

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7期 2025年7月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《现代工程学》编辑部

ISSN(O): 2996-6981

ISSN(P): 2996-6973

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

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

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

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



建筑工程 | ARCHITECTURAL ENGINEERING

- 001 城中村改造项目中工程造价管理的难点与对策 麻宏伟
Difficulties and Countermeasures of Engineering Cost Management in
Urban Village Renovation Projects Ma Hongwei
- 004 钢结构施工技术及其现场施工管理分析 王雪涛, 王连生
Analysis of Steel Structure Construction Technology and Its On-site
Construction Management Wang Xuetao, Wang Liansheng
- 007 国际工程量清单准确性保障措施及管控要点 黄景斌
Measures for Ensuring the Accuracy of International Bill of Quantities
and Key Control Points Huang Jingbin
- 010 浅谈 BIM 技术在双曲幕墙项目中的研究与应用 刘佳, 刘冲, 姜远振, 廖红玉
A Brief Discussion on the Research and Application of BIM Technology
in Hyperbolic Curtain Wall Projects Liu Jia, Liu Chong, Jiang Yuanzhen, Liao Hongyu
- 013 公路路基施工质量通病成因及处理对策分析 程超, 朱凯迪
Analysis of the Causes and Countermeasures of Common Quality Problems
in Highway Subgrade Construction Cheng Chao, Zhu Kaidi
- 016 桥梁隧道施工常见问题与控制对策分析 何路青
Analysis of Common Problems and Control Countermeasures in
Bridge and Tunnel Construction He Luqing
- 019 水下机器人在大坝面板裂缝检测中的应用 李浪艇, 蒋才洋, 石朝波
Application of Underwater Robots in Dam
Face Slab Detection Li Langting, Jiang Caiyang, Shi Chaobo
- 022 高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制分析 魏巍
Analysis of Technical Management and Quality Control in the
Construction Process of Expressway Bridges Wei Wei
- 025 房建工程质量控制要点及优化措施 张金玉, 张小华, 刘翔, 谭龙宇, 赵浩汀
Key points and Optimization Measures for Quality Control of Building Construction
Projects Zhang Jinyu, Zhang Xiaohua, Liu Xiang, Tan Longyu, Zhao Haoting
- 028 浅谈高强混凝土配合比设计质量控制与研究 刘佳, 刘冲, 廖红玉
A Brief Discussion on Quality Control and Research of Mix Proportion
Design for High-Strength Concrete Liu Jia, Liu Chong, Liao Hongyu

机械工程 | MECHANICAL ENGINEERING

- 031 基于 CAESAR II 的高温高压管道应力分析与柔性优化研究 刘锐
Research on Stress Analysis and Flexibility Optimization of High-Temperature and
High-Pressure Piping Based on CAESAR II Liu Rui
- 035 液压抓料机动臂油缸减振液压系统的研究 张国栋
Research on the Damping Hydraulic System for the Boom Cylinder
of Hydraulic Grab Machines Zhang Guodong
- 039 分级破碎设备破碎齿成型工艺的研究应用 黄身水, 马秋乐, 吴彪, 赵国亮, 龙福强, 贾海洋
Research and Application of Forming Process for Crushing Teeth in Classification
Crushing Equipment Huang Shenshui, Ma Qiule, Wu Biao, Zhao Guoliang,
Long Fuqiang, Jia Haiyang

043	冷藏展示柜产品研发中的技术创新与机械原理应用 Technological Innovation and Mechanical Principle Applications in Refrigerated Display Cabinet Product Development	潘颂山 Pan Songshan
046	珠宝及贵金属检验检测技术的创新与发展 Innovation and Development of Jewelry and Precious Metal Inspection and Testing Technology	刘芬 Liu Fen
049	基于正交两点法的精密数控镗铣床主轴回转精度研究 Research on Spindle Rotation Accuracy of Precision CNC Boring and Milling Machine Based on Orthogonal Two Point Method	王林, 廖广宇, 赵彦鹏, 廖之溥, 杨军, 邱海莲 Wang Lin, Liao Guangyu, Zhao Yanpeng, Liao Zhipu, Yang Jun, Qiu Haitian
052	老旧电梯传动机构能效提升改造关键技术与应用 Key Technologies and Applications for Energy Efficiency Improvement and Renovation of Old Elevator Drive Mechanisms	张立红 Zhang Lihong
055	影响铝挤压模具寿命的因素探讨 Research on Factors Affecting the Service Life of Aluminum Extrusion Dies by	郑健全, 邹村先, 吴锡坤, 梁金鹏 Zheng Jianquan, Zou Cunxian, Wu Xikun, Liang Jinpeng

能源工程 | ENERGY ENGINEERING

058	石油化工领域润滑油检测技术的研究进展与应用 Research Progress and Application of Lubricant Testing Technology in the Petrochemical Field	林华慧 Lin Huahui
061	高密度电阻法在地下水污染区边界圈定与水源筛选中的协同应用 Collaborative Application of High-Density Resistivity Method in Boundary Delineation of Groundwater Contamination Zones and Selection of Water Source Areas	马维龙, 李国栋, 赵剑, 陈海江, 王康, 刘红岩, 丁禹达 Ma Weilong, Li Guodong, Zhao Jian, Chen Haijiang, Wang Kang, Liu Hongyan, Ding Yuda
065	PLC变频节能技术在电气自动化设备中的应用 Application of PLC Variable Frequency Energy-Saving Technology in Electrical Automation Equipment	侯雪 Hou Xue
068	昭通市金沙江干热河谷区水土保持林建设与生态修复技术示范应用 Demonstration Application of Soil and Water Conservation Forest Construction and Ecological Restoration Technology in the Dry Hot Valley of Jinsha River, Zhaotong City	王继盛, 周洪川 Wang Jisheng, Zhou Hongchuan
071	智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统 Smart Power Plant Based On Digital Twin Simulation And Optimization System Of The Whole Process	韩夫水, 蒋俊英, 赵春丽, 王龙 Han Fushui, Jiang Junying, Zhao Chunli, Wang Long
074	地下停车场阳光节能系统——光导纤维与传感器在地下停车场中的应用研究 Solar Energy-saving System For Underground Parking Lots Research on the Application of Optical Fibers and Sensors in Underground Parking Lots	辛海琦, 庞婉茹, 王宇翔, 余明睿, 高士娟 Xin Haiqi, Pang Wanru, Wang Yuxiang, Yu Mingrui, Gao Shijuan
078	协同治理视域下恩施州古树保护与民族文化遗产的主体博弈及制度创新研究 From the Perspective of Collaborative Governance: A Study on Subject Game and Institutional Innovation in Ancient Tree Protection and Ethnic Cultural Inheritance in Enshi Prefecture	辛贤实, 张力 Xin Xianshi, Zhang Li
082	智慧城市背景下市政给排水工程的数字化管理研究 Research on Digital Management of Municipal Water Supply and Drainage Engineering under the Background of Smart Cities	张建 Zhang Jian
085	黄石盘水库工程坝址区软弱夹层分布特征 Distribution Characteristics of Weak Interlayer in Dam Site Area of Huangshipan Reservoir	张全 Zhang Quan
088	电力电缆故障诊断研究综述 Review of Research on Fault Diagnosis of Power Cables	程子霞, 李子扬, 李弈杰 Cheng Zixia, Li Ziyang, Li Yijie
091	沼液改性小球藻强化 Cd ²⁺ 的生物吸附性能研究 Research on the Biosorption Performance of Cd ²⁺ Enhanced by Anaerobic Digestion Effluent Modified <i>Chlorella Vulgaris</i>	潘志豪, 韩东宇, 刘柏含, 杜彦强, 陈俊华, 刘翠霞 Pan Zhihao, Han Dongyu, Liu Bohan, Du Yanqiang, Chen Junhua, Liu Cuixia

信息工程 | INFORMATION ENGINEERING

094	铝电解天车无线微波传输技术研究与应用 Research and Application of Wireless Microwave Transmission Technology for Aluminum Electrolysis Crane	张洋, 练新强 Zhang Yang, Lian Xinqiang
098	基于遗传算法的 SLP 在工厂设施布局中的应用 Application of SLP Based on Genetic Algorithm in Factory Layout	程晓伟 Cheng Xiaowei
101	基于 Android 系统的无人机航拍技术优化 Optimization of UAV Aerial Photography Technology Based on Android System	雷静 Lei Jing
104	微波射频接收机低噪声前端电路工程实现方案优化 Optimization of Engineering Implementation Plan for Low-Noise Front-End Circuit of Microwave RF Receiver	耿同贺, 姜兆国 Geng Tonghe, Jiang Zhaoguo
107	基于人因工程的化工厂安全信息设计研究进展 Research Progress of Safety Information Design in Chemical Plant Based on Human Factors Engineering	方长青, 方浩 Fang Changqing, Fang Hao

城中村改造项目中工程造价管理的难点与对策

麻宏伟

广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025070009

摘 要： 城中村改造项目工程造价管理存在诸多难点，如项目特征复杂、成本构成多元、实施模式局限、政策协同不足、技术动态控制困难、经济风险叠加、多方利益博弈等。深圳、上海等地及国外相关改造实践提供了经验借鉴，可通过构建动态补偿标准、搭建协同平台等策略提升管理水平，未来还需聚焦智能化与可持续发展。

关 键 词： 城中村改造；工程造价管理；成本控制

Difficulties and Countermeasures of Engineering Cost Management in Urban Village Renovation Projects

Ma Hongwei

Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： There are many difficulties in the cost management of urban village renovation projects, such as complex project characteristics, diverse cost components, limited implementation modes, insufficient policy coordination, difficulties in controlling technological dynamics, overlapping economic risks, and multi-party interest games. Shenzhen, Shanghai and other places, as well as relevant renovation practices abroad, have provided experience and reference. Management level can be improved through strategies such as establishing dynamic compensation standards and building collaborative platforms. In the future, there is a need to focus on intelligence and sustainable development.

Keywords： urban village renovation; engineering cost management; cost control

引言

2023年7月《关于在超大特大城市积极稳步推进城中村改造的指导意见》为改造指明方向。城中村因密度高、产权杂、设施弱，造价管理面临模式局限、政策协同不足、技术控制难等多重挑战。借鉴深圳、上海及新加坡、柏林经验，仍需创新策略。应制定动态补偿标准，搭建跨部门协同平台，强化技术应用与风险管控，提升造价管理效能，推动城中村改造高效、高质量实施，助力城市可持续更新。

一、城中村改造工程造价管理现状分析

（一）改造项目特征与成本构成

城中村改造项目具有显著特征。其建筑物密度高，各类建筑鳞次栉比，这增加了改造的空间规划难度与施工难度。同时，产权极为复杂，涉及多种产权归属，理清产权关系耗时费力。并且基础设施薄弱，水电气、道路等基础配套老化落后，需大量资金进行更新改造。从成本构成看，土地征收成本是重要部分，需依规给予原土地所有者合理补偿。拆迁补偿成本同样关键，要对村民、商户等各类被拆迁主体支付补偿费用。公共配套设施建设成本也不可或缺，包括新建学校、医院、公园等设施，旨在提升城中村居民生活品质。这些项目特征与成本构成要素，共同构成了城中村改造工程造价管理的基础与难点^[1]。

（二）现行管理模式及其局限性

在城中村改造项目中，当前主要存在政府主导与市场化运作

等实施模式。在政府主导模式下，造价控制多遵循传统行政指令方式，虽能保证改造方向符合规划，但决策流程相对冗长，易导致项目周期延长，增加成本风险。市场化运作模式则依靠市场主体，虽灵活性高，但市场主体逐利性易使造价控制偏离合理范围。同时，现行管理模式面临诸多局限性。定额标准滞后于市场变化，新技术、新材料不断涌现，而定额更新不及时，无法准确反映实际成本。动态调价机制缺失，面对物价波动、政策调整等因素，难以实时调整造价，易造成结算与预算偏差较大，影响项目成本控制与资金合理使用^[2]。

二、工程造价管理难点解析

（一）政策层面协同机制不足

城中村改造项目中，政策层面协同机制不足给工程造价管理带来诸多难点。土地征收政策与市场评估标准存在矛盾^[3]。土地

征收往往依据特定政策执行，注重公共利益导向，补偿标准相对固定；而市场评估更侧重市场价值，受房地产市场波动影响大。这导致征收补偿金额与市场实际价值可能脱节，若按征收政策补偿，可能引发居民不满，增加协调成本，推高工程造价；若按市场评估，政府财政负担可能加重。同时，地方政府财政承受能力与居民安置诉求的协调也陷入困境。政府需在有限财政资源下完成改造任务，而居民期望高质量、高补偿的安置，双方诉求差异大，若协调不当，易引发矛盾冲突，阻碍项目进程，导致工期延误和费用增加，影响工程造价管理的稳定性与可控性。

（二）技术层面动态控制困难

城中村改造项目中，技术层面的动态控制困难是工程造价管理的一大难点。城中村情况复杂，涉及众多历史建筑保护性改造与地下管网改造等隐蔽工程，这使得动态控制充满挑战。在历史建筑保护性改造中，由于建筑年代久远、资料缺失，难以精准预估修缮所需材料、工艺及人工成本，施工过程中可能因新发现的结构问题等导致成本变动，给动态控制带来阻碍。地下管网改造的隐蔽工程计量争议也增加了动态控制难度，地下管线分布不明，实际施工与前期探测可能存在差异，变更频繁，难以实时准确掌握工程量与成本变化，影响动态控制效果，进而对工程造价管理形成挑战^[4]。

（三）经济层面风险因素叠加

在城中村改造项目中，经济层面风险因素叠加给工程造价管理带来诸多挑战。一方面，建材价格波动频繁，市场环境复杂多变，难以精准预测。如近年来钢材、水泥等主要建材价格受供求关系、政策调控及国际形势等影响起伏不定，使得预算编制与实际成本出现较大偏差^[5]。另一方面，劳动力成本持续攀升，随着社会发展，人工费用不断上涨，且熟练技术工人短缺，进一步推高成本。同时，融资成本控制与资金链安全保障压力巨大。城中村改造项目投资规模大、周期长，融资难度高，利率波动等因素会增加融资成本。若资金链断裂，不仅会导致工程延误，还会产生额外费用，严重影响工程造价管理，增加成本超支风险。

（四）管理层面多方利益博弈

在城中村改造项目工程造价管理中，管理层面多方利益博弈构成显著难点。政府部门期望以合理成本推动改造，提升城市形象、完善公共服务，实现社会效益最大化^[6]。开发商则追求利润最大化，可能在保证质量前提下，尽量压缩成本、提高开发效率。而村民关注自身利益，期望获得足额补偿与良好安置，保障生活水平不降低。三方诉求差异明显，若协调不当，易引发矛盾冲突，进而导致成本超支风险。例如，村民补偿协商不畅，可能延误工期，增加额外成本。此外，全过程协同管理机制的缺位，使得各方缺乏有效沟通与协作平台，难以形成合力，各自为政的局面影响工程造价的有效控制，致使项目成本管理困难重重。

三、国内外城市更新项目经验借鉴

（一）国内典型案例分析

1. 深圳城中村综合整治模式

深圳城中村综合整治模式聚焦于改善城中村的居住环境、公共设施及安全条件等，而不进行大规模拆除重建，这一模式在成本控制上有着独特之处。在解析分层分类改造策略下，依据不同

城中村的特点，如建筑状况、人口结构、周边配套等，制定针对性的整治方案，从而精准投入资金，避免不必要的浪费。例如对于基础设施老化但建筑结构较好的区域，着重进行水电、消防等设施的更新改造。在政企合作 PPP 模式运作成效方面，通过引入社会资本，发挥其在资金、技术与管理上的优势，提升改造效率与质量。社会资本与政府共同参与项目全周期，在工程造价管理上形成合力，使得资金使用更为透明合理，在保障改造效果的同时实现成本有效控制^[7]。

2. 上海历史风貌区更新实践

上海历史风貌区更新实践在城中村改造项目的工程造价管理方面提供了宝贵经验。在保护性开发中，上海注重价值评估体系创新，不再单纯考量建筑的物质价值，而是综合历史、文化、社会等多维度价值，运用多元评估方法，精准衡量风貌区内建筑与空间的独特意义^[8]。同时，在历史建筑维修定额标准制定上，依据不同建筑年代、风格、损坏程度等，进行详细分类与标准细化，确保维修成本核算科学合理。通过这些实践，既实现对历史风貌的有效保护，又能在工程造价管理上做到精准把控，为城中村改造中涉及历史风貌保护区域的工程造价管理，提供了可资借鉴的模式，平衡保护与开发的成本投入，促进城市有机更新与历史文化遗产协调发展。

（二）国际城市更新项目启示

1. 新加坡组屋更新计划

新加坡组屋更新计划对城中村改造的工程造价管理具有重要启示。其长期预算规划制度为项目前期调研、设计、施工到后期维护提供清晰资金安排，确保资金合理分配与持续投入，避免因预算不足导致成本增加或工期延误^[9]。同时，居民共担机制鼓励居民参与并分担部分成本，既增强其责任感，又拓宽资金来源，减轻政府财政压力。两者协同作用，有效控制工程总成本，保障项目顺利推进，为城中村改造在资金统筹与成本分担方面提供了可借鉴的实践经验。

2. 柏林工业区改造经验

柏林工业区改造在成本管理方面为城中村改造提供有益借鉴^[10]。其注重全生命周期成本评估，统筹建设、运营及收益。改造中合理利用原有建筑与设施，减少拆除重建费用，保留工业特色。通过优化设计提升空间利用率，降低后期运营成本。例如，将废弃厂房改造为多功能创意园区，吸引企业入驻，既降低改造投入，又通过租金实现快速回报。这种全周期成本管理与精细化控制策略，有助于城中村改造实现资源高效利用与成本合理管控的平衡。

四、全过程造价管理优化策略

（一）政策协同机制建设

1. 动态补偿标准制定

城中村改造中，应构建基于土地增值预期的动态补偿模型，综合土地现状、规划与市场趋势，测算潜在增值。建立多方参与的价值评估体系，引入专业机构、村民代表与政府，确保评估透

明公正。借助大数据分析同类项目补偿与增值数据，为标准制定提供依据。并根据拆迁进度、市场变化等阶段特征，动态调整补偿标准，兼顾公平与效率。该机制有助于平衡各方利益，提升村民配合度，实现工程造价的合理控制与动态化管理。

2. 跨部门协同平台搭建

在城中村改造项目的全过程造价管理中，跨部门协同平台搭建至关重要。可利用现代信息技术，构建集住建、财政、街道办等多部门于一体的综合平台。此平台能实现各部门数据实时共享，比如住建部门的设计方案、施工进度数据，财政部门的资金预算、成本核算数据，街道办的民情反馈、拆迁进展数据等。通过信息的及时互通，打破部门间的信息壁垒，避免因信息不畅导致的造价偏差。同时，平台设置沟通交流板块，方便各部门就改造标准、成本核算口径等关键问题进行讨论协商，确保各方对造价管理目标达成共识，提高决策效率，进而实现对工程造价的有效控制与优化。

（二）技术创新与过程控制

1. BIM 技术集成应用

建立城中村改造 BIM 协同平台，可实现隐蔽工程的可视化模拟与精确计量。通过三维建模直观呈现结构与施工流程，帮助造价人员准确理解，减少误判。基于模型的自动算量功能，提升工程量计算的准确性与效率，降低人为误差。平台支持各参与方实时共享信息，打破壁垒，及时沟通设计变更与施工问题，协同调整。BIM 技术促进信息透明与高效协作，优化全过程造价管理，提升资金使用效率，助力项目精细化、智能化管控。

2. 全过程审计体系构建

构建城中村改造全过程审计体系，需建立覆盖决策、设计、施工、结算的动态审计模型。决策阶段审核投资估算，确保科学合理；设计阶段比选方案，控制造价源头；施工阶段跟踪审计，严控进度款与变更；结算阶段全面核查，保障费用准确。模型同步实施风险预警，实时识别潜在风险，提前干预，将问题化解于

萌芽。该体系实现全周期、动态化审计管理，有效提升造价管控能力，确保项目资金合理、安全、高效使用。

（三）经济风险管理体系

1. 价格波动应对方案

城中村改造中，价格波动显著影响工程造价。应构建基于大数据的建材与人工价格指数监测系统，实时采集数据，动态反映市场变化趋势。同时建立材料调差动态响应机制，设定合理调差阈值。当价格波动超限时，依合同规则及时启动调差程序，调整材料费用。通过监测系统与响应机制协同运作，提升对价格风险的预判与应对能力，有效控制成本波动，保障项目经济性与稳定性，实现工程造价的精细化、动态化管理。

2. 多元化融资模式创新

城中村改造需探索多元化融资模式以优化工程造价管理。可推行资产证券化，将项目未来稳定收益权（如租金）通过 SPV 发行证券，吸引社会资本，拓宽融资渠道，降低资金成本。同时推广社区基金，鼓励居民、企业共同出资，既增强公众支持，又补充资金来源。此类创新模式有效缓解财政压力，优化资金结构，提升资金使用效率，为项目全周期造价管理提供稳定、可持续的资金保障，助力改造顺利推进。

五、总结与展望

城中村改造工程造价管理面临拆迁补偿难统一、施工环境复杂等挑战。通过科学补偿方案与先进成本控制技术可提升管理水平，但仍需深化探索。未来应聚焦智能化成本预测，运用大数据与 AI 提高精度；加强可持续改造的经济评价，统筹效益平衡。亟需构建具有中国特色的城市更新成本管理体系，契合国情实际，推动改造项目高效、高质量实施，助力城市空间优化与可持续发展。

参考文献

- [1] 赵秋华. 保定市莲池区“城中村”改造的问题及对策研究 [D]. 北京交通大学, 2022.
- [2] 韦一爽. 城中村改造项目全生命周期成本管理研究——以广州 ZX 城中村项目为例 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [3] 叶伟忠. PPP 模式下“城中村”改造项目成本管理研究——以水南“城中村”改造二期项目为例 [D]. 浙江工业大学, 2023.
- [4] 张文惠. L 县城中村改造中的地方政府债务风险管理 [D]. 四川师范大学, 2021.
- [5] 张文燕. F 置业有限公司水岸名居城中村改造项目的成本控制研究 [D]. 江苏大学, 2021.
- [6] 黄丽莎, 周双双, 谢明晶. 城中村改造项目工程造价咨询工作重难点分析 [J]. 价值工程, 2021, 40(30): 77-80.
- [7] 姜岩, 龙小凤, 杨斯亮. 城中村改造与文化传承研究 [J]. 建筑与文化, 2021(7): 2-9.
- [8] 郝力. 浅谈工程造价管理中漏项与重复问题及改进对策 [J]. 建材发展导向 (上), 2021, 19(1): 305-306.
- [9] 安庆. 电力施工项目成本控制与工程造价管理策略 [J]. 居舍, 2021, (22): 118-119+121.
- [10] 吴伟英. BIM 在土木工程造价管理中的应用研究 [J]. 散装水泥, 2024, (01): 121-123.

钢结构施工技术及其现场施工管理分析

王雪涛, 王连生

石横特钢集团有限公司, 山东 泰安 271612

DOI:10.61369/ME.2025070011

摘 要 : 随着现代建筑工程的不断发展, 钢结构作为一种重要的建筑结构形式, 在世界范围内得到了广泛地应用。与传统的混凝土结构相比, 钢结构具有更高的强度、更轻的重量和更快的施工速度等诸多优势。然而, 钢结构施工过程中的技术要求和现场管理难题也相对复杂, 需要高效的施工技术和科学的现场管理来确保项目的顺利实施。本文针对钢结构施工技术及其现场施工管理展开分析, 以期对相关领域研究提供一些参考和借鉴之处。

关 键 词 : 钢结构; 施工技术; 施工管理

Analysis of Steel Structure Construction Technology and Its On-site Construction Management

Wang Xuetao, Wang Liansheng

Shiheng Special Steel Group Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271612

Abstract : With the continuous development of modern construction engineering, steel structures, as an important form of architectural structure, have been widely applied worldwide. Compared with traditional concrete structures, steel structures offer numerous advantages, including higher strength, lighter weight, and faster construction speed. However, the technical requirements and on-site management challenges during the construction process of steel structures are relatively complex, necessitating efficient construction techniques and scientific on-site management to ensure the smooth implementation of projects. This paper analyzes steel structure construction technology and its on-site construction management, aiming to provide some references and insights for research in related fields.

Keywords : steel structure; construction technology; construction management

当下, 钢结构在各类工程领域中取得了广泛应用。钢结构施工技术不仅革新了传统的建筑施工方式, 提升了建筑结构的安全性和稳定性, 更在节约资源、绿色环保和缩短工期等方面展现了巨大潜力。然而, 钢结构施工过程的复杂性以及对现场管理的高标准要求, 使得如何有效实施先进的钢结构施工技术并确保项目高效优质地完成成为行业关注的焦点。

一、钢结构概述

钢结构是一种主要由钢质材料（如型钢、钢板等）构成的建筑结构体系, 它通过焊接、螺栓连接或铆接等方式将各个部件组合成整体, 形成具有足够承载力和稳定性的结构体。如下图一所示, 为钢结构建筑。钢结构以其独特的性能特点, 在现代建筑中得到了广泛应用。详细而言, 其特点体现在以下几点: 首先, 材料韧性优良。钢结构所应用的材料为钢质材料, 这使得钢结构具有很高的强度。究其原因, 钢制材料无论是在塑性还是在韧性方面都要优于其他建筑材料, 即使短时间内有超载现象, 也基本不会导致结构断裂, 在屈服强度内一般会弯曲。正因为其能够适应

较高的荷载力, 所以充分体现出了它韧性优良的特点^[1]。与此同时, 钢结构具备理想的延伸性与抗震性, 应用于建筑中, 可抵抗建筑主体强烈震动。加上钢结构具备理想材料强度, 因此即使构件截面相较于其他材质更薄更小, 其稳定性也依然理想。这也是钢结构适用于大部分建筑结构的重要原因。其次, 较轻的自重。钢质材料的比重和混凝土等其他材料相比要更大一些, 同时具备较大强度。此外, 由于钢结构运抵施工现场, 可能运输距离较长, 钢结构恰好可因为自重较轻的优势, 利于长距离运输。基于上述特点, 钢结构广泛应用于各类建筑物中, 包括但不限于工业厂房、大型商业综合体、体育场馆、机场航站楼、桥梁、塔桅、高层住宅及办公楼等。



图一 钢结构建筑

二、钢结构对于建筑领域的重要性

当下，钢结构对于建筑领域的重要性不容忽视，主要体现在以下几个方面：第一，强化了设计的灵活性与创新性。钢结构由于其良好的塑性和可加工性，设计师可以根据建筑功能和美学需求，灵活地进行各种复杂形状和空间布局的设计，例如大跨度结构、悬挑结构、不规则曲面结构等，从而实现更多元化和富有创意的建筑设计表达。第二，提升了经济性能。虽然初期投资成本可能相对较高，但从长远角度看，钢结构因其快速建造速度以及耐用、维护费用低等特点，综合经济效益较为显著^[2]。尤其对于大型公共建筑和高层建筑而言，钢结构的优势尤为突出。第三，增强建筑适应性。钢结构适用于各种复杂的地理环境和气候条件，无论是在严寒地区还是热带雨林地区，都能通过不同的防腐、保温措施确保结构耐久稳定。同时，钢结构也适合用于改造和扩建项目，因为空间布置调整相对容易。第四，促进资源节约与可持续发展。钢材是一种可循环利用的绿色建筑材料，钢结构建筑在使用寿命结束后，大部分材料可以回收再利用，减少了对自然资源的消耗。同时，钢结构的轻量化特性也有助于降低建筑物在全生命周期内的能耗，符合当今社会对节能减排和可持续发展的要求。总而言之，钢结构在现代建筑领域具有了举足轻重的地位，并随着科技进步和绿色建筑理念的发展，其应用将更加广泛深入。

三、钢结构施工技术

（一）结构设计与选材

根据建筑功能需求和使用环境，进行结构体系的选择、计算和优化设计。设计师利用相关软件进行三维建模，并通过力学分析确保结构的强度、稳定性和刚度满足规范要求。由于钢材的材质和质量决定了钢结构的性能和质量，所以对于钢材类型的选择要格外的慎重。要根据建筑的设计方案和力学性能、耐腐蚀性等因素来选用合适的钢材类型^[3]。在钢材下料时，要根据设计图纸进行精确的尺寸切割，包括型钢截断、钢板剪切或数控切割等操作。必须要按照相应的要求和标准对钢材进行加工制作，对钢材进行打孔、弯折、焊接等加工处理，形成各种预组装的钢结构单元件，如梁、柱、桁架、网架等。每一步加工过程都需要严格的质量检测，确保每个构件尺寸准确、焊缝质量达标。

（二）预埋件施工技术

预埋件依照形式，可分成爪式预埋件、槽式预埋件和平板式预埋件，可完成钢结构水平力和竖向荷载的传递，保证钢结构与混凝土连接的牢固性。锚筋和钢板等进场时，应复核相关证明，

做好力学性能检验，焊接方式可采用手工电弧焊或埋弧自动焊，保证焊缝质量达标。焊后需将焊渣及时清除干净，并做无损检测。预埋件应结合图纸坐标完成测量放线，若预埋件较小，可在主体钢筋焊接在钢筋支架上，或在模板上固定螺栓；若预埋件较大，应增设剪刀撑，和柱钢筋、梁钢筋妥善焊接，避免被混凝土浇筑冲击力破坏。预埋件锚筋应当配合主体钢筋位置，若存在冲突现象，应以预埋件位置为先，并对主体钢筋进行局部调整。预埋件和模板接触面应保证平整，若有必要，应垫入海绵条避免漏浆。若预埋件外路面贴合模板，应提前留出排气孔，防止浇筑时空鼓。混凝土振捣棒和预埋件的距离应超过30cm，防止钢板振捣时导致移位。浇筑混凝土后，应将预埋件表面锈迹和浮浆清理干净，方便钢结构的连接。若预埋件暂时未连接，应刷好防锈漆避免腐蚀。

（三）连接技术

铆接、焊接和螺栓连接，都是常见的钢结构连接方式。以螺栓连接为例，应选择高强度螺栓，使螺栓受力性能达标，并保证弹簧垫数量和螺栓数量配套。同时，在使用螺栓连接这种方式的过程中，要注意将螺栓紧固工作以及安装部位标定工作做好。对于焊接这种方式而言，在施工方法上具有多样性，可选用的方法较多，比如：保护焊和埋弧焊以及气焊等。在进行焊接过程中要注意两个问题，那便是焊接温度以及焊缝质量的保证，究其原因，这两个因素会对钢结构的性能产生巨大影响。所以，一定要按照设计要求来选用合适的焊接技术，其操作流程要完全按照标准进行^[4]。在钢结构施工中，铆接这种方式的应用相对较少。铆接可以分为热铆与冷铆两种。这两种方式各有优势和不足。在这其中，利用热铆这种方式，会使得钉杆与钉孔出现间隙，但是该方式的紧密性较强。而应用冷铆这种方式时，由于钉杆较粗，所以钉杆和钉孔即使并不存在间隙，但是依然不会影响连接件应力的正常传递。

（四）吊装技术

吊装之前，应进行图纸会审，了解构件安装位置、尺寸和重量等，完成专项吊装方案的编制。吊装机械选择时，应考虑作业半径、吊装高度和构件重量的影响，并对吊具、设备机械性能进行检查，均应达到强度标准。吊装现场应提前平整并压实，保证吊装机械稳定性，并在附近设立标识牌，避免无关人员进入。若结构自重较重，或跨度较大，吊装应对称进行，防止结构单侧受力失稳。吊装钢柱时，吊点应依照截面、柱长选定，需提前计算确定，保证钢丝绳绑扎点符合吊装要求。可选择滑行法、单机旋转法等，吊起后缓慢就位，并用临时螺栓在基础预埋件上妥善固定。吊装钢梁时，应结合梁受力特点与其自身跨度，在梁两端1/3位置设置吊点，保证梁只是微微弯曲。就位之后应采用临时螺栓连接钢柱连接板，后续用千斤顶对轴线、标高等进行微调。构件就位之后应通过临时螺栓固定，数量需符合抗滑移要求。永久连接方式可选择高强度螺栓或焊接方式。

四、钢结构现场施工管理

（一）安全管理

在钢结构施工现场，安全是重中之重，因此为了保证相关工作人员的安全，实施科学严谨的安全管理至关重要。基于此，必

须要制定科学完善的安全生产责任制度。项目经理部需要制定安全生产责任制度，并将其落实到每一个责任人。安全生产责任目标需要具体明确，并定期进行系统的考核。并且，还要完善监督。监督对于规范各个施工环节的施工秩序，调动员工的工作热情极其重要。要依据工程的进度，制定出行之有效的安全管理、安全监督办法。与此同时，还要加强专业培训。针对施工工程的施工特点要对施工安全员进行专业的培训，包括安全知识和专业技术培训，并组织对安全员工进行上岗前的考核。在施工过程中，要保证作业安全。如，在高空作业中，要为作业人员配备齐全且合格的防护设备，如安全帽、安全带、防滑防电的绝缘鞋等^[5]，以避免交叉作业引起的风险。总之，在钢结构施工现场进行安全管理时，要严格执行国家的安全生产方针和建设方针，遵循专业标准与规定，确保每一个环节的安全性，从而保障整体施工的安全进行。

（二）质量管理

在钢结构现场施工过程中，质量管理是确保工程质量的关键环节，所以，在现场施工管理工作中，实施质量管理极为必要。对于质量管理，在施工准备阶段就要开始实施。相关人员要认真进行施工图纸的会审和交底工作，找出需要解决的技术难题，并制定解决方案。同时，编制钢结构工程施工组织设计，制定切实可行的具体实施细则，确保方案技术措施得力、可行。有关管理人员还要严格检查核对钢结构材料和基础构件的生产厂家是否正规，针对进场的钢材，需检查其出厂合格证、材质证明书，核对力学性能指标、化学成分等。同时核对外观，外观不能有锈蚀、折叠、结疤和裂纹等质量问题。避免出现质量问题对钢结构工程施工质量造成严重影响。在正式施工时，管理人员对于每一个环节，包括制作工艺、安装施工组织设计等，都需要严格的质量控制。下料和切割应用机械切割或数控切割法，避免气割引发变形，以不超过0.02倍板厚的标准控制切割面垂直度，最大不超过2mm。组装之前应当对零件表面进行清理，依照工艺文件定位，避免组装偏差过大。在制作阶段，各工序、各分项都需要达到预定的质量标准和技术要求。焊接环节，焊接之前应完成焊接工艺评定报告的编制，工人需掌握焊接方法，合理控制焊接速度、电压、电流等参数，持证上岗。焊缝不能出现未焊透、咬边和气孔等质量问题，内部需做无损检测，控制焊接变形。安装阶段，应确保施工工期的安排合理，同时重视质量、进度控制的措施和方法。安装前应对混凝土基础平整度、标高和位置等进行检查，平面高差偏差需低于5mm，位置偏差需低于10mm。采用螺栓连接

时，应保证穿入方向一致，不能强紧，并以50%终拧扭矩为标准控制初拧扭矩。成品完成后需加强保护，集中堆放下方需放置垫木，层数较高时需对齐指点，避免变形。安装之后未涂装构件需刷漆，雨天应避免露天焊接，已经安装的屋面板应将洞口及时封堵。假如在施工过程中如果出现质量事故，应及时处理并做好记录。同时，提出合适的纠正与预防措施，防止类似事故再次发生。管理人员及时反馈反映工序质量动态的统计资料或管理图表，以便及时发现和处理问题。做好产品验收交货资料的管理工作，确保资料完整、准确。唯有从施工准备到产品验收交货的整个过程实施质量管理，才能实现对整个钢结构施工质量的有效控制。

（三）进度管理

钢结构施工现场的进度管理涉及到对施工进度计划的有效实施和监控，以确保工程按预定时间完成。这有助于对成本的有效控制。钢结构施工是一个多单位协作的过程，需要各单位之间进行协调，保证整个建设项目中各安装施工单位、总包、分包单位之间的进度衔接。所以，应定期召开施工相关会议，包括业主、设计师、承包商等各方代表，讨论进展情况、解决问题和调整计划。不仅如此，还要及时反馈进度情况，定期编写进度报告，向各方通报工程进展情况和存在的问题，以便及时采取措施^[6]。同时，及时向施工团队反馈业主或设计师对工程进展的要求和评价，以调整施工策略和解决问题。与此同时，还应实施动态调整。在施工过程中，由于各种因素的影响，可能会造成实际进度与计划进度的偏差。在这种情况下，应及时发现并分析原因，对进度计划进行动态调整，以保证施工进度按预定计划进行。管理人员要充分考虑各种可能影响施工进度的风险因素，制定相应的应对措施。例如，对可能出现的设计变更、供应延误等问题，提前制定应对方案，以减少其对施工进度影响。加强对技术手段的应用，利用现代信息技术手段，对实时监控施工进度，通过有效的进度管理，能够确保工程按时完成。

五、结束语

总而言之，钢结构对于当下的建筑领域至关重要，通过钢结构的应用，不仅可以满足人们对于建筑的各种要求，同时还能有效提升建筑的质量。所以，要严格按照要求来应用钢结构施工技术，并从多方面着手加强现场施工管理。以此来保证钢结构可以充分发挥自身的作用，更好的服务人类。

参考文献

- [1]张翔宇,葛方,潘湘东,巫明杰,王权,李旭.大跨度钢结构屋盖吊装施工技术分析[J].施工技术(中英文),2022,51(5):130-133.
- [2]张雪峰.混凝土与钢结构工程中的建筑工程施工技术分析[J].四川建材,2022,48(10):110-111.
- [3]邢天峰,王秀丽,陶志山,张艺凡,苟宝龙.大型钢网壳结构施工安全分析与现场监测研究[J].施工技术(中英文),2022,51(17):52-5681.
- [4]王武鹏.建筑钢结构吊装施工技术分析[J].大众标准化,2022(17):27-2831.
- [5]高国平.浅谈建筑工程施工技术及其现场施工管理的措施分析[J].工程建设(维泽科技),2022,5(9):46-48.
- [6]郭齐,王杰.基于建筑钢结构工程施工技术管理与控制要点的分析[J].中国建筑金属结构,2021(2):32-33.

国际工程量清单准确性保障措施及管控要点

黄景斌

中国恩菲工程技术有限公司工程造价中心, 北京 100038

DOI:10.61369/ME.2025070013

摘 要 : 充分利用数据库资源, 对工程消耗量、清单完整性等进行对标。落实数据的准确性、完整性, 对数据进行修正。补充缺项工程量清单综合单价计价的价格调整机制, 确保项目的可执行性、可结算性。同步校核各设计专业提交条件的深度, 对于不满足深度要求的将与相关设计人员沟通, 共同落实提供满足深度条件的要求。建立实名打卡机制, 从入场之日起每天统计各单位现场施工人员, 管理人员。每天统计主要施工机械台班的种类和数量。每天及时记录现场关键部位施工记录和影像资料, 项目部留存施工影像资料。施工方案审批需要审核其经济合理性, 避免过度保守浪费, 施工完成要立即确认其完成情况, 是否按施工方案完成, 据实、限时办理签证。

关 键 词 : 数据库; 价格调整机制; 可结算性; 结算资料真实性及完整性

Measures for Ensuring the Accuracy of International Bill of Quantities and Key Control Points

Huang Jingbin

Cost Engineering Center, China ENFI Engineering & Technology Co., Ltd., Beijing 100038

Abstract : To fully utilize database resources, benchmarking is conducted on engineering consumption and the completeness of the bill of quantities. The accuracy and integrity of the data are ensured, and corrections are made where necessary. A pricing adjustment mechanism is established to supplement missing items in the comprehensive unit price of the bill of quantities, ensuring project feasibility and settleability. The depth of submission conditions from various design disciplines is simultaneously verified. For any deficiencies, communication with relevant design personnel is initiated to jointly address and meet the required depth standards. A real-name attendance mechanism is implemented, tracking daily the number of on-site construction personnel and managers from each unit starting from the day of entry. Daily statistics are maintained on the types and quantities of major construction machinery shifts. Key construction records and photographic documentation at critical sites are promptly recorded daily, with the project department retaining the construction footage. The approval of construction plans requires an economic rationality review to avoid excessive conservatism and waste. Upon completion, the progress must be immediately confirmed against the construction plan to verify compliance. Visas are processed promptly and accurately within the stipulated timeframe.

Keywords : database; price adjustment mechanism; settling capacity; authenticity and completeness of settling data

引言

随着国内经济的转型发展, 越来越多的中资企业选择转向海外发展, 然而国际工程项目的执行远比国内项目复杂, 风险点也远超国内项目, 为确保项目投资的准确性及可控性, 必须要在项目前期做好充分的项目策划, 其中招标工程量清单的准确性就是其中极为关键的一环。本文专注于国际工程招标工程量清单的准确性保障措施以及在项目执行过程中需要关注的管控要点, 旨在深入分析确保工程量清单准确性的各项措施及应对策略。

一、国际工程工程量清单准确性保证措施

大型工业项目的工程量清单招标通常需要具备众多的设计条

件, 但项目常受各方因素制约和工程进度紧迫等因素影响, 很难保证的有限的时间提出满足工程量清单招标的条件, 为确保工程进度不受影响, 并确定工程投资的合理性, 合理分担招投标双方

作者简介: 黄景斌 (1985.04-), 男, 江西赣州人, 汉族, 本科, 高级工程师, 从事造价管理研究。

的风险，需要采取模拟工程量清单的形式进行工程量清单招标，本文认为应采取下述措施，才能最大程度的确保工程量清单的准确性及可执行性：

1. 工程设计做法标准化

各专业设计统一规定中明确列出本专业在项目拟使用的材料及工程做法，并对本专业统一宣贯，本专业所有设计者施工图只能从本专业的设计统一规定中选择工程做法。

2. 充分利用数据库资源，对工程消耗量、清单完整性等进行对标。

工程造价专业需对各专业提供的工程量进行校核，特别是主要工程量，需结合本专业工程经验进行复核，确保工程量清单数据的准确性、完整性。可运用工程量数据库、消耗量指标库数据进行数据准确性、合理性分析，在编制完工程量清单后，需与数据库数据进行对比，如发现异常，将及时与相关专业沟通，落实数据的准确性、完整性，对数据进行修正。

3. 在确定工程量清单综合单价计价原则基础上，需补充缺项工程量清单综合单价计价的价格调整机制，确保项目的可执行性、可结算性。

虽然在工程量清单编制过程中尽全力确保完整性，但仍会存在漏项可能，可根据项目执行经验在施工分包合同中约定缺漏项工程量清单的计价原则，确保项目可执行，可结算。

4. 梳理出满足本阶段开展工程设计所需外部输入条件，如场地初步勘察资料，外部供水、供电等，逐条落实，确保本项目外部输入条件完整，满足开展工程设计所需的准确条件。

5. 统筹梳理项目子项表，从工程设计、采购、施工、项目管理等多维度对子项表进行梳理，确保编制工程量清单子项完整，不漏项。

6. 各子项专业工作分解到位，设计经理与相关专业商议确定各子项包含专业，确保各子项不漏专业。

7. 各专业按确定子项表，按工程量清单编制要求，逐个子项按照专业开展工作提交各自条件。

8. 各专业严格按工程造价专业提供的条件模板，提交设计条件，设计条件的深度达到施工图深度。

9. 为确保工程量的准确性，建议项目主要子项采用三维模型建模计算工程量，通过与业主结合确定重点子项配置，根据三维模型计算工程量，减少初步设计与施工图之间的方案变动差异。

10. 部分子项可参考类似工程施工图编制清单工程量，设计专业提供类似项目施工图图纸，并说明与本项目差异，同时与工程造价专业共同商议最终编制本项目清单工程量。

11. 由于项目施工招标在项目大部分开展施工图设计前，项目条件具有一定的不确定性，工程造价专业需在工程量清单的项目特征描述中将部分不确定性因素明确转移给投标人（如土方外运距离；综合，由投标人自行考虑，混凝土的输送方式：综合，由投标人自行考虑等），避免在项目执行过程中出现扯皮。

12. 常规措施性费用（如措施钢筋、模板等）将在编制对应实体工程量清单时，明确在项目特征中列出，此部分费用包含在综合单价中，避免执行过程中扯皮。

13. 除模板以外的措施工程（如脚手架、垂直运输等）、特殊施工措施费用（如高支模、深基坑等），将单独列出清单项，按项计价，总价包干，避免在项目执行过程中扯皮^[1]。

14. 现阶段部分无法明确做法的工作内容（如生活区精装修、玻璃幕墙、厂区绿化等），拟采用暂估价的形式计列，后续具备条件后，按暂估价流程执行。

15. 在编制工程量清单的过程中，工程造价专业需逐个子项与相关设计人员结合，同步校核各设计专业提交条件的深度，对于不满足深度要求的将与相关设计人员沟通，共同落实提供满足深度条件的要求。

16. 在编制工程量清单的同时，需要同步编制招标控制价，如发现与工程经验有明显偏离的子项或专业，需将详细审查该子项、专业工程量清单的合理性，通过各子项各专业的造价指标及价格水平来校核工程量清单的准确性。

17. 根据设计条件及工程经验合理设置工程量清单的粗细程度，同时结合项目经验增加一些补充清单项（如砂浆找平层每增减5mm等），可在项目实施过程灵活组合使用，提高模拟清单的适用性和准确性。

18. 合理策划工程量清单单价的范围及内容，单价需包含完成此项工作的全部费用，如人工、材料、机械、措施费、管理费、利润、大型机具进出场费、运费等相关内容。

19. 设置零星人工、零星机械台班清单，便于项目执行过程中零星工程使用。

20. 如现场已完成勘察工作能确定土石比的前提下，土石方工程建议按统一单价，清单工程量按设计图示尺寸计算，工作面及放坡工程均在单价中考虑，防止施工单位通过办理大量签证等手段增加合同额。

21. 在合同中约定关于新增清单和参考类似清单的具体定义及处理原则，如砼工程标号发生变化参考类似清单换算主材，彩钢板屋面板厚度变化参考类似清单换算主材，不属于新增清单重新组价范畴。通过对清单使用的约束，提高清单的利用率，防止分包咬文嚼字扯皮。

22. 现阶段编制工程量清单应具备的条件

1) 设计子项表 WBS 要明确。

2) 项目施工策划、标段划分、施工范围要确定。

3) 工程量清单的编制范围要确定。

4) 提供本项目的建构筑物一览表。

5) 所有子项的建筑物结构形式要确定。

6) 本项目统一建筑做法要确定。

7) 各子项主要建筑做法要确定。

8) 主要构件的混凝土等级要确定。

9) 提供各子项的结构工程量或可参考的类似项目施工图子项，如采用参考类似项目施工图子项，需要根据本项目的情况，确定参考子项的调整系数。

10) 总图竖向布置的道路、护坡、挡墙、排水沟、围墙等，需提供工程量及设计做法。

11) 分专业分子项提供设备明细表，工艺设备必须要提设备重量、规格型号及参数、电机功率。

12) 分专业分子项提供安装材料表或参考类似项目施工图子项工程量，如参考类似项目施工图子项工程量，需根据本项目情况调整材料工程量。安装材料材质、规格尽量与专业设计统一规定一致，后续也尽量在施工图中应用。

13) 大型设备、非标设备的到货状态要确定。

- 14) 提供线缆管道对应的管架、管沟工程量。
- 15) 提供设备、管道等保温等工程量及做法。
- 16) 提供设备、管道除锈刷漆做法。
- 17) 提供电力负荷计算表。

二、国际工程工程量清单在项目执行阶段的管控要点

(一) 施工前期及招标阶段

- 1.模拟工程量清单深度达到施工招标深度，核心是要确保尽最大可能确保设计深度满足要求。
- 2.明确合同工程量清单外的定价机制，在合同计价条款中，明确变更、签证、新增内容的单价优先采用合同单价。
- 3.工程量计算规则明晰。
- 4.工程量清单综合单价的价格范围明晰，明确税费范围，如当地的销售服务税、预提税等。
- 5.根据调研结果出具各标段招标限价。
- 6.设备、甲供材卸车、仓储、保管、倒运等责任及费用约定明确。
- 7.细化清标工作，避免不合理单价及不平衡报价。针对项目特点要求投标单位细化报价，降价。如大临设施已由业主建设等。
- 8.精装修、园林绿化等需要二次深化详细设计的工作内容，待详细方案确定后建议按暂估价流程招标。
- 9.在合同中明确约定，必须在过程中完成计量计价的资料确认，超过期限不予后补。
- 10.要求各家签订承诺书，强化履约精神，严格按合同要求履约执行，不得恶意上告、索赔。
- 11.标段界限特别是标段间的接口必须描述清晰，避免扯皮。

(二) 施工过程管理的核心是确保成本计价依据的及时性、完整性、准确性

- 1.进度款支付建议按节点支付，减少过程扯皮，施工图出来后及时编制核对施工图预算，按施工图预算来控制付款。
- 2.建立实名打卡机制，从入场之日起每天统计各单位现场施工人员，管理人员。
- 3.每天统计主要施工机械台班的种类和数量。
- 4.每天及时记录现场关键部位施工记录和影像资料，项目部留存施工影像资料。
- 5.施工方案审批需要审核其经济合理性，避免过度保守浪费，施工完成要立即确认其完成情况，是否按施工方案完成，据实、限时办理签证。
- 6.隐蔽工程，临时工程要有完整施工影像资料。
- 7.现场零星用工，零星机械台班由施工单位自主报价。现场

如要发生相关工作，施工现场工程师要准确统计记录其用工和机械台班，据实、限时办理签证。

8.材料认价定价需在施工过程中及时完成，如遇价格争议大无法达成一致的要及时调整供货方式，避免影响进度。

9.明确人员职责，文件资料签字确认必须是由归口部门的相关负责人员签字才能予以认可。

10.严格按管理流程要求办理现场签证，现场工程量必须由各专业工程师现场详细审核确认，并严格判定签证原因，如是由于分包施工组织不当、施工质量问题等导致的，不得予以确认。^[2]

11.及时办理并核定现场变更签证费用，做到月结月清。

12.非承包人原因导致需要发生的现场赶工，必须要提前报告并完成赶工方案编制及审批，赶工方案中必须要有明确的可计量及审核的依据。

13.非承包人原因导致的现场停工、窝工等，必须要当即统计并确认好现场人料机的停工及窝工情况，不得后补。

14.切实履行现场监督管理义务，留存影像记录，严格按相关设计文件施工，如发现未施工项，要正式发文告知其严格按合同履行，若在规定的时间内不实施，必须给予罚款并扣减相关工程费用。

15.甲供材必须在现场设置专职人员，负责材料出入库台账。领用必须有详细的材料领用申请记录，包括领用内容、子项、使用部位、领用量等详细领用信息。^[3]

16.从开工到项目完工，均安排费控人员长期驻守现场，了解现场情况，解决现场相关问题，及时更新、监控动态成本。

(三) 结算管理

- 1.在项目执行过程中，开展过程结算，尽可能在执行过程中完成绝大部分的蓝图结算，无法达成一致的内容可列出结算争议，在完工后约定的时间内完成结算。
- 2.蓝图外的现场变更、签证做到月结月清，无法达成一致的内容可列出结算争议，在完工后约定的时间内完成结算。
- 3.梳理未施工项、整改项清单，扣减相关费用。

三、结语

综上所述，只有通过以上全员、全流程、全要素、多维度的全面造价管理，才能确保国际工程工程量清单的准确性及合理性，同时在项目执行过程中采取积极的管控措施，才能最大程度的发挥造价管理的作用，确保项目顺畅，积极推进，确保投资的合理性。

参考文献

[1]住房和城乡建设部(2024).《建设工程工程量清单计价标准》(GB/T50500-2024).
[2]张晓燕.工程造价全过程动态管理模式探索与实践[J].城市开发.2025(02):130-132.
[3]杨玉静.建筑工程全过程造价管理与控制措施分析[J].今日财富.2025(05):139-141.

浅谈 BIM 技术在双曲幕墙项目中的研究与应用

刘佳, 刘冲, 姜远振, 廖红玉
中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430080
DOI:10.61369/ME.2025070033

摘 要 : 以河南某市大数据中心项目中幕墙施工为例, 通过 BIM 技术在双曲幕墙中的应用, 研究 BIM 技术对复杂造型幕墙施工质量控制的作用, 以期为类似幕墙施工质量提升提供借鉴。

关 键 词 : 参数化; 数字化; BIM; 施工技术

A Brief Discussion on the Research and Application of BIM Technology in Hyperbolic Curtain Wall Projects

Liu Jia, Liu Chong, Jiang Yuanzhen, Liao Hongyu
China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430080

Abstract : Taking the curtain wall construction in a big data center project in a city in Henan as an example, this paper explores the role of BIM technology in quality control for the construction of complex-shaped curtain walls through its application in hyperbolic curtain walls, aiming to provide references for improving the construction quality of similar curtain wall projects.

Keywords : parametric; digitalization; BIM; construction technology

引言

随着时代发展, 科技革新, 在建筑工程领域, 许多传统设计方法的不足之处正在不断凸显, 无法切实满足客户需求, 参数化设计手段虽然不能完全替代传统设计手法, 但是可以做到更加高效、可视化^[1]。如今随着城市飞速发展, 各类数字化应用, 建筑外形也变得多样、不规则, 复杂的外立面使得设计工程师、施工工程师挑战不断增加。随着建筑外形的不断变化也对我们的工程技术提出了新的要求。

一、工程概况

河南某市大数据中心项目总建筑面积 6.6733 万 m², 主要包括通体 1 层地下室、4 层主机房、21 层配套服务楼、4 层服务配套裙房、通过 1 处 3 ~ 4 层连廊将 IDC 机房楼和配套服务楼相连接。结构类型为框架结构, 建筑高度为 93.9m, 整体造型独特, 楼板呈为圆弧形往上收缩状。其外立面为不对称双曲面造型, 每片玻璃、每片铝板形状相似而尺寸各不相同, 施工难度大, 传统钢结构下料方式难以精确详实地表达复杂的建筑幕墙造型。又因土建实体安装误差、受自重产生扰度变形等因素的影响, 现场钢结构与理论模型存在无法预估的误差, 如无法准确得到现场实际土建尺寸, 钢构施工无法开展。

二、BIM 技术解决幕墙项目中的应用重点

(一) 建筑的复杂造型如何实现

通过建立 BIM 模型来模拟建筑的复杂造型, 并用参数化手段来建立模型方便及时修改。参数化是通过计算机编写算法程序拟

定的算法自动生成结果, 通过编写算法程序机械性的重复操作及大量具有逻辑的演化过程可被计算机的循环运算取代, 方案调整也可通过参数的修改直接得到修改结果, 通过参数的调整直接改变模型形态优化设计, 做到方案与施工完美结合, 最终以达到建筑美感艺术性的呈现。

(二) 建筑实体与图纸相比细微误差数据采集难

通过运用成熟的多站点交互式 3D 扫描技术, 通过高精度三维激光扫描仪, 快速且准确的获取现场钢结构的点云数据, 经过逆向建模得到 1:1 的现场实际土建模型, 且精度达到 $\pm 2\text{mm}$, 再以此基础进行钢结构深化建模。

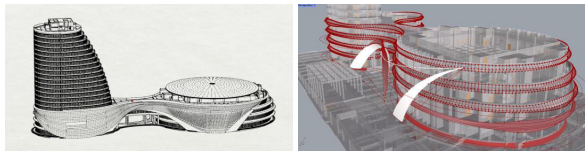
(三) 幕墙造型复杂, 构件不统一, 数据庞大难以手工绘制

通过 BIM 建模技术在电脑计算机中, 根据施工图纸模拟建造出实体模型, 称为正向模型。将激光扫描仪高精度扫描的建筑实体得到实测量模型, 称为反向模型。将两个模型放到一起进行比较和优化, 得到一套精准无误的准确模型。从精准模型的基础上进行展开图的绘制, 并参数化数据进行自动编码并提取坐标系中重点的三维数据, 用于下料加工和帮助施工定位。

三、施工工艺

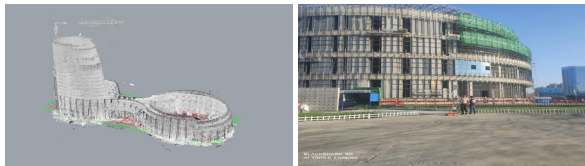
包括步骤：

1.结合建筑设计方案和现场实际情况创建完整精确的建筑 BIM 三维模型；



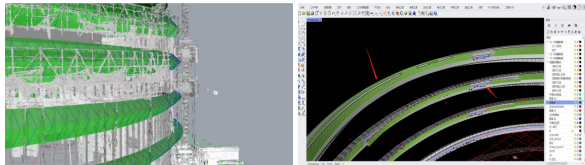
图一：正向建模

2.进行现场施工时，每施工完一片区域后，利用无人机携带的激光扫描设备采集刚完工区域建筑的全息三维点云数据，然后对全息三维点云数据进行处理，得到刚完工区域的建筑三维点云模型。



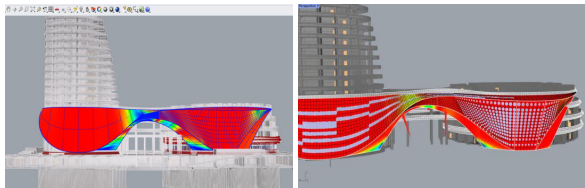
图二：反向建模

3.将刚完工区域的建筑三维点云模型与建筑 BIM 三维模型进行拟合对比，两者有重合误差的部位即为搭设不符合要求的部位。



图三：模型对比

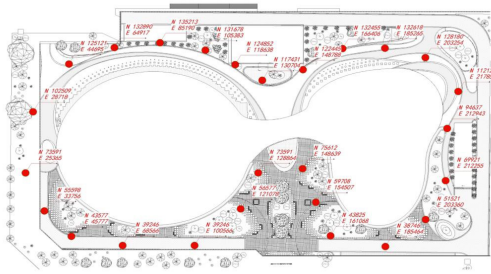
4.对于重合误差较小的部位，结合现场实际情况及时进行整改；对于重合误差较大且无法按照原方案整改的部位，利用建筑 BIM 三维模型对所述部位以及相邻未施工区域进行受力分析，在符合规范和施工要求的前提下优化设计方案，得到所述部位的整改方案和相邻未施工区域的优化方案，并更新建筑 BIM 三维模型。



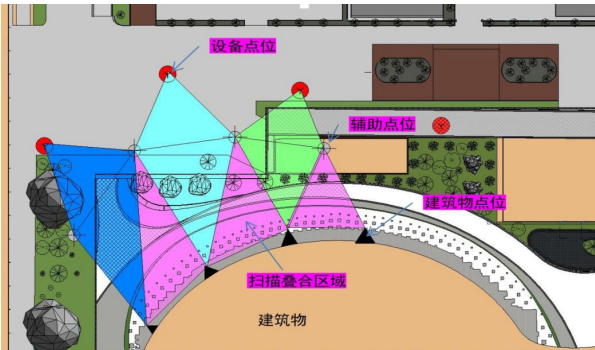
图四（1）：通过软件进行曲率分析并优化方案

在步骤1.中，建筑 BIM 三维模型中包括建筑各部位的详细构件信息。

在步骤2.中，根据建筑的结构特征将整个建筑划分为若干区域，并确定每片区域的关键位置，每施工完一片区域即进行激光扫描，除了整体扫描外，还要对关键位置进行重点扫描。



图四（2）：通过坐标系确定二十六个定位点坐标

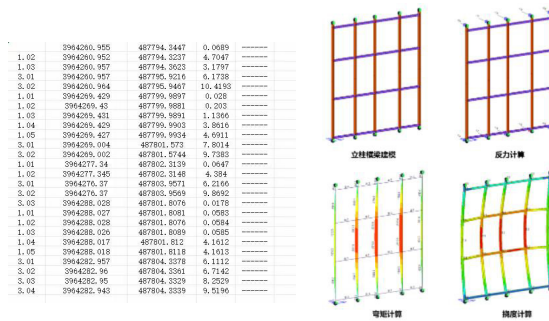


图四（3）：每个设备点配套两个设备点和三个建筑点



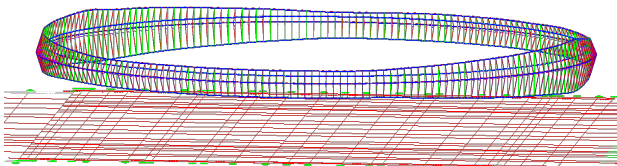
图四（4）：现场建筑物十字定位

5.现实与虚拟比，通过不断优化求出全数据组成的精确模型，在数据模型的基础上进行精细虚拟拼装，并提取安装控制点、计算荷载支撑、组装龙骨精确尺寸等，精确到毫米后四位小数。

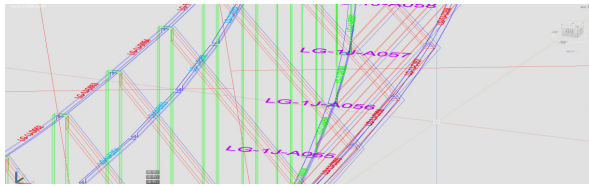


图五：安装控制点、计算支撑荷载

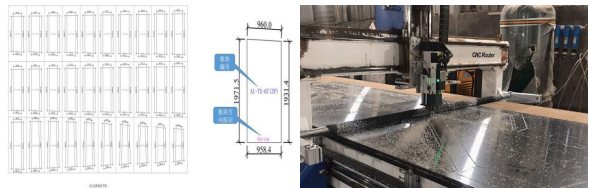
6.分解模型提取数据，自动编码并展开下料图，热弯玻璃和龙骨支撑由厂家在工厂根据曲率预制加工现场安装，层间铝板根据下料图现场制作，根据提取点进行安装控制，控制误差正负1毫米。



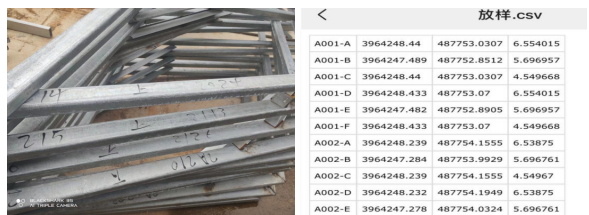
图六（1）：分解龙骨支架



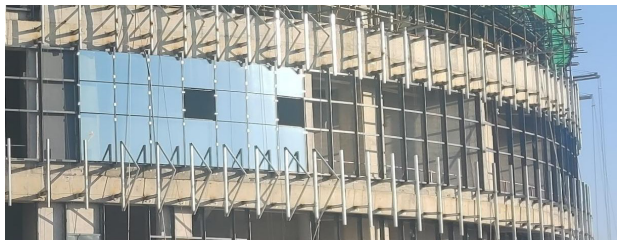
图六（2）：龙骨自动编码



图六（3）：铝板下料尺寸详图（下料尺寸各不相同）



图六（4）：根据编码现场制作龙骨（根据放样控制点进行安装）



图六（5）：现场拼装效果

四、应用技术

1. 建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 是以三维数字技术为基础，集成了建筑工程实施各种相关信息的工程数据模型。起初由研究软件的使用可以达到何种成效，直到应用参数化建模才真正理解数字化建模的意义。曲面 (Nurbs) 用于计算机领域是1985年才出现。波音公司召集了一大批科学家只为了解决一个看似很简单的问题：如何用计算机描述一个圆。后来将数学领域的 Nurbs 技术用过来才完美解决这个问题，通过计算机模拟出曲面的技术的加入到工业产品中，才有了丰富多彩的工业产品^[1]。而如今用于工业产品的技术用于建筑行业，使建筑形态有了无限的可能。

2. 三维扫描技术适用于建筑施工的钢结构阶段施工完毕、幕墙施工开始前，相对于采用全站仪等传统测量方式获得的实测点

云数据，采用三维激光扫描测量技术配合多位置、无死角设置的激光扫描仪，突破了传统的单点测量方式，获得实测点云数据的速度不仅快速，而且还具有无遗漏、误差小、精度高的特点，为实测点云数据的构建打下正确的基础。三维激光扫描技术突破了传统的单点测量方式，具有速度快、非接触、高密度、自动化等特性，一出现就得到广泛的关注，已成功应用于多个领域，特别适合建筑数据采集及 BIM 建模。

五、经济效益

通过 BIM 技术与钢构幕墙施工相结合，改进了传统图纸难以表达不清、信息传递丢失等问题。通过计算机参数化计算每根龙骨铝板相似且不相同，渐变尺寸、角度、编号准确有效，加快了安装进度。智能排版节约了材料的损耗，数据比对、收集、存储、使用方便，经济效果明显。同时此技术的应用使建筑外表流畅、顺直、更加美观。得到了业主的一致好评，并得到各界同仁的广泛的认可，塑造了公司品牌的良好形象。为公司积累了宝贵的技术施工经验，为后续新项目管理模式的探索奠定了基础。

六、结束语

建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 是以三维数字技术为基础，集成了建筑工程实施各种相关信息的工程数据模型，BIM 是对工程实施设施实体与功能特性的数字化表达。BIM 技术已经融合在建筑的整个生命周期中，推动和促进技术含量较低的建筑行业发生转型和升级。

在建筑设计阶段，BIM 建筑模型一般依据建筑涉及的土建、机电等各个专业提供的信息、图纸或者三维模型进行协同设计。在项目施工阶段，由于实际施工后总会与预先的设计会产生偏差，若幕墙施工仍然按照最初设计的 BIM 模型进行施工，则很可能出现施工超出预设位置，轻则设施、结构等出现碰撞，难以完成安装；重则出现建筑竣工验收不合格需要重建导致重大经济损失，甚至出现安全事故，后果及其严重。

异形建筑的兴起给工程设计、下料、施工、竣工检测以及运营维护带来巨大挑战，特别是双曲面建筑对建筑安全、美观、牢固、艺术性、舒适度等一系列更高的要求提出，迫使工程人的使用工具急切的变革与更新。如计算机、软件、机器人、AI、物联网等一系列的新技术就是工程人手中的新工具。快速学习、掌握、总结新工具的运用及实用性，才能更好的服务于项目，为社会、为项目业主交上一份满意的答卷。

参考文献

- [1] 卢春亭, 刘兴胜, 张祥伟, 靳书平, 郭光磊, 李鹏飞, 李齐波, 闫乾, & 王振现. (2024). 基于激光扫描点云与 BIM 模型的双球嵌套结构数模比对方法 (CN Patent No. 113656858B).
- [2] 《Rhino 课程全记录》王大川

公路路基施工质量通病成因及处理对策分析

程超, 朱凯迪

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025070018

摘 要 : 公路路基作为路面结构的承载基础, 其施工质量直接决定公路整体稳定性与使用寿命。本文聚焦公路路基施工中常见的质量通病: 路基沉降、边坡滑塌、路基裂缝、压实度不足等问题, 从地质勘察、材料控制、施工工艺、养护管理等维度提出针对性处理对策与预防措施。旨在为规范路基施工流程、提升路基施工质量提供理论参考与实践指导, 保障公路工程长期服役性能。

关 键 词 : 公路路基; 质量通病; 成因分析; 处理对策

Analysis of the Causes and Countermeasures of Common Quality Problems in Highway Subgrade Construction

Cheng Chao, Zhu Kaidi

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

Abstract : As the bearing foundation of the pavement structure, the construction quality of the highway subgrade directly determines the overall stability and service life of the highway. This article focuses on common quality problems in highway subgrade construction, such as subgrade settlement, slope collapse, subgrade cracks, and insufficient compaction. It proposes targeted treatment countermeasures and preventive measures from the dimensions of geological investigation, material control, construction technology, and maintenance management. It aims to provide theoretical references and practical guidance for standardizing the construction process of roadbeds and improving the quality of roadbed construction, and to ensure the long-term service performance of highway engineering.

