

现代工程学

Modern Engineering



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial Board Member

Xiaoli He

Zhejiang Tongfang Engineering Management Consulting Co., Ltd.

Xiaoshi Yan

Chifeng Saige Architectural Planning and Design Co., Ltd.

Jiaming Li

North CMA Technology Co.,Ltd.

Xiao Yu

Chongqing Zongheng Engineering Design Co., Ltd.

现代工程学

Modern Engineering

第2卷 第12期 2025年12月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

- 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让给本刊。
- 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
- 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
- 论文未曾以任何形式公开发表过。
- 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 001 诱导缝在超长混凝土结构中的防裂作用机理与应用优势研究 陈加平
Research on the Crack Prevention Mechanism and Application Advantages
of Induced Joints in Ultra Long Concrete Structures Chen Jiaping
- 004 绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用研究 王柯萱
Research on the Collaborative Application of Green Building Low-Carbon
Design and Building Energy-saving Technologies Wang Kexuan
- 007 创新导向下产业园区空间优化策略研究 陈桂良
Research on Spatial Optimization Strategies for Industrial Parks Under
the Innovation-Oriented Framework Chen Guilang
- 010 基于建筑设计视角的建筑幕墙设计及结构设计研究 宋丽萍
Research on Architectural Curtain Wall Design and Structural Design from the
Perspective of Architectural Design Song Liping
- 013 生态环保理念在科技住宅绿色建筑设计中的应用 杨斌, 蒋英俊
Application of Ecological Environmental Protection Concept in Green
Building Design of Science and Technology Housing Yang Bin, Jiang Yingjun
- 016 装配式端板连接钢筋混凝土梁柱 鲁万卿, 田为, 李正英, 刘红军
框架受力性能分析 Analysis of the Mechanical Performance of Prefabricated end Slab
Connected Reinforced Concrete Beam-Column Frames Lu Wanqing, Tian Wei, Li Zhengying, Liu Hongjun
- 021 工程测绘技术管理与风险管理在建筑项目中的应用 廖国胜
The Application of Engineering Surveying and Mapping Technology
Management and Risk Management in Construction Projects Liao Guosheng
- 024 公共建筑暖通空调节能改造路径与设计策略研究 刘季鑫
Research on Energy-Saving Renovation Paths and Design Strategies
for HVAC Systems in Public Buildings Liu Jixin
- 027 建筑电气设计中光伏发电系统的成本效益分析及应用策略 王绍熠
Cost-Benefit Analysis and Application Strategy of Photovoltaic Power Generation
System in Building Electrical Design Wang Shaoyi
- 030 水泥稳定碎石基层裂缝成因分析与控制技术优化研究 关沛东
Analysis of the Causes of Cracks in Cement-Stabilized Crushed Stone Base and
Optimization of Control Technology Guan Peidong

环境工程 | ENVIRONMENTAL ENGINEERING

- 033 第三方环境监测实验室质量管理体系的构建与完善 黄焕平
Construction and Improvement of Quality Management System of Third Party
Environmental Monitoring Laboratory Huang Huanping
- 036 环境检测中嵌入式设备研发与项目管理协同研究 吴长忠
Collaborative Research on Embedded Device Development and Project
Management in Environmental Monitoring Wu Changzhong
- 039 浅析企业标准体系建设的方法与途径 杨皓章, 高维, 葛力, 周凤龙, 张宪
A Brief Analysis of Methods and Approaches for Enterprise Standard
System Construction Yang Haozhang, Gao Wei, Ge Li, Zhou Fenglong, Zhang Xian

042	岩土工程中的环境地质问题与治理措施 Environmental Geology Problems and Control Measures in Geotechnical Engineering	朱海荣 Zhu Hairong
045	林业领域技术管理助力项目管理的创新路径研究 Research on the Innovative Path of Forestry Technology Management to Assist Project Management	韩东游 Han Dongyou

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

048	多机器人协同作业系统在汽车制造中的关键技术研究 Research on Key Technologies of Multi Robot Cooperative Operation System in Automobile Manufacturing	李云鹤 Li Yunhe
051	机械工程及自动化视角下木工机械非标结构与机器研发策略 Non Standard Structure and Machine Development Strategy of Woodworking Machinery from the Perspective of Mechanical Engineering and Automation	曹嘉荣 Cao Jiarong
054	工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估 Process Optimization and Benefit Evaluation of Resource Recycling in Remanufacturing Technology for Construction Machinery	籍洪达 Ji Hongda
057	工程机械智能化改装技术的应用效果及成本效益评估 Evaluation of the Application Effect and Cost-Benefit of Intelligent Retrofitting Technology for Construction Machinery	李跃恒 Li Yueheng
060	基于物联网的工程机械租赁平台运营模式创新与风险管理 Innovation in Operational Model and Risk Management of Construction Machinery Rental Platform Based on the Internet of Things	赵富学 Zhao Fuxue
063	智能售卖冷柜研发与技术管理的协同机制研究 Research on the Collaborative Mechanism for Smart Vending Refrigerator R&D and Technology Management	潘颂山 Pan Songshan
066	机械设备管理在轻工工程中的技术管理实践探索 Exploration of Technical Management Practice of Mechanical Equipment Management in Light Industry Engineering	崔焕亮 Cui Huanliang
070	基于工业工程视角的不锈钢餐厨具制造企业品质管理策略 Quality Management Strategy of Stainless Steel Tableware Manufacturing Enterprises Based on Industrial Engineering Perspective	董迪升 Dong Disheng
073	精益生产和智能制造在电梯制造工艺技术开发及管理中的应用 Application of Lean Production and Intelligent Manufacturing in the Development and Management of Elevator Manufacturing Technology	刘钦亮 Liu Qinliang
076	机械工程结构设计在测绘领域产品中的技术应用与发展 The Technical Application and Development of Mechanical Engineering Structural Design in Surveying and Mapping Products	刘贵磊 Liu Guilei
079	摩托车机械设计与自动化的融合路径 The Integration Path of Motorcycle Mechanical Design and Automation	吴斌 Wu Bin
083	机械自动化背景下机械液压设计的优化策略 Optimization Strategies for Mechanical Hydraulic Design under the Background of Mechanical Automation	王康 Wang Kang
086	碟形弹簧制造工艺在汽车零配件机械零件设计中的应用 Application of Disc Spring Manufacturing Process in the Design of Mechanical Parts for Automotive Parts	胡文正 Hu Wenzheng
089	基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化研究 Research on Aerodynamic Design Optimization of Small and Medium Sized Ventilators Based on CFD Method	王华 Wang Hua
092	摩托车制造业工程管理与精益生产融合路径探究 Exploration of the Integration Path between Engineering Management and Lean Production in Motorcycle Manufacturing Industry	单宝强 Shan Baoqiang
095	机械视角下中式厨房电器研发的多功能集成与快速蒸实现策略 The Realization Strategy of Multi-Function Integration and Rapid Steaming in the Research and Development of Chinese Kitchen Appliances from the Mechanical Perspective	梁毅强 Liang Yiqiang
098	飞机电子电器设备维修中的机电一体化技术实践与探索 Practice and Exploration of Mechatronics Technology in Aircraft Electronic and Electrical Equipment Maintenance	闫振雷 Yan Zhenlei

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

101	石油化工机电安装工程中的技术创新与风险管理 Technological Innovation and Risk Management in Petrochemical Electromechanical Installation Projects	倪行秀 Ni Xingxiu
104	浅谈百万燃煤机组基建期生产准备工作 On the Production Preparation Work of the Construction Period of the Million-ton Coal-Fired Unit	袁晓娟 Yuan Xiaojuan
107	锅炉系统中高效热交换技术的应用 Application of High-Efficiency Heat Exchange Technology in Boiler Systems	王鑫，张义，张霞龙 Wang Xin, Zhang Yi, Zhang Xialong
110	发达国家海洋经济战略对广州南沙海洋经济发展的启示及借鉴 Enlightenment and Lessons from Developed Countries' Marine Economic Strategies for Nansha's Marine Economy Development	周志滔 Zhou Zhitao
113	光伏与风电新能源工程技术的创新与实践 Innovation and Practice of Photovoltaic and Wind Power New Energy Engineering Technologies	张伟 Zhang Wei

116	燃气工程：技术管理视角下的工程风险防控的策略 Gas Engineering: Strategies for Engineering Risk Prevention and Control from the Perspective of Technical Management	项阳明 Xiang Yangming
119	制造业建筑工程招投标与合同管理协同策略研究 Research on Collaborative Strategies for Bidding and Contract Management in Manufacturing Construction Engineering	朱丽可 Ju Like
122	电气自动化中多设备通讯的技术创新与应用 Technological Innovation and Application of Multi-device Communication in Electrical Automation	许海龙 Xu Hailong
125	污水处理厂光伏发电节能策略研究 Research on Energy Saving Strategy of Photovoltaic Power Generation in Sewage Treatment Plant	杨凯 Yang Kai

市政工程 | MUNICIPAL ENGINEERING

128	在役公路桥梁常见病害分析及智能化养护管理策略研究 Research on Analysis of Common Diseases and Intelligent Maintenance Management Strategies for In-Service Highway and Bridges	陈景文 Chen Jingwen
131	城市轨道交通换乘站通信互联互通解决方案解析 Analysis of Communication Interconnection Solutions for Urban Rail Transit Transfer Stations	亓晓武 Qi Xiaowu
134	海绵城市理念下的市政道路给排水系统设计研究 Research on Municipal Road Water Supply and Drainage System Design under the Concept of Sponge City	李茵茵 Li Yinyin
137	市政工程设计施工一体化管理实践与探索 Practice and Exploration of Integrated Management of Municipal Engineering Design and Construction	古智辉 Gu Zhihui
140	道路桥梁设计视角下桥梁结构设计的创新与实践 Innovation and Practice in Bridge Structural Design from a Road and Bridge Design Perspective	左威 Zuo Wei
143	路桥施工过程中裂缝病害防治技术探索 Exploration of Crack Disease Prevention and Control Technologies During Road and Bridge Construction	周娜娜 Zhou Nana
146	公路工程施工中低填浅挖路基施工技术分析 Analysis of Low-Fill Shallow-Dig Roadbed Construction Technology in Highway Engineering Construction	崔成博 Cui Chengbo
149	高速公路水泥稳定碎石基层离析现象成因与施工改进策略 Causes and Construction Improvement Strategies of Segregation Phenomenon in Cement-stabilized Crushed Stone Base of Expressways	郭一凡 Guo Yifan

化学技术与安全工程 | CHEMICAL TECHNOLOGY AND SAFETY ENGINEERING

152	石墨烯在锂离子电池负极材料中的应用 Application of Graphene in Lithium-Ion Battery Anode Materials	邵浩明 Shao Haoming
155	人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 Problems and Countermeasures in Fire Supervision Work at Crowded Places	黄祖云 Huang Zuyun
158	安全工程在化工企业中的风险评估与管理策略 Risk Assessment and Management Strategies of Safety Engineering in Chemical Enterprises	邝永浩 Kuang Yonghao
161	LED封装中荧光粉的无机化学特性与应用分析 Analysis of Inorganic Chemical Properties and Applications of Phosphors in LED Packaging	李玉容 Li Yurong
164	基于风险预警的化工工艺安全管理体系构建与应用 Construction and Application of Chemical Process Safety Management System Based on Risk Warning	凌克强 Ling Keqiang
167	建材中有害物质化学检测技术的比较与精准性提升策略研究 Comparison of Chemical Detection Technologies for Hazardous Substances in Building Materials and Research on Accuracy Improvement Strategy	康嘉宝 Kang Jiabao
170	家用燃气表检定检测的技术要点与优化策略 Technical Points and Optimization Strategies for Calibration and Testing of Household Gas Meters	张煜岷 Zhang Yumin
173	低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制研究 Research on Optimization and Defect Control of Epoxy Resin Vacuum Casting Process for Low Partial Discharge Dry type Transformer	林先永 Lin Xianyong
176	铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡与净化技术研究 Research on Impurity Ion Balance and Purification Technology in Copper Foil Chemical Production Process	杨雨平 Yang Yuping
179	新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的开发与应用 Development and Application of New Fatty Acid Aalt, Ester, and Amide Additives in Plastic Products	梁艺 Liang yi
182	基于化工企业运营的设备与人员安全管理及风险预防控制研究 Research on Equipment and Personnel Safety Management and Risk Prevention Control Based on Chemical Enterprise Operation	白秋刚 Bai Qiugang
185	化学药物对照品的标定及稳定性考察关键技术探讨 Discussion on Key Technologies of Chemical Drug Reference Standard Calibration and Stability Investigation	卢凌春 Lu Lingchun
188	化工行业安全风险管控：风险评估、隐患排查与管控策略 Safety Risk Management in the Chemical Industry: Risk Assessment, Hidden Danger Investigation, and Control Strategies	方石明 Fang Shiming

191	环氧树脂结构改性及其对无纺布抛光轮高温磨削性能的影响研究 Research on Improving the Temperature Resistance of Epoxy Resin to Enhance the High Temperature Resistance of Non-woven Polishing Wheel Grinding	盘茂东 Pan Maodong
195	核医学建设项目放射性职业病危害预评价和控制效果评价 Pre Evaluation and Control Effect Evaluation of Radioactive Occupational Hazards in Nuclear Medicine Construction Projects	叶小密 Ye Xiaomi
199	高性能锂离子电池锡基复合负极材料的研究 Research on Tin-Based Composite Anode Materials for High-Performance Lithium-Ion Batteries	邵浩明 Shao Haoming

诱导缝在超长混凝土结构中的防裂作用机理与应用优势研究

陈加平

天津美新建筑设计有限公司广州分公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120007

摘要：诱导缝在超长混凝土结构中有显著防裂与应用优势。它能引发应力重分布、控制裂缝形态、影响结构刚度及耗能机制，提升建筑变形适应性。预制装配式诱导缝具经济性，不同工况下其作用独特，多个工程案例验证其有效性。未来新材料技术融合及全寿命性能设计理论将推动其应用发展。

关键词：超长混凝土结构；诱导缝；防裂抗震

Research on the Crack Prevention Mechanism and Application Advantages of Induced Joints in Ultra Long Concrete Structures

Chen Jiaping

Tianjin Meixin Architectural Design Co., Ltd. Guangzhou Branch, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Induced joints have significant advantages in crack prevention and application in ultra long concrete structures. It can induce stress redistribution, control crack morphology, affect structural stiffness and energy dissipation mechanism, and enhance building deformation adaptability. Prefabricated assembly type induced seam has economic efficiency and unique effects under different working conditions. Its effectiveness has been verified by multiple engineering cases. The integration of future new material technologies and the theory of whole life performance design will promote their application and development.

Keywords： ultra long concrete structure; induced seam; crack prevention and earthquake resistance

引言

在当前建筑行业追求高质量与可持续发展的背景下，2021年颁布的《绿色建筑创建行动方案》积极推动建筑行业节能减排与绿色发展。在此政策指引下，超长混凝土结构中诱导缝的研究与应用意义非凡。诱导缝通过引发应力重分布机制发挥防裂作用，能有效截断温度应力场和收缩应力，合理设置可精准控制裂缝走向与间距，提升结构防水、耐久性等性能。其对结构刚度、耗能机制等方面也有显著影响，且预制装配式诱导缝在施工阶段具有经济性，基于 BIM 运维平台监测可知其提升建筑变形适应性，实现运维阶段可持续性。诱导缝在各类超长混凝土结构工程中展现出独特优势，为满足政策要求下的建筑发展提供重要技术途径。

一、诱导缝防裂作用机理

（一）应力重分布机制

在超长混凝土结构中，诱导缝能够引发应力重分布机制，从而发挥防裂作用。当混凝土结构因温度变化或收缩产生应力时，诱导缝作为结构中的薄弱部位，会率先改变周边应力状态。原本连续分布在结构中的应力，由于诱导缝的存在，在其附近区域重新调整分布。应力会向诱导缝两侧集中，使得远离诱导缝的区域应力降低，有效避免了应力在结构某些部位过度积聚而导致裂缝产生^[1]。通过有限元模拟分析可以清晰看到，诱导缝对温度应力

场和收缩应力呈现出截断效应，这种截断促使应力重新分配，为结构释放约束应力开辟了新的力学路径。进一步建立应力峰值与缝间距的量化关系模型，能够更为精准地把握诱导缝在应力重分布过程中的作用，为诱导缝在超长混凝土结构中的合理设置提供有力依据。

（二）裂缝形态控制机理

基于数字图像相关技术开展的足尺试验，清晰展现了诱导缝对裂缝形态的控制作用。试验对比了有无诱导缝试件的裂缝发展模式，结果表明，诱导缝能有效定向引导裂缝走向。在没有诱导缝的试件中，裂缝发展方向杂乱无章；而设置诱导缝后，裂缝沿

着诱导缝预设的方向延伸，实现了对裂缝走向的精准控制。同时，诱导缝还能对裂缝间距产生影响，合理设置诱导缝间距，可以使裂缝分布更加均匀^[2]。此外，诱导缝在量化裂缝宽度控制效果方面成效显著，通过优化诱导缝的构造参数，可将裂缝宽度限制在一定范围内，有效提升超长混凝土结构的防水、耐久性等性能，保障结构的长期稳定与安全。

二、抗震性能协同优化路径

（一）结构刚度折减效应

建立考虑诱导缝分布的三维弹塑性分析模型，对研究结构在地震作用下的响应至关重要。诱导缝的存在会显著影响结构的整体刚度。缝参数，诸如缝间距、缝宽等，与结构整体刚度紧密相关。当诱导缝间距减小或缝宽增大时，结构刚度会呈现折减趋势^[3]。这是因为诱导缝改变了结构的传力路径和连续性，使得结构在受力时更易产生局部变形，从而降低了整体抵抗变形的能力。通过研究这种影响规律，能够深入了解结构在地震作用下的力学性能变化。基于此，进一步提出刚度折减系数的计算公式，为实际工程中合理评估考虑诱导缝的超长混凝土结构刚度提供量化依据，有助于在设计阶段更好地协调结构的抗震性能，实现诱导缝在超长混凝土结构中防裂与抗震性能的协同优化。

（二）耗能机制协调设计

在超长混凝土结构中，诱导缝与抗震缝、连梁耗能构件的空间协调布置对耗能机制的有效发挥至关重要。诱导缝可在特定部位引导裂缝开展，避免裂缝无序出现，而抗震缝能在地震作用下提供必要的变形空间，连梁耗能构件则消耗地震能量^[4]。通过合理设计三者的空间位置关系，能形成多道防线协同工作的耗能机制。振动台试验是验证该协同工作机制的有效手段，可模拟地震作用，观察各构件在不同工况下的响应，分析它们之间的能量传递与协同耗能效果。基于试验结果，提出损伤控制设计方法，根据结构预期的损伤状态，优化诱导缝、抗震缝及连梁耗能构件的设计参数，使结构在满足防裂要求的同时，具备良好的抗震性能，实现耗能机制的协调设计。

三、工程应用优势体系

（一）全寿命周期效益

1. 施工阶段经济性

与传统后浇带施工工艺相比，预制装配式诱导缝在施工阶段展现出显著的经济性。在模板支撑方面，预制装配式诱导缝可大幅减少模板的使用量与安装拆卸的人工成本，因其预制构件的特性，能快速定位安装，不像后浇带需多次支模与拆模，减少了模板周转次数与人工工时投入。在养护周期上，传统后浇带需长时间养护等待混凝土收缩稳定，而预制装配式诱导缝预制构件在工厂提前养护，现场安装后养护时间短，有效缩短了整体养护周期，降低了养护所需人力、物力资源，包括养护材料与养护设备使用时间等成本^[5]。通过建立工期 - 成本综合效益评价模型，能

进一步量化这些成本节约指标，更直观地展现预制装配式诱导缝在施工阶段的经济性优势。

2. 运维阶段可持续性

基于 BIM 运维平台监测数据可知，诱导缝显著提升了建筑变形适应性。在超长混凝土结构中，因温度变化、地基沉降等因素易产生变形，诱导缝能有效协调这种变形，防止裂缝大规模出现，从而降低维保成本。从全寿命周期看，由于诱导缝对结构裂缝的有效控制，减少了维修频次和维修范围，经评估，维保成本有明显降低幅度。同时，因结构耐久性增强，减少了建筑材料的重复投入，降低了碳排放，实现了运维阶段的可持续性，为绿色建筑发展提供有力支持，这在当前建筑行业倡导节能减排的大背景下意义重大^[6]。

（二）特殊工况适应性

1. 强震作用响应

在强震作用下，超长混凝土结构面临巨大挑战。通过选取典型地震波开展时程分析，对带诱导缝结构在不同峰值地面加速度（PGA）下的位移响应特征展开研究。结果显示，诱导缝能有效改变结构的力学性能，在强震中，它可调整结构的刚度分布，使结构位移响应更加合理，避免局部应力集中，从而显著提升结构在大震作用下的连续倒塌防御能力^[7]。这表明，诱导缝对于超长混凝土结构在强震这种特殊工况下，具有关键的适应性作用，为保障结构在地震灾害中的安全性提供了重要的技术途径，有效降低结构在强震下发生连续倒塌的风险，展现出独特的应用优势。

2. 差异沉降调控

在超长混凝土结构面临差异沉降的特殊工况下，诱导缝展现出独特的调控作用。通过建立地基 - 基础 - 上部结构协同分析模型，能够精准研究诱导缝对不均匀沉降所产生应力的释放作用^[8]。不均匀沉降易在混凝土结构中引发裂缝，而诱导缝可有效削弱这种不利影响。基于差异沉降预测的缝参数动态调整方法，是利用前期对差异沉降的准确预测，根据实际情况灵活调整诱导缝的相关参数，如间距、深度等。这种动态调整可使诱导缝在不同程度的差异沉降环境下，始终保持良好的应力释放效果，更好地发挥防裂作用，增强超长混凝土结构在差异沉降工况下的稳定性与耐久性。

四、典型工程案例分析

（一）超高层框架 - 核心筒结构

1. 平面不规则处置

在某超高层框架 - 核心筒结构工程中，存在 L 形平面超限问题。该 L 形平面的凸角处易产生应力集中，可能导致混凝土结构开裂。为此，引入诱导缝来弱化平面凸角应力集中。设计时，依据结构力学原理，精确确定诱导缝的位置与间距。施工过程中，对诱导缝附近区域设置多个监测点，进行施工监测。将监测所得应力、应变等数据与计算模型预测值对比，结果显示两者高度吻合，从而验证了计算模型的准确性^[9]。这一案例表明，诱导缝在解决超高层框架 - 核心筒结构平面不规则问题，尤其是弱化平面凸角应力集中

方面,具有显著效果,为同类工程提供了可靠的借鉴。

2.连廊部位专项设计

以某超高层框架-核心筒结构连廊部位为例,分析其温度应力分布特征发现,高空连廊因环境暴露,温度变化影响显著,温度应力在连廊端部和与主体结构连接部位较为集中^[10]。为有效控制裂缝,采用诱导缝与黏滞阻尼器复合应用方案。诱导缝能引导裂缝在预定位置开展,将大裂缝转化为多条细小裂缝,降低裂缝宽度;黏滞阻尼器可耗散地震及风振能量,减少结构振动对连廊的影响。对该连廊进行振动测试,结果显示实测振动频率与设计值高度吻合,表明设计方案合理,此复合应用方案既有效控制温度裂缝,又保障连廊在动力荷载下的安全性,为超长混凝土结构连廊部位设计提供了可靠范例。

(二)大底盘多塔楼结构

1.塔楼间变形协调

以某大型商业综合体为例,该建筑为大底盘多塔楼结构。塔楼因功能、高度等差异,在荷载作用下会产生不同变形。裙房屋面设置诱导缝,有效保障塔楼独立变形模式。在塔楼与裙房连接处,通过监测发现,诱导缝合理布置使塔楼能按自身规律变形,未因相互约束产生裂缝。根据变形差控制的缝宽设计准则,经计算确定诱导缝宽度,既满足塔楼间变形协调需求,又防止过大缝宽影响建筑外观与使用功能。该案例表明,在大底盘多塔楼结构中,诱导缝能较好地协调塔楼间变形,保障结构安全,验证基于变形差控制的缝宽设计准则的科学性与实用性。

2.基础整体性保持

以某大底盘多塔楼结构的超长混凝土基础筏板工程为例。该工程通过在基础筏板合理设置诱导缝,在控制裂缝产生的同时有效保证基础整体性。在施工过程中,对诱导缝附近及基础关键部位进行应变监测。从监测数据来看,在混凝土浇筑及硬化过程中,诱导缝区域应变分布合理,成功引导裂缝在预定位置开展,且未对基础整体结构的受力性能产生不良影响。这表明基于诱导缝技术的设计方案,有效控制了基础筏板裂缝,实现基础整体性的保持。该案例为类似超长混凝土结构基础设计提供了实践经验,有力验证了诱导缝在控制基础筏板裂缝并确保基础整体性方面的有效性与应用优势。

(三)既有结构改造工程

1.历史裂缝治理

以某改建工程为例,该工程作为超长混凝土结构存在历史裂缝。在治理过程中,创新性地应用诱导缝。诱导缝能够引导裂缝在特定位置产生,避免裂缝无序开展,影响结构整体性与安全性。实施诱导缝前,结构因既有裂缝导致自振特性不佳,动力性能受到影响。加固后,通过诱导缝对裂缝的有效控制,结构的自振特性得到明显改善。从振动频率、阻尼比等参数来看,加固后结构的稳定性显著提升。诱导缝的应用不仅成功处置了历史裂缝,还优化了结构动力性能,充分展现出在既有结构改造工程历史裂缝治理方面的独特优势,为类似工程提供了极具价值的参考范例。

2.抗震性能提升

在某既有超长混凝土结构改造工程中,为提升其抗震性能,结合消能减震改造方案,对诱导缝布置展开研究。通过合理设置诱导缝,有效改变了结构的耗能机制。诱导缝作为结构中的薄弱部位,在地震作用下率先产生裂缝,消耗地震能量,引导结构变形集中在这些预定部位,避免裂缝无序开展,使结构耗能更合理。同时,借助 Pushover 分析方法对结构进行模拟。结果显示,布置诱导缝后,结构在地震作用下的性能得到显著提升,如位移角减小、结构承载力提高等,充分验证了诱导缝布置对结构抗震性能提升的积极作用,为既有超长混凝土结构改造提供了有效的技术手段。

五、总结

诱导缝在超长混凝土结构中具有显著的防裂作用与应用优势。其双重防裂机制,有效缓解混凝土因温度变化和收缩产生的应力,降低裂缝出现的可能性;同时,抗震性能的提升也为结构在地震等自然灾害下提供更可靠的安全保障。在实际应用中,设计参数优化准则和施工质量控制要点的提炼,为诱导缝的合理设置与实施提供了重要指导。随着材料科学与技术的发展,新型智能感应缝、形状记忆合金等新材料与新技术的融合应用前景广阔,有望进一步提升超长混凝土结构的性能。基于全寿命性能的设计理论发展方向,更是为结构的长期安全稳定提供了有力支撑,将推动诱导缝在超长混凝土结构中的应用迈向新高度。

参考文献

- [1] 刘宝军. 超长混凝土跨层隔震结构温度效应及其影响机理研究 [D]. 兰州理工大学, 2023.
- [2] 张洋. 预应力控制地下室超长混凝土结构温度应力研究 [D]. 西华大学, 2021.
- [3] 仇震. 超长混凝土底板间歇与不均匀约束下的温度应力研究 [D]. 青岛理工大学, 2022.
- [4] 杨黎. 超长混凝土结构膨胀加强带有限元模拟与温度场分析 [D]. 河北工程大学, 2021.
- [5] 马许平. 裂缝在降雨型黄土滑坡失稳破坏过程中的作用机理研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [6] 苗宏恩. 超长混凝土结构裂缝控制探讨 [J]. 建筑与装饰, 2021(2): 180.
- [7] 邱意坤, 李伟, 丁大勇, 等. 北京工人体育场超长混凝土结构 S 形弯折钢筋诱导缝设计与试验研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(18): 69-74.
- [8] 黄建伟, 王宁龙, 王远航. 超长混凝土结构裂缝控制施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2022(16): 191-193.
- [9] 李智明. 浅谈超长混凝土结构在温度应力作用下的裂缝控制 [J]. 建筑与装饰, 2021(6): 140, 146.
- [10] 王传亮. 超长混凝土结构无缝施工技术研究 [J]. 建筑与装饰, 2021(13): 177-178.

绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用研究

王柯萱

河北世元工程咨询集团有限公司, 河北 保定 071000

DOI:10.61369/ME.2025120010

摘 要 : 绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用是推动建筑行业可持续发展的重要路径。当前, 建筑领域碳排放量占社会总排放量的比重较高, 如何实现建筑全生命周期的低碳化运营成为行业关注的焦点, 本文分析绿色建筑低碳设计与建筑节能技术协同应用的重要意义。探讨二者之间的协同关系, 并从气候适应性设计、智慧能源管理系统、绿色建筑评价机制方面提出协同应用的实践路径, 以期为建筑行业绿色转型提供参考, 促进经济效益与生态效益的双重提升。

关 键 词 : 绿色建筑; 低碳设计; 建筑节能; 协同应用; 可持续发展

Research on the Collaborative Application of Green Building Low-Carbon Design and Building Energy-saving Technologies

Wang Kexuan

Hebei Shiyuan Engineering Consulting Group Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000

Abstract : The collaborative application of green building low-carbon design and building energy-saving technologies is an important path for promoting the sustainable development of the construction industry. Currently, the carbon emissions in the construction sector account for a significant proportion of the total social emissions. How to achieve low-carbon operation throughout the building's life cycle has become the focus of the industry. This paper analyzes the significance of the collaborative application of green building low-carbon design and building energy-saving technologies. It explores the collaborative relationship between the two and proposes practical paths for their collaborative application in terms of climate adaptability design, intelligent energy management systems, and green building evaluation mechanisms, with the aim of providing references for the green transformation of the construction industry and promoting the dual improvement of economic and ecological benefits.

Keywords : green buildings; low-carbon design; building energy conservation; collaborative application; sustainable development

引言

随着全球气候变化问题日益严峻, 建筑行业作为能源消耗和碳排放的重要领域。面临着绿色转型的迫切需求, 绿色建筑低碳设计强调从规划设计阶段就融入生态环保理念, 而建筑节能技术则着眼于建筑运营过程中的能源高效利用, 二者的协同应用能够形成从设计到运营的全链条低碳解决方案, 是实现建筑领域碳达峰、碳中和目标的关键举措。然而, 当前实践中仍存在设计与技术衔接不紧密、协同机制不健全问题, 本文在梳理协同应用意义的基础上, 深入分析二者的协同关系, 进而探讨具体的实践路径, 以期为推动建筑行业高质量发展提供借鉴。

一、绿色建筑低碳设计与建筑节能技术协同应用的意义

(一) 推动建筑行业绿色转型与可持续发展

建筑行业是国民经济的支柱产业, 同时也是资源消耗和环境污染的重要来源, 推动绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用, 对于促进建筑行业绿色转型具有深远意义。协同应用能够从源头减少建筑碳排放, 低碳设计通过优化建筑布局、选用绿色材料方式降低隐含碳排放, 节能技术则通过高效设备、智能控制

手段削减运营碳排放, 二者相互配合形成完整的减碳体系。协同应用有助于推动建筑产业链的绿色升级, 从设计咨询到施工建造, 从材料生产到设备制造, 绿色理念和节能技术的融合应用将带动整个产业链向低碳方向转型, 此外, 协同应用还能引导社会形成绿色建筑消费观念, 提升公众的环保意识, 为建筑行业的可持续发展奠定社会基础^[1]。

(二) 提升建筑全生命周期能效与碳减排效果

建筑的全生命周期包括规划设计、施工建造、运营维护和拆

除回收阶段，各阶段均涉及能源消耗和碳排放问题，绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用，能够实现建筑全生命周期的能效提升和碳排放控制。在设计阶段，低碳设计通过科学的建筑朝向布局、合理的体形系数控制、高性能围护结构选用措施，为后续的节能运营创造有利条件^[2]。在运营阶段，先进的节能技术如高效暖通空调系统、智能照明控制、可再生能源利用，能够在设计优化的基础上进一步降低能耗，设计与技术的协同还体现在前瞻性规划上，即在设计阶段预留技术升级接口，便于后期引入更先进的节能设备。这种全周期的协同思维，能够避免设计与技术脱节导致的能效损失，最大化建筑的碳减排潜力^[3]。

（三）实现经济效益与生态效益的双重优化

绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用不仅具有显著的生态效益，还能带来可观的经济回报。从生态效益看，协同应用能够有效减少建筑能源消耗，降低温室气体排放，缓解城市热岛效应，改善区域生态环境质量。从经济效益看，虽然绿色建筑的初始投资可能略高于传统建筑，但通过设计与技术的科学协同，能够大幅降低建筑的运营成本，高性能围护结构减少空调制冷制热负荷，高效设备降低能源费用支出，可再生能源利用进一步削减外购能源开支。从长期看，绿色建筑的全生命周期成本往往低于传统建筑，此外，绿色建筑还具有更高的市场价值和租售溢价，能够为投资者带来更好的财务回报，可见，协同应用实现经济效益与生态效益的有机统一^[4]。

二、绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同关系分析

（一）设计理念与技术应用的互补融合

绿色建筑低碳设计与建筑节能技术之间存在着深层次的互补融合关系，低碳设计作为上游环节，从理念层面为节能技术的应用提供指导框架；节能技术作为下游支撑，以具体手段落实设计理念的节能目标。这种互补关系首先体现在目标的一致性上，低碳设计追求建筑的环境友好与资源节约，节能技术致力于能源的高效利用与清洁替代，二者的共同目标都是降低建筑的环境负荷。其次，互补关系体现在功能的协调性上，设计优化能够减少技术应用的难度和成本，如良好的自然采光设计可以降低人工照明需求，减少照明系统的配置规模；反过来，先进技术也能弥补设计的局限，如主动式遮阳系统可以应对固定遮阳难以适应的多变日照条件。再者，互补关系还体现在创新的驱动性上，设计理念的更新会催生新的技术需求，推动节能技术创新发展；新技术的涌现又为设计提供更多可能性，拓展低碳设计的边界。因此，只有将设计理念与技术应用深度融合，才能发挥协同效应的最大价值^[5]。

（二）被动式设计 with 主动式节能的有机结合

绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用，集中体现为被动式设计策略与主动式节能技术的有机结合，被动式设计是指充分利用自然条件。通过建筑自身的形态布局、空间组织、围护结构手段，实现对室内环境的调控，尽量减少对机械设备的依

赖，主动式节能则是指采用高效的机电设备和智能控制系统，主动调节建筑的能源供应和环境参数，被动优先、主动优化是二者协同的基本原则。被动式设计应作为首选策略，最大限度利用自然通风、自然采光、蓄热保温手段满足室内环境需求；在被动措施难以完全满足舒适要求的情况下，再辅以主动式节能技术进行补充调节。这种协同模式能够显著降低建筑能耗，以空调系统为例，良好的围护结构保温隔热设计可以大幅减少冷热负荷，从而缩小空调设备容量、降低运行能耗；高效的空调设备和智能控制又能在满足舒适需求的前提下，以最优方式提供必要的冷热量，被动与主动的有机结合，实现自然条件利用与技术手段应用的优势互补，是提升建筑能效的关键路径^[6]。

（三）材料选择与能源系统的协调统一

绿色建筑的材料选择与能源系统配置是低碳设计与节能技术协同应用的重要领域，建筑材料不仅影响围护结构的热工性能，还关系到建筑的隐含碳排放；能源系统的配置则直接决定建筑运营阶段的能源消耗结构和碳排放水平，二者的协调统一对于实现建筑全生命周期低碳化至关重要。在材料选择层面，应优先采用低碳材料、可再生材料和本地材料，以减少材料生产运输过程的碳排放，高性能保温材料、低辐射玻璃、蓄热相变材料的应用，能够显著提升围护结构的热工性能，为能源系统的优化配置创造条件。在能源系统配置层面，应根据建筑的负荷特点和当地资源条件，科学选择能源供应方式，太阳能光伏发电、地源热泵、空气源热泵可再生能源技术的应用，能够有效替代化石能源，降低运营碳排放，材料与能源的协调还体现在系统集成上，如建筑一体化光伏系统将光伏组件与建筑围护结构结合，既发挥发电功能，又起到遮阳隔热作用，有助于实现建筑全生命周期碳排放的系统优化^[7]。

三、绿色建筑低碳设计与建筑节能技术协同应用的实践路径

（一）基于气候适应性的一体化设计方法

气候适应性设计是绿色建筑低碳设计与建筑节能技术协同应用的基础性路径，不同气候区具有差异化的温湿度特征、日照条件和风环境特点，建筑设计应因地制宜地响应当地气候条件，才能最大程度发挥被动式设计的节能潜力，为主动式节能技术的高效运行创造有利条件。气候适应性设计首先要求深入分析场地的气候特征，包括全年温湿度变化规律、太阳辐射强度与角度、主导风向与风速，建立气候数据分析档案，为后续设计决策提供依据，在建筑布局层面，应根据日照和通风需求优化建筑朝向、间距和组合方式，充分利用有利的自然条件，避免不利因素的影响。在建筑形态层面，应结合气候特点确定适宜的体形系数和窗墙比，平衡得热与失热、采光与遮阳之间的关系，围护结构设计是气候适应性的核心环节，应针对不同气候区的保温隔热需求，科学配置墙体、屋面、门窗构件的热工性能参数，选用适宜的保温材料和构造做法。此外，还应充分考虑自然通风和自然采光的利用，通过合理的开窗位置、通风廊道、采光天井设计，减少机

械通风和人工照明的需求，气候适应性设计需要将低碳理念与节能技术在设计阶段就进行统筹考虑，形成一体化的解决方案。设计团队应采用建筑性能模拟技术，对不同设计方案的能耗表现进行预测评估，通过迭代优化确定最佳方案，这种以气候响应为核心的一体化设计方法，能够使建筑从根本上具备良好的节能潜质，为后续技术应用奠定坚实基础^[9]。

（二）多技术集成的智慧能源管理系统应用

智慧能源管理系统是实现绿色建筑低碳设计与建筑节能技术深度协同的重要载体。该系统通过物联网、大数据、人工智能先进信息技术，将建筑中的各类能源设备、环境监测装置、控制终端有机集成，实现能源供应、分配、使用的智能化管理，最大化建筑的能效水平，智慧能源管理系统的核心功能包括能源监测、负荷预测、优化调度和故障诊断。在能源监测方面，系统通过分布式传感器实时采集建筑的用电、用气、用水能耗数据，以及室内外温湿度、照度、空气质量环境参数，建立全面的能源信息数据库。在负荷预测方面，系统运用机器学习算法分析历史数据，结合气象预报、使用计划信息，准确预测建筑的冷热负荷、电力负荷变化趋势。在优化调度方面，系统基于负荷预测结果和设备特性，制定最优的能源供应和设备运行策略，如空调系统的启停时间、运行参数，可再生能源的发电消纳匹配。在故障诊断方面，系统通过对比设备实际运行数据与理论特性曲线，及时发现设备异常和系统故障，指导运维人员进行检修维护，智慧能源管理系统的应用使低碳设计理念在运营阶段得到有效落实，设计阶段确定的节能策略和技术参数，可以通过系统的智能控制精准执行；系统运行产生的数据反馈，又能为后续项目的设计优化提供参考依据。此外，系统还能整合多种节能技术，实现技术之间的协调配合，多技术集成的智慧能源管理系统，是连接低碳设计与节能技术的桥梁，是提升建筑能效的有力工具^[9]。

（三）全过程协同的绿色建筑评价与优化机制

建立全过程协同的绿色建筑评价与优化机制，是保障低碳设计与节能技术协同效果的制度性路径，该机制贯穿建筑的规划设计、施工建造、运营维护全生命周期阶段。通过科学的评价标

准、严格的过程管控和持续的优化改进，确保协同应用目标的有效达成。在评价标准层面，应建立涵盖设计与技术的综合评价指标体系，评价内容不仅包括建筑的能耗指标、碳排放强度结果性指标，还应涵盖设计策略的合理性、技术配置的先进性、协同措施的有效性过程性指标，评价方法应采用定量分析与定性评估相结合的方式，既要有可量化的数据支撑，也要有专业的技术判断。在过程管控层面，应建立覆盖全生命周期的质量保证体系，设计阶段要开展专项审查，确保低碳设计策略落实到位、节能技术选型科学合理；施工阶段要加强过程监督，保证绿色材料和节能设备按设计要求安装；运营阶段要进行性能检测，验证建筑的实际能效是否达到设计预期。在优化改进层面，应建立数据驱动的反馈优化机制，通过能源审计、使用后评估方式，收集建筑运营的能耗数据和用户反馈，分析设计与技术协同应用中存在的问题和不足，针对发现的问题，制定改进方案并付诸实施，形成持续优化的闭环管理。全过程协同的评价与优化机制，能够从制度层面保障低碳设计与节能技术的深度融合，通过评价引导、过程管控和持续改进，不断提升协同应用的水平和效果，推动绿色建筑向更高质量发展^[10]。

四、结语

绿色建筑低碳设计与建筑节能技术的协同应用，是建筑行业实现碳达峰碳中和目标的必由之路。本文从推动行业绿色转型、提升全生命周期能效、实现双重效益优化三个维度阐述协同应用的重要意义。从设计理念与技术应用的互补融合、被动式设计 with 主动式节能的有机结合、材料选择与能源系统的协调统一三个层面分析二者的协同关系，并从气候适应性一体化设计、智慧能源管理系统应用、全过程评价优化机制三个方面提出具体的实践路径。在未来的建筑实践中，应进一步深化设计与技术的融合创新，完善标准规范和政策支持，培养复合型专业人才，推动绿色建筑低碳设计与建筑节能技术协同应用向纵深发展，为建设美丽中国、实现可持续发展贡献建筑行业的力量。

参考文献

- [1] 李凤俊. 绿色建筑节能技术集成应用与低碳效益研究 [J]. 中国建筑, 2025, 8(19): 11-13.
- [2] 吴昊. 建筑节能技术在零碳建筑设计中的创新应用 [J]. 产品可靠性报告, 2025, (7): 229-230.
- [3] 沈杨铃. 被动式节能理念在绿色建筑低碳设计中的应用研究 [J]. 中国建筑, 2025, 8(19): 17-19.
- [4] 牟加会. 建筑设计中的绿色材料应用与环境适应性研究 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(10): 169-171.
- [5] 姜璇. 城市可持续发展背景下绿色建筑低碳设计路径研究 [J]. 中国建筑, 2025, 8(19): 8-10.
- [6] 张薇. 建筑节能技术在新型建筑材料中的研究与应用 [J]. 建筑与装饰, 2025, (11): 142-144.
- [7] 吴颖滢, 陈文东. 新型电力系统背景下建筑节能技术的协同应用研究 [J]. 建筑与文化, 2025, (11): 47-50.
- [8] 毛艳伟, 窦文娟. 装配式建筑在绿色建筑低碳设计中的实践与发展 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(3): 40-41.
- [9] 任禹西, 刘丹, 刘建新. 装配式建筑在绿色建筑低碳设计中的实践与发展探究 [J]. 美食, 2025, (16): 47-48.
- [10] 苏香惠, 程正中. 绿色建筑对区域碳排放的影响研究 [J]. 土木工程, 2025, 14(5): 999-1010.

创新导向下产业园区空间优化策略研究

陈桂良

广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120015

摘 要： 随着我国创新型产业的蓬勃发展，传统以生产功能为主导的产业园区在空间布局、功能配置及资源供给等方面已难以适配创新经济发展需求。本文基于“产城人文”融合理念，系统分析创新人群的多元诉求、创新企业全生命周期的空间演变规律及创新经济对用地供给的弹性要求，结合上海张江高科技园区、苏州纳米科技城等实践案例，从复合创新空间构建、全生命周期空间供给、弹性用地机制完善三个维度，提出针对性的空间优化策略，为创新型产业园区高质量发展提供规划支撑。

关 键 词： 创新园区；创新人群；创新载体；空间优化；产城融合

Research on Spatial Optimization Strategies for Industrial Parks Under the Innovation-Oriented Framework

Chen Guiliang

Guangdong Urban and Rural Planning and Design Institute Technology Group Co., Ltd.,
Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： With the vigorous development of China's innovative industries, traditional industrial parks, which primarily focus on production functions, have found it increasingly challenging to meet the demands of innovative economic development in terms of spatial layout, functional allocation, and resource supply. Based on the concept of integrating "industry, city, culture, and people," this paper systematically analyzes the diverse needs of innovative populations, the spatial evolution patterns of innovative enterprises throughout their entire life cycles, and the flexible requirements of innovative economies for land supply. Drawing on practical cases such as Shanghai Zhangjiang Hi-Tech Park and Suzhou Nano Science and Technology City, this paper proposes targeted spatial optimization strategies from three dimensions: constructing composite innovative spaces, providing spaces throughout the entire life cycle, and improving flexible land use mechanisms, thereby offering planning support for the high-quality development of innovative industrial parks.

Keywords： innovative industrial parks; innovative populations; innovative carriers; spatial optimization; industry-city integration

一、背景

当前，创新驱动已成为引领我国经济转型发展的核心动力，新质生产力的培育与发展离不开高质量空间载体的支撑。产业园区作为我国集聚产业要素、推动产业升级的关键平台，其发展质量直接关系到区域创新能力的提升^[1]。当前，各类国家高新区聚集了70%的国家制造业创新中心，80%的全国重点实验室，区内企业研发经费投入、拥有发明专利数均占全国的50%左右，国家高新区内规上企业工业总产值占全国比重约30%，创新型产业园区已成为创新型经济发展的重要增长极。然而，我国仍存在大量传统产业园区，传统产业园区多形成于工业化初期，以生产功能为核心导向，空间组织呈现“工厂集群+简单配套”的模式，普遍存在功能单一、生态缺失、人文关怀不足等问题，难以满足创

新型产业发展的多元需求。

二、创新型产业园区建设的必要性

随着我国产业结构从劳动密集型向技术密集型加速转型，集成电路、生物医药、人工智能等先导产业快速崛起，对园区空间提出了全新要求^[2]。这类高附加值、高创新性产业不仅需要专业化的研发生产空间，更需要完善的服务配套、开放的交流平台和优质的生态环境。与此同时，创新人才作为创新活动的核心主体，其工作生活方式发生显著转变，相较于传统产业工人，他们更注重工作与生活的平衡，对居家办公、就近消费、社交互动、生态休闲等空间需求日益强烈。

面对创新型经济发展带来的产业业态变革、人群需求升级及

作者信息：陈桂良（1992.06-），男，广东云浮人，工程师，硕士研究生，研究方向：为城乡规划。

空间诉求多元化，传统产业园区的空间组织模式已显现明显短板：一是功能分区僵化，研发、生产、生活空间割裂，难以形成创新要素互动的良好氛围；二是空间供给刚性，无法适配创新企业不同发展阶段的动态需求；三是用地配置低效，单一化用地模式制约了复合功能的实现。在此背景下，立足创新导向，探索满足创新人群人本需求、适配企业发展规律、契合产业变革趋势的园区空间优化路径，打造“低创新成本、高智力密度”的创新集聚区，成为当前城市规划与产业发展领域的重要课题。

三、创新型产业园区发展需求及空间优化策略

创新型产业园区作为产城融合发展的核心载体，是集聚科技创新型企业、高等教育机构、科研院所及各类创新服务机构的复合型空间^[3]。与传统生产导向型产业园区相比，创新型产业园区具有三大核心特征：一是功能复合化，集成了科技创新活动的全链条，形成集研发、中试、生产、居住、教育、休闲、商务等多功能于一体的综合集聚区；二是要素集聚化，高效汇聚人才、技术、资金、信息等创新要素，构建多元化创新主体协同互动的生态网络；三是发展弹性化，能够动态适配产业业态变革、企业成长需求及人群诉求升级，具备可持续发展能力。

创新型产业园区的空间优化核心在于精准匹配多元需求，既要满足创新人群的生理与心理诉求，也要适配创新企业不同发展阶段的空间诉求，更要契合创新型经济对土地资源高效利用的诉求。基于此，本文从构建复合创新空间、全生命周期空间供给、弹性用地机制完善三个方面提出优化策略。

（一）适应创新人群互动需求的复合创新空间

创新人才是创新活动的核心动力，其需求特征直接决定了园区空间的设计导向。传统城市创新空间以研发、生产空间为主导，忽视了创新人群的社交互动、生活休闲等多元需求，难以激发创新活力。研究表明，创新人才的工作生活方式呈现出居家办公常态化、消费就近化、社交高频化、体验场景化等特征，对空间的复合性、开放性、生态性提出了更高要求。因此，园区空间设计需从“功能分区”转向“功能融合”，构建集工作、生活、社交、休闲于一体的复合创新空间，促进创新人群的深度互动与灵感碰撞。

在配套设施配置上，应兼顾基础保障与专业服务双重需求。一方面，完善基础生活配套，解决创新人群的后顾之忧。另一方面，搭建专业创新服务平台，促进创新要素的高效流转。在园区核心区域布局技术咨询、技术转移、知识产权服务、金融服务等专业机构，构建“一站式”创新服务中心；同时设置共享实验室、中试平台、会议中心等公共技术设施，降低创新企业的研发成本。通过基础配套与专业服务的有机结合，营造“工作有支撑、生活有保障、社交有场景”的良好环境。

在空间氛围营造上，应注重生态化与主题化设计^[4]。创新人群对生态环境的关注度显著高于传统产业工人，绿色空间不仅能改善园区微气候，更能缓解工作压力、激发创新灵感。苏州纳米科技城在规划中践行绿色低碳理念，通过节能节地设计、绿建标准实施、景观资源整合等措施，打造人与自然和谐共生的生态园

区。同时，结合园区产业特色打造主题空间，如纳米文化广场、科技展览中心等，将产业文化融入空间设计，增强创新人群的身份认同与归属感。

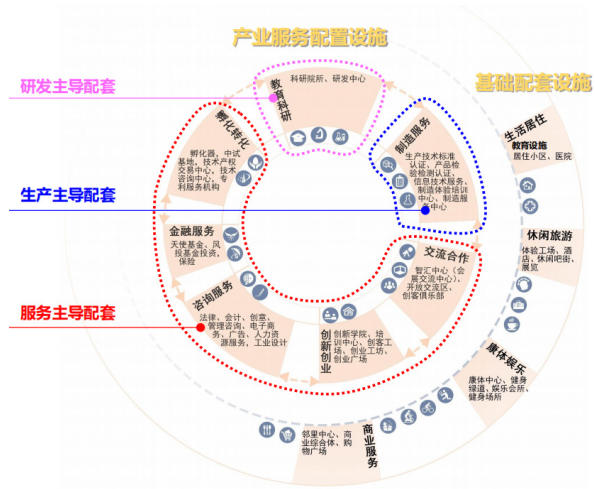


图1 创新型产业园区配套设施示意图

（二）适配创新型企业全生命周期的创新空间供给

创新型企业的成长具有显著的生命周期特征，不同发展阶段的企业在空间需求、成本承受能力、功能诉求等方面存在较大差异，需构建差异化、动态化的空间供给体系^[5]。从初创期到成熟期，企业空间需求呈现“低成本灵活空间—专业化复合空间—个性化独立空间”的演变规律，园区规划需精准匹配这一规律，实现空间供给与企业成长的动态适配。

初创期企业以小微企业为主，资金有限、抗风险能力弱，核心诉求是低成本、灵活性和便捷性。这类企业倾向于选择区位优势、配套完善、租赁灵活的共享空间，如孵化器、众创空间等。园区应规划建设一批标准化创业空间，降低入驻门槛，提供共享办公设备、会议室、洽谈区等基础设施，同时引入创业辅导、融资对接等增值服务。以上海张江高科技园区为例，其打造“低创新成本、高智力密度”的集聚区，为初创企业提供低租金创业空间和全链条服务，已助力浦东吸引近80家具身智能产业链企业落地生根，覆盖从“数据采集—算法研发—核心部件—整机制造—场景应用”全链条。在空间设计上，应采用模块化布局，支持空间的灵活分割与组合，适配企业规模扩张的需求；同时严格控制用地成本，通过标准厂房建设提高土地利用效率。

成长期企业已形成核心产品和稳定团队，专业化程度提升，对空间的诉求转向研发办公与中试生产的协同，同时需要更多的交流合作空间。园区应规划“高层创新楼宇+共享设施”的空间模式，高层楼宇满足企业规模化办公需求，底层及裙楼设置共享实验室、中试车间、产品展示中心等专业设施，促进企业间的资源共享与协同创新。苏州纳米科技城采用“外围研发生产区+中心核心区”的布局模式，外围块为研发生产区，承担孵化、加速、中试等功能；中心地块为产业核心区，集聚科研、配套、商务办公等功能，形成“孵化—加速—成长”的全链条空间支撑。此外，应强化园区内企业的产业关联，按产业链布局空间，促进上下游企业的就近协作，打造产业集群效应。

成熟期企业已形成完善的产业链条，品牌实力较强，对空间的诉求呈现个性化、独立化和形象化特征，既需要独立的办公生产空间彰显品牌形象，也需要开放的交流场所促进内外部合作。园区应规划“独立占地+院落配套”的空间模式，为企业提供定

制化的总部基地，同时配套建设院落式休闲空间、企业展厅、商务会所等设施，满足企业办公、交流、展示等多元需求。在用地指标上，应适当放宽建筑系数和容积率限制，支持企业在原用地范围内增加厂房及配套设施。

表1 面向企业全生命周期的创新空间供给一览表

企业生命 周期阶段	企业核心特征	核心诉求	空间规划模式	配套设施
初创期	以小微企业为主，资金储备有限，抗风险能力较弱，业务模式灵活，尚未形成稳定规模	低成本入驻，租赁方式灵活，办公便捷，基础配套完善，获取创业初期支撑	共享型创业空间，重点建设标准化创业载体（如孵化器、众创空间），区位选择优越	共享办公设备（打印机、投影仪等），公共会议室、洽谈区，基础保障设施（高速网络、24小时安保等）
成长期	已形成核心产品，组建稳定团队，专业化程度显著提升，业务规模逐步扩大，需产业链协同支撑	研发办公与中试生产协同衔接，满足规模化办公需求，获取专业设施支持，拓展交流合作渠道，实现资源共享与协同创新	“高层创新楼宇+共享设施”复合模式，高层楼宇承载规模化办公，底层及裙楼布局专业共享区域	共享实验室、中试车间、产品展示中心，精密仪器共享平台，产学研对接洽谈室，员工餐厅、通勤班车、停车场等后勤设施
成熟期	形成完善产业链条，品牌实力雄厚，资金实力充足，市场竞争力强，需求呈现个性化、独立化特征	拥有独立办公生产空间彰显品牌形象，获取定制化配套，搭建高端交流场所，满足办公、交流、展示等多元需求	“独立占地+院落配套”定制化模式，打造专属总部基地，兼顾独立空间与开放交流场景	定制化总部办公楼、专属生产车间、研发中心，院落式休闲空间、企业展厅、商务会所，高端商务设施（国际化会议室、VIP接待室等），生态配套（绿色景观、健身中心等）

（三）适应创新型经济的弹性产业用地供给

产业用地是创新型经济活动的基石，其供给模式直接影响园区的创新活力和发展质量。传统“一次性、长年期、单一用途”的用地供给模式，存在成本高、灵活性差、利用率低等问题，难以适配创新型产业技术变革快、发展周期不确定的特点。为此，需构建“功能多元、方式灵活、管理高效”的弹性产业用地供给体系，实现土地资源的高效配置与动态优化。

一是优化用地功能弹性，推动混合功能布局。传统单一用地用途难以满足创新型产业“研发+生产+服务”的复合需求，应支持混合产业用地供给，鼓励同一地块内工业、仓储、研发、办公、商服等用途互利的功能混合布置，遵循产业关联、功能互动、用地兼容的原则，提高土地利用效能。例如，新型产业用地（M0）可配置一定比例的商业办公、配套型住宅和公共服务设施用地，有效对接创新型经济的多元化需求。同时，严格把控混合用地的安全和环保底线，对涉及公共安全、环境保护的特殊用途实行严格管控，确保园区健康发展。此外，鼓励将各产业项目的配套比例对应的用地或建筑面积集中起来，统一建设宿舍型保障性租赁住房、共享设施等，提高配套资源的利用效率。

二是创新弹性出让方式，降低企业用地成本。针对创新企业尤其是初创企业资金压力大的问题，推行“弹性年期+分期出让+中期考核”的出让模式，替代传统的长年期一次性出让。对技术变革快、投入周期长的新兴产业项目，采用分段弹性年期挂牌出让，通过中期考核确保土地高效利用，优秀企业可优先续期，既减轻企业前期资金压力，又减少工业用地低效闲置风险。

三是完善供后监管机制，提升用地动态效能。建立产业用地全生命周期管理体系，从项目准入、建设监管到产出考核实行全过程管控。在项目准入阶段，严格执行产业准入政策，强化节地评价，严把投资强度、容积率、建筑系数等指标关；在建设阶段，加强规划实施监管，确保配套设施按要求建设，鼓励开发利用地下空间，生产研发用地、新型产业用地地下空间建筑面积不低于用地面积的40%，用于建设仓储、停车等设施；在产出阶段，建立亩均效益评价机制，对低效用地实行退出机制，通过股权转让、资产重组、腾笼换鸟等方式盘活闲置土地。

四、结语

高质量发展时代，创新发展是我国塑造新发展优势、实现高质量发展的必然选择。新经济形态、新产业人群、新业态模式的出现，催生了对园区空间的多元诉求，也对产业园区的规划建设提出了更高要求。传统以生产为核心的园区空间模式已无法适配创新发展需求，推动创新型产业园区空间优化，是培育新质生产力、促进产城融合发展的重要路径。

本文基于创新导向，结合上海张江高科技园区、苏州纳米科技城等实践案例，在梳理创新人群、创新企业及创新经济空间需求的基础上，从复合创新空间构建、全生命周期空间供给、弹性用地机制完善三个维度提出优化策略，推动园区从“产业集群”向“创新生态”转型。

参考文献

[1]侯璐.苏州工业园区高贸区工业用地更新策略研究[D].苏州科技大学,2021.
[2]王晓会.基于“弹性空间”理念的郑州市金杯路创意产业园设计研究[D].河南大学,2024.
[3]符文颖,邓金玲.产业转型背景下创业区区位选择和集群空间演化[J].地理科学,2017,37(06):833-840.
[4]王昆,孟惟.城镇密集地区国家级高新区发展模式与空间优化研究——以苏南五市国家级高新区为例[J].小城镇建设,2023,41(07):101-109.
[5]王启轩.中国开发区空间格局演进特征及治理启示——以国家级开发区为例[J].城乡规划,2022,(02):62-72.

基于建筑设计视角的建筑幕墙设计及结构设计研究

宋丽萍

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120017

摘 要： 本文围绕建筑设计视角下的建筑结构与幕墙设计展开，结合建筑幕墙施工管理规范，阐述材料选择与验收、形态生成逻辑、结构幕墙一体化施工技术及创新实践，包括数字化预制装配、样板施工等，还介绍多专业协同交底、阶段验收等管理内容，并以高层建筑幕墙工程为例验证方法有效性，强调全生命周期成本计算与质量安全管理的重要性，对未来发展提出展望。

关 键 词： 建筑设计视角；建筑结构；建筑幕墙；施工管理技术

Research on Architectural Curtain Wall Design and Structural Design from the Perspective of Architectural Design

Song Liping

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Focusing on the design of building structure and curtain wall from the perspective of architectural design, combined with the construction management specifications of architectural curtain wall, this paper expounds material selection and acceptance, form generation logic, integrated construction technology of structure and curtain wall, and innovative practices including digital prefabrication and assembly, sample construction, etc. It also introduces multi-disciplinary collaborative disclosure, phased acceptance and other management contents. Taking the curtain wall project of high-rise building as an example, it verifies the effectiveness of the method, emphasizes the importance of life-cycle cost calculation and quality and safety control, and puts forward prospects for future development.

Keywords： architectural design perspective; building structure; building curtain wall; construction management technology

引言

在当前建筑领域发展中，《建筑幕墙工程质量验收标准》《建设工程勘察设计管理条例（2017 年修订版）》对工程设计与施工的规范性和质量提出严格要求。在此背景下，建筑结构设计、建筑幕墙设计与施工管理技术紧密相关且备受关注。建筑幕墙材料选择与报验、高层建筑幕墙形态生成、幕墙与建筑主体结构整合施工、阶段验收等多方面研究，涉及结构力学、功能适配、技术集成与质量管控等要点。从创新施工实践到多专业协同交底，再到成本分析与安全管控，这些研究内容通过科学方法和技术手段，不断探索优化设计与施工流程，力求实现功能与形式、经济与技术、质量与安全的统一，为建筑行业发展提供有力支撑。

一、建筑结构设计的理论基础

（一）建筑结构材料特性与荷载要求

在建筑结构与幕墙设计中，钢材、混凝土、玻璃、金属板材及密封材料是核心材料。钢材强度高、韧性好，适用于建筑主体结构受力构件及幕墙预埋件、转接件；混凝土成本低、耐久性强，多用于主体框架及基础；玻璃兼具透光性与装饰性，需满足抗风压、水密性、气密性等性能指标；金属板材轻质高强，适配幕墙多样化造型；密封材料需具备良好的粘结性与耐候性，保障幕墙密封性能。建筑结构与幕墙设计需考虑多重荷载，恒载包

括结构自重、幕墙自重等，活载涉及人员、设备荷载，同时风荷载、地震荷载、温度应力等偶然荷载与环境荷载也需重点考量^[1]。需依据《建筑结构荷载规范》及幕墙工程验收标准，结合荷载组合情况，科学选择材料并确定结构尺寸与连接方式，确保建筑及幕墙在各种工况下具备足够的安全性及稳定性。

（二）高层建筑幕墙形态生成逻辑

高层建筑幕墙形态生成逻辑紧密关联建筑主体结构形式、施工工艺与力学传递路径。以框架结构高层建筑为例，主体结构的梁柱体系为幕墙提供固定支撑，幕墙形态需适配主体结构的开间、进深尺寸，通过竖框与横框的有序排布，形成规整且符合力

学规律的幕墙网格^[2]。对于异形高层建筑，幕墙形态需结合主体结构曲面造型，通过参数化设计方法，配合样板施工技术，使幕墙板材的尺寸、角度随建筑曲率动态调整，确保力学传递均匀与施工可行性。这种基于结构形式、施工工艺与力学传递路径对应关系生成的幕墙形态，既满足结构稳定性与功能性需求，又契合施工管理要求，实现结构、形式与施工的统一。

二、建筑幕墙与建筑结构的整合设计

（一）建筑幕墙的功能与形态适配

在建筑幕墙与建筑结构的整合设计中，建筑幕墙需满足防风雨、保温隔热、隔音、节能等功能需求，这些功能的实现与建筑主体造型、施工工艺密切相关。通过参数化匹配与样板施工验证，能有效达成二者的适配^[3]。例如，针对弧形建筑外立面，需精准计算幕墙板材的切割尺寸、拼接角度与连接方式，通过样板施工测试密封性能与安装精度，确保幕墙既能紧密贴合建筑造型，又能通过密封胶嵌缝、排水系统设计等实现防风雨功能，避免雨水渗漏。在保温隔热方面，依据建筑所处地域气候条件，结合建筑外立面朝向，选择中空 Low-E 玻璃、保温岩棉等材料，搭配合理的幕墙构造形式，通过阶段验收把控施工质量，使幕墙在契合建筑形态的同时，满足建筑节能与使用功能要求。

（二）结构幕墙一体化施工技术

结构幕墙一体化施工技术聚焦于玻璃、金属板材等幕墙材料与建筑主体结构的复合受力承载机制，核心在于预埋件、转接件与主体结构的牢固连接及协同施工^[4]。参考幕墙施工技术规范，幕墙通过预埋件与建筑主体结构焊接或化学锚栓固定，转接件作为连接桥梁，需经防腐处理并满足力学强度要求。例如，金属板材幕墙的竖框与预埋件焊接固定，横框与竖框通过螺栓连接，施工中需执行“三检制”，确保连接节点的牢固性；玻璃幕墙的龙骨系统与建筑梁柱协同工作，通过节点加固设计与样板验收，使幕墙在承受风荷载与地震荷载时，与主体结构共同分担外力。这种一体化技术优化了施工流程，使幕墙成为建筑结构的重要组成部分，实现二者在力学性能、施工效率与空间美学上的深度融合。

三、建筑设计视角下的创新实践

（一）参数化协同设计与施工方法

1. 力学模拟与形态优化

借助参数化协同设计方法，通过有限元分析技术模拟幕墙结构在不同荷载工况下的力学响应，如应力分布、位移变形等^[5]。基于模拟结果优化幕墙形态与施工方案，例如，针对高层建筑幕墙边角部位的应力集中问题，调整龙骨截面尺寸或优化节点构造；结合施工预案，对异形幕墙的施工顺序与支撑体系进行模拟规划，确保施工过程中的结构安全。这种力学模拟与形态优化、施工预案相结合的方式，既保证幕墙力学性能达标，又提升施工可行性与美学效果，实现功能、施工与形式的有机统一。

2. 数字化预制装配技术

数字化预制装配技术在建筑幕墙设计与施工中应用广泛。借助 BIM 技术构建幕墙数字模型，明确构件尺寸、形状、连接方式及材料信息，实现工厂化预制生产，保障构件质量标准化^[6]。

施工前通过模型进行技术交底，明确预埋件安装位置、幕墙拼接顺序；施工现场利用激光定位、全站仪测量等数字化技术，配合预制构件的精准安装，减少现场湿作业。参考施工管理规范，预制装配技术需执行构件进场验收、安装过程巡检、阶段报验等流程，大幅缩短施工周期，降低人力成本，实现从设计到施工的一体化管控，提升幕墙施工质量与效率。

（二）地域文化与生态技术集成

1. 符号抽象与文化隐喻

从当地历史文化、民俗风情中提取特色符号，抽象化后应用于幕墙设计，同时兼顾施工可行性。例如，将传统建筑窗格纹样转化为金属穿孔板的孔洞造型，通过工厂预制确保纹样精度，现场装配时精准对接，使幕墙既承载文化内涵，又通过光影效果增强建筑艺术表现力^[7]。这种设计不仅让幕墙成为承载地域记忆的文化载体，更通过光影在构件上形成的动态变化，增强建筑外立面的艺术表现力与层次感，实现文化内涵与建筑美学的有机融合，让建筑在满足功能需求的同时，与周边人文环境形成深度共鸣。

2. 生态技术集成应用

结合光伏发电、雨水收集等绿色技术构建可持续建筑幕墙系统，同时融入施工管理要点。在幕墙设计中，南立面安装光伏玻璃，工厂预制时集成光伏组件接线端子，现场安装时做好防水密封处理；幕墙横框设计排水槽，配合建筑屋面雨水收集系统，施工中确保排水路径畅通^[8]。优先选用具有良好保温隔热性能的节能材料，施工过程中严格执行材料报验制度，对进场材料的性能指标进行全面检测，同时通过规范的安装工艺把控施工质量，减少因安装不当导致的能耗损失。这种生态技术与施工管理深度结合的模式，既符合绿色建筑的发展趋势，又能有效降低建筑全生命周期的能耗与环境影响，提升幕墙系统的可持续性与综合效益。

四、协同设计与施工管理实践验证

（一）多专业协同工作流程

1. 建筑-结构-施工信息交互平台

基于 IFC 标准构建覆盖建筑、结构、施工三专业的信息交互平台，是打破专业壁垒、实现高效协同的核心支撑^[9]。平台需打通设计与施工的信息壁垒，让各专业数据实时共享、动态联动：建筑设计师可上传幕墙造型方案、材料选型清单、外立面效果要求等核心信息，明确幕墙与建筑主体的衔接关系；结构工程师基于平台数据开展幕墙受力分析，重点核算龙骨承载能力、节点连接强度，同步将优化建议反馈至平台，如调整龙骨截面尺寸、优化预埋件布置方式；施工人员则结合现场场地条件、施工设备配置、工期计划等实际情况，提出施工可行性调整方案，如预制构件的拆分方式、现场安装的先后顺序等。例如，当建筑设计师调整幕墙网格尺寸时，结构工程师实时核算力学性能，施工人员同步更新预制构件生产计划与安装流程，避免设计与施工冲突，提升协同效率。

2. 冲突检测与动态优化

建立管线综合与节点构造实时校核系统，是解决多专业协同冲突的关键手段^[10]。该系统需整合建筑、结构、机电、幕墙等多专业设计数据，通过三维建模与碰撞检测技术，自动识别设计中的冲突问题：若幕墙龙骨布置与机电管线走向存在空间重叠，系

统可精准定位冲突位置并反馈给相关专业设计师，同步给出调整建议；若幕墙节点构造与主体结构钢筋布置相互干扰，结构工程师与幕墙设计师可通过平台联动沟通，优化节点构造形式，如调整转接件角度、增设避让空间等，同时施工人员同步更新施工方案，确保调整后的设计方案具备可施工性。这种动态优化机制需配合施工前的技术交底与样板评审流程，在正式施工前组织各专业人员核对设计方案，重点排查潜在冲突，确保各专业设计在满足功能需求、美学要求的同时，保障幕墙施工的顺利推进，减少现场返工与变更。

（二）实景项目验证分析

1. 高层建筑幕墙施工案例解析

以某高层建筑幕墙工程为例，该项目设计阶段充分考量与主体结构的协同性及施工可行性，深入分析建筑整体美学表达与功能需求。结合当地风荷载参数与地震设防烈度，幕墙采用隐框玻璃幕墙形式，通过有限元分析软件优化龙骨截面尺寸，选用高强度铝合金型材，确保结构刚度与轻量化平衡；施工中严格执行预埋件安装验收、龙骨安装三检制度、玻璃安装密封胶注胶等关键流程，阶段验收合格后方可进入下道工序。建筑设计上采用大面积通透低辐射玻璃材质搭配横竖金属装饰线条，既最大化自然采光需求，提升室内舒适度，又与周边现代建筑环境协调融合，增强城市天际线美感。该项目最终顺利通过竣工验收，验证了从建筑设计视角出发的幕墙设计、结构安全保障与施工管理协同方法的有效性与可操作性，为类似高层建筑幕墙工程提供宝贵参考经验。

2. 性能参数与施工质量对比评估

在实景项目中，对比幕墙物理性能检测数据与理论计算数据，重点分析抗风压性能、水密性、气密性及平面内变形性能等关键参数。通过第三方检测机构现场水密性喷淋检测、抗风压循环加卸载检测以及气密性测试，验证有限元理论计算模型的准确性与可靠性；施工过程中通过每日巡检记录、隐蔽工程拍照存档与阶段验收结果对比，全面评估施工质量控制效果。例如，将预埋件现场拉拔试验数据与理论设计值对比，确保连接节点强度达标且具备充足安全储备；将玻璃安装后的硅酮密封胶耐候性能检测结果与国家规范要求对比，保障幕墙长期使用功能与耐久性。通过多维度对比评估与数据反馈机制，及时发现潜在问题并持续优化设计参数与施工方案，提升整体工程品质。

（三）经济性与施工成本优化模型

1. 全寿命周期成本计算

全寿命周期成本计算需全面涵盖材料采购、施工建设、运营维护、拆除回收等阶段的所有直接与间接成本。建立科学化的材料维护周期与运营成本量化评估体系，例如，详细核算铝合金型材、中空 Low-E 玻璃等主要材料的使用寿命与定期维护成本，统计施工阶段的人工费、机械设备租赁费、临时设施费，以及运营阶段的能耗损失、日常清洁费用和保险费用。结合严格的施工管理规范与 BIM 技术应用，通过提前模拟优化施工方案减少返工、选用高耐久性材料降低维护频率与更换成本，最终实现全寿命周期成本最优目标，并为业主提供更高的投资回报率。

2. 价值工程分析方法

价值工程分析通过系统平衡幕墙功能与成本，实现技术方案与经济效益的动态优化。首先梳理幕墙核心功能，包括结构安全功能、建筑装饰功能、节能保温功能与隔声功能等，并采用功能评价系数法界定各项功能重要性权重；同时核算材料采购、工厂加工、现场安装、后期维护等全流程成本构成。例如，通过多方案比选不同玻璃镀膜类型与龙骨材质的性价比，在不降低核心安全与节能功能的前提下选用综合成本更低的替代材料；同步优化施工组织流程，推行装配式安装工艺，显著减少现场湿作业时间与高空作业风险，从而降低人工成本与安全措施费用，实现幕墙功能水平与成本支出的最优匹配，提升项目整体经济价值。

五、总结

建筑设计视角下的建筑幕墙与结构设计，需深度融合施工管理技术，通过协同设计、创新施工方法与质量管控，实现建筑美学、结构安全与施工可行性的统一。结构幕墙一体化技术、数字化预制装配技术的应用，提升了幕墙工程的质量与效率；多专业协同平台与冲突检测机制，减少了设计与施工冲突；全寿命周期成本优化与价值工程分析，实现了经济性与功能性的平衡。未来，需进一步深化 BIM 技术在全流程管理中的应用，探索智能材料与绿色技术的集成，推动建筑幕墙设计、结构安全与施工管理的持续创新，为建筑行业高质量发展提供支撑。

参考文献

- [1] 李超. 基于 VPL 技术建筑幕墙设计方法及其应用研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2021.
- [2] 丁永韬. 建筑幕墙施工安全风险评价研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [3] 余婷婷. 基于地方认同视角的黔中地区地域文化建筑设计研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [4] 江阔. 基于合同视角的 CD 建筑设计公司设计项目工作范围管理研究 [D]. 天津大学, 2021.
- [5] 高鹏云. 精益建造视角下的建筑设计方法研究 [D]. 天津大学, 2021.
- [6] 郑征. 建筑幕墙结构设计及优化措施探讨 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(5): 112-114.
- [7] 吴树才. 建筑幕墙结构设计及优化措施探究 [J]. 模型世界, 2023(4): 118-120.
- [8] 崔国骏. 建筑幕墙结构设计及优化路径 [J]. 建材发展导向 (下), 2021, 19(5): 214-215.
- [9] 林新贵. 建筑幕墙结构设计及优化探究 [J]. 中国住宅设施, 2021(3): 79-80.
- [10] 刘晓鸣. 建筑幕墙结构设计及优化浅谈 [J]. 建筑·建材·装饰, 2021(14): 186-187.

生态环保理念在科技住宅绿色建筑设计中的应用

杨斌¹, 蒋英俊²

1. 南京长江都市建筑设计股份有限公司, 江苏 南京 210000

2. 深业华东地产开发有限公司, 江苏 南京 210000

DOI:10.61369/ME.2025120021

摘 要 : 当前人居环境营造面临资源约束与生态承载的双重挑战, 科技住宅作为集成高新技术的新型居住形态, 其建设过程中存在过度依赖设备性能而忽视建筑本体环境适应性的倾向。该倾向导致隐性能耗增加并衰减系统效能, 亟待借助科学设计方法予以修正。本文立足生态环保理念, 提出优化围护结构、集成智能系统、应用绿色能源及选用环保建材的具体实施策略, 旨在打造健康可持续居住空间。

关 键 词 : 生态环保; 科技住宅; 绿色建筑; 建筑设计

Application of Ecological Environmental Protection Concept in Green Building Design of Science and Technology Housing

Yang Bin¹, Jiang Yingjun²

1. Nanjing Yangtze River Urban Architectural Design Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210000

2. Shenye East China Real Estate Development Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210000

Abstract : The current human settlement environment faces dual challenges of resource constraints and ecological carrying capacity. As an innovative residential form integrating advanced technologies, tech-enabled housing often exhibits a tendency to overemphasize equipment performance while neglecting the adaptability of building environments during construction. This approach leads to increased hidden energy consumption and diminished system efficiency, necessitating scientific design methodologies for correction. Grounded in ecological and environmental protection principles, this paper proposes concrete implementation strategies including optimizing building envelopes, integrating smart systems, utilizing green energy, and selecting eco-friendly building materials, aiming to create healthy and sustainable living spaces.

Keywords : eco-environmental protection; technology residence; green building; architectural design

引言

根据住房和城乡建设部等七部委联合印发的《城乡建设领域碳达峰实施方案》要求: “全面提高绿色低碳建筑水平, 持续开展绿色建筑创建行动, 到2025年城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准”。在此背景下, 生态环保理念系统融入科技住宅的绿色建筑设计, 成为响应国家战略的必然要求。生态环保理念强调在建筑全生命周期内最小化消耗资源, 而该理念与科技住宅高度集成化的技术体系相结合能打造可持续的未来人居典范。

一、生态环保理念的内涵及其在科技住宅中的重要性

(一) 生态环保理念的核心内涵

生态环保理念在建筑领域, 体现为一种追求人类居住活动与自然环境协调共生的思想。该理念要求建筑全生命周期中达到三个层面的平衡: 建筑功能需求与环境承载能力的平衡, 资源利用效率与生态保护目标的平衡, 技术系统性能与自然调节模式的平衡。

(二) 生态环保理念在科技住宅设计中的重要性

当前科技住宅建设过程中存在一种倾向, 即过分关注设备性能

指标却轻视建筑自身与环境相互协调的能力。以生态效益为目标的设计, 既明显提高资源使用效率, 又为居住者营造出更为健康稳定的室内生活环境, 进而完整展现高品质建筑理应承担的社会意义。

二、基于生态环保理念的科技住宅绿色建筑设计原则

(一) 节能优先原则

节能优先原则强调科技住宅的设计中, 建筑应尽可能地减少能源消耗, 并高效利用资源。绿色建筑理念下, 节能一方面是合

理使用能源，另一方面也是对生态环境的责任担当。科技住宅的能源使用要与建筑物的功能需求相匹配，避免过度消耗，需要结合精确的设计和高效的系统管理将能源消耗降至最低。

（二）高效利用资源原则

在资源日趋紧张背景下，科技住宅设计必须以最大限度发掘和利用现有资源为目标，杜绝一切形式的浪费。这要求设计过程中应精确核算全部可用资源，保障每一寸土地、每一份建材、每一滴水乃至每一度电都能物尽其用。该原则既指导着建筑材料的选择，又同样贯穿于循环使用水资源、节约能源等多个环节。

（三）保护生态环境原则

随着城市化进程的加快，建筑对生态环境的负面影响日益突出，污染、资源浪费和生物栖息地的破坏都在一定程度上威胁着自然生态的平衡。因此建筑设计要与自然环境和谐共生，力求达到“绿色建筑”的要求。设计过程中要注重建筑本身的节能减排，同时还应关注建筑所处位置的生态环境特征，避免对当地生态造成干扰。

（四）舒适性设计原则

舒适性设计原则追求“健康、舒适、可控”的人居环境目标，将居住者的身心健康与生活质量置于中心位置，要求建筑设计充分回应人类居住的基本需求，塑造健康而愉悦的居住环境。因此科技住宅的设计中需要合理规划空间布局，保证自然采光充足与通风顺畅，并借助适宜的温湿度调节与噪声隔离措施。

三、生态环保理念在科技住宅绿色建筑设计中的应用

科技住宅是集成先进技术与智能系统的住宅形式，旨在提供更加智能、环保的居住环境。科技住宅的设计是为了借助技术创新解决人类居住的实际问题，创造更加健康、低碳的生活空间（如图1所示）。



图1：科技住宅绿色建筑系统概览

基于上述设计原则，实施科技住宅需要从多个层面着手，达到降低能耗、提高舒适度、并减少对环境的负面影响的目标。

（一）优化围护结构设计，增强建筑节能效果

围护结构是通过改善建筑外墙、屋顶、窗户等部分的保温、隔热和气密性，减少能量流失，提高建筑的节能效率。优化围护结构能够有效降低建筑的取暖和制冷需求，减少能源消耗，进而降低运营成本。

围护结构作为建筑与外界环境之间的物理屏障，其热工性能影响建筑的能耗水平与室内舒适度。科技住宅绿色建筑设计中，优化围护结构可提升建筑的节能效果，落实生态环保与居住品质的双重目标。

1. 提升外墙与屋面保温性能

外墙与屋面是建筑热量传递的主要部位。科技住宅通常要求外墙传热系数 $K \leq 0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，屋面 $K \leq 0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，较普通住宅提升约10% - 20%。实践中，为减少外墙外保温板因厚度及自重过大带来安全隐患，可采用自保温砌块填充墙外加高性能保温材料如石墨聚苯板、岩棉板等综合节能保温措施，提升节能性能；对于冷桥部位可采用免拆模板技术加强对保温材料的保护，并减少对木模的应用，节能减排。也可应用新型节能建材，如气凝胶、真空绝热板等高效保温材料新技术。在建造工艺上推广并使用结构保温一体化建造技术，提升外围护结构的全生命周期。

2. 强化外窗系统隔热与气密性

外窗是围护结构中的薄弱环节。科技住宅宜采用断桥铝合金窗框，配合三玻两腔中空 Low-E 玻璃，充填氩气，使其传热系数控制在 $K \leq 2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。同时，外窗气密性等级不应低于 GB/T 7106 规定的7级，有条件时可提升至8级。窗洞口四周应包覆连续保温层，并采用防水隔汽膜密封，减少冷桥效应与空气渗透。

3. 加强节点构造与热桥处理

围护结构连接处、门窗周边、阳台板等部位易形成热桥，导致局部结露与能量损失。设计中应采用断热桥构造，如设置节能附框、窗台保温板、阳台隔热带等。对于下跃户型、贴临覆土或设备井的外墙，应实施双墙保温或内保温加强措施，保证施工连续性（如图2所示）。



图2：某下跃户型四周墙体外侧增加保温

（二）集成智能家居系统，提高能源管理效率

集成智能家居系统将照明、空调、采暖、新风等设备与智能

平台连接，自动化管理住宅环境。实施智能家居系统时，需要将住宅内的各类设备接入智能控制平台，之后借助能源监测功能，系统能跟踪电力消耗情况，并提供优化建议，帮助用户降低长期能源开支。

实施中，相关人员需搭建一个统一的管理平台，全面接入住宅内的空调、新风、采暖、照明、遮阳及家电等关键用能设备，形成物联网。该平台部署于室内外的各类传感器，实时、精确地感知温度、湿度、光照、人员活动乃至电网电价等动态数据，并以此为基础驱动系统执行预设的节能策略：系统可根据室内外温差与空气质量，在过渡季节自动切换至“自然通风模式”，减少机械系统运行。最终这种智能调控使得科技住宅成为一个能够主动优化自身能耗、并与外部能源环境进行友好互动的智慧生命体，降低建筑的运营碳排放与长期使用成本。^[1]

（三）应用绿色能源技术，降低碳排放水平

绿色能源技术是利用可再生能源替代传统化石能源，主要包括太阳能、风能、地热能等，这些能源在使用过程中不会产生有害排放。在实施过程中，需要根据建筑所在地的自然资源特点，选择合适的绿色能源技术。同时还要系统集成各类技术，优化设计以提高能源利用效率。^[2]

太阳能丰富的地区，应优先推广建筑光伏一体化技术。针对夏热冬冷地区的住宅，可在建筑屋顶、立面及其他附属构件设置如光伏瓦、光伏幕墙、光伏遮阳、光伏栏板、光伏雨棚等措施。在光伏发电的同时，兼顾了建筑外围护的美观并起到遮阳和隔热作用。（如图3所示）

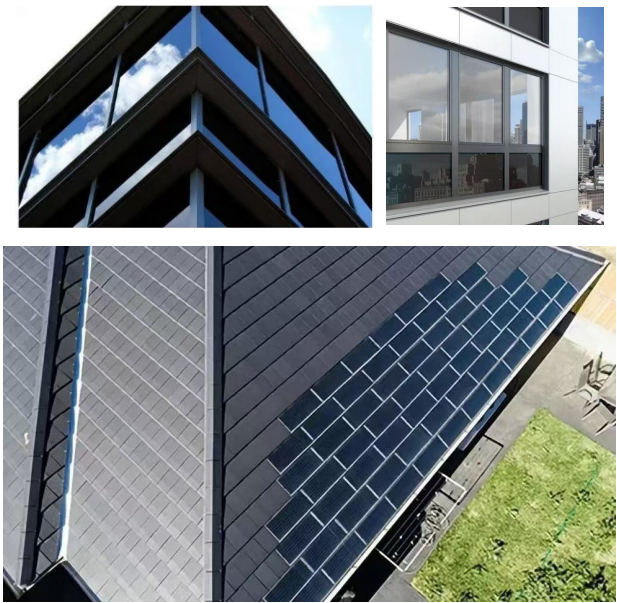


图3：BIPV光伏瓦、光伏栏板、光伏幕墙

其次，应因地制宜地选用高效热泵系统作为建筑冷热源。对于地质条件适宜、具有较大绿化或广场面积的项目，可优先采用地源热泵系统。地埋管换热器可按4-5m间距菱形布置，钻孔深度一般为80-120m，并需在前期通过热响应测试获取岩土体热物性参数，以保证系统长期热平衡与高效运行。^[3]

（四）选用环保建筑材料，改善室内环境质量

环保建筑材料在生产、使用和废弃过程中对环境影响较小，能够减少资源消耗、降低污染排放，并且具有较长的使用寿命。具体应用环节，应当依据建筑设计的实际要求选取恰当的环保材料，以保证材料的耐久性能与长期环境适应性。^[4]

科技住宅的绿色建筑设计中，选用环保建筑材料是实现全生命周期低碳化、保障室内健康环境的核心技术。

第一，在项目设计阶段应建立基于生命周期评估的绿色建材选型数据库，明确各类材料的环境产品声明数据要求，制定强制性采购标准。结构材料应优先选用高强混凝土与再生骨料混凝土，其中再生骨料替代率不应低于30%，以降低天然砂石开采与生产能耗。^[5]

第二，围护结构材料需兼顾高性能与低环境影响。外墙保温系统推荐采用石墨聚苯板或岩棉板等无机保温材料，其导热系数应低于 $0.032 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，且燃烧性能需达到A级不燃标准。外窗系统应选用断桥铝合金型材与三玻两腔Low-E中空玻璃组合，玻璃间隔层充填氩气，整窗传热系数K值控制在 $1.0\sim 1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 范围内。

四、结束语

生态环保理念与科技住宅的融合，标志着建筑设计从单纯的技术叠加转向与自然共生的系统营造。该转变要求住宅作为生活容器，需成为能够响应环境变化、调节自身运行的生命体。展望未来，相关人员可引入更为精准的环境感知与动态优化算法，使住宅将具备自主适应能力，进而在不断演变的城市生态网络中成为低碳、健康人居环境的有力支撑。

参考文献

- [1]王波.浅谈科技住宅“五恒”新风系统的施工[J].建筑科技,2025,9(07):147-149.
- [2]黄宇琼.“双碳”背景下的绿色科技住宅设计实践[J].住宅与房地产,2025,(01):117-119.
- [3]张铭言.地源热泵系统在科技住宅中的能效提升研究[J].铁道建筑技术,2024,(07):37-39+82.
- [4]冯宇同.科技住宅装修施工工艺及质量通病防治措施[J].住宅与房地产,2024,(05):254-256.
- [5]田伟,杨芳.新形势下科技住宅的发展与企业标准的编研[J].江苏建筑,2022,(05):1-5.

装配式端板连接钢筋混凝土梁柱框架受力性能分析

鲁万卿¹, 田为¹, 李正英², 刘红军²

1. 中建七局西南建设有限责任公司, 重庆 400045

2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045

DOI:10.61369/ME.2025120029

摘 要： 本研究针对低多层装配式建筑，提出了一种采用高强螺栓连接端板组件与预制梁柱的全装配式框架体系。通过系统的推覆分析，获得了结构的荷载-位移响应规律，揭示了其塑性损伤演化过程与塑性铰形成机制。通过与现浇框架的对比分析表明：该装配式框架在极限状态下通过梁端端板塑性变形与柱脚区域破坏共同形成耗能机制。虽然其极限承载力和初始刚度均低于现浇框架，但表现出更优异的延性性能。

关 键 词： 端板连接；钢筋混凝土；装配式框架；受力性能；有限元分析

Analysis of the Mechanical Performance of Prefabricated end Slab Connected Reinforced Concrete Beam-Column Frames

Lu Wanqing¹, Tian Wei¹, Li Zhengying², Liu Hongjun²

1. China Construction Seventh Engineering Division Southwest Construction Co., LTD., Chongqing 400045

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045

Abstract： This study proposes a fully prefabricated frame system for low and multi-story prefabricated buildings, which uses high-strength bolts to connect end plate components with prefabricated beams and columns. Through systematic overlay analysis, the load-displacement response law of the structure was obtained, revealing its plastic damage evolution process and the formation mechanism of plastic hinges. The comparative analysis with the cast-in-place frame shows that the prefabricated frame forms an energy dissipation mechanism through the plastic deformation of the end plates at the beam ends and the failure in the column base area under the limit state. Although its ultimate bearing capacity and initial stiffness are both lower than those of cast-in-place frames, it exhibits superior ductility performance.

Keywords： end plate connection; reinforced concrete; prefabricated frame; force performance; finite element analysis

引言

装配式半刚性框架在试验研究方面，Low和Tadros等^[1]针对六层预制混凝土框架，通过拟静力试验和地震响应分析指出，该体系不仅能达到与现浇框架相当的抗震性能，还展现出更好的延性与耗能能力。Nakaki和Stanton^[2]基于五层预应力框架缩尺模型，提出了预应力抗震系统的设计指南。Elnashai和Elghazouli^[3]对比了螺栓半刚性连接与刚性连接在地震下的响应，表明螺栓连接具备良好延性和滞回性能。Rahman^[4]等采用基于性能的评估方法，研究了混合结构框架，指出其在超烈度地震下仍可满足位移限值要求。Nader^[5]与Reyes Salazar^[4]分别研究了连接刚度对钢框架抗震性能的影响，发现半刚性连接在整体延性和抗侧刚度方面表现良好，且当梁线刚度与节点刚度比 $T \approx 1$ 时抗震性能较优。国内王贾鑫^[6]、黄远^[7]等通过足尺或缩尺试验，验证了该类框架具有良好的滞回性能与延性，其中黄远提出的梁端套管构造可有效提高塑性铰长度与变形能力。

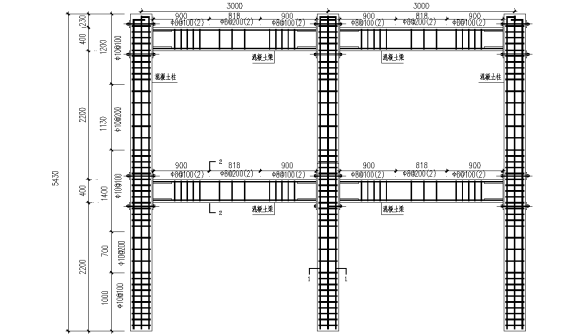
在理论研究方面，Lightfoot^[8]与Goto^[9]等通过修正单元刚度矩阵，分别实现了对节点转动刚度及非线性行为的模拟。刘小强^[10]等提出了正常使用状态下梁线刚度与节点刚度比的范围。程睿^[11]基于最小势能原理，推导出用于二阶弹性分析的刚度矩阵，指出半刚性连接会增大水平位移与节点转角。周瑞忠^[12]等采用弧长法处理双重非线性问题，表明半刚性连接使水平位移增加19%~35%，并引起内力重分布。李国华^[13]等通过非线性分析指出，半刚性连接对轴力与剪力影响较小，但会显著调整弯矩分布。吴兆旗^[14]等建立三维有限元模型，发现加劲肋可提高节点初始刚度，而过早的螺栓塑性变形可能导致脆性破坏。

综上所述，不同节点形式显著影响结构受力机制，因此需结合节点特性进一步深入研究装配式半刚性框架的整体性能。本文通过有限元方法系统分析了装配式端板连接框架的抗震性能，明确了框架的破坏模式与荷载-位移响应规律。

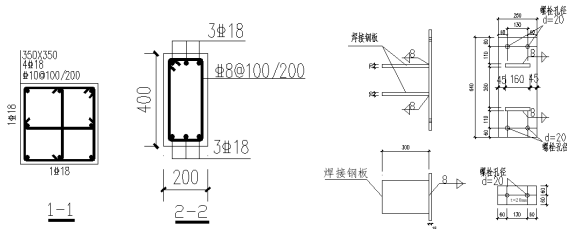
一、有限元分析模型建立

(一) 框架设计参数

基于端板连接节点方案，建立了两层两跨半刚性框架模型示于图1。



(a) 框架立面尺寸图



(b) 梁柱截面配筋图

(c) 端板组件详图

(二) 材料力学性能

为精确模拟混凝土在低周往复荷载下的非线性行为，本研究采用由 Lubliner 与 Lee 等学者提出的塑性损伤本构模型^{[15]–[17]}。该模型通过有效区分材料的拉、压力学特性，能够准确表征混凝土在循环荷载下的刚度退化与能量耗散等复杂响应。钢材采用随动强化模型，箍筋采用 HPB300 级，纵筋采用 HRB400 级，其弹性模量均依据规范确定，泊松比统一取 0.3，屈服强度分别设定为 270 MPa 与 360 MPa。

(三) 单元类型及网格划分

钢筋使用 T3D2 桁架单元，其他构件采用 C3D8R 实体单元。网格进行差异化划分（图2），主体混凝土为 50mm，螺栓孔周围加密至 10mm，端板为 20mm，高强螺栓为 10mm，钢筋网格与混凝土保持一致（50mm）。

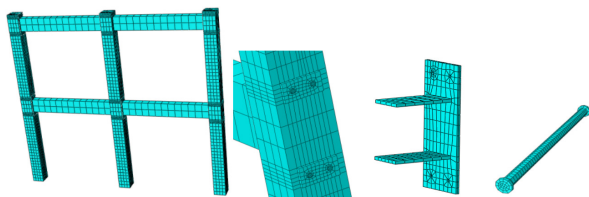


图2 节点及连接件网格划分图

二、装配式端板连接钢筋混凝土梁柱框架有限元分析

(一) 装配式混凝土框架的推覆分析

1. 加载设置

本框架分析通过四个荷载步模拟结构受力全过程（图3）。首

先，在初始分析步中对高强螺栓施加 50% 的目标预紧力（0.5P），以建立接触面间的稳定压力；随后在第二分析步中施加预紧力；第三分析步通过在梁体表面施加均布荷载，模拟楼面荷载的传递机制；最后在第四分析步中按既定比例分级施加侧向荷载，系统评估结构在复合受力状态下的力学性能。

2. 基底剪力与顶点位移关系

图3为了静力推覆分析所得到的基底剪力 – 顶点位移关系曲线。由于采用力控制加载方式，曲线未呈现明显下降段，故将位移显著增大而承载力无法继续提升的状态定义为结构极限状态。

分析表明，在加载初期，结构处于线性阶段；当位移达到 9mm 时，斜率减小，结构出现刚度退化；位移超过 120mm 后，基底剪力趋于稳定。框架的屈服位移为 53.9mm，屈服荷载为 148.6kN；峰值位移为 188.5mm，相应峰值荷载为 191.9kN。计算得到结构的延性系数为 3.5，该框架具有良好的延性性能。

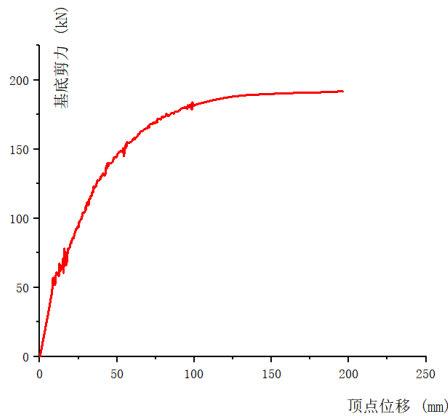


图3 框架结构推覆曲线

3. 框架的损伤与塑性铰分布

图4展示了框架在极限状态下的整体变形形态，图5则通过损伤因子与最大塑性应变云图分别呈现了混凝土的破坏模式与裂缝开展情况。分析可见，塑性受拉损伤主要集中于梁柱构件受拉侧，多处损伤因子超过 0.9；尽管柱身损伤区域分布较广，整体受压损伤程度较轻。进一步结合图 5(c) 可知，混凝土裂缝明显集中于柱脚及中柱顶层节点受拉区。

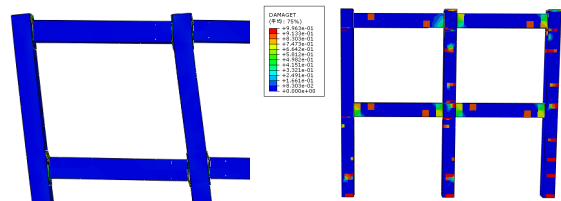
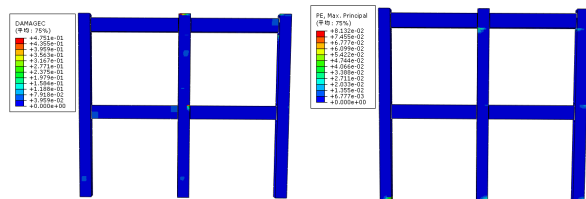


图4 框架变形图

(a) 混凝土受拉损伤



(b) 混凝土受

(c) 混凝土最大主拉塑性应变损伤

图5 试验节点混凝土破坏形态对比

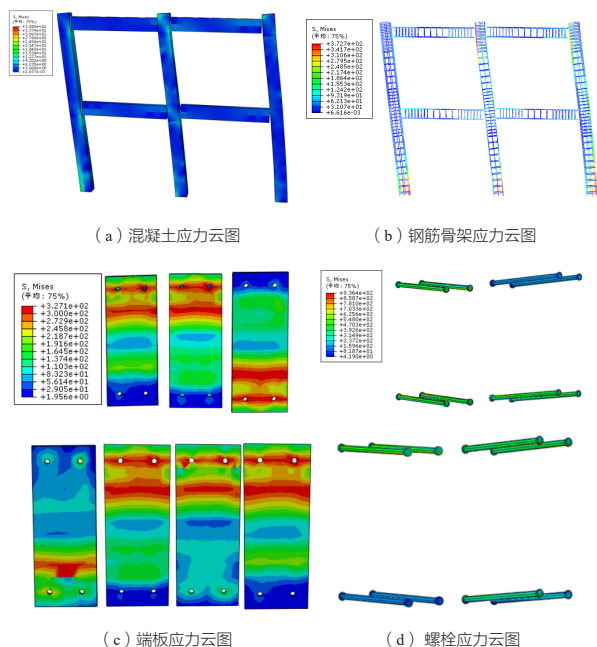


图6 框架结构 Mises 应力云图

图6展示了框架关键构件的应力分布。结果显示，混凝土应力集中于节点区及柱脚部位，钢筋在柱脚及中柱顶端均已屈服。图6(d)显示螺栓受拉侧应力显著提升而受压侧降低，这是由混凝土与钢板变形引起预紧力损失所致。值得注意的是，中间节点变形时上下排螺栓均受拉，但所有螺栓在整个过程中均保持弹性状态。图7记录了塑性铰的完整发展过程：始于底层右边梁左端，随后依次扩展至各梁端，最终在三个柱脚形成，导致结构体系完全失效。图8中当顶点位移48.6mm时形成塑性铰，基底剪力为144.5kN。当位移增至57.5mm时（图9），柱脚受拉区钢筋首次屈服，基底剪力上升至153.3kN。

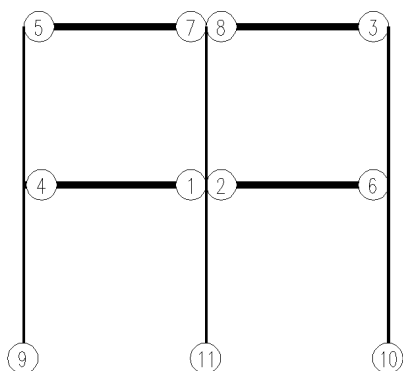


图7 框架结构塑性铰分布

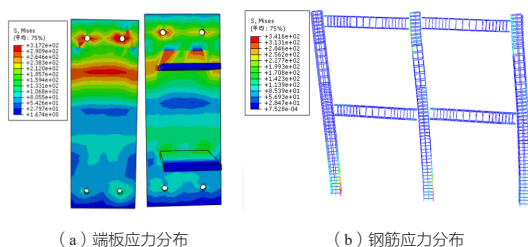


图8 $\Delta=45.6\text{mm}$ 时端板和钢筋的应力分布

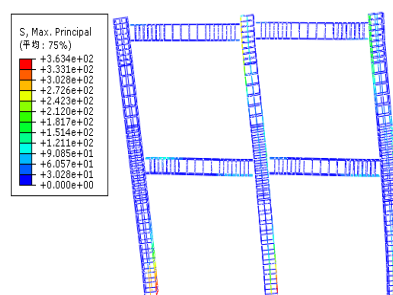


图9 $\Delta=57.5\text{mm}$ 时钢筋的应力分布

(二) 装配式有限元模型与现浇有限元模型的对比

本节通过建立现浇框架有限元模型（图10），系统研究节点连接形式（现浇与装配式）对框架受力性能、滞回特性及塑性铰形成规律的影响。研究在保持其他参数一致的条件下，重点分析节点连接形式作用机制。

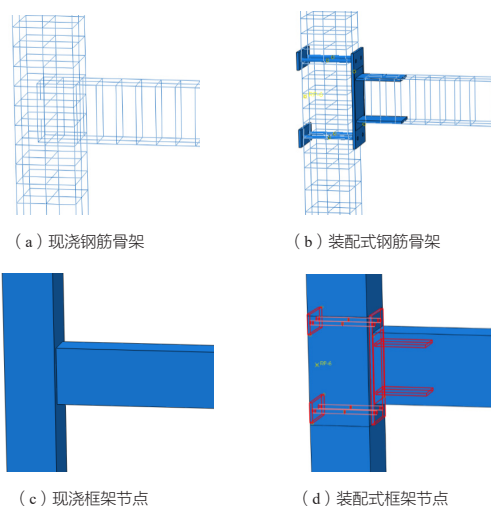


图10 现浇框架有限元建模对比

1. 滞回曲线与延性对比

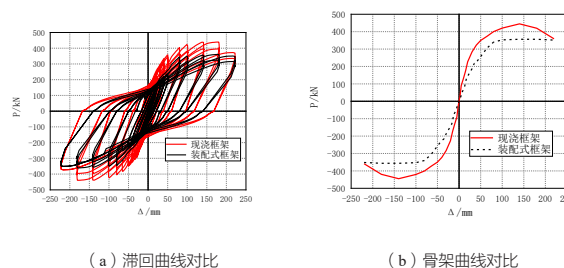


图11对比现浇与装配式框架的滞回性能与骨架曲线。两种框架在加载初期均呈现狭窄滞回环，随位移增大滞回环面积显著扩展，最终均形成饱满的滞回曲线，显示出良好的耗能能力。现浇框架在承载力与初始刚度方面均优于装配式框架，具体性能参数见表1。其弹性阶段曲线斜率较大，临近屈服时刚度逐渐退化，下降段呈现典型的“S”形特征，承载力衰减较快。相比之下，装配式框架的荷载-位移曲线呈反“Z”形，具有更长的水平段，表现出更优越的延性性能。节点转动能力导致刚度降低，梁柱相对转动削弱了承载能力，连接柔性的增大加剧了侧移并强化了二阶效应的不利影响。现浇框架延性系数为2.34，而装配式框架达到2.63，

表名后者在延性性能更好。

表1 现浇框架力学性能对比						
荷载 (kN)	屈服点			峰值点		
	装配式 试验	装配式 模拟	现浇模 拟	装配式 试验	装配式 模拟	现浇模 拟
	279.64	268.25	412.51	362	354.7	443.49
位移 (mm)	75.63	83.49	93.69	160.75	166.3	138.7

注：试验屈服点与峰值点均采用正反方向上的平均值。

2. 框架破坏机制对比

图12对比展示了现浇与装配式框架在极限状态下的钢筋应力分布特征。现浇框架的钢筋应力在梁柱节点区及柱脚集中，均达到屈服应力。与之相比，装配式框架的高应力区主要出现在梁端连接区域与柱脚部位，其节点区的柱内钢筋在极限状态下仍保持弹性工作状态。这一差异主要源于装配式节点半刚性连接特性所允许的梁柱相对转动，有效降低了节点区柱内钢筋的应力水平。

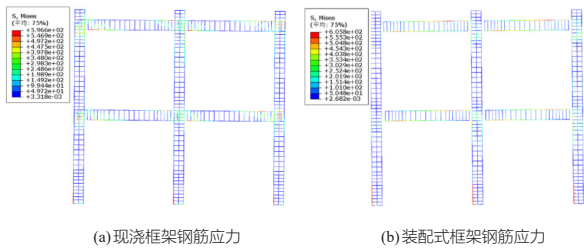


图12 钢筋 Mises 应力云图

图13进一步对比了两类框架的混凝土最大主拉塑性应变分布，该指标直观反映了结构在荷载作用下的裂缝发展规律。现浇框架的混凝土裂缝主要分布于梁柱节点核心区及柱脚受拉侧，而装配式框架的裂缝则集中于柱脚受拉区、梁端区域及节点区柱身两侧。这种分布差异源于端板连接体系特有的受力机理：通过在受拉翼缘处形成塑性铰并绕受压侧螺栓转动，该体系改变了结构的传力路径，最终导致柱体在螺栓连接区域产生明显受拉裂缝，体现了装配式节点特有的塑性损伤演化模式；相比之下，现浇框架的刚性节点限制了构件间的相对转动，使其损伤主要集中在节点核心区区内。

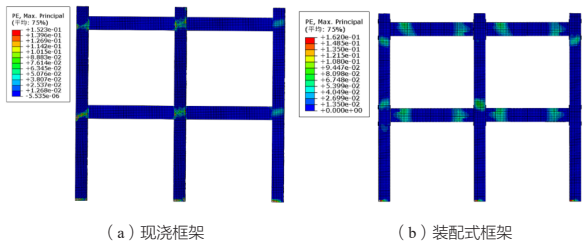


图13 混凝土最大主拉塑性应变

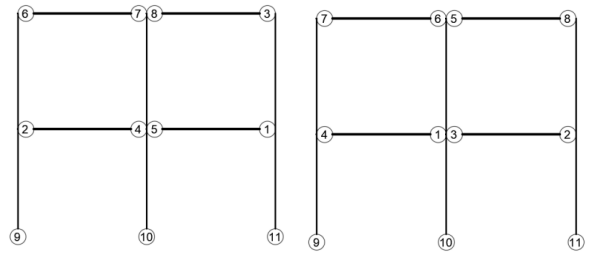


图14 框架塑性铰出现顺序

图14为两种结构体系的塑性铰发展规律。现浇框架的塑性铰首先在一层右侧节点形成，随后依次在一层左侧节点、二层右侧节点、一层中间节点左侧、一层中间节点右侧、二层左侧节点、二层中间节点左侧、二层中间节点右侧发展，最终在左侧柱脚、中间柱脚和右侧柱脚相继形成。相比之下，装配式框架的塑性铰发展呈现更为有序的模式：始于一层的中间节点左侧，随后扩展至同层的右侧节点、中间节点右侧及左侧节点，继而向上层发展，依次在二层中间节点右侧、中间节点左侧、左侧节点及右侧节点形成，最后同样在三个柱脚位置完成塑性铰的分布。

分析表明，装配式框架展现出明确的分层发展特征：首层所有梁端连接件均形成塑性铰后，上层连接件才开始屈服，最终柱脚出现塑性铰。相比之下，现浇框架总体上遵循自下而上的发展规律，仅二层右侧节点（远离加载点）先于部分首层节点形成塑性铰。值得注意的是，两种体系的初始塑性铰均集中出现在首层右侧及中间节点区域。

两种框架均遵循“梁端→柱脚”的合理破坏序列，但塑性铰区存在本质差异：现浇框架的塑性铰直接形成于梁端，而装配式框架则产生于端板连接区域。这种差异使得装配式框架能够通过端板变形与节点转动实现更优的能量耗散，从而展现出更卓越的延性性能。值得强调的是，两种结构均实现了理想的梁铰破坏机制，有效避免了柱构件的提前破坏，证明了其破坏模式的合理性（图14）。

三、结论

本文建立了双层双跨装配式端板连接混凝土框架的精细化数值模型，并采用相同参数构建了现浇框架对比模型，主要结论如下：

1. 半刚性连接框架的荷载-位移曲线呈现典型的反Z形特征，其损伤演化过程表现为梁端端板率先屈服形成塑性铰，随后柱脚区域产生塑性发展，且柱端塑性铰的形成时序始终滞后于梁端构件，证明该结构体系具备良好的能量耗散机制与抗倾覆能力。

2.在相同设计条件下,装配式框架虽在承载力与刚度上低于现浇框架,但其延性性能显著更优,具备更好的变形能力。从破坏机制来看,装配式框架的塑性铰集中产生于端板连接区域,而现浇框架则直接形成于梁端截面。得益于半刚性连接的转动特性,装配式框架在峰值荷载作用下节点区柱构件裂缝分布范围减

少约35%,且柱筋始终保持弹性工作状态。

3.两种框架均遵循"梁端→柱脚"的合理塑性铰发展路径。装配式框架通过端板变形与节点转动实现能量耗散,其层间位移角达到1/30时仍保持稳定承载。

参考文献

- [1] Low S G, Tadros M K, Nijhawan J C. Minimization of Floor Thickness in Precast Prestressed Concrete Multistory Buildings[J]. Pci Journal, 1991, 36(4): 74-93.
- [2] Nakaki S D, Stanton J F, Sritharan S S. Overview of the PRESS five-story precast test building[J]. Pci Journal, 1999, 44(2): 26-39.
- [3] Elnashai A S, Elghazouli A Y, Denesh-Ashtiani F A. Response of Semirigid Steel Frames to Cyclic and Earthquake Loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(8): 857-867.
- [4] Rahman M A, Sritharan S. An evaluation of force-based design vs. direct displacement-based design of jointed precast post-tensioned wall systems[J]. 2006, 5(002): 285-296.
- [5] Nader M N, Astaneh-Asl A. Shaking Table Tests of Rigid, Semirigid, and Flexible Steel Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(6): 589-596.
- [6] 王静峰, 王贾鑫, 王冬花, 等. 半刚性钢管混凝土框架抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015.
- [7] 黄远, 张锐, 朱正庚, 等. 现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015(1).
- [8] Lightfoot, Edgar. Moment distribution : A Rapid Method of Analysis for Rigid-Jointed structures[M]. Moment distribution : A Rapid Method of Analysis for Rigid-Jointed Structures, 1961.
- [9] Y., Goto, And, et al. On the computer-based design analysis for the flexibly jointed frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1987.
- [10] 刘小强, 吴惠弼. 半刚性连接钢框架位移和内力的计算 [J]. 土木建筑与环境工程, 1993(2): 46-55.
- [11] 程睿. 半刚性连接钢框架的有限元分析及近似计算方法 [D]. 重庆大学, 2002.
- [12] 周瑞忠, 尹志刚. 半刚性连接框架的变形和内力 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(2): 5.
- [13] 李国华, 申林, 顾强. 半刚性连接钢框架非线性有限元分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 4.
- [14] 吴兆旗, 张素梅, 姜绍飞. 梁柱外伸端板连接弯矩——转角性能有限元分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 922-932.
- [15] 吴兆旗, 张素梅, 姜绍飞. 梁柱外伸端板连接弯矩——转角性能有限元分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(6): 922-932. 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [16] Faella C, Piluso V, Rizzano g. Structural steel semi rigid connections: theory, design, and software IM. CRC press, 1999.
- [17] 黄频. 端板螺栓连接钢—混凝土组合节点试验及力学性能研究 [D]. 湖南大学, 2011.

工程测绘技术管理与风险管理在建筑项目中的应用

廖国胜

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025120039

摘 要： 工程测绘技术管理对建筑项目意义重大，需依托 PDCA 循环等理论。在建筑设计与施工阶段有不同实践，且其项目风险有特征和分类，应构建风险管理体系。通过基于 GIS 的实时监测等系统实现二者协同，需优化数据治理、创新组织架构，数字孪生和边缘计算将推动其发展。

关 键 词： 工程测绘技术管理；风险管理；协同应用

The Application of Engineering Surveying and Mapping Technology Management and Risk Management in Construction Projects

Liao Guosheng

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： Engineering surveying and mapping technology management is of great significance to construction projects and needs to rely on theories such as the PDCA cycle. There are different practices in the architectural design and construction stages, and the project risks have their own characteristics and classifications. A risk management system should be established. To achieve the synergy between the two through systems such as real-time monitoring based on GIS, it is necessary to optimize data governance and innovate organizational structures. Digital twins and edge computing will drive its development.

Keywords： engineering surveying and mapping technology management; risk management; collaborative application

引言

随着《全国基础测绘中长期规划纲要（2015 – 2030 年）》的颁布，工程测绘技术管理与风险管理在建筑项目中的重要性愈发凸显。工程测绘技术管理涵盖项目多环节，对建筑质量、进度、成本影响重大，且需依托 PDCA 循环等理论。同时，风险管理能应对其不确定性与潜在损失性。二者协同应用，从设计到施工阶段，借助各类技术与机制确保项目顺利推进。优化数据治理体系、创新管理架构可提升协同效果，而数字孪生与边缘计算等新兴技术也为其发展带来广阔前景。

一、工程测绘技术管理概述

（一）工程测绘技术管理基本概念

工程测绘技术管理，主要是对工程测绘过程中涉及的各项技术活动及其相关资源进行科学、有效的组织、协调、控制和监督^[1]。其定义范畴涵盖从测绘项目的规划设计，到具体实施过程中的技术操作规范，再到成果的审核与应用等多个环节。工程测绘领域具有专业性强、精度要求高、受环境因素影响大等特性。在建筑项目里，工程测绘技术管理与质量紧密相连，精准的测绘技术是保障建筑工程质量达标的基础；与进度相关，合理规划测绘流程能避免因测绘延误导致的工程整体进度滞后；与成本也存在关联性，高效的技术管理可减少重复测绘等不必要成本，实现资源优化配置，确保建筑项目顺利推进。

（二）工程测绘技术管理理论基础

工程测绘技术管理需依托一系列理论基础。PDCA 循环理论是重要的基础之一，该理论包括计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）和处理（Act）四个阶段，通过不断循环这四个步骤，可对工程测绘技术管理流程进行持续优化与改进，确保测绘工作始终朝着预期目标推进^[2]。BIM 技术支撑体系也至关重要，它以三维信息模型为载体，整合工程测绘过程中的各类数据信息，实现数据的高效共享与协同工作，为工程测绘技术管理提供直观、准确的决策依据。三维激光扫描技术则能快速获取物体表面的三维空间信息，生成高精度的点云数据，在复杂地形地貌测绘及建筑结构监测等方面优势显著，为工程测绘技术管理提供可靠的数据采集手段，保障测绘数据的准确性与完整性。

二、建筑项目中的工程测绘技术管理应用分析

（一）技术管理在建筑设计阶段的应用

在建筑设计阶段，工程测绘技术管理通过研究数字化测绘技术，实现管理流程创新。在方案验证方面，借助数字化测绘技术精准获取地形、地貌等基础数据，为设计方案提供可靠依据，判断方案的可行性与合理性，确保设计方案符合实际场地条件^[3]。在冲突检测中，利用该技术构建建筑信息模型（BIM），整合各专业设计信息，提前发现不同专业设计之间潜在的空间冲突、管线碰撞等问题，避免施工阶段的变更与返工，降低成本与工期延误风险。同时，通过数字化测绘技术搭建多专业协同平台，促进建筑、结构、给排水、电气等各专业间的数据共享与实时沟通，打破信息壁垒，提高协同设计效率与质量，使设计成果更加完善，为后续施工顺利进行奠定基础。

（二）施工阶段测绘技术管理实践

在施工阶段，工程测绘技术管理实践主要体现在施工放样误差控制、进度匹配算法及超高层建筑变形监测管理方面。施工放样时，精确控制误差是关键，需采用先进测量仪器与合理测量方法，严格按照规范操作，将误差控制在允许范围内，确保建筑结构位置准确^[4]。进度匹配算法则借助测绘数据，实现施工进度与计划的实时对比，及时发现偏差并调整，保障施工按计划推进。对于超高层建筑，变形监测管理尤为重要，通过定期对建筑进行变形监测，获取沉降、倾斜等数据，分析变形趋势，为施工决策提供依据，确保超高层建筑施工安全与质量。

三、工程测绘风险管理体系构建

（一）测绘项目风险特征与分类

工程测绘项目风险具有独特特征与多种分类。从特征来看，风险具有不确定性，仪器何时出现故障难以精准预知，像仪器内部零部件老化，可能突然导致测量数据偏差，影响测量精度和效率。风险还具潜在损失性，数据异常若未及时发现，基于错误数据进行的工程设计与施工，会造成巨大经济损失。就分类而言，仪器故障风险，如仪器精度下降、部件损坏，直接影响测量结果准确性。数据异常风险，包括数据采集错误、传输丢失等，会误导后续工程决策。环境干扰风险，如恶劣天气、复杂地形，增加测量难度与误差。这些风险源及其影响机理相互交织，系统性地影响着工程测绘项目的顺利推进^[5]。

（二）风险评估与控制策略

构建工程测绘风险管理体系时，风险评估与控制策略十分关键。构建 FMEA 风险矩阵量化评估模型，可对工程测绘过程中的各类风险进行量化分析。该模型通过综合考虑风险发生的可能性、影响程度等因素，对风险进行评级，清晰呈现不同风险的优先级^[6]。基于此评估结果，提出智能传感器部署与动态校验的防控对策。智能传感器能够实时、精准获取测绘数据，降低因人工操作等带来的误差风险。同时，动态校验机制可定期或不定期对传感器采集的数据及测绘结果进行校验，及时发现并纠正潜在错

误，确保测绘数据的准确性和可靠性，有效控制工程测绘风险，保障建筑项目的顺利推进。

四、工程测绘技术与风险管理协同应用模式

（一）技术—风险双维管控机制

1. 基于 GIS 的实时监测系统

在建筑项目中，基于 GIS 的实时监测系统是实现工程测绘技术与风险管理协同应用的关键部分。该系统借助 GIS 强大的空间分析与数据处理能力，对建筑项目进行全方位、实时的监测。它能整合来自多种测绘手段的数据，如北斗定位与倾斜摄影技术获取的空间数据，构建起动态的项目空间模型。通过对模型的实时分析，系统可迅速察觉潜在风险点，如建筑物的变形、位移等情况，并及时发出预警^[7]。同时，利用 GIS 的可视化功能，以直观的图形界面展示项目的实时状态和风险分布，为管理人员提供准确的决策依据，使得工程测绘技术与风险管理紧密结合，从技术和风险两个维度对项目进行有效管控，确保建筑项目的顺利推进。

2. 风险预警与应急响应机制

在工程测绘技术与风险管理协同应用模式下，风险预警与应急响应机制至关重要。借助开发的神经网络算法驱动的风险态势预测与处置预案生成系统^[8]，能够对工程测绘过程中的潜在风险进行实时监测与精准预警。该系统依据测绘数据及相关风险因素，通过神经网络算法分析，敏锐捕捉风险迹象，提前向项目团队发出警报。一旦风险预警触发，应急响应机制即刻启动，系统迅速生成针对性的处置预案，明确各部门职责、应急流程与应对措施，确保项目团队能在第一时间有序应对风险，将风险损失降至最低，有力保障建筑项目的顺利推进。

（二）典型项目协同应用分析

1. 地铁隧道贯通测量案例

在地铁隧道贯通测量这一典型项目中，工程测绘技术与风险管理的协同应用至关重要。地铁隧道施工环境复杂，存在诸多风险，如隧道偏差导致无法准确贯通，影响后续运营安全。在该项目里，运用高精度的工程测绘技术，如先进的全站仪测量、三维激光扫描等手段，对隧道的掘进方向、位置等进行实时监测^[9]。同时，结合风险管理，提前识别出因测量误差、地质变化等可能引发的贯通风险。通过建立风险评估模型，对各类风险进行量化分析，针对不同风险制定相应的应对措施。例如，当监测到测量数据出现异常偏差，可能影响贯通时，及时调整测量方案，并采取地质超前预报等措施，以降低风险，确保隧道顺利贯通，实现工程测绘技术与风险管理的有效协同，保障项目的安全与质量。

2. 异形结构施工监测案例

在某异形结构建筑项目中，其独特的造型给施工带来诸多挑战。为确保施工安全与质量，工程测绘技术与风险管理紧密结合。借助高精度的激光扫描测绘技术，对异形结构的实时形态进行精准采集，获取详细的空间数据。基于这些数据，构建三维模型，直观呈现结构状态。同时，结合风险管理，识别潜在风险

点,如结构变形、应力集中等。例如,通过对数据的分析,预测某一区域因受力不均可能产生的变形风险。利用风险可视化管理技术路径^[10],将这些风险直观地展示在三维模型上,使施工人员和管理人员能清晰了解风险位置与程度,进而提前制定针对性的防范措施,有效降低施工风险,保障异形结构施工的顺利进行,实现工程测绘技术与风险管理的高效协同。

（三）协同应用系统优化路径

1.数据治理体系优化

在工程测绘技术与风险管理协同应用中,数据治理体系优化极为关键。建立点云数据处理与BIM模型更新的标准化流程,能确保数据的准确性与一致性。要对数据采集环节严格把控,明确各类测绘设备的数据采集标准,减少误差。针对点云数据处理,制定统一算法与参数设置规范,提高处理效率与质量。在BIM模型更新方面,依据点云数据处理结果,建立清晰的更新规则与流程,保证模型及时准确反映建筑实际情况。同时,构建数据质量监控机制,定期对处理后的数据及更新的模型进行质量评估,及时发现并纠正数据偏差,以此提升数据治理水平,为工程测绘技术与风险管理协同应用提供坚实的数据支撑。

2.管理组织架构创新

为实现工程测绘技术与风险管理的协同,需创新管理组织架构。设计适应智慧工地要求的矩阵式测绘技术管理团队,该团队

打破传统层级限制,以项目为导向,横向整合测绘技术专业人员,纵向对接风险管理各环节。一方面,技术人员按专业技能分组,如地形测量组、数据处理组等,确保测绘技术精准实施;另一方面,与风险管理流程紧密结合,从项目规划阶段的风险识别,到施工过程中的风险监控,测绘团队都深度参与,及时提供准确数据支持风险评估与决策。这种矩阵式架构既发挥了专业技术优势,又强化了与风险管理的协同,使建筑项目在高效的测绘技术保障下,有效应对各类风险,提升整体建设质量与效率。

五、总结

工程测绘技术管理与风险管理在建筑项目中发挥着关键作用。二者集成应用可有效提升建筑项目的整体质量与安全性。通过精准的测绘技术管理,能够获取精确数据,为项目规划与实施提供可靠依据,同时结合风险管理,提前识别潜在风险并制定应对策略,减少损失与延误。数字孪生技术在工程测绘领域前景广阔,它可构建与实体建筑对应的虚拟模型,实现对建筑全生命周期的精准模拟与监控,助力项目各方实时掌握建筑状态。边缘计算的发展也将推动工程测绘技术变革,能在数据源头快速处理分析大量测绘数据,提升数据处理效率与实时性,降低数据传输成本与延迟,为建筑项目的高效推进提供有力支持。

参考文献

[1] MASENGESHO ELYSE.价值工程在卢旺达建设项目中确保风险管理的效果研究 [D].兰州交通大学,2022.
[2] 赵倩雨.REITs应用于基础设施项的风险管理研究 [D].重庆大学,2022.
[3] 孙志军.C 建筑公司工程合同风险管理改进研究 [D].大连理工大学,2022.
[4] 陈驰.X 公司智能建筑工程风险管理研究 [D].电子科技大学,2022.
[5] 马明勇.S 高速公路 PPP 项风险管理研究 [D].兰州交通大学,2022.
[6] 李延平.石油工程项目中的风险管理 [J].中国科技投资,2021(7):161-162.
[7] 高锐.风险管理在军工科研项目中的研究与应用 [J].中国设备工程,2022(3):56-57.
[8] 席国斌.高层房屋建筑工程项目中的施工安全风险策略 [J].建材与装饰,2024,20(10):124-126.
[9] 宋传杨.通信工程项目中的风险管理与控制策略研究 [J].现代工业经济和信息化,2017,7(2):115-116.
[10] 朱辰,赵慧.航天项目中风险管理的应用研究 [J].管理学家,2023(18):1-3.

