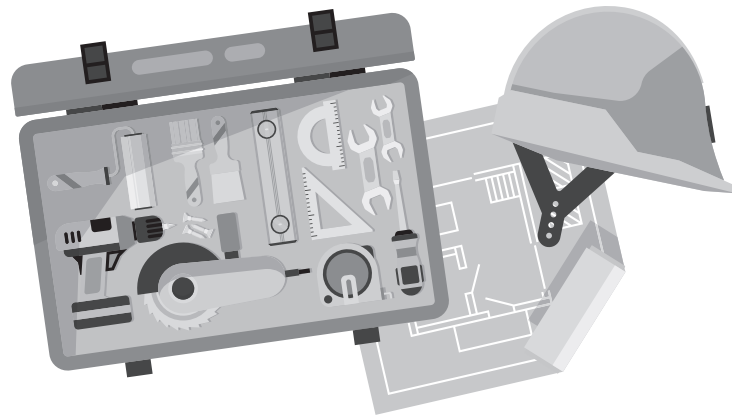


工程技术 与质量管理

Engineering Technology and Quality Management



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2026 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editors-in-Chief

Yulei Chao

Heze Dehe Construction Engineering Group Co. LTD.

Haizhong Gao

Zhejiang Zhongnan Construction Group Co. LTD.

Associate Editor

Pengyue Yu

Shandong Construction Engineering (Group) Co., LTD.

Editorial board member

Sanath Alahakoon

School of Engineering and Technology Centre for Railway Engineering

Salahuddin Azad

School of Engineering and Technology Institute for Future Farming Systems,
Centre for Regional Economies and Supply Chains

Yungang Wang

Ordos Sports Development Center

Qigui Chi

Expert Committee of China Construction Supervision Association

Danhui Chi

Fujian Provincial Institute of Engineering Supervision and Project Management
Association

Yahui Chi

Fujian Provincial Civil Engineering and Construction Industry Association

Chunxiu Liu

Fujian Provincial Association of Engineering Construction Quality and Safety

Guixiong Yang

Yunnan Bo'ao Construction Engineering Consulting Co., Ltd.



工程技术与质量管理

Engineering Technology and Quality Management

第4卷 第1期 2026年1月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《工程技术与质量管理》编辑部

ISSN(O): 2992-9806

ISSN(P): 2995-3170

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。

工程技术 | ENGINEERING TECHNOLOGY

- | | | |
|-----|--|--------------------------------------|
| 001 | 公路沥青路面施工工艺优化与耐久性提升分析
Analysis on Optimization of Construction Technology and Enhancement
of Durability for Highway Asphalt Pavement | 李富东
Li Fudong |
| 004 | SMA 沥青路面双层摊铺施工技术解析
Analysis of Double-Layer Paving Construction Technology of SMA
Asphalt Pavement | 刘心雨, 王金锁
Liu Xinyu, Wan Jinsuo |
| 007 | 高温天气下沥青路面车辙病害分析与应对措施
Analysis and Countermeasures of Asphalt Pavement in High
Temperature Weather | 姬海军
Ji Haijun |
| 010 | 老旧小区改造中的施工进度管理与协调机制
Construction Schedule Management and Coordination Mechanism in the
Renovation of Old Residential Communities | 李晨
Li Chen |
| 013 | 大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治与维护
Treatment and Maintenance of Steel Structure Coating of Large Span Steel
Box Girder Suspension Bridge | 吴艳红
Wu Yanhong |
| 016 | 绿色施工评价体系在土建工程管理中的构建分析
Construction and Analysis of Green Construction Evaluation System in Civil
Engineering Management | 林龙
Lin Long |
| 019 | 数控机床设备现代化管理与维修技术的运用
Application of Modern Management and Maintenance Technology of
CNC Machine Tool Equipment | 李胜蓝
Li Shenglan |
| 022 | 房建施工管理及成本控制分析
Analysis of Construction Management and Cost Control in
Building Construction | 苏瑶
Su Yao |
| 025 | 高速公路桥梁施工中地基处理的技术要点分析
Analysis of Technical Key Points of Foundation Treatment in
Expressway Bridge Construction | 魏巍, 王浙健
Wei Wei, Wang Zhejian |
| 028 | 建筑工程施工技术控制与优化研究
Research on the Control and Optimization of Construction Technology
in Architectural Engineering | 卫兵
Wei Bing |
| 031 | 压力传感器计量检定过程中的干扰因素及抑制策略
Interference Factors and Suppression Strategies in the Metrological
Verification Process of Pressure Sensors | 孔建中
Kong Jianzhong |
| 034 | 卷接机及包装机辅料消耗统计分析系统装置的设计与实现
Design and Implementation of a Statistical Analysis System for Auxiliary Material
Consumption in Cigarette Making and Packing Machines | 王永才, 李金龙
Wang Yongcai, Li Jinlong |
| 037 | 化工自动化仪表的预防性维修管理系统研究
Research on Preventive Maintenance Management System for
Chemical Automation Instruments | 刘海涛
Liu Haitao |
| 040 | 公路隧道围岩大变形段处治措施
Treatment Measures for Rock Mass Deformation in Highway Tunnel | 樊发润
Yi Farun |
| 043 | 卷烟工厂设备管理模式实践探究
Practical Exploration on Equipment Management
Model in Cigarette Factories | 张文慧, 张鹏
Zhang Wenhui, Zhang Peng |

046	建筑工程竣工结算阶段造价争议的常见类型与化解路径 Common Types and Resolution Paths of Cost Disputes in The Final Settlement Stage of Construction Projects	张河 Zhang He
049	超大型边坡地下径流组织方式对失稳触发条件的主控机理研究 Study on The Main Control Mechanism of Instability Triggering Condition of Underground Runoff Organization Mode of Super Large Slope	韩涤清 Han Diqing
052	工程监理在建筑施工中的重要性分析 Analysis of The Importance of Engineering Supervision in Construction	王金成 Wang Jincheng
055	铁路试验检测信息化平台发展综述 A Review on the Development of Information Platform for Railway Testing and Inspection	蔡耀宇 Cai Yaoyu
058	块料面层粘贴工艺对室内地面平整度的改善作用 The Improvement of Indoor Floor Surface Smoothness by Block Laying	侯晓旭 Hou Xiaoxu
061	预制管段安装工艺提高工业管道施工效率 Improving The Efficiency of Industrial Pipeline Construction by Prefabricated Pipe Segment Installation Technology	王博宇 Wang Boyu
064	贵州猫场矿地表分区规划及运输调度优化设计 Visual Design of Surface Planning and Transportation Scheduling for Maochang Mine in Guizhou	朱航宇 Zhu Hangyu

水电工程 | HYDROPOWER ENGINEERING

067	火电厂化学水处理智能监控系统开发 Development of Intelligent Monitoring System for Chemical Water Treatment in Thermal Power Plant	蒋勇, 孙彩珍, 刘宁, 刘帅 Jiang Yong, Sun Caizhen, Liu Ning, Liu Shuai
070	基于数据治理的油水井预警统计优化研究与实践 Research and Practice on Statistical Optimization of Oil and Water Well Early Warning Based on Data Governance	刘翠霞, 冯忠丹, 王鑫, 穆莹莹 Liu Cuixia, Feng Zhongdan, Wang Yao, Mu Yingying
074	水利工程施工中的土方填筑施工技术 Earthwork Filling and Construction Techniques in Water Conservancy Project Construction	王聪, 董元华, 杨靖, 徐狄, 程健涛 Wang Cong, Dong Yuanhua, Yang Jing, Xu Di, Cheng Jiantao
077	潮汐河水水质变化及影响因素分析 Water Quality Variation and Influencing Factors of Tidal River	王慧, 王绍聪, 刘英, 张春霞 Wang Hui, Wang Shaocong, Liu Ying, Zhang Chunxia
080	温度计量测试中热电偶测量精度影响因素分析及改进 Analysis and Improvement of Factors Affecting Thermocouple Measurement Accuracy in Temperature Measurement Testing	吕红贵 Lv Honggui
084	核电站实物保护系统网络安全体系构建研究 Research on the Construction of Cybersecurity Architecture for the Physical Protection System in Nuclear Power Plants	潘航, 王鼎业 Pan Hang, Wang Dingye
087	核电IT运维服务中的自动化工具应用与效率提升研究 Application and Efficiency Improvement of Automation Tools in IT Operation and Maintenance Service of Nuclear Power	史亚 Shi Ya

安全质量 | SAFETY QUALITY

090	高速公路养护区安全设施与交通布设优化研究 Research on Safety Facilities and Traffic Layout Optimization in Expressway Maintenance area	代贵选 Dai Guixuan
093	汛期长江下游复杂条件下航道应急抛石施工质量控制难点突破 The Quality Control Difficulties of Emergency Stone Throwing Construction in The Lower Reaches of The Yangtze River under Complex Conditions During The Flood Season Have Been Overcome	许健勇 Xu Jianyong
096	芯片产业全生命周期质量管理研究 Quality Management of the Whole Life Cycle of Chip Industry	刘莹, 廖武名, 周业华, 周信光, 成岩 Liu Ying, Liao Wuming, Zhou Yehua, Zhou Xinguang, Cheng Yan
100	露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护 Intelligent Diagnosis and Preventive Maintenance of Mechanical Equipment in Open-Pit Coal Mines	袁伟, 院鹏春, 吕鸿鹏 Yuan Wei, Yuan Pengchun, Lv Hongpeng
103	冲床滑块运动轨迹偏差对钣金件冲压质量的影响分析及补偿控制研究 Analysis of the Impact of Punch Slider Motion Trajectory Deviation on the Stamping Quality of Sheet Metal Parts and Research on Compensation Control	潘祺钦, 蔡文忠, 郭洪昌, 刘晓欢, 杨凯, 郑炜嘉 Pan Qiqin, Cai Wenzhong, Guo Hongchang, Liu Xiaohuan, Yang Kai, Zheng Weijia
107	船舶焊接工艺改进对结构安全性的影响研究 Research on the Impact of Improvements in Ship Welding Processes on Structural Safety	欧阳荣 Ouyang Rong

公路沥青路面施工工艺优化与耐久性提升分析

李富东

河北光太路桥工程集团有限公司, 河北 邯郸 056000

DOI:10.61369/ETQM.2026010001

摘 要： 公路沥青路面作为道路交通的关键组成部分，其施工工艺直接关系到路面的耐久性与使用性能。本文围绕沥青路面施工工艺中的关键环节，从原材料选择、施工设备、工艺流程等方面进行系统分析，并结合现代化技术手段探讨优化措施。同时，针对影响路面耐久性的环境与交通因素，提出相应的技术提升路径，旨在提高公路路面整体质量与寿命，降低维护成本，提升通行安全性，为公路建设提供参考。

关 键 词： 沥青路面；施工工艺；耐久性；优化技术；质量控制

Analysis on Optimization of Construction Technology and Enhancement of Durability for Highway Asphalt Pavement

Li Fudong

Hebei Guangtai Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056000

Abstract： As a crucial component of road transportation, highway asphalt pavement's construction technology directly relates to the pavement's durability and performance. This paper systematically analyzes the key aspects of asphalt pavement construction technology, including raw material selection, construction equipment, and process flow, and explores optimization measures in conjunction with modern technological approaches. Additionally, it proposes corresponding technical improvement pathways in response to environmental and traffic factors affecting pavement durability. The aim is to enhance the overall quality and lifespan of highway pavements, reduce maintenance costs, improve traffic safety, and provide references for highway construction.

Keywords： asphalt pavement; construction technology; durability; optimization techniques; quality control

随着我国交通运输体系的不断完善，公路建设规模持续扩大，沥青路面因其良好的行驶舒适性和维修便利性被广泛应用。然而，传统施工工艺常出现早期病害、结构损坏等问题，严重影响其服务年限。为提升路面性能，必须对现有施工工艺进行系统优化。本文基于施工实践与技术发展趋势，分析影响沥青路面耐久性的关键因素，提出可行性优化策略，以期对相关工程提供理论支持和实践指导。

一、沥青路面施工工艺现状分析

（一）原材料选用与性能要求

沥青路面施工质量的优劣首先取决于原材料的选用及其性能表现，这一环节在整个施工过程中起着基础性和决定性的作用。作为沥青混合料的核心成分之一，沥青需具备良好的高温稳定性，以防止夏季软化导致车辙变形；同时还需具备优异的低温抗裂性，以应对冬季温差引起的热胀冷缩效应，避免面层开裂。抗水损害能力也是衡量沥青性能的重要指标，可有效减少雨水侵蚀带来的剥离、泛油等病害。目前常用的沥青材料包括70号基质沥青和性能更优的SBS改性沥青，需通过针入度、延度、软化点等多项指标严格检测其物理性能。集料方面，粗集料应具备坚硬、抗磨、抗压能力，常选用玄武岩、花岗岩等岩石材料；细集料如机制砂或天然砂则需具备良好的级配与粘附性能；填料多采用矿

粉，起到骨架填充与黏结作用^[1]。此外，为提高混合料的整体性能与疲劳寿命，常添加抗剥落剂、木质或矿物纤维等添加剂。原材料的控制不仅影响混合料拌合质量，更决定了整个路面结构的稳定性与长期使用性能，是保障施工质量的根本所在。

（二）施工设备与配套能力

沥青路面施工对设备提出了较高的技术与协同要求，是确保工程质量与施工效率的关键保障。拌合站作为沥青混合料生产的核心，需具备精确的配比控制系统和温度调节功能，保证出料温度稳定在150℃ ± 5℃范围内，以防止沥青老化或温度不足影响成型质量。现代化拌合站普遍采用自动化控制系统，可实现物料自动称量、自动投料、温度实时监控等功能，其拌合效率可达每小时180吨以上。摊铺机则直接影响路面平整度与厚度控制，需具备自动找平装置与智能温控系统，摊铺厚度误差控制在 ± 2mm以内，平整度合格率达95%以上。压路机决定混合料的压实密度与

结构稳定性，常采用振动、轮胎、静力组合碾压方式，压实度要求一般不低于98%。运输车辆需采取保温措施，防止混合料温度在运输过程中下降超过10℃。此外，设备的管理与维护不容忽视，应建立定期检查、保养与校准机制，确保设备始终处于最佳运行状态，从而保障施工工艺的连续性和最终质量目标的实现^[2]。

（三）工艺流程与作业规范

科学规范的工艺流程是保障沥青路面成型质量与长期性能的前提条件，其严谨性直接决定最终道路的服务水平与耐久性。施工初期需对基层进行彻底清理，确保其无浮土、杂物与油污，并保持干燥和平整状态。随后喷洒透层油或粘层油，增强新旧结构层之间的粘结力，防止层间脱空或剪切破坏。混合料运输阶段应采用封闭保温运输车，严格控制温度波动，推荐运输温度维持在140℃至160℃之间，并控制运输时间在30分钟内完成，避免降温 and 离析现象。摊铺前需使用红外线测温仪检测混合料温度，确保其热均匀；摊铺过程中需精准控制摊铺厚度，误差不大于±3mm，并保持匀速推进，避免重叠、冷缝和拉裂现象。在碾压环节，应根据不同混合料类型合理分配初压、复压和终压的温度区间及碾压遍数，一般初压应在150℃以上开始，终压在110℃前完成，以确保密实度达到设计要求。施工全程应设有质量监督岗位，实时记录温度、碾压次数、压实度等关键数据，并依据相关技术规范进行验收评估，实现全流程质量可控、可追溯，为沥青路面的高标准交付提供有力保障。

二、影响沥青路面耐久性的主要因素

（一）结构与施工配合

沥青路面的结构设计是否科学合理直接影响其耐久性和长期使用性能。良好的结构设计需实现各层次功能分工明确、力学匹配合理，一般采用“面层—基层—底基层—土基”的复合结构体系，面层负责抗滑与耐磨，基层负责承载与传力。实际应用中，若设计厚度不足或材料选型不当，极易导致路面早期破坏^[3]。据《公路沥青路面设计规范》数据显示，面层厚度不足30cm时，重载交通下5年内出现结构性裂缝的概率高达42%。施工配合同样关键，如未严格控制层间接缝处理、粘结油喷洒均匀度等工序，常会出现层间脱空、滑移与开裂等问题，影响整体力学协同。此外，压实度是结构成型质量的重要指标，压实度每下降1%，将导致结构寿命缩短8%~12%。因此，设计与施工必须形成闭环，严控结构参数与质量标准，确保力学性能充分发挥。

（二）气候与环境因素

沥青路面长期暴露于自然环境中，受气候变化的影响极为显著，尤其是高温、低温、湿度与紫外线等因素会对其耐久性造成多重挑战。在高温条件下，沥青软化导致表层车辙变形，特别是在≥35℃的夏季高温区域，车辙深度年均增长可达7mm以上；而低温则易引发热应力集中，导致面层开裂，东北及西北地区冬季路面裂缝发生率普遍超过60%。雨水侵蚀亦是破坏性关键因素，雨水通过裂缝或微孔渗入结构层，造成水损坏、冻融破坏甚至路基沉陷。数据显示，当路面空隙率超过6%且连续降雨超过48小

时，其结构层渗水率提升2.5倍。紫外辐射则加速沥青老化，使其逐渐变脆失去黏结性。因此，在不同气候区域应因地制宜选择耐温范围宽广、抗水性强的沥青材料，并加强排水系统设计以降低环境破坏影响^[4]。

（三）交通荷载与疲劳损伤

随着车辆重载化趋势日益明显，交通荷载对沥青路面的疲劳破坏作用日益突出。尤其是大型货车反复碾压下，路面层内逐渐产生微裂缝并扩展为反射裂缝、网裂等病害。研究表明，在年平均交通量为5000辆/车道/天且其中重型车辆占比超过15%的公路上，标准沥青面层的设计使用寿命平均减少30%以上。荷载频率越高，材料疲劳寿命越短；实验数据表明，标准车轴荷载下沥青混合料疲劳寿命为100万次，而当荷载增大10%，疲劳寿命将下降约50%。此外，车辆偏载、刹车点集中等也易形成局部应力集中，加速表面龟裂和坑槽的生成。为延缓疲劳破坏，应通过加强结构层次分担、选用高弹性材料以及优化交通组织等方式减缓荷载冲击，提高沥青路面的承载与缓释能力。

三、施工工艺优化技术研究

（一）材料改性与性能提升

材料性能的提升是优化沥青路面施工工艺的核心环节，尤其在多变环境与重载交通条件下，高性能材料的应用可有效增强路面耐久性与适应性^[5]。当前广泛采用的SBS改性沥青可显著提升沥青的高温抗车辙性能与低温抗裂能力，研究表明SBS改性沥青的软化点较普通沥青提升15℃，低温延度可提高50%以上。此外，应用纤维类增强剂如木质纤维、矿物纤维，能改善混合料的抗裂性和抗水损害性能，适用于超薄罩面和应力吸收层。再生材料技术也是一项重要改进方向，特别是在城市道路养护中，利用再生沥青混合料（RAP）不仅可降低施工成本30%，还具备良好的粘结性和抗老化能力。为进一步提升结构稳定性，还可引入高模量沥青与高强度骨料组合，优化集料级配，提升骨架嵌挤效果，从而显著提高路面的承载能力与疲劳寿命。

（二）智能施工与过程监控

随着信息化与自动化技术的发展，沥青路面施工正在向智能化转型。通过引入智能摊铺与碾压系统，可实现施工过程的实时监控与参数自动调整^[6]。例如，红外热成像技术可用于监测混合料摊铺温度，确保温度控制在140℃至160℃之间，有效避免因冷接缝或温度离析引起的早期病害。同时，基于GPS和GIS系统的碾压轨迹记录技术，可对压路机作业路径和遍数进行可视化管理，确保压实均匀度。智能压实系统（IC）通过振动频率和回弹模量反馈，动态调整碾压力度，使压实度更精确可靠。此外，云平台数据同步与远程调度功能可实现施工进度实时跟踪和质量数据集中管理。数据显示，采用智能施工系统可将质量缺陷率降低40%以上，提升整体施工效率20%~30%，有效保障了施工工艺的一致性与可追溯性。

（三）工序衔接与质量控制

施工过程中各工序的紧密衔接与系统化质量控制机制，是

保障施工质量和路面性能的重要保障。首先，层间粘结处理需加强，采用高粘结性乳化沥青或 SAMI 材料可提升层间抗剪切强度，有效抑制滑移与脱层问题。在摊铺作业中应严格控制摊铺速度与松铺厚度，避免出现离析、错台等缺陷。施工现场应配备质量巡检小组，对混合料级配、含水率、拌合均匀性进行抽检并记录归档，确保每批混合料质量达标。碾压环节要根据材料类型、施工温度确定碾压程序，初压温度控制在 150℃ 以上，复压应于混合料降至 120℃ 前完成。全过程应设置关键工序控制点，实施首件验收、旁站监督与数据闭环反馈机制。研究显示，建立完整质量控制流程的项目，其路面平整度与压实度合格率可达 95% 以上，大幅度降低了后期养护频率和病害发生率，确保了沥青路面长期稳定运行^[7]。

四、提升沥青路面耐久性的策略分析

（一）结构层次优化设计

科学合理的结构层次设计是提升沥青路面耐久性的前提。现代路面结构趋向于多功能分层设计，通过面层、基层与底基层各司其职，有效分散交通荷载，延缓结构疲劳。面层应选用高强度、抗裂性好的改性沥青材料，同时结合粒料级配优化，提升抗车辙性能与表面耐磨性。基层则应采用水稳碎石或水泥稳定土，具备良好的承载与抗剪切能力，保障上层结构受力均匀。为实现层间结构的有效黏结，应采用高附着力粘层油，增强各层之间的剪切稳定性，防止滑移与剥离。此外，可在重载路段或寒冷地区增设防裂垫层或应力吸收层，延缓裂缝反射与疲劳破坏的产生。研究表明，优化后的三层式结构比传统两层结构可提高使用寿命 30% 以上，显著增强整体耐久性与适应性。

（二）施工工况适应与调整

不同气候条件与现场环境对施工质量产生显著影响，需根据具体工况灵活调整施工方案与参数。在高温条件下应加强沥青混合料冷却管理，适当调整拌合温度与摊铺速度，避免热黏、车辙等问题；在低温施工中，应适当提高拌合与压实温度，缩短碾压

起始时间，防止早期开裂^[8]。在降雨频发地区，施工前应密切关注天气变化，施工中需采取防雨棚、排水沟等措施，防止混合料受潮和基层积水影响成型质量。夜间施工时，应配备足够照明设施与夜间施工标识，保证操作精准度和人员安全。此外，在高原、高湿或风沙地区，应根据空气密度、湿度与风速调整摊铺速度与压实时间，确保沥青混合料温度与密实度控制稳定。研究显示，根据工况调整施工参数可有效提升 15% 的施工成品率与压实合格率，减少后期病害发生。

（三）维护养护机制强化

良好的养护管理体系是保障沥青路面耐久性的重要支撑。应建立以“预防为主、防治结合”的全周期养护机制，对路面状况进行周期性检测与动态评估。对于早期微裂缝可采用裂缝灌缝、表面封层等手段进行封闭处理，防止水分入侵；中期病害如松散、车辙等可通过微表处、稀浆封层等工艺恢复功能层；对于严重结构性损坏，应实施局部铣刨重铺，恢复结构整体性。现代化养护还应结合物联网技术，部署传感器对温度、湿度、压实度进行实时监控，提前预警潜在病害点，延长使用寿命。同时应建立养护数据库，形成病害类型、处理工艺与材料性能的对应关系，优化养护决策效率。实践表明，实施科学化、数字化养护策略的道路，5 年内病害发生率可降低 50% 以上，养护成本降低约 25%，显著提升沥青路面使用性能与生命周期效益。

五、结语

沥青路面作为现代公路建设的主要形式，其施工工艺与耐久性关系到道路的整体性能与使用寿命。通过优化原材料选用、提升施工装备智能化水平、强化各工序衔接与质量控制，能够显著提高路面结构稳定性与服务年限。同时，结合结构层次优化设计、适应施工环境调整参数、建立科学养护机制，是提升路面耐久性的关键路径。未来应加强新技术、新材料的研究与推广，推动沥青路面施工向高性能、智能化、绿色化方向发展，全面提升我国公路基础设施水平。

参考文献

- [1] 迟占华. 改性沥青路面施工温度控制与质量保障体系构建 [J]. 山西建筑, 2025, 51(14): 126–128+132. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.14.029.
- [2] 龚永贵. 高寒地区沥青路面施工技术研究 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(07): 28–30. DOI: 10.20259/j.jzjskf.2025.07.0028.
- [3] 张涛. 沥青路面裂缝养护方法与施工处理技术 [J]. 时代汽车, 2025, (14): 181–183.
- [4] 李萧辛. 高速公路路基路面材料选用与施工工艺优化策略探究 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(12): 85–87. DOI: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2025.0515.
- [5] 孙培. 就地热再生沥青混合料施工质量提升方法研究 [J]. 北方交通, 2025, (06): 40–44. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2025.06.011.
- [6] 马光强. 橡胶沥青碎石封层技术在公路施工中的应用 [J]. 汽车周刊, 2025, (07): 143–145.
- [7] 朱永领, 王德勇. 高温重载长寿命沥青复合路面施工技术研究 [J]. 公路, 2025, 70(06): 82–86.
- [8] 董志东. 公路冷再生技术施工质量控制要点分析 [J]. 科技与创新, 2025, (11): 143–146. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2025.11.036.

SMA 沥青路面双层摊铺施工技术解析

刘心雨, 万金锁

德州市公路事业发展中心, 山东 德州 253000

DOI:10.61369/ETQM.2026010002

摘 要 : SMA 沥青路面在施工期间, 会面临层间结合不紧密甚至分离等问题, 如果不及时解决, 将会影响 SMA 沥青路面耐久性。为解决上述问题提高路面耐久性, 本文将引入双层摊铺施工技术。本文立足 SMA 沥青路面, 从拌和、摊铺、碾压、接缝处理、质量检测等方面研究双层摊铺施工技术要点, 并找到合适的施工技术质控对策。研究结果表明, 在 SMA 沥青路面施工期间, 通过双层摊铺施工技术可以提高路面密实度、抗车辙能力等, 保障 SMA 沥青路面完整性与耐久性, 延长使用年限。

关 键 词 : SMA 沥青路面; 双层摊铺施工技术; 施工质量; 耐久性

Analysis of Double-Layer Paving Construction Technology of SMA Asphalt Pavement

Liu Xinyu, Wan Jinsuo

Dezhou Highway Development Center, Dezhou, Shandong 253000

Abstract : During the construction period, SMA asphalt pavement will face some problems, such as loose bonding or even separation between layers. If it is not solved in time, the durability of SMA asphalt pavement will be affected. In order to solve the above problems and improve the durability of pavement, this paper will introduce double-layer paving construction technology. Based on SMA asphalt pavement, this paper studies the technical points of double-layer paving construction from the aspects of mixing, paving, rolling, joint treatment and quality inspection, and finds the appropriate quality control countermeasures for construction technology. The research results show that during the construction of SMA asphalt pavement, the double-layer paving construction technology can improve the pavement compactness and rutting resistance, ensure the integrity and durability of SMA asphalt pavement, and extend the service life.

Keywords : SMA asphalt pavement; double-layer paving construction technology; construction quality; durability

引言

SMA 沥青路面以高剂量石墨纤维、粗集料及改性沥青为主要原料, 通过充分混合以增强路面结构稳定性。但是, 在 SMA 沥青路面施工期间, 会因温度失衡、原料混合不充分而导致层间结合不紧密甚至分离等问题, 影响施工质量。针对上述问题, 将双层摊铺施工技术应用到 SMA 沥青路面施工中, 先摊铺一层基层, 基层摊铺完成后, 再摊铺面层, 以保证层间的耦合性。另外, 双层摊铺施工技术能够有效解决传统单层摊铺施工粗糙的不足, 可以避免因温度过高, 导致层间分离等问题, 提升 SMA 沥青路面抗裂性、耐久性等性能, 保障路面结构完整, 延长使用年限。

一、双层摊铺施工技术概述

(一) 双层摊铺施工技术原理

双层摊铺施工技术指同时摊铺不同层级沥青混合料, 通过同步压实处理, 实现两层路面耦合, 保证路面结构的稳定性^[1]。既利用专业摊铺设备, 将基层和面层沥青混合料一次性摊铺到指定

位置, 随后使用压力机对两层沥青混合料进行压实, 以保证路面结构的完整性。

(二) 双层摊铺施工技术特点

双层摊铺施工技术具有施工效率高、施工简单等特点, 所施工路面抗变形能力强。

1. 抗变形能力强。根据技术应用实践证明, 采用双层摊铺施

工技术,可有效增强路面的抗压性能,即使路面在重型卡车碾压下,也不会发生较大形变,因此可延长路面使用年限^[2]。因为通过双层摊铺施工技术可有效提升路面摊铺、压实效果,使基层、面层能够更加耦合,避免出现层间分离等问题。

2.施工效率高。双层摊铺施工技术与传统施工技术有着很大不同,通过一次性完成基层、面层摊铺施工作业,减少传统摊铺等待时间,提升双层摊铺施工效率。利用双层摊铺施工技术,可保障路面在规定时间内完成施工作业的同时增强路面压实度。

3.施工作业简单。双层摊铺施工技术可以简化传统摊铺施工工序,将基层、面层施工进行整合,使摊铺施工作业能够一次性完成,同时减少多次压实作业压力,并保障良好的施工效果。

二、SMA 沥青路面双层摊铺施工技术要求

（一）拌和

拌和是 SMA 沥青路面双层摊铺施工技术的基础环节,沥青混合料拌和质量直接影响后续施工效果^[3]。因此,在沥青混合料拌和期间,应做到以下几点:

首先,采购沥青混合料所需要的原材料期间,应对材料供应商资质、材料质量等进行严格审核,以保证 SMA 沥青混合料质量符合相关要求。同时,在 SMA 沥青混合料正式搅拌之前,应对原材料进行质量抽检,如果存在质量问题应立即进行更换,只有符合相关施工要求才能使用。

其次,原材料确定没有质量问题后,需根据 SMA 沥青路面施工要求及路面等级等,合理配置沥青混合料,确保沥青混合料符合相关要求。

最后,按照比例对 SMA 沥青混合料进行配比,将各种原材料按照顺序投放到搅拌机中,并严格控制拌和温度、时间等,充分拌和,避免 SMA 沥青混合料出现离析等问题^[4]。

（二）摊铺

SMA 沥青混合料拌和完成后,使用双层摊铺机将混合料摊铺到指定位置,并保证施工质量。根据施工实验结果可以看出,双层摊铺机作业施工量与传统两台单层摊铺机施工作业量相同,并且在施工期间可结合自身需求自动调整摊铺层数,以保证 SMA 沥青路面摊铺平整度。同时,在双层摊铺施工期间,应重点考虑以下几点:

首先,需要结合实际情况,对熨平板位置进行适当调整,使其高度、角度等都处于最佳状态,保证施工的合理性。

其次,应先尝试小范围摊铺作业,时刻观察双层摊铺效果,如果效果较为理想,即可正式展开大面积摊铺作业。同时,在摊铺施工期间,可根据施工现场情况,对 SMA 沥青混合料供料速度进行调节,使摊铺作业可以稳定推进。

再次,双层摊铺一定要匀速、连续展开施工作业,施工阶段切勿随机中断,目的是避免 SMA 沥青混合料出现离析或者路面重复施工等问题^[5]。同时,在摊铺施工期间,利用熨平板对路面进行自动找平,并通过插入铝板方式精准测量路面摊铺厚度,如果不符合施工要求,立即进行调整,以保证摊铺施工符合施工要求。

最后,为避免 SMA 沥青混合料出现离析问题,对摊铺机运行速度严格控制(可控制在 2m/s~5m/s),以保证摊铺施工效果。

（三）碾压

SMA 沥青混合料摊铺完成后,需马上开展路面碾压施工作业,以保证 SMA 沥青路面的压实度达到规范要求。碾压施工分为初压、复压以及终压三个阶段,首先初压阶段应保证摊铺与碾压同时施工,以保证 SMA 沥青路面的平整度^[6]。但是,在具体施工期间,碾压与摊铺作业设备之间应保持一定施工距离(一般控制在 150~200m),即可保证施工效率,也可强化施工效果。在初压施工期间,利用双钢轮压路机进行碾压施工作业时,初压温度应控制在 140℃~150℃,次数控制在 1~2 遍,以保证 SMA 沥青路面初步碾压的压实度达到规范要求;在初压碾压完成以后,进入复压阶段,将碾压温度控制在 120℃~130℃,并通过双钢轮振动压路机进行碾压,次数控制在 4~6 遍,以保证 SMA 沥青路面的耦合度达到规范要求;在复压碾压完成后,进入终压阶段,碾压温度应控制在 110℃,通过振动压路机进行碾压,次数控制在 1~2 遍,以此消除 SMA 沥青路面的轮迹,以保证路面表面的平整度达到规范要求。

（四）接缝处理

在 SMA 沥青路面双层摊铺施工期间,务必注意混合料摊铺拼接缝隙处理,一般情况下应预留 1cm 空隙,保证后续施工环节可沿着预留缝隙实现跨缝压实。同时,为避免出现横向接缝,避免出现反复停机操作,实现连续施工,规避缝隙。

（五）养护施工

等到 SMA 双层摊铺施工施工环节结束以后,需要对 SMA 沥青路面进行养护作业。使用专业洒水车进行养护,目的是保证路面的湿润度,避免裂缝出现裂缝病害^[7]。同时,在养护施工期间,做好交通管制减少施工质量隐患。

（六）质量检测

SMA 沥青路面双层摊铺施工期间,基层、面层沥青混合料可同时进行摊铺和碾压,使骨料可充分耦合。在 SMA 沥青路面双层摊铺施工质量检测时,可采用钻孔取芯方式测定施工质量。将双层摊铺施工技术与传统施工技术进行对比,结果表明:在 SMA 沥青路面施工期间,使用双层摊铺施工技术的 SMA 沥青路面不仅具有更加良好的防水性能,还可以增强抗剪强度。而传统摊铺施工方式,水分会长期存留在面层中,路面沥青很容易出现分离集料面并产生坑槽、网裂等问题,且容易受到车辆荷载及温度失衡等因素的影响,降低传统摊铺路面的耐久性,因而缩短使用年限。

表 1: 传统摊铺和双层摊铺路面渗水系数检测结果。

表 1: SMA 沥青路面传统摊铺和双层摊铺路面渗水系数检测结果

摊铺方法	测点 标号	渗水量/ml			渗水系数/ (ml·min-1)
		1min 末	2min 末	3min 末	
传统摊铺	1	233	342	436	114
	2	227	339	424	110
	3	218	322	414	107
双层摊铺	1	126	166	204	34
	2	112	134	156	22
	3	118	153	185	26

根据表 1 可以知道, SMA 沥青路面双层摊铺施工技术,比传

统摊铺路面渗水系数小，可有效延长使用年限^[8]。另外，在 SMA 沥青路面施工期间，通过双层摊铺施工方式，可实现面层和基层一起摊铺、碾压施工，增强层间耦合性，确保 SMA 沥青路面结构的完整性。

三、SMA 沥青路面双层摊铺施工技术质控对策

SMA 沥青路面双层摊铺施工技术简洁高效，还需要采取行之有效的质控对策，以保证 SMA 沥青路面双层摊铺施工质量。在 SMA 沥青路面双层摊铺施工质量控制期间，应注意以下几点：

- 1. 在 SMA 沥青路面双层摊铺施工期间，应使用精密的温度控制装置，根据施工要求及施工环境温度变化，及时对拌和料温度进行精准调控，保证 SMA 沥青路面在不同施工环境、不同季节下都能够顺利展开施工。另外，SMA 沥青路面双层摊铺施工期间，需要保证每层摊铺厚度、宽度以及平整度等符合相关规范要求，由此解决层间分离或者摊铺不均匀等问题。
- 2. 根据 SMA 沥青路面施工情况，使用高效胶黏剂增强基层表面黏性，提升层间的粘合力，避免 SMA 沥青路面在后期使用中出現层间分离等问题^[9]。
- 3. 务必保证 SMA 沥青混合料的充足性，目的是保证双层摊铺的连续性，且在双层摊铺施工期间，需要对摊铺速度进行严格控制，需要匀速、均匀的展开施工作业，并且针对摊铺接缝，应根据现场施工情况灵活处理，保证 SMA 沥青路面双层摊铺施工质量。另外，还应针对施工人員制定培训计划，定期对施工人員开

展 SMA 沥青路面双层摊铺施工技术培训，提升施工人員的专业性，确保每一项施工作业均能按照规范展开，避免因人为问题引发施工质量问题。

- 4. 构建完善的 SMA 沥青路面双层摊铺施工监管体系，在施工区域合适位置安装传感器，实时获取施工数据，对施工过程定期进行检查和评估，做到及时发现并解决问题^[10]。

四、结束语

本文通过对 SMA 沥青路面双层摊铺施工技术的分析得出以下几点结论：

- 使用双层摊铺施工技术进行 SMA 沥青路施工，可实现摊铺、碾压施工环节同步进行，不仅提升了施工效率，还简化了施工流程。
- SMA 沥青路面双层摊铺施工技术能够有效解决层间分离的问题并且可以对路面磨耗层进行优化，从而降低施工成本，同时增强路面的耐久性。SMA 沥青路面双层摊铺施工期间，需要施工人員掌握各项施工技术要点（拌和、摊铺、碾压、接缝处理、质量检测）并规范施工，从而保证双层摊铺施工技术应用效果。
- 结合实际要求，对施工温度、摊铺速度等进行严格控制，实现匀速摊铺；注重高效黏合剂的使用，解决层间分离作用。另外，SMA 沥青路面双层摊铺施工质量控制期间，应注重施工人員培训，提升施工专业性并构建完善的监管体系，做到及时发现并解决问题，保障 SMA 沥青路面双层摊铺施工质量。

参考文献

[1] 李健. SMA 沥青路面双层摊铺施工技术研究 [J]. 建筑机械, 2025, (07): 287-290.

[2] 胡伟. 双层摊铺施工技术在公路沥青路面改造中的应用 [J]. 交通世界, 2025, (11): 44-46.

[3] 吕正国. 高速公路沥青路面改造双层摊铺施工技术研究 [J]. 交通建设与管理, 2025, (02): 156-158.

[4] 陶师超. 双层摊铺施工技术在公路沥青路面改造中的应用研究 [J]. 交通世界, 2023, (32): 108-110.

[5] 邹振江, 刘源. 公路沥青路面施工双层摊铺技术应用 [J]. 运输经理世界, 2022, (22): 41-43.

[6] 乔勇, 雷学才. 双层摊铺施工技术在公路沥青路面改造中的应用 [J]. 市政技术, 2022, 40(06): 47-51.

[7] 邓瑛, 张声福. 沥青路面双层摊铺施工技术分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(12): 233-234.

[8] 金世伟. 双层摊铺施工技术在公路沥青路面改造中的实践 [J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(02): 169.

[9] 戴志艺. 分析公路沥青路面改造中的双层摊铺施工技术 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(10): 43-44.

[10] 钟国武. SMA 路面抗滑性能优化设计与施工控制要点分析 [C]《建筑科技与管理》组委会. 2019年4月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 广东冠粤路桥有限公司, 2019: 71-73.

高温天气下沥青路面车辙病害分析与应对措施

姬海军

焦作市公路事业发展中心, 河南 焦作 454000

DOI:10.61369/ETQM.2026010004

摘 要 : 随着全球气候变暖, 极端高温天气持续频发, 沥青路面车辙病害愈发严重和多发, 不仅影响驾乘的舒适度, 降低沥青路面的使用寿命, 更对行车安全造成严重隐患。本文着重从沥青材料的特性、路面的高温来源和车辙的位置特征等方面, 分析沥青路面车辙病害产生的原因, 有针对性的提出降低沥青路面温度, 优化施工各个环节, 通过严控原材料质量、采取多种措施降低路面温度和严格控制施工质量等一系列应对措施, 减缓和避免沥青路面车辙病害发生, 就一些解决高温天气下沥青路面车辙的新材料、新工艺和新技术进行利弊分析和论述, 为广大工程技术人员提供一些思路 and 参考。

关 键 词 : 高温天气; 车辙病害; 分析与应对措施

Analysis and Countermeasures of Asphalt Pavement in High Temperature Weather

Ji Haijun

Jiaozuo City Highway Business Development Center, Jiaozuo, Henan 454000

Abstract : With global climate warming, extreme high-temperature weather occurs frequently and continuously, leading to increasingly severe and prevalent rutting distress on asphalt pavements. This not only affects the comfort of driving and riding, reduces the service life of asphalt pavements, but also poses serious hidden dangers to traffic safety. This paper focuses on analyzing the causes of rutting distress on asphalt pavements from aspects such as the characteristics of asphalt materials, the sources of high temperatures on pavements, and the positional characteristics of ruts. It proposes targeted measures to mitigate and prevent rutting distress on asphalt pavements, including reducing the temperature of asphalt pavements, optimizing various construction processes, strictly controlling the quality of raw materials, implementing multiple measures to lower pavement temperatures, and rigorously monitoring construction quality. Additionally, it analyzes and discusses the pros and cons of new materials, processes, and technologies aimed at addressing rutting distress on asphalt pavements under high-temperature conditions, providing ideas and references for engineering and technical personnel.

Keywords : hot weather; unstable rut; analysis and countermeasures

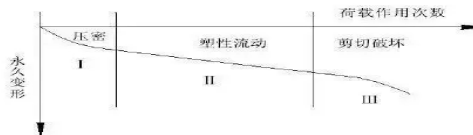
引言

近年来, 随着全球气候变暖和极端高温天气的持续频发, 因高温天气引起的沥青路面车辙病害问题愈加频繁和严重。车辙的形成使路面产生形变, 严重影响路面平整度, 造成车辙轮迹部位厚度变薄, 路面结构整体强度降低, 引发路面其他病害出现。同时, 车辙产生的路面积水, 造成路面抗滑性能下降, 严重的路面车辙也使车辆在变换车道时, 影响方向操控, 形成严重的行车安全隐患。

一、研究方向

本文主要研究高温天气下的失稳型车辙, 重点从沥青材料的特性、路面的高温来源和车辙的位置特征等方面, 分析高温天气下沥青路面车辙病害产生的原因, 有针对性的提出严控原材料质量、降低路面温度和优化施工工艺等一系列应对措施, 并对一些解决高温天气下沥青路面车辙的新材料、新工艺和新技术进行论

述, 供广大工程技术人员参考和研究^[1-3]。



作者简介: 姬海军 (1980.12-), 男, 河南焦作人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

二、产生车辙的原因分析

沥青路面车辙产生的原因较为复杂，但大体来源于内部因素影响和外部因素影响。内部因素主要是路面原材料特性、沥青混合料性质和施工工艺，外部因素主要是气温、荷载、道路线形等。内部因素影响可以进行有效控制，是解决车辙问题的主要措施，但外部影响因素一般难以控制^[4]。

（一）沥青材料特性

沥青是由不同分子量的碳氢化合物及其非金属衍生物组成的黑褐色复杂混合物，是一种高黏度有机体，表面呈黑色，分为煤焦沥青、石油沥青和天然沥青三种，其中沥青路面主要使用石油沥青。石油沥青是原油蒸馏后的残渣，根据提炼程度不同，在常温下成液体、半固体或固体，黑而有光泽，具有较高的感温性。

石油沥青作为一种黑色材料，具有很强的吸热性，吸热率通常为0.80 ~ 0.95。在持续的太阳热辐射下，热量被沥青路面吸收并积聚。根据调查，夏季沥青路面表面温度比周围气温高约24℃。同时，沥青也是一种隔热材料，有吸热容易，降温慢的特点，致使沥青路面吸热后，长时间处于高温状态，而沥青是粘弹性材料，软化点一般在40℃左右，在连续极端高温条件下，粘弹性急剧降低，塑性急剧增大，造成沥青路面的稳定性和结构强度急剧下降，刚度模量和抗车辙性能越低^[5]。

（二）路面高温来源及与车辙发展的关系

沥青路面高温来源包括太阳热辐射、车辆发动机散发热量和轮胎与路面摩擦产生的热量。特别是夏季，太阳热辐射强度高，日照时间长，是沥青路面热量的主要来源；二是汽车发动机工作产生的热量和尾气排放的综合作用，在红绿灯、收费站等车辆临时停驻处，热量更加集中。三是在车辆行驶时，轮胎与路面之间产生的摩擦热量，也是沥青路面热量的来源之一^[6]。

根据调查，沥青路面车辙与温度的关系，呈现如下特征：当气温低于30℃，即路表温度低于54℃时，一般不会发生车辙或车辙限制在几毫米以内，可以忽略不计；当气温高于38℃，路表温度大于62℃时，车辙会迅速发展；当气温持续高于40℃时，几天内就会迅速产生严重的车辙。

（三）车辙位置特征

失稳型车辙多以交叉路口、信号灯停止线附近、收费站、长纵大坡及重载路段等减速或缓行区最为严重。这些位置车辆行驶速度较低或停止不动，交通荷载对路面的作用时间较长，极易引起路面材料失稳、横向位移等永久性变形。特别是当车辆在启动、制动的瞬间，对路面产生极大的水平和竖向应力，尤其是水平应力远高于车辆正常行驶时，是引起车辙和拥包（壅包）的主要外力因素^[7]。

三、降低路面温度应对车辙的措施

（一）传统措施

1. 遮挡：利用种植高大乔木、一定高度的灌木和边坡植草等遮挡措施，遮挡太阳热辐射。经测试发现，在城市内种植8米高度以上的乔木，降温可达2.8℃，种植5 ~ 8米高度的小乔木降温达2.0℃，灌木类降温只有1.2℃，而草坪的降温效果就只有0.6℃。但是太阳热辐射角度不断变化，造成降温效果一般。

2. 洒水降温：通过向沥青路面洒水，利用水分蒸发达到降温目的。实验表明，洒水后路表温度在5 ~ 10min内迅速下降且可保持1h左右，但温度变化主要发生在路面表层5cm以内，对5cm以下温度影响不大。同时，洒水降温效果很大程度上取决于路面保水量和蒸发速度，需要消耗大量水资源。但洒水虽有利于沥青路面降温，达到减少车辙的目的，但是如果造成路面积水则会降低路面抗滑性能，容易引发交通事故和其他路面病害，频繁洒水作业也增加了养护人员的工作量，需要大量的精力、成本且受区域水资源等各种条件制约^[8]。

3. 保水路面：在大孔隙路面结构基础上，通过填充保水性材料，达到吸收储存各种水分的目的。当温度升高时，水分通过毛细作用蒸发，从而达到减低沥青路面温度的目的，当水分蒸发完时，内部空隙内的空气也较实心结构更利于达到降温目的。这种沥青路面结构的优点是维持较长且明显的降温效果，国外已研发出一次降雨后可持续3天降温效果的保水路面。同时，路面快速吸水与海绵城市的理念非常契合，对城市排水、防止内涝有一定作用。通过试验观察，空隙率大小与降温效果正相关，随着孔隙率的增大，降温效果提高，但会导致路面结构承载力下降，特别是冬季气候条件下，路面结构内部的冻融作用，容易引起路面结构破坏，影响沥青路面耐久性，因此应以保证承载力要求为前提，适当提高空隙率以增加降温效果。

（二）新技术应用利弊分析

1. 加铺（涂）或直接铺筑反射层：利用反射原理，通过铺设由热反射涂料制备而成的热反射涂层或铺设由浅色集料、热反射胶结料制备而成的热反射罩面层，达到反射太阳光和降低热吸收率，最终达到沥青路面降温目的。目前热反射涂层通常分为白色和深红色两种，国内以白色反射涂层居多，最高反射率可以达到90%以上，但浅色路面会降低标线与路面的对比度，甚至出现眩光。深红色涂层则是利用提高红外反射率，从而降低路面温度，还较白色涂层降低眩光发生和增加路面与标线对比度，从而有效保证行车安全。加铺（涂）或直接铺筑的反射层抗滑性能与普通沥青路面相比较低，容易引发安全问题。通车后灰尘污染也影响反射效果，大幅降低降温效果^[9]。

2. 集料替代法：在沥青混合料中使用膨胀蛭石或煅烧铝矾土等热阻材料代替集料，从而达到一定的阻热、降温作用。煅烧铝矾土混合料具备一定的降温效果，再通过适当增大集料粒径、降低油石比等措施，降温效果和高温性能会明显优于普通混合料，但水稳定性较差。膨胀蛭石具备与沥青较好的粘合力且降温效果良好，但强度较低，不适合路用。

3. 添加外参剂：比如将相变材料加入到沥青混凝土中，尝试实现路面温度的自主调控，相较于现有降低路面温度的技术方法，相变温控沥青混凝土是一种仿生智能材料，但是目前相变材料没有简单有效的添加方法，存在液态渗漏问题，且受到制备方法复杂、对低温性能有着不利影响等原因，还有待进一步研究。其他如在沥青混合料中添加红外粉，吸收热量产生能级跃迁，向外辐射能量。添加钛白粉等光催化剂，消耗太阳能，促进化学反应，从而达到降低路面温度的目的^[10]。

4. 路面热量综合应用设想：通过在路面结构中敷设热管，利用热管的良好导热性，实现路面降温。热管需要埋置在一定深度才能有效降温，但是又需要保证大于一定埋深才能保证热管不被

损坏，二者之间的矛盾和热管的造价，以及热管埋设处形成的应力集中破坏，都是制约该措施应用的主要因素。近年来，设想通过热管连接热转换设备，将吸收的太阳辐射热能进行转换，实现相邻建筑物的采暖、降温，将沥青路面作为一种新型的可再生能源，引以各界关注和思考。

四、优化施工各环节应对车辙的措施

沥青路面的承载能力由集料间嵌挤作用形成的骨架支撑、摩擦力和沥青、细集料、矿粉组成的沥青砂浆填充和粘合作用共同组成。为有效避免车辙产生，可以从原材料、配合比和施工工艺等方面优化，提高沥青路面的承载力，达到抵抗车辙的目的。

（一）原材料控制

1. 沥青

沥青路面抗剪强度与沥青粘度呈正比例特征，沥青粘度越高，抗剪强度越高。国内通常用粘附性和感温性对沥青抗车辙能力进行评价，以针入度 PI 表征沥青材料的感温性能，针入度和沥青温度敏感性呈现反比例关系。一般采取提高沥青粘度来增加沥青混合料抗剪切能力，减小沥青混合料内部集料相对位移。沥青的软化点、弹性恢复能力较强时，气温较高情况下，沥青路面抵抗变形的能力较强，从而减缓车辙病害发生。同时，沥青用量直接影响沥青混合料结合强度，沥青用量应严格按照马歇尔试验选用，并结合残留稳定度、动稳定度指标，合理确定。沥青用量过多，对车辙产生不利影响，用量过少又严重影响混合料的粘结力，从控制高温车辙考虑，宜适当减低沥青用量。

2. 集料

矿粉是沥青混合料的主要填充料，用于填充孔隙。矿粉和沥青结合形成的沥青胶浆与集料的粘结力更强，可明显增强沥青混合料的稳定性和强度。矿粉应选用无结块的碱性矿粉为优，可以和酸性的沥青更好的形成沥青胶浆。集料是沥青路面的主要组成部分，起主要承载的作用，主要关注：①集料压碎值越低强度越高，抵抗车辙的能力越强；②集料粒径和针片状颗粒含量，粒径越大骨架作用越强，尤其是正多面体集料组成的沥青混合料骨架结构最稳定；针片状颗粒含量越高，不仅影响集料强度，而且集料间容易发生表面滑移，造成失稳破坏；③含泥量较高影响集料与沥青的粘合，对沥青混合料的整体稳定性和强度产生不利影响。

3. 级配

优选采用“S”型级配和骨架密实结构，杜绝驼峰级配，树立级配范围中值并非最佳级配的理念，注意减少 2.36mm-4.75mm 用量，降低 0.3mm 以下筛孔通过率，通过控制原材料砂当量及粉尘含量来控制 0.075mm 筛孔的通过率。骨架密实结构具有优越的嵌挤力，对抵抗车辙产生具有较好的效果，但存在孔隙率较大，沥青胶结料无法有效填充骨架孔隙，对粘结力产生不利影响。

4. 外参剂和改性沥青

沥青与集料的粘合力是路面结构抵抗剪应力的主要因素，通过向沥青混合料中掺加抗车辙剂、高性能聚酯纤维等外参剂是目前解决车辙病害的主要措施之一。外参剂主要通过提高沥青及混合料的粘结力，达到增强抵抗车辙的作用，直接使用橡胶沥青、高黏沥青也是同样原理。

（二）施工质量控制

沥青混合料各项指标确定后，加强施工质量控制，减少质量波动，提高机械设备要求，成为延缓沥青路面车辙病害发生的关键因素。

1. 沥青混合料离析

加强沥青混合料拌和温度和拌和时间控制，达到沥青混合料拌和均匀，通过覆盖、缩短运输时间、均匀布料等方式对混合料温度进行严格控制，避免沥青混合料产生离析。

2. 严格控制压实度

摒弃过度关注路面平整度，对压实度要求不严的思想，在良好天气情况下，组织摊铺和压实作业，保障摊铺作业的连续性、均匀性和合适的压实设备、压实遍数，确保压实度满足要求。同时注意严格控制粘层施工质量，杜绝沥青面层层间滑动。

五、结束语

本文着重从沥青的材料特性、路面高温的来源、车辙发展的特征和容易发生车辙的位置等方面综合分析了沥青路面高温车辙产生的原因，有针对性的提出了降低路面温度、严控原材料质量和施工工艺等减缓失稳型车辙的产生的措施和方法，并就一些新工艺、新技术的应用进行利弊分析，为广大工程技术人员提供一些应对车辙病害的方法和思路。

参考文献

- [1] 崔志兴. 适用于路面控温的定形复合相变材料的制备与性能研究 [D]. 浙江海洋大学, 2019.
- [2] 李新. 相变调温材料对沥青及沥青混合料高温性能及控温性能的影响探究 [J]. 化工新型材料, 2019.
- [3] 袁迎捷. 长上坡沥青路面抗车辙影响因素及实用措施. 公路交通科技应用, 2019.
- [4] 彭源富, 盘力宁, 黄瑞彬, 等. 关于 RCA 抵抗高温湿热地区沥青路面病害能力的研究 [J]. 交通世界, 2022, (31): 70-72.
- [5] 罗苏平. 高温多雨地区沥青路面病害环境与多场耦合效应研究 [D]. 中南大学, 2012.
- [6] 徐桂阳. 新疆高温地区沥青路面车辙病害处治研究 [D]. 新疆: 新疆农业大学, 2014.
- [7] 李波, 王宇, 康爱红, 等. 沥青混合料高温车辙虚拟仿真实验设计与实现 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(5): 10-14, 83.
- [8] 王文辉. 南方高温地区沥青路面车辙病害处治研究与实践 [D]. 广东: 华南理工大学, 2009.
- [9] 罗坤, 马力, 徐琴, 等. 车辙深度对水利枢纽永久道路沥青路面高温稳定性的影响 [J]. 河南科学, 2022, 40(1): 59-65.
- [10] 古灯华, 张江飞, 衣路野, 等. 高粘剂在沥青路面车辙病害处置中的应用研究 [J]. 西部交通科技, 2023(10): 32-35.
- [11] 孟庆宇, 张家龙. 沥青路面失稳型车辙处治技术研究 [J]. 交通科技, 2024(3): 43-46.

老旧小区改造中的施工进度管理与协调机制

李晨

天津市河北区房产服务中心, 天津 300140

DOI:10.61369/ETQM.2026010005

摘 要 : 老旧小区改造是改善民生、提升城市居住品质的重要举措,但其施工推进中面临多重挑战。过往实践中,进度管理存在工期延误、工序衔接不畅、管理方法落后三大核心问题;在协调层面需解决主体职责不清、信息沟通不畅、施工矛盾频发等难题;同时,自然灾害、安全事故、政策变动等突发情况也对项目推进构成威胁。为应对上述问题,本文提出针对性解决方案,在进度管理上,制定兼顾居民需求的科学施工计划,运用BIM、挣值管理等先进工具实现动态监控;在协调机制上,明确政府、施工、设计、监理及居民的职责权益,搭建线上线下多元沟通平台,建立矛盾快速响应小组;在突发情况应对上,围绕针对性、可操作性、动态性原则制定应急预案,并通过定期演练优化完善。这些措施形成闭环管理,可有效保障老旧小区改造项目高效、有序推进,减少矛盾冲突,提升改造综合效益。

关 键 词 : 老旧小区改造;施工进度管理;协调机制;沟通平台

Construction Schedule Management and Coordination Mechanism in the Renovation of Old Residential Communities

Li Chen

Tianjin Hebei District Real Estate Service Center, Tianjin 300140

Abstract : The renovation of old residential communities is a crucial initiative aimed at improving people's livelihoods and enhancing urban living quality, yet its construction process faces multiple challenges. In past practices, three core issues have emerged in schedule management: project delays, poor sequencing of work processes, and outdated management methods. On the coordination front, challenges include unclear responsibilities among stakeholders, ineffective information communication, and frequent construction conflicts. Additionally, unforeseen circumstances such as natural disasters, safety incidents, and policy changes also pose threats to project progress. To address these issues, this paper proposes targeted solutions. For schedule management, it advocates formulating scientific construction plans that consider residents' needs and employing advanced tools such as BIM and earned value management for dynamic monitoring. Regarding coordination mechanisms, it suggests clarifying the responsibilities and rights of government, construction, design, supervision, and residents, establishing a diverse online-offline communication platform, and setting up rapid response teams for conflicts. For handling emergencies, it recommends developing contingency plans based on principles of specificity, operability, and dynamism, and optimizing them through regular drills. These measures form a closed-loop management system that can effectively ensure the efficient and orderly progress of old residential community renovation projects, reduce conflicts, and enhance the overall benefits of the renovations.

Keywords : renovation of old residential communities; construction schedule management; coordination mechanism; communication platform

引言

随着我国城市更新战略的深入推进,老旧小区改造作为补齐民生短板、提升居民幸福感的关键工程,已成为城市治理的重要内容。其不仅能改善老旧小区基础设施老化、居住环境不佳等问题,更对激活城市存量空间、促进社区和谐稳定具有重要意义。基于此,本文结合老旧小区改造实践,系统分析过往进度管理与协调工作中的核心问题,针对性提出进度优化策略、协调机制构建方案及突发情况应对路径,旨在为保障老旧小区改造项目顺利实施、提升改造质量与效率提供实践参考。

一、老旧小区改造施工进度管理过往问题分析

（一）工期延误问题

老旧小区改造项目中，工期延误是普遍存在的现象，其成因呈现出复杂多样的特征。外部环境因素中的天气条件对工期有着显著影响，包括老旧小区改造时的气候、地质变化，如高温、严寒、雨雪、冰雹等，或是泥石流、地震等自然灾害。这些环境问题会影响老旧小区改造施工，耽误项目进度，影响进度管理效果。改造项目涉及大额资金投入，资金问题同样是工期延误的常见诱因，例如，存在项目资金不稳定、资金使用计划不合理、进度款支付不及时等，以及老旧小区改造中项目资金造成的索赔、纠纷等问题^[1]。

居民配合度不足对工期的干扰同样突出，改造工程与居民日常生活交织，部分居民因施工噪音、隐私受扰等问题产生抵触情绪，甚至阻挠施工、引发纠纷，导致工程停滞。以Z项目为例，居民对改造的反对意见及私搭乱建问题未及时处理，曾使施工陷入长时间停滞，严重拖累整体进度。工期延误带来的负面影响具有双重性，既削弱了改造项目的综合效益，更给居民生活造成困扰，长期处于施工环境中会直接降低居民生活质量，工期延长还可能让居民承受额外经济负担。

（二）工序衔接不畅问题

工序衔接不畅是老旧小区改造中另一个突出的问题，主要表现为不同施工环节之间的等待时间过长或交叉作业混乱。这种问题的出现通常源于施工计划的不合理性和现场管理的薄弱性。例如，在某些改造项目中，由于缺乏对施工流程的精细规划，前一工序完成后未能及时启动下一工序，导致现场出现闲置现象，浪费了宝贵的施工时间。同时，交叉作业中的协调困难也加剧了这一问题的。在老旧小区改造中，多个施工单位可能同时同一区域内作业，若缺乏有效的沟通与协调机制，则容易造成施工冲突，进而影响整体效率^[2]。此外，工序衔接不畅还会对施工质量产生负面影响，增加返工率，进一步延长工期并提高成本。

（三）进度管理方法落后问题

传统进度管理方法在应对复杂多变的老旧小区改造场景时表现出明显的局限性，尤其是在实时监控和动态调整方面存在不足。传统的进度管理通常依赖于手工记录和定期汇报，难以全面反映施工现场的实际状况，也无法及时发现潜在的进度偏差。例如，在挣值管理定量分析中，若未能实时跟踪已完成工作量的实际成本（AC）、预算成本（EV）和计划工作量的预算费用（PV），则无法准确评估进度滞后或提前的情况，从而延误纠偏措施的实施。此外，传统方法在应对突发情况时的灵活性较差，一旦施工现场出现意外事件，如安全事故或设计变更，往往需要耗费大量时间重新调整计划，导致进度管理效率低下。相比之下，现代化的进度管理工具和技术，如建筑信息模型（BIM）和信息技术平台，能够提供实时数据支持，并通过数据分析预测潜在风险，从而实现更加精准的进度控制。

二、老旧小区改造施工进度管理策略

（一）制定科学合理的施工计划

为缓解施工与居民生活的矛盾、提升改造效率，施工安排需

兼顾人文关怀与科学规划。施工时间的制定应充分考量居民生活作息，老旧小区带户施工的特性决定了施工活动与居民生活的交叉影响难以避免，因此施工计划制定阶段需深入摸底，掌握居民生活习惯与出行规律，据此优化时间安排，比如避开上下班高峰期开展高噪音作业，或集中在居民外出频繁时段施工。同时施工方需提前与居民沟通，通过多渠道公示施工计划，让居民做好准备，这种以人为本的安排能有效缓解抵触情绪，提升进度管理效率^[3]。与此同时，科学规划施工顺序是提升效率的关键，需结合施工内容特点与逻辑关系统筹安排，降低工序衔接风险，例如屋面、外墙改造受自然条件影响大，应优先安排在适宜季节，楼梯间改造则可灵活穿插进行；针对多小区同步改造场景，采用分片区施工模式，将改造需求相近的小区划片开展流水作业，能避免资源分散与交叉混乱。

（二）运用先进的进度管理工具和技术

进度管理的高效推进还离不开实时监控与动态纠偏的支撑，信息技术手段的应用让施工进度监控更精准高效。建筑信息模型（BIM）技术作为集成几何、物理及成本信息的数字化工具，可贯穿施工全过程提供动态数据支持，施工单位通过搭建三维模型，将施工计划与实际进度进行可视化对比，能及时察觉潜在进度偏差；结合传感器、无人机等物联网设备对施工现场实时监测，更能提升数据采集的准确性与及时性^[4]。挣值管理软件、进度管理平台等其他信息化工具也广泛应用，通过对已完成工作量预算成本（EV）、实际成本（AC）及计划工作量预算费用（PV）的定量分析，为进度监控提供科学依据。基于实时监控数据，运用挣值管理等技术及时调整进度偏差是保障工程推进的关键，这种融合进度、成本与质量的管理方法，通过计算进度偏差（SV）和成本偏差（CV）评估执行情况，SV小于0表明进度滞后，CV小于0意味着成本超支，据此可快速定位根源并采取措施^[5]。

三、老旧小区改造协调机制的建立与运行

（一）明确各方主体职责与权益

老旧小区改造中，明确各方主体职责与权益是施工顺利推进的关键。政府作为主导者，核心职责为政策制定、统筹协调与监督管理；需制定科学改造政策提供制度保障，成立专门机构整合住建、民政、供电等多方资源落实计划，同时加强施工全过程监管确保质量安全。此外，政府还应通过奖励机制引导施工单位提升积极性，推动改造高效开展。施工单位作为具体实施者，需结合小区实际编制详细方案并严控进度，强化安全管理防范高空坠物、触电等隐患。同时要主动配合政府及其他主体，及时解决施工问题，保障改造顺利推进。

设计与监理单位亦承担重要职责，设计单位需结合小区实况与居民需求优化方案，兼顾科学性与实用性；监理单位则全程监督施工，确保质量符合设计及标准要求。居民作为直接受益者，应主动参与方案讨论反馈真实需求，在施工中积极配合以降低对生活的影响。明确上述主体职责与权益，可有效化解责任不清引发的矛盾冲突，为老旧小区改造顺利推进筑牢基础^[6]。

（二）搭建有效沟通平台

搭建有效沟通平台是老旧小区改造协调机制的核心，是保障信息畅通、化解矛盾的关键。实践中需要构建线上线下多元渠

道,实现政府、施工、设计、监理单位与居民的高效互动。线上依托微信群等便捷工具,实时传递施工进度、政策解读及居民反馈,大幅缩短信息传递时差;线下通过召开居民大会提供面对面交流场景,深入掌握居民需求并答疑解惑。

为强化沟通效能,需建立定期通报与及时反馈机制。定期通报能让各方同步掌握施工进度、现存问题及后续计划,提前做好应对准备,例如施工单位可通过周例会向相关部门及居民汇报进展并征集意见。及时反馈则要求对居民诉求快速响应,避免信息不对称引发误解。代建单位作为关键纽带,需在全过程中密切对接政府部门、居委会、业委会等,确保各类问题及时处置^[7]。多元沟通渠道与高效反馈机制的结合,不仅能提升沟通效率,更能增强各方对改造项目的信任感与参与度,为施工顺利推进营造良好环境。

（三）及时解决施工矛盾与问题

老旧小区改造因涉及多方利益、环境复杂,易发各类矛盾。常见问题包括居民与施工方因噪声、扬尘产生的纠纷,以及部门间因职责不清导致的协调困难。这些问题若不及时处理,不仅延误工期,还可能激化社会矛盾。为此,必须建立快速响应机制。应成立由政府、施工方及居民代表组成的矛盾调解小组,对问题分类处理,针对居民投诉的噪声、扬尘等问题,督促施工方调整作业、加强环保;针对部门协调困难,由政府牵头明确职责、优化资源。

四、应对突发情况对施工进度和协调工作的影响

（一）突发情况的类型

在老旧小区改造项目中,突发情况的发生往往会对施工进度和协调工作产生不可忽视的影响。这些突发情况主要包括自然灾害、安全事故以及政策变动等风险因素。自然灾害如极端天气事件(暴雨、暴雪、台风等)可能导致施工现场无法正常作业,甚至造成已完工部分的损坏,从而延误工期^[8]。此外,地质条件的变化也可能对施工进度造成阻碍,例如地基沉降或地下水位异常升高等问题。安全事故则是另一类常见的突发情况,尤其是在老旧小区改造过程中,由于施工现场通常需要进行半封闭处理,居民与施工区域的交叉活动频繁,容易引发高空坠物、火灾、触电等安全隐患。这些安全问题不仅威胁居民和施工人员的生命财产安全,还可能因后续纠纷导致项目停滞。政策变动同样是一个重要的风险因素,尤其是在涉及资金补贴、审批流程或技术标准调整的情况下,可能导致项目计划被迫调整,甚至出现资金链断裂或工程烂尾的风险。

（二）应急预案的制定

为应对上述突发情况,制定科学合理的应急预案显得尤为重要。应急预案的制定应遵循针对性、可操作性和动态性原则,确

保在突发事件发生时能够迅速启动并有效执行。应急组织架构的明确是应急预案的基础,成立专门应急管理小组并明确各成员职责分工,能保障紧急情况下的快速响应与高效协调。资源调配作为应急预案的核心内容,需提前规划应急物资的储备地点、种类和数量,建立快速调用机制,确保灾害或事故发生时可及时补充所需资源^[9]。针对自然灾害,应储备足够的防水材料、排水设备以及临时避难设施;针对安全事故,则需配备消防器材、急救药品和专业救援队伍。

具体应对措施的细化同样关键,应急预案需详细规定事发初期的紧急处置流程、信息通报机制以及后期恢复重建方案。发生安全事故时,应立即疏散现场人员,封锁危险区域,并通知相关部门协助处理;在政策变动导致项目停滞时,需及时与政府部门沟通,争取支持并调整项目计划。通过系统化的应急预案设计,可以最大限度地减少突发情况对施工进度和协调工作的不利影响。

（三）应急演练与调整

应急预案的有效性不仅取决于内容完整性,更需通过定期演练检验并完善。应急演练的核心价值在于帮助各参与方熟悉预案操作流程,提升突发事件应对能力与协作效率。通过模拟自然灾害、安全事故等场景,可直观评估应急响应速度、资源调配效率及信息传递准确性,精准定位预案潜在漏洞^[10]。此外,预案需随项目推进及外部环境变化动态更新,例如政策变动频繁时,需定期核查预案与最新法规要求的一致性。持续的演练与动态调整形成闭环管理,能让应急预案在实操中不断适配风险挑战,为老旧小区改造项目顺利推进筑牢安全保障。

五、结束语

老旧小区改造既是民生工程,更是检验城市治理精细化水平的关键场域,其顺利推进离不开进度管理、协调机制与风险防控的系统性支撑。本文基于老旧小区“带户施工、主体多元、环境复杂”的核心特征,直面改造实践中进度延误、协调失序、风险应对不足等痛点问题,构建了“进度优化—协调保障—风险防控”三位一体的解决方案,通过科学计划与先进技术破解进度管控难题,以职责明晰与多元沟通筑牢协调基础,靠预案制定与演练迭代强化风险韧性,形成了覆盖改造全流程的闭环管理体系。展望未来,随着城市更新战略的持续深化与数字化技术的广泛应用,老旧小区改造将朝着更智能、更高效、更具人文关怀的方向发展,推动更多老旧小区实现“改造提质”与“治理提效”的双重目标,让城市更新成果真正惠及每一位居民,助力构建更具温度与韧性的城市社区。

参考文献

[1] 迟浩奎. 老旧小区改造项目进度管理影响因素及策略 [J]. 住宅与房地产, 2024, (19): 93-95.
[2] 刘欢. 老旧小区改造项目管理研究 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(10): 251-253.
[3] 陈园园. 老旧小区改造机制研究 [J]. 建筑经济, 2023, 44(8): 92-98.
[4] 卢倩楠. 老旧小区综合整治项目全过程管理研究 [J]. 建筑经济, 2024, 45(5): 85-92.
[5] 王月辉. 老旧小区改造工程进度管理的探析 [J]. 前卫, 2021, (5): 181-183.
[6] 蔡小青, 孔亮. 老旧小区改造项目工程进度影响因素研究 [J]. 建筑经济, 2021, 42(7): 63-66.
[7] 徐飞, 孙涛. 老旧小区改造项目施工难点及解决对策 [J]. 住宅与房地产, 2024, (10): 110-112.
[8] 张智. 老旧小区改造项目施工管理要点探讨 [J]. 中国厨卫, 2023, 22(7): 126-128.
[9] 韩晓静. 老旧小区改造项目施工管理要点 [J]. 房地产世界, 2021, (14): 109-111.
[10] 李恒斌. 旧楼改造工程综合管理研究 [J]. 陕西建筑, 2024, (7): 125-129.