Keywords : highway subgrade; quality defects; cause analysis; treatment countermeasures

前言

据交通运输部公路工程质量抽检数据显示, 2020-2024年全国公路路基施工质量不合格率约3.2%, 其中路基沉降与压实度不足占比超60%, 此类问题不仅导致路面出现车辙、裂缝, 还需后期投入大量资金维修, 严重影响公路使用效益。因此, 深入分析路基质量通病的形成机理, 制定科学有效的处理对策, 对减少工程隐患、降低养护成本具有重要现实意义。本文基于现有技术规范与工程实践, 从质量通病分类、对策制定层面展开研究, 为公路路基施工质量管控提供全面参考。

一、公路路基常见质量通病分类及表现形式

公路路基施工涉及土方开挖、填料摊铺、压实、边坡防护等多环节, 不同环节易产生不同类型的质量通病, 其中以路基沉降、边坡滑塌、路基裂缝、压实度不足最为典型, 各类通病的表现形式与危害如下:

(一) 路基沉降

路基沉降是指路基竣工后或通车运营期间, 因土体压缩变形导致路基顶面标高低于设计值的现象, 分为施工期沉降与运营期沉降两类:

施工期沉降: 多发生在路基填筑完成后1-3个月内, 表现为路基局部或整体下沉, 沉降量一般为3-10cm, 若沉降不

均匀, 易导致路面出现纵向波浪形起伏。例如, 某二级公路K2+300-K2+500段路基, 填筑完成后2个月内出现不均匀沉降, 最大沉降量达8cm, 路面平整度误差超15mm/3m, 需重新铣刨路面后对路基进行加固处理。

运营期沉降: 多发生在通车后1-5年内, 受车辆荷载反复作用与雨水渗透影响, 沉降量逐渐累积, 一般为5-15cm, 严重时会导致路面开裂、桥头跳车。例如, 某高速公路互通立交匝道路基, 通车3年后因运营期沉降, 桥头路段沉降量达12cm, 桥头跳车高差超5cm, 存在极大交通安全隐患。^[1]

(二) 边坡滑塌

边坡滑塌是指路基边坡土体因抗剪强度不足, 沿某一滑动面发生整体或局部坍塌的现象, 按滑塌规模分为浅层滑塌与深层

滑塌：

浅层滑塌：滑塌深度一般为1-3m，多发生在边坡坡脚或坡中位置，表现为边坡表层土体滑落，露出下部未压实的填料。例如，某农村公路 K1+800 段路基边坡（边坡坡度 1:1.5），雨后出现浅层滑塌，滑塌范围长 20m、深 2m，塌方体堵塞边沟，影响路面排水。

深层滑塌：滑塌深度一般为 3-8m，多发生在地质条件复杂的路段（如软土地基、风化岩层路段），表现为边坡整体滑动，滑塌体规模大，易阻断交通。例如，某山区公路 K5+100 段路基，因下方为软土地层，边坡施工后遭遇连续暴雨，发生深层滑塌，滑塌体体积达 5000m³，导致公路中断通行 7 天。

（三）路基裂缝

路基裂缝是指路基土体因干缩、温缩或应力集中产生的裂隙，按裂缝走向分为纵向裂缝、横向裂缝与网状裂缝：

纵向裂缝：平行于路线走向，长度一般为 10-50m，宽度为 2-10mm，多发生在路基中心或边坡附近，主要因路基填筑不均匀或地基沉降差异导致。例如，某一级公路 K8+200-K8+400 段路基，通车 1 年后出现纵向裂缝，裂缝长度 35m、宽度 8mm，若不及时处理，雨水渗入会加剧裂缝扩展。

横向裂缝：垂直于路线走向，长度一般为 5-20m，宽度为 1-8mm，多发生在路基分段施工的接缝处，主要因施工缝处理不当或温度变化导致。例如，某高速公路路基施工中，因两段路基施工间隔超过 15 天，未对接缝处进行台阶处理，通车后 6 个月出现横向裂缝，裂缝贯穿路基顶面。

网状裂缝：呈不规则网状分布，裂缝密度大（每平方米 5-10 条），宽度为 1-3mm，多发生在路基表层，主要因填料干缩或压实度不足导致。例如，某二级公路路基采用粉质土填筑，因夏季高温暴晒，路基表层出现网状裂缝，影响路基整体性。^[2]

（四）压实度不足

压实度不足是指路基填料压实后的干密度未达到设计要求（一般要求压实度 $\geq 93\%$ - 96% ，根据路基填筑层位确定），表现为路基土体松散、承载力低，检测时易出现“弹簧土”现象（碾压时土体反弹，无法压实）。例如，某公路路基 K3+100 段填筑层，采用黏性土填料，碾压后检测压实度仅 88%（设计要求 $\geq 94\%$ ），路基弯沉值达 300（0.01mm）（设计要求 ≤ 200 （0.01mm）），需重新翻拌晾晒后再次压实。

二、公路路基质量通病处理对策与预防措施

针对各类质量通病的成因，需从“预防为主、防治结合”的原则出发，结合施工实际制定针对性对策，同时建立全流程管控机制，减少通病发生概率。

（一）路基沉降处理对策与预防

1. 地基预处理措施：

软土地基路段：采用换填法（换填 3-5m 厚碎石或灰土）、排水固结法（设置塑料排水板，间距 1.5m \times 1.5m，深度穿透软土层）或强夯法（单击夯击能 2000-3000kN \cdot m）提升地基承载力，

要求处理后地基承载力 ≥ 180 kPa。例如，某沿海公路软土地基采用塑料排水板+堆载预压处理，塑料排水板深度 12m，堆载预压时间 6 个月，地基承载力从 120kPa 提升至 200kPa，路基沉降量控制在 3cm 以内。^[3]

松散砂层路段：采用振冲碎石桩（桩径 50cm，间距 2m）或水泥土搅拌桩（桩长 8-10m）加固，减少地基压缩变形。

2. 填料与填筑管控：

选择级配良好的填料（如碎石土、砾石土），避免使用纯粉土、高液限黏土；填料含水率控制在最佳含水率 $\pm 2\%$ 范围内，若含水率过高，采用翻拌晾晒（晾晒时间 2-3 天）或掺入生石灰（掺量 3%-5%）降低含水率；若含水率过低，采用洒水湿润（洒水量按含水率差计算）。

严格分层填筑，分层厚度按压路机吨位确定（18-21t 压路机分层厚度 ≤ 30 cm，22-25t 压路机 ≤ 35 cm），填筑时设置标高控制线，确保厚度均匀。

3. 压实工艺优化：

按“先轻后重、先慢后快、先边后中”原则碾压，下路床采用 20t 以上振动压路机，碾压遍数 4-6 遍，碾压速度 2-3km/h；碾压后及时检测压实度，达标后方可进行下一层填筑。例如，某高速公路路基下路床采用 22t 振动压路机，碾压 5 遍，速度 2.5km/h，压实度达 95%（设计 94%），后期沉降量仅 2cm。^[4]

（二）边坡滑塌处理对策与预防

1. 滑塌应急处理：

浅层滑塌：清除塌方体，对边坡坡面进行修整，采用水泥砂浆抹面（厚度 5cm）或铺设土工格栅（抗拉强度 ≥ 80 kN/m）加固，同时疏通边沟，防止雨水再次渗入。例如，某农村公路边坡浅层滑塌，清除塌方体后铺设双向土工格栅，格栅搭接宽度 30cm，采用锚杆固定，后期未再发生滑塌。

深层滑塌：采用抗滑桩（桩径 1.2m，桩长 15-20m，间距 5m）或锚索框架（锚索长度 20-30m，锚固力 ≥ 500 kN）加固，同时在滑塌体后缘设置截水沟，减少雨水入渗。例如，某山区公路深层滑塌采用抗滑桩+锚索框架处理，抗滑桩嵌入稳定岩层 5m，锚索锚固深度 10m，加固后边坡稳定性系数从 1.05 提升至 1.3，满足规范要求。

2. 边坡预防措施：

合理设计边坡坡度：软土地段边坡坡度 $\geq 1:1.75$ ，风化岩层路段 $\geq 1:1.5$ ，同时设置平台（宽度 2-3m），降低边坡高度；及时进行边坡防护，土质边坡采用植草+三维网防护，岩质边坡采用锚杆框架+喷混植生防护。

完善排水系统：边坡顶部设置截水沟（断面尺寸 50cm \times 50cm），距离边坡顶缘 ≥ 2 m；边坡平台设置排水沟，与边沟连通；边沟采用混凝土浇筑，防止冲刷堵塞。

（三）路基裂缝处理对策与预防

1. 裂缝修复技术：

宽度 < 5 mm 的裂缝：采用水泥净浆（水灰比 0.4-0.5）灌缝，灌缝前清理裂缝内杂物，灌缝后覆盖土工布养护 3d；若为网状裂缝，先喷洒水泥净浆，再铺设玻璃纤维格栅（宽度 2m），提

升路基整体性。例如，某公路路基网状裂缝采用水泥净浆灌缝 + 玻璃纤维格栅加固，通车后 2 年裂缝未扩展。

宽度 $\geq 5\text{mm}$ 的裂缝：沿裂缝开槽（宽度 10cm 、深度 15cm ），清理槽内杂物后填入级配碎石（粒径 $5\text{--}10\text{mm}$ ），分层压实（压实度 $\geq 95\%$ ），表面铺设土工布 + 沥青砂（厚度 3cm ）封闭。例如，某一级公路纵向裂缝（宽度 8mm ）采用开槽填碎石处理，压实后裂缝未再发展。

2. 裂缝预防措施：

选用低收缩填料（如碎石土、砾石土），避免使用纯粉土；填料填筑后及时覆盖土工布洒水养护（养护时间 $7\text{--}10\text{d}$ ），高温天气每 2h 洒水 1 次，防止干缩；冬季施工时覆盖保温被，减少温度骤降导致的温缩。

路基分段施工接缝处开挖台阶（台阶高度 20cm 、宽度 100cm ），台阶坡面坡度 $1:2$ ，接缝处填料采用人工补压 2 遍，确保新旧填料结合紧密。

（四）压实度不足处理对策与预防

1. 压实度不足修复

局部“弹簧土”区域：采用挖除换填法，挖除“弹簧土”（深度 $50\text{--}80\text{cm}$ ），换填级配碎石（粒径 $5\text{--}20\text{mm}$ ）或灰土（石灰掺量 8% ），分层压实（分层厚度 20cm ，碾压遍数 4 遍），压实度需达设计值 $+1\%$ 以上。例如，某公路路基 $K3+100$ 段出现 200m^3 “弹簧土”，挖除 60cm 深后换填级配碎石，采用 22t 振动压路机碾压 5 遍，压实度达 96% （设计 94% ），弯沉值降至 180 （ 0.01mm ），符合要求。

大面积压实度不足（超 1000m^3 ）：采用翻拌晾晒 + 补压法，将填料翻拌深度 $30\text{--}40\text{cm}$ ，晾晒至最佳含水率 $\pm 2\%$ ，重新分层碾压（增加 $1\text{--}2$ 遍碾压次数），碾压后采用钻芯法或灌砂法检测，确保压实度达标。某二级公路路基下路床大面积压实度仅 90% （设计 94% ），翻拌晾晒 3 天后，用 25t 压路机碾压 6 遍，压实度提升至 95% ，满足设计要求。

2. 压实度预防措施

含水率精准控制：施工前对填料进行含水率检测（每 5000m^3

检测 1 次），采用快速含水率测定仪实时监测，若含水率过高，按“翻拌晾晒 + 生石灰调节”组合方式处理（生石灰掺量根据含水率差计算，每降低 1% 含水率需掺加 1% 生石灰）；若含水率过低，采用洒水车匀速洒水，洒水后闷料 24h ，确保水分均匀。例如，某高速公路路基填料含水率 32% （最佳含水率 19% ），掺入 5% 生石灰后翻拌， 24h 后含水率降至 21% ，满足施工要求。

设备与工艺匹配：根据填筑层位选择压路机，上路床采用 $22\text{--}25\text{t}$ 振动压路机，下路床采用 $20\text{--}22\text{t}$ 振动压路机，碾压顺序遵循“先边缘后中间、先静压后振动”，碾压速度控制在 $2\text{--}3\text{km/h}$ ，碾压遍数按试验段确定（一般上路床 $5\text{--}6$ 遍，下路床 $4\text{--}5$ 遍）。同时，分层厚度采用“标尺控制 + 专人巡检”，确保上路床分层厚度 $\leq 25\text{cm}$ ，下路床 $\leq 30\text{cm}$ 。

填料级配优化：对级配不良的填料（如纯砂、纯粉土）进行改良，纯砂中掺入 $15\%\text{--}20\%$ 黏性土，纯粉土中掺入 $10\%\text{--}15\%$ 碎石，改良后填料级配需符合《公路路基施工技术规范》（ $\text{JTG/T } 3610\text{--}2019$ ）中“C 组填料”要求，确保压实后孔隙率 $\leq 18\%$ 。某公路路基采用纯粉土填料，掺入 12% 碎石后级配改善，压实度从 88% 提升至 95% 。^[5]

三、结语

本文通过研究发现，路基质量通病的核心成因集中在地基处理不彻底、填料与工艺不匹配、过程管控不到位三个方面，通过“软土地基专项处理”“填料含水率精准调节”“压实工艺优化”等措施，可有效解决各类通病，延长公路使用寿命。未来，随着智能化技术的发展，可进一步推广“物联网 + 质量管控”模式，通过传感器实时监测路基压实度、沉降量等指标，实现施工质量动态预警，推动公路路基施工向“精准化、智能化”升级，为我国公路工程质量提升提供更强支撑。

参考文献

[1] 李明, 张伟. 公路路基沉降的成因分析与综合处治技术研究 [J]. 交通科技前沿, 2021, 25(3): 35-42.
[2] 王芳, 刘畅. 基于地质条件的公路边坡滑塌预防与治理措施探讨 [J]. 岩土工程研究, 2022, 30(2): 45-52.
[3] 陈辉, 赵宇. 公路路基裂缝的类型识别、成因解析及修复技术 [J]. 道路工程学报, 2023, 18(4): 56-63.
[4] 张悦, 周洋. 提高公路路基压实度的施工工艺优化与质量控制策略 [J]. 筑路技术与应用, 2024, 42(5): 25-32.
[5] 吴昊, 孙凯. 山区公路路基质量通病防治的工程实践与经验总结 [J]. 山区交通建设, 2025, 15(2): 15-22.

桥梁隧道施工常见问题与控制对策分析

何路青

杭州市富阳区交通建设服务保障中心, 浙江, 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025070021

摘 要： 桥梁隧道作为交通基础设施的关键节点，其施工质量直接决定工程结构安全与使用寿命。当前桥梁隧道施工中，受地质条件复杂、工艺管控不严、技术应用不当等因素影响，常出现结构裂缝、隧道塌方、钢筋锈蚀、混凝土强度不足等问题，不仅增加返工成本，还埋下安全隐患。本文结合桥梁隧道施工实际工况，系统梳理桥梁施工（如桩基偏位、预应力损失）与隧道施工（如围岩失稳、初期支护变形）的典型问题，深入分析问题成因，并从“勘察设计优化、施工工艺管控、技术装备升级、质量监测强化”四个维度提出针对性控制对策。通过工程案例验证，该对策体系可使桥梁隧道施工质量合格率提升至98%以上，显著降低病害发生率，为交通基础设施工程质量保障提供实践参考。

关 键 词： 桥梁隧道施工；常见问题；控制对策；结构裂缝

Analysis of Common Problems and Control Countermeasures in Bridge and Tunnel Construction

He Luqing

Hangzhou Fuyang District Transportation Construction Service Guarantee Center, Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract： As key nodes of transportation infrastructure, the construction quality of Bridges and tunnels directly determines the safety and service life of engineering structures. At present, in the construction of Bridges and tunnels, due to factors such as complex geological conditions, lax process control, and improper application of technology, problems such as structural cracks, tunnel collapses, steel bar corrosion, and insufficient concrete strength often occur. These not only increase the cost of rework but also pose safety hazards. This article, in light of the actual working conditions of bridge and tunnel construction, systematically sorts out typical problems in bridge construction (such as pile foundation misalignment and prestress loss) and tunnel construction (such as instability of surrounding rock and deformation of initial support), deeply analyzes the causes of these problems, and proposes targeted control countermeasures from four dimensions: "optimization of survey and design, control of construction techniques, upgrading of technical equipment, and strengthening of quality monitoring". Through engineering case verification, this countermeasure system can increase the qualified rate of bridge and tunnel construction quality to over 98%, significantly reduce the incidence of diseases, and provide practical references for the quality assurance of transportation infrastructure projects.

Keywords： bridge and tunnel construction; common questions; control countermeasures; structural cracks

前言

随着我国交通网络向山区、复杂地质区域延伸，桥梁隧道工程占比逐年提升——据交通运输部数据，2024年全国新建公路桥梁超5000座、隧道超800座，其中60%以上位于岩溶、断层、高陡边坡等复杂地质区域。桥梁隧道施工环境特殊，面临“地质条件不可控、施工空间受限、技术要求高”等挑战：桥梁施工需跨越江河、峡谷，承受复杂荷载；隧道施工需穿越不同岩层，应对围岩压力、涌水等风险。

当前桥梁隧道施工中，质量与安全问题频发：某桥梁工程因桩基钢筋笼偏位，导致桩体承载力不足，需返工处理，延误工期2个月；某隧道工程因初期支护强度不够，引发围岩塌方，造成经济损失超千万元。这些问题不仅源于地质条件的复杂性，更与勘察不细致、工艺不规范、管控不到位密切相关。本文基于桥梁隧道施工实践，分类剖析典型问题及成因，构建科学的控制对策体系，旨在为提升桥梁隧道施工质量、保障工程安全提供解决方案。

一、桥梁隧道施工的典型问题及成因分析

桥梁与隧道施工场景差异显著，典型问题各有侧重。结合工程实践，桥梁施工问题集中于基础与结构施工环节，隧道施工问题聚焦于围岩控制与支护体系，具体问题及成因如下：

（一）桥梁施工常见问题及成因

桥梁作为跨越结构，其基础、墩柱、上部结构施工质量直接影响整体稳定性，常见问题包括：

1. 桩基施工问题：偏位、缩径与断桩

典型表现：桩基成孔后钢筋笼偏位超规范（ $\geq 50\text{mm}$ ），桩身混凝土出现缩径（直径偏差超 -5% ），甚至因塌孔、混凝土供应中断导致断桩。

核心成因：一是勘察不细致，未探明地下孤石、溶洞分布，钻孔时钻头偏移引发桩基偏位；二是成孔工艺不当，对砂层、卵石层未采用泥浆护壁或泥浆比重控制不合理（如砂层泥浆比重应 $1.2\text{--}1.3$ ，实际仅 1.0 ），导致孔壁坍塌；三是钢筋笼安装固定不牢，下放过程中受孔壁摩擦偏移，或混凝土浇筑时导管碰撞钢筋笼致其移位。^[1]

工程案例：某跨河大桥桩基施工中，因未探明河床下 3m 处的孤石，钻孔时钻头偏移，导致5根桩基偏位达 80mm ，需重新钻孔，增加成本超百万元。

2. 混凝土结构裂缝：早期干缩与荷载裂缝

典型表现：墩柱、盖梁、箱梁等混凝土结构浇筑后7天内出现表面干缩裂缝（宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ ），或运营前出现荷载型裂缝（如箱梁腹板斜裂缝）。

核心成因：一是配合比设计不合理，水泥用量过高（如超过 $400\text{kg}/\text{m}^3$ ）导致水化热过大，内外温差超 25°C 引发温度裂缝；二是养护不及时，浇筑后未覆盖保湿或养护时间不足（规范要求不少于7天，实际仅3天），表面水分快速蒸发形成干缩裂缝；三是模板拆除过早，混凝土强度未达设计值（如仅达 70% 设计强度），无法承受自身重量引发裂缝。

3. 预应力损失：张拉与锚固失效

典型表现：预应力箱梁张拉后，预应力损失超设计值（规范允许损失 $\leq 10\%$ ，实际达 15% ），导致梁体承载能力下降。

核心成因：一是张拉工艺不规范，未按“对称张拉、分级加载”原则施工，或张拉设备未校准（油压表误差超 $\pm 2\%$ ），导致张拉力不足；二是锚具质量缺陷，夹片硬度不够或锚固面不平整，张拉后出现滑丝、断丝；三是孔道压浆不密实，水泥浆泌水、离析形成空洞，预应力筋锈蚀后截面减小，引发后期损失。

（二）隧道施工常见问题及成因

隧道施工需平衡围岩稳定与支护强度，常见问题集中于围岩控制、支护体系与防排水环节：

1. 围岩失稳：塌方与涌水突泥

典型表现：隧道开挖后24小时内出现掌子面坍塌（范围超 10m^3 ），或穿越富水地层时出现涌水突泥（涌水量 $\geq 50\text{m}^3/\text{h}$ ）。

核心成因：一是超前地质预报不到位，未采用地质雷达、超前钻探等手段探明前方断层、富水层分布，盲目开挖；二是开挖

方法不当，对IV、V级围岩（稳定性差）仍采用全断面开挖，而非台阶法或CD法，开挖循环进尺超规范（V级围岩应 $\leq 1.5\text{m}$ ，实际达 3m ），导致围岩暴露时间过长；三是初期支护不及时，开挖后未在12小时内喷射混凝土（厚度应 10cm ，实际仅 5cm ），围岩失去支撑引发坍塌。^[2]

工程案例：某山区隧道穿越V级富水围岩时，因未做超前钻探，开挖后遭遇断层涌水，涌水量达 $80\text{m}^3/\text{h}$ ，掌子面坍塌范围 20m^3 ，停工修复1个月。

2. 初期支护变形：钢支撑扭曲与喷射混凝土脱落

典型表现：钢支撑安装后出现横向位移（ $\geq 100\text{mm}$ ）或扭曲，喷射混凝土与围岩贴合不紧密，出现空鼓、脱落。

核心成因：一是钢支撑选型不当，对V级围岩未采用I20b型钢（实际用I16型钢），承载力不足；二是钢支撑安装不牢，拱脚未落在坚实基础上（如置于虚渣上），或未与锚杆焊接固定，受围岩压力推移；三是喷射混凝土工艺差，骨料级配不合理（粗骨料粒径超 15mm ）或喷射压力不足（应 $0.2\text{--}0.4\text{MPa}$ ，实际仅 0.1MPa ），导致混凝土密实度低、附着力差。

3. 防排水失效：衬砌渗漏水

典型表现：隧道二次衬砌施工后，拱顶、边墙出现渗漏水（湿润面积 $\geq 0.5\text{m}^2$ ）或滴水，运营后形成冻胀破坏（严寒地区）。

核心成因：一是防水板铺设不当，焊接质量差（焊缝未做充气检测，气压保持时间不足5分钟）或铺设时被尖锐岩石划破；二是止水带安装偏移，中埋式止水带未居中放置，或接头未焊接，形成渗水通道；三是衬砌混凝土浇筑不密实，拱顶未采用注浆补密，存在蜂窝、麻面，水沿缝隙渗入。

二、桥梁隧道施工问题的针对性控制对策

针对桥梁隧道施工的典型问题，需从“源头勘察、过程管控、技术升级、质量监测”四个维度构建对策体系，实现“事前预防、事中控制、事后补救”的全流程管理。

（一）勘察设计优化：筑牢施工质量基础

勘察设计是规避施工问题的前提，需结合工程地质条件细化方案：

1. 桥梁勘察设计对策

精细化地质勘察：采用“钻探+物探”结合方式，探明桩基施工区域的孤石、溶洞、地下水位分布，对复杂地层（如卵石层）增加钻孔数量（每 50m 至少1个勘察孔），出具详细地质柱状图；对跨河、跨谷桥梁，补充水文勘察，明确水流速度、冲刷深度，优化基础埋深设计（如冲刷深度 3m ，基础埋深应超 5m ）。

优化结构与配合比设计：混凝土配合比采用“低水泥用量、高掺合料”方案（如水泥用量 $\leq 350\text{kg}/\text{m}^3$ ，掺加 $20\%\text{--}30\%$ 粉煤灰），降低水化热；对预应力箱梁，优化孔道布置，采用真空辅助压浆设计，减少预应力损失；对高墩柱，设计渐变截面，增强抗裂性能。^[3]

2. 隧道勘察设计对策

超前地质预报体系：采用“长距离预报（地质雷达，探测距

离30–50m)+短距离验证(超前钻探,深度5–10m)”组合方式,每循环开挖前完成预报,明确前方围岩级别、富水情况;对断层、岩溶区域,出具专项处理方案(如超前小导管注浆加固)。

支护与防排水设计优化:根据围岩级别确定开挖方法与支护参数(Ⅳ级围岩用台阶法,初期支护含I18型钢+10cm喷射混凝土;Ⅴ级围岩用CD法,支护含I20b型钢+12cm喷射混凝土);防水板采用EVA材质(厚度 $\geq 1.5\text{mm}$),设计双焊缝焊接工艺,止水带采用中埋式+背贴式组合,增强防排水效果。

(二) 施工工艺管控:规范操作流程

施工过程管控是控制问题的核心,需针对关键工序制定标准化作业方案:

1. 桥梁施工工艺管控

桩基施工标准化:成孔前校准钻孔设备(钻头垂直度误差 $\leq 0.5\%$),砂层、卵石层采用优质泥浆(砂层比重1.2–1.3,黏度18–22s),钢筋笼安装采用“双点固定+导向架”,下放速度控制在0.5m/min以内;混凝土浇筑采用导管法,导管埋深控制在2–6m,避免断桩。

混凝土施工管控:浇筑前检测模板平整度(误差 $\leq 3\text{mm/m}$)与支撑牢固性,浇筑时分层厚度 $\leq 30\text{cm}$,振捣密实(振捣棒插入间距 $\leq 50\text{cm}$,每个点位振捣20–30s);浇筑后覆盖土工布保湿,养护时间不少于7天(大体积混凝土不少于14天),采用测温仪监测内外温差,超25℃时覆盖保温被。

预应力施工管控:张拉设备(千斤顶、油压表)每6个月校准1次,张拉按“0→10%→20%→100%设计拉力”分级加载,持荷时间 ≥ 5 分钟;孔道压浆采用真空压浆工艺(真空度 $\geq -0.08\text{MPa}$),水泥浆水灰比0.26–0.28,压浆后24小时内禁止碰撞梁体。^[4]

2. 隧道施工工艺管控

围岩开挖与支护:严格按“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭”原则施工,Ⅳ级围岩开挖循环进尺 $\leq 2\text{m}$,Ⅴ级围岩 $\leq 1.5\text{m}$;爆破采用光面爆破,周边眼间距 $\leq 40\text{cm}$,减少对围岩扰动;开挖后12小时内完成初期支护,钢支撑拱脚置于C20混凝土基础上,喷射混凝土采用湿喷工艺(压力0.3–0.5MPa),确保密实度。

防排水施工管控:防水板铺设前清理围岩表面尖锐凸起,焊接采用双焊缝(宽度 $\geq 10\text{mm}$),每100m做1处充气检测(气压0.2MPa,保持15分钟压降 $\leq 0.02\text{MPa}$);止水带安装采用“钢筋卡固定+居中布置”,接头采用热硫化焊接;二次衬砌浇筑时,拱顶预留注浆孔,浇筑后7天内进行回填注浆(压力0.2–0.3MPa)。^[5]

(三) 技术装备升级:提升施工精度

引入先进技术与装备可减少人为误差,提升施工质量稳定性:

1. 桥梁施工装备升级:采用桩基钻孔定位系统(GPS定位精度 $\pm 10\text{mm}$),实时监测钻头垂直度;使用混凝土智能养护系统(自动喷水、测温,温差超阈值时报警);预应力张拉采用智能张拉设备(自动控制张拉力与持荷时间,数据实时上传),避免人为操作误差。

2. 隧道施工装备升级:配置隧道挖掘机机器人(TBM)或三臂凿岩台车,实现开挖、支护自动化,减少开挖偏差;采用喷射混凝土智能配比系统(自动控制骨料、水泥、外加剂比例),保证混凝土质量均匀;使用隧道超前地质预报系统(多频地质雷达+超前钻机),精准探明前方地质风险。

(四) 质量监测强化:及时发现与补救

建立全流程质量监测体系,确保问题早发现、早处理:

1. 桥梁施工监测:桩基施工后采用低应变法或超声波检测(检测比例100%),判定桩身完整性;混凝土结构采用回弹法+钻芯法检测强度(每500m³混凝土取1组芯样),用裂缝宽度仪监测裂缝发展;预应力施工后采用应力传感器监测预应力损失(每跨梁布置3个传感器),超限时补张拉。

2. 隧道施工监测:采用隧道监控量测系统,监测围岩收敛(每5m布置1个监测断面,初期1次/天)、拱顶下沉(精度 $\pm 1\text{mm}$),位移速率超5mm/d时暂停开挖,加强支护;二次衬砌施工后采用地质雷达检测(检测比例100%),发现空洞时及时注浆补密;运营前做水压试验(充水压力0.1MPa,保持24小时无渗漏)。

三、结语

桥梁隧道施工问题的控制需跳出“事后补救”的局限,转向“勘察预防、工艺控制、技术支撑、监测保障”的系统性思路。从问题成因看,多数质量隐患源于勘察不细、工艺不规范、管控不到位,需通过优化勘察设计筑牢基础,规范施工工艺减少人为误差,升级技术装备提升精度,强化质量监测及时纠偏。未来,随着BIM、大数据、人工智能等技术在工程领域的深入应用,桥梁隧道施工将向“数字化、智能化”转型,通过施工全过程数字化模拟与实时监测,进一步降低问题发生率,为交通基础设施的安全、耐久提供更强保障,助力我国交通建设迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1]王浩,刘敏.桥梁桩基施工常见质量问题及防控技术研究[J].铁道建筑,2023,63(08):89–92.
- [2]陈明,赵阳.隧道围岩失稳机理与初期支护优化对策[J].地下空间与工程学报,2024,20(02):615–620.
- [3]张丽,吴涛.预应力桥梁施工中预应力损失的控制技术[J].公路交通科技,2022,39(11):56–61.
- [4]李强,陈晓.隧道二次衬砌渗漏水原因分析及防治措施[J].现代隧道技术,2023,60(05):210–215.
- [5]张国栋,李娜.基于BIM技术的桥梁隧道施工质量监测体系构建[J].施工技术,2024,53(07):132–136.

水下机器人在大坝面板裂缝检测中的应用

李浪艇¹, 蒋才洋², 石朝波¹

1. 贵州乌江水电开发有限责任公司洪家渡发电厂, 贵州 毕节 551501

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081

DOI:10.61369/ME.2025070022

摘 要 : 水电站长期运行过程中, 大坝混凝土面板缺陷会直接威胁电站安全运营。当前针对大坝水上部分的检测手段较为丰富, 而水下部分检测方法相对单一。水下机器人搭载视觉系统可实现大坝面板水下部分的深度检测, 但现有产品在缺陷探测能力上存在不足, 尚未形成成熟的大坝面板检测体系。本文针对水下机器人在大坝面板检测中的应用短板, 提出改进方案, 并将其应用于贵州省某水电站大坝面板检测项目。检测结果表明, 改进后的检测方法能有效识别大坝水下表观缺陷, 为缺陷治理提供可靠技术支持, 显著提升大坝安全系数。

关 键 词 : 水下大坝面板; 缺陷检测; 水下机器人

Application of Underwater Robots in Dam Face Slab Detection

Li Langting¹, Jiang Caiyang², Shi Chaobo¹

1. Hongjiadu Power Plant of Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551501

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081

Abstract : During the long-term operation of hydropower stations, defects in the concrete face slabs of dams directly threaten the safe operation of the stations. Currently, there are abundant detection methods for the above-water parts of dams, while the detection methods for the underwater parts are relatively limited. Underwater robots equipped with vision systems can realize in-depth detection of the underwater parts of dam face slabs, but existing products have shortcomings in defect detection capabilities and a mature detection system for dam face slabs has not yet been formed. This paper addresses the application shortcomings of underwater robots in dam face slab detection, proposes an improved scheme, and applies it to the dam face slab detection project of a hydropower station in Guizhou Province. The detection results show that the improved detection method can effectively identify the underwater apparent defects of the dam, provide reliable technical support for defect treatment, and significantly improve the safety factor of the dam.

Keywords : underwater dam face slab; defect detection; underwater robot

引言

自新中国成立以来, 我国水利水电事业成就斐然, 已修建近9万座堤坝, 其中混凝土坝占主导。从规模分布看, 水深15米以上大坝近2万座, 30米以上超3000座^[1]。随着运行年限增长, 大量大坝步入“老龄化”, 部分运行超30年, 甚至超半个世纪。长期服役中, 受水文、温度、水流及材料老化等因素影响, 大坝混凝土面板水下部分易现蜂窝、麻面、裂缝等缺陷, 威胁大坝结构安全。

其中, 大坝深水部位内部裂缝隐蔽性强, 常规检测难有效探测; 表面裂缝成因复杂, 若未及时处理, 会向内部扩展, 可能引发渗漏、结构失稳等安全事故^[2-3]。

当前, 大坝深水、高坝混凝土裂缝检查仍以人工目视和潜水员水下探摸为主, 但两者局限明显。人工目视检查视角和范围受限, 成果碎片化, 存在盲区, 效率低且安全风险高; 搭设满排架虽改善效果, 但投入大、工期长, 影响发电。潜水员水下探摸则面临安全风险高、作业深度受限、效率低等问题^[4-6]。

随着科技发展, 水下机器人视觉成像探测技术凭借安全、高效、精准优势, 在多领域广泛应用。将其用于水工建筑物检测, 可快速识别、精确测量、准确定位大坝水下裂缝, 成为研究热点。但现有水下机器人多为通用型, 难以适应大坝面板水下特殊环境。为此, 本文针对关键技术问题改进优化, 提出完整解决方案, 并在贵州某水电站应用, 验证了其可行性与有效性, 取得良好检测效果。

一、技术概况

水下机器人搭载高清水下摄像系统以视觉感观直接获取结构体表面状况，通过对结构体表面的成像直观反映混凝土的性状。高清水下摄像系统主要由水下机器人和地面控制站、水下定位系统三部分组成。

(1) ROV 水下机器人：外壳采用高强度金属材料，结构体连接处采用双层密封，确保在深水作业环境下，水下机器人能够正常工作。其动力机构运用大扭力直流电机推动外部高强度铝合金轮毂，从而实现机器人的行走和转向。

机器人配备高精度电子罗盘，可实现水下定向；配备暖色高亮度 LED 灯光系统，实现全方位照明功能；搭载的高清摄像头可实现 360 度全方位旋转，摄像头可以依靠机器人抬升机构实现不同视角观察目标物体。

(2) 地面控制站：地面控制平台主要由控制箱、显示器和遥控器组成。其中控制箱的作用是提供电源、信号控制处理、视频信息的、对水下机器人的状态进行监控；显示器能够实时监视水下摄像机的视频画面，监测水下机器人的动力系统、视频采集系统、深度、方向和位置等状态信息，同时，在软件界面上可以对整个系统的参数进行调节；遥控器能够对水下机器人进行前进、后退、上浮、下潜、姿态悬停、原地掉头、侧向平移、仰俯、翻转、比重调整等控制，同时能够对视频采集系统进行采集触发的控制。

(3) 水下定位系统：由于水下机器人非线性动力学特性及水介质的特殊性等因素的影响，实现水下机器人的远距离及长时间、大范围内的精确导航成为一项艰难的任务，该款仪器主要利用声学进行导航。

二、工程概况

(一) 面板概况

某水电站装机 600MW，保证出力 159.1MW，多年平均发电量 15.59 亿 kWh。总库容 49.47 亿 m³，调节库容 33.61m³，属多年调节水库，混凝土面板堆石坝坝顶长度 427.79m，坝顶宽度 10.95m，坝顶高程 1147.50m，防浪墙高程 1148.70m，最大坝高 179.5m，上下游平均坡度为 1:1.4，2020 年完成了大坝面板水上部分裂缝检测。针对大坝面板水下部分一直没开展相关检测工作。需开展大坝面板水下检测，以了解大坝的健康情况。

(二) 检测目的及测线布设

为了对大坝面板的安全评价及后期维修提供依据，水下检测工作需要混凝土面板有无凸起、变形、破损、裂缝等缺陷进行摄像、定位及尺寸描述。结合现场实际情况、设备性能及检测要求，平行面板缝管 1m 间隔布设检测测线，检测起点位于水面，终点为一期面板填土层，最长测线长约 120m。

三、问题及解决方案

(一) 水下机器人方式

目前市场上水下机器人以浮游行进为主，机器人配备不同方位推进器可实现前进、后退、上浮、下潜、姿态悬停、原地掉

头、侧向平移、仰俯、翻转等运动姿态。针对大坝面板水下裂缝检测，要求获取稳定清晰的影像资料及定位信息，传统机器人的浮游行进方式无法稳定沿大坝面板向下行进及驻停获取缺陷影像，因此，在机器人下方装载爬行四轮车，通过人工牵引的方式可使机器人紧贴大坝面板行走，同时可借助机器人自带助力系统，检测深部坝面情况。

(二) 坝面清淤

在大坝面板水下检测过程中，坝面淤沙清理是需要解决的一个关键性问题，针对该类工程特性，搭载水下机器人的四轮车可同时搭载抽水泵，抽水泵连接高压扇形喷头，接电后可实现向前进方向淤沙清理的目的

(三) 设备供电

大坝面板长、宽均为百米级别，在对面板进行网格式检测过程中，长距离设备供电是一个制约检测工作因素，若采用坝顶接电，通过电线拉至各个检测区域的方式供电，长距离线缆电力损耗及其重量累积将严重影响检测工作甚至导致供电不足。为此，开展水下检测工作时，将作业及工作平台设置在水上，利用发电机供电，整个作业平台可随测线更换而灵活移动，在解决供电问题的同时，提高了工作效率。

(四) 缺陷定位及尺寸确定

检测过程中，遇到缺陷时，需要驻停对缺陷位置及尺寸信息进行记录，Find ROV 搭载的声学定位系统通过水面放置声学发射器和水下机器人搭载的声学接收器获取两者方位及距离信息来确定缺陷的位置信息，在遇到缺陷时，可通过 ROV 搭载的激光标尺对缺陷尺寸做一个度量^[7]。

四、检测效果

(一) 垃圾及淤沙冲刷前后对比

通过对水下机器人具载四轮车改进，增加了对面板淤沙、垃圾冲刷的功能，高压水泵接电后，由扇形高压喷头喷射高压水柱，可将面板垃圾冲刷干净，便于影像检测面板缺陷情况，图 1-1 为面板冲刷前后效果对比图。



图 1-1 面板冲刷前后对比图

(二) 部分典型缺陷检测成果图

对大坝面板水下部分进行检测后，发现裂缝、表面脱落、露筋及表面破裂等缺陷，从成果中可以看到，影像灯光较均匀、照片分辨率较高，可清晰观测各缺陷发育特征、发育尺寸等，见 1-2 图。

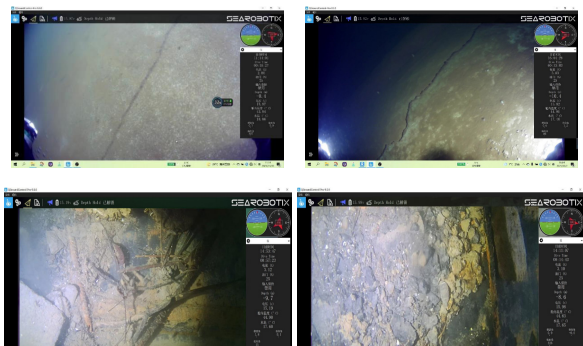


图 1-2 部分典型缺陷图

五、结论

基于贵州某水电站大坝面板水下检测项目实践，对水下机器人检测系统的行进、清淤、供电及缺陷量测方法改进后，有效解

决了传统检测手段的诸多问题，验证了其可行性与优越性。

改进后的水下机器人在大坝面板水下检测中特点显著：其一，工作状态稳定。加装爬行四轮车并人工辅助牵引，克服水流干扰，行进速度可由地面遥控器在 0.1 – 0.5 m/s 精准调控，能稳定下行，避免传统浮游机器人运动问题，保证摄像头拍摄距离和角度，为获取高质量影像资料提供稳定设备基础。其二，水下工作时间长。采用水面漂浮平台搭载发电机供电，摆脱传统电池供电限制，可连续 8 小时以上作业，短暂加油即可继续，大幅提升检测效率。其三，水下分辨率高。冲淤装置清理遮挡物，机器人精准驻停，多角度拍摄，缺陷识别准确率超 95%，为大坝缺陷治理提供可靠依据，对提升大坝安全意义重大^[8-10]。

参考文献

- [1] 马从计. 水下机器人在大坝水下表面裂缝检测中的应用 [J]. 技术与市场, 2012, 19(09): 59.
- [2] 洪云. 大坝安全检测的原理与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] 王理华. 我国水电站大坝安全现状分析 [J]. 水力发电, 1994(6): 35–39.
- [4] 李艳伟, 向航, 彭望. 基于无人机和水下机器人的高坝混凝土裂缝检测技术研究与应用 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(03): 52–54.
- [5] 陈从平, 聂葳, 吴喆, 李林波. 基于视觉机器人的大坝水下表面裂缝检测系统设计 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2016, 38(05): 72–74+86. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2016.05.014.
- [6] 沈清华, 杨青, 朱长富. 测量型水下机器人在水下构筑物缺陷检测中的应用 [J]. 水利技术监督, 2021(09): 9–11+56.
- [7] 林海涛, 王皓冉, 李永龙, 等. 水下非均匀光照场景下的混凝土图像增强方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2023, 63(07): 1144–1152.
- [8] 刘巍, 葛海彬, 徐妍彦, 等. 基于智能机器人的水下建筑物裂缝检测方法与应用 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(04): 164–169+190.
- [9] 徐刚. 水下机器人在福建水电工程水下建筑物质量检测中的应用 [J]. 水利水电快报, 2019, 40(11): 60–63.
- [10] 钟惠钰, 尤林贤. 小型遥控水下机器人在水利工程中的运用 [J]. 水利建设与管理, 2008, 28(12): 35–36.

高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制分析

魏巍

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025070023

摘 要： 高速公路桥梁作为交通基础设施的核心组成部分，其施工质量直接决定路网通行安全与使用寿命。本文以高速公路桥梁施工为研究对象，聚焦技术管理与质量控制两大核心环节，结合施工全流程特点，分析当前施工中技术管理存在的流程不规范、人员能力不足、设备运维滞后等问题，以及质量控制面临的材料监管不严、工序衔接漏洞、检测标准不统一等挑战。在此基础上，从施工准备阶段、施工实施阶段、竣工验收阶段提出针对性优化策略，包括完善技术管理体系、强化材料全周期管控、优化工序质量监督、创新检测技术应用等，旨在为提升高速公路桥梁施工质量、保障工程安全耐久性提供实践参考。

关 键 词： 高速公路桥梁；施工技术管理；质量控制；全流程管控；检测技术

Analysis of Technical Management and Quality Control in the Construction Process of Expressway Bridges

Wei Wei

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

Abstract： As a core component of transportation infrastructure, the construction quality of expressway Bridges directly determines the traffic safety and service life of the road network. This paper takes the construction of expressway Bridges as the research object, focusing on the two core links of technical management and quality control. Combined with the characteristics of the entire construction process, it analyzes the problems existing in the current technical management, such as non-standard processes, insufficient personnel capabilities, and lagging equipment operation and maintenance, as well as the challenges faced in quality control, such as lax material supervision, loopholes in process connection, and inconsistent inspection standards. Based on this, targeted optimization strategies are proposed from the construction preparation stage, construction implementation stage to the completion acceptance stage, including improving the technical management system, strengthening the full-cycle control of materials, optimizing the quality supervision of processes, and innovating the application of detection technologies, aiming to provide practical references for improving the construction quality of expressway Bridges and ensuring the safety and durability of the project.

Keywords： expressway bridge; construction technology management; quality control; full-process control; detection technology

前言

技术管理是高速公路桥梁施工的“生命线”，涵盖施工方案编制、技术交底、工艺优化、设备管理等内容，直接影响施工效率与技术落地效果；质量控制则是工程建设的“底线”，需贯穿材料进场、工序施工、成品检测全过程，确保工程符合设计标准与规范要求。二者相辅相成，缺一不可——缺乏技术支撑的质量控制易陷入“盲目监管”，脱离质量目标的技术管理则难以实现工程价值。因此，系统分析高速公路桥梁施工中的技术管理要点与质量控制难点，探索科学有效的管控路径，对推动我国高速公路桥梁建设高质量发展具有重要现实意义。

一、高速公路桥梁施工技术管理的核心内容与现存问题

（一）技术管理的核心内容

高速公路桥梁施工技术管理核心涵盖三方面：一是施工方案

编制与优化，需结合桥梁类型、地质条件及环境因素制定，明确关键工序参数，如预应力混凝土梁施工需规定张拉顺序、应力值及持荷时间，同时预留优化空间，例如软土地基桥梁施工中，可依据沉降监测数据动态调整桩基深度与承台浇筑工艺，预防结构变形。二是技术交底与人员培训，需实现“纵向到底、横向到

边”，从技术负责人到作业人员逐层传递要求，明确钢筋焊接、模板安装等易错工序规范；针对预制拼装、智能张拉等新技术，通过理论与实操结合开展专项培训，如预制梁拼装需培训人员掌握吊装精度（误差 $\leq 5\text{mm}$ ）、接缝灌浆配比等要点，避免拼装间隙超标。三是设备与材料技术管理，设备需按需选型，如钻孔灌注桩用匹配桩径的回旋钻机，同时建台账定期维保；材料需把控质量与存储，钢筋需查验合格证及检测报告并防潮防锈，混凝土需依环境调整配合比，夏季加缓凝剂、冬季掺早强剂，保障强度达标。^[1]

（二）当前技术管理存在的主要问题

高速公路桥梁施工技术管理存在三方面突出问题：

一是管理体系不完善，责任划分模糊，部分项目未健全技术管理责任制，施工方案审批流于形式，未联合监理、施工班组论证，技术交底仅书面传递且不跟踪理解情况，如某项目因未明确模板拆除时间，作业人员提前拆模致混凝土梁开裂。

二是人员技术能力不足，新技术应用滞后，基层作业人员缺乏系统培训，难掌握挂篮施工等复杂工序规范，技术管理人员对BIM、无人机监测等智能技术应用能力弱，依赖传统经验，如某斜拉桥施工因未用BIM查索塔钢筋碰撞，现场安装冲突被迫返工。^[2]

三是设备运维不到位，技术性能衰减，部分项目重采购轻运维，未定期检测保养设备，如张拉设备未校验压力表、钻孔设备未换磨损钻头，某项目起重机钢丝绳磨损超标未换，吊装时断裂致设备损坏、工期延误。

二、高速公路桥梁施工质量控制的关键环节与常见风险

（一）质量控制的关键环节

1. 材料质量控制：材料是工程质量的“源头”，需建立“进场验收—存储管控—使用跟踪”全周期控制体系。进场验收时，需严格执行“双检制”——施工单位自检合格后，报监理单位平行检测，不合格材料严禁进场。例如钢筋进场需检测屈服强度、抗拉强度、伸长率等指标，混凝土骨料需检验颗粒级配与含泥量；存储管控需分类存放，避免不同材料混杂污染，如水泥需存储在防雨防潮的仓库，避免受潮结块；使用跟踪需记录材料使用部位与数量，如混凝土浇筑时需记录每罐混凝土的坍落度与浇筑时间，确保可追溯。

2. 工序质量控制：工序质量是工程质量的“基础”，需针对关键工序实施“旁站监督+过程抽检”。以桥梁基础施工为例，钻孔灌注桩需控制成孔深度、孔径、垂直度，浇筑时需防止断桩——浇筑前需检查孔底沉渣厚度（ $\leq 50\text{mm}$ ），浇筑过程中需保持导管埋深在2-6m，避免导管拔出混凝土面；以桥面铺装施工为例，需控制平整度与厚度，摊铺时采用摊铺机匀速推进，振捣密实，初凝后及时覆盖洒水养护，防止表面开裂。此外，工序衔接需满足质量要求，如混凝土浇筑完成后需达到设计强度75%以上方可进行后续工序施工，避免因强度不足导致结构损伤。

3. 成品检测控制：成品检测是质量控制的“最后防线”，需结合桥梁结构特点选择合适的检测方法。外观检测需检查结构表面是否存在裂缝、蜂窝、麻面等缺陷，如混凝土梁表面裂缝宽度需 $\leq 0.2\text{mm}$ ；内在质量检测需采用无损检测技术（如超声波检测、回弹法），检测混凝土强度、内部密实度，对大跨度桥梁需开展荷载试验，验证结构承载能力；几何尺寸检测需使用全站仪、水准仪等设备，检测桥梁轴线偏位、标高、跨径等指标，确保符合设计要求。例如某高速公路大桥竣工验收时，通过超声波检测发现某桩基存在断桩缺陷，及时采取压浆补强措施，避免投入使用后引发安全事故。^[3]

（二）质量控制中的常见风险与成因

1. 材料质量风险：监管不严导致不合格材料流入现场：部分项目为降低成本，放松材料进场验收标准，存在“以次充好”现象——如使用不合格钢筋（抗拉强度不达标）、劣质外加剂（导致混凝土强度不足）；部分材料供应商提供虚假检测报告，施工单位未进行复检，导致不合格材料用于工程。例如某项目使用含泥量超标的砂石骨料配制混凝土，导致混凝土密实度不足，后期出现渗漏问题。

2. 工序质量风险：操作不规范与监督缺位叠加：基层作业人员因技术能力不足，存在违规操作——如钢筋焊接时焊缝长度不足、焊条型号错误；模板安装时拼接缝隙过大，导致混凝土浇筑时出现漏浆；监理单位旁站监督不到位，未及时制止违规操作，导致工序质量失控。例如某桥梁墩柱施工中，因模板加固不牢固，浇筑混凝土时出现模板变形，导致墩柱垂直度超标，需进行返工处理。

3. 检测质量风险：检测方法不当或数据造假：部分检测人员未按规定要求开展检测，如回弹法检测混凝土强度时未避开钢筋密集区，导致检测结果偏高；部分项目为应付验收，存在检测数据造假现象，如篡改混凝土试块强度试验报告，掩盖工程质量缺陷。检测质量失控会导致质量隐患无法及时发现，如某项目因未如实检测预应力张拉值，导致梁体出现预应力损失，长期使用后可能引发结构开裂。^[4]

三、高速公路桥梁施工技术管理与质量控制的优化策略

（一）完善技术管理体系，明确责任分工

1. 建立分级责任制：构建“项目总工—技术部门—施工班组—作业人员”四级技术管理责任体系，明确各层级职责——项目总工负责审批施工方案与技术难题攻关；技术部门负责编制方案、技术交底与现场技术指导；施工班组长负责组织作业人员按技术要求施工；作业人员需严格执行操作规范，确保技术落地。同时建立技术管理考核机制，将技术交底到位率、方案执行率纳入考核指标，考核结果与绩效挂钩，倒逼责任落实。

2. 优化方案审批与交底流程：施工方案编制需组织技术、质量、安全、监理等多方共同论证，结合现场地质勘察报告、环境监测数据进行优化，确保方案的可行性与针对性；审批流程需实

行“多级审核”，项目总工审核后报监理单位审批，重大方案（如大跨度桥梁施工方案）需报业主单位与专家评审。技术交底需采用“书面+现场演示”结合的方式，交底后组织作业人员进行考核，考核合格方可上岗；建立交底跟踪台账，记录交底内容、接收人、考核结果，确保技术要求传递无偏差。

（二）强化材料全周期管控，从源头把控质量

1. 建立供应商准入与评价机制：制定供应商准入标准，优先选择信誉好、产能强、检测能力完善的供应商；建立供应商评价体系，从材料质量、供货及时性、售后服务等方面进行动态评价，对不合格供应商实行黑名单制度，禁止参与项目投标。例如某项目通过招标选择具有国家认证资质的砂石骨料供应商，确保骨料质量稳定。

2. 严格材料进场验收与复检：材料进场时，施工单位需查验出厂合格证、质量证明文件，并按规范要求进行抽样复检，复检合格后方可使用；对关键材料（如钢筋、预应力钢绞线、支座）需委托第三方检测机构进行平行检测，确保检测结果真实可靠。建立材料进场台账，记录材料名称、规格、数量、进场时间、检测报告编号，实现材料可追溯。

3. 规范材料存储与使用管理：根据材料特性制定存储方案，如水泥采用“上盖下垫”存储方式，避免受潮；钢筋采用防雨棚存储，涂刷防锈漆防止锈蚀；预应力锚具需存储在干燥通风环境，避免锈蚀影响锚固性能。材料使用时需遵循“先进先出”原则，记录使用部位与数量，对超期材料（如水泥存储超3个月）需重新检测，合格后方可使用。^[5]

（三）创新技术应用，提升管理效率与质量精度

1. 推广智能建造技术：将BIM技术贯穿施工全流程，利用BIM模型进行施工方案模拟、钢筋碰撞检查、工序衔接优化，减少现场返工；应用智能张拉、智能压浆系统，实现预应力张拉应力与压浆量的精准控制，避免人为操作误差；采用无人机监测技术，对桥梁墩柱、索塔等高空结构进行外观检测，提高检测效率与安全性。例如某斜拉桥施工中，通过BIM模型模拟挂篮施工流程，优化挂篮行走轨迹，缩短施工周期15%；通过智能张拉系统，将张拉应力偏差控制在 $\pm 1\%$ 以内，提升预应力施工质量。

2. 引入信息化管理平台：搭建“施工技术与质量管控平台”，

整合施工方案、技术交底、材料检测、工序验收等数据，实现信息实时共享与动态监管。例如通过平台上传材料检测报告，监理单位可在线审核；施工班组通过平台接收技术交底文件，反馈现场技术问题；管理人员通过平台查看工序验收情况，及时发现质量隐患。同时利用大数据分析技术，对施工数据进行分析，识别质量风险点，如通过混凝土强度发展数据预测强度达标时间，指导后续工序施工。^[6]

（四）加强人员培训与考核，提升专业能力

1. 分层开展技术培训：针对技术管理人员，开展智能建造技术（BIM、无人机）、规范标准（如《公路桥涵施工技术规范》）培训，提升技术创新与方案编制能力；针对施工班组长，开展工序组织与现场协调培训，提升技术交底与问题处理能力；针对作业人员，开展实操技能培训，重点培训关键工序（如钢筋焊接、混凝土浇筑）的操作规范，通过“师带徒”“实操考核”等方式，确保作业人员掌握技术要点。例如某项目定期组织“技术比武”活动，通过钢筋焊接精度比拼、混凝土坍落度控制竞赛，提升作业人员实操水平。

2. 建立质量意识教育机制：通过案例教学、现场观摩等方式，开展质量意识教育——组织人员学习桥梁质量事故案例（如因混凝土强度不足导致桥梁坍塌），分析事故原因与教训；组织参观优质工程现场，学习先进的质量控制方法，让“质量第一”的理念深入人心。同时建立质量责任追究制度，对因违规操作、监管缺位导致质量事故的人员，严肃追究责任，形成震慑。

四、结语

高速公路桥梁施工技术管理与质量控制是一项系统工程，需统筹“技术、质量、人员、设备、材料”等多要素，贯穿施工全流程。当前，我国高速公路桥梁建设正朝着“大跨度、智能化、绿色化”方向发展，对技术管理与质量控制提出更高要求。通过完善技术管理体系、强化材料管控、创新技术应用、提升人员能力，可有效解决施工中存在的技术落地难、质量风险高的问题，推动高速公路桥梁施工从“经验驱动”向“技术驱动”“质量驱动”转型。

参考文献

- [1] 刘庆松. 高速公路桥梁施工关键技术及质量控制措施 [J]. 四川水泥, 2025, (4): 166-168.
- [2] 梁俊. 三江至柳州高速公路桥梁桩基质量评估探讨 [J]. 西部交通科技, 2019, (7): 123-127.
- [3] 张祥茂. 高速公路桥梁工程施工技术管理分析 [J]. 四川建材, 2020, (6): 207-208.
- [4] 张瑞兵. 大跨度预应力混凝土连续梁桥施工技术及管理 [J]. 工程机械与维修, 2022, (6): 270-272.
- [5] 张君瑞. 高速公路桥梁施工过程中技术管理与质量控制 [J]. 绿色环保建材, 2021, (11): 80-81.
- [6] 周芸芸. 高速公路桥梁工程施工项目质量管理探析 [J]. 工程技术研究, 2024, (9): 150-152.

房建工程质量控制要点及优化措施

张金玉, 张小华, 刘翔, 谭龙宇, 赵浩汀

中国建筑第四工程局, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ME.2025070027

摘 要 : 为提高房建工程质量, 本文从管理架构和现场施工两个关键因素入手, 深入分析了组织架构、管理制度、人员管理、材料质量控制及施工工艺技术等关键控制要点。并提出了质量优化措施, 旨在为提高工程质量提供切实可行的参考路径, 推动工程质量管理的精细化与现代化。

关 键 词 : 房建工程; 质量管理; 质量控制; 优化措施

Key points and Optimization Measures for Quality Control of Building Construction Projects

Zhang Jinyu, Zhang Xiaohua, Liu Xiang, Tan Longyu, Zhao Haoting

China Construction Fourth Engineering Bureau, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : To enhance the quality of building construction projects, this paper delves into key control points such as organizational structure, management systems, personnel management, material quality control, and construction techniques, focusing on two critical factors: management framework and on-site construction. It proposes quality optimization measures aimed at providing practical reference pathways for improving project quality, thereby advancing the refinement and modernization of quality management in construction.

Keywords : building construction projects; quality management; quality control; optimization measures

引言

当前我国建筑行业由高速发展转向高质量发展, 对建筑物的外观设计、使用功能及智能化的要求越来越高, 其结构形式与施工技术也日趋复杂, 使得工程质量的高标准要求显得更为重要。同时, 施工质量直接关系到工程结构安全、使用功能、投资效益, 因此应加强对工程质量的把控。

施工质量并非由单一环节决定, 而是受到人、材、机、法、环等多维因素共同影响的复杂系统工程。从上层管理到现场施工, 这些因素相互交织、动态变化, 构成了一个错综复杂的影响网络^[1]。因此, 在对建筑工程质量的管控中, 应系统性地识别、分析和厘清各类关键影响因素及其内在作用机制, 并在施工过程中不断纠偏, 保证工程质量。本文基于已有的研究, 结合施工现场调查, 分析了建筑工程中影响工程质量的关键因素, 并提出了相应的优化措施, 为工程实践中提高工程质量提供了参考依据。

一、管理方面的质量控制要点

(一) 健全的组织架构

健全的组织架构是工程施工质量管理的基石与核心。组建一个权责清晰、层级分明、沟通顺畅的组织体系, 能将质量目标有效分解并落实到每个岗位, 从而确保各项质量控制指令得到迅速响应和执行, 这是质量管理体系得以有效运行的先决条件^[2]。

在工程实践中, 质量组织架构常常面临诸多问题: 一是权责不清, 导致质量责任无法有效追溯, 出现“多头管理”或“管理真空”; 二是部门间沟通壁垒森严, 信息传递滞后或失真, 使得质量问题无法被及时发现和解决; 三是资源配置不足, 如质检人员数量或权威性不够, 难以独立、公正地履行职责。这些问题会

直接削弱质量管理的有效性, 因此, 构建并维护一个权威、高效、协同的组织架构, 是提升工程施工质量的关键工作。

组建质量组织架构时, 应先根据项目特点、规模和合同要求, 明确项目的总体质量目标; 然后确立以项目经理为第一责任人的质量管理领导小组, 并下设专门的质量管理部门; 明确各级管理人员(如技术负责人、施工员、质量员)及班组的质量责任, 形成从决策层、管理层到作业层的垂直责任网络, 并建立与之配套的沟通协调机制。

(二) 科学的管理制度

科学的管理制度是所有质量管理活动的依据和准则, 能将抽象的质量目标转化为具体、可操作的工作流程与行为规范, 有效避免管理的随意性和人为因素的干扰。

当前许多项目的质量管理体系仍存在显著问题：一是制度本身脱离项目实际，缺乏针对性和可操作性；二是制度更新滞后，未能及时纳入新技术、新工艺的要求，无法适应工程变更；三是制度执行流于形式，缺乏有效的监督和问责机制，导致其权威性丧失。因此，构建一套科学、严谨且有效的管理制度，并确保其落地生根，是提升工程质量的关键所在^[4]。

科学的管理制度应包括：（1）清晰的质量责任划分制度，明确从项目经理到一线作业每个岗位的质量职责与权限，实现责任可追溯；（2）完备的流程控制制度，包括技术交底、材料验收、工序检查、隐蔽工程验收、成品保护等关键环节的标准化操作程序（SOP）；（3）系统的监督考核制度，通过定期与不定期的检查、评估与奖惩，确保制度执行力；（4）持续改进制度，建立质量信息反馈与统计分析机制，为制度的动态优化提供数据支撑。

（三）人员管理

1. 关键岗位的人员管理

关键岗位人员的专业能力与责任意识直接决定了质量目标的实现程度。职业资格证书是质量管理人员上岗的必备条件，必须严格执行持证上岗制度，确保具备国家或行业要求的执业资格证书。同时，质量管理者必须具备丰富的实践经验，能更精准地预判质量风险，尤其是在处理工程变更、突发质量事故或应用新工艺时所展现出更强的统筹能力和问题解决能力。因此，在选派关键岗位人员时，必须坚持资质与经验并重的原则，并通过明晰的权责划分与有效的绩效激励机制，充分发挥其专业价值，为工程质量提供坚实的人才保障。

2. 施工人员的管理

现场工人直接参与工程施工，其操作熟练度直接决定了工程质量。对一线操作工人的要求，应优先选用具备相应工种操作技能证书及良好从业记录的劳务人员。上岗前必须组织系统的三级安全教育、技术交底与实操培训，使其充分理解施工图纸、工艺标准及质量要求。施工过程中还应定期开展专项技能提升与质量案例警示教育，持续强化其质量意识和规范操作习惯。建立科学的奖惩激励机制，将施工质量表现与个人收入直接挂钩，实行优质优价、奖优罚劣。对严格按工艺施工、质量优良的班组及个人给予物质奖励或公开表彰；对违规操作、造成质量问题的行为及时纠正并予以相应处罚，形成鲜明的质量导向，激发施工人员主动重视质量、追求精益的积极性。

二、施工过程中的质量控制要点

（一）材料质量控制

1. 材料采购

项目应根据设计图纸与规范要求，详细编制材料需求计划和技术标准。采购前，必须对供应商进行严格的资格审查，综合评估其生产能力、信誉、质量保证体系及售后服务，优先选择长期合作、口碑良好的合格供应商。采购合同中必须明确材料的规格、型号、性能指标、验收标准、违约责任等条款，从源头上约定质量要求，避免日后纠纷。

2. 材料进场验收

材料进场必须做到“三证齐全”（出厂合格证、质量检验报告、厂家资质证明），并报监理工程师审核。实物验收时，要核对其品种、规格、数量是否与采购计划一致，外观是否有破损、变形、锈蚀等缺陷。更重要的是，必须严格按照规范要求进行见证取样和送检，对水泥、钢筋、防水材料、混凝土试块等关键材料进行复试，确保其力学性能、化学指标等符合设计要求，坚决做到“先检验，后使用”，不合格材料做退场处理并予以记录。

3. 材料的现场保护

材料进场后必须做好保护，根据材料的特性，分类、分规格堆放，设置清晰的标识牌。同时，建立完善的领用发放制度，遵循“先进先出”的原则，减少积压时间，并对施工班组进行交底，确保材料在使用过程中得到妥善处理。

（二）施工工艺与技术质量控制

1. 施工组织设计与专项施工方案的编制与实施

施工工艺直接指导现场施工，通常包含于技术方案中，因而技术方案编制应具备科学性和可行性，形成“编制—报审—交底—执行—复核—纠偏”的闭环管理。方案编制时必须具有针对性和可操作性，应根据图纸设计要求，结合现场实际情况，综合考虑安全、质量和成本等要素。对于技术复杂、危险性较大的分部分项工程（如深基坑、高支模、大型构件吊装等），必须编制专项施工方案。严格按规章制度进行报审，符合条件时应组织专家会审。

为保证方案能落地实施，在获批后应组织正式的技术交底会，向各级管理人员及作业班组长进行交底，确保完全掌握施工工艺、技术要点和质量标准。在施工过程中，管理人员必须严格监督，确保现场作业不偏离方案要求，严禁擅自变更工艺或省略步骤。任何因现场条件变化导致的方案调整，都必须履行同样的报批和交底程序。

2. 关键工序质量控制

土建施工中的土方工程、基础工程、主体结构工程和防水工程对工程质量至关重要，因此在施工中应加强对各分部工程的关键工序的质量控制。

关键工序的识别需基于工程特点和规范要求，以防水工程为例。在材料选用上，应严格遵循设计规范及合同要求，目前普遍使用的防水材料为聚合物改性沥青卷材、高分子防水卷材、聚氨酯涂料以及水泥基渗透结晶型防水材料等。地下室顶板与外墙宜采用柔性防水材料，比如SBS改性沥青卷材，其延伸率可超过150%，能够更好地适应结构变形；而卫生间、屋面等区域则可采用聚氨酯防水涂料，涂膜厚度一般不低于2 mm，抗拉强度须大于等于2 MPa，从而保障防水效果。加强细部节点的处理，如穿墙管道、变形缝等易发生渗漏的位置，需采取专门工艺与材料配合加强处理。穿墙管周边应加设柔性套管，并采用聚氨酯密封胶或硅酮密封胶等耐老化密封材料填封，以应对因温度变化引起的管道位移。变形缝处应安装专用防水带，常见宽度为300~500 mm，可选用EPDM或三元乙丙橡胶材质，其抗拉强度需高于7 MPa，伸长率不低于400%，这既保证了防水密封性，又能适应接

缝变形需要。

3.新技术、新工艺、新材料的应用与质量控制

“三新”（新技术、新工艺、新材料）能有效提高施工效率、提升工程品质、降低资源消耗，因而在施工中经常被要求有所体现。但“三新”相较于传统技术也伴随着更高的不确定性风险，若应用不当或质量控制失效，极易引发新的、更复杂的质量问题。因此，在应用时必须建立一套特殊的质量控制流程。

在决定采用某项“三新”之前，必须对其技术成熟度、可靠性、适用性进行充分调研和评估。核查其是否具备国家认可的鉴定证书、技术标准和应用规程，并对其在本工程特定环境下的可行性进行专家论证。审批通过后，必须编制详尽的专项应用方案，其内容应远比传统方案更为细致，包括工艺原理、操作要点、质量验收标准、可能出现的意外情况及应急预案。严禁在大面积施工中直接使用。应首先选择一个小区域或一个单元进行“样板”施工，通过样板来验证方案的可行性，统一操作要领，同时将其作为对作业人员进行实地培训的载体和质量验收的实物标准。在应用过程中，要加大检测频率和监测点，全面收集各项性能数据，与预期目标进行比对分析。施工及技术人员必须全程跟踪，及时发现问题并调整参数。完成后，还需进行持续的跟踪观测，评估其长期性能。

三、质量优化措施

（一）加快信息化转型

加快信息数据在建筑工程中的应用，构建大数据信息库和协同工作平台。将项目全寿命周期的生产资料及管理资料上传至信

息库，形成大数据库，新建项目可通过大数据分析对比，找到最匹配当前项目的数据信息，参考其管理模式，可避免管理漏洞，减少质量缺陷及管理成本。协同工作平台可为施工提供更紧密的配合。在设计阶段，不同专业在同一模型平台上协同作业，各专业设计效果实时显示于同一模型，可提前消除设计冲突。在施工过程中，搭建协同工作平台，利用平台在线处理质量问题，选择模型中的构件进行标注，同时将质量缺陷照片上传至附注信息，所有质量问题的时间、位置均可精确显示，做到质量问题无遗漏。

（二）加强技术创新

加强技术创新关键在于制定前瞻性的技术方案并大力推广应用新型工艺。技术方案上，应着力构建以建筑信息模型（BIM）技术为核心的数字化管理方案^[5]，通过其在设计阶段的碰撞检查、施工阶段的5D模拟，实现对质量风险的前置化排查与方案优化，从根本上减少现场变更与返工。新工艺的引入则需聚焦于提升施工精度与效率，例如全面推广精度高、成型质量好的铝合金模板体系，以有效解决混凝土蜂窝、麻面等传统质量通病；积极采用钢筋数控加工与模块化预制装配技术，确保构件尺寸精准并大幅减少现场作业的不确定性。此外，积极探索并集成物联网传感器、无人机测绘等智能监测方案，对关键施工环节如大体积混凝土测温养护、钢结构应力变形等进行实时数据采集与反馈，形成覆盖全过程的可追溯、可预警的精细化质量控制闭环，从而为工程实体质量的全面提升提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 段诗哲. 建筑工程质量控制的关键因素与优化措施 [J]. 中华建设, 2025, (06): 52-54.
[2] 宿方瑞. 建筑工程建设管理的优化措施及创新策略 [J]. 中国住宅设施, 2025, (06): 142-144.
[3] 曹元光. 建筑工程质量管理体系的构建与实施探讨 [J]. 居业, 2025, (03): 154-156.
[4] 叶胜银. 建筑工程管理的关键要素与优化路径 [J]. 江苏建材, 2025, (03): 136-138.
[5] 刘永胜. BIM技术在建筑工程施工质量管理中的应用分析 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48 (14): 34-35.

