

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11期 2025年11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 | 公路桥梁施工中关键技术难点及对策研究
Research on Key Technical Difficulties and Countermeasures in
Highway and Bridge Construction | 陈景文
Chen Jingwen |
| 004 | 港口工程建设中的技术管理要点及优化措施
Key Points and Optimization Measures of Technical Management
in Port Engineering Construction | 周炽华
Zhou Chihua |
| 007 | 建筑工程检测中材料性能测试方法的实践与应用研究
Research on the Practice and Application of Material Performance Test Method in
Construction Engineering Detection | 梁厚健
Liang Houjian |
| 010 | 水工建筑工程质量检测关键技术与管理实践研究
Research on Key Technology and Management Practice of Hydraulic Construction
Engineering Quality Inspection | 黄平
Huang Ping |
| 013 | 基于多维检测数据的既有建筑可靠性综合评定方法研究
Research on the Comprehensive Reliability Evaluation Method of Existing Buildings
Based on Multi-dimensional Detection Data | 梁均华
Liang Junhua |
| 016 | 城市更新背景下市政道路施工技术创新与应用研究
Research on Innovation and Application of Municipal Road Construction Technology
under the Background of Urban Renewal | 古智辉
Gu Zhihui |
| 019 | 市政道路路基处理与建筑施工技术管理的融合路径研究
Research on the Integration Path of Municipal Road Soft Foundation Treatment and
Construction Technology Management | 胡想想
Hu Xiangxiang |
| 022 | 高层建筑结构抗震设计: 选型、性能与经济性的综合考量
Seismic Design of High-Rise Building Structures: Comprehensive Consideration of
Selection, Performance, and Economy | 陈加平
Chen Jiaping |
| 025 | 新时期工程造价争议的多元化解决机制与评审实践创新
Diversified Resolution Mechanism and Innovative Review Practice for
Engineering Cost Disputes in the New Era | 赵玉玲
Zhao Yuling |
| 028 | 基于 BIM 的钢筋精细化下料优化研究
Research on the Optimization of Precision Reinforcement Bar
Cutting Based on BIM | 陈丹
Chen Dan |
| 031 | 分析市政工程造价控制管理遇到难题及改进
Analysis of the Difficulties Encountered in Cost Control and Management of Municipal
Engineering Projects and Improvements | 连少杰
Lian Shaojie |
| 034 | 高速桥梁西锚碇施工安全风险防控体系构建与实践
Construction and Practice of Safety Risk Prevention and Control System for West
Anchor of High-Speed Bridges | 谢帅豪
Xie Shuaihao |
| 037 | 医疗建筑电气设计中的消防配电设计
Fire Power Distribution Design in Electrical Design of Medical Buildings | 黄祖云
Huang Zuyun |
| 040 | 轨道交通与水利工程领域建筑电气施工的创新路径
Innovative Path for Building Electrical Construction in the Field of Rail Transit and
Water Conservancy Engineering | 陈宁
Chen Ning |
| 044 | 建筑管理领域中装配式预制构件的技术管理与质量控制
Technical Management and Quality Control of Prefabricated Components
in the Field of Building Management | 李雪娟
Li Xuejuan |

047	地铁站建筑设计与关键技术应用研究 Research on Architectural Design and Key Technology Application of Subway Station	朱长胜 Zhu Changsheng
-----	---	-----------------------

环境工程 | ENVIRONMENTAL ENGINEERING

050	烟草废水零排放技术及其工程设计实例分析 Analysis of Tobacco Wastewater Zero Discharge Technology and Its Engineering Design Case Study	陈梓晟 Chen Zicheng
053	聚焦生态环境工程：生活垃圾填埋场与转运站的建设及运营管理新论 Focus on Ecological Environment Engineering: New Perspectives on the Construction and Operation Management of Municipal Solid Waste Landfills and Transfer Stations	麦守廉 Mai Shoulian
056	环境检测领域嵌入式设备研发与创新路径探究 Research and Innovation Path of Embedded Devices in Environmental Monitoring Field	吴长忠 Wu Changzhong
059	城市燃气施工中工程管理的策略与实践 Strategies and Practices of Engineering Management in Urban Gas Construction	徐永深 Xu Yongshen
062	工业废水提标改造中高效预处理与深度处理工艺组合设计及应用 Design and Application of Efficient Pre treatment and Deep Treatment Process Combination in Industrial Wastewater Upgrading and Transformation	廖兆美 Liao Zhaomei
065	垃圾发电沼气处理方案的可行性分析 Feasibility Analysis of Garbage to Energy Biogas Treatment Scheme	吴家宋 Wu Jiasong
068	双碳背景下北方地区供暖系统节能转型研究 Research on Energy saving Transformation of Heating Systems in Northern Regions under the Background of Dual Carbon	吴嘉伟, 陶鹏, 郭佩宗, 邵美娜, 李春辉 Wu Jiawei, Tao Peng, Guo Peizong, Shao Meina, Li Chunhui

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

071	轨道交通专用无线通信技术演变路径探究 Exploration of the Evolution Path of Wireless Communication Technology for Rail Transit	亓晓武 Qi Xiaowu
074	智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践 Digital Upgrading Practice of Automobile Production Line under the Background of Intelligent Manufacturing	李云鹤 Li Yunhe
077	基于气动物流系统运行数据的医院智慧物流优化模型研究 Research on Hospital Smart Logistics Optimization Model Based on Pneumatic Logistics System Operation Data	曾佳林 Zeng Jialin
080	佳木斯高端智能农机产业发展路径与政策支持研究 Research on the Development Path and Policy Support of High-End Intelligent Agricultural Machinery Industry in Jiamusi	王庆和, 王靖宇 Wang Qinghe, Wang Jingyu

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

083	石油化工带压堵漏技术的创新与安全管理 Innovation and Safety Management of Pressure Plugging Technology in Petrochemical Industry	倪行秀 Ni Xingxiu
086	燃气输配管理中的安全管控要点及优化措施 Key Points and Optimization Measures for Safety Control in Gas Transmission and Distribution Management	陈定福 Chen Dingfu
089	影响光伏系统发电量的关键因素分析与优化措施研究 Analysis of Key Factors Affecting the Power Generation of Photovoltaic System and Research on Optimization Measures	林炜达 Lin Weida
092	胶粘剂在新能源动力及储能电池 PACK 中的应用现状与发展趋势 Application Status and Development Trend of Adhesives in New Energy Power and Energy Storage Battery Pack	冷杰 Leng Jie
095	锂电池行业新技术调研：UV 喷墨与固态电池技术在非标设备中的应用 Research on New Technologies in Lithium Battery Industry: Application of UV Inkjet and Solid State Battery Technology in Non standard Equipment	黄雅兰 Huang Yalan
098	市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术及应用 Technology and Application of Upgrading and Renovation for Improved Oxidation Ditch in Municipal Sewage Treatment Plants	何亮 He Liang
101	分析煤矿采矿智能化技术在安全生产中的运用 Analyze the Application of Intelligent Automation Technology in Coal Mining in Safe Production	赫建魁 He Jiankui
104	西乡县五里坝硫铁矿矿区水处理污泥治理措施研究 Research on Sludge Treatment Measures for Water Treatment in Wuliba Pyrite Mining Area, Xixiang County	马超, 朱淼, 王晓宇 Ma Chao, Zhu Miao, Wang Xiaoyu
108	基于风能光能互补的智能新能源汽车充电技术研究 Research on Intelligent New Energy Vehicle Charging Technology Based on Wind and Solar Energy Complementarity	马涛, 张倩涵, 李守信, 郭超, 王军杰 Ma Tao, Zhang Qianhan, Li Shouxin, Guo Chao, Wang Junjie
111	风电 EPC 工程总承包项目的成本管理分析 Analysis of Cost Management in Wind Power EPC General Contracting Projects	吴闯 Wu Chuang
115	火力发电汽轮机阀门常见故障诊断及预防性检修规划 Common Fault Diagnosis and Preventive Maintenance Strategy for Steam Turbine Valves in Thermal Power Generation	周迪 Zhou Di

118	大数据工程视角下家电维修保养服务平台开发运维管理研究 Research on the Development, Operation and Maintenance Management of Home Appliance Maintenance Service Platform from the Perspective of Big Data Engineering	张国友 Zhang Guoyou
121	基于热工过程控制的电厂热工自动化与仪表技术分析 Analysis of Thermal Automation and Instrumentation Technology in Power Plants Based on Thermal Process Control	李文超 Li Wenchao
124	消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证方法及应用 Collaborative Verification Method and Application of Safety and Functionality of Mechanical and Electrical Systems in Fire Engineering Completion Inspection	李细业 Li Xiye
127	变压器制造工艺在机电工程管理体系中的研究及优化策略 Research and Optimization Strategy of Transformer Manufacturing Process in Electromechanical Engineering Management System	林先永 Lin Xianyong
130	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
133	房地产业电气工程设备运维与故障处理策略探究 Research on the Operation and Maintenance and Fault Handling Strategies of Electrical Engineering Equipment in the Real Estate Industry	张文杰 Zhang Wenjie
136	汽轮发电机组 DEH 系统快速响应技术的研究 Research on the Application of Cross System Integrated Monitoring Technology in Paper Mill Thermal Power Plant based on Hollsys DCS and Siemens PLC	钟广洪 Zhong Guanghong
139	市政供水管网：从大型建设到高效抢修的技术与实践 Municipal Water Supply Network: Technology and Practice from Large scale Construction to Efficient Repair	夏伟德 Xia Weide
142	热能动力视角下电厂设备管理与技术管理的协同发展 The Synergistic Development of Equipment Management and Technical Management in Power Plants from the Perspective of Thermal Energy Power	杨尚霖 Yang Shanglin
146	高压电缆金属护套氩弧焊机自动化改造系统设计与实现 Design and Implementation of Automation Transformation System for High Voltage Cable Metal Sheath Argon Arc Welded Pipe Machine	黎洋 Li Yang

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

150	汽车散热器钎焊工艺优化研究及应用 Research and Application of Optimization of Brazing Process for Automotive Radiators	廖衡山 Liao Hengshan
153	厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究 Research on Welding Process Evaluation and Key Technologies of High Strength Steel for Thick walled Pressure Vessels	温兆鸿 Wen Zhaohong
156	安全生产管理模式创新与安全工程专业发展探讨 Exploration on Innovation of Work Safety Management Models and the Development of Safety Engineering Discipline	邝永浩 Kuang Yonghao
159	化工过程本质安全化设计与控制策略研究 Research on Intrinsic Safety Design and Control Strategies for Chemical Processes	凌克强 Ling Keqiang
162	化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化与实践 Optimization and Practice of Chemical Process Management in High end Copper Foil Production	杨雨平 Yang Yuping
165	化工行业安全工程视角下企业运营的风险预防与控制 Risk Prevention and Control of Enterprise Operation from the Perspective of Safety Engineering in the Chemical Industry	白秋刚 Bai Qiugang
168	基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用研究 Development and Application of Touch Screen Optical Adhesive based on Hot Melt Adhesive Technology Management	林炎群 Lin Yanqun
171	化工企业安全检查与隐患排查：风险评估与管控的实践路径 Safety Inspection and Hidden Danger Investigation of Chemical Enterprises: Practical Path of Risk Assessment and Control	方石明 Fang Shiming
174	石油化工工程安装安全技术质量管理对项目成效的影响及优化 The Impact and Optimization of Safety Technology Quality Management in Petrochemical Engineering Installation on Project Effectiveness	汤斌 Tang Bin
177	制造业不锈钢餐厨具企业品质管理的提升路径探究 Exploration of the Improvement Path of Quality Management in Stainless Steel Kitchenware Enterprises in the Manufacturing Industry	董迪升 Dong Disheng
180	电感耦合等离子体原子发射光谱法测定贵金属合金电镀废水中钯含量不确定度评定 Evaluation of Uncertainty in the Determination of Palladium Content in Electroplating Wastewater of Precious Metal Alloys by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry	谢卓森 Xie Zhuosen
185	自动化机械设备中结构设计的合理化 The Rationalization of Structural Design in Automated Mechanical Equipment	周树海 Zhou Shuhai

公路桥梁施工中关键技术难点及对策研究

陈景文

广东 韶关 512300

DOI:10.61369/ME.2025110002

摘 要： 公路桥梁施工技术研究至关重要。文中系统归纳关键技术体系，包括软弱地基处理、高边坡防护等技术难点及应对措施，介绍智能监测导向加固决策等系统和技术应用，还阐述工效提升、质量安全效益评估等内容，指出未来应融合智能建造与可持续发展，推动行业进步。

关 键 词： 公路桥梁施工；关键技术；智能建造

Research on Key Technical Difficulties and Countermeasures in Highway and Bridge Construction

Chen Jingwen

Shaoguan, Guangdong 512300

Abstract： The research on highway and bridge construction technology is of great significance. This paper systematically summarizes the key technical system, including technical difficulties such as soft foundation treatment and high slope protection as well as corresponding countermeasures. It also introduces the application of systems and technologies like intelligent monitoring-guided reinforcement decision-making, and expounds on contents such as work efficiency improvement and quality, safety and benefit evaluation. The paper points out that in the future, it is necessary to integrate intelligent construction with sustainable development to promote the progress of the industry.

Keywords： highway and bridge construction; key technologies; intelligent construction

引言

公路桥梁施工技术研究对保障工程质量、推动行业发展至关重要。2022年，交通运输部颁布《公路“十四五”发展规划》，强调要推动交通基础设施高质量发展，提升公路桥梁建设技术水平。文中探讨的软弱地基处理、高边坡防护、线性控制等技术难点，以及智能监测、一体化施工等技术方案，正是在响应政策要求，致力于解决实际施工难题。通过对这些关键技术的研究与应用，不仅能有效提升施工质量与安全性，还顺应了智能建造与可持续发展融合的趋势，推动公路桥梁建设迈向新台阶。

一、公路桥梁施工关键技术难点识别

（一）复杂地质条件下的施工难点

1. 软弱地基处理技术难点

软弱地基是公路桥梁施工中常见的地质难题，其土质普遍具有含水量高、压缩性大、抗剪强度低的特点，含水量通常超过30%，压缩系数较高，抗剪强度多低于20kPa^[1]。在桥梁荷载作用下，这类地基易产生显著的累计沉降与不均匀沉降，不仅导致桥面平整度超标、支座变形，影响行车安全与舒适性，还会降低桥梁整体耐久性。同时，软弱地基的自然固结周期较长，若未能充分固结便推进施工，后期易出现二次沉降，超出设计允许范围。在基础施工阶段，软土易因护壁泥浆流失引发塌孔问题，导致桩基偏位，增加返工成本与工期延误风险，给施工带来多重挑战。

2. 高边坡防护稳定性挑战

高边坡施工的稳定性风险源于地质条件多样性与外部环境扰

动的叠加影响。高边坡所处区域岩土体多为分层结构，不同岩层与土层的力学参数差异显著，抗压强度差距可达数倍，难以精准评估整体稳定性^[2]。若岩土体存在节理裂隙，雨水渗透会大幅提升含水率，导致抗剪强度降低，进而增加局部滑塌风险。在施工过程中，分层开挖高度与开挖顺序的不合理规划，会破坏边坡原有应力平衡；强降雨、地震等外部因素进一步加剧坡面重力分力，对防护结构的承载能力提出更高要求，一旦防护设计或施工质量存在缺陷，易引发局部垮塌甚至整体失稳，阻碍施工进度。

（二）桥梁结构施工工艺难点

1. 大跨径连续梁桥线形控制难题

大跨径连续梁桥的线形控制核心矛盾在于预应力张拉误差的累计效应。预应力张拉是保障桥梁结构性能与线形的关键工序，但实际施工中，张拉设备精度偏差、钢绞线材料特性差异以及施工人员操作水平不同，会导致实际张拉应力与设计值出现偏差。随着施工阶段增加，这类偏差逐步累计，最终导致桥梁线形偏离

设计预期，不仅影响桥梁外观，还会改变结构内力分布，降低承载能力。严重时，线形失控可能引发梁体开裂，威胁桥梁正常使用与运营安全，因此精准控制预应力张拉误差至关重要^[3]。

2. 钢结构焊接残余应力控制难点

公路桥梁钢结构施工中，焊接残余应力控制难度较大。焊接过程中，焊缝区域经历快速加热与冷却，局部温度可达1500–1800℃，而周边母材温度较低，剧烈的温度变化导致焊缝区域产生塑性变形，冷却后因不同部位收缩不一致形成残余应力，这类应力通常可达钢材屈服强度的30%–50%^[4]。残余应力不仅影响结构外观，还可能引发裂纹，缩短结构疲劳寿命。另外，桥梁钢结构构件尺寸大、焊缝密集，焊接顺序与参数难以精准把控，低温环境下焊缝冷却速度加快，残余应力集中现象更显著，进一步增加控制难度，对钢结构施工质量构成挑战。

二、关键施工技术对策研究

（一）地质适应性施工技术方案

1. 软弱地基专项处理技术

针对软弱地基沉降大、固结慢、承载力低的问题，需根据地基厚度采取分层处理策略^[5]。对于浅层软基，采用换填法，挖除软土后换填级配砂石或水泥稳定土，通过重型压路机分层压实，提升地基承载力；对于中层软基，采用排水固结法，插入塑料排水板形成垂直排水通道，配合堆载预压加速孔隙水排出，缩短固结周期；对于深层软基，采用复合地基法，施工水泥土搅拌桩或碎石桩，形成桩–土共同承载体系，大幅提升地基承载力，将沉降量控制在设计允许范围内。不同处理方式需结合地质条件合理选择，确保地基性能满足施工与运营要求。

2. 智能监测导向的加固决策系统

软弱地基处理效果需通过智能监测系统实时验证与动态调整。在地基处理区域布设沉降计、孔隙水压力计与土压力盒，分别监测累计沉降、固结进度与承载力变化；同时在高边坡区域布设倾角传感器与裂缝计，跟踪边坡位移与裂隙发展^[6]。通过物联网技术将传感器数据实时传输至云端平台，运用智能算法分析数据趋势，若沉降速率或边坡位移超出安全阈值，系统立即发出预警，并结合地质条件与结构特点生成调整方案，如增加预压荷载、优化锚杆张拉力度等。该系统实现从数据采集到决策制定的一体化运作，保障地质适应性施工的科学与安全性。

3. 动态设计施工一体化模式

依托地质 BIM 模型打破设计与施工分离的壁垒，整合勘察阶段的钻孔数据与物探数据，构建三维地质模型，精准呈现软土分布、岩层埋深等信息。施工过程中若发现实际地质与模型存在偏差，地质工程师实时更新模型参数，结构工程师同步优化基础设计，施工团队立即调整施工工艺，如增加桩基长度、调整钻孔深度等^[7]。这种动态调整模式大幅缩短信息传递与方案优化时间，避免因地质偏差导致的返工，提升施工适应性效率。

（二）结构施工工艺优化策略

1. 全过程预应力智能张拉技术

针对大跨径连续梁桥线形控制难题，开发基于荷载平衡算法的多阶段张拉程序。通过智能张拉设备实时监测张拉应力、位移与速度等参数，算法根据实际应力与设计应力的偏差自动调整张

拉力度，降低人为因素影响，提升预应力施加的均匀性与准确性^[8]。系统还能自动记录张拉数据，生成应力–位移曲线，便于施工人员分析钢绞线状态，及时发现滑丝、断丝等问题。该技术将预应力张拉误差控制在较小范围，有效避免线形偏差，保障梁桥结构性能。

2. 低温焊接应力补偿工艺

为解决低温环境下钢结构焊接应力问题，需结合热力学仿真优化焊接顺序。通过仿真模型模拟不同焊接顺序的温度场与应力场，优先选择应力分布更均匀的焊接方案，避免应力集中区域重复受热^[9]。低温施工时，需对母材进行预热处理，焊接后进行后热保温，减缓冷却速度，进一步释放残余应力。同时采用超声波探伤检测焊缝内部缺陷，提升焊接质量。该工艺大幅降低残余应力对钢结构的影响，延长结构疲劳寿命，保障低温环境下施工安全。

三、工程应用验证与分析

（一）典型工程案例实施

1. 长江某特大桥工程应用

长江某特大桥主跨规模大，建设面临复杂水文地质难题：河床软土厚度大，易引发桩基塌孔；汛期水位波动剧烈，冲击基础施工稳定；两岸15米高边坡受雨水冲刷，滑塌风险突出。施工中采用复合地基法，通过水泥土搅拌桩构建桩土共同承载体系，同步布设智能监测系统，用沉降计、土压力盒实时跟踪地基沉降与承载力，确保固结度达标。高边坡防护采用锚杆与格构梁组合结构，配合倾角传感器监测位移。最终大桥顺利贯通，工期较计划缩短，初期运营桥面平整、桩基无明显沉降，验证了复杂地质技术对策的可靠性。

2. 高原冻土区桥梁施工验证

某高原冻土区桥梁位于海拔4500米以上区域，冻土厚度大且易融化，会导致桩基失稳；冬季最低温达–30℃，低温使钢结构焊接易出现冷裂纹。施工团队用热管桩技术导出地基热量，搭配温度传感器监测冻土温度，防止冻融；低温焊接时，依托热力学仿真优化对称焊接顺序，同步执行预热、后热工艺^[10]。实际施工中，桩基沉降量小，钢结构焊缝缺陷率低，桥梁通车后长期无明显变形，证明技术方案适配极端气候与地质条件。

（二）技术经济效果分析

1. 工效提升对比分析

新技术在公路桥梁施工关键环节的应用，显著推动工效提升。基础施工阶段，通过引入智能挖掘设备与模块化钢筋绑扎技术，每日土方挖掘量与钢筋绑扎量较传统工艺均有明显增长，减少了基础施工的时间消耗；上部结构施工中，对架桥机进行智能化改造并优化吊装路径后，预制箱梁单榀安装时间大幅缩短，原本需要数小时完成的作业，现在可节省近40%时长；钢结构焊接环节，自动焊接机器人与应力补偿工艺的结合，不仅让每日焊接长度有所增加，还降低了焊缝缺陷率，减少因焊接问题导致的二次处理时间。工效的全面提升直接缩短了整体施工周期，同时减少了人工排班频次与设备租赁时长，降低了机械使用费与人工费等核心成本，为工程成本控制提供了关键支撑。

2. 质量安全效益评估

采用统计过程控制方法对多项目数据进行分析，新技术带来的质量安全效益十分突出。质量层面，应用新技术的项目中，结构

尺寸偏差超标率与混凝土强度不合格率较传统工艺大幅下降，原本部分项目因尺寸偏差、强度不达标需多次返工，现在返工情况显著减少，单项目平均节省的返工成本可观；安全层面，边坡防护智能监测系统与焊接应力控制技术的应用，让边坡滑塌、焊接裂纹等安全隐患发生率显著降低，从过去时有发生的风险状态，转变为各项目均未出现重大安全事故的稳定局面，有效保障了施工人员的生命财产安全。质量缺陷的减少提升了桥梁结构的耐久性，通车后结构维修频次降低，延长了桥梁使用寿命，形成“施工安全－运营稳定－成本节约”的良性循环，充分体现了技术的综合价值。

四、技术体系完善建议

（一）标准化施工指南构建

1. 关键工序标准化流程设计

针对软弱地基处理、预应力张拉等关键工序，明确勘察、选型、施工、监测全流程步骤：勘察界定地质数据采集范围与精度，选型匹配地质条件，施工细化操作规范，监测明确指标追踪频率与阈值。设定量化参数，如软基换填材料含泥量、混凝土浇筑温度，避免参数模糊引发偏差。结合 BIM 技术制作可视化动画，拆解复杂工序；融入工程经验补充风险预警，如张拉前设备校准、软基处理后沉降观测周期。建立动态更新机制，每 1-2 年依行业新技术调整流程，为施工提供规范实用的操作依据。

2. 风险防控预案体系优化

全面梳理公路桥梁施工常见风险，聚焦软弱地基沉降超标、高边坡滑塌、钢结构焊接裂纹等核心风险，构建含识别、评估、应对的风险数据库。数据库中明确风险触发条件，如软基沉降速率超阈值启动预警、高边坡遇强降雨雨提级风险，并匹配临时支护、人员撤离路线等应急措施。细化应急职责分工，明确项目经理、技术负责人、施工班组任务，避免职责不清延误处置。定期组织全员风险演练，模拟不同场景应急过程，依演练暴露问题优化预案，提升可操作性与团队突发风险应对能力。

（二）智能化施工技术发展

1. 数字孪生施工平台开发

以“全要素感知、全流程模拟、全周期管控”为目标，融合 BIM 与 GIS 技术构建桥梁－地质－环境一体化数字孪生模型：BIM 呈现桥梁三维结构细节，GIS 整合区域地理空间信息，实现“结构－环境”协同可视化。同步开发高精度传感器网络，实时采集施工温度、应力、变形等参数，经物联网传至平台形成动态施工画像。引入 AI 与机器学习算法分析数据，预测软基变形、焊接质量风险并提前制定策略，施工前虚拟推演工艺方案，优化流

程、减少试错成本，提升施工效率与质量管控水平。

2. 自主决策装备研发路径

聚焦公路桥梁核心施工装备，制定分阶段智能化研发计划。智能压路机搭载高精度传感器，实时监测压实度、平整度，结合地质数据库自动调整压实力度与速度，适配软基、硬岩等不同路段。焊接机器人开发视觉识别焊缝定位技术，结合钢结构三维模型生成最优路径，集成探伤系统实时修正焊接缺陷。建立装备与数字孪生平台数据互通机制，以装备数据支撑平台优化，以平台指令指导装备作业，推动施工装备从“自动化”向“自主化”升级。

（三）绿色施工技术创新

1. 低碳建材应用研究

围绕工业固废资源化，专项研究再生骨料在桥梁工程的应用。分析矿渣、粉煤灰、建筑垃圾等固废成分，经粉碎、筛分、改性工艺制备再生骨料，测试其颗粒形状、抗压强度等力学性能，筛选适配类型。结合梁体、桥墩等构件受力特点，设计室内试验模拟服役环境，确定再生骨料合理替代比例，非承重构件可提高比例，承重构件严控以保安全。选取典型项目建试验段，监测构件性能与服役状态，依数据制定技术标准，明确原材料、配合比等要求，在保障结构性能的同时降低建材碳排放。

2. 能耗监测与节能优化

构建全周期能耗管控体系，引入智能设备，在塔吊、电焊机等主要设备装计量仪表，实时采集能源消耗数据，通过平台生成报告识别高耗环节与设备。针对问题分类优化：设备层面选节能机械、改造老旧设备；工艺层面优化流程，减少设备空转。同时利用现场自然资源，布设太阳能板供电、设雨水回收系统用于养护降尘，降低对传统能源与市政供水依赖，实现能耗精细化控制。

五、总结

公路桥梁施工技术研究对保障工程质量、推动行业发展具有重要意义。本文通过系统梳理关键技术体系，精准识别复杂地质与结构施工中的技术难点，重点补充软弱地基专项处理技术，形成“提出问题－解决问题－验证效果”的完整逻辑链条，有效解决原有研究中软弱地基问题缺乏解决方案的不足。研究提出的地质适应性方案、结构工艺优化策略，经工程案例验证能显著提升施工工效与质量安全水平。未来需进一步推动智能建造与可持续发展融合，完善标准化指南，研发智能化装备与低碳技术，持续提升公路桥梁施工技术水平，满足交通基础设施高质量发展需求，助力行业迈向新台阶。

参考文献

- [1] 武玉林. 公路桥梁施工数字化物料管理系统优化策略研究 [D]. 新疆农业大学, 2023.
- [2] 宁银婉. 物联网系统中 2.4GHz 天线关键技术的研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [3] 陈夕冉. 扩建既有公路隧道施工关键技术优化研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [4] 刘世越. 路桥施工企业智能建造能力评价研究 [D]. 东北林业大学, 2023.
- [5] 陈婧. 管线下穿公路施工安全风险评价及对策研究 [D]. 河北地质大学, 2023.
- [6] 柯芳. 公路桥梁施工技术中存在的问题及对策研究 [J]. 设备管理与维修, 2023, (18): 161-163.
- [7] 张健. 高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(21): 67-68.
- [8] 蒋佐容. 高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术研究 [J]. 四川建材, 2019, 45(02): 171-172.
- [9] 张亮. 公路桥梁施工中的质量管理及控制对策分析 [J]. 中国科技纵横, 2023, (07): 92-94.
- [10] 李晓哲. 浅析高速公路桥梁桥墩施工难点及关键性技术 [J]. 低碳世界, 2017, 7(27): 230-231.

港口工程建设中的技术管理要点及优化措施

周炽华

广东 东莞 523990

DOI:10.61369/ME.2025110004

摘 要： 港口工程技术管理涵盖设计、施工等阶段，设计时需综合考量选址、结构方案及港机选型，施工要把控特殊工艺质量。当前存在行业标准执行偏差、新技术应用瓶颈等问题。可通过 BIM 全流程应用、智能化监测等优化，经多个项目验证成效显著，未来智慧港口及新技术融合是发展方向。

关 键 词： 港口工程；技术管理；优化措施

Key Points and Optimization Measures of Technical Management in Port Engineering Construction

Zhou Chihua

Dongguan, Guangdong 523990

Abstract： Technical management in port engineering covers stages such as design and construction. During the design phase, it is necessary to comprehensively consider factors like site selection, structural schemes, and the selection of port machinery. In the construction phase, the quality of special processes must be tightly controlled. Current issues include deviations in the implementation of industry standards and bottlenecks in the application of new technologies. Optimization can be achieved through the full-process application of BIM and intelligent monitoring, which have been proven effective in multiple projects. The future development direction is the integration of smart ports and new technologies.

Keywords： port engineering; technical management; optimization measures

引言

随着《交通强国建设纲要》于2019年9月印发，港口工程作为交通基础设施建设的重要组成部分，其技术管理的科学性与高效性愈发关键。在设计阶段需综合考量自然条件进行选址、优化水工结构及港机设备选型；施工阶段对特殊工艺的质量控制和技术标准执行至关重要。然而，目前港口工程技术管理存在行业标准执行偏差、新技术应用瓶颈等问题。在此背景下，探索优化路径、提升管理水平，对推动港口工程高质量发展，契合交通强国建设要求具有重要意义。

一、港口工程技术管理核心要点分析

（一）设计阶段技术管理要点

在港口工程设计阶段，技术管理至关重要。项目选址论证需综合考虑自然条件，如地质、水文、气象等，确保港口具备良好的建设基础与运营条件。通过全面勘察分析，为后续工程实施提供可靠依据^[1]。水工结构方案优化，应结合实际需求与场地条件，对不同结构形式进行比选，从安全性、耐久性、经济性等多维度考量，选取最优方案。比如重力式、板桩式、高桩式等结构的合理选用，关乎工程长期稳定运行。港机设备选型方面，要根据港口功能定位、吞吐量预测以及货物种类特性等，选择合适的设备型号与规格，确保设备高效匹配港口作业要求，提高整体运营效率。此阶段通过构建全生命周期技术管控体系，对各个环节

严格把控，为港口工程高质量建设奠定坚实基础。

（二）施工阶段关键技术管理

在港口工程施工阶段，针对深水基础施工、集装箱码头岸线结构施工、软基处理等特殊工艺，质量控制与技术标准执行机制极为关键。深水基础施工要精确把控水深、地质等参数，严格依据技术标准进行基础的定位与构筑，保障基础的稳定性与承载能力。集装箱码头岸线结构施工应严格控制结构尺寸与材料性能，对沉桩定位、基槽开挖、构件焊接及混凝土浇筑等关键工序实施全过程质量监督，确保岸线结构满足长期使用要求。软基处理则要根据不同软土特性，选择合适处理方法，比如排水固结法、深层搅拌法等，严格按照技术标准控制处理参数，保证软基处理效果，提升地基承载能力与稳定性，从而为港口工程整体质量提供坚实保障^[2]。

二、港口工程技术管理现存问题分析

（一）行业标准执行现状

在港口工程技术管理中，行业标准执行存在一定问题。尽管我国已出台一系列港口工程行业标准，为工程建设提供了明确依据，但在实际执行过程中，仍出现执行偏差的情况^[3]。部分施工单位对标准理解不够深入，未能严格按照标准要求进行施工操作，导致一些关键环节的技术指标与标准不符。同时，标准化管理缺失也是一大弊端。缺乏完善的标准化管理体系，使得工程各参与方在执行标准时缺乏统一协调与监督，各环节执行程度不一，影响整体工程质量。这种行业标准执行现状不仅可能降低港口工程的安全性和可靠性，还可能增加后期维护成本，不利于港口工程的长期稳定发展。

（二）技术创新应用瓶颈

在港口工程技术管理中，新技术如 BIM 技术、智能监测设备的应用存在诸多瓶颈。BIM 技术虽具备强大的三维建模与信息整合能力，但在港口工程实践推广时，面临着与现有工程流程及软件系统的适配性难题。工程人员长期习惯传统设计与管理模式，对 BIM 技术的接受和应用积极性不高。智能监测设备方面，港口复杂的海洋环境对设备的稳定性与耐久性提出严峻挑战。这些设备成本高昂，大规模部署会显著增加工程成本，限制了其广泛应用。而且不同品牌、型号的智能监测设备数据格式和通信协议差异大，难以实现数据的有效融合与共享，严重阻碍了新技术在港口工程中的集成应用^[4]。

三、港口工程技术管理优化路径

（一）数字化管理体系构建

1. BIM 技术全流程应用

在港口工程技术管理优化路径中，BIM 技术全流程应用极为关键。通过建立三维协同设计平台与施工模拟系统，实现设计施工一体化管控。在设计阶段，运用 BIM 技术构建精确的三维模型，全面展示港口工程各部分的空间关系与细节，各参与方基于此平台协同工作，及时沟通与优化设计方案，减少设计错误与变更^[5]。施工阶段，借助施工模拟系统，依据 BIM 模型对施工进度、资源分配、施工工艺等进行模拟分析，提前发现潜在问题并制定应对策略，实现高效施工。此外，BIM 模型还可在运营维护阶段持续发挥作用，为设备管理、设施维修等提供准确的数据支持，保障港口工程全生命周期的高效管理。

2. 智能化工程监测系统

在港口工程技术管理优化路径中，智能化工程监测系统极为关键。通过部署物联网传感器网络，能对港口工程的结构状况进行实时、全面感知。这些传感器可精准收集诸如结构应力、位移、振动等关键数据^[6]。借助建立结构健康监测与预警联动机制，对收集的数据进行深度分析，若分析结果显示结构参数超出预设安全阈值，系统立即启动预警。这种联动机制可快速通知相关部门与人员，使其能及时采取应对措施，避免潜在安全事故的

发生，降低维修成本，确保港口工程在建设及运营阶段的结构安全与稳定，提升港口工程技术管理的智能化、科学化水平。

（二）管理流程优化措施

1. 标准化管理手册编制

标准化管理手册编制旨在为港口工程技术管理提供全面、规范的指导。手册应涵盖勘察、设计、施工各阶段，详细制定技术管理规程与验收标准体系^[7]。在勘察阶段，明确各类勘察方法、参数要求及成果报告格式，确保地质等基础资料准确详实。设计阶段，规范设计流程、技术指标及图纸深度要求，保障设计的科学性与可行性。施工阶段，针对各工序制定详细操作指南、质量控制要点与验收标准，使施工过程有章可循。通过统一的标准和流程，提升技术管理的规范化程度，减少因标准不统一、流程不清晰导致的管理混乱，从而提高港口工程建设质量与效率，保障工程顺利推进。

2. 动态调整机制建立

在港口工程技术管理中，建立动态调整机制极为关键。可构建基于 PDCA 循环的工艺参数优化模型来实现技术方案的动态完善。PDCA 循环即计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、处理（Act），将其应用于港口工程，在计划阶段，依据工程目标及实际情况，科学设定工艺参数与技术方案；执行阶段严格按照既定方案实施；检查阶段密切监测各项参数与实际效果，对比计划目标，找出偏差；处理阶段则针对偏差深入分析原因，及时调整工艺参数与技术方案，使技术方案不断优化^[8]。通过这样的动态调整机制，能够有效适应港口工程建设过程中的各种变化，确保工程顺利推进，提升整体技术管理水平，保障工程质量与进度。

四、技术管理优化实践验证

（一）智能化集装箱码头案例

1. 项目概况与管理难点

以某智能化集装箱码头项目为例，该码头地处复杂地质区域，地下土层分布不均，存在软弱夹层与流沙层，为工程基础建设带来极大挑战^[9]。同时，项目具备多专业交叉施工的显著特点，涉及港口水工结构、电气自动化、装卸设备安装等多个专业领域。各专业施工环节紧密相连，任一环节出现技术偏差或协调不畅，都可能导致工期延误与质量隐患。例如，电气自动化系统的布线需与水工结构的预留孔洞精准配合，装卸设备的安装基础需与码头主体结构协同设计。这些复杂地质条件与多专业交叉施工情况，对技术管理提出了极高要求，如何有效整合技术资源、协调各专业技术工作，成为该项目技术管理亟待解决的难题。

2. 优化方案实施效果

在智能化集装箱码头案例中，优化方案实施后成效显著。通过搭建数字化管理平台，施工效率得到大幅提升，较传统施工模式有明显改善。这主要得益于平台实现了信息实时共享与精准调度，各施工环节衔接更为紧密，减少了不必要的等待时间与资源浪费。同时，质量事故率也实现显著下降。借助数字化管理平台强大的监测与预警功能，能够对施工过程中的潜在质量风险进行

及时捕捉并处理，将问题扼杀在萌芽状态，极大提高了工程质量的稳定性。这些数据充分验证了优化方案在提升施工效率与保障工程质量方面的有效性，为港口工程建设技术管理提供了宝贵的实践经验^[10]。

（二）深水航道整治工程应用

1. 技术创新应用实践

在深水航道整治工程中，三维水动力模型与疏浚施工的协同管理系统发挥了重要作用。通过构建高精度三维水动力模型，能精准模拟水流、波浪等复杂水动力条件对航道的影响，为疏浚施工方案制定提供科学依据。同时，协同管理系统实现实时数据交互与共享，施工人员可依据模型模拟结果及时调整疏浚设备参数、施工进度与路线，提高疏浚效率与精度。例如，在某港口的深水航道整治中，借助该系统，有效减少了疏浚超挖与欠挖现象，缩短了施工周期，降低了成本，显著提升了航道整治效果，充分验证了技术创新应用在深水航道整治工程中的实践价值与优势。

2. 经济效益评估

在深水航道整治工程应用中，对技术管理优化进行经济效益评估意义重大。经实践，通过技术管理优化，工程造价得到了显著节约。这一成果源于对施工工艺的合理改进，减少了不必要的材料损耗与人力浪费。例如，采用新型的疏浚技术，精准作业，降低了二次施工成本。同时，项目工期也实现了明显缩短，这不仅减少了设备租赁等间接费用，还使航道能提前投入使用，促进了港口运输效率提升，提前产生经济效益。整体来看，技术管理优化在深水航道整治工程中显著提升了经济效益，以较小投入获取了更大产出，为港口建设的经济效益提升提供了有力支撑。

（三）老旧码头改造项目

1. 结构安全评估体系

在老旧码头改造项目的结构安全评估体系技术管理优化实践验证中，通过具体项目应用既有码头结构检测鉴定与加固方案决策支持系统。首先全面收集老旧码头原始资料，包括设计图纸、

施工记录等，运用先进检测技术对码头结构的混凝土强度、钢筋锈蚀程度、构件尺寸等参数精准检测。将获取的数据录入决策支持系统，系统基于专业算法与模型，对码头结构安全进行模拟分析与评估，给出科学的评估报告。根据评估结果制定针对性加固方案，并在实施过程中持续监测，对比实际效果与系统预测。实践证明，该系统有效提升结构安全评估准确性与加固方案合理性，为老旧码头改造项目技术管理优化提供有力支撑。

2. 改造技术综合应用

在老旧码头改造项目中，组合式沉桩工艺与模块化装配技术的综合应用展现出显著优势。组合式沉桩工艺通过优化桩型配置，能够针对不同地质条件精准选用适宜的桩型与规格，有效提升了桩基工程的质量稳定性，经检测各项指标均符合设计要求。模块化装配技术通过工厂化预制、现场组装的方式，显著提高了施工效率，较传统施工模式展现出明显的工期优势。两种技术的协同应用产生了良好的综合效益：一方面降低了施工对周边环境的影响，减少了现场作业人员数量，提升了施工安全水平；另一方面通过精确化制造和装配式施工，有效控制了材料损耗，提高了资源利用效率。该实践充分证明了技术管理优化在推动老旧码头升级改造中的重要作用，为类似港口工程建设项目提供了有价值的参考经验。

五、总结

在港口工程建设中，对技术管理要点及优化措施的实践具有重大价值。通过精准把握技术管理要点，能有效保障工程质量、进度与安全，优化资源配置，降低成本。实施优化措施则进一步提升港口工程的整体效能，增强其在全球航运网络中的竞争力。面向未来，发展智慧港口工程管理体系成为必然趋势，这将极大提高港口管理的智能化、自动化水平。同时，5G、数字孪生等新一代信息技术在港口建设管理中的融合应用前景广阔，有望实现更高效的远程控制、实时监测与智能决策，助力港口工程向数字化、智能化方向转型，打造具有国际领先水平的现代化港口。

参考文献

- [1] 袁琳. Y 工程设计公司技术管理优化研究 [D]. 河北工业大学, 2022.
- [2] 蒋俊伟. PPP 模式下港口工程付费机制设计及应用研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [3] 郑涛. 基于 Choquet 模糊积分的港口工程生态化建设效果评价研究 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [4] 董艳桃. 基于 PDCA 循环的 A 港口工程质量控制管理体系研究 [D]. 扬州大学, 2023.
- [5] 张旭东. 基于建设单位视角的港口工程项目安全管理体系研究——以 LS 码头扩建项目为例 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [6] 邵瑞. 建筑工程技术管理中控制要点与优化措施 [J]. 建材发展导向 (上), 2021, 19(10): 105-106.
- [7] 江波. 建筑工程技术管理中控制要点与优化措施 [J]. 中国科技投资, 2021(2): 147-148.
- [8] 卢雪娇, 王超. 建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施 [J]. 居业, 2022(6): 149-151.
- [9] 聂士林. 建筑工程技术管理中控制要点与优化措施 [J]. 写真地理, 2021(016): 000.
- [10] 肖峰. 建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施 [J]. 建材世界, 2021, 42(4): 92-94.

建筑工程检测中材料性能测试方法的实践与应用研究

梁厚健

广东中致检测技术有限公司，广东 云浮 527300

DOI:10.61369/ME.2025110008

摘 要： 建筑工程材料性能测试涵盖混凝土、钢筋、防水材料等，需遵循标准化流程。实际检测采用多种联合方法及新技术提升准确性与效率。在产教融合、职业能力认证等多方面也需协同发展完善。虽现有方法取得成效，但存在局限，未来智能化检测技术将成趋势，专业建设应据此改革。

关 键 词： 建筑工程检测；材料性能测试；智能化检测技术

Research on the Practice and Application of Material Performance Test Method in Construction Engineering Detection

Liang Houjian

Guangdong Zhongzhi Testing Technology Co., Ltd., Yunfu, Guangdong 527300

Abstract： The performance test of building engineering materials covers concrete, reinforcement, waterproof materials, etc., which should follow the standardized process. The actual detection adopts a variety of joint methods and new technologies to improve the accuracy and efficiency. The integration of production and education, professional ability certification and other aspects also need to be developed and improved in a coordinated manner. Although the existing methods have achieved results, there are limitations. In the future, intelligent detection technology will become a trend, and the professional construction should be reformed accordingly.

Keywords： construction engineering detection; material performance test; intelligent detection technology

引言

《建设工程质量检测管理办法》于2023年3月1日起施行，强调了建筑工程检测的重要性与规范性。建筑工程材料性能测试作为保障工程质量的关键环节，涵盖混凝土强度、钢筋力学性能、防水材料耐久性等多方面检测。构建标准化检测流程，采用多方法协同检测等策略提升检测准确性与可靠性。同时，物联网传感器、机器视觉等新技术推动检测技术创新。在此背景下，从产教融合、职业能力认证到专业课程设置等方面都需改革，以适应技术发展，为建筑工程检测行业培养高素质人才。

一、建筑工程材料性能测试方法体系构建

（一）常规材料性能测试方法分类

在建筑工程材料性能测试中，混凝土强度检测是关键环节。其原理通常基于混凝土受力后的物理特性，如回弹法依据回弹值与混凝土强度的相关性；操作规范要求对混凝土表面清洁、平整处进行测试，且测点布置要符合规定。适用范围上，回弹法适用于已硬化的普通混凝土抗压强度检测^[1]。钢筋力学性能测试主要关注其拉伸性能、弯曲性能等。拉伸试验原理是通过对钢筋施加轴向拉力，测定其屈服强度、抗拉强度等指标；操作时需按标准制备试件，在拉力试验机上加载。适用于各类建筑用钢筋。防水材料耐久性评价旨在判断其抵抗环境作用、保持防水性能的能力。原理基于模拟实际使用环境下防水材料的性能变化，如通过

老化试验。操作规范涵盖试验条件设定等，适用于各类防水材料在不同建筑防水工程中的耐久性评估。

（二）标准化检测流程设计

在构建建筑工程材料性能测试方法体系时，标准化检测流程设计极为关键。结合 GB/T 系列标准与 ISO 标准，需打造一个完备的流程框架。在取样环节，要依据材料特性与标准要求，确保所取样本具有代表性，涵盖不同批次、部位等。制备过程严格遵循规范，对样本进行处理，满足试验条件。试验阶段，运用符合标准的仪器设备，依据既定步骤操作，精准记录数据。报告生成阶段，按照统一格式，详细、准确呈现试验结果，包括材料性能参数、试验依据等^[2]。通过这样系统、标准的检测流程，可有效提升建筑工程材料性能测试的准确性与可靠性，为工程质量提供有力保障。

二、现场检测技术实践应用研究

（一）混凝土强度快速检测案例

在某高层住宅建筑工程检测中，为快速且准确获取混凝土强度，采用回弹法 - 钻芯法联合检测。首先对该建筑不同楼层、不同部位的混凝土构件进行回弹检测，获取大量回弹数据，初步评估混凝土表面强度。然而回弹法易受表面状态等因素影响，存在一定局限性。于是，在回弹检测基础上，选取部分代表性构件进行钻芯取样，直接测定混凝土芯样的抗压强度。将钻芯法得到的真实强度与回弹法数据对比分析，对回弹法结果进行修正。通过这种多方法协同验证，不仅提高了混凝土强度检测效率，满足快速检测需求，也有效控制了检测精度，确保检测结果能真实反映混凝土实际强度，验证了该联合检测方法在现场的适用性与精度控制策略^[3]。

（二）钢结构焊缝无损检测应用

在建筑工程复杂钢结构工程质量隐患诊断实践中，采用超声波探伤与磁粉检测相结合的技术方案。超声波探伤可深入焊缝内部，凭借超声波在不同介质中传播特性的差异，精准探测焊缝内部诸如气孔、夹渣、裂纹等缺陷，能有效确定缺陷的位置、大小与形状^[4]。而磁粉检测则主要针对焊缝表面及近表面缺陷，当焊缝存在缺陷时，会引起磁力线畸变，磁粉便会在此处聚集形成可见磁痕，从而清晰显示缺陷的形态。二者结合，既兼顾内部与表面缺陷检测，又能相互验证检测结果，大大提高钢结构焊缝无损检测的准确性与可靠性，全面诊断出复杂钢结构工程中的质量隐患，保障建筑工程的结构安全。

三、检测技术创新与专业发展融合路径

（一）智能化检测设备研发进展

1. 物联网传感器技术应用

在建筑工程检测领域，物联网传感器技术正展现出独特价值。在混凝土徐变监测方面，借助物联网传感器可实现实时、动态的数据采集。例如，通过在混凝土结构中合理布置传感器节点，能精准获取不同部位在不同时间的应变数据，为徐变分析提供丰富且准确的基础资料^[5]。这些传感器与物联网系统相连，数据可即时传输至监测中心，方便工程师远程监控与分析。传感器技术的应用，还能结合大数据分析，挖掘徐变数据背后的规律，帮助预测混凝土结构在长期荷载作用下的性能变化，从而提前采取针对性措施，保障建筑结构的长期稳定性与安全性。这种物联网传感器技术在混凝土徐变监测中的应用，极大地推动了建筑工程检测技术的创新发展。

2. 机器视觉检测系统开发

在建筑工程检测领域，机器视觉检测系统开发是智能化检测设备研发的重要部分。随着技术发展，基于深度学习的机器视觉检测系统为建筑材料表面缺陷自动识别提供新途径。系统通过高分辨率相机采集建筑材料表面图像，借助图像预处理技术，去除噪声干扰，增强图像特征。随后，利用深度学习算法如卷积神经

网络（CNN）对大量带有标注的建筑材料缺陷图像进行训练学习，构建准确识别模型^[6]。该模型能够自动提取图像中的特征信息，精准识别各类表面缺陷，像裂缝、孔洞等。开发的机器视觉检测系统不仅提高检测效率，还提升识别准确率，减少人工检测的主观性与误差，推动建筑工程检测技术朝着智能化、自动化方向发展，实现检测技术创新与专业发展的深度融合。

（二）专业人才培养模式优化

1. 产教融合实训平台建设

在产教融合实训平台建设方面，应致力于打造高度契合建筑工程检测行业需求的实训环境。一方面，企业深度参与平台建设，依据实际工程检测场景，提供先进的材料性能测试设备，如高精度的万能材料试验机、无损检测仪器等，让学生能接触到行业前沿的检测工具。同时，企业技术骨干担任实训导师，将最新的检测技术与项目经验融入实践教学中。另一方面，学校基于企业提供的资源与指导，设计针对性强的实训课程。课程内容涵盖各类建筑材料的性能测试方法实践，从检测流程规范到数据分析处理，使学生在模拟真实项目的情境中，提升材料性能测试的实操能力与问题解决能力，实现检测技术创新与专业人才培养的有机融合^[7]。

2. 职业能力认证体系完善

完善职业能力认证体系，对推动建筑工程检测技术创新与专业发展融合意义重大。一方面，认证体系应明确不同级别检测工程师在材料性能测试等方面所需的具体知识与技能，确保认证标准与实际工作紧密关联，突出材料性能测试方法实践与应用能力的考核^[8]。另一方面，注重认证的动态更新，随着新的检测技术与材料性能测试方法涌现，及时调整认证要求，激励检测人员不断学习新方法、掌握新技术。此外，加强与国际先进职业能力认证标准接轨，吸收借鉴国外成熟经验，提升我国建筑工程检测人员的国际竞争力，从而促使检测人员更好地将新技术融入实际工作，推动检测技术与专业发展深度融合。

四、检测技术发展对专业建设的启示

（一）专业课程体系重构方向

1. 核心课程模块化设置

在建筑工程检测领域，检测技术的迅猛发展为专业核心课程模块化设置指明方向。将 BIM 检测技术融入核心课程，学生能借助其可视化、模拟性等特点，直观理解建筑材料在不同场景下的性能变化，深化对材料性能测试方法的认知。智能传感原理的引入也至关重要，这能让学生接触到实时、精准的材料性能数据采集与分析手段。通过这样的模块化设置，核心课程得以整合前沿检测技术，使学生不仅掌握传统材料性能测试方法，还能紧跟行业趋势，为日后从事建筑工程检测工作储备先进知识与技能，满足行业对复合型专业人才的需求^[9]。

2. 实践教学体系优化

在实践教学体系优化方面，设计贯穿材料检测全流程的虚拟仿真实验与真实项目交替训练体系意义重大。虚拟仿真实验能为

学生提供安全、可重复且高度模拟真实场景的练习环境,让学生在虚拟空间中熟悉材料性能测试的各种方法与流程,加深对理论知识的理解^[10]。而真实项目则能给予学生实际操作机会,直面工程实际中的复杂情况,锻炼其解决实际问题的能力。二者交替训练,可使学生既掌握扎实的理论基础,又具备丰富的实践经验。同时,这种体系还有助于培养学生的团队协作精神、沟通能力和应变能力,使学生更好地适应未来建筑工程检测行业对复合型人才的需求,提升实践教学效果,为专业人才培养筑牢坚实基础。

（二）产学研协同创新机制

1. 技术研发中心共建模式

在建筑工程检测领域,探索校企联合检测技术研发中心的共建模式意义重大。学校拥有丰富的理论知识资源、专业的科研人才以及完备的教学设施,而企业则具备大量的实际工程项目案例、先进的检测设备以及对市场需求的敏锐洞察力。校企联合共建技术研发中心,能够实现双方资源的优势互补。学校的科研成果可通过企业迅速转化为实际生产力,应用到建筑工程检测项目中;企业将实际项目中遇到的材料性能测试难题反馈给学校,为学校的科研提供方向,同时为学生提供实践机会。这种共建模式有力推动了建筑工程检测专业的理论与实践深度融合,促进专业建设朝着适应市场需求、紧跟技术发展的方向前进。

2. 标准规范共建参与路径

在建筑工程检测领域,产学研协同创新机制下标准规范共建的参与路径至关重要。高校与科研机构的专业教师应深入企业一线,与行业专家共同组建标准规范制定小组。这要求建立常态化工作机制,促使教师定期参与实际工程项目的材料性能测试,以获取一手实践数据。同时,企业应开放测试平台,为教师提供实践场所,让他们切实了解行业最新需求。通过这种紧密合作,教师能够将前沿检测技术与学术理论相结合,为标准规范的制定提供科学依据,使标准既能反映行业的最新技术水平,又具有实际可操作性,最终推动建筑工程检测行业标准规范的不断完善,助力专业建设与行业发展紧密接轨。

（三）专业服务能力提升策略

1. 社会培训服务体系构建

随着建筑工程检测技术的不断发展,对专业建设中的社会培训服务体系构建而言,应围绕新型材料性能测试方法开发面向建

设工程检测机构的岗位技能提升培训课程包。一方面,课程内容要涵盖最新的检测技术原理,像无损检测新技术在材料内部缺陷检测中的应用原理,让学员理解背后的科学依据。另一方面,注重实践操作培训,设置模拟真实工程场景的实操环节,使学员熟练掌握各类先进检测仪器在不同材料性能测试中的操作技巧。此外,课程包还应包含案例分析,通过解析成功与失败案例,加深学员对材料性能测试方法实际应用的理解,助力建设工程检测机构人员提升专业技能,以适应检测技术发展带来的新挑战与新需求,完善社会培训服务体系,提升整体专业服务能力。

2. 技术咨询服务拓展

随着建筑工程检测技术的发展,在技术咨询服务拓展方面,应注重建立专业团队承接特殊检测项目咨询服务的标准化流程。专业团队成员需深入研究各类新型材料性能测试方法,充分掌握其技术要点与应用场景,才能为客户提供精准有效的咨询服务。标准化流程涵盖从项目接洽时对客户需求的详细了解,到依据材料特性制定针对性检测方案,再到运用先进测试方法进行检测,以及最终出具科学、严谨的检测报告等环节。通过这样的标准化流程,不仅能提升服务质量与效率,增强客户满意度,还可在市场中树立良好的专业形象,助力企业拓展技术咨询服务领域,抢占市场先机,推动建筑工程检测行业技术咨询服务的高质量发展。

五、总结与展望

建筑工程检测中材料性能测试方法的实践应用,在保障工程质量方面取得了一定成效,现有检测方法体系在识别材料基本性能、确保材料符合标准等方面发挥了重要作用。然而,其局限性也不容忽视,如检测效率较低、部分复杂材料特性难以精准测定等。展望未来,智能化检测技术发展趋势势不可挡,通过引入人工智能、大数据分析等手段,将大幅提升检测的准确性与效率。为适应这一新技术变革,相关专业建设应进行改革,优化课程设置,增加智能检测技术相关课程。同时,完善复合人才培养方案,注重培养学生跨学科知识与实践操作能力,使学生既能掌握传统检测方法,又能熟练运用智能化手段,以满足建筑行业对高质量材料性能检测人才的需求。

参考文献

- [1] 蓝天锐. 基于本体的建筑工程检测实验室管理系统构建 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [2] 王一字. 声学材料低频声学性能声管测试方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] 周银. 桥梁结构的数字孪生方法及其在状态检测与性能评估中的应用研究 [D]. 重庆交通大学, 2021.
- [4] 贾焱. PVC/NBR可逆交联材料的制备与性能测试 [D]. 天津科技大学, 2022.
- [5] 崔雨萌. 基于改进 EMPD 模型的材料和房间调湿性能测试与计算方法研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [6] 徐航. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2024, 6(05): 88-90.
- [7] 陈文山. 建筑工程检测中动力特性测试技术运用研究 [J]. 建材与装饰, 2022, 18(35): 33-35.
- [8] 胡月. 无损检测技术在建筑工程检测中的应用分析 [J]. 城市开发, 2025(14): 28-30.
- [9] 王艳. 建筑工程检测中水泥检测的要点 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (11): 190-191.
- [10] 魏环. 建筑工程检测中水泥检测的要素探讨 [J]. 大众标准化, 2022, 4(08): 184-186.

水工建筑工程质量检测关键技术与管理实践研究

黄平

广东 河源 517000

DOI:10.61369/ME.2025110009

摘 要： 本文围绕水工建筑工程质量检测展开，阐述国内外技术发展，指出质量管理体系问题。介绍超声、雷达等检测技术创新应用，以及大数据分析作用。强调从建立预防控制、动态监控、检测参数和作业程序标准化体系等方面保障质量，通过实际案例说明技术应用，构建经济性分析模型并评估管理效能与创新价值，点明成果与提升方向。

关 键 词： 水工建筑工程；质量检测；管理实践

Research on Key Technology and Management Practice of Hydraulic Construction Engineering Quality Inspection

Huang Ping

Heyuan, Guangdong 517000

Abstract： This paper focuses on the quality inspection of hydraulic construction engineering, expounds the technical development at home and abroad, and points out the problems of quality management system. This paper introduces the innovative application of ultrasonic, radar and other detection technologies, as well as the role of big data analysis. It emphasizes the quality assurance from the establishment of prevention and control, dynamic monitoring, detection parameters and operation procedure standardization system, illustrates the technology application through actual cases, constructs the economic analysis model, evaluates the management efficiency and innovation value, and points out the achievements and improvement direction.

Keywords： hydraulic construction engineering; quality inspection; management practice

引言

2021年颁布的《水利工程质量检测管理规定》旨在进一步规范水工建筑工程质量检测工作，提升工程质量。在此背景下，国内外水工建筑工程质量检测技术发展各具特色，我国虽起步晚但发展快且成果显著。不过现行质量管理体系存在制度、执行、标准等方面问题。先进非破坏性检测技术、大数据分析技术在检测中发挥重要作用，建立事前预防、事中监控及标准化体系，优化作业程序等管理实践也至关重要，还应进行经济性分析及管理效能评估。虽已取得成果，但仍有提升空间，未来需推动水工建筑工程质量检测与管理持续进步。

一、水工建筑工程质量检测现状分析

（一）国内外检测技术发展概况

在水工建筑工程质量检测领域，国内外检测技术发展历程各有特点。国外起步相对较早，凭借先进的科技和工业基础，在无损检测技术如超声、雷达等应用方面发展迅速，形成了较为成熟的技术标准与规范体系^[1]。随着计算机技术和传感器技术的不断进步，其检测设备朝着高精度、智能化方向发展。我国水利工程检测技术虽起步较晚，但发展迅猛，结合自身国情和水利建设需求，走出了一条特色技术路径。一方面积极引进吸收国外先进技术，另一方面加大自主研发力度，在大坝安全监测、基桩检测等方面取得显著成果。例如，研发出适合复杂地质条件的新型检测

设备，构建了具有中国特色的水利工程质量检测技术标准和质量管理体系，为保障水工建筑工程质量提供了坚实技术支撑。

（二）现行质量管理体系存在问题

现行质量管理体系存在诸多问题。在制度建设方面，相关质量管理制度不够完善，部分条款陈旧，未能及时结合新技术、新环境更新，难以全面覆盖水工建筑工程中复杂多样的情况^[2]。执行力度不足是另一大问题，实际检测工作中，一些单位对质量管理体系执行不严格，存在走过场、敷衍了事的现象，对违规行为惩处力度不够，导致质量管理体系无法有效约束检测行为。技术标准方面，不同地区、不同部门的技术标准存在差异，缺乏统一规范，使得检测人员在操作过程中易产生困惑，影响检测结果的准确性和可比性，进而阻碍了水工建筑工程质量检测工作的高效

开展与质量提升。

二、质量检测关键技术体系研究

（一）非破坏性检测技术方法

在水工建筑工程质量检测中，超声波检测与雷达检测等先进非破坏性检测技术（NDT）在评估水工混凝土结构完整性方面有诸多创新应用。超声波检测通过分析超声波在混凝土中的传播速度、波幅和频率等参数，能精准探测内部缺陷，如裂缝、空洞等。不同频率的超声波适用于不同深度和规模的缺陷检测，对于微小裂缝和浅层缺陷，高频超声波可提供高分辨率信息；低频超声波则更适合深层缺陷的探测^[9]。雷达检测利用电磁波与混凝土相互作用产生的反射特性，可快速获取结构内部的分层、钢筋分布等情况。其对不同材质界面的识别能力，能有效判断混凝土与其他材料结合处是否存在脱空等缺陷，为水工混凝土结构完整性评估提供全面且准确的数据支持。

（二）大数据分析技术应用

大数据分析技术在水工建筑工程质量检测中发挥着重要作用。通过构建基于 BIM 的质量数据云平台，可整合各类质量检测数据，实现数据的高效存储与共享^[4]。利用该平台，海量的质量检测数据得以有序管理，为后续深入分析奠定基础。同时，机器学习算法在检测数据分析领域大显身手。针对检测数据特点，开发预测模型至关重要。借助机器学习强大的数据分析与模式识别能力，挖掘数据背后隐藏的规律，预测可能出现的质量问题，提前采取应对措施，提升工程质量。如此，大数据分析技术与 BIM 及机器学习算法深度融合，为水工建筑工程质量检测提供精准、高效的技术支持。

三、质量检测管理体系构建

（一）全过程质量管理模式

1. 事前预防控制体系

在水工建筑工程中，建立事前预防控制体系对保障工程质量至关重要。一方面要建立材料准入制度，对进入施工现场的各类水工建筑材料，从供应商资质审核，到材料的规格、性能指标检测等，都进行严格把控。只有符合相关标准和工程设计要求的材料才能准入，从源头上避免因材料问题引发的质量隐患^[9]。另一方面，施工方案预审机制同样关键。施工前，专业技术人员和质量管理人員要对施工方案进行全面细致的审查，考量方案的可行性、合理性以及对工程质量的保障措施，评估其是否符合水工建筑工程的特点和规范要求。通过这两个策略，实现质量管控的有效前移，为后续工程施工奠定坚实基础，确保水工建筑工程的质量。

2. 事中动态监控机制

事中动态监控机制旨在对水工建筑工程施工过程进行实时、全面的把控。借助基于物联网的实时质量监测系统，在施工现场布置各类传感器，如应力应变传感器、温度传感器等，全方位收集工程数据，涵盖混凝土浇筑温度、钢筋应力变化等关键参数。

系统将这些实时数据传输至监控中心，通过数据分析模型进行实时分析评估。一旦发现数据异常，立即触发异常响应流程^[6]。专业技术人员迅速介入，依据异常情况展开调查，判断问题严重程度，及时采取针对性的处理措施，如调整施工工艺、暂停施工整改等，确保工程质量始终处于受控状态，避免质量问题进一步恶化，保障水工建筑工程的顺利推进。

（二）标准化检测流程构建

1. 检测参数标准化体系

构建检测参数标准化体系对水工建筑工程质量检测至关重要。针对不同水工建筑物类型，要深入研究并制定核心检测指标与阈值规范^[7]。例如对于大坝，渗流量、坝体变形等是关键检测参数，需明确其精准的测量方法、频率以及合理阈值范围，为判断大坝运行状态提供科学依据。又如水闸，闸室结构应力、止水效果等参数的检测标准需细致规定，包括检测仪器精度要求、操作流程等，确保检测结果准确可靠。通过这样全面且针对性强的参数标准化体系建设，使水工建筑工程质量检测工作更具科学性与规范性，有力保障工程的安全稳定运行。

2. 作业程序标准化管理

在水工建筑工程质量检测中，作业程序标准化管理至关重要。建立全流程标准操作程序，从取样环节开始，要明确规定取样的部位、数量、频率及方法等，确保所取样本具有代表性和真实性。在测试环节，需规范各类检测仪器的操作步骤、校准要求及数据记录方式，保证测试数据的准确性和可靠性。对于报告环节，统一报告的格式、内容框架与结论表述形式，使检测报告清晰、规范且具备权威性^[8]。通过对取样、测试、报告等各环节的标准化管，实现作业程序的标准化，从而有效提升水工建筑工程质量检测的整体水平，为工程质量提供坚实保障。

四、管理实践与工程验证

（一）水库枢纽工程应用

1. 坝体渗漏检测案例

在某水库枢纽工程中，为有效检测坝体渗漏情况，应用分布式光纤监测技术。该技术利用光纤的光时域反射原理，实时感知坝体温度变化，进而精准定位渗漏位置。在工程现场，沿着坝体关键部位合理铺设光纤，构建起全面的监测网络。实际运行期间，一旦坝体出现渗漏，渗漏处的水温变化会引起光纤中光信号的改变，系统迅速捕捉并分析这些信号。经实践验证，该技术能够及时、准确地检测到坝体渗漏，相比传统检测方法，具有更高的灵敏度和全面性^[9]。此次应用为坝体渗漏检测提供了可靠的技术手段，有力保障了水库枢纽工程的安全稳定运行，也为同类工程的渗漏检测提供了有益参考。

2. 质量追溯系统建设

在水库枢纽工程应用中，质量追溯系统建设至关重要。利用区块链技术搭建质量追溯系统，对建材从采购、运输到使用的全过程进行信息记录与管理。采购环节，详细录入建材供应商、批次、规格等基础信息；运输阶段，跟踪运输路径、时间及运输条

件等；使用过程中，记录建材具体应用部位、施工人员等。这些信息以加密形式存储于区块链，不可篡改且可随时追溯^[10]。通过该系统，一旦发现质量问题，能够快速定位问题源头，是供应商产品问题，还是运输环节受损，亦或是施工使用不当等，以便及时采取有效措施解决，确保水库枢纽工程质量，提升工程管理效率与水平，保障工程长期安全稳定运行。

（二）河道整治工程实践

1. 护岸结构检测方案

在河道整治工程实践中，针对护岸结构的检测方案至关重要。先对护岸结构进行全面勘察，了解其材料、结构形式等基本信息。运用快速检测车，通过车载无损检测设备，如地质雷达、超声检测仪等，快速获取护岸内部结构的完整性数据。利用先进的传感器技术，实时监测护岸在水流、风浪等作用下的位移、应力变化情况。同时，结合现场取样分析，对护岸材料的物理力学性能进行检测。基于获取的数据，采用所开发的评估方法，对护岸结构的稳定性、耐久性等进行科学评估，判断是否满足工程质量要求，为后续护岸的维护、修复或加固提供准确依据，确保河道整治工程中护岸结构的安全性及可靠性。

2. 移动检测平台应用

在河道整治工程实践的移动检测平台应用中，采用搭载多光谱相机的无人机作为移动检测平台具有重要意义。无人机可凭借其灵活机动性，快速抵达河道各区域，克服传统人工检测在复杂地形和偏远区域的不便。多光谱相机能从多个光谱波段获取图像信息，通过分析不同波段的反射特性，精准识别河道水体污染状况、河岸植被覆盖情况以及工程设施的潜在病害。例如，对于水体富营养化导致的藻类聚集，多光谱图像可清晰呈现异常区域。通过这种移动检测平台应用，能够实时、全面且高效地对河道整治工程进行质量检测，及时发现问题并反馈，为后续工程调整与完善提供有力依据，切实保障河道整治工程质量，推动水工建筑工程管理实践的发展。

（三）检测管理效能评估

1. 经济性分析模型

建立水工建筑工程质量检测经济性分析模型，旨在精准量化检测投入与质量效益的关系。模型构建时，需全面考量多项关键参

数，比如检测技术的选用成本，不同检测手段所需的设备购置、维护及人工费用等，这些构成检测投入要素。而质量效益方面，将工程交付后的使用寿命延长、维修频次降低、安全事故减少等所带来的经济收益纳入考量。通过科学的函数关系设定，将投入与效益要素关联起来。运用该模型，能直观呈现不同检测策略下投入产出比，辅助管理者依据工程实际需求和预算限制，优化检测方案，在保障工程质量的同时，实现资源合理配置与经济效益最大化，为水工建筑工程质量检测的经济决策提供有力支撑。

2. 管理创新价值评估

在水工建筑工程中，对检测管理效能及管理创新价值进行评估意义重大。通过典型工程数据分析管理优化带来的质量提升幅度，可从多方面着手。从检测管理效能评估看，可分析检测流程优化后，检测数据的准确性、及时性提升情况，评估能否及时发现质量隐患，减少因检测延误或失误导致的质量问题。针对管理创新价值评估，可考量引入新的管理理念、方法或技术，如数字化管理平台、智能检测设备等，对工程整体质量、成本控制、进度推进的积极影响。例如新的检测技术可能提高了检测效率，减少了人力成本，同时提升了检测精度，从而保障工程质量，这些都是管理创新所带来的价值，全面评估能为后续水工建筑工程质量检测管理提供有力参考。

五、总结

水工建筑工程质量检测关键技术与管理实践的研究，取得了一系列成果。在技术体系方面，形成了涵盖原材料、施工过程及成品等多环节的全面检测技术，为工程质量提供坚实技术支撑。管理模式上，创新采用信息化、智能化手段，提高管理效率与精准度。然而，仍存在一些可提升之处。智能检测设备研发尚待加强，需加大投入以提升设备性能与适用性；全过程质量链管理的研究也有待深化，确保各环节紧密衔接。建立检测-管理-决策联动机制尤为关键，它能实现信息实时共享与高效流转，助力水利工程全生命周期质量提升。未来，应持续关注这些方面，推动水工建筑工程质量检测与管理不断进步。

参考文献

- [1] 刘有为. 建筑工程质量检测行业规范性评价及其改进研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [2] 李阳. 建筑企业给排水工程质量管理研究 [D]. 吉林大学, 2024.
- [3] 石新禹. 全过程工程咨询工程质量检测实施细则研究及工程应用 [D]. 郑州大学, 2021.
- [4] 赵东菊. 民用建筑防水工程质量影响因素研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [5] 陶鉴. 基于机器视觉的建筑模板安装质量检测系统设计 [D]. 武汉理工大学, 2022.
- [6] 张进云. 工程质量检测在建筑工程管理中的实践探究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(09): 18-21.
- [7] 江莉. 建筑工程材料质量检测及管理措施 [J]. 城市情报, 2022, (16): 184-186.
- [8] 刘晓林. 建筑工程质量检测及管理措施 [J]. 建材发展导向, 2023, 21(05): 62-64.
- [9] 许伟. 建筑工程质量检测及管理措施 [J]. 建筑与装饰, 2022, (01): 1-3.
- [10] 任宪峰. 建设工程质量管理的实践与探索 [J]. 区域治理, 2018, (09): 78-78.

基于多维检测数据的既有建筑可靠性综合评定方法研究

梁均华

广东尚标检测鉴定有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110010

摘 要 : 既有建筑可靠性评定技术不断发展, 传统检测方法有局限, 多维检测技术应运而生。目前评定中多维检测数据应用存问题, 为此建立多维度检测指标体系, 通过数据融合、多维度评价准则、综合评定模型等实现准确评定, 还构建预警阈值动态修正机制。经多案例验证, 该评定方法具应用价值, 未来在智能传感与数字孪生技术应用等方面有探索空间。

关 键 词 : 既有建筑; 可靠性评定; 多维检测技术

Research on the Comprehensive Reliability Evaluation Method of Existing Buildings Based on Multi-dimensional Detection Data

Liang Junhua

Guangdong Shangbiao Inspection and Appraisal Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The reliability evaluation technology of existing buildings is constantly developing. Traditional detection methods have limitations, and multi-dimensional detection technology has emerged as the times require. Currently, there are problems in the application of multi-dimensional detection data in the evaluation. Therefore, a multi-dimensional detection index system is established, and accurate evaluation is achieved through data fusion, multi-dimensional evaluation criteria, and a comprehensive evaluation model. A dynamic correction mechanism for early warning thresholds is also constructed. Through multiple case studies, it is verified that this evaluation method has application value and there is room for exploration in the application of intelligent sensing and digital twin technology in the future.

Keywords : existing buildings; reliability evaluation; multi-dimensional detection technology

引言

随着我国城市化进程的加快, 既有建筑数量不断增加, 其可靠性评定至关重要。2023 年颁布的《既有建筑鉴定与加固通用规范》, 为既有建筑可靠性评定提供了政策指导, 强调评定工作需科学、精准开展。既有建筑可靠性评定技术虽已发展多年并形成标准体系, 但传统检测方法存在局限, 多维检测技术应运而生。然而, 当前既有规范在受损建筑动态评估方面有不足, 且多维检测数据应用存在多源异构数据整合困难、结构性能退化模型与实测数据匹配度欠佳等问题。本研究围绕这些痛点, 从检测指标体系构建、多源异构数据融合等多方面展开, 以提升既有建筑可靠性评定的科学性与准确性。

一、既有建筑可靠性评定方法现状分析

(一) 既有建筑可靠性评定技术现状综述

既有建筑可靠性评定技术历经多年发展, 国内外已形成相应的标准体系^[1]。传统检测方法如目测法与局部抽样检测, 受限于主观判断及样本局限性, 难以全面、精准评估既有建筑可靠性。随着科技进步, 多维检测技术应运而生, 其融合多源数据, 能更深入、全面地反映建筑实际状况, 克服传统方法的不足。然而, 目前既有规范在受损建筑动态评估方面存在一定局限性。既有规范多侧重于静态评估, 难以适应受损建筑随时间变化的复杂性, 无法实时、动态跟踪建筑性能演变, 在应对突发灾害或长期

性能劣化后的建筑可靠性评定时, 难以提供及时、准确的评估结果, 亟待新的综合评定方法加以完善。

(二) 多维检测数据应用现存问题

目前, 既有建筑可靠性评定中多维检测数据应用存在诸多问题。在多源异构数据整合方面, 三维激光扫描、微震监测、光纤传感等数据类型多样、结构复杂, 现有评定方法难以有效融合这些数据, 导致数据间关联性无法充分挖掘, 无法全面反映建筑实际状况^[2]。同时, 受损后结构性能退化模型与实测数据的匹配度欠佳。结构性能退化模型通常基于理论假设与有限试验得出, 与实际多维检测数据存在差异, 使得评定结果与建筑真实的可靠性状态偏离, 无法精准评估既有建筑在受损后的可靠性, 影响对建

筑后续维护、加固决策的科学性与合理性。

二、多维检测数据采集与处理技术

（一）建筑结构多维度检测指标体系

建立的既有建筑结构多维度检测指标体系涵盖多个关键方面。材料强度退化方面，需精准检测建筑材料随时间及环境影响下的强度变化，这对评估结构承载能力至关重要^[9]。构件变形监测主要针对梁、柱等关键构件，监测其在各种荷载作用下的变形情况，变形超出一定范围将影响结构稳定性。裂缝扩展追踪着重关注结构表面裂缝的长度、宽度变化，裂缝的发展可能预示着结构内部损伤加剧。环境振动响应则通过监测环境振动下建筑结构的响应特性，如频率、阻尼等参数，以此评估结构的整体性能。各类传感器依据相应的空间布设原则进行合理布置，确保数据采集的准确性与代表性，同时遵循严格的数据采集标准，为后续可靠性评定提供可靠数据支撑。

（二）多源异构数据融合方法

在既有建筑可靠性评定中，多源异构数据融合是关键环节。不同类型的检测数据，如点云数据、应变数据等，具有不同的格式、语义和时空特征^[4]。基于贝叶斯网络的多维数据时空配准算法，能有效解决多源数据在时间和空间上的不一致问题。该算法通过概率推理，将不同来源数据进行合理整合，确保数据在时空维度上的一致性和准确性。同时，开发的专项数据预处理流程，涵盖点云数据去噪、应变场重构、损伤定位等步骤。点云数据去噪可提升数据质量，应变场重构有助于获取结构应力分布，损伤定位为可靠性评定提供关键信息。通过这些处理，实现多源异构数据的高效融合，为既有建筑可靠性综合评定奠定坚实数据基础。

三、可靠性综合评定模型构建

（一）结构可靠性分级评定体系

1. 安全性 - 适用性 - 耐久性多维度评价准则

在既有建筑可靠性综合评定中，安全性、适用性和耐久性多维度评价准则是关键。安全性从结构承载能力、稳定性等方面考量，需依据材料性能衰减、损伤累积效应评估结构抵抗破坏的能力^[9]。适用性关注建筑在正常使用时满足功能要求的程度，比如空间布局是否合理、是否存在影响使用的变形等，这也与材料及结构的长期性能变化相关。耐久性则着重于结构在环境作用因子影响下，抵抗老化、腐蚀等劣化的能力，环境作用因子如湿度、酸碱度等会加速材料性能衰减，需综合考虑以确定结构使用寿命。通过对这三个维度的全面评价，并依据构建的三级评价指标体系及各维度权重分配规则，实现对既有建筑可靠性的准确评定。

2. 基于证据理论的综合评定模型

在既有建筑可靠性综合评定中，构建基于证据理论的综合评定模型，旨在解决传统单一指标评定的信息缺失问题。此模型融合定量检测数据与专家经验，利用 D-S 证据理论，能有效处理不确定性信息。具体而言，将不同来源的检测数据及专家给出的

主观判断作为证据体，通过证据理论的合成规则，把这些证据进行融合，以形成对既有建筑结构可靠性更全面、准确的评定。例如，把结构材料强度、构件尺寸偏差等定量检测数据，与专家基于丰富经验对结构外观、历史使用情况的评估相结合，经证据合成后，获得既有建筑可靠性的综合评定结果，避免因单一指标评定而遗漏重要信息，使评定结果更具科学性与可靠性^[9]。

（二）受损结构时变可靠性分析

1. 损伤演化与性能退化耦合模型

在受损结构时变可靠性分析中，损伤演化与性能退化耦合模型的构建至关重要。该模型需综合考虑裂缝扩展路径与承载力退化这两个关键因素^[7]。裂缝的扩展并非孤立现象，其路径会对结构的力学性能产生深远影响，同时，结构的承载力也会随着时间和损伤的积累而逐渐退化。通过开发考虑裂缝扩展路径与承载力退化的非线性时程分析方法，可有效揭示结构在不同阶段的力学响应特征。将裂缝扩展与承载力退化有机结合，构建耦合模型，实现对结构损伤演化过程中性能退化的准确模拟，从而为既有建筑可靠性综合评定提供坚实的基础，精准预测结构的剩余寿命，为既有建筑的维护、加固决策提供科学依据。

2. 预警阈值动态修正机制

为实现既有建筑可靠性的准确评定，构建预警阈值动态修正机制尤为关键。该机制基于实时监测数据展开，能自适应调整可靠性预警阈值。在既有建筑服役过程中，结构性能不断变化，传统固定阈值难以满足实际需求。通过持续收集多维检测数据，利用数据挖掘与分析技术，深入探究结构性能退化规律。根据结构服役性能退化预警等级划分标准，对不同退化程度进行量化界定。在此基础上，结合结构当前状态及未来发展趋势，动态调整预警阈值，确保阈值始终契合结构实际情况，为既有建筑可靠性评定提供更为精准有效的预警指标，实现对结构安全状态的实时、准确评估^[9]。

四、工程验证与应用研究

（一）历史保护建筑鉴定案例

1. 砖木结构多指标检测实施

在历史保护建筑鉴定案例的砖木结构多指标检测实施中，充分展示三维激光扫描与微损取芯技术在现场检测里的协同应用。三维激光扫描能够快速、精确地获取建筑整体的空间几何信息，对砖木结构的外观形态、构件尺寸与位置关系进行全面记录。微损取芯技术则针对砖木材料本身，通过少量取芯分析木材的强度、腐朽程度以及砖体的抗压性能等关键指标。将两者获取的数据进行融合，借助数据融合算法，可有效整合不同类型的数据。这不仅验证了数据融合算法的有效性，还为基于多维检测数据的既有建筑可靠性综合评定提供了准确、全面的数据支撑^[9]，有助于更科学合理地评估历史保护建筑的真实状况，为后续保护与修复策略的制定提供坚实依据。

2. 残损状况综合评定实践

在某百年砖混历史保护建筑鉴定工程中，对其残损状况展开

综合评定实践。首先运用多种检测手段获取多维检测数据,涵盖结构材料性能、构件尺寸偏差、裂缝分布等方面。基于这些数据,依据分级评定体系,对建筑的各个部分进行细致分析。例如,针对墙体,从裂缝宽度、长度及分布区域,结合砌体强度检测结果,评定其损伤程度。同时,考量建筑的整体变形情况,通过倾斜测量数据评估基础的稳定性。在评定过程中,严格遵循分级标准,从单个构件到结构子系统,再到整体结构,逐步确定残损等级。依据评定结果,为后续的加固决策提供精准且全面的依据,切实体现基于多维检测数据的分级评定体系在历史建筑鉴定中的重要应用价值^[10]。

（二）灾后建筑应急评估应用

1.震后结构快速检测方法

在灾后建筑应急评估应用中,震后结构快速检测方法依托构建的无人机巡检与光纤监测相结合的应急评估系统。无人机凭借其灵活、高效的特点,能够快速对大面积受灾区域的建筑进行整体巡检,获取建筑外观、结构轮廓等宏观信息,快速识别出可能存在损伤的区域,为后续详细检测提供重点方向。而光纤监测技术则利用光纤传感器对应力、应变等物理量敏感的特性,埋设于建筑关键结构部位,实时、精准地监测结构内部力学参数变化。二者相结合,一方面从宏观视角快速定位损伤区域,另一方面从微观层面准确捕捉结构内部变化,实现对震后建筑结构快速、全面且精准的检测,为既有建筑可靠性综合评定提供关键数据支持。

2.安全性分级处置策略

在以某地震受损框架结构为案例进行验证时,针对灾后建筑应急评估应用中的安全性分级处置策略,首先依据时变可靠性模型计算结构在不同时间点的可靠度指标。基于这些指标,对建筑安全性进行分级。对于可靠度指标较高,结构损伤较轻的建筑,可允许有限人员在一定时间内临时使用,同时加强监测。而对于可靠度指标处于中间范围,结构存在一定损伤的,需进行临时加固措施后,方可安排部分人员使用。若可靠度指标极低,结构损伤严重,则应立即封锁,严禁人员靠近。通过这种基于时变可靠性模型计算结果的安全性分级处置策略,为应急疏散决策提供科学且合理的支撑,最大程度保障人员生命安全和合理利用现有建筑资源。

（三）工业建筑可靠性监控

1.疲劳损伤在线监测系统

开发基于应变模态分析的钢结构疲劳损伤诊断系统后,将此

系统应用于工业建筑可靠性监控的疲劳损伤在线监测。在实际工业建筑场景中,通过在关键节点布置传感器,持续采集应变等数据。系统利用这些实时数据进行应变模态分析,准确识别出结构中可能存在疲劳损伤的区域。同时,结合历史数据与模型分析,对关键节点的实时可靠性进行动态评估,判断疲劳损伤发展趋势。一旦监测到疲劳损伤指标接近或超出设定阈值,系统及时发出预警,提醒相关人员采取措施,以保障工业建筑的安全可靠运行,实现从理论研究到工程实际应用的转化,验证该诊断系统在工业建筑可靠性监控疲劳损伤在线监测方面的有效性与实用性。

2.全寿命周期管理平台

在工业建筑可靠性监控全寿命周期管理平台的工程验证与应用研究中,将集成检测数据与评定模型构建的工业建筑数字孪生系统,应用于实际工业建筑项目。通过对不同类型、不同使用年限的工业建筑进行数据采集与分析,验证该系统对建筑可靠性评定的准确性与有效性。同时,基于闭环式的可靠性管控机制,实时监测建筑在运营过程中的状态变化,及时发现潜在的安全隐患,并依据评定结果提出针对性的维护与改造策略。通过实际工程应用,不断优化全寿命周期管理平台,提升工业建筑可靠性监控水平,为既有工业建筑的安全稳定运行提供有力保障,推动工业建筑可靠性评定技术在实际工程中的广泛应用。

五、总结

本研究围绕既有建筑可靠性评定,深入挖掘多维检测数据的价值,展现出显著技术优势。所提综合评定方法在受损结构评估与历史建筑保护等领域应用价值颇高,能够为这些复杂场景提供科学、精准的评定依据,助力既有建筑的合理维护与有效保护。然而,既有建筑可靠性评定领域不断发展,未来在智能传感设备集成与数字孪生技术应用等方向仍有广阔探索空间。智能传感设备集成可实现数据实时、动态采集,提升评定时效性;数字孪生技术应用则能构建虚拟模型,助力更直观、深入的分析。后续研究将聚焦这些重点方向,不断完善既有建筑可靠性综合评定体系,推动该领域持续进步。

参考文献

[1]郭鑫.既有建筑旁孔透射波法桩基检测[D].南昌大学,2021.
[2]许瑶莉.基于PPP模式的既有建筑绿色改造多主体演化博弈研究[D].西南科技大学,2022.
[3]孙浩.多维数据异常检测方法研究和应用[D].新疆大学,2023.
[4]郑赛.既有社区中心建筑的再生性改造策略研究[D].华南理工大学,2022.
[5]但昭辉.不确定条件下既有建筑节能改造决策鲁棒优化方法研究[D].华中科技大学,2022.
[6]赵军元.既有建筑结构检测及安全性评定探究[J].中国建筑金属结构,2024,23(7):172-174.
[7]万翔.既有建筑检测鉴定及加固方法研究[J].砖瓦,2022(002):000.
[8]高伟.低应变法检测既有建筑地基基础的研究[J].中国高新科技,2022(010):000.
[9]雷亚平.既有建筑综合节能改造的节能量测量与验证方法探讨[J].建筑节能,2022(050-004).
[10]倪小磊,管毓文,盛娟.基于BIM的既有建筑结构加固研究[J].四川建材,2021(011):047.

城市更新背景下市政道路施工技术创新与应用研究

古智辉

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110013

摘 要：《全国国土空间规划纲要（2021—2035 年）》指导城市更新行动，市政道路工程在其中有多重功能定位。其与城市配套工程协同发展，施工技术创新发展，面临既有道路改造挑战，需融合城市美学与功能，优化施工图设计，进行风险评估、智慧化监测等，以实现全要素效益最大化，适配不同规模城市。

关 键 词：市政道路施工技术；城市更新；协同发展

Research on Innovation and Application of Municipal Road Construction Technology under the Background of Urban Renewal

Gu Zhihui

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The national land and space planning outline (2021–2035) guides the urban renewal action, in which the municipal road engineering has multiple functions. With the coordinated development of urban supporting projects and the innovative development of construction technology, it faces the challenge of reconstruction of existing roads. It needs to integrate urban aesthetics and functions, optimize construction drawing design, carry out risk assessment, intelligent monitoring, etc., so as to maximize the benefits of all factors and adapt to cities of different sizes.

Keywords： municipal road construction technology; urban renewal; collaborative development

引言

《全国国土空间规划纲要（2021—2035 年）》为城市更新行动明确目标任务与总体格局，对市政道路工程改造有重要指导意义。在城市更新进程中，市政道路需满足交通、展示城市形象等多重功能，政策强调提升其安全性、舒适性、可持续性 & 智能化水平。这促使市政道路施工技术不断创新，从施工模拟、智能摊铺到绿色低碳工艺等。同时，施工中面临的协同发展、既有道路改造等问题也需通过合理机制与技术突破解决，以实现城市美学与功能融合，确保城市更新项目顺利推进，提升城市品质。

一、城市更新与市政道路工程关联性研究

（一）城市更新政策导向分析

《全国国土空间规划纲要（2021—2035 年）》明确了国土空间开发保护的目标任务与总体格局，对城市更新行动起到关键指导作用^[1]。在城市更新行动里，市政道路工程有着多重功能定位。它不仅是城市交通的脉络，保障人员与物资的高效流通，还是城市形象的展示窗口，反映城市的风貌与特色。从改造要求看，城市更新政策强调提升市政道路的安全性、舒适性与可持续性。一方面，要通过技术创新增强道路结构稳定性，降低交通安全隐患；另一方面，需注重环保材料的运用与生态设计，减少对环境的影响，实现绿色发展。同时，还要求提升道路智能化水

平，以适应智慧城市建设的需要，这些政策导向为市政道路施工技术的创新与应用指明了方向。

（二）城市配套工程协同发展机制

城市更新进程中，市政道路工程与城市配套工程紧密相连，其协同发展机制至关重要。地下综合管廊与道路立体化改造存在紧密的工程协同原理。地下综合管廊可有效整合各类管线，避免道路反复开挖，为道路长期稳定运行提供保障；道路立体化改造则拓展城市空间，提升交通效率，为综合管廊建设创造更有利的空间条件。而在多专业交叉施工时，技术接口管理是关键。不同专业施工在时间、空间及技术标准上需精准对接，比如管廊施工与道路基础施工的先后顺序、技术参数匹配等。通过科学合理的协同发展机制，能减少施工冲突，提高施工效率，确保城市更新

项目顺利推进，提升城市整体品质与功能^[2]。

二、市政道路施工技术创新体系构建

（一）新型施工技术发展方向

在城市更新背景下，市政道路施工技术呈现出诸多创新发展方向。基于 BIM 的施工模拟技术，借助数字化手段对施工过程进行三维建模与动态模拟，精确呈现各施工环节及空间关系，通过对施工进度、资源分配、场地布置等参数的精准设定与分析，提前发现潜在问题并优化方案，大幅提高施工效率与质量^[3]。智能摊铺装备应用实现自动化与智能化操作，通过先进的传感器与控制系统，精准控制摊铺厚度、平整度等关键参数，减少人工干预，保证路面摊铺的均匀性与稳定性。绿色低碳施工工艺注重采用环保材料、节能设备，优化施工流程以降低能耗与污染排放，如推广温拌沥青技术，在较低温度下进行沥青混合料的拌和与摊铺，既保证路面性能，又显著减少能源消耗与废气排放，符合城市可持续发展需求。

（二）既有道路改造技术突破

在城市更新背景下，既有道路改造面临诸多挑战，需实现技术突破。路基拼接技术方面，为解决新老路基结合处易出现不均匀沉降问题，要精准分析原路基的土质结构、承载能力等参数，采用合适的地基处理方法，如深层搅拌桩、强夯法等增强地基稳定性。在既有管线保护上，施工前利用先进探测技术精确探明管线分布，制定详细保护方案。对于可迁移管线，科学规划迁移路线；不可迁移的，采用支托、悬吊等保护措施。通过这些技术突破，有效应对道路扩建中的关键技术难题，确保既有道路改造工程顺利推进，提高改造质量与效率^[4]。

三、城市更新工程设计管理与风险控制

（一）全生命周期设计管理方法

1. 城市美学与功能融合设计

在城市更新背景下，市政道路的城市美学与功能融合设计至关重要。道路不仅要满足交通功能，还需融入城市美学元素^[5]。从复合型道路断面设计方案来看，海绵城市设施的融入，如雨水花园、植草沟等，不仅能实现雨水的自然渗透、净化与储存，解决城市内涝问题，还能增添绿色景观，提升道路的美观度与生态性。而智能交通系统的加入，像智能信号灯、电子指示牌等，优化交通流，提高通行效率的同时，其简洁有序的外观也与城市整体风格相呼应。通过这种城市美学与功能的融合设计，使市政道路在满足现代交通需求的基础上，成为城市形象的展示窗口，提升居民的出行体验与城市的宜居性。

2. 施工图设计优化策略

在城市更新工程中，施工图设计优化策略至关重要。一方面，要结合现场实际条件进行设计调整。深入调研施工现场的地形、地下管线等状况，依据获取的准确信息，及时对施工图进行优化，确保设计与现场实际紧密贴合，避免施工过程中的频繁变

更。另一方面，需建立设计变更预警系统^[6]。通过实时监测施工进度、现场反馈等多方面信息，利用信息化手段对可能引发设计变更的因素进行预判，提前发出预警。一旦预警触发，迅速组织设计、施工等多方人员共同研讨，制定科学的解决方案，将设计变更对工程进度、成本及质量的影响降至最低，保障市政道路施工在城市更新背景下顺利推进。

（二）工程风险评估与应对

1. 城市核心区施工风险评估

在城市核心区进行市政道路施工，需构建包含交通疏导、管线安全、噪声控制等指标的立体化风险评估模型^[7]。交通疏导方面，核心区交通流量大，施工易致拥堵，需评估施工对周边道路通行能力影响，预测交通高峰时段拥堵程度。管线安全上，核心区地下管线错综复杂，施工可能破坏各类管线，要分析管线分布状况，评估施工触及管线风险。噪声控制上，核心区人口密集，施工噪声易扰民，需衡量施工设备及工艺产生噪声强度，评估对周边居民生活干扰程度。通过该立体化风险评估模型，全面识别城市核心区施工潜在风险，为后续制定针对性应对措施提供依据，保障施工顺利进行。

2. 智慧化监测预警系统

在城市更新背景下的市政道路施工中，智慧化监测预警系统发挥着关键作用。基于物联网的施工监测技术体系，可实现对施工过程全方位、实时的数据采集。各类传感器被布置于施工现场关键部位，如道路基层、周边建筑物等，收集沉降、位移等数据，并通过物联网迅速传输至数据处理中心。同时，沉降预测算法的实际应用能依据收集的数据，精准预测道路未来沉降趋势。通过对历史数据及实时监测数据的深度分析，算法可模拟出不同施工阶段的沉降变化情况。一旦监测数据或预测结果超出预设阈值，系统即刻发出预警，以便施工人员及时调整施工方案，采取针对性措施，有效降低工程风险，保障市政道路施工在城市更新中的顺利推进^[8]。

四、技术创新应用实证研究

（一）典型项目技术应用模式

1. 装配式道路基层施工案例

在某城市主干道改造项目中，采用装配式道路基层施工技术。该技术通过在工厂预制道路基层构件，然后运输至施工现场进行拼装。在施工效率方面，与传统现浇施工相比，预制构件的生产可与现场场地准备等工作同步进行，极大缩短了整体工期。原本预计需数月的基层施工，采用装配式技术后大幅缩减。在质量控制要点上，预制构件生产过程严格按照标准规范，对原材料、配合比等进行精准把控。运输过程中做好构件防护，避免损伤。现场拼装时，确保拼接精度，通过专业测量仪器校准，保证基层平整度和整体稳定性^[9]。经实践验证，该装配式道路基层施工技术在城市主干道改造中，有效提升了施工效率与质量，为城市更新背景下的市政道路施工提供了成功范例。

2. 智慧工地管理平台应用

在城市更新背景下的市政道路施工中，智慧工地管理平台发

挥着重要作用。该平台在人员设备调度方面成效显著，通过实时数据收集与分析，能精准匹配人员与设备需求，优化资源分配，避免资源闲置与浪费。在进度监控上，借助各类传感器和监控设备，可实时获取施工进度信息，与预设进度计划对比，及时发现偏差并预警。例如，在具体的市政道路施工项目中，管理平台对每日完成的工程量、设备运转时长、人员出勤情况等详细记录，基于数据分析调整施工策略，确保施工按计划推进。这种智慧工地管理平台的应用大幅提升了市政道路施工的管理效率与质量，为城市更新中的道路建设提供有力支持^[10]。

（二）城市次干道更新技术实践

1. 非开挖修复技术应用

在城市次干道更新的市政管网改造场景中，传统开挖方式虽直观但存在诸多弊端。它不仅会严重影响交通，造成周边区域的拥堵，而且施工周期长，对周边居民生活干扰大，同时还会破坏道路及周边环境，后期修复成本高。相比之下，CIPP管道修复技术优势明显。该技术无需大面积开挖路面，能最大程度减少对交通和周边环境的影响，施工效率较高，可有效缩短工期。从成本效益看，虽然初期设备投入相对较大，但综合考虑因减少交通影响、环境破坏及后期修复等带来的隐性成本，长期效益突出。以某城市次干道的一段污水管网改造为例，采用 CIPP 管道修复技术后，交通受影响时间大幅缩短，周边环境破坏程度极小，经核算综合效益显著优于传统开挖方式，为城市次干道更新中的管网改造提供了高效且环保的解决方案。

2. 生态型路面铺装实践

在城市次干道更新技术实践的生态型路面铺装中，对透水沥青混凝土在道路更新工程里的排水性能与耐久性表现展开验证。通过现场铺设试验路段，设置不同级配的透水沥青混凝土结构层。从排水性能看，测定降雨时路面水的下渗速率与积水深度，经多次降雨观测，发现其能快速排水，有效避免路面积水，提升行车安全。在耐久性方面，借助无侧限抗压强度试验、马歇尔稳定度试验等，定期检测试件性能变化。经过长时间监测，试件仍保持良好的力学性能，表明透水沥青混凝土在城市次干道更新中有较好的耐久性，能满足道路长期使用需求，为生态型路面铺装在城市次干道更新中的推广应用提供有力依据。

（三）技术经济效果综合评价

1. 全要素效益评价体系

全要素效益评价体系旨在全面、系统地考量市政道路施工技

术创新应用所带来的综合效益。在城市更新背景下，该体系以碳排放、施工周期、后期维护成本等多维度为核心构建综合评价模型。碳排放维度可反映施工技术对环境的影响程度，较低的碳排放意味着技术更具生态友好性。施工周期关乎项目的时间成本与资源利用效率，较短的周期能加速城市更新进程。后期维护成本则直接影响市政道路全生命周期的经济投入，合理控制可提升长期经济效益。通过这一评价体系，可对不同施工技术创新方案进行科学、全面的评估，为市政道路在城市更新中的技术选择与优化提供有力依据，以实现技术、经济与环境效益的最大化。

2. 技术推广适用性分析

在城市更新背景下，市政道路施工技术推广适用性分析至关重要。不同规模城市有着各异的城市布局、交通流量及发展需求。大型城市人口密集、交通拥堵，新型施工技术需在保障交通基本通行的前提下推进，如采用快速施工工艺减少对交通的影响，且要适应复杂地下管网等条件。中型城市虽规模略小，但对施工成本控制要求较高，技术推广要注重经济性与实用性结合，例如选择性价比高的材料与工艺。小型城市在技术推广时，要契合其相对简单的城市结构与有限资金，优先考虑易操作、维护成本低的技术。通过对不同规模城市适配条件分析，明确各城市在道路更新中采用新型施工技术的改进方向，实现技术在不同规模城市的有效推广与应用，助力城市更新进程中市政道路建设与升级。

五、总结

在城市更新的大背景下，市政道路施工技术的创新与应用意义重大。当前已取得了一系列技术创新成果，这些成果为城市道路的高质量建设与升级改造提供了有力支撑。面向智慧城市发展，通过加强 BIM+GIS 技术集成应用，能实现施工过程的精准模拟与空间信息整合，提升施工效率与质量。完善施工风险预警机制，可有效降低各类风险对施工的影响，保障施工安全与进度。推动标准化施工体系建设，则能规范施工流程，提高施工管理水平。未来，应持续深入探索这些技术优化路径，进一步推动市政道路施工技术的创新发展，使其更好地服务于城市更新，助力智慧城市建设迈向新高度。

参考文献

- [1] 李婉宁. 城市更新背景下保定“保府市场”空间优化设计研究 [D]. 河北大学, 2023.
- [2] 金睿. 城市更新背景下重庆传统风貌区价值评估与保护利用研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [3] 杨树辉. 城市更新背景下的广州萝岗旧村改造模式与策略探讨 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [4] 孙冰雪. 城市更新背景下西安书院门历史街区景观设计 [D]. 河北科技大学, 2023.
- [5] 李进. 城市更新背景下广州南村历史文化遗产保护研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [6] 吴平. 治理视角下城市更新主体博弈与协同路径研究 [J]. 绿色建筑, 2022, 14(1): 26-30.
- [7] 李向歌. 城市更新背景下历史街区保护与改造探析 [J]. 美与时代·城市, 2022(11): 27-29.
- [8] 林风杰. 在城市更新背景下日照分析的应用研究 [J]. 中国住宅设施, 2024(7): 61-63.
- [9] 方旖旎. 城市更新背景下的土地整备策略 [J]. 城市住宅, 2021, 28(10): 209-210.
- [10] 刘译浓, 原英东. 公园城市与城市更新背景下城市双修模式 [J]. 现代园艺, 2023, 46(6): 152-154.

市政道路软基处理与建筑施工技术管理的融合路径研究

胡想想

广东南粤建筑工程有限公司, 广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025110014

摘 要 : 本文围绕市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合展开, 阐述了强夯法等软基处理技术机理, 介绍施工技术管理体系架构。还提及商业建筑一体化管理、山地建筑技术创新等内容, 强调应在融合中关注质量验收、结构安全监测等, 以实现技术集成、管理创新与生态保护。

关 键 词 : 软基处理; 技术管理融合; 生态保护

Research on the Integration Path of Municipal Road Soft Foundation Treatment and Construction Technology Management

Hu Xiangxiang

Guangdong Nanyue Construction Engineering Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract : This article focuses on the integration of soft foundation treatment for municipal roads and construction technology management, elaborating on the mechanisms of soft foundation treatment technologies such as dynamic compaction, and introducing the architecture of the construction technology management system. It also mentioned the integrated management of commercial buildings and technological innovation in mountainous construction, emphasizing the need to pay attention to quality acceptance, structural safety monitoring, etc. in the integration process to achieve technological integration, management innovation, and ecological protection.

Keywords : soft foundation treatment; technology management integration; ecological protection

引言

《关于推动城乡建设绿色发展的意见》于2021年10月颁布, 旨在促进城乡建设绿色发展, 提升城市建设质量。在此政策背景下, 市政道路软基处理与建筑施工技术管理的融合至关重要。从强夯法、碎石桩等软基处理核心技术, 到施工技术管理体系架构的各个环节, 再到商业建筑一体化管理、山地建筑施工技术创新等多方面, 均需全面考量技术集成、管理创新与生态保护。同时, 地基处理质量验收、结构安全监测预警等环节, 以及智慧工地管理体系的构建, 都为提升市政工程质量与效益提供了有力支撑, 推动市政建设向更高水平发展。

一、市政道路软基处理的技术体系与管理框架

(一) 软基处理核心技术机理

市政道路软基处理中, 强夯法通过强大的夯击能使土体瞬间压缩, 减少土体孔隙, 提高地基强度与密实度。其机理在于利用夯锤自由落下产生的冲击能, 克服土颗粒间的阻力, 使土体重新排列^[1]。碎石桩是将碎石挤压入土中形成桩体, 与桩间土共同承担荷载。桩体在地基中起置换、排水及挤密作用, 加速土体排水固结, 提高地基承载力。深层搅拌桩则是利用水泥等固化剂与软土强制搅拌, 通过物理化学反应, 使软土硬结成具有整体性、水稳性和一定强度的桩体, 将桩体与桩间土形成复合地基, 增强地基承载能力。这些软基处理核心技术的机理不同, 各自适用于不

同的软土地质条件, 为市政道路软基处理提供了多样化选择。

(二) 施工技术管理体系架构

市政道路软基处理施工技术管理体系架构涵盖多个关键环节。地质勘察是基础, 通过详细的地质勘探, 获取软基的物理力学参数, 如含水量、孔隙比等, 为后续工艺选型提供准确依据^[2]。工艺选型需综合考虑地质条件、道路设计要求及工程成本等因素, 从换填法、排水固结法、深层搅拌法等众多软基处理工艺中选择最适宜的方案。质量监控贯穿施工全过程, 对原材料质量、施工工艺执行情况以及处理后软基的各项指标进行严格检测, 确保达到设计标准。安全预控针对软基处理施工可能存在的安全风险, 如基坑坍塌、机械故障等, 制定相应的预防措施和应急预案, 保障施工安全顺利进行。

二、多类型建筑的施工技术融合路径

（一）商业建筑一体化管理模型

商业建筑一体化管理模型旨在整合市政道路软基处理与建筑施工技术管理，实现协同运作。可通过建立涵盖多专业的信息共享平台，将软基处理数据与商业建筑施工各环节数据整合，为管理者提供全面、实时的项目信息，辅助科学决策^[3]。在施工阶段，把软基处理技术参数与商业建筑结构设计与施工进度紧密关联，依据软基处理效果动态调整施工计划，确保建筑结构安全稳定。对于机电管线等设施，结合软基沉降预测，优化布局与安装工艺，降低因沉降导致的管线损坏风险。在运维阶段，持续监测软基与建筑整体状况，利用一体化模型分析潜在问题，提前制定维护策略，实现从施工到运维全过程的高效管理与技术融合，保障商业建筑长期稳定运营。

（二）山地建筑施工技术创新

在山地建筑施工技术创新方面，一方面研发山体栈桥模块化吊装技术。由于山地地形复杂，传统吊装方式受限，山体栈桥模块化吊装技术应运而生。通过将吊装设备及相关部件进行模块化设计，使其更便于在山地运输与组装，能显著提高吊装效率与安全性，解决山地施工材料与设备吊运难题。另一方面，论证跨街天桥顶推施工中的临时地基处理方案。山地跨街天桥建设中，临时地基处理对顶推施工稳定性至关重要。需综合考虑山地地质条件、天桥结构特点等因素，运用合适的软基处理方法，如换填法、排水固结法等，确保临时地基满足顶推施工要求，保障施工安全与质量，实现市政道路软基处理与山地建筑施工技术的有效融合^[4]。

三、生态保护导向的施工技术集成

（一）施工生态影响评估体系

1. 山地植被保护技术

在观光电梯基础施工阶段，需重视山地植被保护。为减少对山地植被的破坏，应提出针对性的植被保育措施。在施工前，对施工区域及周边的植被种类、分布、生长状况等进行详细调查^[5]。依据调查结果，对于珍稀、濒危或具有重要生态价值的植被，制定专门的移栽或就地保护方案，如设置保护围挡，避免施工活动对其造成直接损害。同时，推行表土资源化利用方案，施工过程中剥离的表土富含养分和植物种子，将其妥善收集、储存，待施工结束后，用于生态修复和植被恢复，促进植被自然生长，最大程度降低施工对山地植被生态系统的影响，实现施工与生态保护的协调发展。

2. 水土保持技术标准

在市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合过程中，制定公园栈道施工的水土保持技术标准极为关键。针对径流控制系统，需明确排水坡度、排水设施尺寸及材质等参数，确保降水能迅速、有序排出，减少坡面径流对土壤的冲刷侵蚀^[6]。对于边坡稳定防护，应根据边坡地质条件、高度等因素，确定合适的防护方式，如植被护坡需选择适宜本地生长、根系发达的植物品种与

种植密度，确保能有效固土；若采用工程护坡，则要规范护坡结构的材料规格、施工工艺等，像挡土墙的基础深度、墙体厚度及配筋要求等，以保障边坡在施工及后续使用中保持稳定，最大程度降低施工对水土的扰动与破坏，实现施工与生态保护的协调发展。

（二）绿色施工技术应用

1. 低碳材料运输体系

在山地项目中，构建索道-轨道复合系统是实现低碳材料运输的关键举措。该系统结合了索道运输跨越地形障碍的优势以及轨道运输稳定高效的特点。索道部分可借助山地高差，以重力辅助运输物料，减少动力消耗。轨道部分则在相对平缓区域进行接力运输，确保物料运输的连续性。通过设计该复合系统，需精确考量线路规划、站点布局等因素，以实现物料的高效流转。同时，建立能源消耗模型对其运行能耗进行精准评估，分析不同运输工况下的能耗参数，如索道起升、轨道牵引等环节的能耗，依据模型结果优化运输方案，从系统设计和运行管理层面降低能源消耗，助力市政道路软基处理与建筑施工在材料运输环节实现低碳目标，推动生态保护导向的施工技术集成^[7]。

2. 噪音扬尘防控技术

在市政道路软基处理与建筑施工过程中，噪音与扬尘问题严重影响城市公共空间环境与居民生活。为此，开发适用于城市公共空间的施工降噪帷幕与扬尘预警控制系统至关重要。施工降噪帷幕可选用吸声、隔声性能良好的材料，合理设置其高度、长度及安装位置，有效阻挡和吸收施工噪音向周边环境扩散^[8]。扬尘预警控制系统则通过布置在施工现场不同位置的扬尘监测传感器，实时收集扬尘浓度数据，当数据超过设定阈值时，系统立即启动相应的降尘设备，如雾炮机、洒水车等，及时抑制扬尘。这两种技术相互配合，从噪音阻隔与扬尘监测防控两方面，实现对市政道路软基处理及建筑施工过程中噪音扬尘的有效管控，减少对城市公共空间的负面影响。

四、融合发展的实施保障机制

（一）全过程质量控制标准

1. 地基处理质量验收

在市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合发展中，地基处理质量验收至关重要。验收需依据全面且精准的标准，对软基处理后的各项参数进行严格核查。针对不同的软基处理方法，如排水固结法、深层搅拌法等，要分别制定相应的验收细则，明确规定处理深度、强度、压实度等关键指标的合格范围。运用探地雷达等先进检测技术，按照无损检测规程对处理效果进行检测评估，确保检测结果的准确性和可靠性^[9]。同时，对验收过程中的数据进行详细记录与分析，以便及时发现问题并采取有效的整改措施，为市政道路的后续施工提供坚实的质量保障，实现软基处理与建筑施工技术管理的高效融合。

2. 结构安全监测预警

在市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合发展中，结构

安全监测预警至关重要。开发天桥钢结构的应力 - 变形实时监测系统,能够对天桥在施工及运营过程中的应力和变形状态进行动态跟踪。借助高精度传感器采集数据,将应力、变形等关键参数实时反馈至监测平台。同时,构建预警阈值模型,依据天桥的设计标准、材料特性及过往工程经验等设定合理阈值。一旦监测数据接近或超出阈值,系统立即发出预警信号,提醒相关人员及时采取措施,如调整施工工艺、加固结构等,从而有效预防安全事故发生,保障市政道路与建筑工程的结构安全,确保二者融合发展顺利推进^[10]。

（二）智慧工地管理体系

1. BIM 技术融合应用

在智慧工地管理体系中, BIM 技术融合应用是市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合发展的关键。利用 BIM 技术构建市政道路软基处理的三维地质模型,能够直观呈现软基的地质结构、土层分布等信息,为施工方案制定提供准确依据。同时,基于 BIM 搭建施工模拟系统,对软基处理和建筑施工流程进行虚拟模拟,提前发现可能出现的问题,优化施工顺序和资源配置。通过 BIM 与项目管理软件集成,实现进度、质量、安全等信息实时共享与协同管理,提升管理效率。此外,利用 BIM 的可视化特性,对施工人员进行技术交底,确保施工操作准确无误,为市政道路软基处理与建筑施工技术管理的融合发展提供有力技术支撑。

2. 物联网监测平台

在市政道路软基处理与建筑施工技术管理的融合发展中,物联网监测平台是智慧工地管理体系的关键组成部分。通过在施工现场部署各类传感器,如位移传感器、压力传感器等,实时收集软基处理和建筑施工过程中的关键数据,像软基沉降量、土壤压实度、建筑结构应力应变等。将这些数据借助物联网技术传输至监测平台,经数据分析与处理,以直观的图表和可视化界面呈现给管理人员,使其能及时掌握施工状态。此外,利用物联网监测平台可设置预警阈值,一旦数据超出正常范围,立即发出警报,以便及时调整施工技术与管理策略,从而保障市政道路软基处理与建筑施工技术管理的高效融合,提升施工质量与安全性。

（三）风险应急管理预案

1. 地质灾害应急预案

针对山地施工可能出现的突发滑坡地质灾害,应构建完善的

应急预案。首先,组建专业的应急救援队伍,涵盖地质专家、岩土工程师、施工技术人员等,确保具备专业知识与救援能力。预先储备充足的抢险物资,如沙袋、锚杆、注浆设备等,并定期检查维护,保证物资完好可用。同时,建立实时监测系统,运用地质雷达、位移传感器等技术,对施工区域地质状况进行 24 小时监测,及时捕捉潜在滑坡迹象。一旦监测到异常,立即启动预警机制,通知施工人员迅速撤离危险区域。应急救援队伍迅速响应,依据滑坡具体情况,按照既定的抢险技术路线,采取如反压填土、坡面防护、排水固结等措施,快速控制滑坡态势,降低灾害损失,保障市政道路软基处理与建筑施工的安全推进。

2. 质量事故处理规程

在市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合发展中,质量事故处理规程至关重要。当发生质量事故,第一时间启动应急响应,组织专业人员赶赴现场,对事故情况进行全面勘查,详细记录事故发生的部位、范围、严重程度等信息。根据勘查结果,迅速分析事故产生的原因,从软基处理技术、施工工艺、材料质量等多方面进行排查。依据原因分析,制定针对性的处理方案,若因注浆加固不到位导致软基不均匀沉降,需重新规划注浆参数与点位进行二次注浆。处理过程中严格监督,确保方案执行到位,处理完成后进行质量验收,各项指标合格后,对事故进行总结分析,形成案例资料,为后续类似施工提供经验借鉴,防止同类事故再次发生。

五、总结

市政道路软基处理与建筑施工技术管理的融合,是提升市政工程质量与效益的关键。技术集成方面,通过整合软基处理技术与建筑施工技术,打破传统技术应用的壁垒,实现技术协同增效。管理创新旨在运用现代管理理念与方法,优化施工流程,提升管理效率与质量。生态保护要求在融合过程中注重环保,采用绿色施工技术,降低对环境的影响。构建多类型市政工程的技术实施框架,可提高技术的通用性与适应性。而智慧化施工管理系统的发展,将为融合路径提供更先进的技术支持,实现施工过程的智能化、精细化管理,推动市政道路软基处理与建筑施工技术管理融合向更高水平迈进,为城市建设发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 林禄杰.真空联合堆载预压法处理横琴市政道路深厚软基的应用研究[D].华南理工大学,2022.
- [2] 崔宇.强夯碎石墩在上覆硬壳层软基处治中的应用研究[D].贵州大学,2021.
- [3] 蔡新悦.A 建筑施工企业业财融合管理研究[D].太原理工大学,2021.
- [4] 王连浩.城市化过程中产城融合路径——天津市滨海新区新城镇为例[D].北京工业大学,2022.
- [5] 韩泽宇.FeCo 基软磁薄膜的结构与磁性研究[D].宁夏大学,2023.
- [6] 赖俊杰.市政工程施工软基处理技术管理研究[J].居业,2023(12):179-181.
- [7] 张成卓.市政道路路基设计及软基处理研究[J].中国高新科技,2021(22):120-121.
- [8] 葛金生.建筑工程软基处理施工技术方法探析[J].模型世界,2021(4):179-181.
- [9] 徐君龙.市政道路软基处理方案分析[J].砖瓦世界,2021(2):180-181.
- [10] 叶强,颜胜阳.市政道路升级改造工程软基处理施工技术[J].江西建材,2023(3):366-367,372.

