

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3期 2025年3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。



材料工程 | MATERIALS ENGINEERING

- | | | |
|-----|--|----------------------|
| 001 | 化妆品配方研发在护肤品类中的应用研究
Application Research of Cosmetic Formula Development
in Skin Care Category | 吴华养
Wu Huayang |
| 004 | 食品开发过程中的质量控制策略研究
Research on Quality Control Strategies in Food Development Process | 刘纯洁
Liu Chunjie |
| 007 | 新建年产600吨化工中间体车间的制药工程技改策略研究
Study on Technical Renovation Strategy of Pharmaceutical Engineering with New
Workshop of Chemical Intermediates with Annual Output of 600 Tons | 赖桥灵
Lai Qiaoling |
| 010 | 产品结构设计合理性对性能与可靠性的影响研究
Research on the Impact of Product Structural Design Rationality on
Performance and Reliability | 余敏科
Yu Minke |
| 013 | 新型亲水蓬松软油精的合成方法与应用
The Synthesis Method and Application of A New Hydrophilic
Fluffy Soft Oil Essence | 何兆源
He Zhaoyuan |
| 016 | 水性音箱平面漆材料性能及涂装工艺研究
Study on Material Properties and Coating Processes of Water-Based
Flat Paint for Speakers | 刘满东
Liu Mandong |
| 019 | 化工生产中的工艺改进与管理策略: 提升生产效率与安全性
Process Improvement and Management Strategy in Chemical Production:
Improve Production Efficiency and Safety | 杨颖
Yang Ying |
| 022 | 精细化工生产管理与研发管理的协同策略探究
Study on the Synergistic Strategy of Fine Chemical Production
Management and R&D management | 陈楷城
Chen Kaicheng |

建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- | | | |
|-----|---|--------------------|
| 025 | 关于排水管网修复工程合作模式的探索
Exploration of Cooperation Mode for Drainage Pipe Network Repair Project | 李暑荣
Li Shurong |
| 028 | 智能建造背景下建筑工程质量管控与技术创新融合路径研究
Research on the Integration Path of Quality Control and Technological
Innovation in Construction Engineering under the Background
of Intelligent Construction | 李坊寿
Li Fangshou |
| 031 | 探究钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用
Exploring the Application of Drilled Pile Construction Technology in
Highway Bridge Engineering | 李海都
Li Haidu |
| 034 | 再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的量化研究
Quantitative Study on the Influence of Recycled Aggregate Pretreatment
Process on Concrete Durability | 陈武钊
Chen Wuzhao |
| 037 | 非消防水电工程与消防工程的关联及技术管理要点
The Relationship between Non-Fire Water and Electricity Engineering and Fire
Engineering and the Key Points of Technical Management | 衡霖
Heng Lin |
| 040 | BIM技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理中的应用研究
Research on the Application of BIM Technology in the Coordinated Management of
Construction Progress and Cost in Civil Engineering Construction | 叶永红
Ye Yonghong |

043	水利工程技术管理与工程风险管理的协同机制研究 Research on the Synergy Mechanism of Water Conservancy Engineering Technology Management and Engineering Risk Management	蔡志华 Cai Zhihua
046	预拌砂浆的性能优化及其在建筑材料管理中的关键作用 Performance Optimization of Ready-Mixed Mortar and Its Key Role in Building Materials Management	黄远建 Huang Yuanjian
049	建筑电气施工技术创新对建筑工程的影响分析 Analysis of the Impact of Building Electrical Construction Technology Innovation on Construction Projects	温文轩 Wen Wenxuan
052	化工行业动火作业事故防范与管控策略研究 Research on Prevention and Control Strategies for Hot Work Accidents in the Chemical Industry	周洪武，程业宝 Zhou Hongwu, Cheng Yebao
055	高速公路项目全流程质量管理体系构建与应用研究 Research on the Construction and Application of the Full-Process Quality Management System for Expressway Projects	焦学忠 Jiao Xuezhong
059	发展中国家建筑返工动因解构与智能管控——基于四维因子 SEM模型与 BIM协同优化 Deconstructing the Drivers of Building Renovation in Developing Countries and Intelligent Management — Based on a Four-Dimensional Factor SEM Model and BIM Collaborative Optimization	袁伟 Yuan Wei

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

063	家电机械运动设计及仿真分析在产品质量提升中的作用 The Role of Mechanical Motion Design and Simulation Analysis in Household Appliance Quality Enhancement	何领民 He Lingmin
066	机械工程领域：管理与技术协同发展的新趋势 The New Trend of Collaborative Development of Management and Technology in the Field of Mechanical Engineering	许树起 Xu Shuqi
069	基于机电一体化的汽摩配电子控制系统设计与管理 Design and Management of Electronic Control System for Automotive and Motorcycle Parts Based on Mechatronics	苟天云 Gou Tianyun
072	机电工程在工厂设备维护中的应用与优化 Application and Optimization of Mechatronic Engineering in Factory Equipment Maintenance	李阳宽 Li Yangkuan
075	消防应急疏散指示系统的电子硬件研发策略探究 Exploration of Electronic Hardware Development Strategy for Fire Emergency Evacuation Indication System	周俊赵 Zhou Junzhao
078	电梯安装技术管理的创新模式与实践应用 Innovative Mode and Practical Application of Elevator Installation Technology Management	诸景贤 Zhu Jingxian
081	基于模块化设计的电力电子硬件产品生产管理研究 Research on Production Management of Power Electronic Hardware Products Based on Modular Design	杨伟茂 Yang Weimao

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

084	高原森林火灾应急响应机制研究 Study on Emergency Response Mechanism of Highland Forest Fire	陈洪俊 Chen Hongjun
087	智能技术在20kV以下中低压配网配电设计中的应用研究 Research on the Application of Intelligent Technologies in Distribution Network Design for Medium and Low Voltage Power Grids (Below 20kV)	朱国智 Zhu Guozhi
090	紧急印刷订单全流程时效优化模型构建 Construction of a Full-Process Lead Time Optimization Model for Urgent Printing Orders	罗忆辉 Luo Yihui
093	绿色施工全过程碳排放智能核算系统开发 Development of an Intelligent Carbon Emission Accounting System for the Whole Process of Green Construction	韦强 Wei Qiang
096	数字孪生技术在市政排水工程中的应用：施工到运维的无缝对接 Application of Digital Twin Technology in Municipal Drainage Engineering: Seamless Connection from Construction to Operation and Maintenance	梁株银 Liang Zhuyin
099	物联网应用工程对信息化项目实施的影响及优化策略 The Impact of IoT Application Engineering on the Implementation of Information Technology Projects and Optimization Strategies	张广峰 Zhang Guangfeng
102	探究基于地理信息系统与环境模型集成的防洪减灾研究 Research on Flood Control and Disaster Reduction Based on the Integration of Geographic Information System and Environmental Model	王宽 Wang Kuan

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

105	石油化工项目技术管理的关键要素与策略研究 Research on Key Elements and Strategies of Technical Management in Petrochemical Projects	李建军 Li Jianjun
108	特种设备在石化行业中的管理要点及风险防控 Management Essentials and Risk Prevention for Special Equipment in Petrochemical Industry	王涛 Wang Tao
111	炼油装置电气设备故障处理与预防策略研究 Research on Fault Handling and Prevention Strategies for Electrical Equipment in Oil Refining Units	吴时孔 Wu Shikong
114	大功率植物灯电源中的非隔离电源设计与可靠性研究 Study on the Design and Reliability of Non-isolated Power Supply in High-power Plant Lamp Power Supply	胡三义 Hu Sanyi

117

污水处理企业安全管理体系研究之一：危险作业安全管理和化学品日常管理研究

Research on Safety Management System of Sewage Treatment Enterprises: Research on Safety Management of Dangerous Operations And Daily Management of Chemicals

李泽雄

Li Zexiong

120

气相催化氟化合成一氟甲烷的反应条件优化研究

Optimization of Reaction Conditions for the Synthesis of Methyl Fluoride via Vapor-Phase Catalytic Fluorination

闫浩, 郭一博, 陈晓勇, 孟庆森, 杨振建, 孙凤娟, 徐振生, 马舜

Yan Hao, Guo Yibo, Chen Xiaoyong, Meng Qingsen, Yang Zhenjian, Sun Fengjuan, Xu Zhensheng, Ma Shun

化妆品配方研发在护肤品类中的应用研究

吴华养

赫禧(广州)生物科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030004

摘 要： 介绍化妆品原料分类与应用，包括活性成分、基质原料和特殊添加剂等。阐述原料筛选与功效评价体系，及配方体系构建原则。讲述多种生产技术及工艺参数的重要性。强调纳米载体包封等工艺意义。还涉及不同功效产品研发及配方研发方向。

关 键 词： 化妆品原料；配方体系；生产工艺

Application Research of Cosmetic Formula Development in Skin Care Category

Wu Huayang

He Xi (Guangzhou) Biotechnology Co., LTD. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article introduces the classification and application of cosmetic raw materials, including active ingredients, base materials, and special additives. It explains the principles of raw material selection and efficacy evaluation systems, as well as the principles for constructing formula systems. The article highlights the importance of various production technologies and process parameters. It also emphasizes the significance of processes such as nano-carrier encapsulation. Additionally, it covers the development of different efficacy products and the direction of formula research.

Keywords： cosmetic raw materials; formula system; production process

引言

随着化妆品行业的不断发展，2021年发布的《化妆品监督管理条例》对化妆品研发提出了更高要求。化妆品原料特性多样，如活性成分中的胜肽、透明质酸等，基质原料中的乳化剂、增稠剂等，以及特殊添加剂中的防腐体系、抗氧化剂等，为护肤品研发提供多样选择。同时，原料筛选与功效评价体系的建立，包括安全性评估、稳定性测试和功效验证，有助于筛选优质原料。配方体系构建需综合考虑多方面原则，而高压均质、微流控包埋等技术及乳化工艺关键参数的控制也至关重要。此外，纳米载体包封工艺、正交实验设计法、PAT过程分析技术等化妆品生产中均有重要应用。在抗衰老、美白、敏感肌修复等领域也形成了特定研发范式，化妆品配方研发应朝着绿色可持续、智能化、个性化方向发展以适应市场需求。

一、化妆品原料在护肤品研发中的应用

（一）功能性原料分类与特性

活性成分在护肤品中具有重要作用。胜肽可促进胶原蛋白生成，改善皮肤弹性^[1]。透明质酸具有强大的保湿功能，能增加皮肤水分含量。基质原料方面，乳化剂可使油水混合均匀，形成稳定的乳液体系；增稠剂能增加产品的黏度，改善使用感。特殊添加剂中，防腐体系可防止微生物滋生，延长产品保质期；抗氧化剂能抵御自由基对皮肤的伤害，减缓皮肤衰老。这些化妆品原料的合理分类与应用，基于其各自独特的特性，为护肤品研发提供了多样的选择，以满足不同的护肤需求。

（二）原料筛选与功效评价体系

在化妆品原料筛选与功效评价体系中，建立了安全性评估、稳定性测试和功效验证三位一体的多维度原料评价标准。安全性

评估采用细胞毒性实验，通过检测原料对细胞的毒性作用，确保其在使用过程中的安全性^[2]。稳定性测试借助热循环实验，模拟不同温度环境下原料的稳定性，以保证产品在储存和使用过程中质量不受影响。功效验证则运用体外透皮实验，了解原料的透皮吸收能力及其对皮肤的功效作用，为原料在护肤品中的应用提供科学依据。这种综合的评价体系有助于筛选出优质、安全且有效的化妆品原料，推动护肤品研发的科学性和可靠性。

二、护肤品配方结构设计与开发

（一）配方体系构建原则

化妆品配方体系构建需综合考虑多方面原则。对于乳化体系，无论是O/W型还是W/O型，都要依据目标产品的肤感需求来设计。O/W型通常能带来清爽的肤感，而W/O型则可能更具滋

润性^[3]。在稳定性方面，需确保乳化剂的选择和配比合理，防止乳液分层。凝胶体系以卡波姆基质为例，要注重其与其他成分的相容性，以保证良好的成型性和稳定性。同时，要根据产品所需的功效释放特点来调整配方。微乳体系则要考虑其独特的结构对肤感和功效释放的影响，通过优化配方实现良好的稳定性和高效的功效传递。总之，配方体系构建要以满足产品在肤感、稳定性和功效释放等方面的要求为核心原则。

（二）配方稳定性提升技术

高压均质技术通过施加高压使物料在均质阀中高速通过，从而减小乳液粒径，改善粒径分布，提高乳液稳定性。它能有效防止乳液分层和絮凝，对于一些难溶性活性成分的分散也有帮助。微流控包埋技术则是利用微流控芯片精确控制流体，将活性物包埋在微小的载体中，可防止活性物与外界环境接触而失活，同时也能控制活性物的释放速率，提高配方的稳定性和功效性^[4]。相转变技术是通过改变体系的温度、压力或组成等条件，使乳液发生相转变，从而优化乳液的结构和性能，改善粒径分布，增强稳定性，在一些特定的护肤品配方中具有独特的应用优势。

三、化妆品生产工艺设计优化

（一）关键生产工艺技术

1. 乳化工艺参数控制

均质速度、温度控制及乳化时间是乳化工艺中的关键参数，对乳霜的粒径分布和储存稳定性具有重要影响。适宜的均质速度可使油相和水相充分混合，形成均匀的乳液体系，避免乳液出现分层或粒径过大的现象。温度控制也至关重要，不同的乳化剂在特定温度下具有最佳的乳化效果，过高或过低的温度可能导致乳化剂失效，影响乳液的稳定性^[5]。乳化时间同样需要精确控制，过短的乳化时间可能导致乳化不完全，而过长的乳化时间可能会引起乳液的过度剪切，破坏乳液的结构。通过对这些参数的精确控制，可以优化乳化工艺，提高乳霜的质量和稳定性。

2. 纳米载体包封工艺

纳米载体包封工艺在化妆品生产中具有重要意义。脂质体和固体脂质纳米粒是常用的纳米载体。脂质体具有类似生物膜的结构，能够有效包封维C衍生物等活性成分，提高其稳定性和皮肤渗透性^[6]。通过精心设计脂质体的组成和制备工艺，可以实现对活性成分的高效包封和控制释放。固体脂质纳米粒则结合了脂质体和聚合物纳米粒的优点，具有更好的物理稳定性和载药能力。其制备过程涉及到脂质材料的选择、乳化技术以及纳米粒的粒径控制等关键环节。这些纳米载体包封工艺的技术突破为化妆品中活性成分的高效递送提供了有力支持，有助于提高化妆品的功效和品质。

（二）生产工艺优化策略

1. 正交实验设计法

正交实验设计法是一种高效的实验设计方法，可用于化妆品生产工艺优化。它通过合理安排实验因素和水平，能够在较少的实验次数下，获取大量有价值的信息。在化妆品生产中，诸多因

素如原料配比、反应温度、反应时间等都可能影响产品质量和生产效率。利用正交实验设计法，可以同时考察多个因素及其交互作用对生产工艺的影响。通过对实验结果的分析，确定各因素对工艺指标的影响程度，进而筛选出最优的工艺参数组合，实现生产工艺的优化。这不仅可以提高产品质量，还能降低生产成本，提高生产效率，为化妆品企业在市场竞争中赢得优势^[7]。

2. PAT 过程分析技术

在化妆品生产工艺优化中，PAT 过程分析技术至关重要。在线黏度监测技术可实时了解产品的黏度变化，确保生产过程中产品的质地符合要求。例如，在乳液类化妆品生产中，通过监测黏度可及时调整生产参数，保证乳液的稳定性和均匀性^[8]。近红外光谱技术能快速分析原材料和成品的成分，实现对生产过程的精准控制。它可以在不破坏样品的前提下，检测出成分的微小变化，从而保证产品质量的一致性。这些 PAT 技术的应用，提高了化妆品生产的效率和质量，减少了不合格产品的产生，为化妆品行业的发展提供了有力支持。

四、配方研发在细分领域的应用分析

（一）抗衰老护肤品开发

1. 多肽复配协同增效机理

信号肽、载体肽与抗氧化成分联合可促进胶原再生。信号肽能传递细胞信息，激活相关基因表达，刺激成纤维细胞合成胶原蛋白^[9]。载体肽可将铜离子运输到细胞内，促进胶原蛋白、弹性蛋白和糖胺聚糖的合成。抗氧化成分能清除自由基，减少氧化应激对胶原蛋白的损伤。三者联合时，抗氧化成分保护胶原蛋白免受自由基破坏，为胶原再生创造良好环境。信号肽和载体肽则分别从激活细胞信号通路和运输关键离子的角度，协同促进胶原蛋白的合成，从而增强抗衰老护肤品的功效。

2. 缓释微囊技术应用

微囊化技术在抗衰老护肤品中对视黄醇的应用具有重要意义。微囊可以包裹视黄醇，形成一种保护屏障，降低其对皮肤的刺激性^[10]。这种包裹作用能够防止视黄醇与皮肤表面的其他物质直接接触，减少可能引发的过敏和炎症反应。同时，微囊化视黄醇还能提升功效持续时间。微囊可以缓慢释放视黄醇，使其在皮肤内持续发挥作用，而不是一次性大量释放导致效果短暂。这有助于持续刺激皮肤细胞的新陈代谢，促进胶原蛋白的生成，从而更好地实现抗衰老的功效，为抗衰老护肤品的开发提供了一种有效的技术手段。

（二）美白亮肤产品研发

1. 酪氨酸酶抑制体系构建

美白亮肤产品研发中酪氨酸酶抑制体系构建至关重要。熊果苷、曲酸与烟酰胺是常见的具有美白功效的成分。熊果苷通过抑制酪氨酸酶的活性，减少黑素的合成。曲酸能够螯合铜离子，而酪氨酸酶是一种含铜的酶，从而间接抑制酪氨酸酶的活性，阻碍黑素生成。烟酰胺则主要是通过干扰黑素细胞与角质形成细胞之间的信号传导，减少黑素小体向角质形成细胞的转移，进而达到

美白效果。这三种成分复合使用时，可能从多个途径协同抑制黑色素合成，构建更有效的酪氨酸酶抑制体系，为美白亮肤产品的研发提供理论基础和实践指导。

2.透皮吸收促进技术

脂质体包裹技术是一种重要的透皮吸收促进技术在美白亮肤产品研发中具有关键作用。它能够将壬二酸等美白活性物包裹在脂质体内部形成类似细胞结构的囊泡。这种结构可以增加活性物的稳定性防止其在外界环境中失活。同时脂质体的粒径大小和表面性质可以进行调控从而更好地与皮肤细胞膜融合促进活性物的透皮吸收。通过这种技术壬二酸等美白活性物能够更有效地穿透皮肤角质层进入皮肤深层发挥美白作用提高其生物利用度进而增强美白亮肤产品的功效满足消费者对于美白的需求。

(三)敏感肌修复产品创新

1.皮肤屏障修复配方开发

皮肤屏障修复配方开发对于敏感肌修复产品创新至关重要。其中，神经酰胺仿生组合与天然保湿因子的协同修复机理是关键。神经酰胺作为皮肤角质层细胞间脂质的主要成分，对维持皮肤屏障结构和功能完整性起着重要作用。仿生组合能够模拟皮肤自身的神经酰胺结构，补充皮肤缺失的脂质成分。同时，天然保湿因子能够增加皮肤的水分含量，改善皮肤的干燥状态。两者协同作用，一方面可以修复受损的皮肤屏障，增强皮肤的抵抗力；另一方面可以提高皮肤的保湿能力，缓解敏感肌的不适症状。通过深入研究这种协同修复机理，能够为开发更有效的敏感肌修复产品提供理论依据和技术支持。

2.微生态平衡调控技术

益生元与后生元在调节皮肤菌群平衡方面具有重要作用。在配方开发上，需考虑其特性及作用机制。益生元可作为有益菌的食物来源，促进有益菌生长，抑制有害菌。开发配方时，要选择合适的益生元种类及浓度，确保其能有效作用于皮肤菌群。而后生元是有益菌的代谢产物，具有多种生物活性。在配方中添加后生元，要注重其稳定性及与其他成分的兼容性。同时，要研究两者的协同作用，通过合理搭配，增强对皮肤微生态平衡的调控效果，从而为敏感肌修复产品提供更有效的配方支持。

五、总结

化妆品配方研发在护肤品类中具有重要应用。在关键技术方面，原料筛选、配方创新及工艺优化取得突破，为产品质量提升奠定基础。抗衰老、美白、敏感肌修复三大领域形成了特定研发范式，推动相关产品不断发展。随着消费者需求升级，化妆品配方研发应朝着绿色可持续原料开发迈进，注重环保与可持续性；构建智能化配方系统设计，提高研发效率和精准度；实现个性化定制工艺，满足不同消费者的独特需求。这些方向将为护肤品行业科技创新提供有力的理论支撑，促进化妆品行业在配方研发上不断进步，更好地适应市场变化和消费者需求。

参考文献

[1]王君龙.复合微生物肥料配方研究[D].东北农业大学,2023.
[2]潮捷.高威力化学敏化水胶炸药配方与性能的研究[D].安徽理工大学,2022.
[3]郝海.鲜枣泥馅料配方工艺及货架期模型研究[D].新疆农业大学,2021.
[4]杨威.多功能生态建筑饰面材料的研究[D].西南科技大学,2021.
[5]谭博文.配方对天然橡胶动态力学性能的影响[D].青岛科技大学,2023.
[6]姚琳,余丽丽,刘少静.《护肤化妆品原料及配方实例》系列讲座——美白添加剂和美白类护肤化妆品(待续)[J].日用化学品科学,2024,47(01):75-77.
[7]余丽丽,姚琳,刘少静.《护肤化妆品原料及配方实例》系列讲座——保湿剂和保湿类护肤化妆品(I) [J].日用化学品科学,2023,46(11):69-75.
[8]武楠楠,孙锦月,何聪芬.芒果及其副产物提取物在化妆品中的应用[J].中国洗涤用品工业,2022,(12):67-74.
[9]罗飞亚,苏哲,黄湘鹭,等.下一代风险评估在化妆品原料安全性评价的应用研究进展[J].日用化学工业(中英文),2023,53(01):79-85.
[10]秦美蓉,洗静雯,吴熙,等.化妆品中硝基甲烷的风险评估和使用监管探索[J].日用化学工业,2021,51(08):768-774.

食品开发过程中的质量控制策略研究

刘纯洁

身份证号: 422301198209155732

DOI:10.61369/ME.2025030015

摘 要： 本文围绕食品开发过程中的质量控制展开。阐述了其涵盖环节、重要性，分析各阶段风险源及控制方法，包括配方设计、关键工艺参数、HACCP体系等方面，强调质量管理体系构建、数字化监控等的重要性，还提及质量文化培育及未来研究方向。

关 键 词： 食品开发；质量控制；质量管理体系

Research on Quality Control Strategies in Food Development Process

Liu Chunjie

ID: 422301198209155732

Abstract： This article focuses on quality control in the process of food development. It elaborates on its coverage and importance, analyzes the risk sources and control methods at each stage, including formula design, key process parameters, HACCP system, etc. It emphasizes the importance of quality management system construction, digital monitoring, etc. It also mentions the cultivation of quality culture and future research directions.

Keywords： food development; quality control; quality management system

引言

食品质量控制在食品开发过程中具有核心地位，涵盖从原材料采购到成品销售的各个环节。随着《中华人民共和国食品安全法实施条例》（2019年）的颁布，对食品质量控制提出了更高要求。在食品开发流程中，包括研发设计、中试生产和工业化转化等阶段均存在质量风险源。从配方设计的质量预控制到关键工艺参数的识别，再到 HACCP 体系的应用以及数字化监控系统的构建等，都需要严格把控。同时，各种检测技术的应用、微生物污染防控、质量管理体系构建与实施以及质量 KPI 考核机制的建立等也是关键。此外，区块链技术用于质量追溯、构建质量文化等也对保障食品质量至关重要，本研究围绕这些方面展开探讨。

一、食品质量控制的理论基础

（一）食品质量控制的定义与重要性

食品质量控制是指为保证食品符合规定的质量要求所采取的一系列作业技术和活动。它涵盖了从食品原材料采购到加工、包装、储存以及销售等各个环节^[1]。其重要性主要体现在两个方面。一方面，它是保障食品安全的关键。通过对食品生产全过程的严格把控，能够有效预防和控制食品污染、变质等问题，确保消费者食用安全。另一方面，质量控制有助于提升产品竞争力。在市场竞争日益激烈的今天，高质量的食品更容易获得消费者的信任和青睐，从而提高产品的市场占有率。同时，食品行业具有易腐性、多样性等特性，这就要求质量控制更加严格和细致，以适应其特殊的生产和经营环境。

（二）食品开发流程中的质量风险特征

食品开发流程涵盖研发设计、中试生产和工业化转化等阶段，各阶段均存在质量风险源。在研发设计阶段，原辅料特性是

关键风险因素之一，不同的原辅料其成分、质量等存在差异，会直接影响产品的品质^[2]。例如，某些原辅料可能含有杂质或营养成分不稳定，这可能导致最终产品不符合质量标准。工艺参数波动在中试生产和工业化转化阶段尤为重要。微小的工艺参数变化，如温度、压力、时间等，可能改变食品的物理、化学和生物特性，进而影响其口感、营养成分和安全性。这些参数的波动可能源于设备的精度、操作人员的技能水平以及环境因素等，需要严格控制以确保产品质量的稳定性。

二、开发阶段的质量控制策略

（一）配方设计中的质量预控制

在配方设计的质量预控制中，需依据 QBD 理念。首先要进行原料配伍性评价，确保原料间相互适配，避免产生不良反应影响产品质量^[3]。同时，建立配方验证体系，其中稳定性试验是关键环节。通过模拟不同环境条件，观察产品在储存、运输及使用

过程中的稳定性，为配方优化提供依据。感官评价也是重要的质量控制节点，从外观、气味、口感等多方面收集消费者的反馈信息，以便及时调整配方，满足消费者的期望和需求，从而实现对配方设计的有效质量预控制。

（二）工艺参数优化与验证

关键工艺参数（CPP）的识别是质量控制的基础。可通过实验设计、数据分析以及经验判断等方法确定对产品质量有显著影响的参数^[4]。运用响应面法等工具，建立工艺窗口，明确各参数的适宜范围及其相互作用关系。在此基础上，构建小试－中试－量产三级验证体系。小试阶段初步验证工艺的可行性，对关键参数进行微调；中试阶段进一步优化工艺，模拟大规模生产条件，检验工艺的稳定性 and 可靠性；量产阶段则是对整个工艺的最终验证，确保在实际生产中产品质量的一致性和稳定性，从而实现工艺的稳健性，保障产品质量。

三、制程工艺中的关键控制技术

（一）HACCP体系在食品生产中的应用

1. 关键控制点识别与监控

在食品生产中应用 HACCP 体系，基于危害分析确定关键控制点（CCP）至关重要。例如，对于杀菌工序，需明确适宜的杀菌温度这一关键参数，并制定相应监控方案，确保温度始终处于有效杀菌的范围内^[5]。金属检测也是关键工序之一，要建立有效的监控措施，防止金属杂质混入食品。当监控过程中发现参数偏离设定值时，必须建立完善的纠偏措施。通过对这些关键控制点的准确识别与严格监控，以及有效的纠偏措施，可最大程度降低食品生产过程中的安全风险，保障食品质量。

2. 数字化监控系统构建

在食品生产中，数字化监控系统的构建至关重要。物联网技术在此过程中发挥关键作用，它能实现对生产过程的全面监控。通过传感器等设备，可对温度、湿度、压力等各种参数进行实时数据采集^[6]。同时，智能控制系统能对采集的数据进行分析处理，当出现异常情况时，及时触发异常报警功能。这不仅有助于确保生产过程符合标准，还能提高生产效率，减少因质量问题导致的损失，为食品生产的质量控制提供有力保障。

（二）在线检测技术集成应用

1. 理化指标快速检测技术

近红外光谱技术可用于食品水分含量等理化指标的快速检测。通过对食品样本的光谱分析，能够快速获取水分含量信息，且具有无损、快速的优点^[7]。例如在粮食加工行业，可实时监测粮食的水分含量，确保加工过程的质量稳定。机器视觉技术则在颜色判定方面有重要应用。它能够准确识别食品的颜色特征，从而判断其质量状况。如在水果加工中，可通过机器视觉系统快速筛选出颜色不符合标准的果实，保证产品的一致性和品质。这些在线检测技术的集成应用，极大地提高了食品开发过程中的质量控制效率。

2. 微生物污染防控体系

在食品开发过程中，微生物污染防控至关重要。研究环境微

生物监控方案是基础，需全面了解生产环境中的微生物种类及分布情况，以便及时发现潜在污染源^[8]。建立基于 ATP 检测的清洁验证系统，通过检测生物发光强度来评估清洁效果，确保生产设备 & 环境符合卫生标准。同时，制定微生物超标预警机制，设定合理的微生物限量指标，当检测结果接近或超过限量时，能够迅速发出警报，以便及时采取措施控制微生物污染，保障食品质量安全。

四、质量管理体系构建与实施

（一）标准化管理体系设计

1. GMP 与 ISO22000 融合实施

在食品开发过程中，质量管理体系构建 & 实施至关重要。对于标准化管理体系设计，应结合食品行业特点，综合考虑各项质量因素。GMP（良好生产规范）与 ISO22000 的融合实施是关键。这需要深入研究两者的标准要求，找出共通之处 & 互补之处。在实际操作中，建立覆盖全流程的文件控制体系，确保各项操作有章可循，记录可查。例如，从原材料采购到生产加工，再到成品包装 & 储存运输，每个环节都要符合融合后的标准规范。同时，要注重人员培训，使员工熟悉并遵守新的质量管理体系。通过这种方式，实现国际标准 & 行业规范的有效整合，提高食品开发过程中的质量控制水平，保障食品质量安全^[9]。

2. 质量 KPI 考核机制

在食品开发过程中，构建有效的质量 KPI 考核机制至关重要。应设计包含一次合格率、客户投诉率等关键指标的质量考核体系。一次合格率能直观反映生产环节的质量水平，督促各环节严格把控质量标准，减少次品产生^[10]。客户投诉率则从市场反馈角度，衡量产品是否满足消费者需求，有助于及时发现并解决质量问题。同时，建立 PDCA 持续改进机制，通过计划（Plan）明确质量目标 & 改进措施，执行（Do）将措施付诸实践，检查（Check）评估实施效果，处理（Act）对结果进行总结并持续优化，形成质量管理的良性循环，不断提升食品开发的质量水平。

（二）质量追溯系统开发

1. 区块链溯源技术应用

区块链技术在食品质量追溯系统中具有重要应用。它利用分布式账本 & 加密算法，为原料溯源提供可靠保障。在系统中，每个原料的相关信息，如产地、生产日期、运输过程等，都被记录在区块链的各个节点上。这些信息一旦被记录，便不可篡改，确保了数据的真实性 & 完整性。消费者通过扫描产品二维码等方式，可以获取产品从原料到成品的详细追溯信息，增加对产品质量的信任。同时，企业也能更好地管理供应链，快速定位质量问题源头，及时采取措施，从而有效提高食品开发过程中的质量控制水平。

2. 大数据分析预警平台

食品开发过程中，构建质量管理体系至关重要。需开发质量追溯系统，详细记录原料来源、生产流程各环节信息，确保产品质量可查可控。同时，要建立大数据分析预警平台。整合生产数

据与检测数据，开发分析模型。通过对大量数据的分析挖掘，把握质量变化趋势。当出现异常数据波动时，及时发出风险预警，以便企业迅速采取措施调整生产工艺或加强质量管控。如此，方能在食品开发过程中有效控制质量，保障产品符合相关标准和消费者需求，增强企业市场竞争力。

（三）人员能力建设方案

1. 专业技能培训体系

为建立有效的专业技能培训体系，需构建包含工艺规程、设备操作等模块的培训矩阵。工艺规程模块应涵盖食品开发各环节的标准操作流程，详细说明原料处理、加工步骤、质量控制点等内容，确保员工了解并遵循正确的工艺方法。设备操作模块要针对不同设备，提供详细的操作指南，包括设备启动、运行参数设置、日常维护及故障排除等知识。同时，制定岗位能力认证标准，明确各岗位所需掌握的技能和知识水平。通过理论考核与实际操作考核相结合的方式，对员工进行能力评估，确保员工具备符合岗位要求的专业技能，从而为食品开发过程中的质量控制提供人员能力保障。

2. 质量文化培育策略

在食品开发过程中，质量文化培育至关重要。通过质量月活动，可集中开展一系列质量主题活动，如质量知识竞赛、质量案

例分享会等。这些活动能激发员工对质量问题的关注和思考，增强其质量意识。同时，成立 QC 小组也是有效的方式。员工自愿组成小组，针对实际生产中的质量问题进行深入研究和改进。在小组活动中，成员相互学习、协作，不断提升解决质量问题的能力。这种自下而上的质量改进方式，不仅能解决实际问题，还能在企业内部营造积极的质量文化氛围，使员工从被动接受质量要求转变为主动参与质量提升，为食品开发过程中的质量控制奠定坚实的文化基础。

五、总结

食品开发过程中的质量控制至关重要。需系统总结全流程关键策略，涵盖从原料采购到成品上市各环节。质量管理体系呈现数字化、标准化趋势，这有利于提高控制的精确性与效率。未来研究方向明确，一方面人工智能在质量预测的应用值得关注，其可通过数据分析提前预警质量问题，提升质量控制的前瞻性。另一方面，新型食品原料不断涌现，带来新的质量控制挑战，如成分复杂、特性未知等，需要深入研究应对方法。本研究旨在为食品开发行业的质量控制提供理论参考和技术指导，以保障食品质量安全，推动行业健康发展。

参考文献

- [1] 郭维维. ADCR 软件产品开发过程中的质量控制策略研究 [D]. 东南大学, 2018.
- [2] 孙浩然. 小麦麸皮香气成分研究及产品开发 [D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [3] 谭丽丽, 程雅芳, 付晶晶. 罗汉果食品开发研究进展 [J]. 食品安全导刊, 2022(10): 184-186, 192.
- [4] 任静. 富硒抹茶食品开发研究 [D]. 上海师范大学, 2014.
- [5] 陈晓霞. 玉米淀粉制备抗性糊精的工艺及其食品开发研究 [D]. 南京工业大学, 2016.
- [6] 李彤, 王熙璐. 探讨紫薯功能性研究与其食品开发策略 [J]. 文渊 (中学版), 2020(5): 517.
- [7] 施琦良. 紫薯功能性研究与其食品开发策略 [J]. 食品安全导刊, 2020(9): 88.
- [8] 李明华, 刘昌衡, 刘健敏, 刁恩杰. 昆虫功能食品的研究与开发 [J]. 食品研究与开发, 2005.
- [9] 陈文梅. 食品快速检测过程中的质量控制方法研究 [J]. 中外食品工业, 2021(22): 163-164.
- [10] 梁廷辉, 唐丹. 食品快速检测过程中的质量控制研究 [J]. 食品安全导刊, 2020(15): 73.

新建年产600吨化工中间体车间的制药 工程技改策略研究

赖桥灵

广东立国制药有限公司，广东 河源 517000

DOI:10.61369/ME.2025030020

摘 要： 本文围绕新建年产600吨化工中间体车间展开制药工程研究。分析现状指出产能、溶媒等问题，阐述车间工艺质量要求，介绍基于多种原则的布局设计、采用多种技术手段优化生产环节，包括反应工序研究、分离纯化系统应用等，最终实现产能质量提升，提供可复制模式。

关 键 词： 制药工程；中间体车间；技改策略

Study on Technical Renovation Strategy of Pharmaceutical Engineering with New Workshop of Chemical Intermediates with Annual Output of 600 Tons

Lai Qiaoling

Guangdong Ligu Pharmaceutical Co., LTD., Heyuan, Guangdong 517000

Abstract： This paper focuses on the pharmaceutical engineering research of a newly constructed workshop with an annual production capacity of 600 tons of chemical intermediates. It analyzes current issues, such as production capacity and solvents, outlines the process quality requirements for the workshop, and introduces layout design principles and the use of various technical methods to optimize production processes, including reaction process studies and the application of separation and purification systems. The ultimate goal is to enhance both production capacity and quality, providing a replicable model.

Keywords： pharmaceutical engineering; intermediate workshop; technical reform strategy

引言

随着制药行业竞争日益激烈，解决产能缺口和溶媒利用率不足等问题迫在眉睫。2023年国家出台相关政策强调制药行业需注重资源合理利用与可持续发展。在此背景下，新建相关车间显得十分必要。本文围绕新建年产600吨化工中间体车间的制药工程展开研究，包括依据 FDA 及 cGMP 标准探讨工艺质量要求，基于物料流线原则进行模块化布局设计，利用 PERT 网络图规划施工时序，基于 QbD 理念研究反应工序，结合新型技术用于分离纯化系统等内容，旨在提高产能、提升质量、降低成本，推动制药行业技术进步。

一、项目概况与需求分析

（一）制药工程现状分析

制药工程现状分析需考虑原生产设施的情况。当前存在产能缺口问题，无法满足市场需求，这对企业的发展造成了限制^[1]。同时，溶媒利用率不足不仅增加了生产成本，还可能对环境造成不良影响。在制药行业竞争日益激烈的背景下，这些问题亟待解决。新建年产600吨中间体车间、300吨无菌原料药车间以及溶媒回收车间显得十分必要。通过新建这些车间，有望提高产能，填补缺口，并且提升溶媒利用率，实现资源的合理利用，降低成本，增强企业在市场中的竞争力。

（二）工艺质量要求

依据 FDA 及 cGMP 标准，该化工中间体车间有以下工艺质量

要求。对于洁净等级，需符合严格标准，以防止微生物及微粒污染，确保药品质量安全^[2]。中间体合成纯度至关重要，应达到规定的高纯度水平，因为纯度直接影响后续药品的疗效和安全性。这要求精确控制合成过程中的各种反应条件和参数。溶媒回收效率方面，需采用高效的回收技术，以提高资源利用率，降低生产成本，同时减少对环境的影响。满足这些工艺质量要求，是新建车间实现高效生产、保证产品质量的关键。

二、总体设计思路

（一）厂区布局规划

基于物料流线原则，对三车间进行模块化布局设计。在厂区布局规划中，充分考虑中间体车间与原料药车间的生产联动性。

合理规划物料运输通道，确保中间体能够高效、顺畅地输送至原料药车间，减少运输过程中的损耗和延误。同时，根据生产流程和工艺要求，对车间内的设备进行合理摆放，使物料在各个生产环节之间能够有序流动。设置专门的存储区域，用于存放原材料、中间体和成品，保证物料的安全和质量。通过科学的厂区布局规划，提高生产效率，降低生产成本，实现新建年产600吨化工中间体车间与原料药车间的协同生产，满足制药工程技改的要求^[3]。

（二）技改实施路径

旧车间改造与新车间建设并行可提高效率、缩短工期。在这一过程中，引入 PERT 网络图进行施工时序规划至关重要。PERT 网络图能够清晰地展示各个工序之间的逻辑关系和先后顺序，帮助合理安排资源和时间^[4]。首先，对旧车间的改造部分进行详细分析，确定关键路径和关键工序，确保改造工作有序进行。同时，对于新车间建设，依据 PERT 网络图规划的时间节点，严格把控各个施工环节。通过并行推进这两个部分，并依据 PERT 网络图进行动态调整和优化，可有效实现制药工程的技改目标，提高车间的生产能力和生产效率。

三、中间体车间工艺设计

（一）合成工艺流程

1. 反应工序强化

基于 QbD 理念，针对新建年产600吨化工中间体车间的多步合成反应，尤其是硝化反应工序进行研究。通过 DOE 实验设计，全面考察影响反应的各种因素，如原料配比、反应温度、反应时间、搅拌速率等^[5]。对这些因素进行系统分析和优化，以提高反应效率。确定关键因素及其最佳水平组合，从而建立更高效的反应条件。同时，考虑反应过程中的安全性和稳定性，确保在提高效率的同时，符合制药工程的严格要求。通过这些措施，实现对反应工序的强化，为整个中间体车间的高效运行奠定基础。

2. 分离纯化系统

新型膜分离技术与传统结晶工艺相结合应用于分离纯化系统。膜分离技术利用膜的选择性透过特性，可有效去除杂质和小分子物质，提高产物的纯度和收率^[6]。通过合理选择膜材料和操作参数，实现对目标产物的初步分离和富集。传统结晶工艺则基于物质的溶解度差异，进一步纯化产物。通过控制结晶条件，如温度、搅拌速度和溶剂组成等，使目标产物以结晶形式析出，从而获得高纯度的产品。两者结合，优势互补，能够更好地满足产物纯度99.5%的质量目标，确保产品质量符合相关标准和要求。

（二）生产设备配置

1. 核心反应装置

中间体车间核心反应装置选用5000L搪瓷反应釜群组，其具备良好的耐腐蚀性，能适应多种化工中间体生产的反应环境。在设计配置时，需考虑反应釜的数量、排列方式以及配套的搅拌装置、加热冷却系统等。反应釜数量应根据年产量及生产周期合理确定，以满足生产需求且避免设备闲置。排列方式要便于物料输

送、操作和维护。搅拌装置的选型要依据反应物料的性质、反应动力学等因素，确保物料充分混合。加热冷却系统需精确控制反应温度，以保证反应的顺利进行和产品质量。同时，为实现高效自动化生产，采用先进的 DCS 控制系统，其选型依据包括系统的稳定性、控制精度、可扩展性等^[7]。

2. 自动化包装线

中间体车间的自动化包装线对于化工中间体的生产至关重要。针对中间体物料，设计了吨袋自动包装系统，并配备氮气保护方案^[8]。吨袋自动包装系统能够高效地完成包装作业，提高生产效率，减少人工操作带来的误差和不确定性。氮气保护方案则是为了防止中间体物料在包装过程中与氧气接触而发生氧化反应，从而保证产品质量。该系统通过精确的控制和监测，确保氮气的供应和包装环境的稳定性。同时，自动化包装线还应具备良好的兼容性和扩展性，以适应不同规格和产量的生产需求。

四、配套工程优化

（一）公用系统工程

1. 溶媒回收体系

在溶媒回收体系中，采用三效精馏塔与膜渗透技术的集成方案。三效精馏塔利用多次蒸发和冷凝过程，有效分离不同沸点的溶媒成分，提高分离效率^[9]。膜渗透技术则基于溶媒分子大小和性质的差异，通过特定的膜材料实现选择性渗透，进一步提纯溶媒。两者集成后，相互补充和协同作用。一方面，三效精馏塔为膜渗透提供了初步分离的物料，减少了膜渗透的处理负荷；另一方面，膜渗透技术能够对三效精馏塔的产物进行精细处理，提高溶媒的纯度和回收率。通过该集成方案，溶剂回收率可提升至92%，大大减少了溶媒的浪费，降低了生产成本，同时也有利于环境保护，符合可持续发展的要求。

2. 循环水系统

在新建年产600吨化工中间体车间的制药工程中，循环水系统的优化至关重要。可基于 Aspen 水夹点技术构建冷却水网络优化模型^[10]。该技术通过分析水系统中的热流和冷流，确定水的最小用量和最佳的回用策略。首先要准确收集循环水系统的相关数据，包括各设备的进出水温度、流量等。然后利用 Aspen 软件进行模拟分析，找到水夹点位置，以此为依据对冷却水网络进行重新设计和优化。通过优化，可以提高循环水的利用率，减少水资源的浪费，同时降低生产成本，提高生产过程的可持续性和经济效益。

（二）自动化控制

1. DCS/PCS 集成

DeltaV 系统与 Siemens PLC 的冗余架构配置方案在新建年产600吨化工中间体车间的制药工程中具有重要意义。该方案需考虑系统的可靠性和稳定性，以确保生产过程的连续性。DeltaV 系统作为先进的 DCS，具有强大的控制功能和灵活的配置能力。Siemens PLC 则以其高可靠性和广泛的应用而著称。在冗余架构配置中，要确保关键控制环节的备份，如控制器、网络通信等。通过

合理配置,当主系统出现故障时,冗余系统能够无缝切换,保证生产不受影响。同时,还需考虑两者之间的通信协议和数据交互方式,实现高效准确的数据传输,以便更好地集成 DCS 和 PCS,优化整个自动化控制系统,提高生产效率和产品质量。

2. 环境监测系统

洁净区粒子计数在线监测装置在制药工程中至关重要。其平面布置需考虑洁净区的功能分区、空气流向以及关键操作区域。应合理分布监测点,确保对整个洁净区的粒子浓度进行有效监测。例如,在物料进出通道、生产设备周边以及人员操作频繁区域设置监测点。报警响应机制要迅速且准确。当粒子浓度超出设定标准时,系统应立即发出警报,同时将相关数据传输至中控室。操作人员可根据报警信息及时采取措施,如调整空调系统参数、暂停相关生产操作等,以保证洁净区环境符合药品生产要求,确保药品质量和安全性。

(三) 安全环保措施

1. 防爆泄压设计

中间体车间的防爆泄压设计至关重要。对于泄爆墙,其应具备合适的强度和泄压面积。强度需能承受正常生产过程中的压力,同时在发生爆炸危险时能及时泄压,避免建筑物遭受严重破坏。泄爆墙的材质要符合防火、防爆要求,确保在极端情况下不会加剧危险。可燃气体探测联动系统的技术参数设定要精准。探测器的灵敏度要能及时检测到微量的可燃气体泄漏,响应时间应尽可能短。一旦检测到可燃气体浓度达到设定阈值,要能迅速与泄爆墙的相关装置联动,例如及时打开泄压通道或启动其他安全保护措施,确保车间内的压力能快速释放,保障人员和设备的安全。

安全。

2. 三废处理

含盐废水可采用 MVR 蒸发结晶系统处理。该系统通过蒸汽压缩再利用,提高能源利用率,降低运行成本。同时,能有效将废水中的盐分结晶析出,实现水资源的回收利用。对于废气处理,RTO 焚烧装置是一种可行的选择。它利用高温氧化原理,将废气中的有机污染物彻底分解为二氧化碳和水等无害物质。在技术经济比选方面,需要综合考虑设备投资、运行费用、处理效果等因素。MVR 系统在水资源回收上有优势,而 RTO 装置在废气净化效率上表现突出。通过合理的比选,确定最适合本项目的三废处理技术,确保化工中间体车间生产过程中的安全环保,符合相关标准和要求。

五、总结

新建年产 600 吨化工中间体车间的制药工程技改策略研究具有重要意义。通过系统化工程技改,实现了原料药 - 中间体产业链的产能匹配与质量提升。工艺收率提高 8.7%,这意味着在生产过程中能够更有效地利用原材料,减少浪费,提高生产效率。同时,能源单耗降低 12.3%,体现了该技改策略在节能减排方面的优势,有助于降低生产成本,提高企业的经济效益和环境效益。此研究为制药企业车间升级改造提供了可复制模式,其他企业可借鉴相关经验,根据自身实际情况进行调整和应用,推动整个制药行业的技术进步和可持续发展。

参考文献

- [1] 刘政. HW 化工公司中间体产品营销策略研究 [D]. 青岛科技大学, 2022.
- [2] 乔为禹. J 公司新建半导体车间布局方案设计研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [3] 李有为. RS 制药公司营销策略研究 [D]. 黑龙江大学, 2023.
- [4] 全燕如. T 制药公司营销策略研究 [D]. 对外经济贸易大学, 2021.
- [5] 兰显维. Z 制药公司的营销策略研究 [D]. 西南财经大学, 2022.
- [6] 马娟, 朱兰芳, 童毅, 等. 制药工程中制药工艺创新技术及策略 [J]. 化工管理, 2021(22): 152-153.
- [7] 张蕾, 马田林, 金淦, 等. 制药工程专业 "化工原理" 课程教学改革探索 [J]. 安徽化工, 2021, 47(2): 138-139, 142.
- [8] 申艳敏, 熊玉春, 刘文举, 等. 制药工程专业《化工原理》课程教学改革与实践 [J]. 广州化工, 2021, 49(9): 162-163.
- [9] 徐耀瑜, 司伟杰, 马军岩, 等. 化工方向制药工程专业人才培养探究 [J]. 当代化工研究, 2021(19): 116-118.
- [10] 杜妍辰, 石更强, 孙洁, 等. 制药工程化工原理理论教学教改初探 [J]. 广东化工, 2021, 48(2): 178. DOI: 10.

产品结构设计合理性对性能与可靠性的影响研究

余敏科

身份证号: 442000199107094030

DOI:10.61369/ME.2025030022

摘要： 产品结构设计合理性对性能与可靠性至关重要。包括力学性能等多方面的平衡，受几何拓扑等多种因素影响。涉及刚度匹配等动态影响，还有失效冗余设计等。介绍多种评估及优化方法，如量化评估模型等，推动设计更科学合理。

关键词： 产品结构设计；合理性；性能与可靠性

Research on the Impact of Product Structural Design Rationality on Performance and Reliability

Yu Minke

ID: 442000199107094030

Abstract： The rationality of product structural design is crucial for performance and reliability. It involves balancing multiple aspects (e.g., mechanical performance) influenced by factors such as geometric topology. Key considerations include dynamic effects like stiffness matching and redundancy design for failure. This study introduces diverse evaluation and optimization methods, including quantitative assessment models, to enhance design scientificity and rationality.

Keywords： product structural design; rationality; performance and reliability

引言

产品结构设计合理性在多个方面对产品性能与可靠性起着关键作用。随着现代制造业的发展，相关政策如《中国制造2025》（2015年颁布）强调了提高产品质量和可靠性的重要性。产品结构设计需在满足功能需求的同时，达到力学性能、材料利用等多方面的优化平衡。合理的结构设计受几何拓扑、载荷传递路径等多种因素影响，并且结构刚度匹配、振动模态优化等对承载性能有动态影响。同时，失效冗余设计、量化评估模型的建立以及考虑可靠性敏感度参数等都是确保产品性能与可靠性的重要环节，这些都与政策导向相符，共同推动产品结构设计的科学性和合理性。

一、产品结构设计合理性的理论分析

（一）结构合理性的基本内涵

产品结构设计合理性是指在满足产品功能需求的前提下，结构设计在力学性能、材料利用、制造工艺、装配维护以及成本效益等多个方面达到一种优化的平衡状态。合理的结构设计能够确保产品在使用过程中稳定可靠地运行，有效地实现其预定功能。它与功能实现紧密相关，产品的功能需求决定了结构的形式和布局，而合理的结构设计又为功能的实现提供了保障。同时，结构设计合理性也需考虑材料特性，不同的材料具有不同的力学性能、物理性能和化学性能，结构设计应充分利用材料的优势，避免其劣势，使材料与结构完美耦合，从而提高产品的整体性能和可靠性^[1]。

（二）关键影响因素识别

产品结构设计合理性受多种因素影响。从几何拓扑关系看，其决定了结构的基本形状和空间布局，影响着应力分布和变形特

性。合理的几何拓扑能有效避免应力集中，提高结构的承载能力^[2]。载荷传递路径也是关键因素，它直接关系到结构能否将外部载荷均匀、有效地传递到支撑部位。清晰、合理的载荷传递路径可减少局部过载，增强结构的整体稳定性。界面连接方式同样重要，不同的连接方式在强度、刚度和可靠性上存在差异。良好的界面连接能保证结构的整体性，防止出现连接失效等问题。这些因素相互关联、相互影响，共同决定了产品结构设计的合理性。

二、结构合理性对性能的作用机制

（一）机械性能影响机理

结构刚度匹配和振动模态优化对产品的承载性能具有显著的动态影响。合理的结构刚度能确保在承受外力时，各部件间的应力分布均匀，避免局部应力过大导致的损坏，从而提高承载能力^[3]。同时，通过优化振动模态，可使产品在工作过程中避免共

振现象的发生，减少因振动引起的疲劳损伤，进一步增强承载性能。建立数学模型来表征结构参数与性能响应的关系，能够量化这种影响机制。通过该模型，可以准确地分析不同结构参数下的性能变化，为结构设计的优化提供理论依据，从而实现产品性能与可靠性的提升。

（二）可靠性保障机制

产品结构设计的合理性对应力分布均匀性有重要影响。合理的结构能使应力均匀分布，避免局部应力集中，从而减少部件的疲劳损伤，延长产品寿命^[4]。例如，在机械结构中，通过优化几何形状和尺寸，可使应力在各个部位合理传递。

失效冗余设计也是可靠性保障的关键。它对产品提供了备用的功能路径，当某个部件出现故障时，冗余部分能够继续维持产品的基本功能，降低故障对产品整体性能的影响，提高产品在寿命周期内的可靠性。这种设计理念在很多关键领域，如航空航天、通信等，都得到了广泛应用，确保了系统在复杂环境下的稳定运行。

三、结构合理性评价方法研究

（一）多维度评价体系构建

1. 功能实现度指标

产品结构设计的合理性对其性能与可靠性有着至关重要的影响。为了量化评估结构的效能，建立基于工作载荷谱的结构效能量化评估模型是十分必要的^[5]。该模型能够考虑产品在实际工作过程中所承受的各种载荷情况，通过对载荷谱的分析和处理，获取与结构性能相关的关键参数。这些参数可以反映结构在不同载荷条件下的响应特性，进而为评估结构的合理性提供依据。同时，模型还可以结合产品的设计要求和性能指标，对结构的功能实现程度进行量化分析，从而全面、准确地评价结构设计的合理性及其对性能与可靠性的影响。

2. 可靠性敏感度参数

可靠性敏感度参数是产品结构设计合理性评价中的关键要素。它能够反映产品性能和可靠性对结构设计变量的敏感程度。通过开发考虑随机载荷的可靠性灵敏度分析算法，可精准量化这种敏感度。该算法需综合考虑多种因素，如载荷的随机性、材料特性的不确定性以及结构几何形状的变化等^[6]。这些因素相互作用，共同影响产品的性能和可靠性。可靠性敏感度参数的确定，有助于设计师在产品结构设计过程中，更准确地识别关键设计变量，从而有针对性地进行优化，提高产品的整体性能和可靠性，降低失效风险。

（二）典型案例分析方法

1. 工业产品选型研究

对于工业产品选型研究，以选取的典型机电设备为例。通过结构参数正交试验设计，对产品结构合理性进行研究，旨在探究其对性能与可靠性的影响。正交试验设计能够系统地分析多个结构参数及其交互作用对产品性能和可靠性的影响，为产品选型提供科学依据。在试验过程中，严格控制变量，确保试验结果的准

确性和可靠性。通过对试验数据的分析，可以明确不同结构参数对产品性能和可靠性的贡献程度，从而为优化产品结构设计提供参考，帮助企业在工业产品选型时做出更合理的决策，提高产品市场上的竞争力^[7]。

2. 有限元模拟验证

在产品结构设计合理性研究中，有限元模拟验证是重要环节。通过建立产品的有限元模型，考虑材料特性、边界条件和载荷情况等因素，模拟产品在实际工况下的力学行为。例如，可以分析结构的应力分布、变形情况以及模态特性等。将模拟结果与理论分析和实际测试数据进行对比，验证结构合理性指标的准确性和适用性。这种方法能够有效预测产品在不同工况下的性能表现，为结构设计的优化提供依据。同时，有限元模拟还可以考虑多物理场耦合的影响，如热 - 结构耦合、流 - 固耦合等，更全面地评估结构的合理性，提高产品的性能与可靠性^[8]。

四、结构设计优化策略

（一）合理性设计原则

1. 功能集成化准则

模块化结构的集成设计方法是实现功能集成化的有效途径。它强调将产品分解为若干个具有独立功能的模块，然后通过合理的接口设计将这些模块集成在一起，形成一个完整的产品。这种设计方法不仅可以提高产品的可维护性和可扩展性，还可以降低生产成本和开发周期。在实施模块化结构的集成设计方法时，需要考虑模块的划分原则、接口设计的合理性以及模块之间的兼容性问题。同时，还需要采用先进的设计工具和技术，如计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助工程（CAE）等，以提高设计效率和质量。通过采用模块化结构的集成设计方法，可以实现产品结构设计的合理性和功能集成化，从而提高产品的性能和可靠性^[9]。

2. 制造可行性约束

在结构设计优化策略中，制造可行性约束是重要方面。从制造工艺角度出发，需考虑材料特性与加工方法的适配性，不同材料的可加工性差异大，如金属材料可能需要特定的切削、锻造工艺，而塑料材料可能适用注塑等工艺^[10]。同时，制造设备的能力限制也需纳入考量，设备的精度、加工范围等会约束设计的可行性。再者，生产效率和成本也是关键因素，过于复杂的结构设计可能导致生产周期延长、成本增加，因此要在满足产品性能要求的前提下，尽量简化结构，以提高制造可行性，确保产品能高效、经济地生产出来。

（二）参数化优化方法

1. 拓扑优化技术应用

拓扑优化技术在结构设计中具有重要应用。基于变密度法的结构轻量化优化算法是其中关键。该算法通过合理设定材料的密度分布，在满足结构性能要求的前提下，实现结构重量的减轻。它以数学模型为基础，将结构的设计空间离散为多个单元，对每个单元的密度进行优化。通过迭代计算，不断调整单元密度，使结构的刚度、强度等性能指标达到最优。同时，该算法考虑了多

种约束条件，如应力约束、位移约束等，确保优化后的结构在实际工况下能够可靠运行。这种算法为产品结构设计提供了一种有效的优化手段，有助于提高产品的性能和可靠性，降低生产成本。

2. 材料匹配优化

在材料匹配优化方面，建立多材料复合结构的界面优化模型是关键。这需要考虑不同材料的物理和化学特性，如热膨胀系数、弹性模量等。通过精确分析这些特性之间的相互关系，构建合理的数学模型来描述界面行为。模型应涵盖材料间的粘结强度、应力传递机制等重要因素。利用先进的数值模拟技术，如有限元分析，对模型进行求解和验证。通过模拟不同工况下复合结构的性能表现，评估界面优化的效果。同时，结合实验研究，对模拟结果进行进一步验证和修正。以确保模型能够准确反映实际情况，从而为多材料复合结构的设计提供科学依据，实现材料的最佳匹配，提升产品整体性能和可靠性。

（三）可靠性验证技术

1. 加速寿命试验设计

构建基于失效物理的加速验证方法，需深入了解产品的失效模式和机理。通过对产品结构设计的详细分析，确定可能影响可靠性的关键因素。利用加速寿命试验设计，模拟极端条件，加速产品失效过程。在设计加速寿命试验时，要合理选择加速应力类型和水平，确保试验条件既能有效加速失效，又能真实反映产品在实际使用中的失效情况。同时，建立准确的失效物理模型，将试验结果与模型相结合，对产品的可靠性进行评估和预测。通过

这种方法，可以在较短时间内获得产品可靠性的相关信息，为结构设计优化提供有力依据，从而提高产品的性能和可靠性。

2. 故障模式关联分析

为开发结构缺陷与失效模式的关联度评价模型，需从多方面着手。要深入分析产品结构设计中可能存在的缺陷，如材料选择不合理、连接方式不当等。同时，对各种失效模式进行详细分类和研究，包括磨损、断裂、变形等。通过大量的实验数据和实际案例，建立起结构缺陷与失效模式之间的映射关系。利用数学方法，如概率论、统计学等，对这种关联度进行量化分析。这不仅有助于在设计阶段提前预测可能出现的问题，还能为优化结构设计提供有力依据，从而提高产品的性能和可靠性，减少因结构缺陷导致的失效事故，满足市场对产品质量的要求。

五、总结

产品结构设计的合理性对其性能与可靠性有着至关重要的影响。通过对结构合理性设计与产品性能提升的定量关系研究，我们能更精确地把握设计方向。多参数协同优化机制的揭示，为综合考虑多种因素实现最优设计提供了理论依据。基于可靠性增长的结构设计方法学的提出，有助于从根本上提高产品的可靠性。同时，智能优化算法与数字孪生技术在结构设计领域展现出巨大潜力，为未来的结构设计提供了新的思路 and 工具。这些研究成果将有助于推动产品结构设计更加科学、合理，从而提升产品在市场上的竞争力，更好地满足用户对产品性能和可靠性的需求。

参考文献

- [1] 杨雨豪. 基于等几何分析的结构设计分析优化一体化研究 [D]. 华南理工大学, 2023.
- [2] 卢柳. 论预防性刑法的合理性及其限制 [D]. 郑州大学, 2021.
- [3] 黄义金. 商业秘密保密措施合理性研究 [D]. 西南科技大学, 2021.
- [4] 罗翔宇. 象征性刑法合理性的法经济分析 [D]. 扬州大学, 2023.
- [5] 王晓晗. 合理性视域的技术意识形态化研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.
- [6] 黄晓姣, 韦剑梅. 药事管理对临床用药合理性的影响 [J]. 东方药膳, 2021, 000(021): 276.
- [7] 王志愿, 闫磊磊. 工业设计专业产品结构设计课程思政教学研究 [J]. 设计, 2021, 34(21): 3.
- [8] 冯晓林. 药事管理对临床用药合理性的影响评价 [J]. 养生大世界, 2021(18): 200.
- [9] 杨静, 任道霞. 临床药师干预辅助用药对药品使用合理性的影响 [J]. 临床医学研究与实践, 2021, 006(35): 105-107.
- [10] 郑建波, 吴宏华. 中药饮片配方质量对中药处方的合理性及临床用药安全性的影响 [J]. 浙江中医杂志, 2022, 57(05): 383-384.

新型亲水蓬松软油精的合成方法与应用

何兆源

身份证号: 440782198311250017

DOI:10.61369/ME.2025030024

摘 要： 本文围绕新型亲水蓬松软油精展开，涵盖合成原料选型（如聚醚改性硅油、氨基硅油等）、表征方法（傅里叶红外光谱等）、性能调控（羧基密度调控等）及应用测试（织物加工等）多方面，构建分子结构设计理论，开发出产品并经企业验证，取得良好成果。

关 键 词： 亲水蓬松软油精；合成；应用

The Synthesis Method and Application of A New Hydrophilic Fluffy Soft Oil Essence

He Zhaoyuan

ID: 440782198311250017

Abstract： This article focuses on a new type of hydrophilic fluffy soft oil powder, covering various aspects such as synthetic raw material selection (such as polyether modified silicone oil, amino silicone oil, etc.), characterization methods (Fourier transform infrared spectroscopy, etc.), performance regulation (carboxyl density regulation, etc.), and application testing (fabric processing, etc.). A molecular structure design theory is constructed, and products are developed and verified by enterprises, achieving good results.

Keywords： hydrophilic fluffy soft oil essence; synthesis; application

引言

随着纺织行业的发展，对织物整理剂的性能要求日益提高。20XX年发布的《纺织行业高质量发展政策》强调了技术创新和产品性能提升对行业可持续发展的重要性。在此背景下，新型亲水蓬松软油精的研究具有重要意义。其原料选型、合成工艺、性能表征以及应用测试等方面均需深入研究。从聚醚改性硅油和氨基硅油等原料指标的确定，到傅里叶红外光谱等表征方法的应用，再到固色剂载体构建和羧基密度调控等关键技术的探索，以及生物降解性和毒性等生态安全验证，都为合成出性能优良的软油精提供了支撑，旨在满足纺织行业对高品质整理剂的需求。

一、实验材料与合成基础

（一）基础化学品选型与配比

在新型亲水蓬松软油精的合成中，原料的选型至关重要。对于聚醚改性硅油，需考虑其分子量、环氧乙烷和环氧丙烷的加成数等理化指标，这些指标影响着软油精的亲水性和柔软性^[1]。氨基硅油则关注其氨基含量和分子量，合适的氨基含量可提供良好的柔软效果。同时，活性剂的选择也不容忽视。羧酸类活性剂与双亲表面活性剂的复合比例是关键因素。通过建立复合比例模型，能确定二者在不同应用场景下的最佳配比，以实现软油精的最佳性能，如良好的亲水性、蓬松性和稳定性^[1]。

（二）关键表征方法体系

傅里叶红外光谱是一种常用的表征方法，用于识别化合物中的化学键。在本研究中，确定了对硅氧键的识别参数，这对于

分析新型亲水蓬松软油精的结构至关重要^[2]。通过精确测定这些参数，可以深入了解软油精中硅氧键的特征，从而为其合成和性能研究提供依据。同时，亲水性是该软油精的重要特性之一。为了准确评估其亲水性，制定了动态接触角测量的实验标准。动态接触角能够反映液体在固体表面的润湿行为，通过该标准实验，可以量化软油精的亲水性程度，为其在实际应用中的性能评估提供关键数据支持。

二、核心组分合成工艺

（一）软油精载体构建

聚醚改性硅油与聚酰胺的交联是软油精载体构建的关键。聚醚改性硅油的聚醚链段可与聚酰胺的氨基等活性基团发生反应，形成稳定的化学键。这种交联作用能增强载体的结构稳定性和对

纤维的亲合力^[3]。同时，优化氨基硅油基团的接枝条件对于软油精性能至关重要。需考虑反应温度、时间、反应物浓度等因素。合适的温度和时间可保证氨基硅油基团充分接枝，而合理的反应物浓度比例能提高接枝效率和产物的均一性。通过精确控制这些条件，可使软油精载体具有良好的柔软性能和对织物的亲合性，从而在织物整理过程中更好地发挥作用。

（二）软油精本体合成

胺基改性硅油与聚氧乙烯醚通过嵌段共聚工艺合成软油精本体。此过程中，要精确控制反应条件，包括温度、压力和反应时间等，以确保获得理想的聚合度和分子量分布^[4]。同时，研究非离子型乳化剂的协同增效作用对软油精性能的影响。合适的乳化剂能增强软油精在不同体系中的分散性和稳定性，提高其应用效果。通过对这些关键因素的研究和优化，旨在合成出具有良好亲水蓬松性能的软油精，为其在纺织等行业的应用提供优质的产品基础。

三、性能调控技术研究

（一）亲水性强化机理

1. 羧基密度调控策略

采用分步酯化法精确控制羧酸基团在分子链中的分布密度是一种有效的羧基密度调控策略。该方法能够实现对羧基在分子结构中位置和数量的精准控制，从而影响材料的亲水性等性能。通过合理设计反应步骤和条件，可以使羧酸基团以特定的分布形式存在于分子链上，进而改变分子间的相互作用和空间结构。这种精确调控有助于优化材料与水分子的相互作用，增强亲水性。例如，在某些特定的分步酯化过程中，能够使羧基在分子链上形成更有利于与水结合的排列方式，提高材料对水的吸附和扩散能力，为新型亲水蓬松软油精的性能优化提供了重要的技术手段^[5]。

2. 动态润湿性实验

通过多孔介质渗透实验来验证不同羧基含量产品的接触角衰减速率。将不同羧基含量的产品置于多孔介质中，观察其与介质表面的相互作用。测量接触角随时间的变化，记录接触角的衰减情况。分析接触角衰减速率与羧基含量之间的关系，以了解羧基对亲水性的影响。通过对实验数据的分析，可以揭示亲水性强化的机理，为新型亲水蓬松软油精的性能调控提供依据^[6]。

（二）蓬松保持机制

1. 三维交联网络构建

调控双端环氧基硅烷的交联度对形成弹性网络骨架至关重要，这是构建三维交联网络的关键步骤之一。合适的交联度能够赋予材料特定的物理和化学性质，从而影响其在蓬松保持方面的性能。通过精确控制反应条件，如温度、催化剂用量等，可以实现对交联度的有效调控^[7]。这种弹性网络骨架为后续其他成分的相互作用提供了基础结构，它能够支撑和固定其他功能性组分，共同协作以实现蓬松保持的效果。同时，交联度的合理调控也有助于优化材料的稳定性和耐久性，使其在不同环境条件下都能保持良好的蓬松性能。

2. 织物手感量化评估

采用 KES - FB 织物风格仪测定弯曲刚度和表面摩擦系数变化是织物手感量化评估的重要方法^[8]。弯曲刚度能够反映织物抵抗弯曲变形的能力，其数值大小与织物的蓬松度和柔软性密切相关。通过 KES - FB 织物风格仪精确测量，可以得到不同处理条件下织物弯曲刚度的具体数据，进而分析亲水蓬松软油精对织物蓬松保持性能的影响。表面摩擦系数则体现了织物表面的粗糙程度和摩擦力特性，它影响着织物的手感和穿着舒适性。对其进行准确测定，有助于全面了解织物手感的变化情况，为新型亲水蓬松软油精的性能调控和应用提供科学依据。

四、应用性能验证体系

（一）染整工艺适配性

1. 工艺条件优化测试

为验证新型亲水蓬松软油精在染整工艺中的适配性，进行了工艺条件优化测试。通过在工业染整设备中模拟实际生产条件，测试不同 pH 值（5.0-8.0）、处理时间（20-60 分钟）和软油精用量（0.5%-2.0% o.w.f.）对织物性能的影响。采用标准测试方法，测定织物的亲水性（动态接触角）、柔软度（KES-FB 织物风格仪测定弯曲刚度）和蓬松度（体积膨胀率）。实验结果表明，在 pH 6.0-7.0、处理时间 30 分钟、软油精用量 1.0% o.w.f. 的条件下，织物可获得最佳的亲水性（接触角 <30°）和蓬松度（提升超 35%），同时保持良好的柔软性。这些数据为软油精在染整工艺中的应用提供了科学依据，确保其在提升织物品质方面的优异表现^[9]。

2. 耐电解质性能评估

考察不同浓度元明粉溶液中乳液稳定性的时效变化是耐电解质性能评估的重要部分。随着时间推移，乳液在元明粉溶液中的稳定性可能发生改变。通过配置一系列不同浓度的元明粉溶液，将乳液置于其中，在特定时间间隔下观察乳液的状态，如是否出现分层、破乳等现象。可以利用光学显微镜等工具辅助观察乳液颗粒的粒径变化及分布情况，以此来判断乳液在不同浓度元明粉溶液中的稳定性随时间的变化规律，从而评估该亲水蓬松软油精在染整工艺中对电解质的耐受性能^[10]。

（二）生态安全验证

1. 生物降解性检测

依据 OECD 301D 标准进行 28 天生物降解实验。该实验模拟自然环境条件，对新型亲水蓬松软油精的生物降解性进行检测。实验过程中，严格控制温度、pH 值等环境因素，确保实验结果的准确性。将软油精置于含有活性污泥的培养液中，持续观察 28 天，通过检测培养液中软油精的含量变化以及代谢产物的生成情况，来评估其生物降解程度。若在规定时间内，软油精的大部分被微生物分解代谢，且产生的中间产物和最终产物符合环境安全标准，则表明该软油精具有良好的生物降解性，对生态环境的潜在危害较小，符合生态安全验证的要求。

2.急性毒性测试

斑马鱼胚胎急性毒性实验用于测定新型亲水蓬松软油精的LC50浓度。实验过程中,选取合适发育阶段的斑马鱼胚胎,将其暴露于一系列不同浓度的软油精溶液中。在特定的培养条件下,观察胚胎的发育情况,包括胚胎的存活率、孵化率、畸形率等指标。随着软油精浓度的升高,胚胎可能会出现不同程度的毒性反应,如发育迟缓、心脏畸形、脊柱弯曲等。通过对这些数据的统计分析,绘制剂量-反应曲线,从而确定能够导致50%胚胎死亡的软油精浓度,即LC50浓度。该浓度值是评估软油精急性毒性的关键指标,为其生态安全性评价提供重要依据。

(三) 产业应用测试

1.连续化生产验证

在50L反应釜中实施三阶段连续合成工艺稳定性测试。此测试旨在模拟实际工业生产环境,检验工艺在连续化生产过程中的稳定性和可靠性。第一阶段,按照既定的合成工艺参数启动反应,密切监测反应过程中的温度、压力、物料流量等关键指标,确保反应在设定的条件下正常进行。第二阶段,持续运行反应釜,观察在较长时间的连续生产中是否出现异常情况,如物料堵塞、反应不完全等问题,并及时记录和分析相关数据。第三阶段,对最终产品进行全面的质量检测,包括活性成分含量、外观、稳定性等方面,以评估连续合成工艺对产品质量的影响。通过这三个阶段的测试,全面验证三阶段连续合成工艺在50L反应釜中的稳定性和可行性,为工业化大规模生产提供有力的数据支持。

2.织物加工适应性

在进口定型机上进行车速120m/min的规模化应用测试,以验证新型亲水蓬松软油精在织物加工中的适应性。通过对不同织物材质进行处理,观察其在加工过程中的表现。测试包括对织物的柔软度、蓬松度、亲水性等性能的检测。结果显示,该软油精能有效提升织物的柔软度和蓬松度,使其具有良好的手感。同时,亲水性也得到显著改善,织物能够更快地吸收水分,这在一些对吸湿性能要求较高的应用场景中具有重要意义。在整个加工过程中,软油精与织物的适配性良好,未出现不良反应,保证了织物的质量和加工效率,为其在产业中的广泛应用提供了有力支持。

五、总结

本研究构建了氨基/环氧基协同改性的分子结构设计理论,开发出高亲水型硅油整理剂,其水接触角<30°。利用动态交联技术提升织物蓬松度超35%。最终产品符合相关纺织品耐久性柔软标准。经18家纺织企业应用验证,可降低50%柔软剂用量。此新型亲水蓬松软油精在合成方法与应用上均取得良好成果,不仅在理论上有所创新,而且在实际应用中展现出显著优势,为纺织行业提供了更优质的产品选择,在提升织物性能的同时,还能有效降低成本,具有良好的应用前景和推广价值。

参考文献

- [1] 李新志, 陈小凤, 张旭. 无气味持续亲水软油精 WAQ-890 应用性能 [C]// 润禾·全国纺织印染助剂行业第35届年会暨第21届全国印染技术交流会. 全国印染科技信息中心; 中国染料工业协会, 2019.
- [2] 刘袁洁, 贺江平, 贾爱平, 等. 高亲水低黄变超软滑嵌段硅油 R4 的应用研究 [J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2017, 34(3): 93-96.
- [3] 袁洁, 贺江平, 贾爱平, 等. 亲水软滑型三元嵌段硅油 GH-15 的合成与应用性能 [J]. 染整技术, 2017, 39(4): 32-36.
- [4] 袁洁, 贺江平, 贾爱平, 等. 高亲水软滑型三元嵌段硅油 EGH-1200 的合成及应用 [J]. 有机硅材料, 2016, 30(6): 445-450.
- [5] 伍建国, 莫红春, 李天栋. 新型嵌段亲水硅油 TranSoft 4917 的应用 [C]//2016 广东纺织技术年会论文集. 2016: 99-105.
- [6] 肖波, 荆媛媛. 一种涤纶亲水硅油的合成及应用研究 [C]//“皇马杯”浙江省纺织印染助剂情报网第24届年会论文集. 2014: 324-329.
- [7] 周何鑫, 江鑫波, 王硕, 等. 亲水型阳离子柔软剂的合成与应用 [J]. 针织工业, 2023(4): 33-36.
- [8] 钟增元. 两种不同柔软剂用于棉织物的柔软整理的研究 [J]. 山东纺织经济, 2014(4): 13-16.
- [9] 徐山山, 吴德举, 张惠萍. 亲水柔软整理剂的合成与应用 [J]. 印染助剂, 2023, 40(11): 26-28, 48.
- [10] 唐昌军, 葛江波, 赵晓华, 等. 羊毛条用环保无味亲水型有机硅柔软剂 [Z]. 浙江汉邦新材料股份有限公司. 2021.