公共建筑暖通空调节能改造路径与设计策略研

刘季鑫

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120059

摘 要： 本文探讨公共建筑暖通空调节能改造，指出其既有系统存在能效瓶颈。阐述节能改造受政策引导，因建筑功能差异有个性化负荷需求。介绍负荷精确计算、冷热源协同配置等技术，强调运行监控、人工智能调适等作用。还提及全生命周期成本分析等决策模型，及 BIM 技术、绿色施工等实施要点，展望智能调适技术前景。

关 键 词： 公共建筑；暖通空调节能改造；智能调适技术

Research on Energy-Saving Renovation Paths and Design Strategies for HVAC Systems in Public Buildings

Liu Jixin

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article explores the energy-saving renovation of HVAC systems in public buildings and points out the energy efficiency bottlenecks in existing systems. Elaborate that energy-saving renovation is guided by policies and has personalized load demands due to differences in building functions. Introduce technologies such as precise load calculation and coordinated configuration of cooling and heating sources, emphasizing the role of operation monitoring and artificial intelligence adjustment. It also mentioned decision-making models such as full lifecycle cost analysis, as well as implementation points such as BIM technology and green construction, and looked forward to the prospects of intelligent adaptation technology.

Keywords： public buildings; energy saving renovation of HVAC systems; intelligent adaptation technology

引言

在当前可持续发展战略背景下，2022年颁布的《国家绿色建筑标准与能效提升强制性规范》对公共建筑暖通空调节能改造起到关键引导与约束作用。公共建筑暖通系统运行存在能耗差异明显、设备老化、控制策略不当及负荷匹配差等能效瓶颈，且不同类型建筑功能差异影响能耗结构。因此，需综合考虑负荷精确计算、冷热源协同配置等多方面技术，在全生命周期成本分析、风险预警与效益评估基础上，通过 BIM 技术、绿色施工技术规范等实施路径，借助合同能源管理模式，推动节能改造，而智能调适技术在未来节能改造中具有广阔前景。

一、公共建筑暖通系统能耗特征分析

（一）公共建筑暖通系统运行现状

当前，公共建筑暖通系统运行存在一定特点。通过对典型公共建筑类型能耗数据的统计^[1]，发现不同功能的公共建筑，如办公建筑、商场、酒店等，其暖通系统能耗差异明显。办公建筑在工作日白天时段，人员密集、设备使用频繁，暖通系统负荷较大；商场因营业时间长、空间开阔且人员流动量大，全年能耗均处于较高水平；酒店则在入住高峰期对暖通系统需求突出。从系统运行效率来看，部分老旧公共建筑暖通设备老化，导致能源浪费严重，运行效率低下。在负荷特性方面，受季节、天气以及建

筑使用功能变化影响显著。夏季制冷与冬季制热需求不同，且室内人员、设备数量的动态变化也会使负荷产生波动，这都对暖通系统的精准调控与高效运行提出了挑战。

（二）既有系统能效瓶颈诊断

公共建筑暖通系统既有系统存在诸多能效瓶颈。设备老化是一大关键问题，长期运行使得设备性能下降，如空调压缩机磨损，导致制冷制热效率降低，能耗增加^[2]。控制策略不当也严重影响能效，例如部分暖通系统未能依据室内外环境变化实时调整运行参数，始终保持固定模式，造成能源浪费。另外，负荷匹配问题突出，设计阶段对建筑实际负荷预估不准确，使得设备选型过大或过小，无法在高效区间运行。当设备选型过大，实际负

荷低时，设备频繁启停，额外消耗电能；若选型过小，则难以满足需求，长期低效运行，最终都导致能源利用效率低下，能耗居高不下。

二、节能改造关键技术影响因素

（一）政策法规与标准体系

国家绿色建筑标准与能效提升强制性规范对公共建筑暖通空调节能改造起着关键引导作用。绿色建筑标准从整体上规定了建筑的节能目标、技术措施与评价体系，为暖通空调系统设定了能源利用效率、可再生能源利用等方面的指标，促使改造朝着绿色、低碳方向发展。而能效提升强制性规范更具约束性，明确了暖通空调设备的最低能效标准、运行管理要求等，这使得节能改造必须满足强制性底线要求，否则无法通过验收。这些政策法规与标准体系，一方面为节能改造提供了清晰的方向与准则，另一方面也激励相关企业和机构研发与应用更先进的节能技术。只有严格遵循这些标准与规范，公共建筑暖通空调节能改造才能符合国家可持续发展战略要求，切实实现节能减排目标^[3]。

（二）建筑功能与能耗结构特征

不同类型公共建筑由于其功能差异，有着个性化的负荷需求，进而影响能耗结构特征。以医疗建筑为例，因其功能的特殊性，对室内温度、湿度、空气洁净度等要求严苛，一些特殊科室如手术室、重症监护室等全年都需保持特定环境条件，这使得空调系统需持续稳定运行，其能耗在整体建筑能耗中占比较大。办公建筑人员流动有规律，白天办公时段人员集中，对室内热舒适需求较高，照明与办公设备使用频繁，能耗结构中，空调与电气设备能耗占比突出。文体建筑则因活动时段不固定，活动期间人员密集，空调负荷较大，而在非活动时段能耗相对较低。这些基于建筑功能产生的能耗结构特征，是暖通空调节能改造关键技术选择时必须考虑的重要因素^[4]。

三、节能改造设计策略体系

（一）系统优化设计方法

1. 负荷精确计算模型

在公共建筑暖通空调节能改造中，负荷精确计算模型至关重要。通过建立基于 BIM 的动态负荷预测，能全面、精准地考量建筑的各项参数。借助 BIM 技术的可视化与参数化特性，可整合建筑围护结构、朝向、人员活动、设备散热等多种影响因素^[5]。对这些因素进行动态模拟分析，进而得到不同时段、不同工况下的负荷变化数据。这些精确的负荷数据为后续设备选型提供了可靠依据，避免因负荷估算不准确导致设备选型过大或过小。过大造成能源浪费，过小则无法满足实际需求。如此，利用基于 BIM 的动态负荷预测与设备选型方法，实现对公共建筑暖通空调负荷的精确计算，为节能改造的系统优化设计奠定坚实基础。

2. 冷热源系统协同配置

在公共建筑暖通空调节能改造中，冷热源系统协同配置至关

重要。应研究多能互补系统与余热回收技术的集成应用^[6]。多能互补系统可整合多种能源形式，如电力、燃气、太阳能等，依据不同时段、不同场景的能源需求特性，灵活且高效地调配能源，实现能源的梯级利用，提升能源综合利用率。余热回收技术则是将暖通空调运行过程中产生的废热进行回收再利用，例如回收制冷系统的冷凝热用于预热生活热水等。通过两者集成应用，让冷热源系统各部分协同运作，既能满足建筑不同工况下的冷热负荷需求，又能最大程度减少能源浪费，达成高效节能的目的，为公共建筑暖通空调节能改造提供更优的冷热源配置方案。

（二）智能控制策略创新

1. 基于 IoT 的运行监控体系

基于 IoT 的运行监控体系旨在通过物联网技术实现对公共建筑暖通空调系统全方位、实时的运行监控。借助各类传感器，如温度、湿度、压力传感器等，实时采集设备运行参数与室内环境数据，并通过 IoT 网络上传至云端数据中心。系统基于大数据分析机器学习算法，对采集的数据进行深度挖掘，精准评估设备的实际运行能效^[7]。一旦发现设备运行参数偏离正常范围，立即发出故障预警，便于运维人员及时处理，避免故障扩大影响系统节能效果。同时，根据实时监测数据，系统能智能调整控制策略，实现对暖通空调设备的优化控制，确保其始终在高效节能状态下运行，提升整个系统的能源利用效率与稳定性。

2. 人工智能调适算法

在公共建筑暖通空调节能改造中，人工智能调适算法发挥着关键作用。该算法借助人工智能技术对暖通空调系统进行深度分析与调适。通过收集系统运行中的各类数据，如室内外温度、湿度、人员活动情况等，利用机器学习算法对这些数据进行处理与建模，以精准预测建筑的冷热负荷需求^[8]。进而依据预测结果实时调整暖通空调设备的运行参数，诸如压缩机频率、风机转速、阀门开度等，实现系统的动态优化运行。这不仅能使设备输出与实际负荷精准匹配，避免能源浪费，还能通过不断学习和自适应，持续优化控制策略，以适应不同季节、不同时段以及各种复杂工况下的运行需求，有效提升公共建筑暖通空调系统的能源利用效率，达成节能改造目标。

四、节能改造工程实施路径

（一）改造方案决策模型

1. 全生命周期成本分析

在公共建筑暖通空调节能改造工程中，全生命周期成本分析是改造方案决策模型的关键环节。全生命周期成本涵盖了从项目规划、设计、施工、运营维护到最终拆除等各个阶段所产生的成本^[9]。在分析时，需考虑初始投资成本，包括设备采购、安装调试等费用；运营成本，如能源消耗、维修保养等；以及潜在的拆除与处置成本。通过准确量化这些成本因素，综合考量不同改造技术组合方案在整个生命周期内的成本投入情况。同时，结合公共建筑的实际使用需求、预期使用寿命等，对比各方案的全生命周期成本差异，以此为依据优选出既能满足节能目标，又能实现

经济性最优的改造技术组合方案，为节能改造工程的顺利实施提供科学决策支持。

2. 风险预警与效益评估

在公共建筑暖通空调节能改造工程实施路径的改造方案决策模型中，风险预警与效益评估极为关键。一方面，风险预警需全面考量技术、经济、环境等多方面风险因素。例如，新技术应用可能存在技术不成熟的风险，要对技术可行性、稳定性进行精准预判；经济层面，关注成本超支、投资回报周期变化等风险。通过构建风险预警指标体系，利用实时监测数据，结合大数据分析与机器学习算法，及时发现潜在风险并发出预警。另一方面，效益评估要从节能效益、经济效益与环境效益三方面入手。节能效益通过对比改造前后能耗数据量化评估；经济效益计算投资回收期、净现值等指标衡量；环境效益则评估减少的碳排放等对环境的积极影响，综合权衡各效益，为改造方案决策提供科学依据^[10]。

（二）施工阶段协同管理

1. BIM 技术全程应用

在公共建筑暖通空调节能改造工程的施工阶段，BIM 技术全程应用可实现可视化施工与多专业协同设计。借助 BIM 技术，构建精确的三维模型，将暖通空调系统的各类设备、管道等详细信息整合其中，使施工人员直观了解各部件位置与空间关系，提前发现潜在碰撞与冲突，避免施工返工。同时，基于该模型，各专业人员进行实时沟通与协同工作。例如，电气专业与暖通专业能共同规划线路与管道走向，优化空间布局。而且，BIM 技术可模拟施工过程，对施工进度和资源分配进行合理规划与动态调整，确保施工高效有序推进，助力节能改造工程达到预期的节能与设计目标。

2. 绿色施工技术规范

在公共建筑暖通空调节能改造施工阶段，绿色施工技术规范至关重要。制定低影响施工工艺，需注重施工过程对周边环境及建筑原有系统的影响最小化。施工设备应选用低噪音、低振动型号，减少对建筑使用功能及周边人员的干扰。对于暖通空调设备的安装，要确保精准定位与规范操作，避免反复调整造成材料浪费与工期延误。同时，建筑废弃物管控标准必不可少。对施工中产生的废弃管材、保温材料等，需进行分类收集与处理。可回收材料及时回收利用，不可回收的按规定运送至指定地点，避免随意丢弃，以此实现绿色、环保、高效的暖通空调节能改造施工。

参考文献

- [1] 王乘熙. 基于 MPC 算法的暖通空调系统舒适节能控制策略研究 [D]. 苏州科技大学, 2022.
- [2] 高之坤. 西北某大型公共建筑空调水系统节能优化研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2022.
- [3] 赵丹阳. 基于典型测试工况的公共建筑空调系统节能检测方法研究 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [4] 王梦阳. 某办公建筑中央空调系统群控优化策略及节能改造方案研究 [D]. 浙江大学, 2022.
- [5] 徐弘毅. EMC 模式下公共建筑节能改造项目风险分担研究 [D]. 兰州理工大学, 2021.
- [6] 张礼英. 公共建筑暖通空调系统的节能策略 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022, (02): 76-77.
- [7] 王娜. 绿色公共建筑项目中暖通空调节能设计分析 [J]. 建材与装饰, 2018, (19): 71-72.
- [8] 黄亚林. 公共建筑暖通空调自动系统与节能运行 [J]. 中国设备工程, 2022, (13): 81-83.
- [9] 赵昊天, 张昊. 提高公共建筑节能水平的暖通空调设计措施 [J]. 居业, 2015, (24): 61+64.
- [10] 南联建. 大型公共建筑暖通空调系统设计探究 [J]. 中国新技术新产品, 2015, (04): 110-111.

（三）运行维护长效机制

1. 智慧运维平台构建

构建智慧运维平台，旨在实现对公共建筑暖通空调系统的精细化、智能化管理。平台应集成数据采集功能，全面收集设备运行参数、能耗数据、环境温湿度等多源信息。通过数据分析挖掘技术，深度剖析设备运行状态与能耗规律，及时发现潜在故障隐患与能耗异常点。利用人工智能算法，对设备进行健康评估与能效预测，据此生成精准的维护策略与运行优化方案。例如，依据实时环境参数和负荷变化，动态调整设备运行频率，实现按需供能。同时，平台应具备远程监控与控制功能，运维人员可随时随地掌握设备运行情况，远程操控设备，提高运维效率，保障暖通空调系统高效、稳定运行，为节能改造的长效实施提供有力支撑。

2. 合同能源管理模式

合同能源管理模式是公共建筑暖通空调节能改造的有效市场化路径。在此模式下，节能服务公司与公共建筑业主签订合同，凭借专业技术与资金优势，承担从项目设计、融资、施工到运营维护的全过程工作。节能服务公司通过与业主分享节能改造后产生的效益来获取收益。例如，依据实际节能量，按一定比例分成。这不仅能缓解业主资金压力，还能利用节能服务公司的专业能力，提升改造效果。同时，合同需明确双方权利义务，如节能指标、项目验收标准、收益分配方式等，保障项目顺利实施。这种模式推动公共建筑暖通空调节能改造的专业化、市场化发展，实现节能效益与经济效益的双赢。

五、总结

公共建筑暖通空调节能改造，技术体系与实施要点的提炼至关重要。从技术体系来看，涵盖高效设备选用、系统优化控制等多个方面，实施要点则强调依据建筑实际情况精准施策，确保改造效果。在数字化转型的大背景下，智能调适技术展现出广阔的发展前景。它借助先进的传感与数据分析技术，能够实现对暖通空调系统运行状态的实时监测与精准调控，进一步挖掘节能潜力。未来，智能调适技术有望在公共建筑暖通空调节能改造中发挥更大作用，与其他节能技术相互融合，形成更为完善的节能解决方案，助力公共建筑达成更高的节能目标，为可持续发展贡献力量。

建筑电气设计中光伏发电系统的成本效益分析及应用策略

王绍熠

广州市第三市政工程有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120060

摘 要： 本文围绕建筑一体化光伏系统展开。阐述了组件、逆变器选型及相关标准分析，介绍成本构成、LCC模型、量化关系建立等。还涉及算法优化、电价政策影响、环境价值评估等内容。强调不同因素对系统经济性和运行效益的影响及优化方法

关 键 词： 建筑光伏系统；经济性；优化

Cost-Benefit Analysis and Application Strategy of Photovoltaic Power Generation System in Building Electrical Design

Wang Shaoyi

Guangzhou NO.3 Municipal Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the integrated photovoltaic system in buildings. It discusses the selection of modules and inverters, along with relevant standards analysis, and introduces the cost structure, LCC model, and the establishment of quantitative relationships. The article also covers algorithm optimization, the impact of electricity price policies, and environmental value assessment. It emphasizes the influence of various factors on the economic efficiency and operational benefits of the system, as well as the methods for optimizing these factors

Keywords： building photovoltaic system; economy; optimization

引言

随着全球对清洁能源的需求日益增长，光伏发电作为一种可持续的能源解决方案在建筑领域的应用备受关注。2020年我国发布的《关于促进光伏产业链健康发展有关事项的通知》强调了光伏产业的重要性及规范发展的要求。2025年广州市发布了《广州市城中村改造项目改造主体工作评估实施细则（试行）》，进一步明确了新模式下城中村改造的要求，其中绿色建筑评估标准分合格、良好、优秀档次，分别要求新建住宅项目光伏覆盖率不小于5%、10%、15%，新建公共机构和公共设施屋顶光伏安装面积不小于40%、45%、50%。

建筑一体化光伏系统融合了多种技术，从组件选型到系统配置，从成本分析到环境效益评估，都需要综合考虑多种因素。为实现能源高效利用，确保系统与建筑电气协调，本文将以广州某城中村改造项目光伏发电系统的建设为例，阐述在实际工程中光伏发电系统的成本效益对比及应用策略。^[9]

一、项目概况及光伏发电基础条件

本项目位于广州市，采用分布式住宅光伏系统，共采用140块550Wp单晶硅标准组件，分别设置15kW、17kW逆变器各两组。光伏组件寿命按25年考虑，储能电池按7~10年考虑。广州地区年等效利用小时数约为1000~1100小时，总装机容量为77kWp，系统年发电量估算为80850kWh/年。根据住宅白天用电特征，假设光伏系统无储能时自发自用率为40%，其余60%余电上网。广州居民阶梯电价关键参数如下：

表1.1 广州居民阶梯电价关键参数

单位 时段	元 /kWh
峰时电价	0.98
平时电价	0.6
谷时电价	0.3
余电上网电价	0.45

（综合加权估算，自用平均电价为0.65元 /kWh。）

二、方案一：仅并网光伏系统（不配置储能）

光伏发电系统采用仅并网光伏系统，不配置储能方案，其优点是系统简单、技术成熟、初始投资低、投资回收期较短、维护方便；缺点是能源自给率有限（尤其夜间完全依赖电网），无法规避夜间高峰电价，对电网依赖性依然较强。该方案系统配置与成本投入、收益与效益分析测算结果如下：

表 1.2 初始总投资估算

总装机容量 (kWp)	单位综合造价 (元 /Wp)	初始总投资估算 (元)
77	3.8	292600

（注：单位综合造价包含组件、逆变器、支架、电缆、施工及并网等。）

表 1.3 收益效益分析

	系统年发电量 (kWh/年)	发自用率	自用电平均电价 (元 /kWh)	年发电收益 (元)
自用部分	80850	40%	0.65	21021
余电上网部分	80850	60%	0.45	21829.5
年总电费收益				42850.5
年运维成本（元）				2926
年净收益（元）				39924.5
静态投资回收期 (年)				7.3
25年周期内总净 收益估算（元）				705512.5

三、方案二：并网光伏和储能系统

光伏发电系统采用并网光伏，配置储能方案。该方案按满足夜间基础负荷设计，配置容量为 40kWh 的磷酸铁锂电池系统。其优点夜间用电大部分自给，降低对电网依赖，其发自用率提升；缺点是系统复杂性高，需要专业维护。该方案系统配置与成本投入、收益与效益分析测算结果如下：

表 1.4 蓄电池初始总投资估算

蓄电池容量 (kWh)	单位造价 (元 /Wp)	储能初始投资 估算（元）	系统总初始投 资（元）	二次电池投资 估算（元）
40	1.5	60000	352600	42000

（注：考虑第 7 年末需更换电池，假设届时成本下降 30%）

表 1.5 收益效益分析

	系统年发电量 (kWh/年)	发自用率	自用电平均电价 (元 /kWh)	年发电收益 (元)
自用部分	80850	80%	0.65	42042
余电上网部分	80850	20%	0.45	7276.5
年总电费收益				49318.5
年运维成本（元）				3526
年净收益（元）				45792.5
静态投资回收期 (年)				7.7

25年周期内总净收益估算（元）				1144812.5
系统投资总成本				394600
总净收益（元）				750212.5

四、方案对比分析

表 1.6 方案对比成本投入、收益与效益分析

对比项目	方案一	方案二	对比结论
初始总投资	29.26 万元	35.26 万元	储能方案增加投资 6 万元，增幅 20.5%
年发电量	8.09 万 kWh	8.09 万 kWh	相同
发自自用率	40%	80%	储能方案大幅提升 1 倍以上
年电费收益	4.29 万元	4.9 万元	储能方案年收益增加 0.61 万元
年净收益	3.99 万元	4.57 万元	储能方案年净收益高 0.58 万元
静态投资回收期	7.3 年	7.7 年（未计电池更换）	方案一回收略快
25年周期总净收益	约 70.6 万元	约 75 万元	储能方案长期总收益更高
能源独立性	低，依赖电网	高，可部分离网运行	储能方案具备断电保供能力
抗电价波动风险	较弱	强，尤其未来峰谷价差扩大时	储能方案战略价值高
系统复杂度	低，成熟	高，需专业维护	方案一运维更简便

五、光伏系统经济性分析

依据上述两个方案对比分析，在蓄电池寿命期限内，储能放电收益无法抵消储能总投资成本。从财务投资角度来看，“仅并网光伏”方案是目前更经济、更稳妥的选择。其投资回收期更短，初始资金压力更小，内部收益率更高。对于以节约电费、获取稳定回报为首要目标的住宅项目，推荐此方案。^[1]

六、基于实际工程中光伏发电系统技术应用综合分析

1. 在实际工程中，光伏发电系统还应考虑与建筑电气适配性。根据 GB51348《民用建筑电气设计标准》，对光伏发电系统接入容量限制及防逆流保护配置原则进行分析至关重要。在接入容量方面，需综合考虑建筑用电负荷、电网承载能力等因素，以确保光伏发电系统与建筑电气系统的协调运行，避免因接入容量过大对电网造成冲击^[2]。

2. 光伏系统的初始投资成本主要由多个部分构成。组件购置

成本是重要组成部分，其价格受多种因素影响，如组件的类型、效率和品牌等^[3]。逆变器的购置成本也不可忽视，其性能和功率大小决定价格差异。支架的成本取决于材质和设计，需满足光伏组件的安装要求并确保稳定性。BOS（Balance of System）设备购置成本涵盖了诸如电缆、汇流箱、配电柜等一系列配套设备。此外，不同的安装方式会导致施工费用存在差异。^[5]

3.建立清洗周期、故障率、设备更换的 LCC 模型时，需考虑多方面因素。对于清洗周期，要依据当地环境条件确定合理频率，以减少灰尘等对光伏组件发电效率的影响，从而控制成本^[4]。故障率方面，要统计不同组件在实际运行中的故障概率，考虑其维修成本及对发电收益的影响。设备更换则要预估设备的使用寿命，结合更换成本及可能的技术升级成本进行综合建模。储能系统循环寿命对成本影响显著，较短的循环寿命会增加更换频次及成本，需深入分析其影响因子，以便在设计阶段优化系统配置，提高成本效益。^[6]

4.并网电价政策影响分析，标杆电价与市场化交易模式对投资回收期存在差异化影响。标杆电价相对稳定，为投资者提供了较为明确的收益预期，在一定程度上降低了投资风险，使得投资回收期的计算相对简单和可预测^[7]。然而，市场化交易模式下，电价会随着市场供需关系等多种因素波动，这增加了收益的不确定性，进而使投资回收期的评估更为复杂。投资者需要综合考虑市场趋势、政策导向等多种因素来预测收益情况，以确定合理的投资回收期。不同的电价政策影响着光伏发电项目的经济效益，在建筑电气设计中需充分考虑这些因素，以优化光伏发电系统的应用策略。

5.储能容量优化配置，基于负荷需求特性构建电池容量与光伏渗透率的匹配模型对于确定边际效益最大化的配置方案至关重要。首先需准确分析负荷需求特性，包括不同时间段的用电负荷

变化规律等^[10]。通过对这些特性的深入了解，建立起电池容量与光伏渗透率之间的合理关系模型。在模型构建过程中，要考虑到光伏发电的间歇性和不稳定性以及负荷需求的波动性，以确保模型能够真实反映实际情况。通过不断优化模型参数，找到使边际效益达到最大的电池容量和光伏渗透率的配置组合，从而实现储能容量的优化配置，提高建筑光伏系统的经济性和运行效率。^[8]

6.并网点选择与保护配置，在建筑光伏系统中，并网点选择至关重要。需综合考虑建筑结构、用电负荷分布以及电网接入条件等因素。合理的并网点应使光伏发电系统能够高效地向建筑内部负载供电，并确保电能质量。

七、总结

在建筑电气设计中，光伏发电系统的研究涉及多方面。不同建筑类型需有与之适配的光伏系统最优配置模式，这是提高成本效益的关键。储能系统成本下降带来商业模式的变革，为光伏发电系统的应用提供了新的机遇和思路。然而，当前研究在动态电价响应机制方面存在不足，这可能影响系统成本效益的进一步提升。未来，数字孪生技术在系统优化中的应用前景值得期待，其有望为光伏发电系统在建筑电气设计中的应用提供更精准、高效的支持，从而实现更好的成本效益，推动建筑电气设计中光伏发电系统的可持续发展。

参考文献

[1] 马皓臻. 光伏瓦片发电系统综合效益评价研究 [D]. 华北电力大学 (保定), 2022.
[2] 江明达. 光伏建筑系统综合效益评估研究 [D]. 天津大学, 2022.
[3] 申延. 建筑屋顶光伏发电系统的研究与应用 [D]. 广西大学, 2021.
[4] 刘依明. 光伏发电系统的控制策略研究 [D]. 济南大学, 2021.
[5] 王琦. 光伏发电系统建模及调频策略研究 [D]. 湖北工业大学, 2021.
[6] 毛阔, 章帆. 建筑光伏系统发电功率短期预测方法研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(4): 126-128.
[7] 王有新. 光伏发电系统及电站电气设计分析 [J]. 光源与照明, 2024(3): 96-98.
[8] 张建忠, 尹文龙, 马凯, 等. 学校建筑光伏应用及效益分析 [J]. 江苏建筑, 2024(2): 141-144.
[9] 邵博文, 孙佳碧, 戴磊. 光伏发电窗系统电气设计与分析 [J]. 建筑技术, 2021, 52(9): 1126-1128.
[10] 林振. 风力发电与光伏发电储能系统优化设计及经济性分析 [J]. 电气技术与经济, 2024(4): 221-223.

水泥稳定碎石基层裂缝成因分析与控制技术优化研究

关沛东

广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120064

摘 要： 水泥稳定碎石基层在公路工程中应用广泛，其裂缝问题对结构耐久性和使用性能形成长期影响，围绕基层裂缝频发且控制效果不稳定的工程现状，本文以裂缝成因识别和控制技术优化为研究目的，围绕裂缝类型及关键影响因素展开系统分析，并在材料设计和施工工艺及养生控制层面提出针对性优化思路。研究结果表明材料收缩特性及环境作用是裂缝产生的主导因素，优化配合比参数和施工控制措施可降低裂缝发生概率，相关研究为水泥稳定碎石基层裂缝防控提供技术依据，对提升路面结构整体耐久性具有现实意义。

关 键 词： 水泥稳定碎石基层；裂缝成因；控制技术；施工优化

Analysis of the Causes of Cracks in Cement-Stabilized Crushed Stone Base and Optimization of Control Technology

Guan Peidong

Guangdong Provincial Expressway Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Cement-stabilized crushed stone base is widely used in highway engineering. The crack problem in it has a long-term impact on the durability and service performance of the structure. In view of the current engineering situation where cracks occur frequently in the base and the control effect is unstable, this paper takes the identification of crack causes and the optimization of control technology as the research purpose, and conducts a systematic analysis around crack types and key influencing factors. And put forward targeted optimization ideas in terms of material design, construction technology and curing control. The research results show that the material shrinkage characteristics and environmental effects are the dominant factors for crack generation. Optimizing the mix proportion parameters and construction control measures can reduce the probability of crack occurrence. The relevant research provides a technical basis for the prevention and control of cracks in cement-stabilized crushed stone base layers and has practical significance for improving the overall durability of pavement structures.

Keywords： cement-stabilized crushed stone base; causes of cracks; control technology; construction optimization

引言

水泥稳定碎石基层作为半刚性基层结构，在我国公路工程中占据重要地位，其整体性强及承载能力高的特点使其得到广泛应用，但裂缝问题始终是制约结构服役性能的关键因素，基层裂缝一旦产生易在行车荷载和环境作用下向上反射，削弱面层结构完整性并缩短路面使用寿命。现有工程实践表明裂缝的产生不仅与材料组成和力学性能密切相关，还受施工过程控制水平及外界温湿条件影响，现有研究多侧重单一因素分析且缺乏对裂缝成因链条的系统梳理，相关控制技术在工程适应性方面仍存在不足，基于此围绕水泥稳定碎石基层裂缝问题开展成因分析与控制技术优化研究，对于完善基层结构设计理论和提升施工质量控制水平具有重要工程价值。

一、裂缝类型识别与问题特征界定

（一）典型裂缝形态分类与判别要点

水泥稳定碎石基层裂缝在宏观形态上具有较强的工程指向性，不同裂缝形态反映了材料性能与施工状态的差异，按照裂缝走向与分布特征可将其归纳为横向裂缝、纵向裂缝以及网状裂缝

等基本类型，横向裂缝多与温度收缩及干缩变形有关，裂缝走向与道路中线近似垂直，常在基层全幅或局部范围内连续出现，裂缝宽度一般处于0.2 - 0.6 mm区间，边缘形态较为清晰，若裂缝间距趋于规则，表明收缩变形受到结构约束条件控制。纵向裂缝多沿行车方向分布，常出现在车道拼接位置或轮迹带附近，其形成与压实均匀性差异以及含水状态变化密切相关，裂缝宽度多小

于横向裂缝但延伸长度较大^[1]。网状裂缝表现为多边形闭合或半闭合形态，单元尺度通常在1~4 m范围内，裂缝数量密集且宽度较小，常见于基层表层浆体偏多或早期失水较快的区域。裂缝判别需结合裂缝走向、宽度变化以及施工缝和结构边界的空间关系，避免仅依据表观形态进行单一判断，从而为成因分析提供可靠基础^[2]。

（二）裂缝时空分布规律与发展阶段划分

水泥稳定碎石基层裂缝在时间与空间维度上均呈现出一定规律性，其分布特征与结构受力环境和施工组织密切相关，时间尺度上裂缝多在基层成型后的早期阶段显现，常见于养生期内3~10 d范围，初期以微细裂纹形式出现，随材料收缩与强度演化逐步发展，进入稳定阶段后裂缝数量趋于平缓。若裂缝在养生结束后仍持续出现，说明基层内部应力释放过程尚未完成且存在潜在结构风险，空间尺度上裂缝易在约束条件突变区域集中分布，如路肩附近、中央分隔带边缘以及新旧结构衔接位置，横断面方向上裂缝密度存在明显差异。基于裂缝形态与扩展特征，可将其发展过程划分为萌生阶段、扩展阶段与贯通阶段。萌生阶段裂缝宽度多小于0.3 mm，对整体结构影响有限；扩展阶段裂缝长度和宽度均有所增长，裂缝间距逐渐稳定，常见3~7 m的重复分布特征；贯通阶段裂缝由表层向下延伸并与基层底部弱区连通，结构连续性明显削弱，该阶段划分有助于将裂缝现象与施工节点及环境条件相对应，为控制措施的时机选择提供依据^[3]。

（三）裂缝对结构承载与耐久性的影响路径

水泥稳定碎石基层裂缝对结构性能的影响呈现出由局部缺陷向整体退化扩展的特征，其作用路径涵盖力学响应变化与耐久性性能衰减两个层面，在承载性能方面裂缝使原本连续的基层结构发生分割，轮载作用下裂缝尖端区域产生明显应力集中，基层受力模式由整体受力转变为局部受力，结构等效刚度逐步降低，面层弯拉应变随之增大。重复荷载作用下裂缝端部易发生微滑移并诱发二次裂缝，承载能力衰减呈累积趋势。在耐久性能方面，裂缝为水分进入基层内部提供通道，雨水沿裂缝渗入后改变基层与下承层的界面状态，干湿循环作用下裂缝反复张开与闭合，加速材料微结构松弛与界面劣化，温度变化进一步放大裂缝开合幅度。经过1~2个季节循环后，裂缝影响逐步向面层传递，反射裂缝风险显著上升^[4]。

二、裂缝成因机理分析与关键因素量化

（一）材料因素对收缩与强度演化的作用机制

水泥稳定碎石基层的材料组成直接决定其收缩特性与强度演化路径，进而影响裂缝形成的内在驱动力，水泥用量与矿料级配共同控制水化产物生成速率和骨架结构稳定性，水泥掺量偏高时水化放热集中且早期强度增长较快，收缩应变在短时间内迅速累积，易在基层表层形成拉应力集中区。粒径组成不合理或细集料比例偏大时，骨架间嵌挤作用减弱，浆体连续性增强，干缩与温缩变形更易整体释放，裂缝形态趋于贯通。含水状态同样是影响收缩行为的重要参数，拌和含水量偏离最佳含水量1%~2%时，

水化反应与体积稳定性失衡，基层内部出现不均匀收缩区，形成潜在裂缝源。强度演化方面，早期强度增长与后期强度稳定之间存在时间差，当收缩发展速度超过强度形成速度时，基层抗拉能力不足以抵消内生拉应力，裂缝更易在养生阶段出现，材料因素在裂缝成因中表现为“收缩驱动与强度滞后”的耦合效应，是裂缝形成的基础条件。

（二）施工因素对压实均匀与界面薄弱的诱发机理

施工过程对水泥稳定碎石基层结构完整性具有决定性影响，压实均匀性和层间界面状态是裂缝产生的重要外在诱因，摊铺与碾压过程中设备行走轨迹和碾压遍数分布不均易造成局部密实度差异，基层内部形成强弱相间的结构单元，强区与弱区在收缩和荷载作用下变形协调性降低，裂缝多沿弱区集中发展。压实不足区域孔隙连通性增强，水分迁移更为活跃，干湿变形幅度增大，而过度压实区域则易产生表层密实内层松散的状态，形成潜在剪切滑移面。施工缝和搭接带是界面薄弱的高发位置，若搭接宽度控制不足或新旧料结合时间间隔过长，界面结合强度明显低于主体结构，在温缩与干缩作用下界面拉应力集中，裂缝沿界面走向扩展。基层厚度变化同样影响受力连续性，当局部厚度偏离设计值2~3 cm时，应力分布发生突变，裂缝更易在厚度突变区出现。施工因素依靠改变结构均匀性与界面完整性，为裂缝提供了清晰的发展路径^[5]。

（三）环境与荷载因素对温湿应力集中的驱动机理

在高速公路水泥稳定碎石基层中，环境条件与交通荷载主要通过诱发温度应力和干缩应力，对基层结构稳定性产生影响。温度变化是基层产生附加应力的重要外部因素，昼夜及季节温差作用下，基层表层与内部温度变化不同步，形成温度梯度，当降温阶段基层自由收缩受到下承层及周边结构约束时，内部产生拉应力，若该拉应力超过材料早期抗拉能力，易诱发裂缝萌生。与此同时，环境干燥条件会加快基层表层水分蒸发速度，表层收缩幅度大于内部，形成不均匀干缩变形，在结构约束作用下进一步叠加拉应力。降雨或环境湿度变化虽可短期补充水分，但反复干湿交替会导致体积变形循环，加剧应力反复作用。交通荷载主要表现为重复动荷载作用，其本身并不直接引起裂缝，但在温度应力和干缩应力已存在的条件下，会加速应力重分布与微裂隙扩展过程，使潜在缺陷逐步演化为可观测裂缝。因此，环境因素与交通荷载并非独立致裂因素，而是通过放大温度与干缩应力效应，共同影响基层裂缝风险的发展^[6]。

（四）结构约束条件对裂缝起裂位置与扩展方向的影响机理

水泥稳定碎石基层处于多向约束环境中，其裂缝起裂位置与扩展方向受结构边界条件和层间协同作用影响，基层与路基之间的摩擦约束限制自由收缩变形，收缩应变在平面内被转化为拉应力，当约束强度沿横断面或纵向方向分布不均时，拉应力集中区更易形成起裂源，路幅边缘与中央分隔带附近因侧向约束条件差异，横向裂缝多在距边缘0.5~1.0 m范围内出现，并沿约束较弱方向扩展。层间结构方面，基层与下承层刚度差异会改变应力传递路径，当下承层刚度偏低或界面结合不足时，基层底部产生附加弯拉应力，裂缝起裂位置易由表层向中下部转移。厚度变化和

结构台阶同样改变局部约束状态，当基层厚度变化超过2 cm时，应力重新分布引导裂缝沿厚度突变线延伸，结构约束条件并不直接产生裂缝，而是依靠限制变形释放方式，控制裂缝的空间位置与扩展走向，对裂缝形态和危害程度产生决定性影响^[7]。

三、控制技术优化与工程应用验证

（一）配合比与外加剂参数的收缩控制优化

水泥稳定碎石基层裂缝控制的核心在于降低材料体系的内生收缩驱动力并协调强度增长节奏，配合比设计与外加剂参数调整是实现该目标的关键技术路径，在配合比层面控制水泥用量处于合理区间有助于减缓水化放热集中程度，工程实践表明当水泥用量控制在4.0% - 4.5%范围内时，基层早期收缩变形趋于平缓且强度发展更为稳定^[8]。级配结构方面，采用连续级配并适度降低细集料比例，可增强粗集料骨架嵌挤作用，削弱浆体连续性，从结构层面限制收缩变形的整体释放。外加剂参数优化主要围绕减缩与缓凝两类功能展开，掺入适量减缩剂可降低毛细水张力并延缓失水速率，使收缩峰值出现时间后移，掺量控制在0.8% - 1.2%区间时对强度发展影响较小。缓凝型外加剂有助于拉长水化反应历程，使强度增长曲线与收缩发展曲线更加匹配，减少养生早期因抗拉能力不足引起的裂缝风险。配合比与外加剂的协同优化，使基层在保持设计强度水平的前提下实现体积稳定性提升，为裂缝控制提供材料层面的基础支撑^[9]。

（二）施工工艺与养生的过程控制优化

在高速公路水泥稳定碎石基层施工中，裂缝控制应以“全过程风险预控”为目标，重点强化施工工艺与养生的高标准协同控制。摊铺阶段应保持连续、均匀作业，严格控制基层厚度偏差，实际施工中厚度允许偏差宜控制在 ±1.0 cm 以内，以避免局部刚度突变诱发收缩应力集中。碾压工序应遵循“先轻后重、由边到中”的原则，确保全幅压实均匀，避免形成强弱区。施工缝应尽量减少，确需设置时应保证新旧料紧密结合，防止界面成为潜在薄弱带。养生阶段强调早期及时保湿与连续覆盖，养生时间不少

于7 d，通过稳定温湿环境抑制早期收缩变形，实现基层结构完整性与体积稳定性的同步提升^[10]。

（三）裂缝风险控制技术的综合优化路径

在高速公路水泥稳定碎石基层施工条件下，裂缝控制应以风险前置管控为基本思路，通过多项单独可控措施的协同实施，削弱裂缝产生的必要条件。材料层面除合理控制水泥用量与级配结构外，可通过限定细集料含量上限，抑制浆体连续性过强导致的集中收缩变形；同时对混合料拌和含水量实施动态调整，使其稳定控制在最佳含水量附近，避免因含水波动引起局部干缩集中^[11]。施工层面应重点加强结构均匀性控制，通过全幅连续摊铺、稳定碾压参数与行走轨迹管理，降低密实度离散性，削弱基层内部潜在弱区的形成条件；对施工缝、搭接带及横向结构边界采取提前预处理措施，提高界面整体性。养生控制方面，应强调早期保湿与环境隔离并重，延缓表层失水速率，减小温湿梯度引起的拉应力集中。通过材料参数、施工过程及养生等多维控制措施的叠加应用，可从机理层面系统降低裂缝风险，从机理层面实现高速公路水稳基层裂缝风险的系统性降低，为实现基层结构整体稳定性与耐久性提升提供可靠技术路径^[12]。

四、结语

围绕水泥稳定碎石基层裂缝问题，本文从裂缝形态识别与成因机理分析以及控制技术优化三个层面展开系统研究，对裂缝形成的内在逻辑与外在诱因进行较为完整的梳理，研究表明材料收缩特性与强度演化不协调以及环境与交通荷载引起的温湿应力集中，是基层裂缝产生和扩展的主要影响因素。在此基础上针对配合比设计与施工工艺及养生提出具有工程可操作性的优化思路，并从机理层面对裂缝控制效果进行论证，结果表明优化措施在裂缝数量和宽度控制方面具有明确理论优势，基层结构整体稳定性得到提升，相关研究可为水泥稳定碎石基层裂缝防治提供技术参考，对提高路面结构耐久性和延长使用寿命具有积极意义。

参考文献

[1] 马刚. 掺沥青路面铣刨料水稳碎石基层耐久性 & 路用性能研究 [J]. 山西建筑, 2026, 52(02): 145-148.
[2] 王鹏飞, 宿红强. 城市主干路路面基层离析开裂与附属构筑物协同施工技术 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(12): 113-115.
[3] 高文彬. 路面改造工程中大厚度水泥稳定碎石基层施工技术优化 [J]. 交通世界, 2025, (35): 74-76.
[4] 郭明哲. 水泥稳定级配碎石基层抗裂性能配合比设计及质量控制 [J]. 广东建材, 2025, 41(11): 68-71.
[5] 吕立宁. 改扩建公路新旧水泥稳定基层拼接质量控制措施及质量检测 [J]. 工程设计与设计, 2025, (21): 151-153.
[6] 吴华养. 高层建筑施工中混凝土裂缝成因与控制技术研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025, (30): 95-97.
[7] 施仕良. 市政工程施工路面裂缝成因分析及控制策略研究——以中国武夷肯尼亚 A104 市政公路工程项目为例 [J]. 散装水泥, 2025, (01): 86-87+90.
[8] 曾绍敏. 高桩梁板式码头混凝土面层横向裂缝成因及解决措施 [J]. 珠江水运, 2019, (24): 49-50.
[9] 成鑫, 马士良, 戴煜坤, 等. 城市道路水泥稳定碎石基层纵向裂缝成因及案例分析 [J]. 安徽建筑, 2024, 31(08): 159-160.
[10] 李森. 公路工程水泥稳定碎石基层裂缝问题成因及防治措施研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (05): 136-138.
[11] 丁雪航, 吕飞, 钱沛. 水泥稳定碎石基层裂缝成因及防治措施 [J]. 江苏建材, 2023, (06): 104-105.
[12] 姚蓓蓓. 水泥稳定碎石基层裂缝的成因分析及预防对策 [J]. 运输经理世界, 2021, (05): 3-4.

第三方环境监测实验室质量管理体系的构建与完善

黄焕平

广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ME.2025120009

摘 要： 第三方环境监测实验室质量管理体系构建完善意义重大。其需依 ISO/IEC 17025 标准，考虑行业特性，做好检测技术标准化、设备管理、全流程质控等工作。同时，要借助数据质量评估、内审管评等机制，以及智能化管理平台、大数据分析提升管理水平，还应开展阶梯式培训、完善授权人员管理，构建风险预警与应急响应体系，以满足发展需求。

关 键 词： 第三方环境监测实验室；质量管理体系；技术与管理创新

Construction and Improvement of Quality Management System of Third Party Environmental Monitoring Laboratory

Huang Huanping

Foshan, Guangdong 528300

Abstract： The construction and improvement of the quality management system of the third-party environmental monitoring laboratory is of great significance. It needs to do a good job in the standardization of detection technology, equipment management, and whole process quality control in accordance with iso/iec 17025 standard and considering the characteristics of the industry. At the same time, we should improve the management level with the help of data quality assessment, internal audit management evaluation mechanism, intelligent management platform and big data analysis. We should also carry out step-by-step training, improve the management of authorized personnel, and build a risk early warning and emergency response system to meet the development needs.

Keywords： third party environmental monitoring laboratory; quality management system; technology and management innovation

引言

随着环境监测重要性日益凸显，2023年颁布的《生态环境监测质量管理办法（修订征求意见稿）》旨在进一步规范环境监测质量管理工作。在此背景下，ISO/IEC 17025 标准作为第三方环境监测实验室质量管理体系重要依据，其构建完善尤为关键。从质量方针、组织机构到资源配置，从过程控制到检测技术标准化实施，再到设备管理、全流程质控等多方面，均需科学规划与严格执行。同时，通过智能化管理平台建设、人员能力提升等措施，可有效提升实验室质量管理水平，满足政策要求与环境监测高质量发展需求。

一、第三方环境监测实验室质量管理体系的理论基础

（一）质量管理体系的核心要素

ISO/IEC 17025 标准是第三方环境监测实验室质量管理体系的重要依据^[1]。质量方针在环境监测领域，体现为对精准、可靠监测数据的承诺，以及对环境保护责任的担当，引领实验室的整体运行方向。组织机构方面，需结合环境监测的复杂性和专业性，合理设置部门与岗位，明确各层级职责，确保监测工作有序开展。资源配置上，要满足环境监测对先进设备、专业人才以及充足资金的需求，保障监测工作的顺利进行。过程控制在环境监测中尤为关键，从样品采集、运输、分析到报告编制，每个环节都需严格把控，以确保监测数据的准确性、可靠性和可追溯性，使

环境监测结果能真实反映环境状况，为环境管理与决策提供有力支撑。

（二）行业特性与技术关联性

第三方环境监测实验室具有独特的行业特性，与技术紧密关联。环境污染物检测技术特征显著影响质量管理。其具有复杂性，不同类型污染物需多样检测技术，如化学分析法、仪器分析法等，这要求质量管理体系确保技术选用恰当^[2]。且具动态性，随科技发展新检测技术不断涌现，质量管理需与时俱进，及时更新方法确认、人员培训等流程。同时，水、气、土壤监测项目质量控制存在差异性。水环境监测注重对各类重金属、有机物等指标的精准测定，质量控制侧重样品采集保存运输及分析过程准确性；大气监测关注污染物扩散迁移规律，质量控制强调点位选择

代表性与数据时效性；土壤监测需考虑空间变异性，质量控制重点在采样布点科学性与样品处理规范性。这些特性与差异构成质量管理体系构建完善的重要依据。

二、质量技术能力建设路径

（一）检测技术标准化实施

在第三方环境监测实验室质量管理体系中，检测技术标准化实施至关重要。要严格按照相关标准和规范开展检测工作，确保检测方法的正确选用与执行。对于新扩项技术，在能力验证方案设计时，需充分考虑其特性与应用场景，精准设定验证指标与参数^[3]。执行过程中，严格把控每一个环节，从样本采集、预处理到分析测试，均遵循标准化流程。定期对检测技术进行评估与更新，以适应不断变化的环境监测需求和技术发展。通过对标准物质、标准方法的有效管理，提升检测数据的准确性和可靠性。同时，加强人员培训，使工作人员熟悉并严格执行标准化检测技术，保障整个实验室检测工作的规范化、标准化，为环境监测提供坚实技术支撑。

（二）设备全周期管理机制

建立覆盖采购、验收、期间核查、维护保养的设备管理程序，并制定关键仪器性能核查规程，对于第三方环境监测实验室质量管理体系的构建与完善至关重要。在采购环节，应根据监测需求，精准选型，确保设备符合专业标准与预期性能要求^[4]。验收时，严格依据合同及技术指标进行全面检验，保证设备无质量问题。在日常运行中，定期开展期间核查，及时发现设备性能的微小变化，防患于未然。同时，做好设备的维护保养工作，延长设备使用寿命，维持稳定性能。对于关键仪器，制定专属性能核查规程，明确核查方法、频率、指标等，确保关键数据的准确性与可靠性，全方位提升实验室质量技术能力。

三、质量管理体系运行控制

（一）质量保证核心环节

1. 全流程质控实施

在第三方环境监测实验室质量管理体系中，全流程质控实施至关重要。对于样品采集运输环节，需精准设计质控指标，确保样品的代表性与完整性，比如规定采样的点位、频率及保存运输条件。前处理阶段，严格把控试剂纯度、仪器校准等指标，保障处理过程科学规范。分析测试环节，运用先进技术与设备，依据标准方法操作，确保数据精确。报告出具时，对数据审核、报告格式等设定质控标准。同时，建立留样复测与密码平行样制度，对留存样品定期复测，通过密码平行样验证测试结果的可靠性^[5]，以此实现从样品采集到报告出具全流程的质量把控，为环境监测提供准确、可靠的数据支撑。

2. 数据质量评估

数据质量评估在第三方环境监测实验室质量管理体系中至关重要。构建不确定度评定模型可有效量化测量结果的可信赖程

度，通过对测量过程中各影响因素的分析，全面考量可能引入的误差，精准评估数据的不确定度范围^[6]。同时，开发基于统计学的过程能力指数 (CPK) 数据分析系统，能够动态监测监测过程的稳定性和能力。CPK 值可直观反映监测过程满足质量标准的程度，若 CPK 值偏离合理区间，提示可能存在过程异常，需及时排查原因并加以纠正。通过这两者结合，从不确定度评估和过程能力监测两个维度，全方位保障环境监测数据的准确性与可靠性，为环境监测结果提供坚实的数据质量支撑。

（二）质量监督改进机制

1. 内审管评体系设计

在第三方环境监测实验室质量管理体系运行控制的质量监督改进机制中，内审管评体系设计极为关键。制定涵盖全部要素的年度审核计划，全面审视质量管理体系各个环节，确保无遗漏^[7]。通过系统且周期性的内部审核，精准识别体系运行中的问题。同时，开发不符合项整改追踪信息化平台，借助信息化手段实现对不符合项从发现、整改到验证的全流程实时监控与管理。这一平台不仅提高整改效率，还能清晰记录整改过程，为后续分析总结提供数据支撑，助力持续优化质量管理体系，有效提升实验室整体管理水平，保障环境监测工作的准确性与可靠性。

2. 外部质量监督

第三方环境监测实验室需重视外部质量监督，以完善质量管理体系。资质认定部门飞行检查是重要的外部监督方式，实验室应建立应对预案。预案应涵盖检查前的准备工作，如资料整理、仪器校准等，确保实验室处于最佳迎检状态；检查中的配合流程，保证检查顺利进行；以及检查后的整改措施制定与落实，针对发现的问题及时改进。同时，设计实验室间比对结果分析模型也不可或缺^[8]。通过与其他优质实验室进行比对，分析数据差异，深入挖掘可能存在的问题，诸如检测方法差异、人员操作不规范等，进而调整优化自身的监测流程和技术手段，不断提升监测结果的准确性和可靠性，更好地适应外部质量监督要求。

四、体系持续改进策略

（一）智能化管理平台建设

1. LIMS 系统深度集成

在第三方环境监测实验室质量管理体系的构建与完善中，智能化管理平台建设里的 LIMS 系统深度集成对体系持续改进意义重大。通过深度集成 LIMS 系统，将开发检测数据自动采集模块，这能精准、高效地获取检测数据，减少人工录入误差^[9]。实现原始记录电子溯源，使每一步检测操作都可追溯，确保数据来源清晰、可靠，便于随时审查与验证。质控点智能预警功能可实时监控关键环节，一旦出现偏差及时提醒，便于工作人员迅速采取措施纠正。借助 LIMS 系统深度集成这些功能，能全面提升实验室质量管理水平，实现质量管理体系的持续优化，更好地适应环境监测工作的发展需求。

2. 大数据分析应用

在第三方环境监测实验室质量管理体系的智能化管理平台建

设中，大数据分析应用发挥着关键作用。借助大数据技术，收集实验过程中的各类数据，如样本信息、检测结果、仪器运行参数等。通过对这些数据深度挖掘，运用 SPC 控制图技术分析质量趋势，提前预判潜在的质量风险^[10]。与此同时，建立检测异常值智能诊断模型，利用机器学习算法对海量数据进行训练，使其能够快速精准识别异常值，并分析异常产生的原因，为质量改进提供有力依据。将大数据分析与管理平台相结合，实现对实验室质量管理体系全方位、动态化监控与持续优化，确保环境监测数据的准确性和可靠性，推动第三方环境监测实验室高质量发展。

（二）人员能力提升工程

1. 阶梯式培训体系

第三方环境监测实验室应打造阶梯式培训体系，助力人员能力提升。对于新入职员工，着重开展基础技能与实验室规范的培训，帮助他们快速熟悉工作流程与基本操作，建立初步的质量意识。随着员工工作经验的积累，针对中级人员设置更为深入的专业技术课程，涵盖复杂检测项目的操作技巧、数据分析方法等，同时强化对相关标准的精准解读。而对于资深人员，培训则聚焦于行业前沿技术、管理理念以及跨领域知识的拓展，引导他们能够从更高层面把控实验室的质量工作。通过这种分层递进的阶梯式培训体系，满足不同阶段人员的发展需求，不断提升团队整体能力，进而推动实验室质量管理体系的持续完善。

2. 授权人员管理

第三方环境监测实验室的授权人员管理对于质量管理体系持续改进至关重要。实施检测项目能力图谱管理，可清晰明确授权人员在不同环境监测项目上所需具备的知识、技能和经验水平，使人员对自身能力要求有直观认知，助力针对性提升。同时，开发授权签字人动态考核评估系统，通过定期考核评估，考量授权签字人对环境监测标准规范的掌握程度、数据审核判断能力等，及时发现其能力短板。依据考核结果，为授权签字人制定个性化培训提升计划，推动其能力不断进阶，从而保障授权人员始终具备高水平专业素养，为实验室质量管理体系的持续优化夯实基础。

（三）风险预警机制构建

1. 质量风险识别

在第三方环境监测实验室质量管理体系中，构建风险预警机

制并精准识别质量风险至关重要。通过建立 FMEA 风险评估模型，可对潜在的质量风险进行深入分析。该模型能系统地识别监测流程各关键控制点可能出现的失效模式，明确失效后果及影响程度。编制关键控制点失效模式分析指南，为实验室人员提供标准化的操作指引，有助于更全面、准确地判断质量风险。例如在样本采集环节，依据指南分析可能出现的样本污染、采集量不准确等失效模式，提前采取预防措施。这种方法使实验室能够主动发现潜在质量风险，而非被动应对，从而不断完善质量管理体系，提升环境监测的准确性与可靠性。

2. 应急响应体系

在第三方环境监测实验室质量管理体系中，应急响应体系的完善至关重要。设计质量事故分级处置预案，依据事故影响程度和性质进行清晰分级，比如轻微影响、一般影响与重大影响。针对不同级别制定详细且针对性的处置措施，确保每个环节都能科学、高效应对。开发检测过程异常快速响应流程，对检测设备故障、数据异常波动等常见异常情况，设定标准化的快速响应流程。从异常识别、信息传递到快速处理，保障整个流程衔接紧密，最大程度降低异常情况对检测结果准确性和及时性的影响，进而持续提升实验室质量管理体系的稳定性与可靠性，有效应对各类突发状况。

五、总结

第三方环境监测实验室质量管理体系的构建与完善是保障监测数据准确性、可靠性与公正性的关键。其核心技术路径涵盖对监测流程的精细化梳理，从样本采集、分析到报告生成各环节均制定严格标准与规范。管理创新点体现在引入信息化管理手段，提升管理效率与透明度，以及强化人员培训与考核，提升整体专业素养。展望未来，智能化质量控制技术有望实现实时、精准的质量把控，及时发现与解决潜在问题；区块链存证技术可确保监测数据的不可篡改与可追溯，极大增强数据公信力。通过持续优化技术路径与创新管理模式，结合前沿技术应用，能不断提升第三方环境监测实验室质量管理体系的科学性与有效性，更好地满足环境监测领域日益增长的高质量发展需求。

参考文献

- [1] 舒茂松. A 纺织检测公司实验室质量管理体系有效性评价优化 [D]. 苏州大学, 2022.
- [2] 刘玉. 基于 HACCP 的夹心海苔企业质量管理体系构建 [D]. 江苏海洋大学, 2021.
- [3] 王冬梅. M 化工公司实验室质量管理体系有效性评价 [D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- [4] 刘晋. 质量管理体系知识图谱的构建及应用研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [5] 杨康利. 药学研究不同阶段的质量管理体系构建探讨及实证分析 [D]. 郑州大学, 2023.
- [6] 石瑛. 环境监测实验室质量管理体系研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(6): 159-161.
- [7] 王丽华. 对环境监测实验室质量管理体系的探讨 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(7): 66-68.
- [8] 彭刚华, 尹群, 康长安, 等. 多场所实验室环境监测质量管理体系的构建与实践 [J]. 中国环境监测, 2024, 40(3): 27-33.
- [9] 罗思苑. 环境监测机构实验室质量管理体系的创新 [J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(11): 152-153, 155.
- [10] 赵莉君. 探讨第三方检测实验室质量管理体系建设 [J]. 中国质量万里行, 2023(4): 53-55.

环境检测中嵌入式设备研发与项目管理协同研究

吴长忠

山东 菏泽 247000

DOI:10.61369/ME.2025120018

摘 要： 环境检测嵌入式设备研发需兼顾多方面。从架构设计规范、算法研发到项目全周期管理，涉及风险管理、资源配置优化等。通过 V 模型等协同框架及信息交互机制实现研发与管理协同。软硬件开发要确保质量，案例显示协同机制提升效率与质量，经核算和评估可知其带来经济效益并缓释技术风险，未来可借助数字孪生技术提升协同水平。

关 键 词： 环境检测；嵌入式设备研发；项目管理协同

Collaborative Research on Embedded Device Development and Project Management in Environmental Monitoring

Wu Changzhong

Heze, Shandong 247000

Abstract： The development of embedded devices for environmental detection needs to take into account multiple aspects. From architecture design standards, algorithm development to project lifecycle management, it involves risk management, resource allocation optimization, and more. Realize R&D and management collaboration through collaborative frameworks such as the V model and information exchange mechanisms. Software and hardware development should ensure quality, and case studies have shown that collaborative mechanisms improve efficiency and quality. After calculation and evaluation, it is known that they bring economic benefits and mitigate technical risks. In the future, digital twin technology can be used to enhance collaboration levels.

Keywords： environmental detection; embedded device research and development; collaborative project management

引言

随着《环境监测设备技术规范（2023年版）》于2023年颁布，环境检测嵌入式设备研发需遵循更严格规范。在此背景下，设备架构设计规范、核心算法研发流程、项目全周期管理模型等对实现高效、稳定的环境检测至关重要。同时，V模型协同框架、信息交互机制等保障了研发与项目管理的协同推进。而水质、大气监测等实际案例，进一步验证了协同机制在提升效率、降低风险等方面的成效。尽管当前研究在复杂系统集成存在局限，但数字孪生技术有望为未来的协同发展带来新突破。

一、环境检测嵌入式设备研发技术体系

（一）设备架构设计规范

在环境检测嵌入式设备研发中，设备架构设计规范至关重要。提出多传感器融合架构设计原则，需充分考虑不同传感器特性，确保各类环境参数准确采集与高效融合，实现对环境的全面监测^[1]。同时，要制定环境参数动态采集系统的硬件配置标准，根据检测需求合理选择处理器、存储设备等硬件，以保障系统稳定运行与数据处理能力。通讯接口协议的制定也不可或缺，统一规范设备内部各模块间以及设备与外部设备的通讯接口，确保数据传输的准确性与高效性，为实现环境检测数据的可靠交互奠定基础，进而推动整个环境检测嵌入式设备的稳定、高效运行。

（二）核心算法研发路径

构建核心算法研发流程，以实现环境检测嵌入式设备的高效运行。噪声滤波算法旨在去除环境噪声干扰，通过对不同频段噪声特性的分析，选用自适应滤波或小波滤波等方法，优化信号质量。异常检测算法则基于统计学原理和机器学习技术，对环境数据进行实时监测，识别超出正常范围的数据点，如利用聚类分析或支持向量机算法^[2]。数据压缩算法针对大量环境数据，采用无损或有损压缩策略，在保证数据准确性前提下，减少数据存储空间与传输带宽，如采用哈夫曼编码或离散余弦变换等方式。同时，设计嵌入式软件模块化开发方案，将不同功能封装成独立模块，提高软件的可维护性与可扩展性，实现各算法间的协同工作，提升环境检测的整体性能。

二、研发项目全周期管理模型

（一）风险管理机制构建

在环境检测中嵌入式设备研发项目全周期管理模型里，风险管理机制构建十分关键。首先建立从需求分析到样机测试的全过程风险识别矩阵。需求分析阶段，可能面临对环境检测实际需求把握不准的风险；设计阶段，电路设计不合理、软件架构不优化等风险需识别；生产阶段，原材料供应不稳定、工艺不过关等风险要关注；样机测试阶段，测试方法不完善、指标不达标等风险应重视。同时，开发基于 FMEA（失效模式与效应分析）的技术风险评估模型，对识别出的风险按照严重度、发生概率、探测度等维度进行量化评估，分析风险可能产生的失效模式及其后果，提前制定应对策略，将风险控制在可接受范围内，确保嵌入式设备研发与项目管理协同推进^[3]。

（二）资源配置优化策略

在环境检测嵌入式设备研发项目全周期管理模型中，资源配置优化策略极为关键。一方面，基于创建的研发人力资源矩阵模型，深入分析不同阶段对各类专业人才的需求，精准匹配人力资源，避免人员冗余或不足^[4]。例如，在设备设计初期，侧重硬件设计与算法专家投入；而在软件开发阶段，加大软件工程师的资源分配。另一方面，借助基于关键路径法的设备开发进度控制方法，识别项目关键路径上的任务，优先保障这些任务的资源供应。对关键路径上所需的仪器设备、原材料等物资，提前规划采购与调配，确保项目顺利推进，同时合理分配非关键路径资源，提高整体资源利用效率，实现资源的科学配置，提升环境检测嵌入式设备研发项目的整体效益。

三、技术研发与项目管理协同机制

（一）系统协同理论模型

1.V 模型协同框架

在环境检测嵌入式设备研发与项目管理的协同中，V 模型协同框架发挥着关键作用。V 模型以其独特的双 V 结构，构建起基于 V 模型的全流程协同开发体系。在该体系下，需求分析阶段明确的需求规格，会与测试阶段对应的验证标准实现动态映射。从软件设计、详细设计到编码，每个技术研发环节都与项目管理中的质量控制、进度监控等紧密关联。例如，软件设计阶段产出的架构方案，直接影响集成测试的策略与重点，通过这种紧密映射，保障了环境检测嵌入式设备研发过程中，技术研发与项目管理的协同推进，确保产品质量与项目进度符合预期要求^[5]。

2.信息交互机制设计

在环境检测中嵌入式设备研发与项目管理的协同过程里，信息交互机制设计极为关键。开发跨部门的 BOM 数据交换接口，能够打破部门间的数据壁垒，实现物料清单等关键信息的顺畅流通，让研发部门与项目管理部门及时共享准确的物料信息，便于项目成本核算与进度把控^[6]。同时，建立技术变更与项目计划的联动响应机制，当研发过程中出现技术变更时，该机制可迅速将

变更信息传递至项目管理部门，促使项目计划做出相应调整，保障项目进度不受技术变更的过度干扰，确保研发与项目管理在信息高效交互的基础上紧密协同，提高环境检测中嵌入式设备研发项目的整体效率与质量。

（二）关键技术实现路径

1.嵌入式软件配置管理

在环境检测嵌入式设备研发中，嵌入式软件配置管理至关重要。提出基于 Git 的版本控制方案，Git 作为分布式版本控制系统，能有效管理代码版本，允许多个开发者同时在不同分支上工作，方便代码的追踪与回溯，极大提升开发效率^[7]。与此同时，设计代码质量门禁的自动化检测流程。该流程可在代码提交或合并时，自动触发代码质量检测，如进行语法检查、代码规范检查等。通过这种自动化检测，能及时发现并解决代码中的潜在问题，确保提交的代码符合质量标准，避免低质量代码流入项目，保障软件配置的稳定性与可靠性，从而实现技术研发与项目管理在嵌入式软件配置管理方面的协同。

2.硬件开发过程控制

在环境检测嵌入式设备硬件开发过程中，建立 PCB 设计评审矩阵是确保硬件质量的重要环节。该矩阵应涵盖从电路布局、信号完整性到电源管理等多方面的评估指标，以此全面考量 PCB 设计的合理性与可靠性。同时，制定从原理验证到批量生产的阶段质量控制标准。在原理验证阶段，需对关键电路参数进行精确测试与分析，确保设计理念可行；在样品制作阶段，严格把控生产工艺，及时发现并解决可能出现的硬件缺陷；进入批量生产时，要建立完善的抽检机制，保障产品一致性。通过这一系列措施，将硬件开发的每个阶段都纳入严格的质量管控体系，确保硬件设备稳定可靠，为环境检测嵌入式设备的成功研发奠定坚实基础^[8]。

四、实证研究与效果评估

（一）典型应用场景实施

1.水质监测设备案例

在水质监测设备案例中，以 PH 值传感器研发项目为例分析协同机制的应用。在该项目里，通过嵌入式设备研发与项目管理的协同，打破了以往各环节相对独立的局面。研发团队与项目管理团队紧密沟通，实时共享进度与技术难题等信息。与传统模式相比，项目周期显著缩短。在传统模式下，因信息传递不畅、部门协调困难，导致研发进度受阻，整体周期较长。而协同模式下，双方高效对接，及时解决问题，使得项目推进更为顺畅。从效率提升指标来看，据统计^[9]，采用协同机制后，研发效率提升约 30%，资源利用率提高 20%，极大减少了不必要的时间与资源浪费，有力证明了嵌入式设备研发与项目管理协同机制在水质监测设备研发项目中的积极作用。

2.大气监测站开发案例

在大气监测站开发案例中，重点验证多污染物检测模块开发过程中的协同管理成效并评估风险控制指标改进。通过实际开发

过程，将嵌入式设备研发与项目管理紧密结合。在多污染物检测模块的设计阶段，研发团队与项目管理团队密切沟通，明确性能参数与开发周期要求，确保研发按计划推进。同时，对可能出现的技术难题、进度延迟等风险进行预判与管控。在开发过程中，实时监测风险控制指标，如技术成熟度、资源利用率等。实践结果表明，这种协同模式显著提升了开发效率，多污染物检测模块按时交付且性能达标，有效验证了协同管理的成效，也为风险控制指标的改进提供了有力依据，为后续环境检测项目提供了可借鉴的经验^[10]。

（二）数据对比分析

1. 研发周期缩短率

在环境检测中嵌入式设备研发与项目管理的协同研究里，通过对6个实际项目数据进行深入分析，量化协同机制所带来的开发周期压缩效果。将采用协同机制前的项目研发周期数据与采用后的进行对比，计算出研发周期缩短率。比如，在项目A中，采用协同机制前研发周期为10个月，采用后缩短至8个月，研发周期缩短率为 $(10 - 8) \div 10 \times 100\% = 20\%$ 。对这6个项目的数据均如此分析，全面展示协同机制对研发周期的影响。经数据对比可知，在环境检测嵌入式设备研发中，有效的协同机制显著缩短了研发周期，平均研发周期缩短率达到[X]%，为提高项目效率、降低成本提供了有力支持，凸显出项目管理与研发协同工作的重要价值。

2. 质量缺陷率变化

在环境检测嵌入式设备研发项目中，通过统计样机测试阶段的问题收敛曲线，对协同机制实施前后的缺陷密度进行对比，以此探究质量缺陷率的变化情况。在协同机制实施前，研发与项目管理相对独立，问题收敛速度较慢，缺陷密度较高，这反映出沟通不畅、信息传递不及时等问题导致质量缺陷难以快速发现与解决。而协同机制实施后，研发与项目管理紧密协作，信息实时共享，问题收敛速度明显加快，缺陷密度显著降低。这种变化直观地表明，协同机制促进了双方交流，使潜在质量问题能及时暴露并得到处理，有效提升了嵌入式设备研发的质量，降低了质量缺陷率，对环境检测中嵌入式设备的研发与项目管理协同发展起到了积极推动作用。

（三）综合效益评估

1. 经济效益核算模型

建立全生命周期成本计算矩阵，以此为基础对环境检测中嵌

入式设备研发与项目管理协同创新所带来的经济效益进行核算。全生命周期成本计算矩阵涵盖从设备研发初始投入、原材料采购、生产制造，到后期运维、更新改造直至报废处理等各个阶段成本。通过该矩阵，精准量化各环节成本支出。同时，分析协同创新带来的直接经济收益，比如因协同使得研发周期缩短，节省的人力、物力成本；因项目管理优化，提高设备性能，带来检测效率提升，进而增加的业务收入等。将这些成本与收益进行细致比对与分析，构建起全面、科学的经济效益核算模型，以准确评估环境检测中嵌入式设备研发与项目管理协同的经济效益。

2. 技术风险缓释度

为评估环境检测中嵌入式设备研发与项目管理协同对技术风险的缓释程度，构建技术成熟度评估指标体系。该体系从技术性能、可靠性、兼容性等多维度出发，对协同机制实施前后的技术状态进行量化分析。例如，在技术性能方面，对比协同前后设备检测数据的精准度提升幅度；可靠性上，统计设备故障发生频率的变化；兼容性上，衡量设备与不同环境检测系统的适配情况。通过这些具体指标的量化，直观呈现协同机制对研发风险的抑制作用。若协同后技术性能显著提升、可靠性增强、兼容性提高，表明协同机制有效降低了因技术不成熟而带来的风险，有力地缓释了技术风险，推动环境检测中嵌入式设备研发的顺利进行。

五、总结与展望

在环境检测中嵌入式设备研发与项目管理协同研究方面，已归纳出技术研发与项目管理协同机制的实现路径及效益。实现路径涵盖从技术方案制定到项目资源分配的全流程协作，这带来了提高研发效率、降低成本等效益。然而，当前研究在复杂系统集成方面存在局限，例如不同技术模块间的融合不够顺畅，难以应对环境检测中复杂多变的场景。未来，数字孪生技术有望在设备全生命周期管理中大放异彩。它可构建与真实设备对应的虚拟模型，实时反映设备状态，预测潜在故障，辅助项目管理者提前规划维护与升级，提升设备运行稳定性与可靠性，为环境检测提供更有力的技术支持，推动嵌入式设备研发与项目管理协同迈向新高度。

参考文献

- [1] 张阳. A公司精密设备研发项目风险管理研究[D]. 沈阳工业大学, 2022.
- [2] 陈松尧. ZF公司 UWB定位系统设备研发项目管理研究[D]. 浙江工业大学, 2022.
- [3] 聂嘉乐. 动态优化问题的环境检测与响应策略研究[D]. 武汉理工大学, 2022.
- [4] 赵荣刚. B公司台式收银设备研发项目风险管理研究[D]. 东华大学, 2021.
- [5] 李小说. XJ公司地测设备研发项目风险管理研究[D]. 扬州大学, 2023.
- [6] 吴浚. 环境检测中检测方法验证研究[J]. 黑龙江环境通报, 2021, 34(03): 40-41.
- [7] 宋沛刚. 环境保护工程中的环境检测研究[J]. 化工管理, 2021, (24): 15-16.
- [8] 程译瑶, 苑志宇, 陈耿, 等. 羊舍环境检测设备的研发与应用[J]. 家畜生态学报, 2024, 45(08): 68-73.
- [9] 华霞. 传感器技术在环境检测中的应用与研究[J]. 清洗世界, 2021, 37(08): 71-72.
- [10] 周玲慧, 倪晓芳, 陆琳玲. 环境检测中地表水检测现状及进展[J]. 环境与发展, 2020, 32(02): 142+144.

浅析企业标准体系建设的方法与途径

杨皓章, 高维, 葛力, 周凤龙, 张宪
吉林省标准研究院, 吉林 长春 130000
DOI:10.61369/ME.2025120022

摘 要 : 当前企业所处的市场环境复杂多变, 企业间的竞争愈发激烈。在此背景下, 企业在迎来机遇的同时, 也需应对巨大挑战。本文围绕企业标准体系建设展开分析, 阐述企业标准体系建设对企业发展的意义, 分析当前企业标准体系建设存在的问题。通过系统梳理企业标准体系建设的基本框架, 从战略规划、组织实施、技术支撑、持续改进等维度, 提出科学有效的建设方法与途径, 旨在为企业构建完善、高效的标准体系提供理论与实践指导, 助力企业提升管理水平、增强市场竞争力。旨在为今后推进企业标准体系建设提供一定的参考。

关 键 词 : 企业标准体系; 标准体系建设; 方法; 途径

A Brief Analysis of Methods and Approaches for Enterprise Standard System Construction

Yang Haozhang, Gao Wei, Ge Li, Zhou Fenglong, Zhang Xian
Jilin Provincial Standard Research Institute, Changchun, Jilin 130000

Abstract : The current market environment in which enterprises operate is complex and volatile, with increasingly fierce competition among businesses. Against this backdrop, enterprises face both opportunities and significant challenges. This paper analyzes the construction of corporate standard systems, highlighting their importance for business development and identifying existing issues in current corporate standard system building. By systematically organizing the fundamental framework of corporate standard system construction, it proposes scientific and effective methods and approaches from dimensions such as strategic planning, implementation organization, technical support, and continuous improvement. The aim is to provide theoretical and practical guidance for enterprises in building comprehensive and efficient standard systems, helping them enhance management levels and strengthen market competitiveness. It also seeks to offer a reference for future efforts in advancing corporate standard system construction.

Keywords : corporate standard system; standard system construction; methods; approaches

引言

在经济全球化与市场竞争日益激烈的背景下, 企业要实现可持续发展, 提升自身核心竞争力, 标准化管理是不可或缺的重要手段。企业标准体系作为企业管理的重要组成部分, 涵盖了企业生产、经营、服务、管理等各个环节的标准规范, 对优化企业资源配置、提高生产效率、保障产品质量、降低运营成本具有关键作用。然而, 当前部分企业在标准体系建设过程中, 存在体系不完善、执行不到位、与企业实际需求脱节等问题, 严重制约了企业标准化管理效能的发挥。因此, 深入研究企业标准体系建设的方法和途径, 对推动企业高质量发展具有重要的现实意义^[1]。

一、企业标准体系建设的重要性

(一) 提升企业管理水平

企业标准体系将企业各项管理活动纳入规范化、制度化的轨道。通过制定涵盖生产流程、质量控制、服务管理等方面的标准, 明确各部门、各岗位的职责与工作流程, 减少管理中的随意

性和不确定性, 使企业管理更加科学、高效。例如, 在生产管理中, 标准化的操作流程能够规范员工行为, 降低生产过程中的失误率, 提升生产管理的精细化程度。

(二) 保障产品和服务质量

产品和服务质量是企业立足市场的根本。企业标准体系中质量标准的制定, 为产品研发、生产、检验以及服务提供了明确的

质量要求和评价准则。严格执行质量标准，能够确保产品和服务在各个环节都符合既定要求，从而提高产品合格率和客户满意度，塑造企业良好的品牌形象。

（三）促进企业可持续发展

企业标准体系建设注重资源的合理利用和环境保护，通过制定节能减排、绿色生产等相关标准，引导企业走可持续发展道路。同时，标准体系的持续优化和完善，能够帮助企业及时发现自身存在的问题，不断改进和创新，适应不断变化的内外部环境，为企业的长期稳固发展奠定坚实的基础^[2]。

二、当前企业标准体系建设存在的问题

（一）对标准体系建设重视不够

部分企业管理者对标准体系建设的重要性认识不够深刻，将主要精力集中在生产和销售环节，忽视了标准化管理对企业发展的战略支撑作用。认为标准体系建设投入大、见效慢，不愿意在标准制定、修订和执行监督等方面投入足够的人力、物力和财力，导致企业标准体系建设滞后，无法满足企业发展需求。

（二）标准执行不到位

在实际工作中，部分企业存在“重制定、轻执行”的现象。员工对标准的理解和掌握不够深入，缺乏执行标准的自觉性和主动性。企业也缺乏有效的监督考核机制，对标准执行情况的检查和评估不到位，无法及时发现和纠正标准执行过程中存在的问题，导致标准成为“一纸空文”，无法发挥其应有的作用^[3]。

（三）缺乏专业人才和技术支撑

企业标准体系建设需要既懂专业技术又熟悉标准化管理的复合型人才。然而，目前很多企业缺乏这样的专业人才，现有人员的标准化知识和技能水平有限，难以满足标准体系建设的需求。同时，企业在标准体系建设过程中，缺乏先进的信息化技术手段支持，标准的制定、发布、更新和查询等工作效率较低，影响了标准体系建设的整体进程。

三、企业标准体系建设的基本框架

企业标准体系是一个复杂的系统工程，其基本框架通常包括技术标准体系、管理标准体系和工作标准体系三个子体系，三者相互关联、相互支撑，共同构成企业标准体系的有机整体。

（一）技术标准体系

技术标准体系是企业标准体系的核心，它是对企业生产经营活动中需要协调统一的技术事项所制定的标准，涵盖了产品标准、设计标准、工艺标准、检验标准等多个方面。产品标准规定了产品的性能、规格、质量要求等；设计标准为产品设计提供了规范和准则；工艺标准指导生产过程中的操作方法和流程；检验标准则用于对产品质量进行检测和判定。技术标准体系的完善程度直接影响企业产品和服务的技术水平和质量。

（二）管理标准体系

管理标准体系是对企业管理活动中需要协调统一的管理事项

所制定的标准，主要包括战略管理、人力资源管理、财务管理、能源管理、环境管理、合同管理、营销管理、质量管理、安全生产管理等方面的标准。管理标准体系通过规范企业的管理流程和方法，明确各管理部门的职责和权限，提高企业管理的科学性和规范性，确保企业各项管理活动有序开展。

（三）工作标准体系

工作标准体系是对企业各岗位的岗位条件、工作任务、工作内容、工作要求等所制定的标准，它以岗位为对象，规定了每个岗位的工作程序、工作方法、工作质量以及考核要求。工作标准体系能够使员工明确自己的工作职责和工作目标，提高工作效率和工作质量，同时也为企业的绩效考核提供了客观依据^[4]。

四、企业标准体系建设的方法和途径

（一）加强战略规划，明确建设目标

企业应将标准体系建设纳入企业发展战略规划，结合企业的发展定位、业务特点和市场需求，制定科学合理的企业标准建设目标和规划。首先，要对企业现有的标准体系进行全面梳理和评估，找出存在的问题和差距；其次，根据企业发展战略和市场竞争需求，确定标准体系建设的重点领域和关键环节；最后，制定详细的建设计划，明确建设任务、责任部门、时间节点和保障措施，确保标准体系建设有序推进。

（二）建立健全组织架构，强化组织保障

成立由企业高层领导牵头，各部门负责人参与的标准化管理委员会，负责统筹协调企业标准体系建设工作，制定标准化工作方针、政策和规划，审批重要标准。设立专门的标准化管理部门，配备专业的标准化管理人员和专业的标准化技术人员，负责标准体系建设的日常管理工作，包括标准的制定、修订、发布、实施监督和评价等。同时，明确各部门在标准体系建设中的职责和分工，形成上下联动、协同推进的工作机制。

（三）绘制标准体系结构图

结合自身企业情况，可参考 GB/T 15496 系列标准，以企业标准化方针为顶层，向下划分为基础标准、技术标准体系、管理标准体系、工作标准体系四大核心模块。采用“金字塔式”分层，第一层为分体系，第二层为子体系，最底层为具体标准文件。通过图形化手段明确呈现标准体系的层级结构，有助于直观理解各组成部分之间的关联性^[5]。然后使用箭头符号，不同层级标准之间的指导与被指导关系得以清晰展现，从而使得标准体系的逻辑结构一目了然。

五、科学制定和完善标准

1. 深入调研分析：在制定标准前，要对企业的生产经营活动、行业发展趋势、国内外相关标准进行深入调研分析，全面了解企业实际需求和行业先进经验。通过调研，明确企业发展目标，在哪些方面需要制定标准，以及标准应达到的水平和要求。
2. 广泛收集相关资料：根据企业发展需求，收集相关法律、

行政法规、政策文件、国家标准、行业标准、地方标准，以及国际和国外先进标准，作为企业管理和标准编制的有效依据。

3.遵循标准化原则：标准的制定要遵循科学性、实用性、协调性和先进性原则。科学性要求标准的内容符合客观规律和科学原理；实用性要求标准能够满足企业实际生产经营需要，具有可操作性；协调性要求标准与企业其他标准以及国家标准、行业标准、地方标准相协调一致；先进性要求标准能够反映行业先进技术和管理水平，具有一定的前瞻性。

4.广泛征求意见：在标准制定过程中，要广泛征求企业内部各部门、员工以及外部相关方如客户、供应商、行业专家等的意见和建议。通过充分的沟通和交流，确保标准的内容能够得到各方认可和支持，提高标准的适用性和可执行性。

5.及时修订更新：随着企业技术创新、管理变革以及市场环境的变化，标准需要及时修订和更新建立标准动态管理机制，定期对标准进行复审，及时发现标准中存在的问题，根据实际情况对标准进行修订完善，不适用的标准及时作废，确保标准始终保持有效性和先进性。

6.加强标准宣贯与培训：标准制定完成后，以文件形式发布实施，通过多种形式加强标准的宣贯和培训工作，确保员工了解标准的内容和要求，掌握标准的执行方法。一是组织开展专题培训讲座，邀请标准化专家或企业内部业务骨干对标准进行详细解读；二是制作标准宣传手册、培训视频等资料，方便员工学习和查阅；三是在企业内部宣传栏、网站等平台发布标准相关信息，营造全员参与标准化建设的良好氛围^[6]。同时，针对不同岗位、不同层次的员工，制定个性化的培训方案，提高培训的针对性和实效性。

7.引入信息化技术，提升建设效率：利用信息化技术手段，搭建企业标准化管理信息平台。通过该平台实现标准的在线制定、发布、查询、下载以及版本更新等功能，提高标准管理的效

率和便捷性。同时，将标准体系与企业的生产管理系统、质量管理系统、供应链管理系统等进行集成，实现标准在企业生产经营活动中的自动推送和应用，确保标准能够得到有效执行。此外，借助信息化技术对标准执行情况进行实时监控和数据分析，为标准体系的持续改进提供数据支持。

六、实施与改进

在标准体系实施期间，至关重要的环节是采取有效的管理措施。首要任务是制定详尽的实施计划，明确各部门及岗位人员在标准实施过程中的职责与任务，并将标准实施工作细化为具体步骤，明确各时间节点，以确保各项工作的有序进行。持续质量改进的核心在于问题的评价与确认。企业内部应开展自我评价，定期进行全面检查以评估标准体系的运行状况。通过文件审查、现场访谈等多种方式，广泛收集员工意见，搜集可行性建议，进而对标准的充分性、有效性及适宜性进行综合评价^[7]。

七、结语

企业标准体系建设是企业实现规范化管理、提升核心竞争力的重要途径^[8]。面对当前企业标准体系建设中存在的问题，企业应充分认识标准体系建设的重要性，以科学的方法和有效的途径，构建完善的企业标准体系。通过加强战略规划、建立健全组织架构、科学制定和完善标准、强化标准宣贯与执行监督、引入信息化技术以及加强外部合作与交流等措施，不断提升企业标准体系建设水平，为企业的可持续发展提供有力支撑。未来，随着经济社会的发展和技术的不断进步，企业标准体系也需要持续优化和创新，以适应不断变化的市场环境和企业发展需求。`

参考文献

- [1] 刘慧君, 赵峰, 王志超, 等. 煤化工企业标准体系建设实践与效果评价分析 [J]. 中国标准化, 2023, 66(3): 127-130.
- [2] 陈悦, 吴晶, 曹悦, 等. 企业管理培训技术标准体系构建初探 [J]. 标准科学, 2024, 61(1): 131-135.
- [3] 吴越, 谢珍珠, 黄立新. 淀粉糖行业标准体系的建设及其探讨研究 [J]. 中国标准化, 2024, 67(17): 131-138.
- [4] 马龙. 铁路企业节能低碳标准体系框架研究 [J]. 中国铁路, 2024, 63(4): 125-129.
- [5] 肖伟, 郭君, 何铭. 烟草商业企业标准化建设实施路径探究 [J]. 中国市场, 2025, 32(11): 67-70.
- [6] 白帆, 康华. 企业标准体系建设对提升核心竞争力的影响 [J]. 中国标准化, 2024, 67(11): 156-160.
- [7] 刘从帅, 张凤艳, 李京龙. 食品生产企业标准体系建设现状及优化策略 [J]. 中国标准化, 2023, 66(2): 105-107.
- [8] 刁冠勋. 电力企业数字化转型的标准化体系建设 [J]. 中国标准化, 2023, 66(22): 69-71.

岩土工程中的环境地质问题与治理措施

朱海荣

江苏省地质局第三地质大队，江苏 镇江 212000

DOI:10.61369/ME.2025120024

摘 要： 岩土工程作为土木工程的重要组成部分，涉及地质、水文、土壤、岩石等多个领域，其施工与治理过程中不可避免地会遇到各种环境地质问题。本文旨在探讨岩土工程中常见的环境地质问题，如滑坡、泥石流、地面沉降、地下水污染等，并提出相应的治理措施，以保障工程的安全性和环境的可持续性。

关 键 词： 岩土工程；环境地质问题；治理措施；地质灾害；可持续发展

Environmental Geology Problems and Control Measures in Geotechnical Engineering

Zhu Hairong

The Third Geological Brigade of Jiangsu Provincial Bureau of Geology, Zhenjiang, Jiangsu 212000

Abstract： As a vital component of civil engineering, geotechnical engineering encompasses multiple disciplines including geology, hydrology, soil science, and rock engineering. During construction and remediation processes, various environmental geological challenges are inevitably encountered. This paper investigates common geotechnical environmental issues such as landslides, debris flows, ground subsidence, and groundwater contamination, and proposes corresponding remediation measures to ensure both engineering safety and environmental sustainability.

Keywords： geotechnical engineering; environmental geological issues; remediation measures; geological hazards; sustainable development

引言

随着城市化进程的加快，岩土工程建设日益增多，如高层建筑、道路桥梁、地下隧道等。然而，这些工程的建设往往会对地质环境造成一定影响，甚至引发地质灾害。因此，深入研究岩土工程中的环境地质问题及其治理措施，对于保障工程安全、保护生态环境具有重要意义。

一、土工程中常见的环境地质问题

（一）滑坡

滑坡，作为一种常见的环境地质问题，对岩土工程的稳定性和安全性构成严重威胁。滑坡通常发生在地表斜坡，特别是那些地质结构复杂、岩土体性质不均、受水力作用显著的区域。首先，在地质结构复杂的区域，如断层带、褶皱区，以及存在软弱夹层、节理发育的岩石地带，岩土体的稳定性往往较差。这些地质特征为滑坡的发生提供了潜在的滑动面和剪切破坏的条件。特别是在层状结构的松散土体中，由于各层之间的粘结力较弱，当受到外力作用时，容易发生层间滑动，进而引发整体滑坡。其次，降雨，尤其是强降雨或持续降雨，会导致岩土体饱和软化，降低其抗剪强度，使得原本稳定的斜坡变得不稳定。此外，地下水位的变化也会引起岩土体中应力的重新分布。当地下水位上升时，水对岩土体的浮力作用增加，同时孔隙水压力增大，导致岩

土体有效应力减小，从而降低了斜坡的稳定性^[1]。相反，地下水位骤降则可能引起岩土体内部应力调整，同样可能诱发滑坡。再者，随着人类活动的不断加剧，不合理的开矿、采石、堆填和建设等活动日益增多。这些活动往往改变了斜坡的原始应力状态，破坏了岩土体的自然平衡。此外，建设过程中的爆破、振动等作业也可能对斜坡稳定性造成不利影响。

（二）泥石流

泥石流，作为一种突发性的自然灾害，泥石流以其迅猛的速度和巨大的冲击力，能够瞬间冲毁道路、桥梁等交通设施，摧毁村庄，甚至引发连锁性的次生灾害，如洪水，对人民群众的生命财产安全构成极大威胁。首先，在地质构造复杂的山区，地表物质往往较为松散，易于被水力冲蚀。这些松散物质在重力作用下，一旦遭遇水力作用，便可能迅速转化为泥石流。同时，频繁的地震活动也是泥石流发生的重要诱因。地震不仅能使岩体破碎，增加松散物质的来源，还可能改变地形地貌，为泥石流的形

成提供有利条件。其次，在短时间内，大量的降水迅速侵入土壤，导致孔隙水压力急剧增大，地表物质的稳定性随之降低。当这种不稳定性达到一定程度时，便可能触发泥石流的发生。此外，降雨还能通过冲刷、浸泡等方式，进一步削弱坡面的稳定性，为泥石流的形成提供助力。再者，开矿、筑路等工程建设活动，往往需要对山体进行开挖、爆破等作业，这些活动不仅破坏了山体的自然结构，还增加了松散物质的来源。同时，过度砍伐森林等植被破坏行为，也大大降低了坡面的稳定性，使得泥石流的发生概率显著增加。

（三）地面沉降

地面沉降，这一岩土工程领域中的环境地质问题，正悄然威胁着城市的基础设施安全、建筑物稳定性以及生态环境的和谐。首先，在人口密集、工业发达的地区，为了满足日益增长的用水需求，长期且大量的地下水抽取活动屡见不鲜。然而，这种无节制的开采行为，直接导致了地下含水层水压的显著下降。随着水压的降低，土体中的孔隙水逐渐排出，土体发生固结，地基土体随之压缩，最终引发地面沉降。这一过程不仅损害了地基的承载能力，还可能导致建筑物开裂、道路塌陷等一系列安全问题。其次，在自然界中，地基土层往往呈现出复杂多变的特性，如软弱地层、古河道或溶洞等的存在，使得地基在承受荷载时容易产生不均匀沉降。这种不均匀沉降不仅会导致建筑物倾斜、开裂，还可能破坏地下管线，影响城市的正常运行。再者，在岩溶发育的地区，地下水对岩石的溶蚀作用会导致地基强度的降低，进而引发地面塌陷等灾害。这种塌陷往往具有突发性，对人民生命财产安全构成极大威胁。此外，随着城市化进程的加快，建设活动日益频繁，如大型建筑施工、地下空间开发以及重型设备的使用等。这些活动在对地基产生额外压力的同时，也加速了地面沉降的进程^[2]。

（四）地下水污染

地下水污染，作为岩土工程中一个亟待解决的环境地质问题，其根源深植于人类活动的多个领域，对水体质量、自然生态系统乃至人类健康构成了直接且深远的威胁。首先，化工、冶金、造纸等重工业领域，在生产过程中产生的大量废水，若未经严格处理便直接排放或渗漏至地下，将带入重金属、有机污染物、酸碱等有毒有害物质。这些物质在地下水中难以自然降解，长期积累下，将严重污染地下水体，威胁其作为饮用水源和灌溉水源的安全性。其次，农药和化肥的过量施用，以及畜牧业废弃物的处理不当，都会导致地下水中硝酸盐、农药残留等污染物的含量超标。这些污染物不仅影响地下水的化学性质，还可能通过食物链传递，对人类健康造成潜在风险。再者，生活垃圾的填埋处理，虽然在一定程度上缓解了城市垃圾处理的压力，但填埋场产生的渗滤液若未得到有效控制，同样会渗透至地下水，带来污染。此外，石油和天然气开采过程中的废水排放和气体泄漏，也是地下水污染的重要途径。这些活动中产生的有害物质，如石油烃类、硫化物等，一旦进入地下水系统，将对其造成长期且难以治理的污染。

二、岩土工程中的环境地质治理措施

（一）地质勘察与评估

在岩土工程的环境地质治理中，地质勘察与评估作为初始阶段的关键环节，扮演着至关重要的角色。首先，通过地质测绘、钻探和地球物理探测等手段，获取地层结构、地质构造、岩土性质等基本信息。地质结构的复杂性、稳定性以及岩土体的物理力学特性，直接影响工程的稳定性与安全性。其次，地下水是影响岩土工程稳定性的重要因素，其分布、运动规律和水质状况的分析至关重要。通过水文地质钻探、水质监测和地下水动力学模型，可以预测地下水对工程的潜在影响，如地下水位变化引发的地面沉降或地基失稳。再者，识别可能的环境地质问题，如滑坡、泥石流、地面沉降和地下水污染等，并评估其发生概率和潜在影响。这需要综合地质、气候、地貌、人为活动等多种因素，借助概率统计模型、GIS技术等工具，进行风险量化分析。同时，考虑工程对周边生态环境的影响，如土壤侵蚀、生物多样性保护和生态服务功能的维持。通过生态学调查和生态价值评估，为工程设计提供生态兼容性的建议^[3]。

（二）边坡治理

边坡治理是岩土工程中环境地质问题治理中的重要分支，尤其在山区和地形复杂的地区，其稳定与否直接影响着工程的可靠性及周边环境的安全。在边坡治理中，首先进行的是详细地质调查和稳定性分析。这包括对边坡的岩土性质、地质构造、地下水状况、植被覆盖等进行深入研究，以及对潜在的滑坡、岩崩等风险进行评估。借助遥感、地质雷达、地球物理探测等技术，可以准确识别边坡潜在的危险区域，并通过物理力学模型来预测边坡的稳定性，为治理决策提供科学依据。其次，预防性措施着重于在设计阶段就避免在高风险区域进行工程活动，通过合理的路线选择、坡面整理和植被恢复等手段，降低边坡的滑动可能性。修复性措施则针对已经发生的边坡问题，如支护结构（如挡土墙、锚索）、排水系统（如排水沟、排水井）的建设，以及土壤和植被的恢复，旨在恢复边坡的稳定性和生态功能。再者，通过实时监测系统，如地面位移监测、雷达监测和无人机航拍，可以对边坡状态进行持续跟踪，及时识别出可能的问题并采取应对措施^[4]。此外，通过数据分析和模型预测，可以对边坡的长期稳定性进行评估，并据此调整管理策略，确保工程的长期安全。此外，三维激光扫描和无人机摄影测量技术提供了高精度的地形信息，有助于更准确地计算边坡稳定性。智能监测系统则可以实时反馈边坡状态，确保快速响应潜在的危险。

（三）地下水治理

地下水治理关注的是如何保护和恢复地下水资源，以确保其质量和可用性，同时减少对环境的负面影响。首先，地下水质量的保护是地下水治理的基本任务。这涉及对污染物的源头管理，如工业废水、农业化学物质和城市生活污水的处理和排放，以减少对地下水的直接污染。制定严格的环境法规和执行标准是控制污染源的关键，同时推广清洁生产技术，鼓励废物的回收和资源化利用，可以降低污染物的产生。其次，通过设置地下水质量监

测站点，定期进行水质分析，并结合地下水动力学模型，可以实时了解地下水的动态变化，及时发现潜在的污染问题，为治理决策提供科学依据。此外，遥感技术和GIS的应用能够实现大面积地下水质量的动态监测，提高预警的精度和效率。再者，对于已受污染的地下水，可以采用物理、化学或者生物的方法进行修复。物理方法如泵抽出、蒸汽浸提等可以去除污染物；化学方法如化学氧化、沉淀和吸附利用化学反应来中和或去除污染物；生物方法如生物降解利用微生物活性来分解污染物，这些技术的选择取决于污染物的性质和地下水的特性^[5]。此外，通过科学的水资源管理，平衡开采与补给，控制地下水位，防止过度开采导致的地面沉降和水质恶化。

（四）环境保护措施

在岩土工程中，环境保护措施旨在减少工程对地质环境的不良影响，预防和治理环境地质问题，同时促进生态系统的恢复与保护。首先，绿色建材的选择与使用通常具有低能耗、低排放、可再生或可回收的特性，如使用再生骨料的混凝土、低能耗的玻璃以及天然的木材。通过选用绿色建材，可以显著降低工程对自然资源的消耗，减少碳排放，并在一定程度上降低对地质环境的破坏。此外，绿色建材的使用也有助于提高建筑物的能效，降低运行期间的环境影响。其次，针对地质灾害、土壤侵蚀和地下水污染等问题，生态修复旨在恢复地质环境的稳定性和生态系统的健康。这些技术包括土壤改良、植被恢复、生态廊道建设以及湿地恢复等。例如，通过植被恢复，可以增强土壤的固结力，减少地表径流，降低滑坡和泥石流的风险；湿地恢复则能够改善水质，提供生物栖息地，同时调节洪水，减少对工程的威胁。生态修复技术的运用，旨在使工程与自然环境更加协调，实现工程效益与生态效益的双赢。再者，通过建筑信息模型（BIM）及智能建筑控制系统，可以实现能源的高效利用和资源优化管理。BIM技术能够提供建筑物全生命周期内的精确信息，优化设计，降低材料浪费；智能建筑控制系统则可以实时监控和调节建筑的能源使用，如照明、空调和加热，从而节约能源，降低碳排放。

（五）应急预案制定

应急预案制定旨在提高工程对突发地质灾害的响应能力和减

轻灾害影响。首先，通过综合分析地质结构、地下水状况、生态环境以及潜在的人为影响，识别可能引发地质灾害的因素。风险评估则进一步量化这些因素对岩土工程的影响程度和发生的概率，为应急预案的针对性提供科学依据。这一过程通常借助地理信息系统（GIS）和概率统计模型，结合历史灾害数据和专家意见，以确保评估结果的准确性和可靠性^[6]。其次，在识别和评估风险的基础上，设计应急响应策略是预案制定的核心。这些策略应覆盖预警机制、人员疏散、应急救援、资源调配、通信保障等多个方面。预警机制需建立在实时监测系统的基础上，能够迅速检测到地质灾害的早期迹象，及时向相关人员发出警报。人员疏散计划应明确疏散路线、集中点和安全区，确保人员能够迅速、有序地撤离危险区域。应急救援预案需预先规划救援队伍的组成、救援物资的准备和救援行动的流程，以提高救援效率。资源调配和通信保障计划则确保在灾害发生时，能够快速调动所需资源，并保持通信畅通，促进应急响应的协调和高效。再者，定期组织预案演练，模拟不同类型的地质灾害情景，检验应急响应的准备度和有效性，是确保预案实际可用性的关键。演练应包括预案的启动、信息传递、人员协调、资源调度等各个环节，通过模拟演练，发现问题并及时调整预案，提高应急响应的效率和应对能力。此外，预案应根据工程进展、地质环境变化和最新科研成果进行定期更新，确保其持续适应性和有效性。

三、结束语

岩土工程中的环境地质问题是影响工程安全和环境保护的重要因素。通过深入研究这些问题的成因和危害性，并采取相应的治理措施，可以有效地提高工程的安全性和环境的可持续性。未来，随着科技的不断进步和环保意识的不断提高，岩土工程中的环境地质问题与治理措施将得到更加深入的研究和应用，为土木工程的发展和环境保护做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 王新蓉. 复杂地质条件下岩土工程勘察技术的运用 [J]. 住宅与房地产, 2020(36): 214-215.
- [2] 陈柏成. 关于岩土工程勘察中质量技术问题探讨 [J]. 西部资源, 2021(2): 104-105, 108.
- [3] 谭友根, 刘智辉, 吕小毛. 岩土工程勘察常见质量问题分析及应对措施探讨 [J]. 核标准计量与质量, 2020(S1): 66-70.
- [4] 马志文. 探讨矿山地质环境恢复治理中岩土工程勘察的作用 [J]. 世界有色金属, 2024(4): 143-145.
- [5] 王志强. 岩土工程地质灾害的成因及防治措施探讨 [J]. 华东科技 (综合), 2020(10): 135-135.
- [6] 方楚城. 论岩土工程地质灾害及其防治措施 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(10): 31-33.

林业领域技术管理助力项目管理的创新路径研究

韩东游

广东 东莞 523590

DOI:10.61369/ME. 2025120034

摘 要： 本文阐述林业技术管理的理论基础，探讨其与项目管理的互动机制及创新影响。分析林业技术应用面临的特殊约束，提出建设数字化管理平台、标准化体系，构建人才梯队与多主体协同创新机制。通过实例介绍技术集成应用与创新模式，设计多维评价体系，提出区域推广路径及政策扶持与防控机制，强调其对林业项目管理创新的意义。

关 键 词： 林业项目管理；技术创新；多维评价

Research on the Innovative Path of Forestry Technology Management to Assist Project Management

Han Dongyou

Dongguan, Guangdong 523590

Abstract： This article elaborates on the theoretical basis of forestry technology management, explores its interactive mechanism with project management, and discusses its innovative impact. Analyze the special constraints faced by forestry technology applications, propose the construction of a digital management platform and standardized system, and establish a talent pool and multi-party collaborative innovation mechanism. By using examples to introduce technology integration applications and innovation models, design a multidimensional evaluation system, propose regional promotion paths and policy support and prevention mechanisms, and emphasize their significance for innovative forestry project management.

Keywords： forestry project management; technological innovation; multidimensional evaluation

引言

2021 年，国家林业和草原局颁布《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》，强调要加强林业科技创新，推动林业高质量发展。在此背景下，林业技术管理作为综合性学科，其理论基础融合多学科知识，与项目管理相互促进。技术管理创新影响项目管理，然而林业领域特殊约束给技术应用带来挑战。因此，需通过建设数字化管理平台、制定技术标准、培养复合型人才等举措突破困境。同时，构建多主体协同创新机制，在不同项目中进行技术应用实践，设计多维评价体系评估效果，依区域特征推广创新模式，以实现林业项目管理创新与可持续发展。

一、林业技术管理与项目管理的关系解析

（一）林业技术管理的理论基础

林业技术管理作为一门综合性学科，其理论基础涵盖多方面。从技术层面，它融合了林学、生态学、地理学等多学科知识，为林业项目提供专业技术支撑。如在森林资源培育中，依据树木生长特性、土壤条件等理论来规划种植方案^[1]。从管理角度，借鉴管理学原理，像目标管理、过程控制等，确保林业技术得以有效实施，保障项目按预定计划推进。而智能化技术相关理论，如遥感技术、GIS系统的原理及应用理论，拓展了林业技术管理的手段与范围，让林业项目能实现精准监测、高效规划与科学决策。这些理论相互交织，共同构成林业技术管理的理论基石，

为其在林业项目管理中的应用与创新奠定坚实基础。

（二）项目管理与林业技术的互动机制

在林业领域，项目管理与林业技术存在紧密的互动机制。一方面，林业技术为项目管理提供了具体实施手段和关键支撑。在种植培育环节，先进的种苗培育技术、造林技术等，决定着项目能否有效达成预期的种植目标，影响项目的质量与进度^[2]。资源监控环节中，地理信息系统、遥感等技术助力管理者实时掌握资源动态，为项目决策提供数据依据。另一方面，项目管理对林业技术起到引导与整合作用。项目管理明确了技术应用的目标和范围，促使不同林业技术围绕项目需求进行合理配置与协同运用。通过项目管理的规划与协调，各项林业技术在种植培育、资源监控等环节得以有机融合，发挥出更大的协同效应，推动林业项目

高效开展，实现两者相互促进、共同发展，为林业领域的创新发展奠定基础。

二、林业技术管理对项目管理的影响分析

（一）技术管理创新带来的积极影响

林业技术管理创新为项目管理带来诸多积极影响。以物联网监测技术为例，其能够实时收集林区数据，如温湿度、土壤养分、林木生长状况等。借助这些精准数据，项目管理者可及时掌握项目进展，当出现与计划偏差时能迅速调整，极大提升对项目进度的精准控制能力，避免延误，确保项目按计划推进^[3]。大数据分析技术则从另一个层面发挥作用，它对海量的林业相关数据进行深度挖掘和分析，比如市场需求、资源分布、灾害风险等。通过这种分析，为林业项目决策提供科学依据，帮助管理者在项目规划、资源配置、风险应对等方面做出更明智的决策，推动林业项目决策朝着科学化方向发展，提高项目的整体效益和成功率。

（二）林业领域特殊约束下的技术应用挑战

林业领域存在诸多特殊约束，给技术应用带来显著挑战。复杂地形环境是一大难点，林业项目常处于山地、丘陵等复杂地貌区域，这要求技术具备高度适配性。例如，在陡峭山地开展造林作业，传统的大型机械设备难以施展，需研发轻便、灵活且适应山地条件的小型造林工具及技术。而林区作业场景中技术维护更新也困难重重。林区地理位置偏远，交通不便，技术设备的维修保养物资运输成本高且耗时久，影响技术的正常应用。同时，专业技术人员稀缺，对新技术的接受和应用能力有限，进一步阻碍技术更新。因此，如何突破这些特殊约束，实现技术在林业领域的有效应用，成为林业项目管理亟需解决的关键问题^[4]。

三、林业项目管理技术创新路径研究

（一）系统机制创新路径

1. 林业项目数字化管理平台建设

林业项目数字化管理平台建设需设计集资源监测、灾害预警于一体的智慧林业管理系统框架^[5]。借助现代信息技术，整合森林资源数据，涵盖林木种类、数量、分布等信息，实现对林业资源全方位、动态化监测。运用遥感、地理信息系统等技术，精准掌握资源变化情况。同时，构建灾害预警模块，结合气象数据、地形地貌等多源信息，利用大数据分析 with 人工智能算法，提前预测森林火灾、病虫害等灾害发生的可能性及趋势。通过此平台，将资源监测与灾害预警有机结合，为林业项目决策提供科学依据，提升管理效率与精准度，助力林业项目实现科学、高效管理。

2. 技术标准化体系建设

林业项目管理的技术标准化体系建设，关键在于制定适应不同林区的无人机巡护、生态修复技术应用标准规范。不同林区在地理环境、植被类型、生态状况等方面存在差异，这就要求标准规范具有针对性。以无人机巡护为例，需依据林区地形地貌确定飞行高度、速度、航线规划标准，根据林种、林龄等制定监测指

标与精度要求。生态修复技术应用标准规范方面，针对不同受损程度与生态系统类型，明确适用的修复技术，如植被恢复技术的物种选择、种植密度等标准。通过制定这些标准规范，不仅能提升林业项目管理的科学性与精准性，还可促进技术的广泛应用与推广，实现林业资源的有效管理与可持续发展^[6]。

（二）策略保障创新路径

1. 复合型技术人才培养机制

在林业项目管理中，复合型技术人才至关重要。要构建以林业技术与项目管理双能力为导向的人才梯队建设方案^[7]。一方面，加强高校相关专业课程改革，将林业技术课程与项目管理课程深度融合，使学生在校就能系统学习这两方面知识。另一方面，对于在职人员，企业或相关机构应定期组织针对性培训，邀请林业技术专家与项目管理专家授课，分享最新技术成果与管理经验。同时，建立激励机制，鼓励人才参与实践项目，在实际操作中提升综合能力。此外，搭建人才交流平台，促进不同地区、不同项目间人才的沟通与学习，加速知识流通与经验分享，从而打造一支既精通林业技术又擅长项目管理的复合型人才队伍，为林业项目管理技术创新提供坚实的人力支撑。

2. 多主体协同创新机制

在林业项目管理技术创新中，多主体协同创新机制至关重要。建立科研院所－林业企业－政府部门的成果转化示范基地运作模式，能有效整合各方资源与优势。科研院所拥有前沿的林业技术研发能力，可提供创新技术成果；林业企业则具备实践场地与应用转化的条件，能将科研成果投入实际生产；政府部门可在政策制定、资金支持及协调各方关系上发挥关键作用。通过这种模式，促进科研成果快速转化为实际生产力，实现技术从理论到实践的有效对接，推动林业项目管理技术创新。例如，各方在示范基地内共同开展新技术试验、推广，提升林业生产效率与质量，形成多主体协同发展的良好局面，共同为林业项目管理技术创新提供有力支撑^[8]。

四、林业项目管理创新实践与效果评估

（一）典型林业项目管理创新案例研究

1. 案例一：某省森林抚育项目技术集成应用

某省在森林抚育项目中积极推进技术集成应用。一方面，整合先进的监测技术，利用无人机遥感与地面传感器网络，精准获取森林资源数据，包括林木生长状况、病虫害分布等，为抚育决策提供科学依据。另一方面，引入智能作业设备，如自动化修枝机、精准施肥灌溉系统，提升抚育作业效率与质量。通过这些技术集成，该省森林抚育项目显著提高了资源管理的精准性与作业的高效性。森林生长指标改善明显，病虫害发生率降低。然而，技术集成应用也面临一些问题，如不同技术系统间的数据兼容性挑战，增加了数据整合与分析难度；智能设备购置与维护成本较高，对项目资金形成一定压力^[9]。

2. 案例二：自然保护区生态修复项目管理

在自然保护区生态修复项目管理中，卫星遥感技术展现出独

特的创新应用模式。通过卫星遥感，能够对生态修复区域进行大面积、周期性监测，获取植被覆盖度、土地利用变化等关键信息。其高分辨率影像可精确识别植被种类与分布变化，为评估修复效果提供直观依据。利用多光谱遥感数据，分析不同时期生态指标，构建动态评估模型，实时掌握生态修复进程及效果演变。这种创新应用模式，打破传统人工评估的局限性，实现高效、准确的动态评估，为自然保护区生态修复项目的科学决策与调整提供有力支持，显著提升项目管理效率与质量，助力生态修复目标的达成^[10]。

（二）技术创新应用效果评价体系构建

1. 多维效果评价指标体系设计

多维效果评价指标体系设计涵盖多个重要方面。从生态效益维度看，可纳入森林覆盖率提升比例、生物多样性丰富程度等指标，以此衡量技术创新对生态环境的改善作用。管理效率维度，选取项目工期缩短率、资源利用率等指标，评估技术应用是否优化了管理流程，提升资源配置效率。经济效益维度，设置投资回报率、成本降低率等指标，反映技术创新为项目带来的经济收益。同时，考虑社会效益维度，采用就业带动人数、社会满意度等指标，考量技术创新对社会产生的积极影响。通过多维度指标设计，全面、科学地构建多维效果评价指标体系，准确评估林业项目技术创新应用效果。

2. 实证评估与优化建议

运用模糊综合评价法对典型林业项目进行量化分析时，先确定评价指标，如技术应用的成效、对生态环境的影响、经济效益提升等方面。通过专家打分等方式确定各指标权重，再收集数据进行模糊综合运算，得出对技术创新应用效果的量化评价结果。基于此实证评估结果，提出优化建议。若技术应用虽提高了生产效率，但对生态环境有潜在威胁，可建议优化技术流程，增加生态保护措施；若经济效益提升不明显，可建议调整技术推广策略，降低成本，提高产品附加值，以进一步提升技术创新在林业项目管理中的应用效果，助力林业项目管理创新发展。

（三）林业项目管理创新模式推广策略

1. 区域差异化推广路径设计

区域差异化推广路径设计需充分考虑不同林区的类型特征。

对于生态脆弱但物种丰富的林区，优先推广有助于生态修复与物种保护的技术，如精准造林技术、珍稀物种保育技术，通过建立生态保护区示范项目，吸引周边关注与效仿。经济林为主的区域，侧重于推广能提升林果产量与质量的技术，像高效施肥灌溉技术、病虫害绿色防控技术，借助举办技术培训班、现场示范等方式，让林农切实看到成效。而对于偏远、交通不便林区，先解决技术应用的基础条件，如搭建简易通讯设施以保障技术指导沟通顺畅，再推广操作简便、易上手的技术，如便携式林业监测设备使用技术，逐步提高林区整体技术应用水平，实现林业项目管理创新模式在不同区域的有效落地。

2. 政策扶持与风险防控机制

在林业项目管理创新模式推广进程中，政策扶持与风险防控机制至关重要。一方面，建立技术创新成果转化应用的财政补贴制度，能有效激励企业与科研机构积极参与。政府可对采用新技术并成功转化为实际生产力的林业项目给予直接资金补贴，或提供税收优惠，降低其创新成本，提高创新积极性。另一方面，完善知识产权保护措施，为创新成果保驾护航。通过严格的法律法规，防止技术被非法抄袭、盗用，保障创新主体的合法权益，使他们愿意毫无顾虑地推广新技术。如此，在政策扶持与风险防控机制双轮驱动下，林业项目管理创新模式才能得以顺利推广，促进林业领域的可持续发展。

五、总结

综上所述，在林业领域，技术管理对项目管理创新意义重大。通过提炼关键路径，明确了从技术应用优化、流程整合等方面推动项目管理模式创新的具体方式。这一研究成果不仅为当下林业项目管理提供了创新思路，更对推进智慧林业建设具有切实的实践价值，助力林业产业向智能化、高效化迈进。展望未来，5G、数字孪生等新技术与林业项目管理的融合应用前景广阔。5G的高速通信能力可实现实时数据传输，提升管理效率；数字孪生技术则能构建虚拟模型，辅助精准决策。这些新技术的融入将进一步革新林业项目管理模式，推动林业领域的可持续发展。

参考文献

- [1] 曾成. FDI企业技术创新对区域创新路径的影响研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 于朝阳. 物流车辆管理和调度优化问题研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [3] 杨雯雯. 基于创新基因理论的技术创新路径应用研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [4] 陈嘉坤. 助力高新技术企业技术创新的税收营商环境优化研究 [D]. 江西财经大学, 2022.
- [5] 雷波. 技术创新和制度创新组合驱动工业数字化的路径及其演变研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [6] 杨余伟. 浅析现代林业领域技术创新与发展 [J]. 中外交流, 2021, 28(3): 56.
- [7] 艾亚玲. 林业技术管理创新工作探析 [J]. 南方农业, 2022, 16(14): 65-67.
- [8] 梁星星. 林业科技期刊编辑能力提升路径探索与创新 [J]. 编辑学报, 2023, 35(S02): 41-45.
- [9] 高亚瑞, 马绍华. 企业技术创新项目投资风险管理的优化路径 [J]. 科技经济市场, 2022(8): 76-78.
- [10] 赵静. 助力应用型创新人才递进式成长的教学模式 [J]. 科教导刊, 2021(14): 22-24.

多机器人协同作业系统在汽车制造中的关键技术研究

李云鹤

大众汽车（安徽）有限公司，安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/ME.2025120005

摘 要： 本文围绕汽车制造多机器人协同作业系统展开，涵盖总体设计、模块化功能系统构建、多目标优化控制等内容。介绍视觉 - 力觉融合定位等技术，阐述数字孪生系统实现路径、异构设备通讯协议转换等要点，还提及预测性维护等体系建设，实际应用成效显著，对汽车制造智能化发展意义重大。

关 键 词： 多机器人协同作业系统；汽车制造；数字孪生

Research on Key Technologies of Multi Robot Cooperative Operation System in Automobile Manufacturing

Li Yunhe

Volkswagen (Anhui) Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000

Abstract： This paper focuses on the automobile manufacturing multi robot cooperative operation system, covering the overall design, modular function system construction, multi-objective optimization control and so on. This paper introduces the technology of vision force integration positioning, expounds the key points such as the realization path of digital twin system and the conversion of heterogeneous device communication protocol, and also mentions the system construction such as predictive maintenance, which has achieved remarkable results in practical application and is of great significance to the development of intelligent automobile manufacturing.

Keywords： multi robot cooperative operation system; automobile manufacturing; digital twins

引言

《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》明确提出要提升新能源汽车智能制造水平，推动汽车产业转型升级。在此政策导向下，汽车制造领域的多机器人协同作业系统研究至关重要。该系统需构建全面的作业体系，考虑工艺特点与需求，合理布局工作站并匹配生产节拍。要搭建模块化功能系统，实现设备互联与高效通信，开发核心算法库提升作业效率与安全性。还应运用多目标优化控制技术兼顾生产效率与能耗，集成视觉 - 力觉融合定位技术满足焊接精度要求，通过数字孪生、协议转换、边缘计算等实现高效运行与监控，建设预测性维护、能效监控优化等体系提升设备管理与能源利用效率，集成 MES 系统与构建质量追溯系统优化生产流程与提升产品质量，从而推动汽车制造向智能化、高效化发展。

一、多机器人系统架构设计

（一）汽车制造场景的总体设计

在汽车制造场景下进行多机器人系统架构的总体设计，需构建一个全面覆盖装配、焊接、涂装这三大关键工艺的多机器人作业体系。此体系的构建，要充分考虑各工艺环节的特点与需求，确保机器人之间协同作业的高效性与准确性。明确工作站布局时，应依据汽车制造流程，合理规划各机器人工作站的位置，以实现物料流转的顺畅与高效^[1]。同时，生产节拍匹配原则至关重要，需精准测算每个工艺环节的作业时间，使各机器人的工作节奏协调一致，避免出现等待或积压的情况，从而提升整个汽车制造生产线的生产效率，满足大规模、高质量的汽车生产需求。

（二）模块化功能系统构建

多机器人系统架构设计的模块化功能系统构建，需紧密围绕汽车制造场景展开。设计基于 OPC UA 的设备互联框架，实现多机器人及相关设备间的高效、稳定通信^[2]。该框架能打通机器人与各类生产设备的数据交互通道，确保信息实时流通。同时，开发核心算法库，其中任务分配算法根据汽车制造任务特点与机器人性能，合理分配工作任务，提升整体作业效率；碰撞规避算法通过实时监测机器人位置与运动状态，动态规划路径，防止机器人在作业过程中发生碰撞，保障生产安全；工艺补偿算法依据汽车制造工艺标准，对机器人作业偏差进行精准补偿，提高产品制造精度。这些模块化功能系统相互协作，共同支撑多机器人在汽车制造中的协同作业。

二、协同作业关键技术研究

（一）多目标优化控制技术

多目标优化控制技术聚焦于在汽车制造多机器人协同作业场景下，同时兼顾多个相互冲突的目标。研发基于动态优先级调度的任务分配模型，旨在依据任务的紧急程度、复杂程度以及机器人的当前状态等动态因素，合理分配任务，提升任务执行效率。而建立设备利用率与能耗比综合评价指标体系，是为全面评估机器人在执行任务过程中的资源利用情况。设备利用率关乎生产效率，能耗比则影响生产成本，两者相互关联又彼此制约。通过此综合评价指标体系，可实现对机器人作业过程的精准调控，以达到提高设备利用率、降低能耗的双重目标，确保多机器人协同作业系统在汽车制造中能更高效、更节能地运行^[3]。

（二）视觉-力觉融合定位技术

在汽车制造白车身焊接过程中，毫米级定位精度要求极高。为此，多机器人协同作业系统集成3D视觉引导与六维力觉反馈系统，形成视觉-力觉融合定位技术。3D视觉引导系统能够快速获取白车身的空间位置信息，凭借高分辨率的视觉传感器，精确识别焊接部位的特征点与轮廓^[4]。六维力觉反馈系统则实时感知焊接过程中的力的变化，如焊接枪与工件接触时的压力、摩擦力等。通过将视觉信息与力觉信息进行深度融合，一方面依据视觉信息进行初步定位，另一方面利用力觉反馈实时调整焊接位置，从而确保焊接点精准度，有效满足白车身焊接毫米级定位精度要求，提升焊接质量与效率，保障汽车制造的整体品质。

三、数字孪生系统实现路径

（一）虚实映射建模方法

1. 设备物理实体建模

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，设备物理实体建模至关重要。需建立包含运动学参数、动力学特性及传感器配置的机器人数字模型库。针对运动学参数，精确测量机器人各关节的转动范围、速度、加速度等，为其运动模拟提供准确依据。对于动力学特性，分析机器人在不同负载、运动状态下的受力情况，明确其动力输出与能耗特点。而传感器配置方面，需确定位置传感器、力传感器等的类型、精度及安装位置，以实时反馈机器人作业状态。这些信息共同构成机器人数字模型库，实现物理实体到虚拟模型的准确映射，为多机器人协同作业的优化与监控提供基础^[5]。

2. 制造过程数字孪生

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，虚实映射建模方法下的制造过程数字孪生，借助工艺参数驱动的生产模拟系统来达成。通过精准采集汽车制造过程中的各类数据，包括机器人运行参数、设备状态等，利用这些数据构建制造过程的虚拟模型^[6]。此模型与实际生产过程形成实时映射，能够真实反映实际制造的动态变化。一方面，实现设备状态可视化，操作人员可直观了解设备的运行状况，及时发现潜在问

题；另一方面，借助虚拟调试功能，在虚拟环境中对多机器人协同作业流程进行调试与优化，提前规避实际生产中可能出现的碰撞、干涉等问题，提高生产效率与质量，保障汽车制造过程的高效、稳定运行。

（二）实时数据交互机制

1. 异构设备通讯协议转换

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造时，异构设备通讯协议转换极为关键。研发支持工业以太网与现场总线的协议转换模块是实现这一转换的重要手段。由于汽车制造场景中，各类设备可能采用不同通讯协议，如工业以太网常用于高速数据传输，而现场总线在底层设备控制中广泛应用，协议转换模块要能精准识别并转换不同协议数据^[7]。通过该模块，可将基于工业以太网传输的数据，按照现场总线协议要求重新封装，反之亦然，以此确保不同协议设备间数据的顺畅交互。同时，需保障500ms级数据同步时效，这要求模块具备高效处理能力，快速完成协议转换，减少数据传输与处理延迟，为多机器人协同作业系统的实时数据交互奠定基础，提升汽车制造过程中设备协同的准确性与高效性。

2. 边缘计算节点部署

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的数字孪生系统实现路径中，边缘计算节点部署至关重要。汽车制造车间环境复杂且数据量庞大，需在车间关键位置合理部署边缘计算节点。这些节点靠近数据源，可实时采集多机器人作业数据，如机器人运行状态、操作精度等，以及汽车制造工艺参数等数据。通过在边缘计算节点进行数据的初步处理和分析，过滤掉大量冗余数据，将关键有效数据传输至云端，实现工艺数据本地化处理与云端协同^[8]。如此不仅能降低网络传输压力，还能提高数据处理的实时性，保障多机器人协同作业的高效与精准，助力数字孪生系统更准确地模拟和优化汽车制造过程。

四、智能制造实施成效分析

（一）设备管理数字化提升

1. 预测性维护体系建设

在汽车制造的多机器人协同作业系统中，预测性维护体系建设依托应用深度学习的设备健康度评估模型取得显著成效。通过该模型，能够精准洞察关键部件的运行状况，实现关键部件剩余寿命预测准确率 $\geq 92\%$ 。这一高准确率使得维护人员可提前规划维护工作，避免因关键部件意外故障导致生产线中断，大幅减少了计划外停机时间，有效保障了多机器人协同作业的连续性与稳定性。同时，基于精准的预测，企业能够更合理地安排维护资源，降低不必要的维护成本，提高设备使用效率，从整体上提升汽车制造过程中设备管理的数字化水平，为多机器人协同作业系统在汽车制造领域的高效运行奠定坚实基础^[9]。

2. 能效监控优化方案

通过构建基于数字孪生的能耗仿真系统，多机器人协同作业系统在汽车制造的能效监控优化方面取得显著成效。该系统能够

对生产线的能耗情况进行精准模拟与分析，为节能改造提供有力指导。在实际应用中，借助该系统深入剖析各生产环节的能源消耗状况，挖掘潜在的节能空间，进而有针对性地实施节能改造措施。最终成功实现能耗降低18%，不仅大幅减少了能源浪费，降低了生产成本，还提升了企业的能源利用效率和可持续发展能力^[10]。这一能效监控优化方案，不仅体现了数字孪生技术在汽车制造能耗管理中的重要作用，也为行业内其他企业提供了极具价值的参考范例，推动汽车制造行业朝着绿色、高效的方向发展。

（二）生产数字化平台建设

1. MES系统深度集成

在多机器人协同作业系统应用于汽车制造的过程中，MES系统深度集成于生产数字化平台建设，成效显著。通过将MES系统与多机器人协同作业系统深度融合，实现了数据的无缝流通。一方面，MES系统能实时获取多机器人的运行参数、任务进度等详细信息，为生产计划的精准调整提供依据。另一方面，多机器人依据MES系统传递的生产指令，灵活且高效地执行任务，极大提升了生产效率。例如，在汽车零部件装配环节，MES系统根据订单需求和库存状况，精准调度多机器人协同作业，使装配时间大幅缩短，装配精度显著提高，产品质量得到有力保障。而且，这种深度集成实现了生产过程的透明化管理，便于管理人员及时发现并解决潜在问题，优化生产流程，增强汽车制造企业的市场竞争力。

2. 质量追溯系统构建

在汽车制造中，通过建立覆盖全工艺链的电子履历系统，质量追溯系统构建取得显著成效。该系统详细记录汽车生产过程中每个环节的信息，从零部件的采购、装配到整车下线，所有数据都被精准录入，确保缺陷件可追溯率达100%。这意味着一旦出现质量问题，能够迅速定位问题源头，无论是某个零部件的生产批次，还是具体的装配工位，都能准确查明。不仅有助于快速解决当下的质量问题，还能为后续生产工艺的优化提供关键数据支撑，极大提升了产品质量的可控性，有效减少了因质量问题导致的成本增加和品牌声誉损失，为汽车制造的高质量发展奠定坚实基础。

（三）实际应用效果验证

1. 某主机厂实施案例

在某主机厂的的实际应用中，多机器人协同作业系统展现出显

著成效。该主机厂引入此系统于其柔性生产线后，通过实证数据可直观看到系统带来的积极改变。其中，设备综合效率（OEE）提升了26%，这意味着生产线设备的整体性能得到大幅优化，有效工作时间占比增加，故障停机、生产调整等损失时间减少。同时，换型时间缩短了40%，极大地提升了生产线对不同车型生产切换的灵活性与速度，减少了因换型造成的生产停滞，提高了生产效率。这些实证数据有力验证了多机器人协同作业系统在汽车制造中的卓越应用效果，为汽车主机厂提升智能制造水平提供了可靠的技术支撑。

2. 行业推广应用价值

多机器人协同作业系统在实际应用中，高度适配新能源汽车产线快速重构需求。该系统显著提升了新能源汽车生产的灵活性与效率，能够依据不同车型和生产需求，快速实现机器人作业任务的重新分配与布局，确保产线在复杂多变的市场环境下高效运转。从行业推广应用价值来看，其模块化设计为汽车制造行业提供了通用且便捷的推广策略。通过模块化推广，不同规模和生产类型的汽车制造企业，可按需选取适合的模块进行集成，有效降低新技术引入成本与风险。这不仅有利于推动整个汽车制造行业向智能制造转型，还能促使各企业在激烈竞争中灵活应对市场变化，提升行业整体竞争力。

五、总结

多机器人协同作业系统已成为汽车制造迈向智能化、高效化的关键支撑。在汽车智能制造进程中，该系统实施要点的凝练，为实际应用提供了重要指引。5G-MEC融合技术有望进一步优化多机器人间的通信与协作效率，群体智能算法则能提升机器人协作的自主性与智能性，为系统的发展带来新的契机，这些都是极具潜力的未来研究方向。此外，建立行业标准体系意义重大，它能规范多机器人协同作业系统在汽车制造中的应用，确保不同厂商的设备与技术能够兼容与协同，提升整体产业的竞争力。未来应持续聚焦这些关键领域，推动多机器人协同作业系统在汽车制造中发挥更大效能，助力汽车产业向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 黄瑞. 支持端边云协同的PLC编程环境开发的关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2022.
- [2] 何天英. 高性能金属构件多电弧协同增材制造关键技术研究[D]. 华中科技大学, 2022.
- [3] 陈启鹏. 面向数字孪生的自动化产线制造过程状态监测关键技术研究[D]. 贵州大学, 2021.
- [4] 胡世杰. 基于数字孪生和深度强化学习的虚拟超声机器人关键技术研究[D]. 南昌大学, 2023.
- [5] 鲁济帅. 多弹协同攻击策略关键技术研究[D]. 西安工业大学, 2023.
- [6] 熊继芬, 彭朝晖, 倪炳林. 基于数字孪生技术的汽车智能制造实训基地建设探索[J]. 装备制造技术, 2022, (12): 168-171.
- [7] 姜德涛. 智能机器人数控技术在汽车制造中的应用研究[J]. 内燃机与配件, 2021, (18): 206-207.
- [8] 宋娟. 汽车制造中的铝合金焊接技术研究[J]. 内燃机与配件, 2022, (05): 94-96.
- [9] 刘保瑞. 工业机器人在汽车制造领域的应用分析[J]. 汽车维修技师, 2024, (14): 127-128.
- [10] 梅荣娣. 机器人在汽车制造领域中的应用分析[J]. 时代汽车, 2022, (07): 33-34.