大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治与维护

吴艳红

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650200

DOI:10.61369/ETQM.2026010006

摘 要： 本文选取主跨628米的普立特大桥钢箱梁悬索桥作研究对象，针对2023年检测出来的主缆、加劲梁箱内、箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座等核心构件出现的涂层脱落、锈蚀等病害，剖析由环境侵蚀、施工缺陷、材料老化等共同引发的病害起因，阐明按照差异化处治原则的技术方案，涉及喷砂除锈等表面处理、适合不同构件的涂层修复体系，以及覆盖全生命周期的日常监测、定期养护和应急处置策略。通过严格的检验，确保涂层满足耐久性的需求，修复后涂层性能达标，为大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治及保护的实际应用指引。

关 键 词： 大跨径悬索桥；钢箱梁；涂层病害；处治技术；维护策略

Treatment and Maintenance of Steel Structure Coating of Large Span Steel Box Girder Suspension Bridge

Wu Yanhong

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650200

Abstract： This study focuses on the 628-meter main span of the Pulte Bridge, a steel box girder suspension bridge. It investigates coating detachment and corrosion issues identified in 2023 at critical components including main cables, stiffener box interiors, exterior maintenance channels, wind nozzle slopes, and railing bases. The analysis identifies root causes stemming from environmental erosion, construction defects, and material aging. The research proposes a differentiated treatment strategy encompassing surface treatments like sandblasting, customized coating repair systems, and comprehensive lifecycle management strategies including daily monitoring, periodic maintenance, and emergency response protocols. Through rigorous testing, the study ensures coatings meet durability requirements and achieve performance standards post-repair, providing practical guidance for coating treatment and protection of large-span steel box girder suspension bridges.

Keywords： long-span suspension bridge; steel box girder; coating defects; treatment techniques; maintenance strategies

引言

大跨径钢箱梁悬索桥属于交通重点工程，其钢结构涂层耐久性影响桥梁安全和寿命。普立特大桥是杭瑞高速的控制性工程，主跨628m，2015年通车。2023年专项检测发现多构件涂层病害，存在力学损伤和环境侵蚀恶性循环风险。目前，对于同类桥梁涂层维护缺少针对性的方案，因此以该桥为例，对涂层病害特征、处治技术、全生命周期维护策略进行研究，对保障桥梁运行安全、延长服役年限有重要的现实意义。

一、工程背景与涂层病害特征

普立特大桥是G56杭瑞高速公路的控制性工程，主桥为双塔单跨钢箱梁悬索桥，主跨628m，钢箱梁梁宽28.5m、梁高3米，通车时间：2015年8月。2023专项检测报告（BG2023XCJ0261）显示，桥梁钢结构涂层损坏位于加劲梁内、主缆、索夹、吊索、索鞍、箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座

等主要结构部位，较为集中。涂层出现脱落、锈蚀、局部破损等情况，存在焊缝缺陷、螺栓松动等关联性病害。

从病害成因来看，钢结构涂层劣化是环境侵蚀、施工缺陷、材料老化共同作用的结果。首先，桥梁所处地区湿度较大，钢箱梁外表面长期被雨水冲刷，箱内空气不流通，冷凝水积聚，加速了涂层水解和钢材锈蚀；其次，施工阶段钢材表面清洁度不够，有油污、灰尘残留，涂层附着力差，部分区域涂装间隔过长，出

作者简介：吴艳红（1984.02-），女，云南昆明人，大学本科，中级工程师，研究方向：高速公路工程施工与养护研究。

现层间剥离；再次，材料时效作用下，环氧富锌底漆锌粉含量降低，面漆抗紫外老化能力下降，出现粉化、开裂等现象。索夹和主缆之间存在相对滑动，吊索存在振动，这些力学因素会加剧局部涂层破损程度，造成力学损伤和环境侵蚀相互促进的恶性循环。

二、钢结构涂层处治技术与实施要点

根据普立特大桥各构件涂层病害的不同特点，按照差异化处理、标准化施工、全过程质量控制的原则，根据构件的功能需求和受力特点，制定针对性处治方案。主要技术环节包括表面处理、涂层修复、质量验收。

（一）表面处理：质量控制的基础保障措施

表面处理是涂层修复的基础，直接决定涂层的附着力和耐久性。按照构件材质、病害程度和施工环境，选择恰当的处理工艺：对钢构件大面积锈蚀区域采用喷砂除锈工艺，钢箱梁内表面除锈处理达到 Sa2.5级，表面粗糙度控制在 $35 \sim 75 \mu\text{m}$ ；钢箱梁外表面除锈处理达到 Sa3.0级，表面粗糙度控制在 $40 \sim 80 \mu\text{m}$ 。确保钢材表面没有可见的氧化皮、锈蚀和油污；主缆、索夹、吊索下锚杯等精密构件用手工和动力工具结合除锈，除锈等级不低于 St3级。

表面清洁度用白布擦拭法检测，擦拭后白布无明显污渍；油污严重部位先用溶剂型清洗剂（三氯乙烯）脱脂，再进行除锈。表面粗糙度用粗糙度仪现场检测，每 10m^2 取3个测点，粗糙度符合涂层体系设计要求——环氧富锌底漆适配粗糙度 $40 \sim 70 \mu\text{m}$ ，氟碳面漆适配粗糙度 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 。表面处理完毕后应在4h内进行底漆涂装，超过8h或者表面出现返锈，需重新除锈，防止二次污染影响涂层质量。

（二）差异化涂层修复：基于构件特性的体系设计

各个构件的工作环境、受力状态都相差很大，必须根据构件自身情况选择相应的涂层体系和施工方式，以确保涂层具有良好的耐久性、功能性。

1. 加劲梁内涂层修复

加劲梁是桥梁的承重构件，涂层修复要兼顾防锈和力学性能。涂层体系为第一层环氧预涂层，第二、三层采用厚浆环氧中间漆、面漆，总膜厚 $200 \mu\text{m}$ ，通过除湿系统将箱内湿度控制在50%以下，防止冷凝水破坏涂层。焊缝区域的修复先对漏焊、补焊、打磨等缺陷进行处理，补焊后24h进行超声探伤和磁粉无损检测，合格后清理焊缝周围涂层，形成50mm过渡区，采用箱内刷涂方式涂底漆、中间漆和面漆，确保焊缝处的涂层厚度与周围一致。

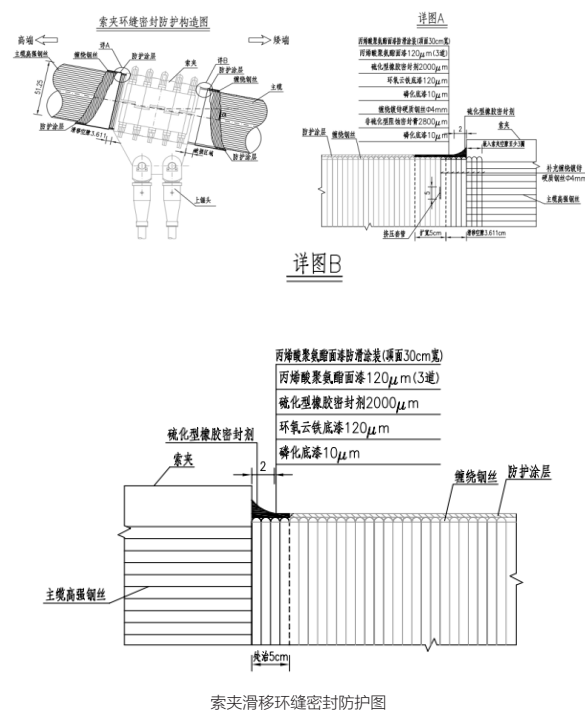
2. 加劲梁箱外检修道、风嘴上斜面、栏杆底座涂层修复

加劲梁箱外表面检修道涂层病害主要为普遍存在涂层脱落、锈蚀、劣化、开裂现象，处治方式为将人行检修道、风嘴上斜面及栏杆底座涂层全部清理，按原设计涂装体系进行全面重新涂装，全面修复外表面防护涂层。涂层体系为第一层采用环氧富锌底漆3道 $180 \mu\text{m}$ 、第二层环氧云铁封闭漆 $25 \mu\text{m}$ 、第三层环氧云铁中间漆 $80 \mu\text{m}$ 、第四、五层均喷涂氟碳面漆各 $40 \mu\text{m}$ ，总干膜厚 $365 \mu\text{m}$ 。采用15–20MPa高压无气喷涂工艺，漆膜厚度均匀

性，防止流挂、针孔等缺陷，确保焊缝等易蚀部位全覆盖。

3. 主缆与索夹涂层修复

主缆、索夹是悬索桥的主要受力构件，涂层修复要同时解决防腐和密封问题。主缆非缠丝段修复：磷化底漆均匀着色，环氧云铁底漆（ $120 \mu\text{m}$ ，2道），硫化型橡胶密封胶（ $5000 \mu\text{m}$ ），高强玻璃布（ $2000 \mu\text{m}$ ，2道），丙烯酸聚氨酯面漆（ $120 \mu\text{m}$ ，3道）；L2号索夹因滑移（滑移量 36.11mm ）造成主缆缠丝外露，处理时先复拧索夹螺栓（预紧力 385kN ），清除损坏、变质涂层，杂物等，用溶剂擦净主缆表面油污及沙尘等有害物质，涂磷化底漆一道（ $10 \mu\text{m}$ ），涂抹非硫化型阻蚀密封膏（ $2800 \mu\text{m}$ ），在腻子固化前截断滑移部分缠丝，补设直径4mm的镀锌硬质钢丝，用挤压套管连接原缠丝，连接点设于索夹侧，钢丝嵌入索夹槽至少3圈，缠丝后用非硫化型阻蚀密封膏对索夹进行嵌缝。涂层体系采用“磷化底漆（ $10 \mu\text{m}$ ）、环氧云铁底漆（ $120 \mu\text{m}$ ）、硫化型橡胶密封胶（ $2000 \mu\text{m}$ ）、聚氨酯面漆（ $120 \mu\text{m}$ ，3道）”，橡胶密封胶要填满索夹环缝，用特制工具压实，确保密封性能；主缆顶部30cm宽范围复涂聚氨酯防滑面漆，提升检修安全性。



4. 吊索、阻尼器与索鞍的涂层处理方案

吊索、阻尼器及主索鞍、散索鞍涂层病害处治表面处理除锈不得低于 Sa2.5级或者3级，移除的区域向外延伸20mm到50mm，彻底去除锈蚀和松散的涂层以及残渣灰尘；涂层修复采用和构件材质匹配的涂装体系，如缆套外表面处理除锈达到 Sa3.0，采用3道环氧富锌底漆（ $200 \mu\text{m}$ ）+2道有色金属环氧封闭漆+1道有色金属环氧中间漆（ $50 \mu\text{m}$ ）+2道聚氨酯面漆（总 $80 \mu\text{m}$ ）等。施工条件要符合环境要求，表面处理后4h内涂装，施工温度 $5^\circ\text{C} \sim 38^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于85%，钢材表面温度高于露点 3°C ，恶劣天气禁止施工。质量验收按加劲梁涂层标准，重点检测总干膜厚度和附着力，确保符合设计及规范要求。

（三）质量验收：全指标控制处理成效

涂层处治质量验收按照公路工程质量检验评定标准 JTGF80/1-2017、钢结构工程施工质量验收规范 GB50205-2020 的规定，采用过程检测和竣工检测相结合的方式。核心验收指标为涂层厚度、附着力和外观质量；涂层厚度检测用磁性测厚仪，按构件类型分检测单元，索塔、加劲梁等大型构件每10m²测10点，主缆、吊索等小型构件每5m测5点，干膜厚度小于设计值的测点数量不超10%，任意测点厚度不低于设计值的90%；附着力检测用拉开法，抽查5%且不少于5件构件，每件测1处，环氧富锌底漆附着力不低于3MPa，氟碳面漆附着力不低于5MPa；外观质量用目测法，漆膜平整均匀，无气泡、皱纹、流挂、漏涂等缺陷，色泽与原有涂层一致，用色差仪检测，色差需 $\Delta E < 2.0$ 。

三、钢结构涂层全生命周期维护策略

大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层耐久性并不是依靠一次性处治质量来完全实现的，而是通过全生命周期的维护来达到预防为主、防治结合的效果。根据普立特大桥的运营情况分析，维护策略应该包括日常监测、定期养护、应急处置这三部分。

（一）日常监测：建立病害预警机制

日常监测是及时发现涂层病害的重要手段，需将人工检查同智能检测相结合，构建起可视化、数据化的监测体系^[1]。人工巡检频率为每季度1次，重点对索夹环缝、吊索下锚杯、加劲梁边角等易锈蚀部位展开巡检，利用高清相机拍摄涂层状况，形成“一构件一档”的监测档案，记载病害位置、面积以及发展趋势。智能监测方面，在主缆、索塔等关键部位安装腐蚀传感器、温湿度传感器，实时采集钢材表面腐蚀电位、环境温湿度等数据，并通过物联网平台传送到后台，当腐蚀电位小于-0.85V时，即自动发出预警，起到提醒运维单位现场核查的作用。另外还要注意特殊天气后的应急监测：暴雨、台风过后，要重点检查迎风面的涂膜是否破损，防止雨水渗入导致锈蚀加重；冬季寒冷时，对箱体内冷凝水凝结情况进行检查，开启除湿系统，控制箱内相对湿度不大于60%。

（二）定期维护：延长涂层寿命

定期养护是维持涂层功能的重要环节，依据涂层材料的寿命和环境侵蚀强度，决定不同的养护周期和内容：环氧富锌底漆+氟碳面漆体系（加劲梁外表面）养护周期为3-5年，主要是涂层的清洁和局部的补涂，用高压水枪（压力 $\leq 0.8\text{MPa}$ ）清洗涂层表面的灰

尘、油污，局部粉化区域（粉化等级 ≤ 2 级）先打磨掉粉化层，再补涂面漆；环氧富锌底漆+聚氨酯面漆体系（加劲梁内表面）养护周期为2-3年，重点是涂层的附着力检查，用划格法检测，附着力等级不低于1级，附着力下降时，局部除锈后重新涂装^[2]。主缆和索夹涂层定期养护，要结合主缆除湿系统运行情况，每隔2年对索夹环缝密封性做一次检测，采用皂膜法检测密封性，若有气泡就重新灌注橡胶密封胶；每隔5年对主缆绞丝涂层全面检查，用超声波测厚仪检测涂层厚度，若低于设计值80%就整体复涂。

（三）突发病害应急处置的快速响应机制

突发病害（交通事故造成涂层破损、极端天气造成涂层大面积脱落）启动应急处置流程，48小时内处治。应急处置前需评估病害影响范围和风险等级：索夹、吊索等受力核心部位涂层破损，采用临时防护加永久修复两步法，用防腐胶带缠绕好破损部位，防止钢材暴露，在7天内完成喷砂除锈和涂层修复；加劲梁非承重部位涂层破损，采用便携式除锈工具局部除锈，补涂快干型环氧底漆和面漆，缩短施工周期。^[4-9]应急处置过程中，施工质量必须严格把控，临时防护措施要满足至少三个月的防腐需求，永久修复要符合原有的涂层体系设计要求，验收时增加附着力检测的频率，确保应急处置的效果和长期耐久性能够衔接^[3]。此外，针对不同气候区可能出现的特殊突发病害，还需制定应急措施：在沿海高盐雾地区，涂层起泡剥落，要先用淡水喷淋去除盐分，再返涂一次冷镀锌；工业污染严重地区，涂层受到酸雨侵蚀后泛白，应该先用弱碱性清洁剂中和，再涂刷抗酸雨功能落的系列丙烯酸面漆。所有的应急处理，都要详细记录病害的位置、处理的方法和材料的批次，建立病害处置档案，为之后涂层维护提供数据支持。

四、结语

对普立特大桥钢结构涂层病害实施差异化处理技术，针对各个构件分别设计涂层体系，严格处理表面状态，合格检验质量，改善各个核心构件涂层问题。经修复后所形成的涂层达到耐久性与功能性目标。全生命周期维护策略的实施，创建起完善的病害预警与应对机制，可及时发现涂层病害并予以处置。该研究形成的技术方案与维护模式，为大跨径钢箱梁悬索桥钢结构涂层处治提供了可以借鉴的实践经验，对提升同类桥梁涂层维护水平，保障桥梁长期安全稳定运营具有推广价值。

参考文献

- [1] 朱绪江. 大跨径钢箱梁悬索桥病害成因及维修策略分析 [J]. 上海建材, 2025, (04): 144-146.
- [2] 姜洪伟. 大跨径悬索桥加劲梁加工制造与拼装技术研究 [J]. 内蒙古公路与运输, 2022, (01): 19-23.
- [3] 周云. 复杂地质条件下大跨径独塔斜拉悬索桥施工关键技术研究 [J]. 建筑机械, 2024, (08): 161-166.
- [4] 白鹏宇. 大跨径悬索桥正交异性钢桥面板疲劳性能研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2017.
- [5] 谭仁智. 钢结构桥梁桥面铺装材料与技术研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008. DOI: 10.7666/d.Y1694123.
- [6] 赵鹏贤. 悬索桥索鞍、索夹设计、施工、维护常见问题探讨 [C]//2014钢结构桥梁论坛论文集. 2014: 311-314.
- [7] 姜俊强. 大跨径悬索桥结构桥梁定期检查的内容与方法 [J]. 电脑爱好者 (普及版) (电子刊), 2022(7): 767-768.
- [8] 苏林. 江阴长江大桥主缆系统运营中的涂装维护 [C]//特大跨径桥梁养护管理论坛暨中国桥梁自主创新论坛论文集. 2009: 104-109.
- [9] 陈若男. 大跨径钢箱梁悬索桥的病害分析及正交异性钢桥面板的疲劳研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2017.

绿色施工评价体系在土建工程管理中的构建分析

林龙

中国石油管道局工程有限公司第一分公司，河北 廊坊 065000

DOI:10.61369/ETQM.2026010008

摘 要： 在“双碳”目标和建筑业转型的当下背景下，绿色施工成了土建工程迈向可持续发展的核心路线，而科学的评价体系是保证绿色施工落地、增强工程管理效能的关键支撑。本文以绿色施工评价体系与土建工程管理融合为核心，针对理论基础、现存问题、构建路径三个维度展开综述：首先界定绿色施工评价体系的核心概念与理论支撑要素；随后剖析当前体系在指标设计、运行机制及实际落地中的不足；接着从指标体系优化、运行机制健全、技术融合赋能三个层面给出构建策略，为土建工程管理中绿色施工评价体系的优化与应用提供理论借鉴。

关 键 词： 土建工程管理；可持续发展；构建路径

Construction and Analysis of Green Construction Evaluation System in Civil Engineering Management

Lin Long

No.1 Branch Company, China National Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000

Abstract： Against the backdrop of the "dual carbon" goals and the transformation of the construction industry, green construction has become the core path for civil engineering to move towards sustainable development. A scientific evaluation system is a key support to ensure the implementation of green construction and enhance the effectiveness of project management. Focusing on the integration of the green construction evaluation system and civil engineering management, this paper conducts a review from three dimensions: theoretical foundation, existing problems, and construction paths. Firstly, it defines the core concepts and theoretical support elements of the green construction evaluation system. Then, it analyzes the shortcomings of the current system in indicator design, operation mechanism, and practical implementation. Subsequently, it proposes construction strategies from three aspects: optimization of the indicator system, improvement of the operation mechanism, and empowerment through technology integration. This paper provides theoretical references for the optimization and application of the green construction evaluation system in civil engineering management.

Keywords： civil engineering management; sustainable development; construction path

引言

伴随着我国建筑业从“规模扩张”过渡到“质量效益”转型，绿色施工已不再是行业发展的“额外添加项”，而是实现节能减排、资源高效运用及生态环境保育的“必要选项”。土建工程作为建筑业的核心领域，施工时资源消耗量大、对环境影响范围广，若缺失科学的评价标准与管理举措，绿色施工容易陷入“做样子”的困境。绿色施工评价体系凭借量化指标、界定标准，把绿色理念贯穿到土建工程管理从策划、实施到验收的全流程，既可规范施工行为，又能为工程管理提供可量化的考核依据。当前，我国绿色施工评价体系还存在指标与土建工程特性适配不足、评价流程与管理环节脱钩、技术支撑能力薄弱等问题，限制了其在工程管理中的实际效果。本文契合土建工程管理的实际需求，系统梳理绿色施工评价体系的理论基础及现存问题，重点探究体系构建的核心路径与保障手段，旨在为推动绿色施工与土建工程管理深度融合、提升工程绿色化水平提供理论支撑与实践指导。

一、绿色施工评价体系的理论基础

（一）核心概念界定

绿色施工评价体系是依据绿色施工理念，结合工程特点搭建

的，包含指标设计、权重分配、评价路径及结果应用的综合性管理工具。其核心目标是通过量化评比，实现土建工程施工阶段“环境友好、资源节约、管理高效、人员健康”的协同优化。从构成要素看，绿色施工评价体系主要涵盖四个维度：

环境维度：聚焦施工对周边生态、大气、水、噪声的影响，如扬尘控制措施、污水排放状况、噪声限定要求等；

资源维度：着眼能源、水资源、建材及土地资源的利用效率，如节能率、节水率、建筑垃圾回收率等；

管理维度：涉及绿色施工前期策划、制度建设、过程管理及人员培训，如专项方案编制、绿色施工责任制实施等；

人员维度：强调施工人员健康保障及绿色理念培养，如劳动防护用品配备、绿色施工培训覆盖率等。

（二）理论支撑体系

绿色施工评价体系的构建并非孤立存在，而是以多学科理论为支撑，确保体系的科学性与合理性。

1. 可持续发展理论

可持续发展理论强调“满足当前需求，不损害后代满足其自身需求的能力”，为绿色施工评价体系提供了核心价值指引。在土建工程管理中，该理论要求评价体系不能仅关注施工阶段的短期效益，更需兼顾资源长期利用效率与生态保护，例如通过设置相关指标推动可再生能源利用、建筑垃圾循环再利用，避免短期施工活动引发生态环境的长期破坏。

2. 循环经济理论

循环经济理论以“减量化、再利用、资源化”为核心原则，直接指导绿色施工评价体系的资源维度指标设计。在建材指标设置中，要求优先采用再生建材、绿色建材，并通过“建材损耗率”“建筑垃圾回收率”等指标，推动施工期间资源的循环利用，减少废弃物产生，契合循环经济“闭环式”发展要求。

3. 全生命周期理论

全生命周期理论将土建工程视为“策划—设计—施工—运营—拆除”的完整周期。绿色施工评价体系虽重点聚焦施工阶段，但需与全生命周期理念衔接：评判建材选择时，需考量建材生产阶段的能耗及环境影响；评价施工工艺时，应兼顾后续运营阶段的维护成本与节能效果，确保施工阶段的绿色措施与工程全生命周期的可持续性一致。

二、绿色施工评价体系在土建工程管理中的应用现状与问题

（一）应用现状概述

我国先后发布《绿色施工评价标准》（GB/T50640-2010）、《建筑工程绿色施工评价标准》（GB/T50640-2022）等规范，为绿色施工评价体系构建提供政策支持。在土建工程管理中，部分大型项目已引入绿色施工评价体系，将其与质量管理、安全管理并列为核心管理模块，依据评价结果优化施工方案、调整资源分配，取得了一定的环境效益与经济效益。从应用范围看，绿色施工评价体系在政府投资项目及重点工程中的应用比例较高，如市政道路建设、大型场馆建造等；从应用深度看，多数项目仍停留在“合规性评价”层面，即满足标准中基础指标要求，针对项目特性的“定制化评价”与“过程动态评价”较少，尚未完全融入工程管理全流程^[1]。

（二）现存核心问题

1. 指标体系与土建工程特性匹配度欠佳

当前，绿色施工评价指标多为通用性指标，缺少针对土建工

程不同类型（如房屋建筑、道路桥梁、地下工程）的差异化设计。例如，地下工程施工中，“基坑降水回收利用”“地下管线保护”等关键绿色环节未纳入核心指标；房屋建筑中“外立面节能施工”指标在道路工程中适用性差，导致评价结果无法真实反映项目绿色施工水平，也无法为工程管理提供精准指导。部分指标存在“重结果、轻过程”问题。如“节能率”指标仅审核施工阶段总能耗是否达标，未考量混凝土浇筑、钢结构安装等不同工序的能耗差异，难以通过评价发现能耗管控薄弱环节，不利于工程管理的精细化改进。

2. 评价运行机制与工程管理流程脱节

绿色施工评价体系的运行需与土建工程管理“策划—实施—验收”流程紧密配合，但当前多数项目存在“评价与管理两张皮”现象：第一，评价时机滞后。多数项目仅在施工结束后进行一次性综合评定，无法及时发现施工过程中的绿色施工问题，错失优化补救时机。第二，评价主体单一。评价工作多由施工单位自行开展，建设单位、监理单位参与积极性低，评价结果客观性不足，难以通过评价推动多方协同管理。第三，结果应用漏洞。评价结果未与工程管理的绩效考核、奖惩机制挂钩，施工单位缺乏落实绿色施工措施的主动性，导致评价体系沦为“表面化流程”，无法切实提升工程管理水平。

3. 技术支撑能力不足，难以满足动态评价需求

土建工程施工过程复杂、动态变化大，绿色施工动态评价与管理需实时数据支撑，但当前评价体系的技术支撑能力明显不足：第一，数据采集滞后。仍以人工统计为主，存在数据滞后、误差大等问题，如“建筑垃圾产量”“水资源消耗量”等指标需人工定期统计，难以实时反映施工现状。第二，新技术融合不足。缺少与BIM、物联网等新技术的融合应用，无法通过数字化手段实现施工过程实时监控与指标自动核算，导致评价效率低、管理成本高，难以适配土建工程大规模、复杂工况的管理需求。

三、土建工程管理中绿色施工评价体系的构建路径

（一）优化指标体系：建立与土建工程特性契合的差异化指标框架

1. 按土建工程类型设计差异化指标

针对房屋建筑、道路桥梁、地下工程等不同类型的土建项目，明确各类型项目绿色施工的关键环节，搭建差异化指标模块：

房屋建筑工程：增设“外墙保温层施工质量”“可再生能源（如太阳能）集成利用”“室内空气质量控制”等指标；

道路桥梁工程：重点纳入“路基土方平衡利用”“沥青路面再生利用”“施工扬尘精细化管控”等指标；

地下工程：新增“基坑降水回收利用率”“地下水土保持”“施工噪声低频控制”等指标^[2]。

采用“通用指标+专项指标”的框架设计，既保证评价体系的统一性，又提升指标与项目特性的匹配度，为各类土建工程的绿色管理提供精准指导。

2. 完善“过程+结果”双维度指标设计

在保留“节能率”“节水率”等结果性指标的基础上，纳入过程性指标，实现施工全流程绿色管控：在“能耗管控”指标中，

细分“混凝土浇筑工序能耗”“钢结构焊接工序能耗”等过程指标；在“环境保护”指标中，增设“施工扬尘实时浓度”“噪声实时分贝值”等动态指标；引入“绿色施工创新”加分项，引导施工单位在工程管理中采用新技术、新工艺，如“采用 BIM 技术优化绿色施工方案”“装配式施工技术应用”等，推动绿色施工与工程管理的创新融合。

（二）完善运行机制：实现与土建工程管理流程的深度契合

1. 建立“分阶段+动态化”评价流程机制

结合土建工程管理“策划、实施、验收”三个核心阶段，设定对应的绿色施工评价节点，实现评价与管理同步推进：

策划阶段：开展绿色施工预评价，结合项目特点优化绿色施工方案，明确各阶段评价指标目标值（如“施工综合节能率目标”“建筑垃圾回收目标”），为工程管理提供前期指导；

实施阶段：每季度开展过程检查，重点核查过程性指标落实情况（如“扬尘浓度是否超标”“工序能耗是否可控”），及时发现问题并督促整改，避免问题累积；

验收阶段：开展综合评价，结合过程评价结果与最终结果性指标，形成完整的绿色施工评价报告，作为工程验收与后续管理改进的依据^[3]。

2. 构建“多方协同”评价主体机制

明确建设单位、施工单位、监理单位、第三方机构的评价职责，形成协同评价格局：

施工单位：负责日常数据采集与自我评价，按周期提交评价报告；

监理单位：复核施工单位自评结果，监督绿色施工措施落实情况；

建设单位：组织过程评价与综合评价，协调解决评价中的争议；

第三方机构：对重点项目开展独立评价，确保评价结果公正客观。

通过多方参与，提升评价结果的可信度，同时推动各方在工程管理中形成绿色施工协同管控合力。

3. 健全评价结果应用机制

将绿色施工评价结果与工程管理的绩效考核、奖惩机制紧密结合：对评价优秀的施工单位，给予优先结算工程款、后续项目投标加分等奖励；对评价不达标且存在违规行为的单位，要求限期整改，并扣除相应绩效分数；将评价结果纳入施工单位信用评价体系，作为市场准入的重要依据。通过明确的激励与约束机制，激发施工单位落实绿色施工措施的积极性，推动评价体系从“走形式”转向“见实效”^[4]。

（三）强化技术赋能：推动评价体系与数字化技术融合应用

1. 基于物联网技术构建实时数据采集体系

在土建项目施工现场部署物联网设备，实现绿色施工指标数据的自动采集与实时传输：

安装智能水电表，实时采集各工序水、电消耗数据；配备扬尘传感器、噪声传感器，实时监测施工环境指标；采用 RFID 技术追踪建材，自动统计建材消耗量与损耗率。通过实时数据采集，解决人工统计滞后、误差大的问题，为绿色施工动态评价与工程管理提供精准数据支撑。

2. 运用 BIM 技术实现评价过程可视化与协同管控

将 BIM 技术与绿色施工评价体系整合，搭建可视化评价与管理平台：

将“节能率”“节水率”等绿色施工指标嵌入 BIM 模型，与模型中的墙体、管线等构件关联，实现指标直观展示；利用 BIM 协同管理功能，实现建设、施工、监理单位在同一平台共享评价数据、查看评价结果，推进多方协同管控；通过 BIM 模拟施工过程，提前优化绿色施工方案，如模拟不同施工工艺的能耗差异，选择最优方案，增强工程管理的前瞻性^[5]。

3. 借助大数据技术开展评价结果深度分析

利用大数据技术对绿色施工评价数据进行深度挖掘，为工程管理提供决策支持：分析不同类型土建项目绿色施工指标的差异，总结共性问题与优化方向；关联绿色施工指标与工程成本、工期数据，分析绿色施工措施的经济效益，为后续项目绿色方案策划提供参考；构建绿色施工评价数据库，生成行业基准值，为各项目绿色施工水平提供对比参照，促进行业整体管理水平提升。

四、结束语

绿色施工评价体系是推动土建工程管理向“绿色化、精细化、智能化”转型的关键工具，其构建需以理论为支撑、以问题为导向、以技术为赋能。当前，该体系在指标适配、运行机制、技术支撑等方面仍存在不足，需通过差异化指标设计、流程融合深化、数字化技术赋能等路径完善，同时辅以政策、管理、人员层面的保障措施，确保体系真正融入土建工程管理全流程。随着“双碳”目标的推进和智慧建造技术的快速发展，绿色施工评价体系需进一步拓展评价维度，持续为土建工程管理提供科学指导，推动建筑业实现可持续发展。

参考文献

[1] 魏长志, 宋长啸, 李慧. 绿色建筑全寿命周期建设工程管理和评价体系分析 [J]. 中国厨卫, 2025, 24(8): 48-50.
[2] 李琦. 精益建设下的绿色建筑工程施工质量管理模式分析 [J]. 产品可靠性报告, 2025(3): 87-88.
[3] 崔艺, 孙伟. 绿色建筑评价体系构建及其在可持续建筑中的应用研究 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(5): 33-35.
[4] 斯庭尉. 基于精益建设视角的绿色建筑工程施工质量管理方法 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(9): 169-171.
[5] 谢谋诚. 绿色施工评价指标在公共建筑项目中的应用效果评估 [J]. 南国博览, 2025(3): 68-71.

数控机床设备现代化管理与维修技术的运用

李胜蓝

东方电机有限公司，四川 德阳 618000

DOI:10.61369/ETQM.2026010009

摘 要： 数控机床作为现代制造业里的关键装备，它的运行稳定性以及维修效率会直接对生产效能造成影响，本文针对数控机床维修管理的现代化技术展开了系统的研究，着重探讨了状态监测技术、数据驱动的故障预测、智能化维修决策支持系统以及预防性维护策略在数控机床管理中的应用机制。经由剖析典型故障案例，像液压系统压力出现异常、伺服电机失调以及刀库定位失效等情况，呈现了现代化管理技术在故障快速定位、精准修复以及系统优化方面所有的优势，研究显示，基于数据分析和智能化技术的维修管理模式可极大地提升设备运行可靠性，减少停机时间，并且为智能制造背景下的设备全生命周期管理给予技术支撑。

关 键 词： 数控机床；维修管理；状态监测

Application of Modern Management and Maintenance Technology of CNC Machine Tool Equipment

Li Shenglan

Dongfang Electric Co., Ltd., Deyang, Sichuan 618000

Abstract： As core equipment in modern manufacturing, the operational stability and maintenance efficiency of CNC machine tools directly impact production effectiveness. This paper systematically explores modern maintenance management technologies for CNC machine tools, focusing on the application mechanisms of condition monitoring, data-driven fault prediction, intelligent maintenance decision support systems, and preventive maintenance strategies. Through analyzing typical failure cases such as hydraulic system pressure abnormalities, servo motor malfunctions, and tool magazine positioning failures, the study demonstrates the significant advantages of modern management technologies in rapid fault localization, precise repairs, and system optimization. The research indicates that maintenance management models based on data analysis and intelligent technologies can substantially enhance equipment reliability, reduce downtime, and provide technical support for equipment lifecycle management in the context of smart manufacturing.

Keywords： CNC machine tool; maintenance management; condition monitoring

引言

在“中国制造2025”战略的指引下，我国制造业正加速向智能化、数字化、网络化方向发展。数控机床作为现代制造业的基础装备，其现代化管理与维修技术的创新与应用对提升制造业整体水平具有重要意义。国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》明确指出，要大力推进高端数控机床与基础制造装备创新，加快推动数控机床的智能化发展^[1]。本研究主要针对数控机床维修管理的现代化技术应用展开系统剖析，深入剖析其在故障诊断、预防性维护以及系统优化方面的实现机制，同时借助案例以及数据分析来验证其实际效能，为智能制造背景下的设备管理提供理论与实践方面的参考依据。

一、数控机床维修管理现代化技术体系

随着工业4.0以及智能制造的不断快速推进，数控机床的维修管理已然从以往传统的被动修复模式转变为依靠数据驱动的主动预防方式，现代化的维修管理体系借助状态监测、数据分析以及智能化决策等技术，搭建起了以设备全生命周期管理作为核心

的技术框架。现代化维修管理体系主要覆盖以下几个关键核心模块，状态监测模块借助传感器收集设备运行参数，像温度、振动以及压力等，以此实时监测机床的运行状态，随后将所获取的数据传输至云端或者本地服务器，数据分析模块运用大数据分析以及机器学习算法来处理采集到的数据，识别出异常模式并对潜在故障给予预测。智能化决策模块依据分析结果，系统会自动生成

维修策略或者给出优化建议，支持快速做出决策，预防性维护模块依据历史数据以及预测模型，制定出定期维护计划，以此降低突发故障的概率，该体系借助模块之间的协同运作，达成了从数据采集直至决策执行的闭环管理，为数控机床的高效运行以及故障预防奠定了坚实的基础^[2]。

二、基于现代化技术的数控机床维修方法

（一）状态监测与实时故障定位

状态监测作为现代化维修管理的基础支撑，关键之处在于借助传感器以及物联网技术，实时获取设备运行时的各项参数，常见的监测参数有主轴振动情况、液压系统压力数值、伺服电机电流大小等，依据这些数据，系统可借助阈值分析或者异常检测算法，迅速确定故障所在区域，比如一旦主轴振动值超出设定的阈值，系统就会发出报警信号，同时生成故障报告，以此提醒维护人员对轴承或者平衡状态展开检查。

为了提升定位的精准程度，可以引入多参数关联分析的方式，举例来说，凭借把振动、温度以及电流数据进行结合，系统可判断出异常状况究竟是由机械磨损、电气故障还是控制逻辑错误所导致的，在实际应用过程中，状态监测系统可把故障定位的时间缩短到传统方法的三分之一，有效提高维修效率^[3]。

（二）数据驱动的故障预测

借助大数据以及机器学习算法的故障预测技术乃是现代化维修管理方面的关键进展，借助对过往运行数据以及故障记录展开分析，系统可构建起故障预测模型，识别出潜在风险，比如随机森林算法可依据主轴温度以及振动数据的走向，预测轴承失效的概率，预测的准确率可达到85%以上^[4]。

故障预测的实施步骤囊括以下方面：

故障预测技术是数控机床现代化维修管理的核心环节，通过数据驱动的方式实现故障的提前预警与预防性维护，其流程科学且高效。数据采集与清洗阶段，系统通过传感器全面收集设备运行参数，如振动、温度、压力等，并对数据进行预处理，剔除噪声、无效值及异常点，确保数据质量。特征提取阶段，系统分析并提取关键特征，例如振动频率、温度变化率、电流波动幅度等，形成反映设备状态的核心指标。模型训练阶段，利用历史故障数据和运行记录，通过机器学习算法（如随机森林或神经网络）构建高精度预测模型，捕捉故障模式与特征之间的关联。实时预测阶段，将传感器采集的实时数据输入训练好的模型，生成故障概率及设备剩余寿命的精确估计，为维护决策提供数据支撑。借助这一故障预测体系，维护人员能够在故障发生前采取针对性预防措施，例如调整运行参数或更换潜在故障部件，从而将设备停机时间减少约30%^[5]。该技术不仅提升了维修效率，还通过数据驱动的精准预测优化了设备全生命周期管理，为智能制造背景下的生产连续性和稳定性提供了强有力的技术保障。

（三）智能化维修决策支持

智能化维修决策系统借助整合状态监测以及故障预测的结果，自动生成维修方案，比如说，一旦系统检测出液压系统压力

出现异常情况，便会结合历史数据以及工艺要求，给出检查泵站或者更换密封件的建议，决策支持系统的核心优势在于其可以综合多源信息，迅速生成优化方案，防止人工判断产生主观误差。

在实际应用里，智能化决策系统可依靠人机交互界面也就是HMI来展示诊断结果以及维修建议，并且支持远程监控与操作，这种依靠数据驱动的决策模式提升了维修效率，还为设备全生命周期管理给予了数据支撑^[6]。

三、典型故障案例的现代化维修技术应用

（一）液压系统压力异常

液压系统是数控机床的关键动力部分，其压力出现异常情况时，可能致使加工精度降低或者设备停止运行，经统计，液压系统故障在数控机床停机事件里占比为20%至25%，其中60%是因为压力传感器失效或者管路发生泄漏，在现代的维修管理工作中，液压系统故障的诊断流程有高效性与系统性：借助压力传感器对系统压力数据进行实时采集，当压力值低于正常范围时，系统就会触发报警，随后，结合历史数据对压力下降趋势展开分析，识别泵站效率降低或者管路泄漏等潜在原因，接着，智能化决策支持系统生成维修优先级清单，建议检查泵站电机电流或者管路连接处，维护人员依照建议检查液压泵或者更换密封件，并验证压力恢复正常。依靠这一流程，液压系统故障的定位时间从传统方法的2小时缩短到30分钟以内，维修效率得到明显提升。

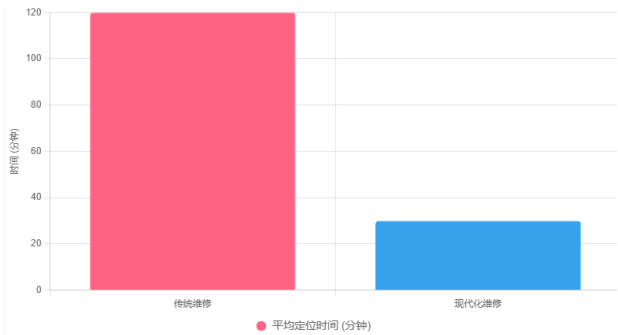


图1：液压系统故障诊断效率对比

（二）伺服电机失调

伺服电机失调属于数控机床中较为常见的电气故障情况，一般会出现定位精度降低或者运动时产生抖动等现象，依据现代化的维修技术，其诊断流程有高效以及系统化的特点：借助加速度传感器和电流传感器来收集电机运行数据，以此检测是否存在异常振动或者电流波动，运用机器学习模型对振动频率和电流波形加以分析，判断故障是不是因编码器失效或者驱动器参数失调所导致，借助HMI界面实时监测电机运行轨迹，以此验证预测结果的准确程度，依据系统给出的建议对驱动器参数进行调整或者更换编码器，完成修复工作。实际案例显示，该方法诊断伺服电机失调的准确率可达到90%以上，维修时间相较于传统方法缩短了大约40%，有效提高了维修效率以及设备运行稳定性。

（三）刀库定位失效

刀库定位出现失效情形属于自动换刀系统里较为常见的故障

状况，一般是因机械卡滞或者传感器信号丢失所引发的，现代化维修技术所有的诊断流程有高效以及系统化的特点：借助 PLC 以及传感器对刀库旋转角度以及定位信号给予监测，运用 PLC 梯形图来分析信号流，以此判断故障是不是由传感器失效或者逻辑条件未得到契合而致使的，凭借 HMI 界面记录刀库动作的时序，识别信号延迟或者抖动，依据分析得出的结果更换传感器或者调整机械限位，最终完成维修工作。数据驱动的诊断方法把刀库定位失效的故障定位时间从 1 小时缩减到了 20 分钟，使得生产效率得到了提升。

四、数据分析与维修管理优化

为了去验证现代化维修技术所有的效能，在此次研究当中，针对企业2024年的数控机床维修数据展开了详细分析，这些数据包含了主要数控机床的运行状态以及故障记录，总共涉及 500 次故障事件，最终得出的分析结果呈现如下：

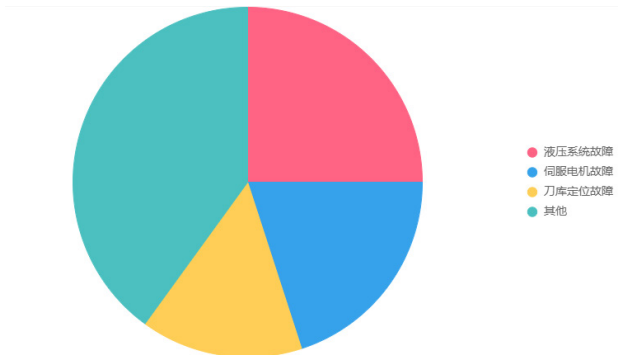


图2：故障类型分布

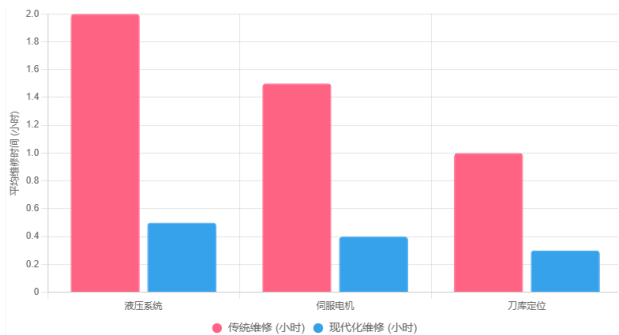


图3：维修时间对比

现代化维修技术应用于数控机床故障诊断与管理，有效提高了设备维护效率以及生产连续性，针对液压系统、伺服电机以及刀库定位等典型故障展开分析，现代化技术呈现出良好的效能，液压系统故障诊断借助压力传感器实时收集数据，依据历史数据分析压力下降趋势，生成维修优先级清单，指引维护人员检查泵站或者更换密封件，使得故障定位时间从原本的2小时缩短至30分钟。伺服电机失调诊断运用加速度传感器和电流传感器监测振动与电流波动情况，结合机器学习模型剖析波形，以此判断编码器或驱动器是否存在问题，经由 HMI 界面验证后调整参数或者更换部件，诊断准确率超过90%，维修时间减少了40%，刀库定位失效诊断凭借 PLC 监测旋转角度与定位信号，结合梯形图分析信号流以及 HMI 记录动作时序，识别机械卡滞或传感器失效状况，定位时间由 1 小时降低至 20 分钟。综合数据分析显示，现代化维修技术把平均维修时间从 1.5 小时缩短至 0.4 小时，效率提升了大约 73%，预防性维护策略凭借状态监测和故障预测，优化维护计划，将设备停机率从 12% 降至 5%，提高了生产连续性，这些技术依靠传感器、大数据分析以及智能化决策，构建起高效的维修管理体系架构，为设备全生命周期管理提供有力支撑。未来随着物联网和人工智能技术的融合发展，数控机床维修管理会朝着智能化、自动化方向迈进，为智能制造提供更强大的动力。

五、结束语

数控机床维修管理的现代化技术借助状态监测、数据驱动的故障预测以及智能化决策支持，对传统维修模式给予了彻底变革，有效提升了设备运行的可靠性以及生产效率，依靠传感器技术、大数据分析与人工智能算法，维修管理体系达成了从被动应对到主动预防的转变，为设备全生命周期管理给予了坚实的技术支持。实际案例分析显示，现代化技术缩短了故障定位与修复所需时间，还凭借预防性维护策略较大降低了设备停机率，未来随着工业物联网、云计算与机器学习技术的融合，数控机床的维修管理会朝着更高水平的智能化与自动化迈进，为智能制造的可持续发展增添新动力，推动制造业达成高效、精准且绿色发展的战略目标。

参考文献

[1] 宋光涛. 数控机床设备现代化管理与维修技术分析 [J]. 模具制造, 2025, 25(01): 36-38.
[2] 张洁, 荆强, 闫友恒. 基于精益制造的数控机床维护维修技术研究 [J]. 装备制造技术, 2024, (07): 178-180.
[3] 俞占仓. 数控机床机械设备故障诊断及维修策略研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(05): 202-204.
[4] 龚仲华, 夏怡. 交流伺服与变频技术及应用 [M]. 人民邮电出版社: 202111: 234.
[5] 王婷, 万志敏, 董应超. 信息化技术在高职数控设备故障诊断与维修课程中的实践——以“数控机床进给轴爬行故障检修”为例 [J]. 襄阳职业技术学院学报, 2021, 20(02): 65-68.
[6] 吴钧. 数控机床的电器故障诊断及维修技术探究 [J]. 内燃机与配件, 2020, (21): 147-149.

房建施工管理及成本控制分析

苏瑶

日照锦蓝城市发展有限公司, 山东 日照 276800

DOI:10.61369/ETQM.2026010010

摘 要： 本文围绕房建工程施工管理与成本控制这一议题，剖析了二者间相互依存、相互影响的协同关系。针对当前项目管理中普遍存在的动态环境适应性差、市场价格波动冲击、设计与施工脱节等难点问题，分别从构建动态协同管理体系、建立价格风险预警机制、推行设计与施工一体化模式等多个维度提出了应对策略，以期为房建项目实现管理效能与成本效益的协同提升提供参考与借鉴。

关 键 词： 房建工程；施工管理；成本控制；方法策略

Analysis of Construction Management and Cost Control in Building Construction

Su Yao

Rizhao Jinlan Urban Development Co., Ltd., Rizhao, Shandong 276800

Abstract： This paper examines the interdependent relationship between construction project management and cost control in building engineering. Addressing common challenges in modern project management—including inadequate adaptability to dynamic environments, market price volatility impacts, and design–construction disconnection—this study proposes strategic solutions through three key dimensions: establishing a dynamic collaborative management system, implementing price risk early–warning mechanisms, and adopting integrated design–construction models. These approaches aim to provide actionable references for achieving synergistic improvements in both management efficiency and cost–effectiveness within building construction projects.

Keywords： housing construction engineering; construction management; cost control; method strategy

引言

随着我国建筑行业向高质量、集约化发展阶段的转型，传统的房建项目管理模式正面临着前所未有的挑战与机遇。在激烈的市场竞争与严格的环保、安全标准下，如何全面有效提高房建施工管理管理，优化成本控制成效，关乎企业的可持续发展。

一、施工管理及成本控制的重要性

房建工程作为民生基础设施，其质量直接关系到公众生命财产安全与社会稳定。施工管理可通过系统化的组织、协调与控制，确保施工过程符合设计规范与质量标准，并采用行之有效的安全风险评估、安全教育培训和现场防护措施，显著降低高处坠落、物体打击等事故发生率。同时，房建项目涉及多工种、多设备的协同作业，施工管理通过科学编制进度计划、动态调整资源分配，能够优化施工流程，减少窝工与返工，提升作业效率。在成本控制方面，房建项目的成本构成复杂，包括人工费、材料费、机械费、管理费等，而成本控制则可通过精细化预算编制、

过程核算和动态调整，使项目在合同价范围内完成，而若成本控制失效，则往往会导致超支、索赔纠纷甚至企业资金链断裂^[1]。此外，成本控制可帮助企业积累历史数据、建设成本数据库，进而以此为基础制定更具竞争力的投标报价，同时保证合理利润，提高企业现金流和偿债能力等。

二、房建施工管理与成本控制的关联关系

（一）施工管理对成本控制的影响

施工管理作为项目执行的核心环节，直接决定着成本控制效能。一方面，施工进度计划的合理性是成本控制的前提，若进

度安排未充分考虑工序逻辑、资源约束及环境因素，则极易引发连锁反应，甚至因合同违约产生索赔成本。另一方面，材料、人力与机械的配置效率影响项目经济性。以材料管理为例，施工过程中提升需求计划精准度、集中采购谈判及余料回收机制，可显著降低采购成本与浪费率^[2]。再如，人力资源管理需匹配技能水平与工序需求，避免因操作不熟练导致的返工或材料损耗。

（二）成本控制对施工管理的反馈作用

成本控制可实时采集、分析成本数据，便于工程管理人员穿透施工管理的表层现象，精准定位潜在问题，为制定更具针对性的工程管理举措提供科学依据。比如，通过分析不同施工工艺的单位成本，可筛选出经济性最优方案，而成本偏差分析则可快速定位超支环节，指导资源重新分配。不仅如此，将成本节约率等成本控制指标纳入项目管理团队考核体系，可激发其主动管理意识，促使团队优化施工组织、挖掘节约潜力，形成“人人关注成本”的管理文化，助力全员参与成本控制。

（三）施工管理与成本控制的协同

施工管理与成本控制在多个维度上具有高度协同性，共同保障项目的顺利有序推进。在目标方面，过度压缩成本可能牺牲质量，而盲目赶工可能推高成本，需通过多目标优化模型，确定各目标的优先级与容忍阈值，为协同提供量化依据；在流程方面，可引入联合办公、成本例会制度等方式进行流程再造，实现数据共享与协同决策，构建形成“并行工程”管理模式。在技术方面，数字化工具的深度应用可构建形成数字生态，充分保障施工管理与成本控制的协同效果。

三、房建施工管理与成本控制面临的难点问题

（一）动态管理与复杂环境带来诸多挑战

在房建施工过程中，动态管理要求根据工程进展、现场实际情况以及各类突发状况及时调整施工计划、资源配置等。然而，复杂的环境使得这种动态调整变得极为困难。施工现场可能同时存在多种作业交叉进行，不同工种之间的作业顺序和时间安排需要精准协调，一旦某个环节出现问题，则会引发连锁反应，导致整个施工进度被打乱。同时，房建项目从项目规划到实施，涉及建设单位、设计单位、施工单位等多个参与方，本身具有复杂性和不确定性，若各方之间的沟通协调不畅，则易导致信息传递不及时、不准确，进而影响动态管理的效果。

（二）材料与人工价格波动大，冲击成本控制

材料和人工成本在房建施工总成本中占据着较大比例，其中宏观经济形势的变化、国际市场的影响以及行业内部的竞争等均会影响材料价格波动，人工价格波动则与劳动力市场的供求关系密切相关。工程实践表明，价格上涨会导致工程成本增加，若企业无法及时将成本增加转嫁到项目报价中，则势必会压缩利润空间，甚至可能导致项目亏损。而价格下跌虽看似有利于降低成本，但如果企业在采购时没有准确预测价格走势，过早大量采购材料，则会造成库存积压和资金占用。同时，价格波动还会影响企业资金安排和财务稳定性，增加企业经营风险。

（三）设计与施工环节脱节，返工与浪费明显

房建项目对工程设计与施工的协同性要求较高，若设计单位在完成设计方案后，未充分考虑施工可行性和经济性，则易在施工过程中出现各种问题，导致成本大幅增加。调查显示，部分设计单位与施工单位之间缺乏有效的沟通和协调，双方在项目前期交流欠充分，设计单位不了解施工单位的实际能力和施工条件，施工单位同样不清楚设计单位的具体设计思路^[3]。此外，建设单位在项目管理中对设计和施工的统筹协调不够，未能建立起有效的信息反馈渠道，使设计变更不能及时传达给施工单位，或者施工单位的问题不能及时反馈给设计单位。

（四）精细化程度不足，过程监管存在漏洞

在施工管理方面，部分工程对施工工序、工艺标准和质量要求等缺乏细致的规范和明确的量化指标，施工人员操作随意性较大。比如，在混凝土浇筑过程中，对于振捣时间、振捣力度等关键参数缺乏严格规定，容易出现混凝土不密实等质量问题。而在成本控制方面，对各项费用的核算不够精细，缺乏对成本动态变化的实时监控和分析，从而形成监管漏洞，出现材料浪费、人工效率低下等问题，增加工程成本。不仅如此，由精细化程度不足而造成的漏洞问题，还会影响企业管理水平和市场竞争力，使企业在激烈的市场竞争中处于劣势，难以获得良好的经济效益和社会效益。

四、房建施工管理与成本控制的优化策略

（一）构建动态协同管理体系，提升复杂环境适应性

在房建施工管理与成本控制中，构建动态协同管理体系是应对复杂环境挑战、提升管理效能的关键举措。对此，可采用模块化施工单元设计方法，将施工流程拆解为基础工程、主体结构、装饰装修等若干独立模块，每个模块设定标准工期、资源配比和成本阈值。当外部环境变化时，快速替换或调整模块，以减少全局影响，同时强化施工计划弹性。针对人工价格波动和技能需求变化，采用核心团队和灵活用工相结合的模式，前者负责关键工序，后者则根据工期需求进行动态调整，降低人工成本波动风险。建立联合决策机制，设立由各参与方代表组成的动态管理小组，定期召开协同会议，针对地质条件变化等施工中的突发问题进行联合决策，并同步调整工期和成本计划，优化资源配置，确保决策的科学性与时效性^[4]。

（二）建立价格风险预警与应对机制，稳定项目成本预期

正如前文所述，多类型因素均会导致价格剧烈波动，若缺乏有效预警与应对机制，企业势必会面临成本超支、利润压缩甚至资金链断裂风险。为稳定项目成本预期、提升企业抗风险能力，应主动建立价格风险预警与应对机制。一方面，将价格风险分为外部风险和内部风险，并建立风险传导路径图，分析价格波动如何通过供应链传导至项目成本，明确关键风险节点，为预警提供靶向目标。另一方面，定期收集历史项目数据、行业报告、政府公开信息等，结合专家访谈，建立涵盖材料类别、波动频率、影响幅度的风险数据库，标注政策调整、突发事件对价格的影响，

为后续预警模型提供数据支撑。同时，在项目预算中设置价格风险准备金，按材料与人工费用的一定比例计提，用于应对突发价格波动，形成风险缓冲带。

（三）推行设计与施工一体化模式，从源头减少变更与浪费

数据显示，因设计缺陷导致的变更占项目总变更的60%–70%，直接成本增加可达项目总价的3%–5%。设计与施工一体化模式主要侧重整合组织架构、再造流程和技术协同，打破设计与施工的壁垒，实现施工管理与成本控制的全周期优化。组建设计、施工联合体，将设计团队与施工团队纳入同一管理框架，共享成本、工期、质量等项目目标和考核机制，并设定“成本节约分成”规则，若通过设计优化减少材料用量，则按成本的特定比例分别奖励给设计团队和施工单位，激发双方协同动力。通过EPC总承包合同，将设计、采购、施工责任统一交由联合体承担，明确“设计缺陷导致变更”的损失由联合体内部消化，倒逼设计团队主动考虑施工可行性^[6]。在联合体中设置专职协调岗位，由同时具备设计经验与施工管理能力的复合型人才担任，负责统筹设计深化与施工方案对接。

（四）深化精细化管理应用，实现全过程成本精准控制

精细化管理注重将成本管理从传统事后核算向前延伸到事前预测、事中控制。对此，在项目启动阶段，必须依据施工图纸和施工组织设计，运用工作分解结构（WBS）将整个项目逐级分解至最小可管理、可计量的作业包。在此基础上，为每一个最末级的WBS单元匹配精确的人工、材料、机械等资源消耗预算，形成详细的成本计划。改变粗放的“包料”或随意领料模式，根据WBS分解出的各工序材料预算，结合施工进度计划，向施工班组签发限额领料单。采用赢得值法（EVM）计算成本偏差（CV）和进度偏差（SV），清晰判断在某一检查点上，成本是节约还是超支，进度是提前还是滞后，辅助精准定位问题所在工序和责任部门。收集和整理各WBS单元的实际人工工效、材料实际损耗率、机械台班产量等关键成本数据，用于持续优化施工工艺和管理流程。

（五）加强数字化技术融合，打造智慧工地与成本管控平台

传统管理模式依赖人工记录、经验决策和事后分析，容易造成成本数据滞后、偏差溯源困难、协同效率低下，因而对数字化

技术的应用产生强烈需求。基于数字化技术的智慧工地与成本管控平台可实时采集施工数据、动态预警成本偏差、智能调配工程资源，有助于推动成本管理向主动预控方向转型。对此，可在工地现场部署边缘计算节点，对终端采集的原始数据进行清洗、聚合和初步分析，减少云端传输压力，并内置规则引擎，实现基础成本预警的本地化处理。利用云端平台整合各边缘节点的数据，通过大数据分析挖掘成本偏差的深层原因，并利用AI模型预测未来成本趋势，为管理层提供决策支持。基于施工进度和资源库存构造资源优化模块，自动生成最优调配方案，对工程资源进行智能调配与闲置再利用。

（六）完善考核与激励机制，培育全员成本控制文化

结合工程项目实际，将成本控制指标量化并层层分解，纳入从项目经理到一线班组的个人绩效职中。其中，对于管理层，其绩效考核应与项目的整体成本节约率、责任成本降低额等宏观指标直接挂钩；对于执行层，则需设定更为具体的微观指标，比如材料损耗率、工时效率、非必要变更签证发生率等。按施工流程设置关键节点考核，将成本考核嵌入施工工序，在基础工程阶段重点考核土方开挖超挖量和钢筋绑扎返工率，主体结构阶段考核模板周转次数和混凝土超耗量等，而在装饰装修阶段则应考核材料损耗率、人工工效偏差等。严格执行“质量安全一票否决制”，一旦在其责任范围内发生重大质量事故或安全责任事故，无论成本绩效如何优异，均不应具备获得奖励资格。

五、结语

综上所述，受限于诸多主客观条件，当前房屋施工管理和成本控制中依然存在诸多难点问题，制约着项目整体效益的持续优化提升。因此，工程管理人员应精准把握施工管理与成本控制之间的关联关系，建立健全基于全流程的工程管理体系，积极有效引入先进数字化技术工具，探索形成更为有效的可持续项目管理能力架构，为全面提高企业竞争力创造良好条件，为推动行业迈向更加精益、智能与高效的新阶段贡献力量。

参考文献

[1] 俞益华. 基于多目标模型的房建施工成本动态调控技术研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(8)[2025-07-28].
[2] 甘宇. 房建工程施工阶段成本控制的精细化管理策略研究 [J]. 中华民居, 2025, 18(01): 157–159.
[3] 陈达怡. 房建安装工程施工成本控制与造价管理的措施研究 [J]. 中华民居, 2024, 17(06): 159–161.
[4] 杨晨光. 基于精益管理的房建施工成本控制策略研究 [J]. 陶瓷, 2025, (07): 123–125.
[5] 王克林. 房建施工全过程成本管控体系的构建与应用分析 [J]. 城市开发, 2025, (13): 170–172.

高速公路桥梁施工中地基处理的技术要点分析

巍巍, 王浙健

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ETQM.2026010011

摘 要 : 高速公路桥梁地基作为桥梁结构的承载基础, 其稳定性直接决定桥梁的安全性能与使用寿命。本文以高速公路桥梁地基处理为研究对象, 结合不同地质条件 (软土地基、岩质地基、填土地基) 的工程特性, 分析地基处理需解决的核心问题, 如承载力不足、沉降变形、抗滑稳定等。在此基础上, 系统梳理换填垫层法、排水固结法、复合地基法、注浆加固法等常用处理技术的适用场景与操作要点, 重点探讨施工过程中的技术控制难点 (如沉降监测、压实度控制、浆液配比), 并提出针对性优化建议, 旨在为高速公路桥梁地基处理提供技术参考, 确保地基满足桥梁结构的承载要求与长期稳定性需求。

关 键 词 : 高速公路桥梁; 地基处理; 软土地基; 复合地基; 沉降监测; 承载力

Analysis of Technical Key Points of Foundation Treatment in Expressway Bridge Construction

Wei Wei, Wang Zhejian

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

Abstract : As the load-bearing foundation of the bridge structure, the stability of the foundation of expressway Bridges directly determines the safety performance and service life of the Bridges. This paper takes the foundation treatment of expressway Bridges as the research object, and combines the engineering characteristics of different geological conditions (soft soil foundation, rock foundation, fill foundation) to analyze the core problems that need to be solved in foundation treatment, such as insufficient bearing capacity, settlement deformation, and anti-skid stability. Based on this, the applicable scenarios and operational key points of commonly used treatment techniques such as the replacement and filling cushion method, drainage consolidation method, composite foundation method, and grouting reinforcement method are systematically sorted out. The technical control difficulties during the construction process (such as settlement monitoring, compaction degree control, and slurry ratio) are mainly discussed, and targeted optimization suggestions are put forward, aiming to provide technical references for the foundation treatment of expressway Bridges. Ensure that the foundation meets the load-bearing requirements and long-term stability demands of the bridge structure.

