

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 7 月 第 19 期 (总第 644 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 翌 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 7 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（包括光盘版和网络版等）的复制权、发行权、翻译权、信息网络传播权的专有使用权授予《科海故事博览》编辑部，同时授权《科海故事博览》编辑部独家代理许可第三方使用上述权利。未经本刊许可，任何单位或个人不得再授权他人以任何形式汇编、转载、出版该文章的任何部分。

目录Contents

科技博览

- 001 基于智能化技术的公路边坡监测与预警系统研究
..... 袁新鹏, 王 慧
- 004 载荷试验在评价湿陷性土换填处理效果中的应用
..... 王洪峰
- 007 基于深度学习的水利工程坝体裂缝智能识别技术研究
..... 温燕霞, 黄修奖
- 010 基于深度学习补偿的容栅传感器非线性误差校正方法研究
..... 杨广禄
- 013 自动化改造对曝气沉砂池污泥抽吸效率及系统稳定性的提升研究
..... 董 晶, 蔡志超

智能科技

- 016 建筑电气智能化系统集成应用与工程实践
..... 王宏俊, 纪栋祥
- 019 高精度电子传感技术在机电运动控制中的应用
..... 张朋亮, 张立琛
- 022 智能化机械设备电气自动化技术及其应用路径
..... 杨正法, 饶梅贵, 尹超杰, 蔡前龙
- 025 智能建造在建筑工程全生命周期中的应用策略
..... 马 添, 齐成成
- 028 智能传感器在地铁监控设备检修中的应用研究
..... 韦安达
- 031 道路桥梁施工机械智能化配置与作业效率优化研究
..... 李 振, 李海东
- 034 基于机器学习驱动的 MEMS 倾角传感器全温区智能补偿方法
..... 梁 冰

应用技术

- 037 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽设计
..... 胡 晓

目录Contents

040	沥青路面平整度试验检测技术应用	苟 樾
043	高速公路高性能混凝土试验检测分析	皇舟龙
046	泡沫轻质土在公路路基修筑中的应用	林 星
049	超前支护技术在公路隧道施工中的应用	苏世鹏
052	市政道路与桥梁工程施工质量控制要点分析	于 洋, 刘 洋
055	道路桥梁工程中电力管线预埋施工技术研究	苏浩宇, 韩金辉
058	改性沥青材料在市政道路施工中的应用及性能分析	黄留男

科创产业

061	铸造车间机械运维管理体系优化研究	卞永强, 杨广辉, 蔡婉静
064	火电厂锅炉燃烧优化及节能减排技术分析	姚卫涛
067	轨道交通供电系统可靠性与安全管控研究	王洪彬, 王瑾怡, 孙效飞
070	基于 BIM 技术的工业厂房建筑与电气系统协同设计	邹宗保, 尹纪涛, 张 凯
073	矿井通风系统优化设计与开采环境改善实践探析	林永森, 兰红波, 侯振江
076	数字化技术驱动下建筑造价全生命周期管理创新研究	余苗苗
079	面向抽水蓄能电站需求的“一矿多用”资源综合评价体系构建与应用	宾榕源

技术管理

082	水利工程精细化管理实践与应用	朱兴波
085	建筑工程管理问题及应对措施研究	苏文波, 苏广安
088	BIM 技术在建筑施工安全管理中的应用分析	何振伟, 王晓帅
091	绿色施工理念在建筑工程管理中的应用探讨	徐坤峰
094	建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施探讨	周旭然
097	建筑工程施工质量控制关键问题与优化策略研究	魏阿垒
100	住宅小区 10 kV 配电室电气施工技术及其质量控制研究	鲁 斌

科学论坛

103	建筑工程给排水系统施工技术研究	苏广平, 李宛凝
106	环境工程中污水处理过程监测与效果分析	马 超
109	建筑施工中的污水处理设施质量控制和检测	李 彬, 王 雪
112	后浇带施工技术在建筑工程中的应用要点分析	程春木, 王 卉
115	抽水蓄能电站输水发电系统的渗流分析	陶永杰
118	水利水电工程钢筋混凝土施工技术分析	陈金波, 王 蒙
121	水利工程基坑施工的防渗处理技术与实践应用	柏翔翔
124	水利水电工程施工过程中高边坡治理技术研究	叶旭明

基于智能化技术的公路边坡监测与预警系统研究

袁新鹏, 王 慧

(陕西省汉中市公路局抢险救援中心, 陕西 汉中 723099)

摘 要 针对秦岭山区陡坡路堤边坡在膨胀土与河水冲刷耦合作用下的复杂变形机理, 本文提出并实施了一套基于多源传感数据融合的智能监测预警系统。系统集成 GNSS 地表位移、深部位移、多参数水文监测及视频 AI 识别技术, 构建了“感知—传输—分析—预警—响应”五位一体的技术框架。工程实践表明, 该系统实现了毫米级位移监测精度与秒级预警响应, 数据完整率达 97.78%, 为山区公路边坡灾害防控提供了可复制的技术范式。

关键词 公路边坡; 智能监测; 多源数据融合; 预警机制; 应急响应

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.001

0 引言

国家交通基础设施安全战略对公路防灾减灾提出更高要求。秦岭地区陡坡路堤兼具膨胀土特殊岩性与河水冲刷动力作用, 传统监测手段难以捕捉其蠕滑渐变特征。本研究依托陕西省 10 处公路边坡监测试点工程, 聚焦汉中市 G108 线 K1592+740 ~ K1592+900 段典型陡坡路堤, 构建覆盖地表—深部—环境多维度的智能监测系统, 旨在探索适应复杂地质条件的监测技术体系与预警阈值判定方法。

1 工程地质背景与风险分析

1.1 地质环境特征

试点段位于秦岭南麓金水镇, 属低山侵蚀地貌, 坡体高程 493 m ~ 510 m, 相对高差 47.34 m, 地形坡度约 35°。地层结构为: 人工填土、强风化片岩及中风化片岩。场地处于金水—西水断裂带(F1), 岩体破碎, 地下水富集, 地震烈度为 VI 度区。

1.2 灾害发育特征

该段老滑坡体呈圈椅状, 规模 100 m × 120 m, 滑面深度约 14 m。次级滑坡 H-1 (K1592+800 ~ K1592+900) 经钢管桩加固, 但支护结构异响表明残余滑动力可能未完全消除; H-2 段 (K1592+740 ~ K1592+800) 未经处治, 路面拱起、水沟损坏, 存在变形迹象。