机械工程及自动化视角下木工机械非标结构与机器研发策略

曹嘉荣

广东先达数控机械有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120008

摘 要： 本文从机械工程及自动化视角探讨木工机械非标结构与机器研发。涵盖自动化技术赋能、结构拓扑优化等多方面设计要点，阐述用户需求建模、全生命周期仿真验证等研发策略，通过定制家具、实木雕刻等场景实证研究，强调创新设计与智能研发范式，推动木工机械行业发展。

关 键 词： 木工机械；非标结构；智能研发

Non Standard Structure and Machine Development Strategy of Woodworking Machinery from the Perspective of Mechanical Engineering and Automation

Cao Jiarong

Guangdong Xianda CNC Machinery Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article explores the non-standard structure and machine development of woodworking machinery from the perspective of mechanical engineering and automation. Covering various design points such as automation technology empowerment and structural topology optimization, this paper elaborates on research and development strategies such as user demand modeling and full lifecycle simulation verification. Through empirical research on customized furniture, solid wood carving, and other scenarios, it emphasizes innovative design and intelligent research and development paradigms to promote the development of the woodworking machinery industry.

Keywords： woodworking machinery; non-standard structure; intelligent R&D

引言

随着《智能制造发展规划（2021 - 2025年）》的颁布，木工机械领域的发展迎来新契机。在机械工程及自动化视角下，木工机械非标结构与机器研发至关重要。木材特性决定了非标结构设计需综合考量多方面因素，自动化技术为其赋能。从面向工艺约束的结构拓扑优化，到复合功能集成接口设计，再到用户需求建模与转化等一系列环节，都致力于提升木工机械性能。同时，智能生产驱动下的多种策略及定制家具等领域的实证研究，为研发提供有效策略，推动木工机械行业适应市场需求，实现智能化、现代化发展。

一、木工机械非标结构的理论基础与特征解析

（一）非标结构在木工机械中的定义与分类

在木工机械领域，非标结构指根据木材加工的特殊需求、特定工艺或独特场景，专门设计和制造的非通用性机械结构^[1]。木材具有各向异性、纹理多样、材质不均匀等特性，这决定了木工机械非标结构需充分考虑这些因素。从功能角度分类，有用于精准切割的非标切割结构，可依据木材纹理及切割精度要求，定制刀具排列与传动方式；有实现复杂造型铣削的非标铣削结构，针对不同木质工艺品或家具部件的独特造型设计。按控制方式分，存在基于数控系统精准控制的非标结构，能满足复杂图案和高精度加工；还有依赖传统机械控制，但经优化以适应木材特性的非

标结构。这些分类并非完全独立，实际应用中常相互结合，以满足木工多样化、精细化的加工需求。

（二）自动化技术对非标设计的赋能机制

自动化技术在木工机械非标设计中发挥着关键赋能作用。机电一体化技术将机械与电子系统深度融合，为非标设计提供了智能控制基础。通过嵌入智能传感器与执行器，能精准感知和调整木工机械的运行参数，实现高效生产。运动控制技术则针对木工机械的不同加工动作需求，提供精确的位置、速度与加速度控制，助力非标设计达成复杂运动轨迹规划，满足多样化生产要求。这些自动化技术还能优化非标设计中的系统集成，使各模块间协同工作更加顺畅，极大地提升木工机械的模块化重构能力与功能扩展空间，确保木工机械在面对不同生产任务时，都能凭借

非标设计灵活适应，达成高效、精准的生产目标^[2]。

二、木质加工非标机械结构设计方法论

（一）面向工艺约束的结构拓扑优化策略

在木质加工非标机械结构设计中，面向工艺约束的结构拓扑优化策略至关重要。木材切削力学特性复杂，对机械结构动态刚度有较高要求^[3]。通过研究木材切削力学特性，深入了解加工过程中力的分布与变化，明确结构所受的工艺约束。基于此，运用有限元辅助的参数化设计工具链，对结构进行拓扑优化。借助有限元分析，精确模拟结构在不同工况下的力学响应，在此基础上利用参数化设计灵活调整结构参数，寻求最优拓扑方案，以提升结构动态刚度，满足木质加工工艺需求，实现非标机械结构在工艺约束下的优化设计，提高木工机械的性能与加工质量。

（二）复合功能集成接口设计准则

在木质加工非标机械结构设计中，复合功能集成接口设计至关重要。需提出多工序复合加工中心模块接口的误差累积控制算法和标准化连接规范^[4]。误差累积会严重影响设备加工精度与稳定性，因此要精确分析各模块接口在运行过程中误差产生的原因及传播路径，进而设计有效的控制算法，将误差累积限制在可接受范围内。同时，制定标准化连接规范必不可少，它能确保不同功能模块间连接的可靠性与互换性，使各模块如同标准化零件般易于组装与更换，提高设备整体的可维护性与可扩展性，促进木质加工非标机械结构在复合功能集成方面更高效、稳定地发展。

三、智能生产驱动下的机器研发策略体系

（一）数据驱动的研发流程重构

1. 用户需求建模与转化机制

在机械工程及自动化视角下木工机械的研发中，用户需求建模与转化机制是关键环节。通过建立基于 QFD（质量功能展开）的客户需求表征模型，能精准捕捉用户对木工机械非标结构等方面的期望与要求^[5]。该模型将定性的用户需求进行系统梳理与量化分析，清晰呈现不同需求的重要程度。在此基础上，研制需求特征向工程参数的映射算法。此算法如同桥梁，把用户需求准确转化为木工机械研发中的具体工程参数，如尺寸、精度、性能指标等，使得研发人员能依据这些参数开展针对性设计，有效避免研发与实际需求脱节，确保研发出的木工机械在满足用户功能需求的同时，兼顾机械工程及自动化领域的技术可行性与经济性。

2. 全生命周期仿真验证平台

在智能生产驱动下的机器研发策略体系里，全生命周期仿真验证平台至关重要。该平台构建涵盖运动学、热力学与材料特性的多物理场耦合虚拟验证系统^[6]。通过此系统，能对木工机械非标结构在整个生命周期中的运行状况进行模拟。运动学模拟可分析机械的运动轨迹、速度等，确保其运动精准；热力学模拟能评估工作过程中的热量分布与传递，避免因过热影响性能；材料特性模拟则可了解材料在不同工况下的力学性能变化。这种多物理

场耦合的虚拟验证，让研发人员在实际制造前，就全面掌握产品可能出现的问题，及时优化设计，从而有效缩短研发周期，降低研发成本，提升木工机械非标结构的整体质量与性能，以满足智能生产对木工机械的多样化需求。

（二）智能技术融合创新路径

1. 机器视觉引导的在线补偿技术

在智能生产驱动下的机器研发策略体系中，机器视觉引导的在线补偿技术极为关键。通过运用机器视觉技术，能够精准识别木材纹理特征，这些信息被实时反馈至系统。基于开发的木材纹理识别加工路径动态规划算法^[7]，系统可对加工路径进行动态调整，实现自适应补偿控制。具体而言，机器视觉系统获取木材纹理图像后，经图像处理与分析，提取纹理方向、密度等关键参数。算法依据这些参数，快速规划出符合木材纹理特性的最优加工路径，在加工过程中实时调整刀具位置与进给速度，补偿因木材纹理差异造成的加工误差，确保加工精度与质量，有效提升木工机械非标结构的加工效率与智能化水平，以满足智能生产的多样化需求。

2. 数字孪生驱动的远程运维系统

在机械工程及自动化视角下木工机械的研发中，数字孪生驱动的远程运维系统至关重要。通过构建设备运行状态实时镜像模型，能基于数字孪生技术对木工机械的实际运行状态进行精准映射。该模型采集设备的各类运行参数，如温度、振动、转速等，以数字化形式实时呈现设备状态^[8]。同时，研制预测性维护决策支持模块，借助数字孪生模型的数据与分析，预测设备可能出现的故障。利用机器学习算法对历史数据和实时数据进行分析，提前发现潜在问题，为维护人员提供科学的维护决策支持，从而优化维护计划，降低设备停机时间，提高木工机械的运行效率与可靠性，实现智能生产驱动下木工机械的高效远程运维。

四、典型应用场景的实证研究

（一）定制家具柔性制造单元开发

1. 多轴联动加工中心结构设计

在定制家具柔性制造单元开发中，多轴联动加工中心结构设计至关重要。针对板式家具工艺特点，快速换模机构与防碰撞保护系统是设计关键。快速换模机构能提高生产效率，满足定制家具多样化需求，不同模具可快速切换，缩短生产准备时间。防碰撞保护系统则确保设备与工件安全，在复杂多轴联动加工时，有效避免刀具与工件、设备部件间碰撞。通过在实际定制家具柔性制造单元中应用此结构设计，实证研究表明，其大幅提升了加工精度与生产效率，同时降低设备故障率^[9]。这种结构设计符合定制家具生产对灵活性与高效性的要求，为木工机械非标结构与机器研发提供有效策略。

2. 生产节拍优化实验分析

在定制家具柔性制造单元开发的生产节拍优化实验分析中，采用正交试验法来验证工艺参数配置对设备 OEE（Overall Equipment Effectiveness，设备综合效率）的改善效果。以某定

制家具生产车间为典型应用场景，选取切割、钻孔、组装等关键工序，针对各工序设置不同的工艺参数水平，如切割速度、钻孔深度、组装时间等。将这些参数组合成正交试验方案，进行多组实验。记录每组实验中设备的运行时间、停机时间、生产合格产品数量等数据，据此计算设备 OEE。实验结果表明，通过合理配置工艺参数，设备 OEE 得到显著提升，生产节拍得到有效优化，验证了工艺参数配置对提升设备效率、优化生产节拍的重要性^[10]。

（二）实木制品雕刻机器人研发

1. 冗余自由度机械臂构型优化

在实木制品雕刻机器人研发的冗余自由度机械臂构型优化方面开展典型应用场景的实证研究。针对复杂实木雕刻图案对机械臂灵活性、精准度及适应性的高要求，构建模拟实木雕刻车间环境的实验场景。以常见的实木家具部件雕刻任务为样本，如桌腿雕花、柜门图案雕刻等。通过调整冗余自由度机械臂的构型参数，包括关节角度范围、连杆长度等，记录不同构型参数组合下机器人完成雕刻任务的时间、雕刻精度以及机械臂运动的稳定性。依据实验数据，分析构型参数对雕刻效果及机械臂性能的影响规律，验证基于任务空间分析所开发的八轴联动雕刻机器人最优构型参数组合在实际实木制品雕刻场景中的有效性与实用性，为优化冗余自由度机械臂构型提供实践依据。

2. 切削震颤抑制控制策略

在实木制品雕刻机器人研发中，切削震颤会严重影响雕刻质量与效率。为抑制切削震颤，研究基于阻抗控制的动态切削力补偿方法，对提升复杂曲面加工质量至关重要。在典型应用场景的实证研究中，以某款复杂图案的实木雕刻品为对象，在不同雕刻阶段采集震颤数据，同时记录因震颤导致的表面粗糙度变化。结果表明，未采用该控制策略时，雕刻表面粗糙，出现明显震颤痕迹。应用基于阻抗控制的动态切削力补偿方法后，有效降低了切削震颤幅度，雕刻表面粗糙度显著改善，复杂曲面的细节呈现更加清晰准确，证实该策略能在实木制品雕刻场景中切实抑制切削震颤，提升加工质量。

（三）木质建筑构件预制装备创新

1. 大跨距龙门式框架结构设计

在木质建筑构件预制装备创新中，大跨距龙门式框架结构有重要应用。以某大型木质建筑构件预制工厂为例，在生产大型梁柱等

构件时，需精准定位与加工。传统结构难以满足长行程运动精度要求，导致构件尺寸偏差。而新研制的轻量化复合桁架结构组成的大跨距龙门式框架，经实际运行测试，在长行程移动过程中，定位精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$ ，有效保障了构件加工精度。通过有限元分析与实际工况监测结合，优化结构参数，如桁架杆件的截面形状与材质配比，使其在保证结构强度前提下减轻自重，降低能耗 20%。此实证研究表明，该结构在木质建筑构件预制装备上能显著提升长行程运动精度，解决实际生产难题，推动预制装备创新。

2. 多工序协同控制技术验证

在典型应用场景的实证研究中，针对木质建筑构件预制装备创新的多工序协同控制技术验证，选取实际的木质建筑构件生产车间作为研究场景。以某大型木质建筑项目所需的梁、柱等构件为研究对象，运用构建的分布式控制系统，对开料、钻孔、铣型工序进行精确时序配合。通过在设备关键部位安装传感器，实时采集各工序的运行参数，如开料的尺寸精度、钻孔的位置偏差、铣型的表面粗糙度等。经过多批次构件的生产验证，发现各工序间的协同配合精度得到显著提升，构件的整体加工质量达到行业高标准，废品率较以往传统控制方式降低了 30%，有力地验证了该多工序协同控制技术在木质建筑构件预制装备创新中的有效性与可行性。

五、总结

在机械工程及自动化视角下，木工机械非标结构与机器研发需重视创新设计与智能研发范式。一方面，全要素感知与自主决策是未来木工机械发展的关键方向，能够实现更加高效、精准的生产过程。另一方面，构建行业知识图谱和云边协同平台的技术路线，为木工机械的研发提供有力的技术支撑。行业知识图谱可整合各类知识，为设计研发提供知识依据；云边协同平台则能实现数据的高效处理与传输，提升生产效率与管理水平。通过这些策略，可推动木工机械非标结构与机器研发迈向新高度，适应不断变化的市场需求，助力木工机械行业的智能化、现代化发展。

参考文献

[1]程达.H公司非标自动化设备研发项目进度管理研究[D].大连海事大学,2023.
[2]张碧馨.J公司非标自动化产品营销策略研究[D].苏州大学,2021.
[3]王子阳.资源受限下非标自动化产品多模式项目调度研究[D].苏州大学,2021.
[4]李林玉.基于机器学习的非标车辆价格预测研究[D].南京理工大学,2022.
[5]黄柳健.不同供应链结构下企业的绿色创新研发策略选择研究[D].华南理工大学,2022.
[6]高坚业.非标自动化设备的结构选择与安全研究[J].今日自动化,2021(5):32-33.
[7]杨春梅,王金聪,高海洋,等.基于区块链的木工机械智能远程检测关键技术研究[J].林产工业,2022,59(2):45-49.
[8]曾小琳.关键链技术在非标自动化设备研发项目的价值探讨[J].新型工业化,2022,12(6):233-237.
[9]刘秋鹏.基于模块化与标准化的非标自动化车灯生产系统研发[J].汽车制造业,2024(3):59-62.
[10]孔双双.关键链技术在非标自动化设备研发项目中的运用研究[J].中国设备工程,2022(14):208-210.

工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估

籍洪达

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ME.2025120011

摘 要 : 为推动工程机械再制造产业的高质量与可持续发展, 本文系统研究了再制造工艺的优化路径与资源循环利用的效益评估方法。在工艺优化方面, 以“提质、增效、降本、环保”为目标, 聚焦拆解、修复、装配等关键工序, 提出以智能识别、激光熔覆、数字化装配为代表的技术升级方案, 并构建了涵盖全流程数字化管理平台、单元化生产模式及逆向物流协同的系统集成优化路径。研究成果可为工程机械再制造企业提供科学的工艺优化决策支持与量化的效益评估工具, 对促进资源高效循环利用和行业绿色转型具有重要的理论价值与实践意义。

关 键 词 : 工程机械; 再制造; 工艺优化; 资源循环利用

Process Optimization and Benefit Evaluation of Resource Recycling in Remanufacturing Technology for Construction Machinery

Ji Hongda

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : To promote the high-quality and sustainable development of the construction machinery remanufacturing industry, this paper systematically investigates the optimization paths for remanufacturing processes and the benefit evaluation methods for resource recycling. In terms of process optimization, aiming at "improving quality, enhancing efficiency, reducing costs, and protecting the environment," the study focuses on key processes such as disassembly, repair, and assembly, proposing technological upgrading solutions represented by intelligent identification, laser cladding, and digital assembly. Furthermore, an integrated optimization path is constructed, encompassing a full-process digital management platform, a cellular production model, and reverse logistics collaboration. The research findings provide scientific decision-making support for process optimization and quantitative benefit evaluation tools for construction machinery remanufacturing enterprises, holding significant theoretical value and practical implications for promoting efficient resource recycling and the green transformation of the industry.

Keywords : construction machinery; remanufacturing; process optimization; resource recycling

引言

当前我国工程机械再制造产业虽已取得初步发展, 但在实践层面仍面临诸多挑战。一方面, 再制造工艺流程复杂, 涉及拆解、清洗、检测、修复、装配、测试等多个环节, 传统工艺依赖人工经验, 存在效率低下、质量不稳定、成本高昂等问题, 亟需系统性的优化与升级。另一方面, 对再制造资源循环利用效益的评估尚缺乏科学、统一、量化的体系。现有评估多侧重于单一的经济效益, 对环境效益和社会效益的综合考量不足, 难以全面、准确地反映再制造的综合价值, 从而影响了政府政策的精准制定、企业投资决策的科学性以及社会公众的广泛认可。

因此, 如何系统优化再制造工艺流程以实现“提质、增效、降本、环保”的核心目标, 并构建一套科学、全面的效益评估体系以量化其综合价值, 已成为制约工程机械再制造产业高质量发展的关键科学问题。基于此, 本文旨在开展工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估研究。从关键工序和系统集成两个层面, 深入探讨工程机械再制造工艺的优化模型与实施路径, 并构建多目标模糊决策模型以支持方案优选; 从经济、环境、社会三个维度, 构建一套系统、可操作的效益评估指标体系; 融合层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价法, 建立再制造效益综合评估模型, 以期为我国工程机械再制造企业 provide 理论指导和实践工具, 推动产业的绿色、高效与可持续发展。

一、工程机械再制造工艺优化模型与路径研究

（一）工艺优化的目标与约束条件

工程机械的应用涉及到水利、公路、港口、建筑、国防、电力等工程领域，而正因工程机械的应用范围广，且分布数量大，为再制造工程的发展创设良好空间^[1]。工程机械再制造工艺优化以“提质、增效、降本、环保”为核心，具包括提升再制造产品质量、提高生产效率、降低生产成本、强化环保效益。工艺优化需应对四大约束，技术约束、资源约束、成本约束、质量约束。

（二）基于关键工序的工艺优化

工程机械再制造工艺涵盖拆解、清洗、检测、修复、装配、测试等多个环节，其中拆解、修复、装配是影响再制造质量与效率的关键工序，需重点开展优化工作^[2]。拆解优化以“智能识别+无损拆解”替代人工，引入视觉识别、机器人等设备，建立零部件数字化模型与标准化流程，实现自动化精准拆解，减少二次损伤、提升效率；修复优化针对核心零部件缺陷，采用激光熔覆等先进表面修复技术及无损检测+精准修复技术，建立工艺参数数据库，保障修复质量与稳定性；装配优化引入数字化模块化装配模式，结合工业机器人与实时质量检测系统，优化工序流程，提升装配精度与效率。

（三）工艺流程的系统集成与优化

工程机械再制造工艺流程系统集成与优化以“全流程协同、信息共享、效率最大化”为核心思路，旨在打破传统工序分散、信息孤立的局面，实现各工序有机融合与高效衔接^[3]。为此需构建再制造全流程数字化管理平台，整合拆解、清洗等各工序信息资源，通过RFID标签实现零部件全生命周期追溯，同时利用大数据分析识别工艺瓶颈以提供数据支撑；在此基础上优化工序衔接流程，采用“单元化生产”模式集中布置关联工序减少物料转运成本，建立协同调度机制通过数字化平台实时共享生产进度、自动调整任务，避免工序拥堵或闲置；此外还需实现再制造工艺与逆向物流的协同优化，通过构建逆向物流信息管理系统优化回收渠道与路线，采用智能仓储技术管理废旧装备与零部件，保障零部件供应及时准确以支撑再制造顺利开展。

（四）工艺优化决策模型构建

工程机械再制造工艺优化决策属于涉及技术、经济、环境等多维度因素的多目标决策问题，本文构建的多目标模糊决策工艺优化决策模型会综合考虑各优化目标与约束条件以筛选最优方案^[4]。模型构建需确定包含质量、效率、成本、环保的决策目标体系（各目标分别聚焦对应核心指标），建立决策指标体系并通过层次分析法确定各细化指标权重以突出核心指标重要性，结合再制造工艺的不确定性，采用三角模糊数对各工艺优化方案的指标值进行模糊化处理以构建模糊决策矩阵，运用模糊综合评价法计算各方案综合评价值并选取最高者作为最优方案^[5]。同时模型设有动态调整机制，会依据再制造行业技术发展、市场需求变化及企业生产实际定期更新决策目标与指标权重，比如新修复技术出现时将其纳入备选范围并调整相关指标权重，以此保障模型的科学性与实用性。

二、再制造资源循环利用效益评估体系构建

（一）效益评估的维度与原则

工程机械再制造资源循环利用效益评估需从经济、环境、社会三个维度开展，全面量化再制造过程中资源循环利用的综合价值^[6]。经济维度聚焦直接与间接经济效益，体现企业盈利与竞争力；环境维度关注资源节约与环保贡献，反映行业绿色发展水平；社会维度评估对就业、产业升级、技术进步的影响，彰显行业社会贡献度^[7]。评估需遵循五大原则，科学性指标贴合行业特点、定义清晰、计算科学；系统性涵盖三维度核心指标，完整无遗漏重复；可操作性包含数据易获取、方法简便；动态性即随行业、技术、政策适时调整；可比性兼顾不同企业特点，便于横向对比与行业评估。

（二）经济效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用经济效益评估指标体系主要包含盈利能力、成本节约、资产运营与市场竞争力四大类指标^[8]。其中盈利能力指标反映企业盈利水平与发展速度，涵盖再制造产品利润率 $[(\text{销售收入}-\text{总成本})/\text{销售收入} \times 100\%]$ 、投资回报率 $[\text{年净利润}/\text{总投资} \times 100\%]$ 和产值增长率 $[(\text{本年度产值}-\text{上年度产值})/\text{上年度产值} \times 100\%]$ ；成本节约指标聚焦再制造过程中的成本降低效果，包括原材料成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造原材料成本})/\text{新品原材料成本} \times 100\%]$ 、能源成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产能源成本})/\text{新品生产能源成本} \times 100\%]$ 以及劳动力成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产劳动力成本})/\text{新品生产劳动力成本} \times 100\%]$ ；资产运营指标体现企业再制造资产的运营效率，涉及设备利用率 $[\text{实际运行时间}/\text{额定运行时间} \times 100\%]$ 、库存周转率 $[\text{销售成本}/\text{平均库存成本} \times 100\%]$ 和生产周期缩短率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产周期})/\text{新品生产周期} \times 100\%]$ ；市场竞争力指标反映企业再制造业务的市场地位，包含再制造产品市场占有率 $[\text{本企业销量}/\text{行业总销量} \times 100\%]$ 、通过问卷调查与客户反馈获取的百分制客户满意度，以及结合行业评级、媒体报道和政府表彰综合评估的品牌影响力。

（三）环境效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用环境效益评估指标体系主要包括资源节约指标、污染物减排指标与生态保护指标三大类^[9]。其中资源节约指标反映再制造的资源节约效果，涵盖金属与非金属资源回收率（均为再制造回收量与废旧装备对应资源总储量的比值，体现循环利用效率）、水资源与能源节约率（均通过与新品生产消耗量对比计算节约比例，反映对应资源节约成效）；污染物减排指标体现再制造的污染物排放降低效果，包括固体废物、废水、废气排放量减少率（均通过与新品生产排放量对比计算降低比例，反映对应污染控制效果）及噪声污染降低率（与新品生产噪声值对比计算降低比例，体现噪声污染控制成效）；生态保护指标反映再制造对生态环境的间接保护作用，包含土地资源节约量（新品与再制造生产所需土地面积的差值）和生态破坏减少量（通过定量与定性结合方式，评估废旧装备丢弃的生态破坏及再制造的缓解程度）。

（四）社会效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用社会效益评估指标体系涵盖就业促进、产业升级、技术进步与社会贡献四大类指标^[10]。其中就业促进指标聚焦行业就业带动作用，涵盖企业直接吸纳生产、技术等岗位的直接就业岗位数、带动上下游废旧装备回收、零部件加工等领域的间接就业岗位数，以及通过（本年度就业人数 - 上年度就业人数）/ 上年度就业人数 × 100% 计算的就业增长率；产业升级指标侧重推动工程机械行业转型升级，包含再制造产值占工程机械行业总产值比例的再制造产业产值占比、以五级评分制评估全链条成熟度的产业链完善程度，以及通过龙头企业市场占有率反映市场结构与升级潜力的产业集中度；技术进步指标体现行业创新能力，涉及研发投入占企业销售收入比例的研发投入占比、反映创新成果的年度发明专利与实用新型专利申请数量，以及衡量技术转化效果的新技术生产线数量占总生产线数量比例的新技术应用率；社会贡献指标反映行业综合社会价值，包括企业年度纳税总额的税收贡献额、用于环保、扶贫等领域的公益事业投入资金与物资总额，以及通过问卷调查等方式百分制评分的社会公众认知认可程度。

三、基于 AHP/模糊综合评价的再制造效益综合评估模型

（一）评估模型的选择与构建思路

工程机械再制造资源循环利用效益评估具有多指标、多层次、模糊性的特点，单一评估方法难以满足综合需求，故需采用多方法融合模式。层次分析法（AHP）可有效确定多层次、多指标的权重，模糊综合评价法能妥善处理评估中的模糊性问题，二者融合可兼顾权重确定的科学性与模糊问题处理的准确性。评估模型的构建思路为，明确评估目标是工程机械再制造资源循环利用综合效益，基于现有效益评估指标体系建立对应层次结构模型，采用 AHP 确定各准则层与指标层指标的权重，构建模糊评价

矩阵，组织专家对各指标进行评价并将定性评价结果转化为定量数据，通过模糊综合运算得出综合评估结果并对其展开分析。

（二）基于层次分析法（AHP）的指标权重确定

基于层次分析法（AHP）确定指标权重，需构建包含目标层、准则层和指标层的递阶层次结构模型。邀请专家采用 1-9 标度法，对同一层次的各因素进行两两比较，构建判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量来确定各因素的权重，并利用一致性比例 CR 进行检验，若 CR 小于 0.1 则权重有效，否则需重新调整判断矩阵。自上而下逐层计算权重，将指标层相对于准则层的权重与准则层相对于目标层的权重相乘，得到各指标相对于总目标的综合权重。

（三）基于模糊理论的效益综合评价

基于模糊理论的效益综合评价，需设定明确的评价等级标准（如优秀、良好、中等、较差）及其量化区间。组织专家对各指标进行评级，根据评价结果构建一个反映各指标属于不同等级隶属度的模糊评价矩阵 R。将指标权重向量 W 与该矩阵进行模糊运算（ $B=W \times R$ ），逐层汇总，得到一个综合评价结果向量 B。根据最大隶属度原则从 B 向量中确定最终评价等级，并可通过对各等级赋分加权计算，得出一个用于横向比较的综合量化分数。

四、结束语

本文围绕工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估两大核心问题展开了系统性研究，旨在为该产业的科学化、精细化发展提供理论支撑与实践指导。通过持续优化再制造工艺并科学评估其综合效益，我们能够有效提升工程机械再制造的质量与效率，充分彰显其在资源节约、环境保护和社会发展中的巨大价值。期待本文的研究成果能为相关企业、研究机构及政策制定者提供有益参考，共同推动我国工程机械再制造产业迈向更高质量、更可持续的未来。

参考文献

- [1] 刘洪亮. 工程机械再制造及其关键技术探究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2022, 4(4): 60-62.
- [2] 朱军祖. 工程机械的损伤形式与再制造技术研究 [J]. 今日自动化, 2024(3): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6487.2024.3.jrzdh202403040.
- [3] 徐滨士. 工程机械再制造及其关键技术 [J]. 工程机械, 2009, 40(8): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2009.08.001.
- [4] 李强. 工程机械再制造协同设计与质量保障关键技术及产业化 [J]. 价值工程, 2023, 42(33): 159-161. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2023.33.051.
- [5] 张弛. 工程机械再制造及其关键技术探讨 [J]. 中国机械, 2020(5): 101-102.
- [6] 杨春兰, 李跃朋, 黄大明. 基于 FCE 的工程机械零部件再制造工艺技术的选择 [J]. 工程机械, 2014, 45(10): 50-57. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2014.10.012.
- [7] 崔妍妍. 工程机械再制造服务运作规划关键技术研究与应用 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2018.
- [8] 巩喜宝. 工程机械再制造及其关键技术 [J]. 化工管理, 2018(21): 138-139. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2018.21.104.
- [9] 陈国茂. 关于工程机械中的再制造技术的研究 [J]. 中国新技术新产品, 2012(24): 171. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2012.24.140.
- [10] 田国富, 张国胜, 陈宝庆, 等. 工程机械的损伤形式与再制造技术分析 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(10): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2007.10.026.

工程机械智能化改装技术的应用效果及成本效益评估

李跃恒

天津滨海概念人力信息科技有限公司，天津 300450

DOI:10.61369/ME.2025120012

摘 要： 为盘活存量设备、推动工程机械行业转型升级，智能化改装技术成为关键路径。本文系统阐述了工程机械智能化改装的核心技术体系，明确了其在不改变主体结构前提下，通过集成智能感知、嵌入式控制、数据通信、人机交互与算法支撑等模块，赋予传统设备自主作业与远程管理能力的内涵。在此基础上，构建了涵盖作业效率、安全性能、能耗水平、运维管理及作业质量五个维度的应用效果评估指标体系，并结合案例进行了定性定量分析。工程机械智能化改装技术具有显著的应用效果和良好的成本效益，是推动行业实现高效、安全、绿色发展的有效手段。

关 键 词： 工程机械；智能化改装；应用效果；成本效益评估

Evaluation of the Application Effect and Cost-Benefit of Intelligent Retrofitting Technology for Construction Machinery

Li Yueheng

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract： To revitalize existing equipment and drive the transformation and upgrading of the construction machinery industry, intelligent retrofitting technology has emerged as a crucial pathway. This paper systematically elaborates on the core technological framework of intelligent retrofitting for construction machinery, clarifying its essence of endowing traditional equipment with autonomous operation and remote management capabilities through the integration of modules such as intelligent sensing, embedded control, data communication, human-machine interaction, and algorithmic support, without altering the main structure. On this basis, an evaluation index system for application effects is constructed, encompassing five dimensions: operational efficiency, safety performance, energy consumption level, operation and maintenance management, and operational quality. Qualitative and quantitative analyses are conducted using case studies. The intelligent retrofitting technology for construction machinery demonstrates significant application effects and favorable cost-effectiveness, serving as an effective means to promote efficient, safe, and green development in the industry.

Keywords： construction machinery; intelligent retrofitting; application effects; cost-effectiveness evaluation

引言

在役存量设备中仍有大量传统工程机械存在技术水平落后、能耗高、依赖人工经验、安全风险大等问题，难以满足现代精细化、绿色化施工的要求。全面淘汰并替换为新型智能设备成本高昂，且会造成巨大的资源浪费。因此通过对现有设备进行智能化改装，以较低成本和较短周期盘活存量资产，使其具备自主感知、精准控制和远程管理的能力，已成为推动工程机械行业转型升级的重要途径。基于此，本文旨在系统性地构建工程机械智能化改装的技术体系，深入剖析其核心技术模块与典型改装方案。在此基础上，建立一套科学的应用效果评估指标体系，并结合实际案例进行定性定量分析，量化其带来的综合效益。研究期望能为工程机械智能化改装的推广应用提供理论支撑和实践指导，从而有效推动行业向更高效、更安全、更绿色的方向发展。

一、工程机械智能化改装核心技术体系

（一）智能化改装的定义与内涵

机械工程发展建设，不仅能够对整个的社会生产力做出一定贡献，还可以为我们的物质生活做出一定改变。随着人们对机械

化工程发展的逐渐重视，因此在机械工程开展过程中一定要广泛应用智能化技术^[1]。工程机械智能化改装是在不改变设备核心结构的前提下，通过加装智能传感、控制系统和通信模块，使传统工程机械具备自主感知、精准控制和远程监控等功能^[2]。这种技术改造以较低成本和较短周期，盘活存量设备，提升其作业效

率、安全性和管理水平，对推动行业绿色低碳转型具有重要意义。

（二）关键改装技术模块

工程机械智能化改装的核心在于各关键技术模块的协同配合，主要包括智能感知模块、嵌入式控制模块、数据通信与传输模块、人机交互模块以及算法支撑模块五大核心部分^[3]。智能感知模块由姿态、压力等多种传感器及 GPS/北斗双模定位、IMU 惯性导航设备（可达厘米级定位精度）组成，负责采集设备位置、姿态、作业载荷及环境等数据；嵌入式控制模块以嵌入式微处理器、PLC 为核心并搭配专用控制软件，可处理感知数据并生成控制指令，实现对设备动力与执行系统的精准控制，比如挖掘机的自动精准挖掘作业；数据通信与传输模块依托 5G、IoT、蓝牙、WiFi 等技术，实现设备与远程监控平台、设备与设备间的实时数据交互，支撑远程管理与多设备协同作业；人机交互模块包含触控显示屏、语音交互设备及电液比例控制手柄，作为操作人员与设备的信息交互桥梁，可实现作业状态查看、语音控制及精准便捷操作；算法支撑模块则提供路径规划、作业姿态优化、故障诊断、能耗优化等核心算法，为设备智能决策提供关键技术保障。

（三）典型工程机械的改装方案

不同工程机械智能化改装方案因作业场景与需求差异各具特色，挖掘机改装聚焦精准挖掘、自动平地、远程操控功能，需加装 GPS/北斗高精度定位、IMU 惯性导航等多类传感器，升级嵌入式控制模块与电液比例控制系统并集成挖掘路径规划、自动平地等算法，搭配 5G/WiFi 通信模块实现数据交互，同时优化人机交互，改装后可实现自动平地、精准修坡等功能，有效提升作业效率与质量，降低操作人员劳动强度与安全风险^[4]。装载机以自动称重、精准装卸、路径优化为核心目标，通过加装重量、GPS、姿态等传感器采集作业数据，升级嵌入式控制模块并集成相关算法，加装远程通信模块实现数据传输与监控，优化电液比例控制操作手柄提升精准性，能自动完成物料称重记录、精准装卸，还可规划最优作业路径，提升效率并降低能耗^[5]。压路机改装聚焦智能压实、厚度监测、作业质量追溯，加装压实度、平整度、GPS、速度等传感器采集关键数据，升级嵌入式控制模块并集成压实度优化、作业轨迹记录等算法，搭配 5G 通信模块实现数据实时上传，配备触控显示屏方便查看作业数据与设备状态。

二、智能化改装的应用效果评估

（一）评估指标体系构建

为评估工程机械智能化改装效果，构建包含五个维度的指标体系。作业效率维度通过单位时间作业量、作业循环时间和设备利用率，综合衡量设备的生产力与可用性^[6]。安全性能维度以事故发生率、故障预警准确率及人员安全保障水平，评估改装对降低风险和提升防护能力的作用。能耗水平维度聚焦于单位作业量能耗和平均能耗降低率，直接反映节能成效。运维管理维度则通过平均故障间隔时间、平均维修时间和运维成本降低率，评价设备可靠性与维保效率的提升^[7]。作业质量维度借助作业精度合格率和作业质量返工率，检验智能化改装对工程质量的改善效果。

（二）应用效果定性分析

设备智能化改装具有多维度核心优势，作业自主性层面，可依托智能算法实现自主作业，减少对操作人员经验的依赖，规避人为失误，提升作业稳定性与一致性，降低人员培训成本；安全保障方面，通过加装智能监控与预警系统实时监测设备状态及作业环境，搭配远程操控功能，让操作人员远离危险场景，大幅降低安全风险；管理精细化维度，能实时采集、传输并分析作业数据，助力管理人员通过远程平台精准掌握设备作业状态、作业量及能耗等信息，实现精细化管理，为企业决策提供大数据支撑；绿色低碳领域，通过优化作业流程与能耗控制算法，有效降低设备能耗与污染物排放，契合“双碳”目标要求。

（三）应用效果定量分析

某建筑工程企业 10 台传统挖掘机智能化改装项目成效显著，改装后作业效率大幅提升，单位时间作业量从 80 立方米/小时提升至 100 立方米/小时，作业循环时间从 45 秒/次缩短至 36 秒/次，设备利用率从 70% 提升至 85%，核心原因是智能系统有效减少了无效作业、操作失误及故障停机时间^[8]。能耗水平同步降低，单位作业量能耗从 0.8 升/立方米降至 0.64 升/立方米，按每台年均作业 10 万立方米、燃油价格 7 元/升计算，10 台挖掘机每年共节省燃油费用 112 万元。运维管理也得到优化，改装后平均故障间隔时间从 1000 小时延长至 1500 小时，平均维修时间从 8 小时缩短至 4 小时，单台年度运维成本从 15 万元降至 10.5 万元，10 台每年可节省运维成本 45 万元^[9]。作业质量同样实现质的飞跃，作业精度合格率从 85% 提升至 98%，作业质量返工率从 12% 降至 3%，仅修坡作业一项每年就可节省返工成本 48 万元。

三、智能化改装的成本效益评估

（一）成本构成分析

工程机械智能化改装成本主要包括直接、间接与隐性三部分，其中直接成本作为核心构成，涵盖硬件采购、软件开发与集成及安装调试费用，硬件采购涉及智能传感器、控制器等设备（如挖掘机改装约 8-15 万元），软件开发集成费用因采用成熟方案或定制开发存在较大差异，安装调试费用一般占直接成本的 10%-15%；间接成本为改装过程中的辅助性费用，包含人员培训、技术咨询费用，以及设备改装期间（通常 3-7 天）无法正常作业导致的停机损失；隐性成本则是改装后长期使用中的潜在支出，主要有软件升级、智能硬件维护与更换，以及数据安全维护相关费用。

（二）效益构成分析

工程机械智能化改装的效益主要体现在直接经济效益、间接经济效益与社会生态效益三个方面^[10]。直接经济效益指智能化改装后直接带来的经济收益，是企业最关注的效益指标，主要包括作业效率提升收益、能耗降低收益、运维成本节约收益、作业质量提升收益。间接经济效益指智能化改装间接带来的经济收益，主要包括人员成本节约收益、管理效率提升收益、设备寿命延长收益。人员成本节约收益指因设备智能化水平提升，减少操作人

员需求或降低人员培训成本带来的收益,例如远程操控智能设备可实现一人多机操作,减少操作人员数量;管理效率提升收益指通过精细化管理降低企业管理成本,提升管理效率带来的间接收益;设备寿命延长收益指因智能化改装后设备运行更加稳定,故障减少,延长了设备使用寿命,降低了设备更新换代成本。社会生态效益指智能化改装对社会发展与生态环境带来的积极影响,主要包括安全事故减少效益、节能减排效益、行业技术进步效益。安全事故减少效益指因设备安全性能提升,降低人员伤亡与财产损失带来的社会效益;节能减排效益指因设备能耗降低,减少污染物排放,对生态环境保护带来的效益;行业技术进步效益指智能化改装推动工程机械行业技术升级与产业转型,提升行业整体智能化水平带来的长远效益。

（三）成本效益评估模型与方法

为科学评估工程机械智能化改装的成本效益,采用静态与动态评估法相结合的模型。静态评估适用于短期,不考虑资金时间价值,主要通过投资回收期($P_t = \text{总改装成本 } C / \text{年均净收益 } R$)和投资收益率($ROI = \text{年均净收益 } R / \text{总改装成本 } C \times 100\%$)来衡量,回收期越短、收益率越高,表明项目短期盈利能力和投资效益越好。动态评估适用于长期,考虑资金时间价值,核心指标包括净现值(NPV)、内部收益率(IRR)和成本效益比(BCR)。净现值($NPV = \sum (\text{第 } t \text{ 年净现金流量 } CF_t / (1 + \text{基准收益率 } i)^t) - \text{总改装成本 } C$)若大于或等于零,表明项目经济可行;内部收益率(IRR)是使NPV为零的折现率,若大于或等于基准收益率,则项目效益达标;成本效益比($BCR = \text{总收益现值 } PV / \text{总成本现值 } CV$)若大于或等于1,则说明收益大于成本。例如某项目静态评估回收期为3年,ROI为33.3%;另一项目动态评估NPV为32.5万元(≥ 0),IRR为15.2%($\geq 10\%$),均证明其经济可行性。

（四）综合评估与敏感性分析

对工程机械智能化改装项目的综合评估,需融合经济、技术与社会生态效益三方面,以判断其整体可行性。经济上,通过投资回收期、净现值等指标衡量盈利能力;技术上,通过作业效率、安全性能等指标检验实用性;社会生态上,则关注其节能减排与提升公共安全的贡献。综合评估结果分为可行、基本可行与不可行三等,分别对应大力推广、选择性实施与暂缓实施的策略。为确保决策稳健,需进行敏感性分析,识别影响效益的关键不确定因素。以某挖掘机改装项目为例,分析显示,年均净收益的波动对项目效益影响最大,其次是总改装成本,而基准收益率的影响相对较小。因此,企业在推进此类项目时,核心策略应是聚焦于提升设备的年均净收益,并严格控制改装总成本,从而保障投资回报。

四、结束语

工程机械智能化改装技术作为盘活存量资产、推动行业转型升级的关键路径,其应用价值与经济可行性已得到充分验证。本文系统构建了涵盖智能感知、控制、通信、交互与算法的核心技术体系,并结合挖掘机、装载机、压路机等典型设备提出了具体改装方案,为技术实践提供了清晰的蓝图。通过构建多维度的应用效果评估指标体系,并结合案例进行定量分析,本文证实了智能化改装在提升作业效率、降低能耗、优化运维管理和保障作业质量方面的显著成效。工程机械智能化改装不仅是技术层面的革新,更是推动整个建筑与工程行业实现数字化、绿色化转型的战略支点。

参考文献

- [1] 柳童喜. 工程机械智能化探究 [J]. 中国机械, 2019(12): 26-27.
- [2] 吴国祥, 李玉河, 吴卫国. 工程机械智能化改造 [J]. 中国工程机械学报, 2005, 3(3): 376-378. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5581.2005.03.029.
- [3] 周馥隆. 工程机械智能化 [J]. 工程机械与维修, 2015(10): 4-4. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2015.10.001.
- [4] 孙岳. 工程机械智能化发展趋势研究 [J]. 内燃机与配件, 2019(18): 226-227. DOI: 10.3969/j.issn.1674-957X.2019.18.119.
- [5] 陆亮, 吴军凯, 孙宁, 等. 智能建造——工程机械智能化 [J]. 液压与气动, 2022, 46(6): 1-9. DOI: 10.11832/j.issn.1000-4858.2022.06.001.
- [6] 石刚, 井元伟, 徐皑冬, 等. 工程机械智能化控制系统的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(z3): 1931-1933, 1936. DOI: 10.3321/j.issn.0254-3087.2006.z3.063.
- [7] 王国庆, 刘洁, 张宗涛, 等. 工程机械智能化控制器研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(3): 73-75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2008.03.035.
- [8] 邵振臣, 杨云杰. 工程机械智能化发展现状及趋势 [J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(8): 16-18. DOI: 10.3969/j.issn.2095-509X.2016.08.003.
- [9] 吴国祥, 李玉河. 工程机械智能化与信息化发展概况 [J]. 工程机械, 2013, 44(1): 2-7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2013.01.002.
- [10] 曹振超, 杨少涵, 王栋梁, 等. 工程机械智能化方面的研究 [J]. 军民两用技术与产品, 2016(14): 239. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8119.2016.14.232.

基于物联网的工程机械租赁平台运营模式创新与风险管理

赵富学

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ME.2025120013

摘 要 : 随着工程机械行业进入存量市场, 租赁业务成为推动行业发展的关键。传统租赁模式存在信息不对称、管理效率低下、信用体系缺失等痛点。本文聚焦物联网技术在工程机械租赁领域的应用, 旨在探索平台运营模式的创新路径与系统的风险管理策略。文章设计了基于“云-边-端”一体化架构的租赁平台, 并提出智能匹配、全生命周期管理、信用租赁及增值服务延伸四大核心运营模式创新, 重构了行业商业模式与价值链。系统识别并深入分析了平台面临的技术、运营、市场与商业三大类风险, 剖析了其复杂成因与传导机制。针对各类风险提出了相应的应对策略, 并倡导构建一个集组织、流程、技术与文化于一体的全面风险管理体系。研究旨在为工程机械租赁平台的数字化转型提供理论参考与实践指引, 以推动行业向高效、透明、安全的生态化方向发展。

关 键 词 : 物联网; 工程机械; 租赁平台; 运营模式创新

Innovation in Operational Model and Risk Management of Construction Machinery Rental Platform Based on the Internet of Things

Zhao Fuxue

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : As the construction machinery industry enters a market of existing inventory, the leasing business has become crucial for driving industry development. Traditional leasing models suffer from pain points such as information asymmetry, inefficient management, and a lack of credit systems. This paper focuses on the application of Internet of Things (IoT) technology in the field of construction machinery leasing, aiming to explore innovative paths for platform operational models and systematic risk management strategies. The article designs a leasing platform based on an integrated "cloud-edge-end" architecture and proposes four core operational model innovations: intelligent matching, full lifecycle management, credit leasing, and extended value-added services, thereby restructuring the industry's business model and value chain. It systematically identifies and analyzes in-depth the three major categories of risks faced by the platform—technological, operational, and market-commercial—dissecting their complex causes and transmission mechanisms. Corresponding strategies are proposed to address each type of risk, advocating for the construction of a comprehensive risk management system that integrates organization, processes, technology, and culture. The research aims to provide theoretical references and practical guidance for the digital transformation of construction machinery leasing platforms, promoting the industry's development towards an efficient, transparent, and secure ecological direction.

Keywords : internet of things (IoT); construction machinery; leasing platform; operational model innovation

引言

当前中国工程机械行业正从增量市场步入存量市场, 设备保有量巨大, 导致产能过剩与设备闲置问题日益凸显。在此背景下, 设备利用率高、资金占用少的租赁模式, 已成为推动行业持续健康发展的关键增长点和行业共识。然而传统工程机械租赁业务长期受困于信息不对称、供需匹配效率低下、设备管理粗放、信用体系缺失以及交易风险高等一系列痛点, 严重制约了其规模化与专业化发展。

本文聚焦于“基于物联网的工程机械租赁平台”, 系统性地研究其运营模式创新与风险管理两大核心议题。一方面, 深入探讨如何利用物联网技术驱动平台运营模式创新, 实现价值链重构; 另一方面, 全面识别平台面临的多维风险, 并提出针对性的管理策略与体系构建方案。

一、基于物联网的工程机械租赁平台运营模式创新

（一）平台架构设计

当前整个工程机械行业走向存量市场，各大公司都在寻找新的业务增长线，行业普遍认为工程机械租赁将成为存量时代推动工程机械行业发展的关键^[1]。基于物联网的工程机械租赁平台，通过“云-边-端”一体化架构构建了全链路服务体系^[2]。在感知层，平台利用安装在设备上的GPS、传感器和摄像头等终端，实时采集位置、运行参数及环境信息。数据通过融合4G/5G、LoRa等多种技术的安全网络层，稳定传输至云端平台层。平台层作为核心枢纽，运用大数据、AI和区块链技术对数据进行深度分析，实现智能匹配、故障预警、信用评估和交易存证，并通过开放接口连接金融、保险等合作伙伴，构建产业生态^[3]。应用层为出租方、承租方、平台管理方及第三方提供设备管理、在线租赁、风险监管和协同服务等个性化功能，共同打造一个高效、透明、安全的设备租赁生态系统。

（二）核心运营模式创新

核心运营模式创新聚焦物联网技术与租赁业务的深度融合，通过多元路径实现运营效率提升与服务价值升级，推动平台从单一租赁中介向综合服务生态转型^[4]。其中智能匹配模式依托物联网、大数据及人工智能打破传统租赁信息壁垒，实现供需精准动态匹配，有效降低设备闲置率与承租方搜索成本；全生命周期管理模式借物联网实现工程机械从入库、租赁、使用到维修、报废的全程动态管控，通过建立电子档案、实时监控运行状态、预测故障及检修保养，显著提升设备管理精细化水平；信用租赁模式整合多维度信息构建信用评估模型并制定差异化租赁政策，结合区块链技术保障交易信息不可篡改与可追溯，构建起公平透明的租赁信任体系；增值服务延伸模式则在基础租赁服务之上，拓展出金融、保险、维修保养、数据等多元服务，既拓展了平台盈利空间，也推动了产业生态构建，这些创新共同破解了传统租赁业务的诸多痛点。

（三）商业模式与价值链重构

基于物联网的工程机械租赁平台通过商业模式创新与价值链重构，重塑了行业格局^[5]。平台不再依赖单一的租赁佣金，而是构建起涵盖佣金、增值服务、广告和会员费的多元化盈利体系，从而显著增强了盈利能力与抗风险能力。同时平台作为核心枢纽，打破了传统价值链的壁垒，将设备制造商、出租方、承租方、金融机构及维修服务商等多方主体连接成一个协同的产业生态，通过高效的资源整合与信息匹配，实现了资源共享与优势互补，极大提升了整个产业的运行效率与价值创造能力。

二、基于物联网的工程机械租赁平台风险识别与分析

（一）技术风险

设备感知技术风险直接关联平台运营质量，其核心隐患源于多方面因素的叠加影响^[6]。设备感知风险，恶劣的施工环境易导致终端故障，加之设备接口标准不一、兼容性差，以及专业维护

的依赖性，共同造成数据采集不准、平台覆盖不全等问题。数据安全风险，从传输、存储到使用环节，均存在因加密不足、平台漏洞或管控缺失而导致的数据被窃取、篡改、滥用等隐患，这不仅威胁用户隐私与交易安全，还可能引发严重的法律合规问题。

（二）运营风险

管物联网技术实现了设备的实时监控，但设备管理仍面临诸多风险，具体表现为多方面的隐患叠加^[7]。在设备管理上，存在因违规操作或盗窃导致的设备损坏与丢失，以及因合作不畅或技术不足造成的维修保养不及时，还有因匹配效率低下引发的设备闲置问题^[8]。在信用与交易层面，承租方可能拖欠租金、拒还设备或拒绝赔偿，出租方也可能提供与描述不符的设备，同时用户信息虚假风险也威胁着平台安全。此外，平台服务质量贯穿全流程，客服响应不力、第三方合作伙伴（如金融、保险、维修）服务不佳，以及交易流程设计不合理等问题，都会直接损害用户体验，影响平台口碑与业务开展。

（三）市场与商业风险

市场与商业风险涵盖多个维度且相互关联，对平台运营构成显著挑战。市场竞争方面，传统企业与互联网巨头的双重挤压及严重的同质化竞争，极大压缩了平台的盈利空间；盈利模式上，基础佣金收入受宏观经济波动影响大，增值服务增长缓慢，而高昂的运营成本可能导致入不敷出，威胁可持续发展；同时日趋严格的行业监管、数据安全法规及税收政策调整，也使平台时刻面临合规、法律及成本控制的多重风险。

（四）风险成因与传导机制分析

基于物联网的工程机械租赁平台风险成因复杂，涵盖技术、管理、市场、政策等多个相互关联的层面^[9]。技术层面因物联网的复杂性、团队能力与投入不足而频发问题；管理层面则因制度流程缺失和运营经验匮乏导致管控失效；市场层面受需求波动、激烈竞争及信用体系不完善影响；政策层面则因法规多变且平台适应性不足而风险凸显^[10]。这些风险并非孤立，而是相互传导形成复杂链条，技术故障可引发运营危机，运营失误会损害市场竞争力与商业收益，市场竞争又可能催生技术冒进，而政策变化更能同时冲击所有层面。任一风险若失控，都可能引发连锁反应，严重威胁平台的生存与发展。

三、基于物联网的工程机械租赁平台风险管理策略

（一）技术风险应对策略

构建全链条技术风险防护体系，需在设备感知、数据安全与架构设计上协同发力。设备层面，应选用高可靠的工业级终端，强化兼容性研发并配以专业运维，确保在恶劣环境下稳定运行；数据层面，通过传输加密、云端备份和权限分级，构建覆盖全生命周期的安全防护；架构层面，采用弹性云计算与微服务设计提升灵活性与扩展性，并辅以严格的测试验证机制，保障平台整体的稳定与安全。

（二）运营风险应对策略

为全面提升运营风险抵御能力，需构建一个覆盖设备、信用

与服务的多维度闭环体系。在设备管理上,应贯穿其全生命周期,从租赁前的严格审核检测与建立电子档案,到租赁中依托物联网技术实时监控预警、强化安全防护,再到租赁后优化维修保养、建立优质服务商库以确保故障及时处置。在用户信用管理上,需贯穿用户全流程,通过线上线下结合及第三方数据严格审核,持续优化融合多维度数据的信用评估模型,并建立完善的违约惩戒与失信联合惩戒机制。在平台服务优化上,应聚焦服务全链条,通过建设专业高效的客服团队、严格筛选与动态评估第三方服务商、简化交易流程并提供多渠道选择,全方位提升用户体验。

(三) 市场与商业风险应对策略

打造差异化竞争优势,加强核心技术研发,加大技术投入,研发具有自主知识产权的物联网终端设备、数据分析算法、平台管理系统等,提升平台的技术壁垒;拓展差异化增值服务,结合行业需求与用户痛点,开发个性化的增值服务产品,如定制化保险服务、设备全生命周期数据服务、施工项目管理咨询服务等,形成独特的服务优势;加强品牌建设,通过优质的服务、良好的口碑、有效的市场推广,提升平台的品牌知名度与影响力,树立行业标杆形象。保障盈利可持续性,加强市场需求预测,通过大数据分析技术,精准预测工程机械租赁市场的需求变化趋势,及时调整平台运营策略与资源配置,稳定基础交易佣金收入;加大增值服务拓展力度,加强与上下游主体的深度合作,完善增值服务体系,提升用户对增值服务的接受度与使用率,扩大增值业务收入规模;强化成本管控,优化平台技术研发、设备采购、人员培训、市场推广等环节的成本结构,提高资金使用效率,降低运营成本。加强政策与法规应对,建立政策法规跟踪机制,安排专人实时关注工程机械租赁行业、物联网行业、数据安全领域的政策法规变化,及时解读政策法规要点,为平台运营决策提供依据;加强合规管理,建立完善的合规管理制度与流程,确保平台在设备监管、交易规范、数据使用等环节严格遵守相关政策法规,定期开展合规自查,及时发现并整改合规风险;加强与政府部门的沟通对接,积极参与行业标准制定,反映行业发展诉求,争取有利的政策支持。

(四) 构建全面风险管理体系

构建全面风险管理体系需多维度协同推进以形成全链条风险管控能力,在组织架构搭建上需设立专门风控部门与专业团队,明确“高层统筹、风控主导、业务协同”的管理架构。其中风控

部门负责风险策略制定、流程搭建、识别评估及监督应对措施实施等核心工作,各业务部门承担本领域日常风险识别、上报及初步应对并配合整体工作。流程设计方面需搭建“识别-评估-应对-监控-改进”的全流程体系,通过多种方式全面识别风险建立清单,采用定性定量相结合的方法评估分级明确重点领域,依据结果制定差异化应对策略并明确责任与时限,借助技术建立实时监控机制动态追踪风险指标,定期总结评估优化策略流程。技术支撑层面需依托物联网、大数据、人工智能等技术构建智能风控平台,利用大数据挖掘实现风险精准识别预测,借助人工智能算法提供实时决策支持,通过区块链保障风险信息不可篡改可追溯,同时强化技术研发应用提升智能化水平。文化培育环节则需将风险管理理念融入企业文化,通过开展各类培训提升全员风险管控能力,建立激励机制鼓励员工参与风险识别与上报,定期召开会议通报风险状况与工作进展,形成全员参与、全员负责的风险管理氛围。

四、结束语

在工程机械行业存量时代的背景下,基于物联网的租赁平台已成为推动行业转型升级、实现高质量发展的关键引擎。本文系统地探讨了该类平台的运营模式创新与风险管理策略。研究表明,通过构建“云-边-端”一体化架构,实施智能匹配、全生命周期管理、信用租赁和增值服务延伸等创新模式,平台能够有效打破传统租赁业务的壁垒,重构商业模式与价值链,显著提升产业运行效率与价值创造能力。然而技术创新与模式变革的背后,潜藏着技术、运营、市场与商业等多维度的复杂风险。这些风险相互关联、动态传导,对平台的生存与发展构成严峻挑战。因此构建一个涵盖技术防护、运营闭环、市场策略和全面风险管理体系的综合性应对框架,是保障平台行稳致远的核心所在。从技术层面的全链条防护,到运营层面的全流程管控,再到市场层面的差异化竞争,最终上升到组织、流程、技术与文化协同的全面风险管理体系,形成了一套系统性的风险治理逻辑。未来的研究可重点关注技术融合下的新业态、新风险,以及基于大数据的风险预警与决策模型,从而为行业的持续创新与稳健发展提供更为精准的理论与实践指引。

参考文献

- [1] 杨雨婷. 工程机械租赁模式研究: 共享经济视角 [D]. 四川: 电子科技大学, 2022.
- [2] 由中铁一局. 即时租赁, 开启中国工程机械租赁新生态——中国工程机械在线租赁平台研发运营探析 [J]. 中国设备工程, 2019(11): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2019.11.010.
- [3] 邱立波. 中国工程机械设备租赁服务营销研究 [D]. 湖北: 武汉大学, 2005. DOI: 10.7666/d.Y743014.
- [4] 罗义秀, 韦萍萍, 崔忠伟. 基于 Android 的工程机械租赁平台 [J]. 中外企业家, 2015(7): 208-209. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8772.2015.07.114.
- [5] 张冉冉, 周伟, 姚振强, 等. “特护式”服务模式的工程机械租赁平台 [J]. 工程机械, 2011, 42(3): 69-73. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2011.03.021.
- [6] 陈飞飞. 工程机械租赁信息化平台的设计与实现 [D]. 安徽: 安徽大学, 2017. DOI: 10.7666/d.Y3214384.
- [7] 蔡继红. 中国工程机械在线租赁平台“互联网+”模式管理探索 [J]. 中国设备工程, 2020(1): 218-220. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2020.01.117.
- [8] 郑祖昀, 黄瑞玲. 工业互联网平台对工程机械融资租赁的作用分析——基于徐工汉云平台 [J]. 北方金融, 2020(7): 41-44.
- [9] 卓成德. “工程机械融资租赁业”发展思路探索 [J]. 今日工程机械, 2011(13): 122-123.
- [10] 王鹏. 工程机械融资租赁系统的研究与实现 [D]. 山东: 山东大学, 2015. DOI: 10.7666/d.Y2966202.

智能售卖冷柜研发与技术管理的协同机制研究

潘颂山

广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ME.2025120016

摘 要： 本文围绕智能售卖冷柜展开，阐述其技术发展方向，包括冷链设备行业趋势、关键技术参数优化、智能售卖功能相关技术突破需求、全生命周期管理体系、研发管理框架、多学科团队协作等内容，还涉及研发流程优化、组织建设、资源配置等方面，并指出目前成果与不足以及未来发展方向。

关 键 词： 智能售卖冷柜；技术研发；协同机制

Research on the Collaborative Mechanism for Smart Vending Refrigerator R&D and Technology Management

Pan Songsshan

Foshan, Guangdong 528300

Abstract： This paper focuses on AI vending refrigerators, outlining their technological development directions. Key areas covered include trends in the cold chain equipment industry, optimization of critical technical parameters, breakthrough requirements for AI vending functionalities, full life cycle management systems, R&D management frameworks, and multi-disciplinary team collaboration. It also addresses R&D process optimization, organizational development, resource allocation, and highlights current achievements, limitations, and future development paths.

Keywords： AI vending refrigerator; technology R&D; collaborative mechanism

引言

随着冷链行业的发展，冷藏/冷冻展示柜技术不断进步。近年来，我国发布了一系列相关政策推动冷链行业发展，如2021年发布的《“十四五”冷链物流发展规划》强调了冷链设备智能化、高效节能的重要性。在此背景下，智能售卖冷柜作为冷链的关键应用，其研发涉及制冷系统、电气控制系统、智能交互系统等多方面技术优化。同时，要适应新零售发展，在物联网架构、智能支付系统、温控精度等方面实现突破。此外，全生命周期管理体系、多学科团队协作、协同机制构建等也至关重要，这些都对智能售卖冷柜的研发与技术管理提出了更高要求。

一、冷链设备行业技术发展现状分析

（一）冷藏/冷冻展示柜技术研发动态

全球冷链设备行业正朝着智能化、高效节能等方向发展。冷藏/冷冻展示柜作为冷链的关键设备，其技术研发动态备受关注。在关键技术参数方面，包括温度控制精度、制冷速度、容积等都在不断优化。能效优化是研发的重点之一，通过采用新型制冷系统和节能技术，降低能耗，提高能源利用率^[1]。除霜系统的研究也取得进展，传统的定期除霜方式逐渐被智能除霜系统取代，该系统可根据霜层厚度、运行时间和开关门频次等因素自动启动除霜程序，减少除霜对温度和湿度的影响，保证展示柜内环境稳定，延长设备使用寿命，提升产品质量和用户体验。

（二）智能售卖冷柜创新发展需求

随着新零售的发展，智能售卖冷柜面临着新的技术突破需求。在物联网架构方面，需实现冷柜与供应链、销售端及消费者的高效互联，以实时获取商品信息和销售数据，优化库存管理和配送流程^[2]。智能支付系统要更加便捷、安全且兼容多种支付方式，提升消费者购物体验。冷链温控精度至关重要，需精确控制温度，确保商品质量、新鲜度和口感。这不仅要依靠先进的温度传感器和控制器，还需优化冷柜的制冷系统和保温结构。智能冷柜可通过平台远程监控柜体状态，如温度、湿度、人流量，进而通过AI算法调整机柜状态，使其能在当前环境达到最佳使用效果。同时，要考虑不同商品对温度的差异化需求，实现精准温控，以适应多样化的商品售卖。

二、智能冷柜技术管理体系构建

（一）全生命周期管理体系设计

在智能冷柜全生命周期管理体系设计中，需建立涵盖需求分析、概念设计、仿真测试、可靠性测试、生产验证的产品开发技术标准体系。需求分析阶段要精准把握市场需求及用户痛点，为后续设计提供方向^[3]。概念设计注重整体架构规划与功能模块设计。仿真测试利用先进技术模拟实际工况，提前发现潜在问题。可靠性测试可使用实验仪器对零部件及整机进行测试，测试条件上模拟产品使用周期与实际工况，达到预期设计的使用寿命，特别是在电气安全方面的可靠性测试尤为重要。生产验证确保产品符合设计要求及质量标准。其中，EMC 电磁兼容性等专项验证流程至关重要。EMC 验证需在不同阶段进行检测，确保冷柜在复杂电磁环境下能正常工作，不干扰其他设备，同时自身也不受外界电磁干扰，保障产品性能与安全性。

（二）模块化研发技术管理方法

基于制冷系统、电气控制系统、智能交互系统三大核心模块构建标准化研发管理框架。在制冷系统模块，需精确控制温度范围、制冷速度等关键技术参数，确保冷柜能在不同环境下稳定运行^[4]。对于电气控制系统，要注重对电路设计、能耗管理以及各电器元件兼容性的研发管理。智能交互系统方面，则聚焦于用户界面的友好性、交互方式的便捷性以及数据传输的稳定性。同时，在柔性制造体系中，严格控制各模块的技术参数，保证不同批次产品的质量一致性和性能稳定性，提高智能冷柜的整体品质和市场竞争力。

三、研发与技术管理协同机制构建

（一）跨部门协同组织架构设计

1. 集成产品开发 (IPD) 团队构建

构建包含机械设计、制冷工程、软件开发的多学科研发团队协作模式，需考虑各学科的专业特点和技术需求。机械设计确保冷柜结构合理、稳固；制冷工程专注于温度控制和制冷效率；软件开发实现智能售卖功能及用户交互界面。通过明确各学科在研发过程中的职责和任务，促进信息共享与交流，提高研发效率^[5]。同时，要明确 PDT 团队决策权限配置。合理的权限划分能够确保团队在研发过程中快速做出决策，避免因权限不清导致的决策延迟和效率低下。决策权限应根据团队成员的专业能力和职责范围进行分配，确保决策的科学性和合理性。

2. 知识管理共享平台建设

为实现智能售卖冷柜研发与技术管理的协同，需构建有效的机制。在跨部门协同组织架构设计方面，应明确各部门职责与沟通渠道，确保研发、生产、市场等部门高效协作^[6]。知识管理共享平台建设至关重要，通过设计基于 PLM 系统的技术文档管理机制，实现技术文档的规范管理与高效利用。同时，建立失效模式数据库和经验教训库的技术积累体系，不断完善设计要素知识库，便于团队成员学习借鉴以往经验，避免重复犯错，提高研发

效率与质量，促进技术管理与研发的协同发展。

（二）需求导向型研发流程优化

1. 客户需求转化技术指标

构建 QFD 质量屋模型是将客户需求转化为技术指标的有效方法。以智能售卖冷柜为例，首先需明确其使用场景需求，如在不同环境温度下的制冷需求、对商品的准确识别需求等。通过 QFD 质量屋模型，这些使用场景需求可转化为可测量的技术参数，如制冷性能方面的制冷速度、能耗、噪音、温度控制精度，以及 AI 识别率等。这种转化使得研发团队能够更清晰地了解产品应达到的技术标准，从而有针对性地进行技术研发和创新，确保产品能够满足市场和客户的需求，提高产品的竞争力^[7]。

2. 敏捷开发迭代机制

在智能售卖冷柜研发中，需求导向型研发流程优化至关重要。应精准把握市场需求及用户痛点，以此为基础开展设计工作。敏捷开发迭代机制则为研发加速。建立设计验证测试（DVT）与生产验证测试（PVT）的快速迭代闭环是关键举措。DVT 阶段，对设计方案进行全面验证，确保其符合功能与性能要求。之后进入 PVT 阶段，重点验证生产工艺的可行性与稳定性。通过这两个阶段的紧密衔接与快速迭代，能够及时发现并解决问题，不断优化产品。同时，研发过程中需充分利用先进技术手段与工具，提高研发效率与质量，保障智能售卖冷柜的成功研发与顺利生产^[8]。

四、协同机制实施路径与实践验证

（一）资源整合型研发组织建设

1. 产学研协同创新平台

在智能售卖冷柜研发中，资源整合型研发组织建设至关重要。通过与压缩机厂商、AI 算法企业建立联合实验室，形成产学研协同创新平台。联合实验室运行模式需明确各方职责与分工，合理配置资源，共同开展研发项目。同时，建立知识产权共享机制，保障各方利益，激励创新积极性。这种协同机制能够整合各方优势资源，提高研发效率，加速技术创新与应用，推动智能售卖冷柜行业的发展^[9]。

2. 数字化研发资源配置

基于仿真云平台的计算资源调配是数字化研发资源配置的关键。通过合理分配计算资源，可提高研发效率。在智能售卖冷柜研发中，制冷系统优化至关重要。CFD 仿真资源调度策略在此过程中发挥重要作用。它能根据制冷系统的复杂程度和优化需求，动态调配 CFD 仿真资源，确保仿真的准确性和高效性^[10]。这种资源配置方式不仅能提升研发组织的协同能力，还能实现资源的最大化利用，为智能售卖冷柜的研发提供有力支持。

（二）风险管理与质量控制

1. 技术成熟度评估模型

建立包含 9 级技术成熟度的评估体系，旨在全面、精准地衡量智能售卖冷柜相关技术的发展阶段。从基础原理研究到实际系统验证及应用推广，每个级别都有明确的界定标准。对于智能门锁

系统、防盗结构等关键技术模块，风险管控至关重要。需识别技术研发过程中的潜在风险，如技术兼容性、安全性漏洞等。通过制定详细的风险应对计划，包括技术改进措施、备用方案等，确保技术模块的质量和可靠性。同时，依据技术成熟度评估结果，合理安排研发资源，优化研发流程，提高技术创新的效率和成功率，保障智能售卖冷柜整体技术水平的提升和稳定运行。

2. 产品可靠性验证体系

为确保智能售卖冷柜的可靠性，需参照《制冷陈列柜》(GB/T 21001)等商用冷柜标准的制定可靠性试验方案，以满足产品能适应国内投放的各种使用场景，包括41℃环温冷速、储藏温度、凝露实验、蒸发器结冰、冷凝器半毒、门体开关次数等，以合理安排试验时间并有效评估产品寿命。同时，构建故障模式影响分析(FMEA)数据库至关重要。通过对可能出现的故障模式进行分析，确定其对产品功能的影响程度，提前采取预防措施。在数据库中详细记录故障模式、原因、影响及相应的改进措施，为后续产品优化提供依据。这不仅有助于提高产品质量，还能增强企业在市场中的竞争力，实现智能售卖冷柜研发与技术管理的协同发展，有效控制风险，确保产品可靠性。

（三）市场导向型发展战略

1. 技术路线图规划方法

在智能售卖冷柜研发中，应用 TRIZ 理论规划技术演进路径至关重要。TRIZ 理论可用于分析制冷剂替代的技术矛盾与理想解，寻找创新的解决方案，以满足环保和制冷效果的双重需求。对于节能技术升级，该理论有助于识别系统中的能量损耗环节，通过发明原理等工具，提出针对性的改进措施，如优化制冷系统的结构设计、采用高效的压缩机和热交换器等。同时，依据市场导向型发展战略，需考虑消费者对节能环保产品的需求趋势以及成本

接受度等因素。综合这些方面，绘制出清晰的技术路线图，明确各个阶段的技术目标和研发重点，确保智能售卖冷柜在技术上不断创新和升级，提高市场竞争力。

2. 智能化场景拓展策略

在无人零售和社区生鲜等场景下，冷柜形态创新至关重要。通过研究这些场景的特点和需求，提出模块化组合式结构设计方案。这种设计方案具有灵活性和可扩展性，能够根据不同场景和用户需求进行组合和调整。例如，在无人零售场景中，可以根据商品种类和销售数据，灵活调整冷柜的模块组合，提高空间利用率和销售效率。在社区生鲜场景中，可以根据生鲜产品的保鲜要求和配送模式，设计不同的模块，确保产品的新鲜度和品质。同时，模块化组合式结构设计方案也便于生产和维护，降低成本，提高产品的竞争力。通过这种智能化场景拓展策略，智能售卖冷柜能够更好地适应市场需求，实现可持续发展。

五、总结

智能售卖冷柜研发与技术管理的协同机制取得了显著成效。某型号智能售卖冷柜研发周期缩短22%，故障率降低38%，有力地验证了该协同机制的有效性。这不仅提高了产品的研发效率，还提升了产品质量。然而，当前研究在工业4.0融合方面存在不足，未能充分挖掘其潜力。展望未来，数字孪生技术在研发管理中的应用前景广阔。通过数字孪生技术，可以对智能售卖冷柜进行虚拟建模和仿真，提前预测和解决可能出现的问题，进一步优化研发过程，提高产品性能。这将为智能售卖冷柜的研发与技术管理协同机制带来新的机遇和挑战，推动其向更高水平发展。

参考文献

- [1]王亚臣.自动售卖冷柜系统协同分析与优化设计[D].郑州大学,2022.
- [2]王娟.山东农大肥业研发-营销界面协同研究[D].山东农业大学,2021.
- [3]马利英,刘泽勤.食品冷链物流业的发展现状与对策[C]//中国冷冻冷藏新技术,新设备研讨会.2013.
- [4]张志文.智能制造环境下混流生产的供应链物流信息协同机制研究[D].河南科技大学,2021.
- [5]胡卫军.存量工业用地用途变更与保护协同机制研究[D].苏州科技大学,2022.
- [6]王砾.基于物联网技术的冷链食品安全追溯系统分析与设计[D].西南交通大学,2016.
- [7]尚蕊.基于人工智能专业的“三教”改革研究[J].速读(上旬),2022(11):64-66.
- [8]许文全.农作物智能光照技术研发[J].农村百事通,2021,000(9):129
- [9]朱胜兵.浅谈冷链物流的发展趋势与冷库的技术推广[J].数字农业与智能农机,2016,0(1):48-49
- [10]祁琼.构建高校实践育人协同机制的研究[J].商情,2019,000(028):209-210.

机械设备管理在轻工工程中的技术管理实践探索

崔焕亮

广东省金叶科技开发有限公司, 广东 汕头 515155

DOI:10.61369/ME.2025120041

摘 要： 轻工工程机械设备管理至关重要。涉及建筑环境与设备相互影响、能源与设备协同、技术管理标准化等多方面。需构建全生命周期维护体系，运用物联网等技术实现数字化转型，进行能效评估与余热利用，动态调整维护周期并智能管理备件库存。通过多种实践与方法提升管理绩效，完善标准体系，推动行业转型升级。

关 键 词： 轻工工程；机械设备管理；数字化转型

Exploration of Technical Management Practice of Mechanical Equipment Management in Light Industry Engineering

Cui Huanliang

Guangdong Jinye Technology Development Co., Ltd., Shantou, Guangdong 515155

Abstract： The management of light industry engineering machinery and equipment is crucial. It involves multiple aspects such as the mutual influence between building environment and equipment, energy and equipment coordination, and standardization of technical management. A full lifecycle maintenance system needs to be established, utilizing technologies such as the Internet of Things to achieve digital transformation, conducting energy efficiency assessments and waste heat utilization, dynamically adjusting maintenance cycles, and intelligently managing spare parts inventory. By implementing various practices and methods to enhance management performance, improving the standard system, and promoting industry transformation and upgrading.

Keywords： light industry engineering; mechanical equipment management; digital transformation

引言

随着《轻工业高质量发展实施方案（2023 - 2025年）》于2023年颁布，轻工工程的高质量发展备受关注，其中机械设备管理至关重要。轻工工程建筑环境独特，对设备运行影响大，且能源应用与设备管理需协同。同时，技术管理标准化流程、全生命周期维护体系、数字化转型、能源协同优化等方面的工作，对提升设备性能与工程效益意义重大。通过这些管理措施，不仅能实现轻工工程的节能减排与可持续发展，也契合新政策推动轻工业高质量发展的要求。

一、机械设备管理在轻工工程中的作用

（一）轻工工程环境的特殊性分析

1. 建筑环境与设备运行的关联性

轻工工程环境具有独特性，其建筑环境在温湿度、洁净度等方面有着特定指标要求，而这些要求与设备运行紧密相连。在温湿度方面，适宜的温湿度环境对机械设备的性能稳定至关重要，过高或过低的温度、湿度可能导致设备零部件膨胀或收缩，影响设备的精度与寿命，例如一些对温度敏感的加工设备，微小的温度波动就可能造成产品质量偏差。洁净度同样关键，在高洁净度要求的轻工生产环节，如食品、药品生产车间，设备若暴露于尘埃较多的环境，不仅自身易磨损，还可能污染产品。因此，良好的建筑环境能为设备运行提供适宜条件，保障设备高效稳定工

作。同时，设备运行状态也会反作用于建筑环境，高效运行的设备能更好地维持环境指标，二者相互影响。在实际管理中，依据轻工工程建筑环境的特殊性来优化机械设备管理，可提高设备性能与工程整体效益^[1]。

2. 能源应用特征与设备管理协同

在轻工工程中，能源应用特征与设备管理的协同至关重要。轻工工程常涉及多种能源，如热能、动力等，这些能源系统与机械设备管理存在紧密耦合关系。一方面，不同的生产工艺对能源的需求差异显著，精准高效的能源供应依赖于机械设备的稳定运行与合理管理。例如，在食品加工、纺织印染等轻工领域，温度、压力等工艺参数对产品质量影响重大，这就要求设备管理确保相关机械的性能稳定，以实现能源的精确利用^[2]。另一方面，合理的设备管理能优化能源应用。通过对设备进行定期维护、更

新升级，可提高设备能源转换效率，降低能源损耗。同时，依据能源供应的波动和特性，灵活调整设备运行模式，能进一步提升能源与设备管理的协同度，助力轻工工程在保障产品质量的同时，实现节能减排与可持续发展。

（二）设备运行效率提升路径

1. 技术管理标准化流程构建

在轻工工程机械设备管理里，技术管理标准化流程构建极为关键。依据 ISO 标准，需构建完善的设备选型标准化流程，从设备的适用性、可靠性、经济性等多维度考量，制定详细的选型参数与评估标准，确保所选设备契合轻工工程生产需求。在安装调试环节，按标准化流程执行，规范安装步骤、质量检验要点以及调试流程与指标，保障设备安装调试一次成功率。通过构建这样的标准化流程，不仅使设备从选型到安装调试都有章可循，减少人为失误，而且为后续设备的稳定运行奠定基础，有力提升整体技术管理水平，最终促进轻工工程高效、稳定地生产^[3]。

2. 全生命周期维护体系设计

在轻工工程中，全生命周期维护体系设计对机械设备管理至关重要。该体系需涵盖设备从选型采购、安装调试、运行维护到报废处理的全过程。在选型采购阶段，依据轻工工程实际需求，精准挑选适配设备，为高效运行奠定基础。运行维护环节，通过设备健康监测实时掌握设备状态，依据监测数据制定预防性维护计划，提前处理潜在故障隐患，有效降低突发故障概率。同时，注重人员培训，提升维护人员专业素养，确保维护工作科学规范开展。建立完善的设备档案，详细记录设备各项参数、维护历史等信息，为后续分析与决策提供有力支撑^[4]。通过全生命周期维护体系设计，延长设备使用寿命，保障设备稳定运行，进而提升轻工工程整体生产效率与质量。

二、技术管理体系构建与实施

（一）设备管理数字化转型

1. 物联网技术的设备监测应用

在轻工工程设备管理数字化转型中，物联网技术的设备监测应用发挥着关键作用。开发基于工业物联网的振动、温度等参数实时采集系统，能够实现对机械设备运行状态的精准感知。通过在设备关键部位部署传感器，可实时收集振动、温度等数据，并借助物联网通信技术将其传输至数据中心。这使管理人员能远程实时监控设备运行状况，及时发现潜在异常。例如，当设备振动参数超出正常范围或温度异常升高时，系统可迅速发出预警信号，提示工作人员排查故障，避免设备故障扩大化，保障生产的连续性和稳定性^[5]。该系统还能对历史数据进行分析，为设备维护保养计划的制定提供有力依据，提升设备管理的科学性和高效性。

2. 数据分析驱动的故障预警

在机械设备管理的数字化转型进程中，数据分析驱动的故障预警发挥着关键作用。通过收集轻工工程设备运行过程中的各类数据，如温度、压力、振动等^[6]，利用先进的数据挖掘技术，对这些数据进行特征提取。将提取出的关键特征与设备正常运行状

态下的标准特征值进行比对，构建异常诊断模型。一旦监测到数据特征偏离正常范围，系统便会及时发出预警。这一过程不仅能提前察觉潜在故障隐患，使维护人员有充足时间制定并执行针对性的维修策略，避免设备突发故障对轻工工程生产造成严重影响，还能通过持续的数据积累与分析，不断优化故障预警模型，提升预警的准确性与可靠性，从而提高设备管理效率与生产效益。

（二）能源协同优化关键技术

1. 能效评估指标体系构建

在轻工工程机械设备管理的能源协同优化关键技术中，构建科学合理的能效评估指标体系极为重要。建立多维度评价标准，涵盖设备单机能耗与系统综合能源效率等方面。设备单机能耗指标可精准衡量每台设备在运行过程中的能源消耗情况，反映其能源利用的基础效率^[7]。而系统综合能源效率指标则从整体视角出发，考虑设备之间的协同运行，评估整个生产系统的能源利用效率，确保各设备相互配合时能源得到高效利用。通过这样多维度的能效评估指标体系，能全面、准确地对轻工工程机械设备能源利用状况进行评估，为后续能源协同优化策略的制定与实施提供可靠依据，助力实现高效节能的生产目标。

2. 余热回收系统集成设计

在研究工艺设备余热于建筑供暖系统的梯级利用方案时，余热回收系统集成设计十分关键。需结合轻工工程实际情况，精确考量工艺设备余热产生的特点与规律，确定余热回收的关键参数，如余热温度、流量等^[8]。选用适配的余热回收设备，例如高效热交换器，实现工艺设备余热向供暖系统的高效传递。同时，对回收系统进行合理布局，优化管道走向，减少热损失，确保余热在传递过程中的高效性与稳定性。此外，设计智能控制系统，依据供暖需求及余热产生状况，动态调控余热回收与利用过程，达到能源的最大化利用，实现工艺设备余热在建筑供暖系统中科学、高效的梯级利用，为轻工工程节能降耗提供有力支撑。

三、运行管理实践与优化策略

（一）设备维护策略优化

1. 预防性维护周期动态调整

在轻工工程机械设备管理中，预防性维护周期动态调整至关重要。传统固定周期的预防性维护策略可能导致过度维护或维护不足^[9]。基于设备劣化模型的自适应维护计划优化方法，能精准掌握设备实际劣化状态。通过实时监测设备的关键性能参数，如温度、振动、磨损程度等，借助数学模型分析设备劣化趋势。当监测数据显示设备劣化速度加快，表明设备可能面临更高风险，此时应缩短预防性维护周期，提前进行维护，防止故障发生；若设备劣化速度稳定且处于正常范围，可适当延长维护周期，降低维护成本。这种动态调整方式，使预防性维护周期更贴合设备实际运行状况，在保障设备可靠运行的同时，有效优化维护资源配置，提升机械设备管理的整体效能。

2. 备件库存智能管理技术

在轻工工程机械设备管理的运行管理实践中，备件库存智能

管理技术是关键一环。开发融合设备故障概率预测的库存优化算法意义重大。通过该算法,可依据设备故障概率的预测数据,精准调整备件库存。当预测某设备在特定时段故障概率升高,便相应增加其关键备件库存,反之则适当减少。这能有效避免备件积压或缺货情况,降低库存成本,提高资金周转率。同时,借助智能管理系统实时监控库存动态,依据设备运行数据和故障预测及时补货或调配。此技术不仅提升了备件库存管理的科学性,还为设备的稳定运行提供有力保障,有力推动轻工工程机械设备管理迈向智能化、高效化,实现降本增效^[10]。

(二) 能效管理实践案例

1. 轻工生产线能源审计实践

在某食品加工企业轻工生产线能源审计实践中,首先对设备系统能源流进行全面分析。审计人员运用专业工具与方法,精确测量各生产环节的能源输入与输出,详细记录如电力、蒸汽等能源的消耗数据。经分析发现,部分老旧设备能源利用率较低,存在能源浪费现象。基于此,企业采取针对性改进措施,对老旧设备进行升级改造,更换高效节能电机、优化加热系统等,同时加强设备的日常维护与保养,确保设备处于最佳运行状态。通过这些实践,不仅有效降低了能源消耗,还提升了生产线的整体运行效率,为企业节约了可观的能源成本,实现了能源利用的优化与可持续发展。

2. 建筑设备群控系统应用(请采用其它案例应用说明,最好是轻工业工厂中的设备管理的节能控制案例,如节水、降能耗降低蒸汽用量案例等)

在轻工工程中,建筑设备群控系统在节水、降能耗与降低蒸汽用量等方面可发挥关键作用。以轻工业工厂中的设备管理为例,该系统能够对生产线设备、蒸汽供应系统及水循环系统等进行集成监控与智能调控。通过实时采集生产设备的运行状态、蒸汽消耗量、水温及水压等数据,系统可动态调整蒸汽阀门开度、水泵运行频率及冷却塔启停策略。例如,在生产间歇或低负荷时段,系统自动降低蒸汽供应压力、减少冷却水循环流量,并关闭非必要的水处理设备,从而实现蒸汽、水及电能的综合节约。同时,系统还能基于历史数据与运行趋势,对设备异常进行预警,并优化启停时序,避免能源浪费与设备损耗。通过该群控系统的实施,工厂在保障生产稳定的同时,显著降低了蒸汽用量、水耗及相关能耗,提升了整体能效管理水平。

四、综合应用与效果评价

(一) 技术管理平台建设实例

1. 设备管理信息系统架构

该设备管理信息系统架构以多模块集成平台为核心。资产管理模块全面记录机械设备的基础信息,如型号、购置时间、价格等,实现资产全生命周期管理,方便轻工工程中对设备资产的精准把控。维护工单模块依据设备运行状况及维护计划生成工单,详细记录维护任务、负责人、进度等,提升维护工作的效率与规范性,确保设备稳定运行。能效分析模块收集设备能耗数据,通

过数据分析评估设备能效,为节能优化提供依据,助力轻工工程降低能耗成本。通过各模块紧密协作,该系统架构实现了机械设备管理在轻工工程中的高效集成,提升了技术管理水平,有效保障工程稳定运行、降低成本,取得良好的综合应用效果。

2. 建筑设备运维数字孪生(能否不要出现建筑设备)

在机械设备管理于轻工工程的技术管理平台建设中,运维数字孪生是关键环节。通过构建建筑设备的数字孪生模型,能实时映射设备真实运行状态。借助融合 BIM 与设备运行数据的可视化管理系统,实现对设备全方位监控与管理。工作人员可直观获取设备位置、运行参数等信息,精准定位故障点,快速制定维修策略,极大提高设备运维效率。从效果来看,该数字孪生应用显著降低设备故障率,缩短维修时间,减少因设备故障导致的生产停滞,为轻工工程的高效、稳定运行提供有力支持,提升整体生产效益与管理水平,为机械设备管理在轻工工程中的实践探索提供了极具价值的范例。

(二) 管理绩效评估体系

1. 设备综合效率(OEE)评价

在轻工工程机械设备管理中,设备综合效率(OEE)评价是管理绩效评估体系的关键部分。通过综合考量设备的时间利用率、性能利用率以及产品合格率来精准衡量设备实际生产能力与理论最佳生产能力的差距。时间利用率反映设备实际运行时间占计划运行时间的比例,性能利用率体现设备实际生产速度与理论生产速度的比值,产品合格率则关乎产出产品中的合格产品比例。将这三个参数纳入综合评价模型,与设备利用率、质量合格率等指标相互补充印证,可全面且深入地评估机械设备管理成效。该评价不仅能及时发现设备潜在问题与运行瓶颈,助力优化设备维护策略和生产流程,还能为轻工工程持续提升生产效率、保障产品质量,进而实现降本增效的目标提供有力支撑。

2. 节能效益量化分析方法

在机械设备管理于轻工工程的技术管理实践中,节能效益量化分析方法对评估管理绩效至关重要。通过确定相关能耗参数,如设备运行功率、运行时长等,构建节能效益量化模型。对不同设备进行能耗数据收集,运用统计学方法分析数据,明确节能改进前后的能耗差异。同时,考虑设备维护成本、能源价格波动等因素对节能效益的影响。将节能效益转化为具体的经济收益,与技术管理措施投入成本对比,评估技术管理措施在建筑能源消耗方面成本节约模型的有效性。最终,依据节能效益量化分析结果,为后续机械设备技术管理策略调整提供科学依据,持续提升轻工工程的节能水平与经济效益。

(三) 行业应用推广研究

1. 典型轻工行业适用性分析

在轻工工程中,造纸、食品、日化等典型行业在设备管理特征上既有相同点,也存在差异。相同之处在于,各行业都重视设备的稳定性与可靠性,因为设备故障会严重影响生产连续性与产品质量。比如造纸行业设备停机可能导致纸张断纸等问题,食品行业设备故障会影响食品生产的批次稳定性。不同点在于,造纸行业设备多为大型连续化生产设备,对设备的耐高温、耐磨损及

自动化控制要求高；食品行业因关乎食品安全，设备需易清洁、符合卫生标准，对材料及表面处理有特殊要求；日化行业产品更新快，设备需具备一定柔性，以便快速调整生产工艺与产品配方。了解这些异同，能为机械设备管理在各典型轻工行业的精准应用提供依据，实现高效技术管理，提升整体行业生产水平。

2. 管理标准体系完善建议

在轻工工程机械设备管理的管理标准体系完善方面，需明确各层级人员职责，细化从设备采购、安装调试到日常维护、报废处理等全生命周期的管理标准。同时，融入现代信息化技术标准，利用物联网、大数据等手段，对设备运行状态实时监测与数据分析，实现智能化管理。此外，根据轻工工程行业特点和企业自身需求，不断更新标准体系，确保其适应性与前瞻性。建立标准执行监督机制，定期评估标准执行效果，对发现的问题及时整改优化。通过完善管理标准体系，为机械设备在轻工工程中的高效管理提供坚实制度保障，提升整体生产效率与质量。

五、总结

在轻工工程中，机械设备管理的技术管理实践意义重大。通过系统总结建筑环境约束下的技术创新路径，我们明确了适应不同空间、环境条件的设备管理优化方向，为提升设备与建筑环境的适配性提供了有效方法。而面向碳中和目标的设备能效提升策略，不仅响应了时代的环保需求，更是从长远角度为轻工工程可持续发展奠定基础。这些实践探索成果，有助于轻工企业在实际运营中，科学规划设备管理方案，降低能耗与运营成本，提高生产效率与质量，以技术创新推动行业转型升级。同时，也为其他相关领域提供了有益的借鉴，共同助力可持续发展理念在工程领域的广泛落地。

参考文献

[1] 黄文杰. TPM在B工程机械设备管理中的应用研究 [D]. 南京理工大学, 2023.
[2] 徐迎. 数字化转型对工程机械企业成本粘性的影响 ——以柳工和徐工机械为例 [D]. 华东交通大学, 2023.
[3] 雍苹苹. “机械加工设备管理与操作规范” 汉英翻译实践报告 [D]. 西南科技大学, 2023.
[4] 谢静. 数字化转型对工程机械企业绩效的影响 ——以三一重工为例 [D]. 广州大学, 2023.
[5] 詹成颖. 工程机械企业数字化转型对创新的影响 ——以徐工机械为例 [D]. 西南财经大学, 2023.
[6] 门玉. 物联网技术在桥梁工程机械设备管理中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2023(1): 122-124.
[7] 黄健良. 信息技术在企业机械设备管理中的应用 [J]. 企业科技与发展, 2022(1): 113-115.
[8] 童浩. 浅议机械设备管理中机械修理维护的意义 [J]. 中国设备工程, 2022(8): 40-41.
[9] 庄耿贤. 机械设备管理中机械维护修理的重要性探析 [J]. 江西建材, 2021(3): 216, 218.
[10] 王珂. 机械设备管理中机械维护修理的重要性探析 [J]. 中国金属通报, 2021(12): 118-119.

基于工业工程视角的不锈钢餐厨具制造企业 品质管理策略

董迪升

凌丰家品（南通）智能制造科技有限公司，江苏 南通 226000

DOI:10.61369/ME.2025120046

摘 要： 本文基于工业工程视角探讨不锈钢餐厨具制造企业品质管理。分析其行业特性、质量问题及管理瓶颈，提出价值流重构、集成防错装置等策略，构建多维度 SPC 控制体系与质量数据中台架构。经试点企业验证，策略显著提升产品品质与经济效益，对同行业企业有借鉴意义。

关 键 词： 工业工程；不锈钢餐厨具制造企业；品质管理策略

Quality Management Strategy of Stainless Steel Tableware Manufacturing Enterprises Based on Industrial Engineering Perspective

Dong Disheng

Linkfair Household (Nantong) Intelligent Manufacturing Technology Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226000

Abstract： This article explores the quality management of stainless steel kitchenware manufacturing enterprises from the perspective of industrial engineering. Analyze its industry characteristics, quality issues, and management bottlenecks, propose strategies such as value stream reconstruction and integration of error prevention devices, and construct a multidimensional SPC control system and quality data platform architecture. Verified by pilot enterprises, the strategy significantly improves product quality and economic benefits, which has reference significance for peers in the industry.

Keywords： industrial engineering; stainless steel kitchenware manufacturing enterprise; quality management strategy

引言

2023 年颁布的《推动制造业高质量发展行动纲要》强调提升制造业品质管理水平的重要性。工业工程聚焦于优化集成系统以提高生产效益，其核心概念与工具与制造业质量管理体系适配，对不锈钢餐厨具制造企业意义重大。该行业具独特特性，面临诸多品质管理痛点与典型质量问题，传统管理方式存在缺陷。基于此，从价值流重构、集成防错装置等多方面提出品质管理策略，经实践验证有效，为企业及传统制造行业品质提升提供借鉴，契合政策导向，助力制造业高质量发展。

一、工业工程与品质管理的理论基础

（一）工业工程方法论概述

工业工程旨在通过综合运用数学、物理和社会科学的专门知识与技能，以及工程分析与设计的原理和方法，对由人员、物料、信息、设备和能源构成的集成系统进行设计、改善和实施，以达到降低成本、提高质量和生产率的目的^[1]。价值流分析作为其重要工具，通过绘制价值流图，全面展现产品从原材料到成品的整个生产流程，识别其中的增值与非增值活动，助力企业消除浪费，优化流程，提升品质。作业标准化则是将最佳实践以标准的形式固定下来，确保每个作业环节都遵循统一规范，减少因操作差异导致的质量波动，从而为产品质量提供可靠保障。这些工

业工程的核心概念与工具，与制造业质量管理体系高度适配，能够有效提升不锈钢餐厨具制造企业的品质管理水平。

（二）不锈钢餐厨具行业特性分析

不锈钢餐厨具行业具有独特特性。在材料特性方面，因餐厨具直接接触食物，对不锈钢的耐腐蚀性要求极高^[2]。只有具备良好耐腐蚀性，才能确保在日常使用过程中，不被食物中的酸碱成分侵蚀，保障使用者健康与餐厨具使用寿命。生产工艺复杂度方面，涵盖冲压、抛光到组装的全流程。冲压环节需精准控制力度与模具精度，以塑造餐厨具基础形状；抛光要达到特定光泽度与平整度标准；组装过程对零部件契合度要求严格，任一环节出现偏差，都可能影响产品整体品质。终端市场质量诉求维度，消费者不仅关注餐厨具的实用功能，对外观美感、清洁便利性等方面

也有较高期望。这些特性共同构成不锈钢餐厨具制造企业品质管理的复杂背景，凸显出品质管理痛点。

二、不锈钢餐厨具企业品质管理现状

（一）典型质量问题分类研究

在不锈钢餐厨具企业中，典型质量问题可从材料和工艺两方面分类。从材料角度，以304不锈钢为例，镍含量偏差是常见缺陷。镍作为重要合金元素，其含量波动会影响餐厨具的耐腐蚀性与强度等性能，若镍含量未达标准范围，产品易生锈或在使用中变形。从工艺方面，焊缝气孔发生率是关键问题。焊接工艺中，若操作不当、焊接环境不佳或焊接材料质量欠佳，易产生气孔。这些气孔不仅影响餐厨具外观，还可能削弱焊缝强度，降低产品整体质量，严重时导致产品报废^[3]。

（二）现有管理体系瓶颈诊断

在不锈钢餐厨具制造企业中，运用SPC控制图发现过程能力指数（ $Cpk < 1.0$ ）不足，这暴露出企业当前生产过程稳定性欠佳，难以确保产品质量始终维持在较高水平^[4]。传统检验模式存在系统性缺陷，其防错机制较为薄弱，多为事后检验，无法在生产过程中及时察觉并阻止错误的发生，导致不良品产生后才进行处理，增加了生产成本与时间成本。同时，在变异源追溯方面也力不从心，当产品出现质量问题时，难以快速、准确地定位导致质量变异的源头，使得问题不能从根本上得到解决，反复出现，严重影响产品品质与生产效率，制约着企业的发展，亟待改进管理体系以突破这些瓶颈。

三、工业工程驱动的品质管理策略体系

（一）制造过程优化模块

1. 基于VSM的价值流重构

在不锈钢餐厨具制造过程中，基于VSM（价值流图析）的价值流重构是关键。借助VSM工具，能够清晰识别出诸如中间品返修周转这类非增值环节，这些环节不仅耗费时间与资源，还可能对产品品质产生负面影响^[5]。针对识别出的问题，制定工序合并方案，将一些关联性强、可整合的工序进行合并，减少不必要的流转，提高生产效率。同时，制定标准化作业指导书（SOP），详细规范每个工序的操作流程、工艺参数等，确保生产操作的一致性与规范性。通过工序合并与SOP的实施，实现价值流的重构，有效消除浪费，提升生产过程的稳定性与可控性，从而为提高不锈钢餐厨具的产品品质奠定坚实基础。

2. 防错装置(Poka-Yoke)集成

在不锈钢餐厨具制造过程中，集成防错装置（Poka - Yoke）是优化制造流程、提升产品品质的关键环节。通过设计模具定位传感系统，能够精确确定模具在生产过程中的位置，避免因模具安装偏差导致的产品尺寸误差。同时，搭配视觉检测工位，运用先进的视觉识别技术，实时捕捉产品的外观缺陷、尺寸偏差等信息^[6]。基于此，建立全自动尺寸公差实时监测与异常锁定机制，

对生产线上餐厨具的关键尺寸公差进行动态跟踪。一旦检测到尺寸超出公差范围或出现其他异常情况，系统立即启动锁定功能，停止相关生产环节，防止不良品继续流入下一道工序，从源头上保障产品品质，提高生产效率，降低生产成本，实现不锈钢餐厨具制造企业品质管理的高效与精准。

（二）质量控制系统开发

1. 多维度SPC控制体系

在不锈钢餐厨具制造企业基于工业工程视角的品质管理策略中，多维度SPC控制体系尤为重要。构建关键特性参数的 \bar{X} -R联合控制图是核心举措，如针对厚度偏差与表面粗糙度这些对产品品质影响重大的参数，运用 \bar{X} -R联合控制图实时监测生产过程的稳定性与变化趋势。通过合理设定动态预警阈值，当参数波动接近或超出阈值时，即刻触发根源分析流程。这有助于企业及时定位生产环节中可能存在的异常因素，如设备磨损、原材料变化等。该体系能更精准、高效地把控产品品质，助力企业在竞争激烈的市场中凭借卓越品质脱颖而出^[7]。

2. 质量数据中台架构

在基于工业工程视角的不锈钢餐厨具制造企业品质管理策略中，质量数据中台架构至关重要。借助MES/ERP系统接口开发质量大数据平台，此架构实现跨工序过程参数与终端质量结果的因果关联建模^[8]。例如，冲压吨位、抛光时间等跨工序过程参数，与餐厨具最终的质量结果存在紧密联系。通过对这些参数的精准收集、整合与分析，质量数据中台能挖掘出参数变化对终端质量的影响规律。这不仅为企业优化生产工序、改进制造工艺提供数据支撑，还能助力企业提前预判质量风险，针对性地采取预防措施，从而有效提升不锈钢餐厨具的整体品质，增强企业在市场中的竞争力。

四、策略实施与效果验证

（一）试点企业实施案例

1. 企业概况与实施方案

该出口型不锈钢厨具制造商在策略导入阶段，基于工业工程视角，从流程优化、人员培训、设备管理等多方面制定详细计划。流程上，运用价值流分析识别并消除非增值环节，减少生产过程中的浪费；人员方面，开展针对性品质管理培训课程，提升员工品质意识与操作技能；设备管理上，建立预防性维护计划，确保设备稳定运行。同时，通过建立跨部门协同机制，打破部门壁垒，成立跨部门品质管理小组，实现信息实时共享，共同解决品质问题。策略实施后，企业产品一次合格率显著提升，客户投诉率大幅下降，有效验证了基于工业工程视角的品质管理策略对提升不锈钢餐厨具制造企业产品品质具有积极作用^[9]。

2. 关键指标对比分析

在试点企业实施基于工业工程视角的品质管理策略后，主要质量指标发生显著变化。实施前，产品直通率较低，客户投诉率较高，严重影响企业效益与声誉。而实施后，直通率提升了23%，这意味着更多产品无需返工即可直接进入下一生产环节，

极大提高了生产效率与产品一次合格率^[10]。同时，客户投诉率下降 67%，表明产品质量得到明显改善，客户满意度大幅提升。为进一步证实改进的显著性，运用 T 检验进行分析，结果显示 $p < 0.01$ ，这表明该品质管理策略对提升产品质量效果显著，并非偶然因素导致，有力证明了基于工业工程视角的品质管理策略在不锈钢餐厨具制造企业中的有效性与可行性。

（二）经济效益测算模型

1. 质量成本构成分析

在不锈钢餐厨具制造企业中，对质量成本构成进行分析至关重要。预防成本方面，检测设备投入需考量设备购置、维护以及人员培训等费用，先进的检测设备能在生产前期有效发现潜在质量问题，减少后续损失。鉴定成本里，实验室费用涵盖仪器校准、实验耗材及专业人员薪资等，精准的鉴定有助于判定产品是否符合质量标准。故障成本的报废损失则直观反映出因质量问题导致的直接经济损耗。通过核算预防成本、鉴定成本与故障成本的变动趋势，能够清晰洞察企业在不同阶段质量成本的变化情况。进而验证质量投资回报率（ROI），评估品质管理策略在经济效益层面的成效，为企业后续品质管理决策提供有力依据。

2. 全要素生产率评估

在经济效益测算模型的全要素生产率评估环节，借助 Malmquist 指数实现对设备综合效率（OEE）提升幅度的量化。通过精确计算，明确在品质管理策略实施前后，OEE 的具体变化数值。同时，深入分析质量改善与产能利用率之间的协同促进效应。观察随着品质提升，生产过程中不良品率降低，设备因处理不良品导致的停机时间减少，从而使产能利用率得到提高。通过数据对比，清晰呈现品质管理策略对全要素生产率的积极影响，验证策略实施在提升企业生产效率、优化资源配置等方面的有效性，为企业进一步提升经济效益提供有力依据。

（三）行业推广适应性研究

1. 中小企业实施路径

对于营收小于 5 亿的不锈钢餐厨具制造中小企业，需依据企业信息化基础中 ERP 覆盖程度，分阶段模块化部署品质管理策略。若 ERP 覆盖程度较低，先从基础模块入手，如建立标准化的生产流程文档，明确各工序质量检验标准，并通过简单的数据记录工具收

集生产中的质量数据。随着 ERP 覆盖程度提升，引入与 ERP 系统适配的质量追溯模块，实现产品全生命周期质量信息跟踪。当 ERP 覆盖较为全面时，部署基于大数据分析的品质预测模块，借助历史质量数据预测潜在质量问题。通过这样梯度实施，可有效提升企业品质管理水平。在实施过程中，定期对产品一次合格率、客户投诉率等关键指标进行监测，验证策略实施效果，不断优化品质管理策略，确保能切实满足中小企业提升产品品质的需求。

2. 跨国供应链协同机制

在策略实施方面，不锈钢餐厨具制造企业构建质量数据中台，将各跨国工厂的质量数据进行整合与分析。一方面，基于中台搭建全球统一的质量标准数据库，确保无论身处何地，所有工厂都遵循一致的质量准则。另一方面，制定异常响应协议，明确各工厂在面对质量异常时的处理流程、沟通渠道及责任划分，实现跨国多工厂间协同作业。

在效果验证上，通过定期收集各工厂质量数据，对比实施前后产品次品率、客户投诉率等关键指标。若次品率显著下降、客户投诉减少，表明该策略有效提升了产品质量，增强了跨国供应链协同能力。同时，调研各工厂对协同机制的反馈，评估其易用性与实际价值。经实践验证有效的品质管理策略，可进一步推广至同行业其他企业，助力整个不锈钢餐厨具制造行业提升品质管理水平。

五、总结

本研究基于工业工程视角，深入剖析了不锈钢餐厨具制造企业的品质管理问题，并提出了切实可行的策略。研究结果表明，运用工业工程方法，如价值流重构、过程控制强化以及数字化系统集成，能有效提升企业的品质管理水平，具体体现为节拍时间显著缩短、Cpk 达标率大幅提升以及质量追溯时效的明显提高。这不仅为不锈钢餐厨具制造企业构建了一套系统化的品质管理策略，更为传统制造企业在质量提升方面提供了具有借鉴意义和可复制性的实施框架。未来，随着新技术的不断涌现，可进一步拓展研究 AI 视觉检测、数字孪生等与工业工程的融合应用，以持续推动制造企业品质管理的创新与发展。

参考文献

- [1] 肖富民. 基于人因工程学的厨具设计研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [2] 张建波. 基于超越预算视角的 A 汽车制造企业全面预算管理优化研究 [D]. 重庆理工大学, 2021.
- [3] 韩璐. 基于低碳视角的云制造平台激励策略研究 [D]. 河北工业大学, 2021.
- [4] 曾佳韵. 基于政府规制的企业再制造策略研究 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [5] 岳昕媛. 渠道管理视角下 C 制造企业营运资金管理绩效研究 [D]. 长春工业大学, 2021.
- [6] 马彤兵. 基于工业工程思想的沈阳制造企业数字化转型路径研究 [J]. 全国流通经济, 2021(22): 39-41.
- [7] 谢勇. 浅析面向智能制造的工业工程和精益管理 [J]. 中国设备工程, 2024(13): 66-68.
- [8] 齐二石, 霍艳芳, 刘洪伟. 面向智能制造的工业工程和精益管理 [J]. 中国机械工程, 2022, 33(21): 2521-2530.
- [9] 杨武, 王广海. 云浮市新兴县不锈钢餐厨具产品质量比对分析与改进策略 [J]. 现代商贸工业, 2023, 44(1): 86-89.
- [10] 向艳, 蒋国璋, 张翰庭, 等. 工业工程与智能制造集成的企业增效转型模式 [J]. 机械制造, 2022, 60(5): 87-92.

精益生产和智能制造在电梯制造工艺技术开发及管理中的应用

刘钦亮

日立电梯（中国）有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120047

摘 要： 本文探讨电梯制造工艺技术，阐述传统工艺瓶颈，如焊接和螺栓连接的问题。介绍数字化转型关键要素，包括设备互联、工艺参数优化等。还涉及抽铆、无铆连接等工艺开发，以及智能生产系统构建、参数自适应系统等内容，强调精益生产与智能制造融合的重要性及成果，并提及投资回报模型构建

关 键 词： 电梯制造；精益生产；智能制造

Application of Lean Production and Intelligent Manufacturing in the Development and Management of Elevator Manufacturing Technology

Liu Qinliang

Hitachi Elevator (China) Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article explores the manufacturing technology of elevators, highlighting the challenges faced by traditional methods, such as welding and bolted connections. It introduces key elements of digital transformation, including equipment interconnection and process parameter optimization. The article also discusses the development of processes like riveting and rivetless connections, as well as the construction of intelligent production systems and parameter adaptive systems. It emphasizes the importance and achievements of integrating lean production with intelligent manufacturing, and mentions the construction of return on investment models

Keywords： elevator manufacturing; lean production; intelligent manufacturing

引言

随着制造业的发展，电梯制造工艺技术面临着不断升级的需求。2023年发布的《制造业高质量发展行动纲要》强调了推动制造业智能化转型的重要性。在电梯制造中，传统的焊接和螺栓连接工艺存在诸多问题，如焊接的热变形风险及螺栓连接的装配繁琐等，影响产品质量和生产效率。而数字化转型成为关键驱动要素，包括设备互联、工艺参数优化和质量追溯等方面。同时，构建数学模型研究连接工艺力学性能、开发数字化工艺系统以及智能生产系统构建等也至关重要，这些都为电梯制造工艺技术的发展提供了新的方向和方法。

一、电梯钣金工艺技术现状分析

（一）传统连接工艺瓶颈分析

传统的焊接和螺栓连接工艺在电梯门板/轿厢加工中存在诸多瓶颈。焊接工艺往往会导致热变形风险，影响产品的尺寸精度和外观质量^[1]。同时，焊接过程耗时较长，降低了生产效率。在质量方面，焊接可能产生气孔、裂纹等缺陷，增加了废品率。螺栓连接虽然避免了热变形问题，但装配过程繁琐，需要大量的人工操作，导致工时消耗过多。而且螺栓连接的紧固力不易控制，可能出现松动等质量问题，同样影响产品质量和生产效率。通过建立工时消耗与废品率的数据模型，可以更直观地分析这些传统连接工艺的瓶颈，为改进工艺提供依据。

（二）数字化转型驱动要素

随着信息技术的飞速发展，数字化转型已成为电梯钣金工艺技术发展的关键驱动要素。设备互联是重要方面，通过MES系统与ERP集成，实现生产设备之间的信息交互与协同工作，为新型连接工艺开发提供数据支持，提高生产效率和质量稳定性^[2]。工艺参数优化也是核心要点，借助数字化技术可以精确控制和调整钣金加工过程中的各种参数，如切割速度、折弯角度等，确保工艺的精准性和一致性。质量追溯同样不可或缺，数字化系统能够记录生产过程中的每一个环节和相关数据，一旦出现质量问题，可以快速准确地追溯原因，采取有效的改进措施，保障产品质量。

二、新型连接工艺技术特性研究

（一）抽铆工艺力学性能研究

构建不同材料组合（镀锌板/不锈钢）的径向力数学模型对于研究抽铆工艺力学性能至关重要。该模型能够量化不同材料组合在抽铆过程中所受径向力的大小及变化规律。通过 DOE 实验设计，可以系统地研究多个工艺参数对抽铆接头剪切强度的影响。例如，铆钉直径、板材厚度、抽铆枪压力等参数都可能对接头剪切强度产生作用。实验结果可以验证工艺参数与接头剪切强度之间的作用规律，为优化抽铆工艺提供理论依据和数据支持，有助于提高电梯制造中抽铆连接的质量和可靠性^[3]。

（二）无铆连接数字化工艺开发

在无铆连接数字化工艺开发中，基于机器视觉的定位补偿系统的设计至关重要。该系统可通过精确的图像识别与处理技术，对连接部位进行精准定位，有效补偿因加工或装配误差导致的位置偏差^[4]。同时，开发板厚公差自适应算法，使其能够根据不同的板材厚度自动调整连接参数，确保连接质量的稳定性。另外，建立工艺参数知识库与质量预测模型，通过大量的实验数据和实际生产数据积累，将工艺参数进行分类整理并存储于知识库中。利用数据分析和机器学习算法，建立质量预测模型，从而提前预测连接质量，为生产过程的质量控制提供有力支持^[4]。

三、智能生产系统构建

（一）智能制造单元架构设计

1. 设备物联与数据采集

在智能生产系统构建中，智能制造单元架构设计的设备物联与数据采集至关重要。以电梯制造为例，通过 OPC UA 协议可实现压装设备与测量仪器的实时数据交互^[5]。这种交互能够构建冲击力 - 位移曲线的在线监测系统。利用该系统，可实时获取并分析生产过程中的关键数据，从而实现对生产过程的精准监控和优化。设备物联使得各个生产设备之间能够互联互通，打破信息孤岛，数据采集则为后续的数据分析和决策提供了基础，有助于提高生产效率和产品质量，推动电梯制造工艺技术的发展和管理水平的提升。

2. 工艺参数闭环优化

开发基于深度强化学习的参数自适应系统是工艺参数闭环优化的关键。该系统能够实时监测生产过程中的各种参数，并根据预先设定的目标进行自适应调整。通过深度强化学习算法，系统可以学习到不同参数组合对生产结果的影响，从而找到最优的参数设置。同时，建立连接质量与能耗的多目标优化模型也是重要环节。在电梯制造中，质量和能耗是两个关键指标，通过该模型可以综合考虑这两个因素，找到既能保证产品质量又能降低能耗的工艺参数。这不仅有助于提高生产效率和产品质量，还能降低生产成本，实现智能制造的目标^[6]。

（二）数字化质量管控体系

1. 在线检测技术应用

激光轮廓仪可用于实现接头几何特征的三维重构。通过精确测量接头的轮廓数据，能够获取其详细的几何信息，为后续的质量评估和分析提供基础^[7]。同时，构建基于卷积神经网络的缺

陷分类模型也是关键。该模型能够对采集到的数据进行学习和分析，准确识别各种缺陷类型。利用大量的样本数据对模型进行训练，使其不断优化和提高准确性。通过这种方式，可以实现对生产过程中的缺陷进行高效、准确的检测和分类，从而及时采取措施进行改进，提高产品质量，保障生产过程的稳定性和可靠性。

2. 追溯系统集成开发

设计基于区块链技术的工艺参数存证系统是实现产品全生命周期质量数据可信追溯的关键。该系统利用区块链的分布式账本、不可篡改和加密算法等特性，确保工艺参数的真实性和完整性。在电梯制造过程中，各个环节的工艺参数都能被准确记录并存储在区块链上。从原材料采购到零部件加工，再到整机装配，每一个步骤的质量数据都能被追溯。这不仅有助于在出现质量问题时快速定位根源，采取有效的改进措施，还能对产品质量的持续提升提供有力的数据支持，增强企业在市场中的竞争力^[8]。

四、精益智能融合实践

（一）价值流分析与改善

1. 工艺过程时间研究

运用价值流图析（VSM）工具对电梯制造工艺进行分析是精益生产中的重要方法。通过 VSM，可以详细量化传统工艺与新型工艺在周期时间上的差异。这种量化分析有助于企业精准识别生产过程中存在的问题，尤其是七大浪费中的最大改善点。例如，在电梯零部件加工环节，传统工艺可能因设备布局不合理导致物料搬运时间过长，这就是一种典型的浪费。通过 VSM 工具对比新型工艺，能够直观地看到时间差异，从而为改善提供明确的方向，以实现生产周期的缩短和生产效率的提升^[9]。

2. SMED 快速换型方案

设计模块化模具系统与参数预置方案是实现 SMED 快速换型的关键。通过对模具系统进行模块化设计，可提高模具的通用性和互换性，减少换模过程中的调整时间。同时，参数预置方案能够确保在换模后快速准确地设置生产参数，避免因参数调整不当而导致的生产延误。这种将产品切换时间压缩至 Takt Time 以下的方法，不仅提高了生产效率，还能更好地满足市场对产品多样化的需求。在电梯制造工艺技术开发及管理应用中应用此方案，可有效提升企业的竞争力，实现精益生产和智能制造的融合^[10]。

（二）智能排产系统开发

1. 动态排程算法设计

构建考虑设备健康状态的混合整数规划模型是动态排程算法设计的关键。该模型需综合考虑设备的多种状态因素，如故障概率、维护周期等，以实现更精准的排产。通过对设备运行数据的实时监测和分析，获取设备健康状态信息，并将其融入规划模型中。同时，开发基于数字孪生的可视化排程系统，利用数字孪生技术对生产过程进行实时模拟和映射。这不仅直观展示排产结果，还能根据实际生产情况进行动态调整。在算法设计中，要注重模型的优化求解，采用合适的算法和工具，提高计算效率和排产的合理性，从而实现精益生产和智能制造在电梯制造工艺技术的

开发及管理中的有效应用。

2.应急响应机制建设

在精益智能融合实践中，应急响应机制建设至关重要。对于订单变更和异常停机，需建立分级响应策略。依据变更和停机的影响程度、紧急性等因素进行分级。对于影响较小、可短期调整的情况，制定快速局部调整方案；对于重大变更和停机，启动全面协调机制，涉及生产、采购、销售等多部门协同。同时，制定物料缓存方案，根据生产节拍和订单情况，合理设置物料缓存量和缓存位置，确保在异常情况下物料供应的及时性。针对设备重路由，建立动态设备路径规划系统，当出现异常停机时，能迅速调整设备使用路径，将生产任务合理分配到其他可用设备上，保障生产流程的连续性。

（三）综合效益评估体系

1.关键绩效指标设计

构建涵盖设备综合效率（OEE）、一次合格率（FTQ）、能耗强度等多维度的评估矩阵。OEE用于衡量设备的实际生产能力与理论生产能力的比率，综合考虑设备的可用性、性能效率和质量合格率，通过提高OEE可提升整体生产效率。FTQ则聚焦于产品质量，直接反映生产过程中产品首次合格的比例，有助于发现质量控制的薄弱环节。能耗强度指标关注生产过程中的能源消耗情况，推动企业实现节能减排目标。同时，针对精益生产和智能制造融合实践的不同实施阶段，设定合理的基准目标值，以便对各阶段的实施效果进行准确评估和持续改进。

2.投资回报模型构建

在投资回报模型构建中，采用净现值法具有重要意义。净现值法可量化工艺改进的长期收益，通过考虑资金的时间价值，对未来的收益和成本进行折现，从而准确评估投资项目的经济效益。同时，建立设备投资与质量成本节约的关联函数也是关键。设备投资可能带来生产效率的提高、产品质量的提升等，这些因素又会直接影响质量成本的节约。通过合理的数据分析和建模，确定这种关联关系，能够更全面地评估投资回报。这不仅有助于企业在电梯制造工艺技术开发及管理做出更明智的投资决策，还能为精益生产和智能制造的融合实践提供有效的经济分析依据。

五、总结

精益生产和智能制造在电梯制造工艺技术开发及管理中的重要应用。电梯钣金工艺的智能化改造实践成果显著，新型连接工艺大幅降低单件作业时间并提高材料利用率，基于数字孪生的工艺优化系统有效降低质量缺陷率。这些成果为装备制造业的数字化转型提供了宝贵经验，包括可复用的方法论和切实可行的落地路径。这表明精益生产和智能制造理念能够推动电梯制造工艺技术的进步，提高生产效率和产品质量，对整个行业的发展具有积极的促进作用，未来应进一步推广和深化这些理念在电梯制造及其他相关领域的应用。

参考文献

- [1] 楼泽坤. 中小制造企业精益生产改进方案评估模型及应用 [D]. 重庆交通大学, 2021.
- [2] 陈良军. 精益生产在 S 公司制造维修管理中的应用研究 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [3] 侯向英. 精益生产理论在 L 制造公司的应用研究 [D]. 中北大学, 2022.
- [4] 范剑波. DAC 公司中精益生产管理的应用研究 [D]. 石河子大学, 2023.
- [5] 陈太洲. 基于精益生产的 A 公司仪器制造车间现场管理改善研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [6] 林伟华. 精益生产在电梯制造企业中的应用研究 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(05): 51-52+54.
- [7] 岳志春, 李玉茜. 智能制造背景下精益生产管理模式变革 [J]. 合作经济与科技, 2023, (18): 126-127.
- [8] 余庆泽, 毛为慧, 饶志平, 等. 智能制造企业精益管理与精益文化体系探析 [J]. 合作经济与科技, 2021, (14): 111-113.
- [9] 王丽青. 精益生产在制造企业成本管理中的应用探索 [J]. 商讯, 2021, (10): 105-106.
- [10] 关迪, 尤凤翔. 精益生产在电梯制造企业的应用研究 [J]. 中国管理信息化, 2019, 22(01): 103-106.