Keywords : expressway bridge; foundation treatment; soft soil foundation; composite foundation; settlement monitoring; bearing capacity

前言

高速公路桥梁地基与普通公路地基相比, 具有承载荷载大、沉降控制严、耐久性要求高的特点——桥梁墩台需承受上部梁体、车辆荷载及环境荷载 (如风力、温度变化), 地基需具备足够的承载力 (通常要求 $\geq 250\text{kPa}$); 同时, 桥梁结构对沉降变形极为敏感, 工后沉降需控制在 50mm 以内, 不均匀沉降需 $\leq 2\%$, 避免因沉降差异导致结构内力集中。这就要求地基处理不仅要满足短期承载力需求, 更要保障长期稳定性, 减少后期沉降变形。基于此, 深入分析不同地质条件下地基处理的技术要点, 对提升高速公路桥梁工程质量、降低运维成本具有重要现实意义。

一、高速公路桥梁地基处理核心需求与地质特性

高速公路桥梁地基处理需围绕三大核心需求展开: 一是满足承载力要求, 桥梁墩台、桩基荷载需通过地基传递至深层土层,

需通过加固、换填等技术提升地基承载力, 通常要求地基承载力特征值 $\geq 200\text{kPa}$, 特大跨度桥梁需 $\geq 300\text{kPa}$, 避免地基剪切破坏引发墩台倾斜、沉降超标; 二是控制沉降变形, 地基沉降含瞬时、固结、次固结三类, 简支梁桥工后沉降需 $\leq 30\text{mm}$, 连续梁

桥、斜拉桥等大跨度桥梁需 $\leq 20\text{mm}$ ，不均匀沉降 $\leq 1\%$ ，需通过排水、加固加速沉降稳定，防止桥面开裂、支座变形；三是保障抗滑与抗渗稳定，山区岩质地基需解决顺层岩面、裂隙引发的抗滑问题，地下水丰富区域需设防渗层或封堵裂隙，避免地基土软化、管涌。^[1]

常见地质类型及工程特性差异显著：软土地基多见于沿海、河流冲积平原，由淤泥、泥炭土组成，天然含水量 $\geq 35\%$ 、孔隙比 ≥ 1.0 、压缩系数 $\alpha_{1-2} \geq 0.5\text{MPa}^{-1}$ 、承载力 $\leq 100\text{kPa}$ ，易产生长期固结沉降，某沿海桥梁因处理不当，通车3年墩台沉降达80mm致桥面开裂；岩质地基分布于山区，以花岗岩等硬质岩石为主，承载力 $\geq 500\text{kPa}$ 但易有裂隙、溶洞，某山区桥梁因隐蔽溶洞未处理，墩台浇筑后坍塌下沉50mm；填土地基多见于城市周边，成分复杂、压实度 $\leq 85\%$ 、均匀性差，易出现工后沉降，某互通桥梁因压实度不足，通车1年不均匀沉降20mm致支座失衡。

二、高速公路桥梁地基处理常用技术及操作要点

（一）软土地基处理技术及要点

1.换填垫层法：适用于软土层厚度 $\leq 3\text{m}$ 的浅层软土地基，通过将表层软土挖除，换填级配砂石、碎石、灰土等强度高、压缩性低的材料，分层压实（压实度 $\geq 96\%$ ），形成垫层，提升地基承载力。操作要点包括：①确定换填深度与范围，换填深度需超过软土层厚度，范围需超出墩台基础边缘1.5~2.0m，避免侧向挤出；②控制垫层材料级配，砂石垫层需选用粒径5~30mm的级配砂石，含泥量 $\leq 5\%$ ；③分层压实，每层虚铺厚度20~30cm，采用重型压路机碾压，压实度需经检测合格后再进行下一层施工。例如某平原高速公路桥梁，采用30cm厚级配砂石垫层处理浅层软土地基，处理后地基承载力提升至180kPa，满足设计要求。^[2]

2.排水固结法：适用于软土层厚度3~10m的深厚软土地基，通过设置排水系统（如塑料排水板、砂井），加速软土中水分排出，促进软土固结，提升地基承载力。操作要点包括：①布置排水系统，塑料排水板需垂直插入软土层底部，间距1.0~1.5m，砂井直径30~50cm，深度需穿透软土层；②施加预压荷载，采用堆载预压（堆载强度 \geq 设计荷载的1.2倍）或真空预压（真空度 $\geq 80\text{kPa}$ ），预压时间根据固结度确定，通常需6~12个月，确保固结度 $\geq 85\%$ ；③监测沉降与孔隙水压力，预压期间每周监测1次沉降，当连续2周沉降速率 $\leq 2\text{mm/周}$ 时，可停止预压。例如某沿海高速公路桥梁，采用塑料排水板+真空预压处理深厚软土地基，预压后软土压缩模量提升3倍，工后沉降控制在25mm以内。

3.复合地基法：适用于软土层厚度5~15m的软土地基，通过在软土中设置增强体（如水泥土搅拌桩、碎石桩、CFG桩），与软土共同承担荷载，形成复合地基，提升承载力与稳定性。操作要点包括：①选择增强体类型，水泥土搅拌桩适用于含水量高的软土，桩径50~60cm，水泥掺量 $\geq 15\%$ ；CFG桩适用于承载力要求高的区域，桩径40~50cm，混凝土强度等级 $\geq \text{C}20$ ；②控制桩体施工质量，搅拌桩需确保搅拌均匀，无断桩、缩颈现象；CFG桩需控制沉管深度与拔管速度，避免桩身离析；③检测复合地基

承载力，采用平板载荷试验，复合地基承载力需 \geq 设计值的1.1倍。例如某高速公路特大桥，采用CFG桩复合地基处理软土地基，桩长12m，桩间距1.2m，处理后复合地基承载力达300kPa，满足特大跨度桥梁的荷载要求。

（二）岩质地基处理技术及要点

1.裂隙封堵法：适用于裂隙发育的岩质地基，通过注浆（水泥浆、水泥砂浆）封堵岩石裂隙，防止地下水渗入，增强岩石整体性。操作要点包括：①勘察裂隙分布，采用地质雷达、钻孔取芯等方式，确定裂隙走向、宽度、深度；②布置注浆孔，注浆孔需沿裂隙走向布置，孔距2~3m，深度需穿透裂隙发育层；③控制注浆参数，水泥浆水灰比1:1~1:1.5，注浆压力0.5~1.0MPa，采用分段注浆方式，确保浆液填满裂隙，注浆结束后需钻芯检测，裂隙填充率需 $\geq 90\%$ 。例如某山区高速公路桥梁，岩质地基存在2~5mm宽裂隙，采用水泥浆注浆封堵后，岩石整体性显著提升，抗渗系数降低1个数量级。

2.溶洞处理法：适用于存在溶洞的岩质地基，根据溶洞大小与填充情况，采用回填法、支撑法或跨越法处理。操作要点包括：①探测溶洞规模，通过钻孔、地质雷达确定溶洞位置、尺寸、填充介质（如空洞、淤泥、碎石）；②选择处理方案，小型溶洞（直径 $\leq 2\text{m}$ ）采用碎石+水泥浆回填，分层压实；中型溶洞（直径2~5m）采用钢筋混凝土盖板支撑；大型溶洞（直径 $> 5\text{m}$ ）采用桥梁桩基跨越，桩基需嵌入溶洞底部稳定岩层 $\geq 3\text{m}$ ；③检测处理效果，回填后需进行平板载荷试验，支撑结构需进行强度检测，确保满足承载要求。例如某高速公路桥梁，岩质地基存在直径3m的空洞型溶洞，采用钢筋混凝土盖板（厚度50cm）支撑处理后，地基承载力达600kPa，满足墩台荷载要求。^[3]

3.风化层处理法：适用于风化层较厚（厚度 $> 3\text{m}$ ）的岩质地基，通过挖除风化层或加固风化层，确保地基稳定性。操作要点包括：①区分风化程度，采用钻孔取芯确定风化层类型（全风化、强风化、中风化），全风化层需全部挖除，强风化层可采用注浆加固；②挖除风化层时，需控制开挖坡度（1:1.5~1:2.0），避免边坡坍塌；③加固强风化层时，采用水泥-水玻璃双液注浆，水玻璃掺量10%~15%，注浆压力0.8~1.2MPa，加固后强风化层承载力需 $\geq 300\text{kPa}$ 。例如某山区高速公路桥梁，岩质地基全风化层厚度5m，挖除后换填碎石垫层，处理后地基承载力达450kPa，满足设计要求。

（三）填土地基处理技术及要点

1.分层压实法：适用于填土层厚度 $\leq 5\text{m}$ 、成分较均匀的填土地基，通过分层开挖-回填-压实，提升填土压实度与均匀性。操作要点包括：①划分压实分层，每层压实厚度20~30cm，开挖时需按分层标高控制，避免超挖；②选择压实机械，采用重型振动压路机（吨位 $\geq 20\text{t}$ ），碾压次数6~8遍，碾压速度2~3km/h；③检测压实度，每层压实度需 $\geq 96\%$ （上路床标准），采用环刀法或灌砂法检测，合格后再进行下一层施工。例如某高速公路互通桥梁，填土地基采用分层压实处理，压实度达97.5%，处理后地基承载力提升至220kPa，工后沉降控制在15mm以内。

2.强夯法：适用于填土层厚度5~10m、含碎石较多的填土地

基，通过重锤（10–30t）自由下落（落距8–15m）产生的冲击能，压实填土，减少孔隙率。操作要点包括：①确定强夯参数，根据填土厚度确定锤重、落距、夯点间距（3–5m）、夯击次数（每点6–8击）；②划分夯击区域，按“先边缘后中间、隔点夯击”的顺序施工，避免填土侧向位移；③检测处理效果，强夯后需检测地基承载力（ $\geq 200\text{kPa}$ ）与压缩模量，同时监测沉降，确保工后沉降 $\leq 30\text{mm}$ 。例如某高速公路服务区桥梁，填土地基厚度8m，采用20t重锤、12m落距强夯处理，处理后填土孔隙率从35%降至18%，承载力达250kPa。^[4]

三、高速公路桥梁地基处理施工质量控制措施

（一）强化施工过程监测

1. 沉降监测：在地基处理区域布设沉降观测点（墩台基础周边每5–10m1个点），采用水准仪按频次监测——预压期间每周1次，施工期间每3天1次，通车后每月1次，记录沉降数据，绘制沉降曲线，当沉降速率 $> 5\text{mm/天}$ 或累计沉降超限时，需暂停施工，分析原因并调整处理方案。例如某软土地基桥梁，沉降监测发现某观测点单日沉降达8mm，及时增加塑料排水板密度，控制沉降速率降至2mm/天以内。^[5]

2. 承载力监测：采用平板载荷试验、静力触探试验等方式，检测地基处理后的承载力——换填垫层法需在垫层施工完成后检测，复合地基法需在桩体养护28天后检测，强夯法需在施工完成1个月后检测，承载力需满足设计要求的1.1倍以上，若不达标，需重新进行地基处理。例如某填土地基桥梁，强夯后承载力检测仅180kPa（设计要求200kPa），补充2遍强夯后，承载力提升至220kPa。

3. 施工参数监测：实时监测关键施工参数，如注浆加固时的

注浆压力、浆液流量；搅拌桩施工时的搅拌速度、水泥掺量；强夯施工时的锤重、落距、夯击次数，确保参数符合设计要求。例如注浆施工中，若注浆压力突然下降，可能存在浆液泄漏，需停止注浆，查找泄漏点并封堵后再继续施工。

（二）严格材料质量管控

1. 垫层材料管控：换填用砂石、碎石需检测级配、含泥量、压实系数，级配需符合设计要求（如砂石垫层粒径5–30mm），含泥量 $\leq 5\%$ ，压实系数 ≥ 0.96 ；灰土垫层需控制石灰含量（ $\geq 10\%$ ），石灰需为Ⅲ级以上，活性氧化钙含量 $\geq 70\%$ ，避免使用受潮或过期石灰。

2. 注浆材料管控：水泥需选用P.O42.5级普通硅酸盐水泥，检测强度、安定性，确保合格；水玻璃需检测模数（2.4–3.0）、浓度（40–50Be'）；浆液配比需按设计要求配制，搅拌均匀，每批次浆液需制作试块，检测28天强度，强度需 \geq 设计值（如水泥浆试块强度 $\geq 15\text{MPa}$ ）。^[6]

3. 桩体材料管控：CFG桩用混凝土需检测坍落度（180–220mm）、抗压强度（ $\geq \text{C}20$ ），每50m³制作1组试块；水泥土搅拌桩用水泥需检测细度、初凝时间，搅拌时水泥掺量需按设计值（ $\geq 15\%$ ）控制，避免掺量不足导致桩体强度不够。

四、结语

高速公路桥梁地基处理是桥梁建设的基础工程，其技术要点需结合地质条件动态调整——软土地基需重点解决沉降与承载力问题，岩质地基需聚焦裂隙与溶洞处理，填土地基需强化压实与均匀性控制。在施工过程中，需通过强化过程监测、严格材料管控、推动技术创新等，这样才能确保地基处理质量达标。

参考文献

- [1] 张明. 公路桥梁工程软土地基施工处理技术要点分析 [J]. 青海交通科技, 2022, 34(3): 54–56.
- [2] 赵乾. 公路桥梁施工技术中软土地基处理研究——以S06酒（泉）嘉（峪关）环线高速公路项目为例 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(10): 79–83.
- [3] 崔亚超. 公路路基和桥梁工程施工中的质量控制对策 [J]. 建筑技术开发, 2022, 49(14): 134–136.
- [4] 王刚. 高速公路软土路基桥涵过渡段差异沉降研究 [J]. 西部交通科技, 2024, (1): 14–17.
- [5] 杜占涛, 万雷. 软土路基过渡段压实质量检测方法与关键控制指标研究 [J]. 工程机械, 2023, 54(9): 129–133.
- [6] 邹韬, 邹仕印. 探究公路与桥梁施工的质量管理方法 [J]. 江西建材, 2015, (22): 187.

建筑工程施工技术控制与优化研究

卫兵

中共天津市委党校, 天津 300450

DOI:10.61369/ETQM.2026010012

摘 要 : 随着建筑行业向高质量方向发展, 施工技术控制与优化已成为提升工程品质、保障施工安全、提高资源利用效率的核心环节。本文基于当前建筑行业发展现状, 聚焦建筑工程施工技术的控制与优化开展研究, 系统分析了施工技术控制中存在的 key 问题, 包括工序控制不力、技术交底脱节、新技术应用受阻等痛点, 并提出了构建信息化动态控制体系、推行标准化精细作业、建立技术创新激励机制、强化专业技术人才培养等四位一体的优化策略。研究表明, 通过技术控制与管理的深度融合, 可实现建筑工程从粗放式管理向精细化建造的转型升级, 为行业可持续发展提供技术支撑。

关 键 词 : 施工技术控制; 技术优化; 建筑工程; BIM 技术; 标准化管理作者信息

Research on the Control and Optimization of Construction Technology in Architectural Engineering

Wei Bing

Party School of the CPC Tianjin Municipal Committee, Tianjin 300450

Abstract : As the construction industry advances towards high-quality development, the control and optimization of construction technology have become crucial for enhancing project quality, ensuring construction safety, and improving resource utilization efficiency. Based on the current development status of the construction industry, this study focuses on the control and optimization of construction technology in building projects. It systematically analyzes key issues in construction technology control, including ineffective process control, disconnection in technical disclosure, and obstacles in applying new technologies. A four-pronged optimization strategy is proposed, which involves establishing an informatized dynamic control system, promoting standardized and precise operations, creating a technological innovation incentive mechanism, and strengthening the cultivation of professional technical talents. The research indicates that through the deep integration of technical control and management, the construction industry can achieve a transformation from extensive management to refined construction, thereby providing technical backing for the sustainable development of the sector.

Keywords : construction technology control; technology optimization; building projects; BIM technology; standardized management

引言

建筑工程施工技术的科学控制与持续优化是确保工程项目质量、安全与效益的关键所在。随着我国建筑行业规模持续扩大和技术要求不断提高, 施工技术管理已成为影响工程成败的决定性因素。据统计, 2024 年我国建筑业总产值达到 32.7 万亿元, 但质量通病发生率仍居高不下, 这与施工技术控制不到位密切相关。

有效的技术控制不仅能够规范施工流程、预防质量隐患, 还能显著提高资源利用效率, 缩短工期 10%-15%, 降低工程成本 5%-8%。然而, 当前许多工程项目在关键工序管理、技术交底落实、新技术应用等方面仍存在明显短板, 制约了工程质量进一步提升。特别是在超高层建筑、大跨度结构、装配式建筑等复杂工程中, 传统施工技术控制方法已难以满足现代工程建设的需求。因此, 对施工技术控制过程中所存在的棘手难点展开深度剖析, 探寻具备实际可操作性的优化对策对于提高建筑工程的整体建设水准、促进建筑行业实现持久且稳健的发展而言, 有着极为关键的现实价值^[1]。

本文结合行业最新发展动态, 从系统性、实用性角度出发, 构建了一套完整的施工技术控制与优化体系。

一、建筑工程施工技术控制与优化的重要性

（一）保障质量安全的基石

对施工技术实施严格管控并进行持续优化是确保工程实体质量以及结构安全的根本前提条件^[2]。在建筑施工过程中，任何一道工序的偏差都可能埋下严重安全隐患。根据住房和城乡建设部数据，2023年建筑工程质量事故中，因技术控制不到位导致的比例高达65%。技术控制并非仅仅是对流程的简单遵循，而是把设计规划安全稳妥、切实可靠地转变为实际工程的关键支撑，其重要意义显而易见。以混凝土施工为例，从配合比设计、浇筑工艺到养护措施的全过程技术控制，直接影响混凝土的最终强度和耐久性。现代建筑工程中，通过引入自动化监测设备和大数据分析，可实现施工过程的实时监控和预警，将质量安全隐患消除在萌芽状态。

（二）控制成本工期的关键

对施工技术展开有效的管控以及具有前瞻性的优化举措，是实现项目成本节约和工期目标的核心途径。研究表明，精细化的技术管理可使材料损耗率降低3%~5%，劳动生产率提高15%~20%。于技术控制范畴而言，精确无误的测量放线可规避重新施工的情况，合乎规范的模板安装能够减少混凝土的不必要浪费，科学合理的材料管理能够降低材料损耗，上述这些情况均会直接转变为经济方面的效益。在技术方面不断地追求极致精准并进行创新性的运用，是促使项目管理从较为“粗放的模式”迈向“精细的模式”，达成降低成本、提高效益这一目标的关键推动力量^[3]。

（三）推动行业进步的引擎

对施工技术持之以恒地开展优化与创新工作，是带动建筑行业整体实现转型与升级的核心动力源泉。伴随社会对于建筑质量、能源节约与环境保护以及施工效能的要求持续攀升，以往那种依靠人力的传统施工方式已然难以继续维持，技术的优化进程本质上就是摒弃陈旧工艺、采用先进技术的进程。依托技术优化开展实践活动项目的建造水准得到了提升，更于宏观范畴催生出全新的生产模式以及管理理念，持续促使建筑业向着高质量、高效率、低消耗的可持续发展路径前行。

二、当前建筑工程施工技术控制中存在的主要问题

（一）关键工序控制不力

于当下建筑工程实施进程中针对那些危险系数较高、技术层面复杂的核心分部分项工程而言，其流程管控的力度依旧较为不足。2023年行业调研数据显示，超过40%的项目在关键工序控制方面存在明显缺陷。在基坑支护工程中，锚杆预应力的张拉未能达到应有的标准，土钉墙的施工存在偷工减料情况；在高支模体系里，扫地杆和剪刀撑的搭设显得很随意，扣件拧紧的力矩没有达到规定数值；对于大体积混凝土，内外温差监测仅仅走了个形式，养护措施运用不当引发温度裂缝，这些针对关键工序的监控缺乏力度，其根源主要在于项目管理处于缺失状态、监管责任没有切实落实，为了追求工程进度而舍弃了必要的技术间歇时间，

给工程埋下了难以准确估量的风险。

（二）技术交底与执行脱节

技术交底身为衔接设计和施工的关键枢纽部分，常出现“上层热、下层冷”的脱节现象，这使得顶层的技术设想难以在操作层面精准地得以施行，当下大部分项目的技术交底依旧停留在过往那种“在会议上宣读”或者“发放纸质资料”的形式，其内容满是专业方面的术语以及规范条文，没有转变为一线工作的工人尤其是农民工能够理解记住的直观性指令。此类型单向且形式化的交底工作，未充分考虑接受者的知识架构以及实际操作情境，其后果通常是工人依据“经验”与“感觉”开展施工工作。比如图纸里复杂的钢筋节点排列状况，要是缺少可视化的三维模型予以辅助极有可能引发绑扎失误；对于模板平整度、垂直度的特定指标，要是不在现场制作实体样板，仅仅依靠口头阐释很难确保执行成效。此类脱节状况直接造成了施工质量于不同施工班组、不同建筑楼栋之间呈现出随机的波动情形。

（三）新技术应用推广受阻

新型施工技术在建筑行业的规模化应用存在多重障碍。首要障碍是高昂的初始投入成本，令许多中小建筑企业望而却步。传统的路径依赖和思维惯性形成强大阻力，从管理层到作业班组都对熟悉的老方法存在依赖心理，对学习新流程、新工艺有畏难情绪，担心影响工期。此外，新技术通常需要设计、生产、施工全链条协同，在当前割裂的工程承包模式下，各环节衔接不畅，难以形成合力。

（四）测量数据支撑不足

项目现场在数据的采集以及处理方面的能力依旧处于滞后状态，难以契合精细化管理的实际需要。在诸如建筑物轴线的测定、标高的引测这类常规性的测量工作中，依旧在很大程度上借助全站仪、水准仪等传统意义上需要人工操作的仪器设备，由于受到仪器自身精度的局限、操作人员专业技能水平的高低以及现场周遭环境干扰等诸多因素的影响，误差的不断积累难以做到完全杜绝，工作效率极为低下。

三、强化施工技术控制与推进技术优化的策略

（一）构建信息化动态控制体系

搭建以BIM和物联网技术为核心的信息化动态管控体系，将技术管理从静态、事后管控转变为全流程、可视化的实时监控预警模式，实现数据驱动下的精准决策^[4]。

在项目启动阶段，应构建一个全员协同的BIM模型，用于管线综合排布、施工模拟等工作，提前发现和解决技术冲突。在施工阶段，对关键部位植入传感器，如在高大模板支架处布设应力应变监测点，在深基坑周边安装自动位移监测仪，将实时数据汇集到管理平台。一旦数据超出预设阈值，系统自动报警，项目人员可立即研判并采取措施，实现重大风险的即时响应和闭环管理。

（二）推行标准化精细作业

大力推进以“作业指导书”和“实体样板”为载体的标准化精细作业模式，将复杂技术规范转化为统一、直观、可操作的现场

指令，保证施工工艺的规范性和一致性。具体实施中，针对钢筋绑扎、模板支护等关键工序，编写图文并茂的《标准化作业指导书》，清晰界定材料、工具、操作流程和验收标准。同时，严格落实“样板引路”制度，在每道工序大规模开展前，在施工现场制作实体样板，组织施工班组进行直观技术交底和实操培训。验收时以样板为唯一标准，避免凭经验施工，有效提高整体施工质量，降低质量通病发生率。

（三）建立技术创新激励机制

有必要构建一种以问题为导向的技术创新激励体系，激励处于一线的管理人员以及作业人员针对技术方面的棘手难题开展“微创新”活动，同时，把创新所取得的成果与绩效相互关联起来，以此营造出一种有利于持续改进的组织环境^[9]。例如，项目部可组建QC（质量控制）小组，针对诸如“超长结构混凝土无缝施工”或“复杂钢结构节点安装精度控制”等具体问题设立创新课题，给予资源支持。对提出有效优化方案（如改进施工缝处理工艺、设计新型定位模具）并成功应用的团队或个人，给予物质奖励和荣誉表彰，同时将优秀成果汇编成册，在全公司推广，建立“发现问题—创新解决—分享应用”的良性循环。

（四）强化专业技术人才培养

重点加强专业技术人才的培育工作，通过对培训模式进行变

革，对考核机制进行完善，来提升一线从事技术工作人员的理论知识素养与实际操作技能，为技术方面的控制与优化提供稳固可靠的人才支撑保障^[6]。实施中应改变单一“开会听课”模式，积极引入VR安全体验馆、AR辅助安装等沉浸式培训技术，让学员在虚拟场景中模拟高风险工序操作。同时，定期组织测量放线员、模板工长等关键岗位专项技能竞赛，以赛促学，将培训考核结果与岗位资格认定、薪酬晋升直接关联，激发从业人员学习积极性，系统打造理论通、技能精的专业化技术队伍。

四、结语

施工技术的严密控制和持续改进是打造高质量精品工程、推动建筑行业高质量发展的基础保障。当前施工过程面临诸多挑战，只有积极融入信息化发展大势，坚定不移地执行标准化、创新发展和人才培养策略，才能实现从粗放管理向精细建造的重大转变。面向未来，促进技术与管理深度融合，构建智能化、高效能、环保型的现代施工体系是建筑行业可持续发展的必由之路。

参考文献

[1]熊康为，唐文瑞. 建筑施工技术对房建工程质量控制的影响与优化策略[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (18): 139-141.
[2]梁颖君，那冰操，刘欣. 土木工程施工与材料应用[M]. 辽宁科学技术出版社: 202404.96.
[3]丁清涛. 浅谈建筑工程技术施工现场控制与优化对策[J]. 居业, 2023, (11): 41-143.
[4]万婷钰，车宣屹，刘海峰，等. 建筑工程屋面防水施工质量控制优化技术[J]. 工程机械与维修, 2023, (6): 152-154.
[5]杨海浪. 建筑工程项目施工中的结构优化设计控制技术应用研究[J]. 建筑施工, 2022, (06): 50-52.
[6]胡克武. 建筑工程技术施工现场控制与优化对策[J]. 四川水泥, 2021, (05): 129-130.

压力传感器计量检定过程中的干扰因素及抑制策略

孔建中

扎赉特旗产品质量检验检测中心, 内蒙古 兴安盟 137600

DOI:10.61369/ETQM.2026010014

摘 要 : 设备自身性能缺陷或者状态欠佳, 会对检定精度产生直接影响, 标准压力源输出不稳定, 压力波动超出许可范围, 会导致检定基准出现失真, 传感器自身存在诸如零点漂移, 灵敏度衰减之类的性能问题, 会令测量数据偏离实际值, 检定仪的信号采集模块缺乏足够的精度, 数据处理算法存在缺陷, 执行信号转换与分析时会产生误差, 设备校准历时过长, 造成量值溯源失效, 这也是产生干扰的重要原因。

关 键 词 : 压力传感器; 计量检定过程; 干扰因素; 抑制策略

Interference Factors and Suppression Strategies in the Metrological Verification Process of Pressure Sensors

Kong Jianzhong

Zhalait Banner Product Quality Inspection and Testing Center, Xing'an League, Inner Mongolia 137600

Abstract : Defects in the equipment's inherent performance or suboptimal condition can directly affect verification accuracy. Unstable output from the standard pressure source, with pressure fluctuations exceeding permissible limits, may lead to distortion in the verification reference. Issues such as zero drift or sensitivity attenuation in the sensor itself can cause measured data to deviate from actual values. Insufficient precision in the signal acquisition module of the verification instrument, along with flaws in data processing algorithms, may introduce errors during signal conversion and analysis. Prolonged calibration duration can result in the failure of value traceability, which is also a significant source of interference.

Keywords : pressure sensor; metrological verification process; interference factors; suppression strategy

引言

压力传感器被全面应用到航空航天, 石油化工, 医疗设备, 智能制造等重要领域当中, 它的测量数据是否准确无误, 直接关乎生产安全, 产品质量以及科研结论能否被人信服, 计量检定作为验证压力传感器测量精度, 保证量值统一与溯源的法定环节, 是保障传感器正常运转的基础性工作, 一旦在实际检定进程中, 受到外部环境, 设备自身状况, 操作流程等诸多因素的干扰, 各种各样的干扰就很容易渗入到检定系统当中, 造成检定数据发生失真, 量值传递出现偏差, 从而引发诸如设备运行出现故障, 生产效率降低等一连串问题。所以, 深入探究压力传感器计量检定过程中的干扰因素, 探寻科学有效的抑制策略, 对于改善检定工作质量, 完善计量检定体系, 保障各行业精准测量需求有着重要的现实意义, 本文凭借检定经验, 系统整理干扰类型, 给出对应的解决办法, 给相关工作人员给予参考。

一、压力传感器计量检定的重要意义

(一) 保障量值准确传递, 夯实计量基础

计量检定是完成压力传感器量值统一、溯源到国家基准的关键手段, 严格依照 JJG860-2015《压力传感器(静态)检定规程》等国家标准, 经由与标准压力源的量值比对, 保障传感器测量结果的溯源性, 经过规范的检定, 可以解决不同厂家、不同型号的传感器由于生产工艺差别而产生的量值偏差问题, 使各类传

感器测量数据具备横向可比性与纵向一致性, 免除由于数据混乱造成的生产调度失误或者科研结论偏差, 精准的量值传递还是计量工作本身的中心需求, 也是支撑工业生产、医疗检测、环境监测等各个行业测量工作有序进行的根基所在, 给之后的设备调试、工艺优化、数据归档等环节赋予无法替代的可信依据^[1]。

(二) 支撑设备可靠运行, 降低安全风险

在航空航天、石油化工等高危行业, 压力传感器属于关键监测部件, 测量精准度同生产安全和设备稳定直接相关, 石油化工

管道压力监测时，传感器误差高于0.5%FS就有超压爆炸风险，经过严格检定合格的压力传感器，可以随时准确反馈实际压力值，给 PLC 控制系统供应精确信号，保证安全阀，减压阀等安全装置按时触发^[2]。免除因为测量误差造成设备过载，介质泄漏等安全事故，检定工作依靠按阶段的零点漂移，灵敏度等指标检测，可以马上察觉传感器因为长期使用而产生的性能衰减，精度漂移等状况，事先采取校对调整或者替换新品等手段，从源头上减小设备非计划停机，安全事故等风险，给企业安全生产构筑屏障^[3]。

（三）规范行业市场秩序，提升产品质量

计量检定给压力传感器行业赋予了统一的质量评判准则，借助检定可以把不符合精度要求的产品筛选出来，进而促使生产企业增强研发水平和生产工艺，防止差质产品流入市场，规范的检定流程为企业的质量认证，市场准入等给予了重要依照，促使企业之间展开良性竞争，推动压力传感器产品质量整体向好发展。

（四）助力科研创新发展，提供数据支撑

科研试验时，压力传感器的测量精度关乎试验结论的科学与否，计量检定精准，试验过程中的压力数据才真实可靠，科研人员才能得到准确的基础数据，从而推动技术创新，突破科研难题，新材料研发，新工艺探索，新设备研制，都离不开可靠的压力测量数据^[4]。

二、压力传感器计量检定过程中的干扰因素

（一）电磁干扰

电磁干扰是检定过程中最常见的干扰类型之一，电气设备、供电线路和无线信号是检定环境中最常见的电磁干扰来源，检定装置中的电源、变频器等设备在运行过程中会辐射电磁波，通过空间耦合进入传感器信号线路，供电线路中的杂波信号也会通过导线路径干扰传感器的供电，电磁干扰会使传感器输出信号发生畸变、数据波动，严重时甚至造成信号中断，影响检定结果。

（二）环境因素干扰

环境因素对压力传感器计量检定影响较为显著，环境因素主要包含温度，湿度，气压以及振动这四个部分，温度变化会使传感器敏感元件的性能产生漂移，从而影响零点和灵敏度，湿度太高容易导致传感器绝缘性能变差，出现漏电或者信号短路的情况，环境气压的波动会对标准压力源的稳定性造成干扰，检定台的振动会经由机械传导影响传感器的受力状况，进而使得测量数据出现波动。

（三）安装操作干扰

安装操作不规范属于人为因素引发检定误差的重要部分，传感器安装位置不合适，若靠近热源，振动源或者电磁辐射源，外部干扰影响就会增大，安装过程中密封不到位，压力介质泄漏现象发生，实际压力与标准压力不相符的情况就会出现，接线错误，接触不良会导致信号传输出现异常，检定人员操作手法不统一，压力施加速度快慢不一，读数时机存在差异等，也都会造成检定结果存在偏差^[5]。

（四）设备自身干扰

设备自身性能缺陷或者状态欠佳，会对检定精度产生直接影

响，标准压力源输出不稳定，压力波动超出许可范围，会致使检定基准出现失真，传感器自身存在诸如零点漂移，灵敏度衰减之类的性能问题，会令测量数据偏离真实值，检定仪的信号采集模块缺乏足够的精度，数据处理算法存在缺陷，执行信号转换和分析时会产生误差，设备校准历时太久，造成量值溯源失效，这也是产生干扰的重要缘由^[6]。

表1 压力传感器计量检定主要干扰因素影响程度统计

干扰因素类型	影响程度（1-5级，5级最强）	出现频率	典型误差范围（%FS）
电磁干扰	4级	高频	±0.3-1.2
环境因素干扰	3.5级	中频	±0.2-0.8
安装操作干扰	3级	中频	±0.1-0.6
设备自身干扰	4.5级	低频	±0.5-1.5

三、压力传感器计量检定干扰的抑制策略

（一）电磁干扰抑制策略

压力传感器计量检定是保证传感器量值准确，提升应用可靠性的关键步骤，干扰因素的存在直接影响检定结果的精准性。本文经由对电磁干扰，环境因素干扰，安装操作干扰以及设备自身干扰这四类主要干扰因素展开系统分析，并给出了对应的抑制策略，为解决检定过程中的干扰问题给出了全方位的解决办法，经由科学运用电磁屏蔽，环境调控，规范操作以及设备优化等干扰抑制策略，可以有效地缩减干扰带来的影响，提升检定工作质量，往后看，伴随智能化，数字化技术持续发展，可以进一步探寻依靠人工智能的干扰预测与自适应抑制技术，不断完善压力传感器计量检定体系，给各行业高质量发展赋予更有力的计量支撑。

（二）环境干扰控制策略

优化接地系统设计，采用“一点接地”模式，创建独立接地网，把传感器信号地，检定仪工作地，标准压力源接地端汇总链接到同一接地桩上，接地桩深度大于等于2m，周围填入降阻剂，接地电阻维持在4Ω以下，为防止地环路干扰，传感器和检定仪的接地引线选用截面积大于等于4mm²的铜芯导线，长度限制在5m以内，不同设备的接地引线不可交叉缠绕。在供电回路中串联三级电源滤波器，第一级过滤电网中的低频杂波，第二级抑制中频干扰，第三级针对高频噪声过滤，滤波器的额定电流要高于检定设备总电流的1.2倍。而且，定期利用接地电阻检测仪来检测接地系统性能，每个月至少检测一次，一旦察觉接地电阻不合标准，就及时替换降阻剂或者外延接地桩，而且在雷雨天气过后还要加大检测次数，保证接地系统一直处在有效状态^[7]。

（三）安装操作规范策略

制定《压力传感器安装检定作业指导书》，明确安装流程12个节点，安装位置需符合“三远离”原则：远离热源（≥1.5m、远离电磁辐射源（≥2m、远离气流通道。安装时使用扭矩扳手，按照传感器说明书扭矩值紧固，M12接口传感器扭矩控制在25±2N·m，避免过紧或过松造成测量误差。密封采用“双重密封”，第一重氟橡胶密封圈、第二重高温密封胶，安装后采用压力泄漏检测仪检测，泄漏率≤1×10⁻⁹Pa·m³/s。对于不同类型

的传感器（绝压、表压、差压）分别提供对应的压力安装示意图，在示意图中明确具体的取压点以及具体安装角度，例如对于差压传感器而言其正负压接口应该保持同一水平面，避免因存在液位差而导致的检定误差。建立压力传感器安装质量追溯体系，每一个安装的环节都要求相关人员签字，发生问题后可以准确追溯^[8]。

（四）设备自身优化策略

严格依照 JJG860-2015《压力传感器（静态）检定规程》的要求来制定设备校准计划，标准压力源每隔3个月就要校准一次，检定仪则需每6个月校准一次，校准工作要由具备 CNAS 资质的第三方机构来执行，要对零点漂移，灵敏度误差，重复性误差等关键项目实施校准，校准合格之后粘贴校准标识，并把校准数据予以记录，校准证书的保存期限不少于3年^[9]。针对那些使用频率较高或者所处环境较为恶劣的传感器，将校准周期缩短为2个月，而且还要增多稳定性测试项目，持续72小时监测传感器的输出信号，如果波动幅度超出 $\pm 0.1\%FS$ 就得及时修理。定期维护传感器的敏感元件，用无水乙醇擦拭表面污渍，防止油污和粉尘造成灵敏度下降，陶瓷电容式传感器每半年检查一次电容值变化，超出范围及时调整，建立设备维修档案，记录维修时间，故障原因，更换部件等信息，为设备全生命周期管理提供参考^[10]。

四、结束语

综上所述，压力传感器计量检定是保证传感器量值准确，提升应用可靠性的关键步骤，干扰因素的存在直接影响检定结果的精准性。本文经由对电磁干扰，环境因素干扰，安装操作干扰以及设备自身干扰这四类主要干扰因素展开系统分析，并给出了对应的抑制策略，为解决检定过程中的干扰问题给出了全方位的解决办法，经由科学运用电磁屏蔽，环境调控，规范操作以及设备优化等干扰抑制策略，可以有效地缩减干扰带来的影响，提升检定工作质量，往后看，伴随智能化，数字化技术持续发展，可以进一步探寻依靠人工智能的干扰预测与自适应抑制技术，不断完善压力传感器计量检定体系，给各行业高质量发展赋予更有力的计量支撑。

参考文献

[1]牛鑫, 窦若兮, 刘皓, 等. 规整微纳米锥结构柔性压力传感器的研究 [J]. 针织工业, 2024, (12): 66-70.

[2]刘义付, 孙瑞霞. 冲击激励校准下汽车压力传感器信号小波变换降噪 [J]. 山西电子技术, 2024, (06): 35-37.

[3]张立品, 彭瀚旻, 唐雄峰. 导丝头端柔性压力传感器设计及灵敏度分析 [J]. 振动. 测试与诊断, 2024, 44(06): 1196-1200+1250-1251.

[4]杨健, 许姣, 赵晨曦, 等. SiC 压阻式压力传感器欧姆接触制备工艺及性能研究 [J]. 实验流体力学, 2024, 38(06): 93-98.

[5]向伟, 张东光, 刘治, 等. 柔性温度—压力传感器的设计与制备 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43(12): 96-99+104.

[6]郭威, 李辉, 罗登玲, 等. MEMS 压阻式压力传感器梁—膜—三岛膜结构与优化 [J]. 电子科技大学学报, 2024, 53(06): 852-861.

[7]刘彩霞, 李帅, 胡若海, 等. 基于均匀微突结构的高灵敏柔性电容压力传感器 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2024, 47(11): 1448-1452+1471.

[8]薛振华, 董延东, 丁浩, 等. 薄膜压力传感器在铁路运输行业中的运用 [J]. 科学技术创新, 2024, (23): 1-4.

[9]冯齐斌, 姜毅韡, 周宇仁. 浅谈静态压力传感器的计量检定 [J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(11): 110-112, 92.

[10]陈建峰, 钱同伍, 高雪. 多通道压力传感器校准系统的研制 [J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 49-54.

卷接机及包装机辅料消耗统计分析系统装置的设计与实现

王永才, 李金龙

红云红河烟草(集团)有限责任公司乌兰浩特卷烟厂, 内蒙古 兴安盟 137400

DOI:10.61369/ETQM.2026010015

摘 要 : 针对卷烟厂卷包车间现有卷接机、包装机辅料消耗统计精度低、无法对接车间管理系统等问题,设计了一套卷接机及包装机辅料消耗统计分析系统装置。该装置由显示控制部分与支撑架部分组成,通过 PLC 采集设备脉冲信号与相位信号,结合光耦转换与传感器检测技术,实现对卷接机盘纸、水松纸及包装机多类辅料消耗的精准统计。经实践验证,系统统计精度达 99%,可在不修改原设备程序、不影响生产的前提下,完成数据采集与车间 MES 系统、辅料管理系统的对接,显著提升车间管理信息化水平,降低统计人员工作量。

关 键 词 : 卷接机; 包装机; 辅料消耗; PLC 控制; 统计分析系统; 数据对接

Design and Implementation of a Statistical Analysis System for Auxiliary Material Consumption in Cigarette Making and Packing Machines

Wang Yongcai, Li Jinlong

Ulanhot Cigarette Factory, Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Xing'an League, Inner Mongolia 137400

Abstract : To address the issues of low statistical accuracy in auxiliary material consumption and the inability to integrate with workshop management systems in the existing cigarette making and packing machines in a cigarette factory's rolling and packing workshop, a set of statistical analysis system devices for auxiliary material consumption in cigarette making and packing machines has been designed. This device consists of a display control section and a support frame section. By collecting equipment pulse and phase signals through PLC, combined with optocoupler conversion and sensor detection technology, it achieves precise statistics on the consumption of various auxiliary materials such as bobbin paper and tipping paper for the cigarette making machine, as well as multiple types of auxiliary materials for the packing machine. Practical verification has shown that the system achieves a statistical accuracy of 99%. It can complete data collection and integrate with the workshop MES system and auxiliary material management system without modifying the original equipment programs or affecting production, significantly enhancing the level of workshop management informatization and reducing the workload of statistical personnel.

Keywords : cigarette making machine; packing machine; auxiliary material consumption; PLC control; statistical analysis system; data integration

引言

在卷烟生产过程中,卷接机与包装机的辅料消耗统计是车间成本管控、生产调度的核心环节。当前卷烟厂卷包车间存在两大关键问题:一是卷接机(如 PROTOS70/ZJ17)依赖产量换算剔除量统计辅料消耗,未考虑跑条、手工盘车等异常情况,且设备电控程序版本多样,厂商不愿单独研发优化;二是包装机(如 GDX1/ZB25、GDX2/ZB45)采用 MICROII 控制系统与 GDLAN 专用协议,无主要辅料消耗统计功能,仅记录产量与剔除数据,且国外厂商技术垄断导致改造难度大。同时,车间 MES 系统与辅料管理系统无法直接读取各班次辅料实际消耗量,辅料库损耗统计精度不足,严重制约车间生产管理的科学性与信息化水平。为此,本文设计了一套无需修改原设备程序、兼容性强的辅料消耗统计分析系统装置,以解决上述问题。

一、系统装置总体设计

（一）系统组成

卷接机及包装机辅料消耗统计分析系统装置主要分为两部分：显示控制部分（1）与支撑架部分（2），系统总体结构。

— 显示控制部分：是系统的数据采集、处理与交互核心，由安装屏框、显示屏、主机、PLC、8个光耦（光耦1—光耦8）组成。其中，安装屏框用于固定显示屏、主机等部件，由前面板、下底板、右侧板、左侧板、上顶板、后背板、合页、右固定架、上固定架、下固定架构成；显示屏承担人机交互功能，实时显示辅料消耗数据；PLC通过IO端口与光耦、传感器连接，完成信号采集与数据计算；主机负责数据存储与传输，实现与车间数采中心的通讯。

— 支撑架部分：为显示控制部分提供稳定支撑，由固定底板与旋转支撑座组成，可根据现场安装需求调整角度，确保设备安装牢固且不影响车间现有生产布局。

（二）核心部件功能

— PLC：作为系统控制核心，通过IO端口接线与光耦配合，采集卷接机、包装机的脉冲信号（如机器运转时钟脉冲、辅料运行脉冲）与相位信号，精准计算辅料消耗量，同时避免与原设备电控系统产生冲突。

— 光耦：共8个，分别承担不同信号处理功能。光耦1采集卷接机盘纸部位机器运转时钟脉冲，光耦2-3采集盘纸左右侧运行脉冲；光耦4采集水松纸部位机器运转时钟脉冲，光耦5-6采集水松纸左右侧运行脉冲；光耦7将内卡纸检测的NPN型信号转换为PNP型信号，光耦8完成条包透明纸、条包拉带检测信号的类型转换，确保信号稳定传输至PLC。

— 显示屏：实时显示各班次盘纸、水松纸、铝箔纸、内卡纸等辅料的消耗数据（单位：米/包），支持历史记录查询与参数设置，方便工作人员直观掌握辅料使用情况。

二、辅料消耗统计原理与实现

系统针对卷接机与包装机的不同辅料类型，设计了差异化的统计方法，均通过PLC采集信号、软件计算、数据传输三个步骤完成，同时考虑拼接剩余量、人工消耗等异常情况，确保统计精度。^[1-5]

（一）卷接机辅料统计（盘纸、水松纸）

1. 盘纸统计

PLC通过光耦1采集卷接机盘纸部位机器运转时钟脉冲（机器运转一圈产生1个脉冲），光耦2-3同步采集左右侧盘纸运行脉冲（盘纸转动即产生脉冲）。当机器完成一个双支烟生产周期时，系统记录1个运行脉冲，按双支烟长度计算基础盘纸消耗量；对于盘纸拼接过程中的剩余部分与加速消耗部分，通过多次取样得出平均值，在每次拼接完成后自动计入总消耗。最终数据经PLC软件

分析计算，通过以太网传输至显示屏与卷包车间数采数据库。

2. 水松纸统计

与盘纸统计原理类似，PLC通过光耦4采集水松纸部位机器运转时钟脉冲，光耦5-6采集左右侧水松纸运行脉冲。以双滤嘴生产周期为单位，计算基础水松纸消耗量，拼接剩余量与加速消耗量按预存平均值计入，数据实时传输至终端与数据库。^[6]

（二）包装机辅料统计（多类辅料）

1. 铝箔纸统计

PLC通过IO端口采集包装机铝箔纸输送辊运转脉冲（输送辊转动一圈产生1个脉冲），结合输送辊周长（固定参数），按“消耗量=脉冲数×周长”计算铝箔纸消耗；拼接剩余量与人工消耗按取样平均值补充计入。

2. 内卡纸统计

由于内卡纸传送位置受支架干扰，PLC先采集包装机相位信号，在特定相位区间内对其进行计数以排除干扰；同时通过光耦7将内卡纸传感器的NPN信号转换为PNP信号，避免信号干扰。按“消耗量=单张内卡纸长度×计数数量”计算总消耗，拼接损耗按平均值补充。

3. 小盒商标纸、条盒商标纸统计

两类商标纸均受支架干扰，PLC通过相位信号确定有效计数区间，同时增加光纤传感器与放大器采集商标纸信号，直接按计数数量统计消耗（无需长度换算），数据经处理后传输至终端。

4. 小包/条包透明纸、拉带统计

小包透明纸与小包拉带：PLC采集包装机辅机相位信号，直接统计两者的运行脉冲，按“单张长度×数量”计算消耗，拼接损耗计入总消耗；条包透明纸与条包拉带：需通过相位信号排除支架干扰，光耦8转换传感器NPN信号，再按“单张长度×数量”统计，确保数据准确。

三、系统优势与实践效果

（一）核心优势

1. 高精度与低干扰：统计精度达99%，通过独立PLC控制与光耦信号处理，不修改原设备程序，确保原机组运行稳定，无性能影响。

2. 信息化对接：系统软件可与卷包车间MES系统、辅料管理系统精准对接，实现辅料消耗数据的自动采集与共享，提升车间管理信息化能力。

3. 便捷性与安全性：显示屏支持直观查看与历史查询，改造过程严格遵循烟机设备行业标准，布线规范、维修量少，符合电气线路安全要求，且不改变原设备任何功能。

（二）实践效果

该系统在某卷烟厂卷包车间试运行后，实现三大效果：一是生产统计人员工作量减少60%以上，避免人工统计误差；二是车间可根据实时辅料消耗数据优化生产调度计划，辅料库存周转率

提升15%；三是MES系统与辅料管理系统数据更新延迟缩短至1分钟内，为成本管控提供精准数据支撑。

四、结论

本文设计的卷接机及包装机辅料消耗统计分析系统装置，通过PLC与光耦协同的信号采集方案、差异化的辅料统计算法，解

决了传统统计精度低、无法对接管理系统的问题。系统在不影响原设备运行的前提下，实现了99%的统计精度，同时具备信息化对接、操作便捷、安全可靠等特点，可有效提升卷烟厂卷包车间的生产管理效率与成本管控水平，为同类烟机设备的辅料统计改造提供参考。

参考文献

[1]王磊.MK-95卷烟机控制系统设计与实现[J].中国设备工程,2020(12):132-134.
[2]李明,张晓峰.PLC在卷接机组电气改造中的应用研究[J].自动化与仪器仪表,2019(8):78-81.
[3]赵强.烟草卷包车间辅料消耗精准计量技术探讨[J].烟草科技,2021,54(3):92-97.
[4]陈晓华.卷烟厂MES系统与辅料管理系统的数据集成方案[J].信息技术与信息化,2022(5):165-168.
[5]刘建国,王丽萍.基于光耦转换的烟机设备信号采集技术研究[J].电子技术与软件工程,2020(18):138-139.
[6]张军.高速包装机辅料消耗统计算法优化与实践[J].包装工程,2019,40(19):201-206.

化工自动化仪表的预防性维修管理系统研究

刘海涛

美吉星供应链管理（黑龙江）有限公司，黑龙江 大庆 166200

DOI:10.61369/ETQM.2026010016

摘 要： 本文基于设备全生命周期管理理论与故障模式影响分析（FMEA）方法，深入研究化工自动化仪表预防性维修管理系统的设计与实施。通过剖析当前化工企业仪表维修管理的现存问题，构建涵盖数据采集层、核心处理层与应用服务层的三级系统架构，实现维修计划智能生成、故障预警、备件管理及数据分析等功能。实际应用表明，该系统可使仪表故障停机时间缩短35%以上，维修成本降低20%，为化工企业实现精细化维修管理提供有效技术支撑。

关 键 词： 化工自动化仪表；预防性维修；管理系统；故障预警；全生命周期管理

Research on Preventive Maintenance Management System for Chemical Automation Instruments

Liu Haitao

Meijixing Supply Chain Management (Heilongjiang) Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 166200

Abstract： This study investigates the design and implementation of a preventive maintenance management system for chemical instrumentation through equipment lifecycle management theory and Fault Mode and Effect Analysis (FMEA). By analyzing current challenges in instrumentation maintenance management within chemical enterprises, the research establishes a three-tier system architecture comprising data acquisition, core processing, and application service layers. The system enables intelligent maintenance planning, fault prediction, spare parts management, and data analytics. Practical applications demonstrate that this solution reduces instrument downtime by over 35% and lowers maintenance costs by 20%, providing effective technical support for chemical enterprises to achieve refined maintenance management.

Keywords： chemical automation instrumentation; preventive maintenance; management system; fault warning; full life cycle management

引言

传统化工企业对自动化仪表多采用“故障后维修”或“定期大修”模式，前者易造成生产中断与安全隐患，后者存在过度维修现象，导致维修成本居高不下。随着工业4.0理念在化工行业的深度渗透，以及智能制造战略的推进，传统维修管理模式已难以满足精细化生产需求。因此，构建一套科学、高效的预防性维修管理系统，实现对仪表运行状态的实时监测、故障提前预警及维修计划精准制定，对于提升化工企业生产安全性、降低运营成本、增强市场竞争力具有重要的理论价值与实际意义^[1-3]。

一、化工企业自动化仪表维修管理现状及问题分析

（一）现存主要问题

1. 维修管理模式落后，预防性意识不足：多数中小型化工企业仍采用“故障后维修”模式，缺乏对仪表运行状态的实时监测，直到仪表出现明显故障才进行维修，导致非计划停机频繁。部分企业虽采用“定期维修”模式，但维修周期多基于经验制定，未结合仪表实际运行状态与工艺需求，存在“过度维修”或

“维修不足”现象。例如，某中型化工企业对所有流量仪表采用“半年一修”的固定周期，部分运行状态良好的仪表被频繁拆解，而部分高负荷运行的仪表因未及时维修导致故障。

2. 数据管理分散，信息整合能力弱：调研发现，多数企业的仪表数据分散存储于不同系统或纸质台账中，如仪表台账由设备管理部门记录，运行数据由生产部门监控，维修记录由维修部门存档，数据缺乏有效整合。这种“信息孤岛”现象导致维修人员无法全面获取仪表全生命周期数据，难以精准判断故障原因与

维修需求。例如，某企业反应釜温度仪表出现故障，维修人员仅能查阅维修记录，无法获取该仪表的历史运行数据与工艺参数变化，导致维修时间延长至8小时^[4-5]。

3. 故障预警精度低，缺乏智能化手段：现有系统多依赖人工巡检发现仪表故障，人工巡检效率低、主观性强，难以及时发现隐蔽性故障。部分企业虽配备简单的报警装置，但仅能在参数超标时发出报警，无法提前预测故障风险。例如，某大型石化企业的压力变送器出现零点漂移时，报警装置未及时响应，直至漂移量超过阈值才发出报警，此时已导致工艺参数波动，影响产品质量。

（二）问题成因分析

导致上述问题的原因主要包括：1. 企业管理层对预防性维修的重视程度不足，更关注短期生产效益，忽视长期设备管理投入；2. 缺乏专业的维修管理系统，传统管理手段无法满足智能化、精细化管理需求；3. 维修人员培训体系不完善，技术更新滞后于仪表发展；4. 各部门之间缺乏协同机制，导致数据共享与流程衔接不畅。因此，构建一套集成化、智能化的预防性维修管理系统，是解决上述问题的关键途径。

二、化工自动化仪表预防性维修管理系统设计

（一）系统设计目标与原则

1. 设计目标：针对化工自动化仪表维修管理的现存问题，本系统旨在实现以下目标：实现仪表运行状态的实时监测与数据整合，打破“信息孤岛”；通过智能算法实现故障提前预警，预警精度达到90%以上；基于仪表重要性及运行状态，自动生成优化的维修计划；实现备件库存的动态管理，提升库存周转率；通过数据分析为仪表采购、更新提供决策支持^[6]。

2. 设计原则：实用性原则，结合化工企业实际业务流程，设计简洁易用的操作界面，确保系统可快速落地应用；可靠性原则，采用分布式架构与数据备份技术，确保系统在工业环境下稳定运行，数据传输与存储安全；扩展性原则，预留接口便于与企业现有DCS、ERP等系统对接，支持新增仪表类型与功能模块；智能化原则，引入数据分析与机器学习算法，提升故障预警与维修计划制定的精准度。

（二）系统总体架构设计

基于分层架构思想，本系统构建“数据采集层-核心处理层-应用服务层”三级架构，各层功能相互衔接，实现从数据采集到决策支持的全流程管理，具体架构如下：

1. 数据采集层：作为系统的数据入口，负责采集仪表运行数据、工艺参数及维修相关数据。数据采集方式包括：通过工业以太网与智能仪表、DCS系统对接，实时采集仪表测量值、自诊断信息、运行时间等数据；通过无线传感器网络（WSN）采集偏远区域仪表数据，解决有线传输布线困难问题；通过人工录入模块采集维修记录、备件库存、仪表台账等非实时数据。采集的数据经标准化处理后，传输至核心处理层存储与分析。

2. 核心处理层：是系统的“大脑”，负责数据存储、故障

预警及维修计划优化。该层包含三大模块：数据存储模块，采用MySQL+MongoDB混合数据库架构，MySQL存储结构化数据（如仪表台账、维修记录），MongoDB存储非结构化数据（如仪表运行日志、故障图片），确保数据存储的高效性与安全性；故障预警模块，基于FMEA与机器学习算法，对采集的运行数据进行分析，识别故障特征，提前发出预警信息；计划优化模块，结合仪表重要性等级、故障风险评估结果及生产计划，生成最优维修计划与备件采购计划。

3. 应用服务层：面向不同用户提供个性化服务，主要包括五大功能模块：设备管理模块，实现仪表台账的数字化管理，包括仪表基本信息、安装位置、校准记录等；状态监测模块，以可视化界面展示仪表运行状态，支持异常数据追溯；维修管理模块，实现维修计划下发、维修过程跟踪、维修效果评估全流程管理；备件管理模块，实时监控备件库存，自动触发补货提醒，优化库存结构；数据分析模块，生成仪表可靠性报告、维修成本分析报告等，为管理决策提供支持。

（三）核心功能模块详细设计

1. 故障预警模块设计：该模块是预防性维修的核心，采用“FMEA风险评估+LSTM神经网络预测”的双层预警机制。首先，通过FMEA方法对仪表进行风险评估，确定各仪表的风险等级（高、中、低）及核心故障模式。例如，对于反应釜压力变送器，其故障模式包括零点漂移、量程偏差、线路故障等，通过FMEA分析确定零点漂移为高风险故障模式。其次，针对高风险故障模式，采用LSTM神经网络构建预测模型，以仪表历史运行数据（如测量值偏差、环境温度、运行时间）为输入，训练模型预测故障发生概率。当预测概率超过设定阈值时，系统自动发出预警，并推送故障原因分析与处理建议^[7]。

2. 维修计划优化模块设计：该模块的核心是实现维修计划与生产需求的精准匹配。首先，建立仪表重要性等级评价体系，从工艺关联性、故障影响范围、安全风险三个维度，采用层次分析法（AHP）确定各仪表的重要性权重，将仪表分为关键级（如反应釜控制仪表）、重要级（如储罐液位仪表）、普通级（如车间环境温度仪表）。其次，结合仪表重要性等级、故障预警结果及生产计划，采用遗传算法优化维修计划，目标是在满足生产连续性要求的前提下，最小化维修成本与故障风险。例如，对于关键级仪表的高风险预警，系统优先安排维修，且维修时间避开生产高峰期；对于普通级仪表的低风险预警，可合并至下次定期停机时维修。

（四）系统技术实现方案

系统采用B/S（浏览器/服务器）架构，便于企业各部门通过浏览器访问系统，无需安装客户端。前端开发采用Vue.js框架，结合ECharts可视化库实现数据图表展示，提升用户体验；后端采用Python的Django框架，实现业务逻辑处理与接口开发；数据采集采用Modbus、OPC UA等工业通信协议，确保与不同品牌的仪表、DCS系统兼容；算法实现方面，采用TensorFlow框架构建LSTM神经网络模型，结合Scikit-learn库实现FMEA风险评估与AHP权重计算。系统部署采用Docker容器化技术，提高

部署效率与环境一致性，同时配备数据备份与容灾恢复机制，确保系统稳定运行。

三、系统应用案例分析

（一）案例背景

选取某大型石化企业的催化裂化装置作为应用场景，该装置是石化生产的核心单元，涉及自动化仪表320台，包括压力变送器85台、温度仪表102台、流量仪表78台、液位仪表55台。应用前，该装置采用“定期维修+事后维修”模式，2023年仪表故障导致非计划停机6次，停机时间累计120小时，维修成本达180万元，备件库存周转率仅1.1次/年。为解决上述问题，该企业于2024年1月引入本文设计的预防性维修管理系统，进行为期6个月的试运行。

（二）系统实施过程

1. 前期准备阶段（1个月）：完成系统部署与数据对接，录入320台仪表的台账信息（包括型号、厂家、安装时间、校准周期等），通过工业以太网与装置DCS系统对接，实现运行数据实时采集；组织维修人员、生产人员及管理人员进行系统操作培训，确保各岗位人员掌握系统功能^[8]。

2. 试运行阶段（5个月）：系统正式投入运行，实时监测仪表运行状态，自动生成维修计划并下发至维修人员；每周召开系统运行分析会，收集用户反馈，优化系统参数（如预警阈值、维修周期系数）。例如，初期压力变送器的预警阈值设定为80%，运行1个月后发现误报率较高，结合实际故障数据调整为85%，误报率降至5%以下。

（三）应用效果评估

通过对比系统应用前后的关键指标，评估系统实施效果，具体数据如下表所示：

评估指标	应用前（2023年同期）	应用后（2024年试运行期）	改善幅度
非计划停机次数	6次	1次	83.3%
故障停机时间	120小时	38小时	68.3%
仪表故障率	8.5%	2.2%	74.1%
维修成本	180万元	142万元	21.1%
备件库存周转率	1.1次/年	1.8次/年	63.6%
故障预警准确率	—	92.3%	—

由上表可知，系统应用后取得显著效果：仪表故障率从8.5%降至2.2%，非计划停机次数减少83.3%，故障停机时间缩短68.3%，有效提升了生产连续性；维修成本降低21.1%，备件库存周转率提升63.6%，实现了维修资源的优化配置；故障预警准确率达到92.3%，可提前3-7天识别潜在故障，为维修准备争取了充足时间。此外，系统的数据分析功能为企业提供了仪表可靠性报告，识别出3台运行年限超过8年、故障频发的老旧仪表，建议进行更新换代，为设备升级提供了科学依据。

四、结论与展望

本文针对化工自动化仪表维修管理的现存问题，基于设备全生命周期管理、FMEA等理论，设计并实现了一套预防性维修管理系统。通过理论研究与案例验证，得出以下结论：1. 化工自动化仪表的故障具有隐蔽性、关联性、环境敏感性及可预测性等特性，传统维修模式已难以适应现代化工生产需求，预防性维修是提升仪表可靠性、降低故障风险的有效手段。2. 构建的“数据采集层-核心处理层-应用服务层”三级系统架构，实现了仪表运行数据的实时采集、智能分析与精准管理，打破了传统维修管理的数据壁垒，提升了管理效率。3. 系统集成的故障预警模块（FMEA+LSTM）与维修计划优化模块（AHP+遗传算法），实现了故障提前预警与维修计划的智能生成，预警准确率达到92.3%，可显著降低故障发生率与维修成本。4. 实际应用案例表明，该系统可使仪表故障停机时间缩短68.3%，维修成本降低21.1%，备件库存周转率提升63.6%，为化工企业实现精细化、智能化维修管理提供了有效支撑^[9-10]。

参考文献

- [1] 中国石油和化学工业联合会. 2023年中国化工行业运行报告[R]. 北京：中国石油和化学工业联合会，2024.
- [2] 张宏，李阳，王强. 基于FMEA的化工仪表故障风险评估模型研究[J]. 化工自动化及仪表，2022，49(3)：389-394.
- [3] 李娟，张伟，刘敏. 物联网技术在化工仪表状态监测中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置，2023(2)：78-82.
- [4] 王建军. 设备全生命周期管理理论在化工企业中的应用[J]. 中国设备工程，2022(15)：28-30.
- [5] 刘辉，陈静. 基于RCM的化工自动化仪表维修策略优化[J]. 化工机械，2021，48(6)：891-895.
- [6] 西门子(中国)有限公司. Siemens Industrial Edge平台技术白皮书[Z]. 北京：西门子(中国)有限公司，2023.
- [7] 艾默生自动化解决方案. Plantweb Optics资产绩效管理系统应用案例[Z]. 上海：艾默生自动化解决方案，2022.
- [8] 赵亮，王小红. 基于LSTM神经网络的化工仪表故障预测研究[J]. 计算机测量与控制，2023，31(4)：45-49.
- [9] 陈明，李娜. 基于遗传算法的化工设备维修计划优化[J]. 控制工程，2022，29(7)：1321-1326.
- [10] 张浩. 化工企业自动化仪表维修管理现状及改进措施[J]. 化工技术与开发，2021，50(10)：65-68.

公路隧道围岩大变形段处治措施

矣发润

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650217

DOI:10.61369/ETQM.2026010020

摘 要： 随着我国交通基建向复杂地质推进，长隧道修建增多，软弱围岩大变形严重，影响施工安全与进度，造成成本增加、工期延误等问题。本文以思澜高速大尖山隧道为研究对象，探究围岩大变形成因机制，创建“监测预警－分级处置－加固补强－效果验证”全流程处治技术体系，通过优化监控量测、细化处置标准、完善加固措施等手段，为公路隧道围岩大变形段处治给予理论及实际参照，尤其为穿越断裂带、破碎带等复杂地质条件下的隧道工程提供关键技术支撑，该体系有益于改进隧道工程建设品质和安全性。

关 键 词： 公路隧道；围岩大变形；监控量测；分级处治；加固技术

Treatment Measures for Rock Mass Deformation in Highway Tunnel

Yi Farun

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650217

Abstract： With China's transportation infrastructure advancing into complex geological formations, the increasing construction of long tunnels has led to severe deformation of surrounding rock masses, posing challenges to construction safety and schedule while causing cost increases and project delays. This study investigates the deformation mechanisms of surrounding rock masses in the Dajianshan Tunnel of the Silan Expressway, establishing a comprehensive treatment system encompassing "monitoring and early warning, graded response, reinforcement and consolidation, and effectiveness verification". Through optimizing monitoring and measurement techniques, refining response standards, and improving reinforcement measures, the framework provides theoretical and practical references for addressing large deformation sections in highway tunnels. Particularly, it offers critical technical support for tunnel engineering in complex geological conditions such as fault zones and fractured zones, thereby enhancing the quality and safety of tunnel construction projects.