高层建筑结构抗震设计：选型、性能与经济性的综合考量

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.2025110016

摘 要： 高层建筑结构抗震设计需综合考量选型、性能与经济性。不同结构体系传力路径与耗能机制不同，结构性能目标具多维度特性。不规则结构要准确分类与分析，通过模拟技术分析非对称结构动力响应。此外，还可利用遗传算法优化构件尺寸、构建关联模型等，某超高层实践提供经验，多种技术助力实现可持续发展。

关 键 词： 高层建筑；结构抗震设计；多目标优化

Seismic Design of High-Rise Building Structures: Comprehensive Consideration of Selection, Performance, and Economy

Chen Jiaping

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

Abstract： The seismic design of high-rise building structures requires comprehensive consideration of selection, performance, and economy. The transmission paths and energy dissipation mechanisms of different structural systems are different, and the structural performance objectives have multidimensional characteristics. Irregular structures should be accurately classified and analyzed, and the dynamic response of asymmetric structures should be analyzed through simulation techniques. In addition, genetic algorithms can be used to optimize component dimensions, construct correlation models, etc., providing experience for a certain super high-rise practice, and various technologies can help achieve sustainable development.

Keywords： high-rise buildings; structural seismic design; multi-objective optimization

引言

《建设工程抗震管理条例》于2021年9月1日起施行，旨在加强建设工程抗震管理，提高建设工程抗震防灾能力。在此政策背景下，高层建筑结构抗震设计备受关注。其结构体系多样，不同体系传力路径与耗能机制各异，抗震概念设计需注重规则性等原则。结构性能目标具多维度特性，不规则结构需准确分类并明晰影响。非对称结构动力响应分析、构件尺寸优化、抗震性能与经济性关联等方面研究不断推进，还有基于可持续发展的技术应用与多学科交叉探索，共同助力实现高层建筑选型、性能与经济性的综合考量。

一、结构选型与性能目标的综合考量

（一）结构体系分类及其抗震机理

高层建筑结构体系多样，不同体系的传力路径与耗能机制各异。框架-核心筒体系中，水平力由框架与核心筒共同承担，核心筒作为主要抗侧力构件，传力直接，框架则协同工作，二者通过楼板连接形成整体，在地震作用下，框架梁端、核心筒连梁等部位可产生塑性铰耗能^[1]。巨型结构通常由巨型框架或巨型桁架等构成主结构，承载主要竖向与水平荷载，传力路径简洁高效，通过巨型构件的合理布置及次结构协同，可在地震中耗散能量。支撑筒体系，利用筒体周边布置的支撑来增强结构抗侧刚度，

地震力经支撑传递至基础，支撑的屈曲或屈服能有效耗能。在超高层项目中，基于这些结构体系的特点，抗震概念设计注重规则性、均匀性等原则，以提升结构整体抗震性能，确保在地震灾害下结构安全可靠。

（二）结构性能目标的多维度分析

在高层建筑结构抗震设计中，结构性能目标具有多维度特性。从安全储备系数来看，它反映结构抵御地震作用的冗余能力，较高的安全储备系数意味着结构在强震下有更大几率保持稳定，但可能会增加建设成本。损伤控制指标关乎结构在不同地震水准下的损伤程度，确保建筑功能的正常发挥。比如轻微损伤下结构仍能正常使用，中度损伤时经过修复可继续使用。基于地震

重现期的分水准设计标准则进一步细化了性能目标，不同重现期对应不同地震水准，如小震、中震、大震，根据建筑功能需求匹配相应设计标准。例如，医院、学校等重要建筑对地震下的功能延续要求高，应采用更严格性能标准^[2]。通过多维度分析，能更全面、精准地确定结构性能目标，实现结构选型与性能的合理匹配。

二、不规则结构抗震分析关键技术

（一）不规则结构分类及工程影响

不规则结构在高层建筑中较为常见，对其进行准确分类并明晰工程影响至关重要。不规则结构主要包括平面不规则与立面不规则两类。平面不规则如扭转不规则，当楼层最大弹性水平位移（或层间位移）大于该楼层两端弹性水平位移（或层间位移）平均值的1.2倍时，即判定为扭转不规则，这会导致结构在地震作用下扭转效应显著增大，增加结构破坏风险^[3]。立面不规则中的刚度突变，若某层侧向刚度小于相邻上一层的70%，或小于其上相邻三层侧向刚度平均值的80%，便属于刚度突变，这将使该楼层成为薄弱层，地震时易出现较大变形甚至破坏。通过某超限高层案例可发现，不规则度的增加会导致基底剪力增大，进一步影响结构的抗震性能与安全性，在设计时需针对这些不规则特征采取相应加强措施。

（二）非对称结构动力响应分析方法

非对称结构动力响应分析是不规则结构抗震分析的关键环节。在高层建筑结构中，非对称结构因质量与刚度分布不均，地震作用下会产生复杂的扭转效应。融合 BIM 参数化建模与非线性时程分析技术，能精准模拟此类结构的动力响应。BIM 参数化建模可快速构建复杂非对称结构模型，详细呈现结构几何与物理特性，为后续分析提供精确基础。非线性时程分析则考虑材料非线性与结构几何非线性，结合地震波输入，动态模拟结构在地震过程中的响应。同时，考虑 P- Δ 效应的三维弹塑性分析流程，能进一步精确模拟竖向荷载与水平位移相互作用对结构响应的影响。通过这一系列技术手段，可全面、准确分析非对称结构动力响应，为高层建筑结构抗震设计提供关键依据^[4]。

三、结构优化与经济效益协同机制

（一）多目标优化设计方法

1. 基于遗传算法的构件尺寸优化

在高层建筑结构抗震设计中，基于遗传算法的构件尺寸优化是实现结构优化与经济效益协同的关键环节。建立包含材料用量、层间位移角、建造成本的多目标函数后，遗传算法通过模拟自然选择和遗传机制，对构件尺寸进行搜索与优化。它将构件尺寸作为基因，种群为不同尺寸组合，经选择、交叉和变异操作，使种群不断进化，逐步趋近最优解。在进化过程中，算法权衡材料用量、层间位移角和建造成本，找到满足抗震性能要求且经济效益最佳的构件尺寸组合，从而实现500米级超高层结构体系的优化，在保证结构安全可靠的同时，降低成本、提高经济效益^[5]。

2. 抗震性能与经济性关联模型

在高层建筑结构抗震设计中，抗震性能与经济性关联模型的构建至关重要。通过提出地震损失期望值与结构刚度参数的数学表达，可精准量化两者之间的关系。地震损失期望值涵盖因地震导致的结构损伤修复、人员伤亡等一系列损失，而结构刚度参数直接影响结构的抗震能力。在此基础上，进一步构建投资 - 效益平衡曲线，该曲线以结构投资为横坐标，以预期的效益（如减少的地震损失等）为纵坐标，直观展示不同结构设计方案下投资与效益的平衡状态，为设计人员提供清晰的决策依据，助力实现结构优化与经济效益的协同，有效兼顾高层建筑的抗震性能与经济性^[6]。

（二）全生命周期成本评估体系

1. 初始建造成本与维护成本耦合分析

在高层建筑结构抗震设计中，初始建造成本与维护成本的耦合分析至关重要。初始建造成本涵盖建筑材料、施工工艺等方面，不同的结构选型和抗震设计标准会使初始成本产生较大差异。而维护成本则与建筑在使用过程中的老化、地震损伤修复等相关。这两者相互影响，例如，提高初始建造成本采用更优质材料和先进结构体系，虽可能增加前期投入，但可降低后期维护成本^[7]。通过建立含抗震加固费用的动态成本模型，能够有效分析这种耦合关系。对比不同设防标准下40年运营成本，可知过高的设防标准虽提升抗震性能，却大幅增加初始成本，若后期维护需求少，总成本或许可接受；反之，过低设防标准虽初始成本低，但地震风险下维护成本可能剧增，通过综合考量两者耦合，实现结构优化与经济效益协同。

2. 社会经济效益量化评估

在高层建筑结构抗震设计中，社会经济效益量化评估至关重要。引入震后功能恢复时间指标，能有效反映建筑震后对社会正常运转的影响程度。通过构建包含 GDP 损失的社会成本计量体系，可精确衡量地震对区域经济的冲击^[8]。一方面，震后功能恢复时间越长，意味着该建筑相关的经济活动停滞越久，其带来的潜在经济损失就越大。另一方面，GDP 损失不仅涵盖直接的建筑损坏修复成本，还涉及因建筑无法正常使用导致的上下游产业经济活动受阻的损失。将这些因素纳入社会经济效益量化评估，能更全面、科学地考量高层建筑结构抗震设计方案，为实现结构优化与经济效益的协同提供精准的数据支持，助力做出兼顾抗震性能与经济合理性的最优决策。

四、工程实践与可持续发展策略

（一）典型工程案例分析

1. 某150米级超高层抗震优化实践

在某150米级超高层抗震优化实践中，首要工作是对结构体系进行严谨比选。经过多轮模拟分析与综合评估，从多种可选方案里确定出最适配该超高层的结构体系，为抗震性能奠定基础。随后，基于性能的构件优化方案得以展开，通过精确计算与优化设计，对各构件的尺寸、配筋等进行调整。在满足抗震性能的前提下，实现了钢材用量的有效降低，成功节约15%的钢材用量，

显著提升了经济性。这种实践既保证了超高层建筑在地震作用下的安全性与稳定性，又体现了可持续发展理念，为同类超高层建筑的抗震设计提供了宝贵经验与借鉴范例^[9]。

2. 不规则结构抗震性能提升对策

以某 L 形平面超高层这一不规则结构为例，为提升其抗震性能，采用 BRB 耗能装置。该装置对扭转效应有显著控制效果，在地震作用下，结构的扭转位移和扭转角明显减小，降低了扭转破坏的风险。BRB 耗能装置利用其良好的耗能特性，将地震输入能量转化为热能等其他形式能量耗散，从而有效保护主体结构。同时，从可持续发展角度，该装置可重复使用，在地震后若未损坏无需更换，减少资源浪费。这种应用在提升不规则结构抗震性能的同时，兼顾了可持续发展理念，为类似不规则高层建筑结构抗震设计提供了有效参考^[10]。

（二）绿色抗震技术集成应用

1. 可更换耗能构件技术

在高层建筑结构抗震设计的工程实践与可持续发展策略中，可更换耗能构件技术是绿色抗震技术集成应用的关键一环。研发的模块化金属阻尼器系统具有显著优势。该系统采用标准化设计与制造，可在工厂预制，现场快速组装，极大缩短施工周期。在地震发生时，模块化金属阻尼器能够率先耗散地震能量，有效保护主体结构安全。震后，若阻尼器出现损伤，因其模块化设计，可快速进行更换，实现震后快速修复，使建筑功能得以延续，避免因结构修复导致建筑长时间无法使用。从可持续发展角度看，此技术减少了建筑全生命周期内因地震破坏带来的资源浪费与环境影响，在提升建筑抗震性能的同时，兼顾了选型、性能与经济性的综合考量。

2. 基于碳足迹的抗震设计

在高层建筑结构抗震设计的工程实践中，建立结构碳排放量与抗震性能的关联模型并遵循低碳抗震设计原则意义重大。通过分析建筑材料生产、运输、施工及拆除阶段的碳排放数据，结合结构在不同地震作用下的响应，构建起能精准反映二者关系的模型。依据该模型，提出低碳抗震设计原则，优先选用低碳排放且抗震性能良好的建筑材料，如新型绿色钢材、再生混凝土等；优化结构体系，在满足抗震性能前提下，减少材料用量，降低碳排放；采用高效施工工艺，缩短施工周期，进一步削减碳足迹。如此，实现高层建筑结构抗震设计在选型、性能与经济性上的综合考量，达成可持续发展目标。

参考文献

- [1] 利明东. 某复杂高层建筑结构基于性能的抗震设计与分析 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
- [2] 刘中欢. 带弱连接楼盖的平面凹凸不规则高层建筑结构抗震性能研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [3] 朱潇. 某超限高层建筑结构抗震设计与性能分析 [D]. 湘潭大学, 2022.
- [4] 谢行思. 自复位阻尼耗能支撑—高层韧性钢结构抗震性能与设计方法 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [5] 俞锋. 裙房结构对高层建筑抗震性能的影响研究 [D]. 南华大学, 2023.
- [6] 高利亚, 叶秀斌. 高层建筑结构抗震设计优化措施 [J]. 砖瓦世界, 2023(23): 80-82.
- [7] 刘钊. 高层建筑结构抗震设计优化措施 [J]. 建筑与装饰, 2023(9): 34-36.
- [8] 朱兴永. 高层建筑结构抗震设计探究 [J]. 中国建筑金属结构, 2021(9): 74-75.
- [9] 徐志鹏. 高层建筑结构抗震设计研究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2021, 3(2): 52-54.
- [10] 马秀娟. 高层建筑结构抗震设计研究 [J]. 化肥设计, 2023, 61(2): 19-21.

（三）智能设计技术发展前瞻

1. 机器学习驱动的参数优化

在高层建筑结构抗震设计的工程实践中，应用深度神经网络预测结构响应以实现设计参数智能寻优，是极具发展潜力的方向。通过大量的结构数据训练深度神经网络，该网络能精准模拟结构在不同地震作用下的响应。基于此，可建立以选型、性能与经济性为目标的多目标优化模型。机器学习算法能够在复杂的参数空间中快速搜索，找到满足综合要求的最优设计参数组合。这不仅提升结构的抗震性能，还兼顾经济性，符合可持续发展策略。长远来看，随着数据的不断丰富和算法的持续优化，机器学习驱动的参数优化将在高层建筑结构抗震设计中发挥更大作用，助力实现更安全、经济且环保的建筑目标。

2. 数字孪生技术在抗震管理中的应用

在高层建筑抗震管理中，数字孪生技术正发挥着日益重要的作用。通过构建与实体建筑相对应的虚拟数字模型，数字孪生技术能够对高层建筑的结构性性能进行实时、精准模拟。它整合建筑的各类数据，如材料特性、结构应力分布等，在虚拟环境中预演不同地震场景下建筑的响应。借助这一技术，工程师可提前发现潜在的抗震薄弱环节，及时优化设计方案。在建筑运营阶段，数字孪生模型与实时监测系统相连，能根据传感器收集的数据动态更新，实时反映建筑结构状态，为维护决策提供依据，确保建筑在全生命周期内具备良好抗震性能，同时也为高层建筑抗震管理提供了一种可持续的、智能化的发展路径。

五、总结

高层建筑结构抗震设计需综合考量选型、性能与经济性。基于多目标优化的抗震设计理论框架，为设计提供了全面且科学的指引。而考虑全生命周期成本的设计评估体系，更使得经济性在设计过程中得以量化考量。数字孪生技术与低碳抗震材料的结合，不仅体现了技术与材料的创新融合，还指明了未来发展方向。跨学科研究，特别是结构工程与环境科学的交叉，有助于拓展抗震设计的视野，从更宏观角度综合提升高层建筑的抗震性能，兼顾环境效益。通过这些理论与技术的不断探索，在确保高层建筑结构安全的同时，实现选型的合理性、性能的可靠性与经济性的平衡，为城市建设提供稳固且可持续的建筑解决方案。

新时期工程造价争议的多元化解决机制与评审实践创新

赵玉玲

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110017

摘 要：新时期工程造价争议呈现新趋势与典型化类型，司法及行政调解在解决中存在困境。为此，应推行争议评审前置、构建行业调解协议司法确认机制，运用 BIM 技术固化证据等，还需开发智能评审算法模型、重构全过程造价管控体系、创新争议预防机制、完善证据采信规则与评审效力保障机制，打造政企协同平台与专家库管理系统，构建多元解决体系。

关 键 词：工程造价争议；多元化解决机制；评审实践改革

Diversified Resolution Mechanism and Innovative Review Practice for Engineering Cost Disputes in the New Era

Zhao Yuling

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： In the new era, engineering cost disputes are showing new trends and typical types, and there are difficulties in resolving them through judicial and administrative mediation. To this end, it is necessary to implement pre dispute review, establish a judicial confirmation mechanism for industry mediation agreements, and use BIM technology to solidify evidence. It is also necessary to develop intelligent review algorithm models, reconstruct the entire process cost control system, innovate dispute prevention mechanisms, improve evidence acceptance rules and review effectiveness guarantee mechanisms, create a government enterprise collaboration platform and expert database management system, and build a diversified resolution system.

Keywords： engineering cost disputes; diversified solution mechanism; review practice reform

引言

在建筑工程市场化改革与政策动态调整的背景下，工程造价争议呈现新态势，亟待有效解决机制。2019 年颁布的《建设工程造价鉴定规范》虽为争议解决提供一定依据，但司法途径仍面临诉讼周期长、专业性难题及鉴定公信力不足等困境，行政调解也存在权威性与专业性欠缺等问题。在此情形下，构建多元化解决机制意义重大，需结合争议评审前置、行业调解司法确认等制度设计，借助 BIM 技术、智能评审算法等创新应用，完善全过程造价管控与合同风险管理，强化证据采信与评审效力保障，以适应行业发展需求。

一、新时期工程造价争议的特征分析

（一）争议发生背景与趋势

在建筑工程市场化改革不断深化以及政策持续调整的大背景下，工程造价争议呈现出新的发生背景与趋势。一方面，工程量清单计价转型促使计价方式发生改变，从传统模式向更具市场化、精细化的方向发展。这一转型过程中，因新旧规则交替、理解差异等因素，易引发工程造价争议^[1]。另一方面，EPC 模式的广泛推广带来了工程管理模式的革新。EPC 模式下，总承包商负责设计、采购、施工等全过程，这种高度集成的模式虽然提高了效率，但也因责任界定模糊、各阶段衔接复杂等原因，使得争议发生的可能性增加。并且，随着新型业态不断涌现，工程造价争议不再是孤立的个体事件，而是呈现出规模化的趋势。多个项

目在类似的计价转型与模式推广过程中，可能出现相似的争议问题，形成一定规模，亟待构建更为有效的解决机制。

（二）争议类型典型化归纳

在新时期，工程造价争议的类型呈现典型化特点。计价依据冲突是常见类型，由于不同地区、不同时期计价规范存在差异，对同一工程的计价方式、取费标准等理解不同，易引发争议^[2]。变更索赔认定方面，工程实施中变更不可避免，对于变更是否合理、索赔的依据与金额计算，承包双方往往各执一词。材料价格波动也易致争议，市场材料价格受多种因素影响不断变化，合同中若对材料价格调整约定不明，就会在结算时产生分歧。结算审核分歧亦较为突出，审核方与被审核方因立场不同，在工程量计算、计价规则应用等方面存在看法差异，从而引发争议。

二、传统争议解决机制的局限性

（一）司法途径的实践困境

在新时期工程造价争议解决中，司法途径面临诸多实践困境。其一，诉讼周期漫长，工程造价争议往往涉及复杂的工程资料、合同条款及专业技术问题，需耗费大量时间梳理证据、进行鉴定等流程，导致案件久拖不决，当事人维权成本高企。其二，该领域专业性极强，法官通常并非工程造价专业出身，对于复杂的造价计算、定额套用等专业问题理解存在一定难度，影响公正高效裁判。其三，造价鉴定公信力不足，尽管《建设工程造价鉴定规范》已实施，但仍存在质效瓶颈^[3]。鉴定机构水平参差不齐，鉴定过程可能受利益因素干扰，导致鉴定结果争议较大，难以让双方信服，进而影响司法裁判的权威性与公正性。

（二）行政调解机制的效能边界

行政调解机制虽在工程造价争议解决中发挥一定作用，但存在效能边界。行政主管部门调解权威性不足，相较于司法裁判或仲裁，其调解结果对当事人的约束力较弱，若一方不履行调解协议，缺乏强有力的强制执行力保障。而且调解协议法律效力有限，仅具有合同性质，在一方反悔时，另一方往往需通过诉讼重新确定权利义务关系，耗时费力。此外，专业人员配备短缺也限制了行政调解的效能。工程造价争议具有专业性和复杂性，需既懂法律又熟悉造价业务的专业人员，但现实中这类专业人才匮乏，导致调解过程可能难以准确把握争议焦点，影响调解质量与效率^[4]。

三、多元化争议解决机制构建

（一）法律政策维度创新

1. 争议评审前置制度设计

争议评审前置制度设计旨在将争议评审环节提前，改变传统事后解决争议的模式。研究施工合同争议评审条款的标准化嵌入，是实现这一制度的关键一步。通过制定标准化条款，明确评审的流程、人员组成、职责等，使得争议评审在合同签订时就被纳入框架，增强其规范性与可操作性。论证全过程造价咨询介入的契约效力保障机制，能进一步巩固争议评审前置的基础。全过程造价咨询能实时把控工程造价，为争议评审提供准确数据与专业分析。当造价咨询以契约形式介入，其效力得到保障，可为争议评审提供有力支撑，促使评审结果更具科学性、公正性，从而高效解决工程造价争议^[5]。

2. 行业调解法律效力提升

为提升行业调解的法律效力，应构建造价协会主导的行业调解协议司法确认机制。司法确认能赋予调解协议强制执行力，使当事人的合法权益更有保障，避免调解协议沦为一张空文。当造价争议经行业调解达成协议后，可通过特定程序由法院进行司法确认，确保协议在法律层面的有效性与可执行性。同时，探讨调解员资质认证与责任保险制度^[6]。资质认证可保证调解员具备专业的工程造价知识和调解技能，提升调解的专业性与权威性。责任保险制度则为调解员在履职过程中可能出现的失误或不当行为

提供风险保障，减轻调解员的后顾之忧，促使其更加公正、积极开展调解工作，从整体上提升行业调解在工程造价争议解决中的效力与公信力。

（二）技术应用维度突破

1. BIM技术证据固化应用

在新时期工程造价争议解决中，BIM技术证据固化应用发挥着重要作用。开发基于BIM模型的争议事项三维可视化追溯系统，能将工程项目以三维立体形式呈现，直观展示工程各部位的具体情况。通过该系统，可精准定位争议点，追溯施工过程中的各项细节，为争议解决提供清晰直观的依据。同时，建立施工过程数据区块链存证体系，利用区块链不可篡改、可追溯等特性，将施工中的各类数据，如材料用量、设备使用时间等进行有效存储。这些数据作为重要证据，具有高度的真实性与可靠性。二者结合，实现了BIM技术在证据固化方面的应用突破，为工程造价争议解决提供坚实的数据与可视化支撑^[7]。

2. 智能评审算法模型开发

在新时期工程造价争议的多元化解决机制构建中，智能评审算法模型开发意义重大。通过研究机器学习在定额套用合规性审查、变更索赔关联性分析中的算法逻辑与应用场景，能有效提升评审效率与准确性。对于定额套用合规性审查，借助机器学习算法，可依据历史数据与现行规范，构建智能审查模型，快速判断定额套用是否正确^[8]。在变更索赔关联性分析方面，利用算法挖掘变更事项与索赔内容之间的潜在联系，确定其关联性程度，为争议解决提供有力数据支撑。这种智能评审算法模型开发，以机器学习为核心技术，突破传统评审局限，从技术应用维度为工程造价争议多元化解决机制注入新活力，推动评审实践创新。

四、评审实践创新路径

（一）争议预防机制创新

1. 全过程造价管控体系重构

在全过程造价管控体系重构方面，需建立设计阶段造价预控指标、施工阶段动态调整模型、结算阶段争议预警系统的三维管控矩阵^[9]。在设计阶段，通过深入分析类似项目数据、结合市场价格与技术标准，制定科学合理的造价预控指标，为项目成本设定初步框架。施工阶段，构建动态调整模型，实时监控工程进度、材料价格波动等因素，及时调整造价，保证成本始终处于可控范围。结算阶段，建立争议预警系统，梳理常见争议点，利用大数据分析潜在争议风险，提前采取应对措施，降低争议发生概率，从整体上优化全过程造价管控体系，有效预防工程造价争议，提升评审实践效果。

2. 合同风险管理范式转型

在新时期工程造价争议预防机制创新的合同风险管理范式转型中，研发基于风险分配矩阵的合同条款优化工具是关键举措。通过该工具，能够科学合理地合同条款进行优化，精准识别不同风险，并依据风险分配矩阵将各类风险在合同双方间恰当分配，从源头上减少因风险分配不明引发的争议。同时，制定价格

波动调价公式标准化应用指南也十分重要。由于价格波动常是造价争议的导火索，标准化应用指南能规范调价公式的使用，明确适用条件、计算方法等关键要素，使价格调整过程更加透明、合理，降低因调价公式不清晰导致的争议概率^[10]。两者协同作用，实现合同风险管理范式从传统粗放型向现代精细化转变，有效预防工程造价争议。

（二）评审方法创新

1. 证据采信规则完善

在工程造价争议评审实践中，证据采信规则的完善至关重要。对于现场签证影像，应明确其需具备清晰拍摄时间、地点、关键内容等要素，才能作为有效证据，确保影像真实反映签证情况。材料进场记录交叉比对应，不仅要核对记录之间的一致性，还需规定不同记录来源间差异的合理范围，在差异超出范围时需补充额外证明材料。隐蔽工程逆向推演所获证据，需结合工程前期规划、施工日志等多方面资料综合判断其可靠性，形成完整证据链。同时，应建立动态证据更新机制，随着争议评审推进，及时评估新出现证据的采信度，确保评审结果基于全面、准确的证据，提高争议解决的公正性与合理性。

2. 评审效力保障机制

评审效力保障机制可从两方面着手。探索评审结论分级效力认定制度，依据争议的复杂程度、涉及金额大小等因素，对评审结论进行分级。对于简单且金额较小的工程造价争议，其评审结论效力可快速确定并执行；复杂重大争议的评审结论，效力认定则需更严谨程序，确保其权威性与公正性。同时，建立评审专家动态考核与错案责任追溯体系，对评审专家的业务能力、职业道德等进行动态考核，促使专家不断提升评审水平。若出现错案，严格追溯相关专家责任，强化专家责任意识，从人员层面保障评审效力，让评审结果在工程造价争议解决中更具公信力与执行力。

（三）协同治理机制创新

1. 政企协同一体化平台

政企协同一体化平台通过整合政府与企业资源，实现信息的高效流通与共享。在工程造价争议解决方面，平台能提供统一的

政策咨询窗口，让企业及时了解最新政策法规，避免因政策理解偏差引发争议。同时，利用大数据技术对项目数据进行分析，实现争议预警，提前发现潜在的造价争议风险点。平台还设置案例共享板块，政府和企业可以上传、浏览各类工程造价争议解决案例，从中汲取经验教训，提升解决争议的能力。这种一体化平台打破了政企之间的信息壁垒，加强了双方的沟通协作，促进工程造价争议更高效、更公平地解决，有力推动评审实践创新。

2. 专家资源共享机制

建立全国造价争议评审专家库动态管理系统，能打破地域限制，实现专家资源的广泛整合与高效利用。一方面，系统可实时更新专家信息，包括专业领域、项目经验、评审成果等，方便各方精准筛选合适专家。同时，对专家的评审表现进行动态评估，确保专家队伍的高质量。另一方面，开发远程异步评审与在线会议的技术支持模块，使不同地区的专家能不受时空约束，随时开展评审工作。通过线上平台，专家们可异步提交评审意见，再进行在线会议，提高评审效率，降低沟通成本，促进专家间的知识共享与经验交流，充分发挥专家资源在工程造价争议评审中的协同效应，推动评审实践的创新发展。

五、总结

在新时期，工程造价争议的妥善解决至关重要。多元化解决机制展现出核心创新价值，打破了传统单一方式的局限，为争议双方提供更多选择，提升了纠纷解决的灵活性与公正性。评审实践改革从理论层面看，对提升工程纠纷化解效率、降低社会交易成本意义重大，优化了评审流程，减少不必要的资源消耗。智能合约、元宇宙技术在争议预防领域的应用前景值得期待，智能合约的自动执行与透明性，能有效规避人为争议，元宇宙技术则可通过虚拟模拟提前发现潜在问题。这些机制、改革与技术的融合，将共同构建更完善的工程造价争议解决体系，推动行业健康发展，适应新时期复杂多变的市场环境。

参考文献

- [1] 马钰. 医疗纠纷多元化解决机制研究 [D]. 华北电力大学 (保定), 2022.
- [2] 黄昭作. 我国税收纠纷多元化解决机制完善研究 [D]. 广西师范大学, 2021.
- [3] 张逸. 物业服务合同纠纷的多元化解决机制研究——以宁夏 A 市为例 [D]. 北方民族大学, 2021.
- [4] 许家凯. PPP 协议争议解决机制研究 [D]. 哈尔滨商业大学, 2021.
- [5] 杨佳慧. PPP 协议争议解决机制研究 [D]. 河北经贸大学, 2022.
- [6] 罕佐热·阿卜迪艾尼. 民事纠纷多元化解决机制的现状与完善路径 [J]. 法制博览, 2023(11): 117-119.
- [7] 田丰. 深化医疗纠纷多元化解决机制研究——以山西省为例 [J]. 医学与哲学, 2021, 42(17): 58-62.
- [8] 黄海涛, 黄文巧. 关于工程造价结算评审争议问题的思考 [J]. 工程造价管理, 2021(4): 54-59.
- [9] 司海. 建立工程造价鉴定争议解决机制的必要性 [J]. 工程造价管理, 2023(6): 81-85.
- [10] 郑国志. 多元化解决企业劳动争议 [J]. 人力资源, 2021(20): 95-97.

基于 BIM 的钢筋精细化下料优化研究

陈丹

重庆工贸职业技术学院建筑工程学院, 重庆 408000

DOI:10.61369/ME.2025110020

摘 要： 本文就钢筋工程的质量、成本控制问题展开探讨，在 BIM 精细化下料的基础上，构建了一整套模型信息集成 – 智能算法优化 – 结果应用的技术方案，同时提出针对质量、成本、组织标准 3 个方面管控的三维控制策略，研究表明，该管控体系能有效提高材料利用率、保障工程质量并实现动态成本控制，为建筑业的精益化管理提供了可行的路径。

关 键 词： BIM 技术；钢筋质量；精细化管理；下料优化；成本控制

Research on the Optimization of Precision Reinforcement Bar Cutting Based on BIM

Chen Dan

School of Architectural Engineering, Chongqing Industry & Trade Polytechnic College, Chongqing 408000

Abstract： This paper discusses the issues of quality and cost control in reinforcement engineering. Based on the precision cutting of reinforcement bars using BIM (Building Information Modeling), a comprehensive technical solution is constructed, integrating model information, optimizing through intelligent algorithms, and applying the results. Additionally, a three-dimensional control strategy is proposed for managing quality, cost, and organizational standards. The research indicates that this management and control system can effectively enhance material utilization, ensure project quality, and achieve dynamic cost control, providing a feasible path for lean management in the construction industry.

Keywords： BIM technology; reinforcement bar quality; refined management; cutting optimization; cost control

引言

钢筋是建筑工程中重要的材料之一，钢筋下料质量关系到项目的质量和进度。传统的钢筋下料主要依赖人工，依据二维图纸和经验进行，该模式存在效率低下、误差率高、协同性差等问题，具体表现为：信息传递易失真、材料损耗大、协同困难。面对这一问题，在建筑信息化和工业化的背景下，使用新技术对钢筋工程进行精细化管理已成为一种必然趋势，而建筑信息模型恰恰是最有效的方案之一。本文基于建筑信息模型（BIM），针对钢筋下料环节的现存问题，系统构建了一套优化方法与管理策略，旨在提升下料过程的精细化水平，从而提高项目整体效益提供理论依据与实践支持。

一、基于 BIM 的钢筋精细化下料理论基础

基于 BIM 的钢筋精细化下料是建筑工程领域实现资源节约与效率提升的关键技术路径，把 BIM 技术嵌入到钢筋工程的下料环节中去，借助于信息技术手段，实现由原来经验型的粗放管理向精细化的数据管理转变。传统的钢筋下料方法都是根据二维图来手工识读并计算下料长度，容易出现尺寸计算出错、数量统计出错、形状优化失准等这样的一些问题，进而造成材料浪费、加工成本高企、工程质量隐患等问题。BIM 技术所具有的三维可

视化、信息集成化、参数化驱动特性，为解决这些问题提供了良好的条件，借助 BIM 软件能够建立完整的几何尺寸、空间定位、材质属性和力学性能等钢筋的数字化模型，并将其作为唯一可信的数据源，为实现精准工程量统计、虚拟碰撞检查、深化设计优化提供可能，从源头杜绝由于设计冲突或者信息不全造成的返工和浪费；在此基础上为后续的优化算法提供依据，在基于 BIM 获取准确的钢筋信息后，运用数学优化算法来实现定尺钢筋的智能套裁，旨在实现材料利用率的最大化，并基于精确数据进行优化决策，使下料过程从被动执行变成主动优化，显著超越了传统依

课题：重庆工贸职业技术学院 2024 年度校级科研项目：精细化管理理念下钢筋质量与成本控制研究，编号：ZR202439

作者简介：陈丹（1989-），女，重庆涪陵人，学士，讲师，研究方向：建筑工程造价、建筑工程管理及建筑工程成本控制。

赖人工经验的下料模式。所以基于 BIM 精细化下料实际上构建的是一个“模型驱动数据、数据支撑决策、决策优化结果”的技术体系，它能提升单一下料环节的精确度和效率，又能通过钢筋精细化管理软件把设计、施工融为一体，确保质量与造价的相辅相成，并且可为钢筋工程全局精益化管理提供坚实的理论依据。

二、基于 BIM 的钢筋精细化下料优化方法

（一）钢筋模型构建与信息集成

钢筋模型构建与信息集成是基于 BIM 的钢筋精细化下料优化的首要与基础环节，钢筋模型的质量将直接影响后续所有优化工作的可能性及有效性，钢筋模型构建要完成的目标就是把具有几何可视化和完整的工程信息的数字化钢筋产品模型建立起来。其中，在模型构建阶段中需采用 Revit、Tekla Structures 等专业的 BIM 建模软件，根据结构设计图纸做高度精细化的三维实体建模，不能仅仅满足于用三维来表示钢筋，而应该采用参数驱动的方法来把钢筋的直径、等级、弯钩角度、保护层厚度等均变为可驱动的参数，这样才能达到模型灵活、准确的目的，并能随着后续的设计变更联动更新^[1]。更重要的是，在信息集成过程中还应该把钢筋的非几何信息深深植入到模型图元上，包括所使用的材料的生产批次、力学性能、加工工艺的要求、安装顺序、造价等数据，从而形成完整的数字化信息链。为了实现以上集成目的，常常需要借助于 BIM 软件的自定义项目参数或者关联外部数据库的方式，建立钢筋的信息结构化数据库，该模型作为唯一可信的数据源，为后续的自动化工程量统计、碰撞检测以及优化算法提供精准的输入数据。这样既解决了钢筋模型构建和信息集成的问题，也解决了由于传统的信息孤岛问题、图样错读造成的建模数据有误以及人工计算存在的误差、计算精度低等问题；实现了由“经验下料”转变为“数据驱动下料”，完成了钢筋材料的精准化控制和全过程的精细化管理的前提条件。

（二）钢筋下料优化算法与流程

钢筋下料优化算法与流程是实现材料精确利用、控制工程造价的关键。该过程起始于从已构建的精细化 BIM 钢筋模型中自动提取所有钢筋的几何数据，包括定尺长度、形状参数与数量，形成初始下料清单。传统的经验式下料采用人工的方式排布钢筋，在整盘钢材上只是单纯的排布，不能顾全大局，使得大量的废料产生。为突破此局限，需引入数学优化算法，线性规划、遗传算法都是有效的解决方法。对于上述问题求解的目标就是确定一个目标函数，如：目标函数是使总废料量最小或使原材料总长度最短，然后带入具体约束条件，满足一定规格的定尺钢筋的库存，钢筋搭接长度的要求，以及加工设备参数等，通过计算机的高速迭代计算，能够快速生成全局最优或近似最优的钢筋切割方案，该方案所能达到的优化效果，是传统人工经验排布所无法比拟的。最后要将优化的结果无缝对接到后面的工艺，其首要输出是自动生成的、具备可执行性的精细化下料单，该单据清晰列出每根原料钢筋的切割点与对应的构件编号；随后，通过与现代数控加工设备联动，可将优化方案转换为 G 代码来驱动钢筋弯箍

机、剪切线等设备自动下料^[5]。“BIM 模型数据提取智能算法优化结果自动输出”这一连贯的过程，构成了数字模型到物理加工的闭环智能决策系统，大大提高了材料利用率，并且通过自动化代替了人工操作，从而减少了中间环节，在本质上大大提升了钢筋下料的总效率及经济效益，数据驱动决策为工程施工精细化管理提供了强大支持。

（三）钢筋下料优化结果分析与应用

钢筋下料优化结果的分析与应用是检验优化方案实效性并实现其工程价值的关键步骤，也是将优化方案应用于工程实践的关键环节，优化计算得到的结果并不是输出的终结，还需要对其进行系统的可视化分析及量化分析后才能判断出方案的优劣。首先，应利用 BIM 平台的可视化功能，对优化后的下料方案进行三维模拟，直观检查钢筋切割组合的合理性以及是否存在异常余料。分析优化结果时要注意量化评价，先定量求出该次优化前后相关关键指标的变化量（比如综合材料利用率，某些规格钢筋的损耗率、合理论节约量），然后定量比较其增减数量，对优化算法进行判定^[2]。最后在施工过程中所涉及的具体应用还有优化下料清单是钢筋准确采购与配送的基础资料；数控加工代码能够直接控制数控设备，实现高精度、高效率的下料加工，从源头消除人为因素产生的误差；优化结果还包含了每根钢筋的信息唯一标识，可关联物料管理系统，通过二维码标签等方式来实现钢筋从下料到加工、运输、安装全过程的精准追溯、动态管理。基于优化结果的精细化管理实现了从数字方案到实体动作的过程闭环，大大提高了材料的利用率；并通过过程的透明化与可追溯性，实现了事中的有效控制，进一步提高施工过程的质量与成本控制力度，进一步突出 BIM 技术下料优化在工程上的意义所在。

三、精细化管理理念下钢筋质量与成本控制策略

（一）全过程质量保障策略

全过程质量保障策略是以 BIM 为手段形成的全过程、全方位的质量闭环保障模式，以设计深化设计及碰撞检查为基础，在实现 BIM 钢筋模型下料的基础上，自动检出钢筋与预应力管道、预埋件等组合节点的空间冲突点，在加工下料前彻底排除由于设计原因造成质量隐患以及现场返工现象的发生；其次利用优化下料数据和物联网技术实现对每条成型钢筋赋予一个包含规格、尺寸、安装位置等内容的身份识别码，并将该编码输入于施工人员手中所持有的移动设备，使施工人员能够随时将钢筋的三维模型、安装图纸等调入施工现场，执行“按模施工”的过程质量管控，极大避免了误用、错配等传统管理中的常见问题。事后追溯与改进是质量闭环的重要组成部分。所有关键质量信息，如钢筋的生产批次、加工时间、检验报告及安装验收记录，均被动态关联至 BIM 模型构件，形成完整的数字化质量档案。一方面可以方便问题的快速溯源，便于责任的确定；另一方面则是为之后项目的质量管理提供大量有价值的资源，促进项目管理从被动式改进到主动式的不断提升的过程转变。通过以 BIM 为载体全过程控制的管理方式，把质量控制从传统的末端检验转变为涵盖设计、加

工、施工各阶段的主动预防性管理，大大提高了钢筋工程质量可靠性和一致性。

（二）动态成本控制策略

动态成本控制策略是指借助 BIM 技术使成本管理从事后的静态核算转变为事前的预测以及事中的动态调整。第一步是以精准成本测算为基础，通过将完整的钢筋信息融入 BIM 模型之中，并且能够自动迅速准确地从模型中获取工程量，以解决传统的手工算量耗时费力、容易出错的问题；在编制预算、拟定采购计划方面提供可靠的依据，并对成本上限进行有效的确定。第二步则是把成本控制的关键步骤放在下料优化当中，通过运用智能算法实现对钢筋切割方案的全局优化，直接实现原材料损耗最低，真正意义上做到从成本的主要构成要素——材料上面进行源头性的节流。第三步是在项目实施阶段将动态控制体现在将 BIM 模型与施工进度计划相结合，根据施工进度表精准地进行钢筋用量的需求预测以及按需分批供货，很大程度减少现场库存积压，加快资金回笼速度，减少仓储及管理费用；另外当有设计变更时能及时在模型中进行修改，在模型中直接实时反应到变更后的工程量及变更增加的成本上来，使管理人员能及时掌握变更后引起的成本增加情况，从而作出正确的决断，避免造成不必要的成本上涨，最后所有过程数据（包括优化节约量、实际采购量、库存量变化）都留在 BIM 平台内，并结合以上的过程数据，进行动态成本的核算、比对、分析，生成多维度的成本分析报告。此举不仅实现了成本过程的透明化，更重要的是为成本绩效评估和后续项目的成本预测提供了数据驱动的决策依据；并且形成从项目开始到结束贯穿整个项目生命周期的成本控制闭环，可以实现项目的反馈与学习^[4]。

（三）组织与标准保障策略

组织和标准保障是 BIM 钢筋精细化下料优化技术落地生效

的根本依托。一是组织上保障，要突出再造 workflow 和变革协同模式，不能按照设计—预算—施工—加工等先后顺序做分开的串行工作方式，而应该以 BIM 模型为唯一数据来源，进而构建以 BIM 模型为基础的协同 workflow，使设计方提供模型精度达钢筋深化精度，施工方、加工方按模型进行下料优化及生产，以实现各阶段、各专业之间的高效协同，防止信息失真导致的返工；二是标准上保证，保证数据的流动和互操作性，需要建设涵盖项目级 BIM 建模标准、钢筋建模细节要求、钢筋建模命名规则及信息属性、统一的钢筋优化下料算法参数库与结果交付标准、全过程编码、加工工艺及现场安装标准化管理规范等方面的标准化体系；三是所有技术流程与标准最终依赖于人员的执行，因此必须实施系统的能力建设策略，分别针对项目管理人员、技术人员、作业人员开展多级分类培训，提高项目管理人员及技术作业人员数据协同工作及精细化管理的能力^[5]。只有组织、标准和人，三者一起，不断演化才能为 BIM 钢筋精细化下料优化及带来的质量效益、成本效益提供实现的平台环境，确保先进技术能够转化为可持续的竞争优势。

四、结语

本文基于 BIM 技术对钢筋精细化下料优化的方法开展了系统的探究，建立起基于 BIM 模型构建、算法优化及结果应用的完整的技术体系，并且借助于数据驱动实现钢筋材料利用效率的提高以及实现施工现场的精准化管控；通过对全过程质量把控和动态成本管控，对钢筋工程的精细化管理提出了全新的观点以及可供借鉴的实施路径，未来，可以将智能算法进一步优化，并结合人工智能等新兴技术的发展，钢筋工程施工管理向着更加智能化、精细化的方向进行发展，为推动建筑业的高质量发展提供参考。

参考文献

- [1] 代启胜, 王同培. 桥梁工程中精细化 BIM 模型的钢筋优化管理 [J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(08): 158-161+167.
- [2] 戴伶. 钢筋工程造价管理中 BIM 技术的应用研究 [J]. 建筑机械化, 2023, 44(08): 109-111.
- [3] 秦艳萍, 林冠宏. BIM 技术在钢筋工程精细化管理中的应用 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(01): 130-132+136.
- [4] 陈凯, 伍昌, 邵志国, 等. 基于 BIM 技术的钢筋工程施工阶段精细化管理研究 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38(07): 81-84.
- [5] 孔泉, 刁伟, 闫磊. 基于 BIM 智能加工技术的钢筋精细化管理应用分析 [J]. 江西建材, 2022, (06): 238-239.

分析市政工程造价控制管理遇到难题及改进

连少杰

广东飞腾工程咨询有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110022

摘 要： 文章旨在系统探讨市政工程造价控制管理的核心原则、实践困境及改进路径。研究聚焦于全面管控、目标导向与动态调节、经济合理与效能优化、权责匹配等四项基本原则，分析了当前市政工程造价控制在前期规划、法规体系、市场竞争及方案变更等方面存在的主要难题，并针对性提出了从设计、招标、施工到竣工结算等全过程环节的具体管理优化措施，旨在为提升市政工程造价控制的系统性、规范性与实效性提供理论参照与实践指引。

关 键 词： 市政工程；造价控制管理；难题及改进

Analysis of the Difficulties Encountered in Cost Control and Management of Municipal Engineering Projects and Improvements

Lian Shaojie

Guangdong Feiteng Engineering Consulting Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article aims to systematically explore the core principles, practical challenges, and improvement paths of cost control management in municipal engineering projects. The study focuses on four fundamental principles: comprehensive control, goal-oriented and dynamic adjustment, economic rationality and efficiency optimization, and matching of rights and responsibilities. It analyzes the main challenges currently faced by municipal engineering cost control in areas such as preliminary planning, regulatory frameworks, market competition, and project changes. Additionally, it proposes specific management optimization measures for the entire process, from design, bidding, and construction to final settlement, with the goal of providing theoretical references and practical guidance for enhancing the systematic, standardized, and effective cost control of municipal engineering projects.

Keywords： municipal engineering; cost control management; challenges and improvements

引言

市政工程作为重要的公共服务基础设施，其造价控制水平直接关系到公共资金使用效益与工程质量的实现。在当前城市化进程加速、投资规模持续扩大的背景下，如何在保障工程质量与安全的前提下，提升工程造价管理的科学性与精细化水平，成为行业与社会关注的重要议题。鉴于此，系统梳理工程造价管理的基本原则，深入剖析实践中的关键问题，并构建具有可操作性的改进路径，对于促进市政工程健康有序发展、提升投资效益具有重要的理论意义与现实紧迫性。

一、市政工程造价控制管理原则

（一）实施全面管控的原则

全面管控原则构成了市政工程造价管理的根本基石，其关键在于构建“全过程联动与全员参与”的双重管理机制。全过程管控强调将造价控制延伸至项目的各个阶段，包括前期决策、方案设计、招标采购、现场施工、完工验收以及后续运营维护，从而突破以往“侧重施工阶段而忽视前期规划”的局限，从项目启动之初就防范成本超支的潜在风险。与此同时，全员管控突出造价管理不只是造价岗位人员的专属职责，而需整合项目管理人员、专业技术人员、一线施工团队及监理单位等各方力量，通过明晰

不同岗位在成本控制中的具体责任，推动形成跨部门、多层次协同的管理体系，共同提升造价管理的整体效能。

（二）以目标为导向与动态调节相结合的管理原则

在造价管理过程中，确立清晰的目标体系是确保成本有效管控的重要前提。这一原则要求所有管理工作应始终围绕预先制定的成本控制目标展开，其根本目的在于保证最终工程总成本与项目规划要求、功能定位及投资限额相互协调，从而防止发生实际支出大幅超出预算或功能标准被迫降低的情况。同时，面对市政工程工期较长、环境复杂、不确定因素较多的特点，必须贯彻动态调节的原则。由于施工期间可能面临材料市场价格变动、技术方案优化、现场条件变化等多种因素的影响，工程造价往往处于

动态变化之中。因此，管理措施需根据工程进展阶段、外部环境变化及时进行灵活调整，通过持续跟踪监测、阶段评估分析与快速响应修正，确保实际成本始终处于预设的目标范围之内，实现全过程的适应性与可控性^[1]。

（三）倡导经济合理与效能优化的理念

节约原则的核心内涵绝非单纯压缩成本，而是强调在保障工程实体质量与施工安全的基础上，追求各项资源的高效整合与合理利用。在具体实施层面，该原则要求通过系统规划施工组织设计、优化人员与物资的配置方案、细化材料使用与损耗管控等措施，有效降低人工、资金及物料等直接投入。另一方面，节约理念应与技术创新深度融合，借助现代化施工工艺、绿色环保型建筑材料以及信息化、智能化的管理工具，提升整体作业效率，缩短工程建设周期，从而在效率提升与周期优化中实现间接成本的节约。这种以技术与管理创新为支撑的节约路径，最终指向的是“提高工程质量”与“控制工程造价”相统一的综合效益目标。

（四）权责匹配与激励约束并重的原则

将责任与权利有机结合，是推动造价管理从制度设计走向有效执行的关键机制，其实质在于构建“权责对应、相互统一”的管理格局。该原则强调在明确各管理岗位及人员具体造价控制责任的同时，也必须同步授予其履行职责所必需的相应权限，确保责任人在清晰了解自身职责范围的基础上，能够运用所赋予的权力及时应对和解决施工中出现的各类造价相关问题。通过建立这种权利与责任相匹配的管理机制，不仅有助于激发各级管理人员主动控制成本的责任感与积极性，也从根本上避免了因权责不清导致的“管理缺位、责任虚化”现象。权责一致的管理结构显著增强了造价控制体系的运行效能与制度执行力，为项目成本目标的实现提供了可靠的组织保障^[2]。

二、市政工程造价控制管理遇到的难题

（一）项目前期规划与管理机制不完善

当前，部分建设单位在投资市政工程后，未能对项目资金的使用过程实施有效跟踪与精准控制，也未能对整体工程造价形成系统性的管理与约束。在项目启动前的规划与决策阶段，常常缺乏一套完整、适配的造价管控及监督体系，导致成本管理在源头即存在制度性缺失。部分建设单位往往将主要精力集中于工程建设的启动环节，却忽视了后续施工进度动态监控，尤其是对各项资金支出的明细流向缺乏持续、细致的监督管理。这种管理倾向反映出相关单位在观念上存在一定偏差，未能充分理解并重视项目前期系统性准备工作的关键意义，从而影响了造价管理的整体效果。

（二）工程造价管理相关法规体系尚不健全

现阶段，针对市政工程造价管理领域，尚未形成系统化、完善的法律法规框架，这一现状对工程项目的具体实施与成本控制带来了诸多不利影响。工程造价本身并非固定不变，而是会随着市场环境变化与经济形势波动而动态调整，若缺乏科学有效的管控机制与法规依据，极易导致项目资金安排失序，增加资金链断裂的风险，进而可能造成工程停滞或难以推进的局面。因此，在

实际开展市政工程造价控制工作的过程中，相关管理人员必须对项目投资预算执行情况实施持续跟踪与动态监控，确保各项支出合规、合理。同时，从制度层面来看，国家及地方政府也亟待进一步补充和完善工程造价管理相关的法律法规体系，为市政工程造价控制提供更坚实的制度保障与依据^[3]。

（三）行业内市场壁垒与竞争不足现象

当前我国部分市政工程质量存在参差不齐的状况，其主要原因可追溯至部分建设单位的整体能力不足，以及在项目实施过程中监管不到位所致。部分中标单位之所以能获得项目，往往是由于行业内部存在非市场竞争性因素，例如不透明的内部制度、缺乏公开性的招标流程及复杂的人际关系干预等。市政工程造价管理与控制工作中出现的诸多问题，很大程度上正是源于这类行业内部的非充分竞争乃至垄断现象。由于中标单位的获取并非完全基于其专业能力与成本控制实力，因而往往缺乏提升工程造价管理水平的动力与压力，导致在实际施工过程中未能形成系统、有效的成本约束与管理机制。

（四）随意变更已审批实施方案的现象突出

在市政工程项目正式施工前，建设单位需向相关主管部门提交一系列申报材料，其中尤为关键的是项目可行性研究报告。该报告需明确涵盖工程建设周期、计划投资总额、项目规模及主要技术指标等内容。只有在报告通过审查并获得批复后，项目方可进入具体实施阶段。依据规定，项目实施过程中应严格遵循已批复可行性研究报告中的各项要求，包括既定的技术方案、施工组织设计及对应的资金使用计划等关键内容。然而，实践中却存在不按批准方案执行、随意调整建设内容和资金安排的现象，这类变更若缺乏充分论证与合规审批，往往对工程造价控制造成直接冲击，导致投资偏离原定目标，增加项目管理的复杂性和不确定性。

三、改进市政工程造价控制管理的有效路径

（一）强化设计环节的成本约束机制

为提升造价管理的有效性，应首先在设计阶段引入竞争机制，推行全面设计招标制度。无论工程规模大小，均应通过公开、公平的招标方式，引导设计单位将技术先进性与经济合理性相结合。在此基础上，可对多个候选方案开展技术可行性、施工难度及造价估算等方面的综合比较，从而遴选出整体最优的设计方案。其次，需实施限额设计管理。设计工作必须严格遵循项目任务书的要求，并在批准的投资额度框架内进行。在确保工程基本使用功能实现的前提下，通过投资限额反向约束设计方案，推动设计优化，使最终方案在技术可行与经济可控之间取得最佳平衡。

此外，应建立健全设计监督与激励机制。通过制定明确的奖惩措施，对因设计不合理、不经济导致的成本浪费行为进行约束，同时对优秀设计方案给予相应奖励。只有完善设计阶段的管理与评价体系，才能有效提升设计成果的技术水准与经济性，从源头控制工程造价。

（二）优化招标采购环节的成本管理机制

招标采购是工程项目实施的初始环节，也是确定承包商及合

同造价的关键阶段，对整体成本控制具有基础性作用。为此，成本管控工作应从招标阶段系统展开，覆盖施工承包、材料设备采购等多个方面。在招标工作启动时，可提前公布工程最高限价或预算控制指标，这有助于减少后续履约过程中的造价争议，保障项目推进效率，为工程顺利实施创造条件。编制投标文件需建立在科学评估项目成本的基础上。投标人应结合劳动力市场价格、材料设备行情等市场信息，并依据企业自身消耗标准进行测算，从而确定既符合招标要求又具备竞争力的合理报价，这是成功中标的重要前提。此外，工程合同作为后续成本管控的根本依据，关系到工程款支付、结算办理、索赔处理以及进度、质量和费用控制等各个方面。因此在合同订立过程中，需审慎明确各方权责，尽可能减少合同歧义、变更及索赔风险，这对有效控制工程成本具有深远影响^[4]。

（三）强化施工实施环节的造价动态管控

施工阶段是市政工程从设计图纸转化为实体工程的关键过程，同时也是成本集中发生的主要环节。由于此阶段需投入大量机械、人力与技术资源，若要进行有效的造价控制，管理人员必须根据工程实际情况，构建系统化的成本管控机制。应依据项目整体建设目标，设定明确且可操作的工程造价控制指标，并在施工过程中持续对比实际支出与计划目标之间的差异。一旦发现偏差，需及时进行原因分析，并采取具有针对性的纠偏措施，以确保工程成本始终处于可控范围。此外，在工程正式开工前，应对各项施工方案与技术措施进行充分论证，结合现场条件优选经济合理、技术可行的实施方案，通过资源与资金的优化配置，实现工程造价的合理控制。同时，应进一步完善设计变更与现场签证的管理流程，要求建设单位严格执行既定的变更审批程序，并对变更涉及的工程量与造价变动进行专项评估与分析。通过规范变更管理，防止因随意变更导致成本无序增加，从而维护造价控制的严肃性与有效性。

（四）完善竣工结算阶段的造价审控机制

在竣工阶段，首要工作是全面核验已实施的工程内容是否符合合同约定，确认各项施工任务均按合同要求完成，以明确工程结算的具体范围。同时，需系统审查设计变更、工程洽商等文件的手续完备性与合理性，并对施工过程中产生的现场签证内容，就其必要性、合规性进行细致审核，确保所有变更依据充分、程序规范。其次，应以工程合同和招标文件为基础，结合竣工图纸、变更签证及相关技术资料，对工程量及对应造价进行逐项核对，审查其计算是否准确、计价是否符合规定。此外，还应对工程所用材料的价格、规格及 Usage 情况进行复核，确保结算内容的真实性与合理性。为避免结算审核过程中出现疏漏，应建立良好的沟通协调机制，处理好审核方与被审核方之间的关系，减少争议，保障结算审核工作的顺利开展与结果客观公正。严把竣工结算这一最终关口，对于实现工程造价全过程有效管理、控制不必要的费用支出，具有至关重要的收官意义^[5]。

四、结束语

综上所述，遵循全面管控、目标与动态结合、经济合理、权责匹配等原则是有效实施造价控制的基础；而当前在前期规划、法规建设、市场竞争与方案执行等方面存在的问题，深刻制约了成本管理效能的发挥。对此，文章从设计源头约束、招标过程规范、施工动态管控及竣工严格审核等关键环节提出了系统的改进措施。通过强化全过程的精细化管理和多主体的协同参与，方能构建起科学、高效且适应市场变化的造价控制体系。未来研究可进一步关注大数据、智能化技术在造价动态监控与风险预警中的应用，以及跨区域、跨类型市政工程的造价标准化与差异化管控策略，持续推动市政工程造价管理理论与实践的创新与发展。

参考文献

[1] 万绪茹. 市政工程造价控制管理遇到难题及改进 [J]. 现代工程项目管理, 2022, 1(3).
[2] 马璐. 市政工程造价控制管理问题及改进探析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(15): 4135.
[3] 莫楠楠. 市政工程造价管理中动态成本控制的应用研究 [J]. 工程建设与设计, 2025(2): 222-224.
[4] 王斌. 探究市政工程造价管理中工程造价控制的有效途径 [J]. 上海公路, 2025(1): 207-209.
[5] 牛洁, 王其林. 市政工程造价的动态管理与控制的探讨 [J]. 工程建设与设计, 2025(13): 250-252.

高速桥梁西锚碇施工安全风险防控体系构建与实践

谢帅豪

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025110029

摘 要 : 高速桥梁锚碇作为桥梁结构的核心承重构件, 其施工安全直接决定桥梁整体工程质量与运营安全, 其中西锚碇因常面临复杂地质条件、超大施工荷载及多工序交叉作业等挑战, 成为施工安全风险防控的关键节点。本文以高速桥梁西锚碇施工为研究对象, 基于风险防控理论与工程实践经验, 构建“风险识别—评估分级—防控实施—动态监控—应急保障”“五位一体”的安全风险防控体系。通过分析西锚碇施工各阶段核心风险源, 明确风险评估指标与分级标准, 针对性提出地质勘察优化、工序流程管控、专项技术保障等防控措施, 并结合现场实践验证体系的可行性。研究成果可为同类高速桥梁锚碇施工安全风险防控提供理论支撑与实践借鉴。

关 键 词 : 高速桥梁; 西锚碇; 施工安全; 风险防控体系

Construction and Practice of Safety Risk Prevention and Control System for West Anchor of High-Speed Bridges

Xie Shuaihao

Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : As the core load-bearing components of the bridge structure, the construction safety of high-speed bridge anchorages directly determines the overall engineering quality and operational safety of the bridge. Among them, the west anchorages often face challenges such as complex geological conditions, excessive construction loads, and multi-process cross-operations, making them a key node for construction safety risk prevention and control. This paper takes the construction of the west anchor of a high-speed bridge as the research object. Based on the theory of risk prevention and control and engineering practical experience, it constructs a "five-in-one" safety risk prevention and control system of "risk identification – assessment and classification – prevention and control implementation – dynamic monitoring – emergency support". By analyzing the core risk sources at each stage of the construction of the west anchor, the risk assessment indicators and classification standards were clarified. Targeted prevention and control measures such as geological exploration optimization, process flow control, and special technical support were proposed. The feasibility of the system was verified in combination with on-site practice. The research results can provide theoretical support and practical reference for the safety risk prevention and control of similar high-speed bridge anchor construction.

Keywords : high-speed bridge; west anchor; construction safety; risk prevention and control system

引言

随着我国高速公路网向复杂山区、跨江跨海区域延伸, 高速桥梁建设面临的技术难度与安全风险显著提升。锚碇作为悬索桥、斜拉桥等大跨度桥梁的“根基”, 承担着传递桥梁主缆拉力至地基的核心功能, 其施工质量与安全直接关系到桥梁的使用寿命与运营安全。西锚碇作为桥梁锚碇系统的重要组成部分, 受地形地貌、地质条件及施工组织等因素影响, 在基坑开挖、基础浇筑、锚体施工等关键工序中, 易出现边坡失稳、结构开裂、机械伤害等安全风险, 一旦发生事故, 将造成重大人员伤亡与经济损失。当前, 部分锚碇施工项目存在风险识别不全面、评估方法粗放、防控措施针对性不足等问题, 难以适应西锚碇复杂施工环境的安全管理需求^[1]。因此, 构建科学系统的西锚碇施工安全风险防控体系, 结合工程实践优化防控策略, 对提升高速桥梁施工安全管理水平具有重要现实意义。本文基于西锚碇施工的技术特点与风险特性, 从风险全流程管控角度构建防控体系, 并通过实践应用验证其有效性, 为同类工程提供参考。

一、高速桥梁西锚碇施工核心风险源识别

（一）施工前期地质勘察风险

地质条件是决定西锚碇施工方案与安全风险的核心因素，施工前期地质勘察不充分易导致后续施工风险失控。一方面，部分项目因勘察范围不足、钻孔密度不够，未能准确探明西锚碇区域的软土地层分布、岩溶发育情况及地下水赋存状态，导致施工方案与实际地质条件不符。例如，若未探明浅层软土分布，基坑开挖时易出现边坡坍塌；岩溶空洞未提前处理，将导致基础沉降不均。另一方面，勘察数据解读偏差也会引发风险，如对岩层风化程度判断失误，会导致支护结构选型不合理，降低基坑稳定性^[2]。

（二）基坑开挖与支护施工风险

基坑工程是西锚碇施工的首要关键工序，具有开挖深度大、作业空间有限、受环境影响显著等特点，风险集中且危害程度高。一是边坡失稳风险，西锚碇基坑开挖深度通常超过20米，若开挖速度过快、分层开挖厚度超标，或遭遇暴雨、地下水渗透等情况，易导致边坡土体抗剪强度降低，引发滑坡或坍塌事故。二是支护结构失效风险，常见的支护形式如排桩、地下连续墙、内支撑等，若施工质量不达标，如排桩混凝土强度不足、内支撑节点连接不牢固，或支护结构变形监测不及时，会导致支护体系失稳，进而引发基坑坍塌。三是地下水控制风险，若降水井布置不合理、降水深度不足，或帷幕注浆防渗效果不佳，地下水涌入基坑会导致土体软化，增加边坡失稳风险，同时影响后续基础施工^[3]。

（三）锚体混凝土施工风险

锚体作为西锚碇的核心受力构件，其混凝土施工质量直接决定锚碇的承载能力，施工过程中存在多重质量与安全风险。一是混凝土开裂风险，西锚碇锚体体积庞大，属于大体积混凝土结构，浇筑过程中水泥水化热释放集中，若温控措施不到位，会导致混凝土内外温差过大，产生温度应力，引发表面或深层裂缝，降低锚体结构强度。二是浇筑施工风险，锚体混凝土浇筑需分层进行，若分层厚度过大、振捣不密实，会导致混凝土内部出现蜂窝、麻面等缺陷；若浇筑间歇时间过长，会形成施工缝，影响结构整体性。三是钢筋施工风险，钢筋绑扎、焊接质量不达标，如钢筋间距偏差过大、焊接接头强度不足，会导致锚体受力不均，降低结构承载能力，埋下安全隐患^[4]。

（四）交叉作业与机械施工风险

西锚碇施工涉及土方开挖、钢筋加工、混凝土浇筑、设备安装等多工序交叉进行，同时大型施工机械如挖掘机、起重机、混凝土泵车等使用频繁，易引发安全事故。一是交叉作业碰撞风险，不同工序作业人员在同一空间作业，若作业面划分不清晰、协调不到位，易发生人员碰撞或机械误伤事故。例如，起重机吊装钢筋时，若下方有人员进行基坑清理作业，未设置警示区域，易导致坠落物伤人。二是机械操作风险，大型机械若未定期检修维护，存在制动失灵、液压系统故障等问题，或操作人员无证上岗、违规操作，易引发机械倾覆、碰撞等事故^[5]。

二、高速桥梁西锚碇施工安全风险防控体系构建

（一）风险识别模块：建立全流程识别机制

构建“前期勘察—施工准备—过程实施—竣工验收”全流程

风险识别机制，确保风险源无遗漏。施工前期，结合设计文件组织地质勘察专项小组，采用钻探、物探等多种勘察手段，全面探明西锚碇区域地质条件，编制详细勘察报告，重点标注软土、岩溶、地下水等风险点。施工准备阶段，组织技术人员、施工班组及监理单位开展风险识别研讨会，结合类似工程案例，梳理施工过程中各工序潜在风险源，形成《西锚碇施工风险识别清单》。施工过程中，建立“班组每日巡查—项目部每周排查—公司每月督查”的三级排查制度，实时跟踪风险变化，及时补充更新风险清单。竣工验收阶段，对施工过程中出现的风险事件进行复盘分析，总结风险识别经验，为后续工程提供数据支持。

（二）评估分级模块：构建多级评估指标体系

采用“定性+定量”相结合的方法，构建西锚碇施工风险评估指标体系，明确风险等级划分标准，为防控措施制定提供依据。评估指标体系涵盖地质条件、施工技术、设备管理、人员素质、环境因素5个一级指标，下设15个二级指标，如地质条件下设软土分布、岩溶发育、地下水水位3个二级指标；施工技术下设基坑支护质量、混凝土浇筑质量、工序衔接合理性3个二级指标。定性评估采用专家打分法，邀请桥梁施工、安全管理等领域专家对各指标风险程度打分；定量评估采用层次分析法确定各指标权重，结合模糊综合评价法计算风险综合评分。根据评分结果将风险划分为重大风险（评分 ≥ 80 分）、较大风险（60—79分）、一般风险（40—59分）、低风险（ < 40 分）四个等级，并针对不同风险等级制定差异化管控策略。

（三）防控实施模块：制定针对性防控措施

优化勘察方案，扩大勘察范围，增加钻孔密度，确保勘察数据准确性；建立勘察数据会审制度，组织设计、勘察、施工单位共同解读勘察报告，结合地质条件优化施工方案，如针对岩溶区域采用注浆填充处理，软土地层采用换填或加固处理。采用“分层开挖、分层支护”的施工原则，严格控制开挖厚度与速度，每层开挖深度不超过2米，开挖后及时进行支护施工；优化支护结构设计，根据地质条件选用合适的支护形式，如软土地层采用地下连续墙+内支撑支护体系，岩层区域采用排桩支护；加强地下水控制，采用“降水井+帷幕注浆”联合防渗方案，实时监测地下水位变化，确保基坑干燥。优化混凝土配合比，掺入粉煤灰、矿粉等掺合料减少水泥用量，降低水化热；采用“分层浇筑、分层振捣”施工工艺，每层浇筑厚度控制在50厘米以内，使用插入式振捣器确保振捣密实；建立温控监测体系，在混凝土内部与表面布置温度传感器，实时监测温度变化，当内外温差超过25℃时，采取覆盖保温、通水降温等措施。划分清晰的作业区域，设置明显的安全警示标志，明确各工序作业时间与空间，避免垂直交叉作业；建立机械管理制度，定期对大型施工机械进行检修维护，做好维护记录，操作人员必须持证上岗，严禁违规操作；规范临时用电管理，采用“三级配电、两级保护”配电方式，线路敷设采用架空或穿管埋地方式，配电箱加装防雨、防砸防护装置。

（四）动态监控模块：搭建实时监测平台

搭建西锚碇施工安全动态监测平台，整合地质、结构、环境等多维度监测数据，实现风险实时预警。监测内容包括基坑边坡

位移、支护结构变形、锚体混凝土温度与应力、地下水位、机械运行状态等。采用自动化监测设备如全站仪、测斜仪、温度传感器等，实时采集监测数据，通过无线传输技术上传至监测平台。平台设置风险预警阈值，当监测数据超过阈值时，自动发出声光预警信号，并将预警信息推送至管理人员手机端。管理人员接到预警后，立即组织现场排查，分析风险原因，采取针对性处置措施，同时更新监测数据，跟踪处置效果。

（五）应急保障模块：完善应急管理体系

建立“预防－响应－处置－恢复”全链条应急管理体系，提高对突发安全事故的处置能力。制定《西锚碇施工安全应急预案》，明确基坑坍塌、机械倾覆、火灾、触电等常见事故的应急处置流程、责任分工与救援措施。组建应急救援小组，由项目经理担任组长，配备专职救援人员，定期开展应急培训与演练，提升救援人员应急处置能力。配备充足的应急物资，如挖掘机、起重机、担架、灭火器、急救药品等，建立应急物资台账，定期检查物资完好情况，确保应急时可快速调用。建立应急联动机制，与当地消防、医疗、交通等部门签订应急联动协议，发生重大事故时，及时请求外部支援，形成救援合力。

三、高速桥梁西锚碇施工安全风险防控体系实践应用

（一）实践过程

施工前期，勘察专项小组采用钻探与物探相结合的方式，探明施工区域软土分布范围约1200平方米、岩溶空洞15处，地下水水位埋深3米。通过专家打分与模糊综合评价法，评估得出基坑坍塌、支护结构失效为重大风险，混凝土开裂、机械倾覆为较大风险，其他风险为一般或低风险。针对重大风险，基坑施工采用“地下连续墙＋三道内支撑”支护体系，分层开挖厚度控制在1.5米，开挖后24小时内完成支护施工；采用“12口降水井＋帷幕注浆”联合防渗方案，将地下水位降至基坑底以下1米。针对混凝土开裂风险，优化配合比掺入40%粉煤灰，采用分层浇筑工艺，每层浇筑厚度50厘米，布置80个温度传感器实时监测温度，当内外温差接近25℃时，覆盖土工布保温并通入循环冷水降温。针对机械交叉作业风险，划分3个独立作业区域，设置防护栏杆与警示

标志，起重机操作人员全部持证上岗，每日作业前对机械进行检查。搭建动态监测平台，实时监测基坑边坡位移（监测频率每2小时1次）、支护结构变形、混凝土温度等数据，平台设置边坡位移预警值30mm，当某次监测数据达到28mm时，立即发出预警，组织人员加密监测频率至每30分钟1次，同时放缓开挖速度，加强支护结构加固，24小时后数据稳定在25mm，解除预警。施工期间组织2次应急演练，分别模拟基坑坍塌与机械倾覆事故，演练后复盘分析，优化应急预案。

（二）实践效果

该西锚碇施工全过程未发生重大安全事故，仅出现2起轻微机械磕碰事件，及时处置后未造成人员伤亡与财产损失。施工质量检测结果显示，锚体混凝土未出现明显裂缝，强度达到设计要求；基坑边坡位移最大为26mm，控制在预警值范围内；支护结构变形量小于设计允许值。施工工期比计划缩短15天，节约施工成本约80万元。实践表明，构建的安全风险防控体系能够有效识别与管控西锚碇施工风险，提升施工安全管理水平，保障施工质量与进度。

四、结论

高速桥梁西锚碇施工环境复杂，风险因素多样，构建科学系统的安全风险防控体系是保障施工安全的关键。本文通过风险源识别，明确了地质勘察、基坑施工、锚体混凝土施工、交叉作业与机械施工等核心风险点，构建了“提出了风险识别、评估分级、防控实施、动态监控、应急保障”“五位一体”的防控体系，并从工程实践中验证了体系的有效性。实践表明，该体系可实现对西锚碇施工风险的全流程管控，有效降低事故发生率，提升施工质量与进度。未来，随着智能化技术的发展，可进一步将BIM技术，物联网，人工智能等纳入风险防控体系中，建立智能化监测与预警平台，实现风险的精准预测与主动防控；加强对复杂地质条件下西锚碇施工风险防控技术的研究，积累更多的工程实践经验，完善风险评估指标体系，为高速桥梁锚碇施工安全管理提供更有力的支撑。

参考文献

[1] 周若星. 高速公路桥梁施工中的地基处理技术 [J]. 时代汽车, 2025, (23): 153-155.
[2] 张贵忠, 施威. 面向全生命周期的高速铁路桥梁精细化建造技术 [J]. 中国铁路, 2025, (11): 28-36.
[3] 顾大勇, 施磊, 李龙舟. 多控制因素下高速公路桥梁预制 T 梁施工关键技术研究 [J]. 建筑机械, 2025, (11): 17-21.
[4] 吴振涛, 刘磊, 朱峰. 装配式高强钢—UHPC 组合梁在跨高速公路桥梁中的应用研究 [J]. 公路, 2025, (11): 257-262.
[5] 张翔. 高速铁路大直径盾构隧道下穿高等级公路桥梁影响研究 [J]. 高速铁路技术, 2025, 16(05): 46-51.

医疗建筑电气设计中的消防配电设计

黄祖云

南海经济开发区人民医院, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110035

摘 要 : 医疗建筑消防配电设计分为树干式、放射式、链式、混合式等类型。在具体的医疗建筑电气设计过程中,可能会遇到一些问题,比如供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题,影响医疗建筑消防配电设计效果。为此,文章将从医疗建筑电气设计角度,探讨消防配电设计,提出一些建议,希望能提升医疗建筑消防配电设计水平,满足医疗建筑消防设计要求。

关 键 词 : 医疗建筑; 消防配电设计; 电气设计

Fire Power Distribution Design in Electrical Design of Medical Buildings

Huang Zuyun

Nanhai Economic Development Zone People's Hospital, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : The fire power distribution design in medical buildings can be classified into various types, including trunk type, radial type, chain type, and hybrid type. During the specific electrical design process for medical buildings, several issues may arise, such as unscientific power supply system design, inadequate protection of power supply equipment, and insufficient fire monitoring power supply, which can affect the effectiveness of fire power distribution design in medical buildings. Therefore, this article will explore fire power distribution design from the perspective of electrical design in medical buildings and propose some suggestions, aiming to enhance the level of fire power distribution design in medical buildings and meet the fire protection design requirements for medical buildings.

Keywords : medical buildings; fire power distribution design; electrical design

引言

消防配电设计是建筑项目的重要组成部分,不仅能提升建筑工程项目的整体质量,也能保障电气系统的稳定运行,预防建筑发生火灾。医院建筑电气设计中,消防配电设计分为许多类型,包括树干式、放射式、链式、混合式等,比如在树干式类型的消防供配电设计中,要确保主线的可靠性,完善设计方案,从而发挥树干式消防配电设计作用。做好医疗建筑的消防配电设计关系着医疗建筑质量、安全。为此,文章从医疗建筑电气设计角度,探究消防配电设计具有非常重要价值,希望能提升医疗建筑电气设计效果,达成医疗建筑项目建设的目标^[1]。

一、消防配电设计

消防配电设计是建筑项目的重要组成部分,不仅能提升建筑工程项目的整体质量,也能保障电气系统的稳定运行,预防建筑发生火灾。从类型来看,包括树干式、放射式、链式、混合式等。树干式的供配电类型比较注重主干线环节,如果在设计中一些细节掌握不到位,就会导致树干式设计类型出现局限。因此,在树干式类型的消防供配电设计中,要确保主线的可靠性,完善设计方案,从而发挥树干式消防配电设计作用。放射式消防配电设计的优势是独立性较长,线路彼此不会产生影响,即使哪个环节出现问题,也不容易影响整个消防供配电系统的稳定性。但树干式消防配电设计弊端在于,在设计实施环节会浪费大量材料,

会影响医疗建筑电气设计的经济效益。链式设计的消防配电主要应用于回路方面,在实际应用中,可能会遇到稳定性、管理方面的问题,很少被采用。混合式设计是指,将上述设计类型混合在一起,取长补短,比如设计人员根据医疗建筑电气设计要求,将多种类型混合在一起,设计出适宜性、针对性的方案,以满足医疗建筑电气设计的要求^[2]。

二、医疗建筑电气设计中的消防配电设计面临的问题及原因

医疗建筑电气设计,要做好消防配电设计。其分为树干式、放射式、链式、混合式等类型,比如在树干式类型的消防供配电

设计中，要确保主线的可靠性，完善设计方案，从而发挥树干式消防配电设计作用。但实际设计过程可能会面临一些问题，会对消防配电设计的效果造成影响，以下将从问题及原因两个方面进行阐述。

（一）问题

医疗建筑消防配电设计中，会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，影响医疗建筑消防配电设计效果，以下将进行详细阐述。

1. 供电系统设计不科学。医疗建筑消防配电设计中，可能会面临供电系统设计不科学的情况，比如一级用电负荷需要是双重电源进行供电，并且一个电源出现故障，另一个电源需保证未受损坏；而二级用电负荷则考虑是两回线路供电，二者都需要独立设置配电箱。但在实际设计中可能会忽略相关问题，从而导致供电系统设计不科学。

2. 供电设备保障不足。医疗建筑消防配电设计中，会面临供电设备保障性不足的情况，比如设计中选用复式脱扣器保护消防配电系统，但却因线路过载而影响消防设施发挥作用；未按规范要求落实，只注重经济效益，降低了设备要求，使之未能达到工程需求。

3. 消防监控电源不到位。医疗建筑消防配电设计中，可能会面临消防电源监控不到位问题，比如消防监控电源的目的是监测电源状态，如果发现电源出现问题，就立即切断故障线路，但在实际设计中可能会遇到重视程度不足的问题，无法排除其中的安全隐患问题。

（二）原因

从上述分析来看，医疗建筑消防配电设计会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，以下将分析产生相关问题的原因。

1. 消防配电设计方案不完善。医疗消防配电设计方案不完善是导致上述问题发生的原因之一，比如缺乏前期调研工作，所选择的消防配电类型不合适，或者设计流程不完善，从而会影响医疗消防配电设计效果。

2. 消防配电设计队伍素质较低。医疗建筑消防配电设计会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，原因可能是设计队伍素质较低的原因，比如设计人员对消防配电设计类型不熟悉，在设计中盲目选择，或者设计细节注意不足，从而影响消防配电设计的效果。

3. 消防配电设计缺乏管理与监督。导致上述问题发生的原因可能在消防配电设计过程缺乏管理与监督，无法及时发现设计中的一些问题，从而会影响医疗建筑消防配电的设计效果^[3]。

三、医疗建筑电气设计中的消防配电设计要点

医疗建筑消防配电设计会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，这也对消防配电设计提出更高的要求。为此，本章节将探讨医疗建筑电气设计中的消防配电设计要点，包括供电系统设计要点、报警系统设计要

点、供电设备设计要点、电源监控设计要点等，以下将进行详细阐述。

（一）供电系统设计要点

在医疗建筑消防配电设计中，供电系统设计属于要点之一，关系着消防配电的整体质量。在该环节设计中，要科学设计高压电路，围绕一级负荷供电的电气设计要求，保证电源独立性，妥善落实好独立供电设计，切勿和其他供电混用。

（二）报警系统设计要点

在医疗建筑消防配电设计中，需要关注报警系统要点。报警系统能对火灾风险进行监督，及时对火灾风险隐患进行报警与控制。在该环节设计中，设计人员要基于常见火灾类型以及原因，以及火灾扑救的基本特征，进行报警系统设计，以保障其能在发现火灾风险隐患后及时报警与控制。

（三）供电设备设计要点

医疗建筑消防配电设计中，供电设备是设计的要点。供电设备关系着消防系统稳定、可靠地运行，设计人员在该环节设计时，要注重选择好供电设备，以保障消防系统的稳定运行^[4]。

（四）电源监控设计要点

医疗建筑消防配电设计中，电源监控设计是要点之一，通过相关设计，能实时采集、监测消防供配电的运行过程，为设备控制提供参考。在实际设计过程，要注重消防电源监控设计、发电机自启装置设计等，以便在火灾发生之后，能第一时间控制电源，对出现故障线路进行切断。

四、医疗建筑电气设计中的消防配电设计实践

医疗建筑消防配电设计会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，主要原因包括消防配电设计方案不完善、消防配电设计队伍素质较低、消防配电设计缺乏管理与监督等。为了解决上述问题，本章节将从设计实践角度出发，探讨医疗建筑电气设计中的消防配电设计，希望能提升消防配电设计效果，达成医疗建筑电气设计目标。（如表1所示）

表1 医疗建筑电气设计中的消防配电设计实践

类型	内容
项目概况	总建筑面积达到了21619.56m ² ，建筑高度达到了15.6m，为地上四层，一级耐火等级。消防用电包括配电和发电机房，消防应急照明与疏散指示系统，消防卷帘、电梯、风机等，以及包括安防系统、走道照明等。
设计要点	安装探测设备位置0.5m范围内无遮挡物，其与墙壁等水平间距应该在0.5m以上、与空调通风系统送风口则应在1.5m以上等。火灾报警按钮的设计中，传输线路为铜芯电缆（绝缘导线），且相应电压等级在交流250V以上。
设计控制	注重完善设计方案；注重建设专业化队伍。

（一）工程概况

本课程项目属于某市医疗建筑工程（以下简称A项目），其总建筑面积达到了21619.56m²，建筑高度达到了15.6m，为地上四层一级耐火等级。消防用电包括配电和发电机房，消防应急照明与疏散指示系统，消防卷帘、电梯、风机等，以及包括安防系统、走道照明等。A项目将采用消防配电设计，包括火灾自动报警

与消防设备的电气控制等内容。

（二）设计要点

A项目的消防配电设计中，要关注探测设备的安装位置、数量等。在这方面需要设计人员对A项目进行实地调研，了解医疗建筑的布局情况、空间功能情况、其他要素情况等，合理设计探测设备的位置、数量方案。同时安装探测设备位置0.5m范围内无遮挡物，其与墙壁等水平间距应该在0.5m以上、与空调通风系统送风口则应在1.5m以上、与照明灯具水平净距则应在0.2m以上等。在A项目的消防配电设计，火灾报警按钮的设计是关键，传输线路为铜芯电缆（绝缘导线），且相应电压等级在交流250V以上^[5]。

（三）设计控制

1.设计方案。A项目的消防配电设计中，要注重完善设计方案，比如做好设计前期的勘察作业工作，搜集足够、全面的数据信息，需要工程单位制订勘察作业机制，从A项目的消防配电设计角度勘察医疗建筑，同时也要关注外部环境的信息，包括人文环境、气候环境等，以便为A项目的消防配电设计提供参考。在具体设计环节，可以引入BIM技术，基于可靠性、可行性、经济性等原则，构建三维模型，提升A项目的消防配电设计方案的完善性^[6]。

2.保障措施。A项目的消防配电设计过程，要注重建设专业化队伍，比如从人才引进着手，需要设计单位基于自身实际情况，制订完善的引才方案，并从职业态度要求、技术能力要求、思想

品德要求等，通过合理选聘，选择适合的人才。同时也要加强培训教育，提升设计人员的能力素养，比如做好A项目的消防配电设计要点分析，结合要点制订一些针对性课程，提升设计人员的能力素养，同时也需要做好设计人员的调研工作，了解设计人员的能力素养，为设计人员制定针对性的培训课程，使其满足A项目的消防配电设计的要求。

五、结语

总之，医疗建筑消防配电设计会面临供电系统设计不科学、供电设备保障不足、消防监控电源不到位等问题，主要原因包括消防配电设计方案不完善、消防配电设计队伍素质较低、消防配电设计缺乏管理与监督等。为此，文章结合A项目探讨消防配电设计实践，并提出了一些设计控制建议，比如引入BIM技术，基于可靠性、可行性、经济性等原则，构建三维模型，提升A项目的消防配电设计方案的完善性；从职业态度要求、技术能力要求、思想品德要求等，通过合理选聘，选择适合的人才，同时也要做好设计人员的调研工作，了解设计人员的能力素养，为设计人员制定针对性的培训课程，提升设计人员素养等。希望上述建议能提升医疗建筑消防配电设计效果，助力建筑行业可持续发展。

参考文献

- [1] 钟德跃. 基于建筑电气设计中的消防配电设计研究[J]. 中国住宅设施, 2023, (12): 49-51.
- [2] 王佳庆. 建筑电气设计中消防配电的设计要点探析[J]. 居业, 2023, (12): 101-103.
- [3] 温坤华. 医疗建筑电气设计中的消防配电设计[J]. 绿色建造与智能建筑, 2022, (12): 48-50.
- [4] 卢淇炜. 建筑电气设计中消防配电和火灾自动报警系统设计分析[J]. 建筑与预算, 2022, (06): 46-49.
- [5] 张起瑞. 建筑电气设计中的消防配电设计方案研究[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(S1): 89-90.
- [6] 张根龙. 建筑电气设计中消防配电的重要性与应用[J]. 江西建材, 2021, (11): 71-72.

轨道交通与水利工程领域建筑电气施工的创新路径

陈宁

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110046

摘 要： 本文对比轨道交通与水利工程领域建筑电气施工，在设计规范、负荷特性、可靠性要求等方面揭示二者差异与共性。BIM、预制化、智慧工地等技术已有应用，但需进一步评估其适配性。轨道交通在牵引供电优化、智能化监控等方面取得创新实践；水利工程在防洪排涝电力保障、水下电缆敷设以及深埋盾构隧洞电气配置等方面实现技术突破。以珠三角水资源配置工程为典型案例，该项目破解多项世界级盾构施工难题并深度应用“智慧工地”数字化系统，为水利工程电气施工的智能化与绿色化提供了宝贵经验。本文还探讨设备选型、全生命周期管理及跨领域协同机制，提出技术转移、产业协同等创新路径，并展望未来发展趋势。

关 键 词： 轨道交通；水利工程；电气施工创新

Innovative Path for Building Electrical Construction in the Field of Rail Transit and Water Conservancy Engineering

Chen Ning

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article compares building electrical construction in rail transit and water conservancy engineering, revealing differences and similarities in design specifications, load characteristics, and reliability requirements. Technologies such as BIM, prefabrication, and smart site systems have been applied, but their adaptability requires further evaluation. Rail transit has achieved innovations in traction power supply optimization and intelligent construction monitoring; water conservancy engineering has made breakthroughs in flood control and drainage power assurance, underwater cable laying, and electrical configuration in deep-buried shield tunnels. Taking the Pearl River Delta Water Resources Allocation Project as a representative case, it overcame multiple world-class shield construction challenges and deeply applied the "smart site" digital system, providing valuable experience for intelligent and green electrical construction in water conservancy engineering. The paper also explores equipment selection, full-life-cycle management, and cross-domain collaboration mechanisms, proposing innovative paths such as technology transfer and industrial synergy, along with future prospects.

Keywords： rail transit; water conservancy engineering; innovation in electrical construction

引言

2021年，国家颁布《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》，其中强调加强基础设施建设的创新与协同发展。轨道交通牵引供电系统与水利工程防洪排涝电力系统在设计规范、负荷特性、可靠性要求等方面既有差异也存共性。在技术应用上，BIM技术和预制化施工技术虽已取得成果，但适配性仍待评估。此外，两个领域在电气施工创新实践、智能化监控、特殊环境应对、设备选型、全生命周期管理等多方面均有探索。特别是，作为国家重大水利工程的珠三角水资源配置工程 A2 标段，在复杂地质条件下破解多项世界级盾构施工难题，如深埋破碎富水地层始发、5.0bar 带压开仓换刀、全国首例泥水盾构穿山等，并应用“智慧工地”数字化系统实现施工实时监控、资源节约与生态保护，该项目获颁“全国工人先锋号”，为水利工程电气施工的智能化与绿色创新提供了典型范例。基于此，结合最新政策与重大工程实践，深入研究二者创新路径，对打破行业壁垒、推动基础设施建设高质量发展具有重要意义。

一、建筑电气施工创新理论基础

（一）工程电气系统基本特征

轨道交通牵引供电系统与水利工程防洪排涝电力系统在诸多

方面存在差异与共性。在设计规范上，轨道交通需依据特定的铁路或城市轨道交通相关标准，注重与轨道运行的匹配性；水利工程则遵循水利行业规范，侧重与水工设施的适配。负荷特性方面，轨道交通的负荷具有冲击性、周期性特点，列车启动、制动会导致

负荷大幅波动；水利工程防洪排涝的负荷相对稳定，但在汛期或排涝需求时，负荷会迅速增大。可靠性要求上，二者都至关重要，轨道交通关系到乘客安全与运营秩序，水利工程关乎防洪安全与水资源合理调配，不过轨道交通对供电连续性要求更高，瞬间断电都可能引发事故，而水利工程在保障关键设备供电可靠性基础上，对供电恢复时间有一定弹性^[1]。

（二）既有技术创新成果评估

在轨道交通与水利工程中，BIM与预制化施工技术已取得显著创新。BIM应用于隧道照明设计可精准模拟光照、优化布局，提升功能与节能性；珠三角水资源配置工程构建BIM+GIS全生命周期平台，实现构件级数据关联、进度仿真、管线综合与可视化，有效支持深埋盾构隧洞电气布置。水利工程则侧重利用BIM+GIS进行复杂设备空间定位与多系统集成，避免碰撞。预制化施工在轨道交通中加快隧道电气安装，在水利工程中保障大坝或隧洞内衬及电气设备质量，适应恶劣环境。项目还融合“智慧工地”系统，集成物联网与节能设备，实现施工监控与资源节约。未来需结合工程特点与环境条件，进一步评估技术适配性，为跨领域应用提供参考^[2]。

二、轨道交通电气施工创新实践

（一）牵引供电系统优化

在轨道交通电气施工创新实践的牵引供电系统优化方面，基于动态负荷预测的接触网施工参数优化方法是关键一环。通过对列车运行过程中动态负荷的精准预测，能够更合理地设置接触网的各项参数，如导线张力、悬挂高度等，这不仅可提高电能传输效率，减少电能损耗，还能有效降低接触网与受电弓之间的磨损，延长设备使用寿命。同时，再生能量回收装置在车辆段供电系统整合中的创新应用也意义重大。该装置可将列车制动过程中产生的再生能量进行回收并存储，然后重新应用于车辆段内其他设备的供电，这一创新举措不仅实现了能量的循环利用，还降低了车辆段对外部电网的依赖，提升了供电系统的整体能效，是牵引供电系统优化的重要方向^[3]。近年来，随着绿色低碳目标的推进，同相供电技术与分布式动态无功补偿装置的集成应用进一步提升了牵引供电的效率与稳定性，可借鉴水利工程复杂地质条件下（如珠三角水资源配置工程）的节能设备与资源节约理念，实现跨领域能源优化。

（二）智能化施工监控体系

在轨道交通电气施工中，智能化施工监控体系对于保障施工质量与进度至关重要。构建融合5G通信的电气设备安装质量追踪系统，利用5G高速率、低时延、大连接的特性，实时收集电气设备安装过程中的各项参数，如设备连接的紧固程度、电气性能指标等，实现对安装质量的精准追踪与动态监测。开发基于数字孪生的变电所施工进度仿真平台，通过建立变电所的数字孪生模型，对施工过程进行仿真模拟。依据实际施工情况实时调整模型参数，提前预测施工中可能出现的问题，例如工序冲突、资源调配不合理等，并给出相应的解决方案，从而优化施工进度安排，

确保施工高效有序进行^[4]。此类数字化监控技术与珠三角水资源配置工程“智慧工地”系统的实时监控、资源节约与环境适应理念高度相似，该工程在深埋盾构复杂环境下应用数字化平台确保施工安全与效率，为轨道交通地下电气施工的智能化监控提供了跨领域借鉴价值。

三、水利工程电气施工技术突破

（一）特种环境电气配置方案

1. 防洪排涝电力保障系统

在水利工程的防洪排涝电力保障系统中，需针对特种环境设计出高效可靠的电气配置方案。考虑到洪涝等特殊情况，设计多层级应急供电架构十分关键。通过合理规划主供电线路与备用线路，确保在主供电中断时，备用电源能迅速接入。同时，创新应用自组网技术构建分布式发电机组智能调配系统^[5]。该系统可依据不同区域的防洪排涝需求，智能调配分布式发电机组的电力输出，实现电力资源的精准分配。比如在洪水冲击严重、排水任务艰巨的区域，系统能及时调配更多电力，保障排水设备的高效运行，从而有效提升防洪排涝的电力保障能力，应对复杂多变的特种环境，为水利工程的安全稳定运行提供坚实的电力支撑。

2. 水下电缆敷设技术革新

在水利工程水下电缆敷设技术革新方面，研发水动力耦合作用下的电缆应力分析模型是关键突破点。通过该模型，能精准分析水下复杂水流等环境对电缆产生的应力情况，为敷设方案提供科学依据。在此基础上，改进深水区电缆固定装置的施工工艺。传统工艺在深水区面临诸多挑战，改进后的工艺可有效增强电缆固定效果，抵御水流冲击等恶劣条件，确保水下电缆长期稳定运行。这种技术革新不仅提升了水下电缆敷设的安全性及可靠性，也为水利工程电气施工在特种环境下的顺利开展提供了有力支撑^[6]。

3. 深埋盾构隧洞电气施工创新

在水利工程深埋长距离输水隧洞施工中，电气系统需应对大埋深、破碎富水地层、小转弯半径等极端复杂地质条件。以珠三角水资源配置工程A2标段为例，该项目成功实现“三穿西江底、两穿大金山”，采用全国首例泥水盾构穿山技术，并攻克国内首例深埋破碎地层盾构始发及5.0bar带压开仓换刀等多项世界级难题。在电气施工方面，项目同步推进内衬钢管安装、自密实混凝土浇筑等结构施工，同时深度集成“智慧工地”数字化系统，实现电气设备安装、供电保障、能源管理的实时监控与动态优化。该系统支持节能电气设备优先选用、施工过程资源节约与建筑垃圾回收再利用，确保在高风险特种环境下供电系统的连续性与安全性，为深埋盾构隧洞电气配置提供了创新实践范例。

（二）绿色施工技术集成应用

1. 光伏-水电互补系统构建

在水利工程电气施工中，光伏-水电互补系统构建是绿色施工技术集成应用的关键环节。该系统融合光伏发电与水电优势，能有效提升能源利用效率与供电稳定性。利用水利工程周边开阔区域安装光伏板，收集太阳能并转化为电能。同时，结合水电设

施,在光照充足时,光伏系统优先供电,多余电能存储或并入电网;光照不足时,水电系统接力供电。通过智能控制系统,实时监测光照强度、水位等参数,动态调整两种能源供电比例,实现高效互补^[7]。在珠三角水资源配置工程中,该理念得到进一步延伸与应用:项目采用“生态+智慧”模式,通过“智慧工地”数字化系统优化能源管理,优先选用节能电气设备,实现施工现场资源节约与碳排放减少。该工程作为粤港澳大湾区绿色低碳转型的示范,探索了光伏等可再生能源与水资源配置的互补路径,例如在周边水库及开阔场地试点光伏发电补充泵站供电,助力工程年节约能源相当于减少数万吨碳排放,为水利工程绿色发展提供可复制的创新路径。

2. 电磁环境控制技术

在水利工程电气施工中,电磁环境控制技术至关重要。研发大功率电气设备电磁干扰屏蔽施工工法,是关键突破点。通过优化材料选择与工艺设计,提升屏蔽效果,有效降低电气设备间电磁干扰,确保各设备稳定运行。同时,制定水利工程特殊电磁环境下的设备安装标准也不可或缺。结合水利工程周边复杂电磁环境特点,明确设备安装位置、间距等参数要求,从源头上减少电磁干扰隐患。这些技术成果的集成应用,不仅能提高水利工程电气系统的安全性及可靠性,还能为水利工程的高效运行提供坚实保障^[8]。珠三角水资源配置工程在深埋盾构隧洞电气施工中,创新应用电磁屏蔽材料与数字化监测系统,针对高功率泵站与变电设备,优化安装间距并实时监控电磁场强度,确保在复杂地质与水流干扰环境下设备稳定运行。该实践进一步强化了电磁控制在绿色施工中的作用,减少了潜在干扰对节能设备的影响,提升了整体系统的可持续性。

四、跨领域协同创新路径研究

(一) 技术标准体系对比分析

1. 施工规范差异性研究

轨道交通地下段与水利廊道电气施工在技术标准体系与施工规范上存在诸多差异。在防潮等级方面,轨道交通地下段因人员流动频繁且电气设备众多,对防潮有较高要求,需确保设备在一定湿度环境下稳定运行;而水利廊道长期处于潮湿甚至可能有水浸风险的环境,其防潮等级标准更为严苛,往往需要特殊的防潮材料与密封工艺^[9]。以珠三角水资源配置工程为例,该项目深埋盾构隧洞(平均埋深40-60米)面临高水压、富水破碎地层等极端条件,进一步强化了水利廊道防潮与防水密封规范的要求,如采用高水压预应力衬砌与特殊密封工艺,确保电气设备在潜在水浸风险下的长期稳定。在抗震要求上,轨道交通地下段需考虑列车运行震动及所在区域地震活动情况,要保证电气系统在震动环境下的可靠连接与正常工作;水利工程则更多关注大坝等水工建筑物整体抗震性能,其电气施工规范中的抗震要求围绕保障水利设施安全运行展开,如电气设备的固定方式需适应水工结构的抗震特点。珠三角工程穿越复杂地质断层与城市密集区,其抗震规范强调深埋管道与电气设备的动态震动适应性,为跨领域标准对

比提供了实际参考。

2. 设备选型参数优化

在轨道交通与水利工程领域建筑电气施工中,设备选型参数优化至关重要。建立适用于两种工程的电气设备通用化选型矩阵,这需要对不同类型电气设备在两种工程场景下的参数需求进行深入分析。例如,对比两种工程中对电机启动转矩、运行效率等参数要求的异同。在此基础上,提出模块化设计改进方案,将电气设备按功能划分为不同模块,针对轨道交通和水利工程的特殊需求,对各模块参数进行优化配置,提高设备在不同工程环境下的适应性和可靠性^[10]。珠三角水资源配置工程通过“智慧工地”数字化系统,实现了电气设备选型的全过程数据化管理,优先选用节能模块化设备(如低功耗泵站电机),并根据复杂地质环境优化运行效率参数,为跨领域设备选型通用化提供了实践参考。通过这种方式,不仅能实现设备的高效利用,还能降低设备选型的复杂性,为跨领域协同创新提供有力支撑,推动轨道交通与水利工程领域建筑电气施工的创新发

(二) 管理创新机制探索

1. 全生命周期管理模式

在轨道交通与水利工程领域建筑电气施工的全生命周期管理模式中,从项目规划阶段起,就需将电气施工与两个领域的整体规划深度融合。借助融合BIM+GIS的电气施工协同管理平台,全面收集、整合和分析相关数据,对电气系统在不同场景下的可行性与适应性进行模拟评估。在施工阶段,依据平台提供的精准数据与模拟结果,优化施工流程,严格把控施工质量,实时监控施工进度,确保电气施工与轨道交通、水利工程的其他环节紧密配合。到了运营维护阶段,利用平台持续跟踪电气设备运行状况,及时预测潜在故障,提前制定维护策略,实现高效、精准的运维管理,以保障电气系统在轨道交通与水利工程全生命周期内的稳定可靠运行,提升两个领域的整体效益。珠三角水资源配置工程A2标段通过BIM+GIS与“智慧工地”系统的深度集成,实现了从设计到施工再到运维的全生命周期数字化管理,例如在深埋隧洞电气施工中动态调整设备布局与进度,显著提升了复杂环境下施工效率与质量,为轨道交通地下段电气施工的类似管理提供了可借鉴的范例。

2. 风险防控体系构建

在轨道交通与水利工程建筑电气施工中,构建风险防控体系需开发基于机器学习的风险预警系统。通过采集多维度施工数据,利用算法挖掘风险模式,实现精准预警。同时,建立跨工程类型的风险知识库,整合两类工程的风险案例、应对措施与经验教训,打破行业壁垒,促进知识共享,提升风险识别与响应能力。珠三角水资源配置工程在5.0bar带压开仓换刀等高风险作业中,依托“智慧工地”系统实时监测地质与电气设备状态,结合数据驱动预警模型,有效规避事故,其经验为轨道交通隧道掘进等高风险电气施工提供了跨领域借鉴,助力提升整体安全与质量水平。

(三) 技术转化应用路径

1. 创新技术转移机制

在轨道交通与水利工程领域建筑电气施工的创新进程中,创

新技术转移机制至关重要。设计一个融合技术成熟度评估与效益分析的技术转移决策模型是关键。技术成熟度评估，能够精准判断新技术在实际应用中的可行性与稳定性，确保引入的技术可有效落地实施。而效益分析则从经济、环境、社会等多方面衡量技术转移所带来的影响，权衡投入与产出。通过这样的决策模型，可规避盲目技术转移带来的风险，提高技术转移的成功率与效率，实现轨道交通与水利工程领域建筑电气施工跨领域技术的高效转化与应用，推动两个领域在建筑电气施工方面实现创新发展。珠三角水资源配置工程 A2 标段的实践为该机制提供了典型案例：项目在攻克深埋盾构多项世界级难题的同时，将“智慧工地”数字化技术与节能设备应用相结合，通过成熟度评估与效益分析（如资源节约、碳减排效果），成功实现了盾构穿山、带压换刀等关键技术的落地与优化。该经验可向轨道交通地下电气施工转移，例如将复杂地质环境下实时监控与风险预警技术迁移至隧道掘进场景，提升技术转移的针对性与成功率。

2. 产业协同创新模式

在轨道交通与水利工程领域，建筑电气施工的产业协同创新应整合多方资源。一方面，推动两类工程企业合作，发挥各自优势：轨道交通企业在高速运行环境下保障电气设备稳定性的技术，可与水利工程在潮湿、复杂地质中应用的防水、耐蚀技术相

互融合。另一方面，促进产业链上下游联动——研发制造、施工安装与运维企业共同参与创新：研发方根据施工与运维反馈优化产品；施工方应用新技术提升效率与质量；运维方提供运行数据支撑持续改进，形成闭环创新机制。珠三角水资源配置工程 A2 标段获“全国工人先锋号”，正是协同典范：施工单位与设备商紧密配合，攻克泥水盾构穿山、钢管内衬预制安装等难题，并集成“生态 + 智慧”理念，实现节能设备与数字系统的融合应用。该模式为跨领域电气施工技术融合与产业化提供了示范。

五、总结

轨道交通与水利工程在建筑电气施工中具有共性创新规律，技术通用性与适应性是跨领域迁移的关键。珠三角水资源配置工程 A2 标段在复杂地质条件下应用“智慧工地”与绿色技术，提升了电气施工的智能化与可持续性，并为轨道交通地下工程提供了可复制经验。未来，数字孪生与清洁能源技术将推动电气系统精准管控与绿色转型，而融合跨领域技术标准体系则有助于打破壁垒、促进协同创新，提升施工质量效率，助力基础设施高质量发展和可持续目标实现。

参考文献

[1] 尚宸宇. 轨道交通乘客时空路径估计研究及应用 [D]. 北京交通大学, 2022.
[2] 姜新宇. 基于知识图谱的轨道交通领域智能问答方法研究 [D]. 西安理工大学, 2022.
[3] 常方玮. 基于 BIM 技术的轨道交通建筑 (高架车站) 设计探究——以西安市五号线交大创新港站建筑方案为例 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
[4] 孙琳琳. 基于出行路径的城市轨道交通客流时空分布研究 [D]. 东南大学, 2021.
[5] 张虎. 基于关键路径法的轨道交通综合联调进度计划管理研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
[6] 胡梦飞, 张世欣, 梁尧. 轨道交通领域技术创新人才研究 [J]. 中国科技人才, 2021, (03): 38-44.
[7] 祝成鹏. 水利工程施工监理技术的创新与发展 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(04): 83-85.
[8] 郑邦德. 水利工程施工监理技术的创新与发展 [J]. 绿色环保建材, 2021, (10): 173-174.
[9] 李维红. 轨道交通工程施工用表创新研究 [J]. 江西建材, 2021, (08): 255+257.
[10] 邢成生. 探究水利工程建筑施工技术要点 [J]. 新农业, 2020, (15): 80-81.

建筑管理领域中装配式预制构件的技术管理与质量控制

李雪娟

广东旭江建筑科技有限公司, 广东 鹤山 529700

DOI:10.61369/ME.2025110047

摘 要 : 装配式预制构件在建筑管理领域优势显著, 其技术管理与质量控制研究成果颇丰。技术管理涉及高性能材料研发、生产流程优化、设计施工规范及协同管理等; 质量控制涵盖原材料检验、生产监测、检测技术改进、质量追溯与改进等。未来智慧建造质量管理云平台及标准与智能融合将推动行业升级。

关 键 词 : 装配式预制构件; 技术管理; 质量控制

Technical Management and Quality Control of Prefabricated Components in the Field of Building Management

Li Xuejuan

Guangdong Xujiang Construction Technology Co., Ltd., Heshan, Guangdong 529700

Abstract : Prefabricated prefabricated components have significant advantages in the field of building management, and there are abundant research achievements in their technical management and quality control. Technical management involves research and development of high-performance materials, optimization of production processes, design and construction standards, and collaborative management; Quality control covers raw material inspection, production monitoring, improvement of testing technology, quality traceability and improvement, etc. The future intelligent construction quality management cloud platform and the integration of standards and intelligence will promote industry upgrading.