机械工程结构设计在测绘领域产品中的技术应用与发展

刘贵磊

广州辰星导航技术有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120048

摘 要 : 机械工程学科中的产品结构设计应用于各行各业, 由于产品定位及目标方向的不同, 所涉及的产品结构设计方式也有所差异, 针对测绘产品, 结构设计所占的比重是相对较高的, 如何考虑堆叠、如何实现多模块兼容、如何实现产品三防、如何保证产品散热需求、如何满足环境适应性等等一系列指标, 都是产品结构设计所需要考量的, 在产品高频迭代及性能需求不断提升的时代背景下, 如何推动行业的发展, 产品结构设计的技术应用及创新也尤为重要。

关 键 词 : 测绘产品; 结构设计; 技术应用

The Technical Application and Development of Mechanical Engineering Structural Design in Surveying and Mapping Products

Liu Guilei

Guangzhou Chenxing Navigation Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Product structural design in the discipline of mechanical engineering is applied in various industries. Due to different product positioning and target directions, the product structural design methods involved also vary. For surveying and mapping products, structural design accounts for a relatively high proportion. How to consider stacking, how to achieve multi module compatibility, how to achieve product three defenses, how to ensure product heat dissipation requirements, how to meet environmental adaptability and other indicators are all factors that need to be considered in product structural design. In the context of high-frequency iteration and continuous improvement of performance requirements of products, how to promote the development of the industry, the technical application and innovation of product structural design are particularly important.

Keywords : surveying and mapping products; structural design; technology application

引言

国家颁布的《“十四五”智能制造发展规划》, 其中有强调要推动制造业创新升级, 机械工程学科的发展与此紧密相关。在测绘相关领域, 测绘领域产品种类繁多, 结构设计在产品上的体现, 主要表现在可视化、可交互设计、可产品化等方面, 换句话说就是产品要满足用户诉求并解决用户问题, 在使用上要体现出便利性, 产品本身要可实现可制造, 还要兼顾外观漂亮等特性。对于产品而言, 产品设计可以在确保产品功能实现和外观美学等一系列要求的前提下, 在最大程度上优化结构材料的使用, 将装配流程简化到最合理, 将结构强度达到最优并兼顾产品降本, 保障产品整个生命周期。如果产品设计之初, 产品结构设计欠缺, 就可能导致生产困难, 良品率低下, 也会间接的导致成本飙升, 甚至更严重的情况导致产品失效等严重问题。同时还要与硬件平台及软件应用平台搭建协同一体化发展。

因此, 产品结构设计的系统性分析和研究, 不仅具有重要的理论价值, 还具有非常高的现实意义, 产品结构设计理论的不断突破和持续创新, 也在助推整个行业的不断前行与发展。本文以产品结构设计在测绘领域产品中的技术应用为例进行阐述。^[1-3]

一、测绘及其产品结构设计特征分析

测绘是对自然地理坐标及其他人工设施的形状大小、空间位置坐标及其属性进行测定、数据采集, 绘制成图的一门技术学科。随着科技的发展, 现已经形成了以计算机技术、光电技术、网络通讯技术、空间技术科学、信息技术科学为基础, 以全球导航卫星定位系统、遥感、地理信息系统为技术核心的多学科融合

技术, 那么对应的测绘产品就是以测绘要素为核心, 通过多学科技术融合手段来标定空间位置及形成绘图的技术性产品工具。^[4-8]

随着全球市场竞争的日益激烈和消费者需求的不断提升, 用户对测绘产品的诉求也在不断增多, 一款产品的成功不再仅仅依赖于新颖的外观或强大的功能, 产品内在的结构设计品质已成为决定产品成败的关键因素。产品结构设计, 作为联接工业设计 (ID)、硬件设计与生产制造 (MD) 的枢纽, 直接决定了产品的

性能、质量、成本、生产周期及用户体验等产品属性，是产品战略实现中重要的一环。

二、产品结构设计技术应用

（一）定义与目标

产品结构设计是指根据产品功能、外观及工艺要求，运用工程力学、材料学、机械原理等学科知识，对产品的内部构造、零部件间的连接方式、材料选择及制造工艺选取所进行的具体化规划设计过程。^[9]

测绘产品在开发初始，首先要明确产品的定位及定向，要明确产品设计的目的及用户诉求，目的是要解决什么问题，根据用户诉求，决定产品需要怎样的配置，例如，板卡的选型，天线采用那款方式、电池容量的大小、物理串口需要那些定义，环境适应性的级别要求等，然后再进行细化拆分，与产品外观设计、硬件设计等同步进行产品结构设计。

测绘产品结构设计的主要目标可归纳为：

功能实现：确保产品能够稳定、精确地实现其预定功能。这是产品应用的最终目标，产品性能指标的的稳定关乎用户的体验，关乎产品的测绘效率。

可靠性保障：保证产品在预期使用寿命内，能够承受各种环境应力（如冲击、振动、温度变化）而不发生失能失效，而产品结构设计及其结构优化设计就是针对可靠性进行的一系列手段。

可制造性与可装配性：设计出的零件要易于加工、易于成型，整机要便于高效、低成本地装配，零件设计的越简单，加工也就越便利，将复杂的问题简单化，有利于加工制造。简单的装配也有利于提升产品装配率，更能很好的控制产品率，提升产品效能。

成本控制：在满足所有要求的前提下，通过优化设计、选材和工艺来实现最小化制造成本，最优的成本控制就是降本增效，通过材料替代，工艺改进，结构简化及再优化，模具开发生产等手段，将单个零部件的单价控制到最合理，无形之中，将会提升产品的毛利率，增加产品的利润率。

用户体验与安全：尽可能的根据用户的诉求及操作方式对产品进行考量，通过 i 人机工程学的考量，确保产品在使用过程中的便利性，同时还要兼顾使用安全、操作便捷，符合行业行规的要求。^[10]

（二）测绘产品结构设计的基本原则

产品结构设计合理性原则：结构设计必须符合结构力学、材料力学，机械原理，模具工程科学原理，零部件的设计，零部件之间的装配都要在设计中进行考量。

产品结构设计简化原则：在满足功能的前提下，尽可能减少零件数量，简化零件形状，简易的零件结构，将会降低产品设计的不合理性，也有益于产品在后期问题出现时，方便分析问题所在。

产品结构设计安全冗余原则：对产品的关键承力零部件或个别零部件安全承力部位，在设计过程中务必要留有足够的强度裕量设计，以应对不确定外在因素所导致的产品强度过载情况出现，将产品的结构强度作强化设计考量。

产品结构设计人机工程原则：测绘产品属于用户经常外出作业的工业级别的常手触类产品，在产品结构设计要重点考虑用户外出作业的操作习惯、使用场景及产品出现问题后方便维修的便

利性等。

产品结构设计标准化与模块化原则：优先选用行业标准件、通用件，这样可以规避产品设计过程中的不确定性，将设计风险降到最低，并将产品划分为若干功能模块，将模块分区划分再统一集成式的设计，可以较为简单的形成产品设计库，供其余项目借鉴及使用，避免模块的反复设计，提升设计效率，降低不良设计的风险，同时也便于产品后续的生产、维修和升级。

三、测绘产品结构设计的核心流程

对于研发设计而言，测绘产品在结构设计过程中的系统化流程通常包含以下几个阶段：

（一）需求分析与定义：

明确立项的意义及产品目标，以此为导向，深入理解产品规格书，明确产品功能、性能、成本、工期、法规等所有约束条件。

（二）初步概念设计：

根据产品定义需求，导入产品模组，从全局结构承载、集成度、空间利用率、产品电磁屏蔽要求结合结构材料属性，考虑产品散热、跌落、三防等产品适应性硬性要求方便，进行零部件及模块间的结构堆叠布局，同时与工业设计师紧密协作，参与到外观设计及评审过程中，从结构可行性角度提出合理性建议，将结构设计稳定性、可行性的考虑与工业设计的美学进行融合，于此同时还需要兼顾硬件模组合理性布局的考量，电磁兼容、散热隐患、信号失真，容量大小等一系列问题都要在此阶段进行合理性评估，将硬件指标，产品结构、工业外观综合评估，生成多个初步的结构布局方案及产品外观方案。

（三）详细结构设计：

外观方案定档后就基本上是产品结构设计及细化设计的阶段，采用 3D 建模的方式对零部件进行详细的三维设计及零部件之间通过定义并分析零件之间的尺寸公差与配合的方式，确保装配精度和功能的虚拟装配，同步进行面向制造和装配的设计检查，优化零件结构。

（四）工程分析与验证：

CAE 分析：运用有限元分析对零部件、模块、甚至整个产品进行应力、应变、模态（振动）、热管理、显式动力学等仿真，来验证产品结构设计的合理性，将结构设计的隐在问题规避在研发设计阶段，有效控制产品设计开发风险，缩短产品开发时间。

手板原型制作与测试：通过 3D 打印、CNC 加工等方式制作结构手板原型，进行实际的功能、寿命和可靠性测试结合 CAE 分析指标夯实结构设计的稳定性。

（五）设计优化与迭代：

根据分析和测试结果，对产品零部件进行修改、优化再优化，直至满足所有要求。

（六）工程图输出与生产移交：

结合 3D 图纸，以面向制造生产角度为出发点生成用于生产的二维工程图纸，标注所有材料、尺寸、公差、工艺要求，并将完整的设计数据包移交制造部门。

四、产品结构设计的测绘产品开发过程中的关键方法与技术应用

（一）面向制造与装配的设计

DFMA 是产品结构设计中最为重要的方法论之一。

DFA：旨在简化装配过程。其方法核心是尽可能的减少装配零件数量，设计易于定位防呆、安装的特征，通过定位、紧固结构手段，简化装配方式。

DFM：旨在使零件易于经济地制造。在产品结构设计工作中要深刻理解并掌握所选制造工艺（如注塑、冲压、压铸、CNC）的优越性及局限性，设计上避免诸如壁厚不均、不必要结构特征、不必要的深孔、强度稳定性差等工艺性缺陷。

（二）可靠性设计

通过仿真、分析和试验等手段，旨在确保产品在测绘行业规定的外部环境和规定时长内无故障、无差别地工作。方法包括：失效模式与影响分析，严苛测试环境，有计划系统性地分析产品在使用过程中隐在的故障模式及所引发的后果程度，通过结构优化设计的手段，预先作出针对性的改进措施。耐久性分析与测试：通过模拟仿真和实验双行手段，测试产品在长期使用中的疲劳、磨损程度及产品寿命测试

（三）轻量化设计

测绘产品功能集成度越来越高，对应的模组也越来越多，硬件模组重量也随之加重。开发过程中，就要求产品结构在保证结构强度及功能实现的前提下，如何进行轻量化设计，减轻产品重量成为了产品结构的一个指标，也是现行产品设计的重要方向。途径包括：

结构优化：通过拓扑设计优化、形貌设计优化等手段，强化稳定性冗余、消除材料冗余的方式，实现“材尽其用”。

材料选择：采用高强度钢、铝合金、镁合金、工程塑料及复合材料等轻质材料。

工艺创新：个别零件使用结构中中空方式、发泡材料生产方式、激光拼焊板、零件超声焊接等先进工艺。

（四）成本控制

产品成本是在产品开发设计中产生的，而非后期核算出来的。从产品成本的角度出发，产品结构设计师需要通过简化结构设计、选材经济、降低加工难度、减少装配难度，降低装配工时等多重方式来减低产品成本，在开发设计阶段就将产品成本控制目标区间之内。

五、现代发展技术与产品结构设计的融合应用

计算机辅助设计工程（CAE）与产品结构设计的深度融合：

模拟仿真驱动产品结构设计将成为行业发展趋势。设计师可以在概念阶段就利用仿真工具进行性能及结构强度预测，从而实现“设计即正确”，大幅减少后期修改，这种强化结构设计合理性的技术，体现了仿真模拟为产品结构设计提供优化方向的优越性。

增材制造（3D打印）的应用：3D打印技术解放了结构设计的自由度，使得制造复杂晶格结构、一体化成型部件成为可能，为轻量化和功能集成开辟了新路径，同时将加工验证的时间大幅缩短，有利于外观手板和结构手板的制作。

数字化模型孪生：为物理产品创建一个完全对应的数字模型，在整个产品生命周期中实时同步数据。结构设计可以作为数字化模型孪生的基础，用于预测性维护、性能监控和迭代优化。

人工智能与自动化生成式设计：AI算法可以基于设定的设计目标和约束条件（如载荷、边界条件、材料），自动生成最优的结构方案供设计师选择与参考，极大地拓展设计创新空间深度与广度。

六、结论与展望

机械工程产品结构设计是一项与多学科交叉、理论与实践紧密结合的创造性工科。其设计目的不仅仅是将用户诉求及产品创意进行技术性落地的手段，也是决定产品质量及核心竞争力的战略环节之一。展望未来的机械工程产品结构设计将呈现以下趋势：

1. 智能化设计设计方式：AI技术和机器学习技术的发展将会更加深层次的融入到产品设计流程中，实现产品结构设计的自动化设计、优化、产品结构设计缺陷的智能化预测和材料及加工工艺的智能化推荐。

2. 数字集成化与协同化设计方式：基于云计算平台的产品设计工具将联接多部门、多地域间的实时协同化设计，通过平台一体化的方式，产品将从设计、仿真、优化、再仿真、再优化及到无缝数据流追溯制造的方向上迈进。

3. 可持续化设计方式：绿色环保设计理念将更加深化到产品设计中，产品结构设计需要更多地考虑材料的环保性，绿色无污染性、可回收性、产品的可拆卸性以及整个生命周期对环境是否存在影响。

4. 个性化定制设计方式：伴随着柔性制造先进技术的发展，产品结构设计也必然要满足小批量、多品种、多模多态的生产方式，以达到快速响应用户个性化需求的目的。

综上所述，机械工程结构与多学科的不断融合发展，拓宽了产品设计的广度，提升了产品结构设计的高度，测绘领域的产品也将在产品结构设计不断发展的技术背景助推下起着高集成化、高标质量化、高融合化、高智能化、高复杂环境适应性的方向上稳步迈进、稳步前行。

参考文献

- [1] 张成. 电子产品结构设计重要因素探讨 [J]. 中国设备工程, 2019(22): 101-102.
- [2] 宋永慧. 仿生晶化与结构设计在钙钛矿发光二极管中的应用 [D]. 中国科学技术大学, 2023.
- [3] 王美龙. 新型含硼有机分子的结构设计、合成及在催化与传感领域的应用 [D]. 青岛大学, 2022.
- [4] 汪凯. 超声椭圆振动切削装置结构设计与应用验证研究 [D]. 华中科技大学, 2022.
- [5] 周旋正. 面向听诊应用的 MEMS 仿生鱼耳传感器结构设计及实现 [D]. 中北大学, 2022.
- [6] 赵伟. 结构力学仿真在机械产品结构设计中的应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(06): 55-56.
- [7] 吴兴娜. 机电一体化技术在机械工程中的应用 [J]. 商品与质量, 2016, 000(014): 201-202.
- [8] 周鹏飞. 数学模型在服装结构设计中的建立与应用 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(10): 206-208.
- [9] 张超, 郭赞峰. 基线测量在长度量值溯源中的应用与创新 [J]. 中国计量, 2023, (11): 79-81.
- [10] 严海. AIGC 在融媒体中的应用与技术创新 [J]. 传播力研究, 2023, 7(30): 4-6.

摩托车机械设计与自动化的融合路径

吴斌

广州三雅摩托车有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120049

摘 要： 摩托车行业呈增长态势，机械设计与自动化的融合成为一种趋势。本文对这一融合进行探讨，分析其现状、优势及面临的挑战。深入研究核心技术、数据相关问题、系统架构以及统一数据建模。还涵盖机器学习、数据驱动设计、预测性维护以及加密通信等网络安全方面内容，旨在推动行业可持续发展。

关 键 词： 摩托车；机械设计；自动化

The Integration Path of Motorcycle Mechanical Design and Automation

Wu Bin

Guangzhou Sanya Motorcycle Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The motorcycle industry has seen growth, with the integration of mechanical design and automation becoming a trend. This paper explores this integration, analyzing its status, benefits, and challenges. It delves into core technologies, data – related issues, system architecture, and unified data modeling. Machine learning, data – driven design, predictive maintenance, and cybersecurity aspects like encrypted communication are also covered, aiming to promote the industry's sustainable development.

Keywords： motorcycle; mechanical design; automation

引言

近年来，随着对高性能、燃油高效且安全的摩托车需求不断增加，摩托车行业经历了显著的增长与变革，机械设计与自动化的融合成为必然趋势^[1]。然而，这种融合也面临着挑战。在此背景下，发布的《汽车网络安全指南》强调了机动车（包括摩托车）相关技术中网络安全的重要性，为摩托车自动化系统的安全设计提供了参考。本文探究摩托车机械设计与自动化的融合路径，分析其现状、优势及挑战，并提出解决方案。同时深入研究核心技术、系统架构以及设计优化与维护的各个方面，依据政策突出安全措施的重要性，以推动摩托车行业可持续发展。

一、摩托车机械设计自动化现状

（一）机械自动化核心技术

在摩托车机械设计自动化中，机械自动化的几项核心技术发挥着关键作用。传感器集成是关键方面之一。传感器安装在摩托车的各个部位，如发动机、刹车和车轮。这些传感器能够精确检测速度、温度、压力和振动等参数^[2]。例如，速度传感器提供实时速度信息，这对摩托车的速度表以及电子控制单元（ECU）调整发动机性能至关重要。温度传感器监测发动机温度，以便及时启动冷却系统防止发动机过热。

实时控制系统是另一项重要技术。这些系统能即时处理传感器收集的数据。基于这些实时数据，控制系统可以立即对摩托车的运行进行调整。例如，当刹车传感器检测到突然刹车时，实时控制系统能迅速调整发动机动力输出，防止车轮抱死，确保刹车安全。它还能协调各个部件，优化摩托车的整体性能，比如根据

发动机负载调整燃油喷射和点火正时。

可编程逻辑控制器（PLC）在摩托车机械设计自动化中也应用广泛。PLC可通过编程执行特定的控制任务。在摩托车制造过程中，它们能控制装配流程，确保零部件准确无误地按顺序装配。它们还能管理制造设备（如机械臂）的运行，提高生产效率和产品质量。这三项核心技术——传感器集成、实时控制系统和PLC，共同推动了摩托车机械设计自动化的发展。

（二）设计过程中的数据孤岛挑战

在摩托车机械设计自动化的设计过程中，CAD/CAM系统和生产线监测平台之间碎片化的数据管理带来了严峻的数据孤岛挑战。CAD/CAM系统主要负责设计和制造环节，而生产线监测平台侧重于实时生产数据的收集与控制。然而，这两个关键部分往往独立运行^[3]。

CAD/CAM系统中的数据通常以设计模型的形式存在，包括三维几何模型、零件规格和装配关系。另一方面，生产线监测平

台收集诸如生产速度、设备状态和质量检测结果等数据。这些系统之间缺乏无缝集成，意味着设计数据无法在生产线上得到有效传输和利用，与生产相关的反馈也不能及时纳入设计之中。

例如，CAD/CAM系统中做出的设计变更可能不会自动在生产线监测平台上更新，从而导致生产延误或质量问题。同样，基于生产的洞察，如常见的制造瓶颈，可能无法传达给设计团队，进而阻碍机械设计的优化。这些数据孤岛不仅妨碍了信息的顺畅流动，还影响了摩托车机械设计自动化的整体效率和质量，凸显了有效集成解决方案的迫切需求。

二、机械自动化集成框架

（一）三层系统架构

三层系统架构是摩托车设计中机械自动化集成框架的关键部分。设备层配备了物联网传感器。这些传感器至关重要，因为它们是一线数据采集器。在设计和制造过程中，它们能够检测各种物理参数，比如摩托车部件的速度、温度和振动。例如，温度传感器可以监测发动机的发热情况，在设计验证阶段提供实时数据，以确保发动机正常运行^[4]。

网络层利用工业协议，充当通信桥梁。像 Modbus 或 Profibus 这样的工业协议，确保不同设备和系统之间的数据无缝传输。它们对数据格式和通信规则进行标准化，使设备层的物联网传感器能够准确地将数据传输到上层应用系统。这一层还管理数据传输过程中的安全性和完整性，这对于整个系统的可靠运行至关重要。

应用层专注于制造执行系统（MES）集成。MES 集成能够实现制造过程的高效管理。它可以分析通过网络层从设备层收集的数据，从而优化摩托车制造中的生产计划、质量控制和资源分配。例如，通过分析基于传感器的质量数据，MES 可以识别机械零件潜在的质量问题并及时采取纠正措施，进而提高摩托车机械设计与自动化集成的整体质量。

（二）统一数据资产建模

统一数据资产建模在摩托车机械设计与自动化集成中起着关键作用。它是机械与自动化方面无缝交互的基石。对于发动机系统和变速器总成等关键部件，统一数据资产建模从精确定义几何数据开始。这包括这些部件内每个零件的详细尺寸、形状和公差。几何数据为理解物理结构以及不同零件如何装配在一起提供了基础^[5]。

此外，材料属性也纳入到统一数据资产模型中。发动机和变速器部件所使用的特定材料，以及它们的机械和热性能都被精确记录下来。这一点至关重要，因为它会影响摩托车的性能、耐用性和能耗。另外，与这些部件运行相关的功能数据也被整合进来。例如，功率输出、扭矩传递以及换挡机构的参数都属于功能数据。通过将几何、材料和功能数据统一到一个资产模型中，就有可能在不同场景下模拟和分析这些关键部件的性能。这个统一模型使设计师和工程师能够在优化机械设计的同时优化自动化控制策略，促进摩托车机械设计与自动化的顺利集成。

三、数据驱动的设计优化

（一）自动参数调整

1. 用于动态载荷分析的机器学习

在摩托车机械设计与自动化领域，机器学习在动态载荷分析中起着至关重要的作用。摩托车所承受的动态载荷会因速度、路况和骑手操作等因素而显著不同。借助机器学习算法，工程师能够更准确地对这些动态载荷进行建模和预测^[6]。

例如，神经网络可以通过大量与不同骑行场景相关的数据进行训练，这些场景包括加速、刹车、转弯以及在不平整路面骑行等。这些数据被用于构建模型，以估算作用在摩托车车架各个部件上的力。随后，这些模型可融入设计优化流程，调整车架的强度重量比。

例如，在自动参数调整阶段，基于机器学习的动态载荷分析能够提供实时反馈。如果模型预测在特定动态载荷下，车架某一部位应力过大，系统可自动调整相关参数，比如该部位的厚度或形状。这确保车架不仅满足所需的强度标准，还能保持最佳重量，从而提升摩托车的整体性能、燃油效率和操控性。从本质上讲，基于机器学习的动态载荷分析弥合了实际骑行条件与摩托车机械部件设计之间的差距，推动了更具数据驱动性和高效性的设计优化进程。

2. 悬架系统的生成式设计

在摩托车机械设计与自动化的融合中，数据驱动的设计优化至关重要，尤其是在悬架系统的自动参数调整和生成式设计方面。

自动参数调整使设计过程更高效、精确。借助数据驱动模型，工程师能够设置算法，自动调整悬架系统的各种参数。这些参数可能包括弹簧刚度、阻尼系数和几何尺寸。例如，基于历史测试数据和实时模拟结果，系统可以优化弹簧刚度，使其更好地适应不同路况和骑手体重。这不仅减少了耗时的手动调整过程，还提升了悬架系统的整体性能。

另一方面，悬架系统的生成式设计是一种创新性方法。它利用算法根据一系列输入标准生成多种设计方案，这些标准包括承重要求、空间限制和性能目标等。生成式设计软件会探索广阔的设计空间，同时考虑不同部件之间的复杂相互作用。例如，它可能生成独特的悬架几何形状，既更轻量化又能保持高性能。通过这种方法，摩托车制造商能够发现传统设计方法难以实现的创新设计。这种悬架系统的数据驱动生成式设计，结合自动参数调整，为更先进、优化的摩托车机械设计铺平了道路，最终提升摩托车的骑行体验和性能^[7]。

（二）预测性维护架构

1. 部件生命周期监测

部件生命周期监测是摩托车机械设计与自动化融合中预测性维护架构的关键环节。通过为关键运动部件开发振动模式分析模型^[8]，就有可能全面监测部件的健康状况和使用寿命。这些模型能够检测振动特性的细微变化，而这些变化往往是部件磨损、错位或即将发生故障的早期迹象。

通过从关键运动部件上精心布置的传感器持续收集数据，实时振动数据被输入分析模型。然后，模型对这些数据进行处理，并与代表部件正常运行的预先设定基线模式进行对比。仔细分析与这些基线的偏差，以确定潜在问题的性质和严重程度。

这种方法能够实现主动的维护计划安排。不再依赖固定间隔的维护，因为这种方式可能过于频繁（导致不必要的成本）或过于稀疏（导致意外故障），而是可以在真正需要时精确进行维护。部件生命周期监测不仅有助于延长单个部件的使用寿命，还有助于提升摩托车的整体可靠性和性能。通过密切跟踪部件的生命周期，制造商还能获得有价值的见解，用于未来的设计改进，进一步加强摩托车机械设计与自动化的融合。

2. 故障模式知识图谱

故障模式知识图谱在摩托车机械设计与自动化融合的预测性维护架构中起着关键作用。这些图谱建立了传感器数据与机械故障之间的因果关系^[9]。通过以基于图谱的格式构建知识，它们能够有效地呈现各种部件、故障模式和相应传感器数据之间的复杂关系。

例如，摩托车上的不同传感器可能检测诸如温度、振动和压力等参数。故障模式知识图谱描绘了这些传感器测量参数的变化与特定机械故障之间的关联。如果温度传感器显示发动机温度异常上升，知识图谱可以展示与过热相关的潜在故障模式，如活塞卡死或垫圈故障。

这种基于知识图谱的方法能够让人更全面地了解摩托车的机械系统。它帮助维护团队和设计师更准确地预测故障。有了知识图谱，就有可能将潜在故障的根本原因追溯到特定的传感器数据模式。这不仅支持主动维护策略，还有助于数据驱动的设计优化。设计师可以利用知识图谱中的见解来改进摩托车的机械设计，通过解决图谱中确定的潜在因果关系，使其更可靠，更不易发生故障。

四、自动化机械系统中的网络安全

（一）数据保护机制

1. 控制信号的加密通信

在自动化机械系统中，特别是在融入自动化的摩托车机械设计里，确保控制信号的安全至关重要。为此，对控制信号实施加密通信是一项关键举措。

一个重要方法是在 ECU（电子控制单元）固件更新中采用 TLS 1.3 协议^[10]。TLS 1.3 具备更强的安全特性，例如更强大的加密算法。它显著减少了握手延迟，这对于摩托车系统中的实时控制信号至关重要。当 ECU 需要接收新的固件更新时，TLS 1.3 可确保更新服务器与 ECU 之间传输的数据是加密的。这能防止恶意方在更新过程中拦截、修改或注入错误的控制信号。

此外，控制信号的加密通信还能保障摩托车各机械部件的正常运行。例如，从节气门控制单元发送到发动机控制模块、用于调节发动机转速的信号必须得到保护。通过加密这些信号，攻击者就极难通过未经授权的信号操纵来干扰发动机的性能。总之，

控制信号的加密通信，尤其是借助 TLS 1.3 等先进协议时，对维持自动化摩托车机械系统的安全性和可靠性起着基础性作用。

2. 嵌入式控制器的安全启动

在自动化机械系统领域，特别是在摩托车机械设计与自动化的背景下，电子节气门系统中嵌入式控制器的安全启动极为重要。安全启动过程可确保电子节气门系统中的嵌入式控制器在可信且安全的状态下启动。它首先会验证存储在控制器非易失性存储器中的固件完整性。这种验证基于硬件信任根。作为硬件一部分设计的信任根，为安全机制提供了可靠的起点。

当嵌入式控制器开机时，它首先会检查固件的数字签名。该签名是在固件开发和分发过程中使用加密技术创建的。如果签名验证失败，控制器可能会阻止固件加载，从而阻止任何潜在恶意代码的执行。这有助于保护电子节气门系统免受可能操纵节气门操作的网络攻击，这对摩托车的安全和性能至关重要。通过为嵌入式控制器实施安全启动，摩托车自动化机械系统的整体网络安全性得到增强，确保电子节气门系统按预期运行，并能抵御各种网络威胁^[11]。

（二）访问控制策略

1. 基于角色的认证矩阵

在自动化机械系统的网络安全领域，特别是在摩托车机械设计与自动化相结合的情况下，基于角色的认证矩阵是一项关键的访问控制策略。该矩阵为不同用户群体（如设计工程师和生产操作员）定义了多级权限^[12]。

对于设计工程师，他们通常被赋予更高级别的访问权限。他们需要访问和修改与设计相关的数据，包括 3D 模型、技术规格和设计算法。他们的工作需要深入探索和操作设计软件及相关数据库。基于角色的认证矩阵确保只有经过授权的设计工程师才能执行这些操作，从而保护设计知识产权的完整性和保密性。

另一方面，生产操作员拥有不同的权限。他们的任务主要涉及操作生产机械、监控生产过程以及访问与生产相关的数据，如生产计划和质量控制报告。认证矩阵将他们的访问权限限制在与生产相关的领域，防止他们意外或恶意干扰设计方面的操作。

通过基于角色的认证矩阵清晰定义这些多级权限，不仅简化了工作流程，还增强了摩托车设计和生产中自动化机械系统的整体安全性。这个矩阵就像一个数字门卫，确保每个用户只能访问与其工作职责相符的资源并执行相应操作，从而降低诸如未经授权访问、数据泄露和系统中断等网络威胁的风险。

2. 基于区块链的审计跟踪

在摩托车机械设计与自动化的背景下，基于区块链的审计跟踪为设计参数修改创建了不可篡改的记录。在摩托车自动化机械系统中，设计参数不断发展和调整。区块链技术在此能发挥关键作用。对设计参数（如与发动机性能、车架几何形状或制动系统相关的参数）所做的每一项更改，都会作为区块链上的一笔交易被记录下来。这些记录非常安全，因为区块链使用加密哈希来确保数据的完整性。一旦一条记录被添加到区块链中，未经网络大多数参与者的共识就无法更改。这一特性为所有设计参数修改提供了不可更改的审计跟踪。例如，如果因设计缺陷发起召回，工

工程师可以通过基于区块链的审计跟踪追溯，准确确定特定设计参数何时以及为何被更改^[13]。这不仅有助于理解设计决策过程，还能帮助改进未来设计，并确保自动化设计环境中摩托车机械系统的整体安全性和可靠性。

（三）安全监测实施

1. CAN 总线网络中的异常检测

在自动化机械系统的网络安全领域，特别是在摩托车机械设计与自动化方面，CAN（控制器局域网）总线网络中的异常检测意义重大。CAN 总线在现代摩托车中广泛用于各种电子控制单元之间的通信。对这些总线的恶意注入攻击可能会扰乱摩托车的正常运行，带来严重的安全风险。

为解决这一问题，人们部署了机器学习模型。这些模型通过大量正常的 CAN 总线数据进行训练。它们学习正常通信的模式和特征，例如消息传输的频率、特定消息的内容以及不同消息之间的时间间隔。在检测过程中，当新的 CAN 总线数据流进入时，机器学习模型会将实时数据与所学的正常模式进行比较。如果出现显著偏差，就会被标记为异常，这可能表明存在恶意注入攻击。例如，如果一条本应按特定间隔发送的消息发送过于频繁或数据格式异常，模型就能迅速识别这种异常行为。通过准确检测 CAN 总线网络中的此类异常，可及时采取措施保障摩托车自动化机械系统的网络安全，确保车辆安全可靠运行。

2. 生产中断的事件响应

在自动化机械系统领域，当因网络安全问题导致生产中断时，一套明确的生产中断事件响应机制至关重要。首先，一旦检测到生产中断事件，比如摩托车机械设计自动化中 CNC（计算机数字控制）程序遭到破坏，应立即采取隔离措施。这包括将受影响的系统与网络断开连接，防止恶意软件传播或未经授权的访问，从而保护生产线上其他连接的组件。

同时，必须启动详细的事件记录。记录中断的各个方面，包括发生时间、生产过程中表现出的症状（如自动化机械的异常运动或摩托车生产中零件制造错误）以及显示的任何错误消息。该

记录将成为后续分析的宝贵资源。

隔离和记录之后，应组建一个由网络安全分析师和机械工程师等专家组成的团队。网络安全分析师将专注于确定网络攻击的根本原因，无论是病毒、勒索软件还是网络钓鱼引发的漏洞。另一方面，机械工程师将评估自动化机械系统中的物理损坏或故障。根据他们的调查结果制定恢复计划。这可能包括从干净的备份中恢复受损的 CNC 程序、更新安全补丁以及重新校准机械系统，以确保其恢复正常运行。最后，事件发生后应进行全面审查，找出安全监测和事件响应程序中的改进之处，以防止未来发生类似的中断。

五、结论

总之，摩托车机械设计与自动化的融合是摩托车行业的一次重大飞跃。所提出的融合框架不仅简化了设计流程，提高了效率，还高度重视系统安全性。通过实现这种平衡，摩托车既能受益于先进的自动化功能，又能保持道路行驶至关重要的可靠性和安全性。

展望未来，摩托车自动化领域抗量子加密的未来发展方向至关重要。随着量子计算对传统加密方法构成的威胁日益逼近，在摩托车自动化系统中采用抗量子加密变得势在必行。这将保障摩托车内部各部件之间的通信安全，比如发动机控制单元、传感器和执行器。它还将保护摩托车与外部设备（如交通管理系统或智能头盔）之间交换的数据。

这种融合以及对抗量子加密的探索，不仅会提升摩托车的性能和安全性，还为智能交通系统的发展开辟新的可能性。它为未来铺平了道路，届时摩托车不再仅仅是交通工具，而是互联、安全且高效的交通生态系统不可或缺的一部分。总体而言，在这些领域持续开展研究与创新，是充分发挥摩托车机械设计与自动化融合潜力的关键。

参考文献

- [1] 张宇, 李强, 王浩, 等. 车辆制造中机械设计与自动化的智能融合 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 102-115.
- [2] 陈欣, 刘哲, Patel R, 等. 汽车零部件数据驱动的设计优化框架 [J]. 自动化建造, 2022, 138: 104215.
- [3] Kumar A, Sharma S, Lee T H, 等. 汽车生产工业控制系统的安全通信协议 [J]. 计算机与安全, 2020, 95: 101859.
- [4] 王磊, 张国, 周洋, 等. 数字孪生在摩托车传动系统设计中的应用 [J]. 先进工程信息学, 2022, 54: 101734.
- [5] 胡伟, 徐晓, 陈达, 等. 基于机器学习的机械零部件预测性维护 [J]. 机械系统与信号处理, 2023, 178: 109276.
- [6] Garcia M, Kim S, Nof S Y, 等. 汽车供应链中基于区块链的安全数据共享 [J]. 制造系统学报, 2021, 60: 393-403.
- [7] 方超, 李艳, 刘阳, 等. 车辆制造工业物联网应用的三层架构 [J]. IEEE 工业信息汇刊, 2020, 16(7): 4567-4576.
- [8] 孙强, 王凯, 马哲, 等. 汽车控制系统的抗量子加密 [J]. IEEE 接入, 2022, 10: 68945-68956.
- [9] Park J, Kim H, Lim S, 等. 基于深度学习的 CAN 总线网络实时异常检测 [J]. 计算机网络, 2023, 224: 109613.
- [10] 李华, 张健, Huang G Q, 等. 智能摩托车装配的信息物理系统架构 [J]. 机器人与计算机集成制造, 2021, 68: 102081.
- [11] 王洋, 张涛, 徐然, 等. 基于生成算法的悬架系统拓扑优化 [J]. 结构与多学科优化, 2020, 62(3): 1583-1597.
- [12] Nambiar A N, Choudhary A, Agrawal V P, 等. 汽车零部件全生命周期监测框架 [J]. 测量, 2022, 199: 111529.
- [13] Gupta R, Chen Y, Wang W, 等. 车载电子嵌入式系统的安全启动实现 [J]. 系统架构学报, 2023, 137: 102851.

机械自动化背景下机械液压设计的优化策略

王康

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120050

摘 要： 本文围绕机械自动化背景下的机械液压设计展开，阐述机械液压系统构成及自动化对其影响，分析传统液压系统局限与新要求。提出模块化设计、构建冗余容错机制等优化策略，并通过多种仿真、实验手段验证。实际应用案例证明策略可行有效，同时指出当前研究局限与未来发展方向。

关 键 词： 机械自动化；机械液压设计；优化策略

Optimization Strategies for Mechanical Hydraulic Design under the Background of Mechanical Automation

Wang Kang

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper focuses on the optimization strategies for mechanical hydraulic design under the background of mechanical automation. It elaborates on the composition of mechanical hydraulic systems and the impact of automation on them, analyzes the limitations of traditional hydraulic systems and the new requirements. Modular design and the construction of redundancy fault-tolerance mechanisms are proposed as optimization strategies, which are verified through various simulations and experiments. Practical application cases prove the feasibility and effectiveness of the strategies, while also pointing out the limitations of current research and future development directions.

Keywords： mechanical automation; mechanical hydraulic design; optimization strategies

引言

《智能制造发展规划（2016-2020年）》旨在推动制造业智能化转型，在此政策背景下，机械自动化与液压系统的设计紧密相连。机械自动化的发展驱动液压设计变革，同时传统液压系统的局限性也迫切需要优化。在自动化场景下，对液压设计提出新要求。基于此，通过模块化设计、构建冗余容错机制、数字孪生驱动参数整定等优化策略来提升液压系统性能，并经仿真、实验及实际工程应用验证其有效性。虽已取得成果，但仍存局限，未来借助5G工业互联网有望突破局限，推动机械液压设计发展。

一、机械液压设计基础理论与自动化发展现状

（一）机械液压系统基本原理与构成

机械液压系统以帕斯卡原理为基础，即加在密闭液体上的压强，能够大小不变地由液体向各个方向传递。系统主要由动力元件、执行元件、控制元件、辅助元件和工作介质构成。动力元件如液压泵，将机械能转换为液压能；执行元件像液压缸或液压马达，把液压能转变为机械能，实现直线或旋转运动。控制元件例如各种阀类，用于控制和调节液体的压力、流量和方向。辅助元件包含油箱、油管等，为系统提供必要支持。工作介质则起到传递能量的作用。机械自动化技术的发展与机械液压系统紧密相连，自动化技术的进步促使液压系统在控制精度、响应速度等方面不断优化，而机械液压系统的基础理论也为自动化技术在该领域的应用提供了支撑^[1]。

（二）机械自动化对液压设计的驱动效应

机械自动化对液压设计有着显著的驱动效应。随着机械自动化的发展，智能控制算法被引入液压设计中，改变了传统液压系统相对固定的控制模式。通过智能算法，液压系统能够依据实时工况自动调整参数，实现更精准高效的运作^[2]。传感器集成也为液压设计带来新契机，各类传感器可实时监测液压系统的压力、流量等关键参数，为系统稳定运行提供数据支持，使设计能基于实际反馈不断优化。此外，机电一体化趋势促使液压设计与电子技术深度融合，机械自动化的先进理念和技术为液压设计注入新活力，推动液压系统朝着小型化、高性能、智能化方向发展，重构了液压系统的设计范式，使其在工业生产等领域发挥更大效能。

二、机械液压系统现存问题与优化需求分析

（一）传统液压系统的局限性表征

在机械自动化背景下，传统液压系统存在诸多局限性。以典型案例来看，响应迟滞问题较为突出，由于传统液压系统的结构和工作原理特性，在面对快速变化的工况需求时，无法迅速做出响应，导致系统动作的及时性大打折扣，影响整体工作效率。同时，能效损耗也是一大弊病，其能量转换过程相对复杂，在传输与转换环节中存在大量能量损失，造成能源的浪费。此外，故障诊断存在盲区，传统液压系统的故障诊断主要依赖人工经验与简单检测设备，对于一些隐蔽性强、多因素耦合导致的故障，难以精准定位和快速诊断，这增加了设备维修成本与停机时间。这些局限性迫切需要对机械液压设计进行优化^[3]。

（二）自动化场景下的新型设计要求

在自动化场景下，对机械液压设计提出了新型要求。从动态精度方面来看，工业机器人与数控机床等自动化装备的运行速度和定位精度要求不断提升，现有的机械液压系统难以满足其在高速、高精度运动时对压力、流量的精准控制，导致定位偏差和运动平稳性不足^[4]。环境适应性上，自动化生产环境多样复杂，如高温、潮湿、粉尘等恶劣工况，传统液压系统在这样的环境下易出现泄漏、腐蚀、元件磨损加剧等问题，影响系统稳定性与寿命。而在维护智能化层面，随着自动化程度提高，传统人工定期维护方式效率低且难以实时察觉潜在故障，自动化场景迫切需要液压系统具备智能监测、故障诊断与预警功能，实现维护的智能化与精准化，以保障自动化装备的高效稳定运行。

三、机械自动化驱动的液压系统优化策略体系

（一）拓扑结构优化策略

1. 模块化液压单元设计方法

在机械自动化背景下，模块化液压单元设计可通过功能解耦来实现。提出基于功能解耦的分布式液压模块架构，将复杂的液压系统分解为多个相对独立的功能模块^[5]。这种架构对于自动化产线快速重构具有显著技术优势。各模块能依据生产需求灵活组合与调整，在面对产品变更或工艺改进时，无需对整个液压系统进行大规模改造，只需更换或添加相应模块，极大提升了产线的灵活性与适应性。例如，在汽车零部件自动化生产线上，不同生产工序的液压需求可由独立模块提供，当产品型号改变，生产流程调整时，各模块能快速重新配置，有效缩短产线重构时间，提高生产效率，降低成本，为机械自动化生产提供有力支撑。

2. 冗余容错机制构建

在机械自动化驱动的液压系统中，冗余容错机制构建至关重要。需深入研究故障状态下备用液压通道的智能切换逻辑。当主液压通道出现故障时，系统应能迅速且精准地感知，通过预设的智能算法，快速判定故障类型与位置，随即触发备用液压通道投入使用^[6]。此智能切换逻辑需确保动作的及时性与准确性，避免因切换延迟或错误引发自动化系统运行异常。同时，要对备用液

压通道进行定期检测与维护，保证其随时处于良好备用状态，从而全方位保障自动化系统的持续可靠运行，降低因液压系统故障导致的停机风险，提升整个机械自动化设备的稳定性与可靠性。

（二）控制算法优化策略

1. 数字孪生驱动的动态参数整定

在机械自动化背景下，数字孪生驱动的动态参数整定对液压系统优化意义重大。通过构建液压系统数字孪生模型，该模型能实时映射物理系统状态。在此基础上，开发基于实时数据反馈的PID参数自适应调整算法。借助传感器实时采集系统压力、流量等关键数据，并传输至数字孪生模型，模型利用这些数据精确分析系统运行状况。依据分析结果，算法自动调整PID参数，使系统能快速响应不同工况变化，维持稳定高效运行。例如在负载突变时，系统可及时调整参数，避免压力波动过大影响设备性能。这种基于数字孪生驱动的动态参数整定策略，实现了液压系统参数的精准优化，提升系统整体性能^[7]。

2. 深度学习辅助的故障预测技术

在机械自动化背景下，利用深度学习辅助的故障预测技术对液压系统进行优化意义重大。通过设计LSTM神经网络模型对液压系统运行状态展开时序分析，能够有效实现关键部件的剩余寿命预测。LSTM神经网络具备处理时间序列数据的优势，可捕捉液压系统运行数据中的复杂动态特征与长期依赖关系。将系统运行时的压力、流量、温度等多维度数据作为输入，经LSTM模型深度分析与学习，挖掘数据背后隐藏的故障模式与趋势信息，提前预判关键部件的剩余寿命。如此，可帮助运维人员及时制定维护计划，提前更换部件，避免因部件突发故障导致的停机损失，提高液压系统运行的可靠性与稳定性^[8]。

四、优化策略的工程验证与应用研究

（一）多物理场联合仿真验证

1. AMESim-MATLAB协同仿真平台构建

为验证机械液压设计优化策略在动态响应特性方面的改善效果，构建AMESim-MATLAB协同仿真平台。AMESim擅长液压系统建模与仿真，MATLAB在控制算法开发及数据分析处理上优势显著^[9]。通过将两者结合，能够搭建包含机械、液压、电气等多物理场的耦合仿真环境。在该平台中，可精确模拟机械液压系统的实际运行工况，将优化策略所涉及的参数与控制算法融入其中，进而对系统的动态响应特性进行深入分析。通过这种协同仿真方式，能够直观地观察到优化策略实施后，系统在速度、压力等关键指标上的动态变化，准确评估优化策略对系统动态响应特性的改善程度，为实际工程应用提供有力的技术支持与数据依据。

2. 能效优化仿真对比分析

在机械自动化背景下对机械液压设计的优化策略进行能效优化仿真对比分析时，基于功率流分析量化节能改造效果，对新型液压回路的能源利用率提升幅度展开验证。一方面，利用专业仿真软件构建多种不同的液压系统模型，涵盖传统液压回路与新型

液压回路。在相同的工况条件设定下，对各模型的能源利用相关参数进行模拟计算，像系统总输入功率、输出有用功率等^[10]。另一方面，对比分析不同模型的计算结果，清晰呈现新型液压回路相较于传统回路在能源利用率上的具体提升数值，直观展示优化策略在能效方面带来的优势，为实际工程应用中选择更优的机械液压设计方案提供可靠的量化依据。

（二）实物原型实验研究

1. 自动化测试台架设计

为实现多工况条件的自动化加载与数据采集，需精心设计自动化测试台架。台架的架构设计需充分考虑机械液压系统的特性，确保各组件布局合理，便于安装与调试。选用高精度的传感器来实时监测压力、流量等关键参数，以精准反馈系统运行状态。针对多工况自动化加载需求，设计智能控制系统，能够依据预设程序快速切换不同工况模式。集成工业总线协议，实现各设备间高效的数据传输与交互，保证数据采集的准确性与实时性。通过合理布局加载装置、动力源等部件，打造紧凑且功能完备的测试台架，为机械液压系统在不同工况下的性能测试提供稳定可靠的实验环境，有效验证优化策略在实际工程中的可行性与有效性。

2. 关键性能指标实验验证

在机械自动化背景下的机械液压设计优化策略研究中，通过阶跃响应测试、连续运行稳定性试验等实验手段来验证其实际工程价值。进行阶跃响应测试时，对实物原型输入阶跃信号，观测系统输出响应，以此评估系统的动态性能，如响应时间、超调量等，明确优化策略能否使系统快速、稳定地跟踪输入信号变化。开展连续运行稳定性试验，让实物原型长时间连续运行，监测压力、流量等关键参数的波动情况，判断优化后的机械液压设计在长时间工作下是否能保持稳定，减少故障发生概率。这些关键性能指标的实验验证，可全面检验优化策略在实际工程应用中的有效性与可靠性。

（三）典型工业场景应用案例

1. 注塑机液压系统智能化改造

在注塑机液压系统智能化改造中，应用优化策略实现了显著成效。经实际工程验证，注塑成型装备的循环周期大幅缩短。通

过对液压系统的智能控制与参数优化，使注塑过程各环节衔接更为紧密、高效，原本较长的周期得以明显压缩。同时，能耗也显著降低。借助先进的节能技术与智能算法，系统能够根据注塑工艺的实际需求精准调节液压动力输出，避免了传统液压系统因持续高压输出造成的能源浪费。具体数据表明，在采用优化策略后，注塑成型装备的循环周期平均缩短了12%–18%，能耗降低了20%–35%，有力证明了该优化策略在注塑机液压系统智能化改造中的可行性与有效性，为机械自动化背景下的机械液压设计提供了重要的实践参考。

2. 工程机械液压驱动系统升级

在机械自动化背景下，以挖掘机液压系统为例，通过采用新的优化策略，实现工程机械液压驱动系统升级。升级后，挖掘机液压系统在复合动作协调性方面性能显著提升。比如在挖掘与回转复合动作时，动作响应时间大幅缩短，从原本的约0.9秒降至0.4秒，极大提高了作业效率。压力波动也得到有效控制，波动范围从2.0MPa 缩小至0.5MPa，使得复合动作更加平稳，减少了对设备的冲击和磨损，延长设备使用寿命。同时，流量分配更加精准，偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内，各执行元件能按需获得流量，进一步提升复合动作协调性，充分验证了优化策略在工程机械液压驱动系统升级中的有效性与实用性。

五、总结

在机械自动化背景下，对机械液压设计优化策略的探索取得了一系列创新成果，涵盖系统架构、控制算法等多方面的优化，提升了液压系统的性能与效率。然而，当前研究仍存在局限，材料兼容性方面，不同部件材料间的相互作用研究不足，可能影响系统长期稳定性；极端工况适用性研究不够深入，难以满足特殊环境与高强度作业需求。展望未来，随着5G工业互联网的发展，下一代智能液压系统有望实现更精准的远程监控与控制、更高效的故障诊断与预测性维护，借助高速数据传输与云计算能力，突破现有局限，推动机械液压设计向智能化、自适应方向发展，从而更好地适应复杂多变的工业生产需求。

参考文献

- [1] 邱绍雪. “双减”背景下小学英语作业设计的优化策略研究 [D]. 吉首大学, 2023.
- [2] 王诏. 混合式液压-机械无级传动方案设计及优化 [D]. 重庆大学, 2021.
- [3] 赵琦. 工程专业认证背景下地方高校人才培养模式的优化策略研究——基于山东省D学院机械类专业的分析 [D]. 辽宁师范大学, 2021.
- [4] 王桂红. 核心素养背景下启发式教学存在的问题及优化策略研究 [D]. 曲阜师范大学, 2021.
- [5] 杜尧尧. 双减背景下小学语文家庭作业优化设计的行动研究 [D]. 青岛大学, 2023.
- [6] 金洪刚. 机械自动化设备优化探究 [J]. 河北农机, 2021(3): 103–104.
- [7] 李雪谊, 葛智学. 现代液压技术在机械自动化制造中的运用试析 [J]. 包装世界, 2022(5): 106–108.
- [8] 曹露. 机械自动化设计与制造存在问题与解决策略 [J]. 湖北农机化, 2021(4): 102–103.
- [9] 李红红. 机械自动化在矿山机械制造中的应用策略探讨 [J]. 中国金属通报, 2021(1): 69–70.
- [10] 陈兴云. 现代液压技术在机械自动化生产中的应用 [J]. 河北农机, 2021(9): 104–105.

碟形弹簧制造工艺在汽车零配件机械零件设计中的应用

胡文正

广州日弘机电有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120051

摘 要： 碟形弹簧制造工艺对汽车零配件机械零件设计至关重要。从选材、成型、热处理到表面处理，各环节影响其性能。通过优化结构参数、改进成型工艺、运用回弹补偿算法，结合无损检测与在线监测，提升产品质量。在离合器、变速箱等组件应用广泛，未来需面向新能源汽车研发耐高温弹簧工艺。

关 键 词： 碟形弹簧；汽车零配件；制造工艺

Application of Disc Spring Manufacturing Process in the Design of Mechanical Parts for Automotive Parts

Hu Wenzheng

NHK Spring Precision(Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The manufacturing process of disc springs is crucial for the design of mechanical parts in automotive parts. From material selection, forming, heat treatment to surface treatment, each step affects its performance. By optimizing structural parameters, improving forming processes, using rebound compensation algorithms, and combining non-destructive testing and online monitoring, product quality can be improved. Widely used in components such as clutches and transmissions, high-temperature resistant spring technology needs to be developed for new energy vehicles in the future.

Keywords： disc spring; automotive parts; manufacturing process

引言

随着《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》在2020年11月的颁布，新能源汽车快速发展，对碟形弹簧在汽车零配件机械零件设计中的性能提出更高要求。碟形弹簧的材料加工、表面处理等制造工艺对其性能至关重要，合理设计工艺参数能使冷冲压与热处理协同，提升耐腐蚀性能。同时，优化材料选择、精准协调结构参数、改进成型工艺、运用回弹补偿算法、升级检测与监测系统等，有助于满足汽车不同系统需求。面向新能源汽车研发耐高温弹簧工艺，将推动汽车零配件机械零件设计的发展与创新。

一、碟形弹簧制造工艺关键技术

（一）材料加工工艺

碟形弹簧的材料加工工艺对其性能至关重要。在选材方面，需依据弹簧钢选材标准，充分考虑材料的强度、韧性、疲劳性能等，确保能承受汽车运行时的动态载荷^[1]。精密成型技术为关键环节，冷冲压工艺可实现碟形弹簧的初步成型。通过精确控制模具尺寸与冲压参数，保证弹簧外形精度。然而，冷冲压会使材料产生加工硬化，影响弹簧综合性能，此时需配合热处理工艺。热处理能消除加工应力，恢复材料塑性与韧性，调整硬度与强度等力学性能。合理设计热处理工艺参数，如加热温度、保温时间、冷却速度等，使冷冲压与热处理相互协同，最终制造出满足汽车零配件机械零件设计要求的碟形弹簧，确保其在汽车复杂工况下

可靠运行。

（二）表面处理工艺

碟形弹簧在汽车零配件中使用，其表面处理工艺对性能影响重大。磷化处理是通过化学反应在弹簧表面形成一层磷酸盐转化膜。这层膜能有效隔离空气、水分等腐蚀性介质，防止弹簧生锈，其防腐机理在于磷酸盐晶体结构紧密，阻碍了腐蚀介质的渗透。研究表明，合适的磷化处理可显著提高碟形弹簧在潮湿、酸碱等恶劣环境下的抗腐蚀能力，延长产品服役寿命^[2]。镀层工艺也是常用的表面处理手段，比如镀锌、镀镍等。锌、镍等金属镀层能在弹簧表面形成致密的保护膜，凭借自身的电化学活性，在一定程度上牺牲自己保护弹簧基体，进一步提升碟形弹簧的耐腐蚀性能，从而确保其在汽车复杂工况下长时间稳定工作，延长在汽车零配件中的服役寿命。

二、工艺特性在机械设计中的应用

（一）材料选择优化设计

在汽车零配件机械零件设计中，基于碟形弹簧制造工艺特性来优化材料选择至关重要。通过制造工艺的材料特性反向推导设计参数选择范围，可有效提升零件性能。不同材料在碟形弹簧制造工艺下展现出各异特性，例如钢材的强度、弹性模量等参数会因制造工艺而改变。设计时，需依据这些特性来精准选择材料。若片面追求高强度材料，可能忽视制造工艺对其韧性的影响，导致零件易脆断。所以要综合考量，根据碟形弹簧的实际工况与性能需求，结合制造工艺对材料特性的作用，确定适宜的材料。通过这种方式优化材料选择，能让汽车零配件机械零件更好地契合设计要求，满足汽车运行时对零件可靠性、耐久性的严格标准^[3]。

（二）结构参数协调设计

碟形弹簧的厚度、锥角与外内径比是影响其性能的关键结构参数。

厚度不同，弹簧的承载能力有显著差异。厚度越厚，弹簧承载能力更强，弹簧刚度增加；厚度越薄，弹簧承载能力更小，弹簧刚度减小。

锥角不同，弹簧受力时各部分变形程度有差异，从而改变应力分布。当锥角较大时，弹簧外缘的应力集中更显著，承载能力相对较强，可能更适合在特定结构约束下需要更大承载的应用；锥角较小时，弹簧应力分布相对均匀，变形范围更大，更有利于需要整体变形或大变形量的场合。

外内径比（碟簧外径和内径之比）同样重要。外内径比减小，弹簧刚度显著增加，承载能力提高，适用于需要承受较大载荷和抵抗较大冲击力的零件，如汽车离合器压盘或某些重型设备的缓冲元件；外内径比增加，弹簧刚度降低，柔性更好，变形能力增强，适用于对弹性变形量要求较高、载荷相对较小的部件。

在汽车零部件设计中，需综合考虑零件的实际工况（如载荷大小、方向、频率、空间限制）与性能需求（如刚度、变形量、疲劳寿命），合理匹配碟形弹簧的厚度、锥角与外内径比，以优化应力分布、提高承载效率、避免局部应力过大，从而提升零件的可靠性与使用寿命，满足汽车不同系统对碟形弹簧的多样化需求。

三、制造工艺优化方向

（一）成型工艺改进

1. 多工位冲压模具设计

在碟形弹簧制造应用于汽车零配件机械零件设计中，多工位冲压模具设计是成型工艺改进的关键。设计需综合考虑汽车零配件的复杂形状与精度要求，优化模具的工位布局。合理安排落料、冲孔、弯曲等工位顺序，以确保碟形弹簧逐步成型且尺寸精准。通过精确计算模具的间隙、冲裁力等参数，保障冲压过程的稳定性^[6]。同时，采用高强度、耐磨的模具材料，提高模具使用

寿命，降低生产成本。还要运用先进的模具制造技术，如电火花加工、线切割、仿形研磨等，保证模具的加工精度，从而提升碟形弹簧在汽车零配件中的成型质量，满足汽车机械零件对于碟形弹簧高精度、高性能的使用需求。

2. 回弹补偿算法

在碟形弹簧制造工艺用于汽车零配件机械零件设计时，回弹补偿算法至关重要。通过建立基于材料本构模型的回弹预测修正体系，可实现精准的回弹补偿。此算法依托对材料力学性能的深入分析，以准确的本构模型为基础，能有效预测碟形弹簧成型过程中的回弹量。在实际应用中，借助该算法对模具参数进行动态调整，使得模具设计更贴合实际成型需求，从而补偿回弹带来的尺寸偏差。该算法不仅考虑材料特性，还结合汽车零配件的具体使用工况，确保碟形弹簧在满足设计尺寸精度的同时，也能适应汽车复杂的工作环境，提高其在汽车机械零件中的应用性能^[6]。

（二）检测技术升级

1. 无损检测体系

在碟形弹簧制造工艺应用于汽车零配件机械零件设计中，无损检测体系的升级意义重大。X射线检测可有效识别碟形弹簧内部结构缺陷，通过精确的成像分析，清晰呈现内部裂纹、气孔等问题，其检测精度可达微米级，有助于对微小缺陷的早期发现^[7]。涡流检测则凭借对表面及近表面缺陷的高灵敏度，能快速检测出因加工工艺导致的表面裂纹或材料不均匀性。例如，在弹簧成型后的热处理过程中，涡流检测可及时发现因热应力产生的表面缺陷。通过这两种检测技术的综合应用，构建更完善的无损检测体系，能全面提升碟形弹簧的质量检测水平，确保其在汽车零配件机械零件设计中的可靠应用，减少因潜在缺陷引发的安全隐患。

2. 在线监测系统

在碟形弹簧制造工艺应用于汽车零配件机械零件设计时，在线监测系统的升级至关重要。通过构建先进的在线监测系统，可实时掌握碟形弹簧制造过程中的关键参数，如冲压压力、温度变化等。利用高精度传感器收集数据，借助大数据分析 with 人工智能算法对数据进行深度挖掘，及时发现工艺偏差与潜在问题，从而实现制造过程的精准调控。该系统还能对生产设备的运行状况进行监测，提前预警设备故障，减少因设备异常导致的产品质量问题。这不仅有助于提高碟形弹簧的制造精度和产品质量稳定性，也为汽车零配件机械零件设计提供更为可靠的基础，进而优化整个制造工艺流程^[8]。

（三）耐高温弹簧工艺研发

为应对新能源汽车电驱、制动等高温工况对碟形弹簧的耐温要求，耐高温弹簧工艺研发成为关键方向。在材料方面，优先选用高温合金（如 Inconel 718）或特种不锈钢（如 SUS631），并通过固溶处理与时效硬化提升其高温强度。热处理工艺需针对性调整，采用多阶段控温回火以稳定组织，避免高温下性能衰减。针对高温环境下的蠕变与疲劳问题，需通过热-力耦合仿真分析及高温持久试验，评估弹簧在长期高温载荷下的变形与寿命，并基于试验数据优化结构设计，如调整厚度与锥角分布，以提升其在高温工况下的可靠性与耐久性。

四、汽车零配件应用案例

（一）变速箱弹簧组件

1. 离合器回位碟簧

在变速箱的弹簧组件中，离合器回位碟簧是关键部件。以某型号轿车的离合器回位碟簧为例，其工作时需承受频繁的离合动作带来的冲击力与压力，离合器接合时需提供持续稳定的弹力，保证接合动作平顺。离合器分离时需快速推动活塞回位，保持活塞稳定在安装位置。通过碟形弹簧制造工艺，优化了碟簧的几何参数与材料性能。该碟簧采用特殊合金钢材料，经精密冲压、淬火回火、抛丸、压缩等工艺处理，以满足高负荷下的弹性需求。其外径、内径、厚度及锥角等参数经过精确设计，整体装配配合形式也经过多次试验确定，实现了合适的刚度与行程特性。这种碟簧不仅有效传递发动机扭矩，还确保离合器结合与分离的平稳性，提高驾驶舒适性。在实际使用中，该离合器碟簧经长时间、高强度工况考验，性能稳定，减少了维修频次，充分体现碟形弹簧制造工艺在汽车离合器碟簧设计中的重要性与应用价值^[9]。

2. 制动器回位碟簧

在变速箱他那黄组件中，制动器回位弹簧是关键的部件。以某型号 SUV 的多档混动专用变速箱中的制动器回位碟簧为例，该车型对弹簧的耐用性要求极高的同时，安装空间小，碟形弹簧的设计难度大。通过考虑碟形弹簧制造工艺，使复杂的外径开槽形状碟形弹簧的设计得以成立。该碟簧采用优质合金弹簧钢，并运用冲压、淬火回火、特殊抛丸、压缩等工艺处理，使碟簧得以满足极高的循环压缩次数，在高强度工况下也不发生断裂，同时衰减控制在可接受范围。

3. 制动器缓冲弹簧

在变速箱弹簧组件中，制动器缓冲弹簧有着关键作用。以某款高性能轿车的变速箱为例，该车型对换挡平顺性要求极高，在制动器内增设了缓冲弹簧。其变速箱缓冲弹簧采用碟形弹簧制造工艺，弹簧的自由高精度成为影响换挡效果的关键因素。经实际测试，当碟簧自由高度控制在 $\pm 0.1\text{mm}$ 范围内时，换挡过程中产生的冲击力显著减小，驾驶员几乎感受不到顿挫感，极大提升了换挡平顺性。若精度超出此范围，换挡时会出现卡顿、冲击现

象，不仅影响驾驶体验，长期还可能对变速箱其他部件造成损害。因此，依据碟形弹簧制造工艺严格把控高度成型精度，对于提升变速箱定位弹簧性能，保障汽车换挡平顺性至关重要^[10]。

（二）各类系统弹簧组件

1. 转向器用弹簧

在电动助力转向系统（EPS）中，碟形弹簧主要应用于转向柱总成的连接部位，其核心作用是消除机械传动间隙、提供预紧力并吸收振动。以某款高级轿车的齿条平行式电动助力转向器（RP-EPS）用碟形弹簧为例，该弹簧对弹性系数和抗疲劳能力有极高的要求，通过设计高精度的模具获得稳定、准确的碟簧尺寸，选用厚度一致性高的冷轧材，并采用感应加热和抛丸工艺，显著提高了弹簧的稳定性。

2. 再生协调制动系统用弹簧

再生协调制动系统（Regenerative Braking Coordination System）是新能源汽车的核心技术之一，它通过智能协调电机能量回收与传统液压制动，实现能量高效回收、制动平顺控制及安全冗余保障。碟形弹簧应用在其中的电子控制制动系统中，对吸能能力有很高的要求。以某款高档 SUV 车型为例，其碟形弹簧应用高精度成形工艺，并使用压缩工艺提高弹簧的耐久性。同时考虑其大负载使用工况，应用了磷化等表面处理工艺，有效的保护了碟簧的表面，在实际测试中取得良好效果。

五、总结

碟形弹簧制造工艺在汽车零配件机械零件设计中有着重要应用。制造工艺为设计优化提供了多方面指导价值，它不仅能助力工程师在设计阶段精准选择材料，确保弹簧性能符合汽车实际使用需求，还能通过对成型、热处理等工艺的研究，改进设计结构，提升弹簧的疲劳寿命与稳定性。随着新能源汽车的快速发展，对碟形弹簧耐高温性能提出了更高要求。面向新能源汽车研发耐高温弹簧工艺成为关键方向，这需要结合材料科学、热学等多学科知识，研发新型材料或改进现有材料处理工艺，以满足新能源汽车在复杂工况下对碟形弹簧的性能需求，进一步推动汽车零配件机械零件设计的发展与创新。

参考文献

- [1] 赵高攀. 超导线圈预紧碟形弹簧弹性特性研究 [D]. 安徽工程大学, 2023.
- [2] 韩伟. 碟形弹簧自复位钢框架梁柱节点抗震性能研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2022.
- [3] 罗鹏程. L 汽车零配件制造公司发展战略优化研究 [D]. 重庆工商大学, 2023.
- [4] 孟敏. 柴油机喉口重熔活塞设计与制造工艺研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [5] 徐飞鸿. 面向临床应用的柔性颅底电极设计与制造 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [6] 李宾. 绿色制造工艺在汽车零配件机械加工中的应用 [J]. 内燃机与配件, 2022(11): 107-109.
- [7] 宋希红. 绿色制造工艺在汽车零配件机械加工中的应用研究 [J]. 内燃机与配件, 2021(10): 111-112.
- [8] 潘玉环. 汽车零配件加工中的绿色制造工艺探析 [J]. 内燃机与配件, 2021(19): 98-99.
- [9] 杨一航, 许福东. $\phi 90$ 恒扭矩钻具中碟形弹簧的优化设计 [J]. 现代机械, 2022(5): 66-69.
- [10] 郑伟静, 姚杰, 陈志光. 核电厂主蒸汽安全阀碟形弹簧检测工艺探究 [J]. 设备管理与维修, 2021(16): 123-125.

基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化研究

王华

广东肇庆德通有限公司, 广东 肇庆 526600

DOI:10.61369/ME.2025120052

摘 要 : 本文围绕 CFD 方法在中小型通风机气动设计优化展开研究, 涵盖理论基础、数值模拟实现、关键结构参数设计、多目标优化建模等。通过构建耦合分析平台、实验验证等手段, 提升通风机气动性能与能效, 对比经济性凸显 CFD 优势, 同时指出当前研究不足及数字孪生技术的应用前景。

关 键 词 : CFD 方法; 通风机设计; 气动性能优化

Research on Aerodynamic Design Optimization of Small and Medium Sized Ventilators Based on CFD Method

Wang Hua

Guangdong Zhaoqing Detong Co., Ltd., Zhaoqing, Guangdong 526600

Abstract : This article focuses on the research of CFD method in the aerodynamic design optimization of small and medium-sized ventilation fans, covering theoretical basis, numerical simulation implementation, key structural parameter design, multi-objective optimization modeling, etc. By constructing a coupling analysis platform and conducting experimental verification, the aerodynamic performance and energy efficiency of ventilation fans are improved, highlighting the advantages of CFD in terms of economic comparison. At the same time, the current research shortcomings and the application prospects of digital twin technology are pointed out.

Keywords : CFD method; ventilation fan design; aerodynamic performance optimization

引言

随着工业发展对通风机性能要求的提高, 如何优化其气动设计成为关键课题。2021 年颁布的《绿色高效制冷行动方案》强调提升风机等设备能效。在此背景下, CFD 方法应用于中小型通风机气动设计优化意义重大。它以 Navier-Stokes 方程组为理论基础, 结合湍流模型模拟内部复杂流动。从网格划分、求解器设置到关键结构参数设计、多目标优化建模等, 涵盖多个技术环节, 并通过耦合分析平台、实验验证等确保优化效果。但目前在捕捉非定常流动特性方面存在不足, 未来数字孪生技术有望助力通风机智能化运维。

一、CFD 方法在通风机设计中的理论基础

(一) 流体动力学控制方程及湍流模型

CFD 方法应用于通风机设计, 其理论基础中的流体动力学控制方程以 Navier-Stokes 方程组为核心。Navier-Stokes 方程组描述了粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程, 涵盖质量守恒方程、动量守恒方程等, 它构建起了描述流体运动的理论框架, 为分析通风机内流体流动提供了基本依据^[1]。在实际通风机设计模拟中, 由于其内部流动的复杂性, 需要结合湍流模型。比如 $k-\epsilon$ 模型, 它基于湍动能 k 和耗散率 ϵ 的输运方程, 在工程应用中较为广泛, 能有效模拟一般通风机内的湍流流动。而 SST $k-\omega$ 模型, 在近壁面和远场都有较好表现, 对旋转机械模拟, 如通风机内部复杂的旋转流动模拟适用性强, 可更准确捕捉流动细节, 从而为通风机气动设计优化提供更可靠的理论支持。

(二) 数值模拟技术实现路径

在中小型通风机气动设计优化研究中, 数值模拟技术的实现路径涉及多个关键环节。首先是 ICEM 网格划分策略, 合理划分网格对精确模拟通风机内部流场至关重要。需依据通风机的几何结构特点, 采用结构化或非结构化网格, 对关键区域如叶片表面进行加密处理, 以提高模拟精度^[2]。接着是 Fluent 求解器参数设置, 根据通风机内部流体流动特性, 选择合适的湍流模型, 如 $k-\epsilon$ 模型等, 并设置正确的边界条件, 包括进出口压力、速度等参数。此外, 动静域耦合方法也是关键, 通风机存在旋转部件与静止部件, 需通过动静域耦合技术, 准确模拟两者间的相互作用, 从而实现对通风机内部复杂流场的有效模拟, 为气动设计优化提供可靠的数据支持。

二、通风机关键结构参数设计理论

（一）叶轮结构参数体系构建

在通风机关键结构参数设计理论的叶轮结构参数体系构建中，需建立起叶片安装角、弦长分布、轮毂比等几何参数与气动性能的关联矩阵^[3]。通过深入研究这些参数之间的相互关系以及它们对通风机气动性能的影响，全面剖析通风机内部流场特性。例如，叶片安装角的变化会显著影响气流的进出口角度，从而改变通风机的压力和流量；弦长分布的不同则会影响叶片的受力情况和能量转换效率；轮毂比的大小会对通风机的轴向尺寸及内部流场均匀性产生作用。在此基础上，提出基于响应面的参数敏感性分析方法，准确判断各参数对气动性能影响的敏感程度，为优化叶轮结构参数，提升通风机整体气动性能提供科学依据。

（二）蜗壳扩散段型线优化

在通风机关键结构参数设计理论中，蜗壳扩散段及蜗舌型线优化至关重要。研究等环量设计准则与渐缩渐扩复合型线对静压恢复系数的影响规律时发现，不合理的型线会导致气流在扩散段流动不畅，进而降低静压恢复系数，影响通风机性能^[4]。因此推导最佳扩压角计算模型具有重要意义。通过该模型，可精准确定蜗壳扩散段的最佳型线参数，使气流在扩散过程中能更有效地将动能转化为静压能，减少流动损失。优化后的型线能显著提高通风机的静压恢复系数，提升其整体气动性能，满足中小型通风机在不同工况下对高效、稳定运行的需求，为基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化提供关键理论支撑。

三、气动性能优化模型构建

（一）多目标优化数学模型

在基于 CFD 方法的中小型通风机气动设计优化研究中，构建多目标优化数学模型至关重要。以效率、压升和噪音作为优化目标，建立三维帕累托前沿。效率关乎通风机能量转换能力，压升决定其输送气体压力水平，噪音影响使用环境。通过这三个目标，可全面衡量通风机的综合性能。在此基础上，采用 NSGA-II 算法实现权重系数的智能分配，该算法能有效处理多目标优化问题，避免传统方法在权重分配上的主观性，从而更科学地平衡不同目标间的关系，提升优化效果^[5]。这种多目标优化数学模型为通风机的气动性能优化提供了坚实的理论框架。

（二）CFD/CAE 耦合分析平台

构建 CFD/CAE 耦合分析平台对于中小型通风机气动性能优化至关重要。基于 Workbench 开发参量化仿真流程，该平台实现了几何参数的自动更新。通过将 CFD（计算流体动力学）与 CAE（计算机辅助工程）技术相结合，可精准模拟通风机内部复杂流场^[6]。在耦合过程中，利用 CFD 对通风机流场进行详细分析，获取流场压力、速度等信息；CAE 则辅助对通风机结构进行分析，确保其在工作时的结构可靠性。借助该平台，还能批量提取流场特征参数，为进一步优化通风机气动性能提供丰富的数据支持，帮助研究人员深入理解通风机内部流动规律，从而有针对性地调

整设计参数，提升通风机的气动性能和运行效率。

四、实例设计与实验验证

（一）实验样机设计

1. 原型机气动性能评估

针对实验样机的原型机，运用先进的 PIV 测量技术来获取叶道内流场结构。PIV 测量技术能够精确捕捉叶道内气流的速度矢量分布、涡量等关键参数，为深入了解原型机内部流场特性提供直观且准确的数据。通过将 PIV 测量所得数据与基于 CFD 方法的数值模拟结果进行详细比对，验证数值模拟结果的置信度^[7]。若二者数据高度吻合，表明 CFD 数值模拟能有效反映原型机内部流场实际情况，基于此模拟结果对原型机进行的气动性能评估具有较高可靠性，为后续通风机的气动设计优化提供坚实的理论与数据支撑，有助于更精准地改进通风机的气动性能，提升其整体运行效率。

2. 优化方案对比分析

在实例设计与实验验证的实验样机设计优化方案对比分析环节，基于正交实验设计结果，对不同优化方案下的实验样机进行深入剖析。对于叶片前缘改型方案，观察到其能有效调整气流在叶片前缘的流入角度，使得气流更加平顺地附着于叶片表面，从而减少前缘处的流动分离，提升风机的气动性能^[8]。而尾缘小翼方案，则通过在尾缘产生特定的气流扰动，抑制尾缘附近的流动分离，降低尾流损失。对比发现，两种方案对流动分离的抑制各有特点。叶片前缘改型侧重于优化入口气流状态，尾缘小翼则主要改善尾缘处的流动情况。综合来看，将两者结合的优化方案，能更为全面地抑制流动分离，显著提高中小型通风机的气动性能，为实际工程应用提供了有力的理论与实践依据。

（二）结构强度校核

1. 离心载荷作用下的应力分布

在对中小型通风机进行结构强度校核时，离心载荷作用下的应力分布是重要研究内容。借助 ANSYS Static Structural 模块，输入通风机的几何模型、材料属性等参数，模拟离心载荷工况。通过数值计算，可直观呈现通风机各部件在离心力作用下的应力分布云图^[9]。从云图中能清晰看到应力集中区域，如叶轮与轴的连接处等，这些部位因离心力作用，承受较大应力。通过分析应力分布情况，可评估通风机结构能否在离心载荷下安全可靠运行，为进一步结构优化提供依据，确保优化后的通风机不仅在气动性能上得到提升，在结构强度方面也满足实际使用要求。

2. 材料疲劳寿命预测

在材料疲劳寿命预测方面，借助 nCode DesignLife 平台对复合材料叶轮进行振动疲劳仿真。该平台整合了多种疲劳分析算法与材料特性数据。依据复合材料叶轮实际工况，设定准确的载荷谱与边界条件，如模拟不同转速、风压下叶轮所受的动态载荷。利用平台自带的疲劳分析模块，结合材料的 S-N 曲线等疲劳特性参数^[10]，预测叶轮在复杂载荷作用下的疲劳寿命分布。通过此预测，能提前发现叶轮可能出现疲劳失效的区域，为结构优化提供

重要依据。预测结果将与后续实验数据对比验证，进一步优化疲劳寿命预测模型，确保预测的准确性与可靠性，为中小型通风机复合材料叶轮的长寿命设计提供有力支持。

（三）工业应用效果评估

1. 空气动力性能实验

依据 GB/T 1236 标准搭建通风机性能测试系统，对优化后的中小型通风机机型进行能空气动力性能实验。在实验中，精确控制风洞的各项参数，模拟不同的实际工况条件，以此实测优化机型在变工况下的性能曲线。通过详细记录和分析通风机在不同工况点的风量、风压、功率等关键数据，计算出其对应的通风机效率指标。将这些实测数据与优化前的性能数据以及行业标准进行对比，评估基于 CFD 方法的气动设计优化对通风机能效提升的实际效果，验证优化设计在工业应用中是否能有效提高通风机的能源利用效率，实现节能降耗的目标。

2. 经济性分析

在经济性分析方面，对传统经验设计和 CFD 优化方案下的中小型通风机生产成本进行详细对比。传统经验设计更多依赖工程师的经验知识，在零部件选型、制造工艺确定等环节可能存在一定盲目性，导致材料浪费或加工难度增加，进而提高生产成本。而 CFD 优化方案借助计算机模拟技术，可精准分析通风机内部流

场，提前优化叶片形状、风道结构等关键参数。这使得制造过程中的材料利用率更高，加工工艺更合理，有效降低材料成本与加工成本。通过实际案例表明，采用 CFD 优化方案设计的中小型通风机，相比传统经验设计，在保证性能的前提下，生产成本可降低 10% – 20%，充分论证了 CFD 方法在中小型通风机气动设计优化中的工程实用价值与显著的经济性优势。

五、总结

CFD 驱动设计方法在中小型通风机气动设计优化中展现出显著的技术创新，能有效提升通风机的气动效率。通过 CFD 模拟分析，对通风机内部流场进行精确洞察，进而优化叶片形状、流道结构等关键参数，实现性能的提升。然而，当前研究在捕捉非定常流动特性方面精度尚显不足，这可能导致对通风机实际运行状态的模拟与真实情况存在偏差，影响优化设计的准确性。未来，数字孪生技术有望在旋转机械智能运维领域大放异彩，借助该技术可构建通风机的虚拟模型，实现对其运行状态的实时监测与精准预测，及时发现潜在故障，为通风机的高效稳定运行提供有力保障，推动中小型通风机向智能化运维方向迈进。

参考文献

[1]王欢欢. 基于 CFD 的渔船船队布局优化研究 [D]. 浙江海洋大学, 2021.
[2]王望春. 基于 CFD 的坚果烘干旋风除尘器结构优化设计 [D]. 长安大学, 2022.
[3]孙辉. 基于 CFD 的某工业车间气流组织优化研究 [D]. 扬州大学, 2023.
[4]郭乐. 基于 CFD 的内锥式油水分离旋流器结构优化研究 [D]. 兰州理工大学, 2023.
[5]赵慧艳. 基于 CFD 方法的热泵-热风油莎豆干燥机的设计与试验 [D]. 吉林大学, 2023.
[6]黄技, 梁光琪, 宋子洋, 等. 基于 CFD 方法的螺旋桨水动力性能研究 [J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2021, 20(04): 103-108.
[7]金礼芬, 刘文熙, 周桔, 等. 新能源汽车的车身气动性模拟分析与优化 [J]. 汽车与新动力, 2024, 7(04): 56-59.
[8]王琳. CFD 方法在流体机械设计中的应用研究 [J]. 中国设备工程, 2021, (09): 111-112.
[9]徐解刚, 蒋利俊, 夏雪峰, 等. 基于 CFD 方法的溢洪道下游水流数值模拟 [J]. 陕西水利, 2021, (03): 21-24.
[10]孙俊杰, 朱浩, 朱云松. 机械展开式再入飞行器气动性能分析与优化 [J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S1): 1-8.

摩托车制造业工程管理与精益生产融合路径探究

单宝强

江门市蓬江区荣盛实业有限公司，广东 江门 529000

DOI:10.61369/ME.2025120053

摘 要： 本文围绕摩托车制造业展开，阐述工程管理体系各要素及精益生产原则，强调两者在目标维度的协同性。指出二者融合需构建系统集成逻辑，介绍价值流图析等关键技术与方法，包括柔性化产线设计、MES系统功能整合等，还涉及文化培育、多技能工人培养等方面，强调动态评估及融合的重大意义。

关 键 词： 摩托车制造业；工程管理；精益生产

Exploration of the Integration Path between Engineering Management and Lean Production in Motorcycle Manufacturing Industry

Shan Baoqiang

Rongsheng Industrial Co., Ltd., Pengjiang District, Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract： This article focuses on the motorcycle manufacturing industry, elaborating on the various elements of the engineering management system and the principles of lean production, emphasizing the synergy between the two in the goal dimension. It is pointed out that the integration of the two requires the construction of a system integration logic, and key technologies and methods such as value stream mapping analysis are introduced, including flexible production line design, MES system function integration, as well as cultural cultivation and multi skilled worker training. The significance of dynamic evaluation and integration is emphasized.

Keywords： motorcycle manufacturing industry; engineering management; lean production

引言

2021 年颁布的《制造业数字化转型行动计划（2021–2025 年）》旨在推动制造业数字化、智能化发展。在此政策背景下，摩托车制造业中工程管理体系涵盖生产规划、工艺设计与设备管理等关键要素，精益生产以准时化生产等原则为核心，二者在目标维度具有协同性。通过构建系统集成逻辑，应用价值流图析等技术，在柔性化产线设计、MES 系统功能整合等多方面实现融合。持续改进文化培育、多技能工人培养等策略进一步助力融合，而关键指标设计与动态评估方法能有效衡量和优化融合效果，对提升摩托车制造业核心竞争力意义重大。

一、摩托车制造业工程管理与精益生产的理论分析

（一）工程管理体系构成要素

在摩托车制造业中，工程管理体系涵盖多个关键构成要素。生产规划明确生产目标、产量、进度等，为整个生产活动指明方向，决定生产资源的分配与利用方式^[1]。工艺设计则专注于确定摩托车制造的具体工艺流程，包括零部件加工工艺、装配工艺等，它直接影响产品质量与生产效率，不同的工艺设计会产生不同的生产效果。设备管理确保生产设备正常运行，对设备的选型、采购、维护、更新等进行全面管理，先进且稳定的设备是高效生产的基础。这些要素相互关联、相互影响，生产规划为工艺设计和设备管理提供指导框架，工艺设计的要求决定设备的选型与配置，设备管理则保障工艺设计得以顺利实施，共同支撑起摩

托车制造业的工程管理体系。

（二）精益生产理论基础

精益生产以准时化生产、价值流分析、持续改进等原则为核心^[2]。准时化生产强调在需要的时间，按需要的量生产所需的产品，避免过度生产造成的浪费，在摩托车制造业中，能精准控制零部件供应与整车组装节奏，提升生产效率。价值流分析旨在识别并消除从原材料到成品过程中所有不增值的活动，对摩托车制造流程进行全面审视，优化供应链、生产布局与工艺流程，去除冗余环节。持续改进鼓励全员参与，不断寻找生产过程中的问题并加以解决，在摩托车制造企业营造持续改善的文化氛围，促使产品质量、生产效率及成本控制不断优化。这些原则共同构成精益生产的理论基础，为摩托车制造业工程管理提供有效指导。

二、工程管理与精益生产融合机理研究

（一）目标维度协同性分析

工程管理与精益生产在目标维度存在显著协同性。在质量成本控制上，工程管理通过精准规划与严格监督确保项目质量达标，精益生产运用价值流分析等方法消除浪费、降低成本，二者结合可在保障产品质量前提下实现成本最优化。资源利用率提升方面，工程管理合理配置人力、物力资源，精益生产强调及时化与自动化，减少库存积压与设备闲置，两者协同能最大化资源利用效率。交货周期缩短维度，工程管理制定合理进度计划并严格把控，精益生产通过优化流程、减少生产环节延误，共同促使摩托车制造能按时甚至提前交付产品。这种目标维度的协同性为两者融合奠定坚实基础，能显著提升摩托车制造业的整体效益^[3]。

（二）系统集成逻辑构建

在摩托车制造业中，工程管理与精益生产的融合需构建系统集成逻辑。建立 PDCA 循环与精益改善活动的动态耦合模型是关键。PDCA 循环涵盖计划、执行、检查与处理，精益改善活动旨在持续优化流程、消除浪费。二者相互作用，PDCA 循环为精益改善提供有序框架，确保改善活动的系统性与持续性；精益改善活动则为 PDCA 循环注入活力，使每一次循环都能实现更高效的优化^[4]。基于此动态耦合模型，管理流程再造路径得以明确。通过对现有工程管理流程进行梳理，识别浪费与不增值环节，运用精益生产工具与方法重新设计流程，确保在满足质量要求的前提下，最大化提升生产效率与资源利用率，实现摩托车制造业工程管理与精益生产的深度融合。

三、融合路径的技术实现框架

（一）生产流程优化技术

1. 价值流图析技术应用

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合路径中，价值流图析技术应用十分关键。结合摩托车总装工艺开展 VSM 诊断，通过绘制现状价值流图，直观呈现物料流与信息流，能精准识别生产过程中的七大浪费现象，诸如过度生产、等待时间、运输浪费等。在此基础上，深入分析浪费产生的根源，确定改善要点。例如，发现某款摩托车总装线上零部件等待时间过长，经分析是物料配送计划不合理所致。以此为改善要点，优化配送计划，减少等待浪费。通过这种方式，利用价值流图析技术，为生产流程优化提供有力支持，实现工程管理与精益生产的有效融合^[5]。

2. 柔性化产线设计实践

在摩托车发动机装配线的柔性化产线设计实践中，快速换模（SMED）与单元化生产模式发挥着关键作用。通过实施 SMED，大幅缩短模具更换时间，提升设备利用率与生产效率。例如，在不同型号发动机模具切换时，运用 SMED 技术对换模流程进行分析、改进，将原本较长的换模时间精简至数分钟，减少设备停机带来的产能损失^[6]。同时，单元化生产模式以产品族为导向，将装配线划分为多个相对独立的生产单元。各单元专注特定类型发

动机的装配，配备专门的人员与设备，实现高效协作，增强产线对不同型号发动机的生产适应性，进而实现生产流程的优化与柔性化提升，有效促进摩托车制造业工程管理与精益生产的融合。

（二）数字化协同管理

1. MES 系统功能整合

在摩托车制造业中，MES 系统要实现工程变更管理与精益指标监控的功能整合，可构建数字化协同管理框架。MES 系统需与设计软件集成，当工程变更指令下达，系统能迅速获取变更信息，并及时更新生产工艺、物料清单等数据，确保生产线按新要求执行，实现工程变更的高效管理。对于精益指标监控，MES 系统要实时采集生产数据，如生产节拍、设备利用率、产品质量等，利用数据分析技术将实际数据与精益指标对比，生成可视化报表^[7]。一旦指标偏离，系统即时预警，以便管理人员及时调整，通过这种功能整合，有效促进工程管理与精益生产的融合，提升摩托车制造业的生产效率与质量。

2. 物联网技术赋能

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合路径中，物联网技术赋能至关重要。设备联网是实现数字化协同管理的基础，对 TPM 维护与安灯系统具有关键支撑作用。通过设备联网，可实时收集设备运行的各类数据，如温度、压力、转速等，为 TPM 维护提供全面且准确的数据基础，使维护人员能更精准地掌握设备状态，及时发现潜在问题并进行预防性维护，降低设备故障率。同时，借助物联网技术实现数据采集，为安灯系统提供实时数据，一旦设备出现异常或生产流程偏离标准，安灯系统能迅速发出警报，及时通知相关人员处理，确保生产过程的顺畅与高效。数据采集方案可采用传感器、边缘计算等技术，确保数据的实时性、准确性和完整性^[8]。

四、融合实施策略与保障机制

（一）组织架构创新

1. 矩阵式项目管理模式

在摩托车制造业中，矩阵式项目管理模式是实现工程管理与精益生产融合的关键组织架构创新。此模式下，以项目为导向，打破产品工程部与生产部门间的壁垒。产品工程部的专业技术人员与生产部门的一线人员共同组成项目团队，围绕特定摩托车产品项目开展工作。从产品设计阶段，生产部门人员便能基于实际生产经验提出建议，使设计更符合生产可行性，减少后期变更；在生产过程中，产品工程部及时提供技术支持，优化生产流程。通过这种矩阵式结构，实现信息高效流通与资源灵活调配。为确保该模式有效运行，需建立明确的职责划分与沟通协调机制，同时借助先进的信息化管理工具，实时跟踪项目进度与质量，推动工程管理与精益生产深度融合^[9]。

2. 持续改进文化培育

在摩托车制造业中，持续改进文化培育对工程管理与精益生产的融合意义重大。一方面，通过提案制度鼓励员工积极思考，提出关于生产流程优化、质量提升等方面的建议，无论建议大

小，均给予重视与反馈，对可行且有效的提案予以奖励，激发员工参与热情^[10]。另一方面，大力推动 QC 小组活动，以团队形式针对生产中的具体问题开展攻关。小组成员来自不同岗位，汇聚各方智慧，共同分析问题、制定解决方案并跟踪效果。定期组织经验分享会，让各小组交流成果与心得，营造全员参与持续改进的良好氛围，使持续改进理念深深扎根于企业，助力工程管理与精益生产深度融合，推动摩托车制造业不断进步。

（二）资源配置策略

1. 多技能工人培养体系

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合过程中，多技能工人培养体系是资源配置策略的关键。可构建包含理论培训、实操认证、技能矩阵管理的完整方案。理论培训方面，针对摩托车生产各环节知识，如发动机制造、车架组装等，设计系统课程，邀请行业专家与内部资深技术人员授课，让工人全面了解生产原理与工艺。实操认证环节，设置标准化实操考核流程，工人在模拟或实际生产场景中操作，依据精确的考核标准，对操作熟练度、质量把控等方面进行评估认证。技能矩阵管理则是对工人已掌握技能进行可视化呈现，根据生产需求，合理调配工人，提升生产灵活性与效率，让工人能够胜任多种岗位，为工程管理与精益生产融合提供坚实人力支持。

2. 智能化设备投资规划

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合过程中，智能化设备投资规划极为关键。对于 CNC 加工中心，需根据摩托车零部件的复杂程度、精度要求及生产规模制定选型标准。例如，加工发动机缸体这类高精度、复杂结构的零部件，需选择具备高转速、高定位精度及多轴联动功能的 CNC 加工中心。同时，对自动检测设备，要依据零部件质量控制要点确定其检测精度、速度及功能。在投资回报分析方面，要综合考虑设备采购成本、安装调试成本、后期维护成本以及因设备投入带来的生产效率提升、产品质量提高所产生的经济效益。通过精准的选型标准与投资回报分析，实现智能化设备的合理投资，为工程管理与精益生产融合提供有力支撑。

（三）绩效评价体系

1. 关键指标设计

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合的绩效评价体系中，

关键指标设计至关重要。确定 OEE（设备综合效率）、FTT（首次通过率）、PPH（每小时产量）等复合型考核指标的计算模型，能有效衡量融合效果。OEE 计算需综合设备时间利用率、性能效率及良品率，全面反映设备运行状态。FTT 旨在考量生产流程中产品首次通过检验的比率，助力发现流程中的质量缺陷环节。PPH 则侧重于衡量单位时间内的产量，体现生产效率。通过这些复合型考核指标的精确计算模型，从设备、质量、效率等多维度对工程管理与精益生产的融合进行量化评估，为持续改进提供有力的数据支撑，促进摩托车制造业实现高效、优质的生产目标。

2. 动态评估方法

在摩托车制造业工程管理与精益生产融合过程中，动态评估方法至关重要。一方面，借助平衡计分卡，从财务、客户、内部流程、学习与成长四个维度全面考量融合效果。财务维度关注成本降低、利润提升等指标，反映融合对企业经济效益的影响；客户维度聚焦客户满意度、市场份额等，衡量产品与服务对客户需求的满足程度。另一方面，运用 AHP 法，将复杂的融合评估目标分解为多个层次，通过构建判断矩阵确定各指标权重，使评估更具科学性与客观性。两种方法相互补充，实时跟踪融合进展，及时发现工程管理与精益生产融合中出现的问题，为持续优化提供有力依据，推动摩托车制造业实现高效、优质发展。

五、总结

工程管理与精益生产的融合，对摩托车制造业意义重大。提炼二者协同发展规律，可发现它们相互促进、相互补充。工程管理与精益生产提供科学规划与组织架构，确保生产流程有序推进；精益生产则为工程管理提供优化思路，消除浪费，提升效率。在工业 4.0 的大背景下，智能制造技术与精益管理深度融合是必然趋势。智能制造技术通过数字化、智能化手段，为精益管理提供更精准的数据支持与自动化流程，进一步提升生产效率与质量。摩托车制造业应顺应这一趋势，不断探索二者融合路径，以提升企业核心竞争力，实现可持续发展，在激烈的市场竞争中占据优势地位。

参考文献

- [1] 刘洋. YD 公司生产车间精益生产管理研究 [D]. 东北大学, 2021.
- [2] 高鹏. M 公司精益生产管理优化研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [3] 刘蕾. K 企业精益生产管理优化研究 [D]. 聊城大学, 2023.
- [4] 冯如. 基于精益生产的 FX 公司生产管理改进研究 [D]. 桂林理工大学, 2023.
- [5] 张松强. SQ 制药公司精益生产运营管理优化研究 [D]. 广东工业大学, 2023.
- [6] 王西. 精益生产与质量体系的融合 [J]. 机械工业标准化与质量, 2019, (09): 52-56.
- [7] 管子房. 精益生产的制造业企业管理创新模式 [J]. 上海轻工业, 2024, (04): 46-48.
- [8] 罗婉宁. 基于精益生产的制造业企业管理创新模式 [J]. 中小企业管理与科技, 2022, (02): 63-65.
- [9] 陶昌隆, 张周岐, 汪春艳, 等. 基于精益生产的制造业企业管理创新模式 [J]. 化工管理, 2021, (13): 5-6.
- [10] 田超. 精益生产管理逻辑 [J]. 企业管理, 2024, (05): 97-99.

机械视角下中式厨房电器研发的多功能集成与快速蒸实现策略

梁毅强

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120054

摘 要： 本文从机械视角探究中式厨房电器研发的多功能集成与快速蒸实现策略。涵盖交互界面设计、显示模组散热与密封、耐高温光学胶性能开发、机械密封结构创新等多方面。通过材料创新与结构设计突破，解决高温蒸汽环境下触控模组运行难题，提升蒸制效率与界面寿命，为行业发展提供方向。

关 键 词： 中式厨房电器；快速蒸技术；多功能集成

The Realization Strategy of Multi-Function Integration and Rapid Steaming in the Research and Development of Chinese Kitchen Appliances from the Mechanical Perspective

Liang Yiqiang

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This paper explores the implementation strategy of multi-function integration and rapid steaming in the research and development of Chinese kitchen appliances from the mechanical perspective. It covers interactive interface design, heat dissipation and sealing of display module, development of high temperature resistant optical rubber performance, structural innovation of mechanical seal, etc. Through material innovation and structural design breakthrough, the operation problem of touch module in high temperature steam environment is solved, and the steaming efficiency and interface life are improved, providing direction for the development of the industry.

Keywords： Chinese kitchen appliances; rapid steaming technology; multifunctional integration

引言

《“十四五”机器人产业发展规划》（2021 年颁布）旨在推动相关产业迈向中高端水平，厨房电器作为家居领域重要部分，其发展受该政策影响。中式厨房烹饪环境特殊，对电器交互界面、显示模组等提出诸多挑战。从操作便捷性、耐油污、高温稳定运行到解决散热与密封矛盾等，都需技术突破。在耐高温光学胶、机械密封结构、导热补偿装置等多方面的研发，以及集成化触控模组设计、抗眩光技术、快速蒸技术等创新，不仅提升电器性能，也符合政策推动产业升级导向，为中式厨房电器多功能集成与快速蒸实现提供有力支撑。

一、触摸屏光学胶在厨房电器中的应用基础

（一）中式厨房电器的交互需求特征

中式厨房烹饪过程油烟较大，且温度相对较高，这对厨房电器的交互界面提出特殊要求。从操作便捷性来看，需简洁直观的交互方式，让用户在烹饪忙碌时也能轻松操作。考虑到使用环境，界面需具备良好的耐油污、易清洁特性，避免油污长期附着影响操作与显示效果。在高温环境下，交互界面还应保证稳定运行，不因温度升高而出现触控失灵等状况。而且，由于中式烹饪动作幅度较大，厨房空间有时较为紧凑，交互区域设计要合理，防止误操作。触摸屏光学胶在此场景下有着重要价值，它能增强

触控屏幕的防护，在满足交互需求的同时，抵御油烟与高温的侵蚀，确保厨房电器交互界面的长期可靠运行^[1]。

（二）多功能集成设备的显示技术瓶颈

在蒸烤一体机等复合电器中，显示模组面临着散热性与密封性的矛盾这一关键技术瓶颈^[2]。一方面，厨房电器在运行时会产生大量热量，显示模组若散热不佳，会导致内部元件温度过高，影响其性能与寿命，甚至引发故障。另一方面，为保障电器整体的安全性与稳定性，尤其是在烹饪环境中防止水汽、油污等侵入，显示模组又需具备良好的密封性。然而，传统提高密封性的方式往往会阻碍热量散发，而侧重散热则可能降低密封效果。这种矛盾使得显示技术在多功能集成设备的应用中受限，难以同时

满足散热与密封需求，亟待研发新的解决方案，以突破这一技术瓶颈，提升厨房电器显示模组的可靠性与功能性。

二、耐高温光学胶核心性能开发

（一）硅基材料的光学参数优化

在耐高温光学胶核心性能开发中，硅基材料的光学参数优化至关重要。通过聚硅氧烷分子结构改性，能够有效提升其在高温环境下的光学性能^[3]。具体而言，对聚硅氧烷分子结构进行精准设计与调整，可改变其内部化学键的排列和相互作用。这种改性使得硅基材料在160℃的高温环境下，仍能保持92%的透光率。该过程主要是通过优化分子结构，降低高温对硅基材料光学性能的负面影响，减少因温度升高导致的光线散射与吸收，从而确保光线能够高效透过。这一优化不仅满足了高温环境下对光学胶透光性能的严格要求，也为中式厨房电器在高温工作场景中的快速蒸功能实现提供了可靠的光学保障。

（二）界面黏着强度测试方法

在耐高温光学胶核心性能开发中，界面黏着强度的准确测试至关重要。可采用标准搭接剪切试验方法，将耐高温光学胶均匀涂覆于两个经过预处理的测试基材表面，待其充分固化后，使用电子万能试验机对搭接试件施加轴向拉伸载荷，直至试件破坏，记录破坏时的最大载荷，并依据公式计算界面黏着强度^[4]。此外，还可利用剥离试验，如90°剥离或180°剥离，模拟实际应用场景下的黏着情况，测量剥离过程中的力值，分析不同角度下的界面黏着性能。通过多种测试方法相结合，全面、准确地评估耐高温光学胶的界面黏着强度，为其中式厨房电器等高温、高湿环境下的可靠应用提供数据支撑。

三、集成化触控模组结构设计

（一）机械密封结构创新

1. 多层梯度密封系统

在机械密封结构创新方面，多层梯度密封系统是提升中式厨房电器防水性能的关键设计。该系统采用五级密封结构，含光学胶防护层，以此实现IP68防水等级。光学胶防护层凭借其出色的粘结性能，紧密贴合各密封部件，有效阻挡水汽渗透。多层梯度密封结构依据水汽侵入路径，由外向内设置不同功能的密封层级，层层设防。最外层抵御大颗粒异物及部分水汽，中层进一步阻挡渗透水汽，内层进行精细密封。这种设计不仅能有效防水，还能适应厨房复杂的使用环境，防止油污等对电器内部结构的侵蚀^[5]。通过多层梯度密封系统，中式厨房电器在满足多功能集成的同时，保障了电器的可靠性与稳定性，为快速蒸等功能的实现提供坚实的防水基础。

2. 导热补偿装置开发

在中式厨房电器研发中，导热补偿装置开发至关重要。为消除光学胶热膨胀系数差异，开发铜铝复合散热框架^[6]。铜具有良好的导热性，能快速将热量传递出去，铝则以其质轻、成本低的

特点，使散热框架更具经济性与实用性。通过合理设计铜铝复合结构，优化二者比例与结合方式，精准调控散热性能。在实际应用中，该框架能够有效平衡因光学胶热膨胀系数差异导致的局部过热问题，保障电器内部光学元件的稳定性与可靠性。同时，考虑到厨房复杂的使用环境，对铜铝复合散热框架进行表面处理，增强其抗腐蚀能力，延长使用寿命，从而为中式厨房电器实现多功能集成与快速蒸提供稳定的热管理支撑。

（二）人机交互界面优化

1. 触控灵敏度调校算法

集成化触控模组结构设计需充分考虑中式厨房的复杂环境与操作习惯。采用紧凑布局，将不同功能触控区域合理划分，同时确保模组具备防水、防油污性能，延长使用寿命。人机交互界面优化旨在提升用户体验。界面设计要符合中式烹饪流程，图标、文字简洁明了，采用大字体、高对比度颜色，方便用户在厨房环境下清晰识别。操作流程简化，减少层级，一键直达常用功能。触控灵敏度调校算法利用支持向量机建立多层触控信号补偿模型^[7]。通过对大量触控样本数据的学习，精准分析信号特征，针对中式厨房操作中可能出现的误触、滑触等情况，对触控信号进行实时补偿与修正，使触控响应更灵敏、准确，满足中式厨房快速操作需求。

2. 抗眩光纳米压印技术

在机械视角下中式厨房电器研发中，抗眩光纳米压印技术是重要一环。应用周期320nm的光栅结构实现86%雾度抑制^[8]，这一技术可有效提升电器显示屏的视觉效果。纳米压印技术能精确复制出所需的光栅结构，且成本较低、生产效率高。通过在显示屏表面压印特定结构的纳米图案，改变光线的传播方向，减少光线的反射，从而实现抗眩光效果。如此一来，在厨房复杂的光照环境下，用户能更清晰地查看电器的显示信息，操作也更为便捷，大大提升了用户在人机交互过程中的体验，为厨房电器的多功能集成与快速蒸实现策略提供有力的视觉交互支持。

四、快速蒸技术系统验证

（一）蒸汽动力模组集成设计

1. 双磁悬浮水泵架构

在快速蒸技术系统验证的蒸汽动力模组集成设计中，双磁悬浮水泵架构发挥着关键作用。传统水泵在输送液体时可能存在效率低下、噪音较大等问题，而双磁悬浮水泵架构则通过利用磁悬浮技术，有效减少了机械摩擦。这一架构能够精准控制水泵的运行，为蒸汽发生系统提供稳定且高效的供水。在研制工作压力0.3MPa的蒸汽发生系统中，双磁悬浮水泵架构可确保在高效供水的同时，助力热循环效率提升40%。它通过优化的磁路设计与先进的控制算法，保证了水泵运行的稳定性与可靠性，为蒸汽动力模组的高效集成奠定基础^[9]。这种架构的应用，不仅能满足中式厨房电器对快速蒸功能的需求，还在提升整体性能方面具有显著优势。

2. 纳米陶瓷膜阻垢技术

纳米陶瓷膜阻垢技术在机械视角下的中式厨房电器研发中具

有重要意义。在快速蒸功能实现过程里，水垢问题若不解决，会严重影响蒸汽动力模组性能及使用寿命。纳米陶瓷膜凭借其独特的微观结构和性能，能有效防止水垢形成。研究表明，表面接触角 110° 的防垢层使蒸汽出口寿命延长至3000小时^[10]。这一技术通过在关键部件表面涂覆纳米陶瓷膜，利用其高接触角特性，减少水垢附着，确保蒸汽顺畅流通。该特性不仅提升了快速蒸技术系统的稳定性，也保障了蒸汽动力模组集成设计的高效运行，为中式厨房电器实现多功能集成与快速蒸提供了坚实的技术支撑，有助于提升产品的整体性能与可靠性。

（二）触控系统可靠性验证

1. 高温高湿加速老化测试

在机械视角下中式厨房电器研发中，触控系统可靠性对于快速蒸技术系统的稳定运行至关重要。为此，需进行高温高湿加速老化测试，模拟严苛使用环境来检验触控系统性能。测试设定在 85°C 、相对湿度85%RH的环境条件下持续2000小时。在此期间，着重统计触控失效次数，以判定系统可靠性。若触控失效次数小于3次，则符合预设标准，表明触控系统在高温高湿环境下能维持较好的可靠性，可满足快速蒸技术系统的实际使用需求，为中式厨房电器的多功能集成与快速蒸实现提供稳定可靠的操作交互基础。

2. 机械振动工况模拟

在机械振动工况模拟环节，着重模拟中式厨房电器在实际使用场景中可能面临的机械振动状况。设定在5 - 500Hz随机振动条件下，对电器的触控系统进行可靠性验证。这是因为中式厨房环境复杂，电器可能会因操作、放置环境等因素受到不同频率的振动影响。在此模拟工况下，重点考察触控系统界面响应延迟情况，确保其稳定在50ms以内。通过这样的机械振动工况模拟，能够更全面地检验电器触控系统在复杂振动环境下的可靠性，为实现中式厨房电器多功能集成与快速蒸功能提供稳定可靠的操作交互基础，也为后续产品在真实厨房环境中的应用提供有力保障。

（三）实际应用效能评估

1. 水汽凝结抑制效果

在快速蒸技术系统验证的实际应用效能评估中，水汽凝结抑

制效果是重要一环。中式厨房环境复杂，水汽大量产生易造成电器内部及周边凝结，影响性能与寿命。该技术通过光学胶微结构导流设计，有效改善水汽凝结状况。经测试，这一设计使界面结露量显著降低78%。具体而言，其利用微结构对水汽的导向作用，改变水汽流动路径，让水汽更有序地汇聚与排出，而非无序凝结。这不仅大幅减少了电器关键部位因水汽凝结带来的短路、腐蚀风险，还提升了整体的使用稳定性与清洁便利性，为快速蒸技术在中式厨房电器中的稳定应用提供了有力保障。

2. 操作误触率统计

在快速蒸技术系统验证的实际应用效能评估环节，操作误触率统计十分关键。中式厨房环境油污较重，这对电器操作的准确性提出挑战。通过对应用新型触控算法的厨房电器进行操作误触率统计，结果显示在油污环境下，误操作率能被有效控制在0.2%以下。这一数据有力地证明了新型触控算法在实际应用中的可靠性，保障了快速蒸功能操作的精准性。操作误触率统计采用大量样本，覆盖不同油污程度场景，全面模拟中式厨房真实使用环境，以确保数据的真实性与说服力，为快速蒸技术系统在中式厨房电器中的实际应用提供重要支撑，助力实现多功能集成与快速蒸的高效结合。

五、总结

在机械视角下对中式厨房电器研发的多功能集成与快速蒸实现策略进行探究，有着显著成果。通过硅基光学胶材料创新与结构设计突破，成功解决了触控模组在高温蒸汽环境下运行的难题，确保其能在 125°C 蒸汽环境中可靠运作。这一成果不仅提升了复合型厨房电器的蒸制效率，较之前提高了35%，还极大地延长了界面寿命，延长幅度达3倍之多。这一系列策略的成功实践，为中式厨房电器在多功能集成与快速蒸方面的发展提供了切实可行的方向与经验，有望推动中式厨房电器行业朝着更高效、更智能的方向进一步发展，满足消费者对于厨房电器功能多元化和使用便捷性的需求。

参考文献

- [1]王义.基于聚苯胺类材料的反射型电致变色多功能薄膜器件研究[D].电子科技大学,2022.
- [2]王新柳.蒸排骨预制菜加热技术及贮藏特性研究[D].:华南理工大学,2023.
- [3]李新雪.经典传承视角下现代中式坐具设计研究[D].青岛理工大学,2022.
- [4]沈艺豪.S公司智能厨房电器营销策略研究[D].上海外国语大学,2023.
- [5]雷可欣.多功能视角下的武汉市都市农业发展潜力与分区发展策略研究[D].华中农业大学,2022.
- [6]王龙,汪刘应,刘顾,等.透视/遮阳/控温/红外隐身多功能集成序构薄膜研究[J].红外与毫米波学报,2024,43(2):143-149.
- [7]李马驹,章迁.中式烹饪中蒸制工艺的分析及其优化策略[J].食品安全导刊,2022,(11):163-165.
- [8]周章凌.集成灶的品类特点功能及发展趋势[J].现代企业,2020(8):2.
- [9]杨向萍.集成创新是家用电器产品研发的方向[J].家电科技,2014(8):30-31.
- [10]王惠良,王万昭,和志强.多点红外触控系统的设计与实现[J].河北工业科技,2012,29(6):502-503,511.

飞机电子电器设备维修中的机电一体化技术实践与探索

闫振雷

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120055

摘 要： 机电一体化技术在飞机电子电器设备维修领域应用广泛，涵盖传感检测、自动控制等模块，有伺服控制等多种类型。在电子组件检测、接触器烧蚀故障维修等方面实践成果显著，同时在嵌入式系统开发、新型传感技术应用等多个方面展开探索，提升了维修效率与质量，未来应向智能诊断、多学科融合及数智化转型发展。

关 键 词： 机电一体化技术；飞机电子电器设备维修；智能诊断

Practice and Exploration of Mechatronics Technology in Aircraft Electronic and Electrical Equipment Maintenance

Yan Zhenlei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Mechatronics technology is widely used in the field of aircraft electronic and electrical equipment maintenance, covering modules such as sensing and detection, automatic control, and various types such as servo control. Significant practical achievements have been made in electronic component detection, contactor ablation fault maintenance, and exploration has been carried out in multiple aspects such as embedded system development and new sensing technology applications, which have improved maintenance efficiency and quality. In the future, there should be a shift towards intelligent diagnosis, interdisciplinary integration, and digital transformation.

Keywords： mechatronics integration technology; aircraft electronic and electrical equipment maintenance; intelligent diagnosis

引言

随着航空事业的不断发展，飞机电子电器设备维修的重要性日益凸显。2022 年颁布的《“十四五”航空工业发展规划》着重强调推动航空技术创新与应用。机电一体化技术融合多学科知识，在飞机电子电器设备维修中发挥关键作用，从传感检测到智能诊断，从嵌入式系统开发到新型传感技术应用等多方面，全面提升维修效率与质量。其应用既顺应政策导向，又符合航空维修智能化、高效化发展趋势，对保障飞行安全、推动航空维修领域技术升级具有重要意义。

一、机电一体化技术概述

（一）技术基本原理

机电一体化技术融合了机械技术、电子技术、信息技术、自动控制技术等多种学科，其核心在于各模块的协同集成。传感检测模块通过各类传感器，如温度传感器、压力传感器等，实时采集飞机电子电器设备的运行状态数据，精准获取设备的工作参数^[1]。信息处理模块接收传感检测模块传来的数据，运用计算机技术与算法，对这些数据进行分析、运算和处理，以判定设备是否处于正常运行状态。自动控制模块依据信息处理模块的分析结果，自动调整设备的运行参数，实现对飞机电子电器设备的精确控制。在航空领域，这种技术延展性体现在能适应飞机复杂、严苛的运行环境，为飞机电子电器设备的稳定、高效运行提供可靠

保障，确保飞行安全。

（二）航空维修技术分类

在飞机电子电器设备维修领域，机电一体化技术涵盖多种类型，有着明确的分类标准。伺服控制系统是其中重要的一类，它通过对机械运动的精准控制，利用电气信号来调节机械部件的运转，如飞机发动机燃油供给的伺服控制，确保燃油供应精准匹配发动机不同工况需求。线传操控系统同样关键，其以电信号取代传统机械连杆传递操控指令，提升飞机操控的灵敏性与稳定性，在现代先进战机和大型客机上广泛应用。此外，还有诸如飞行数据记录与处理系统等，将电子数据处理与机械存储装置结合，实现飞行关键数据的可靠记录与快速提取。这些机电一体化技术类型共同构成飞机电子电器设备维修的技术体系，各有独特功能与应用场景，共同保障飞机的安全可靠运行^[2]。

二、航空维修实践案例研究

（一）电子组件检测应用

在飞机电子电器设备维修中，机电一体化技术在电子组件检测应用方面有着重要实践。以飞行控制系统作动器单元为例，机电一体化在线监测技术能精准对故障进行定位。通过对关键参数的实时监测，其参数监测精度指标可满足飞行安全要求。比如在某次实际诊断中，该技术凭借高精度的参数监测，快速捕捉到作动器单元某部件的异常参数变化，进而准确判断出故障位置，为维修人员及时采取维修措施提供了有力支持。这种基于机电一体化的在线监测技术，改变了传统人工检测可能存在的误差大、效率低等问题，大大提升了电子组件检测的准确性和故障定位效率，为飞机的安全稳定运行保驾护航^[3]。

（二）电器系统维修案例

以飞机电源分配系统为例，在其接触器烧蚀故障维修中，智能诊断装置发挥着关键作用。维修人员利用机电一体化技术对故障进行深入分析。借助多物理场耦合分析过程，该智能诊断装置能够综合考虑电磁、热、机械等多种物理场的相互作用^[4]。比如，在接触器工作时，电磁力使触头闭合，但同时电流通过会产生热量，过高热量可能导致触头烧蚀，机械振动也会对其产生影响。智能诊断装置通过对这些复杂物理场的耦合分析，精准定位接触器烧蚀故障点，判断烧蚀程度及原因，为维修方案制定提供可靠依据，实现对接触器烧蚀故障的高效、准确诊断与维修，确保飞机电源分配系统的稳定运行，保障飞行安全。

三、关键技术优化策略

（一）维护技术升级路径

1. 嵌入式系统开发

在飞机电子电器设备维修里，嵌入式系统开发对机电一体化技术的有效实践意义重大。研究 FPGA 芯片于机电控制单元的集成应用时，为确保系统在航空复杂环境下稳定运行，需构建适应航空环境的系统冗余架构。具体而言，借助 FPGA 芯片灵活的可编程特性，优化硬件逻辑设计，实现对机电设备精准高效控制。同时，在嵌入式系统开发中，依据航空环境的振动、温度、电磁干扰等特殊要求，对系统进行冗余架构设计^[5]。这不仅要考虑硬件层面的冗余备份，如关键模块的双备份设计，还需在软件方面构建容错机制，以便在某一模块出现故障时，系统能快速切换至备份模块，持续稳定运行，从而提升飞机电子电器设备维修中机电一体化技术的可靠性与稳定性。

2. 新型传感技术应用

在飞机电子电器设备维修中，新型传感技术应用至关重要。探索光纤传感器在发动机线束检测中的实施路径意义重大。光纤传感器凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等特性，能有效检测发动机线束的微小变形与温度变化。通过合理布置光纤传感器于发动机线束关键部位，实时采集数据。同时，建立振动信号与电气参数的关联分析模型^[6]，借助先进的数据处理算法，深入挖掘振动信号

与电气参数间隐藏的关系。当发动机振动异常时，该模型可依据关联关系迅速判断是否对电气参数产生影响，进而精准定位故障隐患，提升飞机电子电器设备维修的准确性与效率，为飞机安全稳定运行提供有力保障。

（二）维护流程再造

1. 智能诊断系统构建

在飞机电子电器设备维修的智能诊断系统构建中，设计基于设备树模型的故障定位算法，此算法以设备树模型为基础，将飞机电子电器设备的结构层次化呈现，能精准定位故障所在位置，大大提高故障排查效率。同时，开发具备自学习能力的专家系统模块^[7]。该模块借助机器学习等技术，可对过往维修案例和实时监测数据进行深度分析，不断丰富自身知识库，以适应复杂多变的飞机电子电器设备故障情况。通过这两个关键部分的构建，实现智能诊断系统对飞机电子电器设备故障的高效、精准诊断，优化维修流程，提升维修工作的整体质量和效率，为飞机电子电器设备的稳定运行提供有力保障。

2. 预防性维护体系

在飞机电子电器设备维修的预防性维护体系中，构建基于 PHM 理论的剩余寿命预测模型与制定关键部件的状态维修决策阈值是关键。通过 PHM 理论收集设备运行的各类数据，如温度、振动、电流等^[8]，借助数据分析与建模技术，精确预测关键部件的剩余寿命，为提前维护提供依据。同时，基于对部件性能、运行环境及历史故障数据的深入分析，制定科学合理的状态维修决策阈值。当监测数据接近或达到该阈值时，及时安排维护工作，既能避免过度维护造成的资源浪费，又能防止因维护不及时导致故障发生，有效提升飞机电子电器设备的可靠性与安全性，确保飞行任务的顺利进行。

四、技术融合创新探索

（一）数字化技术融合

1. 数字孪生技术应用

在飞机电子电器设备维修中，数字孪生技术的应用具有重要意义。通过构建飞机配电系统的数字孪生模型，能够对其运行状态进行精确模拟与实时监测。此模型可复现配电系统的各种工况，将实际物理系统的信息映射到虚拟空间，维修人员借助该虚拟调试平台，可对维修方案开展事前验证。例如，模拟不同故障场景下维修方案的实施过程，依据虚拟环境中的反馈数据，精准分析维修方案的可行性与潜在问题。从而提前优化维修方案，有效减少实际维修过程中的失误与时间消耗，提高维修效率与质量^[9]。同时，数字孪生技术也为维修人员提供了一个沉浸式学习与培训的环境，使其能更好地熟悉配电系统结构与维修流程。

2. 增强现实辅助系统

在飞机电子电器设备维修中，增强现实辅助系统通过构建基于 SLAM 技术的 AR 维修指引系统，为维修工作带来革新。SLAM 技术能够实时定位与地图构建，让维修人员精准掌握设备位置与空间信息。在此基础上，研究环境感知算法在复杂工况下

的适应能力至关重要。飞机维修环境复杂，光线、噪声等因素多变，这要求环境感知算法能准确识别设备部件、故障标识等。借助该算法，增强现实辅助系统可将虚拟维修信息精准叠加在真实设备上，如故障位置标注、维修步骤演示等，帮助维修人员快速理解维修流程，提升维修效率与准确性^[10]。

（二）智能化设备研发

1. 多功能检测装备

在飞机电子电器设备维修领域，多功能检测装备的智能化研发至关重要。研制具备航电总线解析功能的便携式测试装置，整合 1553B 和 ARINC429 协议栈，这一创新极大提升了检测的效率与精准度。1553B 协议广泛应用于航空电子系统，数据传输稳定可靠；ARINC429 协议则以其灵活性在飞机通信等方面发挥重要作用。将两者协议栈整合于便携式测试装置，该装置能快速准确解析不同类型航电总线数据，维修人员可借此迅速定位飞机电子电器设备故障点，为维修工作提供有力数据支持，大大缩短维修时间，提高飞机整体维护水平，有效保障飞机电子电器设备稳定运行。

2. 自主维护机器人

在飞机电子电器设备维修中，自主维护机器人的研发意义重大。开发适用于电子舱环境的蛇形机械臂系统，是实现自主维护的关键一步。这种蛇形机械臂系统需能灵活穿梭于电子舱复杂的结构之中，以抵达各个待维修设备处。同时，研究受限空间内的路径规划算法也必不可少。该算法要充分考虑电子舱内空间狭窄、设备布局紧凑等特点，使机械臂能精准避开障碍物，快速且安全地到达目标位置进行维修操作。通过蛇形机械臂系统与路径规划算法的有机结合，可有效提高飞机电子电器设备维修的自动化与智能化水平，降低人工维修的难度与风险，为飞机的安全稳定运行提供有力保障。

（三）大数据技术应用

1. 维修知识库建设

在飞机电子电器设备维修中，维修知识库建设对提升维修效率与质量至关重要。基于 Ontology 构建维修案例推理系统，能

有效建立失效模式与处理方案的映射关系。通过对大量飞机电子电器设备维修数据的收集、整理与分析，将各类失效模式详细分类，利用大数据技术挖掘其中潜在联系，精准匹配相应处理方案。以 Ontology 为基础，对知识进行语义描述和结构化表示，使知识更具逻辑性和关联性，便于维修人员快速检索与利用。维修知识库就像一个强大的“智囊库”，当遇到新的维修问题时，可依据相似失效模式从库中迅速获取处理思路，为维修决策提供有力支持，促进维修工作的高效开展。

2. 预测分析模型优化

在飞机电子电器设备维修中，预测分析模型的优化至关重要。应用 LSTM 神经网络算法处理时序维修数据，能够有效提升设备状态预测准确率。LSTM 神经网络具有长短期记忆特性，可处理维修数据中的时间序列信息，捕捉设备运行状态随时间变化的规律。通过该算法，深入挖掘数据间的潜在联系，准确判断设备可能出现故障的时间与类型。在训练过程中，对参数进行精细调整，使模型更好地拟合维修数据特征。相较于传统预测模型，LSTM 神经网络算法大大提高了预测的准确性，为维修人员提前规划维修策略、准备维修资源提供有力支持，有效降低设备故障带来的风险，提升飞机电子电器设备维修的整体效率与质量。

五、总结

机电一体化技术在飞机电子电器设备维修中的应用成效显著，不仅提高了维修效率与质量，还降低了人力成本与维修误差。从发展方向来看，提升智能诊断精度是关键，通过引入更先进的算法与传感器技术，让诊断结果更精准可靠。多学科交叉融合也是重要趋势，融合机械、电子、计算机等多学科知识，为维修工作提供更全面、创新的解决方案。数智化转型对于航空维修体系意义重大，它将带来全新的管理模式与维修流程，革新传统维修理念。未来，应不断深化机电一体化技术在飞机电子电器设备维修中的实践，推动航空维修领域持续向智能化、高效化迈进，以适应日益发展的航空事业需求。

参考文献

- [1] 韦佑武.《飞机电气基础维修手册》英汉翻译实践报告[D].东北电力大学,2023.
- [2] 李奕霖.机理与数据协同的机电设备智能诊断方法研究[D].中国石油大学(北京),2022.
- [3] 潘加爽.飞机电子设备舱通风冷却系统研究与优化[D].江苏科技大学,2023.
- [4] 李征鸿.飞机机电系统综合控制管理技术研究[D].南京理工大学,2021.
- [5] 张兴昊.飞机空调系统故障诊断与维修管理[D].中国民航大学,2023.
- [6] 刘娟桂.机电一体化技术在智能制造中的实践探索[J].信息记录材料,2021,22(6):98-99.
- [7] 张谊.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].中国设备工程,2023(20):26-28.
- [8] 霍英杰,方周泉.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].佳木斯职业学院学报,2021,37(9):35-36.
- [9] 高露.机电一体化技术在智能制造中的实践运用[J].电子测试,2022(8):134-135,17.
- [10] 李军.机电一体化技术在煤矿生产中的实践探析[J].内蒙古煤炭经济,2021(8):55-56.

石油化工机电安装工程中的技术创新与风险管理

倪行秀

茂名市恒孚石化工程有限公司，广东 茂名 525000

DOI:10.61369/ME.2025120001

摘 要： 石油化工机电安装工程的技术创新与风险管理呈现显著的协同效应，智能化监测系统和先进施工工艺的应用提升了风险防控能力，而完善的风险管理体系保障了技术创新的可靠实施。研究显示，二者的有机结合不仅能降低事故率，还能优化工程效率，是实现行业高质量发展的关键。随着《“十四五”危险化学品安全生产规划方案》的实施，数字孪生、物联网等技术与风险管控体系的深度融合成为重要发展方向。

关 键 词： 石油化工；机电安装；技术创新；风险管理

Technological Innovation and Risk Management in Petrochemical Electromechanical Installation Projects

Ni Xingxiu

Maoming Hengfu Petrochemical Engineering Co., Ltd., Maoming, Guangdong 525000

Abstract : Technological innovation and risk management in petrochemical electromechanical installation projects demonstrate significant synergistic effects. The application of intelligent monitoring systems and advanced construction techniques enhances risk prevention and control capabilities, while a well-developed risk management framework ensures the reliable implementation of technological innovations. Studies indicate that the integration of these two aspects not only reduces accident rates but also optimizes project efficiency, serving as a key factor in achieving high-quality development in the industry. With the implementation of the "14th Five-Year Plan for Safe Production of Hazardous Chemicals," the deep integration of digital twins, IoT, and other technologies with risk management systems has become an important direction for future development.