Keywords： highway tunnel; rock mass large deformation; monitoring and measurement; graded treatment; reinforcement technology

引言

围岩大变形是公路隧道软弱围岩施工的难点，其本质是应力失衡下的非线性响应。随着隧道工程向复杂地质延伸，多重因素叠加会引发初期支护失效、断面侵限等风险。思澜高速大尖山隧道穿越断裂带，K25+371 ~ K25+466段的大变形现象正是复杂地质施工风险典型例子。目前，研究大多只针对单一技术展开，并未进行“监测－处置－验证”的全流程研究与工程论证工作。本文结合大尖山隧道实践，在对地质成因分析的基础上构建处治体系，围绕监控量测、分级处置、加固技术和效果验证展开论述，其成果为类似工程提供实际解决方案并促进处治技术发展。

一、公路隧道围岩大变形成因机制

围岩大变形产生的原因是由地质条件、施工扰动和支护设计等诸多因素综合作用的结果。从地质本质上看，岩体自身特性是基础诱因。例如大尖山隧道微风化灰岩由于断层揉皱作用导致岩体完整性受损，结构面发育使自稳能力严重下降。叠加上述岩体

特性后，由地质构造作用形成的破碎带、软弱夹层使得岩体力学性能进一步降低，岩体在开挖卸荷后极易产生塑性变形。

施工扰动是造成变形的直接原因，隧道开挖时形成的应力重新分布，若支护结构未及时约束，就会使围岩发生持续性变形。同时，支护设计参数不合适、支护时机延迟等情况也会加重变形风险，初期支护强度不够难以抵挡住围岩压力，导致喷射混凝土

剥落、钢支撑扭曲、初期支护侵限等病害发生。

二、公路隧道围岩大变形监测预警技术

（一）监测方案优化原则

在隧道围岩大变形迹象显现时，常规的监控量测方案，已无法满足反馈设计、引导施工的需求。在工程中，需要借助加密监测点、改良监测项目，来实现准确预估。监测方案改良的关键准则，在于“有针对性、精度达标、数据及时”，需依照实际变形段的地质状况与施工进度同步进行，随时作出改变，从而全面掌握围岩的变动规律^[1]。

（二）关键监测内容与技术要求

监测点布设方面，拱顶下沉监测按5m间距设置断面，在每个断面上分别布置3个测点，即隧道中心线及两侧横向距离2~3米处，以确保覆盖拱顶受力关键部位。周边收敛监测也采用5m间距断面，每个断面均设置两条水平测线，测线高度应高出起拱线1.5m以上，以免受到下台阶施工扰动的影响。

除必测项目外，还要增设选测项目以加深监测程度，围岩体内位移、钢架内力与外力、围岩压力以及锚杆轴力等均属此列，以全面掌握围岩和支护结构的受力变形情况，所用监测仪器需满足精度要求，如水准仪、全站仪及专用传感器等，在数据搜集频次方面也需依循变形速率调整，当变形剧烈时更要加强观测力度，从而确保能迅速捕捉到变形特征。

（三）监测数据应用标准

监测数据的核心作用在于处治决策，需确立起判断准则：当监测显示围岩变形趋于稳定，并且初期支护未侵限或者侵限之处，能保障二次衬砌90%检查点厚度不少于设计厚度、最小厚度不低于0.5倍设计厚度时，在加固之后，便可开展二次衬砌施工；若变形持续处于不稳定状态并符合侵限标准，需启动换拱处理流程，从而确保结构安全。同时，应结合监测数据对换拱处理的时机进行精准把控，避免因过早或过晚实施而带来额外风险。

三、公路隧道围岩大变形分级处治策略

（一）分级处置标准制定

基于监测数据和工程实际，围岩大变形处治采取“分级施策”，主要依据是变形是否稳定、初期支护是否存在侵限及衬砌厚度能否满足要求^[2]。一级处置，适用变形趋于稳定、缺乏侵限或轻微侵限且符合衬砌厚度要求的地段，以加固处理为主；二级处置，适用变形不稳定、初期支护侵限且不能满足衬砌厚度要求的地段，以换拱处理为主；三级处置，适用换拱后仍不稳或围岩自稳能力极差的地段，需要结合设计优化进行综合处治。分级标准制定要兼顾科学性和实操性，需结合施工现场实际操作经验，确定各级处置的触发阈值，不能因为判断标准不明确，而造成处置太迟或者过度处置。以侵限判断标准为例，二次衬砌厚度的要求是核心：90%检查点厚度不低于设计厚度，最小厚度不少于0.5倍的设计厚度，这个标准既确保了结构安全，又为施工处置提供

了一个清晰的操作指南。

（二）分级处治核心措施

一级处置，主要是通过加固手段控制变形发展，加固方案由施工单位根据现场实际情况提出，需经设计单位进行结构受力及安全验算、建设单位审批同意后方可实施，以确保加固方案的科学性和可行性。针对不同的变形情况采取相应的加固措施：对初期支护喷射混凝土剥落处补喷，钢支撑变形处局部加强，增设锚杆、锚索等增强围岩约束能力，采取有针对性的措施阻止其继续变形。

二级处置，换拱施工必须严格按照专项方案执行，且该专项方案须经监理工程师签字并报建设单位同意。在开展换拱施工前应先经向注浆加固围岩，注浆浆液要按照围岩性质来选择：一般情况下常规围岩选用水泥浆，特殊情况可采用双液浆或化学浆，防止浆液分布不均造成变形加剧。换拱施工应遵循“先加固后换拱、分段分幅施工”原则（可细化为：分段、分幅对称施工），在换拱过程中控制开挖进尺，防止一次开挖面积过大造成围岩应力集中，并做好临时支护工作以确保换拱过程中的结构安全，在换拱施工时，现场技术员、专职安全员要全程在场指导，确保施工依照批复方案执行；完工后立即开展监控量测，跟踪变形情况。

三级处置，须采取综合方法，加大二次衬砌钢筋密度，在二衬内部增设钢架改善刚性受力能力；对掌子面前方围岩进行采样试验分析，若围岩自稳能力不足，需反馈至建设单位，由设计单位改良初期支护参数，施工单位按新图纸施工。改良初期支护参数时，可以依据围岩岩性分析的结果，减小钢支撑间距、增大喷射混凝土强度等级或增多锚杆布置数量，通过加强初期支护体系，来提升围岩控制效果。同时，三级处置也要重视施工工艺的改进，采用台阶法开挖以减小对围岩的干扰，缩减支护滞后的时间等手段，从施工环节降低变形风险^[3]。

四、公路隧道围岩大变形关键加固技术

（一）仰拱及仰拱填充加固技术

仰拱是隧道结构的“基础”，其稳定关系到整个结构的安全。在变形段处置中，要对仰拱填充进行专项观测：观测范围为变形段前后各100m，监测断面每5~10m一个，测点沿垂直于隧道中心线方向按1m间距布设，使用满足精度要求的水准仪或全站仪测量，确保能捕捉到仰拱填充顶面的变形特征。当发现仰拱开裂、底部隆起时，则说明原设计的仰拱不能承受围岩反力，此时，需要对未施工的仰拱重新设计，优化图纸由设计单位验算、建设单位认可后方可实施。优化方向包括增加仰拱厚度、增设仰拱钢架数量、提高混凝土强度等级，在仰拱底部增设隔水层，降低地下水对围岩软化的影响等措施，通过上述措施，从设计上提升仰拱承载能力。

对于已经发生病害的段落，在变形稳定后进行加固处理，加固范围为病害段落及前后50~100米。核心工艺是设置锁脚管棚或者沿仰拱填充面垂直打入钢花管注浆，注浆材料可与拱部加固浆液相同，确保加固效果的一致性、协同性，提高仰拱承载能力

和抗变形能力^[4]。锁脚管棚施工,要控制好管棚角度和间距,一般采用 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 倾角,间距控制在1~5米之间,确保管棚能锚固到稳定的围岩中,形成良好的支撑作用。注浆施工要严格控制好注浆压力以及浆液的扩散范围,防止注浆压力过大扰动围岩或压力过小导致浆液填充不足。

(二) 二次衬砌裂缝加固技术

二次衬砌裂缝的处置要依靠准确检测的结果,以目测法为主,结合尺量、刻度放大镜和超声波做全面检测。用超声波检测混凝土缺陷的主要根据是超声波在传播过程中产生的声时变化、能量衰减、频率差别以及波形畸变等现象,采用平面测试与钻孔测试相结合的方法来精确判定裂缝长度、宽度和深度^[9]。在开展检测时,要对裂缝实施编号标注,并按照裂缝的发展方向布置检测点,确保检测数据能够充分反映裂缝特点,为加固方案制订提供可靠依据。例如,遇到疑似深层裂缝的情形需利用钻孔测试方法,将径向振动式换能器放入钻孔之中,凭借超声波传播的数据,判断裂缝深浅及其延伸范围,防止因为检测不周全,致使加固举措缺乏针对性。^[6-10]

根据检测结果采取差异化加固措施:钢筋混凝土结构裂缝宽度 $<0.2\text{mm}$ 或混凝土结构裂缝宽度 $<0.4\text{mm}$,且裂缝发展趋于稳定时,可采用注射环氧树脂方法进行加固,利用浆液填充裂缝恢复结构整体性。注射环氧树脂施工应按照“清缝、封缝、注浆、固化”顺序开展:先使用高压气流清除裂缝内杂物,再用封缝胶封闭裂缝表面,通过注浆嘴将环氧树脂浆液注入裂缝,确保浆液能充分填充到裂缝末端处;待其固化后应对加固效果重新检查验收,确保裂缝闭合达到要求。当裂缝宽度大于上述规定值时,项目法人应当组织专家进行结构安全分析论证,并依据论证结论采取加固补强措施,确保结构受力安全。

对于宽裂缝加固,可采用粘贴钢板加固法:在裂缝两侧粘贴钢板,依靠钢板与混凝土的粘结传递应力,提高衬砌结构承载能力;或采用增设钢筋网加固法:凿除裂缝处部分混凝土,在增设钢筋网后重新浇筑混凝土,形成新的受力体系。同时,对因结构受力不平衡而产生的裂缝,要结合初期支护加固、围岩注浆等措

施,从源头上消除产生裂缝的原因,确保加固后的结构长期稳定可靠。在完成加固施工之后,需要持续开展裂缝监测工作,跟踪裂缝发展变化情况,确保加固效果符合工程要求。

五、处治效果验证与质量控制

(一) 效果验证核心指标

围岩大变形处治效果,要凭借监测数据和结构检测结果来加以证实,重点指标包含围岩变形速率、衬砌结构完整性及承载能力。通过持续监控量测,若围岩的变形速率逐渐趋于稳定,并且处于可接受范围之内,这就体现出加固措施是有效的;借助超声波探测、断面测量这些方法,可以检验二次衬砌的厚度、裂缝是否已经闭合等指标,确保其符合设计标准及质量要求。

(二) 全流程质量控制措施

质量控制要覆盖处治全过程:方案设计时,要将地质调查和围岩岩性分析结合起来,做到经济、合理、安全的目标;施工阶段,要严格遵守技术交底制度,重点把控注浆压力、钢架安装、钢筋安装、混凝土浇筑等重要环节;验收时,要组织设计、监理、施工等单位一起验收,对监测数据、施工记录、检测报告进行全面核查,确保处治效果符合工程需求。

六、结论

本文基于思澜高速大尖山隧道工程展开,深入探究公路隧道围岩大变形段处治技术,建立起“监测预警-分级处置-加固补强-效果检验”全流程处治体系。通过改良监测规划以准确抓住变形状况,凭借分级处置策略妥善应对,在仰拱加固、二次衬砌裂纹修复等关键技术助力下稳固结构。通过实践证实,该体系可以掌控围岩变形速率并保证衬砌品质,为软弱围岩大变形地段的类似处理赋予理论与工程典范参照,对于改善隧道工程建设安全及质量很有帮助。

参考文献

- [1] 张舜,蒋云东,王余.公路隧道软弱围岩大变形的注浆加固施工分析[J].建筑安全,2022,37(10):70-73.
- [2] 杨辉.穿越断层破碎带隧道围岩大变形机理及控制技术研究[D].辽宁工程技术大学,2022.
- [3] 付廷波.软岩长大公路隧道围岩大变形控制措施及其应用[J].建筑技术开发,2022,49(01):95-98.
- [4] 陈俊权.公路隧道软弱围岩大变形处治对策[J].公路交通技术,2018,34(05):106-112.
- [5] 叶雄,卢超波,姜洪亮.某隧道堆积体出洞段大变形控制与侵限处治研究[J].西部交通科技,2024(12):141-144.
- [6] 卢阳,邓修甫,鲁志强.云南华丽高速公路隧道大变形处治措施[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2020,29(1):15-19.
- [7] 谢雄耀,蔡杰龙,周应新,等.浅埋软弱围岩隧道施工塌方及处治措施研究[J].建筑施工,2022,44(3):545-549.
- [8] 高峰,郑东书.隧道软弱围岩大变形机理分析与加固措施研究[J].科学技术创新,2017(27):148-149.
- [9] 郑先奇.浅埋偏压软弱围岩大断面隧道综合处治措施[J].山西建筑,2012,38(8):198-200.

卷烟工厂设备管理模式实践探究

张文慧，张鹏

红云红河烟草（集团）有限责任公司乌兰浩特卷烟厂，内蒙古 兴安盟 137400

DOI:10.61369/ETQM.2026010021

摘 要： 卷烟行业转型发展背景下，内部设备作为卷烟厂生产的重要载体，设备管理水平高低，很大程度上影响卷烟厂生产效率和质量。传统卷烟厂设备管理模式以事后维修模式为主，资源协同效率偏低、预防性维护不足，以至于卷烟厂设备管理水平偏低，难以满足新时期精益生产和智能化管理需求。文章围绕卷烟工厂设备管理模式实践内容进行分析，总结一系列实践路径以供参考。

关 键 词： 设备管理；管理模式；卷烟厂；实践路径

Practical Exploration on Equipment Management Model in Cigarette Factories

Zhang Wenhui, Zhang Peng

Ulanhot Cigarette Factory, Hongyun Honghe Tobacco (Group) Co., Ltd., Xing'an League, Inner Mongolia 137400

Abstract： Against the backdrop of the transformation and development of the cigarette industry, internal equipment serves as a crucial carrier for production in cigarette factories. The level of equipment management significantly influences the production efficiency and quality of cigarette factories. Traditional equipment management models in cigarette factories primarily rely on post-failure maintenance, characterized by low resource coordination efficiency and insufficient preventive maintenance, resulting in a relatively low level of equipment management that struggles to meet the demands of lean production and intelligent management in the new era. This article analyzes the practical content of equipment management models in cigarette factories and summarizes a series of practical paths for reference.

Keywords： equipment management; management model; cigarette factory; practical path

卷烟工厂作为烟草制造产业链的基础设施，设备高效、稳定运行，直接关系卷烟厂生产效率。而且卷烟工厂设备往往占据总投资40%以上，设备一旦故障停机，不仅会影响生产活动连续性，还会影响产品质量，无形中增加企业运营成本。现阶段我国烟草行业正处于智能制造、质量效益转型的重要阶段，为了保证生产效率，加快卷烟工厂设备管理模式转型升级是必然选择，有助于打破卷烟工厂设备管理瓶颈，推动卷烟行业高质量发展。

一、卷烟工厂设备的主要类型和功能

卷烟工厂设备类型多样，主要包含以下几类：

1.制丝设备。制丝是卷烟生产的重要工序，制丝设备主要功能在于通过物理和化学处理方式，平衡烟丝的填充性、水分和燃烧性，最终将烟叶材料加工成合乎工艺标准的烟丝，为后续卷接提供稳定的原料基础。制丝设备根据功能可细化为以下几类：①预处理设备：主要包括润叶机、真空回潮机等设备，将烟叶加湿处理，软化烟叶纤维，并去除烟叶生青味，调整烟叶含水率在16% ~ 18%；②烘丝设备：主要有气流干燥机、筒式烘丝机等，去除烟丝中的多余水分，在热力作用下增强烟丝的弹性和填充性；③切丝设备：主要以切丝机为主，预处理的烟叶切成厚度

均匀的叶丝，大概0.8mm ~ 1.2mm，切丝是否均匀直接关系到后期成品卷烟产品的燃烧速度^[1]。

2.卷接设备。卷接设备依据工艺标准将烟丝卷为半成品烟支，对接过滤嘴，最终形成烟支成品。卷接设备主要包括卷烟机和接装机两种。卷烟机方面，以国产ZJ116/ZJ118型卷烟机为例，基于吸丝带从储丝柜吸附一定量的烟丝，并输送到卷制区域，在卷烟纸包裹下形成连续的烟条；采用烙铁加热方式使胶水逐渐固化，最后通过切刀切割为单支烟支。接装机以国产的YJ27/YJ29型号为例，其功能在于将滤棒和烟支对接形成完整的过滤嘴烟支。滤棒传送到搓接区，与烟支滤嘴接触，使用胶水粘合；借助检测装置剔除其中不合格产品，形成完整的烟支^[2]。

3.包装设备。包装设备将最终生产的成品烟支采用不同烟盒

包装,最终成为市场上正常流通的烟支产品。包装主要为了避免烟支被污染或损坏,同时也可以借助包装传递企业文化和品牌价值。以国产的YB45/YB55型号的小盒包装机为例,能够将20支成品烟支包装为尺寸88mm×56mm×22mm的单个小盒。烟支输送到通道排列为2×10的烟包,包裹上内衬纸防潮、防损,同时贴上标签和封签纸,最后对产品进行密封处理。

二、卷烟工厂设备管理模式实践路径

(一) 设计全生命周期管理框架

卷烟工厂设备管理实践中,针对现有管理模式不足,应充分契合行业高质量发展需求设计全生命周期管理框架,为设备前期选型、报废更新提供系统化管理,最终实现各类资源最优配置利用。卷烟工厂设备具有高精度以及高关联性的特点,设备全生命周期管理覆盖了前期设计选型、设备安装调试、维护以及报废更新几个阶段^[3]。

1.设计选型。卷烟工厂设备前期设计选型是否合理,关系到后期设备运维效率和成本。卷烟工厂应当联合工艺部门和设备供应商,多维度进行设备评估:①可靠性:所选购的设备关键部件故障率不超过0.1次/千小时,使用寿命不少于10年。②经济性:建立全生命周期成本模型,综合评估卷烟工厂设备的采购、安装和运维等环节成本,避免决策不合理增加不必要成本。③可维护性:采购的设备便于后期检修和维护,提供详细的设备操作和维护手册。

2.安装调试。卷烟设备的安装调试环节,应设计标准化流程,为设备性能提供保障。前期设备环节,明确设备使用说明书和工艺布局要求,严格控制设备安装规范;设备空载试运行和生产,保证设备符合设计要求;记录设备电机功率、传感器灵敏度等参数,同时整合供应商和相关技术资料,设立专门的设备档案,为后续设备管理和维护提供支持^[4]。

3.运行维护。运行维护环节,摒弃传统事后维修模式,推行预防性维护和预测性维护模式,全方位降低设备故障和维护成本。预防性维护,根据设备运行磨损程度制定全周期保养计划,如制丝线烘丝滚筒每月末清理避免影响设备的热效率。预测性维护,基于温度传感器、振动传感器等装置,实时采集卷烟工厂设备运行数据,分析潜在设备故障,及早组织人员处置和维护。

4.报废更新。报废更新环节,综合评估设备的使用寿命和市场残值,并结合生产需求,强制评估一些运行时间15年以上的设备,优先采购和升级低能耗设备,降低企业生产成本^[5]。

基于全生命周期管理体系,推动卷烟工厂设备管理朝着全程优化过度转型,最终达成降低设备运维成本,延长设备使用性能和使用寿命的目标。

(二) 创新应用精益化管理工具

结合卷烟工厂设备管理升级需要,应摒弃传统管理模式不足,坚持持续改进为核心引入精益化管理模式,并通过标准化流程和工具手段,推动卷烟工厂设备管理朝着数据驱动方向升级。具体可以采用以下几类精益化管理工具:

1.TPM全员生产维护体系。TPM体系推崇全员参与,提前明确各级职责,便于实现设备管理横纵向联系^[6]。操作人员负责日常检查卷烟设备表面污垢、油位以及螺栓紧固情况,采取边操作边确认关键点的方式落实基础维护工作;维修人员提供部件磨损检测和精度校准等专业检查工作,使用红外测微仪、振动分析仪等仪器设备,精准识别设备潜在故障隐患;管理人员负责监督考核,考核指标包括OEE(设备综合效率)、MTBF(平均故障间隔时间)、MTTR(平均修复时间)等,量化评估卷烟设备运行状态,为设备管理的后期动态改进提供依据。

2.5S与可视化管理。5S与可视化管理模式,具体包含了整理、整顿、清扫、清洁和素养几项要素,辅助精益化管理工作开展,创设清洁、规范的现场环境。整理和整顿要素,重点清理设备周边无关产品,使用螺丝刀、扳手等工具确定摆放位置,取用时间不超过30秒;清扫和清洁要素,针对各类设备制定合理的设备清洁标准,并定期公示设备清洁状况;素养要素,定期培训和考核员工设备维护习惯,将5S管理模式执行情况定期反馈,指导员工改进不足,充分掌握卷烟工厂各类设备运行状态^[7]。

3.标准化作业流程。实行标准化作业流程,结合卷烟工厂设备操作和维护需要,制定详细的卷烟机操作手册或制丝线烘丝机维护规程。标准化作业流程中,明确各类设备的启动顺序、规格参数和异常问题处理流程等;细化点检项目以及各类工具使用方法,督促工作人员严格执行标准化作业流程,减少主客观因素干扰影响,为卷烟工厂设备安全、稳定运行提供坚实保障。

(三) 智能化技术赋能

智能化技术在卷烟工厂设备管理中融合应用,致力于提升设备精益化管理水平。卷烟工厂可建立设备物联网平台,在卷烟机、动力设备以及制丝机等核心设备上安装传感器,收集设备的电流、温度、振动等运行数据,数据采集频率为每分钟不少于1次,经由工业以太网传输至中央数据库。卷烟机细丝带电机上安装温度、振动和电流传感器,监测过热风险、轴承磨损以及负载变化等情况,客观反馈电机的运行状况;制丝机烘丝滚筒上安装湿度传感器、压力传感器,获取烟丝含水率和蒸汽压力等数据,为工艺精准控制提供数据依据^[8]。

引入大数据技术,收集海量数据,基于机器学习算法智能分析和处理,为卷烟工厂和新设备建立健康评估模型,从而精准评估和预测设备运行状况,便于及时发现设备故障、及时处置。根据设备历史故障数据,提前3~7天预警设备故障,并自动化生成设备维护方案;动态调整设备维护计划和备件库存,尽可能降低设备故障停机时间和维护成本;分析设备运行参数和产品质量关系,挖掘数据潜在价值,为后续工艺调整优化提供可靠数据依据。

引入AI和自动化技术,辅助设备运维管理,提高设备维护效率同时,降低设备运行风险、成本。在卷烟工厂内部高温、高压等风险较高的环节,适合部署大量的巡检机器人,依托机器人的气体检测传感器、红外传感装置,精准识别电气火灾、管道泄漏等安全隐患。巡检机器人代替人工巡检方式,既能提高巡检效率,还可有效避免人员安全受到威胁。对于一些空间狭小的区

域,适合选择维修机器人配合摄像头精细化操作,完成高精度维修任务^[9]。

（四）建立协同化管理机制

为了实现卷烟工厂设备高效运行,需要设备部门、采购部门、工艺部门和生产部门多方联动,建立协同化管理机制。生产部门负责反馈设备使用中的故障问题和操作不便等情况,配合预防性维护需求计划停机;设备部门,主要负责设备运维管理计划制定和执行,针对设备故障或损坏问题,提供设备备件;工艺部门负责提供设备运行各项工艺参数,负责指导设备升级改造;安全部门负责监控设备安全风险识别和防控,保证设备运维全过程合乎规范和标准。加强卷烟工厂内部各部门沟通交流同时,针对供应商分级管理,设立安全库存模型;与供应商合作,负责设备的定期改造升级,基于技术共享模式实现软件定期升级,降低设备后期维护成本^[10]。

（五）加强人才梯队建设

加快卷烟工厂设备管理转型升级,需要组建一支高素质的人才队伍提供支撑。面向卷烟工厂具体的岗位需求,建立一体化人才培养体系,在招聘人员同时,为人员提供技术培训、能力认证以及激励等服务。建立分层分类培养体系,针对操作人员,讲述专业理论内容基础上,组织模拟实操培训活动,重点讲解日常点检项目、标准以及设备功能,保证操作人员熟练掌握卷烟设备参

数规范和启停流程;面向维护人员开设一系列培训课程,如大数据平台操作、故障诊断技术等,重点提高维护人员的数据分析和专业维修专业技能;面向管理人员,组织跨部门沟通、精益工具应用等培训活动,重点强化管理人员的协同管理以及战略规划能力。除此之外,建立传帮带机制,在工厂内部实行师徒模式,由高级技师带领新员工,传授特殊工况处理技巧、故障判断经验,加快人才的成长周期;设立技术攻关小组,围绕设备运行难点问题组织协同创新工作,如如何提高卷接机高速运行稳定性,在分析问题和解决问题过程中,有效提高工作队伍解决问题的能力。

深化卷烟工厂内部人才梯队建设,致力于打造复合型的队伍,为设备管理模式优化改进提供源源不绝的人才支持,助推卷烟工厂持续稳定发展。

三、结论

综上所述,卷烟工厂内部涉及多类型的机械设备,为了保证卷烟工厂高效生产,需要结合卷烟工厂设备管理和维护中的各类问题,大力引入前沿技术手段融合应用,持续优化设备管理模式,从而全面提升设备管理技术水平,助推卷烟产业高质量转型发展。

参考文献

[1]王小庆,张星雨,张哲田.基于全生命周期管理的卷烟物流设备维修优化分析[J].中国物流与采购,2025,(03):73-74.
[2]李林,李磊,陈林.设备状态感知系统在卷烟物流设备管理中的运用[J].设备管理与维修,2024,(12):129-132.
[3]于治林.卷烟工厂设备健康管理探索[J].设备管理与维修,2023,(19):163-167.
[4]王立春,张宝.卷烟工厂物流管理系统数字孪生技术应用[J].物流技术与应用,2023,28(06):164-168.
[5]王倩倩,雷西勇,李世江.卷烟企业MES设备管理模块的研究与应用[J].设备管理与维修,2021,(13):119-121.
[6]王国萍.卷烟工业企业监视和测量设备管理模式研究[J].中国计量,2021,(02):50-52.
[7]陈祖龙.卷烟工业企业物流系统设备精益管理研究[J].中国新技术新产品,2020,(14):135-136.
[8]尹馨.设备全生命周期管理在卷烟制丝车间的应用[J].现代制造技术与装备,2020,56(07):219-220.
[9]夏欢.烟草卷烟机械设备管理方法优化分析[J].科技创新导报,2020,17(14):164-165.
[10]王伟博.烟草卷烟机械设备管理的问题及对策[J].装备维修技术,2020,(02):336.

建筑工程竣工结算阶段造价争议的常见类型与化解路径

张河

天津市房屋鉴定建筑设计院有限公司, 天津 300381

DOI:10.61369/ETQM.2026010024

摘 要： 建筑工程竣工结算阶段是确定工程最终造价、明晰各方经济权益的关键环节，此阶段涉及的利益主体多元、计价因素复杂，极易引发造价争议。这些争议不仅会延缓结算进程、增加交易成本，更可能激化发承包双方矛盾，影响工程后续移交与使用。本文基于建筑工程结算实践，深入剖析竣工结算阶段常见的造价争议类型，包括工程量计算争议、计价依据适用争议、签证变更计价争议及规费税金计取争议等，结合争议产生的深层原因，从协商调解、仲裁诉讼、机制完善三个维度提出针对性的化解路径，旨在为规范结算行为、减少造价纠纷、保障工程建设市场有序运行提供实践参考。

关 键 词： 建筑工程；竣工结算；造价争议；化解路径

Common Types and Resolution Paths of Cost Disputes in The Final Settlement Stage of Construction Projects

Zhang He

Tianjin House Appraisal and Architectural Design Institute Co., LTD. Tianjin 300381

Abstract： The final settlement stage of construction projects is a crucial link in determining the final project cost and clarifying the economic rights and interests of all parties involved. This stage involves multiple interest subjects and complex pricing factors, which can easily lead to cost disputes. These disputes will not only delay the settlement process and increase transaction costs, but also may intensify the conflicts between the employer and the contractor, affecting the subsequent handover and use of the project. Based on the practice of construction project settlement, this article deeply analyzes the common types of cost disputes in the final settlement stage, including disputes over the calculation of quantities of work, disputes over the application of pricing bases, disputes over the change of visa pricing, and disputes over the calculation of fees and taxes, etc. Combined with the deep-seated causes of the disputes, it proposes targeted resolution paths from three dimensions: negotiation and mediation, arbitration and litigation, and mechanism improvement. It aims to provide practical references for standardizing settlement behaviors, reducing cost disputes, and ensuring the orderly operation of the engineering construction market.

Keywords： construction engineering; completion settlement; cost dispute; resolution path

引言

建筑工程竣工结算作为工程建设全流程的收尾环节，是发承包双方根据合同约定、施工图纸及现场实际情况，对工程总造价进行最终核定的核心工作。其结果直接关系到建设单位的投资效益、施工企业的营收利润，以及监理、设计等相关方的利益分配^[1]。然而，由于工程建设周期长、技术复杂度高、现场变更频繁等特点，结算阶段往往成为造价争议的集中爆发点。争议的产生既与计价规则理解偏差、合同条款约定不明有关，也受现场签证管理不规范、各方利益诉求冲突等因素影响。若争议未能得到及时合理化解，不仅会导致结算工作陷入僵局，还可能引发工程款拖欠、工程留置等连锁问题，破坏建筑市场信用体系。因此，系统梳理竣工结算阶段造价争议的常见类型，探寻科学高效地化解路径，对提升结算效率、维护建筑市场秩序具有重要的现实意义^[2]。

一、建筑工程竣工结算阶段造价争议的常见类型

（一）工程量计算争议

工程量是工程造价计价的基础，工程量计算的准确性直接决

定了造价结果的合理性，因此工程量争议是结算阶段最常见的争议类型。此类争议主要源于三个方面：一是清单项目特征描述与实际施工不符。招标阶段工程量清单编制若存在项目特征描述模糊、漏项或与施工图纸脱节等问题，施工中发承包双方对清单

项目的理解易产生偏差，结算时对实际完成工程量的界定便会出现分歧^[3]。例如，清单中对“墙面抹灰”仅描述为“水泥砂浆抹灰”，未明确抹灰厚度及基层处理要求，施工中按图纸要求完成加厚抹灰及基层挂网处理后，结算时建设单位可能以清单未明确为由拒绝认可新增工程量。二是施工图纸与现场实际施工存在差异。

工程施工过程中，受地质条件变化、设计优化等因素影响，常需对原施工图纸进行调整，若现场变更未及时形成完整的书面记录，结算时仅依据原图纸计算工程量，便会与施工企业实际完成的工程量产生冲突。如基坑开挖过程中遇到特殊地质层，需增加降水及基坑支护工序，若未及时办理签证手续，结算时建设单位可能不认可该部分新增工程量^[4]。三是计量规则适用存在分歧。现行建筑工程计价规范虽对计量规则有明确规定，但部分分项工程的计量边界较为模糊，发承包双方可能基于自身利益诉求选择不同的计量口径。例如，对于混凝土结构中的钢筋保护层厚度，若规范未明确是否计入钢筋工程量，建设单位可能主张按钢筋设计长度计量，施工企业则可能要求计入保护层厚度对应的钢筋长度，从而引发争议。

（二）计价依据适用争议

工程量清单计价，是指招标人公开提供工程量清单，投标人自主报价或招标人编制标底及双方签订合同价款，工程竣工结算等活动，是由投标人完成由招标人提供的工程量清单所需的全部费用，包括分部分项工程费、措施项目费、其他项目费、规费、税金。计价依据是竣工结算的核心准则，计价依据适用不当或理解偏差是引发造价争议的重要原因，主要体现在定额选用、材料价格确认及新增项目组价三个层面。定额选用争议多发生于定额体系更新或特殊工程场景中，部分工程同时涉及多个专业定额，发承包双方对定额的选用优先级存在不同理解。例如，工业建筑中的管道安装工程，既可适用安装工程定额，也可参考市政工程相关定额，若合同未明确约定，建设单位可能倾向选用单价较低的定额，施工企业则可能选择更贴合施工工艺的定额，导致计价结果差异^[5]。材料价格确认争议是计价依据争议的高频点，建筑工程材料种类繁多，价格受市场波动、采购渠道等因素影响较大，结算时对材料价格的认定极易产生分歧。若合同约定采用“信息价”计价，但未明确信息价的来源及调整方式，当信息价与实际采购价存在差距时，施工企业会主张按实际采购价结算，建设单位则可能坚持以信息价为准，尤其对于单价较高的装饰材料、特种设备等，价格争议往往较为激烈。新增项目组价争议则源于施工过程中出现的合同外新增工程，若合同未明确新增项目的组价原则，发承包双方对组价依据的选择会存在分歧。部分建设单位主张按现行定额计价并下浮一定比例，施工企业则认为新增项目工艺特殊，应采用“成本加酬金”模式或参考市场询价结果组价，若未能达成一致便会引发争议^[6]。

（三）签证变更计价争议

建筑工程施工过程中，现场签证和设计变更是不可避免的，签证变更是否规范直接影响结算阶段造价认定，此类争议主要表现为签证手续不完整、变更计价原则不明及签证内容与实际不符

3个方面。争议的诱因中最多的就是签证手续不完整，部分施工企业在发生现场变更后没有及时办理正式的签证审批手续，只是以口头约定或施工日志记录作为结算依据，建设单位在结算时以“无书面签证”为由拒绝认可该部分造价^[7]。又如，建设单位口头要求施工企业增设临时道路，施工企业完成后未及时让建设单位及监理单位签字，结算时建设单位否认其口头指令，这部分费用不能计入结算。因变更计价原则不明引发的争议则与合同约定的缺失相关，若设计变更在合同中未作明确计价方法的规定，当变更涉及工程量增减或工艺调整时，发承包双方对计价标准的主张往往相左。若因设计变更造成原混凝土结构改为钢结构，建设单位可能要求按原混凝土结构造价与钢结构造价的差额进行调整，施工企业主张按钢结构实际造价重新计算，并要求计取因变更造成的窝工、材料损耗等费用。另外，签证内容与实际施工不符的情况也屡有发生，有部分签证存在“虚签”“多签”的现象。或签证内容描述模糊、工程量标注不清，结算审核时发现签证内容与现场核查结果不一致，便会引发造价争议^[8]。

（四）规费税金计取争议

规费是政府机关履行行政行为或提供公有物使用权时，依法向特定主体征收的行政管理费。其费用构成包括工程排污费、社会保障费、住房公积金等法定项目，法律依据涵盖《企业法人登记管理条例》《建筑安装工程费用项目组成》等文件。作为财政收入组成部分，规费专项用于公共服务，同时构成企业运营成本。收费标准的确需综合考虑行政成本、政策导向等因素。规费和税金作为工程造价的组成部分，具有法定性和强制性，但结算阶段仍存在计取范围、计取标准及计取基数的争议。规费计取争议主要源于对施工企业资质及规费缴纳义务的认定，部分施工企业可能存在资质挂靠、分包转包等情况，建设单位会以“实际施工单位不具备规费计取资质”为由拒绝支付规费，而施工企业则认为规费是工程造价的法定组成部分，应按规定计取。例如，某挂靠施工企业完成工程后，建设单位以其未实际缴纳社会保障费为由，扣除结算中的社会保障费，双方由此产生争议。税金计取争议多与税率调整及计税基数确定有关，工程建设周期内若遇到税率政策调整，发承包双方对税率适用时段的划分可能存在分歧，部分建设单位要求按结算时的税率计取，施工企业则主张按施工期间的实际税率分段计取。计税基数争议则表现为对“税前工程造价”的范围认定不同，部分建设单位认为应扣除暂列金额、专业工程暂估价等不确定费用后计取税金，施工企业则认为应按全部工程造价作为计税基数，双方对政策文件的理解偏差导致争议产生^[9]。

二、建筑工程竣工结算阶段造价争议的化解路径

（一）构建多元化协商调解机制

协商调解作为非诉讼纠纷解决方式，具有效率高、成本低、灵活性强的优势，应作为造价争议化解的首选路径。在协商调解机制构建中，需强化事前沟通、引入专业第三方及规范调解流程。事前沟通机制应贯穿结算全过程，发承包双方应在结算工作启动前成立专项沟通小组，明确结算流程、时间节点及争议沟通

渠道，对结算中发现的问题及时对接，避免争议积累。例如，对工程量核对中的分歧，可通过现场复核、图纸会审等方式即时沟通，形成书面共识记录，防止争议扩大。第三方调解的核心是引入专业机构或人员，由于造价争议涉及专业计价知识，单纯依靠双方协商易陷入僵局，此时可委托具有甲级造价咨询资质的机构或注册造价工程师介入调解^[10]。第三方基于专业知识和中立立场，对争议问题进行技术论证，提出客观公正的计价建议，帮助双方打破认知壁垒。如对于签证变更计价争议，第三方可结合现场勘察结果、施工工艺标准及市场价格水平，出具专业的造价鉴定意见，为双方协商提供依据。规范调解流程则需明确调解程序、时限及调解协议的效力，双方达成一致后应签订书面调解协议，明确争议解决结果及履行方式，并可通过公证或司法确认增强协议的法律效力，避免调解后再次产生争议。

（二）规范仲裁与诉讼程序应用

当协商调解无法化解争议时，仲裁和诉讼作为具有强制执行力的纠纷解决方式，是争议化解的重要保障。在仲裁与诉讼程序应用中，需注重程序规范、证据留存及专业支持。仲裁方式的优势在于保密性强、裁决效率高且当事人可自主选择仲裁机构和仲裁员，适用于对商业秘密保护要求较高的造价争议。采用仲裁方式解决争议时，发承包双方需在合同中明确约定仲裁条款，明确仲裁机构、仲裁范围及仲裁规则。仲裁过程中，应重点提交工程量清单、施工图纸、签证单、计价依据等核心证据，必要时委托造价鉴定机构出具鉴定报告，为仲裁裁决提供专业支撑。诉讼作为司法救济途径，适用于争议金额较大、双方矛盾尖锐的情形。诉讼过程中，需严格遵循法定程序，注重证据的合法性、真实性和关联性。例如，工程量争议，施工企业需要提交建设单位及监理单位签字确认的签证单、现场施工影像资料、工程量核对记录等证据，证明其实际完成的工程量；建设单位需要提交招标清单、中标通知书等证据，证明工程量计算的依据。此外，不论是仲裁还是诉讼，均应注重专业的律师和造价工程师的协作参与，律师负责程序把控和法律论证，造价工程师负责技术层面的造价核算，形成专业合力，提高争议解决的精确性和效率。

（三）完善事前预防与过程管控机制

事前预防和过程管控，是造价争议化解的根本，通过规范前

期工作，强化合同管理及细化过程控制，从源头上减少争议发生。在前期工作规范方面，一是提高招标阶段清单编制质量，清单编制单位必须有相应资质，编制人员必须对施工图纸、规范要求有充分理解，明确项目特征描述，不漏项、错项；二是加强招标控制价审核，保证控制价与市场实际水平一致，为后续结算做好铺垫。加强合同管理，预防争议发承包双方在合同中应明确计价依据、工程量计算规则、签证变更流程、规费税金计取标准等重要内容，对涉及新增项目组价、材料价格调整、税率变动处理等有可能引发争议的问题，应有具体可操作的约定。例如，合同中可明确“新增项目若有相同或类似清单项目，按原有项目单价执行；无相同或类似项目时，按现行定额计价并参考市场询价结果确定”，减少结算时的计价分歧。过程控制细化则需加强施工全过程的签证管理和造价动态监控，施工企业应在签证发生时及时办理书面手续，明确签证原因、工程量、计价标准等内容，并经建设单位、监理单位签字确认；建设单位则应建立签证审核机制，对签证的真实性、合理性进行即时审核。同时，双方可引入造价动态管理系统，实时跟踪工程量变化、材料价格波动等情况，定期进行造价核算，及时发现并解决过程中的潜在争议，避免结算阶段集中爆发。

三、结论

建筑工程竣工结算阶段的造价争议具有类型多样、成因复杂的特点，工程量计算、计价依据适用、签证变更计价及规费税金计取等争议直接影响结算效率和各方利益。化解这些争议需构建“预防为主、调解优先、仲裁诉讼兜底”的多元化解决体系，通过构建专业协商调解机制、规范仲裁诉讼程序应用，为争议提供高效解决路径；更需从源头发力，通过完善前期清单编制、强化合同管理、细化过程管控，减少争议产生的土壤。建筑工程各参与方应树立全过程造价管理理念，加强沟通协作，将争议预防和化解贯穿工程建设全流程，以提升结算质量、保障各方合法权益，推动建筑市场的健康有序发展。

参考文献

[1] 陈晓慧. 建筑工程竣工结算审核方法及其要点分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(20): 178-180.
[2] 黄锦霖. 建筑工程竣工结算阶段的造价管理问题及优化对策 [J]. 散装水泥, 2025, (05): 202-204.
[3] 成俊艳. 建筑工程竣工结算阶段造价管理研究 [J]. 工程建设与设计, 2025, (19): 266-268.
[4] 朱金弟. 房屋建筑工程竣工结算审核工作创新研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(18): 121-123.
[5] 丘鹏兴. 建筑安装工程竣工结算审查问题及对策分析 [J]. 中华建设, 2025, (04): 48-50.
[6] 莫伟春. 建筑工程竣工结算环节工程造价问题分析及对策研究 [J]. 房地产世界, 2024, (17): 98-100.
[7] 李光平. 建筑工程清单计价模式下措施项目竣工结算常见问题研究 [J]. 四川水泥, 2024, (08): 17-19.
[8] 李瑞君. 建筑工程竣工结算造价的审核标准问题分析 [J]. 大众标准化, 2024, (13): 52-53+56.
[9] 肖德威. 建筑工程竣工结算审计工作的相关探讨 [J]. 房地产世界, 2024, (13): 125-127.
[10] 谢军涛. 建筑工程竣工结算审计工作要点探讨 [J]. 房地产世界, 2024, (09): 131-133.

超大型边坡地下径流组织方式对失稳触发条件的 主控机理研究

韩涤清

河南省地质局地质灾害防治中心, 河南 郑州 450012

DOI:10.61369/ETQM.2026010028

摘 要 : 超大型边坡由于其庞大的规模和复杂的地质环境, 容易受到地下水流动的影响, 导致失稳。本文研究了超大型边坡地下径流的组织方式对失稳触发条件的主控机理, 分析了地下水流对边坡稳定性的作用机制。通过对不同地下水流动模式的模拟与分析, 揭示了地下水的分布、流速及其与岩土介质的相互作用对边坡失稳的影响。研究表明, 地下水流动方式不仅影响边坡的渗透性与应力状态, 还在一定条件下引发失稳现象。结果为超大型边坡的稳定性评估提供了新的思路和方法, 对工程设计及风险评估具有重要意义。

关 键 词 : 超大型边坡; 地下径流; 失稳触发; 水流特征; 稳定性分析

Study on The Main Control Mechanism of Instability Triggering Condition of Underground Runoff Organization Mode of Super Large Slope

Han Diqing

Geological Disaster Prevention and Control Center, Henan Provincial Geological Bureau, Zhengzhou, Henan 450012

Abstract : Super large slopes, due to their massive scale and complex geological environments, are susceptible to instability triggered by groundwater flow. This study investigates the primary mechanism of instability triggering conditions influenced by underground runoff organization patterns in super large slopes, analyzing the interaction mechanisms between groundwater flow and slope stability. Through simulations and analyses of different groundwater flow patterns, the research reveals how groundwater distribution, flow velocity, and their interactions with rock-soil media affect slope instability. The findings demonstrate that groundwater flow patterns not only influence slope permeability and stress states but may also induce instability under specific conditions. These results provide new approaches and methodologies for stability assessment of super large slopes, offering significant implications for engineering design and risk evaluation.

Keywords : super large slope; underground runoff; instability trigger; flow characteristics; stability analysis

引言

超大型边坡常见于复杂的地质环境中, 承载着重要的工程功能和生态价值。边坡稳定性一直是地质灾害研究的核心内容, 而地下水的影响因素往往被忽视。地下水在边坡内的流动模式和流速, 直接关系到其稳定性状态。特别是在大规模边坡工程中, 地下水流对边坡稳定性可能产生极为复杂的作用。因此, 如何合理分析地下水流的组织方式, 并深入探讨其对边坡失稳的主控机理, 成为亟待解决的关键问题。通过对地下水流动特征及其与边坡相互作用的深入研究, 可以为未来边坡工程的安全设计提供有力支持。

一、超大型边坡地下径流的流动特性分析

由于边坡规模庞大, 地下水流动的特点较为复杂, 呈现出不同于小型边坡的多变性和不确定性。不同的地质结构、土壤类型和水文条件, 使得地下水的流动呈现出不均匀的分布, 这种不均

匀性在一定程度上增加了地下水与边坡土体之间的相互作用强度。地下水的流动方向、速度和分布方式, 都在影响边坡稳定性的过程中起到了至关重要的作用。尤其是在大规模的边坡上, 地下水流动的路径不仅受地质结构的限制, 还受外界降水、地表水和地下水的相互关系影响。^[1-4]

作者简介: 韩涤清 (1997.02-), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地质水工环。

在超大型边坡中，地下水的流动往往不是单一的线性流动。水流的组织方式更加复杂，可能呈现出层流、湍流或不规则流动。不同的地下水流动模式对边坡的影响各异。层流通常表现为地下水沿着较为规则的流动通道向下渗透，可能导致边坡稳定性逐渐下降。而湍流则可能在局部区域产生强烈的冲刷作用，改变土体结构和孔隙分布，进而提高了失稳的风险。非均质的地质条件使得地下水流动表现出更加复杂的特征，例如局部区域可能出现地下水流动速率急剧增大的现象，这种变化可能在某些条件下引发突发性失稳。^[5-8]

水流的渗透性和边坡土体的结构性密切相关。当地下水流动经过某些土体层时，若渗透性较差的土层阻止水流的进一步扩展，水流会在上层或下层堆积，造成应力集中，进而引发滑坡或其他失稳现象。水流与土体间的相互作用也会影响边坡的孔隙水压力分布，进而影响土体的强度特性。地下水的渗透作用不仅会改变土体的力学特性，还可能通过水化反应影响土体的稳定性。^[9]

二、地下水流与边坡稳定性的相互作用机制

在超大型边坡中，地下水不仅在流动过程中改变了土体的应力分布，还通过渗透作用对土体的结构、强度和刚度产生了深远影响。地下水流的渗透性、流速和压力分布直接影响边坡内部应力场的变化，进而可能导致滑坡、崩塌等灾害性事件的发生。水流与土体的相互作用首先体现在孔隙水压力的变化上。当地下水流动穿越不同土层时，由于土体的渗透性差异，水流的速度和路径会发生改变，局部地区可能出现较高的孔隙水压力。这些局部压力的积累会在边坡的某些关键部位形成应力集中，降低土体的抗剪强度，甚至引发滑移。特别是在上层土壤饱和的情况下，孔隙水压力显著增加，会削弱土体的剪切强度，使得边坡容易发生失稳。^[10]

水流在土体中的传播也影响了边坡土体的水力传导性。水流的导水性、流向和流速与土层的孔隙结构、土体的孔隙率及水分的含量密切相关。较大的水流速度可能带来土体的侵蚀效应，局部区域的水流可能对土层的稳定性造成破坏，进而导致土层的崩塌或变形。水流的非均匀性也导致了地下水流动过程中出现水流路径的错综复杂，这种流动的不规则性加剧了边坡失稳的风险。在地下水流动作用下，边坡的土体水化反应也发挥着重要作用。水流中的溶解物质可能与土体中的矿物发生反应，导致土体结构的变化，进而改变其力学特性。这种水化作用不仅改变了土层的刚度，还可能导致土体的膨胀或收缩，进一步影响边坡的稳定性。

三、失稳触发条件的关键因素及其分析

在超大型边坡中，多个因素的相互作用可能引发失稳现象。地下水的流动特性是影响边坡失稳的重要因素，尤其是水流的速度、路径及其与土体的相互作用。在不同的地质和水文条件下，地下水流的路径可能产生较大的变化，这些变化在特定条件下可能导致土体的抗剪强度下降，进而引发失稳。地下水渗透与孔隙

水压力的增加在失稳触发中起着关键作用。当水流通过边坡土层时，由于土体的非均质性，地下水在某些区域积聚并导致孔隙水压力显著升高。孔隙水压力的上升会使得土体的有效应力减少，进而降低其抗剪强度，特别是在饱和条件下，水流的侵蚀作用和水力压降效应会加剧这一过程。这种压力积累会在边坡内部形成弱面，土体在外部扰动或应力变化的作用下可能发生滑移或崩塌。随着水流不断渗透和积聚，失稳的可能性逐渐增大。

边坡的地质条件和土体特性也是决定失稳触发的关键因素之一。土体的粒径分布、土层结构以及土壤的含水率都会影响水流的渗透性和边坡的稳定性。岩层的分布和破碎带的存在会使得地下水流路径发生偏移，进而改变水流的流速和压力分布。如果水流集中于某一破碎带或低渗透层中，可能导致局部地区的水压急剧增加，从而在应力作用下触发边坡失稳。土体中的有机质含量、矿物成分以及土壤的塑性也决定了边坡的稳定性。低塑性土体在水流渗透作用下容易发生流变性变化，导致边坡的变形和滑动。

外部因素，特别是降水量、地震或人为扰动等，也可能是失稳触发的关键因素。在极端降水条件下，地下水位的快速上升可以迅速改变边坡的稳定状态，尤其是在雨季或暴雨后，边坡的水分饱和度和增大，导致土体失去部分支撑力，进一步降低边坡的稳定性。地震或其他动态加载也可能引发已存在的地下水压力或裂隙中的水流加剧，造成潜在的失稳。而人为因素，如开挖、填埋或水利工程建设，也可能改变地下水流的原始模式，进一步加剧边坡失稳的风险。综合考虑地下水流、土体特性、外部环境因素等，失稳触发条件的分析不仅依赖于静态的水文地质条件，还要关注动态因素的影响。在实际工程应用中，对这些因素的精准评估有助于识别潜在的失稳风险，并采取有效的加固措施以避免灾害发生。

四、地下水流对超大型边坡失稳的影响模式

地下水流对超大型边坡失稳的影响模式十分复杂，涵盖了水流的流动机制、土体与水流的相互作用以及水流在土体内的分布特征。地下水在边坡中的流动不仅直接影响土体的力学性质，还通过改变土体孔隙水压力、应力状态和渗透特性，促进了边坡稳定性变化。在超大型边坡中，地下水流动方式多种多样，其对边坡稳定性的影响模式也因此呈现出不同的特征。在超大型边坡中，地下水流的渗透作用通常首先表现为土体内部孔隙水压力的变化。当水流进入土体时，水压通过渗透作用逐渐积累，这种孔隙水压力的增加降低了土体的有效应力，从而使得土体的抗剪强度减弱。在饱和条件下，孔隙水压力的增高特别容易导致边坡内部的土体产生滑动或变形，形成潜在的失稳面。水流的侵蚀作用进一步加剧了土体的结构破坏，尤其是在存在裂隙或不均质层的土体中，地下水流可以通过裂隙系统加速土体的侵蚀，削弱土体的整体稳定性。

不同类型的地下水流模式也会对边坡稳定性产生不同程度的影响。层流状态下，水流沿着一定的路径均匀渗透，虽然流动

速度较慢，但长期的水流作用会使得土体的强度不断下降，形成较为均匀的水压力分布。与之相对的是湍流模式，水流的不规则性和速度的增加会导致局部区域水流的侵蚀作用加剧，可能会在边坡内形成高压水区，进而触发边坡失稳。特别是在具有复杂地质条件的边坡中，水流路径的变化更加复杂，可能在某些局部区域形成强烈的水流集中现象，导致局部土体的剪切强度降低，从而加剧了边坡的失稳风险。

地下水流的长期作用不仅改变了土体的力学性质，还可能引起水化作用，导致土体的膨胀或收缩。这种膨胀或收缩现象会进一步影响土体的密实性和强度，特别是在粘土或膨胀土等易受水流影响的土质中，地下水流的作用更为显著。水流与土体的相互作用可能导致土体在某些区域发生剪切破坏或发生滑坡，尤其是在极端降水或快速水位变化的情况下。地下水流的另一种影响模式是在特定地质条件下对边坡滑移面位置的影响。水流通过地下裂隙或层间渗透，可能导致滑移面的位置发生变化，进而引发整个边坡的失稳。水流不仅在滑移面上增加了滑动力，也可能通过局部压力波动的形成，触发土体内原本较弱的结构面发生滑动。通过不同的水流模拟与土体分析，可以更加精准地识别地下水对边坡稳定性影响的具体模式，为边坡失稳的预警和防控提供理论依据。

五、基于地下径流分析的边坡稳定性评估方法

基于地下径流分析的边坡稳定性评估方法是通过综合考虑地下水流动特性及其与边坡土体的相互作用，来准确评估边坡在不同水文地质条件下的稳定性。这种方法涉及地下水流动模拟、土体力学分析以及边坡稳定性理论的结合，旨在揭示地下水对边坡失稳的具体影响，为边坡的风险评估和工程设计提供科学依据。在评估过程中，地下水流动的模拟是核心环节之一。通过建立地下水流动的数值模型，能够准确模拟地下水在边坡土体中的分布及流动路径。利用渗透性、土壤孔隙率等参数，水流的速度、压

力以及渗透深度得以精准计算，进而获得地下水流动对边坡的实际影响。通过模拟水流的动态变化，可以揭示水流在不同条件下对边坡稳定性的影响，特别是在强降水或极端天气情况下，地下水的突发性变化对边坡的潜在威胁。

土体力学分析也是评估方法中不可或缺的一部分。根据地下水流动产生的孔隙水压力变化，结合边坡土体的强度参数，能够计算出土体的有效应力和抗剪强度。通过对不同土层、不同土质特征的详细分析，可以识别出哪些区域可能会在地下水流的作用下出现剪切破坏或滑移。利用极限平衡法或滑坡稳定性分析方法，能够量化地下水在不同边坡工况下对稳定性的影响，评估边坡的安全系数，进而判断其失稳的可能性。

除了数值模拟和力学分析外，基于地下径流的评估方法还需考虑边坡的地质特征和水文条件。地质条件的变化，如不同岩土层的渗透性差异、裂隙的存在以及土体的结构性，都对地下水流的流动方式和边坡的稳定性有着显著影响。此外，水文条件的长期变化，例如季节性地下水位波动，也需纳入考虑范畴。通过综合这些因素，可以对边坡在长期和短期内的稳定性作出全面评估，识别潜在的失稳风险区域。这种基于地下径流的边坡稳定性评估方法，为实际工程提供了更为精准的判断依据，能够在设计阶段及实际运行中为防范边坡失稳提供有力支持。

六、结语

本研究通过分析超大型边坡地下径流的流动特性及其对边坡稳定性的影响，揭示了地下水流动、孔隙水压力、土体力学特性等多重因素在边坡失稳中的重要作用。基于地下水流的边坡稳定性评估方法为工程设计提供了新的视角，能够有效识别潜在的失稳风险。未来，在复杂地质条件下，结合多种评估手段将有助于进一步提高边坡稳定性评估的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 刘建国, 王勇. 超大型边坡地下水流动特征与稳定性分析 [J]. 地质力学报, 2023, 29(4): 92-104.
- [2] 李雪, 孙立军. 边坡稳定性评估中的地下水流动模拟方法 [J]. 岩土工程技术, 2023, 40(3): 56-64.
- [3] 陈伟, 张健. 基于水流模拟的边坡失稳风险分析 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 78-87.
- [4] 王涛, 黄志强. 复杂地质条件下边坡失稳触发机制研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 40(2): 112-123.
- [5] 杨鹏, 李东. 边坡稳定性分析中水文地质条件的影响 [J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(1): 15-22.
- [6] 王强, 周阳. 边坡稳定性分析方法的比较与选择 [J]. 水利水电工程学报, 2022, 40(6): 133-145.
- [7] 赵杰, 朱铭. 地下水对边坡稳定性影响的数值模拟 [J]. 工程与建设, 2022, 34(4): 99-107.
- [8] 刘亮, 徐林. 超大型边坡地下水流动对失稳机制的影响 [J]. 土地科学, 2023, 31(2): 45-52.
- [9] 陈晨, 李明. 边坡水流作用下的稳定性分析方法研究 [J]. 水土保持学报, 2022, 39(3): 56-65.
- [10] 张宏伟, 王飞. 基于地下水流动的边坡稳定性评估及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 12-21.

工程监理在建筑施工中的重要性分析

王金成

天津市华泰建设监理有限公司，天津 300000

DOI:10.61369/ETQM.2026010029

摘 要： 随着我国建筑行业的蓬勃发展，建筑工程的质量、安全与效益愈发受到社会关注。工程监理作为建筑施工过程中的关键监督与管理环节，对保障工程质量、规避安全风险、控制工程成本、确保工程进度具有不可替代的作用。为此，本文对工程监理在建筑施工中的重要性进行分析，希望能够为提升建筑工程整体建设水平提供理论参考。

关 键 词： 工程监理；建筑施工；重要性

Analysis of The Importance of Engineering Supervision in Construction

Wang Jincheng

Tianjin Huatai Construction Supervision Co., Ltd. Tianjin 300000

Abstract： With the rapid development of China's construction industry, the quality, safety, and efficiency of construction projects have garnered increasing societal attention. As a critical supervisory and management component in the construction process, engineering supervision plays an irreplaceable role in ensuring project quality, mitigating safety risks, controlling costs, and maintaining schedules. This paper analyzes the significance of engineering supervision in construction, aiming to provide theoretical references for enhancing the overall quality of construction projects.

Keywords： engineering supervision; construction; importance

引言

如今，随着建筑工程项目规模的日益扩大，工程的复杂性也在不断增加，这对施工过程中的质量控制、安全管理、进度管理及成本控制提出了更高要求。在此背景下，工程监理作为连接建设单位、施工单位的重要桥梁，其角色和作用就显得尤为重要。工程监理通过运用专业的知识、技能和经验，对建筑工程的规划、设计、施工及竣工验收等全过程实施监督与管理，旨在确保工程建设符合法律法规、技术标准及合同要求，同时促进资源的合理利用和环境的和谐共生。

一、工程监理在建筑施工中的重要性

（一）有效把握施工进度

工程监理在建筑施工过程中，对施工进度的有效把握是确保工程按时交付的关键。施工进度不仅关系到项目的经济效益，还直接影响到后续施工环节的顺利展开，通过参与制定科学合理的施工进度计划，监理人员能够明确各阶段的任务和时间节点，为施工活动提供明确的指导^[1]。在实际操作中，监理人员会基于项目合同、施工图纸以及现场实际情况，综合考虑资源调配、天气变化等多种因素，参与制定出详细的施工进度计划，并将该计划细化到每个施工环节，明确具体的施工内容、所需时间、负责人等，以确保施工活动有序进行。与此同时，监理人员还可以利用专业的项目管理软件，对施工进度进行动态监控和预警，实时更新施工进度数据，需要组织相关人员专门根据更新的数据内容进

行分析，判断施工过程是否存在问题，如果存在问题，便采取相应的措施进行调整，以确保实际进度与计划进度保持一致。

（二）协调各方关系

在建筑工程中，工程监理能让工程建设各参与方协同顺畅，确保项目顺利推进。工程监理首要协调建设单位与施工单位的关系，这两方因立场与利益诉求不同，常在日常工作开展过程中产生分歧。比如建设单位期望加快进度尽早投入使用，施工单位可能担忧过快施工影响质量与成本^[2]。此时，工程监理可以基于专业知识与经验，以合同为依据，通过组织各方沟通会议，让双方充分表达意见，客观分析情况，提出兼顾进度、质量与成本的方案，使双方达成共识，减少矛盾冲突同时，工程监理还能积极协调与设计单位、勘察单位的关系，施工中若发现设计与实际不符或勘察数据有偏差，工程监理能迅速组织相关方研讨^[3]。例如建筑施工时发现基础地质与勘察报告差异大，监理马上召集勘察、

设计、施工单位，共同商议解决方案，调整设计，确保工程顺利^[4]。此外，对于材料供应商，工程监理也会协调其与施工单位间的供应关系，以保障材料按时、按质供应，避免因材料问题影响施工进度，通过全方位协调各方关系，营造良好的工程建设环境，提高项目整体效率与质量。

（三）强化安全监督，规避安全风险

建筑施工作业具有高空作业多、交叉作业多、大型机械设备使用频繁等特点，安全风险较高，一旦发生安全事故，将对施工人员的生命安全与企业的经济利益造成严重影响^[5]。工程监理在安全管理方面发挥着关键作用，监理人员会依据国家安全生产法律法规与工程建设安全标准，对施工现场的安全管理制度、安全防护措施、施工人员安全教育培训等情况进行检查。在施工现场，监理人员会重点排查高空作业的安全防护设施是否齐全、临时用电是否符合规范、大型机械设备的运行是否正常等安全隐患，对发现的违规操作与安全问题要求施工单位立即整改，情节严重的可下达停工令。

工程监理的核心职能之一是对施工全过程进行质量监督，通过标准化流程与专业化手段确保工程符合设计规范与质量标准。在材料管理环节，监理需核查进场材料的合格证、检测报告、企业资质等，对钢筋、混凝土等关键材料实施见证取样送检，杜绝不合格材料流入施工现场。例如，某高层建筑项目中，监理发现施工单位违规使用未达强度标准的水泥，立即要求退场并重新采购，避免了因材料缺陷导致的结构安全隐患^[6]。施工过程监督方面，监理对隐蔽工程（如地基验槽、钢筋绑扎）进行旁站监理，签署验收文件后方可进入下一工序。某桥梁工程中，监理通过实时监测混凝土浇筑的坍落度与振捣密实度，发现局部区域存在蜂窝麻面问题，立即要求返工处理，确保了桥梁的耐久性与安全性。

（四）优化资源配置，推动工程高效履约

需要看到，工程监理通过科学管控进度与成本，助力项目实现经济效益与社会效益的双赢。在进度管理方面，监理需审核施工单位提交的进度计划，结合天气、材料供应等实际因素提出优化建议。例如，某地铁项目因地质条件复杂导致施工滞后，监理协调设计方调整支护方案，同时督促施工单位增加机械投入，最终将工期延误控制在合同允许范围内，避免了高额违约金支出。造价控制是监理的重要职责之一。监理需核实工程量清单与付款申请，确认已完成工程质量合格后签署支付证书，防止超付或不合格工程付款。某商业综合体项目中，监理通过严格审核施工方申报的变更签证，发现部分变更内容与原设计重复，及时剔除不合理费用，为业主节约成本约12%。此外，监理参与工程变更费用评估，确保变更造价在合同范围内，避免因设计调整导致的成本失控^[7]。合同管理方面，监理作为业主与施工方的桥梁，需监督合同条款的履行，处理工期延误索赔、质量责任争议等纠纷。某住宅项目因施工方未按合同约定使用指定品牌材料，监理依据合同条款要求其更换并承担违约责任，维护了业主的合法权益。同时，监理通过组织定期工地例会，协调设计、施工、材料供应等各方关系，解决工序交叉冲突、设计图纸矛盾等问题，保障工

程顺利推进。工程监理通过质量、安全、进度、造价的全方位管控，不仅为工程建设提供了技术保障与管理支撑，更在推动行业规范化、维护社会公共利益方面发挥着不可替代的作用。

二、如何加强建筑施工中工程监理的策略

（一）完善监理制度体系，规范监理工作流程

健全的监理制度体系是规范监理工作、保障监理效果的重要保障。目前，我国工程监理制度虽已初步建立但在实际执行过程中仍存在制度不完善、流程不规范等问题。因此，需进一步完善监理制度体系：首先，明确监理单位与建设单位、施工单位的职责权限，避免因职责不清导致监理工作无法顺利开展。例如在合同条款中细化监理对隐蔽工程验收、材料质量抽检的独立决策权，避免建设单位以“进度优先”为由干预监理正常履职，或施工单位以“技术争议”为由拒不整改监理指令^[8]。以某市政道路项目为例，因合同未明确监理对路基压实度的否决权，施工方在监理提出压实度不足需返工时，以“已通过建设单位验收”为由拖延整改，最终导致路面沉降事故。若制度中明确“监理对质量验收拥有一票否决权，建设单位不得干预”，此类纠纷可大幅减少。其次，还需要专门制定详细的监理工作流程与标准，如施工图纸审核流程、隐蔽工程验收标准、工程进度款审核程序等，确保监理工作有章可循：最后，建立监理工作质量评价机制，从监理资料完整性、监理指令执行情况、工程质量、安全管控效果等方面对监理工作进行针对性评价，对评价优秀的监理单位与个人给予表彰，对评价不合格的进行整改，推动监理工作规范化、标准化发展。

（二）提高管理与监理人员素质，打造专业化复合型团队

施工企业应重视施工管理人员的培养，制定系统的培训计划。针对不同层次的施工管理人员，开展有针对性的培训课程。对于基层的施工管理人员，侧重于施工技术与现场管理技能培训，如新工艺、新材料的应用方法，施工现场的组织与协调技巧等。例如，在某建筑企业承接的一项老旧小区改造项目中，基层施工管理人员普遍对新型外墙保温材料的应用方法掌握不足。因此该企业可以为基层施工管理人员专门安排新型外墙保温材料的培训课程，详细讲解材料的特性、施工工艺和质量控制要点。培训后，基层管理人员在实际施工中能够熟练指导工人正确使用新型材料，不仅可以提高施工效率，还可以提升外墙保温工程的质量，减少返工现象，原本预计因材料使用不当可能导致的5%的返工率降低到1%以内。对于中高层的施工管理人员，则注重项目管理知识、战略规划能力的培养，如学习项目集成管理、风险管理等知识，提升其对项目整体的把控能力。

与此同时，管理者需要鼓励施工管理人员参加行业研讨会与学术交流活动，拓宽视野，学习先进经验。工程监理单位则要加强对监理人员的专业发展。一方面，定期组织监理人员参加专业技能培训，包括法规、新标准的学习，以及监理业务能力提升培训，如工程质量检测方法、安全监理要点等。另一方面，鼓励监理人员参与各类继续教育培训与职业资格考试，如注册监理工程

师考试，提升其专业水平与综合素质。此外，建立监理人员绩效考核机制，将培训效果与绩效挂钩，激励监理人员不断学习进步^[9]。

（三）推进信息化准监理，提高监理工作效率

随着信息技术的快速发展，信息化已成为提升建筑工程管理水平的重要手段。当前，部分监理单位仍采用传统的人工监理方式，存在监理资料管理混乱、信息传递不及时、监理工作效率低等问题。因此，需推进信息化监理，提高监理工作效率：首先，建立监理信息化管理平台，实现监理资料的电子化管理，如施工图纸、监理日志、验收报告等资料可通过平台进行存储、查询与共享，减少纸质资料的浪费，提高资料管理效率；其次，还需要专门利用互联网大数据等技术对施工现场进行实时监控，如通过视频监控系统监督施工现场的施工情况，通过传感器监测混凝土养护温度、钢筋保护层厚度等关键指标，及时获取工程质量与安全信息，实现对工程的动态管控；最后，利用信息化工具开展监理工作，如使用移动监理 APP 进行现场检查记录、发监理指令提高监理工作的便捷性，为建筑工程质量安全提供更有力的保障。

（四）推行第三方评估机制，引入独立监督力量

在建筑施工监管体系中，建设单位自监或监理单位“既当运动员又当裁判员”的固有模式，极易因利益关联滋生监管漏洞，导致质量安全隐患难以被及时发现与整改。为破解这一困境，需构建多元化、立体化的独立监督机制，以第三方评估力量强化公正性^[10]。一方面，委托具备 CMA 资质的专业检测机构作为“技术裁判”，定期对工程实体质量（如混凝土强度回弹检测、钢筋保护层厚度扫描）及安全状况（如塔吊运行参数监测、临时用电

线路绝缘测试）开展全面“体检”，通过科学仪器与标准化流程出具客观评估报告，为监理单位提供权威依据，避免人为因素干扰判断；另一方面，由建设行政主管部门或行业协会牵头实施“飞行检查”，通过“四不两直”（不发通知、不打招呼、不听汇报、不用陪同接待，直奔基层、直插现场）方式随机抽查监理日志、旁站记录、验收资料等履职痕迹，对发现的问题纳入企业信用评价体系，与市场准入、招投标资格挂钩，形成“一处失信、处处受限”的约束效应；此外，还可通过政府网站或移动端平台搭建相关公示平台，主动公开监理单位资质、人员信息及巡查记录，鼓励公众通过拍照举报、在线反馈等方式参与监督，对查证属实的举报给予物质奖励，以社会共治力量织密监管网络，倒逼监理行业回归“独立、公正、科学”的本质属性。

三、结语

综上所述，工程监理作为建筑施工全过程的“质量卫士”与“安全屏障”，其履职成效直接关系到工程实体质量、施工安全底线及行业可持续发展。面对建筑市场转型升级的新形势，唯有以制度创新为根基，通过细化监理职责清单、构建标准化流程体系，筑牢监管制度根基；以人才培育为支撑，打造既懂技术规范又具备风险管控能力的复合型监理团队，方能破解传统监理模式中“人情监管”“滞后监管”等顽疾。未来，需持续推动监理行业向专业化、精细化、社会化方向迈进，使工程监理真正成为保障工程质量的“防火墙”，为构建安全、高效、绿色的建筑产业生态提供坚实保障。

参考文献

[1] 颜涛. 建筑安全施工管理在建筑施工中的价值与应用. 住宅与房地产, 2023(35):91-93.
[2] 曾旺枫. 工程监理对建筑工程高支模施工质量安全控制的价值探讨. 江西建材, 2022(6): 178-180.
[3] 罗曼. 建筑工程施工中工程监理的作用及其质量管理策略 [D]. 建材发展导向, 2023.21(4): 157-159.
[4] 姜建良. 工程监理在建筑施工质量管理中的作用分析 [C]//2025 年第四届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集. 2025.
[5] 辜丽洁. 探究工程监理在建筑施工质量管理中的作用 [J]. 2024(20): 100-102.
[6] 朱志坚. 建筑施工质量管理中工程监理的有效运用 [J]. 2024(9): 52-54.
[7] 张义凯. 浅析工程监理在建筑施工质量管理中的作用 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(4): 4.
[8] 魏知明. 建筑工程施工风险分析及安全监理工作探讨 [J]. 2025.
[9] 李自立. 建筑工程施工中工程监理的作用及其质量管理策略分析 [J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2023(4): 4.
[10] 杜运鹏, 王颖杰. 建筑工程施工监理安全风险及其防范对策 [J]. 中国地名, 2023(8): 0127-0129.

铁路试验检测信息化平台发展综述

蔡耀宇

中国铁路设计集团有限公司，天津 300000

DOI:10.61369/ETQM.2026010031

摘 要： 铁路试验检测是保障铁路工程建设质量的核心环节，其信息化水平直接影响工程质​​量管控效率与决策科学性。随着国家信息化与标准化战略的推进，以及铁路建设行业对全过程质量控制需求的提升，试验检测信息化平台成为行业发展的必然趋势。本文基于铁路试验检测工作的核心需求，系统梳理了国内外铁路试验检测信息化的发展现状，详细阐述了信息化平台的核心功能模块、关键技术支撑，分析了平台的应用价值与产业化前景，并探讨了当前发展面临的挑战与未来趋势，为铁路试验检测信息化的进一步发展​​与优化提供参考。

关 键 词： 铁路试验检测；信息化平台；质量控制；大数据分析；自动化管理

A Review on the Development of Information Platform for Railway Testing and Inspection

Cai Yaoyu

China Railway Design Corporation Group Co., Ltd., Tianjin 300000

Abstract： Railway testing and inspection is a core aspect of ensuring the quality of railway engineering construction, and its level of informatization directly affects the efficiency of project quality control and the scientific nature of decision-making. With the advancement of national informatization and standardization strategies, as well as the increasing demand for whole-process quality control in the railway construction industry, the informatization platform for testing and inspection has become an inevitable trend for industry development. Based on the core needs of railway testing and inspection work, this paper systematically reviews the current development status of railway testing and inspection informatization both domestically and internationally. It elaborates in detail on the core functional modules and key technological supports of the informatization platform, analyzes the platform's application value and industrialization prospects, and discusses the current challenges and future trends in its development, providing a reference for the further development and optimization of railway testing and inspection informatization.