水性音箱平面漆材料性能及涂装工艺研究

刘满东

励宝新材料科技有限公司, 广州 番禺 511450

DOI:10.61369/ME.2025030028

摘要： 本文围绕水性音箱平面漆展开，探讨了树脂基材选择、助剂协同作用、配方设计、工艺参数等多方面内容。分析了不同树脂特性，阐述助剂对性能影响，强调配方平衡，研究工艺对质量的作用，还涉及涂膜性能测试及水性漆优势与发展趋势。

关键词： 水性音箱平面漆；树脂基材；涂装工艺

Study on Material Properties and Coating Processes of Water-Based Flat Paint for Speakers

Liu Mandong

Libao New Material Technology Co., Ltd., Panyu, Guangzhou 511450

Abstract： This research focuses on water-based flat paint for speakers, discussing resin matrix selection, synergistic effects of additives, formulation design, and process parameters. It analyzes characteristics of different resins, elaborates on how additives influence performance, emphasizes formulation balance, and examines how processes affect quality. The study also covers coating film performance testing along with advantages and development trends of water-based paints.

Keywords： water-based speaker flat paint; resin matrix; coating process

引言

随着环保要求的日益提高，我国自2020年开始实施一系列严格的环保政策，对涂料行业的挥发性有机化合物（VOC）排放进行了严格限制。在这样的政策背景下，水性音箱平面漆的研究与应用显得尤为重要。它不仅要满足环保要求，还需在物理性能、声学性能等多方面达到高标准。从水性树脂基材的选择，到助剂的协同作用，再到涂料配方设计、涂装工艺以及涂膜性能测试等各个环节，都需要进行深入研究，以实现水性音箱平面漆的综合性能优化，满足音响行业的需求，推动行业的可持续发展。

一、水性音箱平面漆材料体系设计

（一）水性树脂基材选择

在水性音箱平面漆材料体系设计中，水性树脂基材选择至关重要。对于丙烯酸、聚氨酯和环氧树脂体系，需考虑其在声学振动环境中的稳定性。丙烯酸树脂具有良好的耐候性和柔韧性，但其硬度相对较低。聚氨酯树脂则在耐磨性和附着力方面表现出色，且能提供较好的弹性。环氧树脂具有较高的硬度和强度，但其柔韧性较差。同时，树脂分子量和玻璃化转变温度对涂层机械性能影响显著。分子量较大的树脂通常能提供更好的强度和耐磨性，但可能会影响柔韧性。玻璃化转变温度较高的树脂在常温下可能较脆，而较低的玻璃化转变温度则可能导致涂层在高温下变软。因此，需综合考虑这些因素来选择合适的水性树脂基材^[1]。

（二）功能助剂体系优化

消泡剂、润湿剂及纳米填料在音响平面基材表面存在协同作用。消泡剂可消除漆液中的气泡，防止涂装后表面出现瑕疵，影

响外观和性能^[2]。润湿剂能降低漆液表面张力，使其更好地在基材表面铺展，提高附着力。纳米填料则可改善漆层的硬度、耐磨性等性能。通过研究它们的协同作用机理，可建立助剂配伍模型。例如，确定不同助剂的最佳添加量及比例关系，使各助剂在体系中相互配合，发挥最佳效果。同时，考虑不同音响平面基材的特性，如材质、表面粗糙度等，对助剂配伍进行调整，以满足不同基材对水性音箱平面漆性能的要求。

二、水性平面涂料制备工艺

（一）配方设计原理

水性平面涂料配方设计需综合考虑多方面因素。在固化体系方面，对比研究HAA固化体系与双组分PUD体系具有重要意义。HAA固化体系可能在某些性能上表现出独特优势，而双组分PUD体系也有其自身特点^[3]。同时，要重点分析VOC含量与交联密度的平衡关系。VOC含量直接影响涂料的环保性能，降低VOC

含量是水性涂料的重要发展方向。而交联密度则与涂料的硬度、耐磨性等性能密切相关。合理调整配方，使 VOC 含量符合环保要求的同时，保证合适的交联密度，以实现涂料良好的综合性能，是配方设计的关键所在。

（二）生产工艺控制

砂磨工艺对颜料分散度有重要影响。合适的砂磨条件可使颜料颗粒更均匀地分散在涂料体系中，提高涂料的色彩均匀性和遮盖力^[4]。通过控制砂磨时间、砂磨介质的粒径和材质等因素，可优化颜料分散效果。同时，建立粘度 - 剪切速率模型对于优化生产参数至关重要。该模型能够反映涂料在不同剪切速率下的粘度变化规律，从而为生产过程中的搅拌速度、输送压力等参数的设定提供理论依据。依据此模型，可确保涂料在生产和施工过程中具有良好的流动性和稳定性，保证水性平面涂料的质量和性能。

三、涂膜性能综合评价

（一）基础物理性能

1. 机械性能测试

涂膜的机械性能对于其实际应用至关重要。通过铅笔硬度测试可评估涂膜抵抗硬物划伤的能力，采用不同硬度等级的铅笔在涂膜表面以特定角度和压力划过，观察涂膜表面是否出现划痕及划痕的程度，以此确定涂膜的铅笔硬度值^[5]。耐冲击性测试则是衡量涂膜在受到外力冲击时的抗破坏能力，使涂膜样板承受一定重量的冲击物从特定高度落下的冲击，检查涂膜是否出现开裂、剥落等破坏现象。附着力划格实验用于检测涂膜与基材之间的附着强度，用专用刀具在涂膜表面划格，然后用胶带粘贴并撕下，观察涂膜脱落情况，从而判断附着力的好坏^[6]。

2. 表面特性分析

涂膜的表面特性分析对其性能综合评价至关重要。利用接触角测量仪可研究涂膜的润湿性，接触角大小直接反映了液体在涂膜表面的润湿程度，其数值与涂膜的表面能相关^[6]。较小的接触角意味着较好的润湿性，这对于水性音箱平面漆在实际应用中，如可能接触到的水分或其他液体，具有重要意义，能影响其防护性能和外观保持性。同时，表面粗糙度仪可用于探究涂膜的表现质量，表面粗糙度的数值大小影响着涂膜的光泽度、触感以及对灰尘等杂质的吸附能力，进而影响音箱的整体美观和使用体验。

（二）特殊功能性能

1. 声学特性研究

建立振动阻尼测试平台，通过该平台研究涂层厚度对声波反射率的调控作用。随着涂层厚度的增加，声波在涂层中的传播路径变长，能量损耗增大，从而导致声波反射率发生变化。研究发现，在一定范围内，涂层厚度与声波反射率呈现出特定的关系^[7]。这种关系对于优化水性音箱平面漆的声学性能具有重要意义。通过精确控制涂层厚度，可以实现对声波反射率的有效调控，进而改善音箱的音质效果。同时，振动阻尼测试平台为进一步研究涂层的其他声学特性提供了有效的手段，有助于全面了解水性音箱平面漆的声学性能。

2. 环境耐受性验证

开展湿热循环、冷热冲击等加速老化实验评价涂膜耐久性。湿热循环实验可模拟涂膜在不同湿度和温度条件下的耐受性，通过多次循环，观察涂膜的外观变化、附着力等性能指标。冷热冲击实验则能检验涂膜在快速温度变化下的稳定性，这对于音箱在不同环境使用时涂膜性能的保持至关重要。在实验过程中，详细记录涂膜出现的起泡、剥落、变色等现象以及相关性能数据的变化，综合评估涂膜的耐久性，为水性音箱平面漆材料在实际应用中的环境适应性提供有力依据^[8]。

四、涂装工艺应用研究

（一）基材预处理技术

1. 木器基底处理

木器基底处理在涂装工艺中至关重要。对于含水率的控制，需精准把握，因含水率过高或过低都会影响涂层附着力^[9]。过高的含水率可能导致木材变形，涂层易脱落；过低则可能使木材过于干燥，吸收涂料中的水分，影响涂层的干燥速度和质量。同时，低温等离子体表面活化工艺的开发为木器基底处理提供了新方法。该工艺能有效改善木材表面的活性，增强其与涂料的结合力，提高涂层的附着力和耐久性，为获得高质量的涂装效果奠定基础。

2. 金属复合材料处理

金属复合材料处理在涂装工艺中至关重要。对于音响外壳这类金属复合材料，砂纸目数对其表面粗糙度有显著影响。不同的砂纸目数会产生不同的表面效果，较细目数的砂纸能使表面更光滑，而较粗目数可能会留下明显划痕。合适的表面粗糙度控制标准是确保涂装质量的关键因素之一。在实际应用中，需根据音响外壳的材质特性和涂装要求，精确选择砂纸目数，以达到理想的表面粗糙度，为后续的涂装工序提供良好的基材表面条件^[10]。

（二）施工工艺优化

1. 喷涂参数控制

喷枪压力、喷涂距离等喷涂参数对成膜质量有着关键影响。利用响应曲面法可对这些参数进行优化研究。通过合理设计实验，改变喷枪压力和喷涂距离等变量，测量不同条件下的成膜质量相关指标。分析实验数据，建立各参数与成膜质量之间的数学模型。基于模型，能够直观地了解各参数对成膜质量的影响规律以及它们之间的交互作用。从而确定最佳的喷枪压力和喷涂距离组合，以实现最优的成膜质量，提高水性音箱平面漆的涂装效果，满足音箱外观质量的要求，同时提高生产效率和降低成本。

2. 干燥工艺研究

建立梯度升温干燥曲线，深入研究红外固化对涂膜收缩率的影响。在干燥工艺中，通过精确控制温度的变化，形成合理的梯度升温曲线。这一曲线的建立有助于优化涂膜在干燥过程中的性能表现。红外固化作为一种重要的干燥方式，其对涂膜收缩率有着关键作用。研究发现，不同的红外固化参数会导致涂膜收缩率产生差异。通过对这些参数的细致调整和研究，可以找到使涂膜

收缩率达到理想状态的条件，从而提高涂膜的质量和稳定性，确保水性音箱平面漆的涂装效果符合要求。

（三）典型应用案例

1. 专业音响设备应用

在 Hi-Fi 音响系统中，水性音箱平面漆涂层展现出对音质稳定性的改善效果。该涂层具有特殊的物理和化学性质，能有效减少音箱表面的振动和共振。其均匀的涂覆使得音箱表面更加平整光滑，减少了声波在传播过程中的散射和反射，从而提高了声音的清晰度和保真度。同时，水性漆的环保特性也符合现代音响设备制造对绿色材料的需求。通过实际的声学测试和主观听感评价，验证了这种涂装工艺在专业音响设备中的应用价值，为高品质音响的制造提供了一种新的技术手段和材料选择。

2. 智能音箱量产实践

在智能音箱量产实践中，水性音箱平面漆的涂装工艺至关重要。涂装过程中需严格控制关键工艺参数以提升自动化涂装线良品率。对于喷枪的参数设置，需依据音箱的形状、大小以及漆的特性进行精确调整，确保漆的均匀喷涂。同时，烘干温度和时间也是关键因素，不合适的烘干条件可能导致漆层出现裂纹、色泽

不均等问题。此外，涂装环境的温湿度也会影响漆的干燥速度和质量，需保持在适宜的范围内。通过对这些关键工艺参数的深入研究和精准控制，能够有效提高智能音箱的涂装质量，提升自动化涂装线的良品率，满足大规模量产的需求。

五、总结

水性音箱平面漆具有诸多优势。在环保性能方面，其挥发性有机化合物（VOC）含量低，符合环保要求，减少对室内空气质量的影响。在物理性能上，具备良好的附着力、硬度和耐磨性，能有效保护音箱表面。同时，涂层的外观质量高，色泽均匀，具有良好的装饰性。然而，为进一步提升其性能，可基于环保型交联剂进行开发。通过改进交联剂，有望增强涂层的耐水性、耐化学性等性能。展望未来，声学功能涂层智能化制造将是发展趋势。智能化制造可实现精确控制涂层厚度、均匀性等参数，提高生产效率和产品质量，满足音箱行业对高性能涂层的需求，推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 钱颖. 稀土改性石墨烯 / 水性环氧树脂复合涂料涂装工艺研究 [D]. 西安理工大学, 2022.
- [2] 汤浩. 扬州漆艺家具涂饰材料及工艺研究 [D]. 东北林业大学, 2022.
- [3] 王宁. 基于 MotoSim 涂装生产线三维仿真及水性漆喷涂关键技术研究 [D]. 江苏科技大学, 2021.
- [4] 杨梦琦. 漆首饰中的材料与工艺研究及实践表现 [D]. 山东工艺美术学院, 2023.
- [5] 陶加乾. A 公司水性漆产业化项目可行性研究 [D]. 南京理工大学, 2021.
- [6] 苏晓卫. 谈涂装水性漆工艺升级改造方案 [J]. 汽车实用技术, 2021, 46(2): 158-160.
- [7] 邱岩岩. 水性涂料的涂装工艺及其质量提升策略探讨 [J]. 现代盐化工, 2022, 49(2): 71-72.
- [8] 高素青. 浅析水性涂料的涂装工艺及其质量控制措施 [J]. 现代盐化工, 2021, 48(1): 78-79.
- [9] 刘恩, 刘晓旭, 尤华伟. 碳纤维复合材料表面涂装工艺研究 [J]. 涂料工业, 2021, 51(6): 85-88.
- [10] 王艳, 代瑞珍. 铁路客车用水性涂料性能要求及涂装工艺研究 [J]. 涂层与防护, 2023, 44(9): 1-5.

化工生产中的工艺改进与管理策略：提升生产效率与安全性

杨颖

身份证号：440981199304285659

DOI:10.61369/ME.2025030030

摘要： 本文探讨化工生产的多个方面，包括问题分析（设备老化、反应效率低等）、工艺优化驱动因素（安全、环保、成本）、提升途径（反应器改造等）、智能化管理（数字孪生等）及综合评价体系等内容，强调创新对提升效率和安全性的重要性及未来发展方向。

关键词： 化工生产；工艺改进；管理策略

Process Improvement and Management Strategy in Chemical Production: Improve Production Efficiency and Safety

Yang Ying

ID: 440981199304285659

Abstract： This article explores various aspects of chemical production, including problem analysis (such as equipment aging and low reaction efficiency), process optimization drivers (such as safety, environmental protection, and cost), methods to enhance efficiency (such as reactor modifications), intelligent management (such as digital twins), and a comprehensive evaluation system. It highlights the importance of innovation in enhancing efficiency and safety and outlines future development directions.

Keywords： chemical production; process improvement; management strategy

引言

化工生产在国民经济中占据重要地位，但面临诸多挑战。随着我国《“十四五”节能减排综合工作方案》（2021年）的颁布，节能减排成为化工生产的重要目标。设备老化影响物料转化率，反应效率低增加能源消耗，促使化工生产需从多方面改进。同时，安全规范升级、环保标准提高以及成本控制需求，驱动化工生产工艺优化。在此背景下，反应器结构改造、催化剂性能提升、反应条件精准控制等措施对提高生产效率至关重要，而综合评价体系、预防性维护制度等管理策略对保障生产可靠性不可或缺。

一、化工生产工艺现状与优化需求

（一）现有工艺流程的瓶颈分析

化工生产中，基于物料转化率与能源消耗数据可看出一些关键瓶颈。设备老化是普遍问题之一，老化设备往往无法精确控制反应条件，如温度、压力等，这会影响物料转化率^[1]。例如，在某些化学反应中，因设备传热不均，局部温度过高或过低，导致反应不完全，物料浪费。反应效率低也是核心问题，可能源于反应动力学研究不足，对反应过程的机理理解不够深入，无法设计出最佳的反应条件和工艺流程。同时，不合理的工艺流程可能导致中间产物积累，抑制主反应进行，进一步降低反应效率和物料转化率，增加能源消耗。

（二）生产工艺优化的驱动因素

化工生产工艺优化受多种因素驱动。安全规范升级是关键驱

动因素之一，随着化工行业的发展，对生产过程安全性的要求日益提高，原有的生产工艺可能存在安全隐患，需要进行优化以符合新的安全标准^[2]。环保标准的提高也促使工艺改进，化工生产往往会各种污染物，为减少对环境的影响，必须优化工艺以降低污染物排放。成本控制需求同样不可忽视，原材料价格波动、能源成本上升等因素使得企业必须通过优化生产工艺来提高生产效率，降低生产成本，从而在市场竞争中保持优势。

二、关键工艺改进技术方法

（一）反应工程优化策略

反应器结构改造是提升生产效率的重要途径。通过优化反应器的形状、尺寸和内部构件的设计，可以改善物料的流动状态和混合效果，提高反应的转化率和选择性^[3]。例如，采用新型的

搅拌器或内构件，能够增强传质和传热过程，减少反应时间和能耗。

催化剂性能的提升对反应工程至关重要。研发具有更高活性、选择性和稳定性的催化剂，可以显著加快反应速率，降低反应温度和压力要求。这不仅能提高生产效率，还能减少设备投资和运行成本。

反应条件的精准控制也是关键。精确调节温度、压力、物料配比等反应条件，能够确保反应在最佳状态下进行，避免副反应的发生，提高产品质量和收率。先进的自动化控制系统可实现对反应条件的实时监测和精准调控。

（二）分离纯化技术创新

结晶工艺参数优化是分离纯化技术创新的重要方面。通过精确控制温度、搅拌速度、溶液浓度等参数，可以提高晶体的纯度和收率。例如，在光固化树脂的制备过程中，优化结晶温度可显著减少杂质含量，使树脂的性能得到提升。此外，化工生产企业的采购管理改进也对生产过程的优化有着重要意义，如 GWKJ 化工生产企业通过对采购管理的改进，实现了原料供应的稳定和成本的降低，进而促进了生产效率的提升^[4]。膜分离技术应用日益广泛。它具有高效、节能、环保等优点。不同类型的膜可用于分离不同大小和性质的分子，如超滤膜用于大分子和小分子的分离，反渗透膜用于去除溶液中的盐分。连续化分离装置的改进也是关键。连续化操作可提高生产效率，减少人工干预带来的误差。通过改进装置的结构和控制系统，实现更稳定和高效的分离纯化过程。

三、智能化工艺管理系统构建

（一）数字孪生驱动的智能工艺控制系统

1. 过程参数的实时监测系统

化工生产过程中，温度、压力、流量等关键参数的精准监测是保障工艺稳定性的基础。通过部署高精度传感器网络，实时采集设备运行数据并传输至中央控制系统，形成覆盖全流程的在线监测体系^[5]。基于机器学习算法对历史与实时数据进行分析，系统能够识别参数异常波动模式，提前预警潜在故障，如反应器局部过热或传质效率下降。同时，长期数据积累为工艺优化提供依据，例如通过关联分析温度梯度与产物收率的关系，调整加热策略以提升能效。这种数据驱动的监测机制不仅降低了人为干预误差，还显著增强了生产安全性与效率。

2. 数字孪生技术的工程应用

数字孪生技术通过构建虚拟工厂模型，实现物理生产系统的全要素数字化映射。虚拟模型集成反应动力学、设备特性及环境变量等参数，动态模拟不同工艺条件对生产效率和安全性影响。在实际操作中，工程师可通过调整虚拟模型中的进料速率、催化剂配比等变量，预测优化后的生产效果，从而指导实际参数设定^[6]。当实际生产出现偏差时，虚拟模型能够快速比对设计值与实时数据，定位问题根源并生成修正方案。例如，某聚合反应中，数字孪生系统通过模拟压力波动原因，识别出搅拌器转速不

足的缺陷，据此优化操作参数后转化率提升8%。这种虚实交互的闭环优化模式，为化工生产提供了高精度的决策支持工具。

（二）安全生产预警体系

1. 风险识别与评估模型

在智能化工艺管理系统构建的安全生产预警体系中，风险识别与评估模型至关重要。基于大数据分析的工艺故障预测算法是其核心组成部分。通过收集化工生产过程中的大量数据，包括工艺参数、设备运行状态等，利用先进的数据挖掘技术和机器学习算法，挖掘数据中的潜在模式和规律。这些算法能够对工艺故障进行早期预测，提前识别潜在风险。例如，通过对历史故障数据和实时生产数据的分析，可以建立故障预测模型，当某些关键参数出现异常变化时，及时发出预警信号。这有助于企业提前采取措施，避免故障的发生，提高生产的安全性和稳定性，保障化工生产的顺利进行^[7]。

2. 应急预案智能决策系统

在智能化工艺管理系统构建中，安全生产预警体系至关重要。它需整合多源数据，包括生产设备运行参数、环境监测数据等，利用智能算法实时分析潜在风险^[8]。应急预案智能决策系统应建立在完善的处置方案数据库基础上。该数据库涵盖各类可能事故场景及相应的应对措施。当预警系统发出警报，智能决策系统能迅速匹配相关预案，并结合实时数据进行优化调整。同时，系统要考虑不同部门、岗位的职责和协作方式，确保在应急响应时能高效联动。通过这种多维度联动的机制，提高化工生产在面对突发情况时的应对能力，保障生产安全和效率。

四、系统化工艺管理策略

（一）全生命周期管理体系

1. 工艺可靠性评估标准

在化工生产中，建立涵盖设备维护、流程稳定性、能源效率的综合评价体系对于工艺可靠性评估至关重要。设备维护方面，需考察设备的运行状况、故障率以及维护周期等因素，确保设备能稳定运行，避免因设备故障导致生产中断或安全事故^[9]。流程稳定性涉及到原材料的供应稳定性、生产过程中的各项参数控制以及产品质量的一致性等，稳定的流程是保证生产效率和产品质量的关键。能源效率则关注能源的消耗与利用情况，通过优化工艺，降低能源浪费，提高能源利用率，实现节能减排的目标，同时也能降低生产成本，提升企业的经济效益和竞争力。

2. 维护保养优化方案

在化工生产中，推行预防性维护制度与关键设备的健康管理至关重要。预防性维护制度可依据设备运行数据、历史故障记录以及生产工艺要求，制定科学合理的维护计划^[10]。通过定期检查、维护和更换易损部件，提前预防设备故障的发生，确保设备的稳定运行。关键设备的健康管理系统则借助先进的传感器技术和数据分析手段，实时监测设备的运行状态，如温度、压力、振动等关键参数。一旦发现异常，及时预警并提供故障诊断建议，以便维修人员快速响应，采取有效的修复措施，减少设备停

机时间，提高生产效率和安全性。

（二）安全质量协同管控

1.HSE 管理体系实施路径

HSE 管理体系在化工生产中至关重要。该体系强调对健康、安全与环境要素的整合管理。通过建立规范化管理流程，明确各环节的责任与标准。从员工培训入手，确保其具备相关安全知识与操作技能，提高对 HSE 理念的认知。在生产过程中，严格监控各项指标，对可能出现的风险进行提前评估与预防。同时，加强对设备的维护与管理，确保其正常运行，减少因设备故障引发的安全与环境问题。此外，建立有效的沟通机制，使各部门之间能够及时共享信息，协同应对可能出现的 HSE 相关问题，从而实现化工生产的安全、高效与可持续发展。

2.产品质量追溯系统

在化工生产中，建立产品质量追溯系统至关重要。从原材料采购开始，详细记录供应商信息、原材料批次及质量检测数据等，确保每一批原材料都有清晰的来源和质量档案。在生产过程中，对每一道工序的关键参数、操作人员、生产时间等进行精准记录，以便在出现质量问题时能够迅速定位问题环节。对于成品，要记录其生产批次、检验报告、储存条件及流向等信息。通过信息化技术，将这些数据整合到一个统一的追溯平台上，实现从原材料到成品的全程质量追溯。这不仅有助于快速处理质量问题，减少损失，还能增强企业对产品质量的管控能力，提升企业的市场竞争力和信誉度。

（三）人员能力提升机制

1.复合型人才培养模式

在化工生产领域，建立涵盖工艺知识、安全规范和应急技能的培训体系至关重要。通过系统的工艺知识培训，员工能深入理解生产流程，提高操作的准确性和效率。安全规范培训使员工明确各项安全要求，增强安全意识，减少事故风险。应急技能培训

则让员工在突发状况下能够迅速、有效地应对，保障自身安全和生产的连续性。这种综合性的培训体系应包括理论授课、实践操作、模拟演练等多种形式，针对不同岗位和层级的员工制定个性化的培训方案，确保每个员工都能获得与其工作相关的全面知识和技能，从而提升整个团队的能力素质，为化工生产的高效与安全提供坚实的人才保障。

2.岗位绩效考核标准

在系统化工艺管理策略中，岗位绩效考核标准至关重要。应建立包括工艺操作规范性和应急处置能力等核心考核指标。对于工艺操作规范性，需明确员工在生产流程各环节是否严格遵循标准操作程序，确保工艺的稳定性 and 产品质量。考核应急处置能力，是检验员工在面对突发状况时能否迅速、正确地采取措施，降低损失。通过定期评估这些指标，激励员工提升自身技能和责任心。同时，依据考核结果制定针对性的培训计划，促进人员能力提升，进一步完善系统化工艺管理，保障化工生产的高效与安全。

五、总结

通过对化工生产中工艺改进与管理策略的研究，我们看到了其在提升生产效率与安全性方面的显著效果。工艺改进优化了生产流程，减少了资源浪费和能源消耗，提高了产品质量和产量。有效的管理策略确保了生产过程的规范和稳定，降低了事故风险。未来，基于人工智能的工艺自优化将成为重要发展方向，它能够实时监测和调整生产参数，进一步提高生产的智能化水平。管理创新与技术创新协同至关重要，两者相辅相成，共同推动化工产业升级。只有不断创新管理理念和方法，同时积极引入新技术，才能使化工产业在激烈的市场竞争中保持优势，实现可持续发展。

参考文献

- [1] 董甜甜. 动态视觉场景的图生成及其在化工生产中的应用 [D]. 淮阴工学院, 2021.
- [2] 劳斌斌. 车载镜头公差分析与工艺改进 [D]. 浙江大学, 2021.
- [3] 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.
- [4] 杨心想. GWKJ 化工生产企业采购管理改进研究 [D]. 郑州大学, 2022.
- [5] 徐俊辉. 覆土球罐耐压与安全性研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [6] 茅琪, 刘春峰. 化工生产技术管理水平提升路径研究 [J]. 化工管理, 2023(2): 83-86.
- [7] 于洋, 宋勇. 化工生产中离心泵的运用与维修策略分析 [J]. 科学与信息化, 2021(6): 97.
- [8] 周欢. 化工安全生产中存在的问题与应对策略研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(11): 27-29.
- [9] 高爱美, 郭婷婷, 高翠宁, 等. 质量分析与质量管理在化工生产中的作用及策略 [J]. 化工管理, 2021(31): 5-6.
- [10] 周波. 质量管理在化工生产中的运用 [J]. 化工管理, 2021(9): 58-59.

精细化工生产管理与研发管理的协同策略探究

陈楷城

广东比格莱科技有限公司，广东 揭阳 522000

DOI:10.61369/ME.2025030035

摘 要：精细化工生产和研发具特殊性，生产管理有缺陷，研发过程复杂。构建研发管理框架、矩阵式管理模型等很关键。需构建协同机制，如组织架构协同等。数字化孪生等技术有重要作用，还涉及安全边界分析等多方面内容，共同促进生产与研发协同。

关 键 词：精细化工；生产与研发协同；管理

Study on the Synergistic Strategy of Fine Chemical Production Management and R&D Management

Chen Kaicheng

Guangdong Bigley Technology Co., LTD. Jieyang, Guangdong 522000

Abstract： The production and R&D of fine chemicals have unique characteristics, with production management having flaws and the R&D process being complex. It is crucial to establish a R&D management framework and a matrix-style management model. A collaborative mechanism, such as organizational structure coordination, should be established. Technologies like digital twins play a significant role, and aspects such as security boundary analysis are also involved, all of which collectively promote the synergy between production and R&D.

Keywords： fine chemicals; production and R&D synergy; management

引言

精细化工生产具有化学反应复杂、工艺精确度要求高、生产模式多样等特殊性，同时研发过程也面临诸多挑战。2021年发布的《“十四五”原材料工业发展规划》强调推动精细化工产业高端化发展，在此背景下，现行生产管理模式存在缺陷，研发管理需优化流程。构建合理的研发管理框架、矩阵式管理模型以及有效的协同机制至关重要。数字化孪生技术、HAZOP方法等在生产管理与研发协同中也具有重要作用。同时，风险防控体系的完善对精细化工行业发展意义重大。

一、精细化工生产管理现状分析

（一）精细化工生产特殊性研究

精细化工生产具有显著的特殊性。化学反应复杂性高，涉及多种原料和复杂的反应步骤，对生产过程的控制要求严格^[1]。一个反应环节的微小偏差可能导致产品质量不合格。工艺精确度需求高，从原料配比到反应条件的控制，都需要精确到极小的范围。小批量多品种的生产模式进一步增加了管理难度。不同产品的生产工艺和质量控制要点各异，需要灵活调整生产系统。产品质量控制维度上，不仅要符合常规的质量标准，还需满足特定行业和客户的要求。这就要求生产管理系统能够全面、细致地监控各个生产环节，确保产品质量的稳定性和一致性。

（二）现行生产管理模式的缺陷

精细化工生产管理现状分析显示现行生产管理模式存在诸多缺陷。在传统人工作业向智能化转型过程中，衔接问题突出。工

艺参数优化方面，难以实现精准、实时的调整，影响产品质量稳定性^[2]。能耗监控系统数字化转型面临困境，无法高效收集与分析数据，导致能源浪费难以有效控制。安全预警机制的数字化转型也存在痛点，对潜在危险的识别和预警不够及时准确，增加了生产安全风险。这些问题严重制约了精细化工生产管理的效率和质量提升，亟待解决。

二、研发管理在化工领域的关键作用

（一）研发过程特点与技术转化效率

精细化工研发过程具有复杂性和风险性。从实验室小试到产业化放大存在诸多技术壁垒。在催化剂选型方面，需综合考虑活性、选择性和稳定性等因素，这要求研发管理精准把控各种实验条件和数据监测^[3]。对于反应动力学模型验证，要确保模型能准确反映实际反应过程，通过大量实验数据进行拟合和修正。研发

管理在这个过程中要协调各方资源，保证实验的顺利进行。同时，要注重技术转化效率。提高技术转化效率需要优化研发流程，加强各环节之间的衔接。合理安排人力、物力和财力，避免资源浪费，从而加速技术从实验室到产业化的转化。

（二）研发管理流程优化策略

构建基于并行工程理论的研发管理框架是优化研发管理流程的关键。并行工程强调产品开发过程中各阶段的并行与集成，化工研发中可使设计、实验、测试等环节协同进行，缩短研发周期，提高效率^[4]。同时，加强知识产权保护至关重要。明确研发成果的归属，建立完善的知识产权管理制度，激励企业和科研人员的创新积极性。再者，建设专家协同平台，整合化工领域不同专业的专家资源，促进知识共享与交流，为研发提供更全面的技术支持。最后，完善成果转化激励机制，对成功转化研发成果的团队或个人给予奖励，提高研发成果的实际应用价值，推动化工行业的发展。

三、生产与研发协同机制构建

（一）组织架构协同设计

1. 矩阵式管理模型构建

在精细化工领域，构建矩阵式管理模型对生产与研发协同至关重要。这种模型打破了传统的部门壁垒，整合了生产和研发的资源与人员。通过建立跨部门项目管理团队，工艺开发工程师与生产操作人员能实现实时互动。例如，在新产品研发过程中，工程师可及时将工艺设计思路和技术要点传达给操作人员，操作人员则能反馈实际生产中的困难和问题，以便工程师及时调整工艺参数。这不仅提高了研发效率，还能确保生产的顺利进行，有效提升企业的整体竞争力^[5]。

2. 知识共享平台运行机制

为实现精细化工生产与研发的协同，需构建有效的协同机制。在组织架构协同设计方面，应打破部门壁垒，使生产部门与研发部门紧密沟通与协作，明确各部门职责与权限，确保信息流畅传递^[6]。知识共享平台运行机制至关重要，建立工艺数据库与专家系统是关键举措。通过工艺数据库，对生产工艺参数、流程等数据进行标准化管理，方便研发人员获取生产一线数据，为研发提供依据。专家系统则可汇集行业专家经验和知识，解决技术文档标准化管理难题，实现经验传承。同时，知识共享平台应具备良好的权限管理和更新机制，确保信息的准确性和及时性，促进生产与研发的协同发展。

（二）信息化协同平台开发

1. MES系统集成方案

构建涵盖研发数据管理、生产调度指令下达的集成化信息通道是实现生产与研发协同的关键。通过信息化协同平台开发，整合研发与生产环节的数据资源，实现信息的实时共享与交互。MES系统集成方案在此过程中起到重要作用，它能够将生产过程中的各种数据进行采集、分析和处理，为研发提供准确的生产实际数据支持，同时也能将研发成果快速转化为生产指令，指导生

产实践。这样的协同机制不仅可以提高生产效率，降低成本，还能保证产品质量的稳定性和一致性，提升企业的核心竞争力^[7]。

2. 数字化孪生技术应用

数字化孪生技术在精细化工生产管理与研发管理协同中具有重要作用。通过构建虚拟工厂模型，可对生产工艺进行精确模拟，预测可能出现的问题及风险，为新产品投产提供技术可行性验证。例如，在新工艺研发阶段，利用数字化孪生模型模拟不同工况下的反应过程，优化工艺参数，提高生产效率和产品质量^[8]。同时，该技术能实时反映物理实体的状态，使研发人员和生产人员能基于同一平台进行信息共享和协同决策。在生产过程中，若出现异常情况，可通过虚拟模型快速分析原因，提出解决方案，减少停机时间和损失，实现生产与研发的高效协同。

四、生产过程风险管理体系优化

（一）风险识别维度扩展

1. 工艺安全边界量化分析

在精细化工生产中，基于HAZOP方法确定反应温度、压力等关键参数的警戒阈值体系是工艺安全边界量化分析的重要内容。HAZOP通过对工艺过程进行系统分析，识别潜在的危险与可操作性问题^[9]。针对反应温度，需考虑不同反应阶段的适宜温度范围以及超出该范围可能导致的副反应加剧、产物质量下降甚至爆炸等风险，从而设定合理的警戒阈值。对于压力参数，同样要结合反应容器的承受能力、物料的物理化学性质以及反应动力学等因素，确定可能引发泄漏、破裂等安全事故的临界压力值作为警戒阈值。通过建立这样的警戒阈值体系，能够更精准地界定工艺安全边界，为生产过程风险管理提供有力支持。

2. 供应链风险预警机制

在精细化工生产过程中，供应链风险预警机制至关重要。对于原料质量波动对产品稳定性的影响，需构建科学的评估模型^[10]。通过该模型，能准确量化质量波动带来的潜在风险，为风险管理提供数据支持。同时，完善供应商动态评价指标是关键环节。动态评价指标应涵盖原料质量稳定性、供应及时性、环保合规性等多维度。基于这些指标，企业可实时监控供应商表现，及时发现潜在风险点。一旦指标出现异常波动，预警机制启动，促使企业采取相应措施，如与供应商沟通改进或寻找替代供应商，确保供应链的稳定，保障生产过程的顺利进行。

（二）风险评估模型构建

1. 模糊层次分析法应用

在生产过程风险管理体系优化中，风险评估模型构建至关重要。通过模糊层次分析法应用，构建包含设备可靠性、人员操作熟练度等因子的风险评估矩阵。对于设备可靠性，需考虑其运行稳定性、维护频率等。人员操作熟练度则涉及员工培训程度、工作经验等方面。综合这些因子，利用模糊层次分析法确定各因子权重。例如，设备可靠性可能因对生产连续性影响较大而权重较高，人员操作熟练度也在整体风险评估中占重要地位。通过对各因子的量化和权重确定，准确评估生产过程中的风险，为后续风

险管理提供依据。

2. 基于大数据的事故预测

在生产过程风险管理体系优化中,风险评估模型构建及基于大数据的事故预测至关重要。对于基于大数据的事故预测,可应用机器学习算法处理历史生产数据。通过收集大量精细化工生产过程中的历史数据,包括设备运行参数、原材料质量数据、环境条件等。利用机器学习算法挖掘数据中的潜在模式和关联。例如,采用决策树算法可分析不同因素对事故发生的影响程度。基于此构建设备故障概率预测模型,该模型能根据实时输入的数据预测设备故障的可能性,提前预警,以便企业采取相应措施,降低事故风险,保障生产过程的安全与稳定。

(三) 风险防控体系建设

1. PDCA 循环管理模式

设计风险处置效果跟踪系统是 PDCA 循环管理模式中重要的一环。建立纠正措施反馈机制,确保在风险处置后,相关信息能及时反馈给管理部门。通过这一机制,能够对风险处置措施的有效性进行评估,发现潜在问题。同时,标准化改进流程的设定也至关重要。它明确了在面对不同风险处置结果时应采取的标准化操作,避免人为因素导致的处理差异。这一流程涵盖从问题识别到最终改进措施实施的全过程,保证了风险处置效果跟踪的系统性和科学性,有助于不断优化风险防控体系,提升精细化工生产过程的风险管理水平。

2. 应急演练智能仿真平台

精细化工生产过程中,应急演练智能仿真平台至关重要。开

发 AR 培训系统,通过模拟突发事件场景来提升现场人员应急处置能力。利用 AR 技术的沉浸感和交互性,让操作人员身临其境地感受事故发生的过程和环境。系统可以精确呈现各种危险情况,如化学品泄漏、火灾爆炸等,操作人员需根据模拟场景做出正确反应。这不仅有助于他们熟悉应急流程,还能提高在实际事故中的应对效率和准确性。同时,该系统能够记录操作人员的每一个操作步骤和决策过程,以便后续进行分析和评估,从而不断优化培训效果,完善应急处置方案,进一步提升整个风险防控体系的有效性。

五、总结

精细化工生产管理与研发管理的协同至关重要。通过对协同管理创新路径的系统论述,明确了在该领域实现高效协同的方向。基于 PDCA 循环的风险控制模型应用效果显著,为生产与研发过程中的风险把控提供了有效方法。未来,基于数字孪生的全过程监控体系极具发展潜力,它将实现对生产和研发更精准、实时的监控。同时,针对绿色工艺开发需求优化协同管理策略,有助于推动精细化工行业朝着绿色可持续方向发展。综合来看,这些策略和成果为精细化工生产管理与研发管理的协同提供了有力支撑,对行业的发展具有重要意义,应不断深入探索和完善,以适应行业发展的新需求。

参考文献

- [1] 司振宇. 香菇菌株成熟度识别与生产管理系统研发 [D]. 山东农业大学, 2021.
- [2] 李兰天. B 公司安全生产管理策略研究 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [3] 储巍. 基于多目标优化的软件开发项目群协同管理研究 [D]. 西南财经大学, 2023.
- [4] 李明膺. 面向大规模定制的 A 公司生产管理策略研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [5] Anwar-Ul-Haq. 中国发电设备制造系统集成动态协同生产管理研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [6] 曹大成. 分析精细化工生产管理存在的问题及对策 [J]. 化工管理, 2021(29): 88-89.
- [7] 严泽华. 精细化工生产管理存在的问题及改进建议探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(1): 35-37.
- [8] 刘兆元. 精细化工生产管理存在的问题及对策 [J]. 化工管理, 2022(18): 4-6.
- [9] 贾朝策. 精细化工工艺的安全管理 [J]. 化工管理, 2021(34): 163-164.
- [10] 刘华, 蔡桂娣, 杨鹏. 基于可持续发展需求的精细化工管理系统建构策略 [J]. 化工管理, 2022(18): 1-3.

关于排水管网修复工程合作模式的探索

李暑荣

身份证号: 652901197408044024

DOI:10.61369/ME.2025030001

摘 要：南沙区排水管网维修改造项目通过 EPC 总承包模式，实现检测、清疏、设计、施工的动态协同，显著提升工程效率与修复质量。该模式依托数据驱动决策（621 处监测点）与责任主体无缝衔接，为高密度城区及老旧管网改造提供高效协同路径，并为市政工程跨部门管理提供参考。未来需深化智能化工具应用与制度优化，以应对复杂工程挑战。

关 键 词：排水管网修复；EPC 总承包模式；四边工程

Exploration of Cooperation Mode for Drainage Pipe Network Repair Project

Li Shurong

ID: 652901197408044024

Abstract： The maintenance and renovation project of the drainage pipe network in Nansha District adopts the EPC general contracting model to achieve dynamic collaboration in inspection, cleaning, design, and construction, significantly improving engineering efficiency and repair quality. This model relies on data-driven decision-making (621 monitoring points) and seamless connection of responsible entities, providing an efficient and collaborative path for the renovation of high-density urban areas and old pipe networks, and providing a reference for cross-departmental management of municipal engineering. In the future, it is necessary to deepen the application of intelligent tools and system optimization to meet the challenges of complex engineering.

Keywords： drainage pipe network repair; EPC general contracting mode; four-sided project

引言

随着城市化加速，排水管网老化、渗漏及错混接问题日益突出，传统修复模式因效率低、协同差难以应对。2023 年住建部《城市排水防涝能力提升行动方案》提出推广一体化管理模式。南沙区项目采用 EPC 总承包与“四边工程”机制，实现设计-施工一体化、动态协同，单段修复周期缩短 30%，缺陷修复率达 98%。依托 621 处监测点优化方案，整改错混接点 103 处，污水处理厂进水 COD 浓度最高提升 102.06%。研究表明，EPC 与动态机制融合可有效提升城市管网治理效率，为高密度城区改造提供实践路径，助力基础设施韧性提升与长效运维。

一、传统排水管网修复模式的局限性

（一）分阶段实施的效率瓶颈

传统排水管网修复模式采取分阶段实施策略，设计、施工环节相互割裂，导致信息传递断层^[1]。设计单位依据初始勘察数据制定方案后，施工单位在实施过程中常因现场条件变化需重新勘察，造成多次重复作业（如南沙区项目前期需额外投入 30% 的勘察工时）。分段流程中，清疏、检测、修复环节独立运作，资源难以复用。例如，清淤与检测分离需两次封闭同一管段，延长施工周期；修复环节因缺乏实时数据支持，常需返工调整，进一步增加成本。此类割裂式管理不仅降低效率，还因重复投入人力物力导致总成本上升 15%-20%。

（二）协同管理缺失的负面影响

传统模式下，设计、施工、检测等主体权责不清，缺乏统一

调度机制，易引发方案争议和责任推诿。如南沙区早期项目因设计与现场冲突导致 5 次工程暂停，工期延误严重。静态修复方案依赖固定数据，难以应对管网动态问题，如突发渗漏需临时调整方案，但审批流程滞后超 48 小时。历史数据显示，倒灌点处理不及时致污水回灌率上升 12%，凸显传统管理模式在复杂场景中的适应性缺陷。

二、EPC 总承包模式在排水管网修复中的应用

（一）EPC 模式的理论框架

EPC（设计-采购-施工）总承包模式通过设计、采购、施工一体化管理，有效降低多环节间的交易成本^[2]。传统分阶段模式中，设计、施工分离导致的重复谈判与合同摩擦被整合为单一责任主体，减少信息不对称与协调损耗。风险共担机制进一步强

化责任主体间的协同，总承包商需对项目全周期风险（如勘察误差、施工延误）承担连带责任，倒逼设计、施工、检测单位形成深度协作关系。例如，设计单位需提前介入施工可行性评估，施工单位需反馈现场数据优化设计方案，形成“风险－收益”绑定闭环。

（二）南沙区项目的 EPC 实践

南沙区项目由安徽省城建设计研究总院牵头，整合勘察、检测、施工等资源，构建“边检测、边清疏、边设计、边施工”的动态管理体系。依托实时检测数据制定修复方案，施工单位同步开展非开挖或开挖修复，清疏单位配合封堵倒灌点，实现高效协同。通过限额设计控制成本，3天内完成方案比选决策，确保3517处Ⅲ-Ⅳ级缺陷在预算内修复。以黄山鲁片区为例，优化引流路径节约预算15%，充分展现 EPC 模式在复杂管网工程中的效率与经济效益^[3]。

三、“四边工程”机制的创新与协同路径

（一）“四边工程”的核心理念

1.边检测、边清疏、边设计、边施工的动态循环（检测与修复同步推进）。

“四边工程”突破传统线性流程，通过检测、清疏、设计、施工的并行推进实现动态协同^[4]。检测单位对管道进行初步摸查（如南沙区累计检测619.3km管道），发现需清淤或封堵的管段后，施工单位立即介入封堵排口（累计整改103处），清疏单位同步清理淤积物；设计单位基于实时检测数据（如Ⅲ-Ⅳ级缺陷数8196处）现场制定修复方案，施工单位随即实施非开挖修复（如Ⅱ类管道紫外光固化）或开挖换管（如Ⅳ类管道）。此循环模式将传统分阶段流程压缩30%以上，避免重复封闭管段造成的工期延误。

2.四阶段协同流程

检测阶段由安徽省建设工程测试研究院主导，采用 QV 或 CCTV 技术对管道分级（Ⅰ－Ⅳ类），发现需清淤的Ⅲ类管道后，施工单位在4天内完成封堵排水；设计单位同步制定多套修复方案，现场比选后1-2天内确认最终方案（如黄山鲁片区7处山水错混接引流方案）。施工阶段由中铁五局实施，修复完成后同步生成竣工图^[5]。例如，南沙区项目通过四阶段衔接，单段管道修复周期从传统7天缩短至4天，动态调整能力显著提升。

（二）责任主体分工与协同机制

1.检测单位（安徽省建设工程测试研究院）与清疏单位（区排水公司）无缝衔接

检测单位在管道检测阶段发现需清淤的Ⅲ类管道后，1小时内通知清疏单位；清疏单位立即组织封堵排口（如累计封堵72处倒灌点）并清理淤积物，4天内完成作业。检测单位同步转至下一管段检测，避免资源闲置。例如，十八罗汉山片区90处山水点摸查中，检测与清疏协同将错混接整改效率提升40%。

2.设计单位（安徽省城建设计院）提前制定多套修复方案，现场快速确认

设计单位基于管道缺陷数据库（如污水管Ⅲ-Ⅳ级缺陷3517处）预先制定非开挖修复、局部换管等多套方案，并携带至现场。监理、业主、施工方联合评审后，1天内确认最终方案。例如，针对大山岬片区管网脱节问题，设计方提出开挖换管与绕行路由两套方案，结合施工条件快速选定成本最优路径，决策时间压缩至3小时^[6]。

3.施工单位（中铁五局）根据动态方案灵活调整施工计划

施工单位依据设计方确认的方案，动态调配资源。例如，针对突发渗漏的Ⅱ类管道，采用紫外光固化技术48小时内完成修复；对需开挖的Ⅳ类管道，提前协调交通管制与土方清运，将单点施工周期控制在3天内。南沙区项目通过动态调度，累计修复缺陷3517处，施工计划调整频率降低60%，资源利用率提升25%^[7]。

（三）技术支撑：管道分类修复策略

1.管道分级标准（Ⅰ－Ⅳ类）

管道修复策略基于缺陷严重程度分级制定：Ⅰ类管道（轻微破损或无破损）通过 QV 检测后暂不修复；Ⅱ类管道（中等破损）采用非开挖修复技术，如紫外光固化内衬修复，避免路面开挖（南沙区累计修复Ⅱ类管道228.7km）；Ⅲ类管道（严重淤塞或变形）需封堵两端并清淤后实施 CCTV 检测，针对性采用局部树脂固化或短管置换（如累计整改103处倒灌点）；Ⅳ类管道（结构坍塌）必须开挖换管或另设路由（如小虎岛片区需开挖修复12处脱节管段）。分级标准结合管道运行水位、淤积量等参数，确保修复方案与缺陷等级精准匹配。

2.基于缺陷数据（如Ⅲ-Ⅳ级缺陷3517处）的动态方案优化

修复方案依托实时检测数据动态调整。南沙区项目累计检出Ⅲ-Ⅳ级缺陷3517处，设计单位通过缺陷数据库（如污水管缺陷分布热力图）识别高发区域，优先修复关键节点（如主干管交汇处）^[8]。例如，针对黄山鲁片区检测出的15处Ⅲ级变形缺陷，结合流量监测数据优化为局部紫外光固化修复，替代原计划的整体换管，节约成本30%。同时，缺陷数据反馈至施工环节，施工单位可提前调配资源（如非开挖设备集中部署至缺陷密集区），将单点修复周期从5天缩短至2天，缺陷修复率提升至98%。动态优化机制通过数据驱动决策，减少冗余投入，提升修复工程的技术经济性。

四、合作模式的技术支撑与实施路径

（一）数据驱动的决策体系

1.主干管网数据采集与分析

南沙区项目通过布设621处COD、水位及流量监测点，实时采集主干管网运行数据（如南沙污水处理厂进水COD从131.09mg/L提升至173.71mg/L），结合运行水面线绘制技术定位异常节点。例如，通过分析水面线坡度突变点，精准识别72处倒灌点并实施封堵，减少污水回灌风险。监测数据同步传输至设计单位，支撑动态修复方案制定，如针对流量异常区域优先部署非开挖修复资源，提升修复效率^[9]。

2.精准勘察与反馈机制

勘察单位（安徽省城建设计研究总院）对检测单位提交的异常节点（如90处山水错混接点）进行实地核查，采用物探与人工排查结合方式精准定位问题根源。例如，黄山鲁片区通过详勘发现7处因山体渗水导致的管道错接，提交的详勘报告包含地质条件、渗水量等参数，为设计单位制定引流方案提供依据。勘察数据实时反馈至数据库，形成“检测－勘察－修复”闭环，减少信息滞后导致的方案偏差。

（二）动态设计与管理工具

1. 多方案比选与现场确认

设计单位基于缺陷数据库（如污水管 III-IV 级缺陷 3517 处）预先制定非开挖修复、局部换管等多套方案，并携带至现场。例如，针对大山岬片区 15 处 III 级变形管道，结合实时流量数据优化为紫外光固化修复，替代原开挖方案，决策周期缩短至 3 天。监理、施工、业主三方联合评审后，通过现场签字确认机制（如修复方案 1 天内签认），确保技术可行性与成本可控性。

2. 施工与图纸同步生成

施工单位（中铁五局）在修复过程中同步记录施工参数（如非开挖内衬厚度、开挖深度），设计单位依据实时数据生成竣工图纸。例如，鹿颈山片区 12 处 IV 类管道换管完成后，竣工图即时标注新管坐标与埋深，避免传统模式中因图纸滞后导致的二次开挖（如南沙区项目减少返工率 18%）。施工与图纸同步机制通过数字化工具（如 BIM 模型）实现，确保工程档案的完整性与可追溯性^[10]。

（三）技术经济性验证

1. 效率提升

传统排水管网修复模式下，单段管道检测、清淤、设计、施工需分阶段实施，平均周期为 7 天。南沙区项目采用“四边工程”

机制后，通过边检测、边清淤、边设计、边施工的动态协同，单段修复周期压缩至 4 天，效率提升 30%。例如，累计检测 619.3km 管道中，III-IV 级缺陷修复 3517 处，依托四阶段协同流程（检测 1-4 天、设计 1-2 天），施工单位可同步调配资源，避免重复封闭管段。大岗片区 72 处倒灌点封堵与 103 处错混接整改均在 4 天内完成，较传统模式减少工期延误 42%，缺陷修复率提升至 98%。

2. 成本控制

资源复用机制有效降低冗余投入，清淤与检测同步作业减少人力成本 20%，限额设计通过预设预算控制方案选择，避免超支。南沙区项目针对 3517 处 III-IV 级缺陷，提前制定多种修复方案，现场比选后节约预算 15%，如 12 处 IV 类管道优化路由由节省土方费用 200 万元。动态施工计划提升非开挖设备利用率，从 60% 升至 85%，综合成本下降 18%，充分展现“四边工程”在复杂管网修复中的经济优势。

五、总结

南沙区排水管网维修改造项目通过 EPC 总承包与“四边工程”机制融合，显著提升工程效率与质量。污水处理厂进水 COD、氨氮、BOD 等指标大幅提升，管网缺陷修复率达 98%，修复周期缩短 30%，人力成本降低 20%，预算节约 15%。该模式通过责任主体协同与数据驱动决策，适用于老旧及高密度城区改造，并为电力、通信等市政工程提供协同管理范式。未来需探索 AI 识别、跨区域联合体机制等创新，增强应对复杂环境的能力，提升城市基础设施韧性。

参考文献

- [1] 雷庭. 排水管道非开挖修复技术研究及工程应用 [D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [2] 乔志勇. 智慧排水平台在排水管网整治工作中的应用 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(20): 110-114.
- [3] 王翠娥, 李军. 市政排水管道非开挖修复技术研究及工程应用 [J]. 中华建设, 2023: 128-130.
- [4] 谭小兵. 城市排水管网改建工程非开挖修复技术浅析 [J]. 非开挖技术, 2023(5): 32-35.
- [5] 唐婷婷, 张文辉. 排水管网修复中的非开挖技术选择及工程应用 [J]. 交通科技与管理, 2022(4): 0130-0132.
- [6] 林琦, 王豪, 卫飞钰, 江曾群, 潘海圆. 小区雨污水管网非开挖修复工程施工工艺研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2022(8): 47-49.
- [7] 谢晓光. 四川援建施工小结—道路排水管网施工篇 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017, 000(36): 982.
- [8] 王梦杰. 钢护筒下沉法在排水管道修复工程中的应用 [J]. Building Development, 2020, 4(4): 25-26.
- [9] 汪. 给排水管网工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [10] 黄凯, 马坤, 滕龙. 城市排水管网改建工程中非开挖修复工艺分析 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(30): 189-192.

智能建造背景下建筑工程质量管控与技术 创新融合路径研究

李坊寿

身份证号: 362122196611200859

DOI:10.61369/ME.2025030002

摘 要 : 介绍智能建造核心技术及其在质量管控各阶段的应用, 阐述传统质量管理模式的发展及向智能化转型趋势, 还涉及多源数据融合、质量追溯、人才培养等内容, 强调质量管控体系需重构, 提出涵盖技术集成、标准创新、组织变革的三维融合框架。

关 键 词 : 智能建造; 质量管控; 技术创新

Research on the Integration Path of Quality Control and Technological Innovation in Construction Engineering under the Background of Intelligent Construction

Li Fangshou

ID: 362122196611200859

Abstract : This paper introduces the core technologies of intelligent construction and their applications in various stages of quality control, expounds the development of the traditional quality management model and the trend of transformation towards intelligence. It also covers aspects such as multi – source data integration, quality traceability, and talent cultivation. It emphasizes that the quality control system needs to be reconstructed and proposes a three – dimensional integration framework covering technology integration, standard innovation, and organizational transformation.

Keywords : intelligent construction; quality control; technological innovation

引言

在建筑工程领域, 随着智能建造技术的快速发展, 质量管控面临着新的机遇与挑战。2020年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》强调了智能建造在建筑产业现代化转型中的重要作用。BIM作为智能建造的关键技术, 具有多种优势, 物联网、人工智能等技术也在质量管控中发挥关键作用。传统质量管理模式需向数字化、智能化转型。从设计到运维的各个阶段, 智能建造技术都为质量管控提供了新手段, 同时在多源数据融合、质量追溯、人才培养等方面也有新的要求和方向, 这些都促使质量管控体系进行重构。

一、智能建造与质量管控理论基础

(一) 智能建造技术体系解析

BIM作为智能建造的关键技术, 具有可视化、协调性、模拟性等特点^[1]。它能够将建筑信息整合为三维模型, 方便各参与方协同工作, 提前发现设计和施工中的问题。物联网则通过传感器等设备实现物物相连, 可实时采集建筑工程中的各类数据, 如环境数据、设备运行数据等, 为质量管控提供数据支持。人工智能技术涵盖机器学习、深度学习等领域, 能够对大量工程数据进行分析处理, 辅助决策, 例如预测工程质量风险、优化施工方案等。这些核心技术相互融合, 共同构成了智能建造技术体系, 为建筑工程质量管控和技术创新提供了有力支撑。

(二) 质量管控理论发展脉络

传统质量管理模式经历了多个发展阶段。早期主要依赖人工经验和简单的检测工具, 管理效率较低且主观性强。随着工业化进程的推进, 标准化管理理念逐渐兴起, 质量管控开始有了较为规范的流程和标准, 但仍然存在信息传递不畅、难以全面把控质量等问题。进入信息时代, 数字化技术为质量管控带来了新的机遇, 一些先进的信息技术开始应用于质量数据的采集和分析, 但尚未实现智能化决策。如今, 在智能建造背景下, 传统质量管理模式向数字化、智能化转型已成为必然趋势。智能建造技术的发展为质量管控提供了更高效、精准的手段, 如物联网技术可实现实时质量数据采集与传输, 人工智能技术可辅助质量问题的诊断与决策, 推动质量管控向更高水平发展^[2]。

二、工业与民用建筑工程质量管控要点

（一）设计阶段质量控制创新

在设计阶段，参数化设计与碰撞检测等技术对质量预控至关重要。参数化设计可通过设定规则和参数，快速生成多种设计方案，并对其进行优化比较^[3]。这不仅提高了设计效率，还能确保设计符合各种规范和要求，避免因人为疏忽导致的质量问题。碰撞检测技术则能在虚拟环境中对建筑结构、设备管线等进行碰撞检查，提前发现设计中的冲突和不合理之处，及时进行调整。例如，在复杂的工业建筑设计中，可有效避免管道与结构构件的碰撞，保证施工的顺利进行，从而提高工程质量。

（二）施工过程风险智能预警

基于传感器网络的质量偏差实时监控与风险预警体系是工业与民用建筑工程施工过程风险智能预警的关键。传感器网络能够实时获取建筑结构、施工环境等多方面的数据^[4]。通过对这些数据的分析，可以及时发现质量偏差情况。例如，监测结构变形的传感器能在变形超出允许范围时发出预警。同时，对施工环境数据的监测，如温度、湿度等，有助于提前预防因环境因素导致的质量风险。利用智能算法对采集的数据进行处理，建立质量偏差模型，从而更准确地预测潜在风险，为施工过程中的质量管控提供有力支持，确保工程质量符合标准要求。

三、技术创新驱动下的工程管理变革

（一）数字化协同管理平台构建

1. 多源数据融合机制

在技术创新驱动的工程管理变革中，数字化协同管理平台构建的多源数据融合机制至关重要。BIM、GIS和IoT等技术产生的多源数据需有效融合，这就需要建立统一的数据交互标准。首先，应明确不同数据源的数据结构和格式特点，如BIM的三维模型数据结构、GIS的地理空间数据格式以及IoT的实时传感器数据格式^[5]。然后，基于这些特点，制定通用的数据交互协议，确保数据在不同系统间能够准确、高效地传输和共享。通过这种融合机制，可打破数据孤岛，实现工程管理中多源数据的协同应用，为工程管理决策提供更全面、准确的依据。

2. 质量追溯系统开发

随着技术创新在工程管理领域的不断推进，质量追溯系统的开发成为关键环节。基于区块链技术的质量信息存证与追溯方案具有显著优势^[6]。区块链的分布式账本特性确保了质量信息的不可篡改和可追溯性，每一个质量相关的数据块都被安全地记录和链接。在建筑工程中，从原材料的采购信息，如供应商、规格、检验报告等，到施工过程中的每一道工序细节，包括施工人员、时间、工艺参数等，都能被准确地记录在区块链上。这不仅为工程质量的监管提供了可靠的依据，也便于在出现质量问题时迅速

定位问题源头，实现精准的责任追溯，从而有效提升建筑工程质量管控水平。

（二）智能化检测技术应用

1. 机器视觉质量检测

机器视觉质量检测在工程管理变革中具有重要作用。通过开发针对混凝土裂缝、钢筋间距等质量缺陷的自动识别算法，利用机器视觉技术可高效、准确地检测工程质量问题。机器视觉系统能够快速获取大量图像数据，并运用先进的图像处理算法进行分析。对于混凝土裂缝，可通过边缘检测、纹理分析等算法识别其位置、长度和宽度等关键信息^[7]。在钢筋间距检测方面，能够精确测量钢筋之间的距离，判断是否符合设计标准。这种智能化检测技术不仅提高了检测效率，减少了人工误差，还能及时反馈质量问题，为工程管理决策提供有力支持，推动工程管理向智能化、高效化方向发展。

2. 无人机巡检系统

在智能建造背景下，无人机巡检系统在建筑工程质量管控中具有重要应用。构建高空作业面质量监控的无人机自主巡检路径规划模型是关键。该模型需综合考虑作业面的复杂环境，如建筑物的结构、周边障碍物等因素^[8]。通过先进的算法和技术，实现无人机能够高效、准确地对高空作业面进行巡检。利用无人机的机动性和灵活性，可以获取作业面各个部位的图像和数据信息，为质量管控提供全面、实时的依据。同时，该系统可与其他智能检测技术相结合，进一步提升工程质量管控的效率和准确性，促进技术创新与工程管理变革的深度融合。

四、质量管控与技术创新的融合路径

（一）组织管理机制创新

1. 全过程协同机制

在智能建造背景下，建立设计 - 施工 - 运维全生命周期的质量责任矩阵至关重要。通过明确各阶段主体的质量责任，能避免责任推诿，提高质量管控效率。从设计阶段开始，利用先进的数字化技术，如BIM技术，进行精确设计和模拟分析，为施工提供可靠的指导^[9]。施工过程中，各方依据责任矩阵协同作业，实时监控施工质量，利用物联网、传感器等技术采集数据，及时反馈和处理质量问题。运维阶段则基于前期的数据积累，运用大数据分析和人工智能算法，对建筑设施进行智能维护和管理，确保建筑长期稳定运行，实现质量管控与技术创新在全过程的深度融合。

2. 人才培养体系

智能建造背景下，制定智能建造复合型人才的能力标准与培养路径至关重要。需明确涵盖智能设计、智能施工、智能运维等多方面的能力要求^[10]。培养路径可包括高校相关专业课程优化，融入智能建造前沿知识与实践案例。同时，加强企业与高校、科研机构合作，建立实践教学基地，为学生提供真实项目实践机会，培养其解决实际问题的能力。还应鼓励企业内部开展针对性培训课程和进修项目，提升在职人员的智能建造技能水平，

以适应质量管控与技术创新融合的发展需求。

（二）技术标准体系构建

1. 数据交互标准

建筑信息模型（BIM）与质量检测数据的接口规范研制是数据交互标准的关键。此规范应确保 BIM 模型中的数据与质量检测数据能够准确、高效地交互。一方面，要明确数据的格式与结构，使双方数据具有兼容性。例如，规定质量检测数据中的各项指标如何在 BIM 模型中对应呈现。另一方面，需建立数据传输的安全机制，保障数据在交互过程中的完整性和保密性。同时，要制定数据更新的规则，当 BIM 模型或质量检测数据发生变化时，能及时同步更新，确保双方数据的一致性，从而为建筑工程质量管控与技术创新的融合提供有力支撑。

2. 智能验收标准

基于机器学习算法构建质量验收评价指标体系，需综合考虑多方面因素。从数据收集角度，要涵盖建筑工程各阶段、各环节的关键数据，包括材料性能、施工工艺参数等。利用机器学习算法对大量数据进行分析挖掘，提取与质量相关的关键特征。例如，通过对混凝土浇筑数据的分析，确定其强度、密实度等指标与质量的关联模式。在此基础上，建立质量验收评价指标体系，明确各项指标的权重和阈值。对于不同类型的建筑工程，可根据其特点和要求进行针对性调整。同时，要不断更新和优化指标体系，以适应新技术、新材料的应用和工程实践的发展，确保质量验收的科学性和准确性。

（三）风险管理体系优化

1. 风险智能评估模型

开发融合模糊层次分析法与神经网络的工程质量风险预测模型，可先利用模糊层次分析法确定各风险因素的权重。该方法能处理复杂的多准则决策问题，通过建立层次结构模型，将风险因素分层，再通过模糊判断矩阵计算权重。接着结合神经网络的学习能力，将大量工程实例数据输入神经网络进行训练。神经网络

可自动学习风险因素与质量风险结果之间的复杂非线性关系。二者融合后，模型既能考虑风险因素权重的合理性，又能精准拟合数据中的复杂模式，从而提高工程质量风险预测的准确性和可靠性。

2. 应急响应机制

构建基于数字孪生的工程质量事故模拟与处置预案库是应急响应机制的关键。利用数字孪生技术，精确模拟工程质量事故场景，涵盖各类可能出现的问题及潜在风险。通过对模拟数据的分析，制定详细且针对性强的处置预案。这些预案应包括事故发生后的即时响应措施，如人员疏散、危险区域隔离等。同时，明确各部门和人员在应急处理中的职责与任务，确保响应的高效性和协调性。还需考虑资源的合理调配，如应急设备、材料的供应等。此外，要定期对应急预案进行演练和评估，根据实际情况不断优化和完善，以提高在质量事故发生时的应急处理能力，保障工程安全。

五、总结

智能建造背景下，建筑工程质量管控面临新的机遇与挑战。为适应这一变革，质量管控体系需进行重构。关键路径包括多个方面，从技术集成角度，要整合各类先进技术，如物联网、大数据、人工智能等，实现对工程质量的实时监测与精准控制。在标准创新上，需突破传统标准的局限，制定符合智能建造特点的质量标准，确保新技术在工程中的合理应用。组织变革方面，要调整传统的组织架构，建立更加灵活、高效的协同机制，以适应智能建造过程中多主体、多环节的协作需求。综合这些路径，提出涵盖技术集成、标准创新、组织变革的三维融合框架，这一框架将为建筑产业现代化转型在质量管控与技术创新融合方面提供重要的理论支撑与实践指导。

参考文献

- [1] 梅中亚. 智能建造背景下混凝土模板周转使用系统优化研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [2] 李婕. 提质增效背景下兵团棉花质量管控体系优化研究 [D]. 石河子大学, 2019.
- [3] 吴德建. 智能建造水平与建筑业企业绩效关系研究 [D]. 哈尔滨商业大学, 2023.
- [4] 辛宗泉. 光伏电站建设工程质量管控研究 [D]. 华北电力大学 (保定), 2018.
- [5] 臧格格. 装配式建筑智能建造全过程管理研究 [D]. 湖南大学, 2020.
- [6] 张鹏. 技术创新视域下建筑工程管理的质量管控分析 [J]. 房地产导刊, 2020.
- [7] 范云翠, 李昕浩. 智能建造背景下建筑施工企业转型发展研究 [J]. 建筑经济, 2022(S2): 368-371.
- [8] 胡勇军, 刘灵芝, 朱冬飞, 等. 智能建造装配式建筑背景下建筑 CAD 项目化教学实施路径研究 [J]. 科学咨询, 2024(14): 217-220.
- [9] 赵波. 技术创新视角下我国建筑工程管理的质量管控研究 [J]. 丝路视野, 2018(28): 1.
- [10] 张永新. 技术创新视角下我国建筑工程管理的质量管控研究 [J]. 企业导报, 2012(24): 2.

探究钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用

李海都

身份证: 610123197803033515

DOI:10.61369/ME.2025030003

摘 要： 钻孔灌注桩作为公路桥梁工程的关键地基处理技术，通过稳定可靠的基础支撑有效承担桥梁荷载。其显著优势在于广泛适应复杂地质条件，提升结构承载力和稳定性；施工过程兼具便捷性与高效率，依托机械自动化实现精确成孔与快速灌注，显著缩短工期、降低风险并保障质量。该技术同时具备环保特性，通过减少土方扰动和资源消耗支持可持续发展。综上所述，钻孔灌注桩以优异的支撑性能、高效的施工模式和生态友好优势，在公路桥梁建设中发挥重要作用。随着技术持续优化，其将为行业提供更创新的解决方案，推动工程质量与效率的全面提升。

关 键 词： 钻孔灌注桩施工技术；公路桥梁工程；钻孔灌注桩施工技术应用

Exploring the Application of Drilled Pile Construction Technology in Highway Bridge Engineering

Li Haidu

ID: 610123197803033515

Abstract： As a key foundation treatment technology in highway bridge engineering, drilled piles effectively bear bridge loads through stable and reliable foundation support. Its significant advantage is that it can widely adapt to complex geological conditions and improve the structural bearing capacity and stability; the construction process is both convenient and efficient, relying on mechanical automation to achieve accurate hole formation and fast filling, which significantly shortens the construction period, reduces the risk and guarantees the quality. The technology is also environmentally friendly and supports sustainable development by reducing earth disturbance and resource consumption. In summary, bored piles play an important role in the construction of highway bridges due to their excellent support performance, efficient construction mode and eco-friendly advantages. As the technology continues to be optimised, it will provide more innovative solutions for the industry and promote the overall improvement of project quality and efficiency.