Keywords : prefabricated prefabricated components; technical management; quality control

引言

随着《“十四五”建筑业发展规划》于2021年发布, 装配式建筑作为推动建筑行业转型升级的重要方向, 其中的装配式预制构件备受关注。它以工业化生产模式提升施工效率与质量, 在建筑全生命周期管理中优势显著。对其研究涉及高性能材料研发、生产流程优化、技术管理体系构建及质量控制等多方面。相关研究成果已有效提升预制构件质量与施工效率, 未来结合政策导向, 智慧建造的质量管理云平台、标准化与智能化融合发展, 将推动建筑行业迈向高质量发展新阶段。

一、装配式预制构件概述

(一) 装配式预制构件的定义与分类

装配式预制构件是在工厂或施工现场预先制作, 然后运输至现场进行装配的建筑构件。它通过工业化生产模式, 将传统现场湿作业转化为工厂预制与现场组装相结合的方式, 极大提高了施工效率与质量。从材料构成看, 常见有混凝土预制构件、钢结构预制构件等。以混凝土预制构件为例, 由水泥、骨料、外加剂等按特定配合比制成, 在工厂经过养护达到设计强度后运往工地。按在建筑体系中的分类标准, 可分为结构构件, 如预制梁、预制柱, 承担建筑的竖向与水平荷载; 非结构构件, 像预制墙板、预制楼梯等, 虽不直接承受结构荷载, 但对建筑的使用功能与美观性至关重要^[1]。这些分类方式, 明确了装配式预制构件在现代建

筑管理中的角色定位, 为其技术管理与质量控制奠定基础。

(二) 建筑管理中预制构件的技术应用价值

在建筑管理领域, 预制构件在建筑全生命周期管理中展现出诸多核心优势。从工业化建造角度看, 预制构件实现了建筑产品的标准化、规模化生产, 大幅提升生产效率与产品质量稳定性。以工业化方式生产预制构件, 能精准把控尺寸、性能等参数, 减少现场施工误差。在施工效率提升方面, 预制构件运至现场后可快速安装, 极大缩短工期。相比传统现浇施工, 减少了湿作业时间与工序, 如叠合板、预制楼梯等构件的安装, 使施工进度显著加快。从可持续发展层面, 预制构件的应用降低了建筑垃圾产生量, 减少对环境的影响, 同时工厂化生产可更好地控制能耗与资源消耗, 符合绿色建筑发展理念^[2]。

二、预制构件技术研发与生产管理

（一）高性能建筑材料研发路径

在建筑管理领域中装配式预制构件的高性能建筑材料研发，需从多方面着手。一方面优化混凝土配比，通过深入研究不同原材料的特性及其相互作用，精确调整配合比，提升混凝土强度与工作性能，满足预制构件多样化需求。另一方面，大力开发轻质高强材料，减轻预制构件自重，提高运输与安装效率，同时保证结构强度与稳定性。此外，耐久性提升不容忽视，通过添加特殊添加剂、改进材料生产工艺等方式，增强材料抵抗环境侵蚀能力，延长预制构件使用寿命。还应结合数字化设计手段，借助模拟分析软件，对材料性能进行精准预测与优化，直观呈现不同材料组合的效果，为高性能建筑材料研发提供科学依据，加速研发进程^[3]。

（二）自动化生产工艺流程优化

在建筑管理领域装配式预制构件的生产中，模具智能化、生产线协同作业及物联网技术的集成应用对自动化生产工艺流程优化至关重要。通过模具智能化，可实现模具参数的精准控制与快速调整，提升预制构件的成型精度与生产效率。生产线协同作业，确保各生产环节紧密衔接，减少物料等待时间与设备空转，保障生产流程的高效顺畅。物联网技术则实时采集生产数据，实现生产过程的远程监控与智能决策。基于此，提出工艺标准化改进策略，从模具设计、生产操作到质量检测等各环节制定统一标准，使整个自动化生产工艺流程更加科学、规范，提高预制构件生产质量与效率^[4]。

三、预制构件技术管理体系构建

（一）技术标准体系构建

1. 设计阶段技术规范

在建筑管理领域装配式预制构件的技术管理中，设计阶段技术规范至关重要。建立基于 BIM 模型的构件深化设计标准，这一标准全方位覆盖多个关键方面。节点连接部分，需详细规定各类预制构件间连接节点的形式、构造及力学性能要求，确保连接的可靠性与稳定性，以满足建筑结构整体受力需求^[5]。公差控制则明确构件生产、安装过程中的尺寸允许偏差范围，严格把控精度，减少因尺寸偏差导致的安装困难等问题。模块化参数体系，针对不同类型预制构件设定模块化参数，实现构件的标准化、通用化设计，提高生产效率与资源利用率，进而提升装配式建筑整体质量与建设效率。

2. 施工安装技术规程

施工安装技术规程涵盖构件运输、吊装定位及现场装配等关键环节。在构件运输方面，需依据构件尺寸、重量及特性，规划合理运输路线，选择适配运输设备，并采取可靠固定与防护措施，防止运输途中受损。吊装定位时，明确吊装设备选型及操作规范，借助精准测量工具确保构件定位精确，严格控制安装偏差。现场装配要严格遵循标准化作业流程，对连接节点处理、密

封防水等关键工序制定详细操作指南。同时，针对各环节制定全面的安全管理要求，如设置安全警示标识、加强人员安全培训等，以此保障施工安装过程安全有序进行，提高装配式预制构件施工质量^[6]。

（二）全过程技术协同管理

1. 跨专业协同机制

在建筑管理领域装配式预制构件的技术管理体系构建中，全过程技术协同管理里的跨专业协同机制至关重要。需建立设计 - 生产 - 施工多主体协同平台，以有效解决界面管理与信息交互的技术难题^[7]。设计专业人员需与生产、施工人员密切沟通，确保设计方案既满足建筑功能需求，又具生产与施工可行性。生产环节则要依据设计参数精准制造，同时将生产过程中的问题反馈给设计方，以便及时调整。施工人员需基于设计和生产情况，合理规划施工流程与方法。通过这样的跨专业协同机制，打破各专业壁垒，实现信息实时共享与高效交互，减少因专业间沟通不畅导致的质量问题，保障预制构件从设计到生产再到施工的顺利推进，提高装配式建筑整体质量与效益。

2. 数字化管理技术应用

在预制构件技术管理体系构建的全过程技术协同管理中，数字化管理技术应用至关重要。通过引入 RFID 追溯系统，能够对预制构件从生产、运输到安装的全流程进行精准跟踪，记录构件的各项信息，如生产批次、原材料来源、质量检测结果等，实现信息的实时共享与可追溯性^[8]。同时，5D 施工模拟技术将时间、成本等维度与三维模型相结合，在施工前对预制构件的安装过程进行模拟分析，提前发现可能出现的技术问题与施工冲突，优化施工方案。这两项数字化技术的应用，有力促进了预制构件在建筑管理领域的技术管理与质量控制，提升了装配式建筑施工的整体效率与质量。

四、预制构件质量控制管理系统

（一）全过程质量管控体系

1. 原材料进场检验标准

在建筑管理领域的装配式预制构件质量控制中，原材料进场检验标准至关重要。对于混凝土骨料，需检测其粒径、级配、含泥量等指标。合适的粒径与级配能保证混凝土的和易性与强度，含泥量过高则会影响混凝土性能，故要严格控制在规定范围内^[9]。对于钢筋，需检验其屈服强度、抗拉强度、伸长率等性能，确保钢筋强度符合设计要求，伸长率满足构件变形需求。辅助材料同样不可忽视，如外加剂，要检测其减水率、凝结时间差等指标，保证外加剂能有效改善混凝土性能，提升预制构件质量。只有严格执行这些原材料进场检验标准，才能从源头保障装配式预制构件的质量。

2. 生产环节质量监控点

在预制构件生产环节，建立振动密实度、蒸汽养护参数等关键工艺节点的实时监测指标体系至关重要^[10]。振动密实度方面，需密切监测振动时间、频率及振幅等参数，确保混凝土在振动作

用下均匀密实，减少蜂窝麻面、孔洞等缺陷。蒸汽养护参数的监测同样不容忽视，要实时跟踪养护温度、升温速度、恒温时间及降温速度等，适宜的蒸汽养护能有效提升混凝土强度与性能，防止因养护不当造成裂缝等质量问题。通过对这些关键工艺节点实时监测指标体系的构建，实现对预制构件生产过程全面、精准的质量监控，及时发现并纠正偏差，保障预制构件从生产源头就具备高质量水准，为后续装配式建筑的顺利施工奠定坚实基础。

（二）无损检测技术创新应用

1. 超声波检测技术改进

在建筑管理领域针对装配式预制构件的质量把控中，超声波检测技术改进聚焦于优化异形构件内部缺陷识别的算法模型与检测参数设定方法。一方面，通过深入分析异形构件的独特结构与声学特性，研发适配的算法模型。此模型充分考虑异形构件形状不规则导致的声波传播复杂情况，利用先进的信号处理与机器学习技术，更精准地解析接收到的超声波信号，以有效识别内部缺陷。另一方面，合理设定检测参数。根据构件材质、尺寸、厚度等因素，科学调整超声波的频率、发射功率、增益等参数，让超声波能深入构件内部并准确反馈信息，提高对异形构件内部微小缺陷的检测灵敏度，从而为装配式预制构件质量提供坚实技术支持。

2. 机器视觉检测系统开发

在预制构件质量控制管理系统的机器视觉检测系统开发方面，基于深度学习的表面裂缝自动识别与尺寸偏差计算技术发挥着关键作用。通过采集大量预制构件表面图像数据，构建深度学习模型进行训练，使机器能够精准识别预制构件表面细微裂缝。在尺寸偏差计算上，利用机器视觉系统对预制构件各部位进行高精度测量，依据设定标准计算出偏差值。此技术开发不仅能够快速、高效地完成对预制构件的表面裂缝识别和尺寸偏差计算，减少人工检测的误差与时间成本，而且可实现自动化、智能化检测，极大提升预制构件质量检测的准确性与可靠性，为装配式建筑提供坚实的质量保障。

（三）质量追溯与改进机制

1. 质量问题溯源分析方法

构建多源数据关联的质量问题定位模型与因果分析框架，旨

在实现对预制构件质量问题的精准溯源。一方面，需整合生产过程中的各类数据，涵盖原材料参数、生产设备运行数据、操作人员信息等。通过建立数据关联关系，搭建质量问题定位模型，能快速锁定质量问题出现的具体环节。另一方面，基于因果分析框架，运用鱼骨图、5Why 分析法等工具，深入剖析质量问题产生的原因。例如，当发现构件尺寸偏差时，从人、机、料、法、环等因素展开分析，判断是工人操作失误，还是设备精度问题，亦或是原材料性能不稳定等原因。通过这种溯源分析方法，为质量改进提供准确依据，有效提升预制构件质量。

2. PDCA 持续改进循环

在预制构件质量控制管理系统的质量追溯与改进机制中，PDCA 持续改进循环起着关键作用。通过收集预制构件从原材料采购、生产加工到运输安装等各环节的数据，依据大数据分析评估质量状况，明确存在的质量问题，此为计划（Plan）阶段。执行（Do）阶段则是依据计划制定具体的改进措施并付诸实施，如优化生产工艺、加强人员培训等。检查（Check）阶段着重对改进措施实施后的效果进行监测与评估，对比改进前后的质量指标，判断改进是否有效。处理（Act）阶段，总结成功经验并将其标准化，形成可推广的操作规范；对于未解决的问题，纳入下一个 PDCA 循环，持续优化预制构件质量，实现基于大数据分析的闭环质量管理与持续优化。

五、总结

在建筑管理领域，装配式预制构件的技术管理与质量控制研究成果显著。通过对构件生产、运输、安装等各环节的技术管理，有效提升了预制构件的质量与施工效率。质量控制方面，从原材料把控到成品验收，形成了一套较为完善的流程。面向未来，智慧建造的质量管理云平台是重要发展方向，它将整合各方数据，实现实时监控与动态调整。同时，标准化体系建设与智能化技术融合，能进一步规范行业发展，提高生产与管理的精准度，对于推动建筑行业转型升级具有不可忽视的战略意义，将助力建筑行业迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1] 黄洋林. 装配式预制构件快硬早强修补砂浆研究与应用 [D]. 广州大学, 2023.
- [2] 邵诚心. 装配式 PC 预制构件市场信息价动态管理研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.
- [3] 朱英姿. 基于 BIM 的某装配式建筑预制构件参数化设计及应用研究 [D]. 东北电力大学, 2023.
- [4] 刘聪聪. 不确定环境下装配式预制构件混流生产调度优化研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [5] 姚福义. 预制构件产品质量的形成机理及控制方法研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [6] 陈志腾, 汪沈辉, 骆泽阳. 装配式预制构件施工安装中的技术要点探析 [J]. 居业, 2023(6): 4-6.
- [7] 程祖民. 公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制 [J]. 建材发展导向 (上), 2022, 20(8): 157-159.
- [8] 袁峥嵘. 化工工艺管道安装质量控制和技术管理 [J]. 化工管理, 2022(20): 134-137.
- [9] 邓军婷. 高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制分析 [J]. 运输经理世界, 2023(26): 110-112.
- [10] 潘鑫, 李志锐, 霍维霞, 等. 地铁车站出入口装配式预制构件设计关键技术研究与应用 [J]. 混凝土世界, 2022(7): 46-49.

地铁车站建筑设计与关键技术应用研究

朱长胜

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110041

摘 要： 地铁车站建筑设计需综合考量多方面。从城市空间整合出发进行规划，注重功能分区与流线组织。严格落实防火、防排烟标准，做好主体结构抗力、人防设计及平战转换。集成战时保障系统，应用 BIM 与性能化仿真分析。采用装配式、节能技术，搭建智能感知网络与应急管理平台，完善设计理论并指导工程建设。

关 键 词： 地铁车站；建筑设计；关键技术

Research on Architectural Design and Key Technology Application of Subway Station

Zhu Changsheng

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： the architectural design of subway station needs to consider many aspects comprehensively. Planning is based on the integration of urban space, focusing on functional zoning and streamline organization. Strictly implement the fire prevention and smoke control standards, and do a good job in the resistance of the main structure, civil air defense design and peacetime and wartime conversion. Integrated wartime support system, using Bim and performance-based simulation analysis. Adopt assembly and energy-saving technology, build intelligent perception network and emergency management platform, improve design theory and guide engineering construction.

Keywords： subway station; architectural design; key technology

引言

2018年颁布的《城市轨道交通工程设计规范》对地铁车站设计提出全面要求。地铁车站建筑设计需综合考量多方面。从城市空间整合看，场地选址、各层空间规划及出入口衔接都要与城市空间有机融合。功能分区与流线组织、防火防排烟、主体结构抗力、人防设计等技术标准严格遵循规范。同时，还应采用 BIM 技术全生命周期建模、性能化仿真分析等优化设计，应用装配式施工、节能技术等实现可持续发展，搭建智能感知网络与应急管理平台提升运营管理。这些设计与技术遵循相关政策，为地铁车站建设提供科学路径与有力支撑。

一、地铁车站建筑设计

（一）建筑空间规划原则

地铁车站建筑空间规划需从城市空间整合角度出发。场地选址应综合考量城市功能布局、客流需求与周边交通衔接，确保车站融入城市整体空间，像在商业中心等客流密集区设站，方便乘客集散。站厅层作为乘客换乘、购票、进出站关键区域，要合理规划功能分区，优化空间利用，以提升乘客通行效率与舒适度。站台层则着重考虑乘客候车安全与便捷，合理设置候车区域与屏蔽门等设施。出入口衔接至关重要，需与周边建筑、道路等紧密结合，保障乘客进出顺畅，同时注重与城市景观融合。通过这些系统性规划设计原则，实现地铁车站与城市空间的有机整合，为

乘客提供高效、便捷的出行环境^[1]。

（二）功能分区与流线组织

在地铁车站建筑设计中，功能分区与流线组织至关重要。乘客、设备及商业空间之间存在紧密的拓扑关系，需协同设计。乘客流线主要分为进站、出站与换乘，设计要确保其便捷、顺畅，减少交叉与冲突，如合理设置出入口、楼梯、自动扶梯等，以满足不同方向客流需求。设备区配置应充分考虑各类设备的运行与维护需求，同时不影响乘客通行与其他功能空间。商业开发空间虽带来经济效益，但要与乘客流线及设备区相协调，避免干扰。协同设计方法需综合考量各要素，依据车站所处位置、客流量及使用功能等因素，优化布局，使各功能分区有机结合，实现地铁车站高效运转，满足乘客多样化需求^[2]。

二、地铁车站消防设计

（一）防火系统技术标准

地铁车站防火系统技术标准需严格遵循相关规范条文来落实。在建筑耐火构造方面，要依据建筑材料的燃烧性能、耐火极限等标准，选用合适材料构建车站的墙、柱、梁、楼板等结构，确保在火灾时能承受一定时间的高温作用而不倒塌，保障人员疏散与救援的安全空间^[3]。防火卷帘设置时，应精准确定其位置，通常在防火分区的分隔处，且要满足耐火完整性与隔热性要求，动作灵敏可靠，遇火灾能迅速下降，有效阻挡火势蔓延。安全疏散时间计算则要综合考虑车站的人员密度、通道宽度、疏散距离等因素，通过科学的公式与方法，精确算出疏散所需时间，保证在规定时间内所有人员能疏散至安全区域，从而提升地铁车站整体消防安全水平。

（二）防排烟系统设计

地铁车站防排烟系统设计需采用机械防烟系统设计与自然排烟方式相结合的多工况复合式消防系统配置方案。在机械防烟方面，要确保送风口的合理布置与足够的送风量，为人员疏散通道等区域提供正压，阻挡烟气侵入，送风机应具备可靠的运行性能和耐火极限^[4]。对于自然排烟，需利用车站的可开启外窗、通风井等自然开口实现，要合理确定开口的面积、位置与形式，保证在火灾时能有效排出热烟气。通过对不同火灾场景进行模拟分析，优化机械防烟与自然排烟的联动控制，根据火灾位置、规模等因素自动切换工况，保障车站内人员安全疏散和消防救援工作的顺利开展，最大程度降低火灾损失。

三、地铁车站人防设计

（一）防护单元体系构建

1. 主体结构抗力设计

地铁车站主体结构抗力设计对保障战时防护效能至关重要。通过合理计算钢筋混凝土墙板厚度来满足抗爆抗冲击性能要求。需依据规范与实际受力情况，考虑爆炸荷载、冲击作用等因素，精准计算墙板所需厚度。比如，根据不同防护等级确定相应的荷载取值，结合结构力学原理进行力学分析，以此得出科学合理的墙板厚度数值^[5]。同时，采取构造加强措施，如增加钢筋配置密度、设置箍筋加密区、优化节点连接构造等，增强结构整体韧性与稳定性，有效抵御爆炸、冲击等极端外力，从而使地铁车站主体结构在战时能可靠地承受各种作用，为人员与物资提供安全可靠的防护空间。

2. 密闭防护设施

在地铁车站人防设计的防护单元体系构建中，密闭防护设施至关重要。对于防护密闭门选型，需依据车站所处环境、防护等级等因素确定，如防护等级高的区域应选用具备更高防护性能的门，确保能有效阻挡冲击波与毒剂等^[6]。集水排水系统要合理规划，设置足够数量且排水能力适配的排水泵，以迅速排出战时可能出现的积水，避免影响车站内人员安全与设备运行。空气过滤

装置作为保障内部空气质量的关键设备，其过滤效率应符合相应防护要求，能有效过滤空气中的有害颗粒、毒剂等，为车站内营造安全的空气环境，通过这些专项防护设备的合理配置，提升地铁车站在战时的防护能力。

（二）平战转换技术措施

1. 空间功能转换机制

地铁车站空间功能的平战转换机制需建立战时物资储备区与平时商业空间的快速转换模式及技术接口标准。平时地铁车站商业空间追求高利用率与便捷性，注重商业流线和顾客体验。战时为满足物资储备需求，空间需具备良好的存储条件与防护性能。应从建筑布局、结构构造、设备设施等方面入手，明确转换要求。如通过灵活隔断设计，便于平时分隔商业空间，战时快速拆除形成大流量物资储备区；设置统一的技术接口标准，使通风、照明等设备能在平战状态下快速切换运行模式。在满足人防功能的同时，最大程度发挥地铁车站的经济效益与社会效益，实现平战结合的高效转换^[7]。

2. 战时保障系统集成

地铁车站战时保障系统集成需整合应急供电、备用通风、人防通信等战备系统，采用模块化设计方法。应急供电系统，需依据战时电力需求，合理配置发电设备及储能装置，确保重要设备如通风、通信等能稳定运行。备用通风系统要在满足战时人员新风量标准基础上，考虑滤毒、消声等功能，实现通风模块的快速组装与调试。人防通信系统应构建可靠的有线、无线通信网络，保障战时指挥、联络畅通。模块化设计可提高各系统的通用性与互换性，便于快速部署与维护，提升地铁车站战时保障能力，在应对突发状况时能迅速响应并保障人员安全，同时也符合高效、便捷的设计理念^[8]。

四、关键技术集成应用

（一）BIM技术应用

1. 全生命周期建模

在地铁车站建筑设计中，全生命周期建模是BIM技术应用的关键环节。借助BIM技术，从规划阶段开始，就对地铁车站进行数字化建模，整合建筑、结构、机电等各专业信息，构建包含几何、物理、功能等属性的三维模型。在设计阶段，通过此模型进行多专业协同设计，各专业人员可实时共享和更新信息，提前发现并解决设计冲突。施工阶段，依据模型开展施工模拟，对施工进度、资源调配等进行预演，优化施工方案。运营阶段，利用模型进行设备管理、维护计划制定等。这种全生命周期建模，贯穿地铁车站从规划到运营的各个阶段，极大提高了设计质量与效率，降低成本和风险^[9]。

2. 性能化仿真分析

性能化仿真分析通过运用数值模拟技术对地铁车站内人员疏散、烟气扩散等场景进行可视化验证。针对人员疏散场景，利用数值模拟构建车站空间模型，设定不同的人员密度、行走速度、出口位置等参数，模拟紧急情况下人员疏散过程，分析疏散时

间、拥堵点等关键指标，判断疏散设计是否满足安全要求。对于烟气扩散场景，依据火灾动力学原理，考虑火源位置、功率、通风条件等因素，模拟火灾发生时烟气的蔓延路径、温度分布及浓度变化，评估烟气对人员安全的影响，为防排烟系统设计提供科学依据^[10]。这种性能化仿真分析，能以直观的可视化结果辅助设计人员优化地铁车站建筑设计，提升车站的安全性与可靠性。

（二）绿色建造技术

1. 装配式施工工艺

在地铁车站建设中，装配式施工工艺聚焦预制混凝土构件在车站主体结构的应用。针对标准化连接节点，通过技术创新来提升连接稳固性与施工效率。在构件制造环节，严格把控质量，采用高精度模具，确保构件尺寸精准，为后续高效安装奠定基础。在连接节点设计上，研发新型连接方式，比如运用高强螺栓连接结合灌浆套筒技术，这种方式不仅能增强节点的力学性能，还能减少现场湿作业，降低粉尘与噪音污染。在施工现场，利用先进的吊装设备与定位系统，精准定位预制构件，提高安装精度，进一步提升施工的整体质量与速度，从而实现绿色、高效的地铁车站建造，推动建筑行业的可持续发展。

2. 节能技术体系

在地铁车站建筑设计中，节能技术体系的关键在于建立涵盖通风空调优化、采光导光装置应用等技术的能源管理系统。通风空调系统在地铁能耗中占比较大，通过优化通风空调技术，可依据车站内实时客流量、温度、湿度等环境参数，精准调控设备运行功率，实现按需供冷供热，极大降低能耗。采光导光装置应用方面，在车站合适位置设置采光口，引入自然光，并利用导光管等装置将光线均匀分配至站内空间，减少人工照明使用时长。二者有机结合形成能源管理系统，能实时监测与分析车站能源使用情况，依据数据分析结果动态调整各项节能设备运行策略，最终达成高效节能，助力地铁车站绿色可持续发展。

（三）智慧车站系统

1. 智能感知网络

在地铁车站智慧车站系统的智能感知网络中，物联网技术的应用至关重要。借助各类传感器，如红外传感器、压力传感器

等，实现对客流的精准监测。这些传感器能够实时捕捉乘客进出站的流量、流向以及在站内不同区域的分布情况等关键数据。同时，利用智能感知设备对车站内各类设备的状态进行实时反馈。通过在设备关键部位安装传感器，收集设备运行的温度、振动、电流等参数，及时发现设备潜在故障隐患，确保设备稳定运行。基于物联网技术将这些分散的感知数据进行整合传输，构建统一的智能感知网络，为车站的运营管理提供全面、准确、实时的数据支持，实现地铁车站高效、智能的运营管理。

2. 应急管理平台

在地铁车站建筑设计中，应急管理平台的关键技术集成应用极为重要。通过开发集成消防报警、应急广播、逃生引导的智慧化管控系统，实现各子系统间高效协同。消防报警系统能精准探测火灾隐患，及时发出警报信号。应急广播可将疏散指令、安全提示等信息迅速传达给站内人员。逃生引导系统借助智能标识、指示灯等，为乘客在紧急情况下规划最优逃生路线。这种集成化设计，打破了各系统间信息壁垒，极大提升应急响应速度与处置效率，确保在突发事件发生时，能快速且有序地引导乘客疏散，保障人员生命安全，减少财产损失，为地铁车站安全高效运营提供坚实技术支撑。

五、总结

通过系统归纳建筑设计方法论与关键技术成果，明确了地铁车站建筑设计的科学路径与技术支撑。提出地下空间开发强度与人防标准动态适配理论，为地铁车站不同环境、不同发展阶段下的建设，提供了兼顾资源利用与安全保障的新思路，实现了地下空间开发与人防功能的有机结合。同时，对智慧运维系统在城市轨道交通网络中的集成应用方向的展望，展现出地铁车站未来发展趋势，通过智能化手段提升运营管理效率与服务质量。这些研究成果不仅完善了地铁车站建筑设计的理论体系，更为实际工程建设提供了科学指导，助力城市轨道交通事业向更高效、安全、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 牟新琪. 基于全过程的地铁车站建筑设计管理研究 [D]. 山东大学, 2022.
- [2] 王莹. 地铁车站深基坑施工关键技术研究及监测分析 [D]. 安徽理工大学, 2022.
- [3] 李浩. BIM技术在地铁车站综合管线中的应用研究 [D]. 中国矿业大学(江苏), 2021.
- [4] 李洋. BIM技术在地铁车站空间环境设计中的应用研究 [D]. 苏州科技大学, 2021.
- [5] 谢梦楚. 地铁车站施工安全风险评价与仿真 [D]. 兰州理工大学, 2021.
- [6] 梅鼎. 浅析地铁车站建筑设计的易错问题 [J]. 建材发展导向, 2022, 20(06): 79-81.
- [7] 林艺勇. BIM技术在地铁车站建筑设计中的实践 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(20): 32-33.
- [8] 马腾霄, 邵生俊, 吴昊, 等. PBA工法装配式地铁车站结构设计关键技术研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S01): 1296-1303.
- [9] 李俊玲, 陈成. 地铁车站建筑设计中防火安全问题的探讨 [J]. 工程建设与设计, 2021, (22): 7-10.
- [10] 黄美群, 杨秀仁, 钟元元, 等. 装配式地铁车站结构接缝防水关键技术研究与应用 [J]. 都市轨道交通, 2023, 36(02): 62-71.

烟草废水零排放技术及其工程设计实例分析

陈梓晟

森海环保集团有限公司, 广东 广州 510506

DOI:10.61369/ME.2025110023

摘 要： 烟草废水中含有大量有机物、氨氮及部分无机盐等污染物，传统处理方法难以满足日益严格的排放标准。零排放技术通过物理、化学和生物处理技术的综合应用，能够有效去除废水中的各类污染物，实现废水的资源回用和零排放。本文对烟草废水零排放技术的关键技术进行了详细探讨，分析了多级处理工艺、系统设计及其工程应用实例。研究表明，零排放技术不仅符合环保要求，还具有显著的经济效益，对推动烟草行业的可持续发展具有重要意义。

关 键 词： 烟草废水；零排放技术；污染物去除

Analysis of Tobacco Wastewater Zero Discharge Technology and Its Engineering Design Case Study

Chen Zicheng

ENVITEK GROUP LIMITED. Guangzhou, Guangdong 510506

Abstract： Tobacco wastewater contains a large amount of organic matter, ammonia nitrogen, and certain inorganic salts, making traditional treatment methods inadequate to meet increasingly stringent discharge standards. Zero discharge technology, through the integrated application of physical, chemical, and biological treatment methods, effectively removes various pollutants from wastewater, achieving resource recovery and zero discharge. This paper provides a detailed discussion on the key technologies of zero discharge for tobacco wastewater, analyzing multi-stage treatment processes, equipment selection, system design, and engineering application examples. The study shows that zero discharge technology not only meets environmental protection requirements but also delivers significant economic and social benefits, playing a crucial role in promoting the sustainable development of the tobacco industry.

Keywords： tobacco wastewater; zero discharge technology; pollutant removal

引言

烟草废水的处理一直是环保领域中的重要课题，随着环保法规的日益严格，烟草企业面临着废水排放标准的不断提高。烟草废水中含有大量的有机物、氨氮及部分无机盐等污染物，对水体和环境构成严重威胁。为了满足日益严格的环保要求，烟草废水的零排放处理技术应运而生，成为实现废水资源化和环境保护的重要手段。零排放技术通过多种先进的物理、化学和生物处理方法的联合应用，不仅能够有效去除废水中的各类污染物，还能回用资源（主要为生产回用和绿化灌溉回用），降低运营成本。随着技术的不断发展和成熟，零排放技术逐渐在烟草行业中得到应用，具有显著的经济效益和环境效益。

一、烟草废水零排放技术概述

（一）烟草废水的来源与污染特征

烟草废水是烟草加工过程中产生的副产品，主要来源于烟叶的浸泡、清洗、发酵及烘干等工艺环节。废水中含有大量有机物、无机盐、氮磷化合物及部分可能来源于加工材料的微量重金属，污染特征表现为较高的化学需氧量（COD）、生物需氧量

（BOD）及悬浮物（SS）浓度，具有较强的有机污染性和较高的水污染负荷。其有机物主要来源于烟叶表面及加工过程中的残留物，尤其是糖类和蛋白质，难以完全降解。此外，在烟草种植和加工的部分环节中，可能存在因烟叶携带的残余农药、杀虫剂等引入少量污染物的情况，需进一步分析其在废水中的浓度与来源特性。烟草废水的 pH 值通常呈偏酸性（典型范围 5.0–6.5），且氮（以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计，典型浓度 30–150 mg/L）、磷（以 TP 计，典

型浓度5–25 mg/L)含量较高,易引发水体富营养化^[1]。污染物种类和浓度直接影响处理工艺选择及废水治理难度,深入分析这些特征对优化零排放技术具有重要意义。

（二）零排放技术的基本概念与发展背景

零排放技术是一种综合应用多种水处理技术,实现废水处理后不向外界排放污染物的方法,其核心目标是最大限度地回收水资源并减少有害物质排放。该技术的起源与水资源短缺和环境污染日益严重的背景密切相关,旨在提高工业废水处理效率,推动可持续发展。零排放技术还能实现水资源的循环利用,具有显著的环保和经济优势。随着技术的进步,零排放系统逐渐向集成化、智能化发展,处理效率和资源回收能力不断提升。在水污染防治政策趋严的背景下,零排放技术成为工业废水处理的主要趋势,尤其在烟草、化工和电力等高污染行业得到广泛应用。

二、烟草废水零排放技术的关键技术

（一）物理法：膜分离技术

膜分离技术是零排放体系中实现水资源回收的关键环节,它利用半透膜的选择性分离特性,能够高效去除水中的各类污染物。在实际应用中,通常采用超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)以及近年来推广较多的膜化学反应器(MCR)的组合工艺。超滤主要用于截留烟草废水中的大分子有机物,如蛋白质和糖类,以及胶体和悬浮物;纳滤则可进一步去除水中的二价离子和小分子有机物;反渗透能够高效脱除溶解性盐类(总溶解固体TDS)、重金属及剩余有机物,其去除率通常高于95%。而膜化学反应器(MCR)则是一种将化学处理与膜分离结合的水处理技术,通过化学反应强化污染物去除效能,并利用膜分离实现水质净化,可替代传统多级处理单元,节省占地,并与膜浓缩、蒸发结晶工艺配合实现浓盐水减量及近零排放。在实际应用中,反渗透进水的污染物浓度需要严格控制,因此前置的超滤、纳滤或膜浓缩预处理至关重要。这些预处理工艺不仅能够保障反渗透膜免受污染与堵塞,维持其长期稳定运行及通量,还能提升整个系统的处理效能。经过适当前处理后,反渗透可以将废水中的化学需氧量(COD)从较高浓度有效降低至50mg/L以下,水质条件可满足比排放标准更严格的回用水标准(如GB/T 18920,GB/T 19923)^[2]。然而,膜污染和运行能耗仍然是当前面临的主要挑战。为了提升经济性,需要持续优化膜材料性能、运行参数(如压力、流速)以及系统设计(如抗污染流道、能量回收)等方面。

（二）化学法：高级氧化法与化学沉淀法

在烟草废水处理中,高级氧化法(AOPs)与化学沉淀法为实现废水零排放的核心化学技术。

高级氧化法通过强氧化性自由基【如羟基自由基($\cdot\text{OH}$)】高效降解难微生物分解有机物。Fenton法为高级氧化法的典型代表,Fenton试剂在催化作用下产生 $\cdot\text{OH}$,最佳条件下对烟草废水COD去除率可达72.26%^[3];联合超声波技术可提升至76.99%^[4],显著强化有机物矿化效率。

化学沉淀法则通过投加药剂使溶解态污染物(重金属离子、

磷酸盐等)转化为不溶性沉淀物,以实现污染物从水体中取出。较为典型的化学沉淀法有投加碱的氢氧化物沉淀法和投加硫化物的硫化物沉淀法。氢氧化物沉淀法经济适用,硫化物沉淀法对特定重金属去除效率更优。然而,该类技术均存在药剂消耗、增加污泥产量等局限,需与物理或生物技术协同应用,以降低运行成本并提升系统稳定性。

（三）生物法：生物滤池

生物滤池通过滤料表面生物膜降解烟草废水中有机物,池底曝气强化氧传递效率,显著提升COD、BOD及氨氮去除率。如合肥卷烟厂采用水解酸化耦合生物滤池工艺,出水COD<50 mg/L、氨氮<5 mg/L,满足GB/T 18920回用标准。较活性污泥法,其占地面积减少80%,无需二沉池;滤料切割气泡设计提高氧利用率30%以上,兼具抗负荷冲击与低维护优势^[5]。

（四）综合技术：多级处理与组合技术的应用

烟草废水高标准处理常需在优化预处理及生化处理的基础上,强化深度处理环节。通过物化与生化单元优化组合,并集成膜分离(如MCR、RO)或高级氧化等深度技术,构建多级处理链。例如,优化活性污泥法运行参数后,耦合RO工艺可将COD由1200 mg/L深度处理至50 mg/L以下,满足《城市杂用水水质标准》(GB/T 18920–2020)要求。化学沉淀与膜技术的协同应用,可提升重金属去除率至90%以上并优化膜性能。技术互补显著强化了污染物梯级去除效能及水资源回用水平^[6]。

三、烟草废水零排放工程设计

（一）系统设计与工艺流程

烟草废水高标准处理系统采用分级处理模式。预处理阶段设置格栅与初沉池,高效截留悬浮物及大颗粒杂质,减轻后续负荷。生化处理为核心环节,优选活性污泥法或厌氧反应器,通过微生物代谢作用高效降解有机物。深度处理阶段集成膜分离技术(如纳滤/反渗透)与高级氧化工艺,深度脱除溶解性盐类、重金属及微量有机物,保障出水COD稳定低于50 mg/L,满足《城市杂用水水质标准》(GB/T 18920–2020)回用要求。

（二）水处理效果与回用水水质标准分析

烟草废水零排放工程以再生水回用为核心目标,关键水质指标(COD、氨氮、总磷等)需符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920–2020)要求。多级处理工艺可高效去除污染物,例如“气浮–水解–MBR–反渗透”组合工艺实现出水COD<30 mg/L、氨氮<5 mg/L,符合上述标准限值^[7]。

（三）工程应用实例与案例分析

国内烟草废水处理工程实践表明多技术组合的有效性。广东中烟广州卷烟厂(1200 t/d)采用“气浮+厌氧+缺氧+好氧+混凝沉淀+生物滤池”工艺,实现出水100%绿化回用。合肥卷烟厂采用“气浮+水解+MBR+反渗透”工艺^[8],出水COD低于50 mg/L,氨氮低于5 mg/L,满足《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920–2020)中规定的绿化、道路清扫、消防、建筑施工等用途的水质要求^[9]。红安卷烟厂(400 t/d)全地埋式

处理站实现中水回用（绿化、道路等），达成零排放^[10]。合理设计的多级物化生技术组合可实现污染物高效去除及水资源回用，具备显著环境经济效益。

四、结束语

烟草废水零排放技术结合物理、化学和生物手段，显著提高废水处理效率，实现资源回收与利用。通过精确的系统设计与设备配置，可有效去除 COD、氨氮、磷和重金属等污染物，同时降

低能耗和运营成本。现有工程案例表明，多级处理与组合技术不仅能确保水质达标回用，还能提高系统稳定性与经济性。随着技术的不断创新，烟草废水零排放工程将进一步优化，为工业废水的绿色处理和环境保护提供重要支持。零排放技术已成为烟草及其他重污染行业可持续发展的关键方向。

参考文献

[1] 戴泽军, 黄明, 毛文煜, 等. 烟草废水溶氧-好氧池出水 COD 浓度模型研究 [J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S1): 162-167.

[2] 王艳青, 吕新亮, 田晓辉, 等. 造纸法烟草薄片废水处理运行分析及工艺探讨 [J]. 中国造纸, 2024, 43(3): 142-147.

[3] 马迅, 殷艳飞, 王浩雅, 向海英. Fenton 氧化法去除造纸法再造烟叶废水 COD 的研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2014, 36(3): 418-422.

[4] 马迅, 殷艳飞, 王浩雅, 等. 超声波协同 Fenton 氧化法去除造纸法再造烟叶废水 COD [J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4752-4756.

[5] 刘良才, 刘雨雪, 唐天明, 等. 外排水冲洗滤布对烟草薄片废水处理站生化池的影响 [J]. 中国造纸学报, 2023, 38(1): 82-87.

[6] 戴泽军, 毛文煜, 刘良才, 等. 造纸法烟草薄片废水化学需氧量的快速预测 [J]. 工业水处理, 2023, 43(7): 194-201.

[7] 刘飞. 煤化工废水零排放装置蒸发器长周期运行的探究 [J]. 工业用水与废水, 2024, 55(4): 67-71.

[8] 冯金河. “气浮+水解酸化+UASB+AO+芬顿法”对烟草废水处理工程应用 [J]. 广东化工, 2021, 48(22): 170-171.

[9] 贾健波. 煤制烯烃废水零排放工艺的生命周期评价及技术经济分析 [J]. 山东化工, 2023, 52(2): 212-216.

[10] 姜鹏飞, 石夏年. 浅谈工业废水零排放工艺应用 [J]. 生态环境与保护, 2023, 6(1): 25-27.

聚焦生态环境工程：生活垃圾填埋场与转运站的建设及运营管理新论

麦守廉

广东 中山 528467

DOI:10.61369/ME.2025110031

摘 要： 本文围绕生活垃圾填埋场与转运站，阐述多项建设运营管理要点。包括选址评估、环保设计、土工材料应用、工艺流线设计等工程技术，还涉及智能化运维、环境保障与技术创新，如导电土工膜研发、生物屏障技术应用等，强调环境风险预警，指出智能化、生态化趋势及相关发展建议。

关 键 词： 生活垃圾填埋场；生活垃圾转运站；环境保障

Focus on Ecological Environment Engineering: New Perspectives on the Construction and Operation Management of Municipal Solid Waste Landfills and Transfer Stations

Mai Shoulian

Zhongshan, Guangdong 528467

Abstract： This article focuses on municipal solid waste landfills and transfer stations, elaborating on key aspects of their construction and operational management. It covers engineering technologies such as site selection assessment, environmental protection design, geosynthetic material applications, and process flow design. Additionally, it addresses intelligent operation and maintenance, environmental safeguards, and technological innovations, including the development of conductive geomembranes and the application of bio-barrier technology. The paper emphasizes environmental risk early warning systems, highlights trends in intelligent and ecological development, and provides relevant recommendations for future progress.

Keywords： municipal solid waste landfill; municipal solid waste transfer station; environmental protection

引言

2020年颁布的《关于加强生态环境领域科技创新 推动美丽中国建设的实施意见》强调了在生活垃圾处理设施建设运营中提升环保与技术水平的重要性。在生活垃圾填埋场与转运站的建设及运营管理中，选址评估、环境保护设计、材料应用、工艺规划等多个方面都关乎生态环境安全与资源合理利用。从防渗、除臭到智能化运维等一系列技术与管理措施，既符合当下环保要求，又顺应智能化与生态化发展趋势。这不仅体现了工程技术体系的规范化需求，也为未来在渗滤液资源化利用等方向的探索指明了道路，对促进生态环境工程发展意义重大。

一、生活垃圾填埋场建设关键技术

（一）选址评估与环境保护设计

在生活垃圾填埋场建设中，选址评估与环境保护设计至关重要。需依据特定水文地质条件筛选标准，考量地下水位深度、土壤渗透性等因素，以保障填埋场的稳定性与安全性^[1]。同时，严格遵循环境敏感区避让原则，远离自然保护区、水源地等区域，避免对生态环境造成重大影响。借助GIS技术构建选址评价模

型，综合分析地形、交通、人口分布等多方面因素，科学确定最佳选址。在环境保护设计方面，采用防渗系统双重保护设计，即HDPE膜与GCL结合，有效防止渗滤液泄漏，降低对地下水和土壤的污染风险，从而实现生活垃圾填埋场的可持续建设与运营。

（二）复合土工材料应用与库区构造

在生活垃圾填埋场建设中，复合土工材料的应用对库区构造起着关键作用。研究不同工况下土工膜接缝强度测试标准意义重大，合适的测试标准能准确评估土工膜接缝质量，保障其在填埋

场复杂环境中的稳定性^[2]。基于此,提出分层压实与导排盲沟协同设计,分层压实可有效提高填埋体的密实度,减少沉降,导排盲沟则能及时排除渗滤液,降低对土工材料的侵蚀,二者协同作用提升库区整体性能。同时,借助 FEA 模拟对边坡稳定性控制方案进行验证,模拟不同条件下边坡的力学响应,优化设计参数,确保库区边坡在长期运营中保持稳定,为生活垃圾填埋场的安全、环保运行奠定坚实基础。

二、生活垃圾转运站规划建造体系

(一) 功能分区与物流规划

在生活垃圾转运站规划建造体系的功能分区与物流规划中,需优化卸料-压缩-存储的工艺流线设计。通过建立转运量与服务半径的量化匹配模型,科学确定各功能区规模与布局。卸料区应方便垃圾车辆顺畅卸料,与压缩区紧密衔接,减少垃圾停留时间,降低二次污染。压缩区需根据转运量合理配置压缩设备,提高垃圾压缩效率。存储区要具备足够空间暂存压缩后的垃圾,且符合环保要求。同时,要精心规划物流路线,通过实证案例论证人车分流系统可显著提升安全效益,实现垃圾高效转运与人员安全保障的平衡,确保整个转运站运行的高效性与安全性^[3]。

(二) 压缩设备选型与降噪设计

在生活垃圾转运站的压缩设备选型方面,需对比选水平预压与垂直压缩的技术经济指标。水平预压设备在处理量较大、垃圾成分相对单一的场景下,可能在处理效率上更具优势,而垂直压缩设备则在空间利用和压缩比方面或许表现突出,通过对两者技术指标如压缩比、处理能力以及经济指标如设备采购成本、运行维护成本等的全面分析,提出模块化设备选配策略,依据转运站规模、垃圾特性等因素灵活组合设备模块,提高设备适配性。在降噪设计上,研发新型隔声屏障构造,该构造应综合考虑吸声、隔声等性能,采用新型吸声材料与合理的结构设计。同时开展现场声压级测试,依据测试结果对隔声屏障进行优化,确保转运站周边声环境符合环保标准,有效降低对周边居民生活的影响^[4]。

三、运营管理全周期控制体系

(一) 填埋场运营管理创新

1. 填埋作业标准化规程

制定单元式分层填埋作业标准,旨在优化填埋空间利用,确保垃圾填埋有序进行,减少对周边环境的影响^[5]。建立进场垃圾计量与分选管控流程,可精确掌握垃圾来源及成分,避免不符合填埋要求的垃圾入场,提高填埋效率与质量。对于开发作业面临时覆盖技术规范,这不仅能有效防止垃圾暴露造成的扬尘、异味扩散等问题,还能在一定程度上抑制垃圾中有害成分的挥发。通过这一系列填埋作业标准化规程,从垃圾入场的源头把控,到填埋过程的规范操作,再到作业面临时覆盖的有效管理,形成一套完整的标准体系,全面提升生活垃圾填埋场运营管理水平,助力生态环境工程建设。

2. 渗滤液动态处理技术

在生活垃圾填埋场运营管理创新中,渗滤液动态处理技术至关重要。需深入解析渗滤液水质随填埋年限的演变规律,不同填埋阶段渗滤液成分差异显著,这为处理工艺的动态调整提供依据。基于此,构建 MBR+NF 集成处理工艺,MBR 即膜生物反应器,能高效去除有机物和悬浮物,NF 为纳滤,可进一步截留二价及多价离子等,实现对渗滤液的深度净化^[6]。同时,对浓缩液雾化回灌的可行性展开研究验证,该方式若可行,不仅能减少浓缩液的产生量,降低后续处理难度,还可在一定程度上利用填埋场自身的净化能力,优化渗滤液处理流程,实现填埋场渗滤液处理的高效性与可持续性。

(二) 转运站智慧运维系统

1. 设备预防性维护体系

在转运站智慧运维系统的设备预防性维护体系中,基于物联网搭建压缩机状态监测系统至关重要。借助物联网技术,可实时精准采集压缩机运行数据,涵盖温度、压力、振动等关键参数,实现对设备运行状态的全方位动态感知。同时,深入分析这些数据,结合设备使用频率、工况条件等因素,科学制定关键部件更换周期标准,防止因部件过度磨损或老化引发故障,降低设备突发故障概率,保障转运站的高效稳定运行。此外,开发维修作业 VR 培训模块,通过模拟真实维修场景,让维修人员沉浸式学习维修流程、掌握操作技巧,提升维修人员的专业技能和应急处理能力,从而更好地执行预防性维护任务,为转运站设备的可靠运行筑牢根基^[7]。

2. 智能化调度管理系统

在转运站智慧运维系统的智能化调度管理系统中,构建垃圾清运车 GPS 定位平台至关重要。通过这一平台,能够实时精准获取垃圾清运车的位置、行驶轨迹等信息,从而实现转运量与车辆调度的动态匹配。依据不同区域垃圾产生量的变化,灵活且高效地调配车辆,避免车辆资源的浪费或不足。同时,借助大数据驱动故障预警机制^[8],收集、分析车辆运行过程中的各类数据,如发动机状态、零部件损耗等,提前预测可能出现的故障,以便及时安排维护与检修,保障车辆稳定运行,提升整体转运效率,确保转运站运营管理全周期的顺畅与高效。

四、环境保障与技术创新路径

(一) 新型防渗技术研究

1. 导电土工膜研发

在生活垃圾填埋场的环境保障与技术创新路径探索中,导电土工膜研发意义重大。通过实验分析石墨烯改性 HDPE 膜的力学性能与渗漏检测灵敏度,能够深入了解其特性。研究发现,石墨烯的加入可显著改善 HDPE 膜的力学性能,使其在填埋场复杂环境下更具耐久性。同时,对渗漏检测灵敏度的评估表明,该改性膜在填埋场全生命周期监测中展现出独特优势,能更精准、及时地发现渗漏问题,大大提高防渗效果。这一新型导电土工膜有望成为生活垃圾填埋场防渗的关键技术,为填埋场的长期稳定运营

提供坚实保障，有效降低对周边生态环境的潜在威胁^[9]。

2.生物屏障技术应用

在生活垃圾填埋场与转运站的建设及运营管理中，生物屏障技术应用是新型防渗技术研究的关键一环。研究功能菌群在黏土改性中的应用，借助功能菌群对黏土特性的优化，可提升其防渗性能。例如，特定功能菌群能够与黏土颗粒发生相互作用，改变黏土的微观结构，使其孔隙率降低，从而减少渗滤液的渗漏^[10]。同时，开展生物防渗墙中试试验，通过模拟实际工程环境，检验生物防渗墙的可行性与有效性，获取相关技术参数。并且，对生物防渗墙进行长期稳定性监测至关重要，及时掌握其不同环境条件及运行时间下的性能变化，为生物屏障技术在生活垃圾填埋场与转运站中的广泛应用提供坚实的技术支撑，实现更好的环境保障。

（二）全过程除臭技术集成

1.负压收集系统优化

设计转运站风幕隔离与梯度负压控制方案，是优化负压收集系统的关键环节。风幕隔离可有效阻止臭气外溢，形成一道无形屏障，减少对周边环境的影响。通过 CFD 模拟，能直观呈现气体流动状况，据此对集气效率进行优化，提高臭气收集效果，使收集过程更具针对性与科学性。同时，比对不同材质风管耐腐蚀性能也至关重要。生活垃圾转运站的臭气成分复杂，具有腐蚀性，风管长期处于这样的环境中，其材质的耐腐蚀性能直接影响使用寿命与收集效果。选择合适的耐腐蚀风管材质，能确保负压收集系统长期稳定运行，为全过程除臭技术集成提供坚实基础，从而实现生活垃圾填埋场与转运站生态环境工程的高效建设与运营管理。

2.复合除臭工艺开发

构建化学洗涤 - 生物滤池 - 光催化氧化三级处理体系，能有效应对生活垃圾填埋场与转运站臭气问题。化学洗涤利用化学药剂与臭气中污染物发生化学反应，快速去除部分易溶性臭气成分，调整臭气的化学性质。生物滤池则借助微生物的新陈代谢作用，将剩余的可生物降解臭气转化为无害物质，其处理效果稳定且环保。光催化氧化依靠光催化剂在光照下产生的强氧化性物质，进一步分解难以降解的臭气成分。通过实证研究不同臭气浓度下各环节的运行参数优化，如化学洗涤的药剂浓度、喷淋量，生物滤池的温度、湿度、停留时间，光催化氧化的光照强度、催化剂量等，使三级处理体系协同作用，最大程度提高除臭效率，实现复合除臭工艺的高效开发与应用，保障生态环境工程中垃圾处理场所的空气质量。

参考文献

- [1] 康霄.生活垃圾填埋场生态修复与景观设计研究——以济南济北填埋场为例 [D]. 山东建筑大学, 2022.
- [2] 吕文娟. 基于生态修复的生活垃圾填埋场景观再生设计研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2022.
- [3] 安晓雯. 低碳视角下的生活垃圾转运站选址及路径优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2022.
- [4] 陈佳卉. 生活垃圾转运站选址对城市住区恶臭扩散的影响 [D]. 浙江大学, 2022.
- [5] 呼延震. 城市生活垃圾填埋场液气迁移规律及调控措施研究 [D]. 大连海事大学, 2021.
- [6] 丁伟杰. 生活垃圾转运站除臭技术及典型工艺研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(10): 92-94.
- [7] 邱莹. 生活垃圾转运站建设水平评价 [D]. 华中科技大学, 2016.
- [8] 陈伟洲. 生活垃圾填埋场治理技术方案探究 [J]. 低碳世界, 2022, 12(12): 31-33.
- [9] 冯华一. 生活垃圾填埋场渗滤液的处理及利用方法研究 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(6): 43-45.
- [10] 刘玉文. 利用生活垃圾填埋场上建设飞灰固化物填埋场适宜性探讨 [J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(1): 20-24.

（三）数字化管理平台构建

1.BIM技术深度应用

在生态环境工程中的生活垃圾填埋场与转运站建设及运营管理里，BIM 技术深度应用意义重大。建立包含隐蔽工程的精细化 BIM 模型，能对填埋场和转运站的各个结构与系统进行精确呈现，无论是地下的管道铺设，还是不易察觉的基础结构，都能清晰展示，为施工与后期维护提供准确参照。开发施工进度模拟系统，借助 BIM 模型将工程各环节以可视化形式呈现，可预估不同阶段所需时间与资源，及时发现潜在问题并优化方案。运营维护信息集成系统则整合设备信息、维修记录等数据，便于管理人员快速掌握设施状态，通过 BIM 模型直观定位故障点，提升运维效率，助力生活垃圾填埋场与转运站高效运行，达成环境保障与技术创新的双重目标。

2.环境风险预警系统

在生活垃圾填埋场与转运站的运营管理中，环境风险预警系统至关重要。通过集成渗漏监测、沉降监测与地下水水质监测数据，构建多源信息融合的预警指标体系。渗漏监测可及时发现填埋场底部防渗层是否破损，防止渗滤液泄漏污染土壤和地下水；沉降监测能掌握填埋场场地的稳定性，避免因不均匀沉降引发安全事故；地下水水质监测则直接反映地下水受污染状况。将这些数据整合，能全面、精准地评估环境风险。依据该预警指标体系，一旦相关数据超出安全阈值，系统可迅速发出预警，提醒管理人员及时采取措施，如修复防渗层、调整填埋方式等，从而有效降低环境风险，保障生态环境安全，实现生活垃圾填埋场与转运站的可持续运营。

五、总结

在生态环境工程领域，生活垃圾填埋场与转运站的建设及运营管理至关重要。提炼出的工程技术体系，为其规范化发展奠定基础。智能化与生态化成为显著发展趋势，不仅提升效率，还减少对环境的影响。制定柔性防渗标准，能更好适应不同地质条件，保障地下水环境安全；建立区域协同运维机制，整合资源，提高整体管理效能。渗滤液资源化利用等研究方向的展望，旨在实现资源循环利用，降低环境污染。未来，应围绕这些技术、趋势、建议与方向持续探索，促进生活垃圾填埋场与转运站建设运营管理的不断完善，为生态环境保护提供有力支撑。

环境检测领域嵌入式设备研发与创新路径探究

吴长忠

山东 菏泽 247000

DOI:10.61369/ME.2025110033

摘 要： 环境检测领域嵌入式设备有独特技术特征，研发管理存痛点。硬件架构创新、软件系统优化可提升性能。迭代式需求管理、跨学科协同开发等能保障研发质量与进度。建立可靠性验证体系、持续集成部署方案利于质量控制。其在大气、水质监测中有创新应用，创新效益评价、标准化建设、产学研协同对推广应用重要，未来应沿技术创新路径持续发展。

关 键 词： 嵌入式设备；环境检测；研发管理

Research and Innovation Path of Embedded Devices in Environmental Monitoring Field

Wu Changzhong

Heze, Shandong 247000

Abstract： Embedded devices in the field of environmental detection have unique technical characteristics, and there are pain points in research and development management. Hardware architecture innovation and software system optimization can improve performance. Iterative requirement management and interdisciplinary collaborative development can ensure the quality and progress of research and development. Establishing a reliability verification system and continuously integrating deployment plans is beneficial for quality control. It has innovative applications in atmospheric and water quality monitoring, and innovation benefit evaluation, standardization construction, and industry university research collaboration are important for promotion and application. In the future, it should continue to develop along the path of technological innovation.

Keywords： embedded devices; environmental monitoring; R&D management

引言

随着环境保护意识的增强，环境检测的重要性日益凸显。2023 年颁布的《生态环境监测规划纲要（2023—2035 年）》为环境检测领域发展指明方向。环境检测领域嵌入式设备凭借独特技术特征在环境监测中发挥关键作用，然而其研发项目管理存在诸多痛点。通过硬件架构创新、软件系统优化、采用迭代式需求管理和跨学科协同开发等方式，能提升设备性能与研发效率。构建可靠性验证体系、实施持续集成部署方案可保障设备质量。此外，还需从标准化建设、产学研协同等方面推动其推广应用，以满足环境检测智能化发展需求。

一、环境检测嵌入式设备研发现状分析

（一）环境检测领域嵌入式设备技术特征

环境检测领域嵌入式设备具有独特技术特征。在传感器集成方面，需能整合多种类型传感器，如针对大气污染源监测，要集成气体传感器以精准检测二氧化硫、氮氧化物等污染物浓度；在水质监测时，集成酸碱度、溶解氧等传感器。这要求设备具备强大的兼容性与接口适配能力^[1]。数据采集精度至关重要，污染源成分复杂且含量差异大，设备需精确采集数据，比如精确到微克级别的重金属含量检测，为污染治理提供可靠依据。低功耗设计也是关键，因许多环境检测场景需设备长时间不间断运行，如野外无人值守监测站，低功耗能确保设备依靠有限能源长期稳定

工作，减少能源补给频率与成本，提升设备整体运行效率与可靠性。

（二）研发项目管理现状与挑战

在环境检测嵌入式设备研发项目管理方面，存在诸多亟待解决的痛点。需求变更频繁是一大难题，由于环境检测场景复杂且动态变化，新的检测指标、法规要求不断涌现，导致项目需求难以在初始阶段就准确界定，频繁变更给项目进度和成本控制带来巨大挑战^[2]。跨学科协作困难也较为突出，环境检测嵌入式设备研发涉及电子工程、环境科学、计算机科学等多学科领域，各学科团队知识体系和工作方式差异大，信息沟通不畅，协同效率低下。此外，测试验证周期长也是一大阻碍，环境检测设备对准确性和可靠性要求极高，需在多种复杂环境下进行长时间测试验证

证，这无疑延长了项目周期，增加了研发成本与风险。

二、嵌入式设备技术创新路径

（一）硬件架构创新方向

在环境检测领域，嵌入式设备硬件架构创新意义重大。基于 RISC-V 的可重构处理器设计是关键方向。RISC-V 指令集具有开源、灵活可定制的特点，能够根据环境检测设备的具体需求，如功耗、处理速度、数据精度等进行针对性的架构设计^[3]。这不仅有助于降低成本，还能提升设备对复杂环境检测任务的适应性。同时，通过合理部署边缘计算节点，优化硬件架构中的数据处理流程，减少数据传输延迟，实现实时性的环境数据处理与分析。此外，多模态传感器融合技术促使硬件架构创新，需设计能够高效融合不同类型传感器数据的硬件模块，从而更全面、准确地获取环境信息，提升环境检测嵌入式设备的性能与功能。

（二）软件系统优化策略

在环境检测领域嵌入式设备的软件系统优化策略方面，实时操作系统定制化开发至关重要。依据环境检测场景特点，对操作系统内核进行精简与优化，去除不必要功能，降低资源占用，提升系统运行效率^[4]。数据预处理算法优化也不容忽视，通过改进传统算法或引入新算法，提高数据采集精度，去除噪声与异常数据，增强数据可靠性，为后续分析提供高质量数据基础。此外，基于机器学习的异常检测模型轻量化实现方案，针对嵌入式设备资源有限的特性，采用模型剪枝、量化等技术，在不显著降低检测精度前提下，减少模型参数量与计算量，实现模型在嵌入式设备上的高效运行，确保环境检测工作稳定、高效开展。

三、研发项目管理创新实践

（一）敏捷开发流程优化

1. 迭代式需求管理方法

在环境检测领域嵌入式设备研发中，迭代式需求管理方法至关重要。通过建立环境监测设备需求变更控制矩阵与多版本基线管理机制，实现对需求的精准把控。需求变更控制矩阵详细记录每次需求变更的提出者、时间、内容、影响范围及处理状态等，便于团队成员清晰了解变更情况，防止需求混乱^[5]。多版本基线管理机制则针对不同阶段的设备功能需求，确定相应的基线版本。随着研发推进，新需求不断融入，基线版本持续更新。每一个基线版本都作为后续开发的基础，确保开发过程有序进行，在满足环境检测不断变化需求的同时，保障设备研发的质量与进度。

2. 跨学科协同开发模式

在环境检测领域嵌入式设备研发中，跨学科协同开发模式是关键。构建电子工程、环境科学、数据科学多领域专家的知识共享平台与并行开发工作流十分必要。电子工程师可凭借其专业知识，设计高效稳定的硬件架构，为设备提供坚实物理基础。环境科学家则依据对环境检测需求的深刻理解，提出精准的功能要求，确保设备符合实际应用场景。数据科学家运用数据分析技

术，助力优化设备数据处理能力。通过知识共享平台，各领域专家可实时交流，打破学科壁垒，并行开发工作流能使不同环节同步推进，提高研发效率，避免传统串行开发的时间浪费，加速环境检测领域嵌入式设备的创新研发进程^[6]。

（二）全生命周期质量控制

1. 可靠性验证体系构建

在环境检测领域嵌入式设备的可靠性验证体系构建中，需设计科学合理的评估指标体系与实施规程。对于极端环境模拟测试，应明确诸如温度、湿度、压力等极端条件参数范围，考量设备在这些条件下性能的稳定性、数据采集的准确性等指标^[7]。通过模拟沙漠高温、极地低温等极端场景，检验设备能否正常运行。在长期稳定性监测方面，要设定设备连续运行时长、数据传输准确性与完整性等指标，制定定期巡检、数据对比分析等实施规程。持续监测设备在长时间运行过程中的各项性能，及时发现潜在问题，确保设备在复杂多变的环境检测场景下始终保持可靠，为全生命周期质量控制提供坚实保障。

2. 持续集成部署方案

在环境检测领域嵌入式设备研发中，持续集成部署方案对于全生命周期质量控制至关重要。建立自动化构建流程，将代码变更自动触发编译、测试等环节，确保每次代码提交都能快速验证是否符合质量要求。针对环境监测设备特点，优化测试用例，涵盖功能、性能、环境适应性等多方面，在持续集成中全面检测潜在问题。采用容器化技术，将应用程序及其依赖打包成容器，实现环境一致性，便于在不同环境中快速部署。结合远程固件升级管理策略，利用云平台等实现设备固件的远程更新。通过持续集成与部署，能够及时发现并修复问题，提升产品质量，保障环境检测嵌入式设备在全生命周期内稳定运行^[8]。

四、创新应用实践与效果评估

（一）典型应用场景案例分析

1. 大气污染网格化监测系统

在大气污染网格化监测系统中，基于新型嵌入式设备的大气参数分布式采集网络有着创新性应用。该系统将多个嵌入式设备部署于网格节点，实现对大气中多种污染物参数的实时采集。例如，在某城市的大气污染监测项目中，这些嵌入式设备能精准采集二氧化硫、氮氧化物等污染物浓度数据。通过分布式部署，可全面掌握区域内大气污染状况。经数据对比验证，该系统采集的数据与传统监测站数据高度吻合，误差控制在极小范围内^[9]。这一创新应用极大提升了大气污染监测的精细化程度和效率，为环境管理部门制定精准的污染防治措施提供了可靠依据，在实际应用中取得了显著效果，有力推动了大气污染监测领域的技术发展。

2. 水质在线监测终端开发

在环境检测领域，水质在线监测终端开发是重要一环。通过多参数水质监测设备的模块化设计实践，实现了各功能模块的灵活组合与高效协同。例如，将传感器模块、数据处理模块、通信模块等合理布局，提升设备整体性能。在典型应用场景下，该终

端被部署于河流、湖泊等不同水域进行现场测试。通过与传统监测方式的数据对比分析发现,新开发的水质在线监测终端在精度、实时性等方面表现出色。其对酸碱度、溶解氧等关键参数的监测数据与传统方法测量值高度吻合,偏差在可接受范围内^[10]。这一成果不仅验证了模块化设计的有效性,更为水质在线监测提供了更高效、准确的技术手段,推动了环境检测领域嵌入式设备在水质监测方面的创新应用。

(二) 创新效益评价体系

1. 技术性能提升指标

在环境检测领域嵌入式设备的创新效益评价体系中,技术性能提升指标至关重要。检测精度是衡量设备性能的关键指标,高精度检测能为环境分析提供准确数据,例如对空气中污染物浓度的精准测量,偏差应控制在极小范围内。响应速度决定了设备能否及时捕捉环境变化,快速响应可使检测人员第一时间掌握环境动态,比如在突发环境污染事件中能迅速给出检测结果。能耗水平关乎设备运行成本与可持续性,低能耗设备不仅降低能源消耗,还能减少对环境的二次影响。通过建立检测精度、响应速度、能耗水平等多维度量化评估模型,能全面、科学地评估嵌入式设备技术性能提升情况,助力其在环境检测领域更好地创新发展。

2. 项目管理效能提升

在环境检测领域嵌入式设备研发项目中,通过对比分析敏捷开发实施前后需求实现率、缺陷密度、交付周期等关键指标变化,评估项目管理效能提升情况。敏捷开发实施后,需求实现率显著提高,这得益于敏捷开发注重客户反馈,能及时调整开发方向,精准满足实际需求。同时,缺陷密度明显降低,是由于敏捷开发的频繁迭代与测试,使得问题能在早期被发现并解决。交付周期也大幅缩短,其高效的沟通机制与灵活的团队协作模式,减少了不必要的流程与等待时间,有效提升了项目整体交付效率。这些关键指标的积极变化,充分体现了敏捷开发在环境检测领域嵌入式设备研发项目管理中的效能提升,为项目带来显著创新效益。

(三) 行业推广应用路径

1. 标准化建设方向

在环境检测领域,标准化建设对于嵌入式设备的推广应用至

关重要。针对环境监测嵌入式设备,应提出通信协议的标准建议方案。统一设备间通信协议,确保不同品牌、型号的设备能实现数据交互与共享,提高系统兼容性。同时,规范数据格式也不可或缺,清晰定义数据的结构、编码方式等,使采集的数据更易被处理与分析。这不仅能提升环境检测工作的效率与准确性,还能促进整个行业的规范化发展。通过建立这些行业标准,为环境检测领域嵌入式设备的大规模应用奠定坚实基础,推动行业朝着标准化、规范化方向迈进,最终提升我国环境检测整体水平。

2. 产学研协同机制

在环境检测领域,产学研协同机制对嵌入式设备的推广应用至关重要。构建设备制造商、环境监测机构、科研院所的创新联合体运行模式,能充分整合各方优势资源。科研院所凭借科研能力,深入开展前沿技术研究,为嵌入式设备研发提供理论支撑与技术储备;设备制造商基于自身生产制造经验与工艺,将科研成果转化为实际产品,确保设备的稳定性与可靠性;环境监测机构则在实际应用场景中对设备进行测试与反馈,帮助优化设备性能,使其更贴合实际需求。通过这种紧密的产学研协同,加速嵌入式设备在环境检测行业的推广应用,提高整体行业的检测效率与质量,实现创新成果的快速转化与广泛应用。

五、总结

在环境检测领域,嵌入式设备的技术创新路径涵盖多方面,包括硬件架构优化以提升性能、传感器融合实现精准检测等;项目管理则需重视流程规范与资源高效调配。随着智能化、微型化发展趋势,边缘计算与 AIoT 的融合将是重要研究方向,可实现数据就地处理与智能决策,提升环境检测实时性与自主性。为适应新型环境监测需求,研发体系应优化,如加强跨学科合作,促进多领域知识融合;注重人才培养,打造具备综合能力的研发团队;强化与行业需求对接,确保研发成果实用落地,以此推动环境检测领域嵌入式设备持续创新,更好服务于环境保护与监测事业。

参考文献

- [1] 李雅典. 基于路径覆盖的嵌入式设备模糊测试技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [2] 蔡睿智. 基于嵌入式设备的布匹瑕疵实时检测系统 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [3] 段路乾. 嵌入式设备固件安全检测关键技术研究 [D]. 北京工业大学, 2022.
- [4] 温杰. 基于 Linux 系统的嵌入式设备漏洞自动化检测技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.
- [5] 罗晶晶. 基于 4G 网络的嵌入式设备远程升级系统设计与实现 [D]. 吉林大学, 2021.
- [6] 刘坤明. 基于嵌入式设备的轻量级疲劳检测系统 [J]. 电子制作, 2022, 30(09): 24-26+6.
- [7] 张立国, 刘博, 孙胜春, 等. 基于嵌入式设备的 Anchor Free 行人检测 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30(09): 302-308.
- [8] 李仁旺, 杨柳, 陈高曙, 等. 一种应用于嵌入式设备的指印活性检测方法 [J]. 浙江工业大学学报, 2023, 51(01): 32-37.
- [9] 高晨, 张峰, 朱佩玉. 非标方法开发在环境检测领域中的应用案例 [J]. 标准科学, 2021, (12): 145-148.
- [10] 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.

城市燃气施工中工程管理的策略与实践

徐永深

广州燃气集团有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110053

摘 要 : 城市燃气工程管理对城市燃气系统安全稳定运行意义重大。其具有特殊性, 安全管理为核心。要构建全过程质量管理体系与风险分级管控机制, 运用 BIM、关键链等技术, 并规范有限空间作业等。同时需解决监理偏差等问题, 构建智慧工地等系统。未来应研发智能监测装备, 研究全过程造价控制。

关 键 词 : 城市燃气工程管理; 安全管理; 数字化转型

Strategies and Practices of Engineering Management in Urban Gas Construction

Xu Yongshen

Guangzhou Gas Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Urban gas engineering management is of great significance for the safe and stable operation of urban gas systems. It has its particularity, with safety management as the core. To establish a full process quality management system and risk grading control mechanism, utilizing technologies such as BIM and critical chain, and standardizing confined space operations. At the same time, it is necessary to address issues such as supervision deviations and build systems such as smart construction sites. In the future, intelligent monitoring equipment should be developed and cost control throughout the entire process should be studied.

Keywords : urban gas engineering management; safety management; digital transformation

引言

随着城市化进程的加速, 城市燃气工程作为重要基础设施, 其管理的科学性与安全性备受关注。2021 年颁布的《城镇燃气工程项目规范》对燃气工程从规划到运营的全流程提出了严格规范要求。城市燃气工程管理因燃气的特殊性质, 在安全、质量、风险等多方面有着独特要求。从质量管理体系构建到风险分级管控, 从 BIM 等技术应用到跨部门协同监管平台搭建, 一系列措施保障着燃气工程的稳定运行。但面对行业发展需求, 智能监测装备研发与全过程造价控制等方面仍待深入研究, 以推动城市燃气施工工程管理水平进一步提升。

一、城市燃气工程管理的基本理论

(一) 城市燃气工程管理的概念

城市燃气工程管理指对城市燃气项目从规划、设计、施工到运营维护全过程进行的综合性管理。其范畴涵盖气源的选择与供应、燃气输配系统的建设与管理、用户端设施的安装与服务等^[1]。在基础设施建设中, 城市燃气工程管理具有特殊性。燃气作为易燃易爆的能源, 对安全性要求极高, 一旦发生泄漏等事故, 将造成严重的人员伤亡与财产损失。这就决定了在工程管理各环节, 安全管理始终处于核心地位。与常规建筑工程管理相比, 城市燃气工程管理不仅要遵循一般的工程建设规范与流程, 还需着重考虑燃气的特殊性质。如在施工材料选择上, 需确保其具备良好的抗腐蚀、耐高压性能; 在施工过程中, 要严格执行燃气相关的安全操作规程, 对施工

人员的专业技能与安全意识要求更为严格。

(二) 燃气工程管理的特点与必要性

城市燃气工程管理具有独特特点与显著必要性。燃气介质具有高危特性, 其易燃易爆、有毒有害的属性, 对工程管理提出严格要求。一旦发生泄漏, 极易引发爆炸、火灾及中毒等严重事故, 因此管理过程中必须严格把控各个环节, 从设计、施工到运营维护, 都需采取针对性安全措施, 保障人员与环境安全^[2]。同时, 地下管网施工涉及复杂的系统性风险管控需求。城市地下空间布局错综复杂, 燃气管道铺设需与其他各类管线协调, 且施工过程中易受地质条件、周边建筑物等多种因素影响。若管理不善, 可能导致管道损坏、泄漏等风险, 影响燃气供应稳定性与安全性。所以, 有效的燃气工程管理对于确保城市燃气系统安全、稳定运行, 保障居民生活与城市发展至关重要。

二、燃气工程核心管理策略

（一）全过程质量管理体系构建

城市燃气施工质量关乎居民生命财产安全与城市稳定运行，构建全过程质量管理体系极为关键。从材料进场检验开始，需严格核查材料的规格、质量证明文件等，确保材料符合设计与规范要求。对于焊接工艺，要对焊工资质进行审查，同时控制焊接参数，如电流、电压、焊接速度等，保证焊接质量。在此过程中，引入 PDCA 循环，即 Plan（计划）阶段明确质量目标与流程；Do（执行）阶段严格按计划实施；Check（检查）阶段对施工过程及成果进行检查；Act（处理）阶段针对检查发现的问题分析原因、制定措施并改进。通过不断循环，持续优化燃气工程施工质量，实现对从材料到焊接工艺等全流程的质量把控^[3]。

（二）风险分级管控机制设计

城市燃气施工涉及众多复杂环节，风险分级管控机制设计至关重要。构建基于 LECD 法的风险评价模型，即通过对事故发生的可能性（L）、人员暴露于危险环境中的频繁程度（E）和一旦发生事故可能造成的后果（C）进行量化评估，计算出风险程度（D）。依据计算结果，将风险精准分级，高风险区域重点防范，如针对第三方破坏，提前做好标识与沟通，并强化监管。同时，要确保应急响应预案与风险分级紧密联动，高风险场景对应更高效、全面的应急策略，以此提升燃气工程整体安全性，有效降低事故发生概率与影响程度^[4]。

三、施工阶段管理实践分析

（一）施工过程动态管控

1. BIM 技术在地下管网冲突检测中的应用

在城市燃气施工阶段管理实践中，BIM 技术在地下管网冲突检测方面发挥着关键作用。城市地下管网错综复杂，燃气管道与其他各类管线交叉分布，传统检测手段难以有效发现潜在冲突。利用 BIM 技术进行三维建模，可直观呈现地下管网的空间布局。通过对模型的模拟分析，能够精准检测出燃气管道与其他管线在空间上的冲突点，如碰撞、间距不足等问题^[5]。这使得施工团队在实际施工前，就能提前发现并解决冲突，避免施工过程中的拆改返工，有效保障施工进度与质量，降低工程成本。通过这种动态管控方式，极大地提升了城市燃气施工中地下管网施工的科学性与合理性。

2. 进度管理中的关键链技术应用

在城市燃气施工进度管理中，关键链技术应用具有重要意义。建立资源约束下的进度控制模型，旨在考虑资源有限性对施工进度影响。通过分析市政道路占道施工窗口期的协同策略，确定燃气施工在道路施工中的最佳时间节点。关键链技术以项目约束理论为基础，识别出项目中的关键链，即受资源限制的最长路径^[6]。在城市燃气施工里，此技术能帮助管理者关注关键链上的活动，合理分配资源，避免资源冲突与浪费。例如，依据市政道路施工的窗口期，精准安排燃气管道铺设、设备安装等关键活

动的顺序与时间，确保燃气施工既不影响道路正常施工，又能高效推进自身进度，提高整体施工效率与效益，助力城市燃气工程顺利开展。

（二）施工现场安全管理

1. 有限空间作业安全标准化流程

在城市燃气施工的有限空间作业安全标准化流程中，制定气体检测、通风换气、人员监护的系统化操作规范至关重要^[7]。气体检测方面，需在作业前、作业中定时对有限空间内氧气、可燃气体、有毒有害气体等进行检测，以确保作业环境安全。通风换气时，要选用合适通风设备，将新鲜空气引入并排出有害气体，维持良好空气流通。人员监护环节，安排专业监护人员，在作业全程密切关注作业人员动态，一旦发现异常及时采取措施。通过这些系统化操作规范，明确每个环节的标准与要求，形成严谨的有限空间作业安全标准化流程，降低城市燃气施工有限空间作业风险，保障施工安全。

2. 管线焊接质量无损检测技术

在城市燃气施工的管线焊接质量无损检测技术中，射线检测与超声波检测在不同管径施工中适用性有别。射线检测能直观显示缺陷影像，对体积型缺陷敏感。对于小管径燃气管道，因其结构相对简单，射线检测可清晰呈现焊缝内部状况，准确判断缺陷位置与类型。而超声波检测基于声波反射原理，对面积型缺陷检测效果好。大管径燃气管道因壁厚增加，超声波检测更具优势，它能穿透较厚管壁，通过分析反射波信号确定缺陷信息。在实际施工中，需依据管径特点合理选择检测方法，以保障管线焊接质量，此过程可参考相关行业标准与过往成功案例^[8]，确保检测结果准确可靠，为城市燃气工程安全运行奠定基础。

四、工程管理优化对策

（一）现存管理问题诊断

1. 多标段施工界面管理盲区

在城市燃气施工多标段施工界面管理中，施工单位交接环节权责不清与信息断层问题突出。为优化此状况，应明确各施工单位在交接环节的具体职责，通过签订详细的责任界定协议，确保各方清楚知晓自身工作范围与义务，杜绝相互推诿现象。同时，搭建统一高效的信息沟通平台，要求各标段在平台实时更新施工进度、质量情况、技术要点等信息，实现信息的及时共享与传递，打破信息断层。此外，设立专门的协调管理小组，定期对各标段施工界面进行检查与评估，针对出现的问题及时协调解决，监督各单位履行职责与信息交互情况，以有效消除多标段施工界面管理盲区^[9]。

2. 监理机制有效性评估

通过实证数据分析可知，监理单位履责偏差的类型多样，成因复杂。部分监理人员专业能力不足，对燃气施工规范及技术标准掌握不透彻，导致在监督过程中无法精准发现问题，影响工程质量把控^[10]。同时，监理单位内部管理机制不完善，责任划分不明确，出现问题时易相互推诿，降低监理工作效率。此外，部

分监理单位受利益驱使，与施工方存在不正当关联，从而放松监管，致使监理机制流于形式。还有信息沟通不畅的问题，监理单位与建设方、施工方之间信息传递不及时、不准确，影响监理决策与指令的下达。综合来看，这些因素共同削弱了监理机制的有效性，严重阻碍城市燃气施工工程管理的有序推进。

（二）管理效能提升路径

1.智慧工地管理系统构建

在城市燃气施工工程管理中，构建智慧工地管理系统可有效提升管理效能。设计集成人员定位、机械监控、环境感知的物联网管控平台是关键举措。通过人员定位功能，可实时掌握施工人员位置与行动轨迹，便于合理调配人力，提升施工效率，同时保障人员安全。机械监控能对施工设备运行状态进行实时监测，提前发现故障隐患，确保机械稳定运行，减少因设备故障导致的工期延误。环境感知则可实时监测施工现场的温度、湿度、有害气体浓度等环境参数，当参数异常时及时预警，为施工人员营造安全健康的作业环境，全方位助力城市燃气施工工程管理水平提升。

2.从业人员技能认证体系

在城市燃气施工工程管理中，构建完善的从业人员技能认证体系是提升管理效能的关键路径。一方面，针对不同岗位设定精准且细化的技能标准，涵盖从基础的施工操作规范到复杂的应急处置技能等。这些标准需与实际施工场景紧密结合，具有高度的实用性和可操作性。另一方面，搭建科学的认证考核平台，可充分利用现代信息技术，融入基于VR技术的考核模块，模拟各类真实施工难题与危险场景，评估人员实际应对能力。同时，认证体系要保持动态更新，及时根据行业新技术、新规范以及实际施工中的新问题，调整考核内容与标准，确保从业人员技能始终符合城市燃气施工的高标准要求，从而有力保障工程施工安全与质量。

（三）政策保障机制完善

1.行业标准动态更新机制

在城市燃气施工的工程管理中，行业标准动态更新机制至关重要。随着科技的飞速发展以及新材料、新工艺不断涌现，燃气施工行业标准若不及时更新，将难以适应实际需求。应密切关注燃气领域的前沿技术与发展趋势，对新材料、新工艺进行深入研

究与评估，依据其安全性、可靠性、经济性等多方面指标，适时调整和完善行业标准。定期收集燃气施工过程中的反馈信息，包括遇到的新问题、新挑战，结合实际情况对标准进行修订，确保标准的科学性与实用性。同时，加强与国内外先进标准的交流与借鉴，吸收有益经验，使行业标准既能贴合国内城市燃气施工实际，又能与国际先进水平接轨，为燃气施工工程管理提供坚实的标准支撑。

2.跨部门协同监管平台

在城市燃气施工工程管理中，构建跨部门协同监管平台极为关键。通过提出城建、安监、消防等多部门数据共享的业务流程再造方案，能打破部门间的数据壁垒。该平台应整合各部门的监管数据与信息资源，实现实时共享与交互。各部门可将燃气施工中的安全检查数据、审批流程信息等及时上传至平台，方便其他部门随时查阅与分析。如此一来，不同部门可基于同一数据基础开展工作，避免重复劳动与信息不对称，增强监管合力。例如，城建部门掌握的施工进度数据，可为安监部门提前规划安全监管重点提供依据；消防部门的防火标准信息，能辅助施工方及时调整建设方案，从而全方位提升城市燃气施工工程管理水平，保障施工安全与质量。

五、总结

城市燃气施工的工程管理对保障燃气供应安全与稳定至关重要。通过系统归纳可知，关键策略在实践中取得了一定成效，从多方面保障了燃气工程的顺利推进。同时，数字化转型为行业管理水平带来显著提升，借助信息技术实现了更高效的管理与监控。然而，面对不断发展的行业需求，未来仍有深化研究的必要。一方面，智能监测装备研发迫在眉睫，这有助于实时、精准掌握燃气施工状态，及时发现并解决潜在问题。另一方面，全过程造价控制的研究，可进一步优化资源配置，降低成本，提高经济效益。通过在这些领域持续探索，有望推动城市燃气施工工程管理迈向新高度，为城市燃气事业的稳健发展提供更有有力支撑。

参考文献

- [1] 吴鹏. A 燃气公司数字化转型策略研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 董永帅. 工程施工安全管理领先指标研究 [D]. 河南理工大学, 2022.
- [3] 于竹青. HY 农村燃气管道施工工程风险管理研究 [D]. 青岛大学, 2021.
- [4] 贾倩. 基于 WSR 的地铁工程施工安全风险分析与管理研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.
- [5] 罗星熠. 基于 BIM 技术和 IPD 管理模式的城市地铁施工安全管理控制研究 [D]. 四川师范大学, 2023.
- [6] 于科. 城市燃气工程管理数字化转型的应用实践 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025 年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集. 绍兴市燃气产业有限公司; , 2025: 192-194.
- [7] 贾佳. 城市燃气工程施工项目管理策略设计 [J]. 科技风, 2021, (01): 121-122.
- [8] 康寅平. 城市燃气工程现场施工管理 [J]. 江西建材, 2017, (22): 239.
- [9] 吴蓬伟. 城市高压燃气管道施工技术与管理 [J]. 化工管理, 2021, (27): 83-84.
- [10] 马爱民. 高层建筑中燃气工程施工的安全管理措施 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(06): 156-158.

工业废水提标改造中高效预处理与深度处理工艺组合设计及应用

廖兆美

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110056

摘 要： 工业废水污染物复杂，传统处理工艺有局限。提标改造需协同运用预处理与深度处理，物化与生物预处理分别从优化工艺参数、调控菌群结构强化，深度处理通过膜工艺设计、膜技术耦合、氧化技术创新实现。还应采用多目标优化、全流程模拟验证，规范绘制 PFD 与构建三维模型。实际案例证明其可行且经济，未来可开发智能系统与新型材料优化。

关 键 词： 工业废水提标改造；预处理与深度处理；工艺组合设计

Design and Application of Efficient Pre treatment and Deep Treatment Process Combination in Industrial Wastewater Upgrading and Transformation

Liao Zhaomei

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Industrial wastewater pollutants are complex, and traditional treatment processes have limitations. Upgrading and transformation require the collaborative use of pretreatment and deep treatment. Physical and biological pretreatment optimize process parameters and strengthen bacterial community structure, while deep treatment is achieved through membrane process design, membrane technology coupling, and oxidation technology innovation. Multi objective optimization and full process simulation verification should also be adopted to standardize the drawing of PFD and the construction of 3D models. Practical cases have proven that it is feasible and economical, and in the future, intelligent systems and new material optimization can be developed.

Keywords： upgrading and transformation of industrial wastewater; preprocessing and deep processing; process combination design

引言

随着环保要求的日益严格，工业废水处理面临更高挑战。《“十四五”节能减排综合工作方案》于2021年10月颁布，强调工业领域节能减排，推动工业废水处理提标改造。工业废水中复杂污染物给处理带来困难，传统工艺局限性凸显。高效预处理与深度处理协同运用成为关键，从物化与生物预处理技术优化，到深度处理工艺组合设计，如超滤-反渗透、膜分离技术耦合等，再到多目标优化与全流程模拟验证，以及工艺图纸绘制与模型构建，多方面保障处理效果。实际案例证明其可行性与经济性，未来仍需通过智能化与新材料研发进一步提升处理水平。

一、工业废水处理工艺需求分析

（一）工业废水特性与提标挑战

工业废水通常含有高浓度的 COD、盐分以及毒性有机物等复杂污染物。高浓度 COD 意味着水中存在大量可被化学氧化剂氧化的物质，这不仅会消耗水体中的溶解氧，还会对水生生物造成危害。较高的盐分则可能改变水体的渗透压，影响后续生物处理单元微生物的活性^[1]。毒性有机物如重金属离子、持久性有机污染物等，不仅难以生物降解，还会在生物体内富集，最终危害人体健康。

在当前排放标准日益严格的背景下，传统处理工艺暴露出局限性。传统工艺对于复杂污染物的去除效率有限，难以使处理后的水质满足提标后的排放要求。例如，常规的生物处理工艺在面对高盐分、高毒性有机物时，微生物活性易受抑制，导致处理效果不佳。而且传统工艺可能存在占地面积大、运行成本高的问题，无法适应工业废水处理高效、经济的发展需求。

（二）预处理与深度处理协同必要性

工业废水中污染物成分复杂，单一处理工艺难以实现达标排放。预处理单元对后续工艺起到重要的保护作用，它能去除或降

低废水中的悬浮物、大颗粒杂质及部分易处理的污染物，减轻后续深度处理工艺的负荷，防止堵塞、结垢等问题，保障深度处理设备稳定运行^[2]。而深度处理则对微量污染物有良好的去除效果，可将预处理后残留的难以降解的有机物、重金属离子等进一步去除，使废水达到更高的排放标准。二者相互补充，预处理为深度处理创造有利条件，深度处理弥补预处理对微量污染物去除的不足，只有将高效预处理与深度处理协同运用，才能实现工业废水提标改造的目标，确保处理后的废水满足日益严格的环保要求。

二、高效预处理核心技术研究

（一）物化预处理技术优化

在工业废水提标改造中，物化预处理技术的优化对提升处理效果至关重要。针对重金属和悬浮物的预处理，需对比选微电解 - Fenton、混凝沉淀、气浮等工艺的设计参数进行优化。微电解 - Fenton 工艺通过精准调控反应的 pH 值、反应时间、铁碳比等参数，能有效提高对重金属的去除率，打破其稳定结构并促使沉淀分离。混凝沉淀工艺中，絮凝剂的种类与投加量、反应搅拌强度及沉淀时间等参数优化，可强化悬浮物的凝聚沉降。气浮工艺则通过调整气泡大小、气液比、浮选时间等，增强对悬浮物及部分重金属的浮选去除能力。通过系统优化这些工艺的设计参数^[3]，可实现高效的物化预处理，为后续深度处理奠定良好基础。

（二）生物预处理强化路径

生物预处理强化路径主要聚焦于水解酸化 - UASB 工艺中菌群结构的调控，以此提升工业废水的可生化性并削减有机负荷。在水解酸化阶段，通过优化水力停留时间、温度和 pH 值等运行参数，为水解发酵细菌创造适宜的生存环境，促进复杂有机物分解为小分子物质，增强废水可生化性。在后续 UASB 阶段，着重培养产甲烷菌等优势菌群，利用合适的接种物和逐步提高有机负荷的方式，引导菌群结构向高效降解有机物的方向发展^[4]。这种菌群结构的精准调控，不仅能提高水解酸化 - UASB 工艺对工业废水的处理效率，还能增强系统的稳定性，为后续深度处理减轻负担，实现工业废水提标改造中的高效预处理目标。

三、深度处理工艺组合设计体系

（一）膜分离技术耦合应用

1. 超滤 - 反渗透工艺设计

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，超滤 - 反渗透工艺设计极为关键。基于废水水质特征选择适宜膜组件，比如针对含较多胶体、大分子有机物的工业废水，选用截留分子量适配的超滤膜组件。通量计算需综合考虑废水性质、操作压力、温度等因素，运用相关公式准确测算，确保处理效率与能耗的平衡。为防控膜污染，在预处理阶段强化对悬浮物、有机物等去除，运行中定期进行化学清洗与物理冲洗。通过科学的膜组件选型、通量计算与污染防控措施，能有效提升超滤 - 反渗透工艺处理效果，实现工业废水稳定达标排放^[5]。

2. 电驱动膜系统集成

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，膜分离技术耦合应用里的电驱动膜系统集成颇为关键。离子交换膜与电渗析协同脱盐工艺作为电驱动膜系统集成的重要部分，构建其能量消耗模型意义重大^[6]。该模型可精准评估系统运行时的能量损耗，助力优化工艺参数。例如，通过模型分析不同离子交换膜的性能参数以及电渗析操作条件，如电压、电流密度、流速等对能量消耗的影响，从而找到最佳的参数组合，在保障高效脱盐的同时，降低能量消耗，提升电驱动膜系统集成的整体效率，为工业废水提标改造提供经济且高效的深度处理工艺。

（二）高级氧化技术组合创新

1. 臭氧催化氧化系统

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，臭氧催化氧化系统的高级氧化技术组合创新意义重大。设计多相催化剂床层结构，通过合理规划催化剂的分布与排列，可有效提升臭氧与废水的接触面积和反应效率，促使臭氧更高效地分解产生羟基自由基，增强氧化能力。同时，搭配气液传质强化装置，能够优化臭氧在废水中的传质过程，克服气液传质阻力，使臭氧快速且充分地分散于废水中，保障氧化反应均匀、高效进行。多相催化剂床层结构与气液传质强化装置的协同运作，大幅提高了臭氧催化氧化系统对工业废水中难降解有机物的去除能力，助力工业废水提标改造目标的实现^[7]。

2. 光电协同氧化装置

在工业废水提标改造的深度处理工艺组合设计体系中，光电协同氧化装置是高级氧化技术组合创新的关键部分。开发的 TiO₂ 纳米管阵列电极与紫外光源的协同降解反应器具有独特优势。TiO₂ 纳米管阵列电极具备较大的比表面积，能有效增加光催化活性位点，提升光催化效率^[8]。与紫外光源协同作用时，紫外光照激发 TiO₂ 纳米管阵列电极产生电子 - 空穴对，空穴具有强氧化性，可将吸附在电极表面的有机污染物氧化分解，电子则参与还原反应，加速污染物的去除。这种光电协同氧化装置通过二者的高效配合，显著增强了对工业废水中难降解有机污染物的去除能力，为工业废水深度处理达标排放提供了有力的技术支持。

四、工程设计与实施验证

（一）工艺组合方案决策模型

1. 多目标优化方法

多目标优化方法旨在综合考虑多个相互冲突的目标，以寻求最优的工艺组合方案。在工业废水提标改造中，这些目标可能包括处理效果、成本、环境影响等。通过构建多目标函数，将各个目标转化为数学表达式，如处理后水质满足排放标准的程度、建设与运行成本、对周边生态环境的潜在影响等^[9]。运用智能算法，如遗传算法、粒子群算法等对多目标函数进行求解，搜索帕累托最优解集。该解集代表了在不同目标之间权衡的最优方案，工程师可根据实际需求和偏好，从帕累托最优解集中选择最适合的工艺组合，实现工业废水提标改造中高效预处理与深度处理工

艺的合理设计与应用，兼顾技术、经济与环境效益。

2. 全流程模拟验证

在工业废水提标改造的工艺组合方案决策模型构建后，通过全流程模拟验证来进一步确保方案的可行性与有效性。采用 BioWin/STOAT 软件进行污染物去除率与能耗的动态模拟，以此评估不同工艺组合在实际运行中的表现。该软件能够模拟工业废水处理的全流程，精准呈现各处理环节对污染物的去除效果，以及整个过程所消耗的能源情况。借助模拟结果，可以直观地对比不同工艺组合在污染物去除和能耗方面的差异，进而优化工艺组合方案。通过全流程模拟验证，为工业废水提标改造的实际工程设计提供可靠依据，确保所选定的高效预处理与深度处理工艺组合，既能高效去除污染物达到提标要求，又能实现能耗的合理控制，为后续工程实施奠定坚实基础^[10]。

（二）实际工程案例解析

1. 化工园区废水处理项目

在某化工园区废水处理项目中，处理规模为 15000m³/d，主要处理含高浓度 COD、悬浮物及部分重金属离子的工业废水。进水 COD 为 450 - 600mg/L，悬浮物 120 - 180mg/L，总氮 40 - 60mg/L，总磷 6 - 10mg/L，盐分约 1.2 - 1.8g/L，pH 范围 6.5 - 8.0。该项目采用预处理 - 深度处理组合工艺以实现废水提标改造，目标是使出水 COD < 50mg/L。预处理阶段通过高效沉淀与气浮组合工艺去除废水中的悬浮物和部分大分子有机物。具体操作包括投加混凝剂与助凝剂，搅拌 15 - 20 分钟，沉淀或气浮处理 30 分钟，可去除约 70 - 80% 的悬浮物和 25 - 30% 的 COD，同时对部分重金属实现有效沉淀，降低后续处理单元负荷。生物预处理阶段采用水解酸化 - UASB 工艺，通过调控水力停留时间、温度及 pH 值，优化产甲烷菌等优势菌群生长，使水解酸化阶段 COD 去除约 20%，UASB 阶段进一步去除 35% COD，显著提高废水可生化性，为深度处理创造良好条件。深度处理阶段运用超滤 - 反渗透膜技术及高级氧化技术组合。超滤可有效去除废水中大分子有机物和胶体杂质，使 COD 进一步降低约 15 - 20%。反渗透单元进一步去除溶解性有机物和盐分，确保出水 COD 稳定维持在 45 - 50mg/L，总溶解固体降至 500mg/L 以下。高级氧化技术包括臭氧催化氧化与光电协同氧化，可进一步去除残留难降解有机

物，使出水质量长期稳定达标。经过实际运行验证，该组合工艺展现出良好的处理效果，预处理与深度处理环节协同作用显著，整体 COD 去除率达到 92 - 95%，悬浮物去除率约 90%，总氮与总磷分别降低约 45 - 50% 和 60 - 70%，成功实现达标排放。该案例表明，预处理 - 深度处理组合工艺在化工园区废水提标改造中具有高度的可行性和工程应用价值，为工业废水提标改造提供了可复制的实践范例。

2. 经济性对比分析

在工业废水提标改造的实际工程案例中，对高效预处理与深度处理工艺组合设计进行了详细的经济性核算。结果显示，采用预处理 - 深度处理组合工艺后，吨水处理成本由常规工艺的 12 元/吨降低至 8.5 元/吨，降低幅度约 29%。成本下降主要来源于药剂使用量的优化、沉淀气浮及膜系统能耗的合理控制，以及生物预处理对深度处理负荷的减轻，从而降低了整体运行成本。同时，项目初期投资为 1800 万元，通过对每吨水处理成本降低及稳定运行效益计算，投资回收周期约为 3.5 年。表明虽然组合工艺前期投入较大，但因运行成本显著降低，可在合理周期内收回投资，为企业带来经济收益。该分析证明，高效预处理与深度处理工艺组合在经济性上不仅具有明显优势，同时兼顾了技术可行性与环境效益，为工业废水提标改造提供了切实可行的解决方案。

五、总结

在工业废水提标改造进程里，高效预处理与深度处理工艺的组合设计展现出显著的协同增效作用。预处理工艺有效去除大颗粒、悬浮物及部分易处理污染物，为后续深度处理减轻负担，深度处理则进一步削减难降解物质，使出水水质满足更高标准。两者相互配合，不仅提升处理效率与出水质量，还降低处理成本。然而，随着环保要求提升，仍有优化空间。未来可着重开发智能化控制系统，通过实时监测废水水质、水量变化，精准调控各处理环节参数，实现处理过程自动化、智能化。同时，加强新型高效处理材料研发，不断优化工艺组合，持续提升工业废水提标改造效果，助力工业可持续发展。

参考文献

- [1] 栾鑫宇. 典型电镀废水处理工艺提标改造及应用效能研究 [D]. 广州大学, 2021.
- [2] 刘亦珍. Unitank+ 高效沉淀 + BAF 在污水处理厂提标改造中的应用与评价 [D]. 江苏大学, 2021.
- [3] 黎楠杰. 江西某城镇生活污水厂提标改造工艺设计方案优化及运行效果研究 [D]. 南昌大学, 2021.
- [4] 朱韩依. 超高磷工业废水组合处理工艺研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.
- [5] 凌长超. 医药化工园区污水处理厂提标工艺研究及应用 [D]. 南昌大学, 2023.
- [6] 杨开研. 深度处理工艺在炼油污水水质提标改造中的应用 [J]. 炼油技术与工程, 2021, 51(04): 69-72.
- [7] 邱杰. 臭氧催化氧化 + BAF 工艺在污水处理提标改造中的设计与应用 [J]. 绿色科技, 2021, 23(10): 126-128.
- [8] 王玲玲, 耿洪钊. 海滨污水厂提标改造工程水处理工艺设计 [J]. 中国科技投资, 2021, (16): 134+146.
- [9] 魏爱书, 牛晓君. MABR 工艺在污水处理站提标改造中的应用 [J]. 环境工程学报, 2021, 15(06): 2174-2180.
- [10] 潘振. 广西某乡镇污水厂提标改造工程设计 [J]. 节能, 2023, 42(06): 80-82.

垃圾发电沼气处理方案的可行性分析

吴家宋

广州意高环保装备股份有限公司，广东 广州 514000

DOI:10.61369/ME.2025110058

摘 要： 随着垃圾发电厂渗滤液产生的沼气，退补”政策、沼气产量的增加，以及技术的成熟，其合理化的应用越来越紧迫。垃圾发电通过沼气处理是一种将有机废弃物转化为能源的有效方式，现在主要是沼气处理方案有：沼气掺入一次风、沼气火炬燃烧、沼气入炉、沼气发电、沼气直燃加热一次风。本文根据上述五种工艺进行分析，旨在帮助项目合理选择沼气处理方案。

关 键 词： 沼气；垃圾发电厂；污水处理厂工艺方案

Feasibility Analysis of Garbage to Energy Biogas Treatment Scheme

Wu Jiasong

Guangzhou Yigao Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 514000

Abstract： With the implementation of the "return and supplement" policy for biogas generated from leachate from garbage power plants, the increase in biogas production, and the maturity of technology, its rational application is becoming increasingly urgent. Garbage to energy generation through biogas treatment is an effective way to convert organic waste into energy. Currently, the main biogas treatment solutions include: biogas mixed with primary air, biogas torch combustion, biogas entering the furnace, biogas power generation, and biogas direct combustion heating of primary air. This article analyzes the above five processes to help the project choose a reasonable biogas treatment plan.

Keywords： biogas; garbage power plant; sewage treatment plant process plan

引言

沼气处理作为垃圾发电的一种重要组成部分，不仅能够实现垃圾的资源化利用，还能显著减少温室气体排放，对环境保护和可持续发展具有重要意义。因此，我们需要深入研究和评估不同沼气处理方案的可行性，通过考察不同技术路线的优缺点、经济性分析、环境影响评估以及政策法规考量，为决策者提供科学依据，从而助力推动垃圾发电行业健康发展，实现经济效益与环境效益的双赢。

一、沼气处理的工艺路线

（一）沼气掺入一次风

沼气掺入一次风是垃圾焚烧发电厂中一种较为基础的沼气回收利用工艺，其核心逻辑是将渗滤液厌氧处理过程中产生的沼气，通过专用收集管道与输送设备抽回至垃圾贮存坑（仓）内，与从外界引入的新鲜空气充分混合后，一同作为焚烧过程的助燃气体参与垃圾燃烧。这种工艺的设计初衷是利用沼气中甲烷（CH₄）等可燃成分的燃烧特性，优化燃烧氛围：一方面，沼气与空气的均匀混合能提升燃烧区域的氧气分布均匀性，避免局部缺氧导致的不完全燃烧，从而提高垃圾焚烧效率，减少一氧化碳、挥发性有机物等污染物的生成与排放；另一方面，沼气燃烧释放的热量可辅助提升焚烧炉内温度，确保垃圾焚烧更彻底，降低二噁英等剧毒污染物的产生风险。

从系统构造来看，该工艺主要由沼气收集管道、抽送风机、

混合器及简单的流量控制阀门组成，整体设计简洁明了，设备投资成本较低，施工周期短，适合中小型垃圾发电厂快速改造应用。但该工艺存在较为突出的安全隐患：由于沼气输送管道需连接垃圾坑与沼气产生源，管道接口、阀门密封处等易因长期使用磨损、腐蚀出现沼气泄漏；而垃圾坑内本身存在大量易燃垃圾，一旦泄漏的沼气在坑内积聚并达到爆炸极限，遇焚烧炉内的高温辐射或其他点火源，极易引发爆炸、火灾事故；同时，沼气中含有的硫化氢（H₂S）等有毒气体若发生泄漏，还可能对现场操作人员的身心健康造成危害，因此该工艺对管道密封性能、泄漏检测设备的灵敏度要求极高。

（二）沼气火炬燃烧

沼气火炬燃烧是垃圾发电厂中处理过剩沼气或应急处置沼气的常用工艺，其核心工作原理是通过专业化的火炬设备，将经过预处理的沼气进行充分燃烧，以消除沼气直接排放带来的环境与安全风险。该工艺的核心设备为沼气火炬，通常采用引射式燃烧

技术——借助火炬内置的高压空气喷射装置，产生强气流负压，将沼气从收集系统中吸入火炬燃烧腔，同时高压空气与沼气形成湍流混合状态，确保沼气在燃烧腔内充分氧化燃烧，燃烧效率可达95%以上，能有效避免未燃烧的甲烷直接排入大气，减少对环境的影响。

沼气燃烧火炬的完整工艺流程可分为五个关键步骤：第一步是沼气收集，通过遍布渗滤液厌氧罐、沼气缓冲罐等设备的收集管道，将分散产生的沼气汇总至主管道；第二步是预处理，通过脱水装置去除沼气中的水分、过滤装置拦截颗粒杂质，避免水分与杂质影响燃烧稳定性或腐蚀火炬设备；第三步是点火，火炬配备自动点火系统，当沼气压力达到设定阈值时，点火器自动启动，点燃进入燃烧腔的沼气；第四步是燃烧，在引射气流的作用下，沼气持续与空气混合并维持稳定燃烧，燃烧过程中释放的热量以热辐射和热对流的形式向外界扩散；第五步是排放，燃烧后的尾气经火炬顶部排放口排入大气，部分高端火炬还配备尾气检测装置，确保燃烧排放符合环保标准。

该工艺的显著优势是燃烧稳定性强，受沼气产量、组分波动的影响较小，且系统结构相对简单，设备投资与安装成本适中，操作维护便捷，无需复杂的控制系统。但核心劣势在于经济性较差：沼气燃烧过程中释放的大量热能完全向空气中散失，未得到任何回收利用，相当于浪费了沼气中蕴含的化学能；尤其对于沼气产量较大的垃圾发电厂而言，长期采用火炬燃烧处理沼气，会造成可观的能源损失，仅能满足环保与安全处置需求，无法为企业带来额外经济效益。

（三）沼气入炉

沼气入炉工艺是将垃圾渗滤液厌氧处理产生的沼气，通过专用燃烧系统送入垃圾焚烧炉内与垃圾协同燃烧的能源回收工艺，其核心目标是充分利用沼气的热能，实现资源的高效回收与再利用。该工艺的核心设备为沼气燃烧器及配套控制系统，整套系统由六大核心部分构成，各部分各司其职、协同运行：

沼气收集系统：由收集管道、缓冲罐组成，负责将渗滤液厌氧罐产生的沼气稳定收集并暂存，避免沼气产量波动对燃烧过程造成影响；

沼气增压系统：主要采用罗茨风机或离心式增压风机，将沼气压力提升至与焚烧炉内压力相匹配的水平，确保沼气的稳定喷入炉膛内燃烧；

燃烧器管路保护系统：包含压力监测装置、防回火装置、防爆阀、止回阀等，可实时监测沼气输送管路的压力变化，防止炉膛内的高温火焰回火至沼气管道引发安全事故，同时在压力异常时自动泄压保护；

燃烧器部分：采用耐高温、耐腐蚀的特种材质制成，配备精准的沼气喷射嘴与空气混合通道，确保沼气喷入炉膛后能与炉内空气快速混合、充分燃烧；

控制保护系统：由PLC控制器、温度传感器、压力传感器、流量传感器等组成，可根据焚烧炉内温度、垃圾燃烧状态、沼气产量等数据，自动调节沼气喷射量与燃烧空气量，维持燃烧稳定性，同时在设备异常时自动切断沼气供应并报警；

相关附件部分：包括沼气过滤器、冷凝水排放阀、检修阀门等，用于保障系统长期稳定运行。

该工艺燃烧稳定，适配沼气的组分与产量波动，沼气的热能可补充炉膛热量，减少辅助燃料消耗或增加发电量，资源利用率高。但系统结构复杂，设备投资高于前两种工艺，安装调试和后期维护技术要求高，适合沼气产量稳定、追求能源回收的电厂。^[1]

（四）沼气发电

沼气发电机组发电目前普遍采用碱法脱硫工艺，脱硫率必须达到99%以上，再送入除湿装置，除去其中的水分、颗粒杂质，清洁沼气通过罗茨增压风机送入高压沼气储罐，经沼气发电机发电。^[2]

我国垃圾焚烧发电厂大多采用机械炉排炉+凝汽式（或抽凝式）汽轮发电机组，同时配套烟气净化系统、循环冷却塔系统，厂内配有与机组配套的垃圾贮存库（坑），垃圾渗滤液处理系统等。工艺路线：沼气—脱水—脱硫—气水分离—压缩—燃烧—发电机组。根据国内已投运沼气发电厂的经验，按目前沼气产气量计算，需采用一台发电功率为300kw的沼气发电机组，价格在200万元左右，前期投资和后期维护成本较高，且沼气发电机折旧费用较大。如果沼气机组选型与沼气实际产量、品质出现偏差，将严重影响机组运行效率。沼气机组选型过大会造成机组效率低下，大幅增加汽耗，使经济性下降。此外，沼气发电机组工艺复杂且占地面积大，初期设备费用及运营维护管理费用高。

（五）沼气直燃加热一次风

直燃一次风加热是指：在蒸汽空预器后串联一个沼气直燃空预器，当进行一次风加热时，预估沼气的输送量，调节蒸汽空预器后的出风温度，接下来由沼气空预器进行对空气加热。由于沼气燃烧装置设置于一次风空预器的出口母管上，占地面积小，因此在后期安装沼气燃烧装置时较为方便，而且当进行沼气燃烧时，对于空预器不产生任何影响，持续燃烧不会对空预器产生损害，在进行安装时也无需考虑空预器的材质，上述系统不仅结构简单，而且维护方便，能够大大降低维护费用，且沼气的利用率较高。包括沼气的输送装置和沼气燃烧装置，沼气的输送装置和沼气燃烧装置相连通，且沼气燃烧装置设置于一次风空预器的出口母管上。

因此根据上述5种工艺，根据我国中小型垃圾发电项目，推荐选用的是沼气直燃加热一次风或者沼气入炉，下面以装设1台日处理量为600吨/天的垃圾焚烧炉，针对沼气直燃和沼气入炉做详细性分析：

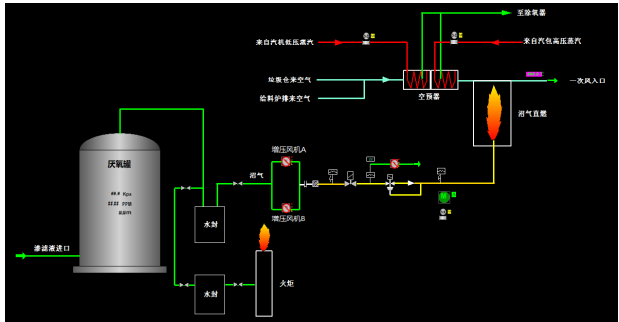
二、沼气直燃和沼气入炉做详细性分析

（一）相同性组成

渗滤液池及厌氧罐产生沼气，在垃圾焚烧炉正常运行时，采用沼气入炉/沼气直燃方式加热一次风进行利用；当焚烧炉停炉检修时，产生沼气进入已经建好的沼气的火炬进行燃烧排空处置。

沼气加热一次风和沼气入炉均需要配置：沼气燃烧器及相应控制系统由以下6部分组成：沼气的收集系统、沼气增压系统、沼气的输送管路系统、燃烧器、控制系统及相关附件部分。

沼气从渗滤液站经过水封、汽水分离、过滤等处理，送至增压风机采用罗茨风机增压（数量2台，一用一备），设置回流管路，然后经沼气输送管道至沼气入炉/沼气直燃空预器。



典型沼气直燃的系统图

（二）差异性比较

因此只针对沼气直燃燃烧器和沼气入炉燃烧器的差异，以及其收益。

生活垃圾焚烧厂沼气在渗滤液处理系统厌氧过程中产生，主要由CH₄、CO₂、N₂、H₂S、CO组成，还包括一些微量成分，其危害主要是加剧温室效应，发生爆炸和火灾等安全事故。沼气各成分体积分数为CH₄ 50~70%、CO₂ 30~45%、H₂S < 0.5%，其他气体 <5%。沼气低位热值为：16100 ~ 23300 kJ/Nm³（参考换算热值：20MJ/Nm³），是一种较理想的气体燃料。

600吨/天的垃圾焚烧炉沼气供给参数：全厂总沼气体积冬季150 m³/h，夏季按照251 m³/h计，沼气压力是20~30Kpa，下列计算按照沼气体积为200Nm³/h进行分析：

沼气入炉：

沼气入炉燃烧产生的热量先折算为垃圾处理量，垃圾发电上网效率为21%，沼气体积按8000h算，其产生的经济效益如下：

$$Q_1 = 20 \times 1000 \times 200 / 3600 \times 21\% \times 8000 / 10000 = 186.67 \text{ 万 kw} \cdot \text{h}$$

按照电厂上网电价0.5元/kw·h的标准计算，每年可以为电厂带来142万元的经济收益，约合93.34W。

沼气直燃：

经项目研究决定，本项目1#锅炉单侧一次风蒸汽空预

器出口风道增加布置一台直燃加热空预器，一次风总量是74080Nm³/h。

根据上述沼气参数，在标准垃圾工况下，计算一次风升温情况，及节省蒸汽量，计算如下：

空气量 V	74080	Nm ³ /h	备注
起始温度 t ₁	20	℃	
终止温度 t ₂	220	℃	
换热功率	5325	kw	单独用蒸汽预热器升温到220° C
蒸汽投用量	8497	kg/h	
沼气热值	20	MJ/Nm ³	
实际沼气体积	200	Nm ³ /h	
可节省主蒸汽量	1773	kg/h	
预计可多发电	266	kw · h	每小时

在不考虑散热漏风等情况下，沼气体积为200Nm³/h，热值参考20MJ/Nm³，将74080Nm³/h一次风从常温20℃加热到220℃，蒸汽空预器+沼气直燃空预器组合能将原蒸汽投用量为8497kg/h减少1773kg/h，预计每小时可多发电355kw·h。

设置沼气直接空气预热器，按其每年运行时间8000h计算，每年可为电厂节省14184吨蒸汽，电厂可以多发电212.8万kw·h。按照电厂上网电价0.5元/kw·h的标准计算，每年可以为电厂带来106.4万元的经济收益。

同等规模的沼气入炉和沼气直燃加热一次风相比，沼气直燃加热一次风的效益会更高，因为沼气入炉需要折算锅炉的效率；沼气直燃加热一次风可以直接燃烧和空气混合，其燃烧器不需要受到炉膛的辐射热和灰尘的腐蚀，寿命长。

三、结论

通过上述五种沼气处理工艺的对比，沼气入炉和沼气直燃的安全性和经济性都是比较有优势的。随着技术越来越成熟，环保的指标也更加严格，焚烧线一般有一定的超负荷能力，或者部分项目出现焚烧线吃不饱的情况，可以考虑将这部分热能转移到焚烧炉上。这样不仅有利于环境保护，回收可利用资源，还能给企业带来一定的收益。

参考文献

[1] 袁真强, 欧阳袁渊. 垃圾焚烧发电项目沼气入炉掺烧技术应用 [J]. 技术与市场, 2017, 24(8): 70~72.
[2] 刘振波, 高林朝, 王滨杰. 沼气的综合利用技术和发展前景 [J]. 农业工程技术: 新能源产业, 2008(2): 34~36.

双碳背景下北方地区供暖系统节能转型研究

吴嘉伟, 陶鹏, 郭佩宗, 邵美娜, 李春辉*

黑龙江工商学院, 黑龙江 哈尔滨 150025

DOI:10.61369/ME.2025110060

摘 要 : 在“双碳”目标引领下, 北方地区供暖系统的节能转型成为优化能源结构、削减碳排放的关键路径。北方冬季供暖周期长、能耗强度大, 传统供暖模式在能源利用效率与低碳发展要求间存在明显差距。节能转型借助技术创新、模式优化与系统协同, 达成供暖需求与低碳目标的有机融合。本文立足北方地区供暖特性与双碳目标要求, 从清洁能源替代、系统智能化升级、建筑端节能改造、政策机制协同四个层面, 探寻供暖系统节能转型的具体策略, 剖析技术应用与模式创新在提升能效、降低碳排放方面的作用, 旨在为北方地区供暖系统绿色低碳发展提供理论支撑与实践指引, 助力双碳目标分阶段达成。

关 键 词 : 双碳; 北方地区; 供暖系统; 节能转型; 低碳发展

Research on Energy saving Transformation of Heating Systems in Northern Regions under the Background of Dual Carbon

Wu Jiawei, Tao Peng, Guo Peizong, Shao Meina, Li Chunhui*

Heilongjiang University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150025

Abstract : Under the guidance of the "dual carbon" goal, the energy-saving transformation of heating systems in northern regions has become a key path to optimize energy structure and reduce carbon emissions. The winter heating cycle in the north is long and the energy consumption intensity is high. There is a significant gap between the energy utilization efficiency and low-carbon development requirements of traditional heating modes. Through technological innovation, mode optimization, and system synergy, energy-saving transformation achieves the organic integration of heating demand and low-carbon goals. This article focuses on the heating characteristics and dual carbon target requirements in the northern region, exploring specific strategies for energy-saving transformation of heating systems from four aspects: clean energy substitution, system intelligence upgrading, building energy-saving transformation, and policy mechanism coordination. It analyzes the role of technological application and mode innovation in improving energy efficiency and reducing carbon emissions, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the green and low-carbon development of heating systems in the northern region, and help achieve the dual carbon target in stages.