Keywords： railway testing and inspection; informatization platform; quality control; big data analysis; automated management

引言

在新时代铁路建设高质量发展的背景下，试验检测工作作为工程质量把控的关键防线，其标准化、精细化、智能化水平亟待提升。国家大力推进传统行业与信息化的深度融合，明确要求铁路建设领域建立符合行业规范的信息化管理体系。中国国家铁路集团有限公司更是通过招标文件、行业标准等形式，强制要求试验检测中心接入统一信息化管理系统，实现检测工作的全流程可控。

当前，我国铁路行业信息化发展迅猛，但试验检测领域的信息化建设仍有很大改进空间。传统试验检测工作存在数据积累不足、统计分析滞后、流程规范性欠缺、人为误差难以规避等问题，难以满足大规模铁路建设项目的质量管控需求。铁路现场检测项目繁多、仪器设备复杂、人员流动频繁，亟需一套专属的信息化平台实现资源整合与高效管理。在此背景下，铁路试验检测信息化平台的研发与应用，不仅能响应国家政策与行业要求，更能通过数据整合、流程优化、智能分析，夯实铁路工程建设质量基础，为工程质量控制提供科学支撑，具有重要的现实意义与应用价值。

简介：蔡耀宇（1990.03—），男，河南郑州人，工学硕士，研究方向：工程试验。

一、国内外研究现状

（一）国外研究现状

从上世纪八十年代开始，西方发达国家便将计算机技术应用于公路、铁路等建设项目的管理系统研发中，形成了一批成熟的工程检测信息化解决方案。这些平台普遍具备数据自动采集、流程标准化管理、多维度统计分析等功能，实现了试验检测工作的全流程信息化管控。

国外平台的核心优势在于技术成熟度高、兼容性强，能够与各类检测仪器实现无缝对接，且在数据安全与隐私保护方面形成了完善的保障体系。例如，欧美国家的铁路检测信息化平台已实现与工程管理系统、质量追溯系统的深度融合，通过大数据分析技术为施工决策提供实时支持，显著提升了工程建设效率与质量管控水平。但此类平台多针对本国铁路技术标准与管理模式设计，难以直接适配我国铁路建设的特殊需求。

（二）国内研究现状

我国建设工程领域的信息化管理系统始于上世纪九十年代，随着互联网、5G 技术的普及，信息化应用逐渐渗透到铁路建设的各个环节。中国铁路总公司高度重视试验室信息化建设，卢春房副总经理在《铁路建设项目标准化管理》中明确提出，要加大拌和站和试验室信息管理系统的投入，提升信息化技术应用效果^[1]。

2013 年，中国铁路总公司工程管理中心发布《铁路工程拌和站及试验室数据接口暂行规定》（工管办函〔2013〕381 号）与《铁路工地试验室标准化管理实施意见》（工管办函〔2013〕284 号），为铁路试验检测信息化制定了统一标准与规范。然而，当前市场上的信息化平台普遍存在功能单一、个性化不足等问题，难以满足铁路试验检测项目庞杂、仪器众多、人员流动复杂的实际需求。现有平台多侧重于单一环节的管理，缺乏对人员、设备、样品、检测过程等全要素的整合，且大数据分析能力薄弱，无法为质量控制提供深度支撑。因此，基于我国铁路建设实际需求，定制开发专属的试验检测信息化平台成为行业发展的迫切需求。

二、铁路试验检测信息化平台核心功能与关键技术

（一）核心功能模块

铁路试验检测信息化平台的核心目标是实现试验检测工作的标准化、自动化、智能化管理，其功能模块围绕试验检测全流程设计，主要包括六大核心管理模块与自动化功能体系。

1. 人员管理模块：涵盖人员授权、资格确认、考核评价等功能，实现试验检测人员的全生命周期管理。通过建立人员资质数据库，自动核验人员上岗资格，记录人员工作业绩与考核结果，确保检测人员具备相应的专业能力。

2. 设备管理模块：包括设备台账管理、期间核查、检定校准、供应商评价等内容。平台可实时跟踪设备运行状态，自动提醒设备检定校准周期，建立设备维护档案，保障检测设备的准确性与可靠性。

3. 样品管理模块：实现样品标识、状态跟踪、处理处置的全

流程管控。通过唯一标识技术，确保样品可追溯，实时更新样品检测进度，规范样品存储与处理流程，避免样品混淆或丢失。

4. 方法管理模块：聚焦检测方法的有效性验证、查新确认、偏离技术验证等工作，建立作业指导书数据库，确保检测方法符合行业标准与规范，及时更新最新检测技术与方法。

5. 环境管理模块：针对检测标准对环境的要求，实现环境参数的实时监控、区域隔离规范管理、现场检查动态记录等功能。通过环境数据自动采集与分析，确保检测环境满足试验要求。

6. 检测过程管理模块：核心在于检测过程控制、设备选用优化、数据误差控制、原始数据精准取值。平台通过标准化流程设计，规范检测操作步骤，减少人为干预，确保检测数据的真实性与准确性。

此外，平台还具备完善的自动化功能体系，包括自动任务指派、自动成本核算、自动报价、自动仪器数据采集、自动计算、自动查表、自动修约、自动判别、自动生成报告、自动留痕等，大幅降低人为失误，提升检测工作效率。

（二）关键技术支撑

1. 软件开发技术：平台开发以 Visual Studio 为核心开发工具，采用 Net（C#）或 Python 作为开发语言，搭配 MySQL 数据库构建稳定、高效的软件架构。该技术组合具备兼容性强、开发效率高、运行稳定等优势，能够满足铁路试验检测多场景、高并发的应用需求。通过模块化设计，实现各功能模块的灵活对接与扩展，便于后续系统升级与维护。

2. 大数据统计分析技术：依托平台积累的海量试验检测数据，运用统计学分析方法，挖掘数据背后的规律与趋势。通过建立数据模型，对工程质量状况进行预判与评估，为铁路质量控制和工地试验室管理提供科学参考^[2]。大数据技术的应用，打破了传统数据分散管理的局限，实现了数据的全方位整合与深度利用。

3. 数据接口与集成技术：平台需实现与各类检测仪器、上级管理系统的无缝对接，通过标准化数据接口，确保数据的实时传输与共享。同时，整合人员、设备、样品、检测过程等多维度数据，形成完整的数据链条，为全流程管控提供技术支撑。

4. 自动化控制技术：通过与检测仪器的联动，实现检测数据的自动采集与上传，减少人工录入环节。结合流程自动化技术，实现检测任务的自动分配、报告的自动生成与审核，提升检测工作的标准化水平与效率。

三、平台应用价值与产业化前景

（一）应用价值

1. 提升检测工作效率：平台通过自动化流程设计与数据自动处理，大幅减少人工操作环节，缩短检测周期。例如，自动生成检测报告、自动提醒设备校准等功能，降低了工作人员的重复劳动，提升了工作效率^[3]。

2. 保障检测数据质量：标准化的流程设计与数据自动采集功能，减少了人为误差，确保检测数据的真实性、准确性与完整

性。同时，数据自动留痕功能为质量追溯提供了有力支撑，便于问题排查与责任认定。

3. 优化质量管控水平：通过大数据分析技术，实现工程质量的实时监控与预判，帮助管理人员及时发现潜在风险，采取针对性措施，提升铁路工程质量控制的精准度与有效性。

4. 规范管理流程：平台严格遵循行业标准与规范，实现人员、设备、样品、检测过程等全要素的标准化，提升试验检测中心的管理水平与综合实力。

（二）产业化前景

铁路试验检测信息化平台的研发与应用，具有广阔的产业化前景。首先，平台可直接应用于铁路试验检测中心，解决当前检测工作中的痛点问题，提升企业核心竞争力。其次，平台的核心技术与功能模块可迁移至公路、市政、水利等其他建设工程领域，满足不同行业的试验检测信息化需求。

此外，平台积累的大数据资源具有重要的商业价值，可为工程咨询、技术服务等提供数据支撑。随着铁路建设行业的持续发展与信息化水平的不断提升，市场对专业化试验检测信息化平台的需求将持续增长^[4]。平台相关的软件著作权、技术方案等知识产权，可通过技术转让、授权使用等方式实现产业化推广，形成完整的产业链条，创造显著的经济与社会效益。

四、挑战与展望

（一）面临挑战

1. 行业标准与技术适配问题：铁路建设领域技术标准不断更新，平台需及时跟进标准变化，确保功能与规范的一致性。同时，不同厂家的检测仪器接口不统一，增加了数据集成的难度。

2. 数据安全风险：平台存储大量敏感的试验检测数据与工程信息，数据泄露、篡改等安全风险不容忽视。如何建立完善的安全防护体系，保障数据安全是平台应用的重要前提。

3. 人员操作与适应问题：部分检测人员习惯于传统工作模式，对信息化平台的操作存在抵触情绪或能力不足，需要加强培训与指导，确保平台的有效应用^[5]。

4. 系统维护与升级压力：平台运行过程中需要持续进行维护与升级，以适应新的应用场景与技术需求，这对技术团队的专业能力与响应速度提出了较高要求。

（二）未来展望

1. 智能化水平提升：引入人工智能、机器学习等先进技术，实现检测数据的智能分析与异常预警，提升质量预判的精准度。例如，通过图像识别技术自动判断样品状态，通过机器学习模型优化检测流程参数。

2. 跨平台与云端部署：采用云端部署模式，实现平台的灵活访问与资源共享，支持多终端协同工作。同时，加强与铁路工程管理系统、质量追溯系统等跨平台的深度融合，形成一体化的信息管理体系^[6]。

3. 个性化定制与模块化设计：基于不同铁路项目的特点与需求，提供个性化的功能定制服务。通过模块化设计，实现功能的灵活组合，满足不同规模、不同类型检测机构的应用需求。

4. 加强数据安全保障：采用加密传输、权限管理、数据备份等多重安全防护措施，建立完善的数据安全管理体系。同时，制定数据安全管理制度，规范数据的使用与共享流程，防范安全风险。

五、结论

铁路试验检测信息化平台是铁路建设行业信息化与标准化发展的必然产物，其研发与应用对于提升试验检测工作效率、保障工程质量、优化管理水平具有重要意义。当前，国内外铁路试验检测信息化建设已取得一定进展，但我国仍缺乏适配铁路建设实际需求的专业化平台。

通过构建涵盖人员、设备、样品、检测过程等全要素的核心功能模块，依托软件开发、大数据分析、自动化控制等关键技术，铁路试验检测信息化平台能够有效解决传统检测工作中的痛点问题。平台不仅具有显著的应用价值，还具备广阔的产业化前景，能够为铁路建设行业的高质量发展提供有力支撑。

面对行业标准更新、数据安全、人员适应等挑战，未来需持续加强技术创新，提升平台的智能化水平与适配能力，完善安全防护体系，加强人员培训与推广应用。相信随着技术的不断进步与行业需求的持续推动，铁路试验检测信息化平台将不断完善，为铁路工程质量控制提供更加强有力的保障，推动铁路建设行业向信息化、智能化方向持续迈进。

参考文献

[1] 张世锐. 铁路试验检测信息化管理的实践研究 [J]. 城市情报, 2023(2): 124-126.
[2] 严璟. 铁路建设工程质量检测信息化平台的研发 [J]. 铁道建筑, 2018(9): 140-143.
[3] 周琪. 铁路工程质量检测管理模式的探讨 [J]. 铁道技术监督, 2011, 39(3): 36-38.
[4] 米玖润. 探析信息管理在公路试验检测工作的应用实践 [J]. 黑龙江交通科技, 2018, 41(5): 196-197.
[5] 王开森. 信息管理在公路试验检测中的应用 [J]. 交通世界, 2015(35): 20-21.
[6] 耿红斌. 信息管理用于公路试验检测的实践探究 [J]. 工程技术研究, 2017, 2(10): 186-187.

块料面层粘贴工艺对室内地面平整度的改善作用

侯晓旭

鞍山冶金集团建筑安装有限公司, 辽宁 鞍山 114031

DOI:10.61369/ETQM.2026010032

摘 要： 块料面层粘贴工艺作为现代室内地面施工的重要手段，在提升地面平整度方面展现出显著优势。优化材料配比、控制粘贴流程及施工环境条件，该工艺有效克服了传统施工方法存在的起鼓、空鼓与不平整问题。本文对施工案例的对比分析，总结块料面层粘贴工艺在不同基底条件下的适应性及其对地面质量的提升作用，为后续地面施工提供理论支持与实践指导。

关 键 词： 块料面层；粘贴工艺；地面施工；平整度控制；质量提升

The Improvement of Indoor Floor Surface Smoothness by Block Laying

Hou Xiaoxu

Anshan Metallurgical Group Construction and Installation Co., Ltd. Anshan, Liaoning 114031

Abstract： As a key technique in modern interior flooring construction, block surface layer bonding demonstrates significant advantages in enhancing floor flatness. By optimizing material ratios, controlling bonding procedures, and managing construction conditions, this method effectively addresses common issues like blistering, hollow drumming, and unevenness associated with traditional approaches. Through comparative analysis of construction cases, this study examines the adaptability of block surface layer bonding under various substrate conditions and its role in improving floor quality, providing theoretical support and practical guidance for future flooring projects.

Keywords： block paving; bonding process; floor construction; flatness control; quality improvement

引言

在室内地面工程中，地面平整度影响美观程度，更关系到后续铺装工艺与使用功能。传统的地面处理方法难以在施工效率与质量控制之间取得理想平衡，而块料面层粘贴工艺凭借其快速固化、高附着力及可控性，成为解决地面不平整问题的重要技术手段。本文将从理论与实操层面对该工艺的应用效果进行分析，旨在为行业提供具有推广价值的施工经验。

一、块料面层粘贴工艺的技术原理与应用背景

块料面层粘贴工艺是近年来在室内地面精装工程中广泛应用的一项关键施工技术，其核心原理在于利用高性能快干型粘结材料，结合优化的施工方法，快速实现面层材料与基层之间的稳定粘结^[1]，从而提高整体地面的平整度与施工效率。该工艺采用聚合物改性砂浆或水泥基快干材料作为粘结介质，具备初凝快、粘结强度高、抗收缩性能优异等特点，能够显著降低地面起鼓、空鼓及翘边等质量缺陷的发生概率。在不同地面基底条件下，块料材料渗透、填充、嵌固等多重机制与基层产生有效界面作用，提高地面系统整体结构的均匀性和稳定性。

实际施工过程中，块料面层粘贴工艺对材料性能有严格要求，对施工环境的控制也提出了更高标准。为确保施工质量，须

对基层含水率、平整度、强度等参数进行系统评估，确保其符合粘贴条件。在施工流程上，块料材料需按比例搅拌均匀，施工时间需严格控制，以免材料失去施工活性影响粘贴效果。压实、排气、找平等环节需一气呵成，避免因施工中产生界面弱化问题。该工艺对施工关键节点的精准控制，使得面层在固化后的整体平整度、密实度及附着牢固度均优于传统粘贴方式，尤其在对地坪平整度要求高的商业空间及精装住宅中表现尤为突出^[2]。

近年来，随着装配式建筑、精装修交付等新型建造方式的快速发展，块料面层粘贴工艺的应用需求日益增长。其工艺适用于瓷砖、石材、复合地板等多种面层材料的施工，且能显著缩短施工周期，提高单位时间内作业效率，满足当前高强度、快节奏的施工组织要求。在绿色建筑理念推动下，快干型低 VOC 排放材料的应用也进一步提升了该工艺的环保性能。综合而言，块料面层

粘贴工艺已逐步成为现代室内地面施工的重要组成部分，在改善地面平整度方面发挥了显著作用，更为施工标准化、精细化管理提供了坚实的技术支撑^[3]。

二、地面平整度在室内施工中的技术要求与常见问题

在室内地面施工中，平整度作为评价施工质量的重要指标，直接关系到地面使用功能、美观性及后续工序的施工难度。国家相关标准（如《建筑地面工程施工质量验收规范》GB50209）对地面平整度有明确的技术要求，不同的铺装材料和使用功能对平整度的容许偏差值存在差异。精装修住宅、写字楼和商用空间等对地面平整度要求更高，通常控制在2mm以内，确保铺设面层后的视觉统一性和使用舒适度。在实际施工中，为达到这一要求，需采用合适的找平材料和机械设备，还要确保施工流程的科学性与连续性，避免因中断或操作不当造成局部高低不平。

施工过程中常见的地面平整度问题包括局部凹陷、起鼓、裂缝和空鼓，这些问题大多源于基层处理不当、材料配比失误、施工环境变化或人为操作不规范。基层未清理干净会导致粘结不牢，从而产生空鼓；配比不合理会造成材料收缩率增大，形成裂缝；气温和湿度剧烈变化也可能引起材料硬化速度异常，进而影响整体平整度。机械找平未充分结合现场实际标高控制点，容易造成整体高低错位，尤其是在大面积施工中更为常见。这些问题降低了地面系统的稳定性，还可能影响后续面层材料的铺设效果，增加施工返工率与维护成本^[4]。

面对这些问题，施工单位需在技术管理与操作层面同步加强控制。一方面需加强施工前的地面勘察与基层检测，明确基层材质、强度和含水率等关键参数，为粘贴工艺提供技术依据；另一方面，应采用性能稳定、适应性强的快干型找平材料，并配合先进的机械设备实现自动化施工控制。强化施工人员的技能培训，提高操作精准度，也有助于减少因人为误差引起的平整度问题。地面平整度作为地面工程的核心控制项，其在室内施工中的技术地位不容忽视，需科学的工艺体系与质量管理手段加以保障，以全面提升地面施工的整体品质^[5]。

三、块料面层粘贴工艺对地面平整度的关键影响因素分析

块料面层粘贴工艺在提升室内地面平整度方面起到显著作用，其效果受多种关键因素影响，其中包括材料性能、基层处理质量以及施工工艺控制水平。在材料方面，快干型粘结剂的流动性、可操作时间、抗滑移性与初期强度发展速度是影响粘贴效果的核心参数。若材料粘结强度不足或固化速度过快，会导致粘贴过程中出现位移或翘边，破坏整体平整度。粘结材料中的聚合物添加剂含量、骨料级配和水灰比控制也直接影响其变形能力与应力释放性能，从而影响面层与基层之间的界面稳定性。在对地面平整度要求严格的施工场景中，必须使用具备高柔韧性与低收缩性的专用快干材料，以确保地面结构的稳定与均匀。这类材料能

够有效适应基层微小形变，防止因干缩应力引发的裂缝、翘边等质量问题，提高整体施工质量^[6]。

基层处理质量是确保块料面层粘贴工艺成功的前提。如果基层存在明显凹凸不平、起砂、裂缝或含水率超标等问题，会直接导致粘结不牢或面层铺设后出现空鼓、鼓包等缺陷，破坏地面的整体平整度。在粘贴施工前需对基层进行系统评估与修补处理，确保其表面洁净、干燥、强度达标，并设置合理的控制标高。基层与块料材料之间的界面反应对后续稳定性也有重要影响，建议使用界面剂进行预处理，以增强粘结力并防止水分交换不均造成的硬化差异^[7]。在大面积铺贴中，还需结合激光标高仪等精密测量工具，提前布设基准控制点，避免因人工估测误差导致整体高差积累。

施工工艺控制则是影响块料粘贴效果与地面平整度的关键环节。搅拌时间、摊铺厚度、刮涂顺序、压实方式等均需严格按照工艺标准执行。若搅拌不均，会导致材料性能分布不均，进而影响流平性和附着力；若摊铺厚薄不一，则容易在局部形成高低差，降低地面整体平整度。在施工过程中需保持连续作业，避免“冷缝”产生，加强压实排气，确保面层紧贴基层且无气泡残留。施工环境温度和湿度的控制同样重要，若外界温差过大或风干过快，会加速表面水分蒸发，造成早期干裂或强度下降^[8]。严密的施工组织管理与全过程质量监控，可将块料面层粘贴工艺在提升地面平整度方面的优势最大化，实现稳定、高效、高质量的施工效果。

四、施工案例对比分析与实测数据结果

在对比分析块料面层粘贴工艺对地面平整度改善作用的过程中，选取两组具有代表性的施工项目具有重要意义。某住宅精装修工程中，A区采用常规水泥砂浆粘贴工艺，B区采用块料面层粘贴工艺，面层均为600×600mm的瓷砖，基层处理与铺设环境条件保持一致。完工后分别采用2米靠尺加塞尺法与激光扫描仪进行平整度检测。A区地面最大高差为4.6mm，平均偏差为2.9mm，局部存在明显起鼓与空鼓现象；而B区最大高差控制在1.9mm以内，平均偏差为1.2mm，面层整体密实、粘结牢固，无空鼓区域。该对比验证了块料粘贴工艺在控制地面高差、提升平整度方面的显著优势。

对施工过程记录的分析可以看出，块料粘贴工艺在控制施工节奏、缩短工期方面也展现出良好性能。在B区施工中，快干型聚合物砂浆具备较高初期强度，面层铺贴完成4小时后即可进行初步上人作业，相比A区常规施工需24小时以上养护周期大大缩短，有效减少了交叉作业干扰。在对比过程中也发现，块料工艺对施工人员操作水平要求较高，搅拌时间、材料摊铺厚度、压实手法等对最终平整度影响显著，对技术交底和现场监督的严密性提出了更高要求^[9]。B区施工团队严格执行施工规范，每日红外水平仪检查标高偏差，有效保障了整体地面系统的一致性与稳定性。

结合对多个工程项目的实测数据整理发现，采用块料面层粘

贴工艺的地面，其平整度偏差值控制在国家《建筑地面工程施工质量验收规范》允许范围的优质标准内的比例显著提高。在10个采用该工艺的项目中，有8个项目地面平整度偏差值稳定控制在1.5mm以内，而传统工艺项目中仅有3个达到同等标准。块料工艺在高湿度、复杂结构地段中的适应性也表现良好，材料干缩变形小，未出现明显翘边或接缝开裂。综合施工效率、平整度表现和稳定性数据，块料面层粘贴工艺在现代室内施工中的技术价值与推广潜力已得到充分验证，为地面质量控制提供了可靠路径与实践依据。

五、块料粘贴工艺在地面平整度提升中的综合表现与施工建议

块料粘贴工艺在提升地面平整度方面展现出显著的综合表现，已成为现代室内精装施工中提高质量与效率的关键技术手段。优化粘结材料的配比和施工流程，该工艺有效解决了传统工艺中常见的空鼓、翘边及地面高差超标等问题。粘结材料采用高性能聚合物改性砂浆，具备快干、高强、低收缩等特点，能够在短时间内形成稳定的粘结界面，提高面层与基层之间的附着牢固度，减少后期因材料不均匀沉降造成的平整度偏差^[10]。该工艺配合精密施工设备及测控工具，使地面铺设更为精准，为后续地板、瓷砖等装饰层提供稳定基层，保障整体美观度与使用安全性。

在工程实践中，块料粘贴工艺对施工组织管理的配合程度提出了更高要求。从原材料储备、施工环境温度湿度控制到工人操作熟练度，均需严格执行工艺标准。在材料使用前，须现场搅拌

试验确定最佳水灰比，确保施工时材料处于最佳可操作状态。地面施工应分区域分层控制，激光水平仪设置基准标高，结合2米靠尺反复检验施工效果，实时修正局部高差。在施工过程中需保持连续作业，避免施工“冷缝”形成，要加强压实与排气处理，减少因内部空气残留产生的空鼓隐患。对于收边、阴阳角等节点部位应采取加强处理措施，确保整体地面结构的完整性与平整性。

基于大量案例实测与技术数据反馈，建议在推广块料粘贴工艺时，建立一整套标准化作业流程与技术交底机制，对施工班组进行针对性培训，强化质量过程控制，提升施工精度与成品率。应根据不同项目特点合理选用粘结材料类型与施工策略，在高温或高湿环境下，应选用具备延缓凝结功能的改性材料，以防止表面提前硬化影响平整效果。完善施工前的技术准备、施工中的精密控制与施工后的质量复核，可系统提升块料粘贴工艺在地面平整度控制中的综合表现，为精装工程高标准、高效率的交付提供强有力的技术保障。

六、结语

本文围绕块料面层粘贴工艺对室内地面平整度的改善作用进行了系统分析与技术探讨，从工艺原理、施工标准、影响因素到案例对比与施工建议等多个维度，充分论证了其在现代室内地面工程中的适用性与优越性。实测数据与实际工程验证，该工艺有效提升了地面平整度控制水平，也对施工效率与工程质量起到了积极推动作用。未来在装配式、精装修等高标准工程中，该工艺具有广泛推广价值和实践意义。

参考文献

[1] 刘志强, 王建华. 快干型地坪砂浆在室内地面工程中的应用 [J]. 建筑技术, 2021, 52(9): 88-91
[2] 李宏伟, 陈俊伟. 聚合物水泥基粘结材料性能分析与应用 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 77-81
[3] 周维峰, 吴志远. 室内地面施工中平整度控制技术研究 [J]. 建筑施工技术, 2022, 43(5): 114-117
[4] 郭伟东, 黄志强. 快干砂浆材料在室内装修工程中的施工优势 [J]. 建筑实践, 2021, 38(3): 56-59
[5] 刘立新, 杨浩然. 地面工程空鼓与开裂原因分析及防治措施 [J]. 工程质量, 2020, 28(2): 42-45
[6] 赵文杰, 孙天明. 室内地坪找平施工的质量控制方法研究 [J]. 施工技术, 2021, 50(12): 99-102
[7] 王鹏飞, 梁志强. 快粘结材料在室内铺装工程中的技术应用 [J]. 建筑工程技术与设计, 2022(17): 121-123
[8] 袁伟华, 朱洪涛. 建筑室内精装修地面平整度控制要点分析 [J]. 建筑科技发展, 2020, 38(6): 67-70
[9] 韩立国, 徐光耀. 新型面层粘结工艺在住宅精装中的应用研究 [J]. 现代建筑材料, 2021, 43(4): 83-86
[10] 林志强, 郑晓波. 快硬材料施工性能研究及工程实践 [J]. 建材与装饰, 2022(14): 92-94

预制管段安装工艺提高工业管道施工效率

王博宇

鞍山冶金集团建筑安装有限公司, 辽宁 鞍山 114031

DOI:10.61369/ETQM.2026010033

摘 要 : 工业管道施工过程中, 现场作业环境复杂、工序衔接不稳和质量难以统一等问题长期制约施工效率的提升。预制管段安装工艺通过在工厂环境下完成管段加工、组对与质量检测, 使施工现场主要以吊装与连接为主, 从而减少现场焊接量, 降低环境因素对施工质量和进度的影响。该工艺能够提高加工精度, 缩短施工周期, 优化资源配置, 并有效提升安全管理水平。随着工业工程规模增大和对施工效率要求提高, 预制化程度成为衡量管道施工现代化水平的关键指标。本研究围绕预制管段安装工艺的流程特点、应用优势及其对施工效率的提升作用展开系统分析, 为工业管道工程的施工组织优化提供方法参考。

关 键 词 : 预制管段; 工业管道; 施工效率; 模块化施工; 施工组织优化

Improving The Efficiency of Industrial Pipeline Construction by Prefabricated Pipe Segment Installation Technology

Wang Boyu

Anshan Metallurgical Group Construction and Installation Co., Ltd. Anshan, Liaoning 114031

Abstract : The construction of industrial pipelines has long been constrained by complex on-site environments, unstable process coordination, and inconsistent quality control, which have hindered efficiency improvements. The prefabricated pipe segment installation process, by completing pipe segment processing, assembly, and quality inspection in factory settings, reduces on-site welding requirements and minimizes environmental impacts on construction quality and progress. This approach enhances processing precision, shortens construction cycles, optimizes resource allocation, and significantly improves safety management. With the expansion of industrial projects and increasing demands for construction efficiency, prefabrication has become a key indicator of pipeline construction modernization. This study systematically analyzes the workflow characteristics, application advantages, and efficiency-enhancing effects of prefabricated pipe segment installation technology, providing methodological references for optimizing construction organization in industrial pipeline projects.

Keywords : prefabricated pipe sections; industrial pipelines; construction efficiency; modular construction; construction organization optimization

引言

工业管道作为工业设施运行的重要组成部分, 其施工质量与效率直接影响装置投产周期和运行可靠性。传统现场加工模式受空间限制、环境干扰和人员操作差异等因素影响, 施工效率偏低, 质量稳定性难以保障。随着工程规模扩大和建设周期压缩, 提升管道施工效率成为工程管理中的关键目标。预制管段安装工艺因其在工厂条件下完成标准化加工, 可提高质量可控性并减少现场作业量, 因此逐渐成为行业发展的重要方向。本研究旨在探讨预制管段工艺在提高工业管道施工效率方面的作用机制和实施要点, 为工程项目优化施工组织方式提供更加可行的技术路径。

一、预制化施工背景下的管道工程发展态势

随着现代化工厂对连续性生产、安全运行和设备寿命的关注不断加强, 传统以现场加工为主的施工方式已难以满足快速建设

与高质量同步推进的需求^[1]。管道系统作为工业装置内部最复杂的工程单元之一, 涉及材质种类多、连接方式多样、施工环境受限等特点, 长期以来依赖大量现场焊接和组对操作, 使质量受操作人员水平波动影响明显, 施工周期难以精确控制。工程建设单

位在项目管理与资源配置过程中逐渐意识到，通过提升标准化水平和减少现场工序，可以提升整体施工的可预期性与安全性。

随着精密加工设备、数字化设计工具和三维建模技术的普及，预制管段工艺逐渐具备规模化推广的条件^[7]。在工厂环境中加工管段，可以借助自动化焊接、数控切割、坡口加工等技术，实现高一致性的尺寸精度与焊缝质量。经过标准化检验流程的预制管段能够实现模块化运输与吊装，使现场工作量被压缩到连接、固定和系统调试等核心工序。随着施工组织方式发生转变，项目进度安排更具灵活性，不再受现场气候、空间拥挤程度或交叉作业干扰的显著影响^[8]。

二、管道施工模式中的效率瓶颈表现

传统管道施工模式长期依赖现场加工与组对，在实际工程组织中常出现效率受限的多重表现。现场空间往往狭窄，设备管线密集且交叉作业频繁，使焊接位置受限、操作姿态不理想，直接影响施工速度与焊缝成形质量^[4]。现场环境的不稳定性，如温度变化、风力影响、照明不足和地面不平整，会干扰焊接工艺参数的控制，使质量波动增加，返修率提高。不稳定的作业条件会消耗大量施工时间，导致整体进度不易预测，拖延现象普遍存在^[9]。

在资源调配方面，传统模式中大量工序集中在现场完成，使人工、机具和材料的组织协调难度加大。焊口排布密集时，工种交叉干扰严重，施工队伍往往需要等待焊口开放、脚手架搭设或前道工序结束才能继续操作，形成动态瓶颈。现场加工需要大量临时设备，如坡口机、切割机、焊机和辅助工装，这些设备占用空间并需反复转运，造成物料流动性差，增加无效工时。由于无法形成批量化加工链条，传统施工模式在效率上呈现出明显的碎片化特征。在质量控制方面，传统施工模式难以实现可复制的标准化工艺。不同焊工之间的水平差异、工序衔接的不一致以及检测流程的分散化，都会增加不合格品出现的概率，而返修工作耗时长、影响面大，进一步加剧进度压力。现场记录与数据采集方式相对滞后，缺乏对施工过程的实时监测，质量问题往往在后续检测阶段集中暴露，修复成本高、时间占用大。

此外，传统施工模式在计划管理方面存在较强的被动性。由于现场加工周期难以准确估算，施工组织编排往往基于经验进行，容易造成计划更新频繁、资源调度混乱和供应链衔接不稳。管材、阀门、配件等物资到场批次不一致，也会产生断料、缺件等情况，使施工队伍被迫等待，影响连续作业率。在这些因素共同作用下，传统管道施工模式呈现出效率低、波动大、可控性弱的典型特征。其瓶颈本质上来自过度依赖现场作业和缺乏标准化工艺流程，难以在规模化建设需求下保持稳定高效的施工节奏^[10]。

三、预制管段工艺的实施策略与流程优化

预制管段工艺的实施需要以精确的设计信息和可制造性分析为基础，通过优化加工流程与现场衔接方式，构建高效、稳定的施工体系。在设计阶段引入三维建模与数字化校核，可以将管线

走向、构件接口和空间位置完全可视化，有助于提前识别碰撞风险并确定合理的预制分段策略。结合施工现场的吊装条件、运输路径以及安装位置特点^[7]，对管段尺寸、重量及接口数量进行优化，使预制件既具备高加工精度，又便于在现场实施快速定位与对接。可制造性评估在这一过程中占据关键作用，通过对焊缝朝向、坡口形式、安装空间和焊接工艺可达性的综合分析，为后续工厂加工提供明确依据。

在加工环节，预制工厂通常依托自动化与数控化设备开展管段切割、坡口处理、组对定位和焊接成型，并应用恒定参数控制技术保持焊接质量的一致性。通过建立标准化工艺流程，将不同材质、壁厚和压力等级的管道制定为可复制的作业规范，实现大批量加工的稳定性。质量检验贯穿加工全过程，包括尺寸检测、焊缝无损检测和装配精度复核，使加工阶段质量问题能够被即时识别和处理。数字化制造管理系统的引入，使材料批次、焊口编号、检测记录等全过程数据可追溯，为后续施工和运行维护提供完整的技术资料。

在工厂加工完成后，管段需要进行合理包装、标识和物流规划。运输策略要求确保管段在搬运和装卸过程中不发生变形或表面损伤，同时明确现场的堆放顺序，使安装队伍能够按照流程顺利取用^[8]。现场安装以预制管段的快速吊装、精确定位和焊接对接为核心，配合激光测量仪器和快速夹具系统提高接口拼装效率。将现场作业压缩到较少的焊口和固定作业，使整体安装节奏更加可控。不同工序之间的界面清晰，有助于减少交叉干扰并优化施工组织路径。流程优化的关键在于形成贯穿设计、加工、物流与安装的协同体系，通过前期信息共享和全过程数据链管理，使各环节之间实现顺畅衔接。随着管理方式的系统化提升，预制管段工艺能够最大限度发挥其效率优势，为工业管道工程提供高质量、高稳定性的施工流程。

四、工程应用中效率提升的实践体现

在工程实践中，预制管段工艺带来的效率提升通常体现在施工节奏、质量控制和资源配置等多个层面。预制化将大量复杂、耗时的加工工序转移到可控性更强的工厂环境，使现场的作业内容被简化为安装、对接和调试环节，直接减少了现场焊口数量，降低了因环境变化导致的工艺波动^[9]。管段经工厂标准化加工后，其尺寸精度和装配一致性明显提高，使现场组对时间缩短，定位误差减少。安装过程能够依托预先编号的管段及吊点标识，实现按序快速布置，提升施工区内的作业连贯性。

项目现场的进度稳定性也因预制化而得到加强。管段在工厂完成质量检验后即可按物流计划批量运输到场，安装单位可根据施工计划灵活安排日作业量，不再受到现场加工不可控因素的影响。大量工程实践表明，通过降低焊口密度和减少临时加工设备的占用，施工区域的作业干扰显著下降，工种之间的交叉影响得到缓解，形成更畅通的作业面。现场需要处理的工序变少，使管理人员能够集中精力于关键接口控制与吊装协调，提升整体组织效率^[10]。在质量表现方面，预制管段的焊缝质量更易稳定达标，

返修概率下降，对进度的影响随之减少。工厂加工过程中产生的质量数据可追溯，为现场安装提供可靠依据，使检测步骤与验收流程更加顺畅。现场焊接因数量减少，检测工作量相应压缩，检测周期缩短，使安装后的系统试压、吹扫和投运能够提前展开，从而推动整个项目的里程碑节点前移。

资源利用效率的提升也是工程实践中的明显成果。预制化工艺降低了现场对专业焊工、切割人员和加工设备的需求，现场人员配置得到简化，辅助作业工时减少。由于管段到场即可安装，物料搬运路径缩短，材料堆放更为清晰，施工现场秩序改善。项目成本结构也因加工与安装环节的优化而得到调整，使人力、设备和时间资源得到更高效的使用。预制管段工艺在实际工程中的综合效果表明，通过标准化加工、精简现场作业和强化施工衔接，不仅改善了施工节奏和质量表现，也为项目管理模式带来更高的可控性与可靠性，呈现出显著的效率提升价值。

五、预制化管道施工的未来发展方向

预制化管道施工的未来发展方向将围绕数字化协同、智能制造和系统化管理展开，以适应现代工业工程规模不断扩大、建设周期持续压缩以及质量要求日益提升的发展趋势。随着工程数据模型的精细化程度不断提高，设计、制造、物流和安装等环节对数据的一致性依赖增强，通过建立统一的数据平台实现全过程的信息联动，将成为推动预制化深度发展的关键。基于三维模型的可制造性分析将更加智能，能够自动识别不合理分段、难装接口和可能的施工风险，为预制策略提供更高精度的决策依据。

智能制造技术将在预制管段加工环节发挥更重要作用。自动化焊接装备、智能切割系统和机器人组对技术将进一步提升加工精度与生产效率。通过引入实时监测、工艺参数闭环控制和数字化质量追踪体系，预制工厂将具备更加稳定的生产能力，实现不

同材质与复杂结构管段的柔性制造。同时，制造端的智能排产系统能够对多项目、多批次的管段需求进行统筹分析，使生产流程更具连续性和可预测性，减少加工资源的闲置与冲突。在施工现场，预制化将与智能安装技术深度融合。应用激光扫描、数字测量和安装辅助定位系统，可以实现管段的快速校准与精准对接。移动设备终端可实时获取预制件信息、安装顺序和质量要求，使安装人员在数字化指引下完成作业。随着施工现场数字孪生技术的发展，现场可基于实时模型动态调整安装节奏和资源配置，提高施工组织的灵活性。

供应链协同能力的提升也将成为预制化未来发展的重要方向。通过强化制造、运输、仓储与安装之间的流程衔接，建立可追溯、可监测、可调度的供应链体系，有助于进一步减少现场等待时间和资源浪费，使施工计划更加稳定。预制化施工将被逐步纳入工程项目从规划到运维的全生命周期管理框架，在运维阶段通过预制件数据实现设备检修的可溯源性和智能化管理。随着行业标准体系的逐步完善，预制化管道施工将在更多工业领域得到应用。未来的预制化不再局限于单纯提升施工效率，而是通过数字化、智能化和系统化手段构建高效、可靠、低风险的工程建设模式，为工业设施建设提供更具前瞻性的技术支撑。

六、结语

预制管段工艺的应用展现出在效率、质量与管理上的综合优势，为工业管道施工提供更稳定可控的技术路径。随着数字化设计、智能制造与协同管理的不断发展，预制化施工将形成更加成熟的体系，实现设计、加工与安装的高度融合。未来的发展方向将围绕精细化、智能化和系统化持续推进，为工业工程建设带来更高效、更可靠的实施方式。

参考文献

- [1] 陈泽坤. 预制化技术在工业管道施工中的应用研究 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(6): 112-115.
- [2] 郑雨桐. 工业管道安装工艺优化与施工效率提升探讨 [J]. 化工装备技术, 2020, 41(4): 57-61.
- [3] 程嘉徽. 模块化建造模式在大型工业工程中的应用及发展 [J]. 工程管理学报, 2022, 36(2): 89-94.
- [4] 柳春晖. 工厂预制在管道工程中的质量控制要点 [J]. 建筑施工, 2019, 41(12): 73-77.
- [5] 孙景耀. 工业装置管道系统施工组织优化方法研究 [J]. 施工技术, 2023, 52(8): 142-146.
- [6] 宋沛骏. 工业管道防腐保温材料及工艺选择 [J]. 化工管理, 2025, (20): 134-137.
- [7] 谭静. 大数据分析在工业管道施工安全管理中的应用 [J]. 黑龙江科学, 2025, 16(04): 97-100.
- [8] 张小波, 周厚飞, 张建国. 冶金复合无缝钢管在工业管道中的应用 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(01): 35-37.
- [9] 李文振, 蔡延彬, 李朝, 等. 工业管道等级智能化判定方法探讨 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(02): 76-80.
- [10] 王兴帅. 工业管道定期检验存在的问题及对策 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(06): 184-186+190.

贵州猫场矿地表分区规划及运输调度优化设计

朱航宇

中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650224

DOI:10.61369/ETQM.2026010036

摘 要 : 针对中铝集团核心铝土矿基地贵州猫场矿山区运输拥堵、数据分散的痛点, 结合全自采模式要求, 规划矿区地表四大功能分区, 融合物联网、动态调度算法与数据可视化技术, 设计山区适配的智慧运输管理系统。该系统以地表分区为基础, 构建“分区适配-生产优先级-拥堵状态”三维调度机制, 新增车辆动态调度模块和“一块屏”可视化平台, 通过人脸+车牌双认证、多源数据校验实现开采-运输-质检全链条协同。结合日均3000吨出矿量、“窄陡弯”道路特点优化参数后, 运输效率提升35%以上, 拥堵率降低50%, 数据处理时效缩短60%, 达成地表规划与智能化深度融合的目标, 为中铝全自采模式下山区矿山提供落地方案。

关 键 词 : 贵州猫场矿; 中铝全自采模式; 智慧矿山; 地表分区规划

Visual Design of Surface Planning and Transportation Scheduling for Maochang Mine in Guizhou

Zhu Hangyu

China Nonferrous Metals Industry Kunming Prospecting, Design and Research Institute Co., Ltd.,
Kunming, Yunnan 650224

Abstract : To address mountain transportation congestion and scattered data at Maochang Mine (CHALCO's core bauxite base) in Guizhou, this study plans four surface functional zones for the mine in line with CHALCO's full self-mining mode. Integrating IoT, dynamic scheduling algorithms and data visualization, an intelligent transportation management system adapted to mountainous areas is designed. Based on surface zoning, the system builds a 3D scheduling mechanism of "zoning adaptation - production priority - congestion status", and incorporates a dynamic vehicle scheduling module and a "one-screen" visualization platform. Through face-plate dual authentication and multi-source data verification, it realizes full-chain synergy of mining-transportation-quality inspection. Optimized for the mine's 3,000-ton daily ore output and "narrow-steep-curved" roads, the system boosts transportation efficiency by over 35%, cuts congestion rate by 50% and shortens data processing time by 60%. It achieves in-depth integration of surface planning and intellectualization, providing a practical solution for mountain mines under CHALCO's full self-mining mode.

Keywords : Maochang mine in Guizhou; CHALCO full self-mining mode; intelligent mine; surface zoning planning

引言

(一) 研究背景

猫场矿为中铝核心矿产枢纽, 矿区总面积12平方公里, 年产原矿110万吨、精矿75万吨, 正推进全自采转型以实现全流程自主管控^[1]。受山区地形限制, 场内道路呈现“窄陡弯”特征(主干道宽4.5米、最大坡度12°、最小弯道半径8米), 且传统地表功能分区模糊, 各区域车流交叉干扰严重: 商品矿运输与筛矿作业车流重叠、维修车辆与通勤车辆混行, 叠加全自采作业强度提升, 导致传统运输存在四大突出问题: 日均拥堵超2小时、数据分散于多系统、人工调度响应需30分钟、各环节衔接滞后。

(二) 研究现状与适配性分析

现有系统难以适配猫场矿“地表分区+全自采”双重需求^[2]: 国外系统(卡特彼勒 MineStar等)基于平原外包模式, 缺乏山区地表分区适配模块与全链条协同功能; 国内研究聚焦平原路径优化, 未涉及山区矿区地表分区规划与集团数据对接; 中铝总部平台缺乏“分区适配型”山区全自采调度子系统。

（三）研究内容与创新点

1.研究内容

梳理矿区地表四大功能分区，明确各分区边界、功能定位与交通流向^[3]；构建“分区适配－生产优先级－拥堵状态”三维调度机制，融合物联网、动态调度算法与数据可视化技术；设计“矿区－集团”两级数据可视化平台，实现分区运营、运输调度、全链管控的可视化管理；优化运输流程，融入双认证、多源校验等技术，适配中铝全自采标准与分区作业需求。

2.创新点

首次提出山区矿山“四大功能分区＋智能调度”融合方案，通过分区规划减少车流交叉干扰，为智能化调度提供空间基础；构建纳入分区适配参数的中铝定制型调度算法，提升调度精准度；建立“分区可视化＋全链管控”的两级平台，既满足矿区分区运营需求，又适配集团全局管控标准；兼容现有设备与分区作业流程，通过“分区优化＋技术升级”降低系统落地成本。

一、矿区地表分区规划与核心技术适配（全自采定制化）

（一）地表四大功能分区规划（空间基础）

结合猫场矿地形特征、作业流程与安全规范^[4]，重新梳理地

表功能如表1，分区规划核心原则：①功能集聚：同类作业集中布局；②交通分离：各类车流物理隔离；③安全适配：危险作业区与办公生活区保持≥300m安全距离；④弹性预留：各分区预留10%–15%扩展空间。

表1地表四大功能分区

分区名称	边界范围	核心功能	交通流向设计	适配要求（全自采＋安全）
商品矿外运输区	北坡主出口－省道连接线（长1.2km，宽6m）、东端外运输停车场（约1500 m ² ）	商品矿对外运输、外来车辆装卸货与临时停放	单向通行，设3个会车避让点，与其他分区物理隔离	道路承载≥80吨，配备地磅2台、双认证设备3套，满足中铝外运数据实时上传
出矿筛矿选矿区	北坡开采区－南坡选矿厂（含运输通道、筛矿车间、精矿仓）	原矿开采、筛选、选矿、精矿存储	闭环流通，设专用运输通道（宽5m），禁止非作业车辆进入	部署GPS＋北斗定位模块，数据采集覆盖全节点，符合中铝生产标准
机械维修区	西侧闲置坡地（占地约800 m ² ）	设备日常维修、保养、应急抢修	独立进出口，设维修车辆专用通道与临时停放区	部署设备状态监测传感器，维修记录同步至中铝设备管理平台
办公生活区	矿区南端平缓区域（占地约6000 m ² ）	行政办公、员工住宿、应急指挥	通勤与作业车辆分流，设人行步道隔离带	部署视频监控与应急通信终端，与调度中心实时联动

（二）核心技术适配（分区＋全自采融合）

1.物联网技术适配

针对四大分区特性定制化部署感知设备：一是商品矿外运输区：防水防雾双认证摄像头（3台）、抗干扰地磅传感器（2套）；二是出矿筛矿选矿区：GPS＋北斗双模定位模块（70套）、装货点光指示器（4个）、振动传感器；三是机械维修区：设备故障监测传感器（15个）、无线通信终端（3台）；四是办公生活区：高清视频监控（8台）、应急呼叫终端（5个）。

网络层采用“5G＋中继器＋LoRa”混合网络，覆盖3个信号盲区，预留中铝专用接口保障数据加密上传^[5]。

2.动态调度算法适配

融入“分区适配参数＋中铝生产优先级＋拥堵状态”三维指标，算法公式如下：

$$\text{调度优先级得分} = \text{任务优先级得分} \times 0.4 + \text{分区地形修正值} \times 0.3 + \text{分区拥堵得分} \times 0.3$$

任务优先级：A类（中铝重点订单）10分、B类8分、C类6分；分区地形修正值：商品矿外运输区0.1、出矿筛矿选矿区0.3、机械维修区0.05；分区拥堵得分：畅通（≤5辆车）10分、轻度拥堵（6–10辆）7分、重度拥堵（>10辆）3分。

针对出矿筛矿选矿区采用“单向通行＋分区优先级调度”，商品矿外运输区实施“预约运输＋错峰调度”，减少拥堵冲突。

3.数据可视化技术适配

一方面是矿区端驾驶舱^[6]：展示四大分区实时状态（车流密度、作业进度、设备运行），GIS地图标注核心信息；另一方面是集团端监控端：按中铝标准展示各分区核心指标，支持数据钻取与追溯。

（三）系统设计五大原则

一是分区－全自采适配原则：功能模块贴合分区作业与中铝全自采要求；二是地形－分区协同原则：优化调度策略与设备部署，适配各分区道路特点；三是中铝标准兼容原则：数据格式、接口协议符合集团标准；四是低成本落地原则：复用现有设备，按分区需求新增关键设备；五是本地化操作原则：界面适配操作习惯，支持离线操作应对山区断网。

二、核心模块详细设计（分区＋智能融合）

（一）原有运输模块优化（分区适配）

1.分区运输流程优化

原矿运输（出矿筛矿选矿区闭环）：运营部提交车辆状态，调度中心结合货源与中铝计划生成运输单，车辆按“开采区→筛矿车间→选矿厂→精矿仓”闭环行驶；

商品矿外运（商品矿外运输区独立流程）：销售部提报中铝

外运订单，车辆经“安检→商品矿外运输区过磅→出矿”流程，与生产分区隔离；

维修车辆运输（机械维修区独立）：维修车辆经专用通道进出，跨区作业需提前预约，由调度中心规划专属路线。

2. 关键环节优化

入场采用“人脸+车牌+分区任务编码”双认证，LED屏提示分区行驶路线^[7]；过磅分空重车计量，定位确认车辆分区，稳定5秒后采集数据（误差 $\leq \pm 0.1\%$ ），实时同步中铝；装货需双确认原矿归属与目标分区，卸货自动匹配分区点位。新增分区时效预警与排队管理：商品矿外运输区采用“预约排队+错峰过磅”，出矿筛矿选矿区设置“闭环车流优先级排序”，A类任务车辆优先通行，减少无效等待。

（二）新增核心功能（分区+智能融合）

1. 分区适配型动态调度机制

以“调度优先级得分”为核心决策依据，系统每5分钟重新计算排序，结合四大分区特性精准调度：

一是出矿筛矿选矿区：自动触发单向通行，A类任务车辆优先，限制非作业车辆进入，二是商品矿外运输区：采用“预约运输+批量调度”，动态调整发车频次；三是机械维修区：跨区作业提前1小时预约，避开生产分区高峰；四是办公生活区：通勤与作业车辆错峰通行（高峰7:00–8:00、18:00–19:00），设独立人行通道。

2. “分区可视化+全链管控”两级平台

（1）矿区端驾驶舱（分区运营可视化）

分区状态实时监控：GIS地图标注分区边界，红黄绿三色标识车流密度，同步展示作业进度与设备状态；交通调度可视化：呈现运输路线、会车点占用情况，调度指令一键下发（响应时间 ≤ 3 秒）；数据统计分析：自动生成分区运营报表，支持异常数据追溯。

（2）集团端监控端（全局管控可视化）

分区核心指标汇总：按中铝标准展示各分区关键数据，支持多矿区分区数据对比；全链追溯功能：通过中铝订单编码，追溯矿产品在各分区流转轨迹与相关数据；指令下达功能：集团可直接下达生产调整指令，响应时间 ≤ 5 分钟。

3. 分区质检过程管理

构建“分区取样+标准化验+全链追溯”闭环体系：出矿筛矿选矿区设3个固定取样点与2个流动取样点，样本粘贴含分区信息的防伪二维码；商品矿外运输区过磅时校验二维码，不合格产品拦截；质检结果自动同步至运输单、分区报表与中铝系统，实

现全链追溯^[8–9]。

三、结论与未来展望

（一）结论

本文针对贵州猫场矿山区“窄陡弯”地形与中铝全自采模式要求，创新性提出“地表四大功能分区+智能调度”深度融合方案。通过科学划分商品矿外运输区、出矿筛矿选矿区、机械维修区、办公生活区，从空间层面减少车流交叉干扰；构建“分区适配–生产优先级–拥堵状态”三维调度机制，融入定制化算法与物联网技术；设计“矿区–集团”两级可视化平台，实现分区运营与全链管控的有机统一。

系统兼容现有设备与分区作业流程，落地成本低、适配性强^[10]。试运行结果表明，运输效率提升35%以上，拥堵率降低50%，数据处理时效缩短60%，成功解决传统运输痛点，达成“地表规划与智能化深度融合”的智慧矿山建设目标，为中铝全自采模式下山区矿山提供了可复制、可推广的落地方案。

（二）未来展望

1. 分区智能化升级

引入机器学习算法，基于分区历史数据构建预测性调度模型，进一步降低等待时间；预留自动驾驶接口，在商品矿外运输区、出矿筛矿选矿区试点自动驾驶矿卡；升级分区设备物联网监控模块，新增多维度传感器与AI视觉检测技术，实现设备故障预警与智能诊断。

2. 绿色低碳与数字孪生融合

新增分区能耗监测功能，优化高能耗分区行驶路线与驾驶行为，降低碳排放；构建“分区数字孪生模型”，基于GIS与BIM技术实现物理与虚拟世界实时映射，支持调度方案模拟、应急演练与产能规划。

3. 跨矿区推广与集团化应用

将“四大功能分区+智能调度”方案推广至中铝集团其他山区矿山，形成标准化模块；打通各矿区分区数据壁垒，构建集团“全局分区管控平台”，实现跨矿区资源优化配置与调度协同，提升集团整体运营效率。未来，系统将持续融合人工智能、数字孪生等前沿技术，推动猫场矿从“分区智慧运输”向“全面智慧矿山”转型，为中铝全自采模式规模化推广与矿业高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 李雄辉, 郝波, 李程, 等. 智慧矿山协同作业系统人机交互技术研究 [J]. 控制与信息技术, 2024, (06): 34–42.
- [2] 张少鹏. 考虑新能源电车电池容量衰退的露天矿运输调度优化研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2024.
- [3] 赵加征. 考虑最优车铲配比的露天矿运输调度优化研究 [D]. 武汉理工大学, 2021.
- [4] 吴亚辉. 基于工时精准预测的地下矿无轨运输调度优化方法研究 [D]. 武汉理工大学, 2023.
- [5] 王晓静. 充矿煤炭运输调度系统设计与实现 [D]. 电子科技大学, 2015.
- [6] 浦勇, 韩映炜. 石材地下矿设计的基本要求 [J]. 石材, 2020, (09): 8–12.
- [7] 李波, 陈金山. 西部山区农村片区客运运力调度研究 [J]. 道路与安全, 2014, 14(05): 56–60.
- [8] 刘永红, 宋一鸣. 基于重构理念的矿山开发可持续设计及评估方法研究 [M]. 湖南大学出版社: 202412: 297.
- [9] 尧金才, 熊根, 乐敏杰, 等. 某新建矿山全尾砂膏体充填站设计方案研究 [J]. 有色冶金设计与研究, 2024, 45(05): 5–8+32.
- [10] 邓立, 郑丹, 阳铮轩, 等. 适用于四川矿山生态修复动态监测的无人机共享平台初步设计 [J]. 资源与人居环境, 2023, (S1): 77–80.

火电厂化学水处理智能监控系统开发

蒋勇, 孙彩珍, 刘宁, 刘帅

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ETQM.2026010003

摘 要 : 火电厂化学水处理是保障机组安全运行及环境保护的核心环节, 其技术效能直接关系到发电设备寿命与运行稳定性。传统水处理工艺依赖人工监测与经验调节, 存在污染物去除效率低、资源回收率不足及运行成本高等局限, 尤其在应对水质波动与设备工况变化时, 易引发安全隐患与资源浪费。随着电力行业环保要求提升及水资源循环利用需求增长, 水处理工艺优化与监控效率提升成为制约火电厂可持续发展的关键因素。在此背景下, 智能监控系统的开发成为突破技术瓶颈的重要路径。通过集成传感器技术、大数据分析及人工智能算法, 系统可实时采集水质参数、动态调整处理工艺并预测设备状态, 从而提升处理过程的自动化水平与资源利用效率。

关 键 词 : 火电厂; 化学水处理; 智能监控系统; 自动化控制; 水质预测模型

Development of Intelligent Monitoring System for Chemical Water Treatment in Thermal Power Plant

Jiang Yong, Sun Caizhen, Liu Ning, Liu Shuai

China Energy Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : Chemical water treatment in thermal power plants serves as the cornerstone for ensuring both operational safety and environmental protection, with its technical effectiveness directly determining the lifespan and operational stability of power generation equipment. Traditional water treatment methods, relying on manual monitoring and empirical adjustments, suffer from limitations including low pollutant removal efficiency, insufficient resource recovery rates, and high operating costs. These shortcomings become particularly problematic when handling water quality fluctuations and equipment condition changes, often leading to safety hazards and resource waste. As environmental standards in the power industry tighten and water recycling demands grow, optimizing water treatment processes and enhancing monitoring efficiency have emerged as critical factors constraining the sustainable development of thermal power plants. Against this backdrop, developing intelligent monitoring systems has become a crucial pathway to overcome technological bottlenecks. By integrating sensor technology, big data analytics, and AI algorithms, these systems can collect real-time water quality parameters, dynamically adjust treatment processes, and predict equipment status, thereby improving automation levels and resource utilization efficiency throughout the treatment workflow.

Keywords : thermal power plant; chemical water treatment; intelligent monitoring system; automatic control; water quality prediction model

引言

火电厂化学水处理是保障机组安全运行和环境保护的核心环节。化学水处理技术直接影响到发电设备的寿命与运行稳定性, 不当处理会导致水中杂质在高温高压环境下形成水垢及腐蚀性物质, 最终引发设备故障甚至安全事故。随着电力行业对环保要求的提升和水资源循环利用的迫切需求, 水处理工艺的优化与监控效率成为制约火电厂可持续发展的重要因素。当前, 火电厂废水处理面临多方面挑战: 一方面, 冷却水系统产生的大量废水需经过复杂流程实现达标排放或循环利用, 传统方法在污染物去除效率、资源回收率及运行成本控制方面存在明显局限; 另一方面, 现有水处理工艺依赖人工监测与经验判断, 难以实时应对水质波动及设备工况变化, 导致处理过程存在安全隐患与资源浪费^[1]。在此背景下, 智能监控系统的开发成为突破传统技术瓶颈的关键路径。随着传感器技术、大数据分析和人工智能算法的快速发展, 构建能够实时采集水质参数、动态调整处理工艺、预测设备状态的智能化系统, 已成为提升水处理可靠性与经济性的必然选择。

一、相关理论

（一）智能监控技术

智能监控系统作为火电厂化学水处理过程的核心技术载体，其功能实现依赖于多层级架构与先进控制技术的协同运作。系统基本构成包含感知层、控制层、信息层和决策层四个主要部分，其中感知层通过高精度水质传感器、流量计及压力变送器等设备实时采集水处理工艺参数，包括 pH 值、电导率、溶解氧浓度以及关键设备运行状态数据。控制层采用分布式 PLC 冗余系统作为核心控制单元，通过 Profibus 现场总线连接各子系统，确保在高温高压环境下实现制水过程的精准控制与故障冗余保障^[2]。信息层依托工业以太网构建数据通信平台，不仅支持生产数据的实时传输，还可与远程运维管理云平台实现数据交互，为异常工况诊断和设备健康管理提供基础支撑。

在关键技术方面，智能监控系统的核心创新体现在多源数据融合与智能控制算法的集成应用。针对热交换器结垢问题，系统通过在线监测给水中的钙镁离子浓度及浊度变化，结合锅炉管材腐蚀防护的 AVT 处理工艺参数，构建动态预测模型以实现防垢防腐的前瞻性控制^[3]。工业通信技术采用现场总线与工业以太网混合组网方案，既保证了控制指令的实时性，又通过 OPC UA 协议实现了与企业级管理系统的数据贯通。远程运维管理技术通过云平台部署设备数字孪生模型，可实时跟踪高压泵、离子交换器等关键设备的振动频率与能耗曲线，结合故障特征数据库完成预判预警。

（二）自动化控制理论

自动化控制理论在火电厂化学水处理系统中的应用为确保水质达标和设备安全运行提供了关键技术支持。火力发电厂对水质的要求极为严苛，锅炉水的 pH 值控制直接关系到设备腐蚀防护与热效率优化，因此需要精准的反馈控制系统。通过引入模糊 PID 控制策略，研究人员针对锅炉水处理系统设计了加药控制组件，采用 PLC 与 HMI 软件构建了自动化控制框架，实现了 pH 值的动态调节与实时监测。该系统通过连续采集水质参数，结合模糊逻辑调整 PID 控制器参数，有效克服了传统控制方法在非线性过程中的滞后与波动问题，确保锅炉水 pH 值稳定在设定区间内^[4]。

在污染物监测领域，自动化分析技术为废水处理提供了高效解决方案。针对火电厂燃煤产生的硒污染问题，基于顺序氢化物发生与化学发光检测的自动监测系统得以开发。该技术通过注射泵与八端口选择阀构建连续化流程，使硒以 H₂Se 形式蒸发并与臭氧反应产生化学发光信号，其检测灵敏度与抗干扰能力显著提升^{[13][14]}。尽管硒元素可能对检测信号造成干扰，但通过优化反应条件与设备配置，系统仍能实现对硒含量的精准量化，为废水排放控制提供了可靠数据支持。

二、系统设计

（一）硬件选型与配置

本系统硬件设计遵循高精度、高可靠性、强环境适应性原则，综合考虑火电厂化学水处理系统的特殊工况及实时监控需

求，构建了由感知层、控制层、执行层构成的分层硬件架构。在感知层部署多参数水质传感器网络，pH 值检测选用高精度玻璃电极传感器（分辨率 0.01pH，精度 ± 0.02pH），其具备温度补偿功能以消除环境波动影响；电导率监测采用四电极补偿型传感器，量程覆盖 0–100mS/cm，满足不同水质阶段的测量需求；浊度检测配置散射光式浊度计，检测范围 0–1000NTU，支持自动清洗功能以应对高悬浮物环境^[5]。离子浓度监测集成复合电极离子选择电极系统，通过双通道测量技术实现 Cl⁻、Na⁺ 等关键离子的在线分析，电极表面采用抗污染镀层处理，有效延长使用寿命。

表1 关键设备性能对比表

设备类型	核心技术指标	环境适应性设计
pH 传感器	精度 ± 0.02pH，温度补偿	抗污染镀层，耐 50℃ 环境
四电极电导率传感器	量程 0–100mS/cm，RS485 输出	四电极抗极化，免维护设计
工业 PLC	40MHz 主频，128MB 内存，PROFINET 接口	宽温宽压，符合 IEC 61131-3
通信网络	双冗余环网，千兆速率，M12 接口	自愈时间 < 50ms

数据采集模块采用 16 位多通道数据采集卡，具备 8 路差分输入通道，采样频率达 1kHz，配备硬件过压保护和电磁隔离设计，确保强电干扰环境下数据完整性。系统配置工业级 PLC 作为核心控制器，选用西门子 S7-1200 系列，集成 PROFINET 通信接口，支持 IEC 61131-3 标准编程，CPU 主频为 40MHz，内存容量扩展至 128MB 以满足多任务实时处理需求^[6]。通信网络构建双冗余工业以太网架构，核心交换机采用支持环网协议的 M12 接口设备，确保单点故障时的网络自愈能力，传输速率配置为千兆以太网标准。

（二）软件设计与实现

本系统软件设计以模块化、高实时性和智能化为原则，采用分层架构设计方法构建核心功能模块。系统整体架构分为数据采集层、数据处理层、智能分析层和人机交互层，通过多线程通信机制实现各层级间的数据交互与功能协同。在数据采集层，基于工业总线协议开发专用通信模块，实现对火电厂化学水处理系统中 pH 值、电导率、溶解氧等关键参数的实时采集，通过 FIFO 队列缓存机制确保数据采集的连续性和稳定性。数据处理层采用流式计算框架对原始数据进行预处理，包括异常值过滤、信号去噪和特征提取，利用滑动窗口算法对时序数据进行动态标准化处理，为后续分析提供结构化数据支撑。

表2 系统级优化建议与风险应对

模块	现存风险	优化策略
数据采集层	高悬浮物导致浊度计误差	增加自动清洗频次 + 散射光补偿算法
智能分析层	水质突变导致模型失效	引入在线学习机制，动态更新模型参数
人机交互层	操作员误触引发连锁反应	增设权限分级与关键操作二次确认
边缘计算节点	高温环境影响服务器稳定性	采用宽温型工业服务器（-40℃ ~70℃）

针对实时性要求较高的功能模块，设计了基于多线程与事件驱动的混合调度机制。在智能分析层，采用机器学习与深度

学习相结合的混合建模方法,开发了多组分水质预测模型和异常工况诊断算法^{[7][8]}。其中,水质预测模块基于长短期记忆网络(LSTM)构建时序预测模型,通过动态调整时间窗口参数提升预测精度;异常诊断模块则采用改进的随机森林算法,结合特征重要性评估机制实现故障模式的快速识别。同时,引入边缘计算理念,在本地服务器部署轻量化推理引擎,确保关键控制指令的实时响应时间控制在200ms以内。

三、系统测试

(一) 系统测试方法

系统测试是验证智能监控系统功能完整性、性能可靠性及环境适应性的关键环节。为确保测试过程的科学性和系统性,本研究基于V模型构建了分层递进的测试体系,涵盖功能验证、性能评估和环境适应性试验三个维度。在功能测试阶段,采用黑盒测试与白盒测试相结合的方法,针对化学水处理系统的核心功能模块进行逐项验证。具体而言,通过预设的典型工况参数输入,测试数据采集模块的传感器信号捕获精度和数据传输延迟,确保其满足 $\pm 0.5\%$ 的误差要求;同时对水处理过程的逻辑控制模块进行状态机遍历测试,验证其在不同水质指标异常情况下的响应逻辑是否符合设计预期。对于模糊控制算法等复杂模块,则采用白盒测试策略,通过覆盖所有判定条件和分支路径的方式,确保算法在边界条件下的稳定性。

性能测试采用压力注入与负载模拟技术,重点考察系统在极限工况下的运行表现。搭建包含300个虚拟传感器节点的仿真环境,模拟电厂化学水处理系统的多源异构数据流。通过逐步增加数据传输频率至设计峰值的120%,持续监测系统响应时间、内存占用率和CPU负载等指标,验证其在高并发数据流下的实时处理能力。此外,设置连续72小时的不间断运行测试,观察系统在持续运行中的资源消耗趋势,确保内存泄漏率低于0.1%且无累计误差^[9]。针对水质预测模块的准确性,采用历史工况数据回放

方式,对比系统预测值与实测值的相对误差,要求关键水质参数(如PH值、电导率)的预测误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

(二) 测试结果与分析

本系统测试阶段采用实验室模拟与现场实测相结合的方式,重点围绕数据采集精度、控制响应速度、异常工况处理能力及系统稳定性四大核心指标展开验证。测试过程中,以某600MW超临界机组化学水处理系统为实测对象,设置典型运行场景包括凝结水精处理、补给水处理及锅炉给水调节等环节,通过对比传统人工监测与智能监控系统的实时数据差异,评估系统性能参数。

在数据采集模块测试中,系统配置的pH值、电导率、二氧化硅等关键水质参数传感器,在实验室标准溶液标定后,现场实测数据与离线化验结果的相对误差均控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。其中pH值监测模块在0.5Hz采样频率下,连续72小时运行的标准差为0.03^[10],表明传感器信号稳定性和数据传输可靠性达到设计要求。对比传统人工取样分析,本系统将水质参数检测频次从每2小时一次提升至实时监测,数据延迟时间压缩至0.8秒以内,有效解决了传统方法存在的时效性不足问题。

四、结论

本研究针对火电厂化学水处理工艺的智能化需求,开发了一套集成多参数监测、数据分析与智能决策的化学水处理智能监控系统。系统开发以工业现场数据为基础,结合化学水处理过程的物理化学特性,构建了涵盖原水预处理、离子交换、凝结水精处理及锅炉补给水制备全流程的智能监控体系。在技术层面,系统创新性地融合了物联网传感器网络、多源数据融合算法与机器学习模型,实现了关键水质参数的实时监测、异常工况的精准识别以及化学药剂投加量的动态优化。通过部署高精度pH值、电导率、硅含量及离子浓度传感器,系统能够以分钟级响应速度采集处理单元的水质数据,结合边缘计算技术完成原始数据的去噪与特征提取,显著提升了数据采集的准确性和时效性。

参考文献

- [1] 郝庆,黄甫怀阳.火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[J].机电信息,2010(18):2.
- [2] 陈进生.大型火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[C]//全国水处理技术研讨会.2002.
- [3] 陈莹.火电厂化学水处理设备腐蚀问题处理方法研讨[J].黑龙江科学,2014,5(9):1.
- [4] 王芳芳.火电厂化学水处理技术进展与应用探讨[J].城市建设理论研究:电子版,2016(9).
- [5] 赖晓玲.大型火电厂化学水处理技术进展与应用[J].化工管理,2021,(36):58-59.
- [6] 郭铭.火电厂化学水处理系统的节能降耗优化措施探讨[J].价值工程,2020,39(29):181-182.
- [7] 张立敏.基于残差网络模型识别与检测框架的化学水处理无人值守项目研究.内蒙古自治区,内蒙古京海煤研石发电有限责任公司,2023-12-23.
- [8] 纪海滨.浅析电厂化学水处理技术发展与应用[J].北京电力高等专科学校学报(自然科学版),2012.
- [9] 陈志清.化学水车间轮式智能巡检机器人涉水系统设计[J].新型工业化,2022,12(05):249-252.
- [10] 李勇.电厂化学水处理运行中存在的问题及应对措施分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(7):4

基于数据治理的油水井预警统计优化研究与实践

刘翠霞, 冯忠丹, 王垚, 穆莹莹

大庆油田第三采油厂作业区, 黑龙江 大庆 163113

DOI:10.61369/ETQM.2026010017

摘 要 : 在油田数字化转型中, 预警系统是油水井生产状态的实时感知中枢, 其效能直接影响生产效率与运营安全。但海量预警引发的“信息过载”与“警报疲劳”, 已成为制约油水井运行时率提升的关键瓶颈。

本文以典型油田作业区为案例, 剖析传统预警系统的深层矛盾, 构建融合“单井信息聚合、多维动态分类、跨域数据联动”的预警统计优化体系。该体系通过状态锁定、参数防抖消除信息冗余; 通过分级分类可视化提升信息可读性与处置优先级; 通过打通数据壁垒实现预警智能校验与虚实甄别。

经现场验证, 作业区日均预警量降低近 1/3, 异常处置效率提升超 70%, 油水井运行时率显著增长。本研究为解决油田数字化管理共性难题提供了实践路径, 对推动生产管理智能化、精益化具有重要参考价值。

关 键 词 : 油水井管理; 运行时率; 预警优化; 数据治理; 生产智能化; 数字化转型

Research and Practice on Statistical Optimization of Oil and Water Well Early Warning Based on Data Governance

Liu Cuixia, Feng Zhongdan, Wang Yao, Mu Yingying

Operation Area of the Third Oil Production Plant of Daqing Oilfield, Daqing, Heilongjiang 163113

Abstract : In the digital transformation of oil fields, the early warning system is the real-time perception center of the production status of oil and water Wells, and its effectiveness directly affects production efficiency and operational safety. However, the "information overload" and "alarm fatigue" caused by a large number of early warnings have become the key bottlenecks restricting the improvement of the operating time rate of oil and water Wells.