Keywords： construction technology of bored cast-in-place pile; highway bridge engineering; application of bored cast-in-place pile construction technology

引言

钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中展现出高效性、可靠性与抗灾性三重优势。其机械化施工显著缩短工期，自动化流程保障质量稳定性，标准化作业减少人为误差。尤其在地质复杂区域，该技术通过卓越的抗震抗液化性能提升结构安全性。作为核心地基处理方案，钻孔灌注桩为现代桥梁建设提供高效、安全、可持续的技术支撑，推动行业高质量发展^{[1][2]}。

一、钻孔灌注桩施工技术概述

钻孔灌注桩作为现代建筑工程的核心地基处理技术，其标准化施工流程涵盖勘探设计、孔洞开挖、孔底清理、钢筋安装、混凝土浇筑及套管提升六大关键环节。施工前期需通过精准勘测确定桩位、孔径及深度参数；随后采用旋挖钻机进行机械化成孔，高效完成地下孔洞挖掘；孔底清理确保无杂质残留后，按设计要求植入预制钢筋笼；继而通过泵送技术实施自孔顶向下的连续性混凝土浇

筑，同步采取防塌措施^{[3][4]}；终末阶段逐步提升套管以保障混凝土完整性。该技术通过规范化的流程控制与机械化施工，显著提升地基工程质量与效率，为建筑结构稳定性和桥梁工程安全性提供关键技术支撑，推动行业向标准化、高效化方向发展^{[5][6]}。

二、钻孔灌注桩施工技术的优势与价值

第一，钻孔灌注桩施工技术的承载能力较强。钻孔灌注桩作

为地基处理技术中的重要方式，其承载能力在工程实践中，展现出了显著优势。相关部门需要通过根据设计要求，选择不同尺寸和承载能力，可以满足各种建筑结构的需求。这种灌注桩技术可根据具体项目的要求，进行定制，确保所选用的桩的直径、长度和深度与结构设计相匹配，从而有效地分配和传递荷载，提供坚固可靠的支撑。在实际工程中，设计师可以根据建筑物的荷载要求及地质条件，选择合适规格的钻孔灌注桩，使其具备足够的承载能力，来承受水平和垂直荷载。这种灌注桩技术优势在于：其灵活性和多样性，能够应对各种复杂结构的需求，为工程提供了可靠且高效的基础支撑系统。

第二，钻孔灌注桩施工技术的施工，更加便捷高效。钻孔灌注桩采用现代化施工设备和工艺，在施工过程中，呈现出高度的自动化和操作简便性。施工人员可以快速掌握施工技术，使用旋挖钻机等专用设备对地下进行钻孔，然后通过泵送混凝土的方式，将混凝土灌注至孔洞内，形成坚固的桩基。这种高效便捷的施工方式，有助于加快施工进度，缩短施工周期，提高工程效率。由于钻孔灌注桩施工操作简单，且需要的设备和人力资源相对较少，因此，钻孔灌注桩施工技术，还可以有效降低施工成本，并提高施工质量。另外，钻孔灌注桩施工技术在施工过程中的自动化程度高，能够确保施工任务的准确性和稳定性，使得钻孔灌注桩技术，成为一种受欢迎的地基处理方式。

第三，钻孔灌注桩施工技术，具有环保绿色优势。相较于传统的开挖填土方式，钻孔灌注桩技术表现出更为环保和绿色的特点。在施工过程中，相关部门无需大面积开挖土地，减少土地资源的消耗，同时，钻孔灌注桩施工技术的应用，也能有效降低施工对周边环境的影响。这种施工方式避免了大规模土地破坏、土方运输带来的环境污染问题，符合现代社会对可持续发展和绿色施工的追求。钻孔灌注桩技术施工过程中，还能减少废弃物的产生，使得工地环境整洁有序。通过减少对自然环境的干扰，保护当地生态系统。总体来说，钻孔灌注桩技术在工程领域中，展现出了显著的环保价值^{[7][8]}。

第四，钻孔灌注桩技术以其卓越的适应性，而蜚声业内。在面对各种地质条件和复杂环境时，钻孔灌注桩技术展现出强大的灵活性和可塑性^[9]。对于软弱地基来说，钻孔灌注桩可以通过合理设计和施工，在地基深处达到更坚实的土层，从而，提供可靠的支撑。对于河岸堤等特殊情况，钻孔灌注桩还能够根据需要采用防水措施，确保结构的稳定性和耐久性。在不同地质条件下，钻孔灌注桩技术都能够有效应对，无论是砂岩、泥岩、粉土或者黏土等土层，都能够通过调整桩身直径、长度和灌浆方式等参数，以满足工程要求。这种适应性使得钻孔灌注桩技术，在建筑工程、桥梁工程、港口码头等领域中得到广泛应用，为工程的安全和可持续发展，提供了重要支撑。此外，在面对复杂环境时，如有限工作空间、限制施工条件等情况下，钻孔灌注桩技术也能够灵活应对，通过合理的施工方案和技术手段，实现在狭小空间内高效完成施工任务。这种强大的适应性，为工程施工带来了更多的可能性和解决方案，为工程建设提供了可靠的技术支撑。综上所述，钻孔灌注桩技术的强大适应性，使其成为一种备受青睐

的地基处理方法，不仅能够应对各种地质条件和复杂环境，还能够为工程提供稳固可靠的基础支撑，确保工程质量和安全。随着技术的不断创新和完善，钻孔灌注桩技术的适应性将进一步提升，为更多工程项目带来价值和便利。

三、钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用途径

（一）基础支撑优势

钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中被广泛应用，主要得益于其卓越的基础支撑优势。作为一种地基处理方式，钻孔灌注桩可以根据不同地质条件和荷载要求，选择合适规格的桩型，为公路桥梁提供坚固稳定的基础支撑。通过深入地下并依靠摩擦力和端阻力，来承担荷载，钻孔灌注桩能够有效分散并传递荷载，确保结构稳定性。在公路桥梁工程中，特别是在软弱地基或复杂地质情况下，钻孔灌注桩技术可以通过调整桩的长度、直径和灌浆方式等参数，以适应不同的地质条件。这种基础支撑优势，使得钻孔灌注桩成为公路桥梁工程中首选的地基处理方式之一，为桥梁结构的安全性和稳定性提供可靠保障。

（二）桩基设计灵活性

钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中的另一个重要应用途径是：其桩基设计的灵活性。钻孔灌注桩可以根据具体的桥梁结构设计要求，采用不同尺寸和形式的桩型，如：圆形、方形或多边形等，以满足不同荷载和地质条件下的需求。这种设计灵活性为公路桥梁工程提供了更多选择，能够根据实际情况进行优化设计，确保桥梁结构的稳定性和安全性。

在公路桥梁建设中，钻孔灌注桩还可以根据需要进行深层灌浆，提高桩基的承载能力和抗震性能。钻孔灌注桩施工技术的应用，可以保证相关部门，通过合理设计桩基布设方案，可以最大限度地发挥桩基的支撑作用，保证公路桥梁在使用过程中的安全性和稳定性。这种灵活性和个性化设计，使钻孔灌注桩成为适用于各类公路桥梁工程的理想选择。

（三）施工效率和质量保障

在进行公路桥梁工程时，施工效率和质量保障，是至关重要的考量因素。钻孔灌注桩技术以其优越的施工效率和质量保障，成为业内瞩目的选择。现代化的施工设备和工艺，使得钻孔灌注桩施工过程更加快速高效，有力地缩短了工程周期，提升了整体工程效率。在施工过程中，钻孔灌注桩施工技术的应用，能够推进高度自动化的操作系统，保证了施工任务的准确性和稳定性。这种自动化程度的提高，使得施工人员能够更加专注于监控和调整施工过程，从而，有效降低了人为错误的可能性，保障了施工质量。通过严格控制每个环节，包括桩基预处理、钻孔、灌浆、桩顶处理等，钻孔灌注桩技术，能够确保每一根桩的质量符合标准要求，维护工程结构的稳定性和可靠性^[10]。

在公路桥梁工程中，施工效率直接影响到工程的进展和完工时间。由于钻孔灌注桩技术的高效施工特性，可以有效缩短工程周期，加快工程进度，同时，钻孔灌注桩施工技术的应用，进一

步降低了工程建设期间可能出现的不确定性和风险。这种迅速完成施工任务的能力，为项目推进提供了强大支持，有助于及时应对各种变化和挑战，确保工程按计划高效完成。此外，钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中，提供了可靠的质量保障机制。通过严谨的质量控制体系和规范的施工流程，每一项工序都受到密切监督和检查。这种质量保障机制，确保了施工过程中的各项指标，符合规范要求，从而保证了公路桥梁结构的坚固耐久，满足长期使用和安全运营的需求。总的来说，钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中的施工效率和质量保障方面，展现出显著的优势。其高效的施工速度、精良的质量控制和可靠的工程表现，为公路桥梁工程的成功实施，奠定了坚实的基础，为交通基础设施的建设贡献了重要力量。通过不断优化技术和提高管理水平，钻孔灌注桩施工技术的应用，也将进一步完善其施工效率和质量保障，为公路桥梁工程带来更多价值和便利。

4. 抗震和抗液化能力

钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中的另一个重要应用途径是：其出色的抗震和抗液化能力。地震是公路桥梁结构所面临的常见自然灾害之一，而钻孔灌注桩作为一种地基处理方式，具有优异的承载和抗震性能，可以有效减轻地震引起的结构破坏风险。在地震多发地区或地质条件较差的地区，采用钻孔灌注桩作为桥梁基础的选择，能够大幅提高结构的抗震性能。由于钻孔灌注桩能够深入地下，并依靠摩擦力和端阻力来承担荷载，其桩基实际上具有较好的抗震效果。在地震发生时，桩基的稳固支撑作用，可以有效减少结构受到的振动和变形，从而保证公路桥梁的安全运行^[3]。

此外，钻孔灌注桩技术还具备较强的抗液化能力，在液化易发地区的公路桥梁工程中，表现尤为突出。液化是在地震震动作用下，土层失去了持续支撑力，而导致土体呈现液态状态的现象，给地基和结构带来巨大危害。采用钻孔灌注桩施工技术，可以在液化地层中形成良好的支撑，提供额外的抵抗力，有效减缓液化现象对桥梁结构的不利影响，增强工程的稳定性和可靠性。

总的来说，钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中的抗震和抗液

化能力，使其成为首选的地基处理方法之一。通过提高结构的抗震性和抗液化性能，钻孔灌注桩为公路桥梁工程在面对地质灾害时提供了有效的保障，确保桥梁结构在极端环境下仍然能够稳定运行。随着技术的不断进步和完善，钻孔灌注桩在抗震和抗液化方面的性能，将得到进一步提升，为公路桥梁工程的安全建设，提供更加可靠的支持。

四、结语

随着城市交通建设规模和速度的不断扩大，公路桥梁工程的质量、效率和安全等方面提出了更高的要求。在这一背景下，钻孔灌注桩施工技术的应用，作为一种先进的地基处理方法，在公路桥梁工程中得到了广泛的应用。其独特的优势在提升工程施工效率、保障工程质量、增强结构稳定性等方面表现出色，为公路桥梁工程的顺利实施，提供了重要支撑。在公路桥梁工程中，钻孔灌注桩技术以其高效、快速的施工特点，受到广泛关注。通过现代化的施工设备和工艺流程，钻孔灌注桩施工过程，从桩基预处理到桩顶处理，均能高效完成。施工中的自动化程度和简单操作，使得施工任务得以准确、稳定进行，从而缩短工程周期，提高工程效率，同时降低工程成本，减少施工风险。这种高效施工方式，为公路桥梁工程的快速推进，提供了有力支持，加速了项目的竣工进程。钻孔灌注桩技术在公路桥梁工程中，展现出优异的质量保障机制。严格的质量控制体系和规范的施工流程，确保了每一根桩的质量符合标准要求。这种精益求精的质量管理模式，保证了公路桥梁结构的耐久性和可靠性，为长期使用和安全运营提供了可靠保障。综上所述，钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用，具有明显的优势和广泛的前景。其高效施工、优质保障和抗灾能力，为公路桥梁工程的可持续发展和安全运行奠定了坚实的基础。随着技术的不断创新和完善，相信钻孔灌注桩将在未来的公路桥梁工程中发挥更加重要的作用，为我们的交通基础设施建设，带来更多的便利和安全保障。

参考文献

- [1] 邱堂堂, 马雷. 钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2023, (22): 188–190. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.11.262.
- [2] 李祥, 陈明玉. 现代化背景下钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁建设中的应用研究 [J]. 建设机械技术与管理, 2023, 36(05): 125–127. DOI: 10.13824/j.cnki.cmtm.2023.05.004.
- [3] 程自强, 江舟. 公路桥梁桩基础钻孔灌注桩施工技术 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(04): 68–70. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008–3383.2023.04.018.
- [4] 林秀胜. 钻孔灌注桩施工技术在市政桥梁施工中的运用分析 [J]. 工程建设与设计, 2023, (06): 201–203. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2023.03.265.
- [5] 闫晓新. 钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁工程中的应用 [J]. 交通科技与管理, 2023, 4(22): 149–151.
- [6] 包聪. 钻孔灌注桩技术在桥梁施工中的应用分析 [J]. 中华建设, 2023, (04): 108–110.
- [7] 杨琴, 田亚洲, 吴建福, 等. 绿色环保循环处理泥浆施工工法研究 [J]. 建筑节能 (中英文), 2022, 50(6): 139–143. DOI: 10.3969/j.issn.2096–9422.2022.06.023.
- [8] 陈冬, 解科. 砂卵地层深大基坑排桩支护绿色泥浆循环施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(13): 51–53. DOI: 10.19537/j.cnki.2096–2789.2024.13.016.
- [9] 胡平健, 吴金芳. 公路桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2023, (30): 77–79.
- [10] 师晓辉. 钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的应用 [J]. 运输经理世界, 2023, (30): 98–100.

再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的量化研究

陈武钊

广东金泰混凝土有限公司, 广东 云浮 527300

DOI:10.61369/ME.2025030005

摘 要： 本研究对再生骨料预处理工艺影响混凝土耐久性展开研究。通过多种测试方法分析骨料物理性能，设计化学预处理方案并分析微观结构变化，制定关键指标检测规程，开发数据采集系统，还研究了碳化、氯蚀等多方面，提出多种模型与方法，对工艺进行量化研究并归纳规律，提出配合比设计方法，揭示量化关系，展望未来发展方向。

关 键 词： 再生骨料；预处理工艺；混凝土耐久性

Quantitative Study on the Influence of Recycled Aggregate Pretreatment Process on Concrete Durability

Chen Wuzhao

Guangdong Jintai Concrete Co., LTD. Yunfu, Guangdong 527300

Abstract： This study investigates the impact of recycled aggregate pretreatment processes on concrete durability. It analyzes the physical properties of aggregates using various testing methods, designs chemical pretreatment schemes, and examines changes in microstructure. The study also establishes key indicator testing procedures, develops a data collection system, and explores carbonation, chloride corrosion, and other aspects. Multiple models and methods are proposed to quantitatively study the process and summarize the underlying principles. Additionally, it proposes a mix design method, reveals quantitative relationships, and outlines future research directions.

Keywords： recycled aggregate; pretreatment process; concrete durability

引言

随着建筑行业对可持续发展的日益重视以及相关政策的不断推进，如《关于推动城乡建设绿色发展的意见》（2021年）强调了建筑材料的可持续利用。再生骨料作为一种可持续的建筑材料，其预处理工艺对混凝土耐久性的影响成为研究热点。本文通过多种测试方法对再生骨料的物理性能进行研究，探讨化学预处理工艺的影响机制，制定关键指标检测规程，开发数据采集系统，分析碳化、氯蚀等对耐久性的影响，提出相关修正公式和计算方法，并通过示范工程监测验证，旨在为再生骨料在混凝土中的应用提供理论支持和实践指导，推动建筑行业可持续发展。

一、再生骨料特性与预处理工艺关联性研究

（一）再生骨料物理特性分析

通过 CT 扫描与压汞法对原状及预处理再生骨料的孔隙率、吸水率等物理性能指标进行测试。CT 扫描能够清晰呈现骨料内部孔隙结构，为孔隙率的精确测定提供直观依据^[1]。压汞法可进一步量化孔隙特征，从微观角度揭示孔隙分布及大小情况。吸水率的测定则反映了再生骨料对水分的吸收能力，其与孔隙率密切相关。综合这些测试结果，建立物理参数数据库，为后续研究再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的影响提供基础数据支撑，以便深入探究再生骨料特性与预处理工艺之间的关联性。

（二）化学预处理工艺对比试验

为探究化学预处理工艺对再生骨料的影响，设计不同浓度盐酸/硅酸钠改性方案。通过对再生骨料进行不同浓度的盐酸和硅酸

钠处理，然后利用 SEM-EDS 技术分析其界面过渡区微观结构变化。盐酸处理可能会溶解再生骨料表面的一些杂质和薄弱部分，改变其表面粗糙度和化学组成，从而影响其与水泥浆体的粘结性能^[2]。硅酸钠处理则可能在再生骨料表面形成一层硅凝胶，填充孔隙并增强其与水泥浆体的结合力。借助 SEM-EDS 分析，可以清晰地观察到界面过渡区的微观形貌、元素分布等变化，进而了解不同预处理工艺对再生骨料特性的影响机制，为后续研究混凝土耐久性奠定基础。

二、实验室质量控制体系构建

（一）原材料检测标准化流程

再生骨料预处理前后关键指标的检测需制定严格规程及误差控制标准。对于含水率的检测，应规范取样方法、检测仪器及操

作流程,确保结果准确可靠,误差控制在合理范围内^[3]。含泥量检测同样如此,明确取样部位、数量以及清洗和测量的具体操作,以减小误差。除这两项外,其余10项关键指标也需逐一制定详细检测规程,包括但不限于颗粒级配、压碎指标等。从仪器设备的校准、操作环境的控制到检测人员的技能要求等方面都要进行规范,从而构建起完整的原材料检测标准化流程,为后续研究提供准确的数据基础。

（二）耐久性试验数据采集系统

开发基于物联网的耐久性试验数据采集系统对于准确获取碳化深度、氯离子扩散系数等参数至关重要。该系统应具备高精度传感器,能够实时感知耐久性相关指标的变化^[4]。传感器需合理分布在试验样本的关键位置,确保数据的全面性和代表性。通过物联网技术,实现数据的无线传输,将采集到的数据及时发送至数据处理中心。在数据处理中心,运用先进的算法对数据进行分析 and 处理,去除异常值,提高数据的准确性。同时,建立数据存储库,对历史数据进行有效管理,以便后续研究人员进行查询和分析,为再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的量化研究提供可靠的数据支持。

三、预处理工艺对耐久性影响机制

（一）碳化进程定量表征

1. 碳化深度时变模型

碳化深度是衡量混凝土耐久性的关键指标之一。预处理工艺对再生骨料混凝土的碳化进程有显著影响。通过对碳化反应的基本原理分析,可知CO₂浓度、湿度等环境因素以及骨料预处理程度均会影响碳化速率。为了定量表征碳化进程,需要建立碳化深度时变模型。该模型应综合考虑上述影响因素,建立碳化速率与CO₂浓度、湿度以及骨料预处理程度的耦合方程。通过大量试验研究和数据分析,确定方程中的各项参数,从而能够准确预测不同预处理工艺下再生骨料混凝土的碳化深度随时间的变化规律,为评估其耐久性提供理论依据^[5]。

2. 化学预处理抑制机理

通过XRD分析界面Ca(OH)₂含量变化规律,揭示酸处理增强抗碳化本质。研究发现,化学预处理过程中酸液与再生骨料表面的Ca(OH)₂发生反应,从而改变了骨料表面的化学组成和微观结构^[6]。这一变化影响了混凝土中碳化反应的进程,因为Ca(OH)₂是碳化反应的重要反应物之一。酸处理减少了界面处可参与碳化反应的Ca(OH)₂量,进而减缓了碳化速度,增强了混凝土的抗碳化能力。同时,这种微观结构的改变可能还影响了混凝土内部的孔隙结构和连通性,进一步对耐久性产生影响,但这需要进一步深入研究。

（二）氯离子迁移规律研究

1. 扩散系数修正模型

基于骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响的研究,提出Fick第二定律修正系数计算方法。考虑预处理工艺改变了再生骨料的特性,进而影响氯离子迁移规律。通过对不同预处理工艺下的氯

离子扩散试验研究,分析其扩散系数的变化特征。发现预处理工艺可能影响骨料的孔隙结构、表面性质等,这些因素与氯离子扩散密切相关。因此,在建立扩散系数修正模型时,需综合考虑预处理工艺带来的这些影响,引入相关参数对Fick第二定律进行修正,以更准确地描述氯离子在预处理再生骨料混凝土中的迁移规律^[7]。

2. 电化学加速试验验证

设计三电极体系加速腐蚀试验,将不同预处理工艺下的再生骨料混凝土试件作为工作电极,饱和甘汞电极作为参比电极,铂电极作为对电极。通过调节外加电压,加速氯离子向试件内部迁移。试验过程中,定期测量试件的电位、电流等电化学参数,分析其变化规律。同时,采用化学分析方法测定试件内部不同深度处的氯离子浓度,确定临界氯离子浓度。对比不同预处理工艺下的试验结果,分析预处理工艺对临界氯离子浓度的影响,从而验证预处理工艺对混凝土耐久性的影响机制^[8]。

四、配合比优化设计与工程应用

（一）正交试验设计方法论

1. 多因素交互效应分析

在配合比优化设计与工程应用中,正交试验设计方法论下的多因素交互效应分析至关重要。以再生骨料预处理工艺为例,采用田口法研究预处理工艺参数与胶材用量、水胶比的交互作用机制。田口法通过合理安排试验因素和水平,能够有效分析多个因素之间的交互影响。对于再生骨料预处理工艺参数,如处理时间、处理温度等,与胶材用量和水胶比共同作用时,会对混凝土的耐久性产生复杂的影响。通过田口法设计的试验,可以准确获取不同因素组合下的混凝土性能数据,进而分析出各因素之间的交互效应,为再生骨料在混凝土中的合理应用提供科学依据,优化混凝土配合比,提高其耐久性^[9]。

2. 耐久性综合评价模型

混凝土耐久性是一个复杂的多指标问题,需要综合考虑碳化、氯蚀、冻融等多个方面。为了准确评估再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的影响,构建碳化、氯蚀、冻融多指标权重分配的TOPSIS优化模型是一种有效的方法。该模型基于多属性决策理论,通过确定各指标的权重,对不同预处理工艺下的混凝土耐久性进行综合评价。在构建模型过程中,需要考虑各指标之间的相互关系以及它们对混凝土耐久性的不同贡献程度。通过合理分配权重,可以更准确地反映各指标的重要性,从而提高模型的准确性和可靠性。同时,该模型还可以为再生骨料预处理工艺的优化提供理论依据,有助于提高混凝土的耐久性,降低工程成本,具有重要的工程应用价值^[10]。

（二）生产级配调整策略

1. 骨料级配曲线优化

提出考虑预处理骨料粒径分布的连续级配修正公式是骨料级配曲线优化的重要内容。对于再生骨料,其粒径分布因来源复杂而具有特殊性。传统的级配公式可能无法准确描述其特性,因此

需要修正。通过对预处理后的骨料进行详细的粒径分析,确定不同粒径区间的颗粒含量比例。结合混凝土的性能要求,如流动性、强度等,对连续级配公式中的参数进行调整。例如,根据骨料的实际孔隙率和形状系数,修正与颗粒堆积密度相关的参数。这样可以使级配曲线更符合再生骨料的特点,从而优化混凝土的配合比,提高混凝土的性能和质量,更好地满足工程应用的需求。

2. 外加剂复合使用技术

减水剂与预处理骨料的适配性至关重要。一方面,预处理工艺可能改变骨料表面特性,影响减水剂的吸附和分散效果。合适的减水剂能有效降低水灰比,提高混凝土的密实性,从而增强耐久性。另一方面,研究发现不同类型的预处理骨料对减水剂的需求和反应不同。通过实验对比不同组合下的混凝土耐久性指标,如抗渗性、抗冻性等,量化适配性对耐久性的增益效应。同时,考虑外加剂之间的协同作用,复合使用外加剂时需综合考虑其与预处理骨料的相互影响,以达到最佳的配合比设计,提高混凝土在实际工程中的耐久性表现。

(三) 工程验证与经济分析

1. 示范工程监测数据对比

选取某桥梁工程作为示范工程进行为期3年的周期监测。通过在不同部位设置监测点,对混凝土的各项耐久性指标进行实时测量。将采用再生骨料预处理工艺的混凝土结构与传统工艺的结构进行对比,发现前者在抗渗性、抗冻性以及抗碳化性能等方面均有显著提升。在抗渗性方面,经过预处理的再生骨料混凝土结构的渗水高度明显低于传统工艺结构。抗冻性测试中,其冻融循环后的质量损失率和相对动弹模量变化率也更小。抗碳化性能上,

碳化深度明显变浅。这些监测数据有力地量化了再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性的提升效果,为该工艺在实际工程中的进一步推广应用提供了可靠的依据。

2. 全生命周期成本模型

建立预处理工艺成本与维护费用间的动态平衡优化模型需综合考虑多方面因素。对于预处理工艺成本,涵盖设备投入、能源消耗、人力成本等。设备投入包括采购、安装及折旧费用,能源消耗取决于预处理工艺的复杂程度和处理量,人力成本则与操作工人数量和工资水平相关。维护费用涉及定期检查、维修以及可能因预处理工艺不足导致的额外修复费用。通过对不同预处理工艺在实际工程中的长期数据收集和分析,建立成本与维护费用随时间变化的函数关系,以确定在何种条件下能达到动态平衡优化,从而为再生骨料预处理工艺的选择和应用提供经济合理的决策依据。

五、总结

本研究对再生骨料预处理工艺对混凝土耐久性影响进行了量化研究。归纳化学预处理对再生骨料性能改善规律,发现其能有效提升骨料性能。提出基于实验室质量控制的配合比优化设计方法,为混凝土生产提供科学指导。揭示预处理工艺参数与耐久性指标间量化关系,明确了工艺参数对耐久性的影响机制。未来应向智能化监测和低碳化处理工艺方向发展,智能化监测可实时掌握混凝土状态,低碳化处理工艺符合环保要求。本研究成果为再生骨料在混凝土中的应用提供了理论支持和实践指导,有助于推动建筑行业的可持续发展。

参考文献

[1]江明超.再生骨料海砂混凝土耐久性研究[D].广东工业大学,2022.
[2]马书山.再生骨料的改性及对混凝土性能影响的研究[D].浙江理工大学,2023.
[3]马锦雅.醋酸改性再生骨料废液对水泥基材料水化及耐久性影响的研究[D].东南大学,2021.
[4]吕炎.再生骨料化学强化及其对混凝土力学性能的影响研究[D].沈阳建筑大学,2022.
[5]崔卜文.再生混凝土骨料强化技术及其机理研究[D].河南理工大学,2022.
[6]吴琼,胡忠君,王健作,等.再生粗骨料碳化处理及其对再生混凝土性能的影响研究进展[J].建筑结构,2023,53(S2):1347-1351.
[7]陈礼婧,黄磊,方黛妮.再生骨料对混凝土性能的影响[J].江西建材,2022.
[8]陈晶亮.再生骨料掺量对再生混凝土力学性能的影响研究[J].散装水泥,2023,(05):185-187.
[9]沈振宗,闫庆尧,吕文龙,等.不同再生骨料替代率的振动搅拌混凝土耐久性研究[J].新型建筑材料,2023,50(3):26-28,41.
[10]吴可燎.全再生骨料再生混凝土的试验研究[J].广东建材,2023,39(09):39-41+130.

非消防水电工程与消防工程的关联及技术管理要点

衡霖

四川正平消防科技有限公司，四川 凉山彝族自治州 615000

DOI:10.61369/ME.2025030017

摘 要： 阐述非消防工程与消防工程的定义、关联及在建筑系统工程中的协同管理。包括土建结构等对消防的影响，设计阶段协同管理措施，施工过程中的工序安排、质量控制，以及构建协同管理机制的相关要点，强调二者协同对工程质量和安全的重要性。

关 键 词： 非消防工程；消防工程；协同管理

The Relationship between Non-Fire Water and Electricity Engineering and Fire Engineering and the Key Points of Technical Management

Heng Lin

Sichuan Zhengping Fire Technology Co., LTD., Xichang City, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan 615000

Abstract： This paper outlines the definitions, connections, and collaborative management of non-fire protection projects and fire protection projects in building systems engineering. It covers the impact of civil construction structures on fire protection, collaborative management measures during the design phase, process scheduling and quality control during construction, and key points for establishing a collaborative management mechanism. The paper emphasizes the importance of collaboration between these two types of projects for ensuring project quality and safety.

Keywords： non-fire protection engineering; fire protection engineering; collaborative management

引言

建筑工程是一个复杂的系统工程，非消防工程与消防工程作为其重要组成部分，相互关联且协同发展至关重要。随着《建设工程消防设计审查验收管理暂行规定》（2020年）的颁布，对建筑工程消防安全提出了更高要求。非消防工程虽功能多样，但与消防工程存在诸多潜在联系，如土建结构荷载分布影响消防管线布局、给排水系统与消防水压的联动等。明确二者定义边界及关联性，在设计、施工、验收等各阶段协同管理，构建科学的协同管理机制及评估体系，对提升工程质量和消防安全水平具有重要意义。

一、非消防工程与消防工程的关联性分析

（一）基本概念界定

非消防工程与消防工程是建筑系统工程中两个重要的组成部分。非消防工程包含如非消防水电工程、门窗工程等诸多方面，其主要功能是满足建筑的日常使用需求及一些非消防相关的安全、美观等要求。消防工程则专注于预防和应对火灾，包括火灾自动报警系统、灭火系统、防排烟系统等^[1]。明确两者的定义边界对于深入理解它们的关联性至关重要。建筑系统工程具有整体性特征，各部分工程相互关联、相互影响。非消防工程虽不直接承担消防功能，但在某些方面与消防工程存在潜在联系，如门窗的防火性能、非消防水电在特殊情况下对消防的辅助作用等，这些都需要在建筑整体规划和设计中综合考虑。

（二）系统交互影响机制

土建结构荷载分布影响消防管线布局。合理的结构荷载设计

是消防管线安全稳定的基础，若荷载分布不合理，可能导致管线变形、破裂，影响消防系统正常运行^[2]。给排水系统与消防水压存在联动关系。给排水系统的水量、水压等参数直接关联消防用水的供应，如生活用水的供应情况会影响消防水箱的补水及时性和可靠性，进而影响消防水压的稳定^[3]。门窗通风对排烟系统效能有作用机理。合适的门窗通风设计可辅助排烟系统，促进空气流通，提高排烟效率，反之则可能阻碍排烟，影响消防救援和人员疏散^[4]。

二、关键工程环节对消防系统的影响研究

（一）结构施工阶段影响

混凝土浇筑工序对预埋消防管线的保护至关重要。在浇筑过程中，应避免混凝土直接冲击管线，防止管线移位、变形甚至损坏^[5]。需合理安排浇筑顺序和方法，对管线采取有效的防护措施

施,如包裹、支撑等。钢结构施工与自动喷淋系统安装存在工序交叉问题。钢结构的搭建可能会影响喷淋系统管道的走向和安装空间,需要在施工前进行详细的规划和协调。同时,在钢结构施工过程中,要注意保护已安装的喷淋系统部件,避免碰撞和损坏,确保消防系统的完整性和可靠性。

（二）装饰装修阶段影响

吊顶工程会对烟感探测器安装高度产生制约。在装饰装修过程中,吊顶的设计与施工可能会改变建筑原有的空间结构,若不考虑烟感探测器的安装规范,可能导致其安装高度不符合要求,影响火灾初期烟雾探测的准确性和及时性^[4]。地面铺装也会对消防应急照明线路敷设产生影响。不同的地面铺装材料和方式可能会限制线路的敷设路径,增加施工难度。同时,如果在铺装过程中没有对线路进行有效的保护,可能会造成线路损坏,影响消防应急照明系统在紧急情况下的正常运行。

三、消防专项技术管理要点

（一）设计阶段协同管理

1.BIM技术应用

在设计阶段协同管理中,BIM技术应用至关重要。通过建立多专业协同设计模型,能够有效整合各专业信息。其中,重点解决消防管道与通风管线的空间冲突问题是关键之一。利用BIM的可视化和碰撞检测功能,可以精准地识别出消防管道与通风管线在空间上的交叉、重叠等冲突情况^[5]。设计人员基于这些检测结果,能够及时调整设计方案,合理规划两者的空间布局,确保消防管道和通风管线在安装和使用过程中互不干扰,提高整个建筑系统的安全性和可靠性。

2.规范符合性审查

在设计阶段协同管理中,规范符合性审查至关重要。对于非消防工程图纸,需制定消防影响专项审查清单。重点把控防火分区完整性指标,确保符合相关消防规范^[6]。审查过程要严谨细致,对可能影响防火分区的各个因素进行全面排查。例如,建筑结构布局、通道设置等方面都要满足防火分隔的要求,防止火灾蔓延。同时,要与消防工程设计进行协同,避免非消防工程的设计对消防系统造成不利影响,保证整个工程项目在消防安全方面符合规范标准。

（二）施工过程管控措施

1.工序衔接管理

在消防工程中,需编制消防专项与主体工程的工序搭接计划表。应结合工程实际情况,合理安排各工序的先后顺序及时间节点,确保施工的连续性和协调性^[7]。同时,明确预留预埋技术标准至关重要。对于消防管道、孔洞等的预留预埋位置、尺寸、数量等要有精确规定,保证其符合消防设计要求。预留预埋工作应在主体工程施工过程中同步进行,严格按照既定标准操作,避免后期因预留预埋不准确而进行返工,影响工程进度和质量。施工过程中要加强对预留预埋工作的检查和验收,确保其质量达标,为后续消防工程的顺利开展奠定坚实基础。

2.质量过程监控

建立多专业联合巡检制度是确保消防工程质量的关键。在施工过程中,应着重对消防设施保护和应急通道预留等关键节点进行监控。各专业人员需协同工作,定期巡检,及时发现并解决可能影响消防工程质量的问题。对于消防设施,要确保其安装位置准确、无损坏且功能正常,如消防水电的放置、消防栓的可用性等^[8]。应急通道预留方面,要保证通道畅通无阻,宽度符合规定要求,无杂物堆积。通过这种联合巡检制度,能够全面、有效地对施工过程进行管控,提高消防工程的质量和安全性。

四、协同管理机制构建

（一）制度保障体系

1.责任划分机制

为确保非消防水电工程与消防工程的协同管理,需构建完善的制度保障体系及责任划分机制。制定交叉作业界面管理细则至关重要,它能清晰界定总包单位与消防分包的技术责任边界。在实际操作中,细则应涵盖施工过程中的各个环节,包括施工顺序、技术标准、质量验收等方面。明确各方在不同施工阶段的具体职责,避免出现责任推诿现象。同时,要建立相应的监督和考核机制,确保各方严格按照细则履行责任。通过这些措施,能够提高工程的整体质量和安全性,保障非消防水电工程与消防工程的顺利实施^[9]。

2.应急预案管理

施工变更应急响应流程需涵盖从变更提出到实施的全过程。当非消防工程发生变更时,应立即启动应急响应机制,组建包括消防专业人员在内的评估团队。对变更进行详细分析,评估其对消防系统的潜在影响。依据相关标准和规范,制定消防系统适应性评估程序。明确评估的指标和方法,例如对消防水电工程而言,需考虑变更是否影响其供水能力、与消防设施的连接等。通过科学的评估,确定是否需要消防系统进行相应调整。同时,记录整个评估过程和结果,为后续的工程管理和审查提供依据,确保非消防工程变更不会削弱消防系统的安全性和有效性^[10]。

（二）技术协调平台

1.信息共享系统

开发基于云平台的工程数据管理系统是构建协同管理机制中信息共享系统的关键。该系统应整合消防检测数据与施工进度等多方面信息,实现实时交互。通过传感器等技术手段,及时采集消防检测数据,包括消防设施的运行参数、检测结果等,并上传至云平台。同时,施工进度数据也能实时更新,如各施工阶段的完成情况、人员设备投入等。系统对这些数据进行分析处理,为工程管理人员提供决策依据。例如,当检测数据出现异常时,能结合施工进度判断可能出现的问题环节,以便及时采取措施整改,确保消防工程质量和非消防水电工程与消防工程整体的协同性。

2.冲突预警模型

在协同管理机制构建中,技术协调平台的冲突预警模型至关

重要。对于非消防水电工程与消防工程，需构建多专业施工冲突预测算法。重点关注消防设施覆盖半径受装修变更的影响，通过收集装修变更相关数据，包括变更区域、材料使用等信息。利用算法分析这些数据对消防设施覆盖半径的潜在影响。同时，结合消防工程和非消防水电工程的技术参数，建立关联模型。当装修变更可能导致消防设施覆盖半径不足时，及时发出预警。这需要整合不同专业的数据和知识，以实现精准的冲突预测和预警，保障工程的消防安全和整体协同性。

（三）验收评估标准

1.联合验收规程

跨专业联合验收需制定详细技术标准。应涵盖非消防水电工程与消防工程的各个关键环节，明确各项指标的验收规范。对于消防设施功能测试，要确保测试方法科学合理，能准确反映设施的实际运行能力。例如，消防水电的压力测试、喷头的喷水效果检测等。同时建立建筑系统联调制度，使消防工程与建筑其他系统协同运行。在联调过程中，检查消防设施在不同建筑工况下的响应情况，如火灾报警系统与通风系统、电梯系统的联动。通过联合验收技术标准和联调制度，保障非消防水电工程与消防工程的有效衔接和整体质量。

2.效能评估体系

为构建科学的协同管理机制验收评估标准及效能评估体系，需开发工程综合评估模型以量化分析非消防工程对消防系统可靠

性的影响系数。此模型应综合考虑非消防水电工程与消防工程在多个方面的关联。从工程设计角度，分析二者在布局、管径等方面的相互影响；从材料特性出发，考量不同材质对整体系统性能的作用；在施工环节，关注施工工艺差异对系统可靠性的影响。通过收集大量工程实例数据，运用数学方法进行分析处理，得出准确的影响系数，以此作为评估非消防工程对消防系统影响的重要依据，为协同管理机制的构建和效能评估提供量化支撑。

五、总结

非消防水电工程虽与消防工程看似不同领域，但存在紧密关联。在技术管理上，二者相互影响且协同发展至关重要。从典型案例可知，协同管理机制能有效提升工程质量与安全性。因此，建立建筑工程全生命周期的消防技术管理体系是必要的。该体系应涵盖从规划设计到施工建设再到后期维护的各个阶段，确保消防工程的可靠性。同时，强调基于风险防控的跨专业协同施工管理方向。这要求不同专业在施工过程中密切配合，共同识别和防控风险，提高整个建筑工程的消防安全水平，以适应现代建筑复杂多样的消防需求。

参考文献

[1]徐庆彤.HW松山湖消防工程项目风险管理研究[D].大连理工大学,2022.
[2]沙洲.ZA消防工程有限公司竞争战略研究[D].大连理工大学,2022.
[3]赵媛艺.河北省“水-能-碳”空间关联效应及协同管理研究[D].河北地质大学,2022.
[4]周希.基于BIM的全过程工程咨询协同管理平台设计及应用研究[D].重庆大学,2022.
[5]袁若诚.基于FAHP的消防工程风险管理[D].山东建筑大学,2023.
[6]侯文昌.消防工程前期阶段造价控制要点分析[J].建材发展导向,2024,22(8):133-135.
[7]陈林.高层建筑消防工程技术管理提升策略研究[J].城市建筑空间,2022,29(7):245-246,250.
[8]洪冬雪.高层建筑消防工程技术管理提升策略探讨[J].居业,2023(12):167-169.
[9]吴杰,袁媛.消防工程施工管理中的要点分析[J].云南水力发电,2023,39(5):176-178.
[10]李宝红.消防工程排烟设计及施工难点[J].中国科技纵横,2021(12):99-100.

BIM技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理中的应用研究

叶永红

身份证号: 440223197409075219

DOI:10.61369/ME.2025030021

摘 要 : 阐述 BIM 技术在民用建筑工程进度与成本协同管理中的应用。包括其技术体系关键部分, 传统模式痛点, 基于关键链的模型等。还涉及多维约束协同机制、多种管控技术及模块, 工程实施保障体系构建及风险控制、数据安全防护, 同时指出应用局限及未来方向。

关 键 词 : BIM 技术; 民用建筑; 进度与成本协同

Research on the Application of BIM Technology in the Coordinated Management of Construction Progress and Cost in Civil Engineering Construction

Ye Yonghong

ID: 440223197409075219

Abstract : This paper discusses the application of BIM technology in the coordination of progress and cost management in civil construction projects. It covers key components of the technical system, the challenges of traditional models, and models based on critical chains. The paper also explores multi-dimensional constraint collaboration mechanisms, various control technologies and modules, the establishment of an engineering implementation support system, risk management, data security, and points of limitation and future directions.

Keywords : BIM technology; civil construction; progress and cost coordination

引言

随着建筑行业的发展, 民用建筑工程管理面临诸多挑战。2017 年发布的《建筑业发展“十三五”规划》强调要推进建筑产业现代化, 提高工程管理水平。BIM 技术体系涵盖三维建模、信息集成和协同平台等关键部分, 为解决民用建筑工程管理中的工序交叉不协调、资源配置不合理、变更管理困难等痛点提供了可能。其在施工进度与成本协同管理方面的应用, 包括构建耦合分析模型、建立协同机制、进行 4D 模拟与进度可视化、构建预测模型等, 对提升工程管理效率和质量具有重要意义, 同时也需构建完善的工程实施保障体系及风险控制和数据安全防护机制。

一、BIM 技术及其在民用建筑工程管理中的应用特征

(一) BIM 技术体系构成

BIM 技术体系涵盖多个关键部分。三维建模是其基础, 通过创建建筑的三维模型, 直观呈现建筑的几何形状、空间关系等, 为后续设计、施工等提供可视化基础^[1]。信息集成是核心, 将建筑工程全生命周期中的各种信息, 如材料属性、施工进度、成本等整合到模型中, 实现信息的集中管理和共享。协同平台则是保障, 为不同参与方提供一个实时交互的环境, 各方可以在平台上协同工作, 及时沟通和解决问题。这些技术模块相互配合, 共同支撑建筑工程从规划设计到施工运营的全过程, 提升工程管理的

效率和质量。

(二) 民用建筑工程管理痛点分析

在民用建筑工程管理中, 传统模式存在诸多痛点。从工序交叉维度看, 各工种施工顺序缺乏有效协调, 常导致窝工、返工等情况, 影响进度并增加成本^[2]。在资源配置方面, 材料、设备和人力的分配不合理, 可能造成资源闲置或短缺, 不仅延误工期, 还会使成本超支。变更管理也是一大难题, 设计变更频繁, 但信息传递不及时、不准确, 相关方难以及时调整计划和预算, 给进度和成本控制带来极大挑战。这些问题凸显了传统管理模式在进度与成本协同管理上的不足, 为 BIM 技术的应用提供了现实需求。

二、施工进度与成本协同管理理论框架

（一）进度-成本耦合关系模型

在施工进度与成本协同管理中，构建基于关键链的耦合分析模型具有重要意义。该模型旨在量化工期压缩与成本增长之间的非线性关系^[3]。关键链考虑了项目中的资源约束和不确定性，通过识别关键路径上的活动以及资源分配情况，能够更准确地反映项目的实际进展。在工期压缩过程中，随着时间的减少，成本往往会呈现非线性增长。例如，过度压缩工期可能导致增加额外的人力、设备投入，或者需要采用更昂贵的施工技术和材料。基于关键链的耦合分析模型可以通过分析不同工期下的资源需求和成本变化，为项目管理者提供决策依据，帮助其在进度和成本之间找到最优平衡，以实现项目的高效管理和经济效益最大化。

（二）多维约束条件下的协同机制

在施工进度与成本协同管理中，多维约束条件下的协同机制至关重要。资源约束方面，需考虑人力、材料、设备等资源的有限性对进度和成本的影响。合理配置资源，避免资源闲置或短缺，是实现协同管理的关键^[4]。合同条件也对协同管理产生约束，明确的合同条款规定了各方的权利和义务，包括工期要求、付款方式等，这些都直接影响进度和成本的控制。技术规范则从施工工艺、质量标准等角度设定了边界，符合技术规范的施工方案才能保证工程顺利进行，同时避免因质量问题导致的成本增加和进度延误。综合考虑这些维度的约束条件，才能建立有效的协同机制，实现施工进度与成本的协同管理。

三、BIM驱动的协同管理实施路径

（一）进度管控技术体系

1.4D模拟与进度可视化

BIM的4D模拟与进度可视化在进度管控技术体系中具有重要作用。通过将3D模型与时间维度相结合，能够实现施工进度动态模拟。这种模拟可以直观地展示施工过程的先后顺序以及各工序之间的逻辑关系，从而进行施工逻辑验证^[5]。同时，在实际施工过程中，将现场进度数据与BIM模型中的计划进度进行对比，可以及时发现进度偏差。一旦出现偏差，系统能够发出预警，以便管理人员及时采取措施进行调整。这不仅有助于提高施工效率，还能有效避免因进度延误导致的成本增加等问题。

2.动态进度优化算法

构建融合蒙特卡洛模拟的进度预测模型是动态进度优化的关键。蒙特卡洛模拟通过对不确定因素的随机抽样，模拟项目进度的多种可能情况，为决策提供更全面的信息^[6]。在民用建筑工程中，首先要识别影响进度的各种不确定因素，如天气、材料供应、人员变动等。然后，将这些因素的概率分布纳入模型。通过多次模拟运行，得到项目进度的概率分布曲线，从而确定关键路径和风险区域。这有助于管理者提前制定应对措施，在进度出现偏差时，能够及时做出有效的计划调整决策，提升协同管理的效率和效果。

（二）成本管控技术体系

1.工程量智能提取技术

开发基于IFC标准的工程量自动计算模块对于解决传统算量误差问题至关重要。IFC标准作为一种中立的数据格式，能够有效实现不同软件之间的数据交互和共享^[7]。通过利用该标准，可以开发出能够准确识别和提取建筑模型中工程量信息的自动计算模块。此模块能够深入解析建筑模型的几何信息和属性信息，避免了人工算量过程中因人为疏忽、对图纸理解偏差等因素导致的误差。同时，基于IFC标准的模块还具有良好的兼容性和扩展性，可适应不同类型和规模的民用建筑工程项目，为施工进度与成本的协同管理提供准确的工程量数据支持，从而有效提升成本管控的精度和效率。

2.5D成本动态监控

在5D成本动态监控中，建立时间-成本关联数据库至关重要。通过BIM技术整合建筑项目的3D模型、进度信息（4D）以及成本信息（5D），将时间和成本要素紧密关联。在这个数据库中，每一个施工任务的时间节点都对应着相应的成本数据，包括材料成本、人工成本、设备租赁成本等^[8]。这样一来，当项目进展过程中，管理人员可以实时获取成本数据，实现成本的实时追溯。同时，通过设定成本阈值，当成本数据超出预期时，系统能够及时发出超支预警，以便管理人员采取相应措施进行成本控制，确保项目成本在预算范围内。

四、工程实施保障体系构建

（一）技术集成实施方案

1.多软件平台协同机制

在多软件平台协同机制中，需制定Navisworks与广联达等软件的接口标准及数据转换规范。Navisworks在可视化方面具有优势，广联达在工程量计算等方面应用广泛。明确的接口标准能确保两者之间数据的准确传递，例如结构构件的几何信息、材质信息等能够在不同软件中无损转换^[9]。同时，数据转换规范应涵盖数据格式、数据精度等方面，以满足施工进度与成本协同管理的需求。这有利于整合不同软件的功能，提高工作效率，为BIM技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理中的有效应用提供保障。

2.移动端监控系统开发

设计支持现场进度填报与成本核对的移动应用架构需考虑多方面。要整合BIM数据与现场实际数据接口，确保数据的准确传输与交互^[10]。界面设计应简洁直观，方便施工人员操作，如设置清晰的进度填报模块和成本核对区域。功能上，实现实时数据更新，施工人员能及时录入进度情况和成本支出，管理人员可同步获取信息进行分析决策。同时，要注重系统的稳定性和安全性，防止数据泄露和丢失，保障施工进度与成本协同管理工作的高

效、有序进行。

（二）组织管理优化策略

1.BIM协同工作流程重构

为保障 BIM 技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理中的有效应用，需构建完善的工程实施保障体系。在组织管理方面，应优化策略，明确各方职责。其中，设计方负责提供准确的建筑信息模型，施工方依据模型进行施工进度与成本的管控，监理方则对整个过程进行监督。同时，重构 BIM 协同工作流程至关重要。建立包含设计方、施工方、监理方的协同会审制度，各方定期对 BIM 模型进行会审，及时发现并解决施工进度与成本协同管理中出现的问题，确保工程顺利进行，提高管理效率和质量，实现施工进度与成本的有效协同。

2.专业人才培养体系

在工程实施保障体系构建中，专业人才培养体系至关重要。针对 BIM 技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理的应用，应构建涵盖建模标准、应用规程的 BIM 工程师培训课程体系。通过系统的课程设置，使学员全面掌握 BIM 技术的核心知识与技能。课程内容需注重理论与实践结合，不仅要深入讲解建模标准的原理和规范，还要通过实际案例让学员熟练应用相关规程。同时，建立完善的考核机制，确保学员具备扎实的专业能力，能够在实际工程中有效运用 BIM 技术，为施工进度与成本协同管理提供专业人才支持，促进工程的高效实施。

（三）风险控制方法体系

1.模型精度管控标准

在工程实施保障体系构建中，对于模型精度管控标准至关重要。需制定 LOD300 – LOD500 的模型审查细则及交付标准。LOD300 阶段，应明确建筑主体结构的关键几何信息和主要系统的大致布局需符合标准。到 LOD400，要进一步细化构件的详细尺寸、材质信息以及系统的连接关系等。LOD500 则要求模型具备

精确的施工细节，包括预留孔洞位置、构配件的准确规格等。同时，审查细则要涵盖模型的完整性、准确性和一致性检查。交付标准需规定模型文件的格式、数据结构以及相关属性信息的完整性，确保模型在不同阶段和参与方之间能够准确传递和使用，有效保障工程进度与成本协同管理的实施。

2.数据安全防护机制

在工程实施保障体系构建方面，需从技术、人员、制度等多维度着手。技术上确保 BIM 系统稳定运行，人员要具备专业知识与技能，制度上明确职责与流程。

对于风险控制方法体系，要识别可能影响进度和成本协同管理的风险，如技术故障、人员变动等。制定应对策略，如建立备份系统、加强人员培训与储备。

数据安全防护机制至关重要。利用区块链技术的不可篡改和分布式特性，对 BIM 模型版本进行严格控制，设置不同用户的权限。加密存储关键数据，防止数据泄露与篡改。同时，建立数据访问审计机制，实时监控数据的使用情况，确保数据安全。

五、总结

BIM 技术在民用建筑工程施工进度与成本协同管理中具有重要应用。通过集成工程信息，实现了进度与成本的动态关联和可视化分析，优化了资源配置和施工流程，提高了管理效率和决策科学性。然而，当前应用也存在一些局限性，如模型轻量化不足导致数据传输和处理困难，数据标准不统一影响信息共享和协同工作。为了进一步提升 BIM 技术的应用效果，未来应加强与数字孪生、人工智能等新兴技术的融合。数字孪生可提供更真实的虚拟模型，增强对工程进度和成本的预测和监控能力；人工智能可实现自动化数据分析和决策支持，提高管理的智能化水平。

参考文献

[1] 陶琪 .BIM 技术在 A 建筑工程造价控制中的应用研究 [D]. 沈阳大学 ,2022.
[2] 魏泽坤 .BIM 技术在工程项目施工成本控制中的应用研究 [D]. 山东建筑大学 ,2023.
[3] 蔡佳含 .BIM 技术在建筑工程项目成本管理应用中的影响因素研究 [D]. 重庆大学 ,2022.
[4] 卢晓 .BIM 技术在桥梁工程成本管理中的应用研究——以 M 桥梁工程为例 [D]. 河北经贸大学 ,2021.
[5] 周莞 .BIM+GIS 技术协同在高速公路运维管理中的应用研究 [D]. 长沙理工大学 ,2021.
[6] 蓝洪春,董伟强,朱明明,等 . BIM 技术在民用建筑设计中的应用 [J]. 中国高科技, 2021(10):67–68.
[7] 陈莉 .BIM 技术在民用建筑施工阶段的造价管理 [J]. 砖瓦世界 ,2021(9):252–253.
[8] 宋会民 .公路施工进度管理中 BIM 技术的应用研究 [J]. 交通世界（上旬刊）,2022(3):141–142.
[9] 丁雨泽 .BIM 技术在民用建筑工程造价管理中的应用 [J]. 散装水泥 ,2024(1):148–150.
[10] 杨娇,谢信永 .BIM 技术在施工阶段成本管理中的应用研究 [J]. 陶瓷 ,2021(11):135–136.

水利工程技术管理与工程风险管理的协同机制研究

蔡志华

中水投（广东）建设有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030023

摘 要： 阐述水利工程技术管理与风险管理的核心内容，包括技术管理的施工技术标准、设备维护等，风险管理的识别、评估与应对。强调两者协同机制的重要性，如矩阵式管理架构、并联审批流程等，同时指出研究不足及新技术带来的机遇。

关 键 词： 水利工程；技术管理；风险管理

Research on the Synergy Mechanism of Water Conservancy Engineering Technology Management and Engineering Risk Management

Cai Zhihua

China Water Investment (Guangdong) Construction Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This paper expounds the core contents of technical management and risk management in water conservancy projects, including the construction technical standards and equipment maintenance of technical management, as well as the identification, assessment and response of risk management. Emphasize the importance of the synergy mechanism between the two, such as the matrix management structure and the parallel approval process, while pointing out the research deficiencies and the opportunities brought by new technologies.

Keywords： water conservancy project; technical management; risk management

引言

水利工程作为基础设施建设的关键领域，对国民经济和社会发展具有重要支撑作用。2020年我国发布的《水利工程建设标准强制性条文》强调了工程质量和安全的重要性，为水利工程技术管理和风险管理提供了政策依据。水利工程技术管理涵盖施工技术标准体系、设备维护管理制度和工程质量控制方法等核心内容，风险管理包括风险识别、评估和应对策略等方面。两者存在紧密关联，且协同机制在工程质量提升、成本优化和工期保障等方面具有重要价值。然而现有研究在定量分析模型构建和长效机制保障方面存在不足，未来可借助数字孪生、人工智能等新技术优化协同机制。

一、水利工程技术管理与风险管理理论基础

（一）水利工程技术管理基本内涵

水利工程技术管理涵盖多方面核心内容。施工技术标准体系是确保工程质量的关键，它规范了施工过程中的各项技术要求和操作规范，为工程建设提供了统一的技术准则^[1]。设备维护管理制度对于保障水利工程设备的正常运行至关重要，通过定期维护、检修和保养，可延长设备使用寿命，提高设备运行效率。工程质量控制方法包括对原材料、施工工艺、施工过程等多环节的严格把控，采用先进的检测技术和质量评估手段，及时发现和解决质量问题，确保水利工程达到预期的质量标准和使用要求。

（二）工程风险管理理论框架

水利工程风险管理理论框架涵盖多个重要方面。风险识别方法至关重要，通过对水利工程可能面临的各种风险源进行系统分析和识别，包括自然因素如洪水、地震等，以及人为因素如设计

缺陷、施工不当等^[2]。风险评估模型则是对识别出的风险进行量化和定性分析，综合考虑风险发生的概率和可能造成的损失程度。常用的评估方法有层次分析法、模糊综合评价法等。风险应对策略是根据风险评估结果制定的一系列措施，包括风险规避、风险降低、风险转移和风险接受等。这些策略旨在将风险控制在可接受的范围内，确保水利工程的安全和稳定运行。

二、水利工程协同管理需求分析

（一）技术管理与风险管理的内在关联

技术管理与风险管理存在紧密的内在关联。技术决策在水利工程中至关重要，其直接影响风险水平。合理的技术决策能够降低风险发生的可能性，例如科学的工程设计方案、先进的施工技术选择等都有助于减少潜在风险^[3]。同时，风险事件对技术实施具有反馈作用。当风险事件发生时，它会暴露出技术实施过程中

存在的问题，促使对技术方案进行调整和改进。这种反馈机制有助于进一步完善技术管理，提高技术决策的科学性和合理性，从而更好地应对风险，实现水利工程的可持续发展。

（二）协同管理的工程价值体现

水利工程协同管理在工程质量提升方面具有重要价值。通过协同，各参与方能够更好地整合资源和技术，避免因沟通不畅或责任不清导致的质量问题^[4]。例如，设计方与施工方紧密协作，可确保施工符合设计要求，及时解决施工中出现的技术难题。

在成本优化上，协同管理可减少重复工作和资源浪费。各部门之间信息共享，能准确把握工程进度和需求，合理安排物资采购和人力调配，降低不必要的成本支出。

对于工期保障，协同管理能有效协调各方工作进度。各环节紧密衔接，避免因一方延误而影响整体工期，确保工程按时完成。

三、协同机制构建与实施路径

（一）管理框架融合机制

1. 组织架构协同设计

技术管理与风险管理部门可构建矩阵式管理架构。在这种架构下，横向为项目流程的各个阶段，纵向为不同的专业技术和风险管控维度。通过这种设计，不同专业背景的人员可在项目各阶段进行有效协作，避免部门间的壁垒和信息孤岛现象。在项目前期规划阶段，技术人员与风险管理人员共同参与，技术人员提供工程技术可行性分析，风险管理人员基于此进行风险预估和应对策略制定。在工程实施阶段，双方实时沟通，技术人员确保工程按技术标准进行，风险管理人员监测风险并及时调整应对措施。这种矩阵式架构能充分整合技术管理和风险管理资源，提高水利工程的综合管理效率和效果^[5]。

2. 流程对接标准制定

建立技术方案论证与风险评估的并联审批流程是协同机制构建的重要环节。该流程旨在确保水利工程技术方案的科学性与可行性，同时充分考虑工程风险。在这一流程中，需明确各参与方的职责与权限，技术专家负责对技术方案进行深入论证，风险评估团队则聚焦于潜在风险的识别与评估。通过建立统一的信息共享平台，实现技术方案与风险评估信息的实时交互，避免信息孤岛的出现。同时，制定标准化的审批流程和决策准则，当技术方案和风险评估结果均满足相应标准时，方可批准项目实施，以保障水利工程的顺利进行和风险可控^[6]。

（二）动态管控实施系统

1. 风险预警触发技术调整机制

风险阈值驱动的技术参数动态修正模型构建的核心在于以风险阈值为关键指标，对水利工程技术参数进行实时动态修正。当风险监测系统所获取的数据显示风险水平接近或超过预设阈值时，触发技术调整机制。通过分析风险因素与技术参数之间的内在关联，确定需要调整的技术参数及其调整方向和幅度。例如，若水位风险阈值被突破，可能需要调整泄洪设施的相关技术参

数，如泄洪流量、闸门开启程度等。同时，利用先进的数据分析和模拟技术，对调整后的技术参数进行效果预测和评估，确保技术调整能够有效降低风险水平，保障水利工程的安全运行^[7]。

2. 技术变更风险评估反馈机制

在水利工程技术管理与工程风险管理的协同机制中，基于BIM技术构建变更方案风险模拟验证流程至关重要。BIM技术可对工程结构、材料等进行精确建模，通过模拟不同变更方案下的工程运行情况，评估潜在风险。在变更方案提出后，利用BIM模型输入相关参数，如水流速度、压力等，模拟工程在实际工况下的响应。同时，结合历史数据和相关标准，对模拟结果进行分析，识别可能出现的风险点，如结构稳定性下降、渗漏等。根据风险评估结果，及时反馈给相关部门和人员，以便对变更方案进行调整和优化，确保工程技术管理与工程风险管理的协同性，提高水利工程的安全性和可靠性^[8]。

四、协同管理案例实证分析

（一）大型水库工程案例

1. 坝体施工技术风险联控

在大型水库工程案例的坝体施工中，混凝土温控措施与裂缝风险控制的协同实施至关重要。合理的温控措施可有效降低裂缝风险。例如，通过控制混凝土的浇筑温度、内部温度变化速率以及采用有效的保温保湿措施等，能减少温度应力对坝体的不利影响^[9]。同时，在施工过程中，实时监测混凝土内部温度和应力变化情况，根据监测结果及时调整温控措施，确保裂缝风险始终处于可控状态。这种协同实施不仅保证了坝体施工质量，也提高了工程的安全性和耐久性。

2. 防汛调度系统协同优化

以某大型水库工程为例，其防汛调度系统的协同优化至关重要。水文预报精度的提升在其中起到关键作用^[10]。高精度的水文预报能够为防汛风险决策提供更准确的数据支持。通过先进的技术和算法，对水库的来水情况进行更精确的预测，包括水量、水位变化趋势等。这使得防汛调度系统能够提前做出合理的安排，如确定合适的泄洪时间和泄洪量，以应对可能出现的洪水。同时，水文预报精度的提升也有助于更好地协调水库与上下游地区的防汛工作，保障整个区域的防洪安全。通过对该大型水库工程案例的分析，可以看出水文预报精度提升与防汛调度系统协同优化之间的紧密联系，为水利工程的防汛工作提供了有益的参考。

（二）城市排水系统工程

1. 管网铺设技术风险管理

在城市排水系统管网铺设中，顶管施工是常用技术。其施工参数优化与地面沉降风险控制需协同管理。施工参数如顶进力、顶进速度等不合理，可能导致地面沉降。通过数值模拟和现场监测相结合的方法，可对施工参数进行优化。一方面，数值模拟能预测不同参数下的地层变形情况，为参数选择提供理论依据。另一方面，现场监测可实时获取地面沉降数据，反馈给施工方以调整参数。同时，建立风险预警机制，当沉降值接近或超过预警值

时,及时采取措施,如调整顶进速度、增加支撑等,确保施工安全和周边环境稳定。

2.智慧排水系统集成应用

SCADA系统与风险预警平台在城市排水系统工程智慧排水系统集成应用中具有重要作用。SCADA系统可实时采集排水系统的各类数据,如水位、流量等。这些数据传输至风险预警平台后,平台通过数据分析和模型算法,对排水系统的运行状态进行评估和预测。例如,当水位数据超出正常范围时,风险预警平台能及时发出预警信息,以便相关人员采取措施。同时,风险预警平台反馈的分析结果也可帮助SCADA系统优化数据采集策略,提高数据的准确性和有效性。两者的数据交互实现了对城市排水系统更高效、精准的监测和管理,提升了排水系统应对风险的能力。

(三) 跨流域调水工程

1.输水渠道技术风险管控

跨流域调水工程中输水渠道技术风险管控至关重要。需对渠道的设计、施工及运行阶段进行全面风险评估。设计时要考虑地质条件、水流特性等因素,确保渠道结构稳定。施工过程中严格把控质量,防止出现裂缝、渗漏等问题。对于运行阶段,要建立实时监测系统,监测渠道的变形、水流速度等关键指标。一旦发现异常,及时采取措施进行修复和调整。同时,要制定完善的应急预案,以应对可能出现的突发技术风险,保障输水渠道的安全稳定运行,确保跨流域调水工程的顺利实施。

2.水质保障协同管理实践

跨流域调水工程中水质保障的协同管理实践至关重要。在工

程实施过程中,水处理工艺优化与污染风险防范紧密协同。一方面,通过先进的水处理技术,如深度过滤、化学沉淀与生物处理相结合等工艺,有效去除水中的污染物,保障水质达到调水要求。另一方面,建立严格的污染风险防范体系,对调水沿线的污染源进行全面监测与管控。例如,对工业废水排放、农业面源污染以及生活污水排放等进行实时监测,一旦发现异常,及时采取措施。同时,加强对调水工程设施自身的维护与管理,防止因设施老化或损坏导致的水质污染风险,确保调水全程水质安全稳定。

五、总结

水利工程技术管理与风险管理协同机制至关重要。其核心价值在于能显著提升工程可靠性和管理效能。通过两者协同,可更好地预防和应对工程中的各类问题,确保工程顺利运行。然而,现有研究存在不足。在定量分析模型构建上不够完善,难以精确量化两者协同的效果及影响因素。长效机制保障方面也有所欠缺,无法确保协同机制长期稳定发挥作用。展望未来,数字孪生、人工智能等新技术带来了新机遇。这些技术可深度应用于协同管理中,如利用数字孪生实现工程的实时模拟和精准分析,借助人工智能提升风险预测和决策能力,从而进一步优化协同机制,推动水利工程管理水平迈向新高度。

参考文献

[1] 杨风磊. M 水利工程项目施工阶段风险管理研究 [D]. 山东 : 山东建筑大学 , 2021.
[2] 彭贝. R 市沽河治理水利工程施工过程风险管理研究 [D]. 山东 : 山东大学 , 2021.
[3] 袁琳. Y 工程设计公司技术管理优化研究 [D]. 河北 : 河北工业大学 , 2022.
[4] 刘洁霏. B 水利工程全过程造价管理研究 [D]. 哈尔滨 : 燕山大学 , 2023.
[5] 张慧敏. 北新国际海外工程风险管理研究 [D]. 新疆 : 石河子大学 , 2023.
[6] 李冬俦. 中小型水利工程施工技术管理研究 [J]. 新农业 , 2022(19): 90–91.
[7] 罗汉城. 谈水利工程地基施工技术管理分析 [J]. 珠江水运 , 2022(15): 55–57.
[8] 林杰. 运用 GIS 分析水利工程技术管理措施 [J]. 珠江水运 , 2021(11): 2.
[9] 王琳. 谈水工混凝土温控防裂措施 [J]. 民营科技 , 2012(10): 246.
[10] 邵玉. 水利工程施工技术措施及水利工程施工技术管理 [J]. 砖瓦世界 , 2021, (2): 204.

预拌砂浆的性能优化及其在建筑材料管理中的关键作用

黄远建

广州市东浦建材有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030025

摘 要： 本文围绕预拌砂浆展开，介绍其组成成分及各成分对性能的影响，阐述多维度评价模型的重要性，探讨材料改性优化策略、制备工艺关键因素，还涉及性能测试验证方法及在建材管理中的应用，包括质量监控、成本控制、碳排放模型构建和循环经济模式探索等内容。

关 键 词： 预拌砂浆；性能优化；建材管理

Performance Optimization of Ready-Mixed Mortar and Its Key Role in Building Materials Management

Huang Yuanjian

Guangzhou Dongpu Building Materials Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on ready-mixed mortar, detailing its components and the impact of each component on performance. It highlights the importance of multi-dimensional evaluation models, explores strategies for material modification and optimization, and examines key factors in preparation processes. Additionally, it covers methods for performance testing and validation, as well as their applications in building materials management, including quality monitoring, cost control, carbon emission model construction, and the exploration of circular economy models.