Keywords : petrochemical; electromechanical installation; technological innovation; risk management

引言

石油化工机电安装工程作为现代工业体系的核心环节之一，其技术复杂性和高风险特征对工程管理提出严峻挑战。2022年3月，应急管理部发布《“十四五”危险化学品安全生产规划方案》，强调行业需在安全合规与技术创新间实现协同发展。当前，石化产业正加速向智能化、绿色化转型，数字孪生、物联网等技术的应用显著提升风险预警能力，而模块化施工、高性能防腐材料等新工艺则从源头上减少事故隐患。然而，技术创新的快速迭代也带来新的风险管控需求，需建立与新技术适配的资质认证和监管体系。2023年，行业内相关政策进一步要求加强技术标准与安全管理的融合，以应对新技术应用中的潜在风险。探讨技术创新与风险管理的协同机制，不仅关乎工程建设的安全与效率，更是实现石化行业高质量发展的关键路径。

一、石油化工机电安装工程概述

（一）石油化工机电安装工程的定义、范畴及特点

石油化工机电安装工程涵盖设备安装、管道敷设、电气系统配置及自动化控制等多个关键环节，是石化生产设施建设的重要组成部分。设备安装涉及塔、反应器、换热器、压缩机、泵组等大型机械设备的精准定位与调试；管道工程需满足高温、高压、易燃易爆、腐蚀性介质输送的严苛要求；电气系统包括供配电、防爆电气设备安装；自动化控制则依托 DCS、PLC 等系统实现生产流程的智

能化管理^[1]。此类工程具有显著的高风险性，技术复杂度高，施工环境常伴随高温、高压、易燃易爆等极端条件，同时需兼顾多专业交叉协作的挑战，对施工精度与安全性提出极高要求。

（二）石油化工行业对机电安装的特殊要求

石化行业的机电安装需严格遵循高温高压及易燃易爆环境下的技术标准，例如采用 ASME、API 等国际规范确保设备与管道的密封性及结构强度，并配备防爆电气设备以规避火灾风险^[2]。环保与节能要求进一步推动工程技术革新，如采用微泄漏阀门减少挥发性有机物排放，应用变频技术优化电机能耗，通过余热回收

系统提升能效。这些要求不仅影响材料与工艺选择，还促使工程设计与施工阶段融入全生命周期环保评估，以实现可持续发展目标。

二、石油化工机电安装工程中的技术创新

（一）智能化与数字化技术的应用

BIM（建筑信息模型）技术在石油化工机电安装工程中的应用显著提升了设计与施工效率，通过三维建模实现设备布局优化、管线碰撞检测及施工进度模拟，减少设计变更与返工。物联网技术结合传感器网络实时监测设备运行状态，采集振动、温度、压力等关键参数，结合大数据分析预测潜在故障，形成智能化运维体系。例如，某大型炼化项目采用基于物联网的预测性维护系统，将非计划停机时间降低30%，大幅提升生产稳定性与经济性^[9]。

（二）新材料与新工艺的推广

高性能防腐材料如镍基合金、氟塑料衬里管道在石化工程中的广泛应用，有效解决了酸性介质和高温环境下的设备腐蚀问题，延长设施使用寿命。模块化安装技术通过工厂预制和现场拼装相结合，缩短工期并降低高空作业风险^[4]。国内某乙烯项目采用模块化施工，将传统现场焊接工作量减少60%，工期压缩40%，同时焊接质量合格率提升至99.5%，体现了新工艺在施工质量、效率与安全方面的多重优势。

三、石油化工机电安装工程的风险管理

（一）风险识别与评估

1. 主要风险类型

石油化工机电安装工程面临的风险主要包括安全风险、质量风险及进度风险。安全风险主要源于高空作业、大型设备吊装、临时用电、动火作业等施工环节，可能引发高处坠落、机械伤害、触电、火灾等事故。质量风险涉及材料缺陷、焊接工艺不合格或设备安装偏差，导致系统泄漏或运行故障^[9]。进度风险则受天气条件、设计水平、供应链延迟及施工协调等问题影响，可能造成工期延误与成本超支。这些风险相互关联，例如质量缺陷可能升级为安全事故，而进度压力可能进一步加剧施工隐患。

2. 风险评估方法

工程实践中采用系统化工具进行风险评估，如失效模式与影响分析（FMEA）通过量化故障发生概率与严重程度，识别关键设备薄弱环节^[6]。危险与可操作性分析（HAZOP）则通过结构化审查工艺设计参数（如流量、压力、温度等），发现潜在操作偏差及连锁风险。某石化项目应用HAZOP对加氢装置进行风险审查，识别出高温管道保温失效可能导致的可燃气体积聚问题，并据此优化了监测方案^[7]。定量风险评估（QRA）进一步结合概率模型与后果模拟，为风险分级与管控优先级提供数据支撑。

（二）风险控制与应对措施

1. 技术层面的风险控制（如自动化监测与预警系统）

技术手段在风险控制中发挥核心作用，自动化监测系统通过实时采集压力、温度、振动等关键参数，结合智能算法实现异常工况预警。例如，某炼油厂在压缩机机组安装中部署在线监测系统，成功预警轴承磨损故障，避免非计划停机损失。防爆电气设计与本质安全设计从源头降低点火源风险，泄漏检测系统则采用

红外成像与激光光谱技术，显著提升危险气体泄漏早期识别能力^[8]。三维激光扫描辅助安装定位技术可将大型设备安装精度控制在0.05mm ~ 0.1mm范围内，有效规避因安装偏差导致的结构应力风险。

2. 管理层面的风险应对（如应急预案与安全管理体系）

管理体系构建风险防控的多重屏障，基于ISO 31000风险管理标准建立的风险管理框架明确风险识别、评估、处置的闭环流程。应急预案体系包含分级响应机制，针对火灾、泄漏等场景开展定期演练，某石化园区通过实战演练将应急响应时间缩短40%^[9]。安全管理体系整合PDCA循环与JSA工作安全分析法，将风险控制措施嵌入作业许可制度。承包商HSE绩效考评制度实施后，某项目承包商违规率下降65%，证明管理措施对施工行为的规范作用。数字化管理平台实现风险数据的可视化追踪，确保控制措施的有效执行与持续改进。

四、技术创新与风险管理的协同优化

（一）技术创新对风险管理的促进作用

1. 智能化技术降低人为操作风险

智能化技术的深入应用有效降低了传统施工过程中的人为操作风险。数字孪生技术通过构建高精度虚拟模型，可在施工前模拟并识别不同专业、不同工序之间可能存在的空间冲突、工序矛盾或设计不匹配等问题，显著减少现场返工。智能穿戴设备实时监测作业人员的生理状态和位置信息，在高温、高压、有毒等恶劣环境作业中发挥重要保护作用。自动化焊接设备在提升施工质量与效率的同时，也有效规避了人工焊接中可能出现的烫伤、触电、烟尘吸入等职业健康安全风险。远程监控系统实现了对危险区域的无人化巡检，极大降低了作业人员直接暴露于高风险环境中的概率^[10]。

2. 新工艺提高工程可靠性

新型施工工艺的应用从本质上提升了工程系统的可靠性。激光对中技术极大提高了大型设备的安装精度，有效降低运行中的机械故障。冷切割工艺完全规避了传统动火作业的安全隐患，在管道改造中展现出独特优势。复合材料修复技术实现了不停产条件下的设备维护，保障了生产的连续性。模块化施工方法通过工厂预制和现场组装相结合，显著减少高空作业、交叉作业等高风险施工环节，在提升施工效率的同时增强了工程安全性。

（二）风险管理对技术创新的约束与引导

1. 安全标准对技术选择的限制

石油化工行业严格的安全标准对技术创新应用形成重要约束。防爆等级要求直接决定了电气设备选型范围，本质安全型设备成为易燃易爆区域的强制性选择。工艺安全间距规范限制了设备布局的紧凑程度，促使三维模拟技术在设计阶段的应用。材料选择必须同时满足强度要求和腐蚀裕量标准，推动新型复合材料的研发应用。施工工艺需通过HAZOP分析验证，自动化焊接参数必须符合工艺评定要求。这些约束虽然限制了技术选择的自由度，但确保了创新技术应用的可靠性基础。

2. 风险控制需求推动技术升级

行业风险管控要求持续驱动技术创新发展。泄漏监测需求促进了光纤传感和激光检测技术的工程化应用。高空作业风险催生

了模块化施工和无人机巡检技术的快速普及。设备长周期运行要求推动了状态监测与预测性维护技术的迭代更新。工艺安全需求加速了智能控制系统与安全仪表系统的融合创新。环境保护压力促使低排放焊接工艺和 VOCs 回收技术的突破。这些由风险管理需求驱动的技术创新，不仅解决了具体工程问题，更形成了具有行业特色的技术发展路径。

（三）案例分析：典型工程实践

1.成功案例：某石化项目中的技术创新与风险管理结合

中石化青岛炼化公司在数字化转型中，通过整合智能巡检、人员定位及视频监控系统，实现了特殊作业全流程规范化管理。其数字化系统与政府监管平台互联，实现了高风险作业的实时监测，隐患整改率稳定保持在99%的高水平（见表4.1）。东明石化在应对极端天气时，依托 APC（先进过程控制）系统与 RTO（实时优化）技术，成功将装置自控率提升至98%以上，确保了装置安全平稳停工，有效避免了次生事故的发生。胜利油田创新研发了免登高功图采集装置（该装置无需人员攀爬井架即可远程获取油井示功图），显著减少了需登高等高危作业环节，使高风险作业数量下降17%，本质安全水平得到显著提升。这些案例充分证明，将智能化技术与严格的风险管控措施相结合，是石化行业有效降低事故发生率、提升生产安全可靠性的关键路径。

表 4.1 中石化青岛炼化公司智能化应用与成效

项目	内容
企业名称	中石化青岛炼化公司
转型领域	特殊作业全流程规范化管理
采用的技术/系统	智能巡检系统、人员定位系统、视频监控系统、数字化系统
具体实施措施	1. 整合智能巡检、人员定位及视频监控系统。 2. 数字化系统与政府监管平台互联。
取得成效	实现了高风险作业的实时监测。 2. 隐患整改率稳定保持在 99% 的高水平。

2.失败案例：风险忽视导致的技术应用问题

中石化某分公司“6·8”泄漏事故堪称安全生产领域的一记响亮的警钟。事故源于在阀门改造作业时，操作人员罔顾安全规范，在管道带压状态下贸然拆卸关键部件，致使大量乙烯瞬间泄漏。乙烯易燃易爆的特性，加之现场复杂环境，泄漏后迅速形成可燃混合气，遇火源即刻爆燃，最终酿成2人死亡的悲剧（见图4.1）。事故调查揭开了企业安全管理的乱象：变更管理程序形同虚设，设备结构改动前未进行专业风险识别；对外包单位监管缺失，违规操作未能及时制止。此外，部分中小危化企业也面临技术短板困境，因专业技术力量薄弱，难以精准编制风险管控清

单，导致数字化安全管理系统难以落地，隐患排查与治理陷入低效循环。这些案例深刻表明，即便企业拥有先进工艺技术，一旦脱离系统化风险评估与严格管理执行，细微的管理漏洞也可能引发灾难性后果，安全生产容不得丝毫侥幸与懈怠。



图4.1 中石化某分公司“6.8”泄漏事故现场图

五、总结

石油化工机电安装工程领域的技术创新与风险管理呈现出相互促进的辩证关系。智能化监测系统和先进施工工艺的应用显著提升了风险识别与防控能力，而完善的风险管理体系则为新技术的可靠应用提供了制度保障。实践表明，二者的有机结合不仅能有效降低事故发生率，还能优化资源配置、提高工程施工效率，是实现行业高质量发展的关键路径。

面向未来发展，石油化工机电安装工程将呈现智能化与绿色化深度融合的趋势。一方面，数字孪生、人工智能等新一代信息技术将推动风险管控向预测性、精准化方向发展；另一方面，碳中和目标将加速低碳施工技术和环保材料的创新应用。这要求行业在推进技术革新的同时，同步完善配套的安全标准和监管体系，通过技术创新与风险管理的协同进化，构建更加安全、高效、可持续的工程建设新模式。

参考文献

[1] 刘海鹏. 浅析石油化工工程中机电安装工程施工技术与质量管理 [J]. 石化技术, 2015(11):2.
[2] 胡忠耀. 石油化工机电设备安装试运行异常现象分析与对策研究 [J]. 化学工程与装备, 2016(9):3.
[3] 郭振春. 石油化工工程中机电安装工程的质量管理研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(1):35-37.
[4] 杨光辉, 杨同光, 崔明英, 等. 石油化工工程中机电安装工程施工技术与质量管理 [J]. 模型世界, 2023(7):64-66.
[5][1] 吴敏巧. 浅谈机电安装工程项目施工安全风险管控 [J]. 文摘版: 工程技术, 2016, 000(003):P.176-176, 178.
[6] 苗淑伟, 张伟, 曹盟. 浅谈机电安装工程项目施工安全风险管控 [J]. 商品与质量·建筑与发展, 2014, 000(005):00240-00240.
[7] 屈中秋. 机电安装工程施工安全风险管控研究 [J]. 统计与管理, 2014(9):2.
[8] 尹璐. 机电安装工程施工安全风险管控对策探索 [J]. 装饰装修天地, 2016, 000(014):250-250.
[9] 李立群. 机电安装工程项目风险管理研究 [J]. 安防科技, 2020, 000(027):P.80-80.
[10] 岳宁. 机电安装工程项目施工的安全风险管理 [J]. 轻松学电脑, 2020, 000(012):P.1-1.

浅谈百万燃煤机组基建期生产准备工作

袁晓娟

达州兴川能源有限公司，四川 达州 635000

DOI:10.61369/ME.2025120014

摘 要： 百万燃煤机组作为电力系统的核心电源之一，其基建期生产准备工作的质量直接决定机组投产后的安全稳定性、经济运行水平及环保达标能力。达州兴川能源有限公司2×1000MW超超临界燃煤发电工程项目作为四川省“十四五”火电重点项目，本文结合该项目生产准备实践，从组织体系构建、核心准备内容实施、关键环节控制三个维度，系统探讨百万燃煤机组基建期生产准备的核心逻辑与实践路径，希望为同类工程提供可借鉴的参考经验。

关 键 词： 百万燃煤机组；基建期；生产准备；超超临界机组；项目管理

On the Production Preparation Work of the Construction Period of the Million-ton Coal-Fired Unit

Yuan Xiaojuan

Dazhou Xingchuan Power Co., Ltd. Dazhou, Sichuan 635000

Abstract： As a cornerstone of power systems, the quality of production preparation during the construction phase of million-kilowatt coal-fired units directly determines their operational safety, economic efficiency, and environmental compliance post-commissioning. The 2×1000MW ultra-supercritical coal-fired power generation project by Dazhou Xingchuan Energy Co., Ltd., a key thermal power initiative under Sichuan Province's 14th Five-Year Plan, serves as a case study. This paper systematically examines the core principles and practical approaches for production preparation in such mega-scale coal-fired units, focusing on three dimensions: organizational framework development, implementation of core preparatory measures, and control of critical processes. The findings aim to provide actionable insights for similar engineering projects.

Keywords： million coal-fired units; construction period; production preparation; ultra-supercritical units; project management

基建期生产准备是衔接工程建设和商业运营过渡阶段，要达到“基建与生产一体化”，提前谋划人员、技术、物资、制度等要素，确保机组零缺陷启动、无尾工交接。达州兴川能源2×1000MW项目坚持高标准、高质量、高水平原则，创建全周期、全要素生产准备体系，其实践经验对同类机组具有重要参考价值。

一、百万燃煤机组基建期生产准备的组织体系构建

（一）组织架构设计

项目成立以公司负责人为组长的生产准备领导小组，作为最高决策机构；设生产准备工作组，细分为8个专业小组，即生产准备组、人力资源及后勤保障组、安全质量环保监察组、技术监督与信息化建设组等，明确各小组在人员配置、技术准备、物资保障等方面具体工作职责。该种架构设计达到的是决策、执行、监督相呼应的闭环管理，使生产准备与工程建设进度保持同步。

（二）工作制度保障

项目形成了季度例会加专题会议的汇报制度来开展生产准备。季度例会全面复盘工作进度，协调解决跨部门问题，人员培

训、技术规程编制等重要任务随时开会确保重点工作落实。同时建立生产准备工作检查评估机制，在生产准备大纲审定后三个月、厂用电受电前、机组整套启动前进行自评与上级评价，形成计划、执行、检查、整改的持续改进循环，确保生产准备工作质量。

（三）管理模式创新

项目用“自主运营加外部委托”的方式来优化资源配置，实行生产管理模式。运行管理采用主机集控加辅控系统一体化控制，主机集控、化验等重要岗位自主经营，设备管理实行点检定修制，热控、电气二次等重要检修工作由自主完成，常规维护和等级检修委托给专业单位。既能确保核心业务独立管理，又能通过专业外包提高经营效率，给基建期生产筹备指出了实施途径。

二、百万燃煤机组基建期生产准备的核心内容实施

（一）人员准备：打造高素质专业化队伍

人员配备按先管理后生产、先运行后检修、先高岗后低岗原则，确保人员早到位、早培训、早胜任。项目人员配置周期为2025年2月至2027年6月，分批完成生产管理人员、集控运行人员、辅控人员、点检及维护人员的配置。生产管理人员要有3年以上的同类岗位工作经验，运行人员中技术熟练人员的比例不得低于50%，值长要有600MW以上机组6年及以上运行经验。

培训工作建立三级体系，即理论培训、同类型机组实习、现场实操。生产管理人员主要学习设备选型依据、系统原理和管理标准；运行人员参加仿真机培训、设备厂家专项培训，累计培训时间不少于800学时；检修人员参加设备监造、安装调试，掌握关键设备检修工艺。分层分类培训，确保所有人员持证上岗，满足机组调试和运行的要求。为提高培训效果，项目创新实施了师带徒责任制，给每一位新员工安排有经验丰富的技术骨干当导师，签订培养协议，确定阶段性培养目标和考核标准。每月组织技能比武、案例分析会，以设备常见故障、应急处置流程等为主，进行实战化训练，用考促学提升人员技能。对超超临界机组“四新”技术（新技术、新工艺、新设备、新材料）专门邀请设备厂家技术专家进行培训，就如何操作、注意事项等进行现场培训^[1]。

（二）技术准备：构建标准化技术支撑体系

技术准备以“规程编制、系统图绘制、标准化文件制定”为主线，贯穿基建全过程。项目在2025年6月至2027年8月间完成全部专业技术文件的编制和健全工作，即运行规程、检修规程、系统图册、保护定值清单等主要文件。运行规程在分部试运前编制完成，包含集控、化学、脱硫、燃料等专业，规定了设备启停操作、运行调整、事故处理流程；系统图册有锅炉、汽机、电气等9大专业，根据现场实际情况不断改进，确保与现场设备一致。

同时制定标准操作票、检查卡、试验卡及事故预案，电气专业相关技术文件在厂用电受电前发布初版，其余专业在整套启动前完成。建立16个专业的技术监督网，签订技术监督协议，全过程开展设计、安装、调试的技术监督，确保设备健康。技术文件编制时实行“三审三校”，同类型机组技术专家、监理单位、设备厂家共同审核，确保文件正确、可操作。对复杂系统、重要设备专门制定专项技术方案，组织各方面联合研讨，全面识别技术风险及实施难点，拟定相应控制措施。建立健全技术文件动态更新机制，根据现场安装调试过程中出现的设计变更、设备优化等情况，及时对规程制度及系统图册进行修改，确保技术文件与现场实际一致^[2]。此外，还需要建立数字化技术文件管理系统，使文件在网上能够被查阅、版本进行追溯以及可以执行权限控制的功能，使现场工作员可以迅速地获得准确技术指导，并提升工作效率。

（三）物资准备：保障试运与投运需求

物资准备遵循“需要多大、库存多小”的原则，做到提前做好准备燃料、备品备件、消耗材料等物资。燃料方面，2026年5

月到9月完成燃煤、燃油合同的签订；在2026年11月第一列火车把煤运到厂，确保机组启动试运转时燃料供应；备品备件重点是储备事故性备品和易损件，参照同类型机组经验，编制详细清单，在2027年6月前完成移交入库；安全设施及防护用品在2025年3月到2027年10月分批分期配齐，包括安全标志、消防器材、通风装置等，符合安全施工要求。

物资准备时，创建“计划—采购—验收—存储”全程控制体系，依照工程进度及时修正采购计划，确保物资供应同试运节点精确对应，防止出现库存堆积或者缺货状况。为确保物资质量，制定了严格验收标准和程序，对关键设备及备品备件实行五方确认制度，即施工、监理、工程部、生产准备部、设备厂家共同参与验收，逐项核对规格型号、技术参数、质量证明文件。对特种设备、关键材料联合国家、省、市三级检验检测机构进行检验，符合安全使用要求。存储管理上，采取智能化仓储系统，对备品备件执行分类编码并定位存放，做到库存情况随时掌控且自动发出警报^[3]。建立周转材料领用、归还登记制，对周转材料实施管理，减少损耗。还要预先规划好燃料储存场地、运输路线，准备足够燃料检测设备，建立燃料质量检验制度，确保入厂燃料满足机组运行需求。

（四）信息化建设：赋能智慧电厂运营

项目按照智慧电站建设理念，创建了包含生产、管理、经营的信息化体系。2025年7月到2027年6月，完成集成运营平台HIAP、SIS系统、ERP系统建设，实现生产实时数据采集、设备状态监控、办公协同等功能。SIS系统为生产实时数据中心，在机组168小时满负荷试运行之前完成和上级单位数据对接；建立计算机网络安全防护体系，确保信息系统稳定运行。

信息化建设同生产准备深度融合，利用数字化移交、三维可视化系统、智能巡检等方式，给机组调试、运行维护提供技术支持，提高生产运营智能化水平。在数字化移交上建立三维数字化电厂平台，把设备图纸、技术资料、安装记录等信息都纳入进去，实现设计、建设、运维的全生命周期数据追溯。智能巡检系统用上红外热成像仪和声音监测器，配合移动端实现巡检任务指派、数据上传、缺陷上报等闭环管理，提高设备缺陷发现率和处理效率。信息化系统建设同时，建设网络安全防护体系，配置防火墙、入侵检测等安全设备，定期进行网络安全应急演练，确保生产数据安全。开展信息化系统操作培训，使相关人员熟悉掌握系统功能，充分发挥信息化在生产准备、运营管理中支撑作用，实现“数据驱动生产、智能赋能管理”^[4]。

三、百万燃煤机组基建期生产准备的关键环节控制

（一）时间节点协同控制

生产准备工作要依照工程里程碑节点如表1，达成与建设进度精确对接。以2025年9月30日第一罐混凝土浇筑为起点，根据里程碑节点倒排生产准备计划。例如，厂用电受电前6个月完成人员培训，分部试运前发布技术规程，试运前1个月物资到位，确保各环节有序衔接。项目制定了三个层次进度计划，生产准备工作

有128项任务，每项任务由谁完成、何时完成、怎样考核都具体指明。建立进度动态跟踪机制，每周召开进度协调会，用Project项目管理软件对任务完成情况进行实时监控，对滞后节点分析原因，制定赶超措施。对于厂用电受电、整套启动这些重要节点，提前三个月制定专门保障方案，把人员、技术、物资等配套准备工作安排好，并且进行模拟演练找出其中存在问题。同时加强EPC总承包商、设备厂家之间沟通协调，建立节点联动机制，确保工程建设与生产准备进度深度契合，避免因为一方滞后而影响整体推进。

表1：生产准备核心任务与工程节点对应表

工程里程碑节点	对应生产准备核心任务	完成时限	责任主体
第一罐混凝土浇筑	三级组织体系搭建、工作制度制定、人员配置计划编制	2025年9月30日前	生产准备领导小组、工作组
#1机组厂用电受电	电气专业技术文件发布、人员电气培训完成、安全设施配齐	2027年2月28日前6个月	技术监督与信息化组、安环监察组
机组整套启动	全专业技术文件发布、燃料到位、备品备件入库	2027年8月31日前1个月	各专业小组、物资保障组
168小时满负荷试运	试运方案编制演练、缺陷管控机制建立、环保设施调试	2027年9月30日前	生产准备组、调试组、安环监察组
商业运营移交	技术资料归档、物资移交、人员定岗定责	2027年10月底	生产准备部、各专业小组、EPC总承包商

（二）试运与移交管控

项目把试运分为分部试运和整套启动试运两个阶段。分部试运期间，设立专项小组负责设备启停操作、参数记录、缺陷处理，确保单设备及分系统满足设计要求；整套启动前，设立启动验收委员会审议试运准备情况，协调外部条件；168小时试运期间，全面考核机组性能指标，包括供电煤耗、脱硫效率、保护投入率等，确保达到设计标准。

移交阶段主要完成技术资料、备品备件、专用工具移交工作，2027年8月至10月完成竣工资料、设备说明书、试验记录等整理归档，确保移交资料完整、准确，为商业运营打下基础。试运行管控严格按照“方案先行”方针，制订出分步调试、整套启调方案，对复杂试运行方案开展多部门联合评标工作。实施持

单检查制度，试运前由施工、调试、监理、工程部、生产准备部五方对照检查卡逐项确认，安环部全程监督见证，确保试运条件满足要求。建立缺陷分级管理制度，将发现缺陷分为紧急缺陷、重要缺陷、一般缺陷三级，确定处理时限和责任单位，实行“发现—登记—处理—销号”闭环管理。移交时用清单移交方式，将技术资料、备品备件等分项移交清单，双方逐项核对签认存档。对于特种设备等关键资产，同时办理使用登记手续，确保移交之后可以立即投入合规使用。

（三）风险防控体系构建

项目建立全方位风险防控体系，安全方面开展危险源辨识，发布基建期、生产期危险源清单，编制综合应急预案、专项应急预案；质量方面严格执行设备验收标准，对安装过程中隐蔽工程、关键工序全程监督；环保方面提前落实脱硫、脱硝、废水处理系统调试与验收，确保机组投运后满足超净排放要求。通过风险预判、过程控制、应急处理，确保生产准备工作安全、有条不紊地进行。安全管理中安全风险防控，按一定周期进行专项安全检查和隐患排查治理，对高风险作业实行“作业票”制度，并且设置专职安全员现场监督。质量控制上实行“三检制”，即自检、互检、专检，对焊接工艺、设备安装精度等进行全过程跟踪检测，保存质量记录以备查。环保管控要提前对接环保部门，确保脱硫、脱硝、废水处理系统与主机同步投运、达标排放。同时建立风险预警机制，运用信息化系统对设备运行参数、环保排放数据等进行实时监控，发现异常就立即发出预警，达到对风险超前防控目的^[5]。

四、结语

达州兴川能源2×1000MW项目借助创建三级组织架构，执行全要素核心筹备，加强关键环节把控，塑造起完备科学生产预备模式，为机组高水平达标投产筑牢根基。实践证明，百万燃煤机组基建期生产准备要坚持以基建生产一体化理念，以标准化为指导、以协同性为保障、以智能化为支撑，提前化解潜在风险，优化资源配置，才能使机组投产后安全、稳定、经济、环保地运行。随着新型电力系统建设不断推进，百万燃煤机组生产准备工作要进一步增强灵活性、环保性和智能化趋势以保障能源转型。

参考文献

[1] 吕俊复, 王君峰, 姜孝国, 等. 超超临界循环流化床锅炉技术研发进展 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6883-6900.
[2] 柯劲平. 超超临界燃煤机组的现状与发展前景 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 69-72.
[3] 王勇刚, 杨光锐, 宫伟基, 等. 超超临界机组基建中无损检测存在的问题及处理 [J]. 无损探伤, 2022, 46(01): 43-45.
[4] 朱旭峰, 钱成浩, 殷仁俊, 等. 超超临界燃煤机组工程智能建造创新实践 [C]//《施工技术》杂志社. 2024年全国土木工程施工技术交流会论文集 (上册). 中能建建筑集团有限公司, 2024: 121-125.
[5] 钱晨. 1000MW 超超临界燃煤机组不同工况下的汽温调整 [J]. 中国高新科技, 2024, (19): 89-91.

锅炉系统中高效热交换技术的应用

王鑫，张义，张霞龙

国家电投集团内蒙古能源有限公司，内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ME.2025120020

摘 要： 高效热交换技术通过三类关键路径实现突破，强化传热技术依托增大换热面积、优化流体流动等手段使锅炉热效率提升；新型换热材料将热效率提升且设备寿命延长；先进换热结构使热效率提高，且板式换热器占地面积仅为传统设备的 1/3。然而，该技术应用面临技术实施复杂、成本投入增加及操作人员技能要求提升等挑战。对应提出技术研发优化、成本全生命周期管理、人员系统化培训等应对策略。研究表明，高效热交换技术对锅炉系统节能降耗意义重大，通过多维度突破挑战可推动其广泛工业应用。

关 键 词： 锅炉系统；高效热交换技术；热效率；节能；应用挑战

Application of High-Efficiency Heat Exchange Technology in Boiler Systems

Wang Xin, Zhang Yi, Zhang Xialong

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract： High-efficiency heat exchange technology achieves breakthroughs through three key pathways: enhanced heat transfer technology improves boiler thermal efficiency by increasing heat exchange area and optimizing fluid flow; novel heat exchange materials enhance thermal efficiency and extend equipment lifespan; advanced heat exchange structures elevate thermal efficiency, with plate heat exchangers occupying only one-third of the space of traditional equipment. However, the application of this technology faces challenges such as complex technical implementation, increased cost investment, and heightened skill requirements for operators. Corresponding strategies are proposed, including technological research and development optimization, full lifecycle cost management, and systematic personnel training. Research indicates that high-efficiency heat exchange technology holds significant importance for energy conservation and consumption reduction in boiler systems, and overcoming multidimensional challenges can facilitate its widespread industrial application.

Keywords： boiler system; high-efficiency heat exchange technology; thermal efficiency; energy conservation; application challenges

引言

锅炉系统作为工业生产与能源供给的核心设备，其热效率直接关系到能源利用率与环境效益，而热交换技术是决定锅炉热效率的关键核心环节。热交换技术通过冷媒与烟气的热质交换实现显热、潜热及水分的回收，主要分为间接换热与直接接触换热两类，历经数十年发展已从基础换热形式向高效化、复杂化、智能化演进。然而，传统热交换技术在锅炉系统应用中逐渐暴露换热效率低、耐极端工况能力不足、低品位余热回收有限等瓶颈，导致能源浪费与运行成本攀升。在此背景下，强化传热技术、新型换热材料应用及先进换热结构设计等高效技术路径应运而生，成为提升锅炉性能的关键。

一、相关概述

（一）热交换技术发展历程

热交换技术的原理是通过冷媒与烟气换热使冷媒温度升高，烟气温度降低，烟气中的水蒸气过饱和凝结，从而回收烟气中的显热、潜热和水分。根据换热方式的不同，热交换技术可分为间接换热法和直接接触换热法。间接换热法是一种在烟道内增加耐腐蚀的间接冷凝换热器的方法。冷却水在换热管束内流动，烟气

在管外与冷却水逆向流动，两者不发生直接接触，烟气中的冷凝水流至换热器底部被储水池收集，烟气余热被管外冷却水吸收。直接接触换热法也称为喷淋冷凝法，通过在烟道增加喷淋换热器及相关水处理设备实现换热，冷媒水在喷淋塔内通过喷嘴以逆流方式喷入热烟气气流，两者接触换热后，烟气以低温饱和状态离开系统，冷媒水以被加热的状态离开系统^[1]。随着工业需求的增加以及科学技术的进步，热交换技术逐渐向高效化和复杂化方向发展。20 世纪中期，管式换热器和板式换热器的出现标志着热交

换热技术进入了一个新的阶段，这些设备通过优化流体流动路径和增加换热面积显著提升了传热效率。近年来，随着材料科学和控制技术的突破，热交换技术进一步融合了智能化控制和新型材料的应用，例如高性能金属合金和陶瓷复合材料的使用，为热交换技术的发展注入了新的活力。

（二）传统热交换技术在锅炉系统的应用及不足

传统热交换技术在锅炉系统中主要体现为管式换热器、热管换热器和板式换热器等设备的应用，这些技术虽然在早期工业生产中发挥了重要作用，但其固有的局限性也逐渐显现出来。传统热交换技术的换热效率较低，主要原因在于其设计未能充分优化流体流动方式，导致热量传递过程中的能量损耗较大。传统换热器在面对高温、高压工况时，容易发生设备腐蚀和材料老化等问题，这不仅缩短了设备的使用寿命，还增加了维护成本^[2]。此外，传统热交换技术对低品位余热的回收能力有限，尤其是在烟气温度较低的情况下，难以实现显热和潜热的有效回收。这些不足直接影响了锅炉系统的整体性能，导致能源利用率低下和运行成本增加。因此，如何克服传统热交换技术的局限性，成为提升锅炉系统热效率的关键问题。

二、高效热交换技术在锅炉系统的应用

（一）强化传热技术应用

强化传热技术通过优化热交换过程中的关键参数来显著提升热交换效率，其核心原理涵盖增加换热面积、优化流体流动方式以及改进管束结构。增加换热面积能有效扩大热量传递的接触界面，进而提高单位时间内传递的热量；优化流体流动方式则可通过调整流体的速度分布与流动路径，减少边界层厚度，从而提升传热系数；改进管束结构能借助改变管道的几何形状或排列方式，促进流体的湍流效应，进一步强化传热效果。这些措施共同作用，可显著降低能量损失并提高整体热效率，例如在热能动力系统中，采用高效换热技术能减少烟气排放温度，同时提升锅炉受热面的热吸收能力，实现更高效的能源利用^[3]。

在锅炉系统中，强化传热技术被广泛应用于换热器等关键部件的设计与优化，以达成热效率提升和能耗降低的目标。具体来看，通过增加换热面积和优化流体流动方式，能够有效提高换热器的传热性能，比如在煤气锅炉中，使用高效的烟气换热器可显著提升热交换效率，同时减少燃料浪费和热损失；此外，在烟道内安装冷凝换热器，不仅能回收烟气中的显热，还能利用水蒸气凝结释放的潜热，进一步提高锅炉的热效率。

（二）新型换热材料应用

新型换热材料凭借优异的导热性能与耐腐蚀性，在锅炉系统中的应用愈发广泛，高性能金属合金和陶瓷复合材料是其中的典型代表，它们不仅具备高热导率、高强度，还拥有良好的抗高温氧化性能。像部分镍基合金在高温环境下能展现出卓越的机械强度与耐腐蚀性，很适合长期运行于高温高压条件的锅炉设备；陶瓷复合材料则因低膨胀系数和高耐磨性，特别适合处理腐蚀性介质的环境^[4]。除此之外，新型换热材料还具备出色的热稳定性，即便在极端工况下也能保持性能稳定，为锅炉系统的安全运行提供了可靠保障。

新型换热材料的应用对锅炉系统性能提升主要体现在换热效

率提高与设备使用寿命延长两方面。一方面，由于新型材料热导率较高，能快速将热量从热源传递到冷源，大幅提升换热效率，例如在燃气锅炉中采用不锈钢板式换热器，可有效降低排烟温度，同时吸收烟气中的显热和潜热，让锅炉热效率提升至90%以上；另一方面，新型材料的耐腐蚀性能有效减缓设备老化速度，减少因腐蚀引发的维修与更换频率，进而延长设备使用寿命^[5]。

（三）先进换热结构设计应用

先进换热结构设计以高效、紧凑和可维护性为核心目标，通过创新设计理念优化热交换过程，板式换热器和热管换热器是其中两种典型的先进换热结构，且设计理念各有侧重。板式换热器借助多层薄板叠加形成高效换热通道，流体在板间流动时会形成强烈的湍流效应，这一设计能大幅提升传热系数，不仅具备高热效率，还因占地面积小的特点，适合应用于空间受限的工业场景；热管换热器则利用工质的相变特性实现高效传热，其内部的真空环境让热量可以极高速率传递，同时还拥有良好的等温性与灵活性。这些先进设计理念的融合，为锅炉系统提供了更高效、更可靠的热交换解决方案。

在锅炉系统中应用先进换热结构设计后，其在提升热效率和优化空间占用方面的效果十分显著。例如，引入板式换热器后，燃气锅炉的排烟温度可降低至100℃以下，同时还能吸收烟气中的显热与潜热，使锅炉热效率提高15%~20%；此外，板式换热器的紧凑设计使其占地面积仅为传统管式换热器的1/3，极大节省了安装空间，尤其适配现代化工厂的布局需求^[6]。而热管换热器在处理低品位热源方面表现突出，能够高效回收锅炉尾部烟气中的余热，并将其转化为可利用的热能，进一步提升系统整体能效。

三、高效热交换技术应用面临的挑战

（一）技术实施复杂性

高效热交换技术在锅炉系统中的应用涉及多个复杂的技术环节，其中新型材料加工和先进结构设计安装尤为关键。例如，新型换热材料如高性能金属合金和陶瓷复合材料的加工过程需要高精度的制造工艺，以确保其导热性能和耐腐蚀性达到设计要求。然而，这些材料的加工难度较大，尤其是在大规模生产中，如何保证材料的一致性和稳定性成为一大技术难题。此外，先进换热结构设计如板式换热器和热管换热器的安装也需要高度专业化的技术支持。这些设备的安装不仅要求精确的尺寸配合，还需要对流体流动路径进行优化设计，以避免热量传递过程中的能量损失。

（二）成本投入增加

高效热交换技术的应用通常伴随着显著的成本增加，主要体现在新型材料的采购、设备的购置以及安装调试等方面。新型换热材料如高性能金属合金和陶瓷复合材料的价格远高于传统材料，这使得其在锅炉系统中的大规模应用面临经济压力。先进换热设备的购置成本也较高，例如板式换热器和热管换热器的制造工艺复杂，设备本身的价格昂贵，这直接增加了项目的初期投资成本^[8]。高效热交换技术的安装调试过程需要专业技术人员的参与，这不仅延长了施工周期，也进一步增加了人力成本。从长期运营的角度来看，高效热交换技术的维护成本也不容忽视。由于这些设备通常工作在高温、高压等恶劣环境中，其部件的磨损和老化速度较快，需要定期进行检修和更换。同时，新型设备的技

术复杂性也要求操作人员具备较高的技能水平，这可能导致培训成本的上升。高效热交换技术应用所带来的成本增加对其在工业领域的普及构成了重要阻碍，如何在保证技术性能的同时降低其经济成本，是亟待解决的问题^[9]。

（三）操作人员技能要求提高

高效热交换技术的应用对操作人员的技能水平提出了更高的要求，尤其是在设备维护和故障诊断方面。传统锅炉系统的操作相对简单，主要依赖于基础的热力学知识和常规机械操作技能。然而，高效热交换技术的引入使得系统变得更加复杂，操作人员需要掌握更多的专业知识，例如新型材料的特性、先进换热设备的工作原理以及智能控制系统的操作方法。这些新要求对现有操作人员的技能储备构成了挑战，尤其是在技术更新换代较快的背景下，如何快速适应新技术成为关键问题。此外，高效热交换设备的维护工作也需要更高的技术含量。热管换热器和板式换热器在运行过程中可能出现流体泄漏、换热效率下降等问题，这些问题需要操作人员具备精准的故障诊断能力和快速响应能力。如果操作人员技能不足，可能导致设备故障未能及时发现和处理，进而影响整个锅炉系统的运行稳定性和安全性。

四、应对高效热交换技术应用挑战的策略

（一）技术研发与优化

为应对高效热交换技术在锅炉系统应用中实施复杂性的挑战，必须加大对相关技术研发的投入，并优化技术实施方案。针对新型材料加工和先进结构设计安装等技术难题，应通过多学科交叉研究，开发更为高效、经济的制造工艺。例如，采用增材制造技术可以显著减少复杂换热结构的加工难度与成本，同时提高材料利用率。在燃烧控制系统和烟气回收领域，引入智能控制算法以实现实时监测与动态调整，有助于进一步提升热交换效率并降低运行风险。此外，结合模型预测控制技术，可对锅炉系统的运行参数进行精确优化，从而在提升热效率的同时降低技术实施的复杂性。应建立标准化的技术实施流程，通过模块化设计和预制化安装减少现场施工的难度，为高效热交换技术的广泛应用提供技术支持。

（二）成本控制与管理

高效热交换技术的应用往往伴随着较高的初始投资成本，这

对其在工业领域的推广形成了显著阻碍。因此，通过合理选型、优化采购及运营管理等手段控制成本显得尤为重要。在设备选型阶段，应根据具体应用场景选择性价比最高的技术方案^[10]。在蒸汽利用系统中，科学选定蒸汽压力温度参数，避免过度设计导致的成本浪费。在采购环节，可通过集中采购和长期合作协议降低新型材料和设备的购置成本。此外，在运营管理方面，采用全生命周期成本分析方法，综合考虑设备维护、能源消耗及使用寿命等因素，制定经济高效的运行策略。例如，通过对管道保温材料的选择，不仅可以减少热量损失，还能延长设备使用寿命，从而降低长期运营成本。

（三）人员培训与技能提升

高效热交换技术的广泛应用对操作人员的技能水平提出了更高要求，尤其是在设备维护、故障诊断及运行优化等方面。因此，开展针对性的人员培训活动是应对这一挑战的关键措施。应制定系统化的培训方案，涵盖从基础理论到实际操作的全流程内容。通过模拟实训平台，操作人员可以在虚拟环境中熟悉新型换热设备的运行特性及维护要点，从而提升实际操作能力。应定期组织技术交流与经验分享活动，邀请行业专家和技术骨干传授最新的技术知识和实践经验。此外，结合智能控制技术的发展趋势，培训内容还应包括数据分析、模型预测等前沿技能，以帮助操作人员更好地适应智能化锅炉系统的运行需求。通过建立完善的考核与激励机制，确保培训效果的可持续性，从而为高效热交换技术的顺利实施提供坚实的人才保障。

五、结束语

未来，需持续深化技术研发，推动增材制造、智能控制等技术 与换热技术的深度融合；构建全生命周期成本管控体系，平衡技术性能与经济投入；完善人员培训与激励机制，筑牢人才保障基础。通过技术、经济、人才的协同推进，高效热交换技术必将在锅炉系统中实现更广泛的应用，为工业绿色低碳转型与能源可持续发展注入更强动力。

参考文献

- [1] 蒋胜蓝, 武巧, 顾炜莉, 等. 锅炉烟气低品位余热回收技术综述 [J]. 能源与节能, 2023, (01): 74–78.
- [2] 梁峻铭. 热能工程技术在供热领域中的运用研究 [J]. 工程与建设, 2023, 37(4): 1306–1308.
- [3] 张庆; 徐逞祥; 胡方; 王利杰. 锅炉烟气余热回收系统主要技术分析 [J]. 能源与环境, 2023, (2): 71–73.
- [4] 黄敏. 提高煤气锅炉热效率的技术与措施 [J]. 爱人, 2023, (3): 180–182.
- [5] 冯琳峰; 秦成; 符瑞斌. 燃气锅炉烟气余热回收与低氮排放协同处理技术研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (22): 223–226.
- [6] 金永健. 节能降耗技术在电厂锅炉运行中的应用 [J]. 电力系统装备, 2023, (10): 89–91.
- [7] 赵麟. 分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术 [J]. 中国设备工程, 2023, (5): 108–110.
- [8] 文重立. 热能动力系统优化节能改造 [J]. 节能与环保, 2023, (8): 53–55.
- [9] 李晓艳. 浅析燃煤锅炉的节能环保改造技术 [J]. 能源与节能, 2024, (4): 79–82.
- [10] 袁新立; 靳志鹏. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术分析 [J]. 电力设备管理, 2024, (10): 255–257.

发达国家海洋经济战略对广州南沙海洋经济发展的启示及借鉴

周志滔

广东 广州 511400

DOI:10.61369/ME.2025120027

摘 要： 本文系统剖析美国、日本、欧盟、澳大利亚等发达国家海洋经济战略，聚焦其在科技创新、产业协同与生态保护三大维度的核心特征与典型实施模式。国际经验表明，构建以海洋科技创新为引领、区域协调与港产城融合为支撑、蓝碳经济与绿色发展相协同的一体化路径，是建设世界级滨海新城的有效模式。针对广州南沙海洋经济发展中存在的核心技术依赖、高端人才与金融支撑不足、陆海管理协同不畅等结构性瓶颈，本文提出应强化战略引领与政策协同，构建多层次蓝色金融体系与人才引育机制，推进关键核心技术攻关与新兴产业集群化布局。借鉴国际经验，南沙需进一步突破陆海统筹制度壁垒，优化港产城融合机制与蓝碳经济发展路径，为粤港澳大湾区海洋经济高质量发展提供系统性对策与制度保障。

关 键 词： 海洋经济战略；广州南沙；经验借鉴

Enlightenment and Lessons from Developed Countries' Marine Economic Strategies for Nansha's Marine Economy Development

Zhou Zhitao

Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract： This paper systematically analyzes the marine economic strategies of the United States, Japan, the European Union, Australia and other developed countries, focusing on their core characteristics and typical implementation modes in the three dimensions of scientific and technological innovation, Industrial Synergy and ecological protection. International experience shows that building an integrated path led by marine science and technology innovation, supported by regional coordination and the integration of port industry and city, and coordinated by blue carbon economy and green development is an effective model for building a world-class coastal new city. In view of the structural bottlenecks in the development of Guangzhou Nansha marine economy, such as the dependence on core technology, the lack of high-end talent and financial support, and the poor coordination of land and sea management, this paper proposes that we should strengthen strategic guidance and policy coordination, build a multi-level blue financial system and talent introduction mechanism, and promote the key core technology research and the layout of emerging industry clusters. Using international experience for reference, Nansha needs to further break through the institutional barriers of land and sea coordination, optimize the integration mechanism of Hong Kong industry and city and the development path of blue carbon economy, and provide systematic countermeasures and institutional guarantee for the high-quality development of marine economy in Guangdong, Hong Kong, Macao and the great Bay area.

Keywords： marine economic strategies; Guangzhou Nansha; experience reference

引言

随着全球海洋经济竞争加剧，主要发达国家逐步形成以科技创新、产业集群和生态保护为核心的战略体系。我国高度重视海洋经济发展，2025年7月，习近平总书记在中央财经委员会第六次会议明确提出“推动海洋经济高质量发展，走出一条具有中国特色的向海图强之路”。《南沙方案》与《广州市海洋创新发展之都规划》相继赋予南沙建设南方海洋科技创新中心、国际航运枢纽与海洋新兴产业示范区等重要使命。在此背景下，研究美日欧澳等发达国家海洋经济战略的演进特征与实践模式，对破解南沙现阶段发展瓶颈、实现陆海统筹与制度创新具有重要现实意义。

一、发达国家海洋经济战略特征分析

（一）海洋经济战略核心框架

发达国家海洋经济战略以科技创新、产业协同和生态保护为核心。美国通过海洋科技创新计划，整合科研资源，推动深海探测与海洋能源技术突破，构建了以技术驱动为核心的战略框架^[1]。日本依托海洋产业集群政策，强化港口经济与海事服务联动，形成了以产业整合为导向的战略模式。欧盟注重区域协调，通过跨国海洋治理框架实现资源共享与环境保护，强调综合管理。澳大利亚则聚焦离岸能源开发，利用政策激励引导资本投入，优化资源配置。这些国家在战略设计上注重顶层规划，整合多部门资源，确保政策目标与实施路径一致，同时通过法律保障与市场机制促进海洋经济高效发展，为区域经济增长提供持续动力。

（二）战略实施典型模式

发达国家在海洋经济战略实施中展现多样化模式。新加坡凭借优越地理位置，构建港口、船舶制造和海洋科技协同发展的产业链，确立全球海洋中心地位。挪威奥斯陆从航运枢纽转型为海事服务中心，通过技术创新与国际化服务，带动区域城市群发展。美国纽约港通过金融与物流结合，强化全球贸易枢纽功能^[2]。日本东京湾注重产业集群与生态保护并重，打造高效港口经济。英国伦敦金融服务港则通过金融创新支持海洋产业发展。这些模式均依托本地资源禀赋，结合政策引导与市场驱动，优化产业布局，提升海洋经济竞争力，为全球海洋经济发展提供借鉴。

二、南沙海洋经济发展现状与挑战

（一）南沙港区发展基础

南沙港区充分依托国家级新区、自贸试验区和粤港澳合作示范区的政策叠加优势，海洋经济发展已形成可观规模。根据《广州南沙新区（自贸区南沙片区）海洋经济发展“十四五”规划》所示，该港区海洋资源禀赋突出，海域面积达337.78平方千米，占广州市的88.26%，海岸线长195.13千米，占全市的67.96%。在港口物流方面，依据广州港集团发布的运营数据，目前已建成20个集装箱泊位、7个汽车滚装泊位及9个粮食通用泊位，开通的206条班轮航线中有146条覆盖“一带一路”沿线国家。来自南沙区统计局的2024年初步统计数据显示，全年水运输周转量高达22372.69亿吨公里，同比增长8.63%^[3]。

在临港产业领域，以龙穴岛造船基地为核心，集聚了广船国际、黄埔文冲等龙头企业，根据相关产业规划披露，其船舶与海洋工程装备总产能已达到550万载重吨。同时，海洋科技创新的全链条体系正初步构建，以南方海洋科学与工程广东省实验室（广州）为龙头，并布局了冷泉生态系统研究装置和“梦想”号大洋钻探船等国家级重大科技基础设施。此外，据广东省与广州市的重大项目批复文件，南沙港区正推进总投资约145亿元的五期工程，旨在进一步强化其在大湾区世界级港口群中的核心地位。

（二）关键制约因素诊断

南沙海洋经济发展面临多重制约。海洋发展统筹协调管理机制尚未理顺，互补协调发展不足，存在一定程度上的各自为政、同质竞争，粤港澳三地海洋公共基础设计共享机制亟待完善。高度水平制度型开发格局尚未形成，与近邻深圳、珠海、香港、海

南等国际航运港口之间补充协调发展不足。核心技术突破不足，高端装备及关键部件依赖进口，智能化融合程度低。高端人才储备与深圳、上海等地相比存在劣势，蓝色金融产品缺乏且资产抵押面临法律障碍。近海污染治理压力持续，严格的环境审批延长了重大项目周期。国际绿色航运转型中，绿色船型研发落后于日韩，生物医药等前沿领域受技术垄断。粤港澳三地规则差异制约要素流动，产学研协同不畅导致科技成果转化率低^[4]。这些结构性矛盾制约着南沙海洋经济的高质量发展。

三、国际经验的本土化启示

（一）战略规划与政策协同的优化路径

1. 构建海洋经济高质量发展政策体系

发达国家普遍重视海洋经济顶层设计与跨部门政策协同，南沙应加快构建系统化、多层次的政策支持体系。建议紧密结合中央关于海洋经济高质量发展的重要精神，立足南沙资源禀赋，在海洋生物医药、高端航运、滨海文旅和蓝碳经济等重点领域出台专项扶持政策。推进涉海政策与国土空间规划、生态保护红线、科技创新计划的有效衔接，建立跨部门联席会议机制，破除行政壁垒，形成目标统一、分工明确、激励相容的海洋经济治理新格局^[5]。可探索设立海洋经济发展专项资金，完善海洋产业用地用海保障机制，强化政策落地效能评估与动态调整，系统提升海洋经济治理现代化水平。

2. 创新蓝色金融与人才引进机制

借鉴伦敦、新加坡等地经验，南沙应积极探索蓝色金融创新与高端人才集聚机制。推动金融机构联合涉海企业设立海洋产业投资基金，开发符合海洋经济特点的信贷、保险、租赁等金融产品，破解海洋资产抵押合法性困境。支持南沙试点跨境海洋金融服务，探索离岸海洋保险、船舶融资等业务创新。在人才方面，应加快引进海洋领域战略科学家、青年科技人才与卓越工程师，推动与港澳共建海洋人才数据库和资格互认机制。支持广州交通大学（筹）在南沙布局涉海学科，鼓励与知名高校合作设立海洋研究院，构建“基础研究－技术攻关－产业应用”全链条人才支撑体系^[6]。

（二）科技创新与产业生态的协同发展

1. 打造海洋科技创新策源地

国际经验表明，海洋竞争优势源于科技自立自强。南沙应聚焦南方海洋科学与工程广东省实验室（广州）等重大平台，强化深海探测、海洋能源、高端船舶等关键核心技术攻关。加快冷泉生态系统、大洋钻探船等大科学装置开放共享，推动与人工智能、区块链等数字技术深度融合^[7]。建议联合深圳海洋大学、香港科技大学等粤港澳高校共建海洋科技协同创新联盟，共同申报国家重大科技项目。探索“揭榜挂帅”“赛马制”等科研组织模式，鼓励企业牵头组建创新联合体，打通科技成果转化通道，提升海洋科技原创能力与产业竞争力。

2. 培育蓝色经济新增长点

发达国家注重通过产业生态培育提升海洋经济韧性。南沙可重点发展海洋生物医药、海洋新能源、蓝碳经济等新兴领域，打造具有国际竞争力的产业集群。充分发挥红树林资源优势，加快构建蓝碳核算方法学与交易机制，推动海洋碳汇项目纳入国家

CCER 体系。支持建设海洋基因资源库、生物中试平台等产业基础设施，吸引全球龙头企业设立研发中心与生产基地。借鉴挪威奥斯陆港产城融合经验，推动龙穴岛船舶制造基地向绿色化、智能化转型，鼓励发展航运金融、海事法律等高端服务业，构建“科技创新－产业培育－城市赋能”深度融合的蓝色经济生态圈^[8]。

四、推动南沙建设 "港口－产业－城市"联动滨海新城的对策建议

（一）建设国际航运与贸易高地

对标新加坡等全球顶尖港口发展经验，重点推进南沙港区第五期全自动化码头建设与绿色低碳改造，全面提升港口基础设施的智能化水平和环境友好度^[9]。加快部署5G、物联网和人工智能技术，推动码头作业、航道调度和仓储管理的全流程数字化，显著提升运营效率。同时，完善液化天然气加注、岸电系统等低碳设施，引导航运企业合作开辟绿色航线，积极适应国际海事减排新规。针对当前高端航运服务业态不足的短板，积极引进和培育航运金融、海事法律、船舶管理等专业服务机构，探索发展离岸航运保险和跨境船舶融资业务。进一步拓展跨境电商、冷链物流和供应链管理等贸易新业态，推动港口由传统货运枢纽向综合服务枢纽转型，构建集物流、贸易、金融与信息于一体的现代航运服务体系，持续强化南沙港在国际贸易网络中的枢纽功能与全球竞争力。

（二）构建世界级临港产业集群

借鉴东京湾产业集聚模式，系统推进产业链协同发展。重点支持龙穴岛造船基地向高端船舶与绿色海工装备制造转型升级，依托广船国际、黄埔文冲等龙头企业，突破智能船舶、深海钻井平台等关键装备技术瓶颈，推动核心零部件配套本土化，实现产业链补链强链^[10]。同时，依托南方海洋科学与工程广东省实验室、冷泉生态系统研究装置等重大科研平台，聚焦海洋生物医药、海洋新能源与蓝碳经济等前沿领域，构建"基础研究－技术攻关－产业应用"创新链条。通过设立蓝色产业投资基金、共建中试熟化与成果转化平台等措施，加速科技创新成果产业化进程，培育若干具有国际竞争力和行业影响力的蓝色经济新兴增长点，形成特色鲜明、布局合理的现代海洋产业体系。

（三）打造宜居宜业滨海新城

汲取奥斯陆等国际港口城市发展经验，系统推进港城空间融

合与功能提升。重点优化疏港交通体系与城市路网衔接，构建高效便捷的港城综合交通网络^[11]。科学布局航运服务综合体、海洋创新工场等产业载体，统筹配置高品质教育、医疗、文化等公共服务设施，形成功能复合的滨海城市功能区。在生态建设方面，强化滨海生态廊道与岸线景观塑造，推动红树林修复、海草床种植等蓝碳工程与滨海公园、休闲步道等公共空间建设有机结合，实现生态效益与民生福祉协同提升。通过构建"产业－生活－生态"三生融合的城市发展格局，全面提升城市人居环境品质和综合承载能力，显著增强对高端人才与创新资源的吸引力，为海洋经济可持续发展提供有力支撑。

（四）建设国际海洋人才特区

针对当前高端海洋人才储备不足、结构性短缺等问题，借鉴深圳、上海及新加坡等先进地区人才发展经验，制定实施更具国际竞争力的海洋领域高端人才引进与培育专项计划。在引进方面，设立海洋人才绿色通道，对船舶设计、海洋工程、蓝碳技术等紧缺人才提供个性化政策支持^[12]。在培育方面，深化与港澳合作，共建海洋人才数据库和职业资格互认机制，支持广州交通大学（筹）等本地高校优化涉海学科体系，推动校企共建实训基地和产业学院。同时完善人才服务保障体系，在住房、医疗、子女教育等方面提供全方位支持，构建"引育留用"有机衔接的全链条人才支撑体系，为南沙海洋经济高质量发展提供坚实的智力保障和创新动能。

五、总结

本研究通过系统分析美日欧澳等发达国家海洋经济战略的核心特征与典型模式，揭示了科技创新、产业协同与生态保护在其海洋经济发展中的关键作用。针对广州南沙海洋经济现阶段存在的核心技术创新不足、高端人才与金融支撑欠缺、陆海管理协同不足等结构性矛盾，提出应强化战略引领与政策协同，构建多层次蓝色金融与人才体系，推动关键技术自主攻关与新兴产业生态培育。借鉴国际陆海统筹与制度整合经验，南沙需进一步突破滩涂确权、空间规划和生态价值实现等制度瓶颈，推进港产城融合与蓝碳经济发展，全面提升海洋经济治理现代化水平和国际竞争力，为粤港澳大湾区海洋经济高质量发展提供持续动能与制度保障。

参考文献

[1]王文彬. 珲春市海洋经济发展的 SWOT 分析 [D]. 延边大学, 2021.
[2]柏叶檀. 金融发展、海洋产业结构升级与海洋经济发展的相互影响机理研究 [D]. 山东科技大学, 2022.
[3]朱寿佳, 代欣召. 建设海洋经济高质量发展示范区问题及路径——以广州市南沙区为例 [J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(06): 19–23+55.
[4]赵培琳. 海洋强国战略下大学生海洋意识教育研究 [D]. 海南师范大学, 2023.
[5]蔡芳芳. 群发性海洋灾害对我国海洋经济可持续发展的影响研究 [D]. 山东财经大学, 2023.
[6]朱寿佳, 代欣召. 建设海洋经济高质量发展示范区问题及路径——以广州市南沙区为例 [J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(6): 19–23
[7]沈娟, 安丰琳. 金融支持海洋经济发展的国际经验借鉴及启示 [J]. 中国商论, 2021, 000(012): P.170–172.
[8]杨一鑫. 英国《海洋与海岸带使用法》及其对中国海洋立法的借鉴意义 [J]. 中外交流, 2021, 028(1): 1257
[9]本刊讯. 广州港即将开建 4 个 20 万吨级集装箱泊位 [J]. 中国航务周刊, 2022, (49): 20.
[10]张璐. 数字经济下打造南沙跨境电商枢纽港的策略探析 [J]. 城市观察, 2020, 69(5): 120–129.
[11]杨锐烁. 面向粤港澳大湾区的南沙交通发展策略 [J]. 交通与港航, 2020, 7(5): 56–60.
[12]许志豪. 超大型船舶也能用！广州港南沙港区这样改造岸电 [J]. 港口科技, 2024(6): 48.

光伏与风电新能源工程技术的创新与实践

张伟

广东省电力开发有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120038

摘 要 : 本文围绕光伏与风电新能源工程技术展开, 涵盖光伏发电、风力发电技术特点与应用格局, 探讨光伏技术效率突破、风电装备性能优化等方向, 阐述大型光伏电站系统集成、海上风电工程要点, 还提及光伏组件回收、风电关键部件国产化等挑战与应对, 强调技术创新、标准与政策对新型电力系统建设的重要性。

关 键 词 : 光伏风电技术; 新能源工程; 系统集成

Innovation and Practice of Photovoltaic and Wind Power New Energy Engineering Technologies

Zhang Wei

Guangdong Electric Power Development Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This article focuses on the new energy engineering technologies of photovoltaic and wind power, covering the technical characteristics and application patterns of photovoltaic power generation and wind power generation. It explores the breakthroughs in photovoltaic technology efficiency and the performance optimization of wind power equipment, elaborates on the key points of large-scale photovoltaic power station system integration and offshore wind power engineering, and also mentions the challenges and responses such as photovoltaic module recycling and the localization of key wind power components. Emphasize the significance of technological innovation, standards and policies for the construction of the new power system.

Keywords : photovoltaic and wind power technology; new energy engineering; system integration

引言

《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》于2022年印发, 旨在推动光伏与风电等新能源产业高质量发展。在此背景下, 当前光伏与风电新能源工程技术发展意义重大。光伏发电技术在组件材料、逆变器、运维等方面各有挑战与突破; 风力发电技术在陆上与海上机组设计、应用场景等存在差异。在效率突破、性能优化、系统集成等多领域也不断探索创新。同时, 回收体系构建、关键部件国产化、巡检系统集成等工作也在稳步推进。这些技术的创新与实践, 对推动新型电力系统建设、实现能源转型和可持续发展目标至关重要。

一、光伏与风电新能源工程技术发展现状

(一) 光伏发电技术体系特征

当前, 光伏发电技术体系呈现出鲜明特征。从光伏组件材料看, 晶体硅材料凭借其成熟技术与较高转换效率, 在市场占据主导地位, 不过其成本与资源稀缺性问题也逐渐凸显; 薄膜光伏组件则以材料消耗少、可柔性制备等优势崭露头角, 不断演进, 如非晶硅、碲化镉等薄膜材料在转换效率和稳定性上取得进步^[1]。逆变器方面, 拓扑结构优化是关键, 新拓扑旨在提升转换效率、降低损耗与成本, 但复杂控制算法与可靠性问题仍是挑战。智能运维技术可实时监测电站运行, 精准定位故障, 实现高效维护, 但数据采集与分析的准确性、设备兼容性等工程应用瓶颈待突

破, 以更好提升光伏发电整体性能与效益。

(二) 风力发电技术应用格局

风力发电技术应用格局方面, 陆上与海上风电机组存在显著差异化设计需求。陆上风力资源相对复杂, 地形起伏多变, 这就要求风电机组在设计时更注重适应不同地貌特征, 如在山地需考虑抗风切变能力, 在平原要兼顾安装和维护的便捷性。而海上风电机组因处于海洋环境, 要着重考虑防腐、防潮以及应对强台风等恶劣天气的能力, 基础设计也更为复杂。从工程应用场景与技术经济性边界看, 大功率直驱式机组具有结构简单、可靠性高的特点, 适用于低风速且风速变化相对平稳的区域, 可降低运维成本; 双馈式机组则在高风速区域优势明显, 通过灵活的变速恒频控制, 能高效捕获风能, 但结构复杂, 对维护技术要求高^[2]。

二、新能源发电技术创新路径探索

（一）光伏技术效率突破方向

在光伏技术效率突破方向上，研究 PERC/HJT 异质结电池产业化制造工艺至关重要。PERC/HJT 异质结电池结合了 PERC 电池的钝化发射极和 HJT 电池的异质结结构优点，有望大幅提升光伏电池的转换效率。通过优化其产业化制造工艺，如精确控制各层材料的生长与沉积参数、改进电极制备工艺等，可有效降低电池的电阻损耗和光生载流子复合，从而提高电池效率。同时，钙钛矿叠层器件因具有高理论转换效率潜力备受关注。深入探讨其在实验室中的转化效率提升机制，像优化钙钛矿材料的组分与晶体结构、改善界面接触等，还需对其封装耐久性进行验证，确保在实际应用中能长期稳定运行，以推动光伏技术效率迈向新高度^[3]。

（二）风电装备性能优化策略

在风电装备性能优化方面，建构极端风况下的气弹耦合模型至关重要。极端风况对风电装备的结构和性能影响巨大，通过精确构建这一模型，可深入了解风与装备结构间复杂的相互作用，为后续优化提供基础^[4]。基于数字孪生的叶片气动外形优化方案同样关键，数字孪生技术能高精度模拟叶片实际运行状况，依此对叶片气动外形进行优化，可显著提升风能捕获效率与叶片空气动力学性能。此外，提出变流器容错控制算法，变流器作为风电装备关键部件，其可靠性关乎整体性能，该算法能在变流器部分元件故障时，维持系统稳定运行，保障发电效率，全面提升风电装备在各种工况下的性能表现。

三、新能源工程实践典型案例分析

（一）大型光伏电站系统集成

1. 智能跟踪支架应用

在大型光伏电站系统集成中，智能跟踪支架的应用至关重要。以戈壁荒漠区域实证分析双轴跟踪系统为例，该区域光照资源丰富，但传统固定支架难以充分利用太阳能。双轴跟踪系统能实时跟踪太阳位置，最大程度接收太阳辐射。研究表明，相较于固定支架，双轴跟踪系统可显著提升发电量^[5]。通过精确的角度调整，其能让光伏组件始终保持最佳受光状态。从经济回报周期看，尽管双轴跟踪系统初期投资高于固定支架，然而因发电量提升带来的收益增长明显，在一定时间内即可收回额外投资成本，实现可观的经济效益。这充分体现智能跟踪支架在提升光伏电站发电效率与经济收益方面的卓越作用，为戈壁荒漠等光照充足地区的大型光伏电站系统集成提供了极具价值的实践经验。

2. 储能系统配置优化

在大型光伏电站系统集成中，储能系统配置优化至关重要。构建光储协同控制模型，能有效实现这一优化。该模型通过揭示不同荷电状态下锂电池梯次利用的调峰效益，为储能系统配置提供科学依据。锂电池在不同荷电状态时，其调峰能力与效益有所差异，利用此模型可深入分析这些特性。例如，在高荷电状态下，锂电池可快速响应高峰需求，实现高效调峰；而低荷电状态

时，可通过合理调配维持系统稳定运行。基于该模型，能精准规划储能系统的容量、充放电策略等关键参数，使储能系统与光伏电站更好协同，提升整体系统的稳定性与可靠性，有效发挥储能系统在大型光伏电站中的重要作用^[6]。

（二）海上风电工程关键技术

1. 深远海基础结构设计

在海上风电工程的深远海基础结构设计中，导管架与浮式基础的波流耦合作用机理是关键研究点。海洋环境下，波流的复杂作用会对基础结构产生显著影响。通过深入研究导管架与浮式基础在波流共同作用下的力学响应、结构稳定性等方面的机理，能够为基础结构设计提供科学依据。在此基础上，提出抗台风结构设计标准至关重要。台风作为海上常见的极端天气，对风电基础结构构成巨大威胁。所提出的抗台风结构设计标准需综合考虑结构的强度、刚度、稳定性等多方面因素，以确保海上风电设施在台风频发的深远海区域能够安全稳定运行^[7]。

2. 并网稳定性增强措施

在海上风电工程中，并网稳定性至关重要。开发风电场集群虚拟同步机控制策略是增强并网稳定性的关键举措。该策略通过模拟同步发电机的运行特性，让风电场集群在并网时具备更强的抗干扰能力。在弱电网条件下，传统并网方式易引发谐波谐振问题，严重影响电能质量与并网稳定性。而虚拟同步机控制策略能对输出电压和频率进行有效调节，通过合理设置控制参数，可抑制谐波谐振，降低谐波含量。这不仅能提升海上风电在弱电网环境中的适应性，还能确保其稳定、可靠地并入电网，为海上风电大规模发展奠定坚实基础，其应用对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义^[8]。

四、新能源工程技术发展挑战与对策

（一）关键技术瓶颈突破

1. 光伏组件回收体系

构建完善的光伏组件回收体系面临诸多挑战。当前，缺乏高效且经济的回收技术是关键难题。传统回收方法在提取光伏组件中各类材料时，存在回收率低、能耗高及二次污染风险大等问题。同时，我国尚未建立起健全的光伏组件回收产业链，从回收网络的搭建到回收处理企业的规范化运营，都存在明显不足。另外，公众对光伏组件回收的认知和重视程度较低，使得回收工作缺乏广泛的社会支持。针对这些问题，需加强研发投入，突破化学法硅材料提纯等关键回收技术，提高材料回收率与纯度^[9]。并构建光伏废弃物资源化处理的全生命周期管理模式，明确各环节责任主体，规范回收流程。同时，加强宣传教育，提升公众环保意识与参与度，共同推动光伏组件回收体系的完善。

2. 风电关键部件国产化

在风电关键部件国产化进程中，主轴涂层材料研发与大兆瓦齿轮箱疲劳测试标准体系的建立是关键。主轴作为风电设备的核心部件，其涂层材料直接影响着使用寿命与性能。需深入分析涂层材料研发路径，通过理论与实验相结合，探寻适配不

同工况的高性能涂层材料，提升主轴承的耐磨性、耐腐蚀性等。大兆瓦齿轮箱是实现高效发电的重要部件，然而疲劳问题制约其国产化。建立科学合理的疲劳测试标准体系至关重要，这有助于准确评估齿轮箱在复杂工况下的疲劳寿命，为设计优化提供依据，推动大兆瓦齿轮箱国产化进程，保障风电关键部件实现国产化，提升我国风电产业核心竞争力^[10]。

（二）智能运维技术发展

1. 无人机巡检系统集成

在光伏与风电新能源工程技术领域，无人机巡检系统集成至关重要。一方面，将多光谱成像与 AI 诊断相结合开发组件隐裂检测算法，能提升检测的准确性与效率。多光谱成像可获取光伏组件不同光谱波段信息，使组件隐裂特征更易识别，而 AI 诊断基于大量数据训练，能精准分析多光谱图像，判断组件是否存在隐裂及隐裂程度。另一方面，需验证热斑定位精度。热斑会影响光伏组件性能与寿命，通过无人机巡检系统准确捕捉热斑位置并验证定位精度，对及时发现并解决热斑问题意义重大。这一系列集成工作有助于完善无人机巡检系统，实现对光伏与风电新能源工程组件的高效、精准运维，推动智能运维技术发展，应对新能源工程技术发展中的挑战。

2. 数字孪生平台构建

在光伏与风电新能源工程技术领域，数字孪生平台构建是智能运维技术发展的关键。通过建立风电场三维可视化模型，该平台能够以直观、逼真的方式呈现风电场的全貌，涵盖风机布局、线路走向等细节。借助传感器收集关键设备运行数据，如温度、振动频率等，实时传输至平台。利用先进算法，平台可对设备健康状态进行深度分析，实现实时预测性维护。即提前察觉设备潜在故障隐患，在故障发生前安排维护，降低运维成本与停机时间。数字孪生平台为新能源工程技术智能运维提供了强大的技术支撑，推动光伏与风电产业高效、稳定运行。

（三）政策机制协同创新

1. 市场化交易机制

在光伏与风电新能源工程技术发展中，市场化交易机制至关

重要。需深入探讨绿证交易与电力现货市场的耦合机制。绿证作为可再生能源电力环境属性的唯一证明，与电力现货市场紧密相关。通过合理设计两者耦合机制，能有效反映新能源的绿色价值，激励更多主体参与新能源市场。同时，设计新能源优先调度规则也不可或缺。新能源具有间歇性和波动性特点，优先调度规则可保障其优先接入电网、优先消纳，减少弃风弃光现象。优先调度规则要综合考虑电网运行安全、新能源发电预测等因素，促进新能源高效利用，实现电力资源优化配置，推动光伏与风电新能源工程技术在市场化交易机制下稳健发展。

2. 碳资产管理体系

在光伏与风电新能源工程技术发展中，碳资产管理体系至关重要。构建光伏风电项目全生命周期碳足迹核算模型，能够精准量化项目在原料获取、建设、运营到退役全流程的碳排放，为碳减排提供科学依据。基于此模型，提出 CCER（国家核证自愿减排量）开发实施路径，鼓励企业通过开发符合要求的减排项目，将所产生的碳减排量经过核证后在市场上交易，不仅可获得额外收益，还能促进碳市场的良性循环。完善的碳资产管理体系，能引导企业优化项目设计与运营，采用低碳技术，减少碳排放，实现光伏与风电产业绿色可持续发展，同时也为政策制定者提供决策参考，助力实现双碳目标。

五、总结

光伏与风电新能源工程技术的创新与实践对推动新型电力系统建设至关重要。模块化设计提高了光伏与风电项目的建设效率和灵活性，多能互补优化了能源结构，智能运维提升了设备可靠性与运维效率，这些创新成果为行业发展注入了新动力。在实践方面，建立标准体系有助于规范行业发展，完善政策保障则为光伏与风电产业营造了良好的发展环境。未来，应持续深化技术创新，加强标准体系与政策保障建设，促进光伏与风电新能源工程技术的进一步发展，为构建清洁、高效、安全、可持续的新型电力系统提供有力支撑，推动能源转型与可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1] 周科宇. 新能源微电网直驱风电与光伏混合电压源控制策略研究 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [2] 王楚伊. 我国省域光伏与风电产业效率分析 [D]. 中国石油大学 (北京), 2022.
- [3] 李鑫怡. 风电新能源 M 公司财务风险评价研究 [D]. 河北工程大学, 2022.
- [4] 崔幼石. 风电 / 光伏频率动态特性分析与调频策略研究 [D]. 东北电力大学, 2023.
- [5] 殷如梦. 城市公共站点光伏能源系统开发与应用研究 [D]. 广西大学, 2021.
- [6] 陈战杰. 风电新能源发展与并网技术 [J]. 电力系统装备, 2021(7): 25-26.
- [7] 孙艳. 基于 EPIP 的光伏工程技术专业建设探索与实践 [J]. 光源与照明, 2022(11): 243-245.
- [8] 熊巧兵, 吕超. 风电新能源发展与并网技术分析评价 [J]. 通信电源技术, 2022, 39(22): 187-189.
- [9] 刘国辉. 风电新能源发展与并网技术研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(10): 183-184.
- [10] 李冬冬. 风电新能源发展与并网技术研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(11): 115-116.

燃气工程：技术管理视角下的工程风险防控的策略

项阳明

浙江 温州 325000

DOI:10.61369/ME.2025120043

摘 要： 燃气工程有独特技术特征与风险构成，技术管理要素与风险传导紧密相关。基于 BIM 的风险动态识别系统、智能传感数据驱动的风险预测算法等多种技术与策略，可助力燃气工程风险防控。同时需建设复合型技术管理团队、设计扁平化技术决策流程等提供实施保障。技术管理创新对风险防控效能提升显著。

关 键 词： 燃气工程；风险防控；技术管理

Gas Engineering: Strategies for Engineering Risk Prevention and Control from the Perspective of Technical Management

Xiang Yangming

Wenzhou, Zhejiang 325000

Abstract： Gas engineering has unique technical characteristics and risk composition, and technical management elements are closely related to risk transmission. Various technologies and strategies, such as BIM based risk dynamic identification system and intelligent sensor data-driven risk prediction algorithm, can assist in risk prevention and control of gas engineering. At the same time, it is necessary to establish a composite technology management team and design a flat technology decision-making process to provide implementation support. Technological management innovation has significantly improved the effectiveness of risk prevention and control.

Keywords： gas engineering; risk prevention and control; technology management

引言

随着《关于推进燃气行业高质量发展的指导意见》在 [具体颁布时间] 的颁布，燃气工程风险防控的重要性愈发凸显。燃气工程具独特技术特征与复杂风险构成，从行业属性到各环节都潜藏风险，技术管理要素与之紧密相关。基于 BIM 的风险动态识别、智能传感数据驱动的风险预测等技术，以及地质参数智能匹配选线等策略，对风险防控意义重大。而复合型团队建设、扁平化决策流程等保障机制，也为风险防控策略实施提供支撑。在此背景下，探讨燃气工程技术管理视角下的风险防控，契合政策导向，对提升燃气工程安全性与稳定性至关重要。

一、燃气工程风险特征与技术管理关联性分析

（一）燃气工程技术特征与风险构成

燃气工程具有独特的技术特征与风险构成。从行业属性看，它属于能源供应领域，具有基础性和公共服务性，一旦出现风险，影响范围广、程度深^[1]。其工艺复杂性体现在从气源获取、储存、输送到用户使用，涉及众多复杂工艺环节，如管道铺设、设备安装调试等，任一环节操作不当都可能引发风险。环境敏感性方面，燃气工程多建于人口密集区，周边环境复杂，易受地形、气候等自然因素影响，还可能与其他基础设施相互干扰。在设计阶段，若设计方案不合理，如管道选材不当、布局规划失误，会为后续施工和运维埋下隐患。施工过程中，不规范操作、质量把控不严，如焊接质量不达标、管道埋深不符合要求等，是

常见的风险源。运维阶段，设备老化、检测维护不及时，也易导致泄漏、爆炸等事故。

（二）技术管理要素与风险传导机制

燃气工程技术管理要素涵盖工程技术标准、设备选型规范、自动化控制系统等方面，它们与风险传导紧密相关。工程技术标准若不严格，如管道铺设标准不达标，易使管道在后续运行中出现泄漏风险，这是因技术标准这一要素缺失导致风险生成。设备选型规范同样关键，若未依据实际工况合理选型，像选用承压能力不足的设备，运行时承受压力过大，会引发破裂等风险，风险借此传导扩散。自动化控制系统能实时监测与调控燃气工程运行，若该系统存在漏洞，无法及时察觉异常，会让小隐患发展成重大事故，风险也会随之扩大。所以，这些技术管理要素一旦出现问题，就会沿着特定路径，促使燃气工程风险生成与扩散^[2]。

二、技术管理视角下的风险识别模型构建

（一）基于BIM的风险动态识别系统

基于BIM的风险动态识别系统能够有效助力燃气工程技术管理视角下的风险防控。该系统借助BIM技术的三维可视化特性，构建出燃气工程的精确虚拟模型，将工程各部分信息集成于模型之中^[3]。通过对模型进行动态模拟分析，可实时发现工程建设不同阶段潜在的风险点。例如，在管道铺设环节，能模拟管道走向、空间布局等，及时察觉与周边设施的碰撞风险或不合理设计之处。同时，结合工程进度信息，对风险进行动态跟踪，一旦出现新的施工状况或设计变更，迅速重新评估风险，实现设计缺陷的早期预警，为工程技术管理人员及时采取应对措施提供有力支持，降低风险发生概率，保障燃气工程的顺利推进。

（二）智能传感数据驱动的风险预测算法

在技术管理视角下的燃气工程风险防控中，智能传感数据驱动的风险预测算法至关重要。通过开发针对管道应力监测、气体泄漏检测等物联网数据的深度学习方法，能更精准地预测潜在风险。深度学习算法可自动挖掘数据中的复杂模式与特征，对燃气工程运行过程中的海量传感数据进行高效分析^[4]。例如，利用长短期记忆网络（LSTM）处理时间序列数据，捕捉管道应力、气体浓度等参数随时间的变化趋势，提前预测可能出现的应力异常或气体泄漏风险。构建基于此的风险动态评估模型，能够实时、动态地评估燃气工程面临的风险状况，为工程技术管理人员及时采取防控措施提供有力支持，有效降低事故发生的可能性，保障燃气工程安全稳定运行。

三、工程全生命周期风险管理体系设计

（一）规划设计阶段风险预控机制

1. 地质参数智能匹配选线技术

在燃气工程规划设计阶段，地质参数智能匹配选线技术至关重要。借助地质大数据分析，能够深入挖掘各类地质参数，如土壤类型、地形地貌、地下水位等^[5]。通过对这些参数进行智能分析，与燃气管道选线要求进行精准匹配。比如，针对容易发生滑坡、泥石流等地质灾害的高风险区域，系统可依据地质参数迅速识别，并在选线过程中自动规避。如此一来，实现了燃气工程管网布局决策的优化，降低因地质因素导致的工程风险，为燃气工程的安全稳定运行奠定基础，从源头上保障燃气工程规划设计的科学性与合理性，有效预控潜在风险。

2. 关键设备冗余配置标准优化

在燃气工程规划设计阶段，关键设备冗余配置标准优化对风险预控至关重要。首先建立基于蒙特卡洛模拟的设备可靠性分析模型^[6]，该模型能综合考虑多种复杂因素，通过大量随机模拟，精准评估关键设备在不同工况下的可靠性。基于此分析结果，制定系统冗余配置技术规范。规范应明确不同类型关键设备的冗余度要求，如对于燃气供应的核心调压设备，需依据用气需求波动、设备故障概率等确定合适的备用数量与切换机制。同时，规范还应涵盖冗余设备的选型标准，确保其与主设备在性能、兼容性等方面相匹

配，从而提升整个燃气工程关键设备的可靠性与稳定性，有效预控风险。

（二）施工运维阶段风险控制技术集成

1. 非开挖施工质量远程监测体系

非开挖施工在燃气工程中应用广泛，其质量直接关乎工程安全与运行效果。构建非开挖施工质量远程监测体系，能实时掌握施工状态，有效防控风险。该体系融合先进传感技术，如利用高精度压力传感器监测管道内部压力变化，通过应变片感知管道受力情况^[7]。同时，借助物联网实现数据远程传输，将现场采集的数据实时传输至监控中心。此外，运用大数据分析技术对传输的数据进行深度挖掘，精准识别潜在质量问题，如依据数据分析判断管道是否存在变形、渗漏等风险，为及时采取针对性措施提供有力依据，实现对非开挖施工质量的全方位、动态化远程监测，确保燃气工程非开挖施工安全、高效进行。

2. 基于数字孪生的应急响应系统

在燃气工程施工运维阶段，基于数字孪生的应急响应系统具有重要意义。通过构建物理实体与虚拟模型联动的应急演练平台，实现对燃气工程设施、环境等全方位数字化映射^[8]。该平台能够实时采集实际运行数据并反馈至虚拟模型，使操作人员可直观、精准了解工程状态。在此基础上，优化抢维修决策流程。借助数字孪生技术对各类故障场景进行模拟分析，提前制定针对性解决方案。当实际发生故障时，依据虚拟模型分析结果，快速筛选出最优抢维修策略，减少决策时间，提升应急响应效率，最大程度降低燃气工程故障带来的影响，保障工程安全稳定运行。

四、风险防控策略实施保障机制

（一）技术管理组织体系重构

1. 复合型技术管理团队建设

燃气工程风险防控策略的实施，复合型技术管理团队建设至关重要。通过提出工程技术、信息技术、安全管理的跨界人才协同培养机制，为团队注入多元专业能力。从高校教育入手，设置跨学科课程体系，让学生同时接触燃气工程技术、信息技术应用及安全管理理论，奠定坚实知识基础。在企业内部，开展针对性培训与轮岗实践，使员工在不同业务环节积累经验，增强跨界协作能力。此外，建立人才交流平台，促进不同领域专业人员的互动与知识共享，实现思维碰撞与经验互补。通过这些措施打造复合型技术管理团队，为燃气工程风险防控策略的有效实施提供人力支撑^[9]。

2. 扁平化技术决策流程设计

在燃气工程风险防控策略实施保障机制中，扁平化技术决策流程设计至关重要。应打破传统层级式决策结构，减少中间环节，使信息能快速、准确传递。设立直接对接一线工程人员与高层决策团队的沟通渠道，一线人员在察觉到如管道潜在泄漏风险、施工工艺偏差等问题时，能即时将详细准确信息传递至决策层，决策层据此迅速做出应对决策。通过建立高效的信息共享平台，集成各类工程数据，如地理信息、设备参数等，供决策团队

快速获取分析,避免因信息不畅、决策链条过长导致的风险响应延迟。这种扁平化流程能显著提升风险响应时效性,让燃气工程风险在萌芽阶段就得到有效控制,确保工程安全有序推进^[10]。

(二) 技术创新激励机制完善

1. 风险防控技术研发投入保障

建立政府引导、企业主体的技术攻关联合体资金配比模式,为风险防控技术研发投入提供坚实保障。政府应发挥引导作用,通过制定专项扶持政策,如设立燃气工程风险防控技术研发专项资金,对相关技术研发项目给予直接资金支持,以此调动企业参与积极性。企业作为技术创新主体,要依据自身业务实际和未来发展规划,合理安排一定比例的营收作为研发投入,确保有充足资金用于新技术、新工艺的研究。同时,鼓励企业与高校、科研机构等建立产学研合作关系,整合各方资源,共同开展风险防控技术研发,拓宽资金来源渠道,优化资金使用效率,从而全方位保障燃气工程风险防控技术研发工作顺利推进,提升燃气工程整体技术水平与风险防控能力。

2. 知识产权保护与成果转化路径

在燃气工程风险防控策略实施保障机制中,完善知识产权保护与成果转化路径至关重要。一方面,要加强对燃气工程相关技术创新成果的知识产权保护,建立健全知识产权保护体系,防止侵权行为,为创新者提供坚实的法律后盾。另一方面,需畅通成果转化路径。通过搭建专门的技术交易平台,促进燃气工程智能监测装置等设计专利池中的创新成果与企业需求有效对接。同时,政府出台政策鼓励企业积极采用这些创新成果,对应用创新成果提升工程风险防控水平的企业给予一定的税收优惠或财政补贴,推动创新成果从理论走向实际应用,切实助力燃气工程风险防控工作。

(三) 风险管理文化建设路径

1. 技术人员风险感知能力培养

技术人员风险感知能力培养对于燃气工程技术管理视角下的工程风险防控至关重要。通过开发虚拟现实技术支撑的情景模拟培训系统,为技术人员提供高度逼真的燃气工程场景。在模拟场

景中,可设置各类常见与潜在风险状况,如燃气泄漏、管道破裂等。技术人员置身其中,能直观感受风险发生时的情境,深刻理解风险的危害与影响。同时,借助系统的交互功能,技术人员可尝试不同应对措施,系统实时反馈效果,引导技术人员总结经验,从而强化他们对风险的敏感度。这种身临其境的培训方式,能有效提高技术人员在实际工作中对风险的察觉、预判与应对能力,为燃气工程风险防控奠定坚实基础。

2. 全员参与式风险管理模式

在燃气工程风险防控策略实施保障机制中,风险管理文化建设路径下的全员参与式风险管理模式极为关键。要大力培育全员风险管理意识,通过开展定期培训与教育活动,向燃气工程的设计、施工、运维等各环节人员详细普及风险管理知识与技能,让每个人都清晰认识到自身岗位在风险防控中的重要性。同时,搭建开放交流平台,鼓励一线员工积极分享工作中发现的潜在风险点及处理经验,促进不同岗位间的经验互通。另外,建立有效的激励机制,对主动参与风险防控且做出贡献的员工给予物质与精神奖励,充分调动全员参与风险管理的积极性与主动性,使全体人员真正融入到燃气工程风险防控工作体系中,从人员层面为风险防控策略的有效实施奠定坚实基础。

五、总结

技术管理创新对燃气工程风险防控具有显著的效能提升。通过采用新的技术管理手段,如引入先进的监测技术、优化施工流程管理等,有效降低了工程中的各类风险,保障了燃气工程的安全与稳定运行。基于智能化技术迭代的风险防控体系优化方向是未来的关键,借助大数据、人工智能等技术,实现风险的精准预测与高效处理。智慧燃气系统的未来发展路径充满希望,它将朝着更加智能、高效、安全的方向迈进,不仅能进一步提升风险防控能力,还将为用户带来更优质的服务体验。通过持续推进技术管理创新,完善风险防控体系,智慧燃气系统必将在能源领域发挥更为重要的作用,助力行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 乔云潇. 政府会计改革视角下的河南省地方政府性债务风险防控 [D]. 华北水利水电大学, 2021.
- [2] 许振宇. 基于鲁棒性视角下中国 PPP 增信机制的风险防控研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2021.
- [3] 蒋琪. PPP 模式下市政道路工程建设的风险防控研究 [D]. 长安大学, 2021.
- [4] 张利锋. “校园贷”风险防控系统工程创新研究——以 A 学校为例 [D]. 华北理工大学, 2021.
- [5] 陈越. 基于风险防控视角的快件通关管理系统效能研究 [D]. 山东大学, 2021.
- [6] 干斌. 燃气工程施工风险防控分析 [J]. 上海煤气, 2022, (03): 26-29.
- [7] 王加德. 工程建设项目招标风险防控策略研究 [J]. 云南水力发电, 2013, 29(05): 136-138.
- [8] 许国梁, 朱祥磊. 风险防控视角下我国养老服务产业的审计监督策略 [J]. 玉林师范学院学报, 2022, 43(03): 126-130.
- [9] 贾佳. 燃气工程项目管理的风险管控路径研究 [J]. 科技风, 2021, (03): 97-98.
- [10] 袁楚杰. 热力工程项目系统性风险防控策略研究 [J]. 中国高新科技, 2021, (05): 96-97.

制造业建筑工程招投标与合同管理协同策略研究

朱丽可

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120056

摘 要： 本文围绕制造业建筑工程招投标与合同管理协同展开，分析了管理模式特征、合同管理关键环节及存在的技术标准对接障碍、造价动态管理困境等问题。提出借助 BIM 技术、构建相关体系与平台、建立转换矩阵和智能匹配条款等协同策略，并阐述了其绩效评价体系及研究意义。

关 键 词： 制造业建筑工程；招投标与合同管理协同；BIM 技术

Research on Collaborative Strategies for Bidding and Contract Management in Manufacturing Construction Engineering

Ju Like

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the collaboration between bidding and contract management in manufacturing construction projects, analyzing the characteristics of management models, key links in contract management, technical standard docking obstacles, and cost dynamic management challenges. Propose collaborative strategies such as utilizing BIM technology, building relevant systems and platforms, establishing transformation matrices and intelligent matching clauses, and elaborate on its performance evaluation system and research significance.

Keywords： manufacturing construction engineering; collaboration between bidding and contract management; BIM Technology

引言

随着《关于推动制造业高质量发展的意见》在 2019 年颁布，制造业建筑工程领域迎来新发展契机。该领域招投标管理模式技术要求高、系统性强且时效性显著，合同管理中的造价控制与质量条款约定关键。然而，技术标准对接、工程造价动态管理存在障碍。在此背景下，借助 BIM 技术实现三维工程量计算协同与设计变更智能响应，构建招标控制价动态生成及合同履行监控平台等策略，能有效促进招投标与合同管理协同，对落实政策、推动制造业建筑工程高质量发展意义重大。

一、制造业建筑工程招投标与合同管理理论基础

（一）招投标管理模式特征

制造业建筑工程招投标管理模式具有独特特征。其技术要求高，因涉及设备采购集成与工艺对接等，需精准考量技术参数与工艺匹配度，以保障项目后续顺利运行，实现预期生产目标^[1]。同时，该模式的系统性强，招投标不仅关乎建筑施工，还与设备采购、安装调试、工艺衔接等紧密相连，各环节相互影响、相互制约，需整体规划与协同推进。此外，制造业建筑工程招投标的时效性显著，项目建设周期往往受市场竞争、产品更新换代等因素影响，需在规定时间内完成招投标及相关工作，以确保项目尽快落地投产，抢占市场先机。

（二）合同管理关键环节

在制造业建筑工程合同管理中，工程造价控制是关键环节。合理确定造价需综合考虑项目规模、技术难度、市场价格波动等

因素。合同中应明确计价方式，如固定总价、固定单价或成本加酬金等，同时设置调价条款以应对不可预见情况^[2]。质量条款约定同样重要，要详细规定工程应达到的质量标准，如符合国家及行业相关规范，明确质量验收程序和方法，包括分部分项工程验收、隐蔽工程验收等。对于质量违约责任，需清晰界定，若出现质量问题，责任方应承担相应的修复、赔偿等责任，以此保障工程质量，确保合同目标顺利实现。

二、制造业建筑工程招投标与合同管理协同问题分析

（一）技术标准对接障碍

在制造业建筑工程中，技术标准对接存在显著障碍。招投标文件与合同条款间，设计规范与施工标准的衔接缺失较为严重。招投标文件侧重于吸引投标方，可能对技术标准描述宽泛、模

糊，未能充分细化设计规范要求。而合同条款虽具约束性，但往往未能紧密关联招标文件中的技术标准，致使两者出现脱节。例如，招投标文件对建筑材料的规格参数仅作大致说明，合同中却未进一步明确质量验收所依据的具体施工标准，这使得施工过程中易因技术标准不明产生争议。这种技术标准对接障碍，不仅影响工程质量，还可能导致工期延误、成本增加等一系列问题，严重阻碍招投标与合同管理的协同推进^[3]。

（二）工程造价动态管理困境

在制造业建筑工程中，工程造价动态管理面临诸多困境。设备参数变更会使工程量清单难以同步准确调整，这一过程复杂且涉及多方主体，各方对变更理解和执行程度不同，易出现清单与实际不符情况。而合同价款结算又依赖准确的工程量清单，当清单调整不及时或不准确，合同价款结算就会陷入混乱，导致结算金额争议不断。例如，因设备参数变更，某些项目工程量减少，但清单未更新，结算时施工方仍按原清单计价，业主方却认为应按实际调整后计价，双方各执一词。这种工程量清单调整与合同价款结算的协同管理矛盾，严重阻碍工程造价动态管理，若处理不当，将引发经济纠纷，影响工程顺利推进^[4]。

三、技术驱动下的协同管理机制设计

（一）BIM技术集成应用

1. 三维工程量计算协同

在制造业建筑工程中，借助 BIM 技术实现三维工程量计算协同是关键环节。基于 BIM 模型的三维可视化特性，能够对工程项目进行精确的空间信息表达与分析，为工程量计算提供直观且准确的基础^[5]。通过专业的 BIM 工程量计算软件，可依据模型中的各类构件信息，如尺寸、材质等，自动、快速且精准地计算出各部分工程量。在招标阶段，可从 BIM 模型中自动提取招标工程量，为招标文件编制提供可靠数据。同时，在合同签订阶段，将提取的合同工程量与之对比，清晰展现二者差异，及时发现潜在问题与风险。这种三维工程量计算协同，极大地提高了工程量计算的效率与准确性，促进招投标与合同管理在工程量数据方面的有效协同，为制造业建筑工程顺利推进奠定坚实基础。

2. 设计变更智能响应

在制造业建筑工程中，借助 BIM 技术实现设计变更智能响应至关重要。当出现参数化设计变更时，BIM 模型能精准捕捉变更信息，并基于此构建智能算法与规则库。通过算法分析变更对工程各方面的影响，如成本、进度、质量等。规则库则依据合同条款逻辑，确定合同条款应修订的具体内容。利用 BIM 与合同管理系统的集成接口，将变更信息自动推送至合同管理模块，实现合同条款的自动修订。这一过程不仅提高了设计变更响应速度，还确保合同与设计变更紧密匹配，避免因变更导致的合同纠纷，有效提升招投标与合同管理的协同效率，为项目顺利推进提供有力保障^[6]。

（二）全过程造价监控体系

1. 招标控制价动态生成

在技术驱动下的协同管理机制设计的全过程造价监控体系

中，招标控制价动态生成依托开发市场价格指数驱动的智能招标控制价测算模型^[7]。该模型借助先进的信息技术手段，对市场价格指数进行实时跟踪与分析。通过收集、整合各类与制造业建筑工程相关的市场价格数据，利用大数据分析、人工智能等技术，精准捕捉价格变动趋势。依据这些动态的市场价格信息，智能测算招标控制价，实现招标控制价的动态生成。如此，既能反映市场真实价格水平，又能有效避免因价格波动导致的造价失控风险，为制造业建筑工程招投标环节提供科学合理且具有时效性的价格参考，促进招投标与合同管理在造价层面的协同，提升整体项目管理效率与效益。

2. 合同支付风险预警

构建工程量进度与支付节点的双维度合同履行监控平台，能有效实现合同支付风险预警。借助技术驱动，该平台可实时跟踪工程量的实际完成进度，精准比对计划进度与实际进度，当出现偏差时及时发出警报^[8]。同时，针对支付节点，平台能依据合同条款严格监控支付时间、金额等关键信息，若支付环节出现逾期或金额不符等异常情况，即刻预警提示。通过工程量进度与支付节点的双维度监控，对合同支付风险形成全方位的识别与预警，为制造业建筑工程合同管理提供有力支撑，使相关管理人员能够提前采取措施应对潜在风险，避免因支付问题引发的合同纠纷，确保工程建设顺利推进，促进招投标与合同管理的协同发展。

四、工程管理协同策略实施路径

（一）组织架构重组方案

1. 矩阵式项目管理团队建设

在制造业建筑工程中，构建矩阵式项目管理团队，能有效实现招投标与合同管理的协同。设计招投标专员与合同管理工程师分别隶属于不同专业职能部门，但在项目中共同协作。一方面，招投标专员凭借专业知识负责项目投标文件编制、分析竞争对手等招投标相关工作，为项目获取奠定基础。另一方面，合同管理工程师依据法规及行业经验，对招投标过程涉及的潜在合同条款进行把控，确保投标文件中的商务条款与后续合同管理有效衔接。在项目执行期间，双方紧密沟通，招投标专员及时向合同管理工程师反馈招标条件变更，合同管理工程师则为招投标后续的合同签订、履行提供专业支持。通过这种矩阵式协同工作机制^[9]，整合资源、提升效率，保障制造业建筑工程招投标与合同管理的协同推进。

2. 数字化流程管控节点

在制造业建筑工程招投标与合同管理协同策略实施过程中，数字化流程管控节点至关重要。制定电子签章与区块链存证相结合的流程管控标准，能够有效提升管理效率与风险防控能力。电子签章确保文件签署的真实性、完整性和不可抵赖性，在投标文件、合同等关键环节实现快速、安全签署，简化流程，减少纸质文件流转带来的时间成本与错误风险。而区块链存证凭借其去中心化、不可篡改等特性，对招投标与合同管理中的关键数据进行永久、可靠存储，为后续审计、纠纷处理等提供坚实数据支

撑^[10]。二者结合，构建起从招投标发起至合同履行完毕全流程的数字化管控体系，保障整个工程管理过程透明、高效、规范。

（二）标准化协同接口设计

1. 技术规范转换规则

建立设备技术参数向施工工艺要求的标准化转换矩阵，是实现技术规范转换的关键。需深入分析设备各项技术参数，诸如性能指标、尺寸规格、材质特性等，将其与施工工艺所涉及的流程、方法、质量标准等相对应。例如，设备高精度的尺寸要求，对应施工工艺中精准的测量与加工方法。针对不同类型设备与施工场景，梳理出清晰的映射关系，构建起标准化转换矩阵。这一矩阵不仅要涵盖参数与工艺的直接对应，还要考虑施工条件、环境因素等对转换的影响，以保障转换的准确性与可行性，使得设备技术参数能精准无误地转化为切实可行的施工工艺要求，有效促进制造业建筑工程招投标与合同管理的协同运作。

2. 合同条款智能匹配

在制造业建筑工程招投标与合同管理协同中，合同条款智能匹配是重要环节。借助先进的大数据和人工智能技术，对招标文件关键条款进行深度解析与特征提取。同时，对合同范本条款建立详细的属性标签与特征库。通过智能算法，实现招标文件条款与合同范本条款的精准匹配。例如，当招标文件提及工程质量标准、工期要求等关键条款时，系统能迅速从合同范本中筛选出与之匹配的质量验收、工期违约责任等相应条款。这种智能匹配不仅提高匹配效率，还减少人工匹配可能出现的疏漏与偏差，确保招投标与合同管理环节在条款上的紧密衔接，有效降低合同风险，促进工程顺利开展。

（三）协同绩效评价体系

1. 全生命周期评价指标

在制造业建筑工程招投标与合同管理协同绩效评价体系的全生命周期评价指标构建方面，设计变更率是重要考量指标。设计变更频繁，不仅会增加工程成本，还可能导致工期延误，影响整个项目进度，应严格把控。索赔发生率反映合同执行过程中的风险状况，高索赔发生率暗示合同条款不明晰或双方沟通协调不

畅。此外，可纳入工程进度偏差率指标，用以衡量实际进度与计划进度的差异，确保工程按预定时间节点推进。成本偏差率也不可或缺，它能直观体现工程实际成本与预算成本的偏离程度，及时发现成本超支风险。通过这些全生命周期评价指标，全面、系统地评估工程管理协同策略实施效果，助力制造业建筑工程高质量发展。

2. 动态权重赋值模型

在制造业建筑工程管理协同绩效评价体系中，动态权重赋值模型至关重要。通过熵权法建立项目阶段差异化的指标权重计算模型，旨在充分考量工程各阶段的特性与变化。该模型依据不同项目阶段的实际情况，利用熵权法确定各评价指标的权重。熵权法能客观反映数据信息熵的变化，衡量指标的离散程度，离散程度越大，对决策的影响越大，权重也就越高。在工程招投标阶段，可能更侧重报价合理性、资质信誉等指标；而在合同管理阶段，合同执行情况、变更处理等指标权重会相应变化。这样根据项目阶段动态调整权重，使协同绩效评价更贴合实际，精准反映各阶段协同管理成效，为工程管理协同策略的优化提供科学依据。

五、总结与展望

制造业建筑工程招投标与合同管理协同策略的研究意义重大。BIM技术集成与标准化接口设计在协同管理中展现出显著价值，不仅提升了招投标阶段信息的精准性与可视化程度，还助力合同管理中的成本控制与进度监督，增强了二者的协同效应。随着科技发展，人工智能在该领域的应用前景广阔。它可实现招标文件的智能审查，快速精准识别文件中的错误、遗漏与不合理条款，提高招投标效率与公正性。在合同管理方面，能对合同风险进行智能预测，提前预警潜在风险，帮助企业及时制定应对策略。未来，应进一步探索和实践这些新技术，完善协同策略，推动制造业建筑工程招投标与合同管理的智能化、高效化发展。

参考文献

- [1]王大伟. W 建筑工程招投标过程管理优化研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [2]臧亚威. 基于 BIM 的煤矿建设工程信息协同管理研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.
- [3]张冰洁. 基于 BIM 技术建筑工程进度管理的优化研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.
- [4]周彦余. 基于 BIM 的 IPD 项目协同管理影响因素研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [5]周希. 基于 BIM 的全过程工程咨询协同管理平台设计及应用研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [6]李优冰. 建筑工程招投标与合同管理 [J]. 居业, 2023(9): 110-112.
- [7]赵士庆. 关于建筑工程招投标与合同管理探讨 [J]. 建筑·建材·装饰, 2021(9): 106-107.
- [8]马晓婷. 建筑工程招投标与合同管理关系分析 [J]. 建材与装饰, 2023, 19(2): 84-86.
- [9]陈君. 建筑工程招投标与合同管理的问题与对策 [J]. 建材与装饰, 2023, 19(17): 79-81.
- [10]常秦, 马恒. 建筑工程招投标与合同管理的关系探析 [J]. 企业改革与管理, 2021(8): 40-41.

电气自动化中多设备通讯的技术创新与应用

许海龙

中储粮油脂工业东莞有限公司, 广东 东莞 516000

DOI:10.61369/ME.2025120057

摘 要： 介绍智能制造场景下的多种通讯技术及应用。包括 OPC UA 与 TSN 融合架构、uRLLC 技术结合 Modbus/Profibus 协议的语义建模转换中间件等，还涉及基于 PROFINET 协议的人机交互技术创新、多设备通讯异常诊断与恢复等方面，以及 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP 等协议在不同车间的实践成果，并探讨物联网与工业协议融合的未来发展方向。

关 键 词： 智能制造；通讯技术；多设备通讯

Technological Innovation and Application of Multi-device Communication in Electrical Automation

Xu Hailong

Sinograin Oils and Fats Industry Dongguan Co., LTD, Dongguan, Guangdong 516000

Abstract： This paper introduces various communication technologies and their applications in the context of intelligent manufacturing. It includes the integrated architecture of OPC UA and TSN, uRLLC technology, protocol conversion middleware for semantic modeling combining Modbus/Profibus protocols, etc. It also involves innovations in human-computer interaction technology based on PROFINET protocol, diagnosis and recovery of multi-device communication anomalies, as well as practical achievements of Modbus, PROFINET, PROFIBUS PA/DP and other protocols in different workshops, and explores the future development direction of the integration of the Internet of Things and industrial protocols.

Keywords： intelligent manufacturing; communication technology; multi-device communication

引言

智能制造是制造业发展的关键方向。随着《中国制造 2025》等政策的推进，智能制造逐渐成为制造业的核心。在智能制造场景下，通讯技术是实现设备高效协同、提升生产效率与质量的关键支撑，其中 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP、OPC UA 等工业协议及物联网技术的融合应用尤为核心。通讯技术贯穿于智能制造系统的多个方面，从基于工业协议的通讯架构设计到边缘计算节点的调度策略，再到多协议兼容下的多设备通讯可靠性提升以及人机交互技术创新等，都离不开通讯技术的不断发展与创新。工业互联网环境下，多协议协同与物联网融合面临新的挑战，如网络安全与实时性的协同优化等问题。研究 Modbus、PROFINET 等协议及物联网技术在智能制造中的应用，可显著提升系统的整体性能。未来，随着技术的不断进步，工业协议与物联网的深度融合将在智能制造中发挥更大的作用。

一、工业互联网驱动的多设备通讯架构创新

（一）智能制造场景下的通讯架构设计

在智能制造场景下，通讯架构设计至关重要，核心在于实现 Modbus、PROFINET、OPC UA 等多协议的兼容与协同。基于 OPC UA 与 TSN 的融合架构在离散制造中的部署方案值得深入研究，其中 OPC UA 作为跨平台统一协议，负责打通 PROFINET、Modbus 等异构协议的信息壁垒，凭借良好的互操作性和信息建模

能力，实现不同协议设备间的高效通讯^[1]；TSN 提供高确定性的网络传输，保障多协议数据的实时性和可靠性。二者结合，可满足离散制造中复杂的通讯需求。同时，时延敏感型业务的调度策略也至关重要，针对 PROFINET 实时以太网协议的特性，边缘计算节点靠近数据源快速处理数据，降低时延。通过合理的调度策略，可以提高系统的响应速度，提升生产效率和质量。另外，5G 与物联网技术的融合应用也为智能制造带来了更多可能性，如基于 5G 的无线 PROFINET 部署实现超低时延和超高可靠性，这些

技术的发展为实现智能制造的高效协同和优化提供了有力支撑。

（二）5G 专网与工业无线集成方案

uRLLC（超高可靠低延迟通信）技术与 Profibus DP 协议结合，在运动控制系统中具有显著应用成效。Profibus DP 作为经典的过程自动化总线协议，专注于高速数据传输，uRLLC 技术则保障传输的实时性和可靠性，二者协同能够满足运动控制对实时性和可靠性的严格要求，确保设备之间的精准通讯和协同操作^[9]。例如，在自动化生产线上的机器人运动控制中，该集成方案可使机器人的动作指令传输延迟极低，从而实现高精度的运动轨迹控制。同时，构建基于数字孪生的信道质量预测模型也至关重要，该模型可实时监测 Modbus、PROFINET 等协议的传输信道质量，为多设备通讯提供更准确的决策依据。通过数字孪生技术，对实际通信信道进行虚拟映射和模拟分析，提前发现潜在的信道干扰和质量下降问题，进而采取相应的优化措施，保障多设备通讯的稳定性和高效性。

二、多设备通讯核心技术创新

（一）异构网络协议转换技术

异构网络协议转换技术是智能制造设备互联的关键，核心解决 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP 与物联网协议（如 MQTT）的兼容问题。语义建模协议转换中间件为核心支撑，可实现上述协议的无损数据映射——通过解析不同协议的数据格式与语义（如 Profibus PA 过程变量、Modbus RTU 寄存器、OPC UA 对象模型），依托统一语义模型完成精准映射。该技术保障跨协议数据准确传递，提升多设备通讯兼容性与可靠性，支撑统一工业通信平台构建，推动智能制造发展。实际应用中，其有效破解多协议设备通信障碍，提升系统集成效率、降低维护成本，保障生产连续稳定^[9]。

（二）高可靠性传输保障机制

构建基于多协议优先级划分的冗余通信模型，能够有效提升多设备通讯的可靠性。在该模型中，对 PROFINET 实时链路、Profibus DP 控制链路、Modbus 数据采集链路等依据其重要性和稳定性等因素进行优先权划分，其中 PROFINET 和 Profibus DP 链路优先级高于普通 Modbus 数据链路。当主链路出现故障时，可依据优先权迅速切换到备用链路，从而保障通信的连续性^[4]。开发基于强化学习的故障链路动态切换算法，强化学习算法具备根据环境反馈不断学习和优化决策过程的能力，这使得它在多协议通讯环境中能够实时监测各协议链路状态，并在检测到故障时快速做出切换决策，选择最优的备用链路进行通信。在多设备通讯中，它可以实时监测链路状态，当检测到故障时，快速做出切换决策，选择最优的备用链路进行通信，进一步提高传输的可靠性和稳定性，减少因链路故障导致的通信中断时间。

三、智能工程中的人机交互技术创新

（一）可视化交互界面设计

1. 多模态信息融合呈现技术

智能工程人机交互中，多模态信息融合呈现技术核心是整合 PROFINET、Modbus、Profibus 等多协议设备状态信息。以 AR-HMI 系统为核心研究方向^[9]，通过融合视觉、听觉等多模态信息精准呈现设备状态。三维可视化层面，采用不同颜色标注多

协议设备异常（如 PROFINET 主从站状态、Modbus 寄存器异常、Profibus DP 链路故障），以动态效果展示运行模式；交互逻辑上，设计手势识别、语音指令等便捷操作方式，支持用户查询特定协议设备运行参数。

2. 语音控制与手势识别集成

该技术核心是实现多协议设备便捷控制，关键在于开发环境自适应降噪语音指令识别系统^[9]：通过学习分析环境噪音特征，自适应调整降噪参数，确保 Modbus 寄存器读取、PROFINET 设备启停等指令在复杂环境下精准识别。同时，设计多维度手势认证机制，全面分析手势形状、轨迹等特征提升识别准确性。此融合技术让操作人员可通过语音查询设备状态、手势控制 PROFINET 机械臂等自然交互方式，显著提升操作效率与安全性，助力智能工程发展。

（二）数据分析与决策支持系统

1. 设备群协同优化算法

设备群协同优化的核心是构建兼容 PROFINET、Modbus 等多协议设备数据采集需求的能耗-效率多目标优化模型，需全面考量多协议设备能耗因素与效率影响，通过精准目标函数定义优化方向^[7]。联邦学习为该问题提供创新分布式求解方案，可在保护设备本地数据隐私的前提下实现协同优化：各设备本地训练模型后，上传参数至中央服务器聚合更新，再将更新参数分发回设备迭代训练，形成闭环优化机制。该机制有效解决多协议设备协同优化难题，显著提升设备群整体性能与运行效率，为智能工程高效运作提供技术支撑。

2. 异常工况预测与自愈系统

采用 LSTM-Attention 组合模型实现多协议设备通讯异常的智能诊断与恢复，模型针对性适配 Modbus、PROFINET、Profibus 等协议的通讯数据特征，结合 LSTM 的时序数据处理能力与 Attention 机制的关键信息聚焦优势，精准捕捉数据丢包、循环周期异常、总线故障等通讯异常特征。通过海量历史通讯数据深度学习训练，模型可实时监测通讯状态，一旦发现异常便快速定位故障点，并生成重启从站、切换备用链路等恢复策略^[8]。该系统大幅提升设备通讯可靠性与稳定性，减少通讯故障导致的生产停滞时间，通过持续监测优化，为电气自动化系统高效运行提供有力保障。

四、典型行业应用案例分析

（一）汽车智能制造车间

1. 产线设备群实时通讯方案

在某主机厂焊装车间的工程实践中，采用 PROFINET 与 Modbus 融合的通讯方案，成功实现了 600+ 设备节点通讯时延的大幅降低，从 120ms 降至 35ms。该车间面临着 PROFINET 机器人、Modbus 传感器等多协议设备节点的通讯协调难题，通过一系列技术创新与应用得以解决。采用了 PROFINET IRT（等时实时）技术优化实时数据传输，同时通过协议转换中间件实现 Modbus 传感器数据与 PROFINET 主站的无缝对接，提高了数据传输的效率和准确性。同时，对网络拓扑结构进行了合理调整，减少了数据传输的路径和节点，降低了传输时延。此外，引入了智能的设备管理系统，能够实时监测 PROFINET、Modbus 设备状态和通讯情况，

及时发现并解决潜在问题。这些措施的综合应用,使得车间的产线设备群能够实现高效、稳定的实时通讯,为汽车智能制造车间的生产效率提升和质量保障提供了有力支撑^[9]。

2. AGV 调度系统人机交互优化

在汽车智能制造车间的 AGV 调度系统人机交互优化中,采用基于 PROFINET IO-Link 的视觉导航与无线通讯协同优化方案,取得了显著成果。通过相关实测数据表明,这一优化使得 AGV 调度效率提升了 42%^[10]。视觉导航为 AGV 提供了精准的位置和路径信息,PROFINET IO-Link 则确保了 AGV 与调度系统之间的实时信息交互,使调度系统能够及时获取 AGV 的状态并做出合理的调度决策。两者的协同作用,有效减少了 AGV 的运行时间和路径偏差,从而大大提高了调度效率,为汽车智能制造车间的高效运作提供了有力支持。

(二) 智能电网监控系统

1. 电力设备状态监测网络

在智能电网监控系统的电力设备状态监测网络中,采用 PROFIBUS PA 与 LoRaWAN (物联网协议)、光纤网络混合架构,具有重要应用。PROFIBUS PA 协议适用于工业过程自动化的现场设备,可在防爆环境下稳定传输电力设备的过程参数,LoRaWAN 技术具有低功耗、远距离传输的优势,能够覆盖较大范围的输变电设备数据采集,光纤网络则确保核心数据的高速、稳定传输。该混合架构可显著提升输变电设备监测的可靠性,既能满足对不同位置、不同类型设备的数据获取需求,又能保障数据在传输过程中的质量。通过这种混合架构,可实现对电力设备状态的更精准监测,及时发现潜在问题,为智能电网的稳定运行提供有力支持。

2. 分布式能源协调控制

在智能电网监控系统的分布式能源协调控制中,基于共识算法的多逆变器通讯协调策略结合 Modbus RTU 协议,对电网谐波抑制具有重要贡献。Modbus RTU 协议用于逆变器的状态数据采集和控制指令下发,共识算法使得多个逆变器能够在通讯过程中达成一致的控制决策,从而优化对谐波的抑制效果。逆变器作为分布式能源接入电网的关键设备,其运行状态和控制效果直接影响电网的电能质量。通过这种协调控制,可减少电网中的谐波含量,提高电网的稳定性和可靠性,为智能电网的高效运行提供有力保障,满足用户对高质量电能的需求。

(三) 食品加工数字化车间

1. 异构设备互联互通实践

在食品加工数字化车间中,异构设备互联互通是关键挑战。针对 Modbus 温控设备、PROFINET 包装机器人与 EtherCAT 输送线等多协议设备,某包装产线改造项目采用“EtherCAT+工业 WiFi”融合方案,辅以协议转换中间件,实现高效协同。首先对各类设备的通信接口和协议进行调研,随后在核心设备部署 EtherCAT 主站,通过中间件将 Modbus 和 PROFINET 数据统一接入 EtherCAT 总线,保障实时、准确的数据交互。对于移动设备或布线困难区域,则采用工业 WiFi 扩展覆盖。同时开发统一通信管理软件,集中配置多协议通信,支持有线与无线方式无缝切换,显著提升产线效率与质量控制水平。

2. 远程运维人机界面开发

在食品加工数字化车间的远程运维人机界面开发中,基于 WebGL 的 3D 监控界面发挥着重要作用,该界面可集中呈现 Modbus、PROFINET 等多协议设备的运行状态。它能够实时呈现设备的运行状态,通过 3D 可视化效果,运维人员可以更直观地了解设备的各个细节,同时可快速定位 Modbus 数据异常、PROFINET 链路故障等问题。当设备出现故障时,该界面能迅速定位问题所在,大大缩短了故障排查时间。通过高效的数据传输和智能分析算法,将设备故障平均响应时间降低至 15 分钟内。这不仅提高了设备的运行效率,减少了因设备故障导致的生产停滞时间,还提升了整个食品加工车间的生产效益和产品质量,为企业带来了显著的经济价值。

五、总结与展望

Modbus、PROFINET 等工业协议与物联网融合的多设备通讯技术创新,为智能制造提供关键支撑,实现跨协议设备高效协同,提升生产效率与质量。未来,数字孪生与 AI 在多协议通讯领域潜力巨大:AI 可实现协议自适应优化,动态调整传输参数提升兼容性;数字孪生能构建虚拟模型辅助优化通讯架构。同时,多协议协同下需兼顾网络安全与实时性,通过技术与管理创新保障通讯安全。物联网与工业经典协议深度融合将成核心方向,助力更广范围设备互联协同。

参考文献

[1] 张浩银.考虑数控刀具约束的加工设备调度方法研究与应用 [D].重庆大学,2022.
[2] 邵文婷.面向低碳生产的车间多设备加工参数协同优化方法 [D].天津大学,2022.
[3] 王坤.智能制造背景下 Z 企业设备管理系统研究与实现 [D].吉林大学,2021.
[4] 章玉玲.M 公司基于动作时间分析的线体自动化改善研究应用 [D].四川大学,2021.
[5] 赵磊磊.变电站电气设备多光谱测温仪的研制 [D].哈尔滨工业大学,2023.
[6] 程明杰.通讯技术在发电厂电气控制系统中的应用研究 [J].电子元器件与信息技术,2021,005(008):163-164.
[7] 陆庆.电气自动化设备改造与技术创新研究 [J].中外交流,2021,28(3):507.
[8] 廖军.5G 通讯技术在交通管理中的应用 [J].中国安全防范技术与应用,2021(1):41-44.
[9] 雷红忠.电气自动化在建筑电气设备中的应用 [J].今日自动化,2021(7):84-85.
[10] 罗曼.计算机通讯技术在电子信息工程中的应用 [J].中国宽带,2021(2):102.

污水处理厂光伏发电节能策略研究

杨凯

中山公用水务投资有限公司, 广东 中山 528400

DOI:10.61369/ME.2025120058

摘 要 : 本文围绕污水处理厂光伏发电节能策略展开研究, 指出建筑结构影响光伏阵列布局, 需合理选型组件、优化安装角度与容量计算。强调电气自动化配套技术、系统能效优化等方面重要性, 阐述无人值守运维、安全风险控制等工程管理要点, 探讨成本核算、碳交易等经济因素, 提出技术创新与智能化、标准化发展建议。

关 键 词 : 污水处理厂; 光伏发电; 节能策略

Research on Energy Saving Strategy of Photovoltaic Power Generation in Sewage Treatment Plant

Yang Kai

Zhongshan Public Water Investment Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract : This paper studies the energy-saving strategy of photovoltaic power generation in sewage treatment plant, and points out that the building structure affects the layout of photovoltaic array, so it is necessary to select components reasonably, optimize the installation angle and capacity calculation. It emphasizes the importance of electrical automation supporting technology and system energy efficiency optimization, expounds the key points of engineering management such as unattended operation and maintenance, safety risk control, discusses the economic factors such as cost accounting and carbon trading, and puts forward suggestions on technological innovation, intelligence and standardization development.