1.3 预警监测预期目的

通过预警监测系统, 实时监测滑坡体位移与地裂缝发展态势, 判定边坡稳定状况, 为应急处治及后续处置措施提供依据。

2 智能监测系统设计

系统采用“井”字型三维监测网, 构建“感知层—网络层—应用层”架构。感知层 16 个测点集成 9 类传感器, 包括 GNSS 地表位移、固定式测斜仪、裂缝计、雨量计、雷达水位计、含水率仪、孔隙水压计、视觉位移计及视频 AI 监控。

3 监测设备选型与精细化布设

3.1 布设原则

1. 空间控制: 3 条纵向测线覆盖主滑方向, 每条线 ≥ 2 个测点。

2. 深浅结合: 地表 GNSS 与深部测斜仪同孔布设, 滑动面下延 5 m ~ 10 m。

3. 重点加密: H-2 未处治段布设 3 套 GNSS、2 孔深部位移监测。

4. 环境同步: 雨量计设于开阔区, 水位计布设于金水河岸, 含水率仪埋深 1 m/3 m/5 m。

3.2 核心设备配置

1. 地表位移监测: 7 台 GNSS 接收机 (1 基站 + 6 测点), 静态精度平面 ± (2.5 + 0.5 ppm × D) mm, 动态精度 ± (8 + 1 ppm × D) mm, 采样频率 15 s, 输出频率 1 次/h, 异动时 1 次/30 min。

2. 水文环境监测: 雨量计分辨率 0.2 mm, 雨强范围 0.01 mm/min ~ 4 mm/min; 雷达水位计量程 40 m, 精度 0.1% F·S; 孔隙水压计量程 0 MPa ~ 0.35 MPa, 精度 0.025% F·S; 含水率仪采用 FDR 原理, 精度 ± 3% RH^[1]。

作者简介: 袁新鹏 (1985-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 公路桥梁设计和建设管理。

4 预警机制与应急响应体系

4.1 动态阈值预警模型

采用单参数预警与多参数综合预警双模式（见表 1、表 2）。预警值依据《崩塌、滑坡、泥石流监测规范》（DZ/T 0221）及现场专家经验综合确定。

预警指数采用改进的综合判据：

$$A=\omega1\cdot vcv+\omega2\cdot aca+\omega3\cdot hc\Delta h$$
 (1)

式（1）中：v 为位移速率，vc 为对应预警等级阈值；a 为加速度，ac 取 0.1 mm/h²；Δh 为地下水位变化量，hc 为水位预警阈值；权重系数 ω1=0.6，ω2=0.3，ω3=0.1，经层次分析法确定^[2]。

表 1 项目监测预警值及等级

预警等级监测项目		蓝色	黄色	橙色	红色	备注
地表位移监测	变化速率（连续 3 d）	5 mm/d	8 mm/d	12 mm/d	20 mm/d	
	报警值	20 mm	40 mm	60 mm	80 mm	
深部位移监测	合位移值变化速率（连续 3 d）	5 mm/d	8 mm/d	12 mm/d	15 mm/d	
	累计合位移报警值	20 mm	30 mm	45 mm	60 mm	
倾斜监测	变化速率（连续 3 d）	0.015° /d	0.05° /d	0.1° /d	0.25° /d	
	报警值	0.3°	0.6°	1.0°	1.5°	
地下水位	变化速率	200 mm/d	400 mm/d	500 mm/d	600 mm/d	
	报警值	500 mm	700 mm	900 mm/d	1 000 mm/d	

表 2 监测预警响应措施

预警级别	预警指数	预警联系人	现象	建议应对策略
蓝色	A > 0.5	监测单位技术人员	地质灾害发生的可能性小，有一定的变形特征，在一年内发生的概率不大	项目监测技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，并将有关情况反馈至业主负责人
黄色	A > 1.0	监测单位技术人员和项目负责人	地质灾害体变形进入加速阶段初期，有明显的变形特征，在数月内或一年内发生大规模地质灾害的概率较大，定为黄色预警	项目监测技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，加强监测数据分析，开展中期预警，预测发展趋势，并到现场进一步核查，将有关情况反馈至业主负责人。持续开展监测，提高数据采集频率
橙色	A > 1.5	监测单位人员和管养单位工作人员	地质灾害体变形进入加速阶段中后期，有一定的宏观前兆特征，在几天内或数周内发生大规模地质灾害的概率大，定为橙色预警	项目监测负责人、技术负责人应去现场对宏观迹象进行巡查，加强对宏观变形迹象的监测，加强监测数据分析，调整自动监测采集频率，开展短期预警，预测发展趋势，并到现场进一步核查，将有关情况反馈至业主负责人，提醒公路边坡管养单位加强关注，加强人工巡查
红色	A > 2.0	监测单位人员和管养单位工作人员及分管领导	地质灾害体变形进入加速阶段，各种短临前兆特征显著，在数小时或数周内发生大规模地质灾害的概率很大，定为红色预警	项目监测负责人及技术负责人应去现场对宏观现象进行排查，加强宏观变形监测及短临前兆监测，开展短临预警，由其根据现场宏观变形等实际情况判定是否提前组织地质灾害危险区群众进行转移。业主和技术服务单位前往现场进一步调查处置，若确属险情，则立即按照应急预案和灾险情速报机制采取相应行动。向边坡管养单位发送预警，采取应急避险措施，如临时交通管制、限制通行等

4.2 秒级应急响应设施

响应系统采用“光+声+电”三级警示：

1. 警告区：坡体两端 100 m 外各设 2 套声光报警器（110 dB/套）+1 块交通诱导屏（800 mm×1 200 mm），预警触发后 10 s 内启动。
2. 反应区：设置柔性阻拦标识，提供制动安全距离。
3. 灾害区：LED 照明设施（120 W）+ 视频 AI 监控，夜间保障视觉识别。

系统通过 PLC 控制器与监测平台直连，红色预警经人工视频复核后，一键启动应急设施，响应延迟 $<15\text{ s}$ ^[3]。

5 系统实施与监测成效

5.1 施工部署

2025 年 1 月启动，2025 年 6 月完成，16 个测点安装调试。

5.2 运行效能评估

2025 年 7 月 13 日正式投入监测，截至 2026 年 1 月 14 日，系统连续运行 6 个月，完整经历 2025 年汛期（8 月-9 月）和秋霖期（10 月-11 月）考验，各项指标运行正常。

1. 数据完整性：在线率 97.78%，达到行业优秀水平（95%）。

2. 监测精度：GNSS 静态观测 RMSE=0.8 mm（与全站仪对比）；测斜仪深部位移重复性误差 $\pm 1.2\text{ mm}$ ；视觉位移计与 GNSS 同步观测相关系数 $R^2=0.96$ 。