This paper takes a typical oilfield operation area as a case to analyze the deep-seated contradictions of the traditional early warning system and construct an early warning statistics optimization system that integrates "single-well information aggregation, multi-dimensional dynamic classification, and cross-domain data linkage". This system eliminates information redundancy through state locking and parameter anti-jitter. Enhance the readability of information and the priority of processing through hierarchical and classified visualization. By breaking down data barriers, intelligent verification of early warnings and virtual-real discrimination can be achieved.

On-site verification shows that the average daily warning volume in the operation area has decreased by nearly one third, the efficiency of abnormal handling has increased by more than 70%, and the operating time rate of oil and water Wells has significantly grown. This research provides a practical path for solving the common problems in digital management of oil fields and has significant reference value for promoting the intelligence and lean management of production.

Keywords : oil and water well management; operational efficiency rate; early warning optimization; data governance; intelligent production; digital transformation

引言

油水井运行时率, 作为衡量油田开发作业精益程度与生产效率的核心指标, 其数值的微小波动都会对原油产量目标和油田开发经济效益产生直接而显著的影响。在当今油田生产数字化、智能化转型的大背景下, 依托于物联网、云计算与大数据技术构建的实时预警监控系统, 已然成为保障油水井平稳运行、实现故障早期干预不可或缺的技术手段。然而, 技术的先进性并非总能直接转化为管理的有效

性。在许多已经部署了先进监控系统的油田作业区，一个普遍的困境正在浮现：监控系统产生了海量的数据，但真正能够指导行动的有效信息却淹没其中。具体表现为预警信息重复推送、分类逻辑缺失、误报率居高不下，导致工程技术人员不得不耗费大量精力进行繁琐的人工筛选与甄别，从而使得对真实异常工况的处置响应严重滞后。这种“数据洪流”下的“决策饥渴”现象，严重制约了数字化系统潜能的充分发挥，使得提升油水井运行时率的目标面临挑战。

因此，探索如何通过科学的数据统计方法与系统性的流程优化，对现有的预警信息处理流程进行重塑与升级，实现从被动、低效的“数据监控”向主动、精准的“智能诊断”的战略性跨越，已成为油田企业深化数字化转型、挖掘存量资产潜力的关键课题。本文立足于这一现实需求，旨在深入分析预警系统应用瓶颈的根源，并构建一套行之有效的预警统计优化体系，最后通过现场实践数据验证其效能，以期为油田的智能化生产管理提供一套可借鉴、可推广的解决方案。

一、问题概述与成因深度剖析

（一）预警系统应用现状与问题具体表现

本研究聚焦于一个管理着近千口油水井的典型作业区。该区已全面部署了覆盖所有生产井的智能预警系统，通过安装在井口的多种传感器，实现了对生产关键参数的持续采集与监控。然而，在系统投入运行后，其实际效果与预期存在较大差距，集中表现为以下三个方面：

1. 信息冗余严重，重复推送泛滥

系统对于同一口井发生的同一类故障，由于参数在故障状态下的持续存在或波动，会按照固定的时间周期反复触发和推送内容高度相似的预警信息。这种缺乏状态持续识别的机制，导致单口故障井在一天内可能产生数十条无效预警，严重挤占了有限的监控注意力资源，使得真正需要紧急处置的预警信息面临被淹没的风险。

2. 分类逻辑缺失，信息呈现无序

现有的预警平台界面往往采用简单的时序列表方式呈现信息，缺乏基于业务逻辑的结构化分类与优先级排序。不同紧急程度、不同故障类型、不同井号的预警信息杂乱无章地混杂在一起。监控人员为了找到高优先级的任务，必须进行大量重复的人工扫描与筛选工作，这不仅效率低下，而且极易因视觉疲劳导致关键信息被遗漏。

3. 虚实偏差显著，误报率居高不下

预警系统的判定逻辑严重依赖于预设的固定阈值，而未能充分考虑油田生产的复杂性与动态性。例如，对于间歇采油井、计划性检修、热洗作业等特定工况，其正常的生产参数变化极易触发系统的报警阈值，从而产生大量“虚警”。根据现场抽样统计，此类误报在预警总量中占有相当比例，这不仅极大地损耗了基层班组对预警系统的信任度，也造成了大量不必要的人力与物力资源浪费于现场核实工作。

二、核心成因深度剖析

上述问题的产生，是系统设计理念、数据架构与管理流程等多个层面因素共同作用的结果。

（一）算法模型固有缺陷

传统的预警模型多采用基于固定阈值的单向、静态触发机

制。这种模型设计简单，但其核心缺陷在于缺乏对生产“上下文”的理解。它无法识别一口井是处于连续生产、间歇采油、计划关停还是维修作业状态，从而将各种正常工况下的参数波动也误判为异常。这是导致误报频发的根本技术原因。

（二）数据架构滞后与信息孤岛

在数据层面，预警系统往往作为一个独立模块存在，其数据存储结构未充分考虑与其他生产管理系统（如生产执行系统、设备管理系统、调度计划系统）的深度融合。数据之间缺乏有效的关联与索引，形成了“信息孤岛”。为了进行综合判断，技术人员不得不采用手工方式，在不同系统间反复切换、复制、粘贴、比对数据，流程极其繁琐且容易出错，这从底层架构上限制了处置效率的提升。

（三）人机交互设计不足，决策支持薄弱

预警平台的用户界面功能单一，主要侧重于原始数据的罗列，而未能有效地集成与预警处置相关的知识库、历史案例库以及标准作业程序等决策支持信息。技术人员在接收到一个预警后，需要依赖个人经验记忆和跨系统查询来进行判断，这不仅增加了认知负荷，也因个体经验差异引入了决策的不确定性与风险。

三、预警统计优化方法体系的构建与实施

为解决上述系统性痛点，本研究构建了一套多层次、一体化的预警统计优化方法体系。该体系的核心由三大相互支撑的支柱构成。

（一）单井汇总机制：从离散告警到连续状态管理

核心目标是消除针对同一对象的重复性、瞬态性干扰信息，将监控焦点从“一次次报警”转移到“井的持续状态”上。

1. 状态锁定规则：开发并实施了基于时间的状态持续判定逻辑。对于已确认发生故障（如杆管断裂、泵卡）并导致停产的井，系统会将其标记为一个特定的“长期故障状态”。在此状态持续期间，系统将自动屏蔽所有由该故障所衍生的、重复的参数越限预警，仅在井的维修状态发生变更（如作业完成、恢复生产）时，才重新激活全面监控。这从源头杜绝了无效报警的持续产生。

2. 参数防抖处理：针对那些易受瞬时干扰（如电网波动、设

备启停冲击)的生产参数,引入了在工业控制和软件工程中广泛应用的“滑动窗口”算法。通过设定一个合理的时间窗口,只有当参数在该窗口期内持续或多次超过阈值时,才被判定为一次有效的、需要推送的预警。这有效过滤了大部分的瞬时尖峰噪声。

3.人工干预接口:认识到全自动系统的局限性,为复杂多变的生产现场预留了灵活处置的空间。在预警平台设置了“计划性屏蔽”或“临时消警”功能,授权技术人员对已知的计划内作业(如定期热洗、措施作业、系统调试等)所涉及的井,进行手动、临时性的预警屏蔽,并可根据作业时长预设屏蔽有效期。

(二) 分类标记体系:实现信息的结构化与可视化

为了将无序的信息流转化为层次清晰、重点突出的“任务清单”,构建了一套多维度的分类标记标准,并利用信息化工具实现自动化可视管理。

紧急度维度(采用红色与加粗突出):用于标识那些已导致生产中断、或对安全、环境构成直接威胁的最高优先级预警,要求立即响应。

处置复杂度维度(采用黄色底纹标记):用于标识那些处置流程复杂、需要跨专业协作或调动外部资源的预警,要求制定详细方案并限期处置。

可信度维度(采用绿色勾选标识):基于历史数据回溯分析,对不同类型的预警规则进行可信度评级,高可信度预警给予更高的处置优先权。

数据来源维度(采用蓝色斜体区分):标明预警是由传感器直接测量触发,还是经由算法模型推断产生,有助于技术人员快速确定验证方向。

(三) 多维度联动机制:构建基于数据融合的智能校验

这是提升预警准确率、实现“去伪存真”的核心环节。其本质在于打破数据孤岛,让预警信息在与更广阔的生产上下文数据的关联碰撞中得到校验。

1.生产数据深度关联:通过开发数据接口与服务,实现预警系统与油田其他关键生产管理系统的自动对接与融合。系统能够自动校验每一口触发预警的井的实时生产状态与计划状态。例如:

自动与生产调度计划比对,识别处于计划关停、计划检修期内的井,其预警将被自动降级或标记为“计划内”。

自动与设备管理系统联动,确认井口或设备是否处于维修状态,从而屏蔽相关报警。

自动与工艺设计数据比对,校验报警参数是否在合理的设计范围之内。

建立和维护一个动态的“例外井名单”,对于经确认因特殊原因无需推送常规预警的井,系统自动过滤。

2.逻辑规则优化与算法重构:针对误报率最高的几类预警,重构其判定算法,从简单的“阈值判断”升级为“多条件、上下文感知的复合逻辑判断”。新的算法会综合考量井的生产模式、设备运行时序、多个参数间的关联性等多种因素,从而显著提升判定的准确性。例如,对于某类常见机械故障的预警,新算法会同时检查电流、载荷、运行时间等多个信号,并只有在特定组合条

件满足时才会最终触发。

3.视频联动验证:对于少数经过数据筛选后仍存疑的、或后果特别严重的高级别预警,建立与井场视频监控系统的联动机制。在预警触发时,可自动调用现场高清摄像头,通过图像识别技术或人工远程查看,对设备物理状态进行直观确认,形成“数据预警、视频复核”的闭环验证,极大提升了对重大故障判断的把握。

三、应用效果与综合效益分析

该优化体系在作业区经过一段时期的试运行与迭代优化后,其应用效果逐步显现,体现在运行效率、经济效益与管理提升等多个方面。

(一) 运行效率显著提升

1.预警质量实现质的飞跃:系统优化后,作业区日均有效预警推送量实现了大幅下降,降幅显著。其中,尤为突出的成果是重复性预警的数量得到了根本性控制,系统整体的误报率也下降了数十个百分点。预警信息的“信噪比”获得了根本性改善,监控人员接收到的信息价值密度显著提高。

2.处置效率大幅提速:得益于预警信息的有效聚合、清晰分类与初步的自动筛选,技术人员每日用于信息筛选和初步甄别的时间大幅缩短,工作效率提升显著。更快的识别速度直接转化为更快的现场响应,计划外停井的时间因此得到了有效压缩,最终直接推动了油水井综合运行时率实现了具有统计意义的显著提升。

3.管理流程得以优化:标准化、结构化的预警处置流程,减少了跨部门、跨层级沟通的不确定性,明确了各环节的责任与时限,使整个生产异常管理流程更加流畅、高效。

(二) 经济效益显著

1.直接人工成本节约:预警处理工作的自动化与智能化,降低了对人工进行重复性、低价值信息筛选工作的依赖。经过流程优化,可以有效释放部分人力资源,将其配置到更具创造性的技术分析或管理岗位,从而直接节约了人工成本。

2.运维费用降低:误报率的大幅下降,最直接的效益就是减少了为核实虚假警报而进行的非必要现场出车。这使得相关的车辆燃油费、维修保养费、里程损耗等运维费用得到了有效控制。

3.隐性效益巨大:因生产中断时间减少而带来的原油增产、因准确预警而避免的次生设备损坏与更大规模的生产事故、以及将高技能人才从繁琐工作中解放出来所产生的创新价值等,共同构成了更为巨大的隐性经济效益,其长远价值往往超过直接的成本节约。

(三) 技术创新与推广价值

1.模型通用性强:本研究构建的“数据治理→智能分类→联动校验”的三层优化架构,方法论清晰,所采用的技术组件成熟且通用,不依赖于特定厂商的系统,具有很强的行业普适性与可复制性,尤其适用于生产情况复杂、管理井数众多的油田作业区。

2.系统扩展性良好：本次优化的核心逻辑与数据处理流程采用模块化设计，可以较为方便地集成到油田现有的数字化管理平台中。这套体系为后续引入更高级的人工智能算法（如基于机器学习的故障预测模型）奠定了高质量的数据基础和框架准备。

3.标准前瞻性：在实践基础上总结提炼形成的工作规范与指导原则，为油田乃至行业层面推进生产监控的标准化、精细化管理工作提供了有价值的实践参考与理论支撑。

四、深化应用与未来展望

（一）当前推广进展与制度化建设

1.区域试点成功，全面推广启动：该预警统计优化方法在首发作业区成功实践后，其成效形成了良好的示范效应。目前，该方法已开始油田范围内更多同类型作业区进行推广实施，覆盖的油水井资产规模显著扩大。来自不同区域的初步反馈数据证实，该优化方法在不同环境下均能有效提升生产运行效率，验证了其鲁棒性与适应性。

2.培训体系同步构建，人才队伍得到赋能：为确保优化方法论能够被准确理解和有效执行，配套开发了系统的培训课程与实操手册。通过“理论讲解、平台实操、案例研讨”相结合的培训模式，有效提升了基层技术人员的数据素养和系统应用能力，为方法的成功落地与持续优化提供了人才保障。

3.管理制度实现标准化与绩效化：将优化后的预警处置流程、响应时效和质量标准纳入油田的生产管理绩效考核体系。通过设立关键绩效指标，将技术改进与管理提升紧密结合起来，形成了用数据驱动管理优化、用绩效保障技术落地的良性循环。

（二）未来技术演进方向

当前的优化方案主要解决了“感知”和“诊断”环节的效率与准确性问题。面向未来，油田的智能化管理将向“预测”和“自主”方向演进。

1.人工智能深度应用：下一步将重点引入深度学习和机器学习算法，利用积累的海量历史数据，训练故障预测与健康管理模型。这些模型能够更早地识别出设备的早期退化迹象，实现从“故障后报警”到“故障前预警”的转变，并能为每个预警给出量化的可信度评分与风险等级，进一步提升决策的智能化水平。

2.边缘计算前置处理：为应对物联网终端数量激增带来的数

据洪流，考虑将部分数据清洗、特征提取和实时推理能力下沉至井场边缘侧。通过在数据源头进行初步处理，只将有价值的信息和高级别预警上传至云端，可以极大减轻网络带宽和中心服务器的压力，提升系统的实时性与可靠性。

3.数字孪生技术融合：构建关键生产设施的数字孪生体，实现物理世界与虚拟世界的精准映射与交互。当预警发生时，不仅可以在数字孪生体中进行根因分析、过程推演和处置方案模拟，从而辅助制定最优决策；还可以基于历史与实时数据，在虚拟空间中进行预测性维护和运行优化，最终实现生产系统的安全、高效与自主运行。

五、结论

本文系统性地研究了在油田数字化转型背景下，如何通过优化预警统计方法来破解“信息过载”难题，进而有效提升油水井运行时率这一核心命题。研究通过深入剖析传统预警系统在实际应用中的痛点，构建了一套集成了管理理念与技术措施的综合性优化体系。该体系通过引入单井汇总机制从根本上消除了信息冗余，通过建立多维分类标记体系实现了信息的结构化与可视化，通过实施多维度数据联动机制大幅提升了预警的准确性与可信度。^[1-3]

现场实践成果充分证明，该优化体系是一套技术上行得通、经济上算得过来、管理上见效快的解决方案。它成功地将技术人员从海量、低效的信息筛选工作中解放出来，使其能够聚焦于异常根因分析、处置策略优化等更具价值的活动，从而全面提升了生产管理的精益化水平与应急响应能力。本研究不仅为当前油田数字化深化应用面临的共性挑战提供了经过实践检验的解决思路与可复用的方法论，更重要的是，它清晰地展示了一条通过数据驱动、流程重构与智能化技术渐进式融合来推动传统生产管理模式转型升级的有效路径。

展望未来，随着人工智能、边缘计算、数字孪生等前沿技术的不断成熟与渗透，油水井的生产监控与管理必将迈向一个更加智能、精准、高效的新阶段——一个具备自感知、自诊断、自预测、自决策能力的智慧管理新范式。本项研究在此演进历程中所做的探索与实践，无疑为这一宏伟目标的实现奠定了坚实的基石，并为推动油田企业的高质量发展与数字化转型注入了新的动能。

参考文献

[1] 赵金龙、丁健. 油田智能预警系统设计与应用 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 456-463.

[2] 孙逢亮. 油田机械设备状态监测与故障诊断技术研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (16): 163-165

[3] 马楠, 赵楚丹. 大数据分析在油田生产设备的故障诊断应用 [J]. 信息系统工程, 2023, (08): 44-47

水利工程施工中的土方填筑施工技术

王聪¹, 董元华², 杨靖¹, 徐狄¹, 程健涛¹

1.扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007

2.常熟市水利工程质量监督站, 江苏 常熟 215500

DOI:10.61369/ETQM.2026010018

摘 要 : 为有效提升水利工程土方填筑施工的总体质效, 降低技术应有的盲目性与低效性, 推动土方开挖、填筑、压实等任务有序开展。文章运用系统性思维, 借助文献资料研究等方法, 总结施工经验, 归纳技术规律, 及时调整技术思路, 确立施工原则, 从基底平整、测量放线、土方开挖、土料摊铺、填筑压实等维度出发, 建立完善全流程施工技术体系, 旨在规范施工流程, 提升土方填筑施工质量。

关 键 词 : 水利工程; 土方填筑; 施工技术; 应用路径

Earthwork Filling and Construction Techniques in Water Conservancy Project Construction

Wang Cong¹, Dong Yuanhua², Yang Jing¹, Xu Di¹, Cheng Jiantao¹

1.Yangzhou Survey and Design Institute Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225007

2.Changshu Water Conservancy Project Quality Supervision Station, Changshu, Jiangsu 215500

Abstract : To effectively enhance the overall quality and efficiency of earthwork filling construction in water conservancy projects, reduce the blindness and inefficiency inherent in the technology, and promote the orderly execution of tasks such as earth excavation, filling, and compaction, this article employs a systematic thinking approach and utilizes methods such as literature review to summarize construction experiences, deduce technical patterns, promptly adjust technical strategies, and establish construction principles. Starting from dimensions such as base leveling, surveying and staking out, earth excavation, soil spreading, and filling compaction, a comprehensive full-process construction technology system is established. The aim is to standardize the construction process and improve the quality of earthwork filling construction.

Keywords : water conservancy projects; earthwork filling; construction technology; application path

前言

土方填筑作为水利工程施工体系的重要组成, 是形成工程主体轮廓、保障结构承载能力与防渗性能的关键工序。施工企业应当发挥主观能动性, 立足土方填筑施工的功能定位, 坚持技术导向, 借鉴过往有益经验, 创新技术应用路径, 完善技术应用体系, 有效解决填筑体沉降、防渗性能不足等常见问题, 旨在延长水利工程使用寿命, 降低后期运维成本, 保障堤坝、围堰等作用的充分发挥。

一、水利工程施工中土方填筑施工的主要原则

(一) 遵循“挖填结合”的处理思路

“挖填结合”原则的核心在于打破土方开挖与填筑的割裂状态, 构建工程内部土方资源的循环利用体系, 实现施工效率与资源利用率的双重提升。在具体实践中, 以工程地质勘察报告为依据, 结合 BIM 技术建立土方量可视化模型, 精准计算开挖区域的土方总量、土料类型分布, 以及填筑区域的土方需求总量与分

层需求。通过模型模拟优化开挖与填筑的施工时序, 优先将开挖区域的合格土料直接转运至填筑作业面, 减少土方的临时堆放场地占用与二次转运成本^[1]。例如, 在平原区水库堤坝施工中, 可同步开展堤坝基础开挖与坝体下部填筑作业, 将基础开挖出的合格黏性土直接用于坝体防渗层填筑, 既缩短土料运输距离, 又避免开挖土料长期堆放导致的含水率变化。同时, 建立“开挖-检测-填筑”的闭环管控机制, 对开挖土料的含水率、颗粒级配等指标进行实时检测, 确保其与填筑区域的技术要求匹配, 避免因

土料性质不符引发填筑体质量缺陷。

（二）遵循“就近取料”的处理方式

“就近取料”原则并非单纯追求运输距离最短，而是在综合考量土料质量、开采成本、生态影响的基础上，实现技术经济性与环境友好性的平衡。施工前期，需采用无人机航拍结合实地勘察的方式，对工程周边5-10公里范围内的潜在取料场进行全面排查，重点评估取料场的土料储量、物理力学性能、开采难度及生态恢复可行性。通过建立多目标决策模型，对不同取料场的运输成本、土料处理成本、生态补偿成本进行量化分析，筛选最优取料方案。制定取料场生态保护方案，明确开采边界与开采深度，采用分层开采、及时复绿的方式，减少对周边植被与土壤的破坏，符合水利工程绿色施工的要求。

（三）遵循“分类分层”的处理要求

“分类分层”原则是保障填筑体结构稳定性与功能可靠性的核心，需从“土料分类使用”与“分层有序填筑”两个维度协同推进。在土料分类方面，根据土料的工程特性进行精准分类，将渗透系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 的黏性土用于堤坝防渗体，确保防渗性能^[2]。将级配连续、压实后孔隙率低的砂性土用于坝壳，提升坝体整体稳定性。将强度高、透水性好的碎石土用于填筑体底部或边坡护坡，增强承载能力。同时，建立土料分类存放区，设置隔离设施与标识牌，避免不同类型土料混杂。在分层填筑方面，根据土料类型与压实机械性能确定合理的分层厚度，例如，采用20吨振动压路机压实砂性土时，分层厚度控制在30-40cm。采用18吨静压压路机压实黏性土时，分层厚度控制在25-35cm。每层填筑前需进行高程复核，填筑过程中对土料含水率进行动态调整，通过洒水或晾晒使其处于最优压实含水率区间。

二、水利工程施工中土方填筑施工技术的应用路径

（一）做好基底平整

基底平整需要以“提升基底承载能力、保障填筑体与基底结合紧密”为目标，遵循“检测-处理-平整-压实-验收”的闭环流程开展施工。首先进行基底清理与初检，采用液压反铲挖掘机配合人工清表，清除地表杂草、树根、腐殖土及建筑垃圾，清理深度根据土层性质确定：耕植土区域不小于30cm，杂填土区域延伸至原土层顶面，清表后采用动力触探法检测基底承载力，如果实测值低于设计值10%以上需要启动专项处理方案。对基底软土、淤泥层实施差异化处置，软土厚度0.5-1m时，采用“挖除-换填-压实”工艺，换填材料选用级配碎石与中砂混合料，其中低级配碎石的粒径保持5-40mm，含泥量 $\leq 5\%$ 。与中砂混合料中碎石占比40%-50%，换填深度需要超出软土边缘50cm，且垫层底面宽度按公式 $b' \geq b + 2z \tan \theta$ 计算，其中b为基础宽度，z为垫层厚度， θ 为压力扩散角，中砂垫层 θ 取 30° ，分层虚铺厚度35-40cm，采用22t振动压路机碾压6-8遍，压实度需要达到重型击实标准的94%以上^[3]。软土厚度1-3m时，采用深层搅拌桩加固，桩径500mm，桩间距按正三角形布置，桩长需要穿透软土层进入稳定土层 $\geq 1\text{m}$ ，固化剂选用32.5级普通硅酸盐水泥，掺量

为土重的15%-20%，28天无侧限抗压强度不低于1.2MPa，加固后基底承载力特征值需要 $\geq 150\text{kPa}$ 。基底处理完成后进行平整作业，采用PY180平地机按“由低向高、循序渐进”原则刮平，结合DSZ2水准仪实时监测高程，使基底形成2‰-5‰的排水坡度，坡向临时排水明沟。平整后采用12-15t光面压路机碾压，碾压速度2-3km/h，碾压轨迹重叠1/3轮宽，共碾压3-4遍，碾压完成后检测，压实度 $\geq 90\%$ ，压实度检测过程中，工作人员使用环刀法检测，为保障检测结果的准确性，应当每 100m^2 设1个检测点，利用专业软件做好检测数据的获取、分析以及共享。如果表面平整度偏差 $\leq 50\text{mm}$ ，且基底无积水、无弹簧土现象方可以组织验收。

（二）做好测量放线

测量放线需要构建“基准控制-动态监测-多级复核”的高精度体系，实现设计参数的精准传递。施工前依据《水利工程测量规范》（SL197-2013）建立控制网：平面控制网采用GNSS静态测量，选用TrimbleR12i接收机，按E级网精度布设，相邻控制点间距500-1000m，点位中误差 $\leq 20\text{mm}$ ，基线解算闭合差 $\leq 3\sqrt{n}\text{mm}$ 。高程控制网采用二等水准测量，使用DS05水准仪，水准路线闭合差 $\leq \pm 4\sqrt{L}\text{mm}$ ，水准点间距300-500m，且与平面控制点联测形成三维控制体系。测量放线实施阶段，采用全站仪结合RTK技术（定位精度 $\pm 10\text{mm} + 1\text{ppm}$ ）进行现场放样。填筑区域边界线采用 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 50\text{cm}$ 木桩标记，桩间距20-30m，桩顶钉设钢钉作为点位标志，并用红漆标注设计高程与桩号。分层高程线采用石灰粉撒设，直线段每20m设一处高程校核点，曲线段加密至10m。对于堤坝、围堰等曲面结构，采用“三维建模-加密放样-曲面拟合”技术：先通过BIM软件构建填筑体三维模型，提取曲面特征点坐标，再在现场每隔10-15m布设曲面控制点，采用全站仪采集实际坐标与设计坐标对比，偏差超出30mm时采用二次曲线插值法调整放样点位。施工过程中建立“三级复核”制度，施工班组采用5m塔尺进行初核，重点检查边界线偏差。技术部门采用水准仪与钢尺进行复核，复核频率为每填筑层不少于3次。监理单位采用GNSSRTK进行终核，对关键部位进行100%点位复测。同时引入BIM技术进行测量数据管理，将每次复核数据导入模型生成偏差分析报告，对连续3处偏差超15mm的区域，追溯测量仪器精度与操作流程，确保放线精度满足施工要求。

（三）做好土方开挖

土方开挖需要基于“挖填匹配、质量可控、效率最优”原则，实施“分区段、分层次、分类别”开挖。开挖前结合BIM土方模型进行开挖规划，根据“挖填结合”原则划分3-5个开挖-填筑匹配单元，每个单元面积控制在5000-10000 m^2 ，通过模型计算各单元开挖量与填筑需要量，确保土方平衡偏差 $\leq 5\%$ 。同时开展土料试验，采用重型击实试验确定各土料的最大干密度与最优含水率，如砂性土最优含水率8%-12%，黏性土19%-23%，作为开挖过程质量控制依据。开挖方式按土层性质分级选择，表层松散土采用SD22推土机直接开挖，开挖深度1-2m，推运距离控制在50m以内^[4]。中层密实土采用PC200挖掘机配

合 ZL50 装载机开挖, 挖掘机斗容按土料硬度调整, 硬塑黏土选用 1.5m^3 斗, 中砂选用 2.5m^3 斗, 开挖时预留 20cm 保护层采用人工清理, 避免扰动下卧层。岩石地层采用“控制爆破-机械清渣”工艺, 浅孔爆破炮孔直径 42mm, 孔距 1.5-2m, 排距 1.2-1.5m, 孔深 2-3m, 采用 2# 岩石乳化炸药, 装药量按公式 $Q=qabH$ 计算, 其中 q 为单位炸药消耗量, 取 $0.3-0.5\text{kg}/\text{m}^3$; a 、 b 为孔距与排距; H 为孔深。爆破后采用液压锤破碎大块岩石, 确保粒径 $\leq 100\text{mm}$ 。开挖过程中实施“双控”管理, 在开挖面每 500m^2 设 1 个含水率检测点, 采用酒精燃烧法实时检测, 砂性土含水率低于 8% 时采用雾状洒水补湿, 黏性土高于 23% 时采用铧犁翻松晾晒, 晾晒深度 $\geq 30\text{cm}$, 翻松频率每 2 小时 1 次。沿开挖坡脚设置 $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ 临时明沟, 每隔 50m 设 1 个 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$ 集水井, 采用 $100\text{m}^3/\text{h}$ 潜水泵排水, 确保地下水位低于开挖面 50cm 以上。开挖土料按“合格区-待检区-弃料区”分区堆放, 合格土料直接采用 15t 自卸车转运至填筑作业面, 转运时间控制在 2 小时以内, 避免含水率损失。不合格土料集中堆放至弃料场, 采用浆砌石挡墙防护, 并规划外运至指定填埋点。

(四) 做好土料摊铺

土料摊铺需要以“厚度均匀、含水率适配、接缝密实”为核心, 构建“预控-过程-验收”三级质控体系。摊铺前工作人员要进行参数预控, 根据压实机械性能与土料类型确定摊铺厚度, 振动压路机碾压砂性土时虚铺厚度 35-40cm, 静压压路机碾压黏性土时虚铺厚度 25-30cm, 采用白灰线划分 $500-1000\text{m}^2$ 的摊铺单元, 每个单元设置 4 个厚度控制桩, 桩顶挂设钢丝绳作为高程基准线。同时开展土料含水率调整, 采用烘干法测定进场土料含水率, 与最优含水率偏差 $\pm 2\%$ 以内方可摊铺, 偏差超出时采用“精准补水”或“翻松晾晒”处理, 补水采用洒水车匀速喷洒, 洒水量按公式 $W=\rho V(w_0-w_1)$ 计算, 其中 ρ 为土料密度, V 为摊铺体积, w_0 为最优含水率, w_1 为实测含水率。洒水后静置 2-4 小时确保水分渗透均匀。晾晒采用推土机翻松, 翻松深度 \geq 摊铺厚度, 晾晒时间根据气温调整。摊铺过程采用“梅花形布料+分层刮平”工艺, 自卸车按预设点位卸料, 卸料间距 3-4m 形成梅花形料堆, 采用 SD22 推土机推平, 推土刀倾斜角度调整为 30° , 行走速度 $3-4\text{km}/\text{h}$, 避免土料离析^[6]。推平后采用 PY180 平地机精平, 平整顺序为先中间后边缘, 每次刮平重叠宽度 $\geq 50\text{cm}$, 精平后采用 2m 靠尺检测平整度, 偏差 $\leq 50\text{mm}$ 。接缝处理采用“阶梯

式搭接”技术: 横向接缝处预留 1:3 坡度的阶梯, 阶梯高度等于摊铺厚度, 搭接宽度 $\geq 50\text{cm}$ 。纵向接缝采用两台推土机同步摊铺, 搭接宽度 $\geq 30\text{cm}$, 搭接区域土料含水率需要提高 1%-2%, 确保压实后接缝密实。

(五) 做好填筑压实

填筑压实需要基于“机械适配、参数优化、智能监控”原则, 实现压实质量的精准控制。压实机械选型遵循“土料适配”原则: 砂性土、碎石土选用 20-25t 振动压路机, 振动频率 30-45Hz, 振幅 1.5-2mm, 利用振动能量使土颗粒重新排列密实。黏性土选用 18-20t 静压压路机, 压实压力 200-300kPa, 通过静压力挤出土中孔隙水。软弱土料选用羊足碾, 羊足面积比 15%-20%, 利用揉搓作用增强压实效果。压实作业遵循“三先三后”流程, 先静压后振动、先慢后快、先边缘后中间。初压采用轻型压路机静压 1-2 遍, 速度 $2\text{km}/\text{h}$, 稳定土料表面。复压采用重型压路机振动碾压 3-4 遍, 振动压路机速度 $3\text{km}/\text{h}$, 轮迹重叠 $1/3-1/2$ 轮宽。终压采用轻型压路机静压 1 遍, 速度 $4\text{km}/\text{h}$, 消除轮迹。压实过程引入智能监测系统: 在压路机上安装压实度传感器与 GNSS 定位模块, 实时采集压实度、振动频率、行驶轨迹数据, 通过无线传输至监控平台生成压实质量云图, 当某区域压实度低于设计值时, 系统自动报警并标记补压区域, 补压采用增加 1-2 遍振动碾压的方式处理。压实后质量检测采用“分层检测+重点抽查”模式: 常规检测采用灌砂法, 每 1000m^2 设 3 个检测点, 取样深度为压实层厚度的 $2/3$ 处, 计算干密度与最大干密度的比值即为压实度。关键部位采用核子密度仪法进行抽查, 每 500m^2 设 1 个检测点, 与灌砂法结果对比偏差 $\leq 1\%$ 。检测合格后填写《填筑压实质量检验记录》, 不合格区域需要分析原因, 整改后重新检测, 直至达标方可进行下一层填筑。

三、结语

水利工程土方填筑施工技术的优化与应用, 是提升工程质量、保障工程安全的关键所在。文章通过梳理挖填结合、就近取料、分类分层的基本原则, 从基底平整、测量放线、土方开挖、土料摊铺、填筑压实五个环节构建技术应用路径, 细化了各环节的技术要点与质量管控措施, 形成了全流程、标准化的施工技术体系。

参考文献

- [1] 韩延春. 水利工程施工中土方填筑施工技术分析 [J]. 水上安全, 2025(11): 191-193.
- [2] 武晓毅. 水利工程施工中土方填筑施工技术要点探讨 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(4): 30-33.
- [3] 范广超, 许占军, 郝青青. 水利工程施工中土方填筑施工技术研究 [J]. 微型计算机, 2024(7): 157-159.
- [4] 曹水秀. 水利工程施工中土方填筑施工技术的应用分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(17): 39-42.
- [5] 陈亮. 水利工程施工中土方填筑施工技术研究 [J]. 工程研究与实用, 2024(10): 96-98.

潮汐河水水质变化及影响因素分析

王慧, 王绍聪, 刘英, 张春霞

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013

DOI:10.61369/ETQM.2026010022

摘 要 : 潮汐河段的水质会因海水的定时性侵入而产生大幅改变, 其关键之处在于含盐量的变动情况。文章全面剖析了潮汐河水盐度在时空维度上的变化规则, 涵盖倒灌时期盐度的变化幅度、时间特性以及不同海域之间的差别。研究探寻了盐度起伏给离子合成、营养盐、有机物质以及微生物等水质要素带来影响的原理, 而且考量了由于这种情况而产生的饮用水不安全因素、工业设备被腐蚀现象、污水处理费用增加等问题。最后, 从预警监测、水源调度与工艺强化等方面提出适应性对策, 为潮汐河网地区的水资源安全保障提供理论依据和管理思路。

关 键 词 : 潮汐河水; 水质变化; 含盐量; 海水倒灌; 生产用水; 生活用水

Water Quality Variation and Influencing Factors of Tidal River

Wang Hui, Wang Shaocong, Liu Ying, Zhang Chunxia

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., LTD., Jinan, Shandong 250013

Abstract : The water quality in tidal river sections undergoes significant fluctuations due to periodic seawater intrusion, with salinity variations being the key factor. This study comprehensively analyzes the spatiotemporal patterns of salinity changes in tidal rivers, examining variations in salinity amplitude, temporal characteristics, and regional differences during backflow periods. The research explores how salinity fluctuations affect water quality parameters including ion composition, nutrient levels, organic matter, and microbial communities. It also addresses associated challenges such as drinking water safety risks, industrial equipment corrosion, and increased wastewater treatment costs. Finally, adaptive strategies are proposed from three dimensions: early warning monitoring, water source management, and process optimization, providing theoretical foundations and management approaches for water resource security in tidal river networks.

Keywords : tidal river; water quality change; salinity; seawater backflow; production water; domestic water

引言

潮汐河流位于陆地和海洋之间, 其水文过程和水质特征受海洋潮汐动力强烈约束。海水定时回流是这类水域最突出的特点之一, 造成河水盐度、离子合成以及各种污染物浓度出现复杂规律性的改变。这样的水质动态波动给沿岸地区的供水安全、生态系统健康以及工业生产可持续性带来直接而重大的考验。所以, 深入了解潮汐河水水质, 特别是含盐量的改变规律及其激发机制, 科学考量其对社会经济活动的潜在影响, 并找寻有效的解决办法, 具备重要的理论价值和实际意义。本文力求系统整理有关本质规律, 为相关领域的研究与实践提供清晰框架。

一、潮汐河水含盐量变化特征

(一) 海水倒灌期间含盐量变化范围

海水倒灌直接造成潮汐河水含盐量增大。当潮汐动力很强时, 海水会大量逆流到上游河段, 从而致使河口以及上游河段的水体盐度短期内大幅上升。这种变化幅度很大, 水体盐度可能由

淡水迅速升至接近甚至达到当时海水的盐度。这种变化幅度受上游径流量大小的强烈制约。在枯水季节或者特枯年份, 上游来流对海水的顶托作用减弱, 海水倒灌距离更远, 强度更大, 造成受影响河段盐度峰值更高, 高盐度状态持续时间更长。而在丰水期, 强大的径流可以把盐水压制在河口附近, 致使上游大面积区域的盐度处于较低水平。所以, 倒灌期间含盐量的变化范围属于

动态区间，其上下限由潮汐强度和上游径流共同确定。^[1-3]

（二）含盐量变化周期规律

潮汐河水含盐量的变化具有多时间尺度的周期规律，其中最突出的周期与天文潮汐周期相符，即为日周期和半月周期。在一个太阴日里，涨潮和落潮不断交替，河水盐度就会随之起伏。一般而言，涨潮期间盐度上升，退潮之时盐度下降。从半月时间范围看，朔望大潮期间潮差最大，海水倒灌动力最强，盐度峰值也最高；上下弦小潮期间潮差最小，海水倒灌势力减弱，盐度峰值就会下降。从年际角度来看，含盐量变化存在季节性规律。雨季时流域降水丰富，径流较大，河水盐度一般处于较低水平；旱季时径流缩减，海水倒灌增多，河水盐度明显上升，从而产生一年中的高盐时期。^[4-8]

（三）不同海域倒灌对含盐量的影响差异

不同海域的自然地理及水文特征存在差异，这种差异会直接左右海水倒灌针对潮汐河水含盐量所产生的作用效果。海域自身的盐度背景值属于关键要素。盐度较高的海域，其倒灌进河口的盐水团起始盐度便较高，因而对河水盐度改善的效果更为显著。海域的潮汐特性十分关键。潮差较大的海域，像部分喇叭形河口外的海域，潮汐动力很强，可促使盐水团向内陆河流上游流动很远，影响范围较广。潮差小的海域，海水倒灌的强度和规模一般较小。海底地形以及河口地貌会经由改变潮波形态和能量散发间接决定盐水入侵的方式与强度。因而，处于不同海域环境下的潮汐河水，其盐度变化规律表现出突出的区域性特征。^[9-10]

二、潮汐作用对水质参数的影响

（一）盐度与主要离子变化规律

盐度的改变实质上是水体里主要离子浓度发生改变的一种综合表现形式。海水倒灌的时候会带来高浓度的氯化钠，并且会改变河水原先的离子构成比例，使得河水从碳酸盐型或者碳酸盐-钙镁型朝着氯化物-钠型方向转变。当盐度逐步提升时，氯离子和钠离子就成了占据绝对优势的阴离子和阳离子，其浓度与盐度呈高度正相关。钙、镁、硫酸根、碳酸氢根这些离子的浓度会增多，不过它们在总体离子里所占的比重渐渐靠近海水原本的构成情况。这样的离子构成发生本质上的改变，会影响到水体的化学性质，比如离子强度、渗透压之类的，还会影响水体的物理化学性质以及水生生物的生理机能。

（二）营养盐与有机物浓度响应特征

潮汐作用给营养盐和有机物的输移与转化过程造成复杂影响。海水入侵常常带有来自外海的富集营养盐的水体，这也许会使河口区域氮、磷等营养盐的浓度上升。盐度发生极大改变时，会影响到水体里浮游植物和微生物的群落结构及其活性，进而改变营养盐的摄取、释放以及循环途径。有机物方面，咸淡水交汇引发的絮凝作用也许会促使部分胶体态与溶解性有机物发生沉降，造成局部水域有机物浓度出现变化。而且，盐度梯度会对有机物的降解速率产生影响，还可能引起沉积物里营养盐和有机物的重新释放。这些过程造成了营养盐和有机物浓度对于潮汐作用

的响应表现出非线性特点。

（三）微生物指标与悬浮物变化规律

盐度出现波动时，会对水体里的微生物群落造成很大影响，这包含指示菌和病原菌在内。很多淡水微生物无法适应盐度骤然升高的环境，它们的存活率就会变低。不过，有些源自海洋或者具备耐盐性的微生物也许会渗入到河水当中，从而改变微生物群落的形成及其数量分布情况。咸淡水混合的时候，电解质浓度变大，这会使胶体颗粒表面的电荷被中和，破坏其稳定性，引发絮凝和沉降现象，造成水体浊度在咸淡水锋面附近出现显著改变。这个物理过程另外影响水体透明度，也关联着悬浮物吸附的污染物归宿。

三、水质变化对生活用水的影响

（一）饮用水源氯化物超标风险

潮汐河水是关键的水源地，它的盐度，特别氯离子浓度存在定时性超标情况，这形成主要威胁。当前饮用水水质标准针对氯化物含量设定了限定值。海水倒灌时，水源水中的氯离子浓度会快速增多，如果超过了水厂常规处理工艺所能应对的限度，就有可能引发出厂水氯化物超标。长期饮用氯化物含量过高的水，也许会给人体健康带来潜在不良影响，对于高血压患者这些敏感人群而言更是如此。即便只是短期超标，也必定会突出改变水的感官特性，令使用者感到不适。保障供水安全乃是解决咸潮侵入问题的关键所在。

（二）供水系统腐蚀与消毒副产物变化

高盐度水体对于城镇供水系统的腐蚀性较强，这包含输水管网和蓄水设施。氯离子会破坏金属管道表面的钝化膜，促使铁、钢、铜等管材加快腐蚀速度，有可能造成水中重金属离子（例如铁、锰、铅）浓度增大，从而引发“红水”“黄水”现象。盐度的改变会左右消毒流程。高离子强度有可能影响到像氯这样的消毒剂的消毒效果，还可能导致诸如三卤甲烷之类的有害消毒副产物增多，进而加大饮用水化学层面的安全风险。所以，水厂必要按照原水盐度的波动情况及时对消毒工艺参数作出调整。

（三）终端用水口感与健康影响

对于终端用户来说，河水盐度上升后，饮用水口感变差会是最直观的感受。含氯化钠量较高的水会有明显的咸味或者苦涩味，这会影响到饮用时的舒适度。而且不只存在口感方面的问题，如果长时间用高盐度的水洗澡，也许会对皮肤敏感的人造成刺激。日常烹饪时若使用这种水，也许会改变食物原本的味道。经由饮用水摄取的盐分占总体膳食摄入量的比例往往较低，但对于那些须要严格控制食盐摄入量的特殊群体来说，还是要留意其中可能存在的叠加效果。

四、水质变化对工业生产的影响

（一）高盐度对工业设备的腐蚀效应

工业用水对水质有一定的要求，高盐度给很多工业过程带来

很大威胁。氯离子是一种很强的腐蚀推动剂，可以穿过设备金属表面的保护层，造成电化学腐蚀，大幅缩减锅炉、热交换器、冷却塔、反应釜等重要设备以及输送管道的使用期限。企业若要控制腐蚀现象，则常常需加大缓蚀剂的投放量或者选用更高级的耐腐蚀材料，这会直接提升设备的投资费用和守护成本。而且，腐蚀产物一旦混入产品或者工艺介质当中，也许会影响到产品质量，甚至造成生产出现故障。

（二）冷却水系统与工艺用水水质要求冲突

在电力、化工、冶金等行当中，许多水体被用来达成冷却效果。冷却水对盐度有着严格的限定，如果盐分过大，就会致使结垢现象加重，腐蚀风险提升，进而减小换热效率，极端情况下还会引发管道堵塞。当出现海水倒灌状况时，倘若采用盐度不合格的河水作为冷却水的补充水源，那么整个冷却系统的安全稳定运行将会遭遇重大考验。电子、食品、医药、精密制造这些对水质要求很高的行业，它们的工艺用水常常要经过深度纯化。高盐度的原水会大幅加重预处理单元的负担，明显提升纯化过程的能耗并加快树脂再生的频率，使生产成本急剧上升。

（三）产品品质控制与处理成本增加

水质出现波动会危及工业产品品质的稳定性。以食品饮料业为例，水中有咸味，这会影响产品的风味。纺织印染业中，水中盐分发生改变，可能会致使织物着色不匀。在制造高纯化学品时，如果离子含量过多，就会使产品等级降低。要应对水源水质的波动状况，企业需加大进水检测力度，还要投入更多资金来创建和升级水处理设施，比如安装反渗透或者电渗析之类的脱盐装置。这些举措不仅会提升固定资产投资规模，也造成持续的运行能耗以及化学品消耗，从而引发产品综合成本上涨，影响到其市场竞争力。

五、水质管理与适应性对策

（一）咸潮预警监测体系构建要点

创建高效又可靠的咸潮警报监测体系，这是积极应对的前提所在。此体系需包含针对上游径流量、河口潮位以及重点断面盐度这些关键指标的即时在线监测网络。通过水文模型并结合数据同化技术，达成对海水入侵强度、距离及其持续时长的动态预测目标。警报信息要尽快传达给水务部门、有关企业以及公众，从

而为执行避咸、蓄淡举措赢得珍贵的时间。需巩固流域内水文、环保、气象、海洋等部门之间的资料共享及协作交流，以改进警报的精准度与时效性。

（二）多水源调度与蓄水避咸措施

减轻咸潮影响的关键在于水资源的改良调度。咸潮高发之前，依靠水库等水利工程蓄存多余水量填补枯水期，维持河道一定生态基流，用径流动力抑制盐水逆流而上。执行区域多水源联合调度，在咸潮时期及时加大地下水、水库水等其他水源的供水量，缩减对受损河段的用水量。在河道两岸创建避咸蓄淡水库，当河水盐度低的时候抓紧时间储存优质的淡水，等到咸潮来袭时开启闸门放水，以此来满足区域的供水需求。改良取水口的分布状况并调整取水的时间，这些都是行之有效的工程措施。

（三）水处理工艺抗盐强化方向

对于那些只能采用潮汐河水作水源的水厂以及工业企业来说，要改良其水处理工艺以增强抵抗盐类冲击负荷的能力。就饮用水处理而言，可以加强传统工艺，亦或是采用膜处理技术（纳滤、反渗透等）来执行深度除盐，不过应当协调好处理成本与出水水质之间的关系。

工业水处理需按照用水水质要求选取恰当的除盐技术，离子交换、电除盐等均为可选技术。开发并应用效率更高、耐盐性能更强的缓蚀剂、阻垢剂同样十分关键。工艺改进旨在形成一道技术壁垒，使得即便水源水质出现波动，也能持续产出符合标准的用水。

六、结语

潮汐河水水质处于动态变化之中，其中含盐量存在周期性波动，这属于自然水文过程和社会人类活动相互交织的复杂问题。海水倒灌会改变水体主要的物理化学特性，而且还会左右供水安全、工业生产成本等情况，为临岸区域的经济社会发展造成悠远影响。要想有效地解决这个问题，就要深入领会其中蕴含的规律，采用监测警报、资源调配以及工艺改良等多种综合性的管理策略。未来，随着气候变化和海平面上升可能带来的潜在影响，加强相关研究，提升应对能力，对于保障潮汐河网地区水资源的可持续利用显得愈发重要。

参考文献

[1] 黄文平. 潮汐—连续垂直流湿地对高污染河水的净化特性研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2017.
[2] 王林林. 潮汐对黄河三角洲感潮河段水质影响机理研究 [D]. 山东师范大学, 2024.
[3] 苏芬芬, 梁紫湾, 陶益. 深圳龙岗沙湾河水污染特征及水质评价 [J]. 广州化工, 2024, 52(12): 107–113.
[4] 刘传咏, 柴一荻, 徐亮根, 等. 南方某河水质荧光指纹特征及污染溯源 [J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(07): 2142–2147.
[5] 柴宁馨. 汾河流域河水污染的地球化学示踪 [D]. 长安大学, 2021.
[6] 赵金香, 于志强. 潮河水系水质污染特征分析与防治对策 [J]. 水利技术监督, 2019, (05): 115–117.
[7] 云晋, 宋凤芝, 范宇成, 等. 山区城市内河水水质变化与污染源分析 [J]. 乡村科技, 2019, (14): 105–106.
[8] 邱志伟. 基于“三位一体”的大凌河水生态修复技术体系研究 [J]. 水土保持应用技术, 2025, (03): 25–27.
[9] 黎广. 联盟河流域水质提升及水生态修复策略研究 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(08): 198–200.
[10] 张巨星. 农村污染河道生态修复措施 [J]. 农村经济与科技, 2024, 35(08): 65–67+82.

温度计量测试中热电偶测量精度影响因素分析及改进

吕红贵

四川衡准检测技术有限公司, 四川 成都 610101

DOI:10.61369/ETQM.2026010026

摘 要： 温度计是一种可广泛应用在工业、医疗、科研等领域的测量温度的仪器，但在不同的领域，温度计所测量的范围也不一样，在航天、冶炼金属等涉及 1000℃ 以上环境，需要热电偶、辐射温度计等专用高温温度计，为了精确实验测量精度，将此次实验分为三个挡位，高温档（500℃ 以上）中温档（100–500℃）低温档（100℃ 以下），同时，避免热平衡的变化，使实验测量准确，良好的响应特性所以在测量中热电偶不接触被测物。本次实验将测温系统与单片机予以融合，实现智能化测量，目标是打造一套把热电偶用作温度传感器的测温系统，在 STM32L476 芯片的调控作用下，该温度计借助 DS18B20 温度传感器开展实时温度检测与显示工作，能够实现对环境温度的快速测量。

关 键 词： 单片机；热电偶；温度测量系统

Analysis and Improvement of Factors Affecting Thermocouple Measurement Accuracy in Temperature Measurement Testing

Lv Honggui

Sichuan Hengzhun Testing Technology Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610101

Abstract： A thermometer is an instrument that can be widely used in industrial, medical, scientific research and other fields to measure temperature. However, the range of temperature measured by a thermometer varies in different fields. In aerospace, metal smelting and other environments involving temperatures above 1000℃, specialized high-temperature thermometers such as thermocouples and radiation thermometers are required. In order to achieve precise experimental measurement accuracy, this experiment is divided into three stages: high temperature stage (above 500℃), medium temperature stage (100–500℃), and low temperature stage (below 100℃). At the same time, to avoid changes in thermal balance, the experimental measurement is accurate and has good response characteristics. Therefore, thermocouples do not contact the measured object during measurement. In this experiment, the temperature measurement system will be integrated with a microcontroller to achieve intelligent measurement. The goal is to create a temperature measurement system that uses thermocouples as temperature sensors. Under the control of the STM32L476 chip, the thermometer uses the DS18B20 temperature sensor to perform real-time temperature detection and display, enabling rapid measurement of environmental temperature.

Keywords： microcontroller; thermocouple; temperature measurement system

一、温度计量测试中热电偶的测量精度影响因素分析与改进方案

（一）影响因素分析

1. 热电偶种类影响

热电偶作为温度测量的“核心感应元件”，其材质纯度、结构完整性直接决定测量基准的可靠性，是最根本的影响因素。热电偶的热电势（测温核心信号）由两种金属的“热电特性差”决定，若材质含杂质（如镍铬合金中混入铁、碳），会改变热电势–温度对应关系，导致与标准分度号（如 K 型、S 型）偏差。

2. 配套组件的影响

分度号不匹配：补偿导线需与热电偶分度号完全一致（如 K 型热电偶配 K 型补偿导线），若错用（如 K 型配 E 型），会因热

电特性差异产生“附加热电势”。例如：20℃ 环境下，K 型错配 E 型补偿导线，每米导线会引入 $\pm 3^\circ\text{C}$ 误差。

材质杂质与线径：劣质补偿导线含杂质多，或线径过细（导致电阻过大），会在信号传输中产生电压损耗；若导线屏蔽层破损，还可能受外界电磁干扰（如工业电机、变频器），导致读数波动。

敷设方式不当：补偿导线若与动力电缆并行敷设（距离 $< 10\text{cm}$ ），会被电磁感应干扰；若敷设路径存在较大温度梯度（如从高温车间穿到低温控制室），导线自身产生的热电势会叠加到测量信号中。

热电偶的热电势仅与“热端温度（ T ）–冷端温度（ T_0 ）”的差值相关，需通过冷端处理保证 T_0 稳定（理想状态 $T_0=0^\circ\text{C}$ ），常见问题包括：

冷端温度波动：若冷端暴露在室温变化的环境中（如靠近空调出风口、热源）， T_0 随室温波动（如 $10^{\circ}\text{C}\rightarrow 25^{\circ}\text{C}$ ），会直接导致测量误差（ T 测量值=实际 $T-\Delta T_0$ ， $\Delta T_0=25-10=15^{\circ}\text{C}$ 时，误差即达 15°C ）。

冷端补偿器失效：自动冷端补偿器（如半导体补偿模块）若未校准、或超出补偿范围（如标注补偿范围 $0\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，实际冷端达 60°C ），会导致补偿值偏差；手动补偿（如冰浴法）若冰块融化、冰水混合物温度高于 0°C ，也会引入误差。

多支热电偶共用冷端：多支热电偶共用一个冷端补偿装置时，若某一支热电偶断线或短路，可能导致整个冷端补偿电路异常，影响所有热电偶的读数。

3. 外部环境因素

测量环境的温度、电磁、气氛等条件，会通过“干扰信号”或“腐蚀热电偶”间接影响测量准确性。

环境温度梯度与热辐射：若热电偶探头周围存在局部高温热源（如邻近的加热管），即使热端未直接接触，也会通过热辐射使测量端温度升高，导致读数偏高（如实际介质温度 100°C ，辐射影响下读数达 105°C ）。

环境气流速度过快（如强冷风直吹热电偶），会加速测量端的热量散失，尤其在低温测量（如 -50°C ）时，易导致读数偏低。

电磁干扰：工业现场的变频器、高压电机、电焊机等设备会产生强电磁辐射，若热电偶未采用屏蔽补偿导线、或屏蔽层未单端接地，电磁信号会耦合到热电势中，导致读数波动（如正常读数 100°C ，波动范围 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ）。

介质气氛影响：热电偶在腐蚀性气氛中（如含硫、含氯的高温气体）会被腐蚀，例如：K型热电偶（镍铬-镍硅）在含硫气氛中，镍会与硫反应生成NiS，破坏热电特性；还原气氛（如氢气环境）会导致某些热电偶（如S型，铂铑-铂）的铂被还原，纯度下降，热电势漂移。

（二）热电偶改进方案

热电偶能够测量高温且成本较为低廉，因此备受青睐，本次实验在温度计量测试领域展开，目的是探究于氧化以及中性气体环境里，热电偶的偶丝直径和其测温范围之间是否存在关联。同时，为保障有效热电偶不受损害，所以外部环境在还原气氛中密封保护管进行实验。

在对温度计量测试中，通常要考虑其使用温度范围和允许误差，基于此，可将热电偶的精度进行划分，如表2-2：

表2-2 温度计量测试中热电偶等级表

等级	允许误差	使用温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)
I	$\pm 1.6^{\circ}\text{C}$	$0\sim 400$
	$\pm 0.4\%t$	$400\sim 1100$
II	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	$0\sim 400$
	$\pm 0.75t$	$400\sim 1300$

实验前提醒明确热电效应在热电偶测温电偶丝实验中具体处理方法：使得冷端温度和热端温度存在温度差（冷端不做处理然后对热电偶的热短进行加热），在热电偶的回路中产生热电势。

当金属A与材质不同金属B而相互接触时，在二者的接触区域会出现电子扩散情况，从而产生接触电势，其电势的定义公式如下：

$$e_{AB}(T) = \frac{k_0 T}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

式中： $1.6 \times 10^{-10}\text{C}$ ， k_0 其具体数值为 $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ；。

式中： T 表示绝对温度，电子所带电荷量用 e 来代表，它的数值是 $1.6 \times 10^{-10}\text{C}$ ；金属材料A和B中的自由电子密度分别由 n_A 与 n_B 来表示；玻尔兹曼常数是 k_0 为玻尔兹曼常数 $k_0=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 。^[1-4]

在对其中某一种金属开展加热操作之际，两种金属之间就会产生温度差异。在这样的情形当中会致使二者两端自由电子的浓度呈现出差别，从而产生温差电势，下面是该电势的定义：

$$e_A(T_0, T_1) = U_{t_0} - U_{t_1}$$

在实际情况当中，然而同一种金属所产生的温差电势极其微小所以是能够忽略的。倘若将金属A的两端同时放置到高温与低温这两种温度不同的环境里，并且要满足 $T_0 > T_1$ 的条件，那么热电偶的闭合回路电势 $E_{AB}(T_0, T_1)$ 可以表示为：

$$E_{AB}(T_0, T_1) = e_{AB}(T_0) - e_{AB}(T_1) = \frac{K}{e}(T_0 - T_1) \ln \frac{n_A}{n_B}$$

以冷端温度当作参照基准的情况下，该公式表达的是金属AB热端对应的温度数值，在测温实验开展的时候要保证把冷端温度始终恒定，保持在 0°C 以此来确保实验具备精确性。所以需要通过 $E_{AB}(T_0, 0)$ ， T_0 和 $E_{AB}(T_0, T_1)$ 求出，这就是冷端温度补偿的过程。^[5-8]

此次实验在多样的冷端补偿手段里，选取了物理途径中的冰点补偿法：将冷端补偿导线的末端放置到 0°C 的冰水混合物恒温装置当中，通过这样的方式来消除冷端温度所产生的误差。

静态校准过程如下：1.将热电偶量程以固定间距均匀划分成 n 个点位，依据经过等分处理之后的标准量，依照由小至大的顺序逐个输入，3.操作方式与步骤2完全相同，不过需按照从大到小的顺序逐个输入。重复步骤2与步骤3并记录对应的测试结果。^[9]

（三）总体方案

1. 设计需求

基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统的指标、主要功能如下：

（1）对多处环境温度实施测量采用的是温度计，以及热电偶式温度传感器。

（2）测量范围涵盖三个温区：高温档 500°C 以上，中温档 $100\sim 500^{\circ}\text{C}$ 之间，低温档低于 100°C ，其精确度能够达到 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

（3）利用LCD液晶显示记录实际的测量温度值。

（4）设置自主告警极限温度。

（5）当温度超过上、下限报警温度后，自动发出声光报警。

2. 设计需求

本次温度计量测试中热电偶的温度测量系统实验设计主要针对高温物体的温度测量，具体测量温度分为三个档位，测量前先预估待测物体的温度并选择合适的档位测量以提升测量的准确度和精确度。基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统的总体设计方案。

（四）功能介绍

在非接触式温度的计量测试当中，热电偶温度传感器被测温系统选用，主要依托于单片机STM32L476来实现的是测控系统所具备的数据采集处理、显示以及报警等功能。

选用构建更为简洁且反应迅捷的温控系统，旨在数字温度传

感器,便于单片机开展精准控制以及高效处理的是其输出信号彻底数字化。此举省去了采样运放还有长距离传输时所需的串/并转换电路以及数/模转换,极大缩短了系统运行时间,简化了电路结构同时降低了硬件成本。为测温系统的应用提供有力支持的该传感器,能够快速测量环境温度,进行实时温度的检测并显示。

二、温度计量测试中热电偶的温度测量系统硬件设计

(一) 核心控制系统设计

STM32L476Gxx 器件集成 QuadSPI 闪存接口和高速嵌入式存储器(有128KBSRAM与1MB闪存),以及灵活的外接存储控制器(FSMC)并配备多种增强型 I/O 端口和外设模块。其总线架构含有2条 AHB总线和2条 APB总线,借助32位多 AHB总线矩阵达成互联。

针对嵌入式闪存与 SRAM,STM32L476Gxx 器件集成了多种保护机制,其中包括读保护、写保护、专有代码读保护以及防火墙功能。该器件配备四个数字滤波器并支持外部 SigmaDelta 调制器(DFSDM),集成12路 ADC(采样率达5Msps),内置三种类型的闪存设备且配备两个运算放大器、两个比较器以及两条 DAC 通道。定时器资源涵盖两个32位通用定时器和两个低功耗16位定时器,支持低功耗模式的 RTC和七个16位通用定时器,以及两个专用16位 PWM电机控制定时器。此外24个电容感测通道由器件提供内置转换器,且支持内部配置,集成了同时8×40规格或4×44规格的 LCD驱动器。

(二) 温度采集系统设计

在温度计量测试中,热电偶传感器的选择直接决定了测量结果的可靠性和精度,所以为了确保系统的稳定运行,本次设计需根据具体应用场景选择合适的热电偶类型。

例如,在高温环境下,通常选用具有较高的耐温能力和良好的抗氧化性能的 S型或 B型热电偶;而在低温环境中,选用灵敏度高且成本较低的 K型热电偶则更为适用,为了减少外部环境对测量信号的干扰,热电偶的安装方式也需要结合实际工况进行优化。

(三) LCD显示系统设计

具备高亮度显示优势的是 LED数据显示终端,不过每只数码管仅能呈现单一字符这使得引脚数量众多接线过程也十分繁琐。而且在字符信息量增多的情况下,要针对不同信息设计各异的字符,此外若所显示字符代表的信息与功能没有明确说明,观察者将难以理解这无疑给使用者带来了不便。

液晶显示器件种类很多,例如:HG1286401C 显示器具备直接显示阿拉伯数字字符以及汉字的能力,它使用起来十分便捷,显示结果直观可视,我们选定 LCD1602作为显示电路方案正是鉴于此。不仅具备背光功能以及字符对比度调节等优势,1602型液晶显示模块还可显示丰富字符。

三、基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统软件设计分析

(一) 主程序流程

在设计基于温度计量测试的热电偶温度测量系统时,系统会

检测四路信息,并把它们传送到 STM32L476里,随后对系统预设温度进行设置借助四个中断服务程序来完成,每当触发中断的时候,预设温度值要么增1要么减1。待测对象的实时温度会被系统拿来与预设报警温度做比对,然后根据比对所得结果来采取对应的措施:若 LCD显示正常,则无需进一步操作;声光报警会在未显示的情况下触发,方便工作人员及时处理。

(二) 温度采集流程

本设计搭建起一个温度测定系统,此系统以多通道模数转换器为基础,它借助采集多个位置的温度数据,并且针对各个点的温度开展积分运算来进行数据处理,最终达成对真实温度值的精确确定与精准控制。

在软件项目开展实施期间运用中断机制,达成数据的存储以及处理,具体来讲一旦输出电平发生变动,这就意味着数据转换流程已然顺利结束而且中断技术已成功应用在微控制器当中。

(三) 显示程序流程

程序设计过程中,对所设温度值与当前温度值借助 LCD进行控制显示,这样我们就能够直观观测到设定温度以及当前温度,此程序部分的目的是达成当前温度值的展示,重点是合理设定液晶显示器的初始化命令,使显示器能够显示我们想要的效果。

四、温度计量测试中热电偶的温度测量系统改进结果分析

(一) 软件仿真

开展仿真研究于 MATLAB软件平台,以验证基于温度计量测试的热电偶温度测量系统的可行性,在对该系统测量精度展开验证的进程里,能够实时测定处于被加热状态的工件在任意时刻的温度数值,并且依据这些数值开展误差计算工作。在热处理过程里此方法对温度测量以及控制的优化颇有帮助,能够让控制精度得到提升同时使系统自动化水平得以提高。

(二) 仿真环境

在一个操作便捷的独立窗口界面下,MATLAB集成了跨科学领域的多种算法功能,涵盖建模仿真及图形展示等其名源自“矩阵实验室”。科研与工程设计的各个领域,都全面渗透着它广泛的应用范畴,在电子生物通信及金融等行业占据举足轻重地位的主要应用领域包含工程计算,嵌入式与控制系统信号检测以及图像处理与分析等。新型试剂盒能配置编程所需的基础程序,而 MATLAB操作简便无需编写基础程序,其工具箱丰富,覆盖三十余个科学领域。允许用户根据个人需求进行必要修改,所有工具箱的函数源程序均公开,用户可通过编程进行仿真分析。

(三) 工作流程

在热电偶的测温系统平台所处的温度计量测试领域里,其工作流程包含两种模式:系统平台能够执行处理操作其一是手动输入图像,自动随即处理显示相应结果从而获取对应的温度值以及误差数据。

系统平台在第二种自动模式里会预先将定时器时长设定好,进而自行开展图像存储与采集操作,随即实时计算温度及误差,待图像自动处理完毕后将相关数据同步显示。

(四) 仿真结果

在温度计量测试领域,借助热电偶构建的温度测量系统平

台,关于其计算得出的温度值和标定温度的统计结果具体情况在 表1中呈现。

表1 计算温度值与标定温度统计结果

标定温度 /℃	高温档			中温档			低温档		
	500	600	800	450	300	200	80	50	30
计算温度	500.1	600.4	800.7	499.6	300.2	200.1	80.1	49.8	29.8
计算误差	+0.1	+0.4	+0.7	-0.4	+0.2	+0.1	+0.1	-0.2	-0.2

在表1里呈现出高、中、低三个温度档位的情况下,计算误差全都没有超过3.5%能够满足工业应用的需求,此外对实时温度计算算法予以优化,同时增加标定温度样本数量可进一步减小误差。

对最近十次记录的温度值与标定温度值在热电偶温度测量系统(该系统应用于温度计量测试领域)中展开对比分析,相关结果展示于图1。

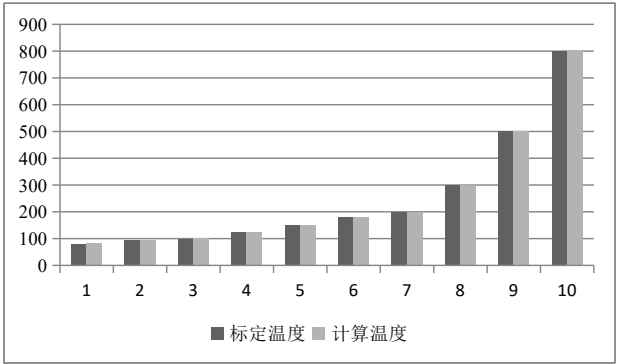


图1 近十次的温度值与标定温度值比较结果

在温度计量测试领域经于仿真平台开展对比分析,从图1能够看到基于热电偶构建的温度测量系统,该系统测得的温度值和标定温度值之间误差较小,基本上能够实现对温度的有效测量。

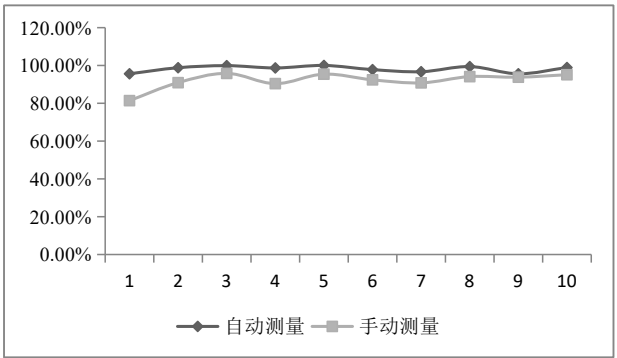


图2 基于温度计量测试中热电偶的温度测量系统中近十次温度检测结果的准确率

把最近十次检测获取的基于温度计量测试的热电偶温度测量系统的温度准确率,同手工温度检测的准确率予以对比,具体对比结果在图2中详细呈现。

在图2展示的实验结果里能清楚看到,本设计所基于的温度计量测试中的热电偶温度测量系统于整体检测准确率方面有着出色表现,精度达到了较高的水平。在实际工业应用以及科学研究里,该系统呈现出良好的稳定性与可靠性,具备显著的实际应用潜力与推广意义故而如此。

五、结论

本次实验以采用热电偶作为温度传感器的温度测量系统作为设计对象,着重于温度计量测试领域,全面深入探究温度测量数据采集过程,广泛查阅国内外海量关于采集设备的文献资料。根据测温系统具体的设计要求,将温度采集的总体设计方案进行精心拟定,为确保系统拥有高精度与高可靠性这一设计目标,选用热电偶进行温度采集。此热电偶需具备优良线性度,强大稳定性高测温精度同时热电动势大测温范围广,在完成温度采集模块通信方式以及显示装置的设计工作中,测温系统综合运用了多方面知识,涵盖传感器技术单片机技术LCD显示技术以及数字电子技术等。

此次实验把STM32L476单片机选作测温系统的核心部件,在温度计量测试环节里借助ADS1248针对热电偶产生的电动势开展采样工作。同时将信息采集传输存储处理以及单片机通信技术进行有效整合,以此实现对温度的实时监测判断被测场所的温度是否处于适宜范围。整套系统复杂且实用的功能鉴于单片机对数字信号具有的高度敏感性,良好可控性以及温度传感器所具备的高准确性得以通过简易软件编程达成。该测温系统更易于契合实际应用需求,具备功能完备电路简洁应用便捷的特点。

参考文献

[1]孙岩.光纤荧光接触式测温系统研究及实现[J].电气技术,2018,19(02):49-53.
[2]余国卫.基于单片机的温度计量测试中热电偶测温系统[J].电脑知识与技术,2017,13(24):206-207.
[3]李竹青.运动目标表面温度非接触在线自动测量系统的研究[D].河北科技大学,2016.
[4]李峰,王贵锋.非接触式红外数字测温系统的设计与实现[J].自动化与仪器仪表,2016(08):188-189.
[5]明军.接触网线夹非接触测温系统研究[D].石家庄铁道大学,2016.
[6]胡家骏.红外非接触测温系统设计与实现[D].黑龙江大学,2016.
[7]张玲娜,李想.基于MLX90615传感器的人体非接触式红外测温系统设计[J].电子测试,2014(S1):19-21.
[8]龚恒.碳素钢热处理温度非接触式测量系统研究[D].西南大学,2014.
[9]王锦,门长贵.煤气化炉炉壁温度计量测试中热电偶测温技术[J].化工自动化及仪表,2014,41(04):349-351+376.