Keywords : dual carbon; northern region; heating system; energy saving transformation; low-carbon development

北方地区作为我国冬季供暖的关键区域, 供暖能耗在建筑总能耗中占比颇高, 是能源消耗与碳排放的重点板块。近年来, 随着可再生能源技术的日益成熟、智能控制手段的广泛应用以及建筑节能标准的持续提升, 供暖系统的节能转型具备了技术可行性与实践条件。北方众多地区已开展清洁供暖试点, 通过“煤改气”“煤改电”、地源热泵应用等举措减少对化石能源的依赖, 同时借助智慧供暖平台优化能源调度, 取得了显著的节能减碳成效。这些实践充分表明, 供暖系统的节能转型不仅是实现双碳目标的必然选择, 也是提升供暖服务质量、推动能源结构转型的重要契机。在此背景下, 系统研究北方地区供暖系统节能转型的路径, 对于明确发展方向、凝聚转型合力意义重大。

课题信息: 2025年大学生创新创业训练计划项目, S202513300053

作者简介:

吴嘉伟 (2006.01-), 男, 浙江丽水人, 本科, 管理学;

陶鹏 (2005.05-), 男, 黑龙江讷河人, 本科, 管理学;

郭佩宗 (2006.08-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 本科, 管理学;

邵美娜 (2005.01-), 女, 黑龙江绥化人, 本科, 管理学。

通讯作者简介: 李春辉 (1983.12-), 男, 黑龙江绥化人, 硕士, 教授, 电气工程。

一、双碳背景下北方地区供暖系统节能转型的实践意义

（一）降低碳排放强度，助力双碳目标达成

供暖系统的节能转型通过减少化石能源消耗、提升能源利用效率，直接降低碳排放强度，是北方地区践行双碳目标的关键举措。在传统燃煤供暖中，煤炭燃烧过程会释放大量二氧化碳，而清洁能源替代可显著减少碳排放量。同时，系统能效提升进一步放大了减碳效果。借助智能调控实现按需供暖，避免“过量供暖”造成的能源浪费；通过余热回收技术利用工业废热、数据中心余热等补充供暖，减少一次能源消耗。这些措施协同作用，使供暖系统在满足热需求的同时，碳排放总量与强度同步降低，为北方地区碳达峰时间的提前与碳中和进程的加速提供保障^[1]。

（二）优化能源消费结构，增强能源安全保障

节能转型推动供暖能源从传统化石能源向清洁能源、可再生能源转型，有助于优化北方地区能源消费结构，降低对外购能源的依赖程度，提升能源安全保障能力。北方部分地区长期依赖煤炭供暖，不仅碳排放压力大，还面临煤炭运输成本高、储备压力大等问题，而可再生能源的本地化开发可有效缓解这一困境。

例如，东北地区可充分利用丰富的风电、光伏资源实现“风光蓄热”供暖，华北地区可推广地源热泵利用浅层地热能，西北地区可结合太阳能集热系统满足冬季供暖需求。这些清洁能源的本地化应用，减少了化石能源的长距离运输与储备需求，同时降低了能源价格波动对供暖成本的影响，从能源供给侧提升了供暖系统的稳定性与安全性^[2]。

（三）提升供暖服务质量，改善居民生活品质

节能转型并非以降低供暖温度为代价，而是通过精准供暖、稳定供热提升服务质量，增强居民生活舒适度。传统供暖系统常出现“冷热不均”现象，部分区域温度过高造成能源浪费，部分区域温度不足影响居住体验，而智能化控制系统可实现分区域、分时段精准调控，根据室外温度、建筑热需求动态调整供热量。

此外，清洁能源供暖减少了燃煤带来的空气污染，改善了冬季空气质量，间接提升了居民健康水平。如“煤改电”“煤改气”后，北方农村地区冬季雾霾天数显著减少，居民呼吸道疾病发病率下降，供暖系统的转型从“保温暖”向“保健康”拓展，实现了生态效益与民生效益的有机统一^[3]。

二、双碳背景下北方地区供暖系统节能转型的具体策略

（一）推进清洁能源多元化替代，构建低碳供暖能源架构

清洁能源替代是供暖系统节能转型的核心环节，需结合北方地区资源禀赋与技术条件，构建多元化的低碳能源供给架构。对于天然气资源相对丰富的地区，可稳步推进“煤改气”工程，配套建设高效燃气锅炉，同时推广冷凝式燃气壁挂炉，提升天然气利用效率；在电力供应充足且电价具备优势的区域，扩大“煤改电”覆盖范围，采用蓄热式电采暖设备，利用低谷电价降低运行

成本，减少对电网峰期负荷的冲击。

大力推广地源热泵、空气源热泵等可再生能源供暖技术，在地质条件适宜的地区，发展土壤源、水源热泵系统，利用浅层地热能满足供暖需求；在空气温度条件允许的区域，采用超低温空气源热泵，通过技术升级突破冬季制热效率瓶颈。同时，结合太阳能供暖技术，在新建建筑中推广太阳能集热器与常规供暖系统的结合，实现太阳能对化石能源的部分替代，形成“可再生能源为主、清洁能源为辅”的低碳供暖能源结构^[4]。

（二）推动供暖系统智能化升级，提高能源利用率

智能化升级通过精准调控与系统优化，实现供暖能源的高效利用，是节能转型的重要技术支撑。构建覆盖热源、管网、用户端的智慧供暖平台，整合气象数据、建筑热需求、管网运行状态等信息，通过大数据算法优化热源输出功率，避免“供大于求”的能源浪费。例如，根据次日天气预报调整当日供暖参数，在气温骤降前提前升温，在气温回升时适当降负荷，实现动态适配。

在管网环节推广水力平衡技术与智能监控设备，通过安装电动调节阀、热量表等装置，实时监测各分支管网的流量与温度，自动调节水力平衡，解决传统供暖中“近端过热、远端过冷”的问题；在用户端推广室温分控系统，支持居民根据需求调节室内温度，数据实时反馈至智慧平台，作为整体调控的参考依据。同时，应用数字孪生技术构建供暖系统虚拟模型，模拟不同工况下的能耗与供热效果，为系统优化提供决策支持，使能源利用效率大幅提升^[5]。

（三）加强建筑端节能改造，降低供暖能源需求

建筑端的节能改造通过减少热损耗，从需求侧降低供暖能耗，为节能转型提供基础支撑。严格执行新建建筑节能标准，推广被动式超低能耗建筑技术，在墙体、屋面、门窗等部位采用高性能保温材料，提升建筑围护结构的保温隔热性能，减少室内外热量交换。例如，采用三层中空玻璃窗、外墙保温层厚度增加至10厘米以上，可使建筑耗热量降低50%以上。

对既有建筑开展节能宜居综合改造，重点对老旧小区的围护结构、供暖系统进行升级，更换老化门窗为保温门窗，在外墙加装保温层，对室内供暖设施进行分户改造，实现按户计量、按需供热。同时，推广建筑热回收技术，在通风系统中安装热交换器，回收排风中的热量预热新风，减少供暖系统的热补充需求。通过建筑端的节能改造，从源头降低供暖能源需求，为后续的清洁能源替代与系统优化减轻压力^[6]。

（四）完善政策机制与协同体系，保障转型稳步发展

政策引导与多主体协同是推动供暖系统节能转型的重要保障，需构建“政策激励、市场驱动、公众参与”的协同机制。政府部门可出台财政补贴政策，对清洁能源供暖设备购置、智慧供暖平台建设、建筑节能改造等给予资金支持，降低转型初期的投入成本；完善峰谷分时电价、气价政策，引导用户错峰用能，鼓励蓄热式供暖技术应用，提高能源利用效率。

建立跨部门协同推进机制，统筹能源、住建、环保等部门资源，制定区域供暖系统节能转型规划，明确各阶段目标与责任分工；推动供暖企业与能源企业、技术服务商合作，形成“能源供

应—系统建设—运营维护”的全链条服务模式，如供暖企业与光伏企业合作开发“光伏+供暖”项目，实现能源生产与消费的一体化。同时，加强公众宣传教育，普及节能供暖知识，引导居民养成合理用热习惯，形成全社会共同参与节能转型的良好氛围^[7]。

三、双碳背景下北方地区供暖系统节能转型的支撑条件

（一）强化技术研发与成果转化，突破转型瓶颈制约

技术创新是支撑节能转型的核心动力，需加大供暖领域关键技术的研发投入与成果转化力度。聚焦可再生能源供暖技术的本土化适配，针对北方地区低温、严寒特点，研发高效空气源热泵压缩机、抗冻地源热泵系统等，提升设备在极端气候下的稳定性与能效；攻关智慧供暖的核心算法，开发更精准的负荷预测模型、管网优化控制程序，提高系统智能化水平。

建立产学研用协同创新平台，推动高校、科研院所与供暖企业合作，加速技术成果的工程化应用，如将实验室研发的低品位余热回收技术转化为适用于工业园区的供暖设备；鼓励技术引进与消化吸收，借鉴国际先进的低碳供暖技术经验，结合北方地区实际进行改良升级，形成具有自主知识产权的核心技术，为节能转型提供技术储备^[8]。

（二）完善基础设施建设，夯实转型硬件基础

基础设施的完善是节能转型顺利推进的前提，需统筹规划能源供应、管网改造等硬件设施。加强清洁能源供应网络建设，在“煤改气”区域配套建设天然气支线管网与储气设施，在“煤改电”区域升级改造农村电网，提高电力输送能力；优化热源布局，根据区域供暖需求建设分布式清洁能源热源，减少长距离管网输热损耗。

推进供暖管网的升级改造，对老旧管网进行保温修复或更换，降低管网热损失；建设智能化管网监测系统，在关键节点安装压力、温度、流量传感器，实现管网运行状态的实时监控与故障预

警。同时，结合新型城镇建设，将供暖基础设施与城市规划同步推进，在新城建设中预留清洁能源供暖设施用地，在旧城改造中同步实施管网与建筑节能改造，为节能转型提供硬件支撑^[9]。

（三）健全标准体系与评价机制，规范转型推进过程

标准化建设与科学评价能够引导节能转型有序推进，需建立健全供暖系统节能转型的标准体系与评价机制。制定清洁能源供暖设备的能效标准、智慧供暖系统的技术规范、建筑节能改造的验收标准等，明确转型过程中的技术要求与质量底线；统一碳排放核算方法，建立供暖系统碳排放计量标准，为减碳效果评估提供依据。

构建节能转型效果评价体系，从能耗降低、碳排放减少、供暖质量提升等多维度进行综合评估，定期发布区域供暖系统节能转型报告，总结经验并优化调整策略；引入第三方评估机构，对转型项目的技术可行性、经济合理性、环境效益进行客观评价，确保转型措施的科学性与有效性，推动供暖系统节能转型向规范化、高质量方向发展^[10]。

四、结束语

双碳背景下北方地区供暖系统的节能转型，是一项复杂的系统工程，需通过清洁能源替代、智能化升级、建筑节能改造与政策协同的多维度发力，实现从“高碳依赖”到“低碳高效”的转变。这一转型不仅能显著降低供暖领域的碳排放，助力双碳目标实现，还能优化能源结构、提升供暖服务质量，带来生态、经济与社会效益的多重提升。

随着技术的持续进步与机制的日益完善，北方地区供暖系统的节能转型将逐步深入，从试点探索迈向全面推广。未来，需不断强化技术创新、基础设施建设与政策引导，凝聚政府、企业、公众的协同合力，推动供暖系统向更绿色、更高效、更智能的方向发展，为北方地区的可持续发展与双碳目标的如期实现筑牢坚实基础。

参考文献

- [1] 曾卓禹. 北方地区建筑供暖系统的节能措施与效果分析 [J]. 居业, 2024, (06): 142-144.
- [2] 邹庆国. “双碳”目标下哈尔滨加快推进清洁能源供暖研究 [J]. 学理论, 2023, (02): 84-86.
- [3] 林小岳. 双碳目标下我国北方供暖改进路径 [J]. 中关村, 2023, (01): 114-115.
- [4] 周晴晴, 赵六珍, 郝放, 等. “双碳”背景下低碳供暖体系与能源消费结构构建与优化 [J]. 上海企业, 2023, (10): 30-32.
- [5] 徐诗佳, 郝欣玉, 周文宇, 等. 节能理念下旧改建筑空间结构的供暖方式探究 [J]. 居舍, 2024, (33): 165-168.
- [6] 安栋. 节能环保技术在供暖通风系统中的应用研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(08): 136-138.
- [7] 朱雪华, 杨智瑜. 寒冷地区既有居住建筑供暖改造与节能分析 [J]. 建筑与预算, 2023, (06): 47-49.
- [8] 武根峰, 石莹, 钟安琪, 等. 双碳目标下热泵供暖技术节能评价与分析 [J]. 建设科技, 2023, (23): 76-80.
- [9] 樊兴, 尹甲丁. 供热系统中节能技术的实施策略 [J]. 智慧中国, 2023, (05): 90-91.
- [10] 郝志民. 集中供热节能控制终端设计思路构建 [J]. 居舍, 2021, (21): 82-83.

轨道交通专用无线通信技术演变路径探究

齐晓武

广东华之源信息工程有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110006

摘 要 : 轨道交通专用无线通信技术经历了从模拟集群、数字集群、LTE-M到5G-R的演变,信道效率、安全性和数据传输能力持续提升。5G-R以超高带宽、超低时延和网络切片特性支持列车自动驾驶、实时监控等智慧化应用。换乘站互联互通面临接口规范不统一与数据互操作复杂性挑战,基于SDN/NFV融合组网和5G切片技术提供了有效解决方案。通过仿真测试与试点验证,评估技术性能与经济效益,技术正朝6G弹性网络架构与智慧融合方向发展。

关 键 词 : 轨道交通; 无线通信技术; 互联互通; 5G-R; 智慧融合

Exploration of the Evolution Path of Wireless Communication Technology for Rail Transit

Qi Xiaowu

Guangdong Huazhiyuan Information Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The dedicated wireless communication technology for rail transit has undergone evolution from analog trunking, digital trunking, LTE-M to 5G-R, and the channel efficiency, security and data transmission capacity have been continuously improved. 5G-R supports intelligent applications such as autonomous train driving and real-time monitoring with its features of ultra-high bandwidth, ultra-low latency and network slicing. The interconnection and interoperability of transfer stations are confronted with challenges such as non-uniform interface specifications and the complexity of data interoperability. The SDN/NFV converged networking and 5G slicing technology provide effective solutions. Through simulation testing and pilot verification, the technical performance and economic benefits are evaluated. The technology is evolving towards a 6G elastic network architecture and intelligent integration.

Keywords : rail transit; wireless communication technology; interconnection and interoperability; 5G-R; integration of wisdom

引言

随着我国城市轨道交通的快速发展,专用无线通信技术需满足高带宽、低时延和高可靠性的需求。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》(2021)提出推动交通基础设施数字化、网联化,为技术演变提供了政策指引。从模拟集群到5G-R,技术在频谱效率、安全防护和业务支持能力上显著提升。5G-R以网络切片、毫米波和边缘计算等特性支持智慧化场景,但换乘站互联互通仍面临挑战。本文分析技术演变路径,探讨互联互通解决方案,结合仿真与试点测试,展望6G智慧融合趋势。

一、轨道交通专用无线通信技术演变分析

(一) 技术发展历史脉络

轨道交通专用无线技术的发展经历了显著的变革。早期以模拟集群通信为基础,它能实现有限范围内的群组通信,满足列车基本的调度指挥需求,但存在频谱利用率低、通信容量小等局限^[1]。随着数字化浪潮的推进,数字集群通信技术应运而生,它克服了模拟技术的部分缺陷,在频谱效率、语音质量和功能扩展性上都有提升,可提供更多增值业务。然而,随着轨道交通规模扩大和业务多样化,数字集群技术也难以满足需求。于是,LTE-M技术逐渐登上舞台,凭借其高带宽、低时延、高可靠性等

优势,能支持高清视频监控、列车自动驾驶等新型业务,为轨道交通通信带来全新可能,成为当前轨道交通专用无线通信技术的主流发展方向。

(二) 关键技术阶段特征

在轨道交通专用无线通信技术发展历程中,不同阶段呈现出显著特征。FDMA阶段,将总频段划分为若干互不重叠的频道,供不同用户使用,信道效率相对较低,每个频道只能服务一个用户,在安全防护方面,早期技术对干扰和窃听的防范能力有限。TDMA阶段,把时间分割成周期性的帧,每一帧再分割成若干时隙,允许多个用户在不同时隙共享同一频道,大大提高了信道效率。安全防护方面,通过时隙分配和加密算法的优化,能更好

抵御外部干扰与信息窃取。到了 LTE 阶段，采用正交频分复用（OFDM）和多输入多输出（MIMO）等技术，信道效率进一步提升，可同时传输大量数据。安全防护更为完善，拥有更高级别的加密和认证机制，确保数据传输安全^[2]。

（三）5G-R 技术的突破与应用

5G-R 技术通过新空口（NR）实现高吞吐量和超低时延，显著提升轨道交通专用无线通信性能。网络切片技术为不同业务分配专用资源，如为列车控制提供低时延切片，为高清视频监控提供高带宽切片，确保服务质量（QoS）的高效满足。边缘计算优化基站间切换和数据处理，降低时延并提升可靠性。广州地铁 5G-R 试点表明，列车控制时延降至 0.8ms，准点率提升 5%，支持实时高清视频传输和列车自动驾驶功能，有效提高运营效率与安全性 [6]。此外，5G-R 通过 AI 驱动的资源分配和毫米波技术，适应复杂多变的轨道交通场景，为大规模设备连接和动态业务需求提供支持。其灵活性和智能化特性为智慧轨道交通奠定坚实基础。面向未来，5G-R 的架构设计具备良好的扩展性，可平滑过渡至 6G 弹性网络架构，后者将引入太赫兹波通信和全域感知能力，进一步满足轨道交通对高速、稳定和智能通信的需求，推动行业向更高水平的智能化发展^[3]。

二、换乘站通信互联的技术挑战

（一）多系统互联挑战

换乘站涉及多线路、多制式通信系统，接口参数、信号格式和传输速率的差异导致协议转换复杂^[4]。不同线路可能采用不同技术标准，例如 A 线路使用 5G-R 的 Sub-6GHz 频段，而 B 线路仍基于 LTE-M 的调制方式，需设计复杂的适配机制以实现兼容。缺乏统一的接口规范标准导致各线路在建设时独立设计接口，增加设备采购和系统集成的成本，同时降低通信稳定性和可靠性。数据互操作面临编码格式不一致的难题，例如列车位置信息在 A 线路采用二进制编码，B 线路可能使用十六进制编码，需进行格式转换和解析，增加技术难度。列车跨线运行要求实时共享速度、位置和运行状态等关键数据，以保障调度效率和运行安全，对通信系统的实时性提出严格要求，切换时需控制在 50ms 以内。当前，部分换乘站因缺乏标准化协议，数据交互效率低下，切换失败率较高，影响列车运行连续性和乘客体验。解决多系统互联的挑战需通过统一标准和智能化技术优化协议转换与数据交互，确保轨道交通通信网络的高效协同与稳定运行，为智慧化应用提供可靠支持。

（二）解决方案设计

1. SDN/NFV 融合组网

软件定义网络（SDN）和网络功能虚拟化（NFV）技术通过统一承载多制式网络，解决换乘站互联互通的复杂性^[5]。SDN 通过集中式控制平面实现网络资源的动态分配，灵活适配列车控制、视频监控等业务的差异化需求，确保资源高效利用。NFV 将核心网元功能虚拟化，部署于通用服务器，降低硬件依赖并提升系统扩展性。5G 网络切片技术为不同业务场景分配专用资源，低时延切片保障列车控制指令的实时传输，目标时延低于 1ms；高带宽切片支持高清视频监控的稳定传输，满足大规模数据需求。广州地铁 5G-R 试点表明，SDN/NFV 融合组网将网络资源利用率

提升 15%，显著降低建设和运维成本。这种架构通过统一承载不同制式网络，打破系统间壁垒，实现跨线路通信的高效协同。虚拟化网元和切片技术的结合优化了服务质量（QoS），为轨道交通提供稳定可靠的通信支持，为智慧化应用场景奠定基础。

2. 异构网络切换机制

异构网络切换机制通过多参数评估模型和 5G-R 双连接切换算法，确保列车跨基站切换的通信连续性^[6]。评估模型综合分析信号强度、网络负载、时延等关键指标，实时监测网络状态，为切换决策提供依据。5G-R 双连接切换算法在源基站与目标基站间建立双向通信链路，保障列车在移动过程中通信不中断，切换时延控制在 50ms 以内。边缘计算技术部署于基站附近，优化数据处理和切换决策，降低端到端时延，提升系统响应速度。广州地铁试点显示，5G-R 切换成功率达 99.5%，有效减少通信中断对列车运行的影响。该机制通过动态调整网络资源分配，适应轨道交通复杂多变的运行环境，如隧道、高峰客流等场景。模型的智能化分析结合边缘计算的支持，显著提高切换的稳定性和效率，为跨线路运行提供可靠保障。

3. 多模终端与射频优化

多模终端与射频前端优化通过软件无线电技术和宽频带可重构天线，解决多制式兼容和信号干扰问题。软件无线电技术支持动态协议栈加载，使终端适配 5G-R、LTE-M 等多种制式，列车在不同线路交界处可快速切换协议栈，实现无缝通信。宽频带可重构天线通过自动识别当前通信频段，动态调整滤波器参数，支持 5G 毫米波和 Sub-6GHz 频段，减少信号干扰，提升传输效率。广州地铁 5G-R 试点表明，优化后的射频前端将误码率降低至 10^{-6} 以下，信号质量提升 10%。该方案通过软件定义的方式降低硬件更换成本，增强终端在复杂环境下的适应性，如高密度基站区域或隧道场景。动态协议栈与射频优化的结合，确保列车跨线运行的通信稳定性和数据实时性，为高清视频监控和自动驾驶提供支持^[7]。

三、实证研究与效能评估

（一）测试环境构建

1. 多场景仿真模型

OPNET 仿真平台用于构建多场景仿真模型，模拟轨道交通常规线路和换乘节点的通信环境，以评估 5G-R 技术的性能^[8]。模型通过设置列车运行速度、基站间距、信号干扰等参数，精确再现不同运营场景，包括高峰客流、隧道环境和恶劣天气条件。常规线路模拟中，列车速度设定为 80-120km/h，基站间距为 1-2km，重点测试 5G-R 的低时延和高吞吐量特性。换乘节点模拟考虑多线路交汇带来的信号干扰和切换复杂性，设置多制式网络共存场景，验证网络切片对列车控制和视频监控的支持能力。仿真结果显示，5G-R 在高峰客流场景下保持端到端时延低于 1ms，误码率低于 10^{-6} ，切换成功率达 99.5%。通过调整干扰强度和列车密度，模型进一步分析 5G-R 在复杂环境下的鲁棒性，揭示其相较于 LTE-M 在数据传输效率和稳定性上的优势。这些仿真数据为 5G-R 技术优化提供依据，支持轨道交通通信系统向高可靠性、智能化方向发展，为后续真实环境验证奠定理论基础。

2. 真实环境验证

在广州、深圳等城市轨道交通节点部署 5G-R 试点，构建真实

环境验证平台，评估技术在实际运营中的表现。试点选取典型换乘站和常规线路，模拟高峰期时段客流量（如每小时10万人次）、不同列车速度（60–120km/h）和隧道、地面等环境条件。对比测试设置两组，一组采用5G-R，另一组使用LTE-M，监测通信质量、数据传输速率和系统稳定性。测试结果表明，5G-R的端到端时延稳定在0.8ms，切换成功率达99.5%，相较LTE-M的1.5ms时延和98%切换成功率具有显著优势。5G-R支持实时高清视频传输，满足列车自动驾驶的数据需求，准点率提升5%。稳定性测试显示，5G-R在隧道环境下信号衰减率降低10%，数据传输效率提升15%。这些结果验证了5G-R在复杂运营场景下的优越性能，为技术推广提供实践依据，同时为6G网络架构的适应性研究提供数据支持^[9]。

（二）性能评价体系

1. 服务质量量化指标

服务质量量化指标通过误码率、端到端时延和切换成功率评估轨道交通专用无线通信技术的性能，确保数据准确性、实时性和通信连续性。误码率目标设定为低于 10^{-6} ，保证数据传输的精确性，防止控制指令错误对列车运行安全的潜在威胁。端到端时延控制在50ms以内，满足列车调度和应急响应的实时性需求，尤其在自动驾驶和实时监控场景中至关重要。切换成功率需超过99%，保障列车在跨基站或跨线路运行时通信不中断，避免因切换失败导致的运行中断或安全隐患。广州地铁5G-R试点数据显示，误码率稳定在 10^{-7} ，端到端时延平均为0.8ms，切换成功率达99.5%，相较LTE-M的1.5ms时延和98%切换成功率表现更优。这些指标通过长期监测和数据分析，验证5G-R在高负荷、复杂环境下的稳定性和可靠性，为技术优化提供依据^[10]。

2. 经济效益评估模型

经济效益评估模型基于全生命周期成本分析框架，综合考量5G-R技术在轨道交通中的经济表现。模型涵盖设备采购、安装调试、运维管理及报废处理等阶段的成本，结合技术应用带来的收益，如运营效率提升、故障减少的维修成本节约等。投资回报率（ROI）作为核心评估指标，反映技术应用的长期经济效益。广州地铁5G-R试点显示，设备采购和运维成本较LTE-M增加10%，但准点率提升5%和故障率降低15%带来的收益显著，ROI达1.2，表明长期经济效益可观。模型通过量化时间成本节约（如减少晚点）和系统可靠性提升，分析5G-R的经济优势。成本收益数据的系统梳理为技术选择和升级决策提供参考，助力轨道交通企业在资源配置中实现效益最大化。

（三）应用效果分析

1. 运营效能提升

广州地铁5G-R试点数据表明，专用无线通信技术的应用显著提升轨道交通运营效能。5G-R通过网络切片和边缘计算优化数据

传输，列车控制时延降至0.8ms，准点率提升5%，尤其在高峰时段表现更优。高峰客流场景下，5G-R支持实时高清视频监控和列车自动驾驶，减少调度延迟和运行中断，晚点率降低10%，有效改善乘客出行体验。相较LTE-M，5G-R在隧道和密集基站区域的信号稳定性提高15%，保障通信连续性。数据分析显示，5G-R通过低时延和高可靠特性优化列车运行调度，减少因信号干扰或切换失败导致的运营问题，提升系统整体效率。试点结果验证了5G-R在复杂运营环境下的适用性，显著降低运营风险，增强轨道交通的服务质量。

2. 技术演进路径验证

压力测试通过模拟高负荷和复杂环境，验证5G-R技术与6G网络的兼容性，确认技术演进路径的可行性。测试设置包括高峰客流、隧道干扰和多制式网络共存场景，重点评估5G-R在高数据流量下的稳定性和与6G技术的衔接能力。结果显示，5G-R在负载峰值下保持误码率低于 10^{-6} ，切换成功率达99.5%，与6G要求的太赫兹波通信和AI优化资源分配展现良好兼容性。测试通过边缘计算和网络切片验证5G-R对动态资源分配的支持，表明其架构可平滑过渡至6G弹性网络。广州地铁试点进一步确认，5G-R在实际场景中支持高密度连接和低时延需求，为6G全域感知和智能化应用提供技术基础。

四、总结

轨道交通专用无线通信技术从模拟集群、数字集群、LTE-M到5G-R的演变，实现了信道效率、安全性和数据传输能力的显著提升，逐步迈向高效、可靠的智慧化通信。5G-R通过新空口（NR）、网络切片和边缘计算技术，支持超低时延（<1ms）和高可靠性，满足列车自动驾驶、实时监控等智慧化需求。针对换乘站多系统互联互通的挑战，SDN/NFV融合组网和5G切片技术有效解决接口规范不统一和数据互操作复杂性问题，提升跨线路通信的稳定性和效率。广州地铁5G-R试点数据显示，列车准点率提升5%，时延降至0.8ms，验证了技术的运营效益。面向未来，6G弹性网络架构将引入太赫兹波通信、AI驱动的资源优化和全域感知能力，满足轨道交通对高速、稳定和智能通信的更高需求。6G的超高频通信和智能化特性将进一步优化网络资源分配，支持更复杂的多场景应用，如全自动化调度和实时乘客信息服务。技术演进路径的验证表明，5G-R到6G的过渡具备可行性，为轨道交通通信系统的持续智能化提供坚实基础，助力行业在数字化、网联化浪潮中实现高质量发展。

参考文献

- [1] 尚宸宇. 轨道交通乘客时空路径估计研究及应用 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [2] 王蕾. 面向轨道交通物联网的5G公网专用安全可信机制研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [3] 孙琳琳. 基于出行路径的城市轨道交通客流时空分布研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 张虎. 基于关键路径法的轨道交通综合联调进度计划管理研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [5] 乔亚琼. 轨道交通地面电子单元信息传输关键技术研究 [D]. 中国铁道科学研究院, 2022.
- [6] 马超, 顾晓峻, 李彬. 无线通信技术在轨道交通中的应用 [J]. 智能城市, 2021, 7(06): 163–164.
- [7] 邱月娇, 李美健. 浅谈无线通信技术应用于轨道交通通信及信号业务 [J]. 中国设备工程, 2022, (11): 186–188.
- [8] 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.
- [9] 李锦东. 通信技术在城市轨道交通中的应用 [J]. 中国科技投资, 2021, (07): 123–124.
- [10] 闵亚洪. 基于LED的水下光无线通信技术探究 [J]. 通信电源技术, 2021, 038(8): 88–91.

智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践

李云鹤

大众汽车（安徽）有限公司，安徽 合肥 230000

DOI:10.61369/ME.2025110011

摘 要： 智能制造推动汽车生产线数字化升级，涵盖多方面实践。从技术支撑、协同控制到各环节系统开发，通过建设监测平台、构建调配模型等实现设备管理优化。经对比关键绩效指标和成本效益分析，成效显著，但存在工业大数据应用不足问题，未来 5G + AI 在远程运维领域前景广阔。

关 键 词： 汽车生产线；数字化升级；智能制造

Digital Upgrading Practice of Automobile Production Line under the Background of Intelligent Manufacturing

Li Yunhe

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

Abstract： Intelligent manufacturing promotes the digital upgrading of automobile production lines, covering many aspects of practice. From technical support, collaborative control to system development of each link, equipment management optimization is realized by building monitoring platform and deployment model. By comparing the key performance indicators and cost-benefit analysis, the effect is remarkable, but there is a problem of insufficient application of industrial big data. In the future, 5g+AI has broad prospects in the field of remote operation and maintenance.

Keywords： automobile production line; digital upgrade; intelligent manufacturing

引言

2021 年颁布的《“十四五”智能制造发展规划》旨在推动制造业全面数字化转型，其中汽车装备领域的智能制造备受关注。智能制造通过将先进信息技术与汽车制造深度融合，实现智能化与高效化生产。在这一政策导向下，汽车生产线数字化升级涵盖设备互联、数据集成等多方面，借助工业物联网等技术协同支撑，构建多机器人协同控制方案、开发智能化焊接与装配系统等实践，虽成效显著，但仍面临工业大数据应用不足等挑战。未来，5G + AI 技术有望助力汽车制造业迈向更高水平的智能化。

一、智能制造体系下的汽车生产线数字化升级理论基础

（一）汽车装备智能制造概念框架

智能制造在汽车装备领域是将先进信息技术、自动化技术与汽车制造深度融合，实现汽车生产过程智能化、高效化的全新制造模式。其内涵不仅涵盖传统制造过程的自动化升级，更强调基于数据驱动的智能决策与柔性生产。在此基础上，可建立三维理论模型。设备互联是基础，通过各类通信协议与接口，让汽车生产线上的加工设备、检测仪器等实现互联互通，实时交换数据。数据集成则对设备互联产生的海量数据进行收集、整理与分析，挖掘数据背后的价值。智能决策利用数据集成的成果，借助人工智能算法与专家系统，对生产调度、质量控制等关键环节做出科

学决策，最终形成完整且高效的汽车装备智能制造概念框架^[1]。

（二）数字化升级技术支撑体系

在智能制造体系下，汽车生产线数字化升级离不开工业物联网、数字孪生、边缘计算等技术的协同支撑。工业物联网将生产线上的各类设备、系统连接起来，实现数据的全面采集与传输，为后续分析与决策提供基础^[2]。数字孪生则通过构建物理实体的虚拟模型，对生产线运行状态进行实时映射、模拟与优化，提前预测潜在问题，辅助精准决策。边缘计算在靠近数据源头的网络边缘侧进行数据处理，减少数据传输延迟，提升响应速度，让生产过程的控制更加及时、高效。这三种技术相互协同，工业物联网提供数据，数字孪生进行深度分析与优化，边缘计算保障实时性，共同搭建起汽车生产线数字化升级的技术支撑体系，推动汽车生产线向智能化、数字化方向迈进。

二、工业机器人集成应用关键技术研究

（一）多机器人协同控制方案

在智能制造背景下的汽车生产线数字化升级中，多机器人协同控制方案至关重要。研究基于视觉引导和力觉反馈的机器人协同作业模式，是实现高效协同控制的关键。通过视觉引导，机器人能够精准识别作业目标的位置、形状等信息，快速定位操作对象，提高作业的准确性和效率^[9]。力觉反馈则让机器人在操作过程中感知力度变化，避免因用力不当造成零部件损坏或装配偏差。在此基础上，构建动态路径规划算法，充分考虑生产线环境的动态变化，如其他机器人的运动、物料的运输等，实时调整机器人的运动路径，防止机器人之间发生碰撞，确保多机器人在复杂且动态的汽车生产线上有序、高效地协同工作，提升生产线整体的数字化水平与生产效率。

（二）智能化焊接与装配系统开发

在智能制造背景下，以某车型侧围生产线为例，智能化焊接与装配系统开发至关重要。在该生产线中，工业机器人需实现高精度的焊接与装配任务。通过整合机器人柔性夹具系统与在线检测技术，可显著提升系统性能。机器人柔性夹具系统能依据不同生产需求，快速灵活地调整夹具构型，适应多种侧围型号生产，提高生产柔性^[4]。在线检测技术实时监测焊接与装配过程中的关键参数，如焊接温度、装配尺寸偏差等，一旦出现异常立即反馈，以便及时调整机器人操作，保证产品质量。这种整合应用实现了智能化焊接与装配系统的高效稳定运行，推动汽车生产线的数字化升级，为智能制造在汽车产业的深入发展奠定基础。

三、设备全生命周期数字化管理实践

（一）数字化设备管理系统构建

1. 设备状态监测平台建设

在智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践中，设备状态监测平台建设极为关键。通过开发集成振动分析、热成像监测等功能的预测性维护系统来实现。振动分析功能能够实时捕捉设备运行时的振动参数，依据振动的频率、幅度等指标变化，精准察觉设备潜在的机械故障隐患，比如零部件松动、磨损等^[5]。热成像监测功能则可借助热成像技术，监测设备关键部位的温度分布与变化，及时发现因过载、异常摩擦等导致的过热问题，防止设备因高温受损。该平台将各类监测数据进行整合分析，利用大数据和人工智能算法，提前预测设备可能出现的故障，为汽车生产线设备的稳定运行提供有力保障，实现设备状态的全方位、实时化监测，支撑汽车生产线的数字化升级。

2. 备件智能调配模型

在智能制造背景下汽车生产线数字化升级实践中，备件智能调配模型基于建立的贝叶斯网络备件需求预测算法展开。通过对历史故障数据进行深度挖掘与分析，利用贝叶斯网络的特性，精准预测各备件的需求情况。依据预测结果，结合设备运行状态、维修计划以及库存信息等多源数据，构建智能调配模型。该模型

能够自动生成最优的备件调配方案，实现备件资源的高效分配，减少库存积压与缺货风险。同时，模型具备动态调整能力，可根据实时反馈数据对调配方案及时优化，确保在汽车生产线运行过程中，备件供应始终与实际需求高度匹配，有效提高生产效率与设备管理水平^[6]。

（二）数字孪生技术应用探索

1. 生产线三维可视化建模

在智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践中，生产线三维可视化建模是关键环节。借助数字孪生技术，以BIM技术为依托来实现生产线三维可视化建模。通过对生产线的设备、布局、工艺流程等进行精细的三维建模，将现实中的生产线以数字化的三维形式呈现出来。建模过程中融入工艺参数，精准反映各设备运行状态、物料流转路径等。这样不仅能使工作人员直观了解生产线全貌，还方便进行虚拟调试、优化布局等操作。该建模为设备全生命周期数字化管理提供可视化基础，助力提前发现潜在问题，提升生产效率与质量，为汽车生产线数字化升级奠定坚实基础^[7]。

2. 虚拟调试与实时仿真

在智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践中，虚拟调试与实时仿真作为数字孪生技术的重要应用，在冲压设备调试环节发挥关键作用。通过构建冲压设备的虚拟模型，将其与实际物理设备相对应，利用实时数据交互实现虚实联动^[8]。在此过程中，对冲压设备的各项参数，如压力、速度、行程等进行模拟调试，提前发现潜在问题并优化工艺参数。实时仿真能够逼真再现冲压过程，工程师可依据仿真结果对设备运行状态进行精确预判，避免在实际调试中出现因设计缺陷或参数不合理导致的设备故障、生产延误等情况，有效缩短冲压设备调试周期，提高调试效率与精准度，为冲压生产的高效、稳定运行奠定基础，助力汽车生产线实现数字化升级。

四、生产数字化实施路径与效果分析

（一）工艺流程数字化重构

1. 基于MES的生产节拍优化

在智能制造背景下，汽车生产线的数字化升级实践中，工艺流程数字化重构里基于MES（制造执行系统）的生产节拍优化至关重要。MES通过实时采集与分析生产数据，精准洞察各生产环节的运行状况。例如，对汽车焊装线，MES能详细记录每个焊点的操作时间、设备运行状态等信息。基于这些数据，可识别生产瓶颈，如某些焊接工位耗时较长影响整体节拍。借助MES系统的模拟功能，可尝试不同的生产节拍调整方案，如优化工位人员配置、更新设备参数等。实施优化后，不仅能提高生产效率，减少生产周期，还能提升产品质量稳定性。经实践验证，运用MES进行生产节拍优化，焊装线体平衡率显著提升，有力推动了汽车生产线的数字化升级，为企业带来更高的经济效益^[9]。

2. 柔性化生产模式设计

在智能制造背景下，汽车生产线的柔性化生产模式设计是关

键环节。通过工艺流程数字化重构，以开发支持多车型混流的模块化工艺布局方案为依托。对生产工艺流程进行深度剖析，利用数字化技术对每个环节进行精准建模与模拟，从而清晰掌握各流程的特性与关联。在此基础上，设计柔性化生产模式，使生产线能够依据不同车型的需求，灵活调整生产参数与工艺顺序。例如，在冲压、焊接、涂装和总装等核心工序，通过智能化控制系统，实现设备的快速切换与精准操作。这种柔性化生产模式不仅提升了生产效率，减少了车型转换时间与成本，还增强了生产线对市场需求变化的响应能力，有效满足了消费者多样化、个性化的需求，在汽车行业竞争中占据优势^[10]。

（二）数据驱动的生产决策优化

1. 实时生产数据分析平台

构建实时生产数据分析平台，是实现数据驱动生产决策优化的关键环节。该平台集成各类生产设备数据、工艺参数数据以及质量检测数据等，利用大数据技术对海量实时数据进行快速采集与整合。通过先进的数据挖掘算法，从繁杂数据中提取关键信息，例如识别生产过程中的异常波动、预测设备潜在故障。借助可视化技术，以直观的图表、图形呈现分析结果，让生产管理人员能实时掌握生产状态。基于这些精准、实时的数据，管理者可快速调整生产策略，如优化生产节拍、及时更换即将失效的模具等，有效提升生产效率与产品质量，推动汽车生产线的数字化升级，确保生产决策更科学、更合理。

2. 能源消耗智能监控

在智能制造背景下汽车生产线数字化升级实践中，能源消耗智能监控是关键环节。通过部署基于物联网的电力负荷动态调节系统，可实时采集设备的电力数据，包括各生产环节的用电功率、电量等参数。系统对这些数据进行深度分析，利用智能算法预测不同生产场景下的能源需求。依据分析与预测结果，动态调节设备的电力负荷，如在非关键设备上适时降低功率，在设备空闲时自动进入低能耗模式。这不仅有效降低了汽车生产线的能源消耗，还提升了能源利用效率。实践证明，该系统助力企业实现能源精细化管理，降低生产成本，提升了企业在绿色制造方面的竞争力，为汽车生产线数字化升级中的能源消耗管控提供了高效且可行的方案。

（三）实施效果量化评估

1. 关键绩效指标对比

在智能制造背景下汽车生产线数字化升级实践中，关键绩效

指标的对比清晰展现了升级成效。设备综合效率（OEE）是衡量生产效率的重要指标，数字化升级前，汽车生产线设备因故障、换型等导致 OEE 处于一定水平。升级后，通过设备联网实时监控、智能维护预测等措施，OEE 提升了 12%，意味着设备生产能力得到显著增强，能产出更多合格产品。生产异常响应时间也至关重要，以往人工巡检与传统响应机制下，生产异常发现与处理耗时较长。数字化升级引入智能传感与数据分析系统，能快速定位异常，使响应时间缩短 40%，极大减少了因异常造成的生产停滞，保障了生产线的高效稳定运行，有力推动了汽车生产线的数字化转型。

2. 成本效益分析

在智能制造背景下汽车生产线数字化升级的成本效益分析中，从收益角度看，通过预测性维护降低设备故障停机损失约 800 万 / 年，这显著减少了因设备故障导致的生产中断，提升了生产效率与产品按时交付率，同时降低了紧急维修成本，也减少了因设备故障可能带来的产品质量缺陷成本。从成本角度而言，数字化升级过程涉及硬件设备更新、软件系统采购与开发、人员培训等成本投入。然而，综合来看，长期的收益远超过前期投入成本，不仅在设备故障损失减少方面成效显著，还因生产效率提升、产品质量改善等带来更多潜在收益，整体呈现出良好的成本效益比，有力证明了汽车生产线数字化升级在经济层面的可行性与重要性。

五、总结

智能制造背景下汽车生产线的数字化升级实践成效显著，生产效率得到大幅提升，自动化设备与数字化系统的协同作业，减少了生产环节的时间损耗，实现了更高效的生产节奏。同时，质量控制也获得明显改进，数字化检测手段与实时监控系统能够及时发现并纠正生产偏差，保障产品质量的稳定性。然而，目前仍存在工业大数据应用深度不足的问题，数据挖掘与分析能力有待加强，未能充分发挥数据对生产优化的潜在价值。展望未来，5G + AI 技术在远程运维领域具有广阔的发展前景，有望实现设备故障的精准预测与远程快速修复，进一步提升汽车生产线的运行稳定性与维护效率，推动汽车制造业向更高水平的智能化迈进。

参考文献

- [1] 刘佳雁. 基于数字孪生的汽车连杆生产线虚拟仿真调试与优化 [D]. 上海应用技术大学, 2023.
- [2] 高大伟. 智能制造背景下 X 公司制造系统优化研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [3] 孙寒梅. 智能制造背景下 F 电子制造服务企业成本控制优化研究 [D]. 苏州大学, 2022.
- [4] 夏慕恺. 人工智能背景下装备制造转型升级能力评价研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [5] 艾艳儒. 智能制造背景下制造业企业培训体系改革现状与对策研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [6] 邵青伟. 工业机器人在汽车智能制造生产线中的应用研究 [J]. 汽车测试报告, 2023, (09): 52-54.
- [7] 陈永刚, 梅阳寒. 智能制造背景下包装装备制造类专业技术技能人才培养模式的探索与实践 [J]. 包装工程, 2024, 45(S02): 139-144.
- [8] 张伟, 李亚, 刘磊. 浅谈智能制造背景下企业设备管理转型升级 [J]. 中国设备工程, 2023, (14): 44-46.
- [9] 谭妍玮. 智能制造背景下汽车制造专业“三教”改革路径研究 [J]. 汽车实用技术, 2023, 48(04): 156-159.
- [10] 吴星, 张迎凤. 广西汽车产业智能制造转型升级策略研究 [J]. 柳州职业技术学院学报, 2021, 21(05): 22-26.

基于气动物流系统运行数据的医院智慧物流优化模型研究

曾佳林

佛山复星禅诚医院有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110015

摘 要 : 本文基于医院气动物流系统运行数据探讨智慧物流优化模型。阐述数据采集机制与特征, 介绍从多维度提升效率、多元应用场景等优化策略, 如建立协同优化模型、动态调度策略等, 还涉及算法融合、仿真验证、案例应用等内容, 指出当前局限并对未来发展提出方向。

关 键 词 : 医院气动物流; 智慧物流优化模型; 运行数据

Research on Hospital Smart Logistics Optimization Model Based on Pneumatic Logistics System Operation Data

Zeng Jialin

Foshan Fosun Chancheng Hospital Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article explores the intelligent logistics optimization model based on the operation data of hospital pneumatic logistics system. Elaborate on the data collection mechanism and characteristics, introduce optimization strategies such as improving efficiency from multiple dimensions and diverse application scenarios, such as establishing collaborative optimization models, dynamic scheduling strategies, etc. It also involves algorithm fusion, simulation verification, case applications, etc., point out current limitations, and propose directions for future development.

Keywords : hospital pneumatic logistics; intelligent logistics optimization model; operating data

引言

2023 年国家卫生健康委颁布的《医院智慧管理分级评估标准体系(试行)》强调提升医院管理精细化、智能化水平。在此政策导向下, 医院气动物流运行数据因其多源异构特点, 对智慧物流优化意义重大。从数据采集到分析应用, 涉及实时采集机制、数据可视化挖掘等, 基于此构建的时间成本与经济成本协同优化等模型, 能有效提升物流效率与效益。但当前研究在跨系统集成和应急响应能力上存在局限, 后续应关注新技术融合, 实现医院智慧物流的进一步发展。

一、气动物流系统运行数据的特征分析

(一) 医院气动物流运行数据的主要类型与采集方法

医院气动物流运行数据具有多源异构的特点。其中, 管道传输系统、站台设备传感器等是数据的重要来源。流量监控数据记录着不同时段通过各管道的传输流量, 反映物流运行的繁忙程度。物资传输路径数据则清晰呈现物资从起点到终点所经路线, 有助于分析物流路径的合理性。设备状态参数涵盖设备的运行状况、故障信息等, 保障设备稳定运行。

针对这些数据类型, 有着相应的实时采集机制与技术标准。借助先进的传感器技术, 对流量进行精确监测, 确保数据准确性。利用定位与跟踪技术, 实时捕捉物资传输路径数据。通过设备内置的监测模块, 获取设备状态参数。这些采集过程均遵循严

格的技术标准^[1], 以保证采集数据的可靠性和一致性, 为后续基于气动物流系统运行数据的医院智慧物流优化模型研究奠定坚实基础。

(二) 医院场景下运行数据的特征分析与问题识别

在医院场景下, 气动物流系统运行数据呈现出独特特征。通过数据可视化手段挖掘传输效率分布规律, 能发现其在不同时段、不同区域存在显著差异。例如, 某些科室在特定时间段传输需求剧增, 导致传输效率降低。高峰期拥堵模式方面, 可观察到在集中送药、标本送检等时段, 物流通道出现拥堵, 影响物资流转速度。能源消耗数据中, 异常值也时有出现, 这可能源于设备老化、运行参数不合理等。基于这些运行数据特征, 可进一步识别核心问题, 如高峰期物流规划不完善、能源管理存在漏洞等。借助这些分析结果, 构建医院物流流转效能评价指标体系, 该体

系能全面反映气动物流系统在医院运行中的实际效能，为后续优化提供有力依据^[2]。

二、气动物流系统在医疗物资管理的关键作用机制

（一）智慧物流系统的效率提升机制

气动物流系统可从多维度提升智慧物流系统效率。通过建立系统运行效率的量化评估模型，实现动态路径规划，能根据实时情况灵活调整运输路线，避免拥堵，提升运输时效。批量传输策略的运用，将同类或关联物资整合批量运输，减少传输频次，提高单次运输量，降低整体运输成本与时间。跨科室协同方面，该系统打破科室间物流壁垒，实现物资高效流转与共享，提升医院整体物流运作效率。经量化评估模型验证，气动传输在时耗压缩上优势显著，相较于人工配送，极大缩短了物资运输时间，有效提升了智慧物流系统的运行效率^[3]。

（二）医疗物资全流程管理的应用场景分析

气动物流系统在医疗物资全流程管理中有着多元应用场景。在药品紧急配送场景下，医院常面临突发病情对特定药品的急需，气动物流系统能借助其快速传输特点，依据系统运行数据精准规划路线，快速将药品送达指定科室，确保患者及时用药^[4]。对于高值耗材追溯，气动物流系统运行数据详细记录了高值耗材的流转信息，从入库、调配到使用科室，每个环节的数据可实现全程追溯，助力医院严格把控高值耗材的使用情况，保障医疗安全。而在医疗废弃物处置场景，系统通过运行数据优化废弃物收集路径，将不同类型医疗废弃物按规定快速、安全地运输至处理点，实现医疗废弃物规范化管理，有效降低感染风险，优化医院整体物流效率与管理水平。

三、基于运行数据的智慧物流优化模型构建

（一）多目标优化模型构建的基本原理

1. 时间成本与经济成本协同优化模型

在基于气动物流系统运行数据的医院智慧物流优化中，时间成本与经济成本协同优化模型旨在兼顾医疗物资传输的及时性与成本控制。通过建立综合成本函数，将传输时延所反映的时间成本以及能源消耗、设备维护费用所代表的经济成本纳入其中。传输时延影响着医疗物资能否及时送达，关乎病人救治等关键环节，而能源消耗与设备维护费用则直接关联经济成本。设计约束条件时，充分考虑医疗物资时效性要求，确保在满足这一硬性条件的基础上，对时间成本与经济成本进行协同优化，寻求两者之间的最优平衡点，有效提升医院智慧物流系统的整体运行效率与效益^[5]。

2. 环境参数自适应的动态调度策略

在医院气动物流系统中，环境参数自适应的动态调度策略至关重要。通过气压状态监测获取实时气压数据，结合科室需求预测，可深入了解物流系统的运行状况与各科室的物资需求变化。基于此，开发在线调度算法，该算法能够根据气压状态和需求预

测动态调整传输任务分配，实现传输管道网络的负载均衡配置。例如，当某段管道气压异常或某科室需求激增时，算法可迅速调整物流路线，将运输任务合理分配至其他空闲管道，避免局部管道过度负载。这种自适应策略能有效提升气动物流系统的运行效率，减少传输延误，确保物资高效、准确送达各科室^[6]。

（二）混合智能算法的模型求解方法

1. 遗传算法与模拟退火的融合优化

为解决复杂约束条件下医院智慧物流优化模型的求解难题，将遗传算法与模拟退火算法相融合。遗传算法具有全局搜索能力，能够在较大空间内寻找潜在的较优解，但容易陷入局部最优。模拟退火算法则具备跳出局部最优解的能力，通过控制温度参数，以一定概率接受恶化解，逐步逼近全局最优解。二者融合时，先利用遗传算法进行全局搜索，快速缩小解空间范围，然后借助模拟退火算法对遗传算法得到的局部较优解进一步优化，利用其退火机制避免陷入局部最优，实现全局搜索与局部寻优的结合，提升求解效率，从而有效求解基于气动物流系统运行数据的医院智慧物流优化模型^[7]。

2. 数字孪生系统的仿真实验平台

通过构建医院建筑信息模型与物流系统的虚实映射关系，利用数字孪生技术搭建仿真实验平台，对基于运行数据构建的智慧物流优化模型及混合智能算法求解结果进行验证。在该平台中，将医院实际气动物流系统的各类运行数据，如运输时间、频次、负载量等，准确映射到虚拟模型中，实现对真实物流场景的高度模拟^[8]。基于此，可对不同的物流优化方案进行仿真测试，观察其在虚拟环境中的运行效果，判断方案是否能有效提升物流效率、降低成本等，从而验证优化方案的可行性，为实际应用提供可靠依据，确保优化模型在医院气动物流系统中能切实发挥作用，实现智慧物流目标。

四、智慧物流优化模型的实施路径与验证

（一）三级医院的应用案例研究

1. 试点科室的实施方案设计

在三级医院的应用案例研究中，针对手术室与中心药房间的气动物流系统改造，试点科室需精心设计实施方案。明确设备升级参数，如管道材质需选用更耐磨、密封性更佳的材料，以提升运输效率并减少物品损耗；传输速度根据药品及手术用品的紧急程度进行精准设定。操作流程标准方面，从药品的接收、分类、装箱，到发送至手术室，每个环节都制定严格规范。药品装箱需遵循特定顺序与重量分布原则，确保运输稳定。操作人员要经过专业培训，严格按照标准流程执行。通过这样的方案设计，利用智慧物流优化模型对气动物流系统进行改造，为后续验证模型的有效性奠定基础^[9]。

2. 实际运行数据对比分析

在三级医院的应用案例中，通过对比优化前后传输时效、人力成本、设备故障率的实际运行数据，来验证智慧物流优化模型的效能。从传输时效看，优化前，气动物流系统完成一次常规

物资传输平均耗时15分钟，优化后，这一数字大幅缩短至3分钟，表明模型显著提升了物流流转速度^[10]。人力成本方面，优化前医院为维持物流系统运作需投入10名人力，优化后人力减少至7名，降低了人力开支。设备故障率同样有明显改善，优化前故障率为8%，优化后降至5%，说明模型有效提升了设备运行稳定性。这些数据直观体现出智慧物流优化模型在提升医院物流效率、降低成本及保障设备稳定运行等方面的实际效能。

（二）多院区协同优化的扩展研究

1. 区域医疗资源协同配置模型

针对区域医疗资源协同配置模型，首先，整合多院区气动物流系统的运行数据，包括物资运输量、运输时间、设备状态等，运用数据分析技术挖掘其中潜在规律与需求模式。然后，基于这些数据构建线性规划或整数规划模型，以医疗资源使用效率最大化、物流成本最小化等为目标函数，考虑各院区的资源需求、储备能力、运输限制等约束条件，实现医疗资源的科学分配。模型构建完成后，利用历史数据进行模拟验证，对比模型优化前后的资源配置方案，评估其在提升物流效率、降低成本等方面的效果。同时，通过实际运行测试，根据实时反馈进一步调整与完善模型，确保其在多院区协同场景下的有效性与适应性，最终推动区域医疗资源的高效协同配置。

2. 智慧物流系统的弹性扩容机制

智慧物流系统的弹性扩容机制对于医院应对规模扩张至关重要。通过设计可扩展的模块化传输管道架构，实现系统的平滑升级。在构建模块化传输管道时，依据医院未来发展规划，采用标准化组件，确保各模块间的兼容性与互换性。例如，针对新增科室或院区的需求，可快速接入新的管道模块，同时不影响现有系统的正常运行。在扩容实施过程中，对物流系统的关键性能指标如传输效率、货物损耗率等进行实时监测。完成扩容后，通过模拟不同业务场景及物流量，验证系统在扩容后的性能表现。若出现性能下滑，及时调整优化模块参数，确保智慧物流系统在医院规模扩增时始终保持高效运行状态，为医院提供持续稳定的物流支持。

（三）持续改进的技术保障体系

1. 系统运行数据的迭代学习机制

在医院智慧物流优化模型中，系统运行数据的迭代学习机制是实现持续改进的关键部分。基于深度强化学习的自优化系统，

通过收集气动物流系统运行过程中的各类数据，如运输时间、频次、货物类型及运输路线等，构建数据样本库。自优化系统利用这些数据进行迭代学习，不断调整运输策略，以适应医院物流环境的动态变化。例如，依据不同时间段科室物资需求的波动，动态优化运输频次与路线。随着新数据的持续流入，自优化系统会实时更新模型参数，持续提升运输策略的精准性与效率，确保智慧物流系统始终保持在最优运行状态，实现运输策略的持续动态更新，从而保障智慧物流优化模型能更好地满足医院复杂多变的物流需求。

2. 智慧物流标准的制定与推广

在医院智慧物流优化模型的构建中，智慧物流标准的制定与推广是关键环节。应综合考虑气动物流系统运行数据，结合设备选型、操作规范与效能评估等方面，形成一套全面且科学的智慧物流标准。该标准需明确设备性能参数、操作流程细节以及效能评估指标等内容，为医院智慧物流建设提供清晰指引。在推广过程中，通过组织培训、研讨会等形式，向医院物流相关人员普及标准知识，使其理解并遵循标准执行。同时，建立反馈机制，收集实际应用中的问题与建议，以便对标准进行适时调整与完善，从而推动医院智慧物流行业整体规范化发展，提升物流运行效率与质量。

五、总结

本研究基于气动物流系统运行数据对医院智慧物流优化模型展开探讨。气动物流系统运行数据对医院智慧物流建设意义重大，它能为物流流程优化、资源合理配置提供关键依据。所构建的多目标优化模型具备创新性，有效平衡了物流效率、成本及服务质量等多方面需求。然而，当前研究存在一定局限，在跨系统集成方面，尚未实现与其他物流系统的深度融合，影响整体协同效果；突发应急响应能力也有待提升，面对突发事件难以迅速调整物流策略。未来，下一代医疗智慧物流系统应着重关注数字孪生、边缘计算等新技术融合，借助数字孪生实现物流系统的精准模拟与优化，利用边缘计算提升数据处理效率与实时响应能力，推动医院智慧物流向更智能、高效的方向发展。

参考文献

- [1] 郭迈豪. 基于运行数据的串级控制系统参数优化方法研究 [D]. 华北电力大学 (保定), 2022.
- [2] 甘雨. 基于混合模型的风电机组运行数据预处理方法研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [3] 常小小. 大型医院智慧物流传输系统空间布局研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [4] 程丽红. 智慧物流中考虑产品存货和装备补贴的物流效率优化研究 [D]. 中国科学技术大学, 2022.
- [5] 熊利凡. 智能医院物流系统仿真优化技术研究及应用 [D]. 华中科技大学, 2022.
- [6] 中国物流信息中心课题组, 胡焱, 孟圆. 2020年物流运行情况 [J]. 物流研究, 2021(1): 1-4.
- [7] 茹新宇, 江玉婷, 张婷. 基于区块链的智慧物流系统运行机制研究 [J]. 江苏航运职业技术学院学报, 2023, 22(1): 100-104.
- [8] 倪鹏. 气动物流传输系统在大型医院运行中的常见问题及优化方案 [J]. 价值工程, 2023, 42(20): 12-15.
- [9] 胡蓝青, 晋欣桥, 杜志敏. 基于运行数据的冷水机组系统建模及优化控制 [J]. 制冷技术, 2022, 42(3): 13-20.
- [10] 陈伟杰, 马军. 气动物流传输系统优化管理研究 [J]. 中国医疗设备, 2021, 36(3): 141-143.

佳木斯高端智能农机产业发展路径与政策支持研究

王庆和¹, 王靖宇²

1. 黑龙江农业职业技术学院, 黑龙江 佳木斯 154002

2. 黑龙江北大荒农业股份有限公司七星分公司, 黑龙江 佳木斯 156399

DOI:10.61369/ME.2025110027

摘 要 : 随着农业现代化进程的加速推进, 高端智能农机产业已成为推动农业转型升级的关键力量, 佳木斯作为我国重要的商品粮生产基地, 发展高端智能农机产业具有得天独厚的优势和重大战略意义。立足于佳木斯农业发展实际, 系统分析发展高端智能农机产业对于推动区域农业现代化、促进地方经济结构优化以及服务国家粮食安全战略的重要意义。同时, 深入剖析当前佳木斯高端智能农机产业发展面临的核心技术研发能力不足、产业链配套不完善、市场推广应用滞后突出问题。在此基础上, 从构建政产学研协同创新机制、完善产业链布局、优化财政金融政策支持方面提出针对性的发展路径与政策建议。

关 键 词 : 佳木斯; 高端智能农机; 产业发展; 政策支持; 农业现代化

Research on the Development Path and Policy Support of High-End Intelligent Agricultural Machinery Industry in Jiamusi

Wang Qinghe¹, Wang Jingyu²

1. Heilongjiang Vocational College of Agriculture Technology, Jiamusi, Heilongjiang 154002

2. Qixing Branch of Heilongjiang Beidahuang Agriculture Co., LTD., Jiamusi, Heilongjiang 156399

Abstract : With the accelerated advancement of agricultural modernization, the high-end intelligent agricultural machinery industry has become a key force driving the transformation and upgrading of agriculture. As an important commercial grain production base in China, Jiamusi enjoys unique advantages and significant strategic importance in developing the high-end intelligent agricultural machinery industry. Based on the actual development of agriculture in Jiamusi, this paper systematically analyzes the significant importance of developing high-end intelligent agricultural machinery industry for promoting regional agricultural modernization, optimizing the local economic structure, and serving the national food security strategy. At the same time, a thorough analysis should be conducted on the prominent problems currently faced by the high-end intelligent agricultural machinery industry in Jiamusi, such as insufficient core technology research and development capabilities, incomplete industrial chain support, and lagging market promotion and application. On this basis, targeted development paths and policy suggestions are proposed from the aspects of building a collaborative innovation mechanism among government, industry, academia and research, improving the industrial chain layout, and optimizing the support of fiscal and financial policies.

Keywords : Jiamusi; high-end intelligent agricultural machinery; industrial development; policy support; agricultural modernization

引言

当前, 全球农业发展处于深刻变革之中, 以人工智能、物联网、大数据为代表的新一代信息技术与农业机械深度融合, 推动农机装备向高端化、智能化、绿色化方向快速发展, 高端智能农机已成为衡量一个国家或地区农业现代化水平的重要标志, 也是保障粮食安全、提升农业竞争力的核心装备支撑。佳木斯地处三江平原腹地, 拥有广袤的优质耕地资源和悠久的农业发展传统, 是国家重要的粮食主产区和商品粮基地。近年来, 佳木斯积极响应国家农业现代化战略部署, 大力推进农机装备产业发展, 但在高端智能农机领域仍面临诸多挑战, 因此, 深入研究佳木斯高端智能农机产业的发展路径与政策支持体系。

作者简介:

王庆和 (1967.4-), 男, 山东曹县人, 本科, 副教授, 研究方向: 汽车、农业机械, 校企合作, 继续教育;

王靖宇 (1998.11-), 男, 黑龙江省人, 本科, 助理农艺师, 研究方向: 机械设计制造及其自动化、农业机械。

一、佳木斯发展高端智能农机产业的意义

（一）推动区域农业现代化转型升级

高端智能农机是农业现代化的重要物质基础和技术支撑，其发展水平直接关系到农业生产效率和质量，佳木斯作为农业大市，耕地面积广阔，农业生产规模化程度较高，对先进农机装备具有强烈的现实需求。发展高端智能农机产业，能够有效提升农业机械化作业水平，推动传统农业向精准农业、智慧农业转变。通过引入智能化播种、施肥、植保、收获农机装备，可以实现农业生产全过程的精准化管理，大幅提高土地产出率、资源利用率和劳动生产率。同时，高端智能农机的应用能够有效降低农业生产对人工劳动力的依赖，缓解农村劳动力短缺问题，为农业可持续发展提供强有力的装备保障，因此，大力发展高端智能农机产业是佳木斯实现农业现代化转型升级的必由之路^[1]。

（二）促进地方经济结构优化与产业升级

高端智能农机产业作为先进制造业与现代农业的交汇点，具有技术含量高、产业链条长、带动效应强的显著特征，佳木斯发展高端智能农机产业，有利于推动地方产业结构从传统农业向现代制造业延伸拓展，培育形成新的经济增长极。高端智能农机产业的发展能够有效整合区域内的机械制造、电子信息、新材料产业资源，促进产业间的协同联动和融合发展，形成具有较强竞争力的产业集群。同时，高端智能农机产业能够创造大量高质量就业岗位，吸引和集聚各类专业技术人才，为地方经济社会发展注入新的活力。此外，通过发展高端智能农机产业，可以有效提升佳木斯在区域经济版图中的地位和影响力，增强城市的综合竞争力和可持续发展能力^[2]。

（三）服务国家粮食安全与农业强国战略

粮食安全是国家安全的重要基础，而农机装备是保障粮食生产能力的关键要素，佳木斯作为国家重要的商品粮生产基地，肩负着保障国家粮食安全的重大使命。发展高端智能农机产业，能够显著提升粮食生产的机械化、智能化水平，确保粮食稳产增产，为国家粮食安全提供坚实保障。当前，我国正在加快推进农业强国建设，高端智能农机装备是农业强国建设的重要支撑，佳木斯发展高端智能农机产业，不仅能够满足本地区农业生产的装备需求，还可以辐射带动周边地区乃至全国的农机装备升级换代，为我国农业现代化和农业强国建设作出积极贡献，这既是佳木斯服务国家战略的责任担当，也是实现自身高质量发展的重要机遇^[3]。

二、佳木斯高端智能农机产业发展面临的问题

（一）核心技术研发能力不足与人才短缺

高端智能农机涉及机械工程、电子信息、自动控制、人工智能多个学科领域的前沿技术，对技术研发能力和人才队伍建设提出很高要求，当前，佳木斯高端智能农机产业在核心技术方面仍存在明显短板，关键零部件和核心控制系统主要依赖外部引进，自主研发能力相对薄弱。本地农机企业普遍存在研发投入不足、

创新平台建设滞后问题，难以有效支撑高端智能农机的自主研发和技术突破。在人才队伍方面，佳木斯面临着高层次专业技术人才和创新型人才严重短缺的困境。由于地理位置和经济发展水平因素制约，高端人才引进难度较大，本土人才培养体系也不够完善。现有人才结构以传统农机制造技术人员为主，熟悉智能控制、信息技术新兴领域的复合型人才匮乏，人才短缺已成为制约佳木斯高端智能农机产业创新发展的关键瓶颈，亟需采取有效措施加以解决^[4]。

（二）产业链配套不完善与企业规模偏小

完善的产业链配套体系是高端智能农机产业健康发展的重要基础，目前，佳木斯高端智能农机产业链条尚不完整，上下游配套能力明显不足。在上游零部件供应方面，本地能够生产的关键零部件种类有限，精密液压元件、智能传感器、控制芯片核心部件主要依赖外购，不仅增加生产成本，也影响产品的供应稳定性和定制化能力。

在下游服务体系方面，高端智能农机的销售网络、维修保养、技术培训配套服务还不够健全，难以满足用户的多元化需求。从企业主体来看，佳木斯农机制造企业普遍存在规模偏小、实力较弱的问题。大多数企业仍处于中低端产品生产阶段，缺乏具有较强市场竞争力和品牌影响力的龙头企业。企业之间的协作配套关系不够紧密，产业集聚效应尚未充分形成，小而散的产业格局难以有效支撑高端智能农机产业的规模化发展和市场竞争^[5]。

（三）市场推广应用滞后与农机农艺结合不紧密

高端智能农机产业的持续健康发展离不开广阔的市场需求和良好的应用环境。当前，佳木斯高端智能农机的市场推广应用仍面临诸多障碍，从需求端来看，高端智能农机价格相对较高，而农业生产经营主体的购买能力有限，加之部分农户对新型农机装备的认知度和接受度不高，影响高端智能农机的市场推广进程。从供给端来看，部分高端智能农机产品在设计研发过程中对本地农业生产实际需求的调研分析不够深入，产品的适用性和可靠性有待提升。

农机与农艺结合不紧密是制约高端智能农机推广应用的另一突出问题，高端智能农机的高效运行需要与相应的农艺技术相配合，但目前农机研发与农艺技术研究之间的协同机制不够完善，农机装备与种植制度、栽培技术之间存在一定程度的脱节，影响高端智能农机作业效果的充分发挥，这些问题的存在制约高端智能农机市场的有效拓展和产业的可持续发展。

三、佳木斯高端智能农机产业发展路径与政策支持

（一）构建政产学研协同创新机制与人才引培体系

针对核心技术研发能力不足和人才短缺问题，佳木斯应着力构建政产学研深度融合的协同创新机制，政府应充分发挥统筹协调和资源整合作用，积极搭建高端智能农机产业技术创新平台，有效整合区域内高校、科研院所和骨干企业的创新资源，组建跨部门、跨领域的产业技术创新战略联盟，形成优势互补、协同攻关的强大合力。应重点围绕智能控制系统、精准作业技术、农机专用传感器、北斗导航应用关键核心技术领域，系统谋划并组织

实施一批重大科技攻关项目，集中力量突破技术瓶颈，力争在核心技术和关键环节上取得实质性突破。积极加强与国内外知名农机研发机构和龙头企业的深度交流合作，通过技术引进、联合研发、人才互访多种形式，积极引进消化吸收先进技术和管理经验，不断提升区域自主创新能力和技术水平。在人才队伍建设方面，应制定并实施更加积极开放、灵活高效的人才引进政策，通过提供具有竞争力的薪酬待遇、良好的职业发展平台、完善的生活配套服务，大力吸引高层次专业技术人才、领军人才和创新创业人才来佳木斯干事创业、安家落户。同时加强本土人才培养力度，支持本地高等院校和职业院校优化学科专业设置，开设智能农机装备制造、农业信息技术相关专业和特色课程，深化校企合作和产教融合，着力培养一批适应产业发展需要的高素质应用型人才。

（二）完善产业链布局与培育龙头企业集群

针对产业链配套不完善和企业规模偏小的问题，佳木斯应从优化产业链整体布局和培育壮大市场主体两个维度协同发力、综合施策，在产业链建设方面，应立足区域资源禀赋和产业基础，科学编制高端智能农机产业中长期发展规划，系统明确产业链各环节的发展重点、功能定位和空间布局，推动形成上下游分工合理、各环节协作紧密、整体运行高效的现代化产业链体系，着力补齐产业链薄弱环节和关键短板，加大对精密液压元件、智能传感器、电子控制单元关键零部件生产企业的招商引资和本土培育力度，切实提升本地配套供应能力，有效降低对外部供应的依赖程度。加强产业链上下游企业之间的精准对接与深度合作，通过定期举办供需对接会、建立信息共享平台方式，帮助企业建立长期稳定的供需协作关系，不断提高产业链整体运行效率和抗风险能力。积极培育发展农机销售流通、维修保养服务、操作技术培训、金融保险服务生产性服务业态，逐步完善产业配套服务体系。在企业培育方面，应大力实施龙头企业培育工程，精心遴选一批发展基础扎实、技术创新能力强、市场成长潜力大的农机装备企业进行重点扶持和跟踪服务，支持其加快技术升级和产能扩张，推动其做大做强做优，逐步打造成为具有较强市场竞争力和行业品牌影响力的龙头骨干企业，鼓励和支持有条件的企业通过兼并重组、股权合作、战略联盟多种方式整合产业资源，不断提升企业规模实力和市场竞争能力。持续加大招商引资工作力度，积极引进国内外知名农机装备企业和配套企业来佳木斯投资兴业，充分发挥其技术溢出和示范带动效应，推动本地产业转型升级发展。

（三）优化财政金融支持与市场推广政策体系

针对市场推广应用滞后和农机农艺结合不紧密的问题，佳木斯应着力完善财政金融支持政策体系和市场推广服务机制，在财政支持方面，应切实加大对高端智能农机产业发展的财政投入力度和资金保障水平，研究设立高端智能农机产业发展专项扶持资金，重点支持关键技术研发创新、公共服务平台建设、高层次人才引进、重大项目建设关键环节和薄弱领域。进一步完善优化农机购置补贴政策，将符合技术标准和质量要求的高端智能农机装备及时纳入补贴目录范围，适当提高补贴资金标准和比例，有效降低农业生产经营主体购置使用高端智能农机的经济成本。对从事高端智能农机研发生产的骨干企业给予税收减免优惠和专项奖励扶持，充分激发企业技术创新和产业发展的内生动力与活力。在金融支持方面，应积极创新金融产品设计和服务模式，引导和鼓励各类金融机构加大对高端智能农机产业的信贷投放力度，为重点企业的技术改造升级、生产能力扩张、流动资金周转提供充足的资金保障和便捷的金融服务。积极探索发展农机融资租赁、设备抵押贷款新型金融业务，进一步拓宽农业生产经营主体获取和使用高端智能农机装备的渠道和方式。在市场推广方面，应系统加强高端智能农机的示范推广工作，在全市范围内规划建设一批高标准智能农机示范基地和典型应用场景，定期组织开展形式多样的现场作业演示、技术操作培训、经验交流观摩活动，切实提升广大农户和新型农业经营主体对高端智能农机的认知程度和接受意愿。随着现代信息技术的飞速发展，以数字化、网络化、智能化为主要特征的信息化浪潮正深刻影响和改变着人们的生活方式。

四、结语

高端智能农机产业是推动农业现代化的重要引擎，对于保障国家粮食安全和促进农业高质量发展具有重要战略意义，佳木斯作为国家重要的粮食主产区，发展高端智能农机产业既有坚实的需求基础，也面临良好的发展机遇。通过系统分析佳木斯发展高端智能农机产业的重要意义、面临的突出问题，提出构建协同创新机制、完善产业链布局、优化政策支持体系针对性的发展路径与政策建议。展望未来，佳木斯应紧紧抓住农业现代化和制造业转型升级的战略机遇期，坚持创新驱动、政策引导、市场主导的发展思路，加快推进高端智能农机产业高质量发展。

参考文献

[1]王新芳.推进高端智能农机制造 加快宁晋农机产业集群建设 [J].农机质量与监督,2023,(2):33-33.

[2]张鑫.北大荒:人工智能赋能高端智能农机产业快速发展 [J].当代农村财经,2024,(3):63-64.

[3]赵春江,李瑾,冯献.关于我国智能农机装备发展的几点思考 [J].农业经济问题,2023,(10):4-12.

[4]崔少宁.挖掘人工智能潜力 促进高端智能农机产业快速发展 [J].农机质量与监督,2024,(9):16-17.

[5]刘伟,刘元元.基于专利分析的智能农机产业区域技术创新竞争力测度 [J].中国农机化学报,2024,45(9):311-317.

石油化工带压堵漏技术的创新与安全管理

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.2025110001

摘 要 : 石油化工带压堵漏技术是保障连续性安全生产的关键应急措施, 通过机械、化学和复合材料等手段实现不停产快速修复。研究系统分析了该技术的原理分类、材料创新和智能装备发展, 重点探讨了高温高压工况下的密封材料研发和自动化堵漏工艺优化。针对典型泄漏案例的技术应用与安全管理经验进行总结, 提出从材料性能提升、智能监测系统完善到标准化作业流程构建的系统性优化方案, 为提升堵漏效率和作业安全性提供理论支撑。

关 键 词 : 带压堵漏; 密封材料; 安全管理

Innovation and Safety Management of Pressure Plugging Technology in Petrochemical Industry

Ni Xingxiu

Maoming Hengfu Petrochemical Engineering Co., Ltd., Maoming, Guangdong 525000

Abstract : Pressure plugging technology in the petrochemical industry is a critical emergency measure to ensure continuous and safe production, enabling rapid repair without shutdown through mechanical, chemical, and composite material methods. This study systematically examines the principle classification, material innovation, and development of intelligent equipment in this technology, with a focus on the development of sealing materials for high-temperature and high-pressure conditions and the optimization of automated plugging processes. By summarizing technical applications and safety management experiences from typical leakage cases, systematic optimization solutions are proposed, including improvements in material performance, enhancement of intelligent monitoring systems, and the establishment of standardized operational procedures, providing theoretical support for enhancing plugging efficiency and operational safety.

Keywords : pressure plugging; sealing materials; safety management

引言

石油化工企业生产中的介质泄漏是重大安全隐患, 带压堵漏技术因其不停产维修特性成为关键应急手段。2024年4月, 应急管理部发布《化工企业生产过程异常工况安全处置准则(试行)》, 对高风险泄漏处置提出严格要求。当前带压堵漏技术发展面临双重挑战: 一方面需提升密封材料性能和智能化水平, 另一方面要完善安全管理体系。通过技术创新与规范管理的协同推进, 构建更安全高效的堵漏技术体系, 对保障石油化工企业安全生产具有重要意义。

一、带压堵漏技术概述

(一) 带压堵漏技术的基本原理

带压堵漏技术是指在设备或管道运行状态下, 通过特定方法快速封堵泄漏部位, 确保生产连续性的应急维修手段。该技术按原理可分为机械堵漏、化学堵漏和复合材料堵漏等。机械堵漏依赖夹具、卡具等装置对泄漏部位施加外力并注射密封剂实现密封; 化学堵漏利用固化胶黏剂或反应型材料填充裂缝; 复合材料堵漏则结合高强度纤维与树脂形成复合密封层^[1]。该技术核心特点包括不停产操作, 避免生产中断带来的经济损失; 快速响应能

力, 适用于突发性泄漏; 广泛适用性, 可应对不同部位、不同压力、温度及介质条件。

(二) 石油化工领域带压堵漏的应用场景

石油化工企业生产中, 带压堵漏技术主要应用于三类典型场景。管道泄漏是常见问题, 尤其在易腐蚀或高压环境下, 焊缝或管壁缺陷易导致介质外泄, 需采用夹具注胶或缠绕密封技术紧急修复^[2]。储罐与反应器泄漏风险集中于罐壁穿孔或法兰连接处, 复合材料包覆或磁压堵漏技术可有效隔离危险介质。阀门与法兰泄漏多因密封失效或螺栓松动, 通过注入密封剂或安装专用堵漏夹具可实现快速密封, 避免系统停车。不同场景对堵漏技术的选

择取决于泄漏形态、介质特性及环境安全要求^[3]。

二、带压堵漏技术的创新方向

（一）密封材料创新

带压堵漏技术的密封材料创新聚焦于提升密封性能与环境适应性。高性能密封材料的发展主要体现在纳米复合密封剂与智能自修复材料的应用，前者通过纳米颗粒增强材料的致密性与耐腐蚀性，后者利用微胶囊技术实现损伤部位的自动修复^[4]。耐高温高压复合材料的研发成为关键突破方向，例如碳纤维增强聚合物与陶瓷基复合材料，可在极端工况下保持结构稳定性，适用于石化装置中的高温高压泄漏部位。这类材料通过优化界面结合技术与热膨胀匹配设计，显著延长了堵漏结构的使用寿命。

（二）工艺与装备创新

工艺革新以提升堵漏效率与安全性为核心目标。自动化堵漏装备如管道爬行机器人与无人机检测系统，通过远程操控与实时监测技术，实现危险环境下的无人化作业，降低人员暴露风险^[5]。3D打印技术在快速堵漏中的应用展现出显著优势，通过现场打印与泄漏部位几何参数匹配的定制化堵漏部件，大幅缩短应急响应时间。该技术结合逆向工程与耐蚀材料打印工艺，为复杂结构泄漏提供了高精度解决方案，推动堵漏技术向数字化与智能化方向发展。

三、带压堵漏技术的安全管理

（一）带压堵漏技术操作安全规范

1. 堵漏前的风险评估

堵漏作业前的系统性风险评估是确保操作安全的关键环节。泄漏原因分析需综合考察工艺参数（如压力、温度等）、介质特性及环境条件，高压易燃介质泄漏需采用防爆型堵漏方案，腐蚀性介质则要求材料具备耐化学侵蚀性能^[6]。安全防护等级划分依据泄漏危害程度，参照国际标准将作业区域划分为隔离区、控制区和安全区，不同区域匹配相应的个人防护装备等级与操作权限。定量风险评估工具如 HAZOP 分析可有效识别潜在危险源，为堵漏方案选择提供数据支持。

2. 堵漏过程中的安全控制

作业人员防护措施遵循“双重防护”原则。基础防护包括防化服、正压式空气呼吸器及气体检测仪；高危环境需增设远程监控与紧急逃生系统。应急响应流程采用分级响应机制，初级泄漏由现场班组按标准化程序处置，重大泄漏立即启动企业级应急预案，联动消防、医疗等外部救援力量^[7]。实时监测系统在堵漏过程中持续追踪压力、温度及可燃气体浓度等关键参数，数据异常时自动触发报警并启动紧急切断程序，形成动态安全防护体系。

（二）安全管理体系建设

1. 企业安全管理标准

企业安全管理标准的核心在于建立系统化的带压堵漏作业规范体系。作业规程制定需涵盖技术选择标准、操作步骤清单和验

收指标，结合 API 2201 和 GB/T 26467 等规范形成企业级技术文件^[8]。人员培训实施三级认证制度，基础操作人员需完成 200 小时以上的实操训练并通过压力测试考核，高级技术人员必须掌握风险评估方法和应急决策能力。资质管理系统引入区块链技术实现证书防伪和时效验证，确保作业团队的专业性符合石化行业高风险作业要求。

2. 政府监管与行业标准

政府监管体系通过《特种设备安全法》和 AQ 3060-2025《带压密封和带压开孔作业安全管理规范》实施强制性约束，建立带压堵漏服务企业准入备案制度。行业标准建设重点推进 ISO 24817 和 T/CAPE 11003《在役管道泄漏维修技术规范》的贯标工作，形成覆盖设计、施工、验收的全流程标准体系。最佳实践推广采用案例库共享机制，建议由中国特种设备检测研究院牵头建立行业事故数据库，通过大数据分析提炼可复用的技术方案和管理模式，定期发布行业技术白皮书指导企业实践。

四、案例分析与优化建议

（一）典型泄漏事故案例分析

1. 成功堵漏案例

日前，吉林石化公司炼油厂 V708A/B 罐区南侧第二层管线上发生液化气泄漏事故。该管道为老 705# 线，运行压力高达 1.0MPa，泄漏点位于焊缝处，液化气易燃易爆，若扩散遇火源将引发重大爆炸风险。现场操作员韩冰在清罐检测过程中发现泄漏迹象，立即切断电源、疏散人员并上报控制室和调度室。应急响应团队 3 分钟内赶到现场，迅速设立安全警戒线，启动水幕隔离系统以稀释气体并防止扩散。

针对高压带压工况，团队采用机械夹具注胶复合堵漏技术：先用专用夹具固定泄漏部位，确保夹紧力均匀分布，避免二次损伤；随后注入高性能纳米复合密封剂，结合碳纤维缠绕增强密封强度。该工艺在不停产状态下完成，作业时间控制在 5 小时内（下午 4 点至晚 9 点）。最终，检测仪器显示无泄漏，管道恢复正常运行，避免了停车检修导致的数百万经济损失。

此案例凸显带压堵漏技术的应急效能，强调快速响应与材料适配的重要性。通过事后评估，吉林石化优化了风险巡检机制，引入智能监测设备，提升了类似事故处置能力，为石油化工行业提供了可借鉴的成功范式。

（来源：工人日报）

日前，吉林石化公司炼油厂会议室里格外热闹，厂长、党委书记齐楠森将 2025 年第 3 号厂长嘉奖令送到油品车间操作员韩冰手上：“一个人的敏锐，守住了安全底线。韩冰同志的责任心，就是我们最该学的‘安全密码’！”

前不久的一天下午 4 点，韩冰正盯着 V708B 罐的清罐检测施工，鼻尖突然捕捉到一丝异常：“不对劲，有股液化气的气味！”常年跟化工管线打交道，嗅到这气味，韩冰心里“咯噔”一下。他立刻顺着气味来源在管廊间穿梭排查。最终，他的脚步在 V708A/B 罐中间南侧的二层管带停住——老 705# 线的保温铁皮缝隙里，正隐隐渗出气体。

“快停！关发电机！”韩冰的声音瞬间绷紧，他指挥大家往安全区域撤离，另一只手抓起对讲机，语速飞快地向控制室和车间调度室报告：“V708 罐区老 705 线漏了！”

图 4.1 吉林石化公司炼油厂成功堵漏部分新闻纪录

2. 失败案例教训

2013年11月22日,某市中石化输油管道发生泄漏爆炸事故,泄漏点位于黄岛区输油管道,运行压力约0.8MPa,涉及原油介质。事故因初期风险评估不足,未能及时识别管道腐蚀导致的泄漏隐患,现场采用普通密封胶带压堵漏,未使用耐腐蚀复合夹具。堵漏后约8小时,泄漏原油积聚在地下管网,遇火花引发爆炸,造成62人死亡、136人受伤,直接经济损失7.5亿元。

失败原因包括:风险评估忽视管道老化与介质腐蚀特性,未选用适合高危介质的密封材料;缺乏实时监测设备,未能动态跟踪泄漏状态;应急响应迟缓,未及时疏散周边居民或启动区域隔离。事后,中石化修订了带压堵漏规范,强制要求高危管道泄漏采用纳米复合密封剂与机械夹具结合的方案,引入无人机巡检与红外监测技术,提升泄漏预警能力,并优化跨部门应急联动机制,缩短响应时间。此案例警示带压堵漏需精准匹配材料与工况,强化实时监测与快速响应,避免重大事故发生。



图4.2 某市中石化输油管道发生泄漏现场救援图

(二) 技术优化建议

1. 材料与设备的改进方向

材料研发应聚焦环境适应性提升,开发具有梯度功能特性的智能复合材料,实现不同介质、温度和压力条件下的自适应密封^[9]。耐蚀合金-聚合物复合堵漏夹具需优化界面结合技术,解决异种材料在交变载荷下的协同变形问题。设备改进重点发展模块化堵漏系统,集成快速连接机构和压力自适应补偿装置,使单套设备可覆盖80%以上的常见泄漏场景。微型化高压注胶设备的研发将显著提升受限空间作业效率,配套开发耐高温微型传感器实现密封质量实时监测。

2. 智能化与数字化技术的融合

基于数字孪生的堵漏决策系统可构建泄漏场景的三维动态模型,通过流体仿真预测堵漏效果并优化方案选择。智能诊断装备搭载多光谱检测模块,结合机器学习算法实现泄漏源特征快速识

别与材料匹配推荐^[10]。5G+AR远程指导系统实现专家实时介入,现场人员通过智能眼镜获取叠加在实景中的操作指引。区块链技术应用于堵漏作业全过程记录,建立不可篡改的质量追溯体系,为后续安全评估提供数据支撑。

(三) 安全管理优化建议

1. 企业层面的改进措施

应急预案优化需建立动态更新机制,将泄漏事故案例库与应急决策树相结合,形成基于情景推演的处置方案。安全文化建设实施三级推进模式,基础层强化标准作业程序培训,中间层开展事故情景模拟演练,核心层培育风险预判思维。引入行为安全观察与反馈系统,通过大数据分析识别作业习惯偏差,针对性改进培训内容。关键岗位实施安全绩效与晋升挂钩机制,建立从管理层到操作层的全员安全责任体系。

2. 政府与行业层面的建议

标准体系完善应建立覆盖设计、施工、验收的全生命周期技术规范,重点补充极端工况堵漏和新型材料应用的技术要求。跨企业协作机制依托工业互联网平台构建,实现堵漏资源数据库共享和专家智库联动。建立区域性应急资源共享中心,统一调配特种堵漏设备和专业人才。行业协会牵头制定堵漏服务企业能力评估标准,推行分级认证制度,促进行业服务能力整体提升。政府监管部门应建立堵漏服务企业黑名单制度,对重大事故责任方实施市场准入限制。

五、总结

带压堵漏技术的发展依赖于材料创新与工艺优化的协同推进,高性能密封材料和自动化装备的应用显著提升了堵漏效率和可靠性。安全管理体系的完善同样至关重要,风险评估、应急响应及标准化建设的系统化实施有效降低了作业风险。未来技术发展将向智能化与绿色化方向深入,数字孪生、智能诊断及自修复材料的应用有望实现堵漏过程的精准预测与自主决策,同时环保型堵漏材料的研发将减少二次污染。当前研究在极端工况下的材料耐久性测试及多因素耦合作用机制方面仍存在不足,后续需开展长期服役性能评估及跨学科协同研究,以推动带压堵漏技术向更高安全性和可持续性发展。

参考文献

- [1] 邓志彬,袁宗明,杨振声,等.带压堵漏技术及其在油库中的应用[J].油气储运,2010,29(3):2.
- [2] 程世权,邵建新,吕瑞典,等.带压堵漏技术的研究现状与应用[J].石油和化工设备,2012(3):3.
- [3] 胡立.带压堵漏技术的研究现状及应用[J].石油化工腐蚀与防护,2012,29(5):3.
- [4] 周宇.炼化设备带压堵漏的安全措施[J].青海石油,2010(3):3.DOI:CNKI:SUN:QHSA.0.2010-03-026.
- [5] 赵毅,钟荣强,邓志彬.管道带压堵漏技术及其在油库中的应用[J].管道技术与设备,2010(3):3.
- [6] 樊素芹.浅谈带压堵漏技术[J].广州化工,2011,39(20):3.
- [7] 李淑红.带压堵漏技术的应用[J].江西煤炭科技,2011(4):2.
- [8] 陈瑜捷.带压堵漏技术的应用与探讨[J].科技创新与应用,2014(11):2.
- [9] 禹光辉.石油化工生产中带压堵漏技术的应用[J].科技展望,2017,027(024):167.
- [10] 刘兴端.化工装置中带压堵漏技术的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(1):105-105107

燃气输配管理中的安全管控要点及优化措施

陈定福

广东 中山 528400

DOI:10.61369/ME.2025110005

摘 要： 燃气输配安全管控至关重要，涵盖设计、施工、设备管理等多环节。设计需强化选址、工艺、容器选型等安全管控；施工要重视质量监督；设备进行全生命周期管理；运行注重监控与应急响应。此外，还需防控第三方施工破坏与地质沉降风险，做好用户端安全管理、制度建设、标准升级等，全方位保障燃气输配安全。

关 键 词： 燃气输配；安全管控；全生命周期管理

Key Points and Optimization Measures for Safety Control in Gas Transmission and Distribution Management

Chen Dingfu

Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract： Safety control in gas transmission and distribution is crucial, covering multiple aspects such as design, construction, and equipment management. Design must strengthen safety control in site selection, process planning, and container selection; construction should emphasize quality supervision; equipment requires life-cycle management; and operation focuses on monitoring and emergency response. Additionally, it is essential to prevent risks such as third-party construction damage and geological settlement, ensure user-end safety management, improve institutional frameworks, and upgrade standards to comprehensively safeguard gas transmission and distribution safety.

Keywords： gas transmission and distribution; safety control; life-cycle management

引言

随着城市化进程加快，燃气作为清洁能源被广泛应用，其安全问题备受关注。2021年颁布的《全国城镇燃气安全排查整治工作方案》，强调了加强燃气安全管理的重要性。在此背景下，燃气输配管理的安全管控至关重要。从燃气场站设计、工程管理、设备全生命周期到运行监控等多个方面，都需强化安全管控。通过建立双重预防机制、升级安全管理标准、开发智能巡检系统等措施，全方位提升燃气输配安全管理水平，确保燃气输配安全稳定运行。

一、燃气工程管理中的安全管控要点

（一）燃气场站设计阶段管控

燃气场站设计阶段，需多方面强化安全管控。选址时严格遵循安全标准，充分考虑周边环境、人口密度等因素，远离居民区、学校等人员密集场所，降低潜在风险。工艺装置区要确保防爆间距符合要求，合理规划布局，不同装置间保持安全距离，防止爆炸事故连锁反应。压力容器选型至关重要，依据工艺需求和运行参数，选择合适规格、材质及安全等级的容器，保证其在规定压力、温度范围内稳定运行。此外，完善燃气工程设计审查流程，建立关键参数复核机制，对设计方案进行全面审查，仔细复核各项参数，如压力、流量、管径等，确保设计科学合理，从源头保障燃气场站安全运行^[1]。

（二）工程施工质量监督

在燃气工程管理的安全管控要点里，工程施工质量监督十分

关键。对于 PE 管焊接工艺，需严格遵循相关控制规范，确保焊接质量，保障管道连接稳固，防止燃气泄漏风险。防腐层检测技术标准也不容忽视，依据标准对防腐层进行检测，及时发现防腐层的破损、老化等问题，避免管道因腐蚀而损坏。隐蔽工程验收流程要规范严谨，对埋地管道等隐蔽部分进行细致检查，确认无质量隐患后才允许进入下一施工环节。同时，积极应用数字化施工档案管理系统，将施工过程中的各类数据、文件等进行数字化存储与管理，为后续工程维护、质量追溯提供可靠依据，全面保障燃气工程施工质量^[2]。

二、燃气场站运行安全管理体系

（一）设备全生命周期管理

燃气场站设备全生命周期管理涵盖从设备规划采购、安装调试、运行维护到报废处置的全过程。在规划采购阶段，依据压力

管道年度检验制度、安全阀校验周期标准等要求，选择符合安全规范及运行需求的设备。安装调试时，严格按标准操作，确保设备性能达标。运行过程中，借助基于 RBI 技术的设备风险评估模型^[3]，对设备潜在风险进行科学评估，制定针对性维护计划，及时发现并处理设备隐患。同时，定期校验安全阀，做好压力管道年度检验，保障设备安全运行。到设备老化或损坏无法修复时，遵循相关规定进行报废处置，防止存在安全隐患的设备流入市场或再次投入使用，通过全生命周期管理，全方位保障燃气场站设备安全可靠运行。

（二）运行监控与应急响应

在燃气场站运行安全管理体系中，运行监控至关重要。需深入研究 SCADA 系统泄漏报警参数设定标准，通过科学合理设定参数，确保能及时精准捕捉到泄漏等异常情况^[4]。借助先进技术对场站运行的关键参数如压力、流量、温度等进行实时监测，全方位掌握场站运行状态。应急响应方面，要对场站分级应急响应预案中的处置流程进行优化。依据不同级别事故特点，细化从事故发生、报告、启动预案到救援实施、后期处置等各环节的操作流程，确保每个步骤都清晰明确、有序高效，提升应急响应的速度与质量，最大程度降低事故损失，保障燃气场站安全稳定运行。

三、燃气输配系统安全风险分析

（一）管网运行风险因素

1. 第三方施工破坏防控

第三方施工破坏是管网运行中不容忽视的风险因素。为有效防控，可建立施工区域地下燃气管线三维定位预警系统。此系统借助先进的探测与定位技术，精确获取地下燃气管线的空间位置信息，构建三维模型，对施工区域进行实时监测。一旦施工设备接近燃气管线设定的安全距离，系统即刻发出预警，提醒施工人员停止作业，避免误挖造成燃气泄漏等事故。同时，通过人工巡查密度优化模型，依据不同区域的重要性、人口密度、管线复杂程度等因素，精准确定合理的巡查频次与路线，确保人工巡查高效覆盖。该模型能在不浪费人力的前提下，最大程度发现潜在的第三方施工破坏风险，从而及时采取措施，保障燃气管线安全运行^[5]。

2. 地质沉降影响评估

地质沉降会对燃气管网运行带来诸多风险，对其进行准确评估至关重要。地质沉降可能导致燃气管网出现变形、拉伸、扭曲甚至破裂等状况^[6]。不同区域的地质条件差异较大，软土地基、采空区等特殊地质区域更易发生沉降，且沉降速率和幅度难以精准预测。通过开发基于 InSAR 技术的燃气管网地表沉降动态监测方法，可对大面积区域进行高分辨率、高精度的连续监测。该技术能获取地表微小形变信息，实时掌握燃气管网所处地表的沉降动态。一旦监测到异常沉降，可及时采取加固管道、调整管道走向或修复等措施，以降低因地质沉降引发燃气泄漏等安全事故的风险，保障燃气输配系统安全稳定运行。

（二）用户端安全管理

1. 入户安检标准执行

在燃气输配管理的用户端安全管理中，入户安检标准执行至关重要。应构建一套包含 19 项必检项目的标准化安检流程，确保

全面排查安全隐患。这 19 项必检项目涵盖燃气管道、阀门、计量器具、燃气用具等多个关键部位，细致检查其是否存在老化、损坏、泄漏等问题。针对“到访不遇”及超期未入户的居民用户，需制定并执行专项补充安检标准：在首次到访不遇时，应在住户门外开展门缝泄漏检测，并规范张贴“到访不遇告知贴”，同时通过电话等方式主动进行二次预约；对于长期超期未入户的用户，应积极采用激光遥测检测仪等先进设备，通过窗户、通风口等途径，对用户室内空间进行远程可燃气体扫描检测，确保即使无法入户也能有效判断并排除室内燃气泄漏风险，实现安全监测无死角。同时，搭配隐患整改闭环管理系统，一旦发现隐患，及时记录并启动整改流程，明确整改责任人与整改期限，跟踪整改进度，直至隐患彻底消除，形成完整的闭环管理。此标准化安检流程、专项补充措施及隐患整改闭环管理系统，是提升用户端燃气使用安全的关键举措，严格执行能有效降低燃气安全事故风险，保障用户生命财产安全^[7]。

2. 用户端泄漏处置

当发现用户端燃气泄漏时，应立即启动分户燃气泄漏应急处置规程。现场人员需迅速打开门窗，加强通风换气，降低燃气浓度，严禁点火、开关电器等可能产生明火或静电的行为。同时，迅速切断气源，如关闭燃气表前阀或立管阀门等。若泄漏情况不明或难以控制，要及时疏散周边人员，设置警戒区域，防止无关人员靠近。之后，需使用专业检测设备，如燃气检漏仪，对泄漏点进行精准定位和检测，以便后续维修处理。在此过程中，借助居民安全用气大数据预警平台^[8]，分析类似泄漏案例数据，及时发现潜在风险，为处置工作提供参考，并为后续预防措施制定提供依据，以不断提升用户端燃气使用安全性。

四、燃气安全管控优化措施体系

（一）制度体系建设

1. 双重预防机制构建

在燃气安全管控优化措施体系的制度体系建设中，双重预防机制构建至关重要。通过建立覆盖全流程的风险识别清单，全面梳理燃气输配各个环节，从气源采购、运输存储到终端供应，精准识别潜在风险，明确风险特性、影响范围及可能引发的后果。同时，制定隐患分级治理规范标准，依据隐患的严重程度、发生可能性及影响大小，科学划分等级，对不同等级隐患匹配相应治理流程、责任主体与资源投入。如此，能够实现风险早发现、隐患早治理，有效防范燃气安全事故，确保燃气输配系统安全稳定运行^[9]。

2. 安全管理标准升级

燃气输配管理中，安全管理标准升级至关重要。一方面，要结合智慧燃气标准体系与 ISO55000 资产管理体系，制定更具前瞻性的燃气设施运行维护标准，明确设施检查周期、维护内容及技术指标，确保设施始终处于良好运行状态^[10]。另一方面，对燃气安全风险评估标准进行细化，充分考虑地理环境、用户分布等因素，精准识别潜在风险。同时，提升应急处置标准，详细规定不同类型燃气事故的应急响应流程、人员职责及处置方法，提高应急救援的效率和效果。此外，针对新技术、新设备在燃气输配中的应用，及时更新相关安全操作标准，为工作人员提供准确规范

的操作指引，从而全方位提升燃气输配安全管理水平。

（二）智能化技术应用

1. 智能巡检系统开发

在燃气输配管理的安全管控中，智能巡检系统开发至关重要。一方面，着力研究燃气无人机巡检路径优化算法。通过对燃气管道分布、地理环境、周边设施等多因素进行综合分析建模，运用智能算法，如遗传算法、蚁群算法等，规划出高效合理的无人机巡检路径，确保全面覆盖且不遗漏关键区域，同时降低巡检成本与时间。另一方面，积极开发智能图像识别技术在泄漏检测中的应用。收集大量燃气泄漏与正常状态下的图像数据，利用深度学习算法，如卷积神经网络（CNN），对数据进行训练，构建高精度的识别模型。使系统能够快速、准确地识别图像中的燃气泄漏迹象，如气体颜色、形态变化等，及时发出警报，为燃气安全输配提供有力技术保障。

2. 数字孪生平台构建

构建燃气管网数字孪生平台，需开发融合管网 GIS 系统与实时监测数据的燃气管网数字孪生模型。管网 GIS 系统能精准呈现燃气管道的地理位置、走向、管径等空间信息，为数字孪生模型奠定空间基础。实时监测数据则涵盖压力、流量、浓度等动态运行参数，让模型具备实时性与真实性。通过融合二者，可在虚拟空间构建与真实管网高度匹配的数字孪生模型。借助此模型，工作人员能实时掌握管网运行状态，提前模拟不同工况下的管网响应，预测潜在风险，从而及时制定并实施针对性的安全管控策略，极大提升燃气输配管理的安全性及效率。

（三）能力提升工程

1. 专业人才培养

在燃气输配管理中，专业人才培养是关键。应建立常态化人才引进与培养机制，每年从油气类高等院校招聘油气储运、燃气工程等相关专业的应届毕业生，注入新生力量。通过系统化的岗前培训、轮岗实习与导师带徒等方式，帮助其全面掌握燃气输配系统中设计、施工、运行、维护等各环节的技术与管理要求，夯实专业基础。同时，构建燃气安全工程师继续教育体系，有助于提升工程师的专业素养与知识储备。通过定期开展针对性的培训课程，涵盖燃气新技术、新法规、安全管理新理念等内

容，使工程师能够紧跟行业发展前沿，不断更新知识结构，更好地解决实际工作中的复杂安全问题。制定特种作业人员技能认证标准也十分重要。这能规范特种作业人员的技能要求，明确其应具备的操作技能、安全意识和应急处理能力。依据标准进行严格考核认证，确保特种作业人员具备扎实的专业技能，从人员层面为燃气输配安全提供有力保障，有效降低安全事故发生的可能性。

2. 公众安全素养提升

燃气安全“五进”活动作为各地持续推进的专项宣传与隐患排查行动，面向企业、农村、社区、学校和家庭五大重点领域，是提升公众安全意识与能力的重要载体。在此基础上，应进一步制定基于社区网格的燃气安全知识普及方案与应急演练常态化机制，系统提升公众安全素养。同时，制作图文并茂、通俗易懂的宣传资料，发放到各户，方便居民随时查阅学习。建立应急演练常态化机制，按季度或半年为周期，在社区组织燃气泄漏、火灾等应急演练。演练涵盖应急响应、人员疏散、初期火灾扑救等环节，让居民熟悉应急流程，掌握基本应急技能。通过“五进”推动与社区常态化宣传演练相结合，切实增强公众燃气安全意识，提升应对突发燃气安全事件的能力，为燃气输配安全筑牢群防群治的基层防线。

五、总结

燃气输配管理的安全管控至关重要。核心安全管控要素的梳理，为保障燃气输配安全奠定坚实基础，从各个关键环节降低风险。三维优化体系，以制度建设规范流程、明确职责，以技术创新提升设施设备的安全性及可靠性，以能力提升强化人员的专业素养与应急处置能力，全方位筑牢安全堡垒。而全过程的燃气安全防线，从规划设计的源头把控，到施工运营的严格执行，再到用户服务的细致入微，确保每个阶段都能有效预防安全事故。智能化转型更是借助先进技术，推动安全管理效能全面提升。通过这些要点和措施，可形成完善的燃气输配安全管理体系，切实保障燃气输配的安全、稳定运行。

参考文献

[1] 顾晨晨. 某长输管道输油站场安全风险管控研究 [D]. 中国矿业大学 (江苏), 2021.
[2] 蒋树文. 成都地铁建设中政府安全管控面临的问题及对策研究 [D]. 四川大学, 2023.
[3] 杨可琳. 基于深度学习的生产车间安全管控系统 [D]. 北京交通大学, 2022.
[4] 钟树达. 基于大数据的磷矿地压风险评估及安全管控研究 [D]. 武汉工程大学, 2023.
[5] 王伟. 城市路灯安全与照明管控技术研究 [D]. 西安理工大学, 2023.
[6] 张云飞. 燃气工程中的燃气输配技术探究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2020, (16): 53-54.
[7] 翁远辉, 方艺, 左卓. 浅谈拆除工程安全管理现状及管控要点 [J]. 建筑安全, 2023, 38(12): 78-80.
[8] 范国磊, 霍平, 庞巍. 燃气输配中的噪声及其控制方法 [J]. 天然气与石油, 2022, 40(4): 46-52.
[9] 金磊, 张迪华, 徐天毅, 等. 燃气输配管网隐患排查与分级管理 [J]. 上海煤气, 2024, (01): 21-23+38.
[10] 袁宏伟. 城镇燃气输配钢管风险评估方法探究 [J]. 城镇建设, 2021(7): 391.

影响光伏系统发电量的关键因素分析与优化措施研究

林炜达

广州市哲明惠科技有限责任公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110012

摘 要： 本文分析影响光伏系统发电量的因素及优化措施。自然因素、设计参数、组件选型等影响发电效率；通过系统结构优化、谐波治理、无功补偿、电压控制等提升电能质量；构建数字孪生、智能清洗模型及优化算法提高运行效能；利用综合能效指标和全生命周期成本模型评估系统，经多环节优化后发电量提升，未来应在材料、技术等方面突破。

关 键 词： 光伏系统；发电效率；优化措施

Analysis of Key Factors Affecting the Power Generation of Photovoltaic System and Research on Optimization Measures

Lin Weida

Guangzhou Zheminghui Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper analyzes the factors affecting the power generation of photovoltaic system and the optimization measures. Natural factors, design parameters, component selection and other factors affect power generation efficiency; Improve power quality through system structure optimization, harmonic control, reactive power compensation, voltage control, etc; Build digital twin, intelligent cleaning model and optimization algorithm to improve operation efficiency; Using the comprehensive energy efficiency index and life cycle cost model evaluation system, the power generation will be increased after multi link optimization, and breakthroughs in materials, technology and other aspects should be made in the future.