3. 预警时效：从数据异常到平台推送平均延迟 8 s，应急响应设施启动延迟 12 s，优于规范要求的 30 s 阈值。

4. 预警成效：累计引发蓝色预警，均属于 BD04 号路肩外 GNSS 测点变化速率预警（3.2 mm/d $\sim$ 4.8 mm/d），触发原因为降雨后膨胀土吸水膨胀导致浅表层微变形。现场核查未出现宏观裂缝扩展或深部滑移迹象，系统灵敏度高，无误报。该现象揭示膨胀土边坡具有“微动频发、整体稳定”的典型特征，为阈值动态调整提供了数据支撑^[4-5]。

5.3 科研数据分析

监测数据揭示以下规律：

1. 变形时序特征：H-2 段 BD04 号路肩外 GNSS 测点变化速率预警，深部测斜仪、其他点位监测点均未触发预警，表明变形以地表浅层膨胀土胀缩为主，非深部整体滑移。

2. 水文耦合效应：雨后地下水位上升 0.3 m $\sim$ 0.5 m，

孔隙水压力增幅 0.05 MPa $\sim$ 0.08 MPa，位移速率峰值滞后降雨峰值 12 h $\sim$ 18 h，验证“降雨-渗流-软化-变形”的链式机理。

3. 预警阈值验证：蓝色预警平均位移速率 4.1 mm/d，低于黄色预警阈值 25 mm/d，系统预警保守度合理，有效避免漏报风险。

6 结论与展望

1. 技术适配性：提出“GNSS+测斜仪+水文监测”核心组合，避免遥感技术在地形遮挡区的局限性。实测静态精度达 $\pm 0.8\text{ mm}$ ，满足二级风险边坡预警需求。

2. 预警科学性：基于变形-水力双控指标构建动态阈值模型，实现预警前移 12 h $\sim$ 18 h。蓝色预警均有效识别膨胀土微变形，无误报。

3. 响应时效性：应急设施与监测平台毫秒级联动，响应延迟 $<15\text{ s}$ ，填补传统监测“预警无响应”的短板。

6.1 存在问题与改进方向

1. 阈值优化：膨胀土微变形频发导致蓝色预警次数较多，需引入降雨强度修正系数，实现阈值自适应调整。

2. 数据融合：当前多参数预警模型为线性加权，后续拟引入 LSTM 时序预测算法，提升非线性耦合分析能力。

6.2 应用前景

基于智能化技术的公路边坡监测与预警系统已纳入陕西省公路边坡监测技术推广清单，技术成果可复用于：黄土高原区湿陷性黄土边坡；西南山区降雨型滑坡；既有公路改造中的高风险边坡。

参考文献：

- [1] 交通运输部. 全国公路边坡监测工作实施方案(2024-2030 年)[R]. 北京：交通运输部办公厅, 2024.
- [2] 自然资源部. 地质灾害自动化仪器监测预警规范：DZ/T 0460-2023[S]. 北京：中国标准出版社, 2023.
- [3] 自然资源部. 崩塌、滑坡、泥石流监测规范：DZ/T 0221-2006[S]. 北京：中国标准出版社, 2006.
- [4] 陕西省交通运输厅. 陕西省公路边坡监测工作实施方案(2024-2030 年)[S]. 2024.
- [5] 王恭先, 李焯芬. 滑坡防治的关键技术问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(05): 1-12.

载荷试验在评价湿陷性土换填处理效果中的应用

王洪峰

(华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要 浅层平板载荷试验是测定地基土层承载力的核心检测方法, 其显著的优势在于试验受力条件与工程实际工况高度契合, 操作流程简单易用, 试验结果直观且便于技术人员理解与应用。结合刚果(金)南部湿陷性土地区换填地基处理方案, 利用浅层平板载荷试验的方法验证换填地基土承载力特征值, 检验地基处理效果。该方法作为一种直接可靠的原位测试手段, 在缺乏本地工程经验的地区, 为评价地基处理质量提供了关键依据。

关键词 载荷试验; 换填地基; 湿陷性土

中图分类号: TU413.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.002

0 引言

刚果(金)岩土勘察规范缺失、经验匮乏, 工程多参考中国标准。依托南部矿区建设项目, 针对Ⅱ级非自重湿陷性粉质黏土地基, 设计采用级配碎石换填处理。为验证处理效果, 采用浅层平板载荷试验检测换填后承载力。该方法受力条件与实际工况吻合, 结果直观可靠, 可为当地同类工程评价地基处理质量提供关键依据。

1 工程概况

拟建厂区位于刚果(金)南部某矿区内, 主要建筑物为浓密洗涤车间, 结构形式为钢结构, 基础形式为独立基础, 要求承载力特征值 f_{ak} 不小于 170 kPa。根据设计基础的埋深, 基础持力层位于②层粉质黏土。

1.1 场地地层土质概况

根据勘察报告成果, 本场地地层情况如下:

主要地层由人工填土、粉质黏土、含砾粉质黏土、砾砂、残积土、粉砂质泥岩等构成。自上而下分述如下:

①层人工填土: 灰褐色, 稍湿, 稍密, 以碎石土为主, 粒径 5 mm ~ 50 mm, 充填粉质黏土。该层层厚 0.2 m ~ 2.3 m。

②层粉质黏土: 红褐色, 硬塑, 稍有光泽, 干强度中等。该层层厚 1.2 m ~ 19.0 m。

③层含砾粉质黏土: 红褐色、黄褐色, 硬塑, 稍有光泽, 含角砾 10% ~ 20%, 砾径 2 mm ~ 5 mm 不等, 岩芯呈碎块状。该层层厚 0.80 m ~ 6.80 m。

③₁层砾砂: 灰白色、红褐色, 稍密, 湿, 砾径 2 mm ~

5 mm 不等, 含量 25% ~ 50% 不等, 砂质不纯, 粉质黏土充填, 主要矿物成分为石英、长石、白云石等。该层层厚 1.00 m ~ 11.70 m。

④层残积土: 母岩为白云质砂岩, 不见原岩结构, 风化成块石、碎石、角砾、砾砂、细砂等, 土质不均, 灰白色, 稍密~密实, 湿, 碎石、砾、砂的主要矿物成分为石英、长石和白云石等, 粉质黏土填充。该层层厚 3.00 m ~ 11.80 m。