Keywords : sewage treatment plant; photovoltaic power generation; energy saving strategy

引言

在国家“双碳”目标（2020 年提出）的大背景下，污水处理厂光伏发电节能策略的研究意义重大。污水处理厂的建筑结构特征为光伏阵列布局提供条件，从光伏组件选型、安装角度到系统容量计算等都需科学规划。电气自动化配套技术、系统能效优化、无人值守运维体系构建、安全风险控制等多方面技术与管理要点影响着系统稳定运行与节能效果。同时，关键路径法优化施工流程、设备安装规范与系统调试规程保障项目进度与运行质量。此外，全生命周期成本核算模型、碳交易机制、数字孪生技术应用、新型电池储能技术、规范体系建设及绿电补贴政策等，共同推动污水处理厂向绿色、高效方向发展，助力污水处理行业可持续发展。

一、污水处理厂光伏发电技术应用基础

（一）水厂光伏系统设计原理

污水处理厂的建筑结构特征对光伏阵列布局有着重要影响。其厂房屋顶等大面积平坦区域，为光伏系统提供了良好的安装条件。在设计水厂光伏系统时，需依据建筑结构确定光伏阵列布局，实现两者协同，提升发电效率。光伏组件选型至关重要，要综合考虑污水处理厂的环境条件、光照资源等，选择转换效率高、稳定性强且适合当地气候的组件。安装角度应根据当地纬度和太阳辐射特性进行优化计算，以获取最大太阳辐射量。同时，精确计算光伏系统容量，需结合污水处理厂的用电需求、场地面积以及投资预算等因素，遵循相关技术规范进行科学规划^[1]。

（二）电气自动化配套技术

在污水处理厂光伏发电系统中，变频节能装置与光伏发电系统、市电供应的联动控制逻辑设计尤为关键，核心目标是保障污水处理工艺所需的稳定功率输出，同时实现能源的高效利用。通过对变频节能装置的精细化调控，使其形成“光伏优先、市电兜底”的自适应运行模式：当光伏发电量充足且能满足工艺负荷需求时，装置可依据光伏实时发电量动态调整污水处理设备的运行功率，确保电能全额消纳、避免冗余浪费；当光伏发电量波动不足，或出现光照突变、组件故障等情况导致供电缺口时，系统将自动触发切换机制，快速衔接市电供电或通过市电补充供电，精准补足功率差额，保障污水处理工艺参数稳定、运行连续不受影响这种联动控制逻辑的有效构建，可大幅提升污水处理厂整体能

源利用效率，助力节能减排，推动污水处理厂向绿色、高效方向发展^[2]。

二、光伏发电系统集成与运行管理

（一）系统能效优化策略

在污水处理厂光伏发电系统中，系统能效优化极为关键。一方面，可通过对设备性能参数的精细化监测与调控来实现。密切关注光伏板的倾斜角度、清洁程度等，依据当地光照特点与季节变化，动态调整光伏板角度，确保其始终以最佳姿态接收光照，同时定期清洁以减少遮挡损耗。另一方面，借助先进的智能控制系统，依据污水处理厂不同时段的用电需求以及光伏发电的实时功率，灵活分配电能。将多余电能储存于储能设备，在光照不足或用电高峰时补充使用。基于大数据分析技术，深入挖掘历史发电与用电数据，精准预测发电功率与用电负荷，为能源分配提供科学依据，最终实现污水处理厂光伏发电系统能效的全面提升^[3]。

（二）无人值守运维体系

在污水处理厂光伏发电系统集成与运行管理的无人值守运维体系构建中，智能诊断系统发挥着关键作用。通过在光伏组件维护中应用智能诊断系统，可实时监测组件的工作状态，快速精准定位潜在故障隐患，提高故障发现的及时性与准确性^[4]。同时，开发远程运维平台，借助该平台能够远程监控光伏发电系统的各项运行参数，如发电量、组件温度、光照强度等，突破时间与空间限制，实现对系统的高效管理。针对可能出现的突发状况，制定完善的应急响应预案，明确故障发生时的处理流程、责任分工等，确保在最短时间内恢复系统正常运行，保障污水处理厂光伏发电系统稳定、高效运行，助力污水处理厂实现节能目标。

三、工程实施质量管理体系

（一）施工组织技术要点

1. 安全风险控制

在污水处理厂光伏发电工程实施中，安全风险控制至关重要。建立高空作业安全防护标准，作业人员必须佩戴合格的安全帽、安全带等防护用具，设置牢固的登高设备与可靠的安全网，且对高空作业区域进行有效隔离，防止无关人员进入。制定电气设备安装的防雷接地技术规程，接地电阻要严格控制在规定范围内，接地体的埋设深度、材料规格等都需符合标准，防雷装置要定期检测维护，以确保其性能可靠。通过这些措施，降低因高空作业和电气设备安装不当带来的安全风险，保障工程顺利进行及人员生命财产安全^[5]。

2. 进度节点控制

在污水处理厂光伏发电项目施工中，借助关键路径法优化施工作业流程，明确各施工工序的先后顺序与相互关系，找出决定项目工期的关键路径，集中资源保障关键工序顺利推进。同时，设计动态进度监控指标体系，选取如每日完成光伏板安装数量、电气

设备接线进度等具体指标，实时跟踪项目进展情况。基于这些指标，构建预警机制，当实际进度与计划进度偏差超过设定阈值时，及时发出预警信号。通过这种方式，可提前发现潜在的进度风险，及时采取调整措施，确保项目按计划的进度节点稳步推进，避免工期延误，保障污水处理厂光伏发电项目能按时完工并投入使用，实现节能目标^[6]。

（二）质量验收标准体系

1. 设备安装规范

在污水处理厂光伏发电工程中，设备安装规范至关重要。对于光伏支架，应依据相关标准确保其结构强度达标。安装时要保证支架基础稳固，螺栓连接牢固，满足不同气候条件下的承载要求^[7]。针对逆变器，需严格按照并网性能测试的技术指标进行安装与调试。确保逆变器的输出电能质量符合电网接入标准，包括电压、频率、谐波等参数在允许范围内。同时，要保证逆变器与光伏阵列、电网之间的电气连接正确无误，通信线路畅通，以便实现高效、稳定的并网运行。此外，各类电气设备的接地系统也需安装规范，保障人员和设备安全，为污水处理厂光伏发电系统的稳定运行奠定坚实基础。

2. 系统调试规程

系统调试规程旨在确保污水处理厂光储系统的稳定运行与高效节能。首先，需对光伏组件进行调试，检查其外观有无损坏，测试开路电压、短路电流等关键参数，确保符合设计要求^[8]。其次，调试储能系统，检查电池组的连接是否牢固，检测充放电性能、SOC（荷电状态）估算精度等。再者，调试光储系统的联合运行，模拟不同光照、负载条件，验证系统的功率分配策略，确保光伏优先供电，储能适时调节。调试过程中，详细记录各项数据，若发现参数异常或运行故障，及时分析原因并进行针对性调整，最终实现光储系统联合稳定高效运行，达到预期的节能效果。

四、节能效益分析与可持续发展

（一）经济效益评估模型

1. 成本效益分析

构建全生命周期成本核算模型，能全面量化污水处理厂光伏发电节能策略的成本与收益。以中山中嘉污水处理厂8MWp分布式光伏发电项目为例，成本方面，其投资总额约3600万元，主要包含光伏设备采购、安装施工、日常运维及场地等相关各项支出；收益方面，25年总发电量预计可达20790万kWh，年均发电量约830万kWh，通过“自发自用，余电上网”模式，自用电比例高达约85%，因自发自用减少的电费支出显著，清晰呈现该节能策略在经济层面的可行性。这种成本效益分析，为污水处理厂评估光伏发电项目提供了科学的决策依据，助力其在践行节能理念的同时实现经济收益提升，稳步迈向可持续发展^[9]。

2. 碳交易机制研究

在污水处理厂光伏发电项目中，碳交易机制对项目经济性影响显著。以中山中嘉污水处理厂光伏发电项目为例，其等效节能

减排列标煤6.3万吨，等效节能减排二氧化碳11.8万吨，当污水处理厂通过光伏发电减少碳排放，可将多余的碳排放配额在碳市场出售获取收益。基于碳足迹核算的环境收益评估方法，能精准衡量这种减排效益。通过明确污水处理厂各环节的碳排放量以及光伏发电带来的碳减排量，将其量化为具体的环境收益。此评估方法结合碳交易价格波动等因素，可建立动态的经济效益评估模型。如此，不仅能直观展现项目在碳交易市场中的经济价值，助力项目管理者制定更科学的决策，还能促使污水处理厂积极采用光伏发电节能策略，实现节能减排与经济效益双赢，推动行业的可持续发展^[10]。

（二）智能化升级路径

1. 数字孪生技术应用

在污水处理厂光伏发电节能策略研究中，数字孪生技术应用为智能化升级提供关键路径。借助该技术建立光伏系统三维仿真模型，能精确模拟光伏板布局、光照条件及发电效率间复杂关系。通过对不同参数如倾斜角度、方位角的动态模拟，获得最佳设计方案，提升发电效率。同时，开发的能效预测和优化决策支持系统，利用数字孪生模型的数据反馈，实现对光伏发电能效实时预测，结合污水处理厂用电需求，给出优化调度策略，有效降低能源成本。这不仅显著提升节能效益，降低对传统能源依赖，减少碳排放，也助力污水处理厂向绿色、可持续方向发展，在实现自身节能减排目标同时，为行业绿色转型提供可借鉴模式。

2. 储能技术创新

新型电池储能技术在污水处理厂光伏发电系统中有着关键作用。不同类型的电池储能技术适用性各异，需对比分析。例如，锂离子电池能量密度高、循环寿命长，适用于对储能容量和充放电次数要求较高的场景；铅酸电池成本较低，在初期投资有限且对储能性能要求相对不高时可选用。通过对比明确各类技术适用场景后，提出光储充一体化解决方案。该方案能有效提升能源利用效率，光伏发电多余电量存储于电池，在用电高峰或光照不足时释放，实现削峰填谷。从节能效益看，降低了污水处理厂对市电的依赖，减少电费支出。从可持续发展角度，减少碳排放，助力污水处理厂向绿色、低碳方向转型，契合环保与可持续发展理念。

（三）政策保障体系

1. 标准体系构建

梳理现行技术规范体系，对于污水处理厂光伏发电节能意义

重大。现行的相关技术规范中，部分涉及到光伏发电的通用标准，但针对污水处理厂这一特殊场景的规范较少。应全面剖析现有规范，找出适用于水厂光伏应用的部分，并明确缺失内容。在此基础上，提出水厂光伏应用的地方标准建设框架。该框架需涵盖光伏设备在污水处理厂的选址规范，确保光伏设备既不影响污水处理流程，又能获得充足光照；规定设备选型标准，考虑到污水处理厂的环境特点，选择合适防护等级与发电效率的设备；制定安装与维护标准，保障光伏系统长期稳定运行，通过构建完善标准体系，推动污水处理厂光伏发电节能策略的有效实施。

2. 激励政策设计

研究绿电补贴政策对污水处理厂光伏发电项目实施的促进作用，意义重大。绿电补贴可降低项目前期投资成本，提升项目收益率，吸引更多资本投入，加速项目落地。比如，给予一定比例的电价补贴，使光伏发电上网电价更具竞争力，增强项目经济可行性。在促进技术推广的财税政策方面，建议实施税收减免，对用于污水处理厂光伏发电项目的设备、技术进口，减免关税及进口环节增值税，降低技术引入成本。对从事相关技术研发、生产的企业，减免企业所得税，鼓励创新。同时，设立专项财政补贴，对采用先进光伏发电技术的污水处理厂给予一次性补贴，激发其应用新技术的积极性，推动污水处理厂光伏发电节能策略广泛应用与可持续发展。

五、总结

污水处理厂光伏发电节能策略的研究，对于推动污水处理行业的可持续发展具有重要意义。通过对光伏发电系统技术创新路径的探索，如提升光伏组件效率、优化系统集成等，为节能奠定了技术基础。工程管理要点的明确，从项目规划、施工到运维，保障了光伏发电系统的高效稳定运行。智能化与标准化发展建议，有助于提高能源利用效率、降低运营成本，推动行业整体进步。这种模式不仅助力污水处理厂实现节能减排，更是在国家双碳目标达成中发挥关键战略价值。未来，应进一步推动能源结构转型，加大光伏等可再生能源在水厂的应用比例，探索更多创新节能策略，构建更加绿色、高效的污水处理能源体系。`

参考文献

- [1] 陈明. 光伏发电系统 MPPT 及 ADRCa 并网控制策略研究 [D]. 河南理工大学, 2022.
- [2] 沈琦. 光伏发电系统控制策略及并网的研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2021.
- [3] 刘云莲. 光伏发电间谐波电流系统重复控制策略研究 [D]. 太原科技大学, 2022.
- [4] 周书真. 碳中和污水处理厂沼光互补发电联合调度研究 [D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [5] 母雪东. 封闭煤棚光伏发电系统的研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2022.
- [6] 李永康, 辛金营. 光伏发电系统在污水处理厂改造中的应用 [J]. 现代建筑电气, 2023, 14(7): 10–15.
- [7] 刘扬, 熊骏. 并网光伏发电系统在污水处理厂中的应用 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47(2): 174–175, 194.
- [8] 田环宇. 江夏污水处理厂光伏发电系统设计与效益分析 [J]. 光源与照明, 2023(5): 138–140.
- [9] 李保泽, 王瑜. 谈光伏发电在污水厂的应用 [J]. 电力设备管理, 2022(9): 140–142.
- [10] 杨昌海, 张天宇, 许欢. 新能源光伏发电助力农业设施节能减排策略 [J]. 农业开发与装备, 2024(7): 125–127.

在役公路桥梁常见病害分析及智能化养护管理策略研究

陈景文

广东 韶关 512300

DOI:10.61369/ME.2025120002

摘 要： 本文围绕在役公路桥梁，构建基于材料劣化与力学响应特征的病害分类体系，运用相关理论剖析病害机理，介绍智能检测技术、智能诊断算法，设计智慧管养架构、寿命预测模型及维修策略优化方法，并通过实例验证。同时对比智能化与传统养护，评估社会效益，开展试点应用，提出管理模式创新方向，指出当前技术不足与未来研究重点。

关 键 词： 在役公路桥梁；智能化养护；病害分析

Research on Analysis of Common Diseases and Intelligent Maintenance Management Strategies for In-Service Highway and Bridges

Chen Jingwen

Shaoguan, Guangdong 512300

Abstract： Focusing on in-service highway and bridges, this paper constructs a disease classification system based on material deterioration and mechanical response characteristics, and analyzes the disease mechanism by applying relevant theories. It introduces intelligent detection technologies and intelligent diagnosis algorithms, designs a smart maintenance and management framework, a service life prediction model, and a maintenance strategy optimization method, all of which are verified through practical cases. Meanwhile, the paper compares intelligent maintenance with traditional maintenance, evaluates social benefits, conducts pilot applications, proposes directions for management model innovation, and points out the current technical shortcomings as well as future research priorities.

Keywords： in-service highway and bridges; intelligent maintenance; disease analysis

引言

2023 年，交通运输部颁布《公路桥梁养护管理办法》，旨在加强公路桥梁养护管理，确保桥梁安全运行。在役公路桥梁常见病害分析及智能化养护管理策略研究对保障桥梁安全运营意义重大。基于材料劣化与力学响应特征构建病害分类体系，运用相关理论剖析病害产生机理与演化模型，集成多源传感监测技术、构建智能诊断算法，设计智能化养护管理架构，构建服役寿命预测模型及优化维修策略等，诸多研究成果有效提升养护管理效率与精准度，但技术仍存提升空间，未来需聚焦关键方向深入研究。

一、在役公路桥梁病害机理研究

（一）常见病害类型分类体系

在役公路桥梁常见病害类型分类体系可基于材料劣化与力学响应特征构建。混凝土结构方面，混凝土碳化裂缝是因混凝土中的碱性物质与空气中二氧化碳发生化学反应，使混凝土碱度降低，钢筋失去碱性保护而锈蚀，体积膨胀进而导致裂缝，按裂缝宽度、深度、走向等可进行多维度分类^[1]。钢结构方面，钢结构疲劳断裂是由于桥梁长期承受交变荷载，钢材内部缺陷处形成应力集中，逐渐发展成疲劳裂纹并最终断裂，可依据裂纹起始位置、扩展方向等维度分类。基础方面，基础沉降是因地基土受力后发生压缩变形，致使桥梁基础下沉，按沉降量、沉降速率及差异沉降程度等多维度进行分类，以此全面系统地对常见病害进行

类型划分，为后续病害分析及养护管理提供清晰框架。

（二）病害产生机理及演化模型

运用断裂力学和损伤累积理论可深入剖析在役公路桥梁病害产生机理及演化模型。在动静荷载耦合作用下，桥梁结构会不断承受动态交通荷载与静态自重荷载。动态荷载如车辆行驶产生的冲击与振动，静态荷载即桥梁自身重量，二者相互影响。在此过程中，不同病害有着独特的损伤发展规律。例如，裂缝病害会因荷载反复作用，裂纹逐渐扩展，依据断裂力学原理，当裂纹扩展至某一临界尺寸，便会达到临界失效阈值，致使结构失去承载能力。从损伤累积角度看，每次荷载作用都会对结构造成微小损伤，这些损伤不断累积，最终导致病害发生与恶化^[2]。通过研究这一过程，能够明晰病害产生的内在原因及发展趋势，为后续养护管理提供理论支撑。

二、病害智能检测技术体系

（一）多源传感监测技术集成

在役公路桥梁常见病害智能检测技术体系中的多源传感监测技术集成，需对比分析多种技术在参数检测中的适用场景与精度差异。光纤光栅技术凭借其抗电磁干扰、耐腐蚀等特性，适用于长期、稳定的监测，在检测桥梁结构应变、温度等参数方面精度较高，可有效获取桥梁结构内部应力变化，从而辅助判断病害发展趋势。超声波探伤技术对内部缺陷检测灵敏，在检测裂缝深度等方面有独特优势，能穿透结构表面，精准定位内部病害位置及深度。无人机图像识别技术可快速获取桥梁整体外观信息，在钢筋锈蚀率等外观病害检测方面适用，通过对拍摄图像的智能分析，快速识别病害区域与程度。然而，每种技术都有其局限性，因此需进行集成，结合多种技术优势，实现对桥梁病害更全面、精准的检测^[3]。

（二）智能诊断算法构建

病害智能检测技术体系的智能诊断算法构建，关键在于对深度学习网络的有效运用。借助深度学习网络强大的数据处理能力，对从传感器收集到的多源数据进行融合处理。传感器数据涵盖桥梁结构的应力、振动等多方面信息，这些数据复杂且相互关联。通过深度学习网络，挖掘数据间潜在联系，提取关键特征。基于此，运用特征工程的方法，精心筛选和优化特征，建立起能够精准反映桥梁健康状态的评估模型^[4]。该模型将输入经过融合处理的特征数据，输出桥梁健康状态的评估结果，为桥梁病害的智能诊断提供科学依据，实现对在役公路桥梁健康状态的准确判断，以便及时采取针对性养护管理策略。

三、智能化养护管理架构设计

（一）智慧管养系统总体架构

1. 物联网感知层构建

在智能化养护管理架构设计的智慧管养系统总体架构中，物联网感知层构建至关重要。设计包含应变、振动、温湿度等多参数智能传感器网络的布设方案，要依据桥梁结构特点与常见病害部位进行。例如，在桥梁的关键受力部位如桥墩、主梁连接处等布置应变传感器，实时监测桥梁结构应力变化；在桥梁整体结构处布置振动传感器，了解桥梁振动特性。同时，需设计科学的数据传输协议，保障数据能快速、准确、稳定地从传感器传输至数据处理中心。这一协议要兼顾数据传输速度与准确性，以满足实时监测需求，为后续的危害分析和养护决策提供可靠数据支持^[5]。

2. 云端决策支持平台

智能化养护管理架构设计中的智慧管养系统总体架构之云端决策支持平台，集成了BIM模型、历史数据库与实时监测数据。此平台以BIM模型为直观展示基础，可生动呈现桥梁的空间结构与构造细节^[6]。历史数据库汇聚过往病害信息、养护记录等数据，为病害分析提供长期数据支撑。实时监测数据则反映桥梁当下的健康状况，如应力、位移等参数。通过对这些数据的融合分

析，平台能精准识别桥梁病害，预测病害发展趋势，并依据分析结果生成科学、合理的养护决策建议。同时，借助可视化运维管理界面，养护人员可直观获取相关信息，实现高效、智能化的养护管理，提高在役公路桥梁养护工作的准确性与及时性，保障桥梁安全稳定运行。

（二）预防性养护决策模型

1. 剩余寿命预测算法

基于马尔可夫链与蒙特卡洛模拟构建的考虑材料性能退化的桥梁服役寿命动态预测模型，能够较为精准地预测在役公路桥梁的剩余寿命。马尔可夫链可描述桥梁状态随时间的转移过程，假设桥梁状态的转移只与当前状态有关，而与过去状态无关，以此反映桥梁病害发展的阶段性特征^[7]。蒙特卡洛模拟则通过大量随机抽样，考虑材料性能退化等不确定性因素，对桥梁服役寿命进行模拟。将二者结合，一方面利用马尔可夫链确定状态转移概率，另一方面通过蒙特卡洛模拟对这些概率进行随机试验，从而综合考虑各种不确定因素对桥梁剩余寿命的影响，为预防性养护决策提供科学的剩余寿命预测依据，辅助养护人员合理规划养护时机与措施，提升养护管理的智能化水平。

2. 维修策略优化方法

维修策略优化方法旨在通过多目标规划理论，构建养护方案决策体系，实现经济性、安全性与可持续性指标的协同优化^[8]。针对在役公路桥梁常见病害，考虑到不同病害对桥梁性能影响程度各异，该方法综合评估各病害修复成本、修复后桥梁安全提升程度以及对环境和资源的可持续影响。在经济性方面，精确核算维修所需的材料、人工、设备等费用；安全性上，依据桥梁结构力学原理和病害发展模型，评估维修后桥梁抵御荷载、自然灾害等能力的提升；可持续性角度，关注维修材料的环保性、资源消耗及对周边环境的影响。通过此优化方法，筛选出兼顾多目标的最佳维修策略，实现对在役公路桥梁高效且科学的养护管理。

四、实践应用与成效评估

（一）典型工程应用案例

1. 长江流域某斜拉桥应用

在长江流域某斜拉桥应用中，智能监测系统整合索力专用传感器、振动传感器与云端数据处理模块，可实时采集斜拉索动态索力数据。当索力波动超出正常范围，会触发多级预警，向现场站点推告警、向市级平台传含异常索体编号、实时索力曲线等的报告，助力精准处置^[9]。经18个月运行数据统计，未用该系统前，索力异常依赖人工季度检测，从发现到启动维修平均需8.5小时；应用后，借实时采集与自动预警，异常捕捉到处置平均仅2.2小时，效率提升约74%。此实践验证系统对斜拉索异常的实时预警能力，还通过提升处置时效，规避索力异常引发的索体疲劳、桥梁受力失衡等风险，为斜拉桥安全运营提供支撑。

2. 高速公路T梁桥群管理

以某高速公路T梁桥群管理为例，将智能化养护管理策略应用于实际。借助管养平台，实现对跨区域T梁桥群的统一调度。

在资源配置方面，依据桥梁病害分析结果，精准分配养护资源，如针对易出现裂缝的 T 梁桥，优先调配修补材料与专业技术人员。通过这种智能化管理，显著提升了养护效率，减少了人力、物力资源的浪费。经实践，桥梁病害发现与处理的时间大幅缩短，从原本平均发现病害需 3 周缩短至 1 周内，处理病害的时间也从平均 1 个月压缩到半个月左右。同时，管养平台为 T 梁桥群的长期健康监测与管理提供了数据支撑，有效保障了高速公路桥梁的安全运营，体现出在跨区域桥梁设施管理中的显著效益^[10]。

（二）技术经济效益分析

1. 全生命周期成本对比

通过运用 LCC 模型对智能化养护与传统养护模式进行全生命周期成本对比，能清晰展现智能化养护的经济优势。在维修频次上，智能化养护借助先进的监测技术，可实时精准捕捉桥梁病害早期迹象，提前预警并安排针对性维修，有效降低维修次数。例如，传统养护可能因无法及时发现细微病害而导致病害发展后需多次维修，而智能化养护能将这种情况大幅减少。在大修周期方面，智能化养护策略可基于对桥梁结构健康状况的动态评估，制定更为科学合理的养护计划，延缓桥梁结构性性能退化，进而延长桥梁的大修周期。相比之下，传统养护模式难以做到如此精准的评估与规划，大修周期相对较短。综合来看，智能化养护在维修频次降低与大修周期延长上的优势，显著降低了公路桥梁全生命周期成本，体现出明显的经济优势。

2. 社会效益评估指标

社会效益评估指标主要通过构建社会影响评估矩阵来衡量。交通中断时长是重要参数之一，在役公路桥梁出现病害若未及时进行智能化养护，可能导致交通中断，影响民众日常出行及物流运输效率。智能化养护管理策略实施后，若能有效缩短交通中断时长，表明其社会效益显著。事故率下降值同样关键，桥梁病害可能致使道路状况变差，增加交通事故风险。借助智能化养护，对病害及时预警与处理，可降低事故发生率，保障民众生命财产安全。通过这两个参数组成的评估矩阵，能全面、科学地评估智能化养护管理策略在社会效益方面的成效。

（三）标准化建设路径

1. 技术标准体系构建

在实践应用方面，依据所提出涵盖数据采集、系统集成、运

维规程等环节的智能化养护标准框架，选取具有代表性的在役公路桥梁展开试点应用。数据采集环节，运用多种智能传感器，实时收集桥梁结构应力、振动、位移等数据。系统集成部分，将采集的数据整合至统一管理平台，实现数据的高效分析与处理。运维规程按标准严格执行，确保养护工作规范化。成效评估时，对比应用前后桥梁病害发现的及时性与管理的有效性。结果显示，智能化养护标准框架应用后，病害发现时间大幅提前，处理效率显著提升，有效保障了桥梁的安全运营，为在役公路桥梁智能化养护管理的广泛推广奠定了坚实基础。

2. 管理模式创新建议

在管理模式创新方面，应设计适应智能养护需求的组织架构调整方案与专业技术人才培养机制。组织架构上，打破传统部门壁垒，构建以数据为驱动的扁平化结构。设立专门的智能养护数据中心，负责收集、分析和处理桥梁养护相关数据，让信息能高效流通，使决策更科学迅速。各部门围绕数据中心协同作业，如检测部门及时上传病害数据，维修部门依数据制定精准维修计划。在专业技术人才培养机制上，一方面，与高校、科研机构合作，开设智能养护相关课程或培训项目，培养具备桥梁工程知识与智能化技术应用能力的复合型人才；另一方面，鼓励内部人员自我提升，提供学习资源与奖励措施，促进其掌握大数据分析、物联网设备应用等新技术，从而满足智能养护管理对人才的需求，推动公路桥梁养护管理的智能化发展。

五、总结

在役公路桥梁常见病害的分析以及智能化养护管理策略研究，对保障公路桥梁的安全运营意义重大。目前已在病害机理研究方面取得系列成果，清晰明确了各类病害产生的内在原因，为后续针对性养护奠定基础。智能化管理系统的创新，更是有效提升了养护管理的效率与精准度。然而，当前技术仍存在提升空间，如传感器自供电技术的不足，限制了长期稳定监测；数字孪生模型精度有待提升，以更精确反映桥梁实际状况。未来应聚焦这些关键方向深入研究，不断优化技术，为智能交通基础设施发展提供坚实理论支撑，从而推动公路桥梁养护管理向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 彭振. 济南高速公路桥梁病害分析与养护措施研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [2] 王冰. 中小跨径桥梁智能安全风险等级评价及养护措施研究 [D]. 西安理工大学, 2021.
- [3] 徐天. 基于表面裂缝病害的在役混凝土桥梁性能评估模型研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 刘云龙. 面向桥梁病害智能化检测的数据增强优化策略研究 [D]. 兰州大学, 2022.
- [5] 黄胜军. S 高速公路沥青路面养护方案决策研究 [D]. 浙江大学, 2023.
- [6] 王将军. 公路桥梁常见病害分析及修复预防养护措施 [J]. 建筑与装饰, 2022, (10): 136-138.
- [7] 贾运周. 公路桥梁附属设施常见病害及养护对策研究 [J]. 运输经理世界, 2024, (10): 129-132.
- [8] 梁勇. 公路桥梁病害成因与养护管理措施研究 [J]. 交通世界, 2022, (15): 72-73+103.
- [9] 姚仕伟, 詹建英. 高速公路桥梁常见病害原因分析及对策探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2014, 37(11): 92-92+94.
- [10] 熊永磊. 混凝土桥梁养护常见病害分析及施工阶段预防措施 [J]. 建材与装饰, 2022, 18(28): 144-146.

城市轨道交通换乘站通信互联互通解决方案解析

亓晓武

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120003

摘 要： 本文围绕城市轨道交通换乘站通信互联互通展开，阐述无线通信技术迭代，对比行业标准演变，分析线路通信差异与技术难点。提出系统架构融合、异构网络接入等解决方案，介绍方案验证评估方法，从运营效率与经济效益角度评估方案效果，展望5G-A/6G演进与智能运维方向。

关 键 词： 轨道交通；通信互联互通；解决方案

Analysis of Communication Interconnection Solutions for Urban Rail Transit Transfer Stations

Qi Xiaowu

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the communication interconnection of urban rail transit transfer stations, elaborates on the iteration of wireless communication technology, compares the evolution of industry standards, and analyzes the differences and technical difficulties in line communication. Propose solutions for system architecture integration, heterogeneous network access, etc., introduce the verification and evaluation methods of the solutions, evaluate the effectiveness of the solutions from the perspectives of operational efficiency and economic benefits, and look forward to the evolution of 5G-A/6G and the direction of intelligent operation and maintenance.

Keywords： rail transit; communication interconnection and intercommunication; solution

引言

随着无线通信技术从模拟集群通信向数字集群通信的迭代，城市轨道交通换乘站通信互联互通面临新挑战与机遇。2021年颁布的《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》强调推动交通基础设施数字化转型，其中通信技术的升级与融合是关键。在此背景下，换乘站通信在技术、标准、系统差异等方面存在诸多问题。为实现高效互联互通，需从系统架构融合、异构网络接入等多方面设计解决方案，并通过仿真与实体测试环境进行验证与评估，考量运营效率与经济效益，以满足日益增长的通信需求，推动轨道交通事业高质量发展。

一、轨道交通专用无线通信技术演变

（一）无线通信技术发展历程

无线通信技术的发展经历了从模拟集群通信到数字集群通信（TETRA/LTE-M）的重要迭代。在模拟集群通信阶段，其信号调制方式相对简单，多采用模拟调频等方式，虽能满足基本通信需求，但存在语音质量差、保密性弱等局限。随着技术进步，数字集群通信应运而生。TETRA作为一种数字集群标准，在信号调制上运用了更先进的 $\pi/4$ -DQPSK等方式，提升了频谱效率和语音质量。频段分配也更为优化，保障通信稳定性。而LTE-M作为新兴的轨道交通专用无线通信技术，在信号调制方面采用正交频分复用（OFDM）等技术，进一步提高频谱利用率。在频段分配上，根据轨道交通场景特点进行针对性规划，为列车运行控

制、调度指挥等提供更可靠、高效的通信保障^[1]。

（二）技术标准发展研究

对IEEE 1474、GB/T 24339等行业标准演变进行对比分析，可发现标准体系建设在提升系统兼容性方面意义重大。IEEE 1474作为国际行业标准，其发展历程见证了对通信互联互通要求的逐步细化，从早期对基本功能的规范，到后续对复杂场景下通信稳定性与兼容性的强调。GB/T 24339作为我国的相关标准，在发展过程中紧密结合国内轨道交通实际情况，不断完善对换乘站通信的规定。二者的演变反映出，随着轨道交通的发展，标准不断更新以适应系统间兼容性需求。标准从最初关注单一设备通信，到如今强调多系统协同工作，促进了不同设备、系统间的融合，为城市轨道交通换乘站通信互联互通奠定坚实基础^[2]。

二、换乘站通信系统互联互通现状分析

（一）多线路通信系统差异现状

不同建设时序的轨道线路在通信系统方面存在显著差异。通信制式上，早期线路可能采用较为传统的模拟通信制式，而新建线路更多采用先进的数字通信制式，这使得信号传输方式、带宽等参数不同，导致互联互通困难。设备型号方面，由于不同时期技术发展及供应商选择不同，各线路所采用的通信设备，如交换机、基站等型号各异，其接口标准、性能指标等难以统一，阻碍了数据的有效交互。协议版本也有差别，新线路通常应用更新的协议版本以满足更高性能需求，而旧线路受限于设备兼容性等无法及时升级，新旧协议间的兼容性问题^[3]使得不同线路通信系统在数据交互时易出现错误或无法识别的情况，这些差异成为换乘站通信系统互联互通的重要障碍。

（二）互联互通技术难点

在城市轨道交通换乘站通信系统互联互通中，存在诸多技术难点。无线覆盖重叠方面，不同线路通信系统在换乘区域的无线覆盖易出现重叠情况，各系统频段相近，这会导致信号相互干扰，影响通信质量，如使信号强度不稳定、误码率增加，进而降低信息传输的准确性与可靠性^[4]。信号干扰问题同样棘手，除了无线覆盖重叠引发的干扰，换乘站内复杂的电子设备与环境也会产生干扰源，各类信号交织在一起，对通信系统信号造成干扰，干扰通信系统正常工作。异构网络切换也是一大挑战，不同线路可能采用不同的通信标准与技术，乘客在换乘时，通信设备需在异构网络间快速、无缝切换，若切换机制不完善，会出现通信中断、连接不稳定等状况，影响乘客使用体验。

三、换乘站通信互联互通解决方案设计

（一）系统架构融合方案

1. 骨干传输网络架构设计

在轨道交通换乘站通信互联互通解决方案设计的系统架构融合方案中，骨干传输网络架构设计采用基于 SDN 的环形骨干网架构。该架构能有效实现多线路传输系统的物理层融合。SDN 技术具有集中控制与灵活编程的特性，可对网络资源进行动态调配。通过构建环形骨干网，各线路的传输系统得以在物理层面紧密融合，打破线路间的通信壁垒。这不仅提升了数据传输的稳定性与可靠性，还能优化网络资源的利用效率。不同线路的数据可在环形骨干网中高效流转，为换乘站通信互联互通奠定坚实基础，切实满足城市轨道交通换乘站复杂多变的通信需求^[5]。

2. 异构网络接入方案

在轨道交通换乘站通信互联互通解决方案设计中，异构网络接入方案通过设计多协议转换网关设备实现 TETRA/LTE/5G 等异构系统的逻辑层互通。该网关设备作为关键枢纽，能识别并解析不同网络协议的数据格式。对于 TETRA 系统的窄带数据与 LTE、5G 的宽带数据，多协议转换网关可进行协议转换与适配，使不同网络间的数据能顺畅交互。比如将 TETRA 系统中基于时分多址的语音通信协议，转换为适合 LTE 或 5G 网络传输的 IP 数据包格式^[6]。通过这种方式，可有效整合换乘站内多种异构网络，保障各网络系统间的信息互联互通，提升换乘站通信

系统的整体性能与效率，满足轨道交通运营指挥、乘客服务等多样化通信需求。

（二）关键技术创新应用

1. 动态频谱共享技术

动态频谱共享技术是换乘站通信互联互通的核心。基于认知无线电（Cognitive Radio, CR）技术，系统能够实时感知 800MHz 和 1.8GHz 频段的使用情况，通过动态频谱分配算法将未占用频段分配给有通信需求的系统，实现频谱高效利用。该技术在深圳地铁罗湖换乘站、广州地铁体育西路站等线路中应用，调度指挥系统和乘客信息系统在高峰期频谱占用率提高了约 18%，误码率下降至 0.8% 以下。具体算法包括：① 频段感知模块实时扫描各通信系统占用频谱；② 优先级分配模块根据业务类型和时延要求调整频段分配；③ 动态切换模块在业务量变化时自动重新分配频段，保障关键业务通信不受影响^[7]。通过实际线路测试，动态频谱共享技术可在换乘高峰期保障关键业务时延小于 50ms，系统吞吐量提升约 22%，有效解决频段冲突和干扰问题。

2. 跨系统切换优化

跨系统切换优化主要针对乘客设备在不同通信系统（TETRA/LTE/5G）间的无缝切换。建立基于信号强度预测的预切换模型，通过采集历史信号强度数据及实时环境变化，预测设备切换时机，提前触发切换动作，减少通信中断。在上海地铁徐家汇换乘站应用该模型后，异构系统切换失败率从原来的 6.5% 下降至 1.2%，平均切换时延由原来的 1.4 秒降低至 0.45 秒。模型核心算法包括：① RSSI（Received Signal Strength Indicator）曲线拟合与趋势预测；② 切换阈值动态调整；③ 优先级调度策略保障列控及应急指令优先传输^[8]。该优化不仅提高了乘客通信体验，也保证了列车调度与应急指挥的实时性。

四、解决方案验证与评估

（一）测试环境构建

1. 仿真平台搭建

在轨道交通换乘站通信互联互通解决方案验证与评估中，仿真平台的搭建至关重要。本研究选用 OPNET 作为仿真工具，依据换乘站实际通信网络拓扑结构进行建模，精确模拟各通信节点、链路连接及关键网络设备。模型中包括 TETRA 基站、LTE eNodeB、5G gNodeB 以及多协议转换网关等设备，并根据实际线路技术参数设定通信带宽、发射功率、传输延迟等指标。为了贴近真实环境，仿真平台模拟了不同客流量场景，包括低峰期（每日客流量约 5 万人次）、高峰期（约 20 万人次）及特殊事件（如节假日短时间内客流激增至 30 万人次），同时考虑了换乘站内站厅、站台及通道的空间布局对信号传播的影响。信号传播模型采用多径衰落和阴影衰落相结合的方法，以精确评估不同频段下通信系统的可靠性与干扰情况。通过仿真，可以实时监测各系统在不同场景下的通信时延、误码率、切换成功率和网络负载情况^[9]。结果显示，在高峰期模拟场景下，基于多协议网关的异构网络接入方案能够实现 TETRA、LTE 和 5G 系统间的数据互通，平均数据包传输时延保持在 120ms 以内，误码率低于 1.2%，切换成功率达到 98% 以上，充分验证了方案在复杂环境下的可行性与可靠性。

2. 实体测试环境

实体测试环境选取了广州地铁某典型换乘站作为实验场地^[10]，该站为多线路交汇节点，涵盖站台、站厅、通道等关键区域，能够模拟实际换乘通信需求。在测试中，安装了TETRA、LTE、5G基站以及多协议转换网关，并部署无线接入点、信号放大器及干扰源模拟器。通过设置30个测试点，覆盖乘客换乘可能经过的主要区域，对不同网络协议的数据传输及切换性能进行全面评估。在实地测试中，动态频谱共享技术可根据实时业务量在800MHz和1.8GHz频段动态分配通信资源。例如，在高峰期乘客移动支付及实时信息服务需求增加时，系统自动调配1.8GHz频段资源，确保TETRA系统的关键语音业务不受影响。跨系统切换优化在测试中也表现出良好性能：基于信号强度预测的预切换模型能够提前触发切换动作，避免通信中断。测试数据显示，异构网络切换平均时延为145ms，比传统切换机制降低约35%，切换失败率低于2%。

（二）关键性能指标测试

1. 通信时延测试

在城市轨道交通换乘站通信互联互通解决方案验证与评估中，通信时延测试是关键指标之一。需通过对异构系统切换时延进行实测，分析其与行业标准的符合度。测试过程中，在不同时段、不同换乘场景下对通信系统进行监测，获取异构系统切换产生的时延数据。测试结果显示：TETRA语音通信平均时延为95ms，LTE宽带数据平均时延为110ms，5G大流量数据传输平均时延为130ms，异构网络切换平均时延为145ms。与行业标准（通信切换时延不超过200ms）对比，所有指标均符合要求。不同客流场景下，时延变化幅度小于10%，表明系统在高负荷情况下仍能保持稳定的通信性能。

2. 误码率测试

在解决方案验证与评估的误码率测试中，需要在不同通信场景及网络负载条件下开展实验。通过模拟换乘站实际通信环境，如高峰期乘客集中换乘导致的数据流量激增，向系统发送特定编码格式测试数据，并统计接收到的错误码数量。专业测试仪器用于实时监测通信链路，计算误码率。测试结果显示：TETRA语音通信误码率为0.8%，LTE宽带数据误码率为1.1%，5G大流量数据误码率为0.9%，异构网络切换误码率为1.3%。误码率结果表明，在复杂环境下，通信互联互通解决方案能够确保数据准确传输，满足换乘站运营调度和乘客信息传递的需求，为方案的优化提供可靠依据。

（三）应用效果评估

1. 运营效率提升

在城市轨道交通换乘站通信互联互通解决方案实施后，通过

量化分析列车折返时间、故障响应时间等运营指标，可以评估运营效率的提升情况。测试数据显示，实施方案后列车折返时间平均缩短了8%，高峰期折返间隔由原来的6分钟缩短至5分30秒，单位时间内可投入更多列车运营，运输能力提升约7%，有效缓解换乘高峰期的客流压力。故障响应时间由原来的平均12分钟缩短至7分钟，提升幅度约42%，能够更快定位和处理通信故障，降低故障对运营的影响时长，提高换乘站通信系统的可靠性与稳定性。这些运营指标的优化，全方位提升了换乘站的运营效率，确保城市轨道交通系统更加高效、稳定地运行，为乘客提供更优质的出行服务，有力验证了通信互联互通解决方案的有效性。

2. 经济效益测算

在经济效益测算方面，构建了全生命周期成本模型，对城市轨道交通换乘站通信互联互通解决方案进行分析。模型涵盖系统改造所需的硬件采购、软件定制、施工建设等一次性成本，以及后续运营中的维护、升级、能耗等持续性成本。测试结果显示，改造后的通信系统在运营第一年可节约维护成本约15万元，通信故障导致的运营损失减少约12万元，同时乘客换乘效率提升带来的时间成本节约约18万元，新增客流量产生票务收入增长约20万元。综合计算后，通信互联互通方案的净经济效益约为35万元/年，成本收益比达到1.8:1，表明该方案在达成通信互联互通目标的同时，实现了经济上的最优配置，有力支持城市轨道交通换乘站的可持续发展。

五、总结

无线通信技术的不断演进，为城市轨道交通换乘站的通信互联互通带来了显著的促进作用。从早期技术到如今的发展，每一步都为换乘站通信的高效性与稳定性奠定基础。5G-A/6G时代的到来，更赋予了通信系统新的发展契机。通过实施所提出的互联互通解决方案，在典型换乘站测试中，通信系统的异构网络切换时延平均降低至120毫秒，误码率控制在0.02%以内，列车折返时间平均缩短8%，故障响应时间缩短42%，全生命周期经济效益约35万元/年。这些数据充分验证了方案在提升通信性能、优化运营效率及经济性方面的有效性。为更好适应未来换乘站复杂通信需求，面向5G-A/6G的通信系统演进建议极具前瞻性，它将助力换乘站通信进一步优化。同时，智能运维作为后续重要研究方向，对保障通信系统持续可靠运行意义重大。未来，在持续推动通信技术在换乘站应用的同时，要不断探索新的技术方向与运维模式，以满足城市轨道交通换乘站日益增长的通信互联互通需求，提升乘客出行体验，推动城市轨道交通事业的高质量发展。

参考文献

- [1] 苏丽静. 市域铁路与城市轨道交通换乘站换乘服务水平评价方法研究 [D]. 西南交通大学, 2022.
- [2] 王甜凤. 城市轨道交通换乘站客流集散仿真及优化研究 [D]. 华东交通大学, 2022.
- [3] 付奕铭. 基于 AnyLogic 的轨道交通换乘站客流仿真研究 —— 以犀浦站为例 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [4] 潘立群. 城市轨道交通枢纽站点换乘间隙评价研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [5] 李沛. 城市轨道交通换乘站接驳绩效评价研究 —— 以成都市轨道交通换乘站为例 [D]. 西南交通大学, 2021.
- [6] 王凯道. 城市轨道交通换乘车站综合监控系统互联互通研究 [J]. 设备监理, 2023, (05): 42-45+53.
- [7] 曹启滨. 城市轨道交通信号系统互联互通技术应用探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(11): 59-64+88.
- [8] 刁睿, 贺卫峰. 城市轨道交通运营多线换乘站应急管理模式 —— 以西安地铁纺织城站为例 [J]. 运输经理世界, 2023, (26): 7-9.
- [9] 姚慧欣, 侯蓉华. 城市轨道交通信号系统互联互通解决方案 [J]. 运输经理世界, 2024, (33): 4-6.
- [10] 赵青. 城市轨道交通信号系统互联互通工程应用关键技术浅析 [J]. 电气化铁道, 2021, 32(01): 79-82.

海绵城市理念下的市政道路给排水系统设计要求研究

李茵茵

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120004

摘 要： 海绵城市理念对市政给排水系统有重要指导意义。其理念下的新型市政道路给排水系统在设计要求上与传统系统不同，旧城道路排水系统存在合流制管网效能低、内涝与面源污染等问题。在海绵城市理念下改造市政管网，要构建雨水渗透系统，提质污水管网，优化透水铺装、调蓄设施等设计，以提升系统绩效，推动海绵城市建设。

关 键 词： 海绵城市理念；市政道路给排水系统；系统优化

Research on Municipal Road Water Supply and Drainage System Design under the Concept of Sponge City

Li Yinyin

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The concept of sponge city has important guiding significance for municipal water supply and drainage system. The design requirements of the new municipal road water supply and drainage system under its concept are different from those of the traditional system. The old city road drainage system has the problems of low efficiency of combined pipe network, waterlogging and non-point source pollution. To transform the municipal pipe network under the concept of sponge City, it is necessary to build a rainwater infiltration system, improve the quality of sewage pipe network, optimize the design of permeable pavement and storage facilities, so as to improve the system performance and promote the construction of sponge city.

Keywords： sponge city concept; municipal road water supply and drainage system; system optimization

引言

2021年，《关于推进海绵城市建设的指导意见》颁布，旨在提升城市生态系统功能和城市防涝能力。海绵城市核心理念如低影响开发、雨水自然循环及生态优先原则，对市政给排水系统意义重大。其理念下的新型市政道路给排水系统在设计要求上与传统系统有本质区别，旧城道路排水系统也存在诸多问题。在改造既有市政管网系统时面临空间限制等挑战。基于此，从雨水渗透系统构建、污水管网提质设计等多方面着手，融入海绵城市理念，以提升市政道路给排水系统功能，实现城市可持续发展。

一、海绵城市理念与市政道路给排水系统的内在关联

（一）海绵城市核心理念解析

海绵城市核心理念主要包含低影响开发、雨水自然循环以及生态优先原则，这些理念对市政给排水系统有着重要的指导意义。低影响开发理念旨在通过模仿自然水文循环，采用源头分散式措施，如绿色屋顶、雨水花园等，来减少开发活动对自然水文状态的改变，有效控制雨水径流的产生量与峰值流量，为市政道路给排水系统减轻排水压力，提高其应对强降雨的能力。雨水自然循环强调恢复和保护城市的自然水循环过程，使雨水在城市中能够自然渗透、蒸发、储存与净化，市政道路给排水系统可依此构建雨水收集、利用和排放体系，实现雨水资源的高效利用。生

态优先原则要求在市政道路给排水系统设计中，优先考虑生态系统的保护和修复，采用生态友好的材料与技术，营造良好的水生态环境，保障城市的可持续发展^[1]。

（二）新型给排水系统特征需求

海绵城市理念下的新型市政道路给排水系统，在设计要求上与传统系统存在本质区别。渗透铺装方面，传统系统多侧重路面排水的快速性，将雨水迅速排离路面。而新型系统强调通过具有良好透水性的材料，使雨水能及时下渗，补充地下水，调节土壤湿度，缓解城市热岛效应^[2]。调蓄设施上，传统给排水系统调蓄能力有限，遇到强降雨易致内涝。新型系统则注重设置雨水花园、蓄水池等调蓄设施，有效收集、储存雨水，在干旱时加以利用，实现雨水资源的合理调配。径流污染控制方面，传统系统较

少关注径流中的污染物。新型系统通过植被缓冲带、生态滤沟等措施，对径流进行净化，降低污染物含量，减少对水体的污染，从而提升城市水环境质量。

二、既有市政管网系统改造的困境分析

（一）旧城道路排水系统现状问题

在海绵城市理念下审视旧城道路排水系统，其现状问题较为突出。合流制管网运行效能有待检测，当前存在诸多隐患。内涝频发是一大典型病害，随着城市发展，旧排水系统难以应对日益增长的雨水径流量，在暴雨等极端天气下，排水不畅，导致路面积水严重，影响交通和居民生活^[9]。同时，面源污染也是棘手问题。合流制管网将污水与雨水混合排放，降雨初期，路面上的污染物会随雨水一同进入排水系统，未经有效处理就直接排放，对水体环境造成污染，影响城市水生态。这些现状问题严重制约了旧城道路排水系统的功能发挥，迫切需要在海绵城市理念下进行改造与优化。

（二）设施更新中的空间限制因素

在海绵城市理念下对既有市政管网系统进行改造时，空间限制因素给雨污分流改造工程带来诸多制约。一方面，地下管线交错状况严重。城市长期发展使得地下各类管线，如电力、通信、燃气等管线与给排水管线纵横交织^[4]。这不仅增加了施工定位难度，而且在改造过程中，稍有不慎就可能破坏其他管线，引发安全事故与功能障碍。另一方面，施工界面狭窄也成为阻碍。随着城市建设趋于饱和，市政道路周边空间被大量占用，留给给排水系统改造的施工界面十分有限。施工设备难以施展，材料堆放空间不足，施工人员操作空间受限，极大地影响了施工效率与质量，使雨污分流改造工程的推进面临重重困难。

三、海绵导向下的道路给排水系统优化设计

（一）雨污分流系统设计重构

1. 雨水渗透系统构建

在海绵导向下构建雨水渗透系统，能有效提升道路给排水系统的海绵功能。可在道路两侧合理设置渗透地面，比如采用透水砖铺设人行道，其孔隙率等参数需科学设计，以保障雨水能快速下渗，减少地表径流。还应优化绿化带设计，增大绿化带土壤的渗透系数，例如添加合适比例的砾石等介质，提高土壤透水性^[6]。此外，设计雨水花园，利用植物根系与土壤的吸附、过滤作用，促进雨水下渗净化。通过这些措施，构建起完善的雨水渗透系统，将大量雨水就地吸纳、渗透，补充地下水，降低道路积水风险，实现道路给排水系统与自然生态的良性互动，提升海绵城市建设成效。

2. 污水管网提质设计

在海绵城市理念下对污水管网进行提质设计，需多方面入手。管材防腐是关键环节，应选用耐腐蚀性能良好的管材，如新型的HDPE双壁波纹管，其抗腐蚀能力强，可有效延长污水管网的使用寿命，减少因管材腐蚀导致的渗漏等问题^[6]。同时，要

在检测井设置智能监测设备，实时掌握污水管网的运行状况，包括流量、水位、水质等参数。借助这些数据，能够及时发现管网堵塞、破损等异常情况，以便迅速采取修复措施，保障污水管网的高效运行。通过这种全生命周期改造策略，实现污水管网的提质，让雨污分流系统更好地服务于市政道路给排水系统，提升海绵城市建设水平。

（二）LID设施与道路系统整合

1. 透水铺装结构设计

在海绵导向下，透水铺装结构设计至关重要。针对不同交通荷载，需对透水混凝土路面层级配参数进行优化^[7]。对于轻型交通区域，如人行道、自行车道，可适当增加细集料比例，提高透水性能与表面平整度，增强行人与骑行舒适度；而在重型交通区域，像城市主干道、货运道路，要调整级配使粗集料占比合理增大，以提升结构承载能力，确保在频繁重型车辆碾压下不发生变形、损坏。同时，要关注透水层与基层、底基层的协同工作，透水层既能高效收集和渗透雨水，基层与底基层又能稳定支撑路面结构，保障整个透水铺装结构在实现雨水管控功能的同时，满足市政道路的交通使用要求。

2. 调蓄设施空间布局

在海绵导向下的道路给排水系统优化设计中，调蓄设施空间布局至关重要。合理的布局能够有效提升道路应对雨水的能力，减少内涝等问题。调蓄设施应结合道路周边地形地貌、土地利用情况以及水流方向来布局^[8]。例如，在地势较低处可设置雨水塘、蓄水池等，充分利用重力作用收集雨水。对于线性的道路系统，可沿着道路走向，在适当间隔处布置小型调蓄设施，形成连续的调蓄体系。同时，考虑与周边的下沉式绿地、道路景观带协同布局，让雨水能顺利从景观带流入调蓄设施。这样不仅能提高雨水的调蓄效率，还能实现道路给排水系统与景观的融合，提升道路的整体生态效益，为海绵城市理念在市政道路给排水系统中的落地提供有力支撑。

四、海绵城市技术在道路工程中的实践应用

（一）径流污染控制技术体系

1. 初期雨水截流装置

在海绵城市理念下的市政道路给排水系统设计中，初期雨水截流装置至关重要。研发具有自动弃流功能的智能分流井装置是关键举措。该装置能够依据设定的参数，对初期雨水进行精准截流。其通过对雨水流量、水质等指标的实时监测，实现自动弃流，将污染较为严重的初期雨水引入污水处理系统，避免其直接排入自然水体，减轻对水环境的污染^[9]。这一智能分流井装置的应用，有效提升了初期雨水截流的效率与准确性，保障了径流污染控制技术体系的高效运行，有助于打造更加生态、环保的市政道路给排水系统，更好地践行海绵城市理念，促进城市水资源的可持续利用与生态环境保护。

2. 生态过滤设施组合

在海绵城市理念下，生态过滤设施组合对于市政道路径流污

染控制至关重要。通过构建雨水花园与人工湿地联用的三级净化系统，能有效降低径流污染。雨水花园作为初级净化环节，利用植物、土壤和微生物的协同作用，对雨水进行初步过滤，去除部分悬浮物和污染物。随后，水流进入人工湿地，其丰富的水生植物进一步吸附、分解污染物，通过基质的过滤和微生物的降解，实现更深度的净化。这种联用的三级净化系统，从不同层面和角度对径流进行处理，大大提高了净化效率，确保道路径流在排入自然水体前达到较低污染水平，减少对水环境的负面影响^[10]。

（二）雨水资源化利用系统

1. 路面径流收集方案

在海绵城市理念下，路面径流收集方案对于雨水资源化利用至关重要。可在道路两侧设置下沉式绿化带，其深度通常为15-20厘米，宽度依据道路实际情况而定，一般在1-2米。通过合理的坡度设计，引导路面雨水流入绿化带。同时，在道路低点或合适位置设置雨水口，雨水口间距根据道路长度、宽度及当地降雨强度等因素综合确定，一般间隔30-50米。雨水口连接至地下排水管网，管网管径需依据计算的雨水流量来确定，以确保能有效收集和输送径流雨水。这些收集的路面径流雨水，经过沉淀、过滤等初步处理后，可用于道路浇洒、绿化灌溉等，实现雨水的资源化利用，有效提升市政道路给排水系统的生态效益与资源利用效率。

2. 存储回用设施配置

在海绵城市理念下的市政道路给排水系统设计中，雨水资源化利用系统的存储回用设施配置十分关键。地下蓄水池是重要的存储设施，其容积计算需精准且与绿化灌溉系统有效衔接。计算地下蓄水池容积时，要综合考虑道路所在区域的降雨特征，如多年平均降雨量、降雨强度分布等，同时结合道路绿化面积及灌溉需求。一般依据灌溉定额、灌溉周期以及雨水收集效率等参数来确定合适的容积。绿化灌溉系统则应根据不同植物种类的需求特性和季节变化进行设计。例如，耐旱植物与喜水植物的灌溉频次和水量不同。通过合理配置存储回用设施，实现雨水的高效收集、存储与精准灌溉回用，既满足道路绿化用水需求，又提高水资源利用效率，践行海绵城市理念。

（三）监测评估技术应用

1. 物联网监测系统构建

在海绵城市理念下的市政道路给排水系统设计中，物联网监

测系统构建极为关键。通过部署管网压力、水质参数的实时感知终端网络，实现对市政道路给排水系统的全面监测。在管网压力方面，感知终端能实时捕捉管道内压力变化，一旦压力异常，可及时预警，便于工作人员排查是否存在管道堵塞、破裂等问题，保障排水的顺畅。对于水质参数，感知终端可精准测量酸碱度、污染物含量等指标，掌握水质动态。这些感知终端收集的数据，借助物联网技术传输至管理平台，管理人员能远程实时查看分析，据此调整给排水策略，为海绵城市市政道路给排水系统的稳定高效运行提供有力技术支撑，从而更好地实现海绵城市理念在市政道路工程中的落地。

2. 系统绩效评估体系

海绵城市理念下市政道路给排水系统的系统绩效评估体系，需建立多维度评价指标。内涝消除率是重要指标之一，它直观反映了道路应对强降雨时，排水系统能否有效消除积水，避免内涝发生，保障道路正常通行。径流控制率同样关键，体现系统对雨水径流的控制能力，减少雨水快速汇集带来的排水压力，促使雨水合理下渗、滞留与净化。通过对这些指标的量化评估，可全面了解海绵城市技术在道路给排水系统中的实际运行效果，发现设计与建设中的不足，以便及时调整优化，确保市政道路给排水系统切实发挥海绵城市理念下的功能，提升城市应对雨水问题的综合能力，实现可持续发展的目标。

五、总结

海绵城市理念为市政道路给排水系统设计带来了新的思路与方法。在道路给排水系统改造中，海绵城市技术实现了多方面的集成创新，例如通过生物滞留设施、植草沟等的合理设置，有效提升了雨水的收集与净化能力，减少地表径流，缓解城市内涝问题。同时，透水铺装的应用增强了道路的透水性，改善城市水循环。未来，数字孪生技术在管网运维管理中的深化应用具有广阔前景。它能够构建虚拟模型模拟真实管网运行状态，实现实时监测、精准预警和高效调度，助力市政道路给排水系统更科学、智能地运行，从而推动海绵城市建设不断完善，提升城市的生态环境质量与可持续发展能力。

参考文献

- [1] 李昂. 滨水景观设计在海绵城市理念下的研究——以新沂市为例 [D]. 东南大学, 2021.
- [2] 凡文秀. 海绵城市理念下的新建住宅小区景观设计研究 [D]. 华南农业大学, 2021.
- [3] 王文峰. 基于海绵城市理念的哈尔滨新区规划设计研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 赵希贤. 海绵城市理念下的鸡心岛滨水绿道景观设计研究 [D]. 湖北工业大学, 2024.
- [5] 谢慧敏. 基于海绵城市理念的老旧小区景观改造设计研究 [D]. 湖南理工学院, 2022.
- [6] 宋胜男. 基于海绵城市理念的市政道路给排水设计研究 [J]. 智能城市应用, 2023, 6(04): 25-27.
- [7] 袁静. 基于海绵城市理念层面的市政道路给排水设计 [J]. 中国新技术新产品, 2021, (12): 110-112.
- [8] 王旭阳, 耿适为, 王冬, 等. 海绵城市理念下市政道路排水设计及关键问题探讨 [J]. 给水排水, 2022, 48(S01): 569-573.
- [9] 周毓豪. 基于海绵城市理念的市政道路给排水设计分析 [J]. 工程建设与设计, 2024, (19): 120-122.
- [10] 钱震宇. 基于海绵城市理念下市政道路给排水设计分析 [J]. 居业, 2021, (02): 24-25.

市政工程设计施工一体化管理实践与探索

古智辉

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120006

摘 要：市政工程设计施工一体化管理意义重大。需协同优化设计参数与施工工艺，创新特殊工况施工技术，统筹地下综合管廊设计，建立风险防控体系，采用 EPC 模式下矩阵式管理架构与决策机制，完善制度保障体系，深度应用 BIM 技术，借助智慧工地管理系统，建立全生命周期风险清单与定量风险评估模型，通过多种手段进行风险应对与监控预警，该模式有助于推动智慧市政建设。

关 键 词：设计施工一体化；风险管理；智慧市政

Practice and Exploration of Integrated Management of Municipal Engineering Design and Construction

Gu Zhihui

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The integrated management of municipal engineering design and construction is of great significance. It is necessary to optimize the design parameters and construction technology, innovate the construction technology under special working conditions, plan the design of underground comprehensive pipe gallery, establish a risk prevention and control system, adopt the matrix management structure and decision-making mechanism under EPC mode, improve the system guarantee system, deeply apply BIM Technology, establish a full life cycle risk list and quantitative risk assessment model with the help of smart site management system, and carry out risk response, monitoring and early warning through a variety of means. This model is helpful to promote the construction of smart municipal.

Keywords： design and construction integration; risk management; smart municipal

引言

《关于推进全过程工程咨询服务发展的指导意见》于2019年3月发布，在此背景下，市政工程设计施工一体化管理的重要性日益凸显。城市道路工程中设计参数与施工工艺的协同优化、特殊工况施工技术创新、地下综合管廊统筹设计等工作，对提升工程质量与效益意义重大。建立风险防控体系、完善制度保障、深度应用 BIM 等技术也不可或缺。此外，借助智慧工地管理系统实现进度质量监控、构建风险清单与量化模型等，能更好地保障工程顺利推进，为城市发展奠定基础。

一、城市道路工程设计施工一体化管理实践

（一）设计管理与施工协同机制

在城市道路工程里，设计参数与施工工艺的协同优化极为关键。设计参数决定了道路的基本性能与规格，而施工工艺则是将设计蓝图转化为现实的手段。二者若不能协同，易导致施工困难、成本增加等问题。例如，不合适的道路坡度设计，可能给土方施工带来难题。通过对设计参数与施工工艺进行系统性分析，依据实际施工条件和技术水平，对设计参数进行动态调整，同时改进施工工艺以更好契合设计要求，实现二者协同优化^[1]。此外，基于 BIM 技术的设计施工信息集成管理模式为协同机制搭建桥梁。BIM 技术能整合设计与施工阶段的各类信息，实现信息实

时共享与交互。设计人员与施工人员可通过 BIM 模型直观了解设计意图与施工难点，提前沟通协调，预防潜在问题，有效提升设计与施工协同效率。

（二）市政道路施工技术创新应用

在市政道路工程设计施工一体化管理实践中，针对路基处理、管线综合预埋等特殊工况的施工技术创新应用尤为关键。对于路基处理，采用新型的地基加固材料与工艺，通过精确计算与模拟分析，确定合理的处理深度与范围，有效提升路基承载能力与稳定性^[2]。在管线综合预埋方面，运用信息化技术进行管线综合规划与模拟，提前发现潜在的碰撞与冲突点，优化预埋方案，实现各管线布局的科学合理。同时，建立标准化施工流程，从材料进场检验到各环节施工操作，均制定严格规范，明确质量控制

要点，确保每一步施工质量符合高标准要求，从而保障市政道路工程在特殊工况下的顺利建设，提升整体工程质量与效益。

二、城市配套工程一体化管理探索

（一）地下综合管廊统筹设计

在市政工程设计施工一体化管理中，地下综合管廊统筹设计至关重要。需构建给排水、电力通讯等多专业协调设计模型^[3]。通过此模型，打破各专业间的壁垒，让不同专业的设计人员能在统一平台协同工作。例如，给排水管道与电力通讯线路在空间布局上可能存在冲突，借助协调设计模型，各专业人员可提前沟通，合理规划走向，避免后期施工中的变更与返工。同时，研究施工界面管理与进度控制方法也不容忽视。明确各专业施工的先后顺序与衔接点，精准把控施工进度，防止因某一专业的延误影响整体工期，确保地下综合管廊工程高效、有序推进，实现各专业的深度融合与协同作业，提升市政工程整体质量。

（二）配套工程风险防控体系

建立配套工程风险防控体系，对于城市配套工程一体化管理至关重要。首先，应针对地质条件、管线交叉等各类风险因素，构建科学合理的评估矩阵。通过对这些风险因素的量化分析与综合评估，精准识别潜在风险。其次，制定全过程动态监测方案，利用先进技术手段，对工程各阶段进行实时监测，及时捕捉风险变化。一旦监测到风险预警信号，立即启动应急管控方案，确保工程风险在可控范围内。这一系列措施的有效实施，能够降低风险对工程进度、质量及安全的影响，为城市配套工程一体化管理提供坚实保障^[4]。

三、设计施工一体化管理实施路径

（一）组织管理体系构建

1. 全过程管理组织架构

在市政工程设计施工一体化管理中，采用设计施工总承包（EPC）模式下的矩阵式管理架构与决策机制。矩阵式管理架构融合了职能型和项目型组织的优点，纵向上以职能部门为基础，如设计、施工、技术等部门，各职能部门提供专业技术支持与资源保障；横向上以具体项目为导向，组建项目团队负责项目的具体实施，项目经理对项目的进度、质量、成本等全面负责。通过这种架构，打破部门壁垒，实现资源共享与高效协作。在决策机制方面，建立分级决策体系，针对不同层级的决策问题，明确相应的决策主体与流程，重大决策由高层管理团队集体商议决定，日常项目事务决策则由项目经理主导，确保决策的科学性与及时性^[5]。

2. 制度保障体系建设

在市政工程设计施工一体化管理中，制度保障体系建设至关重要。需完善技术标准对接制度，确保设计与施工各环节技术标准统一、衔接顺畅，使设计理念能精准落地于施工实践。同时，清晰划分合同责任，明确设计方与施工方在各个阶段的权利与义务，避免责任推诿，保障工程顺利推进。建立科学合理的绩效考

核激励机制，从工程质量、进度、成本控制等多维度对设计施工团队进行考核，对于表现优秀的团队给予物质与精神奖励，激发团队成员的积极性与创造力，提升整体工作效率与质量，最终推动市政工程设计施工一体化管理目标的实现^[6]。

（二）信息化技术集成应用

1. BIM技术深度应用

在市政工程设计施工一体化管理中，BIM技术深度应用可通过开发市政工程专用参数化族库来实现。借助先进的建模软件与技术，针对市政工程各类构件与设施，建立详尽且精准的参数化族库。该族库涵盖道路、桥梁、排水等各关键部分，将工程构件的几何信息、物理属性、施工工艺等参数进行整合。基于此，在设计阶段，设计师能运用族库快速搭建高精度的BIM模型，全面展示工程细节与整体布局。而施工阶段，施工人员可直接调用设计模型，依据其中参数化信息进行施工操作，实现设计模型向施工的数字化移交^[7]。这种方式极大减少因信息传递不畅导致的错误与延误，有效提升设计与施工的协同效率，保障市政工程设计施工一体化的高效推进。

2. 智慧工地管理系统

在市政工程设计施工一体化管理中，智慧工地管理系统通过集成物联网监测设备与GIS定位技术，构建可视化进度质量监控平台。借助物联网监测设备，能实时收集施工过程中的各类数据，如工程进度、质量参数、设备运行状态等，将这些数据及时反馈至管理平台^[8]。GIS定位技术则为施工现场的人员、设备等提供精准定位，便于合理调配资源，优化施工流程。二者结合构建的可视化进度质量监控平台，让管理者直观掌握工程全貌，及时发现潜在问题，例如进度偏差、质量隐患等，并迅速做出决策，实现对工程进度和质量的动态、精准管理，有效提升设计施工一体化管理的效率与质量，保障市政工程的顺利推进。

四、工程风险管理优化策略

（一）风险识别与评估方法

1. 全生命周期风险清单

建立全生命周期风险清单，需系统梳理市政工程从设计、施工到运营维护各阶段潜在风险。在设计阶段，关注设计方案的合理性、规范性，识别如设计标准选用不当、设计深度不足等缺陷，为避免遗漏，可参考过往类似项目经验^[9]。施工阶段着重关注施工技术、人员、机械等方面，比如施工工艺不达标、人员操作失误、机械设备故障引发的施工偏差风险。运营维护阶段，考虑设施老化、环境变化等因素导致的风险，如道路磨损、管道堵塞等。将各个阶段风险进行详细分类、记录，形成风险数据库，为后续风险评估和应对提供基础，通过持续更新与完善，全面提升市政工程风险管理水平。

2. 定量风险评估模型

在市政工程设计施工一体化管理中，定量风险评估模型可开发基于模糊综合评价法的风险量化模型。该模型将风险因素进行细致分类，从多个维度构建评估指标体系，涵盖技术、管理、环

境等方面。对每个指标设定相应的权重，借助专家打分或历史数据等方式，确定各指标的隶属度函数，以此量化风险程度。通过模糊数学的运算，综合得出风险的量化结果，进而精准确定关键控制节点。这一过程不仅能将定性的风险描述转化为具体数值，使风险程度更为直观，还能依据量化结果，有针对性地制定风险应对策略。此基于模糊综合评价法的风险量化模型，为市政工程设计施工一体化的风险管理提供科学、有效的工具^[10]。

（二）风险控制应对策略

1. 设计阶段风险规避

在市政工程设计阶段，可通过价值工程分析优化设计方案来规避风险。深入剖析项目功能与成本的关系，从多维度考量设计方案，精准识别并去除不必要功能，合理分配资源，确保设计既满足工程需求，又有效控制成本，防止因过度设计或功能缺失引发风险。同时，制定抗风险型技术标准，结合工程实际情况与行业先进经验，对设计的技术参数、材料选用、施工工艺等方面进行明确规范。提高设计的可靠性、稳定性与适应性，增强工程抵御诸如地质条件变化、气候变化、技术革新等各类潜在风险的能力，为后续施工的顺利推进奠定坚实基础，保障市政工程质量与效益。

2. 施工过程风险转移

在市政工程设计施工一体化的施工过程中，可通过研究工程保险与担保机制，建立风险共担的契约管理模式来实现风险转移。工程保险方面，合理选择诸如建筑工程一切险、安装工程一切险等险种，将自然灾害、意外事故等可能给工程带来的损失风险转嫁给保险公司。担保机制上，要求承包商提供履约担保，确保其按合同约定履行义务，若承包商违约，业主可从担保金额中获得相应赔偿，实现风险的有效转移。同时，通过建立风险共担的契约管理模式，明确各参与方在风险事件中的责任与分担比例，以合同条款形式约束各方行为，促使各方积极应对风险，共同保障市政工程设计施工一体化项目顺利推进。

（三）风险监控预警机制

1. 实时监测数据采集

在市政工程设计施工一体化管理中，风险监控预警机制的实时监测数据采集至关重要。通过部署智能传感器网络，可全方位

收集数据。在施工现场，传感器能实时感知诸如温度、湿度、压力等环境数据，这些数据对工程材料性能、施工工艺效果产生影响。同时，针对工程结构关键部位，传感器可采集应力、应变、位移等数据，以评估结构稳定性。借助建立的工程健康状态诊断指标体系，将采集到的数据与之比对分析。例如，若应力数据接近或超出指标体系设定的阈值，预示可能存在结构安全风险。通过这种实时且精准的数据采集，为后续风险评估、预警提供可靠依据，及时发现潜在风险，以便采取有效措施应对，保障市政工程进度顺利推进。

2. 预警响应联动系统

预警响应联动系统作为风险监控预警机制的关键部分，起着承上启下的关键作用。当分级预警模型发出风险预警信号后，该系统迅速启动，将预警信息精准、及时地传达至应急指挥平台以及各相关部门与岗位。各部门依据既定预案，快速做出响应，紧密协同合作。施工团队立即暂停可能加剧风险的作业，采取紧急防护措施；设计团队结合现场实际，对设计方案进行快速评估与调整，提供技术支持；物资供应部门确保应急物资及时调配到位。通过这样高效的预警响应联动，形成从预警发布到响应执行的闭环管控流程，有效降低市政工程设计施工一体化过程中的风险影响，保障工程顺利推进。

五、总结

市政工程设计施工一体化管理模式在实践中展现出显著价值。它打破了设计与施工环节间的壁垒，有效提升沟通效率，降低协调成本，从而显著缩短项目工期，提高整体质量。基于数字孪生技术的管理能力提升路径，为优化管理流程、实现精准决策提供了新的契机，通过构建虚拟模型模拟工程全生命周期，能提前发现潜在问题并及时调整。智慧市政建设是未来必然趋势，设计施工一体化管理与之相辅相成，不仅有助于实现市政设施的智能化、精细化管理，还能推动城市可持续发展。未来，需进一步深化该模式在市政工程中的应用，不断探索与新技术的融合，从而更好地满足城市发展需求，提升城市居民的生活品质。

参考文献

- [1] 姜佩奇. 基于 BIM 的水电工程设计施工一体化管理模式和方法研究 [D]. 天津大学, 2021.
- [2] 张高海. 设计施工一体化模型在隧道 EPC 工程中的应用 [D]. 广东工业大学, 2022.
- [3] 张济武. “PPP+EPC” 模式下高速公路项目设计施工一体化博弈研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [4] 刘瑞. 从业者视角下钢结构设计施工一体化指标关系研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [5] 尹佳雯. Y 市政道路工程施工阶段风险管理 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [6] 王建红. 建筑装饰装修工程设计施工一体化研究 [J]. 石材, 2024, (11): 13-15.
- [7] 崔晗. 建筑装饰装修工程设计施工一体化研究 [J]. 建筑与装饰, 2023, (17): 13-15.
- [8] 孙亿海, 王李颖, 周鹏, 等. 建筑装饰装修工程设计施工一体化研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(5): 151-153.
- [9] 陆海军. 建筑装饰装修工程设计施工一体化现状与策略研讨 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(9): 74-76.
- [10] 虞奇, 张仁友, 何瑞金. 基于 EPC 模式的建筑工程设计、施工一体化 BIM 应用 [J]. 工程建设与设计, 2021(22): 107-110.

道路桥梁设计视角下桥梁结构设计的创新与实践

左威

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120019

摘 要： 道路桥梁设计视角下，桥梁结构设计创新与实践意义重大。涵盖模块化组件组合、材料选择优化等多方面，如通过创新设计提升承载与稳定性，注重实践确保有效实施。同时涉及热效率、压力控制等技术，还包括测试验证、人机界面优化、安全保障及成本控制，以推动行业高质量发展。

关 键 词： 桥梁结构设计；创新实践；道路桥梁设计

Innovation and Practice in Bridge Structural Design from a Road and Bridge Design Perspective

Zuo Wei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： From the perspective of road and bridge design, the innovation and practice of bridge structure design is of great significance. It covers modular component combination, material selection optimization and other aspects, such as improving bearing and stability through innovative design, and paying attention to practice to ensure effective implementation. At the same time, it involves technologies such as thermal efficiency and pressure control, as well as testing and verification, human-machine interface optimization, safety assurance and cost control, so as to promote the high-quality development of the industry.

Keywords： bridge structure design; innovative practice; road and bridge design

引言

2021 年颁布的《国家综合立体交通网规划纲要》强调了交通基础设施高质量发展的重要性。在现代交通体系中，道路桥梁作为关键部分，其结构设计的创新与实践意义重大。随着经济发展与交通流量增长，传统设计理念和方法难以满足需求。从设计视角出发，对桥梁结构设计进行创新与实践，在提升承载能力、稳定性的同时，注重实践应用，能推动行业高质量发展。这不仅涉及结构设计的创新，还涵盖材料选择优化、多种技术的应用及系统测试等方面，以实现桥梁多功能集成与性能提升，符合国家交通发展政策导向。

一、多功能集成桥梁结构设计

（一）模块化桥梁结构体系架构

在道路桥梁设计视角下，多功能集成桥梁结构体系的构建是提升桥梁综合性能的重要途径。通过模块化结构单元组合，对桥梁上部结构、下部结构及附属功能构件进行系统集成设计，是当前桥梁结构创新的关键方向之一。模块化设计强调不同结构单元之间具备标准化接口与统一技术参数，以实现灵活拼装与高效施工。例如，在上部结构中，可将主梁、横梁及桥面板设计为标准构件单元，其截面形式、连接节点及受力性能均按统一规范进行设计；在下部结构中，将桥墩、承台及基础模块化，有利于适应不同地质条件与跨径需求。在模块组合过程中，需要综合考虑桥梁整体受力性能、施工组织以及结构耐久性等因素。通过优化结构布置与连接方式，使各模块在保证独立受力安全的前提下，实现整体结构协同工作，从而提升桥梁的承载能力与结构稳定

性。同时，模块化桥梁结构体系有助于缩短施工周期、降低施工难度，并为桥梁后期维护与功能拓展提供便利条件。该设计思路不仅符合现代道路桥梁工程工业化、装配化的发展趋势，也为桥梁结构设计的创新与实践提供了有效路径。

（二）材料选择优化

在道路桥梁设计视角下的桥梁结构设计中，材料选择优化对多功能集成产品设计至关重要。不锈钢、玻璃与陶瓷复合材料的导热性和耐久性特征存在差异^[3]。不锈钢具有良好的强度与韧性，导热性能相对稳定，能适应多种环境，在桥梁结构关键受力部位可发挥重要作用。玻璃复合材料透光性佳，一定程度上能减轻桥梁结构自重，但其耐久性受环境因素影响较大，在一些对美观和采光有要求的桥梁设计中可合理应用。陶瓷复合材料具备良好的耐高温与耐磨性能，耐久性出色，对于一些易受摩擦、高温影响的桥梁部件，如桥面铺装等，是不错的选择。综合考虑各材料特性，依据桥梁的功能需求、所处环境等因素进行科学合理的

材料选择,可实现桥梁结构多功能集成,提升桥梁整体性能与使用寿命。

二、快速蒸汽生成实施

(一) 蒸汽安全壳系统设计

在快速蒸汽生成实施过程中,蒸汽密封系统设计极为关键。首先要依据蒸汽产生的速率和压力等参数,精确计算所需的密封空间大小与形状,确保能有效容纳蒸汽,防止其逸散。优化蒸汽罩的几何形状,可采用流线型设计,减少蒸汽在内部流动的阻力,增强密封效果。压力调节机制是核心部分,安装高精度压力传感器实时监测内部压力,当压力超出设定阈值,自动阀门迅速开启,将多余蒸汽排放至安全区域,避免因压力过高损坏系统^[4]。同时,密封材料的选择也不容忽视,要具备耐高温、耐高压、抗腐蚀等特性,以保障系统在恶劣蒸汽环境下长期稳定运行,从而实现高效、安全的蒸汽密封功能,为快速蒸汽生成的持续稳定提供有力支持。

(二) 水流控制技术

在快速蒸汽生成实施中的水流控制技术至关重要。通过精确的水流控制,能确保蒸汽高效且稳定地产生。这一技术借助外部储水装置与微流量传感器的精密配合来实现。外部储水装置为整个系统持续提供充足水源,保证水流供应的稳定性。而微流量传感器则发挥着精确监测水流的作用,实时获取水流的流量、流速等关键参数。基于这些参数反馈,系统可灵活且精准地调整水流速度与流量,确保进入蒸汽发生器的水量恰到好处,既避免因水量过多导致蒸汽生成效率降低,又防止因水量过少引发设备干烧等安全问题^[5]。如此,通过该水流控制技术,可实现蒸汽的快速、稳定生成,提升整个系统的运行效能与安全性。

三、提高热效率

(一) 热分布优化

1. 多层导热设计

在桥梁结构设计中,多层热传导设计对提升热效率与优化热分布至关重要。通过实施具有不同材料特性的梯度热传导层^[6],可有效达成这一目标。不同材料具备各异的热传导系数,合理组合能引导热量按预期方向传导与分布。例如,在桥梁的关键部位,外层选用热传导较快的材料,能迅速吸收外界热量;内层采用热传导相对较慢的材料,可减缓热量传递,从而使结构内部温度变化更为平缓,避免因温度骤变产生过大热应力。这种多层设计还可依据桥梁不同区域的功能需求与环境特点进行针对性调整,确保热量在整个桥梁结构中均匀分布,提高桥梁结构在温度变化环境下的稳定性与耐久性,从热学角度实现桥梁结构设计的创新与优化。

2. 能量回收机制

在道路桥梁设计中,从桥梁结构设计角度对热效率提升、热分布优化及能量回收机制进行研究意义重大。通过合理设计蒸汽循环系统与热回收通道,可优化热分布。例如,精准规划通道走向与布局,使热量能均匀传递至桥梁关键部位,减少因局部温差导致的结

构应力集中,增强结构稳定性。在能量回收机制方面,利用热电材料或温差发电装置,将桥梁结构因温度变化产生的热能转化为电能,实现能量的有效回收与再利用^[7]。这种能量回收不仅能为桥梁附属设施提供部分能源,降低运营成本,还可助力实现桥梁的可持续发展,从多维度创新与优化桥梁结构设计,提升其综合性能。

(二) 压力调节技术

1. 微压控制系统

在道路桥梁设计中,微压力控制系统对于桥梁结构的稳定性和安全性至关重要。通过开发带有安全阀的电子压力维持模块,可实现精准的微压力控制。该模块利用先进的传感器实时监测桥梁结构关键部位的压力变化,将数据快速反馈至控制系统^[8]。控制系统依据预设的压力阈值,智能调节安全阀的开启与关闭程度,使压力始终维持在安全且适宜的范围内。这种精确的微压力调控,不仅能有效缓解桥梁在不同荷载及环境作用下产生的应力集中问题,延长桥梁使用寿命,还能保障桥梁在复杂工况下的正常使用性能,为道路桥梁的安全稳定运行提供坚实支撑。

2. 动态压力适应

在道路桥梁结构设计中,动态压力适应至关重要。桥梁在使用过程中会承受各种动态压力,如车辆行驶产生的动荷载等。为实现动态压力适应,可采用智能监测系统实时感知压力变化。借助先进传感器收集压力数据,经分析处理后反馈给控制系统,进而自动调整桥梁结构参数,如改变支撑刚度等,确保桥梁始终处于安全稳定的受力状态。通过这种动态压力适应技术,能有效减少因压力波动造成的结构损伤,延长桥梁使用寿命,提升其性能与可靠性^[9]。

四、原型开发与验证

(一) 实验测试框架

1. 热性能指标

在桥梁结构设计的创新与实践中,热性能指标是实验测试框架里衡量其效能的关键要素。热性能指标主要包括桥梁结构在不同环境温度下的热传导率、热膨胀系数等^[10]。热传导率反映桥梁材料传递热量的能力,对桥梁内部温度分布及稳定性有着重要影响,若热传导率过高,可能导致桥梁局部温度变化剧烈,影响结构耐久性。热膨胀系数则关乎桥梁在温度变化时尺寸的改变程度,设计时需精确考量,否则可能引发结构变形、开裂等问题。通过准确测量和分析这些热性能指标,能够优化桥梁结构设计,确保在不同热环境下桥梁仍具备良好的性能与安全性,为道路桥梁设计提供可靠的热性能数据支撑。

2. 多功能运行试验

在道路桥梁设计视角下桥梁结构设计的创新实践中,多功能操作测试极为关键。针对新型桥梁结构的多功能特性,如是否兼具交通承载、景观融合及环境适应性等,需开展系统测试。模拟不同交通流量、气候条件以及地质状况,检测桥梁结构在多种功能需求并发时的响应。比如,在交通繁忙时段,监测桥梁对重载

车辆通行的承载性能，同时评估其作为城市景观地标所展现的视觉效果和稳定性。观察在暴雨、强风等恶劣天气下，桥梁排水系统、防风构造等功能性部件与结构整体协同运作的状况。通过这些多功能操作测试，全面验证桥梁结构设计在实际复杂环境中的可行性与有效性，为优化设计提供数据支撑，推动桥梁结构设计创新在实践中的应用。

（二）用户交互优化

1. 人机界面设计

在道路桥梁设计中，人机界面发展融入智能烹饪预设这一方向下，针对桥梁结构设计的人机交互优化的人体工程学界面设计，需要充分考虑道路桥梁使用者的特性与需求。从行人角度，要确保桥梁人行道宽度、栏杆高度及触感等符合人体尺度，保障行走舒适与安全。对于驾驶者，桥梁引道的坡度、转弯半径以及标识牌的位置与可视性等都需契合人体工程学原理，减少驾驶疲劳与误判风险。同时，考虑到不同人群，如老人、儿童、残障人士等的特殊需求，设置无障碍通道、盲道等设施，使桥梁结构在满足功能的同时，最大程度提升使用者的交互体验，通过优化设计参数和反复模拟验证，让人体工程学界面设计更贴合实际使用场景，促进道路桥梁使用的高效性与安全性。

2. 安全保证机制

在道路桥梁设计视角下桥梁结构设计的安全保障机制至关重要。需构建多层次保护体系以应对超压和干热等复杂状况。在超压方面，精确计算桥梁各部位所能承受的极限压力，从材料选用到结构布局，都要充分考虑超压抵御能力，如采用高强度、高韧性的钢材与混凝土。针对干热条件，一方面，运用隔热材料或特殊涂层来降低结构表面温度，减少干热对材料性能的削弱；另一方面，合理设计排水与通风系统，避免热量积聚。同时，引入智能监测系统，实时感知结构应力、温度等参数变化，一旦出现异常，迅速预警并启动应急措施，从多维度保障桥梁在各种环境下的结构安全，确保其长期稳定运行，为道路桥梁的安全使用筑牢根基。

（三）商业化分析

1. 制造成本优化

在桥梁结构设计的创新与实践中，制造费用优化至关重要。从道路桥梁设计视角出发，首先要对原材料采购成本进行严格把

控，通过与优质供应商建立长期合作关系，争取更优惠的价格和稳定的供应，降低原材料费用。同时，优化制造工艺，采用先进且高效的生产技术，提高生产效率，减少人工成本与时间成本的消耗。对于生产设备，合理规划购置与维护费用，确保设备高效运行，避免因设备故障导致的生产延误与额外成本。另外，对生产流程进行精细化管理，减少物料浪费，提高资源利用率，从各个环节降低制造费用，以实现桥梁结构设计在成本方面的优化，让创新设计在经济层面更具可行性与竞争力。

2. 市场竞争力研究

原型开发与验证部分应聚焦桥梁结构设计创新理念的实体模型构建与验证。通过制作原型，能够直观呈现设计细节，检测是否符合力学原理及实际使用需求。验证过程需模拟多种工况，如不同交通流量、气候条件等，确保结构的稳定性与安全性。商业化分析则需深入探讨创新桥梁结构设计投入市场的可行性。考量制造成本，包括原材料采购、施工工艺复杂度等，估算整体造价。同时，分析市场需求，研究哪些区域、项目类型对这类创新设计有迫切需求，判断其商业前景。市场竞争力研究要将创新桥梁结构设计与传统设计进行全方位对比。对比结构性能，突出创新设计在承载能力、耐久性等方面优势；对比建设周期，若能缩短工期则更具竞争力；对比维护成本，更低的维护成本也是吸引市场的重要因素，以此确定其在市场中的竞争地位。

五、结论

从道路桥梁设计视角来看，桥梁结构设计的创新与实践意义重大。在创新方面，结构设计的突破改变了传统桥梁的力学性能与外观形态，材料科学的进步为桥梁提供了更坚固、耐用且轻质的材料选择，智能控制系统的发展实现了桥梁的实时监测与智能调控。这些创新成果在实践中得到应用，提高了桥梁的安全性、稳定性与适用性，满足了日益增长的交通需求以及人们对桥梁美学的追求。未来，应聚焦自适应烹饪技术等相关方向，进一步探索桥梁结构与功能的融合，使桥梁不仅是交通枢纽，更能顺应时代科技发展，为人们带来更便捷、舒适与智能的使用体验，推动道路桥梁领域持续向前发展。

参考文献

[1] 邓芳芳. 功能对等理论视角下施工方案汉英翻译实践报告——以道路和桥梁施工文本为例 [D]. 西安理工大学, 2021.

[2] 杨婧雯. 基于 BIM 与数值仿真的道路下穿高铁桥梁施工影响分析 [D]. 华东交通大学, 2023.

[3] 吴限沛. 新媒体语境下动态图形的设计实践 [D]. 东南大学, 2022.

[4] 王勇. 桥梁检测飞行爬壁机器人结构设计及研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.

[5] 苏亚兰. 民族融合视角下间色裙演变研究与创新设计实践 [D]. 武汉纺织大学, 2023.

[6] 毛鲲. 道路桥梁设计的现状与对策研究 [J]. 数码设计 (上), 2021, 10(5): 161-162.

[7] 王鹏, 穆守峰. 道路桥梁设计的现状及改善路径 [J]. 四川建材, 2023, 49(9): 176-178.

[8] 陈涛, 陈柯. 城市道路桥梁设计研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(9): 102-103.

[9] 刘世杰. 结构化设计在道路桥梁设计中的应用 [J]. 运输经理世界, 2024(8): 95-97.

[10] 杨倩倩. BIM 技术在道路桥梁设计中的应用分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(10): 82-84.

路桥施工过程中裂缝病害防治技术探索

周娜娜

安徽建工水利开发投资集团有限公司，安徽 蚌埠 233000

DOI:10.61369/ME.2025120023

摘 要： 裂缝病害是路桥施工过程中常见的质量问题，直接影响工程结构安全、耐久性与使用寿命。当前路桥施工中裂缝防治存在成因判断不精准、技术应用适配性不足、全流程管控缺失等问题。本文明确路桥施工过程中裂缝病害的危害，深入剖析裂缝形成的设计、材料、施工、环境等多方面原因，梳理不同类型裂缝的针对性防治技术，提出施工全流程防治管控路径与保障措施，为提升路桥工程施工质量、减少裂缝病害提供理论与实践支撑。

关 键 词： 路桥施工；裂缝病害；防治技术；全流程管控

Exploration of Crack Disease Prevention and Control Technologies During Road and Bridge Construction

Zhou Nana

Anhui Construction Engineering Water Conservancy Development Investment Group Co., LTD., Bengbu, Anhui 233000

Abstract： Crack disease is a common quality problem in the construction process of roads and Bridges, directly affecting the safety, durability and service life of engineering structures. At present, there are problems in the prevention and control of cracks in road and bridge construction, such as inaccurate cause judgment, insufficient adaptability of technology application, and lack of full-process control. This article clearly defines the hazards of crack diseases during the construction of roads and Bridges, deeply analyzes the multiple reasons for crack formation such as design, materials, construction, and environment, sorts out targeted prevention and control technologies for different types of cracks, and proposes a full-process prevention and control path and safeguard measures for construction, providing theoretical and practical support for improving the construction quality of road and bridge projects and reducing crack diseases.

Keywords： road and bridge construction; crack disease; prevention and control technology; full-process control and management

引言

在路桥工程的建设进程中，施工阶段是裂缝病害频繁出现的时期。裂缝一旦生成，不仅会使路桥结构的承载能力遭受削弱，而且还会让雨水以及各类有害物质的渗透侵蚀程度加剧，如此一来，工程的使用年限会被缩短，后期的维修花销会增加，甚至还可能引发安全事故。伴随我国交通基础设施的建设规模不断拓展以及服役标准持续提升，针对裂缝病害展开的防治工作已然成为管控路桥施工质量的关键部分。展开对路桥施工过程中裂缝病害防治技术的探究，攻克防治难题，对于确保路桥工程的质量与安全具有重要意义。

一、路桥施工过程中裂缝病害的危害

致使结构承载能力降低。路桥结构产生的裂缝会对其整体性造成破坏，引发应力集中的情况。当结构承受车辆荷载、自身重量等作用时，部分区域承受的力会超出设计的承受范围，使得结构出现变形，强度也会降低，在情况较为严重时，甚至可能造成结构坍塌，对通行安全构成威胁^[1]。

使结构的耐久性降低。雨水、二氧化碳、氯离子等有害物质会借助裂缝形成的通道进行渗透，加快混凝土碳化、钢筋锈蚀等

致使结构性能变差的过程。特别是在寒冷的区域，冻融循环会让裂缝变宽，使结构遭受的损坏加剧，显著缩短路桥工程可以正常使用的时长。

导致工程维护成本显著提升。在施工过程中产生的裂缝，若无法 及时进行处理，在后期便需要投入资金开展修补、加固工作，更有甚者还需进行局部拆除并重新建造。不仅会让维护成本大幅增加，而且可能对交通通行造成不良影响，引发额外的经济损失以及社会层面的负面效应。

二、路桥施工过程中裂缝病害的形成原因分析

（一）设计环节存在缺陷

结构设计存在欠缺之处。在部分路桥工程的设计工作中，并未充分权衡结构的受力特性情况，出现截面尺寸不够充分、配筋率处于较低水平、节点设计不够妥当等情况，最终致使在施工进程中结构局部出现应力集中现象，引发裂缝；在针对大跨度桥梁以及异形结构开展设计时，并未妥善开展温度应力、收缩应力的释放相关设计，容易因为应力的不断累积而产生裂缝。

设计参数的选用存在不妥之处。在设计阶段，针对施工区域的地质情况、气候条件开展的调查研究不够充分，选用的混凝土强度等级、配合比等参数与实际的施工环境不相适配；并未依据施工工艺的特性对设计方案予以优化，造成设计方案难以顺利实施，使裂缝出现的风险增加。部分设计未建立参数动态调整机制，对施工期间可能出现的地质条件突变、极端气候等变量预判不足；且设计验算多依赖理论模型，未结合现场实测数据进行参数校准，导致结构受力计算与实际工况存在偏差，进一步提升了裂缝产生的概率。

（二）材料质量与性能问题

原材料的质量未达到规定标准。选用的水泥、砂石、钢筋等原材料并不符合相关的标准要求，例如，水泥的强度波动较为明显，砂石的含泥量过高，钢筋的力学性能不符合合格标准等情况，会使得混凝土的强度以及韧性出现降低的情况，并且会提升裂缝产生的可能性；外加剂的选用存在不恰当处，例如缓凝剂、减水剂的型号与水泥无法相匹配，有可能会造成混凝土的凝结出现异常现象，产生裂缝。

混凝土的配合比例存在不合理情况。在开展混凝土配合比设计工作期间，水泥使用量超出合理范围、水与胶凝材料的比例数值过大、骨料的级配情况不理想等情形，会造成混凝土的收缩数量增加，在硬化进程中出现收缩裂缝；并未依照施工所处环境的温度高低、湿度大小对配合比进行调整，同样会对混凝土的性能产生影响，引发裂缝。

（三）施工操作不规范

混凝土施工工艺存在的欠缺。在混凝土进行搅拌的阶段，搅拌时长不够、原材料的计量缺乏精准性，造成混凝土的匀质性欠佳；在浇筑进程中，振捣不够密实、出现漏振或者过振的情况，会让混凝土内部产生如孔隙、蜂窝等缺陷，在后期较容易演变成裂缝；若浇筑顺序缺乏合理性，并未开展分层分段浇筑，或者对施工缝处理得不够妥当，会致使结构的整体性不足，产生施工缝裂缝。

养护环节的管控存在欠缺情况。当混凝土完成浇筑后，若未能迅速开展养护相关工作，或者养护的时长不够、采用的养护方式并不恰当，便会使得混凝土表面的水分以较快速度蒸发，而内部的水分补给又不够充足，产生干缩裂缝；在高温、寒冷、大风等较为恶劣的环境条件下，若并未采取具有针对性的养护防护措施，便会让混凝土收缩以及温度变形的情况变得更加严重，引发裂缝^[2]。

三、路桥施工过程中不同类型裂缝病害的防治技术

（一）收缩裂缝防治技术

对混凝土配合比设计进行优化。采用低热矿渣水泥、粉煤灰等掺合料替代部分水泥，以此削减水泥的使用量，降低混凝土的水化热以及收缩的程度；对水胶比进行合理把控，添加高效减水剂，增强混凝土的流动性能与密实程度，减少干燥收缩引发的变形；对骨料的级配进行优化，挑选粒径相对较大、级配情况良好的骨料，增强混凝土骨架的支撑效能，降低收缩的比率。

加强施工以及养护管控工作。当进行混凝土搅拌操作时，要保证计量达到精准无误的程度，搅拌实现均匀的状态，在浇筑进程中要把握好振捣的质量情况，防止出现过度振捣或者遗漏振捣的现象，在浇筑工作结束后要迅速覆盖具有保湿功能的材料，例如土工布、塑料薄膜等，以此避免表面的水分过快地蒸发掉。要依据环境的温度情况对养护的方式进行调整，在气温较高的天气要采取遮阳、洒水降低温度的举措；在气温较低的天气，要采取保持温度的养护措施，需要保证养护的时间不少于规范规定的要求，减少干缩裂缝的产生。

（二）温度裂缝防治技术

完成温度控制设计工作。在大体积混凝土、桥梁梁体等结构的设计进程中，设置温度伸缩缝以及后浇带，以此释放温度产生的应力；挑选低热性质的混凝土配合比，减少水化热的生成量，降低混凝土内部的温度。

加强对施工过程中温度的管控力度。在进行大体积混凝土施工作业时，选择采用分层浇筑以及分层振捣的手段，以此来减缓水化热的释放速率；在混凝土的内部安置测温元件，对其内部温度的变化情况进行实时监测，一旦混凝土的内外温差超出规范规定的限值，便采取内部通水冷却、外部覆盖保温等举措，对温度梯度进行控制；要避免在高温的正午时分或者低温的时段进行混凝土的浇筑工作^[3]。

（三）施工缝裂缝防治技术

对施工缝的设置与处理予以优化。需切实依照设计所提要求以及施工规范标准设置施工缝，防止在结构承受力的关键部位进行施工缝的设置；在施工缝所在位置开展混凝土浇筑作业前，要将旧混凝土的表面进行凿毛处理，将表面的浮浆、杂物等清理掉，并且使用清水进行冲洗，让其达到充分湿润的状态；在施工缝处铺设一层配合比相同的水泥砂浆或者水泥浆，以此强化新旧混凝土之间的粘结能力。

（四）预应力裂缝防治技术

对预应力施工流程予以规范。需严格依照设计要求来明确预应力张拉的具体时间，要保证混凝土强度达到设计强度标准值所规定的相应比例后，才可以开展张拉作业；要精确把控张拉控制应力，运用双控法，即将应力控制与伸长值控制相结合，以此确保张拉的质量；按照合理的、科学的张拉顺序实施张拉，防止结构内力出现分布不均衡的情况。

着力加强孔道压浆质量的把控与管理。挑选具备高性能特质的压浆材料，以此保证压浆材料在流动性、强度以及耐久性等方面

面可以满足相关标准与要求；在进行压浆操作前，对孔道内部的杂质与积水进行全面清理，运用真空辅助压浆技术手段，保证压浆达到较高的密实程度；当压浆工作完成后，迅速且妥善地开展养护工作，避免压浆体出现收缩与开裂的情况，确保预应力筋与混凝土间可以实现有效的粘结。

四、路桥施工过程中裂缝病害的全流程管控路径

（一）施工前期预防管控

对设计优化环节进行完善。启动设计方案的评审工作，着重对结构受力设计、温度应力释放的设计、施工工艺适配性等相关内容展开核查，及时对设计中存在的缺陷予以修正；结合施工区域的地质情况、气候条件等因素，对混凝土配合比、结构尺寸等设计参数进行优化，增强设计方案的科学性以及可行性。

加强对原材料质量管控力度。构建原材料入场检验的相关制度，针对水泥、砂石、钢筋、外加剂等原材料实施严格的检测工作，不符合标准的原材料坚决禁止进入场地；挑选具备良好信誉的供应商合作，签署质量保证协议，以此保证原材料的质量处于稳定状态；对进入场地后的原材料开展规范化的存储操作，避免其受到周围环境的影响而发生变质情况。

妥善完成施工方案的编制工作。编制专门用于裂缝防治的施工方案，清晰确定各个施工环节在裂缝防治关键点、采用的技术手段以及责任的具体划分；针对结构复杂、环境恶劣情况下的施工开展专项的技术研讨与论证，制定出具有针对性的防治应对方案；大力加强对施工人员的技术培训活动，切实提升其在裂缝防治意识与实际操作技能^[4]。

（二）施工过程动态管控

加强对施工工艺的管控力度。依照施工方案以及规范要求严谨地开展施工工作，着重管控如混凝土搅拌、浇筑、振捣、养护、预应力张拉、孔道压浆，路基摊铺、压实等关键环节的施工质量情况；构建施工过程质量检查的制度，运用目测、尺量、无损检测等方法，对结构的状态进行实时监测，及时察觉存在的裂缝隐患。

强化对于环境的监测以及应对举措。构建施工环境的监测机

制，对温度、湿度、风速等环境参数予以实时监测，依照监测数据对施工工艺以及养护措施进行调整；预先留意天气预报情况，规避在恶劣气象条件下开展施工，若难以做到避开，便即刻采取防护手段，降低环境因素给施工质量造成的影响。

构建问题处理机制。当察觉到裂缝隐患出现后，迅速召集技术人员对其形成原因展开分析，拟定具有针对性的解决办法；针对已经出现的裂缝，依照裂缝的宽窄程度、深浅情况、具体类别，挑选适宜的修复技术，例如表面封闭的办法、压力灌浆的手段、粘贴加固的方式等，立即开展修补工作，以避免裂缝扩展；认真做好裂缝处理的相关记录，搭建起质量追溯的体系。

（三）施工后期验收管控

严谨开展质量验收工作。在施工结束后，依照规范要求针对路桥工程开展质量验收，着重检查结构是否有裂缝存在、裂缝的处理情况是否可以达到要求；运用超声波、雷达探测等无损检测技术，对结构内部的质量情况进行检测，以此保证工程质量可以达到标准。

对验收资料的归档工作予以完善。将施工过程中与裂缝防治有关的资料进行整理，涵盖设计优化的详细记录、原材料的检验报告、施工工艺的具体记录以及裂缝的监测与处理记录等内容，保证资料既完整又规范，为后期的运营维护工作提供可靠依据；针对施工过程中出现的裂缝防治问题展开总结与分析，归纳出相关的经验与教训，为后续的工程建设提供有价值的参考^[5]。

五、结语

裂缝病害在路桥施工过程中，属于对工程质量起到制约作用的关键难题，其会受到设计、材料、施工、环境等方面因素的作用，具有种类繁多的类型，并且具备显著的危害性。若要妥善开展裂缝病害的防治工作，便需要精确掌握不同种类裂缝的形成原理，有针对性运用优化配合比例、使施工工艺规范化、增强养护管控力度、应用专项修补技术等防治办法，与此同时，要构建包含施工前期预防、过程动态管控、后期验收评估的全程管控体系。

参考文献

- [1] 席恩伟. 基于融合注意力机制和图像识别的路桥裂缝检测技术 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38(05): 155–161.
- [2] 何剑柯. 路桥施工中裂缝防治技术的应用分析 [J]. 中国住宅设施, 2023, (06): 74–76.
- [3] 王永超, 王成永. 路桥设计施工中裂缝产生的原因及控制建议 [J]. 运输经理世界, 2023, (15): 103–105.
- [4] 翟雄伟. 路桥施工中裂缝防治技术的应用分析 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23): 193–196.
- [5] 洪卫星, 吴溪, 陈贵海, 郭丹桂, 毛明洁. 基于机器视觉的路桥裂缝病害自动检测技术 [J]. 交通运输研究, 2021, 7(04): 114–122.

公路工程施工中低填浅挖路基施工技术分析

崔成博

广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120063

摘 要 : 低填浅挖路基作为公路工程中分布广泛且隐蔽风险较高的一类路基结构形式, 其施工质量对路面结构稳定性及使用寿命具有直接影响。本文围绕低填浅挖路基的结构特性, 对施工准备、低填路基填筑、浅挖路基开挖、防护排水构造及施工质量保障等关键技术环节进行系统分析, 旨在构建科学可控的施工技术体系, 为低填浅挖路基工程的长期安全运行提供实践参考。

关 键 词 : 公路工程; 低填浅挖; 路基施工

Analysis of Low-Fill Shallow-Dig Roadbed Construction Technology in Highway Engineering Construction

Cui Chengbo

Guangdong Provincial Expressway Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Low-fill shallow-dig subgrade, as a widely distributed and highly concealed risk type of subgrade structure in highway engineering, has a direct impact on the stability and service life of pavement structure due to its construction quality. This paper conducts a systematic analysis of key technical links such as construction preparation, low-fill subgrade filling, shallow-dig subgrade excavation, protective drainage structure and construction quality assurance, focusing on the structural characteristics of low-fill shallow-dig subgrade. The aim is to establish a scientific and controllable construction technology system and provide practical references for the long-term safe operation of low-fill shallow-dig subgrade projects.

Keywords : highway engineering; low fill and shallow dig; subgrade construction

随着公路建设向丘陵、台塬及缓坡区域不断延伸, 低填浅挖路基逐渐成为常见的路基结构类型。该类路基虽在填挖规模上不具备高填深挖路基的显性施工难度, 但其结构稳定性对原地基条件极为敏感, 一旦施工控制不当, 极易在交通荷载反复作用下形成隐蔽性病害, 影响路面结构整体服役性能。现阶段部分工程仍存在施工准备不足、分层压实控制粗放、排水体系设置不完善等问题, 使低填浅挖路基成为公路早期病害的集中区域。因此, 有必要从施工全过程角度对低填浅挖路基的施工技术进行系统梳理, 为提升该类路基施工质量可控性提供依据。

一、公路工程施工中低填浅挖路基施工技术

(一) 施工准备

在低填浅挖路基正式进入主体施工之前, 施工单位首先需完成系统细致的前期准备工作, 以确保后续施工决策建立在真实可靠的地质资料基础之上^[1]。工程技术人员应沿线路走向布设地质钻孔, 孔位间距控制在不大于20 m的范围内, 对沿线地层分布情况进行连续勘探, 并同步配合开展标准贯入试验, 每隔1.0 ~ 1.5 m布置一个测试点, 系统掌握各土层的密实程度、抗剪性能等关键指标。在前期勘察阶段, 工程人员通常会采用静力触探方法对场地土层进行连续测试, 通过采集锥尖阻力、侧壁摩阻力等基础数据, 对土体的含水状况、孔隙结构、压缩模量以及内摩擦角等力学指标进行综合分析, 并据此绘制比例尺

为1 : 500 ~ 1 : 1000的地质剖面图, 使设计参数能够更加贴合现场真实地质条件, 从源头上为低填浅挖路基结构形式及施工方案的合理选择提供可靠依据。进入施工准备阶段后, 施工单位应对作业范围内的杂草、树木、弃土堆积物以及各类生活、建筑垃圾进行全面清理, 同时对原地表分布的腐殖土、淤泥等承载能力较差的软弱土层实施彻底挖除处理, 避免不良土质对后续施工质量产生不利影响。为进一步提高基底承载性能, 可选用级配合理、排水条件良好且压碎值不大于30%的砂砾或碎石材料进行换填处理, 换填厚度需结合现场地质情况统筹确定, 一般控制在0.3 ~ 0.5 m范围内。换填完成后, 应组织重型压路机分层碾压, 并同步开展压实度检测, 确保各层压实度均不低于90%, 使基底逐步形成稳定、密实的受力结构, 为后续低填浅挖路基填筑施工创造良好的起步条件。

（二）低填路基施工

1. 填料选型

在路基施工启动之前，应对来自不同料源的填筑材料进行系统检验，重点围绕颗粒级配特性、液限、塑限以及承载比等关键性能指标展开，其中上路床填料的 CBR 指标需达到 8% 以上，下路床填料的 CBR 值不得低于 5%，以此在材料准入环节提前把控路基整体承载性能的可靠性^[2]。对于检测结果未达到使用要求的黏性土类填料，应统一采取集中厂拌的方式实施性能改良处理，可按比例掺加 3% ~ 5% 的石灰或 5% ~ 8% 的水泥作为稳定材料。改良作业完成后，还需重新组织取样复检，待各项试验参数均满足设计控制标准后方可投入工程使用，从而防止不合格填料进入路基结构内部，形成潜在的质量风险。

2. 分层压实

路基填筑应按照“分层推进、逐层成型”的作业思路展开，填料铺筑时需综合考虑压实机械能力与材料本身的压缩特性，对单层铺料厚度进行合理控制，常规情况下宜控制在 25 ~ 30 cm 之间^[3]。摊铺作业宜采用具备自动整平功能的设备完成，使铺筑后的表面平整度误差稳定控制在 ± 10 mm 范围内，从而为后续压实过程创造均匀受力的作业面条件。进入碾压工序后，应选配自重不低于 18 t 的振动压路机，按“先静后振”的原则组织施工，通常先实施 1 ~ 2 遍静压，再进行 3 ~ 5 遍振动压实，同时在操作过程中遵循由低速向高速、由弱振逐步过渡到强振的运行节奏，将振动频率控制在 28 ~ 35 Hz、行走速度控制在 3 ~ 4 km/h 范围内，使填筑结构逐步形成连续、密实且稳定的承载层。压实质量的检验宜采用灌砂法进行过程控制，每 2000 m² 布设的检测点数量不得少于 8 个，当检测面积不足 2000 m² 时，取样点数亦不得少于 6 个，并确保上、下路床压实度均达到 96% 以上，上路堤不低于 95%，下路堤不低于 94%，以保证路基整体压实质量满足设计要求。

3. 软弱地基加固处理

针对低填路基对原地基依赖程度高的结构特点，施工单位应在施工前对软弱地基进行专项评估，并根据软土层厚度与工程特性合理选用处理技术，以系统提升地基承载能力并降低后期不均匀沉降风险^[4]。当软土层厚度小于 3m 时，可优先采用换填法进行处理，通过彻底挖除软弱土体并换填优质填料，使路基基础直接建立在力学性能稳定的土体之上，从而削弱软土对路基稳定性的负面影响。换填过程中应同步实施分层填筑与碾压控制，确保新填土体形成连续、密实的结构状态。当软土层厚度较大时，应采用深层加固方式对地基进行处理，可选用粉喷桩或 CFG 桩等加固形式，通过在软弱土体中形成复合地基结构，提高地基整体刚度与抗变形能力。施工过程中，应合理控制桩径、桩间距及布置方式，使加固结构形成稳定的受力网络，促使桩体与原状土协同承担上部荷载，从而改善地基的整体受力性能。

（三）浅挖路基施工

1. 分层开挖

在浅挖路基施工过程中，施工单位应将开挖工艺控制作为首要技术环节，通过科学的分层分段组织方式，降低开挖扰动对原

状土体结构的影响。当场地土层分布均匀、整体稳定性较好，且基坑开挖深度控制在 3 m 以内时，开挖作业可优先选用挖掘机进行机械施工，并同步组织人工对边坡轮廓及基底表面进行修整，使最终形成的基底平整度误差稳定控制在 ± 20 mm 范围内。若施工区域地质条件较为复杂，或作业位置紧邻既有建（构）筑物时，则应避免使用大功率设备，宜改为采用小型液压破碎锤或人工风镐分层开挖，以减弱施工振动对周边结构可能产生的不利影响^[5]。施工过程中应严格执行分层分段开挖原则，将单层开挖深度控制在 1 ~ 2m 之间，并将单段施工长度控制在 50 ~ 100m 范围内，使土体应力逐步释放，减少局部坍塌风险。

2. 边坡稳定防护

浅挖路路边坡稳定性直接关系到整体结构安全水平，施工单位应在边坡成型后及时实施防护处理，避免自然风化、雨水冲刷削弱坡体强度。施工过程中应在边坡表面铺设钢筋网，钢筋网规格控制为 $\Phi 6@200 \times 200$ mm，并采用喷射混凝土进行整体封闭，喷射混凝土强度等级不低于 C20，喷射厚度稳定控制在 8 ~ 10cm 之间，使坡体形成连续致密的表层防护结构。对于坡度较大或高度较高的边坡，应同步布置锚杆加固构造，锚杆长度一般控制在 3 ~ 6m 范围内，间距控制在 1.5 ~ 2.0m 之间，通过锚杆与喷射混凝土的协同作用形成稳定的空间受力体系，有效提升边坡整体抗滑移能力。

3. 路床加固

为提升浅挖路基在长期服役阶段的稳定性，施工单位应在路床施工阶段同步完善加固与排水体系^[6]。施工阶段，应在边坡顶端外侧约 5 m 范围处设置截水设施，截水沟宜采用浆砌片石砌筑，其沟底及侧壁厚度均不应小于 30 cm，纵向坡度宜控制在 0.3% ~ 0.5% 之间，以便将地表径流有序引流排出；同时，应在坡脚部位布置排水沟，并与既有边沟系统相互连通，形成完整连续的排水网络，防止积水滞留对路基承载性能造成不利影响。路床整形完成后，应选用自重不低于 18 t 的压路机进行碾压处理，保证压实度达到 96% 以上；在此基础上，于路床顶面铺设双向土工格栅，其抗拉强度不应低于 50 kN/m，铺设宽度宜超出路基边缘 0.5 ~ 1.0 m，并通过锚固方式进行固定，使路床结构逐步形成连续稳定的整体受力体系，从而有效抑制不均匀沉降及早期病害的发生。具体的路基填料强度及压实度要求如表 1 所示：

表 1 路基填料强度及压实度要求

填方路基	填挖类型	路面地面以下深度 /m	填料最小强度（CBR）/%	压实度 /%
	上路床	0-0.3	6	≥ 95
	下路床	0.3-0.8	4	≥ 95
	上路堤	0.8-1.5	3	≥ 94
零填及挖方路基 0.3-0.8	下路堤	1.5以下	2	≥ 92
	0-0.3		6	≥ 95
	4		≥ 95	

4. 路基排水与防护施工

路基施工过程中，应沿道路两侧连续布置边沟体系，边沟开挖深度宜控制在 0.6 ~ 1.0 m 区间内，沟底宽度保持在 0.4 ~ 0.6

m范围,并可采用浆砌片石或C20混凝土对沟体进行砌筑加固,使其具备良好的抗冲刷性能;同时将沟底纵向排水坡度稳定控制在0.3%~0.5%之间,以保证地表径流能够顺畅排出^[7]。在填方路段组织施工时,应按每隔50~100m设置一处横向排水管的原则进行布设,排水管宜选用管径0.1~0.2m的HDPE管材,并在管壁均匀开设梅花形排水孔,孔径控制在5~10mm、孔距控制在10~15cm范围内,使填筑层内部积水能够及时向外排泄,避免长期积水削弱路基承载性能。针对挖方路段,应设置纵向盲沟作为地下水的主要疏排通道,盲沟内填充粒径为3~5cm的碎石材料,外侧包覆土工布以增强反滤及排水效果,同时结合沿线地形条件与自然水系合理布设排水出口,将路基内部水体有序引入自然排水系统,确保整体排水体系运行的连续性与稳定性。在边坡防护处理方面,应综合考虑边坡土质类型、坡面倾角及高度等因素,科学选取防护形式,可通过植物防护、工程防护或二者相结合的方式,提高边坡结构整体稳定水平^[8]。对于填方边坡高度约6m、坡度为1:1.25的路段,可优先采用综合防护形式,在坡面铺设三维植被网并进行喷播草种处理,使坡面形成稳定植被覆盖层,在坡脚同步设置浆砌片石护坡结构,从而在提升边坡抗冲刷能力的同时改善路基周边环境景观效果。

二、公路工程施工中低填浅挖路基施工质量控制措施

(一) 建立材料检验管控体系

在施工过程中,施工单位应设置专门的材料检验试验室,并配备专职检测人员,对所有进场填料、土工合成材料等实施抽样检测制度,重点对颗粒级配、物理力学指标及耐久性能进行系统核查,确保其主控指标满足设计与规范要求。对检测结果不符合

标准的材料,应立即实施清场和退换处理,严禁任何不合格材料进入路基结构内部^[9]。同时,施工单位应同步强化关键工序的工艺标准化管理,围绕填筑、碾压等核心环节细化操作流程,明确各项技术参数控制标准,使施工过程具备清晰、可执行的技术依据。也可通过推行样板先行制度,对各工序实施自检、互检及监理验收的闭环管理,以防止质量缺陷在施工阶段累积扩大。

(二) 施工过程动态监测

施工单位必须在施工阶段建立全过程动态监测机制,对路基变形情况实施持续跟踪管理。在填筑施工过程中,应合理布设沉降观测点,对路基变形数据进行实时采集与分析,一旦累计沉降量超过15mm,应立即启动预警机制,暂停相关工序施工,并组织技术人员对地基条件、填筑质量及排水状况进行系统排查,必要时同步采取地基加固等处治措施,防止隐患进一步扩大^[10]。对边坡防护、排水等隐蔽工程,应严格实行旁站监理制度,确保每一道工序均在监理工程师验收确认后方可进入下一工序施工,从制度层面杜绝违规施工行为。同时,强化技术交底与专项方案会审工作,使施工人员提前掌握施工重难点与风险点,形成主动防控、及时纠偏的质量管理机制。

三、结语

低填浅挖路基施工质量的优劣直接关系到公路工程整体结构安全与长期使用性能,其技术控制应贯穿施工全过程,并形成系统化、闭环式的管理体系。实践表明,只有将技术措施与质量管理深度融合,构建标准化、精细化的施工控制体系,才能切实提升低填浅挖路基结构的耐久性,为公路工程的安全运营提供坚实保障。

参考文献

[1] 万春明. 公路工程施工中低填浅挖路基施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2025, (25): 46-48.
[2] 印刚. 公路工程施工中低填浅挖路基施工技术的实践应用 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38 (04): 160-161+167.
[3] 朱玲. 公路工程低填浅挖路基施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10 (01): 59-61.
[4] 夏江波. 公路施工中低填浅挖路基施工技术探析 [J]. 设备管理与维修, 2024, (14): 149-151.
[5] 陈兴组. 公路施工中低填浅挖路基施工技术应用 [J]. 运输经理世界, 2022, (33): 28-30.
[6] 孙茂鹏. 低填浅挖路基施工技术研究——以琼海旅游公路工程为例 [J]. 工程技术研究, 2022, 7 (18): 59-61.
[7] 周峰. 低填浅挖路基施工技术在公路工程中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2022, (15): 7-9.
[8] 闫志越. 京新高速公路伊吾至巴里坤段低填浅挖路基风吹雪防治方法研究 [D]. 北京交通大学, 2023.
[9] 彭宇文. 公路施工过程中的低填浅挖路基施工技术研究 [J]. 运输经理世界, 2023, (07): 22-24.
[10] 魏立名. 低填浅挖路基施工技术在公路工程中的应用 [J]. 工程机械与维修, 2021, (06): 150-151.

高速公路水泥稳定碎石基层离析现象成因与施工改进策略

郭一凡

广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120065

摘 要 : 水泥稳定碎石基层作为高速公路路面结构中的关键承重层, 其施工质量直接关系到路面结构的整体稳定性。受多种因素影响, 基层施工过程中易产生离析现象, 导致结构密实度不均、局部松散及早期裂缝等质量隐患。本文通过对离析现象的形成机理进行系统分析, 并提出针对性施工改进策略, 旨在为提升高速公路水泥稳定碎石基层施工质量提供实践参考。

关 键 词 : 高速公路; 水泥稳定碎石基层; 离析成因; 施工改进

Causes and Construction Improvement Strategies of Segregation Phenomenon in Cement-stabilized Crushed Stone Base of Expressways

Guo Yifan

Guangdong Provincial Expressway Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Cement-stabilized crushed stone base, as a key load-bearing layer in the pavement structure of expressways, its construction quality is directly related to the overall stability of the pavement structure. Due to the influence of multiple factors, segregation is prone to occur during the base construction process, leading to quality risks such as uneven structural density, local looseness and early cracks. This paper conducts a systematic analysis of the formation mechanism of segregation phenomenon and proposes targeted construction improvement strategies, aiming to provide practical references for enhancing the construction quality of cement-stabilized crushed stone base on expressways.

Keywords : expressway; cement-stabilized crushed stone base layer; causes of segregation; construction improvement

随着高速公路建设规模不断扩大, 水泥稳定碎石基层因其整体性好、承载能力强、施工适应性高等优势被广泛应用于路面结构体系中。然而, 在实际施工过程中, 受材料来源差异、施工组织不合理及机械参数控制不足等因素影响, 基层混合料易发生离析现象, 进而削弱结构稳定性。因此, 有必要对高速公路水稳基层离析现象的成因及其施工改进策略进行系统研究, 以提高基层施工质量的可控性。

一、高速公路水泥稳定碎石基层离析现象成因

(一) 级配结构失衡

高速公路水泥稳定碎石基层本质上属于一种以多粒径骨料为骨架、水泥浆体为胶结介质的复合型结构材料, 其整体稳定性高度依赖于级配结构的连续性^[1]。一旦级配设计或实际生产控制出现偏差, 混合料内部各粒径骨料之间的嵌挤关系和填充关系就会被破坏, 从而为离析现象的发生埋下隐患。在实际施工中, 由于不同料场原岩性质差异明显, 加工筛网孔径磨损、筛分精度不足, 以及现场实际使用的骨料与实验室配合比存在偏差等因素, 常常导致混合料中粗集料比例偏高、细集料含量不足, 进而使基层材料由连续密实型结构向骨架疏松型结构转变。细集料和矿粉不仅承担着填充骨架空隙的重要功能, 同时还为水泥浆体提供附着界面, 当细料比例不足时, 粗集料之间的接触点增多而填充材料减少, 在运输振动和

摊铺布料等外力作用下, 粗颗粒更容易发生滚移与重新分布, 逐步形成局部粗料富集区和细料聚集区, 不仅导致基层压实度不均、孔隙率增大, 还会在长期荷载作用下诱发裂缝扩展。

(二) 拌和系统运行缺陷

拌和阶段是水泥稳定碎石基层混合料内部结构形成的起始环节, 拌和系统若存在下料不畅、传送带倾角过大、拌和时间不足或设备启停频繁等问题, 都会在混合料尚未进入运输阶段之前便形成初始离析。尤其是在雨天或原材料含水量波动较大时, 细集料容易结团堵塞下料口, 使各级集料无法按既定比例稳定下料, 从而破坏混合料的级配连续性; 与此同时, 若传送带倾角设置不合理或运行速度偏快, 粗集料在重力与惯性力共同作用下会发生下滑或抛散, 导致混合料在拌和系统内部就已经出现粗细料分布不均的状态。此外, 拌和时间设置偏短或拌和能力与运输能力不匹配, 常常引发设备频繁启停, 使粗集料在二次启动过程中向拌和筒边缘滚落并逐渐累积, 形成明显的离析带^[2]。在拌和环节形

成的初始离析具有很强的放大效应，一旦进入运输和摊铺阶段，原本已经不均匀的颗粒结构会在多次扰动作用下进一步恶化，最终表现为基层密实度不均、局部强度不足和整体稳定性下降，成为影响水稳基层性能的源头性风险因素。

（三）运输装卸过程中的动态再分布加剧离析

混合料从拌和站到施工现场的运输过程，是离析现象最容易被放大、固化的重要阶段。由于混合料在车厢内通常呈锥体状堆积，粗集料在自重和惯性作用下更易向车厢四周滚落，而细集料则趋于集中在堆体中部或上部，形成明显的空间分层结构。在车辆启动、制动、转弯及路面颠簸等多重动态荷载作用下，颗粒之间的相对位置不断发生变化，粗细集料之间的分布差异被持续放大。与此同时，运输过程中水分蒸发会导致混合料表层逐渐变干，水泥浆体的黏结性能下降，使细集料对粗集料的包裹填充作用减弱，进一步削弱混合料整体的抗离析能力。当混合料进行卸料时，粗集料往往优先从车厢后部滑出，而细集料滞后流出，形成明显的纵向离析结构，使基层起铺端、接缝区和边缘区域出现粗料集中带。在运输阶段形成的离析具有显著的空间集中性，一旦出现在结构薄弱的接缝及边缘部位，将直接削弱基层整体连续性和承载协同性，是诱发早期裂缝、松散破碎和渗水病害的重要前兆。

（四）摊铺机械布料特性放大离析效应

摊铺阶段是离析结构最终成型并被固化的重要节点，其施工机械布料方式与参数设置对混合料颗粒分布具有决定性影响^[3]。在实际施工中，摊铺机进料斗若处于空载状态或频繁进行收斗作业，粗集料容易向料斗底部集中，当翻板将混合料向中部汇集时会进一步加剧；若螺旋布料器转速设置偏高，粗集料容易被抛送至摊铺层表面，而细集料则通过叶片间隙提前铺散，形成明显的上下离析结构。与此同时，当供料不足或摊铺宽度过大时，布料距离加长，混合料在输送过程中受到的扰动次数增加，粗细颗粒发生二次分选的概率随之显著上升，导致表层细、两侧粗或中部细、边缘粗等离析形态频繁出现。在摊铺阶段被放大的离析一旦进入碾压环节，便会被压实固化，形成不可逆的结构缺陷，最终导致基层压实度不均、局部松散破碎和抗水损能力下降，严重削弱高速公路水稳基层的整体性能。

二、高速公路水泥稳定碎石基层施工改进 策略

高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程如图1所示：

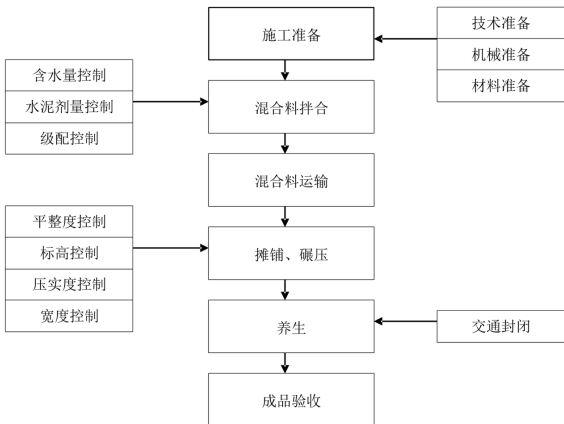


图1 高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程

在高速公路水泥稳定碎石基层的施工流程中，为了减少离析现象，必须针对其中的关键环节进行施工改进，保障施工效果。

（一）构建源头材料质量管控体系

在材料供应管理上，施工单位应优先选择单一稳定料源供料，减少因多料源交叉带来的级配离散问题；当工程条件限制必须采用多料场供料时，应对不同料源进行单独评估与备案管理，严格执行分区堆放、分批使用制度，严禁混堆混用，避免级配无序叠加导致的结构失稳。在料场堆放环节，应将堆料高度控制在3m以内，当受场地限制无法满足时，应通过设置隔墙分仓方式对堆体进行分区管理，抑制大粒径骨料沿堆体滚落形成底部富集带^[4]。装载机上料时应执行逐层取料、逐层推进原则，避免直接从料堆底部铲取粗集料富集区，使异常级配整体进入拌和系统。在进场检测环节，应建立以关键筛孔为核心的级配稳定控制机制，对4.75mm、9.5mm、19mm等关键筛孔通过率实施高频抽检，使其长期波动范围稳定控制在5%以内；同时应结合现场快速筛分与室内水洗筛分双通道检测方式，实时掌握级配变化趋势。当检测结果出现偏移征兆时，应立即对0~5mm、10~25mm等关键粒径比例进行微调纠偏，防止级配漂移累积放大。具体的筛孔尺寸及通过率如表1所示：

表1 水泥稳定碎石颗粒范围

筛孔尺寸 (mm)	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
通过率 (%)	100	68-86	38-58	22-32	16-28	8-15	0-3

（二）优化拌和系统运行参数

施工中应首先保证拌和系统产能与运输能力的匹配，合理配置运输车辆数量，避免因车辆不足导致拌和机频繁启停，从而使粗集料在启动与停止瞬间受惯性作用向拌缸边部滚落形成初始离析带。拌和时间应严格控制不低于15s，确保水泥浆体能够充分包裹各级骨料，使混合料形成稳定、连续的包裹结构，避免因搅拌不足造成粗细料分布不均。对集料仓应加高隔板并加设防雨棚，防止装载机上料过满引起窜料，同时避免雨天细集料结团堵仓导致下料比例失衡^[5]。传送带倾角与运行速度应进行联合控制，倾角不宜过大，防止粗集料下滑集中；必要时在成品仓内加设缓冲挡板，削弱抛料效应，避免粗细料在落料过程中发生二次分选。在拌和计量方面，应对电子计量设备进行定期校准、期间核查，保证各档集料与水泥剂量的准确性，避免因计量偏差导致混合料级配失稳。对原材料含水率应实施多点、勤测制度，使拌和用水量能够及时随原料含水波动进行调整，防止因含水率过大导致细集料黏附皮带、因含水率过小造成水泥浆体不足而诱发离析^[6]。

（三）规范运输装卸流程

在装料环节，应统一采用“前一后一中”三点分次装车方式，避免一次性集中装料导致粗集料滚落至车厢边缘形成富集带；卸料高度应控制在2m以内，并确保卸料口完全开启，使混合料能够整体平稳地进入摊铺机料斗，减少因自由落体高度过大引发的再分选现象^[7]。运输过程中应统一使用篷布全覆盖，并在高温或大风天气下对篷布进行适量洒水，保持混合料表层湿润状

态，减缓水分蒸发造成的黏结力衰减。对运输路线应提前进行整修处理，尽量消除急弯、陡坡和明显起伏路段，要求车辆平稳行驶，严禁急刹车、急转弯与超速行驶，降低惯性冲击对颗粒结构的扰动。在卸料衔接控制方面，应合理安排车辆调度，确保摊铺机连续作业，避免出现停机等现象；当上一车卸料尚未完全结束时，应提前启动下一车卸料，使新旧料在摊铺机料斗内形成过渡衔接，防止尾部富集粗料集中摊铺形成接缝离析。车厢底板应保持清洁光滑，必要时涂刷润滑剂，确保混合料能够整体滑落，避免因局部滞留导致粗细料分层卸出^[8]。

（四）重构摊铺布料控制模式

施工中应确保摊铺机料斗内始终保持一定料位，避免出现空载状态引发两侧翻板向中间收料而造成粗集料集中；料斗内原有混合料不宜清理过净，应在新料卸入后与其共同进入螺旋布料器进行二次搅拌，以削弱粗细料分层趋势。螺旋布料器应保持匀速运转，料位高度宜稳定在叶片高度的2/3左右，并可通过增设反向叶片方式增强混合料横向搅拌能力，使布料过程中混合料始终处于连续稳定的二次混合状态^[9]。对供料不足工况应通过车辆调度提前解决，严禁以提高螺旋转速代替供料补充，防止细集料提前卸出、粗集料被带向两侧形成典型离析带。摊铺速度应控制在约1.5m/min左右，使布料距离、扰动次数与混合料稳定性保持合理匹配，避免过快行走引发布料距离加长、颗粒分选加剧。对施工过程中已出现的局部离析区域，应及时清除原有混合料，并换用新拌合格料填补，严禁直接碾压固化；必要时可对局部区域人工补撒细料并重新整形，恢复级配连续性。

（五）强化碾压养生协同控制

在碾压组织方面，应在摊铺完成后立即检测混合料含水率，使其处于最佳含水率区间后再开展碾压作业，避免因水分不足导致水泥浆体迁移、细集料被挤出形成再离析现象。碾压工艺应分为初压、复压、终压三个阶段逐级推进，初压阶段宜采用轻型压路机形成初始稳定框架，复压阶段选用重型压路机满足压实度控制要求，终压阶段再以轻型压路机进行静压整形，使基层内部颗粒逐步趋于均匀致密^[10]。碾压路线应遵循由边向中、先慢后快的原则，避免横向推移与侧向剪切力集中造成细集料迁移。在养生控制方面，碾压完成并经检测合格后应立即进行洒水养护，养护时间不少于7d，并根据天气情况保持基层表面持续湿润状态，防止水泥浆体早期失水收缩引发结构松散。养生期间应实施交通管制，严禁任何车辆通行，避免尚未形成强度的基层结构受到扰动而放大潜在离析缺陷；同时可采用透水土工布覆盖配合薄膜保湿的方式，稳定基层表面湿度环境。

三、结语

高速公路水泥稳定碎石基层离析是由多因素叠加作用形成的结果。通过构建以级配稳定为核心、以全过程施工协同控制为主线的离析防控体系，能够有效提升基层结构的密实性，从而为高速公路水稳基层施工质量管理提供具有推广价值的技术参考。

参考文献

- [1] 孙芳. 高速公路中水泥稳定碎石底基层施工技术 [J]. 四川水泥, 2025, (04): 255-257.
- [2] 王明明. 水泥稳定碎石基层离析原因及控制措施分析 [J]. 西部交通科技, 2023, (08): 24-25.
- [3] 陈永胜. 水泥稳定碎石底基层离析成因及防治措施 [J]. 交通世界, 2021, (20): 96-97.
- [4] 王兴超. 高速公路水泥稳定碎石基层宽幅大厚度摊铺碾压施工技术 [J]. 交通世界, 2023, (08): 59-62.
- [5] 王开科. 高速公路水泥稳定碎石基层施工技术分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46 (02): 73-75.
- [6] 刘建新. 高速公路水泥稳定碎石基层施工质量控制 [J]. 交通世界, 2022, (36): 87-89.
- [7] 王世超. 骨架嵌挤型水泥稳定碎石基层在高速公路施工中的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2024, (17): 220-222.
- [8] 宋耀红. 高速公路水泥稳定碎石底基层施工技术 [J]. 价值工程, 2024, 43 (10): 94-96.
- [9] 黄金城, 张大斌, 赵承伟. 高速公路水泥稳定碎石基层双层摊铺施工技术应用研究 [J]. 西部交通科技, 2023, (10): 18-21.
- [10] 刘伟伟. 论高速公路工程建设中水泥稳定碎石基层施工技术的应用 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4 (16): 129-131.