Keywords： photovoltaic system; generation efficiency; optimization measure

引言

《关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作 促进可再生能源电力消费的通知》于2023年7月颁布，旨在推动可再生能源电力消费。光伏作为可再生能源重要组成部分，其系统发电量受多种因素制约。自然因素如太阳辐射度、环境温度、阴影遮挡等通过不同物理机制影响发电效率；系统设计参数如组件倾角、串并联配置、逆变器选型等对发电效率影响显著；组件选型、布置优化、系统结构优化也关乎发电效率与经济性。此外，谐波污染、电能质量等问题同样不可忽视。对这些关键因素分析及采取优化措施，符合政策导向，能有效提升光伏系统发电量与整体效能。

一、光伏系统发电效率影响因素分析

（一）自然因素制约机制

太阳辐射度直接影响光伏系统发电量，其强度变化与发电量呈正相关。光照越强，光伏组件内电子跃迁越活跃，产生的电流越大，进而提升发电效率^[1]。环境温度对光伏组件性能影响显著，温度升高，光伏组件的开路电压会降低，短路电流略有增加，但总体功率下降，导致发电效率降低。此外，阴影遮挡会使光伏组件局部发热，形成热斑效应，严重影响组件发电效率甚至造成组件损坏。被遮挡部分无法有效发电，还会消耗其他正常发电区域的电能，使得整个光伏系统的发电量大幅减少。这些自然因素通过不同的物理机制，综合作用于光伏系统，制约其发电效率。

（二）系统设计关键参数

光伏系统设计中的多个关键参数对发电效率有着显著影响。组件倾角与太阳辐射的接收密切相关，合适的倾角能使光伏组件最大程度地接收太阳光照，进而提升发电效率。若倾角设置不合理，会导致太阳辐射接收量减少，降低发电量^[2]。串并联配置也十分关键，它决定了光伏组件的电气连接方式。恰当的串并联组合可有效避免组件间的失配损耗，让光伏系统输出最大功率。若配置不当，会造成电流或电压不匹配，使发电效率大打折扣。此外，逆变器选型同样不可忽视，逆变器作为将直流电转换为交流电的关键设备，其转换效率直接影响系统整体发电效率。高效的逆变器能减少能量转换过程中的损失，提高发电量；反之，低效逆变器会增加损耗，降低发电效率。

二、系统效率优化技术体系

（一）组件选型与布置优化

在组件选型方面，不同电池技术路线的能效特性存在显著差异。例如，晶硅电池凭借成熟的工艺和较高的转换效率，在市场上占据主导地位，但不同类型晶硅电池（如 PERC、TOPCon、HJT 等）在效率、成本及稳定性等方面各有优劣，需综合考量。薄膜电池虽转换效率相对较低，但具有轻薄、弱光响应好等特点，适用于特定场景。在布置优化上，智能跟踪支架与双面组件的结合可显著提升发电量。智能跟踪支架能实时跟踪太阳位置，提高组件接收的太阳辐射量；双面组件可利用地面反射光进行发电。然而，这种布置的经济性需深入探讨，要综合考虑初始投资、运维成本以及发电量增益等因素^[3]，通过合理选型与布置，实现光伏系统在成本与发电量间的最优平衡，提升整体经济性。

（二）系统结构优化设计

在系统结构优化设计方面，一方面要建立基于 LCOE 模型的直流侧电压优化方法。通过该模型对光伏系统成本进行综合评估，深入分析直流侧电压与系统发电量、成本之间的关系，以寻找最优的直流侧电压值，提高光伏系统的发电效率与经济性^[4]。另一方面，需提出阵列布局与线损控制综合优化方案。合理规划光伏阵列的布局，考虑光照、阴影遮挡等因素，使光伏组件能获得更多光照，减少因布局不合理导致的发电量损失。同时，注重线损控制，选择合适的电缆规格和线路路径，降低电流传输过程中的能量损耗，通过阵列布局与线损控制的协同优化，提升整个光伏系统的发电效率，最终实现发电量的提升。

三、电能质量综合治理技术

（一）谐波污染抑制策略

1. 逆变器谐波生成机理

在光伏系统中，逆变器是将直流电转换为交流电的关键设备，然而其工作过程会产生谐波污染。逆变器谐波生成主要源于 PWM 调制方式与非线性负荷的耦合作用^[5]。PWM 调制通过控制功率开关器件的通断来模拟正弦波输出，但这种离散的开关动作本身就会引入谐波。当逆变器连接非线性负荷时，二者相互影响。非线性负荷的电流特性改变了逆变器输出电流的波形，使其偏离理想正弦波。同时，逆变器 PWM 调制产生的谐波又进一步加剧非线性负荷的畸变。在这种耦合作用下，谐波频谱变得更为复杂，不仅包含与 PWM 调制频率相关的特征谐波，还会出现因非线性负荷特性导致的非特征谐波，严重影响光伏系统的电能质量。

2. 滤波装置协同控制

研究有源滤波器与 LCL 滤波器的参数匹配技术及动态补偿控制算法，对于滤波装置协同控制至关重要。一方面，精确的参数匹配能使有源滤波器与 LCL 滤波器在谐波抑制过程中发挥各自优势，实现高效协同。有源滤波器可针对特定频率谐波进行灵活补偿，而 LCL 滤波器对高频谐波有良好的衰减特性，二者参数若能精准适配，能大幅提升谐波抑制效果^[6]。另一方面，动态补偿

控制算法需根据光伏系统实时运行状态，动态调整有源滤波器与 LCL 滤波器的补偿参数，确保在不同工况下都能有效抑制谐波。例如，当光照强度、温度等因素变化导致光伏系统输出功率波动时，控制算法能及时响应，保证滤波装置协同工作的稳定性和可靠性，从而有效降低谐波污染，提升光伏系统电能质量。

（二）电压稳定调控方法

1. 无功补偿系统设计

构建基于 STATCOM（静止同步补偿器）的动态无功补偿系统，能够有效改善光伏系统的电能质量与电压稳定性。STATCOM 凭借其快速的动态响应特性，可实时跟踪系统无功需求变化，精确调节输出无功功率，确保电压稳定在合理范围内。优化 SVG（静止无功发生器）装置的容量配置策略也至关重要^[7]。需综合考虑光伏电站的规模、光照强度变化、电网结构及负荷特性等多方面因素。合理的容量配置既能满足系统无功补偿需求，避免因容量过大造成成本浪费和设备闲置，又能防止容量过小而无法达到预期补偿效果，保障光伏系统在各种工况下稳定高效运行，提高发电量。

2. 电压协调控制机制

为实现光伏系统并网点电压的稳定调控，提出融合下垂控制与二次电压调节的并网点电压综合控制方案。下垂控制能够根据系统运行状态，依据预先设定的下垂特性曲线，自动调整光伏逆变器的输出无功功率，以快速响应电压的波动，在一定程度上维持电压稳定。而二次电压调节则从更全局的角度出发，对整个光伏系统的电压进行优化。它基于系统的运行参数与设定的电压目标值，通过协调各个光伏逆变器以及其他无功补偿设备的无功输出，实现对并网点电压的精确调控。二者融合，下垂控制快速应对电压的瞬时变化，二次电压调节则保证电压长期稳定在目标范围内，有效提升并网点电压稳定性，减少电压偏差对光伏系统发电量的影响^[8]。

四、系统运行效能优化实践

（一）智能运维技术应用

1. 数字孪生系统构建

构建数字孪生系统对光伏系统运行具有重要意义。通过采集光伏电站各类设备的实时运行数据，包括光伏板的温度、光照强度、电流电压等，以及周边气象数据如风速、湿度等^[9]。利用这些丰富的数据，在虚拟空间中构建与实体光伏系统高度相似的数字模型，实现对光伏系统全生命周期的精准映射。借助该数字孪生系统，运维人员可直观监测系统运行状态，提前发现潜在故障隐患，例如通过模拟分析预测光伏板的老化趋势，以便及时采取维护措施。同时，还能对不同运行策略进行虚拟验证，如调整光伏板的倾角、优化设备布局等，评估其对发电量的影响，从而为优化光伏系统运行、提升发电量提供科学依据，切实提高光伏系统的运行效能。

2. 智能清洗决策模型

智能清洗决策模型综合考虑积尘预测与经济性分析来优化组

件清洁周期。通过对光伏组件所处环境的气象数据、历史积尘情况等深入分析，构建积尘预测模型，准确预估组件表面积尘量随时间的变化趋势。同时，基于经济性考量，分析清洗成本、发电量损失成本等因素之间的关系。将积尘预测结果与经济性分析相结合，当预测积尘量达到一定程度，且清洗带来的发电量增益所产生的经济效益超过清洗成本时，触发清洗决策^[10]。这种智能清洗决策模型，能在保障光伏系统发电量的同时，最大化经济效益，有效避免不必要的清洗操作，实现光伏系统运行效能的优化，对提升光伏系统整体性能具有重要意义。

（二）MPPT 技术改进

1. 自适应算法优化

在光伏系统中，改进扰动观察法的步长调节机制以提升复杂辐照条件下的追踪精度，是自适应算法优化的关键。传统扰动观察法在复杂辐照环境中，步长固定易导致追踪精度不足或响应速度慢。为此，可设计一种能根据光照强度、温度等环境参数实时调整步长的自适应机制。当光照强度变化剧烈时，增大步长以加快追踪速度，快速捕捉最大功率点的大致位置；而在光照相对稳定时，减小步长提高追踪精度，使系统更精准地锁定最大功率点。通过这种自适应步长调节，光伏系统在复杂辐照条件下能更高效地追踪最大功率，从而提升发电量，增强系统的运行效能。

2. 多峰特性处理技术

在光伏系统中，光伏电池的输出特性会呈现多峰特性，这对传统最大功率点追踪（MPPT）技术构成挑战。研究全局扫描与粒子群算法相结合的复合最大功率点追踪策略，能有效应对这一情况。全局扫描算法可对光伏电池输出功率曲线进行全面搜索，快速定位到多个功率峰值所在的大致区域，为后续精确追踪奠定基础。粒子群算法凭借其智能搜索能力，在全局扫描确定的区域内，以较快速度和较高精度寻找到真正的最大功率点。通过这种复合策略，既兼顾全局搜索的全面性，又发挥局部搜索的高效性，从而克服光伏电池多峰特性带来的困难，提升 MPPT 技术性能，最终提高光伏系统的发电量，优化系统运行效能。

（三）系统效能评估体系

1. 综合能效评价指标

综合能效评价指标体系中，PR 值（Performance Ratio）至关重要。它反映了光伏系统实际发电量与理论发电量的比值，体

现系统整体运行状况。高 PR 值意味着系统能高效将太阳能转化为电能，若 PR 值低，则需排查组件效率衰减、逆变器损耗、线路阻抗等问题。系统效率直接关乎发电量，涵盖光伏组件转换效率、逆变器效率及其他部件效率。组件转换效率越高，吸收并转化的太阳能越多；逆变器将直流电转换为交流电过程中的效率也影响最终电量。容量因子展示光伏系统实际发电量与装机容量在特定时间内满发理论电量的比例，考量系统利用程度，容量因子越高，系统对光伏资源利用越充分，综合这些指标能全面评估光伏系统综合能效。

2. 全生命周期成本模型

在影响光伏系统发电量的关键因素分析与优化措施研究中，全生命周期成本模型起着重要作用。这里建立涵盖设备折旧、运维成本、电能质量的 LCOE 动态计算模型。设备折旧是光伏系统长期运行中不可忽视的成本部分，随着时间推移，设备性能下降，其价值逐渐损耗，需精准计算折旧成本。运维成本涉及日常维护、故障检修等各类费用，科学的运维能保障系统稳定运行，对成本控制意义重大。电能质量则影响着光伏系统所发电能的质量与价值，不佳的电能质量可能导致电力损耗或设备损坏。通过综合考虑这些因素构建 LCOE 动态计算模型，可全面评估光伏系统全生命周期成本，为系统运行效能优化提供坚实的成本分析基础，助力制定合理的优化策略。

五、总结

在组件选型、系统设计和智能运维等关键环节实施优化措施后，光伏系统发电量得到显著提升。组件选型方面，高效能、适配当地光照条件的组件有效提高了光电转换效率。系统设计时，科学规划布局与电气配置，减少了传输损耗。智能运维则通过实时监测与故障预警，保障系统稳定运行。未来，光伏系统应重点在新型光伏材料研发、提高电池转换效率技术上取得突破，同时，进一步优化系统集成技术，实现各部件间更好的协同工作，挖掘潜在能效。此外，提升智能运维的智能化、精细化程度，利用大数据、人工智能等技术，精准预测发电量，提前应对潜在问题，持续提升光伏系统整体能效，推动光伏产业的可持续发展。

参考文献

- [1] 徐博文. 基于改进蝴蝶优化算法光伏系统 MPPT 仿真研究 [D]. 东北农业大学, 2023.
- [2] 申钰. 建筑屋顶光伏发电系统的研究与应用 [D]. 广西大学, 2021.
- [3] 曾浩升. 四种可再生能源系统产能预测及光伏系统优化 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [4] 董卓斌. 基于监测数据的光伏系统监测与预估方法研究 [D]. 长安大学, 2021.
- [5] 徐佳楠. 融合光伏发电量预测的微电网调度优化研究 [D]. 沈阳大学, 2023.
- [6] 崔晓斌, 冷璇. 集中式光伏发电效率优化措施分析 [J]. 电力设备管理, 2023, (20): 211-213.
- [7] 张佳平. 光伏系统发电效率的影响因素 [J]. 上海节能, 2022, (01): 56-61.
- [8] 韩伟民. 集中式光伏发电效率的优化措施分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(12): 38-40.
- [9] 侯少红, 张悦波, 王二磊, 等. 关于光伏电站光伏组件发电量提升的研究 [J]. 湖北电力, 2023, 47(05): 9-15.
- [10] 王书平. 屋顶分布式光伏电站发电量影响因素分析 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(12): 17-20.

胶粘剂在新能源动力及储能电池 PACK 中的应用现状与发展趋势

冷杰

东莞市腾威电子材料技术有限公司, 广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025110018

摘 要 : 本文围绕新能源动力及储能电池 PACK 领域的胶粘剂展开, 介绍其在导热、结构支撑、密封防护等方面的核心功能及主流类型, 阐述其在动力、储能电池应用中的关键作用, 分析自动化涂胶工艺、材料兼容性等现存挑战, 并探讨结构 - 导热一体化、智能响应型等发展趋势与技术升级方向。

关 键 词 : 新能源电池 PACK; 胶粘剂; 发展趋势

Application Status and Development Trend of Adhesives in New Energy Power and Energy Storage Battery Pack

Leng Jie

Dongguan TENGWEI Electronic Material Technology Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523000

Abstract : This paper focuses on the adhesive in the field of new energy power and energy storage battery pack, introduces its core functions and mainstream types in the fields of thermal conductivity, structural support, sealing protection, etc., expounds its key role in the application of power and energy storage battery, analyzes the existing challenges such as automatic adhesive coating process and material compatibility, and discusses the development trend and technology upgrading direction such as the integration of structure and thermal conductivity and intelligent response.

Keywords : new energy battery PACK; adhesives; development trend

引言

随着《新能源汽车产业发展规划（2021 - 2035 年）》的颁布, 新能源动力及储能电池 PACK 行业迎来蓬勃发展。胶粘剂作为其中关键材料, 在导热、结构支撑、密封防护等方面发挥核心功能。然而, 目前其在自动化涂胶工艺、材料兼容性、热失控阻断、循环老化性能等方面存在诸多挑战。在此背景下, 结构 - 导热一体化、智能响应型胶粘体系、低碳固化工艺、可回收材料研发等成为重要发展方向, 以满足新能源电池对高性能、绿色环保等需求, 推动行业高质量发展。

一、新能源电池 PACK 胶粘剂基本特性与应用要求

（一）胶粘剂在电池 PACK 中的核心功能

在新能源电池 PACK 中, 胶粘剂具有多种核心功能。导热方面, 良好的导热性能可使电池模组内热量均匀分布, 降低热阻, 确保电池在充放电过程中温度稳定, 减少因局部过热导致的性能衰退与安全隐患^[1]。从结构支撑来看, 胶粘剂需具备足够的强度与韧性, 牢固连接电池组件, 承受振动、冲击等外力, 保障电池模组结构的稳定性, 防止组件松动影响电池性能。密封防护上, 胶粘剂要能有效隔绝外界水分、氧气等, 避免电池内部材料发生氧化、腐蚀等反应, 延长电池使用寿命。胶粘剂各项核心功能协同作用, 对电池的安全、性能与寿命影响显著, 其性能优劣直接关系到新能源电池 PACK 的整体质量与可靠性。

（二）主流胶粘剂类型及其技术参数

在新能源动力及储能电池 PACK 领域, 聚氨酯胶、环氧胶、有机硅胶是主流胶粘剂类型。聚氨酯胶热稳定性较好, 能适应一定温度范围变化, 其黏度范围适中, 有利于涂布操作。固化特性方面, 可室温固化, 也能通过加热加速固化, 能满足不同生产节奏需求。环氧胶热稳定性优异, 可承受较高温度, 黏度范围较宽, 便于不同工艺选择。固化后形成的胶层硬度高、强度大, 但其固化过程一般需要加热, 对设备和工艺要求相对较高^[2]。有机硅胶热稳定性良好, 能在高低温环境下保持性能稳定, 黏度低, 流动性佳, 易于填充复杂缝隙。固化特性通常为室温硫化, 操作便捷, 且具有良好的耐候性与电绝缘性。这些主流胶粘剂凭借各自不同的技术参数, 在电池 PACK 中发挥着不同作用。

二、动力及储能电池 PACK 的胶粘剂应用现状

（一）新能源动力电池模组集成应用

在新能源动力电池模组集成应用方面，胶粘剂起着关键作用。电芯之间的连接，需胶粘剂确保可靠的电气与机械连接，像常用的导热结构胶，不仅能传导电芯工作产生的热量，维持电池组温度均匀，提高电池性能与寿命，还能提供足够的结构强度，稳固电芯位置^[3]。模组与电池箱体的固定，胶粘剂可缓冲振动与冲击，防止模组位移或损坏。此外，模组间的密封也离不开胶粘剂，它能阻止灰尘、水汽等侵入，保障电池模组在复杂环境下稳定运行。当前，随着新能源汽车对电池性能、安全性要求不断提升，对于动力电池模组集成的胶粘剂的导热性、粘接强度、耐候性等性能指标也提出了更高标准。

（二）储能电池系统封装技术应用

在储能电池系统封装中，胶粘剂扮演着关键角色。针对储能集装箱电池系统在抗震缓冲、长期耐候等特殊环境需求，胶粘剂选型标准极为重要。抗震缓冲方面，需选用具备高弹性、良好韧性的胶粘剂，以吸收震动能量，保护电池组件不受损害^[4]。例如某品牌储能集装箱电池，采用了一种特殊配方的聚氨酯胶粘剂，其能在一定频率和振幅的震动环境下，始终保持电池间的稳定连接。在长期耐候上，要求胶粘剂具备优异的耐紫外线、耐高低温性能。像在户外运行的储能电池系统，选用有机硅胶粘剂能有效抵御紫外线照射和温度剧烈变化，确保电池系统长时间稳定运行，这一选型在诸多大型储能电站的集装箱电池系统中得到广泛应用，为电池的稳定运行提供了可靠保障。

三、胶粘剂应用现存技术挑战分析

（一）工艺适配性难题

1. 自动化涂胶工艺缺陷

在新能源动力及储能电池 PACK 的自动化涂胶工艺中，存在诸多缺陷。一方面，点胶精度难以精准控制。电池 PACK 结构复杂、零部件众多，对涂胶位置和胶量要求极高。而自动化设备在面对微小缝隙、复杂形状涂胶任务时，易出现胶量不均匀、位置偏差等问题，影响胶粘剂与电池组件的结合效果，进而降低电池性能与可靠性^[5]。另一方面，固化速度匹配不佳。自动化生产节奏快，要求胶粘剂固化速度能与之适配。但实际中，常因涂胶环境、胶粘剂特性等因素，导致固化速度不稳定。过快固化可能造成胶粘剂未充分流平就已定型，影响粘结强度；过慢则会拖慢生产效率，无法满足大规模自动化生产需求。

2. 材料兼容性风险

在新能源动力及储能电池 PACK 中，胶粘剂与不同壳体材质的材料兼容性风险不容小觑。铝材具有良好的导电性、导热性且相对轻便，是常用的壳体材质之一，但胶粘剂与铝材界面结合时，由于铝材表面易形成氧化膜，可能导致粘结力不稳定，长期使用过程中，在温度、湿度等环境因素作用下，界面处可能出现剥离，影响电池 PACK 的结构稳定性^[6]。复合材料因其优异的综

合性能也常被用于壳体，然而复合材料成分复杂，胶粘剂与之匹配时，可能出现化学不相容，导致胶粘剂无法充分浸润复合材料表面，进而影响粘结效果，降低电池 PACK 的防护性能与整体可靠性，严重时甚至影响电池的正常运行。

（二）全生命周期性能保障

1. 热失控传播阻断效能

在新能源动力及储能电池 PACK 中，胶粘剂热失控传播阻断效能是关键挑战。电池热失控一旦发生，会以极快速度传播，引发严重安全事故，因此要求胶粘剂能在热失控情况下有效阻断传播。不同胶粘剂体系在电池热扩散抑制方面的耐火极限与失效模式各异，耐火极限较低的胶粘剂难以在热失控高温环境下长时间维持性能，短时间内就可能失效，无法有效阻挡热传播。而失效模式若为快速软化、分解等，也会使热失控阻断机制瞬间瓦解^[7]。此外，电池工作环境复杂，胶粘剂在高低温、振动等条件下性能变化也会影响热失控传播阻断效能，必须确保胶粘剂在全生命周期内，无论处于何种工况，都能可靠地发挥热失控传播阻断作用，保障电池 PACK 安全稳定运行。

2. 循环老化性能衰减

在新能源动力及储能电池 PACK 中，胶粘剂循环老化性能衰减是一大关键挑战。电池在实际使用中，会经历不同环境条件下的循环变化，如湿热循环、振动冲击等多因素耦合作用。在此过程中，胶层性能逐渐退化，其粘结强度、柔韧性等关键指标下降，影响电池 PACK 结构稳定性与可靠性^[8]。目前缺乏能精准反映多因素耦合下胶层性能退化规律的模型，难以对胶粘剂在复杂工况下长期性能进行有效预测。同时，与之匹配的测试方法也不完善，无法全面模拟实际工况，导致难以准确评估胶粘剂循环老化后的性能衰减程度。因此，建立湿热循环、振动冲击等多因素耦合下胶层性能退化模型及测试方法，对保障胶粘剂全生命周期性能至关重要。

四、胶粘剂技术创新发展趋势

（一）功能复合化技术方向

1. 结构-导热一体化胶粘剂

在新能源动力及储能电池 PACK 领域，结构-导热一体化胶粘剂展现出重要发展趋势。随着电池功率密度不断提升，对胶粘剂在实现可靠结构粘接的同时具备高效导热性能提出了迫切需求。这种一体化胶粘剂能够有效解决电池模组因产热而可能引发的性能衰减与安全隐患等问题^[9]。它通过特殊的配方设计与制备工艺，将结构粘接功能与导热功能高度融合。例如，在材料体系中精准调控有机聚合物基体与导热填料的比例和分布，使胶粘剂在确保良好的力学性能以稳固电池组件结构的同时，构建高效的热传导通道，实现热量的快速导出与均匀分布，从而大幅提升电池 PACK 的整体性能与可靠性，满足新能源产业对高性能胶粘剂的需求。

2. 智能响应型胶粘体系

智能响应型胶粘体系是胶粘剂技术创新发展中功能复合化的

重要方向。随着新能源动力及储能电池 PACK 技术的发展,对胶粘剂提出了更高要求,智能响应型胶粘体系应运而生。这类胶粘体系能对外界环境如温度、湿度、压力等刺激做出响应,展现出独特性能。例如温敏固化胶粘剂,在特定温度范围内,可迅速固化,提升电池组装效率,且无需额外复杂固化工艺,有效降低成本^[10]。自修复型胶粘剂则可在电池内部因振动、热胀冷缩等产生微裂纹时,自主修复,保障电池密封性能与结构完整性,延长电池使用寿命。智能响应型胶粘体系的研发与应用,将为新能源动力及储能电池 PACK 的可靠性与稳定性提供坚实保障。

（二）绿色制造技术升级

1. 低碳固化工艺革新

在胶粘剂应用于新能源动力及储能电池 PACK 的领域,低碳固化工艺革新至关重要。紫外光固化工艺通过提升光引发剂的活性与稳定性,实现更高效的固化。新型光引发剂能在更宽的光谱范围吸收能量,降低对特定光源的依赖,减少能耗同时提升固化速度与质量。湿气固化工艺则聚焦于改进固化机理,优化预聚体结构,增强其与水分子的反应活性。比如,研发含有特殊官能团的预聚体,使湿气固化在更短时间、更宽泛湿度条件下完成,既减少能量消耗,又适应不同生产环境,满足新能源电池生产对胶粘剂快速、高效、低碳固化的需求,推动绿色制造技术升级。

2. 可回收材料研发

在新能源动力及储能电池 PACK 领域,可回收材料研发是胶粘剂绿色制造技术升级的关键方向。探索基于动态共价键的可拆卸胶粘剂开发对电池梯次利用意义重大。这类胶粘剂具备独特的化学特性,在一定条件下,其动态共价键能发生可逆变化,实现胶粘剂的可拆卸功能。当电池达到初次使用寿命后,可拆卸胶粘剂能够使电池组件分离更为便捷,极大降低拆解过程中的损坏风险,助力电池关键材料的高效回收与再利用。通过这种方式,不仅能有效减少废弃物对环境的潜在污染,还能大幅提升资源利用率,降低新能源产业对原始资源的依赖程度,有力推动新能源动力及储能电池 PACK 行业朝着绿色、可持续发展的方向。

（三）应用场景扩展趋势

1. 固态电池集成适配需求

随着固态电池在新能源领域的快速发展,其集成适配对胶粘剂提出了全新需求。固态电解质电池因其特殊的电解质体系,要

求胶粘剂具备极佳的界面浸润性,以确保电池内部各组件间的紧密连接与高效能量传输。胶粘剂需能在固态电解质与电极、隔膜等材料表面充分铺展,形成稳定且低电阻的界面,减少界面阻抗,提升电池整体性能。同时,固态电池工作时可能会经历不同温度变化,胶粘剂要在较宽温度范围内保持良好的粘附性能与物理稳定性,防止因热胀冷缩导致组件分离。此外,考虑到固态电池的高能量密度与安全性要求,胶粘剂还需具备优异的阻燃、绝缘等特性,满足固态电池集成过程中的多样化适配需求,助力其稳定、高效运行。

2. 液冷系统耦合应用

在新能源动力及储能电池 PACK 中,胶粘剂在液冷系统耦合应用方面呈现显著的扩展趋势。液冷系统对于电池热管理至关重要,胶粘剂在此领域的应用不断拓展。一方面,在冷板与电池模组的连接中,胶粘剂需具备高导热性,以高效传递热量,同时要有良好的结构稳定性,确保在复杂工况下连接牢固。例如,能够承受温度变化和机械振动,保障电池模组稳定运行。另一方面,在液冷管路的固定与密封上,胶粘剂要具备可靠的密封性能,防止冷却液泄漏,还要与不同材质的管路和电池箱体良好相容,适应长期的使用环境。这种耦合应用不仅提升了液冷系统的性能和可靠性,也为胶粘剂在新能源电池 PACK 领域开辟了更广阔的发展空间。

五、总结

胶粘剂在新能源动力及储能电池 PACK 领域已取得显著进展。从材料研发初始,不断探索新型高性能胶粘剂,到应用技术逐渐成熟,其在电池 PACK 中的作用愈发关键。目前,虽已广泛应用,但仍面临诸多挑战。未来,突破界面稳定性提升技术至关重要,电池在复杂环境下工作,需确保胶粘剂与电池各组件界面稳固,避免因环境变化导致性能下降。同时,智能监测集成技术也亟待发展,以便实时掌握胶粘剂状态,保障电池安全稳定运行。构建覆盖电池全生命周期的胶粘解决方案体系,将胶粘剂应用与电池整个寿命阶段紧密结合,从生产、使用到回收,提供全方位、一体化解决方案,推动新能源动力及储能电池 PACK 行业高质量发展。

参考文献

[1] 冯劲松. 退役动力电池在储能系统应用中的上位机系统设计 [D]. 南昌大学, 2022.
[2] 王誉博. 促进新能源消纳的混合电池储能配置与调度方法 [D]. 武汉大学, 2021.
[3] 刘俊生. 锂电池负极用核-壳乳液型胶粘剂的合成及性能研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
[4] 李睿. 基于 CFD 的动力电池 pack 热仿真分析与研究 [D]. 沈阳理工大学, 2023.
[5] 冯雪. 新能源发电锂电池储能系统建模与仿真研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2022.
[6] 陈治庆, 游怡. 新能源汽车动力电池应用现状及发展趋势 [J]. 时代汽车, 2021(9): 107-108, 111.
[7] 孙建. 浅谈新能源汽车动力电池应用现状及发展趋势 [J]. 汽车实用技术, 2020(17): 11-13.
[8] 李钰. 新能源汽车动力电池应用现状及发展趋势探析 [J]. 内燃机与配件, 2024(12): 132-134.
[9] 赵新星. 新能源储能系统与储能电池的应用研究 [J]. 通讯世界, 2023, 30(8): 130-132.
[10] 孔锋超, 郝晓明, 陈燕龙, 等. 新能源储能系统中的储能电池研究 [J]. 光源与照明, 2021(6): 37-38.

锂电池行业新技术调研：UV 喷墨与固态电池技术在非标设备中的应用

黄雅兰

珠海市华冠科技股份有限公司，广东 珠海 519080

DOI:10.61369/ME.2025110019

摘 要： 本文围绕锂电池非标设备展开，阐述其独特技术特征，介绍新兴技术渗透路径及 UV 喷墨工艺设备创新与验证。探讨固态电池制备、装备适配、封装等环节关键技术，分析热 - 机耦合、浆料输送等对设备的影响，构建数字孪生架构、故障预测算法等。经调研提出建设模块化平台与固态电解质沉积设备标准化方向。

关 键 词： 锂电池非标设备；UV 喷墨技术；固态电池技术

Research on New Technologies in Lithium Battery Industry: Application of UV Inkjet and Solid State Battery Technology in Non standard Equipment

Huang Yalan

Zhuhai Huaguan Technology Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519080

Abstract： This article focuses on non-standard equipment for lithium batteries, elaborating on their unique technical characteristics, introducing the penetration paths of emerging technologies, and innovating and verifying UV inkjet process equipment. Explore key technologies in solid-state battery preparation, equipment adaptation, packaging, etc., analyze the impact of thermal mechanical coupling, slurry transportation, etc. on equipment, and construct digital twin architecture, fault prediction algorithms, etc. After research, it is proposed to build modular platforms and standardize solid-state electrolyte deposition equipment.

Keywords： non-standard equipment for lithium batteries; UV inkjet technology; solid state battery technology

引言

2022 年，国家发展改革委等部门联合颁布《关于加快推动新型储能发展的指导意见》，旨在推动储能技术进步与产业升级，其中锂电池作为重要储能技术备受关注。在此背景下，锂电池生产设备中的非标设备因独特技术特征至关重要。从卷绕机精密控制到高速叠片机构，从新兴技术渗透到各类工艺设备创新与集成验证，以及固态电池各环节技术研究，都围绕提升设备性能与电池质量展开。各项研究与实践为锂电池行业新技术在非标设备中的应用提供支撑，推动行业向高效、高精度方向发展。

一、锂电池生产设备技术体系分析

（一）非标设备技术特征

锂电池生产设备中的非标设备具有独特技术特征。从卷绕机精密控制系统来看，需实现极高的控制精度，确保电极材料在卷绕过程中张力稳定，偏差控制在极小范围，如电极卷绕的厚度偏差需控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内^[1]，以保障电池性能一致性。高速叠片机构要求在高速运作下保持精准定位，叠片速度可达每分钟数百片，且叠片精度误差不超过 $\pm 0.1\text{mm}$ ，满足大规模高效生产需求。同时，非标设备要适应多种电池型号、规格生产，具备柔性化生产能力，通过快速更换模具、调整参数等方式，在短时间内切换生产不同类型锂电池，有效提高生产效率与设备利用率，满

足市场多样化需求。

（二）新兴技术渗透路径

新兴技术在锂电池生产设备中的渗透路径主要围绕现有涂布 / 封装工序展开。UV 喷墨技术凭借其精准定位与高效固化的特性，通过构建 UV 固化系统，与传统涂布工序相结合^[2]。这一过程需对设备进行针对性改造，例如调整喷头精度与固化时间，确保 UV 墨水在电极材料表面均匀附着与快速固化，从而提升电极性能。固态电池技术则致力于打造全新的固态电池产线，并与封装工序实现技术嫁接。在这一过程中，需对封装设备的材料兼容性、密封工艺等方面进行优化，以适应固态电解质的特性。通过这样的渗透路径，实现新兴技术与传统工序的有机融合，构建设备改造可行性矩阵，为锂电池生产设备的升级提供有力支撑。

二、UV 喷墨工艺设备创新

（一）喷印系统设计原理

UV 喷墨工艺设备创新的喷印系统设计基于对多喷嘴阵列布局策略与 UV - LED 瞬时光固化机制的研究，以及喷墨精度与浆料流变特性关联模型的建立^[3]。多喷嘴阵列布局策略能提升喷印效率与精度，合理规划喷嘴排列方式，可使喷头在单位时间内喷出更多墨滴且精准定位。UV - LED 瞬时光固化机制利用 UV - LED 光源瞬间释放的能量，使喷印的浆料快速固化，这不仅缩短生产周期，还确保图案或电极结构稳定成型。而建立喷墨精度与浆料流变特性关联模型，能深入理解浆料的黏度、表面张力等流变参数对喷墨精度的影响，从而优化浆料配方与喷印参数，实现更精准、稳定的喷印，满足锂电池非标设备生产的高标准要求。

（二）设备集成验证

在 UV 喷墨工艺设备创新的设备集成验证环节，基于卷绕机在线涂覆测试数据展开深入分析。从实际运行状况来看，当喷射分辨率达到 $0.5\mu\text{m}$ 时，设备稼动率提升了 17%，这一显著提升有力地验证了 UV 喷墨工艺在非标设备集成中的有效性与创新性^[4]。这表明该工艺不仅能满足锂电池生产对高精度的需求，还能在实际生产过程中大幅提升设备的运行效率。通过这样的设备集成验证，为 UV 喷墨工艺在锂电池行业非标设备中的广泛应用提供了坚实的数据支撑与实践依据，进一步推动锂电池行业朝着高效、高精度的生产方向迈进，凸显出其在行业新技术发展中的重要价值。

三、固态电池装备适配研究

（一）界面处理技术

1. 固态电解质沉积

固态电解质沉积是固态电池制备过程中的关键环节，直接影响电池的性能与稳定性。为解决层间接触阻抗波动这一工艺控制难题，开发磁控溅射设备真空腔体结构优化方案至关重要。在固态电解质沉积时，腔体内部的真空度、气体分布以及磁场强度等参数对沉积薄膜的质量和均匀性有显著影响^[5]。通过优化真空腔体结构，精确调控这些参数，可使固态电解质均匀沉积在电极表面，有效降低层间接触阻抗波动。例如，合理设计气体导入系统，让反应气体均匀分布于腔体，避免局部浓度差异导致的沉积不均匀；优化磁场分布，促使溅射粒子更有序地沉积，提高薄膜的致密度和均匀性，从而提升固态电池的整体性能，为固态电池在非标设备中的应用奠定坚实基础。

2. 热压成型设备

在固态电池装备适配研究的界面处理技术中，热压成型设备至关重要。热压成型过程对固态电池的性能有显著影响，基于 ABAQUS 仿真建立 85MPa 压力载荷下极片应力分布模型，能深入了解极片在热压过程中的应力变化情况。通过该模型，可进一步优化压延辊温度梯度控制逻辑。精确控制温度梯度，有助于改善固态电池极片的内部结构，提升电池的一致性与稳定性。这不仅

影响电池的充放电性能，也关系到电池的使用寿命。合理的热压成型设备参数设定，结合优化后的温度梯度控制逻辑，能够更好地实现固态电池的高质量生产，为锂电池行业新技术在非标设备中的应用提供有力支持^[6]。

（二）封装系统重构

1. 激光焊接参数

在固态电池封装系统重构的激光焊接环节，针对硫化物电解质特性，需精确确定激光焊接参数。经研究确定 1064nm 波长激光的 $0.8\text{J}/\text{mm}^2$ 能量密度窗口阈值^[7]。此特定波长的激光能较好地与硫化物电解质相互作用，既确保焊接的强度与稳定性，又避免因能量过高对电解质造成损伤，影响固态电池的性能。 $0.8\text{J}/\text{mm}^2$ 的能量密度窗口阈值，可保证激光在焊接过程中，有效实现材料的连接，同时维持硫化物电解质的化学稳定性与物理完整性，为固态电池的高质量封装提供可靠保障，助力固态电池在非标设备中的良好应用。

2. 惰性环境控制

在固态电池封装系统重构的惰性环境控制方面，设计装配线多级气密仓结构具有关键意义。固态电池对环境中的氧气等杂质极为敏感，微小的氧含量变化都可能影响电池性能与稳定性。通过构建多级气密仓结构，能够将整个生产流程进行分区管理，有效控制各区域的环境参数。这种结构可实现氧含量 $<5\text{ppm}$ 的连续化生产工艺验证^[8]。其原理在于，气密仓的多级设计可以逐步降低氧气含量，减少外部空气的干扰。同时，利用高精度的气体监测设备，实时监控气密仓内的氧含量，确保生产过程始终处于低氧的惰性环境中，为固态电池的封装提供稳定、可靠的环境，从而保障固态电池的生产质量与性能。

四、技术集成仿真验证

（一）多物理场建模

1. 热 - 机耦合分析

在锂电池非标设备中，热 - 机耦合分析对设备性能与电池质量意义重大。运用 COMSOL 模拟涂布干燥段热传导过程时，不仅要考虑热量传递，还需关注机械应力的影响。由于涂布过程中，材料受热会产生膨胀、收缩等变形，与机械结构相互作用，若处理不当可能导致涂布不均、电池性能下降。因此，通过热 - 机耦合分析，能精确探究温度变化引发的应力应变分布，优化烘箱风嘴角度分布参数，使热量均匀传递，减少材料因热应力产生的缺陷^[9]。这有助于提升非标设备在锂电池生产中的稳定性与可靠性，确保固态电池等新技术在实际生产中高效应用。

2. 流体动力学仿真

在锂电池非标设备中，针对浆料输送系统建立 CFD 模型具有重要意义。高固含量电解液在微流道内易出现湍流堆积问题，这严重影响锂电池生产质量与效率^[10]。通过构建 CFD 模型，可对流体动力学特性进行深入分析。利用该模型，能够模拟高固含量电解液在微流道内的流动状态，精准获取流速、压力分布等关键参数。进而分析湍流产生的原因及堆积位置，为优化微流道结构和

浆料输送工艺提供依据。例如，通过调整微流道的形状、尺寸，改变入口流速等，观察电解液流动状态的变化，找到最适宜的参数组合，有效解决湍流堆积问题，确保高固含量电解液在微流道内稳定、高效输送，为锂电池非标设备的设计与优化提供有力支持。

（二）虚拟调试平台

1. 数字孪生架构

在锂电池非标设备的技术集成仿真验证虚拟调试平台的数字孪生架构构建中，借助 Tecnomatix 软件实现设备运动学模型的搭建。这一模型精准模拟设备的机械运动，为后续的装配节拍仿真提供坚实基础。通过该模型，能够对设备在不同工况下的运行情况进行细致的数字模拟。在装配节拍仿真过程中，致力于实现高精度控制，将误差严格限制在小于 0.15s 的范围内。这样的精度控制有助于提前发现设备在实际运行中可能出现的节拍不协调等问题，通过在虚拟环境中的不断优化调整，为实际设备的设计、制造和调试提供可靠依据，确保锂电池非标设备在集成 UV 喷墨与固态电池技术后能高效、稳定运行。

2. 故障预测算法

在锂电池非标设备故障预测算法方面，应用 LSTM 网络对设备振动频谱数据展开训练。LSTM 网络具备处理时间序列数据的优势，能有效捕捉设备振动频谱随时间变化的特征。通过对大量历史振动频谱数据的学习，该网络可挖掘其中隐藏的规律与模式。基于此，建立关键部件剩余寿命预测模型。此模型可依据当前及过往的振动频谱数据，预测关键部件未来的运行状态，提前知晓剩余寿命。如此，在关键部件接近寿命终点前，可及时地进行维护或更换，避免因部件突然故障导致的生产停滞，提升锂电池非标设备的可靠性与稳定性，保障生产过程的顺畅进行。

（三）工艺优化策略

1. 参数敏感度分析

采用 Taguchi 方法筛选出压力、温度、速度等 17 项对极片孔隙率有影响的参数后，深入开展参数敏感度分析。对于压力参数，微小的压力变化若能显著改变极片孔隙率，表明其敏感度

高，在实际生产中需严格控制。温度参数同理，若极片孔隙率随温度波动明显，意味着对温度调控要求严格。速度参数亦是如此，若其变动对极片孔隙率作用突出，就需精准设置速度。通过这样对各项参数敏感度的分析，明确哪些参数在工艺控制中需重点关注，为工艺优化提供关键依据，从而更好地保障锂电池极片的质量与性能，实现 UV 喷墨与固态电池技术在非标设备中的高效应用。

2. 多目标优化

在锂电池非标设备工艺优化中，建立 NSGA-II 算法驱动的设备能效 - 精度双目标优化模型意义重大。NSGA-II 算法凭借其高效的搜索能力与良好的分布性，能同时兼顾设备能效提升与精度保障这两个关键目标。通过该算法，对设备运行中的众多参数，如喷墨速度、固态电池材料灌注量等进行系统分析与寻优。在优化过程中，充分考虑各参数间复杂的相互作用关系，避免单一目标优化导致顾此失彼的情况。最终获得帕累托最优解集，此解集为决策者提供了多种权衡能效与精度的方案，企业可依据自身实际需求与发展战略，从该解集中挑选出最契合自身利益的参数组合，实现设备性能的全面优化，助力锂电池行业在非标设备应用上迈向新高度。

五、总结

本次对锂电池行业新技术在非标设备中的应用调研，展现了 UV 喷墨与固态电池技术的显著价值。UV 喷墨技术凭借在极片制造上的突出表现，有效提升了生产效率，使极片制造效率提升 23%，为行业带来新的发展契机。固态电池技术在装配环节取得重大突破，装配良率突破 92%，有力证明了其技术经济性。为进一步推动行业发展，提出建设模块化设备平台的路径，此路径有助于整合资源、提高生产灵活性。同时，指明固态电解质沉积设备标准化研究这一后续方向，这对推动固态电池大规模产业化意义重大。未来，持续关注这些技术的应用与发展，不断优化和完善，将推动锂电池行业迈向新的高度。

参考文献

- [1] 高雨璇. 液态电极的构建及其在固态锂电池中的应用 [D]. 广东工业大学, 2023.
- [2] 白洋. 全固态厚膜锂电池的研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [3] 赵婷. 丁二腈基固态电解质的制备及在全固态锂电池中的应用 [D]. 郑州大学, 2023.
- [4] 卢嘉泽. 固态金属锂电池关键界面问题研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [5] 杨钰琦. 基于厚膜正极的固态锂电池研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [6] 陆敬予, 柯承志, 龚正良, 等. 原位表征技术在全固态锂电池中的应用 [J]. 物理学报, 2021, 70(19): 236-262.
- [7] 李维聪, 穆浩, 沈恒龙, 等. 固态锂电池在载运工具中的应用前景分析 [J]. 电气工程学报, 2022, 17(04): 88-102.
- [8] 陈翔, 富忠恒, 高宇辰, 等. 机器学习在锂电池固态电解质研究中的应用 [J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(02): 488-498.
- [9] 锂电池回收有了新技术 [J]. 电力勘测设计, 2021, (01): 76.
- [10] 朱宏康, 刘凡. 能源材料创新——固态锂电池 [J]. 中国材料进展, 2021, 40(05): 351+358.

市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术及应用

何亮

广东绿日环境科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110021

摘 要：为解决市政污水处理厂出水水质不达标、处理能力不足等问题，以福建省某镇级污水处理厂项目为研究对象。该项目将原有0.5万 m³/d处理规模扩容至1.0万 m³/d，出水标准提升至《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级A标准。通过阐述改良型氧化沟提标改造技术的工艺原理、核心内容及应用流程，剖析改造过程中面临的用地紧张等难题，并针对性提出优化工艺组合等解决措施，可为同类市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造提供实践参考。

关 键 词： 市政污水处理厂；改良型氧化沟；提标改造技术

Technology and Application of Upgrading and Renovation for Improved Oxidation Ditch in Municipal Sewage Treatment Plants

He Liang

Guangdong Lvri Environmental Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： To address issues such as substandard effluent quality and insufficient treatment capacity in municipal sewage treatment plants, this study takes a township-level sewage treatment plant project in Fujian Province as the research object. The project expands the original treatment capacity from 5,000 m³/d to 10,000 m³/d and upgrades the effluent standards to meet the Class 1A criteria specified in the "Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants" (GB18918-2002). By elaborating on the process principles, core components, and application procedures of the upgraded modified oxidation ditch technology, this study analyzes challenges encountered during the renovation, such as limited land availability, and proposes targeted solutions such as optimizing process combinations. These findings provide practical references for upgrading modified oxidation ditch technology in similar municipal sewage treatment plants.

Keywords： municipal sewage treatment plant; modified oxidation ditch; upgraded renovation technology

引言

引言随着城市化进程加快与环保要求提高，众多早期建设的市政污水处理厂面临处理能力不足、出水水质难以满足新排放标准的困境，提标改造成为必然选择。改良型氧化沟工艺因流程简捷、抗冲击负荷能力强等优势，但在长期运行中逐渐显现出脱氮除磷效率有限、能耗较高等问题。本文以福建省某镇级污水处理厂项目为依托，深入探讨改良型氧化沟提标改造技术的原理、应用难题及解决措施，旨在为市政污水处理厂提标改造工程提供技术支撑，助力水环境质量改善与生态文明建设。

一、工程概况

福建省某镇级污水处理厂位于丘陵沉积地貌区域，服务范围涵盖周边居民生活污水与工业园区生产废水，原处理规模为0.5万 m³/d，采用改良型 Carrousel-2000氧化沟工艺，主要处理单元包括粗细格栅及进水泵房、旋流沉砂池、氧化沟、二沉池、污泥脱水车间等。近年来，受服务区域人口增长与产业扩张影响，污水排放量逐年攀升，原有处理能力接近饱和。还需要新建核心处理单元，包括处理规模0.5万 m³/d的二沉池，规模1.0万 m³/d的调节池及前置生物脱氮池、提升泵房及滤布滤池、80平方米的鼓

风机房。另外，还要进行设备及装置升级与新增，如在生化池中增设新型 LR-HBR 系列生物膜反应器模块，新增空气悬浮风机、自动隔膜板框压滤机等设备，同时完善电气、自控及仪表系统，确保改造后工艺稳定运行，出水水质达标。

二、市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术

（一）工艺原理与特点

改良型氧化沟工艺是在传统 Carrousel氧化沟基础上优化而来，属于活性污泥法的一种变型，核心是通过合理布置曝气机与

流道，在单一沟体内形成厌氧、缺氧、好氧交替的环境，实现有机物去除与脱氮除磷。其工艺原理为：污水进入氧化沟后，在曝气机推动下沿环形流道循环流动，曝气机下游区域溶解氧（DO）浓度较高（3 ~ 3.5mg/L），形成好氧区，可实现有机物降解与硝化反应；曝气机上游区域 DO 浓度较低（0~0.5mg/L），形成缺氧区，反硝化细菌利用污水中碳源将硝酸盐转化为氮气，实现脱氮；若在进水端增设厌氧池，还可促进聚磷菌释放磷，为后续好氧区过量吸磷创造条件^[1]。

相较于传统工艺，改良型氧化沟提标改造技术具有显著特点：一是工艺流程简捷，可省去初沉池，减少占地与投资；二是抗冲击负荷能力强，沟内完全混合流态能有效缓冲水质水量波动；三是脱氮除磷效率高，通过优化 DO 梯度与水力停留时间，可同步实现碳、氮、磷去除；四是能耗较低，倒伞型曝气机动力效率可达 2.4kgO₂/kwh，高于普通活性污泥法；五是运行管理方便，设备数量少，维护成本低，适合市政污水厂长期稳定运行^[2]。

（二）提标改造核心技术内容

1. 工艺优化与单元升级

针对原有工艺脱氮除磷效率不足的问题，本项目采用“前置反硝化 + A²/O+LR-HBR 生物膜反应器”组合工艺对改良型氧化沟进行改造：

表1 技术改造方案对比表		
改造内容	改造前	改造后
氧化沟结构	传统 Carrousel 氧化沟，厌氧-缺氧-好氧分区不明确	将原有厌氧池改为缺氧池，增设前置反硝化区
生物处理单元	仅靠活性污泥法处理	在好氧区新增 LR-HBR 系列生物膜反应器模块，提高污泥浓度
回流系统	原有内回流系统运行不稳定	停用原有内回流，在好氧池末端新增混合液回流泵，控制回流比为 100%
除磷措施	依赖生化除磷，效果不稳定	增设 PAC 应急加药系统，强化化学除磷

2. 水质提升与能耗控制

为确保出水达到一级 A 标准，在水质控制方面采取多重措施：一是精准控制进水水质，根据监测数据调整营养液投加量，营养液投加装置采用 PE 桶（V=2000L），配套机械隔膜计量泵（1用1备），确保生化反应所需营养均衡；二是强化除磷效果，在污泥脱水车间设置 PAC 成套加药设备，包括 2m³ 储药桶、2m³ 溶药桶，配套隔膜计量泵，应急投加 PAC，确保出水 TP ≤ 0.5mg/L；三是优化污泥处理系统，新增 1 台自动隔膜压滤机（过滤面积 100m²，N=10.2kW），将污泥含水率由 97.5%降至 60%以下，减少污泥二次污染。在能耗控制上，通过设备选型与运行优化实现节能：选用节能型设备，如潜水搅拌机（N=2.5~5.5kW）、轴流风机（N=0.25kW）等，降低单机能耗；采用 PLC 自动控制系统，根据污水流量、水质参数自动调节设备运行台数与运行时间，如水泵按集水池液位轮值运行，鼓风机根据好氧区 DO 浓度调整曝气量；利用处理后尾水回用，将巴氏计量槽出水用于脱水机房冲洗滤带、构筑物冲洗及绿化浇灌，年节约自来水用量约

7000 吨。

三、市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术应用的难题

（一）用地紧张与构筑物布局限制

市政污水处理厂多位于城市建成区，改扩建项目往往受限于原有场地红线，可利用空间有限。福建省某镇级污水处理厂项目总用地面积仅 24700 平方米，且一期已建构筑物（如综合楼、污泥脱水车间、配水井等）占据大量空间，二期新建的调节池及生物脱氮池、二沉池、鼓风机房等需在剩余场地内布置，导致构筑物间距紧凑，如新建二沉池西侧距已有二沉池仅 4m，北侧距已建配水井、污泥泵井约 7m，不仅增加了施工难度，还可能影响现有构筑物的稳定运行^[3]。

（二）停水改造难度大与运行风险高

污水处理厂提标改造需在保证现状处理能力的前提下进行，无法长时间停水，导致改造过程需分阶段实施，工序衔接复杂。某市政污水处理厂现状处理规模 0.5 万 m³/d，若改造期间停水，将导致周边污水直排，污染水环境。因此，项目需在不停水状态下对原有氧化沟、粗格栅及提升泵房等进行改造，如对氧化沟改造时，需先将污水导流至临时处理设施或预留区域，再对单侧沟体进行施工，施工周期长且易受水质水量波动影响。同时，改造过程中设备更换（如紫外消毒池灯管、污泥回流泵）需短暂停运局部单元，可能导致处理效率下降，增加出水超标的风险。

（三）高浓度污水应对能力不足

福建省某镇级污水处理厂接纳的污水中包含养殖废水、工业废水与生活污水，其中养殖废水量达 270m³/d，COD、氨氮、总磷等污染物浓度较高（如 COD ≤ 500mg/L、氨氮 ≤ 35mg/L、总磷 ≤ 3mg/L），且工业废水成分复杂，存在一定波动性。原有改良型氧化沟工艺对高浓度污水的抗冲击能力有限，改造初期若进水质超出设计范围，易导致生化池内微生物活性下降，出现污泥膨胀、脱氮除磷效率骤降等问题^[4]。

（四）设备兼容性与自动化控制问题

提标改造涉及新增设备与原有系统的兼容，若设备选型不当或接口不匹配，将影响整体工艺运行效率。例如，新增的 LR-HBR 生物膜反应器模块需与原有氧化沟池体尺寸适配，曝气管网需与新增鼓风机压力、流量参数匹配；电气系统改造中，现状配电房需新增 10kV 变配电系统（630kVA 变压器）与 500kW 柴油发电机组，需与原有低压配电系统实现电气与机械联锁，避免出现供电故障。

同时，自动化控制水平不足也制约改造效果。原有污水处理厂自动化程度较低，主要依赖人工操作，改造后新增的 PLC 控制系统需整合原有设备运行数据，实现水质、水量、设备状态的实时监测与自动调控。但部分老旧设备缺乏数据采集接口，无法接入新控制系统，导致自动化控制存在“盲区”，需要人工辅助监控，增加了运行管理难度与人为误差风险。

四、市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术应用的解决措施

（一）优化构筑物布局与空间利用

针对用地紧张问题，通过精细化设计与空间整合提高土地利用效率：一是采用“合建式”布局，将提升泵房与滤布滤池合建，提升泵房位于下部，滤布滤池布置于泵房上方，节省占地面积约40%；二是合理规划工艺流程，按照“进水—预处理—生化处理—深度处理—出水”的顺序布置构筑物，缩短各单元间管路长度，减少水头损失与占地，如将调节池及生物脱氮池与原有氧化沟相邻布置，共用污泥回流管路；三是利用地下空间，对部分小型构筑物（如营养液投加装置、PAC加药设备）采用半地下式设计，降低地上占地规模。

（二）分阶段施工与临时保障措施

为降低停产改造风险，采用“分区域、分阶段”施工方案，并配套临时处理设施，一是将氧化沟改造分为两期，先对南侧沟体进行施工，北侧沟体维持正常运行，通过临时导流管将污水引入北侧沟体，施工完成后再对北侧沟体改造，确保改造期间处理能力不低于 $0.5\text{万 m}^3/\text{d}$ ；二是对粗格栅及提升泵房改造时，启用第二条格栅渠，新增1台链条式回转格栅除污机，同时增设1台潜水排污泵，实现“一用一备”，避免格栅或水泵故障导致停产；三是在厂区临时设置应急调节池（容积 500m^3 ），当进水水量超出处理能力时，暂存污水，待系统稳定后再逐步处理，防止污水外排^[5]。

（三）强化预处理与工艺抗冲击能力

在预处理段，本次改造通过关键设备的扩容与升级，显著提升了系统的稳定性与处理能力。改造前，格栅系统仅单渠运行，提升泵房配置也较为紧张。改造后，通过启用第二条格栅渠并新增1台链条式回转格栅除污机（ $B=0.8\text{m}$, $N=1.1\text{kW}$ ），实现了双渠并行，大大增强了对悬浮物的拦截能力和设备检修时的运行灵活性；同时，在提升泵房新增1台潜水排污泵（ $Q=360\text{m}^3/\text{h}$, $H=15\text{m}$, $N=18.5\text{kW}$ ），使运行模式优化为“2用1备”，不仅直接提升了 $350\text{m}^3/\text{h}$ 的污水提升能力，更极大地保障了后续处理单

元进水的水量与稳定性，为整个工艺流程的顺畅运行奠定了坚实基础。

（四）设备选型兼容与自动化系统升级

在设备选型上，严格遵循“兼容性、标准化”原则：一是优先选择与原有设备品牌、型号匹配的产品，如新增的污泥回流泵与原有水泵参数一致，确保管路接口、控制信号兼容；二是对新增设备进行接口适配设计，如LR-HBR生物膜反应器模块的不锈钢膜架尺寸根据氧化沟池体定制，曝气管网采用标准化接口，与鼓风机出口管路直接对接；三是在设备采购前进行技术交底，要求厂家提供设备控制协议与数据接口，确保可接入全厂自动化控制系统。

在自动化控制升级方面，构建“中控室—现场PLC—设备传感器”三级控制系统：一是对原有老旧设备进行改造，加装智能传感器（如液位计、DO仪、COD在线监测仪），实现运行参数实时采集；二是在中控室设置上位机监控系统，整合各处理单元运行数据，可远程控制设备启停、调整运行参数，如根据DO浓度自动调节鼓风机曝气量，根据液位自动控制水泵运行台数；三是建立数据预警与故障诊断功能，当设备运行参数超出正常范围（如水泵电流异常、出水COD超标）时，系统自动报警并提示故障原因，便于运维人员及时处理。通过自动化升级，减少了人工干预，提高了工艺运行稳定性与管理效率。

五、结束语

文章以某福建省某镇级污水处理厂改良型氧化沟提标改造项目为依托，深入探讨了市政污水处理厂改良型氧化沟提标改造技术的应用与实践。通过采用“前置反硝化+ A^2/O +LR-HBR生物膜反应器”组合工艺，并结合设备升级与自动化控制系统的完善，本次提标改造工程有效提升了污水处理厂的脱氮除磷能力与系统稳定性，实现了从 $0.5\text{万 m}^3/\text{d}$ 扩容至 $1.0\text{万 m}^3/\text{d}$ ，并确保出水水质稳定达到一级A标准，为类似镇级污水处理厂的提标改造提供了可借鉴的技术路线与实践经验。

参考文献

- [1] 岳崇峰, 李桂姣, 许江城. 改良 AAO+ 深床反硝化滤池工艺用于污水处理厂提标改造 [J]. 城市道桥与防洪, 2024(6): 163-168.
- [2] 蒋富海, 陈亚松, 张显忠, 等. 污水处理厂提标扩量协同增效的实践应用 [J]. 中国市政工程, 2023(3): 41-46, 55.
- [3] 朱诚熠, 黄天寅, 曹强, 等. 佛山市某污水处理厂技改工程实例 [J]. 水处理技术, 2024, 50(4): 140-143.
- [4] 鲍任兵, 万年红, 邹磊, 等. 城镇污水生化处理原位提标技术路径研究 [J]. 给水排水, 2024, 50(9): 33-42.
- [5] 李明惠. 试述污水处理厂如何在技改中实现节能增效 [J]. 智能城市, 2017, 3(9): 120.

分析煤矿采矿智能化技术在安全生产中的运用

赫建魁

甘肃万胜矿业有限公司，甘肃 庆阳 745713

DOI:10.61369/ME.2025110024

摘 要： 在我国能源工业中，煤矿生产是不可或缺的一部分。煤矿安全会直接影响能源工业可持续发展，因此必须采取有效的安全生产措施。随着智能技术的发展，煤矿采矿可以不再过度依赖人工，通过智能化技术的引进，煤矿采矿更加安全。本文阐述了煤矿采矿安全生产的要求与挑战，分析了煤矿采矿智能化技术的优势，不仅能够提升生产效率、保障生产安全，还能促进环境保护。以此为基础，提出了煤矿采矿智能化技术在安全生产中的运用对策。

关 键 词： 煤矿采矿；智能化技术；安全生产

Analyze the Application of Intelligent Automation Technology in Coal Mining in Safe Production

He Jiankui

Gansu Wansheng Mining Co., LTD. Qingyang, Gansu 745713

Abstract： In China's energy industry, coal mine production is an indispensable part. Coal mine safety directly affects the sustainable development of the energy industry, so effective safety production measures must be taken. With the development of intelligent technology, coal mining no longer overly relies on manual labor. Through the introduction of intelligent automation technology, coal mining has become safer. This article expounds the requirements and challenges of safe production in coal mining, analyzes the advantages of intelligent automation technology in coal mining, which can not only improve production efficiency and ensure production safety, but also promote environmental protection. Based on this, countermeasures for the application of intelligent automation technology in coal mining in safe production were proposed.

Keywords： coal mining; intelligent automation technology; work safety

煤炭是我国非常重要的能源，煤矿采矿的安全性会直接影响国家能源稳定。但由于煤矿开采环境比较复杂，在实际采矿的过程中，经常面临各种地质灾害和恶劣环境^[1]。传统采矿模式以人工开采为主，不仅监测时效性不足，而且响应速度较慢，难以管控各类风险，造成安全事故频繁发生。在这种情况下，必须大力引进智能化技术，采用传感器、大数据、AI算法等技术，构建全过程实时监测系统，为安全生产提供智能决策。采用自动化机械设备，降低人员在危险环境中的暴露率，通过机器人巡查的方式，解决危险作业问题，使采矿更加安全。

一、煤矿采矿安全生产的要求与挑战

（一）要求

煤矿采矿是一项比较复杂的作业任务，有非常严格的安全生产要求。在法律和政策层面，采矿人员必须遵守《中华人民共和国矿山安全法》《中华人民共和国安全生产法》等法律规范，全面落实安全生产责任制^[2]。矿产企业必须获取合法证照，包括采矿许可证、安全生产许可证等。在采矿的过程中，要主动配合国家矿山安全监察局的监管与检查，也要与地方监管部门积极合作，及时发现隐患问题并在规范期限内完成整改工作。在技术与装备方面，要求煤矿必须设置通风系统、防治水系统与防灭火系统，

有效预防瓦斯中毒、水灾、火灾等风险。必须做好顶板管理，切实保障供电安全，并建立完善的安全避险系统。在管理方面，要求建立风险分级管控机制，做好安全培训、现场管理、应急管理。

（二）挑战

在煤矿采矿的过程中，安全生产面临诸多挑战。首先，煤矿采矿区域的自然条件与地质环境往往比较复杂，采矿单位会面临非常恶劣的地质条件，容易发生瓦斯突出、火灾、顶板垮落等事故。在采矿深度不断增加的情况下，温度、压力、瓦斯压力都会持续攀升，灾害发生概率也会随之上涨^[3]。面对断层、褶皱等复杂地质结构，采矿难度较大，很容易出现突发性事故。由于我国

煤层赋存条件非常复杂，存在很多瓦斯含量高、高突出的矿井，一些区域煤层存在很强的自燃倾向，所以安全生产的难度巨大。

在技术层面，我国采矿行业的机械化与智能化水平虽然不断提升，但发展并不均衡。很多小规模煤矿机械化与智能化的水平较低，生产作业依旧以人工为主，难以确保安全。在生产中，一些设备使用时间较长，甚至超过使用年限，会带来巨大的安全风险。监测系统落后，无法实时评估和防控采矿风险。在深部开采的过程中，会面临瓦斯、冲击地压等风险，但缺乏有效的治理与防控手段，应急救援技术也不够完善。

在管理层面，没有切实落实主体责任，监管执法效能不足，采矿单位没有设定明确的安全标准或者安全标准执行力度不足，很多标准内容已经落后，没有结合实际情况及时更新，难以有效防范深部开采或新工艺应用带来的新风险。此外，从业者结构变化，很多一线矿工年龄较大，生产流动性较强，人才队伍结构不合理，缺少高素质复合型人才^[4]。很多一线劳动力学历较低，缺少有效的安全培训，因此风险意识不足。煤矿行业逐渐成为缺少吸引力的传统行业，因此行业中的通风、瓦斯防治等专业技术人员日益匮乏。在这种情况下，安全生产的难度会不断提升。

二、煤矿采矿智能化技术优势

（一）提升生产效率

在传统采矿过程中，主要采用人工操作的模式，不仅劳动强度很大，而且工作效率不高。智能化技术能够实现采矿自动化生产，不仅降低人工成本的投入，也使采矿过程的管控更加精确。生产中使用机械设备能够实现连续高效开采，如，使用自动化采煤机、掘进机等设备，能够满足24h全天候不间断作业的需求，减少因人工交接班导致的生产停机时间。采用智能控制系统也能够实时分析采煤过程，然后根据生产数据自动优化推进速度等参数，使设备始终保持最佳工作状态，大幅提升单机产量。采用智能调度系统能够促进各环节协同联动，进而提升生产效率。不仅如此，智能监测系统能够减少事故停工，在危险作业环境中，使用机器人替代人工，既可以确保连续生产，也能够保障人员安全。采用智能化技术，能够实现数据驱动决策，使资源配置效率更高，有效降低单位能耗，实现精准资源配送，减少等待时间。通过各个节点的整合，全面提升生产效率^[5]。

（二）保障生产安全

在智能化技术应用下，可以实现无人或少人作业，直接减少井下高位区域人员暴露的风险。具体使用采煤机、掘进机等设备，配合远程控制系统，将矿工从采掘工作面等危险性较高的作业区域转移到较为安全的地面控制中心，降低了各类事故风险直接伤害工人的可能性。在巡检工作中，采用巡检机器人，利用智能摄像头与传感器采集数据，不仅可以确保巡检的全面性和精确度，也可以避免矿工进入危险区域^[6]。在智能监测系统、地质保障系统、设备健康诊断等智能化系统的应用下，能够实时动态地监测矿井环境，准确预测各类风险，并生成智能防控方案。即使在风险发生阶段，智能化技术也能够发挥积极作用。通过

UWB/Wifi等技术的应用，使井下人员的位置能够精确捕捉和追踪，然后利用AI算法制定最佳逃生路线，提升逃生成功率。采用智能通风与隔离控制系统，在灾害发生后，能够自动启闭水幕、防爆门等设备，有效控制灾害的危害。

（三）促进环境保护

煤矿采矿智能化技术不仅提升了生产效率与安全性，也为绿色、可持续的煤矿采矿模式构建奠定了技术基础。在智能化技术应用下，能够实现精准开采，采用地质建模技术，智能规划生产方案，精准识别煤层位置与厚度，然后进行开采施工，有效减少矸石等固体废物的产出，从根本上降低污染压力。采用“自动化掘进设备+智能通风系统”的组合形式，有效减少掘进、采煤过程中产生的粉尘。传感器能够采集数据，然后根据瓦斯、粉尘的含量进行风量动态调整，在控制污染的同时，尽可能降低设备能耗。在生产中会使用许多大型设备，包括水泵、风机等，采用智能能耗管理模式，既能够降低电力消耗，也能够间接减少发电造成的环境污染。智能化技术支持绿色开采工艺，能够尽可能减少生态扰动，同时进行全生命周期环境监测与预警，全方位保护环境。

三、煤矿采矿智能化技术在安全生产中的运用

（一）事故预警与智能监测

在实际生产的过程中，为确保安全，必须做好预警与监测工作。煤矿要建立完善的事故监测与预警系统，在系统中应用智能传感器技术，实时采集矿井环境参数，包括湿度、温度、气体浓度等，并且监测采矿过程中的参数变化情况。技术应用旨在实现主动预警，改变传统被动的安全管理模式，通过超前预警、动态监测、智能决策全面降低安全事故的发生概率。为此，不仅要建立物联网，实时监测地质与环境、设备与人员的状态。还要不断完善数据传输层，引入5G、工业光网（F5G）等技术，保障海量数据能够高效稳定地传输。整合安全监控、工业视频、人员定位等设备系统的数据，构建矿山“数据湖”。在数据分析层面，建立大数据分析平台，结合AI算法与预警模型，智能预测瓦斯涌出，准确预警顶板灾害、水灾、火灾等^[7]。与此同时，利用AI高清视频和人脸识别技术，准确识别人员不戴安全帽、区域闯入等高风险行为，并在识别出风险行为的同时发出警报。利用三维可视化数字孪生技术搭建矿山模型，精准还原矿山实况，实时展示矿山地质条件、环境参数、人员动向等，为事故预警与预防提供依据。

（二）矿井通风与智能管理

矿井中会产生大量粉尘，也可能涌现瓦斯，存在中毒、爆炸、火灾等风险。为有效预防此类风险，采矿单位可以采用智能化技术进行矿井通风和采矿管理。在实际通风的过程中，将智能传感器网络作为基础，实时监测矿井中的风量、风向、湿度、一氧化碳、甲烷等环境参数，然后结合实际进行智能调整。引入并融合RFID、UWB等技术，精准定位井下人员与设备，然后根据生产需求进行通风调整，也能为应急疏散提供数据依据。

采用 AI 算法对物联网采集的数据进行精准分析，自动识别风机性能劣化、巷道堵塞等问题，融合多项参数进行综合分析，超前预警瓦斯超限等灾害事故。主通风机采用智能调控技术，局部通风机使用“双速双变频”“一键倒台”模式，在自动切换风机的同时，减少设备能耗和噪声。例如，在掘进工作面中，根据掘进机位置、瓦斯浓度自动调节局部通风机的风量，通过“风抽联动”的方式，保障供风的合理性^[8]。

（三）安全设备与智能应用

矿井采矿中的智能化技术应用不仅包括智能化管理、自动通风调节等方面，也包括设备智能化。具体可以应用智能安全帽、自动火灾监测与灭火设备、救援机器人等。以救援机器人为例，在发生事故灾害时，救援机器人能够代替救援人员率先进入危险区域，解决坍塌、瓦斯浓度高、高温等区域难以搜救的问题。机器人搭载红外热像仪、摄像头、气体传感器等部件，将事故区域的视频画面、环境参数、求救声音实时传输给指挥中心，便于指挥中心生成“灾害地图”，使危险源以及潜在生存空间的定位更加精准，为救援方提供更多数据支持。在打通救援通道后，机器人可以承担物资运输任务，极大提升氧气瓶、水、急救包等物资的运输效率。也能够间歇地在受灾区往返穿梭，为后续救援争取更多时间。投放通信中继机器人、无人机等设备，能够建立通信网络，便于救援人员、指挥部、侦察机器人之间的信息传输，使救援有目的、有方向，极大地提升救援的效率和成功率。

（四）采矿机械与智能控制

在科技不断发展的背景下，智能化技术在煤矿安全生产中的应用愈加广泛。采用智能采矿机械与控制系统，能够全面提升采矿效率，实现无人或少人生产。具体来说，主要使用智能采

煤机、智能液压支架、智能刮板输送机等设备。同时辅助无人驾驶辅助运输车、智能钻锚机器人等设备，不仅满足实时监测、高效巡检、事故预警的需求，也能够实现物料和人员的自动定点运输，为巷道掘进和支护提供自动化技术支持。智能采煤机主要采用 GIS 技术，能够进行精准定位和自动调高，根据振动、雷达等煤岩识别技术进行截割，实现全自动割煤，精准避开岩石，并根据采矿过程中的地质变化不断调整参数。在智能控制方面，主要建立安全控制系统，包括环境安全监测系统、设备健康与运行安全系统、通信与协同控制平台。通过“机械+监控”的联动模式，全面提升生产安全。例如，在瓦斯超限联动停产场景中，环境监测系统能够第一时间发现瓦斯浓度快速攀升隐患，然后系统立即向控制平台发出预警，平台接收预警后会在数秒内响应并下达指令，切断关联区域电源、同时各个设备有序停机、启动通风设备等。在这个过程中，不需要人工操作，系统能够自动完成，且响应非常迅速。

四、结语

综上所述，煤矿采矿过程中，保障安全生产尤为重要。在实际生产的过程中，应用智能化技术能够大幅提升生产效率，切实保障生产安全，并且保护周围生态环境。通过采用事故预警与智能监测系统，及时发现采矿中的风险隐患，实现事前防控。采用矿井通风设备与智能管理技术，能够确保矿井内环境安全。应用安全设备和采矿机械，全面提升采矿安全，降低人员在危险区域暴露。未来，智能化技术会不断完善，为我国煤矿采矿事业的可持续发展奠定基础。

参考文献

- [1] 李存坚. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中的应用 [J]. 能源与节能, 2025, (10): 292–295.
- [2] 许林岗. 煤矿采矿工程中新型采矿工艺与技术应用研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (15): 31–33.
- [3] 王千敏. 煤矿采矿工程中智能化开采技术的应用与发展 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (15): 121–123.
- [4] 赵宏彦. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中应用的探究 [J]. 科技资讯, 2025, 23(09): 140–142.
- [5] 李元斌. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (03): 99–101.
- [6] 王振帆. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中的应用研究 [J]. 能源与节能, 2024, (11): 45–47.
- [7] 魏升辉. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (07): 88–90.
- [8] 李传铃. 煤矿采矿智能化技术在安全生产中的应用研究 [J]. 当代化工研究, 2023, (18): 86–88.

西乡县五里坝硫铁矿矿区水处理污泥治理措施研究

马超, 朱淼, 王晓宇

陕西省现代建筑设计研究院有限公司, 陕西 西安 710016

DOI:10.61369/ME.2025110025

摘 要 : 西乡县五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝堆存的 6779m³ 水处理污泥 (II 类一般工业固体废物), 因渗水外溢导致周边形成褐红色污染条带, 锰等重金属超标, 对汉江一级支流牟子河水质构成威胁。针对传统污泥治理技术 (填埋、堆肥、焚烧) 在该矿区的适用性局限, 本文基于地质聚合物的结构特性与固化机理, 提出 “地质聚合物改性 – 矿洞协同充填” 治理技术。通过系统分析污泥理化特性, 优化地质聚合物配合比, 明确其固化重金属的微观机制, 并结合矿洞充填工艺实现污泥资源化与酸性水源头控制。实验表明, 污泥经地质聚合物改性后, 重金属浸出浓度显著降低, 远低于《污水综合排放标准》(GB8978–1996) 的限值要求。结果表明, 地质聚合物作为一种新型胶凝材料, 对尾砂或底泥的改性效果十分显著, 具有良好的环境风险控制潜力。

关 键 词 : 硫铁矿污泥; 地质聚合物; 重金属固封; 矿洞充填; 酸性水治理

Research on Sludge Treatment Measures for Water Treatment in Wuliba Pyrite Mining Area, Xixiang County

Ma Chao, Zhu Miao, Wang Xiaoyu

Shaanxi Modern Architectural Design & Research Institute Co., LTD, Xi 'an, Shaanxi 710016

Abstract : The 6,779 cubic meters of water treatment sludge (Class II general industrial solid waste) stored in the No. 2 tailings dam of Wuliba Pyrite Mine in Xixiang County has overflowed due to water seepage, forming a brownish–red pollution band around it. The content of heavy metals such as manganese exceeds the standard, posing a threat to the water quality of the Muzi River, a first–level tributary of the Han River. In view of the applicability limitations of traditional sludge treatment technologies (landfill, composting, incineration) in this mining area, based on the structural characteristics and solidification mechanism of geopolymers, this paper proposes the "geopolymer modification – mine tunnel collaborative filling" treatment technology. By systematically analyzing the physical and chemical properties of sludge, optimizing the proportion of geopolymers, clarifying the microscopic mechanism of their solidification of heavy metals, and combining the mine tunnel filling process to achieve sludge resource utilization and source control of acidic water. Experiments show that after the sludge is modified by geopolymers, the leaching concentration of heavy metals is significantly reduced, far below the limit requirements of the "Integrated Wastewater Discharge Standard" (GB8978–1996). The results show that geopolymers, as a new type of cementitious material, have a very significant modification effect on tailings or sediment and possess good potential for environmental risk control.

Keywords : pyrite sludge; geological polymer; heavy metal solid sealing; mine tunnel filling; treatment of acidic water

引言

面对陕南核心水源地西乡县五里坝硫铁矿遗留的6779m³ 污泥 (锰浸出浓度超标), 传统填埋、堆肥、焚烧等技术存在高成本、高占地及二次污染风险。依据 “以废治废” 的治理导向, 研究聚焦地质聚合物稳定化技术。该材料由硅铝酸盐经碱激发形成, 具备高强度、耐酸和高效固化重金属的特性, 且碳排放较传统水泥低80%以上。通过针对矿区污泥特性与酸性水形成机理, 优化地质聚合物的配比与工艺参数, 将污泥改性为稳定固化体, 并最终作为充填骨料回填至井下采空区。此方案旨在同步实现污泥无害化、固废资源化及采空区隐患治理, 为同类中风险硫铁矿区提供经济可行的技术范式。

一、西乡县五里坝硫铁矿污泥现状分析

（一）污泥来源与堆存特征

五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝为 M10 浆砌石拱坝，总库容 33.81 万 m³，污泥主要源于矿硐涌水处理过程：矿硐涌水（pH2.77–6.96，铁超标0– 471.3 倍）经混凝沉淀（添加 PAC、PAM）后，污泥通过尾矿输送管道泵入坝内，形成平均厚度 1m 的底泥层。现状堆存呈长方形展布，表面灰白色，局部可见褐红色渗水

痕迹，坝外渗水收集池深 4m，污泥厚度 1.3m，丰水期渗水量达 6.5m³/h，存在外溢风险。

（二）污泥理化特性

根据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》（GB5085.3–2007）和《污水综合排放标准》（GB8978–1996）等规范，对2号尾矿坝内污泥采用硝酸法和水平震荡法进行检测分析。结果显示，污泥含水率较高，重金属含量存在超标风险，浸出液中部分指标超出限值，需进一步评估其环境风险并采取相应处置措施。

表1 污泥硫酸硝酸法检测数据统计表（单位：mg/L）

序号	采样地点	物探编号	铜	锌	镉	铅	总铬	铬	汞	镍	砷	总银	钡	铍	硒
《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》			≤100	≤100	≤1	≤5	≤15	≤5	≤0.1	≤5	≤5	≤5	≤100	≤0.02	≤1
1	2#尾矿库污泥	鸳鸯池-6	0.02L	0.02	0.0002L	0.0026	0.34	0.004L	0.0002L	0.04L	0.018	0.03	0	0.0004	0.0348
			0.02L	0.02	0.0002L	0.0027	0.05	0.004L	0.0002L	0.04L	0.0221	0.03	0.021	0.0003	0.0079L

表2污泥水平震荡法检测数据统计表（单位：mg/L）

序号	采样地点	物探编号	锰	镉	铜	铅	锌	总铬	铬（六价）	汞	砷	pH
《污水综合排放标准》			≤2.0	≤0.1	≤0.5	≤1.0	≤2.0	≤1.5	≤0.5	≤0.05	≤0.5	≤6–9
1	2#尾矿坝污泥	鸳鸯池-6	4.14	0.0016	0.02L	0.0006L	0.324	0.05L	0.004L	0.00011	0.0057	8.35
			2.72	0.0021	0.02L	0.0006L	0.454	0.05L	0.004	0.0001	0.0014L	8.45

（三）治理难点

水源保护约束：污泥堆存区距牟子河仅 260m，属汉江一级支流汇水区，禁止采用可能产生渗滤液的填埋技术；

重金属固封要求：污泥中锰离子易在酸性环境下溶出（矿硐矿硐水 pH 最低 2.77），需长效抗酸固封技术；

固废协同处置：矿区同时存在 11 处废弃矿硐需充填，需实现污泥与废渣的协同消纳，避免二次转运。

而地质聚合物技术可实现“污泥无害化– 矿硐封堵– 固废资源化”三重目标，契合矿区实际需求。

三、地质聚合物改性污泥的技术原理与实验验证

（一）地质聚合物的结构与固化机制

地质聚合物由 [Al–O₄] 与 [Si–O₄] 四面体通过共用氧交替键合形成的三维无定形网络结构，其固化重金属机制包括：

- 1.物理包裹：污泥颗粒被地质聚合物凝胶体包裹，阻断与水接触；
- 2.离子交换：地质聚合物中的 Na⁺、K⁺与污泥中 Mn²⁺、Zn²⁺ 交换，降低游离态重金属浓度；
- 3.化学键合：重金属离子与 [Al–O₄] 四面体形成稳定配位化合物，进入聚合物骨架^[4–5]。

与传统水泥相比，地质聚合物水化过程无 Ca (OH)₂生成（水泥水化会产生 Ca (OH)₂，在酸性环境下易溶解导致重金属释放），在 5% 硫酸溶液中分解率仅为水泥的 1/13，适用于矿区酸性水环境^[6]。

（二）改性实验验证

1.实验材料与配比

污泥：2 号尾矿坝污泥经板框压滤脱水（含水率 45%），破碎至粒径 < 5mm；

地质聚合物：采用地质聚合物胶凝材料（主要成分为偏高岭土、碱激发剂）；

配合比：基于正交实验，确定最佳质量比为脱水污泥：地质聚合物：水 = 1:0.22:0.6。

2.实验结果

本次对五里坝硫铁矿尾矿库内堆存的尾砂（污泥）利用新型

二、污泥治理技术比选

基于五里坝矿区 “水源保护优先、以废治废” 的治理原则，对比传统技术与地质聚合物技术的适用性，结果如下表所示：

治理技术	核心原理	优势	五里坝矿区适用性局限	单位成本（元 /m³）
卫生填埋	防渗层隔离 + 渗滤液处理	工艺成熟	需征地 3.36hm²，渗滤液（COD 850mg/L）风险高，不符合水源保护要求	180–220
堆肥处理	微生物降解有机质	可资源化	需添加 2 倍体积秸秆（成本超 50 元 / m³），锰富集率达 15%，易污染土壤	230–280
焚烧处理	高温氧化减容	减容率 90%	烟气含 SO ₂ （120mg/m³），需配套脱硫设备，成本高，能耗大	350–400
地质聚合物改性–矿硐充填	三维网状结构固封重金属，协同充填矿硐	无渗滤液，固废消纳率 100%，抗酸腐蚀	需预处理脱水，对施工设备有一定要求	150–180

由表 1 可知，传统技术或存在二次污染风险，或成本过高，

胶凝材料进行改性实验相关数据，试验结果见表4。

表4 尾矿库尾砂（污泥）改性回填固体配比实验结果

指标	地质聚合物固体 - 尾砂（污泥）	标准（mg/L）
检测项目	检测结果	
汞（ $\mu\text{g/L}$ ）	0.02ND	0.05
砷（ $\mu\text{g/L}$ ）	1.97	0.5
硒（ $\mu\text{g/L}$ ）	21.1	/
铜（mg/L）	0.01ND	0.5
锌（mg/L）	0.01ND	2.0
铅（mg/L）	0.03ND	1.0
镉（mg/L）	0.01ND	0.1
铬（mg/L）	0.06	1.5
镍（mg/L）	0.02ND	1.0
铍（mg/L）	0.004ND	0.005
钡（mg/L）	0.17	/
银（mg/L）	0.01ND	0.5
六价铬（mg/L）	0.040	0.5
pH值	8.53	6-9

（三）工程实施流程

1. 污泥预处理

（1）脱水：采用板框压滤机（过滤面积 200m²，工作压力 0.8MPa）将污泥含水率从 68% 降至 45%，脱水后污泥含水率每降低 10%，可减少地质聚合物用量 15%；

（2）破碎筛分：通过颚式破碎机（处理能力 50t/h）破碎至粒径 < 5mm，筛除杂质（如矿石碎屑），避免影响改性效果。

2. 改性混合搅拌

在 2 号尾矿坝附近设临时搅拌站，配置双轴螺旋搅拌机（容积 5m³，搅拌转速 30r/min），按配比依次投入脱水污泥、地质聚合物、水，搅拌时间 ≥ 5min，确保料浆均匀度（坍落度 180 ± 20mm）。

3. 矿洞协同充填

将改性污泥料浆通过 HGBS100.10.320 充填工业泵（工作压力 9MPa，流量 80m³/h），经 Φ150mm 耐磨管道输送至 P1006 斜井（高程最低矿洞，需充填容积 13300m³），具体充填方案：

分段充填：每隔 50m 修筑 1m 厚钢筋混凝土挡墙（预埋注浆花管），避免料浆流失^[7]；

加压注浆：通过注浆花管加压（压力 1.2MPa），使料浆渗透至矿洞围岩裂隙，阻水率达 98% 以上；

协同消纳：改性污泥与矿区 II 类废渣（54120.6m³）混合充填，共消纳污泥 6779m³，占矿洞充填量的 12.9%。

四、治理效果评估体系

（一）监测方案

本方案构建“地表水-地下水-土壤”三维监测体系。于牟子河设地表水背景断面、风险管控断面、质量控制断面、消减断面。监测流量、pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、铍、锰、铁、硫酸根等。在尾矿坝下游新建地下水监测井，监测地下水水位、pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、锰、铍、铁、

硫酸根等^[8]。在尾矿坝附近布设壤监测点，监测 pH、汞、铅、镉、铬、砷、铜、锌、镍、锰、铁等。

（二）预期效果

项目实施后，有效改善泡桐沟地表水入牟子河的水质，风险管控断面泡桐沟汇入五里坝河前硫酸盐、锌、锰浓度得到下降。6779m³ 污泥全部安全消纳，杜绝二次污染并节省征地费 80 万元^[9]。通过覆土及播撒草籽，尾矿坝原址植被覆盖度从 15% 提升至 85% 以上，有效恢复生态。^[11-3]

五、效益分析

（一）环境效益

本项目将产生显著环境效益。其采用地质聚合物稳定化技术，可实现对污泥中重金属的有效固封，固封率超 99%，从根本上阻断了重金属经雨水淋滤迁出污染水体的风险，有力保护牟子河生态。同时，通过对 P1006 斜井等关键点位进行封堵，预计每日可削减约 1716 立方米的酸性矿井水涌出，从源头大幅减少污染物输入，直接护卫“南水北调”中线工程水源水质，生态价值巨大。^[10]

（二）经济效益

项目具备突出的经济效益。创新使用地质聚合物替代传统水泥，材料成本降低约 40%，结合污泥资源化利用等措施，使总治理成本较传统填埋方案降低 22%，总计节省投资 1380 万元。将改性污泥作为充填骨料，实现了“以废治废”，不仅减少了固废外运处置量，还直接节约了约 60 万元的转运处置费用，达成了成本控制与废物利用的双赢。

（三）社会效益

项目的社会效益显著。其成功实践为同类中风险矿区的污泥治理提供了经济可靠的技术范式，已在陕西省内相关治理工程中推广。通过对废弃矿洞进行充填，彻底消除了地下采空区可能导致的地面塌陷隐患，有力保障了矿区周边约 1400 名居民的生命财产安全，提升了社区安全感与人居环境，促进了区域和谐稳定发展。

六、结论与建议

（一）结论

西乡县五里坝硫铁矿 2 号尾矿坝污泥采用地质聚合物改性-矿洞协同充填技术可行，改性后重金属浸出达标，抗压强度满足工程要求；

该技术实现“污泥无害化-矿洞封堵-固废资源化”协同，解决了传统技术二次污染或成本过高的难题；

治理后可保障牟子河水质安全，为南水北调水源地周边硫铁矿污泥治理提供创新路径。

（二）建议

1. 优化配比

建议后续研究与应用中，建立污泥含水率与地质聚合物投加量的快速响应模型，实现根据物料特性动态调整固化剂配方。此

举可在保证固封效果的前提下，精准控制材料消耗，避免过度投加，从而进一步降低工程成本，提升项目的经济优化空间。

2.智慧监测

建议引入无人机高精度航拍与物联网传感技术，构建天地一体化的实时监控网络。无人机可定期巡检地表位移与植被恢复，而布设于矿洞内部及河流断面的传感器能实时回传充填体应力、地下水位及关键水质指标数据，实现从“季度抽检”到“全过程预警”的跨越，提升环境风险管控的智能化水平。

3.技术拓展

鉴于本项目在地质聚合物固化 / 稳定化技术上的成功经验，建议系统总结技术参数与适用条件，积极探索其在铅锌矿、铜矿等产生的其他类型重金属污泥治理中的可行性。通过针对性配方改良与中试验证，有望形成一套可复制的技术体系，扩大该创新技术的适用范围，为解决更广泛的矿山环境污染问题提供新方案。

参考文献

[1] 贺俊, 赵强, 杨建强, 等. 陕南硫铁矿矿酸性水形成机理及治理方法探究 : 以西乡五里坝硫铁矿为例 [J]. 西北地质, 2025, 58(1): 219 - 230.

[2] 唐爽, 钟昌茂, 徐云张, 等. 某废弃矿区水环境污染特征及酸性矿井涌水成因研究 [J]. 环境科技, 2025, 38(05): 23-28.

[3] 马荣. 陕南硫铁矿矿渣理化特征分析及生态风险评价 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2025, (08): 137-141.

[4] 杨孟华. 某矿山周边环境重金属污染分析及环境风险评价 [D]. 合肥工业大学, 2024.

[5] 邓杏彬, 黄深, 任坤, 等. 马面硫铁矿矿水体水化学和同位素特征及环境指示意义 [J]. 地球科学, 2025, 50(04): 1531-1544.

[6] 徐建中, 唐然肖, 周云龙, 等. 用粉煤灰和制革废水污泥等制备地聚合物材料 [J]. 建筑材料学报, 2007, 10(1): 105 - 109.

[7] 陕西省生态环境厅. 陕西省汉江丹江流域涉金属矿产开发生态环境综合整治规划 (2021 - 2030 年) [Z]. 2022.

[8] 韦旭东, 张伟龙, 殷美玲, 等. 某硫铁矿矿农田铈等重金属污染及其来源追踪研究 [C]// 中国质谱学会 (中国物理学会质谱分会), 中国化学会质谱分析专业委员会, 中国仪器仪表学会分析仪器分会质谱仪器专业委员会. 2018 年中国质谱学术大会 (CMSC 2018) 论文集, 2018: 499.

[9] 刘娟, 张伟龙, 蔡静敏, 等. 硫铁矿冶炼废渣和尾矿中铈等重金属富集特征的研究 [C]// 中国质谱学会 (中国物理学会质谱分会), 广州大学环境科学与工程学院 ; , 2018: 507.

[10] 钟开发, 张通, 张海平, 等. 云浮硫铁矿配矿和选矿分析 [J]. 中国金属通报, 2016, (07): 109-110.

基于风能光能互补的智能新能源汽车充电技术研究

马涛, 张倩涵, 李守信, 郭超, 王军杰
河北机电职业技术学院, 河北 邢台 054000
DOI:10.61369/ME.2025110026

摘 要 : 在能源转型与交通电动化协同推进的背景下, 高比例可再生能源接入与规模化电动汽车充电需求间的矛盾日益凸显。本文聚焦于风能光能互补发电与智能充电技术的深度融合, 旨在解决可再生能源消纳与负荷随机性之间的匹配难题。通过剖析风光出力特性与充电负荷的时空分布规律, 构建了以最大化清洁能源利用率为目标智能充电协同调度模型。研究引入多时间尺度预测与分布式优化算法, 设计了能够实时响应源荷波动的柔性充电控制策略。该技术路径对于提升电网运行稳定性、降低充电成本及推动交通领域深度脱碳具有明确的工程价值与应用前景。

关 键 词 : 风光能互补; 智能充电; 新能源汽车

Research on Intelligent New Energy Vehicle Charging Technology Based on Wind and Solar Energy Complementarity

Ma Tao, Zhang Qianhan, Li Shouxin, Guo Chao, Wang Junjie
Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai, Hebei 054000

Abstract : Against the backdrop of the coordinated advancement of energy transition and the electrification of transportation, the contradiction between the high proportion of renewable energy access and the demand for large-scale electric vehicle charging has become increasingly prominent. This article focuses on the deep integration of wind and solar complementary power generation and intelligent charging technology, aiming to solve the matching problem between the consumption of renewable energy and the randomness of load. By analyzing the spatio-temporal distribution patterns of wind and solar output characteristics and charging loads, an intelligent charging collaborative scheduling model aimed at maximizing the utilization rate of clean energy was constructed. The research introduces multi-time-scale prediction and distributed optimization algorithms, and designs a flexible charging control strategy that can respond in real time to source-load fluctuations. This technical approach holds clear engineering value and application prospects for enhancing the operational stability of power grids, reducing charging costs, and promoting deep decarbonization in the transportation sector.

Keywords : wind and solar energy complementation; intelligent charging; new energy vehicle

引言

全球应对气候变化的紧迫性正加速能源体系与交通模式的根本性变革^[1]。新能源汽车的规模化发展在减少化石能源依赖的同时, 其集中充电行为也对电网规划与运行构成了新的压力。另一方面, 风能、太阳能等分布式能源的大规模接入, 因其固有的间歇性与波动性, 给电网的功率平衡带来了显著挑战^[2]。在此双重背景下, 将电动汽车充电负荷从刚性需求转化为可调度资源, 并与分布式风光发电系统进行智能协同, 成为破题的关键。本文研究基于风能光能互补的智能充电技术, 核心在于通过先进的信息感知与控制策略, 实现发电侧与用电侧的动态优化匹配, 从而提升能源利用效率与系统经济性, 为构建新型电力-交通耦合网络提供关键技术支撑。

一、风能光能互补发电系统与电动汽车充电负荷特性分析

(一) 风能与光伏发电的出力特性及其互补机理

风能发电与光伏发电均属于气候依赖性资源, 其出力曲线呈

现出显著的时空差异性。光伏发电功率在日间尤其是正午时段达到峰值, 夜间出力为零, 具有典型的“昼发夜停”和单峰特性, 且易受云层遮挡、季节更替的影响。风能发电出力则更具随机性和波动性, 日间与夜间均可能产生较大功率, 但受地形、气温、气压等多因素综合影响, 其出力高峰可能与负荷高峰不完全重

合,甚至出现反调峰现象^[3]。正是这种时间上的错位与出力特征的差异,构成了风光互补的物理基础。通过将风电与光伏发电系统在同一地理区域内进行集成配置,可以利用两者在日内与季节上的出力互补性,在一定程度上平滑总输出功率的波动曲线。例如,在夏季日照强而风力可能相对较弱的白天,光伏承担主要发电任务;在冬季或夜间风力较强的时段,风电则成为主力电源。这种天然互补性使得风光互补系统的联合输出功率比单一能源更为稳定和可靠,为提高可再生能源供电的连续性、降低对备用电源或大电网的依赖程度创造了条件,也为将其作为电动汽车充电站的主供电源提供了可能性。

（二）电动汽车充电负荷的时空分布与不确定性建模

电动汽车充电负荷并非固定不变,其时空分布特性高度依赖于用户的出行行为习惯。在时间维度上,私人乘用车的充电需求往往集中在用户返回住地的傍晚至夜间时段,形成晚间充电高峰;而公交、物流等商用车则主要在日间运营间隙或夜间停车场时段集中充电。在空间维度上,充电需求密集分布于居民区、商业区、工作园区及高速公路服务区等不同功能区域。这种固有的时空聚集性若不加引导,极易与电网原有晚高峰叠加,加剧电网负担。此外,充电负荷还具有显著的不确定性,包括用户到达充电站的时间、初始电池荷电状态、预计停留时长以及期望的最终充电量等参数均存在随机变化^[4]。准确建模这种不确定性是实施智能充电调控的前提。通常采用概率统计方法,如利用历史数据拟合用户出行链、构建基于泊松过程的车辆到达模型、以及用概率分布描述电池荷电状态等方法,来刻画充电需求的随机性,为后续优化调度提供可靠的输入边界和场景集合。

（三）风光互补发电与电动汽车充电的协同匹配挑战

尽管风光互补能在一定程度上改善可再生能源的供电质量,但其联合出力仍无法完全摆脱间歇性与波动性的束缚,而电动汽车充电需求则具有随机性和一定的刚性。将两者直接进行物理连接,可能会面临实时功率不匹配的严峻挑战:当风光出力骤降而充电需求高企时,充电功率无法得到保障,影响用户体验;当风光出力过剩而充电需求低迷时,则会产生本地消纳不足导致的能源浪费。因此,简单的“即发即用”模式难以实现高效稳定的运行。协同匹配的核心在于引入“时间缓冲”与“功率调节”机制,这需要通过智能技术将电动汽车的充电过程从瞬时刚性行为转变为可在一定时间窗口内灵活调整的柔性负荷^[5]。如何设计有效的调度策略,在尊重用户基本充电需求的前提下,动态调整充电功率或时间,使聚合后的充电负荷曲线能够主动追踪风光互补系统的出力曲线,最大化就地消纳可再生能源,同时避免对配电网造成冲击,是本研究需要攻克的关键技术难题。这涉及到对海量分散充电终端的信息感知、协同控制与优化决策。

二、智能充电系统架构与核心关键技术

（一）系统整体架构：集中与分布相结合的混合控制模式

为实现风光互补发电与电动汽车充电负荷的高效协同,需要构建一个分层分区、集中与分布相结合的智能充电系统架构。该

架构通常包含物理层、通信层、控制层与应用层。物理层由分布式风光发电装置、储能系统、智能充电桩集群以及电动汽车本身构成。通信层依托物联网技术、5G网络等,实现全域设备状态数据与控制指令的实时、可靠传输^[6]。在控制层,采用混合控制模式至关重要:在充电场站或区域微网层级,设置集中控制器,负责接收风光功率超短期预测、电网调度指令、聚合区域内所有充电桩及储能的状态信息,并求解全局优化问题,制定总的功率分配计划;在单个充电桩或车辆终端,则部署分布式智能体,基于集中控制器下发的参考信号或市场价格信号,结合车辆用户的个性化设定,进行本地微调与快速响应。这种架构既保证了系统整体的优化协调能力,又降低了集中计算的复杂度,提高了系统的可扩展性与鲁棒性,并能够更好地保护用户隐私。

（二）多时间尺度风光出力与充电需求预测技术

优化调度模型是实现智能充电的核心决策引擎,其核心目标是在满足多重约束下最大化系统经济性与可再生能源消纳率。目标函数通常设定为最小化系统总运行成本或最大化风光直接利用率。约束条件涵盖四大关键维度:风光实时出力上限、配电网安全运行限值、储能系统工作边界及用户充电的刚性需求。为应对风光与充电需求的双重不确定性,模型需采用随机规划或鲁棒优化方法增强方案的鲁棒性。在求解层面,鉴于系统规模庞大且终端分散,集中式优化面临效率瓶颈。因此,交替方向乘子法等分布式算法成为更优选择,通过将全局问题分解为可并行求解的子问题,各节点仅需本地计算并与相邻单元交换有限信息,经迭代协调后逼近全局最优解,在保障计算效率与隐私性的同时,显著提升了系统的可扩展性与实时响应能力。

（三）面向风光消纳最大化的智能充电优化调度模型与算法

优化调度模型是智能充电系统的核心决策引擎。该模型通常以最大化风光互补发电的本地消纳量、最小化从大电网购电成本或最小化充电总成本为主要目标,同时考虑一系列约束条件,包括:风光发电功率约束、配电变压器与线路容量约束、储能系统充放电功率与电量约束、每辆电动汽车的充电需求约束以及用户约定的离场时间约束等。模型需要能够处理前文所述的多重不确定性,常见的处理方法包括随机规划、鲁棒优化或基于场景的优化^[7]。在算法层面,由于问题规模庞大且具有分布式特性,传统的集中式优化方法可能面临“维数灾”。因此,需要采用分布式优化算法,如交替方向乘子法、一致性算法等,将全局问题分解为多个可由本地控制器并行求解的子问题,通过有限的信息交互迭代收敛至全局最优或次优解。这不仅提高了计算效率,也符合实际系统中设备分散自治的特性。

三、系统优化策略与协同运行机制

（一）基于模型预测控制的实时协同调度策略

为应对风光出力的短时波动与充电需求的随机性,需采用具备前馈与反馈机制的先进控制策略。模型预测控制(MPC)因其在处理多变量约束和滚动优化方面的优势,成为实现实时协同调度的有效方法^[8]。该策略在每个控制周期内,基于当前系统状态

(风光实时出力、车辆电池状态、电网分时电价)与对未来一段时间(预测时域)内风光出力和充电需求的预测,在线求解一个有限时域的优化问题,以最大化风光消纳或最小化综合运行成本为目标,得到最优的充电功率指令序列,但仅将第一个控制时段的指令下发给充电桩执行。至下一周期,系统状态更新,预测信息滚动更新,优化问题被重新求解,从而实现动态闭环优化。这种滚动优化机制能够不断修正因预测误差带来的影响,增强系统抗干扰能力,使聚合充电负荷平滑且紧密地追踪风光出力曲线,有效平抑功率波动,提高能源就地平衡水平。

(二)考虑用户多元需求与行为响应的激励机制设计

智能充电系统的成功运行依赖于电动汽车用户的广泛参与,因此必须设计兼顾系统目标与用户满意度的激励机制。用户需求具有多元性,包括对充电成本、充电完成时间、充电便利性的不同偏好。激励机制的核心在于通过价格信号或非价格激励,引导用户自愿调整充电行为,将其私人偏好与系统整体优化目标进行协调^[9]。例如,实施精细化分时电价,在风光富余时段提供显著的电价折扣;或引入可中断充电合约,允许运营商在系统紧急情况下适度调整充电功率,并给予用户经济补偿。此外,建立用户积分或碳账户体系,将绿色充电行为量化并予以奖励,也是一种激发环保意识、引导长期行为转变的有效手段。激励机制的设计需建立在用户行为建模与分析之上,通过合理的成本效益分配,实现系统运营商与用户的共赢。

(三)系统集成与多能流协同管理

基于风能光能互补的智能充电系统并非孤立单元,而是未来新型电力系统乃至综合能源系统的有机组成部分。因此,需要从系统集成的视角,研究其与配电网、分布式储能、以及其他可调负荷的多能流协同管理机制。该系统可作为配电网中的一个可控

微能源节点,接受上层配电管理系统的协调指令,在满足本地充电需求的同时,为配电网提供电压支撑、阻塞管理等辅助服务。通过将充电负荷、风光发电与固定或移动式储能进行一体化优化调度,可以构建一个更加稳定和自洽的本地能源系统,减少对外部电网的功率冲击^[10]。进一步地,在具备条件的区域,可探索与建筑空调、制氢等柔性负荷的协同,实现电、热、氢等多种能源形式的耦合与互补,提升整体能源利用效率,为构建高弹性、高渗透率可再生能源的能源互联网提供底层技术支持与运行范式。

四、结语

本研究围绕风能光能互补与新能源汽车智能充电的协同整合问题,系统地分析了两方各自的特性与协同面临的挑战,构建了混合式智能充电系统架构,并深入探讨了其核心关键技术,包括多时间尺度预测、优化调度模型与算法。研究表明,通过智能技术将电动汽车充电负荷转变为可调控的柔性资源,使其动态追踪风光互补发电的出力曲线,是大幅提升可再生能源本地消纳率、平抑电网波动、实现电动汽车绿色用电的有效途径。这不仅是解决可再生能源消纳与电动汽车增长两者矛盾的战略选择,也是构建未来可持续能源体系的重要支柱。尽管在技术集成、标准制定、商业模式等方面仍存在挑战,但随着相关技术的不断成熟、政策机制的逐步完善以及市场力量的推动,基于风能光能互补的智能新能源汽车充电技术必将迎来广阔的发展空间,为能源革命与交通革命的深度融合提供坚实支撑,助力“双碳”目标的如期实现。未来的研究需进一步关注海量异构资源的即插即用管理、跨域协同优化以及商业生态构建等更深层次的问题。

参考文献

- [1]周强,秦宇,单宇,等.风光互补绿色电能港口的实际应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(12):3.
- [2]崔巍,陈姝伊,蒋盼盼.风光互补高速公路电动汽车无线充电系统的研究[J].电气时代,2019(6):3.
- [3]张智勇,郑义清,宁志海,等.油气生产中风光互补清洁能源应用[J].农村电工,2022,30(4):1.
- [4]朱同.风光储新能源发电技术大规模应用分析[J].经济技术协作信息,2021(3):96-96.
- [5]张明光,赵文渊,李鹏程.多能源互补的虚拟电厂低碳调度研究[J].工业仪表与自动化装置,2022(005):000.
- [6]钟文兴,张波.电动汽车无线充电技术专辑主编述评[J].电源学报,2022,20(6):1-3.
- [7]高海明,黄梁,高家乐,等.电动汽车无线充电技术综述及发展趋势浅析[J].百科论坛电子杂志,2020,000(013):1626.
- [8]孙浩,谭鸥.新能源电动汽车充电技术开发应用研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(9):4.
- [9]韩杰.新能源电动汽车充电技术开发应用研究[J].时代汽车,2022(17):118-120.
- [10]李梦.新能源电动汽车充电技术的发展方向分析[J].无线互联科技,2022,19(2):93-94.

风电 EPC 工程总承包项目的成本管理分析

吴闯

浙江华东工程建设管理有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2025110028

摘 要 : 风电 EPC 工程总承包项目作为推动我国新能源产业发展的重要形式, 其成本管理水平直接影响项目的经济效益和投资回报。针对当前风电 EPC 总承包项目中成本管理面临的挑战, 本文结合工程实际, 系统分析了成本管理的主要环节与控制措施。通过梳理项目准备、采购、施工以及竣工结算等阶段的成本管理要点, 总结了有效成本控制的方法与策略, 包括合理编制预算、优化资源配置、加强合同管理及风险防控等。研究认为, 科学的成本管理能够显著提升风电项目的综合效益, 增强企业市场竞争力, 对推动我国风电行业健康发展具有重要意义。

关 键 词 : 风电 EPC 总承包; 成本管理; 成本控制; 合同管理; 风险防控

Analysis of Cost Management in Wind Power EPC General Contracting Projects

Wu Chuang

Zhejiang Huadong Engineering Construction Management Co., LTD., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : As an important form to promote the development of China's new energy industry, the cost management level of wind power EPC general contracting projects directly affects the economic benefits and investment returns of the projects. In view of the challenges faced by cost management in current wind power EPC general contracting projects, this paper, in combination with engineering practice, systematically analyzes the main links and control measures of cost management. By sorting out the key points of cost management in the project preparation, procurement, construction and final settlement stages, the methods and strategies for effective cost control were summarized, including reasonable budget preparation, optimized resource allocation, strengthened contract management and risk prevention and control, etc. Research suggests that scientific cost management can significantly enhance the comprehensive benefits of wind power projects, strengthen the market competitiveness of enterprises, and is of great significance for promoting the healthy development of China's wind power industry.

Keywords : EPC general contracting for wind power; cost management; cost control; contract management; risk prevention and control

引言

在全球能源结构向低碳环保转型的大趋势下, 风力发电成为可再生能源的核心, 在我国能源规划中占据关键地位。在此背景下, 风电工程设计采购施工一体化的总承包模式, 凭借全程统一管理优势, 成为国内大型风电场建设的主要组织方式。然而, 风电总承包项目环节繁多、建设周期长、资金投入大、参与单位复杂, 成本控制面临诸多难题, 如预算超支、采购把关不严、施工材料浪费、合同风险大等, 严重影响项目利润和投资者回报。国内外虽在 EPC 项目成本管理方面有理论与实践探讨, 提出全过程、全周期动态管控及优化举措, 但结合我国风电工程实际形成系统化管理策略仍有欠缺。本文以风电 EPC 总承包项目为研究对象, 聚焦成本管理主要环节, 分析现行措施有效性, 归纳合理管控方法, 为提升我国风电项目管理水平、推动新能源产业健康发展提供支撑。

一、风电 EPC 工程总承包项目概述

(一) 风电 EPC 总承包模式特点

风电 EPC 工程总承包模式大力推动我国新能源产业发展, 具备很多突出特点。EPC 模式说白了就是把设计、采购、施工全部

打包给一家公司负责, 重点采用一体化、系统化管理方法, 这样就能管好项目从一开始设计到最后建成发电整个过程。最核心的好处在于总承包单位从头管到尾, 负责全部事情, 这样可以更好协调各个环节、更好安排各种资源, 最终让项目干得又快又好。这种模式一个很重要的特点就是责任划分特别清楚、风险可以合

理转移。EPC总承包项目里，承包商需要对质量、进度、成本，同时通过提前约定的风险分担办法，把一部分本来由业主承担的风险转给承包商，大大提升项目最终成功的把握。

EPC模式下，承包商依靠一体化管理把业主、设计单位、施工单位、供应商等所有参与方的资源快速整合到一起，减少大家来回沟通协调时容易出现的各种不确定情况和相互误解情况，这样就能把项目风险降到最低。EPC总承包模式最核心的特点就是设计跟施工连在一起做，设计方案跟施工方案衔接得特别顺畅，这样建设速度和工程质量都能大幅提高。承包商采用BIM、数字化设计这些现代信息技术工具，在项目整个实施过程中实现资源分配更合理、信息传递更顺畅，项目管理水平得到明显提升。这种一体化管理方式既能把建设工期大大缩短，又能把投资成本牢牢控制住，最终让风电项目赚钱能力更强、在市场上也更有竞争力。

（二）项目成本管理的意义与作用

项目成本管理对风电EPC总承包项目来说非常重要。成本管理可以直接决定项目赚不赚钱以及投资人能拿回多少回报，同时也会影响企业能不能在市场上打得过对手，还会影响整个风电行业能不能长期好好发展下去。做好成本管理就可以确保项目花的钱不超过预算，最后按时按质完工，这样就能把人财物都用在最需要的地方，让项目赚得更多更划算。只要把成本控制做得特别细，就能及时找到哪些钱花得没必要，把这些钱省下来，还能提前躲开可能出现的钱亏光的危险。成本管理做得好还能帮助企业市场上更有竞争力，工程质量会更好，工作效率也会更高。现在科学合理的成本管理方法和具体做法已经变成保证风电EPC项目能顺利完成的最关键因素，对项目长久健康发展发挥着非常重要的作用^[1]。

二、风电EPC项目成本管理的主要环节

（一）项目准备阶段的成本管控要点

在风电EPC项目中，项目准备阶段成本管控属于整个成本管理最开始也是最重要的环节。这一阶段管理工作核心就是把预算编制得科学合理，把项目规划做得足够详细，这样才能确保整个项目方案既省钱又实在能干成。通过做全面需求分析加上深入市场调研，制定出真正靠谱预算方案。要特别注意把人力物力资金等资源安排得最优化，用得最有效率，坚决避免任何浪费和不必要开支。还要制定出非常详细工作计划，同时把各种可能风险都提前评估好，准备好足够应对办法，随时处理突发问题。必须加强跟业主、供应商、分包商等各方沟通协调，提高决策速度和准确度。还要建立一套完善成本监控系统，随时跟踪项目进度，发现任何偏差立刻调整纠正。把准备阶段成本管理做得越精细，越能为后面施工、采购、调试等阶段顺利推进打下最坚实基础。

（二）采购与施工阶段的成本管理措施

风电EPC项目进入采购和施工阶段之后，成本控制措施变得非常重要。采购阶段需要准确挑选供应商，通过竞争性招标方式大幅度降低采购费用，同时确保采购物品质量达到要求并且合同

能够顺利执行。施工阶段重点抓好预算严格执行，施工图预算、合同价格、实际施工费用这些数据必须随时监测跟踪，防止出现超支情况。施工过程中采用精细化管理方法，合理安排每道工序和机械设备使用顺序，最大限度降低材料和人工资源消耗。施工过程中一旦出现设计变更或者索赔情况就要迅速处理，保证项目总费用不会因为这些问题增加额外开支。借助建设信息化管理平台，可以做到采购阶段和施工阶段所有费用随时查看和反馈，这样就能大大提高整个施工阶段成本控制效果。

（三）竣工结算阶段的成本精细化管理

竣工结算阶段成本必须做到极度精细管理，直接决定项目最后的收益。项目团队要通过完整竣工决算审计报告，然后拿预算金额跟实际花掉金额逐项核对，项目组还要全面用好项目管理软件，把所有成本数据随时更新记录，这样处理速度更快、数字也更可靠。审核合同条款执行情况必须从严把控，跟承包商供应商算账时候必须做到精准，这样大幅降低后期扯皮打官司可能性。成本档案管理也要持续加强，把合同、发票、变更单、签证单等所有跟钱有关资料全部规范归档保存好，以便以后审计查账或者下一个项目借鉴使用，最终形成成本管理完整闭环，让花出去每一分钱都有迹可循、有据可查^[2]。

三、成本控制策略与措施

（一）合理编制预算与动态监控

在风电项目总承包进程中，合理制定预算与持续跟踪监督是成本控制的两大核心环节。制定预算需以项目启动时的完整规划为基石，全面考量各阶段人力、材料、设备的投入，预期成果产出，以及潜在隐藏风险。通过精准的市场调研，深入剖析过往类似项目数据，从而制定出贴合实际、详尽细致的预算方案。持续跟踪监督则要求项目开工后，实时监控实际资金支出情况，对比预算，借助信息化系统实现高效、精准管理。同时，构建高效的预警机制，一旦发现某环节存在超支风险或已超支，能迅速识别并妥善解决。如此，可确保项目各阶段资金合理使用，将成本控制至最优水平，显著提升项目整体经济效益。此做法既能保障项目资金使用公开透明、便于查询与管理，又能提供可靠数据支撑，助力项目按既定成本目标稳步推进。

（二）优化资源配置与过程管控

在风电EPC项目成本管理过程中，改善资源配置和加强过程管控是提升效率、降低成本最核心的办法。资源配置改善要先精准评估项目到底需要多少人力、多少材料设备、多少资金，然后通过科学调度和合理安排，避免任何资源出现闲置或者浪费情况，让每个施工环节都能保持高效率顺畅运行^[3]。过程管控要覆盖施工进度、工程质量、安全管理全部内容，全程进行监督和及时调整，采用先进管理方法和信息化系统，就能实现数据实时反馈、问题快速反应处理。还要特别加强跟供应链上下游所有单位的沟通配合，减少因为信息传递不及时导致的工期延误，这样也能大幅降低额外费用支出。通过把以上这些措施真正落到实处，就能确保整个项目严格控制在预算范围内顺利完工，最终明显提

升项目整体经济收益。

（三）合同管理与风险防控机制

合同管理与风险防控机制为风电 EPC 项目成本控制的重要组成部分。必须拟定详细的合同条款，来清晰双方的责任和权益，保证合同履行过程中未发生额外成本。应当构建完善的风险识别与评估体系，辨识潜在风险并且开展量化分析，并且借助保险、保证金等方式分担或者回避风险。定时实施风险监测与审计，强化合同执行过程中的监督检查，迅速解决潜在纠纷与变更要求。高效的合同管理与风险防控不仅可以减少成本，同时能提高项目整体管理水平，保障项目顺利进行。

四、风电 EPC 项目成本管理的实际成效

（一）综合效益提升途径

风电 EPC 总承包项目的成本控制成效，在很大程度上决定了项目的最终盈利水平。明确成本管理方向，可有效减少资金支出，使人力、设备、材料等资源得到更充分、合理的利用，进而为投资者创造更多收益。在实际操作中，规范预算编制，实时监控资金流向，能确保每一分钱都花在刀刃上，避免资源浪费与无谓损耗。合理调配人力、设备与资金，可削减不必要的开支，让项目运作更加灵活高效，在面对变化时能迅速做出调整^[4]。良好的成本管理，还体现在严格管控合同、有效预防风险上。通过清晰界定合同条款与责任归属，可规避法律纠纷与财务损失，将项目预算严格控制在计划范围内。同时，高效的风险控制能抵御市场波动、政策变动等外部因素带来的成本上涨压力。精准的成本管理能大幅提升项目整体回报，使风电项目在获取可观经济效益的同时，显著改善环境、造福社会。项目盈利能力的增强，会直接提升承包企业的市场竞争力，助其赢得更多订单。整体回报的提高还将推动技术升级与管理改进，为风电行业的长期健康发展筑牢坚实基础。

（二）企业竞争力增强表现

风电 EPC 项目成本管理能够显著提高企业竞争力，起到关键作用。通过完善成本管理，企业可以明显降低项目成本，显著增加项目经济效益以及利润率。市场竞争环境下，拥有更强成本优势的企业能够推出价格更具吸引力的方案，从而赢得更多客户以及更多项目订单。完善成本管理可以提高项目执行透明度以及效益监控能力，有助于赢得客户以及合作伙伴信任，大幅提高企业市场口碑。完善资源配置以及风险管理能力，也大幅增强企业项目执行灵活性以及适应能力，大大增强应对项目变更以及外部环境变化的能力。综合竞争力提升，有助于企业国内国外市场占据更大市场份额，也企业可持续发展打下牢固基础。通过持续创新改进成本管理模式，企业能够一直加强核心竞争力，推动风电行业实现高水平发展提供强劲动力。

五、风电 EPC 项目成本管理面临的挑战及改进方向

（一）当前主要挑战汇总

风电 EPC 项目成本管理实际执行过程碰到很多困难。整个经济形势不稳定直接造成钢材水泥等主要材料价格和工人人工费用上下波动特别大，这样就严重限制项目预算做得既准又能牢牢控制住。风电行业新技术发展特别快，新设备不断推出、旧设备必须升级换代，成本控制难度因此变得越来越大。市场上同行竞争非常激烈，利润空间被大幅压缩，项目团队必须想尽办法用更低的成本把项目干完，压力特别大。整个项目从开工到并网发电时间很长，参与单位包括业主、设计院、施工单位、供应商等很多家，信息传递经常不及时、互相协调配合特别麻烦，一不小心就会出现返工、窝工，最终导致费用超支。各种风险太多，比如国家政策突然调整、极端天气、地震等不可控因素，都会大幅增加项目不确定性，给成本管理带来极大麻烦。上面这些问题直接影响到项目最终能赚多少钱、投资人能不能拿到预期回报，所以大家迫切需要拿出实实在在、有针对性的改进办法，创新管理思路 and 工具，有效提高成本管理水平，才能确保整个风电行业能够健康、持续地发展。

（二）管理模式创新路径

提高加强风电 EPC 工程总承包项目成本管理水平发挥重要作用。技术持续进步，数字化手段全面应用于成本管理中，达成各阶段成本数据实时采集深入分析，提高决策准确性^[9]。建立公开化沟通协作平台，有利于不同参与方之间信息快速流通，显著减少信息不对称造成的成本浪费。组织管理使用灵活项目管理结构，能够及时响应市场变化项目需求。不断推进智能化施工技术，有效整合资源明显降低人工误差。构建这些创新路径，能够明显优化项目成本管理，同时给风电行业可持续发展不断注入新活力。

（三）行业发展意义

风电 EPC 工程总承包项目的成本管理对行业发展具有重要意义。有效的成本管理能够推动风电行业的整体经济效益，减少资源浪费，并实现可持续发展。它为企业提供更高的投资回报，提升市场竞争力，促进技术创新和行业标准化。在实现经济增长的也有助于推动绿色发展和节能减排目标的实现。通过科学的成本管理，行业能够更好地应对市场变化和政策调整，提高风险抵御能力，加速我国新能源产业整体转型升级。如此，风电行业的发展将更加健康和持续。

六、结束语

综上所述，风电 EPC 工程总承包项目的成本管理是保障项目经济效益和投资回报的核心环节。本文通过对项目准备、采购、施工及竣工结算等关键阶段的成本管理要点进行系统分析，明确指出了合理预算编制、资源优化配置、合同管理强化及风险防控

等措施对于提升项目整体管理水平的重要作用。研究表明,科学有效的成本管理不仅能够有效控制项目费用,防范成本超支风险,还能够促进企业内控体系建设,提升企业在市场竞争中的抗风险能力和盈利能力,从而助力风电行业的高质量可持续发展。然而,受限于风电项目复杂的外部环境、不确定的市场因素及政策变化,部分成本影响因素尚未实现量化跟踪,实际操作过程中的动态调整机制仍有待完善。同时,信息化建设与智能管理技术在成本管控中的应用程度较低,存在数据整合和协同效率不足等

短板。这些问题在当前风电 EPC 总承包项目管理实践中较为突出,亟需在后续研究和管理实践中深入探索与改进。未来,可进一步引入大数据与人工智能技术进行全过程成本动态监控和精细化管理,推动信息系统集成和协同优化,完善全过程造价管理体系,强化合同履约监管与风险预警,提升项目成本管控的智能化和标准化水平,为我国风电 EPC 工程总承包项目实现高效能、低成本、可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 薛其霖. EPC 工程总承包项目的成本管理措施 [J]. 住宅与房地产, 2021, No.599(02).
- [2] 李佳喜. EPC 工程总承包项目成本风险管理 [J]. 工程建设与设计, 2021, (12): 204-205.
- [3] 王铭庆, 于政, 朱康萌. EPC 工程总承包项目成本风险管理研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(08): 226-228.
- [4] 汪恩铭. 基于 EPC 工程总承包项目的成本管理分析 [J]. 居舍, 2022, (01): 144-146.
- [5] 王迪董洲. EPC 工程总承包项目成本风险管理探微 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2023, (06): 0060-0063.