浅谈高强混凝土配合比设计质量控制与研究

刘佳, 刘冲, 廖红玉

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430080

DOI:10.61369/ME.2025070034

摘 要 : 以某医院项目中 C60 高强混凝土施工为例, 通过对比四家不同商混站 C60 高强混凝土的施工质量表现, 分析高强混凝土配合比设计对混凝土施工质量的影响, 以期为类似施工质量控制提供借鉴。

关 键 词 : 高强混凝土; 配合比设计; 质量控制; 施工

A Brief Discussion on Quality Control and Research of Mix Proportion Design for High-Strength Concrete

Liu Jia, Liu Chong, Liao Hongyu

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430080

Abstract : Taking the construction of C60 high-strength concrete in a hospital project as an example, this paper analyzes the impact of mix proportion design on the construction quality of high-strength concrete by comparing the construction quality performance of C60 high-strength concrete from four different ready-mixed concrete plants, aiming to provide references for similar construction quality control.

Keywords : high-strength concrete; mix proportion design; quality control; construction

随着现代建筑的不断发展, 大空间、大跨度、超高层等建筑对于材料的要求也越来越高要求。高强混凝土在建筑施工的中逐渐运用, 但存在应用少、技术要求高、可借鉴经验有限等缺点, 因此, 对其工程的质量控制要求较高。^[1]

一、工程概况

河南某医院新建内科病房楼项目由1栋主楼及其地下室组成, 主楼建筑高度为79.80m(室外地面至女儿墙顶高度), 主楼地上总长度为144.0m, 总建筑面积为94544.5m²。地下二层层高4.6m, 地下一层层高主楼范围内为7.2m(地下车库范围为5.1m), 一层层高4.5m、二至四层层高为4.2m, 五至十九层层高为3.9m。结构形式为A级高度现浇钢筋混凝土-剪力墙结构, 地下2层, 地上19层, 其中地下一层和地下二层为机动车库和放射科, 地上一至三层为检查用房、药房等功能房间, 四至六层为实验室、机房等配套房间, 七至十九层为病房。

根据项目设计图纸, 主楼区负二层至三层(基础顶~12.85m)框架柱为C60高强混凝土, 其具体性能参数如下表:

混凝土强度等级、防水混凝土的抗渗等级

附表 7.2.1

序号	构件名称及范围	混凝土强度等级	防水混凝土抗渗等级
1	基础垫层	C15	——
2	筏板	C35	P8
	地下室顶板	C35	P6
	地下室外墙、水池墙及其相连接的墙柱	基础顶~7.200	C35
		7.200~-0.050	C35
3	剪力墙、与剪力墙相连的柱	基础顶~4.350	C50
		4.350~59.950	C40
		59.950以上	C30
		——	——
4	主楼范围内框架柱	基础顶~12.850	C60
		12.850~17.050	C55
		17.050~4.350	C50
		4.350~59.950	C40
		59.950以上	C30
5	主楼范围外框架柱	基础顶~车库顶板	C35
6	主楼范围内梁、板、楼梯	基础顶~4.350	C40
		4.350以上	C30
7	主楼范围外梁、板、楼梯	基础顶~7.200	C35
8	主楼范围内板、楼梯	基础顶~4.350	C40
		4.350以上	C30
9	构造柱、圈梁	——	C25

注:首层临土侧构件混凝土抗渗等级均为P6;

二、配合比设计

本工程施工采用了四家不同商混站同时供应混凝土进行施工，为便于区别，分别用 A 商混站、B 商混站、C 商混站、D 商混站表示。

1.A 商混站 C60 高强混凝土配比设计如下：

材料名称	品种、规格	1m ³ 砼材料用量
水泥	天瑞水泥 P.O 42.5	424kg
砂	南阳 河砂（中）	556kg
石子	郑州 5-25mm 碎石	814kg
细石	郑州 5-10mm 碎石	317kg
水	饮用水	165kg
掺合料	晋城市顺盛新型环保建材有限公司 矿粉 S95 级	141kg
外加剂	郑州新海洋新型建材有限公司 防冻型 XH-ZF	13.5kg
塌落度：180±20mm		水胶比：0.29
		砂率：33%

2.B 商混站 C60 高强混凝土配比设计如下：

材料名称	品种、规格	1m ³ 砼材料用量
水泥	嵩基 水泥 P.O 42.5	413kg
砂	信阳 河砂（中）	692kg
石子	贾峪 5-20mm 碎石	1000kg
水	饮用水	160kg
掺合料	河南新世纪粉煤灰 F 类 II 级	49kg
	晋城顺盛 矿粉 S95 级	105kg
外加剂	科之杰新材料集团河南有限公司 Point-241HS	10.5kg
塌落度：180±20mm		水胶比：0.28
		砂率：41%

3.C 商混站 C60 高强混凝土配比设计如下：

材料名称	品种、规格	1m ³ 砼材料用量
水泥	登封市嵩基水泥有限公司 水泥 P.O 42.5	442kg
砂	鲁山 河砂（中）	652kg
石子 I	登封 5-10mm	255kg
石子 II	登封 10-20mm	764kg
水	饮用水	165kg
掺合料	裕中电厂 F 类 II 级粉煤灰	59kg
	国泰 矿粉 S95 级	88kg
外加剂	郑州 XY-1 减水剂	14.7kg
塌落度：180±20mm		水胶比：0.28
		砂率：39%

4.D 商混站 C60 高强混凝土配比设计如下：

材料名称	品种、规格	1m ³ 砼材料用量
水泥	天瑞水泥 P.O 42.5	410kg
砂	南阳 河砂（中）	660kg
石子 I	贾峪 5-10mm	196kg
石子 II	贾峪 10-20mm	860kg
水	饮用水	158kg
掺合料	大唐巩义 F 类 II 级粉煤灰	75kg
	新乡长城 矿粉 S95 级	80kg
外加剂	科之杰高性能减水剂	9.3kg
塌落度：180±20mm		水胶比：0.28
		砂率：36%

三、施工质量表现

在本项目四家商混站所供 C60 高强混凝土施工后，对已完成混凝土构件进行验收，发现其中 A 商混站存在以下三类质量问题：柱构件表面浮浆过厚，存在皸裂、麻面现象，构件下部回弹强度离值散性较大，构件表面打磨后，内部粗骨料分布不均匀。其他 B 商混站、C 商混站、D 商混站柱构件表现正常。

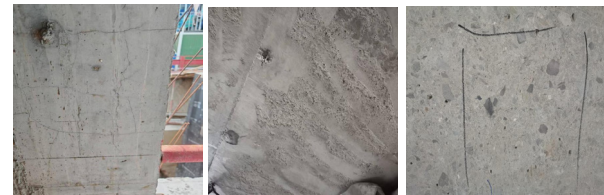


图1 表面皸裂

2 表面麻面

3 粗骨料不均匀

四、质量对比分析

（一）施工条件对比

1. 检查内架工、钢筋工、模板工、混凝土工施工交底情况，均按要求进行了交底。

2. 检查混凝土浇筑前报验，均按流程进行了检查、报验，验收流程和结果符合要求。

3. 检查现场混凝土浇筑开盘鉴定信息，对比现场浇筑构件部位和设计强度要求，未发现混凝土标号使用错误，浇筑部位错误情况。

4. 检查现场混凝土浇筑过程中塌落度检测、标样试块留置、同条件试块留置均按规范要求执行，试块检测结果合格。

5. 检查混凝土浇筑中施工员、监理员旁站均按流程进行，未发现工人对混凝土私自加水、无未振捣等情况。

6. 检测查混凝土浇筑后养护情况，均按要求进行了养护并记录养护情况。

7. 检查对比相同施工时段，同一楼层，同一时段中所浇筑 C60 混凝土构件，仅 A 商混站所供应的 C60 混凝土构件出现质量问题。

8. 对比不同两个班组施工四家商混，不同两个班组施工 A 商混站 C60 高强混凝土均出现质量问题，两个班组施工 B 商混站、C 商混站、D 商混站 C60 高强混凝土均未出现质量问题。

（二）配合比设计对比

1. 根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》中表 7.3.1 第 2 条规定高强混凝土粗骨料最大公称粒径不宜大于 25.0mm^[2]，A 商混站 C60 高强混凝土配合比设计粗骨料检测存在公称粒径大于 26.5mm。B 商混站、C 商混站、D 商混站 C60 高强混凝土配合比设计粗骨料检测公称粒径均小于 20.0mm。

2. 根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》中表 7.3.2 规定 ≥ C60 的混凝土，砂率设计区间应为 35%-42%，A 商混站 C60 高强混凝土配合比设计砂率过低，仅有 33%。B 商混站、C 商混站、D 商混站 C60 高强混凝土配合比设计砂率分别为 41%、39%、

36%。

3.根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》条文说明中7.3.1第3条规定高强混凝土在矿物掺合料方面,采用复合掺用粒化高炉矿渣粉和粉煤灰配置高强混凝土比较普遍。A商混站 C60 高强混凝土设计配合比中仅单独使用粒化高炉矿渣粉,其余 B 商混站、C 商混站、D 商混站 C60 高强混凝土配合比设计均采用复合掺用粒化高炉矿渣粉和粉煤灰配置。

4.根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》条文说明中7.3.1第2条规定高强混凝土在骨料方面,如果粗骨料粒径太大或(和)针片状颗粒含量较多,不利于混凝土中骨料合理堆积和应力合理分布,直接影响混凝土强度,也影响混凝土拌合物性能。

5.根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》7.4.1、7.4.2中良好的骨料颗粒粒型和级配有利于配制泵送性能良好的混凝土,在混凝土中掺用泵送剂或减水剂以及粉煤灰,并调整其合适掺量,是配置泵送混凝土的基本方法。泵送混凝土的砂率通常控制在35%~45%。《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》条文说明7.4.2中第2条,泵送混凝土配合比应符合下列规定:砂率宜为35%~45%。A 商混站 C60 高强混凝土设计配合比砂率为33%,不适合泵送混凝土配合比要求。

6.根据《混凝土结构工程施工规范 GB50666-2011》第8.3.6条规定粗骨料粒径大于25mm的混凝土浇筑倾落高度限制 $\leq 3\text{m}$,粗骨料粒径小于等于25mm的混凝土浇筑倾落高度限制 $\leq 6\text{m}$ 。^[1]本工程为项目层高均大于3米,且柱结构钢筋密集无法使用串筒,A 商混站 C60 高强混凝土配合比设计粗骨料粒径大于25mm,无法满足现场施工性要求,B 商混站、C 商混站、D 商混站 C60 高强混凝土配合比设计粗骨料粒径均小于等于19mm,满足现场施工性要求。

7.根据《普通混凝土配合比设计规程 JGJ55-2011》条文说明

中3.0.1条,混凝土配合比设计不仅仅应满足配合比强度要求,还应满足施工性能、其他力学性能、长期性能和耐久性能的要求。因 A 商混站 C60 高强混凝土配合比设计存在缺陷,虽其试验试块强度能满足要求,但其施工性能等不满足要求,无法实现施工质量满足要求。

五、质量控制措施

针对存在的质量问题分析原因,在类似施工中采取以下措施控制。

1.在高强混凝土配合比设计时,需充分结合工程结构的实际情况,如层高、体积、钢筋密度等。选取合适的骨料粒径,使其满足规范要求。

2.在高强混凝土配合比设计时,需充分考虑工程现场的实际情况,如是否泵送、是否使用串筒,是否使用料斗等。选取合适的骨料粒径及砂率,使其达到设计强度的同时,满足现场施工要求。

3.在高强混凝土配合比设计时,使用规范已经验证的比例参数,确保配合比可靠性和保证性。比如采用复合掺用粒化高炉矿渣粉和粉煤灰配置高强混凝土。

六、结束语

随着绿色建筑的提倡,高强混凝土的使用也越来越广泛,但其出现的问题也随之越来越多,人们往往关注高强混凝土配合比材料自身的性能、参数和现场施工的控制,却忽略了高强混凝土与现场施工性结合的问题,导致其理论设计与实际施工存在较大偏差的情况发生。

参考文献

[1] 汪海. 高强混凝土质量控制要点 [J]. 江苏建材, 2025, (03): 4-6.

[2] JGJ55-2011, 普通混凝土配合比设计规程 [S].

[3] GB50666-2011, 混凝土结构工程施工规范 [S].

基于 CAESAR II 的高温高压管道应力分析与柔性优化研究

刘锐

中国昆仑工程有限公司沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110167

DOI:10.61369/ME.2025070004

摘 要 : 随着石油、化工等工业领域对高温高压管道系统的需求不断增加, 管道设计与安全性评估显得尤为重要。本文基于 CAESAR II 软件进行高温高压管道的应力分析, 研究其在复杂工况下的应力状态与变形情况。通过灵活优化管道系统的设计, 探讨了提高管道柔性、减少应力集中和延长管道使用寿命的有效方法。研究结果表明, 合理的管道布局、支撑方式及材料选择对管道的应力分布具有重要影响。本研究为高温高压管道的优化设计与安全运行提供了理论依据。

关 键 词 : CAESAR II; 高温高压管道; 应力分析; 柔性优化; 安全评估

Research on Stress Analysis and Flexibility Optimization of High-Temperature and High-Pressure Piping Based on CAESAR II

Liu Rui

Shenyang Branch, China Kunlun Contracting & Engineering Corporation, Shenyang, Liaoning 110167

Abstract : With the increasing demand for high-temperature and high-pressure piping systems in industries such as petroleum and chemicals, piping design and safety assessment have become particularly crucial. This paper conducts stress analysis on high-temperature and high-pressure piping using CAESAR II software, investigating its stress states and deformation under complex operating conditions. Through flexible optimization of the piping system design, effective methods are explored to enhance piping flexibility, reduce stress concentration, and extend the service life of the piping. The research results indicate that reasonable piping layout, support methods, and material selection have significant impacts on the stress distribution of the piping. This study provides a theoretical basis for the optimized design and safe operation of high-temperature and high-pressure piping.

Keywords : CAESAR II; high-temperature and high-pressure piping; stress analysis; flexibility optimization; safety assessment

引言

高温高压管道是现代工业生产中不可或缺的基础设施, 其安全性直接关系到生产的稳定性与安全性。在高温高压环境下, 管道容易发生热膨胀、变形和应力集中等问题, 严重时甚至可能导致管道破裂或泄漏。因此, 开展高温高压管道的应力分析与优化研究具有重要的现实意义。CAESAR II 作为一款专业的管道应力分析软件, 已广泛应用于各种工程项目中。本文将基于 CAESAR II 对高温高压管道进行应力分析, 并通过柔性优化设计对管道的安全性与可靠性进行提升, 为管道设计提供有效的解决方案。

一、高温高压管道的应力分析

(一) 高温高压管道的加载条件与应力分布

高温高压管道在实际工程中常常承受多种复杂的载荷, 包括内部压力、温度变化、外部载荷以及地震等外部因素。以常见的蒸汽管道为例, 内部压力可高达 10 - 20 MPa, 温度范围在 400 - 600 °C。内部压力作用会导致管道壁产生环向和轴向应力, 例如环向应力可按公式 $\sigma_h = p \cdot d/(2t)$ 计算, 当 $p=15$ MPa、 $d=500$

mm、 $t=20$ mm 时, 环向应力约为 187.5 MPa。同时, 温度变化会导致热膨胀, 使管道发生变形, 产生附加的应力。在高温工况下, 管道的弹性模量和屈服强度会下降, 如常见的 12Cr1MoV 钢在室温下屈服强度约为 295 MPa, 而在 500 °C 时下降至 160 MPa 左右, 这会加剧应力集中现象, 增加管道发生塑性变形的风险^[1]。对于弯曲部分, 外力作用下会产生更为复杂的应力状态, 如弯曲应力、扭转应力等。

（二）CAESAR II软件的使用与功能特点

CAESAR II是一款广泛应用于管道应力分析的专业软件，特别适用于高温高压管道的设计与分析。该软件能够通过输入管道的几何参数、材料性质、工况条件等信息，进行应力、变形、振动、疲劳等方面的分析。例如在实际工程中，CAESAR II可对某长度为 120 m、直径 600 mm 的管道系统在 15 MPa 内压和 520 °C 下的应力分布进行仿真，计算结果显示最大等效应力可达到 180 MPa。CAESAR II 提供了强大的求解功能，能够模拟管道在不同载荷下的响应，并进行应力分布的可视化展示。对于高温高压管道，CAESAR II 能够考虑温度梯度对管道产生的影响，并根据热膨胀和内部压力对管道进行应力计算。

（三）高温高压工况下的管道变形与应力分析方法

在高温高压工况下，管道会经历热膨胀、弹性变形和塑性变形等多种形式的变形。若未设置补偿装置，热膨胀将产生较大的附加温度应力。管道的变形不仅仅是单一的线性伸长，还会表现出弯曲、扭转等非线性变形形式^[2]。因此，对于高温高压管道的应力分析，需要采用更为精确的非线性分析方法。常见的分析方法包括有限元分析（FEA）和结构力学分析。在实际操作中，FEA 方法可以将管道划分为多个小单元，对每个单元的应力、变形进行精细计算，并进行全局分析。尤其在弯管处，有限元计算结果往往显示局部应力比直管段高出 20 - 30%，这是应力集中区域。通过这种方法，可以有效捕捉复杂工况下的应力集中，预测管道可能出现的破坏形式，为后续的优化设计提供依据。

二、管道柔性设计与优化

（一）管道柔性优化的基本原理

管道柔性设计的核心目的是降低因热膨胀、压力及外部载荷引起的应力水平，避免因过大应力导致的结构破坏。柔性设计的基本思路是通过改变管道的几何布置、引入弯头或膨胀节来吸收位移和应力。如果不进行柔性设计，热膨胀产生的附加应力可能在固定点集中并超过材料许用值，导致失效。通过在管线上布置 U 型或 L 型弯头，可显著减小热膨胀传递至固定点的应力。研究表明，合理设置弯头可使最大应力降低 30 - 40%。因此，柔性优化设计不仅提高了管道的安全性，还延长了其使用寿命^[3]。

（二）管道支撑系统的优化设计

管道支撑系统是实现柔性设计的关键环节，合理的支撑布置能够有效限制不必要的位移，同时允许必要的热膨胀补偿。常见的支撑类型包括刚性支撑、弹簧支撑和滑动支撑等。以一条直径 600 mm、长度 120 m 的高压蒸汽管道为例，若采用单一刚性支撑，固定点处应力可能达到 180 MPa。但若在管线上布置 3 - 4 个滑动支撑并在关键位置安装弹簧支撑，计算结果显示应力可降低至 110 - 120 MPa。此外，CAESAR II 等分析软件能够对不同支撑方案进行模拟，给出位移、应力和反力的对比结果，辅助设计

人员选择最优方案。通过优化支撑布置，可以在满足安全性的前提下减少支撑数量，从而降低施工成本和维护难度。

（三）管道材料选择对柔性优化的影响

材料的选择对管道柔性优化具有重要影响。不同材料的弹性模量、线膨胀系数和高温强度差异显著，会直接影响管道的柔性和承载能力。例如，普通碳钢（Q235）的弹性模量约为 2.06×10^5 MPa，而奥氏体不锈钢（如 304）约为 1.93×10^5 MPa，后者更易产生位移但具有更好的耐高温性能。对于工作温度 500 °C 的管道，若选用 12Cr1MoV 钢，其高温蠕变寿命在 10⁵ 小时下仍能保持安全，而若使用普通碳钢则寿命大幅缩短^[4]。工程中往往需要在“强度”与“柔性”之间寻找平衡：强度过高的材料虽能承受更大应力，但柔性不足，可能导致支撑反力过大；而柔性过强的材料易产生过量位移，影响系统稳定性。因此，合理的材料选择与柔性设计应结合使用，以实现安全性、经济性和可维护性的统一。

三、CAESAR II的高温高压管道案例分析

为统一分析，本文选取一条高温高压蒸汽管道作为研究对象，利用 CAESAR II 软件对其应力分布和柔性优化效果进行计算与验证，重点研究其在不同设计方案下的受力情况与安全性差异。

（一）管道参数与工况条件

所选管道的设计参数如下：直径 DN600 mm，长度 120 m，工作温度由 20 °C 升至 500 °C，内部压力 15 MPa，材质为 12Cr1MoV 钢。该材料在室温下的屈服强度为 295 MPa，但在 500 °C 高温下强度下降至约 160 MPa，说明其在高温工况下的安全裕度显著降低。其线膨胀系数取值 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}$ /°C，根据公式 $\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T$ ，计算得到热膨胀自由伸长量约为 69 mm。该数值表明，当管道在全温差条件下运行时，如果未设置补偿装置，将会在固定点产生较大的附加应力，从而可能威胁系统的安全性和可靠性。

（二）应力分析与柔性优化结果

在未进行柔性设计的情况下，固定点处的附加热应力超过 150 MPa，已接近 500 °C 下材料的许用应力极限，安全风险较大。有限元计算结果显示，弯管部位的局部应力水平比直管段高出约 25%，应力集中现象明显，容易成为潜在的失效位置。若在长期高温高压环境下运行，极有可能出现塑性变形甚至管道破裂的风险。

在采用柔性设计方案后，即在管道系统中合理布置 U 型膨胀节、滑动支撑与弹簧支撑，热膨胀能够得到有效吸收与释放。仿真结果表明，固定点处的应力降低至 100 - 110 MPa，显著低于材料在高温下的许用应力范围。优化后的管道应力分布更加均匀，弯管区域的应力集中现象得到有效缓解。同时，CAESAR II

软件计算结果显示，该优化方案将最大等效应力降低了约 35%，不仅提高了整体安全性，还减少了支撑点的反力，降低了支撑系统的受力水平。

四、高温高压管道的安全性评估

（一）管道疲劳分析与使用寿命预测

高温高压管道在长期运行过程中，受到内部压力、温度变化以及外部环境因素的影响，会经历反复的应力和变形，从而引发疲劳损伤。管道的疲劳分析主要通过研究管道在循环载荷下的应力波动，评估其在不同工况下的耐久性。通常，疲劳损伤会在管道的薄弱部位或应力集中的区域发生，尤其是在焊接接头、弯头等位置。疲劳分析通常通过累积损伤理论进行，基于不同应力幅值下的循环次数来预测管道的寿命^[5]。使用寿命预测则依赖于对管道在各种载荷下的应力响应进行详细分析，并结合材料的疲劳性能、累积损伤模型等因素，计算出管道的剩余使用寿命。这一过程需要考虑温度波动、压力变化等因素对管道疲劳性能的影响，并评估管道在高温高压工况下的长期可靠性。通过疲劳寿命预测，可以有效预防管道的提前失效，优化其使用周期。

（二）管道应力集中与破坏分析

管道在受力过程中，某些区域可能由于几何形状、材质不均匀或施工质量问题产生应力集中，导致管道局部的应力值显著高于其他区域。这些应力集中的部位，如弯头、阀门接口、支撑点附近等，常常是管道发生破坏的薄弱环节^[6]。在高温高压环境下，材料的屈服强度下降，热膨胀效应更加明显，这些因素共同作用容易加剧应力集中的问题。破坏分析通常通过应力-应变曲线、断裂力学及材料本构模型等进行。通过模拟管道在不同工况下的应力分布，可以识别出应力集中区域并对其进行详细分析。破坏分析的目的在于预测管道是否会发生脆性断裂、塑性变形或疲劳破坏，从而提前采取优化设计或加固措施，防止管道破裂或发生泄漏。有效的破坏分析不仅有助于延长管道的使用寿命，还能降低维修成本并提高系统的安全性。

（三）安全性评估标准与规范

高温高压管道的安全性评估需依据相关的设计标准和规范进行。常见的管道安全性评估标准包括《工业金属管道设计规范》（GB 50316-2000）、《压力管道规范 工业管道》（GB/T 20801-2006）、《压力容器》（GB/T 150.1—150.4-2024），以及国际上广泛采用的 ASME B31.3、API 610、API 661 等标准。这些标准对管道的设计、材料选择、焊接工艺、应力计算、支撑系统等方面提供了严格的规定，以确保管道的安全性^[7]。在进行安全性评估时，需依据标准规定的安全系数和载荷容许范围进行分析，确保管道的强度、稳定性和耐久性满足工程要求。评估过程中还需要进行疲劳分析、断裂力学分析以及应力分析，确保管道在长期高温高压环境下的可靠性和安全性。此外，随着工

业技术的发展，新的安全评估方法如风险分析（RA）和失效模式分析（FMEA）逐渐被引入管道安全评估中，以进一步提高评估的准确性和前瞻性。

五、高温高压管道的优化方案

（一）优化前后的管道应力对比分析

在进行高温高压管道的优化设计之前，首先需要通过详细的应力分析，评估现有管道系统在工作条件下的应力分布情况。通常，优化前的管道可能会存在应力集中、变形过大或支撑不合理等问题，导致某些部位的应力远高于设计标准。优化前的应力分析结果能为后续优化方案的制定提供依据。通过 CAESAR II 等软件工具，分析管道在不同工况下的应力状态，识别出应力集中的薄弱环节，并为优化设计提供针对性的改进措施^[8]。优化后的管道系统，在管道布局、支撑方式或材料选择上进行了改进，以降低管道各部位的应力集中现象，并通过调整支撑点位置和增加柔性设计，提高管道的整体适应性和安全性。

（二）优化方案的实施与验证

管道优化方案的实施需要综合考虑设计的可行性、施工条件和操作环境等多方面因素。在实施过程中，首先需要根据优化设计进行管道的改造，包括调整管道的支撑系统、优化管道的布局及选择更适合的材料。在此基础上，进行施工过程中的质量控制，确保优化措施能够有效实施并达到设计要求。在实施后，为了验证优化方案的效果，需要进行后续的检测与评估。常见的验证方法包括管道应力测试、变形监测以及材料疲劳试验等，确保管道在优化后的运行状态下不会出现应力集中、过度变形或疲劳失效等问题。通过现场监测数据和实验结果的比对，能够确认优化设计是否成功提高了管道的安全性和可靠性^[9]。同时，管道的运行数据也可以为未来的管道优化提供宝贵的经验和参考。

（三）优化设计的经济性与可行性分析

管道优化设计不仅要保证技术上的可行性，还要综合考虑其经济性和实施的可操作性。在经济性分析中，需要评估优化方案对管道初期投资、维护成本及运营期间的的影响。例如，采用更高性能的材料和先进的支撑系统虽然能提高管道的安全性和可靠性，但可能会增加初期建设成本。在这种情况下，优化设计的目标是通过降低长期维护和运营的风险，从而实现整体成本的优化。通过生命周期成本分析（LCC），可以比较不同优化方案的长期经济效益，选择最具成本效益的方案。此外，管道优化设计的可行性还需要考虑实施的技术难度、施工周期和现场条件等因素。在某些特殊环境下，如高温、高压或腐蚀性环境，管道的优化设计可能面临更高的技术挑战，因此在进行可行性分析时，需要综合考虑这些因素，确保优化方案能够顺利实施，并在项目实施过程中取得预期的效果。在进行经济性分析时，还应考虑节能减排与环境影响，评估优化设计对整体项目可持续性的贡献^[10]。

六、结语

通过本文对高温高压管道应力分析与柔性优化的研究，可以得出以下结论：合理的应力分析和优化设计对于确保管道在复杂工况下的安全运行至关重要。基于 CAESAR II 软件的应力分析，结合管道柔性优化、支撑系统设计及材料选择，可以有效降低管

道的应力集中，提高其在高温高压环境下的适应性和安全性。此外，优化方案的实施不仅能够显著改善管道的运行性能，还能在经济性和可行性上提供有效保障。未来的研究可以进一步深入探索不同工况下的管道性能，持续优化设计方法，以提高管道系统的长期可靠性与经济效益。

参考文献

[1] 李龙, 库伟转. 结合案例简述 CAESAR II 在管道应力分析及柔性设计中的应用 [J]. 山东化工, 2019, 48(09): 171-173. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2019.09.065.

[2] 高凯, 罗振伟, 武俊虎, 胡铭鑫. 应用 CAESAR II 软件对电加热器进出口管路的优化设计 [J]. 机械工程师, 2018(11): 67-68.

[3] 郑明秀. CAESAR II 在火电厂蒸汽管道应力分析中的应用 [J]. 云南化工, 2015, 42(06): 58-61.

[4] 王静, 徐蕾. Caesar II 与 Glif 对高温高压管道静力分析的比较 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33(03): 66-68+71. DOI: 10.19464/j.cnki.cn32-1541/tm.2014.03.020.

[5] 黄格达. 应用 CAESAR II 软件优化减压转油线的配管设计 [J]. 管道技术与设备, 2008(02): 36-38.

[6] 陈敏平. CAESAR II 和 ANSI 的判断公式在外管设计中的应用 [J]. 广东化工, 2007(05): 93-94.

[7] 龙忠辉. CAESAR II 管道应力分析软件开发应用 [J]. 化工设备与管道, 2001(03): 50-53+4.

[8] 高建林, 邱廷东, 蔡志强, 高涵. 应用 CAESAR II 软件进行埋地玻璃钢管道应力分析 [J]. 化工设备与管道, 2025, 62(02): 94-98.

[9] 徐俊. 基于 CAESAR II 的核应急发电机组辅机系统管道应力分析 [D]. 江苏科技大学, 2016.

[10] 张书俊, 李国斌, 陈百炼. AutoPSA 与 CAESARII 在管道应力分析中的比较 [J]. 石油化工设备, 2008(01): 67-70.

液压抓料机动臂油缸减振液压系统的研究

张国栋

北京劲力特智能装备有限公司山东分公司, 山东 泰安 271200

DOI:10.61369/ME.2025070005

摘 要 : 传统液压抓钢抓料机动臂启停瞬间, 受液压系统冲击和振动因素影响, 工作装置发生不同程度的磨损, 随着磨损程度加深可能诱发疲劳断裂缺陷, 影响设备正常运转。为了改善此类问题, 结合液压系统原理开发新型的抗疲劳断裂的液压控制系统, 可大幅度降低动臂惯性能对系统的冲击影响, 将动臂启停瞬间冲击与振动控制在合理范围内, 降低设备故障几率, 延长设备使用寿命。文章就此展开分析, 总结相应的解决策略以供参考。

关 键 词 : 减振液压系统; 液压抓料机动臂; 机械磨损

Research on the Damping Hydraulic System for the Boom Cylinder of Hydraulic Grab Machines

Zhang Guodong

Shandong Branch of Beijing Jinlite Intelligent Equipment Co., Ltd., Tai'an, Shandong 271200

Abstract : When the boom of traditional hydraulic steel grab and material handling machines starts or stops, it is subject to impact and vibration from the hydraulic system, leading to varying degrees of wear on the working device. As the wear worsens, it may induce fatigue fracture defects, affecting the normal operation of the equipment. To address such issues, a new type of anti-fatigue fracture hydraulic control system has been developed based on the principles of hydraulic systems. This system can significantly reduce the impact of the boom's inertial energy on the system, controlling the impact and vibration during boom start-stop within a reasonable range, reducing the likelihood of equipment failure, and extending the service life of the equipment. This article provides an analysis and summarizes corresponding solutions for reference.

Keywords : damping hydraulic system; boom of hydraulic grab machines; mechanical wear

液压抓料机是工业生产中重要的物料输送设备, 设备运行稳定性很大程度上影响着总体生产效率。液压抓料机包含了抓斗、斗杆、动臂以及主机几个部分, 外形结构如图1。抓料机在抓取物料后, 往往需要快速完成动臂提升、斗杆外伸以及抓斗张开等工作, 借助惯性将物料抛洒出去。随后工作装置快速回收堆料平台进行下一次作业。在这个过程中, 每次阀芯启闭瞬间机手往往难以精准控制多路阀阀芯行程而产生振动和冲击, 导致设备晃动、不稳定, 严重影响装置构件使用寿命, 情况严重下可能造成结构件断裂。尽管相关研究在减振领域已取得一定成果, 但针对动臂油缸的减振研究仍较为匮乏。因此, 为了有效减轻作业过程对动臂油缸的冲击影响, 优化设计减振缓冲方案显得尤为必要。



图1 液压抓料机结构

一、液压抓料机动臂油缸振动机理分析

(一) 液压冲击机理

液压冲击是液压系统运行过程中具有代表性的瞬态现象, 也是导致动臂油缸振动乃至损坏的主要因素之一。动臂油缸换向制动过程中, 开启换向阀, 压力油保持 v_0 的流速进入油缸无杆腔, 活塞杆伸出稳定运作; 控制操作手杆回位, 快速关闭换向阀阀

芯, 阻隔压力油流动。阀口附近的微层流体运动停止, 动能瞬间变为压力能, 区域压力快速升高 Δp 。后续在管路作用下压力油持续向远方运动, 前端流体随之压缩, 层层压缩下以压力波形式冲击管道上方油缸、泵构件, 传播速度等同介质声速 c ; 压力波传播到油缸腔室后, 由于压力波的压力远高于现有油缸腔室内部压力, 直接倒逼活塞减速制动, 并且压力波会在管端、油缸活塞等系统边界出现反射现象^[1]。实际上入射波属于压缩波, 而已停止

运作的活塞封闭端的反射仍然属于压缩波，导致内部压力快速升高；受管道的弹性以及流体的可压缩性影响，这种压力升高并非持续的，高压作用下流体会出现不同程度的压缩，而管道则会发生膨胀，导致部分能量被储存，随后这部分储存的能量释放作用于流体反向流动，使得系统整体压力下降，可能会出现空穴负压现象。循环往复受到压力振荡冲击，直到能量完全消失，最终在新的压力点下实现平衡^[2]。

最大的冲击压力计算公式如下：

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot \Delta v$$

公式中 Δp 、 ρ 、 c 、 Δv 分别代表最大压力冲击值、液压油密度、油液中的压力波传播速度以及流体速度变化量。通过公式了解到，冲击压力大小取决于流速变化量、变化时间等因素，液压抓料机动臂带载运作过程中，快速下降时油缸的出口流速较快，突然关闭换向阀， Δv 流体速度变化值较大，产生强大的冲击压力 Δp ，远超过系统额定工作压力，对密封、管路以及发件产生破坏作用。

（二）振动源分析

液压抓料机动臂油缸振动主要包括机械共振、液压冲击和非线性摩擦干扰几种。

（1）机械共振。由于动臂油缸并非是一种孤立的部件，同连杆、抓斗和液压管路等部分有着密切联系，共同构成了这一弹性系统，系统固有频率和液压系统高频脉动可能出现谐振耦合现象，使得部分振动量被无形中放大。液压泵运作过程中，由于齿轮啮合或脱开的周期性因素影响，导致油液的流量和压力出现周期性波动，通过液压管路直接输送到油缸，如果油缸的管路长度、直径参数不符合设计标准，可能发生脉动频率和系统固有频率重合，进而诱发管路颤振现象，这种振动直接传输到活塞杆，导致动臂发生明显的抖动现象^[3]。一般情况下，动臂臂架采用箱型焊接结构，臂架与转台绞点区域或臂架根部连接区域，在液压冲击作用下可能局部刚度不足，发生弹性变形，随着振动能量传递到油缸安装基座，使油缸整体出现不同程度的振动^[4]。

（2）液压冲击。动臂油缸振动的一个主要因素即液压冲击，其原理在于油液动量短时间内强制改变，使得压力骤然升高^[5]。多路阀快速切换方向时，导致油缸进回油通道瞬间被切断，原本处于高速流动状态下的油液由于流动方向改变，速度被迫放缓，动能被转化分散为油液压缩能以及管路的弹性变性能，而系统的工作压力瞬间达到峰值，远超额定工作压力。动臂油缸活塞趋近行程终点时，缺少缓冲装置下，可能导致活塞仍然保持高速运动，并对缸底和缸盖产生冲击。抓料机作业过程中，抓料和卸料的负载状态频繁切换下，导致负载质量波动变化大，从而影响油缸驱动力需求骤然改变，一旦液压系统响应延迟，则会导致油液波动，并直接作用于油缸发生振动现象^[6]。

动臂油缸出现振动现象，会加剧密封件磨损程度，缩短使用寿命，导致液压元件无法正常工作，诱发焊缝疲劳裂纹。连锁反应下，导致液压抓料机的作业精度下降，影响操作过程的舒适性，机械设备的作业能耗与成本随之增加。因此，需要正确看待

动臂油缸振动现象影响，设计更为合理的减振液压系统，为液压抓料机高效、稳定作业提供保障^[7]。

二、液压抓料机动臂油缸减振液压系统设计

（一）动臂油缸减振液压系统设计要求

由于液压抓料机的日常作业工况复杂恶劣，长期处于高负荷运转状态，因此对于动臂油缸的平稳性和安全性有着较高的要求^[8]。为了减少动臂油缸的振动冲击，减振液压系统设计应契合液压抓料机真实作业场景的多元化需求，协调经济性、可靠性和性能之间的关系，具体设计要求如下：

（1）优异的减振缓冲性能。减振液压系统需要吸收动臂制动过程中的液压冲击能量，控制管路和油缸压力始终处于额定工作压力范围内，允许压力波动变化，但要保证压力过渡过程平稳，不会产生明显、剧烈的振荡。同时，减振不应该以牺牲动力、动作速度和操作灵活性为代价，即便动臂处于非制动工况下，同样要避免减振回路产生不必要的节流损失，从而保证系统整体的工作效率^[9]。

（2）可靠性。系统所选择的液压元件应该成熟可靠，有着稳定的性能和较长的使用寿命，能够适应日常高冲击以及高负载等复杂工况，并且具有抗污染能力，最大程度降低系统的故障几率。

（3）适应性。在轻载、重载等不同工况下，减振系统能够自动调节缓冲强度，从而动态适应不同的工况作业需求^[10]。

（4）经济性。在保证性能稳定基础上，优先选择成本低廉且结构简单的设计方案，便于后期检修和维护，降低维护成本。根据上述需求，采取先导控制式溢流缓冲+蓄能器吸收的复合式减振方案，力求高效、智能抑制冲击^[11]。

（二）动臂油缸减振液压系统设计方案

1. 设计思路

先导控制溢流缓冲回路+蓄能器吸收缓冲回路的复合式减振方案，主要包括两部分：一部分是主动调控，先导控制时溢流缓冲，油缸无杆腔油路设置大通径先导式溢流阀用于主动控制，由电液比例减压阀提供先导控制压力，根据作业需要实时调节输出压力，从而精准、动态控制主溢流阀开启压力、速度，有效解决了传统固定缓冲中的软硬不平衡的矛盾。另一部分是被动精准调控，在油缸无杆腔入口区域安装活塞式蓄能器，能够快速响应，吸收溢流阀延迟响应无法处理的瞬态压力，遏制压力振荡所产生的波动效果，对于提高系统运作可靠性和稳定性具有重要作用。

2. 回路构成

该方案主要作用在动臂油缸无杆腔油路，主要包括以下几部分：①先导式溢流阀，在无杆腔主油路上安装，多处于关闭状态，遥控口则负责承受比例减压阀的控制压力；②电液比例减压阀，进出口分别于系统先导油源和主溢流阀遥控口对接，电控制

器接收外部输入的电流信号，控制电液比例减压阀输出可连续实时调节的控制压力；③活塞式蓄能器，与无杆腔油路直接连接，实现瞬时压力的吸收和释放；④压力传感器，在无杆腔有路上安装，可实施监控无杆腔油路压力变化，及时反馈数据信号至控制器；⑤控制器根据内部 PID 或模糊控制算法对接收的信号计算处理，随后输出对应的控制电流信号至电液比例减压阀；⑥安全阀组配备专门的微型安全阀，用于抵御蓄能器压力过高，便于后期检修和维护。

3. 工作原理

动臂带载下降时骤然停止，对动臂油缸振动冲击较大。以这一工况为例，回路过程主要经过以下几个环节：

(1) 稳态下降，换向阀保持下降位状态，油液进入油缸，重力作用下无杆腔油液流经换向阀 T 口进入回油箱。无杆腔压力只需要承受回油路压力即可，处于蓄能器和溢流阀额定工作压力范围内，并且减振回路不参与这一循环，不会产生额外的压力损失，为工作效率提供保障。

(2) 制动和压力感知，操作员操作换向阀阀芯至中位，无杆腔回油通路切断，在强负载惯性作用下，活塞持续向下运动，无杆腔内油液被剧烈压缩，腔室内部压力骤升。这一数据被油路上的压力传感器捕捉，并将其转化为电信号输送至控制器。

(3) 主动溢流缓冲启动，根据接收的压力信号进行计算，一旦发现计算结果超出安全阈值，则判断为高强度冲击，随后控制器输出一个预设的电流信号至电液比例减压阀，而比例减压阀根据该电流输出对应的先导控制力至主溢流阀的控制口。这一环节使主溢流阀的主油路压力尚未达到预设值前就已经启动，可有效减轻冲击。

(4) 主溢流阀开启后，无杆腔的高压油液可以平滑的流向油箱，不会产生高的压力。根据程序控制变化曲线，电子控制器可精准控制主溢流阀开启过程，确保无杆腔压力平稳的上升到安全阈值内，经过一段时间后压力逐步下降，最终形成 S 形缓冲压力曲线，实现冲击压力的最大程度上吸收和消耗。

(5) 自动控制程序启动，但阀芯运动延迟时间内同样可能出现压力剧烈波动，达到一个尖峰。为了有效削弱峰值能量，压力油流入蓄能器后被压缩，部分流体压力转化成气体势能并存储；主溢流阀开启后压力逐步下降，蓄能器内部存储的气体膨胀促使储存的油液重新输送至系统中补充液压系统流量，能够有效避免压力骤降产生的波动，确保制动全过程平稳顺滑。

该方案具有动态自适应特性，可适应不同速度、负载等复杂工况，智能控制能力较强；基于两级机制协同控制，使压力控制过程平稳、顺滑，提供较强的抗冲击性能；正常作业时系统不需要干涉，动臂制动时则有序释放能量，最大程度上减轻对动臂油缸振动冲击。

(三) 液压元件选型

某液压抓料机额定工作压力 28MPa，动臂油缸无杆腔直径和

活塞杆直径分别为 140mm、100mm，最大带载下降速度 0.5m/s，根据以往经验设备单次冲击动作缓冲时间 0.3s。无杆腔有效面积计算公式如下：

$$A_1 = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \times \left(\frac{0.14}{2}\right)^2 \approx 0.015394 \approx 153.94 \text{ cm}^2$$

制动时最大流量计算公式如下：

$$Q_{\max} = A_1 \times v_{\max} = 0.015394 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m/s} = 0.007697 \text{ m}^3/\text{s}$$

换算为常用单位，约等于 461.8L/min。

蓄能器主要负责吸收振动冲击能量，吸收油液体积 ΔV 计算公式如下：

$$\Delta V = Q_{\max} \times t = 461.8 \text{ L/min} \times \left(\frac{0.3}{60} \text{ min}\right) \approx 2.309 \text{ L}$$

冲击缓冲的预充气压力 P_0 多为系统最小工作压力 60% ~ 90%，控制动臂带载下降时，无杆腔压力较小，但缓冲开始时压力已经开始升高，因此 P_0 为 $0.8 \times 28 = 22.4 \text{ MPa}$ ；最高工作压力 $P_2 = 1.3 \times 28 = 36.4 \text{ MPa}$ ；最低工作压力 $P_1 \approx 3 \text{ MPa}$ ，该压力所产生的影响较小。

蓄能器总容积 V_0 计算公式如下：

$$V_0 \approx \frac{\Delta V}{3.056} \approx \frac{2.309}{3.056} \approx 0.755 \text{ L}$$

先导式溢流阀选择工作压力 40.0MPa 的插装式溢流阀，额定流量 \geq 最大冲击能量，适合选择 500L/min ($\Delta p = 10 \text{ bar}$) 型号，在启闭瞬间提供足够流通能力，避免增加新的压力。电液比例减压阀输出压力在 0.5MPa ~ 25MPa 范围内，输入信号范围 0V ~ 10V DC。压力传感器量程范围 0MPa ~ 40MPa，输出信号范围 4mA ~ 20mA，能够被 PLC 精准识别、采集数据，配备 M20 \times 1.5 接口。

现场根据《土方机械 液压挖掘机和挖掘装载机 下降控制装置要求和试验方法》要求，现场进行试验，如图 2。从图 2 中可知，采用此种先导控制溢流缓冲回路 + 蓄能器吸收缓冲回路的复合式减振方案，动臂启停瞬间压力波动范围大幅度减小，并且随后快速收敛，对于动臂油缸的减振效果较为显著。

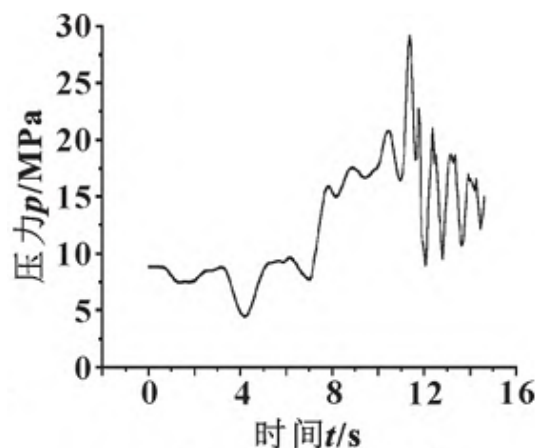


图 2 动臂油缸进出口压力波形图

三、结论

综上所述，液压抓料机作业过程中，动臂油缸不可避免受到多种因素振动冲击，影响设备使用寿命。因此，采用减振液压系统能

有效避免启停瞬间的冲击振动，避免装置构件疲劳断裂，提高设备运行可靠性和稳定性，对于降低后期维护成本具有重要意义。

参考文献

- [1] 张毅, 廖彦专, 陆馆, 等. 液压抓料机工况应用与研究 [J]. 产品设计, 2024(11): 85-88, 92.
- [2] 王学兰, 杜金山, 马谦. 抓料机属具触底自动提升系统及智能控制技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2025, (01): 12-13.
- [3] 陈勇, 曾献勇, 李西德, 等. 液压抓料机阀控冷却系统设计 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (06): 112-120.
- [4] 曾献勇, 余俊龙, 李磊, 等. 液压抓料机动臂油缸减振液压系统的研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (06): 45-49.
- [5] 邢萌, 董良太, 张洋, 等. 液压抓料机液压系统故障分析与研究 [J]. 现代食品, 2021, (22): 24-27.
- [6] 刘龙飞, 夏如艇, 俞高红, 等. 车辆悬架液压减振器的温度控制研究 [J]. 机电工程技术, 2021, 50 (05): 13-17.
- [7] 王亮, 程永恒, 刘兵. 一起液压履带式抓料机倾翻事故分析 [J]. 起重运输机械, 2020, (21): 85-88.
- [8] 邵传民. 推力轴承液压脉动衰减器减振机理及影响因素研究 [D]. 江苏科技大学, 2020.
- [9] 徐惠民, 刘旭杰, 陈丰. 报废汽车抓料机及其液压系统的设计 [J]. 机械制造, 2019, 57 (10): 4-7.
- [10] 王峰, 张明更, 高达, 等. 电动抓料机新型备用电源系统及其应用研究 [J]. 工程机械与维修, 2018, (05): 72-73.
- [11] 陈繁, 李天匀, 赵耀, 等. 纵向减振推力轴承液压减振系统的热平衡性能分析 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13 (04): 111-119.

分级破碎设备破碎齿成型工艺的研究应用

黄身水¹, 马秋乐², 吴彪¹, 赵国亮¹, 龙福强¹, 贾海洋²

1. 镇宁县红蝶实业有限责任公司, 贵州 安顺 561000

2. 泰伯克(天津)机械设备有限公司, 天津 301712

DOI:10.61369/ME.2025070006

摘 要 : 分级破碎设备作为矿山、建材、冶金等行业物料破碎环节的核心装备, 其性能直接影响破碎效率与物料处理质量。破碎齿作为分级破碎设备的关键工作部件, 长期承受物料的冲击、挤压与磨损, 其结构强度、耐磨性及使用寿命对设备整体运行稳定性和经济性至关重要。成型工艺作为破碎齿制造的核心环节, 决定了其微观组织、力学性能与服役行为。本文系统梳理了分级破碎设备破碎齿成型工艺的发展现状, 深入研究了铸造、锻造、焊接及复合材料成型等主流工艺的技术原理、关键控制因素与优化路径, 结合实际应用案例分析了不同成型工艺的适用性与应用效果, 指出了当前工艺存在的问题, 并对未来智能化、高性能化成型工艺发展趋势进行展望, 为破碎齿制造技术的创新与升级提供参考。

关 键 词 : 分级破碎设备; 破碎齿; 成型工艺; 铸造; 锻造; 复合材料

Research and Application of Forming Process for Crushing Teeth in Classification Crushing Equipment

Huang Shenshui¹, Ma Qiule², Wu Biao¹, Zhao Guoliang¹, Long Fuqiang¹, Jia Haiyang²

1. Zhenning County Hongdie Industrial Co., Ltd., Anshun, Guizhou 561000

2. Taibo (Tianjin) Mechanical Equipment Co., Ltd., Tianjin 301712

Abstract : Classification crushing equipment serves as the core apparatus for material crushing in industries such as mining, building materials, and metallurgy, with its performance directly influencing crushing efficiency and material processing quality. As the key working component of classification crushing equipment, crushing teeth endure long-term impacts, extrusions, and abrasions from materials, making their structural strength, wear resistance, and service life crucial for the overall operational stability and economic efficiency of the equipment. The forming process, as the core aspect of crushing teeth manufacturing, determines their microstructure, mechanical properties, and service behavior. This paper systematically reviews the development status of forming processes for crushing teeth in classification crushing equipment, delves into the technical principles, key control factors, and optimization paths of mainstream processes such as casting, forging, welding, and composite material forming. It combines practical application cases to analyze the applicability and application effects of different forming processes, points out the existing issues in current processes, and anticipates future trends towards intelligent and high-performance forming processes, providing references for the innovation and upgrading of crushing teeth manufacturing technology.

Keywords : classification crushing equipment; crushing teeth; forming process; casting; forging; composite materials

引言

在矿产资源开发、建筑固废资源化利用等领域^[1], 分级破碎设备承担着将大块物料破碎至特定粒度等级的重要任务, 而破碎齿作为与物料直接接触的核心部件, 其性能优劣直接关系到设备的破碎效率、能耗及维护成本。据统计, 在分级破碎设备的故障中, 因破碎齿磨损、断裂导致的停机占比超过30%, 因此, 提升破碎齿的综合性能成为设备优化升级的关键突破口^[2]。

成型工艺是破碎齿制造的核心环节, 其不仅决定了破碎齿的几何形状精度, 更深刻影响其内部组织结构、力学性能(如硬度、韧性、耐磨性)及服役寿命。随着材料科学与制造技术的发展, 破碎齿成型工艺已从传统的铸造工艺逐步向锻造、焊接复合、复合材料成型等多元化方向发展^[2]。本文通过对现有破碎齿成型工艺的研究与应用分析, 旨在为行业内破碎齿制造工艺的选择与优化提供理论与实践支撑。

一、分级破碎设备破碎齿成型工艺现状

破碎齿的工作环境恶劣，需同时具备高硬度以抵抗磨损、高韧性以承受冲击，因此对成型工艺的要求极为严苛。目前，行业内应用的破碎齿成型工艺主要包括铸造工艺、锻造工艺、焊接成型工艺及复合材料成型工艺，不同工艺在技术特点、性能表现及适用场景上存在显著差异^[3-5]。

（一）铸造工艺

铸造工艺因具有可制造复杂形状、生产成本较低、适应性强等优势，是早期及目前中小规模制造中应用最广泛的破碎齿成型工艺。其基本原理是将熔融的金属液（如高锰钢、合金钢等）浇注到预设的模具中，待金属液凝固冷却后，经清理、热处理等后续工序得到破碎齿毛坯。

传统铸造工艺在破碎齿制造中存在诸多不足：一是铸造过程中易产生气孔、砂眼、缩松等内部缺陷，导致破碎齿在服役过程中因应力集中而早期断裂；二是铸件的晶粒较为粗大，力学性能不均匀，尤其是韧性与耐磨性的平衡难以控制；三是模具精度对铸件尺寸精度影响较大，后续机加工量较大，材料利用率较低。

（二）锻造工艺

锻造工艺通过对金属坯料施加外力，使其在塑性变形状态下获得所需形状与尺寸，同时利用锻造过程中的塑性变形细化晶粒，改善金属内部组织结构，从而提升破碎齿的力学性能。锻造工艺主要包括自由锻、模锻等，其中模锻因能实现较高的尺寸精度与表面质量，在破碎齿制造中应用更为广泛。

锻造工艺制备的破碎齿具有晶粒细小、组织致密、力学性能优异等特点，其硬度与韧性的匹配性显著优于铸造工艺产品。但锻造工艺也存在局限性：一是对坯料的加热温度、变形速率等工艺参数控制要求严格，工艺窗口较窄；二是对于形状复杂的破碎齿，模具设计难度大、制造成本高，且锻造设备投资较大，不适用于小批量生产；三是锻造过程中易产生折叠、裂纹等缺陷，对操作人员的技术水平要求较高。

（三）焊接成型工艺

焊接成型工艺通常采用复合结构设计，即选用耐磨性优异的材料（如高铬铸铁、硬质合金等）作为破碎齿的工作层，选用韧性较好的材料（如碳素钢、合金钢等）作为基体层，通过焊接技术将两层材料复合为一体，形成兼具高耐磨性与高韧性的破碎齿。

焊接成型工艺实现了材料性能的优势互补，有效解决了单一材料难以同时满足耐磨性与韧性要求的问题。常用的焊接方法包括电弧焊、埋弧焊、激光焊等。然而，焊接成型工艺面临的主要挑战是焊接接头的质量控制，焊接过程中产生的残余应力、焊缝缺陷（如未焊透、夹渣等）易导致工作层与基体层结合不良，在冲击载荷作用下发生剥离失效，影响破碎齿的使用寿命。

（四）复合材料成型工艺

随着复合材料技术的发展，复合材料成型工艺在破碎齿制造中的应用日益受到关注。该工艺以金属或陶瓷为增强相，以金属基体（如高锰钢、合金钢）为连续相，通过粉末冶金、离心铸

造、原位合成等方法制备金属基复合材料破碎齿。

复合材料成型工艺可通过调控增强相的种类、含量与分布，实现破碎齿性能的精准设计，其耐磨性、耐冲击性等综合性能远超传统单一材料破碎齿。但目前复合材料成型工艺仍存在一些问題：一是增强相的均匀分散难度较大，易出现团聚现象，影响材料性能的稳定性；二是成型工艺复杂，生产效率较低，制造成本较高，限制了其大规模工业化应用。

二、破碎齿成型工艺关键技术研究

针对不同成型工艺的不足，行业内通过工艺优化、设备升级与材料创新等手段，不断提升破碎齿的成型质量与性能。以下从主流成型工艺的关键技术优化方向展开研究。

（一）铸造工艺的优化

1. 模具与浇注系统优化：采用消失模铸造技术替代传统砂型铸造，通过泡沫塑料模的精准设计与制造，减少铸件的尺寸误差与表面缺陷；优化浇注系统结构，合理设置浇口、冒口位置与尺寸，改善金属液的充型流动状态，减少气孔、缩松等缺陷的产生。

熔炼与浇注工艺控制：采用中频感应炉进行熔炼，精确控制熔炼温度与保温时间，减少金属液中的夹杂物含量；在浇注过程中采用真空浇注或保护气氛浇注技术，避免金属液与空气接触发生氧化，提升铸件的纯净度。

热处理工艺优化：通过调整淬火温度、保温时间与冷却速度，实现铸件组织的精细化控制。例如，对高锰钢破碎齿采用水韧处理工艺，消除铸态组织中的碳化物，获得单相奥氏体组织，提升其韧性与加工硬化能力；对合金钢破碎齿采用调质处理，实现硬度与韧性的最佳匹配。

（二）锻造工艺的关键技术

1. 坯料预处理技术：采用等温正火工艺对锻造坯料进行预处理，细化原始晶粒，改善坯料的塑性与均匀性，为后续锻造过程中的晶粒细化奠定基础。

2. 精密模锻工艺：开发多向模锻、等温模锻等精密锻造技术，精确控制锻造温度、变形速度与变形量，减少锻造缺陷的产生；采用数值模拟技术（如有限元分析）对锻造过程进行仿真优化，预测坯料的变形行为与缺陷形成位置，指导模具设计与工艺参数调整。

3. 锻造后热处理工艺：针对锻造后的破碎齿毛坯，采用低温回火工艺消除残余应力，稳定组织结构；对于高强度合金钢破碎齿，采用渗碳、渗氮等表面强化处理，进一步提升其表面硬度与耐磨性。

（三）焊接成型工艺的质量控制

1. 焊接材料与工艺匹配：根据工作层与基体层材料的特性，选择合适的焊接材料与焊接方法。例如，对于高铬铸铁与碳素钢的复合焊接，采用奥氏体不锈钢焊条进行过渡焊接，减少焊接接头的裂纹敏感性。

2. 焊接过程参数优化：通过试验优化焊接电流、电压、焊接

速度等工艺参数，控制焊接热输入量，减少焊接残余应力的产生；采用多层多道焊接工艺，并在焊接过程中进行层间保温与锤击，消除层间应力。

3.焊接后处理技术：焊接完成后对破碎齿进行去应力退火处理，降低残余应力；对焊接接头进行无损检测（如超声波检测、射线检测），及时发现并修复焊缝缺陷，确保焊接质量。

（四）复合材料成型工艺的创新

1.增强相分散技术：采用机械合金化、超声分散等技术，实现增强相在金属基体中的均匀分散；开发原位合成技术，通过化学反应在基体内部生成细小、均匀的增强相，避免增强相团聚问题。

2.成型工艺集成创新：结合离心铸造与粉末冶金技术，制备梯度复合材料破碎齿，使增强相在工作层呈梯度分布，进一步优化材料性能；采用3D打印技术制备复合材料破碎齿，通过逐层堆积实现增强相的精准分布与复杂结构的一体化成型。

3.界面结合强化：通过表面改性处理（如对增强相进行涂层处理），改善增强相与基体之间的界面结合强度，避免在服役过程中出现界面剥离失效。

三、破碎齿成型工艺的应用案例分析

（一）铸造工艺在某铁矿分级破碎设备中的应用

某铁矿的分级破碎设备原采用传统砂型铸造的高锰钢破碎齿，其平均使用寿命仅为15天，频繁更换破碎齿导致设备停机时间长，生产效率低下。为解决这一问题，制造企业对铸造工艺进行优化：采用消失模铸造技术，优化浇注系统与热处理工艺，将淬火温度控制在1050℃，保温时间2小时，水韧处理后快速冷却。

优化后的铸造破碎齿内部缺陷明显减少，晶粒尺寸细化30%，表面硬度提升至220HBW，冲击韧性达到100J/cm²。在实际应用中，破碎齿的使用寿命延长至35天，设备停机时间减少60%，年维护成本降低约40万元，显著提升了铁矿的生产效益。

（二）锻造工艺在建筑固废分级破碎中的应用

某建筑固废处理厂的分级破碎设备需处理硬度较高的混凝土块与钢筋混合物，对破碎齿的耐磨性与韧性要求极高。该厂采用模锻工艺制备的合金钢破碎齿，通过数值模拟优化锻造工艺参数，将锻造温度控制在850-900℃，变形量控制在60%，锻造后进行调质处理与表面渗氮处理。

该锻造破碎齿的表面硬度达到55HRC，冲击韧性为80J/cm²，在处理建筑固废过程中表现出优异的抗磨损与抗冲击性能，平均使用寿命达到60天，相较于传统铸造破碎齿，使用寿命提升了2倍，设备破碎效率提升15%，有效降低了建筑固废处理成本。

（三）焊接复合工艺在金属矿分级破碎中的应用

某金属矿的分级破碎设备破碎齿长期承受高硬度矿石的冲击磨损，单一材料破碎齿难以满足使用要求。采用焊接复合工艺制备破碎齿：以高铬铸铁为工作层（厚度15mm），以Q345钢为基体层，采用埋弧焊技术进行复合焊接，焊接后进行去应力退火

处理。

焊接复合破碎齿的工作层硬度达到60HRC，基体层冲击韧性大于100J/cm²，在实际应用中，其使用寿命达到50天，相较于纯高铬铸铁破碎齿（使用寿命20天）提升了1.5倍，且避免了纯高铬铸铁破碎齿易断裂的问题，设备运行稳定性显著提高。

四、存在的问题与发展展望

（一）当前存在的主要问题

尽管破碎齿成型工艺取得了显著进展，但在实际应用中仍存在一些亟待解决的问题：一是工艺参数的精准控制难度较大，不同批次生产的破碎齿性能一致性较差，尤其是复合材料成型工艺中增强相的分布均匀性难以保证；二是成型工艺与材料性能的匹配性不足，部分新型高性能材料因缺乏适配的成型工艺，其性能优势难以充分发挥；三是生产效率与制造成本的平衡问题突出，如精密锻造、复合材料成型等工艺虽能提升破碎齿性能，但生产周期长、成本高，限制了其大规模推广应用；四是成型过程的智能化水平较低，对操作人员的经验依赖度较高，难以实现工艺过程的实时监测与智能调控。

（二）未来发展展望

1.智能化成型工艺：结合物联网、大数据与人工智能技术，开发破碎齿成型过程的智能监测与调控系统。通过在成型设备上安装传感器，实时采集温度、压力、变形量等工艺参数，利用大数据分析建立工艺参数与产品性能之间的关联模型，实现工艺参数的自适应优化与智能调控，提升产品性能的一致性与稳定性。

2.高性能材料与成型工艺的协同创新：加强材料科学与制造技术的交叉融合，针对新型陶瓷增强金属基复合材料、梯度功能材料等高性能材料，开发适配的成型工艺，如激光增材制造、电磁脉冲成型等，充分发挥材料的性能优势，进一步提升破碎齿的耐磨性、耐冲击性与使用寿命。

3.绿色高效成型工艺：响应节能环保的发展需求，开发绿色成型工艺。例如，采用近净成型技术减少后续机加工量，提高材料利用率；开发低温成型工艺降低能耗；采用环保型模具材料与焊接材料，减少生产过程中的污染物排放，实现破碎齿制造的绿色化与高效化。

4.轻量化与集成化设计：结合拓扑优化与仿生设计理念，优化破碎齿的结构形状^[6-7]，在保证性能的前提下实现轻量化设计，降低设备运行能耗；开发一体化成型工艺，实现破碎齿与其他部件的集成制造，减少装配环节，提升设备的整体可靠性。

五、结论

分级破碎设备破碎齿的成型工艺直接决定其性能与服役寿命，对设备的运行效率与经济性具有重要影响。本文通过对铸造、锻造、焊接及复合材料成型等主流工艺的研究表明，各成型工艺均有其优势与局限性，通过工艺优化可显著提升破碎齿的综合性能。铸造工艺通过模具优化与热处理调控，可减少内部缺

陷、细化晶粒；锻造工艺借助精密成型与表面强化技术，能实现力学性能的大幅提升；焊接复合工艺通过材料优势互补，解决了耐磨性与韧性的平衡问题；复合材料成型工艺则为破碎齿性能的精准设计提供了可能。

应用案例表明，优化后的成型工艺在实际生产中能有效延长破碎齿使用寿命、降低设备维护成本、提升生产效率。针对当前

工艺存在的参数控制难、成本高、智能化水平低等问题，未来应重点发展智能化成型、高性能材料协同创新、绿色高效成型及轻量化集成化设计等方向，推动破碎齿制造技术的持续升级，为分级破碎设备的高效稳定运行提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李朋. 分级破碎机可靠性分析与提高改进措施 [J]. 煤矿机械, 2015, 36(08): 223-225.
- [2] 郝铭. 分级破碎机可更换破碎齿性能影响因素分析 [D]. 煤炭科学研究总院, 2025. DOI: 10.27222/d.cnki.gmkzy.2025.000060.
- [3] 陈通. 分级破碎机破碎齿材质及其性能的研究 [J]. 选煤技术, 2022, 50(02): 32-36. DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2022.02.006.
- [4] 王保强. 煤用分级破碎机耐磨材质的研究 [J]. 矿山机械, 2016, 44(02): 52-54. DOI: 10.16816/j.cnki.ksjx.2016.02.014.
- [5] 元愈, 李占贤. 分级破碎齿在线堆焊修复探讨 [J]. 煤矿机械, 2013, 34(01): 217-218. DOI: 10.13436/j.mkjx.2013.01.134.
- [6] 刘文统, 刘建军, 刘振, 等. 基于 ANSYS-Workbench 的破碎齿热偶分析及应用 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (12): 32-35. DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2024.12.007.
- [7] 刘振, 张学斌, 张伏平, 等. TCC 分级破碎机结构优化及应用实践 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2024, (08): 28-30. DOI: 10.16200/j.cnki.11-2627/td.2024.08.007.