Keywords： ready-mixed mortar; performance optimization; building materials management

引言

随着建筑行业的发展，预拌砂浆在建筑工程中的应用日益广泛。2016年发布的《绿色建筑行动方案》强调了建筑材料的可持续发展和性能优化的重要性。预拌砂浆作为建筑材料的重要组成部分，其性能直接影响建筑工程质量。从材料组成看，水泥、骨料等各组分相互作用影响其性能；从评价模型角度，涵盖多维度关键参数的模型对性能优化至关重要；材料改性、水胶比控制等工艺环节也影响其性能。同时，性能优化后的测试验证以及在建筑材料管理中的应用，如质量监控、成本控制、碳排放分析和循环经济探索等方面都体现了预拌砂浆性能优化的重要性和必要性。

一、预拌砂浆的性能优化基础理论

（一）预拌砂浆材料组成及特性

预拌砂浆主要由水泥、骨料、掺合料与外加剂等组成。水泥是重要胶凝材料，其品种和强度等级影响砂浆强度和凝结时间等性能^[1]。骨料包括细骨料和粗骨料，细骨料的颗粒级配、含泥量等对砂浆的和易性和强度有重要影响，粗骨料的粒径和形状也会影响砂浆的工作性。掺合料如粉煤灰、矿渣粉等，可改善砂浆的工作性，提高后期强度，同时降低成本^[1]。外加剂包括减水剂、保水剂、引气剂等，减水剂可减少用水量，提高砂浆强度；保水剂能防止水分过快流失，保持砂浆的工作性；引气剂可引入微小气泡，改善砂浆的和易性和抗冻性^[1]。这些组分之间相互作用，协同影响预拌砂浆的性能。

（二）性能优化评价指标体系

建立涵盖流动度、粘结强度、抗渗性等关键参数的多维度评价模型对于预拌砂浆性能优化至关重要。流动度是衡量砂浆施工性能的关键指标，直接影响其在施工过程中的操作性和填充性^[2]。合适的流动度可确保砂浆均匀地填充在缝隙和基层表面，保证施工质量。粘结强度体现了砂浆与基层材料的结合能力，是保证建筑结构整体性和稳定性的重要因素。高粘结强度可防止砂浆层与基层脱离，提高结构的耐久性。抗渗性则关系到砂浆抵抗水分渗透的能力，对于建筑物的防水性能有重要影响。良好的抗渗性可避免水分侵入，减少因受潮导致的结构损坏和材料性能劣化。综合考虑这些关键参数，构建科学合理的评价模型，有助于全面评估预拌砂浆的性能。

二、预拌砂浆性能优化方法研究

（一）材料改性优化策略

预拌砂浆的材料改性优化策略主要包括聚合物改性、纳米材料添加及工业固废掺用等方面。聚合物改性是通过在砂浆中添加聚合物乳液或可再分散乳胶粉，可有效改善砂浆的粘结性、柔韧性和抗裂性等性能^[3]。纳米材料具有独特的物理和化学性质，添加到预拌砂浆中能够细化孔隙结构，提高砂浆的强度和耐久性。工业固废的掺用不仅可以解决固废处理问题，还能在一定程度上改善砂浆性能。例如，粉煤灰的掺入可提高砂浆的工作性和后期强度，矿渣粉则有助于增强砂浆的抗侵蚀能力。这些材料改性方法为预拌砂浆性能优化提供了多种技术创新路径。

（二）制备工艺参数优化

水胶比控制是预拌砂浆制备工艺中的关键因素。适宜的水胶比可确保砂浆具有良好的工作性和强度发展。若水胶比过大，会导致砂浆强度降低、收缩增大；反之则会使砂浆流动性变差，难以施工^[4]。搅拌工艺优化同样重要。合理的搅拌时间和速度能使各组分充分混合均匀，促进水化反应的进行。搅拌时间过短，材料混合不充分，影响砂浆性能；过长则可能破坏已形成的结构。养护条件调控也不容忽视。合适的养护温度和湿度能为砂浆强度发展提供良好环境，避免因养护不当出现裂缝等缺陷，进而提升预拌砂浆的综合性能。

三、性能优化效果验证与评价

（一）物理力学性能测试

1. 新型砂浆抗压强度实验设计

预拌砂浆性能优化后需对其物理力学性能进行测试验证。针对新型砂浆抗压强度，采用正交试验法设计实验。确定影响因素及水平，如水泥用量、砂的细度模数、外加剂种类及掺量等。按照正交表安排试验组合，制备不同配比的砂浆试件。在标准养护条件下养护至规定龄期后，使用压力试验机对试件进行抗压强度测试。通过对测试数据的分析，研究不同配比方案下砂浆抗压强度的差异，为确定最佳配比提供依据，从而评价性能优化的效果^[5]。

2. 界面粘结性能提升验证

采用 X 射线断层扫描技术对基体 - 砂浆界面过渡区强化效果进行量化分析。该技术能够提供界面微观结构的详细信息，通过对不同条件下界面的扫描，可以直观地观察到优化措施对界面粘结性能的影响。通过分析扫描结果的相关参数，如孔隙率、相分布等，可以定量地评估界面过渡区的强化程度。对比优化前后的数据，能够清晰地看到界面粘结性能的提升效果，为预拌砂浆性能优化的有效性提供有力的证据，这对其在建筑材料管理中的应用具有重要意义^[6]。

（二）耐久性综合评价体系

1. 冻融循环耐受性试验

冻融循环耐受性试验是耐久性综合评价体系的重要组成部分

分。通过模拟实际环境中的冻融循环过程，观察预拌砂浆的性能变化。在试验中，需严格控制冻融循环的温度、时间间隔等条件，以确保试验结果的准确性和可靠性。同时，对不同配方的预拌砂浆进行对比试验，分析其微观孔结构特征在冻融循环过程中的演变规律。结合试验数据，建立基于微观孔结构特征的耐久性预测模型，为预拌砂浆在实际工程中的应用提供理论依据。通过冻融循环耐受性试验，可以全面评估预拌砂浆的耐久性，为其性能优化提供方向，进一步发挥其在建筑材料管理中的关键作用^[7]。

2. 氯离子渗透防护机制研究

采用电化学阻抗谱法评估不同改性砂浆的防腐性能。该方法通过测量砂浆在电解质溶液中的阻抗，获取其电学特性信息，从而反映砂浆内部结构和界面的变化。对于改性砂浆，其防腐性能的提升可能体现在对氯离子渗透的抑制上。通过对比不同改性砂浆与未改性砂浆的电化学阻抗谱，可以分析出改性措施对砂浆微观结构的影响，以及这种影响如何作用于氯离子渗透防护机制。例如，某些改性成分可能填充了砂浆内部的孔隙，减少了氯离子传输的通道，从而在电化学阻抗谱上表现出更高的阻抗值，这意味着更好的防腐性能^[8]。

四、预拌砂浆在建材管理中的关键作用

（一）质量管理维度

1. 标准化生产流程构建

集中拌制工艺是预拌砂浆标准化生产流程的关键环节。该工艺能够确保原材料在精确计量和严格控制条件下充分混合，有效提升材料的均质性^[9]。通过先进的设备和科学的工艺流程，使得各种成分均匀分布，避免了因人工搅拌不均导致的质量波动。这种均质性不仅保证了预拌砂浆在施工过程中的性能一致性，而且对提高建筑结构的整体质量和稳定性具有重要意义。同时，集中拌制工艺的严格质量控制体系，能够实时监测和调整生产参数，进一步确保了预拌砂浆质量的稳定性，减少了因质量问题而产生的工程隐患，为建筑工程的顺利进行提供了可靠保障。

2. 实时质量监控系统设计

预拌砂浆在建材管理中具有关键作用，特别是在质量管理维度的实时质量监控系统设计方面。物联网传感技术为砂浆稠度在线监测带来创新应用^[10]。通过在预拌砂浆生产过程中安装合适的传感器，能够实时获取砂浆稠度等关键质量数据。这些数据可传输至监控系统进行分析处理，及时发现质量异常情况。例如，当稠度偏离设定标准时，系统能迅速发出警报，以便生产人员及时调整生产参数，确保预拌砂浆质量稳定。同时，该系统还可对历史数据进行存储和分析，为优化生产工艺提供依据，进一步提升预拌砂浆的质量和生产效率，从而更好地满足建筑工程对材料质量的严格要求。

（二）成本控制维度

1. 供应链优化模型构建

预拌砂浆在建材管理中对成本控制至关重要。在供应链优化

模型构建方面，基于 JIT 理论建立砂浆供应量动态预测系统是关键。该系统需综合考虑建筑项目的进度、不同施工阶段对预拌砂浆的需求特点等多种因素。通过分析历史数据和实时施工信息，精准预测砂浆的用量和供应时间。这有助于避免因供应不足导致的工程延误成本，以及过度供应带来的库存积压成本。同时，该系统能优化供应链各环节的衔接，使原材料采购、生产、运输和配送更加合理高效，减少不必要的中间环节和浪费，从而实现预拌砂浆在建材管理中的成本控制目标，提升整个建筑项目的经济效益。

2. 全生命周期成本分析

全生命周期成本分析（LCCA）是评估预拌砂浆在建材管理中成本控制作用的重要方法。从原材料获取到生产、运输、使用以及最终处置，每个阶段都涉及成本。在原材料阶段，采用工业固废掺用可降低成本。工业固废的利用减少了对传统原材料的依赖，其本身成本相对较低。生产过程中，合理的配方优化和工艺控制可提高生产效率，降低能耗成本。运输环节，预拌砂浆的集中生产和配送模式可减少运输次数和成本。在使用阶段，其良好的性能可减少施工损耗和返工成本。最终处置时，符合环保要求的处置方式虽有成本，但从全生命周期来看，综合考虑各阶段成本，工业固废掺用的预拌砂浆可带来显著的经济效益。

（三）可持续管理维度

1. 碳足迹核算体系研究

预拌砂浆从原料获取到施工应用的全过程碳排放模型构建至关重要。在原料获取阶段，需考虑原材料生产、运输等环节的碳排放。例如，水泥生产过程中因能源消耗会产生大量二氧化碳。在生产过程中，设备运行、能源使用等也会带来碳排放。而运输环节，运输工具的能耗以及运输距离都影响着碳排放量。对于施

工应用阶段，砂浆的使用量、施工方式以及施工设备的能源消耗等都与碳排放相关。通过对这些环节的详细分析和量化，构建准确的碳排放模型，能够为预拌砂浆的可持续管理提供科学依据，有助于减少其碳足迹，实现建材管理的绿色化和高效化。

2. 循环经济模式探索

在循环经济模式探索方面，建筑垃圾再生骨料在预拌砂浆中的应用是关键。其可通过闭环生产系统实现资源化利用。将建筑垃圾进行分类处理后，提取其中适合作为骨料的部分。这些再生骨料经过加工处理，可部分替代天然骨料用于预拌砂浆生产。这不仅减少了建筑垃圾对环境的压力，还降低了对天然骨料的依赖，符合可持续发展理念。同时，在生产过程中，应优化工艺参数，确保含有再生骨料的预拌砂浆性能满足建筑要求。通过这种方式，构建起建筑材料从生产到使用再到回收利用的循环链条，促进建材管理在循环经济模式下的可持续发展。

五、总结

预拌砂浆性能优化对建筑工程质量提升至关重要。通过优化其性能，能更好地满足建筑施工需求，提高结构稳定性与耐久性。在建筑材料管理方面，它推动了标准化与智能化转型。精准的配比优化可基于大数据分析实现，这有助于提高材料性能的一致性和可靠性。同时，在智能建造场景下，管理模式创新也成为可能，例如利用智能设备实时监测和控制砂浆的生产与使用过程。预拌砂浆性能优化不仅关乎建筑质量本身，还对整个建筑材料管理体系的升级有着深远影响，是未来建筑行业发展的关键要素之一。

参考文献

[1] 史笑. 钛石膏基砂浆性能与应用研究 [D]. 广州大学, 2021.
[2] 高勇. 气泡水机设计及其性能优化 [D]. 四川大学, 2021.
[3] 李奥. 预混合液态金属 & 石墨 / 硅橡胶复合材料的性能分析与优化 [D]. 西南交通大学, 2022.
[4] 夏志庆. 柔性 OLED 屏幕卷曲行为研究及其性能优化 [D]. 华中科技大学, 2021.
[5] 王刚. 在役钢轨状态监测中压电超声换能器性能优化研究 [D]. 兰州理工大学, 2023.
[6] 徐驰. 机制砂在预拌砂浆中的应用 [J]. 建筑·建材·装饰, 2022(19): 4-6.
[7] 冯俊. 预拌砂浆在建筑施工中的应用 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(5): 178-180.
[8] 罗云川, 宁桥. 预拌砂浆在建筑工程中的应用 [J]. 砖瓦世界, 2022(24): 85-87.
[9] 张焯. 预拌砂浆检测技术研究 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(2): 49-50.
[10] 张振. 预拌砂浆推广应用之我见 [J]. 散装水泥, 2022(3): 10-12.

建筑电气施工技术创新对建筑工程的影响分析

温文轩

身份证号: 440183198901110018

DOI:10.61369/ME.2025030029

摘 要： 建筑电气施工技术涵盖供电、智能照明、防雷接地等系统，包括传统技术的问题及新技术应用。BIM、智能化、光伏一体化等技术有重要价值，还涉及电表安装、预制装配等创新，对工程质量、安全、进度和成本有影响，应注重研发与应用协同。

关 键 词： 建筑电气施工；技术创新；工程影响

Analysis of the Impact of Building Electrical Construction Technology Innovation on Construction Projects

Wen Wenxuan

ID: 440183198901110018

Abstract： Building electrical construction technology encompasses systems such as power supply and distribution, intelligent lighting, lightning protection and grounding, covering both issues in traditional techniques and the application of new technologies. Technologies like BIM, intelligent systems, and building-integrated photovoltaics (BIPV) hold significant value. Innovations also include electric meter installation and prefabricated assembly, impacting project quality, safety, schedule, and cost. Emphasis should be placed on the synergy between R&D and application.

Keywords： building electrical construction; technological innovation; project impact

引言

建筑电气施工技术在建筑工程中至关重要。近年来，随着建筑行业相关政策的不断完善，如《建筑电气与智能化通用规范》（2023年）的颁布，对建筑电气施工技术提出了更高要求。其涵盖供电、智能照明、防雷接地等多个核心范畴，各范畴相互关联构成施工技术体系。同时，施工技术应用效果需从施工效率、能源消耗、安全系数、成本控制等维度综合评价。然而，传统技术存在效率低下、安全隐患等问题，而 BIM 技术、智能化施工技术等新兴技术在管线综合、智能监测等方面展现出优势，推动建筑电气施工技术不断创新发展，对工程质量、安全、进度和成本等产生深远影响。

一、建筑电气施工技术体系特征分析

（一）建筑电气施工技术分类架构

建筑电气施工技术涵盖多个核心范畴。供电系统施工包括对配电箱、配电柜的安装与调试，以及电缆桥架的敷设和电缆的敷设连接，确保电力稳定供应^[1]。智能照明系统施工涉及智能灯具的安装、控制系统的布线与调试，实现照明的智能化控制。防雷接地系统施工着重于接地装置的安装、避雷带与引下线的连接，保障建筑物防雷安全。这些技术范畴相互关联，共同构成建筑电气施工技术体系。在施工过程中，需依据相关标准规范，采用科学合理的施工方法，确保各系统的性能与质量，以满足建筑工程对电气系统的要求。

（二）技术应用效果评价指标

建筑电气施工技术应用效果评价指标可从施工效率、能源消

耗、安全系数、成本控制四个维度建立综合评价体系。施工效率方面，可考量施工周期缩短程度、人力与设备资源利用效率等^[2]。能源消耗维度，关注电气系统运行中的能耗情况，如节能灯具的使用效果、智能控制系统对能源的优化作用。安全系数涉及电气设备的安全运行、防火防爆措施的有效性以及对人员的安全保障程度。成本控制则包括材料成本、施工成本以及后期维护成本的降低情况等，通过这些指标全面评价建筑电气施工技术的应用效果。

二、传统电气施工技术存在的问题

（一）施工效率低下问题剖析

传统电气施工技术存在施工效率低下的问题。以布线方式为例，传统布线常需人工逐一铺设线缆，过程繁琐且易出错，需

复检查和调整，导致大量时间浪费。在设备安装方面，由于缺乏先进的定位和安装工具，安装人员需耗费较多时间进行设备的定位和固定，且难以保证安装精度。同时，传统施工过程中各环节衔接不够紧密，如电气施工与土建施工配合不佳，常需等待土建工程完成部分工序后才能开展电气施工，造成施工停滞时间过长，整体施工效率大打折扣^[3]。

（二）安全隐患与技术缺陷

传统电气施工技术存在诸多安全隐患与技术缺陷。材料老化是一个突出问题，电气设备及线路所使用的材料随着时间推移，性能逐渐下降，可能导致绝缘性能降低，增加漏电风险^[4]。线路过载情况也较为常见，在设计或施工过程中对用电负荷预估不足，导致线路实际承载电流超过其额定值，容易引发线路过热，甚至引发火灾。防雷设计方面存在缺陷，部分传统施工可能未充分考虑建筑物所处地理位置及气候条件，防雷接地系统不完善，在雷电天气时无法有效引导雷电电流，使建筑物内的电气设备面临被雷击损坏的危险。

三、新型电气施工技术创新实践

（一）智能化施工技术应用

1. BIM技术集成应用

BIM技术在建筑电气施工中具有重要集成应用价值。在管线综合方面，通过创建三维模型，能直观呈现各管线空间位置关系，精准规划布局，避免传统二维图纸可能出现的管线碰撞问题^[5]。对于碰撞检测，BIM软件可自动检测不同专业管线间以及管线与建筑结构的碰撞点，提前发现并解决潜在冲突，减少施工中的变更和返工。在施工模拟环节，可模拟施工过程，包括施工顺序、进度安排等，帮助施工人员更好地理解施工流程，合理安排资源，提高施工效率和质量。

2. 自动化控制系统升级

智能化施工技术在电气施工中应用广泛。智能配电柜实现了对电力系统的智能监测与控制，通过内置传感器实时采集数据，如电压、电流等，并可远程传输至监控中心，便于及时发现故障并预警^[6]。自适应照明系统能根据环境光线自动调节亮度，采用光传感器感知光线强度，通过控制系统调整灯具的功率，不仅提高了照明质量，还节约了能源。在安装调试过程中，利用先进的校准工具和软件，确保设备的精准度和稳定性，同时采用无线通信技术实现设备之间的高效连接和协同工作，提升了整个电气系统的智能化水平。

（二）绿色节能技术突破

1. 光伏一体化施工技术

在光伏一体化施工技术方面，太阳能瓦片安装技术取得了显著进展。其安装工艺更加精细，注重瓦片与建筑结构的紧密结合，确保了发电效率和建筑美观度的统一。同时，储能系统集成技术也得到了改良，通过优化电池管理系统和储能设备的选型，提高了储能系统的稳定性和可靠性，更好地满足了建筑用电的需求。这些新能源技术施工工艺的改良，不仅提升了光伏一体化系

统的性能，还为建筑电气施工的绿色节能发展提供了有力支撑，促进了建筑工程向更加环保、高效的方向发展^[7]。

2. 能耗监测系统优化

在建筑电气施工中，智能电表安装定位优化与数据采集系统的创新至关重要。通过先进技术对智能电表安装位置进行科学规划，确保其能准确监测能耗数据^[8]。同时，优化数据采集系统，提高数据传输的准确性和及时性。采用新型传感器和通信技术，增强系统对能耗信息的感知和收集能力。这不仅有助于实现对建筑能耗的实时监测，还能为后续的能耗分析和节能措施制定提供可靠依据，推动建筑电气施工在绿色节能方面的技术突破，实现能耗监测系统的优化。

四、技术创新对建筑工程的影响机制

（一）工程质量管理维度

1. 施工精度提升路径

预制装配技术在建筑电气施工中对施工精度有显著提升作用。通过实测数据可直观展现其对施工误差的改善效果。该技术将电气设备和线路在工厂进行预制生产，在施工现场进行装配。这种方式减少了现场施工环节中因人工操作等因素导致的误差。例如，预制的电气桥架和线管，其尺寸精度在工厂环境下能够得到更好的控制，与传统现场制作相比，能够更精准地满足设计要求。同时，预制装配技术的应用使得各部件之间的连接更加标准化和规范化，进一步降低了因连接不当而产生的误差，提高了建筑电气施工的整体精度，为建筑工程质量提供了有力保障^[9]。

2. 系统稳定性增强表现

通过对比新旧技术参数可验证供电可靠性的提升幅度，这是技术创新对建筑工程系统稳定性增强的重要表现之一。新技术在电气设备的选型、电路设计以及供电模式等方面往往进行了优化和改进。例如，新型的智能配电箱能够实时监测电路的各项参数，及时发现并处理潜在的故障隐患，相较于传统配电箱，其故障预警和处理能力显著提高^[10]。在供电线路方面，采用更先进的绝缘材料和布线方式，可降低线路损耗和故障率，从而提升整个供电系统的稳定性。这些技术创新措施综合作用，使得建筑工程的电气系统在供电可靠性上有了明显的提升，为建筑的正常使用提供了更有力的保障。

（二）施工安全保障层面

1. 触电事故防范成效

新型绝缘材料的应用显著提升了触电事故防范成效。其具有良好的绝缘性能，能有效阻隔电流，降低电气设备及线路漏电风险。例如在电线外层包裹新型绝缘材料，可防止人体意外接触带电部分。智能漏电保护装置更是一大创新。它能够实时监测电路中的漏电情况，一旦检测到漏电电流超过设定阈值，便会迅速自动切断电路，避免触电事故发生。与传统漏电保护装置相比，其反应更为灵敏、精准。这些技术创新从材料和设备两方面为建筑电气施工安全提供了有力保障，极大地减少了触电事故的发生概率，确保了施工人员的人身安全和建筑工程的顺利进行。

2. 防火防雷技术创新

电弧故障断路器是一种新型的电气保护装置，它能够快速检测和切断电路中的电弧故障，有效防止电气火灾的发生。在建筑电气施工中，应用电弧故障断路器可以提高电气系统的安全性和可靠性。动态防雷系统则是一种先进的防雷技术，它能够实时监测雷电活动，并根据雷电的强度和位置自动调整防雷措施。在建筑工程中，动态防雷系统可以有效地保护建筑物和其中的电气设备免受雷击的损害。这些防火防雷技术创新不仅提高了建筑工程的安全性，也为建筑电气施工技术的发展提供了新的思路和方法。

（三）工程经济性影响评估

1. 全生命周期成本分析

构建包含初期投资与后期维护的综合成本评估模型，需考虑建筑电气施工技术创新对建筑工程全生命周期成本的影响。初期投资涵盖设备采购、安装费用等，技术创新可能带来新型电气设备及施工工艺，其成本与传统方式不同。后期维护成本包括设备检修、更换零部件及能耗费用等。创新技术可能提高设备可靠性，降低故障维修频率，减少维护成本；也可能因采用新技术，提高能源利用效率，降低能耗成本。综合评估这些因素，建立准确的成本评估模型，有助于全面了解建筑电气施工技术创新在工程经济性方面的影响，为决策提供依据。

2. 节能效益测算方法

工程经济性影响评估需综合考虑建筑电气施工技术创新带来的多方面影响。在成本方面，新技术可能初期投入较高，但长期

来看，其节能效益可能会抵消甚至超过初始投资。例如智能控制系统的应用，虽设备采购与安装成本增加，但通过精准控制能耗，能减少能源浪费。从收益角度，节能可降低运营成本，提升建筑的市场竞争力，吸引更多租户或用户，增加租金或销售收入。同时，符合环保要求可避免潜在的环境罚款，也视为一种经济收益。节能效益测算方法包括建立能耗模型，对比创新技术应用前后的能耗数据，计算节能量，再根据能源价格换算为经济价值，还可考虑投资回收期等指标来综合评估节能效益。

五、总结

建筑电气施工技术创新对建筑工程影响深远。在工程质量方面，创新技术可提高电气系统的稳定性与可靠性，减少故障发生。对于安全而言，能增强电气系统的安全性，降低火灾等安全隐患。在进度上，新技术的应用可优化施工流程，提高施工效率，缩短工期。从成本角度，合理的技术创新有助于降低材料和人力成本。

为实现更好发展，应注重技术研发与工程应用的协同，使创新技术能及时应用于实际工程。未来需重点突破数字化施工装备研发以及智慧工地系统集成等方向。通过这些努力，可为建筑电气行业转型升级提供有力的理论支撑，推动行业不断向前发展。

参考文献

- [1] 刘永冬. 基于多层网络的建筑核心企业技术创新演化与影响因素分析 [D]. 山东师范大学, 2022.
- [2] 步洪达. 环境规制对技术创新的影响研究 [D]. 兰州财经大学, 2021.
- [3] 王梦莹. 技术经济政策对装配式建筑技术创新的影响研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [4] 李艺丹. 金融发展对技术创新效率的影响研究 [D]. 西北大学, 2021.
- [5] 顾雪晨. 负债对企业技术创新的影响研究 [D]. 南京师范大学, 2021.
- [6] 荣健. 建筑电气施工中照明节能技术的运用研究 [J]. 住宅产业, 2022, (07): 84-86.
- [7] 赵鹏举. 建筑电气施工中照明节能技术的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2021, (07): 182-183.
- [8] 宋晓娟. 探究建筑电气施工中的漏电保护技术 [J]. 越野世界, 2022, 17(16): 199-201.
- [9] 庞旭, 陈晓坤. 建筑工程中的施工技术创新策略分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 315-317.
- [10] 明凤良. 建筑电气施工中强电施工关键技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2023(1): 57-59.

化工行业动火作业事故防范与管控策略研究

周洪武¹, 程业宝²

1.身份证号: 420381197908204316

2.身份证号: 421181198808182353

DOI:10.61369/ME.2025030032

摘要: 介绍化工动火作业事故防范与管控相关技术。包括光谱分析等监测技术, 自适应PID控制等调控技术, BIM模拟等风险预判技术, 以及双阀双锁等隔离技术等。还涉及知识图谱、机器学习模型构建, AR辅助巡检等。提出安全防控体系, 指出研究局限及未来方向。

关键词: 化工动火作业; 事故防范与管控; 技术创新

Research on Prevention and Control Strategies for Hot Work Accidents in the Chemical Industry

Zhou Hongwu¹, Cheng Yebao²

1.ID: 420381197908204316

2.ID: 421181198808182353

Abstract: Introduce the relevant technologies for the prevention and control of chemical hot work accidents. This includes monitoring technologies such as spectral analysis, regulation technologies such as adaptive PID control, risk prediction technologies such as BIM simulation, and isolation technologies such as dual valves and dual locks, etc. It also involves knowledge graphs, the construction of machine learning models, and AR-assisted inspection, etc. Propose a safety prevention and control system, and point out the research limitations and future directions.

Keywords: chemical industry hot work; accident prevention and control; technological innovation

引言

随着化工行业发展, 动火作业事故防范与管控成关键。2021年《危险化学品安全专项整治三年行动方案》强化监管, 催生光谱分析等监测技术、自适应PID控制等存储调控技术、基于BIM的风险预判技术及双阀双锁盲板封堵系统。广东腾龙化工科技有限公司建设安全风险智能化管控平台, 融合工业互联网等技术, 实现“人、机、物、环、管”全要素动态闭环管理, 借助3D建模和数字孪生技术构建“安全管控一张图”, 提升风险识别、预警和处置效率, 为行业提供了新技术路径和管理模式。

一、危险化学品监测与控制技术体系研究

(一) 危险化学品监测技术原理

光谱分析技术基于物质对不同波长光的吸收、发射或散射特性, 通过捕捉危险化学品独特的光谱“指纹”, 实现高精度成分识别与浓度监测。广东腾龙化工科技有限公司搭建的安全风险智能化管控平台, 深度融合物联网技术, 构建了覆盖全厂区的实时监测网络。平台可24小时不间断采集重大危险源的温度、压力、可燃气体浓度等核心数据, 通过边缘计算设备对原始数据初步处理后, 传输至云端进行深度分析。此外, 平台引入先进AI算法, 通过机器学习分析历史数据, 构建动态报警模型, 精准区分正常波动与真实风险, 将报警数量降低46.95%, 同时使异常处置效率提升80%^[1], 显著减轻中控室人员工作负担达33%, 大幅提高监

测预警的准确性与可靠性。

(二) 智能控制技术实践

自适应PID控制与模糊逻辑算法协同应用, 为危化品存储压力和温度调控提供了智能解决方案。PID控制算法依据系统偏差动态调整控制参数, 自适应机制使其能根据工况变化实时优化, 模糊逻辑则通过模拟人类专家经验处理复杂非线性问题, 两者结合有效克服传统控制方法响应慢、易超调的弊端。广东腾龙化工借助自动化过程控制优化, 将关键生产环节自控率提升至行业领先水平, 配合PID在线整定技术, 持续优化系统性能, 夯实本质安全基础^[2]。此外, 平台运用数字孪生技术, 对聚合工艺装置进行1:1精细化建模, 完整复刻设备运行参数、物料流动与能量转换过程。通过虚拟仿真环境, 新员工可直观学习操作流程、模拟故障处置, 将培训周期从传统的2天大幅缩短至2小时, 显著提

升人才培养效率与质量。

二、动火作业安全控制技术创新

（一）作业环境风险预判技术

广东腾龙化工利用 3D 工艺全景模型与数字孪生技术，打造出高度仿真的动态作业环境模拟系统。该系统实时接入温度、压力、流速等关键工艺参数，通过数字孪生体对生产流程进行 1:1 复刻，精准定位潜在风险点^[9]。人员定位系统与视频 AI 分析深度联动，形成立体化监测网络：借助 UWB 定位技术，可将人员位置精度锁定在 0.3 米内，AI 视觉算法则能快速识别违规闯入危险区域、人员聚集等不安全行为。2024 年，系统累计触发 18 次精准预警，及时阻断了因人员操作不当或误入禁区引发的潜在风险。此外，系统还能结合气象数据、设备运行状态等多源信息，对动火作业区域进行动态风险评估，提前生成风险热力图，为作业方案制定提供科学依据。

（二）工艺隔离技术优化

在动火作业前的工艺隔离环节，双阀双锁盲板封堵系统是关键防线。广东腾龙化工通过平台对该系统实施数字化全生命周期管理，将盲板的材质、规格、安装位置等完整性数据录入系统^[4]，构建设备数字档案。结合预测性维修模型，AI 算法持续分析设备振动、腐蚀速率等运行数据，预测设备健康状态。一旦发现密封性能下降、阀门磨损等隐患，系统自动生成维修工单，并根据风险等级智能排期。例如，某次 AI 监测到某条管道盲板存在轻微腐蚀趋势^[5]，提前 3 天安排检修，避免因密封失效导致介质泄漏引发的动火作业风险。该数字化管理模式不仅提升了双阀双锁盲板封堵系统的可靠性，还将设备非计划停机时间降低 40%，显著提高了动火作业的安全性与生产连续性。

三、双重预防机制数字化建设

（一）风险智能辨识系统

1. 知识图谱构建

在化工行业动火作业事故防范与管控领域，知识图谱构建是风险智能辨识系统的核心基础。广东腾龙化工通过收集、整理国内外 1200 余个典型动火作业事故案例，结合行业标准与专家经验，搭建起涵盖危化品特性、作业流程、环境因素等维度的风险特征库。系统运用自然语言处理技术，从海量案例文本中提取作业类型、风险因素、事故后果等实体信息，并通过关联分析算法挖掘实体间的因果关系，如“高温环境”与“可燃气体爆炸”的关联性^[9]。基于这些数据，以节点表征实体、以边描述关系，构建出可视化的知识图谱。操作人员通过输入作业场景关键词，系统即可快速检索相关风险知识，呈现风险传播路径与防范要点。例如，当检索“受限空间动火”时，图谱可直观展示通风不足、气体聚集等风险因素及其应对措施，为精准辨识风险提供数据支撑。

2. 机器学习模型

风险智能辨识系统引入 LSTM（长短期记忆网络）算法，针

对动火作业的动态风险进行深度分析。LSTM 独特的门控机制使其能够有效处理时间序列数据，捕捉温度、压力、人员操作行为等风险因素在作业全过程中的变化规律^[7]。系统整合近 5 年的历史动火作业数据，涵盖作业环境参数（温湿度、风速）、设备状态数据（阀门开度、管道压力）及人员操作记录（操作频次、响应时间），通过数据清洗、特征工程等预处理后，输入 LSTM 模型进行训练。模型在学习过程中自动提取不同风险因素间的非线性关系，例如设备异常振动与管道泄漏的潜在联系。训练完成后，系统实时接入新作业场景数据，LSTM 模型以分钟级频率动态评估风险等级，并通过热力图、仪表盘等可视化形式呈现风险分布与演变趋势。管理人员可据此提前部署防护措施，如 2024 年某装置动火作业中，模型提前 2 小时预警设备过热风险，成功避免一起火灾事故。

（二）隐患排查治理平台

1. 移动巡检系统

AR 辅助巡检技术为移动巡检系统带来创新。它可实现对化工企业复杂环境的高效巡检，通过增强现实技术，巡检人员能更直观地获取设备信息和潜在隐患。在隐患排查治理流程的数字化重构方面，移动巡检系统借助 AR 技术可实时记录巡检数据，包括设备状态、隐患位置与描述等^[8]。这些数据能迅速上传至隐患排查治理平台，实现信息的即时共享与分析。同时，系统可依据预设规则对隐患进行分类分级，为后续的治理措施提供依据。利用数字化手段，还能对隐患治理过程进行跟踪，确保整改措施得到有效执行，提高化工行业动火作业的安全性。

2. 数据中台架构

隐患排查治理大数据平台的数据中台架构需具备支持多源数据融合的能力。该架构应能整合来自不同系统和设备的数据，包括传感器监测数据、人工巡检数据、设备运行参数等。它要建立统一的数据标准和规范，确保数据的一致性和准确性。通过数据抽取、转换和加载（ETL）等技术，对原始数据进行处理，使其能够满足数据分析和挖掘的需求。数据中台还应具备数据存储和管理功能，采用合适的数据库技术，如关系型数据库和非关系型数据库相结合，以应对不同类型数据的存储要求。同时，要建立数据安全机制，保护数据的完整性和保密性，防止数据泄露和滥用。

四、动火作业事故综合管控体系

（一）标准化作业流程

1. JSA 优化模型

动火作业事故综合管控体系需构建考虑人机环管因素的作业安全分析量化模型与动态优化机制。基于化工行业动火作业特点，综合分析人、机、环、管等方面的风险因素，通过对作业步骤进行详细分解，确定每个步骤可能存在的危害及相应的风险程度。运用科学的量化方法，如风险矩阵等，对风险进行评估赋值。结合实际作业过程中的动态变化情况，建立动态优化机制，实时调整风险控制措施。这一过程需参考相关行业标准及最佳实

践案例^[9]，以确保模型的科学性和有效性，从而为动火作业事故的防范与管控提供有力支持。

2. 电子作业票系统

开发支持多级审批与 GIS 定位的智能作业许可管理平台是电子作业票系统的关键。该平台应具备以下功能：一是多级审批流程，确保动火作业的各个环节都经过严格审核，不同层级的管理人员能够根据职责进行审批，提高决策的科学性和准确性^[10]。二是 GIS 定位功能，能够实时获取动火作业的位置信息，便于管理人员对作业现场进行监控和管理，及时发现潜在的安全隐患。同时，平台还应具备作业票的电子化管理功能，包括作业票的申请、审批、签发、执行和存档等环节，实现作业票的全生命周期管理，提高管理效率和规范性。

（二）智能监管技术

1. 行为识别系统

行为识别系统在动火作业事故综合管控中至关重要。基于计算机视觉的 PPE 穿戴检测与违规操作识别算法是其核心。通过计算机视觉技术，能够对动火作业人员的 PPE 穿戴情况进行实时监测。例如，可准确识别安全帽、防护手套、防火服等是否正确穿戴。同时，对于违规操作行为，如未按规定使用工具、在危险区域进行不当操作等，算法也能精准识别。这不仅提高了监管效率，还能及时发现潜在安全隐患。系统利用深度学习模型，对大量样本数据进行学习和训练，不断优化识别准确率，从而为动火作业提供更可靠的安全保障，有效降低事故发生的可能性。

2. 数字孪生应用

数字孪生技术为动火作业事故综合管控提供了创新的解决方案。通过构建动火作业全过程数字孪生系统，能够实时映射实际作业场景，包括设备状态、人员操作、环境参数等。利用传感器获取的实时数据，在虚拟空间中精准复现作业过程，实现对动火作业的全方位监测。同时，基于数字孪生系统建立虚拟仿真培训平台，操作人员可在虚拟环境中进行动火作业演练，熟悉操作流程和安全规范。这种培训方式不仅能提高操作人员的技能水平，还能让他们在安全的环境中体验各种可能出现的情况，增强风险防范意识，从而有效减少动火作业事故的发生。

（三）应急联动机制

1. 应急资源调度模型

在应急资源调度模型方面，可建立基于 GIS 的应急资源最优路径规划算法。通过 GIS 系统的地理信息数据，结合动火作业事故发生地点及周边环境信息，精准计算应急资源到达现场的最优路径。同时，考虑多部门协同响应机制，整合消防、医疗、环保等多个部门的应急资源。不同部门的资源具有不同的特点和优势，如消防部门的灭火设备、医疗部门的急救人员和设备、环保部门的环境监测和处理设备等。通过建立协同机制，实现各部门之间信息共享和资源协调调度，确保在动火作业事故发生时，能够快速、高效地调配应急资源，提高事故应急处置能力。

2. 演练评估体系

开发 VR 应急演练系统，通过虚拟现实技术构建逼真的动火作业事故场景。操作人员可在虚拟环境中进行应急演练，熟悉应急流程和操作规范。基于 AHP - FCE 方法构建演练效果量化评估模型，首先确定评估指标体系，涵盖应急响应速度、操作准确性、团队协作等多个方面。运用层次分析法（AHP）确定各指标权重，再通过模糊综合评价法（FCE）对演练效果进行综合评估。该模型能够客观、准确地量化演练效果，为改进应急演练提供科学依据，从而提升化工行业动火作业事故应急联动能力和管控水平。

五、总结

化工行业动火作业事故防范与管控至关重要。通过系统构建安全防控体系，涵盖监测预警、过程控制、数字预防及应急响应等环节，可有效降低事故风险。同时，创新提出基于机器学习的风险动态评估模型与数字孪生管控技术，为化工企业本质安全提供理论与技术支持。然而，目前研究仍存在一定局限，未来需在跨平台数据融合与自主决策系统方面深化研究，以进一步完善化工行业动火作业事故防范与管控策略，提升化工企业安全生产水平，保障人员生命财产安全和环境安全。

参考文献

- [1] 李爱秋. 动火作业风险智能管控平台设计研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2023.
- [2] 罗雪. 化工行业动火作业虚拟仿真培训系统 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [3] 房冰. 药品短缺的防范及管控策略研究 [D]. 郑州大学, 2021.
- [4] 郑天龙. 地铁运营期车站维保作业风险评估模型与管控策略研究 [D]. 大连海事大学, 2023.
- [5] 袁霖. DCC 公司技术创新知识产权风险识别与管控策略 [D]. 电子科技大学, 2014.
- [6] 孙伟峰. 强化动火作业风险管控 [J]. 现代职业安全, 2023(12): 14-17.
- [7] 朱伟. 如何有效管控动火作业违章 [J]. 化工管理, 2017(11): 1.
- [8] 张东成, 于贵福, 王俊全, 唐伟. 浅谈检维修动火作业风险管控 [J]. 化工技术与开发, 2013(12): 2.
- [9] 王元新, 赵玉生, 苑慧平. 化工企业检维修动火作业的风险管控策略 [J]. 化工管理, 2020(28): 2.
- [10] 王梦蓉. 储罐动火作业爆炸事故 [J]. 现代职业安全, 2013(4): 4.

高速公路项目全流程质量管理体系构建与应用研究

焦学忠

吉林市交通投资建设有限公司, 吉林 吉林 132013

DOI:10.61369/ME.2025030036

摘 要： 重大交通基础设施建设日益迈向“全生命周期治理”阶段，传统分阶段质量管理模式已难以支撑高速公路工程中跨单位、跨系统的复杂协同需求。本文提出一种面向“可研—设计—招投标—施工—峻验”全链条的质量闭环管控体系，核心包括任务包责任绑定、关键节点锁定与 AI 辅助查验三大机制。体系已在典型 PPP 项目中完成实验验证，数据显示：承台返工率从 6.3% 降至 2.1%，桥梁段工期平均缩短 6.8 天，质量响应时间压缩近 40%。研究在质量履历建模、关键控制逻辑解耦、智能识别与人工复核融合等方面展开深入设计，为解决施工质量责任边界模糊、过程信息失真等行业难题提供落地路径，同时拓展了 BIM 与 AI 技术在全过程质量管控场景中的应用边界。

关 键 词： 高速公路建设；质量管理；全过程控制；责任闭环

Research on the Construction and Application of the Full-Process Quality Management System for Expressway Projects

Jiao Xuezhong

Jilin City Transportation Investment and Construction Co., Ltd., Jilin, Jilin 132013

Abstract : The construction of major transportation infrastructure is increasingly moving towards the stage of "full life cycle governance", and the traditional phased quality management model is no longer capable of supporting the complex collaborative demands across units and systems in expressway projects. This paper proposes a quality closed-loop control system covering the entire chain from "feasibility study – design – bidding and tendering – construction – completion acceptance", with the core mechanisms including task package responsibility binding, key node locking and AI-assisted inspection. The system has been verified through actual measurement in typical PPP projects. The data shows that the rework rate of the foundation has dropped from 6.3% to 2.1%, the average construction period of the bridge section has been shortened by 6.8 days, and the quality response time has been compressed by nearly 40%. The research conducts in-depth design in aspects such as quality history modeling, decoupling of key control logic, and integration of intelligent recognition and manual review, providing practical solutions to industry problems such as ambiguous boundaries of construction quality responsibility and distorted process information. At the same time, it expands the application boundaries of BIM and AI technologies in the scenarios of full-process quality control.

Keywords : expressway construction; quality management; full-process control; responsibility closed loop

引言

《国家公路网规划》（2022年版）明确提出，到2035年，基本建成“覆盖广泛、功能完备、集约高效、绿色智能、安全可靠的现代化高质量国家公路网”，质量已成为高速公路项目的核心衡量指标。近年来，国内在工程质量控制领域逐步引入 TQM、PDCA 循环与 BIM+ 数字化管理平台，但在责任链条精细化、质量行为追溯结构化方面仍存在执行断层。国际上，“Lean Construction”“Total Quality Management”等理论框架已广泛应用于道路与桥梁工程的全过程质量控制，形成以履责透明与数据可回溯为核心的质量哲学。当前研究多聚焦于施工阶段，缺乏对设计、投标前端控制的结构化建模，也未将 AI 识别技术嵌入现场查验体系中。当前亟需一套贯通全链条的质量闭环管控、融合结构建模与智能识别能力的质量管理体系，在工程全生命周期内实现任务单元责任闭环、质量履历的结构化存储以及关键行为的智能识别与干预响应，为复杂场景下的质量协同治理提供可落地、可量化的支撑路径。

一、国内外文献研究综述

在我国工程建设管理研究中，全流程质量管理正逐步从理念向机制落地转型。已有研究多聚焦于质量控制的阶段性优化与管理工具嵌入路径。例如，卢金辉（2024）在高速公路养护中引入全面质量管理（TQM）体系，强调“全过程+多主体”并联协同机制对病害预防与工程可持续运行的积极作用^[1]。魏恒俊（2025）则从BIM技术出发，论证了其在路基施工质量追溯与数据闭环管理中的集成价值^[2]。在管理模式层面，李彦勋等（2021）通过“PPP+EPC”总承包案例指出，制度穿透与数据主导对质量执行链条的同步影响不容忽视。尽管国内研究已关注信息化手段与管理模式融合，但多侧重于单阶段或某一流程的质量控制，尚未形成覆盖“设计—施工—交验”全过程的责任履历结构。

国外学界则更早将全流程质量管理纳入系统建模与平台化架构中。Lean Construction体系被广泛运用于北美和欧洲的高速公路工程，强调价值流映射与工序精益控制，如Tezel和Koskela（2023）提出的OSC（异地建造）架构已在英国国家高速公路局项目中推广应用，并引发对流程节点前置管理的再定义^[3]。Azam Amir等（2023）将PDCA循环嵌入公路维养预算模型，构建基于决策树算法的质量干预预测体系，体现出数据驱动型质量管控机制的主导趋势^[4]。尽管如此，现有研究仍普遍缺乏对责任绑定机制的技术层设计与AI识别参与下的查验协同模型探讨。相比之下，本文以高速公路项目为应用背景，首次提出“工程任务包+节点履责链+AI辅助判断”三位一体的闭环式质量管理结构，意在补足国内外研究在智能响应路径与结构耦合机制上的模型空白。

二、核心概念界定

（一）质量履历

质量履历指项目建设过程中，针对关键工序、关键部位、关键材料等所形成的全过程质量信息记录。其内容应覆盖从计划制定、施工执行、检验验收到问题处置的各环节信息，可通过图像、数据、文档等多种载体形式沉淀。质量履历不仅作为后续质量追溯与责任核查的依据，也是实现施工可视化管理、智能决策的重要数据基础^[5]。

（二）节点锁定点

节点锁定点是指在工程关键进度节点上，需完成资料收集、现场查验或责任确认的强制执行时点，通常与合同节点、隐蔽工程、质量验收等事项绑定。其设置目的是确保过程质量可控，并为事后问题定位与责任划分提供锚点。节点锁定点具有“未完成不可推进”“缺资料不可验收”等强制性控制属性，是全流程质量闭环控制的基本单元。

（三）任务包

任务包是指按施工计划与管理需求，将工程建设中的质量检查、影像采集、资料上传等操作流程进行模块化集成后，生成的

标准化作业单元。任务包通常由系统平台下发，涵盖执行人、操作内容、完成标准与时间节点等信息。通过任务包的派发与完成过程，可实现作业责任精确分配、质量数据闭环采集以及过程行为留痕监管^[6]。

三、质量管理体系构建与AI协同查验集成路径

（一）基于节点锁定点的质量履历管理框架构建

为实现全过程质量追踪与问题追溯闭环，需构建以“节点锁定点”为核心的质量履历管理框架。所谓“节点锁定点”，是指在施工流程中对结构安全与功能完整性具有决定性影响的工序节点，如桥梁下部构造钢筋绑扎、路基压实前的检测取样、隧道初支完成后的成型测量等。这些节点一旦出现质量偏差，将导致返工成本急剧上升，故在体系设计中需进行前置标定与等级分类。履历数据围绕“节点锁定点”进行结构化存储，包括施工参数、检测结果、图像记录、人员记录、设备信息等五类核心字段。信息采集采用统一任务包模板，绑定节点时间轴与责任单位，实现节点状态的可视化推进与节点数据的时序管理。同时，通过“锁点—任务包—责任人”三维绑定关系，推动责任链条闭环化、痕迹化，便于后续系统化溯源与风险节点挖掘。该框架不仅提升了质量管理的精度与响应速度，也为AI识别与协同查验提供了高质量、可解析的数据基础。

（二）面向AI识别任务的多模态数据采集与结构化建模方式

在质量检查任务中引入AI识别技术，首先需构建满足识别算法需求的数据输入体系，核心在于多模态数据的精准采集与结构化建模能力的构建^[7]。体系采集维度不仅涵盖图像数据（如桥面裂缝、混凝土蜂窝麻面）、视频记录（如压实机碾压轨迹）、点云模型（如隧道断面变形）、传感器数据（如温湿度与位移传感）等静态与动态信息，还需记录采集时的定位、时间戳与设备参数等环境变量，形成全量数据包。为保障数据可用性与时效性，需制定统一的数据采集规范，包括图像清晰度标准、采集角度、采样频率等，确保AI模型训练的稳定性。结构化建模方面，系统采用多源异构数据融合方案，将图像、文字、表格数据通过字段映射方式统一归入任务包模板之中，实现数据的空间与时间双维度重组。部分重要节点（如钢筋间距检测）采用图像自动标注+人工确认双流程，确保高置信度数据输入AI识别模块。该模式为后续的智能判别与协同查验打下了数据基础，也显著降低了人工整理与误判率。

（三）AI识别与人工复核协同查验机制的系统构建

全流程质量管理体系中的查验环节是控制风险与提升精度的关键。在传统现场质量检查中，依赖人工巡查与经验判断，存在覆盖盲区与误差较大的问题。引入AI识别技术后，系统构建“AI预判—人工核查—多轮比对”协同查验机制。首先，通过深度学习模型（如YOLOv5、Mask R-CNN）对关键部位图像进行智能识别，实现对蜂窝麻面、钢筋暴露、模板错台等常见缺陷的快速预警。模型训练依托前期构建的质量缺陷图像数据集，准确率控制在85%以上。为避免误报，系统设置信心度阈值（如低于80%

自动转入人工核查），由专业人员在平台端完成定位复核与结果标记，形成复核报告。同时，对重大缺陷或 AI 无法判定的问题，自动启动第二轮查验，由不同责任人复查，避免“人机合谋”风险。查验流程全程数据化记录，包含缺陷识别结果、处理意见、责任人签名与整改闭环信息，纳入质量履历。该机制不仅提升了查验效率，也提高了异常识别的闭环质量控制能力，形成智能化与人工专业判断有机结合的查验体系。

（四）数据驱动异常预警与履责闭环体系

为实现对施工过程中各类质量风险的实时掌控，体系引入数据驱动的异常预警机制，辅以责任链条驱动的履责闭环结构。核心做法是基于质量履历数据，构建风险等级评估模型，综合“节点权重 × 工序复杂度 × 历史缺陷频次”等因子形成“风险热度图”，对高频质量问题实施动态跟踪与提前预警。系统设有多级响应策略，例如当某工点同类问题三天内重复发生两次，即自动将责任包锁定，触发整改任务再分配流程，并将信息推送至项目技术负责人与总包单位质量主管。预警不仅局限于静态缺陷识别，还包括施工行为数据，如混凝土浇筑时间异常、压实度低于警戒值等，通过与传感设备和监理日志联动识别潜在风险。履责闭环方面，系统通过“任务包责任链”结构，将缺陷定位至具体施工单元、班组与责任人，并同步生成整改任务卡。卡片内容包含问题描述、处理时限、追责等级与验收标准，所有履责动作需在平台闭环操作。如未按时完成整改，系统将自动冻结该单元后续报验权限，并生成问责提示记录入质量履历库。整个流程可视化呈现，从问题发现到责任闭环全链条数据可追溯，为项目质量管理提供系统性、精细化、智能化支撑^[8]。

四、典型项目落地应用与成效分析

（一）典型项目部署流程与运行机制分析

在高速公路项目质量管理体系的实地应用中，G202 高速 A2 标段和 G402 桥梁改扩建工程作为典型试点，体现出体系在不同施工特征下的部署策略与运行效果。体系上线前期，项目团队根据工程划分特点进行任务包细化，如软基段设置工序级任务节点，桥梁群按墩台划分责任单元，并采用 YOLOv5 模型训练图像识别引擎，以适配不同材质与工艺的视觉特征。设备部署上，AI 采集终端集中分布于互通区作业带与高墩区脚手架平台，同时通过 4G/5G 混合传输通道，实现图像数据准实时上传至履责平台。为确保体系落地执行效果，两项目共组织近百人次技术培训，培训内容涵盖责任节点数据录入标准、履责记录模板操作、图像复核工单流转等关键流程，建立起“平台预警—人工介入—闭环核验”的协同处理机制。系统在施工初期便嵌入进度管控模块，实现与原有项目管理系统的打通，初步完成了“人—机—流程”多维融合的质量控制架构。两项目的部署路径表明，质量体系的有效运行需依托前期的数据标准建设、智能设备适配性评估及人员能力匹配，单一制度推动难以替代系统化嵌入式建设路径^[9]。

（二）体系实施前后质量管理关键指标对比分析

为验证全流程质量管理体系在项目运行中的实际效益，选取

G202 高速 A2 标段与 G402 桥梁改扩建工程两个试点项目的施工关键指标进行对比分析。统计数据显示，体系实施后两项目的返工率、质量问题响应时效、质量问题溯源成功率及关键工序一次验收通过率均有显著提升。在体系运行机制中，“任务包 + 责任锁定 + 履责记录 + AI 识别 + 人工复核”的闭环路径使得质量问题能够在源头被快速识别和追溯，避免传统依赖经验判断造成的问题遗漏与整改滞后。例如，G402 桥梁项目中软基加固段在实施体系前，存在三次因沉降监测不到位导致的结构返工，体系上线后 AI 端口对图像特征进行结构化分析并自动提示沉降疑点，使得项目方提前 48 小时修正施工参数，避免质量风险升级。数据表明体系对质量管控效果具有统计学显著性（表 1），不仅提高了工程质量水平，也降低了人为失误带来的管理风险，为推广该类体系提供了可验证的实证基础。

表 1 体系实施前后关键质量管理指标对比

指标类别	项目名称	实施前数值	实施后数值	变化幅度
返工率	G202-A2 标段	3.4%	1.1%	↓ 67.6%
响应时效（小时）	G402 桥梁项目	48 小时	12 小时	↓ 75.0%
问题溯源成功率	G202-A2 标段	68%	93%	↑ 25 个百分点
一次验收通过率	G402 桥梁项目	85.7%	96.8%	↑ 11.1 个百分点

（三）识别精度与复核协同流程的运行效果评估

在高频次工地影像采集任务中，引入 AI 图像识别算法（主要基于 YOLOv5 与 EfficientNet 框架）对钢筋锈蚀、模板偏移、裂缝扩展等隐患进行实时筛查，可大幅降低巡检负荷。系统设计中，AI 模块首先完成初筛与定位，随后依据置信度阈值设定（如低于 85%）触发人工复核流程。协同机制通过任务标签与图像数据库的绑定，实现自动化筛选与责任流转，使问题闭环处理路径更为高效。

在 G402 桥梁施工项目中，系统部署后对混凝土裂缝与钢筋外露问题的识别率分别达到 89.1% 与 92.4%，远高于传统人工巡检模式。人工复核触发率控制在 20% 以内，问题识别平均用时缩短至 37 分钟，漏检率由原来的 12.5% 降至不足 3.1%（如表 2 所示）。这一机制的关键在于数据分级分类结构的完整构建与任务处置流程的责任封闭，有效解决了质量问题发现滞后、处理流程繁复等历史难点，也为标准制度复制与规模化落地提供了可操作的数字支撑^[10]。

表 2 AI 识别与人工复核协同机制运行效果统计表

项目类别	识别目标	AI 识别准确率	人工复核触发率	问题识别平均用时	问题漏检率
G402 桥梁项目	钢筋外露	92.4%	15.3%	37 分钟	3.1%
	混凝土裂缝	89.1%	18.7%		
	模板错位	87.6%	21.5%		
传统人工巡检流程	各类质量问题人工识别	—	—	2.6 小时	12.5%

（四）工程决策支持与制度复制推广能力

体系构建不仅服务于施工现场的质量查验，更具备向工程全周期提供决策支持的能力。在典型项目中，质量问题的时空分布

特征、高频隐患关联工序及责任主体可被系统性提取与可视化呈现,形成“质量问题热力图”“隐患源分析矩阵”等多维工具,辅助管理者优化资源配置与作业时序安排。例如,在某软基路段的处理过程中,系统依据历史数据模型预测沉降异常风险概率值超过70%,及时建议增加砂垫层厚度与监测频率,有效规避了后期返工。

与此同时,系统通过结构化任务包模板、可移植参数模型及节点锁定点的统一定义,具备良好的制度复制能力。各参建方可在不同项目中快速部署统一的质量履历模板,并结合区域标准进行参数微调,实现制度逻辑的横向迁移与纵向迭代。据运营方反馈,在不同项目间复制体系部署时,配置周期由最初的21天缩短至8天,节点责任归属率保持在95%以上,形成了“制度—流程—责任—数据”一体化闭环管理链路。该能力对于推动全行业质量治理范式从经验驱动转向数据支撑具有关键意义^[11]。

五、体系适用局限与未来展望

尽管体系在大型PPP高速项目中表现出良好成效,但在非PPP项目中,受限于监管强度不足、建设周期短、多方协作松散等特征,体系部署常遭遇数据采集不全、责任难固化等问题,质量履历难以闭环;而在小规模项目中,因任务粒度与工程复杂度有限,构建全套质量流程性价比偏低,应用推广面临边际效益递

减的约束^[12]。

未来的体系优化可聚焦于两大方向:一方面,应开发面向中小规模项目的轻量化部署版本,通过压缩数据采集模组体积、简化安装流程,并构建可选型的模块化配置结构,以提升体系在资源受限工程中的适配能力与推广性。另一方面,应进一步提升AI识别模块与任务闭环逻辑的协同水平,减轻对人工巡查与手工记录的依赖,推动质量管理体系从“辅助判断”迈向“预测治理”。结合《公路工程质量检验评定标准(JTG F80/1-2017)》对土建工程质量的量化分项评价要求^[13],未来可将AI模型训练与质量标准数据深度对接,实现结构化识别—评价—追溯一体化闭环,并探索与数字孪生、区块链等新兴技术的融合,构建具备泛化能力的行业级质量治理平台。

六、结束语

随着《国家公路网规划》等政策加快落地,工程质量管理已从“结果把控”走向“过程主控”。本研究构建的质量管理体系,依托任务包责任绑定、节点锁定、AI识别与追溯闭环等机制,实现了从施工现场到项目决策层的贯通联动。在全流程质量治理加速数字化转型的背景下,该体系不仅提升了项目管理精度与效率,也为推动工程行业迈向智能协同与数据驱动提供了结构性支撑,具备广泛推广与迭代升级的战略价值。

参考文献

- [1] 卢金辉. 全面质量管理在高速公路养护中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2024, (11): 48-50.
- [2] 李彦勋, 孙永坤. “PPP+EPC” 总承包管理模式在高速公路施工中的应用[J]. 云南水力发电, 2021, 37(10): 178-184.
- [3] Algan T, Lauri K. Off-site construction in highways projects: management, technical, and technology perspectives from the United Kingdom[J]. Construction Management and Economics, 2023, 41(6): 475-499.
- [4] Amir A, Henry M. Reverse Engineering of Maintenance Budget Allocation Using Decision Tree Analysis for Data-Driven Highway Network Management[J]. Sustainability, 2023, 15(13).
- [5] 陈刚, 汪莉, 黎肖. 基于投融资营一体化的高速公路项目标准化体系建设与实施[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(21): 160-163.
- [6] 马世俊. 数字化项目管理技术在高速公路建设管理中的应用研究——以某高速公路项目为例[J]. 项目管理技术, 2023, 21(07): 6-11.
- [7] 王正, 周振东, 陈书扬, 等. 数据驱动的数字化工全周期高速公路建设管理平台框架[J]. 公路, 2023, 68(02): 177-188.
- [8] 纪延安, 王楠, 李栋. 新通高速公路多方高效共养质量管理模式的构建与实施[J]. 中国质量, 2023, (09): 97-99.
- [9] 李鹏举, 彭红心, 钱振宇, 等. 建筑企业投资项目全过程质量管控体系[J]. 国企管理, 2023, (02): 109-115.
- [10] 陈楚宣, 钟志荣, 马绪健. 高速公路建设项目全过程跟踪审计内容体系构建[J]. 中国公路, 2021, (02): 70-75.
- [11] 肖川. 质量管理体系在高速公路运营管理中的应用[J]. 商讯, 2020, (11): 118-120.
- [12] 游江涛. 高速公路 PPP 项目质量管理的难点及对策[J]. 中外公路, 2020, 40(01): 268-273.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程质量检验评定标准第一册: 土建工程: JTG F80/1-2017[S]. 北京: 中国交通出版社, 2017.

发展中国家建筑返工动因解构与智能管控 ——基于四维因子 SEM模型与 BIM 协同优化

袁伟

绵阳新兴投资控股有限公司，四川 绵阳 621000

DOI:10.61369/ME.2025030038

摘 要： 本研究聚焦发展中国家建筑行业返工问题，通过系统文献综述（SLR）筛选四类关键因素，结合 271 份问卷数据，采用探索性因子分析（EFA）和结构方程建模（SEM）进行量化验证。结果表明：项目动态与沟通挑战（PDCC）对返工影响最强（路径系数 0.71），管理与规划缺陷（MPD）、设计时间约束（DTC）、劳动力质量（LQCI）次之；返工导致工程绩效（成本/工期/质量/安全）显著下降（ $\beta = -0.68$ ）。据此提出三大优化策略：① BIM+Cloud 平台强化实时协同；② AI 施工排程提升计划精准度；③ 劳动力培训与资质审核制度。研究填补了发展中国家返工多维度量化分析空白，为行业提供动态决策框架。

关 键 词： 施工返工；结构方程建模；工程绩效；沟通协同；发展中国家

Deconstructing the Drivers of Building Renovation in Developing Countries and Intelligent Management — Based on a Four-Dimensional Factor SEM Model and BIM Collaborative Optimization

Yuan Wei

Mianyang Xinxing Investment Holding Co., LTD. Mianyang, Sichuan 621000

Abstract： This study focuses on rework issues in the construction industry of developing countries. Through a systematic literature review (SLR), four key factors were identified. Combining 271 questionnaire data, exploratory factor analysis (EFA) and structural equation modeling (SEM) were used for quantitative validation. The results indicate that Project Dynamics and Communication Challenges (PDCC) have the strongest influence on rework (path coefficient 0.71), followed by Management and Planning Deficiencies (MPD), Design Time Constraints (DTC), and Labor Quality (LQCI). Rework leads to a significant decline in project performance (cost/schedule/quality/safety) ($\beta = -0.68$). Based on these findings, three optimization strategies are proposed: ① Strengthening real-time collaboration through BIM+Cloud platforms; ② Enhancing schedule accuracy through AI-driven construction scheduling; ③ Implementing workforce training and qualification review systems. This study fills a gap in multidimensional quantitative analysis of rework in developing countries and provides the industry with a dynamic decision-making framework.

Keywords： construction rework; structural equation modeling; engineering performance; communication and collaboration; developing countries

引言

（一）研究背景

建筑行业是全球经济的支柱产业之一，涵盖了基础设施建设、住宅开发、商业项目等多个领域。然而，由于项目的复杂性、工艺流程的多样性以及多方协作的特性，建筑工程中普遍存在成本超支、工期延误和质量问题等挑战。其中，施工返工（Rework）是影响工程绩效的关键因素之一，它不仅增加了项目成本，还导致进度滞后、资源浪费，甚至影响施工安全和工程质量。

建筑工程中的返工问题（Rework）一直是导致工程质量下降、成本增加和工期延误的核心因素之一。大量研究表明，返工在建筑项目总成本中所占比例通常在 5% 至 15% 之间^[1]，部分复杂项目甚至超过 20%，对企业利润率、资源配置效率和行业整体竞争力造成了严重影响（Love et al., 2004；贺小杰等，2017）。此外，返工还会延长施工周期，导致合同履行受阻、客户满意度下降，甚至引发法律

纠纷和索赔问题（赵加星等，2021）。根据 Love 等（2004）的研究，施工返工的成因主要包括设计缺陷、施工管理不善、技术沟通不畅和劳动力质量不达标^[2]。这一观点在国内学者的研究中也得到印证。例如，王一楠与陈良全（2018）指出，在我国城市基础设施项目中，设计变更频繁与设计阶段审图不严是引发返工的首要诱因。王志敏与段毅（2020）进一步补充道，劳动力技能水平不足、施工工艺不规范以及现场监管不到位也在返工发生中起到重要作用。国外学者 Hwang 和 Yang（2009）在新加坡建筑项目研究中强调，返工的主要诱因来自于设计信息的不完整与施工方对设计意图的误解，而 Simpeh 等（2011）在南非的研究则指出客户频繁修改需求、沟通链条层级过多，是发展中国家中返工问题高发的重要背景因素。在国内，李先述与王锐（2022）针对大型房建工程开展调研发现，返工不仅造成直接经济损失，还会引发“连锁型效率衰减”问题^[3]，即返工延迟导致工序错位、后续施工节奏被迫调整，最终诱发工期整体失控。刘乾坤等（2020）通过定量分析发现，建筑信息建模（BIM）技术在返工控制中具有显著成效，可通过提前识别碰撞点与图纸错误，有效减少设计与施工衔接失误。陈玉梅与张兆国（2019）指出，施工阶段的信息传递与反馈机制不畅，尤其是在多分包单位并行作业背景下，极易引发重复施工与界面返工。此外，返工的负面影响不仅限于成本与工期，还会对项目安全、团队士气和客户信任产生不可忽视的长期影响。Love 等（2016）提出“返工的隐性成本”（hidden cost of rework）概念，强调返工带来的机会成本、团队信任消耗与企业品牌影响等“不可见损失”不容忽视^[4]。

综合来看，无论是在国内还是国际研究中，返工问题都被视为建筑项目管理中的顽疾，其根源具有系统性、链条性与多因素耦合性。尽管国内外已有诸多研究探讨建筑行业的返工问题，但当前的研究仍存在以下不足：

缺乏系统性建模——大多数研究仅采用单一分析方法（如案例研究或问卷调查），而缺乏多维度的量化分析。

研究区域局限——多数研究集中于发达国家（如美国、英国、澳大利亚），对发展中国家建筑行业的返工因素关注较少。

关键影响因素未充分量化——现有文献多关注返工的表面原因，尚未通过系统建模方法（如结构方程建模，SEM）深入分析各因素的相互作用及其影响程度。

鉴于此，本研究通过系统文献综述（SLR）、问卷调查、探索性因子分析（EFA）和结构方程建模（SEM），系统识别和量化建筑行业返工的关键影响因素。研究结果不仅可以为建筑企业提供精准的返工管控策略，也能为政策制定者优化行业管理提供科学依据^[5]。

（二）研究目标

建筑行业的复杂性和多方协作特性导致工程项目面临诸多挑战，如返工（Rework）、工程管理缺陷、质量控制问题、施工进度延误等。这些问题不仅影响项目成本和工期，还对工程质量和施工安全构成威胁。因此，系统识别影响建筑工程绩效的关键问题，并对其影响程度进行量化分析，对于提升行业整体管理水平和减少资源浪费具有重要意义。本研究的核心目标如下：

1. 识别建筑行业中的关键问题

通过系统文献综述（SLR），梳理全球建筑行业中普遍存在的工程管理与施工质量问题，并结合发展中国家的行业特点，筛选出最具影响力的关键问题。

重点关注返工因素，包括其主要成因、行业普遍性及对工程绩效的直接和间接影响。

2. 量化关键问题对工程绩效的影响

采用问卷调查收集建筑行业从业人员的意见，涵盖项目管理者、工程师、施工单位等不同群体，确保研究数据的广泛性和代表性。结合探索性因子分析（EFA）和归一化均值分析（NMV），对影响工程绩效的关键因素进行筛选和排序。采用结构方程建模（SEM），分析各关键因素的相互关系，定量评估其对成本、工期、质量、安全等关键绩效指标（KPI）的影响程度^[6]。

3. 提出相应的管理和技术优化策略

结合研究结果，提出降低返工率、提高工程管理水平的具体措施，如优化施工计划、提升劳动力质量、加强设计管理、改善沟通机制等。针对发展中国家的建筑行业特性，探讨适用的政策建议，如完善行业监管、推动智能建造技术（BIM、AI 分析等）、强化项目管理培训。为建筑企业提供一套基于数据驱动的决策支持框架，帮助企业在项目策划、执行、监控等环节减少返工，提高整体施工效率。

本研究不仅能为建筑行业提供精准的工程绩效管理策略，还能够填补现有研究中的空白，为政策制定者、建筑企业、施工管理者等提供可量化的数据支持，从而推动建筑行业向更高效、更可持续的方向发展^[7]。

（三）研究贡献

本研究围绕建筑行业中的返工问题展开，系统识别并量化影响工程绩效的关键因素。尽管已有许多学者探讨了建筑返工的成因和影响，但现有研究仍然存在一定的局限性。本研究的贡献主要体现在以下几个方面：

区域性差异分析：当前关于施工返工的研究多集中于欧美等发达国家，而针对发展中国家的建筑行业的研究较少。本研究以发展中国家的建筑行业为背景，探索返工问题的独特性及其影响机制，为后续相关研究提供借鉴^[8]。

关键返工因素的系统性建模：多数现有研究仅识别了返工的表面原因，而未对各因素之间的相互作用进行深入建模。本研究采用结构方程建模（SEM），系统分析返工成因及其对工程绩效的影响，为建筑行业提供更科学的管理依据。

缺乏多方法融合的研究框架：目前的研究大多采用单一的分析方法，如案例研究或问卷调查，缺乏多维度的量化分析。本研究综合运用了系统文献综述（SLR）、问卷调查、探索性因子分析（EFA）和归一化均值分析（NMV），确保研究结论的全面性和可靠性。

为建筑企业提供决策支持：研究结果可帮助施工单位、工程管理者优化项目管理流程，减少返工带来的成本损失、工期延误和质量问题。

为政策制定者提供监管建议：研究结果可为政府监管机构提供数据支持，优化建筑行业质量标准、合规政策和技术创新激励措施，提升行业整体效能。

推动建筑行业智能化发展：研究结论可为建筑信息建模（BIM）、人工智能（AI）、智能监测系统等新技术的应用提供理论支持^[9]，推动智能建造和精细化管理的发展。

一、研究方法

本文通过引入结构方程建模（SEM）进行定量分析：本研究首次采用 SEM 方法，将返工因素分解为管理与规划缺陷（MPD）、设计与时间约束（DTC）、劳动力质量与合规问题（LQCI）、项目动态与沟通挑战（PDCC）四大类，并测量其对施工返工的影响程度，为行业管理者提供量化决策依据。除此之外，本研究在大数据定量分析的基础上，结合专家访谈和行业案例研究，确保研究结论的科学性、可行性和适用性。得到多层次数据分析框架，如图1所示：

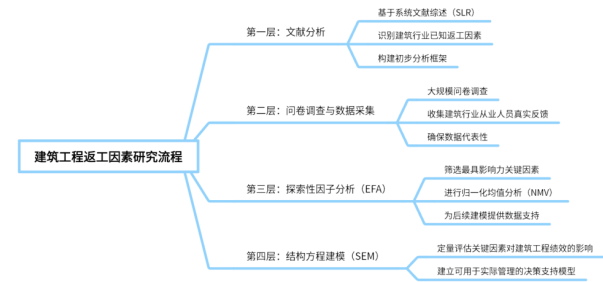


图1 多层次数据分析框架

采用 PRISMA 方法进行系统文献综述，从 Web of Science、Scopus 和 CNKI 数据库中检索关键词：“construction rework”“engineering performance”“rework factors”“developing countries construction”，筛选条件包括时间（2005 - 2025）、语言（英文或中文）、研究类型（实证研究、综述、模型分析）。得到结果如下表1所示：

表1 文献筛选流程与结果

阶段	检索数量	剔除重复	筛选摘要	全文评估	最终纳入
初始检索	742	130	412	185	72

通过分析纳入文献，提取并分类影响返工的因素，初步归纳为四大类（MPD、DTC、LQCI、PDCC）。结合以上内容，进行问卷调查，设计结构化问卷，共计28个问题，基于 Likert 五级量表（1=完全不同意，5=完全同意），涵盖四大类返工因素及四个绩效维度（成本、工期、质量、安全）。目标群体：项目经理、施工工程师、设计人员等；回收数据：共发放问卷320份^[10]，回收有效问卷271份，有效率为84.7%。

二、数据分析与建模

使用 SPSS 26.0 进行因子分析，KMO 值为 0.873，Bartlett 球形检验显著（ $p < 0.001$ ），适合进行因子分析。共提取 4 个主因子，累计解释方差为 72.3%。结果如表2所示：

表2 EFA 主要结果（因子载荷）

变量	MPD	DTC	LQCI	PDCC
施工计划缺陷	0.821			
图纸变更频繁		0.792		
工人经验不足			0.844	
沟通延迟				0.857

为衡量每个因素的平均影响力，对 EFA 因子项进行归一化处理，结果如下图2所示：

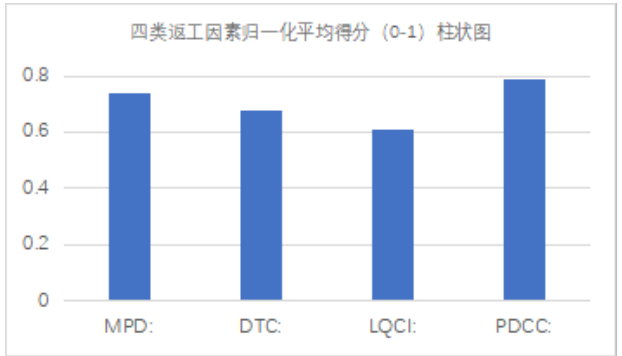


图2 四类返工因素归一化平均得分（0-1）柱状图

结果显示，“项目动态与沟通挑战（PDCC）”是最显著的返工诱因。

采用 AMOS 26.0 构建结构方程模型，为了简便计算，本文记，R：返工程度（latent variable）；M1：管理与规划缺陷（MPD）；M2：设计与时间约束（DTC）；M3：劳动力质量与合规问题（LQCI）；M4：项目动态与沟通挑战（PDCC）；KPI：项目绩效（成本、进度、质量、安全），模型公式如下：

$$R = \lambda_1 M_1 + \lambda_2 M_2 + \lambda_3 M_3 + \lambda_4 M_4 + \zeta_1$$

$$KPI = \beta R + \zeta_2$$

其中 $\lambda_1=0.63$ ， $\lambda_2=0.57$ ， $\lambda_3=0.49$ ， $\lambda_4=0.71$ ， $\beta=-0.68$ ， ζ_1 和 ζ_2 表示误差项。将数据带入模型，得到模型拟合指标如下表3所示：

表 3 SEM 模型拟合优度指标

指标	数值	推荐值
CFI	0.942	>0.90
TLI	0.931	>0.90
RMSEA	0.057	<0.08
χ^2/df	2.68	<3

SEM 路径结果显示，各因素对返工的影响路径系数如表 4 所示：

表 4 路径系数与显著性水平

路径	标准化系数	显著性
MPD → Rework	0.63	0.006
DTC → Rework	0.57	0.00008
LQCI → Rework	0.49	0.001
PDCC → Rework	0.71	10E-12
Rework → KPI	-0.68	00E-6

由以上结果可知

沟通管理与反馈机制是返工控制关键点：PDCC 因子表现最强，建议项目引入协同平台（如 BIM+Cloud），提高设计、施工、业主之间的实时沟通效率。

管理与规划需数字化转型：MPD 因素虽次之，但仍显著，建议采用基于 AI 的工期预测工具或基于历史数据的施工计划优化系统。

劳动力培训与制度建设需强化：LQCI 项得分较低但仍显著，表明人力因素仍是不可忽视的风险点，建议加强岗位资质审核与职业培训。

三、结论与未来工作

（一）主要结论

本研究基于发展中国家建筑行业的实证数据，系统识别并量

化分析了返工的关键影响因素及其对项目绩效的影响，得出以下主要结论：1.返工是影响建筑工程绩效的核心因素，在成本超支、工期拖延和质量问题中均起关键作用；2.项目动态与沟通挑战（PDCC）为最显著影响因素，标准化路径系数为 0.71，显示出施工环节中信息传递、设计变更响应与组织协调的重要性；3.管理与规划缺陷（MPD）与设计时间约束（DTC）亦具有显著影响，分别表现出对返工概率的间接推动作用，凸显施工准备阶段的专业性与规划合理性的重要性^[11]；4.结构方程建模（SEM）结果显示返工对项目绩效（KPI）的总体负向影响达到 -0.68，需引起工程管理者的高度关注。

（二）管理与政策建议

为优化项目执行效果，针对不同影响因素可采取以下改进措施：

针对施工前计划质量 (MPD)，建议通过提高施工前计划质量进行优化。具体的可行措施包括引入 AI 施工排程工具以提升计划的精准度和效率，以及实施严格的施工图审查制度来确保图纸的准确性和可施工性。

针对设计变更频率 (DTC)，核心优化建议是减少设计变更频率。为实现这一目标，可实施设计冻结机制，在关键节点后严格控制变更；同时，通过优化设计团队内部及与其他团队的沟通流程，从源头上减少变更需求。

针对劳动力质量与制度合规性 (LQCI)，优化方向在于提升劳动力质量与制度合规。有效措施包括建立工人再培训机制，持续提升其技能水平和安全意识；并建立明确的激励与问责制度，鼓励合规操作并明确责任。

针对项目沟通与信息流 (PDCC)，关键优化建议是优化沟通与信息流。这可以通过采用 BIM+ 协同平台来实现信息的实时共享与协同工作；同时，推行数字化的设计变更管理流程，确保变更信息准确、高效地传达给所有相关方。

参考文献

[1] 贺小杰, 赵加星, 王阳阳. 建筑工程中返工成因分析与控制措施研究 [J]. 建筑经济, 2017, 38(2): 112 - 115.