④₁层粉质黏土: 紫红色、红褐色, 此层为粉砂质泥岩的残积土, 不见原岩结构, 风化成黏性土状, 可塑, 含黏土矿物。该层层厚 1.00 m ~ 15.00 m。

⑤层全风化白云质砂岩: 灰白色, 基本不见原岩结构, 岩芯呈碎石土状、砂土状, 局部岩芯呈短柱状, 主要矿物成分为长石、石英和白云石等。该层层厚 2.00 m ~ 11.00 m。

⑤₁层全风化粉砂质泥岩: 紫红色, 基本不见原岩结构, 岩芯呈泥柱状, 碎块状, 手掰易断, 手捻易碎, 含黏土矿物^[1]。

各天然地基土层承载力特征值见表 1。

1.2 场地地基土湿陷性情况

根据勘察报告成果, ②层粉质黏土具有湿陷性, 场地为Ⅱ级非自重湿陷性场地。

1.3 地基处理方法

由于基础持力层具有湿陷性, 根据勘察报告②层粉质黏土具有湿陷性, 未经处理不得作为持力层, 且天

作者简介: 王洪峰(1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

表 1 场地主要土层承载力特征值

土层序号	土层名称	承载力特征值 (kPa)
②	粉质黏土	130
③	含砾粉质黏土	130
③ ₁	砾砂	140
④	残积土	170
④ ₁	粉质黏土	160
⑤	全风化白云质砂岩	230
⑤ ₁	全风化粉砂质泥岩	220

然地基承载力不能满足建筑物荷载要求, 设计院采用换填法进行地基处理。

处理方法: 基底之下土层采用碎石土或级配碎石换填层, 换填深度不小于 1 m, 换填宽度每边宽出基础边 0.6 m, 碎石土或级配碎石分层夯实, 每层厚度 250 mm ~ 300 mm, 压实系数 0.97^[2]。

2 浅层平板载荷试验概况

2.1 试验要求

1. 在浓密机车间场地进行 6 个浅层平板载荷试验点, 具体位置覆盖整个场地, 且布置于独立基础所在位置。

2. 按规范要求加载分级为 8 级, 加载方式采用慢速维持荷载法。

3. 选用的承压板为方形刚性承压板, 面积为 1.0 m²。

4. 数据采集: 每一级荷载成功加载后, 根据时间的间隔, 第一次到第三次的加载时间为 10 min, 第四次和第五次的加载时间为 15 min, 后续试验的加载间隔为 30 min 读取一次沉降变形量, 每一级加载中, 在两小时内, 每 1 h 的沉降变形量少于 0.1 mm 时, 即可判断为稳定, 进行下一次及的加载试验。

5. 终止的加载条件如下:

- (1) 在承压板附近的地层出现明显被从侧向挤出;
- (2) 沉降量出现陡然增加, 压力和沉降的变化曲线出现陡然下降段;
- (3) 在单一加载等级下, 二十四个小时内均未出现稳定段;
- (4) 沉降变形量 s 和承压板的宽度或原型承压板的直径的比值等于或大于 0.06 时;
- (5) 如果进行的是验证性的试验, 但达到设计规范所要求的最大加载值时。当 (1) ~ (3) 之一时, 其上一级的加载量即可作为极限荷载。

6. 要求最终确定换填土层承载力 f_{ak} 不小于 170 kPa。

2.2 试验装置及设备

试验装置由加荷系统、堆重平台反力装置、数据控制采集系统组成。试验加荷、补压、卸荷、荷载量测、沉降量测均由静载荷测试分析仪自动控制完成, 以获取荷载~沉降 ($p \sim s$) 关系曲线^[3]。主要设备为 RS-JYC 桩基静载自动测试分析仪、500 kN 油压千斤顶、全自动电动油泵、堆重平台反力装置、基准梁、1.0 m² 承压板等。

1. 压力传感器的测量误差为 0.5%, 位移传感器的测量误差为 0.1% FS, 分辨率为 0.01 mm。

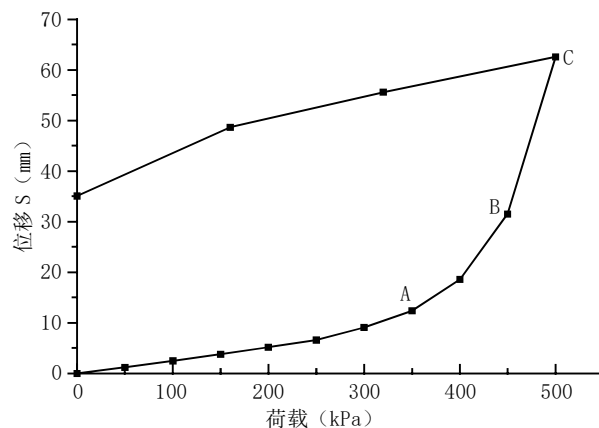
2. 最大加载时的极限压力不大于千斤顶、油泵、油管额定压力的 80%。

3. 反力装置可提供的最大反力大于最大加载量的 1.2 倍。

2.3 试验点承载力确定方法

根据规范要求, 一般情况下, 首先要绘制压力和沉降的变形曲线, 如果有特殊需要, 还需要提供每一级的加载作用下的沉降量与观测时间以及地表变形情况的变化曲线。

典型的压力沉降变形曲线会出现明显的三个阶段, 如图 1 所示。

图 1 典型静力载荷试验的 $p-s$ 曲线 (沉降变形曲线)

其中, 0 ~ A 段称为弹性变形阶段, 该段变化曲线的主要特征为接近线性变化, 可以反映试验土层的弹性变化特征, A 点为比例界限, 该点所对应的荷载 P 称为临塑荷载。

A ~ B 段称为塑性变形阶段, 该段的变形特征为曲线的曲率明显增大, 说明试验土层从弹性变形已经过渡到了弹塑性变形阶段, 并趋向于进入破坏。

BC 段称为破坏变形阶段, 该段的变形特征为出现了陡降趋势, C 点所对应的加载量为破坏荷载, 在该级

荷载作用下压板的沉降通常不能稳定或总体位移太大, C点荷载的前一级荷载(不一定是B点)称为极限荷载^[4]。

如果出现绘制出的沉降变形曲线的直线段未通过坐标原点0, 则可以根据直线段的变化趋势确定出曲线的起始点, 并对沉降变形的曲线进行适当的修正。

建筑物的地基应有足够的强度和稳定性, 也就是说, 地基要有足够的承载能力和抗变形能力。确定地基的承载力时, 既要控制强度, 一般至少确保安全系数不小于2, 又要确保建筑物不产生过大沉降。但具体到各类工程时侧重点有所不同, 这与工程的使用要求和环境有关。