核电站实物保护系统网络安全体系构建研究

潘航, 王鼎业

国核示范电站有限责任公司, 山东 荣成 264300

DOI:10.61369/ETQM.2026010027

摘 要 : 随着工业互联网与信息技术的深度融合, 核电站实物保护系统的网络安全已成为关乎国家能源安全与公共安全的核心议题。本文系统分析了当前核电站实物保护系统在设备、人员与系统配置等方面所面临的网络安全挑战, 提出从设备安全加固、人员管理策略和系统配置防御三个层面构建综合防护体系。具体措施包括采用安全认证设备、实施全生命周期设备管理、强化物理安全措施; 开展体系化网络安全教育、实行基于最小权限的访问控制、建立常态化审计机制; 推进网络隔离与分段、强化多因素认证与通信加密、实施系统化漏洞与补丁管理等。

关 键 词 : 核电站; 实物保护系统; 网络安全; 纵深防御; 访问控制; 安全审计

Research on the Construction of Cybersecurity Architecture for the Physical Protection System in Nuclear Power Plants

Pan Hang, Wang Dingye

State Nuclear Power Demonstration Plant Company Ltd., Rongcheng, Shandong 264300

Abstract : With the deep integration of industrial internet and information technology, cybersecurity in nuclear power plant physical protection systems has become a critical issue concerning national energy security and public safety. This paper systematically analyzes the current cybersecurity challenges faced by nuclear power plant physical protection systems in terms of equipment, personnel, and system configuration, proposing a comprehensive protection framework from three dimensions: equipment security reinforcement, personnel management strategies, and system configuration defense. Specific measures include adopting security-certified devices, implementing lifecycle management of equipment, and strengthening physical security measures; conducting systematic cybersecurity education, enforcing access control based on least privilege, and establishing regular audit mechanisms; promoting network isolation and segmentation, enhancing multi-factor authentication and communication encryption, and implementing systematic vulnerability and patch management.

Keywords : nuclear power plant; physical protection system; network security; defense in depth; access control; security audit

引言

核电站作为国家能源战略的重要支柱, 其安全性具有极高的公共性与政治敏感性。实物保护系统是保障核材料与核设施免遭盗窃、破坏与非法转移的核心技术手段。然而, 在数字化、网络化转型的浪潮下, 传统的、相对封闭的实物保护系统正日益与工业控制网络、管理信息系统集成, 这在提升运营效率的同时, 也使其暴露在更为复杂的网络攻击威胁之下。从震网(Stuxnet)病毒到针对关键基础设施的勒索软件攻击, 历史事件一再警示我们, 网络安全已成为实物保护系统不可分割的组成部分。近年来, 随着5G、物联网等新技术在核电站的广泛应用, 系统互联程度不断提高, 网络攻击面持续扩大, 使得实物保护系统面临的安全形势更加严峻。本文旨在超越泛泛而谈的安全原则, 从设备、人员、配置三个实操层面入手, 构建一个多层次、可落地的网络安全加固框架, 以应对日益严峻的混合型安全威胁。

一、设备层面的安全加固: 构筑硬件基石

设备是实物保护系统的物理载体, 其安全性是整个体系的基石。在数字化、智能化转型的背景下, 设备安全不仅包括传统的

物理防护, 更需要关注其作为网络节点的安全性^[1]。

(一) 采用经过安全认证的专用设备

在设备选型阶段, 应优先采购符合国家等级保护制度与行业安全规范(如IEEE 802.1X, IEC 62443)的产品。对于核心组件

（如门禁主控制器、交换机、服务器、网络安全设备等），应选用经过严格渗透测试与可靠性认证的工业级产品，从源头降低因设备固有漏洞导致的安全风险^[2]。具体而言，门禁主控制系统应采用通过国家安全认证的专用设备，具备防拆解、防篡改等物理防护特性。视频监控设备应选用具备加密传输、完整性校验等功能的产品，防止视频数据被窃取或篡改。周界入侵检测设备应具备抗干扰、防欺骗能力，确保报警信息的真实性和可靠性。此外，所有设备在投入使用前，都应经过严格的安全测试，包括但不限于渗透测试、漏洞扫描、性能测试等，确保设备在各种工况下都能稳定可靠运行^[3]。

（二）实施全生命周期的设备安全管理

设备安全并非一劳永逸。应建立设备资产清单与安全档案，对每一台入网设备进行登记。定期（如每季度）执行安全扫描与健康状态评估，及时更新设备固件与嵌入式操作系统补丁。对于到达生命周期末期（End-of-Life）且无法获得安全更新的设备，必须制定严格的隔离或替换计划。在设备运行维护阶段，要建立完善的运维管理制度，包括定期巡检、预防性维修、标准故障处理等流程。对于关键设备，还应建立冗余备份机制，确保单点故障不会影响系统整体运行。设备退役时，要严格执行数据销毁流程，确保存储的敏感信息得到彻底清除。同时，要建立设备供应链安全管理机制，对设备供应商进行安全评估，确保设备从源头上就是可信的^[4]。

（三）强化配套的物理安全措施

网络安全需以物理安全为前提。部署实物保护系统的网络设备、服务器机柜及通信线路应置于受控区域，通过视频监控、生物识别门禁、防篡改机箱等措施，防止未经授权的物理接触。关键网络节点应考虑采用光纤通信以增强抗电磁干扰与窃听能力^[5]。具体而言，服务器机房应按照最高安全等级进行建设，配备门禁系统、视频监控、入侵报警等多重防护措施。网络设备间要实行严格的出入管理，所有进出记录都要完整保存。室外设备箱要采用防破坏设计，并设置周界报警装置。对于重要的网络线路，要采用管道敷设、桥架封闭等物理防护措施，防止线路被搭接或破坏。此外，还要定期对物理安全设施进行检查测试，确保其始终处于良好工作状态^[6]。

二、人员管理的安全策略：管控人为风险

人是网络安全中最活跃的因素，也是最薄弱的环节。统计数据显示，超过70%的安全事件都与人为因素有关。因此，建立完善的人员安全管理体系至关重要。

（一）开展体系化的网络安全意识教育

定期举办针对所有员工的网络安全培训，内容应覆盖社会工程学攻击（如钓鱼邮件）、密码安全、数据保护法规等。培训不应流于形式，可通过模拟钓鱼攻击、红蓝对抗演练等方式检验培训效果，并将结果纳入绩效考核。培训计划应当系统化、常态化，新员工入职必须接受基础网络安全培训，在职员工每年至少参加一次复训⁷。对于不同岗位的员工，培训内容应有所侧重。例

如，系统管理员需要深入理解系统安全配置和漏洞管理，而普通员工则更需要掌握基本的安全操作规范。此外，还要通过海报、内部网站、定期通报等多种形式，持续强化员工的安全意识，使网络安全成为企业文化的重要组成部分。

（二）实行基于最小权限原则的访问控制

必须建立并严格执行基于角色的访问控制（RBAC）模型。确保员工只能访问其职责所必需的系统资源和数据。对特权账户（如系统管理员）的管理应尤为审慎，推行“双人原则”和操作日志审查，防止权限滥用。访问权限的分配应当遵循“按需知密”原则，根据岗位职责和工作需求动态调整。对于敏感操作，如系统配置变更、核心数据访问等，要实施多级审批和操作留痕。特权账户要实行严格管理，包括定期更换密码、限制使用范围、监控使用行为等^[8]。对于第三方人员访问，要建立专门的管理制度，通过临时账户、行为审计等措施，确保其访问行为可控可溯^[9]。

（三）建立常态化安全审计与问责机制

部署安全信息与事件管理（SIEM）系统，对全网的登录行为、配置变更、数据访问等操作进行集中日志采集与分析。审计记录应妥善保存不少于6个月，以便在发生安全事件时进行追溯与取证，并形成明确的责任认定。审计内容应当全面覆盖网络设备、安全设备、服务器、应用系统等各个环节^[10]。对于关键系统和数据，要实施更加细致的审计策略，记录完整的操作轨迹。审计分析要智能化、自动化，通过建立异常行为模型，及时发现可疑操作。审计结果要定期向管理层报告，重大安全事件要立即上报。同时，要建立完善的责任追究制度，对违规操作要严肃处理，形成有效的震慑力^[11]。

三、系统配置的纵深防御：构建技术屏障

科学合理的系统配置是抵御网络攻击的最后一道技术防线。在系统层面实施纵深防御策略，可以最大限度地提高攻击者的入侵成本，有效保护核心资产安全。

（一）实施严格的网络隔离与分段

遵循“纵深防御”理念，通过部署防火墙、网闸等设备，将实物保护系统网络与办公网、互联网进行逻辑或物理隔离。在实物保护系统内部，进一步根据安全等级进行VLAN划分或微隔离，将门禁、周界报警、视频监控等子系统分隔开来，即使某一区域被突破，也能有效遏制攻击横向移动。网络隔离策略应当细化到功能模块级别，例如，将管理平面、控制平面和数据平面进行分离。对于特别敏感的系统，如门禁控制服务器，可以考虑采用物理隔离措施。同时，要严格控制网络跨区访问，只有经过严格审批的业务流量才允许穿越安全区域边界。所有跨区访问都要经过防火墙等安全设备的检查，并记录完整的访问日志^[12]。

（二）强化多因素认证与通信加密

在所有关键系统的访问入口（如管理后台、远程维护通道）强制实施多因素认证（MFA），结合密码与动态令牌、生物特征等因素。系统内部各组件之间的数据传输，必须采用国密算法或AES等高强度加密协议，防止数据在传输过程中被窃取或篡改。

认证机制要依据系统的重要程度设置不同的安全等级，对于核心系统的管理员登录，应当采用硬件令牌或生物特征等更高安全等级的认证方式。通信加密要覆盖所有网络层次，包括网络层的 IPsec VPN、传输层的 TLS/SSL 以及应用层的报文加密。加密密钥要实行严格的生命周期管理，定期更换并安全存储。对于无线通信，要采用 WPA3 等最新安全协议，防止无线信号被窃听或干扰。

（三）推行系统化的漏洞与补丁管理

建立漏洞预警与响应机制，主动跟踪国家漏洞库（CNNVD）及设备厂商发布的安全公告。对补丁安装前需在测试环境中进行充分验证，以确保其与现有系统的兼容性。对于无法立即打补丁的漏洞，应制定并实施临时性的缓解措施。漏洞管理应当形成完整闭环，包括漏洞发现、评估、处置、验证等环节。要定期开展系统性的漏洞扫描和渗透测试，重点检查对外服务端口、Web 应用、数据库等常见攻击面^[14]。补丁管理要分级分类，根据漏洞的危害程度和影响范围，制定不同的修复时限。对于生产环境中的关键系统，补丁安装要选择业务低峰期，并做好完整的系统备份和回退预案。同时，要建立漏洞信息共享机制，及时获取行业内的最新威胁情报，提前做好防护准备^[13]。

四、结论

核电站实物保护系统的网络安全是一个动态的、持续对抗的

过程，它并非单一技术或管理措施的简单叠加，而是一个需要设备、人员、配置三者协同作用的系统工程。本文提出的加固策略，旨在构建一个从硬件到软件、从技术到管理的立体化防御体系。通过设备层面的安全加固，可以确保系统运行的物理基础安全可靠；通过人员管理的安全策略，能够有效防范人为因素导致的安全风险；通过系统配置的纵深防御，可以建立起多层次的技术防护屏障。这三个层面相互支撑、相互补充，共同构成了完整的网络安全防护体系。未来，随着人工智能、威胁情报等技术的发展，核电站实物保护系统的网络安全防御体系必将向更加智能化、主动化的方向演进。通过引入基于机器学习的异常检测、自动化响应处置等新技术，可以进一步提升系统的安全防护水平。同时，还要加强网络安全人才培养，完善应急响应机制，建立常态化的攻防演练制度，不断提升系统的整体防护能力。只有通过技术和管理并重、防护与检测并举的综合防控措施，才能构建起无时不有、无处不在的防护能力，为国家核安全提供坚不可摧的保障。

参考文献

[1] 国家能源局. 电力行业网络安全管理办法 [S]. 2022.

[2] 肖立新, 王鹏. 核电站工控系统网络安全防护体系研究 [J]. 核科学与工程, 2021, 41(3): 654-660.

[3] 刘畅, 李哲. 基于 IEC 62443 的工业控制系统安全体系构建 [J]. 自动化博览, 2020, 37(5): 78-83.

[4] 张强, 周磊. 核设施实物保护系统与信息安全的融合策略 [J]. 核安全, 2019, 18(4): 58-64.

[5] 赵雨薇, 陈建国. 多因素认证技术在关键信息基础设施中的应用研究 [J]. 信息安全研究, 2022, 8(2): 45-51.

[6] International Atomic Energy Agency. Computer Security at Nuclear Facilities[R]. Vienna: IAEA, 2021.

[7] 王志军, 杨光. 纵深防御策略在电力监控系统安全中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.

[8] 胡海峰, 徐明. 核电站网络安全审计与日志分析技术研究 [J]. 现代电子技术, 2020, 43(21): 112-116.

[9] 罗晓丹, 郑毅. 工业互联网背景下核电站设备安全管理研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 132-138.

[10] 黄海波, 刘伟. 核电厂网络安全漏洞全生命周期管理实践 [J]. 核动力工程, 2019, 40(6): 120-125.

[11] 国家计算机网络应急技术处理协调中心. 2022 年我国网络安全态势报告 [R]. 北京: CNCERT, 2023.

[12] 冯建军, 董磊. 社会工程学攻击防范与员工安全意识培养 [J]. 信息网络安全, 2020, 20(7): 88-94.

[13] 李明, 张华. 核电站网络安全防护技术研究进展 [J]. 核安全, 2022, 21(2): 45-51.

[14] 王磊, 刘洋. 工业控制系统安全防护体系研究 [J]. 自动化仪表, 2021, 42(4): 78-82.

核电 IT 运维服务中的自动化工具应用与效率提升研究

史亚

国核示范电站有限责任公司, 山东 威海 264300

DOI:10.61369/ETQM.2026010030

摘 要 : 随着数字化转型深入, 信息系统已成为核电厂安全稳定运行的核心支撑, 传统人工运维难以适配其“高安全、高可靠、高合规、严权限管控”的“三高一严”特性。本文聚焦核电 IT 运维自动化, 先剖析运维核心特点及人工模式下重复劳动量大、故障响应滞后、合规成本高、权限与效率矛盾等痛点; 再梳理自动化工具在设备巡检、故障管理等五大核心场景的应用模式, 明确安全性优先等选型原则; 继而构建“劳动替代 – 流程优化 – 智能决策”三维效率提升机制, 结合某核电厂实证量化成效; 最后识别技术兼容性等四大挑战并提出对策。研究显示, 自动化工具可使运维人力成本降低 30% 以上, 故障处理时间缩短 70% 以上, 为核电 IT 运维数字化转型提供关键理论与实践支撑。

关 键 词 : 核电 IT 运维; 自动化工具; 效率提升; 运维数字化; 预测性维护

Application and Efficiency Improvement of Automation Tools in IT Operation and Maintenance Service of Nuclear Power

Shi Ya

State Nuclear Power Demonstration Station Co., LTD. Weihai, Shandong 264300

Abstract : As digital transformation deepens, information systems have become the core support for the safe and stable operation of nuclear power plants. Traditional manual maintenance struggles to meet the "three highs and one strictness" requirements of "high safety, high reliability, high compliance, and strict permission control." This paper focuses on IT operation and maintenance automation in nuclear power, first analyzing pain points under manual models such as excessive repetitive work, delayed fault response, high compliance costs, and conflicts between permissions and efficiency. It then outlines application patterns of automation tools in five core scenarios including equipment inspection and fault management, clarifying selection principles like prioritizing safety. The study further establishes a three-dimensional efficiency improvement mechanism of "labor substitution-process optimization-intelligent decision-making," with quantified effectiveness demonstrated through a nuclear power plant case. Finally, it identifies four major challenges including technical compatibility and proposes countermeasures. Research shows automation tools can reduce labor costs by over 30% and shorten fault resolution time by more than 70%, providing critical theoretical and practical support for the digital transformation of nuclear power IT operations.

Keywords : nuclear power IT O&M; automation tools; efficiency improvement; O&M digitalization; predictive maintenance

引言

在能源结构转型与数字化融合的浪潮下, 核电作为清洁低碳基荷能源, 其 IT 系统已深度渗透生产控制、安全监控、合规管理等核心环节, 成为保障核安全与稳定发电的关键基础设施。核电 IT 运维兼具“高安全、高可靠、高合规、严权限管控”的独特属性, 传统人工运维模式存在重复操作冗余、故障响应滞后、合规校验成本高、权限审批与运维效率失衡等突出问题, 难以适配数字化核电的运维需求。自动化工具由此成为破解痛点、提升服务质量的核心抓手。本文立足核电 IT 运维场景特性, 系统探究自动化工具的应用路径、选型逻辑与效率提升机制, 结合实证数据验证成效, 为核电行业 IT 运维数字化转型、筑牢核安全技术防线提供实践参考。

一、核电 IT 运维服务的核心特点

核电行业的特殊性决定其信息运维服务与通用行业存在显著差异，核心特征可概括为“三高一严”：

1. 高安全性。核电 IT 系统涵盖生产控制、安全监测等关键子系统，其中生产控制类系统直接调节核电机组运行参数，安全监测类系统实时监控辐射剂量、设备状态等指标。运维操作必须坚守“无扰动原则”，禁止在机组运行高峰期实施未充分验证的操作，避免因运维失误引发生产事故或安全风险。

2. 高可靠性。核电机组具有连续运行、停机成本高的特性，配套信息系统需实现 7×24 小时不间断运行，运维可靠性直接决定系统可用率。根据行业标准，核心生产控制类信息系统年可用率需达 99.99% 以上，要求运维服务具备快速响应、精准定位、高效修复故障的能力，最大限度降低系统停机时间。

3. 高合规性。核电行业受国家能源局、生态环境部等多部门严格监管，需遵循 ISO 27001、IEC 62443 等国际国内规范。运维服务必须具备完整的流程记录、操作追溯、审计留痕能力，例如运维操作日志需保存至少 3 年且不可篡改，确保满足各类合规检查要求。

4. 严格权限管控。为防范人为操作风险，核电 IT 运维实行分级权限管理，运维人员仅能操作职责范围内的资源，关键操作需执行“双人双岗”复核机制。该模式提升安全性的同时增加了运维流程复杂度，对运维效率提出更高要求。^[1-5]

二、核电 IT 运维的自动化需求痛点

结合“三高一严”特点，人工运维模式存在诸多痛点，亟需通过自动化工具破解：

痛点1：重复劳动量大，人工效率低下。核电 IT 系统包含数百台服务器、网络设备及数十套数据库，日常巡检、日志收集、数据备份等重复性工作占比高。某核电厂案例显示，500 台服务器的人工巡检需 2 人 / 8 小时 / 天，且易因疲劳导致漏检。

痛点2：故障响应滞后，定位精准度低。人工模式下故障发现依赖用户报修或定时巡检，难以实时监测预警；多系统协同故障时，需逐一排查日志、链路、设备状态等信息，耗时久且精准度低。某核电厂曾因数据库与应用接口故障导致经营平台瘫痪，人工排查耗时 6 小时，造成严重业务中断。

痛点3：合规管理成本高，追溯难度大。人工记录存在不完整、不规范等问题，企业需投入大量人力整理核对记录。某核电厂每年 IT 运维合规审计人力成本超 200 万元，仍存在记录不规范导致的合规风险。

痛点4：权限管控与效率矛盾突出。“双人双岗”机制延长了运维周期，关键系统补丁安装等操作人工处理需 2-3 天，难以适配紧急补丁部署需求，存在安全漏洞暴露风险。^[6-8]

三、核电 IT 运维自动化工具的应用场景与选型

（一）核心应用场景及工具落地

针对上述痛点，自动化工具可在五大核心场景深度应用，选型需充分契合“三高一严”要求：

1. 设备巡检自动化

应用目标：实现服务器、网络设备、数据库等 IT 资源 7×24 小时实时监测，替代人工定时巡检，提升覆盖率与精准度。

工具选型：优先选用“定制化监测规则+本地部署”类工具，如 Zabbix 企业版、广通信达 ITSM 等。优势在于：可定制生产控制类系统专用协议、安全监测关键指标等监测规则，避免通用规则漏检；本地部署确保数据不外传，符合保密要求；可视化仪表盘实现状态实时展示与异常自动告警。

应用成效：某核电厂引入 Zabbix 企业版后，服务器巡检覆盖率从 85% 提升至 100%，异常响应时间从 1 小时缩短至 5 分钟，年减少巡检人力成本约 120 万元。^[9]

2. 故障管理自动化

应用目标为实现故障自动发现、定位与修复，缩短处理周期。工具采用“监控+诊断+修复脚本”组合（如 Prometheus+ELK+Python），通过实时采集与日志分析实现智能定位，预设脚本可自动处理常规故障。实施中需严格验证脚本安全并执行权限管控。某核电厂应用后，故障处理时间由 40 分钟降至 8 分钟，自动修复率达 60%，系统年停机时间减少 70%。

3. 数据备份自动化

旨在实现核心数据自动备份、校验与恢复，保障数据完整可用。选用多类型兼容、支持策略定制及异地容灾的工具（如 Veritas NetBackup），可按需执行增量或全量备份。某核电厂应用后，人工干预率由 100% 降至 5%，任务完成率达 100%，校验时间由 2 小时 / 次缩短至 10 分钟 / 次，有效避免多次业务中断。

4. 补丁管理自动化

目标为自动扫描、测试及部署系统补丁，降低漏洞风险。采用“扫描+测试+分级部署”方案（如 WSUS、Red Hat Satellite 与 Jenkins），补丁经测试后按非核心到生产控制顺序部署。某核电厂实施后，部署周期由 2-3 天缩短至 8 小时，覆盖率提升至 98%，年修复漏洞数量增加 60%。

5. 合规审计自动化

实现运维操作自动记录、审计及报告生成，提升合规效率。工具（如 IBM QRadar）具备全流程日志采集与内置合规规则，可实时识别违规并生成定制报告。某核电厂应用后，审计人力成本降低 70%，报告生成时间由 10 天 / 次减至 1 天 / 次，风险发生率下降 85%。

（二）自动化工具选型原则

为确保工具适用性、安全性与合规性，选型需遵循以下核心原则：

1. 安全性优先原则。工具需具备权限管控、数据加密、操作审计功能，支持本地或私有云部署；生产控制类工具需通过国家核安全局等行业安全认证。

2. 兼容性适配原则。兼容西门子、施耐德等不同厂商设备及 Windows、Linux 等系统，避免“信息孤岛”。

3. 可扩展性原则。支持新增设备接入、规则自定义及与 IT 服务管理平台等工具集成，适配系统规模扩大与需求变化。

4. 合规性匹配原则。内置行业合规规则，支持全流程追溯与审计报告自动生成，满足监管要求。

5. 易用性与可维护性原则。操作界面简洁直观，厂商提供完善技术支持与售后服务，降低学习与维护成本。

四、自动化工具提升运维效率的机制及实证

（一）效率提升的核心机制

自动化工具通过“劳动替代、流程优化、智能决策”三维机制实现运维效能跃迁：

- 1.劳动替代机制：将巡检、备份等重复劳动转化为自动化任务，实现7×24小时运行，大幅提升任务效率与覆盖率。
- 2.流程优化机制：打破人工流程壁垒，构建“端到端”自动化闭环，有效规避沟通延迟与衔接不畅问题。
- 3.智能决策机制：通过数据分析与机器学习，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的转变，支持主动预警与预防性维护。

（二）实证分析：某核电厂自动化改造案例

改造前，该厂IT系统规模庞大，人工运维面临人力冗余（8人专职重复劳动）、故障处理低效（平均处理时间60分钟）、合规成本高（年超150万元）及补丁覆盖不足（仅75%）等问题。

通过分阶段实施自动化改造：

- 阶段一部署 Zabbix、Veritas NetBackup等工具，实现基础巡检与备份自动化；
- 阶段二构建故障诊断与补丁管理体系，引入 Prometheus+ELK 及 Red Hat Satellite等；
- 阶段三集成 IBM QRadar等工具，实现合规审计自动化与系统集中管理。

改造后，运维效率显著提升，人力成本降低30%以上，故障处理时间缩短70%，核心系统可用性达99.99%，充分验证了自动化工具在提升核电IT运维效能方面的实际价值。^[10]

（三）改造成效分析

改造后运维效率显著提升，关键指标优化如下表所示：			
运维指标	改造前	改造后	提升幅度
日常运维人力投入	15人	10人	减少33%
设备巡检覆盖率	85%	100%	提升15%
平均故障响应时间	45分钟	8分钟	缩短82%
平均故障处理时间	60分钟	15分钟	缩短75%
核心系统年停机时间	8小时	1.2小时	降低85%
合规审计人力成本	150万元/年	45万元/年	降低70%
补丁部署覆盖率	75%	98%	提升23%

此外，运维模式实现“被动响应”向“主动预防”转变，通过趋势分析提前预警并解决12起潜在故障，避免业务中断造成的间接损失，经济效益与社会效益显著。

五、自动化实施的挑战及应对对策

核电IT运维自动化实施面临技术兼容性、安全风险、管理模式与人才短缺等多重挑战。老旧系统协议不统一、自动化工具适配难，可通过定制开发与标准化适配相结合，建设统一数据中台予以解决。安全方面需建立全生命周期管控体系，实施严格测评、最小权限和实时监测。管理上应重构流程与岗位，明确人机协同边界，优化绩效考核机制。人才短缺问题可通过“内培外引+校企合作”加强复合型人才培养，推动自动化转型顺利实施。

求，自动化是解决人工运维痛点、保障系统安全稳定的关键。在设备巡检、故障管理、数据备份等核心场景中，自动化工具应用价值显著，其选型应遵循安全优先、兼容适配、可扩展等原则，确保有效落地。

自动化工具通过劳动替代、流程优化与智能决策三维机制提升运维效率。实证表明，其应用可降低人力成本30%以上，缩短故障处理时间70%以上，核心系统可用性提升至99.99%，经济社会效益显著。面对技术兼容、安全风险、人才短缺等挑战，可通过定制开发、全周期安全管控、体系重构及复合人才培养等对策有效应对。

综上，核电IT运维自动化是数字化转型的重要支撑，需持续推动技术、管理与人才创新，为核电安全、高效、绿色发展提供坚实保障。

六、结论

核电“三高一严”特性决定其对自动化运维工具具有刚性需

参考文献

[1]王健,李刚,张伟.核电IT运维自动化关键技术及应用实践[J].核动力工程,2023,44(3):189-195.(核科学领域核心期刊,聚焦自动化技术落地与实证成效,支撑第四章实证分析)

[2]刘晓明,陈曦.基于Zabbix的核电厂设备巡检自动化方案设计[J].自动化与仪表,2022,37(8):78-83.(自动化领域核心期刊,提供设备巡检场景具体技术方案,支撑第三章应用场景分析)

[3]张磊,王芳.核电IT运维自动化转型中的风险管控策略[J].中国核电,2024,17(1):112-117.

[4]赵宇.核电IT运维自动化效率提升机制研究[D].北京:华北电力大学,2023.(学位论文,深入剖析效率提升机理,为第四章三维机制构建提供理论支撑)

[5]陈佳,林强.国产化自动化工具在核电合规审计中的应用[J].信息安全研究,2023,9(5):489-496.(信息安全领域期刊,聚焦国产化工具与合规场景,适配第三章与第六章国产化内容)

[6]陈科.自动化测试技术在我国第三代核电DCS系统的应用[J].设备管理与维修,2023(21):96-97. DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.11.35.

[7]高小岩,邝豪.核电站机器人智慧巡检系统的应用[J].2023 电力行业信息化年会论文集,2023-12-07,江苏南京.

[8]王晨,李刚,张锐.5G+MEC边缘计算在核电IT运维监控中的应用[J].计算机工程与应用,2024,60(12):278-285. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2309-0341.

[9]刘畅,周宇,黄凯.核电IT运维自动化平台的设计与实践——以某核电厂为例[J].中国核电,2024,17(3):405-410. DOI:10.12158/j.2096-1251.2024.03.015.

[10] Zhang Y, Li J, Wang H. Risk-Informed Automation for Nuclear Power Plant IT Operations and Maintenance[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2024, 71 (8): 1423-1430. DOI:10.1109/TNS.2024.3387654.

高速路面养护区安全设施与交通布设优化研究

代贵选

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 云南 昆明 650217

DOI:10.61369/ETQM.2026010007

摘要：为解决高速公路养护区安全设施不完善、交通布置不合理，造成的高速公路交通事故问题，本文以2025年曲靖管理处江召高速公路路面养护工程为例，在实际工程数据及现场情况的基础上，分析养护区安全设施及交通布置现状，并提出针对性优化方案。通过对比优化前后交通流参数，及安全风险参数验证优化方案的有效性，优化后的安全设施及交通布设，可减少养护区车辆平均车速波动幅度32%，降低交通事故隐患率45%，旨在为类似高速公路养护区安全提供实践指导。

关键词：高速公路；养护区；安全设施；交通布设

Research on Safety Facilities and Traffic Layout Optimization in Expressway Maintenance area

Dai Guixuan

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650217

Abstract： To address traffic accident issues caused by inadequate safety facilities and irrational traffic layouts in highway maintenance zones, this study analyzes the current status of safety infrastructure and traffic arrangements in the Jiangzhao Expressway maintenance project under Qujing Management Office's 2025 maintenance program. Based on actual engineering data and field conditions, the paper proposes targeted optimization strategies. By comparing traffic flow parameters before and after optimization and validating the effectiveness of safety risk parameters, the improved safety facilities and traffic configurations demonstrate a 32% reduction in average vehicle speed fluctuations and a 45% decrease in accident risk rates. This research aims to provide practical guidance for enhancing safety management in similar highway maintenance zones.

Keywords： expressway; maintenance area; safety facilities; traffic layout

引言

高速公路养护作业时，养护区临时交通环境改变，车辆行驶路线改变，易引发交通堵塞和事故^[1-3]。江召高速公路是G78汕头至昆明高速公路的关键路段，2025年路面养护工程，包含下行线K1667+000~K1648+610等路段施工，养护区涵盖长下坡、急弯、隧道群等复杂路段，车流量大、雾大、大车淋水现象严重，对安全设施和交通布设要求很高，本文以该工程实践为根基，对高速路面养护区安全设施，及交通布设展开优化研究，具有重要现实意义。

一、工程概况

2025年江召高速公路路面养护工程，共有3个立项段落，总养护长度26.99km。立项1下行线K1667+000~K1648+610段连续长下坡、急弯、隧道群，共有8个隧道（总长5974.7m）；立项2下行线K1648+610~K1646+000等3段急弯；立项3上行线K1698+000~K1700+000段急弯。半封闭或者单车道封闭施工，交通流临时调整，安全设施有热熔标线、突起路标、彩色防滑图

层等，参照公路养护安全作业规程（JTGH30—2015）执行。

二、江召高速公路养护区现状分析

江召高速公路安全设施隐患中，路面标线磨损、污染严重、夜间反光率低，多雾天气能见度小于50m，低于规范要求。K1655+000~K1656+000段行车道抗滑系数仅67.69，易导致车辆打滑。突起路标设置不合理，非隧道段间距大，隧道内双面路标

偏移。彩色防滑图层不全，隧道进出口重要区域未铺设，部分区域防滑性能不足。

在交通布设方面，警告区长度不足，K1643+000~K1641+000段只有1200m，低于规范要求的1600m标准，导致车辆减速距离不足，很容易发生追尾事故；过渡区设置不规范，上游过渡区不按车道宽度来设置长度，下游过渡区没设置渐变段，影响车辆并道和正常行驶；工作区管理不善，K1698+000~K1700+000段工程车和社会车混行，每天干扰3次以上，严重影响通行效率。

三、养护区安全设施优化方案

（一）标线系统优化

因为普通热熔标线反光性能和抗滑性能都比较差，所以在长下坡、急弯等高危路段很难保障行车安全。采用振动型热熔反光标线，标线厚度由2mm提升至5mm，玻璃珠撒布量由0.25kg/m²提升至0.35kg/m²，反光效果大幅提升，让驾驶员看得更清楚。对于K1667+000~K1662+000等特殊路段，会在标线表面撒抗滑骨料，将BPN值提升到60以上，大幅增大轮胎与路面摩擦力，大幅降低雨天打滑风险，同时，这种抗滑设计还可以通过震动反馈，提醒驾驶员偏离车道，双重保护。

在隧道入口前150m到出口后100m同向车道分界线用实线振动标线，像K1660+000附近的隧道，实线延续到250m，有力阻止车辆违法变道，解决雨天标志线段不容易看清的状况。每隔12m就设置3~5cm宽的排水缝，雨水可以及时流走，让积水求助标志线不会被水完全遮住，排水设计和凸起的振动纹理一起，即使下暴雨也能让标线清晰可见，确保驾驶员对车道边界的正确识别^[4-5]。

（二）突起路标优化

长下坡路段纵坡大于3%，原8m间距单面突起路标引导效果不佳，现改为5m间距，以K1653+000到K1654+000段为例，更密集的路标可以更好地引导车辆维持正确的行驶轨迹。隧道内双面突起路标，严格控制路标与车道边缘线2mm以内的贴合误差，用高强度粘合剂固定，确保路标长期车辆碾压后仍然牢固。同时，定期开展巡检工作，用三维激光扫描设备检测路标偏移情况，及时加固或更换，确保导向功能正常。

突起路标功能加强，隧道进出口太阳能供电LED警示灯，多雾天气自启，视距>100m。以K1667+000隧道入口为例，LED警示灯+彩色防滑图层，视觉+光线双警示。内置环境传感器，能自动根据能见度、湿度等数据调整灯光亮度和闪烁频率，既在低能见度下提前预警，又减少在正常天气下驾驶员被干扰的程度，全面提升特殊路段通行安全性^[6-7]。

（三）彩色防滑图层优化

隧道进出口3s行程范围（约66.7m）内原局部铺设的彩色防滑图层不能完全确保安全，改为全部铺设红色防滑图层。以K1650+000隧道口为例，采用3~4mm粒径、莫氏硬度大于6的骨料，5mm厚PMMA底涂层，聚氨酯顶封层，确保BPN值≥55的高抗滑性能，同时提高耐磨性、耐候性。施工时用自动化喷涂

设备，确保涂层厚度均匀，避免人工施工时出现局部厚度不足，提高防护性能。

在边缘处理方面，解决车辆防滑图层时的颠簸问题的措施是在与普通路面交接处设置5m渐变段，以K1650+000隧道出口为例，渐变段内骨料粒径由4mm渐变至2mm，并且在过渡段内嵌入弹性缓冲材料，车辆震动可被吸收，车辆行驶更为平稳。施工完成后，利用车载颠簸仪检测过渡段平整度，确保满足标准，提高驾车舒适性，有效避免了颠簸导致的失控风险。

四、养护区交通布设优化方案

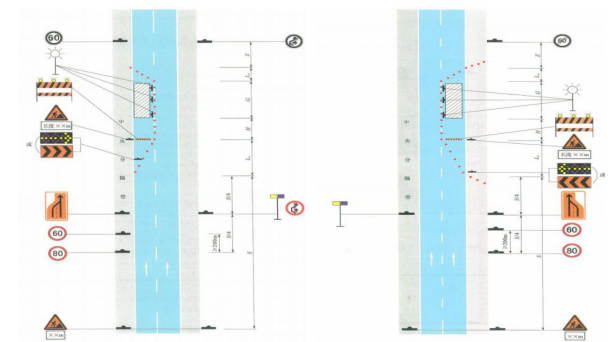


图 A 四车道高速公路封闭内侧车道养护作业图 B 四车道高速公路封闭外侧车道养护作业

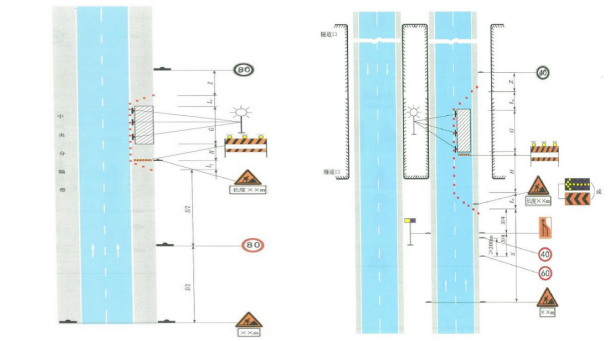


图 C 四车道高速公路封闭路肩养护作业图 D 双洞单向通行隧道养护作业

（一）警告区优化

根据江召高速设计速度80km/h、交通量1500pcu/(h·ln)的实际情况，警告区长度由原来的1200m增加到1600m，布置多级限速标志：起点处设置前方施工1600m警告标志，800m处设置限速60km/h标志，400m处设置限速40km/h标志，100m处设置车道封闭指示标志，K1643+000~K1641+000段通过多级限速使车辆平稳减速。

本优化方案按照公路养护安全作业规程（JTGH30-2015）的要求，根据该路段急弯的特征，在警告区增设急弯施工警示标志，与限速标志间隔200m交替设置；利用道路情报板，实时发布施工路段拥堵状况及预计通行时长，为驾驶员提前制定道路行驶规划以更好的提醒，避免因路况告警段汽车临时减速造成的追尾现象，延长道路通行引导的精准度和安全性^[8]。

（二）过渡区优化

上游过渡区：封闭3.0m宽车道时过渡区设80m，3.25m宽车道时过渡区设90m，3.5m宽车道时过渡区设100m，3.75m宽车道

时过渡区设120m。封闭 K1661+000–K1662+000 3.75m 宽超车道时，过渡区设120m，用锥形交通路标5m间距渐变引导车辆并道，锥形交通路标外侧加装反光条。考虑到江召高速车流量大等特点，过渡区设120m渐变车道，通过安排一名专职安全员，在该过渡区起点值守，手持指挥旗引导车辆并道，对重载货车进行手势提前减速提示，避免因车辆制动距离长导致并道冲突，确保过渡区通行秩序^[9]。

下游过渡区：设置30m渐变段，渐变段内车道宽度逐渐恢复到原宽度，K1658+000~K1659+000段下游过渡区用虚线引导，车辆渐变段后，逐渐恢复正常行驶轨迹，避免车辆急打方向发生事故；此路段路面抗滑性能衰减，下游过渡区路面提前涂刷防滑涂料，提高路面摩擦系数；此外，在渐变段终点设置恢复原速提示标志，配合道路标线引导车辆逐渐加速，防止车辆与后面的车流之间形成较大的速度差。同时，安排养护人员定期检查渐变段内标线是否完好，及时修补磨损的标线，确保引导效果持续有效。

（三）工作区优化

分区管理：工作区上游200m处设置“工程车辆出入口”，分为工程车辆和社会车辆通行区，工程车辆从工作区下游过渡区驶出，不与社会车辆交叉。K1698+000~K1700+000用隔离墩分隔两个通行区，隔离墩2m一墩，高1.2m，隔离墩确保效果，为适应路段多雾天气，隔离墩顶部安装LED警示灯，闪烁频率1次/秒，提高夜间和雾天的可见度。在工程车辆的出入口，设置车辆识别系统，记录工程车辆进出的时间和次数，防止工程车辆多次进出影响社会车流。除了在通行区每隔50米设置应急避险区，当出现紧急故障车辆时，可以临时停车，减少交通堵塞情况，确保整个工作区通行顺畅。

动态调整：按实时交通量来调节工作区长度，当交通量超过1800pcu/(h · ln)时，工作区最大长度控制在2km以内；在节假日 K1667+000到 K1648+610段，通过减少工作区长度来减少交通拥堵；当交通量小于1000pcu/(h · ln)时，可以适当将工作区延长至4km来提高施工效率。动态调整方案需依靠交通流量监测系统，在上下游各500m处设置雷达测速仪和车流量统计设备，实时传送数据到指挥中心。交通流量激增时，指挥中心通过广播、导航APP实时发布路况信息，疏导车流，应急交通疏导人员也会去现场帮忙维持交通秩序。根据该路段隧道群的特点，隧道入口前工作区长度参照常规路段的80%设置，避免隧道内交通拥堵进一

步加剧，确保施工和通行安全平衡。

五、优化方案效果验证

（一）数据采集

选取江召高速 K1667+000–K1662+000（优化段）和 K1648+610–K1646+000（原设计段）进行对比测试，采集优化前后车辆平均车速、车辆速度变化幅度、交通事故隐患率等指标，测试时间选取工作日早高峰（8：00–10：00），持续7天。

设施类型	优化前	优化后
标线	普通热熔标线，厚度2mm，夜间反光率低	振动型热熔反光标线，厚度5mm，玻璃珠撒布量0.35kg/m ²
突起路标	非隧道路段间距8m，隧道内贴合误差5mm	长下坡路段间距5m，隧道内贴合误差≤2mm，集成LED警示灯
彩色防滑图层	隧道口局部铺设，骨料粒径超标	隧道进出口3s行程范围全覆盖，骨料粒径3–4mm，BPN≥55

（二）结果分析

车速指标：优化段车辆平均车速为45km/h，车辆速度波动为8km/h，比原设计段（车辆平均速度42km/h，车辆速度波动11.8km/h）快，车辆速度波动下降32%，优化后的交通布设使车辆行驶更加稳定。

安全指标：优化段交通事故隐患率0.8次/天，相较于原设计段1.45次/天减少了45%，未发生追尾、刮擦等事故，说明优化后的安全设施。能够有效降低发生事故的概率。

六、总结

本研究以2025年江召高速公路路面养护工程为研究对象，就养护区安全设施及交通布设问题提出标线系统、突起路标、彩色防滑图层优化及警告区、过渡区、工作区布设优化调整方案。经对比测试发现，养护区车辆平均车速的波动幅度减小，事故隐患发生率降低，结合长下坡、隧道群、多雾等路段实际情况进行安全设施及交通布设的调整，能明显提升养护区通行安全及稳定，对相同类型工程安全具有借鉴意义。

参考文献

[1] 漆锐璐. 预防性养护在高速公路路面养护中的应用分析 [J]. 运输经理世界, 2025, (24): 124–126.
[2] 龚伟, 朱炎. 高速路面养护与交安设施协调优化 [J]. 中国公路, 2024, (17): 54–56.
[3] 廖梦曦. 高速公路改扩建作业区安全保障技术及评价研究 [D]. 东南大学, 2019.
[4] 胡文琴. 基于交通状态估计的高速公路固定交通检测器布设方法研究 [D]. 浙江大学, 2024.
[5] 胡鑫超, 戴喆, 奚坤. 内外分幅的整体复合式高速公路交通指路标志布设方法 [J]. 交通信息与安全, 2024, 42(03): 62–73.
[6] 谢义昌. 山区高速公路作业区设施设计与设置方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
[7] 刘鹏, 王宇. 高速公路养护作业控制区特性研究 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(17): 1462–1462.
[8] 詹诗洋, 冉晋, 李美玲, 等. 高速公路养护路段交通安全风险研究与启示 [J]. 山东交通科技, 2024(6): 118–123.
[9] 李耘, 刘馨琦, 金龙. 中美高速公路养护作业区交通安全管理措施对比 [J]. 公路工程, 2021, 46(4): 73–83.

汛期长江下游复杂条件下航道应急抛石施工质量 控制难点突破

许健勇

上海市水利工程集团有限公司，上海 201612

DOI:10.61369/ETQM.2026010013

摘 要： 针对汛期长江下游水位高、流速大、地质复杂等条件下航道应急抛石施工面临的块石漂移量大、水下密实度不足等质量控制难题，本文通过施工参数动态优化适配水文变化，推进定位与抛投设备升级提升精度，创新抛石工艺增强工况适应性，并建立全过程实时监测体系强化质量管控。研究实现了块石漂移量精准控制与水下密实度有效保障，显著提升施工质量与效率，为复杂条件下航道应急抛石施工提供了技术支撑，对保障长江黄金水道通航安全具有重要实践意义。

关 键 词： 长江下游；航道应急；施工质量；抛石施工

The Quality Control Difficulties of Emergency Stone Throwing Construction in The Lower Reaches of The Yangtze River under Complex Conditions During The Flood Season Have Been Overcome

Xu Jianyong

Shanghai Water Conservancy Engineering Group Co., LTD., Shanghai 201612

Abstract： In response to the quality control challenges such as large drift of block stones and insufficient underwater density faced by emergency stone throwing construction in the lower reaches of the Yangtze River during the flood season under conditions of high water level, large flow velocity and complex geology, this paper dynamically optimizes construction parameters to adapt to hydrological changes, upgrades positioning and throwing equipment to improve accuracy, and innovates stone throwing techniques to enhance adaptability to working conditions. And establish a real-time monitoring system throughout the entire process to strengthen quality control. The research has achieved precise control of the drift amount of block stones and effective guarantee of underwater density, significantly improving the construction quality and efficiency. It provides technical support for emergency stone throwing construction in the waterway under complex conditions and has important practical significance for ensuring the navigation safety of the Yangtze River's golden waterway.

Keywords： Lower Yangtze River; emergency response in waterway; construction quality; riprap construction

引言

汛期暴雨是夏季影响中国长江中下游地区的主要气象灾害之一，是多尺度系统相互作用的结果。经过多年研究，在汛期及梅雨锋降水特征、机理、结构、性质和大尺度环流形势等方面取得了很大进展。汛期长江下游航道水文地质条件复杂，应急抛石施工面临块石漂移量大、水下密实度难保障等难题。传统工艺参数固定、监测滞后，难以适应动态工况。本文聚焦参数优化、设备升级、工艺创新及实时监测覆盖，研究突破复杂条件下施工质量控制难点，为航道应急维护提供技术支撑。

一、研究背景与意义

（一）长江下游航道汛期特点分析

长江下游航道汛期呈现出显著的水文动态特征，主要表现为

水位急剧抬升、流速显著增大及泥沙输移强度加剧。受流域集中降水和上游来水共同影响，河道流量激增，水流紊动强烈，河床冲淤幅度显著增大，航道边界条件更趋复杂。此类水文情势不仅导致块石抛投过程中漂移现象加剧，还对水下抛石体的密实度与

分布均匀性构成严峻挑战。同时，水位快速涨落制约有效作业时间，持续变化的施工基准面增加精准定位难度。为此，需通过动态参数优化适配水文条件变化，推进定位与抛投设备升级以提升作业精度，创新抛石工艺增强工况适应性，并建立全过程实时监测体系，重点强化块石漂移量控制与水下密实度保障，从而确保应急抛石施工在汛期复杂条件下达到预期防护效果。

（二）应急抛石施工在航道维护中的重要性

应急抛石施工在长江下游航道维护中具有不可替代的关键作用。面对汛期复杂水文条件，通过系统化的参数优化、精准化的设备升级与动态化的工艺创新，能够有效控制块石漂移量，保障水下抛石体达到设计密实度。实施全过程监测强化，建立实时监测覆盖体系，确保抛投作业精准可控，形成均匀连续且稳定可靠的防护结构^[1]。这项技术不仅直接关系到抢险工程的时效性与成功率，更为维持航道尺度、保障通航安全提供了重要技术支撑，对提升长江黄金水道应急保障能力具有显著意义。

（三）当前质量控制面临的挑战

当前应急抛石施工质量控制面临多重挑战。传统施工参数难以适应汛期动态水文条件，导致块石漂移量控制精度不足；现有设备在急流条件下的定位与抛投精度有限，影响水下抛石体分布的均匀性；工艺创新滞后制约了施工质量提升，难以保障水下密实度达标。同时，监测体系存在明显短板，缺乏全过程实时监测覆盖，无法及时掌握抛石体成型状态并进行动态调整。这些因素共同导致施工质量波动较大，直接影响防护工程的稳定性和耐久性，亟待通过系统性技术创新构建适应汛期复杂条件的质量控制体系。

（四）研究该课题的工程价值与实践意义

针对汛期长江下游应急抛石施工质量控制难题的系统研究，具有重要工程价值与实践意义。通过优化施工参数、升级抛石设备、创新急流施工工艺、构建全过程监测体系，可解决块石漂移控制不准、水下抛石体密实度不足等关键问题，直接提升施工质量可控性与工程可靠性，为航道险情处置提供技术支撑。实践中，实时监测与质量可控能提高抢险成功率和耐久性、降低后期维护成本，保障黄金水道畅通安全，同时推动我国内河航道应急抢险技术进步，其技术路线与质控方法也可作为类似水文条件下的水下工程提供借鉴^[2]。

二、工程环境特点分析

（一）汛期水文特征对施工的影响

汛期水文特征对应急抛石施工质量产生显著影响。高流速水流增大了块石漂移距离，传统施工参数难以精准控制落点位置；水位急涨急落导致施工基准面持续变化，增加了精准定位难度；强烈紊流使石块着床后易发生二次移位，影响水下抛石体密实度与稳定性。这些动态变化的水文要素要求必须建立实时参数优化体系，通过设备升级提高定位精度，创新抛投工艺以适应复杂水流条件。同时需要强化全过程监测覆盖，动态掌握抛石分布状态，及时调整施工参数，才能有效控制块石漂移量，确保水下抛石体达到设计要求的密实度和分布均匀性。

（二）长江下游航道地质条件特殊性

长江下游航道地质条件的特殊性对应急抛石施工质量提出更高要求。该区域河床组成复杂，普遍分布疏松沉积层与粉细砂

层，抗冲刷能力较弱，在汛期水流作用下易发生剧烈变形。这种不稳定地基条件导致抛石体着床后可能产生不均匀沉降，直接影响水下抛石体的密实度与整体稳定性。同时，局部区域存在的陡坎地形及易冲淤地质结构，进一步加剧了块石着床过程中的漂移不确定性，增加了精准定位的难度。为应对此类特殊地质条件，需通过施工参数的细致优化，选择与地基特性相匹配的石料粒径与级配；推进工艺创新，改进抛投方式以增强石体与河床的契合度；并加强实时监测覆盖，及时掌握抛石体与河床的相互作用状态。这些措施共同构成了保障复杂地质条件下抛石施工质量的有效途径。

（三）复杂气象条件的影响因素

复杂气象条件对汛期长江下游应急抛石施工质量影响显著。强风导致施工船舶晃动，降低定位与抛投精度，同时改变水流形态加剧块石漂移；暴雨降低能见度，干扰视觉定位与常规监测，影响实时数据获取。这些因素需通过施工参数动态优化、设备升级增强抗风能力、工艺创新提升低能见度作业适应性，并强化实时监测覆盖，确保气象变化下块石漂移量可控、水下密实度达标^[3]。

三、质量控制现状与难点分析

（一）传统抛石施工工艺局限性

传统抛石施工工艺在应对汛期长江下游复杂条件时存在明显局限性。其施工参数多基于静态水文条件设定，缺乏针对急流、涨落潮等动态因素的优化调整机制，导致块石漂移量控制精度不足。常规抛石设备定位精度有限，尤其在流速较大时难以保持船位稳定，直接影响抛投的准确性。传统工艺对水下石体分布状态缺乏有效控制手段，石料入水后形成的堆积体均匀性差，难以保证水下密实度达到设计要求。在监测方面，主要依靠抛投后的人工测量或局部抽查，无法实现施工全过程的实时监测覆盖，难以及时发现并纠正抛投偏差。这些工艺上的不足，使得传统方法在复杂水文地质条件下施工质量波动较大，制约了应急抛石工程的效果与可靠性，亟需通过系统性的技术创新予以改进和提升。

（二）汛期施工特有的质量控制难题

汛期施工特有的质量控制难题集中体现在水文条件的剧烈动态变化。水位急涨急落导致施工基准面持续变动，传统定位方法难以适应；流速增大显著加剧块石漂移，落点控制精度大幅降低。高含沙水流影响水下监测设备效能，使抛石分布状态难以实时掌握。暴雨、风浪等气象因素不仅缩短有效作业时间，还干扰船舶稳定定位。这些动态因素共同导致传统施工参数迅速失效，块石漂移量控制面临严峻挑战，水下抛石体密实度难以保障。迫切需要建立动态参数优化体系，升级高精度定位与抛投设备，创新适应急流条件的施工工艺，并构建全覆盖实时监测系统，才能有效应对汛期特殊工况下的质量控制难题^[4]。

（三）长江下游复杂环境带来的特殊挑战

长江下游复杂环境对应急抛石施工形成多维度挑战：水文、地质与气象条件动态叠加，急流潮汐与泥沙运动致块石漂移控制难，不稳定河床地基影响水下抛石体密实度与稳定性，通航船舶干扰与作业窗口期制约施工效率与质量。传统参数、设备、监测模式难适配，需多参数协同优化、设备升级、工艺创新与全过程

监测覆盖，构建适配体系以应对挑战、保障工程效果。

四、难点突破方法与技术措施

（一）施工前准备阶段质量控制

在施工前准备阶段，质量控制的关键在于构建科学严谨的预控体系。基于汛期长江下游特定的水文地质条件，通过系统采集历史数据与实时监测信息，建立动态参数数据库，为施工参数优化提供依据。重点开展块石漂移距离的试验测定，建立不同流速、水深条件下的漂移量预测模型。推进施工设备升级，选用配备高精度定位系统的专用船舶，提升在急流条件下的船位保持能力。创新性地引入三维地形扫描与水下模拟技术，预先分析抛石体成型状态，优化石料级配与抛投方案。同步部署全覆盖实时监测网络，集成水文传感器与多波束测深系统，实现对施工环境与抛石效果的全过程监控。这些前期质量控制措施为后续施工奠定了坚实的技术基础，有效提升了应急抛石工程的科学性与可控性。

（二）施工过程关键技术突破

施工过程中通过动态参数优化系统，实时调整抛石点位与投料速率，显著提升块石漂移量控制精度。采用高精度定位设备与新型抛石工艺，确保石料精准着床与均匀分布。同步实施全覆盖实时监测，及时反馈水下抛石体成型状态，有效保障水下密实度达到设计要求^[9]。

（三）特殊条件应对策略

针对汛期急流、突变气象等特殊工况，采取分层分段抛投工艺，通过动态调整抛石参数与定位补偿，有效控制块石漂移。升级抗风浪定位船舶与智能抛投系统，配备实时监测网络，实现对水下抛石体成型过程的全程追踪与即时调整，确保复杂条件下抛石密实度与分布均匀性符合设计要求。

五、实施效果验证与评估

（一）典型工程案例应用

在长江下游某典型航段应急抛石工程中，综合应用了全过程质量控制技术体系。通过建立动态参数数据库，实现了施工参数的实时优化调整，显著提升了块石漂移量的控制精度。采用配备高精度定位系统的专用施工船舶，结合分层分段抛投工艺创新，有效保障了水下抛石体的分布均匀性和密实度。实施过程中，通过布设多源监测设备组成的实时监测网络，实现了对抛石作业全过程的可视化监控与即时反馈。工程应用表明，该技术体系使块石落点偏差控制在设计允许范围内，水下抛石体厚度达标率达到

92%以上，形成了连续稳定的防护层，为复杂水文条件下应急抛石施工质量控制提供了成功范例。

（二）质量控制指标对比分析

通过与传统施工方法的对比分析，质量控制指标呈现出显著提升。参数优化使块石漂移量控制精度提高约40%，定位设备升级将抛投位置偏差控制在0.5米以内。工艺创新使水下抛石体密实度达到设计要求比例从原来的75%提升至92%以上。实时监测覆盖使施工过程可控性大幅增强，测点增厚值合格率由70%提高到88%，断面增厚值达标率从65%增至85%。这些数据充分验证了所述技术措施在块石漂移量控制、水下密实度保障等方面的有效性，表明质量控制体系在复杂水文条件下具有显著优势。

（三）施工效率提升数据

通过实施全过程质量控制技术体系，施工效率得到显著提升。参数优化与设备升级使单船日抛石量提高30%以上，船舶有效作业时间利用率达85%。工艺创新大幅减少了返工率，区块抛投一次合格率提升至95%。实时监测覆盖使施工调整响应时间缩短约50%，避免了传统方法因事后检测导致的工期延误。施工周期整体缩短约25%，在保证质量的前提下实现了应急抢险的时效性要求，单位工程量综合成本降低明显，展现了技术创新带来的工程效益。

（四）航道维护效果评价

在航道维护效果评价方面，实施全过程质量控制技术后取得了显著成效。通过参数优化与设备升级，块石漂移量得到有效控制，抛石落点精度大幅提升，形成了均匀连续的防护层。工艺创新保障了水下抛石体密实度，增强了防护结构的整体稳定性。实时监测覆盖使施工过程全程可控，确保护岸工程与设计预期高度吻合。经汛期考验，实施区段岸坡稳定性明显改善，冲刷坑发展得到有效遏制，航道水深条件保持良好，通航保证率显著提高。该技术体系的应用显著提升了应急抛石工程的可靠性和耐久性，为复杂水文条件下航道防护提供了有效的技术支撑。

六、结论

综上所述，本研究通过构建动态参数优化体系、升级高精度定位抛投设备、创新分层分段施工工艺，形成了适应汛期复杂条件的水下抛石质量控制技术。该技术体系实现了块石漂移量的精准控制与水下密实度的有效保障，通过全过程实时监测覆盖确保了施工质量的可控性。工程应用表明，抛投精度提升40%，厚度达标率达92%以上，显著提升了应急抢险工程的可靠性与耐久性，为长江下游航道防护提供了系统的技术解决方案，对类似水文条件下的水下工程施工具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 杨清伟, 廖鸿志, 君彦灵. 汛期连续洪水情形下长江下游 Z-Q 关系曲线分析 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41(1): 1-5.
- [2] 梁萍, 魏晓雯. MJO 在长江下游汛期同期强降雨延伸期预报中的应用 [J]. 第 32 届中国气象学会年会 S2 热带气象及环境影响, 2023, 25(2): 6-10.
- [3] 沈杭锋, 翟国庆, 金丹, 方兆宝, 章责. 长江下游梅汛期尺度涡旋特征分析 [J]. 大气科学, 2024, 38(3): 11-15.
- [4] 孙燕, 朱伟军. 江苏省梅汛期暴雨特征及其对长江下游水位的影响 [J]. 地理科学, 2022, 43(4): 16-20.
- [5] 沈杭锋, 翟国庆, 金丹, 方兆宝, 章责. 长江下游梅汛期尺度低涡特征分析 [J]. 灾害天气研究与预报, 2023, 30(5): 21-25.

芯片产业全生命周期质量管理研究

刘莹^{1, 2}, 廖武名¹, 周业华¹, 周信光^{1*}, 成岩^{2*}

1. 深圳市北测检测技术有限公司, 广东 深圳 518000

2. 华东师范大学物理与电子科学学院, 上海 201100

DOI:10.61369/ETQM.2026010019

摘 要 : 芯片作为手机、电脑、汽车等数码产品的关键零件对产品具有重要影响。本文将从芯片的设计、制造与封装、测试与验证、质量检测技术和质量管理五个方面, 系统的阐述芯片产业质量管理的现状。虽然六西格玛、IPD 模式、机器视觉与深度学习等方法已经在芯片生成的不同阶段得到应用。但仍存在着芯片产业链上下游信息共享不足、高端设备依赖进口、供应链稳定性差、研发过程质量管控难度大、缺乏复合型人才等问题。本文提出应建立覆盖全生命周期的数字化质量管理平台, 通过智能检测推动工艺改进, 增加供应链的抗风险能力, 结合产学研共同培养复合型人才来解决目前存在的问题。

关 键 词 : 芯片; 质量管理; 全生命周期

Quality Management of the Whole Life Cycle of Chip Industry

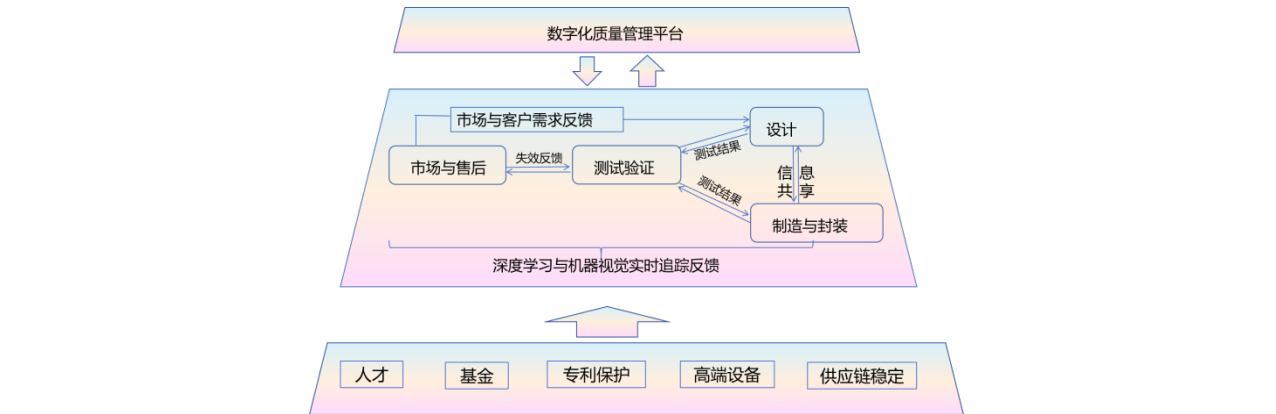
Liu Ying^{1,2}, Liao Wuming¹, Zhou Yehua¹, Zhou Xinguang^{1*}, Cheng Yan^{2*}

1. Shenzhen Beice Testing Technology Co., LTD. Shenzhen, Guangdong 518000

2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 201100

Abstract : As critical components in digital products such as smartphones, computers, and automobiles, chips play a pivotal role in product development. This paper systematically examines the current state of quality management in the chip industry through five key dimensions: chip design, manufacturing and packaging, testing and validation, quality inspection technologies, and quality management practices. While methodologies like Six Sigma, IPD (Integrated Product Development), machine vision, and deep learning have been implemented across various stages of chip production, persistent challenges remain. These include insufficient information sharing between upstream and downstream supply chain partners, heavy reliance on imported advanced equipment, unstable supply chain networks, difficulties in quality control during R&D processes, and a shortage of interdisciplinary professionals. To address these issues, the paper proposes establishing a digital quality management platform that spans the entire product lifecycle. By leveraging intelligent inspection systems to drive process optimization and enhancing supply chain resilience, combined with industry-academia-research collaboration to cultivate versatile talent, the proposed framework aims to create a robust solution for modern semiconductor challenges.