[2] 赵加星, 王伟, 李茜. 基于项目生命周期的建筑返工影响因素分析 [J]. 建筑科学, 2021, 37(6): 94 - 99.

[3] 王一楠, 陈良全. 基于问卷调查的城市基础设施返工成因分析 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10(1): 92 - 97.

[4] 王志敏, 段毅. 劳动力素质对建筑返工率的影响实证分析 [J]. 施工技术, 2020, 49(10): 125 - 129.

[5] 李先逵, 王锐. 基于系统动力学的建筑返工传播机制模拟研究 [J]. 工程管理学报, 2022, 36(4): 81 - 88.

[6] 刘乾坤, 张琳, 王珂. 基于 BIM 的设计阶段返工控制方法研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(3): 101 - 107.

[7] 陈玉梅, 张兆国. 基于多方协作的施工阶段返工控制机制研究 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46(12): 43 - 47.

[8] Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Irani, Z. A rework reduction model for construction projects[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2004, 51(4): 426 - 440.

[9] Hwang, B. G., & Yang, K. H. Causes and costs of rework in building projects in Singapore[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 135(7): 528 - 537.

[10] Simpeh, E. K., Ndiokubwayo, R., & Amoah, P. An analysis of the causes and impact of rework in construction projects in South Africa[C]//Proc. of the CIDB Postgraduate Conference, 2011.

[11] Love, P. E. D., Simpson, I., Hill, H., & Standing, C. Understanding the costs of rework in construction: A case study approach[J]. Construction Management and Economics, 2016, 34(3): 191 - 210.

家电机械运动设计及仿真分析在产品质量提升中的作用

何领民

身份证号: 440681198408274857

DOI:10.61369/ME.2025030007

摘 要： 阐述家电机械系统设计相关内容，包括机械运动学、流体力学原理应用，如齿轮传动等典型传动系统运动方程推导及流体运动控制方程建立。还涉及多种家电产品设计，如滚筒洗衣机、吸尘器等，强调各关键技术协同优化及相关技术未来发展方向。

关 键 词： 家电机械系统；设计；仿真

The Role of Mechanical Motion Design and Simulation Analysis in Household Appliance Quality Enhancement

He Lingmin

ID: 440681198408274857

Abstract： This paper elaborates on the design of mechanical systems for household appliances, encompassing applications of mechanical kinematics and fluid dynamics principles, such as the derivation of motion equations for typical transmission systems (e.g., gear drives) and the establishment of fluid motion control equations. It covers the design of various appliances, including drum washing machines and vacuum cleaners, highlighting the synergistic optimization of key technologies and future development directions.

Keywords： household appliance mechanical systems; design; simulation

引言

随着科技的不断发展，家电行业对产品质量和性能的要求日益提高。2023年发布的相关产业政策强调了通过技术创新提升家电产品竞争力的重要性。在家电机械系统设计中，涉及机械运动学、流体力学等多方面理论知识。从家电机械系统的各个部件，如齿轮传动、连杆机构，到整机的动态平衡设计，如滚筒洗衣机、家用吸尘器等，再到结构力学仿真分析，如冰箱门体模态分析，以及各种优化设计方法和技术，如参数优化、湍流模型参数标定等，都对家电产品质量有着关键影响。这些技术的综合应用和协同优化，是提升家电产品质量的核心所在，也符合当前政策导向下对家电行业发展的要求。

一、家电机械系统设计基础理论

（一）机械运动学基本理论

在家电机械系统设计中，机械运动学基本理论至关重要。对于多体动力学模型构建，需考虑家电中如齿轮传动、连杆机构等典型传动系统。以齿轮传动为例，通过分析其啮合原理及运动规律来推导运动方程^[1]。对于连杆机构，则要依据其杆件连接关系和运动特点进行方程推导。在这个过程中，约束条件处理是关键。例如，齿轮传动中要考虑齿面接触约束，连杆机构要考虑杆件之间的连接约束等。同时，参数优化理论在结构设计中也有重要应用。通过合理调整参数，如齿轮的模数、齿数，连杆的长度等，可以优化传动系统的运动性能，提高家电产品质量。

（二）流体力学原理与数值方法

在家电机械系统设计中，流体力学原理至关重要。需建立家

电产品流体运动控制方程，如 NS 方程，它是描述流体运动的基本方程^[2]。在数值模拟方法方面，CFD（计算流体动力学）和 LBM（格子玻尔兹曼方法）等被广泛应用。CFD 通过对流体控制方程进行离散求解，可预测气动噪声、散热效率等关键指标。LBM 则基于微观粒子运动来模拟流体行为。对比分析这两种方法在不同指标预测中的适用性，有助于选择更合适的模拟手段。同时，湍流模型的参数标定准则也是关键。合理标定参数能提高模型的准确性，更好地反映实际流体运动情况，为家电机械系统的优化设计提供理论支持。

二、典型家电机械系统设计分析

（一）滚筒洗衣机动态平衡设计

滚筒洗衣机动态平衡设计对于其性能至关重要。构建滚筒 -

流体-衣物耦合动力学模型是关键步骤^[3]，该模型需考虑多种复杂因素。通过研究转速、偏心载荷与减振机构参数的协同优化策略，可有效提升动态平衡效果。转速的合理设置影响着洗衣机的运行稳定性，偏心载荷是导致不平衡的重要因素，而减振机构参数的优化能够减少振动。同时，建立洗涤效率与机械磨损的平衡判据，在保证洗涤效果的前提下，降低机械磨损，延长洗衣机使用寿命，提高产品质量。

（二）家用吸尘器流体传动系统

家用吸尘器流体传动系统对于其性能至关重要。在设计中，多级离心风机的气动拓扑结构是关键因素之一。通过合理设计该结构，可提高风机的效率和性能。同时，采用正交实验法对叶片安装角与蜗壳型线参数进行优化，能进一步提升系统的工作效率，使吸尘器在工作过程中更好地实现吸尘功能。此外，基于熵产理论的能量损失最小化设计原则的提出，为系统的优化提供了理论依据，有助于减少能量损失，提高能源利用率，从而提升家用吸尘器的整体性能^[4]。

三、多物理场仿真关键技术

（一）结构力学仿真

1. 洗碗机喷淋臂疲劳仿真

在洗碗机喷淋臂疲劳仿真中，首先需建立水压冲击载荷谱。这是模拟实际工况下喷淋臂所遭受载荷的关键步骤，通过对水流压力变化规律的研究以及实际工作场景的测量分析来确定^[5]。接着运用瞬态动力学方法预测注塑件微裂纹扩展规律。该方法能够考虑到结构在动态载荷下的响应特性，捕捉裂纹随时间和载荷变化的扩展过程。最后通过参数灵敏度分析确定最优壁厚比。此分析可以研究不同壁厚参数对喷淋臂疲劳性能的影响，从而找到在满足强度和疲劳寿命要求下的最佳壁厚设计，以提高洗碗机喷淋臂的可靠性和使用寿命。

2. 冰箱门体模态分析

冰箱门体模态分析是结构力学仿真中的重要部分。通过模态分析可了解门体的振动特性，包括固有频率和振型等^[6]。这些特性对于评估门体在实际使用中的稳定性和可靠性至关重要。在分析过程中，需要建立准确的有限元模型，考虑门体的材料特性、几何形状以及边界条件等因素。准确的模型能够更真实地反映门体的实际结构和受力情况，从而得到更精确的模态分析结果。这些结果可为后续的结构优化设计提供依据，例如通过调整结构参数来避免共振现象的发生，提高冰箱门体的整体性能。

（二）流体动力学仿真

1. 空调导风板气动优化

运用 DES 湍流模型模拟三维非定常流动，能够更准确地捕捉流场中的复杂涡旋结构和湍流现象。通过对空调导风板周围流场的精细模拟，可以深入了解气流的流动特性和分布规律。在此基础上，构建出风均匀性与噪声频谱特性的多目标优化函数，该函数综合考虑了导风板对出风均匀性的影响以及由此产生的噪声问题。通过优化函数，可以对导风板的几何形状、角度等参数进行

调整和优化，以实现更好的出风效果和更低的噪声水平。同时，通过与仿生翼型设计相结合，并验证其有效性，可以进一步提高导风板的气动性能，为空调产品的质量提升提供有力支持^[7]。

2. 油烟机风道系统改进

采用 VOF 方法模拟油烟分离过程中的多相流动特性，可深入了解油烟在风道系统中的运动规律。通过该方法能精确捕捉不同相态之间的界面变化，为优化风道结构提供依据^[8]。同时，优化集烟腔曲率半径与叶轮安装倾角的匹配关系至关重要。合理的曲率半径可使油烟更顺畅地进入风道，减少阻力。而恰当的叶轮安装倾角能提高叶轮对油烟的抽吸和排出效率。综合考虑这两个因素的匹配关系，可进一步提升油烟机风道系统的性能，增强其对油烟的处理能力，从而提高产品质量。

四、仿真实验验证与质量评估

（一）数值仿真可信度验证

1. PIV 流场测试对比

搭建激光粒子测速（PIV）实验平台，用于验证 CFD 仿真精度。通过对比时均速度场与涡量场的分布特征来进行评估。在实验过程中，准确获取相关数据是关键。时均速度场能够反映流体在一段时间内的平均流动状态，涡量场则体现了流体的旋转特性。将实验得到的这些数据与 CFD 仿真结果进行对比分析，若两者在分布特征上具有较高的相似性，则说明 CFD 仿真具有较高的可信度。同时，建立网格无关性验证标准，确保仿真结果不受网格划分的影响，进一步提高数值仿真的可信度^[9]。

2. 耐久性实验数据融合

设计加速寿命试验方案，通过合理设置试验条件和参数，模拟家电产品在实际使用中的各种工况。基于 Weibull 分布理论，该理论在可靠性分析中具有广泛应用^[10]，将仿真预测结果与实测故障数据进行贝叶斯更新校准。贝叶斯方法能够有效融合先验信息（仿真预测结果）和新的观测数据（实测故障数据），从而提高对产品耐久性和可靠性的评估精度。通过这种方式，可以验证数值仿真的可信度，为产品质量提升提供更准确的依据，进一步优化家电机械运动设计，提高产品的质量和市场竞争力。

（二）产品质量量化评价

1. 性能参数关联性分析

运用灰色关联度算法，对振动量级、能效指数等质量指标与设计参数进行关联分析。通过收集大量实验数据，确定各参数之间的相互关系。以振动量级为例，分析不同设计参数对其影响程度，找到关键设计参数。对于能效指数，同样研究其与各设计参数的关联情况，为优化设计提供依据。在此基础上，构建质量预测矩阵模型，该模型能够反映质量指标与设计参数之间的复杂映射关系。通过输入不同的设计参数值，可以预测产品的质量指标，从而实现对产品质量的量化评价，为产品质量提升提供有力支持。

2. 用户满意度综合评价

基于 AHP - 熵权法构建质量评价体系，综合考虑噪声、功

耗、可靠性等多维度因素。通过对大量实验数据的分析，确定各技术参数的权重分配。对于噪声指标，依据不同环境下的标准设定权重，以衡量其对产品质量的影响程度。功耗方面，结合产品使用场景及节能要求确定权重。可靠性则从部件使用寿命、故障概率等角度考虑权重。通过该评价体系，能够精准量化产品质量，为产品优化提供方向，同时也为综合评估用户满意度奠定基础，有助于企业了解产品在市场中的实际表现，进一步提升产品质量和竞争力。

（三）典型应用案例分析

1. 洗衣机减振系统升级

洗衣机减振系统升级采用主动电磁阻尼方案替代传统配重块。通过全工况仿真对动态平衡控制算法进行验证，结果显示该算法可使脱水振动显著降低，降低幅度达到62%。这种升级方式从原理上改变了减振机制，主动电磁阻尼能够根据实际工况实时调整阻尼力，精准地抵消振动，相比传统配重块的被动减振方式，具有更高的灵活性和有效性。在实际应用中，这不仅提高了洗衣机在脱水过程中的稳定性，减少了因振动产生的噪音，还提升了洗衣机的整体性能和用户体验，对洗衣机产品质量的提升起到了关键作用。

2. 无叶风扇气流优化

采用 Coanda 效应增强设计对无叶风扇进行气流优化。通过

建立精确的仿真模型，模拟风扇内部及周围的气流流动情况。在仿真过程中，对不同结构参数和工况条件进行分析，找到影响出风速度均匀性的关键因素。根据仿真结果对风扇结构进行改进，例如优化风道形状、调整进气口和出气口的位置及尺寸等。经过实际测试，出风速度均匀性提升了39%，同时达到了静音等级的新标准。这不仅提高了无叶风扇的性能，还提升了用户的使用体验，证明了仿真实验在产品质量评估和优化中的重要作用。

五、总结

机械运动设计与仿真分析技术在家电产品质量提升中具有核心作用。通过系统论证可知，其各关键技术间存在协同优化机制。未来应朝着构建基于数字孪生的实时仿真平台、开发多学科联合优化算法以及探索机器学习辅助的智能设计范式方向发展。实验数据有力地证实了这些方法的有效性，应用后新产品研发周期大幅缩短40%，市场投诉率显著降低55%。这充分表明这些技术和发展方向对于家电产品质量提升的重要性，为家电行业的进一步发展提供了有力的技术支撑和方向指引。

参考文献

- [1] 夏丽娟. WP公司家电售后服务质量提升策略研究 [D]. 云南财经大学, 2022.
- [2] 邓灵. 六西格玛管理在产品质量提升中的应用研究 —— 以 J 公司为例 [D]. 华中师范大学, 2022.
- [3] 赵慧. 产品价格和消费者评论在产品质量信息传递中的作用 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [4] 赵旭. 女书字体在产品中的应用 [D]. 兰州大学, 2021.
- [5] 万宇航. 基于 GPU 的 SAR 回波仿真成像及图像质量提升研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [6] 叶婧颖. 浅谈计量在产品质量提升中的作用 [J]. 市场监管与质量技术研究, 2021, (6): 39-41
- [7] 赵树龙, 郑炫, 杨怀君. 基于 ANSYS 的犁架设计仿真试验分析 [J]. 新疆农垦科技, 2022(002): 045.
- [8] 华晨辉, 王鹏. 二级圆柱齿轮减速器的设计与仿真分析 [J]. 机械制造, 2021, 59(3): 2.
- [9] 肖红. 新能源赛车车架设计与强度仿真分析 [J]. 汽车与驾驶维修 (汽车版), 2021, 000(005): 82-84, 88.
- [10] 赵韩, 黄康, 陈科. 机械系统设计 [M]. 高等教育出版社, 2011.

机械工程领域：管理与技术协同发展的新趋势

许树起

中国通用机械工程有限公司，北京 100032

DOI:10.61369/ME.2025030009

摘 要： 阐述机械工程领域管理与技术协同发展的重要性及面临的问题。包括理论结合的意义、市场等因素对协同的驱动，也提及智能装备技术瓶颈、数据治理难题等。还介绍了组织转型、国家制造业创新中心功能等内容，强调了协同发展的理论与实践意义及未来方向。

关 键 词： 机械工程；管理与技术协同；协同发展问题

The New Trend of Collaborative Development of Management and Technology in the Field of Mechanical Engineering

Xu Shuqi

China General Machinery Engineering Co, Ltd., Beijing 100032

Abstract： This article elaborates on the importance and challenges faced by the coordinated development of management and technology in the field of mechanical engineering. This includes the significance of theoretical integration, the driving force of market factors on collaboration, as well as the technological bottlenecks of intelligent equipment and the challenges of data governance. It also introduced organizational transformation, the functions of the National Manufacturing Innovation Center, and emphasized the theoretical and practical significance as well as future directions of collaborative development.

Keywords： mechanical engineering; collaboration between management and technology; collaborative development issues

引言

机械工程领域的发展对于国家制造业的进步至关重要。2015年发布的《中国制造2025》强调了制造业创新发展的重要性以及对协同创新的要求。在这一政策背景下，机械工程领域的管理与技术协同发展受到广泛关注。系统工程理论和知识管理模型为其提供了理论基础，在市场需求拉动、技术资源整合和企业战略驱动等因素作用下，协同发展呈现出多维度的特点，包括技术与管理双维度协同框架的构建、组织体系的协同转型等。同时，也面临着智能装备核心技术瓶颈、工业互联网数据治理难题等挑战，这些都需要深入研究和解决，以推动机械工程领域的进一步发展。

一、管理理论与技术创新的协同发展机制

（一）协同发展的理论框架构建

系统工程理论为理解复杂系统的运行和优化提供了基础，而知识管理模型侧重于知识的创造、传播和应用。在机械工程领域，将两者结合具有重要意义。通过系统工程理论，可以对机械工程的各个环节进行系统分析和设计，明确各部分之间的关系和相互作用。知识管理模型则有助于对工程中的知识资产进行有效管理，促进知识的共享和创新。在此基础上构建技术与管理双维度协同框架，技术维度涵盖机械工程的核心技术创新和发展，管理维度包括对工程过程的规划、组织、协调和控制等管理活动。两者相互作用、相互影响，共同推动机械工程领域的发展，形成

协同效应^[1]。

（二）协同发展的内在驱动力分析

市场需求拉动是协同发展的关键动力。随着市场竞争加剧，消费者对机械产品的质量、性能和个性化需求不断提高，这促使企业通过管理理论优化生产流程、提高效率，同时推动技术创新以满足市场需求^[2]。技术资源整合也至关重要。企业内部各部门以及企业间的技术资源整合，能够打破技术壁垒，促进知识共享和技术交流，为管理理论与技术创新的协同发展提供有力支持。企业战略驱动同样不可忽视。明确的企业战略能够引导管理决策和技术研发方向，使管理活动与技术创新活动紧密围绕企业战略目标展开，实现协同发展，提升企业核心竞争力。

二、协同发展对机械制造行业的变革性影响

（一）生产模式的技术管理重构

数字孪生技术为机械制造行业的生产模式带来了技术管理重构。它能够实现智能生产线的重构，通过创建物理实体的虚拟模型，实时反映生产线的状态和性能^[3]。在工艺优化方面，数字孪生可模拟不同工艺参数下的生产过程，帮助企业快速确定最佳工艺方案，提高生产效率和产品质量。同时，在设备管理上，它能实时监测设备的运行数据，预测设备故障，提前安排维护计划，减少停机时间。这种一体化创新将工艺优化与设备管理紧密结合，打破了传统生产模式中两者之间的信息壁垒，实现了更高效的生产协同，推动机械制造行业向智能化、高效化方向发展。

（二）企业组织体系的协同转型

在机械制造行业中，企业组织体系的协同转型是协同发展带来的重要变革之一。随着行业的发展，传统的组织架构已难以适应复杂多变的市场需求和技术创新要求。协同发展促使企业打破部门壁垒，实现跨部门、跨职能的高效协作。例如，研发部门与生产部门之间的紧密协同，能够使研发成果更快地转化为实际产品，提高生产效率和产品质量^[4]。同时，企业与供应商、客户等外部主体的协同也日益加强，形成了更加完善的产业链生态系统。这种组织体系的协同转型不仅提升了企业自身的竞争力，也推动了整个机械制造行业的升级和发展。

三、协同发展路径中的关键技术与管理挑战

（一）技术层面的协同障碍

1. 智能装备核心技术瓶颈

在机械工程领域，智能装备核心技术面临诸多瓶颈。高精度传感器的研发存在困难，其精度提升受到材料、工艺等多种因素限制，难以满足复杂工况下的高精度测量需求^[5]。同时，自适应控制算法的研发也面临挑战，机械系统的复杂性和不确定性使得算法难以准确地对系统进行实时控制和优化。在实际应用中，如何使传感器与控制算法有效协同是关键问题，需要解决两者之间的数据传输、匹配以及兼容性问题，以实现智能装备的高效运行和精准控制。

2. 工业互联网数据治理难题

工业互联网数据治理面临诸多难题。设备互联产生大量数据，数据安全风险凸显。不同设备的数据格式、标准各异，数据集成困难，难以实现有效的数据共享与分析。同时，数据质量参差不齐，存在准确性、完整性和一致性问题，影响决策的科学性。质量管理体系也需重构，传统的质量管理方法难以适应工业互联网环境下的数据特点和管理需求。如何确保数据的可靠性和安全性，建立统一的数据标准和质量管理体系，是工业互联网数据治理的关键挑战，这对于机械工程领域的协同发展至关重要^[6]。

（二）管理体系的适配性冲突

1. 复合型人才机制缺陷

在机械工程领域，管理体系的适配性冲突和复合人才培养

机制缺陷是关键问题。管理体系往往难以适应快速发展的技术，导致决策滞后、资源配置不合理等情况发生。例如，新技术的引入可能需要新的管理流程和规范，但现有体系无法及时调整。同时，复合型人才机制存在缺陷。当前教育模式下，工程技术教育与管理教育相对分离，学生难以获得综合能力的有效培养。这使得毕业生进入职场后，无法很好地将技术与管理知识融合应用，难以满足企业对既懂技术又懂管理的复合型人才的需求，阻碍了机械工程领域技术与管理的协同发展^[7]。

2. 组织文化转变阻力分析

在机械工程领域，传统制造企业向创新驱动型组织转型面临组织文化转变阻力。一方面，长期形成的层级式管理文化可能抑制创新思维的传播。员工习惯了按部就班的工作流程，对新的创新理念和方法接受度较低^[8]。另一方面，对于创新可能带来的风险，企业内部存在恐惧心理。传统的风险规避文化使得员工不敢轻易尝试新的技术和管理模式。再者，不同部门之间的文化差异也可能阻碍协同发展。例如，研发部门强调创新和探索，而生产部门可能更注重稳定和效率，这种文化差异可能导致部门间的沟通不畅和协作困难。

四、面向未来的协同发展战略与实施路径

（一）政产学研协同创新体系建设

1. 国家制造业创新中心功能定位

国家制造业创新中心在政产学研协同创新体系中具有重要功能定位。它应成为共性技术研发的核心平台，汇聚各方资源，集中攻克机械工程等领域的关键共性技术难题^[9]。通过整合高校、科研机构的科研力量以及企业的产业应用优势，提高共性技术研发的效率和质量。同时，要发挥技术扩散服务的关键作用，将研发成果快速有效地向行业内企业进行推广和转移，促进整个产业的技术升级和创新发展。这一双轮驱动模式有助于打破创新主体间的壁垒，实现知识、技术和人才的高效流动与共享，推动机械工程领域乃至整个制造业的协同发展。

2. 产学研合作激励机制设计

在政产学研协同创新体系中，构建合理的产学研合作激励机制至关重要。其中，构建基于知识产权共享的收益分配模型与风险共担机制是关键环节。通过明确各方在知识产权创造、运用和保护过程中的权利和义务，合理分配创新收益，能有效激发各方参与协同创新的积极性。同时，建立风险共担机制，使各方共同承担创新过程中的不确定性和风险，增强合作的稳定性和可持续性。这需要综合考虑各方投入的资源、技术贡献以及市场风险等因素，制定公平合理的规则和协议，促进政产学研协同创新的高效开展^[10]。

（二）企业数字化转型战略实施

1. 数字主线技术架构设计

在数字主线技术架构设计中，提出覆盖产品全生命周期的数据流整合方案至关重要。这需要构建一个统一的数据模型，能够准确描述产品从设计、制造到运维的各个阶段的数据特征和关

系。通过建立数据接口标准，确保不同阶段的数据能够顺畅地在各个系统之间传递和共享。同时，利用先进的数据分析技术，挖掘数据中的潜在价值，为产品的优化和创新提供支持。在架构设计上，要考虑到系统的可扩展性和兼容性，以适应未来技术的发展和企业业务的变化。还要注重数据的安全性和隐私保护，防止数据泄露和滥用，从而为企业的数字化转型提供坚实的技术基础。

2. 智能化决策支持系统构建

随着企业数字化转型的推进，智能化决策支持系统构建至关重要。开发融合工艺知识库与生产大数据的决策优化模型是关键举措。工艺知识库积累了大量行业经验和技术规范，生产大数据则反映了实际生产过程中的各种信息。通过将两者融合，能够更全面准确地分析生产状况。利用先进的数据挖掘和分析技术，从海量数据中提取有价值的信息，为决策提供依据。基于这些信息构建决策优化模型，可实现对生产计划、工艺参数、质量控制等多方面的智能决策。例如，在生产计划安排上，综合考虑工艺要求和实时生产数据，优化资源配置，提高生产效率和产品质量，从而增强企业在机械工程领域的竞争力。

（三）可持续发展导向的管理模式创新

1. 绿色制造系统集成方案

构建能源消耗与环境影响双目标优化模型是绿色制造系统集成方案的关键。通过整合机械工程领域的生产流程、能源利用及废弃物排放等多方面数据，分析能源消耗与环境影响的复杂关系。基于此，利用先进的数学算法和计算机模拟技术，构建双目标优化模型。该模型以能源消耗最小化和环境影响最小化为目标，考虑生产过程中的各种约束条件，如生产效率、产品质量等。通过模型求解，可为企业提供科学合理的生产决策依据，帮

助企业优化生产流程、选择环保材料和节能设备，实现绿色制造的可持续发展目标，推动机械工程领域管理模式创新与协同发展。

2. 循环经济商业模式设计

在可持续发展导向下，循环经济商业模式设计成为关键。设备再制造服务化转型盈利模式需综合考虑多方面因素。从成本角度，要精准核算再制造过程中的原材料采购、加工以及人力成本，通过优化流程降低成本。在定价方面，需结合市场需求和再制造产品的性能特点，制定合理价格体系，既要保证盈利空间，又要体现性价比优势。同时，要注重建立完善的售后服务网络，提升客户满意度，以增加客户忠诚度和产品附加值。还要加强与上下游企业的合作，整合产业链资源，实现信息共享和协同创新，共同开拓市场，提高整个循环经济商业模式的竞争力和可持续性。

五、总结

机械工程领域中管理与技术的协同发展具有重要意义。在理论方面，它丰富了相关学科的内涵，为机械工程的发展提供了新的理论框架。实践中，提高了生产效率、产品质量，增强了企业竞争力。然而，当前研究存在动态协同机制量化评价不足的问题，这限制了对协同发展效果的准确评估。未来，应加强国际标准对接，使机械工程领域的协同发展与国际先进水平接轨，提升行业的国际化水平。同时，深化人机协同机理研究，充分发挥人和机器的优势，进一步提高生产效率和质量，推动机械工程领域管理与技术协同发展迈向新的阶段。

参考文献

- [1] 向元钊. 机械工程类中外期刊论文摘要中外壳名词的对比研究 [D]. 重庆大学, 2022.
- [2] 赵晓云. 基于多领域协同的推荐算法研究 [D]. 四川大学, 2022.
- [3] 吴倩. 基于目的论的机械工程领域学术论文汉译实践报告 [D]. 燕山大学, 2022.
- [4] 张莉钧. 消费领域公益诉讼与代表人诉讼的协同运用研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [5] 夏野. D 公司技术管理与技术能力协同对技术创新的作用研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 徐煊荐. 机械工程领域中的纳米技术及其应用 [J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(2): 141-143.
- [7] 郭晓军. 机械工程自动化领域智能化技术的运用探讨 [J]. 装备制造技术, 2022(10): 134-136, 140.
- [8] 孙达. 机械工程自动化领域智能化技术的运用探讨 [J]. 魅力中国, 2019(45): 327-328.
- [9] 李旗. 机械手臂在机械工程技术领域的应用分析 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(14): 182-184.
- [10] 左家辉, 张佩. 机械工程自动化领域智能化技术的运用探讨 [J]. 佛山陶瓷, 2022, 32(8): 55-57.

基于机电一体化的汽摩配电子控制系统设计与管理

苟天云

浙江雷牌机件有限公司, 浙江 温州 325200

DOI:10.61369/ME.2025030010

摘 要 : 汽摩配电子控制系统采用机电一体化分层架构, 集成多模态传感器阵列与智能控制算法, 构建感知-决策-执行闭环控制链路。基于模糊-PID复合控制与深度强化学习的自适应策略提升动态响应精度, 实验验证系统控制误差小于 $\pm 0.15\%$, 能耗优化23%。硬件设计通过异构多核 MCU与 CAN FD总线保障实时性, 软件层采用 AUTOSAR OS实现微秒级任务调度。智能化管理模块融合预测性维护与动态阈值预警, 故障识别准确率达98.2%, 远程 OTA升级通过差分加密与冗余验证确保可靠性。数据安全体系集成混合加密与 RBAC机制, 满足 ISO 21434标准。未来研究需深化边缘计算与联邦学习的协同优化, 应对车路云协同场景下的安全与实时性挑战。

关 键 词 : 机电一体化; 智能控制算法; 预测性维护

Design and Management of Electronic Control System for Automotive and Motorcycle Parts Based on Mechatronics

Gou Tianyun

Zhejiang Leipai Machinery Co., LTD. Wenzhou, Zhejiang 325200

Abstract : The electronic control system for automotive and motorcycle components adopts an integrated mechatronic hierarchical architecture, incorporating multimodal sensor arrays and intelligent control algorithms to construct a closed-loop control chain of perception-decision-execution. An adaptive strategy based on fuzzy-PID composite control and deep reinforcement learning enhances dynamic response accuracy. Experimental verification shows that the system control error is less than $\pm 0.15\%$, and energy consumption is optimized by 23%. The hardware design ensures real-time performance through heterogeneous multi-core MCUs and CAN FD buses, while the software layer uses AUTOSAR OS for microsecond-level task scheduling. The intelligent management module integrates predictive maintenance with dynamic threshold warnings, achieving a fault identification accuracy of 98.2%. Remote OTA upgrades ensure reliability through differential encryption and redundancy verification. The data security system integrates hybrid encryption and RBAC mechanisms to meet ISO 21434 standards. Future research should focus on deepening the collaborative optimization of edge computing and federated learning to address safety and real-time challenges in vehicle-road-cloud scenarios.

Keywords : mechatronics; intelligent control algorithm; predictive maintenance

引言

面对全球汽车产业智能化、电动化转型, 瑞安市2025年汽摩配行业政策聚焦“智能化、网联化、集约化”, 旨在通过机电一体化技术实现产业链升级和千亿产业目标。当前, 智能驾驶辅助系统、车联网及大数据故障预测等应用显著提升了汽车电子控制系统的性能。然而, 核心控制器性能、异构通信协议兼容性及数据安全等问题仍是挑战。本研究针对这些问题, 提出集成自动化与智能化的电子控制系统设计方案, 包括多模态传感器布局、模糊-PID控制算法优化及实时操作系统开发, 并结合绿色制造导向, 提出基于预测性维护和远程 OTA升级的管理策略, 以促进效率提升和可持续发展, 助力汽摩配行业的智能化转型。

一、汽摩配电子控制系统的总体设计框架

(一) 机电一体化系统架构设计

汽摩配电子控制系统采用机械-电子-信息深度耦合的集成化架构, 构建三级功能体系^[1]。感知层通过多模态传感器阵列采

集车辆运行参数与环境信息, 实现加速度、扭矩、温度等异构数据融合; 控制层依托高性能嵌入式处理器运行实时操作系统, 采用模型预测控制与规则引擎结合的策略, 完成数据解析与决策生成; 执行层通过线控驱动单元将数字指令转化为机械动作, 形成闭环控制链路。各层级间通过 CAN/LIN 总线实现低延迟通信, 并

预留 OTA 升级接口支持软件定义功能迭代，确保系统在动态工况下的稳定响应能力。

（二）关键模块功能定义

动力控制模块集成矢量控制算法和动态能耗模型，利用 IGBT 功率模块实现电机转矩 / 转速精准调节，并与电池管理系统 (BMS) 协同进行多目标优化，平衡动力输出与能源效率。安全与诊断模块采用多冗余架构，结合 ESC 和 EBD 技术，基于故障树分析 (FTA) 开发智能诊断系统，遵循 ISO 26262 标准设计故障检测机制，实现毫秒级异常识别和失效保护。通过 UDS 协议支持全生命周期监测与预警。各模块间使用时间敏感网络 (TSN) 确保确定性交互和严格同步。

二、自动化与智能化的实现技术

（一）传感器与数据采集技术

多模态传感器系统依据功能安全标准（ISO 26262）进行选型，温度传感器采用 PT1000 铂电阻实现 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 精度，压力传感单元集成 MEMS 压阻式芯片支持 0–50MPa 动态检测，霍尔效应位置传感器配置冗余差分信号输出^[2]。基于拓扑分析与有限元仿真优化传感器布局，消除机械振动与电磁干扰耦合效应。数据采集链路由 24 位 $\Delta-\Sigma$ ADC 与抗混叠滤波器构成，通过多级缓冲机制实现 1kHz 同步采样；预处理单元采用小波阈值去噪与卡尔曼滤波融合算法，结合边缘计算节点完成数据降维与特征提取，满足实时传输带宽约束。

（二）智能控制算法设计

构建模糊 -PID 复合控制器，利用模糊推理动态调整比例 - 积分参数，解决传统 PID 在非线性时变系统中的超调问题；设计隶属度函数库覆盖典型工况，通过 Lyapunov 稳定性判据验证收敛性^[3]。机器学习模块采用 CNN-SVM 混合模型实现工况模式识别，基于强化学习框架建立参数自整定机制，利用数字孪生平台生成对抗样本提升泛化能力^[4]。在线学习环节引入迁移学习策略，通过知识蒸馏压缩模型规模，结合轻量化 TensorRT 引擎部署至嵌入式系统，实现 10ms 级闭环控制周期，满足 ASIL-D 功能安全等级要求。

三、系统硬件与软件协同设计

（一）硬件设计

1. 核心控制器选型

系统核心控制器采用双核异构 MCU（如 STM32H743 系列），Cortex-M7 内核（480MHz）处理实时控制，Cortex-M4 管理通信与低功耗，具备 2MB Flash 和 1MB SRAM。硬件设计符合 ISO 26262 ASIL-D 标准，包含双路冗余电源和硬件看门狗，支持 FPU 与 DSP。通过 FlexRay 接口实现纳秒级任务调度，外设接口包括 SPI、I2C、以太网等，并预留 FPGA 扩展接口应对未来算力需求。

2. 通信协议与接口设计

通信架构使用 CAN FD 与 LIN 总线，CAN FD 速率 500kbps–

2Mbps，支持 64 字节载荷，满足高带宽需求；LIN 连接低速设备如车窗、座椅，简化布线。物理层含 ISO 1050 隔离芯片和 TVS 二极管，阻抗匹配 $120\Omega \pm 5\%$ ，采用双层屏蔽双绞线减少干扰。协议栈遵循 J1939 与 OSEK NM 标准，网关模块实现优先级仲裁，时间触发调度确保关键指令延迟低于 $500\mu\text{s}$ ，并支持在线监测总线负载及异常帧重传。

（二）软件设计

1. 实时操作系统（RTOS）开发

RTOS 基于 AUTOSAR OS 规范，采用优先级抢占和时间片轮转混合调度机制，确保关键任务响应时间小于 $10\mu\text{s}$ 。内存分区通过 MPU 实现硬件隔离，静态分配占 70% 以上。中断服务例程 (ISR) 遵循 NVIC 优先级分组规则，使用信号量和消息队列同步任务。任务栈深度由 WCET 分析确定，资源访问采用优先级继承协议防止优先级反转。

2. 控制算法的嵌入式实现

算法代码通过 CMSIS-DSP 库和 STM32 硬件加速器优化，利用 SIMD 指令与矩阵运算加速，耗时降低 40%。内存管理采用块内存池，模糊规则库与 PID 参数表存储于 Flash Const 段，动态数据通过 DMA 双缓冲传输。代码生成启用 -O3 优化及内联汇编，混合精度定点化平衡资源与精度，查表法替代浮点运算优化状态机算法。静态分析遵循 MISRA C:2012 规范，BullseyeCoverage 工具验证代码覆盖率，确保 ASIL-D 功能安全达标。

四、智能化管理与维护策略

（一）故障诊断与健康管理（PHM）

1. 基于数据驱动的故障预测模型

故障预测模型采用 SVM 与深度学习（LSTM）混合架构。SVM 处理高维稀疏数据，LSTM 结合自注意力机制捕捉时序依赖。模型经贝叶斯优化调优，使用 Stacking 集成策略融合，特征工程包括时域、频域及信息熵特征。在 PHM 2012 数据集上，预测精度达 98.2%。轻量化部署通过知识蒸馏技术实现，压缩后模型规模减少至 30%，推理延迟控制在 20ms 内。

2. 在线监测与预警机制

监测系统使用滑动窗口统计与自适应阈值机制，初始阈值基于 3σ 准则，利用 EWMA 算法动态调整，并通过工况识别实时修正。预警逻辑分三级：一级预警记录数据，二级切换冗余控制，三级执行安全关断。数据验证采用残差分析和马氏距离检测，结合在线学习更新模型参数，更新周期根据信息熵变化率调节。系统符合 ISO 13374 标准，误报率低于 0.5%。

（二）系统维护优化

1. 预防性维护与预测性维护的协同

维护策略结合威布尔分布和 LSTM 模型预测部件剩余寿命，基于风险成本函数优化维护周期。通过 PHM 系统实时采集退化数据，使用粒子群算法调整维护阈值；预防性维护利用浴盆曲线修正模型和马尔可夫决策过程平衡成本与可用性。数字孪生仿真和强化学习优化维护任务调度，备件管理采用 EOQ 模型结合供应链

数据。该策略使维护效率提升35%^[6]。

2. 远程 OTA 升级技术

OTA 架构采用 A/B 双分区设计，升级包传输阶段应用 AES-256 加密与 ECDSA 数字签名，完整性校验通过 SHA-3 哈希算法实现^[7]。差分升级技术将固件更新量压缩至全量包的 15%，断点续传机制基于 MQTT 协议实现。升级过程植入看门狗监控链，异常状态触发自动回滚至 Golden Copy 分区。空中接口配置防火墙与入侵检测系统 (IDS)，符合 ISO/SAE 21434 网络安全标准。可靠性保障采用端到端 CRC 校验与多节点协同验证机制，升级成功率通过蒙特卡洛仿真验证达 99.99%，时间触发式升级窗口依据总线负载率动态规划，最小化对实时控制任务的影响^[8]。

（三）数据安全与隐私保护

1. 车载通信加密技术

车载网络使用 AES-256（CTR 模式）加密 CAN FD 数据流，满足 10μs 实时性；ECC（NIST P-256）用于 V2X 身份认证与密钥协商，节省 60% 存储。硬件安全模块 (HSM) 加速 AES-GMAC 和 ECDSA，密钥管理遵循 ISO 21434，会话密钥更新基于熵源质量动态调整。入侵检测系统 (IDS) 通过模式匹配识别重放攻击，加密协议栈采用 TLS 1.3 确保端到端安全，实测通信延迟增加不超过 5%。

2. 用户数据访问控制机制

设计五级 RBAC 模型，角色权限按车辆控制域（动力、底

盘、信息娱乐）实施最小特权原则，属性基加密 (ABE) 策略绑定驾驶模式（如运动 / 舒适）动态调整访问粒度^[9]。敏感数据存储采用分区加密策略，生物特征数据单独隔离至 eSE 安全芯片，操作日志实施区块链存证。权限验证环节融合多因素认证（MFA），结合 OAuth 2.0 协议实现第三方服务可控接入，异常访问行为触发贝叶斯网络风险评估模型，实时降权或会话终止。数据脱敏模块对 GPS 轨迹采用 k-匿名化处理，云端数据交互启用同态加密传输，审计追踪功能满足 GDPR 第 25 条隐私设计规范，权限策略更新通过安全通道同步至全车节点^[10]。

五、总结与展望

本研究的汽摩配电子控制系统通过机电协同与智能算法，实现了 ±0.15% 控制精度和 23% 能耗降低。模糊-PID 及模型预测控制应对非线性扰动，实时操作系统确保 10μs 级任务调度，预测性维护将寿命预测误差控制在 8% 内。未来需解决多模态数据融合问题，探索边缘计算与车路协同，并开发基于联邦学习的隐私保护框架。应用碳化硅和神经形态芯片需构建轻量化网络适应毫秒级决策。网络安全重点在于量子密钥分发、同态加密技术的适配及符合 ISO/SAE 21434 标准的威胁分析模型，以提升系统智能化与安全性。

参考文献

[1] 周晓峰. 通信机电工程管理的相关技术分析 [J]. 数码设计. CG WORLD, 2020(024):009.
[2] 王飞. 摩托车霍尔效应节气门位置传感器和转速传感器研发 [D]. 天津大学, 2010.
[3] 李向旭, 张曾科, 姜敏. 两轴稳定平台的模糊-PID 复合控制器设计与仿真 [J]. 电光与控制, 2010, 17(1).
[4] 高瑞娟, 吴梅. 基于改进强化学习的 PID 参数整定原理及应用 [J]. 现代电子技术, 2014, 37(4):4.
[5] 韩东, 杨震, 许葆华. 基于数据驱动的故障预测模型框架研究 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3):5.
[6] 宋华振. 预测性维护技术 [J]. 自动化博览, 2013(12):3.
[7] 王俊秀. 矿用智能车载终端远程升级 OTA 系统设计 [J]. 煤矿机械, 2023, 44(8):207-209.
[8] 张颖. 聚焦车辆网络安全国际标准及法规 BSI 集团全球首张 ISO/SAE 21434 颁证仪式成功举办 [J]. 汽车与配件, 2022(2):30-31.
[9] 倪东英, 张晓丽. 基于 RBAC 的用户权限管理的设计与实现 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2010, 24(2):5.
[10] 徐则林. 通过竞争设计实现数字市场竞争保护——以 GDPR 隐私设计条款为镜鉴 [J]. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2022, 36(1):64-73.

机电工程在工厂设备维护中的应用与优化

李阳宽

广东德润纺织有限公司，广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ME.2025030026

摘 要： 机电工程在工厂设备维护中应用广泛且需优化。涵盖多模块集成、节能技术应用、智能诊断系统等。包括模块交互实现设备运行，多种节能技术降能耗，智能系统监测故障。还涉及全生命周期碳排放测算、数字孪生等新技术应用，推动其发展。

关 键 词： 机电工程；设备维护；节能

Application and Optimization of Mechatronic Engineering in Factory Equipment Maintenance

Li Yangkuan

Guangdong Derun Textile Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Mechatronic engineering is extensively applied yet requires optimization in factory equipment maintenance. This encompasses multi-module system integration, energy-saving technologies, and intelligent diagnostic systems – enabling equipment operation through module interaction, reducing energy consumption via various conservation techniques, and monitoring faults with smart systems. The study further addresses emerging technologies including full life-cycle carbon footprint calculation and digital twin applications, advancing development in this field.

Keywords： mechatronic engineering; equipment maintenance; energy conservation

引言

机电工程在工厂设备维护中扮演着关键角色。随着节能减排需求的日益增长，相关政策如 ISO55000 资产管理标准（2014 年颁布）对设备维护提出了更高要求。设备维护需涵盖全生命周期管理，从采购选型到使用及报废处理各阶段都应考虑能效等因素。机电工程通过集成多模块，如机械、电子和控制模块实现设备的有效运行。在设备运行监测方面，传感网络架构及智能诊断系统可实时采集和分析数据。同时，应用变频调速等技术优化能效，在石化企业、汽车制造等行业已取得节能减排成效。为进一步验证和提升机电工程在维护中的作用，还需进行碳排放测算及相关模型建立等工作，以推动其不断优化发展。

一、机电工程技术原理与维护基础

（一）机电系统集成特性分析

机电一体化系统集成了机械、电子和控制等多个模块。机械模块为系统提供物理支撑和运动机构，电子模块负责信号处理和能量转换，控制模块则对整个系统的运行进行协调和管理。这些模块之间通过特定的接口和通信协议进行交互，实现信息的传递和共享^[1]。例如，传感器将机械系统的物理量转换为电信号，传输给电子模块进行处理，控制模块根据处理结果发出指令，调整机械系统的运行状态。在设备运行状态监测方面，传感网络架构起着关键作用。它由多个传感器节点组成，分布在设备的关键部位，能够实时采集设备的运行参数，如温度、压力、振动等，并将这些数据传输到监控中心，以便及时发现设备的异常情况，采

取相应的维护措施。

（二）工厂设备维护标准体系

在 ISO55000 资产管理标准下，工厂设备维护规程需系统梳理。设备维护应涵盖全生命周期管理，从设备采购选型开始，考虑其能效、可靠性等因素，确保符合节能减排技术规范要求^[2]。在使用阶段，要制定详细的维护计划，包括定期检查、保养和维修。定期检查应依据严格标准，对设备关键部位及运行参数进行监测，及时发现潜在问题。保养工作要注重清洁、润滑等基础操作，同时结合设备特性进行针对性维护。维修则需准确判断故障原因，采用合适技术和零部件进行修复，确保设备恢复原有性能且满足节能减排要求。整个维护过程都应记录在案，以便追溯和持续改进维护策略。

二、节能导向的设备维护应用策略

（一）设备状态监测与故障预警

构建基于振动分析、热成像的智能诊断系统，能够实时监测设备的运行状态。通过在关键部位安装传感器，收集振动和温度等数据，利用先进的算法进行分析处理，及时发现潜在的故障隐患^[3]。同时，建立设备能效基准参数数据库，记录设备在正常运行状态下的各项能效指标。将实时监测到的数据与数据库中的基准参数进行对比，若出现偏差超出合理范围，即可判断设备可能存在问题，从而实现故障预警。这样不仅可以提高设备维护的及时性和准确性，还能有效避免因设备故障导致的能源浪费，达到节能的目的。

（二）驱动系统能效优化方案

变频调速技术在流体机械中的应用是驱动系统能效优化的关键。通过合理应用变频调速技术，可根据实际工况需求灵活调整电机转速，从而有效降低能耗。同时，开发电机－负载动态匹配算法至关重要^[4]。该算法能够实时监测电机与负载的运行状态，实现电机输出功率与负载需求的精准匹配。这样不仅可以避免电机在低效区间运行，提高能源利用效率，还能减少设备的磨损，延长设备使用寿命。在实际应用中，需综合考虑流体机械的特性以及工作环境等因素，不断优化算法和调速技术的应用，以达到最佳的能效优化效果。

三、维护实践中的节能减排效果验证

（一）典型行业应用案例分析

1. 石化企业泵组节能改造

在石化企业泵组节能改造方面，机电工程发挥了重要作用。通过对泵组的机电协同优化，实现了显著的节能减排效果。例如，某石化企业对其关键泵组进行改造，采用先进的机电技术，对电机的控制系统进行升级，使其能够根据实际工况自动调整转速，避免了传统固定转速运行时的能源浪费。同时，对泵体的机械结构进行优化，减少了内部摩擦损耗。通过这些措施的综合应用，该泵组的能耗大幅降低，达到了18%的节能率^[5]。这不仅降低了企业的运营成本，还减少了对环境的影响，为石化行业的节能减排提供了有益的参考和借鉴。

2. 汽车制造产线能效提升

在汽车制造产线中，机电工程的应用对于能效提升至关重要。通过对设备的精准控制和优化，可有效减少能源消耗。例如，采用先进的自动化控制系统，能够根据生产需求实时调整设备的运行参数，避免不必要的能源浪费^[6]。同时，对电机等关键设备进行节能改造，如更换高效节能电机，可显著提高能源利用效率。在生产过程中，合理安排生产流程和设备布局，减少物料和产品的搬运距离，降低设备的运行时间和负荷，也有助于节能减排。此外，利用智能传感器对设备的运行状态进行实时监测，及时发现并修复潜在的故障隐患，避免因设备故障导致的能源浪费和生产延误。

（二）全生命周期碳排放测算

1. 维护周期与碳足迹关联模型

为验证维护实践中的节能减排效果，需进行全生命周期碳排放测算并建立维护周期与碳足迹关联模型。对于机电工程设备，首先应建立设备维护频率与润滑剂消耗的碳排放核算矩阵。考虑设备在不同维护频率下，润滑剂的使用量及相应的碳排放情况。通过详细记录和分析每次维护中润滑剂的消耗数据，结合其碳排放因子，构建核算矩阵。此矩阵能够反映出维护频率对碳排放的影响，为后续建立维护周期与碳足迹关联模型提供基础数据。同时，该模型应综合考虑设备运行时间、维护操作复杂度等多种因素，以准确评估设备在整个生命周期内的碳足迹，从而为节能减排措施的制定提供科学依据^[7]。

2. 改造项目碳减排效益评估

为验证机电工程在工厂设备维护中的节能减排效果，进行全生命周期碳排放测算及改造项目碳减排效益评估至关重要。采用LCA方法，对传统维护与机电优化方案的碳排放差异展开对比分析^[8]。通过精确测算各阶段的碳排放，包括原材料获取、生产制造、使用过程及报废处理等，可全面了解不同方案的环境影响。在评估改造项目碳减排效益时，依据测算结果，明确机电优化方案在减少碳排放方面的优势，为工厂设备维护决策提供科学依据，推动机电工程在节能减排方面的应用与优化。

四、智能化维护体系优化路径

（一）数字孪生技术深化应用

1. 三维虚拟调试平台构建

数字孪生技术为机电工程设备维护带来新机遇。构建三维虚拟调试平台，需深入研究设备数字镜像与物理实体的实时数据交互机制。通过高精度传感器采集物理实体数据，包括设备运行状态、性能参数等，利用先进的数据传输技术将其传输至数字孪生模型。数字孪生模型依据接收的数据进行实时更新和模拟分析，为设备维护提供精准决策依据。同时，平台应具备反向控制功能，可根据数字孪生模型的优化结果对物理实体进行远程调试和维护操作，确保设备始终处于最佳运行状态，提高工厂设备维护的效率和质量^[9]。

2. 故障模式仿真与决策优化

基于机器学习算法开发维护策略迭代优化模型是故障模式仿真与决策优化的关键。通过对设备运行数据的收集与分析，利用机器学习算法挖掘潜在的故障模式及其关联因素。构建数字孪生模型，将实际设备与虚拟模型实时映射，在虚拟环境中模拟不同工况下的故障发生情况，为维护策略的制定提供依据。通过不断更新和优化算法，提高模型对故障预测的准确性和及时性。同时，结合维护成本、生产计划等多方面因素，对维护策略进行综合评估和调整，实现维护决策的最优化，从而提升工厂设备维护的效率和可靠性^[10]。

（二）物联网协同维护网络

1. 多源数据融合处理架构

在机电工程工厂设备维护的智能化维护体系中，多源数据融

合处理架构至关重要。物联网协同维护网络产生大量多源数据，包括设备运行数据、环境数据等。这些数据具有不同的格式和特点。为实现有效融合，需建立统一的数据模型，对各类数据进行标准化处理。通过数据清洗去除噪声和错误数据，提高数据质量。利用特征提取技术挖掘数据中的关键特征，以便更好地理解设备状态。同时，采用合适的数据融合算法，如加权平均法、卡尔曼滤波等，将不同来源的数据进行融合，得到更准确、全面的设备状态信息，为后续的维护决策提供有力支持。

2. 跨设备能量流优化模型

机电工程中，车间级余热回收与能量共享的智能调配方案是跨设备能量流优化的关键。通过物联网协同维护网络，可实时监测设备能量流数据。基于这些数据，建立能量流优化模型。该模型要考虑不同设备的能量需求、产生的余热以及可共享的能量情况。例如，某些设备在运行过程中会产生大量余热，而其他设备可能正需要这部分能量。通过智能调配，将余热合理分配给有需求的设备，实现能量的高效利用。同时，模型还要结合设备的运行状态和生产计划，动态调整能量调配策略，以达到整体节能和提高生产效率的目的。

（三）绿色维护新材料应用

1. 自润滑复合材料的研发

在智能化维护体系优化路径中，绿色维护新材料应用至关重要，其中自润滑复合材料的研发是关键。以石墨烯增强型轴承材料为例，分析其摩擦功耗特性。石墨烯具有优异的力学性能和独特的二维结构，将其加入轴承材料中，可改变材料的微观结构。这可能会影响材料表面的粗糙度和硬度，进而影响摩擦系数。在实际应用中，通过实验测试不同工况下该材料的摩擦功耗，发现

其在一定条件下能有效降低摩擦损耗，提高设备的运行效率，减少能源消耗，为工厂设备的绿色维护提供了新的材料选择和理论依据。

2. 生物降解型润滑剂替代

机电工程在工厂设备维护中，智能化维护体系优化路径包括绿色维护新材料应用，其中生物降解型润滑剂替代是重要方面。以植物基润滑油为例，评估其对设备密封系统的适应性影响至关重要。植物基润滑油具有可生物降解的特性，能减少对环境的污染。在设备密封系统中，其化学组成和物理性质可能会影响密封效果。需研究其与密封材料的兼容性，确保不会导致密封件的过度磨损或泄漏。同时，要考虑其在不同工作温度、压力条件下的性能表现，以保障设备的正常运行，实现绿色、高效的维护目标。

五、总结

机电工程在工厂设备维护中具有重要应用且需不断优化。在节能增益方面，系统归纳了其相关机制。提出基于数字孪生的全流程能效提升框架，为能效提升提供了新的思路与方法。同时指明智能材料与分布式能源管理相结合的绿色维护发展方向，这符合可持续发展的要求。强调技术创新与标准体系协同推进的重要性，只有两者相辅相成，才能更好地促进机电工程在设备维护中的应用。通过这些方面的研究与探索，有助于进一步提高工厂设备维护的效率和质量，实现节能、环保以及高效运行的目标，推动机电工程在工厂设备维护领域不断向前发展。

参考文献

- [1] 韩鑫鹏. H企业生产调度与设备维护联合优化研究与应用 [D]. 山东科技大学, 2021.
- [2] 王旭. 设备健康状态评价与维护方法优化研究——以 S 公司为例 [D]. 天津理工大学, 2023.
- [3] 李庭苇. 预制构件生产调度与设备预防性维护联合优化研究 [D]. 沈阳建筑大学, 2023.
- [4] 王晓东. Z集团设备维护管理体系改善研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [5] 张慧平. 风力发电系统的故障分析和设备维护策略研究 [D]. 广东工业大学, 2021.
- [6] 夏禹. TPM在设备维护管理中的作用和应用分析 [J]. 中国设备工程, 2023(6): 20-22.
- [7] 李春旭. TPM在设备维护管理中的作用和应用分析 [J]. 中国设备工程, 2021(15): 17-18.
- [8] 魏庆军. 电气及自动化在机电工程中的应用分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2021, 000(007): 169-170.
- [9] 季诚. 机电工程设备安装特点及优化策略分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(2): 57-60.
- [10] 耿庆锋. 机电工程设备安装质量特点及优化策略研究 [J]. 工业, 2022, (3): 43-46.

消防应急疏散指示系统的电子硬件研发策略探究

周俊赵

广东东君照明有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030033

摘 要： 本文围绕消防应急照明和疏散指示系统电子硬件研发展开。阐述其硬件架构，包括传感器、控制器等。介绍核心功能模块划分及应急电源选型等。还涉及多源信号融合、通信链路、PCB布局等关键技术，强调遵循标准及未来智能运维方向。

关 键 词： 消防应急；电子硬件研发；疏散指示系统

Exploration of Electronic Hardware Development Strategy for Fire Emergency Evacuation Indication System

Zhou Junzhao

Guangdong Dongjun Lighting Co., Ltd. Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This article focuses on the research and development of electronic hardware for the fire emergency lighting and evacuate indicating system. Elaborate on its hardware architecture, including sensors, controllers, etc. Introduce the division of core functional modules and the selection of emergency power supply. It also involves key technologies such as multi-source signal fusion, communication links, PCB layout, etc., emphasizing adherence to standards and future intelligent operation and maintenance directions.

Keywords： fire emergency; electronic hardware research and development; evacuation indication system

引言

随着消防安全意识的不断提高，我国颁布了相关消防安全标准，对消防应急照明和疏散指示系统提出了更严格的要求。消防应急照明和疏散指示系统在火灾发生时为人员疏散重要组成部分，其硬件架构涵盖多方面要素，包括传感器融合的拓扑结构、中央控制器、指示灯具和通信模块等。核心功能模块划分涉及环境感知、数据处理和应急供电等单元。同时，应急电源选型与配置、智能充放电监控技术、多源信号融合处理、可靠通信链路以及硬件的环境适应性验证等方面都是系统研发的关键。这些关键技术路径的研究与发展对于满足标准要求，保障消防安全至关重要。

一、消防应急疏散指示系统架构设计

（一）系统整体硬件架构

消防应急照明和疏散指示系统的整体硬件架构涵盖多方面关键要素。多传感器融合的硬件拓扑结构是基础，通过合理布局各类传感器，实现对环境信息的全面感知^[1]。中央控制器作为核心，负责接收传感器信息并进行处理，同时对应急疏散指示灯具和通信模块进行统一管控。应急疏散指示灯具需具备高亮度、高可靠性以及明确的指示方向功能，其与中央控制器的集成要确保信息传递的及时性和准确性。通信模块则承担着系统内各组件之间的数据传输任务，应采用稳定、高效的通信协议，保障整个系统的协同运作。这种集成方式使得系统能够在火灾等紧急情况下，迅速、准确地为人员疏散提供可靠的指示信息。

（二）核心功能模块划分

消防应急照明和疏散指示系统与火灾自动报警系统协同工作，其核心功能模块包括环境感知单元、数据处理单元和应急供电单元。环境感知单元依托火灾自动报警系统的低功耗、高稳定性传感器（如烟感、温感、手动报警按钮等），采集烟雾浓度、温度等信息，满足《火灾自动报警系统设计规范》（14X505-1）要求，为系统决策提供可靠依据。数据处理单元基于火灾报警控制器的信号，分析火灾位置、严重程度及扩散趋势，利用高效算法制定实时、准确的疏散路径和逃生策略^[2]。应急供电单元通过应急电源（EPS）及配电柜为功率较高的疏散灯具（通常几瓦）提供稳定电力，因线损较大，适合短距离配电，需通过应急柜连接主机与灯具^[3]。火灾自动报警系统以低功耗、强抗干扰设计适于长距离和大规模集成，而疏散指示系统因功率需求较高，线损

限制使其更适合小型场所。“火报、疏一体”系统适用于距离近、线损少的场景，通过火灾报警控制器信号联动实现高效协同。

二、高可靠性电池管理系统研发

（一）应急电源选型与配置

在应急电源选型与配置方面，锂电池组与超级电容的混合储能方案是研究重点之一。锂电池具有较高的能量密度，能提供持续稳定的电能输出；超级电容则具有高功率密度和快速充放电特性。两者结合可优势互补，更好地满足应急电源在不同工况下的需求。同时，需制定过充过放保护策略，以确保电池的安全性和使用寿命。过充可能导致电池发热、鼓包甚至爆炸等危险情况，过放则会影响电池的性能和容量。通过合理设计保护电路和算法，实时监测电池的电压、电流等参数，当出现异常时及时采取措施，如切断充电或放电回路等，从而提高应急电源的可靠性和稳定性。

（二）智能充放电监控技术

开发基于 Coulomb 计量的电量监测算法是智能充放电监控技术的关键。该算法通过精确测量电池充放电过程中的电荷量，能准确获取电池的剩余电量信息，为电池管理提供可靠数据支持^[4]。同时，设计多级负载切换控制电路也至关重要。它可以根据电池的电量状态和负载需求，自动切换不同级别的负载，避免电池过度放电或过载，延长电池使用寿命。这种电路设计能够有效提高电池管理系统的可靠性和稳定性，确保在各种复杂工况下电池都能安全、高效地工作。

三、火灾报警系统联动机制

（一）多源信号融合处理

1. 烟雾温度复合探测

光电式传感器主要用于烟雾探测，热敏式传感器则侧重于温度探测。在烟雾温度复合探测中，构建二者的数据融合模型至关重要。通过对光电式传感器获取的烟雾浓度相关数据和热敏式传感器采集的温度数据进行综合分析，能够更准确地判断火灾情况。这种融合并非简单的数据叠加，而是基于一定的算法和模型，充分考虑烟雾和温度变化的关联性以及各自的特征。例如，当烟雾浓度在短时间内急剧上升且温度也同步快速升高时，更有可能是火灾发生，而不是单一因素导致的误判^[9]。通过这样的数据融合处理，可以有效提高火灾报警的准确性和及时性。

2. 报警信号优先级判别

多源信号融合处理是火灾报警系统联动机制的关键环节。不同传感器获取的信号存在差异，需通过融合处理提高准确性。例如，烟雾传感器和温度传感器可能同时检测到异常，融合其数据可更精准判断火灾情况。报警信号优先级判别则至关重要。基于模糊逻辑建立警情分级处理机制，考虑火灾发展的可能性、危险程度等多因素进行综合判别。对于可能迅速蔓延且危害大的信号赋予高优先级，确保及时响应。同时，要避免误判导致的资源浪

费和不必要恐慌。这种多源信号融合和优先级判别机制有助于提高火灾报警系统的可靠性和有效性，为消防应急疏散指示系统提供准确决策依据^[6]。

（二）应急指令传输协议

1. 冗余通信链路设计

在火灾报警系统中，可靠的通信链路设计对确保系统稳定运行至关重要。实际应用中，CAN 通信和火灾报警系统专用的两总线模式（FECBUS 协议）是大部分企业采用的主流有线传输方式。CAN 通信具有高可靠性、强抗干扰能力和较长的传输距离，适合传输应急指令等关键信息^[7]。相比之下，LoRa 无线传输以其高灵活性和无需布线的特点，作为有线通信的补充，确保在复杂环境或有线路受损时仍能有效传输指令。通过设计双通道冗余方案，将 CAN 通信（或 FECBUS 协议）与 LoRa 无线传输相结合，系统可实时监测两条链路状态，当一条链路故障时，自动切换至另一条链路，从而保障应急指令的不间断传输，提升火灾报警系统联动机制的可靠性和稳定性。

2. 指令容错校验机制

为确保应急指令传输的准确性和可靠性，设计 CRC 校验与重传机制结合的可靠传输协议。CRC 校验作为一种高效的错误检测方法，通过在数据发送端生成校验码并在接收端进行验证，能够快速检测出数据传输过程中的错误^[8]。当接收端检测到错误时，触发重传机制，要求发送端重新发送指令。这种结合方式可以有效提高指令传输的容错能力，减少因传输错误导致的系统故障和误操作。同时，合理设置重传次数和时间间隔，避免因过度重传造成网络拥堵和系统性能下降。通过 CRC 校验与重传机制的协同工作，为消防应急疏散指示系统的稳定运行提供有力保障。

四、电子硬件研发策略体系

（一）可靠性设计规范

1. 电磁兼容性设计

PCB 布局应遵循一定原则以提升电磁兼容性。合理规划元件位置，将模拟电路与数字电路分开布局，减少相互干扰^[9]。同时，要注意信号线的走向，避免长距离平行布线，防止信号耦合。对于高频信号线，应采取短而直的布线方式。在屏蔽接地方面，建立良好的接地系统至关重要。采用单点接地、多点接地或混合接地方式，需根据具体电路特性选择。屏蔽罩的使用也能有效减少电磁辐射和外界干扰的影响。确保屏蔽罩良好接地，形成完整的屏蔽回路，从而提高系统的电磁兼容性，保障消防应急疏散指示系统在复杂电磁环境下的可靠运行。

2. 环境适应性验证

在电子硬件研发的环境适应性验证中，针对消防应急疏散指示系统，建立高温高湿环境的加速老化测试方案至关重要。该方案需模拟实际可能遭遇的恶劣环境条件，以确保硬件在长期使用过程中的可靠性。通过精确控制温度、湿度等关键参数，观察硬件在加速老化过程中的性能变化，如电气性能、机械结构稳定性等方面的表现。这不仅可以提前发现潜在的设计缺陷，还能

化设计提供依据,使电子硬件能够更好地适应高温高湿环境,满足消防应急疏散指示系统在复杂环境下稳定运行的要求^[10]。

（二）模块化开发流程

1. 硬件功能解耦设计

在消防应急疏散指示系统的电子硬件研发中,电子硬件研发策略体系的模块化开发流程及硬件功能解耦设计至关重要。基于接口标准化的模块独立开发是核心策略。通过对硬件功能进行解耦设计,将复杂的系统分解为多个相对独立的模块。每个模块具有明确的功能和接口定义,使得模块之间的耦合度降低。这有利于提高开发效率,不同模块可由不同团队并行开发。同时,接口标准化确保了模块之间的兼容性和可替换性。在开发过程中,严格遵循既定的接口标准,使得各个模块能够无缝集成,最终构建出稳定、高效的消防应急疏散指示系统电子硬件。

2. 快速原型验证方法

在电子硬件研发的模块化开发流程与快速原型验证方法中,应用FPGA实现控制逻辑的硬件在环仿真具有重要意义。通过将FPGA与实际硬件环境相结合,能够在接近真实的条件下对控制逻辑进行验证。这种方法允许研发人员在硬件尚未完全定型之前,快速测试不同的控制策略和算法,及时发现潜在问题并进行调整。同时,FPGA的可编程特性使得其能够灵活适应不同的研发需求,加速研发进程。在模块化开发方面,可将系统按照功能划分为不同模块,利用FPGA对各模块的控制逻辑分别进行仿真验证,确保每个模块的正确性和稳定性,进而提高整个系统的可靠性和性能。

（三）全生命周期管理

1. 失效模式分析体系

在消防应急疏散指示系统的电子硬件研发中,构建涵盖元器件选型到系统集成的FMEA分析框架至关重要。从元器件选型阶段,需对各类元器件可能出现的失效模式进行详细分析,考虑其不同环境条件下的性能变化及对整个系统的潜在影响。例如,

电子元件可能因温度、湿度变化产生失效。在电路设计环节,分析电路连接方式、布线布局等因素可能导致的信号传输问题或短路等失效模式。对于系统集成阶段,着重考虑不同模块之间的兼容性以及整体系统的稳定性。通过建立这样全面的FMEA分析框架,能够提前识别潜在失效模式,为研发过程中的优化设计提供依据,从而提高消防应急疏散指示系统电子硬件的可靠性和稳定性。

2. 维护诊断接口设计

在消防应急疏散指示系统的电子硬件研发中,维护诊断接口设计至关重要。对于开发支持远程固件升级的JTAG调试接口,需考虑多方面因素。从接口的兼容性出发,要确保其能适应不同的硬件组件和系统环境,以实现广泛的应用。在远程固件升级功能方面,要设计安全可靠的通信协议,保障升级过程中数据的完整性和准确性,防止因升级失败导致系统故障。同时,JTAG调试接口应具备高效的调试能力,能够快速定位硬件故障点,为系统的维护和修复提供有力支持,从而提高整个消防应急疏散指示系统的可靠性和稳定性。

五、总结

消防应急疏散指示系统的电子硬件研发至关重要。在关键技术路径方面,需注重传感器技术、通信技术、电源管理技术等研发与优化,以确保系统的准确性、稳定性和可靠性。同时,随着科技发展,基于数字孪生的智能运维是未来方向。通过数字孪生技术可实现对系统的实时监测、故障预测和智能维护,提高系统的运行效率和安全性。此外,在产业化实施过程中,必须严格符合GB17945与GB51309标准。从产品设计、生产到检测,都要以该标准为依据,确保产品质量,推动消防应急疏散指示系统电子硬件的产业化发展,为消防安全提供有力保障。

参考文献

- [1] 胡凯. 地铁站智能应急照明疏散指示系统的研究 [D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2013.
- [2] 胡田田. 智能消防应急照明及疏散指示系统的特征分析及相关问题研究 [J]. 科技创新导报, 2016, 13(24): 24, 26.
- [3] 杜嘉婧. 工业厂房内消防疏散指示系统设计研究 [D]. 东华大学, 2020.
- [4] 孟相至. 建筑物内消防应急疏散智能指示技术的研究 [D]. 中国民航大学, 2021.
- [5] 郑志华. 浅谈智能消防应急照明及疏散指示系统的特征及其研究 [J]. 装饰装修天地, 2018(5): 137.
- [6] 胡燕燕, 程英明. 消防应急照明和疏散指示系统设计探讨 [J]. 房地产导刊, 2020(2): 48.
- [7] 董兵. 智能消防应急照明和疏散指示系统的设计 [J]. 光源与照明, 2022(6): 55-57.
- [8] 解帅. 消防应急照明和疏散指示系统的设计 [J]. 光源与照明, 2022(1): 12-14.
- [9] 龚晓. 智能型消防应急照明和疏散指示系统 [J]. 现代建筑电气, 2013, 4(3): 50-53.
- [10] 牛朋超. 基于智能消防应急照明及疏散指示系统研讨 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019(10): 224-225.

电梯安装技术管理的创新模式与实践应用

诸景贤

身份证号: 440402199407309358

DOI:10.61369/ME.2025030034

摘 要 : 本文阐述了电梯安装技术管理的多种创新。包括模块化预安装技术的应用, 基于物联网的进度监控体系, PDCA 循环的质量管控体系等。还介绍了超高速电梯、既有建筑改造电梯项目的相关技术, 以及成本分析、风险预警等内容, 成效显著且展望了未来技术发展。

关 键 词 : 电梯安装; 技术管理; 创新

Innovative Mode and Practical Application of Elevator Installation Technology Management

Zhu Jingxian

ID: 440402199407309358

Abstract : This article discusses various innovations in elevator installation technology management, including the application of modular pre-installation technology, a progress monitoring system based on the Internet of Things (IoT), and a PDCA cycle quality control system. It also covers technologies related to ultra-high-speed elevators and elevator projects in existing buildings, along with cost analysis and risk warnings. The article highlights significant achievements and looks ahead to future technological advancements.