《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340-2015)中4.4.3对于单个试验点的土(岩)地基承载力特征值确定应符合下列规定:

1. 当p-s曲线上有比例界限时, 应取该比例界限所对应的荷载值。

2. 地基土平板载荷试验, 当极限荷载小于对应比例界限荷载值的2倍时, 应取极限荷载值的一半; 岩石载荷试验, 当极限荷载小于对应比例界限荷载值的3倍时, 应取极限荷载值的1/3。

3. 当满足该规范第4.3.5条第5款(加载至要求的最大试验荷载且承压板沉降达到相对稳定标准)情况, 且p-s曲线上无法确定比例界限, 承载力又未达到极限时, 地基土平板载荷试验应取最大试验荷载的一半所对应的荷载值, 岩石载荷试验应取最大试验荷载的1/3所对应的荷载值。

4. 当按相对变形值确定天然地基及人工地基承载力特征值时, 可按表2规定的地基变形取值确定, 且所取的承载力特征值不应大于最大试验荷载的一半。当地基土性质不确定时, 对应变形值宜取0.010b; 对有经验的地区, 可按当地经验确定对应变形值。

表2 按相对变形值确定天然地基即人工地基承载力特征值

地基类型	地基土性质	特征值对应变形值 s_0
天然地基	高压缩性土	0.015b
	中压缩性土	0.012b
	低压缩性土和砂性土	0.010b
人工地基	中、低压缩性土	0.010b

本次浅层平板载荷试验的目的是验证换填土层地基承载力特征值 $f_{ak} > 170$ kPa, 因此本次最大试压荷载为340 kPa, 若加载至340 kPa未达到换填土层的极

限荷载, 即表明换填土层承载力特征值 $f_{ak} > 170$ kPa, 换填效果达到预期目的^[5]。

2.4 浅层平板载荷试验成果分析

本次浅层平板载荷试验针对场区②层粉质黏土换填土层开展检测, 共布设6个试验点, 均匀覆盖车间独立基础区域。试验采用慢速维持荷载法, 分8级加载, 最大试验荷载设定为340 kPa, 用以验证地基承载力是否满足170 kPa设计指标。试验全程严格规范操作, 数据采集准确可靠。各级加载条件下, 各试验点沉降变形稳定, 未出现沉降突增、土体侧向挤出等失稳问题。加载至340 kPa时, 换填碎石土层荷载-沉降曲线整体呈线性弹性变化, 无明显拐点、比例界限及极限破坏特征。依据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340-2015)判定, 换填地基承载力特征值大于最大试验荷载的一半, 即大于170 kPa。试验结果表明, 级配碎石换填处理效果良好, 地基承载力满足工程设计要求^[6]。

3 结束语

本文采用浅层平板载荷试验, 对刚果(金)南部矿区湿陷性土换填地基的处理效果开展检测验证。试验结果表明, 经级配碎石换填夯实处理后的地基承载力特征值满足170 kPa的设计要求, 地基加固效果良好, 可为当地同类湿陷性土地基处理工程提供参考。本次仅为验证性试验, 无法精准确定地基极限承载力。未来可丰富原位试验数据, 建立本地化承载力评价体系, 进一步探究换填地基长期变形与水文稳定性, 完善区域岩土工程设计依据。

参考文献:

- [1] 李云瑜, 贾世平, 苏天涛. 湿陷性黄土地区多桩型挤密桩复合地基加固效果对比研究[J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50(05):147-152.
- [2] 余波江. 湿陷性黄土地区工程地基基础方案优选分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(07):131-133.
- [3] 师晨辉. 湿陷性黄土场站刚-柔性桩复合地基承载特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [4] 徐文涛. 湿陷性黄土地基高能级增强夯击试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [5] 孙晨东. 浸水状态下湿陷性黄土地区长短桩基础负摩阻力研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [6] 钟琳. 湿陷性黄土可控劈裂注浆桩单桩承载力特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.

基于深度学习的水利工程坝体裂缝智能识别技术研究

温燕霞¹, 黄修奖²

(1. 广西凯阔建筑工程有限公司, 广西 来宾 546100;

2. 广西理工职业技术学校, 广西 南宁 530031)

摘要 针对高混凝土坝巡检中裂缝漏检率高、定位耗时长的问題, 构建了一种改进注意力机制的轻量化 U-Net 模型, 实现裂缝识别从数据采集、预处理、训练到边缘部署的全流程。模型在编码解码阶段引入通道注意力与深度可分离卷积, 结合结构化剪枝与量化感知训练, 在边缘计算平台上实现单幅高分辨率图像的快速推理。测试集总体精确率、召回率、F1 值与 IoU 分别达 0.94、0.92、0.93 与 0.89。工程验证表明, 相比人工巡检, 应用该模型后准确率显著提升, 漏检率大幅降低, 处理速度与复核效率均得到明显改善, 具备良好的工程实用价值。

关键词 混凝土重力坝裂缝检测; 轻量化 U-Net; 通道注意力; 边缘计算; 量化感知训练

中图分类号: TP183; TV698.2

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.003

0 引言

高坝在汛期台风暴雨等极端天气窗口期, 对毫米级裂缝的快速筛查提出严峻的时效与精度要求^[1]。受坝体曲率、高空风载及光照条件等因素影响, 传统人工目视与超声检测方法难以有效覆盖背光侧、顶拱等观测盲区, 且易受混凝土龄期增长导致的表层碳化干扰, 致使裂缝识别存在明显的漏检与定位延迟问题^[2-3]。现有检测流程在广域覆盖与弱边缘识别之间难以兼顾, 亟需构建一种兼具高精度与高时效的自动化识别方法^[4]。深度学习视觉方法可端到端同步捕捉裂缝与背景纹理梯度, 结合轻量化网络与注意力机制, 在边缘设备上实现高分辨率影像的实时推断^[5]。将识别结果与坝面 GIS 及数字孪生平台融合, 有望提升巡检效率、盲区覆盖与复核一致性, 推动高坝安全运维向标准化与智能化发展。

1 研究基础与坝体裂缝数据采集处理

1.1 水利工程坝体裂缝识别现状与深度学习技术应用分析

针对南方某混凝土重力坝汛后巡检中裂缝漏检率达 18.7%、单条裂缝定位耗时 43 min 的运维瓶颈, 传统人工目视受限于坝面曲率与高空风载, 易在背光侧及廊道顶拱形成盲区, 超声脉冲透射法因耦合层碳化致使信噪比衰减 9 dB, 进一步放大漏判风险。相较之