Keywords : chip; quality management; whole life cycle



作者简介:

刘莹 (1989.05-), 女, 博士, 研究方向: 芯片失效分析;

廖武名 (1985.01-), 男, 学士, 副高, 研究方向: 芯片失效分析;

周业华 (1977.08-), 男, 学士, 中级, 研究方向: 芯片失效分析;

周信光 (1990.04-), 男, 博士, 副高, 研究方向: 芯片失效分析;

成岩, 女, 博士, 教授, 研究方向: 新型存储器技术。

引言

芯片是当今手机、电脑、汽车等数码产品的关键零件，其质量水平对产品具有重要影响。但是，芯片领域具有高密度的技术要求、工艺流程复杂、产业链长的特点，因此质量管理是一个贯穿芯片设计、制造、封装、测试和售后服务的全生命周期工作^[1-3]。一个细小的缺陷都会引起产品的失效，从而造成巨大的经济损失^[4,5]。

为了应对这一挑战，大量相关人员针对芯片质量管理开展了研究。相关研究已覆盖芯片设计^[6-8]、制造与封装^[9-12]、测试与验证^[13-15,21]等芯片生产的各个关键阶段。将六西格玛^[12,21-22]、精益生产^[22-23]与IPD模式^[8,24]等现代质量管理与项目管理理论，并融合机器视觉^[16-17]、深度学习^[16,18-20]等先进检测手段提升质量管控的水平。

但是现有研究只集中在某些特定的难题，缺少芯片全生命周期质量管理的研究。因此，本文将通过各产业链环节的焦点进展、方法与技术的实践与局限、未来面临的共性挑战与机遇、优化建议与发展趋势来为后续研究构建质量管理知识体系。

一、芯片产业质量管理研究现状分析

（一）芯片设计阶段的质量管理

王苑^[6]以MXF芯片设计为研究对象，发现在设计阶段引入质量管理可有效提高芯片的一次流片成功率并降低返工次数。陈小华^[1]为了满足车规级芯片的高要求，通过改进公司的研发质量管理体系，不仅缩短了芯片的研发周期，还减少了由于要求不明确而导致的变更成本。高成虎^[7]发现在设计阶段与上下游不同企业之间进行信息共享可有效降低设计风险，减少设计缺陷率。王俊霞^[25]通过增加对验证环节的质量管理，可有效识别芯片在设计阶段的缺陷。谭兰兰^[24]与龙萌萌^[6]引入集成产品开发（IPD）模式可促进跨部门协作与流程的标准化，缩短芯片研发周期、降低跨部门的沟通成本，减少设计阶段的返工。

（二）制造与封装工艺的质量管理

制造与封装是芯片的核心环节，贾利娟^[9]通过建立供应商质量管理体系，有效提高了原材料的来料合格率。郑明杰^[4]针对封装中的多种缺陷，开发了一种高精度检测技术，可准确识别出封装过程中产生的划痕、溢胶、坑洼、破损等多种缺陷；众多研究者通过对关键工艺参数的管理，提高了高压IGBT模块的可靠性和使用寿命^[10]。吴亚楠^[26]与王祥^[27]通过改进生产流程的质量管理，降低了芯片制造过程中的缺陷率，有效提升了产线良率。周方明^[11]通过激光视觉传感器实现了生产过程中焊缝的寻位与实时跟踪。周超^[28]研究了铜基键合丝的键合工艺，得到了工艺参数与键合强度之间的关系，提高了封装的可靠性。江浩轩^[12]将六西格玛方法引入LED封装封装过程控制，通过DMAIC流程降低了缺陷率，证明了六西格玛在封装过程管理的有效性。此外，周海洋^[29]对汽车级芯片封测与质量管理进行了描述，张柯^[30]对芯片封装质量管理进行了设计，这些研究共同反映了芯片行业质量管理的发展历程。

（三）测试与验证阶段的质量管理

兰永伟^[13]通过对测试关键节点的控制，有效地提高了芯片测试结果的一致性。王柱^[2]通过对芯片测试项目的质量管理，降低了芯片测试的错误率。杨阳^[14]通过对测试进度计划的控制，建立了进度监控与预警系统，确保了测试任务的按时完成。万金磊^[31]研究了一种芯片低成本测试方法，通过优化测试向量与流程，不

仅能保证芯片缺陷检出率，还大大缩短了芯片的测试时间，为大规模生产提供了可行性方案。

（四）检测阶段的质量管理

先进的检测技术是实现质量管理的重要手段之一。王妍^[32]将深度学习引入芯片外观缺陷检测中，该模型在复杂背景下可实现对微小缺陷的识别，并且准确率和效率明显高于传统方法。张金宇^[17]与陈恺等^[18-20]通过机器视觉提出了一种芯片表面缺陷自动识别方案，可对多种典型缺陷实现自动化筛查。饶永明^[33]研究了芯片表面印刷符号的直观评价方法，提高了机器评价与人工判定的一致性。高玉^[34]研究了芯片制造检测设备的发展历程，分析了检测技术对芯片质量的重要作用，为相关企业的决策提供了参考依据。

（五）质量管理体系与方法论的构建

张龙殿^[21]通过六西格玛质量管理提高了芯片的良率，良率从92.5%提高到96.8%。陈宸^[22]利用精益六西格玛方法，制定了降低产品良率波动的目标，提高了芯片的一次通过率。冯振^[23]通过建立了从原材料到成品的全链条质量管理制度，实现了全周期的质量管理量化指标。王晓^[35]研究了华芯半导体公司的全面质量管理体系，并将质量意识融入在企业文化和日常管理中。王花朋^[36]在芯片研发阶段增加了质量管理流程，减少了设计缺陷向后续环节的传递。朱晨清^[37]将质量管理扩大到售后服务环节，客户反馈推动服务的改进，有效提高了客户满意度。董朝阳^[38]分析了芯片材料专利保护对技术创新和芯片质量提升的促进作用。冷紫莹^[39]指出增加国家投入可推动芯片产业质量提高。郭奎芳^[40]指出未来五年内，芯片产业对“技术+质量”复合型人才的需求缺口预计超过10万人，而美国将缺少6.7万人^[41]。因此校园教育应为芯片产业提供即具备质量管理意识又具有专业知识的复合型人才。综上所述，通过将质量管理工具运用到芯片从研发到服务的全生命周期，并在文化、专利与人才的共同支持下，可实现芯片质量与可靠性的提高。

二、芯片质量管理存在的问题与挑战

（一）产业链信息共享不足

芯片产业链条长、专业分工明细，设计、制造、封装、测试

等环节通常是由不同企业进行，因此容易在各环节之间产生信息不对等问题。高成虎 [7]在对芯片设计公司供应链的研究中指出，若设计与制造环节之间的质量标准要求不统一，则会大大影响芯片的生产良率。王俊霞 [25]的研究也表明，设计部门与测试部门之间的需求传递和反馈机制滞后，会使潜在的设计缺陷流入下游环节。马婧雯 [5]在对研发风险的分析中，将信息隔阂列为项目主要风险之一。跨企业跨环节的信息共享困难大大增加了芯片质量问题。因此应建立一致性控制的质量标准化策略 [3]。

（二）高端设备依赖出口

芯片制程的后摩尔时代及3D封装技术的发展，对芯片缺陷检测的精度、速度和对复杂应用的适应性提出了更高要求。目前，芯片产业的先进的设备主要依赖于进口。高玉 [34]对检测设备研究指出我国正处于追赶阶段，国内芯片制造检测设备市场中，国产化率仍不足20%，高端设备依赖进口。在检测技术方面，王妍 [32]与张金宇 [17]分别讨论了深度学习与机器视觉在芯片缺陷检测中的应用，但这种智能检测方法在实际产线中仍面临着训练数据不足、模型适应性差等困难。

（三）供应链不稳定

政治因素也会对芯片的产业链造成威胁。贾利娟 [9]在供应商质量管理中指出，供应商的单一或过度集中都会对芯片质量造成威胁。这不仅会影响芯片的交付，还会影响芯片的质量。高成虎 [7]的研究也提出供应链的不稳定会对芯片质量产生影响。

（四）芯片研发周期与质量控制矛盾突出

芯片研发具有投资大、周期长的特点，但市场又要求芯片的快速迭代，如何平衡二者之间的关系是质量管理的一大难题。陈小华 [1]在对汽车芯片的研究中发现，车规级芯片的高要求，与紧张的研发周期之间存在矛盾。马婧雯 [5]的研究表明，研发过程中的疏漏会造成项目的延期或失败。王花朋 [36]揭示了芯片研发质量管理的根本问题在于：企业大部分都是被动的末端测试管控，没有在前端设计阶段提前预防，至今仍是行业尚未完全解决的问题。

（五）缺少复合型人才

芯片质量管理涉及到微电子、材料、机械、统计学和管理学等多个不同学科，因此芯片产业需要大量的复合型人才。郭奎芳 [40]指出未来五年内，芯片产业对“技术+质量”复合型人才的需求缺口预计超过10万人，而美国将缺少6.7万人 [41]。因此校园教育应为芯片产业提供即具备质量管理意识又具有专业知识的复合型人才。当前教育体系缺少对即掌握芯片技术背景又掌握现代质量管理知识人才的培养。这种人才缺口使企业在推行六西格玛 [12,21, 22]、精益生产 [22~23]等质量管理方法时受到阻碍，也影响售后服务水平 [37]。

（六）知识产权与持续创新不足

芯片质量的提升离不开科学技术的不断革新，而科学技术革新又依赖于知识产权的保护。董朝阳 [33]对芯片材料专利保护的研究表明，目前在基础材料和制造工艺仍存在着知识产权保护不足的问题，这对企业开展长期的质量管理投入的积极性产生消极影响。冷紫莹 [39]的研究表明，国家投入对芯片的创新具有促进作用，但如何将投入有效转化为持续的革新能力仍是一个长期的挑战。

三、优化建议与发展趋势

（一）推进全生命周期数字化质量管理平台建设

构建覆盖芯片设计、制造、封装到测试全流程的数字化平台，是促进芯片产业链发展的重要方法之一。这需要将质量管理从局部扩大到至全产业链。芯片设计 [6]、芯片的研发 [1]以及对制造质量 [27]的研究，均表明了对全生命周期数字化质量管理平台的需求。通过建立统一的数字化平台，可以实现质量信息的共享，使供应商质量 [9]、测试结果 [13]，以及工艺缺陷数据 [4]均为基于数据的质量分析提供有力支持。

（二）深耕先进工艺与智能检测技术，提升质量管控精度

在制造与封装环节的质量管理需要持续迭代。高压IGBT封装 [10]、键合工艺 [28]、以及对激光微焊缝 [11]的研究均为特定工艺的质量提升提供了有力支持。深度学习模型 [32]、机器视觉系统 [17]和视觉检测 [18~20]关键技术，不仅是检测工具，更应作为全生命周期质量数据采集与分析的核心技术，包含设证、生产过程监控、封装、测试等环节，形成“检测-反馈-优化”闭环。

（三）强化供应链韧性管理与项目风险管理

灵活的供应链质量管理体系可有效地应对全球政策的不确定性。如供应链协同方案 [7]与供应商管理 [9]方法，构建了多源供应和透明管理的供应链管理网络。马婧雯 [5]提出对研发过程中的各类风险进行提前识别和提前应对应对。

（四）创新项目管理模式与低成本测试策略

研发与测试环节仍然离不开质量管理。如谭兰兰 [24]和龙萌萌 [8]研究的IPD模式，通过跨职能团队协作可提高研发效率与芯片质量。万金磊 [31]提出的低成本适应性测试方法，在确保测试覆盖率的前提下，降低测试成本。再结合杨阳 [14]对测试项目进度管理的研究，可实现保证测试质量的同时达到控制成本的效果。

（五）构建产学研融合的人才培养与创新生态

人才是实施质量管理的基础。需要学校教育培养既有芯片技术背景又有质量管理知识的专业人才。完善专利保护机制 [38]，再加上投资的引导作用 [39]，可完善产业链中的薄弱环节，为高质量芯片产业良性发展提供支持。

（六）推广先进质量管理方法并延伸至服务环节

张龙殿 [21]与陈宸 [22]将精益六西格玛的应用范围从生产制造扩大到了设计开发 [8]和售后服务 [37]环节。冯振 [23]和王晓 [35]在生产与全面质量管理方面的研究，为实施质量管理提供了参考依据。建立能覆盖产品全生命周期的质量管理，不仅能使产品质量符合标准要求，更能满足用户的需求。

四、结论

本文综述了芯片产业质量管理的研究现状。目前我国已形成设计、制造与封装、测试与验证、质量检测技术和质量管理体系等主要环节的质量管理体系，并在六西格玛、IPD模式、机器视觉与深度学习检测等管理方法上取得进展。但是仍存在产业全链条信息沟通不足、高端检测装备依赖进口、供应链不稳定、研发质

量风险高、缺乏复合型人才等问题。为了解决这些问题需要做到以下几点：（1）企业从局部改进转向全产业链协同工作；（2）建立覆盖芯片全生命周期的数字化质量管理体系；（3）推进智能检测与工艺改进相结合；（4）加强供应链稳定性与项目风险管

理；（5）并注重人才培养与产业环境建设。本研究建立的综述框架可为后续研究者提供参考，也为企业管理者推进质量管理体系的建设提供思路。

参考文献

- [1] 陈小华. A公司汽车芯片研发质量管理优化研究 [D]. 广东工业大学, 2024.
- [2] 王柱. H公司集成电路芯片测试项目质量管理改善研究 [D]. 浙江大学, 2023.
- [3] 王豪. 人工智能芯片生产过程中的质量标准化策略 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (10): 143–145.
- [4] 郑明杰, 潘桥, 许海燕. 基于深度学习的芯片封装缺陷检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(08): 45–53.
- [5] 马婧雯. 半导体芯片研发项目的风险管理 [D]. 厦门大学, 2022.
- [6] 王苑. G公司 MFX 芯片设计项目质量管理研究 [D]. 大连理工大学, 2024.
- [7] 高成虎. T 芯片设计公司供应链质量管理优化研究 [D]. 华东师范大学, 2024.
- [8] 龙萌萌. IPD 模式下芯片产品研发项目质量管理改进研究 [D]. 北京邮电大学, 2021.
- [9] 贾利娟. S 企业供应商质量管理改善方案研究 [D]. 吉林大学, 2024.
- [10] 陈利. IGBT 的研究与进展 [J]. 中国集成电路, 2022, 31(12): 13–23+28.
- [11] 周方明, 蒋尊宇, 陈琪昊, 等. 基于激光视觉的焊接机器人离线自动编程技术 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2021, 35(03): 37–41.
- [12] 江浩轩, 欧淑, 柏子尧, 等. 基于 DMAIC 模型的中小企业产品质量改进研究 [J]. 价值工程, 2023, 42(32): 45–47.
- [13] 兰永伟. M 公司芯片测试项目质量管理优化研究 [D]. 西华大学, 2024.
- [14] 杨阳. A 企业芯片测试项目进度计划和控制研究 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [15] 宋旻皓. 集成电路芯片测试项目质量管理研究 [D]. 华东理工大学, 2014.
- [16] 王妍. 基于深度学习的芯片外观缺陷检测模型研究 [D]. 天津工业大学, 2023.
- [17] 张金字, 朱立军, 林紫强. 基于机器视觉的晶圆表面缺陷检测方法研究 [J]. 计算技术与自动化, 2025, 44(03): 94–99+122.
- [18] Chen K, Zhou Y, Zhang Z, et al. Multilevel image segmentation based on an improved firefly algorithm [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016. 2016(pt.2): 1–12.
- [19] Chen K, Zhang Z, Chao Y, et al. Defects extraction for QFN based on texture detection and region of interest selection [M]. Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering. Springer Singapore, 2016. 119–126.
- [20] Chen K, Zhang Z, Chao Y, et al. Defects extraction for QFN based on mathematical morphology and modified region growing [C]. Mechatronics and Automation (ICMA), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 2426–2430.
- [21] 张龙殿. 基于六西格玛管理的 J 公司 PMU 质量改进研究 [D]. 江苏科技大学, 2023.
- [22] 陈宸. L 半导体公司产品质量精益六西格玛管理研究 [D]. 电子科技大学, 2021.
- [23] 冯振. IIT 公司生产质量管理改进研究 [D]. 大连理工大学, 2021.
- [24] 谭兰兰. X 芯片公司预研项目管理优化策略研究 [D]. 中南财经政法大学, 2022.
- [25] 王俊霞. K 公司芯片验证项目管理研究 [D]. 北京交通大学, 2022. DOI: 10.
- [26] 吴亚楠. S 公司芯片制造质量改善研究 [D]. 北京邮电大学, 2023.
- [27] 王祥. I 公司芯片制造质量管理改进研究 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [28] 周超. 铜基键合丝成球质量及键合工艺研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023.
- [29] 周海洋. 汽车级芯片封测、失效分析及质量管理 [D]. 天津大学, 2012.
- [30] 张柯. W 公司芯片封装质量管理体系设计 [D]. 北京化工大学, 2008.
- [31] Tai Song, Huaguo Liang, Tianming Ni, Zhengfeng Huang, Yingchun Lu, Jinlei Wan, Aibin Yan, “Pattern Reorder for Test Cost Reduction Through Improved SVM-RANK Algorithm,” [J] IEEE Access, vol. 8, pp. 147965–147972, 2020.
- [32] 王妍. 基于深度学习的芯片外观缺陷检测模型研究 [D]. 天津工业大学, 2023.
- [33] 饶永明, 吴帅, 闫峰, 等. 芯片表面印刷符号结构缺陷的质量评估方法研究 [J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(09): 1642–1649.
- [34] 高玉. DF 公司芯片制造检测设备产品战略研究 [D]. 中央财经大学, 2023.
- [35] 王晓. 华芯半导体公司质量管理研究 [D]. 吉林大学, 2018.
- [36] 王花朋. A 公司芯片研发项目质量改进研究 [D]. 北京理工大学, 2016.
- [37] 朱晨清. D 公司半导体设备售后服务质量管理改进研究 [D]. 大连理工大学, 2022.
- [38] 董朝阳. 加强新材料专利保护势在必行 [N]. 中国知识产权报, 2019–12–11(5).
- [39] 冷紫莹. 国家集成电路投资基金投资对芯片行业研发创新影响研究 [D]. 江西财经大学, 2020.
- [40] 郭奎芳. 芯片产业视域下高职生职业能力的现状及培养策略研究 [D]. 天津职业技术师范大学, 2024.
- [41] 美国半导体行业协会称, 2030 年美国半导体行业人才缺口将达 6.7 万人 [J]. 金属功能材料, 2023, 30(04): 58.

露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护

袁伟, 院鹏春, 吕鸿鹏

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ETQM.2026010023

摘 要 : 针对露天煤矿高强度、高粉尘、强振动的恶劣工况, 以及传统维护模式响应滞后、成本高昂的痛点, 本文提出了一套露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护体系。系统分析挖掘、运输、破碎等核心设备的故障机理, 评析事后维修、定期维护等传统模式的局限性。并在此基础上, 构建了以可靠性、实时性、兼容性和可扩展性为设计原则, 涵盖感知层、传输层、平台层和应用层的“四层递进”体系架构。该体系依托工业物联网、大数据与人工智能三大关键技术, 重点阐述了多源异构数据采集与融合、基于机器学习的智能故障诊断、基于数据驱动的设备剩余使用寿命(RUL)预测, 以及面向生产全局的智能维护决策优化等核心实现方法。通过构建“监测-诊断-预测-维护-复盘”的闭环管理, 该体系能够实现对设备故障的秒级预警、精准定位与寿命预测, 并输出兼顾维护成本与生产效益的最优维护方案, 为提升露天煤矿设备管理水平、保障安全生产、降低运营成本提供了系统性的技术解决方案。

关 键 词 : 露天煤矿; 智能诊断; 预测性维护; 剩余使用寿命预测

Intelligent Diagnosis and Preventive Maintenance of Mechanical Equipment in Open-Pit Coal Mines

Yuan Wei, Yuan Pengchun, Lv Hongpeng

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : In response to the harsh working conditions of open-pit coal mines, characterized by high intensity, high dust levels, and strong vibrations, as well as the drawbacks of traditional maintenance models such as delayed response and high costs, this paper proposes an intelligent diagnosis and preventive maintenance system for mechanical equipment in open-pit coal mines. It systematically analyzes the failure mechanisms of core equipment such as excavation, transportation, and crushing, and evaluates the limitations of traditional models such as post-failure repair and regular maintenance. Building on this foundation, a "four-layer progressive" system architecture is constructed, adhering to design principles of reliability, real-time performance, compatibility, and scalability, encompassing the perception layer, transmission layer, platform layer, and application layer. Leveraging three key technologies—industrial IoT, big data, and artificial intelligence—the paper focuses on elaborating on core implementation methods such as multi-source heterogeneous data acquisition and fusion, intelligent fault diagnosis based on machine learning, data-driven remaining useful life (RUL) prediction of equipment, and intelligent maintenance decision optimization oriented towards overall production. Through the establishment of a closed-loop management system encompassing "monitoring–diagnosis–prediction–maintenance–review," this system enables second-level early warning, precise positioning, and life prediction of equipment failures, and outputs optimal maintenance plans that balance maintenance costs and production efficiency. It provides a systematic technological solution for enhancing the equipment management level, ensuring safe production, and reducing operational costs in open-pit coal mines..

Keywords : open-pit coal mine; intelligent diagnosis; predictive maintenance; remaining useful life prediction

引言

露天煤矿凭借其开采规模大、资源回收率高、生产效率高等优势, 在我国煤炭生产体系中占据着举足轻重的地位。然而露天煤矿的开采作业环境极其恶劣, 设备长期暴露于高粉尘、强振动、大温差及重载荷的严苛工况之下, 导致其故障率高、可靠性低。如何保障这

些关键设备的稳定、高效运行，已成为制约露天煤矿智能化转型与高质量发展的核心瓶颈。在此背景下，本文聚焦露天煤矿机械设备的智能诊断与预防性维护展开研究。旨在构建一套集数据采集、智能分析、预测预警与决策优化于一体的综合性技术体系。文章分析露天煤矿关键设备的维护现状与故障机理，进而提出智能诊断与预测性维护体系的总体架构与设计原则，并深入探讨多元数据融合、智能故障诊断、寿命预测及维护决策优化等核心关键技术的实现方法，以期为提升我国露天煤矿的设备管理智能化水平、保障安全生产、实现降本增效提供理论参考与技术路径。

一、露天煤矿关键设备及其维护模式分析

（一）核心设备分类与工作原理

露天煤矿设备机械维修的高效性一直是矿山行业的焦点问题。设备故障不仅会导致生产中断，还可能对工人的安全构成威胁^[1]。露天煤矿生产以“采、运、破”为核心流程，配套的关键设备需适配高强度、连续性作业需求，且需耐受高粉尘、强振动的恶劣工况^[2]。开采环节由挖掘设备主导，主要包括单斗挖掘机与轮斗挖掘机，前者通过液压驱动铲斗进行周期性挖掘，后者则利用旋转斗轮实现连续切削，其核心部件需承受百吨级的冲击载荷。运输环节作为物流枢纽，主要依靠载重百吨级的矿用自卸卡车在坡道上转运物料，大型矿山则配套自移式破碎站与带式输送机系统，通过摩擦力实现连续高效输送^[3]。破碎环节作为预处理单元，通常由颚式破碎机负责粗破，圆锥破碎机进行中细破，再经振动筛按粒度分级，以确保出料均匀，满足后续加工要求。

（二）设备常见故障模式与机理分析

露天煤矿设备故障的发生与恶劣工况、高负荷运行直接相关，不同类型设备的故障模式存在显著差异，但故障机理多围绕部件老化、磨损、应力集中展开^[4]。挖掘设备故障高发于液压系统与结构件，如密封件老化导致的液压油泄漏、冲击载荷引发的回转支承异响，以及频繁冲击造成的斗齿断裂^[5]。运输设备故障集中在传动与制动系统，例如粉尘进入或高温导致的发动机拉缸、重载工况下的变速箱齿轮磨损，以及长下坡时因高温引发的制动蹄片烧蚀。破碎设备故障则以易损件磨损和轴承故障为主，包括与硬岩直接摩擦导致的颚板磨损、润滑不良或粉尘侵入造成的轴承过热，以及异物划伤或跑偏摩擦引起的输送带撕裂。

（三）传统维护模式评析

露天煤矿传统维护模式以“被动响应”或“固定周期”为核心逻辑，难以适配设备动态运行状态，主要包含事后维修、定期预防性维护与视情维护三种类型。事后维修在设备故障后进行，虽短期成本低，但易导致突发停产和连锁故障^[6]。定期预防性维护按固定周期执行，能降低突发故障率，但易造成过度维修或遗漏非周期性隐患。视情维护依据人工巡检决策，虽更灵活，但高度依赖人员经验，无法实时监测内部状态，难以实现早期预警。

二、智能诊断与预测性维护体系总体架构

（一）设计原则

露天煤矿智能诊断与预测性维护体系的设计，必须以特殊工

况和生产需求为核心，并遵循四大原则，可靠性优先原则，要求硬件能抵抗极端温、粉尘与振动，确保数据采集稳定；实时性保障原则，要求故障预警响应在秒级至分钟级，避免生产中断；兼容性适配原则，需支持多协议解析，打通不同品牌设备间的数据孤岛；可扩展性预留，体系需为未来新增设备和算法升级预留接口与空间，降低长期改造成本。

（二）体系架构

基于上述设计原则，体系采用“四层递进”的结构设计，从数据采集到应用落地形成全流程闭环。感知层作为基础，针对挖掘机、卡车、破碎机等不同设备部署振动、温度、压力等多类型传感器，并同步采集 PLC 数据，全面覆盖核心部件的运行状态^[7]。传输层承担数据流转，移动设备采用 5G+ 北斗双模传输保障信号稳定，固定设备则通过工业以太网连接，同时利用边缘网关对原始数据进行预处理，以减轻云端压力并提升响应速度。平台层作为核心中枢，利用时序数据库存储海量历史数据，通过算法引擎进行故障诊断与寿命预测，并以可视化仪表盘直观呈现结果^[8]。应用层面向运维与调度人员，推送精准的故障报警与寿命报告，提供智能维护计划建议，并支持故障溯源查询，从而实现“监测-诊断-预测-维护-复盘”的闭环管理。

（三）关键技术支撑

体系的稳定运行依赖三大核心技术的协同支撑，共同保障数据采集、处理与智能分析的有效性。工业物联网（IIoT）技术通过耐极端环境的传感器与网关，保障了设备状态数据的全面采集与可靠传输。大数据处理技术负责对海量时序数据进行存储、清洗和特征提取，为智能分析提供高质量输入^[9]。人工智能（AI）技术作为“智能”核心，运用机器学习与深度学习算法，精准诊断故障并预测部件剩余寿命。三者协同运作，IIoT 确保数据“采得全、传得通”，大数据技术保障数据“洗得净、用得上”，AI 则实现数据“判得准、算得对”，共同构成了体系的技术基石。

三、核心技术与实现方法

（一）多源异构数据采集与融合技术

露天煤矿设备数据来源复杂且格式多样，多源异构数据采集与融合需围绕“全维度覆盖、高质量处理、多维度整合”展开^[10]。数据采集阶段，针对不同设备部署振动、温度等传感器，并通过 CAN 总线读取 PLC 数据，同时结合人工巡检记录，构建全面的数据网络。在预处理环节，采用 3σ 原则、小波变换等方法清洗噪声、填补缺失，并对数值与文本数据进行标准化，提升数

据质量。在融合阶段，采用特征层融合策略，将同一设备的多源特征整合为统一特征向量，通过加权算法形成全面反映设备状态的数据集合，为智能诊断提供高质量输入。

（二）基于机器学习的智能故障诊断

基于机器学习的智能故障诊断需结合露天煤矿设备故障特点，构建“数据标注-模型训练-实时诊断”的全流程技术体系。在数据集构建阶段，收集设备历史运行与故障记录，进行故障类型标注，并通过数据增强扩充小样本故障数据。其次在模型选择上，根据故障复杂度适配算法：对特征明确的故障采用支持向量机（SVM）；对多特征耦合的故障采用随机森林；对依赖深层特征的故障采用卷积神经网络（CNN）。模型训练通过交叉验证优化超参数，确保识别准确率超95%。在实时诊断阶段，模型在10秒内完成故障判断与定位，若概率超阈值则自动推送可能原因、处理建议，并向工作人员发送报警信息，实现快速响应。

（三）基于数据驱动的设备剩余使用寿命预测

基于数据驱动的设备剩余使用寿命（RUL）预测需聚焦设备退化规律，构建“特征筛选-模型构建-误差优化”的技术路径。退化特征提取是预测的核心前提，需从海量监测数据中筛选与部件寿命强相关的特征，对于轴承这类旋转部件，选取振动信号的“均方根随运行时间变化率”“峰值因子增长趋势”作为核心退化特征，因这些特征随轴承磨损加剧呈现明显上升趋势；对于发动机这类复杂系统，选取“机油污染度”“冷却液温度波动幅度”“油耗增长率”作为退化特征，这些参数直接反映发动机内部零件的老化程度；对于输送带这类易损件，选取“张紧力衰减速率”“跑偏量累积值”作为退化特征，可量化输送带的性能退化状态，特征筛选过程中通过皮尔逊相关系数与互信息熵，剔除与寿命相关性低的冗余特征，降低模型计算复杂度。预测模型构建需根据退化特征的线性/非线性特性选择适配算法，对于输送带磨损这类退化趋势平稳的场景，采用线性回归模型，通过拟合退化特征与运行时间的线性关系，计算特征达到失效阈值所需时间，即剩余使用寿命；对于发动机、轴承这类退化趋势非线性的部件，采用长短期记忆网络（LSTM），该模型可捕捉时序数据中的长期依赖关系，通过输入历史退化特征序列，输出未来一段时间内的特征变化趋势，进而预测寿命终点，模型训练时采用Adam优化器最小化预测值与实际寿命的均方误差（MSE）。模型优化环节需建立动态更新机制，定期将设备实际报废数据反馈至模型，重新训练调整参数，同时引入迁移学习技术，将成熟矿山的模型参数迁移至新矿山设备，减少新场景下的数据采集量，确保剩余使用寿命

参考文献

[1] 杜林栋. 露天煤矿设备机械维修中故障诊断技术的应用 [J]. 工程技术研究, 2024, 6(11): 190-192. DOI: 10.12417/2705-0998.24.11.058.
[2] 孟祥健, 田定康. 露天煤矿机械设备故障诊断与维修 [J]. 自动化应用, 2023, 64(15): 125-127, 131.
[3] 富哈. 露天煤矿机械安全管理与维修保养管控 [J]. 工程机械与维修, 2023(6): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2114.2023.06.012.
[4] 张永富. 浅谈露天煤矿机械设备的维修保养工艺 [J]. 中国设备工程, 2021(15): 250-251. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.15.152.
[5] 秦曙辉. 露天煤矿机械设备维修性的讨论 [J]. 露天采矿技术, 2014(7): 70-71, 76. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2014.07.021.
[6] 宋伟. 露天煤矿机械设备运行管理策略探究 [J]. 魅力中国, 2020(44): 329.
[7] 鲜小泉. 露天煤矿机械设备的发展与安全管理方法 [J]. 科技资讯, 2015, 13(13): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2015.13.116.
[8] 张玉林. 现代化露天煤矿机械设备维修性的讨论 [J]. 科学与信息化, 2017(12): 121, 123.
[9] 张国强. 露天煤矿机械安全管理与维修保养管控 [J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 155-157. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.052.
[10] 李一林. 浅谈露天煤矿机械设备的维修保养工艺 [J]. 工程建设与发展, 2024, 3(5): 101-103. DOI: 10.12417/2811-0722.24.05.034.

预测误差控制在10%以内，为预防性维护提供精准时间依据。

（四）智能维护决策与优化

智能维护决策与优化需结合露天煤矿生产实际，平衡设备维护需求与生产计划，构建“多要素输入-成本优化-方案输出”的决策体系。决策输入需整合三类核心要素，设备重要性等级，根据设备在生产流程中的作用划分优先级，优先级高的设备需优先安排维护；设备剩余使用寿命（RUL），当 $RUL < 7$ 天时标记为“紧急维护”， $7 \leq RUL \leq 30$ 天时标记为“计划维护”， $RUL > 30$ 天时暂不安排维护；生产计划安排，需避开矿山高产时段、衔接设备闲置窗口，避免维护导致的产量损失。维护决策优化以“总成本最低”为目标，总成本涵盖维护成本（备件采购费、人工维修费）与停产损失，通过建立成本优化模型，计算不同维护时间点的总成本。例如某台主采挖掘机 RUL 为 10 天，若选择当前维护，需支付备件费 2 万元 + 人工费 1 万元，但会导致日间停产 8 小时（损失 80 万元），总成本 83 万元；若选择 3 天后夜间维护，需支付维护成本 3 万元（备件库存紧张需加急采购），但仅停产 4 小时（损失 40 万元），总成本 43 万元，模型通过对比不同方案的总成本，选择最优维护时机。维护方案输出需明确具体执行细节，维护时间精确到小时，避免与生产冲突；维护内容细化至部件级，确保维护全面性；备件清单需同步至仓库管理系统，自动核查备件库存，若库存不足则触发紧急采购流程；同时将维护方案推送至生产调度部门，协调调整维护时段的生产计划，避免影响整体采剥进度，维护完成后需记录维护效果，反馈至决策模型优化后续维护策略，形成“预测-决策-执行-反馈”的闭环管理。

四、结束语

本文围绕露天煤矿机械设备维护的痛点与挑战，系统性地提出并构建了一套集智能诊断与预测性维护于一体的综合性技术体系。该体系从露天煤矿的实际生产需求与恶劣工况出发，通过构建“四层递进”的总体架构，整合了工业物联网、大数据与人工智能等前沿技术，深入阐述了从多源异构数据采集融合，到基于机器学习的故障诊断，再到基于数据驱动的剩余使用寿命预测，实现智能维护决策优化的全流程闭环管理方法。露天煤矿机械设备的智能诊断与预测性维护是一个持续演进、不断深化的过程，需要学术界与产业界共同努力，推动我国矿山行业向更安全、更高效、更绿色的未来迈进。

冲床滑块运动轨迹偏差对钣金件冲压质量的影响分析及补偿控制研究

潘祺钦，蔡文忠，郭洪昌，刘晓欢，杨凯，郑炜嘉
浙江易锻精密机械有限公司，浙江 宁波 315700
DOI:10.61369/ETQM.2026010025

摘 要： 冲床滑块是钣金冲压加工中传递动力与运动的核心部件，其运动轨迹精度直接决定钣金件的最终质量。本文以曲柄式冲床为研究载体，深入剖析轨迹偏差对钣金件尺寸精度、形状精度、表面质量及力学性能的作用机制，从机械结构优化与电控系统升级两个方向提出综合补偿控制策略，并通过对比实验验证策略有效性。研究结果显示，采用“机械改进 + 实时电控补偿”方案后，滑块运动轨迹偏差可控制在0.015mm以内，钣金件尺寸超差率从28%降至3%，为高精度钣金冲压生产提供理论支持与实践路径。

关 键 词： 冲床滑块；运动轨迹；偏差；钣金件；冲压质量；补偿机制

Analysis of the Impact of Punch Slider Motion Trajectory Deviation on the Stamping Quality of Sheet Metal Parts and Research on Compensation Control

Pan Qiqin, Cai Wenzhong, Guo Hongchang, Liu Xiaohuan, Yang Kai, Zheng Weijia
Zhejiang Yidian Precision Machinery Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315700

Abstract： The punch slider is the core component for transmitting power and motion in sheet metal stamping processes, and the accuracy of its motion trajectory directly determines the final quality of sheet metal parts. This paper takes a crank-type punch as the research subject to deeply analyze the mechanisms by which trajectory deviations affect the dimensional accuracy, shape accuracy, surface quality, and mechanical properties of sheet metal parts. Comprehensive compensation control strategies are proposed from two directions: mechanical structure optimization and electronic control system upgrades, and the effectiveness of these strategies is verified through comparative experiments. The research results indicate that after adopting the "mechanical improvement + real-time electronic control compensation" solution, the deviation in the slider's motion trajectory can be controlled within 0.015 mm, and the out-of-tolerance rate for the dimensions of sheet metal parts decreases from 28% to 3%. This provides theoretical support and practical pathways for high-precision sheet metal stamping production.

Keywords： punch slider; motion trajectory; deviation; sheet metal parts; stamping quality; compensation mechanism

引言

在汽车制造、电子设备、航空航天等领域，钣金件凭借轻量化、高强度、易批量生产的优势，成为关键结构与外观部件的核心选择^[1,2]。冲压加工作为钣金件成型的主流工艺，其质量稳定性直接影响终端产品的装配性能与使用寿命。冲床滑块作为连接传动系统与模具的关键部件，需严格遵循“垂直往复、水平无偏”的理想运动轨迹——在垂直方向保持稳定的速度与行程，在水平方向控制极小的径向跳动，确保模具上下模精准对位。随着制造业对钣金件精度要求的不断提升，滑块运动轨迹偏差引发的质量问题愈发突出。实际生产中，受机械磨损、负载波动、温度变形等因素影响，滑块常出现“水平偏移”“倾斜摆动”“行程波动”等轨迹异常，导致钣金件出现孔位偏差、折弯角度超差、表面划痕等缺陷，不仅增加废品率，还会加速模具损耗，提高生产成本^[3]。因此，系统研究滑块运动轨迹偏差的影响规律与补偿方法，对推动冲压行业高质量发展具有重要现实意义。

一、滑块运动轨迹偏差对钣金件冲压质量的影响机制

（一）对钣金件尺寸精度的影响

尺寸精度是钣金件装配性能的核心指标^[4]，滑块轨迹偏差对尺寸精度的影响主要体现在“行程深度偏差”与“水平位置偏差”两个方面。

当滑块存在行程深度偏差时，会导致钣金件的高度、孔深、折弯高度等尺寸超差。例如，在钣金件冲孔加工中，若滑块下行深度不足（偏差 -0.08mm ），会导致孔未完全穿透，形成“半冲孔”缺陷；若下行深度过大（偏差 $+0.08\text{mm}$ ），会使下模承受过大压力，孔边缘出现“翻边”，超出设计尺寸要求。在折弯加工中，行程深度偏差会直接改变折弯角度，如设计折弯角度为 90° ，滑块下行深度不足 0.05mm 时，折弯角度会增大至 $91.5^\circ\sim 92^\circ$ ，导致钣金件无法与其他部件装配；若深度过大 0.05mm ，折弯角度会减小至 $88\sim 88.5^\circ$ ，同样影响装配精度。

当滑块存在水平位置偏差时，会导致钣金件的孔位、轮廓尺寸出现偏差。例如，在连续冲孔加工中，若滑块每次下行时水平偏移 0.03mm ，经过10次冲压后，最终孔位与设计位置的偏差会累积至 0.3mm ，远超 $\pm 0.05\text{mm}$ 的公差要求；在汽车门板轮廓冲压中，滑块水平偏移会导致模具与工件对位偏差，使门板边缘出现“缺口”或“多余料”，贴合间隙增大，影响车身密封性。

（二）对钣金件形状精度的影响

形状精度反映钣金件几何形态的完整性，滑块轨迹偏差引发的“倾斜”“卡顿”会直接导致钣金件形状畸变，常见缺陷包括“翘曲”“扭曲”“波浪形变形”^[5]。当滑块运动存在倾斜偏差时，会使钣金件承受不均匀冲压力，进而出现翘曲。例如，在平板冲压加工中，若滑块左侧下行速度比右侧快 0.02m/s ，左侧冲压力会大于右侧，导致钣金件左侧向下弯曲、右侧向上翘起，形成“单边翘曲”，翘曲量可达 $0.5\sim 1\text{mm}$ ；在圆柱面钣金件冲压中，滑块倾斜会导致工件圆柱度超差，如设计圆柱度为 0.03mm ，倾斜偏差会使圆柱度增大至 0.1mm 以上，影响工件旋转性能。

当滑块运动存在卡顿偏差时，会导致钣金件局部出现波浪形变形。例如，在拉伸加工中，钣金件需通过滑块持续下行实现塑性变形，若滑块在中间位置卡顿 0.1s ，会导致该位置材料变形不充分，与周围区域形成高度差，出现“波浪纹”；在折弯加工中，卡顿会使折弯部位出现“台阶”，折弯边直线度从 0.02mm 增大至 0.08mm ，破坏形状完整性。

（三）对钣金件表面质量的影响

钣金件表面质量直接影响外观与耐腐蚀性，滑块轨迹偏差会通过“摩擦加剧”“压力不均”导致表面缺陷，常见问题包括“划痕”“压痕”“凹陷”^[6]。当滑块运动存在水平窜动偏差时，会使模具与钣金件产生额外摩擦，出现划痕。例如，在不锈钢钣金件冲压中，滑块水平窜动会使上模与工件表面相对滑动，若模具表面存在微小毛刺，会在工件表面划出长度 $2\sim 5\text{mm}$ 的划痕；在家电面板冲压中，即使 0.1mm 的划痕也会导致产品报废，显著增加生产成本。

当滑块运动存在压力波动偏差（下行过程中冲压力不均匀）时，会导致钣金件表面出现压痕或凹陷。例如，在冲压带有凸点的钣金件时，若滑块压力突然增大 10% ，会使凸点周围材料过度挤压，形成“环形压痕”；若压力突然减小 10% ，会导致凸点高度不足，出现“凹陷”，这些缺陷不仅影响外观，还会降低结构

强度。

（四）对钣金件力学性能的影响

钣金件的力学性能决定其使用可靠性，滑块轨迹偏差会通过“变形不均匀”“残余应力增大”改变材料性能，甚至导致工件开裂。

当滑块轨迹偏差导致材料变形不均匀时，会使钣金件局部出现“过度变形”或“变形不足”，改变力学性能。例如，在低碳钢钣金件拉伸加工中，若滑块倾斜导致工件一侧变形量是另一侧的2倍，变形量大的区域会出现“加工硬化”，抗拉强度从 300MPa 增至 400MPa ，延伸率从 25% 降至 15% ，而变形量小的区域性能未达标，整体性能不均；在折弯加工中，变形不均匀会降低折弯部位疲劳强度，长期使用易出现裂纹。

当滑块轨迹偏差导致残余应力增大时，会加剧钣金件时效变形。例如，在 5mm 以上厚板冲压中，滑块卡顿会使材料内部产生 $100\sim 150\text{MPa}$ 的附加残余应力，若未及时消除，工件存放或使用中会出现时效变形，平面度从 0.05mm 增至 0.2mm ；在高精度仪器钣金件中，残余应力过大会影响仪器测量精度，导致设备性能下降。

二、滑块运动轨迹偏差的补偿控制策略

（一）基于机械结构优化的被动补偿

机械结构优化是减少轨迹偏差的基础，通过改进部件设计、提升装配精度、加强维护保养，从源头降低偏差产生的可能性。

在关键部件设计上，针对易磨损部件采用高强度、高耐磨性材料。例如，曲柄与连杆的连接轴承可选用陶瓷材料，其耐磨性是传统轴承钢的 $3\sim 5$ 倍，使用寿命延长2倍以上，能有效减缓间隙增大速度，将水平偏移量控制在 0.01mm 以内；导轨表面采用等离子喷涂技术，形成厚度 $50\sim 100\mu\text{m}$ 的硬质涂层（硬度 $\text{HV}800$ 以上），摩擦系数降低 30% ，磨损量减少 50% ，避免滑块“卡滞”。同时，在连杆与滑块连接部位增加“浮动接头”，允许连杆存在微小角度偏差，避免附加扭矩传递至滑块，减少倾斜偏差。

在装配工艺上，采用高精度测量工具严格控制误差。装配曲柄与连杆时，使用激光对中仪检测同轴度，确保误差不超过 0.005mm ；装配导轨与滑块时，用塞尺检测配合间隙，确保间隙在 $0.01\sim 0.03\text{mm}$ 范围内，间隙过大时加装垫片调整，间隙过小时通过精密磨削修正。装配后还需进行空载试运行与负载测试，空载时通过光栅尺检测滑块水平偏移与垂直速度波动，确保偏移量不超过 0.02mm 、速度波动不超过 5% ；负载时模拟实际工况检测轨迹偏差，不合格则重新调整。

在维护保养上，建立“定期检查—及时更换”制度。制定“每月检查、每季度保养、每年大修”计划，每月用百分表检测导轨磨损量，磨损量达 0.03mm 时及时更换；每季度拆解曲柄连杆机构，清洗轴承并补充润滑脂，避免润滑不足加剧磨损；每年全面拆解设备，检测曲柄、滑块变形情况，变形量超过 0.02mm 时通过校正或更换恢复精度。同时，在冲床上安装振动传感器与温度传感器，实时监测部件状态，当轴承振动幅度超过 0.1mm/s 或温度超过 80°C 时，及时预警停机检查。

（二）基于电控系统的主动补偿

电控系统主动补偿是控制轨迹偏差的核心，通过实时检测、

动态调整、预测优化，实现偏差的精准修正^[7]。构建多传感器实时检测网络是基础，在滑块四个角部分别安装光栅尺，实时采集水平位置与垂直行程数据，计算水平偏移与倾斜偏差；在曲柄轴上安装扭矩传感器，检测负载变化；在模具上安装压力传感器，监测冲压力分布。传感器数据实时传输至数控系统，通过卡尔曼滤波算法消除噪声干扰，确保偏差数据可靠，滤波后光栅尺检测误差从0.001mm降至0.0005mm。

采用PID控制算法实现动态调整，根据检测到的轨迹偏差实时优化伺服电机输出。例如，光栅尺检测到滑块水平偏移0.02mm时，系统计算调整量，通过PID算法控制伺服电机驱动导轨微调，将滑块拉回预设位置，响应时间控制在5ms以内；针对负载波动导致的行程深度偏差，采用“负载自适应PID控制”，根据扭矩传感器数据动态调整PID参数，负载增大时提高输出扭矩，避免行程不足，负载减小时降低扭矩，防止“过冲”，可将行程深度偏差控制在0.01mm以内。

引入机器学习算法实现预测性补偿，通过BP神经网络建立偏差预测模型^[8,9]。采集大量历史数据（不同负载、温度、材料厚度下的偏差数据）训练模型，使模型能根据当前工况参数（材料厚度、冲压速度、环境温度）预测即将出现的偏差，提前输出补偿指令。例如，检测到材料厚度增加0.1mm时，模型预测滑块行程

深度需增加0.05mm，提前调整伺服参数；检测到环境温度升高10℃时，预测水平偏移会增加0.01mm，提前微调导轨位置，将偏差消除在萌芽状态。

三、补偿控制策略的实验验证

为验证补偿策略有效性，以J23-63型曲柄冲床为实验对象，1mm厚SPCC低碳钢薄板为冲压材料，开展“无补偿”“仅机械补偿”“机械+电控补偿”三种工况的对比实验，测试滑块轨迹偏差与钣金件质量。

（一）实验设备与参数

实验设备包括J23-63型冲床（公称压力630kN，最大行程120mm）、光栅尺（精度0.001mm）、扭矩传感器（量程0-1000N·m）、压力传感器（量程0-1000kN）、三维坐标测量仪（精度0.001mm）。冲压工艺参数设置为：滑块行程速度0.25m/s，冲压间隙0.15mm，连续冲压100件带冲孔与折弯特征的钣金件。

（二）实验结果与分析

实验结果显示，三种工况下的滑块轨迹偏差与钣金件质量存在显著差异，具体数据如下表1所示：

表1不同工况下的滑块轨迹偏差与钣金件质量差异

工况类型	滑块水平偏移量 (mm)	滑块倾斜偏差 (mm)	滑块行程深度偏差 (mm)	钣金件孔位超差率 (%)	钣金件折弯角度超差率 (%)	钣金件表面划痕缺陷率 (%)
无补偿	0.05-0.08	0.04-0.06	0.05-0.07	25	30	20
仅机械补偿	0.03-0.04	0.02-0.03	0.03-0.04	10	12	8
机械+电控补偿	0.008-0.015	0.005-0.008	0.005-0.01	3	4	1

从表中数据可见，无补偿工况下，滑块轨迹偏差最大，钣金件质量缺陷率最高；仅机械补偿工况下，滑块各项偏差显著降低，钣金件缺陷率大幅下降；机械+电控补偿工况下，滑块水平偏移量最小仅0.008mm，行程深度偏差最小仅0.005mm，钣金件孔位超差率降至3%，折弯角度超差率降至4%，表面划痕缺陷率降至1%，整体质量显著提升。

直观展现不同工况下滑块轨迹偏差的变化规律，绘制图1所示对比曲线。由图可知，随着补偿策略的升级，水平偏移量、倾斜偏差、行程深度偏差均呈显著下降趋势，其中“机械+电控补偿”方案对倾斜偏差的优化效果最为突出，降幅达87%，充分体现了机械结构优化与电控系统补偿的协同作用。

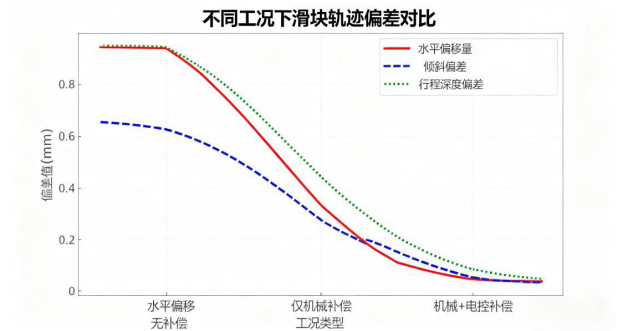


图1不同工况下滑块轨迹偏差对比

不同工况下钣金件质量缺陷率的变化趋势如图2所示。曲线清晰表明，无补偿工况下各类缺陷率均处于较高水平，仅机械补偿

可使缺陷率大幅下降，而机械+电控补偿方案进一步将孔位超差率降至3%、折弯角度超差率降至4%、表面划痕缺陷率降至1%，各类缺陷率降幅均超过80%，直观印证了滑块轨迹偏差控制对钣金件质量的关键影响。

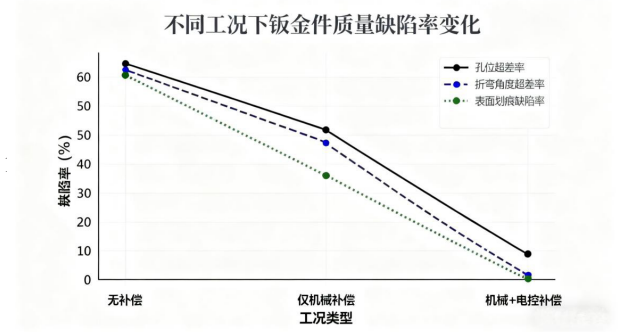


图2不同工况下钣金件质量缺陷率对比

实验结果表明，机械补偿能有效减少静态偏差，电控补偿可实时修正动态偏差，两者结合可实现滑块轨迹偏差的精准控制，大幅提升钣金件冲压质量。

四、结语

本文通过对滑块运动轨迹偏差的系统研究，得出以下结论：采用“机械结构优化+电控系统补偿”的综合策略，可将滑块轨迹偏差控制在0.015mm以内，钣金件缺陷率大幅降低，有效解决

冲压质量问题。未来研究可聚焦三个方向：一是开发基于工业互联网的智能补偿系统，实现多台冲床的协同补偿与远程监控^[10]；二是深入研究多因素耦合偏差的作用机制，优化补偿算法，提升复杂工况下的控制精度；三是探索数字孪生技术在补偿控制中的应用，通过构建冲床数字模型，提前模拟偏差影响，优化补偿参数，为高精度冲压生产提供更高效的解决方案。

参考文献

[1] 苾晓楠. 钣金件压筋加工方法改进与参数补偿机制 [J]. 金属加工 (冷加工), 2025, (10): 94-95+98.

[2] 卢广华, 倪雁冰, 范胜波, 等. 钣金虚拟仿真实验平台建设与应用 [J]. 锻压技术, 2024, 49(01): 236-240.

[3] 郑文雅, 宋安源. 复杂型面钛合金钣金零件高效数控加工工艺分析 [J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(01): 162-164.

[4] 王俊豪. 基于响应面与3DCS的车身钣金件定位布局优化设计 [J]. 汽车制造业, 2025, (05): 76-81.

[5] 刘春晖. 汽车钣金修复从入门到精通 [M]. 化学工业出版社: 202007: 235.

[6] 冯运, 郭寨东, 刘晓阳. 铆工 (钣金工) 实用手册 [M]. 化学工业出版社: 202205: 604.

[7] 续永, 王瑛琪, 张武亮. 多端直流配电系统对负载变流器相位补偿控制的应用研究 [J]. 灯与照明, 2025, 49(05): 130-132.

[8] 刘英, 夏强, 王伟彬, 等. 基于可解释机器学习模型的复合生物酶道路固化土类水稳结构强度评估研究 [J]. 四川环境, 2025, 44(05): 110-118.

[9] 张思晨, 周善石, 郭睿, 等. 基于机器学习的 ERP 中长期预报方法研究 [J/OL]. 大地测量与地球动力学, 1-11[2025-10-31].

[10] 陶冲. 基于智能监理技术的机械工程设备安装质量控制研究 [J]. 中国品牌与防伪, 2025, (09): 178-180.

船舶焊接工艺改进对结构安全性的影响研究

欧阳荣

中国船级社实业有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ETQM.2026010035

摘 要 : 随着船舶工业的不断发展, 焊接工艺的改进成为提高船舶结构安全性的重要途径。本文研究了不同焊接工艺改进对船舶结构安全性的影响, 分析了传统焊接方法与新型焊接技术在强度、耐腐蚀性以及抗疲劳性能方面的差异。通过实验数据和理论分析, 探讨了优化焊接工艺的技术路线和应用前景。研究结果表明, 焊接工艺的优化能够显著提高船舶结构的整体安全性, 具有广阔的应用价值。

关 键 词 : 船舶; 焊接工艺; 结构安全性; 改进; 疲劳性能

Research on the Impact of Improvements in Ship Welding Processes on Structural Safety

Ouyang Rong

Wuhan Branch, China Classification Society Industrial Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the continuous development of the shipbuilding industry, improvements in welding processes have become an important means to enhance the structural safety of ships. This paper investigates the impact of various welding process improvements on the structural safety of ships, analyzing the differences in strength, corrosion resistance, and fatigue resistance between traditional welding methods and new welding technologies. Through experimental data and theoretical analysis, the technical routes and application prospects for optimizing welding processes are explored. The research results indicate that optimizing welding processes can significantly enhance the overall safety of ship structures, demonstrating broad application value.

Keywords : ship; welding process; structural safety; improvement; fatigue performance

引言

船舶焊接作为船舶结构制造中的关键工艺, 直接影响到船舶的强度和耐久性。随着船舶设计要求的提高, 传统的焊接工艺已经难以满足现代船舶对安全性和可靠性的要求。为了提高船舶结构的安全性, 许多研究者致力于焊接工艺的改进与创新, 尤其是在焊接接头的强度、抗疲劳性和耐腐蚀性方面。本研究旨在分析焊接工艺改进对船舶结构安全性的影响, 并探讨其在实际应用中的可行性。

一、船舶焊接工艺概述

(一) 船舶焊接技术的发展历程

早期的船舶焊接工艺多采用手工焊接, 主要以电弧焊为主。这种焊接方法虽然操作简单, 但焊接接头的质量难以保证, 且焊接效率低下。随着船舶制造需求的增大, 焊接工艺逐渐发展起来。进入20世纪, 气体保护焊和埋弧焊技术的应用使得焊接质量和效率得到了大幅提升, 特别是在船体结构的大规模焊接中, 自动化焊接技术逐渐成为主流。随着计算机技术的发展, 数控焊接设备的出现使得船舶焊接更加精准、可靠。现代焊接工艺不仅注重焊接效率, 更加强调焊接接头的强度、耐腐蚀性及抗疲劳性, 这些技术的发展大大提升了船舶结构的安全性和耐久性^[1]。然而, 随着船舶设计复杂度的增加, 焊接工艺面临的挑战也愈加严

峻, 如何在保证焊接质量的同时提高生产效率, 依然是现代船舶焊接技术需要解决的关键问题。

(二) 船舶焊接工艺的类型与特点

手工焊接通常用于小型船舶或对焊接要求不高的部位, 虽然操作灵活, 但焊接接头的质量受操作工人的技术水平影响较大, 且劳动强度大, 效率较低。与之相比, 自动焊接技术具有更高的精度和一致性, 特别是在船舶大规模生产中得到广泛应用。气体保护焊采用惰性气体保护焊接过程, 能有效避免焊接过程中空气污染对焊缝的影响, 特别适合对焊接接头质量要求较高的部分。埋弧焊则广泛应用于船体结构的焊接, 具有焊接速度快、接头强度高等优点, 适合大厚度钢板的焊接。新型焊接技术如激光焊接和电子束焊接等, 凭借其高精度、高效率的特点, 逐渐成为船舶制造中的前沿技术。激光焊接能够提供极高的焊接质量, 适用于

船舶特殊结构部件的焊接，而电子束焊接则适合精密焊接需求，能够在减少热输入的同时，提高焊接接头的强度和精度^[2]。

（三）船舶焊接工艺对结构安全性的影响

焊接接头的强度直接关系到船舶整体结构的安全性。在焊接过程中，焊接接头易产生残余应力、裂纹和孔洞等缺陷，这些缺陷可能导致焊接接头的强度下降，进而影响船舶的抗压、抗拉和抗弯能力。焊接缺陷如气孔、夹渣、裂纹等，是船舶结构失效的常见原因，尤其是在承受疲劳载荷和冲击载荷时，这些缺陷极易引发裂纹扩展，导致结构破坏。因此，提高焊接工艺的质量、减少缺陷的产生，是提升船舶结构安全性的关键。焊接工艺的可靠性和稳定性至关重要，现代焊接技术不断优化焊接参数，采用先进的无损检测手段，能够实时监控焊接过程中的质量变化，确保每个焊接接头达到规定的安全标准^[3]。通过精确控制焊接过程中的温度、速度和气体流量等参数，可以有效降低焊接缺陷的发生率，提高船舶结构的整体安全性和耐用性。

二、焊接工艺改进的研究背景与意义

（一）焊接工艺的传统问题

焊接残余应力是传统焊接工艺中的一大问题。在焊接过程中，由于不同区域的加热与冷却速率不同，容易在焊接接头和热影响区产生应力集中，进而引发裂纹或变形，影响船舶结构的长期稳定性和安全性。焊接缺陷，如气孔、夹渣和裂纹等，可能在船舶使用过程中扩展，导致疲劳失效或应力集中，从而威胁整体结构安全。传统的焊接工艺往往无法完全避免这些缺陷，且焊接质量的控制较为困难，尤其在大规模生产时，人工操作的误差难以避免。加之焊接热输入控制不精确，使得焊接接头的性能波动较大，这些问题使得传统焊接工艺在复杂结构和高要求船舶制造中难以满足现代船舶安全标准的需求。

（二）焊接工艺改进的必要性

船舶结构的安全性要求极高，特别是在面临强烈的海洋环境和极端天气条件时，任何结构上的弱点都可能导致严重后果。因此，焊接工艺的改进成为提升船舶结构安全性的关键。随着船舶设计日益复杂，传统焊接工艺已难以满足高强度、长寿命及高可靠性的需求，焊接工艺的优化能够显著提升船舶结构的强度、耐腐蚀性及抗疲劳性，确保船舶在复杂条件下的长期稳定性。焊接工艺优化不仅能够提高焊接接头的抗拉强度和韧性，还能降低焊接缺陷的产生，减少后期维护和修复的成本。通过对焊接参数、材料选择及焊接方法的持续优化，能够更好地控制焊接过程中的质量波动，确保船舶结构的整体性能提升^[4]。

（三）焊接工艺改进的研究意义

焊接工艺的改进首先能提高焊接接头的可靠性。在焊接过程中通过优化热输入、焊接速度和气体保护等参数，可以有效避免传统工艺中容易出现的焊接缺陷，增强接头的强度和韧性，延长

船舶结构的使用寿命。其次，改进的焊接工艺能够降低焊接缺陷的发生率，确保每个焊接接头符合严格的质量标准，减少裂纹扩展的可能性，降低疲劳损伤的风险。最终，焊接工艺的优化能够提升船舶整体的安全性，降低船舶结构的事故发生率，提高船舶的抗压、抗弯和抗腐蚀能力，确保船舶在复杂海况下的稳健性和可靠性。因此，焊接工艺改进不仅对单一焊接接头的质量提升有重要意义，更为船舶制造及其运营的整体安全性提供了技术保障。

三、焊接工艺改进对船舶结构安全性的影响

（一）焊接工艺改进对焊接接头强度的影响

焊接工艺的改进直接影响焊接接头的强度。传统焊接方法在焊接接头区域往往容易产生较大的残余应力和热影响区，导致接头强度不足，增加裂纹扩展的风险。通过改进焊接工艺，如优化焊接参数、采用新型焊接方法（如激光焊接或脉冲焊接）和高性能焊接材料，可以有效减少焊接缺陷的发生，提高焊接接头的强度。与传统焊接工艺相比，改进后的工艺通过减少热输入、优化熔池流动和加热速率，能够更好地控制接头的金相组织，提高焊接接头的拉伸强度、抗弯强度以及疲劳强度。实验数据显示，经过焊接工艺优化后的接头强度有显著提升，尤其在焊接接头的疲劳性能和韧性方面，改进工艺能够明显减少裂纹的发生，提高船舶结构的安全性和可靠性^[5]。

（二）焊接工艺改进对抗疲劳性能的影响

疲劳裂纹的生成通常是由于焊接接头在长期重复荷载作用下，局部应力集中导致微裂纹的形成与扩展。焊接接头的疲劳寿命直接受到焊接工艺的影响，尤其是焊接工艺引入的缺陷、应力集中和金相结构的变化。通过改进焊接工艺，如降低热输入、使用细颗粒强化材料、控制冷却速度等，可以有效减小接头区域的残余应力，改善接头的表面质量和金相组织，进而延长焊接接头的疲劳寿命。焊接工艺的优化能够减少焊接缺陷，避免应力集中区域的产生，使得接头在受到重复荷载作用时表现出更强的抗疲劳能力。实验研究表明，经过优化焊接工艺的接头在疲劳实验中表现出更高的疲劳强度和更长的疲劳寿命，从而提升船舶整体结构在长期使用中的可靠性。

（三）焊接工艺改进对耐腐蚀性的影响

腐蚀失效通常发生在焊接接头或热影响区，这些区域由于焊接过程中的金属结构变化，可能导致局部的腐蚀性能降低。传统焊接工艺中，由于焊接热输入较高，接头区域容易出现晶粒粗大、脆性增高等问题，导致该区域的耐腐蚀性差。焊接工艺的改进能够有效解决这些问题。通过控制热输入，采用合适的焊接参数，能够减少焊接接头区域的组织缺陷，提升材料的抗腐蚀能力。此外，改进后的焊接工艺也能够与防腐涂层技术相结合，进一步提高焊接接头的耐腐蚀性。改进焊接材料的选用，例如使用含有更高耐蚀性的合金材料，可以提高焊接接头的抗腐蚀性能。

在耐腐蚀性实验中，采用改进焊接工艺的接头表现出更好的抗腐蚀性，尤其在海洋环境中，改进后的焊接工艺能显著延长船舶的使用寿命和减少维护成本^[6]。

四、焊接工艺改进技术的应用与展望

（一）先进焊接技术在船舶中的应用

激光焊接技术作为一种高精度、高效率的焊接方法，已在船舶制造中得到广泛应用。激光焊接具有极高的能量集中性，可以实现精细的焊接效果，尤其适用于薄板焊接。相比传统焊接，激光焊接能显著降低热输入，减少焊接过程中可能产生的热影响区和残余应力，提升焊接接头的强度和耐腐蚀性。高能束焊接技术通过利用高能量密度束流进行焊接，能够在高强度、深熔透的同时，减少热损伤，适用于大厚度材料的焊接。此技术在船舶的特殊结构焊接中展现出独特优势，尤其在复杂的舱体和外壳部件焊接中具有较强的应用前景。超声波焊接技术则通过高频振动传递能量，用于小尺寸金属零件的焊接，具有高效、无污染的特点^[7]。虽然其在船舶工业中的应用仍处于探索阶段，但随着技术的不断发展，超声波焊接有望应用于高精度的船舶部件焊接，尤其是在微型船舶和精密设备制造中。

（二）焊接工艺改进的实施案例分析

在国内外船舶制造业中，焊接工艺的改进已在多个项目中取得了显著成果。例如，在某些大型船舶制造项目中，采用了激光焊接与埋弧焊相结合的工艺，显著提升了船体结构的焊接质量和生产效率。此外，某些船舶公司通过优化焊接参数，改进了焊接接头的强度和抗疲劳性能，成功解决了传统焊接工艺中常见的裂纹和缺陷问题，提升了船舶的抗压和抗冲击能力。工艺优化后的

船舶结构在疲劳和环境适应性方面得到了显著提高，特别是在长期航行中的稳定性和安全性方面，取得了良好的应用效果。对比改进前后的实践效果，焊接接头的可靠性和船舶的总体安全性都有了明显的提升，且维护和修复成本大幅降低^[8]。

（三）焊接工艺改进的未来发展趋势

随着船舶工业对焊接技术要求的不断提高，智能化焊接技术的发展成为未来的趋势。智能化焊接技术通过人工智能、物联网和自动化控制等技术，实现焊接过程的实时监控与调整，能够自动优化焊接参数，确保每个焊接接头都符合高标准的质量要求。新型焊接材料的研发也将推动焊接工艺的进一步发展，尤其是耐高温、高强度和抗腐蚀性材料的应用，将极大提高船舶结构的整体性能和使用寿命。此外，焊接工艺的持续优化将在材料选择、焊接方法、工艺控制等方面取得更大的突破，推动船舶焊接技术向高效、环保、智能化方向发展。随着这些技术的不断进步，未来船舶制造将更加注重精细化生产和结构安全性，焊接工艺的创新将继续为船舶工业的升级提供强大的技术支持。

五、结语

焊接工艺的改进在提升船舶结构安全性方面具有重要意义。通过优化焊接参数、采用先进的焊接技术，如激光焊接、高能束焊接和超声波焊接，能够显著提高焊接接头的强度、抗疲劳性和耐腐蚀性，降低焊接缺陷的发生率，提升船舶的整体安全性。随着智能化焊接技术和新型材料的不断发展，未来船舶焊接工艺将更加高效、可靠，为船舶制造提供更加坚实的技术保障，进一步提高船舶的稳定性和长期运营的可靠性。

参考文献

[1] 陈剑光. 小型船舶焊接变形原因与控制对策 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(06): 37-39. DOI: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2025.06.012.
[2] 李洁. 船舶制造质量控制与检验技术的融合应用 [J]. 中国质量监管, 2025, (06): 76-77.
[3] 胡天翔. 基于数字孪生的船舶车间仿真与调度优化 [D]. 江苏科技大学, 2025. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2025.000236.
[4] 李明轩. 船舶板材加工车间能耗预测与协同调度优化方法研究 [D]. 江苏科技大学, 2025. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2025.000609.
[5] 钟赣斌. GDC 公司船舶建造精益生产体系研究 [D]. 广州大学, 2025. DOI: 10.27040/d.cnki.ggzdu.2025.002043.
[6] 于腾. 基于 CONWIP 的船舶曲面分段建造虚拟流水线技术研究 [D]. 江苏科技大学, 2025. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2025.000963.
[7] 张书童. 船用低速柴油机气缸盖机器人焊接工作站及镍基合金堆焊工艺技术开发 [D]. 江苏科技大学, 2025. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2025.001083.
[8] 米锦江. 船舶曲面分段车间排产与动态调度研究 [D]. 江苏科技大学, 2025. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2025.001336.