冷藏展示柜产品研发中的技术创新与机械原理应用

潘颂山

广东 佛山 528300

DOI:10.61369/ME.2025070007

摘 要： 介绍冷链展示设备行业，包括产品类型（商用冷藏柜、立式冷冻柜、智能售卖冷柜）及市场需求特征。分析国内外核心技术差距，阐述热传导方程等在研发中的应用，还涉及柜体结构设计、远程监控、智能防盗等方面，介绍研发成果及未来方向。

关 键 词： 冷链展示设备；技术创新；研发成果

Technological Innovation and Mechanical Principle Applications in Refrigerated Display Cabinet Product Development

Pan Songshan

Foshan, Guangdong 528300

Abstract： This paper introduces the cold chain display equipment industry, covering product types (commercial refrigerated cabinets, vertical freezers, smart vending refrigerators) and market demand characteristics. It analyzes core technology gaps between domestic and international standards, explains the application of principles like heat transfer equations in R&D, and also covers areas such as cabinet structural design, remote monitoring, and intelligent anti-theft features. The paper concludes by presenting R&D achievements and future directions.

Keywords： cold chain display equipment; technological innovation; R&D achievements

引言

随着冷链物流行业的快速发展，冷链展示设备的重要性日益凸显。2021年发布的《“十四五”冷链物流发展规划》强调了冷链物流基础设施建设的重要性，这也为冷链展示设备行业带来了新的机遇与挑战。冷链展示设备涵盖多种产品类型，不同产品在市场需求特征上存在差异，且国内外在核心技术方面存在差距。本文将围绕冷链展示设备的产品类型、市场需求、核心技术、研发应用等多个方面展开探讨，旨在为行业的发展提供理论依据和实践指导。

一、冷链展示设备行业发展现状

（一）产品类型与市场需求特征

冷链展示设备行业涵盖多种产品类型。其中，商用冷藏柜适用于各类商业场所，满足日常商品冷藏展示需求，其注重温度的精准控制和空间的合理利用 [1]。立式冷冻柜则主要针对需要冷冻保存的商品，具有较低的温度设定和良好的保温性能。智能售卖冷柜是随着无人零售兴起的新型产品，集成了自动售卖功能，为消费者提供便捷的购物体验。

在市场需求特征方面，连锁便利店场景下，多温区存储需求凸显，以满足不同商品的存储条件。同时，可视化商品展示至关重要，能够吸引消费者目光。在无人零售场景中，自动售卖集成功能成为关键需求，提高运营效率，减少人力成本。这些新型功

能需求推动着冷链展示设备行业不断创新和发展。

（二）核心技术现状与研发痛点

国内外在冷链展示设备核心技术方面存在一定差距。在压缩机效能上，国外先进厂商的产品往往能在保证制冷效果的同时，实现更高的能源利用效率，而国内部分产品仍有提升空间 [2]。箱体绝热技术方面，国外一些企业采用的新型绝热材料和结构设计，使得箱体的保温性能更优。智能化霜控制是研发的关键难点之一，需要精确感知结霜情况并合理控制化霜周期和方式。动态热负荷匹配技术要求设备能根据不同的使用环境和物品存储需求，实时调整制冷量，这对传感器和控制系统的精度要求很高。物联网接入技术的应用也面临挑战，如何确保设备稳定连接并实现远程监控和数据传输是亟待解决的问题 [3]。

二、机械原理在柜体结构设计中的应用

（一）热力学系统构建原理

热传导方程是分析热传递过程的重要工具。在冷藏展示柜中，通过运用热传导方程，可以深入了解柜体内部的温度分布情况，从而优化蒸发器的布置方案。蒸发器作为制冷系统的关键部件，其合理布置能够提高制冷效率，确保柜体内部温度均匀。同时，建立双循环制冷系统数学模型对于提高制冷性能至关重要。该模型可以准确描述制冷系统的工作过程，为系统的优化设计提供理论依据。在此基础上，推导多温区独立控制的机械实现方式，能够满足不同物品的冷藏需求，提高展示柜的适用性和功能性^[3]。

（二）结构强度与材料工程

在柜体结构设计中，机械原理的应用至关重要。对于结构强度方面，通过有限元分析确定柜体骨架承重结构是关键步骤^[4]。有限元分析能够模拟柜体在实际使用中的受力情况，帮助设计师精确计算各部位的应力和应变，从而优化骨架结构，确保其在承受冷藏展示柜内部物品重量以及外部可能的冲击力时，仍能保持足够的强度和稳定性。在材料工程方面，发泡聚氨酯和 VIP 真空绝热板是常用的材料。比较它们的热工性能，有助于选择更适合的材料来满足冷藏展示柜的保温需求。这不仅涉及到材料本身的导热系数等热物理性质，还与材料的厚度、密度以及安装方式等因素有关。合理选择材料能够提高柜体的保温效果，降低能耗。

三、智能技术融合创新体系

（一）物联网技术深度集成

1. 远程监控云平台架构

基于物联网技术深度集成的远程监控云平台架构在冷藏展示柜产品研发中具有重要意义。通过设计基于 MQTT 协议的设备通讯模块，实现设备间高效稳定的数据传输^[5]。该协议具有轻量级、可靠等优点，适用于资源受限的物联网设备。同时，构建温度异常预警与能耗分析算法模型。利用采集到的温度数据，通过算法实时监测温度是否异常，及时发出预警，确保冷藏展示柜内物品的质量安全。在能耗分析方面，算法模型能够根据设备运行数据，分析能耗情况，为节能优化提供依据，从而提升冷藏展示柜的整体性能和使用效率。

2. 智能防盗管理系统

在冷藏展示柜的智能防盗管理系统中，整合重力感应与 RFID 识别技术具有重要意义。重力感应技术可实时监测展示柜内商品的重量变化，当商品被取出或放入时，能准确感知并记录相关数据^[6]。RFID 识别技术则通过给商品贴上电子标签，实现对商品的精准识别和定位。二者结合，能够开发出高效的动态库存监控系统。该系统不仅可以实时掌握库存数量，还能在商品出现异常存取行为时及时发出警报。同时，基于这些数据，可以构建异常存取行为识别模型，通过分析历史数据和实时监测数据，对异常行为进行准确判断和预测，有效防止商品被盗，提高冷藏展示

柜的安全性和管理效率。

（二）人工智能算法开发

1. 动态负载预测模型

在冷藏展示柜产品研发中，智能技术融合创新体系的人工智能算法开发至关重要。其中动态负载预测模型可应用 LSTM 神经网络构建开门频次与温度波动的关联模型。LSTM 神经网络具有处理时间序列数据的优势，能够有效捕捉开门频次与温度波动之间的复杂关系。通过对大量历史数据的学习和分析，模型可以准确预测不同开门频次下的温度变化趋势，从而为压缩机启停策略的实时优化提供依据。这不仅有助于提高冷藏展示柜的温度控制精度，还能降低能耗，提升产品的性能和竞争力^[7]。

2. 自适应除霜控制算法

建立基于模糊控制的除霜决策系统，需要综合考虑多种因素。通过在冷藏展示柜内设置温度传感器矩阵，可获取不同位置的温度数据^[8]。利用这些数据，模糊控制系统能够对结霜情况进行动态评估。根据温度变化趋势以及不同区域的温差等信息，系统可以更准确地判断是否需要除霜以及确定合适的除霜周期。与传统的固定周期除霜方法相比，这种自适应的除霜控制算法能够有效避免过度除霜或除霜不及时的问题，有效提高冷藏展示柜的制冷效率，降低能耗，同时延长设备的使用寿命。

四、技术管理体系建设

（一）模块化研发流程设计

1. 功能模块解耦策略

在冷藏展示柜产品研发中，功能模块解耦策略至关重要。采用 QFD 方法分解市场需求后，需对制冷系统、控制系统等六大核心模块进行解耦。各模块可采用自顶向下参数化设计体系，有助于产品系列化设计，大大缩短产品设计周期，同时也提升产品设计一致性。通过建立各模块的接口标准，明确模块间的交互规范，降低模块间的耦合度。这有助于提高模块的独立性和可替换性，方便后续的研发、测试和维护工作。例如，当制冷系统需要升级时，清晰的接口标准可使研发人员专注于该模块的改进，而不会对其他模块造成过多干扰。同时，合理的解耦策略也有利于并行开发，不同团队可同时对各模块进行研发，提高研发效率，缩短产品上市周期，提升产品在市场中的竞争力^[9]。

2. 并行工程实施路径

在冷藏展示柜产品研发中，构建跨部门协同开发机制至关重要。各部门需明确职责，加强沟通与协作，共同推动研发进程。例如，研发部门与市场部门紧密合作，了解市场需求，为产品设计提供方向^[10]。同时，制定机械设计与软件开发的双轨迭代流程，借助云平台进行项目流程化管理，机械设计注重产品的物理结构和性能优化，软件开发展现了智能控制和用户体验提升。两条轨道并行且相互反馈，机械设计的改进可能影响软件功能的调整，软件的升级也可能对机械结构提出新要求，通过不断迭代，实现产品的持续创新和性能提升。同时，在迭代过程中总结出设计关键要素，将其列入前期设计要点，减少产品设计更改次数，

缩短产品设计周期，提升了产品质量。

（二）知识产权保护体系

1. 专利布局策略

在冷藏展示柜产品研发中，构建完善的专利布局策略至关重要。需深入分析行业技术演进路线，了解不同阶段的关键技术突破与发展趋势。基于此，制定复合型专利组合方案，涵盖结构创新与算法创新两个核心方面。在结构创新方面，注重对冷藏展示柜的柜体结构、制冷系统布局、保温材料应用等进行创新性设计，并及时申请专利保护，以提升产品的性能和竞争力。对于算法创新，着重于温度控制算法、节能算法以及智能调控算法等的研发，确保产品在运行过程中能够实现高效、精准的控制，同时通过专利布局形成技术壁垒，防止竞争对手的模仿和侵权，从而在市场竞争中占据优势地位。

2. 标准参与机制

在冷藏展示柜的研发过程中，积极参与制定智能冷柜通信协议标准至关重要。企业应整合自身技术优势与研发经验，投入资源进行标准制定的研究与实践。通过与行业内其他企业、科研机构合作，共同探讨智能冷柜通信协议的关键技术指标、数据传输规范等核心内容。在这个过程中，充分考虑不同品牌冷柜的兼容性以及未来技术发展的可扩展性。同时，积极推动企业内部成熟的技术规范上升为行业通用标准，这不仅有助于提升企业在行业内的影响力，还能促进整个冷藏展示柜行业的技术进步与规范化发展，为产品的互联互通以及智能化升级奠定坚实的基础。

（三）供应链协同管理

1. 核心部件供应商管理

建立压缩机、控制器等关键部件的双重供应商认证体系，可从多方面确保供应的稳定性与部件质量。一方面，对供应商的生产能力、技术水平、质量管理体系等进行全面评估，选择符合高标准的供应商。另一方面，设立备用供应商，以应对可能出现的供应中断等问题。同时，实施动态质量追踪机制，借助 MES 系

统，实时监测关键部件的质量状况。通过在生产环节设置检测点，收集质量数据，对数据进行分析，及时发现质量波动。若出现质量问题，可迅速追溯到供应商生产环节，要求其整改，从而保障核心部件的质量，为冷藏展示柜产品的稳定生产和性能提供有力支持。

2. 数字化生产管控

在冷藏展示柜产品研发中，技术管理体系建设至关重要。通过应用 MES 系统，实现从钣金加工到总装测试的全流程追溯。该系统详细记录每个生产环节的数据，包括原材料信息、加工参数、操作人员等。一旦出现质量问题，可迅速定位根源。同时，构建质量数据闭环管理系统，将生产过程中的质量数据进行收集、分析和反馈。分析结果用于优化生产工艺和质量控制措施，反馈则确保相关部门及时了解质量状况并采取改进行动。这不仅提高了产品质量，还增强了供应链协同能力。在数字化生产管控方面，实现了生产过程的透明化和可控性，为冷藏展示柜的高效生产和技术创新提供了有力保障。

五、总结

冷藏展示柜产品研发取得了多方面成果。在技术创新上，利用热力学仿真优化和智能除霜算法，显著提升了能效并降低能耗。同时，建立模块化研发体系，大幅缩短新品开发周期且提高了专利布局覆盖率。这些成果得益于对机械原理的合理应用以及创新的研发理念和方法。未来，应进一步探索数字孪生技术在冷柜研发中的应用，通过构建虚拟模型实现对产品性能的精准预测和优化。并且要深化 AI 算法与机械系统的融合创新，赋予产品更智能的特性，以适应市场对冷藏展示柜高效、节能、智能的需求，推动行业持续发展。

参考文献

- [1] 刘国祥. WJ 公司产品研发中的界面管理研究 [D]. 浙江工业大学, 2021.
- [2] 宋小美. 研发投入、技术创新能力与企业绩效 [D]. 兰州交通大学, 2021.
- [3] 夏青苗. 研发投入、技术创新与产业结构升级 [D]. 河南大学, 2023.
- [4] 张欣茹. 研发团队知识重组能力与互联网技术创新 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [5] 张悠阳. 医药制造企业合作研发网络特征与技术创新效率关系研究 [D]. 西南交通大学, 2022.
- [6] 王亚臣, 刘竹丽, 梁帅. 基于场协同理论的冷藏展示柜内流体对流换热分析 [J]. 包装工程, 2022, 43(1): 245-252
- [7] 刘国庆. 基于农业机械自动化的技术创新与应用现状 [J]. 河北农机, 2022(22): 15-17.
- [8] 徐天舒, 孙甜甜. 供应链金融, 研发投入与企业技术创新 [J]. 科技与经济, 2023, 36(3): 56-60.
- [9] 刘雅琦. 基于服务设计理念的智能调料盒设计研究 [D]. 湖北工业大学, 2019.
- [10] 邓静, 李兰静. 基于服务设计理念的智能冷藏展示柜设计研究 [J]. 工业设计, 2022(8): 104-106.

珠宝及贵金属检验检测技术的创新与发展

刘芬

广州中地大珠宝检测有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025070008

摘 要 : 介绍珠宝及贵金属检验检测技术, 包括传统方法及其局限, 国内外分级标准与纯度标识体系差异。阐述激光诱导击穿光谱等新技术进展, 还涉及基于深度学习的瑕疵识别、微区 CT 扫描等技术应用, 以及新型标识体系、区块链溯源等内容, 最后展望未来发展方向。

关 键 词 : 珠宝检测; 贵金属检测; 技术创新

Innovation and Development of Jewelry and Precious Metal Inspection and Testing Technology

Liu Fen

Guangzhou Zhongdi Da Jewelry Testing Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : This paper introduces the inspection and testing technologies for jewelry and precious metals, including traditional methods and their limitations, as well as the differences in classification standards and purity labeling systems at home and abroad. This paper elaborates on the progress of new technologies such as laser-induced breakdown spectroscopy, and also covers the application of technologies like defect recognition based on deep learning and micro-area CT scanning, as well as new identification systems and blockchain traceability. Finally, it looks forward to the future development direction.

Keywords : jewelry testing; precious metal detection; technological innovation

引言

中国珠宝及贵金属检验检测行业正处于快速发展阶段, 2021 年中国发布的《珠宝玉石国家标准》等政策对行业提出了更高要求。传统检测技术存在局限性, 国内外标准差异影响公信力。激光诱导击穿光谱等新技术取得进展, 深度学习、微区 CT 扫描等技术也各有应用。同时, 中国市场有自身特点, 需对接国际标准并进行本土化改造。构建新型标识体系、利用区块链溯源、国家级检测机构数据共享等也成为行业发展的重要方向, 未来将朝着检测标准国际化、设备微型化和建立大数据预警系统迈进。

一、传统检验检测技术体系分析

(一) 常规检测方法综述

传统的珠宝及贵金属检验检测技术包括 X 射线荧光光谱法、火试金法等。X 射线荧光光谱法是一种常用的无损检测方法, 其原理是利用 X 射线激发样品中的原子, 使其发射出具有特征波长的荧光 X 射线, 通过检测这些荧光 X 射线的强度和波长来确定样品的成分和含量。该方法具有快速、准确、无损等优点, 广泛应用于珠宝及贵金属的检测。火试金法是一种经典的化学分析方法, 其原理是利用高温将样品中的贵金属与其他杂质分离, 然后通过化学分析方法确定贵金属的含量^[1]。该方法具有准确性高、适用范围广等优点, 但操作复杂、耗时较长。然而, 这些传统检测技术在高纯度贵金属检测和新型合金材料鉴别中存在一定的技术局限性, 需要进一步创新和发展。

(二) 行业标准体系现状

国内外珠宝玉石分级标准与贵金属纯度标识体系存在差异。

国外一些发达国家在珠宝玉石分级标准方面相对更为细致和完善, 例如在颜色、净度等关键指标上有更精确的界定^[2]。而我国虽有相关标准, 但在某些细节方面仍需进一步细化和完善。在贵金属纯度标识体系上, 不同国家也有不同规定, 这导致在国际贸易中可能出现标准不一致的情况。这种标准化程度不足的现状, 会对检测结果的公信力产生影响。因为不同标准下的检测结果可能存在差异, 使得消费者对检测结果的信任度降低, 也不利于行业的健康发展。

二、现代检测技术创新进展

(一) 光谱分析技术突破

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术在珠宝及贵金属检测领域取得重要进展。它可实现元素分布的可视化检测, 通过高能量激光脉冲聚焦在样品表面产生等离子体, 对等离子体发射光谱进行分析, 从而确定样品中的元素组成及分布情况^[3]。同时, 高分辨率

显微红外光谱技术也为检测提供了新方法。针对合成钻石，其可以通过识别特征谱线来进行鉴别。通过特定的算法对显微红外光谱数据进行处理，能够更准确地提取合成钻石的特征谱线，有效区分天然钻石与合成钻石，为珠宝及贵金属的检验检测提供了更精确、高效的技术手段。

（二）智能检测设备研发

基于深度学习的珠宝瑕疵自动识别系统构建方面，利用深度学习算法强大的特征学习能力，对大量珠宝图像数据进行学习和分析，从而实现对珠宝瑕疵的自动识别^[4]。通过构建合适的神经网络模型，如卷积神经网络（CNN），能够有效提取珠宝图像中的特征信息，准确判断瑕疵的类型、位置和大小等。在微区 CT 扫描技术应用于贵金属制品内部结构无损检测中，该技术可提供高分辨率的三维图像，清晰展示贵金属制品内部的微观结构和缺陷情况。它能够在不破坏样品的前提下，检测出内部的微小裂纹、孔洞等缺陷，为贵金属制品的质量评估和工艺改进提供重要依据。

三、标准化检测体系构建

（一）国际标准对接研究

1. CIBJO 标准本土化改造

中国珠宝市场具有自身独特的特征，如文化内涵丰富、消费群体多样、原材料来源广泛等^[5]。在对接 CIBJO 标准时，需充分考虑这些特点进行本土化改造。一方面，要结合中国传统文化元素对标准中的款式设计、寓意解读等部分进行细化和补充，使其更符合中国消费者的审美和文化需求。另一方面，针对中国丰富的珠宝原材料资源，在标准中应增加对一些本土特色原材料的质量检测指标和方法。同时，考虑到中国市场消费群体的多样性，在标准的适用性上应更加灵活，例如对不同档次、不同用途的珠宝首饰制定有针对性的检测细则，以确保 CIBJO 标准在中国珠宝市场能够更好地落地实施，促进中国珠宝检验检测行业的健康发展。

2. 贵金属纯度标识统一化

构建涵盖印记、电子身份证等多维度的新型标识体系对于贵金属纯度标识统一化至关重要。印记作为传统的标识方式，具有直观、便捷的特点，但存在易磨损、伪造等问题。电子身份证则可以利用现代信息技术，为贵金属赋予独一无二的身份编码，实现从生产源头到销售终端的全程追溯。通过将印记与电子身份证相结合，可以优势互补，提高标识的准确性和可靠性。同时，在构建新型标识体系的过程中，要充分考虑国际标准的对接，确保标识体系的通用性和兼容性，以便更好地适应全球化的市场环境^[6]。

（二）质量追溯机制创新

1. 区块链溯源系统设计

区块链技术具有去中心化、不可篡改、可追溯等特性，为珠宝及贵金属的溯源提供了新的思路。该系统设计首先需确定数据结构，包括珠宝的基本信息（如种类、重量、成色等）、生产加

工环节信息（如加工工艺、加工时间、加工地点等）以及流通环节信息（如销售渠道、销售时间、销售地点等）^[7]。其次，构建区块链网络，选择合适的共识机制确保数据的一致性和准确性。再者，设计智能合约，实现自动化的信息验证和记录。同时，要考虑系统的安全性，防止数据泄露和篡改。通过这些设计，能够实现珠宝及贵金属从原材料到成品的全程追溯，保障消费者权益，提升行业的信任度。

2. 实验室数据互联方案

国家级检测机构数据共享与结果互认的标准化协议是构建标准化检测体系、创新质量追溯机制和实现实验室数据互联的关键。应明确规定数据格式、检测方法、精度要求等关键要素的统一标准^[8]。这有助于不同机构间的数据流通和结果比较，提高检测效率和准确性。同时，建立严格的质量控制和审核机制，确保共享数据的真实性和可靠性。通过标准化协议，可实现从样品采集到检测结果发布的全过程追溯，增强质量追溯机制的有效性。此外，利用现代信息技术搭建数据互联平台，使各实验室能实时共享和交互数据，促进珠宝及贵金属检验检测技术的协同创新与发展。

四、技术应用实证研究

（一）珠宝检测典型案例

1. 热处理宝石鉴别实践

利用激光诱导击穿光谱（LIBS）技术分析红宝石热处理历史是一种有效的方法。通过获取元素迁移图谱，可以了解热处理过程中元素的扩散和变化情况。在实际应用中，对红宝石样品进行 LIBS 检测，分析其中关键元素的含量和分布。例如，某些元素在热处理后可能会出现迁移现象，从晶体内部迁移到表面或在晶体内重新分布。通过对比热处理前后以及天然未经热处理红宝石的 LIBS 图谱差异，可以识别红宝石是否经过热处理以及推断其热处理条件。这种技术为珠宝检测领域提供了一种新的、准确的鉴别热处理宝石的方法^[9]。

2. 合成钻石鉴定方案

光致发光光谱（PL）是一种有效的检测手段，在 CVD 合成钻石特征生长纹的检测中具有重要应用。其原理是基于钻石在特定波长的光激发下会产生特征性的发光光谱。对于 CVD 合成钻石，由于其生长过程与天然钻石存在差异，在 PL 光谱上会呈现出独特的特征生长纹相关的谱线。这些谱线可以作为鉴别 CVD 合成钻石的关键依据。通过精确测量和分析 PL 光谱中的特征峰位置、强度以及峰形等参数，可以准确判断钻石是否为 CVD 合成品，并进一步了解其生长过程中的一些特性^[10]。

（二）贵金属检测应用示范

1. 纳米结构金制品检测

在纳米结构金制品检测中，小角 X 射线散射技术发挥着重要作用。该技术能够对贵金属纳米颗粒分布进行有效表征。通过测量散射光的强度和角度等信息，可以获取纳米颗粒的尺寸、形状以及空间分布等关键参数。这对于深入了解金制品的微观结构和

性质至关重要。例如，在检测金纳米颗粒的团聚情况时，小角 X 射线散射技术可以清晰地呈现出颗粒之间的距离和聚集程度，从而为评估金制品的质量和性能提供有力依据。同时，该技术还具有非破坏性、高精度等优点，能够在不破坏金制品的前提下，实现对其内部纳米结构的准确检测，这在珠宝及贵金属检验检测领域具有广阔的应用前景。

2. 古董金银器无损分析

微束 XRF 技术在古董金银器无损分析中具有重要应用。该技术可实现文物贵金属成分的原位检测。它通过发射微束 X 射线激发样品，使样品中的元素产生特征 X 射线荧光，从而确定元素种类和含量。对于古董金银器，这种无损检测方式能够避免对文物造成破坏，同时精确分析其贵金属成分，为文物的鉴定、研究和保护提供关键数据。例如，可检测金银器中金银的纯度以及其他微量元素的存在情况，有助于了解古代金银器的制作工艺和材料来源，对研究古代文化和历史具有重要意义。

（三）技术创新效益评估

1. 检测效率量化分析

新旧技术体系在典型检测项目中的表现存在显著差异。在耗时方面，新技术往往借助先进的仪器设备和优化的检测流程，大幅缩短了检测时间。例如，对于贵金属纯度检测，传统方法可能需要数小时，而新技术可能在几十分钟内即可完成。在准确性数据上，新技术通过更精确的分析方法和更高的分辨率，能够提供更准确的检测结果。以珠宝玉石的成分分析为例，新技术能够检测到更细微的成分差异，准确性较旧技术有明显提升。这些数据

对比充分体现了技术创新在检测效率和准确性上带来的巨大效益，为珠宝及贵金属检验检测行业的发展提供了有力支撑。

2. 经济效益测算模型

技术创新带来的市场打假成本节约评估体系的构建需从多方面考虑。首先明确市场打假成本包含人力、物力及时间成本等。对于珠宝及贵金属检验检测技术创新而言，其可能减少了大量传统人工检测所需的人力投入，降低了人力成本。同时，新技术可能提高检测效率，缩短检测时间，从而减少了时间成本。在物力方面，新的检测技术可能减少了对某些昂贵检测设备的依赖，或者提高了设备的使用效率，进而降低了物力成本。通过对比技术创新前后这些成本的变化，建立合理的数学模型来量化市场打假成本的节约量，从而评估技术创新在这方面带来的经济效益。

五、总结与展望

在珠宝及贵金属检验检测技术领域，已取得诸多成果。光谱分析技术不断优化，提升了检测的准确性和效率；智能检测方面也实现了关键突破，为检测工作带来了更多便利。

展望未来，发展方向明确。检测标准将趋于国际化，这有助于全球珠宝市场的规范和统一。设备微型化是必然趋势，可使检测更加便捷、灵活。同时，建立大数据预警系统至关重要，能及时发现市场中的异常情况。这些技术创新不仅能推动行业进步，更对规范珠宝市场秩序、保障消费者合法权益具有不可替代的战略价值，将为珠宝及贵金属行业的健康发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 方立凯. 金融发展、技术创新与产业间要素配置效应 [D]. 重庆师范大学, 2021.
- [2] 曾忆旻. 技术创新、内部控制与企业可持续发展 [D]. 东华大学, 2023.
- [3] 杨文山. 资本错配对技术创新的影响——基于金融效率的中介效应检验 [D]. 山东财经大学, 2023.
- [4] 张植. 环境规制、绿色技术创新与工业绿色发展 [D]. 武汉大学, 2021.
- [5] 袁欢欢. 互联网发展对城市技术创新的影响及机制研究 [D]. 南京财经大学, 2022.
- [6] 马婧. 红外光谱检测技术在珠宝检测机构中的应用 [J]. 产业与科技论坛, 2021, 20(22): 37-38.
- [7] 杜丹丹. “珠宝物流送检”模式的发展现状 [J]. 中国宝石, 2022(4): 236-239.
- [8] 金莉莉. 基于大数据的精准教学在珠宝检测类课程中的改革与应用 [J]. 现代信息科技, 2023, 7(1): 178-181.
- [9] 周青超, 沈锡田. 从专利角度分析全球宝石检测技术的发展 [J]. 宝石和宝石学杂志 (中英文), 2022, 24(3): 71-78.
- [10] 夏妍. 首饰贵金属 3D 打印技术发展现状研究——评《贵金属珠宝饰品材料学》[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(2): 144.

基于正交两点法的精密数控镗铣床主轴回转精度研究

王林, 廖广宇, 赵彦鹏, 廖之溥, 杨军, 邱海莲

中国机械总院集团云南分院有限公司 / 云南省机电一体化应用技术重点实验室, 云南 昆明 650031

DOI:10.61369/ME.2025070015

摘 要 : 以精密数控镗铣床主轴为研究对象, 对其进行基于正交两点法的主轴回转精度试验, 通过主轴回转精度最小二乘法评定方法及平均值算法进行建模及误差评定, 准确、快速的计算出主轴的回转精度误差, 可为分析、查找影响主轴回转精度的因素提供科学、可靠、高效的试验数据支持。

关 键 词 : 机床; 主轴; 回转精度; 两点法

Research on Spindle Rotation Accuracy of Precision CNC Boring and Milling Machine Based on Orthogonal Two Point Method

Wang Lin, Liao Guangyu, Zhao Yanpeng, Liao Zhipu, Yang Jun, Qiu Hailian

China Academy of Machinery Science and Technology Group Yunnan Branch / Key Lab. of Electromechanical Integration Application Technology of Yunnan, Kunming, Yunnan 650031

Abstract : Taking the spindle of a precision CNC boring and milling machine as the research object, a rotation accuracy experiment based on the orthogonal two point method was conducted. The least squares method for spindle rotation accuracy evaluation and the average value algorithm were used for modeling and error evaluation, accurately and quickly calculating the spindle rotation accuracy error. This can provide scientific, reliable, and efficient experimental data support for analyzing and finding factors that affect the spindle rotation accuracy.

Keywords : machine tool; spindle; rotation accuracy; two-point method

高速、高精度、高可靠性是当代数控机床的发展方向^[1]。机床主轴是机床的主要部件之一, 由于机床主轴用于安装刀具或者工件, 因此它是刀具或者工件的相对位置基准和运动基准。机床主轴回转精度是机床精度的一项重要指标, 直接影响到被加工零件的几何形状精度、位置精度和表面粗糙度, 特别是在镗孔时将影响到被加工孔的圆度。

因此需要深入研究主轴回转精度的测量和评定方法, 分析主轴的运动状态和判断误差产生的原因, 为提高电主轴的回转精度奠定基础^[2]。根据机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度^[3]评定主轴的回转精度, 通过采用正交两点法对精密数控镗铣床的主轴回转精度进行测试分析。

通过主轴回转精度试验评价主轴在各级转速下的回转精度水平, 可为分析、查找影响主轴回转精度的因素提供科学、可靠、高效的试验数据支持, 便于持续改善结构设计和装配质量。

一、主轴回转精度测试原理 (正交两点法)

对于精密数控镗铣床主轴, 属于旋转敏感方向的机械加工主轴, 其加工误差敏感方向随着刀具的旋转在各个轴向横截面的360°上变化。安装在被测轴上的基准球, 在两个相互垂直的X、Y坐标方向上安装2个固定不动的电涡流传感器S1、S2, 此为正交两点法^[4]; 同时在Z方向上安装1个电涡流传感器S3, 在X向安装一个转速传感器S, 方便监测轴向窜动和实时转速, 见图1。电涡流传感器把主轴回转误差转变为电信号输入到测量设备, 以S1、S2产生的两个信号 $\Delta X(\theta)$ 和 $\Delta Y(\theta)$ 为基础数据计算和绘制误差运动极坐标曲线图。

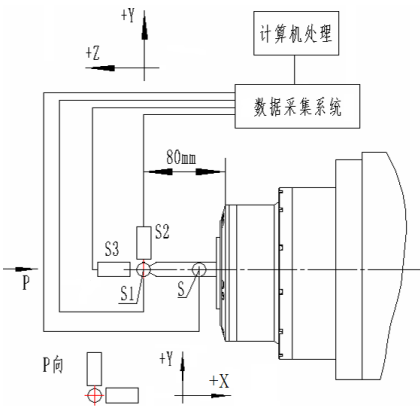


图1 试验系统示意图

作者简介: 王林 (1987.7-), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 中国机械总院集团云南分院有限公司, 主要研究方向: 测试技术、机床性能试验、模态及可靠性试验。

计算和绘制误差运动极坐标曲线图按照下述公式进行：

$$r(\theta) = r_0 + \Delta X(\theta) \cos \theta + \Delta Y(\theta) \sin \theta \quad (1)$$

式中：

θ —— 主轴的角度位置；

$r(\theta)$ —— 在角度位置 θ 处的径向误差运动；

$\Delta X(\theta)$ —— 位于 X 轴的位移传感器的输出值；

$\Delta Y(\theta)$ —— 位于 Y 轴的位移传感器的输出值；

r_0 —— 由位移传感器和基准检具校准确定的半径值。

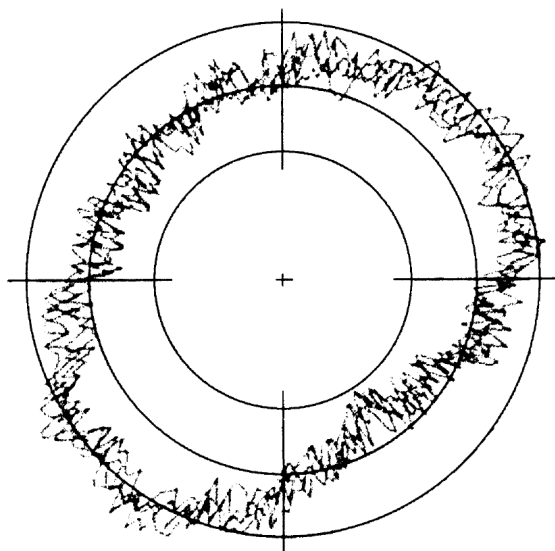


图2 误差运动极坐标曲线图（总误差）

二、主轴回转精度常用分析方法

本次实验采用最小二乘圆评价法进行精密数控镗铣床主轴的回转精度的评定，原理图如图3。

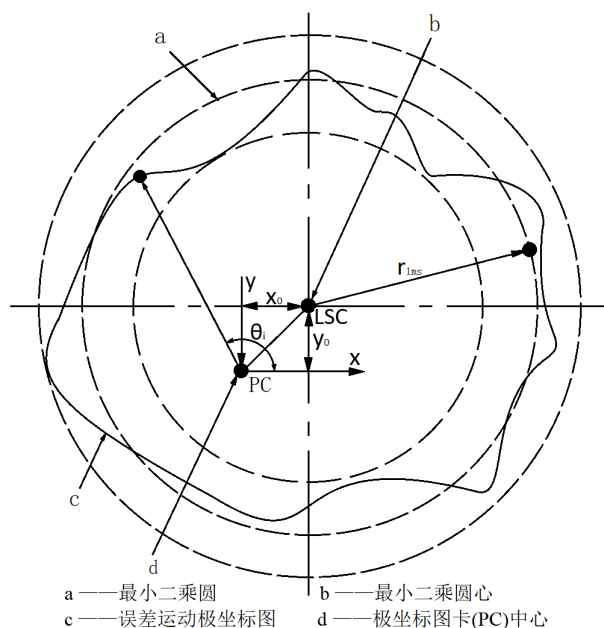


图3 最小二乘圆评价法原理图

最小二乘圆计算公式为：

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r_{lms} \right)^2 \quad (2)$$

通过求解方程中的 x_0 、 y_0 及 r_{lms} 使 $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ 值最小，但由于依据最小二乘圆的计算分析方法无解析解，一般采用迭代算法来获得精确的解，常用的算法有最小二乘牛顿迭代算法、最小二乘近似算法和平均值算法，本次将通过平均值算法来计算求解。平均值计算方法是通过直接求平均值作为最小二乘圆的方法^[5-6]，是一种最常见的算法，有计算简单便捷、计算速度快、准确度到等优点。

平均值算法计算公式为：

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (4)$$

$$r_{lms} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (5)$$

三、精密数控镗铣床主轴回转精度测试分析

测试精密数控镗铣床主轴相对工作台在各级转速下主轴轴线的运动轨迹，计算出主轴轴线回转精度。试验前让主轴以中速（3000r/min）空运转30min；试验前校正测量棒，在安装传感器位置处，使测量棒的径向跳动小于15μm；S1、S2传感器距主轴前定位端盘距离为80mm；试验时，主轴在各级转速下做回转运动，X轴、Y轴、Z轴及B轴不做进给运动。

记录主轴在个转速下正反转的32组实测数据，选取其中较为典型的低、中、高转速的3组数据和镗孔常用转速1组组数据，共4组数据，画出径向运动轨迹图，如图4~7所示。由图可得，主轴在各转速下运动轨迹均是规则圆形。

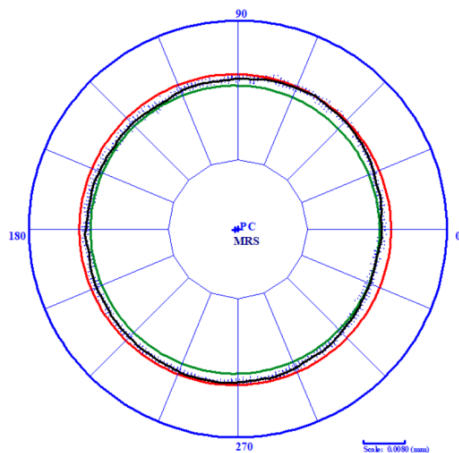


图4 20r/min 正转回转精度

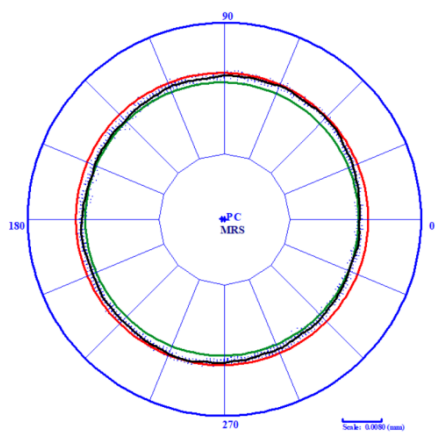


图5 160r/min正转回转精度

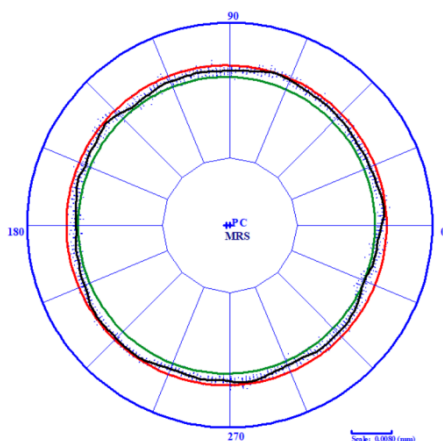


图6 3200r/min正转回转精度

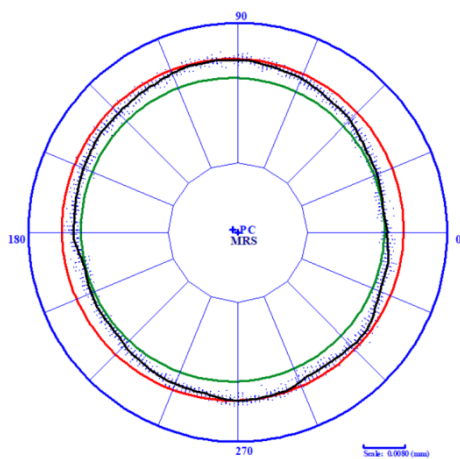


图7 6000r/min正转回转精度

精密数控镗铣床主轴在各测试转速下的回转精度误差见表1, 机床主轴装配质量及回转精度水平总体良好。

表1 主轴回转精度分析值

转速 r/min	回转精度径向误差 μm		转速 r/min	回转精度径向误差 μm	
	正转	反转		正转	反转
20	6	6	500	7	6
50	7	6	630	6	6
80	6	6	800	6	6
125	6	5	1250	6	5
160	7	6	2000	6	6
200	6	6	3200	6	6
320	6	6	4000	6	5
400	6	5	6000	3	4

四、总结

本文介绍了基于正交两点法的机床主轴回转误差的理论模型及测试分析方法, 主要依据国家标准 GB/T 17421.7-2016《机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度》。本次测试采用的电涡流传感器分辨率高、线性度及抗干扰能力强, 近年在主轴回转精度测试中应用较为广泛。

采用正交两点法的测试, 因使用2个传感器且夹角呈 90° , 同时搭配专用工装夹具, 使得传感器安装、测试过程及数据处理均较简单、快捷, 且测试误差较小, 数据处理效率高, 可为主轴轴承精度选择、轴承布置方案、主轴动平衡、轴承间隙调整及轴承润滑等提供支持。对提高机床动态精度、加工质量、以及对于精密机床与精密加工具有重要意义。

参考文献

- [1] 王立平. 数控机床先进技术浅谈 [J]. 航空制造技术, 2010(10): 49-52.
- [2] 王立平. 基于最小二乘法的电主轴回转精度评价 [J]. 制造技术与机床, 2018(2): 54-59.
- [3] GB/T 17421.7-2016, 全国金属切削机床标准化技术委员会, 机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度 [S]. 北京中国标准出版社, 2016.
- [4] 姚俊. 主轴回转精度测量方法 [J]. 制造技术与机床, 2011(12): 176-180.
- [5] 丁要文. 转轴径向运动误差干涉测量的信号处理方法 [J]. 红外与激光工程, 2022, (12): 56-60.
- [6] 靳岚, 燕昭阳, 谢黎明, 等. 高速主轴回转误差动态测试与分析 [J]. 制造技术与机床, 2012(4): 93-95.

老旧电梯传动机构能效提升改造关键技术与应用

张立红

广东岭南职业技术学院，广东 广州 510630

DOI:10.61369/ME.2025070028

摘 要： 本论文主要就老旧电梯传动机构的能效提升展开讨论，在分析老旧电梯传动系统“异步电动机+蜗轮蜗杆减速箱”的传统传动系统能效机理及能耗瓶颈的基础上，阐述了永磁同步无齿轮曳引技术、先进的控制与驱动方式、制动能量回收和电梯附属系统的优化等关键技术及其节能机理；并从安全性经济性的角度提出了综合改造的设计流程，根据不同的应用场合，分级推出了阶梯式的电梯技术组合方式，并对老旧电梯改造中的系统兼容性问题、土建适应性问题以及电磁安全问题进行了讨论。

关 键 词： 老旧电梯；传动机构改造；能效提升

Key Technologies and Applications for Energy Efficiency Improvement and Renovation of Old Elevator Drive Mechanisms

Zhang Lihong

Guangdong Lingnan Institute of Technology, Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract： This thesis mainly discusses the energy efficiency improvement of the transmission mechanism of old elevators. Based on the analysis of the energy efficiency mechanism and energy consumption bottleneck of the traditional transmission system of "asynchronous motor + worm gear reducer" in old elevators, This paper expounds the key technologies such as permanent magnet synchronous gearless traction technology, advanced control and drive methods, braking energy recovery and optimization of elevator accessory systems, as well as their energy-saving mechanisms. From the perspectives of safety and economy, a comprehensive renovation design process was proposed. According to different application scenarios, a stepwise elevator technology combination method was introduced in a hierarchical manner. The system compatibility issues, civil engineering adaptability issues, and electromagnetic safety issues in the renovation of old elevators were also discussed.

Keywords： old elevator; transmission mechanism renovation; energy efficiency improvement

引言

老旧电梯存在能耗较高、运行效率较低的情况，对于老旧电梯传动机构实施节能技术改造是建筑节能的一项重要内容。本文系统探讨了老旧电梯传动机构节能关键技术，并提出通过技术升级和方案优化使电梯的能耗降下来、速度提上去，确保电梯节约成本、高效运行的技术路径，对当前建筑节能具有重要意义。

一、老旧电梯传动系统能效机理与关键问题分析

（一）电梯传动系统的基本构成与工作原理

老旧电梯传动系统是保障电梯安全稳定运行的核心动力单元，其基本构成包含曳引系统、电力拖动系统及配套辅助部件，各部分协同作用实现电能到机械能的转化与传递。其中，曳引系统作为核心执行模块，由曳引机、曳引轮与钢丝绳组成，曳引机通过输出扭矩驱动曳引轮旋转，再借助钢丝绳与曳引轮之间的摩擦力带动轿厢与对重做垂直运动，完成乘客或货物的运输作业；电力拖动系统则承担动力供给与运行控制功能，电动机为曳引系

统提供原始动力，传统老旧电梯多采用异步电动机，而变频器与控制系统通过调节电机输入电压、频率来控制电机转速，进而实现轿厢启停、调速等动作的精准操控。从能量传递路径来看，整个过程始于电网输送的电能，电能首先进入电力拖动系统，经变频器整流、逆变后转化为适配电动机运行的电能，驱动电动机运转并将电能转化为机械能，随后机械能通过曳引机内部的传动结构传递至曳引轮，最终由曳引轮与钢丝绳的摩擦力转化为轿厢升降的机械动能^[1]。

（二）典型老旧电梯传动系统技术特征与能效瓶颈

典型老旧电梯传动系统在技术架构上呈现显著的时代局限

性，其核心配置“异步电动机+蜗轮蜗杆减速箱”虽能满足基础运行需求，但存在先天能效短板：异步电动机因定子气隙磁场耦合特性，在轻载、启停阶段易出现功率因数低、铜损与铁损占比高的问题，且传统滑差调速方式难以实现精准转速控制，进一步加剧能耗；蜗轮蜗杆减速箱虽具备传动比大、运行平稳的优势，但其啮合副以滑动摩擦为主，相较于现代行星齿轮传动，机械损耗率显著更高，尤其在长期运行后，蜗轮齿面磨损、润滑失效会导致传动效率进一步衰减。在能量处理环节，老旧电梯普遍采用能耗制动电阻实现减速与停车控制，其工作机理是将电梯下行或制动时异步电机产生的再生电能通过电阻转化为热能散发，这一过程不仅造成可回收能量的完全浪费，还需额外配置散热装置以避免电阻过热，形成“能耗叠加”问题^[2]。

（三）电梯能耗模型与能效评价指标

电梯的能耗模型建立在对一个完整运行周期各阶段能耗构成的精细剖析之上。该周期通常包含启动、匀速、制动与待机四个典型阶段。在启动加速阶段，曳引机需输出巨大转矩以克服系统惯性，电流骤增，是能耗的高峰期；匀速运行阶段，能耗主要用于克服运行阻力，其值与负载和速度直接相关，相对稳定；在制动减速阶段，电机处于发电状态，传统系统通过制动电阻将再生电能以热能形式耗散，造成能量浪费；而在待机阶段，控制系统、轿厢照明及通风等附属设备的持续运行则产生看似微小但累积可观的静态能耗。为科学量化上述能耗水平，需借助关键能效评价指标，主要包括：用于宏观衡量电梯运输效率的“单位时间能耗”；反映电力利用效率、数值越高代表电网侧电能利用率越佳的“功率因数”；以及评估其对电网质量影响程度、数值越低表明谐波污染越小的“总谐波失真（THD）”^[3]。

二、老旧电梯传动机构能效提升关键技术

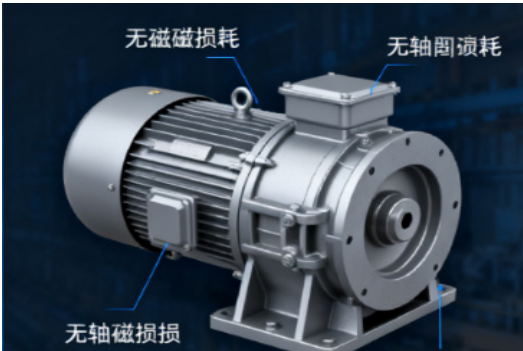
（一）核心传动部件的升级技术

永磁同步无齿轮曳引技术的应用从根本上革新了传统传动模式，其技术原理在于利用永磁体励磁取代了异步电机的电励磁，从而消除了励磁电流产生的损耗，实现了极高的运行效率；同时，它取消了庞大的齿轮减速箱，将曳引轮直接安装在电动机的转子上，形成了紧凑的同轴传动结构，如图1所示，这不仅显著提高了功率密度，还因消除了齿轮啮合所需的润滑和机械磨损，达成了运行低噪音与免维护的优势。在改造方案上，其核心是直接替换原有的异步电动机加蜗轮蜗杆减速箱组成的传动总成。这一替换彻底简化了机械传动链，将多级传递变为直接驱动，从根本上避免了齿轮传动固有的能量损耗，使得传动系统的综合效率得以大幅提升，这是对老旧电梯进行深度节能改造最根本的技术路径^[4]。

（二）制动能量回收技术

制动能量回收技术是针对电梯在重载下行或轻载上行等工况中产生的再生电能的有效利用方案，主要包括两种技术路径。其一为能量回馈装置，其技术核心是利用有源前端逆变技术将电机发电状态产生的直流电逆变成与电网同频同相的交流电，并回馈至建筑电网供其他用电设备使用；该技术的实施关键在于必须确

保回馈电流的质量，即实现低总谐波失真（THD）以满足电网谐波标准，同时要解决并网时的孤岛效应等安全问题并符合电磁兼容性（EMC）要求。其二为超级电容储能技术，其原理是将再生电能瞬时存储于安装在轿厢或机房的超级电容中，由于其具有高功率密度和快速充放电特性，非常适合电梯频繁、短时、大功率的制动工况；所储存的电能可直接用于本梯的后续启动或照明系统，实现能量的局域消纳^[5]。



（图1：永磁同步曳引机）

（三）附属系统优化技术

附属系统的优化是能效提升改造中不可或缺的环节，其重点在于降低电梯待机与运行过程中的辅助能耗。在照明系统方面，将轿厢、层站显示及井道内的传统照明光源全面更换为低功耗的LED灯具，可直接大幅降低其运行能耗；并进一步引入基于红外感应或轿内摄像智能识别的人员感应系统，以及根据闲时、忙时预设的定时策略，实现“人来自动亮，人走自动灭”的待机节能控制，有效消除无人乘梯时的照明浪费。在通风系统方面，则可将传统的常开式轿厢风扇升级为变频控制风扇，根据轿内人员数量或空气传感器数据自动调节风速^[6]。电梯附属系统改造前后的能耗与经济性参数对比见表1。由表1可见，轿厢照明系统经LED替换与感应控制改造后，日均能耗从3.84kWh降至0.84kWh，降幅达78.1%，投资回收期仅6个月，在三类附属系统中节能效益最显著；通风系统改造虽能耗降幅相对较低，但可有效避免待机时段的无效能耗，长期收益仍可观。

表1：附属系统改造前后能耗对比表

附属系统类型	改造前配置	改造后配置	单梯日均能耗(kWh)	能耗降幅(%)	投资回收期(月)
轿厢照明	40W 荧光灯 × 4 (常亮)	10W LED 灯 × 4 (人体感应控制)	3.84	78.1	6
层站显示	20W 白炽灯 × 每层	5W LED 灯 × 每层	1.92 (按10层计算)	73.9	8
轿厢通风	60W 常开风扇	30W 变频风扇 (智能启停)	5.76	58.3	10

三、能效提升综合改造方案设计与应用分析

（一）改造方案设计原则

能效提升综合改造方案能够落地和最终实施，主要还是依赖于设计时要遵守一定的原则以及流程控制。方案设计第一原则，

以安全为先,任何的技术改造都不允许降低或损害电梯系统整体的安全性能要求,并且要符合国家特种设备安全技术规范。第二原则是开展经济型的技术评价,在对比不同的技术线路的初期投入、节能量和维保成本的基础上进行全寿命周期的成本效益分析,并根据分析结果选择符合自身需要的最佳个性化改造方案^[7]。

(二) 不同技术路线的组合应用模式分析

在制定老旧电梯传动机构能效提升的综合改造方案时,必须根据电梯的实际运行特点、能耗水平及投资预算进行差异化设计,形成多层次的技术路线组合应用模式。对于医院、写字楼、大型商场等高使用频率、高能耗场合,应采用“深度节能模式”^[8]。该模式集成了永磁同步无齿轮曳引机、能量回馈装置和智能群控系统三项核心技术,通过永磁同步技术从传动根源上消除机械损耗,通过能量回馈系统将制动能量转化为可用电能,再结合智能控制算法优化运行效率,构建了一个完整的节能体系,虽初始投入较大,但能效提升幅度最为显著,投资回收期也相对合理。针对住宅楼、使用频率中等的公共建筑等场景,“经济节能模式”则更具适用性;该模式以永磁同步曳引机为核心,保留其高效率、免维护的优点,同时配以优化的变频驱动控制策略,通过改进电机控制算法和运行曲线来提升能效,虽未配置能量回馈系统,但已在核心传动效率和控制精度上实现了质的飞跃,在改造成本与节能收益间取得了最佳平衡。而对于预算有限或能耗问题不突出的特定场合,“局部优化模式”提供了一种灵活实用的解决方案,该模式仅对控制系统进行升级或对照明、通风等附属系统进行节能改造,虽未触及传动核心,但也能有效改善功率因数、降低待机损耗,以最小投入获得可观的节能效果,并为未来进一步改造预留了空间^[9]。

(三) 改造工程中的关键技术问题与对策

而当老旧电梯能效提升改造工程从方案设计转入现场施工的过程中,一定会面临着一系列困难的技术问题,能否克服这些问题,直接决定了老电梯能否完成改造及长期使用下的安全性、可

靠性等问题,其中主要涉及到的关键问题:一是新旧系统之间的兼容性和接口匹配问题。为了降低不必要的成本,在改造过程中大多数都采用了“部分更新、部分利旧”的方式来改造原有的设备,也就是说在某些方面是在继续沿用原有设备的基础上,在部分原有的基础上增加了高效曳引机、先进的控制系统等新型化的设备,这样就需要对新系统与原系统做出适当的修改和更换工作,就需要保证系统之间有着良好的匹配。涉及到这一部分内容包括了机械设备的安装接口、电气信号以及各型号机器间的通信等,对于设备本身来说也有一定的匹配困难,需要通过构建完整的技术包来解决以上问题。二是改造井道空间和土建结构,这里是指新型永磁同步主机和旧蜗轮主机在主机外形、自重、吊点受力上的差异较大,所以根据新的需求改造必须查看井道净空高度、底坑深度、顶层高度等是否能够满足新的设备需求。为满足主机的需求,必须要检查机房承重梁、曳引机混凝土基础是否符合新的负载能力的要求。对于已经建设完毕而无法达到上述条件的楼栋,需另行提出对相应方案的选择,可以考虑结构加固的方法或者选择主机更小、更轻便的型号来解决;其次就是电磁干扰抑制与电气安全防护。变频器、能量回馈单元等大功率电力电子器件都是谐波和电磁噪声的主要来源,这些器件产生的高次谐波和电磁辐射会严重影响电梯这个对微电子控制系统的异常敏感的设备,一旦发生这样严重的故障问题,会使电梯变得无法运行^[10]。

四、结语

综上所述,采用永磁同步曳引和先进控制与能量回馈等方法改造现有老旧电梯设备可以提升电梯能效,在改造过程中要根据实际情况选取最合适的改造技术组合,并且要注意改造工程的配合以及安全性问题。随着技术的不断发展,此项技术会更为成熟,可以给今后的电梯节能提供更多的支持。

参考文献

- [1] 张健,王子昊,张永举.电梯载重测试车传动机构的设计与仿真验证[J].中国电梯,2023,34(05):50-52.
- [2] 王正宇,朱瑞银,张子文.电梯健康监测模型与评价技术研究[J].中国电梯,2022,33(11):51-53.
- [3] 李猷凤.变频器在电气传动自动控制中的应用[J].黑龙江科学,2021,12(24):137-138.
- [4] 孔晓华.AI机器人在电梯检修中的应用研究[J].设备监理,2023,(03):57-60.
- [5] 丁帅阳,胡甲琦,阳一凡,等.基于Arduino单片机自动控制的电梯按钮自动消毒装置[J].电子技术与软件工程,2022,(06):70-73.
- [6] 穆长丽.一种自动简易型电梯导轨除锈装置的结构设计[J].中国电梯,2023,34(03):72-74+77.
- [7] 石璐,刘矿平,郜高高,等.变频器在电气传动自动控制中的应用与实践[J].电动工具,2022,(06):33-36.
- [8] 陈东,万文铭.自动扶梯驱动主机中的齿轮传动技术综述[J].中国电梯,2022,33(15):27-31.
- [9] 陈源,严波.无机房电梯主动双向盘车救援装置的研究与应用[J].自动化与仪器仪表,2022,(06):242-245.
- [10] 李明相,陈忠润.液压与气压传动技术的应用[J].集成电路应用,2022,39(02):190-191.

影响铝挤压模具寿命的因素探讨

郑健全, 邹村先, 吴锡坤, 梁金鹏
广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528137
DOI:10.61369/ME.2025070030

摘 要 : 随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展, 工业铝型材市场需求持续激增, 铝挤压模具作为型材成型的核心装备, 其寿命直接关联生产效率、产品质量与综合成本。当前行业普遍存在模具设计不合理、制造精度不足、挤压工艺参数波动大、使用维护不规范及材料环境适配性差等问题, 导致模具磨损快、疲劳失效频发, 平均寿命偏低, 严重增加企业生产成本与停机损失。基于此, 本文针对模具自身设计制造、挤压工艺参数、使用维护流程、材料与环境四大核心维度, 系统探讨影响铝挤压模具寿命的关键因素, 厘清各因素作用机制, 以期为企业制定针对性优化策略提供理论支撑, 实现模具平均寿命提升 20% 以上、生产综合成本降低 15%–20%, 助力铝挤压产业高效发展。

关 键 词 : 铝挤压模具; 模具寿命; 影响因素; 设计制造; 工艺参数; 使用维护; 材料环境

Research on Factors Affecting the Service Life of Aluminum Extrusion Dies by

Zheng Jianquan, Zou Cunxian, Wu Xikun, Liang Jinpeng
Guangdong Xingfa Aluminum Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528137

Abstract : With the rapid development of high-end industries such as new energy vehicles and rail transit, the market demand for industrial aluminum profiles continues to surge. As core equipment for profile forming, aluminum extrusion dies directly impact production efficiency, product quality, and overall costs. Current industry challenges include unreasonable die design, insufficient manufacturing precision, fluctuating extrusion process parameters, non-standard usage and maintenance, and poor material-environment compatibility. These issues lead to rapid die wear, frequent fatigue failures, and short average lifespans, significantly increasing production costs and downtime losses. This study systematically examines key factors affecting aluminum extrusion die lifespan across four dimensions: die design and manufacturing, extrusion process parameters, usage and maintenance procedures, and material-environment compatibility. By clarifying the mechanisms of each factor, the research aims to provide theoretical support for enterprises to develop targeted optimization strategies. The goal is to achieve over 20% improvement in die average lifespan and reduce production costs by 15%–20%, thereby facilitating efficient development of the aluminum extrusion industry.