下, 深度学习卷积网络以高分辨率可见光影像为输入, 通过端到端训练将“先分割后识别”的两阶段流程压缩为单次前向推理, 在保持 0.5 mm 宽度敏感度的同时, 将单幅 4K 影像处理耗时降至 120 ms 以内。结合“空窗期 4 h 完成全坝面扫描”的运维要求, 轻量化 U-Net 在嵌入式 Jetson 边缘节点上可实现 28 FPS 实时推断, 为数字孪生平台提供毫米级裂缝语义图层, 展现出深度学习视觉范式对高坝运维时效瓶颈的工程契合性。

1.2 坝体裂缝数据采集与预处理

鉴于该重力坝巡检空窗期仅 4 h, 工程单位将 2022 年 9 月至 2023 年 3 月期间, 五次登高巡检获取的 5 000 张 4K 可见光影像, 作为原始样本库使用, 样本覆盖背光侧、顶拱、溢流面等盲区, 涵盖 0.2 mm ~ 25 mm 宽度裂缝以及网状、纵向、斜向三种形态, 同步记录 10:00-14:00 强直射、16:00-18:00 侧光、夜间补光三种光照条件。为抑制高空风载引入的高频噪声, 先对 RAW 影像开展 $\sigma=1.2$ 的高斯滤波去噪工作, 随后借助限制对比度自适应直方图均衡化在 YUV 通道的 Y 分量上进行局部增强, 把裂缝边缘梯度与混凝土麻面纹理的对比度从原图的 42 提升至 68, 同时避免过增强带来的伪影。标注阶段选用 LabelMe 开源工具, 由两名具备五年坝工经验的工程师沿裂缝骨架进行多边形闭合, 把背景、裂缝、渗水晕染三类像素当作标签来使用, 对分歧像素引入第三仲裁, 最终形成像素级掩膜^[6]。

作者简介: 温燕霞 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

数据集按时间顺序分层抽样,以7:2:1比例划分为训练、验证与测试子集,确保同一坝段影像不会跨集泄漏,为后续轻量化U-Net提供一致性基准。

2 基于深度学习的坝体裂缝识别模型构建

2.1 改进U-Net 裂缝分割模型架构设计

针对毫米级裂缝识别中纹理相似与光照变换并存的场景约束,本研究以经典U-Net为主干架构,在编码器与解码器对应层级嵌入通道注意力模块,以提升对裂缝弱边缘与复杂麻面纹理的区分能力。整体采用对称的四级编码与四级解码结构,编码路径逐级叠加通道数为32、64、128、256,解码路径采用双线性插值上采样与编码特征拼接以恢复边缘细节。为适应边缘部署,以深度可分离卷积替代标准卷积,并采用组归一化以保障小批量训练的稳定性。特征图尺寸约束关系如下:

$$H_{out} = \frac{H_{in} + 2p - k}{s} + 1, W_{out} = \frac{W_{in} + 2p - k}{s} + 1 \quad (1)$$

式(1)中, H_{out} 与 W_{out} 表示输出特征图的高与宽, H_{in} 与 W_{in} 为输入特征图的高与宽, k 为卷积核尺寸, s 为步幅, p 为零填充大小。通道注意力模块在编码卷积块尾部及解码拼接后加入,通过全局平均与瓶颈映射生成逐通道权重,实现裂缝显著性的重标定,在前两级编码层采用较小压缩比以保留细节通道,高层适度压缩以抑制背景响应,整体兼顾弱小裂缝可分性与边缘实时推断需求。

2.2 模型训练与参数优化

鉴于该重力坝裂缝像素分布高度不均,本研究把1.2节得到的像素级掩膜当作训练基底来使用,按瓦片裁剪与重叠采样生成 512×512 子块,并在亮度、色温与轻微仿射上进行在线增强,以覆盖直射、侧光与补光情境。训练批次依据时间分层进行混合,确保不同坝段与不同宽度裂缝在批次内保持均衡曝光。

从损失函数的配比来看,微小裂缝像素占比偏低会放大类别不平衡的优化难度,因此把Dice Loss作为主损失来引入,用于直接对重叠率进行优化,公式如下:

$$\mathcal{L}_{Dice} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^N p_i g_i + \epsilon}{\sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i + \epsilon} \quad (2)$$

式(2)中, p_i 表示第*i*个像素的裂缝预测概率, g_i 为对应像素的真实标注取值, N 为当前子块像素总数, ϵ 为避免分母为零的平滑项,求和范围覆盖当前子块的像素集合。

参数优化选用Adam优化器,初始学习率为0.001,

批量大小为16,总迭代200轮。学习率按余弦退火衰减,前5轮进行线性预热,最小学习率降至初始值的十分之一,同时在验证Dice停滞时触发早停以抑制过拟合。为稳定梯度传播,引入权重衰减与梯度裁剪,阈值设为1.0,并把解码浅层赋予更高样本权重以强化细缝敏感度。训练在单卡GPU以混合精度开展,配合组归一化与小批量设定稳定收敛,同时在参数更新端引入滑动平均以平滑噪声梯度并提升收敛鲁棒性。

2.3 模型轻量化改进

针对Jetson平台的显存约束与汛前空窗期的边缘推断需求,本研究以结构化剪枝与量化感知训练为核心路径,将参数收缩约40%,并将单幅4K影像端到端推断时延压缩至0.2s量级。剪枝基于编码—解码对称拓扑与跳连保持,采用通道粒度结构化剪枝,结合滤波器权重的L1范数与通道梯度敏感度联合排序。浅层前两级编码层设置较低压缩率并固定跳连宽度,以保护毫米级细缝对低层纹理的依赖;瓶颈与高层解码阶段适度提高压缩率,并利用挤压与激励单元输出的通道权重作为稀疏正则引导,降低对裂缝关键通道的误删概率。所有保留通道数约束为8的整数倍,在上采样节点前引入 1×1 卷积进行通道重整,确保拼接维度对齐。剪枝采用迭代式流程与短周期微调,并借助知识蒸馏维持边界概率与细缝连通性。量化方面采用对称INT8与量化感知训练,权重逐通道缩放,激活逐张量缩放并结合百分位裁剪以稳定强光与背光场景;GroupNorm在导出阶段展开为定形张量缩放与加法序列,并融合卷积与线性缩放。剪枝与量化交替进行,首尾卷积与上采样插值保持FP16,其余算子下沉为INT8,通过卷积—归一化—激活三元组融合降低访存开销,最终在跳连对齐与注意力路径保留下实现轻量化U-Net在边缘端的可部署性与可维护性。