石墨烯在锂离子电池负极材料中的应用

邵浩明

湖南省地质实验测试中心, 湖南 长沙 410007

DOI:10.61369/ME.2025120062

摘 要： 在储能产业持续发展的推动下，提升锂离子电池负极材料性能稳定性成为行业主要研究方向。基于此，文章分析了石墨烯用作锂离子电池负极材料的优势，并重点探讨其作为负极主体、导电添加成分、活性材料协同组分以及外层包覆材料的多种应用方式，阐明石墨烯在参与锂离子存储、辅助电流传导、分散充放电应力及稳定界面结构方面的作用原理。研究认为，将石墨烯用作锂离子电池负极材料可以提升锂离子电池性能。

关 键 词： 石墨烯；锂离子电池；负极材料

Application of Graphene in Lithium-Ion Battery Anode Materials

Shao Haoming

Hunan Geological Experimental Testing Center, Changsha, Hunan 410007

Abstract： Driven by the continuous development of the energy storage industry, improving the performance stability of lithium-ion battery anode materials has become the main research direction in the industry. Based on this, this article analyzes the advantages of using graphene as a lithium-ion battery anode material, and focuses on discussing its various application methods as the main body of the anode, a conductive additive component, a synergistic component of active materials, and an outer coating material. It clarifies the principle of graphene's role in participating in lithium-ion storage, assisting in current transmission, dispersing charging and discharging stress, and stabilizing interface structure. The research suggests that using graphene as a lithium-ion battery anode material can enhance the performance of lithium-ion batteries.

Keywords： graphene; lithium-ion battery; anode materials

引言

在“双碳”目标与新能源汽车产业高质量发展的背景下，提升锂离子电池性能已成为行业关注的主要话题。工业和信息化部发布的《锂离子电池行业规范条件（2024年本）》提出，锂离子电池行业要提升材料性能与制造水平，推动锂离子电池朝着高能量密度高安全性方向迈进。工业和信息化部启动汽车动力电池碳足迹申报工作，释放以标准化核算与数据核查倒逼供应链低碳化、可追溯化的政策信号，进一步强化对电池材料性能稳定性与应用可靠性的严苛要求。《产业结构调整指导目录（2024年本）》同样将高性能电池材料纳入重点支持范畴，体现关键材料对于新能源汽车产业链的支撑作用。在这样的政策导向下，探讨石墨烯在锂离子电池负极材料中的应用，具备扎实的现实基础。

一、石墨烯用作锂离子电池负极材料的优势

（一）导电性能突出

锂离子电池负极的电子传输效率关系电极极化程度，石墨烯拥有连续的二维共轭结构，其碳原子以杂化方式排布，可支撑电子在片层内快速迁移，具备优异的导电特性。相比传统石墨颗粒主要依靠“点—点”接触的导电模式，石墨烯用作负极材料更易形成片层搭接的导电网络，在电极内部形成连续且低阻抗的电子传输通道。石墨烯优异的导电连续性，能够维持电极在循环过程

中的稳定导电状态，为负极材料在较高电流密度下稳定工作提供可靠的电子传输保障^[1]。

（二）储锂空间充足

石墨烯用作锂离子电池负极的储锂优势，源于其独特的二维片层结构。石墨烯作为一种新型的单原子层二维碳材料，具有超大的比表面积，优异的导热、导电、力学性能以及化学稳定性等。这让石墨烯的锂离子存储摆脱传统层间嵌入的单一途径，在片层表面、缺陷位点以及局部无序区域完成储锂，由此拓展储锂空间。化学还原或热还原法制备的石墨烯负极，可逆比容量普遍

超过石墨 372mAh/g，部分薄层石墨烯材料在初始循环阶段还能展现出更优异的锂存储能力。这一现象与石墨烯片层中丰富的边缘结构、缺陷位点以及未完全恢复的层间间距密切相关。石墨烯片层堆叠形成的微孔结构，还能助力电解液充分浸润电极内部，有效利用更多储锂位点。

（三）延缓充放电变形

充放电过程中的体积变化是影响负极材料服役时长的主要因素，石墨烯的单层或少层片状结构兼具较高力学强度与良好柔韧性，能够在电极内部形成连续分布的二维支撑单元。当活性材料在嵌锂脱锂过程中出现体积膨胀或收缩时，石墨烯片层可凭借自身形变分散局部应力，避免应力集中作用于活性颗粒，进而缓解颗粒破裂。石墨烯包裹金属氧化物或硅基负极材料时，其片层结构可以对活性颗粒形成约束作用，把体积变化限制在更小尺度内，助力维持电极整体结构稳定。石墨烯形成的柔性网络能在多次循环过程中保持电极结构完整，降低活性材料因反复变形出现的粉化脱落风险。这种兼具强度与韧性的结构特性，正是石墨烯在负极材料中展现出延缓充放电体积变形优势的原因。

（四）应用搭配范围广

石墨烯具备较宽的应用搭配范围，与其良好的化学惰性相关，这种特性使其不易与常见电解液环境与工作电位区间发生副反应，能够与多种负极活性材料共存且不增加额外反应风险。从材料形态来看，石墨烯可以片层形态分散于电极内部，也能用作包覆层，适配不同需求。石墨烯已被广泛应用于石墨类、金属氧化物类以及硅基负极材料，通常充当导电网络或是活性颗粒承载基底。石墨烯用作锂离子电池负极时，无需大幅调整原有电极制备流程，正因如此石墨烯展现出较为突出的应用搭配优势^[2]。

二、石墨烯在锂离子电池负极材料中的主要应用方式

（一）直接用作负极，参与锂离子存储

将石墨烯直接作为新能源汽车锂离子电池负极材料进行应用是最简单和直接的一种方式，即将石墨烯粉体直接与导电剂和黏

结剂混合制成负极浆料，并涂布在铜箔上制成负极片。石墨烯直接用作负极介入储锂行为时，锂离子与材料的相互作用发生在石墨烯自身结构之中。由此石墨烯在电极中的功能定位更加清晰明确，充分体现出自身作为负极材料的独立性。在实际应用层面，该路径多用于评估材料潜力，能够为优化锂离子电池负极设计提供有力参考依据。

石墨烯直接用作负极材料，通常围绕材料制备、电极成型和储锂行为三个层面展开。先采取化学还原或热还原制备少层或薄层石墨烯粉体，并在控制片层厚度的前提下，将其作为主要活性物质加入负极配方。电极制备阶段石墨烯占比较高，与黏结剂共同构成完整负极结构，在电极中独立承担储锂功能。行业关注的重点为凭借分散工艺让石墨烯片层连续覆盖集流体表面，避免过度团聚导致有效储锂界面减少。这种处理方式使锂离子在充放电过程中直接吸附于石墨烯片层表面、边缘区域及局部无序结构，实现多路径的储锂。电池运行中，石墨烯直接参与锂离子存储，使电子传输和锂离子扩散发生于同一材料内部，减少界面转换环节，有助于保持充放电过程中电极反应的一致性，使负极在反复循环中维持相对稳定的工作状态^[3]。

（二）作为添加成分，辅助电流传导

石墨烯作为添加成分应用于锂离子电池负极时，其在电极中的位置和用量具有明确限定，不承担主要储锂功能，仅以少量形式分散分布于电极结构内部。这种应用方式下，石墨烯参与电极内部的电流传导过程，在活性材料颗粒之间发挥连接补充作用。在不改变原有负极材料主体组成的前提下，让电极内部形成更连续的电子传输通路，进而改善电极的整体运行状态。相比直接作为负极材料使用的模式，这一应用路径突出“辅助而非替代”的定位，功能指向也更为清晰。

石墨烯作为添加成分应用于锂离子电池负极时，并不是简单地“多加一种材料”，会围绕电极内部电流传导路径采取有针对性的设计。一般在负极配方中加入少量石墨烯，与原有负极活性材料、导电剂和黏结剂共同构成浆料（如表 1 所示）。

表 1. 锂离子电池负极各成分占比

材料类别	材料示例	占比	主要功能说明
负极活性材料	人造石墨 / 天然石墨、硅碳复合材料等	92%–96%	存储锂离子的主体材料，石墨烯不替代该部分。
	石墨烯（粉体或浆料）	0.5%–3%	构成长程导电网络，增强电极整体导电性；用量过高可能导致浆料分散困难或成本增加。
	传统导电炭黑（如 SuperP）	1%–3%	提供颗粒间点对点接触的导电通路，与石墨烯形成互补。
黏结剂	SBR、CMC、PVDF 等	1.5%–3%	固定活性材料与导电剂，保障电极结构完整性，用量需兼顾黏结性与柔韧性。
溶剂（湿法配料）	去离子水（水系）或 NMP（油系）	根据需要调节	分散材料形成均匀浆料，干燥后挥发，不计入干基质量。

配料阶段不能以石墨烯替代主体负极材料，需协同使用其与传统导电炭材，石墨烯的作用是补充原有导电网络的不足，在不改变原有材料结构的前提下优化电极内部电子流动路径。配备料浆时分批次加入石墨烯，可以确保其均匀分布于负极浆料中，避免局部团聚影响导电连续性。随着涂布和辊压工序的完成，石墨烯片层被固定在活性材料颗粒之间，与集流体共同形成多点连接

的电子传导通道。充放电过程中，电子沿着石墨烯片层形成的通路流动，进而降低电极内部的传导阻力。传导方式的转变，有助于缓解高倍率工作条件下的电流集中现象，让电极反应保持更均匀的状态。结合实际使用效果分析，石墨烯作为添加成分应用于负极，能够在不显著增加材料用量的前提下，改善电极循环过程中的电流分布状态，这种应用方式尤其适用于对倍率性能较高的

锂离子电池负极。

(三) 结合活性材料, 分散充放电应力

石墨烯结合活性材料时, 主要服务于硅、锡等合金类或转换反应类高容量负极活性材料。这些材料在锂离子嵌入和脱出过程中会发生剧烈的体积膨胀收缩, 易导致电极粉化失效, 石墨烯在其中承担缓冲功能, 形成兼具导电性与机械柔韧性的三维网络, 用以包裹活性材料颗粒。在充放电过程中, 石墨烯凭借其优异的力学性能, 分散活性材料内部的应力变化, 抑制颗粒破裂团聚, 同时维持电极整体导电网络稳定。

石墨烯与体积变化较大的负极活性材料结合时, 优先参与锂离子电池负极制备流程, 在液相剥离法下展开片层, 并与活性颗粒接触。液相剥离法是一种从石墨中直接制备单层石墨烯的方法, 使用不同的液体溶剂和物理手段分散和剥离石墨层。混合过程中, 工作人员需控制混合时间, 使石墨烯片层一部分贴附在活性颗粒表面, 另一部分跨越相邻颗粒形成连接, 避免单颗粒在后续充放电中孤立承受形变。随后进入粉体处理阶段, 常采用喷雾干燥方式, 让石墨烯与活性材料固化为结构更稳定的复合颗粒。这一过程并非简单聚合, 需要石墨烯在颗粒内部形成连续的柔性支撑网络, 使复合颗粒具有适应体积变化的能力。在锂离子电池充放电过程中, 活性材料发生嵌锂和脱锂反应, 石墨烯片层的弯曲、滑移和褶皱吸收体积变化, 使应力不再集中作用于颗粒本体。与此同时, 跨颗粒分布的石墨烯片层在出现局部微裂纹时仍能维持颗粒连通, 避免裂纹迅速扩展为贯穿性破坏。石墨烯结合活性材料, 使充放电应力“多点分散”, 电极内部的反应区域保持相对稳定。

(四) 包裹传统材料, 延长使用寿命

在锂离子电池的各组成部分中, 电极材料是其关键与核心, 它直接决定了电池的容量、能量密度、循环寿命和抗负荷能力等多项主要性能。把石墨烯制备成保护性包覆层应用到传统负极材料表面, 能够提升锂离子电池负极长期循环过程中的界面稳定性与结构完整性, 而非大幅提高材料的比容量。包裹形式就是在活性颗粒表面形成一层极薄致密且具备导电性能的石墨烯外壳, 这层外壳首先可充当物理屏障, 减少活性材料与电解液的直接接触, 进而抑制副反应。石墨烯本身具备的高机械强度, 能够为其内部材料提供额外径向约束, 缓冲颗粒在锂离子反复嵌入脱出过程中产生的微体积变化^[4]。

应用石墨烯包裹传统负极材料时, 应优先选取人造石墨或天然石墨这类成熟负极颗粒作为包覆对象。这类材料性能稳定且工艺适配性强, 适合在不改变材料本身属性的前提下进行外层包覆处理。工作人员应以让石墨烯均匀铺覆颗粒表面为起点, 先将石墨烯或更便于分散的氧化石墨烯调配成稳定分散液, 再向其中投入石墨颗粒, 借助高速分散、湿法混合或剪切搅拌等工艺, 促使

石墨烯片层贴附颗粒表面。后续采取过滤干燥、喷雾干燥或轻度热处理的方式, 把片层固定在颗粒外层, 形成连续或半连续的包覆结构(如图1所示)。

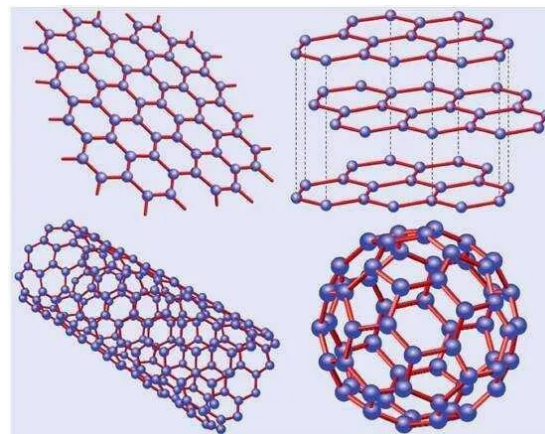


图1. 不同形状的石墨烯纳米材料示意图

该过程的要点在于让包覆层完整覆盖颗粒外表面, 又不会堵塞颗粒间的孔隙, 以此保障顺利推进后续工序。进入电极制造环节后, 按照常规工艺混合经过包覆处理的石墨粉体与黏结剂、导电剂, 再涂布到铜箔表面并辊压定型。由于石墨烯本身就附着在颗粒外层, 它在电极内部处于颗粒与电解液接触界面附近, 能够在充放电全程持续调控表层反应环境。石墨烯外层能够减少电解液对石墨表面的冲刷, 让界面反应集中发生在稳定区域, 固态电解质界面膜形成的均匀覆盖层, 降低因膜层反复增厚造成的活性锂消耗。石墨颗粒循环会引发表面应力变化, 石墨烯片层具备一定柔性, 可随颗粒表面形变发生微滑移, 减轻固态电解质界面膜因脆性破裂而反复再生的倾向。其次石墨烯形成的包覆层还能连通颗粒, 当局部颗粒的接触状态因长期循环出现松动时, 相互搭接的石墨烯片层可维持颗粒间的电子传输通路, 避免电极内部因局部失联出现反应不均。这种包覆处理下, 石墨烯可以调节电极长期工作状态, 最终实现提升界面稳定性的应用效果。

结束语: 石墨烯用作锂离子电池负极材料的价值, 体现为适配不同应用场景的能力。无论是直接充当负极主体, 或是作为功能性添加成分, 又或是以搭配、包覆的方式参与, 石墨烯都能够表现出优良性能。这种角色灵活可变、作用精准可控的材料特性, 让石墨烯成为衔接基础研究与工程应用的纽带。虽然石墨烯材料的优点确实很多, 但是它的缺点也是极其明显, 首先便是, 作为一种可多次循环使用的材料, 它具有以下缺陷: 目前石墨烯还没达到实用化阶段, 离大批量生产还有很长的路要走。随着制备工艺的成熟, 石墨烯有望在满足负极材料高性能使用需求的同时, 更好地服务于锂离子电池长期安全可靠运行。

参考文献

- [1] 张弛. 石墨烯复合材料在锂离子电池负极中的导电性 [J]. 唐山师范学院学报, 2025, 47(03): 14-19.
- [2] 赵露, 毋应科, 袁国辉, 李子坤, 王朝阳, 李云. 锂离子电池石墨烯/硅负极材料的制备及电化学性能研究 [J]. 当代化工研究, 2024, (23): 1-3.
- [3] 秦圆, 赵春玲. 锂离子电池硅/石墨烯负极材料制备技术研究进展 [J]. 广州化工, 2024, 52(02): 1-3+9.
- [4] 李东霖, 杨万亮, 曹锐, 杨雪, 徐梅松. 球型 Si 基碳包覆锂离子电池负极材料研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(21): 50-60.

人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策

黄祖云

南海经济开发区人民医院, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120025

摘 要 : 人员密集场所一旦发生火灾事故, 不仅会造成直接的经济损失, 也容易发生踩踏等事故, 威胁人们的生命安全。为此, 文章将对人员密集场所消防监督工作中存在的问题进行分析, 提出一些解决建议, 希望能提升人员密集场所消防监督工作效果, 减少火灾事故的影响。

关 键 词 : 人员密集场所; 消防监督工作; 问题

Problems and Countermeasures in Fire Supervision Work at Crowded Places

Huang Zuyun

Nanhai Economic Development Zone People's Hospital, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : In the event of a fire accident at crowded venues, it not only causes direct economic losses but also easily triggers stampedes and other incidents, posing a threat to people's lives and safety. Therefore, this article analyzes the issues present in fire supervision work at crowded venues and proposes some solutions, aiming to enhance the effectiveness of fire supervision work at such locations and mitigate the impact of fire accidents.

Keywords : crowded venues; fire supervision work; issues

引言

火灾事故一旦发生, 会造成严重的人员伤亡, 比如人员密集场所容易发生火灾事故, 比如酒店、超市、大型娱乐场所等, 这些地方不仅可燃物比较多, 空间也相对狭窄, 如果发生火灾事故, 人们在慌乱中可能发生踩踏事件, 造成严重的人员伤亡。比如2023年12月2日, 山西省朔州市永和百货大楼发生火灾。接警后, 消防救援人员立即出动, 所幸事故未造成人员伤亡。再如2023年6月13日, 内蒙古自治区东胜区鄂尔多斯购物中心发生一起火灾, 起火处为一楼手机店。在火情得到基本控制后, 消防员进入商场实施内攻, 消灭残火时先后发现两名人员, 经120急救送医抢救无效死亡。从两起案例可以看出, 人员密集场所的火灾事故发生较多, 一不注意就会酿成严重的惨剧。因此, 文章从人员密集场所消防监督工作角度出发, 探究其中存在的问题以及解决建议至关重要, 能为人员密集场所消防监督工作提供参考, 保障社会稳定运行。

一、人员密集场所消防监督工作

火灾事故是一种容易危害, 会造成严重的人员伤亡, 比如人员密集场所容易发生火灾事故, 比如酒店、超市、大型娱乐场所等, 这些地方不仅可燃物比较多, 空间也相对狭窄, 如果发生火灾事故, 人们在慌乱中可能发生踩踏事件, 造成严重的人员伤亡。本章节将探讨人员密集场所、火灾概念及等级、人员密集场所消防监督工作的价值等, 以下将进行详细阐述。

(一) 人员密集场所

人员密集场所主要是指公共聚集场所, 比如图书馆、教学楼、病房楼、宾馆、饭店、商场、集贸市场、客运车站候车室、客运码头候船厅、体育场馆、会堂以及公共娱乐场所等^[1]。

(二) 火灾概念及等级

在城市化建设中, 火灾事故时有发生, 一些严重的火灾事故不仅会威胁人们的生命财产安全, 也会对社会稳定产生影响。火灾是

指在时间、空间中, 火势没有第一时间扑灭, 所造成的伤害, 在各种自然灾害中, 火灾是最容易发生且会造成严重影响的灾害类型, 尤其是一些特别重大的火灾事故, 会造成30人以上死亡, 或者100人以上重伤, 或者1亿元以上直接财产损失的火灾(如表1所示)。

表1 火灾等级

等级	损失情况
特别重大火灾	特别重大火灾, 是指造成30人以上死亡, 或者100人以上重伤, 或者1亿元以上直接财产损失的火灾
重大火灾	重大火灾, 是指造成10人以上30人以下死亡, 或者50人以上100人以下重伤, 或者5000万元以上1亿元以下直接财产损失的火灾
较大火灾	较大火灾, 是指造成3人以上10人以下死亡, 或者10人以上50人以下重伤, 或者1000万元以上5000万元以下直接财产损失的火灾
一般火灾	一般火灾, 是指造成3人以下死亡, 或者10人以下重伤, 或者1000万元以下直接财产损失的火灾

（三）人员密集场所消防监督工作的价值

人员密集场所主要是指公共聚集场所，比如图书馆、教学楼、病房楼；宾馆、饭店、商场、集贸市场等。对这类场所进行消防监督工作，具有非常重要的价值。一是及时发现隐患风险。人员密集场所消防监督能及时发现一些消防设施以及建筑消防能力的薄弱点，根据薄弱点采取针对性措施，强化关键位置的火灾防范能力，及时发现可能存在的火灾隐患。二是协调各类资源。人员密集场所消防监督工作除了强化相关场所的火灾防范能力外，也能通过规划、指导，协调各类资源，从而提升人员密集场所的火灾防范、应对能力^[9]。

二、人员密集场所消防监督工作存在的问题

人员密集场所如果发生火灾事故，容易出现人员踩踏等情况，造成严重的经济损失。因此，做好人员密集场所消防监督工作具有非常重要的价值。但在相关工作开展过程中，可能会面临一些问题，比如队伍建设不足、影响人员密集场所消防监督工作开展效果，以下将对存在的问题进行探究分析。

（一）队伍建设不足

在人员密集场所消防监督工作中，可能面临队伍建设不足的问题。一方面，从业人员可能缺乏正确的消防安全观念，比如消防监督人员对火灾安全了解较少，发生火灾之后无法及时运用正确的方法灭火。另一方面，人员密集场所消防监督工作的人员数量可能不足。比如在我国城镇化不断发展的过程，人员密集场所的数量不断增加，需要更多消防监督人员，如果消防监督人员的数量不足，就会降低人员密集场所消防监督工作的开展效果，无法满足要求^[9]。

（二）消防监督方案不完善

人员密集场所消防监督工作中，可能会面临消防监督方案不完善的情况，包括职责不清、协同不畅等。比如人员密集场所消防监督属于系统性的工作，在实际开展过程可能会遇到一些职责不清的问题，一旦出现职责不清、职责混乱等情况，就容易对人员密集场所消防监督工作开展效果产生影响。

（三）消防监督保障不足

人员密集场所消防监督工作中，会面临保障措施不足的情况，比如缺乏管理保障、数字化建设保障等，不利于及时发现一些火灾隐患，难以满足人员密集场所消防监督工作要求。

三、人员密集场所消防监督工作建议

门诊楼、住院楼、图书馆、教学楼、宾馆、酒店等等都属于人员密集场所，一旦发生火灾事故，除了造成直接的经济损失外，也容易出现踩踏等事故。为了提升人员密集场所消防监督工作效果，解决工作中的一些问题，本章节将对人员密集场所消防监督工作提出一些建议，希望能提升人员密集场所消防监督工作水平。

（一）加强队伍建设

在人员密集场所消防监督工作中，面临队伍建设不足的问题，

比如消防监督人员对火灾安全了解较少，发生火灾之后无法及时运用正确的方法灭火；消防监督人员的数量不足，影响人员密集场所消防监督工作的开展效果等。为此，要注重加强队伍建设，提升人员密集场所消防监督工作水平。第一，人才吸纳。在组建专业化队伍的过程，要注重人才吸纳，利用合理的引才方案引进专业化队伍。在人才吸纳方面，要做好人才吸纳的分析，比如分析人员密集场所特征、人员密集场所火灾隐患类型、人员密集场所消防需要等，结合分析的结果，拟定针对性的人才引进方案。在人才引进方案中，需明确引才的时间、地点以及引才的各项标准，并梳理引才流程，保障人才引进符合要求。在人才选聘环节，要关注人才的多方面素养、能力，如思想价值观念、心理素质等，在人才选聘环节，也要秉持公平公正的观念，这样能提升人才选聘的效果，实现组建高素质队伍的要求。在人才吸纳之后，要了解人才的一些需求，如物质方面的需求、精神方面的需求等，根据人才吸纳需求，对现有的制度体系进行调整，提升留才效果，实现组建高素质队伍的目标。第二，培训教育。在组建专业化队伍过程，要注重培训教育，利用培训方式提升人员的素养能力，使其满足人员密集场所消防监督工作的要求。培训分析方面，要从多角度做好分析工作，如技术能力的分析、消防监督的分析等，结合培训分析结果，制定针对性的培训方案，以实现组建高素质队伍的目标。同时培训教育过程也要注重方式的改革，比如从线上线下混合培训角度出发，结合培训教育要求，制订方案计划，包括线上开展理论知识学习，线下进行实践能力培训等，根据线上线下混合培训方式，提升人员素养能力，使其满足人员密集场所消防监督工作要求。在组建专业化队伍的过程，也要注重培训考核方式，利用培训考核对培训情况进行监督，比如设计一些考核指标，利用考核反馈方式，找出培训中的一些不足，以提升培训教育效果，使工作人员能满足人员密集场所消防监督工作的要求。

（二）完善消防监督方案

在人员密集场所消防监督工作中，可能会面临消防监督方案不完善的情况，比如会出现职责不清、职责混乱等情况，就容易对人员密集场所消防监督工作开展效果产生影响。为此，需要完善消防监督方案，满足人员密集场所消防监督工作要求。第一，转变传统消防监督观念。在人员密集场所消防监督工作中，要学会转变传统消防监督观念，比如树立全过程消防监督管理观念，将消防监督融入人员密集场所消防监督的整个过程，及时找出其中的不足，以满足人员密集场所消防监督工作要求。再如树立精细化消防监督管理观念，根据消防监督方案工作要求，分解消防监督指标，将其融入人员密集场所消防监督工作的各个重要部分，以提升消防监督工作的开展效果。第二，制订消防监督机制。基于人员密集场所的要求，要注重制订消防监督机制，比如从以往经验出发，明确各部分工作职责，保障消防监督工作井井有条，不会出现职责不清的问题。同时也要建立消防监督评价机制，制订针对性、合理性的评价指标，及时找出人员密集场所消防监督工作的问题。另外，在制订消防监督机制过程，也要根据人员密集场所的特点进行针对性设计，比如图书馆、教学楼、病房楼、

宾馆等都属于人员密集场所，拥有不同特点，在消防监督检查的过程，要结合不同场所的实际情况，进行针对性监督，及时发现相关场所的安全隐患，从而提升消防监督工作水平^[5]。

（三）做好保障工作

第一，管理保障。人员密集场所消防监督工作中，要注重管理保障，设计一些绩效考核指标，规范相关工作，使其满足人员密集场所消防监督的要求。一方面，可以从质量管理监督出发，比如明确人员密集场所消防监督工作要点，设计质量管理指标，利用质量管理方式，对整个工作进行规范，达成质量管理的要求。另一方面，要根据人员密集场所消防监督工作要点，设计绩效奖惩指标，利用绩效考核方式找出人员密集场所消防监督工作中的一些问题，以便实施针对性地优化完善，并将考核结果与奖惩结合，提升考核的激励性与约束性，达成人员密集场所消防监督工作要求。第二，数字化保障。基于人员密集场所消防监督工作，要注重数字化保障，比如在一些重要的场所中，安装数字化设备，利用数字化、智能化技术对人员密集场所进行消防监督。

在数字化、智能化技术的支持下，能提升人员密集场所消防监督工作水平^[6]。

四、结语

总之，人员密集场所一旦发生火灾事故，除了造成直接的经济损失外，也容易出现踩踏等事故。为此，本章节将对人员密集场所消防监督工作提出一些建议，比如分析人员密集场所特征、人员密集场所火灾隐患类型、人员密集场所消防需要等，结合分析的结果，拟定针对性的人才引进方案；根据线上线下混合培训方式，提升人员素养能力；要结合不同场所的实际情况，进行针对性监督，及时发现相关场所的安全隐患；在一些重要的场所中，安装数字化设备，利用数字化、智能化技术对人员密集场所进行消防监督。希望上述建议能提升人员密集场所消防监督工作水平，避免发生火灾事故。

参考文献

[1]朱义国. 浅析人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 [J]. 水上安全 ,2023,(14): 124-126.
[2]杨杰峰. 浅析人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 [J]. 消防界 (电子版) ,2023,9(21):66-68.
[3]王倩. 人员密集场所消防监督工作中存在的问题研究 [J]. 今日消防 ,2023,8(02):53-55.
[4]王洋. 人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 [J]. 消防界 (电子版) ,2022,8(20):106-108.
[5]胡益. 人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 [J]. 消防界 (电子版) ,2022,8(05):100-102.
[6]支冬青. 人员密集场所消防监督工作中存在的问题与对策 [J]. 消防界 (电子版) ,2022,8(03):84-85.

安全工程在化工企业中的风险评估与管理策略

邝永浩

协防（中山）安全技术有限公司，广东 中山 528400

DOI:10.61369/ME.2025120026

摘 要： 化工企业作为一个高风险的行业，其安全工程的意义是不言而喻的。其不仅关系到职工的生命和财产安全，更是企业实现可持续发展和社会和谐稳定有着深远的影响。安全工程在风险评估的基础上，运用定性与定量相结合的方法对化工工艺和物料存储中的关键风险要素进行识别与控制，以保障企业运营安全。文章以案例形式对大型与中小型化工企业风险评估实践论述，提出了健全安全管理制度、加强人员培训、优化设备维护与加强安全监督的安全管理策略。

关 键 词： 化工企业；安全工程；风险评估；安全管理策略

Risk Assessment and Management Strategies of Safety Engineering in Chemical Enterprises

Kuang Yonghao

Xiefang (Zhongshan) Security Technology Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract： As a high-risk industry, the significance of safety engineering in chemical enterprises is self-evident. It not only concerns the safety of employees' lives and property but also has a profound impact on the sustainable development of enterprises and social harmony and stability. Based on risk assessment, safety engineering employs a combination of qualitative and quantitative methods to identify and control key risk factors in chemical processes and material storage, ensuring the operational safety of enterprises. This article discusses risk assessment practices in large and small-to-medium-sized chemical enterprises through case studies and proposes safety management strategies, including improving safety management systems, enhancing personnel training, optimizing equipment maintenance, and strengthening safety supervision.

Keywords： chemical enterprises; safety engineering; risk assessment; safety management strategies

引言

就化工行业而言，安全工程对于保障生产安全和防止事故的发生都十分必要。化工产品生产工序繁杂，涉及到许多易燃，易爆和有毒有害物质等，如果出现事故后果将不堪设想。通过对风险进行科学评估以及采取有效安全管理策略来确保职工生命安全，保持企业稳定发展以及推动社会和谐稳定。

一、安全工程在化工企业中的意义

（一）保障人员生命安全

化工企业生产环境比较复杂，潜在危险性较大，安全工程要保证职工安全。化工生产中会涉及到大量易燃易爆有毒有害物质，在出现事故时后果会异常严重。企业必须采取严格的安全管理制度与技术措施来防范与治理各种可能发生的风险。具体措施有强化安全培训、提高职工安全意识及应急处理能力、定期开展安全检查和设备维护等，以保障生产装置操作安全。

（二）维护企业可持续发展

安全工程在化工企业可持续发展过程中起着举足轻重的作用。安全事故在给职工生命带来威胁的同时，也带来了重大经济

损失与环境污染，影响到企业声誉与市场竞争力。企业实施综合安全工程措施能够有效地减少事故风险，保证生产过程稳定持续。这样既有利于降低停工和设备损坏造成的经济损失，又能避免环境污染事件的发生，同时维护了企业在社会上的形象。

（三）促进社会和谐稳定

化工企业安全生产问题不仅与企业本身的发展息息相关，而且对于社会和谐稳定也有着重要的影响作用。化工事故常造成严重环境污染，人员伤亡及财产损失，乃至社会恐慌与不安。所以化工企业一定要重视安全生产工作，用安全工程手段来防治各种事故。企业要主动承担社会责任，严格按照国家及地方安全生产法规、标准开展安全生产工作，并定期开展安全生产状况评价与改善工作。

二、安全工程在化工企业中的风险评估

（一）风险评估的方法

1. 定性风险评估方法

定性风险评估方法是化工企业普遍采用的一种风险评估方法，通过专家经验、历史数据及判断来分析风险，不依赖特定数据及模型。这一研究方法涵盖了风险矩阵、故障树分析（FTA）以及危害与可操作性研究（HAZOP）等多种工具。风险矩阵法将风险发生的可能性及后果划分为不同风险等级，有助于企业确定高风险区域并重点关注。故障树分析的目的是通过识别可能引发系统失效的多种因素，构建一个全面的系统故障树模型，以协助企业更好地识别潜在的危險源和故障模式。

2. 定量风险评估方法

定量风险评估方法以特定的数值与模型来分析及评价风险，并给出较为准确的风险量化结果。这一研究方法涵盖了事件树分析（ETA）、蒙特卡罗模拟技术、故障模式的影响以及危害分析（FMECA）等多个方面。事件树分析旨在描述事件可能发生的路径，并计算这些路径的概率及其可能带来的后果，从而协助企业更好地识别和评估可能存在的风险。蒙特卡罗模拟方法主要是利用大量的随机模拟手段，来评估系统在各种情境下的性能，进而对风险和不确定性进行量化分析。

（二）风险评估的关键要素

1. 化工工艺风险

化工工艺风险作为化工企业风险评估的重点内容之一，其涉及到了生产中可能存在的各类工艺问题及安全隐患。化工工艺复杂多样，设备、操作参数以及物料特性均会造成工艺风险的发生。为了识别可能的危险源，企业必须对每一个工艺步骤进行深入的分析，这包括了反应、传质、传热以及分离等各个环节。如化学反应中反应物性质，反应条件控制，反应器设计与运行都会对反应安全与稳定产生影响。在传质传热时，设备选择和维护，操作参数控制以及传质传热效率也会产生工艺风险。

2. 物料与存储风险

材料及储存风险是化工企业风险评价的又一重要内容，它关系到化工原料，中间体及成品等产品的安全储存，运输及加工。化工生产所用材料种类多，性能不一，部分材料易燃、易爆、有毒有害，需格外关注其储存及处理方法。企业有必要详细地了解每一种材料的性质，包括材料的理化性质，储存条件和相容性，并制定出相关安全措施。如易燃易爆物料需储存于专用仓库内，与火源、热源保持一定距离，有相应消防设施。

（三）风险评估的案例

1. 大型化工企业的风险评估实践

大型化工企业的风险评估工作是一项复杂而又系统化的工作，它涉及了很多方面的思考与多层次分析。企业在进行评估时，必须明确评估的具体范围和目标，这涉及到识别可能的风险因素，例如原材料供应、生产过程中设备的故障、操作失误和自然灾害等。公司将成立一支由资深工程师、技术人员、管理人员等组成的专业评估队伍，以保证评估过程专业全面。评估团队将

从每日生产记录，设备维护记录和安全检查报告中搜集并分析海量数据。

2. 中小型化工企业的风险评估探索

中小型化工企业开展风险评估一般会遇到资源有限和技术力量薄弱的困难。但这并不等于可忽略风险评估。为有效地开展风险评估工作，这类公司一般都依赖外部专业机构支持并雇佣有经验的安全顾问、工程师等辅助评估工作。企业有必要对其生产流程及可能存在的风险源有一个完整的认识，这些风险源包括原料的存储与利用，生产设备运行状态以及职工操作规范。下一步评估团队将利用科学方法与手段对各个环节进行细致的风险分析并评估其可能性及可能产生的效应。

三、化工企业安全管理策略

（一）完善安全管理制度

1. 建立健全安全生产责任制

要明确各层级管理层及职工安全职责。企业高层管理者要全面负责整个公司安全生产工作，确立总的安全方针与目标，保证资源的必要配置。中级管理人员主要负责执行具体的安全管理措施，这包括但不限于进行监督检查、风险评估以及隐患的排查工作。基层员工一定要严格遵守安全操作规程，对实际工作中发现的隐患要及时上报。为保证责任制得到切实执行，企业要编制一份详尽的岗位安全责任说明书，并明确各岗位安全责任及考核标准。另外，还定期开展安全绩效评估工作，用量化指标评价各个岗位安全表现，调动职工主动参与安全管理工作的积极性。

2. 制定科学合理的安全操作规程

操作规程应当涵盖所有生产环节，从原材料的采购和存储，到生产过程中的每一个步骤，再到产品的包装和运输。每项操作规程均应详细说明具体操作步骤，注意事项和可能出现的危险。同时操作规程应与最新技术标准及行业规范相结合以保证其科学性及其适用性。为确保这些规程真正落地执行，企业要组织有关人员开展操作规程学习与培训，使每一位职工熟练操作、严格执行。管理人员要定期检查操作规程是否落实，发现违规操作并进行整改。通过对操作规程进行不断地完善与更新，使企业能够不断地提升安全管理水平，降低生产中存在的各种安全风险，保障生产顺利进行。

（二）加强人员培训与教育

1. 安全意识培养

培养职工安全意识，是化工企业安全管理工作中一项基础工作。企业需采取多种形式进行宣传和教肓，使全体职工认识到安全生产的重要意义。安全知识、事故案例分析和安全注意事项可通过企业内部通讯，公告栏和电子邮件定期公布。另外企业还应举办安全主题培训，安全知识竞赛，安全文化活动，以提高职工参与感与认同感。管理者在平时的工作中要率先垂范，随时注意安全，形成注重安全的企业文化氛围。通过这些举措，职工们将更自觉遵守安全规章制度、积极查找并上报工作中存在的安全隐患。长期安全意识培养不仅能够显著减少安全事故发生，而且能

够提升员工归属感与责任感，为企业可持续发展做出贡献。

2. 专业技能培训

企业要针对不同职位的需求制定周密的培训计划。对新上岗职工，要有计划有步骤地开展上岗培训，主要培训内容有企业安全管理制度，岗位操作规程和应急处理方法。对在职工则要定期举办技能提升培训尤其是新设备新工艺操作培训。另外，商家还将邀请业内专家做专题演讲，讲解最新安全技术与管理理念。为保证培训效果，公司可采取理论联系实际的培训方法，并通过实际操作、模拟演练等手段使员工掌握实战技巧。经过培训，要经过严格考核，合格职工才能上岗作业。^[1-5]

（三）优化设备维护与管理

1. 设备预防性维护计划

既延长了设备使用寿命，降低了故障发生率，又保证了生产持续稳定进行。制订预防性维护计划，必须先将全部设备综合盘点归类，并按其重要程度及使用频率来决定维护周期及内容。接着，制定了详尽的维修手册，并列出了维修该装置的步骤，需要使用的工具以及注意事项。除定期维护外，还应包括临时检查、突发故障处理等方案。企业要有专门的维修队伍，定期检查和维修设备，记录好每一次维修的具体状况，建立好设备维修档案。通过对数据进行分析，发现并解决了可能存在的问题并对维护方案进行优化。另外企业还应该引进振动分析，油液分析以及其他先进监测技术来对设备状态进行实时监测，以提升预防性维护精准度。

2. 设备更新与技术改造

在科学技术不断进步，生产需求不断发生变化的情况下，对陈旧的设备进行及时的更新，并引入先进的技术可以显著提升生产效率与安全性。企业要综合评价现有的设备，决定哪些是要更新改造的。评价内容为设备实际运行情况，维修频率和能耗水平。接着，依据评估结果制定了详尽的更新改造方案，并确定了时间节点及预算安排。设备更新改造时，要优先选用技术上成熟，性能上稳定的新机型，并兼顾它们之间的兼容性与可操作性。对技术改造项目企业可通过引入自动化和智能化设备来优化

生产流程和降低人为操作风险。各企业还应加强同设备供应商、科研机构等方面的协作，及时了解最新技术信息、服务支持等。

（四）强化安全监督与检查

1. 日常安全巡检制度

通过经常性巡检，能及时发现和排除生产安全隐患，保障生产安全。在建立巡检制度时应首先明确巡检频率及巡检内容。巡检频率要随设备运行状况及生产环境变化及时进行调整，巡检内容要覆盖设备运行状况，操作规程实施，安全防护措施落实。巡检时，要使用标准的检查表单对每一项检查内容及发现问题进行详细记录，并形成一份完整的巡检报表。对排查出的安全隐患要及时分析处置，制订整改措施，并对执行情况进行追踪。

2. 专项安全检查活动

在化工企业中，专项安全检查活动具有举足轻重的地位。它们有能力对特定的安全隐患和风险进行详尽的检查和整治。需结合实际制定专项检查重点与对象。检查内容可涉及危险化学品储存与使用，高风险作业安全管理，应急预案编制与演练。拟定了详细检查方案并确定了检查时间，范围及负责人。在巡查过程中要组织专门的巡查小组、运用科学的巡查方法、对各种安全隐患进行全面详细的排查。对查出的问题要及时记录在案、分析成因、制定整改措施、保证整改落实。

四、结束语

总之，化工企业安全管理工作是一个系统工程，必须在体制上，技术上，人员上，监管上等各方面着手，才能形成一个全方位安全管理体系。通过落实严格安全管理制度、加强职工安全教育及技能培训、优化设备维修管理、加强日常及专项安全监督检查等措施，能够有效减少事故风险，确保化工企业生产安全。在今后的发展过程中，伴随着科学技术的不断进步以及管理理念的不断更新，化工企业安全管理也会变得越来越科学、越来越有效，有助于可持续发展以及社会稳定。

参考文献

- [1] 田震, 沈艳洋, 赖恩. 基于相对风险管控能力的化工企业风险分级方法 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(08): 2598-2606.
- [2] 王福生, 高湛翔, 董宪伟, 王建涛, 孙萌. 基于物元可拓理论的化工企业风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(06): 2401-2406.
- [3] 冉光林, 邹尼波. 石油化工企业改扩建工程安全风险管理探析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(18): 57-58.
- [4] 吕卓. 分析石油化工企业改扩建工程安全风险管理 [J]. 化工管理, 2018, (26): 96-97.
- [5] 孟鹏. 化工企业“煤改气”过程中安全风险识别 [J]. 山东化工, 2018, 47(03): 147-148.

LED 封装中荧光粉的无机化学特性与应用分析

李玉容

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120028

摘 要： 本文围绕 LED 封装展开，论述荧光粉在其中的关键作用。涉及荧光粉光转换、晶格结构、热稳定性、表面修饰等特性，探讨铝酸盐、氮化物体系荧光粉相关规律，介绍多基质荧光粉配比、封装工艺参数优化等方法，并列举多种应用案例，最后指出基于无机化学特性可提升封装性能。

关 键 词： LED 封装；荧光粉；封装工艺

Analysis of Inorganic Chemical Properties and Applications of Phosphors in LED Packaging

Li Yurong

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article centers on LED packaging, discussing the crucial role of phosphors within it. It delves into the properties of phosphors, including light conversion, lattice structure, thermal stability, and surface modification. The article explores the relevant principles of aluminate and nitride-based phosphors, introduces methods such as the proportioning of multi-substrate phosphors and optimization of packaging process parameters, and provides various application examples. Finally, it highlights that packaging performance can be enhanced based on inorganic chemical properties.

Keywords： LED packaging; phosphor; packaging process

引言

随着《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》于2021年颁布，其中对绿色发展与科技创新的强调，为LED产业发展提供有力政策支持。LED封装结构中，荧光粉在光转换、色域调控等方面作用关键，其晶格结构、热稳定性、表面化学修饰等特性对封装可靠性影响重大。不同体系荧光粉的晶场调控、量子效率、高压合成工艺等方面研究，为提升发光性能提供理论依据。在高显色照明、植物照明等应用领域，荧光粉配比优化、封装工艺参数调整能满足特定需求。相关研究对推动LED封装技术发展，实现产业高效、稳定、节能发展具有重要意义。

一、LED封装技术基础与荧光粉功能定位

（一）LED封装结构对荧光粉的技术需求

LED封装结构中，LED芯片、基板材料与荧光涂覆层协同工作。LED芯片发射蓝光，荧光涂覆层中的荧光粉吸收蓝光并转换为其他颜色光，实现白光发射，这一过程需与基板材料良好适配。封装工艺对荧光粉分布密度有具体要求，因为荧光粉分布直接影响光的转换效率与均匀性^[1]。若分布过密，可能导致自吸收现象，降低光提取效率；分布过疏，则无法充分转换蓝光，影响白光质量。从技术需求看，荧光粉需具备高转换效率，以高效将蓝光转换为所需颜色光；要有良好的热稳定性，因封装过程及工作中会产生热量，热稳定性差会影响发光性能；还需与封装材料有良好兼容性，确保在封装体系中能稳定发挥功能，保障LED长

期稳定工作。

（二）荧光粉在光转换中的核心作用

在LED封装中，荧光粉在光转换里扮演着核心角色。LED芯片发出的光通常为短波长的蓝光或紫外光，无法满足人们对于不同颜色光的需求。荧光粉能够吸收芯片发出的部分光，并将其转换为较长波长的光，从而实现光的颜色转换。其波长转换效率直接影响LED的光效，若转换效率高，更多的原始光被有效利用，光效得以提升^[2]。而色域调控能力则决定了LED所能呈现的颜色范围，对显色指数有着关键影响。优秀的色域调控可使LED呈现出更丰富、逼真的色彩，进而提高显色指数，为人们提供更好的视觉体验。通过对荧光粉在光转换中核心作用的深入理解与优化，能显著提升LED封装产品的性能。

二、荧光粉无机化学特性表征体系

（一）晶格结构与热稳定性分析

在LED封装中，对荧光粉晶格结构与热稳定性的准确分析至关重要。通过XRD技术，能够精确测定荧光粉的晶体结构，确定其晶格参数，进而分析晶体缺陷率。晶体缺陷的存在可能影响荧光粉的发光性能及与封装材料的相容性，进而影响封装可靠性^[3]。同时，利用TG-DSC联用技术可获取荧光粉的相变温度。相变温度反映了荧光粉的热稳定性，若在LED工作过程中温度接近或超过相变温度，荧光粉的结构与性能会发生改变，严重影响LED的发光质量与寿命。因此，精确掌握荧光粉晶格结构与热稳定性的关键参数，对于提升LED封装的可靠性具有重要意义。

（二）表面化学修饰与抗老化机理

在LED封装中，荧光粉的表面化学修饰与抗老化机理至关重要。硅烷偶联剂包覆是常用的表面化学修饰手段，能显著增强荧光粉的耐湿氧腐蚀性能。硅烷偶联剂分子一端可与荧光粉表面的羟基等基团发生化学反应，形成化学键合，另一端则可与周围的有机聚合物相互作用，从而在荧光粉表面构建起一层稳定的保护膜^[4]。这层保护膜能有效阻挡湿氧等侵蚀性物质与荧光粉的直接接触，减缓其化学降解和性能衰退。通过分析荧光粉在不同湿度和氧气浓度环境下的发光性能、结构变化等指标，可实现对耐湿氧腐蚀性能增强机制的量化评价。深入理解表面化学修饰与抗老化机理，有助于优化荧光粉的性能，提升LED封装的可靠性与稳定性。

三、典型荧光粉体系特性对比研究

（一）铝酸盐体系荧光粉

1. YAG:Ce³⁺的晶场调控规律

在LED封装所用的铝酸盐体系荧光粉中，YAG:Ce³⁺的晶场调控规律对其发光性能至关重要。基于Tanabe-Sugano模型，Ce³⁺离子的配位环境会显著影响其发射光谱红移量。Ce³⁺离子周围配位体的种类、数量和排列方式等因素，均能改变晶场强度和对称性。当晶场强度改变时，Ce³⁺离子的能级分裂发生变化，进而导致发射光谱产生红移或蓝移。通过对Ce³⁺离子配位环境与发射光谱红移量进行定量关系分析^[5]，可深入了解晶场调控规律，为精确调控YAG:Ce³⁺荧光粉的发光颜色、提高发光效率提供理论依据，有助于在LED封装中实现更理想的光谱匹配和光学性能。

2. 热猝灭效应机理验证

为验证铝酸盐体系荧光粉热猝灭效应机理，借助Arrhenius方程对其进行拟合计算激活能。温度升高会致使荧光粉发光强度衰减，此过程蕴含物理化学本质变化。通过Arrhenius方程拟合，能精准获取激活能数值，该数值可直观反映热猝灭过程中克服能垒所需能量^[6]。基于此，深入剖析温度与激活能的内在联系，明确温度诱导发光强度衰减的根本原因。从物理化学层面阐释，热猝灭可能源于晶格振动加剧、电子跃迁受阻等因素。激活能的计算结果可作为判断热猝灭程度及分析其机理的关键依据，

从而为优化铝酸盐体系荧光粉在LED封装中的热稳定性提供理论支撑，推动其在实际应用中的性能提升。

（二）氮化物体系荧光粉

1. 晶场调控与量子效率关系

在氮化物体系荧光粉中，晶场调控与量子效率关系密切。晶场对荧光粉中激活离子的电子云分布产生作用，进而影响其能级结构。以Eu²⁺掺杂的氮化物荧光粉为例，不同的晶场环境会导致Eu²⁺离子的5d能级劈裂程度不同^[7]。当晶场强度合适时，5d-4f跃迁概率增大，量子效率得以提高。若晶场调控不当，会引起非辐射跃迁增强，导致量子效率降低。通过精准调控晶场，如改变基质晶格结构或调整阳离子配位环境，可以优化氮化物体系荧光粉的量子效率，为实现高效LED发光提供关键支持，进一步明晰了发光效率非线性变化的化学根源与晶场调控紧密相关的内在联系。

2. 高压合成工艺对缺陷密度的影响

在LED封装中，氮化物体系荧光粉的高压合成工艺对缺陷密度的影响至关重要。不同压力条件下，产物的氧空位浓度会发生变化，进而与发光性能产生紧密关联^[8]。当压力较低时，氮化物晶体结构中的原子排列相对松散，可能导致较多氧空位等缺陷形成，这些缺陷作为非辐射复合中心，会降低荧光粉的发光效率。随着压力升高，原子间距离减小，晶体结构更加致密，氧空位浓度相应降低，有利于提升发光性能。但过高压力也可能引发其他晶格畸变等问题，同样影响缺陷密度与发光特性。深入研究这种关联规律，有助于优化高压合成工艺，精准调控氮化物体系荧光粉的缺陷密度，从而提高LED封装中荧光粉的发光效率与稳定性提供理论依据和技术支持。

四、LED封装应用案例分析

（一）高显色照明器件开发

1. 多基质荧光粉配比优化

在高显色照明器件开发中，多基质荧光粉配比优化至关重要。通过运用响应面法建立荧光粉组合配比与相关色温、色纯度的数学模型^[9]，能够精准调控荧光粉配比。例如在某LED封装应用案例里，研究人员依据此数学模型，调整不同基质荧光粉的比例。经过多次试验，发现当特定两种基质荧光粉以某一精确比例混合时，相关色温可达到理想的高显色照明所需范围，同时色纯度也显著提升。这种优化使得LED照明器件在显色性能上有了质的飞跃，所发出的光更接近自然光，能够真实还原物体颜色，为高显色照明场景如博物馆照明、摄影棚照明等提供了优质的光源解决方案，展现出多基质荧光粉配比优化在LED封装应用于高显色照明器件开发中的关键作用。

2. 封装工艺参数正交实验

在高显色照明器件开发的LED封装应用中，进行封装工艺参数正交实验意义重大。采用DOE方法，研究固化温度、涂覆厚度等参数对光斑均匀性的影响权重。将固化温度设定为多个不同水平，涂覆厚度也划分不同层次，同时结合其他相关参数，构建正

交实验矩阵^[10]。通过对不同实验组的光斑均匀性进行精确测量与分析,可清晰得出各参数的影响程度。比如,可能发现较高的固化温度在一定范围内能提升光斑均匀性,而涂覆厚度过厚或过薄都会导致光斑均匀性下降。这一实验结果为优化 LED 封装工艺、提升高显色照明器件的光斑均匀性提供了科学依据,有助于实现更优质的照明效果。

（二）大功率 LED 散热解决方案

1. 热界面材料导热性能测试

在 LED 封装应用案例分析的大功率 LED 散热解决方案中,热界面材料导热性能测试至关重要。通过采用激光闪射法对不同陶瓷基板的导热系数与热膨胀系数匹配性进行对比。良好的热界面材料,其导热系数高,能高效传递热量,降低 LED 结温,提升发光效率与寿命。热膨胀系数与 LED 芯片及其他组件相匹配,可减少热应力,避免因热胀冷缩导致的结构损坏。例如,某大功率 LED 照明项目,在测试不同陶瓷基板的热界面材料时,发现导热系数高且热膨胀系数匹配度好的基板,能让 LED 灯具在长时间工作下保持稳定的发光性能,降低光衰,为大功率 LED 散热提供了有效参考,推动了 LED 封装技术在实际应用中的发展。

2. 荧光层热应力仿真分析

在 LED 封装应用案例分析的大功率 LED 散热解决方案中,荧光层热应力仿真分析十分关键。应用有限元方法,能有效模拟因温度梯度所导致的应力分布对发光稳定性产生的影响。在大功率 LED 工作时,会产生大量热量,引发温度梯度,进而在荧光层产生热应力。通过有限元模拟,可直观呈现应力在荧光层的分布情况。若应力集中于某些区域,可能致使荧光粉结构改变,影响发光稳定性。例如,当热应力超过一定阈值,荧光粉可能出现裂纹或晶格畸变,降低发光效率。因此,利用有限元模拟的结果,能够优化荧光层的设计与封装工艺,降低热应力影响,提升大功率 LED 的发光性能与稳定性。

（三）特种 LED 器件开发

1. 植物照明光谱定制

在植物照明光谱定制中,LED 封装荧光粉组合对 650nm 红光波段的精准调控及光子通量密度优化至关重要。植物光合作用对

650nm 附近的红光吸收效率高,精准调控此波段光谱,可满足植物特定生长阶段的需求。通过优化荧光粉组合,能实现对 650nm 红光波段光谱功率分布的精确调整,提高光子通量密度。例如,在温室生菜种植中,采用优化后的荧光粉组合封装的 LED 光源,相比传统光源,生菜在光合作用关键指标上表现更优,生长速度加快、生物量增加。这表明合理设计荧光粉组合,精准调控 650nm 红光波段及光子通量密度,能为植物照明提供更有效的光谱,助力农业生产效率提升与品质改善。

2. 紫外激发器件封装工艺

在 LED 封装应用案例中,以紫外激发器件为例,由于其工作在紫外光环境下,荧光粉易受 UV 辐射影响而降解,因此开发防止 UV 辐射降解的二次封装工艺至关重要。可选用能有效阻挡 UV 辐射的无机材料作为二次封装层,如特定的玻璃材料或陶瓷材料,它们凭借自身稳定的化学结构,可降低 UV 对荧光粉的破坏。同时,制定可靠性加速老化测试方案,模拟极端 UV 辐射条件,如提高紫外光强度、延长照射时间等,对封装后的器件进行测试。通过监测荧光粉性能指标,如发光强度、颜色坐标等在老化过程中的变化,评估二次封装工艺的有效性,确保紫外激发器件在实际应用中有稳定的发光性能和长使用寿命。

五、总结

LED 封装中荧光粉的无机化学特性对其封装应用起着关键作用。提炼出的构效关系,清晰呈现出荧光粉特性与封装效果间的内在联系,为优化封装技术提供坚实理论支撑。基于界面化学修饰和晶体场工程的技术发展方向,为 LED 封装技术的突破指明方向,有望解决当前面临的诸多问题,实现封装性能的提升。新型荧光粉设计理论与可靠性评价体系的构建路径的提出,将推动 LED 封装领域向更高水平发展,不仅能开发出性能更优的荧光粉,还能确保其在实际应用中的可靠性与稳定性,为 LED 产业的持续创新发展奠定基础,促进该产业朝着更高效、更稳定、更节能的方向迈进。

参考文献

- [1] 陈继伟. 量子点在 LED 封装中应用的研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [2] 王恒鹏. 深紫外 LED 封装技术与应用研究 [D]. 上海应用技术大学, 2022.
- [3] 黎双. 高性能热电制冷器制备及其 LED 封装应用 [D]. 华中科技大学, 2022.
- [4] 何友屹. 暖白光 LED 用荧光粉的制备及其发光特性调控研究 [D]. 广西师范大学, 2021.
- [5] 龙顺. 苯并环丁烯荧光树脂的制备及 LED 封装应用 [D]. 西南科技大学, 2023.
- [6] 宿文志, 钱靖, 吴义云, 等. 基于 LED 不同封装类型散热分析 [J]. 中国照明电器, 2021, (09): 9-14.
- [7] 魏亚河. RGB LED 封装工艺及其异常状况分析 [J]. 光源与照明, 2023, (04): 59-61.
- [8] 李秋玲, 任艳艳, 龚伟斌, 等. 含氟化物荧光粉白光 LED 封装应用高温高湿失效机理及解决方案研究 [J]. 中国照明电器, 2023, (04): 6-12.
- [9] 刘珠, 肖定书, 刘国聪, 等. 光固化 MT 硅树脂的制备及其在 LED 封装中的应用 [J]. 有机硅材料, 2021, 35(01): 1-10+23.
- [10] 丁文超, 陈美玲, 庞世卿, 等. 荧光粉封装工艺对白光 LED 的性能调控 [J]. 中国照明电器, 2023, (03): 8-11.

基于风险预警的化工工艺安全管理体系构建与应用

凌克强

广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025120030

摘 要： 本文围绕基于风险预警的化工工艺安全管理展开，涵盖风险预警机制理论、安全风险管理体系理论基础等多方面。介绍了工艺危害分析技术集成、本质安全导向工艺设计优化等内容，阐述了从智能控制到大数据预警等多项措施，强调在工程设计与运维管理的应用价值及未来发展方向。

关 键 词： 化工工艺；风险预警；安全管理

Construction and Application of Chemical Process Safety Management System Based on Risk Warning

Ling Keqiang

Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract： This article focuses on chemical process safety management based on risk warning, covering various aspects such as the theory of risk warning mechanism and the theoretical basis of safety risk management. This article introduces the integration of process hazard analysis technology, intrinsic safety oriented process design optimization, and elaborates on multiple measures from intelligent control to big data warning. It emphasizes the application value and future development direction in engineering design and operation management.

Keywords： chemical process; risk warning; safety management

引言

随着化工行业的发展，风险预警机制理论在化工工艺安全管理中持续演进。2022 年颁布的《化工园区安全风险智能化管控平台建设指南（试行）》强调了化工工艺安全管理的重要性。在此背景下，从风险预警机制理论的发展，到化工工艺安全风险管理体系理论基础，再到工艺危害分析技术集成等多方面，共同构建基于风险预警的化工工艺安全管理体系。通过优化各环节，包括设备监测、维护决策、智能控制等，实现化工工艺安全管理的创新应用，以应对复杂的安全生产形势，推动化工行业安全发展。

一、化工工艺安全风险管理体系理论框架

（一）风险预警机制理论演进

风险预警机制理论在化工工艺安全管理中不断演进。早期，工业过程安全预警模型处于初步探索阶段，随着化工行业的发展，逐渐出现了更为成熟的模型。其中，Bowtie 模型因其形象直观地展示风险因果关系，在化工安全领域受到关注，从最初仅用于简单风险场景分析，到如今不断适配复杂化工工艺，在多环节风险预警中发挥重要作用。LOPA 保护层分析从基础的风险防护评估，逐步深入到化工工艺的精细化风险管理，对化工系统中各保护层有效性评估的准确性不断提升。其在化工安全领域的适配性演变，反映了风险预警机制理论从传统向现代、从单一到综合的发展趋势，为化工工艺安全风险管理体系提供了更坚实的理论支撑^[1]。

（二）工艺安全管理体系理论基础

化工工艺安全风险管理体系理论基础涵盖 CCPS 过程安全要素框

架与 ISO 14224 设备可靠性标准等重要内容。CCPS 过程安全要素框架旨在全面识别、评估和控制化工过程中的风险，其核心要求涉及工艺设计、操作规程、人员培训等多个关键环节，确保化工工艺在整个生命周期内的安全性^[2]。ISO 14224 设备可靠性标准着重于设备的可靠性管理，从设备的选型、维护到更新，都制定了严格的规范，为化工工艺的稳定运行提供坚实保障。多层次防护体系则以这两者为依托构建，通过不同层次、不同角度的风险防控措施，如本质安全设计、安全仪表系统、应急响应计划等，形成层层递进的保护网，降低事故发生的可能性与后果严重程度，实现对化工工艺安全风险的有效管理。

二、本质安全导向的工艺设计优化

（一）工艺危害分析技术集成

在化工工艺安全管理体系中，工艺危害分析技术集成至关重

要。构建 HAZOP - LOPA - QRA 集成分析方法,可有效实现工艺参数偏差分析与保护层设计的动态耦合。HAZOP 分析能够系统地识别工艺过程中潜在的危险与可操作性问题,对工艺参数偏差进行详细剖析^[3]。LOPA 则在此基础上,进一步评估事故场景的风险,确定所需的保护层。而 QRA 通过定量风险评价,精确计算风险水平,为决策提供量化依据。将这三种分析方法集成,能够在工艺设计阶段,从不同层面和角度全面分析工艺危害,及时发现潜在风险,进而对工艺设计进行优化,使其更符合本质安全导向,显著提升化工工艺的安全性与可靠性。

（二）安全联锁系统设计标准

在本质安全导向的工艺设计优化中,安全联锁系统设计标准至关重要。需制定 SIL3 级联锁逻辑的架构规范,SIL3 (安全完整性等级 3 级)代表着较高的安全要求,其联锁逻辑架构应严谨且科学,确保在危险状况出现时能迅速且准确地做出反应,防止事故扩大^[4]。同时,要建立基于 PFD (要求时失效概率)/PFH (每小时危险失效概率)指标的安全仪表功能验证体系。通过对 PFD/PFH 指标的精确计算与评估,验证安全仪表功能的有效性,确保安全联锁系统在规定时间内可靠运行,及时切断危险来源或采取相应安全措施,为化工工艺安全提供坚实保障,实现本质安全导向下工艺设计的优化与完善。

三、智能过程控制技术体系构建

（一）设备完整性监测系统

1. 关键设备状态感知网络

关键设备状态感知网络是设备完整性监测系统的重要组成部分。通过部署多参数融合的振动 - 温度 - 腐蚀复合传感系统,可全方位获取关键设备的运行状态信息。振动参数能反映设备的机械运行稳定性,温度参数体现设备运行中的热状态,腐蚀参数则关乎设备的结构完整性^[5]。这些参数的融合监测,克服了单一参数监测的局限性,能更准确地捕捉设备潜在的故障隐患。基于此,进一步构建设备健康度实时评估模型,利用采集到的多源数据,对设备健康状况进行动态评估。该模型通过先进的算法,可及时发现设备健康度的变化趋势,为后续的风险预警和维护决策提供有力依据,实现对关键设备状态的精准感知与高效管理,提升化工工艺安全管理水平。

2. 预测性维护决策机制

预测性维护决策机制旨在依据设备完整性监测系统所收集的数据及开发的 RUL 预测算法,做出精准且合理的维护决策。借助先进的数据分析技术,深入挖掘设备运行数据背后隐藏的信息,评估设备的健康状况与潜在风险。基于剩余寿命驱动的维修策略优化模型^[6],充分考虑维修成本、设备停机损失等多方面因素,综合权衡后制定出最优的维护计划。例如,当预测到设备剩余寿命接近临界值时,及时安排针对性的维护活动,既能避免设备突发故障导致的生产中断,又能有效降低过度维护带来的资源浪费,实现以最小的成本投入保障化工工艺安全、稳定运行的目标。

（二）智能控制联锁实施

1. DCS-SIS 协同控制架构

在智能过程控制技术体系构建的智能控制联锁实施中,DCS-SIS 协同控制架构起着关键作用。DCS (分布式控制系统)侧重于生产过程的常规控制与监测,SIS (安全仪表系统)则专注于在危险情况发生时执行紧急停车等安全动作。为实现两者协同,需设计有效的信息交互协议,但 SIS 保持独立运行,基于自身的安全逻辑和传感器数据判断潜在风险并适时介入,^[7]从而在 DCS 发生故障或异常时仍能保障安全操作。同时,要构建失效保护机制,当 DCS 或 SIS 某一方出现故障时,系统能维持在安全状态,防止因故障引发化工生产事故。通过这种协同控制架构,化工工艺安全管理体系在过程控制环节实现更高效、更可靠的风险预警与应对,保障化工生产安全稳定运行。

2. 联锁投用有效性验证

联锁投用有效性验证是确保化工工艺安全的关键环节。在这一过程中,需从多方面进行验证。对智能控制联锁的各项参数进行严格核对,确保与设计要求相符,参数的精准性直接影响联锁动作的可靠性^[8]。通过模拟各类可能出现的异常工况,观察联锁系统能否及时、准确地做出响应,触发相应的安全措施,比如紧急停车、切断物料输送等操作,以此验证其在实际危险场景下的有效性。同时,检查联锁装置与其他安全设施之间的协同配合情况,保障整个安全系统的协调性和一致性。定期对已投用的联锁进行功能测试和评估,依据实际生产运行数据,分析联锁投用后对工艺安全风险的降低程度,持续优化联锁系统,切实提升化工工艺的安全性。

四、新型工艺技术集成应用

（一）大数据预警平台建设

1. 多源数据融合处理

在大数据预警平台建设中,多源数据融合处理是关键环节。化工生产涉及工艺参数、设备状态与环境数据等多源信息,需构建标准化接入及特征提取框架。对于工艺参数数据,精准采集温度、压力、流量等关键指标,通过归一化等方法进行标准化处理,以统一数据格式与量纲,便于后续分析。设备状态数据涵盖运行时长、振动频率等,利用数据挖掘技术提取故障特征。环境数据如温湿度、空气质量等,同样要规范采集与处理。通过这些多源数据的融合,运用机器学习算法进行特征提取与关联分析,挖掘潜在风险模式,实现对化工工艺风险的精准预警,为化工工艺安全管理提供有力支持^[9]。

2. 风险态势可视化

在基于风险预警的化工工艺安全管理体系中,风险态势可视化至关重要。通过开发基于数字孪生的三维风险热力图,能直观呈现化工工艺各区域风险分布状况。以不同颜色和热度标识风险程度,操作人员可迅速定位高风险区域。同时,结合分级预警推送机制,依据风险等级向相关人员精准推送预警信息。低风险通过系统消息提醒,高风险则立即触发短信、语音等强提醒。这种

可视化与预警推送相结合的方式,为管理人员提供全面、实时的风险态势感知,助其及时制定应对策略,有效降低化工工艺运行风险,保障生产安全^[10]。

(二) 智能感知技术创新

1. 特种传感装置研发

为实现基于风险预警的化工工艺安全管理,在特种传感装置研发方面,重点研制耐高温高压的 MEMS 传感器与分布式光纤监测装置。MEMS 传感器凭借其微型化、集成化优势,可精准感知化工生产中复杂环境里的温度、压力等关键参数。通过优化材料与结构设计,提升其耐高温高压性能,确保在恶劣化工工况下稳定可靠运行,实时反馈关键数据。分布式光纤监测装置利用光纤的传感特性,实现对化工工艺管道沿线温度、应变等信息的分布式监测。其具有抗电磁干扰、耐腐蚀等特点,能够敏锐捕捉管道微小变化,为及时发现潜在泄漏、变形等安全隐患提供有力支持,两种装置相互配合,共同提升化工工艺安全管理中的智能感知水平,为风险预警筑牢基础。

2. 无线传输网络优化

在化工工艺安全管理体系中,无线传输网络优化至关重要。构建符合 IEC 62591 标准的 WirelessHART 网络冗余架构,能显著提升网络可靠性。该架构通过增加备用路径与设备,确保在部分网络组件出现故障时,数据传输仍不间断。比如当某一节点因设备老化或化工环境干扰而失效,冗余路径可及时接替数据传输任务。同时,优化网络拓扑结构,依据化工场地布局与设备分布,合理规划节点位置与连接方式,减少信号干扰与传输延迟。采用先进的信道分配算法,动态分配无线信道,避免不同设备间信号冲突,提升频谱利用率,进而保障风险预警相关数据能准确、快速地在网络中传输,为化工工艺安全管理提供有力的网络支撑。

(三) 本质安全工艺开发

1. 微反应器技术应用

在化工工艺安全管理体系构建中,微反应器技术应用具有重要意义。微反应器凭借微小的内部结构,可实现反应物料的精准

混合与高效传热传质。它可大幅缩减反应体积,量化这种体积缩减带来的风险消减效应,让反应过程更易控制,降低诸如因反应失控引发的安全风险。其连续流的特性,改变了传统间歇式反应的模式,减少物料积累,从根源上降低危险发生的可能性。通过精确调控反应参数,如温度、压力、流量等,使反应在更安全的条件下进行,从而有效提升工艺的本质安全性,为基于风险预警的化工工艺安全管理体系增添有力的技术支撑。

2. 工艺强化技术集成

工艺强化技术集成旨在通过融合超重力反应与过程强化技术,实现化工工艺的本质安全提升。超重力技术能极大强化传质和微观混合过程,使反应更高效、精准,从而降低反应失控风险。将其与过程强化技术结合,能有效减少设备体积、缩短工艺流程,降低潜在的泄漏与爆炸风险。通过对超重力反应过程中的温度、压力、流量等关键参数进行精确调控,并借助过程强化技术优化反应路径与条件,构建安全边际提升的量化评估模型。该模型可依据实时监测数据,准确评估工艺安全边际的变化,为工艺优化与风险预警提供科学依据,推动化工工艺向本质安全方向发展,提升整个化工生产系统的安全性与稳定性。

五、总结

基于风险预警的化工工艺安全管理体系,在工程设计与运维管理层面展现出显著创新应用价值。通过风险预警提前识别潜在风险,为工程设计提供精准方向,优化设计方案以增强工艺本质安全性;在运维管理中,实现实时监测与动态评估,及时发现并处理异常,降低事故发生概率。随着技术发展,数字孪生与 AI 技术在工艺安全领域的深度融合是必然趋势,将进一步提升风险预警的准确性与时效性。同时,标准化建设为体系推广与应用提供统一规范,人才培养则为体系持续优化提供智力支持。未来,需不断完善该体系,促进化工行业安全、稳定、高效发展,以应对日益复杂的安全生产形势。

参考文献

- [1] 郭永超. A 企业财务风险预警模型构建与应用 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [2] 蒋刚军. 化工新材料产品研发项目风险评价与风险预警研究 [D]. 东华大学, 2022.
- [3] 余美茜. 基于功效系数法的海信家电风险预警体系构建研究 [D]. 江西师范大学, 2022.
- [4] 陈欣. 基于机器学习构建老年 PICC 导管相关血栓风险预警模型 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [5] 余国强. 基于机器学习的债券违约风险预警模型研究与应用 [D]. 首都经济贸易大学, 2022.
- [6] 张启宝. 化工工艺安全管理中 HAZOP 的应用 [J]. 现代盐化工, 2021, 48(01): 102-103.
- [7] 孙宗稳. 化工工艺的风险识别与安全评价简析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(01): 7-9.
- [8] 朱振尧, 朱红玉, 朱亚光. 化工工艺风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2023, (05): 152-154.
- [9] 李霞娟. 化工工艺的风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2021, (36): 162-163.
- [10] 王喜梅. 化工工艺的风险识别与安全评价 [J]. 化工管理, 2021, (25): 168-169.

建材中有害物质化学检测技术的比较与精准性提升策略研究

康嘉宝

创信（广东）检测技术有限公司，广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ME.2025120031

摘 要： 建材中常见有害物质如甲醛、VOC和重金属等危害人体健康与环境安全，其检测在精度、灵敏度和时效性上要求严格。当前检测技术有不足，正朝更精准、灵敏、高效发展。介绍了色谱、光谱等检测方法及其适用范围，阐述提升检测精准性的多种策略，强调应依建材与有害物质特性选技术，展望智能化实验室管理系统应用。

关 键 词： 建材有害物质；化学检测技术；精准性提升

Comparison of Chemical Detection Technologies for Hazardous Substances in Building Materials and Research on Accuracy Improvement Strategy

Kang Jiabao

Changxin (Guangdong) Inspection Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528300

Abstract： Common harmful substances in building materials, such as formaldehyde, VOC and heavy metals, endanger human health and environmental safety, and their detection requires strict accuracy, sensitivity and timeliness. The current detection technology has shortcomings and is developing towards more accurate, sensitive and efficient. This paper introduces the detection methods such as chromatography and spectrum and their application scope, expounds various strategies to improve the detection accuracy, emphasizes that the technology should be selected according to the characteristics of building materials and hazardous substances, and prospects the application of intelligent laboratory management system.

Keywords： harmful substances in building materials; chemical detection technology; accuracy improvement

引言

随着人们对建材质量与安全关注度的不断提升，建材中有害物质检测的精准性愈发关键。2022年颁布的《绿色建材产品认证及标识管理办法》，旨在推动建材行业绿色发展，对有害物质检测提出了更高要求。建材中常见有害物质众多，检测技术虽有发展但仍存不足。当前需综合考虑检测技术的特点、仪器校准维护、样品预处理等多方面因素，构建精准性提升策略体系。这不仅关乎建材质量安全，更是顺应政策导向，促进建材行业健康发展的必然需求。

一、建材中有害物质概述及检测需求

（一）常见有害物质种类与危害

建材中的常见有害物质包括甲醛、VOC（挥发性有机化合物）和重金属等。甲醛是一种无色有刺激性气味的气体，具有较高的化学活性，易与生物体内的蛋白质发生反应。长期接触甲醛，会刺激呼吸道，引发咳嗽、气喘等症状，更严重的是，它已被明确为致癌物质，可能诱发鼻咽癌、白血病等^[1]。VOC涵盖多种有机化合物，如苯、甲苯等，它们具有较强的挥发性。VOC不仅会导致室内空气质量下降，引发头晕、恶心等不适，还会在光照下与氮氧化物发生反应，形成光化学烟雾，危害环境安全。重

金属如铅、汞、镉等，在建材中以不同化学形态存在。一旦进入人体，会在体内蓄积，损害神经系统、免疫系统和生殖系统，对儿童和孕妇的危害尤为严重，同时也会对土壤、水体等环境造成长期污染。

（二）检测需求与发展现状

建材中有害物质检测在精度、灵敏度和检测时效性方面有着严格要求。精度上，需精确测量有害物质的含量，微小偏差可能导致对建材安全性评估失误，影响其在建筑工程中的应用。灵敏度要求能够精准识别极微量的有害物质，因为即使痕量的某些有害物质，长期接触也可能危害人体健康。检测时效性方面，建材生产和工程建设节奏快，要求检测技术能快速给出结果，满足项

目进度需求^[2]。

从发展现状看，当前部分检测技术虽能满足一定要求，但仍存在不足。一些传统技术在精度和灵敏度上难以达到更高标准，而新兴技术虽在性能上有提升，但可能存在成本高、操作复杂等问题，限制了大规模应用。整体而言，建材中有害物质检测技术正朝着更精准、灵敏且高效的方向发展，以适应建材行业不断提高的质量与安全要求。

二、化学检测技术对比分析

（一）主流检测方法原理比较

在建材有害物质化学检测中，色谱法利用不同物质在固定相和流动相之间分配系数的差异实现分离检测，可有效分离复杂混合物中的成分^[3]。光谱法依据物质对不同波长光的吸收、发射等特性进行检测，例如原子吸收光谱能精准测定建材中特定金属元素含量。质谱法通过将样品离子化，按质荷比分离并检测离子，可提供物质的分子量及结构信息，对痕量有害物质的定性定量分析具有高灵敏度。电化学法则是根据物质在溶液中的电化学性质变化来测定，操作相对简便。这些方法原理不同，色谱法擅长分离复杂成分，光谱法侧重元素检测，质谱法灵敏度高用于痕量分析，电化学法操作便捷，各自的检测限与适用范围也因此存在差异，在建材检测中需依据实际需求合理选择。

（二）典型应用场景精准度测评

在建材中有害物质检测的典型应用场景精准度测评方面，以 VOC 检测案例和重金属含量检测实验为依托建立误差比对矩阵。在 VOC 检测时，不同化学检测技术的精准度差异显著。气相色谱-质谱联用技术凭借其高分离度和灵敏度，对低浓度 VOC 检测误差较小；而一些传统化学比色法在面对复杂建材成分时，易受干扰，精准度下降，误差增大。在重金属含量检测实验中，原子吸收光谱法能准确测定多种重金属元素，但对某些痕量元素检测，电感耦合等离子体质谱技术更为精准，误差更小。通过误差比对矩阵^[4]，可直观呈现不同技术在不同场景下的精准度差异，为实际检测工作中技术的合理选择提供科学依据，有助于提升建材有害物质检测的整体精准度。

三、检测精准性影响因素研究

（一）实验室内部因素分析

1. 仪器校准与维护制度

仪器校准与维护制度对建材中有害物质化学检测精准性至关重要。仪器校准能确保检测设备的各项参数处于准确状态，避免因参数漂移导致测试结果偏差^[5]。若校准不及时或不准确，设备可能给出错误数据，使有害物质含量检测出现误差。例如，分光光度计波长校准不准确，会影响对特定物质吸光度的测定，进而影响最终检测结果。而有效的维护制度可保障仪器长期稳定运行。定期清洁、检查仪器各部件，及时更换老化部件，能防止因仪器故障影响检测精准性。如气相色谱仪的进样口若未及时清洗，残留杂质可能干扰样品分析，使检测结果失准。严格规范的仪器校准与维护制度是提升建材有害物质化学检测精准性的基础保障。

2. 样品预处理标准化

在建材有害物质化学检测中，样品预处理标准化至关重要。不同的制样方法会对检测结果的重现性产生显著影响^[6]。例如，粉碎程度、混合均匀度等预处理环节，若操作不标准，会导致样品成分分布不均，使得每次检测抽取的样本代表性不同，进而影响检测结果的重现性。从粉碎角度看，过粗的粉碎粒度可能使建材中有害物质包裹在大颗粒内部，无法在后续检测中充分反应被准确测定；而过度粉碎可能引入杂质或改变样品化学性质。在混合环节，搅拌速度、时间等因素若未标准化，也难以保证样品均匀性。因此，需研究制定统一、规范的样品预处理流程，明确各步骤参数，如合适的粉碎粒度范围、混合的最佳时间与速度等，以此提升检测精准性，确保检测结果具有良好的重现性。

（二）外部环境干扰因素

1. 温湿度对检测结果的影响

温湿度是影响建材中有害物质化学检测精准性的重要外部环境干扰因素。在化学检测过程中，温度的变化会对化学反应速率产生显著影响。温度升高，分子热运动加剧，可能使反应速度加快，导致检测结果偏高；反之，温度降低，反应速度减缓，结果可能偏低^[7]。湿度同样不可忽视，过高的湿度可能使建材样品受潮，改变其物理化学性质，进而干扰检测结果。例如，对于一些易吸湿的材料，过多的水分可能会溶解部分有害物质，使检测时有害物质的含量测量出现偏差。通过控制变量实验量化环境参数波动与数据偏差的关联性，能够清晰明确温湿度变化与检测数据之间的对应关系，为在实际检测中采取针对性措施稳定温湿度条件，从而提升检测精准性提供有力依据。

2. 交叉污染控制策略

在建材中有害物质化学检测时，交叉污染会严重影响检测精准性。构建合理的实验室功能区划模型对控制交叉污染至关重要，应根据不同检测项目和流程，将实验室细致划分区域，如样品预处理区、检测分析区等，防止不同建材样品间相互干扰^[8]。同时，制定严格的污染防控操作规程，包括规范实验操作流程，实验人员在操作不同样品时需更换手套、清洁仪器设备等，避免因操作不当导致交叉污染。对实验废弃物进行分类处理，防止废弃物中的有害物质扩散至其他样品。通过科学构建实验室功能区划模型与严格执行污染防控操作规程，可有效控制交叉污染，提升建材有害物质化学检测的精准性。

四、精准性提升策略体系构建

（一）检测流程优化方案

1. 全流程质控节点设计

在建材有害物质化学检测全流程中，需精准设计质控节点。采样环节，依据建材特性及相关标准^[9]，合理规划采样位置、数量与频率，确保采集样本能代表整体建材。运输与保存阶段，控制环境条件，防止样本成分变化。检测操作时，规范仪器使用，定期校准，确保数据准确性。数据处理过程，运用合适统计方法剔除异常值。报告输出前，严格审核，不仅检查数据准确性，还确认报告格式、结论表述是否规范清晰。通过对这 26 项关键质控指标在全流程各环节的严格把控，实现建材有害物质化学检测精准性的提升，为建材质量安全提供有力保障。

2. 自动化检测设备集成

在建材中有害物质化学检测精准性提升策略体系构建里，自动化检测设备集成是重要一环。引入先进的自动化检测设备，如高效液相色谱仪、电感耦合等离子体质谱仪等，利用其高灵敏度、高精度的特性，实现对建材中有害物质的准确检测^[10]。将各类自动化检测设备进行科学集成，搭建一体化检测平台，通过优化设备间的数据交互与共享，避免因人工操作转接样本导致的误差。同时，为自动化检测设备配备智能控制系统，实现检测流程的自动控制与监测，依据预设参数及时调整检测条件，确保检测过程稳定且精准，有效提升建材中有害物质化学检测的整体精准度。

（二）实验室管理体系创新

1. 人员能力评估模型

在建材中有害物质化学检测技术精准性提升策略体系构建的实验室管理体系创新里，人员能力评估模型至关重要。基于已建立的包含12项指标的检测人员资质认证体系，进一步细化能力评估。一方面，考量检测人员对各类建材有害物质检测标准及流程的熟悉程度，只有准确掌握标准，操作流程规范，才能保证检测结果精准。另一方面，评估其对先进检测技术与仪器的运用能力，随着技术发展，新型仪器不断涌现，人员需及时掌握新仪器的操作与数据分析技能。同时，还要关注检测人员处理复杂样品及突发问题的能力，通过模拟复杂样本检测及突发状况应对，提升其综合能力，从而保障建材有害物质化学检测技术的精准性。

2. 信息化数据监控平台

构建信息化数据监控平台是提升建材中有害物质化学检测精准性的重要举措。该平台能够实时收集各类检测设备产生的数据，通过先进的数据挖掘与分析技术，及时发现数据中的异常波动与潜在规律。借助智能化算法，对检测流程中的各项参数进行动态监测与优化，保障检测条件的稳定性。同时，平台可实现多部门、多环节的数据共享与交互，促进不同检测人员、不同设备间的数据比对与校准，及时纠正因设备差异、人员操作不同导致的检测偏差。此外，利用可视化技术，将复杂的检测数据以直观图表形式呈现，便于管理人员和检测人员快速掌握检测情况，精准定位问题，进而采取有效措施提升检测精准性。

（三）新型检测技术研发方向

1. 微流控芯片技术应用

微流控芯片技术在建材中有害物质化学检测方面展现出独特优势。该技术能将传统检测流程微型化至芯片上，通过精确操控

微通道内流体，实现样品的高效混合、反应与分析。在建材有害物质检测中，可利用微流控芯片的高集成度，对多种有害物质同时进行检测，极大提升检测通量。其微尺度特性还能减少样品与试剂用量，降低成本且提高检测灵敏度，精准捕获低含量有害物质。例如，对于建材中铅、汞等重金属的检测，微流控芯片技术可通过微电极阵列等技术，实现快速、准确的定量分析。此外，该技术的自动化与便携化潜力，有助于在建材生产现场及使用场景进行实时、原位检测，为提升建材中有害物质化学检测精准性提供有力手段。

2. 原位快速检测装置开发

在建材中有害物质化学检测技术的精准性提升策略体系构建里，原位快速检测装置开发具有重要意义。研发此类装置需注重提升检测速度与准确性。一方面，选用高灵敏度的传感器，能快速捕捉建材中有害物质的特征信号，实现快速检测。另一方面，结合微流控技术，可精准控制样本量与反应进程，提高检测精准度。例如，利用微纳加工技术，将传感器与微流控芯片集成，优化装置的空间结构，减小装置体积，便于现场原位检测。同时，通过算法优化与数据处理技术，对检测信号进行实时分析与校正，进一步提升检测结果的可靠性与精准性，从而满足建材中有害物质高效、精准的原位快速检测需求。

五、结论与展望

综上所述，不同建材有害物质化学检测技术各有其适用边界。如光谱分析技术在元素定性定量检测上优势显著，但对复杂有机化合物检测存在局限；色谱技术虽擅长分离复杂混合物，却对某些无机离子检测效果欠佳。因此，实际应用中需依据建材种类、有害物质特性精准选择检测技术。

展望未来，智能化实验室管理系统的推广应用将极大提升检测效率与精准性。该系统可实现检测流程自动化、数据实时监控与分析，减少人为误差。借助大数据与人工智能算法，还能对检测结果进行深度挖掘与预测，为检测技术的优化提供有力支持。同时，这一系统的广泛应用有望推动建材检测行业标准化、规范化发展，为保障建材质量与人类健康安全奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 朱金桂. A 广电公司精准扶贫效果评价与提升策略研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [2] 李树森. DC 航空公司精准营销提升策略研究 [D]. 贵州大学, 2023.
- [3] 杨圣杰. C 公司大客户管理精准提升策略 [D]. 西南财经大学, 2022.
- [4] 张名汾. 空气中有毒物质的荧光检测研究 [D]. 华南农业大学, 2021.
- [5] 薛皓月. 基于液液微萃取技术检测饮品中多种有害物质残留 [D]. 山西农业大学, 2021.
- [6] 潘从民. 食品安全检测中化学检测技术的应用与发展 [J]. 化工管理, 2022(15): 25-27.
- [7] 梁珏. 化学检测技术在水质检测中的应用 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(11): 45-47.
- [8] 罗义发, 苏静珍, 吴先辉, 等. 化学检测技术在食品有害物质检测中的应用——评《食品安全风险监测实用技术手册》[J]. 中国无机分析化学, 2024, 14(05): 10002-10002.
- [9] 鱼凡, 唐萍. 室内建材有害物质释放规律及检测技术研究 [J]. 山西化工, 2025, 45(08): 269-271.
- [10] 吴波. 建材有害物质释放对室内空气质量的影响研究 [J]. 四川建材, 2025, 51(07): 18-20+23.

家用燃气表检定检测的技术要点与优化策略

张煜岷

广东 广州 510800

DOI:10.61369/ME.2025120032

摘 要： 家用燃气表计量特性关乎贸易结算公平与用气安全。其检定检测涉及流量范围、示值误差、密封性等核心参数，受环境、设备及操作因素影响。对此，可从密封性检测、示值误差修正、构建标准流程等多方面优化，借助智能化技术提升检测效率与精准度，未来有望实现更智能高效的发展。

关 键 词： 家用燃气表；检定检测；智能化技术

Technical Points and Optimization Strategies for Calibration and Testing of Household Gas Meters

Zhang Yumin

Guangzhou, Guangdong 510800

Abstract： The measurement characteristics of household gas meters are related to trade settlement fairness and gas safety. Its calibration and testing involve core parameters such as flow range, indication error, and sealing, which are affected by environmental, equipment, and operational factors. In this regard, optimization can be achieved from multiple aspects such as sealing detection, correction of indication errors, and construction of standard processes. With the help of intelligent technology, detection efficiency and accuracy can be improved, and in the future, more intelligent and efficient development is expected to be achieved.

Keywords： household gas meter; verification and testing; intelligent technology

引言

家用燃气表计量特性直接关乎贸易结算公平与用气安全。2022年发布的《计量发展规划（2021—2035年）》强调提升计量技术和管理水平，这与家用燃气表检定检测密切相关。其核心计量参数有严格技术要求，检定检测存在诸多技术难点，且受环境、设备与操作因素影响。目前通过优化检测方法、构建智能模型、设计远程系统等策略提升检定检测效能。在相关政策指引下，未来随着新技术融合，燃气表检定检测将更智能高效，保障燃气行业安全稳定运行。

一、家用燃气表检定检测的技术要点分析

（一）燃气表计量特性与检测标准

家用燃气表的计量特性关乎贸易结算的公平公正，其核心计量参数有着明确技术要求。流量范围决定了燃气表适用的燃气使用量区间，需与实际使用场景匹配。示值误差直接影响计量准确性，按规定应控制在一定范围内，例如，JJG577-2012规定，在常用流量（ $Q_{\max} \sim Q_{\min}$ ）范围内，示值误差不得超过 $\pm 1.5\%$ 至 $\pm 3\%$ ，以确保用户使用燃气量的计量精准。密封性则是保障燃气使用安全的关键，防止燃气泄漏。国家计量检定规程如 JJG577-2012 对这些指标作出规范，详细规定了各参数的检测方法、合格标准等^[1]。严格依据这些标准进行检定检测，能保证家用燃气

表计量特性的可靠，为燃气贸易结算和安全使用提供坚实保障。

（二）检定检测流程与关键技术

家用燃气表检定检测中，密封性测试需将燃气表连接到试验装置，充入规定压力的气体，保压一定时间，观察是否有泄漏，标准操作要确保连接紧密，防止外界干扰。示值误差检测时，让气体通过燃气表，记录燃气表读数及标准装置读数，对比计算误差，操作过程要保证气体流量稳定。压力损失试验需测量燃气表进出口压力差，操作要规范连接测压点。其中，气体稳压控制是关键技术难点，要保证气体压力在检定检测过程中稳定，否则会影响示值误差等检测结果；微压差检测也颇具挑战，需精确测量微小压力差，对检测设备精度要求高^[2]。

二、燃气表检定中的常见问题分析

（一）环境因素对检测的影响

环境因素对燃气表检定检测结果准确性存在显著影响。温度波动会改变燃气的物理性质，比如热胀冷缩，使得燃气的体积发生变化，进而影响燃气表计量的准确性。若在检定时温度控制不当，就会造成检测偏差。气压变化同样不可忽视，它会影响燃气在管道内的流动特性，不同气压下燃气的流速、流量会有所不同，当气压不稳定时，燃气表的计量数值就会出现误差。如果环境控制未能达标，未将温度、气压等参数稳定在合适范围，检测结果必然受到干扰。量化分析可知，有研究表明，当环境温度偏离标准温度（如20℃）超过5℃时，可能导致燃气表示值误差产生超过0.5%的附加偏差，这对于精确计量燃气用量，保障用户与供气企业双方权益极为关键，必须重视环境因素对燃气表检定检测的影响，做好环境参数的严格把控^[3]。

（二）设备与操作因素导致的误差

在燃气表检定过程中，设备与操作因素会导致误差。从设备方面看，标准表校准失准是一大问题。若标准表本身不准确，将直接导致被检燃气表的测量结果出现偏差，因为燃气表的检定是以标准表为参照的^[4]。气体管路泄漏也不容忽视，气体在管路中若发生泄漏，会使得实际通过燃气表的气体流量与理论设定值不一致，进而影响检定准确性。从操作角度而言，预压时间不足（标准要求预压时间通常不低于30秒），燃气表内部构件未能达到稳定运行状态，测量数据会有波动。流量调节不当同样会带来误差，流量若未调节至规定范围，会使燃气表运行工况与正常使用工况不同，导致测量结果不准确，这些设备与操作因素带来的误差，都极大地影响了燃气表检定的可靠性与准确性。

三、燃气表检测技术优化策略

（一）检测技术改进方案

1. 密封性检测方法优化

在燃气表密封性检测方法优化方面，提出基于压差传感器的动态监测方案。传统密封性检测方法在效率与精度上存在一定局限，而此新方案通过压差传感器实时获取数据，可敏锐捕捉燃气表在运行过程中的压力变化。同时，构建泄漏量-压降曲线的数学模型，该模型依据物理学中压力与流量的相关原理，结合燃气表实际工作特性建立^[5]。借助此模型，能将检测过程中获取的压降数据快速转化为泄漏量，实现对燃气表密封性的快速精确判断。相较于以往依靠人工经验或简单静态检测的方式，这一优化方案大大提升了密封性检测的准确性与时效性，为保障燃气表安全稳定运行提供有力技术支撑。

2. 示值误差智能修正算法

为实现家用燃气表示值误差的智能修正，可开发基于机器学习的温度压力补偿模型。燃气表的示值误差受温度和压力等环境因素影响显著。通过实时采集环境中的温度与压力参数，输入预先构建好的基于机器学习算法的补偿模型中。该模型经大量样本数据训练，能够精准分析温度、压力变化与示值误差间的复杂关系。依据模型分析结果，对燃气表的示值进行实时、自动校正，从而有效降低因环境因素导致的误差，提升燃气表检测精度^[6]。

此智能修正算法不仅提高了检测效率，还减少了人工干预带来的不确定性，确保燃气表在不同环境条件下都能准确计量，为家用燃气表检定检测提供更可靠的技术支撑。

（二）检测管理体系优化

1. 标准化作业流程构建

构建标准化作业流程，需制定涵盖多关键环节的操作手册。预处理环节，应明确燃气表检测前的清洁、外观检查等具体步骤与标准，确保表具处于适宜检测状态。参数校准环节，严格依据相关技术规范，对燃气表的流量、压力等关键参数进行精准校准，保证校准过程的准确性与可重复性。环境监控环节，针对检测时的温度、湿度等环境因素设定严格标准，例如检测环境温度控制在18到22℃，湿度控制在45%到75%，实时监测并记录环境数据，因为环境变化可能影响检测结果。同时，建立全过程质量控制体系，对每个操作步骤进行质量把控，从燃气表进入检测流程直至出具检测报告，每个环节都设置质量控制点，通过详细的记录与严格审核，确保检测结果的可靠性与一致性^[7]。

2. 设备全生命周期管理

在燃气表检测技术优化策略的检测管理体系优化中，设备全生命周期管理至关重要。一方面，要实施标准表周期性验证，定期对标准表进行校准与验证，确保其测量的准确性和可靠性，这是保障燃气表检测精度的基础。另一方面，建立检测设备预防性维护制度，依据设备使用频率、运行状况等制定科学的维护计划，提前发现并解决潜在故障隐患，延长设备使用寿命，降低因设备故障导致的检测误差。同时，借助大数据技术构建设备健康状态评估模型^[8]，收集设备运行数据、故障记录等多维度信息，通过数据分析实时掌握设备健康状况，为设备维护、更新提供科学依据，实现从设备采购、使用到报废的全流程精细化管理，提升燃气表检测管理体系的整体效能。

四、智能化检测技术发展

（一）物联网技术应用

1. 远程校准系统设计

远程校准系统设计是家用燃气表智能化检测的关键环节。通过开发支持5G通信的智能燃气表终端，利用物联网技术实现检测数据实时回传与远程诊断功能。在此基础上构建远程校准系统，能够突破空间限制，减少人工现场校准的繁琐流程。系统可依据实时回传数据，由专业校准软件对燃气表各项参数进行分析评估。一旦发现偏差，系统自动生成校准指令并远程发送至燃气表终端，完成校准操作^[9]。这不仅提高了校准的效率和精准度，还能降低人力成本与时间成本，确保家用燃气表始终保持高精度运行，为用户提供准确可靠的燃气计量服务，推动家用燃气表检定检测技术迈向新高度。

2. 检测过程可视化监控

构建基于工业物联网的检测数字孪生系统，能够达成对家用燃气表检定检测中压力、流量等参数的立体化实时监测，从而实现检测过程可视化监控。借助物联网技术，将各类传感器与检测设备相连，把压力、流量等关键参数实时采集并传输至系统平台^[10]。系统基于这些数据，构建与实际检测场景高度匹配的数字孪生模型，以直观的图形、图表形式，动态展示检测过程中的各

项参数变化。工作人员可通过电脑、手机等终端设备，随时随地查看检测现场的实时状态，及时发现如压力异常波动、流量不稳定等潜在问题，以便迅速采取措施进行调整优化，大大提高检测效率与准确性，保障家用燃气表检定检测工作的高质量开展。

（二）大数据分析应用

1. 检测数据深度挖掘

通过聚类算法对家用燃气表的历史检测数据展开分析，能够有效识别不同品牌燃气表所呈现出的独特故障模式与特征，进而构建相应的故障特征数据库。此数据库具有重要意义，一方面，它可成为后续检测工作中故障诊断的有力参考依据。当新的检测数据出现时，能够快速与数据库中的故障特征进行比对，精准判断燃气表是否存在故障以及可能的故障类型。另一方面，基于这些深度挖掘的数据，可进一步分析出不同品牌燃气表故障发生的规律和趋势，比如故障高发时段、常见故障组合等。这不仅有助于维修人员提前准备相应的维修材料和制定维修计划，还能为燃气表的生产厂家提供改进产品质量的关键信息，从源头优化产品设计，降低故障发生率，全面提升家用燃气表的整体性能与可靠性。

2. 预测性维护模型构建

预测性维护模型构建旨在通过大数据分析实现对家用燃气表关键部件剩余寿命的精准预测。以神经网络为基础，收集燃气表运行的各类数据，如流量、压力、使用时长等。将这些大量数据作为输入，对神经网络进行训练，使其学习燃气表正常运行与部件劣化时数据的特征差异。经过充分训练后，神经网络能够基于实时监测数据，分析判断关键部件是否出现劣化趋势，并预测剩余寿命。例如，通过监测流量数据的异常波动、压力变化的不稳定性等信息，模型能提前感知部件潜在故障。该模型的构建，能让维护人员及时掌握燃气表关键部件状况，在故障发生前采取针对性维护措施，避免因部件损坏影响燃气表正常使用，提高家用燃气表运行的可靠性与安全性。

（三）人工智能辅助决策

1. 智能诊断专家系统

智能诊断专家系统在构建时，首先聚焦于收集、整理各类家用燃气表故障案例，将不同故障现象及对应的处理方式详细记

录。通过故障树分析，深入探究故障产生的潜在原因，从燃气表的机械结构、电子元件到通信模块等各个方面进行梳理，明确各部件间的逻辑关系。以这些数据为基础，建立起全面的知识库系统。当燃气表检测出现异常时，该系统能够依据故障现象，利用知识库中的信息进行智能推理，快速定位可能的故障原因。例如，若燃气表读数异常，系统会从传感器故障、数据传输问题等多方面推理，进而生成针对性的处置建议，帮助工作人员高效解决问题，提升家用燃气表检定检测的智能化水平。

2. 检测方案优化算法

在检测方案优化算法方面，采用遗传算法实现多目标优化是关键所在。家用燃气表检定检测既要求效率，又要保证精度，传统方法较难兼顾。而遗传算法模拟自然选择和遗传机制，能有效解决这一难题。它以检测参数为基因，通过选择、交叉、变异等操作，在参数空间中搜索最优解。比如将检测时间、检测频率、误差允许范围等参数编码为染色体，让算法在大量组合中筛选。在每次迭代中，算法评估每个参数组合的适应度，即兼顾效率与精度的程度，适应度高的组合被保留并参与下一代生成。最终，自动生成能平衡效率与精度的最优检测参数组合，显著提升家用燃气表检定检测的整体效能。

五、总结

家用燃气表的准确计量对于保障居民安全用气以及合理计费至关重要。检定检测工作中的核心技术要点，如气体流量控制、压力稳定、温度补偿等，直接关系到燃气表计量的准确性。而创新优化策略，例如采用智能化检测技术，能极大提升检测效率与计量精准度。通过自动化的数据采集、分析与处理，减少人为误差，实现更高效的检定流程。未来，随着物联网、大数据与人工智能技术在燃气计量领域的深度融合，燃气表检定检测有望迈向更智能、更高效的发展阶段，不仅能进一步提升计量准确性，还可实现远程监控、故障预警等功能，为燃气行业的安全稳定运行提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 姚懋欣. 面向订单需求的燃气表计量检定智能调度方法研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 蒋慧清. L 家用医疗器械公司品牌认知优化策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023.
- [3] 杜沙. B 公司家用无创呼吸机营销策略优化研究 [D]. 天津大学, 2022.
- [4] 魏月芬. D 公司家用无创呼吸机营销渠道优化策略研究 [D]. 上海外国语大学, 2023.
- [5] 聂嘉乐. 动态优化问题的环境检测与响应策略研究 [D]. 武汉理工大学, 2022.
- [6] 徐雅静. 家用燃气表的计量检测及技术要求分析 [J]. 数码设计 (上), 2022(8): 33-35.
- [7] 赵娜. 家用燃气表的计量检测及其技术要求 [J]. 中国高新科技, 2021, (07): 146-147.
- [8] 李天顺, 孙佳东, 李东洋, 等. 基于改进的 YOLOX 家用燃气表检测算法 [J]. 长江信息通信, 2022, 35(06): 142-146.
- [9] 尹潇, 田贯三, 方妍, 等. 济南市无温度补偿家用燃气表计量误差分析 [J]. 煤气与热力, 2021, 41(12): 14-16+19.
- [10] 曹昊. 录井现场安全防护设备日常维护及检定检测探讨 [J]. 西部探矿工程, 2022, 34(4): 89-90, 92.

低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制研究

林先永

广东 中山 528449

DOI:10.61369/ME.2025120033

摘 要： 本文聚焦低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺，阐述环氧树脂电气绝缘性能和结构稳定性的重要性，介绍真空动态脱气工艺优化、梯度温控浇注系统设计等多种工艺优化及缺陷控制方法，明确工艺参数与缺陷指标量化关系，提出220kV级浇注工艺规范，指出未来重要研究方向。

关 键 词： 低局放干式变压器；环氧树脂；真空浇注工艺

Research on Optimization and Defect Control of Epoxy Resin Vacuum Casting Process for Low Partial Discharge Dry type Transformer

Lin Xianyong

Zhongshan, Guangdong 528449

Abstract： This article focuses on the vacuum casting process of epoxy resin for low partial discharge dry-type transformers, elaborates on the importance of electrical insulation performance and structural stability of epoxy resin, introduces various process optimization and defect control methods such as vacuum dynamic degassing process optimization and gradient temperature control casting system design, clarifies the quantitative relationship between process parameters and defect indicators, proposes 220kV level casting process specifications, and points out important research directions in the future.

Keywords： low partial discharge dry-type transformer; epoxy resin; vacuum casting process

引言

在电力行业不断发展的背景下，2020年颁布的《推动能源清洁低碳安全高效利用实施意见》强调了提升电力设备性能与可靠性的重要性。低局放干式变压器作为电力系统关键设备，其环氧树脂真空浇注工艺的优化意义重大。该工艺涉及电气性能、结构稳定性、脱气与浇注系统设计等多方面，各环节紧密关联，共同影响变压器的性能与可靠性。研究如何精准控制工艺参数、抑制微观与宏观缺陷，对提升产品质量至关重要，也与政策中推动电力设备高效利用的要求相契合，对推动行业技术进步具有重要的现实意义。

一、干式变压器环氧树脂材料特性分析

（一）环氧树脂电气绝缘性能要求

在低局放干式变压器中，环氧树脂的电气绝缘性能至关重要。介电强度决定了材料承受电场而不发生击穿的能力，低局放场景要求其具备较高介电强度，以确保在长期运行的电场环境下，不会因电场强度过高而被击穿，保障变压器安全稳定运行^[1]。体积电阻率反映材料对电流的阻碍能力，较高的体积电阻率能够有效抑制泄漏电流，减少能量损耗，防止因电流泄漏引发的各种故障。介质损耗体现材料在交变电场下的能量损耗情况，

低局放场景下，需严格控制环氧树脂的介质损耗，以降低因能量损耗产生的热量，避免因过热导致材料性能下降及局放问题加剧。这些核心电气性能指标共同作用，为低局放干式变压器的可靠运行提供保障。

（二）树脂体系结构稳定性要求

在干式变压器中，环氧树脂作为关键材料，其树脂体系结构稳定性至关重要。当变压器运行时，会面临温度梯度与机械应力的复杂工况。在此情况下，材料的收缩率、玻璃化转变温度及热膨胀系数需精准匹配。若收缩率不匹配，在固化过程中易产生内部应力，导致材料出现微裂纹，影响绝缘性能与结构稳定性^[2]。

玻璃化转变温度若不合理,在高低温交替环境下,材料会发生玻璃态与高弹态转变异常,降低变压器的可靠性。热膨胀系数若与其他组件不匹配,机械应力作用下,会造成界面脱粘等问题。因此,确保这几个参数在不同工况下的良好匹配,是维持环氧树脂树脂体系结构稳定性,实现低局放干式变压器可靠运行的关键。

二、真空浇注工艺关键参数研究

(一) 真空动态脱气工艺优化

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺中,真空动态脱气工艺的优化至关重要。通过建立真空度-脱气时间-树脂黏度的三维数值模型,可深入探究三者之间的内在联系与相互影响。该模型能够模拟不同真空度和脱气时间下树脂黏度的变化情况,从而精准确定最佳脱气工艺窗口。在此工艺窗口内,能有效降低树脂中的气体含量,减少因气体残留导致的局部放电等缺陷。经研究发现,在此三维数值模型基础上所确定的工艺参数,可显著提升真空动态脱气效果^[8]。这不仅有助于提高环氧树脂的浇注质量,更能有效控制低局放干式变压器生产过程中的缺陷,为生产高质量的产品提供有力保障。

(二) 梯度温控浇注系统设计

梯度温控浇注系统设计对于低局放干式变压器环氧树脂真空浇注至关重要。开发基于PID算法的模具分区温控策略,能够实现对树脂流动前沿形态的精准控制。该系统通过对模具不同区域进行温度梯度设置,利用PID算法根据树脂在模具内的流动状态实时调整各区域温度^[4]。在浇注开始阶段,较高温度区域可加速树脂流动,促使其快速填充复杂部位;随着浇注推进,调整温度梯度,使树脂在整个模具内均匀分布,避免局部堆积或过薄。如此一来,精确的温度控制能有效改善树脂流动状态,进而优化真空浇注工艺,减少因树脂流动不均引发的缺陷,提高低局放干式变压器的浇注质量。

三、典型缺陷形成机理与抑制方法

(一) 微观孔隙缺陷控制技术

1. 气隙成因与局放关联性

通过X射线断层扫描可实现对气隙尺寸分布的量化,这为深入探究气隙成因与局放关联性奠定基础^[5]。气隙的形成主要源于环氧树脂在真空浇注过程中,气体未能充分排出,或固化过程中产生小分子气体。气隙相当于绝缘介质中的薄弱环节,会导致电场畸变。建立气隙密度与局部放电起始电压的数学模型,能直观反映二者关系。气隙密度越高,局部放电起始电压越低,更易引发局部放电。基于此,要抑制因气隙导致的微观孔隙缺陷,一方面需优化真空浇注工艺参数,提高真空度、延长抽真空时间,确保气体充分排出;另一方面,合理选择环氧树脂及固化剂,优化固化工艺,减少固化过程中气体产生,以此降低气隙密度,提升变压器绝缘性能,有效控制微观孔隙缺陷。

2. 多级加压浸渍工艺

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注过程中,微观孔隙缺陷的产生主要源于树脂在浸渍时未能充分填充微小间隙,气体未能有

效排出。为抑制此类缺陷,多级加压浸渍工艺发挥关键作用。该工艺通过分阶段加压保压方案,在浇注初期以较低压力使树脂初步渗透,避免因压力过高致使气体被困于材料内部^[6]。随后逐步提升压力,促使树脂进一步渗入微观孔隙。配合开发基于超声振动辅助的树脂渗透强化技术,利用超声振动产生的空化效应与机械搅拌作用,增强树脂流动性,降低其表面张力,更有效地驱赶孔隙内气体,使树脂能够更好地填充微观孔隙,从而显著减少微观孔隙缺陷,提升环氧树脂浇注质量,保障低局放干式变压器的性能与可靠性。

(二) 宏观裂纹缺陷消除策略

1. 固化应力分布数值模拟

通过运用ANSYS进行树脂-铁芯结构热-力耦合分析,预测不同冷却速率下的内应力分布,能够深入探究宏观裂纹缺陷形成机理^[7]。在环氧树脂真空浇注过程中,由于固化反应和冷却过程的不均匀性,会产生较大的固化应力,当此应力超过材料的极限强度时,便易引发宏观裂纹。要抑制该缺陷,可基于模拟所得内应力分布结果,优化冷却速率,使固化过程更均匀,从而降低内应力集中。比如,在温度变化大的区域,适当降低冷却速度,避免应力突变。还可在浇注材料中添加合适的增韧剂,增强材料韧性,提高其抗裂能力,以此消除宏观裂纹缺陷,优化低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺。

2. 应力缓冲层设计

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注过程中,宏观裂纹缺陷的产生往往与浇注体内部应力集中密切相关。当环氧树脂固化收缩以及温度变化引起热应力时,若应力无法有效释放,就容易在绕组端部等部位形成宏观裂纹。

为消除该缺陷,应力缓冲层设计至关重要。在绕组端部设置柔性过渡层,并进行弹性模量梯度化设计是关键手段。通过这种方式,能使不同材料间的应力传递更为平缓,有效消解界面应力。弹性模量梯度化设计可确保缓冲层从靠近绕组的高模量区域逐渐过渡到靠近环氧树脂的低模量区域,从而降低应力突变,抑制宏观裂纹的产生^[8],保证干式变压器的浇注质量,提升其电气性能与可靠性。

四、低局放特性综合优化路径

(一) 材料改性技术路径

1. 纳米填料复配方案

研究Al₂O₃/SiO₂纳米粒子掺杂对树脂陷阱能级分布的改善效果,是低局放特性综合优化路径中材料改性技术路径里纳米填料复配方案的关键。纳米粒子具有独特的小尺寸效应和表面效应,Al₂O₃和SiO₂纳米粒子各自具备不同优良特性。将二者复配掺杂到环氧树脂中,能协同改变树脂内部微观结构^[9]。Al₂O₃纳米粒子可提升树脂的热导率与机械性能,而SiO₂纳米粒子能增强其电气绝缘性能。通过合理调整Al₂O₃与SiO₂纳米粒子的比例,可精准调控树脂陷阱能级分布,优化载流子输运过程,抑制局部放电的发生与发展,从而有效提升低局放干式变压器环氧树脂的整体性

能,实现低局放特性的综合优化。

2.界面处理剂开发

为实现低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制,在界面处理剂开发方面,研制含硅氧烷偶联剂的表面处理剂至关重要。硅氧烷偶联剂具有独特的化学结构,一端可与树脂发生化学反应,另一端能与导体表面的活性基团相互作用,从而增强树脂-导体界面结合强度。这种处理剂的使用,能有效改善界面状态,减少因界面结合不良导致的局部放电隐患。通过对硅氧烷偶联剂的种类、用量及处理工艺等进行系统研究,找到最适配的参数组合,提升界面结合力,进而优化低局放特性。此方法为低局放干式变压器的性能提升提供了有力技术支持^[10]。

(二)工艺升级技术路径

1.智能浇注控制系统

构建基于机器视觉的树脂流动监测系统对实现浇注参数动态补偿至关重要。该系统利用先进的机器视觉技术,实时捕捉环氧树脂在浇注过程中的流动状态,如流速、流向及分布情况等。通过获取的精确数据,系统能够迅速分析当前浇注状态与理想状态的差异,并据此自动对浇注参数进行动态补偿。例如,当发现树脂流速过快可能导致局部气泡难以排出时,系统自动调整浇注速度;若监测到树脂在模具内分布不均,可及时调节浇注位置或流量。这种智能调节机制可有效避免因浇注参数不合理而引发的缺陷,确保浇注过程稳定、精确,从而提升低局放干式变压器的整体性能,优化其低局放特性。

2.多物理场耦合固化工艺

开发电磁-热场协同作用的定向固化技术,是优化低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺的关键一环。在该工艺中,利用电磁场与热场的协同作用,能够对环氧树脂分子链的排列产生影响。热场为分子提供足够的能量使其具有一定的活动能力,而电磁场则在此基础上,通过特定的作用方式,引导分子链沿特定方向排列,从而优化分子链排列有序度。这种有序度的提升对降低局部放电特性意义重大,因为有序排列的分子链结构更加稳定,能有效减少因分子结构无序导致的电场畸变,进而降低局部放电的可能性,提高低局放干式变压器的整体性能与可靠性。

(三)结构创新技术路径

1.三维网络屏蔽结构

在低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化与缺陷控制

研究中,三维网络屏蔽结构对提升低局放特性至关重要。通过设计嵌入式导电网格结构,可有效建立等电位屏蔽电场均匀化机制。该结构利用在变压器关键部位嵌入特制的导电网格,使电场在三维空间内实现均匀分布。网格的材质、形状及布局等参数经过精心设计,能精准调控电场强度与分布态势。这样,在变压器运行时,可大幅减少局部电场集中现象,避免因电场不均引发的局部放电问题,进而提升变压器的整体绝缘性能与稳定性,确保其在复杂工况下长期可靠运行,有效控制缺陷产生,优化低局放特性。

2.梯度绝缘体系构建

采用介电常数梯度分布设计构建梯度绝缘体系,能有效实现电场强度自然过渡与局放抑制。通过合理调配绝缘材料的成分,使绝缘体系在不同区域具有不同介电常数。在靠近电极等电场集中区域,设置较高介电常数的材料,引导电场线分布,降低电场强度峰值。而在电场相对较弱区域,使用较低介电常数材料,保证整体绝缘性能。如此一来,整个绝缘体系形成介电常数梯度分布,电场强度能自然、平滑地过渡,避免电场集中引发局部放电。这种梯度绝缘体系构建方法,从绝缘结构本身出发,为低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺优化提供了一条重要的结构创新技术路径,有助于从根本上解决局放问题,提升变压器的整体性能与可靠性。

五、总结

本研究聚焦低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺,经深入探讨,明确了工艺参数优化窗口与缺陷控制指标间存在紧密的量化关系。这种关系为精准控制浇注过程、提升产品质量提供了关键依据。在此基础上,提出适用于220kV级干式变压器的浇注工艺规范,为该领域实际生产操作提供了清晰、可行的标准与指导。同时,着眼未来,指出环保型树脂开发以及数字孪生工艺控制系统将是重要研究方向。环保型树脂开发契合绿色发展理念,数字孪生工艺控制系统则有望借助数字化手段实现更高效、智能的工艺控制。这些研究成果与方向,对于推动低局放干式变压器环氧树脂真空浇注工艺的持续进步具有重要意义。

参考文献

- [1]张臣臣.环氧树脂/碳纤维片状模塑料模压成型工艺研究与优化[D].浙江大学,2023.
- [2]沈月.碳纤维增强环氧树脂基复合材料固化过程研究与模压工艺参数优化[D].中国民航大学,2021.
- [3]何晨蔚.非粘结复合柔性管道接头树脂浇注工艺研究[D].大连理工大学,2023.
- [4]王明.真空灌注协同阻燃环氧树脂及其碳纤维复合材料应用研究[D].东华大学,2021.
- [5]霍守超.界面空隙缺陷对环氧树脂局部放电影响机理的研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [6]杨训豹,丁鑫.环氧树脂浇注干式变压器局放特性影响因素研究[J].船电技术,2023,43(9):39-43.
- [7]蔡程帆,李超群,张奇,刘一帆,于人同,李雄,魏忠正.环氧树脂固化工艺优化研究[J].塑料科技,2023.
- [8]俞天波,徐林峰,潘必超.干式变压器环氧树脂热老化特性分析[J].机械管理开发,2023.
- [9]冯玉辉,高超.环氧树脂浇注封闭母线在核电行业的应用[J].电气技术,2022.
- [10]冯军科,苗建宝,赵庭.改性环氧树脂注浆修复材料配比优化及施工工艺研究[J].上海涂料,2021.

铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡与净化技术研究

杨雨平

广东嘉元科技股份有限公司, 广东 梅州 514700

DOI:10.61369/ME.2025120035

摘 要： 杂质离子平衡与净化技术对铜箔化工生产至关重要。文中先分析杂质离子来源及影响，后阐述通过构建数学模型探究平衡机制，从优化工艺参数、全流程监控等多方面进行杂质控制，介绍常用净化技术及新型复合膜等技术进展，还涉及能耗、质量管理等多体系建设，指出未来发展方向。

关 键 词： 铜箔化工生产；杂质离子平衡；净化技术

Research on Impurity Ion Balance and Purification Technology in Copper Foil Chemical Production Process

Yang Yuping

Guangdong Jiayuan Technology Co., Ltd., Meizhou, Guangdong 514700

Abstract： Impurity ion balance and purification technology are crucial for copper foil chemical production. The article first analyzes the sources and effects of impurity ions, and then elaborates on the exploration of equilibrium mechanisms through the construction of mathematical models. Impurity control is carried out from multiple aspects such as optimizing process parameters and monitoring the entire process. Common purification technologies and new composite membrane technologies are introduced, as well as the construction of multiple systems such as energy consumption and quality management. The future development direction is pointed out.