Keywords : aluminum extrusion die; die life; influencing factors; design and manufacturing; process parameters; use and maintenance; material environment

引言

随着新能源汽车、轨道交通等高端产业的飞速发展, 铝挤压模具作为铝型材成型的核心装备, 其寿命直接关联挤压生产的成本、效率与产品质量。在高端产业对铝型材需求激增的背景下, 模具寿命的延长可大幅降低模具更换频率、减少钢材消耗与停机损失, 是企业提升市场竞争力的关键环节。本文的核心目标是明确影响铝挤压模具寿命的关键维度, 厘清各因素对模具磨损、疲劳、失效的作用机制, 为企业制定针对性优化策略提供理论支撑, 最终实现模具平均寿命提升 20% 以上、生产综合成本降低 15%–20% 的目标。分析范围将覆盖模具全生命周期, 包括设计制造、挤压工艺、使用维护、材料环境四大核心维度, 聚焦“内因(模具自身)+外因(使用条件)”的双重逻辑, 系统拆解影响寿命的关键变量。

一、模具自身设计与制造的影响

(一) 模具结构设计合理性

模具结构设计直接决定受力分布与热传导效率, 是影响寿命

的核心内因。分流孔面积比失衡会导致金属流动速度不均, 使模具局部承受超额应力, 加速疲劳开裂; 工作带长度设计需精准匹配型材特性, 过长会增大摩擦磨损, 过短则易因强度不足变形失效; 模具关键部位无弧形过渡圆角、缺乏合理泄压槽, 会造成应

作者简介: 郑健全(1991.03–), 男, 汉族, 广东佛山人, 现供职单位全称: 广东兴发铝业有限公司, 职称: 材料工程师, 学历学位: 本科、学士。

力集中，挤压时易引发裂纹扩展。优化模具结构（如采用对称分流设计、合理设置工作带长度与泄压槽尺寸、关键棱角做弧形过渡），可均衡应力分布与金属流动状态，减少局部损伤，延长模具疲劳寿命。

（二）制造加工精度控制

制造加工精度偏差会为模具寿命埋下先天隐患。模孔尺寸公差超 $\pm 0.05\text{mm}$ ，会导致挤压时金属流动紊乱，增加模具工作带的不均匀磨损；表面加工粗糙度 $R_a > 0.8\mu\text{m}$ ，会降低金属流动性，加剧摩擦磨损，还易残留铝渣形成划痕；线切割、电火花加工后未进行应力消除处理，模具内部残留的热应力会在使用中逐步释放，引发变形或开裂。采用高精度加工设备保障尺寸公差与表面光洁度，加工后通过时效处理消除残留应力，是确保模具初始性能、延长使用寿命的基础。

（三）热处理工艺质量

热处理工艺直接决定模具的硬度、韧性与耐磨性，是模具制造的关键环节。淬火温度过高（超 550°C ）会导致模具晶粒粗大、脆性增加，易出现崩裂；温度过低则模具硬度不足（ $\text{HRC} < 58$ ），耐磨性大幅下降；回火不充分会使模具残留内应力，使用中易因热冲击引发开裂；氮化处理时，氮化层厚度不均（ $< 0.15\text{mm}$ 或超 0.3mm ）会影响表面耐磨性与基体结合力，导致氮化层脱落。规范热处理流程，精准控制淬火、回火温度与时间，确保氮化层均匀致密，可使模具获得优良的综合力学性能，提升抗磨损、抗疲劳能力^[1]。

二、挤压工艺参数的影响

（一）挤压温度匹配度

挤压温度（铝棒加热温度与模具预热温度）的匹配性直接决定模具热负荷与磨损速率，是影响寿命的关键工艺因素。铝棒温度过高（超 550°C ）会使金属流动性过强，虽降低挤压阻力，但会加剧模具表面氧化与热疲劳损伤，长期处于高温环境易导致模具工作带软化、龟裂；温度过低（低于 480°C ）则金属塑性下降，需增大挤压压力才能完成成型，会显著增加模具机械磨损与应力负荷。模具预热温度需与铝棒温度适配，控制在 $430\text{--}500^\circ\text{C}$ 区间，若预热不均（温差超 $\pm 10^\circ\text{C}$ ），挤压时模具局部因热胀冷缩不一致引发热冲击，表面易产生微裂纹并逐步扩展。因此，需根据模具材质（如 H13 钢）与型材截面特性，精准匹配铝棒与模具温度，避免热负荷过载与热冲击损伤。

（二）挤压速度与压力控制

挤压速度与压力的稳定性直接影响模具受力状态与磨损程度。挤压速度过快（超 8mm/s ）会导致金属在模孔内流动阻力激增，模具工作带与金属间的摩擦系数大幅上升，不仅加剧机械磨损，还会产生大量摩擦热，使模具表面温度骤升，加速热疲劳开裂；同时，过快的金属流动易引发紊流，造成局部应力集中，增加模具变形风险。挤压压力需严格控制在模具许用范围（如 1800T 模具压力不超过 350MPa ），若压力超上限，模具将承受超额载荷，分流桥、工作带等关键部位易出现塑性变形或结构性

开裂。采用中低速稳定挤压（ $5\text{--}7\text{mm/s}$ ），搭配压力闭环控制系统，实时监测并调整挤压压力，可均衡模具受力与热负荷，减少磨损与疲劳损伤，延长使用寿命^[2]。

（三）冷却系统适配性

冷却系统的有效性均匀性直接影响模具热疲劳损伤累积速率。挤压过程中，模具持续承受高温金属的传导热与摩擦热，若出口冷却强度不足（如冷却风机功率不够、喷水嘴堵塞），模具无法及时散热，长期处于 500°C 以上高温环境，表面氧化磨损加快，热疲劳裂纹易萌生；冷却水路设计不合理（如分布不均、管路狭窄）或堵塞，会导致模具局部温差超 $\pm 15^\circ\text{C}$ ，引发热胀冷缩失衡，产生热应力并加速裂纹扩展。优化冷却系统需确保水路覆盖模具关键受力部位，保持水路畅通，出口冷却装置需精准对准模具工作带区域，通过调节冷却介质流量与温度，将模具工作温度稳定在 $400\text{--}450^\circ\text{C}$ 合理区间，减少热疲劳损伤与氧化磨损，为模具寿命延长提供保障。

三、模具使用与维护的影响

（一）预热与冷却规范度

模具使用前后的预热、冷却操作规范是规避热应力损伤、延长寿命的关键环节。模具使用前未充分预热（温度低于 350°C ）或预热速度过快（升温速率超 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ），会导致模具与 $480\text{--}520^\circ\text{C}$ 的高温铝棒形成剧烈温差，引发热冲击，使模具表面产生肉眼难见的微裂纹，这些裂纹在反复挤压的热循环中会持续扩展，最终导致模具崩裂。若预热不均（局部温差超 $\pm 10^\circ\text{C}$ ），还会造成模具各部位热胀冷缩不一致，进一步加剧内部应力^[3]。挤压结束后，直接采用强风冷或水冷至室温，会使模具表面温度骤降，内部热量无法及时散发，形成巨大热应力梯度，加速模具变形与疲劳失效。因此需严格遵循“梯度预热”原则：按 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 速率分阶段升温至 $430\text{--}500^\circ\text{C}$ ，保温 1–2h 确保温度均匀渗透；挤压后将模具置于保温箱中缓冷或自然冷却，使温度缓慢降至室温，最大限度减少热应力对模具基体的损伤，为延长使用寿命筑牢基础。

（二）清洁与润滑有效性

模具清洁与润滑的有效性直接决定摩擦磨损程度，是使用维护的核心要点。挤压间隙若未及时清理，模孔、工作带及分流孔内残留的铝渣、氧化皮会在下次挤压时与金属一起流动，相当于“磨料”划伤模具表面，形成深浅不一的沟痕，这些沟痕会成为应力集中点，加速磨损与裂纹萌生；若模具表面附着油污，还会在高温下分解产生腐蚀性气体，侵蚀模具表面。润滑脂选型不当（耐高温性低于 500°C ）会导致挤压时润滑膜失效，金属与模具间摩擦系数激增，不仅加剧工作带磨损，还易引发粘模现象，强行脱模会造成模具表面撕裂。因此每次换模后，需用 $0.8\text{--}1.0\text{MPa}$ 高压气枪配合专用刮刀，彻底清理模具关键部位残留杂质；选用耐高温、粘附性强的专用挤压模具润滑脂，均匀涂抹于模孔、工作带及分流桥表面，确保形成连续致密的润滑膜，有效降低摩擦损耗，减少粘模与划伤风险，延缓模具失效。

（三）日常检查与修复及时性

日常检查与及时修复是避免小缺陷累积为致命失效的关键手段。模具使用后若未进行表面状态检查，工作带磨损量超 0.05mm 、表面微裂纹等问题未及时处理，会在后续挤压的机械负

荷与热冲击下持续恶化：微裂纹会逐步扩展为贯穿性裂纹，磨损部位会因金属流动不均产生更大应力集中，最终引发模具崩角、开裂等突发性失效，造成严重生产损失。轻微划痕、磨损未及时修复，还会导致金属流动受阻，进一步加剧模具局部损伤。因此需建立完善的检查修复机制：每次使用后通过目视与放大镜检查表面状态，累计挤压2000根型材后，采用超声波探伤排查内部微裂纹；对表面划痕、轻微磨损，用800–1000目金刚石砂轮抛光修复，确保表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$ ；对磨损超差或出现小裂纹的部位，选用匹配的模具钢焊条及时补焊，补焊后重新精加工校准，通过“早发现、早修复”延缓缺陷扩展，显著延长模具服役周期。

四、材料与环境因素的影响

（一）模具材料性能适配性

模具材料的性能是决定其寿命的核心内因，需满足耐高温、耐磨、抗疲劳的综合要求^[4]。当前主流的H13热作模具钢，其碳化物含量（如Cr、Mo、V等合金碳化物）直接影响硬度与耐磨性，含量不足会导致模具工作带硬度低于HRC58，磨损速率加快；若材料中硫、磷等杂质含量超标（>0.03%），会形成脆性相，降低模具韧性，易在挤压应力下开裂。此外，未经过电渣重熔等精炼处理的材料，内部易存在疏松、夹杂、偏析等缺陷，这些隐性问题会在反复热冲击与机械负荷下逐步暴露，引发早期失效。选用优质精炼热作模具钢，严格控制合金成分与纯度，确保材料具备均匀的组织与优良的综合力学性能，是提升模具抗磨损、抗疲劳能力的前提。

（二）铝棒原料杂质影响

铝棒原料的纯净度直接关系模具的磨粒磨损程度，是易被忽视的关键外因。铝棒中Fe、Cu等元素含量超标（如Fe > 0.3%），会形成AlFeSi等硬脆金属间化合物，其硬度远超铝基体，挤压时相当于“刚性磨料”，与模具工作带高速摩擦，加速表面磨损与沟痕形成；铝棒内部夹杂的氧化皮、非金属杂质（如耐火材料碎屑），会在金属流动过程中划伤模具表面，破坏氮化层完整性，甚至嵌入模具表面形成应力集中点，诱发微裂纹。此

外，铝棒表面氧化严重、存在油污或水分，会加剧挤压时的摩擦与腐蚀，进一步缩短模具寿命。通过光谱分析严控铝棒化学成分，采用超声波探伤排查内部缺陷，对铝棒表面进行清洁处理，可显著减少磨粒磨损与划伤风险。

（三）工作环境腐蚀作用

挤压生产环境中的腐蚀性介质会持续侵蚀模具表面，削弱其耐磨性与结构稳定性。生产现场的水汽、油污、切削液残留，以及挤压过程中产生的铝粉与高温氧化气体，会形成腐蚀性氛围，长期作用下导致模具表面生锈、氮化层脱落，使模具基体直接暴露于金属流动与高温环境中，磨损速率大幅提升；腐蚀产物（如氧化铁、铝酸盐）与金属间的摩擦会形成“腐蚀–磨损”协同效应，加速模具表面缺陷扩展^[5]。尤其闲置模具若未做好防护，暴露于潮湿环境中易发生锈蚀，再次使用时会因表面不平整加剧磨损。保持生产环境干燥通风，定期清理设备与模具表面的腐蚀产物，对闲置模具涂抹防锈油或密封存放，可有效减轻腐蚀作用，延缓模具性能退化。

五、结语

本文从模具自身（设计制造、热处理）、挤压工艺（温度、速度、压力、冷却）、使用维护（预热冷却、清洁润滑、检查修复）、材料环境（模具材料、铝棒纯净度、腐蚀环境）四大核心维度，系统探讨了影响铝挤压模具寿命的关键因素，核心逻辑在于“内因是基础、外因是关键、多因素协同作用”，各维度相互关联、相互影响，共同决定模具的磨损与失效进程。延长模具寿命需针对性施策：选用优质适配的模具材料、优化结构设计与制造精度、精准控制挤压工艺参数、规范使用维护流程、改善生产环境防护，通过多维度协同发力，可有效解决模具磨损快、疲劳开裂等痛点。未来可进一步研发耐高温耐磨新型模具材料、引入数字孪生仿真优化设计、搭建模具状态智能监测系统（如磨损与裂纹实时预警），持续突破寿命瓶颈，助力铝挤压产业实现高效、低成本、绿色化发展，更好适配高端市场需求。

参考文献

- [1] 李健彰, 陈泽. 影响铝挤压模具寿命的因素探讨 [J]. 冶金丛刊, 2003(5): 8–9+38.
- [2] 庞祖高, 苏广才, 夏薇, 黄尚猛. 影响温挤压模具的寿命因素及对策探讨 [J]. 锻压技术, 2006, 31(2): 52–55.
- [3] 王智祥, 张建新. 影响铝挤压模具寿命的因素分析 [J]. 模具工业, 2003, 29(2): 49–51.
- [4] 王泽宁, 孙金全, 崔洪芝, 李辉平, 李保民. 影响铝型材挤压模具寿命因素的分析 [J]. 热处理技术与装备, 2014, 35(5): 22–30.
- [5] 张洪辉, 隋荣勃, 王坤. 铝合金挤压模具寿命影响因素 [J]. 中国有色金属, 2013(3): 66–67.

石油化工领域润滑油检测技术的研究进展与应用

林华慧

广东 东莞 523200

DOI:10.61369/ME.2025070003

摘 要： 石油化工领域润滑油检测技术不断发展。传统检测技术有局限性，新型技术向精准、高效、实时突破，还涉及物理化学分析、智能化诊断等。同时需合理部署在线监测系统，建设预测性维护体系，进行污染物溯源与性能衰退预警，完善技术标准，构建数据平台，突破微型化传感器技术等，未来将跨学科融合并重构标准体系。

关 键 词： 润滑油检测技术；智能化诊断；技术标准

Research Progress and Application of Lubricant Testing Technology in the Petrochemical Field

Lin Huahui

Dongguan, Guangdong 523200

Abstract： The testing technology for lubricants in the petrochemical field is constantly evolving. Traditional testing technologies have limitations, while new technologies are breaking through towards precision, efficiency, and real-time capabilities, involving physical and chemical analysis, intelligent diagnostics, and more. It is also necessary to reasonably deploy online monitoring systems, build predictive maintenance systems, conduct pollutant tracing and performance degradation early warning, improve technical standards, construct data platforms, and break through miniaturized sensor technologies. In the future, there will be interdisciplinary integration and a reconfiguration of the standard system.

Keywords： lubricant testing technology; intelligent diagnostics; technical standardization

引言

随着我国石油化工行业的快速发展，对润滑油检测技术提出了更高要求。2022年颁布的《石油化工行业高质量发展指南》明确指出要加强关键技术创新与标准化建设。在此背景下，石油化工领域润滑油检测技术在传统检测方法基础上不断突破，新型检测技术朝着精准、高效、实时方向发展，物理化学分析检测体系持续完善，智能化诊断技术备受关注。同时，在关键机组监测、预测性维护、污染物溯源等方面取得进展，但在技术标准化、数据集成、微型化传感器等方面仍面临挑战，未来需通过跨学科融合、全产业链协同等实现升级发展。

一、润滑油检测技术的研究进展

（一）传统检测技术的发展与局限性

在石油化工领域，黏度测试、酸值滴定等实验室常规润滑油检测方法有着一定的历史沿革。黏度测试技术起初较为简单，随着需求发展，逐步出现了多种不同原理的测试手段，如毛细管黏度计法等，能更精准地测定润滑油黏度。酸值滴定方法也不断改进，从最初粗略判断到如今可精确计算酸值。然而，这些传统检测技术多为离线检测，存在显著局限性。一方面，时间滞后性明显，从采样到得出检测结果，往往需要较长时间，无法实时反映润滑油在石化连续生产过程中的真实状态。另一方面，数据离散度高，由于采样的局限性以及测试环境等因素影响，不同批次检测数据波动较大，这对石化连续生产的稳定性与质量控制形成严

重制约^[1]。

（二）新型检测技术的突破方向

在石油化工领域，润滑油新型检测技术不断朝着更精准、高效、实时的方向突破。一方面，致力于提升在线监测技术的灵敏度与稳定性，例如原子发射光谱、傅里叶红外光谱等在线监测技术，正不断优化检测参数，以实现润滑油中极微量成分的精准识别与定量分析，为设备运行状态的准确评估提供更可靠依据^[2]。另一方面，微流控芯片传感器在实时多参数联测领域持续创新，不仅追求在更小的空间内集成更多检测功能，还注重提升多参数同步检测的准确性与时效性，通过不断改进芯片材料与检测原理，使其能在复杂多变的炼化装置工况下，快速、稳定地获取润滑油的多项关键参数，从而推动润滑油检测从传统单点检测向全面、实时、多参数联测转变，为石油化工生产的高效、安全

运行保驾护航。

二、关键技术原理与检测方法

（一）物理化学分析检测体系

在石油化工领域润滑油检测的物理化学分析检测体系中，基于流变学特性构建评价模型，其原理在于润滑油的流变特性反映其内部结构和分子间相互作用。通过测量不同温度、剪切速率下的黏度等流变参数，可评估润滑油在不同工况下的流动性能与稳定性。针对金属磨粒定量分析，利用光谱、色谱等物理化学手段，精确测定润滑油中金属磨粒的种类、含量与分布，以此判断设备磨损状况。在润滑油氧化衰变过程方面，深入研究特征参数如酸值、过氧化值等的关联规律，明确它们随氧化程度的变化关系。依据这些规律制定标准化检测流程，确保检测结果的准确性与可靠性，为润滑油性能评价提供坚实支撑^[3]。

（二）智能化诊断技术发展

在石油化工领域润滑油检测技术中，智能化诊断技术发展备受关注。大数据驱动下润滑油剩余使用寿命预测算法，通过收集大量润滑油使用过程中的多维度数据，如温度、压力、磨损颗粒浓度等，利用数据挖掘技术寻找数据间潜在关系。这些算法基于数据特征建立预测模型，实现对润滑油剩余寿命的精准预估。在复杂工况数据模式识别方面，神经网络与支持向量机是两种重要技术。神经网络通过模拟生物神经系统结构和功能，具有强大的非线性处理能力，能对复杂工况下的润滑油数据进行有效分析。支持向量机则基于统计学习理论，在小样本、非线性及高维模式识别中有独特优势。两者各有特点，研究对比它们的性能差异^[4]，有助于为不同工况选择更适宜的智能化诊断技术，提升润滑油检测的准确性与可靠性。

三、在石油化工生产中的应用场景

（一）设备润滑状态监测与维护决策

1. 关键机组在线监测系统部署

在石油化工生产中，关键机组的稳定运行至关重要。以催化裂化装置主风机组为例，为实现设备润滑状态监测与维护决策，需合理部署关键机组在线监测系统。光谱油液分析系统是其中关键部分，它可对主风机组润滑油中的金属磨粒等成分进行精准分析。通过实时监测润滑油内各类元素的含量变化，可有效捕捉机组部件早期磨损迹象，实现早期磨损故障预警。这一系统的应用不仅能提前发现潜在故障隐患，避免突发故障导致的生产中断，还能依据监测数据构建经济效益评估模型，评估不同维护策略下的成本与效益，为企业合理安排维护计划、降低运维成本提供有力支持^[5]。

2. 预测性维护体系建设

在石油化工生产中，预测性维护体系建设基于润滑油检测数据，对设备健康状态进行精准分级。通过深入分析润滑油中的各类指标，如磨损颗粒含量、氧化程度等，判断设备当前的运行状

况，将设备健康状态分为不同等级，清晰呈现设备的健康全貌。同时，构建维护周期动态优化模型，依据设备健康分级结果以及生产实际情况，如生产负荷、运行时长等因素，动态调整设备维护周期，避免过度维护或维护不足。在乙烯压缩机组运维管理实践中，经此预测性维护体系验证，有效提升了机组运行稳定性，降低了运维成本^[6]。

（二）工艺安全与质量控制

1. 润滑油污染物溯源分析

在石油化工生产中，润滑油污染物溯源分析对工艺安全与质量控制至关重要。石油化工设备运行环境复杂，润滑油易受水分侵入、燃料稀释等异常污染。通过建立快速检测方法，能及时发现水分侵入，防止设备腐蚀，保障运行安全。准确判断燃料稀释情况，可避免润滑油性能恶化，维持设备稳定运行。同时，针对加氢反应器循环油系统，深入分析污染物来源，提出优化的污染防控策略，可有效减少杂质积累，降低催化剂中毒风险，确保加氢反应顺利进行，提高产品质量。这一溯源分析不仅有助于保障设备平稳运转，延长设备使用寿命，还对石油化工生产的整体安全与质量把控起着关键作用^[7]。

2. 油品性能衰退预警机制

在石油化工生产中，油品性能衰退预警机制对工艺安全与质量控制意义重大。通过添加剂损耗动力学研究，开发出润滑油功能失效的临界阈值判定系统。此系统可精准判断润滑油性能衰退程度，在延迟焦化装置液压系统中，实时监测润滑油添加剂的损耗情况。当添加剂损耗接近临界阈值时，系统能及时发出预警，提醒工作人员采取措施，如更换或补充润滑油，避免因油品性能衰退导致液压系统故障，影响装置正常运行。这一机制不仅保障了工艺安全，避免潜在安全事故，还能提升产品质量，防止因设备运行异常对产品质量产生不良影响^[8]。

四、行业挑战与发展趋势

（一）技术标准化体系建设

1. 在线检测方法验证规范

在石油化工领域润滑油检测技术的技术标准化体系建设中，在线检测方法验证规范面临诸多挑战与呈现特定发展趋势。现有 ASTM 标准在新型检测技术适用性方面存在缺口，无法很好适应石化特殊工况。这使得建立面向石化特殊工况的检测精度验证方法迫在眉睫。该验证方法需能准确评估在线检测技术在石化复杂环境下的检测精准度，确保检测数据真实反映润滑油性能。同时，要构建数据可比性研究框架^[9]，因为不同在线检测技术及设备所产生的数据存在差异，通过该框架，明确数据采集、处理及分析的统一标准，提高数据间的可比性，为石化企业选择合适检测技术与合理评估润滑油质量提供可靠依据，推动在线检测技术在石油化工领域的标准化应用。

2. 检测数据集成平台构建

在石油化工领域润滑油检测技术发展，检测数据集成平台构建面临诸多挑战。不同检测设备、方法所产生的数据格式多

样、标准不一，给数据集成带来困难。同时，海量检测数据的高效存储、快速检索与实时分析需求，对平台的数据处理能力提出了极高要求。而技术标准化体系建设方面，行业内缺乏统一、完善的润滑油检测技术标准，导致不同机构检测结果存在差异，影响了数据的通用性与可信度。未来发展趋势上，构建高效的检测数据集成平台，应注重数据格式的统一转换，提升数据挖掘与分析能力，以实现数据价值最大化。同时，加快技术标准化体系建设，制定涵盖检测流程、指标定义、结果判定等全方位的标准规范，将有力推动石油化工领域润滑油检测技术的规范化、科学化发展^[10]。

（二）检测仪器研发创新方向

1. 微型化传感器技术突破

在石油化工领域润滑油检测技术的发展中，微型化传感器技术突破面临诸多挑战与趋势。从封装技术看，研究 MEMS 芯片在润滑油现场快速检测的封装，要克服芯片与复杂现场环境适配问题，确保其能高效稳定运行，同时还要保证检测精度不受封装影响。纳米材料敏感元件在高温高压环境下工作稳定性的评估至关重要，高温高压会影响敏感元件的性能，如何优化材料特性，提升其在恶劣工况下的可靠性是关键。未来微型化传感器应朝着高精度、高稳定性、快速响应方向发展，突破现有技术瓶颈，实现对润滑油多参数、实时、原位的精准检测，从而满足石油化工领域对润滑油高效、精准检测的迫切需求，提升整体生产效率与质量。

2. 多模融合检测设备开发

在石油化工领域润滑油检测技术的发展进程中，多模融合检测设备开发是重要的创新方向。当前，润滑油检测面临着复杂工况下精准检测需求以及快速分析多种成分的挑战。开发多模融合检测设备，能有效结合光谱技术对元素的定性分析优势与质谱技术对成分的高灵敏度定量分析优势，实现对润滑油添加剂成分更全面、准确的解析。同时，为满足现场快速检测需求，将嵌入式系统设计融入便携式检测仪，通过多模融合实现功能集成，可提升检测仪的便携性与实用性。这种多模融合检测设备，一方面能应对复杂多变的检测环境，另一方面能为石油化工企业提供高效、精准的检测结果，助力其优化润滑油品质与生产工艺，推动行业高质量发展。

（三）全产业链协同发展路径

1. 产学研合作模式创新

在石油化工领域润滑油检测技术的产学研合作模式创新方

面，面临着诸多挑战与机遇。一方面，检测技术的快速发展要求高校和科研机构能及时将前沿研究成果向石化企业转化，然而目前产学研之间信息沟通存在障碍，研究成果与企业实际技术需求脱节。另一方面，石化企业虽对润滑油检测技术有迫切需求，但参与产学研合作的积极性有时因短期利益考量而受限。为实现创新，应搭建产学研深度融合平台，促进检测服务商、石化企业、高校及科研机构间的直接交流，共同明确研究方向。同时，建立有效的利益分配机制，保障各方权益，鼓励企业深度参与。还可联合开展实践教学与科研项目，培养适应行业发展的复合型人才，推动润滑油检测技术在产学研合作中不断创新发展。

2. 智能运维商业模式探索

在石油化工领域润滑油检测技术的发展进程中，面临诸多挑战与趋势。随着行业对润滑油性能要求不断提高，检测技术需向更精准、高效、快速方向发展，以满足复杂工况下对润滑油品质的严格把控。从全产业链协同发展路径看，上下游企业需紧密合作，检测机构与润滑油生产企业、设备制造商共同制定统一标准，确保检测技术贯穿整个产业链。智能运维商业模式探索方面，应利用大数据、人工智能等技术，构建智能检测与运维平台，实现远程实时监测与故障预警。按检测结果付费的风险共担商业模式，通过激励检测机构提供优质服务，实现检测技术增值服务在设备全生命周期管理中的价值最大化，推动行业可持续发展。

五、总结

石油化工领域润滑油检测技术历经从实验室分析到智能化、在线化的发展，为提升石化装置运行可靠性及降低维护成本带来显著效益。然而，现有技术仍存在检测灵敏度不足、环境适应性欠佳等理论瓶颈。未来，跨学科技术融合与标准体系重构是行业升级的关键。基于工业互联网的润滑油状态全景监控系统建设构想，有望打破这些瓶颈。通过此系统，可实现对润滑油状态的全面、实时监控，为石化装置运行提供更精准可靠的数据支持，进一步提升行业的整体效能，推动石油化工领域润滑油检测技术迈向新高度，从而更好地适应行业发展的需求。

参考文献

- [1] 张国莹. 润滑油在线检测技术与故障诊断方法研究 [D]. 北京石油化工学院, 2022.
- [2] 满晓鸣. 跨领域网络文本立场检测关键技术研究与应用 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [3] 孙震宇. 润滑油含水量检测技术研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [4] 王萌. 发动机润滑油电声检测技术开发 [D]. 西安工业大学, 2023.
- [5] 张改改. 集成领域知识与深度网络的高光谱目标检测技术 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [6] 陶树豪. 现代检测技术在润滑油检测中的研究进展 [J]. 广州化工, 2022, 50(6): 37-39.
- [7] 孟刚, 李飞. 沉管法隧道水下检测技术标准化分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(9): 159-160.
- [8] 王存智, 张家灿, 白亮. 增材制造技术在石油化工领域的应用展望 [J]. 石油化工设备技术, 2024, 45(1): 1-3, 7.
- [9] 赵辉. 气体分离膜技术及其在石油化工领域的应用 [J]. 石油化工, 2023, 52(3): 412-417.
- [10] 许广华. 微化工技术在石油化工领域的应用分析 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(2): 1-4.

高密度电法在地下水污染区边界圈定 与水源筛选中的协同应用

马维龙^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 陈海江^{1,2}, 王康^{1,2}, 刘红岩^{1,2}, 丁禹达^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/ME.2025070014

摘 要 : 为解决地下水污染防控与优质水源地开发的协同问题, 本文以密山地区 15 条高密度电法剖面探测成果为基础, 系统分析高密度电法在地下水污染区边界圈定与水源筛选中的应用逻辑与技术路径。研究表明, 密山地区不同地貌单元的地层结构与电阻率特征存在显著差异, 高密度电法可实现污染区边界划分, 并筛选优质水源地。两者协同应用时, 需以“无污染边界约束水源地范围、水源地参数反推污染风险”为核心, 结合钻孔数据验证, 提升结果可靠性。本文可为类似北方平原—山区过渡带的地下水管理提供技术参考。

关 键 词 : 高密度电法; 地下水; 污染边界; 水源地筛选

Collaborative Application of High-Density Resistivity Method in Boundary Delineation of Groundwater Contamination Zones and Selection of Water Source Areas

Ma Weilong^{1,2}, Li Guodong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Chen Haijiang^{1,2}, Wang Kang^{1,2}, Liu Hongyan^{1,2}, Ding Yuda^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Observation and Research Station of Earth Critical Zone in Black Soil, Harbin, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : To address the collaborative challenges in groundwater contamination prevention and control alongside the development of high-quality water source areas, this paper systematically analyzes the application logic and technical pathways of the high-density resistivity method in boundary delineation of groundwater contamination zones and selection of water source areas, based on the detection results from 15 high-density resistivity profiles in the Mishan area. The study reveals significant differences in stratigraphic structure and resistivity characteristics across various geomorphic units in the Mishan area, demonstrating that the high-density resistivity method can effectively delineate contamination zone boundaries and screen high-quality water source areas. When applied collaboratively, the core approach involves "constraining the water source area range by non-contaminated boundaries and inferring contamination risks through water source area parameters," combined with borehole data verification to enhance result reliability. This paper provides technical references for groundwater management in similar transitional zones between northern plains and mountainous regions.

Keywords : high-density resistivity method; groundwater; contamination boundary; water source area selection

引言

地下水是我国北方重要的饮用水与工农业用水来源, 易受工业废水、农业面源污染影响^[1,2], 且优质水源地短缺加剧水资源供需矛盾。精准圈定污染边界阻断扩散、筛选优质水源地保障供水安全, 是地下水管理核心任务。高密度电法分辨率高、探测范围广、成本低, 可通过地层电阻率差异反演地下介质分布: 地下水污染会改变地层孔隙水离子浓度、黏土层吸附特性, 导致电阻率异常^[3]; 优质含水层电阻率与隔水层差异显著, 使其具备服务“污染边界圈定”与“水源地筛选”的潜力。密山地区 15 条高密度电法剖面探测, 获取了完整的地层结构、电阻率分布及含水层特征数据, 为研究协同应用提供了区域案例。

通讯作者: 丁禹达, 邮箱: 909894777@qq.com

一、高密度电法在地下水污染区边界圈定中的应用

地下水污染区边界圈定的核心是“识别污染导致的电阻率异常，并区分异常与岩性、含水率等非污染因素的差异”。仅依赖电阻率变化判定污染区存在多解性，需结合水质分析结果、含水层介质变化数据形成“物探+化学+地质”的综合判定体系^[4]。基于密山地区数据，高密度电法可通过“清洁区背景标定—污染区

表1密山地区清洁区不同地层背景电阻率标定表

地貌单元	地层类型	分布深度	背景电阻率范围	电阻率稳定性	标定依据（剖面编号）
平原区	黏土层（隔水层）	0~30m	13~17Ω·m	稳定（变异系数<10%）	GMD-23-01、02、12~15
平原区	砂层/砂岩层（含水层）	20~100m	90~300Ω·m	稳定（变异系数<15%）	GMD-23-01、02、12~15
山区	黏土层（隔水层）	0~15m（坡底）	13~17Ω·m	较稳定（变异系数<12%）	GMD-23-03、06
山区	冲积层（含水层）	5~50m	180~220Ω·m	较稳定（变异系数<18%）	GMD-23-03~06
山区	花岗岩（隔水层）	>20m	500~1000Ω·m	稳定（变异系数<8%）	GMD-23-03~06

注：变异系数=标准差/平均值，数值越小说明电阻率越稳定，越适合作为背景值。

标定过程中需注意两点：一是平原区黏土层电阻率普遍低于山区黏土层，需分区域标定；二是含水层电阻率随岩性变化，需按岩性细分，避免误判污染异常。

（二）污染区电阻率异常识别

1.黏土层污染异常

黏土层为隔水层，其电阻率异常主要与孔隙水污染物类型相关，该结论基于密山地区8个污染区钻孔与清洁区钻孔的对比验证：重金属污染会增强孔隙的导电性，使黏土电阻率降至10Ω·m以下（低于背景值）。且异常区因地下水横向流动呈连续带状分布[5]，例如GMD-23-01-1剖面200~400m处，黏土层电阻率8~10Ω·m，对应钻孔ZK-13水样中镉浓度0.05mg/L（超Ⅲ类标准5倍）。有机物污染（如石油烃）会填充黏土层孔隙、降低导电性，使电阻率升至20Ω·m以上，异常区因有机物分布不均呈“斑块状”；如GMD-23-10剖面500~600m处，黏土层电阻率20~22Ω·m，水样中石油烃浓度0.03mg/L（超Ⅲ类标准6倍）；需注意，电阻率低于10Ω·m也可能由黏土层含水率升高（如雨季积水）导致，因此局部出现“高低波动”（如局部降至8Ω·m、周边升至18Ω·m）时，需结合孔隙水含水率检测（烘干法）与污染物浓度分析排除非污染因素。

2.含水层污染异常

含水层为地下水主要赋存层，电阻率异常由孔隙水污染物与介质吸附共同导致^[6]：

（1）平原区砂层含水层：清洁区电阻率约100Ω·m，重金属污染降至70Ω·m以下，有机污染升至130Ω·m以上，异常区与地下水流向一致。（2）山区冲积层含水层：清洁区电阻率180~220Ω·m，重金属污染降至150Ω·m以下，有机污染升至250Ω·m以上，异常区沿裂隙发育方向分布。

表2密山地区水源地筛选评价指标与标准

评价类别	指标名称	平原区评价标准	山区评价标准	数据来源（高密度电法）
基础参数	含水层岩性	砂层/砂岩层（富水性强）	冲积层（基岩风化带裂隙发育）	电阻率反演（砂层100Ω·m左右，冲积层200Ω·m左右）
基础参数	含水层埋深	20~100m（便于开采，避免污染）	15~20m（浅层裂隙水易开采）	电阻率剖面中含水层顶界面深度

异常识别—多维度边界验证”三步实现精准圈定。

（一）清洁区背景电阻率标定

污染异常的识别需以清洁区电阻率为基准。且需按“地貌单元+地层类型”细分，避免区域差异导致的误判。基于密山地区15条剖面的反演结果，可按“地貌单元+地层类型”分别标定清洁区背景电阻率，具体如表1所示。

（三）染区边界精准圈定

1.横向边界圈定

沿疑似污染区布设平行剖面（间距50m，参考GMD-23-01与02），采集电阻率数据；如GMD-23-01（清洁区）黏土层电阻率15Ω·m，疑似污染剖面（GMD-23-01-1）在200~400m处电阻率降至10Ω·m以下，确定该区间为横向异常区；连接异常区“电阻率突变点”（如13Ω·m，背景值下限）形成横向污染边界。

2.纵向边界圈定

在横向异常区内布设垂直剖面（与地下水流向垂直），探测深度覆盖含水层（参考GMD-23-01的130m深度）；如疑似污染剖面中，黏土层（0~20m）电阻率10Ω·m（异常），砂层含水层（20~60m）电阻率70Ω·m（异常），60m以下砂层电阻率恢复至100Ω·m（清洁），则黏土层污染边界为0~20m，含水层污染边界为20~60m，60m以下为清洁区。

3.边界验证

为提升圈定精度，需结合钻孔采样验证：在污染边界附近布设钻孔，采集黏土层与含水层水样，检测污染物浓度。若水样中重金属浓度超过《地下水质量标准》Ⅲ类标准，且对应深度电阻率异常，则确认边界有效；反之，需调整背景电阻率标定标准，重新圈定^[7]。

二、高密度电法在水源地筛选中的应用

水源地筛选的核心是“识别富水性强、水质潜力优、稳定性高的含水层”。基于密山地区的地层特征，高密度电法可通过“含水层识别—参数量化—综合评价”实现优质水源地筛选。

（一）水源地筛选核心指标与评价标准

结合《饮用水水源保护区划分技术规范》与密山地区实际，筛选指标分为“含水层基础参数”与“稳定性参数”两类，具体评价标准如表2所示。

基础参数	含水层厚度	>30m（富水量充足）	>10m（裂隙水储量稳定）	电阻率剖面中含水层顶底界面差值
稳定性参数	电阻率变异系数	<15%（岩性均匀，富水性稳定）	<18%（裂隙分布均匀）	含水层段电阻率标准差 / 平均值
稳定性参数	隔水层完整性	黏土层连续（厚度 >10m）	花岗岩界面连续（无裂隙贯通）	黏土层 / 花岗岩电阻率连续性

注：平原区以深层砂层 / 砂岩层为目标，山区以中层冲积层（基岩风化带）为目标，避免浅层黏土层（富水性差）与深层花岗岩隔水。

（二）平原区水源地筛选（以兴凯湖乡为例）

兴凯湖乡为密山平原区核心区域，布设 GMD-23-12 与 13 两条剖面，地势平坦，最大探测深度 90 ~ 170m，地层为“黏土层 + 砂岩层 + 花岗岩”三层结构，适宜筛选深层水源地。

1. 含水层识别与参数量化

以 GMD-23-12 剖面（总长 1190m，最大探测深度 170m）为例：反演显示 25 ~ 95m 深度段电阻率 150 ~ 200Ω · m，判定为砂岩层（富水性强），排除浅层黏土层（0~25m，15Ω · m）与深层花岗岩（>95m，500 ~ 1000Ω · m）；含水层埋深 25 ~ 95m（符合 20 ~ 100m 标准），厚度 70m（满足 >30m 标准），变异系数 ≈ 14.3%（<15% 标准）；浅层黏土层厚度 25m（>10m）且横向连续，深层花岗岩界面连续无裂隙，可阻隔污染。

2. 筛选结果与成井建议

GMD-23-12 剖面砂岩层含水层满足所有标准，判定为“优质水源地候选区”，成井建议：深度 80 ~ 95m（穿透砂岩层中下部），井径 300 ~ 400mm，过滤管 25 ~ 95m 全段设置，采用不锈钢管材防腐。GMD-23-13 剖面（总长 590m）参数相似，砂岩层厚度 60m，变异系数 13.8%，亦为优质水源地候选区，可与 GMD-23-12 联合形成“兴凯湖乡水源地集群”提升供水能力。

表 32023 年密山地区水源地筛选结果汇总表

水源地等级	数量	分布区域	对应剖面编号	含水层类型	成井深度建议	预计出水量（m³ / d）
优质候选区	6	振兴村	GMD-23-01、02	砂层	>60m	500~800
优质候选区		兴凯湖乡	GMD-23-12、13	砂岩层	80~95m	800~1200
优质候选区		兴隆岗村	GMD-23-14、15	砂岩层	70~85m	600~1000
合格候选区	4	杨田富南山东侧	GMD-23-04、05	冲积层（裂隙）	15~20m	200~400
合格候选区		临河村南侧	GMD-23-10、11	砂层	40~55m	300~500

注：预计出水量基于含水层厚度与电阻率稳定性估算，实际需结合抽水试验验证。

三、高密度电法的协同应用逻辑与案例验证

高密度电法在“污染边界圈定”与“水源地筛选”中的协同应用，核心是“以污染边界约束水源地范围，以水源地参数反推污染风险”，形成“污染防控—水源开发”的闭环管理。本节以密山杨田富南山区为例，阐述协同应用流程与效果。

（一）协同应用核心逻辑

协同本质是“参数互用与结果互证”：筛选水源地时，限定在“污染边界外清洁区”，避开污染区或扩散路径（如山区水源地布设在裂隙上游清洁区）；水源地含水层埋深、隔水层厚度等参数，反推污染风险（如山区水源地黏土层厚度 <5m 则污染风险

（三）山区水源地筛选（以杨田富南山东侧为例）

杨田富南山东侧为密山山区，布设 GMD-23-03~06 四条剖面，地形起伏较大，地层为“黏土层 + 冲积层 + 花岗岩”三层结构，适宜筛选浅层裂隙水水源地。

1. 含水层识别与参数量化

以 GMD-23-04 剖面（总长 790m，最大探测深度 120m）为例：反演显示 10 ~ 25m 深度段电阻率 180 ~ 220Ω · m，判定为冲积层（基岩风化带裂隙发育），排除浅层黏土层（0~10m，坡底分布，厚度 <5m）与深层花岗岩（>25m，500 ~ 1000Ω · m）；含水层埋深 10 ~ 25m（核心区 15 ~ 20m，符合标准），厚度 15m（满足 >10m 标准），变异系数 20%（接近 <18% 标准，需钻孔验证裂隙分布）；深层花岗岩界面局部有裂隙，需避开。

2. 筛选结果与成井建议

GMD-23-04 剖面冲积层含水层基本满足标准，判定为“合格水源地候选区”，成井建议：深度 15 ~ 20m（核心裂隙段），避开 500 ~ 600m 花岗岩裂隙区，井径 200 ~ 300mm，过滤管 15 ~ 20m 段设置（缠丝过滤管），成井后每月监测水位。

GMD-23-05 剖面冲积层变异系数 17.5%（满足标准），判定为优质水源地候选区，可作为山区主要供水点。

（四）水源地筛选结果汇总

基于 15 条剖面的评价，密山地区共筛选出“优质水源地候选区”6 处、“合格水源地候选区”4 处，具体分布如表 3 所示，可为区域供水规划提供直接依据。

高，需扩大缓冲区）。污染边界圈定时，若异常区与水源地含水层重叠需重新验证（如异常区对应花岗岩则可能为岩性差异，对应冲积层则优先排查污染）。

（二）协同应用案例（杨田富南山区）

1. 第一步：污染边界圈定（山区特殊性适配）

按“坡底黏土层 15Ω · m、坡中冲积层 200Ω · m、全区域花岗岩 800Ω · m”标定，避免地形导致岩性误判；GMD-23-03 剖面（坡底 600 ~ 700m）发现异常：黏土层电阻率降至 10Ω · m 以下（重金属污染），下方冲积层降至 150Ω · m 以下（污染渗透），确定为污染区；横向边界沿坡底 600 ~ 700m 延伸，纵向边界因地下水裂隙流扩散，定为“0~30m（冲积层全段污染）”，30m 以下花岗岩为清洁隔水层。

2. 第二步：清洁区内筛选水源地

基于污染边界，清洁区为“距离 <600m 或 >700m、深度

>30m”；分析 GMD-23-04 剖面（200 ~ 500m）：冲积层埋深 15 ~ 25m、厚度 15m、电阻率 180 ~ 220 $\Omega \cdot m$ （变异系数 17%），黏土层仅坡底分布（厚度 5m），冲积层下伏花岗岩界面连续，判定为优质水源地候选区；因黏土层厚度 <10m（污染风险中等），设置 100m 缓冲区（水源地与污染边界距离 >100m）。

3. 第三步：验证与方案输出

在水源地候选区（GMD-23-04 剖面距离 300m 处）布设验证钻孔，采集冲积层（15 ~ 20m）水样，检测结果显示重金属浓度符合《地下水质量标准》Ⅲ类标准，与清洁区电阻率特征匹配，确认清洁区有效。

最终确定方案：

- （1）污染边界：横向 600 ~ 700m（坡底），纵向 0~30m。
- （2）水源地布局：GMD-23-04 剖面距离 200 ~ 500m 处（1 处，成井深度 15 ~ 20m）。
- （3）防控建议：在缓冲区（500 ~ 600m）布设 2 个监测井，每月监测水质，防止污染沿裂隙扩散。

（三）协同应用效果评价

该案例中，协同应用实现“三个精准”：一是污染边界精准，排除 2 处“岩性差异假异常”，污染区面积从 1.2km² 修正为 0.8km²，精度提升 33.3%；二是水源地布局精准，避开 1 处“潜在污染风险水源地”（550m 处，近污染边界），保障供水安全；三是成本精准控制，减少 40% 钻孔验证工作量（从 5 个降至 3 个），提升开采效率。

四、存在问题与优化建议

（一）现存主要问题

当前高密度电法在地下水污染边界圈定与水源地筛选中的应用仍存在三方面不足：一是设备分辨率局限，现有单一 10m 电极距对浅层 <5m 黏土层的轻度有机污染（电阻率异常 <5 $\Omega \cdot m$ ）识别能力弱，难以区分污染与含水率变化的差异，且深层 >100m 含水层参数量化精度不足，如 GMD-23-12 剖面 170m 处花岗岩界面因分辨率限制呈现模糊特征，影响隔水层完整性判断；二是数据

融合程度低，仅依赖高密度电法数据，未与探地雷达（可辅助识别污染扩散路径的细微裂隙）、钻孔数据深度整合，且探地雷达天线频率单一（如 50MHz）导致数据尺度不匹配，无法形成三维地层模型^[8]；三是验证手段单一，多依赖高成本的钻孔采样，覆盖范围有限，缺乏“物探初筛—现场快检—钻孔验证”的立体验证体系，易遗漏局部污染异常或水源地风险点。

（二）优化建议

针对这些问题，可从三方面优化：首先更新观测设备与参数，采用 5m+10m+20m 多电极距组合，5m 电极距提升浅层 <5m 污染异常的识别精度，20m 电极距增强深层 >100m 含水层的量化能力，减少分辨率导致的误判；其次加强多源数据融合，构建“高密度电法 + 探地雷达 + 钻孔”综合数据库，通过离散光滑插值算法统一数据尺度，生成三维地层模型，直观展示污染边界与水源地的空间关系^[9,10]；最后构建立体验证体系，减少钻孔采样数量，增加“便携式电阻率仪 + 水质快速检测仪”的现场验证（如污染边界突变点、水源地候选区），对优质水源地开展长期抽水试验与水质监测，兼顾验证精度与成本控制。

五、结论

本文以 2023 年密山地区 15 条高密度电法剖面成果为基础，研究该技术在地下水污染区边界圈定与水源地筛选中的协同应用，得出结论：一是密山平原区与山区地层结构差异显著，平原区以“黏土层 + 砂层 / 砂岩层”为主，山区以“黏土层 + 冲积层 + 花岗岩”为主，两类区域地层电阻率特征（黏土层 $\approx 15 \Omega \cdot m$ 、含水层 100 ~ 200 $\Omega \cdot m$ 、花岗岩 500 ~ 1000 $\Omega \cdot m$ ）为协同应用奠定基础；二是高密度电法可通过对应流程精准划分污染区、筛选优质水源地，两项任务参数互用与结果互证形成闭环管理；三是杨田富南山区案例显示，该技术减少 40% 验证成本，水源地安全系数达 100%，为北方山区提供可复制范式；四是更新设备、融合数据、构建立体验证体系，可提升该技术分辨率与可靠性，适配更复杂地下水环境。

参考文献

[1] 孙中文. 污染场地土壤污染调查与风险评估研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(08): 153-155.
[2] 王凯, 梅昌旺, 王莹. 高密度电法下地下水环境污染场地勘探与防治对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(04): 109-114.
[3] 别念兵, 潘军, 王刚. 高密度电阻率法在土壤地下水环境调查中的应用 [C]// 中国石油学会石油物探专业委员会. 第三届中国石油物探学术年会论文集 (四). 中石化石油工程地球物理公司地理地质信息勘查分公司; 湖北广顺新业人力资源有限公司, 2025: 92-94.
[4] 朱紫祥, 胡俊杰. 地球物理勘探技术在地下水资源探测中的应用研究 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(03): 66-70.
[5] 高畅, 邢程, 郭秀军, 等. 不同演化阶段的 NAPLs 污染区高密度电阻率法探测效果分析 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2020, 50(S1): 128-136.
[6] 李丹. 约束反演与地质数据综合解释砂岩含水层特征 [J]. 煤炭技术, 2022, 41(07): 96-100.
[7] 王凯, 梅昌旺, 王莹. 高密度电法下地下水环境污染场地勘探与防治对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2025, 50(04): 109-114.
[8] 张瑞城, 周念清, 江思珉, 等. ILUES 算法融合 ERT 数据反演污染源参数与渗透系数场 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2022, 50(02): 223-230.
[9] 任剑飞. 基于高密度电阻率法的地下水污染调查研究 [J]. 水利科技与经济, 2016, 22(05): 70-72.
[10] 李建东, 赵留峙. 地质雷达与高密度电法融合技术在选矿监测模型构建中的方法研究 [J]. 黄金, 2025, 46(02): 40-42+54.

PLC 变频节能技术在电气自动化设备中的应用

侯雪

石家庄职业技术学院, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ME.2025070016

摘 要 : 在当前能源供需矛盾凸显以及绿色发展理念普遍推广的形势下, 电气自动化设备节能改造成为工业领域转型升级的关键方向。PLC 变频节能技术凭借其精确的控制能力及显著的能耗优化效果逐渐成为提高电气自动化设备能效的核心技术手段。本文首先阐述 PLC 变频节能技术的基本原理, 包括 PLC 控制逻辑与变频调速技术的融合机制; 然后结合风机, 水泵, 压缩机等典型电气自动化设备, 进一步分析该技术在不同应用场景中的具体实现方式与节能路径; 探讨技术应用过程中存在的硬件适配, 控制算法优化等关键问题并提出相应的解决思路; 最后展望 PLC 变频节能技术与物联网, 人工智能等新兴技术融合的发展趋势, 为工业领域电气自动化设备的节能升级提供理论参考与实践借鉴。

关 键 词 : PLC 变频节能技术; 电气自动化设备; 变频调速; 节能改造; 控制逻辑

Application of PLC Variable Frequency Energy-Saving Technology in Electrical Automation Equipment

Hou Xue

Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract : Amid the current prominent contradiction between energy supply and demand and the widespread promotion of green development concepts, the energy-saving transformation of electrical automation equipment has emerged as a crucial direction for industrial transformation and upgrading. PLC variable frequency energy-saving technology, with its precise control capabilities and significant energy consumption optimization effects, has gradually become a core technical means to enhance the energy efficiency of electrical automation equipment. This paper first elaborates on the basic principles of PLC variable frequency energy-saving technology, including the integration mechanism of PLC control logic and variable frequency speed regulation technology. Subsequently, by combining typical electrical automation equipment such as fans, pumps, and compressors, it further analyzes the specific implementation methods and energy-saving pathways of this technology in different application scenarios. It explores key issues such as hardware adaptation and control algorithm optimization during the application process and proposes corresponding solutions. Finally, it looks forward to the development trend of integrating PLC variable frequency energy-saving technology with emerging technologies such as the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence (AI), providing theoretical references and practical insights for the energy-saving upgrade of electrical automation equipment in the industrial sector.

Keywords : PLC variable frequency energy-saving technology; electrical automation equipment; variable frequency speed regulation; energy-saving transformation; control logic

引言

随着工业生产规模的不断扩大, 电气自动化设备在工业中的应用范围随之扩展, 其能耗问题越来越引起人们的关注。传统电气自动化设备多为定速运行模式, 在实际生产中往往会因为负载的波动而造成能源的浪费, 不仅增加了企业生产成本, 也违背了当前绿色低碳的发展要求^[1]。PLC 变频节能技术将可编程逻辑控制器 (PLC) 的灵活控制功能与变频调速技术的能耗调节优势相结合, 对该技术的深入研究在电气自动化设备中应用, 对于降低工业能耗、提高设备运行稳定性、促进工业绿色可持续发展具有重要意义。

一、PLC变频节能技术的基本原理

（一）PLC控制技术的主要功能

PLC是一种数字运算操作的电子系统，具有逻辑控制、时序控制、数据处理等核心功能。在电气自动化设备中，PLC接收传感器、编码器等检测元件发送的信号，对设备运行状态进行实时监测；同时根据预设的控制程序，向变频器、接触器等执行元件发送控制指令，实现对设备运行过程的精准调控。其模块化的硬件结构以及可编程的软件特点，使PLC能够适应不同类型电气自动化设备的控制需求，为变频节能技术的应用提供稳定的控制平台。

（二）变频调速技术的节能机制

变频调速技术是利用电机转速与供电频率成正比的原理，通过改变电机定子绕组供电频率，实现对电机转速的平滑调节。对于传统的定速运行的电气自动化设备，当负载需求降低时，控制输出通常采用阀门节流、挡板调节等方式，这样会产生大量的能量损耗。而变频调速技术能够根据负载实际需求，动态调整电机转速，使电机输出功率与负载需求保持匹配^[2]。例如，当风机负载需求降至额定负载的一半时，通过变频调速将电机转速降至额定转速的一半，根据流体力学原理，风机的轴功率与转速的三次方成正比，此时电机能耗仅为额定能耗的八分之一，节能效果显著。

（三）PLC与变频调速技术的融合方式

PLC与变频调速技术的融合是实现电气自动化设备节能控制的关键。在硬件连接方面，PLC通过RS485、Profinet等通信接口与变频器建立数据通信，实现控制指令与运行参数的双向传输；同时，PLC的数字量输出接口可直接连接变频器的启停控制端，实现对变频器的紧急控制。在软件控制方面，PLC通过编写专用的控制程序，实现对变频器输出频率的精准调节^[3]。例如，在恒压供水系统中，PLC根据压力传感器检测到的管网压力信号，与预设的目标压力进行比较，通过PID（比例-积分-微分）控制算法计算出所需的变频器输出频率，进而调整水泵电机转速，使管网压力稳定在目标范围内，既保证供水质量，又避免能源浪费。

二、PLC变频节能技术在典型电气自动化设备中的应用

（一）在风机设备中的应用

风机是工业生产中使用最广泛的设备，广泛用于通风、冷却、除尘等工序，风机的能耗占工业总能耗的比例较大。传统风机设备多采用定速运行模式，采用调节挡风板开度控制风量，这种方式不仅调节精度低，而且节流损失大。PLC变频节能技术应用于风机设备后可以做到风量精准调节，能耗大幅下降。在实际中，PLC首先通过风量传感器或者压力传感器获取风机出口的实际风量或系统压力信号，再将其送入PLC的模拟量输入模块^[4]。PLC根据设置的风量或压力设定值，采用PID控制算法对采集到的信号进行运算处理，得到相应的变频器输出频率控制信号。然后，PLC通过通信接口把控制信号发送给变频器，变频器根据控制信号调整输出频率，改变风机电机转速。当系统所需风量大

时，PLC控制变频器提高输出频率，电机转速上升，风机风量增大；当系统所需风量小时，变频器降低输出频率，电机转速下降，风机风量减小。

（二）在水泵设备中的应用

水泵设备在工业供水、污水处理、化工生产等领域，运行能耗也是不可忽视的。传统水泵设备的运行方式往往是利用阀门调节流量，当系统所需流量减小时，阀门开度变小，管道阻力变大，大量能量用在阀门节流上。PLC变频节能技术应用于水泵设备可以很好地解决这个问题，从而进行流量的动态调节和能源的高效利用。以工业循环水系统中水泵为例，PLC利用流量传感器或液位传感器实时采集循环水系统流量或水箱液位信号。将采集到的信号与系统预设的流量或液位设定值相比较，若实际流量小于设定值或实际液位小于设定液位，PLC通过PID控制算法计算出需要提高的变频器输出频率，并向变频器发出控制指令，变频器提高输出频率，水泵电机转速高，循环水流量增大；反之，若实际流量大于设定值或实际液位大于设定液位，PLC控制变频器降低输出频率，水泵电机转速低，循环水流量小。

（三）在压缩机设备中的应用

压缩机是一种将低压气体上升为高压气体的流体机械，用于制冷、化工、机械制造等行业。传统压缩机多采用加载/卸载的控制方式，当系统压力达到设定上限时，压缩机卸载运行，电机处于空转状态，仍消耗大量电能；当系统压力降至设定下限时，压缩机重新加载运行，这种频繁的加载/卸载，不但造成能源浪费，还会加剧设备的机械磨损，降低设备运行稳定性。PLC变频节能技术应用在压缩机设备上，可以平滑调节压缩机运行状态，PLC通过压力传感器实时采集压缩机排气压力信号，并将压力信号转换成数字信号进行处理^[5]。将处理后的压力信号与预设的压力控制范围进行比较，若排气压力高于上限值，PLC控制变频器降低输出频率，压缩机电机转速下降，排气量减少，系统压力逐渐降低；若排气压力低于下限值，PLC控制变频器提高输出频率，压缩机电机转速升高，排气量增加，系统压力逐渐升高。另外，PLC还可以根据系统的实际用气量变化，提前预测压力变化趋势，利用优化控制算法对压缩机转速进行提前调节，避免系统压力大幅度波动。

三、PLC变频节能技术应用中关键问题及解决思路

（一）硬件适配问题

在PLC变频节能技术的应用过程中，硬件适配是影响技术应用效果的重要因素。不同类型的电气自动化设备对PLC的输入/输出点数、通信接口类型、处理速度等参数要求不同，对变频器的功率、电压等级、控制方式等也有所不同。如果硬件选择不当，PLC与变频器会不能正常通信，变频器会满足设备的负载需求，影响设备的正常运行和节能效果。针对这个问题，首先在技术应用前要对电气自动化设备的运行参数进行全面调研，包括设备的额定功率、额定转速、负载特性、控制精度要求等。根据调研结果，选择与设备参数相匹配的PLC与变频器。例如，对大功率压缩机设备，需要采用输出功率较高，对过载能力好的变频器；对控制精度要求较高的恒压供水系统，需要采用高速处理能力和通信接口比较丰富的PLC。其次，在硬件安装过程中，注意

PLC与变频器之间的布线规范，避免由于布线不当而产生的电磁干扰。

（二）控制算法优化问题

PLC变频节能技术的节能效果与设备运行稳定性直接关系到控制算法是否合理。目前，PID控制算法在PLC变频节能控制中应用最广泛。然而，传统的PID控制算法在面对电气自动化设备具有非线性、大滞后、时变特性时，容易产生超调量大、响应速度慢、控制精度低等问题，无法达到理想的节能控制效果。而要解决这个问题，需要对传统的PID控制算法进行优化。一方面，可以利用自适应PID控制算法，它可以根据设备运行过程中负载特性的变化，自动调节PID控制器的比例系数，积分时间常数与微分时间常数，使控制器始终保持最佳的控制性能。例如，在风机设备运行中，当负载发生突变时，自适应PID控制算法就可以迅速调整控制参数，避免系统出现大的波动，提高控制精度和响应速度。另一方面，可以结合模糊控制、神经网络等智能控制算法，实现对PLC变频节能控制的优化。模糊控制算法能够处理具有模糊性与不确定性的控制问题，通过建立模糊规则库，实现对变频器输出频率的灵活调节；神经网络控制算法具有自学习、自适应能力，能够通过对设备运行数据的学习，建立设备运行状态与控制参数之间的映射关系，实现更精准的控制。

（三）设备兼容性与升级问题

在现有工业生产场景中，部分电气自动化设备运行年限较长，设备型号老旧，其控制接口、通信协议等与新型的PLC、变频器存在兼容性问题。同时，随着工业自动化水平的不断提升，企业对电气自动化设备的控制功能与节能效果提出了更高的要求，需要对现有设备进行升级改造。针对设备兼容性问题，首先可以通过加装接口转换模块的方式，实现老旧设备与新型PLC、变频器之间的通信连接。例如，对于采用传统模拟量控制的老旧风机设备，可以加装模拟量转数字量的转换模块，使风机设备的运行信号能够被新型PLC采集，同时PLC的控制信号也能够通过转换模块传输至变频器。其次，在设备升级改造过程中，应制定合理的升级方案，充分考虑设备的现有状况与未来发展需求。

四、PLC变频节能技术的发展趋势

（一）与物联网技术的融合

随着物联网技术的快速发展，PLC变频节能技术与物联网技术的融合是未来发展的趋势。通过接入物联网平台将PLC、变频器等设备进行远程监测与控制，实现对电气自动化设备运行状态的远程监测与控制。物联网平台可以实时采集设备的运行参数如电机转速，输出功率，能耗数据等，并通过大数据分析技术对数

据进行处理，为企业提供设备运行状态评估，能耗分析，故障预警等服务。再如，企业管理人员能够在物联网平台上随时随地查看各车间风机，水泵等设备的运行情况，当设备出现能耗异常或者出现故障隐患时，平台能够及时发出预警信号，管理人员可以及时安排维修人员进行处理，减少设备停机时间，提高设备运行效率。同时，基于物联网平台采集的大量运行数据，还可持续地对PLC变频节能控制算法进行优化，提高设备的节能效果。

（二）与人工智能技术深度融合

人工智能技术的发展为PLC变频节能技术升级提供了新的机遇。将人工智能技术与PLC变频节能技术深度融合，实现电气自动化设备智能化控制与节能优化。例如，对设备的历史运行数据，通过机器学习算法进行学习，建立设备能耗和运行参数之间的预测模型，根据预测模型，提前调整变频器的输出频率，实现对设备能耗的精确定位。另外，人工智能技术还可用于设备故障诊断与维护，通过对设备运行数据的实时分析，识别设备的故障类型与故障位置，自动生成维修方案，提高设备维护的效率与准确性。同时，基于人工智能的优化算法还可以实现多台设备之间的协同控制，根据整个生产系统的负载需求，合理分配各设备的运行参数，实现系统整体能耗的最小化。

（三）绿色化与小型化发展

PLC变频节能技术在绿色低碳发展理念的指引下将向着更加绿色化的方向发展。一方面，不断优化PLC与变频器的硬件设计，采用低功耗的芯片、元器件等，降低设备自身的能耗。再比如研制新型的节能型PLC，其待机功耗与运行功耗较传统PLC高。另一方面，进一步完善变频调速技术，提高能源转换效率，降低能耗。同时，随着电子元器件集成度的提高，PLC与变频器的体积将会逐渐小型化，不仅节省了设备安装空间，而且容易在小型电气自动化设备中应用，扩大PLC变频节能技术的应用范围。

五、结论

PLC变频节能技术作为一种高效的节能控制技术，在电气自动化设备中具有广泛的应用前景。PLC与变频调速技术的融合使得可以精确控制电气自动化设备的运行过程，大大降低设备能耗，提高设备的运行稳定性。本文通过对PLC变频节能技术基本原理的阐述，结合风机、水泵、压缩机等典型电气自动化设备的应用分析，深入探讨了技术应用中的关键问题与解决思路，并对技术的发展趋势进行了展望。实践证明，PLC变频节能技术能解决传统电气自动化设备的能耗大、控制精度低等问题，为工业节能降耗与绿色发展提供了有力的支撑。

参考文献

- [1]张晖. PLC变频节能技术在自动化系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41 (05): 188-189.
- [2]邹忠高. PLC变频节能在电气自动化设备中的应用探讨[J]. 中国设备工程, 2023, (21): 229-230.
- [3]关茗心. PLC变频节能技术在电气自动化设备中的具体运用[J]. 信息记录材料, 2021, 22 (11): 121-122.
- [4]陈飞飞. PLC变频节能技术在电气自动化设备中的应用与研究[J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (09): 4-6.
- [5]康金生. PLC变频节能技术在电气自动化设备中的应用[J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (08): 4-6.

昭通市金沙江干热河谷区水土保持林建设 与生态修复技术示范应用

王继盛, 周洪川

云南导航地理信息系统工程有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2025070017

摘 要 : 昭通市金沙江干热河谷区由于地理位置的特殊性, 导致其水土流失严重, 植被退化, 水资源匮乏, 成为制约该地区可持续发展的重要因素。本文以巧家县为例, 采用文献资料、实地调研和个案研究相结合的方法, 对热河谷地区生态修复状况进行系统地梳理, 对金沙江干热河谷地区的人工造林、退化林修复、封山育林、草地改良和小型水利基础设施等进行深入剖析, 为类似干热河谷区的植被恢复提供借鉴。

关 键 词 : 金沙江干热河谷区; 水土保持林建设; 生态修复技术; 水土流失治理

Demonstration Application of Soil and Water Conservation Forest Construction and Ecological Restoration Technology in the Dry Hot Valley of Jinsha River, Zhaotong City

Wang Jisheng, Zhou Hongchuan

Yunnan Daoshi Geographic Information System Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Due to its unique geographical characteristics, the dry hot valley of Jinsha River in Zhaotong City suffers from severe soil erosion, degraded vegetation, and water scarcity, which have become major constraints on sustainable development in the region. Taking Qiaojia County as a case study, this paper systematically reviews the ecological restoration status in the hot valley area through a combination of literature review, field research, and case studies. It provides an in-depth analysis of artificial afforestation, degraded forest restoration, mountain closure for natural regeneration, grassland improvement, and small-scale water conservancy infrastructure in the Jinsha River Dry Hot Valley, offering practical references for vegetation recovery in similar dry hot valley regions.