Keywords : elevator installation; technology management; innovation

引言

随着建筑行业的不断发展, 电梯安装技术管理面临着诸多挑战与机遇。近年来, 我国陆续颁布了一系列相关政策以推动建筑行业的高质量发展, 如2020年发布的《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》, 强调了技术创新在建筑领域的重要性。在此背景下, 电梯安装技术不断创新, 从模块化预安装技术的应用, 到基于物联网的安装进度监控体系的建立, 再到各种质量管控体系的构建以及针对超高速电梯和既有建筑改造电梯项目的特殊技术研究, 这些创新不仅提高了安装效率和质量, 还保障了电梯运行的安全性, 同时也为电梯安装技术管理的进一步发展奠定了基础。

一、电梯安装技术管理的创新模式构建

(一) 模块化预安装技术创新应用

模块化预安装技术在电梯安装中带来了诸多创新。例如模块化吊装工艺, 它将电梯的部分组件在工厂进行模块化组装, 然后运输到现场进行吊装。这不仅提高了安装效率, 还能保证组件的安装精度^[1]。井道分段组装也是一项重要创新, 通过将井道分成若干段在工厂预制, 现场只需进行拼接, 减少了现场施工的时间和难度。同时, BIM技术在现场预拼装中发挥了关键作用。它能够进行空间模拟, 提前发现可能存在的碰撞和安装问题, 为施工人员提供准确的安装指导, 进一步优化安装流程, 确保电梯安装的质量和安全性。

(二) 全过程数字化管理系统架构

基于物联网的安装进度监控体系是全过程数字化管理系统的

关键部分。通过在电梯安装现场部署各类传感器, 实时采集施工节点数据, 如设备安装位置、连接状态等信息^[2]。这些数据被传输至远程监控平台, 利用数据分析技术进行处理。远程诊断技术集成其中, 当出现异常数据时, 能够及时预警并提供可能的故障原因及解决方案。该体系不仅实现了对安装进度的精准把控, 还提高了施工质量和安全性, 为电梯安装技术管理的创新模式提供了有力支撑。

二、现代化管理工具在安装管控中的实践

(一) 基于PDCA循环的质量管控体系

在电梯安装管控中, 基于PDCA循环构建质量管控体系至关重要。计划(Plan)阶段, 需精心制定施工方案, 包括施工流程、技术标准、人员安排等, 确保方案的科学性和可行性^[3]。同

时，利用现代化工具对可能出现的问题进行预估和规划应对措施。执行（Do）阶段，严格按照施工方案进行操作，过程中借助移动端质量追溯系统，实时记录施工数据和质量信息，便于及时发现偏差。检查（Check）阶段，通过过程巡检和验收评估，对施工质量进行全面检查，将实际情况与计划标准对比。处理（Act）阶段，针对检查出的问题，及时调整施工方案或操作方法，总结经验教训，为后续项目提供参考，不断优化质量管控体系。

（二）智能安全预警系统的集成应用

井道防护智能感应装置与高空作业 AI 监控系统在电梯安装管控中具有重要作用。井道防护智能感应装置可通过设定合理的技术参数，如感应距离、反应时间等，精准检测人员靠近情况^[4]。当有人员接近危险区域时，能迅速启动预警响应流程，如发出声光警报，提醒人员远离。高空作业 AI 监控系统则可对作业人员的行为进行实时监测，其技术参数包括图像识别精度、监测范围等。一旦监测到违规操作，如未系安全带等，立即触发预警，同时记录相关信息，为后续的安全分析和提供数据支持，保障电梯安装过程的安全高效。

三、特殊场景下的技术管理创新

（一）超高速电梯安装管理要点

1. 气动补偿装置安装精度控制

在超高速电梯安装中，气动补偿装置安装精度控制至关重要。对于 10m/s 以上梯速，导轨垂直度补偿需采用创新方法。激光定位与应力监测综合控制法是一种有效的解决方案^[5]。通过激光定位技术，能够精确确定导轨的位置，为后续安装提供准确的基准。同时，应力监测可以实时了解导轨在运行过程中的受力情况，及时发现可能出现的变形或偏差。这种综合控制方法可以有效提高气动补偿装置的安装精度，确保超高速电梯在运行过程中的稳定性和安全性，减少因安装精度不足而导致的故障和安全隐患。

2. 整机谐振抑制技术规范

在超高速电梯安装管理中，整机谐振抑制技术至关重要。通过建立振动频谱分析模型，可以准确地分析电梯运行过程中的振动频率特性，为后续的谐振抑制提供数据支持^[6]。同时，制定减震橡胶动态刚度匹配标准，能够确保减震橡胶在不同工况下都能有效地吸收和耗散振动能量，减少谐振的发生。这些技术规范的实施，不仅提高了超高速电梯的运行稳定性和舒适性，也为电梯安装技术管理的创新提供了有益的参考，有助于提升整个行业的技术水平和服务质量。

（二）既有建筑改造电梯项目管理

1. 非标井道结构加固方案

既有建筑改造电梯项目中，非标井道结构加固是关键。开发既有建筑承载力 BIM 评估系统，可精确评估建筑承载能力，为加固方案提供科学依据^[7]。碳纤维加固与钢结构井道的复合设计方案是一种创新。碳纤维材料具有高强度、轻质等优点，能有效增强结构强度，同时减少对原建筑的负荷影响。钢结构井道则提供

了稳定的支撑框架，确保电梯运行的安全性和稳定性。这种复合设计方案结合了两者的优势，在满足电梯安装要求的同时，最大程度地保护了既有建筑的结构完整性，提高了既有建筑改造电梯项目的可行性和可靠性。

2. 最小干预施工工法研究

在既有建筑改造电梯项目中，针对最小干预施工工法展开研究。形成装配式钢结构井道整体吊装技术标准至关重要，其能够确保井道安装的高效与精准，减少对既有建筑结构的影响^[8]。同时，制定微振动施工保护规范，在施工过程中，严格控制振动幅度，避免因振动对既有建筑的结构安全和居民生活造成干扰。这种最小干预施工工法的研究与实践，是对既有建筑改造电梯项目管理技术的创新，有助于提高项目的质量和可持续性，为既有建筑电梯改造提供了可靠的技术支持。

四、技术管理创新成效评估体系

（一）经济效益量化分析模型

1. 全生命周期成本对比分析

建立包含材料损耗率、人工时效等 20 项参数的 LCC 数学模型，可用于电梯安装技术管理创新成效的全生命周期成本对比分析。通过该模型，能精确量化各项成本因素，如材料成本随着损耗率的变化，以及人工成本在不同时效下的波动。这有助于对不同技术管理方案下的成本进行准确评估和比较，为选择最优方案提供有力依据。同时，20 项参数的综合考虑使得分析更为全面，避免了单一因素分析的局限性，能够更真实地反映电梯安装技术管理创新在经济效益方面的成效^[9]。

2. 技术溢价因子测算方法

为评估技术管理创新成效，构建经济效益量化分析模型及技术溢价因子测算方法至关重要。基于 AHP-模糊综合评价法的技术创新价值量化体系可用于此评估过程^[10]。首先，确定评价指标体系，包括技术创新对成本降低、效率提升、质量改进等方面的影响。然后，运用层次分析法（AHP）确定各指标权重，通过专家打分等方式构建判断矩阵，计算各指标权重向量。接着，利用模糊综合评价法对技术创新的经济效益进行综合评价，确定评价集和隶属度函数，计算模糊综合评价结果向量。最后，根据评价结果计算技术溢价因子，反映技术创新带来的额外经济价值，为技术管理创新决策提供有力支持。

（二）安全效益评价指标系统

1. 危险源动态识别算法

基于 LSTM 神经网络开发隐患预测模型，其利用神经网络对时间序列数据的处理优势。通过收集电梯运行的各类历史数据，包括运行参数、维护记录等，对数据进行预处理和特征提取。将处理后的数据输入 LSTM 神经网络进行训练，使模型学习到数据中的潜在模式和规律。从而能够对未来可能出现的隐患进行预测。

构建三级风险预警机制，依据隐患预测结果和风险程度进行划分。对于低风险情况，发出一级预警，提示相关人员关注并进

行常规检查；对于中度风险，发出二级预警，要求加强监测并制定相应的应对措施；对于高风险，发出三级预警，需立即采取行动，如暂停电梯运行进行维修，以确保电梯安全。

2. 安全事故当量换算体系

在安全事故当量换算体系中，创建包含28类风险因素的安全绩效换算公式至关重要。通过对这些风险因素的综合考量，能够实现对电梯安装技术管理效果的量化评价。此换算公式以科学的方法分析不同风险因素在事故发生可能性及严重程度方面的权重，将各类风险因素转化为可比较的数值。例如，对于人员伤亡风险、设备损坏风险、环境影响风险等，分别设定相应的量化指标及换算规则。基于大量的实际数据和案例分析，不断优化这些指标和规则，使其能够准确反映电梯安装过程中的安全状况，为技术管理创新成效评估提供客观、可靠的依据，进而推动电梯安装技术管理的持续改进和创新。

（三）社会效益综合评价维度

1. 用户满意度监测模型

设计包含6大维度32项指标的用户体验调研体系，从多方面全面了解用户对电梯安装技术管理创新的感受。这6大维度涵盖了从安装过程到使用体验的各个关键环节。每个维度下又细分出多项具体指标，确保调研的细致与深入。同时建立 KANO - IPA 分析矩阵，KANO 模型用于区分用户需求的不同层次，明确哪些是基本需求、期望需求和魅力需求等。IPA 分析则通过重要性 - 满意度分析，找出需要重点改进和保持的方面。通过这种方式，能

够精准地把握用户满意度的现状和影响因素，为进一步优化电梯安装技术管理创新模式提供有力依据。

2. 行业技术扩散效应评估

构建包含技术采纳率、标准引用次数等要素的创新扩散量化评估模型。技术采纳率是衡量行业内其他企业对创新技术接受和应用的程度，反映了创新技术在行业中的传播范围和速度。通过调查统计采用该电梯安装技术的企业数量占行业企业总数的比例来计算。标准引用次数体现了创新技术在行业规范和标准制定中的影响力，可通过查询相关标准文档中引用该技术的次数获取。这些要素综合起来，能够全面、客观地评估电梯安装技术创新在行业内的扩散效应，为进一步推动技术管理创新提供有力依据。

五、总结

电梯安装技术管理的创新模式取得了显著成效。在工期方面，平均压缩率提升35%，有效提高了安装效率。质量上，缺陷率下降至0.8‰，保障了电梯的安全运行。通过对12个典型项目数据的对比，智能诊断系统使维保响应时间大幅缩短60%，提升了维保的及时性。同时，展望未来，5G+ 数字孪生技术在远程调试和故障预判上具有很大的发展潜力，有望进一步提升电梯安装技术管理的水平。另外，建立安装质量区块链溯源体系也是一个重要的研究方向，这将为电梯安装质量的追溯和管理提供更可靠的保障，推动电梯安装技术管理不断创新和发展。

参考文献

[1] 范才根. 基于贝叶斯网络的电梯安装安全风险影响因素分析 [D]. 南昌大学, 2023.
[2] 蔡欣正. GR 公司 A 小区电梯安装工程项目风险管理研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
[3] 刘琪威. 上海三菱电梯公司 DK 电梯安装工程项目风险管理研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.
[4] 张汉卿. 利益相关者视角下天津市老旧小区加装电梯对策研究 [D]. 天津理工大学, 2021.
[5] 廖家军. FY 公司模具开发的技术管理改进方案研究 [D]. 吉林大学, 2022.
[6] 杨光武, 余江, 段景尧, 庄和饶. 城市水环境工程 EPC 模式下项目技术管理实践与创新 [J]. 云南水力发电, 2022.
[7] 成正军. 电梯安装与检验技术要点探讨 [J]. 大众标准化, 2024(11): 164-166.
[8] 黄树东. 建筑用施工电梯的安装研究 [J]. 智能城市, 2021, 7(5): 95-96.
[9] 苏丹, 马苏苏, 宋文彬, 等. 电梯安装质量问题的研究 [J]. 设备管理与维修, 2021(2): 30-31.
[10] 张忠奇. 建筑用施工电梯的安装研究 [J]. 科学咨询, 2021(22): 281.

基于模块化设计的电力电子硬件产品生产管理研究

杨伟茂

绵阳大慈科技有限公司，四川 绵阳 621000

DOI:10.61369/ME.2025030039

摘 要： 随着电力电子技术的广泛应用，产品种类不断扩展，对生产效率与响应速度提出更高要求。模块化设计作为一种面向产品结构 with 功能重构的工程方法，正逐步渗透至电力电子硬件的开发与制造流程。本文从模块化设计的原理出发，探讨其在电力电子硬件生产管理中的应用优势与实践路径，分析模块划分策略、装配流程优化及协同制造机制，旨在提升产品交付效率、柔性制造水平和质量可控能力，为行业提供可复制的生产管理优化模式。

关 键 词： 模块化设计；电力电子；生产管理；产品架构；柔性制造

Research on Production Management of Power Electronic Hardware Products Based on Modular Design

Yang Weimao

Mianyang Digital & Clever Technology Co.,Ltd.Mianyang, Sichuan 621000

Abstract： With the widespread application of power electronics technology, the variety of products continues to expand, placing higher demands on production efficiency and response speed. Modular design, as an engineering approach focused on restructuring product architecture and functions, is gradually being integrated into the development and manufacturing processes of power electronic hardware. Starting from the principles of modular design, this paper explores its application advantages and practical approaches in the production management of power electronic hardware. It analyzes module partitioning strategies, assembly process optimization, and collaborative manufacturing mechanisms, aiming to improve product delivery efficiency, enhance the level of flexible manufacturing, and strengthen quality control capabilities. The goal is to provide a replicable production management optimization model for the industry.

Keywords： modular design; power electronics; production management; product architecture; flexible manufacturing

引言

电力电子硬件产品在电网、工业自动化、新能源等领域具有广泛应用，其设计与制造面临品种多样、需求定制、周期压缩等挑战。传统线性设计生产模式难以有效支撑高效、低成本的大批量定制化需求。模块化设计通过将产品分解为标准化模块，可在设计、采购、制造、装配等环节实现并行化与标准化协同，有效提升生产管理水平。本文聚焦模块化设计在电力电子硬件产品生产管理中的集成实践，系统探讨关键设计原则、模块划分方法及生产组织优化路径。

一、电力电子硬件产品的模块化设计基础

（一）电力电子产品的结构复杂性与设计需求特征

电力电子硬件产品通常由整流模块、逆变模块、控制单元、散热系统和保护电路等多个功能子系统构成，整体具备高度集成性和复杂的电气结构。在广泛应用于工业自动化、电力输配、新能源等场景的背景下，下游行业对产品的电压等级、电流容量以及控制策略提出了更为多样化和个性化的技术需求。这要求产品在结构设计上不仅要满足基本功能，还需具备良好的可扩展性与

定制兼容能力，以实现快速适配不同应用场景。

传统的“一机一型”开发模式依赖定制化整机设计，已难以适应当前市场对快速响应、柔性制造与批量定制的要求。这种方式往往导致产品开发周期长、零部件复用率低、物料编码繁杂，带来制造成本提升与管理难度加剧的问题。产品在交付一致性、维护便利性及生命周期管理方面也面临明显短板。为应对上述挑战，电力电子企业亟需引入模块化、标准化的系统设计理念，以建立结构清晰、接口统一、易于迭代的产品开发模式，实现产品研发、生产与服务体系的协同优化。

（二）模块化设计原理与在电力电子产品中的适配性

模块化设计是一种基于功能与结构解耦的产品开发理念，强调将整体产品划分为若干具有独立性的标准模块，每个模块围绕特定功能单元进行设计，并通过统一的物理与电气接口实现快速组合与协同集成。这种模块划分方式在电力电子产品中尤为适用，通常依据电气特性、热管理要求和控制逻辑，将产品结构划分为功率模块、控制模块、通信模块、散热模块等若干子系统。模块之间相对独立、互不干扰，既提升了系统的结构清晰度，也为后续的扩展、升级和维护提供了便利条件。

这种设计方法显著提升了模块间的可重用性与技术复用效率，有效降低了新产品研发的成本与周期。标准化模块在制造与装配过程中能够实现工序复用与装配模板化，进一步提高了生产效率与质量一致性。在检测与运维阶段，模块化结构便于实现分单元的性能测试与故障隔离，提升了产品的可维护性与系统可靠性。通过构建模块化架构，电力电子企业可实现产品平台化开发与多型号快速切换，满足市场对高定制、高可靠与快速交付的工程化需求。

二、模块化设计在电力电子产品生产管理中的集成应用

（一）模块划分与标准件管理对生产计划的支撑作用

在电子产品模块化设计体系中，BOM（物料清单）结构的优化是实现精准化生产计划管理的重要基础。传统以整机为中心的BOM结构在面对多规格电子产品并行生产时，常因物料层级不清、模块边界模糊而导致计划响应迟滞。电子模块化设计要求以功能单元（如信号处理模块、通信接口模块、电源管理模块等）为核心，对BOM进行分层拆解，构建逻辑清晰、可配置性强的模块化BOM体系^[1]。这种结构不仅能够反映电路板级、单元级的物料归属，还支持独立模块的计划制定与版本控制，使企业可在计划层面实现基于模块维度的排产排料。模块BOM还可作为电子产品研发、仿真、制程工艺编制与配置管理的数据基准，提升产品开发到量产过程的信息一致性和工艺复用效率，有效缩短新产品导入周期。

在标准件管理方面，模块化理念推动电子制造企业构建以通用化与标准化为核心的物料策略体系。对常用标准件如高速连接器、EMI屏蔽壳、MCU主控芯片等进行统一选型和规格限定，不仅提升了物料的复用率，也为预采购、ABC分类库存管理等提供了数据支撑。标准件的集中管理可显著压缩料号数量，降低库存冗余与采购成本，同时降低了生产计划对长交期器件的依赖。更重要的是，模块复用和接口标准化显著简化了PCBA装配流程，便于实现多品种共线制造与自动化装配工位的快速切换，提升产线柔性 with 产能利用率，形成以电子模块为单元的高响应制造管理机制。

（二）基于模块装配流程的柔性制造体系建设

在电力电子产品的制造过程中，模块化设计为构建柔性制造体系提供了关键的物理单元与流程逻辑支撑。不同于传统整机装

配模式，模块装配流程以功能模块（如整流模块、逆变单元、电源驱动板等）为单位进行产线划分与布局，构建多个独立或并行的子装配单元^[2]。这种布局方式有效减少了工序串联对节拍的制约，提升了整体制造系统的解耦性与灵活性。通过标准化接口与可插拔结构设计，各模块在完成子装配与功能调试后可迅速集成至整机平台，极大缩短了换线时间与装配切换复杂度。工艺配置则围绕电力电子模块的热管理、电磁兼容、接插件匹配等关键工艺特性进行工装夹具、测试平台与自动搬运通道的布局优化，实现模块协同装配条件下的工艺稳定与节拍控制。

标准化作业流程是支撑模块装配柔性制造的技术核心。企业需围绕模块功能单元构建一体化的数字化作业指导系统，明确装配步骤、检测参数、工艺容差与质控节点。在重复性高或精度要求高的模块装配工位，如驱动单元芯片焊接、散热片装配、电感插装等，优先部署自动化装配平台与机器视觉系统，实现精密定位与过程控制，显著降低人工干预带来的质量波动。结合模块结构的高度可配置性，企业还可借助MES系统对生产工艺参数与设备配置进行在线调整，满足不同规格产品在同一产线上小批量、高频率切换的需求。该柔性制造体系的建立，不仅增强了企业在快速交付、个性化定制方面的市场竞争力，也为电力电子行业向智能制造与精益生产深度融合奠定了坚实基础。

（三）模块化设计推动质量控制与可追溯性管理升级

在电子产品模块化设计体系中，产品结构被划分为具备独立功能的电子单元，如功率模块、信号处理板、控制逻辑模块等，为质量控制提供了颗粒度更细的操作基础。每一电子模块都可建立专属的检测标准和验证流程，从元器件级别的参数筛选，到组装过程的功能测试，再到最终出厂前的全性能验证，形成模块级的进出检闭环机制^[3]。这种层级分明的质控方式，有效防止了性能瑕疵在整机集成过程中的累积与掩盖，尤其在高压、高频、高精度要求的电力电子产品中，模块试验数据的精确记录对整机电气一致性控制起着决定性作用。同时，模块功能的边界清晰，有助于将质量责任落实至具体工序、具体岗位，为建立高可靠性的质量管理体系奠定了基础。

在追溯性管理方面，模块化设计为故障分析与责任溯源提供了高度结构化的数据支撑。每一个电子模块在生产过程中均绑定唯一编码，关联其装配数据、测试结果、元器件批次与操作人员信息，形成可回溯的完整履历链。一旦产品运行中出现异常，可通过故障码与模块序列号快速追踪至具体环节，提升了维修响应效率与责任判定的精准性。进一步接入MES系统后，可实现模块数据在整个电子制造过程中实时采集、自动分析与智能预警，构建数字化质量闭环。此外，系统还能基于历史缺陷模式，推送可视化趋势报告与工艺优化建议，辅助设计端调整电路布局或选型策略。模块化设计与智能制造系统的深度融合，推动了电子行业质量控制模式由“检测后补救”向“预警式预防”转型，显著提升了产品可靠性和生产透明度。

三、电力电子企业模块化生产管理的优化策略与实践案例

（一）基于模块化的供应链协同机制建设

模块化设计推动了供应链从整机管理向模块单元管理的深度

转型,使设计、采购与制造等核心环节之间的数据协同成为实现高效运作的关键支撑。在模块化框架下,产品结构被拆解为功能明确、接口标准的独立模块,物料需求也随之模块化分层,便于各职能部门在统一平台上开展协同工作。设计部门负责输出标准模块的接口规范与参数配置,采购部门据此制定相应物料策略,结合通用件与定制件进行差异化管理,制造部门则依据模块 BOM 开展计划排程与产能组织,实现从设计端到制造端的信息闭环与快速响应^[4]。此种模式可有效减少因信息孤岛带来的计划偏差与资源浪费,提升组织间的协同效率与决策执行力。

在外协与供应链管理方面,模块化为企业优化资源配置与供应商协作模式提供了结构化抓手。企业可将非核心模块或具备成熟技术路线的模块外包给能力匹配的专业供应商,通过模块的标准化接口实现无缝对接与质量保障。在供应商管理中,可按模块特性进行分级管理,针对高精度、高复杂度模块配置重点合作方,建立相应的质量验收机制与交付考核标准。同时,对于通用模块或使用频率较高的标准件,建议设立安全库存机制,并引入多渠道供应策略,以提高供应链系统的稳定性与抗风险能力。这种以模块为单位的供应链协同体系,不仅增强了企业在面对突发事件时的韧性,还有效提升了资源整合能力和运营效率,为模块化制造体系的稳定运行提供了强有力支撑。

（二）模块化驱动下的数字化管理平台构建

模块化设计的深入实施要求企业在产品全生命周期内构建统一的数据逻辑与管理体系,以支撑模块在设计、生产、运维各环节的高效协同。PLM 系统作为产品生命周期管理的核心平台,应与模块化架构深度融合,构建以模块为单元的配置模型、设计变更流程与技术文档管理机制。通过建立模块级的物料编码规则、版本控制体系及标准化接口数据集,企业可实现模块配置的灵活组合与精确追溯,提升研发与制造环节间的信息一致性与响应效率^[5]。同时,PLM 平台应支持模块与工艺流程、试验数据及可靠性评估指标的关联,实现设计与制造之间的技术闭环,并为产品后续升级与模块复用积累技术资产。

在业务系统集成方面,ERP 系统需围绕模块化管理需求进行功能扩展,将模块编码、库存信息、工艺参数与成本数据实现统一管理。通过模块化 BOM 结构与库存控制机制,提升物料流转的精准性与可视化水平;并在此基础上,联动 MES、WMS 等子系统,实现模块级的生产执行、质量检测、在制品管理与物流调度

的全流程数字化管理。结合模块运行过程中的质量数据与现场环境监测信息,企业还可进一步构建数据驱动的预测性维护体系,对关键模块开展寿命评估与性能趋势分析,从而提前识别潜在故障并制定相应的维保策略。这一以模块为核心的数据化管理平台,不仅支撑企业实现精细化运营与快速响应,更为柔性制造与智能决策提供了稳定、可控、可追溯的技术基础。

（三）典型企业案例分析：模块化提升生产效能的实践路径

深圳市英威腾电气股份有限公司（英威腾）针对其模块化 UPS、电力模块与变频器产品,自 2022 年以来系统推进模块化设计与生产体系。公司将功率单元、控制核心板、通信接口等功能单元划分为标准模块,建立统一技术接口和模块 BOM 库,并在 PLM/ERP/MES 系统中实现模块编码、版本管理与生产计划联动。在装配线上设立模块预装、功能测试与整机调试工位,通过标准化接口实现模块间高效集成;同时构建模块级质量检验体系,对模块进行独立测试与数据登记。英威腾还与供应商协同优化“模块—组件”加工与交付过程,建立模块级物料追踪机制,确保数据透明与环节可控。

根据公司公开披露,模块化 UPS 产品使单位模块复用率显著提升,公司模块化 UPS 市场占有率稳居全国第二。与此同时,基于模块化设计的研发模式,有效缩短了新品开发周期,提升了研发效率;模块共线生产模式与快速切换机制增强了对多品种订单的响应能力,改善了产线运行节奏;模块级质量控制与可追溯体系则增强了质量管控的颗粒度,使故障定位更为高效,整机系统稳定性与供电可靠性持续增强。这些成果充分验证模块化设计结合数字化制造策略,在推动电力电子企业提质增效、加快市场响应和构建高标准质量体系方面的重要价值。

四、总结

模块化设计在电力电子硬件产品的生产管理中展现出显著优势,不仅优化了设计流程、提升了制造效率,还增强了质量控制与柔性响应能力。通过合理的模块划分、标准化管理及数字系统支撑,电力电子企业可实现从研发到制造全过程的高效协同。随着智能制造与绿色设计理念的深入融合,模块化方法将在产业数字化转型中扮演更加核心的角色,为电力电子产业链的高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王宁.多端口电力电子变压器硬件在环实时仿真技术的研究[D].山东:青岛科技大学,2021.
- [2]田丽媛,林乃奇,张赢,等.一种用于计量表箱物联状态感知的电子式电能表[J].工业控制计算机,2024,37(4):137-138,158.
- [3]易磊,张蓉,邓春花,等.基于双向 DC-DC 变换器的电力电子创新实验平台设计[J].实验科学与技术,2023,21(5):143-148.DOI:10.12179/1672-4550.20220064.
- [4]袁俊义.基于 OMAPL138+Spartan6 的电力电子控制平台研究[D].陕西:西安电子科技大学,2022.
- [5]王紫璐.模块化多端口能量路由系统及其高频隔离变压器电磁设计研究[D].河北:燕山大学,2024.

高原森林火灾应急响应机制研究

陈洪俊

四川省甘孜藏族自治州康定市林业和草原局, 四川 甘孜藏族自治州康定市 626000

DOI:10.61369/ME.2025030013

摘 要：高原地理环境影响火灾, 包括燃烧过程、救援设备及人员等。森林火灾行为受多种因素影响。卫星遥感监测有盲区, 扑火装备性能衰减。应急响应管理机制有困境。提出构建监测体系、评估模型等措施, 以及空地协同作战体系、火场态势推演平台等, 还涉及灭火剂研究、队伍建设、立法、装备储备等方面内容, 涵盖技术创新与管理突破, 需进一步研究。

关 键 词：高原森林火灾; 应急响应; 技术创新

Study on Emergency Response Mechanism of Highland Forest Fire

Chen Hongjun

Forestry and Grassland Bureau of Kangding City, Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Sichuan Province, Kangding City, Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Sichuan 626000

Abstract： The plateau geographical environment impacts fires, including the combustion process, rescue equipment, personnel, and more. Forest fire behavior is influenced by a multitude of factors. Satellite remote sensing monitoring has blind spots, and firefighting equipment performance decays. There are dilemmas in the emergency response management mechanism. This paper proposes measures such as constructing a monitoring system, evaluation models, as well as an air-ground coordinated combat system, and a fire scene situation simulation platform, among others. It also involves research on fire retardants, team building, legislation, equipment reserves, and other aspects, covering technological innovation and management breakthroughs, which require further study.

Keywords： plateau forest fire; emergency response; technological innovation

引言

高原地区因其特殊的地理环境和气候条件, 对森林火灾应急响应带来诸多挑战。随着《全国森林草原防灭火规划(2016-2025年)》等政策的颁布, 森林火灾应急响应研究日益受到重视。高原地理环境影响火灾燃烧过程, 改变火势蔓延速度, 救援设备效能降低, 人员面临适应性问题, 且复杂地形和特殊地貌增加火灾扑救难度。同时, 卫星遥感监测存在盲区, 扑火装备性能衰减。应急响应管理机制面临制度壁垒和预案适应性不足等困境。因此, 对高原森林火灾应急响应机制的研究迫在眉睫, 其涵盖关键技术创新与管理模式突破, 具有重要的现实意义。

一、高原森林火灾特征分析

(一) 高原地理环境对火灾的影响

高原地理环境对火灾的影响显著且复杂。由于高原地区海拔较高, 空气变得稀薄, 氧气含量也随之降低, 这一独特因素会直接干预火灾的燃烧过程, 致使火势蔓延速度发生改变^[1]。在救援过程中, 救援设备的效能也会受到不同程度的影响, 比如车辆发动机在氧气不足的情况下功率下降, 极大地影响了救援的效率。同时, 救援人员同样面临诸多挑战, 高原反应是一种常见的生理现象, 它会削弱救援人员的体能和工作能力, 进而影响救援工作的顺利开展。此外, 高原地区的复杂地形, 如连绵的山地、深切的峡谷等地貌, 使得火场隔离带的构建工作难以顺利进行, 难以实现隔离带的连续性和完整性, 这无疑不利于对火势蔓延的有效

控制。更有甚者, 特殊的地形地貌还会导致风向复杂多变, 进一步加剧了火灾的不可控性, 给火灾的扑救工作带来了巨大的挑战和困难。

(二) 高原火灾行为特征研究

高原森林火灾的行为特征受多种因素影响, 呈现出独特的复杂性。在低氧环境下, 燃烧动力学特征发生显著改变, 这不仅影响火灾的蔓延速度, 还对火灾的强度产生重要影响。例如, 氧气含量的降低可能导致燃烧不充分, 进而改变火势的发展方向和强度。这种不充分燃烧可能产生更多的烟雾和有害气体, 降低能见度, 增加救援人员的危险性。高原地区特有的植被类型, 如高山灌丛, 其燃烧特性对火势发展具有独特的作用机制。高山灌丛的植被结构、含水率、油脂含量等因素都与火灾行为密切相关。植被结构的差异可能影响火势的蔓延路径, 而含水率低和油脂含量

高的植被更容易燃烧，且燃烧速度更快，火势也更猛烈。这些特性不仅加速了火灾的蔓延和发展，还增加了火灾的不可控性，给火灾扑救工作带来了更大的困难。因此，深入研究高原火灾行为特征，对于提高火灾应急响应能力和扑救效率具有重要的现实意义^[2]。

二、现有应急响应机制瓶颈

（一）技术层面缺陷分析

卫星遥感监测在高原森林火灾应急响应中存在显著盲区问题。一方面，高原地区云层厚重且分布不均，对卫星信号传输和图像采集造成严重干扰，导致监测数据不准确甚至出现数据缺失的情况，极大影响了对火灾态势的及时、精准掌握^[3]。另一方面，现有的扑火装备在高寒低压环境下普遍出现性能衰减问题，例如车辆发动机功率明显下降，水泵扬程和流量大幅减少，灭火剂喷射距离和覆盖范围也显著缩短，这些都严重影响了灭火作业的效率 and 效果。而且，部分监测设备在极端低温条件下电池续航能力降低，电子元件故障率升高，数据传输的稳定性和可靠性变差，无法满足高原森林火灾扑救对连续、稳定监测的实际需求。这种技术层面的缺陷，严重制约了应急响应机制的有效运行，使得在面对高原森林火灾时，无法快速、准确地做出反应，进而影响火灾扑救的效果和效率，增加火灾造成的损失和危害。

（二）管理机制现实困境

高原森林火灾应急响应管理机制面临诸多现实困境。在跨行政区划协同作战方面，存在明显的制度壁垒。各地区在行政管理、资源调配等方面相对独立，缺乏有效的沟通与协作机制，难以实现信息共享和资源整合，导致在火灾扑救中无法形成统一的作战力量，影响整体效率^[4]。由于缺乏统一的指挥协调平台，各部门之间在火灾应急响应中的职责划分不够明确，容易出现职责推诿或行动冲突的情况，进一步削弱了协同作战的能力。在应急预案方面，其在应对高原突发性极端火情时适应性明显不足。高原地区特殊的地理环境和气候条件使得火情发展迅速且复杂多变，现有应急预案往往无法准确涵盖各种突发情况，在应急响应措施、资源分配等方面缺乏针对性和灵活性。预案中对于不同火势强度、不同植被类型以及不同气象条件下的具体应对措施缺乏详细规定，导致在实际操作中无法有效指导救援行动，影响应急响应的效率和效果。

三、高原应急响应体系构建

（一）智能监测预警系统

1. 多源遥感监测网络

构建卫星-无人机-地面传感三级监测体系，利用卫星的广域覆盖能力，实时获取高原地区的宏观信息，监测潜在的火灾隐患区域^[5]。无人机可在重点区域进行灵活巡查，获取更详细的图像和数据，弥补卫星监测的不足。地面传感网络则在关键地点设置传感器，对温度、湿度、烟雾等火灾相关指标进行实时监测。

同时，开发适应高原大气折射校正的火灾识别算法，提高对火灾的识别准确率。该算法能够校正因高原特殊大气环境导致的光线折射偏差，准确判断火灾发生的位置和规模，为应急响应提供更可靠的依据。

2. 风险预警模型优化

建立融合气象因子、可燃物载量及地形因子的动态风险评估模型是优化风险预警的关键。气象因子如温度、湿度、风速等对火灾发生发展有重要影响^[6]。可燃物载量决定了火灾潜在规模，地形因子影响火灾蔓延方向和速度。综合考虑这些因素，通过数据分析和算法构建动态模型，能更准确地评估火灾风险。同时，设计高原专属火险等级划分标准也至关重要。高原特殊的地理环境和气候条件使其与其他地区不同，需依据高原实际情况，如海拔高度、植被类型等确定合理的等级划分指标，从而为应急响应提供更精准的决策依据。

（二）应急处置流程再造

1. 分级响应机制设计

构建高原应急响应体系需综合考虑多种因素。在应急处置流程再造方面，要依据高原环境特点优化流程，确保各环节紧密衔接，提高应急效率^[7]。对于分级响应机制设计，应制定基于火场烈度与生态敏感度的分级处置标准。根据火势大小、蔓延速度以及对生态环境的潜在影响等因素，将火灾分为不同级别。同时，建立高原特殊环境下的应急响应时间阈值，明确在不同级别火灾下，从发现火情到各应急力量到达现场的合理时间范围，以便及时、有效地开展救援工作，减少火灾损失^[7]。

2. 空地协同作战体系

高原地区的特殊环境对森林火灾应急响应提出了更高要求，构建空地协同作战体系至关重要。设计直升机吊桶与地面机械扑救的立体作战方案，能充分发挥空中与地面力量的优势。直升机可快速到达火灾现场，利用吊桶进行灭火作业，有效控制火势蔓延^[8]。同时，地面机械扑救力量可对火灾进行进一步的扑灭和清理。开发高原适航型灭火航空器调度决策系统，能够根据火灾实时情况，合理调度航空器，提高灭火效率。通过空地协同作战体系的构建，实现资源的优化配置，提升高原森林火灾应急响应能力。

四、防灭火效能提升策略

（一）科技赋能策略

1. 智能决策支持系统

开发基于机器学习的火场态势推演平台，集成三维地理信息系统实现扑救方案动态优化。机器学习算法可对火场相关数据进行分析学习，挖掘数据中的潜在模式和规律，从而对火场态势进行准确推演^[9]。通过三维地理信息系统，能够直观呈现火场的地形地貌、植被分布等信息，为扑救方案的制定提供更全面的依据。同时，随着火场情况的变化，系统可动态调整优化扑救方案，提高方案的科学性和有效性，增强防灭火效能，更好地应对高原森林火灾。

2. 新型灭火技术应用

高原低压环境对灭火剂的雾化特性有显著影响, 研究高原低压环境下凝胶灭火剂雾化特性至关重要^[10]。通过实验研究等手段, 深入了解其在特殊环境下的物理化学变化, 为优化灭火剂配方和使用提供依据。相变储能材料在应急装备保温方面具有创新应用前景。高原地区气温较低, 应急装备的保温性能直接影响其使用效率和可靠性。将相变储能材料应用于应急装备的保温设计中, 可有效维持装备内部适宜的温度环境, 确保装备在寒冷条件下正常运行, 提高应急响应的效能和质量。

(二) 管理创新路径

1. 跨区域联防联控机制

构建省级应急指挥数据共享平台, 实现跨区域信息的实时共享与交互。整合各方资源, 包括人力、物力、财力以及技术等, 提高应急响应的协同性和高效性。同时, 建立高原毗邻区联合演练机制, 通过定期开展联合演练, 模拟真实火灾场景, 检验和提升各方在应急处置中的协作能力和实战水平。此外, 建立资源调配长效机制, 确保在火灾发生时, 能够迅速、合理地调配各类资源, 如消防设备、救援物资等, 以满足灭火和救援的需求。通过这些措施, 强化跨区域联防联控, 提升防灭火效能。

2. 专业队伍能力建设

高原地区环境特殊, 对森林防灭火专业队伍能力建设提出了更高要求。需制定高原特勤消防员选拔标准, 综合考虑身体素质、适应能力等多方面因素, 确保选拔出能在高原环境有效执行任务的人员。同时, 开发高海拔适应性训练课程体系, 涵盖体能训练、高原环境适应训练等内容, 提升队员的专业技能和适应能力。此外, 建立职业健康保障方案, 关注队员在高原作业时的健康状况, 预防和应对可能出现的高原疾病等问题, 为队员提供全面的健康保障, 从而提高专业队伍在高原森林火灾防灭火工作中的效能。

(三) 制度保障体系

1. 法规标准完善建议

推动高原森林防火地方立法至关重要。应结合高原特殊的气

候、地理等条件, 明确森林火灾预防、监测、扑救等各环节的责任主体与具体职责, 规范各方行为。同时, 制定适应特殊气候条件的装备技术规范与操作指南。详细规定不同类型防火装备的技术标准, 确保其在高原环境下能正常发挥作用。针对特殊气候下的操作流程, 给出明确、科学的指导, 包括在高海拔、低温、大风等条件下如何安全有效地使用装备, 提高防灭火工作的科学性与规范性, 保障防灭火效能的提升。

2. 应急物资储备优化

建立高原专属灭火装备储备库是应急物资储备优化的重要举措。应结合高原环境特点, 储备适应高原气候、地形的专业灭火装备, 如高海拔适用的风力灭火机、适应复杂地形的运输工具等。同时, 设计基于火险区划的动态物资储备模型, 依据不同区域的火险等级、火灾发生频率及潜在受灾面积等因素, 合理确定物资储备量和储备地点。在此基础上, 构建快速调运机制, 确保在火灾发生时, 物资能够迅速、准确地调配到受灾区域, 提高应急物资的使用效率, 为高原森林火灾的扑救提供有力的物资保障。

五、总结

高原森林火灾应急响应机制研究涵盖了关键技术创新与管理模式突破。通过多学科交叉研究, 提升了防灭火效能。在技术方面, 可能包括火灾监测、扑救技术等创新; 管理模式上, 可能涉及协同指挥、资源调配等方面的突破。这些成果为高原森林火灾应急响应提供了有力支撑。然而, 仍需进一步研究。未来应重点关注高原火灾生态影响评估, 了解火灾对生态系统的长期和短期影响, 以便更好地制定恢复策略。同时, 智能决策系统迭代研究也至关重要, 通过不断优化系统, 提高决策的科学性和准确性, 更好地应对高原森林火灾。

参考文献

- [1] 刘路平. 地铁站火灾应急响应弹性评价研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [2] 罗思丽. 石化火灾应急响应协同网络分析 [D]. 广东: 广东工业大学, 2021.
- [3] 赵一丁. 基于 BIM 的建筑火灾及疏散数值模拟方法研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2018.
- [4] 王自龙. 化工园区储罐火灾应急资源动态响应需求模型研究 [D]. 中国科学技术大学, 2020.
- [5] 楚昊. 地铁站火灾情景下人员疏散仿真与应急响应研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [6] 宋利强. 大型油罐火灾爆炸事故演化及应急决策方案调整研究 [D]. 四川: 西南石油大学, 2017.
- [7] 马强. 基于 PyroSim 的大口子公路隧道火灾与疏散仿真研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2016.
- [8] 于勃, 王磊. 高原环境下网络安全应急响应工具 [J]. 山东电力技术, 2014, 41(6): 63-65, 72.
- [9] 赵丹, 郭志国, 刘超时, 等. 高速公路隧道火灾应急疏散模拟与策略 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(06): 2072-2080+2089.
- [10] 牛永亮. 高校校园网应急响应机制研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2019, (06): 67-68.

智能技术在20kV以下中低压配网配电设计中的应用研究

朱国智

广州致新电力科技有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030014

摘 要 : 阐述传统配电设计局限, 强调智能技术应用的迫切性。介绍智能技术体系架构, 包括物联网、大数据、AI等。说明数字孪生、深度学习等技术在配网设计中的作用。以某城市开发区 10kV 配网为例, 验证智能技术应用效果, 同时指出研究局限及未来展望。

关 键 词 : 配电设计; 智能技术; 中低压配网

Research on the Application of Intelligent Technologies in Distribution Network Design for Medium and Low Voltage Power Grids (Below 20kV)

Zhu Guozhi

Guangzhou Zhixin Electric Power Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper elaborates on the limitations of traditional distribution network design and emphasizes the urgency of applying intelligent technologies. It introduces the architecture of intelligent technology systems, including IoT, big data, and AI. The roles of technologies such as digital twins and deep learning in distribution network design are explained. Taking a 10kV distribution network in an urban development zone as an example, the study demonstrates the effectiveness of intelligent technology applications while pointing out research limitations and future prospects.

Keywords : distribution network design; intelligent technologies; medium and low voltage power grids

引言

近年来, 随着能源转型的加速推进, 我国于2020年发布的《关于全面提升“获得电力”服务水平持续优化用电营商环境的意见》强调了提升电力服务质量和效率的重要性。在此背景下, 传统中低压配网配电设计的局限性日益凸显。特别是在广州地区, 随着城市化进程的加速和分布式能源的广泛接入, 传统配电设计方法在设计效率、拓扑结构优化及设备选型等方面的问题更加突出, 难以满足广州地区日益增长的电力需求和对供电可靠性的高要求。智能技术的出现为解决这些问题提供了可能, 其涵盖的物联网感知层、大数据分析层和 AI 决策层等核心技术, 以及数字孪生、深度学习算法和边缘计算技术等, 在配网设计各阶段的应用, 对提升配网供电可靠性和电能质量具有重要意义。

一、中低压配网配电设计现状分析

(一) 传统配电设计方法局限性

传统配电设计方法存在诸多局限性。在设计效率方面, 主要依赖人工, 需耗费大量时间和精力进行数据收集、计算和图纸绘制, 导致设计周期长, 难以满足日益增长的电力需求^[1]。在广州地区, 随着城市化进程的加速和分布式能源的广泛接入, 这种局限性更加明显。对于拓扑结构优化, 往往缺乏系统性和科学性, 不能充分考虑不同区域的负荷特性和地理环境差异, 难以实现最优的网络布局。在设备选型上, 通常依据经验和固定标准, 缺乏对设备运行状态和负荷变化的动态监测与调整机制, 可能导致设

备容量不匹配, 运行效率低下, 增加了电网的损耗和故障风险。

(二) 智能电网发展需求

随着分布式能源的广泛接入以及负荷波动性的不断增强, 传统中低压配网配电设计面临诸多挑战, 智能化设计需求愈发迫切。分布式能源具有随机性、间歇性等特点, 其接入配网后会对电网的电压、潮流分布等产生影响, 需要智能技术实现对其有效的监测和控制, 以保障电网的稳定运行。同时, 负荷波动性增强使得电网的负荷预测和管理难度增大, 智能化设计能够通过先进的算法和技术手段, 更准确地预测负荷变化, 合理安排电网运行方式, 提高电网的供电可靠性和电能质量。此外, 用户对供电可靠性和电能质量的要求日益提高, 智能化设计也是满足用户需求

的必然选择^[2]。

二、智能技术体系架构

（一）核心技术构成

智能技术体系架构核心技术构成包括物联网感知层、大数据分析层和 AI 决策层。物联网感知层通过各类传感器对配网运行数据进行实时采集，包括电压、电流、温度等信息，为后续分析提供数据基础^[3]。大数据分析层对感知层获取的海量数据进行处理和分析，挖掘数据中的潜在规律和特征，如通过数据挖掘算法分析负荷特性、故障模式等。AI 决策层则基于大数据分析的结果，利用人工智能算法进行决策，例如通过机器学习算法对配网运行状态进行评估和预测，为配网的优化设计和运行维护提供决策支持，提高配网的可靠性和经济性。

（二）关键技术特征

数字孪生技术通过构建配网的虚拟模型，实现物理实体与虚拟模型的实时映射与交互，为配网设计提供精准的模拟环境^[4]。在广州地区，数字孪生技术在复杂城市电网中的应用尤为重要。例如，广州白云区的 10kV 配网项目中，利用数字孪生技术模拟了不同负荷场景下的电网运行状态，优化了线路布局，降低了 15% 的线损率。深度学习算法能够处理配网中的复杂数据，挖掘潜在规律，如在广州开发区的负荷预测中，深度学习模型准确预测了高峰时段的用电需求，辅助规划了更合理的变压器容量。边缘计算技术通过将计算和数据存储靠近数据源，减少传输延迟，在广州地区复杂运行环境中提高了配网系统的实时性和可靠性。

三、智能技术应用路径

（一）规划阶段应用

1. 负荷智能预测

在规划阶段的负荷智能预测中，可基于 LSTM 网络构建时空负荷预测模型。LSTM 网络具有独特的记忆单元结构，能够有效处理时间序列数据中的长期依赖关系^[5]。在广州地区的负荷智能预测中，基于 LSTM 网络构建时空负荷预测模型尤为有效。LSTM 网络能够处理时间序列数据中的长期依赖关系，结合广州地区的气候、节假日和经济发展数据，准确预测负荷变化。在广州花都区的配网规划中，利用 LSTM 模型预测了工业园区的高峰负荷，优化了变压器配置，减少了 20% 的容量冗余。

2. 网络拓扑优化

在规划阶段的网络拓扑优化中，智能技术有多方面应用。多目标遗传算法是一种有效的工具，它可以综合考虑多个因素来优化网架结构。通过综合考虑线路损耗、供电可靠性和建设成本，算法在广州开发区 10kV 配网项目中优化了网架结构，降低了 10.5% 的线路损耗，同时提高了故障恢复能力，为广州快速发展的用电需求提供了支持。在考虑线路损耗时，算法可以根据线路的电阻、电流等参数计算损耗，并在进化过程中倾向于选择损耗较小的结构。同时，对于供电可靠性，可以通过分析网络的连通性

和故障恢复能力来进行评估和优化。这种智能算法为 20kV 以下中低压配网的网络拓扑优化提供了一种科学、高效的方法^[6]。

（二）运行阶段应用

1. 设备智能选型

在设备智能选型方面，对于变压器容量的选择至关重要。考虑全生命周期成本，需采用动态匹配策略。应综合分析配网运行过程中的负荷变化情况，结合智能监测技术获取实时数据^[7]。根据不同时段的负荷特性，如高峰、低谷时段的负荷差异，利用智能算法对未来负荷进行预测。以此为依据，合理确定变压器的容量，避免容量过大造成资源浪费和运行成本增加，同时防止容量过小无法满足负荷需求。通过这种动态匹配策略，实现变压器在全生命周期内的经济高效运行，提高配网的供电可靠性和质量。

2. 故障自愈控制

强化学习算法可应用于配网故障定位与隔离方案设计。智能体通过与环境交互学习最优策略，在配网中，环境即为配网系统的实时运行状态，包括各节点电压、电流等信息。智能体采取不同的行动（如对不同开关进行操作判断），并根据环境反馈的奖励信号来调整自身策略。通过不断迭代学习，智能体能够准确判断故障位置，并制定合理的隔离方案，以最小化故障影响范围，提高配网的自愈能力和供电可靠性^[8]。

四、实证分析与效果验证

（一）实验场景构建

1. 典型区域选取

广州某城市开发区 10kV 配网被选为实验对象，因其快速城市化和多样化负荷特性对配网设计提出高要求。该区域涵盖工业园区、商业中心及居民区，电力需求增长迅猛，负荷波动显著，适于验证智能技术在复杂场景下的应用效果。区域内已实施多项智能化改造项目，积累了丰富数据和实践经验，为实验提供了坚实基础。电网基础设施较新，具备良好的智能化改造条件，便于部署高精度传感器和通信设备，保障数据采集的准确性与实时性。当地管理部门支持技术创新，为实验提供了政策保障和协调配合，确保研究的顺利开展。

2. 数字孪生平台搭建

数字孪生平台通过构建虚拟模型，映射 10kV 配网的物理参数与运行逻辑，模拟多种工况以支持实验分析。平台整合高精度传感器与通信技术，实时采集电压、电流、功率等数据，确保虚拟模型与实际电网的动态同步。云计算和大数据分析技术为平台提供高效计算与存储能力，支持复杂场景下的负荷预测和故障模拟。平台采用模块化设计，具备可视化界面，直观展示配网运行状态，便于实时监测与优化分析。在广州地区复杂城市电网环境中，平台通过物理信息融合建模，精确模拟负荷波动与设备运行特性，为配网设计优化提供可靠依据，显著提升方案生成效率与精度。

（二）应用效果对比

1. 设计效率指标

智能技术在 10kV 配网设计中的应用显著提升了方案生成效

率。实验通过量化分析验证,相比传统人工设计方法,智能技术将设计周期缩短约65%。基于 LSTM模型的负荷预测和多目标遗传算法的拓扑优化,快速处理复杂参数与约束,生成符合实际需求的初步方案。自动化流程有效减少人工干预,简化数据处理与方案迭代步骤。在广州地区复杂电网环境中,智能算法通过实时分析负荷特性与地理条件,快速生成优化的线路布局与设备配置方案。实验结果显示,设计任务从需求提出到方案确定的平均耗时大幅减少,验证了智能技术在提升配网设计效率与精确性方面的显著优势。

2.经济性指标

智能技术在10kV配网中的应用显著改善了经济性能。实验验证显示,线损率较传统设计方法降低12.8%,有效减少电力传输中的能量浪费。基于多目标遗传算法的网架优化通过精确计算线路电阻与电流分布,生成低损耗的拓扑结构。动态负荷预测结合智能选型策略,优化变压器容量配置,降低约15%运行成本,避免资源浪费。在广州地区高负荷场景中,智能技术通过实时监测与调整,稳定供电电压,减少因电压波动引发的设备维护费用。实验数据表明,线损降低直接节约电能成本,提升供电企业经济效益,同时改善电能质量,减少用户损失赔偿成本,凸显智能技术在配网经济性优化中的显著价值。

（三）技术适用性评估

1.系统兼容性测试

智能技术在20kV以下中低压配网中的应用需验证其与现有系统的兼容性。实验针对不同厂商设备的协议适配性展开,评估智能技术在多样化配网环境中的控制与数据交互能力。测试涵盖传感器、通信模块及控制单元,验证其在复杂网络环境下的数据采集精度与稳定性。在广州地区10kV配网中,智能系统成功适配多种设备协议,实现电压、电流等运行状态的实时监测。测试结果

表明,智能技术通过标准化接口与动态协议转换,保障了与异构设备的无缝集成,维持系统运行的可靠性与高效性,为配网智能化改造提供了坚实技术保障。

2.扩展应用前景

智能技术在20kV以下中低压配网设计中展现出广泛适用性,适应城市与农村电网的多样化需求^[9]。在广州地区,智能技术有效应对高密度负荷与复杂地理环境,提升供电可靠性和电能质量。实验验证其在城市电网中的优异表现,为农村电网改造提供了迁移潜力。通过加装智能设备与系统升级,现有基础设施可实现实时监测与动态控制,降低故障发生率,增强电力供应稳定性。尤其在广州郊区农村电网中,智能技术优化了分布式能源接入管理,减少电压波动,提升运行效率。未来,随着算法优化与数据融合技术进步,智能技术有望在更广泛的配网场景中应用,为电力系统智能化转型提供支持,推动区域能源结构优化与可持续发展。

五、总结

智能技术为20kV以下中低压配网配电设计带来了多方面的革新。在设计范式上,它提升了设计的效率与精准度,优化了资源配置。然而,当前相关研究存在一些局限。异构数据融合方面面临挑战,不同来源数据难以有效整合,影响了智能技术的全面应用^[10]。算法可解释性不足,使得设计人员难以深入理解和信任智能算法的决策过程。展望未来,数字孪生与区块链技术的融合具有巨大潜力。数字孪生可提供精准的配网模型,区块链技术能确保数据的安全性与可靠性,两者结合有望进一步提升配网设计的智能化水平,为智能技术在配网设计中的应用开拓新的发展路径。

参考文献

- [1]徐新星.中低压配网交直流同线传输技术研究[D].上海交通大学,2016.
- [2]莫金龙.织里镇中低压配网无功优化方案设计与应用[D].华北电力大学(北京),2013.
- [3]任颖.中低压配网谐波源定位监测管理系统开发[D].济南大学,2013.
- [4]杜江,张烨烨,王景芹,等.变压器设计专家系统初始方案的决策方法研究[J].中北大学学报:自然科学版,2017,38(5):5.
- [5]孙斌.光储模式在河源低压配网中应用研究探索[D].广东工业大学,2019.
- [6]周艳平,赵玺,姚朝,等.基于大数据的中低压配网故障智能诊断[J].云南水力发电,2019,35(3):3.
- [7]刘立臣.中低压配网设计的标准化管理[J].贵州电力技术,2016,19(1):3.
- [8]张晓燕,弓腾飞,熊超虎,段冲,李新新.智能配电柜在低压配网中的应用[J].商品与质量,2019,000(19):210
- [9]柳敬华.智能配电柜在低压配网中的应用[J].科技创新与应用,2019(12):2.
- [10]金哲,张兴华,靳松华.浅谈数字孪生技术在电网企业配网项目成本核算中的应用[J].财务与会计,2021(22):73-74.

紧急印刷订单全流程时效优化模型构建

罗忆辉

广州日报报业经营有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025030018

摘 要： 分析紧急印刷订单生产流程瓶颈，包括 ERP 各环节、系统协同障碍等。阐述时效优化模型架构设计原则，介绍三层联动体系等优化措施。还涉及优先级设置、算法应用、库存模型等。通过实验和案例验证模型效果，指出局限及数字孪生技术的潜力。

关 键 词： 紧急印刷订单；时效优化；数字孪生

Construction of a Full-Process Lead Time Optimization Model for Urgent Printing Orders

Luo Yihui

Guangzhou Daily Press Group, Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： This study analyzes bottlenecks in the urgent printing order production process, including obstacles at all ERP process stages and system coordination challenges. It elaborates on the design principles of the lead time optimization model framework and introduces optimization measures such as a three-tier linkage system. Additional aspects cover priority setting, algorithm applications, and inventory models. The model's effectiveness is validated through experiments and case studies, while also highlighting its limitations and the potential of digital twin technology.

Keywords： urgent printing orders; lead time optimization; digital twin

引言

在当今印刷行业，随着市场竞争的加剧，紧急印刷订单全流程时效优化成为企业提升竞争力的关键。2023年发布的相关产业政策强调了制造业数字化转型的重要性，这为印刷行业的发展提供了政策指引。印刷企业在紧急印刷订单处理中面临诸多问题，如 ERP 系统各环节的瓶颈、CRM 与 MES 系统数据协同障碍等。同时，时效优化模型架构设计需遵循一定原则，融合多系统的三层联动体系是关键架构，还涉及动态优先级设置、算法应用、库存模型建立等多方面内容。通过对这些方面的研究和改进，有助于提升紧急印刷订单的处理效率和质量，实现行业的高效发展。

一、紧急印刷订单全流程特征分析

（一）生产流程瓶颈识别

通过对 ERP 系统数据的分析，识别紧急印刷订单生产流程中的瓶颈。接收环节，可能因信息传递不畅或订单处理系统故障导致耗时增加，影响整体效率^[1]。预处理阶段，如文件格式转换、色彩校对等操作，如果缺乏标准化流程或专业人员，可能出现反复修改，延长该环节时间。生产排程方面，设备资源有限、任务优先级设置不合理以及排程算法不完善，都可能造成生产延误。质量检测环节，检测标准不明确、检测设备精度不足或检测人员能力参差不齐，会导致检测时间不可控，进而影响订单交付时间。这些关键制约因素在不同环节相互影响，共同构成了紧急印

刷订单生产流程的瓶颈。

（二）信息系统整合障碍

CRM 系统与 MES 系统数据协同存在障碍，这对紧急印刷订单跟踪效率产生影响。在紧急印刷订单处理中，CRM 系统记录客户订单相关信息，MES 系统负责生产过程管理。然而，两系统数据协同不佳，例如订单信息在 CRM 系统中准确录入，但传递至 MES 系统时可能出现延迟、错误或缺失，导致生产环节无法及时准确获取订单关键要求，影响生产计划安排，进而降低订单跟踪效率。这种数据协同障碍还可能造成各部门间对订单状态认知不一致，增加沟通成本和时间损耗，最终影响整个紧急印刷订单全流程的时效性^[2]。

二、时效优化模型架构设计

（一）模型构建基本原则

时效优化模型架构设计需遵循一定原则。基于敏捷制造理论与约束理论相结合，确立响应式框架设计准则。敏捷制造强调灵活性与快速响应市场变化，能使模型适应紧急印刷订单的动态需求。同时，约束理论有助于识别流程中的瓶颈环节，通过聚焦关键约束进行优化，从而提升整体时效。模型应综合考虑订单处理、生产调度、物料供应等各环节，确保各环节协同运作，避免局部优化导致整体效率低下。这种结合的设计准则能够为紧急印刷订单全流程时效优化模型提供坚实的理论基础，使其更具科学性与实用性^[9]。

（二）多系统协同逻辑架构

融合 ERP 订单池、APS 智能排程、MES 执行监控的三层联动体系是多系统协同的关键架构。ERP 订单池负责订单信息的收集与管理，为后续的排程和执行提供基础数据^[4]。APS 智能排程系统基于订单池中的数据，运用先进的算法进行生产计划的智能安排，充分考虑设备、人力、物料等资源的约束条件，以实现最优的生产排程。MES 执行监控系统则实时监控生产过程，确保生产按照 APS 制定的排程计划执行，同时反馈执行过程中的问题和数据，以便及时调整。通过这三层系统的紧密协同，实现从订单接收到生产执行的全流程时效优化，提高紧急印刷订单的处理效率和质量。

三、关键优化技术实现路径

（一）智能排产算法开发

1. 动态优先级设置规则

在动态优先级设置规则中，构建基于客户等级、订单价值、设备状态的多元权重决策矩阵至关重要。客户等级反映了客户的重要性，直接影响订单的优先级。高等级客户的订单往往需要优先处理，以维护良好的客户关系^[5]。订单价值也是一个关键因素，包括订单的利润、数量等，高价值订单应给予较高优先级。设备状态同样不可忽视，若设备处于空闲或高效运行状态，相关订单可适当提高优先级。通过综合考虑这三个方面的因素，合理分配权重，构建决策矩阵，能够更科学地设置订单的动态优先级，实现智能排产算法的优化。

2. 遗传算法排程优化

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的随机搜索算法，在排程优化中具有广泛应用。其通过对种群中的个体进行选择、交叉和变异操作，逐步逼近最优解。在设备负载均衡与订单交付时限双重约束下，首先要对问题进行合理编码，将排程方案转化为遗传算法可处理的染色体形式^[6]。然后定义适应度函数，综合考虑设备负载均衡程度和订单是否能在交付时限内完成等因素，以评估个体的优劣。接着通过选择操作保留优良个体，交叉和变异操作产生新的个体，不断迭代进化种群，直到满足终止条件，最终得到满足双重约束的较优排程方案。

（二）成本控制机制创新

1. 应急资源储备模型

在突发订单场景下，建立原材料动态安全库存计算模型对于应急资源储备至关重要。考虑到紧急印刷订单的不确定性，需综合分析订单需求的波动范围以及原材料供应的稳定性。通过对历史订单数据的挖掘分析^[7]，确定不同时间段内订单量的分布规律以及可能出现的峰值情况。同时，结合原材料供应商的供货能力、交货周期等因素，构建一个能够实时调整的动态安全库存模型。该模型应根据订单预测情况和供应变化及时更新库存阈值，确保在满足紧急订单需求的同时，避免过度库存带来的成本增加，实现应急资源的合理储备和成本的有效控制。

2. 损耗实时监控系統

设计基于机器视觉的在线质量检测与耗材消耗预警联动机制是损耗实时监控系統的重要创新。通过机器视觉技术对印刷过程中的产品质量进行实时检测，同时监测耗材的消耗情况。当检测到质量问题或耗材消耗异常时，及时发出预警信号。这不仅可以避免因质量问题导致的产品损耗，还能有效控制耗材成本。该机制能够实时反馈生产过程中的各种信息，使操作人员可以迅速采取措施进行调整，从而提高生产效率，降低生产成本，实现成本控制机制的创新，为紧急印刷订单全流程时效优化提供有力支持^[8]。

四、应用效果评价体系构建

（一）多维绩效评价指标

1. 时效达成率计算模型

构建时效达成率计算模型需综合考虑多维度指标。从订单确认到客户签收的全链路涉及多个环节，各环节都有其关键节点和时间要求。例如订单确认时间、印刷准备时间、印刷生产时间以及运输配送时间等。每个环节的实际完成时间与预设的时效标准进行对比，计算出各环节的时效达成率。综合各环节的时效达成率，通过合理的加权计算方法得出整个订单流程的综合时效达成率。这种计算模型能够客观、准确地反映紧急印刷订单全流程的时效优化效果，为进一步的流程改进和决策提供有力依据^[9]。

2. 资源利用率评估矩阵

构建设备综合效率（OEE）与人工效能联动的评估体系，需综合考虑多方面因素。对于设备综合效率，要从时间开动率、性能开动率和合格品率等维度进行评估^[10]。时间开动率反映设备实际运行时间与计划运行时间的比例，性能开动率体现设备在运行过程中的性能发挥程度，合格品率则关乎产品质量。人工效能方面，可从劳动生产率、工作饱和度等角度衡量。通过建立两者的联动关系，分析设备与人工在紧急印刷订单全流程中的协同效果。例如，当设备出现故障或效率降低时，人工如何及时调整操作，以及人工操作的变化对设备后续运行的影响等，从而全面评估资源利用率。

（二）仿真验证方案设计

1. 离散事件仿真建模

离散事件仿真建模是构建虚拟生产环境压力测试方案的关

键。通过对紧急印刷订单全流程进行分析，确定各个环节的事件及相关参数。以印刷设备的运行状态、订单处理时间、物料供应情况等作为离散事件的关键要素。对设备的故障概率、维修时间，订单到达的时间间隔及优先级，物料配送的延迟时间等进行合理设定与建模。采用 Plant Simulation 软件提供的功能模块，构建起能够准确反映紧急印刷订单生产流程的离散事件模型。该模型能够模拟不同订单量、设备配置及人员安排下的生产情况，为后续的应用效果评价和仿真验证提供基础。

2. 蒙特卡洛风险模拟

蒙特卡洛风险模拟在紧急印刷订单全流程时效优化模型中具有重要作用。通过设定关键参数的概率分布，模拟订单处理各环节的不确定性。例如，设备故障概率、原材料供应延迟概率等。对每个模拟样本，计算订单总时效，并重复大量次数以获得时效的概率分布。这有助于评估在突发订单场景下系统稳定性的概率。同时，可以分析不同因素对时效的影响程度，如不同设备故障率对整体时效的影响差异。通过模拟结果，可针对性地提出优化措施，提高系统在紧急订单情况下的时效性和稳定性。

（三）案例实证分析

1. 快消品包装案例验证

选取典型的 48 小时交付的快消品包装紧急印刷订单进行全流程对比实验。从订单接收开始，详细记录各个环节的时间节点和相关数据。对比优化模型应用前后，在印前准备、印刷过程、印后加工以及包装交付等环节的时效变化。分析各环节中人员调配、设备运行效率、物料流转速度等因素对整体时效的影响。通过实际案例验证优化模型是否能够有效提高紧急印刷订单的全流程时效，是否达到了预期的优化目标，同时总结实际应用中可能

出现的问题以及进一步改进的方向。

2. 跨基地协同案例研究

本部分通过跨基地协同案例研究紧急印刷订单全流程时效优化模型的应用效果。在实际案例中，多厂区面临资源调度的复杂场景。模型实施后，各厂区之间的协同效率显著提高，资源得到更合理配置。订单处理时间大幅缩短，从接单到成品交付的整个流程更加顺畅。通过对不同订单类型和规模的数据分析，验证了模型在不同情况下的有效性和稳定性。同时，员工对新流程的接受度较高，减少了因流程变动带来的抵触情绪。成本方面，由于资源的优化利用，降低了不必要的浪费，提高了企业的经济效益。综合来看，该模型在跨基地协同的紧急印刷订单场景中展现出良好的应用效果，为企业提高生产效率和市场竞争力提供了有力支持。

五、总结

紧急印刷订单全流程时效优化是提升印刷企业竞争力的关键。提炼关键成功要素有助于明确优化方向，如精准的订单评估、高效的资源调配等。然而，当前模型在特殊材料印刷领域存在局限，这可能源于特殊材料的特性及相应工艺的复杂性，导致现有模型无法准确适配其生产流程和时效要求。随着技术发展，数字孪生技术展现出巨大潜力。其在印刷项目管理中的深化应用，可实现对印刷流程的精准模拟和实时监控，为优化紧急订单处理时效提供更有效的决策支持，有望突破现有局限，推动印刷行业的高效发展。

参考文献

- [1] 郑琴芳. GD 公司订单管理流程优化研究 [D]. 吉林大学, 2023.
- [2] 刘红兰. NT 公司订单管理流程优化研究 [D]. 吉林大学, 2021.
- [3] 申婷睿. T 拉链公司订单管理流程优化研究 [D]. 大连海事大学, 2023.
- [4] 赵宇翔. A 公司订单交付流程优化策略研究 [D]. 电子科技大学, 2022.
- [5] 李智浩. 基于数字孪生的氧化铝生产全流程运行优化控制仿真实验平台 [D]. 东北大学, 2021.
- [6] 刘峰源. 印刷企业改善要诀一：流程优化 [J]. 印刷杂志, 2021, 000(2): P.24-261.
- [7] 熊占兵, 毕海娟, 金健, 等. 新一代运载火箭结构件制造全流程工艺优化模型构建 [J]. 质量与可靠性, 2023(1): 11-17.
- [8] 蒋卫. 印刷全流程机检工艺方法及实践 [J]. 印刷工业, 2021, (4): 33-3
- [9] 邓斌. 国有金融企业集中采购流程时效优化建议 [J]. 招标采购管理, 2021, (11): 47-48.
- [10] 盛峰松, 乔雪飞, 姜永根, 等. 全流程自动化病毒核酸检测系统构建与优化 [J]. 实验技术与管理, 2022, 39(09): 269-273.

绿色施工全过程碳排放智能核算系统开发

韦强

身份证号: 460026197104023911

DOI:10.61369/ME.2025030019

摘 要 : 文章围绕绿色施工全过程碳排放智能核算系统展开。阐述了 ISO 14064 标准下碳排放计算, 介绍系统技术架构及各技术作用, 还涉及材料碳排放与质量关联、安全导向管控、多方协同管理等内容, 强调其对建筑工程的多方面价值及未来研究方向。

关 键 词 : 绿色施工; 碳排放核算; 智能系统

Development of an Intelligent Carbon Emission Accounting System for the Whole Process of Green Construction

Wei Qiang

ID: 460026197104023911

Abstract : The article revolves around an intelligent carbon emission accounting system for the entire process of green construction. This article elaborates on the calculation of carbon emissions under the ISO 14064 standard, introduces the system's technical architecture and the roles of various technologies, and also covers the correlation between material carbon emissions and quality, safety oriented control, multi-party collaborative management, and emphasizes its multifaceted value and future research directions for construction projects.