3 模型效果评估与工程应用验证

3.1 模型性能指标评估

鉴于边缘部署对鲁棒性的要求,本研究在不泄漏坝段的测试子集上开展像素级评估,选用精确率、召回率、F1值与IoU四项指标,并对直射、侧光与补光情境进行分层统计。由此把概率图经验证阈值裁剪为二值掩膜,按裂缝与背景两类像素计算混淆矩阵,并把同一坝段的连续瓦片进行合并求解全幅指标。进一步观察发现,改进后的注意力轻量化U-Net在弱边缘与复杂麻面纹理下保持稳定辨析能力,跨光照条件的指标波动收敛于合理区间。需重点关注的是,改进前后在不同光照与场景的均衡性提升,有助于空窗期扫描的时效与可复现性。

3.2 工程案例应用验证

结合该重力坝汛前空窗期的作业组织方式,本研究把改进注意力轻量化 U-Net 部署于 Jetson Xavier NX 边缘节点,联动工程单位的无人机低空巡检与悬索点位补拍流程,构建采集、瓦片切分、在线推断、工程师复核的闭环。为贴近运维现场的光照与纹理扰动,本研究在 2023 年汛前例行巡检中选取 100 张原始影像作为工程化样本,按照现场巡检规程由两名具备坝工经验的工程师进行独立复核并完成冲突仲裁,把输出

语义掩膜回填至坝面 GIS 底图以支撑跨坝段连续化对比。进一步观察发现,流水线以 512×512 瓦片在边缘端完成阈值裁剪与连通域跟踪,并把疑似异常在廊道口进行即时提示,人工仅对模型低置信度片段开展针对性复核,从而把盲区覆盖与作业连贯性同步推进。与人工基线对照的核心作业指标见表 1,速度倍率与漏检控制共同带动影像级判读的组织效率与复核可复现性提升,且不改变既有巡检记录与竣工档案的归档范式。

表 1 工程案例检测结果对比表

指标	人工巡检	改进注意力轻量化 U-Net	说明
样本量	100 张现场影像	100 张现场影像	同批次、同坝段
准确率	0.89	0.92	以像素级掩膜与仲裁结果为准
漏检率	0.19	0.03	以最终仲裁为口径统计
处理速度提升倍数	1×	15×	以人工判读为基线
边缘端单幅推断时延	—	0.2 s	4K 影像端到端时延
复核工作量占比	100%	30%	仅复核低置信度片段
输出形态	照片标注与记录文本	裂缝与渗水语义掩膜回填至 GIS	可叠加坝段历史版本
盲区覆盖	顶拱与背光侧受限	顶拱与背光侧覆盖	借助补光与分区航线实现

3.3 技术应用价值与展望

鉴于汛前空窗期短与坝面纹理复杂并存的运维语境,本研究把改进注意力轻量化 U-Net 嵌入边缘巡检链路,构建从影像到裂缝语义图层的自动化通道,把工程师从大规模初筛中解放出来,并把结果回填至坝面 GIS 与数字孪生,实现跨坝段与跨时相的可比对管理与闭环留痕。该路线对场景噪声与光照漂移具备较强适配性,为制定标准化作业规程与可推广的软硬一体化方案提供了路径。后续工作将推进可见光、近红外、热成像与超声的多模态融合,把裂缝边缘与内部劣化信号进行联合解译;构建面向季节与材性漂移的自监督域自适应框架,稳定跨年复测一致性;在边缘端完善不确定度评估与人机协同主动学习,压缩低置信度复核量;搭建边缘云协同的时空裂缝演化管理系统,把检测、追踪与维修计划联动起来^[7]。

了作业时效,识别结果与 GIS 联动支撑全坝面精细化管理。未来将进一步融合可见光、近红外、热成像与超声等多模态信息,探索自监督域自适应方法以增强跨季节泛化能力,完善人机协同与不确定度评估机制,构建边缘云协同的时空裂缝演化管理平台。

4 结束语

本研究围绕高坝运维实际,构建了改进注意力机制的轻量化 U-Net 裂缝智能识别方法,完成了从数据采集、预处理到模型训练、剪枝量化及边缘端部署的完整技术闭环。模型在多种光照与复杂纹理条件下保持稳定分割性能,工程验证显著降低了漏检率,提升

参考文献:

- [1] 徐裕民. 混凝土坝体裂缝产生原因分析[J]. 石材, 2025(11):104-106.
- [2] 王强,高利宁. 水利工程中高拱坝施工技术的关键难点与对策研究[J]. 产品可靠性报告, 2025(09):166-167.
- [3] 常旭东,何鑫,孙西文. 水利工程混凝土裂缝成因机理及控制措施[J]. 水泥, 2025(09):116-119.
- [4] 陈远,赵亚伟,王光明,等. 基于 SSG-YOLOv8n 模型的砖砌墙体裂缝形态识别方法[J]. 工业建筑, 2025,55(07):152-161.
- [5] 唐筱翔. 基于深度学习的混凝土墙体裂缝识别与三维重建[D]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [6] 孟阳. 基于深度学习的混凝土裂缝智能检测与修复策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2026(07):100-102.
- [7] 李振全. 水利工程混凝土裂缝成因分析及控制技术研究[J]. 石化技术, 2025,32(05):409-410.

基于深度学习补偿的容栅传感器非线性误差校正方法研究

杨广禄

(桂林市晶瑞传感技术有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要 容栅传感是量具行业核心支撑技术, 具备非接触测量、低功耗、低成本、高稳定性等突出优势, 在精密加工与检测领域发挥关键作用。深化该技术研究, 既能推动测量精度、响应速度等核心性能提升, 也能为其在智能制造、消费电子等新兴领域的创新应用筑牢基础, 助力产业升级与消费场景拓展。目前该技术虽已发展成熟, 但受测量精度限制, 在高端测量领域的应用拓展遭遇明显瓶颈。基于此, 本文提出一种基于 CBB-LTM 深度学习的容栅传感器非线性误差校正方法。该方法系统解析误差来源并构建误差数据库, 设计融合时序分析与特征提取的混合校正模型。经理论仿真与试验验证, 该方法可有效抑制非线性误差, 显著提升传感器测量精度, 完全满足工程实际应用需求。