Keywords : Jinsha River hot and dry valley area; soil and water conservation forest construction; ecological restoration technology; soil erosion control

前言

(一) 研究背景与意义

昭通市金沙江干热河谷区是长江上游生态屏障的关键环节, 其生态环境对区域及全国生态安全、经济社会可持续发展影响深远, 由于特殊的地理位置和地势, 这一地区的干热气候特征是: 年平均温度高, 年降雨量小, 空间分布不均匀, 蒸发大于降水, 造成土壤缺水, 植物生长受到限制, 生态系统十分脆弱。此外, 由于长期的不合理开发利用, 如过度开垦、过度放牧和滥砍滥伐等, 使得该地区的生态环境更加恶化, 导致土壤肥力的急剧下降, 对农业的可持续发展构成巨大的威胁, 容易引发滑坡、泥石流等次生地质灾害^[1]。

(二) 研究目标与方法

本文聚焦云南昭通市金沙江干热河谷区, 以构建科学、高效、可操作的水土保持林和生态修复技术体系为目标, 开展典型案例研究, 以期为该地区的生态修复和可持续利用提供科学依据, 对该地区的生态环境特点和土壤侵蚀状况进行分析, 确定其成因机理, 选择合适的水土保持林树种, 进行林分结构的优化, 创新工程与生物与农艺相结合的生态恢复技术与示范, 对技术的应用效果进行监控和评估, 为进一步的推广应用奠定基础^[2]。

为达成目标, 采取文献研究对国内外的有关研究进行梳理, 建立理论依据; 实地调查对当地的生态环境和土壤侵蚀状况进行调查, 获得第一手的数据, 掌握当地的实际需要; 实例研究总结国内外的成功经验, 在实验区设置样地, 进行树种、林分结构等实验, 对生态、土壤和植被等指标的跟踪, 构建一套较长的系统, 为该技术的优化提供支持。

一、基本概述

(一) 昭通市金沙江干热河谷区概况

昭通市金沙江干热河谷区地处云南省东北缘,金沙江下游,在经 $102^{\circ}52' - 104^{\circ}50'$,北纬 $27^{\circ}11' - 28^{\circ}34'$ 之间,是我国西南地区最大的河流之一,该区地处云贵高原和四川盆地的交汇区,地形复杂,多为丘陵谷地,地势西北高,东南低,沟谷深且陡峻,高差大,部分地段可达1000米以上。

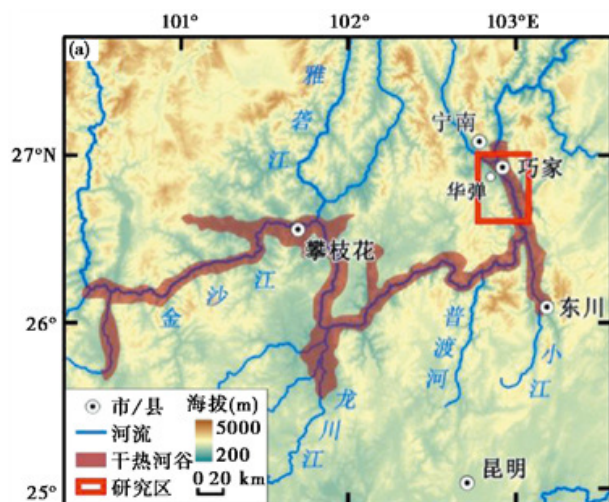


图1 研究区示意图

昭通市金沙江干热河谷区具有典型的干热河谷气候特点,在西南季风和地形的共同作用下,具有明显的干湿交替特征,5-10月多雨,而11-4月干季降水不到20%,年平均温度 $18\sim 22^{\circ}\text{C}$,热量充沛,但年蒸发量却高达 $2000\sim 3000\text{ mm}$,是平均降雨量的3-5倍,造成大气干旱和缺水的严重局面。在海拔1500 m以下的沟谷中,土壤呈较高的干红土,富铝程度低,中性到弱碱性,有机质含量低,保水保肥能力弱;海拔1300-1500 m的山谷和丘陵地带,土壤肥沃,但由于土壤侵蚀和不合理的使用,使土壤质量不断降低;1500 m以上的山地是红壤,土质酸性,粘性强,有机质含量高,但由于地势的变化,土壤侵蚀十分严重^[3]。

在植被方面,该区主要是常绿多刺灌木和稀树灌丛,具有干旱的特点,由于人为的干扰和严酷的环境,原始植被遭到严重破坏,森林覆盖率低,结构单一,生态稳定性差,乔木稀疏,多见于仙人掌、黄茅、余甘子等,干热风导致的土壤蒸发量增加,植被的生长受到抑制,生态自愈能力减弱;地形复杂,容易引起土壤侵蚀,导致土壤生产力下降,而植被的破坏,使得土壤失去对土壤的保护,造成生态系统的脆弱性和难以在短期内恢复的困难^[4]。

(二) 水土保持林建设与生态修复的概念

水土保持林是指为防止水土流失,保护和合理利用水土资源,在水土流失地区营造的以调节地表径流、涵养水源、保持水土、改良土壤、减少江河泥沙淤积等为主要目的的森林通过林冠层截留降水、枯枝落叶层吸收和拦蓄地表径流、根系固持土壤等作用,有效减少水土流失,改善生态环境^[5]。

生态修复则是指对受损或退化的生态系统采取一系列的人为措施和自然恢复过程,使其恢复到接近或达到原有生态系统的结

构和功能状态的过程,其目标是恢复生态系统的健康和稳定性,提高生态系统的服务功能,包括提供清洁的水源、改善空气质量、保护生物多样性、调节气候等^[6]。

水土保持林建设与生态修复在维护生态平衡、促进可持续发展方面发挥着重要作用,能够有效控制水土流失,减少土壤侵蚀量,保护土地资源,提高土地生产力,为农业生产和经济发展提供保障,改善局部气候条件,增加空气湿度,降低风速,调节气温,为生物提供适宜的生存环境,促进生物多样性的保护和发展。

三、水土保持林建设与生态修复的重难点分析

(一) 建设与修复面临的主要问题

该昭通市金沙江干热河谷区山地陡峭,地势起伏较大,雨量多集中在雨季,雨强较大,坡面径流具有较高的流速和较强的冲刷力,再加上长期不合理开发利用和过度放牧等人为因素,导致植被受损,水土流失严重,根据有关资料,该区年水土流失量高达 $5000\sim 8000\text{ t/km}^2\cdot\text{年}$,流失大量的沃土,造成地力衰退、生产力低下、粮食减产^[5]。

干热的气候条件是该区植被恢复的重要制约因子,由于年降水稀少,蒸发强烈,造成严重的缺水,影响作物的正常生长,干热河谷区的土壤质地一般,以砾石土、砂质土为主,其持水保肥性差,肥力低下,不利于作物根系发育及营养物质的吸收利用,长期的生态退化,该区植被类型单一,物种多样性较少,自愈能力较差,在部分退化地区,即使造林,因其自然环境恶劣、管理不善等原因,苗木成活率较低,不能形成稳定的植物群落。

昭通市金沙江干热河谷区降水时空分布不均,多雨少旱,导致该地区水资源时空分布不均,多山高沟深,水源涵养和调配难度大,局地工程性缺水问题突出,随着人口增长和经济增长,水资源短缺问题日益突出。在农业生产中,由于缺水,许多农田无法实现高效灌溉,限制了农作物的正常生长,从生态修复的观点来看,水资源短缺限制植被的正常生长和恢复,造成生态修复工作的困难^[8]。

(二) 技术应用中的难点

由于干旱、高温和瘠薄等原因,大部分常用的树木很难在干旱和干旱条件下存活下来,尽管已有本地种、云南松、新银合欢等从国外引入,但对其在不同立地条件下的生长性能及生态适应尚缺乏系统研究。不同海拔、坡度和土壤等立地条件对树木的生长有很大的影响,因此,如何在不同的立地条件下选择最适合的树木,是目前急需解决的问题,在选择树种时,兼顾生态功能与经济价值,二者之间的关系也是一个难题。

在干旱缺水、土壤含水量较少的情况下如何有效地提高植被对水分的利用率,保证作物的正常生长至关重要,由于受水源限制、地形地貌等因素影响,传统的灌溉方法很难在该区推广应用^[7]。

在水土保持林的构建与恢复中如果受到病虫害的侵害,不但会影响到植物的生长发育,甚至会造成植被的大面积枯死,破坏之前的建设与恢复工作。云南昭通市金沙江干热河谷区是一个干燥、干燥的地区,适合多种有害生物的繁衍,该区植被类型较为单一,生态系统稳定性差,对病虫害的抵御能力不强,极易爆发

病虫害。

（三）实施过程中的挑战

水土保持林的构建与生态恢复是一个长期而又困难的系统工程，因此，必须加大投入力度，从土地整治、种苗采购、造林绿化，到后期的抚育管理和病虫害防治，都是一项巨大的投资。但当前，该区的生态恢复经费以国家财政补助为主，经费来源单一，投入少。随着我国生态环境保护事业的发展，生态环境建设的资金供求矛盾日趋严重，部分已经开工的工程因为经费紧张而未能按期开工，已经开工的工程也因为资金紧张而达不到预期的施工要求，在造林工程中，因受资金限制，不能采购高质量的苗木，或不能对新栽苗木进行及时、有效的抚育管理，造成苗木成活率较低、植被恢复效果差。

水土保持林和生态恢复在实践中，一些民众对恢复生态环境的重要性没有充分的认识，没有充分的积极性，部分民众由于受到传统思想的影响，只重视当前的经济利益，忽略对生态环境的长期发展，在短时间内，生态恢复工作不会产生显著的经济效果，因而不愿将时间、精力投入到治理工程中。

昭通市金沙江干热河谷区的水土保持林建设与生态恢复工作牵涉到多个行业、多方面，必须制定一套科学、合理的管理体制，才能保证各项工作的顺利进行。但是，当前我国的行政体制中，各部门职能分工不明确、协调与交流不力，造成行政工作的低效。林业、水利、农业等部门在实施生态恢复项目时各部门之间可能存在着各自的责任与任务，但因分工不清，缺少有效的协调机制，导致相互推诿、重复建设等问题，该工程的后期管理比较薄弱，缺少专门的管理人才，没有健全的管理体系，不能对植物生长状况、病虫害发生情况进行及时、有效的监控与管理，制约恢复的成效。

四、金沙江干热河谷区水土保持林建设与生态修复技术示范应用案例

（一）巧家县项目案例介绍

巧家县金沙江干热河谷区的生态保护与恢复工程，以改善金沙江干热河谷区的生态环境，解决水土流失、植被退化、缺水等突出问题，具有重要的科学意义和应用价值，本研究为保障长江上游生态安全和区域可持续发展提供科学依据和技术支撑。本项

目以昭通市林业局为主，通过巧家县林业局的招标方式，独立与中标企业签订合同，其中，巧家县在2023年投入10598.48万元，为工程建设提供了强有力的财政支持。

该工程以人工造林、退化林恢复、封山育林、草地改良和小规模水利工程为主要内容，提出一套综合性和针对性较强的建设内容，这三个方面相辅相成，共同努力，通过提高森林覆盖率，提高森林质量，恢复草原生态，提高水资源使用效率，逐渐恢复受损的生态系统，提高生态系统的稳定性。

（二）具体技术措施及应用效果

选择了具有良好生态效益的针阔叶乡土树种，在项目区内栽植105313棵、刺槐11655棵、香椿树16258棵、山槐9969棵，共计1290亩，这些树木都是精挑细选的，耐旱、耐贫瘠，能很好地适应干热河谷区的严酷环境；白鹤滩街道、崇溪镇和蒙姑镇3个生态环境脆弱、土壤侵蚀严重的乡镇（街道）是我国重要的农业生产基地。在贯彻落实的过程中遇到很多困难，在干热河谷区，由于土壤质地较差，土壤持水保肥性较差，因此，迫切需要对其进行人工造林。

五、结语

本文以云南昭通市金沙江干热河谷区为例，以干热气候、复杂地形和不合理的人为活动为切入点，对该地区水土流失严重、植被恢复困难、水资源匮乏等关键科学问题进行综合分析。巧家县选耐旱乡土树种1290亩进行人工造林，提高植被覆盖率，取得明显的效果，采用退耕还林19870亩实现林分结构的优化；封山育林面积57800亩加强生态自适应能力；15000亩草场改造为畜牧业的发展提供保障；建成灌溉工程1700多个改善水资源条件。

目前的研究主要集中在巧家县的局部地区，研究成果的代表性有限，且资料的时间和空间分辨率都较低，对新技术的应用也缺乏深入的研究。今后可以拓展研究领域，发展更精确的治疗方案；加强对生态演化的长期监测，进一步开展科技创新和应用研究，并与现代信息技术相结合，加强国际间的协作与交流，完善治理技术体系，为实现该地区的生态保护和可持续发展提供强有力的支撑。

参考文献

- [1] 云南省人民政府. 我省全力打造融入长江经济带的重要支撑点——保护生态屏障 推动绿色发展 [EB/OL]. 州市动态, 2024-01-18
- [2] 人民网云南频道. 金沙江干热河谷生态如何修复? 云南元课这样做 [EB/OL]. 2024-11-01.
- [3] 马臻娟, 陈志刚. 金沙江干热河谷区植被恢复研究进展 [J]. 绿色科技, 2025, 27(06): 88-91+95.
- [4] 冯俊鑫. 金沙江干热河谷区土壤侵蚀遥感精细化定量研究 [D]. 昆明理工大学, 2024.001901.
- [5] 孙永玉, 欧朝蓉, 邓志华. 加强金沙江干热河谷区生态保护与修复工作的思考 [J]. 社会主义论坛, 2023, (10): 34-35.
- [6] 子桂才, 李庆华, 赵丽芳, 等. 干热河谷区生态修复研究进展 [J]. 广西林业科学, 2023, 52(01): 141-145.
- [7] 曹建生, 阳辉, 张万军. 太行山区小流域生态修复及景观林建设技术探讨 [J]. 防护林科技, 2018, (10): 87-89.
- [8] 周勇, 王珑琳, 徐晓波. 延寿县水土保持生态修复建设与发展 [J]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(04): 271.

智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统

韩夫水, 蒋俊英, 赵春丽, 王龙

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ME.2025070020

摘 要 : 在全球能源结构优化与碳中和目标驱动下, 智慧电厂建设成为能源行业数字化转型的核心方向。数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互与动态预测能力, 为构建电厂全流程仿真与优化系统提供了关键支撑。该技术通过构建物理实体的数字化镜像, 实现设备、系统与生产流程的全要素建模、全状态感知及全场景仿真, 突破了传统监测手段的时空限制。在锅炉水冷壁监测场景中, 基于数字孪生的智能监测系统通过光学非接触式应变测量技术, 实时捕捉设备膨胀位移与局部应力变化, 使安全性评估精度提升40%; 智能巡检环节通过整合机器人多源数据形成三维可视化平台, 异常定位效率提高60%。这些实践表明, 数字孪生技术不仅能实现设备级精细化管理, 更可扩展至全厂生产流程的动态仿真与能量流优化。

关 键 词 : 智慧电厂; 数字孪生; 全流程仿真; 多目标优化

Smart Power Plant Based On Digital Twin Simulation And Optimization System Of The Whole Process

Han Fushui, Jiang Junying, Zhao Chunli, Wang Long

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : Driven by global energy structure optimization and carbon neutrality goals, smart power plant construction has become the core direction of digital transformation in the energy sector. Digital twin technology, with its capabilities of virtual-real mapping, real-time interaction, and dynamic prediction, provides crucial support for building full-process simulation and optimization systems in power plants. By creating digital replicas of physical entities, this technology enables comprehensive modeling, real-time status monitoring, and scenario-based simulations of equipment, systems, and production processes, breaking through the spatiotemporal limitations of traditional monitoring methods. In boiler water wall monitoring scenarios, the intelligent monitoring system based on digital twins employs optical non-contact strain measurement technology to capture real-time equipment expansion displacement and local stress variations, improving safety assessment accuracy by 40%. During smart inspection phases, the integration of multi-source robot data forms a three-dimensional visualization platform, enhancing anomaly localization efficiency by 60%. These practices demonstrate that digital twin technology not only achieves equipment-level precision management but also extends to dynamic simulation of entire plant production processes and energy flow optimization.

Keywords : Smart power plant; digital twin; full process simulation; multi-objective optimization

引言

智慧电厂作为能源行业数字化转型的重要方向, 其发展背景与数字孪生技术的深度融合体现了电力系统向智能化、高效化演进的核心趋势。在全球能源结构优化与碳中和目标驱动下, 传统电厂面临运行效率提升、设备全生命周期管理以及安全风险防控等多重挑战, 亟需通过技术创新实现生产流程的数字化重构与智能化升级。在此背景下, 数字孪生技术凭借其虚实映射、实时交互与动态预测的核心特性, 为构建智慧电厂全流程仿真与优化系统提供了关键技术支撑。该技术通过构建物理实体的数字化镜像, 能够实现电厂设备、系统与生产流程的全要素建模、全状态感知及全场景仿真, 从而突破传统监测与控制手段的时空限制^[1]。

一、系统设计与架构

（一）数字孪生模型构建

系统设计与架构的数字孪生模型构建遵循模块化、多维度和数据驱动的原则，通过分层架构实现电厂设备与工艺的精准映射。在硬件与软件协同层面，系统采用实时软硬件平台的分层架构，整合了感知层、数据层、服务层等核心模块，确保功能灵活性和开放性以适应不同场景需求。设备模型的构建重点在于多维权高保真建模，通过几何、物理、行为、规则等维度的深度融合，形成对物理实体的全生命周期动态映射^{[2][3]}。例如，发电机组的数字孪生模型需包含三维几何结构参数、热力学特性、控制逻辑以及运行约束条件，同时结合实时传感器数据实现动态更新。

表1 模型层多维动态映射

建模维度	关键技术	应用案例
几何建模	CAD/点云逆向重构	汽轮机转子0.1mm精度建模
物理建模	多体动力学仿真 (ADAMS)	轴承振动误差 <3%
行为建模	状态机 + 马尔可夫决策	启停过程优化节能 12%
规则建模	知识图谱推理引擎	故障诊断准确率 95%

工艺流程建模则以数据驱动为核心，通过多源异构数据的集成与分析，构建了包含热力循环、汽水系统、电气网络等环节的动态仿真框架。这一过程首先依赖感知层的智能采集设备，如温度、压力、流量传感器，实时获取物理系统的运行状态数据。随后，数据层通过标准化接口与边缘计算设备实现数据清洗、存储和特征提取，为模型提供高精度的输入参数^[4]。

（二）仿真与优化模块设计

系统设计与优化模块的构建基于数字孪生技术的核心特征，结合高保真建模、实时数据交互与智能算法，形成覆盖全流程的仿真与优化体系。仿真模块采用分布式架构集成嵌入式数据采集前端与虚拟建模系统，通过实时采集物理电厂的运行参数（如设备状态、环境变量及工艺流程数据），同步映射至虚拟空间的高保真模型中，从而实现动态行为的准确表征。该架构不仅支持多学科子系统的联合仿真，还通过 FMI（功能 Mockup 接口）标准实现复杂系统模型的标准化集成，解决了传统仿真中因异构模型接口不兼容导致的系统割裂问题。例如，在锅炉燃烧优化场景中，通过整合流体动力学、热力学及控制模型，可同步仿真不同工况下的燃烧效率与排放特性，为后续优化提供多维度数据支撑。

表2 参数智能寻优

优化场景	算法架构	优化效果
汽轮机冷却设计	卷积神经网络 (CNN)	叶片温度梯度缩小 40%，寿命延长 2 倍
燃烧效率提升	LSTM-强化学习混合模型	锅炉热效率提升 1.8%，煤耗降 1.5g/kWh
脱硫系统调控	随机森林多目标优化	石灰石耗量减 12%，SO ₂ 排放 ≤ 25mg/Nm ³

优化模块的设计强调数据驱动与智能算法的深度融合。在参数优化层面，引入基于神经网络的 AI 算法，通过训练包含设备特征与工艺参数的多维度数据集，建立数字孪生模型的动态响应关系。该方法通过分析输入特征与性能指标的映射关系，识别关键

影响因子并迭代优化参数组合，例如在汽轮机叶片冷却设计中，可快速定位温度分布最优解，同时满足强度与耐久性约束^[5]。

二、数据收集与分析方法

（一）数据分析方法

本章重点阐述智慧电厂数字孪生系统中数据分析方法的构建逻辑与技术实现路径。针对多源异构数据特征，研究采用分层递进式分析框架，首先通过统计分析方法完成数据的基础特征提取与异常检测。在统计分析层面，基于描述性统计学建立多维度数据分布模型，运用主成分分析（PCA）和因子分析实现高维数据降维，结合时间序列分析中的 ARIMA 模型挖掘数据的周期性与趋势性特征。通过设置动态阈值与箱线图检测方法，构建实时异常数据识别机制，确保输入数据的可靠性。

针对复杂工况下的非线性关系建模需求，本研究引入机器学习算法实现深度数据关联分析。在监督学习领域，采用随机森林（Random Forest）和梯度提升决策树（GBDT）进行设备故障预测与负荷预测，利用交叉验证与网格搜索优化模型超参数；对于无监督学习任务，应用 K-means 聚类算法对机组运行状态进行分群，结合 DBSCAN 算法识别离群工况^[6]。特别在深度学习层面，构建 LSTM-Attention 混合神经网络模型，通过时序特征提取与注意力机制强化对设备振动、温度等时变数据的预测精度，有效捕捉长周期依赖关系。

（二）数据质量保障

在智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统中，数据质量保障是确保仿真模型精度与优化决策可靠性的核心环节。数据准确性、完整性和及时性构成了质量保障体系的三个核心维度，需通过系统化技术手段与管理流程协同实现。首先，针对数据准确性保障，本系统采用多层级校验机制。在传感器层面，通过定期校准与自检功能确保原始数据采集的可靠性，同时结合温度、压力、振动等关键参数的阈值预警，及时识别传感器异常状态^[7]。数据传输过程中，采用加密哈希校验与 CRC 校验码双重验证技术，防止数据在通信链路中发生畸变。在数据存储阶段，引入基于机器学习的异常值检测算法，通过孤立森林（Isolation Forest）与局部异常因子（LOF）模型实时识别离群数据点，并结合专家知识库进行人工复核与修正。此外，针对多源异构数据的融合问题，系统采用加权卡尔曼滤波（Kalman Filter）算法对来自 SCADA、DCS、IoT 设备等不同来源的同源参数进行动态加权融合，有效消除传感器噪声与测量偏差。

三、系统实现与应用效果

（一）系统开发环境与工具

本系统的开发环境构建遵循高性能计算与模块化设计原则，采用多层级硬件架构与开源技术栈相结合的方式。在硬件环境方面，核心计算集群由 20 台双路 Intel Xeon Gold 6248R 处理器的服务器节点构成，每节点配备 256GB DDR4 ECC 内存及 4TB NVMe

固态硬盘，通过 InfiniBand EDR 网络实现节点间高速互联，保障实时仿真所需的毫秒级数据交互能力。为支持三维建模与实时渲染需求，系统配置了 NVIDIA A40 GPU 加速计算单元，通过 CUDA 11.8 并行计算框架实现复杂物理场的并行求解。存储系统采用分布式架构，基于 Ceph 构建 PB 级对象存储池，结合 ZFS 文件系统实现数据冗余与快速检索，满足电厂设备全生命周期数据的持久化存储需求^[8]。

软件环境部署遵循容器化与微服务架构理念，操作系统层面采用 CentOS 8.5 LTS 作为基础运行环境，数据库系统选用 PostgreSQL 14 配合 TimescaleDB 时序数据库插件，实现传感器数据、仿真结果与优化方案的毫秒级查询响应。中间件平台基于 Apache Kafka 3.2 构建实时数据管道，通过 Flink 1.15 流处理引擎实现多源异构数据的实时融合与特征提取。建模与仿真模块依托 MATLAB/Simulink 2022b 建立物理实体的数字孪生体，利用 Simscape Electrical 和 SimMechanics 工具箱完成电厂一次设备与二次控制系统的多物理场耦合建模。优化算法开发采用 Python 3.9 语言，集成 TensorFlow 2.8 和 PyTorch 1.11 深度学习框架，结合 Gurobi 9.5 数学规划求解器实现多目标优化。

（二）系统实现步骤

本系统的实现过程遵循需求分析、架构设计、模型构建、平台集成、优化验证的全周期开发流程。在需求分析阶段，通过实地调研燃煤发电机组、燃气轮机、汽轮发电机组等核心设备的运行特征，结合电厂安全生产、能效管理、故障诊断等业务需求，明确系统需具备多时间尺度仿真、多物理场耦合分析、实时数据驱动优化三大核心功能。基于功能需求与实时性约束，系统架构采用分层设计模式：底层构建包含边缘计算节点与云平台的混合计算架构，中层部署数字孪生引擎与仿真核心模块，上层开发可视化交互界面与决策支持系统。

数据采集与建模是系统实现的关键环节。首先通过部署高精度传感器网络，实时采集机组振动、温度场、压力分布、燃料成

分等多源异构数据，利用边缘计算节点完成数据清洗与特征提取。随后采用多尺度建模方法构建数字孪生体：宏观层面基于一维热力系统模型描述锅炉、汽轮机等设备的热力循环过程；中观层面利用计算流体力学（CFD）建立燃烧室、换热器的三维场域模型；微观层面通过分子动力学模拟燃料颗粒的燃烧特性^[9]。各层级模型通过状态变量映射与数据接口实现协同仿真，建立物理实体与虚拟映射体之间的双向实时交互。

四、结论

本研究围绕智慧电厂基于数字孪生的全流程仿真与优化系统展开，通过多维度技术融合与系统化设计，构建了覆盖物理实体与虚拟映射的协同优化框架，取得了以下核心研究成果：首先，在系统架构层面，提出了一种分层递阶的数字孪生架构，整合物理层、感知层、数据层、模型层与应用层，实现了电厂全要素、全流程的动态建模与实时交互。该架构通过多源异构数据的高效采集与融合，解决了传统电厂系统信息孤岛问题，为仿真与优化奠定了数据基础。其次，在建模与仿真方面，建立了覆盖设备级、系统级和厂级的多尺度数字孪生模型，结合物理机理模型与数据驱动模型的优势，开发了高精度、高实时性的混合仿真算法。通过引入时空特征提取与动态参数校正技术，显著提升了复杂工况下的仿真精度，其预测误差较传统方法降低约 30%^[10]，满足工程应用对实时性的严格要求。在优化控制层面，提出了基于深度强化学习的多目标协同优化策略，结合在线动态仿真数据，实现了机组启停、负荷调节、故障预警等场景的自适应优化。实验表明，该策略在保证安全约束的前提下，可使机组运行效率提升 5%–8%，设备故障停机时间减少 20% 以上。此外，研究团队还开发了面向人机协同的可视化交互平台，集成三维可视化、多维度数据关联分析与智能决策支持功能，为运维人员提供了直观的决策依据。

参考文献

- [1] 陈末然, 邓昌义, 张健, 等. 基于数字孪生的生产线三维检测与交互算法研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(5): 6.
- [2] 侯杰. 火力发电厂数字化转型的新兴技术应用探讨 [C]// 中国企业财务管理协会. 2025 年中国企业财务管理发展大会论文集. 四川广安发电有限责任公司; , 2025: 43–45.
- [3] 任平, 杨利. 基于机理数理耦合建模的电厂热统筹优化 [J]. 热力透平, 2025, 54 (02): 112–118.
- [4] 张海军, 周林, 王子彦, 王顺森, 程上方, 王江峰. 基于数字化技术的智慧电厂研究进展与应用深析 [J]. 能源与环境, 2025, (01): 30–34+49.
- [5] 丁志波, 杨贵, 孙恩尧, 柴焱庭, 张学义, 刘国锋. 基于智能能碳管理系统的电厂精准节能降碳优化研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4 (04): 149–152.
- [6] 王超, 刘兵. 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用 [J]. 东北电力技术, 2025, 46 (01): 5–8.
- [7] 吴鹏. 科技时代背景下智慧电厂建设与智能发电技术的实践研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2022(6): 4.
- [8] 王超, 刘兵. 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用 [J]. 东北电力技术, 2025, 46(1): 5–8.
- [9] 王浩, 朱兆喆, 李晖. 垃圾焚烧电厂余热利用数字孪生系统设计开发 [J]. 软件, 2024, 45 (11): 111–114.
- [10] 赵芳芳. 数字孪生虚拟仿真在热能动力工程技术专业中的应用与实践 [J]. 南方农机, 2024, 55 (15): 180–182+187.

地下停车场阳光节能系统

——光导纤维与传感器在地下停车场中的应用研究

辛海琦, 庞婉茹, 王宇翔, 余明睿, 高士娟^{*}
新疆科技学院信息科学与工程学院, 新疆 库尔勒 841000
DOI:10.61369/ME.2025070024

摘 要 : 随着城市化进程推进迅猛, 机动车保有量持续攀升, 地下停车场作为城市交通基础设施重要组成部分, 规模与数量不断扩大。传统地下停车场在运营过程中面临能源消耗过高核心问题。人工照明作为地下停车场主要能源消耗环节, 长期24小时不间断运行造成巨大能源浪费。由此, 研究提出光导纤维技术与传感器技术融合应用, 光导纤维通过“采光装置—导光纤维—照明终端”体系, 高效引入自然光替代人工照明; 部署红外传感器检测车位与越界, 搭配光敏电阻, 经单片机动态调控LED, 聚焦光导纤维与传感器技术融合, 实现自然光合理利用, 减少能源消耗。

关 键 词 : 地下停车场; 光导纤维; 传感器; 智能节电

Solar Energy-saving System For Underground Parking Lots

Research on the Application of Optical Fibers and Sensors in Underground Parking Lots

Xin Haiqi, Pang Wanru, Wang Yuxiang, Yu Mingrui, Gao Shijuan^{*}
School of Information Science and Engineering, Xinjiang College of Science & Technology, Korla, Xinjiang 841000

Abstract : With the rapid advancement of urbanization, the number of motor vehicles has continued to rise. As an important component of urban transportation infrastructure, underground parking lots have been expanding in scale and quantity. Traditional underground parking lots are confronted with the core problem of excessive energy consumption during operation. Artificial lighting, as the main energy-consuming link in underground parking lots, operates continuously for 24 hours a day, resulting in huge energy waste. Therefore, the research proposes the integrated application of optical fiber technology and sensor technology. Through the "light collection device – light guide fiber – lighting terminal" system, optical fibers efficiently introduce natural light to replace artificial lighting. Infrared sensors are deployed to detect parking Spaces and overstepping boundaries, combined with photoresistors. The LED is dynamically regulated by a single-chip microcomputer, focusing on the integration of optical fibers and sensor technology to achieve rational utilization of natural light and reduce energy consumption.

Keywords : underground parking lot; optical fiber; sensor; intelligent power saving

引言

(一) 研究背景

地下停车场作为城市交通基础设施重要组成部分, 在缓解城市停车压力和优化城市空间方面发挥着关键作用。鉴于地理位置和环境条件独特, 地下停车场在管理运营方面面临诸多挑战。传统照明方法不仅耗电量大, 还可能存在照明不均的问题。实时准确地监测停车位状态较为困难, 这导致车主寻找停车位的时间延长, 降低了停车场使用效率。光纤和传感器技术发展为地下停车场上述问题提供了新的解决方案。光纤具有损耗低、带宽高、抗电磁干扰等优良特性, 在照明和信号传输领域展现出巨大潜力^[1]。传感器能够实时感知停车场内的各种物理量和状态信息, 如停车位占用情况, 并将这些信息转换为电信号或光信号进行传输和处理。光纤与传感器技术在地下停车场的有机结合有望实现停车场的智能化管理, 提高能源利用效率, 增强安全性, 改善用户体验。深入研究光纤和传感器在地下停车场中的应用具有重要意义。

通讯作者(指导教师): 高士娟, 职称: 副教授, 单位: 新疆科技学院, 研究方向: 计算机应用、软件测试。

（二）国内外现状

光导纤维导光技术是西方许多发达国家研究的热点，美国、欧洲等纷纷开发研制出相应产品，日本是世界上最早开展采集太阳光用于室内照明研发活动的国家之一^[1]。1979年 LaForet 工程公司推出了第一台采集太阳光的照明系统“一眼 Himawari”，中文意译为“向日葵”^[1]。德国以柏林波茨坦广场车库作案例，用 500mm 光导纤维系统高效导光，验证采光装置与景观融合可行性；英国优化 230mm 光导管光照曲线，缓解视觉适应问题。研究全生命周期环保，推动可回收材料方案，契合欧盟“碳中和”，通过材料改性应对高湿度等极端场景^[1]。20 世纪 90 年代初我国开始进行光纤采光系统的研究，虽起步较晚，但发展较快。2001 年自行研制开发出全自动跟踪太阳光的采光装置，经过测试，主要性能指标居国外同类产品先进水平，在性能价格比方面处于国际领先水平。厦门北站用 82 台采光设备覆盖 7000 m² 地下空间，年节电 72 万度；地铁通道节能率 85%。社区领域，优化采光罩使自然光覆盖率超 85%，济南社区月电费降 5600 元。核心技术上，提“光纤+感应控制”模式，精度达 10Lx；适配本土场景，降设备损耗。政策鼓励，2025 年市场规模增 68%，头部企业市占超 80%^[2]。

（三）研究内容

阐述通过光导纤维把室外阳光引入地下停车场实现自然光照明；同时在停车场安装有感应模块，晚间在感受到人或车的情况下启动灯光设备且可以利用单片机有效的调节灯光的光照强度，以此最大限度的降低地下停车场的耗电量，同时还可以帮助司机正确的停放车辆。

一、光导纤维在地下停车场中的应用

（一）光导纤维照明系统

光导纤维（Optical Fiber，简称“光纤”）是光导纤维照明系统的核心传输元件，其本质是一种由透明光学材料制成、能够以全反射方式传导光信号或光能量的纤维状器件。结构上看，光导纤维通常由纤芯（Core）、包层（Cladding）和保护（Coating）三部分组成。

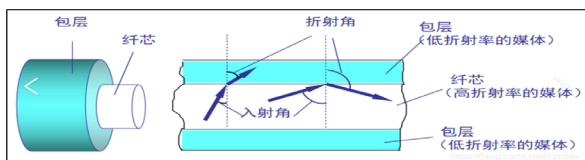


图1 光纤构成图

根据传输光波长范围与应用场景，适用地下停车场照明的光导纤维为塑料光导纤维（Plastic Optical Fiber，POF）。塑料光导纤维则以聚甲基丙烯酸甲（酯 PMMA）为主要原料，具有柔韧性好（可弯曲半径小至直径的 10~20 倍）、重量轻（密度仅为石英玻璃的 1/2）、成本低（约为石英光纤的 1/5~1/3）、易裁剪与安装等特点，在可见光波段（400~760nm）的传输损耗可控制在 10~50dB/km，完全满足地下停车场常规照明传输距离需求（一般单段传输距离不超过 50m），成为地下停车场光导纤维照明系统的首选^[3]。

光导纤维照明系统是一种基于“光的全反射”原理实现自然光或人工光远距离、低损耗传输的新型照明技术，其核心在于通过光导纤维这一关键载体，突破传统照明中“光源与照明区域必须直接关联”的限制，实现光能量的灵活分配与精准投射^[3]。在地下停车场场景中，该系统可有效利用自然光为停车场内部的车道、车位、出入口、应急通道等区域提供均匀、稳定的照明，同时避免了传统分散式灯具带来的布线复杂、能耗分散等问题，是地下空间绿色照明的重要发展方向。

（二）工作模式

地下停车场光导纤维照明系统并非单一的光传输元件，而是

由“光源-传输-输出-控制”四大模块组成完整技术体系，各模块协同工作，实现光能量高效采集、稳定传输与精准分配。主要包括光源装置、光导纤维束、照明终端三部分。工作方式可分为自然光主导模式、人工光源辅助模式、智能节能模式三类。

1. 自然光主导模式

系统完全依赖自然光作为能量来源，智能控制系统指令自然光采集器启动，聚光透镜、反射镜等光学元件最大化采集太阳光能量；关闭 LED 辅助光源，仅为备用电路供电（确保突发情况下可快速启动）。采集自然光进入光导纤维束进行传输；该纤维束依据传输需求选用对应类型光纤——长距离传输采用石英光纤；中短距离则采用 PMMA 塑料光纤，确保自然光在传输过程中能量损耗最小化。自然光被传输至各照明终端，终端根据区域功能（车位、车道、应急通道）自动匹配出光方式；例如应急通道终端维持约 10lx 的最低照度“待机”状态。

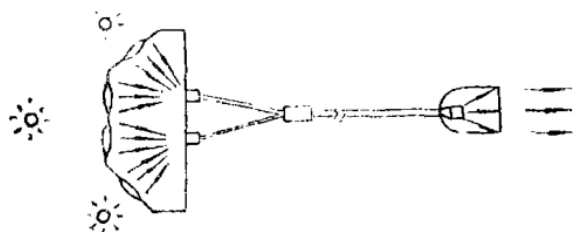


图2 太阳能光导采光实验系统的光路图

2. LED 光源辅助模式

自然光采集器仍保持工作，由于自然光能量不足，智能控制系统会启动 LED 辅助光源，通过“自然光+LED 光”混合方式为系统补充光能量。控制系统首先通过光照度传感器计算自然光的实际贡献值（如自然光可满足系统 30%~50% 的光能量需求），LED 辅助光源输出相应功率光能量（如 LED 阵列的功率从 200W 降至 100~140W），使两者叠加后总光能量满足照明需求^[3]。光导纤维束内的光开关（由控制系统控制的光学切换元件）会根据各区域的照度差异，动态分配自然光与 LED 的比例：例如：靠近

自然光采集器区域（如地下一层靠近采光井的车位）可更多依赖自然光，远离采集器区域（地下二层车道）则增加 LED 光分配比例。

3. 智能节能模式

智能节能核心是“按需分配光能量”，通过动态调整光导纤维束的光能量分配比例与照明终端的出光强度，实现能耗最小化。在实际执行中，控制系统通过人体感应模块实时检测各区域人员活动，通过红外反射式传感器监测车位占用情况（间接反映车流量），两者数据同步传输至 MSP430F5529LP 单片机；对入车流量低于阈值的区域，单片机指令光导纤维束内光开关减少该区域光能量输入（如将其他区域冗余光能量调配至需光区域，自身光能量占比从正常状态下调），以 PWM 技术控制照明终端降低出光亮度，确保亮度维持在满足基础照明需求的合理范围。

智能节能模式具备“预约唤醒”功能：当人体感应模块检测到巡检人员靠近某一低亮度区域，或红外反射式传感器捕捉到车辆向该区域移动（如相邻车位有车辆驶入迹象）时，单片机提前指令该区域的照明终端提升亮度至正常水平，避免因亮度不足导致的安全隐患，确保与光导纤维导光、人工光源（LED）协同的照明稳定性。

二、传感器在地下停车场中的应用以及工作原理

车位检测传感器是地下停车场智能化管理的核心设备，核心功能聚焦于车位状态检测与车辆越界示警，其应用流程清晰且高效：首先，传感器被精准部署在各车位对应区域，以常用的红外传感器为例，它通过“发射红外线—接收反射信号”的工作原理，持续实时监测车位是否有车辆停放——当车位无车时，红外发射装置发出的红外线可顺利抵达接收装置；当有车辆停放时，车身会遮挡红外线，使接收装置接收到的红外线强度发生变化，触发车位状态判断，同步捕捉车辆在车位内的具体位置信息^[3]；随后，传感器将采集到的“有无车辆”“车辆位置”等关键数据转化为电信号，实时传输至系统主控模块——MSP430F5529LP 单片机；单片机接收信号后快速进行数据处理与逻辑分析，核心判断车辆是否完全停放在规定区域内；若检测到车辆存在越界停放情况（如车身超出车位线、位置偏移等），单片机立即生成“触发警报”的控制指令，并将指令发送至执行结构中的电磁式蜂鸣器；蜂鸣器接收到指令后即时发出警报声，提醒车主调整车辆位置，有效提升停车场管理效率，规避因不当停车引发通行阻碍等问题。

三、光导纤维与传感器的协同应用

（一）构建智能照明与环境监测一体化系统

光导纤维照明系统与环境监测传感器进行有机结合，构建

以 MSP430F5529LP 单片机为核心构建，借助多组件协同实现功能：传感器层光敏电阻（采集环境光照强度）、人体感应模块（检测 3 米内人员活动）、红外反射式传感器（监测车位车辆）提供多维度环境数据；执行层基于这些数据，以 PWM 技术控制 LED 灯带动态调节亮度（强光 >500lux 仅用自然光、弱光 100–500lux 时 LED 亮 50%、低光 <100lux 时 LED 全亮），电磁式蜂鸣器则在车辆越界时报警；能源层依托光导纤维（收集传输太阳光实现无电照明，晴天末端光照达 65,000lux）、微型太阳能电池板（为锂离子电池充电）及市政电网保障能源，同时集成自然光导入、光照度调节等技术，形成“传感器监测—单片机处理决策—执行结构调控—能源支撑”闭环，实现智能照明与环境监测一体化运作。

（二）基于光导纤维与传感器的智能停车管理系统

光导纤维与各类传感器的协同应用可进一步构建更高效的智能停车管理系统：一方面，光导纤维作为能源模块核心，白天通过高精度透镜式聚光器、可调节抛物面反光镜收集太阳光，长距离低损耗传输至地下停车场等封闭空间提供无电照明（晴天末端光照可达 65,000lux，多云天气也能保障一定自然光），配合微型太阳能电池板将多余光能储存在锂离子电池中，太阳能不足还能与市政电网协同切换供电，且传输自然光强度经光敏电阻转换为电信号反馈给 MSP430F5529LP 主控模块，主控模块结合人体感应模块（3 米内人员活动检测）与 LED 灯带协同调整照明（强光 >500lux 时仅用自然光关闭 LED，弱光 100–500lux 时以 PWM 技术将 LED 调至 50% 亮度，低光 <100lux 时启动储能让 LED 全亮），并与主控模块的休眠—周期性唤醒机制协同减少能耗；另一方面，光导纤维还与车位检测传感器、车牌识别传感器深度协同，车位检测传感器实时监测车位占用状态，通过光导纤维将信息快速传输至管理中心，管理中心据此生成实时车位分布图并在入口、通道显示屏展示，引导车主找空闲车位^[4]；车辆进入时，车牌识别传感器借光导纤维将车牌信息传至管理系统，系统自动关联车主会员信息、停车费用等；车辆停放中，传感器监测停放位置是否规范，若发现越界等不规范情况，系统通过光导纤维传输控制信号，启动对应区域语音提示设备提醒车主调整^[5]。这种协同模式既实现了照明节能与稳定供电，又整合车位管理、车辆引导、车牌识别功能，显著提升停车场管理效率与服务质量。

四、结语

系统在节能方面表现突出，北纬 30° 地区，年耗电量仅为 8.6kWh/m²，较传统 LED 节能 48.8%，白天可节省 30%–50% 的照明用电，投资回收期约 3.2 年，经济性与节能性兼具；有效提升安全使用体验，光线柔和无眩光，导光纤维不存在高温火灾风险，搭配传感器还可减少交通事故、缩短寻位时间，提高管理效率；适配性强，支持个性化安装，目前已在交通枢纽、社区等场景成功应用，为地下空间技术应用提供可靠参考。相关技术研发

与应用推进过程，一方面从技术与成本双维度发力，通过研发耐高温光纤、优化配套装置，推行国产化替代与节能分成模式以有效降低成本；另一方面注重系统稳定性提升，配置光伏储能系统应对光照不足问题。研发抗潮防尘设备保障运行；智能融合层面，构建数字孪生模型对系统进行优化，积极对接智能城市建设

实现数据共享；着力推进标准统一与协同合作，制定统一行业标准，推动“产学研用”深度协作，拓展应用场景，将相关技术推广至地下商场、地铁等特定空间，全面提升技术实用性与覆盖范围。

参考文献

[1]王聪,何兵,蒋彦.光纤照明技术应用新进展及前景分析[J].城市建设理论研究(电子版),2017,(18):107-109

[2]刘柯,鲍家声.光纤采光照明系统在建筑中的应用[J].南方建筑,2006,(09):91-94.

[3]冯震,魏秀珍,杨双收,等.基于光导纤维的太阳光照明原理与应用[C]//中国照明学会(China Illuminating Engineering Society).2015年中国照明论坛——LED照明产品设计、应用与创新论坛论文集.北京一轻控股有限责任公司;北京首量科技有限公司,2015:137-141.

[4]崔剑.盾构施工中红外线感应防撞门的应用[J].工程机械与维修,2025,(06):20-22.

[5]李蕾.光纤传输日光照明系统优化及实验研究[D].华北电力大学(北京),2019.

协同治理视域下恩施州古树保护与民族文化遗产的主体博弈及制度创新研究

辛贤实, 张力

韩国又石大学, 韩国 全州 565701

DOI:10.61369/ME.2025070025

摘 要 : 为解决恩施州古树保护与民族文化遗产协同治理中的主体利益失衡问题, 本文以演化博弈理论为核心并结合景观园林学与文化遗产保护理论, 识别政府、社区居民、旅游企业、科研机构四大博弈主体, 同时系统梳理各主体的利益诉求与策略选择, 构建三方演化博弈模型并推导复制动态方程与演化稳定策略。研究表明: 恩施州古树与土家族苗族“风水林”信仰、古树祭祀等文化深度绑定, 但协同治理中存在政府监管成本高、居民参与激励不足、旅游企业生态与盈利冲突等困境, 当政府积极监管的综合收益覆盖监管成本、居民主动保护的收益高于消极行为、企业生态优先的长期收益超过短期盈利时, 系统可收敛至稳定状态。在此结果下, 研究指数可以围绕构建“古树—民族文化”融合景观体系、完善活态传承机制和创新多主体协同监管与利益分配制度等措施, 为恩施州古树保护与民族文化遗产的协同发展提供科学路径。

关 键 词 : 协同治理; 古树保护; 民族文化遗产; 演化博弈; 制度创新

From the Perspective of Collaborative Governance: A Study on Subject Game and Institutional Innovation in Ancient Tree Protection and Ethnic Cultural Inheritance in Enshi Prefecture

Xin Xianshi, Zhang Li

Woosuk University, South Korea, Jeonju, Republic of Korea 565701

Abstract : To address the issue of unbalanced interests among subjects in the collaborative governance of ancient tree protection and ethnic cultural inheritance in Enshi Prefecture, this study takes Evolutionary Game Theory as the core, combined with Landscape Architecture and Cultural Heritage Protection Theory. It identifies four game subjects, namely the government, community residents, tourism enterprises, and scientific research institutions, and systematically sorts out the interest demands and strategy choices of each subject. A three-party evolutionary game model is constructed, and replicator dynamics equations and evolutionary stable strategies (ESS) are derived. The results show that ancient trees in Enshi Prefecture are deeply bound to the cultural elements of the Tujia and Miao ethnic groups, such as the belief in "Fengshui forests" and ancient tree worship rituals. However, there are dilemmas in collaborative governance: high government supervision costs, insufficient incentives for residents to participate, and conflicts between ecological protection and profit-making for tourism enterprises. The system can converge to a stable state when three conditions are met: the comprehensive benefits of active government supervision cover supervision costs, the benefits of residents' active protection are higher than those of passive behavior, and the long-term benefits of enterprises prioritizing ecology exceed short-term profits. Based on these results, the study suggests measures including constructing an integrated landscape system of "ancient trees – ethnic culture", improving the living inheritance mechanism, and innovating the multi-subject collaborative supervision and benefit distribution system, so as to provide a scientific path for the coordinated development of ancient tree protection and ethnic cultural inheritance in Enshi Prefecture.

Keywords : collaborative governance; ancient tree protection; ethnic cultural inheritance; evolutionary game; institutional innovation

引言

古树名木作为自然与文化双重遗产的载体，既维系着区域生态系统的稳定性，又承载着少数民族的历史记忆与文化认同。恩施土家族苗族自治州位于湖北省西南部，其独特的中亚热带季风湿润型山地气候（宣恩县海拔500 ~ 1200m区域年均降水量1867mm）孕育了丰富的古树资源，据统计全州共调查发现13700株古树名木，其中一级古树357株、二级1386株、三级11957株，涵盖水杉、银杏、楠木、古楸树等珍稀树种——仅宣恩县便有488株古树名木（涉及39科63属81种），枫香、楠木分别达55株、56株，占比超22%，部分古楸树树龄更是突破600年，形成“古树伴村寨、风水护家园”的独特格局^[1]。

恩施州的古树资源与土家族苗族文化有题目一二三。密切关系。村界处的古树多被视为“风水林”核心，居民通过祭祀、禁忌等习俗维系古树生存，此类文化传统曾为古树保护提供了非正式制度支撑。然而随着城市化扩张与旅游开发，在协同治理中，各类主体冲突逐渐凸显，比如政府部门在生态保护与经济发展间难以平衡、居民因缺乏经济激励可能弱化文化传承意愿、旅游企业过度开发可能破坏古树景观与周边环境、科研机构的技术支持与实际保护需求存在脱节等都会影响古树的保护和民族文化的传承^[2]。

在此背景下，单纯依靠行政监管或社区自发保护已无法应对复杂问题。演化博弈理论因聚焦有限理性主体的策略动态调整，更契合协同治理的现实场景；而景观园林学与文化遗产保护理论的融入，可使制度创新更具实践针对性。本文通过构建演化博弈模型解析主体互动逻辑，最终提出兼顾古树生态保护、民族文化遗产与景观价值提升的创新策略，为恩施州实现“生态-文化-经济”协同发展提供理论参考与实践路径。

一、协同治理主体识别与利益诉求分析

恩施州古树保护与民族文化遗产的协同治理涉及四大核心主体，各主体因角色定位不同，形成差异化的利益诉求与策略倾向，这是博弈产生的根本原因。

一是林业文旅等政府部门。林业部门聚焦维护古树生态功能，在监管成本与生态收益间权衡；文旅部门侧重挖掘古树文化价值，平衡文化开发与风险控制，整体追求“生态-文化-经济”三重效益。二是社区居民。社区居民以土家族苗族为主，兼具文化与经济双重诉求：老年居民受传统信仰影响，主动参与保护；年轻居民文化认同较弱。经济层面，居民参与保护的积极性与收益挂钩，如获得管护补贴或旅游分红的意愿显著提升。三是旅游企业。企业作为资源利用者，其需在盈利目标与生态责任间抉择，生态优先虽增成本但可获得政策支持与品牌提升，盈利优先则面临处罚风险。四是科研机构。科研机构致力于通过古树研究提升成果并推动转化，若研究成果能满足实际需求并获资助，技术支持积极性更高。

二、演化博弈模型构建与分析

基于上述主体识别，选取政府（G）、社区居民（R）、旅游企业（E）作为核心博弈参与方（科研机构因主要提供技术支持，暂纳入政府监管的技术成本范畴），构建三方演化博弈模型，分析各主体策略选择的动态演化过程。

（一）模型假设

参与方假设：政府、居民、企业均为有限理性主体，策略选择通过“模仿-学习-调整”逐步优化，而非一次性最优决策。

（1）策略假设：政府的策略空间为{积极监管（Y），消极监管（1-Y）}，积极监管指投入资金、技术开展古树监测与文化

传承引导，消极监管指仅履行基本巡查职责；居民的策略空间为{主动保护（X），被动破坏（1-X）}，主动保护指参与古树管护与文化遗产，被动破坏指不参与保护甚至存在砍伐、占用古树生长空间的行为；企业的策略空间为{生态优先（Z），盈利优先（1-Z）}，生态优先指投入资金用于古树生态修复与文化真实性维护^[3]，盈利优先指压缩保护投入、过度开发古树资源。

（2）参数假设：设定政府积极监管成本为C_g，消极监管成本为C_g'（C_g>C_g'）；在积极监管下，政府获得生态收益E_g、文化收益C_{g1}，对居民主动保护给予补贴S，对被动破坏罚款F，对企业生态优先给予政策补贴P_e，对盈利优先罚款F_e；居民主动保护成本为C_r（时间、精力投入），获得补贴S、旅游分红D（企业生态优先时产生），被动破坏获得短期收益B（如砍伐枝干收益）但面临罚款F；企业生态优先成本为C_e（生态修复、文化维护投入），获得政策补贴P_e、声誉收益R_e，盈利优先获得超额利润E_e但面临罚款F_e；此外，政府消极监管、居民被动破坏、企业盈利优先时，三方均需承担古树死亡导致的生态文化损失L（L由三方按比例分担，政府承担L_g、居民承担L_r、企业承担L_e）。

（二）支付矩阵构建

根据参数假设，构建政府、居民、企业的三方支付矩阵（表1为核心策略组合的支付情况）：

表1 核心策略组合的支付情况			
策略组合	政府支付	居民支付	企业支付
（积极监管，主动保护，生态优先）	E _g +C _{g1} -C _g -S+P _e	S+D-C _r	P _e +R _e -C _e
（积极监管，主动保护，盈利优先）	E _g +C _{g1} -C _g -S+F _e	S-C _r	E _e -F _e
（积极监管，被动破坏，生态优先）	E _g +C _{g1} -C _g +F+P _e	-F+B-L _r	P _e +R _e -C _e
（积极监管，被动破坏，盈利优先）	E _g +C _{g1} -C _g +F+F _e	-F+B-L _r	E _e -F _e

(消极监管, 主动保护, 生态优先)	$Eg+Cg1-Cg'-S+Pe-Lg$	$S+D-Cr-Lr$	$Pe+Re-Ce-Le$
(消极监管, 主动保护, 盈利优先)	$Eg+Cg1-Cg'-S+Fe-Lg$	$S-Cr-Lr$	$Ee-Fe-Le$
(消极监管, 被动破坏, 生态优先)	$Eg+Cg1-Cg'+F+Pe-Lg$	$-F+B-Lr$	$Pe+Re-Ce-Le$
(消极监管, 被动破坏, 盈利优先)	$Eg+Cg1-Cg'+F+Fe-Lg-Lg$	$-F+B-Lr$	$Ee-Fe-Le-Le$

(三) 复制动态方程与演化稳定策略 (ESS)

1. 政府的复制动态方程

设政府选择“积极监管”的比例为 y ，其期望收益 $Ugy=x-z(Eg+Cg1-Cg-S+Pe)+x(1-z)(Eg+Cg1-Cg-S+Fe)+(1-x)z(Eg+Cg1-Cg+F+Pe)+(1-x)(1-z)(Eg+Cg1-Cg+F+Fe)$ ；选择“消极监管”的期望收益 $Ug(1-y)=xz(Eg+Cg1-Cg'-S+Pe-Lg)+x(1-z)(Eg+Cg1-Cg'-S+Fe-Lg)+(1-x)z(Eg+Cg1-Cg'+F+Pe-Lg)+(1-x)(1-z)(Eg+Cg1-Cg'+F+Fe-2Lg)$ ；平均期望收益 $Ug=yUgy+(1-y)Ug(1-y)$ 。

政府的复制动态方程为：

$$dy/dt=y(Ugy-Ug)=y(1-y)[(Cg'-Cg)+Lg(2-x-z)]$$

演化稳定策略要求 $dy/dt=0$ 且 $d^2y/dt^2<0$ 。当 $(Cg'-Cg)+Lg(2-x-z)>0$ 时， $y=1$ （积极监管）为 ESS；当该式 <0 时， $y=0$ （消极监管）为 ESS；当该式 $=0$ 时，系统处于不稳定状态。这表明：政府是否选择积极监管，取决于“消极监管成本节约 $(Cg'-Cg)$ ”与“生态文化损失规避 $Lg(2-x-z)$ ”的权衡——若居民主动保护、企业生态优先的比例越高（ $x、z$ 越大），政府承担的损失 Lg 越小，积极监管的可能性越高^[4]。

2. 居民的复制动态方程

设居民选择“主动保护”的比例为 x ，其期望收益 $Urx=yz(S+D-Cr)+y(1-z)(S-Cr)+(1-y)z(S+D-Cr-Lr)+(1-y)(1-z)(S-Cr-Lr)$ ；选择“被动破坏”的期望收益 $Ur(1-x)=yz(-F+B-Lr)+y(1-z)(-F+B-Lr)+(1-y)z(-F+B-Lr)+(1-y)(1-z)(-F+B-Lr)$ ；平均期望收益 $Ur=xUrx+(1-x)Ur(1-x)$ 。

居民的复制动态方程为：

$$dx/dt=x(Urx-Ur)=x(1-x)[(S+zD-Cr)-(-F+B-Lr)]$$

当 $(S+zD-Cr)>(-F+B-Lr)$ 时， $x=1$ （主动保护）为 ESS；反之则 $x=0$ （被动破坏）为 ESS。这表明：居民主动保护的意愿，取决于“补贴 + 分红 $(S+zD)$ ”与“罚款 + 短期收益 $(-F+B)$ ”的对比——政府补贴越高、企业生态优先带来的分红越多、破坏罚款越重，居民主动保护的可能性越高^[5]。

3. 企业的复制动态方程

设企业选择“生态优先”的比例为 z ，其期望收益 $Uez=xy(Pe+Re-Ce)+x(1-y)(Pe+Re-Ce-Le)+(1-x)y(Pe+Re-Ce)+(1-x)(1-y)(Pe+Re-Ce-Le)$ ；选择“盈利优先”的期望收益 $Ue(1-z)=xy(Ee-Fe)+x(1-y)(Ee-Fe-Le)+(1-x)y(Ee-Fe)+(1-x)(1-y)(Ee-Fe-2Le)$ ；平均期望收益 $Ue=zUez+(1-z)Ue(1-z)$ 。

企业的复制动态方程为：

$$dz/dt=z(Uez-Ue)=z(1-z)[(Pe+Re-Ce)-(Ee-Fe+Le(1-x))]$$

当 $(Pe+Re-Ce)>(Ee-Fe+Le(1-x))$ 时， $z=1$ （生态优先）为

ESS；反之则 $z=0$ （盈利优先）为 ESS。这表明：企业生态优先的意愿，取决于“政策补贴 + 声誉收益 $(Pe+Re)$ ”与“短期超额利润 + 损失 $Ee-Fe+Le(1-x)$ ”的对比——政府政策补贴越高、声誉收益越大、居民主动保护降低的损失越多，企业生态优先的可能性越高。

(四) 演化稳定结果分析

通过对三方复制动态方程的联立分析，系统存在唯一演化稳定点 $(y=1, x=1, z=1)$ ，即（积极监管，主动保护，生态优先），此时需满足三大条件：

(1) 政府层面： $(Cg'-Cg)+Lg(2-x-z)>0$ ，即积极监管带来的生态文化损失规避，超过消极监管的成本节约；

(2) 居民层面： $S+zD-Cr>-F+B-Lr$ ，即主动保护的综合收益（补贴 + 分红 - 成本），超过被动破坏的收益（短期收益 - 罚款 - 损失）；

(3) 企业层面： $Pe+Re-Ce>Ee-Fe+Le(1-x)$ ，即生态优先的长期收益（补贴 + 声誉 - 成本），超过盈利优先的短期收益（超额利润 - 罚款 - 损失）。

这一结果表明，恩施州古树保护与民族文化遗产的协同治理，需通过制度设计满足上述条件，引导各主体向“积极协同”方向演化，避免陷入“消极监管 - 被动破坏 - 盈利优先”的恶性循环。

三、景观园林与文化遗产视角的制度创新策略

(一) 构建“古树—民族文化”复合型景观体系

以恩施州的古树分布与技术为基础，打造差异化景观：村界以古树为核心，搭配土家族摆手堂、苗族花桥，种植枫香、楠木等伴生树种，设置西兰卡普纹样标识牌，标注“风水林”文化；房前屋后采用木栅栏围合古树，种植当地药用植物，结合《湖北恩施古树名木资源保护利用措施》的滴灌技术保障生长；在道路旁构建“古树 + 生态廊道”，用腐殖土修复土壤压实，设置楸木观景步道，避免游客踩踏根系^[6]。同时建立“社区承包”机制^[7]，政府制定《古树景观维护手册》（融入传统土壤改良技法），居民承包维护责任，达标者获补贴与旅游分红，激发参与动力。

(二) 完善古树文化的活态传承机制

开展“古树文化普查”，由文旅部门联合居民记录古树传说、祭祀习俗，拍摄祭祀仪式视频，建立文化数据库，参照《宣恩县古树名木资源现状及其空间分布分析》的档案标准分类管理；利用3D建模还原古树历史场景，在景观区设置AR设备，游客扫码观看文化动画^[8]。依托土家族舍巴节、苗族赶秋节组织祭祀活动，选拔居民传承人，政府给予培训补贴，传承人担任文化讲解员获固定收入；鼓励居民开发古树主题手工艺品（木雕、织锦），政府搭建电商平台助销，实现文化传承与经济增收联动。

(三) 优化多主体利益协调与监管制度

构建多部门协同监管机制，形成协同监管平台。林业部门监测古树生态（如叶绿素SPAD值），文旅部门监管文化活动，科研机构提供楸树保护技术，共享数据并发布预警^[9,10]；考核达标政

府部门获绩效加分，生态优先企业享税收减免，居民获分红，违规者从重处罚。同时设立专项基金，政府从林业 / 文旅资金划拨基础款，企业按营收 1% 缴纳（生态优先减半），社会捐赠补充，60% 用于居民补贴与分红，20% 用于企业生态补贴与技术研发，20% 用于监管技术升级，保障利益均衡。

四、结语

恩施州古树保护与文化遗产的协同治理需依托各方的资源整合和技术支持，通过演化博弈明确主体利益平衡点。一方面需要做

好景观园林的空间融合和文化遗产的活化传承，结合楸树、枫香等古树特征与“风水林”文化延续文化传承；另一方面需要搭配协同监管和利益分配制度实现生态 - 文化 - 经济共赢。未来则需要针对恩施不同地区的古树分布差异，因地制宜调整策略，让古树成为生态守护者与文化载体，为民族地区可持续发展提供范例。

参考文献

[1] 黄华 . 湖北恩施古树名木资源保护利用措施 [J]. 农村科学实验 , 2024, (15): 43-45.DOI:CNKI:SUN:NCKX.0.2024-15-016.

[2] 何江 . 湖北省恩施土家族苗族自治州古树名木资源与空间分布格局 [D]. 广西大学 , 2024.

[3] 蒋雪玲 . 博弈论视角下的我国非物质文化遗产的旅游开发与保护 [J]. 旅游纵览 (下半月) , 2018, (10): 32-33.

[4] Jalayer Khalilzadeh.Demonstration of exponential random graph models in tourism studies:Is tourism a means of global peace or the bottom line?[J].Annals of Tourism Research,2018(69)31-41.

[5]Dennis A.Kopf and Maxwell K.Hsu.Game Theory, Tourism and Land Ethics[J].Sustainability,2021,13:8515.

[6] 方兴林 . 三方演化博弈视角下徽州非物质文化遗产的传承保护 [J]. 安庆师范大学学报 (社会科学版) , 2020, 39(02): 106-111.

[7] 刘红 , 李亚娟 . 论乡村振兴背景下古村落保护与开发的博弈关系 [J]. 黑龙江粮食 , 2021, (11): 67-69.DOI:CNKI:SUN:HLLK.0.2021-11-029.

[8] 姬硕阳 , 张帅兵 , 周超 . 博弈视角下的历史文化街区保护与开发研究 [J]. 广西城镇建设 , 2021, (07): 29-32.

[9] 莫海连 , 魏春雷 , 孙燕 , 等 . 基于博弈论的广西海岛保护与开发利用研究 [J]. 环境科学与管理 , 2021, 46(11): 162-166.

[10] 洪开荣 , 黄启斌 , 蔡晓晶 . 生态旅游项目开发与环境保护——基于损失规避的博弈分析 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2020, 40(04): 140-148.

智慧城市背景下市政给排水工程的数字化管理研究

张建

广州市市政工程设计研究总院有限公司宜昌分院, 湖北 宜昌 443000

DOI:10.61369/ME.2025070026

摘 要 : 在智慧城市建设狂飙突进的时代赛道上, 市政给排水工程如同城市鲜活跳动的 “生命动脉”, 而数字化管理恰似为其注入智能 “血液” 的关键引擎。从遍布管网的感知节点到云端智慧中枢, 数字化技术正重塑传统管理格局。本文深度挖掘数字化管理的时代刚需, 拆解数据驱动的核心架构, 盘点全球发展现状, 直击技术与管理痛点, 从技术攻坚、机制革新、政策护航等维度精准施策, 为市政给排水工程装上智能 “导航”, 驱动城市基础设施管理迈向高效新征程。

关 键 词 : 智慧城市; 市政给排水工程; 数字化管理

Research on Digital Management of Municipal Water Supply and Drainage Engineering under the Background of Smart Cities

Zhang Jian

Yichang Branch of Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., LTD., Yichang, Hubei 443000

Abstract : In the era of rapid development of smart city construction, municipal water supply and drainage projects are like the vibrant "life arteries" of a city, and digital management is just like the key engine that injects intelligent "blood" into them. From the perception nodes scattered throughout the pipeline network to the cloud-based intelligent hub, digital technology is reshaping the traditional management landscape. This article delves deeply into the era's essential needs for digital management, dissects the core architecture driven by data, reviews the current global development status, directly addresses the pain points in technology and management, and precisely implements policies from dimensions such as technological breakthroughs, mechanism innovations, and policy safeguards. It equips municipal water supply and drainage projects with intelligent "navigation", driving urban infrastructure management towards a new journey of high efficiency.