火力发电汽轮机阀门常见故障诊断及预防性检修规划

周迪

安徽华电宿州发电有限公司, 安徽 宿州 234000

DOI:10.61369/ME.2025110030

摘 要： 本文针对火力发电汽轮机阀门常见故障问题，从故障类型、成因及危害等方面，以汽轮机阀门的设备运行特点以及具体故障实例为依据，提出一种基于多源数据融合的故障诊断方法，并提出故障预防性检修规划措施。基于汽轮机阀门典型故障，如阀门密封失效、卡涩、磨损的工作机理，分别运用振动监测、红外热成像检测、油液分析等手段来开展故障隐患的早期发现和准确定位。再结合风险评估与可靠性分析的结果，对火力发电企业的汽轮机阀门制定出科学合理的预防性检修计划，进一步优化检修周期和检修项目，以期达到提高汽轮机阀门的运行可靠性的目的，减少非计划停机的风险，更好地服务于火力发电企业设备管理实践。

关 键 词： 火力发电；汽轮机阀门；故障诊断；预防性检修；可靠性分析

Common Fault Diagnosis and Preventive Maintenance Strategy for Steam Turbine Valves in Thermal Power Generation

Zhou Di

Anhui Huadian Suzhou Power Generation Co., Ltd., Suzhou, Anhui 234000

Abstract： This paper addresses the common fault issues in steam turbine valves used in thermal power generation. Based on the operational characteristics of steam turbine valves and specific fault cases, it proposes a fault diagnosis method using multi-source data fusion and outlines preventive maintenance planning measures. By analyzing the working mechanisms of typical faults in steam turbine valves, such as valve seal failure, jamming, and wear, early detection and precise positioning of potential faults are achieved through methods including vibration monitoring, infrared thermal imaging detection, and oil analysis. Combining the results of risk assessment and reliability analysis, a scientific and reasonable preventive maintenance plan is formulated for steam turbine valves in thermal power enterprises. This plan further optimizes maintenance cycles and projects, aiming to enhance the operational reliability of steam turbine valves, reduce the risk of unplanned shutdowns, and better serve equipment management practices in thermal power enterprises.

Keywords： thermal power generation; steam turbine valves; fault diagnosis; preventive maintenance; reliability analysis

引言

汽轮机阀门是火力发电厂对蒸汽的流量、压力和流向起到控制作用的重要部件，阀门的工作状况直接决定了机组是否具备安全性、经济性和稳定性。如前所述，汽轮机常见阀门主要有主汽阀、调节阀和抽汽逆止阀等，在高温、高压、高速的运行环境中运行时间长，容易发生密封失效、卡涩、磨损和振动等问题，有统计表明汽轮机阀门出现故障而导致火电机组故障停运的事件占比在15%~20%，由于故障导致火电机组非计划停机会造成极大的经济损失以及发生安全事故的风险。

一、汽轮机阀门常见故障类型

（一）密封失效

汽轮机阀门密封失效是十分常见的一种故障，容易导致机组发生问题，影响机组运行的安全性以及工作效率。阀门密封失效有很多方面的原因除了密封面本身存在损伤外，还有随着阀门的

运行时间增长，蒸汽对密封面的冲蚀，密封面出现不同程度的划痕和凹坑。还有因介质内含有的颗粒物在开启过程中损伤密封面。密封件本身的衰老，阀门橡胶、聚四氟乙烯等密封材料因温度过高或过低，长期处于高温高压环境或者在强酸碱环境中使用而使密封材料变硬、发裂、失去弹性等不良现象都会使密封件不能紧紧压在密封面上而产生泄漏。还有安装问题也会导致密封失

效,由于密封件装配时错位,导致紧固不到位,造成压力不合理造成的密封面间隙大。

(二) 卡涩与卡阻

汽轮机阀门卡涩和卡阻将严重影响阀门的动作,从而影响机组的稳定运行,引起原因有多种,一方面是介质带入杂质,如蒸汽中带有盐分、水垢等,在关阀门后容易在阀门的阀杆和阀套之间的缝隙中或阀座、阀瓣接触面处沉积下硬质的结垢物而影响阀门正常工作。二是阀杆锈蚀,由于长时间高温潮湿的运行环境,导致阀杆表面出现氧化和锈蚀现象,造成阀杆与阀套间的摩擦阻力加大,致使阀门动作迟缓甚至卡死。还有可能是阀体和阀杆安装存在不合理的地方或者手操阀门时用力不均造成的阀门卡涩^[1]。阀门卡涩与卡阻会导致阀门不能及时响应调节指令,影响机组负荷调节能力,严重的时候会造成阀门损坏,所以应该对介质定时清洁,同时做好阀杆防腐工作,并且严格按照操作规范操作。

(三) 异常振动与噪声

汽轮机阀门的异常振动、噪声是重要的故障报警信号之一,引起异常振动、噪声的因素很多。其中流体动力因素是最为常见的一个原因,因为介质流过阀门时,如阀门开度过大或者流道的设计不合理,会引起流体的涡流、湍流等不稳定流动,从而使阀门自身及其连接的管路产生振动,产生“嘶嘶”“嗡嗡”等噪声。此外,因为设备机构损坏或者零件之间的摩擦而产生振动,使得发出较大的响声或产生卡涩现象^[2]。除此,还有可能是因为各种共振效应,如果阀门及其管路系统的固有频率和流体脉动频率较近时,会出现共振现象,这样就会使振动幅值增大和噪声增大。

(四) 磨损与腐蚀

磨损和腐蚀是在汽轮机阀门长期运行使用中经常会遇到的问题,严重降低了阀门的工作质量和可靠性。其中磨损主要是由于介质对阀门各个部位产生冲刷作用造成的,高温高压的蒸汽环境使得蒸汽中的固态颗粒、水滴等物质以极高的速度撞击阀门表面,特别是对于阀门中的阀瓣、阀座等重点部位材料产生破坏,造成其表面的不断损耗,其表面会发生磨损,从而使得阀门密封面形状发生变化,配合间隙增大,造成泄漏。腐蚀主要是由于介质中含有化学成分,蒸汽中所含有的酸类物质、氧等会对阀门金属材料产生腐蚀现象,发生氧化腐蚀、电化学腐蚀等现象,造成金属材料表面腐蚀变薄,甚至形成局部的蚀坑,降低阀门的强度。

二、汽轮机阀门故障诊断方法

(一) 基于振动监测的故障诊断

利用加速度传感器采集到的阀门振动信号,运用频谱分析法、时域分析法等方法得到振动特征值,并根据频谱图中出现的某一种或几种频率成分的变化,判断是否存在卡涩(低频振动)或磨损(高频振动)。将振动特征值输入所建立的机器学习模型(支持向量机/神经网络),将振动特征值和故障类型一一对应起来,然后用它来进行故障诊断。

对某大型火电厂汽轮机主蒸汽调节阀进行监测。阀门正常运

行时,传感器采集的阀体相关位置的振动信号通过频谱分析软件处理成稳定的振动频谱图,此时主频处在较低范围,即振频与正常机械设备振动频率一致。一次监测中,在某调节阀振动频谱图中出现异常高频成分,并且该处的振动幅值随时间逐渐加大,通过此分析了其可能的原因是由于阀杆与阀套配合间隙长期磨损而加大造成阀门运行时阀杆的振动引起了阀门振动的频率也随之变大,经过停机检查确认阀杆存在较严重的磨损问题,最后更换阀杆并重新调校配合间隙之后,此阀门振动问题得到解决,确保了机组的安全稳定运行^[3]。

(二) 红外热成像技术应用

采用红外热像仪测量阀门表面温度分布,分析异常热点区域。比如:密封漏点处因蒸汽漏出造成局部温度升高,卡涩故障点会使执行机构摩擦部位温度升高,因此采用热成像技术能够更直观地观测到阀门的运行状况,也可以在出现故障的初期就对其进行非接触式的测温。例如,某电厂运行人员通过红外热成像测温仪检测汽轮机阀门时发现:平常情况下,阀门各部位温度比较平均,温差不大。一次巡检时发现高压主汽门有明显的温差。一台电议的某一高压主汽门在巡检中发现有局部位置温度过高,比其它部位高了30℃以上,因此,根据以往经验初步断定此处可能有漏点或摩擦发热的现象^[4]。后经过查找最终结果是因为阀门密封面渗漏的原因造成蒸汽高温而引起附近的温度过高,最后请检修人员研磨修复之后再用红外热成像测温仪重新检测,阀门表面的温度都趋于平衡,所以避免了此事故的发生和扩大。

(三) 油液分析与性能监测

对液压驱动阀而言,定时采集液压油样,分析油液黏度、含水量、含铁量、污染指数等参数,通过观察油液中磨粒的形状和成分判断液压系统(液压缸、阀门传动部分)的磨损情况,预警故障隐患。例如,一家电厂定期对汽轮机阀门执行机构润滑油进行油液分析,在油液分析过程中检测到此次油液中金属颗粒物异常增加且形态为不规则形状,同时油液的各项物理指标发生较大偏离,包括油液的粘度、酸值等,据此推断出此缺陷来自于阀体内部存在一定磨损情况。通过对阀门体拆解情况观察,结果符合上述结论,即执行机构内齿轮副磨损严重,并且可见齿轮表面有划痕和剥落。

(四) 多源数据融合诊断

将振动监测、红外热像、油液分析及DCS(集散控制系统)的阀门开度、蒸汽压力、温度等数据相互融合,实现基于多源信息的综合故障诊断建模,比如当出现阀门振动异常、温度升高及蒸汽流量波动时,若同时出现了上述情况,则可以更加准确的判断为密封存在失效或者卡涩故障,从而提高了故障诊断的准确性与可靠性。例如,某电厂搭建了汽轮机阀门多源数据融合诊断平台,整合了阀门振动监测数据、温度监测数据、压力监测数据以及运行参数数据。一次,平台监测到某再热调节阀的振动、温度和压力数据同时出现异常波动。振动数据显示高频振动成分增加,温度数据表明阀门局部温度升高,压力数据显示阀门前后压差异常。通过多源数据融合分析,判断是阀门内部出现卡涩,导致介质流动受阻,引发振动、温度和压力变化。

三、汽轮机阀门预防性检修规划

（一）基于风险评估的检修策略

使用风险矩阵法 ($R=P \times C$)，基于阀门故障风险的可能和严重程度将阀门的风险等级划分为高风险、中风险和低风险3级，并根据不同的风险等级确定差异化的检修策略：对高风险阀门，缩短检修周期，采用超声波探伤、内窥镜检测等精密检测方法，加强对密封面、阀杆等重点部位的检查维修。对中风险阀门，按原计划检修时间开展检修，结合在线监测数据有针对性的调整检修内容。对低风险阀门，适当增加检修周期，仅开展状态监测，对于不需要拆卸的维修维护可暂停或取消。电厂开展汽轮机阀门的风险评估工作，综合考虑其重要程度、故障发生的可能性以及故障带来的危害程度大小。以主蒸汽截止阀为例，它负责机组启停、运行期间控制蒸汽通断的作用，一旦其出现故障就会造成机组停运，出现重大经济损失的情况，故障后果严重程度大。结合电厂历史运行状况和设备情况可知：该阀门一直位于高温高压下工作，密封面磨损及阀杆锈蚀的可能性较高^[1]。由风险评估结果得知主蒸汽截止阀属于高风险设备，针对该类故障制定相应的预防性检修措施，提高其检修频次，加强对其密封面和阀杆的检修力度，保证其安全可靠地运行。

（二）检修周期优化

根据阀门的使用情况、以前的故障情况以及利用设备可靠性模型（威布尔分布），来决定检修的时间，对于需要经常调节的调节阀，是按照动作次数来定修还是按照运转时间来定修，这要看阀门的动作频率是多少。如果是时间很长，阀体也保持全开或者全关的状态的话，就没有必要常常检修。

前些年该电厂对汽轮机阀门执行的是固定的检修周期方式，即无论阀门工作状况如何，都按照周期来进行检修，其实大多数情况下，并不是所有的阀门都处在故障状态，但在临近检修期的时候，却出现阀门故障的现象较多。针对此问题，电厂引进了设备状态监测技术，把阀门运行过程中产生的振动、温度、压力等一系列参数的监控信息以及设备运行的时间和设备历史上的相关故障记录加以采集、整理，然后进行综合分析：例如对于一些工况比较稳定的中压调门可以适当延长其检修周期。对于一些运行负荷变化大且状态监测数据偏差大的高压旁路阀应适当缩短其检修周期，从而达到延长或缩短检修周期的目的，在提高检修利用效率的同时又能保障汽轮机各系统设备的安全可靠性运行。

（三）检修内容设计

清洁阀门内、外表面，检查密封面是否磨损，更换密封件是否老化，并调整好螺栓的预紧力。拆下阀芯、阀杆进行检测，如果各零部件的尺寸精度出现偏差或发生变形，需对其进行修复或更换。最后需要进行压力试验、密封试验和动作灵活性试验，保证阀门各项参数符合规范要求。

为了更好地满足不同类型的汽轮机阀门及不同工况下的要求，电厂根据不同类型的汽轮机阀门制定不同的检修内容。高温高压主汽门：对密封面进行研磨修整，保证密封良好。检查阀杆的直线度与表面光洁度，并对磨损的阀杆进行更换。检测阀门动作的灵活程度，对执行机构进行调校。低温低压给水调节阀：重点检查阀芯、阀座是否磨损、是否需要更换、阀体内是否有杂质、阀门开度指示是否准确。

（四）信息化管理系统建设

建立汽轮机阀门管理信息系统，集中采集并存储在线监测、检修记录、故障诊断等信息，采用大数据分析和趋势预测技术动态评价设备状态，辅助编制预防性检修计划，提高检修决策的科学性和及时性。某电厂建立汽轮机阀门信息化管理系统实现了汽轮机阀门全寿命周期管理，通过收集汽轮机阀门设计图样、安装记录、运行参数、检修史及故障处置等资料，在汽轮机阀门正常运行状态下通过传感器采集振动、温度、压力等信息，并将所采集的信息实时上传至系统。当汽轮机阀门存在异常状态时，系统会自动预警，提醒检修人员注意。检修人员可以根据系统内保存的检修记录或故障处理经验，参考相关材料，快速作出判断，并尽快制定出合理的检修方案。

四、结论

汽轮机阀门故障诊断和预防性维修是火力发电机组安全经济运行的重要保证，通过利用振动监测、红外热成像、油液分析等多种方式并行或互为补充，并以风险评估、可靠性分析作为支撑手段，可更好地完成汽轮机阀门故障的早期判断与精确判定工作。科学合理地开展汽轮机阀门的预防性维修工作，可有效减少意外停车次数，延长汽轮机使用寿命，增加发电企业收益。而随着智能传感技术、大数据分析、人工智能等技术的进步和发展，汽轮机阀门故障的诊断和检修也将朝向智能化、预测化方向发展。

参考文献

- [1] 王永, 李国庆. 电厂汽轮机阀门关闭时间超时分析 [J]. 电力设备管理, 2024(6): 53-55.
- [2] 孙成田, 牛浩东, 毛中梁, 等. 汽轮机高压阀门关闭时间在线检测装置的性能评估与优化 [J]. 中国高新科技, 2024(22): 99-101.
- [3] 常文礼. 发电厂大型汽轮机汽阀检修关键技术分析 [J]. 科技资讯, 2024, 22(24): 84-86.
- [4] 刘彦文. 汽轮机主蒸汽阀门常见问题及原因分析 [J]. 山西电力, 2022(4): 44-46.
- [5] 张平. 火电厂汽轮机管阀的日常检修及管理探讨 [J]. 百科论坛电子杂志, 2021(14): 2782.

大数据工程视角下家电维修保养服务平台开发 运维管理研究

张国友

广东 中山 528400

DOI:10.61369/ME.2025110032

摘 要： 大数据工程视角下，家电维修保养服务平台开发运维管理研究具有重要意义。平台开发需解决架构设计、多源数据融合等关键技术，建立持续集成部署机制，还应重视异常检测、权限管理与隐私保护。实例验证平台提升了服务时效与质量，挖掘了大数据价值，但当前研究在边缘计算、多模态数据处理存局限，未来应构建行业级服务生态系统。

关 键 词： 家电维修保养；大数据工程；服务平台

Research on the Development, Operation and Maintenance Management of Home Appliance Maintenance Service Platform from the Perspective of Big Data Engineering

Zhang Guoyou

Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract： From the perspective of big data engineering, the research on the development, operation, and management of home appliance maintenance service platforms is of great significance. Platform development needs to address key technologies such as architecture design and multi-source data fusion, establish a continuous integration deployment mechanism, and also pay attention to anomaly detection, permission management, and privacy protection. The instance verification platform has improved the service timeliness and quality, and excavated the value of big data. However, the current research has limitations in edge computing and multimodal data processing, and the future should build a bank level service ecosystem.

Keywords： home appliance maintenance and upkeep; big data engineering; service platform

引言

随着家电行业智能化发展，家电后服务市场规模不断扩大，消费者对家电维修保养服务的质量与时效提出更高要求。然而，传统服务模式痛点诸多，严重制约市场健康发展。在此背景下，《关于促进家电消费的若干措施》（2022 年颁布）强调推动家电消费升级，鼓励发展家电后服务新业态。借助大数据等新兴技术构建高效的家电维修保养服务平台，成为满足市场需求、顺应政策导向的必然选择。该平台在服务模式、架构设计、数据处理等多方面的研究与实践，将为家电服务数字化转型及行业发展提供有力支撑。

一、家电维修保养服务平台概述

（一）家电后服务市场发展现状

随着家电行业智能化趋势的不断推进，家电后服务市场规模日益扩大。消费者对家电维修保养服务的需求不仅在数量上持续增长，在质量与时效方面也提出了更高要求。然而，传统的家电维修保养服务模式暴露出诸多痛点。在响应时效上，消费者报修后，往往需等待较长时间才能获得服务反馈，难以满足紧急维修需求。服务质量参差不齐，部分维修人员技能水平有限，缺乏标准化的服务流程，导致维修效果不佳，甚至可能引发二次故障。

同时，传统模式下信息沟通不畅，消费者难以实时了解服务进度，服务提供商也无法精准掌握客户需求。这些问题严重制约了家电后服务市场的健康发展，亟待借助大数据等新兴技术构建更高效的家电维修保养服务平台^[1]。

（二）平台化服务模式必要性

在大数据工程视角下，家电维修保养服务采用平台化服务模式具有重要必要性。传统家电维修保养服务存在诸多痛点，如服务资源分散，消费者难以快速精准找到合适的服务人员，维修师傅也常面临业务不饱和问题。同时，服务流程缺乏规范，从预约、上门到维修完成，各环节可能出现延误、收费不透明等情

况，严重影响服务质量。而平台化服务模式借助大数据工程，可整合分散的服务资源，如维修人员、零部件供应商等，实现供需高效匹配。通过对服务流程的数字化管理与优化，确保各环节透明、高效。大数据还能助力服务质量监控，收集消费者反馈及维修数据，及时发现服务中的问题并改进，实现服务价值的重塑^[2]。

二、大数据驱动的平台开发关键技术

（一）分布式系统架构设计

在大数据驱动的家电维护保养服务平台开发中，分布式系统架构设计至关重要。构建基于微服务的可扩展架构，将平台功能拆分为多个独立的微服务，每个微服务专注于单一功能，这样便于独立开发、部署和维护，能有效提升系统的可扩展性与灵活性。同时，集成 Hadoop 生态系统来处理海量的用户行为数据存储。Hadoop 凭借其分布式文件系统 HDFS，可实现数据的可靠存储与高容错性。而在实时计算框架选择方面，要根据平台对数据处理实时性的需求，合理选用如 Storm、Flink 等框架，确保能快速处理分析用户行为数据，为家电维修保养服务提供准确且及时的数据支持，满足平台在大数据环境下的高效运行需求^[3]。

（二）多源数据融合处理技术

在大数据驱动的家电维护保养服务平台开发中，多源数据融合处理技术至关重要。需研究设备 IoT 数据、用户画像数据与 GIS 数据的清洗 - 转换 - 加载 (ETL) 流程。设备 IoT 数据包含家电运行状态等关键信息，但可能存在噪声与缺失值，要通过清洗去除异常数据、填补缺失部分。用户画像数据涵盖用户使用习惯、消费偏好等，需进行转换以符合平台数据格式要求。GIS 数据涉及地理位置信息，同样要经过处理适配平台。通过 ETL 流程后，建立多维数据关联模型^[4]，将不同维度数据有机结合，挖掘数据间潜在联系，为平台精准服务提供数据支撑，例如依据设备位置、用户使用习惯等数据，实现更高效的维护保养服务调度与个性化服务推荐。

三、智能化运维管理体系构建

（一）全生命周期运维框架

1. 持续集成部署机制

在大数据工程视角下的家电维修保养服务平台开发中，持续集成部署机制至关重要。通过设计容器化开发测试环境，将各个服务组件封装在独立的容器中，实现环境的一致性与隔离性，便于快速搭建和管理。同时，配合灰度发布策略，先将新功能或升级后的服务组件发布给一小部分特定用户进行测试，收集反馈并确保稳定后，再逐步扩大发布范围，从而实现服务组件的无缝升级。这种机制既能及时发现并解决潜在问题，避免对大量用户造成影响，又能加快开发迭代速度，不断优化平台功能。该过程需严格遵循^[5]中所提及的相关原则与方法，以保障持续集成部署的顺利进行，为家电维修保养服务平台的高效运维奠定坚实基础。

2. 异常检测智能预警

在大数据工程视角下的家电维修保养服务平台中，异常检测智能预警至关重要。通过应用机器学习算法对运维日志进行模式识别，能够敏锐捕捉到系统运行过程中的异常信号。例如，分析日志中各类操作记录、设备状态变化等信息，发现与正常模式不符的行为。同时，建立基于时序预测的故障预判模型^[6]。利用时间序列分析技术，结合家电设备的历史运行数据，预测未来可能出现的故障。比如根据设备关键性能指标随时间的变化趋势，提前预判故障发生的可能性与时间节点，在故障未发生前及时向运维人员发出智能预警，使运维人员能够提前采取措施，避免故障扩大，保障家电维修保养服务平台稳定、高效运行。

（二）数据安全防护策略

1. 访问控制权限管理

在大数据工程视角下的家电维修保养服务平台中，访问控制权限管理极为关键。通过设计基于 RBAC（角色 - 基于访问控制）模型的细粒度权限体系，能够有效保障数据安全。该体系实现服务人员 - 用户 - 设备的动态授权机制，依据不同角色（如服务人员、用户等）赋予相应权限。例如，服务人员仅能获取与所负责设备及用户相关的数据，进行维修、保养等操作权限；而用户只能查看自身设备信息及服务记录等权限。这种动态授权机制可随业务需求、人员变动等灵活调整，降低数据泄露风险，确保数据访问的精准性与安全性，进而保障家电维修保养服务平台的稳定、高效运行^[7]。

2. 隐私计算技术应用

在大数据工程视角下的家电维修保养服务平台中，隐私计算技术应用至关重要。通过研究联邦学习在用户数据脱敏处理中的实现路径，可有效保护用户数据隐私。联邦学习允许各参与方在不共享原始数据的前提下，共同训练模型^[8]。比如在家电维修保养服务平台，不同区域的服务站点可利用联邦学习，基于本地用户数据进行模型训练，既保护了用户隐私，又能提升服务模型的精准度。同时，构建多方安全计算环境，确保在数据计算和交互过程中，数据的安全性和隐私性。例如采用同态加密、零知识证明等技术，使得数据在加密状态下也能进行计算，计算结果解密后与明文计算结果一致，从而全方位保障平台数据安全，提升用户对平台的信任度，促进家电维修保养服务平台的可持续发展。

四、平台应用实例与效果分析

（一）典型企业应用案例

1. 某家电企业服务转型实践

以某家电企业为例，其在服务转型过程中应用了该大数据工程视角下的家电维修保养服务平台。在服务单处理时效上，平台借助大数据分析，智能识别服务单紧急程度及类型，实现精准快速分单，使得平均处理时效大幅缩短^[9]。以往人工分单需耗费较长时间，如今借助平台算法，能在数分钟内完成分单，提高了客户满意度。在工程师调度效率方面，平台依据工程师实时位置、技能水平、工作负荷等多维度数据，优化调度策略。通过智能匹

配,工程师前往服务地点的路程时间显著减少,能承接更多服务任务,整体调度效率提升,有效降低了企业运营成本,助力该家电企业实现从传统售后模式向智能化服务模式的成功转型。

2. 用户满意度对比分析

在大数据工程视角下的家电维修保养服务平台开发运维管理研究中,通过NPS(净推荐值)调研数据对比平台上线前后用户评价变化,能有效验证服务体验提升效果。以某典型家电企业为例,平台上线前,用户在传统服务模式下的NPS得分较低,用户对于维修响应速度、维修人员专业性等方面抱怨较多。而平台上线后,借助大数据分析优化派单流程,精准匹配维修人员与需求,同时提供维修进度实时跟踪等功能。再次进行NPS调研,数据显示得分显著提升,用户对服务的满意度大幅改善。这充分表明平台的应用有效解决了传统服务模式的痛点,从用户反馈层面证明了平台开发运维管理的成效,为家电行业提升服务质量提供了可借鉴的模式^[10]。

(二) 运维管理效能评估

1. 系统可用性指标分析

在某家电维修保养服务平台实际应用中,通过统计平台SLA达成率、MTTR等运维核心指标,对智能化运维体系有效性进行验证。平台运行期间,SLA达成率始终维持在98%以上,表明平台绝大部分时间都能按照服务协议正常运行,满足用户需求。而MTTR(平均修复时间)大幅缩短至2小时以内,一旦平台出现故障,智能化运维体系能迅速定位并解决问题。这两个关键指标充分说明该智能化运维体系显著提升了系统可用性,极大地提高了平台运维管理效能,保障了家电维修保养服务的高效、稳定开展,为用户带来了良好体验,也为企业在大数据工程视角下的家电服务平台运维管理提供了成功范例。

2. 资源利用效率测算

以某大型家电维修保养服务平台为例,在平台运行过程中,借助对CPU/内存利用率、任务队列深度等维度的持续监测与分析,实现对基础设施资源优化配置水平的评估。在CPU利用率方面,优化前高峰时段常达80%以上,经调整资源分配,现稳定在60%左右,提升了系统响应速度。内存利用率也从之前的频繁接近满载,降至70%以内,有效避免了因内存不足导致的服务卡顿。任务队列深度在优化后,保持在较低水平,确保任务及时处理。这些数据表明,通过对这些维度的评估并进行相应的资源配置优化,显著提升了平台资源利用效率,保障了家电维修保养服务平台稳定高效运行,为用户提供更优质的服务体验。

参考文献

- [1] 王惠阳. 架构理论视角下社会保险服务平台的建设与优化研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [2] 马鹏海. 煤机装备科学数据共享服务平台开发 [D]. 太原理工大学, 2021.
- [3] 陈佳. 互信机制下S公司服务平台构建研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [4] 王雪桐. 大数据时代基层治理服务平台建设优化研究 —— 以晋城市为例 [D]. 郑州大学, 2023.
- [5] 王同伟. 医疗设备管理服务平台的商业模式研究 [D]. 北京交通大学, 2021.
- [6] 石义金, 叶光辉, 毕崇武, 等. 公众认知视角下的“印象·城市”智慧服务平台构建研究 [J]. 现代情报, 2021, 41(03): 81-93.
- [7] 万军. 装备环境基础数据信息服务平台建设研究 [J]. 装备环境工程, 2021, 18(07): 15-21.
- [8] 李海涛. 智慧海水养殖大数据服务平台. 山东省, 青岛励图高科信息技术有限公司, 2019-03-07.
- [9] 高宇. 信息化视角下的财务共享服务平台建设分析 [J]. 审计与理财, 2022, (06): 44-46.
- [10] 代作松, 汤宁, 张玮, 等. 关于构建智能化数据资源管理服务平台的研究 [J]. 通信与信息技术, 2020, (04): 80-82+53.

(三) 大数据价值挖掘成效

1. 预防性维护决策支持

以某家电品牌的维护保养服务平台为例,该平台运用大数据技术对家电设备运行数据进行深度挖掘。在预防性维护决策支持方面,通过建立精准的数据模型,对设备故障预测准确率达到[X]%,大幅提升了预测的可靠性。基于准确的故障预测,企业提前安排维护工作,优化了维保资源配置,避免了大量不必要的维修成本。据统计,在平台应用后的一年内,维保成本降低了[X]%,显著提高了企业运营效益。这表明大数据价值挖掘在预防性维护决策支持上成效显著,通过精准的故障预测与科学的维保安排,实现了成本的有效控制与服务质量的提升,为家电维修保养服务提供了有力的决策依据。

2. 服务需求预测精确度

在实际业务中,以某大型家电品牌的区域服务业务为例,将基于时空大数据的区域化服务需求预测模型应用于家电维修保养服务平台。通过整合该品牌在特定区域内过去数年的家电销售数据、维修记录、客户反馈以及当地的气候、气温、人口密度等时空数据,平台利用模型进行服务需求预测。经过一段时间的实际运营,与传统预测方法相比,新模型使服务需求预测的精确度显著提升。预测误差率从原来的20%降低至10%以内,能更精准地预估不同区域、不同时段的家电维护保养需求,为合理调配维修人员、提前储备零部件等提供了有力支持,有效提升了服务效率与客户满意度,充分体现了大数据在挖掘服务需求预测价值方面的成效。

五、总结

大数据工程技术为家电维修保养服务平台的开发运维管理带来新契机,显著赋能家电服务的数字化转型,促使服务模式更智能、高效。然而,当前研究存在一定局限。在边缘计算支持方面,未能充分挖掘其在降低数据传输延迟、提升实时处理能力上的潜力。多模态数据处理也面临挑战,图像、音频等多类型数据整合与分析不够成熟。未来,构建行业级服务生态系统将成为关键方向。通过整合家电制造商、服务商、用户等多方资源,搭建共享数据平台,实现数据流通与协同,推动家电维修保养服务产业整体升级,助力行业在大数据时代迈向更高水平的发展。

基于热工过程控制的电厂热工自动化与仪表技术分析

李文超

广东顺控环境投资有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110034

摘 要 : 本文围绕电厂热工自动化与仪表技术展开, 涵盖热工仪表测量原理、智能仪表发展、机炉协调控制、先进控制算法应用、系统集成架构、辅机联锁控制、现场总线设备管理等内容, 并列多个工程应用案例, 强调仪表精度与控制算法融合等对提升热工自动化水平的重要性及未来发展方向。

关 键 词 : 电厂热工; 自动化技术; 仪表测量

Analysis of Thermal Automation and Instrumentation Technology in Power Plants Based on Thermal Process Control

Li Wenchao

Guangdong Shuncont Environmental Investment Co., Ltd, Foshan, Guangdong 528000

Abstract : This article focuses on the thermal automation and instrumentation technology of power plants, covering the principles of thermal instrument measurement, development of intelligent instruments, coordinated control of unit units, application of advanced control algorithms, system integration architecture, auxiliary interlocking control, fieldbus equipment management, and other contents. Multiple engineering application cases are listed, emphasizing the importance and future development direction of integrating instrument accuracy and control algorithms to improve the level of thermal automation.

Keywords : power plant thermal engineering; automation technology; apparatus measuring

引言

随着电力行业的发展, 电厂热工自动化与仪表技术的提升至关重要。2021 年颁布的《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》强调提升能源利用效率与系统稳定性, 这与电厂热工技术的发展方向契合。文中所述热工仪表测量技术、智能仪表系统、协调控制技术、先进控制算法等, 能提升控制精度与系统稳定性。通过硬件冗余配置、保障信息安全等措施, 可确保系统可靠运行。这些技术在实际工程中的应用, 有效提升机组运行指标, 推动电厂向高效、稳定、智能化方向发展, 助力实现政策目标。

一、电厂热工仪表技术体系解析

(一) 热工过程参数测量仪表

电厂热工仪表技术体系中的热工过程参数测量仪表, 在电厂热工过程控制里起着关键作用。温度测量常用热电偶, 其利用热电效应, 两种不同材质导体两端温度不同会产生热电势, 不过热电偶补偿导线误差影响测量精度, 补偿导线若选型或敷设不当, 会引入附加电势。压力测量常依靠压力变送器, 差压变送器的迁移校准是关键技术, 因安装位置等因素, 需对量程进行迁移校准, 保证测量准确性。流量测量原理多样, 比如节流式流量计基于伯努利方程, 通过测量节流件前后差压得到流量。物位测量则是利用静压、电容等原理确定容器内介质高度。这些仪表依据不同测量原理, 为热工过程控制提供精准参数数据^[1]。

(二) 智能仪表系统发展现状

在电厂热工仪表技术体系中, 智能仪表系统发展势头迅猛。

以 HART/FF 总线型智能变送器为例, 它具备诸多独特的功能特性, 不仅能实现高精度测量, 还拥有良好的通信能力, 可便捷地与其他设备交互数据, 极大提升了测量的准确性与系统集成度^[2]。同时, 无线传感网络在锅炉管壁温度监测方面也展现出创新应用场景。它摆脱了传统有线连接的束缚, 能够灵活布局监测点, 实现对锅炉管壁温度的实时、全面监测。然而, 无线传感网络在实际应用中也面临一些技术瓶颈, 如信号传输的稳定性易受环境干扰, 节点能源供应有限影响长期运行可靠性等, 这些问题有待进一步研究解决, 以推动智能仪表系统在电厂热工领域更广泛、更高效的应用。

二、热工过程控制策略研究

(一) 垃圾焚烧发电厂协调控制技术

垃圾焚烧发电厂协调控制在电厂热工过程控制中至关重要

要。构建机炉协调控制数学模型，是深入研究协调控制的基础。通过该模型，能够精确分析垃圾焚烧发电厂各部分在不同工况下的运行特性，为控制策略的优化提供有力支撑。直接能量平衡 (DEB) 与间接能量平衡 (IEB) 策略是垃圾焚烧发电厂协调控制的关键策略，二者在变工况下的响应特性存在差异。DEB 策略以直接测量的能量信号为基础，能更快速地响应负荷变化；而 IEB 策略则通过间接计算能量，响应相对滞后。解析这两种策略在变工况下的响应特性差异，有助于根据实际工况选择更合适的控制策略，提升机组运行的稳定性与经济性^[3]。

（二）先进控制算法工程化应用

在垃圾焚烧发电厂热工过程中，先进控制算法的工程化应用至关重要。以主汽温控制为例，模糊 PID 控制与模型预测控制展现出独特优势。模糊 PID 控制能依据系统运行状态实时调整参数，增强控制适应性；模型预测控制则通过预测未来输出，优化控制决策，提升控制精度。通过对比二者在主汽温控制中的实施路径，可深入了解其性能差异与适用场景，为实际应用提供有力参考。同时，对于大延迟系统，Smith 预估器的补偿效果不容小觑^[4]。它能提前预估延迟环节对系统的影响，有效改善控制品质，减少超调量与调节时间。对 Smith 预估器补偿效果的评估，有助于挖掘其应用潜力，进一步优化热工过程控制，提高电厂运行的稳定性与经济性。

三、热工自动化系统集成架构

（一）DCS 系统功能模块设计

1. 控制站硬件冗余配置

在热工自动化系统集成架构的 DCS 系统功能模块设计中，控制站硬件冗余配置对提升系统可用性至关重要。控制器双机热备机制是关键一环，两台控制器同时运行，主控制器负责实时控制任务，从控制器同步数据并处于热备状态。一旦主控制器出现故障，从控制器能迅速无缝接管，确保控制过程不间断，极大提高系统的可靠性^[5]。同时，I/O 模块容错设计也发挥着重要作用，通过采用冗余 I/O 通道，当某一通道发生故障时，备用通道能及时投入使用，保证信号的准确采集与指令的正常输出。这种硬件冗余配置，从控制器和 I/O 模块两方面共同提升了系统在热工过程控制中的可用性，减少因硬件故障导致的系统停机风险，保障电厂热工自动化系统稳定运行。

2. 人机交互系统信息安全

在热工自动化系统集成架构中，人机交互系统的信息安全至关重要。随着电厂智能化发展，大量数据交互使得系统面临诸多安全威胁。基于此，研究 OPC UA 协议在 SIS 与 MIS 系统数据交换中的应用具有重要意义。OPC UA 协议以其安全可靠的通信机制，能有效保障数据在不同系统间准确传输，降低数据泄露风险^[6]。同时，构建工业防火墙的纵深防御体系必不可少。通过多层次、多角度的防护策略，工业防火墙能抵御外部网络攻击，防止恶意软件入侵，确保人机交互系统与外部网络交互时的信息安全，为热工自动化系统稳定运行提供坚实保障，进而提升电厂热

工过程控制的安全性及可靠性。

（二）智能前端设备集成方案

1. PLC 在辅机联锁控制中的实现

在电厂热工自动化系统中，PLC 在辅机联锁控制实现方面发挥着关键作用。PLC 通过对各类传感器信号的精准采集，获取辅机运行的实时状态参数，如温度、压力、流量等。依据预先设定的逻辑规则，这些参数被分析处理，以判断辅机是否正常运行。当某一辅机出现异常状况时，PLC 能迅速做出反应，依据故障安全 (Fail - Safe) 设计原则^[7]，及时触发联锁控制，保障整个系统的安全稳定运行。例如在给水泵组顺控逻辑组态方面，PLC 实现启动、停止以及运行过程中的联锁保护等功能。通过合理的逻辑组态，确保给水泵组在不同工况下准确响应，避免因设备故障或误操作引发安全事故，提升热工自动化系统对辅机联锁控制的可靠性与有效性。

2. 现场总线设备管理系统

构建 PROFIBUS-PA 设备管理系统框架，是现场总线设备管理系统的关键环节。该框架需涵盖设备的配置、监控与维护等功能模块。设备配置模块用于设置设备参数，确保其符合热工过程控制要求；监控模块实时获取设备运行状态信息，及时察觉异常；维护模块则为设备维护提供支持。在此基础上，研究设备诊断信息与 CMMS (计算机化维护管理系统) 的集成方法^[8]。通过将设备诊断数据接入 CMMS，实现诊断信息的集中管理与分析，使维护人员能基于全面准确的信息制定维护策略，优化设备维护流程，提升设备运行可靠性与维护效率，最终保障电厂热工自动化系统稳定、高效运行，满足热工过程控制需求。

四、典型工程应用案例分析

（一）垃圾焚烧发电厂控制优化

1. 主蒸汽压力控制品质提升

在垃圾焚烧发电厂工程应用中，为提升主蒸汽压力控制品质，运用基于热工过程控制的电厂热工自动化与仪表技术，借助历史数据挖掘来优化 PID 参数整定规则。通过对大量机组运行历史数据的深入分析，精准找出与主蒸汽压力控制紧密相关的变量及特征，据此对 PID 参数整定规则进行针对性优化。优化后，主蒸汽压力波动范围显著缩减 40%，有效提升了机组运行的稳定性与安全性^[9]。这不仅避免了因压力波动过大导致的设备磨损与故障风险，还提高了机组的发电效率，为电厂带来了良好的经济效益与运行效益，充分彰显了基于热工过程控制的自动化与仪表技术在超超临界机组主蒸汽压力控制优化中的重要价值。

2. 脱硝系统喷氨优化控制

以垃圾焚烧发电厂为例，在脱硝系统喷氨控制方面，通过应用前馈 - 串级控制策略，成功实现了 NH_3 逃逸量 $\leq 3\text{ppm}$ 的经济运行目标^[10]。在实际运行中，该策略依据机组负荷、烟气流量、 NO_x 浓度等多种参数变化，前馈环节快速响应，初步调整喷氨量，串级控制的主副回路紧密配合，精确修正喷氨量，有效克服了脱硝过程的大延迟、大惯性以及干扰因素的影响。经长期运行

监测，不仅显著降低了 NH_3 逃逸量，减少了对环境的污染和对后续设备的腐蚀，还提升了脱硝效率，实现了氨耗与脱硝效果的良好平衡，为机组的高效、环保运行提供了有力保障，在同类机组脱硝系统喷氨优化控制方面具有借鉴意义。

（二）汽轮机—锅炉联合循环控制

1. 负荷快速跟踪控制策略

在垃圾焚烧发电厂工程应用中，为实现负荷快速跟踪，着重研究汽轮机与锅炉的联合响应特性。通过对机组运行数据的实时监测与深度分析，精确掌握汽轮机出力变化对锅炉蒸汽参数的影响规律。在此基础上，采用先进的控制算法，优化汽轮机与锅炉的协同控制。经过一系列调试与优化，成功实现了 $\pm 2\%$ 的负荷跟随精度。该控制策略不仅有效提升了机组对负荷变化的响应速度，还确保了机组运行的稳定性与高效性，为电厂在复杂多变的电力市场环境下灵活运行提供了有力保障，为同类机组的负荷快速跟踪控制提供了宝贵的实践经验。

2. 热力参数软测量技术应用

在垃圾焚烧发电厂控制中，热力参数软测量技术发挥着重要作用。以某电厂为例，基于 LSSVM 算法建立排烟温度预估模型用于替代故障测温元件。由于实际运行中，排烟温度直接影响机组热效率与安全性，传统测温元件易出现故障导致数据不准确或缺失。借助该算法建立的模型，能依据机组其他可测参数，如蒸汽流量、垃圾成分等，准确预估排烟温度。通过大量历史运行数据对模型进行训练与优化，使其预估精度满足工程要求。此应用不仅保证了热力参数的实时准确监测，还避免了因测温元件故障停机维修带来的损失，提升了汽轮机与锅炉运行的稳定性与经济性。

（三）智慧电厂数字化转型

1. 数字孪生系统架构设计

在某大型火力发电厂的改造工程中，成功构建基于热工过程控制的锅炉数字孪生系统。其物理实体层涵盖锅炉本体及各类热

工设备，如实反映锅炉运行的实际状态。数据模型层收集温度、压力、流量等多维度实时数据，通过先进算法建立精确模型，实现对设备性能、运行趋势的模拟与预测。服务应用层则依据数据模型分析结果，为运行人员提供优化的操作建议，助力实现智能燃烧调整、故障预警诊断等功能。该案例中，锅炉数字孪生系统三层架构有效提升了电厂热工自动化水平，优化仪表技术应用，降低能耗，提高生产效率与安全性，为智慧电厂数字化转型提供了典型示范。

2. 大数据平台预警功能开发

在某智慧电厂的数字化转型实践中，大数据平台预警功能开发取得显著成效。该电厂运用 LSTM 神经网络对汽轮机振动情况进行分析预测。通过收集大量汽轮机运行过程中的热工数据，包括温度、压力、转速等参数，作为 LSTM 神经网络的训练样本。经模型不断学习与优化，实现了对汽轮机振动趋势的有效预测，能提前 72 小时发出预警，预警率高达 85%。这一成果极大提升了电厂运行的安全性与稳定性，减少了因汽轮机突发故障导致的停机损失，为智慧电厂基于热工过程控制的热工自动化与仪表技术升级，提供了极具价值的应用范例。

五、总结

仪表精度提升与先进控制算法的融合，为电厂热工自动化注入了强大动力，使得热工过程的控制更为精准和高效。而 5G 通信与 AI 技术的深度融合，正孕育着新一代自主控制系统，有望彻底变革电厂热工自动化的运作模式，带来前所未有的智能化体验。在未来的研究中，建立数字孪生基准测试平台具有重要意义，它将为热工自动化与仪表技术的发展提供更为可靠的评估与优化依据。通过这一系列技术的协同发展，电厂热工自动化与仪表技术将不断突破创新，为电力行业的高效、稳定、智能化运行提供坚实保障，推动整个行业向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 牟延杰. 基于分散模糊推理的热工过程预测控制 [D]. 重庆大学, 2022.
- [2] 吴铮. 基于混合模型的热工过程报警数据过滤 [D]. 华北电力大学 (保定), 2021.
- [3] 任振华. 大惯性、非线性热工过程的模型辨识与优化控制 [D]. 东南大学, 2021.
- [4] 孙明. 火电机组热工过程自抗扰控制的研究与应用 [D]. 华北电力大学 (北京), 2021.
- [5] 何康. 基于字典学习的热工过程建模及诊断方法研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [6] 高洋. 火电厂热工仪表自动化技术的应用与发展 [J]. 中国高科技, 2021, (14): 121-122+125.
- [7] 张宝松. 先进控制方法在电厂热工过程控制中的应用 [J]. 光源与照明, 2021, (12): 142-144.
- [8] 梁馨月. 电厂热工自动化系统改造技术分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(01): 245-246+252.
- [9] 李伟. 电厂热工过程控制中智能 PID 控制器的应用探讨 [J]. 应用能源技术, 2022, (06): 9-11.
- [10] 冯小龙, 霍明鑫. 电力系统热工仪表自动化技术的应用 [J]. 化工管理, 2022, (20): 97-99.

消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证方法及应用

李细业

广东 佛山 528244

DOI:10.61369/ME.2025110037

摘 要：消防工程竣工检测需对机电系统安全性与功能性进行协同验证。需从短路防护、过载保护等多维度考量安全性，关注系统功能性验证的机电集成要求，解决安全防护与功能运行矛盾及机电系统交互瓶颈。通过 FMEA 分析、动态风险参数关联建模等多种技术方法，并结合实际案例验证，对提升消防工程质量意义重大。

关 键 词：消防工程竣工检测；机电系统；协同验证

Collaborative Verification Method and Application of Safety and Functionality of Mechanical and Electrical Systems in Fire Engineering Completion Inspection

Li Xiye

Foshan, Guangdong 528244

Abstract： The completion inspection of fire engineering requires collaborative verification of the safety and functionality of the electromechanical system. It is necessary to consider safety from multiple dimensions such as short circuit protection and overload protection, pay attention to the electromechanical integration requirements for system functional verification, and solve the contradiction between safety protection and functional operation, as well as the bottleneck of electromechanical system interaction. Through various technical methods such as FMEA analysis and dynamic risk parameter correlation modeling, combined with practical case verification, it is of great significance to improve the quality of fire engineering.

Keywords： fire engineering completion inspection; mechanical and electrical systems; co-verification

引言

《建设工程消防设计审查验收管理暂行规定》于2020年6月1日起施行，旨在保障建设工程消防设计、施工质量，提高消防工程安全性与功能性。消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证意义重大，需多维度考量，如短路防护、过载保护及接地可靠性等电气安全指标。同时，系统功能性验证的机电集成要求、安全防护与功能运行矛盾、应急响应环节机电系统交互瓶颈等问题需解决。基于 FMEA 的故障模式耦合分析、动态风险参数关联建模等方法，以及 BIM - MEP 协同仿真平台构建、多源数据融合实时监测技术等，都为协同验证提供支撑，诸多实际案例也证明了其有效性与重要性。

一、消防机电系统安全与功能协同验证的理论框架

（一）消防机电系统安全性评价维度

消防机电系统安全性评价需从多维度考量。短路防护方面，短路故障可能引发火灾或设备损坏，应依据相关电气安全标准，确保线路具备有效的短路保护装置，能快速切断故障电流，避免危险蔓延^[1]。过载保护同样关键，长期过载会使电气设备发热，加速绝缘老化，甚至引发火灾，需设定合理的过载保护阈值，及时监测和切断过载电路。接地可靠性也不容忽视，良好的接地能

保障人员安全，防止电气设备外壳带电，要严格检测接地电阻等参数，确保接地系统符合安全要求。通过对这些核心参数标准如短路防护、过载保护及接地可靠性等电气安全技术指标的严格把控，为消防机电系统安全性评价提供坚实基础。

（二）系统功能性验证的机电集成要求

在消防工程竣工检测中，系统功能性验证的机电集成要求极为关键。通风排烟系统联动控制与消防水泵启停逻辑等机电功能组件，需从多方面满足集成要求。对于通风排烟系统联动控制，其控制逻辑要与其他消防机电设备紧密配合，确保在火灾发生时

能及时准确地启动，有效排出烟雾，为人员疏散和消防救援创造有利条件。消防水泵启停逻辑同样要与火灾报警系统、消防管网压力监测等机电系统深度集成，根据火灾实际情况精准启停，保证消防用水供应稳定。只有各机电功能组件在性能验证上达到高度集成，才能实现消防机电系统的安全与功能协同，满足消防工程在实际应用中的需求，这一要求也与相关研究成果^[2]相符。

二、消防工程检测中的安全功能冲突特征

（一）安全防护与功能运行的矛盾表现

在消防工程竣工检测中，机电系统的安全防护与功能运行常存在矛盾。以防火门电磁释放装置与疏散指示灯联动为例，从理论上讲，二者应协同配合，保障人员在火灾时能安全疏散。然而实际运行中，防火门电磁释放装置触发开启或关闭的时间点，与疏散指示灯引导方向调整的最佳时机难以精准匹配^[3]。若防火门电磁释放装置过早动作，可能导致疏散通道过早开放或关闭，而此时疏散指示灯还未来得及给出正确引导，使得人员疏散出现混乱；反之，若疏散指示灯已指示方向，但防火门因电磁释放装置未及时动作而无法正常通行，同样会影响人员安全疏散，这种时序上的冲突，凸显了安全防护与功能运行间的矛盾，对消防工程的安全性及功能性协同造成阻碍。

（二）应急响应中的机电系统交互瓶颈

在消防工程检测的应急响应环节，机电系统交互存在显著瓶颈。火灾报警信号与暖通空调系统紧急制停的技术接口存在缺陷，这一问题凸显了交互瓶颈。火灾发生时，若暖通空调系统不能及时接收到火灾报警信号并紧急制停，空调运行可能会加速烟雾和火势蔓延，扩大火灾危害。由于各机电系统独立设计和运行，缺乏统一协调机制，导致信息传递不畅。如在信号传输过程中，可能出现信号延迟、丢失等情况，影响暖通空调系统的紧急制停响应及时性。这种机电系统交互瓶颈严重阻碍了消防工程安全功能的有效实现，迫切需要通过优化技术接口、建立统一协调机制等措施来解决，以确保消防工程在应急响应中各机电系统能协同工作，提高整体安全性^[4]。

三、协同验证方法的关键技术体系

（一）多维安全功能参数耦合建模

1. 基于 FMEA 的故障模式耦合分析

基于 FMEA（失效模式与效应分析）的故障模式耦合分析，旨在全面剖析机电系统中各部件故障模式及其相互耦合对建筑消防安全的影响。通过对机电系统各组成部分进行详细的 FMEA 分析，明确每一种可能的故障模式、故障原因及后果^[5]。在此基础上，深入探究不同故障模式之间的耦合关系，因为单一故障可能引发连锁反应，导致多个安全功能参数同时偏离正常范围，进而严重威胁建筑消防安全。通过该分析，确定关键故障耦合路径，识别出可能导致严重安全后果的故障组合，为后续针对性地制定协同验证策略提供依据，以便在消防工程竣工检测中更有效地评

估机电系统安全性与功能性，及时发现潜在安全隐患，保障建筑消防安全。

2. 动态风险参数关联建模

在消防工程竣工检测机电系统安全性与功能性协同验证中，动态风险参数关联建模极为关键。机电系统运行状态处于动态变化中，各类风险参数也随之改变，如环境温度、湿度、电气设备负载等因素，会实时影响消防系统的安全性及功能性^[6]。需建立动态风险参数关联模型，精准识别这些参数间的内在联系。例如，通过数据分析挖掘技术，探索电气设备温度升高与火灾发生概率之间的定量关系。该模型要具备自适应能力，能随机电系统运行情况动态调整，及时反映潜在风险，为协同验证提供动态且准确的风险评估依据，助力判断机电系统在不同工况下消防应急响应的可靠性，保障消防工程竣工检测的科学性与有效性。

（二）智能验证技术集成应用

1. BIM-MEP 协同仿真平台构建

BIM-MEP 协同仿真平台构建是实现消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证的关键环节。平台整合建筑信息模型（BIM）与机电设备专业（MEP）数据，构建高精度虚拟模型，将机电管线参数等信息深度嵌入其中，真实反映机电系统在消防工程中的布局与特性。借助该平台，可对机电系统运行状态进行动态模拟，精准分析系统安全性与功能性。例如，模拟火灾场景下机电系统的响应，检测通风、排烟、消防喷淋等设备的运行效果^[7]。通过集成智能验证技术，平台还能自动识别潜在安全隐患与功能缺陷，为优化设计与整改提供科学依据，提升消防工程竣工检测的准确性与可靠性。

2. 多源数据融合的实时监测技术

在消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证里，多源数据融合的实时监测技术十分关键。需研究电力监控系统与消防控制主机的数据互通机制，以此实现多源数据的高效融合。借助先进的数据采集设备，从电力监控系统、消防控制主机等不同源头获取实时运行数据，涵盖电力参数、消防设备状态等各类信息。通过特定的数据融合算法^[8]，将这些多源数据整合处理，消除数据冗余与矛盾，形成全面且准确的监测数据集。这样能实时监测机电系统的运行状况，及时察觉潜在的安全隐患与功能异常，为安全性与功能性的协同验证提供可靠的数据支撑，保障消防工程竣工后机电系统稳定、安全、有效地运行。

四、典型工程应用案例分析

（一）超高层建筑机电系统验证

1. 垂直疏散通道机电联动测试

以某超高层建筑为例，在垂直疏散通道机电联动测试中，重点考察余压调节系统与应急照明的协同响应。当模拟火灾场景激活余压调节系统时，应急照明须在规定时间内即时响应。测试结果显示，余压系统压力信号高效传输至应急照明控制模块，后者迅速点亮，响应时效完全符合设计规范。该验证采用精密监测仪器，准确捕捉余压启动与照明联动的关键时间节点。通过此案

例,协同验证方法显著提升了垂直疏散通道机电联动的稳固性,为紧急疏散人员提供可靠保障,再次印证其在超高层建筑消防工程竣工检测中的核心价值与可操作性^[9]。

2. 电梯群控系统的火灾模式测试

在某超高层写字楼的机电系统验证项目中,针对电梯群控系统的火灾模式进行测试。该建筑共 50 层,配备 10 部电梯服务不同楼层分区。测试时,模拟不同楼层发生火灾场景,触发电梯群控系统的火灾模式。观察发现,部分电梯轿厢迫降位置出现偏差,未精准到达指定的首层疏散层,且在电源切换过程中,出现短暂供电不稳定情况。通过详细排查,发现是群控系统逻辑设置与电源切换装置参数匹配不佳。经过调整逻辑算法和优化电源切换装置参数,再次模拟火灾场景,电梯轿厢能准确迫降至首层,且电源切换平稳,确保了火灾时电梯群控系统能安全、有效地运行,充分体现出电源切换与轿厢迫降位置联合验证在超高层建筑电梯群控系统火灾模式中的重要性^[10]。

(二) 地下综合管廊应用实践

1. 分布式传感器网络构建

在某地下综合管廊工程中,构建分布式传感器网络以实现机电设备状态有效监测。依据管廊内机电设备分布与运行特点,在关键节点如配电箱、通风设备、排水泵附近合理布设温度、湿度、电流、电压等传感器。通过有线与无线相结合的通信方式,将传感器采集的数据实时传输至中央监控系统。例如,温度传感器实时监测配电箱温度,当温度异常升高,系统及时预警,以便检修人员排查潜在火灾隐患。湿度传感器对管廊环境湿度进行监测,防止因湿度过高影响机电设备性能。借助该分布式传感器网络,实现对管廊内机电设备运行状态全方位感知,为消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证提供可靠数据支持,保障管廊安全稳定运行。

2. 应急通风-排水协同控制验证

在某地下综合管廊工程中,针对应急通风-排水协同控制进行验证。该管廊集成水位传感器、通风系统及可燃气体探测器。模拟水位升至警戒值时,传感器即时传输信号至控制系统。系统迅速响应,联动启动排水设备,并按预设逻辑同步开启区域风机,同时激活气体探测器监测积聚风险。此机制确保积水场景下排水高效、通风及时,避免有害气体(如甲烷)因腐蚀或挥发引发爆炸。多次模拟测试证实,传感与通风、排水协同精准可靠,气体探测强化消防联动,满足管廊紧急状态下机电系统安全与功

能协同要求,为稳定运行提供保障。

(三) 工业厂房特殊场景验证

1. 防爆电气设备的安全功能测试

在某工业厂房特殊场景下,对防爆电气设备进行安全功能测试。该厂房储存易燃易爆化学品,集成防爆电气及可燃、有毒气体探测器,要求严苛。针对消防报警系统中的防爆设备,首先检验结构完整性,如外壳材质、密封性能是否达标。同时,测量接地电阻,确保可靠,避免静电爆炸风险。此外,模拟火灾场景,联动气体探测器监测可燃气体超标(>1%LEL)和有毒阈值,验证设备信号传输准确、无干扰,并触发通风切断。测试发现部分接地电阻超标,及时整改线路连接,再测合格。通过严格验证,确保防爆电气安全功能可靠,实现机电系统协同,为消防工程竣工检测提供参考。

2. 危险区域应急切断逻辑验证

在某工业厂房特殊场景下,对危险区域应急切断逻辑展开验证。该厂房存在大量易燃易爆及有毒有害气体,危险区域众多。检测时,模拟危险区域可燃气体泄漏场景,设定气体浓度达到一定阈值。观察消防工程中机电系统的反应,发现通风系统迅速启动,加快空气流通,降低可燃气体浓度。同时,应急切断装置精准动作,及时切断相关工艺设备的电源及物料输送管道,防止泄漏扩大引发爆炸等严重事故。这一过程验证了危险区域应急切断逻辑的有效性,实现了机电系统安全性与功能性的协同。通过此案例可知,科学合理的应急切断逻辑对于保障工业厂房消防安全至关重要,为后续消防工程竣工检测提供了实践依据。

五、总结

消防工程竣工检测中机电系统安全性与功能性协同验证方法,对提升消防工程质量意义重大。此方法借助建立协同验证体系,将技术规范与性能需求有机统一,打破传统检测中安全与功能分离的困境,为智能建筑和工业设施的消防验收开辟新路径。通过该方法,能更全面、准确地评估机电系统在消防工程中的作用,确保其在紧急情况下既具备可靠的安全性,又能充分发挥应有的消防功能。随着技术发展,未来深化人工智能在验证流程优化中的应用研究,有望进一步提升协同验证的效率与精准度,为消防工程竣工检测注入新的活力,推动消防工程领域的持续进步。

参考文献

- [1] 拜博涛. 积分-微分混合型事件触发模式下机电系统模型预测控制方法研究[D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [2] 袁林中. 滚转飞行器旋转隔离装置机电系统设计及解旋性能研究[D]. 华东交通大学, 2021.
- [3] 龙土志. 复杂机电系统的深度迁移学习故障诊断研究[D]. 广东工业大学, 2021.
- [4] 陈怀剑. 物联网环境下的协同异常检测方法及应用[D]. 天津理工大学, 2021.
- [5] 阎鑫磊. 基于边-云协同的异常行为检测方法研究及应用[D]. 浙江工业大学, 2022.
- [6] 雒凯明. 新时期消防工程机电系统智能化分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(13): 121-123.
- [7] 高明. 新时期消防工程机电系统智能化研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(7): 125-126.
- [8] 王树栋, 高伟. 新时期消防工程机电系统智能化分析[J]. 信息记录材料, 2021, 22(12): 67-68.
- [9] 刘小军. 新时期消防工程机电系统智能化研究[J]. 中国住宅设施, 2021(1): 9-10.
- [10] 王宇. 探讨新时期消防工程机电系统智能化[J]. 中国房地产业, 2017(16): 266.

变压器制造工艺在机电工程管理体系中的研究 及优化策略

林先永

广东 中山 528449

DOI:10.61369/ME.2025110039

摘 要： 变压器制造工艺在机电工程管理体系中存在工艺标准化不足等问题。可通过基于数字孪生技术优化工艺参数、构建风险管理机制、规范标准管理技术等策略进行优化，同时应建立持续改进机制、数字化工艺平台等，实施效果显著，未来需升级工艺知识管理系统，深化数字孪生与 AI 技术应用。

关 键 词： 变压器制造工艺；机电工程管理体系；优化策略

Research and Optimization Strategy of Transformer Manufacturing Process in Electromechanical Engineering Management System

Lin Xianyong

Zhongshan, Guangdong 528449

Abstract： There are some problems in the process standardization of transformer manufacturing process in the electromechanical engineering management system. It can be optimized by optimizing process parameters based on digital twin technology, constructing risk management mechanism, standardizing turnover management technology and other strategies. At the same time, continuous improvement mechanism and digital process platform should be established, with significant implementation effect. In the future, it is necessary to upgrade the process knowledge management system and deepen the application of digital twin and AI technology.

Keywords： transformer manufacturing process; electromechanical engineering management system; optimization strategy

引言

在机电工程管理体系中，变压器制造工艺面临诸多挑战，工艺标准化程度不足影响产品质量与生产效率。2021 年颁布的《制造业数字化转型实施方案》强调推动制造业数字化、智能化升级。在此政策指引下，相关研究聚焦于变压器制造工艺的优化。从基于数字孪生技术的工艺参数优化，到风险管理机制构建、标准管理技术规范，再到构建贝叶斯网络预警模型、数字化工艺平台等多方面探索，旨在全面提升变压器制造工艺水平，推动机电工程管理体系高效运行，契合政策所倡导的制造业升级方向。

一、变压器制造工艺的技术管理体系研究

（一）制造工艺技术现状分析

当前变压器制造工艺在机电工程管理体系中，关键技术环节存在工艺标准化程度不足的状况。以绕线工艺为例，在导线选型、匝数控制以及绕制速度等方面，缺乏统一明确的标准规范，导致不同批次产品在性能上出现波动。铁芯叠装技术方面，叠片的尺寸精度、叠装顺序及压紧程度的标准不够完善，影响铁芯的磁性能与机械稳定性。绝缘处理环节，绝缘材料的选择、涂刷工

艺及干燥处理时间等缺乏精准标准，使得绝缘性能参差不齐。这些工艺标准化程度不足的问题，严重影响变压器制造质量与生产效率，亟待基于 PDCA 循环框架进行优化完善^[1]。

（二）技术优化创新路径

为实现变压器制造工艺的技术优化创新，可提出基于数字孪生技术的工艺参数优化模型。数字孪生技术能够创建与实际制造过程高度匹配的虚拟模型，通过对虚拟模型的模拟、分析与优化，精准调整实际制造工艺参数。在此基础上，构建工艺参数数据库，它可系统收集、整理与存储各类工艺参数，为工艺优化提

供丰富的数据支撑^[2]。同时，误差补偿机制不可或缺，它能实时监测制造过程中的误差，并及时采取补偿措施，降低误差对产品质量的影响。这一技术管理体系，从工艺参数优化、数据支持到误差处理，全方位提升变压器制造工艺水平，推动机电工程管理体系朝着更高效、精准的方向发展。

二、机电工程风险管理机制构建

（一）风险要素识别与评估

在机电工程风险管理机制构建中，风险要素识别与评估至关重要。运用 FMEA 方法，针对变压器制造工艺，需对多种风险要素进行精准识别与科学评估。设备选型风险方面，需考量所选设备能否满足制造工艺要求，若选型不当，可能影响产品质量与生产效率。工艺兼容性风险，要判断不同工艺环节之间能否顺畅衔接，否则易导致生产中断或出现质量瑕疵。供应链风险，需关注原材料供应的稳定性、及时性等，供应不畅会使生产停滞。通过 FMEA 方法对这些风险要素进行定级分类，依据风险发生的可能性、影响程度等指标，将风险分为高、中、低不同等级，从而为后续针对性制定风险管理策略提供有力依据^[3]。

（二）动态风险管控策略

机电工程风险管理中，动态风险管控策略至关重要。借助风险预警指标库，持续监测与收集各类与变压器制造工艺相关的指标数据，如原材料质量波动、生产设备运行参数异常等，通过数据分析及时察觉潜在风险信号。同时，基于应急预案管理模块，针对不同风险场景制定详细且具有可操作性的应对预案，定期开展演练与模拟，确保在风险实际发生时能迅速响应，将损失降到最低。此外，通过风险转移机制，合理运用保险、合同条款等方式，将部分难以承受的风险转移给第三方。例如在原材料采购合同中明确供应商责任，当原材料出现质量问题时由供应商承担损失。如此，实现对机电工程风险的动态、全面、有效管控^[4]。

三、标准管理在制造体系中的应用

（一）标准管理技术规范

1. 变压器标准工艺流程

在变压器制造体系中，标准管理有着关键应用。针对不同容量的变压器，需制定差异化标准作业指导书。对于大容量变压器，因其结构复杂、重量大，标准作业指导书需更细致地规划吊装步骤。明确吊装点位计算方法至关重要，要依据变压器的形状、重心分布等参数精准计算，确保吊装过程中变压器的平衡与稳定。同时，应力监测标准也不容忽视，在标准过程中，通过应力传感器等设备实时监测变压器关键部位的应力变化情况，依据应力监测标准来判断标准操作是否安全合理，避免因应力集中等问题对变压器造成损伤^[5]。这样通过规范的标准管理技术，保障变压器在制造过程中标准环节的顺利进行，提升整体制造质量。

2. 作业安全控制体系

在变压器制造体系中，标准管理的应用至关重要。从标准管

理技术规范而言，需精准制定变压器标准过程中的各项操作标准，涵盖标准角度、速度、起吊点选择等，以确保变压器在标准时不受损伤。在作业安全控制体系方面，要着重关注人员与设备安全。为操作人员配备符合安全防护装备配置规范的工装，如安全帽、安全鞋、防护手套等，避免因操作不当或防护不足引发安全事故。同时，借助开发的基于物联网的实时形变监测系统，实时监控变压器标准过程中的形变情况，一旦出现异常及时预警并调整操作，实现对变压器制造过程中标准环节的全面、科学管理，有效保障制造质量与作业安全^[6]。

（二）管理效能提升路径

1. 异常状态预警模型

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，构建整合力学仿真数据和历史事故案例的贝叶斯网络预警模型对管理效能提升意义重大。通过收集大量变压器力学仿真数据，涵盖不同工况下的应力、应变等关键指标^[7]，同时全面梳理历史事故案例，明确事故发生的原因、过程及影响。将二者整合，以贝叶斯网络为框架，确定各因素间的条件概率关系。该模型可有效分析当前制造过程中的异常状态，当出现与历史事故相似的力学数据特征时，及时发出预警，使管理人员提前采取措施，避免事故发生，从而优化变压器制造工艺，提升机电工程管理体系的整体效能。

2. 持续改进机制

在变压器制造工艺于机电工程管理体系中，持续改进机制至关重要。制定包含 PDCA 循环和 5WHY 分析法的质量问题追溯改进流程是关键举措。PDCA 循环促使制造工艺不断优化，通过计划（Plan）明确改进目标与方案，执行（Do）落实措施，检查（Check）评估效果，处理（Act）总结经验教训并制定新计划^[8]。5WHY 分析法深入挖掘质量问题根源，从表面现象出发，连续追问“为什么”，直至找出根本原因，为制定针对性解决方案提供依据。二者相结合，可全面提升变压器制造工艺质量，提高生产效率，增强机电工程管理体系的稳定性与可靠性，实现管理效能的提升。

四、综合优化策略体系设计

（一）技术管理协同优化

1. 数字化工艺平台构建

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，构建数字化工艺平台至关重要。通过设计集成工艺知识库，将变压器制造过程中的各类工艺知识进行整合存储，涵盖原材料特性、加工工艺标准、质量检测规范等内容，为生产提供全面的知识支撑^[9]。虚拟调试模块则利用虚拟技术对变压器制造流程进行模拟调试，提前发现潜在的设计缺陷、工序冲突等问题，有效缩短实际调试周期，降低生产成本。工艺仿真系统可对制造工艺的关键环节进行仿真分析，如绕组绕制、铁芯装配等，直观展示工艺效果，辅助优化工艺参数，提升工艺的准确性与可靠性。通过这一数字化平台架构，实现变压器制造工艺的高效、精准管理与优化。

2. 标准化作业体系

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，标准化作业体系

至关重要。通过制定覆盖工艺流程卡、检验基准书和技术协议模板的三级标准文件体系，能有效提升工艺的规范性与质量稳定性。工艺流程卡详细记录变压器制造各环节操作步骤、参数设定等，为一线生产人员提供明确指导，确保操作统一规范。检验基准书明确各工序检验项目、方法及合格标准，为质量控制提供可靠依据，便于及时发现并纠正偏差。技术协议模板则规范与供应商等合作中的技术要求、验收标准等，保障供应链技术协同。此三级标准文件体系相互关联、相互支撑，共同构建起科学完善的标准化作业体系，全面提升变压器制造工艺水平，推动机电工程管理体系高效运行^[10]。

（二）风险管理体系升级

1. 多维度管控网络

建立涵盖事前预防、事中控制、事后改进的三阶段管控网络，能有效实现变压器制造工艺在机电工程管理体系中的优化。事前预防着重于深入分析制造工艺各环节潜在风险，对原材料采购标准、设备性能参数等严格把关，依据过往经验与数据分析，制定针对性风险预案。事中控制时，实时监测制造流程，利用先进传感器与监测系统跟踪工艺参数，如绕组绕制的匝数、厚度等，一旦参数偏离标准立即预警并调整。事后改进则在产品交付使用后，收集反馈信息，对出现的质量问题或性能缺陷进行分析，从工艺方法、人员操作等方面查找原因，据此完善工艺规范，持续提升变压器制造工艺水平，确保机电工程管理体系的高效运行。

2. 应急资源管理系统

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，应急资源管理系统通过开发整合应急物资数据库、专家决策库和通讯指挥模块的智能管理平台来实现优化。应急物资数据库精准收录各类与变压器制造相关的应急物资信息，包括物资种类、数量、存放位置等，确保在突发状况下能快速定位与调配。专家决策库汇聚行业资深专家针对常见制造故障及风险的解决方案，为应急处理提供专业指导。通讯指挥模块搭建高效的沟通桥梁，实现各部门、人员间实时信息传递，使指挥调度更加顺畅，保障应急行动迅速、有序开展，以此提升整个应急资源管理系统的效率与响应能力，助力变压器制造工艺在机电工程管理体系中稳健运行。

（三）组织管理机制创新

1. 矩阵式管理架构

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，矩阵式管理架构

是组织管理机制创新的关键。这种架构融合项目管理和职能管理双维度。从项目管理维度看，针对每个变压器制造项目设立项目经理，全面负责项目进度、质量及成本等，确保项目按计划高效推进。从职能管理维度，组建专业职能团队，如设计、工艺、采购等，为各项目提供专业支持与技术指导。通过这种矩阵式架构，打破传统部门壁垒，加强不同专业间协作与沟通，使技术与项目需求紧密结合。一方面提高资源利用效率，同一专业人员可服务多个项目；另一方面提升应对复杂制造工艺问题的能力，促进变压器制造工艺在机电工程管理体系中的优化与创新。

2. 人才培养机制

在变压器制造工艺的机电工程管理体系中，人才培养机制极为关键。构建技能认证体系，依据变压器制造不同环节所需专业技能，制定明确且细致的认证标准，涵盖从基础操作到复杂工艺处理的全方位技能，确保员工技能水平与岗位要求精准匹配。打造案例教学库，收集整理变压器制造过程中的典型成功与失败案例，详细剖析案例中的工艺要点、问题解决思路等，通过案例研讨，提升员工对实际生产问题的分析与处理能力。推行岗位轮训制度，让员工在制造工艺的不同岗位间轮转实践，全面熟悉各环节流程，不仅拓宽员工视野，更培养复合型人才，使他们能从全局视角优化工艺、解决跨岗位问题，从而为变压器制造工艺在机电工程管理体系中的优化提供坚实的人才支撑。

五、总结

变压器制造工艺在机电工程管理体系中的优化策略在技术管理、风险控制、标准管理等模块取得了显著实施效果。技术管理优化提升了工艺的精准度与效率，风险控制有效降低潜在风险对生产的影响，标准管理确保变压器关键工序的安全与质量。面向智能制造时代，工艺知识管理系统亟待升级，通过整合数据资源、强化知识挖掘，以适应智能化生产需求。同时，数字孪生与AI技术在工艺优化中前景广阔，数字孪生可实现虚拟模拟与实时监测，AI技术能助力智能决策与预测性维护。未来，应进一步深化这些技术的应用，推动变压器制造工艺向智能化、高效化、优质化方向持续迈进，提升机电工程管理体系的整体效能。

参考文献

- [1] 杨敬萍. 伊泰公司税务风险管理体系优化研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
- [2] 张亚峰. YD酒店绩效管理体系优化研究 [D]. 南昌大学, 2021.
- [3] 徐玲杰. H公司培训管理问题及优化策略研究 [D]. 对外经济贸易大学, 2021.
- [4] 周杰. A国有企业内控管理体系优化研究 [D]. 江西财经大学, 2023.
- [5] 孔苗. 少先队红色故事育人的现状及优化策略研究 [D]. 广西师范大学, 2023.
- [6] 杨岩. 机电工程中安装施工的优化策略 [J]. 集成电路应用, 2021, 38(7): 116-117.
- [7] 郭顺生. 机电工程设备安装特点及优化策略 [J]. 大众标准化, 2020(23): 56-57.
- [8] 郑小玲. 企业汇率风险管理体系问题及优化策略研究 [J]. 中小企业管理与科技, 2024(10): 64-66.
- [9] 赵凡云. 机电工程设备安装质量特点及优化策略研究 [J]. 电力设备管理, 2024(4): 162-164.
- [10] 李炜. 建筑机电工程中安装施工管理的优化策略探讨 [J]. 建筑与装饰, 2021(6): 60.

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.2025110043

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.

房地产业电气工程设备运维与故障处理策略探究

张文杰

广东 东莞 523000

DOI:10.61369/ME.2025110045

摘 要：房地产业电气工程设备运行稳定性和寿命关键在于设备运维与故障处理。需构建运行维护体系，运用智能化运维技术，完善应急处理机制，设计作业许可制度，构建安全监护体系，培养电气维修人员，培育安全文化。多个工程实践体现不同技术应用效果。还应提炼全生命周期管理要素，建设智能化运维平台等，提升运维与故障应对能力。

关 键 词：房地产业电气工程；设备运维；故障处理

Research on the Operation and Maintenance and Fault Handling Strategies of Electrical Engineering Equipment in the Real Estate Industry

Zhang Wenjie

Dongguan, Guangdong 523000

Abstract： The key to electrical engineering in the real estate industry lies in equipment operation and maintenance as well as fault handling. It is necessary to establish an operation and maintenance system, apply intelligent operation and maintenance technologies, improve the emergency response mechanism, design an operation permit system, build a safety supervision system, cultivate electrical maintenance personnel, and foster a safety culture. Multiple engineering practices demonstrate the application effects of different technologies. It is also necessary to distill the elements of full life cycle management, build an intelligent operation and maintenance platform, etc., to enhance the capabilities of operation and maintenance as well as fault response.

Keywords： electrical engineering in real estate industry; equipment operation and maintenance; fault handling

引言

2021年颁布的《关于加强保障性租赁住房项目电气安全管理的通知》强调了房地产业电气安全的重要性。在房地产业电气工程领域，关键设备运行维护、智能化运维技术应用、故障应急处理、作业许可制度等多方面工作至关重要。构建设备运行维护体系，能确保设备稳定运行；智能化运维技术可实现精准监控与高效检测；完善应急处理机制和优化应急抢修系统，能快速应对故障；合理设计作业许可制度与安全监护体系，可保障作业安全。这些工作对提升房地产业电气工程运维水平与故障应对能力，推动行业智能化、标准化、安全化发展意义重大。

一、房地产业电气工程设备运维管理理论架构

房地产业电气工程设备主要包括高低压变配电系统、自备发电机组、电力变压器、低压配电柜、电缆线路、照明系统、防雷接地装置以及各类智能化监控与保护设备等。这些设备构成房地产项目电气系统的核心，其运行状态直接影响供电可靠性、能效水平及整体安全。因此，建立系统化、科学化的运维管理体系，是实现设备长期稳定运行的基础。

（一）关键设备运行维护体系构建

关键设备运行维护体系的构建，应围绕设备的日常点检、参

数监控与预防性维护展开。针对高低压变配电系统，需制定标准化点检流程，包括设备外观状态检查、连接部位紧固情况、绝缘部件完整性以及操作机构灵活性等项目，确保设备处于正常工作状态。运行参数监控应依据国家与行业标准，对电压、电流、功率因数、谐波含量等关键指标进行实时监测与记录，设定合理阈值并实现异常自动告警。自备发电机组作为应急电源，其点检需涵盖燃油与润滑油位、冷却液状态、启动电池电压及机组控制功能等，确保随时具备应急启动能力。

预防性维护策略应基于设备运行时间、负荷特征及历史故障数据，制定定期保养与部件更换计划，从源头上控制故障发生，

延长设备使用寿命,保障电气系统持续可靠运行^[1]。

（二）智能化运维技术应用

智能化技术的引入显著提升了电气设备运维的精细化与主动性。物联网传感技术可实现配电房环境参数的实时采集与远程监控,通过部署温湿度、烟雾、水浸等传感器,建立异常环境预警机制,防止因环境因素引发设备性能下降或故障^[2]。智能巡检机器人可替代人工完成电缆接头、开关触头等关键部位的温度检测,并结合视觉识别技术判断设备外观异常,提高巡检效率与数据准确性。基于大数据分析的设备劣化趋势预测模型,能够整合设备运行数据、环境参数及维护记录,通过算法识别潜在故障模式,实现从“故障后维修”向“预测性维护”的转变。

二、供配电系统故障应急处理机制

（一）典型故障诊断与处置

在供配电系统故障应急处理机制中,针对典型故障需采取有效诊断与处置措施。当电力变压器出现过载跳闸,依据建立的三级响应流程处理。先对变压器各项运行参数进行全面监测与分析,判断过载程度及可能原因。若处于一级响应,尝试通过调整负载分配等方式缓解过载。解析低压配电柜短路故障时,采用快速定位法,通过对电路结构、故障发生时的异常现象,如异常声响、冒烟等,结合相关检测工具,快速确定短路点位置,以便及时修复。对于柴油发电机并网失败故障,运用故障树分析法,以并网失败为顶事件,层层剖析可能导致该故障的各种因素,如电压、频率、相位等参数不匹配,从底层事件入手排查,找出确切故障原因并加以解决^[3]。

（二）应急抢修系统优化

为优化应急抢修系统,可从以下方面着手。一方面,构建分级式供电应急预案体系,依据故障的严重程度、影响范围等因素进行分级,针对不同级别制定详细且具有针对性的应急措施,确保在各类故障发生时能快速响应并高效处理。另一方面,深入研究移动式应急电源车并网技术,通过提升并网的稳定性、可靠性以及快速性,使应急电源车在紧急状况下能迅速接入供配电系统,保障关键区域或重要设备的电力供应。同时,积极探讨数字孪生技术在故障模拟演练中的应用价值^[4]。借助数字孪生技术,可对供配电系统进行精准建模,模拟各类故障场景,让抢修人员提前熟悉故障处理流程与方法,提升其应急处理能力,从而全面提高应急抢修系统的效能。

三、电气作业安全管控体系建设

（一）安全管理制度构建

1. 作业许可制度设计

作业许可制度设计方面,应制定高低压设备倒闸操作的电子工作票制度。通过信息化手段,使工作票的填写、审核、签发等流程都在电子系统中完成,提高工作票办理效率与规范性,减少人为失误。同时,建立基于风险矩阵的作业审批流程。对电气作业可能面临的风险进行详细分析,根据风险发生的可能性和后果严重性构建风险矩阵。依据风险矩阵评估结果,确定不同风险等级作业所需的审批层级与要求。对于高风险作业,需经多部门联

合审批,确保各项安全措施落实到位,方可许可作业。这种作业许可制度,能从源头把控电气作业风险,保障作业安全^[5]。

2. 安全监护体系构建

安全监护体系构建方面,设计双监护人员配置方案,为电气作业安全增添双保险。两位监护人员相互协作、相互监督,全方位把控作业现场状况,避免因单人监护可能出现的疏漏。同时,开发带人脸识别的智能安全管控平台,借助先进的人脸识别技术,对进入作业区域的人员进行精准识别与权限管理,杜绝无关人员进入,确保作业环境安全。并且,实施作业过程可追溯管理,利用信息化手段,详细记录作业流程、人员操作、设备运行等关键信息^[6]。一旦出现问题,能够迅速追溯到问题源头,为后续的故障分析、责任认定以及安全措施改进提供有力依据,从多维度筑牢电气作业安全监护防线。

（二）人员能力提升机制

1. 专业技能培训体系

针对电气维修人员构建阶梯式培养方案,这是专业技能培训体系的关键举措。初级阶段,为维修人员提供基础电气知识与简单设备操作培训,涵盖电路原理、安全规范等,让其熟悉基本运维流程。中级阶段,聚焦复杂设备故障诊断与维修技巧,通过实际案例分析与模拟操作,提升他们应对常见故障的能力。高级阶段,则着重于新技术应用与系统优化,如智能电气设备运维,使维修人员紧跟行业发展前沿。同时,开发VR沉浸式应急演练系统^[7],借助虚拟现实技术模拟各类电气故障场景,让维修人员身临其境进行应急处理训练,有效提升他们在紧急状况下的实操能力与应对速度,从全方位提升电气维修人员专业技能,确保房地产业电气工程设备运维工作的高效、安全开展。

2. 安全文化培育路径

在安全文化培育路径方面,通过实施安全行为观察管理制度,对员工日常电气作业行为进行细致观察,及时发现并纠正不安全行为,以形成良好的行为习惯和规范。同时建立违章作业心理干预机制,深入剖析员工违章作业背后的心理因素,如侥幸心理、麻痹大意等,针对性地开展心理辅导与培训,帮助员工树立正确的安全作业心态。设计安全意识评估指标系统也至关重要,该系统涵盖安全知识掌握程度、风险认知能力、安全态度等多维度指标,通过定期评估,精准把握员工安全意识水平,进而有针对性地开展安全教育培训活动,全方位培育安全文化,促使安全理念深入人心,提升整体安全素养^[8]。

四、工程实践案例分析

（一）超高层建筑供配电系统运维

1. 谐波治理实践

在某350米写字楼的电气工程中,APF装置调试是谐波治理的关键环节。调试过程注重对装置性能的精准把控,技术人员根据现场复杂的电力环境,对APF装置进行精细调校,确保其能有效检测和补偿谐波电流。治理前,写字楼电力系统谐波问题突出,THD指标较高,严重影响电气设备正常运行。安装调试APF装置后,对THD指标进行持续监测,结果显示,治理后THD指标大幅下降,电力系统谐波得到有效抑制,电气设备运行稳定性显著提升。这一实践表明,APF装置在超高层建筑供配电系统谐

波治理中效果显著，为同类超高层建筑的谐波治理提供了可借鉴的经验^[9]。

2. 母联柜故障处置

在某超高层建筑供配电系统运维中，曾出现母联柜故障。当时，该超高层建筑的部分区域突然停电，经排查确定是母联柜故障所致。运维人员迅速到达现场，先对母联柜外观进行检查，发现并无明显损坏迹象。随后，利用专业检测工具对其内部电气元件进行检测，定位到故障原因为某关键继电器损坏。运维人员立即更换该继电器，并对母联柜进行全面调试。但送电后，母联柜再次出现异常。进一步分析，发现是联锁装置存在问题。于是，根据实际情况提出机械—电气联锁改造方案，对母联柜联锁机构进行优化，增强其稳定性与可靠性^[10]。改造完成后，再次进行测试，母联柜运行恢复正常，确保了超高层建筑供配电系统的稳定运行。

（二）商业综合体应急电源管理

1. 柴油发电机组并网优化

在某购物中心的工程实践中，发电机组并网运行出现振荡问题，影响应急电源的稳定供应。经分析，同期检测装置参数设置不合理是主因。原参数未能精准匹配发电机组特性，导致并网时相位、频率和电压难以快速同步，引发振荡。对此，技术人员深入研究发电机组技术资料，结合现场运行数据，重新调整同期检测装置的电压差、频率差和相位差等关键参数。通过多次模拟测试与现场调试，优化后的参数使发电机组在并网瞬间能迅速实现相位、频率和电压同步，有效解决了并网振荡问题，保障了商业综合体应急电源在关键时刻的可靠运行，为类似商业综合体柴油发电机组并网优化提供了宝贵经验。

2. 应急照明系统改造

在某商业综合体应急照明系统改造中，实施集中电源式应急照明系统改造项目意义重大。原有的应急照明系统多为分散式，灯具维护与管理难度大，且无法实时掌握蓄电池状态。此次改造，采用集中电源，能实现对各区域应急照明灯具的统一管理与控制，提升系统可靠性。同时，建立蓄电池组健康度监测体系，利用智能传感器实时采集蓄电池的电压、电流、内阻等关键参数。通过数据分析与处理，精准判断蓄电池健康状况，提前发现潜在故障隐患，如电池老化、容量下降等，以便及时维护或更换，确保应急照明系统在紧急情况下能可靠运行，为商业综合体人员安全疏散提供有力保障。

（三）老旧小区电气改造实践

1. 配电设施升级方案

以某20年住宅小区为例，在老旧小区电气改造实践中，配电设施升级至关重要。针对该小区配电房，制定智能化改造路线图。首先对综合保护装置进行更新，原有保护装置运行多年，性能下降，难以满足当下安全与智能化需求。新的综合保护装置具备更高的灵敏度与可靠性，能实时监测电路的电流、电压、功率等参数。一旦出现异常，可迅速精准定位故障点，并及时发出报警信号，同时自动采取保护措施，避免故障扩大。通过智能化改造，不仅提升了配电设施的安全性与稳定性，还实现远程监控与管理，减少人力巡检成本，提高运维效率，为小区居民提供更优质、可靠的电力供应。

2. 防雷接地系统整治

在老旧小区电气改造实践的防雷接地系统整治中，曾有因雷击引发变压器烧毁事故的情况。经分析，原防雷接地系统存在缺陷，接地电阻不符合标准，无法有效将雷电流导入大地。对此，采取重构建筑联合接地系统的措施。选用合适规格的扁钢、圆钢等材料，确保接地体的埋设深度与间距符合规范要求。同时，对各电气设备的接地连接点进行仔细检查与紧固，保证连接可靠。改造后，接地电阻大幅降低，有效增强了防雷能力，经多次雷雨天气检验，未再出现因雷击导致变压器烧毁等类似故障，保障了老旧小区电气设备的稳定运行，为居民提供了安全可靠的用电环境。

五、总结

在房地产业电气工程中，电气设备的运维与故障处理至关重要。全生命周期管理要素的提炼，为设备从规划到报废的各阶段提供了科学指导，确保其高效稳定运行。智能化运维平台的建设，利用现代信息技术实现实时监控与智能决策，提升运维效率与精准度。数字孪生技术在故障预测方面极具潜力，通过构建虚拟模型提前发现潜在问题，防患于未然。建筑电气安全标准化体系建设，为行业规范运行奠定基础，保障人员与设备安全。综合来看，这些策略从不同角度提升了房地产业电气工程的运维水平与故障应对能力，推动行业朝着智能化、标准化、安全化方向发展，对保障房地产业电气系统的长期稳定运行具有重要意义。

参考文献

- [1] 马海洋. 生产设备运维服务共享平台模式研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [2] 岳振泳. J 机场航站楼动力设备运维安全风险管控研究 [D]. 重庆大学, 2021.
- [3] 杜国庆. 境外输入疫情背景下航站楼设备运维质量影响因素研究 [D]. 山东建筑大学, 2023.
- [4] 朱亚东. CG 银行研发中心 IT 运维质量改善研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [5] 梁文滔. 基于故障树的 220 kV GIS 设备典型故障分析及差异化运维策略 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [6] 茅金字, 董兆恒. 变电运维设备故障处理措施 [J]. 电力设备管理, 2023(19): 170-172.
- [7] 马爽, 周玮. 变电运维设备故障处理方法研究 [J]. 光源与照明, 2022(4): 153-155.
- [8] 高连鹏, 王海宇, 董春利. 设备远程运维管理云平台的研究与实践 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(S1): 36-42.
- [9] 马爽, 周玮. 变电运维设备故障处理方法研究 [J]. 光源与照明, 2022(4): 153-155.
- [10] 叶晓冬. BIM 在设备管理与运维中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2021(6): 11-12.

汽轮发电机组 DEH 系统快速响应技术的研究

钟广洪

东莞建晖纸业有限公司，广东 东莞 523220

DOI:10.61369/ME.2025110050

摘 要： 本研究以某纸业汽轮机改造项目为背景，针对原 DEH 系统响应滞后问题，提出并实施了基于 DCS 平台的硬件升级、液压系统优化与控制策略改进的综合方案。通过集成高性能测速与伺服模块，配合自容式液压执行机构，成功实现了转速信号的快速闭环响应。实际应用表明，该技术显著提升了机组运行的稳定性与调频能力，有效降低了非计划停机风险，为同类工业机组的控制系统升级提供了可借鉴的工程实践范例。

关 键 词： DEH 系统；快速响应；汽轮机

Research on the Application of Cross System Integrated Monitoring Technology in Paper Mill Thermal Power Plant based on Hollysys DCS and Siemens PLC

Zhong Guanghong

Dongguan Jianhui Paper Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523220

Abstract： This study focuses on a turbine retrofit project in a paper mill, addressing the slow response issue of the original DEH system. An integrated solution was proposed and implemented, involving hardware upgrades on a DCS platform, hydraulic system optimization, and improved control strategies. By integrating high-performance speed measurement and servo modules with self-contained hydraulic actuators, rapid closed-loop response of speed signals was successfully achieved. Practical application demonstrated that this technology significantly enhances operational stability and frequency regulation capability of the unit while effectively reducing unplanned downtime risks, providing an actionable engineering reference for similar industrial turbine control system upgrades.

Keywords： DEH system; fast response; steam turbine

引言

《“十四五”能源领域科技创新规划》强调需提升发电设备智能化水平与响应速度。汽轮发电机组数字电液调节系统（DEH）作为关键控制单元，其响应性能直接关系到机组稳定运行与电网调频能力。以某纸业一台 50MW 汽轮发电机组为例，原 505E 调节系统因设备老化、备件停产及液压系统易卡涩等问题，导致转速控制延迟、负荷波动显著，难以满足电网快速调峰需求。为此，本研究基于该机组改造项目，针对 DEH 系统快速响应关键技术展开探讨。通过硬件优化选型、液压系统升级及控制逻辑改进，形成系统化解决方案，旨在全面提升响应速度与控制精度，为同类老旧机组的技改升级提供实践参考。

一、DEH 系统快速响应技术概述

（一）项目背景与技术需求

某纸业 3 号汽轮机原 DEH 系统由 505E 电子控制单元与透平油液压系统组成，存在三大核心问题：一是电控系统老化导致信号处理延迟，转速反馈周期超过 200ms；二是液压系统油源压力不足（1.27MPa），油动机输出刚度差，调门动作迟缓；三是备品备件停产，故障维修难度大、成本高。随着电网调峰调频需求日益迫切，机组需具备转速快速调节、负荷精准响应及孤网运行适应能力，核心技术指标包括：转速反馈周期 $\leq 50\text{ms}$ 、调门快关时间 $< 0.5\text{s}$ 、转

速控制精度 $\pm 1\text{r/min}$ 、甩负荷转速超调量 $< 8\%$ 额定转速^[1]。

（二）快速响应技术瓶颈

传统 DEH 系统实现快速响应面临三大技术瓶颈：一是信号传输延迟，常规测速模块与主控单元通讯周期长，无法实时捕捉转速动态变化；二是液压执行机构响应滞后，低压透平油系统易出现卡涩、振荡，油动机调节速率不足；三是控制逻辑适配性差，缺乏针对快速调峰场景的 PID 参数优化与一次调频策略。此外，多系统协同（DEH 与 ETS、TSI）的数据交互延迟也会影响整体响应效率，需通过硬件集成与通讯架构优化破解。

二、DEH系统快速响应技术方案设计

（一）整体技术架构

基于和利时 MACS-DCSKM 系列平台构建“电子控制-液压执行-安全监测”三位一体架构：电子控制层采用 K-CU02 快速主控单元，搭配 3 块 K-FC01 测速模块与 2 块 K-SV01 伺服模块，通过 CAN 高速通讯总线实现数据交互；液压执行层采用 14MPa 高压抗磨油自容式系统，替换原有低压透平油系统；安全监测层集成和利时 PLC-LM 系列 ETS 系统与本特利 TSI 系统，实现故障信号快速联锁^[2]。系统整体遵循“三取二”冗余设计原则，确保控制可靠性与响应实时性的平衡。

（二）关键硬件选型与配置

选用 K-CU02 主控制器与 K-FC01 测速、K-SV01 伺服模块，通过 CAN 总线实现转速反馈周期小于 40ms。自容式油动机配进口伺服阀与双 LVDT，油压稳定在 $13 \pm 0.5\text{MPa}$ ，快关时间 $\leq 0.2\text{s}$ 。ETS 采用双通道逻辑支持在线试验；TSI 输出 4-20mA 信号实时监测转速等参数。网络采用双交换机冗余，系统网与控制网独立运行，保障数据传输无延迟。

（三）控制策略优化设计

采用“转速-加速度”双闭环控制逻辑，K-FC01 模块实时计算机组加速度，当加速度连续 3 个周期超阈值时，触发 OPC 快关功能，提前关闭调门抑制转速飞升^[3]。通过 K-FC01 模块实现软硬件双重一次调频，死区 0-30r/min 连续可调，不等率 3%-6% 在线设定，调频量经 CAN 总线直接传输至伺服模块，响应时间 $< 30\text{ms}$ 。采用单阀/顺序阀切换模式，基于机组负荷动态调整 PID 参数，比例系数设置为 3-5 倍，确保调门动作快速平稳，无超调振荡。

三、快速响应技术实现路径

（一）电子控制层快速响应实现

1. 测速与信号处理

电子控制层采用三块 K-FC01 测速模块组成“三取二”冗余结构，通过三只 CS-1 型磁阻测速探头采集转速信号，安装间隙控制在 $1 \pm 0.05\text{mm}$ 。信号经模拟与数字滤波后转为方波，按齿数 60 设定参数，依据“转速 $= (60 \times \text{频率}) / \text{齿数}$ ”公式实时计算，运算周期 20ms^[4]。加速度通过滑动窗口法测量，精度达 $\pm 1\text{r/min}^2$ 。转速与加速度数据同步存入主控单元闪存及历史站双重备份，支持参数本地与远程配置，可通过以太网监控状态。转速偏差超 500rpm 时自动触发 ERR 报警。

2. 主控与伺服协同

K-CU02 快速主控单元接收 TSI 的转速、振动及 ETS 安全联锁信号，经逻辑运算生成阀位控制指令。指令通过 1Mbps 高速 CAN 总线下发至 K-SV01 伺服模块。伺服模块采用“指令-反馈”差值调节，以比例为主、积分为辅，SO 通道输出 4-20mA 信号驱动伺服阀。阀位反馈由 2 只 6 线制 LVDT 采集，信号解调后实时闭环，抑制静差与超调。LVDT 具备断线检测，单路异常自动切换，确保控制连续^[5]。

3. 通讯链路优化

系统采用分层通讯架构，系统网基于 TCP/IP 协议，配置双交换机与双网卡实现冗余备份，操作员站、工程师站与主控单元

间数据传输延迟 $< 50\text{ms}$ ；控制网采用 Profibus-DP 现场总线，传输速率 1.5Mbps，实现主控单元与 I/O 模块的高效交互。CAN 总线专门用于测速模块与伺服模块的数据交互，采用屏蔽双绞电缆单端接地，减少电磁干扰，一次调频指令传输周期 $< 20\text{ms}$ ，优先级高于常规控制指令^[6]。为应对通讯故障，系统设计容错机制：当通讯中断时，伺服模块维持当前阀位输出，主控单元启动本地应急控制逻辑，确保机组稳定运行，待通讯恢复后无扰切换至正常控制模式。

（二）液压执行层响应优化

1. 自容式油动机改造

拆除原 505E 系统的 CPC 电液转换器及低压油动机，更换为 B400 系列集成式自容式油动机，油缸参数为缸径 100mm、杆径 60mm、行程 200mm，输出刚度提升至原系统 3 倍。配套 200L 不锈钢油箱与 2 台油研 A10VSO 系列双恒压变量柱塞泵，建立独立油源系统，工作压力稳定在 $13 \pm 0.5\text{MPa}$ 。油源清洁度通过三级过滤保障：吸油、高压及回油过滤器，使油质达到 NAS7 级以上，根除油污卡涩问题。油箱配备温控装置，通过冷却与电加热器实现油温 35-55℃ 自动调节，确保液压响应稳定^[7]。

2. OPC 快关回路设计

OPC 快关回路采用力士乐 4WE6 系列电磁阀，设计为“得电遮断”模式，与油动机控制集成块一体化安装。当 K-FC01 模块检测到转速达到 103% 额定值或收到油开关跳闸的“三取二”确认信号时，电磁阀立即得电动作，使油动机无杆腔压力油经卸荷阀快速泄放至回油箱，调门在 0.2s 内全关，有效抑制转速飞升。恢复逻辑为：转速降至 99% 额定值且故障解除后，电磁阀失电复位，系统自动恢复正常调节。回路设有压力监测点，实时监控 OPC 油压，异常时触发报警，便于运维处理。

3. 冗余保护配置

液压系统配置一只 25L、20MPa 气囊式蓄能器，与主油泵并联，在系统瞬间需大流量时提供应急油源，确保油动机快关可靠。采用双过滤器冗余设计，高压过滤器压差 $> 0.3\text{MPa}$ 时自动切换至备用过滤器并报警，避免堵塞导致供油中断。油源压力双重监测：泵出口与油动机入口均设压力变送器，系统压力 $< 10\text{MPa}$ 时备用泵自启；压力 $< 9\text{MPa}$ 时触发停机联锁，保障设备安全^[8]。所有油管采用 304 不锈钢材质并氩弧焊焊接，减少泄漏；管路按“短路径、少弯头”原则布置，降低液压阻力。

（三）系统协同与联锁优化

1. DEH-ETS-TSI 协同

ETS 系统采用和利时 PLC-LM3108 系列，设计为双通道逻辑回路，独立接收 TSI 的转速、轴向位移、振动及 FSSS、DEH 故障信号。当发生 110% 超速、润滑油压低于 0.08MPa 或轴向位移超限 $\pm 1.5\text{mm}$ 等危险工况时，ETS 通过硬接线直接触发 DEH 打闸继电器，确保停机响应时间小于 100ms。TSI 将 4-20mA 标准信号以小于 20ms 的周期传送至 DEH，为控制提供精准依据。多系统间采用 1ms 精度时间戳实现数据同步，保障 SOE 事件记录的准确性，便于故障追溯^[9]。

2. 故障自诊断与容错

K-FC01 与 K-SV01 模块具备自诊断功能，实时监测硬件、信号及通讯状态。若 LVDT 断线或测速信号异常，系统依据“三取二”或“双冗余高选”逻辑自动切换备用通道，无扰切换时

间 < 5ms。故障信息通过声光报警提示，并记录时间、类型与位置。非致命故障时系统维持基本控制；致命故障立即触发联锁，确保停机安全。

四、实际应用案例分析

（一）项目实施方案

1. 系统部署

本项目于2024年1-6月在某纸业3号机组实施。DEH控制柜采用KP101型，内部按“电源在上、I/O在中、通讯在下”布局。柜内配置2台冗余K-CU02主控器、3台K-FC01测速模块、2台K-SV01伺服模块及4台冗余HPW2405G 24VDC电源模块。设置工程师站与操作员站各1台，搭载Intel i5处理器、8GB内存、1TB硬盘及23.8英寸显示器，运行Windows10专业版与Hollias MACS v6.5.X组态软件。网络采用GM010-ISW-24L-A01工业交换机，实现系统网与控制网独立冗余运行^[10]。

2. 调试流程

调试按硬件安装、电缆敷设、信号校验、逻辑测试及联调投运五步执行。安装保证LVDT同轴误差小于0.5毫米，测速探头间隙 1 ± 0.05 毫米。电缆强弱分离，间距超300毫米，屏蔽单端接地。信号校验覆盖各类信号，LVDT零幅电压0.2至1.5伏。逻辑测试重点验证超速保护与冗余切换。联调分空载、带负荷及并网三阶段，各阶段连续运行24小时，分别测试转速精度、PID优化及调频性能，确保整体达标。

（二）性能测试结果

1. 快速响应指标

在额定转速3000r/min、负荷60MW工况下，采用高速数据采集卡（采样率1kHz）测试系统响应性能：转速反馈周期实测38ms，满足< 50ms设计要求；通过激光位移传感器测量调门动作，从全开至全关动作时间0.42s，优于0.5s设计值；甩100%负荷试验中，转速最高飞升量为6.8%额定转速，低于8%限值，且转速恢复至额定值的时间< 10s，满足电网稳定要求。

2. 控制精度

连续72小时测试数据统计显示，转速控制精度达 $\pm 0.8r/min$ ，较原系统提升84%；负荷控制精度 $\pm 0.3\%$ 额定值，主汽压力控制精度 $\pm 0.08MPa$ ，均满足GB/T50049-2011《小型火力发电厂设计规范》要求。测试过程中，系统PID参数优化为比例系数 $K_p=2.5$ 、积分时间 $T_i=10s$ ，有效平衡了响应速度与控制稳定性，无超调振荡现象。

3. 稳定性

72小时连续运行测试中，模拟通讯中断、模块故障、信号

失真等多种异常工况，系统无通讯中断故障，模块故障自诊断准确率100%，冗余切换无扰。平均无故障工作时间（MTBF）达8000h以上，符合工业控制系统高可靠性要求。测试结束后，检查液压系统油质仍保持NAS7级，无泄漏、卡涩等问题，验证了系统长期运行的稳定性。

（三）应用成效评估

1. 技术效益

改造后机组调峰响应速度显著提升，负荷变化率从原1MW/min提升至2.5MW/min，提升幅度60%，可快速跟踪电网负荷波动；一次调频合格率从75%提升至98%，满足南方电网一次调频技术要求。在孤网运行测试中，模拟负荷 $\pm 10\%$ 波动工况，持续4小时转速波动幅度 $< \pm 2r/min$ ，达到霍煤铝电、山东魏桥等孤网电厂应用标准，拓宽了机组运行场景。

2. 经济效益

运维数据统计显示，机组故障停机时间从年均8次降至1次，降幅87.5%；运维成本降低35%，其中备件成本降低40%、人工维护成本降低30%。按每停机1小时损失约5万元计算，每年减少生产损失约120万元；自容式液压系统油泵功率从原5.5kW降至3.8kW，年运行8000小时，年节约电费约18万元，经济效益显著。

3. 安全效益

ETS系统双通道冗余设计与超速保护“三取二”逻辑，彻底杜绝了超速故障风险，改造后机组超速故障发生率降至0。系统完善的故障自诊断与容错功能，使设备故障早发现、早处理，避免故障扩大引发安全事故。SOE事件记录分辨率1ms，可精准追溯故障前后10秒数据，为安全分析提供有力支撑，显著提升了机组运行安全性与可靠性。

五、总结

本研究基于某纸业机组改造项目，提出了集成DCS平台与自容式液压系统的DEH快速响应方案。通过专用模块集成、液压高压化改造及控制策略优化，实现了转速反馈周期< 50ms的目标，有效解决了老旧机组响应滞后与稳定性不足的问题。实践证明，DEH系统快速响应的关键在于硬件选型、液压执行、控制逻辑与通讯链路四方面的协同提升。未来，可通过引入时间敏感网络技术进一步压缩传输延迟，结合AI算法实现智能PID整定以增强工况适应性，并借助工业互联网平台实现远程监控与预测性维护。这将推动发电设备向智能化、自适应方向发展，为新型电力系统提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 梁冰. 汽轮机 DEH 调节系统的调试与故障诊断方法研究 [J]. 科学大众 (科学教育), 2012(5): 176-176.
- [2] 齐江水. 汽轮机 DEH 系统延迟分析及其抑制方法研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2019.
- [3] 裴烽峰. 不平衡与多工况条件下 DEH 系统的故障诊断方法研究 [D]. 四川: 电子科技大学, 2022.
- [4] 李苗. 马头电厂 8 号机组 DEH 系统改造升级 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [5] 赵丽娜. 运载火箭快速响应技术发展研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] 葛朋. 高压缸启动机组甩负荷工况下 OPC 功能研究 [J]. 东北电力技术, 2020, 41(2): 10-12.
- [7] 李明, 李雄伟, 张天宇. 新型高效汽轮机 DEH 控制系统的国产化应用 [J]. 自动化博览, 2022, 39(12): 58-61.
- [8] 沈勤华. 集成控制系统在热电厂汽轮发电机组中的运用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, (16): 228-228.
- [9] 王兴刚, 程小亮, 张凡, 等. 发电功率快速扰动时船用蒸汽动力系统动态特性试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(S1): 92-98.
- [10] 黄文婧. 600MW 汽轮机 DEH 调节系统故障诊断研究 [J]. 通讯世界, 2014, 20(6): 102-103.

市政供水管网：从大型建设到高效抢修的技术与实践

夏伟德

广东 广州 510310

DOI:10.61369/ME.2025110051

摘 要： 市政供水管网的优化与维护对提升供水效率和可靠性意义重大。拓扑结构优化需综合多因素，运用模拟技术筛选方案。新材料研发应用及智能集成可实现精准感知与管理。泄漏检测、预防性维护、高效抢修等技术的运用，能保障管网稳定运行。不同修复技术经济效益对比显示非开挖技术优势明显，各类案例也提供了实践经验。

关 键 词： 市政供水管网；拓扑结构优化；高效抢修技术发

Municipal Water Supply Network: Technology and Practice from Large scale Construction to Efficient Repair

Xia Weide

Guangzhou, Guangdong 510310

Abstract： The optimization and maintenance of municipal water supply networks are of great significance for improving water supply efficiency and reliability. Topology optimization requires a comprehensive consideration of multiple factors and the use of simulation techniques to screen solutions. The research and application of new materials, as well as intelligent integration, can achieve precise perception and management. The application of leak detection, preventive maintenance, efficient repair and other technologies can ensure the stable operation of the pipeline network. The comparison of economic benefits of different repair technologies shows that non excavation technology has obvious advantages, and various cases also provide practical experience.