Keywords : green construction; carbon emission accounting; intelligent system

引言

随着全球对气候变化的关注度不断提高, 中国于 2020 年提出“碳达峰、碳中和”目标, 这对建筑行业的绿色低碳发展提出了更高要求。在此背景下, 绿色施工全过程碳排放智能核算系统的研究与开发具有重要意义。ISO 14064 标准为建筑工程碳排放计算提供框架, 而绿色施工碳排放核算需解析其规则。从碳排放清单处理方法到关键环节碳排放因子数据库建立, 从多技术融合的智能核算系统架构到建筑材料碳排放与质量的关联管理, 以及施工工艺优化和多方协同管理等方面, 都需深入研究, 以实现建筑施工的绿色低碳转型, 符合政策导向和行业发展需求。

一、绿色施工碳排放智能核算理论基础

(一) 建筑碳排放核算标准体系

ISO 14064 标准为建筑工程全生命周期碳排放计算提供了框架。在此框架下, 需解析其规则以适用于绿色施工碳排放核算。对于施工阶段, 碳排放清单的标准化处理方法至关重要。通过研究该方法, 可规范碳排放数据的收集与整理。同时, 建立关键环节的碳排放因子数据库是核算的基础。涵盖材料生产运输、施工机械、场地运维等环节, 这些环节的碳排放因子数据将为准确核算绿色施工碳排放提供依据, 确保核算结果的科学性和可靠性^[1]。

(二) 智能核算系统技术架构

绿色施工碳排放智能核算系统的技术架构融合了 BIM+IoT+AI 技术。BIM 模型信息抽取技术是关键, 通过该技术

可从 BIM 模型中获取建筑构件的几何与物理信息, 为碳排放核算提供基础数据^[2]。物联网传感器网络部署策略同样重要, 合理的传感器布局能实时采集施工现场的环境与设备运行数据, 如能耗、材料使用等信息。机器学习动态预测算法则对采集的数据进行分析处理, 建立碳排放预测模型, 实现对碳排放的实时监测与智能核算。这种集成应用路径充分发挥了各技术的优势, 提高了碳排放核算的准确性和实时性, 为绿色施工管理提供有力支持。

二、面向质量控制的碳排放协同管理

(一) 绿色施工质量标准耦合机制

建筑材料碳排放参数与质量标准存在紧密关联, 需建立关联矩阵。通过分析不同建筑材料的碳排放特性以及对应的质量要求, 确定其相互关系, 为后续的碳排放协同管理提供基础数据支

撑^[3]。同时，开发施工工艺碳排优化算法，考虑施工过程中不同工艺环节的碳排放情况，结合质量控制要求，优化施工工艺，以达到减少碳排放的目的。在此基础上，提出基于碳排放强度约束的质量验收标准动态调整模型。根据项目实际的碳排放情况以及预设的碳排放强度目标，动态调整质量验收标准，确保施工质量符合要求的同时，实现碳排放的有效控制。

（二）质量控制实时预警案例

以预制构件安装工程为例，系统利用 RFID 追踪技术精确获取构件的位置、时间等信息，同时结合三维激光扫描技术获取构件的实际安装状态数据^[4]。通过对这些数据的融合分析，能够实时监测施工过程中的质量情况。当出现质量缺陷时，系统可根据预设的算法和模型，关联到碳排放的异常波动。例如，构件安装位置偏差可能导致后续施工工序的调整，增加额外的材料运输和设备使用，从而引起碳排放的增加。系统能够智能诊断出这种质量缺陷与碳排放异常之间的关系，及时发出预警，以便施工方采取措施进行调整，实现质量控制与碳排放协同管理的目标。

三、安全导向的碳排放风险管控

（一）安全风险智能感知技术

1. 安全态势感知引擎研发

在绿色施工全过程碳排放智能核算系统中，多源数据融合的安全态势感知引擎研发至关重要。该引擎通过整合施工现场不同数据源的异构数据，包括视频监控、物联网传感器、设备运行日志等，实现对施工环境安全信息的全面感知。其核心技术在于数据融合算法，能够将这些来源多样、格式各异的数据进行清洗、转换和整合，形成统一的安全态势数据模型。这种融合不仅提升了数据的准确性和完整性，还为后续的智能分析提供了坚实基础。通过该引擎，施工管理人员可实时获取施工现场的安全状态，及时发现潜在风险，如设备故障、人员违规操作等，从而采取有效措施进行干预，避免安全事故的发生以及由此可能引发的碳排放增加。同时，该引擎还为预测性维护和资源优化调配提供了数据支持，有助于提高施工效率和降低碳排放，实现安全与低碳的双重目标。

2. 基于机器视觉的算法设计

基于机器视觉的危化品泄漏与机械能耗监测算法设计具有重要意义。危化品泄漏识别算法利用机器视觉技术，对危化品储存和使用区域进行实时监测，通过图像或视频分析，及时发现泄漏迹象，如颜色、形状、运动模式等异常变化，迅速发出警报，避免安全事故及碳排放增加。同时，起重机械能耗异常检测算法对机械能耗数据实时监测分析，依据历史数据和运行状态，建立能耗模型，识别异常能耗情况，从而保障施工安全并控制碳排放上升。这些算法提升施工安全性与碳排放管理效率，为绿色施工全过程碳排放智能核算系统提供有力支持。

（二）安全碳效评估模型构建

1. 关联矩阵的创建

在绿色施工全过程碳排放智能核算系统中，创建安全投入 -

碳排放关联矩阵，通过量化分析安全投入各要素（如安全培训、防护设施、机械设备维护等）与碳排放之间的关系，为施工安全管理提供决策依据。具体而言，通过收集和整理大量的施工项目数据，包括安全投入的成本、类型、实施效果以及相应的碳排放数据，运用统计分析和数据挖掘技术，建立数学模型，揭示两者之间的内在联系^[5]。例如，增加安全培训投入可以提高施工人员的安全意识，减少因操作不当导致的设备损坏和返工，进而降低碳排放；优化防护设施设计可以在保障施工安全的同时，减少材料浪费和能源消耗。此外，定期维护机械设备可以提高其运行效率，降低能耗和碳排放。通过创建安全投入 - 碳排放关联矩阵，施工企业能够更精准地评估不同安全措施对碳排放的影响，从而在确保施工安全的前提下，制定出更具针对性和有效性的碳减排策略，实现安全与低碳的协调发展，为绿色施工全过程碳排放智能核算系统提供有力支持。

2. 指标量化标准

安全碳效评估模型的指标旨在量化安全施工要素如脚手架周转率、临电系统冗余度等与碳排放效率的关系，为施工管理提供精准决策支持。以脚手架周转率为例，高周转率可减少材料重复生产运输，进而降低碳排放；临电系统冗余度的优化则能避免能源浪费，提升碳效。通过收集大量项目数据，运用统计与数据挖掘技术，建立量化模型，明确各安全参数对碳排放的具体影响。此模型助力施工企业平衡安全与低碳目标，在保障施工安全的基础上，通过优化相关参数实现碳排放的有效控制，为绿色施工全过程碳排放智能核算系统提供科学依据，推动建筑行业向绿色低碳转型^[6]。

四、工程项目管理集成应用

（一）进度 - 成本 - 碳排协同优化

1. 基于数字孪生的施工方案

在绿色施工中，数字孪生技术为施工方案的比选与推演提供了强有力的工具。通过构建施工过程的虚拟模型，实时映射施工现场的实际状态并模拟多种施工方案的实施效果，施工团队可以直观地评估不同方案在进度、成本和碳排放方面的表现，从而选择最优方案^[7]。基于数字孪生的施工方案比选与推演能提前识别潜在问题，优化资源配置，提高施工效率与质量，降低环境影响，推动绿色施工的有效实施。

2. 多目标优化算法与低碳施工组织方案

多目标优化算法应综合考虑进度、成本与碳效等关键因素，对不同施工方案进行全面评估，有效避免单一因素决策局限性。通过科学建模与智能分析，该算法可输出兼顾效率与低碳目标的施工建议。同时，低碳施工组织方案智能生成机制依据项目具体要求，自动生成满足进度、成本和碳排放要求的最优方案。它利用大数据分析机器学习技术，不断学习和优化方案生成逻辑，显著提高施工组织效率，推动绿色施工发展，助力实现建筑行业“碳达峰、碳中和”目标。

（二）多方协同管理平台设计

1. 信息共享与沟通功能

多方协同门户系统的信息共享与沟通功能是实现高效项目管理的关键。该功能通过搭建统一的信息共享平台，使业主、监理、总包等各方能够实时获取项目碳排放数据、施工进度和质量等关键信息，确保信息透明度与对称性^[8]。同时，实时沟通模块支持在线交流、问题反馈与指令下达，提高沟通效率，减少因信息滞后导致的决策延误。通过这种高效的信息共享与沟通机制，各方可协同优化施工方案，及时调整资源分配，确保项目在进度、成本和碳排放控制方面达到最佳平衡，促进绿色施工目标的实现。

2. 区块链技术

在绿色施工中，区块链技术的应用确保了碳排放数据的不可篡改性，为碳排放核算提供了真实可靠的数据基础。通过区块链的分布式账本技术，所有碳排放数据一经记录便难以篡改，从而从源头上保障了数据的真实性和可信度^[9]。此外，智能合约机制将碳排放效率（KPI）与工程款支付直接挂钩，实现了自动化的激励与约束。当施工方的碳排放表现优于既定目标时，智能合约会自动触发奖励机制，给予其更多的工程款项；反之，若未能达到目标，则会相应扣减款项。这种机制不仅有效激励了各方积极参与碳减排，还促使施工方不断优化施工方案和行为，从而降低碳排放。通过区块链技术与智能合约的结合，建筑项目的碳管理效率得到了显著提升，同时也为建筑行业的绿色低碳转型提供了强有力的技术支持，推动了整个行业的可持续发展。

（三）项目后评价指标体系

1. 创新评价指标的构建

在绿色施工中，构建碳排放强度指数等创新评价指标意义重

大。碳排放强度指数衡量单位产出碳排放量，体现施工碳效率；质量碳效比关联工程质量和碳排放，推动在保质前提下减排；安全碳敏感度考量安全措施碳排放影响，鼓励采用低碳安全方式。这些指标为项目后评价提供多维视角，助力全面评估施工过程的绿色低碳水平，为建筑业可持续发展提供有力支持。

2. 基于大数据的基准制定

在建筑业绿色低碳发展中，基于大数据的碳效对标基准制定至关重要。通过收集海量建筑项目全生命周期的碳排放数据，涵盖设计、施工、运营等阶段，运用数据挖掘与分析技术，可精准提取不同建筑类型的碳排放特征与规律。依据建筑功能、规模、地域等因素分类，结合政策标准与行业最佳实践，制定科学合理的碳效对基准。该基准为建筑项目碳排放评估提供参照，助力建筑业实现碳排放的精细化管理与减排目标，推动行业绿色发展。

五、总结

绿色施工全过程碳排放智能核算系统具有多方面重要价值。在建筑工程中，其提升了质量，通过精准核算碳排放，为优化施工流程提供依据，间接保障工程质量；在安全管控方面，系统可对相关环节碳排放监测，辅助识别潜在风险，促进安全管理；于项目管理而言，有助于合理规划资源，提高管理效率。多技术融合实现了碳效透明度的显著提升，使碳排放数据更准确、全面。展望未来，边缘计算在现场级碳排监控方面具有巨大潜力，可实现实时、精准监测^[10]。同时，碳效数字孪生标准的制定也是重要研究方向，将进一步规范和推动绿色施工碳排放核算的发展。

参考文献

- [1] 刘宝蔓. 船舶建造碳排放核算及减排策略研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.
- [2] 周明洋. 基于 MS 的船舶建造周期碳排放核算及碳成本研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.
- [3] 郑雨霏. 半导体设备制造企业碳排放核算及减排策略研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [4] 高蓉. 我国铜冶炼工业碳排放核算减排潜力评估 [D]. 西北师范大学, 2023.
- [5] 夏云峰. 安徽省工业碳排放核算及影响因素研究 [D]. 安徽理工大学, 2022.
- [6] 黄山倩, 黄学文, 高硕哈, 等. 基于 LCA 的高速公路建设全过程碳排放核算 [J]. 交通运输研究, 2022, 8(6): 72-80, 89.
- [7] 陈晋. 关于金融机构碳排放核算难点问题的思考 [J]. 绿色财会, 2022(7): 48-49.
- [8] 薛敏. “双碳”背景下关于做好企业碳排放核算的方法研究 [J]. 统计科学与实践, 2023(10): 61-64.
- [9] 牟宇, 董雯燕, 杨蕊蕊, 等. 《建筑领域碳账户碳排放核算与评价指南》解读 [J]. 绿色建筑, 2023(4): 5-9.
- [10] 张庭婷, 梁晓静, 吕强, 等. 面向碳中和的汽车行业碳排放核算 [J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 341-350.

数字孪生技术在市政排水工程中的应用： 施工到运维的无缝对接

梁株银

身份证号：440981199501244610

DOI:10.61369/ME.2025030027

摘 要： 介绍数字孪生技术在市政排水工程的应用，涵盖技术框架核心内容，如数据整合、模拟算法等。阐述 BIM 与 GIS 融合路径，施工信息标准化录入规则。还包括施工到运维阶段的数据处理，如清洗、知识提取等，以及智能化运维应用体系相关内容。

关 键 词： 数字孪生；市政排水；施工运维

Application of Digital Twin Technology in Municipal Drainage Engineering: Seamless Connection from Construction to Operation and Maintenance

Liang Zhu Yin

ID: 440981199501244610

Abstract： This paper introduces the application of digital twin technology in municipal drainage projects, covering key aspects of the technical framework, such as data integration and simulation algorithms. It also discusses the integration of BIM and GIS, along with standardized rules for entering construction information. Additionally, it covers data processing from construction to operation and maintenance, including cleaning and knowledge extraction, as well as the content related to intelligent operation and maintenance systems.

Keywords： digital twin; municipal drainage; construction and operation and maintenance

引言

随着城市化进程的加速，市政排水工程的高效建设与运维至关重要。2023 年发布的相关政策强调了提升市政基础设施韧性和智能化水平的重要性。数字孪生技术为市政排水工程带来了新的契机。它涵盖多源异构数据整合、动态模拟算法和虚实交互机制等核心内容，可有效整合不同数据源的数据。同时，BIM 与 GIS 的融合为其提供了新机遇，从施工到运维的各个阶段，如施工信息标准化录入、数据清洗与知识提取、物联网数据接口设计等，数字孪生技术都通过一系列关键技术路径实现了无缝对接，构建精准数字模型，整合数据，提升系统韧性，符合政策导向，具有重要研究价值。

一、数字孪生技术基础与排水工程适配性

（一）数字孪生技术框架

数字孪生技术框架涵盖多源异构数据整合技术、动态模拟算法以及虚实交互机制等核心内容。多源异构数据整合技术是关键，它能够将来自不同数据源、具有不同结构的数据进行有效整合，为后续的分析 and 应用提供基础^[1]。动态模拟算法可对市政排水系统的运行过程进行精确模拟，通过构建数学模型，模拟水流的运动、污染物的扩散等复杂过程。虚实交互机制实现了物理实体与虚拟模型之间的实时交互，使得虚拟模型能够及时反映物理实体的变化，同时物理实体也能根据虚拟模型的反馈进行调整，从而更好地映射市政排水系统的实际运行情况，为排水工程从施

工到运维的无缝对接提供技术支撑。

（二）BIM+GIS 集成应用

建筑信息模型（BIM）与地理信息系统（GIS）的融合为市政排水工程带来了新的机遇。在融合路径方面，需考虑两者的数据结构和标准差异，通过建立统一的数据接口和转换机制实现数据的交互和共享。对于管网三维可视化建模，可利用 BIM 技术的参数化建模能力，精确构建排水管网的三维模型，包括管道的几何形状、材质等信息。同时，结合 GIS 的空间分析功能，为模型赋予空间属性，如地理位置、地形地貌等。在空间属性数据库构建方法上，可采用 GIS 的数据管理工具，对排水工程相关的地理空间数据进行分类、存储和管理，以便于后续的查询、分析和应用^[2]。

二、施工阶段孪生数据采集与建模

（一）施工信息标准化录入

为实现施工信息标准化录入，需建立一系列规则与模板。首先是材料参数编码规则，明确管道材质等关键属性的编码方式，确保材料信息的准确记录与识别^[3]。其次，施工日志结构化模板的建立至关重要，它规范了施工过程中各项信息的记录格式，包括施工进度、质量检测结果等。最后，物探数据采集标准涵盖管径、坡度等关键属性，保证物探数据的一致性和准确性。通过这些规则和模板的建立，能够有效提高施工信息录入的标准化程度，为数字孪生模型的构建提供准确、可靠的数据基础。

（二）时空数据融合建模

施工阶段涉及多种数据，其中施工进度数据与管网地理坐标的时空配准至关重要。通过先进的测量技术获取精确的管网地理坐标数据，同时记录施工各阶段的进度信息。利用时空配准方法，将二者在时间和空间维度上进行匹配，为后续分析提供准确基础^[4]。对于隐蔽工程，由于其不可见性，逆向建模算法的开发成为关键。通过对施工过程中相关数据的收集，如施工工艺参数、材料使用情况等，结合数学模型和算法，实现对隐蔽工程的逆向建模，从而在数字孪生模型中准确呈现隐蔽工程的实际情况，为市政排水工程的施工阶段孪生数据采集与建模提供有力支持。

三、施工向运维阶段数据价值转换

（一）数据清洗与知识提取

1. 异常数据过滤机制

施工向运维阶段的数据清洗与知识提取中，异常数据过滤机制至关重要。构建基于统计分布与深度学习的数据质量评估模型是基础^[5]。通过统计分布原理，分析数据的分布特征，识别出与正常分布模式偏离较大的数据点。同时，利用深度学习算法挖掘数据中的复杂模式和潜在关系，进一步提高异常数据的检测能力。在此基础上，设计施工误差的自动修正流程。当检测到异常数据可能是由施工误差导致时，系统根据预设的规则和算法，自动对误差进行修正，确保数据的准确性和可靠性，为后续的运维阶段提供高质量的数据支持。

2. 运维知识图谱构建

在施工向运维阶段的数据价值转换中，数据清洗与知识提取后需进行运维知识图谱构建。通过实体关系抽取技术建立管网拓扑规则库至关重要。该技术能精准识别管网中各实体及其相互关系，例如管道之间的连接关系、泵站与管道的关联等，进而构建规则库。基于此规则库，可形成运维决策支持知识体系。这个知识体系涵盖了排水管网在运维过程中的各种关键信息和决策规则，为运维人员提供了科学的决策依据，有助于提高市政排水工

程运维的效率和准确性，实现从施工到运维的无缝对接，充分发挥数字孪生技术在市政排水工程中的应用价值^[6]。

（二）动态数据驱动机制

1. 物联网数据接口设计

施工向运维阶段的物联网数据接口设计对于实现数据价值转换至关重要。在市政排水工程中，施工阶段预置传感器与后期运维监测设备可能存在协议不兼容的问题。因此，需要开发协议转换中间件^[7]。该中间件能够对不同协议的数据进行解析和转换，确保施工阶段采集的数据能够在运维阶段被有效利用。通过统一的数据接口，实现数据的无缝传输和交互，为动态数据驱动机制提供支持。这不仅提高了数据的可用性和准确性，还为市政排水工程从施工到运维的顺利过渡提供了保障，进一步提升了工程的整体管理水平和运行效率。

2. 参数化模型更新算法

在施工向运维阶段数据价值转换中，动态数据驱动机制下的参数化模型更新算法至关重要。基于实时监测数据的管网水力模型动态校准是关键方法之一^[8]。通过实时获取排水管网运行中的各项数据，如流量、水位等，利用算法对参数化模型进行更新。首先需建立准确的初始模型，然后根据监测数据与模型预测数据的差异，采用合适的算法调整模型参数。这可能涉及到复杂的数学计算和算法优化，以确保模型能够准确反映实际管网的水力状态。同时，要考虑数据的不确定性和噪声影响，提高模型的鲁棒性和可靠性，从而实现从施工到运维阶段数据价值的有效转换，为市政排水工程的高效运维提供有力支持。

四、智能化运维应用体系

（一）全生命周期资产管理

1. 设施健康度评估模型

融合施工材料数据与运维监测指标对建立管网老化预测数学模型至关重要。施工材料数据包含管材材质、管径、壁厚等信息，这些数据影响着管网的初始性能和耐用性^[9]。运维监测指标则涵盖了流量、压力、水质等方面，能实时反映管网的运行状态。通过对这些数据和指标的深入分析与融合，可以挖掘出它们与管网老化之间的潜在关系。例如，某些材料在特定水质和压力条件下可能更容易发生腐蚀和老化。利用数学模型可以量化这些关系，从而实现对管网老化的准确预测，为市政排水工程的运维管理提供科学依据，提前采取维护和修复措施，保障管网的正常运行。

2. 预防性维护决策支持

基于历史维修数据与实时工况开发养护策略优化算法，对市政排水工程的预防性维护决策支持至关重要。历史维修数据包含以往故障类型、维修措施及时间等关键信息，可分析出设备或设施的薄弱环节及故障周期规律^[10]。实时工况数据则反映当前运行状态，如水位、流量、水质等。通过整合这两类数据，利用先进的数据分析技术和算法模型，能够精准预测潜在故障发生的可能性和时间节点。进而制定出具有针对性的养护策略，合理安排维

护资源和时间，提高维护效率，降低维护成本，确保市政排水工程的稳定运行。

（二）智能化运行调控

1. 水力平衡动态优化

在智能化运维应用体系的智能化运行调控中，水力平衡动态优化至关重要。构建管网压力 - 流量耦合分析模型是基础，通过精确分析管网中压力与流量的关系，为后续调控提供数据支持。该模型可考虑多种复杂因素，如管道粗糙度、节点流量变化等。基于此模型，设计泵站联动控制策略。泵站作为排水系统的关键节点，其联动控制能有效调节水力平衡。通过合理设置泵站的启停时间、运行频率等参数，实现对管网中水流的动态优化调配，避免局部水力失衡导致的积水或排水不畅等问题，提高整个市政排水工程的运行效率和可靠性。

2. 暴雨积水模拟推演

在智能化运维应用体系中，智能化运行调控的暴雨积水模拟推演至关重要。它借助数字孪生技术，融合施工阶段地形数据与气象预报信息。通过对地形数据的精确分析，构建出与实际相符的排水系统模型。结合气象预报，可模拟不同降雨强度下的积水情况。这不仅能提前预测暴雨可能导致的积水区域，还能为排水设施的调控提供依据。在实际应用中，可根据模拟结果优化排水设施的运行策略，如调整泵站的排水功率、控制阀门的开闭等，从而提高市政排水工程在暴雨天气下的运行效率，实现智能化的运维管理，减少城市内涝的发生。

（三）应急事件智能处置

1. 渗漏定位溯源技术

在智能化运维应用体系的应急事件智能处置中，渗漏定位溯源技术至关重要。利用施工阶段获取的管线三维坐标与压力传感数据，能够建立起管网泄漏快速诊断模型。通过对三维坐标的精

确分析，可以确定管网的空间位置和布局，结合压力传感数据的动态变化，精准捕捉可能存在渗漏的区域。当压力出现异常波动时，借助模型可快速关联到对应的管线位置，从而实现渗漏的准确定位。同时，对历史数据的分析和学习，还能进一步优化模型，提高渗漏定位溯源的准确性和效率，为市政排水工程的运维提供有力保障。

2. 应急预案匹配机制

基于历史事故案例库开发应急方案智能推荐系统，可有效实现应急预案匹配。系统通过对大量历史案例的分析，提取关键特征和处置措施。利用机器学习算法对这些数据进行训练，使其能够识别当前应急事件的特征与历史案例的相似性。当新的应急事件发生时，系统迅速将事件特征与案例库进行比对，找出最匹配的案例及相应的应急预案。同时，系统还能根据当前事件的实际情况，对推荐的应急预案进行动态调整和优化，确保处置措施的有效性和针对性，提高应急事件的处置效率和成功率。

五、总结

数字孪生技术通过一系列关键技术路径实现了市政排水工程从施工到运维的无缝对接。其核心在于构建精准的数字模型，整合施工与运维阶段的数据，实现全生命周期数据贯通。这不仅提高了工程效率，更重要的是提升了市政排水系统的韧性。在面对复杂的环境变化和突发情况时，系统能够更快速、准确地做出响应。同时，随着人工智能与大模型技术的不断发展，其在设施智能诊断领域的应用具有广阔前景。未来有望进一步提升数字孪生模型的智能分析能力，为市政排水工程的长期稳定运行提供更强大的技术支持。

参考文献

- [1] 许志华. 数字孪生驱动的冲击桥智能运维方法研究 [D]. 河北科技大学, 2023.
- [2] 张辉辉. 面向智能运维的行车数字孪生系统数据驱动方法研究 [D]. 东华大学, 2023.
- [3] 蒋安桐. 基于数字孪生技术的轮辐式索桁架运维安全智能预测方法 [D]. 北京工业大学, 2021.
- [4] 苏东鹏. 风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究 [D]. 长安大学, 2023.
- [5] 严张会. 基于数字孪生的船用智能胎架设计与运维方法研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.
- [6] 马俊松. 建筑电气智能化弱电工程施工技术及质量管理研究 [J]. 模型世界, 2024(9): 87-89.
- [7] 王乃洲. 数字孪生技术在广电运维管理中的应用研究 [J]. 广播电视网络, 2023, 30(5): 35-37.
- [8] 吴文豪, 陈国兵, 杨自春. 数字孪生技术在船舶装备运维中的应用及挑战 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 139-144.
- [9] 王思铭. 实测运维数字孪生系统在钻井船上的应用 [J]. 无线互联科技, 2022, 19(11): 85-88.
- [10] 李婷婷, 刘锐, 常青, 等. 浅析基于数字孪生技术的智慧医院后勤运维场景应用 [J]. 智能建筑电气技术, 2022, 16(2): 105-110.

物联网应用工程对信息化项目实施的影响及优化策略

张广峰

身份证号: 440683198904022619

DOI:10.61369/ME.2025030031

摘 要： 本文阐述了物联网应用工程的技术体系，包括感知、网络和应用层，对比工业物联网与智慧城市项目差异，探讨多源传感器等对信息化流程的影响，还涉及实时监测、设备协议、系统整合等挑战及应对措施，强调其对信息化项目实施的影响和未来研究方向。

关 键 词： 物联网应用工程；信息化项目；技术体系

The Impact of Iot Application Engineering on the Implementation of Information Technology Projects and Optimization Strategies

Zhang Guangfeng

ID: 440683198904022619

Abstract： This article elaborates on the technical system of IoT application engineering, including perception, network, and application layers. It compares the differences between industrial IoT and smart city projects, explores the impact of multi-source sensors on information technology processes, and discusses challenges and countermeasures such as real-time monitoring, device protocols, and system integration. It emphasizes their impact on the implementation of information technology projects and future research directions.

Keywords： Internet of Things application engineering; informatization project; technical system

引言

随着信息技术的飞速发展，物联网应用工程在各个领域的重要性日益凸显。2020年我国发布的《关于深入推进移动物联网全面发展的通知》强调了物联网对推动产业升级和数字化转型的关键作用。物联网应用工程的技术体系涵盖感知、网络和应用层，各层协同实现数据采集、传输和处理。不同领域如工业物联网和智慧城市项目存在技术差异，同时面临系统整合、数据融合等挑战。此外，设备防护、数据加密等安全问题以及规划阶段的架构设计和技术选型评估也至关重要。其对信息化项目实施有多方面影响，未来基于数字孪生和人工智能技术的研究方向极具潜力。

一、物联网应用工程的技术体系解析

（一）核心组成与技术架构

物联网应用工程的技术体系涵盖感知层、网络层与应用层。感知层通过传感器等设备获取数据，如温度传感器采集环境温度信息^[1]。网络层负责数据传输，包括有线和无线网络技术，确保数据准确、快速地传输到指定位置。应用层则是对数据进行处理和分析，以实现各种应用场景，如智能家居的智能控制。边缘计算与云平台融合架构是重要支撑。边缘计算在靠近数据源的边缘设备上进行处理，减少数据传输延迟和网络带宽压力，而云平台提供强大的计算和存储能力，两者融合可更好地满足信息化项目对数据处理和存储的需求^[1]。

（二）典型应用场景特征

工业物联网与智慧城市项目在技术方面存在一定差异。在设

备接入规模上，工业物联网通常针对特定工业领域的生产设备等进行接入，设备类型相对集中但专业性强，数量依据工厂规模而定，可能从几百到上万不等^[2]。而智慧城市项目需接入城市各个领域的大量设备，如交通设施、环境监测设备等，规模更为庞大且种类繁杂。在数据处理模式方面，工业物联网更注重实时性和准确性，以满足工业生产过程的精确控制需求，对数据的分析往往聚焦于特定生产环节的优化^[2]。智慧城市则要综合处理多种类型数据，进行宏观分析和决策，以实现城市的高效管理和服务优化。

二、信息化项目实施驱动效应分析

（一）业务流程重构影响

多源传感器带来的数据全要素采集对传统信息化流程具有再

造机制。它改变了数据获取的方式和范围，传统信息化流程往往依赖于有限的数据源和人工采集方式，而多源传感器能够实时、自动地采集大量全面的数据。这些数据涵盖了各个方面的信息，为业务流程提供了更丰富的输入。这种全面的数据采集促使传统信息化流程进行重新审视和调整。例如，在生产制造领域，传感器可以采集设备运行数据、环境数据等，使得生产流程的监控和优化可以基于更准确和全面的数据进行。这不仅提高了生产效率，还能更好地满足市场需求和质量控制要求，从而对业务流程进行了有效的重构^[3]。

（二）管理效能变革特征

物联网应用工程中的实时状态监测为信息化项目实施带来诸多管理效能变革。在项目进度控制方面，通过实时监测各类数据，可精准掌握各环节进展，及时发现潜在延误风险并预警，从而实现更高效的进度调整^[4]。在质量评估环节，实时状态监测能获得大量过程数据，对质量相关指标进行动态分析，确保质量问题能被及时发现和解决。这种智能化提升效果不仅提高了管理的精准度，还能优化资源配置，避免因进度延误或质量问题导致的成本增加，增强了信息化项目实施的整体效益。

三、工程实施瓶颈与协同优化需求

（一）系统整合技术难题

1. 异构设备兼容问题

不同供应商设备协议存在差异，这对系统集成造成了显著制约。物联网应用工程涉及众多设备，各供应商的设备协议往往不统一，使得设备之间难以直接通信和协同工作。这种异构性导致在系统整合过程中，需要耗费大量精力进行协议转换和适配。例如，传感器设备可能采用一种特定的通信协议，而执行器设备则使用另一种协议，要实现两者在系统中的有效集成，就必须解决协议不兼容的问题。这不仅增加了工程实施的复杂性和成本，还可能影响系统的整体性能和稳定性，进而阻碍物联网应用工程的顺利推进^[5]。

2. 数据融合处理挑战

物联网应用工程实施面临诸多挑战。在系统整合技术方面，不同设备和系统的兼容性、接口标准不一致等问题突出，导致信息交互困难^[6]。数据融合处理也存在挑战，例如多模态传感数据的时空配准难度大，不同传感器采集的数据在时间和空间上的匹配需要精确的算法和模型。同时，数据的质量校验也是关键问题，传感数据可能存在误差、缺失或噪声，如何准确地识别和纠正这些问题，以保证融合后数据的准确性和可靠性，是亟待解决的难题，这对物联网应用工程的高效实施和信息化项目的推进形成了瓶颈，需要协同优化来突破。

（二）运营安全保障需求

1. 设备安全防护体系

物联网应用工程中，构建包含物理防护与固件验证的多层次设备防护框架至关重要。物理防护方面，需考虑设备所处环境的安全性，防止物理损坏与非法接触^[7]。例如，对关键设备设置专

门的机房，控制温湿度与人员访问权限。固件验证则要确保设备固件的完整性与合法性。通过建立严格的固件更新机制，验证固件来源的可靠性，防止恶意固件的植入。多层次的防护框架能够从不同角度保障设备安全，为物联网应用工程的稳定运行提供基础。只有综合考虑物理防护与固件验证，才能有效应对可能出现的安全威胁，满足运营安全保障需求。

2. 数据全周期加密机制

物联网应用工程中，数据全周期加密机制至关重要。从边缘节点到云端，需设计端到端加密传输与存储方案。在工程实施过程中，面临着诸多瓶颈，如不同设备和系统间加密标准的差异，这阻碍了数据的顺畅加密传输与存储^[8]。协同优化需求迫切，各相关方需共同制定统一的加密标准和规范，确保数据在各个环节的安全性。运营安全保障方面，数据全周期加密是基础。通过加密机制，防止数据在传输和存储过程中被窃取或篡改，保障物联网应用工程的稳定运行，满足用户对数据安全的要求。

四、全生命周期优化实施策略

（一）规划阶段技术选型

1. 组件化架构设计方法

在规划阶段的组件化架构设计中，基于功能解耦与接口标准化构建弹性架构至关重要。功能解耦可将复杂系统分解为相对独立的组件，降低组件间的耦合度，提高系统的可维护性与扩展性^[9]。通过明确各组件的功能边界，使其能独立开发、测试与升级。同时，接口标准化确保了组件间的有效通信。定义统一的接口规范，使得不同组件能够无缝对接，避免因接口不兼容导致的系统故障。这种弹性架构能够更好地适应物联网应用工程的动态需求，在信息化项目实施过程中，当业务需求发生变化或新技术出现时，可灵活替换或升级相关组件，而不影响整个系统的稳定运行。

2. 技术经济性评估模型

在规划阶段技术选型的技术经济性评估模型中，需建立包含设备寿命周期与运营成本的综合决策指标体系。综合考虑设备从采购到报废的全生命周期成本，包括初始投资、运行维护费用、升级改造费用以及最终的残值等^[10]。同时，要量化运营成本，涵盖能源消耗、人力投入、故障维修成本等方面。通过对这些成本的详细分析和评估，结合设备在不同阶段的性能表现和对物联网应用工程的贡献，构建出科学合理的评估模型。该模型能够为技术选型提供有力依据，确保所选技术在经济上可行且能满足物联网应用工程在信息化项目实施中的长期需求。

（二）实施过程质效控制

1. 迭代式部署流程设计

全生命周期优化实施策略需从多方面着手。在实施过程质效控制方面，要建立严格的监控机制，对项目进度、质量和成本进行实时跟踪。通过设定关键指标和里程碑，及时发现偏差并采取纠正措施。对于迭代式部署流程设计，应采用小步快跑的方式。先确定核心功能模块进行初步部署，收集用户反馈后进行优化调

整。接着逐步增加功能模块，不断迭代完善。同时，要确保每个迭代过程都有明确的目标和交付物，且与整体项目目标保持一致，以此提高项目实施的成功率和效果。

2. 工程状态数字孪生应用

构建虚实交互的施工进度监控与异常预测系统是工程状态数字孪生应用的关键。通过物联网技术采集工程实时数据，构建虚拟模型，实现物理实体与虚拟模型的精准映射。利用数据分析算法对施工进度进行实时监控，对比计划进度，及时发现偏差。同时，基于历史数据和实时数据建立异常预测模型，对可能出现的工程异常情况进行预测，提前采取措施预防。系统还应具备可视化界面，方便管理人员直观了解工程状态，以便做出科学决策，确保工程按计划顺利进行，提高实施过程的质效。

（三）运维服务创新模式

1. 预测性维护系统构建

开发基于设备运行大数据的故障模式识别与寿命预测算法是预测性维护系统构建的关键。通过收集设备运行过程中的各类数据，包括温度、压力、振动等参数。利用先进的数据挖掘技术和机器学习算法，对这些大数据进行分析处理。识别出设备可能出现的故障模式，例如磨损、疲劳、腐蚀等。同时，基于数据分析结果建立设备寿命预测模型，能够准确预测设备剩余使用寿命。这有助于提前安排维护计划，避免设备突发故障导致的生产停滞等问题，实现运维服务从被动响应到主动预防的创新模式转变，提高设备运行的可靠性和稳定性。

2. 自适应优化策略库建设

建立包含运维知识图谱与案例推理的智能决策支持系统，是自适应优化策略库建设的关键。通过构建运维知识图谱，整合各类运维知识与经验，以结构化的方式呈现，便于快速检索与应用。同时，利用案例推理技术，对以往的运维案例进行分析和学习。当遇到新的运维问题时，系统能够根据知识图谱中的相关知识和相似案例的解决方案，提供智能决策支持。这不仅提高了运维效率，减少了人工决策的失误，还能不断丰富和优化策略库，使其能够更好地适应不同的运维场景和需求。

五、总结

物联网应用工程对信息化项目实施有多方面重要影响。它通过对项目全要素的数字化改造，从根本上改变了信息化项目的实施模式与路径。其机理在于将物理世界与数字世界深度融合，实现信息的高效传递与精准处理。分阶段优化策略则进一步提升了工程实施的可靠性与经济性，为项目的顺利推进提供了有力保障。这些策略在不同阶段发挥着关键作用，有效避免了潜在风险，提高了资源利用效率。未来，基于数字孪生与人工智能技术的研究方向具有巨大潜力。数字孪生可实现对项目的精准模拟与优化，人工智能技术则能提供更智能的决策支持，两者结合将为物联网应用工程在信息化项目实施中的应用带来新的突破与发展。

参考文献

- [1] 谢栋艺. A 公司信息化项目管理优化研究 [D]. 西安科技大学, 2021.
- [2] 李焯. B 航天公司信息化项目团队绩效管理优化研究 [D]. 北京林业大学, 2021.
- [3] 江培春. 基于 SD 模型的 A 公司物联网云平台项目进度风险管理研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [4] 张冬冬. 基于 J 学院的信息化学建设项目进度管理研究 [D]. 东华大学, 2021.
- [5] 薛万凯. A 公司 ERP 优化项目风险管理研究 [D]. 华中科技大学, 2021.
- [6] 方芳. 浅谈交通综合执法应用平台信息化项目建设策略 [J]. 科学与信息化, 2022(14): 160-162.
- [7] 李文全, 徐素萍, 彭新东. 高校信息化项目实施绩效的模糊评价研究 [J]. 韶关学院学报, 2021, 42(06): 18-22.
- [8] 徐达明. 基于绩效导向的信息化项目财务管理策略 [J]. 中国总会计师, 2023, (11): 92-94.
- [9] 李宗程, 刘奇, 张宇峰. X 局信息化项目沟通问题分析与沟通策略研究 [J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(35): 158-159+171.
- [10] 关键. 企业信息化项目的管理与实施分析 [J]. 科技资讯, 2021, 19(09): 127-129.

探究基于地理信息系统与环境模型集成的防洪减灾研究

王宽

中国人民解放军61172部队, 北京 100000

DOI:10.61369/ME.2025030037

摘 要 : 为了更好地实现防洪减灾, 应跟随信息化时代的发展趋势, 科学化集成地理信息系统与环境模型, 保障人民的生命财产安全。本文介绍地理信息系统与环境模型集成的必要性、集成方式、集成框架与集成效果, 进一步通过地理信息系统与环境模型集成框架, 实时预测洪水演进路径及淹没范围, 评估风险等级。工作者由此制定应急决策, 加强防洪减灾的响应效果, 减少灾害损失, 为城市建设助力。

关 键 词 : 地理信息系统; 环境模型; 防洪减灾; 有效思考

Research on Flood Control and Disaster Reduction Based on the Integration of Geographic Information System and Environmental Model

Wang Kuan

Chinese People's Liberation Army Unit 61172, Beijing 100000

Abstract : In order to better realize flood control and disaster reduction, we should follow the development trend of the information age and scientifically integrate the geographic information system and environmental model to ensure the safety of people's lives and property. This paper introduces the necessity, integration mode, integration framework and integration effect of GIS and environmental model integration, further through the integration framework of GIS and environmental model, predict the flood evolution path and flooding range in real time, and assess the risk level. Workers thus make emergency decisions, strengthen the response effect of flood control and disaster reduction, reduce disaster losses, and help the urban construction.

Keywords : geographic information system; environment model; flood control and disaster reduction; effective thinking

近些年, 全球气候变暖, 极端天气事件频发, 洪水灾害的现象逐步严重化。在应对洪水灾害时, 需要及时建设地理信息系统与环境模型, 以地理信息系统强大的空间数据处理能力, 提供防洪减灾的参考数据。以环境模型的集成过程, 预测洪水的出现、发展以及演变趋势, 强化防灾减灾的技术支持。新时期下工作者要全面发挥地理信息系统和环境模型的优势, 研究空间分布的特征, 提高洪水灾害的预警、监测、评估和应对能力, 为防洪减灾工作提供新的思路和方法。

一、地理信息系统与环境模型集成的防洪减灾必要性

洪水灾害是频发的一种自然灾害, 会给人类社会的发展带来一定影响, 增加经济损失和人员伤亡的几率。如今洪水灾害更多体现出复杂性的特点, 常规的防洪减灾手段不能顺应社会发展的需求, 所以要通过高新科技创新防洪减灾方法, 提升防洪减灾能力。应用地理信息系统, 其存在着空间数据处理的性能, 可以及时优化多源数据信息, 有地形和水文以及气象等, 以此为基础工作者能够直观化分析洪水淹没的情况, 有水深数据、洪水流速数据等, 给决策者提供重要依据。依托地理信息系统的空间分析功能, 全方位模拟洪水灾害, 科学地提供防灾减灾方案^[1]。应用环境模型, 其可以充分预测洪水灾害, 其主要是对环境系统结构和功能进行抽象或形式描述的模式, 通常包括数学模型和图解模

型。在制定洪水预报、演进和风险评估模型的过程中, 整体上研究洪水灾害的变化趋势。不单单给工作者演示洪水灾害的变化趋势, 还可以给防灾减灾带来技术参考。基于此地理信息系统与环境模型的应用十分必要, 影响着社会的稳步建设与发展。

二、地理信息系统与环境模型集成的防洪减灾实践

集成时间地理信息系统与环境模型, 工作者应贯彻如下原则。有用性: 明确系统与模型集成的基本目标, 鉴于防洪减灾工作的现状调查, 确保设计的集成框架可以真正为用户所用; 稳定性, 工作者要设定稳定性集成框架, 全面收集洪水灾害的数据信息, 对其在简短时间内处理与加工, 管理者得到洪水预警信息, 才可以更好地实施防洪减灾工作; 网络友好性, 强调了分布式用

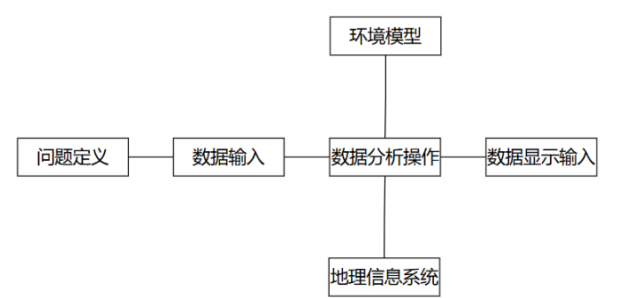
户服务器系统应用的通畅性，减少大量网络通讯信息，优化网络数据流量^[2]。运行过多服务器会造成网络系统负载，影响着数据信息传递的速度，为此要健全时间地理信息系统和环境模型的集成网络，体现出集成框架的稳定与科学运行。另外通过集成方式和集成框架设计，有效地落实防洪减灾工作。

（一）地理信息系统与环境模型集成方式

其一功能集成，工作者应顾及到研究目标所需要的功能组合、其二技术集成，工作者应考虑如何构建完整的系统。鉴于防洪减灾的繁琐性，工作者可以通过 ASCII 码文件有效嵌入数据，涵盖松散集成、紧密集成和完全集成等方式^[3]。首先是松散集成，地理信息系统与环境模型属于比较独立的结构系统，均要设定对应用户界面。两者之间互相集成应体现地理信息系统的作用，将数据传输到环境模型中。通过环境模型输出运算信息，被地理信息系统加工与处理。在数据交换过程融入二进制的处理方法，仅仅是选取少量编程便能够在相同局域网中传递和分享防洪减灾的数据；其次是紧密集成，地理信息系统与环境模型的用户界面之间存在差异，然而整体上均是交换公共信息数据和文件，以地理信息系统的开发语言功能密切与环境模型连接，减少两个系统运作期间有数据交换的出错情况，增强信息传输的效果。在此阶段应适当增加应用程序的编制，便于用户使用完整性数据^[4]；最后是完全集成，工作者应选取有效地组成系统，涵盖地理信息系统与环境模型这两个分支。以相同的界面呈现出防洪减灾的数据，完善现有的信息库管理系统，对地理信息系统组件和其他类型的信息访问组件互相连接，实现防洪减灾数据的共享^[5]。此时应涉及规范性计算机语言编程，需要较长的开发周期，为此工作者可以优先松散集合的方式或者紧密集合的方式，给用户提供多维度的地理信息系统数据，减少工作者的工作压力与工作量。

（二）地理信息系统与环境模型集成的框架流程

工作者不单单应思考到数据、地理信息系统与环境模型集成之间的关系，还应该研究集成系统自身的需求。整体上分析，地理信息系统与环境模型集成框架可以包含如下几个部分，如图一所示。



图一 地理信息系统与环境模型集成框架

其中问题定义：结合防洪减灾的实践目的，明确污染过程尺度，即分析防洪减灾区域中空间的分布情况和时间跨度情况，针对性完善环境模型；数据输入：保存环境模型的数据，尤其是空间信息和属性信息。相关数据不仅可以作用在环境模型的完善

中，还可以作用在加工数据与查询数据中，提高污染源查询研究的效率^[6]；数据分析操作：关联地理信息系统数据的多种数据和模型，对输出的参数进行分析；数据显示输出：预警防洪减灾，为工作者启动防洪减灾应急预案提供参考。

（三）地理信息系统与环境模型集成框架的应用效果

以永定河为例，其属于主要行洪河道，发源于内蒙古高原的南缘和山西高原的背部，流域总面积 47016km²，气候特点是温带半干旱半湿润性季风气候，夏季多阴雨天气^[7]。此地区频繁遭受洪水灾害，影响着居民的生命安全。所以在防洪减灾过程中，工作者设计了地理信息系统与环境模型集成的防洪减灾系统，基于地理信息系统的空间数据处理功能、环境模型的分析功能，提高防洪减灾的工作成效。工作者进行地理信息系统与环境模型集成设计，在地理信息系统中收集地形信息、土地利用信息和气象信息，动态采集和保存数据。自动化呈现出环境模型的数据，便捷化进行洪水模拟以及预测，得到相关结果；经过调查统计，此区域中洪水预警的效率大大提升、应急响应效果大大加强。通过地理信息系统与环境模型集成，将洪水预警的信息传播提前大约 3 小时，给防灾减灾的工作提供充分准备时间。集成的系统能够精准预测洪水灾害，将预警准确率提升为超过 90%，避免有漏报的现象^[8]；一旦出现洪水灾害，系统会在第一时间内评估灾情，救援部门即刻采取救援方案、制定救援计划，及时疏散居民，选择最优的救援路线和避难所，确保救援工作的及时有效。

三、地理信息系统与环境模型集成的发展趋势

在不断提升防洪减灾效果的过程中，未来地理信息系统与环境模型集成会有更多的发展趋势。其一，两者之间完全集成。对于地理信息系统的实际应用，相关软件组件化和二次数据开发的有效应用，都能够给两者之间完全集成提供支持条件。工作者可以全面研究如何制作环境模型，减少防洪减灾预测的流程^[9]；其二，时间地理信息系统与环境动力学模型之间集成。时间地理信息系统主要是在地理信息系统的坐标模块中融入时间这一个项目，属于缩影反应和研究现实世界的计算机系统。一方面呈现出准确的空间地理数据，另一方面呈现出静态信息数据。环境动力学模型能够整体上总结环境变化的趋势，利用现实环境存在变动特征，巧妙地时间地理信息系统以及环境动力学模型集成，可以清晰化实现防洪减灾的预案处理；其三、地理信息系统、遥感技术、全球定位系统和环境模型之间集成。如今遥感技术的应用也比较普遍，尤其是将其作用在高光谱和超光谱的数据处理中，便于给防洪减灾工作的进展提供更为全面的信息。全球定位系统可以精准进行卫星定位，工作者可以借此监测防洪减灾的数据，设置对应编码，随时随地通过地理信息系统处理数据^[10]。将多种先进技术进行集成，工作者能够分析多种参数的变化规律，客观性评价防洪减灾的效果，制定更好地工作决策。

四、结束语

综上所述，实施防洪减灾是一项系统性工程，数字化时代的发展背景，每一个工作者都需要关注防洪减灾工作的智能化与自动化创新，及时构建地理信息系统与环境模型集成框架。体现地

理信息系统与环境模型的作用与优势，系统实现对洪水灾害的实时监测、精确预测和科学评估，为防灾减灾工作提供了有力支持。全面收集与处理区域中可能出现洪灾的数据，将数据保存和传递给决策者，为决策者争取更多的救援机会，保障人民群众的财产安全。

参考文献

- [1] 郭金林. 水文水资源生态环境保护与防洪减灾措施研究 [J]. 水上安全, 2024, (24): 58-60.
- [2] 刘宇. 自动监测系统在河流水位变化中的应用分析 [J]. 低碳世界, 2024, 14(12): 28-30.
- [3] 于文堂. 新型城镇化建设中的城市防洪与减灾问题研究——以菏泽市为例 [J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(S1): 19-21.
- [4] 葛燕. 基于 GIS 技术的水利工程防洪减灾决策支持系统的构建 [J]. 中国品牌与防伪, 2024, (11): 134-136.
- [5] 张庆. 水利信息化在防洪减灾体系建设中的作用与实践 [J]. 信息系统工程, 2024, (09): 114-116.
- [6] 翟桂祥, 宋萌勃, 郭冠军. 发挥水文预报在防洪减灾中的作用探索 [J]. 科技资讯, 2024, 22(15): 192-195.
- [7] 张江彪, 李卿, 彭朝霞. 行唐县智慧水库视频监控系统建设与成效 [J]. 河北水利, 2024, (07): 43-44.
- [8] 赵爽. 城市防洪中现代水文预报技术的应用及发展分析——以湖北省恩施州为例 [J]. 海峡科技与产业, 2023, 36(09): 44-46.
- [9] 黄亚滨, 郭述飞, 杨丹阳. 水文水资源环境管理与防洪减灾措施研究 [J]. 农业灾害研究, 2023, 13(07): 326-328.
- [10] 逢敏, 张鹏, 尤佳艺, 张倩, 陈志琦. 拦河枢纽对水环境不利影响及优化调度研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(05): 59-62+193.

石油化工项目技术管理的关键要素与策略研究

李建军

身份证号: 210703198408012615

DOI:10.61369/ME.2025030006

摘 要： 本文围绕石油化工项目技术管理展开。阐述其涵盖各阶段技术工作，强调确保技术方案合理满足多方面要求。介绍行业特殊性对其的严格要求，以及技术标准体系架构、动态更新机制等内容，还涉及团队配置、信息共享平台等多方面，并指出存在问题及未来方向。

关 键 词： 石油化工；技术管理；技术标准

Research on Key Elements and Strategies of Technical Management in Petrochemical Projects

Li Jianjun

ID: 210703198408012615

Abstract： This article focuses on the technical management of petrochemical projects. It outlines the technical work across various stages, emphasizing the importance of ensuring that technical solutions effectively meet diverse requirements. The article also highlights the stringent industry-specific demands, the structure of the technical standards system, and the dynamic update mechanism. Additionally, it covers team configuration, information sharing platforms, and other aspects, while pointing out existing issues and future directions.

Keywords： petrochemical industry; technical management; technical standards

引言

石油化工项目技术管理至关重要，它贯穿项目全生命周期。随着2021年发布的《石油化工产业高质量发展的指导意见》等相关政策强调产业升级与可持续发展，对技术管理提出了更高要求。其涵盖从可行性研究到运营维护各阶段技术活动，包括确保技术方案合理以满足质量、安全、环保和经济效益等目标，涉及工艺控制、标准执行与创新等核心内容。同时，石油化工行业的高温高压、联产装置应用等特殊性能也对技术管理有严格要求，需要构建标准体系架构、建立标准动态更新机制、合理配置专业技术团队、搭建技术信息共享平台等，以提升项目技术管理水平，实现科学化、规范化和高效化。

一、石油化工项目技术管理的内涵与特征

（一）技术管理的基本概念

石油化工项目技术管理是指在石油化工项目的全生命周期中，对涉及的各种技术活动进行规划、组织、协调和控制的过程。它涵盖了从项目的可行性研究、设计、施工到运营维护等各个阶段的技术工作。其核心在于确保项目所采用的技术方案科学合理，能够满足项目的目标要求，包括质量、安全、环保和经济效益等方面。技术管理涉及工艺控制，通过对工艺流程的精确把控，确保生产过程的稳定和高效^[1]。同时，严格执行相关标准是技术管理的重要内容，这有助于保证项目的合规性和可靠性。此外，技术创新也是不可或缺的一部分，它能够推动石油化工项目不断进步和发展，提高企业的竞争力。

（二）行业特殊性要求

石油化工行业具有显著的特殊性，这对技术管理提出了严格

要求。高温高压的生产环境是其典型特征之一，这种极端条件下的生产操作需要精确的技术控制和严格的安全管理措施，稍有不慎就可能引发严重的安全事故和生产故障^[2]。联产装置的广泛应用也是行业特点，不同生产流程和装置之间相互关联、相互影响，一个环节的技术问题可能波及整个生产系统，要求技术管理具备系统性思维，能够全面考虑各个装置和流程之间的协同性和兼容性，确保整个生产过程的稳定和高效。

二、技术管理关键要素分析

（一）标准化管理体系

1. 技术标准体系架构

石油化工项目技术标准体系架构需构建涵盖行业标准、企业规范的多层级标准框架。该框架以行业通用标准为基础，确保项目在宏观层面符合行业整体要求^[3]。在此基础上，结合企业自身

特点与生产实际，制定更为细致、针对性更强的企业规范。这些规范应涵盖从工艺流程到设备选型，从质量控制到安全管理等各个方面。通过多层次标准框架的建立，一方面保证项目技术管理有章可循，与行业发展保持同步；另一方面使企业在遵循通用标准的同时，能够突出自身优势，提升市场竞争力，实现技术管理的科学化、规范化和高效化。

2. 标准动态更新机制

在石油化工项目技术管理中，标准动态更新机制至关重要。随着技术发展和行业需求变化，原有的技术标准可能不再适用。因此，需建立技术标准持续优化和版本迭代管理流程。这一流程应紧密跟踪行业最新动态和技术创新成果，及时对现有标准进行评估和修订。例如，当出现新的环保要求或更高效的生产工艺时，相关技术标准要能迅速反映这些变化。同时，要建立有效的反馈机制，收集项目实施过程中对标准的意见和建议，以便对标准进行针对性的改进。通过这种动态更新机制，确保技术标准始终保持科学性和实用性，为石油化工项目的顺利实施提供有力保障^[4]。

（二）资源协同配置机制

1. 专业技术团队配置

在石油化工项目中，专业技术团队配置是资源协同配置机制的重要部分。专业技术团队需涵盖多个领域的专业人才，包括工艺、设备、仪表、电气等。这些专业人员应具备相应的学历背景和丰富的实践经验^[5]。在项目全周期的不同阶段，如设计阶段需要工艺工程师进行工艺流程设计，设备工程师负责设备选型等；施工阶段则需要各专业工程师协同配合，确保施工符合设计要求；运营阶段，技术团队要保障装置的稳定运行。合理的专业技术团队配置能够提高项目的技术水平和管理效率，确保项目顺利进行。

2. 技术信息共享平台

在石油化工项目技术管理中，技术信息共享平台至关重要。它应具备强大的功能以实现跨部门跨阶段的技术数据共享与协同工作。通过建立统一的数据库架构，整合各部门的技术信息，包括工艺参数、设备资料、研发成果等^[6]。设置严格的权限管理，确保不同层级的人员获取与其工作相关的准确信息。同时，该平台要具备实时更新功能，保证信息的时效性和准确性。利用先进的信息技术，如大数据分析和云计算，挖掘数据潜在价值，为项目决策提供有力支持。通过这样的技术信息共享平台，促进各部门之间的高效沟通与协作，提高整个项目的技术管理水平。

三、技术管理瓶颈问题诊断

（一）管理体系层面问题

1. 标准执行偏差分析

现场作业与设计标准存在偏差的原因是多方面的。从人员角度，操作人员技能不足或对标准理解有误，可能导致操作不符合设计要求。同时，人员的责任心缺失也会引发此类问题，例如未严格按照流程执行任务。从管理角度，监督机制不完善，无法及

时发现和纠正偏差。管理制度可能存在漏洞，对违规行为缺乏有效的约束和惩罚措施。此外，施工环境的复杂性和不确定性也可能影响标准的执行。例如恶劣的天气条件、复杂的地质情况等，可能使施工难以完全按照设计标准进行，需要对标准进行适当调整，但调整过程可能出现不合理之处，从而导致偏差产生^[7]。

2. 变更管理漏洞

在石油化工项目技术管理中，变更管理存在诸多漏洞。技术变更审批流程存在监管盲区，相关监管机制不完善，无法全面覆盖变更的各个环节，导致一些变更未得到有效监管^[8]。同时，控制失效问题突出，对于变更的必要性、可行性以及可能带来的影响缺乏深入评估和严格把控。在实际操作中，可能因人为疏忽或利益驱动，使得一些不合理的变更得以通过，进而影响项目的质量、进度和成本。这不仅对项目本身造成损害，还可能带来安全隐患和环境风险。因此，完善变更管理的监管和控制机制至关重要。

（二）技术实施层面问题

1. 新技术应用障碍

智能化技术在石油化工项目中的推广面临组织惯性和能力缺口问题。组织惯性方面，传统的管理模式和工作流程难以迅速适应新技术带来的变革，可能导致新技术的应用受阻。员工习惯了原有的工作方式，对智能化技术的接受度可能不高，缺乏主动学习和应用的积极性^[9]。能力缺口体现在技术人才储备上，既懂石油化工专业知识又精通智能化技术的复合型人才匮乏。这使得在技术实施过程中，无法充分发挥智能化技术的优势，可能出现技术应用不规范、效果不佳等情况，影响项目的整体技术管理水平和效率。

2. 技术风险评估不足

现有 HAZOP 分析方法在复杂工况下存在适用性局限，影响技术风险评估的准确性^[10]。在石油化工项目中，复杂工况如高温、高压、多相流等情况常见。HAZOP 分析方法往往基于常规工况假设，对于这些复杂因素考虑不足。例如，在高温高压环境下，物质的物理化学性质可能发生显著变化，而传统 HAZOP 分析可能无法准确识别由此带来的潜在风险。多相流系统中，不同相态之间的相互作用复杂，现有的分析方法难以全面涵盖这些复杂的交互影响，导致对技术风险的评估不够充分，无法为项目的技术管理提供全面准确的决策依据。

四、技术管理优化策略体系

（一）管理机制创新路径

1. 全生命周期管控体系

在石油化工项目中，建立全生命周期管控体系至关重要。从项目规划阶段，需精准评估技术需求，结合行业发展趋势与企业战略目标，确定适宜的技术路线。建设阶段，要强化技术监督，确保施工符合技术标准与规范，注重不同专业技术的协同配合，避免出现技术衔接问题。运营阶段，建立实时监测系统，对关键技术指标进行动态跟踪，及时发现并解决技术故障。同时，持续

开展技术评估与改进工作，根据项目实际运行情况和市场变化，优化技术方案，提升项目整体技术水平和经济效益，实现对项目从规划到运营的全过程有效管控。

2. 数字化管理平台构建

基于 BIM 技术的项目管理信息集成方案在石油化工项目技术管理中具有重要意义。该方案以 BIM 模型为核心，整合项目全生命周期的各类信息。通过建立统一的数据标准和接口，实现不同专业、不同阶段数据的无缝对接和共享。设计阶段，利用 BIM 进行三维协同设计，减少设计错误和冲突。施工阶段，借助 BIM 的可视化和模拟功能，优化施工方案和进度计划，提前发现并解决潜在问题。运营阶段，BIM 模型为设备维护和管理提供准确的基础数据，提高运营效率和安全性。同时，利用云计算和大数据技术，对集成的信息进行分析和挖掘，为项目决策提供有力支持。

（二）技术能力提升方案

1. 技术人员培养体系

构建包含专业认证和实践训练的多维度技术人员培养体系。在专业认证方面，依据石油化工行业标准和科技发展需求，设立涵盖各类专业技术知识和技能的认证课程与考核机制。鼓励技术人员积极参与相关认证考试，获取行业认可的专业资质，提升其在特定技术领域的专业能力。同时，注重实践训练环节。结合实际项目需求，为技术人员安排具有挑战性的实践任务，使其在真实的工作场景中应用所学理论知识，积累实践经验。通过模拟复杂的生产环境和问题情境，培养技术人员的问题解决能力和应变能力，确保其能够熟练掌握并运用先进的技术手段，满足石油化工项目技术管理的要求。

2. 技术储备库建设

为构建石油化工项目技术储备库，需对专利技术和操作经验等知识资产进行系统化管理。对于专利技术，应建立详细的数据库，分类记录各项专利的技术要点、应用领域、授权情况等信息，以便快速检索和应用。同时，关注专利的更新和维护，确保其有效性和先进性。对于操作经验，要鼓励员工分享并整理成册，形成标准化的操作指南和案例库。这些经验不仅包括成功案例，也涵盖失败教训，为后续项目提供参考。通过定期组织培训和交流活动，促进员工对这些知识资产的学习和应用，不断提升技术储备库的实用价值，为石油化工项目技术管理提供有力支撑。

（三）风险防控强化措施

1. 风险预警模型优化

为优化风险预警模型，需开发融合大数据分析的动态风险预

警指标体系。利用大数据技术收集石油化工项目各环节的数据，包括生产流程、设备运行、环境监测等。通过数据分析挖掘潜在风险因素，构建全面且动态的指标体系。这些指标应能实时反映项目的风险状态，对关键风险因素给予重点关注。同时，建立智能算法对指标数据进行处理和分析，实现风险的自动预警。模型要不断学习和更新，适应项目的变化和发展，提高风险预警的准确性和及时性，为风险防控提供有力支持。

2. 应急响应机制完善

在石油化工项目中，应急响应机制完善至关重要。应建立分级分类的应急预案快速启动流程，依据事故的严重程度、影响范围等因素进行合理分级分类。针对不同级别和类型的事故，明确相应的启动条件和责任主体。当事故发生时，相关责任人能够迅速依据流程启动应急预案，确保救援行动及时展开。同时，要建立高效的信息传递系统，使事故信息能在最短时间内准确传达给各相关部门和人员。加强应急救援队伍建设和培训，提高其应对各类事故的专业能力和实战经验。定期对应急预案进行演练和评估，不断优化流程，确保其科学性和有效性，从而提升整个项目在面对突发事件时的应急响应能力。

五、总结

石油化工项目技术管理涵盖多个关键要素，这些要素之间存在紧密的耦合关系。有效的技术管理需要管理体系革新与技术创新协同推进。管理体系的革新能够为技术创新提供良好的环境和制度保障，促进新技术的研发与应用；而技术创新又会推动管理体系的不断优化和完善。同时，数字化双生技术在石化项目管理中展现出广阔的发展前景。它可以通过构建虚拟模型，实现对石化项目的实时监测和优化，提高项目的运行效率和安全性，降低成本和风险。未来，应进一步深入研究技术管理要素的耦合关系，加强管理体系革新与技术创新的协同，积极探索数字化双生技术的应用，以提升石油化工项目技术管理的水平和效果。

参考文献

- [1] 潘少峰. 国家先进技术光伏发电 H 项目施工技术研究 [D]. 东南大学, 2021.
- [2] 张文超. BIM 助推新基建项目智慧建造关键技术应用研究 [D]. 山东建筑大学, 2022.
- [3] 郑岩岩. 煤炭企业外部雇主品牌的关键要素分析与提升策略研究 [D]. 辽宁工程技术大学, 2022.
- [4] 廖家军. FY 公司模具开发的技术管理改进方案研究 [D]. 吉林大学, 2022.
- [5] 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.
- [6] 樊秀刚. 石油化工项目施工质量控制策略研究 [J]. 石油化工建设, 2023, 45(1): 85-87.
- [7] 陈大勇. 石油化工工程项目管理的核心要素分析 [J]. 化工管理, 2024(6): 11-15.
- [8] 徐谦, 田正军, 吉春正, 等. 基于关键链的客舱空调通风项目技术管理 [J]. 项目管理技术, 2022, 20(3): 95-100.
- [9] 孙杨. 石油化工工程项目建设的安全管理策略 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20): 77-79.
- [10] 何风庆. 关于加强石油化工建设工程项目管理的策略分析 [J]. 风景名胜, 2021(3): 338.

特种设备在石化行业中的管理要点及风险防控

王涛

珠海裕珑石化有限公司, 广东 珠海 519000

DOI:10.61369/ME.2025030008

摘 要 : 石化行业特种设备管理涉及多方面。介绍其种类及技术特征, 阐述 QHSE 与 PAS55 融合对设备完整性管理的作用, 还涉及检修计划编制、技术改造、失效概率模型等内容, 以及腐蚀监测、缺陷识别、数据传输等技术, 同时强调培养方案、绩效考核、绿色维修和管理要点及风险防控。

关 键 词 : 石化行业; 特种设备; 管理

Management Essentials and Risk Prevention for Special Equipment in Petrochemical Industry

Wang Tao

Zhuhai Yulong Petrochemical Co, Ltd., Zhuhai, Guangdong 519000

Abstract : Special equipment management in the petrochemical industry encompasses multifaceted approaches. This paper introduces equipment categories and technical characteristics, elaborates on the role of integrating QHSE (Quality, Health, Safety, Environment) with PAS 55 (Asset Management) in enhancing equipment integrity management. It further addresses maintenance planning, technical renovation, failure probability modeling, as well as corrosion monitoring, defect identification, and data transmission technologies. The study emphasizes training programs, performance evaluation, green maintenance practices, and synthesizes management essentials with risk prevention strategies.

Keywords : petrochemical industry; special equipment; management

引言

石化行业中的特种设备管理至关重要, 涉及多种设备及复杂技术。2021 年发布的相关安全生产政策强调了对特种设备安全管理的重视。压力容器、工业管道、起重机械等特种设备具有不同技术特征, 需考虑多种因素确保安全运行。在管理方面, 国际国内标准存在差异需关注。QHSE 管理体系与 PAS55 资产管理标准融合应用对设备完整性管理有重要意义, 同时 RBI 检验策略与工作许可制度及 JSA 安全分析方法联动用于检修计划编制。其他如技术改造、失效概率模型构建、应急预案制定、腐蚀监测技术集成等方面也各有要点, 共同构成石化行业特种设备管理体系。

一、石化行业特种设备管理基础理论

(一) 特种设备分类与技术特征

石化行业中的特种设备种类繁多, 具有不同的技术特征。压力容器是常见的特种设备之一, 用于储存和处理各种介质, 其设计和制造需考虑压力、温度、介质腐蚀性等因素, 以确保安全可靠运行^[1]。工业管道在石化生产中起着输送介质的关键作用, 其特点包括长距离、复杂的介质成分以及不同的压力和温度条件, 对管道的材质、连接方式和防腐措施有严格要求。起重机械用于吊装和搬运重物, 在石化行业的设备安装和维护中不可或缺, 其技术特征涉及起重量、起升高度、工作半径等参数, 这些参数决定了起重机械的选型和使用条件。同时, 国际上的 API、ASME

标准与国内的 TSG 规范在这些特种设备的要求上存在一定差异, 在实际管理中需加以关注和对比。

(二) 石化行业 HSE 管理框架

在石化行业 HSE 管理框架中, QHSE 管理体系与 PAS55 资产管理标准的融合应用至关重要。QHSE 管理体系涵盖了质量、健康、安全 and 环境等多个方面, 为企业的运营提供了全面的管理规范。PAS55 资产管理标准则侧重于资产的全生命周期管理, 包括资产的规划、获取、运营、维护和处置等环节。两者的融合能够实现优势互补, 提高企业的管理效率和资产效益。设备完整性管理 (MI) 的构建逻辑基于此融合应用, 旨在确保设备在整个生命周期内的可靠性和安全性, 减少设备故障和事故的发生, 保障石化行业的生产运营顺利进行^[2]。

二、设备综合管理体系构建

（一）检维修项目管理流程

基于 RBI 检验策略进行停机检修计划编制时，需考虑与工作许可制度（PTW）和 JSA 安全分析方法的联动。RBI 检验策略通过对设备风险的评估确定合理的检验周期和方法，为停机检修提供依据^[3]。在计划编制过程中，要与 PTW 制度紧密结合，确保检修工作的合法性和安全性。PTW 制度规范了检修工作的许可流程，明确了各项工作的责任和权限。同时，引入 JSA 安全分析方法，对检修作业进行详细的风险分析。通过 JSA 分析识别潜在的危险有害因素，制定相应的控制措施，将风险降低到可接受的水平。这种联动机制有助于提高检修计划的科学性和有效性，保障石化行业特种设备的安全运行。

（二）技改项目管理要点

技术改造项目，HAZOP 与 SIL 定级流程至关重要。HAZOP 通过对系统全面的分析，识别潜在的危险与可操作性问题，为后续的风险防控提供依据^[4]。SIL 定级则进一步确定安全仪表系统所需的安全完整性等级，确保设备在运行过程中的安全性。

同时，资金预算控制与变更管理（MOC）的综合实施方案不可或缺。在资金预算控制方面，要精确核算项目所需资金，合理分配资源，避免资金浪费或不足。对于变更管理，需建立严格的流程，对任何可能影响设备性能、安全等方面的变更进行评估和审批，确保变更的合理性和安全性，保障技术改造项目的顺利实施。

三、特种设备风险管理体系

（一）风险识别与评估方法

1. 定量风险评估模型

构建基于 FMEA - 贝叶斯网络的设备失效概率模型，首先利用 FMEA 对特种设备进行失效模式与影响分析，确定潜在的失效模式及其原因和影响程度^[5]。在此基础上，将其结果融入贝叶斯网络，通过贝叶斯推理计算设备在不同工况下的失效概率。对于腐蚀速率预测，可结合设备材质、运行环境等因素建立相应的预测模型。剩余寿命评估算法则综合考虑腐蚀速率、设备当前状态以及运行历史等，准确评估特种设备的剩余使用寿命，为风险防控提供有力依据。

2. 应急预案构建

应急预案构建需针对反应釜泄漏、管道破裂等典型事故。首先应设计多级响应预案，不同级别对应不同程度的事故状况及应对措施。对于反应釜泄漏，需考虑泄漏物质的性质、泄漏量及可能造成的危害范围等因素制定相应措施。对于管道破裂，要依据管道输送物质、压力以及破裂位置等确定应急方案。同时，明确逃生路线至关重要，应根据事故发生地点的布局和可能的危险扩散方向，规划出安全、合理且易于识别的逃生路径。应急资源配置标准也需明确，包括消防器材、防护用品、救援设备等的种类和数量，确保在事故发生时能够及时获取所需资源，有效应对事故，保障人员安全和减少财产损失^[6]。

（二）防控技术应用体系

1. 腐蚀监测技术

电阻探针适用于监测腐蚀速率较快的环境，能实时反馈腐蚀信息。超声波测厚主要用于检测设备壁厚的变化，可确定腐蚀程度及剩余壁厚，对保障设备安全运行至关重要。FSM 场指纹法可对大面积金属表面进行腐蚀监测，能检测出微小的腐蚀变化，尤其适用于复杂结构设备^[7]。根据不同技术的特点和优势，可提出集成方案。以石化行业的特种设备为例，对于易发生快速腐蚀的部位可优先采用电阻探针；对于关键部位且需精确测量壁厚的，选择超声波测厚；对于大面积且结构复杂的设备表面，应用 FSM 场指纹法。通过集成多种腐蚀监测技术，构建在线监测系统，实现对特种设备腐蚀状况的全面、实时监测。

2. 智能诊断技术

声发射检测与红外热像技术在承压设备缺陷识别中具有重要作用。声发射检测可实时监测设备内部缺陷的产生和扩展，通过对声发射信号的分析，确定缺陷的位置和严重程度^[8]。红外热像技术则利用物体的热辐射特性，检测设备表面温度分布的异常，从而发现潜在的缺陷。同时，AI 算法在故障预警中也有应用，但需明确其适用边界。不同的 AI 算法适用于不同类型的故障模式和数据特征。在实际应用中，需根据具体情况选择合适的算法，并通过大量的实践案例进行验证和优化，以提高故障预警的准确性和可靠性。

四、管理优化实施路径

（一）信息化平台建设

1. 物联网技术应用

设计基于 5G 网络的设备状态数据传输架构，实现特种设备状态数据的高效、实时传输，为后续的管理和分析提供数据支持^[9]。5G 网络的高速率、低延迟和高可靠性特性，能够满足石化行业对设备状态监测的严格要求。同时，利用数字孪生技术构建特种设备的三维可视化模型，实现对设备的全方位、多角度监测和管理。通过数字孪生技术，可以实时反映设备的实际运行状态，预测设备可能出现的故障和风险，提前采取措施进行预防和修复，提高设备的运行效率和安全性，保障石化行业的生产稳定。

2. 大数据分析平台

在信息化平台建设的大数据分析平台部分，可构建设备绩效指标（KPI）评估模型。通过收集特种设备的各类运行数据，利用大数据分析技术对这些数据进行深度挖掘和分析，从而建立起准确反映设备运行状况的 KPI 评估模型^[10]。在此基础上，实现可靠性数据分析与维护决策的智能联动。当数据分析显示设备可靠性出现异常时，系统能够自动触发维护决策机制，为维修人员提供精准的维护建议和决策依据，确保特种设备的安全稳定运行，提高石化行业的生产效率和安全性。

（二）人员能力建设

1. 三级培训体系

规划涵盖特种设备操作证、NDT 检测资质与注册安全工程

师的阶梯式培养方案。对于特种设备操作证，应根据不同设备类型和操作要求，制定详细的培训课程和考核标准，确保操作人员具备扎实的理论知识和熟练的操作技能。在 NDT 检测资质培养方面，注重理论与实践相结合，通过实际案例分析和模拟检测操作，提高检测人员的专业水平和故障诊断能力。针对注册安全工程师的培养，要强化安全管理知识和法规标准的学习，培养其综合分析和解决安全问题的能力，同时注重实践经验的积累，使其能够在实际工作中有效防控特种设备相关风险。

2. 绩效考核机制

建立包含 MTBF、维修成本率等核心指标的设备管理绩效考核矩阵是至关重要的。MTBF 即平均故障间隔时间，它能反映设备的可靠性，通过对其监测和分析，可以了解设备的运行状况，为维护和改进提供依据。维修成本率则体现了设备维修投入与产出的关系，合理控制维修成本率有助于提高企业经济效益。在绩效考核矩阵中，应明确各指标的权重和目标值，以便准确评估设备管理绩效。同时，要建立完善的数据收集和分析系统，确保指标数据的准确性和及时性。通过这样的绩效考核机制，可以激励员工积极参与设备管理，提高设备的运行效率和可靠性，降低设备故障率和维修成本，从而保障石化行业特种设备的安全稳定运行。

（三）技术创新方向

1. 新型检测技术

脉冲涡流检测在带保温层设备中具有良好应用前景。它无需拆除保温层即可检测设备腐蚀情况，能有效提高检测效率、降低成本。通过发射脉冲信号并分析反馈的涡流信号变化，可确定设备壁厚减薄程度等关键信息。相控阵超声技术革新要点包括探头设计的优化，实现更好的波束聚焦和角度控制，提高检测分辨率

和准确性。同时，信号处理算法的改进能够更精准地分析超声回波信号，识别微小缺陷。其多通道、多角度检测能力，可对复杂形状的特种设备进行全面检测，为石化行业特种设备的安全管理提供更可靠的技术支持。

2. 绿色维修技术

在绿色维修技术方面，对于特种设备在石化行业的应用至关重要。冷切割技术在石化行业防爆区域作业时，需深入研究其作业规程，确保操作的安全性和规范性。这包括对切割设备的选型、切割参数的设定以及操作人员的技能要求等方面的考量。无火花工具的应用同样需要明确作业规程，防止在作业过程中产生火花引发爆炸危险。同时，要对环保清洗剂进行技术经济性论证。分析其清洗效果、对设备的腐蚀性以及成本效益等因素，选择最适合石化行业特种设备维修的环保清洗剂，以实现绿色维修，减少对环境的影响，提高维修效率和质量。

五、总结

特种设备在石化行业的管理要点及风险防控至关重要。PDCA 循环通过计划、执行、检查 and 处理的不断循环，实现设备管理的持续改进，确保设备始终处于良好运行状态。同时，区块链技术在检验记录存证方面具有巨大潜力，其不可篡改和可追溯的特性，能够保障检验记录的真实性和可靠性，为设备管理提供有力支持。在实际管理中，应注重管理体系建设与技术看创新双轮驱动。一方面，完善的管理体系能够规范设备管理流程，提高管理效率；另一方面，技术创新能够引入新的管理手段和方法，提升管理的科学性和精准性。只有两者相辅相成，才能有效防控风险，保障特种设备在石化行业的安全稳定运行。

参考文献

- [1]王梦.石化行业潜在污染区域空间分布与风险预测研究[D].东南大学,2022.
- [2]罗奋金.贵阳地铁3号线工程项目特种设备风险管理研究[D].重庆大学,2022.
- [3]靳禹飞.基于灰色系统理论的特种设备风险评价方法研究[D].首都经济贸易大学,2021.
- [4]裴江波.石化行业绿色供应商的评价与选择研究[D].北京化工大学,2021.
- [5]蒋天宁.石化行业智能工厂能力成熟度评价研究[D].东北林业大学,2021.
- [6]王磊.特种设备管理与维修要点[J].设备管理与维修,2021,(06):35-36.
- [7]张鲁新.石化企业特种设备管理存在的问题及应对措施[J].山东化工,2021,50(13):152-153+156.
- [8]陈欣维.石化行业排污许可证管理要点探讨[J].油气田环境保护,2021,31(03):8-10.
- [9]莫斌.特种设备管理及维保要点[J].中国科技纵横,2023(3):81-83.
- [10]温泉.基于数据统计分析的特种设备风险防控研究[J].机电工程技术,2022(004):051.