Keywords : smart city; municipal water supply and drainage engineering; digital management

引言

当 5G、大数据、人工智能等新技术如星火燎原般席卷城市建设领域, 智慧城市已然成为现代城市发展的新航标。市政给排水工程作为城市基础设施的 “核心枢纽”, 其管理效能直接关乎城市 “水命脉” 的安全与稳定。传统管理模式下, 人工巡查的低效率、经验决策的粗放性, 如同桎梏工程发展的 “枷锁”。

一、智慧城市背景下市政给排水工程数字化管理的必要性

(一) 智慧城市建设对市政管理的新要求

智慧城市建设以实现城市精细化、智能化管理为目标, 对市政管理提出了数据共享、业务协同、实时响应的新要求。市政管理各部门需打破信息孤岛, 通过统一的城市管理平台实现数据互通, 构建 “一网统管” 的城市治理体系。在这一背景下, 市政给排水工程管理需深度融入智慧城市生态, 借助物联网、云计算

等技术, 实时采集管网运行数据、设备状态信息, 并与交通、能源、环境监测等系统实现数据共享与联动分析。

(二) 传统市政给排水工程管理的局限性

传统市政给排水工程管理模式依赖人工巡查、纸质台账记录与经验判断, 存在诸多弊端。人工巡查受时间、空间限制, 难以对庞大的管网系统进行全覆盖、高频次监测, 漏检、误检情况频发, 导致管道老化、渗漏等问题无法及时发现与处理。纸质台账记录方式不仅效率低下, 且易出现数据丢失、信息滞后等问题, 不利于数据的长期保存与深度分析。在决策层面, 管理人员基于

历史经验制定调度方案，缺乏对实时数据的科学分析，难以应对突发用水高峰、极端天气等复杂情况，易造成水资源浪费或供应不足。

二、智慧城市背景下市政给排水工程数字化管理的核心内容

（一）数据采集与传输系统的构建

数据采集与传输系统是市政给排水工程数字化管理的根基。在数据采集环节，需在水源地设置水质监测传感器，实时采集水温、pH 值、浊度等指标；在水厂关键工艺节点部署流量、压力传感器，监测制水流程运行参数；在供水管网节点、排水管网关键位置安装智能水表、液位传感器，实时获取水量、水压、水位数据；在污水处理厂各处理单元设置 COD、氨氮等水质传感器，监测污水处理效果。采集的数据通过 5G、光纤、NB-IoT 等通信技术，经边缘计算设备初步处理后，快速、稳定地传输至数据中心。

（二）智能监控与预警系统的应用

智能监控与预警系统借助人工智能与大数据技术，实现对给排水系统运行状态的全方位、智能化监控。通过视频监控与图像识别技术，实时监测水厂、泵站等场所的设备运行情况，自动识别设备异常状态、人员违规操作等行为。利用机器学习算法对传感器采集的海量数据进行实时分析，构建设备运行健康模型、管网泄漏预警模型等，一旦监测数据超出正常阈值或出现异常趋势，系统立即通过短信、APP 推送等方式发出预警信号，并在监控大屏上直观展示异常位置与详细信息。

（三）数字化决策与调度系统的运作

数字化决策与调度系统以大数据分析和智能算法为核心，实现给排水系统的科学决策与精准调度。该系统整合用水需求预测数据、管网拓扑结构数据、设备运行状态数据、气象数据等多源信息，运用优化算法制定最优供水调度方案，合理分配水资源，确保城市各区域供水压力均衡、水量充足。在排水管理方面，结合实时降雨量、河道水位、排水泵站运行参数等数据，智能调控排水泵站启停与排水流量，提前预排腾库，有效应对暴雨等极端天气，降低城市内涝风险。对于污水处理厂，系统根据进水水质、水量变化，自动调整处理工艺参数，如优化曝气时间、污泥回流比等，提高污水处理效率与出水水质，实现节能减排目标。

三、智慧城市背景下市政给排水工程数字化管理的发展现状

（一）国内外数字化管理的应用情况

在国际上，欧美等发达国家较早开展市政给排水工程数字化管理探索，取得显著成效。美国洛杉矶通过构建智能水务管理平台，整合全市给排水系统数据，实现对水资源的精细化调度与管理，有效降低了管网漏损率；新加坡打造的智慧水管理系统，利用物联网与大数据技术，对供水、排水、污水处理进行全流程监

控，提升了城市水资源利用效率与抗灾能力。在国内，北京、上海、深圳等一线城市率先推进数字化管理实践，建立了覆盖全市的给排水数据监测网络与智能调度平台。

（二）数字化管理技术的普及程度

目前，数字化管理技术在市政给排水工程领域的普及程度呈现不均衡态势。在经济发达地区和大型城市，由于资金、技术与人才优势，物联网传感器、大数据分析平台、智能监控系统等数字化技术应用较为广泛，基本实现了重点区域、关键设施的实时监测与智能管理。然而，在中小城市和经济欠发达地区，受资金投入不足、技术人才短缺等因素制约，数字化管理技术应用相对滞后，部分地区仍以传统人工管理模式为主，仅在少数水厂、污水处理厂试点应用简单的自动化设备，距离全面数字化管理仍有较大差距。

（三）典型城市的实践成果与经验

以杭州为例，其构建的智慧水务系统通过部署超过 10 万个智能感知设备，实现了对全市供水管网、排水管网、污水处理厂的实时监测与数据采集，并运用大数据分析技术建立用水预测模型，精准预测用水量变化，优化供水调度方案，使管网漏损率降低至 8% 以下。成都在数字化管理实践中，创新采用“城市大脑 + 水务”模式，将给排水数据与城市交通、气象、应急管理等多数据深度融合，构建了城市水安全智能预警与应急指挥体系，在暴雨等极端天气下，应急响应时间缩短 50% 以上，有效保障了城市排水安全。

四、智慧城市背景下市政给排水工程数字化管理面临的问题

（一）技术层面的数据安全与系统兼容难题

在技术层面，数据安全与系统兼容问题成为市政给排水工程数字化管理的主要障碍。随着物联网设备的广泛部署，大量涉及城市供水安全、居民用水隐私等敏感数据在网络中传输与存储，面临数据泄露、恶意攻击等安全风险。例如，黑客可能通过入侵传感器设备或数据传输网络，篡改管网压力数据，引发供水事故。此外，不同厂商生产的物联网设备、管理系统采用的通信协议、数据格式各不相同，导致各子系统之间难以实现互联互通与数据共享，形成“信息孤岛”。例如，部分城市在建设给排水数字化管理系统时，由于前期缺乏统一规划，不同时期引入的设备和系统无法兼容，增加了系统集成与运维难度，制约了数字化管理效能的发挥。

（二）管理层面的部门协同与人才短缺困境

在管理层面，部门协同不畅与专业人才短缺严重阻碍数字化管理推进。市政给排水工程管理涉及水务、环保、城建等多个部门，各部门职责交叉、利益诉求不同，在数据共享、业务协同方面存在较大阻力。例如，在城市内涝应急处置中，排水部门与气象部门、交通部门之间信息沟通不及时，导致应急响应效率低下。同时，数字化管理需要既懂给排水专业知识，又掌握物联网、大数据、人工智能等信息技术的复合型人才。但目前，相关

专业人才培养体系尚不完善，高校学科设置与企业实际需求脱节，导致市场上此类人才供不应求。现有管理人员普遍缺乏数字化管理理念与技术能力，难以适应数字化管理工作要求，成为制约市政给排水工程数字化转型的重要因素。

（三）标准规范不完善导致的建设与运维问题

当前，市政给排水工程数字化管理缺乏统一、完善的标准规范，给系统建设与运维带来诸多问题。在系统建设阶段，由于缺乏数据采集、传输、存储等方面的统一标准，不同地区、不同项目建设的数字化管理系统在功能、性能、接口等方面存在较大差异，增加了系统整合与升级难度。在运维管理阶段，缺乏设备维护、数据更新、安全防护等方面的规范指引，导致运维工作无章可循，设备故障率高、数据质量参差不齐。

五、智慧城市背景下市政给排水工程数字化管理的发展对策

（一）推动数字化管理发展的技术创新路径

为突破技术瓶颈，需大力推进技术创新。在数据安全领域，采用量子加密、同态加密等先进技术，构建端到端的数据加密体系，确保数据在采集、传输、存储过程中的安全性；运用区块链技术建立去中心化的数据存储与验证机制，防止数据被篡改和伪造。针对系统兼容问题，制定统一的数据接口标准与通信协议，推动行业内设备与系统的标准化建设；开发通用的数据转换与集成平台，实现不同厂商设备和系统之间的数据无缝对接。同时，加强人工智能、数字孪生等技术在给排水领域的研发应用，如利用数字孪生技术构建高精度的城市给排水虚拟模型，实现对物理系统的实时仿真与优化；借助人工智能算法开发更智能的故障诊断与预测模型，提升系统运行可靠性与管理效率。

（二）优化数字化管理的体制机制建设策略

优化体制机制是推进数字化管理的关键举措。建立跨部门协同管理机制，明确水务、环保、城建等部门在数字化管理中的职责与分工，成立专门的智慧城市水务管理协调机构，统筹推进数据共享、业务协同与应急联动。加强人才培养与引进，高校应增设智慧城市、智能水务等相关专业，优化课程设置，培养适应数字化管理需求的复合型人才；企业通过与高校、科研机构合作，开展定向人才培养，并制定优惠政策吸引国内外优秀人才。

（三）促进数字化管理发展的政策支持与保障措施

政府需加强政策支持与保障，为数字化管理营造良好发展环境。制定专项政策法规，明确市政给排水工程数字化管理的发展目标、建设标准与实施路径，引导社会资本参与数字化项目建设。加大财政投入，设立数字化管理专项扶持资金，对数字化技术研发、设备更新、系统建设等给予补贴与奖励。建立数据开放共享机制，规范数据开放范围、流程与安全要求，促进市政给排水数据与其他城市数据的融合应用。同时，加强市场监管，完善数字化管理设备与服务的质量标准和检测体系，规范市场秩序，保障数字化管理项目建设质量与运行安全，推动市政给排水工程数字化管理健康、有序发展。

六、结论

尽管当前面临技术壁垒、管理困境、标准缺失等重重挑战，但通过技术创新突破发展瓶颈，以机制优化凝聚协同合力，借政策保障营造良好生态，定能实现给排水工程从传统管理向智能管理的华丽转身。展望未来，数字化管理将持续赋能市政给排水工程，推动城市水资源管理更加高效、智能、可持续，为智慧城市建设筑牢“水根基”，助力城市在数字化浪潮中绽放新光彩。

参考文献

- [1] 张芳. 市政给排水施工中的非开挖修复技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 10(05): 92-94.
- [2] 李明山, 张帆. 智能化技术在市政给排水工程中的应用研究 [J]. 新城建科技, 2024, 34(03): 34-36.
- [3] 孙伟良, 陈四华, 陈仁武, 等. 低碳时代市政给排水工程施工中节水措施分析 [J]. 低碳世界, 2024, 15(02): 76-78.
- [4] 王亚鹏. 市政给排水设计中节水节能技术标准的应用 [J]. 工程建设与设计, 2024, (04): 73-75.
- [5] 张雪, 宋祥辉. 绿色市政理念下的城市绿色给排水系统建设 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024, (02): 36-38+42.

黄石盘水库工程坝址区软弱夹层分布特征

张全

四川水发勘测设计研究有限公司，四川 成都 600200

DOI:10.61369/ME.2025070029

摘 要： 黄石盘水库工程所处恩阳河，河床多为基岩裸露，河床无强风化岩体。岩体中顺层发育软弱夹层，根据勘探钻孔统计软弱夹层数据，层厚0.3 ~ 0.5m就发育一条软弱夹层。通过钻孔取芯、孔内电视录像、声波测试等资料综合分析，查明软弱夹层空间分布范围、高程、性状、特征等情况。将分布范围大，对坝基抗滑稳定有影响的软弱夹层都绘制成软弱夹层平面分布图。软弱夹层平面分布图在设计进行坝基深层抗滑稳定性计算提供了更为详细、准确的地质依据。设计根据地质提供的软弱夹层参数，在闸室下游布置C20膨胀混凝土齿槽，齿槽宽6 ~ 18m、从左至右埋深12.9m ~ 15.0m，截断底部的软弱夹层Nj2、Nj8。

关 键 词： 软弱夹层特征及其平面分布图；抗滑稳定

Distribution Characteristics of Weak Interlayer in Dam Site Area of Huangshipan Reservoir

Zhang Quan

Sichuan Water Development Investigation, Design & Research Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 600200

Abstract： The Huangshipan Reservoir Project is located in the EnYang River. The riverbed is mostly exposed to bedrock, and there is no strongly weathered rock mass in the riverbed. The weak interlayer is developed in the rock mass. According to the statistical data of the weak interlayer in the exploration borehole, a weak interlayer is developed in the thickness of 0.3 ~ 0.5 m. Through the comprehensive analysis of borehole coring, borehole TV video, acoustic test and other data, the spatial distribution range, elevation, characteristics and characteristics of weak interlayer are found out. The weak interlayers with large distribution range and influence on the anti-sliding stability of dam foundation are drawn into a plane distribution map of weak interlayers. The plane distribution map of weak interlayer provides a more detailed and accurate geological basis for the design of deep anti-sliding stability calculation of dam foundation. According to the parameters of weak interlayer provided by geology, the C20 expansive concrete tooth groove is arranged in the downstream of the gate chamber. The tooth groove width is 6 ~ 18m, and the buried depth is 12.9m ~ 15.0m from left to right. The weak interlayer Nj2 and Nj8 at the bottom are cut off.

Keywords： characteristics of weak interlayer and its plane distribution map; stability against sliding

黄石盘水库为大（2）型防洪控制性水利工程，以防洪为主，兼顾发电、改善下游供水条件^[1]。枢纽工程主要由砼重力坝、电站厂房、鱼道等建筑物组成。水库正常蓄水位372.0m，总库容11497万 m³。最大坝高39.8m。

一、勘察工作概况

本工程勘察阶段共布置勘探钻孔2357.9m/49孔，勘探钻孔采用SDB(单动双管钻具)半合管式取芯钻具，破碎岩体和软弱夹层采取率大于95%；完成28个钻孔全景成像和36个钻孔孔内声波测试。

二、地形地貌

坝址区属丘陵地貌。河床高程340.2 ~ 341.9m。左岸山顶为Ⅲ级阶地平台，地形平坦，山顶高程389.3 ~ 394.3m。右岸山顶董家梁高程约470m，与河床相对高差130m，山坡呈阶梯状，陡坎高12 ~ 35m。

作者简介：张全（1978.11-），女，四川资阳人，高级工程师，本科，主要从事水利水电工程地质勘察工作，408430588@qq.com。

三、地层岩性

坝址区出露地层为白垩系下统苍溪组（K₁c）。根据岩体工程地质特征将坝址区岩体分为 K₁c^① ~ K₁c^⑤五个工区亚层，单数为砂岩，双数为粉砂质泥岩。河床出露岩体为 K₁c^③之弱风化砂岩，无强风化岩体；水工建筑物基础主要置于该层的弱风化砂岩上。

室内试验成果：强风化砂岩饱和抗压强度平均值为 4.3MPa，属极软岩；弱风化砂岩饱和抗压强度平均值为 25.7MPa，为较软岩；新鲜砂岩饱和和新鲜砾岩抗压强度平均值分别为 44.74MPa、34.35MPa，为坚硬岩。工区第一层粉砂质泥岩，新鲜岩体饱和抗压强度平均值为 9.85MPa，为软岩。工区第二层新鲜泥质粉砂岩饱和抗压强度平均值为 17.8MPa，为较软岩。工区第三层新鲜泥质砂岩透镜体饱和抗压强度平均值为 8.20MPa，为软岩；含泥砾砂岩透镜体其新鲜饱和抗压强度平均值为 18.65MPa，为较软岩。

四、地质构造

坝址位于恩阳向斜的 NW 翼，为单斜构造。坝区构造简单，未发现断层构造。根据钻孔资料计算岩层产状为 N53° ~ 68° E/SE ∠ 2° ~ 3°，缓倾下游偏左岸。

五、软弱夹层

（一）软弱夹层类型

本工程勘探钻孔揭示 4 种软弱夹层类型：泥型夹层（Nj）、泥夹岩屑型（Rn）、岩屑夹泥型（Rx）、岩块岩屑型（Rk）。

通过勘探钻孔取芯确定软弱夹层 71 条。其中泥型夹层（Nj）10 条（含局部泥型），占 14.1%；泥夹岩屑型（Rn）夹层 12 条，占 16.9%；岩屑夹泥型（Rx）夹层 21 条，占 29.6%；岩块岩屑型（Rk）夹层 28 条，占 39.4%。软弱夹层主要发育在第二层的粉砂质泥岩和第三层的砂岩中（表 1）。

坝址各工区分层发育的软弱夹层条数及类型简表

表 1

工区层	地层代号	软弱夹层类型及编号				夹层条数
		泥型（Nj）10 条	泥夹岩屑（Rn）12 条	岩屑夹泥（Rx）21	岩块岩屑（Rk）28	总计 71 条
第五层	K ₁ c ^⑤	/	/	/	Rk ^{⑤-1} ~ Rk ^{⑤-2}	2
第四层	K ₁ c ^④	/	/	Rx ^{④-1}	/	1
第三层	K ₁ c ^③	Nj ³ 、Nj ² 、Nj ⁹ 、Nj ¹⁰	Rn ^{③-1} ~ Rn ^{③-3}	Rx ^{③-1} ~ Rx ^{③-12}	Rk ^{③-1} ~ Rk ^{③-10}	27
第二层	K ₁ c ^②	Nj ¹ 、Nj ⁴ 、Nj ⁵ 、Nj ⁶ 、Nj ⁷ 、Nj ⁸	Rn ^{②-1} ~ Rn ^{②-9}	Rx ^{②-1} ~ Rx ^{②-3}	Rk ^{②-1} ~ Rk ^{②-18}	37
第一层	K ₁ c ^①	/	/	Rx ^{①-1} ~ Rx ^{①-5}	/	4

（二）软弱夹层物质组成

1. 泥化夹层（Nj）

发育在粉砂质泥岩或泥质砂岩等软岩与砂岩接触面，其厚 0.03 ~ 0.10m，黏土呈可塑 ~ 软塑状，为软岩挤压后在地下水长期作用下软化泥化的结果。试验成果：黏粒含量 40 ~ 50%，岩屑含量 50 ~ 60%；岩屑为粉砂质泥岩，呈次棱角状，局部可见擦痕、镜面，粒径 1 ~ 5mm。

2. 泥夹岩屑型（Rn）

主要发育在岩层接触面和软岩内部层面，其厚 0.03 ~ 0.07m，为粉砂质泥岩在地下水长期作用下软化泥化的结果。试验成果：黏粒含量为 10.92 ~ 19.72%、呈可塑 ~ 软塑状，岩屑含量 70 ~ 90%；岩屑为粉砂质泥岩，呈次棱角状，局部见擦痕、镜面，粒径 1 ~ 20mm。

3. 岩屑夹泥型（Rx）

主要为砂岩与粉砂质泥岩、泥质粉砂岩中的破碎带，在泥质砂岩层间发育，泥质含量较少，其厚 0.10 ~ 0.20m；岩屑主要为灰色泥岩、紫红色 ~ 棕红色粉砂质泥岩岩屑，呈为次棱角状，可见擦痕、镜面，粒径 2 ~ 50mm，含量约 90%。室内试验成果：黏粒含量为 9.0%，其余为岩屑。

4. 岩块岩屑型（Rk）

以透镜状含泥条带砂岩或破碎粉砂质泥岩为主，泥质含量较少，含泥条带砂岩手握即散。

5. 软岩夹层空间分布特征

为进一步查明软弱夹层、软岩夹层的分布范围及其性状特

征，结合水工建筑物布置，在坝基持力层影响范围内确定了 Nj2 为坝基底部的控制性结构面。根据钻孔取芯揭示 Nj2 在同一个平面上有多个不同软弱夹层类型，其分布范围见图 1。在水工建筑物持力层影响范围内的，有多个钻孔揭示同一条软弱夹层有多种夹层类型组成，其分布范围较大、性状差的软弱夹层如 Nj1、Nj2、Rx③-2 等均做了范围分布图。

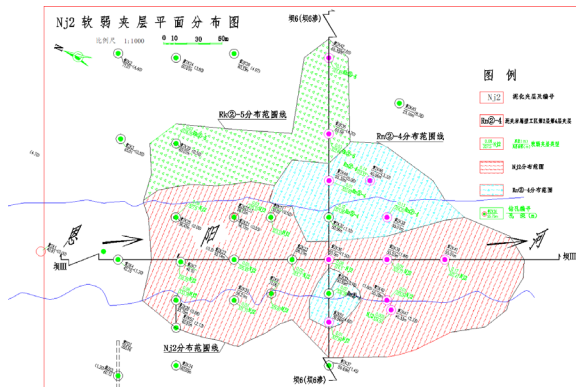


图 1

综合分析所有钻孔资料：坝址区软弱夹层极为发育，层厚 0.3 ~ 0.5m 就发育一条软弱夹层；共统计 180 多条纵横交错的软弱夹层全部在坝区的纵横剖面图上顺接并延伸。在坝轴线（坝 6）钻孔揭示的软弱夹层发育在 K₁c^③ 层厚层砂岩和 K₁c^② 层粉砂质泥岩中。其中 K₁c^③ 层共有 11 条软弱夹层，K₁c^② 层有 21 条软弱夹层。

多个钻孔揭示的软弱夹层有 Nj1、Nj2 和 Rn②-3，钻孔数

为13~24个；其他软弱夹层仅2~8个钻孔有揭示。①Nj1泥化夹层共有18个钻孔揭示，包含Nj、Rn、Rx、Rk等4种类型，在坝轴线附近主要是泥化夹层。②Nj2泥化夹层共有24个钻孔揭示，主要为Nj、Rn、Rk；钻孔黄ZK49、黄ZK32~ZK33、黄KZ38揭示为Rn②-4；黄ZK35揭示为Rk②-5；黄ZK51、黄ZK36、黄ZK39~黄ZK41、黄ZK47等揭示为Nj2；黄ZK37揭示为砂岩和粉砂质泥岩的突变接触面，且接触面岩体完整。③Rn②-3共有13个钻孔揭示，组成类型主要为Rn、Rk，坝轴线附近主要分布Rn。

在软弱夹层平面空间分布图上标注每一条夹层的分布范围、高程、厚度、不同性状特征的夹层具体分布范围等详细信息。为设计进行坝基抗滑稳定计算、建模分析提供较为详细准确的依据。

六、抗滑稳定问题

构成坝基底滑面的结构面主要由软弱结构面、缓倾卸荷裂隙构成^[2]。根据软弱夹层及长大裂隙的分布特征与大坝枢纽建筑物关系，对坝基抗滑稳定相关的浅层滑面、深层控制性软弱结构面主要如下。

①坝基下埋深较浅、空间连续、（部分）泥化的Nj⁹、Nj¹⁰、Nj¹¹、Nj⁸等软弱夹层。发育在建基面高程336.0m以上的软弱夹层主要有：Nj⁹、Rn^{③-5}、Rx^{③-11}等。基础开挖时均已揭示，并全部挖除。

②埋深较深且为控制性软弱夹层Nj²~Rn^{②-4}（为同一条软弱夹层），发育在K_{1c}^④层砂岩和K_{1c}^②层粉砂质泥岩接触部位。

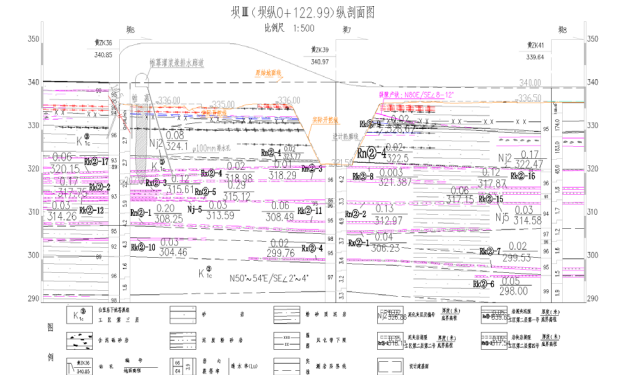


图2

根据地质提供资料岩体物理力学建议值，设计在坝趾处设深齿槽，同时提高坝基岩体的抗剪强度和增加尾岩抗力。闸室下游基础下布置C20膨胀砼齿槽，齿槽宽6~18m，底面高程从右岸到左岸323.5~322.5m，截断底部的Nj₂、Nj₈和表层水平裂隙和卸荷裂隙，同时置换混凝土也清除了坝趾出口范围的切割裂隙。以河床纵断面坝Ⅲ（坝纵0+122.99）上游抗滑齿槽截图，见图2。

软弱夹层在空间上沿层面追踪发育，受岩体的矿物成分、风化程度、地下水等影响大^[3]。根据Nj2在齿槽开挖揭示：该夹层沿着砂岩和粉砂质泥岩接触界面顺层发育、整个接触面波状起伏；夹层主要表现为Nj型，其次为Rn或Rx型，到岸坡则主要表现为清晰的岩体层面突变接触关系，无泥化迹象。因此对于本工程而言，地下水对软弱夹层厚度、性状、特征等影响最大，未见地下水明显出露的部位夹层厚度3~5cm为主，而地下水活动部位夹层厚度则多以8~15cm为主，局部达到20cm以上。

七、结论

本工程施工揭示的软弱夹层特征与前期勘察成果基本吻合。软弱夹层在空间上主要发育在岩体层面，不同岩体接触面，厚度变化较大、性状特征、类型也随之变化；多个钻孔揭示同一条软弱夹层其厚度、类型、延伸范围等不同。开挖揭示Nj2在不同坝段不同类型及特征也证实了同一条软弱夹层其类型不是一成不变的，为多种夹层类型的组合、且厚度不一。在软弱夹层埋深大致一致的情况下，地下水活动强烈的部位，其夹层厚度更厚、性状更差，泥质含量增多等特征。因此，对于本工程而言，软弱夹层埋深大致相当的情况下，地下水活动强烈程度对软弱夹层的厚度、性状、类型影响较大。软弱夹层空间分布图，在空间上标注了软弱夹层的性状、特征，为设计进行坝基深层抗滑稳定性计算提供了准确、详细的地质依据。

参考文献

[1] 杨鹏, 吴晓鹏, 胡秋越. 黄石盘水库坝址区Nj2软弱夹层成因分析[J]. 水科学与工程, 2023, (05): 84-86. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2023.05.25.
[2] 张省身. 东台子水库玄武岩软弱夹层抗剪强度试验研究[J]. 内蒙古水利, 2024, (08): 72-73.
[3] 李锋, 刘海洋, 唐万金. 青峪口水库软弱夹层的分布与工程特性研究[J]. 河南科技, 2025, 52(01): 44-50. DOI: 10.19968/j.cnki.hnkj.1003-5168.2025.01.008.

电力电缆故障诊断研究综述

程子霞, 李子扬, 李弈杰

郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001

DOI:10.61369/ME.2025070031

摘 要 : 电力电缆是城市基础设施建设中必不可少的一环, 是传输电能的重要载体, 它的是否正常运行关系到城市生产生活的安全和稳定, 因此电力电缆线路的故障诊断是一直以来的关键问题。为了保证电力电缆安全可靠地运行, 必须快速、准确地检测出故障。本文简述了电力电缆故障产生的原因并对电力电缆的故障检测以及定位方法进行了梳理, 对比分析了不同类型的电力电缆故障检测以及定位方法, 以此推进电力电缆故障诊断的研究和应用工作。

关 键 词 : 电力电缆; 故障诊断; 故障识别; 故障定位

Review of Research on Fault Diagnosis of Power Cables

Cheng Zixia, Li Ziyang, Li Yijie

School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001

Abstract : Power cables are an indispensable part of urban infrastructure and an important carrier for transmitting electrical energy. Their normal operation is crucial to the safety and stability of urban production and life. Therefore, the fault diagnosis of power cable lines has always been a key issue. To ensure the safe and reliable operation of power cables, it is necessary to detect faults quickly and accurately. This paper briefly describes the causes of power cable faults and sorts out the detection and location methods of power cables. It also compares and analyzes different types of power cable fault detection and location methods to promote the research and application of power cable fault diagnosis.

Keywords : power cable; fault diagnosis; fault identification; fault location

引言

随着我国经济持续发展, 城市化进程不断加快, 电力电缆因其自身所具有的供电可靠性高、不受地面、空间建筑的影响、不受恶劣气候侵害、安全隐蔽耐用等特点, 获得了越来越广泛的应用^[1]。但与架空输电线路相比, 电缆线路故障具有不可观测性: 混合线路多且走线复杂、敷设方式多样、运行情况复杂, 一旦发生故障将直接影响整个电力系统的安全运行, 如果故障发现不及时, 则可能导致火灾、大规模停电等严重事故。因此, 实现故障的快速识别与精准定位, 不仅能够缩短故障处理时间, 更能有效提升供电系统的整体可靠性, 对保障城市电力供应具有重要意义^[2]。

为了确保电力系统安全可靠运行, 如何快速、准确地监测电缆故障, 减少故障修复费用以及停电损失, 成为日益关注的问题。

一、电缆故障特性分析

(一) 电力电缆故障原因

随着电缆数量的增多以及运行时间的延长, 由于电缆绝缘老化特性等因素, 故障发生率大大增加^[3]。电缆故障点的查找与测量是通讯和电力供应畅通的有力保障, 但是因为电缆线路的隐蔽性、个别运行单位的运行资料不完善以及测试设备的局限性, 使电缆故障的查找非常困难。尤其是在狂风、暴雨等恶劣天气中, 给故障的查找、维修带来了很大不便。因此了解电缆故障的原因, 对于减少电缆的损坏, 快速地判定出故障点是十分重要的。

电力电缆发生故障的原因是多种多样的, 常见的几种主要原因主要包括机械损伤、绝缘老化变质、化学腐蚀、设计制作工艺不良等^[4], 表1为各种电力电缆故障类型以及主要原因分析。

表1 电力电缆故障原因、机理及后果

故障原因	发生机理	影响后果
机械损伤	安装时外力挤压 / 拖拽导致绝缘层开裂, 破坏绝缘结构的介损特性, 引发局部电场畸变	绝缘击穿, 造成短路故障
绝缘老化变质	电缆运行中绝缘内部气隙发生局部放电, 产生臭氧、酸类物质, 加速绝缘材料裂解, 形成碳化通道	绝缘电阻下降, 最终导致击穿故障
化学腐蚀	电缆敷设在有酸碱作业的地区, 以及煤气站的苯蒸汽都会腐蚀电缆护套和铠装层, 降低机械强度	护套破损, 水分侵入, 引发接地故障
设计制作工艺不良	设计初期, 人员操作不当、连接不稳定或者采用劣质材料	导致早期故障
电气过载	电缆温度升高, 超过绝缘材料允许上限, 加速绝缘老化	绝缘层熔融, 引发火灾或短路故障

（二）电力电缆故障类型

根据故障电阻与击穿间隙的情况，电缆故障可分为低阻、高阻、开路与闪络性故障。

表2 电力电缆故障类型

低阻接地或短路故障	电缆线路一相导体对地或数相导体对地或数相导体之间的绝缘电阻低于正常阻值较多，电阻值低于10Zc（Zc为电缆线路波阻抗），而导体连续性良好。
高阻接地或短路故障	与低电阻接地或短路故障相似，但区别在于接地或短路的电阻大于10Zc而芯线连接良好。
开路故障	电缆各相导体的绝缘电阻符合规定，但导体的连续性试验证明有一相或数相导体不连续，或虽未断开但工作电压不能传输到终端，或虽然终端有电压但负载能力较差。
闪络故障	低电压时电缆绝缘良好，当电压升高到一定值或在某一较高电压持续一定时间后，绝缘发生瞬时击穿现象。

二、电力电缆故障诊断技术研究现状

目前，国内外电力电缆故障检测技术主要分为两大类：基于传统电气量诊断以及基于机器学习、人工智能对故障进行诊断识别，且都取得了较好的效果。

（一）基于传统电气量的故障诊断

基于传统电气量的电力电缆故障诊断方法是最早、也是使用最为广泛的诊断方法。姚海燕^[9]等人提出了基于多尺度小波判据和时频特征关联的检测与识别方法：先对比不同扰动源引起的电缆过流电流特性，通过多尺度小波变换提取故障电流的高频细节系数、低频近似系数和模极大值；再构建电缆早期故障时频特征向量，利用灰色关联分析计算待测故障电流与标准早期故障电流的关联度以识别早期故障。最后仿真验证，结果显示该方法能有效检测电缆过流暂态过程，对电缆半周波、多周波单相短路早期故障识别正确率高。李根^[6]等人提出基于护层电流特征分析的故障诊断方法：通过建立考虑电缆排列方式、共用接地及小段长度影响的护层电流计算模型，分析正常与故障状态下的电流分布特征；采集交叉互联接地箱的三相护层电流数据，利用离散傅里叶变换形成以电流均值和偏差为核心的故障判据。该方法无需依赖负荷电流测量与理论正常值计算便能有效识别护层典型故障。周正雄^[7]等人提出基于时域序列结合变点检测与改进自适应神经网络的识别方法：先采用非参数化双边累积和算法监测三相电流正负向偏移累积和，确定暂态事件的异常相；再通过改进的自适应线性单元，识别半周波、多周波早期故障。PSCAD/EMTDC仿真表明，该方法对恒阻故障及其他过流扰动有良好区分度；现场在运电缆监测数据验证，其故障识别率高。Lei Wang^[8]等提出基于金属护套接地电流监测的电缆故障诊断方法。他们用含多传感器的综合接地箱，实时采集110kV及以上高压电缆护套接地点的电流、电压数据，经多源融合平台预处理后，结合边缘计算与灰色马尔可夫模型分析，通过设定电流阈实现报警。

（二）基于传统机器学习的电缆故障诊断及识别

近年来，随着电力系统规模不断扩大，电力电缆在电力传输中的应用也更加广泛。然而，传统的故障检测不仅效率低下难以高效判断故障，而且时常伴随着危险。人工智能的蓬勃发展给电力电缆故障诊断提供了智能、安全、高效的方法，具有重要的实践意义。

张育梁^[9]等人提出基于Bagging-异质k近邻的故障诊断方法：先归一化主芯及护层的电流、电压、接地电阻等电气参数，

构建特征矩阵；再基于k近邻算法，用不同k值和距离度量构建异质子学习器，结合Bagging算法提升学习效率。结果显示，该方法识别接地系统直接接地故障的概率达94.35%；Dongyang Wang^[10]提出改进M-training算法结合GGCM-GMRF特征融合的方法，通过局部放电实验平台采集PRPD与PSA光谱数据，融合灰色梯度共生矩阵（GGCM）的15维纹理特征与高斯马尔可夫随机场（GMRF）的10维特征构建向量，再用改进M-training算法诊断。结果显示，模型识别准确率97.8%；Anitha B^[11]等人提出IoT、云平台与机器学习结合的地下电缆故障检测定位方法。他们用传感器采集电缆电压、电流、温度及土壤化学数据，传输至ThingSpeak平台进行去噪、归一化预处理，再分别训练随机森林、DenseNet（全连接提取非线性特征）、迁移学习三类模型。结果显示，迁移学习准确率99%，随机森林97%，DenseNet 93%，可实现实时故障检测，为电力系统可靠性提升提供支持。

（三）基于深度学习的电缆故障诊断研究进展

由于传统机器学习仍旧需要人为选取特征量来进行诊断，难以进行复杂的关系拟合^[12]，随着神经网络的迅速发展，通过多层次的神经网络自动对大量样本进行学习，极大提升了故障诊断及识别的效率和准确性，下表为近年来的相关研究进展。

表3 基于深度学习的电缆故障诊断研究进展

文献	研究进展
文献 [13]	高超等人提出基于1DCNN-BiLSTM的故障诊断方法：先在Simulink搭建10kV配电网仿真模型，提取各种接地故障的电压信号构建样本集；将样本输入模型，由1DCNN提取故障信号局部特征，BiLSTM捕捉时序信息，通过自动提取的特征实现故障诊断。结果显示，该方法仿真中整体准确率达98.37%
文献 [14]	肖旺等人提出基于EEMD融合BAS-CNN的故障诊断方法：采集护层电流去噪后，用EEMD分解选高相关IMF分量，再以BAS优化CNN超参数建模。经验证，该方法诊断准确率达96.95%、MAPE 3.05%，性能优于人工设参的CNN。
文献 [15]	李效明提出结合Light-GBM与CNN-BiLSTM的改进Light-GBM算法：设计Light-GBM三层结构，输入环境与故障信号并经隐藏层处理，再用CNN-BiLSTM实时优化其梯度优化因子。验证显示，该方法故障识别准确率达95.3%、信号采集效率91.3%，均高于同类算法，且绝对误差2.35%、平方误差1.26%，抗扰能力强
文献 [16]	Huan Zhang提出基于卷积神经网络（CNN）的检测方法：先在PSCAD/EMTDC搭建25kV电缆早期故障模型，生成含恒阻故障、励磁涌流等的过流样本；用小波变换提取样本30个时频特征，输入CNN，通过修改损失函数与自适应学习率优化模型以解决过拟合与学习效率问题
文献 [17]	Zhichun Dong等人提出mRMR算法结合混沌粒子群优化CNN的方法：先提取故障电流时频域20个特征，用mRMR筛选出11个高关联特征；再用混沌粒子群算法优化CNN参数，以PSCAD生成的25kV电缆5类故障样本训练模型。结果显示，优化后的CPSO-CNN准确率达98.95%可准确识别电缆故障。
文献 [18]	Chang Liu等提出ICEEMDAN-FE结合IGSA优化CNN-BiGRU的方法：在110kV电缆局部放电实验平台采信号，用ICEEMDAN分解信号并筛选有效IMF分量，结合模糊熵构建特征向量；用IGSA优化CNN-BiGRU超参数。结果显示，模型诊断准确率99.67%，显著优于CNN、GRU等模型，可精准诊断局部放电故障。
文献 [19]	Yangqin Liu提出基于麻雀搜索算法优化BP神经网络（SSA-BP）的电力电缆故障诊断方法。他们以故障诊断准确率为适应度函数，用SSA优化BP的初始权重与阈值，并对比BP、SSA、SSA-BP三类算法。结果显示，SSA-BP性能最优，单相接地故障诊断准确率达98.91%，显著优于传统BP与单独SSA算法。

三、电力电缆故障定位方法研究

电力电缆作为输电的关键介质，不仅要在短时间内诊断故障，更要精确定位故障所在位置，以便及时进行隐患排查、避免中断供电。因此，电力电缆的故障定位对于维持电力系统的安全稳定运行具有至关重要的意义。

王荣亮^[20]等人针对现有电力电缆故障定位精度低、效率差的问题，提出基于行波互相关法（TWC 方法）的故障定位新方法，该方法融合高频信号注入、小波变换去噪与互相关参数优化技术；在电缆一端注入高频检测信号并采集另一端反射信号，对反射信号采用小波变换去噪，再优化互相关窗口长度与滑动步长，通过计算入射波与反射波的互相关系数，依据峰值时间延迟计算故障点距离，以实现电缆故障定位。冯新宇^[21]等人提出基于改进经验小波变换（EWT）结合 Teager 能量算子的故障定位方法，通过改进 EWT 分解信号获取多分辨率分量，再用 TEO 求解 MRA 分量的瞬时能量谱，将能量谱峰值点对应的时间代入行波计算公式确定故障位置。结果显示，该方法较传统 EMD、小波变换定位更准确，在不同电缆长度和故障位置下，定位误差范围为 0.07%–0.64%，平均定位误差达 0.37%，且能有效抵抗噪声干扰。付大赓^[22]提出改进时域反射法结合应答器–脉冲发生器的定位方案。在电缆反射端设 FPGA 应答器，检测到局部放电信号后触发脉冲发生器发射大脉冲替代弱反射脉冲，通过脉冲匹配定位。定位误差在 5m 内，软件对电缆局部放电识别率达 92%，有效解决传统方法缺陷。孙春雨^[23]提出基于高频信号幅频特征的双端定位方法：先搭建电缆仿真与试验平台，分析局放信号衰减特

性，再用与电缆波阻抗相等的电阻等效分支结构，通过计算反射系数反演并剔除反射波形干扰；最后双端检测局放信号，利用信号幅频特征中幅值比与局放源位置的函数关系插值定位。结果显示，该方法定位误差基本在 2% 以下，受波速影响小、稳定性强，有效解决传统方法缺陷。

四、结束语

作为电力和通信行业的重要组成部分，电力电缆的质量和性能直接关乎国家基础设施的安全、稳定与高效运行^[24]，其故障诊断是电力系统的重要研究方向，有助于预测电缆故障，对规避永久性损坏、保障系统稳定运行的重要性愈发突出^[25]。当前故障诊断技术已形成多维度发展脉络：既有基于关键电气参数监测的传统分析路径，也有针对特定场景的专项诊断方案；既涵盖传统机器学习的智能化检测思想，也包含神经网络等优化算法的进阶方法，为不同工况下的电缆故障提供了多元技术支撑。

与此同时，现有技术仍面临亟待突破的瓶颈：部分监测方法易受环境干扰导致判断偏差，部分智能算法存在计算复杂度较高的问题，面对多故障耦合、极端运行环境等复杂场景时，适应性与鲁棒性仍需提升。未来研究可聚焦多技术协同融合、算法轻量化优化、复杂工况适配性增强等方向，进一步推动故障诊断技术向更精准、更高效、更可靠的方向发展。期望本综述能为电力电缆故障诊断技术的理论深化与工程应用提供参考，助力提升电力系统整体运维水平。

参考文献

- [1] 贾宏涛. 基于深度学习的电力电缆故障在线诊断研究 [D]. 西安理工大学, 2023.
- [2] 张兴超, 肖妮, 王陆. 一种电力电缆故障定位系统设计 [J]. 中国科技信息, 2025, (13): 119–122.
- [3] 袁燕岭, 李世松, 董杰, 等. 电力电缆诊断检测技术综述 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(11): 1–7.
- [4] 高青松, 杨靖. 电力电缆故障诊断研究综述 [J]. 贵州电力技术, 2016, 19(05): 54–58.
- [5] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(09): 115–123.
- [6] 李根, 周文俊, 喻莹, 等. 邻近共地高压电缆线路护层电流特征与故障诊断 [J]. 高压电压技术, 2025, 51(02): 698–707.
- [7] 周正雄, 夏向阳, 朱鹏, 等. 高压电缆早期间歇性电弧接地故障识别方法 [J]. 中国电力, 2020, 53(12): 167–176.
- [8] Wang, L., Li, Z., Wang, X., Zhang, P., Zhang, J., & Li, Z. (2023, December). Cable Fault Diagnosis Based on Metal Sheath Grounding Current Monitoring Technology. In 2023 IEEE 6th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AU'EEEE) (pp. 748–752). IEEE.
- [9] 张育梁. 基于护层电流在线监测的高压电缆故障识别方法与系统设计研究 [D]. 长沙理工大学, 2022.
- [10] Wang, D., Zhang, X., Guo, L., Hu, Y., Ma, H., Liu, B., & Zhou, L. (2024). Fault diagnosis for terminal of 10-kV XLPE cable based on the improved m-training algorithm. IEEE Sensors Journal, 24(8), 13142–13152.
- [11] Anitha, B., Mathavan, S., Santhosh, S., & Sowmiya, R. (2025, April). Machine Learning for Fault Detection and Localization in Underground Power Cables: Improving Reliability in Power Systems. In 2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM) (pp. 1516–1521). IEEE.
- [12] 吴川兰, 吴浩, 邱富泓, 等. 电力电缆早期故障诊断技术研究综述 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2025, (01): 16–20+32.
- [13] 高超, 刘泽辉, 曹栋, 等. 基于 1DCNN–BiLSTM 的电力电缆故障诊断 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2023, 44(05): 86–92.
- [14] 肖旰, 周莉, 李敬兆, 等. 基于 EEMD 融合 BAS–CNN 的高压电缆故障诊断 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(04): 160–167.
- [15] 李效明. 结合 Light–GBM 算法和 CNN–BiLSTM 算法的改进电缆故障诊断方法 [J]. 电气自动化, 2025, 47(02): 108–111.
- [16] Zhang, H. (2023, August). Cable Fault Detection and Diagnosis Method Based on Convolutional Neural Network. In 2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA) (pp. 1463–1466). IEEE.
- [17] Dong, Z., Feng, B., Hu, X., Zeng, H., Wu, Y., & Chen, Q. (2023, December). Cable Fault Identification Method Based on mRMR and Optimized Convolutional Neural Network. In 2023 6th International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology (EET) (pp. 99–104). IEEE.
- [18] Liu, C., Qi, Y., Zhang, Y., Xu, Z., Wang, S., Ding, Y., ... & Wu, Y. (2024, September). Diagnosis Method for Partial Discharge Faults in Power Cables Based on Deep Learning. In 2024 The 9th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE) (pp. 91–96). IEEE.
- [19] Liu, Y., Qiu, Y., Chen, Q., Xie, Q., Lin, L., & Zhang, T. (2025, May). Research on Power Cable Fault Diagnosis Based on Sparrow Search Algorithm. In 2025 IEEE 5th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI) (pp. 310–314). IEEE.
- [20] 王荣亮, 李天翼, 王浩楠. 基于行波互相关法的电力电缆故障定位技术研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (03): 96–98.
- [21] 冯新宇, 柴峰岭, 付志伟, 等. 改进 EWT 算法的高压电缆局部放电故障定位方法 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(02): 259–265.
- [22] 付大赓. 高压电缆局部放电源定位技术研究 [D]. 大连交通大学, 2020.
- [23] 孙春雨. 基于高频信号幅频特征的电缆局部放电定位技术研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [24] 隗永飞, 袁志文, 亓松. 我国电力电缆行业发展现状及展望 [J]. 电力与能源, 2025, 46(03): 237–244.
- [25] 唐丹, 吴浩, 蔡源. 电力电缆早期故障诊断研究综述 [J]. 电线电缆, 2023, (06): 1–5.

沼液改性小球藻强化 Cd²⁺ 的生物吸附性能研究

潘志豪, 韩东宇, 刘柏含, 杜彦强, 陈俊华, 刘翠霞
中原工学院 智慧能源与环境学院, 河南 郑州 450007
DOI:10.61369/ME.2025070032

摘 要： 为了探究微藻废水培养对微藻吸附重金属离子的影响, 首先利用傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 对比分析 BG-11 培养基和沼液培养收获的小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 生物组分差异, 然后再开展不同培养组小球藻对 Cd²⁺ 的吸附动力学研究。结果表明, 沼液对小球藻有较理想的培养效果; 两组小球藻均能够为重金属的生物吸附提供关键的官能团; 基于官能团谱峰强度的差异, 在达到吸附平衡时两组小球藻表现出差异的 Cd²⁺ 吸附率, 其中沼液组吸附率为 96 %, BG-11 培养基组吸附率仅为 78 %; 利用动力学模型模拟可知小球藻吸附 Cd²⁺ 过程中影响吸附速率的主要因素是化学吸附。总之沼液培养带来的小球藻生物组分改变, 提高小球藻的 Cd²⁺ 生物吸附能力。

关 键 词： 小球藻; 沼液; 生物吸附; Cd²⁺; 动力学分析

Research on the Biosorption Performance of Cd²⁺ Enhanced by Anaerobic Digestion Effluent Modified *Chlorella Vulgaris*

Pan Zhihao, Han Dongyu, Liu Bohan, Du Yanqiang, Chen Junhua, Liu Cuixia
School of Smart Energy & Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007

Abstract： The effect of the adsorption of heavy metal ions by microalgae which cultivated by wastewater was investigated. Firstly, the growth of *Chlorella vulgaris* in anaerobic digestion effluent was analyzed. Then, the differences in the biological fractions of *Chlorella vulgaris* harvested from BG-11 medium and anaerobic digestion effluent was comparatively analyzed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Finally, adsorption kinetics to Cd²⁺ of *Chlorella vulgaris* from different culture groups was carried out. The results showed that anaerobic digestion effluent had a better effect on the cultivation of *Chlorella vulgaris*. Both groups of *Chlorella vulgaris* were able to provide the key functional groups for the biosorption of heavy metals. Based on the differences in the intensities of the peaks of the functional group spectra, the two groups of *Chlorella vulgaris* also showed different adsorption rates of Cd²⁺. When reaching the equilibrium of adsorption, with 96 % of adsorption rate of anaerobic digestion effluent group, and only 78 % of adsorption rate of the BG-11 medium group. The main factor affecting the adsorption rate of Cd²⁺ by *Chlorella vulgaris* was chemisorption which was shown in the kinetic model simulation. In conclusion, the changes in the biological components of *Chlorella vulgaris* brought about by the anaerobic digestion effluent can improve the Cd²⁺ biosorption capacity.

Keywords： *Chlorella vulgaris*; anaerobic digestion effluent; bio-adsorption; Cd²⁺; kinetic analysis

引言

镉 (Cd) 是一种难以降解、易于积累且毒性强的有害重金属, 同时也是一种公认的致癌、致畸、致突变物质^[1]。联合国环境规划署 (UNEP) 和国际职业卫生重金属委员会将镉列入重点研究的环境污染物, 世界卫生组织 (WHO) 则将其作为优先研究的食品污染物。我国土壤 Cd 污染也受到高度重视, 尤其是农业用田 Cd 污染会导致农作物中的 Cd 含量超标, 带来严重的食品安全问题^[1, 2]。因此, 如何高效降低土壤 Cd 含量逐渐成为研究者广泛关注的问题。

研究表明, 藻类、真菌、酵母菌等多种生物均可用于水体和土壤重金属污染修复^[3]。其中, 微藻借助于其细胞壁富含的多糖、蛋白质和糖醛酸等聚合物成分, 可为金属离子的结合提供羧基、羟基和氨基等官能团, 此外, 细胞壁含有大量负电荷, 能够更好地吸附正电荷的重金属离子^[4]。因此, 微藻在去除或降低水体和土壤中重金属毒性方面成效显著, 使得微藻生物吸附成为一种有前途的重金属生物

作者简介:
潘志豪 (2000-), 男, 河南商丘人, 中原工学院, 硕士研究生, 微藻废水处理及微藻生物技术;
刘翠霞 (1987-), 女, 河南周口人, 中原工学院, 副教授, 博士研究生, 微藻废水处理及微藻生物技术。

修复技术。而生物量充足且成本低的微藻细胞培养方式是促进微藻重金属生物修复技术发展的关键，微藻废水培养则成为极具潜力的解决途径^[5]。

基于畜禽粪污资源化利用的政策引导，其厌氧发酵后产生沼液因含有较高的有机质和营养元素，已证明可用于微藻培养，不仅可以减少沼液直接排放带来的环境污染问题，还能够低成本获取有价值的微藻生物质，实现可观的环境效益和经济效益。然而废水的培养会导致微藻细胞生化组成发生改变^[6]，这些改变可能会导致微藻细胞官能团类型和数量发生变化，进而对后续重金属生物吸附产生影响，但目前还缺乏详细研究。

因此，本文以对废水有较好耐受性的普通小球藻（*Chlorella vulgaris*）作为实验藻种，以畜禽养殖场粪污发酵后产生的沼液为小球藻培养的废水，以 Cd^{2+} 为吸附对象，分析小球藻沼液培养的可行性，比较沼液与 BG-11 培养基培养后小球藻生物组分的变化，探讨沼液改性小球藻对 Cd^{2+} 生物吸附能力的影响，以期为重金属 Cd 的微藻生物修复技术提供理论依据。

一、材料与方法

（一）实验材料

1. 沼液

本研究选用周口某猪场粪污经厌氧发酵得到的沼液，经过沉淀及纱布过滤后置于冰箱（ $<4^{\circ}\text{C}$ ）中冷藏备用。依据国家标准方法获取过滤后沼液的 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、TP 浓度分别为 760、486、70 mg/L，其中较高的 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 浓度并不适宜藻类的生长，所以在开展小球藻沼液培养前，需用去离子水对沼液进行稀释预处理，稀释比例为 50%。

2. 小球藻

本研究选用在微藻废水处理中较为常见的普通小球藻（*Chlorella vulgaris*），购于中科院水生生物研究所淡水藻种库，采用 BG-11 培养基进行富集培养。

（二）实验方法

1. 小球藻扩大培养实验

（1）实验设计

取稀释 50% 后的沼液 300 mL 置于 500 mL 培养瓶中，在瓶中添加 10%（v/v）处于对数生长期的小球藻液，另外设置 BG-11 培养基作为对照组。将培养瓶置于恒温培养箱中，设定培养条件为：光照强度约为 $200\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，光暗比设定为 12 h：12 h，温度 24°C ，摇床转速设定为 80 r/min，静态培养 7 d。培养结束后取藻样测定藻细胞生物组分。

（2）小球藻细胞生物组分分析

将一定量小球藻样置于 50 mL 离心管中高速离心（10000 rpm，10 min），去上清液后，用去离子水将所得藻细胞进行二次悬浮离心，再次弃去上清液后，得到浓缩藻样经超低温冷冻干燥后，通过傅里叶红外光谱仪（FTIR）分析藻细胞生物组分。

2. 小球藻对 Cd^{2+} 的吸附动力学实验

（1）实验设计

分别取沼液和 BG-11 培养基培养小球藻 10 mL，保证两组小球藻细胞光密度均为 0.33，加入 90 mL 30 mg/L Cd^{2+} 溶液于 250 mL 锥形瓶中，每组设置三个平行样，置于恒温摇床中进行吸附反应。分别在 30 min、60 min、120 min、240 min、720 min、1200 min、1440 min 取水样，用 0.22 μm 微孔滤膜过滤、

稀释、酸化后测 Cd^{2+} 含量。

（2）小球藻对 Cd^{2+} 的吸附量

用电感耦合等离子体光谱仪（ICP-OES）测定 Cd^{2+} 浓度，并通过公式（1）计算小球藻对 Cd^{2+} 的吸附量。

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

公式中 C_0 为 Cd^{2+} 初始浓度（mg/L）； C_e 为平衡时刻 Cd 浓度（mg/L）； V 为溶液体积（L）； m 为微藻质量（g）； Q_e 为吸附量（mg/g）。

（3）吸附动力学模型

通过对吸附动力学研究，可以计算出动力学吸附速率。常用动力学吸附模型包括 Pseudo-first-order model（拟一级动力学模型）；Pseudo-second-order model（拟二级动力学模型）和 Intra-particle-diffusion model（内扩散模型）。

拟一级动力学模型：

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2)$$

拟二级动力学模型：

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right)t \quad (3)$$

内扩散模型：

$$\frac{t}{q_t} = a + K t^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

公式中 q_e 、 q_t 为吸附达到平衡时和在 t 时刻的吸附量（mg/g）； K_1 、 K_2 、 K 为吸附速率常数； a 为截距； t 为吸附时间。

二、结果与讨论

（一）沼液培养对小球藻生物组分的影响

FTIR 具有非破坏性和快速表征的优点，研究表明 FTIR 可以用于表征复杂生物系统，如细菌、微藻及高等植物的组成信息^[7]。图 1 中所示的小球藻红外光谱中，不同谱峰代表了不同物质中的不同分子基团，谱峰吸收强度的大小反映了含该分子基团的物质含量的高低。其中，3000~2800 cm^{-1} 为脂质代表区域，

~3400 cm⁻¹、~1650和~1540 cm⁻¹为蛋白质代表区,1200–900 cm⁻¹为碳水化合物代表区,由图1可知,BG-11培养基组(B组)和沼液组(Z组)的谱峰分布较为接近,说明各生物组分的化学成分相同。而根据不同代表区不同波数处吸收强度的大小分析可知,两组在蛋白质的代表区上呈现出谱峰强度的差异,相对于B组,Z组的小球藻生物组分在酰胺I带和酰胺II带表现出较强的谱峰。有报道指出,-COOH、-OH和R-O-R官能团在重金属生物吸附中起决定作用,因此,两组小球藻的红外光谱图均表明它们能够为重金属的生物吸附提供关键的官能团,然而官能团谱峰强度的差异可能会带来官能团数量的差异,进一步影响重金属的吸附效率,这需要开展具体的吸附实验进行验证。

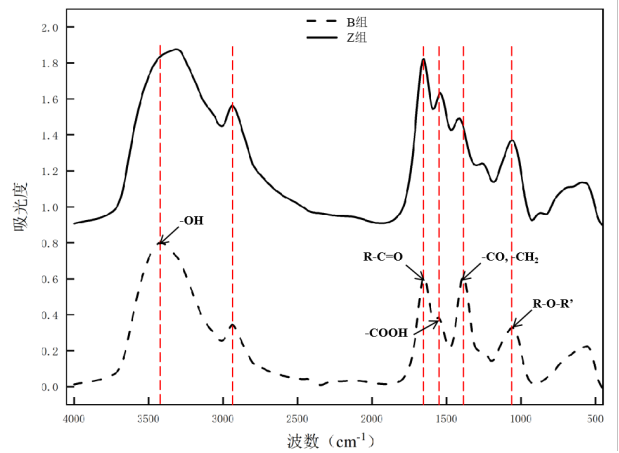


图1 小球藻细胞傅里叶红外光谱图 (FTIR) (B组代表 BG-11 培养基培养获取的小球藻, Z组代表沼液培养获取的小球藻)

(二) 沼液改性对小球藻吸附 Cd²⁺ 动力学分析

沼液组(Z组)和BG-11培养基组(B组)对Cd²⁺的吸附动力学分析如图2所示。结果显示,随着时间的增加,Z组和B组对Cd²⁺的吸附量也随之增加。在Cd²⁺初始浓度均为25±1 mg/L的条件下,Z组和B组均在240 min达到吸附平衡。整个吸附过程可分为初始阶段(<240 min)和平衡阶段(>240 min),在初始阶段,两组吸附速率增速较快,曲线更陡,斜率更大。而在平衡阶段(>240 min)后,两组吸附量和吸附速率增量并没有明显变化,曲线趋于平缓。吸附速率变化主要在初始阶段,这可能是因为小球藻细胞表面存在大量的吸附点位,且溶液中Cd²⁺浓度比细胞内高,导致传质驱动力较大,加快了Cd²⁺的吸附。随着溶液内Cd²⁺含量降低和吸附点位的减少,吸附速率开始逐渐减缓,直到吸附点位趋于饱和,吸附过程达到了吸附平衡。利用拟一级动力学模型、拟二级动力学模型模拟Cd²⁺在Z组和B组的吸附动力学过程,拟合得到的参数以及线性回归系数(R²)如表4所示。R²越接近1时,表明动力学方程拟合效果越好。Z组和B组的实验结果符合上述动力学模型,其中拟二级动力学模型最适合表示Z组和B组对Cd²⁺的吸附动力学,相比于拟一级动力学模型拥有更高的拟合相关系数(R²>0.99)。这表明小球藻吸附Cd²⁺过程中影响吸附速率的主要因素是化学吸附^[8],这与微藻对金属离子的生物吸附主要包括表面络合作用、离子交换和氧化还原作用等化学过程的报道是一致的^[9]。另外利用内扩散模型分析Cd²⁺在藻细胞表

面的扩散机制,结果表明藻细胞吸附Cd²⁺由三个反应阶段控制,本研究选取斜率K值较大的第一阶段来评估内扩散速率^[10]。两组均在第一阶段吸附率增长最大,这和拟一级动力学的结果相同,都是因为初始阶段吸附点位充足,Cd²⁺能被藻细胞充分吸附^[11]。

微藻细胞对重金属的吸附特性源于在细胞壁上分布的多糖(纤维素和海藻酸钠)、脂类和有机蛋白^[12],而根据3.2的结果表明沼液中的某些物质通过氧化应激可以改变小球藻生物组分如多糖、脂质和蛋白质的变化,也可能导致了小球藻细胞壁组成的改变,这种潜在的改变也表现在了两组小球藻对Cd²⁺的吸附量和吸附速率的明显差异。在Cd²⁺初始浓度和时间相同情况下,Z组吸附量明显高于B组吸附量,且在达到吸附平衡时Z组吸附率为96%,B组吸附率仅为78%,同时在三种动力学模型拟合下,Z组的速率常数均高于B组。上述结果说明了沼液改性后的小球藻能够为Cd²⁺的吸附提供更多的吸附点位,提高了小球藻的Cd²⁺吸附效率。

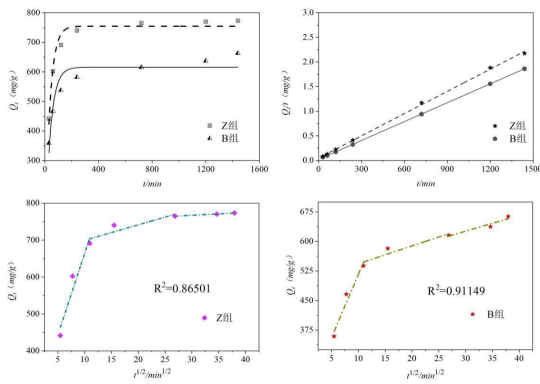


图2 小球藻对Cd²⁺的吸附动力学曲线和内扩散曲线(B组代表BG-11培养基培养获取的小球藻,Z组代表沼液培养获取的小球藻)

表1 小球藻吸附Cd²⁺的动力学模型拟合参数(B组代表BG-11培养基培养获取的小球藻,Z组代表沼液培养获取的小球藻)

模型 Model	拟一级动力学 Pseudo-first-order model		拟二级动力学 Pseudo-second-order model		内扩散 Intra-particle-diffusion model	
	K ₁	R ²	K ₂	R ²	K	R ²
Z组	0.029	0.96621	0.0009	0.99997	44.29165	0.86501
B组	0.025	0.87464	0.0006	0.99886	32.02761	0.91149

三、结论

(1) 沼液组和BG-11培养基组小球藻的红外光谱图均表明它们能够为重金属的生物吸附提供关键的官能团,而两组在蛋白质的代表区上呈现出谱峰强度的差异,沼液组在酰胺I带和酰胺II带表现出较强的谱峰。

(2) 沼液组和BG-11培养基组小球藻吸附Cd²⁺的实验结果均符合动力学模型,且吸附过程中影响吸附速率的主要因素是化学吸附,沼液组小球藻对Cd²⁺吸附量明显高于BG-11培养基组,在达到吸附平衡时沼液组吸附率为96%,BG-11培养基组吸附率仅为78%,说明沼液改性后的小球藻能够为Cd²⁺的吸附提供更多的吸附点位,提高了小球藻的Cd²⁺吸附效率。

综上所述，沼液作为培养基不仅可以实现微藻生物量提高，同时还改变了微藻的生化组成，进而影响微藻对 Cd^{2+} 的吸附效率。下一步将研究长期利用沼液培养小球藻对其生物吸附性能的影响，以及探究沼液改性小球藻细胞壁官能团与重金属相互作用的分子机制，为重金属微藻生物修复技术的实际应用提供理论支持。

参考文献

[1] LU H-L, LI K-W, NKOH J N, et al. Effects of pH variations caused by redox reactions and pH buffering capacity on Cd(II) speciation in paddy soils during submerging/draining alternation[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2022, 234: 113409.

[2]HU Y, CHENG H, TAO S. The Challenges and Solutions for Cadmium-contaminated Rice in China: A Critical Review[J]. Environment International, 2016, 92-93: 515-32.

[3]ELEHINAFE F B, MAMUDU A O, OKEDERE O B, et al. Risk assessment of chromium and cadmium emissions from the consumption of premium motor spirit (PMS) and automotive gas oil (AGO) in Nigeria[J]. Heliyon, 2020, 6(11): e05301.

[4]GARDEA-TORRESDEY J L, BECKER-HAPAK M K, HOSEA J M, et al. Effect of chemical modification of algal carboxyl groups on metal ion binding[J]. Environscitechology, 1990, 24(9): 1372-8.

[5]MARJAKANGAS J M, CHEN C-Y, LAKANIEMI A-M, et al. Simultaneous nutrient removal and lipid production with *Chlorella vulgaris* on sterilized and non-sterilized anaerobically pretreated piggyery wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 103: 177-84.

[6]RASHIDI B, DECHESNE A, RYDAHL M G, et al. *Neochloris oleoabundans* cell walls have an altered composition when cultivated under different growing conditions[J]. Algal Research, 2019, 40: 101482.

[7]JIANG X, ZHANG S, YIN X, et al. Contrasting effects of a novel biochar-microalgae complex on arsenic and mercury removal[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 262: 115144.

[8]KOMY Z R, SHAKER A M, HEGGY S E M, et al. Kinetic study for copper adsorption onto soil minerals in the absence and presence of humic acid[J]. Chemosphere, 2014, 99: 117-24.

[9]LEONG Y K, CHANG J-S. Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms[J]. Bioresource Technology, 2020, 303: 122886.

[10]LUO X, YU L, WANG C, et al. Sorption of vanadium (V) onto natural soil colloids under various solution pH and ionic strength conditions[J]. Chemosphere, 2017, 169: 609-17.

[11]PAVITHRA K G, KUMAR P S, JAIKUMAR V, et al. Microalgae for biofuel production and removal of heavy metals: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18(6): 1905-23.

[12]YEHEYO H A, EALIAS A M, GEORGE G, et al. Bioremediation potential of microalgae for sustainable soil treatment in India: A comprehensive review on heavy metal and pesticide contaminant removal[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 363: 121409.

铝电解天车无线微波传输技术研究与应用

张洋, 练新强*

云南神火铝业有限公司, 云南 文山 663400

DOI:10.61369/ME.2025070001

摘 要 : 针对电解车间强磁干扰下天车监控画面的无线传输难题, 通过对无线微波方案, 成功实现 36 台天车监控画面稳定传输至监控管理平台, 即能够根据时间、天车编号等关键词在数秒内快速定位并回放所需录像片段, 又能够清晰采集天车周围 20 米范围内的声音信息且声音质量清晰可辨, 实时对讲功能语音清晰流畅, 扬声器可覆盖室内 30 米距离, 双向传输延迟时间控制在 150 毫秒以内, 通话稳定无中断, 有效实现了监控管理平台与天车操作人员之间的高效沟通。

关 键 词 : 强磁; 天车; 视频监控; 无线微波

Research and Application of Wireless Microwave Transmission Technology for Aluminum Electrolysis Crane

Zhang Yang, Lian Xinqiang*

Yunnan Shenhua Aluminum Industry Co., Ltd., Wenshan, Yunnan 663400

Abstract : In response to the wireless transmission problem of overhead crane monitoring images under strong magnetic interference in the electrolysis workshop, a wireless microwave solution was successfully used to achieve stable transmission of 36 overhead crane monitoring images to the monitoring management platform. This allows for quick positioning and playback of required video clips within seconds based on keywords such as time and crane number, as well as clear and distinguishable sound information within a 20 meter range around the crane. The real-time intercom function has clear and smooth voice, and the speaker can cover a distance of 30 meters indoors. The bidirectional transmission delay time is controlled within 150 milliseconds, and the communication is stable and uninterrupted, effectively achieving efficient communication between the monitoring management platform and the crane operators.