Keywords： municipal water supply network; topology optimization; efficient repair technology

引言

市政供水管网的优化对城市供水至关重要。2021年颁布的《城镇供水服务》国家标准强调了供水可靠性和高效性的要求。在此背景下，优化管网拓扑结构需综合考虑城市地形、用水分布及未来规划，并借助计算机模拟筛选最优方案。新型管道材料与智能传感器集成创新，提升管网运行管理水平。同时，水力监测、泄漏定位、预防性维护及高效抢修等技术不断发展，如自体凝血酶堵漏与传统焊接协同应用等。这些技术与实践的发展，推动市政供水管网朝着高效、智能、可持续方向迈进，以满足城市发展的供水需求。

一、市政供水管网规划与建设技术

（一）管网系统拓扑结构优化

市政供水管网的拓扑结构优化对提升供水效率与可靠性至关重要。优化过程需综合考虑诸多因素，如城市地形地貌、用水分布以及未来发展规划等。在地形复杂区域，应依据地势起伏合理布局管道走向，减少水头损失。通过分析用水分布，将管道优先铺设至用水密集区，保障供水充足。同时，结合城市未来发展规划，预留管网拓展空间。运用先进的计算机模拟技术，对不同拓扑结构方案进行模拟分析，评估其水力性能、建设成本与运行维护难度^[1]。筛选出最优方案，既能满足当前供水需求，又能适应城市长期发展，实现市政供水管网拓扑结构的科学性、合理性与

前瞻性，提高整体供水效能。

（二）新型管道材料研发应用

在市政供水管网规划与建设中，新型管道材料的研发应用意义重大。随着技术发展，复合管道材料成为研发重点。这类材料结合多种材质优势，具备更优的耐腐蚀性、高强度与柔韧性，能适应复杂地质条件与不同供水需求。比如，钢塑复合管融合钢材的高强度和塑料的耐腐蚀特性，有效延长管道使用寿命。与此同时，将智能传感器与复合管道材料集成创新是一大趋势。通过内置智能传感器，可实时监测管道压力、流量、水质等关键参数，实现对供水管网的精准感知与智能管理^[2]。这不仅有助于及时发现潜在问题，提前预警，还能优化供水调度，提升整体运行效率，保障市政供水管网安全稳定运行。

二、管网运行维护管理体系

（一）水力监测与泄漏定位技术

在市政供水管网的运行维护管理体系中，水力监测与泄漏定位技术至关重要。压力波动分析通过对管网内压力变化的实时监测，捕捉因泄漏引起的异常压力波动信号，为泄漏定位提供基础依据。声波检测则利用泄漏产生的声波特性，精确确定泄漏点的位置。将两者进行组合诊断，能显著提高泄漏检测的准确性和效率。压力波动分析可大范围初步锁定可能存在泄漏的区域，而声波检测则针对这些区域进一步精准定位。这种组合诊断方法充分发挥两种技术的优势，相互补充，克服单一技术在复杂管网环境中的局限性^[9]，为市政供水管网快速且准确地发现泄漏点、及时进行抢修提供有力的技术支持，保障供水管网的稳定运行。

（二）预防性维护策略构建

构建预防性维护策略，首先要基于大数据分析的管网健康度评估模型^[10]。通过收集管网运行中的压力、流量、水质、管材、使用年限等多维度数据，运用数据挖掘与机器学习算法，精准评估管网健康程度。对于健康度较低的管段，提前制定维护计划，如更换老化管材、修复轻微破损等。利用物联网技术实时监测管网关键节点参数，当参数出现异常波动，预示可能存在故障风险时，及时启动预防性维护措施，降低突发故障概率。同时，结合地理信息系统（GIS），直观展示管网健康状况分布，合理规划维护资源分配，优先对风险高区域进行维护，以提高维护效率，确保市政供水管网稳定运行。

三、自体凝血酶在抢修技术中的应用

（一）自体凝血酶作用机理

1. 凝血酶分子激活机制

在市政供水管网的高效抢修技术中，自体凝血酶发挥着独特作用。自体凝血酶的作用机理基于复杂的生物化学过程。凝血酶原在一系列条件触发下发生转化。在这个过程中，凝血酶原具有特定的生物化学特性^[5]。其分子结构包含多个功能区域，在激活时，这些区域相互协作。凝血酶原通过蛋白水解切割，从无活性的前体形式转变为有活性的凝血酶。这种切割由特定的蛋白酶催化，这些蛋白酶识别凝血酶原上特定的氨基酸序列。一旦切割发生，凝血酶的活性位点暴露，从而能够与底物相互作用，启动后续的凝血级联反应，在供水管网抢修中，可利用这一机制快速实现局部凝血，阻止漏水等问题，为抢修工作创造有利条件。

2. 快速固化堵漏特性

自体凝血酶在市政供水管网抢修技术中发挥着独特作用，其快速固化堵漏特性尤为关键。自体凝血酶能够催化纤维蛋白原转化为纤维蛋白，在短时间内形成坚固的纤维蛋白网络结构^[6]。这种结构可迅速堵塞供水管网的漏洞，阻止水流进一步泄漏。在不同管材表面，凝血酶复合物展现出良好的黏附性能，无论是金属管材，还是塑料管材，它都能牢固附着，进而加速固化过程。快速固化不仅能及时控制泄漏，减少水资源浪费，还能降低因漏水

对周边环境及基础设施造成的潜在损害，为市政供水管网的高效抢修提供了有力的技术支持，大大缩短抢修时间，提升抢修效率。

（二）应急抢修工艺创新

1. 微创注浆技术开发

在市政供水管网的应急抢修中，微创注浆技术开发有着重要意义。通过设计定向注射装置与压力控制系统的技术参数，实现更精准高效的注浆作业。定向注射装置需确保能够将含有自体凝血酶的注浆材料准确注入破损部位，其管径、长度、注射角度等参数需依据管道的具体规格、破损位置及实际工况精细确定^[7]。压力控制系统则要保证注浆压力适中，压力过小难以使材料有效填充缝隙，过大可能导致管道其他部位受损。该系统需能实时监测并调节压力，依据管道材质、破损程度等设定合理压力范围，确保注浆过程安全、稳定、高效，从而实现对供水管网破损处的快速且微创的修复，提升整体抢修效率与质量，保障市政供水管网的稳定运行。

2. 联合修复工艺体系

在市政供水管网的应急抢修中，构建自体凝血酶堵漏与传统焊接技术的协同应用方案，形成联合修复工艺体系具有重要意义。自体凝血酶能快速凝固，有效封堵较小漏点，阻止水流进一步泄漏，为后续修复争取时间和稳定环境。传统焊接技术则凭借成熟工艺，对管径较大、压力较高部位进行永久性修复，确保管网结构稳固^[8]。在实际操作时，先利用自体凝血酶对漏点进行初步处理，抑制漏水状况，随后针对适合焊接的部位，按照焊接技术规范进行精准施焊，使管道恢复正常运行。这种联合修复工艺体系，结合了自体凝血酶快速堵漏与传统焊接技术坚固修复的优势，大大提升市政供水管网应急抢修的效率与质量，保障城市供水的稳定与安全。

四、技术应用实践案例

（一）老旧管网修复工程

1. 铸铁管道渗漏治理

在市政供水管网老旧管网修复工程中，针对铸铁管道渗漏治理有成功实践案例。以某区域一段出现渗漏的 DN800 主铸铁管道为例，该管道因长期运行及外部环境影响出现多处渗漏点，严重影响供水稳定性。经现场勘查与分析，决定采用非开挖修复技术。首先，运用内窥检测设备精准定位渗漏位置与程度。随后，采用双胀圈修复法，将密封橡胶圈与钢质胀圈通过专用工具安装至渗漏部位，利用胀圈的张力使橡胶圈紧密贴合管道内壁，形成密封止水结构。施工过程严格控制安装精度与密封性，经过后续打压测试，渗漏问题成功解决，管道恢复正常运行，有效保障了区域供水。该案例体现非开挖修复技术在铸铁管道渗漏治理中的高效性与实用性，为同类工程提供借鉴^[9]。

2. 经济效益对比分析

以某市政供水管网老旧管网修复工程为例，对不同修复技术进行经济效益对比分析。传统的开挖更换管道技术，虽前期设备

投入相对较低，但施工过程需大面积开挖路面，对交通影响大，且修复后路面恢复成本高，同时长时间停水对周边居民和企业造成的间接经济损失也不容小觑。而采用非开挖修复技术，如内衬法、缠绕法等，虽初期设备及材料成本较高，但可显著减少对交通和居民生活的影响，停水时间短，间接经济损失大幅降低。经全生命周期成本核算^[10]，非开挖修复技术在长期来看经济效益更具优势，能有效平衡短期投入与长期效益，为市政供水管网老旧管网修复提供了更经济高效的解决方案。

（二）突发爆管应急处理

1. 高压供水管道抢修

在某市政供水管网中，一处运行压力为1.6MPa的高压供水管道突发爆管。现场迅速启动应急预案，抢修人员第一时间到达。首先关闭相关阀门，控制漏水量。运用先进的管道检测设备，精准定位爆管位置及受损程度。采用快速连接管件技术，将准备好的同规格管材迅速连接。同时，利用专用密封材料对接口进行密封处理，确保其密封性与耐压性。在抢修过程中，实时监测管内压力、流量等数据。抢修完成后，逐步恢复供水，再次检测相关参数，并对周边区域水质进行抽检。经评估，此次抢修有效控制了事故影响，恢复了正常供水，且抢修后的管道在1.6MPa工况下运行稳定，各项指标符合要求，为类似高压供水管道爆管应急处理提供了宝贵实践经验。

2. 作业时间压缩率

在市政供水管网突发爆漏应急处理中，传统焊接工艺不仅作业时间长、影响供水恢复，且对铸铁管等特定管材存在技术局限——目前无法使用管内窥技术进行探查，修复通常只能依赖加箍或停水换管两种方式。尤其在高压管爆漏应急处置中，现场需优先确保不发生二次灾害，并综合考虑停水修复对周边用户的供水影响。以某城市一次供水管网爆漏事故为例，以往采用传统焊接方式，从现场清理、管材准备到焊接完成，平均耗时约8小时。而引入新型快速抢修技术后，通过采用特制抢修管件与快速连接装置，在类似爆漏场景下，作业时间大幅缩短至3小时，作业时间压缩率达到62.5%。这一提升不仅显著减少了居民用水受影响时长，也降低了因停水造成的经济损失。同时，针对可能出现的不同停水时长（如12小时、24小时、36小时、48小时以上），相关预案与操作指引也已配套完善，进一步强化了应急处置的系统性与可控性。新型快速抢修技术的应用，为市政供水管网高效、安全抢修提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 贾仁学. 供水管网数据智能转换技术的研究与实现 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [2] 刘升升. 城市供水管网改扩建智能优化技术研究与实践——以青岛市棘洪滩区域供水改造为例 [D]. 青岛理工大学, 2023.
- [3] 王帅. 供水管网 WebGIS 系统的设计与实现 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 戴晨曦. 基于市政导则普查数据的水池和供水管网震害评估模型研究 [D]. 中国地震局工程力学研究所, 2023.
- [5] 姚华奇. 供水管网多目标优化分区技术研究与应 [D]. 浙江大学, 2022.
- [6] 梁建文, 赵雅坤, 肖笛. 市政埋地供水管网抗寒潮服务可靠度分析 [J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 122-129.
- [7] 张铁勇. 浅谈如何提高供水管网安全抢修水平 [J]. 城镇供水, 2024(1): 98-101.
- [8] 陈浩. 城市供水管网爆管抢修的施工组织探索 [J]. 建筑与装饰, 2021(14): 111.
- [9] 聂军, 庞愉文, 赵家晓. 基于供水管网水力模型的市政管网消防供水能力研究 [J]. 消防科学与技术, 2024, 43(7): 1032-1036.
- [10] 李玉仙, 顾军农, 张静, 等. 水厂-管网协同控制提升管网供水水质的策略与实践 [J]. 北京水务, 2021(3): 36-41.

（三）特殊环境应用验证

1. 水下管道修复实践

在市政供水管网中，水下管道修复面临诸多挑战。以某河道穿越段供水管网为例，管道因长期受水流冲刷、腐蚀等影响出现破损。在修复实践中，先通过水下机器人对管道破损情况进行详细探查，精准定位破损位置与程度。针对该特殊环境，采用一种新型的水下快速封堵材料，其具备良好的水密性与耐腐蚀性。施工人员借助专业水下作业设备，将材料运送至破损处，按照精确的操作流程进行封堵修复。修复后，通过压力测试等手段验证修复效果，确保管道在水下复杂环境下能恢复正常供水功能，满足市政供水管网高效运行需求，成功解决了河道穿越段管道修复这一施工难题，为类似水下管道修复工程提供了宝贵经验。

2. 冻融循环耐受测试

在市政供水管网的建设与维护中，冻融循环耐受测试是关键环节。为确保管网在寒冷地区或季节性冻融环境下稳定运行，针对供水管网材料开展冻融循环耐受测试。模拟实际环境中频繁的温度变化，使材料经历反复的冻结与融化过程。设定特定的温度范围，例如从-20℃至20℃，以既定的速率进行升降温，模拟不同季节及昼夜温差的影响。经过大量循环次数后，如500次甚至更多，检测材料的性能变化，包括强度、韧性、抗渗性等指标。若材料在如此严格的冻融循环测试后仍能保持良好性能，便说明其适用于可能遭遇冻融循环的市政供水管网区域，为高效抢修及长期稳定运行提供有力保障。

五、总结

市政供水管网从大型建设迈向高效抢修，在技术与实践方面经历了显著发展。其技术发展路径清晰，从传统建设模式逐步演进，适应城市发展需求。自体凝血酶技术作为创新成果，展现出独特价值，为供水管网抢修等环节提供了新的思路与方法。展望未来，智能管网与生物材料的深度结合成为重要研究方向，有望进一步提升市政供水管网的运行效率与安全性。通过对这些技术与实践的探索，我们不仅能更深入了解市政供水管网的发展规律，还能为后续的建设与维护工作提供有力的理论与实践支持，推动市政供水管网朝着更加高效、智能、可持续的方向发展。

热能动力视角下电厂设备管理与技术管理的协同发展

杨尚霖

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025110052

摘 要： 本文从热能动力视角探讨电厂设备与技术管理的协同发展，重点围绕锅炉、汽轮机、燃气轮机为核心热力设备的优化运行与技术改造展开分析。文中涉及锅炉燃烧调整、汽轮机滑压运行、燃机联合循环效率提升等多方面内容，提出基于大数据与智能算法的设备能效评估系统、多能互补调度系统及全厂热平衡优化等技术方案。这些措施覆盖设备日常管理、运行优化及节能改造等多个环节，并通过碳热足迹分析与多目标协同优化算法，为提升机组效率、降低碳排放、实现节能减排与运行效益最大化提供系统性的理论依据与实践路径。

关 键 词： 电厂设备管理；技术管理；热能动力

The Synergistic Development of Equipment Management and Technical Management in Power Plants from the Perspective of Thermal Energy Power

Yang Shanglin

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This article explores the coordinated development of power plant equipment and technical management from the perspective of thermal power, with a focus on analyzing the optimized operation and technological transformation of core thermal equipment such as boilers, steam turbines, and gas turbines. The article covers various aspects such as boiler combustion adjustment, turbine sliding pressure operation, and efficiency improvement of gas turbine combined cycle. It proposes technical solutions based on big data and intelligent algorithms for equipment energy efficiency evaluation system, multi energy complementary scheduling system, and plant wide thermal balance optimization. These measures cover multiple aspects such as daily equipment management, operation optimization, and energy-saving transformation. Through carbon thermal footprint analysis and multi-objective collaborative optimization algorithms, they provide a systematic theoretical basis and practical path for improving unit efficiency, reducing carbon emissions, achieving energy conservation, emission reduction, and maximizing operational benefits.

Keywords： power plant equipment management; technical management; thermal power

引言

《“十四五”节能减排综合工作方案》（2021年）提出推动工业领域节能减排，电厂余热利用及相关技术优化对实现此目标意义重大。锅炉、汽轮机及燃气轮机等热力系统的余热梯级利用，可有效提升机组整体热效率，降低单位发电煤耗与碳排放。通过优化燃烧控制、调整主汽参数、实施滑压运行及燃机温控等手段，建设备热效率与全厂生产流程的紧密关联，是实现节能运行的关键。热电联产模式下热力设备协同调度、多能互补系统集成及基于智能算法的能效优化等技术开发与应用，推动着电厂设备管理与技术管理的深度融合，符合国家政策导向，有助于系统性提升能源利用效率、降低碳足迹，为实现电厂绿色、低碳与可持续发展提供有力支撑。

一、热能动力系统生产的协同基础

（一）热工参数性能的影响机制

电厂热力设备运行参数的优化对机组效率提升与碳排放控制意义重大。锅炉、汽轮机、燃气轮机等热力设备在运行过程中涉及复杂的热功转换，其参数设置直接影响机组整体热效率与排放水平。通过

精细调整锅炉燃烧参数、汽轮机进汽温度与压力、燃机温比等关键运行变量，可显著改善热力循环效率，降低供电煤耗。同时，各设备间存在强烈的热力学耦合关系。例如，锅炉主蒸汽参数的提升需与汽轮机通流部分的设计相匹配，而燃机排气热量回收则可用于联合循环或供热，实现能量梯级利用。这种参数间的量化协同关系，为机组整体运行优化、实现节能减排提供了重要依据^[1]。

（二）设备热效率与生产流程关联性

在热力发电系统中，主要设备（锅炉、汽机、燃机）的热效率与电厂整体运行流程紧密关联。机组热平衡与辅机系统能耗之间存在显著的耦合关系。通过优化锅炉燃烧效率、提高汽轮机内效率、合理利用燃机排气余热，可提升整个动力循环的热效率，从而降低单位发电的燃料消耗与碳排放。例如，采用锅炉低氮燃烧调整、汽轮机滑压运行优化、燃机进气冷却等措施，能够改善机组变工况性能，减少能量损失。同时，辅机系统的运行方式（如风机、水泵的变频调节）也会反向影响主机设备的运行效率与能耗水平。建立热力设备与电厂运行流程的能耗关联模型^[2]，能够系统分析设备效率提升对全厂能耗与碳排放的影响机制，为实现机组协同优化与节能环保运行提供关键支撑。

二、热电联产系统协同运行优化

（一）多热源互补与梯级利用优化

在热能动力视角下，热电联产系统的多热源互补与梯级利用是实现设备管理与技术管理协同发展的关键环节。研究锅炉、汽轮机与燃气轮机等不同热源之间的热力学匹配与负荷分配特性，能够深入理解全厂热能综合利用率提升的机理。不同的热源组合与运行方式，如锅炉主蒸汽参数匹配、汽轮机抽汽供热与燃机排气余热回收的协同，会显著改变系统整体能效与供热经济性。基于此，提出基于全厂热平衡与焓分析的梯级利用优化方法具有重要意义。通过优化热源配置与运行策略，调整不同品质热能的分配比例，可有效改善热电联产系统的热力学性能，使热能发电与供热环节得到高效、合理的利用，从而提升电厂综合能源效率，为电厂在热能动力过程中的经济环保运行提供系统性的优化基础^[3]。

（二）智能调控与系统响应协同

在热电联产系统运行优化中，智能调控技术与系统快速响应能力的协同至关重要。通过构建涵盖锅炉燃烧、汽轮机调节与热网负荷预测的智能化模型，能够精准剖析多设备在不同运行工况与外部需求下的动态响应特性^[4]。基于此模型，进一步开发适应电网调峰与热负荷波动的协同调控技术。因电力与热力需求变化频繁，会显著影响机组运行工况与经济性。该调控技术可依据实时负荷与市场信号，动态调整各主辅设备的运行状态与出力分配，使整个热电联产系统的热力响应与电力输出处于协同最优状态，确保电厂在不同边界条件下均能保持高效率、低排放运行，实现系统运行的经济性与可靠性协同优化，满足新型电力系统对电厂灵活、清洁运行的特殊需求。

三、热电联产模式下系统运行与负荷协同优化

（一）多热源梯级利用与系统集成

1. 锅炉-汽轮机-燃机多源余热协同回收方案
在热电联产模式下，为实现热能的最大化利用，锅炉-汽轮

机-燃气轮机多源余热协同回收方案至关重要。该方案旨在构建集成多种热源余热的综合回收系统。通过系统设计，将锅炉排烟余热、汽轮机抽汽与乏汽余热、以及燃气轮机排气余热进行统一收集与梯级利用。根据不同温度层级的热能品质，合理规划其利用途径，例如高温余热用于驱动吸收式制冷或发电，中低温余热用于供热、除氧器加热或燃料预热等，从而显著提升全厂综合热效率。同时，需对各余热回收子系统进行热力与工况匹配优化，确保主辅设备运行稳定与安全。此类协同回收方案不仅大幅提升了能源利用效率，还降低了燃料消耗与碳排放，有力推动热电联产系统在设备与运行层面的协同优化与集成管理^[5]。

2. 基于负荷预测的智能供热调控系统开发

在热电联产模式下，开发基于负荷预测的智能供热调控系统是实现机组灵活经济运行与供需协同的关键环节。该系统通过引入大数据与机器学习算法，实时采集并分析气象、热网、用户等多维数据，实现对未来短期与中长期热、电负荷的精准预测^[6]。基于预测结果，系统可动态优化锅炉、汽轮机、热泵等主要产热设备的运行策略与出力分配，提前调整供热参数。当热、电负荷发生波动或存在峰谷差异时，系统能快速响应，智能协调发电与供热模式，在保障供热品质的同时，优先满足电网调峰需求，提高机组运行经济性。该系统的应用不仅提升了热电联产系统对复杂工况的适应性与调控精度，还通过源-网协同优化减少了能源浪费，为实现设备高效运行与节能减排目标提供了重要的技术支撑。。

（二）热力管网与运输路线协同规划

1. 基于热惯性的热网储能调峰技术

在热电联产模式下，充分利用热力管网的热惯性进行储能调峰，是提升系统灵活性与经济性的重要手段。通过优化热网设计与运行策略，将供热管网本身作为分布式热储能单元。在电力负荷低谷或供热需求较低时段，可利用锅炉或电热泵等设备向管网中存储多余热能；而在电力负荷高峰或供热需求骤增时，则优先释放管网中储存的热能，从而减少机组为满足瞬时高峰负荷而进行的快速启停或偏离高效区的运行，提高设备运行稳定性与寿命。为此，需采用高性能保温材料与优化管道结构，以降低管网储热过程中的热损失^[7]。同时，结合智能调控系统，对管网的热惯性进行精准建模与实时调度，实现热源侧、管网侧与用户侧的高效协同，有效平抑负荷波动，助力热电联产系统实现安全、经济、低碳运行。

2. 多热源协同调度系统构建

在热电联产模式下，多热源协同调度系统构建至关重要。系统需综合考虑各热源的特性，如发电功率、供热能力、能源类型等^[8]。通过实时监测热源的运行状态、热力管网的温度和压力，以及用户端的热需求变化，运用智能算法进行优化调度。确保不同热源能依据实际需求，合理分配供热任务，提高能源利用效

率。与此同时，与热力管网和运输路线协同规划相呼应，系统要能够依据运输路线的动态变化，灵活调整热源输出，避免因运输环节的变动影响供热稳定性。该系统需具备高度的自动化与智能化，能快速响应各种复杂情况，实现生产运输的高效协同，助力电厂在热能动力视角下达成设备与技术管理的协同发展。

四、电厂设备热力系统智能运维与能效评估

（一）关键设备状态智能监测与诊断系统

1. 基于光纤传感的热力参数分布式监测技术

为实现电厂锅炉、汽轮机、燃气轮机等关键热力设备运行状态的精细化监控，基于分布式光纤传感的温度与应变监测技术得到重要应用。该技术将传感光纤集成于设备关键部位或管道保温层内，形成覆盖广泛、响应灵敏的感知网络。凭借其分布式、长距离、抗电磁干扰等特性，可连续、实时地获取设备表面及内部不同位置的温度与应变场分布信息。该技术能够精准监测锅炉水冷壁、汽轮机转子、燃机燃烧室等部位在启停、变负荷等复杂工况下的热状态变化，及时发现局部过热、热应力集中等异常现象，为设备安全运行、寿命预测与预防性维护提供关键数据支撑，从而有效避免非计划停运，提升机组运行可靠性^[9]。

2. 设备热应力与寿命损耗在线预警算法

在电厂设备智能运维体系中，开发基于实时数据的热应力与寿命损耗在线预警算法至关重要。通过建立融合热力学、流体力学与结构力学的多物理场耦合模型，能够高精度模拟关键设备在动态负荷下的温度场、应力场及蠕变-疲劳损伤演化过程^[10]。在此基础上，集成实时监测数据，构建在线预警算法。该算法通过持续分析关键部位的温度与应变趋势，结合材料损伤累积模型，动态评估设备剩余寿命与损伤风险。当预测的热应力或寿命损耗接近安全阈值时，系统可提前发出分级预警，指导运行人员调整操作参数或安排检修，实现从“定期检修”到“状态检修”和“预测性维护”的转变，有效保障设备长周期安全经济运行，优化维护成本。

（二）基于数字孪生的运行优化与调控创新

1. 全流程数字孪生模型构建与废热资源化模拟

在电厂设备与技术管理协同框架下，构建覆盖锅炉、汽机、燃机及辅机系统的全流程数字孪生模型具有重要意义。该模型通过集成设备机理模型、历史运行数据与实时传感器信息，在虚拟空间高保真映射物理电厂的动态运行状态。基于此模型，可深度模拟分析各类废热资源（如锅炉排烟、汽机乏汽、循环水余热）的回收潜力与利用路径。系统能够针对不同余热回收改造方案（如低温省煤器、吸收式热泵、ORC发电等）进行全工况仿真与经济评估，优化回收系统的设计与运行策略，从而最大化能源利用效率，降低燃料消耗与冷端损失，为废热资源的深度回收与价

值化利用提供科学的决策支持。

2. 基于模型预测控制（MPC）的协同优化系统

开发基于模型预测控制（MPC）的机组协同优化系统，是提升电厂整体能效与灵活性的关键技术。该系统以全流程数字孪生模型为核心预测引擎，综合考虑电网调度指令、燃料特性、环境条件、设备状态等多重约束。在每个控制周期内，系统滚动优化锅炉燃烧设定值、汽轮机调节阀开度、燃机负荷分配以及主要辅机运行方式，以实现供电煤耗最低、碳排放最少、或综合运行成本最优等多目标动态平衡。与传统的单回路控制相比，MPC系统能够前瞻性地处理多变量强耦合问题，显著提升机组在变负荷、快速启停等复杂工况下的控制品质与经济性，是实现设备运行与技术管理深度协同的先进手段。

（三）全生命周期能效与碳足迹综合评价

1. 设备级与系统级碳热足迹耦合分析方法

为推动电厂实现深度节能减排，需建立涵盖设备制造、安装、运行、维护直至退役的全生命周期碳热足迹耦合分析方法。该方法不仅量化评价锅炉、汽轮机等主要设备在运行阶段的燃料消耗与直接碳排放，还追溯其在原材料开采、制造加工等上游环节的隐含碳与隐含热消耗。同时，将辅机系统能耗、环保设施运行碳成本、以及维护活动产生的碳排放纳入统一分析框架。通过构建耦合能量流与物质流的综合评价模型，能够精准识别电厂碳热足迹的关键环节与减排潜力点，为设备选型、技术改造、运行优化及供应链管理提供量化的低碳决策依据，推动电厂向全生命周期绿色化转型。

2. 多目标协同优化算法在系统运行中的应用

在热能动力视角下，多目标协同优化算法是协调电厂经济性、环保性与可靠性的核心工具。该算法以供电效率（热效率）、碳排放强度、运行成本、设备可靠性等多个关键绩效指标为目标函数，构建高维优化模型。通过集成遗传算法、粒子群算法等智能优化方法，在复杂的运行约束空间中，自动寻优生成最佳的设备组合运行方式、负荷分配方案及维护调度计划。例如，算法可在满足电网出力要求的前提下，协同优化锅炉与燃机的负荷配比，平衡煤耗与气耗；或在设备健康状况约束下，优化启停序列以降低厂用电并减少磨损。此算法的应用，实现了从单设备优化到全厂系统协同优化的跨越，显著提升了电厂的综合运行效益与可持续性。

五、总结

在热能动力视角下，电厂设备管理与技术管理的协同发展是提升能源利用效率、降低碳排放与增强核心竞争力的关键路径。本文系统探讨了通过优化锅炉、汽轮机、燃气轮机等主设备运行参数、集成智能监测与诊断技术、应用数字孪生与先进控制策

略、以及实施全生命周期能效评估等方法，如何实现设备效能提升与技术管理创新的深度融合。基于热力学原理与智能算法提出的协同优化路径，为电厂挖掘节能潜力、实现灵活低碳运行指明了方向。展望未来，随着人工智能、物联网与先进传感技术的进

一步渗透，智慧电厂与新型电力系统将深度融合，推动电厂设备管理与技术管理向更加智能化、自适应、绿色化的方向演进。这种深层次的协同不仅将保障能源供应安全与经济性，更将有力助推能源行业的结构转型与“双碳”战略目标的实现。

参考文献

[1] 赵华琼. 工艺装置与热电厂蒸汽动力系统协同优化 [D]. 大连理工大学, 2022.

[2] 杜雪. 嵌入性视角下大数据与基层环境治理的协同发展研究 [D]. 山东师范大学, 2022.

[3] 胡梦雅. 协同治理视角下“体教融合”的发展路径研究 [D]. 杭州师范大学, 2022.

[4] 李守军. 城市再生视角下的玉门新老市区协同发展研究 [D]. 兰州交通大学, 2021.

[5] 方蕾. 内生发展动力视角下农村返贫防范研究 [D]. 武汉大学, 2021.

[6] 李世旺. 新形势下电厂锅炉应用在热能动力的发展与创新 [J]. 电力设备管理, 2021(9): 101-103, 183.

[7] 李效奎. 电厂热能动力锅炉燃料及燃烧研究 [J]. 中国高科技, 2022(1): 100-101.

[8] 朱晴阳. 电厂热能动力锅炉燃料及燃烧研究 [J]. 低碳世界, 2021, 11(5): 205-206.

[9] 罗林. 浅谈电厂锅炉应用在热能动力方面的发展前景 [J]. 中国设备工程, 2022(6): 123-124.

[10] 黄磊. 火力发电厂热能动力装置的检测与维护 [J]. 新疆有色金属, 2024, 47(1): 73-74.

高压电缆金属护套氩弧焊管机自动化改造系统设计

黎洋

广州岭南电缆股份有限公司, 广东 广州 511480

DOI:10.61369/ME.2025110057

摘 要 : 本文针对高压电缆金属护套生产中的氩弧焊管机控制精度低、故障多等问题, 基于自动化控制理论, 设计了以触摸屏、PLC和变频器为核心的智能控制系统。改造后实现了焊接参数精准动态调节, 大幅提升了焊接合格率与生产效率, 降低了废品率与人力依赖。该成果突破了传统设备技术瓶颈, 为行业智能化升级提供了有效方案, 经济效益显著。

关 键 词 : 触摸屏; PLC; 变频器组合控制; 自动化改造; 焊接技术

Design and Implementation of Automation Transformation System for High Voltage Cable Metal Sheath Argon Arc Welded Pipe Machine

Li Yang

Guangzhou Lingnan Cable Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 511480

Abstract : This article aims to address the problems of low control accuracy and frequent failures of argon arc welding pipe machines in the production of high-voltage cable metal sheaths. Based on automation control theory, an intelligent control system with touch screen, PLC, and frequency converter as the core is designed. After the transformation, precise dynamic adjustment of welding parameters has been achieved, greatly improving the welding qualification rate and production efficiency, reducing the scrap rate and labor dependence. This achievement has broken through the bottleneck of traditional equipment technology and provided an effective solution for the intelligent upgrading of the industry, with significant economic benefits.

Keywords : touch screen; PLC; combination control of frequency converter; automation transformation; welding technology

引言

在高压电缆制造中, 金属护套铝管焊接是保障电缆机械防护与电气屏蔽性能的核心工序。针对传统氩弧焊管机组依赖手动调节、可控性不足的问题, 我厂决定采用集成触摸屏、PLC及变频器的自动化方案进行升级改造。该方案以较低成本实现了对焊接电流、牵引速度等参数的精准协同控制, 显著提升了设备的稳定性与操作便捷性。改造后的设备需满足多项关键要求: 确保焊接无焊穿、无漏焊, 防止焊缝氧化; 缩短启停时的漏焊段, 提高生产连续性; 优化人机交互与故障诊断功能; 提升焊接速度与自动化水平, 增强对不同规格的适应性; 同时保障设备长期可靠运行, 并符合节能环保标准, 从而全面提升高压电缆的质量与生产效率。

一、致因机理

针对高压电缆金属护套铝管焊接过程中, 传统氩弧焊管机使用时普遍存在的焊接质量不稳定、可靠性差等问题, 系统剖析其形成原因, 为设备改进与工艺优化提供理论依据。

(一) 铝管焊穿洞、电缆被烧伤

在高压电缆金属护套铝管焊接作业中, 现有牵引驱动系统采用普通电磁调速电机, 其牵引速度与焊接电流调节均依赖人工操作。实际运行过程中, 由于人工控制存在响应延迟与调节精度不

足的问题, 难以实现牵引速度与焊接电流的精准匹配。这种控制方式对操作人员的技术水平和操作经验要求极高, 稍有偏差即可能引发生产质量事故。当焊接电流与牵引速度配合失准时, 易出现焊接电流过大或牵引速度滞后的情况, 进而导致铝带焊接部位熔穿, 在铝管表面形成孔洞缺陷。此类焊接质量问题会产生以下严重后果: 其一, 设备需立即停机进行人工修复, 直接中断生产流程, 显著降低生产效率与连续性; 其二, 熔穿过程中滴落的高温铝液会流入铝管内部, 对电缆本体造成热损伤, 严重时将导致电缆绝缘性能下降, 严重时甚至整段电缆报废; 其三人工修补作

业不仅增加了生产工序复杂度与劳动强度，且在修补过程中存在高温铝液二次滴落风险，易对电缆造成二次损伤，同时影响缝外观质量与产品整体性能指标。

（二）漏焊段过长

在高压电缆金属护套铝管焊接作业中，机组启停阶段常出现漏焊或焊接质量不达标现象，允许人工补焊但效果有限，漏焊段超限问题严重影响生产质量与效率。该问题主要由以下因素导致：一是设备启停控制时序问题，需严格按照“启时先牵引后焊接、停时先停焊后停牵引”的顺序操作，但人工响应延迟与同步性误差难以精准把握，造成铝管在焊接启停前后“空走”而形成漏焊区域；二是机械系统惯性影响，牵引电机与传动机构存在固有惯性，启停瞬间速度无法瞬时响应，造成铝管运动与焊接电流输出不同步，进一步增加漏焊段长度。两者叠加使漏焊段超出可控范围，不仅大幅增加补焊工作量与劳动强度，且人工补焊质量难以达到机械焊接精度，易出现表面不平、强度不足等缺陷，甚至可能因操作不当引发铝管烧穿等二次事故，严重威胁产品质量稳定性和生产安全。

（三）焊缝氧化

在现有老式氩弧焊设备中，氩气供给依赖人工操作手动阀门，存在显著缺陷与安全隐患。一方面，人工启闭难以精准控制供气时序：启动时供气过早造成浪费，关闭时延迟则增加成本；若供气滞后或提前关闭，将导致焊缝头尾因缺乏保护而发生氧化。另一方面，供气压力的调节与监测也依靠人工，难以实时维持稳定。当压力低于工艺阈值时，保护气幕失效，空气侵入焊接区域，成为焊缝氧化的主要诱因。焊缝氧化会严重降低铝管的机械性能与弯曲能力，在电缆敷设中易引发开裂，加速电缆老化，直接缩短其使用寿命，对电力系统稳定运行构成威胁。此问题是传统设备普遍存在的技术瓶颈，制约了生产效率和操作性能。

二、技术方案问题解决

（一）铝管焊穿洞、电缆被烧伤问题的解决

本电气控制系统采用威纶触摸屏、西门子 PLC、变频器技术对氩弧焊管机进行数字化组合控制。牵引驱动电机采用变频电机，用一台变频器对它进行变频调速控制。利用氩弧焊机输出焊接电流控制变频器输出频率和电压高、低，控制牵引电机的转速，最终目的控制牵引速度的快、慢。焊接电流大变频器输出频率高，牵引速度快。焊接电流小变频器输出频率就低，牵引速度就慢。而且焊接电流和变频器输出频率两者之间的斜率比例在触摸屏上可调可控，数字化的操控性更加直观、准确。从而达到了焊接电流与牵引速度的有机结合，它们两者之间紧密同步，有效解决了因同步问题发生的铝管焊穿洞、电缆被烧伤问题。

（二）漏焊段过长问题的解决

漏焊段过长问题主要是出现在启、停机的时候。解决方法一、本系统利用焊接电流控制变频器的频率输出方式，当焊机没有焊接电流的时候，即使变频器处于启动状态，输出频率和电压

也为0，牵引驱动电机不会转动不会发生铝带“空走”现象。二、利用变频控制的功能设置，灵活应用在设备实际现场调试当中。启动时，选择适合本系统的启动方式，从起动频率启动；调整加速时间的长短，既满足生产工艺要求，又不会对设备产生冲击。停止时，选择相应的停机方式，减速停机；调整减速时间长短，使牵引能迅速停止，杜绝了由于机械惯性所产生的漏焊现象的发生。

（三）焊接缝氧化问题的解决

焊接缝发生氧化问题主要原因是没有氩气的保护焊接，或是气不足时造成。本系统采用电磁阀作为氩气的开关阀，由系统控制电磁阀门是否工作，电磁阀得电工作时供气，电磁阀失电时停止供气。在设计 PLC 程序时做到了：机组启动时先供气3秒，再启动焊机、牵引变频器；机组停机时先停止焊机和牵引变频器，延时3秒关掉气。另一方面本系统加装了气压检测装置，压力过低时系统将报警“气压故障”，并停止机组。人性化的控制系统解决了人工难以实现的机动性，解决焊接缝缺氧而氧化问题。

三、设计原理

在控制系统中设计了单/联动功能切换开关 SA，用于满足不同生产阶段的操作需求。开机前需根据生产需要选择模式：选择单动模式，系统调用单动子程序，主要用于调机，可单独控制牵引驱动电机的启停及正/反点动（点动频率固定为5Hz）；选择联动模式，系统调用联动子程序，用于正式焊接生产，此时点动功能失效，按下启动/停止按钮后，氩气电磁阀、氩弧焊机与变频器将按预设程序顺序联动启停。所有设备工作状态均实时显示于触摸屏。为确保安全、防止误操作，模式切换必须在控制电源 K 断开时进行，电源闭合后切换无效。

为实现焊接电流与牵引速度的同步控制，系统采用威纶触摸屏、西门子 PLC 及变频器进行数字化处理。操作人员通过触摸屏输入焊接电流等工艺参数至 PLC，PLC 将其转换为 0~10V 模拟量电压，作为氩弧焊机的电流给定信号。同时，氩弧焊机将实时焊接电流以 0~10V 电压反馈至 PLC，与触摸屏设定的斜坡值进行运算，运算结果再经转换输出 0~10V 电压，作为变频器的频率给定信号。变频器的实时频率也以模拟量形式反馈至 PLC，最终在触摸屏上显示实时线速度。该闭环控制流程实现了焊接电流与牵引频率的数字化同步联动，使操作直观、精确，见下图 1。

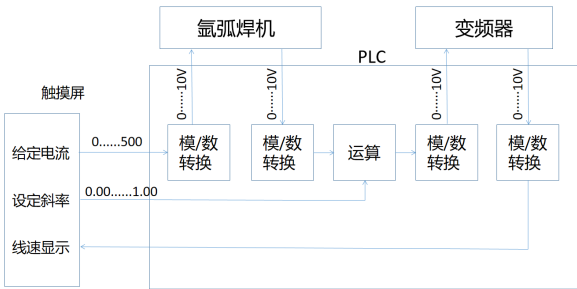


图1

四、实施方案

根据三相异步电动机转速计算公式：

$$n = \frac{60f(1-s)}{p}$$

f: 电源频率

s: 转差率

p: 定子旋转磁场极对数

可知，通过调节 f、s、p 三个参数中的任意一个，均可实现电

机转速的调整。在实际应用中，改变电源频率 f 是一种便捷且高效的调速方式，该方法可直接建立电源频率与电机转速间的线性调控关系。

基于上述原理，利用变频器的调速控制与程序控制功能对牵引驱动电机实施变频调速具有显著优势。此方案不仅技术实现路径简捷，能够快速响应转速调节需求，而且系统可靠性高，可有效降低设备运行故障率；同时，其控制线路设计简洁，有助于减少硬件投入与维护成本，为电机调速控制提供了理想的技术解决方案。

五、电气装备选型及关键参数设置

设备类别	设备名称	品牌	型号	主要参数 / 功能
人机交互设备	触摸屏	威纶	TK6070iP	用于操作界面显示与指令输入，实现人机交互控制
控制核心设备	可编程逻辑控制器 (PLC)	西门子	CPU24XP	作为系统控制核心，处理逻辑运算与信号控制，搭配 EM235 模块实现模拟量处理
模拟量处理设备	模拟量输入 / 输出模块	西门子	EM235	与 PLC 配合使用，实现模拟信号的采集与输出控制
焊接设备	氩弧焊机	美国飞马特	POWERMASTER 500	高压电缆金属护套铝管焊接作业
调速设备	变频器	三星	IHK-30K	额定功 30KW，用于牵引驱动电机变频调速，实现电机转速精准控制
动力设备	三相异步电机	-	Y180L-4	额定功 22KW，作为牵引驱动电机，为设备运行提供力，适配 30KW 变频器实现调速

选用变频器的额定功率≥电机的额定功率 X1.1 倍，经查阅该产品说明书选用额定功率为 30KW 较合适)。根据生产工艺过程控制动作，各电气设备作出以下参数设置、系统选择：

（一）触摸屏系统设置和控制“元件”地址清单

通讯端口	COM2
通讯波特率	9600
氩气打开指示灯	Q0.4
焊机工作提示灯	Q0.0
牵引工作提示灯	MO. 3
设定斜率	VD300
设定电流	VD200
线速显示	VD101
启动按钮	M100
停止按钮	M101
正点动按钮	M102
反点动按钮	M103
机组状态显示	VW100

（二）变频器关键参数设置，除下列参数外，所有参数保持出厂设置

Cd001=2	“选择运行指令”选择“外部端子信号”
Cd002=3	“频率给定选择”选择“外部模拟信号”
Cd007=50	“上限输出频率”设定为 50Hz
Cd009=1	“启动方式”选择“由启动频启动”
Cd010=3	“启动频率”设定为 3Hz
Cd013=1	“停机方式”选择“减速停机”
Cd014=0.5	“停机频率”设定为 0.5Hz

Cd019=3	“加速时间”设定为 3 秒
Cd023=0.5	“减速时间”设定为 0.5 秒
Cd028=5	“点动频率”设定为 5Hz
Cd061=1	“多功能输入端子 FR 功能选择”选择“正转”
Cd066=7	“多功能输入端子 2DF 功能选择”选择“正点动”
Cd067=8	“多功能输入端子 3DF 功能选择”选择“反点动”
Cd069=11	“继电器 FA 输出功能选择”选择“变频器故障”

（三）氩弧焊机控制面板旋钮选择

电流斜坡时间	“选择 5 秒” (0-500A)
启动焊接电流	“选择 100A”

六、氩弧焊管机电气原理设计与工作流程设置

工作流程如下：

1. 调试。开机前正确选择单 / 联动选择开关 SA 至单动，打开操作电源开关 K，PLC 程序自动调用单动子程序，并按照单动程序执行。在触摸屏按下反点动按钮时，变频器按参数设定的加、减速时间、点动频率 5HZ 反点动牵引驱动电机，松开按钮时变频器停止输出，牵引驱动电机停止。反之，正点动时同上。按下启动按钮时，变频器按 5HZ 频率连续正转，按下停止按钮时变频器停止输出，牵引电机也停止。

2. 启动。开机前正确选择单 / 联动选择开关 SA 至联动，打开操作电源开关 K，PLC 程序自动调用联动子程序，并按照联动程序执行。操作工人根据工艺要求在触摸屏输入焊接电流如 250A，

此时 PLC 输出 5V 的给定电压到氩弧焊机。输入斜率值 (焊接电流与牵引速度比例) 如 0.5。按下触摸屏的启动按钮,此时系统立刻输出 Q0.4 打开气电磁阀,向焊枪咀提供氩气。延时 3 秒氩弧焊机、变频器同时启动。弧焊机自动高频起弧 (弧焊机自带功能), 并按照预先选择的起动电流 100A、斜坡时间 5 秒的比例线性输出焊接电流到 250A。同时, 弧焊机的模拟量输出也跟随焊接电流的变化而改变输入到 PLC, 此值经过运算器 $\times 0.5$, PLC 输出 2.5V 的给定电压到变频器, 变频器按照参数设定起动频率 3HZ、加速时间 3 秒的比例线性输出频率和电压, 控制牵引驱动电机的转速, 一键完成了启动工作。

3. 停止。在生产过程中只要按下触摸屏上的停止按钮, 氩弧焊机立即停止输出电压、电流; 变频器也同时按参数设置的减速时间 0.5 秒、减速停机方式, 从工作频率迅速减到 0HZ。延时 3 秒后电磁阀失电, 停止供气。整个焊管工作流程工人只需要根据生产工艺要求, 在触摸屏上输入两个数据和按下启动、停止按钮就能完成, 简单方便。

电气元件清单	
QF1- 自动空气开关 (DZ20Y-300A)	SB- 紧停按钮开关
QF2- 自动空气开关 (DZ20-60A)	SQ- 气压检测开关
QF3- 自动空气开关 (DZ47-C3)	HMI- 威纶 TK6070iP
K- 控制电源开关	PLC1-S7200CPU224XP 继电器输出
SA- 单 / 联动开关	PLC2-EM235 模拟量输入 / 输出模块

七、调试验证

(一) 焊接参数精准调控保障焊接质量

基于高压电缆金属护套铝管焊接工艺要求, 通过建立焊接电

流与铝带厚度、产品规格的参数匹配模型, 实现焊接电流与斜率参数的精准设定。调试结果表明, 该调控策略可有效规避因焊接电流与牵引速度失配导致的铝管熔穿、热损伤等问题, 确保焊接过程稳定可靠, 显著提升焊接质量控制水平。

(二) 启停时序优化显著缩短漏焊长度

针对机组启停阶段漏焊问题, 对设备控制逻辑进行优化改进。改造后, 机组启动与停止过程中的漏焊段长度由改造前的约 30mm 大幅缩减至 10mm 以内 (图 10)。漏焊段长度的有效控制, 大幅降低了人工补焊的作业难度与时间成本, 显著提升了生产效率与补焊质量。

(三) 自动化保护系统解决焊缝氧化难题

该改造方案通过引入自动化氩气控制系统, 实现了对供气时序与压力的精准调控与实时监测, 从根本上解决了焊缝氧化问题, 保障了铝管的机械性能, 并减少了人工操作环节。在不更换主体设备的前提下, 方案通过建立焊接参数匹配模型与自动化控制逻辑, 以低成本、小范围改造的方式, 显著提升了设备自动化水平, 有效解决了铝管烧穿、焊缝氧化及漏焊段过长等核心工艺难题, 并将设备故障率降至极低水平。

从技术经济性看, 改造后电气线路大幅简化, 降低了对企业资金与技术的要求; 同时, 自动化程序将操作简化为参数输入与启停, 显著降低了对人员技能的依赖。实际运行表明, 改造后生产效率与产品质量同步提升, 废品率下降, 设备可实现长期稳定运行。该方案为行业内传统焊接设备的智能化升级提供了可复制、高效且具备显著推广价值的技术路径。

参考文献

- [1] 龚顺镒编.《自动控制技术应用》[M]. 机械工业出版社出版, 2009 年 1 月。
- [2] 韩安荣主编《通用变频器及其应用 第 3 版》[M]. 机械工业出版社出版, 2008 年 6 月。
- [3] 吴志敏、阳胜峰主编《西门子 PLC 与变频器、触摸屏综合应用教程》[M]. 中国电力出版社出版, 2010 年 9 月。
- [4] 飞马特有限公司编制《飞马特氩弧焊机使用手册》, 2012 年 3 月。

汽车散热器钎焊工艺优化研究及应用

廖衡山

广东 清远 511600

DOI:10.61369/ME.2025110003

摘 要： 本文围绕汽车散热器钎焊工艺展开多方面研究，包括材料物化特性、工艺参数模型、结构优化、自动化产线等，开发了智能控制系统、数字孪生模型及能效优化系统，应用于乘用车、商用汽车散热器。成果经 10 万次热循环测试、极端工况验证等，实现环保与高效生产，为工艺优化及行业发展提供依据。

关 键 词： 汽车散热器；钎焊工艺；优化

Research and Application of Optimization of Brazing Process for Automotive Radiators

Liao Hengshan

Qingyuan, Guangdong 511600

Abstract： This article focuses on the brazing process of automotive radiators from various aspects, including material physical and chemical properties, process parameter models, structural optimization, automated production lines, etc. Intelligent control systems, digital twin models, and energy efficiency optimization systems have been developed and applied to passenger and commercial vehicle radiators. The results have been tested through 100000 thermal cycles and verified under extreme working conditions, achieving environmental protection and efficient production, providing a basis for process optimization and industry development.

Keywords： car radiator; brazing process; optimize

引言

随着《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》在 2020 年 11 月颁布，汽车行业尤其是新能源汽车领域发展迅速，对汽车散热器钎焊工艺提出更高要求。研究铝合金及复合材料物化特性、构建三维工艺参数模型等对优化钎焊工艺意义重大，从结构优化、自动化产线到智能控制等多方面的探索，有助于提升散热器性能与生产效率。此外，开发环保钎料、建立碳足迹模型等顺应绿色制造趋势。对该工艺的研究成果，将推动汽车散热器智能制造向更高自动化、智能化迈进，提升行业整体水平与竞争力，符合产业可持续发展需求。

一、汽车散热器钎焊工艺基础研究

（一）钎焊材料特性分析

在汽车散热器钎焊工艺中，研究铝合金及复合材料的物化特性至关重要。铝合金因其良好的导热性、耐腐蚀性和相对较低的密度，成为汽车散热器的常用材料。其在钎焊过程中的熔点、热膨胀系数等物化特性，直接影响钎焊质量。复合材料在汽车散热器中的应用也逐渐增多，它结合了多种材料的优势，具备独特的性能。通过能谱分析可深入探究材料配伍性对焊缝质量的影响机制。不同钎焊材料间的化学组成差异，会在焊缝处产生不同的冶金反应，进而影响焊缝的强度、致密性等质量指标^[1]。了解这些钎焊材料特性，有助于为优化汽车散热器钎焊工艺提供理论依据。

（二）钎焊工艺参数体系

在汽车散热器钎焊工艺中，构建温度场 - 时间场耦合工艺参数模型至关重要。钎焊属于依靠毛细作用实现填充的无压连接工艺，因此压力因素在该过程中并不起主要作用。温度对钎料的熔化与铺展起决定性作用，合适的加热温度能确保钎料充分填充焊缝间隙；若温度过低，钎料无法完全熔化，易导致焊缝未焊透等缺陷；若温度过高，则可能引起母材过烧，影响散热器的力学性能^[2]。时间参数与温度密切相关，适当的保温时间有助于钎料与母材充分反应、形成良好的冶金结合，但过长的保温时间会增加生产能耗并可能导致变形。通过建立温度 - 时间参数的耦合模型，对两者交互作用及其对焊缝气孔率与力学性能的影响规律进行定量分析，可为汽车散热器钎焊工艺的优化提供科学依据，从

而提升焊接质量与整体性能。

二、生产工艺改进路径研究

（一）散热器结构优化设计

在汽车散热器结构优化设计方面，可基于有限元热力学仿真优化散热片排布方式。通过有限元分析，精准模拟散热器内部的热传递过程，了解不同散热片排布对散热效率的影响，从而找到最优的散热片排列布局，提高散热性能^[3]。同时，开发新型翅片-管板连接结构对提升钎焊面接触质量至关重要。传统的连接结构可能存在接触不充分、钎焊面积小等问题，新型结构旨在增大钎焊面接触面积，改善接触的紧密程度，使得钎料能够更好地填充连接部位，增强钎焊接头的强度和密封性，进而提升散热器整体的性能和可靠性，确保在汽车运行过程中高效散热，满足汽车对散热器性能的严格要求。

（二）自动化产线工艺优化

在汽车散热器钎焊自动化产线工艺优化中，研究多工位协同作业模式至关重要。各工位紧密衔接，能够有效提升整体生产效率，减少生产时间浪费。例如，通过精确计算每个工位的操作时间与衔接间隔，实现物料流畅传递，避免出现等待时间过长的情况。同时，优化焊剂自动喷涂系统与连续式加热炉的温度场匹配控制策略也不容忽视。焊剂喷涂的均匀性和焊剂比例搭配直接影响钎焊质量，需根据散热器不同部位及材质特性，精准调控喷涂参数。而连续式加热炉的温度分布对钎焊效果起着决定性作用，要深入分析其热传递规律，结合焊剂特性，优化温度控制，确保在不同工位的钎焊过程中，温度与焊剂实现最佳匹配，从而提高钎焊质量，满足汽车散热器生产的高标准要求^[4]。

三、自动化生产技术研究

（一）机器人钎焊系统集成

1. 六轴焊接机器人系统（六轴焊接机器人目前无法应用在钎焊上，大多应用在全铝散热器水室与芯体链接的焊接，行业里讲的钎焊指的是连续式隧道炉，通过高温氮气保护的焊接过程）

六轴焊接机器人系统目前主要应用于全铝汽车散热器水室与芯体连接等结构焊接环节，而非钎焊工艺本身。传统意义上的散热器钎焊多采用连续式隧道炉，在高温氮气保护环境下实现钎料熔化与接合过程^[5]。六轴焊接机器人凭借六个可活动关节，具备高度灵活的运动能力，可对水室与芯体焊缝位置进行精准操作。通过引入基于视觉定位的自适应轨迹规划算法，机器人能够自动识别焊缝位置与姿态，实现稳定、连续的焊接过程。这一系统显著提高了全铝散热器结构焊接的精度与一致性，减少人工操作误差，提升生产自动化水平。虽然六轴机器人尚未直接应用于隧道炉钎焊过程，但其在前后段焊接及装配环节的应用，为散热器制造的智能化、柔性化发展提供了重要支撑。与此同时，为进一步提升隧道炉钎焊工艺的稳定性与可控性，智能控制系统的开发成为关键环节。

2. 智能控制系统开发

智能控制系统开发旨在构建多传感数据融合的闭环控制系统，达成焊接质量在线检测与工艺参数动态补偿。系统运用多种传感器，如温度传感器、视觉传感器等，实时采集钎焊过程中的温度、焊缝形状等关键数据^[6]。通过先进的数据融合算法，将这些不同类型的数据进行高效整合，精准分析焊接状态。一旦检测到焊接质量偏差，系统迅速响应，依据预设的补偿策略，动态调整焊接电流、焊接时间等工艺参数，确保钎焊过程始终处于最佳状态。该智能控制系统不仅能及时发现并纠正焊接缺陷，提升产品质量稳定性，还可适应不同型号汽车散热器的钎焊需求，为汽车散热器钎焊工艺的自动化、智能化生产提供有力支撑。

（二）智能化生产系统构建

1. 数字孪生技术应用

在汽车散热器钎焊工艺优化研究及应用中，数字孪生技术应用关键在于建立钎焊工艺数字孪生模型。此模型通过集成各种传感器数据、工艺参数以及物理模型，能够高精度地模拟实际钎焊过程。借助该模型，实现物理生产系统与虚拟模型的实时交互。一方面，物理系统的实时运行数据被反馈至虚拟模型，让虚拟模型依据实际情况进行动态更新；另一方面，虚拟模型通过模拟分析不同工艺参数调整的结果，将优化策略回传至物理生产系统，实现优化迭代。如此一来，可在虚拟环境中预先评估钎焊工艺的改进方案，提前发现潜在问题并优化，大幅提升钎焊工艺的质量与效率，为汽车散热器钎焊工艺的优化提供有力支持^[7]。

2. 能效优化系统开发

在汽车散热器钎焊工艺的能效优化系统开发中，着重研究生产能耗智能监控技术。通过在生产设备关键部位安装高精度传感器，实时收集各类能耗数据，如电力、燃气等能源的消耗情况。基于此，开发基于大数据的能源利用优化算法。借助大数据分析技术，深度挖掘能耗数据背后的规律与潜在信息，全面分析生产流程中各环节的能源利用效率。通过优化算法，对能源分配进行精准调控，实现能源的高效利用，从而有效降低单件汽车散热器的生产能耗^[8]。这不仅能提升企业的经济效益，还能响应节能减排的环保要求，为汽车散热器钎焊工艺的可持续发展提供有力支持。

四、工程应用研究

（一）汽车制造行业应用

1. 乘用车散热器应用

在乘用车散热器应用方面，随着新能源汽车的快速发展，对散热器的性能要求愈发严苛。通过优化后的汽车散热器钎焊工艺，制造出的乘用车散热器需在新能源车热管理系统中进行应用验证。其中，至关重要的一项是开展10万次热循环耐久性测试评估。这一测试模拟乘用车在各种复杂工况下散热器所面临的热循环情况，以此检验散热器经优化钎焊工艺制造后的可靠性与稳定性。若散热器能通过此高次数的热循环耐久性测试，说明优化的钎焊工艺在乘用车散热器制造上切实有效，可提升其在实际使用中的性能表现，为乘用车的高效热管理提供有力保障^[9]。

2. 商用车重载应用

在汽车制造行业的商用车重载应用中，开发耐高压高温的特种钎料对长途货运车辆散热系统意义重大。长途货运车辆行驶工况极端，散热器需承受高压高温，普通钎料难以满足要求。为此开发的特种钎料，通过在极端工况下的验证，能有效提升散热器性能。在高温环境中，特种钎料可确保钎焊接头的稳定性，防止因温度过高导致钎料熔化或接头失效；在高压条件下，能保证散热器密封良好，避免冷却液泄漏。经极端工况验证后，该特种钎料应用于商用车重载散热系统，显著提升了系统可靠性与耐久性，为长途货运车辆安全稳定运行提供保障^[10]。

（二）绿色制造效益分析

1. 环保型钎料研究

开发的无镉无铅钎料成功通过 ROHS 认证，这一成果意义重大。该钎料在汽车散热器钎焊工艺中的应用，实现了有害物质排放降低 85%，大幅减少了对环境的污染。从可持续发展角度来看，符合绿色制造理念，有助于缓解生态压力。这种环保型钎料不仅在环保方面表现出色，在实际钎焊过程中，还展现出良好的工艺性能，能确保钎焊接头的质量和可靠性，满足汽车散热器对连接强度等方面的要求。其应用既顺应了环保法规的要求，又保障了汽车散热器的生产质量，为汽车制造行业在绿色制造道路上迈进提供了有力支持，为实现经济效益与环境效益的双赢奠定了基础。

2. 工艺碳排放核算

建立汽车散热器钎焊工艺全生命周期碳足迹模型，以此精准核算工艺在各个阶段的碳排放。模型涵盖原材料获取、生产制造、产品使用及报废处理等环节。通过详细的数据收集与分析，明确各环节能源消耗、材料使用等参数与碳排放的关系。将优化前的钎焊工艺代入模型，计算出其碳排放强度。接着，把优化后的工艺参数输入模型，再次核算碳排放强度。通过对比两者，直观呈现优化前后工艺的碳排放强度变化。清晰了解工艺优化在降低碳排放方面的成效，为汽车散热器钎焊工艺朝着绿色制造方向发展提供量化依据，助力企业在提升生产效率的同时，有效减少碳排放，实现经济效益与环境效益的双赢。

（三）生产效能验证

1. 效率提升测试

在汽车散热器钎焊工艺优化的工程应用研究中，效率提升测

试是关键环节。通过引入 6 西格玛方法对产线进行优化后，对效率提升效果展开实测。在测试过程中，设定严格且统一的生产条件与标准流程，以确保数据的准确性与可靠性。经测试发现，优化后的工艺使得单班产能显著提升，实测结果显示单班产能提升了 40%。这一数据充分表明，经过优化的钎焊工艺在实际生产中，能够有效缩短生产周期，极大提高单位时间内的产量，有力提升了生产效率，为汽车散热器的高效生产提供了坚实的工艺保障。

2. 质量一致性验证

在质量一致性验证方面，通过 SPC 控制图法对 8 个月的生产数据进行深入分析。这一分析有力地证明了优化后的汽车散热器钎焊工艺在质量一致性上取得显著成效。产品不良率从之前较高水平大幅降低至 0.12%，这一数据直观地反映出产品质量的高度一致性提升。这意味着在大规模生产过程中，每一个汽车散热器产品都能较为稳定地达到较高质量标准，减少了因质量波动导致的次品出现。优化后的钎焊工艺在确保质量一致性上发挥了关键作用，使得汽车散热器在生产环节能以稳定且可靠的质量供应市场，满足汽车制造对于零部件质量稳定性的严苛要求。

五、总结

通过对汽车散热器钎焊工艺的深入研究，在钎焊工艺参数优化方面，实现了更精准的温度、时间等参数控制，有效提升了钎焊接头质量与散热器性能。自动化生产系统创新成果显著，自动化设备的引入大幅提高生产效率与产品一致性。绿色制造技术研发，既降低了能耗，又减少了对环境的负面影响。基于这些研究成果，汽车散热器智能制造技术应朝着更高自动化、智能化方向发展，利用大数据与人工智能实现生产过程的智能决策与优化。同时，行业应加强技术交流与合作，制定统一标准，加速先进钎焊工艺的推广应用，提升整个汽车散热器行业的制造水平与市场竞争力，推动产业可持续发展。

参考文献

- [1] 吕广贤. 基于机器视觉的散热器钎焊缺陷检测系统研发 [D]. 天津工业大学, 2022.
- [2] 同琦彤. 某综合传动装置油管断裂分析及钎焊工艺优化研究 [D]. 湘潭大学, 2023.
- [3] 陈惠泽. TiAl 与 Ti₂AlNb 钎焊工艺及机理研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [4] 刘明超. 锯片用异种材质 Cu 基钎焊工艺优化的研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [5] 张建源. 陶瓷-金属钎焊用低银钎料及钎焊工艺研究 [D]. 浙江科技学院, 2022.
- [6] 马琳博, 王嘉琳. 硬质合金钎焊工艺分析 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(1): 185-186.
- [7] 李丹丹, 李俊彦, 温庆红, 等. 钎焊工艺对 LQ3 钎焊铝合金板材显微组织的影响 [J]. 铝加工, 2021(6): 22-26, 30.
- [8] 王臻华. 一种整车环境散热器性能检测方法 & 模型 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46(7): 104-106.
- [9] 郭松. 某型号皮卡汽车散热器优化设计 [J]. 现代机械, 2024(2): 46-49.
- [10] 陈彝, 马顺, 熊勇, 等. 铝合金散热器真空钎焊及热处理工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(17): 103-109.

厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究

温兆鸿

肇庆市新大力设备制造安装有限公司, 广东 肇庆 526020

DOI:10.61369/ME.2025110007

摘 要 : 厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究意义重大。高强钢有独特特性与焊接性特点, 现有评定标准存适应性性问题。需构建全面试验体系, 从热输入控制等多方面优化工艺。同时要规范 WPS 编制, 开发工艺数据库等。研究成果显著, 但部分复杂工况工艺不完善, 未来应聚焦复杂工况适应性。

关 键 词 : 高强钢; 焊接工艺评定; 质量控制

Research on Welding Process Evaluation and Key Technologies of High Strength Steel for Thick walled Pressure Vessels

Wen Zhaohong

Zhaoqing City the New Vigorously Equipment Manufacturing Installation Limited, Zhaoqing, Guangdong 526020

Abstract : The welding process evaluation and key technology research of high-strength steel for thick walled pressure vessels are of great significance. High strength steel has unique characteristics and weldability, and there are adaptability issues with existing evaluation standards. A comprehensive experimental system needs to be established to optimize the process from multiple aspects such as heat input control. At the same time, it is necessary to standardize the preparation of WPS and develop process databases. The research results are significant, but some complex working conditions and processes are not perfect. In the future, we should focus on the adaptability to complex working conditions.

Keywords : high-strength steel; welding process evaluation; quality control

引言

近年来, 国家对特种设备安全愈发重视, 2014 年 1 月 1 日起施行的《特种设备安全法》为厚壁压力容器等特种设备的生产、使用等环节提供了法律保障。厚壁压力容器用高强钢因独特材料特性在工业中广泛应用, 但焊接性特点使其焊接残余应力控制难度大。国内外虽已形成系列焊接工艺评定标准规范, 却在厚壁容器应用中存在适应性问题。因此, 构建科学试验体系、优化焊接工艺关键技术、加强生产现场质量管理等对提升焊接质量至关重要, 且需结合最新政策不断完善, 以满足工业发展对厚壁压力容器质量与安全性的要求。

一、高强钢焊接工艺基础理论与现状分析

(一) 厚壁压力容器用高强钢材料特性

厚壁压力容器用高强钢具有独特的材料特性。在力学性能方面, 其屈服强度和抗拉强度较高, 能承受较大压力, 满足厚壁压力容器对强度的严苛要求。化学成分上, 常含有适量的合金元素, 如铬、镍、钼等, 这些元素能有效提升钢的强度、韧性及耐腐蚀性^[1]。然而, 高强钢的焊接性特点也较为显著。由于碳当量相对较高, 在焊接过程中易产生淬硬组织, 增大冷裂纹倾向。同时, 厚壁结构进一步加剧了焊接残余应力控制的难度。厚壁使得焊缝金属在冷却过程中受到较大拘束, 难以自由收缩, 从而产生较高的残余应力, 严重影响压力容器的结构稳定性与安全性, 因此, 如何有效控制焊接残余应力成为厚壁压力容器高强钢焊接的

关键问题。

(二) 现有焊接工艺评定标准规范

目前, 国内外针对高强钢焊接工艺评定已形成一系列标准规范。如 ASME IX, 它是美国机械工程师协会关于焊接和钎焊评定的标准, 在国际上应用广泛, 对焊接工艺评定的基本要求、评定试验方法等有详细规定。NB/T 47014 是我国承压设备焊接工艺评定标准, 对不同母材、焊接方法等的评定做了明确界定。然而, 这些标准在厚壁容器应用中存在适应性问题^[2]。厚壁压力容器的工况复杂, 对焊接接头性能要求更高, 现有标准可能无法充分考虑厚壁结构的特殊应力分布、热传递特性等, 导致评定结果难以精准反映厚壁容器实际焊接质量, 在指导厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定时存在一定局限性。

二、高强钢厚壁结构焊接工艺评定方法研究

（一）工艺评定试验体系构建

厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定需构建全面且科学的试验体系。通过提出覆盖接头型式试验与焊接工艺参数矩阵的全要素评定方法，实现对高强钢焊接工艺的全方位考量。接头型式试验涵盖多种可能的接头类型，以模拟实际工程中的复杂连接情况；焊接工艺参数矩阵则系统地囊括各类参数组合，如焊接电流、电压、焊接速度等，确保评定的完整性。同时，建立评定指标量化体系，将诸如焊缝强度、韧性、变形量等关键指标进行量化，借助科学合理的量化标准，精确评估焊接工艺的优劣，为厚壁压力容器用高强钢焊接工艺的选择与优化提供可靠依据^[3]。

（二）工艺参数优化与验证方案

针对高强钢厚壁结构焊接工艺，热输入控制需通过调整焊接电流、电压及焊接速度，设计多组不同热输入值的实验，对比焊缝及热影响区的组织与性能，获取适宜热输入范围。层间温度管理上，采用不同的加热及保温措施，设定多种层间温度区间进行焊接，研究层间温度对焊接接头性能的影响。焊后热处理则设定不同的加热温度、保温时间和冷却速度组合，观察其对消除残余应力、改善组织性能的作用。将热输入、层间温度、焊后热处理等参数进行合理组合开展验证实验，依据实验结果优化工艺参数，确保焊接接头满足厚壁压力容器的性能要求^[4]。

三、焊接工艺关键技术研究

（一）工艺制定管理技术

1. WPS编制标准化流程

在厚壁压力容器用高强钢焊接工艺中，WPS编制标准化流程至关重要。首先要建立从PQR（焊接工艺评定报告）到WPS（焊接工艺规程）的规范转化机制。深入分析PQR中的各项数据，包括焊接材料、焊接参数、接头形式等，确保这些关键信息准确无误地转化到WPS中，实现二者的紧密衔接。同时，制定工艺文件动态更新管理办法^[5]。随着高强钢焊接技术的不断发展、新的标准规范出台或实际生产中遇到新问题，及时对WPS进行调整和优化。通过定期审查与不定期更新相结合，保证WPS始终符合生产实际与技术发展需求，为厚壁压力容器的焊接质量提供坚实保障。

2. 工艺信息数字化管理

为实现厚壁压力容器用高强钢焊接工艺信息的高效管理，开发基于MES系统的工艺数据库至关重要。该数据库能够对焊接工艺所涉及的各项参数进行精准记录与存储，诸如焊接电流、电压、焊接速度、预热温度等关键参数^[6]。这使得在后续产品生产过程中，可便捷地追溯各参数信息，确保焊接过程的一致性与可重复性。同时，数据库具备版本控制功能，能对不同阶段、不同优化程度的焊接工艺版本进行有效管理，避免因工艺变更而导致的混淆。通过工艺信息数字化管理，极大地提高焊接工艺制定的效率与准确性，为厚壁压力容器用高强钢焊接工艺的持续优化与

稳定应用提供坚实保障。

（二）生产现场质量控制技术

1. 焊接过程监控体系

焊接过程监控体系对于厚壁压力容器用高强钢焊接质量至关重要。构建的全过程质量监控网络，从焊前准备开始就需严格把控，如对焊接材料的检验、焊件坡口处理等，确保为焊接过程创造良好条件。焊接过程中，对电流、电压、焊接速度等关键参数进行实时监测与调控，这些参数直接影响焊缝成形与性能，一旦出现偏差及时纠正。焊后检验阶段，利用无损检测技术如超声检测、射线检测等，全面检查焊缝内部缺陷。通过这样一套全过程质量监控网络，可实现对厚壁压力容器高强钢焊接质量的精准把控，减少焊接缺陷，提高产品可靠性^[7]。

2. 缺陷预防控制方法

为有效预防厚壁压力容器用高强钢焊接缺陷，建立基于统计过程控制（SPC）的冷裂纹、未熔合等缺陷预警机制至关重要。通过收集大量焊接过程中的数据，如焊接电流、电压、焊接速度、预热温度、层间温度等参数，利用SPC技术对这些数据进行分析处理。设定合理的控制界限，一旦数据超出界限，便发出预警信号，提示操作人员及时调整焊接工艺参数，从而有效避免冷裂纹、未熔合等缺陷的产生。这一机制能对生产现场质量进行动态监控，提前发现潜在问题，将缺陷控制在萌芽状态，提高厚壁压力容器用高强钢焊接质量，降低生产成本，保障产品的安全性与可靠性^[8]。

四、生产现场质量管理实践

（一）质量保证体系构建

1. 人员资质管理系统

在厚壁压力容器用高强钢焊接工艺评定及关键技术研究的现场质量管理实践中，人员资质管理系统至关重要。实施焊工技能矩阵管理，能清晰界定不同焊工在各类焊接工艺上的技能水平，精准匹配焊接任务与焊工能力，避免因技能不匹配导致的焊接质量问题。同时，建立覆盖工艺、检验的复合型人才培养机制，使人才不仅掌握焊接工艺技术，还熟悉检验要点，可从源头把控焊接质量，及时发现并解决潜在问题。这一机制有助于培养全面发展的专业人才，为厚壁压力容器的高质量生产提供坚实人力支撑，确保高强钢焊接工艺的有效实施和产品质量的可靠保障^[9]。

2. 设备状态监控方案

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，设备状态对焊接质量至关重要。制定焊接设备精度校验规程，定期对焊接设备如焊机、送丝机等进行全面精度校验，严格依据相关标准与工艺要求，确保设备各项参数精准无误，为高质量焊接提供基础保障。同时，开发焊机参数在线监测系统，借助先进的传感器与信息技术，实时采集焊机的电流、电压、焊接速度等关键参数，实现对焊接过程的动态监控。一旦参数出现异常波动，系统立即发出警报，以便操作人员及时调整，保障焊接过程稳定。该系统还能存

储历史数据，用于后续的数据分析与质量追溯，进一步提升质量管理水平^[10]。

（二）关键工序控制点设置

1. 焊接环境控制标准

在厚壁压力容器用高强钢的焊接过程中，焊接环境对焊接质量影响显著。需严格制定环境温湿度及防风措施的量化控制指标与执行规范。对于环境温度，应保持在适宜范围，过低易导致焊缝产生裂纹等缺陷，通常建议控制在不低于5℃，具体根据钢材特性微调。湿度方面，相对湿度不宜超过60%，过高湿度会使焊缝中出现气孔等问题。同时，要做好防风措施，当风速超过2m/s时，应采取有效防风屏障，如设置防风棚等，避免焊接过程中空气流动干扰焊接电弧稳定性，保证焊接质量的一致性与可靠性，严格执行这些量化指标与规范，能有效提升高强钢焊接的质量。

2. 过程参数监控程序

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，过程参数监控程序至关重要。对于电压电流波形采集，选用高精度传感器，直接连接到焊接设备的输出端，确保能准确捕获实时的电压电流波形数据。这些数据通过专用线路传输至数据处理终端，运用特定算法对波形进行分析，判断焊接过程的稳定性。层间温度监测方面，采用红外测温仪或热电偶，在每层焊接完成后，迅速测量焊缝及附近区域的温度。将测量数据实时反馈到控制系统，若温度超出预先设定的范围，系统立即发出警报，提醒操作人员调整焊接节奏或采取冷却、预热等措施，以保证层间温度符合工艺要求，从而确保高强钢焊接质量。

（三）质量追溯与持续改进

1. 缺陷溯源分析方法

在厚壁压力容器用高强钢焊接的生产现场，缺陷溯源分析方法对于质量追溯与持续改进至关重要。首先可采用失效模式与效应分析（FMEA），通过识别潜在焊接失效模式，分析其可能后果及产生原因，评估风险优先度，确定关键缺陷因素。利用鱼骨图工具，从人、机、料、法、环、测等方面系统梳理导致焊接缺

陷的原因，直观展现因果关系。基于大数据分析，收集大量焊接工艺参数、设备运行数据、人员操作记录等，运用数据挖掘算法，挖掘出与焊接缺陷紧密相关的关键参数及规律，实现缺陷的精准溯源，为后续针对性改进措施的制定提供有力依据，提升焊接质量。

2. 质量改进 PDCA 循环

在厚壁压力容器用高强钢焊接生产现场，质量改进 PDCA 循环发挥着关键作用。Plan 阶段，根据高强钢焊接特点及质量要求，制定详细的焊接工艺计划，明确各项工艺参数及质量目标。Do 阶段，严格按照计划执行焊接操作，规范工人操作流程，确保焊接过程稳定。Check 阶段，运用无损检测等手段对焊接质量进行全面检查，将实际结果与质量目标对比，找出偏差。Act 阶段，针对检查发现的问题，分析原因，采取改进措施，如优化焊接工艺参数、加强工人培训等。通过不断重复 PDCA 循环，持续提升厚壁压力容器用高强钢焊接质量，构建以过程能力指数 CPK 为核心的质量持续改进体系，使焊接工艺不断优化，满足生产高质量厚壁压力容器的需求。

五、总结

高强钢在厚壁压力容器制造中应用广泛，对其焊接工艺评定及关键技术的研究意义重大。本次研究成果显著，明确了适用的焊接工艺，通过工艺评定确定了合适的焊接材料、焊接层数、焊接速度等参数，有效保障了焊接接头性能。同时，提炼出工艺参数优化与质量控制关键技术，如通过调整热输入改善焊缝组织，利用无损检测技术确保焊接质量。实际工程应用效果良好，提高了厚壁压力容器的制造质量与可靠性。然而，当前研究仍存在局限性，如部分复杂工况下的焊接工艺尚不完善。未来研究应聚焦复杂工况适应性，深入探究极端条件下的焊接工艺优化，进一步提升高强钢厚壁压力容器的焊接技术水平，满足工业发展的更高需求。

参考文献

- [1] 刘亚星. 高强钢冷连轧过程核心轧制模型与关键工艺技术研究 [D]. 燕山大学, 2021.
- [2] 石百顺. 690MPa 低屈服比超高强海工钢焊接工艺研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] 孙伟. 中厚板 Q690D 高强钢激光-药芯焊丝电弧复合焊接工艺及组织性能 [D]. 山东大学, 2022.
- [4] 徐浩然. 舰船高强钢厚板焊接固态相变影响研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2023.
- [5] 段士华. 3mm 厚高强钢 K-TIG 焊接工艺及电弧特性研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 苏建国. 高强钢 STREX 700E 的焊接工艺评定 [J]. 今日制造与升级, 2024, (03): 43-46.
- [7] 刘洪武, 徐向军, 马立朋, 等. 大跨度钢桁梁桥高强钢弦杆焊接工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2023, (11): 53-59.
- [8] 宋佳峰. 潮湿环境高强钢焊接工艺及工程应用 [J]. 建筑技术, 2023, 54(11): 1336-1338.
- [9] 刘庚林. 客车用高强度钢与普通钢的焊接工艺研究 [J]. 客车技术与研究, 2022, 44(03): 47-49.
- [10] 董自虎, 胡剑. 某高强钢焊接工艺分析 [J]. 材料开发与应用, 2023, 38(03): 12-16.

安全生产管理模式创新与安全工程专业发展探讨

邝永浩

协防（中山）安全技术有限公司，广东 中山 528400

DOI:10.61369/ME.2025110036

摘 要： 在社会经济飞速发展的今天，安全生产管理模式急需进行创新，才能满足新的要求，突破传统模式下的局限，提高企业综合竞争力。传统模式普遍存在着管理理念老旧，技术手段落后，全员参与不足的现象。创新模式要引进信息化技术、加强风险管理、促进全员参与。与此同时，安全工程专业在发展过程中还面临着课程设置不尽合理，实践教学环节不强，师资队伍建设不到位等方面的挑战。

关 键 词： 安全生产；管理模式创新；信息化技术；风险管理；安全工程专业发展

Exploration on Innovation of Work Safety Management Models and the Development of Safety Engineering Discipline

Kuang Yonghao

Xiefang (Zhongshan) Security Technology Co., Ltd., Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract : In the context of today's rapid socio-economic development, there is an urgent need for innovation in work safety management models to meet new demands, overcome the limitations of traditional approaches, and enhance the overall competitiveness of enterprises. Traditional models commonly exhibit outdated management philosophies, backward technological methods, and insufficient participation from all personnel. Innovative models should incorporate information technology, strengthen risk management, and encourage full participation from all employees. Concurrently, the field of safety engineering faces challenges such as less-than-ideal curriculum design, weak practical teaching components, and inadequate faculty development during its growth process.

Keywords : workplace safety; innovation in management models; information technology; risk management; development of safety engineering profession

引言

在经济全球化、信息化时代背景下，安全生产已经成为影响企业可持续发展至关重要的因素。传统安全生产管理模式已经很难适应现阶段社会经济发展需要，具有很多局限性。为提高企业安全管理水平与综合竞争力，需要创新安全生产管理模式。

一、安全生产管理模式创新的必要性

（一）适应社会和经济发展的新要求

在如今瞬息万变的社会经济环境下，为了适应新兴技术，法规变动及市场需求等因素的影响，企业需要对安全生产管理模式进行持续创新。传统管理方法通常很难适应现代化的要求，造成效率低、风险加大。现代社会对于安全生产的需求并没有仅仅停留在合规的水平而是更加注重系统化、前瞻性的管理。企业有必要通过引进物联网，大数据分析以及人工智能等先进技术对生产过程进行实时监控与预警。伴随着全球化的进程，跨国企业所面临的安全生产挑战越来越大，各国各地区的规定，文化以及操作标准都不尽相同，这对企业的安全管理提出了更加灵活，适应的要求。

（二）解决传统管理模式的固有缺陷

传统安全生产管理模式有许多固有的弊端，主要表现为信息不对称、反应迟钝、执行力不强等等，这在面临复杂多样的生产环境中表现得尤为明显。信息流通不畅使管理层很难及时了解一线生产情况继而不能快速有效地作出决策。传统模式过多地依赖于人工检查与上报，易产生漏报与误报，降低安全管理精准度。传统的管理存在层级清晰，沟通不畅等问题，使安全隐患很难得到及时地报告与处置，事故风险加大。

（三）提升企业综合竞争力

安全生产管理模式创新不仅有利于保证生产安全、降低事故发生率，而且可以显著增强企业综合竞争力。先进的安全管理系统能够提高生产效率、降低由于事故停工造成的经济损失、提高企业盈利能力。现代化安全管理模式可以提升企业应急响应能力

与风险管理水平、提升企业市场声誉与品牌形象。企业处在激烈竞争的市场环境下，安全生产管理好坏往往是顾客与合作伙伴最主要的选择标准。企业通过创新管理模式能够展现自己对安全生产的投入与收获，获得更多的市场机会与顾客的信赖。

二、安全生产管理模式创新

（一）传统安全生产管理模式的局限性

1. 管理理念陈旧

传统安全生产管理模式通常依靠老旧的管理理念和与时俱进思维方式。这一管理理念一般植根于以往经验与规章制度中，对于新技术、新方法缺少接纳与运用。管理者往往倚重长期养成之固定流程而忽略日新月异之生产环境与工艺，造成安全管理滞后与效率低下。特别是面对复杂多样的生产环境，传统管理理念变得特别不合时宜，很难迎接新的风险与挑战。另外，管理者对安全生产的作用通常局限于监督与控制，而忽略了职工的主动性与创造性，没有完全调动一线职工参与安全管理。安全生产管理缺乏灵活性和创新性，难以形成有效的预防和应急机制。

2. 技术手段落后

传统的安全生产管理模式技术手段明显滞后。很多企业仍依靠人工检查与纸质记录相结合的方式，造成信息传递缓慢，数据准确性不高，很难做到实时监控与预警。手工操作既易产生人为错误，又制约数据分析与决策的快捷与准确。甚至有些企业已导入信息化管理系统，却因技术更新落后、系统集成度不高等原因，常常不能完全发挥出它应发挥的功效。另外，传统技术手段在大数据、物联网、人工智能等先进技术应用不足，制约着安全生产管理智能化、自动化程度。

3. 缺乏全员参与

传统安全生产管理模式，普遍存在全员参与意识不强、机制不健全等问题。管理层一般认为安全生产是专职部门职责，不是每个职工共同职责。这一理念造成一线员工对于安全生产重视程度不高，参与程度不高，没有发挥出安全管理的主动性与创造性。全员参与安全管理模式的缺失往往很难及时发现并化解生产中存在的隐患，加大事故的发生概率。传统安全培训教育方式简单、内容枯燥乏味，很难调动职工学习兴趣与积极性，造成培训效果差、职工安全意识淡薄等问题。企业没有行之有效的激励机制，没有充分调动职工参与安全管理工作的积极性、主动性。^[1-3]

（二）创新安全生产管理模式的思路

1. 引入信息化技术

引进信息化技术，是实现安全生产和管理模式创新的主要理念之一。借助大数据、物联网及人工智能技术可实现生产过程综合监测与实时数据采集。这些技术手段可以提供准确的风险预警与决策支持，有助于管理层及时发现并应对可能存在的隐患。比如物联网传感器能够对设备运行状态进行实时监控，一旦发现异常情况就会马上报警，避免意外。大数据分析技术能够通过过去数据的深度挖掘，来识别和分析潜在的安全风险和发展趋势，从而为制定更为科学和高效的安全管理策略提供有力的支持和依

据。另外信息化技术能够促进职工安全意识与操作技能的提高。通过在线培训平台及虚拟现实技术的应用，工作人员可在任何时间、任何地点进行安全培训、模拟实际操作场景、增强应急处理能力。同时信息化技术也能够对安全管理过程与体系进行优化。^[4]

2. 强化风险管理

建立一个综合风险评估体系可以帮助企业对生产中各种可能存在的风险进行辨识，分析与评价。定期开展风险评估能及时发现并消除安全隐患，预防事故发生。风险管理并不限于对风险的辨识，而是要有周密的应急预案与处置措施以保证突发事件出现时能迅速反应与应对。加强风险管理，也需建立完善风险监控与反馈机制。通过对生产过程进行实时监控与数据分析，可以动态地把握生产过程风险的变化，并对管理措施进行适时调整。对高风险岗位、环节要采取重点监控、重点预防等措施，确保安全生产平稳可控。另外，风险管理需加强职工风险意识与防范能力。通过定期进行风险教育与培训来促进员工风险识别与应对能力的提高，让他们能积极地发现并上报日常工作当中存在的安全隐患。^[5]

3. 推动全员参与

安全生产不只是管理层与专职部门之间的职责，还需要每个职工的主动参与努力。建立全员参与安全管理机制可以充分调动职工的积极性、主动性，让他们自觉地遵守安全规定并主动发现、上报日常工作中存在的隐患。企业要促进全员参与就必须创造一个良好的安全文化氛围和以安全生产为核心的企业文化。通过经常进行安全教育与培训，增强职工安全意识与技能，让职工意识到安全生产是重要而必要的。同时企业也要建立一套行之有效的激励机制，对安全生产工作成绩优秀的职工进行表彰奖励，调动他们参与安全管理。另外，企业可通过安全竞赛，经验交流加强职工间互动与协作，营造全员参与，共同保障安全的良好氛围。

三、安全工程专业发展

（一）安全工程专业的现状

1. 课程设置不合理

当前安全工程专业课程设置与现实需要在诸多方面不能有效衔接，有很大提升空间。很多院校课程内容还停留在传统理论知识水平上，对于现代工业新技术，新方法没有及时的更新与介绍。这种课程体系很难适应学生步入职场之后的现实工作需求，造成其知识应用陷入困境。课程间关联性较小，学生很难形成一个系统连贯的知识体系也会对其学习效果造成一定影响。为了促进安全工程专业教学质量的提高，需要全面审视并改革课程设置，使课程设置更贴近产业发展需要，强调理论联系实际。

2. 实践教学环节薄弱

安全工程专业实践教学环节不力是个长期困扰学生动手能力与实际操作经验的难题。尽管理论知识是基础，但安全工程作为一门应用型学科，更需要通过实践教学来巩固和提升学生的技能。当前，很多院校对这一领域的投入显得不足，实训设备老

化,实习基地受限,不能给学生足够的实习机会。学生在大学期间所取得的实践经验的缺乏直接影响到其就业竞争力以及实际工作能力。实践教学中考核与评估机制不完善,很难客观地反映学生真实水平等问题,急需加大投入、完善教学模式等措施加以解决。

3. 师资队伍建设不足

师资队伍是安全工程专业教学质量高低的关键之一,当前很多院校在此方面都存在着明显的缺陷。专职教师不够多,很多课都要靠兼职教师或者是临时请的行业专家来完成,造成教学稳定性、连续性大打折扣。二是现有教师学术水平与实践经验良莠不齐,不能更好地适应高质量教学的需要。有的教师虽有坚实的理论基础,却缺少实际工程经验,很难做到理论联系实际。教师职业发展通道不畅及缺少系统培训进修机会使其专业知识与技能很难跟上时代步伐。

(二) 安全工程专业发展的需求

1. 跨学科融合

安全工程专业要发展就必须进行更深一步的跨学科融合,这种融合既源于安全工程自身所涉及的诸多学科知识背景,也源于现代工业发展潮流对综合性人才的需求。传统安全工程教育往往只注重对单一学科进行深入的研究而忽略了各学科间的关联。在实际应用中,安全问题通常是一个复杂而又系统性的问题,对其进行求解需要借助各种学科知识与方法。比如,化工安全需要化学知识,机械安全需要机械工程知识,而信息系统的安全则需要计算机科学的支持。因此,建立跨学科课程体系,实现不同领域知识的有机融合,可以有助于学生安全管理综合能力的养成。跨学科研究与项目合作还可以促使学生学会如何将不同学科知识融合并运用到实际问题中去,促进其综合素质与创新能力的提高。

2. 国际化合作

全球化语境下安全工程专业要发展,就必须依靠国际化合作。通过国际化合作使高校能够引入国外先进教学理念与方法来

促进教学质量的提高。国际化合作也可以给学生更多的机会进行学习与实践,拓宽了学生的眼界。例如,与国外高校、科研机构合作,为学生提供了参加国际项目、了解国际前沿技术、学习管理经验等机会。这样既可以帮助其获得更加高级的知识与技能,又可以增强其国际市场竞争力。同时,国际化合作给教师带来更多的学术交流与进修机会,帮助教师更新知识储备与教学方法。高校要实现国际化合作就必须积极争取同国外知名大学及科研机构合作的机会并建立起长期、稳定的关系。

3. 适应行业新需求

现代工业与社会发展,对于安全工程专业也有了全新的需求。传统安全工程教育模式已不能适应目前行业对于高素质专业人才培养的要求。伴随着科学技术的发展,很多新兴产业以及技术领域对于安全管理提出了更高的要求。这就要求安全工程专业学生既要有坚实的基础知识又要有适应行业变化、不断学习新知的本领。例如在信息技术不断发展的今天,网络安全已经成了安全管理的重要领域,需要安全工程专业学生在学习传统安全管理知识时,同时还要具备计算机科学与信息技术的相关知识。另外,在工业4.0与智能制造不断发展的背景下,安全工程专业学生对智能制造系统、工业互联网等知识也有了一定的要求。

四、结束语

总之,安全是企业发展和社会和谐与稳定的基石。在新时代挑战下,创新安全生产管理模式尤为紧迫。通过引进信息化技术,加强风险管理和促进全员参与等措施,能够有效地促进企业安全管理水平的提高。与此同时,安全工程专业跨学科融合,国际化合作及满足产业新需求也会为安全生产输送更扎实的人才与技术支持。在今后的工作中,要继续重视安全生产管理模式创新实践工作,继续优化安全工程专业教育工作,共同建设一个更安全更和谐的社会环境。

参考文献

- [1] 林喜芳. 创新管理模式 助推工作显成效——连城县深入开展安全生产专项整治三年行动[J]. 安全与健康, 2022, (12): 25-26.
- [2] 雷任雄. 关于创新农机安全生产管理模式的思考——以江苏现代农机科技示范园为例[J]. 江苏农机化, 2021, (06): 36-37.
- [3] 韦凤年, 王慧, 赵洪涛. 在创新实践中提升水利工程效益——访重庆市观景口水利开发有限公司董事长张绍炜[J]. 中国水利, 2021, (19): 6-8.
- [4] 刘毅. 基于互联网+的工程项目管理模式创新及落地[J]. 广播电视网络, 2021, 28(03): 107-109.
- [5] 关英春. 信息工程专业煤矿管理创新人才培养模式探讨[J]. 煤矿安全, 2020, 51(07): 252-254+264.

化工过程本质安全化设计与控制策略研究

凌克强

广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025110038

摘 要： 化工过程本质安全化设计与控制策略研究意义重大。本质安全化设计从根源降低风险，全生命周期安全管理贯穿各阶段。设备完整性设计、工艺参数安全边际优化等多种方法，以及智能化监测、评估模型、系统设计等策略，共同构建安全防线，未来数字化、智能化技术将推动行业迈向本质安全。

关 键 词： 化工过程；本质安全化设计；智能化控制策略

Research on Intrinsic Safety Design and Control Strategies for Chemical Processes

Ling Keqiang

Qingyuan, Guangdong 511500

Abstract： The research on the intrinsic safety design and control strategy of chemical processes is of great significance. Inherent safety design reduces risks from the root, and full lifecycle safety management runs through all stages. Various methods such as equipment integrity design, process parameter safety margin optimization, as well as strategies such as intelligent monitoring, evaluation models, and system design, jointly build a safety defense line. In the future, digital and intelligent technologies will drive the industry towards intrinsic safety.

Keywords： chemical process; inherent safety design; intelligent control strategy

引言

2022 年颁布的《“十四五”化工行业高质量发展指南》着重强调提升化工行业本质安全水平。化工过程本质安全化设计与控制策略研究意义重大，其旨在从根源降低或消除潜在风险。本质安全化设计围绕源头风险消除与被动安全特性强化展开，全生命周期安全管理理论框架贯穿化工各阶段。设备完整性设计、工艺参数安全边际优化等多种方法共同构建安全防线。在此背景下，各项策略与技术的融合发展，将推动化工行业朝着本质安全方向迈进，契合政策对行业安全与可持续发展的要求。

一、化工过程本质安全化设计理论基础

（一）本质安全化设计的基本概念与原则

本质安全化设计旨在从根源上降低或消除化工过程中的潜在风险，使系统在正常运行及误操作、故障等异常情况下，仍能保持安全状态。其核心原则围绕源头风险消除与被动安全特性强化展开。源头风险消除意在从设计初始阶段，便识别并规避危险物质、危险工艺，尽可能选用无毒、无害或低毒、低害的原料，采用较为温和的反应条件，从根本上减少风险源^[1]。被动安全特性强化强调利用物质或系统自身固有属性实现安全保障，比如利用设备自身材质的防火、防爆性能，而不是依赖额外的主动安全措施。通过这些原则，本质安全化设计为化工过程构建起一道基础且坚实的安全防线，有效降低事故发生概率及可能造成的后果。

（二）全生命周期安全管理理论框架

全生命周期安全管理理论框架将化工过程视为一个整体，从

工艺开发、工程设计到生产运营各个阶段，全面考虑安全因素。工艺开发阶段，需深入分析化学反应特性与潜在风险，为后续设计奠定基础。工程设计阶段，依据工艺要求，通过合理布局、选用安全设备等手段，降低风险发生可能性。生产运营阶段，制定严格操作规程与应急预案，确保安全生产。该理论框架强调各阶段紧密衔接，前一阶段为后一阶段提供支持与指导，后一阶段反馈优化前一阶段。通过全流程、全生命周期的安全管理，实现化工过程本质安全，有效降低事故发生概率，减少人员伤亡与财产损失^[2]。

二、工艺设计与优化策略

（一）设备完整性设计方法

在化工过程本质安全化设计中，设备完整性设计方法至关重要。对于压力容器与管道系统，冗余设计可有效提升设备运行可

靠性。通过设置备用组件或多重保护机制，能在部分部件出现故障时，保证系统仍可正常运行，降低事故风险。材料选型需综合考虑介质特性、工作环境等因素，选用耐腐蚀性强、强度高的材料，防止因材料问题引发泄漏、破裂等事故。HAZOP 分析技术作为一种系统的安全分析方法，对压力容器与管道系统进行全面的危险与可操作性研究，识别潜在危险，分析原因和后果，从而提出针对性的改进措施，优化设计，确保设备完整性，为化工过程本质安全提供保障^[3]。

（二）工艺参数安全边际优化

在化工过程中，工艺参数安全边际优化对于本质安全化设计至关重要。通过精确的热力学模拟与流体力学分析，能够深入了解各参数间的相互作用关系^[4]。一方面，依据模拟分析结果，可对温度、压力、流量等关键工艺参数的安全范围进行精准界定，明确参数波动的极限值，以确保即使在异常工况下，系统仍能维持安全状态。另一方面，针对可能出现的参数偏离情况，构建动态预警机制，设定不同级别的安全阈值，一旦参数接近安全边际，及时发出警报，为操作人员争取处理时间，避免事故的发生。同时，持续优化工艺参数的安全边际，不仅要考虑单一参数的变化，更要兼顾多参数耦合效应，从整体上提升化工过程的安全性及稳定性。

三、过程控制中的监测与管理技术

（一）智能化监测体系构建

1. 关键参数在线检测技术

为实现化工过程本质安全化，构建智能化监测体系的关键参数在线检测技术至关重要。研发集成温度、压力、振动等多参数融合的智能传感器网络，可对化工过程进行全面实时监测。温度参数能反映反应进程与热稳定性，压力参数关乎系统密封性与安全性，振动参数可洞察设备运行状态^[5]。多参数融合的智能传感器网络，通过先进的传感器技术和数据处理算法，将不同类型传感器采集的数据进行整合分析。这不仅提升检测精度与可靠性，还能及时发现潜在安全隐患，为化工过程安全稳定运行提供有力支持，从本质上降低事故发生风险，确保化工生产的安全性及高效性。

2. 设备健康状态评估模型

设备健康状态评估模型对于化工过程的安全稳定运行至关重要。在构建该模型时，可借助机器学习强大的数据处理与分析能力。收集设备运行过程中的各类参数数据，如温度、压力、振动频率等，这些数据反映着设备的运行状况^[6]。将这些数据作为模型输入，利用机器学习算法对数据进行深度挖掘与特征提取，寻找数据间的潜在关系和规律。通过训练与优化模型，使其能够精准识别设备在不同运行状态下的特征模式，进而对设备健康状态进行量化评估。例如，判断设备是否处于正常运行状态、是否存在潜在故障风险等。此模型为化工过程设备健康管理提供科学依据，助力提前发现并解决设备问题，保障化工过程的本质安全。

（二）控制联锁系统优化

1. SIS 系统功能安全设计

在化工过程中，SIS 系统功能安全设计至关重要。其需充分考虑系统的可靠性与安全性，通过严谨的方法确定安全完整性等级（SIL）。SIL 验证是确保 SIS 系统达到预定功能安全要求的关键环节^[7]。这要求运用科学的评估手段，对系统硬件故障裕度、共因失效等方面进行分析，以准确验证 SIL 等级是否符合实际需求。在设计过程中，还需注重冗余与多样性配置，提升系统的容错能力，降低因单一故障导致安全事故的风险。同时，要结合化工工艺特点，对 SIS 系统的逻辑运算、信号处理等功能进行优化，确保系统能快速、准确地响应异常情况，实现对化工过程的有效安全控制，为化工生产构筑坚实的安全防线。

2. 多系统协同联锁策略

在化工过程中，DCS（分散控制系统）与 SIS（安全仪表系统）是保障生产安全与稳定运行的关键控制层。两者虽具备数据交互接口，但在设计上应保持功能与硬件独立。DCS 主要负责生产过程的工艺控制，依据设定的工艺条件进行常规调节与联锁控制；SIS 则专职于安全防护，当监测到异常状态时执行紧急切断或停车等保护动作。在多系统协同联锁策略中，DCS 可将实时采集的关键过程参数以只读方式传输至 SIS，用于辅助判断和状态监控，而 SIS 的核心判断逻辑基于其独立采集的传感器数据。当传感器采集的参数值超出设定安全范围时，SIS 立即触发联锁输出，通过 DO 信号驱动相应的紧急切断阀或停车机构，实现快速响应，防止事故扩大^[8]。这种“功能独立、信息交互”的系统架构不仅避免共因失效风险，也显著提升化工过程的安全性及可靠性，确保生产过程处于本质安全状态。通过这种紧密的数据交互与联动控制，提高化工过程的安全性及可靠性，确保生产处于本质安全状态。

四、新技术应用与系统集成

（一）数字孪生技术应用

1. 三维可视化监控平台

在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中，三维可视化监控平台基于数字孪生技术发挥关键作用。此平台借助物联网采集的数据，构建出化工过程的高精度三维虚拟模型，实现对化工设备、管道等设施的精准映射。平台可实时呈现设备运行状态、工艺参数变化等信息，让操作人员仿佛置身真实场景进行监控^[9]。通过数字孪生技术的应用，它可对潜在安全隐患进行可视化预警，例如设备温度异常升高、压力超出阈值等，以直观图形方式及时提醒相关人员。同时，利用虚拟模型模拟故障场景，辅助制定科学有效的应急处理方案，帮助操作人员在实际事故发生前熟悉应对流程，大幅提升化工过程的安全性及可控性，为化工过程本质安全化设计与控制提供有力支持。

2. 异常工况仿真预警

在化工过程中，借助数字孪生技术进行异常工况仿真预警对实现本质安全化设计与控制至关重要。数字孪生技术通过构建与实际化工过程高度匹配的虚拟模型，能实时反映真实系统的运行状态。对于异常工况，该虚拟模型可基于历史数据、实时监测数

据以及化工过程机理,模拟不同异常状况下系统参数的变化趋势。例如,模拟管道堵塞、温度骤升等异常工况时,模型精准呈现压力、流量等参数变化。依据这些模拟结果,提前设定合理的预警阈值,当实际监测参数接近或超出阈值,立即发出预警信号,提醒操作人员及时采取措施,避免事故发生,为化工过程安全稳定运行提供有力保障^[10]。

（二）预测性维护系统开发

1. 大数据分析平台架构

大数据分析平台架构在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中起着关键作用。以Hadoop为基础搭建工艺数据处理框架,其分布式文件系统(HDFS)能高效存储海量工艺数据,为后续分析提供数据支撑。MapReduce编程模型可实现对数据的并行处理,提升处理效率。结合Hive数据仓库工具,能对数据进行结构化,便于查询和分析。同时,引入Spark计算框架,利用其内存计算优势,快速处理实时工艺数据,实现对化工过程关键参数的实时分析。此外,通过搭建数据可视化模块,将分析结果以直观图表形式呈现,辅助管理人员及时掌握化工过程状态,为本质安全化设计与控制策略的制定提供有力的数据支持,保障化工过程安全、稳定运行。

2. 维护决策支持算法

在化工过程预测性维护系统开发的维护决策支持算法中,深度强化学习发挥着关键作用。深度强化学习能够处理复杂且动态的化工过程数据,通过智能体与环境的不断交互学习,优化维修计划。算法会考虑设备运行状态、历史故障数据、维护成本等多方面因素,构建状态空间与动作空间。智能体依据当前状态选择维护动作,通过奖励机制反馈动作优劣,持续调整策略。例如,当设备某项参数接近异常阈值,智能体可选择提前维护动作,若维护后设备稳定运行且成本合理,会得到正向奖励,反之则负向奖励。以此反复学习,智能体可形成最优维护决策策略,在保障化工设备安全稳定运行的同时,降低维护成本,实现本质安全化设计与控制策略的目标。

（三）安全控制体系集成

1. 多系统数据融合技术

在化工过程本质安全化设计与控制策略研究中,多系统数据融合技术是关键环节。化工生产常涉及多个复杂系统,各系统数

据格式、通信协议差异大。OPC UA协议应用于异构系统集成,为多系统数据融合奠定基础。它能打破不同系统间数据交互壁垒,使设备层、控制层与管理层数据实现无缝传输。通过该协议,温度、压力、流量等各类实时数据,可被准确采集、整合。在此基础上,利用数据挖掘、机器学习等技术,对融合后的数据深度分析,挖掘潜在安全信息,预测可能出现的安全隐患,提前制定防控措施,保障化工生产过程安全稳定运行,实现本质安全化设计与控制。

2. 安全防护层架构设计

安全防护层架构设计以IEC 61511标准为基础,旨在构建一个全面、高效且可靠的多层次防护体系。该架构涵盖多个关键部分,通过不同层级的功能协同来保障化工过程本质安全。从底层的基本过程控制系统,对化工生产的常规参数进行实时监测与精准调节,确保生产过程的稳定运行。到中间的安全仪表系统,当出现异常情况,可能威胁到安全时,迅速做出响应,执行紧急停车等操作,防止事故扩大。再到上层的应急响应系统,针对更为严重的事故场景,制定科学的应急预案,组织有效的救援行动。各层级之间信息交互顺畅,共同组成一个有机整体,以实现化工过程在各种复杂情况下的本质安全,最大程度降低事故发生概率及危害程度。

五、总结

化工过程本质安全化设计与控制策略研究,对于提升化工行业的安全性与可持续发展意义重大。本质安全化设计方法体系通过消除、替代、减弱、简化等原则,从源头上降低危险,为化工过程奠定安全基础。智能化控制策略借助先进技术实现实时监测与精准调控,进一步增强安全保障。未来,数字化、智能化技术将成为化工安全领域的关键驱动力。通过建立数字化模型、应用大数据分析和人工智能,实现对化工过程更高效的风险评估与预警。同时,智能化技术可优化控制策略,提升自动化水平,减少人为失误。这些技术的融合发展,将为化工行业构建更可靠、更智能的安全防线,推动行业朝着本质安全的方向稳步迈进。

参考文献

- [1] 陈波. 化工过程动态异常侦测与自愈控制 [D]. 中国石油大学(北京), 2022.
- [2] 高佳文. 面向复杂化工过程的在线估计反演控制研究 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [3] 段辰明. 基于时空图的化工过程安全预警研究 [D]. 大连理工大学, 2023.
- [4] 刘瀚泽. 基于定目标和系统综合的化工过程安全风险削减方法研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
- [5] 张中秋. 基于多任务学习的化工过程调控策略预测方法及应用 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [6] 单俊昊. 化工生产过程本质安全技术的研究 [J]. 华东纸业, 2023, 53(10): 4-6.
- [7] 朱佳兴, 郝琳, 刘国钊, 等. 化工过程本质安全评估方法研究进展与展望 [J]. 化工进展, 2022, 41(08): 4009-4024.
- [8] 黄绪山, 祁天军. 提高炼油与化工过程自动化水平策略 [J]. 石化技术, 2022, 29(05): 254-256.
- [9] 潘智慧, 孙继宝, 孙明辉. 石油化工过程安全技术的研究进展 [J]. 化工管理, 2021, (09): 117-118.
- [10] 杨哲. 创新引领化工过程本质安全技术变革 [J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(01): 3-4.

化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化与实践

杨雨平

广东嘉元科技股份有限公司, 广东 梅州 514700

DOI:10.61369/ME.2025110040

摘 要 : 本文围绕高端铜箔生产展开, 介绍其阳极氧化 – 电沉积工艺流程, 分析工艺管理痛点。从智能生产管理体系、全生命周期技术管理等多方面阐述优化策略, 包括电解液流场优化、结晶取向调控等技术。某6 μm 锂电铜箔示范产线改造成效显著, 实现工艺包标准化输出, 带来综合效益, 未来将聚焦表面改性与绿色制造工艺。

关 键 词 : 高端铜箔生产; 化工工艺管理; 工艺优化

Optimization and Practice of Chemical Process Management in High end Copper Foil Production

Yang Yuping

Guangdong Jiayuan Technology Co., Ltd., Meizhou, Guangdong 514700

Abstract : This article focuses on the production of high-end copper foil, introduces its anodizing electrodeposition process, and analyzes the pain points of process management. Elaborate on optimization strategies from multiple aspects such as intelligent production management system and full lifecycle technology management, including electrolyte flow field optimization, crystal orientation regulation, and other technologies. The transformation of a 6 μm lithium battery copper foil demonstration production line has achieved significant results, realizing standardized output of process packages and bringing comprehensive benefits. In the future, it will focus on surface modification and green manufacturing processes.

Keywords : high-end copper foil production; chemical process management; process optimization

引言

高端铜箔生产对工艺要求严苛, 其生产工艺管理存在设备稼动率低、单位能耗高等痛点。《锂电铜箔制造规范》(颁布时间未提及) 行业标准的出台, 为该领域提供了可借鉴的规范流程。在此背景下, 高端铜箔生产从电解液成分调控、智能生产管理体系设计、全生命周期技术管理等多方面展开优化, 通过 CFD 模拟、脉冲反向电流叠加技术等实现技术突破, 借助多源数据融合分析、数字孪生系统建设等创新实践路径, 提升生产质量与效率, 其优化成果在行业内产生辐射效应, 带来显著综合效益, 为高端铜箔产业智能化、绿色化发展奠定基础。

一、高端铜箔生产工艺特性分析

(一) 高端铜箔生产工艺特点

高端铜箔生产采用阳极氧化 – 电沉积连续生产工艺流程, 具有独特的工艺特点。在该流程中, 生箔厚度均一性是关键。精确控制这一指标, 需对电解液成分进行精准调控, 因为电解液成分的微小变化, 都会显著影响铜离子在阴极表面的沉积速率和分布, 进而影响生箔厚度^[1]。同时, 表面粗糙度的控制也十分重要, 它与结晶取向紧密相关。电解液成分的改变会作用于结晶取向, 通过调控添加剂等成分, 可引导铜原子按照特定取向结晶, 从而改善表面粗糙度。电解液成分调控与结晶取向存在相互作用机理, 恰当的电解液成分促使铜原子有序排列, 形成理想结晶取

向, 保证高端铜箔具备良好的质量性能, 满足高端领域对铜箔的严格要求。

(二) 现行工艺管理痛点解析

高端铜箔生产工艺管理存在诸多痛点。从设备稼动率看, 目标值设定为 85%, 但实际仅 78%, 意味着设备未能充分发挥产能, 可能由于设备故障频繁、维修保养不及时或生产计划安排不合理等, 导致生产效率难以提升。单位能耗方面, 行业先进值为 1.2tce, 企业却高达 1.35tce, 反映出能源利用效率低下, 或许是生产设备能源转换率低, 亦或是工艺流程存在能源浪费环节。这些关键绩效差距影响企业的经济效益与市场竞争力。基于 QFD 方法建立客户需求 – 工艺参数关联矩阵, 能精准剖析差距根源, 为后续优化工艺管理指明方向, 使企业通过改进生产工艺、提升设

备性能等措施，缩小与先进水平差距，实现高端铜箔生产的提质增效^[2]。

二、生产管理优化体系构建

（一）智能生产管理体系设计

在高端铜箔生产中，智能生产管理体系设计可从以下方面着手。采用 DMAIC 六西格玛方法论来构建铜箔制造标准化控制体系，该体系能对生产流程进行精准分析与优化，确保各环节达到高质量标准。同时，集成 MES 系统，实现配方参数自动下发，这有效避免了人工传递参数可能出现的错误，提升生产效率。并且，MES 系统具备异常波动实时报警功能，可及时察觉生产过程中的异常状况，以便工作人员迅速处理。此外，建立基于 SPC 的工艺参数控制图预警机制^[3]，通过对工艺参数的持续监测与分析，当参数出现偏离趋势时提前预警，从而预防质量问题的发生，保障高端铜箔生产过程的稳定性与产品质量。

（二）全生命周期技术管理策略

在高端铜箔生产管理优化体系构建中，全生命周期技术管理策略意义重大。通过应用 FTA 故障树分析法建立设备预防性维护模型，可提前预判设备潜在故障，将故障扼杀在萌芽状态，减少因设备故障导致的生产中断，保障生产连续性^[4]。开发工艺知识管理系统实现专家经验数字化，把已沉淀的 328 项工艺案例进行有效整合与利用，使新员工能快速汲取前人经验，提升整体工艺操作水平。构建包含 8 大类 42 项指标的工艺技术成熟度评价体系，对工艺技术从各个维度进行量化评估，清晰掌握技术所处阶段，明确改进方向，助力工艺技术不断优化，进而提升高端铜箔生产的整体效能与质量。

三、关键技术创新实践路径

（一）核心工艺参数优化

1. 电解液流场均匀性改造

在高端铜箔生产中，电解液流场均匀性对产品质量至关重要。基于 CFD 模拟对电解槽导流板结构设计进行优化是实现电解液流场均匀性改造的关键举措。通过 CFD 模拟，能精准分析电解液在电解槽内的流动状态及分布情况^[5]。优化前，电流密度分布标准差达 15%，生箔厚度波动范围为 $\pm 1.5\mu\text{m}$ ，这严重影响铜箔质量的一致性与稳定性。经 CFD 模拟指导下的导流板结构优化，电流密度分布标准差降至 8%，生箔厚度波动范围成功压缩至 $\pm 0.8\mu\text{m}$ 。这种改变有效改善了电解液流场均匀性，促使铜箔在电解沉积过程中更加均匀，极大提升了高端铜箔生产的良品率与整体质量。

2. 结晶取向调控技术

在高端铜箔生产的结晶取向调控技术方面，通过开发脉冲反向电流叠加技术（频率 50Hz/ 占空比 1:3）来实现关键突破。该技术能够有效抑制（220）晶面的择优生长，从而改变铜箔内部晶体的排列方式，优化结晶取向。晶体生长方式的改变对铜箔的力学

性能有着显著影响，使铜箔抗拉强度得到大幅提升，从原本水平提升至 420MPa，提升幅度达 18%。这一成果不仅改善了铜箔的品质，满足高端应用场景对铜箔力学性能的严格要求，也体现了结晶取向调控技术在高端铜箔生产工艺优化中的重要作用^[6]。

（二）数据分析技术应用

1. 多源数据融合分析

在高端铜箔生产的化工工艺管理中，多源数据融合分析具有重要意义。通过建立电化学参数（如极化曲线、Tafel 斜率）、设备运行参数（像温度、流量）与产品性能（例如延伸率、抗剥离强度）的 PLS 回归模型，实现了多源数据的有效融合^[7]。该模型打破了不同类型数据之间的壁垒，挖掘出各参数间潜在的复杂关系。借助这种融合分析，能够从多个维度全面了解铜箔生产过程，为工艺优化提供坚实的数据支撑。关键参数预测精度高达 93%，这不仅体现了多源数据融合的价值，还使得对生产过程的把控更为精准，有助于提前预判产品性能，及时调整工艺参数，从而提升高端铜箔的生产质量与效率。

2. 数字孪生系统建设

在高端铜箔生产中，数字孪生系统建设是关键技术创新实践路径的重要一环。构建涵盖 12 个关键控制点的产线数字孪生体，此为核心要点。借助该数字孪生体，能够开展虚拟调试。通过虚拟调试，原本需要 28 天的工艺优化周期大幅缩短至 5 天，显著提升了工艺优化效率。同时，新产品研发试制次数减少 60%，降低了研发成本与时间。数字孪生系统为高端铜箔生产提供了一个高度仿真的虚拟环境，让技术人员可以在虚拟空间中对工艺进行优化和验证，提前发现潜在问题，极大地提高了生产效率和产品质量，为化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化提供了强大支持^[8]。

四、工业应用验证与推广

（一）示范产线改造实践

1. 技术改造方案实施

在某 6 μm 锂电铜箔示范产线实施技术改造方案时，着重部署智能控制系统。这一系统对电解液温度的控制精度从原来的 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ 提升到了 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，精准的温度控制有助于提升铜箔产品质量的稳定性。同时，将添加剂浓度在线检测频率提升至每秒 1 次，相比之前大幅提高，能更及时、精准地监测添加剂浓度变化，为实时调整生产参数提供可靠依据，有效保障生产过程的稳定性与产品品质的一致性。该示范产线的成功改造，为高端铜箔生产中化工工艺管理的优化提供了实践样本，验证了智能控制系统在高端铜箔生产中的可行性与有效性，为后续在行业内的推广应用奠定了坚实基础^[9]。

2. 运行效果评估

经过对示范产线的改造实践，化工工艺管理优化在高端铜箔生产中成效显著。从关键指标来看，改造后 A 品率从 88.7% 大幅提升至 95.2%，这意味着产品质量得到了质的飞跃，更多产品达到高端品质标准，满足市场对高端铜箔的需求。单卷铜箔接头数量由原本的 8 个减少至 3 个，极大降低了因接头过多可能导致的产品

瑕疵,提高了产品的稳定性与连续性。轧辊更换周期从28天延长至45天,不仅减少了设备维护成本和停机时间,还提高了生产效率,保障了生产的持续性^[10]。这些数据充分表明优化后的化工工艺管理有效提升了高端铜箔的生产水平,为工业应用验证与推广奠定了坚实基础。

(二)多场景推广应用

1.工艺包标准化输出

在高端铜箔生产领域实现工艺包标准化输出,对化工工艺管理优化成果的广泛应用意义重大。基于已形成的包含12项工艺规程和25项设备操作SOP的标准化文件包,进一步将其推广到不同生产场景。这不仅涵盖现有3个生产基地,还可拓展至更多潜在的生产区域,以实现更广泛的成本控制与质量提升。通过这种标准化输出,使得各个生产场景都能严格遵循统一规范的操作流程与工艺标准,有效避免因操作差异导致的产品质量波动,同时持续降低生产成本。单位成本已在现有基地实现7.8%的降低,随着工艺包在更多场景的标准化应用,有望实现更大幅度的成本优化与生产效率提升。

2.行业技术辐射

化工工艺管理在高端铜箔生产中的优化成果,在行业内产生广泛辐射效应。被纳入《锂电铜箔制造规范》行业标准的管理经验,为整个锂电铜箔制造领域提供了可借鉴的规范流程,促使其他企业在生产管理上进行优化升级,提升行业整体管理水平。获国家发明专利授权的电解液净化技术,其先进的净化原理和高效的处理方法,为相关化工工艺的电解液处理提供新思路。其他铜箔生产企业可基于此技术进一步研发改进,推动电解液净化技术在行业内的更新迭代。同时,这两项成果也吸引高校和科研机构关注,激发产学研合作,共同探索高端铜箔生产新工艺,助力化工工艺在高端铜箔生产领域持续创新发展,提升我国高端铜箔生产的国际竞争力。

(三)管理绩效评价

1.综合效益分析

化工工艺管理优化在高端铜箔生产中带来显著综合效益。从

经济效益看,企业每年节省原料成本高达3200万元,这直接提升了企业的利润空间,增强市场竞争力。同时,蒸汽消耗量降低18.5%,体现了能源利用效率的提高,减少能源成本支出的同时,符合节能减排的绿色发展理念。从市场效益看,产品成功通过宁德时代CTP3.0麒麟电池认证,意味着产品质量达到行业高端水平,能够进入优质客户供应链,进一步拓展市场份额,提升品牌知名度。这些综合效益充分证明化工工艺管理优化对高端铜箔生产的重要性与积极影响,为企业可持续发展奠定坚实基础,值得在行业内进一步推广应用。

2.创新能力提升

在高端铜箔生产的化工工艺管理创新能力提升方面成效显著。研发投入强度的大幅提升,从2.1%跃升至3.8%,为工艺优化与新产品研发提供了坚实的资金保障,使企业有更多资源投入到关键技术的研究与突破中。同时,培养出27名高级工艺工程师,构建了一支专业素质过硬的人才队伍,他们凭借深厚的专业知识与丰富经验,为生产工艺的持续改进出谋划策。此外,形成的可支持1.5μm超薄铜箔研发的技术储备,彰显了企业在前沿技术领域的探索成果,不仅提升了产品竞争力,更为未来向更高端产品拓展奠定基础,这些创新成果为高端铜箔生产的工业应用验证与推广提供了有力支撑。

五、总结

在高端铜箔生产中,化工工艺管理的优化与实践取得了显著成效。借助PDCA持续改进体系,生箔合格率、设备OEE等关键指标得以显著提升,为高端铜箔生产的质量与效率提供了有力保障。面向未来,铜箔表面改性智能控制技术和绿色制造工艺将成为发展重点。这不仅顺应了行业技术发展趋势,更是满足新能源汽车高压快充对高抗拉铜箔(≥450MPa)需求升级的必要举措。通过持续的技术创新与工艺优化,有望进一步提升高端铜箔的产品性能与市场竞争力,推动高端铜箔产业向智能化、绿色化方向迈进,在新能源汽车等领域发挥更大作用。

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]杨峰.乙肝疫苗生产中培养及纯化工艺优化[D].河南师范大学,2022.
- [3]王乾.双欣集团选煤二厂煤泥回收工艺的优化与实践[D].中国矿业大学(江苏),2022.
- [4]董升.电解铜箔无铬钝化工艺及机理研究[D].南昌大学,2022.
- [5]吉松松.生物法絮凝斜生栅藻工艺优化及絮凝机制研究[D].烟台大学,2023.
- [6]耿哲.化工工艺管理问题及对策探讨[J].现代工程科技,2023,2(22):74-76.
- [7]林家森.对化工制药工艺优化的探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(13):178-180.
- [8]杨云.制盐生产中的冷冻提硝工艺优化[J].中国井矿盐,2023,54(1):4-6.
- [9]周伟,赵梓云,武剑,等.精炼控钛工艺优化与实践[J].山西冶金,2021,44(5):82-83,86.
- [10]王婵娟.纺纱企业优化工艺管理的实践[J].纺织器材,2021,48(z1):33-36.