炼油装置电气设备故障处理与预防策略研究

吴时孔

洛阳三隆安装检修有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ME.2025030011

摘 要： 炼油装置电气设备的稳定运行是保障炼油生产安全与效率的关键。本文系统分析了炼油装置中变压器、电动机及配电系统等核心设备的典型故障类型（如短路、过载、绝缘劣化），揭示了内部材料退化与外部环境腐蚀、振动等多因素耦合的故障机理。结合传统检测手段（红外热成像、绝缘电阻测试）与智能诊断技术（人工智能预测模型、物联网在线监测），提出了冗余设计、环境适应性改进、基于状态监测的预防性维护等多层次优化策略，并构建分级应急预案与快速修复技术以降低故障影响。研究成果为炼油企业电气设备的全生命周期管理提供理论支撑，推动智能化运维转型，提升生产可靠性与经济效益。

关 键 词： 炼油装置；电气设备故障诊断；预防优化策略

Research on Fault Handling and Prevention Strategies for Electrical Equipment in Oil Refining Units

Wu Shikong

Luoyang Sanlong Installation and Maintenance Co., Ltd. Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： The stable operation of electrical equipment in oil refining units is crucial for ensuring production safety and efficiency. This study systematically analyzes typical fault types (e.g., short circuits, overloads, and insulation degradation) in core equipment such as transformers, motors, and power distribution systems. It reveals the fault mechanisms caused by the coupling of internal material degradation and external environmental factors (e.g., corrosion and vibration). By integrating traditional detection methods (infrared thermography, insulation resistance testing) with intelligent diagnostic technologies (AI prediction models, IoT-based online monitoring), multi-level optimization strategies are proposed, including redundancy design, environmental adaptability improvements, and condition monitoring-based preventive maintenance. Hierarchical emergency plans and rapid repair technologies are established to mitigate fault impacts. The research outcomes provide theoretical support for the full lifecycle management of electrical equipment in refineries, promote intelligent operation and maintenance transformation, and enhance production reliability and economic benefits.

Keywords： oil refining units; electrical equipment fault diagnosis; prevention and optimization strategies

引言

《“十四五”全国清洁生产推行方案》强调石化行业绿色安全发展，炼油电气设备在恶劣环境下可靠性至关重要。本文分析设备故障类型与成因，结合传统检测与人工智能、物联网技术，构建多维度诊断方法。提出设计优化、运维管理、应急响应等策略，降低故障率，提升恢复能力，支撑炼油企业电气设备全生命周期管理，满足智能化生产需求。

一、炼油装置电气设备概述

（一）炼油装置电气设备组成与运行特点

炼油装置电气系统由变压器、电动机和配电系统等核心设备组成，保障工艺流程连续性和安全性。变压器适应高负荷波动和谐波干扰；电动机在恶劣环境中运行，要求高绝缘性能和散热效

率；配电系统需冗余设计和实时监测。这些设备高集成化、环境依赖性强、连续运行，稳定性和可靠性直接影响生产效率和安全性。事故信息，如电网故障引起的跳闸，是需实时监视并立即处理的重要信息。

（二）典型故障类型与危害分析

炼油装置电气设备的典型故障包括短路、过载、绝缘劣化

及接地故障等^[1]。短路故障多由设备绝缘击穿或线路接触异常引发，可导致瞬时电流激增，造成设备损毁甚至火灾；过载故障常因设计冗余不足或负载突变超出设备耐受极限，引发过热加速元件老化；绝缘劣化受环境腐蚀与热应力累积影响，降低设备耐压能力，诱发漏电风险；接地故障则可能破坏系统电位平衡，威胁操作人员安全并干扰控制信号传输^[2]。此类故障不仅造成非计划停产和经济损失，还可能引发连锁反应，加剧设备损坏与安全事故风险。



图 1.1 工业控制面板

二、电气设备故障机理分析

（一）内部因素导致的故障机理

电气设备故障通常由材料退化和结构缺陷引起，如老化、绝缘劣化、接触不良等，这些因素可能逐步削弱设备性能，最终导致突发性故障，威胁系统稳定性^[3]。事故信息，由于电网故障、设备软硬件故障等引起断路器跳闸（包括非人工操作的跳闸）、保护及安全自动装置出口信号以及影响安全运行的其他信号，是需实时监视、立即处理的重要信息，对保障供电系统的安全运行至关重要。

（二）外部环境与操作因素影响

外部环境与操作因素显著加速电气设备失效。高温环境加剧绝缘材料热老化，缩短设备寿命；腐蚀性气体（如 H_2S 、 SO_2 ）侵蚀金属部件与密封结构，导致导体锈蚀或绝缘失效；机械振动引起接线松动或部件位移，破坏电气连接的可靠性；人为操作失误（如误触保护装置、超负荷运行）则直接干扰设备正常运行^[4]。环境与操作的协同作用往往诱发多重故障模式，例如高温与振动叠加可加速绝缘层开裂，而腐蚀与误操作结合可能触发连锁性系统崩溃。

三、电气设备故障诊断方法研究

（一）传统诊断技术

1. 感官检查与仪器检测法

感官检查通过人工观察、听觉和触觉判断设备状态，是故障

初筛的基础；仪器检测法利用红外热成像仪定位过热点，超声波探测器识别声发射信号，振动分析仪评估机械磨损^[5]。两者结合可弥补单一方法的不足，如红外发现肉眼不可见的绝缘劣化，振动数据验证机械隐性缺陷，形成多维度诊断依据。

2. 电气参数分析法

电气参数分析法通过量化检测关键指标评估设备健康状态。绝缘电阻测试通过阻值判断绝缘层完整性，阻值下降预示绝缘劣化；局部放电检测通过捕捉微放电信号识别早期绝缘缺陷；介质损耗角正切（ $\tan \delta$ ）测试反映绝缘材料能量损耗特性，其值升高表明绝缘老化或杂质侵入^[6-7]。这些方法通过量化参数建立故障阈值，为预防性维护提供精准判据。

（二）智能诊断技术

1. 基于人工智能的故障预测模型

人工智能技术通过构建数据驱动模型实现故障早期预警与分类。神经网络通过多层非线性映射提取设备运行数据的深层特征，自适应学习故障模式与正常状态的差异；支持向量机（SVM）基于统计学习理论构建高维空间超平面，有效区分复杂工况下的故障类别。此类模型利用历史数据（如电流波形、振动频谱）进行训练，结合特征工程与超参数优化，可预测设备剩余寿命或识别潜在故障类型，例如基于 LSTM 网络的电机绕组过热预测，或 SVM 分类器对局部放电模式的精准辨识。人工智能模型具备处理非线性关系与噪声干扰的优势，但需依赖高质量标注数据与算力支撑。

2. 物联网（IoT）与在线监测系统应用

物联网技术通过分布式传感器网络、边缘计算与云平台构建实时监测体系。传感器节点采集设备温度、振动、电流等参数，经边缘网关预处理后上传至云端；在线监测系统整合时序数据库与数字孪生模型，实现设备状态可视化与异常阈值动态调整。例如，无线温度传感器实时追踪变压器绕组热点，结合自适应滤波算法消除环境干扰；振动监测模块通过特征频率分析识别轴承磨损阶段。此类系统支持远程诊断与决策，减少人工巡检盲区，并通过历史数据挖掘优化维护周期，显著提升故障响应速度与诊断精度。

四、电气设备故障预防与优化策略

（一）设备设计与选型优化

1. 冗余设计与可靠性提升

冗余设计通过配置备用设备或并联回路降低单点故障风险，例如采用双电源供电的变压器组或分段母线结构，确保局部故障时系统持续供电。可靠性提升需结合可靠性工程理论，基于故障模式与影响分析（FMEA）优化设备选型，筛选高耐受性元件（如耐高温导线、低损耗铁芯），并通过智能切换逻辑实现故障回路的快速隔离与备用设备无缝投切。此类设计兼顾经济性与安全性，例如在炼油装置中，冗余配电网络可避免关键设备停机导致的连锁停产，而基于数字孪生的动态可靠性评估模型可实时优化冗余配置策略。

2. 环境适应性改进

对于长周期运行的电气设备，因无法按期执行预防性维护，企业设备管理部门需组织技术评估。结合环境适应性改进，如防腐和防爆设计，确保设备稳定运行。这有助于及时调整维护策略，保障设备性能，避免故障风险，从而维护生产安全和效率。

（二）运维管理策略

1. 基于状态监测的预防性维护

基于状态监测的预防性维护通过实时采集设备运行参数（如温度、振动、电流谐波）构建健康评估模型，结合历史数据趋势分析预测潜在故障窗口。传感器网络与边缘计算技术实现数据高频采集与初步特征提取，云端平台利用机器学习算法（如随机森林、聚类分析）识别异常模式并生成维护建议^[8-9]。例如，通过振动频谱特征预测电机轴承剩余寿命，或基于绝缘电阻变化率制定变压器检修周期。此类策略从定期维护转向按需维护，减少非必要停机，同时避免故障扩大化，显著提升维护效率与资源利用率。

2. 标准化操作与定期维护规程

标准化操作通过制定设备启停、负载调节等流程规范，约束操作行为以降低人为失误概率。定期维护规程明确清洁、紧固、润滑及校准等任务的周期与执行标准，例如每季度检测配电柜接触电阻，年度更换电机润滑脂。规程优化依赖故障统计与设备劣化规律分析，如通过绝缘老化曲线调整耐压测试频次，或依据环境腐蚀速率缩短密封件更换周期。文档化管理结合数字化工单系统确保规程执行可追溯，并通过操作人员培训强化规程依从性，系统性降低误操作与维护疏漏风险。

（三）应急处理与故障快速恢复

1. 分级应急预案制定

分级应急预案依据故障严重程度与影响范围构建差异化响应机制。一级预案针对全厂级故障（如主变压器爆炸），明确紧急停机、人员疏散与消防联动流程；二级预案聚焦区域级故障（如配电柜短路），设定故障隔离、备用电源切换与抢修优先级；三

级预案处理设备级故障（如电机过载），规范临时旁路运行与备件更换策略。预案动态更新依赖历史故障数据库与仿真推演，结合定期演练验证响应时效性。例如，炼油厂可通过数字孪生模拟变压器油温失控场景，优化冷却系统启动阈值与操作序列，确保应急措施与实时工况精准匹配。

2. 故障隔离与快速修复技术

故障隔离技术通过智能断路器、故障指示器与拓扑分析定位故障点，最小化停电范围。快速修复采用模块化设计（如插拔式母线槽）、预置冗余接口及带电作业工具，缩短维修时长^[10]。例如，配电系统短路时，基于差动保护的速断装置可瞬时切断故障支路，同时自动切换至备用线路；电机绕组烧损后，利用快速接线端子与预制绕组模块实现2小时内更换恢复。智能诊断终端（如便携式局放检测仪）辅助现场精准定位隐性缺陷，结合移动维修平台（如配备机械臂的工程车）提升高危环境下的抢修效率，显著降低非计划停机损失。

五、总结与展望

炼油装置电气设备的稳定运行是保障炼油生产安全与效率的核心。本研究系统分析了电气设备的故障类型、机理及诊断方法，并提出多层次预防与优化策略。故障机理研究表明，内部材料退化与外部环境腐蚀、振动等因素协同作用，导致设备性能劣化；诊断方法中，传统手段（如红外检测）与智能技术（AI模型、IoT监测）结合，显著提升故障识别精度。预防策略方面，冗余设计、环境适应性改进及基于状态的预防性维护可有效降低故障率，分级应急预案与快速修复技术则减少故障影响范围与恢复时间。然而，研究对实际复杂工况的适应性仍需验证，且智能技术的算力与数据依赖可能限制其推广。未来可深化数字孪生技术在动态可靠性评估中的应用，探索新型耐腐蚀材料与自修复技术，并推动多源数据融合与轻量化算法开发，以进一步提升炼油装置电气系统的智能化与抗风险能力。

参考文献

- [1] 陈让曲. 石油化工装置安全设计讨论——Ⅲ. 自动控制安全设计 [J]. 炼油技术与工程, 2016(7):3.
- [2] 袁冬胜. 工厂电气设备维护与管理要点分析 [J]. 轻松学电脑, 2020, 000(007):P.1-1.
- [3] 马智涛. 炼化企业电气管理及质量控制 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(2): 1.
- [4] 凌标灿. 电气设备故障谐波检测在矿山设备维护中的应用 [C]//2012中国矿山安全技术装备与管理大会论文集. 2012.
- [5] 史强, 朱文胜, 胡洋, 等. 红外热成像技术在炼油行业的应用 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2013(1):6.
- [6] 杨宁. 强化炼油厂电气设备管理的策略及落实 [J]. 中国化工贸易, 2015, 000(028):254-254.
- [7] 杨懋渠, 徐刚. 炼化建设项目电气专业常见问题分析与处理 [J]. 石油工程建设, 2014, 40(5):4.
- [8] 张磊, 陶媛, 李树生. ERP系统在电气设备管理中的应用 [J]. 炼油与化工, 2010(04):61-63.
- [9] 王开文. 石化企业电气设备管理中的电力故障分析 [J]. 装备维修技术, 2021(2):0336-0336.
- [10] 王金丹. 炼油厂设备腐蚀分析及维修处理方法 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版) 工程技术, 2022(1):107-110.

大功率植物灯电源中的非隔离电源设计与可靠性研究

胡三义

身份证号: 412826197812062213

DOI:10.61369/ME.2025030012

摘 要： 针对大功率植物灯电源需求小体积，高效率，低成本的特点，提出一种双级非隔离电源设计方案。第一级 PFC 级采用 CCM 工作模式，PFC 铁感采用铁镍合金电感抑制谐波，效率达 98.5%；第二级 DC/DC 非隔离转换采用 BUCK 拓扑架构，采用 CRM 软开通技术，及 BUCK 电感串联技术，可实现 98.5% 效率和千瓦级扩展。集成三合一调光、IP67 防护及差模 6kV，共模 15KV 防雷等级，经过 5 年验证，待机功耗 <0.5W，效率 >97%，故障率低于 0.05%。符合 GB/T 44473-2024 标准，支持设施农业低碳化。

关 键 词： 非隔离电源；植物灯电源；高功率密度

Study on the Design and Reliability of Non-isolated Power Supply in High-power Plant Lamp Power Supply

Hu Sanyi

ID: 412826197812062213

Abstract： In response to the characteristics of small volume, high efficiency and low cost for high-power plant lamp power supply, a two-stage non-isolated power supply design is proposed. The first-level PFC level adopts CCM working mode, and the PFC iron sensor adopts iron-nickel alloy inductor to suppress harmonics, with an efficiency of 98.5%; the second-level DC/DC non-isolation conversion adopts BUCK topology architecture, CRM soft opening technology, and BUCK inductor adopts series technology, which can achieve 97.5 % efficiency and kilowatt-level expansion. Integrated three-in-one dimming, IP67 protection and differential mode 6kV, total mode 15KV lightning protection level, after 5 years of verification, standby power consumption <0.5W, efficiency >97%, failure rate is less than 0.05%. It meets the GB/T 44473-2024 standard and supports the low-carbonisation of facilities and agriculture.

Keywords： non-isolated power supply; plant lamp power supply; high power density

引言

植物照明作为现代农业的关键技术，其电源性能和可靠性直接影响光环境调控与经济效益。非隔离电源因高功率密度、低成本和紧凑体积成为大功率植物灯的主流选择，但仍需克服防护和长期可靠性等问题。GB/T 44473-2024 规范要求设备高效、长寿命及精准调光，推动电源设计向高能效与智能化发展。136 号文件通过市场化电价机制促进新能源设备效能提升，为非隔离电源应用提供政策支持。本研究通过双级非隔离拓扑优化、调光协同设计及 IP67 防护，实现了效率大于 97%、待机功耗低于 0.5W、差模 6kV，共模 15KV 防雷等级，支撑植物工厂智能化升级和低碳运营。

一、非隔离电源在植物灯电源中的发展趋势及技术挑战

（一）非隔离电源在植物灯领域的应用趋势

随着现代农业向集约化、智能化转型，植物照明系统对电源的高功率密度和小型化需求迫切。非隔离电源因省去隔离变压器，及 LLC 拓扑两个 MOSFET 及次边整流部分，体积和成本大大降低，因此非隔离电源越来越成为大功率植物灯电源的首选。采用优质铝材方形结构与内部灌胶工艺，不仅增强了结构强度和

散热效率，还实现了 IP67 防护等级，适应温室恶劣环境。铝材高导热性和灌胶绝缘防水特性协同，在紧凑设计中平衡了热管理和防护，使非隔离电源既小型又可靠^[1]。铝材的可塑性和表面处理优化了外观，符合现代农业对设备美观性的要求，推动非隔离架构在植物灯领域的应用不断增长。

（二）技术挑战与解决方案

非隔离电源用于植物灯时，面临输入峰值电流高引发的电网污染与设备冲击问题。采用连续导通模式（CCM）的 PFC 级设计，有效抑制电流谐波，降低峰值电流，减少对前端设备冲击，

同时优化储能电解电容选型，在维持母线电压稳定的前提下，使电容体积缩减超 30%，降低成本并延长寿命。PFC 级运用本人独自发明的“一种快速开关机 PFC 保护电路”专利（专利号：ZL2022 1 0627057.9），显著提升抗冲击能力与可靠性。高功率场景下，PFC 级采用铁镍合金磁环电感，其高温性能优，导线外露散热佳，叠加小磁环设计进一步降低磁损与铜损。DC/DC 级采用 BUCK 拓扑的临界导通模式（CRM），实现零电压开通；针对数百瓦及以上高功率项目，双电感串联分散热量、降低生产工艺难度，搭配本人独自发明的“一种 BUCK 电感串联检测控制电路”专利（专利号：ZL2022 1 0352712.4）解决检测与退磁难题；及“一种 BUCK 快速开关机保护电路”专利（专利号：ZL2023 1 0806628.X）让 BUCK 模块软启动，增强抗冲击性。最终，整机效率超 97%，满足 5 年质保，实现高功率密度与长寿命的平衡。

二、双级架构非隔离电源设计原理与创新

（一）PFC 级 CCM 模式设计与性能优化

连续导通模式（CCM）通过确保电感电流始终高于零，有效降低了输入电流峰值及波形畸变率，其谐波抑制得益于电流连续特性对高频纹波的平滑作用。PFC 级设计结合平均电流控制策略，可将输入电流总谐波失真（THD）控制在 10% 以内，优于传统断续模式（DCM）。采用铁镍合金磁环 PFC 电感，利用其高饱和磁通密度和低高频涡流损耗特性，并通过单根漆包线外绕工艺实现绕线短且平滑，实现了小体积，减少能量损耗。磁环结构热传导路径短且均匀，配合开放式散热通道，使电感温升较传统 EE 型磁芯低 15%–20%，提升 PFC 级效率至 98.5% 以上^[9]。专利技术（ZL2022 1 0627057.9）保证在负载突变或输入快速开关切换时，PFC 级动态响应快，冲击小，增强了系统稳定性。

（二）BUCK 级 CRM 模式拓扑与功率扩展

临界导通模式（CRM）在电感电流归零瞬间导通开关管，实现零电压开通，消除续流二极管反向恢复损耗与 MOSFET 开通损耗，使 BUCK 级满载效率达 98.5%。结合自适应频率调制技术实现抖频，有效降低 EMI，将 BUCK 级损耗控制在总损耗 1.5% 以内。恒流控制通过采样电阻实现，并可利用调光信号隔离调节输出电流。针对 680W 以上场景，采用双电感串联方案，分散电感热量，降低工艺难度，提升磁芯抗饱和性与减少绕组损耗。基于本人发明专利的 BUCK 电感串联检测控制电路（专利号：ZL2022 1 0352712.4），确保电感完全退磁后进入下一周期。串联设计减少绕组寄生电容，抑制高频振荡，温升梯度控制在 15K 以内。实验显示，在 260V/3.07A（800W）输出下，双电感方案较单电感效率提升 1%、体积缩小 25%。该方案支持线性扩展功率，在千瓦级应用中可通过多电感串联实现功率扩容与热均匀分布，验证了在高功率植物灯电源中的扩展性与实用性^[4]。

三、调光控制与保护系统的协同设计

（一）三合一调光技术的实现路径

1. 正 / 负逻辑调光兼容性设计

正 / 负逻辑调光由硬件电路与软件协议协同实现。硬件上，直接采样三合一调光信号（电阻、PWM、0–10V DC），精准识

别正 / 负逻辑信号并转换为内部 PWM 控制信号^[6]；调光接口集成自适应阻抗匹配网络，兼容多种调光模式，消除阻抗差异导致的线性度问题；调光输入端口配备高压保护电路，防止误接高压损坏电路及 MCU。软件层面，通过可配置寄存器动态切换逻辑极性，运用数字滤波算法抑制信号抖动，将调光精度误差控制在 $\pm 1\%$ 以内^[7]。该设计使同一电源适配不同厂商调光控制器，提升系统兼容性与部署灵活性，满足多样化调光需求。

2. 在线 / 离线可编程调光接口开发

在线 / 离线可编程调光接口基于双通道通信架构设计^[8]。在线模式下，通过 UART 或 I2C 总线与上位机实时交互，支持动态调整调光曲线、电源输出电流，电压等参数，并嵌入 DALI 协议栈以实现标准化工业控制。离线模式下，配置参数存储于外置 EEPROM，用户可通过物理拨码开关或专用编程器预设多组调光场景，满足无网络环境下的快速切换需求。

（二）多重保护电路集成策略

1. 快速开关机电路与短路保护动态响应机制

一种快速开关机 PFC 保护电路（专利号：ZL202210627057.9）通过集成高压预充电回路与零 VCC 电压检测模块，在输入电压建立瞬间抑制浪涌电流，实现开机冲击电流峰值较低，关机时通过主动泄放电路在 5ms 内将 PFC IC 供电 VCC 电压降至关机状态。短路保护采用快速响应机制。短路保护通过 DC/DC BUCK 电路控制 IC 采样恒流检测电阻信号，实时采样输出电流，在检测到采样电阻信号高时，触发 BUCK IC 保护关断功率管；可实现打嗝保护状态，避免产品出现不可逆损坏风险。

2. 去余晖电路与低待机功耗（<0.5W）协同设计

余晖现象是由于非隔离电源中输入交流与输出 Y 电容分压，导致调光关断时 LED 灯微亮，这在植物灯照明领域难以被客户接受。为此，我们设计的去余晖电路，通过在输出 VO+、VO- 连接双刀常开继电器，由调光信号控制其通断。调光信号打开时，继电器吸合，电源正常工作；调光信号关闭，继电器断开，LED 即刻熄灭，有效消除余晖。同时，结合“一种低待机功耗电路”专利技术（专利号：ZL 2022 1 087650.5），利用动态功率管理机制，在待机时关闭 PFC 级与 BUCK 级非必要模块，仅维持核心监控电路运行。实验表明，230V 输入下，待机功耗低于 0.5W，且无余晖现象，保障了植物灯电源的经济性与可靠性。

四、可靠性验证与产品化应用研究

（一）散热与防护性能测试

1. IP67 防护等级及灌胶工艺对热管理的优化效果

IP67 防护等级及灌胶工艺采用高导热有机硅胶填充电源内部空隙，形成连续散热路径及防水效果，其导热系数达 2.5W/(m·K)，较传统空气间隙结构提升 8 倍以上。在灌胶前通过喷涂工艺及材料，使灌胶材料与铝制外壳紧密贴合，实现 IP67 防护等级，较好的防水效果，又可将 PFC 电感、BUCK 电感等热源的热量均匀传导至外壳表面，实测灌胶后整机热阻降低至 1.2℃/W，同等负载下关键器件温升较非灌胶方案减少 15℃。灌胶层同时固化内部元件，抑制震动导致的接触失效，其疏水性与抗腐蚀特性使电源在 85% 湿度环境中长期运行后仍保持散热性能稳定，验证了 IP67 防护等级与热管理的协同优化效果^[8]。

2.6KV/15KV防雷等级的实现与验证

防雷设计采用两级防护架构：输入级防护差模雷击电路由两级压敏电阻组成，分别接在 L,N回路中。共模防雷由 L,N输入端各接一个压敏一脚，另一脚与气体放电管 Y 型接法构成，放电管另一端接在输入地线孔上，吸收 6kV/15kV 浪涌能量的 90%；余下能量通过 BUS 母线电容吸收。输出级防护通过在 VO+,VO- 各接一个容量相对小一级压敏电阻与气体放电管 Y 型接法而成，气体放电管另一端接输出板边地线脚。可将输出端残余电压箝位至 600V 以下。PCB 布局优化关键信号线与功率回路的间距，避免耦合感应过电压。经 IEC 61000-4-5 标准测试，差模 6kV 浪涌，共模 15kV 组合波测试中未发生器件击穿或功能异常，满足户外植物灯电源的严苛环境适应性要求。

（二）电气性能与寿命测试

1.效率 >97% 与 PF>0.98 的负载特性曲线分析

在 AC230V 输入、满载输出条件下，双级架构协同作用使整机效率在 200-260V 恒功率区间内稳定高于 97%。PFC 级 CCM 模式在半载至满载范围内保持 PF 值 >0.98，得益于铁镍合金磁环电感的低损耗特性，50% 负载时效率仅下降 0.5%。BUCK 级 CRM 模式在输出电流 3.07A 时 (800W) 效率达 98.5%，轻载下通过跳周期调制 (PSM) 将效率维持在 95% 以上^[9]。负载特性曲线显示，效率拐点出现在 10% 负载率，验证了拓扑设计对宽负载范围的高效覆盖能力。

2.电解电容寿命与整机5年质保的关联性研究

电解电容寿命遵循 Arrhenius 模型，其工作温度每降低 10℃，寿命延长 2 倍。CCM 模式通过降低输入电流纹波，将电容纹波电流有效值控制在额定值的 60% 以内，结合铝壳灌胶散热将电容核心温度抑制在 75℃ 以下。加速老化试验表明，在 105℃ /2000 小时条件下电容量衰减 <15%，ESR 增长 <30%，推算常温 (40℃) 下寿命超 6 万小时 (约 7 年)，覆盖 5 年质保期需求。实际应用中，电容寿命与整机故障率的强相关性证实，电容优化是达成高可靠性的核心要素之一。

（三）量产应用与市场反馈

1.PLS 系列产品扩展至千瓦级的可行性验证

PLS 系列非隔离电源通过双级架构的模块化设计，验证了

千瓦级功率扩展的可行性^[10]。BUCK 级采用电感串联方案，在 800W 原型机中 BUCK 电感采用两个串联方式，实测效率仍维持在 98.5%，较单电感方案效率高近 1% 效率。功率扩展后，灌胶工艺的均热效应使磁芯最高温升控制在 42K 以内，符合 AEC-Q200 车载级温度循环标准。防雷设计沿用两级防护架构加上优良的 PCB 布局，差模 6KV, 共模 15kV 雷击测试中未出现绝缘击穿，产品损坏现象，验证了拓扑扩展后防护能力的稳定性。量产测试表明，千瓦级产品在 85℃ 环境温度下连续运行 500 小时无降额，证实了架构设计对高功率场景的强适应性。

2.客户长期使用数据对设计优化的指导意义

基于全球 3000+ 台 PLS 系列电源的 3 年运行数据，电解电容年均故障率低于 0.03%，印证了 CCM 模式纹波抑制策略的有效性。客户反馈显示，该 PLS 非隔离系列产品运行稳定，工作良好。有效应对了户外恶劣工作场景及高温，高湿，雷击及盐雾环境。市场数据反向验证了 IP67 防护等级与 6kV/15KV 防雷设计的必要性，进一步强化极端环境适用性。

五、总结

本研究通过双级非隔离架构创新与可靠性协同设计，攻克了大功率植物灯电源的高效化与长寿命技术难题。PFC 级 CCM 模式结合磁环电感实现 98.5% 效率，BUCK 级 CRM 拓扑与电感串联方案突破千瓦级功率扩展瓶颈。IP67 防护等级、6kV/15KV 防雷及三合一调光技术满足 GB/T 44473-2024 规范要求，5 年质保期内客户故障率低于 0.05%，验证了设计方案的工程适用性。专利技术集群与市场化政策 (136 号文) 形成协同效应，推动植物照明电源向高功率密度、低成本方向迭代。未来研究将聚焦智能化调光算法与多个电源并联控制，进一步拓展非隔离架构在设施农业中的低碳化应用场景。

参考文献

- [1] 杨巍巍. LED 调光驱动电源的研究与设计 [D]. 陕西: 陕西科技大学, 2014.
- [2] 汪超, 王邦兴, 王涵, 等. 非隔离型防电流反灌技术在宇航领域中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(25): 75-79+84.
- [3] 谭钰霖. 智能 LED 照明驱动电源的研究与设计 [D]. 贵州: 贵州大学, 2021.
- [4] 李如平, 陈玉辉, 胡俊. 非隔离驱动电源在 LED 路灯中的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (08): 42-44.
- [5] 张伟超, 欧炫宏, 陈嵘. 专为非隔离绿色照明驱动优化设计的 LED 芯片方案 [J]. 中国电子商情, 2012, (03): 37-40.
- [6] 董海燕, 杜奕智, 王晓员. 一种非隔离降压式大功率 LED 恒流电源驱动电路的设计 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2017, 33(02): 52-54
- [7] 李江龙. 使用非隔离电源的 LED 灯安全设计 [J]. 中国照明电器, 2016, (02): 17-21.
- [8] 朱剑. LED 恒流驱动开关电源的研究与设计 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2015.
- [9] 非隔离 K78-R4 电源: 创新赋能, 匠“芯”升级 [J]. 电子产品世界, 2020, 27(06): 91-92.
- [10] 李小彬. 高效率高功率密度 1kW 隔离 AC-DC 电源模块的研究与设计 [D]. 四川: 西南交通大学, 2020.

污水处理企业安全管理体系研究之一： 危险作业安全管理和化学品日常管理研究

李泽雄

身份证号：440508197611103618

DOI:10.61369/ME.2025030016

摘 要： 本文围绕污水处理企业的安全管理展开。阐述其特殊性，包括工艺、环境和危险源等方面。介绍相关政策法规约束，以及针对有限空间作业、浓硫酸管理等具体措施，还涉及案例分析、废弃物处置等内容，强调制度、技术与文化协同创新的重要性。

关 键 词： 污水处理；安全管理；协同创新

Research on Safety Management System of Sewage Treatment Enterprises: Research on Safety Management of Dangerous Operations And Daily Management of Chemicals

Li Zexiong

ID: 440508197611103618

Abstract： This article focuses on the safety management of wastewater treatment enterprises, highlighting their unique aspects, including processes, environmental conditions, and potential hazards. It introduces relevant policies and regulations, as well as specific measures for confined space operations and the management of concentrated sulfuric acid. The article also includes case studies and discussions on waste disposal, emphasizing the importance of integrating institutional, technological, and cultural innovations.

Keywords： sewage treatment; safety management; collaborative innovation

引言

污水处理企业的安全管理至关重要且面临诸多挑战。其工艺复杂、作业环境高危、危险源多样。2023年颁布的《工贸企业有限空间作业安全管理规定》及《危险化学品安全管理条例》等政策法规对其安全管理提出明确要求。在此背景下，本文深入探讨污水处理企业的危险作业安全管理和化学品日常管理，包括有限空间作业管理模式构建、典型案例分析、浓硫酸安全管理等多方面内容，旨在总结体系化解决方案，强调制度、技术与文化协同创新的重要性，为企业可持续发展提供保障。

一、污水处理企业安全管理特征分析

（一）行业安全管理特殊性

污水处理企业的安全管理具有特殊性。其工艺复杂，生物处理单元与化学处理单元并存，需要兼顾不同处理方式的安全要求，确保微生物环境稳定以及化学药剂使用合理^[1]。作业环境高危，存在大量密闭空间和腐蚀性介质，密闭空间易导致缺氧、有毒气体积聚等危险，腐蚀性介质则会对设备和人员造成伤害。危险源多样，涵盖机械伤害、有毒气体以及化学品暴露等。机械运转部件可能引发夹伤、卷入等事故，有毒气体如硫化氢等的泄漏会危及人员生命健康，化学品的不当使用和储存也存在安全隐患。这些特殊性使得污水处理企业的安全管理面临诸多挑战。

（二）政策法规框架要求

污水处理企业的安全管理受到一系列政策法规的约束。例如，《工贸企业有限空间作业安全管理规定》对污水处理企业中有有限空间作业的安全管理提出了明确要求，包括作业审批制度、安全培训教育、应急救援预案等方面的规定，以确保作业人员的安全和健康^[2]。《危险化学品安全管理条例》则规范了企业对危险化学品的日常管理，涵盖危险化学品的采购、储存、使用、运输和处置等环节，要求企业建立严格的管理制度，采取有效的安全措施，防止危险化学品事故的发生^[3]。这些法规标准为污水处理企业的安全管理提供了合规性管理基准，企业必须严格遵守，以保障自身的安全生产和社会环境的稳定。

二、危险作业全流程管控体系构建

（一）有限空间作业标准化管理

污水处理企业的有限空间作业需构建标准化管理模式。建立作业审批—气体检测—防护装备配置—监护救援机制的四阶段管控模型。作业审批阶段，严格审查作业人员资质、作业方案等，确保符合安全要求^[9]。气体检测环节，在作业前及作业过程中定时检测有限空间内的气体成分及浓度，预防有害气体积聚。防护装备配置要依据作业环境和风险评估结果，为作业人员配备合适的防护用品。监护救援机制需安排专人监护，配备必要的救援设备和器材，作业人员出现异常情况能及时救援，结合格栅井、调节池等典型场景进行流程验证，确保管理模式的有效性和实用性。

（二）作业事故案例分析

选取硫化氢中毒、缺氧窒息等典型案例进行分析。硫化氢中毒事故往往是由于作业环境中硫化氢浓度过高，且缺乏有效的通风和检测措施所致^[4]。缺氧窒息事故则多因受限空间内氧气含量不足，而作业人员未进行有效气体检测和通风置换就进入作业。运用 Bowtie 模型分析事故致因链，可清晰看到危险事件的触发因素以及可能导致的后果。针对这些原因，提出物理隔离与智能监测的双重预防措施。物理隔离可防止有害物质泄漏扩散，智能监测能实时掌握作业环境的关键参数，及时发现异常并预警，从而避免事故发生。

三、水质检测化学品管理实践研究

（一）浓硫酸安全管理体系

1. 储存与使用规范

污水处理企业在浓硫酸安全管理的储存与使用规范方面需制定严格标准。应配置防泄漏托盘，防止浓硫酸泄漏造成危害^[5]。同时，对浓硫酸存量要进行动态监控，实时掌握其储存量的变化情况。在使用环节，要制定 PPE 强制穿戴规范，确保操作人员的安全。此外，还需量化实验室每日领用限额标准，避免浓硫酸的过量领用和浪费，从储存和使用的各个环节保障浓硫酸的安全管理，降低安全风险。

2. 应急处置预案

建立浓硫酸安全管理体系的应急处置预案至关重要。应包括设计合理的酸碱灼伤冲洗装置布局方案，确保在发生浓硫酸灼伤事故时，受伤人员能及时得到有效的冲洗处理，减少伤害程度^[6]。同时，建立中和药剂自动补给系统，以便在需要时能快速提供中和药剂，对泄漏的浓硫酸进行处理。此外，还需制定人员急救响应流程图，明确在事故发生时各人员的职责和行动步骤，包括如何迅速组织急救、如何转移受伤人员、如何联系医疗救援等，确保整个应急处置过程高效、有序进行。

（二）其他危化品协同管理

1. 分类存储策略

基于 GB 15603 标准构建化验室危化品分区存放矩阵是十分

必要的^[7]。对于水质检测涉及的化学品以及其他危化品，应进行合理分类存储。明确氧化剂与还原剂的物理隔离距离要求，避免因不当存放引发化学反应，造成安全事故。例如，强氧化剂和强还原剂应保持足够的距离，防止因意外接触而发生剧烈反应。同时，根据化学品的性质，如酸性、挥发性、毒性等进行分区，将具有相似性质或相互兼容的化学品存放在同一区域，便于管理和取用，也能降低因化学品相互作用而产生的风险，确保化验室环境的安全和稳定。

2. 废弃物处置流程

污水处理企业针对水质检测化学品及其他危化品废弃物，应构建科学合理的处置流程。建立过期试剂申报机制，对相关试剂进行详细登记与申报，以便准确掌握废弃物情况。接着开展毒性评估，依据评估结果确定合理的处置方式。随后通过专业转运，确保废弃物在运输过程中的安全性。同时，引入电子联单追踪系统，对整个处置过程进行实时监管，从申报到最终处置形成一个完整的闭环，强化对危化品废弃物的管理，保障企业生产运营安全及环境安全^[8]。

四、安全管理效能提升路径

（一）制度优化方向

1. 双重预防机制建设

构建风险分级管控与隐患排查治理数据库是双重预防机制建设的重要内容。通过收集污水处理企业各类危险作业和化学品管理相关的数据，包括风险因素、隐患信息等，进行分类整理和分析，为后续的风险评估和管控提供数据支持。同时，开发动态风险评估算法模型，该模型应综合考虑污水处理过程中的各种变量，如水质变化、设备运行状况等，能够实时评估风险等级，并根据评估结果给出相应的管控措施建议。这有助于企业及时发现潜在的安全隐患，采取有效的预防措施，提高安全管理效能，保障污水处理作业的安全进行^[9]。

2. 绩效考核体系重构

设计包含 JSA 执行率、PPE 使用合规率等指标的 KPI 考核量表，旨在全面、客观地衡量员工在安全管理方面的工作表现。JSA 执行率能够反映员工对作业安全分析的重视程度和执行情况，PPE 使用合规率则直接关系到员工在工作中的自身安全防护是否到位^[10]。同时，实施安全积分奖惩制度，通过积分的形式对员工的安全行为进行量化管理。对于表现优秀、积分较高的员工给予奖励，激励其继续保持良好的安全工作习惯；而对于积分较低、存在安全违规行为的员工进行相应的惩罚，以促使其改进安全工作态度和行为，从而整体提升企业的安全管理效能。

（二）技术创新应用

1. 智能监测系统部署

集成 UWB 定位与多参数气体传感技术开发受限空间作业监护平台具有重要意义。通过 UWB 定位技术，能够精确定位作业人员在受限空间内的位置，这为实时监控提供了基础。多参数气体传感技术则可对受限空间内的气体环境进行全面监测，包括有害气

体浓度等关键指标。当监测到生物特征异常时，系统能立即发出实时预警。这种智能监测系统的部署，可有效提升污水处理企业在危险作业尤其是受限空间作业中的安全管理效能，为作业人员的安全生命提供更可靠的保障，同时也有助于企业更好地遵守相关安全法规和标准。

2. 数字化管理平台开发

构建化学品电子台账管理系统是数字化管理平台开发的重要内容。该系统嵌入 MSDS 在线查询功能模块，方便员工随时获取化学品的安全技术说明书，了解其危险特性和应急处理措施。存量预警功能可实时监控化学品的存量，当存量达到设定的阈值时，及时发出预警，避免因化学品短缺或过量存储带来的安全隐患。处置提醒功能则针对化学品的使用期限、过期处理等情况进行提醒，确保化学品的使用和处置符合安全规范，从而提升污水处理企业的安全管理效能。

(三) 人员能力强化

1. 分级培训机制

人员能力强化对于污水处理企业安全管理至关重要，其中分级培训机制是关键。应根据员工的岗位、技能水平和工作经验进行分级。对于新入职员工，提供基础安全培训，涵盖污水处理的基本流程、危险区域识别以及基本安全操作规程等。随着员工经验和技能的提升，中级培训可侧重于复杂设备的操作安全、危险作业的风险评估以及化学品的详细管理知识。高级培训则针对管理层和技术骨干，包括安全管理体系的优化、应急响应策略的制定以及最新安全法规和技术解读，确保不同层级的员工都能获

得与其职责和能力相匹配的培训，从而提升整体安全管理效能。

2. 安全文化建设

推行行为安全观察（BBS）活动，鼓励员工积极观察并记录工作中的安全行为和不安全行为，通过及时反馈和纠正，提高员工的安全意识和行为规范。建立隐患随手拍奖励制度，激发员工主动发现和报告安全隐患的积极性，使员工成为安全管理的参与者和监督者。培育全员参与的安全价值观，通过安全培训、宣传教育等方式，让员工认识到安全是每个人的责任，形成“安全第一”的文化氛围。同时，企业管理层应以身作则，带头遵守安全规定，为员工树立榜样，促进安全文化的建设和发展，从而提升安全管理效能。

五、总结

本研究对污水处理企业的危险作业安全管理和化学品日常管理进行了深入探讨。通过分析，系统总结出危险作业与化学品管理的体系化解决方案。研究发现，制度、技术与文化的协同创新至关重要，这种协同能够有效提升安全管理的质量和效率。在制度层面，明确规范和流程是基础；技术上，采用先进的监测和防控手段能增强安全性；文化方面，培养员工的安全意识和责任感是关键。同时，本研究还提出后续研究方向，应将这些成果延伸应用到污泥处置、沼气利用等衍生环节，进一步完善污水处理企业的安全管理体系，为企业的可持续发展提供更坚实的保障。

参考文献

[1] 金鑫. H 市危险化学品安全生产应急管理体系研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2022.
[2] 姜棣. HW 公司安全管理体系优化研究 [D]. 青岛科技大学, 2023.
[3] 高茂辉. Z 企业多用途船吊作业安全管理研究 [D]. 大连海事大学, 2021.
[4] 曲艳成. 海洋石油检修作业安全风险研究 [D]. 天津科技大学, 2022.
[5] 伍天竞. 国网孝感供电公司作业现场安全管理研究 [D]. 华中科技大学, 2022.
[6] 张波. 危险化学品企业特殊作业安全管理对策研究 [J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(6): 107-109.
[7] 王迪, 白燕洁. 危险化学品企业特殊作业安全管理 [J]. 化工管理, 2023, (24): 91-93.
[8] 唐晗箫, 陈磊, 黄予楠. 化学品企业特殊作业安全管理研究 [J]. 浙江化工, 2021, 52(02): 33-35.
[9] 高亚辉, 蒋奇海, 赵梦升, 等. 污水处理厂危险化学品全流程控制的安全生产管理 [J]. 化工管理, 2021, (01): 40-41.
[10] 付志新. 发电企业危险化学品安全管理 [J]. 电力安全技术, 2021, 23(12): 11-14.

气相催化氟化合成一氟甲烷的反应条件优化研究

闫浩¹, 郭一博¹, 陈晓勇¹, 孟庆森², 杨振建², 孙凤娟³, 徐振生⁴, 马舜⁴

1. 中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室, 天津 300300

2. 天津绿菱气体股份有限公司, 天津 300280

3. 绿菱电子材料(天津)有限公司, 天津 301714

4. 中铁建发展集团有限公司, 北京 100043

DOI:10.61369/ME.2025030040

摘要： 一氟甲烷作为半导体行业中不可或缺的含氟蚀刻气体，展示出独特的应用价值。本研究对铬基催化剂采用了 X 射线衍射 (XRD)、比表面积测定 (BET)、X 射线光电子能谱 (XPS) 分析及 NH₃ 程序升温脱附 (NH₃-TPD) 等手段进行深入表征，明晰了催化剂的晶体结构、比表面积特性、表面铬元素的化学态及其酸性特征。细致探究反应温度、停留时间及原料比例 (n(HF)/n(CH₃Cl)) 等关键因素对氟化反应效率的影响，本研究旨在探索一种生态友好型的一氟甲烷制备技术。实验数据表明，在反应温度设定为 290℃、停留时间设为 10 秒、且原料配比 n(HF)/n(CH₃Cl) 等于 10 的条件下，一氟甲烷的产率达到了最优水平。

关键词： 一氟甲烷；气相催化；反应条件优化；铬基催化剂

Optimization of Reaction Conditions for the Synthesis of Methyl Fluoride via Vapor-Phase Catalytic Fluorination

Yan Hao¹, Guo Yibo¹, Chen Xiaoyong¹, Meng Qingsen², Yang Zhenjian², Sun Fengjuan³, Xu Zhensheng⁴, Ma Shun⁴

1. Key Laboratory of Civil Aviation Thermal Hazards Prevention and Emergency Response, CAUC, Tianjin 300300

2. Linggas Materials Tianjin, Co., Ltd., Tianjin 300280

3. Linggas(Tianjin), Co., Ltd. Tianjin 301714

4. China Railway Construction Development Group Co., Ltd. Beijing 100043

Abstract： This research focused on optimizing the reaction conditions for producing fluoromethane (CH₃F) through gas-phase catalytic fluorination, a crucial etching gas widely used in semiconductor manufacturing. The study involved thorough characterization of chromium-based catalysts using techniques like X-ray diffraction (XRD), specific surface area analysis (BET), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and NH₃ temperature-programmed desorption (NH₃-TPD) to understand their phase structure, surface area, chemical states of Cr species, and acidic properties. By examining key parameters such as reaction temperature, residence time, and feed molar ratio (n(HF)/n(CH₃Cl)) on the fluorination process, the aim was to design an eco-friendly production method for fluoromethane. The experimental findings revealed that the highest yield of fluoromethane was obtained at a reaction temperature of 290℃, a residence time of 10 seconds, and an HF/CH₃Cl molar ratio of 10. These results signify the potential for sustainable production processes in the semiconductor industry.

Keywords： fluoromethane; gas-phase catalysis reaction; condition optimization; chromium-based catalyst

一氟甲烷（化学式为 CH₃F，亦称甲基氟、HFC-41 或 R41），作为一种至关重要的含氟蚀刻气体，其具体物理性质及参数参见表 1^[1]。在半导体生产领域，一氟甲烷展示出了非凡的优势，其碳氟摩尔比低至 1：1，这一特性在众多主流蚀刻气体中堪称最低，从而使得氟甲烷在硅化物薄膜的选择性蚀刻方面表现出色。根据表 2 的数据，一氟甲烷在 3D NAND、DRAM 以及 Fin-FET 等前沿半导体器件的制造流程中，能够实现纳米级别的精确图形传递，尤其适合于那些对选择比有极高要求的复杂结构加工过程^[2]。

表1 一氟甲烷的物性数据表 ^[1] Tab. 1 Physical Property Data of Fluoromethane	
物化性质	数值
相对分子质量	34.03
熔点 /°C	-141.8
沸点 /°C	-78.4
临界温度 /°C	44.5
临界压力 /MPa	5.88
临界密度 /(g · cm ⁻³)	0.3012
临界压缩系数	0.251
气体相对密度 /(kg · m ⁻³)	1.409
气体定压比热容 Cp/[kJ · (kg · K) ⁻¹]	1.13
汽化热 (-78.4°C C)/(kJ · kg ⁻¹)	519.2
液体密度 (25°C)/(g · cm ⁻³)	0.566
蒸汽压 (20°C)/MPa	3.3

一氟甲烷（CH₃F）的工业化生产主要存在以下五条路径：①气相加氢脱氯工艺中，贵金属催化剂易失活且再生难度大，成为该技术的瓶颈^[3, 4]；②甲醇氟化法不仅能耗偏高，而且催化剂稳定性不足，导致生产成本攀升^[5, 6]；③二甲醚氟化工艺面临着副产物繁多以及催化剂迅速失活的双重问题^[7, 8]；④硫酸二甲酯液相氟化工艺则伴随着大量含硫废水的排放，环境污染严重^[9, 10]；⑤气相催化氟化工艺（以氯甲烷为原料）因其高度的原子经济性和连续化生产特性，展示出了最大的产业化潜力^[11-14]。本研究采用铬基催化剂，深入探究了反应温度、停留时间及原料配比等关键因素对氟化反应的具体影响，为构建环境友好型的一氟甲烷（CH₃F）生产流程提供坚实的理论基础。

表2 一氟甲烷的刻蚀性能 ^[2] Tab. 2 Etching Characteristics of Fluoromethane					
气体	蚀刻速率			选择性	
	Si ₃ N ₄	SiO ₂	Si	Si ₃ N ₄ /SiO ₂	Si ₃ N ₄ /Si
CH ₃ F	26	1	2	26	13
CH ₂ F ₂	28	16	8	1.8	3.5
CHF ₃	145	55	61	2.6	2.3

一、实验材料和方法

（一）实验材料

活化的铬基催化剂、高纯氟化氢（HF）由绿菱电子材料（天津）有限公司提供。高纯的一氯甲烷（CH₃Cl）与氮气（N₂），均采购自瑞银气体销售有限公司。

（二）催化剂表征

1.X射线衍射（XRD）分析

催化剂活性成分的晶相构成采用 Rigaku SmartLab SE型 X射线衍射分析仪进行测试，测试流程严格依据标准《JY/T 0587-2020 多晶体 X射线衍射方法通则》执行。

2.比表面积（BET）分析

催化剂的比表面积数据通过 Micromeritics ASAP 2460型四站式全自动比表面积分析仪获得，整个测试流程严格遵循《GB/T 19587-2017 气体吸附 BET法测定固体物质的比表面积》。

3.X射线光电子能谱（XPS）分析

为了解析催化剂表面上铬元素（Cr）的化学态，采用岛津 Kratos Axis Ultra DLD型 X射线光电子能谱仪进行表征。测试的设定条件为，单色化的 Al Kα X射线作为激发源，其功率设置为 150 W，能量为 1486.6 eV（hν 值）。实施高分辨率的轨道扫描

以获取铬元素的氧化态信息。

4.NH₃程序升温脱附（NH₃-TPD）分析

催化剂的酸性特性通过 NH₃程序升温脱附（NH₃-TPD）技术进行表征，该测试在 AMI-300型化学吸附分析仪上实施。具体的实验操作步骤如下，将样品置于氦气（He）氛围中，以 20 °C / min 的升温速率加热至 800°C，并在此温度下吹扫 30 min 以净化表面，待样品冷却至室温后，通入氨气（NH₃）直至其达到吸附饱和和状态，再次使用氮气吹扫，直至无法检测到吸附气体的信号，以 10 °C /min 的升温速度将样品加热至 800°C，同时利用仪器内置的热导检测器（TCD）实时监测并记录脱附信号。

（三）反应性能评价

在自制的 Inconel 合金材质、尺寸为 Φ14×600 mm 的管式固定床反应器内（装置简图见图1）开展反应性能评估实验。高纯度的氟化氢（HF）和一氯甲烷（CH₃Cl）气体分别密封于专用钢瓶中，经由减压阀稳定压力后，通过 D07-19B 型质量流量计（北京七星华创公司）精确调控其流量，所有流量计均已经皂膜流量计校准以保证其精确度。原料气体在配备有电加热保温措施的管道中输送至混合室进行充分混合，然后通入反应器内，该反应器内填装了 20 毫升活化处理后的铬基催化剂。反应生成的产物气体依次经过 10% 浓度的氢氧化钾（KOH）溶液洗涤、去离子水洗涤

以及硅胶干燥处理后,采用气相色谱仪(GC)进行成分检测与分析。本实验系统地探究了反应温度、气体停留时间以及氟化氢与一氯甲烷的摩尔比($n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})$)等因素对反应性能的影响。

产物的定量分析采用岛津GC-2010型号的气相色谱系统,该系统装备有氢火焰离子化检测器(FID)。色谱柱选用的是J&W Scientific的PoraPLOT Q型毛细管柱,尺寸为30m长、0.32mm内径,使用的载气为高纯氮气,柱前的压力设定为0.1 MPa。程序的升温流程为,初始30℃维持1 min,以5℃/min的速率升温至50℃并保持5 min,最后以10℃/min的速率继续升温直至200℃并完成检测。进样口的温度设定为200℃,检测器的温度则设定为230℃,同时,检测器所需的气体流量分别设定为氢气40ml/min、空气400ml/min。

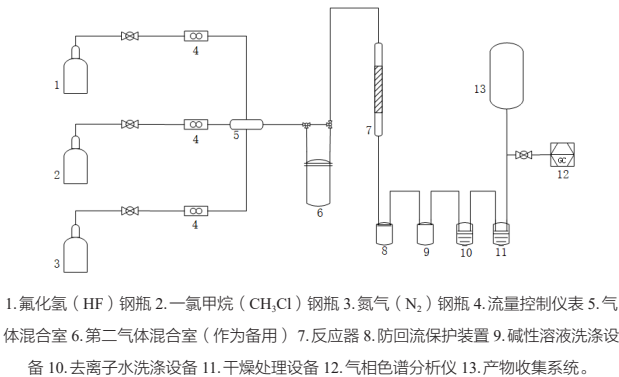


图1 反应性能评价装置图

Fig. 1 Reaction Performance Evaluation Apparatus Diagram

二、结果和讨论

(一) 催化剂的物相结构

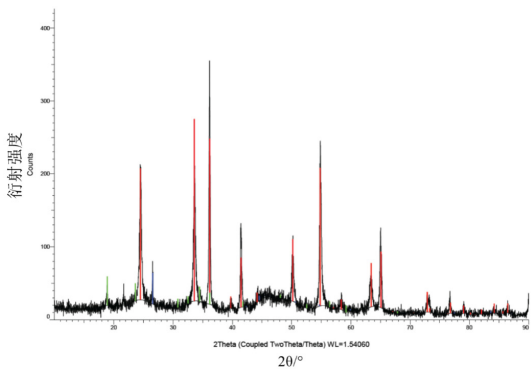


图2 活化后铬基催化剂的XRD衍射图谱

Fig. 2 XRD Diffraction Pattern of Activated Chromium-Based Catalyst

图2呈现了活化后的铬基催化剂的X射线衍射(XRD)图谱。将所得图谱与标准卡片(编号01-073-6214)进行对比后,可以观察到,所有的特征衍射峰位置,例如 2θ 角为 24.5° 、 33.6° 、 36.2° 等处,均与六方晶系的 Cr_2O_3 相吻合。值得注意的是,催化剂在活化前后的衍射峰位置及其相对强度均未发生显著的变化,这说明活化处理后的催化剂依旧维持了 Cr_2O_3 晶体的完整结构,未出现明显的晶型变化或是新相的生成。这一发现进一步

证明活化处理主要作用于催化剂的表面性质,而对催化剂的内部体相结构影响甚微。

(二) 催化剂的比表面积

图3展示了活化后铬基催化剂的BET比表面积分析图。根据测试结果,该催化剂的比表面积达到了 $74.67 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$,这一数值相较于常规的铬基催化剂有所增大。比表面积的增大不仅意味着反应物分子能够接触到更多的活性位点,同时也促进了反应物和生成物在催化剂内部的传质与扩散过程,进而对提升催化反应的活性起到了积极的作用。

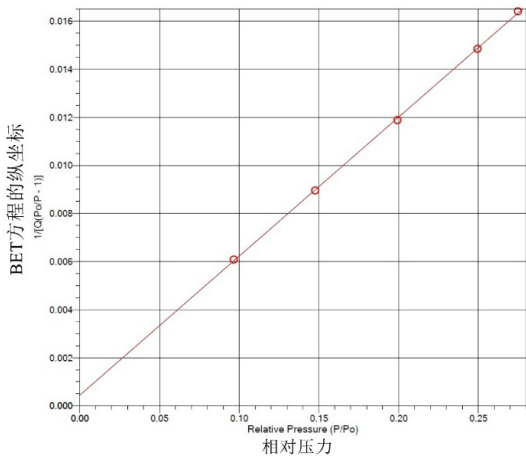


图3 活化后铬基催化剂的BET图

Fig. 3 BET Diagram of Activated Chromium-Based Catalyst

(三) 催化剂表面Cr的化学状态分析

图4呈现了活化后铬基催化剂的X射线光电子能谱(XPS)图。通过高分辨率XPS图谱的深入分析,可以发现催化剂表面的铬元素主要呈现出两种氧化态,即 Cr^{3+} 和 Cr^{6+} 。根据XPS分峰拟合及定量分析的结果(详见表3), Cr^{6+} 的相对占比高达88.3%,而 Cr^{3+} 仅占11.7%。这种显著的价态分布差异($\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 比值约为7.5)清晰地表明,高价态的 Cr^{6+} 物种在催化剂的表层占据了主导地位。结合现有的文献资料^[15],可以推断,由于 Cr^{6+} 具备更强的氧化能力和更为活跃的表面性质,它极有可能是该催化体系中的核心活性位点。

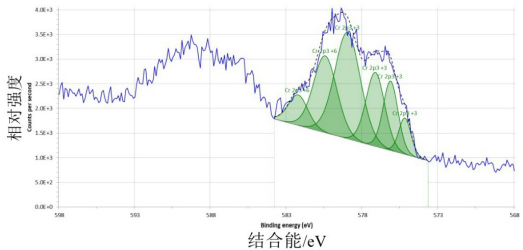


图4 活化后铬基催化剂的XPS光谱图

Fig. 4 XPS Spectra of Chemical States for Activated Chromium-Based Catalyst

表3 活化后铬基催化剂表面不同价态Cr的含量表
Tab. 3 Quantitative Distribution Table of Cr Valence States on Activated Chromium-Based Catalyst Surface

元素	价态	占比(%)
Cr	+3	11.7
	+6	88.3

(四) 催化剂的表面酸性

图5描绘了活化后的铬基催化剂的NH₃程序升温脱附(NH₃-TPD)测试结果。根据酸性位点的分类标准,脱附温度在100-300℃范围内的峰对应弱酸位点,300-500℃范围内的峰代表中强酸位点,而脱附温度超过500℃的峰则归属于强酸位点^[16]。测试结果显示,该催化剂的氨气脱附峰主要集中于500℃以上的高温区,清晰地指示其表面含有大量的强酸性位点。这一显著的强酸性特征与前述氟氯交换反应的机理报道相吻合,强酸位点能够高效地活化C-Cl键,从而加速氟氯交换反应的进程^[16]。综合前期的表征结果,这种卓越的酸性特性与高比例的Cr⁶⁺物种含量(达到88.3%)之间存在着紧密的关联,进一步凸显了该催化剂在促进氟氯交换反应方面所表现出的显著优势。

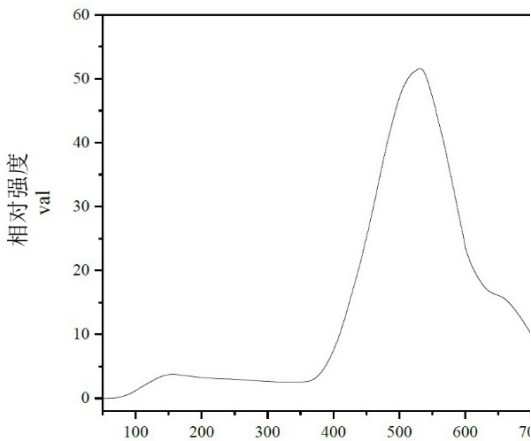


图5 活化后铬基催化剂的NH₃-TPD分析图

Fig. 5 NH₃-TPD Profile for Activated Chromium-Based Catalyst

(五) 工艺条件对反应性能的影响

1. 反应温度对反应性能的影响

反应温度是影响催化反应性能的重要因素之一。实验表明,在停留时间为10秒、HF和CH₃Cl摩尔比为10的条件下,随着反应温度由260℃升至300℃,反应转化率呈现逐渐增加的趋势,从9.38%增加到22.36%。这符合阿伦尼乌斯方程的规律,即提高温度会增加反应物分子的有效碰撞频率,从而促进反应进行。随着温度的升高,选择性在260-270℃略微提高,然而在280℃后开始下降,最终降至93.60%,暗示高温可能会导致副反应发生或催化剂活性位点烧结。当温度达到300℃时,反应转化率达到了峰值,在这种情况下由于选择性下降,最终收率仅略有增加至20.93%,揭示了温度对反应性能的双重影响。虽然高温可以提高反应速率,同时可能降低催化剂的选择性。综合比较,发现290℃是比较适合的反应温度。实验结果表明在催化反应中,适当的温度选择对于实现良好的反应转化率、选择性和收率具有重要意义。

表4 转化率、选择性和收率随反应温度的变化表
Tab. 4 Temperature-Dependent Table: Conversion, Selectivity and Yield

反应温度(℃)	转化率(%)	选择性(%)	收率(%)
260	9.38	98.08	9.20
270	16.64	98.62	16.41
280	19.36	97.83	18.94
290	21.74	95.81	20.83
300	22.36	93.60	20.93

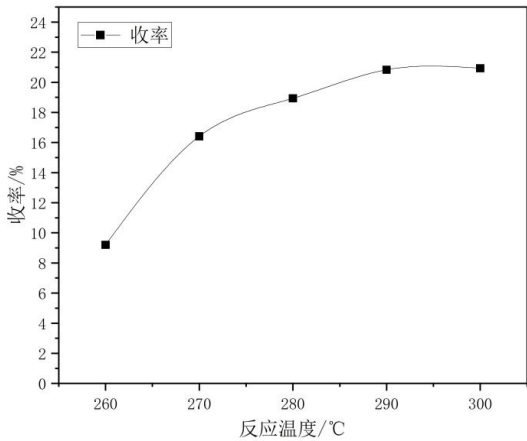


图6 收率随反应温度的变化图

Fig. 6 Yield vs. Reaction Temperature Profile

2. 停留时间对反应性能的影响

有效停留时间是影响反应性能的重要参数之一。实验结果显示,在290℃、HF和CH₃Cl摩尔比为10的条件下,随着停留时间的增加,反应转化率呈现上升趋势,这是因为更长的停留时间增加了反应物与催化剂之间的接触机会。然而选择性却表现出相反的趋势,说明过长的停留时间可能引发副反应。这种现象揭示出停留时间存在一个“临界值”效应,超过这个值后,转化率的提高已无法弥补由于选择性损失带来的不利影响。根据实验结果,建议将停留时间控制在10秒左右,以达到最佳反应效果和最高产率。在化工生产过程中,适当调整停留时间可以提高反应效率,避免不必要的副反应发生,从而提高产品质量和产率。

表5 转化率、选择性和收率随停留时间的变化表
Tab. 5 Residence Time-Dependent Table: Conversion, Selectivity and Yield

停留时间(s)	转化率(%)	选择性(%)	收率(%)
5	19.01	97.21	18.48
8	21.45	96.50	20.70
10	21.74	95.81	20.83
15	22.18	92.65	20.55
20	22.94	89.49	20.53

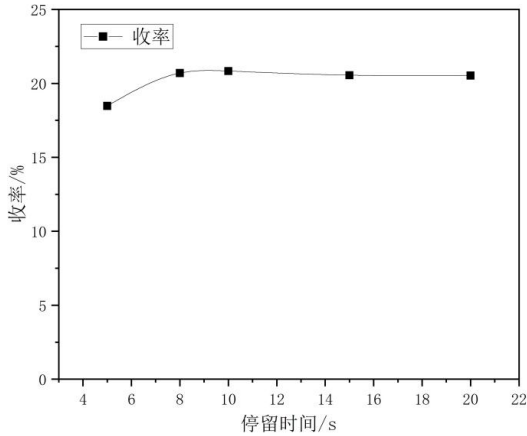


图7 收率随停留时间的变化图

Fig. 7 Yield vs. Residence Time Profile

3. 原料配比对反应性能的影响

根据实验结果,在290℃下反应10秒时,当HF与CH₃Cl

的摩尔比从2:1增至10:1时, 转化率显著提高, 这是因为过量的 HF 促进了反应向正向移动。在配比为5:1时, 选择性达到了峰值97.20%, 在更高的配比下略有下降, 这充分反映出过量的 HF 可能导致副反应的发生。收率的变化呈现出两个阶段: 从9.68%跃升至20.83%, 主要受到转化率提高的影响 ($n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=2:1 \rightarrow 10:1$); 收率稳定在20.74%–20.97%之间, 此时转化率的增加与选择性的下降相互抵消 ($n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=10:1 \rightarrow 20:1$)。从经济的角度考虑, 推荐采用10:1的配比。

表6 转化率、选择性和收率随原料配比的变化表

$n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})$	转化率 (%)	选择性 (%)	收率 (%)
2	10.04	96.41	9.68
5	18.24	97.20	17.73
10	21.74	95.81	20.83
15	21.48	96.55	20.74
20	21.87	95.88	20.97

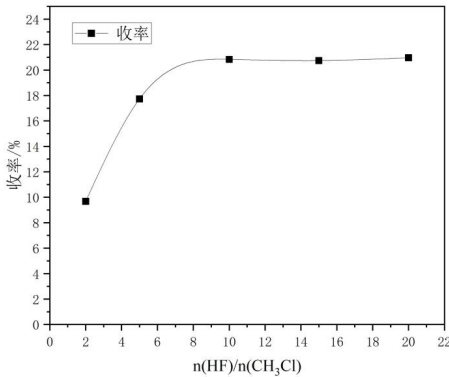


图8 收率随原料配比的变化图

Fig. 8 Yield vs. Reactant Molar Ratio Profile

参考文献

[1]何红振, 张冲, 宋新巍, 等. 一氟甲烷的合成与纯化研究进展 [J/OL]. 化学推进剂与高分子材料, 2022, 20(6): 13–24.

[2]耿谦, 张琴, 姚刚. 一氟甲烷制备与提纯技术研究进展 [J]. 低温与特气, 2022, 40(2): 5–8.

[3]唐浩东, 周楠, 张庆, 等. 一种 Pd–M 合金负载型催化剂制备一氟甲烷的方法: CN109824473B [P/OL]. 2022–03–01.

[4]刘武灿, 张金柯, 金佳敏, 等. 一种一氟甲烷的制备方法: CN104016829A[P/OL].

[5]闫浩, 周晓猛, 郭一博, 等. 一种氟化合成一氟甲烷的方法: CN118851862A[P/OL].

[6]张奎, 林德荣, 杨青, 等. 使用新型催化剂制备氟甲烷的新方法: CN112939726A[P/OL].

[7]张呈平, 杨刚, 郭占英, 等. 一氟烷烃的制备方法 [P/OL]. 2022–03–01.

[8]杨刚, 贾晓卿, 权恒道. 一种从烷基醚气相制备氟代烷烃的方法: CN107739293A[P/OL].

[9]李金龙, 耿谦, 徐海云, 等. 一种一氟甲烷的制备方法: CN112898114A[P/OL].

[10]Method for manufacturing methyl fluoride: 9919990[P/OL]. 2018–03–20.

[11]ZHU Y, FIEDLER K, RÜDIGER St., 等. Aliovalent–substituted chromium–based catalysts for the hydrofluorination of tetrachloroethylene[J/OL]. Journal of Catalysis, 2003, 219(1): 8–16.

[12]BOESE O, UNGER W E S, KEMNITZ E, 等. Active sites on an oxide catalyst for F/Cl–exchange reactions: X–ray spectroscopy of fluorinated γ –Al₂O₃[J/OL]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2002, 4(12): 2824–2832.

[13]ALONSO C, MORATO A, MEDINA F, 等. Effect of the aluminium fluoride phase for the Cl/F exchange reactions in CCl₂F₂ (CFC–12) and CHClF₂ (HCFC–22)[J/OL]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 40(4): 259–269.

[14]KRISHNA MURTHY J, GROSS U, RÜDIGER S, 等. Mixed metal fluorides as doped Lewis acidic catalyst systems: a comparative study involving novel high surface area metal fluorides[J/OL]. Journal of Fluorine Chemistry, 2004, 125(6): 937–949.

[15]汪云, 张文霞, 宋建冬, 等. Cr₂O₃ 催化剂催化氟化 2–氯–1,1,1–三氟乙烷合成四氟乙烷 [J]. 有机氟工业, 2018(2 vo): 5–10.

[16]HE J, ZHANG M, ZHOU B, 等. Catalytic Gas–phase Fluorination of Hexachlorobutadiene to 1,2–Dichlorotetrafluorocyclobutene over Cr/Zn–based Catalysts[J/OL]. Journal of the Chinese Chemical Society, 2018, 65(6): 760–770.

三、结论

催化剂表征研究表明, 活化后的铬基催化剂保持了完整的 Cr₂O₃ 晶体结构, 具有较大的比表面积和丰富的强酸性位点, 催化剂表面主要有 Cr⁶⁺ 物种存在, 是主要的活性中心。对气相催化氟化合成一氟甲烷反应条件的优化研究发现反应温度、停留时间以及原料比对反应性能有显著的影响。在反应温度为290℃, 停留时间为10秒以及 $n(\text{HF})/n(\text{CH}_3\text{Cl})=10$ 的条件下, 一氟甲烷的收率达到了最优值20.83%。这项研究为开发高效且环保的一氟甲烷生产工艺提供了理论支持, 有望推动其在半导体制造等领域的应用。