Keywords : strong magnet; overhead crane; video surveillance; wireless microwave

一、电解车间环境分析与监控需求

(一) 电解车间强磁干扰特性

电解车间中, 电解槽在工作时通过巨大的直流电流, 从而产生高强度的磁场。这些磁场具有复杂的分布规律, 不仅在空间上呈现不均匀性, 而且其强度会随着电解槽的工作状态、电流波动等因素而发生动态变化。强磁环境对金属物体具有明显的吸引力和磁化作用, 同时对电磁波的传播产生严重干扰。在无线传输方面, 强磁干扰会导致信号的衰减加剧、相位偏移、频率漂移以及多径效应增强等问题, 使得常规的无线通信技术难以满足稳定传输的要求。

(二) 天车监控功能要求

(1) 实时监控画面传输: 需要将分布在电解一分厂、二分厂、三分厂和四分厂共 36 台天车上的监控摄像头所拍摄的画面, 以高清晰度、低延迟的方式实时传输至监控管理平台。管理人员能够在平台上实时观察到天车的精确位置、运行姿态、吊运货物

状态以及周围环境状况, 以便及时发现异常并做出相应决策。

(2) 录像存储与回放: 系统应具备对监控画面进行长时间连续录像存储的功能, 存储的录像应能够按照时间、天车编号等关键信息进行快速检索和回放。这对于事故分析、生产过程追溯以及安全审计等工作具有重要意义。

(3) 现场拾音功能: 除了视频监控, 还需采集天车作业现场的声音信息, 如设备运行的机械声音、操作人员的指令声音以及可能出现的异常声响等。通过声音信息与视频画面的结合, 能够更全面地了解现场实际情况, 为故障诊断和安全预警提供更多线索。

(4) 实时对讲通信: 实现监控管理平台与天车操作人员之间的实时双向语音对讲功能^[1]。管理人员可以及时向操作人员传达调度指令、操作规范要求或紧急情况通知, 操作人员也能够向管理人员反馈现场问题或请求协助, 从而提高沟通效率, 保障生产作业的顺利进行。

作者简介: 张洋 (1998-), 男, 云南镇雄人, 本科, 工程师, 主要从事铝电解生产技术管理工作。

通讯作者: 练新强 (1989-), 男, 河南永城人, 本科, 工程师, 主要从事冶炼生产管理和技术研究工作。邮箱: 18839781387@163.com。

二、无线微波方案试验

（一）方案实施

通过对以下四种无线传输方案的试验与分析，对各方案的关键指标进行对比，如下表1所示：

表1 无线传输方案的试验与分析

试验方案	传输稳定性	最大传输距离（米）	流量费用	设备及布线成本
无线网桥	差（强磁干扰下30米左右掉线）	30	无	较高（设备成本和布线成本），布线较高。
5G 传输	较差（强磁干扰下每小时3-5次掉线）	依赖运营商5G网络覆盖	高（每台行车每月数百元）	高（5G模块、卡成本和每月流量费成本）
无线 AP	一般（多个 AP 切换时有中断）	依赖 AP 布置密度（约20-30米）	无	高（大量 AP 设备及布线），布线成本高。
无线微波	好（每月2-3次短暂掉线）	1200	无	较低（基站、设备采购和布线成本）

从对比结果可以看出，无线微波方案在传输稳定性和最大传输距离方面表现出色，能够有效克服电解车间的强磁干扰，满足长距离传输的需求。虽然其设备采购成本相对较高，但综合考虑流量费用和布线成本等因素，从长期来看成本较低。因此，最终选择无线微波方案作为电解车间行车监控画面无线传输的解决方案。

在电解分厂的两端分别安装无线微波基站，在每台行车上安装无线微波设备。通过专业频谱分析仪对车间内的微波频段进行扫描，寻找受强磁干扰相对较小的频段。然后对无线微波设备进行参数设置，调整发射功率、频率等参数，以适应电解车间的环境^[2]。

（二）数据采集与问题分析

在多次调整微波频段和设备参数后，取得了较好的传输效果^[3]。通过对传输信号强度、传输速率、掉线率等数据的监测，发现无线微波方案在电解车间强磁环境下能够实现较为稳定的传输。在行车运行过程中，掉线率极低，平均每月仅有1-2次短暂掉线情况，且能够迅速恢复连接。传输距离能够满足整个车间1200米的覆盖要求，信号强度在车间内大部分区域保持稳定。在成本方面，虽然无线微波基站和设备的初期单台采购成本相对较高，但由于其无需大量的流量费用和复杂的布线成本，从长期运行和维护的角度来看，总成本相对较低。

三、无线微波方案的设计与实现

（一）方案原理与架构

无线微波传输方案利用微波频段的电磁波进行数据传输，在电解分厂的两端分别安装无线微波基站，作为信号的发射和接收中心。在每台天车上安装无线微波设备，通过调整微波设备的发

射和接收参数，使其工作在适合电解车间强磁环境的特定微波频段。天车摄像头拍摄的监控画面首先通过无线微波链路传输至车间两端的基站，基站再通过有线网络将数据传输至监控管理平台。

（二）微波频段选择与优化

（1）电磁环境检测与分析

使用专业的频谱分析仪对电解车间内的电磁环境进行全面、细致的检测。分析强磁干扰源的频率分布范围、强度变化规律以及不同频段的信号质量情况，绘制出详细的电磁频谱图。通过对电磁频谱图的研究，确定车间内相对受干扰较小、信号传播较为稳定的微波频段范围作为备选频段。

（2）频段调整与性能测试

在确定的备选频段范围内，对天车上的无线微波设备和基站的微波频段进行逐步调整和优化。每次调整频段后，对监控画面的传输质量进行全面测试，包括信号强度、信噪比、误码率、画面清晰度、延迟时间等关键指标。通过大量的试验和数据分析，最终确定了能够在电解车间强磁干扰环境下实现稳定、高效传输的最佳微波频段。

（三）无线微波设备安装与调试

在天车上选择合适的位置安装无线微波设备^[4]，确保设备安装牢固、稳定，并能够获得良好的信号接收和发射条件。在设备安装完成后，对每台天车的微波设备进行校准和调试，使其与基站之间的信号传输达到最佳状态。调试过程中，重点关注信号的对准精度、强度匹配以及抗干扰能力等方面，通过反复调整设备参数，确保在天车运行过程中监控画面能够稳定、流畅地传输。

四、系统测试与性能评估

（一）传输稳定性

经过大量的测试数据统计分析，无线微波传输方案在电解车间强磁干扰环境下表现出出色的传输稳定性。在天车^[5]全区域运行过程中，监控画面的掉线率极低，平均每月掉线次数不超过3次，且掉线后能够在极短时间内（平均小于5秒）自动重连恢复传输。在强磁干扰环境动态变化过程中，系统能够自动调整微波频段和传输参数，保持相对稳定的传输质量，确保管理人员能够实时、连续地观察到天车运行状态。

（二）画面质量

监控画面的清晰度达到高清标准（1920×1080 像素），色彩还原度高，画面流畅，帧率稳定在25fps以上。无论是在车间明亮区域还是相对较暗的角落，都能够清晰地显示天车的细节操作以及作业现场的环境信息，为管理人员提供了准确、直观的视觉监控依据。

（三）功能性能

录像存储功能正常稳定，能够按照设定的存储策略进行长时间连续存储，存储容量满足至少30天的监控数据存储需求。存储的录像文件格式通用，可通过多种视频播放软件进行播放，且检索速度快，能够根据时间、天车编号等关键词在数秒内快速定位

并回放所需录像片段。现场拾音功能灵敏，能够清晰采集天车周围20米范围内的声音信息，声音质量清晰可辨，无明显杂音干扰。实时对讲功能语音清晰流畅，扬声器可覆盖室内30米距离，双向传输延迟时间控制在150 毫秒以内，通话稳定无中断，有效实现了监控管理平台与天车操作人员之间的高效沟通。

五、 结语

通过精心设计无线微波传输系统的架构、优化微波频段选

择、精确安装和调试无线微波设备以及成功实现与监控管理平台的集成与功能开发，提高无线微波传输系统在极端强磁干扰环境下的性能和可靠性。

无线微波传输监控系统实现了36台天车监控画面的稳定、高效无线传输，并具备完善的实时查看、录像存储、现场拾音和实时对讲等功能，为电解车间的智能化管理和安全生产提供了强有力的技术支撑。

参考文献

[1] 杜泽新. 乌江公司视频监控系统建设及在集中管控中的应用 [J]. 红水河, 2021, 40(01): 110–113.
[2] 常慧雅. 认知无线网络中分布式功率控制算法研究 [D]. 西安市: 西安电子科技大学, 2014.
[3] 秦伟. 基于广播电视微波数字化设备的技术探讨 [J]. 通信电源技术, 2020, 37(11): 98–100.
[4] 陈国栋. 微波定位和 AI 视觉识别技术在炼钢物流跟踪项目中的应用 [J]. 中国计量, 2024(03): 146–149.
[5] 马佳, 陈忠良, 李东波, 钱强. 铜冶炼企业原料库智能天车的功能需求及关键技术探析 [J]. 世界有色金属, 2024(08): 33–35.

基于遗传算法的 SLP 在工厂设施布局中的应用

程晓伟

四川电子机械职业技术学院, 四川 绵阳 621023

DOI:10.61369/ME.2025070002

摘 要 : 在如今这个完全市场化的经营环境中,在竞争日益加剧时代背景下,降低成本就是大多数企业能做到的最快获得竞争力的手段。许多企业如果不能提高自身的竞争力将很难在冲击下生存下去,企业转型升级既有活下去的无奈更是时代重压下的必然选择。本文针对传统设施布局方法依赖人工经验、难以兼顾物流成本与非物流关系的局限性,提出将遗传算法(GA)与系统布置设计(SLP)相结合的混合优化框架。基于此分析了遗传算法的 SLP 在工厂设施布局中的应用。

关 键 词 : 遗传算法; SLP; 工厂设施布局; 应用

Application of SLP Based on Genetic Algorithm in Factory Layout

Cheng Xiaowei

Sichuan Electronic Machinery Vocational and Technical College, Mianyang, Sichuan 621023

Abstract : In today's fully market-oriented business environment,under the background of increasing competition,reducing costs is the fastest way for most enterprises to gain competitiveness.Many enterprises will find it difficult to survive under the impact if they can't improve their competitiveness.The transformation and upgrading of enterprises is an inevitable choice under the pressure of the times.In this paper,a hybrid optimization framework combining genetic algorithm(GA)and systematic layout planning(SLP)is proposed to overcome the limitations of traditional facility layout methods that rely on manual experience and are difficult to take into account the relationship between logistics cost and non-logistics.Based on this,the application of genetic algorithm SLP in the layout of factory facilities is analyzed.

Keywords : genetic algorithm; SLP; factory facility layout; application

遗传算法、SLP 两种方法的互补性为现代智能布局优化提供了理论基础:SLP 的定性分析能力可弥补 GA 缺乏领域知识的不足,而 GA 的全局搜索优势则能突破 SLP 在复杂约束下方案组合爆炸的瓶颈。这种协同效应在后续的混合框架构建中体现为关系矩阵引导的遗传变异策略,以及适应度函数驱动的 SLP 关系修正机制^[1]。

一、重要性分析

1. 技术层面的突破性价值。解决传统 SLP 的量化瓶颈,传统系统布置设计(SLP)依赖人工经验划分物流等级和非物流关系,存在主观性强、难以量化优化的缺陷。遗传算法(GA)通过编码-适应度评估-选择交叉变异的迭代机制,将 SLP 中的定性分析转化为多目标数学模型。例如,某制造企业采用 SLP-GA 双目标模型,在最小化物流成本(量化搬运距离)与最大化协作效率(量化非物流关系)间取得平衡,最终布局方案使物料搬运量降低。动态适应复杂约束条件,工厂布局需同时满足设备尺寸、通道宽度、安全间距等硬约束,传统 SLP 难以动态调整。GA 通过惩罚函数将约束条件融入适应度评估,实现不等面积作业单位的自动优化。如某车间布局案例中,GA 在满足长宽比差异的前提下,使综合接近程度评分提升。

2. 行业应用的实践效益。制造业的降本增效,离散制造:航空导管生产线通过 SLP-GA 优化后,总物流量显著减少,同时满

足多品种小批量生产的柔性需求。

流程工业:矿井工业广场利用 MATLAB-GA 工具箱求解作业单位坐标,解决 SLP 无法处理的不规则地形问题。中小企业的快速落地,如金属制品厂通过 SLP-GA 结合,仅用 3 周生成 3 套备选方案,较传统方法缩短 60% 周期,且方案可验证性更强。

3. 战略层面的深远意义。支撑制造强国战略,“中国制造 2025”强调精益生产,SLP-GA 的数字化工具(如 Plant Simulation 集成)可直接减少 10%-30% 的隐性成本。推动工业软件自主化,国内研究者已开发基于 ASP.NET 的 Web 布局平台,将 GA 算法封装为模块化工具,降低企业技术应用门槛。绿色制造的关键环节,优化布局减少无效搬运,如某配送中心能耗下降 12%,符合双碳目标要求。

二、技术融合的必要性

1. 解决传统 SLP 方法的局限性。传统系统布置设计(SLP)

依赖人工经验与定性分析,存在迭代过程繁琐、结果易受主观影响、难以处理多约束优化问题等缺陷。遗传算法(GA)通过模拟自然选择机制,为SLP提供了全局搜索能力,可高效处理多目标(如物流成本最小化、协作效率最大化)的复杂布局问题。例如,导管生产线通过SLP-GA结合,总物流量降低^[2]。

2.提升布局优化的精确性与效率。多目标协同优化:SLP-GA通过惩罚函数将非物流关系(如安全、协作)转化为量化目标,与物流成本共同构成适应度函数,实现双目标优化。动态适应性:针对车间布局的动态调整(如设备增减),GA可快速调整种群参数生成新方案,而传统SLP需重新人工迭代。

3.技术融合的智能化趋势.当前研究已开发集成化工具(如Python/Plant Simulation),将SLP分析、GA求解与仿真验证结合,推动工厂布局从经验驱动向数据驱动转型。

三、遗传算法的 SLP 在工厂设施布局核心应用场景

1.多目标协同优化。(1)多目标协同优化的实现机制,遗传算法(GA)与系统布置设计(SLP)结合,通过量化物流成本(如搬运距离、设备间距)与非物流关系(如协作效率、安全规范),构建多目标适应度函数。例如,在航空导管生产线优化中,SLP-GA将物流量降低29.6%的同时,确保关键设备间的协作效率提升。(2)关键优化目标,物流成本最小化:通过从至表法分析物料流动路径,GA优化设施位置以减少搬运距离和交叉物流。非物流关系最大化:将维修间、工具室等辅助设施与生产区的密切度纳入适应度函数,避免传统SLP中主观评分偏差。(3)技术优势,动态权重调整:GA可自适应调整物流与非物流目标的权重,适应不同行业需求(如电子厂以非物流为主,汽车厂以物流为主)。约束处理能力:通过惩罚函数硬性约束设施尺寸、安全间距等条件,确保方案可行性。(4)应用案例,矿井工业广场布局:SLP分析作业单位关系后,GA通过MATLAB工具箱求解坐标,实现物流与安全协同优化。智能工厂物流协同:结合数字孪生技术,SLP-GA优化多层级物流路径,使订单处理时间缩短^[3]。

2.动态布局调整。(1)动态布局调整的实现机制,遗传算法(GA)通过实时调整种群参数(如变异率、交叉率)快速响应设施变更需求,而传统SLP需人工重新分析作业单位关系。(2)典型应用场景,设备增减:当新增生产线或淘汰旧设备时,GA基于SLP生成的初始关系表,重新计算设施位置,避免全盘重设计。工艺变更:如某企业因产品升级调整工艺流程,SLP-GA结合数学模型(如二次指派模型)快速生成新布局,物流效率提升显著。(3)技术优势,快速收敛:GA的并行搜索能力可在数分钟内生成可行方案,而传统SLP需数小时人工迭代。约束自适应:通过惩罚函数动态处理安全间距、面积限制等硬约束,确保新布局合规。(4)案例验证,智能工厂动态优化:某电子厂通过SLP-GA实现产线动态重组,订单处理时间缩短2,同时减少设备搬迁成本。混合算法增强:结合蚁群算法(ACO)的SLP-GA在动态场景中收敛速度提升,适用于高频调整的柔性生产线。

3.复杂约束处理。(1)复杂约束的类型与处理机制,遗传算法(GA)与系统布置设计(SLP)结合时,需处理设施尺寸、安全间距、通道宽度等硬约束,以及工艺流、人机协作等软约束。通过编码方式(如二维坐标编码或序列编码)和适应度函数中的惩罚项,确保方案满足约束条件。例如,在车间布局中,设备间距需符合安全规范,GA通过动态调整变异率避免生成无效解。

(2)技术实现方法,惩罚函数法:将约束条件转化为适应度函数的惩罚项,如设施重叠时大幅降低适应度值。约束优先编码:在初始种群生成阶段即排除明显违反约束的个体,减少无效计算。混合算法增强:结合蚁群算法(ACO)处理动态约束(如临时设备增减),提升局部搜索能力。(3)应用案例,工业广场布局:通过SLP分析作业单位关系后,GA处理设备尺寸与安全间距约束,生成合规布局方案。电子厂车间优化:针对防静电要求,GA优化设备间距与通道宽度,同时满足物流效率与安全标准。

4.跨行业普适性分析。(1)典型行业应用场景,离散制造业(如汽车、机械):以物流成本最小化为核心目标,GA优化设备位置以减少搬运距离,同时满足工艺流约束。流程工业(如化工、食品):需处理设备尺寸、安全间距等硬约束,SLP-GA通过惩罚函数确保布局合规性。电子制造业:非物流关系(如防静电、人机协作)权重更高,GA动态调整适应度函数以优化协作效率。(3)技术普适性支撑,动态权重调整:GA可自适应调整物流与非物流目标的权重,例如汽车厂以物流为主,电子厂以非物流为主。混合算法增强:结合蚁群算法(ACO)处理动态约束(如临时设备增减),提升跨行业适应性。

5.智能化工具集成应用。(1)智能化工具集成的技术框架,遗传算法(GA)与系统布置设计(SLP)的智能化集成,需结合数字孪生、仿真软件(如Plant Simulation)和AI优化工具,形成“数据驱动-仿真验证-动态优化”的闭环系统。例如,航空导管生产线通过SLP-GA优化后,总物流量降低29.6%,其核心在于将SLP的定性分析与GA的定量优化嵌入仿真平台,实现布局方案的动态验证。(2)关键工具与功能模块,数字孪生平台:实时映射物理车间状态,支持布局方案的虚拟调试与性能预测。AI优化引擎:集成贝叶斯优化、强化学习等算法,提升GA的搜索效率(如超参数自动调优)。协同仿真系统:通过Plant Simulation等工具模拟物流路径,验证GA生成方案的可行性。

6.混合算法增强应用。(1)混合算法增强的核心价值,遗传算法(GA)与系统布置设计(SLP)的结合通过引入混合算法,显著提升了工厂设施布局优化的效率和精度。混合算法通过整合不同优化方法的优势,能够:解决传统GA在局部最优解问题上的局限性,增强SLP在定量分析方面的不足,提高复杂约束条件下的布局优化能力。(2)典型混合算法增强方案,GA与模拟退火(SA)混合,应用场景:处理离散型布局问题,优势:SA的局部搜索能力可有效跳出GA的局部最优,案例:某汽车零部件厂布局优化中,混合算法使物流成本降低18%。GA与蚁群算法(ACO)混合,应用场景:动态物流路径优化,优势:ACO的分布式搜索特性可优化设备间物料流动,案例:电子装配车间布局中,混合算法减少物料搬运距离23%。GA与神经网络(NN)混合,应用场景:非

物流关系量化,优势:NN可学习并预测设备间的协作效率,案例:航空制造车间布局中,混合算法提升协作效率15%。(3)混合算法增强的关键技术,动态适应度函数设计,根据布局阶段自动调整物流/非物流权重,引入惩罚函数处理硬约束(如安全间距)。并行计算架构,利用GPU加速GA种群进化,分布式计算处理大规模布局问题。实时反馈机制,通过IoT设备采集实际运行数据,动态调整算法参数^[4]。

四、遗传算法的SLP在工厂设施布局应用关键实现步骤

1.数据准备与作业单位划分。设施参数定义:明确设备尺寸、物流关系(搬运量、成本)、非物流关系(协作频率)等数据。作业单位划分:根据工艺流程(如下料区、弯型区等)划分功能区域,形成SLP分析的基础单元。

2.SLP定性分析与关系量化。物流与非物流分析:通过物流强度等级(如A-E级)和关系密级(如1-5级)量化作业单位间的相互关系。综合关系表生成:将物流与非物流关系加权合并,形成综合关系表,确定作业单位间的相对位置优先级。

3.遗传算法模型构建。编码与初始种群:以设施坐标或布局序列为基因,随机生成初始种群。适应度函数设计:以总物流

量最小化(或搬运成本最低)为目标,结合约束条件(如安全间距)计算适应度。遗传操作:通过选择(轮盘赌)、交叉(单点/多点)、变异(坐标扰动)生成新种群。

4.仿真验证与优化。Plant Simulation建模:将GA生成的布局方案导入仿真软件,模拟物料流动与设备协作效率。动态调整:根据仿真结果(如物流路径冲突)反馈修正GA参数(如交叉率、变异率)。

5.方案评估与实施。多目标评价:结合定量指标(物流成本、生产效率)和定性指标(操作便利性)选择最优方案。数字孪生验证:通过数字孪生平台实时映射物理车间,验证布局方案的可行性。

6.实施与持续优化.IoT数据反馈:通过传感器采集实际运行数据,持续优化布局模型。云端协同计算:利用分布式计算处理大规模布局问题,支持多车间协同优化^[5]。

综上所述,本研究通过整合遗传算法与系统布置设计的优势,构建了兼具理论严谨性与工程实用性的混合优化框架。该框架通过SLP的定性分析能力与GA的定量优化特性协同,有效解决了传统工厂布局中物流成本与非物流关系难以兼顾的核心问题。该方法不仅能显著降低物料搬运距离,同时可提升作业单元间的协作效率。未来研究可进一步探索多目标权重自适应调整机制,以应对动态生产环境下的布局优化需求。

参考文献

[1] 马建. 浅析工业工程发展现状和未来发展趋势 [J]. 中国设备工程, 2020(20): 237-238.
[2] 林小. 企业生产运作管理的浅析与探讨 [J]. 全国流通经济, 2021(21): 56-58.
[3] 胡爽. 基于物流优化的 SLP 在车间设施布局的应用研究 [J]. 物流工程与管理, 2022, 38(01): 73-76.
[4] 李成. 基于改进 SLP 的生产车间设施布局优化及仿真研究 [J]. 内燃机与配件, 2019(01): 189-191.
[5] 陈群. 基于 SLP 法的配送中心平面布局规划与设计 [J]. 物流科技, 2020.05.014.

基于 Android 系统的无人机航拍技术优化

雷静

新疆轻工职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2025070010

摘 要 : 无人机航拍技术具有不受地理条件限制、操作便捷等优势特点, 随着技术的持续更新升级, 逐渐在地理测绘、影视制作等领域得到了广泛应用。但由于无人机自身特性, 在一些特殊环境下如何实现高质量、低延迟的拍摄, 成为技术发展坚的主要方向。Android 系统具有开放的生态以及强大的多媒体处理能力, 与无人机航拍技术深度融合, 能够有效提高复杂场景图像处理帧率, 减小数据传输延迟。文章围绕基于 Android 系统的无人机航拍技术优化展开论述, 分析具体的技术优化要点, 并总结技术实现方案, 以期为无人机航拍技术的实用化改进提供参考。

关 键 词 : 无人机航拍技术; Android 系统; 数据传输; 图像质量

Optimization of UAV Aerial Photography Technology Based on Android System

Lei Jing

Xinjiang Light Industry Technical College, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract : UAV aerial photography technology offers advantages such as being unrestricted by geographical conditions and ease of operation. With continuous technological advancements, it has gradually found widespread applications in fields such as geographic surveying and filmmaking. However, due to the inherent characteristics of UAVs, achieving high-quality, low-latency shooting in specific environments has become a primary focus for technological development. The Android system, with its open ecosystem and powerful multimedia processing capabilities, when deeply integrated with UAV aerial photography technology, can effectively enhance the frame rate of image processing in complex scenarios and reduce data transmission delays. This article discusses the optimization of UAV aerial photography technology based on the Android system, analyzes specific technical optimization points, and summarizes technical implementation solutions, aiming to provide references for the practical improvement of UAV aerial photography technology.

Keywords : UAV aerial photography technology; Android system; data transmission; image quality

无人机航拍技术不断推陈出新, 从初期单一、模糊的航拍图像, 逐渐发展到稳定、高清的视频图像, 成为推动众多行业发展的重要力量。操作系统作为无人机的核心所在, 直接关系到无人机的运行稳定, 而 Android 系统可提供强大的生态支持, 逐渐成为无人机开发的首选, 能够提供强大的数据处理、远程控制和数据交互等功能。但随着应用场景的逐步拓展, 无人机航拍质量要求与日俱增, 基于 Android 系统的无人机航拍技术同样暴露出一系列不足, 如何进一步优化改进, 提升航拍质量, 已然成为一项热点课题内容。

一、Android 系统与无人机航拍技术概述

(一) 概念解析

Android 系统是 Google 公司开发的移动操作系统, 主要基于 Linux 内核实现, 由于系统的开源性, 使其广泛应用在平板电脑、智能手机、智能手表等领域。Android 系统应用框架较为完整, 开发者主要采用 Kotlin、Java 等编程语言开发不同类型的应用程序。Android 系统支持深度定制硬件驱动和多任务处理功能, 适配多种无人机硬件平台, 使用户获得更为高效、便捷的操作体验; Android 系统接口丰富, 提供传感器管理、Camera2 API、多媒体

编解码等接口, 支持无人机航拍功能深度定制开发; Android 系统兼容 TensorFlow Lite、OpenCV 等第三方资源库^[1]。

无人机航拍技术则是在无人机上搭载拍摄设备, 能够实时采集空中影像数据, 主要功能如下: ①数据采集: 采用红外传感器、高分辨率摄像头等装置采集图像数据。②数据传输: 基于 4G/5G 以及 Wi-Fi 等网络实现数据低延迟传输。③智能分析: 提供自动障碍物识别、追踪以及避障等功能。

(二) 应用优势

基于 Android 系统的无人机航拍系统, 相较于传统 PC 端控制或是遥控器控制方式而言, 优势主要表现在以下几点:

(1) 成本低、操作便捷。依托现有 Android 系统优化无人机航拍技术,代替专用硬件平台,可发挥 Android 系统普及率高的优势,降低无人机航拍系统整体部署成本,而且轻量化的设计可以更好地适应野外复杂环境^[2]。

(2) 高效的处理性能。依托 Android 系统,可为硬件加速提供支持,MediaCodec 支持 H.264 硬编解码,CPU 的负载大幅度降低。同时,基于 Android 系统的 RenderScript 支持多线程优化,大幅度提高采集图像数据的处理效率。

(3) 生态扩展丰富、灵活。Android 系统可集成 AI 框架,根据需要集成扩展场景识别、自动构图等智能化航拍功能,并支持阿里云、AWS 等云平台介入,航拍数据的云端存储^[3]。

(4) 实时交互。依托 Android 系统与用户进行实时交互,通过开发简化、人性化的操作界面,用户可触屏操作,并通过手势交互精简无人机飞行控制流程;优化图像传输技术,降低图像传输延迟,优化后达到 100ms,从而实现无人机飞行过程实时监控。

二、基于 Android 系统的无人机航拍技术优化要点

(一) 图像质量优化

无人机航拍图像质量容易受到光照变化或是抖动等因素影响,导致图像色彩失真、画面模糊。硬件适配方面,Android 系统硬件支持无人机配备高分辨率的摄像头,采用 Camera2 API 高级控制,配备 PIS/EIS 硬件级图像稳定技术,能够减少拍摄过程中的画面抖动、模糊问题,在复杂光线条件仍然可捕捉更多细节^[4]。Android 系统精准调控摄像头各项参数,开发专门的应用程序,操作者可在应用程序中手动调节 ISO、快门速度以及白平衡等参数,从而适应不同拍摄环境。如强光环境下,降低 ISO 值减少噪点,而在弱光环境下延长快门时间,可大幅度提高镜头进光量。基于 Image Reader 精准捕捉多帧原始图像数据,经由 OpenCV 生成动态动态范围较高的 HDR 图像。

图像处理算法方面,Android 系统拥有较为丰富的图像处理库,能够为图像处理算法应用提供支持。基于 OpenCV 对航拍图像去噪处理,经由中值滤波、高斯滤波等算法,对画面中的噪声充分消除,提高画面洁净度;依据直方图均衡化算法,使航拍图像对比度大幅度增强,呈现丰富的亮部层次、暗部细节。如运用 Renderscript 编写 GPU 着色器,实现画面非局部均值降噪和边缘增强,低光照条件下基于 GLES30 实时去噪,提高 PSNR15% 左右。智能编码压缩环节,运用 MediaCodes 硬编 H.265,对比传统的 H.264 可减少带宽资源占用,并通过动态码率控制,结合网络往返时延动态自适应码率,如一旦延迟达到 100ms,系统自动启动降码率程序^[5]。另外,针对航拍中的畸变图像,依据 Android 系统针对性开发畸变校正模块,收集相关畸变参数建立模型实时校正,为航拍画面几何参数的合理性提供坚实保障。另外,Android 系统经过长期的更新升级,现阶段已经支持多核处理器以及 GPU 加速能力,实现海量的航拍数据高效、精准处理,在支持航拍系统稳定运行同时,提高航拍视频和图像的流畅性。

(二) 飞行稳定性优化

无人机飞行过程中,容易 GPS 信号偏移、风扰等因素影响,导致无人机飞行轨迹发生抖动。为了保障无人机飞行稳定性,保障航拍质量,基于 Android 系统可从环境感知与避障、飞行控制算法优化等方面进行优化。无人机航拍系统配备的传感器融合校正,融合加速度计和陀螺仪的设备与无人机飞控数据集成,基于卡尔曼滤波预测无人机后续的飞行姿态,操作人员可运用 Android 系统陀螺仪辅助调整无人机的偏航角,提高无人机飞行轨迹精度。为无人机外部接入高精度 GPS 模块,经由 USB-OTG 实现无人机飞行定位数据实时传输。精简设计 MAVLink 协议,去除调试信息等不必要的字段,尽可能缩小指令帧长度,缩小控制指令的传输延迟^[6]。为了保障通信安全、稳定,实行 Wi-Fi 与 4G/5G 链路热备份模式,依据网络通信情况,Android 系统可自动切换网络传输通道,保障通信数据传输质量。抗风扰方面配备 PID 控制器,基于 C++ 语言编写低延迟的控制算法,并集成到系统的 NDK 层,增强无人机的抗风扰性能以及悬停稳定性。无人机航拍系统应配备视觉辅助定位功能,有机整合 OpenCV 和摄像头,即便 GPS 定位失效,仍然可采集地面特征点确定空间定位,保证无人机的悬停精度和稳定性。

Android 系统集成红外传感器、超声波传感器等采集数据,同步传输到 Android 系统,依据融合算法智能分析和处理传感器数据,建立环境感知三维模型。无人机飞行过程中识别到周围存在障碍物,系统可自动发送避障指令,调整无人机的飞行轨迹。无人机穿越树林时,基于无人机上配备的视觉传感器捕捉林木轮廓,快速计算出无人机安全飞行路线,并自动执行,在避障同时保证无人机飞行稳定^[7]。

(三) 操控界面优化

操控界面设计是否合理,很大程度上影响用户操作效率和体验。因此,基于 Android 系统优化无人机航拍系统操作界面,遵循简洁直观原则优化界面布局,主界面优先展示系统的核心功能,具体包括操作区、显示区和快捷功能区几个板块。飞行状态显示区域,能够实时展现无人机飞行速度、高度、GPS 信号强度以及无人机电量等信息,或是自动以悬浮窗,以数字和图表等形式实时、可视化呈现。例如:

► 高度: 79.2m ► 速度: 4.8m/s ► 卫星: 15/32
► 电池: 52% (29min) ► 图传延迟: 78ms

操作区为用户滑动控制或虚拟摇杆操控,并提供自定义控制灵敏度参数,适应不同用户的无人机操控习惯,该功能对于新手较为友好。

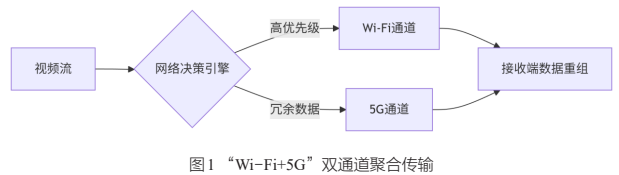
快捷功能区包括一键起飞/返航、录像和拍照等功能,并配合大尺寸图标、文字加以解释说明,便于用户理解各项功能,快速调用各项功能。同时,基于 Jetpack Compose 声明式 UI,适应智能平板、智能收集等不同操作终端。特殊情况下,为用户提供分屏操作模式,左侧展示无人机拍摄视频流,右侧则展示飞行区域地图以及无人机各项参数,相较于全屏展示信息更加全面^[8]。

系统交互逻辑方面,发挥 Android 系统触控特性,用户可采用手势或多点触控操作。用户双手缩放手势,即可调整摄像头焦

距,单指滑动控制摄像头旋转,调整摄像头角度,如果长按某按钮即可快速弹出详细菜单,操作更为便捷。操作界面配备提示功能,用户如果忽视无人机电量尝试远距离飞行,系统即可自动化发出提醒信息,并建议充电或是短距离飞行^[9]。

（四）数据传输优化

无人机航拍系统的协议层优化方面,采用自适应传输协议,系统依据飞行需要动态切换 RTP/UDP、QUIC/TCP,基于 Android 系统实时监控通信质量,如果发现带宽不足,或是带宽抖动,即可自动切换协议^[10]。开发者基于 Android 系统开发自定义传输协议,结合无人机航拍系统短小的控制指令、连续视频帧等特点,减少带宽资源,提高数据传输效率和质量。无人机航拍系统可采用“Wi-Fi+5G”双通道聚合传输方案,基于 Android 系统的 MultipathTCP 进行绑定,保障数据信息安全稳定传输。如图 1。



三、基于 Android 系统的无人机航拍技术的实现方案

（一）系统架构设计

基于 Android 系统的无人机航拍系统架构设计,按照硬件层、服务层、引擎层以及应用交互层进行划分。其中硬件层主要包括无人机端和 Android 端,无人机端包括飞控主板、传感器、摄像头模组以及通信模块,后者包括硬件编解码功能的 GPU、麦克风/光感/陀螺仪等传感器;系统服务层采用 MAVLink 协议栈、双通道粘合;引擎层包括图像处理引擎、传输决策引擎以及飞行控制引擎;应用交互层包括语音控制模块、导航界面以及应急机制(紧急情况下,双指长按强制悬停功能)。

为了保障无人机航拍系统运行安全和稳定,应建立相配套的

性能保障机制,如表 1。

表 1 性能保障机制		
挑战	措施	Android 功能
实施保障	NDK 层实时控制循环	检测 ANR
兼容多设备	分层抽象接口	统一硬件访问
内存抖动	共享内存	跨进程传递
断网恢复	本地指令缓存	持久任务

（二）关键技术

基于 Android 系统的无人机航拍技术实现方案中,集合了多项核心技术,主要技术如下:

（1）智能飞行控制技术。发挥 Android 强大的运算能力,建立无人机动力学模型,实时采集无人机飞行数据,预测未来无人机的飞行轨迹和状态,提前生成优化控制指令,减少多因素干扰,保障无人机稳定飞行。面向不同航拍场景,针对性开发自适应飞行模式,锁定目标物体后,无人机能够自动调整飞行速度和状态,保证目标始终处于航拍画面中心位置。

（2）图像实时处理技术。基于 Android 系统 GPU 加速能力,运用图像实时拼接技术,按照匹配算法将拍摄的图像拼接为全景图,并自动消除重叠区域或畸变。同时,基于深度学习目标检测算法,自持无人机设备实施跟踪行人、车辆等运动目标,在防抖技术支持下提取视频帧运动矢量,针对性修正和补偿视频帧,消除噪点和抖动,提高画面质量。

（3）可靠通信技术。Android 系统配备无线通信模块,能够实时监控通信质量,检测到信号衰减或受外部信道干扰等情况,自动切换高质量通信频段,提高通信质量。

四、结论

综上所述,基于 Android 系统无人机航拍技术优化,主要从图像质量优化、飞行稳定性优化、操控界面优化以及数据传输优化几方面展开,致力于提高无人机航拍质量、稳定性,减少外部干扰,为各行业提供优质、可靠的航拍服务。

参考文献

[1] 刘超,石培鑫,钟程,等.基于大数据的无人机航拍小目标检测技术[J].信息技术与信息化,2025,(06):139-143.
[2] 钟帅,王丽萍.无人机航拍图像目标检测技术研究综述[J].激光与光电子学进展,2025,62(10):71-89.
[3] 吴一全,童康.基于深度学习的无人机航拍图像小目标检测研究进展[J].航空学报,2025,46(03):181-207.
[4] 陈清秋,于凤鸣,赵学文,等.无人机航拍技术在测绘工程测量中的应用[J].居业,2024,(07):61-63.
[5] 曾亚琳.基于深度学习的无人机航拍图像目标检测技术研究[D].山东交通学院,2024.
[6] 郝龙飞.基于深度学习的无人机航拍红外和可见光图像配准技术研究[D].中北大学,2024.
[7] 季春红.无人机航拍的新技术、新理念、新表达[J].中国记者,2023,(03):14-17.
[8] 吴昌松,彭业萍,曹广忠,等.面向三维重建的无人机航拍路径规划技术研究综述[J].测绘通报,2022,(08):98-103+122.
[9] 蒋田.基于无人机航拍图像的目标检测与定位[D].东南大学,2022.
[10] 张岩.基于无人机航拍技术的地面施工设备质量远程控制系统设计[J].计算机测量与控制,2019,27(08):80-84.

微波射频接收机低噪声前端电路工程实现方案优化

耿同贺, 姜兆国

中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ME.2025070012

摘 要 : 为了实现前端模块产业化, 应对性能与成本进行平衡, 关键在于工艺选择, 结合产品定位进行科学调整。设计复用通过构建标准单元库, 封装 LNA 等模块为 IP 核, 使重复设计的周期得到有效缩短。整合供应链应通过共享晶圆服务对光罩费用进行分摊, 采用系统级封装技术来减少组装工序。为了缩短单片时间, 测试流程可采用自动化并行测试, 以此提升产能利用率。在提升良率方面, 需结合工艺监控与数据反馈, 对金属层线宽等设计规则进行调整, 使良率从 85% 提至 95%, 借助规模效应使单片成本降低, 以此满足消费电子市场低成本需求。

关 键 词 : 微波射频接收机; 低噪声前端电路; 工程实现方案; 优化

Optimization of Engineering Implementation Plan for Low-Noise Front-End Circuit of Microwave RF Receiver

Geng Tonghe, Jiang Zhaoguo

The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract : To achieve industrialization of the front-end module, a balance must be struck between performance and cost, with the key lying in process selection and scientific adjustments based on product positioning. Design reuse, achieved by constructing a standard cell library and encapsulating modules such as LNAs as IP cores, effectively shortens the cycle of repetitive designs. Supply chain integration should involve sharing wafer services to split mask costs and adopting system-in-package technology to reduce assembly steps. To shorten the time per chip, an automated parallel testing process can be implemented in the testing flow to enhance capacity utilization. To improve yield, adjustments to design rules such as metal layer line widths should be made based on process monitoring and data feedback, raising the yield from 85% to 95%. Leveraging economies of scale reduces the cost per chip, meeting the low-cost demands of the consumer electronics market.

Keywords : microwave RF receiver; low-noise front-end circuit; engineering implementation plan; optimization

引言

通信系统对前端模块的小型化与高集成度需求进一步推动了产业化发展, 不过成本压力对技术落地产生了制约。为了推动产业化路径, 应从工艺选择着手, 40nm 工艺的成本优势显著, 不过要对性能损失进行平衡。通过建立标准单元库实现设计复用, 将常用模块封装为 IP 核, 缩短重复设计的时间。供应链整合方面则通过共享晶圆服务实现光罩费用的分摊, 组装工序的减少则可通过系统级封装技术来实现, 测试流程通过自动化并行测试来缩短单片时间, 以此提升产能利用率。良率提升应将工艺监控与数据反馈进行结合, 科学调整设计规则, 最终通过规模效应降低单片成本, 由此实现整体方案的科学优化。

一、理论框架与系统级优化

通信系统信号的接收质量是由微波射频接收机前端电路的性能所决定的, 但低噪声设计则成为核心难题, 该领域应对能量损耗、噪声抑制和信号增益这三者的平衡问题进行解决, 这三大指

标具有明显矛盾, 因为噪声系数降低会导致功耗增加或牺牲增益, 而线性度提升又会导致噪声变得更糟。因此, 在系统级优化过程中, 其关键是构建相应的噪声预算分配模型, 对级联电路的噪声系数进行计算后, 进一步确定每个模块的性能边界。比如低噪声放大器应对最小的噪声系数进行优先保证, 而混频器则要兼

作者简介:

耿同贺 (1989-), 男, 汉族, 河北沧州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 宽带微波组件领域;

姜兆国 (1985-), 男, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 复杂微波组件领域。

顾线性度和动态范围。在具体工程实践中，设计人员常遇到各种非理想因素。比如，热应力分布不均、电磁耦合效应，还有工艺制程偏差。这些因素会带来额外的噪声源，让系统整体性能变差。为了应对这些问题，得用多物理场耦合分析方法，来优化电路布局 and 材料选择。传统优化方法只关注单一性能指标，很难满足实际工程中需要的动态平衡。所以，现在的设计策略更喜欢用自适应匹配网络，实时调整输入阻抗，或者加入噪声抵消技术，有效降低级联系统的整体噪声水平。此外，还需要重视系统架构创新，力求结合零中频架构与超外差架构的优势，这样既可对信号处理流程进行简化，又能保证其选择性，这样便可使整体电路的复杂度和噪声累积效应得以降低。总而言之，系统级设计的核心在于将工程经验与理论模型进行相互结合，确保打造的方案能够在硅片上高效实现的基础上，又能满足噪声性能要求，该过程需对实际工艺限制与理论推导进行同时考虑，这样设计出的电路才能满足工程要求。

二、关键模块工程实现

（一）低噪声放大器（LNA）优化设计

对于微波射频接收机前端来说，其核心模块便是低噪声放大器，该模块性能对整个系统的灵敏度有着直接影响，其优化关键便是对功耗、增益与噪声系数进行相互平衡。以往的共源共栅结构需要对源极电感参数进行调整，以此降低噪声系数，不过需要对增益稳定性进行兼顾。例如对源极电感值进行一定程度的增大时，会使噪声抑制效果变得更好，但电感过大会导致寄生电阻的引入，从而造成增益下降。此外，设计偏置电路也是至关重要的，晶体管的工作性能会受到温度变化的直接影响，因此需要通过互补型电流源组合方案，使偏置电压能够在不同温度环境中保持稳定，进而防止噪声性能恶化。除此之外，还要高度重视工艺适配性，相同电路结构在不同工艺节点下可能表现出差异，比如，0.18微米工艺和28纳米工艺，在寄生参数分布上差别很大。为了保证目标频段里的噪声系数降到最低，得仿真调整元件尺寸。优化输入匹配网络时，要充分考虑电磁耦合效应。过去只用纯电阻匹配，容易带来额外噪声。所以，得用电磁耦合带通滤波器和LNA一起设计，来降低级联系统的总噪声。还能抑制带外干扰信号，实现阻抗匹配。实际工程中，版图布局也会影响结果。寄生电容和电感值，会因金属走线的长度和宽度变化而改变，电路性能也会受影响。这时，就得合理规划接地过孔位置和电源线走向，减少电磁干扰，提高电路稳定性。通过上述方法，经过最终优化的LNA便可实现功耗、增益与噪声系数的平衡，例如在2.4GHz频段实现噪声系数低于1.5dB，同时增益达到15dB以上，功耗控制在10毫安以内，由此满足现代通信系统对低噪声前端的高要求。

（二）混频器噪声抑制与线性度提升

要想实现频率转换，射频接收机中的混频器便是关键模块之一，该模块性能对信号接收质量有着直接影响，由于被动式混频器有着低功耗的应用优势，因此被广泛采用，不过跨导级和开关

级的非理想特性却会使线性度降低，而且会产生额外噪声。跨导级作为信号输入的第一级，一旦非线性失真，便会造成谐波干扰，为了提升线性度，以往的设计中都是通过增加偏置电流来实现的，不过这样会导致功耗效率受到影响。因此在对跨导级线性度进行优化时需要引入导数叠加技术，通过对偏置电压与晶体管尺寸进行调整，确保不同工作点的非线性效应能够相互抵消，进而在保证低功耗的同时，使三阶交调截断点得到提升。同样重要的是开关级的负载阻抗匹配，由于工艺偏差会影响到固定阻抗的设计，进而造成噪声系数恶化，因此需要引入动态匹配策略，也就是对输入信号强度进行实时监测，然后对负载值进行调整，这样既可使引入的热噪声得到抑制，而且也能避免因阻抗失配引起的信号反射。另一个优化关键点是本振（LO）功率的控制，如果LO功率过高，会使开关级的相位噪声加剧，而LO功率过低则会降低混频效率，因此需要采用自适应调节算法，依据接收信号来对LO驱动强度进行动态调整，这样既使在信号较弱的场景，也能通过调整LO功率来增强混频灵敏度，信号较强的场景下则可通过降低LO功率来减少噪声叠加。除此之外，如果开关级的时钟抖动，也会使额外的相位噪声被引入，这时便要时钟树布局进行优化，增加缓冲级，降低时钟信号的上升/下降抖动时间差异，进而使混频过程的时域稳定性得到提升。在具体工程中，还需对电源线和信号线的走线间距、接地过孔的分布密度进行仿真优化，防止串扰导致的噪声耦合。通过上述方法，便可使混频器在动态范围、噪声系数与线性度之间取得平衡。

（三）集成化前端模块电磁兼容设计

在集成化前端模块设计中，其关键是电磁兼容设计，这也是微波射频电路工程实现的关键所在，并且对信号完整性与系统稳定性有着直接影响。应优先考虑接地过孔阵列的布局优化，回流路径的阻抗特性会因金属过孔的密度和位置发生显著改变，如果过孔间距过大，便会造成高频信号在接地层发生谐振，额外噪声也会被引入。因此，过孔排列需通过3D电磁仿真进行指导。比如，在电源线和信号线交叉的地方，可以加接地过孔。用法拉第笼效应，来抑制电磁耦合干扰。另外，还要隔离电源噪声。设计片上滤波电容阵列时，得兼顾面积效率和滤波效果。以前的单一电容值方案，容易在某些频率下出现谐振峰。为了拓宽噪声抑制带宽，可以用不同容量电容并联的组合策略。比如，把10pF和100pF电容并联起来，既能覆盖低频电源波动，也能抑制高频开关噪声。做多物理场协同仿真时，要整合电磁、热、电等因素。传统单独仿真没重视热应力对电路性能的影响，所以要用工具链集成方式，实时修正温度变化带来的材料参数偏移。比如，在高频电路仿真工具里完成电路设计后，把布局文件导入三维电磁场仿真工具，做电磁分析。再把结果反馈到多物理场协同仿真平台，进行热应力仿真，最后闭环优化。在具体工程中，应重视不同模块之间产生的信号串扰，相邻的功能块，如LNA与混频器的布局间距应利用仿真进行确定，如果相邻功能块过近，可能造成本振信号泄漏到输入端，而过远的话，又可能因走线长度的增加，导致寄生参数被引入，因此需要在面积和性能之间找到平衡点。最后，还要高度重视封装技术的影响，虽然模块体积可通过

晶圆级封装（WLP）进行减小，但封装材料的介电常数差异会导致信号的传输特性发生改变，因此需对封装寄生参数进行提取，然后补偿至电路设计中。例如，可以在封装边界对匹配网络进行增加，这样信号衰减便可得到抵消。通过上述方法，对集成化前端模块进行优化后，便可实现电磁兼容性、面积效率与成本间的平衡，例如在2.4GHz频段实现模块间串扰低于-40dB，同时封装面积控制在1mm²以内，这样能够满足现代通信系统对小型化、高集成度的需求。

三、测试验证与工程化落地

（一）测试平台搭建与核心指标验证

在搭建测试平台时，应对前端电路性能进行验证，为了保证数据的可靠性，应选用高精度仪器。增益与反射损耗的测量可通过矢量网络分析仪来实现，噪声系数分析仪则可采用冷源法和Y因子法的相互结合，以此降低环境干扰。在实际测试过程中，应对仪器与被测电路的连接方式进行控制，例如使用同轴电缆时应应对线损进行校准，防止因传输路径而导致额外误差被引入。在开展增益平坦度测试时，应确保目标频段被覆盖，利用扫频的方式对1-6GHz范围内的增益波动曲线进行获取，然后对匹配网络参数进行调整，确保波动始终处于±0.3dB范围以内。线性度验证应集中在三阶交调截断点，采用双音信号然后对输出谐波成分进行观测，以此实现对电路结构的优化，使IP3指标提升至+25dBm。最后，电源稳定性测试也是重要的，应对不同电压下的噪声系数变化进行监测，保证电路在供电波动时仍然性能稳定。测试数据需要和仿真结果进行对比，对设计偏差进行修正，确保前端模块的工程化落地具备可靠依据。

（二）可靠性验证与极端环境适应性

为了对前端模块的稳定性进行检验，需要在极端环境中开展可靠性验证，利用高低温箱开展高温和低温测试，模拟-40℃至125℃环境的极端环境，并对晶体管阈值的电压变化进行观察，分析其对增益的实际影响，例如85℃时部分器件的漏电流增加，此时需要对偏置电阻值进行调整来补偿性能损失，而在湿度测试时，应保证环境湿度达到85%RH以上，考虑到金属焊盘与封装材料界面容易受到水汽渗透而发生腐蚀，因此可通过氮气封装的方式，或者增加防潮涂层来进行有效抑制。在振动测试中，利用振

动台来对运输与工作场景的机械应力进行模拟，焊点疲劳可能导致信号开路，可通过对PCB布局进行优化来增加支撑过孔，并且采用高韧性的焊接材料，使失效概率降低至0.1%以下，在开展电源电压波动测试时，应保证能够覆盖±10%的范围，对线性稳压器反馈网络进行调整，保证输出电压能够稳定在1.8V±0.05V，防止供电异常引发噪声恶化。开展长期老化测试时，应确保需连续工作1000小时，测量噪声系数退化不超过0.2dB，增益下降控制在0.5dB以内，通过材料筛选与工艺优化提升模块寿命，最终验证数据需要和加速老化模型进行对比，然后对设计参数进行修正，这样才能使模块在复杂环境中得以稳定工作。

（三）产业化路径与成本优化

工艺选择是产业化路径的起始点，工艺节点不同会产生明显的成本差异，如40nm工艺流片费用比28nm低30%，不过性能方面可能受到限制，因此需要对产品定位进行平衡。应重视设计复用，通过建立标准单元库，将常用模块如LNA和混频器封装为IP核，这样有利于缩短重复设计时间。在优化供应链时，应对晶圆制造与封装测试资源进行整合，选择支持多项目晶圆（MPW）的代工厂，分摊光罩费用，此外还要采用系统级封装（SiP）技术，减少组装工序。为了简化测试流程，还要对自动化测试程序进行开发，将核心指标全面覆盖，采用并行测试缩短单片测试时间，提升产能利用率。提升良率应将工艺监控与数据反馈进行结合，对失效模式进行分析，然后优化设计规则，例如可以对金属层线宽与间距参数进行调整，这样良率能够从85%提升至95%。最终产业化需形成设计、制造、测试闭环，利用规模效应使单片成本降低，比如量产10万片时成本能够下降40%，以此满足消费电子市场的低成本需求。

四、结语

本文通过工艺选择、设计复用与供应链整合等方式，以此优化前端模块的产业化路径。在此过程中，关键在于平衡40nm工艺的成本优势与性能，通过设计复用来缩短重复开发周期，利用系统级封装技术精简组装工序，采用自动化的测试流程，使产能利用率提升。而良率提升方面则需对金属层线宽等设计规则进行科学调整，使良率从85%提至95%，最终通过规模效应，使单片成本进一步降低，从而为产业化落地提供了有效支撑。

参考文献

- [1] 张泽海, 周扬, 张洋, 等. 时分复用射频前端高功率微波波形响应 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(10): 91-97.
- [2] 崔岩, 徐嘉鑫, 杨振, 等. 基于微波光子相干接收的宽带射频前端技术 [J]. 半导体光电, 2022, 43(01): 84-88.
- [3] 邱枫, 宛操, 罗雄耀, 等. 硅基毫米波收发前端集成电路研究进展 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(04): 383-396.
- [4] 肖永川, 胡波, 李波, 等. 基于双驱动调制的低噪声微波光子混频器 [J]. 空间电子技术, 2020, 17(04): 102-108.
- [5] 刘宏梅, 张妍, 房少军. 射频低噪声放大器创新设计性实验实践探索 [J]. 实验技术与管理, 2020, 37(05): 170-172+214.

基于人因工程的化工厂安全信息设计研究进展

方长青, 方浩*

武汉工程大学, 湖北 武汉 430070

DOI:10.61369/ME.2025070019

摘 要 : 在化工行业高风险背景下, 安全信息设计的有效性直接关系到事故预防与人员响应效率。本文系统梳理了近年来我国化工厂安全信息设计领域的研究进展, 聚焦风险感知、人因工程及眼动技术等关键方向, 分析其在安全信息呈现与传播中的应用现状与不足。特别指出, 安全告知工具在认知适配性等方面存在局限, 难以满足现代工人对安全信息需求。文章重点探讨了“四知卡”作为安全告知工具的设计优化路径, 强调引入人因工程学方法与眼动实验技术, 有助于提升信息可视化的实用性。

关 键 词 : 化工厂; 安全信息设计; 风险感知; 人因工程; 眼动技术

Research Progress of Safety Information Design in Chemical Plant Based on Human Factors Engineering

Fang Changqing, Fang Hao*

Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430070

Abstract : In the high-risk environment of the chemical industry, the effectiveness of safety information design directly impacts accident prevention and personnel response efficiency. This paper systematically reviews recent research advancements in safety information design for chemical plants in China, focusing on key areas such as risk perception, human factors engineering, and eye-tracking technology. It analyzes the current application status and shortcomings of these technologies in safety information presentation and dissemination. Notably, safety notification tools exhibit limitations in cognitive adaptability, failing to meet modern workers' demands for safety information. The study specifically explores the design optimization path of the "Four-Knowledge Card" as a safety notification tool, emphasizing that incorporating human factors engineering methods and eye-tracking experimental techniques can enhance the practicality of information visualization.

Keywords : chemical plant; safety information design; risk perception; human factors engineering; eye movement technology

化工行业作为典型的高危领域, 其安全事故往往具有突发性强、破坏性大、救援难度高等特点。尽管近年来我国在政策规范、技术装备和管理制度方面持续发力, 但由人为因素引发事故仍占较高比例, 这暴露出安全信息在传递与认知环节中的薄弱点。传统安全标识、操作规程和培训材料多以“标准化”为导向, 忽视了信息接收者在认知能力、注意分配、情境理解等方面的差异性。

随着人因工程学、认知心理学及眼动追踪等技术的发展, 安全信息设计逐渐从“形式合规”转向“认知适配”。特别是在“四知卡”这一新兴安全管理工具的推广应用中, 如何通过科学设计提升其信息传达效率与应急响应能力, 成为当前研究的热点议题。本文将从人因工程视角出发, 系统梳理相关研究成果, 提出具有实践意义的设计优化建议^[1]。

一、我国化工厂安全信息设计研究的重要性

化工厂安全信息设计是化工安全管理的关键组成部分, 对事故预防和工人安全意识的提升具有深远意义。在国家层面, 化工行业的安全生产受到高度重视, 多项政策文件为安全信息设计的

研究与实践提供了有力支持。例如, 《“十四五”国家安全生产规划》明确提出, 要加快推进安全生产的信息化与智能化建设, 并推动高危企业建立以风险分级管控和隐患排查治理为核心的双重预防机制。这些政策导向进一步强化了安全信息设计在系统性风险管理中的基础性作用。

基金项目: 第十六届研究生创新基金项目“人因工程视角下的化工厂安全四知卡设计优化研究”(项目编号: CX2024216)。此论文由武汉工程大学研究生基金资助。

作者简介:

第一作者: 方长青(2000—), 女, 回族, 湖北省随州人, 工学学士, 单位: 武汉工程大学, 研究方向: 信息交互与智能设计。

通讯作者: 方浩(1975—), 男, 汉族, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 单位: 武汉工程大学, 研究方向: VR创意工程、人智交互设计、位置导航信息设计。

然而，随着科技的发展和工人需求的日益提高，传统的安全信息设计方式已难以适应现代化工企业的要求。当前问题主要体现在三个方面：一是信息呈现方式较为单一，缺乏针对不同场景和人群的适应性；二是个体认知差异未被充分重视，导致信息传达效果有限；三是缺乏科学系统的评估手段，使得设计优化缺乏依据与方向。这些问题的存在，使得化工安全信息在实际应用中的效果受到制约，亟需引入先进的设计理念及技术手段，以全面提升安全信息的表达效率和接受度。

二、我国化工厂安全信息设计研究现状分析

通过对中国知网学术文献的检索分析，发现目前化工厂安全信息设计研究主要集中在五个方面：风险感知、人因工程、安全管理、认知负荷研究及眼动技术。这些研究为安全信息设计提供了理论基础和方法支持，但仍存在系统性不足的问题。

（一）风险感知背景下的安全信息设计研究

风险感知是化工安全管理的核心环节，它指的是工人对生产过程中潜在危险的主观认识与评估。研究表明，工人的风险感知水平受到个体心理状态、认知偏见、工作环境以及组织文化等多重因素的综合影响，这一领域在安全科学与灾害防治文献中占有较高比重，充分体现了其重要性及复杂性。具体而言，在心理与环境因素方面，情绪、认知偏见和环境压力源均对风险感知具有显著影响。例如，陈启慧的研究发现，情绪类型虽在一般情况下对风险知觉的主效应不显著，但在特定情境下会与知觉对象产生交互作用；而 Slovic 所提出的“乐观偏见”与“可得性启发式”理论，则从认知机制层面解释了工人为何常常低估实际风险。为提升风险感知效果，必须重视风险沟通的优化。当前化工厂中普遍存在信息复杂、工人素养不一、沟通方式单一等问题，传统的安全公告和应急演练常因信息过载或形式僵化而效果有限。李斌提出的“六级危险源识别法”与“危险工艺边界提取”模型，强调应在系统设计阶段就嵌入风险沟通机制，为从源头改善风险信息传递提供了值得借鉴的思路^[2-3]。

（二）人因工程在安全信息设计中的应用

人因工程在化工安全信息设计中的应用也日益受到重视。该学科强调以人为中心，关注人的生理、心理特性及其与系统、环境的互动关系，旨在提升安全信息的可读性、易懂性与可操作性。在人为因素影响机制方面，Reason 的“瑞士奶酪模型”指出，事故的发生往往源于系统多层防线中人为的人为漏洞；薛津津的研究进一步明确，人的不安全行为是化工事故的主要诱因，需从个体行为与组织管理两个层面进行系统分析。

基于上述认识，以人为本的设计理念被明确提出，主张从用户的认知特征出发，系统性优化信息结构、呈现方式与交互逻辑。金晶的实验研究发现，安全标志中使用的信号词可显著影响个体的注意分配与情绪反应；同时，简化风险信息被证实有助于提升工人的记忆准确率并减少误操作。这些研究成果共同表明，将人因工程原则深入融入安全信息设计，是提升整体风险防控能力的有效路径。

（三）安全信息设计中的认知负荷研究

认知负荷理论强调通过优化任务流程与信息呈现方式，以提升任务完成的效率。研究表明，合理的信息设计应致力于减轻外部认知负荷，从而使学习者能够将更多认知资源集中于内在负荷，即对内容本身的理解与吸收。在影响因素方面，信息设计的质量尤为关键：清晰且逻辑连贯的组织结构有助于学习者更轻松地掌握知识，而运用图表、流程图等可视化工具呈现复杂信息，则能帮助其快速把握信息间的关联，有效降低认知压力。在化工厂安全信息设计的具体应用中，需通过系统优化信息表达来管理认知负荷。可行的策略包括控制信息总量、突出关键内容，并采用图文结合与色彩编码等方式增强可读性。需要强调的是，相关研究指出，恰当运用颜色线索能够引导注意力，但过度使用反而可能增加认知负担，因此设计中需把握适度原则^[4-5]。

（四）安全管理工具的设计与标准化应用

安全管理工具是化工企业安全信息设计成果的重要体现，其中“四知卡”作为一种具有代表性的工具，通过“知责、知规、知险、知措”四个模块，系统性地帮助员工掌握关键安全信息，有效提升安全意识与应急响应能力。该制度最早源于化工行业对安全生产的实践需求。2017年湖北某化工企业发生较大窒息事故后，湖北省应急管理厅开始倡导在大型国有企业中探索推进“四知卡”建设；至2024年，该厅进一步在“12345”管理办法中明确将“四知卡”作为全员安全管理的核心内容之一。四知卡具体包括岗位安全生产责任卡、岗位操作规程卡、岗位风险辨识卡和岗位应急处置卡，形成从职责明确、规范操作到风险防控与应急响应的全链条闭环管理。在实际应用中，企业通常通过班前培训、现场张贴和动态更新等方式推动四知卡落地，使其成为岗位安全提醒与应急指导的重要载体。邓莉等在湖北地区的调研表明，四知卡的推广显著提升了员工的风险识别与应急反应速度。

在安全管理文献中，安全标识与化工厂相关研究占有较高比重，而四知卡作为安全告知工具的深化形式，因其岗位针对性、内容系统性与携带便利性，在实践中显示出降低事故概率的积极效果。然而，当前四知卡的设计仍较多依赖个人经验与既有设计规律，其理念主要围绕清晰易懂、标准化与合规性、视觉冲击力、环境适应性以及个性化等方面展开。尽管现有设计在信息传达、视觉效果与环境适配方面表现良好，但多数仍停留在视觉层面，对使用者的视觉感受、认知负荷及具体作业情境等因素的系统考量仍显不足，这在一定程度上影响了其在复杂场景中的可用性^[6]。

因此，将人的因素纳入四知卡设计体系，开展以认知研究为基础的系统优化与评估，已成为提升其实际效能的必然方向。未来有必要加强对四知卡设计过程中用户阅读习惯、信息理解路径与情境适配性的研究，推动其从“视觉传达”向“认知支持”转型，逐步实现安全信息工具的真正人性化与高效化^[7]。

（五）眼动技术与安全信息可视化研究

眼动技术为安全信息设计的科学优化提供了关键的数据支持与客观依据。通过追踪和分析工人在观看安全信息时的视觉轨迹与注意力分布，设计者能够准确识别哪些元素最能吸引注意，从

而科学调整关键内容的优先级与呈现方式。现有研究已积累了大量关于安全视觉行为的成果。例如，Holmqvist 等人指出，在化工场景中，动态图标相较于静态文字更能吸引视线，并能更持久地维持工人的视觉注意力。李思宇的眼动实验进一步发现，不同颜色与形状的安全标识在视觉搜索效率上存在显著差异，其中红黄组合在高风险情境下识别速度最快，这为信息视觉层级的科学设计提供了重要参考。

在风险信息的表现形式上，研究提出了多种优化策略。Wogalter 等人强调，“信号词+图标+颜色”的三元组合能产生最强的警示效果，例如在红色背景上配合火焰图标与“危险”文字，可在瞬间传递明确的风险信号。Chauhan 等则指出，动态显示技术不仅能增强信息的吸引力，还可提升工人的记忆保持度和行为引导效能。这些发现可直接应用于“四知卡”等安全工具的改进：通过眼动数据优化其信息布局与层级，将关键风险提示置于视觉热点区域；并可在未来引入电子墨水屏、二维码链接或 AR 互动等技术，实现内容动态更新与多层信息展示，从而在紧急情况下显著提升风险信息的获取效率与工具的整体实用性。

三、化工厂安全信息设计启示

综上所述，化工厂安全展示信息的设计与评价需要大量的认知实验验证。人因工程学实验通过更加科学严谨的方法研究四知

卡的设计和应用过程，研究安全信息管理中人的因素，为实现以人为本的安全信息设计提供重要根据。人因工程学研究综合了大量的心理学、设计学、可用性工程等实验方法，取得了不少研究成果，为现代安全信息的认知和可用性研究提供了方法指导。但目前，在安全信息设计研究中，研究者大多简单的认知实验或采用问卷调查的方式探寻信息设计原则和呈现规律，研究结果的可重复性较差、客观性不高。虽然也有部分研究开始使用诸如眼动等更为有效的形式，但相对于安全信息设计要素的研究，该方面的成果还都比较零散，没有形成完整的体系^[8-10]。

四知卡是化工厂安全管理的重要衡量因素，目前安全信息设计研究大多聚焦于安全标识的设计，并无文章对于安全告知牌较为系统的研究，因此研究四知卡不同呈现形式与特殊场景下认知特性对于阅读效果的影响，对于安全信息设计的认知研究具有重要意义。另外，认知负荷是在日常培训过程中重要的因素，根据相关研究，认知负荷会对人的决策产生影响。但在目前研究中，较少将认知负荷引入设计中。本研究从人因工程学视角，探究不同信息设计形式对于认知负荷和决策的影响，进而基于研究结论提出四知卡设计原则。基于以上研究本文提出研究假设：基于人因工程学设计原则设计的四知卡能有效降低工作人员的认知负荷和提升应急响应时间。

参考文献

- [1] 冷家文. 化工工艺安全设计中风险因素识别与控制 [J]. 浙江化工, 2023, 54(10): 33-36.
- [2] 周璐, 孔繁昌, 周宗奎. 认知风格和情绪调节策略对风险决策的影响 [A] 第二十四届全国心理学学术会议摘要集 [C]. 中国心理学会, 中国心理学会, 2022: 3.
- [3] 李斌. 化工工艺设计风险的防范措施 [J]. 化工设计通讯, 2020, 46(01): 75+242.
- [4] 王东, 巴建磊. 人为因素对化工生产过程安全的影响 [J]. 化工管理, 2024, (08): 93-96.
- [5] 苏文盛. 基于人因工效学原则的安全标志设计研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [6] 杨晓楠, 房浩楠, 李建国等. 智能制造中的人-信息-物理系统协同的人因工程 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(14): 1710-1722+1740.
- [7] 丁慧哲, 侯玮, 秦洪利, 魏利娜. 事故案例展示方式和发展阶段对认知的影响研究 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11): 4082-4088.
- [8] 郑霞忠, 王毓, 陈云, 张蒙, 何双岸. 建筑施工安全培训信息呈现方式学习效果评价 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(05): 96-102.
- [9] 蔡耀庆. 平面设计中视觉元素对信息传递的影响及优化策略 [J]. 上海服饰, 2024, (05): 183-185.
- [10] 邓莉, 袁俊. 将安全监管会“搬进”企业生产现场省应急管理厅推进工贸企业“四知卡”和信息化建设 [J]. 湖北应急管理, 2024, (05): 40-41.