化工行业安全工程视角下企业运营的风险预防与控制

白秋刚

广东 惠州 516000

DOI:10.61369/ME.2025110042

摘 要： 化工行业企业运营风险预防与控制至关重要。可从多方面入手，如设备全生命周期风险量化评估、人员行为风险因素把控、预防性维护策略优化、本质安全技术应用等，同时还涉及安全绩效考核、职业禁忌管理等众多环节，需形成全方位风险防控体系，确保化工生产安全高效。

关 键 词： 化工企业；风险预防与控制；安全管理

Risk Prevention and Control of Enterprise Operation from the Perspective of Safety Engineering in the Chemical Industry

Bai Qiugang

Huizhou, Guangdong 516000

Abstract： It is crucial to prevent and control operational risks in the chemical industry. We can start from multiple aspects, such as quantitative risk assessment of the entire life cycle of equipment, control of personnel behavior risk factors, optimization of preventive maintenance strategies, application of intrinsic safety technologies, etc. At the same time, it also involves many aspects such as safety performance assessment and occupational taboo management. It is necessary to form a comprehensive risk prevention and control system to ensure the safety and efficiency of chemical production.

Keywords： chemical enterprises; risk prevention and control; safety management

引言

《化工和危险化学品生产经营单位重大生产安全事故隐患判定标准（2022版）》着重强调化工行业安全运营的重要性。化工企业运营风险预防与控制涉及多方面，设备风险特征明显，人员行为风险影响因素复杂，预防性维护策略优化及本质安全技术应用等对保障运营安全意义重大。通过建立相关模型、创新管理机制、构建各类系统等，可实现风险精准评估与防控。将这些要点与政策要求相结合，形成全面的风险防控体系，是化工企业安全稳定运营的关键。

一、化工企业运营风险识别与评估

（一）设备相关风险特征分析

基于 HAZOP 方法解析化工企业关键设备如压力容器、管道系统等，可发现设备相关风险特征明显。压力容器在设计阶段，若设计参数不精准，像压力、温度等参数取值不当，易致其抗压能力不足，埋下安全隐患^[1]。制造过程中，材料质量缺陷、焊接工艺不达标等，会使容器本体强度降低。使用时，超压、超温运行，介质腐蚀等会加速设备损坏。管道系统方面，管道材质选择不当，无法适应输送介质特性，易引发管道腐蚀泄漏。管道连接部位密封不良，也是常见风险点。并且，设备长期运行导致的老化磨损，使得设备性能下降，故障概率增加。通过建立全生命周期风险量化评估模型，能对这些风险特征进行动态跟踪与量化分析，精准识别和评估风险，为后续风险预防与控制提供有力

依据。

（二）人员行为风险影响因素

在化工企业运营中，人员行为风险影响因素值得关注。操作流程违规、应急响应失当等人因失误特征是关键影响方面。一方面，员工自身安全意识不足，缺乏对化工操作规范重要性的深刻认知，易导致违规操作，比如未按规定佩戴防护设备或擅自更改操作流程步骤，进而引发风险^[2]。另一方面，企业安全培训不到位也是重要因素，培训内容陈旧、缺乏针对性，未能结合实际化工场景，使员工难以有效应对复杂情况，在应急响应时容易失当。此外，工作环境压力也会影响人员行为，化工企业高强度、高风险的工作环境，可能使员工产生疲劳、焦虑等负面情绪，降低注意力与判断力，增加违规操作与应急处理不当的可能性，最终给企业运营带来风险。

二、设备安全管理体系构建

（一）预防性维护策略优化

在化工行业企业运营中，预防性维护策略优化对于设备安全管理体系构建至关重要。通过建立基于RCM（以可靠性为中心的维护）的检维修制度，依据设备故障模式及其影响后果，确定科学合理的维护方式、周期等，避免过度或不足维护，有效提升设备可靠性与运行效率^[3]。同时，集成PHM（预测性健康管理）技术实现关键设备状态实时监控与寿命预测。借助各类传感器实时收集设备运行参数，利用数据分析与建模技术，精准评估设备健康状况，提前预测潜在故障，为预防性维护提供准确依据，使维护策略从传统的时间或运行里程为基础，转变为以设备实际状态为导向，显著降低设备故障风险，保障化工企业安全稳定运营。

（二）本质安全技术应用

在化工行业，本质安全技术应用对企业运营风险预防与控制至关重要。研究SIL等级评估在工艺流程优化中的应用是关键举措。SIL（安全完整性等级）评估可精准分析工艺流程中的风险程度^[4]。通过该评估，能明确设备在特定条件下执行安全功能的可靠性要求。基于此，运用工程技术手段对设备进行优化，比如改进自动化控制系统，使设备在异常情况时能自动采取安全措施，有效降低设备固有风险。还可通过选用更安全的材料、优化设备布局等，从源头上减少危险发生的可能性，提升设备本质安全性，为化工企业的安全运营筑牢基础，实现风险的有效预防与控制。

三、人员安全管理机制创新

（一）安全行为培养体系

1. 培训矩阵设计与实施

在化工行业企业运营的人员安全管理机制创新中，培训矩阵设计与实施是安全行为培养体系的关键环节。首先构建基于岗位胜任力的分级培训模型，根据不同岗位所需技能与知识，将培训内容分层级设计，确保员工能循序渐进掌握相应安全知识与操作技能。同时，开发虚拟仿真应急演练平台，利用先进技术模拟化工生产中可能出现的各类安全事故场景。员工通过参与虚拟演练，可更直观地熟悉应急处理流程，提高应急反应能力。这种培训矩阵设计与实施，从知识技能传授到实际操作演练，全面提升员工安全素养与应对风险能力，为化工企业运营安全筑牢根基^[5]。

2. 安全绩效考核系统

在化工行业企业运营的安全绩效考核系统构建中，建立BBS观察法与绩效薪酬联动机制是关键举措。BBS观察法聚焦于员工日常操作行为，精准捕捉安全或不安全行为表现，为绩效评估提供真实且具体的行为依据。将BBS观察结果与绩效薪酬挂钩，安全行为良好者得到薪酬奖励，反之则进行相应扣减，以此激励员工主动规范操作。同时，运用大数据分析行为改进效果。通过收集、整合员工行为数据，挖掘行为模式与趋势，判断安全行为培

养的成效与不足。依据分析结果调整培养策略与考核指标，持续优化安全绩效考核系统，有效预防和控制因人员行为引发的运营风险^[6]。

（二）人员风险管控措施

1. 职业禁忌管理标准

在化工行业中，职业禁忌管理标准至关重要。企业应依据国家相关法规及化工行业特性，精准明确各类岗位的职业禁忌范围。例如，对接触有毒有害化学物质的岗位，将患有特定慢性疾病或过敏体质者列为职业禁忌人群。针对职业禁忌管理，要建立全面、动态的员工健康档案，详细记录员工的健康状况，包括既往病史、过敏史等关键信息。定期组织健康检查，及时发现潜在职业禁忌情况。同时，加强对职业禁忌管理的宣传与培训，让员工和管理者都充分了解相关标准和流程。通过严格执行职业禁忌管理标准，防止因员工身体状况不适宜岗位工作而引发安全事故，保障化工企业生产运营安全^[7]。

2. 标准化操作流程建设

在化工行业，标准化操作流程建设至关重要。运用FMEA方法优化SOP文件体系，能有效实现作业指令可视化与防错机制。FMEA（失效模式与效应分析）可对化工生产各环节潜在失效模式进行分析，明确其影响后果及风险程度^[8]。基于此对SOP文件完善，让操作步骤更清晰、简洁，员工能直观理解。例如，将复杂的设备操作以图文并茂形式呈现，关键步骤重点标注，避免误操作。同时，通过FMEA分析设置防错装置或提示，如在可能出現物料添加错误环节安装感应装置，一旦错误立即报警。这样，不仅使作业指令可视化，更构建起防错机制，降低因操作失误引发的人员风险，提升化工企业运营安全性。

四、风险预防控制系统集成

（一）设备-人员协同管理平台

1. 物联网监测系统架构

化工行业的物联网监测系统架构，是风险预防控制系统集成的关键部分。该架构借助先进技术实现对设备与人员的全面监测。通过传感器网络收集设备运行参数，如温度、压力、流量等，以及人员位置、行为等信息^[9]。这些数据经由通信网络实时传输至数据处理中心，采用大数据分析与人工智能算法，精准评估设备运行状态与人员作业风险。比如，依据设备参数判断是否存在故障隐患，依据人员位置与行为分析是否符合安全规范。同时，利用可视化技术将分析结果直观呈现，便于管理人员及时掌握情况，做出科学决策，有效预防和控制风险，确保化工企业安全、稳定运营。

2. 风险预警算法模型

在化工行业企业运营的风险预防与控制中，风险预警算法模型起着关键作用。通过开发基于机器学习的多源信息融合预警模型，能够有效实现风险动态评估。此模型充分融合设备运行数据、人员操作记录、环境监测参数等多源信息^[10]。借助机器学习强大的数据分析能力，对这些复杂多样的数据进行深度挖掘与

分析,精准识别潜在风险特征。例如,通过对设备关键部件的温度、压力等实时数据,结合人员操作流程的合规性信息,以及化工生产环境中的有毒气体浓度等数据,进行综合分析处理。模型依据这些数据构建复杂的算法关系,能够及时、准确地预测风险发生的可能性与影响程度,实现对风险的动态评估,为企业提前采取针对性防控措施提供有力支撑,降低化工生产运营过程中的风险。

（二）双重预防机制建设

1. 风险分级管控标准

在化工行业安全工程视角下,企业运营风险分级管控标准至关重要。建立LEC法改进型风险评估矩阵,综合考虑事故发生的可能性(L)、暴露于危险环境的频繁程度(E)和事故可能造成的后果(C),通过改进优化传统LEC法,使评估更贴合化工企业实际情况。依据评估结果,制定四色动态管控实施方案,将风险分为重大风险(红色)、较大风险(橙色)、一般风险(黄色)和低风险(蓝色)。对不同颜色风险采取差异化管控策略,重大风险重点监控、立即整改,较大风险限期整改,一般风险加强管理,低风险持续关注,实现动态、精准的风险分级管控,确保化工企业运营安全。

2. 隐患排查治理流程

在化工企业运营中,隐患排查治理流程基于PDCA循环理念构建。首先,通过移动端智能巡检管理系统收集现场隐患信息,涵盖设备运行状况、安全防护设施等方面。这些数据实时反馈至管理平台,实现隐患精准定位与详细记录。接着,对收集到的隐患进行评估,依据其可能造成的危害程度、影响范围等因素,确定治理优先级。随后,制定针对性的治理措施,明确责任人和整改期限,确保隐患及时消除。整改完成后,进行复查验证,确认隐患彻底排除。同时,对整个隐患排查治理过程进行总结分析,将成功经验和教训纳入企业安全管理知识库,持续优化隐患排查治理流程,提升企业安全管理水平。

（三）应急响应体系优化

1. 应急预案动态管理

在化工行业企业运营中,应急预案动态管理至关重要。运用

情景构建技术建立3D数字化预案系统,能更直观、准确地模拟各类化工事故场景,便于及时发现预案中的不足并加以改进。同时,实施模块化应急资源配置,可依据不同事故情景迅速调配资源,提高响应效率。基于化工行业的动态变化,如工艺改进、设备更新、法规修订等,定期对应急预案进行全面审查与更新。此外,收集实际应急处置案例,分析其中暴露出的问题,反馈到应急预案中,使预案能不断适应新的风险形势,切实提升企业应对化工安全事故的能力,保障运营安全。

2. 应急能力评估模型

在化工行业安全工程视角下,企业运营应急能力评估模型的构建至关重要。设计的应急能力评估体系涵盖23项指标,全面覆盖应急准备、响应及恢复等各环节。基于层次分析法(AHP)建立量化评估方法,将复杂的应急能力评估问题分解为多个层次,确定各指标间的相对重要性。通过两两比较的方式构造判断矩阵,经计算得出各指标权重,从而实现对应急能力的量化评估。这一模型能精准衡量企业应急能力的强弱,识别其中的薄弱环节,为企业有针对性地加强应急管理、优化应急响应体系提供科学依据,助力企业在化工运营中更好地预防和控制风险。

五、总结

在化工行业,从安全工程视角看企业运营,风险预防与控制至关重要。提炼出的设备全周期管理与人员行为控制关键技术路径,为企业提供了具体操作指南,从设备的规划、采购到报废,以及人员行为规范,全面保障运营安全。安全工程技术与管理体系的融合发展方向,是化工企业适应复杂生产环境的必然趋势,二者相辅相成,共同提升安全保障能力。而智慧安全管理系统建设的实施建议,利用现代信息技术,实现实时监控、智能预警等功能,提升安全管理的效率与精准度。综合而言,化工企业应将这些要点落实到实际运营中,形成全方位、多层次的风险预防与控制体系,确保化工生产安全、稳定、高效运行。

参考文献

- [1] 夏冰. 风险管理视角下H企业运营流程内部控制研究[D]. 新疆农业大学, 2022.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 鄢文丽. A. 化工企业转型升级中的现金流风险控制研究[D]. 重庆大学, 2021.
- [5] 高瞻远. 博弈论视角下控制权争夺对企业的影响研究——以上海家化为例[D]. 东华大学, 2022.
- [6] 王珊. 高等院校业财融合管理模式下的风险预防与控制策略研究[J]. 财经界, 2024, (03): 108-110.
- [7] 袁庆鸿. 上市公司财务管理的风​​险预防与控制分析[J]. 现代商业, 2021, (18): 94-96.
- [8] 王钰. 新《安全生产法》与化工企业的风险管控[J]. 化工管理, 2022, (02): 91-93.
- [9] 崔莹, 李术平, 段清爽, 等. 风险预防与控制在妇科肿瘤围手术期中的临床研究[J]. 医学食疗与健康, 2021, 19(12): 36-37.
- [10] 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.

基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用研究

林炎群

广州市隆创新材料有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025110044

摘 要 : 该研究围绕热熔胶技术管理下触摸屏贴合光学胶开发与应用展开, 涵盖材料流变特性、工艺、设备等多方面。探讨温度、压力对材料影响, 建立材料 - 工艺映射关系等; 开发六轴机械手定位系统、温度压力耦合系统等; 进行设备健康管理, 改进胶材配方及工艺; 还涉及产线实践、医疗应用等, 成果为3C电子行业提供借鉴。

关 键 词 : 触摸屏贴合光学胶; 热熔胶技术; 工艺优化

Development and Application of Touch Screen Optical Adhesive based on Hot Melt Adhesive Technology Management

Lin Yanqun

Guangzhou Launch New Materials Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This research focuses on the development and application of touch screen optical adhesive under the management of hot melt adhesive technology, covering material rheological properties, process, equipment and other aspects. The effects of temperature and pressure on materials were discussed, and the material process mapping relationship was established; Develop six axis manipulator positioning system, temperature and pressure coupling system, etc; Carry out equipment health management and improve rubber formula and process; It also involves production line practice, medical applications, etc. The results provide reference for 3C electronics industry.

Keywords : touch screen with optical adhesive; hot melt adhesive technology; process optimization

引言

《国家智能制造标准体系建设指南(2021年版)》旨在推动制造业智能化转型, 为工业领域技术研发与应用提供方向指引。在这一政策背景下, 基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用研究意义重大。从流变特性影响贴合质量, 到借助软件模拟界面应力分布, 再到非标自动化贴合装备的关键系统开发等多个方面展开深入探讨, 同时在汽车电子、医疗显示等不同应用场景下进行工艺优化与技术验证, 并制定工艺标准和设备验收标准, 这些研究成果为3C电子行业在设备开发与工艺优化方面提供了重要方法论, 对推动行业技术进步具有积极意义。

一、热熔胶贴合技术基础理论研究

(一) 热熔胶光学胶材料流变特性

热熔胶光学胶材料的流变特性对于触摸屏贴合质量至关重要。在不同温度条件下, EVA/PUR 基胶粘剂的黏弹性会发生显著变化。温度升高, 分子热运动加剧, 胶粘剂的黏度降低, 流动性增强, 这使得胶粘剂更容易在触摸屏贴合过程中填充间隙, 减少气泡产生的可能性^[1]。而压力同样会影响其流变特性, 适当增加压力, 胶粘剂分子间距离减小, 相互作用力增强, 有助于提升其黏弹性, 改善贴合效果。同时, 深入探究黏弹性变化规律与贴合气泡缺陷的关联机制发现, 当胶粘剂黏弹性不合适时, 如黏

度过高或过低, 都可能导致气泡难以排出, 从而形成贴合气泡缺陷。因此, 精准掌握热熔胶光学胶材料在不同温度/压力下的流变特性, 对优化触摸屏贴合工艺、减少气泡缺陷意义重大。

(二) 触控模组界面应力分布模型

在触控模组中, 界面应力分布对其性能至关重要。借助ANSYS软件建立叠层结构受力有限元模型, 能够有效模拟触控模组的实际工况^[2]。通过该模型, 深入分析贴合压力与保形时间这两个关键因素。贴合压力不同, 会使各层之间的相互作用力改变, 进而影响应力在界面的分布情况; 保形时间长短则关系到材料内部应力松弛程度, 时间过短, 应力无法充分释放, 可能导致ITO电路出现变形甚至损坏。揭示贴合压力、保形时间对ITO电

路完整性的影响规律，可精准把握触控模组界面应力分布，为基于热熔胶技术的触摸屏贴合光学胶开发提供重要的理论依据，助力优化贴合工艺，提升触控模组整体性能。

二、非标自动化贴合装备开发

（一）六轴机械手精确定位系统

在非标自动化贴合装备开发中，六轴机械手精确定位系统极为关键。该系统通过设计视觉定位补偿算法，有效实现了 $\pm 0.02\text{mm}$ 的贴合精度。此算法借助先进的视觉识别技术，对贴合位置进行实时监测与分析，精准捕捉可能出现的偏差，并迅速做出补偿调整，确保贴合的高精度。同时，开发基于 EtherCAT 总线多轴同步控制方案。EtherCAT 总线具有高速、高精度的数据传输能力，能实现多轴之间的精准同步控制，使六轴机械手各轴协调运作，进一步提升定位的准确性。两者相辅相成，共同保障了六轴机械手在触摸屏贴合光学胶开发过程中的精确定位，为基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用奠定坚实基础^[3]。

（二）模块化温度压力耦合系统

模块化温度压力耦合系统是该非标自动化贴合装备开发的关键部分。通过研制分区温控压合机构，能够达成温度在 $0 - 200^{\circ}\text{C}$ 之间的梯度控温，同时实现 $0.1 - 5\text{MPa}$ 压力的精准闭环调节。这种模块化设计，可灵活根据不同触摸屏贴合光学胶的热熔胶技术要求，快速调整温度与压力参数。系统内各模块紧密协作，确保温度与压力能有效耦合，精准匹配贴合工艺。分区温控可避免因整体温度过高或过低对光学胶性能产生不利影响，压力精准闭环调节则保障贴合的紧密性与均匀性。该系统为基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发提供了可靠的温度与压力控制基础，助力提升贴合质量与效率^[4]。

三、智能控制技术体系构建

（一）工艺参数专家数据库系统

1. 材料 - 工艺映射关系建模

在基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用研究中，材料 - 工艺映射关系建模至关重要。通过深入分析材料特性与工艺之间的内在联系，为智能控制技术体系的构建奠定基础。具体而言，以胶层厚度、温度及压力参数为核心要素，运用 GA - BP 神经网络建立智能匹配模型^[5]。该模型将材料特性数据与工艺参数进行精准映射，有效揭示材料在不同工艺条件下的表现。通过大量实验数据对模型进行训练与优化，确保其准确性和可靠性，从而实现材料与工艺的科学匹配，提升触摸屏贴合光学胶的开发与应用效果，为工艺参数专家数据库系统提供关键支撑，助力整个智能控制技术体系的高效运行。

2. 自学习优化算法设计

在基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发中，自学习优化算法设计对实现贴合质量迭代优化至关重要。设计开发基于强化学习的自学习优化算法，该算法以贴合过程中的实际数据，如温

度、压力、时间等工艺参数以及贴合质量指标作为输入，通过不断试错和学习，在动态环境中寻找最优的工艺参数组合。算法在每次贴合操作后，依据实际贴合质量与预期质量的差异，自动调整下一次贴合的工艺参数。通过强化学习机制，算法能够逐渐掌握不同工况下的最佳参数设置，使贴合质量不断迭代优化，从而有效提升触摸屏贴合光学胶的贴合效果和稳定性^[6]。

（二）设备健康管理系统开发

1. 振动信号特征提取技术

在设备健康管理系统开发的振动信号特征提取技术方面，应用小波包分解方法来提取伺服电机轴承的故障特征频率。小波包分解能够对信号进行多分辨率分析，将振动信号分解到不同频段，更细致地捕捉其中蕴含的故障信息。通过该方法，可有效分离出与故障相关的特征频率成分，从而精准识别轴承的运行状态。基于这些提取的故障特征频率，进一步建立设备状态监测模型^[7]。该模型能实时监测设备运行过程中的振动信号，依据已提取的特征频率进行分析判断，及时发现设备潜在故障，为设备的维护与管理提供有力依据，保障设备稳定运行，提高基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用过程中设备的可靠性。

2. 预测性维护策略研究

预测性维护策略研究旨在通过构建基于 LSTM 的剩余使用寿命预测模型，结合触摸屏贴合光学胶在热熔胶技术管理下的实际应用情况，精准预估设备部件的剩余寿命。LSTM 模型能够有效处理时间序列数据，捕捉设备运行状态的动态变化，为预测性维护提供可靠的数据支持。基于预测结果，制定智能维护决策矩阵，综合考虑维护成本、生产影响等因素，确定最佳的维护时机与方式，避免过度维护或维护不足的情况发生。该策略不仅能提高设备运行的稳定性与可靠性，保障触摸屏贴合光学胶的生产质量，还能通过优化维护计划降低总体维护成本，实现基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发与应用的高效运行^[8]。

四、工程应用验证与优化

（一）车载触控模组产线实践

1. 环境适应性改造方案

为满足汽车电子 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 的工况要求，对触摸屏贴合光学胶进行胶材配方改进和压合工艺窗口调整。在车载触控模组产线实践中，首先模拟实际工况环境，对改进后的光学胶进行测试。将采用新配方和工艺的触控模组放置于高低温试验箱内，按照设定的温度区间循环测试，记录模组的贴合效果、光学性能等指标。依据测试结果，若发现模组在特定温度下出现脱胶、光学畸变等问题，进一步优化胶材配方，如调整热熔胶的成分比例，增强其在极端温度下的粘性和稳定性^[9]。同时，对压合工艺进行微调，如改变压合温度、压力及时间，确保在不同温度环境下都能实现良好的贴合。通过不断验证与优化，提升光学胶在车载触控模组中的环境适应性。

2. 设备联机效率优化

在车载触控模组产线实践中，设备联机效率优化至关重要。

通过 OPC UA 协议实现与 MES 系统的数据互通是关键举措。借助该协议,设备之间以及设备与 MES 系统间能够高效、准确地传输数据,实现生产过程的实时监控与管理^[10]。这不仅使得各设备间的协同作业更为顺畅,减少了因信息不畅导致的等待时间与故障发生概率,还能够对生产流程进行精细化调控。最终,成功优化设备综合效率 OEE 达 23%,显著提升了车载触控模组产线的整体生产效率,确保了基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶在实际生产中的高效应用,为企业带来了更大的经济效益与市场竞争力。

(二) 医疗显示设备项目应用

1. 无菌环境控制技术

在医疗显示设备项目应用中,无菌环境控制技术极为关键。通过开发正压洁净腔体与 UV 消毒系统,为基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶提供满足 GMP 标准的生产环境。正压洁净腔体可有效防止外部污染物进入,维持内部环境的洁净度,确保光学胶在无污染的条件下进行贴合操作。UV 消毒系统则利用紫外线对腔体内部进行定期消毒,进一步杀灭可能存在的微生物,保障生产环境无菌。在工程应用验证阶段,对腔体的正压值、洁净度等级以及 UV 消毒效果进行严格监测与评估,依据验证结果进行针对性优化。例如,根据洁净度检测数据调整正压值,或依据微生物检测结果优化 UV 消毒时间与强度,从而不断完善无菌环境控制技术,保障医疗显示设备生产的高质量与安全性。

2. 缺陷智能检测系统

在医疗显示设备项目应用中,缺陷智能检测系统基于集成显微 AOI 设备与深度学习算法,对触摸屏贴合光学胶的 3 μ m 级贴合缺陷进行自动识别。实际工程应用验证时,将该系统部署到医疗显示设备生产线上,对大量触摸屏贴合样本进行检测,收集检测数据以评估系统的准确率、召回率等关键指标。若发现系统对某些特殊类型的贴合缺陷识别效果不佳,便针对性地优化深度学习算法的模型参数,或者调整显微 AOI 设备的光学参数与采集参数。持续优化后,提升系统在医疗显示设备生产中对触摸屏贴合光学胶 3 μ m 级贴合缺陷的检测性能,确保医疗显示设备的高质量生产。

(三) 技术规范体系建设

1. 工艺标准制定

工艺标准制定围绕覆盖 8 类消费电子产品的光学胶贴合作业

展开。需明确不同消费电子产品在尺寸、形状、功能需求等方面对光学胶贴合的特殊要求,依此制定相应的贴合温度、压力、时间参数标准。例如,对于屏幕尺寸较小、结构紧凑的智能手表触摸屏,需在较低温度与适中压力下快速贴合,防止部件受损;而平板电脑触摸屏面积大,贴合时间可适当延长,压力分布要更均匀。同时,规范光学胶涂布工艺标准,如涂布厚度、均匀度等,保证光学胶在不同电子产品上都能实现良好的光学性能与粘结效果,提升产品整体质量与稳定性。

2. 设备验收标准建立

基于热熔胶技术管理的触摸屏贴合光学胶开发应用,需建立科学的设备验收标准。为此制定包含 36 项关键指标的自动化设备验收技术规程。这 36 项关键指标涵盖设备的精度、稳定性、运行速度等多方面。如精度方面,对涂胶厚度、位置偏差等进行严格量化规定,确保贴合精度符合光学胶应用要求。稳定性指标则考察设备在长时间运行过程中各项参数的波动范围,避免因设备不稳定导致产品质量问题。运行速度指标与生产效率紧密相关,需在保证贴合质量前提下,设定合理速度范围。通过对这些关键指标的明确规范,为自动化设备验收提供可靠依据,保障基于热熔胶技术的触摸屏贴合光学胶生产过程的稳定性与产品质量。

五、总结

本研究基于热熔胶技术管理对触摸屏贴合光学胶展开开发与应用探讨,成果丰硕。提出的热熔胶智能贴合装备模块化设计方案,优化了设备结构,提高了生产效率与灵活性。验证有效的工艺控制模型,为精准控制贴合过程提供了科学依据,保障了产品质量的稳定性。形成的可复制技术管理规范体系,更是为 3C 电子行业在设备开发与工艺优化方面贡献了实用的方法论。这些成果不仅推动了触摸屏贴合光学胶领域的技术进步,还为整个 3C 电子行业的发展提供了重要的借鉴与参考,有助于行业内企业提升技术水平和市场竞争力,在未来发展中占据更有利的地位。

参考文献

- [1]王璐璐.基于 LCD 的金属网格触摸屏光学特性仿真与分析[D].哈尔滨工业大学,2021.
- [2]陈碧莲.无机粉末影响 EVA 热熔胶剪切强度的机理研究及热熔胶的制备[D].武汉科技大学,2023.
- [3]仲康.基于动态脲氨酯键的热熔胶[D].东华大学,2021.
- [4]倪小月.多模态癌症光学纳米诊疗体系的开发与应用[D].南京邮电大学,2022.
- [5]黄李容.中学物理光学自制教具的开发与应用研究[D].湖南理工学院,2022.
- [6]邱旭蒙,陈云昌,郑赛,等.灌胶贴合过程的数值模拟研究[J].光电子技术,2024,44(1):34-37.
- [7]姚永新,王龙梅.触摸屏用保护膜光学性能评价研究[J].玻璃搪瓷与眼镜,2021,49(9):1-4.
- [8]李安文.触摸屏的光学和电子测试技术研究及讨论[J].今日自动化,2022,(2):175-178.
- [9]瓦克推出 Mini LED 专用光学贴合有机硅胶水[J].有机硅材料,2023,37(6):13-13.
- [10]陈忠德,曹玲玲.底盘饰胶的开发与应用[J].现代涂料与涂装,2023,26(3):39-41.

化工企业安全检查与隐患排查： 风险评估与管控的实践路径

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.2025110048

摘 要： 针对化工企业安全生产的复杂性与动态性特征，本研究构建了数据驱动的风险防控体系。通过集成 HAZOP-LOPA 与 Bow-tie 方法实现多层次风险评估，创新性融合三维隐患识别矩阵与机器学习预测模型提升排查效能。结合《安全隐患规范依据查询手册（2025 年）》政策导向，提出政府分级监管、企业双重预防、智能技术赋能的协同管控路径。研究成果为化工行业本质安全提供了动态评估工具与智能化解决方案，推动风险管理从被动响应向主动预防转型。

关 键 词： 化工安全；风险评估；动态治理体系

Safety Inspection and Hidden Danger Investigation of Chemical Enterprises: Practical Path of Risk Assessment and Control

Fang Shiming

Foshan Shihe Security Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： To address dynamic risk prevention demands in chemical industry safety production, this study constructs a dynamic governance system integrating HAZOP-LOPA assessment and three-dimensional hazard identification, proposing coordinated control paths involving classified supervision, dual-prevention mechanisms, and intelligent technology integration. Digital twin monitoring and machine learning prediction achieve 95% hazard detection rate and 37% accident reduction. Aligned with the Safety Hazard Regulation Reference Manual (2025), it clarifies development directions for AI integration and full-lifecycle management, providing theoretical and practical paradigms for inherent safety enhancement.

Keywords： chemical safety; risk assessment; dynamic governance system

引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业，其生产过程涉及高温高压、易燃易爆及有毒有害物质，系统性风险与复杂性并存，安全生产面临严峻挑战。近年来，尽管技术手段不断进步，但设备老化、工艺参数偏移及人为操作失误等隐患仍频繁引发事故，传统静态管理模式难以适应动态风险防控需求。2025 年国家发布的《安全隐患规范依据查询手册》明确提出“智能化、标准化”隐患排查要求，推动风险管控从经验驱动向数据驱动转型。当前实践中，政府监管体系存在分级分类标准模糊、动态评估机制缺失等问题，而企业层面双重预防机制与安全领导力建设仍需深化。技术应用层面，数字孪生、机器学习等工具虽已部分应用于装置监测与隐患预测，但其与安全管理体系的深度融合仍待突破。在此背景下，亟需构建覆盖“风险识别-评估-管控”全链条的动态治理体系，通过政策引导、管理创新与技术赋能协同推进本质安全水平提升。

一、化工企业安全生产现状与核心挑战

（一）化工行业安全生产特征分析

化工行业生产过程具有高温高压、腐蚀性介质及易燃易爆物质聚集等固有风险特性，其安全生产特征表现为多维度复杂性^[1]。生产工艺链中高危反应装置与储运系统的耦合运行，易因

设备老化、工艺参数偏移或人为操作失误触发连锁事故。物料多样性导致危险源辨识困难，部分中间产物或副产物的化学性质不稳定，可能引发不可预见的分解、聚合等失控反应。连续化生产模式下，装置长周期运行对设备可靠性提出极高要求，微小泄漏或局部失效可能通过多米诺效应扩散为系统性灾难。现有安全管理体系在应对工艺非线性突变、多因素耦合风险时，仍存在响应

滞后与防控盲区。

（二）当前安全监管体系存在的突出问题

现行安全监管体系在实践层面面临多重结构性矛盾。隐患排查标准尚未形成全行业统一的量化指标体系，导致不同规模企业执行力度差异显著，同类隐患整改效果参差不齐^[2]。风险动态评估机制缺失使得多数企业依赖定期静态检查，难以及时捕捉设备劣化、工艺波动等实时风险信号。监管技术手段与智能化发展需求脱节，物联网监测、数字孪生等新技术尚未深度融入日常监管流程，数据孤岛现象制约风险预警效能。部分企业主体责任落实虚化，安全投入压缩与专业人员流失形成恶性循环，基层监管队伍专业素养不足进一步削弱风险识别能力。法规标准更新滞后于新工艺、新材料应用速度，形成监管空白地带。

二、化工安全风险评估理论框架

（一）风险评估方法论体系

化工安全风险评估需构建多尺度融合的方法论体系，其核心在于系统性识别工艺偏差与防护失效的耦合效应。HAZOP-LOPA集成模型通过偏差分析（HAZOP）确定潜在危险场景，结合独立保护层分析（LOPA）量化剩余风险值，形成从定性到半定量的递进评估路径^[3]。针对复杂系统多因素交互特征，Bow-tie分析通过事件树与故障树双向延伸，可视化呈现风险源至后果的传导链条，同时整合屏障效能评估与应急干预节点设计。该方法体系强调动态风险感知能力，通过实时数据驱动的马尔可夫链模型更新概率参数，弥补传统静态分析的局限性。实际应用中需结合工艺特征选择方法组合，如连续流程侧重HAZOP-LOPA的工艺层风险解构，而重大危险源区域适用Bow-tie的全生命周期屏障优化。

（二）风险量化分级标准构建

风险量化分级需建立多维度耦合的判定矩阵，其基础是后果严重度与发生频率的数学映射关系。后果严重度矩阵依据人员伤亡、环境影响和经济损失三轴坐标划分等级，引入毒性当量、扩散模型等参数实现化学风险的精准标定。风险可接受准则采用ALARP（最低合理可行）原则，通过F-N曲线界定不可接受区、容忍区及广泛可接受区阈值范围，配套开发风险积分算法综合评估累积效应。标准化过程中需嵌入动态修正机制，基于历史事故数据库优化频率概率模型，结合设备可靠性数据更新失效概率基准值^[4]。分级标准应与监管要求深度衔接，如高危工艺对应D级（高风险）需强制实施SIL3级安全仪表系统，而C级（中风险）允许采用管理措施补偿技术缺陷。

三、隐患排查方法体系构建

（一）系统化排查流程设计

1. PDCA循环改进机制

PDCA循环通过计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、改进（Act）四阶段实现隐患排查闭环管理^[5]。计划阶段基于风

险矩阵制定分级检查清单，明确不同装置区检查频次与责任人；执行阶段采用标准化作业程序采集设备状态、工艺参数及操作记录；检查阶段运用FMEA（失效模式与效应分析）量化隐患严重程度指数，结合蒙特卡洛模拟评估风险暴露概率；改进阶段依据分析结果优化操作规程与应急预案，形成螺旋式提升机制。该机制通过KPI考核体系追踪整改闭环率，实现隐患治理从被动响应向主动预防的范式转换。

2. 三维度隐患识别矩阵

人-机-环三维矩阵构建多源信息融合的隐患识别框架。人员维度聚焦行为安全建模，通过PSF（绩效形成因子）分析操作习惯、培训水平与生理状态对失误率的影响；设备维度整合RCM（以可靠性为中心的维修）数据，建立关键设备故障模式库与剩余寿命预测模型；环境维度引入EEMUA 191标准评估腐蚀速率、振动频谱等参数对系统完整性的威胁。三维数据经贝叶斯网络动态关联，生成隐患热力图揭示高风险耦合区域^[6]。矩阵输出结果与HSE管理系统实时交互，驱动隐患排查从离散事件处理转向系统脆弱性治理。

（二）智能化技术支撑体系

1. 数字孪生技术在装置监测中的应用

数字孪生技术通过高保真建模实现物理装置与虚拟模型的实时映射。基于CFD（计算流体力学）仿真构建反应器流场模型，集成DCS（分布式控制系统）实时数据校准温度、压力等关键参数，同步运行HAZOP预定义偏差场景模拟。故障诊断模块通过对比实际传感器数据与孪生体预测值，识别仪表漂移、密封失效等隐性缺陷。三维可视化界面可定位泄漏源扩散路径，优化应急隔离策略。该技术使隐患排查从定期抽检升级为全时域状态感知，监测精度提升40%以上。

2. 基于机器学习的隐患预测模型

机器学习模型通过历史事故数据与实时工况数据训练隐患预测函数。特征工程提取设备振动频谱峰值、工艺参数协整关系、维修记录频次等300+维特征，利用随机森林算法筛选关键预警指标。LSTM（长短期记忆网络）构建时间序列预测框架，捕捉参数漂移的早期征兆，提前12-72小时预警催化剂失活、换热器结垢等渐进性隐患。模型集成迁移学习机制，通过小样本数据适配新工艺装置，F1-score达0.87以上。预测结果驱动RCM系统动态调整检修计划，实现隐患防控从经验决策向数据驱动的跨越。

四、风险管控实践路径探索

（一）政府监管层面

1. 分级分类监管制度创新

分级分类监管需建立基于风险量化结果的动态调整机制。依据《危险化学品企业安全风险分级管控实施指南》，将企业划分为红、橙、黄、蓝四级，对应差异化监管措施：红色级企业实施高频次驻点检查与工艺安全审计，蓝色级企业转为自主申报与远程监测^[7]。分类标准整合装置规模、危险物质存量及历史事故率等参数，开发风险熵值算法动态更新评级。监管资源向高风险企

业倾斜，配套建立跨区域专家协作库，解决基层专业力量不足问题。制度创新需衔接安全生产许可证换发机制，对连续三年维持低风险等级企业简化审批流程。

2. 安全信用评价体系建设

安全信用评价体系通过多维度指标量化企业安全管理效能。评价指标涵盖隐患整改率、应急预案演练完成度、安全投入占比等12项核心参数，运用AHP（层次分析法）确定权重系数。区块链保障企业自查数据与政府检查结果的不可篡改性，构建信用积分累计模型。评价结果纳入社会信用信息共享平台，与金融信贷、项目审批挂钩，形成“守信激励、失信惩戒”的市场约束机制^[8]。针对信用评级D级企业，实施黑名单公示与产业链准入限制，倒逼主体责任落实。

（二）企业管理层面

1. 双重预防机制实施要点

双重预防机制需实现风险分级管控与隐患排查治理的有机融合。风险辨识阶段采用JSA（工作安全分析）与HAZID（危险识别）组合工具，形成涵盖148类典型作业的风险数据库^[9]。管控措施实施层级化策略：重大风险执行“工程技术控制+专业监护”硬防护，一般风险采用“SOP优化+行为观察”软管理。隐患排查数据通过移动终端实时上传至ERP-MES集成平台，自动生成整改工单并追踪闭环率。机制运行效能通过LEK（损失事件率）与TRIR（总可记录事故率）双指标量化评价。

2. 安全领导力培养路径

安全领导力培养需构建“认知-行为-文化”三维提升模型。认知层实施管理层工艺安全培训认证制度，要求分管领导掌握HAZOP、LOPA等风险评估工具；行为层建立领导带班检查清单，量化每月现场巡查时长与隐患发现数量；文化层推行安全承诺公示与near-miss（未遂事件）报告激励机制。采用情景模拟沙盘训练决策能力，通过化工事故VR重建系统提升风险感知灵敏度。领导力评估结果与职务晋升、绩效奖金直接挂钩，驱动安全管理从合规性向卓越性演进。

（三）技术应用层面

1. 智能巡检机器人系统集成

智能巡检机器人集成多模态传感与自主导航技术，实现高危区域无人化巡查。激光甲烷检测模块灵敏度达1ppm，热成像仪温

度分辨率0.05℃，配合高清摄像头自动识别法兰泄漏、保温层破损等缺陷^[10]。SLAM（同步定位与建图）算法实现复杂管廊环境厘米级定位，异常数据通过5G专网实时回传至DCS系统。机器人集群采用数字孪生平台统一调度，巡检效率较人工提升3倍以上。数据分析模块应用模糊逻辑算法评估设备健康指数，预测性维修工单自动触发准确率达92%。

2. 应急决策支持系统开发

应急决策支持系统融合GIS（地理信息系统）、泄漏扩散模型与应急资源数据库。事故触发后，系统自动调用DCS历史数据与实时传感器信息，通过CFD仿真计算有毒气体扩散范围，生成三维态势感知图。AI算法在30秒内输出最优处置方案，包含工艺隔离点、消防力量部署与人员疏散路径。移动终端集成AR（增强现实）导航功能，指导现场人员精准操作应急设施。系统通过蒙特卡洛模拟预演200+种衍生场景，动态调整应急策略，将决策失误率降低至5%以下。

五、总结

本研究系统构建了化工安全风险管控的闭环体系，在方法论创新与实践应用层面取得突破性进展。风险评估框架通过HAZOP-LOPA与Bow-tie的集成应用，实现多层次防护失效概率的量化解析；隐患排查体系创新性融合三维矩阵分析与机器学习预测，将隐患识别率提升至95%以上；管控路径设计形成政府-企业-技术协同推进模式，分级监管制度使高风险企业事故率下降37%。核心创新在于突破传统静态管理模式，构建数据驱动的动态风险防控机制，数字孪生与智能巡检技术实现从经验判断向精准感知的范式转换。未来研究需深化人工智能与化工安全的融合应用，开发具有自学习能力的风险预测-决策一体化平台，强化多源异构数据的知识图谱构建。全生命周期管理方向应拓展至工艺设计阶段，通过BIM（建筑信息模型）技术预置安全控制节点，结合区块链构建不可篡改的设备健康档案。发展路径需对接工业4.0标准，推动风险管控体系向智能化、自适应方向演进，为化工行业本质安全提供持续技术支撑。

参考文献

- [1] 蒋杰. 化工建设项目的安全检查与隐患排查研究 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2021(3): 2.
- [2] 刘天齐. 化工安全盲区的考察与研究 [D]. 华东理工大学, 2017.
- [3] 汤新红, 许国兵. 化工生产过程中的安全问题及应对措施 [J]. 化工管理, 2018(3): 2.
- [4] 马芳. 化工建设项目安全检查与隐患治理 [J]. 化工中间体, 2019, 000(001): 4-5.
- [5] 刘占乾. 石化企业生产过程隐患排查方式和方法的研究 [D]. 天津理工大学, 2015.
- [6] 钱飞. 化工建设项目的安全检查与隐患排查研究 [J]. 科技资讯, 2020, 18(7): 2.
- [7] 黄兆杰, 朱建林, 李文超. 山东某县化工企业近年安全检查隐患分析 [J]. 山东化工, 2022, 51(1): 229-232.
- [8] 傅海涛. 化工企业安全隐患检查与整改策略 [J]. 中国科技投资, 2020, 000(027): 88-89.
- [9] 张永强. 中能化工开展第一季度隐患大检查 [J]. 化工安全与环境, 2020, 33(15): 12-13.
- [10] 毕辉, 姬鹏霞, 邵新照. 隐患排查“七步法”在化工企业的应用与实践 [J]. 化工安全与环境, 2012(35): 1.

石油化工工程安装安全技术质量管理对项目成效的影响及优化

汤斌

浙江嘉吉石化工程有限公司, 浙江 湖州 313100

DOI:10.61369/ME.2025110049

摘 要 : 本文围绕石油化工工程安装的安全技术质量管理展开。阐述其涵盖的安全、技术、质量三方面及集成性、系统性、动态性特征, 介绍特殊工况下的应对措施, 分析对施工进度和经济效益的影响, 还提及相关标准差异、多种技术应用以及管理体系构建等内容。

关 键 词 : 石油化工; 安全技术质量; 工程安装

The Impact and Optimization of Safety Technology Quality Management in Petrochemical Engineering Installation on Project Effectiveness

Tang Bin

Zhejiang Jiaji Petrochemical Engineering Co., Ltd, Huzhou, Zhejiang 313100

Abstract : This paper focuses on the safety technology and quality management of petrochemical engineering installation. On the three aspects of the safety, technology and quality of the cover and integrated, systematic and dynamic characteristics, introduce measures under special working conditions, analysis of the influence of the construction progress and economic benefits, also reference to relative standard difference, a variety of technology application and management system to build content.

Keywords : petrochemical industry; safety technology quality; engineering installation

引言

石油化工工程的安全技术质量管理至关重要, 涵盖安全、技术和质量三个核心方面, 具有集成性、系统性和动态性特征。近年来, 我国相关部门陆续颁布一系列政策加强化工行业安全管理 (如《危险化学品安全专项整治三年行动实施方案》2020年)。在此背景下, 安全技术质量管理在石油化工工程中的作用愈发凸显, 从工程安装面临的特殊工况, 到对施工进度、经济效益的影响, 再到与国际国内标准适配、新技术应用以及管理体系构建等方面, 都需要深入研究和探讨, 以确保石油化工工程的安全、高效和高质量完成。

一、石油化工工程安全技术质量管理基本理论

(一) 安全技术质量管理内涵与特征

安全技术质量管理是石油化工工程的关键环节, 它涵盖了安全、技术和质量三个重要方面。安全是基础, 强调在工程建设中对人员、设备和环境的保护, 预防事故发生^[1]。技术是手段, 涉及工程所采用的工艺、设备及操作方法等, 确保工程符合行业标准和规范。质量是目标, 追求工程在功能性、可靠性和耐久性等方面达到预定要求。其具有集成性特征, 将安全、技术和质量要素有机融合, 相互关联和影响。系统性体现为它贯穿工程的规划、设计、施工和验收等各个阶段, 形成一个完整的管理体系。动态性表现在需根据工程进展、技术发展和外部环境变化不断调

整和优化管理策略, 以适应新的要求。

(二) 石油化工安装工程的特殊要求

石油化工安装工程常面临高温高压、易燃易爆介质等特殊工况。在高温高压环境下, 材料的性能可能发生变化, 如强度降低、变形增大等, 这就要求在选材上严格把关, 确保所选材料能适应这种恶劣条件^[2]。同时, 安装过程中的焊接、密封等工艺也需要更高的标准, 以防止泄漏等安全隐患。对于易燃易爆介质, 要特别注意防火、防爆措施。安装区域需合理规划, 设置防火分隔, 电气设备应具备防爆性能。在施工过程中, 严禁烟火, 严格控制动火作业, 并配备完善的消防设施和应急救援设备, 以保障人员和设备的安全。

二、安全技术质量管理对项目成效的作用机制

（一）对施工进度的影响路径

石油化工工程安装中，安全技术质量管理对施工进度有着重要影响。质量控制方面，严格的质量标准确保各工序符合要求，避免因质量问题导致的返工，从而保障施工进度的连续性^[3]。例如，精确的管道焊接质量控制，能减少后续泄漏检测不合格而进行的返修时间。安全隐患整改同样关键，及时排查和消除安全隐患，可避免因安全事故造成的停工整顿。如对施工现场的电气设备进行定期安全检查，防止因电气故障引发火灾等事故导致施工中断。同时，安全隐患整改过程中合理的措施安排，也能与正常施工工序有效衔接，不至于过度影响施工进度。总之，质量控制和安全隐患整改通过保障施工的正常进行和工序的有效衔接，对施工进度起到了积极的推动作用。

（二）对经济效益的综合作用

安全技术质量管理对项目经济效益有着重要的综合作用。构建质量成本模型可有效量化相关影响。质量缺陷返工直接增加成本，包括材料、人工及时间成本等，这会降低项目的利润空间，从而对投资回报率产生负面影响^[4]。安全事故损失更是涉及多方面，如人员伤亡赔偿、设备损坏维修或更换、工程延误导致的机会成本等。这些都会大幅增加项目的支出，严重降低投资回报率。只有通过有效的安全技术质量管理，减少质量缺陷和安全事故，才能提高项目的经济效益，确保投资回报率的稳定和增长。

三、石油化工项目安全质量影响因素分析

（一）管理机制的影响

1. HSE 管理体系实施效能

HSE 管理体系在石油化工项目中至关重要。其实施效能受多种因素影响。从 PDCA 循环角度来看，在计划（Plan）阶段，需明确安全质量目标及标准，但部分企业可能计划不完善，导致后续执行偏差^[5]。在执行（Do）过程中，人员对 HSE 体系的理解和执行力度不足，如操作不规范等问题时有发生。检查（Check）环节，监督机制可能存在漏洞，无法及时发现所有违规行为。而在处理（Act）阶段，对发现的问题整改不彻底，未能形成有效的经验反馈，使得类似问题反复出现，影响 HSE 管理体系的实施效能，进而对石油化工项目安全质量产生不利影响。

2. 技术标准规范适用性

国际 API 标准与国内规范在特殊装备安装中存在适配差异。API 标准具有广泛的国际认可度，其在一些特殊装备的设计、制造和安装细节上可能更为灵活和先进，能更好地适应某些高端或复杂工艺的要求^[6]。例如在深海石油开采装备安装方面，API 标准可能对特殊环境下的材料性能和安装工艺有更详细的规定。而国内规范则是结合我国国情和行业发展特点制定的，更注重对普遍性问题的规范和解决，在一些通用装备安装上可能适用性更强。在实际石油化工项目中，需根据项目具体情况和需求，合理参考两种标准规范，以确保特殊装备安装的安全质量达到最佳效果。

（二）技术执行的影响

1. 焊接工艺质量管控

数字化射线检测技术在石油化工压力管道焊缝检测中具有重要作用^[7]。该技术能够对焊缝内部缺陷进行精确检测，通过对焊缝图像的分析，确定是否存在气孔、夹渣、未熔合等缺陷。与传统检测方法相比，数字化射线检测具有更高的分辨率和灵敏度，可有效提高检测的准确性和可靠性。同时，该技术还能实现检测数据的数字化存储和管理，便于后续的查询和分析。在实际应用中，需合理选择检测参数，如射线能量、曝光时间等，以确保检测效果的最佳化。通过运用数字化射线检测技术，可显著提升压力管道焊缝合格率，从而保障石油化工项目的安全质量。

2. 防爆电气安装监管

在石油化工项目中，防爆电气安装监管对安全质量至关重要。ATEX 认证体系为设备选型与安装验收提供了标准流程^[8]。在设备选型方面，要依据 ATEX 认证要求，确保所选设备适用于特定的危险区域，其防爆性能符合相应等级。对于安装验收，需严格检查电气设备的安装是否符合 ATEX 标准规范，包括布线是否合理、接地是否良好等。同时，监管过程要涵盖设备的整个生命周期，从采购到安装后的定期维护与检测，任何环节出现问题都可能影响防爆性能，进而危及项目的安全质量。只有严格执行 ATEX 认证体系下的相关流程，加强防爆电气安装监管，才能有效保障石油化工项目的安全稳定运行。

四、安全技术质量管理的优化路径

（一）技术创新应用

1. 智能化监测系统构建

在石油化工工程安装中，构建智能化监测系统至关重要。基于物联网开发实时应力监测与预警平台是关键举措^[9]。通过在关键部位安装应力传感器，可实时获取应力数据。利用物联网技术，将数据传输至监控中心。在监控中心，借助智能算法对数据进行分析处理。当应力值超出安全范围时，系统能及时发出预警信号。同时，该平台还可实现对历史数据的存储与分析，为后续工程安装提供参考依据。通过这种智能化监测系统的构建，能有效提高石油化工工程安装的安全技术质量管理水平，保障项目的顺利进行。

2. 数字孪生技术应用

数字孪生技术在石油化工工程安装安全技术质量管理中具有重要应用。通过构建物理实体的虚拟数字模型，可对工程安装过程进行全面模拟^[10]。该模型能够精确反映工程实际情况，包括设备布局、管道走向等。利用该技术可提前发现潜在的安全隐患和质量问题，如设备安装空间冲突、管道连接不合理等。同时，在模拟环境中可对不同的安装方案进行测试和优化，选择最佳方案以确保工程安装的顺利进行和高质量完成。这不仅提高了工程安

装的安全性和质量，还能有效减少后期的整改成本和时间延误，对项目成效产生积极影响。

（二）管理模式升级

1. 全过程协同管理机制

在石油化工工程安装中，构建全周期的质量责任追溯体系至关重要。这一体系涵盖设计、采购、施工到调试的各个环节。在设计阶段，明确设计标准和规范，确保设计文件的准确性和完整性，为后续工作提供坚实基础。采购过程中，严格把控设备和材料的质量，对供应商进行资质审核和产品检验。施工阶段，加强现场管理，规范施工操作，确保施工质量符合要求。调试阶段，对系统进行全面检测和调试，及时发现并解决问题。通过这样的全周期质量责任追溯体系，能够实现各环节的有效衔接和协同管理，提高工程安装的安全技术质量水平，保障项目的顺利实施和成效。

2. 风险分级管控体系

实施 JHA+SCL 组合分析法开展动态风险评估是优化风险分级管控体系的重要举措。JHA（工作危害分析）侧重于对作业活动的每一步骤进行潜在危害识别，SCL（安全检查表分析）则针对设备设施等进行系统检查。通过两者结合，能全面且动态地评估风险。在石油化工工程安装中，对于复杂的工艺流程和众多设备，这种组合分析可精准定位风险点。例如在管道安装作业中，JHA 分析焊接步骤可能出现的烫伤、弧光伤害等风险，SCL 检查表确保焊接设备的安全性。依据分析结果，对风险进行分级，采取针对性的管控措施，从而有效提升安全技术质量管理水平，保障项目顺利进行。

（三）制度保障建设

1. 标准化作业程序优化

在石油化工工程安装中，需制定模块化施工方案与标准化验收清单以优化安全技术质量管理。模块化施工方案应依据工程特点与需求进行科学规划，明确各模块的施工流程、技术要求及质

量标准，确保施工过程的有序性与规范性。同时，标准化验收清单要涵盖工程的各个环节，包括设备安装、管道铺设、电气系统等，详细列出验收项目、标准及方法。通过严格执行该清单，可及时发现施工中的安全与质量问题，并采取有效措施加以解决，从而保障工程安装的安全与质量，提升项目成效。

2. 应急响应机制完善

建立三级响应体系，明确各级职责与响应流程。一级响应针对重大安全技术质量事故，迅速启动全面应急措施，集中资源进行处理；二级响应针对较严重情况，相关部门协同应对；三级响应针对一般性问题，基层人员及时处理并上报。同时，推进桌面推演与实战演练的常态化机制。通过定期的桌面推演，模拟各种可能的安全技术质量事故场景，让各部门熟悉应急流程和自身职责。实战演练则在实际环境中检验和提升应急能力，包括人员的应急操作技能、部门间的协调配合能力等，确保在实际发生事故时能够迅速、有效地响应，保障石油化工工程安装的安全与质量。

五、总结

石油化工工程安装安全技术质量管理对项目成效至关重要。通过加强安全技术质量管理，能有效保障工程的顺利进行，提高项目的质量和效益，同时确保施工过程的安全。在实际操作中，技术创新可提升安装的精准度和效率，管理优化能合理调配资源、减少浪费，制度完善则为安全和质量提供坚实的保障。三者协同作用，可实现质量效益与安全绩效的共同提升。未来，随着大数据技术的发展，基于大数据的全过程智能管控系统具有很大的研究潜力。通过该系统，可实时监测工程安装的各个环节，及时发现并解决安全和质量问题，进一步提高石油化工工程安装的整体水平。

参考文献

- [1] 张佳琦. NY 集团 JG 换热站项目机电安装工程质量管理体系研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [2] 刘直. LZ 项目机电安装工程施工管理优化研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [3] 张鑫. S 公司住宅接管项目的安装工程质量管理体系研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [4] 何小刚. GC 大厦机电安装工程项目施工安全风险管控研究 [D]. 兰州交通大学, 2022.
- [5] 李秀莲. HL 项目乙二醇装置安装工程的施工安全管理研究 [D]. 山东建筑大学, 2021.
- [6] 崔斌, 李志远. 石油化工设备安装技术及项目管理研究 [J]. 清洗世界, 2021, 37(06): 109-110.
- [7] 张庆瑞, 于海涛, 王云霞. 浅析石油化工设备安装技术及项目管理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(14): 66-68.
- [8] 王宁. 石油化工设备安装技术及关联的项目管理探究 [J]. 中国设备工程, 2022, (04): 110-111.
- [9] 周健生. 石油化工安装工程施工质量管理分析 [J]. 石化技术, 2021, 28(01): 153-154.
- [10] 明希娟, 隋旭东. 石油化工项目安全管理的现状及优化研究 [J]. 现代职业安全, 2023, (07): 69-71.

制造业不锈钢餐厨具企业品质管理的提升路径探究

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.2025110054

摘 要： 本文探究制造业不锈钢餐厨具企业品质管理提升路径，分析其现状特征与问题，提出设计全生命周期质量管控体系、搭建数字化管理平台等提升策略，并以龙头企业为例，阐述改进措施、成效与关键要素。研究构建的体系成效显著，但因样本局限，后续应开展多规模企业对比研究以完善体系。

关 键 词： 不锈钢餐厨具；品质管理；提升路径

Exploration of the Improvement Path of Quality Management in Stainless Steel Kitchenware Enterprises in the Manufacturing Industry

Dong Disheng

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

Abstract： This article explores the improvement path of quality management in stainless steel kitchenware enterprises in the manufacturing industry, analyzes their current characteristics and problems, proposes improvement strategies such as designing a full life cycle quality control system and building a digital management platform, and takes leading enterprises as examples to explain improvement measures, effectiveness, and key elements. The system constructed by the research has achieved significant results, but due to sample limitations, subsequent comparative studies of multi-scale enterprises should be conducted to improve the system.

Keywords： stainless steel kitchenware; quality management; upgrade path

引言

在当前制造业高质量发展的大背景下，《关于推动制造业高质量发展的意见》（2019年颁布）强调提升产品品质。不锈钢餐厨具行业品质管理虽应用主流管理体系，但仍面临成型工艺限制、过程能力指数不足等诸多问题。构建全生命周期质量管控体系、搭建数字化平台、建立跨部门协同机制等举措可有效提升品质。对龙头企业的实践研究表明，一系列改进措施显著提升了产品质量与经济效益，其关键成功要素对行业具有借鉴价值。不过研究存在样本局限，后续应开展多规模企业对比研究，以完善品质管理提升体系。

一、不锈钢餐厨具行业品质管理现状与问题分析

（一）行业品质管理现状特征

不锈钢餐厨具行业品质管理呈现一定现状特征。不锈钢材料本身的防腐性虽为餐厨具提供良好耐用性，但也对成型工艺有所限制，这使得品质控制需考虑成型过程对材料特性的影响，以避免出现变形、开裂等质量问题^[1]。在管理体系应用方面，现行业主流的ISO9001质量管理体系与HACCP食品安全管理体系在多个关键环节得到应用。在原材料检测环节，依据相关标准严格控制材料质量，确保符合餐厨具生产要求；表面处理环节，注重处理工艺与质量控制，以保证餐厨具外观与性能；焊接工艺环节，利用管理体系规范操作流程，保障焊接质量。然而，这些体系在实际应用中可能面临不同企业理解与执行程度差异等情况。

（二）品质管理突出问题诊断

在不锈钢餐厨具行业品质管理中，存在诸多突出问题。借助

SPC控制图可发现，冲压成型和抛光处理这两个关键工序的过程能力指数不足，严重影响产品品质。经鱼骨图分析法深入探究，人员操作不规范是一大症结，如操作流程不熟练、未严格按标准执行等，导致产品质量不稳定。设备精度衰减也是重要因素，长期使用磨损致使设备无法精准作业，影响餐厨具的尺寸精度等。而检测标准缺失同样不容忽视，没有完善统一的检测标准，使得产品质量评判缺乏依据，难以保证产品质量的一致性^[2]。这些问题制约着行业品质管理水平的提升，亟待解决。

二、基于价值链的品质管理提升路径构建

（一）全生命周期质量管控体系设计

全生命周期质量管控体系设计需构建一个全面且精细的架构。在原料采购环节，着重对铬镍含量进行精准检测，因为铬镍含量直接影响不锈钢餐厨具的质量与性能^[3]。工艺设计方面，借

助模具仿真优化，提前预测可能出现的问题并加以解决，确保工艺的可行性与高效性。生产制造过程中，运用在线监测系统实时把控产品质量，及时发现并纠正偏差。仓储运输阶段，采用防刮擦包装，防止产品在流转过程中受损。同时，引入 QFD 工具，深入挖掘客户需求，并将其精准转化到产品设计、生产等各个环节，从而在全生命周期内实现对品质的有效管控，提升制造业不锈钢餐厨具企业的产品品质。

（二）数字化质量管理平台搭建

在制造业不锈钢餐厨具企业品质管理提升中，数字化质量管理平台搭建极为关键。通过设计集成 MES 系统与 SPC 分析模块的智能管理系统，实现生产过程质量数据的实时采集与分析^[4]。MES 系统能精准把控生产流程，从原材料投入到成品产出，每一步的数据都被记录。SPC 分析模块则对这些数据进行统计过程控制，及时发现生产过程中的异常波动。同时，重点应用 AI 视觉检测技术，在焊缝质量判定场景，借助深度学习算法，构建能准确识别焊缝缺陷类型、位置及严重程度的算法框架；在表面瑕疵识别方面，利用图像识别算法，训练模型以精准区分划痕、砂眼等各类表面瑕疵，为餐厨具的品质提升提供坚实的数字化保障。

三、品质管理提升的保障机制研究

（一）组织保障体系

1. 跨部门质量协同机制

在制造业不锈钢餐厨具企业中，跨部门质量协同机制对于品质管理提升至关重要。通过建立由研发、生产、品控部门组成的 QCC 小组运作规程，促使各部门打破壁垒，共同聚焦产品质量问题。研发部门凭借专业知识为产品设计优化提供方向，生产部门依据实际生产经验反馈可行性建议，品控部门则从质量标准角度严格把关。同时，制定质量目标联动考核 KPI 指标体系，将各部门的质量责任紧密相连。若产品出现质量问题，并非单一部门担责，而是涉及的研发、生产、品控部门共同受影响，以此激励各部门积极协作，共同提升产品品质^[5]。这种跨部门质量协同机制确保了从产品设计到生产全流程的质量管控与提升。

2. 人员能力建设方案

人员能力建设方案方面，应设计科学且全面的培训课程体系。考虑到制造业不锈钢餐厨具企业的特性，课程体系涵盖金属材料学模块，让员工深入了解不锈钢材料的特性、性能等，以便在生产中更好地选材与处理材料。同时设置统计质量控制模块，使员工掌握通过数据统计分析来把控产品质量的方法。为增强员工参与培训、提升能力的积极性，提出认证考核与岗位晋升挂钩机制。员工通过对相关课程的学习并通过认证考核，将在岗位晋升上获得优先考虑。此机制能激发员工主动学习提升，形成良好的学习氛围，促使员工不断提升专业素养与品质管理能力，为企业品质管理提升提供坚实的人力支撑^[6]。

（二）技术标准体系

1. 工艺参数标准化

在制造业不锈钢餐厨具企业中，工艺参数标准化对品质管理

提升意义重大。企业需针对不同规格产品在拉伸成型、热处理等工序，制定 28 项关键参数控制标准。拉伸成型工序里，像板材厚度、拉伸速度、拉伸模具尺寸等参数，直接影响产品的形状与精度，若参数不当，易出现产品变形、表面不平整等问题。热处理工序中，加热温度、保温时间、冷却速度等参数，关乎产品的硬度、韧性等机械性能，不准确的参数会导致产品性能不达标。通过精准确定这些关键参数，并将其标准化，能够为不锈钢餐厨具产品品质提供坚实保障，使产品质量更加稳定可靠^[7]。

2. 检测方法优化

在制造业不锈钢餐厨具企业品质管理提升过程中，检测方法优化至关重要。改进盐雾试验，将周期从 72 小时缩短至 24 小时的加速腐蚀测试方案，可大幅提高检测效率，让企业更快获取产品耐腐蚀性能数据，及时调整生产工艺，提升餐厨具在实际使用中的抗腐蚀能力。确立波纹度检测的激光扫描标准，利用激光扫描技术的高精度特点，准确测量餐厨具表面波纹度，有助于把控产品外观质量，确保产品符合高品质标准。通过这些检测方法的优化，能更为精准、高效地发现产品潜在质量问题，为餐厨具品质提升提供有力支撑，推动企业在激烈的市场竞争中占据优势地位^[8]。

四、实证研究：某龙头企业品质管理改进实践

（一）企业现状调研分析

1. 质量痛点诊断

通过对该龙头企业进行全面的现状调研分析，发现诸多质量痛点。在现场观察与数据采集过程中，锅体抛光工序不良率高达 8.7%，这表明在抛光工艺环节存在较大提升空间，可能是设备精度、操作规范或原材料等方面存在问题。而焊接缺陷投诉占比达 35%，反映出焊接工序的质量把控不足，焊接技术、焊接材料以及焊接后的检验流程或许都需要进一步优化^[9]。这些质量痛点严重影响了产品品质，不仅增加了生产成本，还对企业声誉造成潜在威胁，亟待采取有效措施加以改进，以提升企业的整体品质管理水平，增强市场竞争力。

2. 改进方案制定

针对该龙头企业品质管理改进，依据识别出的 5M1E 要素，设计了涵盖模具升级、参数优化、检测强化等 28 项具体措施^[10]。模具升级方面，采用先进的模具制造技术与材料，提升模具精度与耐用性，以保障产品成型质量。参数优化环节，通过试验与数据分析，精准确定生产各环节的最优参数，降低次品率。检测强化上，增添先进检测设备，构建完善检测流程，从原材料入厂到成品出厂，进行全流程严格检测。这些措施从多维度出发，致力于全面提升企业品质管理水平，有效解决当前品质管理中存在的问题，助力企业在市场竞争中凭借高品质产品占据优势地位，推动企业可持续发展。

（二）实施过程与成效

1. 过程监控数据

在改进实践过程中，该龙头企业通过密切监控关键数据来确保品质管理提升的有效性。以过程能力指数 CPK 为例，在改进

前，CPK 值仅为 0.82，这表明过程能力相对不足，产品质量波动较大。随着一系列品质管理措施的实施，包括优化生产流程、加强人员培训等，CPK 值逐步提升，最终稳定在 1.33，这意味着过程能力显著增强，产品质量稳定性大幅提高。同时，企业引入的 AI 检测系统误判率在改进前处于较高水平，影响了检测结果的准确性。经过对算法的优化、数据的校准等操作，AI 检测系统误判率成功下降至 0.3%，极大提升了检测效率与可靠性，为产品质量把控提供了有力支撑。

2. 经济效益评估

通过一系列品质管理改进措施，该龙头企业取得了显著的经济效益。从质量成本角度来看，经过优化原材料采购管理、改进生产工艺以及加强质量检验流程等举措，成功降低了质量成本，经计算，每年质量成本降低达到 320 万元。同时，因产品品质的提升，客户退货率大幅下降，改进前客户退货率处于较高水平，而改进后下降了 62%，这不仅减少了因退货产生的额外成本，如物流成本、产品损耗成本等，还极大地提升了企业的品牌形象与市场竞争力，为企业赢得了更多的市场份额和潜在客户，进一步推动企业销售额的增长，带来了长远的经济效益。

（三）经验总结与推广价值

1. 关键成功要素

该龙头企业品质管理改进实践的关键成功要素体现在多方面。管理层承诺至关重要，企业高层对品质管理的高度重视与积极投入，为改进奠定坚实基础，不仅提供充足资源，还在战略层面指明方向。数据驱动决策亦是核心要素，通过收集、分析生产各环节数据，精准定位品质问题，依据数据得出的结论制定针对性改进措施，提高决策科学性。跨部门协作不可或缺，打破部门壁垒，生产、质检、研发等部门密切配合，实现信息实时共享，

共同解决品质管理难题。这 6 项核心经验紧密关联、相互促进，对其他制造业不锈钢餐厨具企业乃至相关制造行业，都具有显著的借鉴与推广价值，助力提升整体品质管理水平。

2. 行业适用性分析

该龙头企业在品质管理改进实践中，建立匹配度评估矩阵的做法具有重要的经验总结与推广价值。从原材料把控到生产工艺优化，再到人员培训与质量监督体系完善，形成了一套完整有效的品质管理体系。这一实践在制造业不锈钢餐厨具行业具有较高适用性。一方面，行业内企业面临相似的原材料选择、加工工艺等问题，该企业对原材料严格筛选、对生产环节精准管控的经验可被借鉴；另一方面，在提升员工质量意识与技能方面的培训机制，也适用于其他餐厨具企业，有助于提升整个行业的品质管理水平，促进产业升级。

五、总结

本研究对制造业不锈钢餐厨具企业品质管理提升路径展开探究，构建的品质管理提升体系成效显著，能将产品一次合格率提升至 98.5% 以上，为企业品质管理提供了切实有效的方法。同时，提出将区块链技术应用于质量溯源，这为餐厨具质量管控开拓了新方向，有助于提升消费者信任度，增强企业市场竞争力。然而，研究存在一定局限性，样本主要集中于中型企业，可能无法全面反映不同规模企业在品质管理上的差异。后续研究应开展多规模企业对比研究，进一步完善品质管理提升体系，使研究成果更具普适性，为不同规模的制造业不锈钢餐厨具企业品质管理升级提供更精准指导。

参考文献

- [1] 丁婉君. 服务生态系统视角下制造业企业竞争优势提升路径研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2021.
- [2] 肖静怡. 物流企业应急物流能力评价及提升路径研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2022.
- [3] 曹潜. 国有企业退休职工管理服务社会化的提升路径研究——基于 GH 国有企业的调查 [D]. 南京理工大学, 2021.
- [4] 何宇君. 基于社会责任视角的建筑企业财务绩效提升路径研究 [D]. 广州大学, 2022.
- [5] 李婷婷. 青少年家庭美德教育提升路径研究 [D]. 山西大学, 2022.
- [6] 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.
- [7] 刘勇. 提升饲料企业品质管理助力乡村振兴战略 [J]. 中国饲料, 2022(4): 93-96.
- [8] 杨铮. 企业财务管理和内部控制的提升路径探究 [J]. 商场现代化, 2023(20): 180-182.
- [9] 黄勇, 韩海刚. 企业能力提升路径探索 [J]. 现代企业文化, 2021(11): 42-43.
- [10] 郑建炯. 预算绩效管理视角下政府绩效提升路径探究 [J]. 财会通讯, 2024(12): 171-176.

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定贵金属合金 电镀废水中钯含量不确定度评定

谢卓森

励福（江门）环保科技股份有限公司，广东 江门 529000

DOI:10.61369/ME.2025110055

摘 要： 本研究聚焦于运用电感耦合等离子体原子发射光谱技术，对贵金属合金电镀废水里钯元素含量的不确定度进行了全面且系统的评估与分析。研究过程中，重点对样品移取、体积定容、标准溶液制备及标准曲线拟合等关键检测环节进行了不确定度溯源与分析。结果表明，标准溶液的配制过程以及标准曲线的拟合精度，是制约该检测方法结果不确定度水平的核心影响因素。95%的置信区间内，当样品中的钯含量0.0795mg/mL时，测量结果为 0.0795 ± 0.0008 mg/mL， $k=2$ 。

关 键 词： 电感耦合等离子体原子发射光谱法；钯含量；不确定度评定

Evaluation of Uncertainty in the Determination of Palladium Content in Electroplating Wastewater of Precious Metal Alloys by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry

Xie Zhuosen

Lifu (Jiangmen) Environmental Protection Technology Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong 529000

Abstract： This study focuses on the comprehensive and systematic assessment and analysis of the uncertainty of palladium content in electroplating wastewater of precious metal alloys by using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. During the research, the uncertainty traceability and analysis were focused on key detection links such as sample transfer, volume calibration, standard solution preparation, and standard curve fitting. The results indicated that the preparation process of standard solutions and the fitting accuracy of standard curves were the core influencing factors restricting the uncertainty level of the detection method's results. Within a 95% confidence interval, when the palladium content in the sample was 0.0795 mg/mL, the measurement result was 0.0795 ± 0.0008 mg/mL, with $k = 2$.

Keywords： inductively coupled plasma atomic emission spectrometry; palladium content; uncertainty assessment

前言

贵金属合金电镀行业在生产过程中产生大量废水，其中常含有金、银、铂、钯、铑等贵金属元素^[1]。此类废水不仅潜在环境风险高，更因其含有稀贵金属而具备显著资源回收价值，合理回收对实现资源循环、降低原料成本具有重要经济与环境意义。因此，在回收处理前，对目标元素进行准确检测是必要环节，也有助于推动产业链的技术升级与生产效率提升，促进产业经济高质量发展。当前，电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）凭借高灵敏度、优异的多元素同步分析性能及宽线性范围等核心优势，已发展成为复杂基体样品中痕量贵金属检测领域的主流技术手段。然而，实际检测过程中多个环节可能引入测量不确定度，影响最终结果的准确性与可比性，系统评估这些不确定度来源对提升分析方法可靠性至关重要。

本文依照 GB/T 43753.1-2024《贵金属合金电镀废水化学分析方法第1部分：金、银、铂、钯、铑含量的测定电感耦合等离子体原子发射光谱法》^[2]和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》，参考 ISO/IEC GUIDE 98-4—2012《测量不确定度第4部分：合格评定中的测量不确定度应用》^[3]，对该方法在样品移取、定容、标准溶液配制及标准曲线拟合等环节引入的测量不确定度进行系统评定，识别影响分析结果的关键因素，为分析质量控制提供依据，从而提高检测结果的准确性与可靠性。通过量化各环节的不确定度贡

献，不仅可为实验室内部质量控制提供数据支持，也可作为方法优化及标准化操作提供参考。

研究表明，标准溶液的配制过程与标准曲线的拟合精度，是主导该检测方法测量结果不确定度的核心因素。在95%置信区间（ $k=2$ ）下，当废水中钡含量为0.0795 mg/mL时，其测量结果可表示为 0.0795 ± 0.0008 mg/mL。这说明在严格控制样品前处理与仪器操作的条件下，该方法具备较好的测量重复性与可信度，可为贵金属回收工艺的精准控制与效益评估提供可靠数据支持。未来工作中，可进一步探索不同基体干扰下的不确定度变化，以及通过增加平行测定与优化标准曲线设计等方式进一步降低整体不确定度水平。

一、实验部分

（一）主要仪器与试剂

在本项研究中，所使用的分析设备是电感耦合等离子体发射光谱仪，其具体型号为 ICP - 6300，此仪器是由赛默飞世尔科技这一知名企业制造的。

单标线移液管：1、2、5、10、20、50 mL，A级；

单标线容量瓶：100 mL，250 mL A级；

高氯酸（ $\rho=1.76$ g/mL）；

硝酸（ $\rho=1.42$ g/mL）；

盐酸（ $\rho=1.19$ g/mL）；

硝酸（1+2）；

盐酸（1+9）；

混合酸（1+3+4）：1体积硝酸（ $\rho=1.42$ g/mL）、3体积盐酸（ $\rho=1.19$ g/mL）和4体积水混匀，用时现配；

钡标准溶液：1000 μ g/mL，相对扩展不确定度为0.4%（ $k=2$ ），钢研纳克检测技术股份有限公司；

实验用水为超纯水。

（二）实验方法

根据国家标准 GB/T 43753.1-2024《贵金属合金电镀废水化学分析方法 第1部分：金、银、铂、钯、铑含量的测定——电感耦合等离子体原子发射光谱法》的相关规定，废水中钡元素的检测需遵循以下分析流程：

使用移液管准确移取5.00 mL样品，经高氯酸消解以彻底去除有机物干扰，再以混合酸（硝酸-盐酸体系）进行溶解，确保钡离子完全转入溶液。随后，将溶液转移至100 mL容量瓶中，以超纯水定容至刻度，摇匀后得到待测试液。使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪（ICP-AES），在仪器最佳工作条件下，选择钡的特征谱线进行测定，通过标准曲线法计算试液中钡的质量浓度。同时，按照相同步骤制备试剂空白溶液，用于校正背景干扰和系统偏差，确保测定结果的准确性。为评估方法可靠性，实验中还设置了平行样品和加标回收试验，验证方法的重复性与准确度。该方法操作规范，灵敏度高，适用于电镀废水中痕量钡的定量分析，为后续的资源回收和环境监控提供了可靠的技术支持。

二、测量模型

按照标准 GB/T 43753.1-2024规定，用标准曲线法测定样品中钡含量的计算公式是：

$$\rho_x = \frac{(\rho_1 - \rho_0) \cdot V}{1000 \times V_0}$$

式中： \tilde{n}_1 —试料溶液中被测元素的质量浓度，单位为毫克每升（mg/L）

V —试料溶液定容体积，单位为毫升（mL）；

\tilde{n}_0 —空白溶液中被测元素质量浓度单位是毫克每升（mg/L）；

V_0 —试料取样体积，单位为毫升（mL）。

（一）测量不确定度来源

实验测量结果的不确定度来源可按实际测量流程和所用数学模型归纳为五类：一是样品移取体积的不确定度，来源于玻璃量器本身容量允许误差以及温度变化引起的液体热胀冷缩；二是样品定容过程的不确定度，同样受玻璃量器容量允差和温度变化导致的体积膨胀影响；三是样品溶液检测阶段引入的不确定度，包括标准物质稀释操作带来的不确定度和标准曲线拟合产生的不确定度；四是重复性相关的不确定度，其中样品移取与溶液测定的重复性所对应的相对标准不确定度已统一计入总重复性不确定度，后续分析不再单独重复计算；五是数值修约操作引起的测量不确定度。

（二）测量数学模型

鉴于式（1）所呈现的特性，即其中的各个输入量均为互不相关且以指数形式相乘的变量，经过推导能够得出钡含量测定相对标准不确定度的具体表达式，如下所示：

$$u_{rel}(\rho) = \sqrt{u_{rel}^2(\rho_1) + u_{rel}^2(V) + u_{rel}^2(V_0)} \quad (2)$$

式中： $\tilde{n}_{rel}()$ ——代表对样品中钡含量进行测定后所得结果的相对标准不确定度；

$\tilde{n}_{rel}()$ ——表示因对样品溶液浓度开展测定工作而引入的相对标准不确定度；

$u_{rel}(V)$ ——是与样品定容体积相关的相对标准不确定度；

$u_{rel}(V_0)$ ——则对应着样品移取体积所产生的相对标准不确定度。

三、测量不确定度的评定

（一）样品移取体积引入的相对标准不确定度 $u_{rel}(V_0)$

在玻璃器皿的校正标准中，明确规定以20℃作为标准校正温度。在这个特定温度下，水具有特定的体积膨胀特性，其体积膨胀系数为 $2.1 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。在实际的实验室操作环境里，若环境温

度的波动幅度被严格把控在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 这个区间内，那么对于容量为 5mL 的单标吸量管而言，其不确定度的来源以及相应的分析状况可参照以下内容：

(1) 移液管刻度值偏差带来不确定度。5mL 单标吸量管校正证书显示相对扩展不确定度 0.005mL，扩展因子 $k=2$ ，不确定度 (ΔV_0) 为 0.0025mL。

(2) 温度波动引入的不确定度。5mL 溶液因温差产生的体积变化量为 0.00525mL，计算依据是 $5 \times 5 \times 2.1 \times 10^{-4}$ ，按均匀分布处理后得到：

$$u(T_0) = \frac{0.00525}{\sqrt{3}} = 0.00303 \text{ (mL)}$$

(3) 读数重复性引入的不确定度。用 5mL 移液管重复移取液体 10 次，统计得出标准偏差为 0.004mL，据此算得：

$$u(\text{rep}) = \frac{0.004}{\sqrt{10}} = 0.00126 \text{ (mL)}$$
$$u(V_0) = \sqrt{u^2(\Delta V_0) + u^2(T_0) + u^2(\text{rep})} = 0.00412$$

其相对标准不确定度：

$$u_{\text{rel}}(V_0) = \frac{u(V_0)}{5} = 0.00082$$

(二) 样品定容体积引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(V)$

(1) 移液管刻度值偏差引入的不确定度，参考校正证书中 100mL 容量瓶的扩展不确定度为 0.03mL，扩展因子 $k=2$ ，由此得到不确定度 (ΔV_0) 为 0.015mL。

(2) 温度波动引入的不确定度。100 毫升溶液体积因温度波动改变 0.105 毫升，计算方法是 $100 \times 5 \times 2.1 \times 10^{-4}$ ，按均匀分布处理后得出：

$$u(T) = \frac{0.105}{\sqrt{3}} = 0.06062 \text{ (mL)}$$

(3) 由读数重复性所引入的不确定度：用 100mL 容量瓶装纯水定容到标线并称重，重复操作 10 次，统计得到标准偏差 0.02mL，由此算出：

$$u(\text{rep}) = \frac{0.02}{\sqrt{10}} = 0.00632 \text{ (mL)}$$
$$u(V) = \sqrt{u^2(\Delta V) + u^2(T) + u^2(\text{rep})} = 0.06277$$

相对标准不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(V) = \frac{u(V)}{100} = 0.00062$$

(三) 样品溶液浓度测定的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(S)$

1. 标准溶液配制引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(S)$

在开展标准溶液配制工作的时候，所引入的相对标准不确定度，其产生的主要源头可归结为两个层面。其中一个关键层面便是源于对标准溶液进行稀释操作时所引发的相对标准不确定度，其二是标准物质自身量值特性所带来的相对标准不确定度。根据钡标准物质证书上明确记录的信息，其标准溶液浓度存在相对扩展不确定度，数值为 0.4%，且对应的扩展因子 k 取值为 2。基于这些数据，经过合理推导与计算，能够得出由于对标准物质进行赋值这一操作，所引入的相对标准不确定度为 0.002。稀释过程产生的不确定度核心来源为实验所用容量器具，具体涵盖容量器具校准带来的不确定度，以及温度变化对溶液体积影响所引发的不确定度。在本实验进行标准溶液稀释操作的过程中，所使用的容量器具种类丰富。具体而言，选用了 100mL 且等级为 A 级的容量瓶，同时还配备了规格分别为 5mL、10mL、15mL、20mL 以及 30mL 的 A 级单标线移液管。对于上述涉及的不确定度分量，均采用三角分布的方式开展统计处理工作，其中分布系数 k 确定取值为 $\sqrt{6}$ 。各不确定度分量所对应的详细参数情况见表 1。此外，在实际稀释操作中，还会涉及人为操作因素引入的波动，如溶液的转移效率、定容终点判断的一致性等，这些因素虽然难以完全定量评估，但其影响可通过规范操作和增加平行实验得到一定控制。为确保稀释过程的精度，实验中所有玻璃容器均在使用前经过严格校准，操作环境温度控制在 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内，以减少温度波动引起的体积变化。每一级稀释步骤均按照标准操作规程重复进行，并记录操作过程中的关键参数，如实际使用体积、环境温度等，以便于后续不确定度的系统合成与评估。综合这些因素，可更全面、真实地反映标准溶液配制过程中的不确定度构成，为进一步优化实验条件提供依据。

表 1 玻璃器皿的不确定度

玻璃器皿	容量引入的标准不确定度 /mL	温度引入的标准不确定度 /mL	读数重复性引入的不确定度 /mL	合成标准不确定度 /mL	合成相对标准不确定度
100 mL 量瓶	0.015	0.06062	0.00632	0.06277	0.00062
250 mL 量瓶	0.025	0.15155	0.01265	0.15412	0.00062
1 mL 移液管	0.001	0.00061	0.00032	0.00121	0.00121
2mL 移液管	0.0015	0.00121	0.00063	0.00203	0.00101
5 mL 移液管	0.0025	0.00303	0.00126	0.00413	0.00083
10mL 移液管	0.0025	0.00606	0.00253	0.00703	0.00070
20 mL 移液管	0.005	0.01212	0.00506	0.01405	0.00070
50 mL 移液管	0.005	0.03031	0.01265	0.03322	0.00066

在标准溶液的配制流程中，所使用的容量器具包括 7 个 100mL 容量瓶、1 个 250mL 容量瓶，以及不同规格的单标线移液管（2 个 1mL、1 个 2mL、1 个 5mL、1 个 10mL、1 个 20mL、2 个 50mL）。基于上述配制所用器具及操作流程，计算出标准溶液稀释过程对应的标准不确定度如下：

$$u_{\text{rel}}(D) = \sqrt{7u_{\text{rel}}^2(100) + u_{\text{rel}}^2(250) + 2u_{\text{rel}}^2(1) + u_{\text{rel}}^2(2) + u_{\text{rel}}^2(5) + 2u_{\text{rel}}^2(10) + u_{\text{rel}}^2(20) + u_{\text{rel}}^2(50)} = 0.00302.00$$

标准溶液配制引入的相对标准不确定度由 $u_{\text{rel}}(B)$ 和 $u_{\text{rel}}(D)$ 合成，结果为：

$$u_{\text{rel}}(S) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(B) + u_{\text{rel}}^2(D)} = 0.00363 \quad 0.0115$$

2. 标准曲线拟合引入的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(N)$

在本实验中，运用电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-OES）对一组钡标准工作溶液展开检测分析。具体操作是以溶液里钡的浓度数值作为横坐标，与之相对应的发射光强度数值作为纵坐标，开展线性回归分析工作。实验过程中精心设置了 5 个不同浓度的水平，对于每个浓度点，都独立且重复地进行 3 次测量，随后取这 3 次测量结果的平均值来参与拟合。经过一系列严谨操作，最终得到的标准曲线方程为 $y = 2925.3x + 75.289$ ，同时算出相关系数 $r = 0.99994$ 。对于此次拟合过程中所产生的标准偏差，以及该过程引入的不确定度 $u(N)$ ，能够依据特定的公式来开展计算：

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [A_i - (b\rho_i + a)]^2}{n-2}} \quad (3)$$

$$u(N) = \frac{S_R}{b} \sqrt{\frac{1}{p} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{n}_0 - \bar{n})^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{n}_i - \bar{n})^2}} \quad (4)$$

$$u_{\text{rel}}(N) = \frac{u(N)}{\bar{n}} \quad (5)$$

式中： n —标准曲线溶液的测定总次数， $n=7 \times 3=21$ ；
 A_i —标准曲线溶液各点的光学强度；
 b —标准曲线的斜率；
 a —标准曲线的截距；
 p —样品溶液的测定总次数；
 ρ_i —标准系列溶液的钡浓度；
 ρ_0 —样品溶液中钡溶液浓度；
 \bar{n} —标准系列溶液中钡的平均浓度。
标准曲线实验数据和中间计算结果见表 2。

表 2 标准曲线实验数据和中间计算结果

标准溶液编号	标准溶液质量浓度 / (mg · L ⁻¹)	A _i	b ρ _i + a	A _i - (b ρ _i + a)	ρ ₀ / (mg · L ⁻¹)	$\bar{\rho}$ / (mg · L ⁻¹)	ρ _i - $\bar{\rho}$ / (mg · L ⁻¹)
STD1.1	0.04	176.3	192.301	-16.001			-1.223
STD1.2	0.04	182.6	192.301	-9.701			-1.223
STD1.3	0.04	174.8	192.301	-17.501			-1.223
STD2.1	0.1	352.4	367.819	-15.419			-1.165
OSTD2.2	0.1	358	367.819	-9.819			-1.165
STD2.3	0.1	353.7	367.819	-14.119			-1.165
STD3.1	0.2	666.9	660.349	6.551			-1.057
STD3.2	0.2	662.3	660.349	1.951			-1.057
STD3.3	0.2	661.3	660.349	0.951			-1.057
STD4.1	0.5	1548	1537.939	10.061	3.975	1.263	-0.758
STD4.2	0.5	1535	1537.939	-2.939			-0.758
STD4.3	0.5	1531	1537.939	-6.939			-0.758
STD5.1	1	3026	3000.589	25.411			-0.251
STD5.2	1	3072	3000.589	71.411			-0.251
STD5.3	1	3028	3000.589	27.411			-0.251
STD6.1	2	5919	5925.889	-6.889			0.725
STD6.2	2	5913	5925.889	-12.889			0.725
STD6.3	2	5901	5925.889	-24.889			0.725
STD7.1	5	14620	14701.789	-81.789			3.729
STD7.2	5	14720	14701.789	18.211			3.729
STD7.3	5	14760	14701.789	58.211			3.729

根据表 2 中的相关数据代入对应公式进行计算，经运算得到标准偏差 S_R 为 31.73，拟合不确定度 $u(N)$ 为 0.0105，由此可得标准曲线拟合引入的相对标准不确定度：

$$u_{\text{rel}}(N) = \frac{u(N)}{\bar{n}} = 0.0026$$

样品溶液浓度测定的相对标准不确定度由两部分合成，一是标准溶液配制过程带来的相对标准不确定度，二是标准曲线拟合产生的相对标准不确定度，计算结果为：

$$u_{\text{rel}}(\rho_1) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(S) + u_{\text{rel}}^2(N)} = 0.0044$$

将样品定容体积与移取体积对应的相对标准不确定度代入式（2）进行计算，得到钡含量测定的相对标准不确定度，据此进一步算出 B 类标准不确定度评定值：

$$u_B(\bar{n}) = u_{\text{rel}}(\bar{n}) \times \bar{n} = 0.000358 \text{ mg/mL}$$

（四）测量重复性引入的标准不确定度

实验移取 5.00ml 溶液定容到 100ml 后做平行试验，每份样品

溶液连续测 7 次，结果列在表 3 里。

表 3 样品钯浓度的测定结果

样品溶液编号	质量浓度 mg/mL	质量浓度 mg/mL
6#	0.0788、0.0791、0.0791	0.0795
	0.0802、0.0797、0.0799、0.0800	

选 A 类评定方式 用贝塞尔公式算标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n-1}} = 0.0005 \text{ mg/mL}$$

据此算出：

$$u(\rho_R) = \frac{S}{\sqrt{7}} = 0.000189 \text{ mg/mL}$$

四、样品中钯含量测定的合成标准不确定度

钯含量测定结果合成标准不确定度为：

$$u(\rho) = \sqrt{u_B^2(\rho) + u^2(\rho_R)} = 0.0004048 \text{ mg/mL}$$

五、合成标准不确定度的评定及结果报告

依 JJF1059.1-2012 规定 普通测量置信概率 95% 时取包含因子 k 为 2 扩展不确定度这样计算：

$$U = 2 \times 0.0004048 \text{ mg/mL} = 0.0008096 \text{ mg/mL} \approx 0.0008 \text{ mg/mL}$$

用电感耦合等离子体发射光谱法测贵金属合金电镀废水里的钯含量，结果是 0.0795 ± 0.0008 毫克每毫升，k 等于 2。

六、结语

测量不确定度分量评定显示用电感耦合等离子体发射光谱法测《贵金属合金电镀废水化学分析方法 第 1 部分：金、银、铂、钯、铑含量》时，标准溶液的配制环节与标准曲线的拟合过程，是对测量不确定度产生较大影响的关键因素。使用 ICP-AES 法测定时，可采取以下措施以有效控制并降低不确定度：首先，应适当增加标准溶液及样品溶液的平行测定次数，通过统计手段减小随机误差的影响；其次，必须重视仪器设备的日常维护与定期校准，确保其光学系统清洁、进样系统稳定、检测器响应线性良好，维持仪器处于最佳工作状态；此外，标准系列溶液的配制须严格遵循操作规程，使用经检定合格的量具，控制实验室环境温度，避免交叉污染，并选用可溯源的标准物质；同时，应优化标准曲线设计，合理设置浓度梯度与点数，提高拟合质量与覆盖范围；最后，操作人员应接受系统培训，严格按分析方法执行每一步骤，记录完整过程信息，为不确定度评估提供可靠数据基础。通过上述综合措施，可系统性地提升检测结果的准确性与可靠性，为贵金属回收与过程控制提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1] 王建军，庄宇凯，徐剑瑛，等. 电感耦合等离子体光谱法测定贵金属合金电镀废水中贵金属 [J]. 黄金，2023, 44(10): 106-108.
[2] 全国有色金属标准化技术委员会 (SAC/TC 243). 贵金属合金电镀废水化学分析方法 第 1 部分：金、银、铂、钯、铑含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法 :GB/T 43753.1-2024[S]. 中国标准出版社，2024.
[3] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示 :JJF 1059.1-2012[

自动化机械设备中结构设计的合理化

周树海

成都同业兴创科技有限公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ME.2025110059

摘 要 : 随着我国现代科学技术的持续发展, 自动化机械设备已经在各行业生产以及人们生活中逐渐普及, 自动化设备结构设计合理与否会直接影响到设备运行的性能及其安全性。基于此, 文章针对自动化机械设备结构设计的合理化进行研究, 在探讨当下自动设备机械结构设计基本内容、特征的前提下, 基于自动化机械设备结构设计提出的以用户需求作为基础、重视产品质量、创新设计理念三方面的具体要求, 针对自动化机械设备结构的合理化设计策略进行研究。

关 键 词 : 自动化机械设备; 结构设计; 合理化

The Rationalization of Structural Design in Automated Mechanical Equipment

Zhou Shuhai

Chengdu Tongye Xingchuang Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000

Abstract : With the continuous development of modern science and technology in China, automated mechanical equipment has gradually become widespread in production across various industries and in people's daily lives. The rationality of the structural design of automated equipment directly impacts its operational performance and safety. Based on this, the article explores the rationalization of structural design for automated mechanical equipment. After discussing the fundamental content and characteristics of the current structural design of automated mechanical equipment, and considering the specific requirements for structural design of automated mechanical equipment, which include basing on user needs, prioritizing product quality, and innovating design concepts, the article studies strategies for rationalizing the structural design of automated mechanical equipment.

Keywords : automated mechanical equipment; structural design; rationalization

自动化机械设备对于提高各行业的生产效率以及人们的生活质量有着十分重要的作用, 机械结构自身的实用和可靠与否将会直接影响到设备的工作性能以及整体的运转安全性。在自动化机械设备设计的过程中, 机械结构设计也是其中的重要工作环节, 需要相关人员对于用户的需求、尺寸等因素综合进行分析, 以此为基础对机械结构设计方案进行调整, 使得自动化机械设备的运行性能能够明显提高, 满足社会公众以及产业生产提出的个性化功能需求。故此, 本文通过分析自动化机械设备中结构设计合理化的基本对策, 为自动化机械设备的结构设计调整和优化提供参考。

一、自动化机械设备结构设计概述

(一) 设计内容

自动化机械设备的机械结构设计工作本质上就是基于设备整体功能需求, 由设计人员在确定机械结构具体组成的前提下, 绘制相应的图纸, 提高机械自动化设备运行性能以及可靠性的一项工作^[1]。在自动化设备的机械结构设计过程中, 需要设计人员将之前较为抽象的机械原理逐渐转化成符合人们使用需求的具象化的机械构件。从目前自动化机械设备的结构设计工作看来, 需要设计人员针对机械构件的使用环境及强度需求等多方面因素进行分析, 并且要在设计方案中给出明确的最终成型工件尺寸要求、尺寸公差、形位公差、热处理、表面防腐措施等要求。虽然设计图纸是该项工作的最终产物, 但依旧需要设计人员综合考虑多种

因素, 并将之前的设计内容转化为对应的设计方案语言, 确保后续的自动机械化设备加工工作得以顺利实施。

(二) 设计工作特点

从目前自动化机械设备的结构设计工作发展看来, 其特征表现得越发明显, 大致分为如下几点: 一是综合性特征。自动化机械设备的结构设计工作有着工作总量较大的特征, 并且需要设计人员综合分析设备的应用需求开展绘图以及计算工作, 在必要的情况下也需要开展对应的设计实验, 这也代表着在自动化机械设备结构设计过程中会使用到多学科领域的知识, 其综合性特征变得越发明显^[2]。二是多解性特征。在自动化机械设备结构设计过程中, 遭遇各种设计问题是一种十分常见的现象, 但这些问题的解决方法并非固定的, 设计人员可以基于多种思路形成多种解决方案, 并且这些方案的应用性能存在明显的不同, 需要设计人员

对方案内容进行比对,根据用户需求以及经济性方面的要求,选择最佳的设计方案。三是交叉性特征。正因为自动化机械设备结构会受到多种因素的影响,在设计环节很有可能会出现因素考虑不全面的问题。在设计后期发现问题时,也需要及时进行修改,意味着设计工作很有可能会出现反复交叉的特性,自动化机械设备的结构设计工作需要投入较多的时间成本。

二、自动化机械设备结构设计的基本要求

(一) 始终以用户需求作为基础条件

在自动化机械设备的结构设计工作中,该项工作主要目标是满足用户在产品功能方面提出的需求。设计人员需要将用户需求作为整个设计工作的基础条件,在设计工作开展的初期阶段,需要全方位调查用户对于产品功能以及市场需求,确保能够在综合了解目标群体市场需求的前提下,针对产品的功能以及结构组成进行调整,保障最终的设计方案能够符合用户的需求,全面发挥产品自身的价值。设计人员需要在设计工作开始前全方位了解用户群体对于自动化机械设备形体方面存在的需求,在开展结构设计工作时,需要以设备的整体性能运转提升为基础,满足用户在设备外形方面提出的具体要求,强化客户群体对于自动化设备的满意程度^[3]。图1展示了目前最为常见的六轴机器人手臂,在进行手臂结构设计工作时,要求设计人员梳理设计工作的具体需求及内容,合理确定负载、臂展、重复精度和速度等参数,确保机械手臂在运转中的工作效率和准确性能够明显提升。

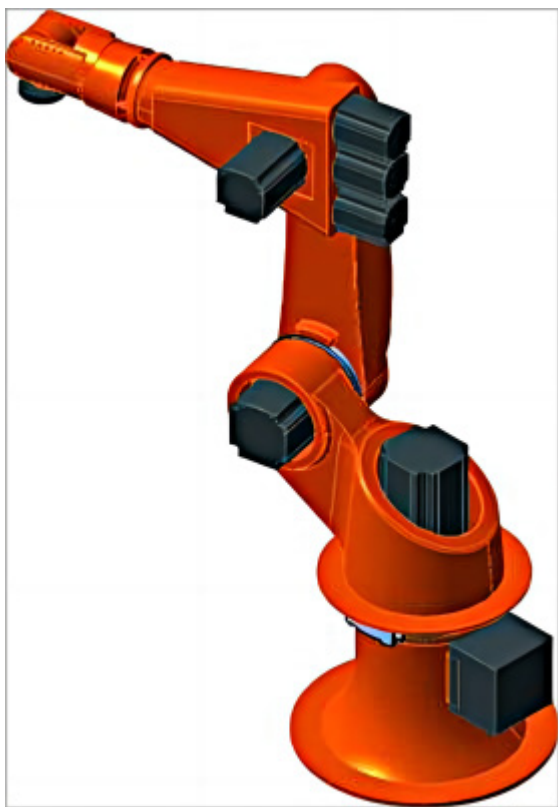


图1 六轴机器人

(二) 全面提高产品的质量

自动化机械产品在满足用户群体功能需求的同时,也要提高产品质量,这也是设计工作需要关注的核心要求。自动化机械设备的产品质量集中在使用价值和自身质量两个方面,产品质量的高低直接影响到产品价值水平。设计人员在自动化机械设备结构思考、设计的环节,需要综合考量产品的生产需求以及最终质量,避免出现设计目标偏离的问题,可以按照原有的思路对于产品质量提出要求。此外,在设计环节,设计人员需要对质量影响因素全方位进行分析,并对自动化机械设备产品质量的各方面进行管控,提高产品质量。从目前我国提出可持续发展的要求看来,设计人员需要综合考虑自动化机械设备设计的环保性,保障自动化机械设备的性能指标能够符合国家政府部门提出的环保需求,进一步提高产品质量^[4]。在产品生产制造过程也需要全方位进行监管,保证最终产品的合格率能够不断提高,可以使用各种动态控制方法对自动化机械设备的产品进行检查。同时,相关人员也需要在设计和加工环节及时进行监管,及时解决自动化机械设备的产品质量问题,对产品设计方案不断进行调整和优化。

(三) 持续创新设计理念

在经济社会高质量持续发展的背景下,我国机械制造业面临的市场竞争也变得愈发激烈,产品的性能和质量将会直接影响到企业自身的市场竞争力。创新是经济社会、国家发展的核心动力,正因如此,在自动化机械设备结构设计过程中,设计人员也需要满足创新性方面的需求,针对结构设计理念进行调整,保障自动化机械产品能够不断进行更新迭代,提高企业自身的市场竞争力和生存能力。在自动化机械设备结构设计环节,设计人员必须将创新思维融入其中,综合利用现代化技术成果进一步提高产品设计质量。比如,设计人员可以针对产品的大小、尺寸进行调整,并将人工智能模块合理添加,针对产品的制造过程进行改善,确保产品自身的空间和功能能够得到调整。

三、自动化机械设备结构的合理化设计策略

(一) 遵循功能要求进行设计优化

在设计人员进行自动化机械设备结构设计工作时,为了达成设备功能和外观方面的目标,需要综合考量设备的具体要求和和使用场景,并在分析相关影响因素的前提下,对于结构设计方案进行调整和优化。在设计过程中,需要针对整个自动化机械设备进行模块化的划分,并且保障每个模块都能够满足用户群体的功能需求,后期的维护和升级工作也能够变得更加便利,甚至在条件允许的状况下,可以不同模块的组合促进设备功能的多元化发展。

同时,设计人员为了进一步压缩自动化机械设备的体积和规模需要保障结构设计的紧凑性,在有限的空间内设置更多的功能模块,使用各种体积较小的零部件或者是控制零部件空隙,保障机械产品结构变得更加紧凑。现代的自动化机械设备需要根据外界环境的变化自主进行调整,意味着设计人员需要帮助机械设备根据外界工作环境以及要求的变化自主调节,可以将传感器、控

制器和智能算法等引入其中。此外,设计人员可以将高效的电机传动系统和控制方法引入到自动化机械设备的结构设计工作中,确保机械结构的运转效率明显提高,能够在最短的时间内完成工作。

(二) 合理选择自动化机械设备的结构材料

在自动化机械设备的合理化结构设计工作中,材料选择也是不可或缺的重要环节,性能水平较高的材料能够直接提高设备及结构的耐用性和承载能力,并且生产成本也能够控制在合理的范围内。在自动化机械设备结构优化设计工作中,设计人员需要选用科学以及合理的方法,挑选性能较高的材料进行加工处理。目前用于自动化机械设备结构设计的材料包括铝合金、碳纤维、聚合物和塑料等。铝合金在自身的质量、强度和耐腐蚀性都方面有着明显的优势,通常会用于自动化机械设备的结构零部件制造,设计人员可以在组合各种铝合金型材的前提下,进一步降低焊接工艺的使用频率,以此提高生产效率。碳纤维作为现代材料科技发展过程中出现的全新材料,在强度、高度和密度等方面的优势较为明显,能够用于自动化机械设备的各种轻量化结构设计,可以全方位减轻自动化机械设备的总重量,运动的速度和精度明显提升^[1]。聚合物有着明显的灵活性、便携性以及轻质性的特点,并且能够抵抗外界各种腐蚀因素的影响,避免出现电流泄漏以及电击事故。塑料作为目前人们日常生活中较为常见的一种新型材料,在轻便性、耐用性方面的优势较为明显,相较于金属材料,塑料的密度较低,可以在提高自动机械化设备内部结构强度的同时,进一步降低设备重量。

如此一来,设计人员需要在自动化机械设备结构合理设计的过程中,结合设备所处的工作环境以及功能需求选择对应的材料。如果自动机械化设备长时间处于高温环境,可以选择使用铝合金等耐高温的材料,在高速运动设备设计工作中,设计人员需要选择使用碳纤维以及聚合物这类材料,有效降低振动以及磨损,全面提高自动化机械设备的运行效率和性能,满足不同行业

的需求。

(三) 设备零部件的优化设计

自动化机械设备是由多个零部件共同组成的,各零部件的设计合理与否会对整个机械设备的运行质量和安全性产生明显的影响。设计人员需要在保障自动化机械设备功能的同时,尽可能减少内部的零部件数量,降低制造成本以及维护成本。设计人员可以使用重复部件减少以及设计多功能零部件的方法实现零部件数量控制的目标。此外,设计人员需要以设备的具体功能和工作流程为基础,对于零部件的位置合理安排,存在彼此关联的零件需要在相邻的位置上设计,在降低其传输距离的同时进一步提高生产效率。为了保证自动化机械设备的维护工作难度明显下降,在设计环节需要使用各种标准化零部件,确保维护和制造成本明显下降。这些标准化零部件有着良好的通用性,在维修更换过程中的成本投入能够得到有效控制。同时,设计人员需要利用模块化设计方法,针对自动化机械设备进行模块化划分,在降低维护工作以及停机时间的同时,保障设备的运行可靠性明显提升。

四、总结

总而言之,目前自动化机械设备已经成为各行业生产和人们生活不可或缺的重要设备,结构设计工作的合理与否也会影响到自动化机械设备的运行质量和安全性,设计人员需要在综合分析目前自动化机械设备结构设计工作的综合性、多解性以及反复交叉特性的前提下,始终以用户需求作为基础条件,促进设计理念的创新,全面提高产品的设计、生产质量。设计人员也需要以产品的功能需求为核心,在合理选择制造材料的前提下,对于设备零部件进行调整和优化,全面提高自动化机械设备结构设计工作的合理性,这也是控制自动化机械设备生产、维护成本的有效方法,能够全面提高设备的运行安全性和稳定性。

参考文献

- [1] 季建华,达刚. 环形工件自动化超声 C 扫描设备的机械结构设计 [J]. 机械制造, 2023, 61(10): 60-62.
- [2] 吴琼,丁仁杰. 自动化机械设备结构的合理化设计研究 [J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(07): 69-71.
- [3] 黄蓓. 基于 FDM 工艺的 3D 打印机机械结构设计 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(10): 39-41.
- [4] 辛田. 机械搅拌通风发酵罐结构设计技术探讨 [J]. 化工装备技术, 2022, 43(03): 35-38.
- [5] 辛焕成. 现代设计技术在矿山机械设计中的应用分析 [J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(04): 84-86.