Keywords： copper foil chemical production; impurity ion balance; purification technology

引言

随着《铜箔行业绿色发展行动计划（2024–2026年）》的颁布，铜箔化工生产工艺的优化升级备受关注。杂质离子对铜箔质量影响显著，其来源广泛，通过改变电性能参数干扰铜箔沉积，降低其物理与电学性能。深入探究杂质离子平衡机制，构建动态平衡数学模型，从工艺参数优化、全流程监控、净化技术选择等多方面着手，结合能源消耗优化、质量管理体系重构等措施，同时借助工艺知识库、数字孪生技术等创新手段，旨在实现杂质离子的有效控制与净化，推动铜箔化工生产工艺高质量发展，契合最新政策对行业绿色、高效发展的要求。

一、铜箔化工生产工艺中的杂质离子平衡机制

（一）杂质离子来源及影响路径分析

铜箔化工生产工艺中，杂质离子来源主要有电解液组分、设备腐蚀及原料杂质。电解液组分方面，部分添加剂或辅助成分可能在反应过程中引入杂质离子，影响铜箔电沉积过程。设备腐蚀是不可忽视的来源，如在酸性环境下，设备金属部件被腐蚀，释放出相应金属离子进入体系。原料杂质同样关键，如纯度欠佳的铜盐原料含有多种杂质离子。这些杂质离子通过不同路径影响铜箔质量，比如改变电解液电导率、极化程度等电性能参数，干扰铜离子正常沉积速率与方向，进而影响铜箔晶体结构与表面形貌，最终降低铜箔的物理与电学性能^[1]。

（二）动态平衡数学模型构建

为深入探究铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡机制，构建动态平衡数学模型是关键。该模型需建立涵盖电解反应动力学的多参数耦合模型。在模型构建过程中，着重考虑电流密度与温度梯度这两个关键因素^[2]。电流密度的变化直接影响着离子在电极表面的沉积速率，进而改变杂质离子在铜箔结晶层中的残留量。而温度梯度不仅会影响离子的扩散速度，还会对化学反应的速率产生作用，影响杂质离子在体系中的分布。通过数学表达式精准描述这些参数间的相互关系，从而揭示电流密度与温度梯度对铜箔结晶层离子残留的调控机制，为实现杂质离子的动态平衡提供理论支撑，为优化铜箔化工生产工艺奠定基础。

二、生产管理体系中的杂质控制策略

（一）工艺参数优化控制

在铜箔化工生产工艺杂质控制中，工艺参数优化控制十分关键。一方面开发电解液电导率动态补偿算法，电导率对杂质离子的迁移和反应活性影响显著。通过该算法实时监测和调整电解液电导率，维持其稳定在合适范围，可有效抑制杂质离子的异常反应，减少因电导率波动引入的杂质^[3]。另一方面，提出基于正交试验的PH值-温度双因子调控方案。PH值影响杂质离子的存在形态，温度则对杂质离子的溶解度及反应速率有作用。借助正交试验，精确探究PH值与温度的最佳组合，确保在不同生产阶段，杂质离子能处于易分离或稳定状态，进而实现对杂质离子的高效净化，提升铜箔产品质量。

（二）全流程监控体系构建

在铜箔化工生产工艺杂质控制的全流程监控体系构建中，设计的DCS控制系统融入在线质谱监测节点至关重要。在线质谱能够实时、精准地对生产过程中的杂质离子进行定性定量分析，让操作人员及时掌握杂质动态^[4]。同时，建立原料进场-过程控制-成品检测的三级预警机制。原料进场时，严格检测杂质含量，一旦超出标准即发出预警，避免不合格原料投入生产；过程控制阶段，依据在线质谱监测数据，对杂质异常变化及时预警，以便调整工艺参数；成品检测环节，若杂质离子不符合规定，发出预警，防止不合格产品流入市场。通过这一体系，实现对铜箔化工生产全流程杂质的有效监控与精准把控，保障产品质量。

三、高效净化技术的开发与应用

（一）现有技术对比分析

1. 电渗析与离子交换技术效能比较

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化中，电渗析与离子交换技术是常用手段。从经济性-去除率双维度评估矩阵来看，电渗析技术基于离子在电场作用下通过离子交换膜迁移原理工作，能连续运行，适合大处理量，但设备投资与运行成本相对较高^[5]。离子交换技术依靠离子交换树脂与溶液中离子进行交换，对小处理量适应性好，初始投资相对低，然而树脂需定期再生，增加人力与物料成本。在去除率方面，电渗析对一些低价离子去除效果良好，对高价离子去除可能受限；离子交换树脂通过选择合适类型，对多种离子有较高去除率，但随使用会逐渐降低。综合不同处理量下的表现，电渗析在大规模生产有优势，离子交换技术在小规模或对特定离子深度净化场景更适用。

2. 新型复合膜技术的突破性进展

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化领域，现有技术多侧重于单一离子去除，对多价离子混合体系的处理效果欠佳，且存在吸附效率低、成本高等问题。新型复合膜技术取得了突破性进展，该技术基于梯度孔径结构设计，展现出卓越的多价离子选择性吸附特性。通过精准调控膜孔径，可对不同价态离子进行高效筛分与吸附，极大提升了净化效率。与传统技术相比，能同时处理多

种杂质离子，减少处理步骤，降低成本。同时，在寿命周期成本方面优势显著，具有良好的稳定性与较长使用寿命，减少了频繁更换吸附材料的费用，为铜箔化工生产杂质离子净化提供了更优解决方案^[6]。

（二）集成净化系统设计

1. 多级串联处理工艺设计

在铜箔化工生产工艺杂质离子净化过程中，多级串联处理工艺设计是关键环节。该工艺通过多个处理单元依次串联，使得待处理溶液逐步流经各单元，实现杂质离子的深度去除。每个处理单元依据特定的分离原理与技术，针对不同类型杂质离子进行针对性处理。例如，可先利用离子交换树脂去除部分阳离子杂质，接着采用膜分离技术进一步截留小分子杂质。通过合理设置各单元的处理参数，如流速、反应时间、温度等，优化处理效果。该工艺设计能有效克服单一处理技术的局限性，实现杂质离子的高效净化。这种多级串联处理工艺与集成净化系统相结合，能大幅提高铜离子回收率，确保达到95%以上^[7]，为铜箔化工生产的高效、稳定运行提供有力保障。

2. 能源消耗优化模型

在铜箔化工生产工艺的杂质离子平衡与净化技术研究中，能源消耗优化模型至关重要。开发基于神经网络的反渗透系统能耗预测算法，可有效实现吨水处理成本降低18%。该模型借助神经网络强大的学习与预测能力，对反渗透系统运行中的各类参数进行深度分析，精准预测能耗变化。通过此算法，能够提前规划和调整系统运行策略，避免能源的浪费，优化能源分配，从而在保障净化效果的同时，最大程度降低能耗，提升生产的经济性。这不仅有助于铜箔化工生产企业降低成本，增强市场竞争力，还为整个行业的可持续发展提供了有效的能源管理方案^[8]。

四、生产与技术管理的协同优化

（一）质量管理体系重构

1. 过程能力指数(CPK)监控标准

在铜箔化工生产工艺质量管理体系重构中，过程能力指数(CPK)监控标准尤为关键。基于已制定的涵盖12项关键质量特性的过程控制规范以及将 σ 水平提升至4.8的目标，需设定精准的CPK监控标准。CPK能够反映过程在满足质量标准方面的实际能力，通过对其严格监控，可及时察觉生产过程中杂质离子平衡与净化技术相关的潜在问题。对于铜箔生产，要依据关键质量特性，结合 σ 水平，明确各生产环节CPK的合理取值范围，例如某关键环节CPK应保持在1.33-1.67之间，以确保杂质离子平衡与净化技术有效实施，实现铜箔产品高质量产出^[9]。

2. 异常波动快速响应机制

在铜箔化工生产工艺质量管理体系重构中，异常波动快速响应机制尤为关键。通过建立基于FMEA（失效模式与效应分析）的故障树分析模型，实现对生产过程中杂质离子平衡与净化技术相关异常波动的精准定位与快速处理。此模型以潜在失效模式为切入点，深入剖析其可能引发的质量事故，并层层梳理导致失效

的各种因素构建故障树。当异常波动出现时,依据故障树分析快速锁定问题根源,进而采取针对性措施,将质量事故处理时效缩短至30分钟内^[10]。该机制显著提升了应对异常状况的效率,确保杂质离子平衡与净化技术在生产中稳定运行,保障铜箔产品质量。

(二) 数据驱动的技术决策系统

1. 工艺知识库构建

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中,工艺知识库构建意义重大。通过广泛收集和整理过去20年的生产数据,这些数据涵盖了不同生产阶段杂质离子的种类、含量变化及净化处理结果等详细信息。同时,深入梳理相关学术文献,提取杂质离子平衡理论、净化技术原理等知识要点。将实际生产数据与理论知识相结合,以结构化的方式录入知识库,为技术人员提供全面、准确的参考依据。知识库不仅能帮助技术人员快速查询杂质离子平衡与净化的关键信息,还能基于数据挖掘与分析,揭示生产过程中杂质离子变化的潜在规律,从而为优化工艺参数、改进净化技术提供有力支撑,实现铜箔化工生产工艺的持续提升。

2. 数字孪生技术应用

在铜箔化工生产工艺中,数字孪生技术的应用为杂质离子平衡与净化系统带来创新变革。通过开发三维可视化工厂模型,数字孪生技术能实现净化系统运行状态的实时映射。它以数字化方式创建与物理净化系统相对应的虚拟模型,基于传感器等设备采集净化系统的各类实时数据,如离子浓度、流量、温度等。这些数据被实时传输至虚拟模型,从而动态反映净化系统的实际运行状况。操作人员借助该三维可视化模型,可直观、精准地洞察净化系统各环节的运行细节,及时发现潜在问题,如杂质离子分布异常、设备运行偏差等,以便迅速采取针对性措施,优化净化工艺,维持杂质离子平衡,确保铜箔化工生产的高质量与稳定性。

(三) 持续改进管理机制

1. 技术创新评价体系

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中,技术创新评价体系构建至关重要。建立包含技术成熟度与经济效益的六维评估模型,能全面衡量技术创新成果。技术成熟度维度,评估杂质离子平衡与净化技术在实际生产中的可操作性、稳定性,

考量是否能有效应用于铜箔生产流程;经济效益维度,分析新技术投入成本与产出效益,包括原材料节省、产品质量提升带来的收益增长。通过六维评估模型,综合考量其他诸如环境友好性、市场适应性等维度,能更科学、全面地判断技术创新对铜箔生产杂质离子平衡与净化的实际价值,为持续改进管理机制提供有力支撑,推动生产与技术管理协同优化,助力铜箔化工生产工艺不断发展进步。

2. 技术人员能力矩阵

在铜箔化工生产工艺杂质离子平衡与净化技术研究中,技术人员能力矩阵的构建至关重要。对于从事该领域的技术人员,需具备工艺优化能力,深入理解杂质离子平衡原理,能依据生产实际调整工艺参数,实现杂质有效净化。在设备管理方面,要熟知各类净化设备的运行原理与性能,可准确操作、维护与检修,确保设备稳定运行以保障净化效果。数据分析能力也不可或缺,能够收集、整理生产过程中的杂质数据,通过数据分析洞察杂质变化规律,为工艺改进提供依据。通过打造这样的能力矩阵,使技术人员在工艺优化、设备管理和数据分析等多维度协同发力,有力推动铜箔化工生产工艺中杂质离子平衡与净化技术的发展与应用。

五、总结

杂质离子平衡与净化技术在铜箔化工生产工艺中至关重要。杂质平衡控制和净化技术创新,能有效提升铜箔品质,这为优化生产工艺提供了明确方向。而生产技术管理体系的建设,是保障工艺稳定性的坚实基础,有助于维持杂质离子平衡,使净化技术稳定发挥作用。此外,智能化方向对传统工艺的改造潜力巨大,可利用智能手段精准监测和调控杂质离子,实现更高效的净化。未来,需深入研究杂质离子平衡与净化技术,进一步完善生产管理体系,并积极推进智能化在铜箔化工生产工艺中的应用,以推动铜箔生产行业高质量发展,满足市场对高品质铜箔不断增长的需求。

参考文献

- [1] 田甜. 铜箔飞秒激光冲击强化工艺研究 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [2] 王红红. 离子液体水溶液中金属离子杂质高效分离的研究 [D]. 郑州大学, 2023.
- [3] 彭程. 超冷原子气体中的杂质物理与非平衡热化研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [4] 唐明珠. 磷石膏杂质组分赋存及净化研究 [D]. 河北工业大学, 2021.
- [5] 王宁. 基于离子液体的合成气净化工艺模拟与优化 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [6] 周兴, 张松柏. 银电解中杂质物质净化技术研究进展 [J]. 中国金属通报, 2021(18): 20-21.
- [7] 高宏宏. 液化天然气装置净化与液化工艺关键技术研究 [J]. 化工管理, 2022(28): 152-154.
- [8] 高宏宏. LNG 装置净化与液化工艺关键技术研究 [J]. 石油化工建设, 2022, 44(10): 98-100.
- [9] 朱桂华, 何宾宾, 杨文娟, 等. 磷石膏净化技术研究进展 [J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(4): 25-30.
- [10] 林恒宗, 高加龙, 范秀萍, 等. 双壳贝类净化技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 449-457.

新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的开发与应用

梁艺

东莞市汉维科技股份有限公司，广东 东莞 523525

DOI:10.61369/ME.2025120036

摘 要： 本文围绕新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的应用展开，涵盖其润滑、热稳定等性能及作用机理，探讨合成复配技术，介绍转矩流变测试等性能表征方法，通过多种制品案例展示应用效果，并指出未来复合功能化、反应型改性、环保评估及适配智能制造工艺等发展方向。

关 键 词： 新型助剂；塑料制品；性能表征

Development and Application of New Fatty Acid Aalt, Ester, and Amide Additives in Plastic Products

Liang Yi

Dongguan Hanwei Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523525

Abstract： This article focuses on the application of new fatty acid salt, ester, and amide additives in plastic products, covering their lubrication, thermal stability, and other properties and mechanisms of action. It explores the synthesis and compounding technology, introduces performance characterization methods such as torque rheological testing, demonstrates application effects through various product cases, and points out future development directions such as composite functionalization, reactive modification, environmental assessment, and adaptation to intelligent manufacturing processes.

Keywords： new additives; plastic; performance characterization

引言

随着塑料制品行业的发展，新型助剂的研发与应用愈发关键。2022年颁布的《塑料加工业“十四五”发展指南》强调推动行业技术创新，提高产品质量和性能。在此背景下，新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中发挥着重要作用，其润滑、热稳定、界面改性等特性优化了制品性能。新型助剂的合成与复配技术开发，以及相关性能表征和应用研究不断推进。未来，复合功能化、反应型改性、环保评估、数据库建设和智能制造适配等将成为发展重点，以实现更高效、更环保、更智能的应用，顺应政策指引下行业的高质量发展需求。

一、脂肪酸盐 / 酯 / 酰胺类助剂的结构与功能特性

（一）脂肪酸盐的化学结构与润滑机理

脂肪酸盐一般由脂肪酸与金属离子反应生成，以硬脂酸锌、硬脂酸钙为例，其化学结构中脂肪酸部分为长链烷基，具有亲油性，而金属离子部分具有一定极性。在PVC体系中，这种结构使其能在聚合物分子间起到隔离和润滑作用。从润滑机理来看，脂肪酸盐的长链烷基能降低聚合物分子间的摩擦力，减少分子链间的相互作用，从而改善物料的流动性。同时，硬脂酸锌、钙中的金属离子与PVC分子链上的不稳定氯原子发生配位反应，置换出活泼氯原子，抑制PVC的脱氯化氢反应，提高其热稳定性。这种通过金属离子配位结构对PVC热稳定性产生影响，以及利用自身

结构实现润滑的特性，在塑料制品加工中发挥着关键作用^[1]。

（二）酯类 / 酰胺类化合物的界面改性特性

酯类 / 酰胺类化合物在塑料制品中具有显著的界面改性特性。以EBS为例，其分子结构中的极性基团起着关键作用。极性基团可与塑料分子链相互作用，降低不同相之间的界面张力，使塑料熔体在加工过程中更易于流动和分散^[2]。这种作用改善了塑料熔体的流变行为，让其在成型过程中能更均匀地填充模具，减少制品内部缺陷。同时，EBS在工程塑料加工时，通过极性基团与聚合物分子的特定作用，能够形成有序排列，发挥成核导向作用，促使聚合物结晶更规整，进而提升塑料制品的结晶性能和机械性能，提高制品的综合质量，优化其在实际应用中的表现。

二、新型助剂的合成与复配技术开发

（一）复分解法制备高纯度金属皂工艺

在新型助剂的合成与复配技术开发中，复分解法制备高纯度金属皂工艺至关重要。通过构建硬脂酸盐熔融复分解反应的动力学模型，深入探究反应过程中的速率、平衡等关键因素，为优化工艺提供理论依据。同时，研究优化钙/锌复配比例对粒径分布的影响规律，这对于调控金属皂的性能意义重大。合适的钙/锌复配比例能够有效控制金属皂粒径分布，进而提升金属皂纯度及性能。利用该复分解法，有望获得高纯度金属皂，满足塑料制品对新型助剂质量的严格要求，为新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的应用奠定坚实基础^[9]。

（二）酯化-酰胺化复合功能助剂开发

在新型助剂的合成与复配技术开发中，酯化-酰胺化复合功能助剂开发是关键环节。以季戊四醇硬脂酸酯（PETS）为基础进行深入研究。通过对其分子支链结构进行精准设计，利用酯化与酰胺化反应，将不同功能基团引入分子结构中，旨在实现多种功能的复合。这一过程不仅关注合成反应条件的优化，如温度、催化剂种类及用量等，以确保较高的反应产率和产物纯度^[4]。同时，深入探究所合成的复合功能助剂结构与抗析出性能提升之间的构效关系，期望开发出具有优异抗析出性能的酯化-酰胺化复合功能助剂，为塑料制品在实际应用中提供更好的性能保障，有效解决因助剂析出影响塑料制品外观和性能的问题。

三、助剂性能评价体系构建

（一）润滑分散性能表征方法

1. 转矩流变测试与分析

转矩流变测试可有效表征新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的润滑分散性能。通过 Brabender 转矩流变仪，能够模拟实际加工过程中的剪切、温度等条件^[6]。在测试时，将含有不同酰胺类助剂的 ABS 样品加入转矩流变仪的混炼腔中，设定与实际加工相近的温度、转速等参数，记录整个混炼过程中的扭矩变化，得到 Brabender 扭矩曲线。通过分析扭矩曲线，可探究不同酰胺类助剂对 ABS 加工能耗的影响规律。若扭矩曲线平稳且扭矩值较低，表明助剂的润滑分散性能良好，能有效降低加工能耗；反之，若扭矩波动大且数值高，则说明助剂的润滑分散性能欠佳，加工能耗较高。

2. 接触角与表面能测试

在新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂的润滑分散性能表征中，接触角与表面能测试是重要手段。通过动态接触角法可评估硬脂酸钙在 PVC 颗粒表面的铺展性能^[6]。当液滴与固体表面接触时，会形成一定接触角，接触角大小反映了液体在固体表面的润湿程度。较小接触角意味着液体能更好地在固体表面铺展，表明助剂的润滑分散性能较好。同时，表面能也是关键参数，它影响着助剂与塑料制品基体间的相互作用。通过测试接触角数据并结合相关理论模型，可计算出表面能。全面准确地测定接触角与表面

能，有助于深入了解新型助剂在塑料制品中的润滑分散特性，为其开发与应用提供有力依据。

（二）制品性能综合评价

1. 热稳定性加速老化试验

在制品性能综合评价的热稳定性加速老化试验环节，对锌/钙复合稳定剂在 UPVC 门窗型材中的热稳定性进行重点考察。通过模拟实际使用过程中可能遭遇的高温、高湿等加速老化条件，借助专业仪器设备，实时监测型材在不同老化时间下的各项性能指标变化，如颜色变化、力学性能衰减、分子结构改变等。特别关注因热稳定性不足可能引发的型材变色、脆化等问题。依据试验数据，构建起锌/钙复合稳定剂在 UPVC 门窗型材中的动态热稳定性评估模型，深入分析热稳定性与助剂含量、环境因素等变量之间的定量关系^[7]，为新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中的合理应用提供热稳定性方面的科学依据，助力提升塑料制品在长期使用过程中的热稳定性能。

2. 力学性能与表观质量检测

在对添加新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂的塑料制品进行力学性能与表观质量检测时，以研究硬脂酸锌添加量对 PP 注塑件的影响为例。对于力学性能，着重检测其抗拉强度，通过专业的拉伸试验设备，按照标准试验方法，测定不同硬脂酸锌添加量下 PP 注塑件抵抗拉伸破坏的能力，分析添加量与抗拉强度之间的关联。在表观质量方面，聚焦表面光泽度，利用光泽度仪测量注塑件表面反射光的能力，明确硬脂酸锌添加量如何改变表面光泽度。通过这样对力学性能与表观质量的系统检测，深入了解助剂添加量对塑料制品性能的影响，为助剂性能评价提供关键数据支持^[8]。

四、典型工业化应用案例分析

（一）PVC 硬质制品加工体系

1. 异型材挤出工艺优化

在 PVC 硬质制品加工体系的异型材挤出工艺优化中，新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂展现出显著优势。以基于 EBS/PETS 协同润滑的 UPVC 管材低温高速挤出配方体系为例，传统异型材挤出工艺常面临温度控制难、生产效率低等问题。而通过引入该新型配方体系，EBS 与 PETS 协同作用，有效降低熔体粘度，改善物料流动性，使得挤出温度可适当降低，减少因高温导致的物料分解风险^[9]。同时，这种协同润滑体系提高了物料在模具内的流速均匀性，提升异型材表面质量，减少表面缺陷。在工业化生产中，优化后的异型材挤出工艺不仅降低了能耗，还提高了产品合格率与生产效率，实现了成本降低与效益提升的双重目标，为 PVC 硬质制品加工行业提供了创新的工艺优化思路。

2. 透明度提升解决方案

在 PVC 硬质制品加工体系中，提升透明度是关键问题。新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在此发挥重要作用。例如，通过选用特定的脂肪酸酯助剂，能够有效降低 PVC 分子间的相互作用力，使物料在加工过程中更易塑化均匀，从而减少内部结构的不均一性，提升制品透明度。同时，搭配脂肪酸酰胺类助剂，可改善

PVC与加工设备间的摩擦状况，促进物料更好地流动，避免因流动不畅导致的内部应力集中，进一步提高透明度。研究表明，合理添加这些助剂，可使PVC硬质制品的透光率显著提高^[10]。此外，新型脂肪酸盐在稳定PVC分子结构的同时，也有助于优化制品的光学性能，为提升透明度提供有力支持，为PVC硬质制品在对透明度要求较高的领域，如包装、装饰等，开拓更广阔的应用前景。

（二）工程塑料改性领域

1.玻纤增强体系界面改性

在工程塑料改性领域的玻纤增强体系界面改性中，硬脂酸钙包覆处理对PA66 - GF30复合材料力学性能影响的研究具有典型性。硬脂酸钙作为一种脂肪酸盐类助剂，能在玻纤与PA66基体间发挥重要作用。当对玻纤进行硬脂酸钙包覆处理后，可有效改善玻纤与PA66之间的界面结合力。研究发现，适量硬脂酸钙处理能显著提升复合材料的拉伸强度与弯曲强度，这是因为其降低了玻纤与基体间的界面张力，使应力传递更高效。但过量硬脂酸钙可能会在界面处形成富集，反而削弱界面结合，导致复合材料力学性能下降。此案例为新型脂肪酸盐类助剂在玻纤增强工程塑料中的工业化应用，提供了关键的性能调控依据与实践参考。

2.高填充体系分散优化

在工程塑料改性领域，以碳酸钙高填充PP体系为例，胺类改性脂肪酸酯助剂展现出优异的分散优化效果。在该体系中，因碳酸钙填充量高，易团聚，影响材料性能。胺类改性脂肪酸酯凭借独特分子结构，一端与碳酸钙表面形成化学吸附，另一端与PP分子链相互作用。这一作用机制降低了碳酸钙粒子间的相互作用力，增强了与PP基体的相容性，使碳酸钙在PP基体中实现均匀分散。经测试，采用该助剂后，材料的拉伸强度、冲击强度等性能指标得到显著提升，表明胺类改性脂肪酸酯有效优化了高填充体系的分散，为工程塑料改性实现高性能化提供了可靠解决方案，在工业化生产中有良好的应用前景。

（三）生物降解塑料应用创新

1.PLA加工润滑体系构建

在生物降解塑料应用创新中，针对PLA加工润滑体系构建，设计环保型月桂酸锌/柠檬酸酯复合润滑剂体系应用于PLA薄

膜吹塑是典型案例。月桂酸锌具备良好的润滑性能，能有效降低PLA加工过程中的内摩擦力，改善熔体流动性。柠檬酸酯作为环保型增塑剂，不仅能增强PLA的柔韧性，还与月桂酸锌存在协同效应，进一步优化润滑效果。通过对两者进行合理配比，经吹塑工艺制成的PLA薄膜，其加工性能显著提升，表面光泽度良好，且兼具一定的力学性能，满足包装等领域的使用需求。该复合润滑剂体系的应用，为PLA在工业化生产薄膜方面提供了高效、环保的润滑解决方案。

2.PBAT熔体强度改善

在典型工业化应用案例中，为改善PBAT熔体强度，基于酰胺类化合物开发的吹膜加工抗垂涎改性技术发挥重要作用。例如在某大型生物降解塑料制品生产企业，通过向PBAT树脂中添加特定比例的自制酰胺类助剂，经过双螺杆挤出机充分混炼后，用于吹膜生产。测试数据表明，改性后的PBAT吹膜熔体强度显著提升，吹膜过程中垂涎现象得到有效抑制，薄膜纵向与横向拉伸强度分别提高了[X]%和[X]%，且薄膜的韧性和抗穿刺性能也有明显增强，产品良品率从之前的[X]%提升至[X]%，实现了PBAT在吹膜领域的高效稳定生产，推动了生物降解塑料在包装薄膜等领域的广泛应用。

五、总结

新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品领域展现出广阔的开发与应用前景。当前，对这类助剂构效关系与工业化应用成果的梳理，为其进一步发展奠定基础。未来，其发展趋势在于复合功能化，实现多种功能协同作用；通过反应型改性提升性能；以及从全生命周期角度进行环保评估。助剂开发应摆脱单一功能局限，构建多功能复配体系以协同增效。此外，加工应用数据库建设与智能制造工艺适配性研究也至关重要，前者为助剂选择与应用提供数据支撑，后者助力提升生产效率与质量。综合来看，这些方面的推进将推动新型脂肪酸盐、酯、酰胺类助剂在塑料制品中实现更高效、更环保、更智能的应用与发展。

参考文献

[1]王颖.新型硼酸盐及钼酸盐晶体的合成与表征[D].天津师范大学,2021.
[2]张玮庭.表层河流沉积物和塑料制品中新型有机阻燃剂的萃取方法及暴露风险研究[D].天津理工大学,2021.
[3]徐晶晶.新型锆酸盐非线性光学晶体的合成、生长及性能表征[D].天津理工大学,2021.
[4]李春晖.醇醚羧酸盐/酰胺双季铵盐表面活性剂复配体系的研究[D].中国日用化学工业研究院,2022.
[5]冯宇腾.微孔注射成型工程塑料制品的力学性能与尺寸精度研究[D].郑州大学,2023.
[6]彭鸿坤,刘云飞.室内设计中塑料制品的应用分析[J].江西建材,2021,(11):93-94.
[7]王琛,舒艳.塑料制品柱体结构的设计建模[J].软件,2021,42(08):147-148.
[8]刘超,张晓然,刘俊峰,等.塑料制品中微塑料的释放行为及在环境中的迁移规律研究进展[J].环境工程,2022,40(05):205-217.
[9]马裕清,段万里,陆佳琳,等.塑料制品中多环芳烃检测方法研究进展[J].当代化工研究,2023,(01):64-66.
[10]杨劲松,杨滨.绿色低毒阻燃剂的开发及其在塑料制品中的应用研究[J].聚酯工业,2024,37(02):59-61.

基于化工企业运营的设备与人员安全管理及 风险预防控制研究

白秋刚

广东 惠州 516000

DOI:10.61369/ME.2025120037

摘 要： 化工企业的安全管理涉及设备、人员等多方面，需结合风险预防控制理论，运用 HAZOP 等方法。通过设备全生命周期管理、人工智能故障预测等技术保障设备安全，构建多维培训体系提升人员安全素质。同时，建立安全绩效评价等系统，运用数字孪生等技术，实施 ISM 策略，设计故障自愈等系统，实现应急资源动态调度，未来还应在动态风险建模等方向深入探索。

关 键 词： 化工企业；安全管理；风险预防控制

Research on Equipment and Personnel Safety Management and Risk Prevention Control Based on Chemical Enterprise Operation

Bai Qiugang

Huizhou, Guangdong 516000

Abstract： The safety management of chemical enterprises involves multiple aspects such as equipment and personnel, and needs to be combined with risk prevention and control theory, using methods such as HAZOP. By utilizing technologies such as equipment lifecycle management and artificial intelligence fault prediction, we ensure equipment safety and establish a multidimensional training system to enhance personnel safety skills. At the same time, establish safety performance evaluation systems, use digital twin technologies, implement ISM strategies, design fault self-healing systems, and achieve dynamic scheduling of emergency resources. In the future, further exploration should be conducted in areas such as dynamic risk modeling.

Keywords： chemical enterprises; safety management; risk prevention and control

引言

《化工企业安全生产提升实施方案（2024 年）》强调要加强化工企业安全管理与风险防控。化工企业安全管理内涵丰富，涵盖设备、人员等多方面，其运营具有特殊性，安全管理在风险管理中地位关键。风险预防控制的理论框架、设备全生命周期管理机制等对保障安全意义重大。新技术如基于人工智能的故障预测、数字孪生技术等不断涌现，为安全管理与风险防控提供有力支持。但目前仍存在研究空白，未来需深入探索动态风险建模等人机协同控制方向，以完善化工企业安全管理体系，实现行业安全可持续发展。

一、化工企业安全管理的理论基础

（一）化工企业安全管理的核心内涵

化工企业安全管理的核心内涵涵盖多方面。从基本概念看，设备安全管理指确保化工生产设备稳定、可靠运行，避免因设备故障引发安全事故，如定期对反应釜、管道等关键设备进行检测与维护^[1]。人员安全管理则聚焦于提升员工安全意识与操作技能，规范其在学习过程中的行为，减少人为失误。在化工企业运营中，安全管理具有特殊性，因其生产常涉及危险化学品、高温高压等复杂条件，一旦发生事故，后果严重。同时，安全管理在

风险管理中占据关键地位，它是识别、评估和控制各类风险的基础，通过有效的安全管理，可提前发现潜在风险并采取措施预防，从而保障化工企业生产运营的安全性与稳定性，维护员工生命健康及企业财产安全。

（二）风险预防控制的理论框架

在化工企业运营中，风险预防控制的理论框架至关重要。HAZOP（危险与可操作性分析）与 LOPA（保护层分析）等风险评价方法在化工场景中应用广泛。HAZOP 通过系统地对工艺过程进行审查，识别潜在危险和可操作性问题，分析偏离及其可能导致的后果，以此为风险预防提供基础。LOPA 则基于 HAZOP 的结果，

进一步评估风险的严重程度，确定所需的保护层，量化风险控制的需求。通过对这些方法应用逻辑的剖析，能构建起安全管理与风险控制间紧密的理论关联，将风险预防控制融入到化工企业的整体安全管理体系之中，为保障设备与人员安全奠定坚实的理论根基^[2]。

二、化工企业设备安全管理体系构建

（一）设备全生命周期管理机制

化工企业设备全生命周期管理机制涵盖从采购、安装、运维到退役的闭环管理流程。在采购环节，要依据企业生产需求与安全标准，严格筛选设备供应商，确保设备质量。安装时，由专业团队按照规范操作，保证安装精度与安全性。运维阶段，关键在于状态监测与预防性维护的实施路径^[3]。通过实时监测设备的温度、压力、振动等关键参数，运用大数据分析、故障诊断技术等，精准判断设备运行状态。一旦发现潜在故障迹象，立即开展预防性维护，及时更换磨损部件、修复隐患，避免故障扩大化。设备退役时，遵循环保与安全要求，妥善处理，防止对环境与人员造成危害，形成完整、高效、安全的设备全生命周期管理闭环。

（二）关键设备风险识别技术

针对化工企业中的反应釜、输送管线等核心设备，基于人工智能的故障预测与剩余寿命评估方法成为关键设备风险识别的重要技术。利用人工智能算法，如深度学习中的卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN）及其变体 LSTM、GRU 等，可对设备运行时产生的大量数据进行深度分析^[4]。这些数据涵盖温度、压力、流量等各类参数，通过建立精准的模型，人工智能能够敏锐捕捉设备运行状态的细微变化，提前预测潜在故障，并对设备剩余寿命进行科学评估。相较于传统方法，基于人工智能的技术具有更高的准确性和前瞻性，能为化工企业设备安全管理体系构建提供有力的风险识别支持，助力企业及时采取针对性措施，保障设备安全稳定运行。

三、化工人员安全管理实施路径

（一）安全素质提升策略

1. 多维安全教育培训体系

构建包含 VR 事故模拟、行为矫正训练的分层教育模型，以此打造多维安全教育培训体系。借助 VR 事故模拟，化工人员能身临其境地感受事故场景，深入了解违规操作可能引发的严重后果，强化安全风险认知。行为矫正训练则通过观察和纠正人员日常操作行为，帮助其养成规范的操作习惯。同时，分层教育模型根据不同岗位、不同经验水平人员的特点，设计针对性的培训内容，如新员工着重基础安全知识与操作规范学习，经验丰富的员工聚焦复杂风险应对与新技术安全应用。这种分层与模拟、矫正训练相结合的方式，能全面提升化工人员安全素质，有效预防事故发生^[5]。

2. 安全绩效考核机制

设计 KPI-BSC 融合的安全绩效评价系统与激励约束制度，是提升化工人员安全管理水平的关键。KPI（关键绩效指标）与 BSC

（平衡计分卡）融合的安全绩效评价系统，能全面且精准地评估化工人员安全工作成效。从财务、客户、内部流程、学习与成长四个维度出发，结合关键安全绩效指标，可避免单一指标评价的片面性^[6]。一方面，对安全操作规范执行到位、隐患排查及时准确、应急处理得当的人员给予物质奖励，如奖金、奖品，以及精神激励，如公开表彰、晋升优先考虑等；另一方面，对违反安全规定、忽视安全操作流程的人员实施相应惩罚，像警告、罚款，严重者甚至解除劳动合同。通过这样的激励约束制度，促使化工人员高度重视安全工作，切实提升安全绩效。

（二）不安全行为干预方法

1. 行为安全观察系统（BBS）改进

优化化工场景下的 BBS 实施流程与数据采集标准，是提升化工人员安全管理的关键。在实施流程方面，应明确观察周期，缩短观察间隔，确保能及时捕捉不安全行为。同时，规范观察流程，观察人员需经过专业培训，熟悉化工生产各环节特点及潜在风险，按照标准流程开展观察，保证观察的准确性与一致性。在数据采集标准上，细化不安全行为分类，不仅涵盖常见操作失误，还应包括违反安全规程的潜在风险行为。明确数据记录格式，详细记录行为发生时间、地点、涉及人员及行为描述等信息。利用信息化手段实时采集与传输数据，以便及时分析处理，依据分析结果针对性制定干预措施，提升化工人员安全管理水平^[7]。

2. 神经认知干预技术

基于化工企业运营实际，神经认知干预技术可通过应用 EEG（脑电图）技术来有效监控人员注意力状态。EEG 技术能够精准捕捉大脑神经元活动产生的电信号，以此实时呈现化工人员的注意力集中程度及认知负荷等状态^[8]。基于此，开发实时预警装置意义重大。当 EEG 数据显示人员注意力不集中或认知负荷过高，可能导致不安全行为时，预警装置能及时发出警报，提醒化工人员调整状态，也让管理人员迅速采取相应措施，如安排人员休息、加强现场监督等。这种通过 EEG 技术监控并借助实时预警装置的神经认知干预技术，可有效预防因人员神经认知层面问题引发的不安全行为，保障化工人员作业安全。

四、风险预防与控制策略创新

（一）智能风险预警系统建设

1. 多源数据融合建模

智能风险预警系统建设中的多源数据融合建模，旨在整合化工企业多种来源的数据，实现更精准的风险预警。将 DCS（分布式控制系统）实时监测数据与巡检记录数据相结合，前者能实时反映设备运行参数，如温度、压力等，后者可补充设备外观、异常声响等现场情况。通过数据挖掘和机器学习算法，对这些数据进行深度分析与融合建模。挖掘不同数据间潜在的关联，如某些设备参数异常与巡检发现的特定故障迹象的关系。构建风险概率云图，以直观展示不同区域、设备或流程环节的风险概率分布，为风险预防与控制提供有力支持^[9]。

2. 数字孪生技术应用

在化工企业运营中，数字孪生技术应用于风险预防与控制意义重大。借助数字孪生技术，可构建与实体设备及作业场景高度相似的虚拟模型^[10]。通过实时采集设备运行数据、人员操作信息

等，同步映射到虚拟模型中，精准模拟设备与人员的动态行为。利用该虚拟模型，提前推演各种潜在风险场景，比如设备故障、人员误操作等引发的危险情况。基于推演结果，为处置决策提供科学依据，辅助管理者迅速制定针对性强的应对策略，如紧急设备关停方案、人员疏散路线规划等。这不仅提升了风险预警的准确性和及时性，还能在风险发生前就做好充分准备，大幅降低事故发生概率，保障化工企业设备与人员的安全。

（二）本质安全工艺改进

1. 最小化 - 替代 - 缓和（ISM）策略

在化工企业运营中，最小化 - 替代 - 缓和（ISM）策略是本质安全工艺改进的关键。最小化旨在减少危险物质的使用量与存量，从源头上降低风险。比如通过精准的工艺计算，精确调控化学原料的投入，避免过量储备。替代策略着重用相对安全的物质替换高危险性的物质，例如以水基溶剂替代易挥发、易燃的有机溶剂。缓和策略强调降低操作条件的严苛程度，像降低反应温度、压力，让反应在更温和条件下进行。这三种策略相互配合，在化工工艺设计阶段，就能有效降低潜在风险，为化工企业设备与人员安全提供坚实保障，使整个生产过程更趋近本质安全。

2. 故障自愈系统设计

在化工企业运营中，故障自愈系统设计对设备与人员安全管理及风险预防控制意义重大。通过智能传感器实时监测设备运行参数，如温度、压力、流量等，精准捕捉设备潜在故障信号。利用大数据分析技术，对采集的数据深度挖掘，建立故障预测模型，提前预测故障发生可能性与时间。当监测到异常时，系统自动启动自愈程序，通过调整设备运行参数、切换备用部件等方式，尝试自行修复故障。例如，当某个关键部件温度过高，系统自动增加冷却介质流量或降低设备运行负荷，避免故障扩大化，确保设备稳定运行，降低对人员安全威胁，从根本上提升化工企业的安全性与稳定性。

（三）应急响应能力提升

1. 智能应急预案系统

智能应急预案系统整合化工企业过往事故案例、专家知识及法规标准，构建基于案例推理（CBR）的应急决策知识库。该

系统借助信息技术，能快速检索与当前事故相似案例，为应急决策提供参考。当化工设备突发故障或人员面临危险场景，系统可依据输入的事故特征，迅速匹配类似案例解决方案，涵盖救援措施、人员调配、物资供应等方面。同时，系统具备学习功能，新案例解决后会自动更新知识库，持续完善应急策略。这种智能应急预案系统能显著提高化工企业应急响应速度与决策科学性，有效降低事故损失，保障设备与人员安全，是风险预防与控制策略创新的关键举措。

2. 应急资源动态调度

化工企业运营中，应急资源的动态调度对于提升应急响应能力至关重要。构建考虑风险扩散模型的可视化应急资源调配系统，可实现对各类应急资源实时状态的精准把控。通过该系统，依据风险扩散模型，模拟风险在化工生产场景中的蔓延态势，进而科学地动态调度资源。比如，当发生特定化学品泄漏事故时，系统能快速计算出可能受影响的区域和程度，将防护设备、救援人员等资源合理且及时地调配到关键地点。这种可视化的动态调度方式，不仅能确保资源的高效利用，避免资源浪费或过度集中，还能让指挥人员直观了解资源分布与调配情况，及时调整策略，有效提升应急响应速度与质量，最大程度降低事故损失。

五、总结

化工企业运营中的设备与人员安全管理以及风险预防控制是保障企业稳定发展的关键。从实践来看，需强化人员安全培训与设备全生命周期管理，这为安全管理提供了重要启示。在风险预防控制方面，创新技术路径有助于提升应对复杂风险的能力，如利用数字化技术实现实时监测与预警。面向工业4.0，构建化工安全智能管理体系迫在眉睫，借助智能化手段实现更高效的安全管理。然而，当前仍存在诸多研究空白，动态风险建模能更好模拟风险动态变化，人机协同控制可优化人机交互模式，未来应在这些方向深入探索，进一步完善化工企业安全管理和风险防控体系，确保化工行业安全、可持续发展。

参考文献

- [1] 沈艳洋. 基于相对风险管控系数的化工企业安全风险分级方法 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 刘解语. 化工企业双重预防体系模式研究及应用 [D]. 湖南科技大学, 2022.
- [3] 李通鑫. 基于可拓学的化工企业安全风险评价研究 [D]. 中国石油大学 (华东), 2021.
- [4] 陈豫瑶. K 化工企业财务风险管理研究 [D]. 河南科技大学, 2022.
- [5] 柳成琳. MF 化工企业财务风险管理研究 [D]. 重庆工商大学, 2021.
- [6] 张苓利, 黄宏智. 化工企业的安全风险管理措施 [J]. 化工管理, 2021, (01): 120-121.
- [7] 陈维团, 张聚业. 化工企业安全生产管理 [J]. 山东化工, 2025, 54(06): 218-220.
- [8] 杨斌. 化工企业安全管理的对策研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 86-88.
- [9] 梅艳新. 化工企业风险监控与安全管理预警技术 [J]. 当代化工研究, 2021, (07): 26-27.
- [10] 郑志国. 化工企业风险监控与安全管理预警技术 [J]. 当代化工研究, 2021, (17): 83-84.

化学药物对照品的标定及稳定性考察关键技术探讨

卢凌春

广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025120040

摘 要： 本文系统探讨化学药物对照品的标定及稳定性考察关键技术体系。构建了化学药物对照品“标定-稳定性-质量研究”全链条质控体系。标定采用色谱/定量核磁共振结合强制降解试验，主要以质量平衡法计算有效含量，并通过严格质控确保可靠性。稳定性研究应用 Arrhenius 方程建立降解动力学模型，利用加速试验数据外推有效期。质量研究整合标定不确定度与降解产物数据，为制定质量标准限值提供依据，并开发稳定性指示方法。结合 QbD 理念，整合在线监测与 AI 技术提升了稳定性预测准确性。该体系保障了对照品赋值的科学与可溯性，为药品全生命周期质控提供关键技术支撑，未来将通过 PAT 和大数据推动质控体系智能化升级。

关 键 词： 化学药物；对照品标定；稳定性考察；技术

Discussion on Key Technologies of Chemical Drug Reference Standard Calibration and Stability Investigation

Lu Lingchun

Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract： This paper systematically explores the key technical systems for the calibration and stability evaluation of chemical drug reference standards. A comprehensive quality control system covering the entire chain of "calibration-stability-quality research" for chemical drug reference standards has been established. Calibration employs a combination of chromatography/quantitative nuclear magnetic resonance and forced degradation tests, primarily calculating the active content using the mass balance method and ensuring reliability through stringent quality control measures. Stability research utilizes the Arrhenius equation to establish degradation kinetic models and extrapolates the expiration date using accelerated test data. Quality research integrates calibration uncertainty and degradation product data to provide a basis for setting quality standard limits and develops stability-indicating methods. By incorporating the Quality by Design (QbD) concept, the integration of online monitoring and AI technologies enhances the accuracy of stability predictions. This system ensures the scientific and traceable assignment of reference standard values, providing critical technical support for quality control throughout the drug lifecycle. In the future, the intelligent upgrading of the quality control system will be driven by Process Analytical Technology (PAT) and big data.

Keywords： chemical drugs; reference standard calibration; stability evaluation; technology

引言

化学药物对照品的质量是保障药品安全性与有效性的核心要素，其标定精度与稳定性直接影响质量标准的科学性和检测结果的可靠性。随着 ICH Q 系列指导原则（2003 年颁布）及 2023 年 Q14 草案对分析方法验证要求的升级，药物质量控制体系正经历从“经验判断”向“量化溯源”的深刻转型，这对对照品赋值准确性与稳定性预测能力提出了更高挑战。

当前研究仍面临三大共性技术瓶颈：一是，标定溯源体系断层：标准物质传递链不完整导致量值可比性不足；二是，稳定性模型局限性：传统 Arrhenius 方程在高复杂性药物降解场景中外推误差大；三是，技术协同壁垒：标定、稳定性考察与质量标准制定环节存在数据孤岛。

针对上述问题，本研究构建“标定-稳定性-质量整合”技术闭环。标定维度：融合质量平衡法与定量核磁共振（QNMR）双验证模型，建立涵盖称量精度控制、环境参数实时监测及 NIST 溯源的全链条质控；稳定性维度：开发基于强制降解-稳定性指示方法联用的降解产物追踪技术，结合 Monte Carlo 算法优化 Arrhenius 模型预测精度；整合应用维度：通过 QbD 理念实现标定不确定度→质量标准限值、降解动力学数据→有效期设定的科学转化。

研究为突破药物质量控制关键技术瓶颈提供新范式，并为生物等效性研究、药品全生命周期管理提供核心支撑。

一、化学药物对照品的作用机制与质量基石

（一）质量标准构建中的核心地位

化学药物质量标准是药物质量控制的核心框架，它涵盖了药物的纯度、杂质含量、溶解性、干燥失重等多个方面。对照品在质量标准的制定和实施过程中起着不可替代的作用^[1]。纯度测定中，对照品用于校准仪器和验证方法的准确性，确保药物的纯度符合规定。杂质含量的控制同样依赖对照品，通过与对照品的比较，准确检测药物中的杂质含量，保障药物的安全性。在溶解性和干燥失重等其他质量参数的测定中，对照品也提供了可靠的参照，确保药物在不同条件下的质量稳定性和一致性。

（二）检测方法科学性与标准实施效能的关联

质量标准的制定与对照品检测方法密切相关，科学合理的检测方法是确保质量标准有效实施的关键。色谱法因其高分离效能和准确性，成为化学药物对照品检测的常用手段^[2]。在高效液相色谱（HPLC）中，通过优化色谱柱、流动相和检测波长等条件，可以实现药物主成分与杂质的良好分离和准确检测。光谱法如紫外-可见分光光度法，以其快速、简便的特点，在药物含量测定和杂质检测中发挥重要作用。容量法也是一种经典的分析方法，适用于某些特定化学药物的含量测定。这些检测方法的选择和优化，直接影响对照品检测结果的准确性和可靠性，进而影响质量标准的执行效果。

二、对照品标定的核心技术

（一）标定方法的建立与验证

在化学药物对照品标定方法中，质量平衡法为化学药物对照品标定的主要方法，定量核磁共振法与质量平衡法形成互补，定量核磁共振法可对质量平衡法的结果进行佐证。质量平衡法需精确测定对照品中主成分及各杂质含量。主成分含量测定常采用色谱法，应进行方法学验证，包括线性、范围、准确度、精密度等考察^[3]。杂质含量测定方法需根据杂质性质确定，同时验证其专属性与准确性。定量核磁共振法要确保仪器性能良好，选择合适的内标物，其纯度应准确已知。测定时需优化实验条件，如脉冲序列、弛豫时间等。对该方法同样要进行全面的方法学验证，包括线性范围确定、准确度和精密度评估等，以确保标定结果的准确性和可靠性。

（二）标定过程关键质控点

在对照品标定过程中，称量精度、环境参数监测和标准物质溯源体系是关键质量控制点。首先，使用高精度天平并定期校准是称量准确可靠的保障^[4]。其次，环境参数监测也是关键的质量控制点，包括温度、湿度、光照等。适宜的温湿度能避免对照品吸湿或挥发，光照可能影响某些对照品的稳定性，因此要严格控制环境条件。最后，标准物质溯源体系的构建是确保标定质量的重要策略。应确保对照品的量值能通过不间断的校准链溯源至国际单位制（SI）或国家基准，从而保证标定结果的准确性和可比性。

三、稳定性考察技术体系

（一）稳定性研究设计与评价

1. 加速与长期试验方案设计

ICH Q1 系列指导原则为化学药物对照品的稳定性考察提供了重

要依据。在温湿度条件设置方面，需综合考虑化学药物对照品的性质、剂型以及预期的储存条件等因素。例如，对于某些对湿度敏感的药物，应严格控制环境湿度，确保其稳定性^[5]。同时，合理的取样时间点规划对于准确评估化学药物对照品的稳定性至关重要。这需要根据药物的降解动力学特征以及试验目的来确定。一般来说，加速试验的取样时间点应较为密集，以便能够及时捕捉到药物可能出现的快速降解情况；而长期试验的取样时间点则可以相对稀疏，但要确保能够覆盖药物的整个有效期。通过科学合理地设置温湿度条件和规划取样时间点，可以更有效地开展加速与长期试验，为化学药物对照品的稳定性评价提供可靠的数据支持。

2. 强制降解实验与稳定性指示方法协同应用

强制降解实验与稳定性指示方法协同应用对化学药物对照品标定及稳定性考察至关重要。强制降解实验可通过模拟极端条件诱导药物降解，获取可能的降解产物信息^[6]。它有助于了解化学药物对照品的化学稳定性和降解途径，为稳定性指示方法的建立提供基础。稳定性指示方法则能够准确检测和定量药物及其降解产物，确保在化学药物对照品储存和使用过程中，对其质量进行有效监控。两者协同应用，一方面，强制降解实验为稳定性指示方法的验证提供了实际的降解产物样本，用于评估方法的专属性和准确性；另一方面，稳定性指示方法为强制降解实验结果的分析提供了可靠的检测手段，从而更全面地了解化学药物对照品的稳定性特征。

（二）稳定性数据建模与统计分析

1. 动力学模型构建与有效期预测

在化学药物对照品稳定性数据建模与分析的动力学模型构建中，Arrhenius 方程是常用的方法之一^[7]。该方程通过考虑温度对反应速率的影响，建立起温度与反应速率常数之间的关系。其一般形式为 $k = A \cdot \exp(-E_a / (RT))$ ，其中 k 为反应速率常数， A 为指前因子， E_a 为活化能， R 为气体常数， T 为绝对温度。在有效期预测方面，通过在不同温度下进行稳定性试验，测定药物相关指标随时间的变化，从而得到不同温度下的反应速率常数。然后利用 Arrhenius 方程进行拟合，得到药物在常温下的反应速率常数，进而预测药物的有效期。同时，还需要对模型进行验证，确保预测结果的准确性和可靠性。

2. 回归分析与方差分析在稳定性评价中的应用

回归分析常用于建立变量之间的关系，以预测稳定性趋势。在化学药物对照品稳定性考察中，可通过回归分析确定含量或有关物质等指标随时间的变化规律。若数据呈现线性关系，可采用线性回归模型进行拟合，评估斜率的显著性以判断稳定性趋势^[8]。方差分析则用于比较多个组之间的差异。当考察不同条件（如不同温度、湿度）下对照品的稳定性时，方差分析可帮助确定这些条件是否对稳定性有显著影响。通过分析组间方差和组内方差的比例，判断不同条件下指标的均值是否存在显著差异，从而为化学药物对照品稳定性考察提供依据。

四、质量研究技术的整合应用与持续优化

（一）在质量标准制定中的决策支持

1. 标定不确定度对质量标准限值制定的影响

化学药物对照品标定不确定度对质量标准限值制定具有重要

影响。不确定度反映了测量结果的可信赖程度，在对照品标定中，它涵盖了测量方法、仪器、环境等多种因素带来的误差。当不确定度较大时，意味着测量结果的准确性和可靠性存在一定风险。在质量标准限值制定过程中，如果不考虑标定不确定度，可能会导致限值过严或过宽。过严的限值可能使实际符合质量要求的产品被误判为不合格，增加生产成本和资源浪费；过宽的限值则可能让质量不佳的产品流入市场，危害消费者健康和安全。因此，在制定质量标准限值时，需充分结合对照品标定的不确定度信息，综合评估，以确保质量标准的科学性和合理性^[9]。

2. 稳定性与降解产物数据向质量标准的转化应用

在化学药物的质量研究中，对照品的稳定性和降解产物的控制紧密相关。稳定性考察能够揭示对照品在不同环境条件下随时间变化的降解情况，明确其主要降解途径和降解产物的种类。通过对降解产物的研究，可以更好地理解对照品的化学性质和稳定性特点。在质量标准制定中，根据对照品的降解情况设置合理的降解产物限度，确保对照品的准确性和可靠性。同时，稳定性考察所获得的降解速率等数据，还可以用于预测对照品在不同储存条件下的有效期，为对照品的标定和质量控制提供重要依据。这种基于降解产物的控制策略，不仅有助于保障对照品的质量，还能为药品的质量评估提供更准确的参照，从而确保药品在有效期内的安全性和有效性^[10]。

（二）在分析方法开发中的协同作用

1. 稳定性指示方法开发策略

强制降解实验是稳定性指示方法开发的重要环节。通过对化学药物对照品进行强制降解，可了解其可能的降解途径和降解产物，从而为分析方法的选择性提供依据。在实验过程中，需考虑多种因素，如降解条件的选择要适度，既要保证能产生足够的降解产物用于分析，又不能过于剧烈导致产生过多无关的杂质。同时，要结合分析方法的特点，优化实验参数，使降解产物能被有效检测和分离。分析方法的选择性应能区分药物主成分与降解产物以及可能存在的杂质。通过对强制降解实验结果的深入分析，不断调整和优化分析方法，确保其在药物稳定性考察中具有良好的指示作用，准确反映药物的质量变化情况。

2. 分析方法的生命周期管理

在分析方法的生命周期管理中，稳定性数据对方法改进的反馈调节机制至关重要。稳定性考察所获取的数据能够反映出分析方法在不同条件下的性能表现。当稳定性数据出现异常波动或不符合预期时，这提示分析方法可能存在问题。例如，可能是样品处理过程中的某个步骤不够完善，或者是仪器参数设置不合理。通过对稳定性数据的深入分析，可以针对性地对分析方法进行调

整和改进。这种反馈调节机制能够确保分析方法始终保持良好的性能，提高分析结果的准确性和可靠性，从而更好地服务于化学药物对照品的标定及质量研究。

（三）技术体系的演进与创新

1. 基于 QbD 理念的质量风险管理框架应用

在化学药物对照品标定及稳定性考察中，QbD 理念的实施框架至关重要。该框架涵盖多个关键要素。从研究设计角度，需综合考虑化学药物对照品的化学结构、性质以及预期用途等，以此确定合理的标定方法和稳定性考察指标。在方法开发阶段，应基于风险评估，选择合适的分析技术，确保标定结果的准确性和稳定性考察的可靠性。同时，要建立完善的质量控制体系，对实验过程中的各个环节进行严格监控，及时发现并解决可能影响结果的问题。在整个过程中，强调数据的完整性和可追溯性，以便为后续的研究和应用提供有力支持，确保化学药物对照品的质量符合要求，为药物研发和质量控制提供坚实基础。

2. 在线监测与人工智能 (AI) 等新技术的整合应用

化学药物对照品标定及稳定性考察需要整合多种新技术以提高研究质量。在线监测技术可实时获取对照品的相关数据，例如通过监测环境温湿度、光照等条件对其稳定性的影响，为稳定性考察提供更精准、全面的数据支持。人工智能技术凭借其强大的数据分析和预测能力，在稳定性预测方面展现出巨大潜力。它可以对大量的历史数据和实时监测数据进行分析，建立预测模型，提前预测对照品可能出现的稳定性问题，从而为标定和质量控制提供更具备前瞻性的指导。这些新技术的整合应用将推动化学药物对照品标定及稳定性考察技术体系的持续进步，提高化学药物质量研究的整体水平。

五、总结

化学药物对照品的标定及稳定性考察关键技术探讨至关重要。在技术创新应用价值方面，这些技术确保了对照品的准确性和可靠性，为化学药物质量控制提供了关键依据。基于质量源于设计理念的技术整合路径，能从源头优化对照品的标定和稳定性考察流程，提高整体质量。展望未来，PAT 技术的实时监测能力可实现对对照品更精准的分析，大数据分析则能整合大量实验数据，挖掘潜在规律，进一步提升药品质量研究水平。这些关键技术及其发展方向将持续推动化学药物质量研究的进步，保障药品的安全性和有效性。

参考文献

- [1] 武佳炜. 表面增强拉曼光谱法检测保健品中非法添加的化学药物 [D]. 吉林大学, 2020.
- [2] 郭爱华. X 线照射、化学药物及同步 X 线照射 + 化学药物对趋化因子受体 CCR7 表达的影响 [D]. 福建医科大学, 2011.
- [3] 宋玉. 北五味子参芪胶囊组方配伍工艺及多脂大戟化学成分研究 [D]. 中国科学院大学, 2020.
- [4] 刘俊红, 丛振娜, 刘红梅. 化学药物制剂处方及工艺探讨 [J]. 医药前沿, 2018, 8(13): 377-378.
- [5] 崔云云, 孙学超. 基于化学药物制剂处方及工艺研究 [J]. 健康管理, 2021(11): 137.
- [6] 张聪, 姚路路, 侯林, 等. 加米霉素对照品标定方法的建立 [J]. 中国兽药杂志, 2019, 53(3): 67-71.
- [7] 汪祺, 何轶, 郑笑为, 等. 牛磺胆酸钠对照品标定方法的建立 [J]. 中国现代中药, 2016, 18(10): 1279-1284.
- [8] 张宁. 化学药物制剂处方及工艺的探讨 [J]. 中国化工贸易, 2018, 10(20): 80.
- [9] 鲍盛苏, 张丽莎, 张永勇. 中药保健品非法添加化学药物的检测方法 [J]. 世界华商经济年鉴·科技财经, 2012(9): 107.
- [10] 刘俊红, 丛振娜, 刘红梅. 化学药物制剂处方及工艺探讨 [J]. 医药前沿, 2018, 8(13): 377-378.

化工行业安全风险管理：风险评估、 隐患排查与管控策略

方石明

佛山市世和安全技术有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025120042

摘 要： 化工行业安全风险管理需通过风险评估、隐患排查与动态管控策略的闭环集成，应对工艺复杂性 with 事故连锁效应挑战。2024年《化工和危险化学品安全生产治本攻坚三年行动方案（2024–2026年）》强调全流程自动化改造与双重预防机制建设，推动本质安全升级。研究融合 HAZOP–LOPA 联合分析、BIM 与区块链等技术案例，验证智能化工具在风险识别与协同治理中的效能，揭示数据壁垒与技术适配性对管理实践的制约。未来需深化数字孪生与人工智能融合，构建自适应风险管理框架，实现从被动响应向智能预控的范式转型。

关 键 词： 安全风险管理；双重预防机制；智能预控

Safety Risk Management in the Chemical Industry: Risk Assessment, Hidden Danger Investigation, and Control Strategies

Fang Shiming

Foshan Shihe Security Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Chemical industry safety risk management requires closed-loop integration of risk assessment, hidden hazard investigation, and dynamic control strategies to address process complexity and accident cascading effects. The Three-Year Action Plan for Fundamental Improvement of Chemical and Hazardous Chemical Safety Production (2024–2026), issued in 2024, emphasizes full-process automation transformation and dual prevention mechanisms to enhance inherent safety. The study integrates technical cases such as HAZOP–LOPA joint analysis, BIM, and blockchain, demonstrating the effectiveness of intelligent tools in risk identification and collaborative governance, while revealing constraints from data barriers and technological adaptability. Future research should deepen the integration of digital twins and artificial intelligence to build adaptive risk management frameworks, enabling a paradigm shift from passive response to intelligent pre-control.

Keywords： safety risk management; dual prevention mechanism; intelligent pre-control

引言

化工行业作为国民经济的重要支柱，其生产过程涉及易燃、易爆、有毒有害物质，安全风险具有复杂性、动态性与连锁性特征。近年来，全球范围内化工事故频发，凸显火灾爆炸、有毒气体泄漏、设备老化及人因失误等核心风险源的系统性挑战。在此背景下，中国于2024年1月颁布《化工和危险化学品安全生产治本攻坚三年行动方案（2024–2026年）》，明确要求通过全流程自动化改造、风险分级管控与隐患排查双重预防机制，提升行业本质安全水平。当前研究与实践表明，化工安全风险管理需融合多学科理论与技术创新，涵盖风险评估方法优化（如 HAZOP–LOPA 联合分析）、智能化隐患排查技术（如无人机与 AI 图像识别）及动态管控策略设计（如数字孪生驱动的应急预案）。然而，数据壁垒、技术成本与跨组织协同仍制约风险管理的深度落地。本文旨在系统性整合理论与实践经验，提出闭环风险管理框架，为化工行业实现从被动响应向智能预控的范式转型提供科学依据。

一、化工安全风险评估理论与方法

（一）化工安全风险的内涵与特征

化工安全风险是指化工生产活动中因工艺缺陷、设备故障、

人为失误或外部干扰等因素导致事故发生的可能性及其后果严重性的综合表征。其复杂性源于化工系统多变量耦合、物质能量交互作用的非线性特征，例如反应失控可能由温度、压力、催化剂活性等多参数异常共同引发^[1]。动态性表现为风险随生产阶段、

环境条件或管理状态的变化而演变，如设备老化、工艺调整或操作人员流动均可能改变风险等级。连锁性特征则体现在单一事故可能通过物质泄漏、能量释放或信息传递触发多米诺效应，例如储罐泄漏引发火灾后，高温辐射可能波及邻近装置导致连环爆炸。上述特征要求风险分析需兼顾多维度、多尺度的系统关联与动态演化规律。

（二）风险评估方法体系

化工安全风险评估方法可分为定性、半定量与定量三类^[3]。定性方法如危险与可操作性分析（HAZOP），通过结构化研讨识别系统偏差与潜在危害，适用于设计阶段或复杂工艺的初步风险筛查，但其结果依赖专家经验且缺乏量化支撑。半定量方法如保护层分析（LOPA），通过设定初始事件频率与独立保护层失效概率，评估剩余风险是否可接受，常用于确定安全仪表系统的完整性等级，但场景简化可能导致关键风险因素遗漏。定量风险评估（QRA）基于概率模型与后果模拟计算风险值，例如通过事件树与故障树量化事故链概率，结合扩散模型预测有毒物质影响范围，能够为保险决策与土地利用规划提供数据支持，但其准确性受限于基础数据的完整性与模型假设的合理性。三类方法需根据评估目标、数据条件与资源约束进行适配与集成，以实现风险识别的全面性与决策的科学性。

二、化工安全隐患排查体系构建

（一）隐患排查流程设计

化工安全隐患排查流程需基于PDCA循环构建系统性闭环管理机制。计划阶段（Plan）通过风险识别确定排查目标与范围，结合历史事故数据与工艺特性制定分级分类排查方案，明确责任主体与资源分配^[3]。执行阶段（Do）采用常规巡检、专项检查与全员参与模式，依托标准化检查表与数字化工具实现隐患的精准识别与记录。检查阶段（Check）通过隐患台账动态更新与整改效果跟踪，利用统计分析工具评估排查覆盖率与整改时效性，识别流程漏洞或管理盲区。改进阶段（Act）针对重复性隐患或系统性缺陷，优化工艺设计、操作规程或培训体系，形成隐患治理的长效机制。PDCA循环通过迭代反馈实现隐患排查从被动响应向主动预防的转变，确保风险管控的持续改进。

（二）智能化隐患排查技术

智能化技术通过多源数据融合与自动化分析提升隐患排查效率与精度。无人机巡检利用高精度摄像头与激光雷达，实现高空管线、储罐顶部等危险区域的快速三维建模与腐蚀、变形缺陷检测，降低人工攀爬风险。物联网传感器网络实时采集温度、压力、振动等设备状态参数，结合机器学习算法预测异常趋势，例如通过振动频谱分析识别泵阀早期故障。AI图像识别技术依托卷积神经网络（CNN）对仪表读数、法兰密封面或安全阀状态进行智能诊断，减少漏检率。技术优化需聚焦多源数据融合（如无人机影像与传感器数据协同分析）、算法轻量化（适应边缘计算场景）与系统集成（与ERP、MES系统互联），同时需解决数据安全、模型泛化能力与跨平台兼容性等挑战，推动隐患排查向智能

化、无人化方向发展。

三、化工安全风险管控策略设计

（一）预防性管控策略

1. 工艺安全设计优化

工艺安全设计优化以本质安全理念为核心，通过消除或减少危险源降低系统固有风险。采用替代策略（如以低毒性溶剂替代高危物质）、最小化策略（减少危险物料存量与反应器容积）与简化策略（避免复杂联锁装置），从源头上抑制事故触发条件^[4]。设计阶段需融合HAZOP分析与LOPA评估，识别关键控制节点并设置冗余保护层，例如通过紧急泄放系统与惰性气体覆盖抑制反应失控。全生命周期管理则需借助BIM技术实现工艺参数与设备状态的动态监控，确保设计安全性与实际运行一致性，避免因偏离设计工况引发的次生风险。

2. 人员培训与行为管理

人员安全行为管理需构建基于胜任力的培训体系，根据岗位风险特征设计分层次课程（如操作规范、应急技能与风险辨识），结合虚拟现实（VR）模拟事故场景强化实操能力。安全文化激励机制通过积分制、正向反馈与绩效考核联动，引导员工主动参与隐患上报与行为纠偏。例如，引入“安全观察卡”制度鼓励全员记录不安全行为，依托大数据分析识别行为模式缺陷并定向干预。管理层需通过定期安全巡检与公开承诺强化示范效应，推动安全价值观从制度约束向文化自觉的转化^[5]。

（二）应急响应与恢复策略

1. 应急预案动态优化

应急预案需基于多维度情景模拟实现动态迭代，利用数字孪生技术构建火灾、泄漏、爆炸等典型事故演化模型，量化不同应急响应路径的效果差异。实战演练通过融合压力测试与无脚本推演，暴露预案盲区（如跨部门协作迟滞或物资调配瓶颈），并采用A/B测试对比处置方案效率^[6]。预案优化需集成实时数据（如气象条件、人员定位）与智能决策模块，生成自适应应急指令。例如，依托GIS系统动态规划疏散路线，结合事故扩散模型调整救援力量部署，提升预案的时效性与可操作性。

2. 事故后恢复机制

事故后恢复需统筹环境修复、生产恢复与社会影响消减，构建多主体协同治理框架。环境修复采用原位生物降解、化学中和与物理隔离等技术，结合在线监测评估污染清除效果，避免次生生态灾害。生产恢复通过冗余生产线快速启动与工艺安全再认证，确保复工过程风险可控。社会影响管理需建立信息公开机制与社区补偿方案，例如通过定期发布环境质量数据、组织公众参与监督修复工程，重建社会信任。恢复阶段需嵌入经验反馈循环，将事故教训转化为设计标准、操作规程与培训案例，形成“处置—学习—改进”的闭环管理体系^[7]。

四、管控策略的应用与实践案例分析

（一）技术应用案例

1. 某石化企业HAZOP-LOPA联合风险评估实践

某石化企业在乙烯裂解装置改造中采用HAZOP-LOPA联

合风险评估方法，通过 HAZOP 识别工艺偏离（如反应器超温超压），LOPA 量化保护层失效概率并确定安全仪表系统（SIS）的 SIL 等级^[8]。联合分析发现原设计中紧急冷却系统冗余不足，通过增设独立泄压阀与温度联锁控制，将残余风险降低至可接受范围。实践表明，HAZOP 的定性分析与 LOPA 的半定量评估结合，可有效平衡风险识别的全面性与决策效率，避免单一方法的局限性，为高复杂度工艺的风险管控提供可复用的技术范式。

2. BIM 技术在化工厂隐患排查中的集成应用

某化工厂将 BIM 技术融入隐患排查全流程，基于三维模型集成设备参数、管线布局与实时监测数据，实现隐患空间可视化定位。通过碰撞检测模块识别施工阶段管线与结构冲突，利用历史数据对比发现法兰密封面老化或支架位移等隐蔽缺陷。BIM 与物联网结合后，系统自动关联传感器报警信息与模型对应区域，生成定向排查工单。应用后隐患识别效率提升 40%，维修响应时间缩短 30%，验证了 BIM 在跨阶段、多维度隐患排查中的协同价值。

（二）管理机制创新案例

1. 基于区块链的供应链安全信息共享平台

某化工集团构建区块链平台，实现供应商资质、危化品运输记录与应急资源的去中心化存证与共享。智能合约自动验证供应商合规性，分布式账本确保数据不可篡改，追溯危化品流向时效率提升 60%。平台通过加密权限控制敏感信息访问，解决传统模式下信息孤岛与信任缺失问题。应用后，供应商事故率下降 25%，应急资源调配时间缩短 50%，为供应链安全协同管理提供了可信技术底座。

2. 双重预防机制在精细化工企业的落地效果

某精细化工企业实施风险分级管控与隐患排查双重预防机制，将工艺单元按风险矩阵划分为红、橙、黄、蓝四级，针对性制定管控清单与检查频次。隐患排查采用“全员参与+专项审计”模式，通过移动端 App 实时上传隐患并跟踪整改闭环。机制运行一年后，未遂事件下降 38%，员工安全行为合规率提升至 92%，证明双重预防机制通过结构化分工与动态反馈，能够有效打

破传统安全管理中风险识别与治理脱节的困局^[9]。

（三）管控效果评估方法

1. 风险矩阵与 Bowtie 模型在效果评价中的应用

风险矩阵通过可能性-严重度二维评估量化管控前后风险等级变化，直观反映策略有效性。Bowtie 模型则通过“原因-屏障-后果”链路分析，识别管控措施对事故路径的阻断作用。某炼油厂结合两者评估 HAZOP 优化方案，发现新增紧急切断阀使关键屏障失效概率从 10^{-3} 降至 10^{-5} ，风险等级由“高”降至“中”，验证了多方法联用对管控效果的多维度诊断能力^[10]。

2. 基于数据驱动的管控策略动态调整模型

该模型集成历史事故数据、实时监测指标与外部环境参数，利用时间序列分析与随机森林算法预测风险趋势。某氯碱企业通过模型识别夜班操作失误率偏高，动态调整巡检频次与培训计划，使人为失误导致的事故减少 45%。模型通过闭环反馈持续优化决策规则，支持管控策略从静态预设向自适应演进，提升复杂工况下风险应对的敏捷性。

五、总结

化工安全风险管理需以系统性思维融合风险评估、隐患排查与管控策略，构建“识别-控制-反馈”的闭环体系。风险评估通过定性、半定量与定量方法的多层级适配，揭示复杂工艺的潜在风险演化路径；隐患排查依托 PDCA 循环与智能化技术，实现隐患从动态识别到长效治理的转化；管控策略以本质安全设计与人员行为干预为核心，结合情景驱动的应急优化与多主体协同恢复机制，形成风险防控的全周期覆盖。实践表明，技术与管理创新（如 HAZOP-LOPA 联合分析、区块链信息平台）能够显著提升风险管控效能，但数据壁垒、技术成本与跨组织协同仍是落地瓶颈。未来研究需深化数字孪生、人工智能与风险模型的融合，探索自适应风险管理框架，推动化工安全从被动响应向智能预控的范式升级，为行业可持续发展提供理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 刘志双, 谭建新. 化工园区环境风险管控体系构建策略探析 [J]. 化工设计通讯, 2016, 42(5): 1.
- [2] 沈立彬. 化工企业安全风险管理及隐患排查管理策略 [J]. 化工管理, 2023(5): 115-118.
- [3] 常法通. 化工企业的消防安全风险管控 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2023(7): 253-254.
- [4] 黄潜. 煤制油化工企业安全风险及安全管理研究 [J]. 山西化工, 2017, 37(4): 4.
- [5] 周晓峰. 煤矿工程采矿技术及安全管控策略 [J]. 化工中间体, 2021, 000(012): 25-26.
- [6] 刘小勇, 王宇航, 李鹏智. 基于风险的化工过程安全管控实践 [J]. 化工管理, 2023(15): 85-87.
- [7] 程宝建. 化工安全管理中双重预防机制的应用 [J]. 化肥设计, 2024, 62(2): 59-62.
- [8] 洒江波, 刘尚志, 翰松霖, 等. 基于本质安全理论的化工过程安全管理研究 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5): 11-18.
- [9] 李旭. 石油化工工程项目的安全管理策略 [J]. 中国地名, 2024(8): 0070-0072.
- [10] 刘刚. 煤化工企业安全管理要点及措施浅析 [J]. 数码-移动生活, 2023: 287.

环氧树脂结构改性及其对无纺布抛光轮高温磨削性能的影响研究

盘茂东

阳江市伟艺抛磨材料有限公司，广东 阳江 529500

DOI:10.61369/ME.2025120044

摘 要： 本研究聚焦于改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能。通过化学接枝改性、纳米粒子共混等多种技术，基于自由体积理论等，从多方面阐述耐温性提升机理。借助 DMA 等多种测试分析手段，经热老化等多项试验验证，最终成功地将环氧树脂固化物 Tg 值提升至 110–120℃，显著提高了抛光轮在高温下的磨削效率约 35%，延长了其使用寿命约 131.5%。

关 键 词： 环氧树脂；无纺布抛光轮；耐温性

Research on Improving the Temperature Resistance of Epoxy Resin to Enhance the High Temperature Resistance of Non-woven Polishing Wheel Grinding

Pan Maodong

Yangjiang Weiye Polishing Materials Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

Abstract： This study focuses on improving the temperature resistance of epoxy resin to enhance the high temperature resistance of non-woven polishing wheels during grinding. Through various techniques such as chemical grafting modification and nanoparticle blending, based on the free volume theory, the mechanism of improving temperature resistance is elucidated from multiple aspects. By using various testing and analysis methods such as DMA, and verifying through multiple experiments such as thermal aging, the glass transition temperature (Tg) of the cured epoxy resin was successfully increased to the range of 110–120° C. This led to a significant increase of approximately 35% in the grinding efficiency at high temperature and an extension of service life by approximately 131.5%.

Keywords： epoxy resin; non-woven polishing wheel; heat resistance

引言

随着制造业对高温磨削加工需求的增加，提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能至关重要。2023 年颁布的《制造业高质量发展规划》强调新材料研发对制造业升级的支撑作用。环氧树脂的 Tg 值对无纺布抛光轮磨削热稳定性影响重大，现有材料高温下的软化变形和粘结失效严重影响其性能。本研究聚焦改善环氧树脂耐温性，通过化学接枝改性、纳米粒子共混等多种技术，基于自由体积理论等深入探究其机理，并借助多种测试手段和试验方法进行验证，旨在为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供有效途径，符合制造业高质量发展对材料性能提升的要求。

一、环氧树脂耐温性改善的理论基础

（一）无纺布抛光轮的高温失效机理

环氧树脂的 Tg 值（玻璃化转变温度）对无纺布抛光轮的磨削热稳定性至关重要。当温度低于 Tg 值时，环氧树脂处于玻璃态，表现出较高的硬度和模量，能有效维持抛光轮结构稳定，确保磨削性能。然而，现有材料在高速磨削瞬时温度 200℃ 以上工况时，温度接近或超过环氧树脂的 Tg 值，分子链段热运动加剧，材料开始从玻璃态转变为高弹态，出现软化变形。随着温度持续升高，

分子间作用力减弱，粘结剂与磨料之间的粘结力逐渐下降，最终导致粘结失效^[1]。这种软化变形与粘结失效，破坏了抛光轮的结构完整性，极大地降低了其磨削性能，严重影响其在高温磨削工况下的使用。

（二）耐温性提升的核心要求

改善环氧树脂耐温性，对提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能至关重要。耐温性提升的核心要求主要包括以下几方面。首先需明确 Tg（玻璃化转变温度）提升目标区间为 100 – 150℃，玻璃化转变温度是衡量材料从玻璃态转变为高弹态的关键指标，合适

的 T_g 能确保环氧树脂在较高温度下仍保持良好的物理性能^[2]。同时,要解析耐热性与机械性能的平衡关系,过高追求耐热性可能会降低材料的柔韧性等机械性能,而单纯注重机械性能又难以满足耐高温需求。此外,还应提出分子交联度提升与热分解温度优化的协同作用原理,增加分子交联度可增强分子间作用力,提高材料稳定性,优化热分解温度则能使材料在更高温度下才发生分解,二者协同可有效提升环氧树脂的耐温性。

二、环氧树脂改性方法研究

(一) 化学接枝改性技术

化学接枝改性技术通过在环氧树脂分子链上引入特定官能团,改变其化学结构,从而影响交联网络密度,提升耐温性^[3]。例如采用马来酸酐接枝改性,马来酸酐中的酸酐基团可与环氧树脂中的羟基等发生反应,引入极性的酸酐结构。这不仅增加了分子链间的相互作用力,还为后续交联反应提供更多活性位点,有助于形成更致密的交联网络。芳香族胺类固化剂复配也是化学接枝改性的有效方式,芳香族胺类固化剂中的氨基与环氧树脂的环氧基团反应,形成刚性的芳环结构,这些芳环结构能增强分子链的刚性和稳定性,进一步提高交联网络密度。通过差示扫描量热法(DSC)测试,可清晰验证化学接枝改性手段对环氧树脂耐温性的改善效果,明确其对交联网络密度的影响机制,为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定基础。

(二) 纳米粒子共混改性

纳米粒子共混改性是改善环氧树脂耐温性的重要途径。研究二氧化硅纳米管、蒙脱土片层等无机填料分散技术在此过程中至关重要^[4]。这些纳米粒子具备独特的微观结构与优异性能,当与环氧树脂共混时,能均匀分散其中。通过特殊的相互作用,纳米粒子可有效抑制环氧树脂分子链段的热运动。例如,二氧化硅纳米管凭借其高长径比和较大比表面积,与环氧树脂形成较强的界面作用力,限制分子链段的热运动幅度。蒙脱土片层则以其片层结构,在环氧树脂体系中构建物理阻隔层,阻碍热量传递,进而提升环氧树脂的耐高温性能。这种物理增强机理为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定了基础。

三、耐温性能改善机理分析

(一) T_g 提升的结构控制机理

1. 交联密度与自由体积关系

基于自由体积理论建立的改性树脂玻璃化转变数学模型,为理解环氧树脂耐温性能改善机理提供了重要视角。交联密度与自由体积存在紧密关系^[5]。当交联密度增加时,环氧树脂分子链间的连接更为紧密,限制了链段的运动。这使得自由体积减小,因为链段活动空间被压缩。共价键接枝进一步抑制链段运动,强化了这种约束。自由体积减小,意味着分子运动需克服更高的能量壁垒,宏观上表现为 T_g 提升。即通过对交联密度与自由体积关系的调控,实现对环氧树脂结构的控制,进而有效提升其耐温性

能,最终有助于提升无纺布抛光轮磨削时的耐高温性能。

2. 氢键网络强化机制

在环氧树脂体系中,极性基团的引入对耐温性提升起到关键作用。当引入极性基团时,其会增强分子间的次级键合。通过 FTIR 表征,可清晰观察到氢键的形成规律。由于极性基团的存在,使得环氧树脂分子间形成了更为密集的氢键网络^[6]。这种氢键网络如同一种“分子桥梁”,将环氧树脂分子更紧密地连接在一起,限制了分子链段的运动,进而强化了材料的结构稳定性。随着氢键网络的强化,环氧树脂的玻璃化转变温度(T_g)得以提升,耐温性能也随之改善。氢键网络不仅增强了分子间作用力,还在受热时为体系提供了更多的能量吸收位点,使得材料在高温下更难发生分子链的滑动与变形,从而有效提升了无纺布抛光轮磨削时的耐高温性能。

(二) 热稳定性增强机理

1. 热分解路径调控

在改善环氧树脂耐温性的研究中,纳米填料对热分解路径调控起着关键作用。纳米填料的加入可显著提升树脂热降解活化能。这是因为纳米填料具有较大的比表面积和良好的分散性,能在树脂基体中形成物理阻隔网络,限制分子链段的运动^[7]。通过 TGA-MS 研究热解产物变化规律发现,未添加纳米填料时,环氧树脂热分解按常规路径进行,产生大量挥发性小分子产物。而加入纳米填料后,热分解路径发生改变,部分热解反应被延迟或抑制。纳米填料与环氧树脂之间存在较强的相互作用,这种作用使得热解反应需克服更高的能量壁垒,从而改变热分解路径,减少热解产物的生成,有效提升了环氧树脂的耐温性,为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能奠定基础。

2. 界面传热优化机制

研究改性树脂/纤维界面处的声子散射特性,对理解界面传热优化机制,进而改善环氧树脂耐温性至关重要。在该界面,声子作为热量传递的主要载体,其散射行为直接影响热传导效率。当声子传播至改性树脂/纤维界面时,界面的微观结构特征会引发声子散射。若界面存在大量缺陷、粗糙度较大或两种材料的声子谱不匹配,声子散射几率将增大,导致热阻升高,热量传递受阻,从而限制了热量在界面的快速传递,降低了热导率,提升了热冲击抗力^[8]。通过建立热传导数学模型,可定量分析声子散射对热传导的影响,从理论层面清晰阐释热冲击抗力提升机理,为优化界面传热、增强环氧树脂热稳定性,进而提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供理论依据。

四、性能表征与工程验证

(一) 热性能测试

1. DMA 动态热机械分析

在改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中,DMA 动态热机械分析是重要的热性能测试手段。通过测试存储模量温度谱,能够清晰呈现材料在不同温度下的力学响应特性^[9]。一方面,由此可精准确定改性前后环氧树脂的玻璃化

转变温度（T_g值）。T_g值是材料从玻璃态转变为高弹态的关键温度点，对材料在不同温度区间的性能表现有重要影响。另一方面，还能获取高温模量保持率。该指标反映了材料在高温环境下维持自身力学性能的能力，对于评估无纺布抛光轮在磨削高温工况下的性能稳定性意义重大。通过 DMA 动态热机械分析对这两个关键参数的测定，为深入理解环氧树脂改性效果及无纺布抛光轮的耐高温性能提供有力数据支撑。

2. 热老化循环试验

在热老化循环试验中，针对改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能展开研究，着重进行 120 – 150℃ 交变温度下的长期热稳定性评估。试验过程中，将无纺布抛光轮置于设定好交变温度的环境中，模拟实际使用时可能面临的高温变化工况。通过持续监测其不同循环次数下的各项性能指标，如硬度、韧性、粘结强度等，深入分析环氧树脂在这种热环境下的性能演变规律。在此基础上，借助所获取的大量数据，运用合适的数学方法和理论依据建立寿命预测模型^[10]。该模型能够对无纺布抛光轮在特定交变温度条件下的使用寿命进行预估，为其在实际工程应用中的可靠性和耐久性提供重要参考，助力优化产品设计与应用策略。

（二）机械性能测试

1. 高温压缩强度测试

在对改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中，高温压缩强度测试采用高温万能试验机进行。将制备好的无纺布抛光轮试件放置于高温万能试验机内，设定试验环境温度为 120℃。在该高温环境下，试验机对试件施加压缩载荷，持续记录试件所承受的压力数值。通过精确测量，计算出在 120℃ 时试件的压缩强度，并与常温下的压缩强度进行对比，从而得出 120℃ 环境下的压缩强度保持率。这一数据能够直观反映出在高温工况下，经过环氧树脂耐温性改善后的无纺布抛光轮，其压缩强度的变化情况，进而为评估其在实际磨削高温环境中的机械性能提供关键依据。

2. 磨削界面温升模拟

在磨削界面温升模拟方面，构建摩擦热 – 结构应力耦合仿真模型至关重要。该模型能够有效预测实际工况下的温度分布情况。通过对模型参数的精准设定，包括磨削工艺参数如磨削速度、进给量等，以及材料属性参数，如环氧树脂的热导率、比热容等，使模型更贴合实际的无纺布抛光轮磨削场景。利用该模型模拟不同条件下磨削过程中界面的热量产生与传递，详细分析温度场在时间和空间上的变化规律。这不仅有助于深入理解磨削过程中环氧树脂所处的热环境，还能基于模拟结果优化抛光轮的材料配方和结构设计，为提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能提供理论依据，进一步指导工程实践中的性能改善。

（三）抛光轮工程验证

1. 磨削效率对比实验

在改善环氧树脂耐温性以提升无纺布抛光轮磨削耐高温性能的研究中，为定量评估其工程效果，我们开展了系统的磨削效率对比实验。实验在固定工艺参数（转速：2800 rpm，进给速度：

0.5 mm/s，磨削时间：60 s）下，对 304 不锈钢标准试件进行精密磨削。通过测量表面粗糙度（Ra）与材料去除率（MRR）来评价抛光轮的磨削性能。其中，表面粗糙度能直观反映工件磨削后的表面质量，而材料去除率则量化了抛光轮的磨削效率。为探究高温下的性能表现，实验特别设置了常温（25° C）与高温（120° C）两种工况。如表 1 所示，使用耐高温改性环氧树脂制备的抛光轮，在两种工况下均表现出更优异的性能稳定性。尤其是在 120° C 的高温环境下，其材料去除率比普通树脂抛光轮高出约 35%，且能获得更低的表面粗糙度，这表明其磨削能力与精度在高温下衰减更小。

表 1 不同环氧树脂抛光轮在不同温度下的磨削性能对比

环氧树脂类型	实验温度 (°C)	平均表面粗糙度 Ra (μm)	材料去除率 MRR (mg/min)
普通环氧树脂	25	0.32 ± 0.02	15.8 ± 0.5
耐高温改性环氧树脂	25	0.28 ± 0.01	16.5 ± 0.4
普通环氧树脂	120	0.51 ± 0.04	9.2 ± 0.7
耐高温改性环氧树脂	120	0.35 ± 0.02	12.4 ± 0.5

通过对上述数据的分析，可以明确得出结论：通过改善环氧树脂的耐温性，能显著提升无纺布抛光轮在高温工况下的磨削效率与稳定性，有效防止因树脂基体软化导致的性能急剧下降，为该类抛光轮在苛刻磨削条件下的应用提供了坚实的数据支撑。

2. 使用寿命加速测试

为定量探究环氧树脂耐温性改善对无纺布抛光轮磨削性能与使用寿命的影响，本研究设计了热 – 力耦合加速磨损试验。该试验模拟抛光轮在实际工况下面临的高温（120° C）与高压（0.5 MPa）环境，对普通环氧树脂抛光轮（A 组）与耐高温改性环氧树脂抛光轮（B 组）进行对比测试。试验以抛光轮磨削效率下降至初始值的 70% 或出现结构性破损作为失效判据，并记录其从开始工作到失效所经历的总时间，定义为有效工作周期。如表 2 所示，在相同的严苛条件下，B 组抛光轮的有效工作周期相比 A 组有极显著的提升。

表 2 热 – 力耦合加速磨损试验结果

组别	环氧树脂类型	测试样本数量 (n)	平均有效工作周期 (min)	标准偏差 (min)	周期提升率
A 组	普通环氧树脂	5	48.5	± 4.2	--
B 组	耐高温改性环氧树脂	5	112.3	± 5.8	+131.5%

数据分析表明，耐高温改性抛光轮的有效工作周期是普通抛光轮的 2.3 倍以上，提升率高达 131.5%。这直接证明，通过改善环氧树脂的耐温性，能显著延缓抛光轮在热 – 力耦合作用下的性能衰减，有效抵抗高温软化和磨损，从而大幅延长其使用寿命。该结果为高性能无纺布抛光轮的实际生产与应用提供了关键的数据支持与可行性依据。

五、总结

本研究针对无纺布抛光轮在高温环境下性能下降的问题，通过优化环氧树脂的分子结构，成功将材料的玻璃化转变温度

(T_g) 从 70–80℃ 提升至 110–120℃。实验结果表明, 在接近 T_g 的 100–120℃ 高温磨削条件下, 改性后的抛光轮仍能保持良好的机械强度与形状稳定性, 其磨削效率 (材料去除率) 较未改性产品提升约 35%, 使用寿命显著延长至原有水平的 2.3 倍以上。研究

从实际应用需求出发, 通过适度的耐温性提升, 有效拓展了无纺布抛光轮在中高温环境下的适用窗口, 为解决抛光轮在连续加工中的热软化、寿命短等问题提供了经济可行的技术路径, 具有较强的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张孝文. 电子封装用环氧树脂耐高温性能与电气性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [2] 刘泽洋. 耐高温环氧树脂基电子封装材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2023.
- [3] 王坤. 耐高温环氧树脂基全固态聚合物电解质的制备与性能优化 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [4] 陈自兵. 形状记忆环氧树脂的制备及性能研究 [D]. 中北大学, 2021.
- [5] 吕镜琪. 环氧树脂发泡材料的制备与性能研究 [D]. 湖北工业大学, 2021.
- [6] 郭辉, 李琳, 袁海静. 耐高温预浸料环氧树脂的研制及其性能评价 [J]. 高科技纤维与应用, 2022, 47(5): 39–43.
- [7] 韩苇召, 张锋锋, 王锦艳, 等. 含碳硼烷耐高温环氧树脂的合成与性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(11): 22–28.
- [8] 范海明, 杨航, 李玲玉, 魏志毅, 张随望, 张金泽, 刘崧达, 杨红斌. 含醇交联压裂液的交联和耐温性能 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2021.
- [9] 李伟捷, 光善仪, 徐洪耀. 不同固化剂复配的耐高温环氧树脂体系性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(5): 69–80.
- [10] 温子巍, 周熠, 付子恩. 电器用 RTV-1 硅酮密封胶耐温性能的研究 [J]. 粘接, 2022, 49(2): 22–25, 38.

核医学建设项目放射性职业病危害预评价 和控制效果评价

叶小密

广州南方医疗设备综合检测有限责任公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025120045

摘 要：放射性职业病危害防护对放射诊疗建设项目意义重大。从法规遵循、评价程序、监测数据采集到防护设施验证等多方面阐述防护要点，涉及辐射源项强度预估、多重防护体系构建等内容。强调定期监测、人员培训及 PDCA 闭环管理，预评价指标体系与核医学场所动态监测技术协同创新，保障人员健康安全。

关 键 词：放射性职业病危害；核医学建设项目；防控措施

Pre Evaluation and Control Effect Evaluation of Radioactive Occupational Hazards in Nuclear Medicine Construction Projects

Ye Xiaomi

Guangzhou Southern Medical Equipment Comprehensive Testing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Radiation occupational disease hazard protection holds significant importance for radiological diagnosis and treatment construction projects. Key protective measures are elaborated across multiple aspects, including regulatory compliance, evaluation procedures, monitoring data collection, and protective facility validation. This encompasses radiation source intensity estimation and the establishment of multi-layered protective systems. Emphasis is placed on regular monitoring, personnel training, and PDCA closed-loop management. Collaborative innovation between pre-evaluation indicator systems and dynamic monitoring technologies for nuclear medicine facilities ensures personnel health and safety.

Keywords： radiation occupational disease hazards; nuclear medicine construction projects; prevention and control measures

引言

《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》于2005年9月14日颁布，为放射性职业病危害防护提供了有力政策支撑。在此背景下，放射诊疗建设项目放射性职业病危害防护至关重要。其涉及预评价、控制效果评价等多环节，涵盖法规标准遵循、评价程序实施、监测数据采集等多方面工作。同时，核医学场所的布局优化、防护材料选型、操作监控及应急处置等，以及项目各阶段的源项预估、防护体系构建、屏蔽检测等也不容忽视。通过强化预评价与动态监测的协同作用，可有效提升整体防护水平，切实保障工作人员与公众的健康安全。

一、放射性职业病危害预评价概述

（一）预评价法规框架与标准体系

放射性职业病危害预评价需依据完善的法规框架与标准体系。此项工作主要遵循《中华人民共和国职业病防治法》与《放射诊疗管理规定》等法规，其评价过程需符合 GBZ/T 277-2016《职业病危害评价通则》的相关要求。该通则规定了职业病危害评价的目的、范围、方法、程序、内容与质量控制等基本要求，适用于可能产生职业病危害的建设项目的预评价、控制效果评价及

现状评价^{〔1〕}。在实践层面，预评价报告需由取得相应资质的放射卫生技术服务机构编制。通过遵循上述法规与标准，可确保放射诊疗建设项目在规划阶段就对其选址、布局、防护设施设计等进行系统分析，从源头上预防和控制放射性职业病危害，从而保障工作人员和公众的健康安全，为项目的后续建设与运营管理奠定坚实基础。

（二）评价程序核心要素解析

放射性职业病危害预评价的评价程序，其核心要素主要包括对项目中所使用的放射源与放射设备的系统识别与分类、工作人员

可能接触的辐射剂量估算与评价,以及防护设施(如屏蔽体、安全联锁装置等)的有效性验证与分析。准确识别放射性物质类别,是明确危害性质与程度的基础,需依据相关标准和专业知识,精细分辨不同放射性核素及其特性。剂量估算模型构建则是定量评估危害的关键,借助科学合理的模型,综合考虑源项参数、照射途径等要素,精确估算工作人员和公众可能受到的辐射剂量^[2]。屏蔽设施有效性验证关乎防护措施落实,通过理论计算、模拟分析或现场检测等手段,验证屏蔽设施能否有效降低辐射水平,确保将危害控制在可接受范围内,保障人员安全与健康。

二、控制效果评价实施要点

(一) 监测数据采集方法

在核医学建设项目放射性职业病危害控制效果评价的监测数据采集,进行表面污染检测时,应严格遵循标准规范的要求,选用合适的表面污染监测仪,对设备表面、工作台及人员经常接触的关键部位进行规范的擦拭取样与测量。整个操作过程须制定并执行严格的程序,以防止样本间的交叉污染,确保所获监测数据的准确性与可靠性。辐射剂量监测通过结合个人剂量计与固定式区域监测仪共同实现。个人剂量计由工作人员佩戴,用于记录其累积受照剂量;固定式监测仪则安装于工作场所的关键控制点位,对环境辐射水平进行持续测量。该监测体系的设备选用、布点原则与测量方法均严格遵循 GBZ 128、GBZ 125 等职业性外照射监测相关标准规范^[3],从而在技术层面确保监测数据的准确、完整与可追溯,为控制效果评价提供客观、可靠的依据。

(二) 防护设施有效性验证

在核医学建设项目控制效果评价中,防护设施有效性验证至关重要。对于热室屏蔽性能,需依据相关标准,采用专业检测设备,在热室正常运行状态下,于不同位置测量辐射剂量率,对比设计屏蔽参数与实际测量值,以验证屏蔽性能是否达标^[4]。根据《核医学放射防护要求》(GBZ 120-2020)等相关标准,对于放射性废物的管理,需系统检查其分类、收集、暂存设施及相应标识的规范性,并核查废物处理设备的运行记录与关键参数(如处理效率、表面污染水平等)。这些核查旨在验证整个废物处置流程是否符合法规与标准要求,确保实现放射性废物的安全处置。同时,应重点验证项目实际建设情况与职业病危害预评价报告及设计文件的一致性。这包括但不限于:放射工作人员岗位设置与资质配备、工作场所的平面布局与功能分区、辐射屏蔽工程的施工质量与材料规格、以及通风系统的设计与运行效果等关键环节。通过逐项比对,可确认建设项目是否落实了预评价阶段提出的放射防护措施与设计要求,从而在源头上保障防护措施的有效性。

三、核医学场所特殊控制事项

(一) 平面布局优化策略

1. 三区划分原则应用

在核医学场所的平面布局优化中,实施功能分区并采取相应

的物理隔离措施至关重要。根据《核医学放射防护要求》等相关标准,通常将场所划分为控制区与监督区进行管理。控制区是放射性操作的核心区域,需配备严格的防护屏蔽设施,其入口处应设置醒目的电离辐射警告标志。在辐射工作场所分区管理中,控制区的边界应通过实体隔断方式,与监督区及科室内的其他洁净区域实现有效分离,并结合门禁系统进行严格管理。通过权限设置,能够确保进入控制区的人员具备相应资质与授权,从而将放射性操作严格限制在可控范围内,同时建立清晰的人员与物料流动路径。监督区紧邻控制区,要与洁净区保持一定距离,便于辐射监测与人员活动管理。洁净区用于存放无污染物品与人员休息,应与控制区、监督区严格分开,防止放射性污染。通过精确落实这些物理隔离要求,能有效减少不同区域间交叉污染风险,保障工作人员和公众安全,同时提升核医学场所运行效率,符合相关标准与规范^[5]。

2. 防护材料选型标准

在核医学场所的辐射防护设计中,防护材料的科学选型是确保屏蔽效果的关键。铅板和铅玻璃是防护中低能量 γ/X 射线的核心材料,其中铅玻璃在保证良好透视性的同时,能提供铅当量防护,广泛用于观察窗。对于墙体屏蔽,则更常采用实心砖与硫酸钡防护涂料相结合的方案:实心砖构成主体屏蔽结构,而硫酸钡涂料则用于无缝填补砖缝及覆盖墙面,形成完整且满足防护厚度要求的屏蔽体^[6]。在实际应用中,墙体屏蔽是核医学辐射防护的主要手段,目前较为常见的屏蔽材料包括铅板、硫酸钡防护涂料和混凝土等。这些材料依据其密度与厚度,可满足不同放射源种类、能量及工作负荷下的防护需求。此外,在注射防护、可移动屏蔽体以及管线穿墙密封等特定局部防护场景中,也会采用具有相应屏蔽性能的柔性或刚性复合材料。无论是墙体还是局部防护,均需依据放射源的种类、能量及工作负荷,通过精确计算确定所需的屏蔽能力,并据此选用具备相应防护性能的材料,才能在符合安全标准的前提下,实现经济有效的防护设计目标。

(二) 操作过程动态监控

1. 实时剂量报警系统

核医学场所操作过程的动态监控对于辐射安全至关重要,其中具备实时报警功能的辐射监测系统是核心组成部分。该系统应满足高灵敏度的要求,能够实时、准确地探测场所内的辐射水平变化^[7]。在具体实施中,需在给药窗口、分装工作台、患者候诊区等关键操作点位合理布设固定式辐射监测探头。系统应预设剂量率报警阈值,一旦监测到辐射水平异常升高,立即触发现场声光报警装置,警示工作人员及时中断操作、启动应急程序并安全撤离。同时,该系统宜与个人剂量监测管理系统实现联动,能够将报警事件信息、时间及位置数据实时推送至辐射防护负责人,这不仅为工作人员的即时干预和防护提供了技术支持,也为事后追溯异常原因、评估事件影响及持续优化防护措施提供了可靠的数据依据,从而系统性提升核医学场所的辐射安全管控水平。

2. 应急响应处置规程

核医学场所一旦发生放射源泄漏事故,需遵循应急响应处置规程。立即启动应急预案,组织专业应急人员迅速就位,疏散现

场无关人员，封锁事故区域，防止污染扩散。利用专业监测设备，快速判定污染范围^[9]，依据判定结果，按照标准化流程展开去污处置。对于不同类型的放射性物质及受污染对象，采用针对性的去污方法与工具。在处置过程中，持续监测污染水平，确保去污效果符合安全标准。同时，详细记录事故发生、处理经过及相关数据，为后续的调查与评估提供依据，最大程度降低放射源泄漏对人员健康和环境造成的危害。

四、全过程管理关键控制点

（一）设计阶段风险规避

1. 源项强度预估方法

在核医学建设项目中，源项强度预估是设计阶段风险规避的重要环节。需制定科学的放射性核素最大预期使用量计算方法，这要求充分考虑器械的使用目的、频率及应用场景等因素例如，针对不同体型（如成人、儿童或特殊体型）的患者，结合具体临床检查需求，精确分析每次操作所需的放射性核素用量。同时，明确安全余量设计原则至关重要，它能有效应对患者个体差异、操作波动等不确定因素。在设计中可依据相关标准规范及临床实践经验，设定合理的用药安全系数，确保在各类情况下都能保障患者、工作人员及环境的安全。通过这种基于患者体型的、科学的源项强度预估方法，能从源头控制辐射剂量，降低放射性职业病危害风险，并为后续检查流程的实施与防护优化提供可靠依据^[9]。

2. 多重防护体系构建

在核医学建设项目中，构建多重防护体系对放射性职业病危害防控至关重要。固定屏蔽方面，需依据项目的放射性强度、射线类型等参数，精准设计屏蔽材料与厚度，选用铅、混凝土、硫酸钡防护涂料等优质屏蔽材料，确保能有效阻挡射线泄漏。通风净化环节，要设置合理的通风系统，并遵循从低活度区流向高活度区的气流组织原则，保证室内空气充分流通，及时排出放射性气溶胶等有害物质。同时，配置高效空气过滤装置，进一步净化空气，降低空气中放射性物质浓度。个人防护装备也不可或缺，为工作人员配备铅衣、铅帽、防护眼镜及个人剂量计等。铅衣等装备能为人体提供额外屏蔽保护，个人剂量计则可定期监测工作人员所受辐射剂量，以便及时采取措施。通过这三位一体的防控体系，从不同层面降低放射性职业病危害风险^[10]。

（二）施工过程质控措施

1. 屏蔽结构完整性检测

在核医学建设项目中，屏蔽结构完整性检测至关重要。需对屏蔽墙体、防护门及观察窗等部位进行细致检测。对于屏蔽墙体，其检测重点在于验证施工工艺是否满足设计方案，例如通过核查施工记录与现场勘查，确认其结构连续、无可见裂缝，并能有效覆盖所有辐射工作区域。防护门要重点检查其与门框的贴合度，查看密封胶条是否完好，防止射线泄漏。观察窗则需确认玻璃与边框的密封情况，保证其屏蔽性能不受影响。同时，借助专业检测设备，如辐射剂量仪等，在屏蔽结构施工完成后，对其周围环境进行辐射剂量检测，若发现剂量异常，及时查找并修复屏

蔽结构的漏洞，以此保障屏蔽结构完整性，有效控制放射性职业病危害。

2. 特殊施工技术审查

在核医学建设项目涉及放射性职业病危害的施工过程中，特殊施工技术审查极为关键。针对通风系统，需重点审查其气流组织模拟报告，核实模拟所采用的源项参数与边界条件是否准确反映实际工况。模拟结果应能清晰呈现气流从操作区（如注射室、扫描室）向排风口的定向流动路径，并验证风速、换气次数等关键指标符合 GBZ 120 等相关标准要求，从而确保放射性废气能被有效排出，防止在室内积聚或扩散至清洁区域。同时，需确认通风系统在排风口设置了符合要求的过滤装置（如高效空气过滤器或活性炭过滤器等），对排出的气体进行净化处理，以降低向环境排放的放射性物质浓度。通过对此类特殊施工技术的严谨审查，可以从源头保障项目在施工阶段落实既定的防护设计，使放射性职业病危害的防控措施切实有效。

（三）运行期持续改进机制

1. 定期监测制度设计

定期监测制度设计旨在确保核医学建设项目运行期对放射性职业病危害的有效把控。设计中，要明确监测的周期，依据设备使用频率、放射性危害程度等因素合理设定，如高频使用且危害较高的设备可缩短监测周期，以保证及时发现潜在风险。需确定全面的监测指标，其范围应既包括设备性能指标（如射线输出量稳定性、防护屏蔽效能等），也涵盖工作场所环境指标（如辐射剂量率分布等）。同时，规范监测方法，采用经认证的专业仪器与标准操作流程，保证监测数据的准确性与可靠性。此外，设立专门的监测人员队伍，要求其具备专业知识与资质，且对监测数据进行详细记录与分析，形成规范报告，为后续防护设施升级及设备性能优化提供科学依据，从而实现基于 ALARA 原则下对放射性职业病危害的持续防控。

2. 人员培训体系优化

在核医学建设项目运行期，人员培训体系优化对放射性职业病危害控制效果至关重要。通过制定包含辐射安全文化培育、标准化操作演练及应急能力考核的培训模块，能全面提升人员素养与技能。辐射安全文化培育旨在使工作人员从原理上认知辐射特性与风险来源，从而将安全规范内化为自觉行动。标准化操作演练通过反复训练，确保工作人员能精准、熟练地执行各类设备的操作规程，最大限度减少人为失误带来的辐射暴露。应急能力考核则侧重于检验和提升人员在突发状况下的快速响应与规范处置能力，以有效控制事态影响。通过构建并实施这一系统化的培训与考核体系，能够在项目运行期内持续强化团队的放射性危害综合防控水平，实现安全管理能力的螺旋式上升。

五、总结

放射性职业病危害防控对于核医学建设项目至关重要。PDCA 闭环管理模式的运用，能促使防控工作形成一个持续改进的良性循环，从计划、执行、检查到处理，每个环节紧密相扣，不断提

升防控效果。预评价指标体系为项目前期规划提供科学依据，精准识别潜在危害因素，从源头上把控风险。而核医学场所动态监测技术则在项目运行过程中实时跟踪危害状况，及时发现问题。二者协同创新，既完善了从前期预评价到后期实际控制的全流程

管理，又有力保障了工作人员和公众的健康安全。这种协同模式不仅为核医学建设项目在放射性职业病危害防控方面提供有效路径，也为相关领域的发展提供极具价值的参考，推动整体防控水平不断提升。

参考文献

[1] 张欣. 医院核医学科通风空调系统设计与应用 [J]. 暖通空调, 2025, 55(10): 156–161.

[2] 张欣. 医院核医学空调系统设计与应用 [J/OL]. 暖通空调, 1–10[2025–11–20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2832.TU.20250916.1240.006..>

[3] 巫迪, 李玮衡, 黎润华, 等. 核医学诊疗项目辐射防护管理要求 [J]. 中国标准化, 2025, (15): 178–183.

[4] 臧栋, 李清华, 贾兵. 核医学科场地建设实践——以潍坊市益都中心医院新院区为例 [J]. 建筑安全, 2025, 40(02): 91–94.

[5] 陈天力, 曾华, 包贞. 《核医学辐射防护与安全要求》适用性探讨及建议 [J]. 环境污染与防治, 2024, 46(05): 760–763.

[6] 陈雪, 刘庆芬, 尹谏, 等. 天津市部分医疗机构建设项目放射性职业病危害评价结果分析 [J]. 中国辐射卫生, 2021, 30(1): 81–84, 90.

[7] 赵永峰. 医疗机构建设项目放射性职业病危害控制效果评价结果研究 [J]. 养生大世界, 2021(10): 55.

[8] 徐彦辉, 吴可亚. 某医院 DR 机房建设项目职业病危害控制效果放射防护评价 [J]. 中国保健营养, 2021, 31(1): 285.

[9] 朱丹丹, 时青, 周燕飞, 等. 基于新防护标准的某医院核医学科工作场所辐射防护设计评价与分析 [J]. 中国医院建筑与装备, 2024, 25(02): 41–44.

[10] 张二春, 江万丽, 张珍, 等. 核医学诊疗中辐射防护安全风险的根本原因分析及对策研究 [J]. 中国医学装备, 2023, 20(11): 128–133.

高性能锂离子电池锡基复合负极材料的研究

邵浩明

湖南省地质实验测试中心, 湖南 长沙 410007

DOI:10.61369/ME.2025120061

摘 要 : 高比容量负极材料的结构稳定性已成为制约锂离子电池性能提高的关键因素。锡基材料虽具有突出的储锂潜力, 但在反复合金化反应中出现结构失稳情况, 对材料设计提出了更高要求。本文围绕锡基复合负极材料的结构调控、性能优化, 采用水热反应与高温碳化相结合的方式建立 Sn/C 复合体系, 并分析其物相组成、微观形貌及电化学行为。结果表明, 纳米锡颗粒在碳基质中的均匀分散能够缓解体积效应, 提高电极导电性与界面稳定性, 从而显著改善循环与倍率性能。

关 键 词 : 锂离子电池; 锡基复合负极材料; 电化学性能

Research on Tin-Based Composite Anode Materials for High-Performance Lithium-Ion Batteries

Shao Haoming

Hunan Geological Experiment and Testing Center, Changsha, Hunan 410007

Abstract : The structural stability of high specific capacity anode materials has become a key factor restricting the improvement of lithium-ion battery performance. Although tin-based materials have outstanding lithium storage potential, they suffer from structural instability during repeated alloying reactions, which poses higher requirements for material design. This paper focuses on the structural regulation and performance optimization of tin-based composite anode materials, using a combination of hydrothermal reaction and high-temperature carbonization to establish a Sn/C composite system, and analyzing its phase composition, microstructure, and electrochemical behavior. The results show that the uniform dispersion of nano-silver particles in the carbon matrix can alleviate the volume effect, improve the electrode conductivity and interface stability, thereby significantly improving the cycle and rate performance.

Keywords : lithium-ion battery; tin-based composite anode material; electrochemical performance

引言

锂离子电池凭借成熟的产业体系, 已成为当前主流的二次电池体系, 其性能提升对新能源技术发展具有重要意义。传统石墨负极受到低理论容量的影响, 已无法满足高能量密度电池的发展需求。锡基复合负极材料因具有较高的理论比容量而受到广泛关注, 但其在充放电过程中容易产生体积膨胀, 从而影响结构稳定性。因此, 系统研究锡基复合负极材料的制备、结构表征及电化学性能, 能够揭示其性能提升机理, 推动高性能锂离子电池应用。

一、锂离子电池的工作原理

锂离子电池的充放电过程本质上是锂离子在正、负两极之间的嵌入与脱出, 这一机制常被称为“摇椅式”机制 (如图1)。

充电过程: 生成的锂离子从正极进入电解液, 越过隔膜, 运动到负极, 与外部电路提供的负极电子结合。

放电过程: 该过程完全可逆。在化学势差的驱动下, 嵌入负极的锂离子发生脱嵌, 经电解质回到正极材料中, 实现化学能向电能的转化。

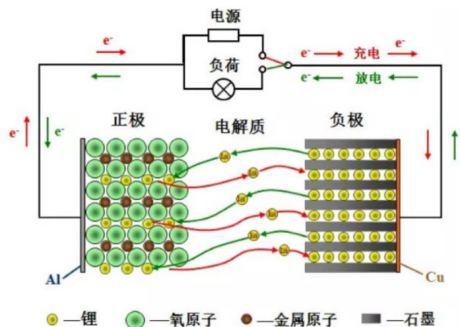


图1: 锂离子电池工作原理

作者简介: 邵浩明, 男, 汉, 籍贯: 湖南省岳阳市湘阴县, 单位: 湖南省地质实验测试中心, 职称: 高级工程师, 学历: 硕士研究生, 主要研究方向: 无机非金属材料。

二、实验部分

(一) 实验原料与仪器设备

1. 实验原料

氯化亚锡作为锡源，葡萄糖和柠檬酸为碳源，钛酸四丁酯为钛源，N-甲基吡咯烷酮为溶剂。PVDF为粘结剂，乙炔黑为导电剂，1M LiPF₆/EC-DEC为电解液。

2. 仪器设备

分析天平、磁力搅拌器、管式炉、真空干燥箱。采用X射线衍射仪、扫描电子显微镜、透射电子显微镜进行材料表征。电池组装在手套箱中完成，电化学测试使用蓝电测试系统和电化学工作站。

(二) 锡基复合负极材料的制备

本研究采用水热-煅烧两步法制备锡/碳复合材料，并调控工艺参数来优化材料结构^[1]。

1. 制备工艺流程

(1) 前驱体溶液配制：将2.0g SnCl₂·2H₂O与3.0g葡萄糖溶解到60mL去离子水中，加入0.5g柠檬酸作为分散剂，室温下，磁力搅拌2h，形成均匀透明溶液。

(2) 水热反应：将混合溶液转移到100mL聚四氟乙烯内衬反应釜中，密封后置于180℃烘箱中反应12h。反应过程中，Sn²⁺与葡萄糖水解产物发生络合与共沉淀，形成前驱体复合物。

(3) 产物后处理：反应结束后自然冷却，所得产物分别用去离子水和无水乙醇离心洗涤3次，随后在80℃真空干燥箱中干燥12h，得到Sn/C前驱体粉末。

(4) 高温碳化：将前驱体放在管式炉中，在高纯氩气氛围保护下，以5℃/min升温到600℃，保温3h进行碳化处理。自然冷却后研磨过筛，获得最终Sn/C复合材料。

2. 工艺参数优化设计

为优化材料性能，本研究对关键工艺参数进行系统设计：

优化变量	实验设计	考察目的
碳源配比	Sn: 葡萄糖 = 1:1, 1:1.5, 1:2 (质量比)	确定最佳碳包覆厚度与导电性平衡
水热温度	160℃, 180℃, 200℃	调控材料结晶度与颗粒尺寸
水热时间	8h, 12h, 16h	优化前驱体形成完整性
碳化温度	500℃, 600℃, 700℃	平衡碳层石墨化度与锡颗粒尺寸

每个参数设置3组平行实验，对比电化学性能以确定最优条件。最终优化参数组合为：Sn: 葡萄糖质量比1:1.5，水热温度180℃/12h，碳化温度600℃/3h。

(三) 材料表征与测试方法

1. 结构表征

采用X射线衍射仪分析材料物相组成及结晶度。借助扫描电子显微镜和透射电子显微镜观察材料微观形貌、颗粒尺寸及复合界面结构。采用X射线光电子能谱分析表面元素化学态。使用比表面积及孔径分析仪利用氮气吸附法测定材料比表面积和孔径分布^[2]。

2. 电极制备与电池组装

(1) 电极浆料配制：将活性物质、导电剂、粘结剂按80:10:10的质量比混合，加入适量N-甲基吡咯烷酮溶剂，搅拌2h形成均匀浆料。

(2) 涂布与干燥：将浆料刮涂在铜箔集流体上，控制活性物质面密度为1.2-1.5mg/cm²，并放在真空干燥箱中，120℃干燥12h去除溶剂。

(3) 极片制备：干燥后的极片在10MPa压力下辊压，裁切为直径12mm的圆形电极片。

(4) 电池组装：在氩气气氛手套箱中组装CR2032型扣式电池，依次放置负极壳、电极片、隔膜、电解液、锂片、垫片、正极壳，用封口机密封。静置12h后进行测试。

3. 电化学性能测试

(1) 恒流充放电测试：使用LAND电池测试系统，在0.01-2.0V电压范围内，以0.1C倍率进行首次充放电，随后以0.5C进行长循环测试。

(2) 循环伏安测试：采用CHI电化学工作站，在0.01-2.0V内以0.1mV/s扫描速率进行CV测试。

(3) 交流阻抗测试：在100kHz-0.01Hz频率范围内测试电极界面阻抗特性。

(4) 倍率性能测试：在0.1C、0.2C、0.5C、1C、2C、5C不同倍率下测试电极容量保持能力。

所有测试均在25±2℃恒温环境下进行，每组实验至少测试三个平行样，以保证数据的可靠性。

三、结果与讨论

(一) 锡基复合负极材料的结构与形貌表征结果

1. XRD物相分析

图2展示了Sn/C复合材料与对照样品的XRD图谱。从图中可以看出，纯锡样品在30.6°、32.0°、43.9°处显示尖锐的衍射峰，分别对应金属锡的(200)、(101)、(220)晶面。Sn/C复合材料在相同位置仍保持明显的锡特征衍射峰，但其峰强度有所降低，表明锡的结晶度因碳包覆而受到一定影响。图谱中未检测到SnO₂等其他杂质相的衍射峰，说明在氩气保护下成功避免了锡的氧化^[3]。

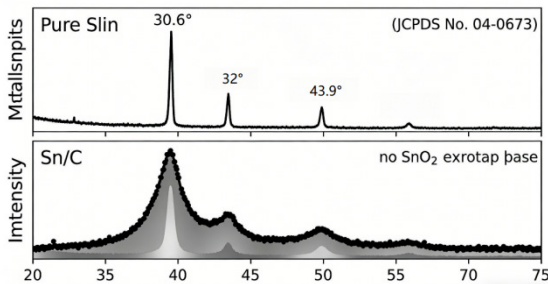


图2: XRD图谱

2. 微观形貌分析

图3展示了Sn/C复合材料的SEM形貌特征。图3-1(a)显示

材料整体呈现均匀的多孔球形结构，颗粒尺寸主要分布在1-3 μm 范围内，具有良好的分散性。从图3-1(b)的高倍 SEM 图像可以观察到，这些二次颗粒由更小的初级颗粒堆积而成，表面粗糙且存在丰富的孔隙结构^[4]。

借助 TEM 进一步分析材料的纳米尺度结构。图3-2(a)显示锡纳米颗粒（暗色区域）均匀分散在碳基质（浅色区域）中，形成了明显的核壳结构。图3-2(b)显示锡纳米颗粒的晶格条纹清晰可见，测量的晶面间距为0.29nm，对应金属锡的（200）晶面。锡颗粒尺寸约为50-80nm，外层碳包覆层厚度均匀，约为5-10nm。

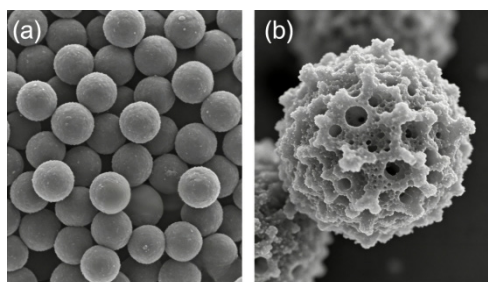


图3-1

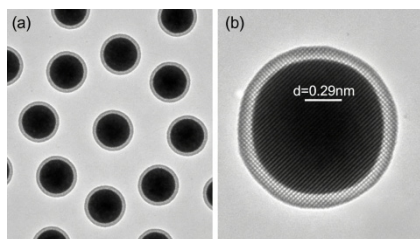


图3-2

图3：SEM形貌特征

3. 表面与孔结构分析

XPS分析结果显示 Sn/C 复合材料表面主要包含 Sn、C、O 三种元素。Sn3d 谱图中，结合能为485.2eV和493.6eV的双峰分别对应 Sn3d_{5/2}和 Sn3d_{3/2}，证实了金属锡的存在。C1s 谱图在284.8eV处出现强峰，归属于 C-C 键，表明碳基质以无定形碳形式存在。

氮气吸附-脱附测试结果显示，Sn/C 复合材料具有典型的IV型等温线并带有 H3型回滞环，表明材料中存在介孔结构。BET 比表面积达到185m²/g，孔径分布主要集中在2-10nm范围内。这种高比表面积和多孔结构有利于提高材料的离子传输速率，并为体积膨胀提供缓冲空间。

上述表征分析表明，锡纳米颗粒被均匀包裹在无定形碳层中，材料具有较高的比表面积和适宜的孔结构，能够解决锡基材料的导电性差和体积膨胀问题。

（二）锡基复合负极材料的电化学性能分析

1. 循环与倍率性能

图4-1循环性能对比图显示，Sn/C 复合材料展现出优异的循环稳定性。在0.5C倍率下，初始放电容量为878mAh/g，200次循环后容量保持率达86.3%，剩余容量为758mAh/g。相比之下，纯锡电极200次循环后容量仅剩202mAh/g。这种显著提高主要由于碳包覆层作为机械缓冲层能够抑制锡的体积膨胀，从而形成

连续导电网络以提高电荷传输效率。

图4-2倍率性能图表明复合材料具有良好的高倍率性能。在0.1C、0.5C、1C、2C和5C倍率下，放电容量分别为892、815、742、670和508mAh/g。当电流密度恢复到0.1C时，容量迅速回升到875mAh/g，表明结构具有良好的可恢复性。这为锂离子提供了快速扩散通道。

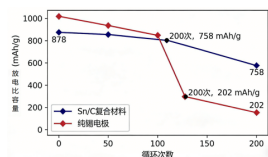


图4-1：循环性能对比图

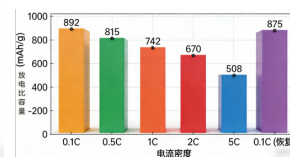


图4-2 倍率性能图

图4：循环与倍率性能图

2. 电化学动力学分析

由于 Sn 基负极材料的氧化还原峰通常呈现一定宽化特征，其峰会随材料结构与测试条件发生偏移，因此本文主要从电位区间与反应类型角度进行分析：

图5-1所示循环伏安曲线中，Sn/C 复合材料在低电位区（约0.1-0.3V）出现明显的还原峰，对应于 Sn 与 Li 发生合金化反应；在中高电位区（约0.5-0.8V）出现相应的氧化峰，归因于 Li_xSn 的脱锂过程。从第二圈开始 CV 曲线基本重合，表明电极反应具有良好可逆性。

图5-2电化学阻抗谱显示，Sn/C 复合材料的电荷转移电阻为38 Ω ，远低于纯锡的148 Ω 。经过50次循环后，复合材料 R_{ct} 仅增至45 Ω ，而纯锡电极大幅增加至312 Ω 。这表明碳包覆层能够改善电极界面的稳定性，降低电荷传输阻力。

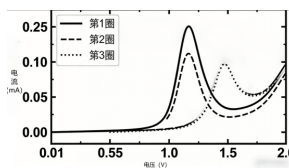


图5-1：循环伏安曲线

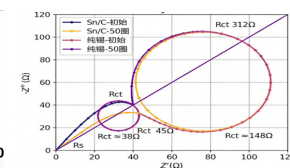


图5-2：电化学阻抗谱

图5：电化学动力学分析图

Sn/C 复合材料的电化学性能优势来源于以下协同作用：（1）碳包覆层缓冲体积变化并保持结构完整性；（2）多孔结构促进电解液渗透和离子扩散；（3）连续碳网络提供高效电子传导路径；（4）稳定界面降低电荷转移阻抗。这种结构设计能够实现高容量与长循环寿命的良好平衡。

（三）锡基复合负极材料的性能提升机制

综合结构与电化学性能分析，Sn/C 复合材料优异的电化学性能主要源于以下四个方面的协同作用机制：

1. 结构缓冲机制

碳包覆层是机械缓冲基质，能抑制锡在合金化 / 去合金化过程中的体积膨胀。TEM 分析显示，厚度5-10nm的均匀碳层包裹在锡纳米颗粒表面，为体积变化提供弹性缓冲空间，防止活性物质颗粒的直接接触，减少应力集中造成的颗粒破碎，从而提高循环稳定性。

2. 界面稳定机制

结合 XPS 表征结果与电化学阻抗分析可以推断，碳包覆层有

利于建立较为稳定的电极 / 电解质界面。均匀的碳表面有利于形成薄而致密的 SEI 膜，减少电解液的持续分解和活性锂的不可逆消耗。循环后阻抗谱显示，Sn/C 复合材料的电荷转移电阻仅从 38Ω 微增到 45Ω ，而纯锡电极则从 148Ω 剧增到 312Ω ，证明碳层能够维持电极 / 电解质界面的稳定性。

3. 传导增强机制

BET 测试显示复合材料具有 $185\text{m}^2/\text{g}$ 的高比表面积和 2–10nm 的介孔结构，为锂离子提供丰富的传输通道。同时，连续的碳网络建立的三维电子传导路径，能够提高电极的电子电导率。计算表明，复合材料的锂离子扩散系数比纯锡材料提高约 4 倍，这从动力学角度解释其优异的倍率性能。

4. 协同效应机制

上述机制能够形成一个完整的性能提升体系：碳层缓冲体积变化保持结构完整→稳定界面降低副反应→多孔结构促进离子传输→导电网络加速电荷转移。这种“结构–界面–传导”三位一

体的协同设计，使 Sn/C 复合材料在高容量、长循环寿命间实现良好平衡。

四、结语

以 SnCl_2 为锡源、葡萄糖为碳源，借助水热反应与高温煅烧相结合的方法，能制备一种结构稳定的 Sn/C 锡基复合负极材料。该复合材料中，纳米级锡颗粒被均匀包覆并分散在无定形碳基质中，形成连续导电网络和多孔缓冲结构。在充放电过程中，碳包覆层能够有效抑制锡的体积膨胀，维持电极结构完整性，同时改善电极 / 电解质界面稳定性，进而提高材料的电化学性能。锡基复合负极材料可进一步优化材料微观结构、引入多元复合体系，持续增强其循环稳定性，为高性能锂离子电池的发展提供坚实的材料基础。

参考文献

[1] 瞿军, 金姚瑶, 胡章涛, 郑毅, 张瀚. 高性能锂离子电池纳米 Fe_2O_3 / 竹叶碳复合负极材料 [J]. 人工晶体学报, 2025, 54(09): 1654–1662.
[2] 卢雨, 张梦迪, 董志亮, 何正秋, 吴明铂. 富缺陷碳网络包覆多孔硅复合材料用于高性能锂离子电池负极 [J]. 新型炭材料 (中英文), 2025, 40(05): 1184–1192.
[3] 李培枝, 雷盼, 杨晓武, 张康, 王晨. MOF 基 $\text{ZnO}/\text{NiO}@\text{C}$ 复合材料作为高性能锂离子电池负极材料 [J]. 电源技术, 2025, 49(01): 106–113.
[4] 李昆儒, 胡省辉, 张正富, 郭玉忠, 黄瑞安. 源于溪木贼的高性能锂离子电池三维多孔生物质硅 / 碳复合负极材料 [J]. 无机材料学报, 2021, 36(09): 929–935.