关键词 容栅传感器; 非线性误差; 深度学习; CBB-LTM 模型; 误差校正技术

中图分类号: TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.004

0 引言

容栅传感技术是一种非接触测量计数, 其技术原理为电容耦合原理, 具备结构简单、分辨率高、抗干扰性强的优势, 广泛应用于量具测量与精密检测领域, 测量精度为其核心性能指标。在实际工况下, 栅极边缘效应、寄生电容、温度漂移及加工偏差会产生非线性误差, 大幅降低测量精度。针对该问题的补救方案有多项式拟合、线性插值、硬件补偿等, 但是上述方案难以适配多误差耦合场景。还有一种具有一定拟合能力的 BP 神经网络补偿方案, 但其特征提取能力弱, 无法提取准确的误差细节。

国内外针对容栅传感器精度提升已开展大量研究: 国外依托工业积累, 聚焦材料稳定性与栅极蚀刻工艺优化; 国内兼顾工艺升级, 同时依托算力开展最小二乘法、神经网络、遗忘滤波等算法补偿。但现有研究均聚焦趋于线性的或非线性耦合项较少的情况下做了理想模型的设计, 在复杂的非线性补偿领域始终是一片空白; 传统方法高精度补偿能力不足, 深度学习模型结构单一, 未兼顾多特征耦合与时序问题, 泛化能力不足^[1]。

本文提出了适配容栅传感器的 CBB-LTM 混合深度学习校正模型, 为解决单一模型精度不足的问题, 构建了融合实测与仿真数据的多因素耦合数据集, 旨在

大大提升模型泛化能力, 且通过仿真与实验验证该方法的有效性。本文主要通过对接容栅传感器误差产生来源进行研究, 结合容栅传感器误差产生理论, 将二者结合在一起进行了耦合数据集搭建, 完成了 CBB-LTM 模型设计、仿真及实验验证三个环节, 形成了完备的验证流程。本研究的核心创新点是提出了 CBB-LTM 混合模型, 将 CBB 特征值和 LTM 时序进行融合适配多误差场景, 在保证精度的前提下降低复杂度、提升实用性。

1 容栅传感器非线性误差机理分析

1.1 非线性误差核心来源

容栅传感器因其理论原理和制造工艺等原因, 其主要误差来源于以下几个方面: 一是由栅极边缘效应引起极板边缘电容畸变、电场耦合不均匀造成非线性误差, 由寄生电容干扰破坏差动电容平衡造成零点漂移、幅值失衡等造成理论误差, 还有栅极尺寸加工误差, 平面度、翘曲变形误差, 电极镀膜与基材误差等传感器自身误差; 二是动定栅安装间隙不均匀造成电容灵敏度波动导致温漂敏感加剧, 还有安装偏心和机械回程空程等装配误差; 三是温度改变介质介电常数, 导致机体热胀冷缩、电极尺寸形变等产生零点漂移, 湿度、油污、粉尘等改变传感器表面等效电阻, 使漏电流增大造成输出偏移, 电磁干扰造成信号耦合产生

作者简介: 杨广禄 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 容栅传感技术算法及应用。

随机误差；四是电路及信号采集造成的误差，如激励源相位不纯、频率漂移破坏差动调节平衡，运放失调、采样串扰引入直流偏置与高频噪声，解调算法存在理论误差等。从工程实践数据可以看出，在不进行补偿时， $0\ \mu\text{m} \sim 80\ \mu\text{m}$ 测量范围内最大非线性误差达 $10\ \mu\text{m}$ ，温漂误差增量为 $0.15\ \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ [2]。

1.2 误差机理与传统方法局限性

容栅传感器非线性误差是多误差共同耦合的结果，具有复杂的非线性与时序相关性。在传统方法中，多项式拟合及线性插值仅能应对简单误差且需要大量数据做补偿依据。例如：线性插补方式需要对传感器进行全量程补偿前数据测量，然后将测量数据与标准数据做对比做出补偿查询表，其中补偿步进值的选取直接决定补偿效果的好坏，不但占用生产时间，还占用芯片内存，更不能满足大量程传感器工程实现要求，无法解决多因素构成的复杂精度问题。例如：由传感器本身加工及环境温度变化共同作用造成的非线性误差，若使用线性插补方案进行补偿，则只能补偿在某一温度范围内的制造误差，而当温度变化时则无法进行全温区适配，若需进行全温区补偿则需结合制造误差一起将温区分成不同区间进行逐个补偿，这种补偿方案会造成工作内容翻倍导致效率严重低下。此外，还有一种叫做 BP 神经网络特征提取的补偿方式，该方式则存在提取效率低、难以捕捉误差时序与耦合特性的问题。实测数据表明，多项式拟合校正后最大误差 $0.58\ \mu\text{m}$ ，BP 神经网络校正后最大误差 $0.32\ \mu\text{m}$ ，均无法满足高端场景 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ 的精度要求 [3]。

2 深度学习校正模型设计

2.1 模型总体设计

结合容栅传感器的误差耦合特性与时序特征，设计出基于输入层、特征提取层、时序耦合层、融合层与输出层的 CBB-LTM 混合深度学习校正模型，该模型不但能够实现静态误差补偿，还能实现动态时序误差的协同补偿。各层具体描述如下：

输入层采用归一化处理，将位移测量值、温度、湿度三个因素转换为 $0 \sim 1$ 区间的数据来消除量纲影响提升模型训练收敛速度，其中测量位移值在 $0\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 范围内取值，温度在 $-10\ ^\circ\text{C} \sim 60\ ^\circ\text{C}$ 范围内取值，湿度在 $40\% \text{ RH} \sim 80\% \text{ RH}$ 范围内取值。

特征提取层采用 2 层 CBB 结构实现，第一层是用于提取边缘效应及寄生电容等静态误差特征的卷积层，其特征为卷积核大小 3×3 ，数量 32，步长 1，填充方式为 same；第二层是数据核大小为 2×2 ，步长为 2 的缓冲层，该层主要用于配合第一层来抑制过拟合保留

核心误差特征，避免无用数据对结果产生冲击 [4]。

时序耦合层则采用 1 层 LTM 结构将 CBB 提取的静态特征作为输入传输到该层，该层共设置 64 个隐藏层神经元，同时还配有遗忘门、输入门及输出门控制单元，该单元不但能够捕捉温度漂移和动态位移等时序误差的演化规律，还能解决静态模型无法适配动态误差的缺陷。

融合层采用全连接层方案将 CBB 静态特征与 LTM 时序特征进行加权融合（权重分别为 0.6 和 0.4），然后通过 ReLU 激活函数进一步将数据进行融合，该方式不但能增强特征表达能力，还能避免特征冗余，提高输出数据的准确性。

输出层则由线性激活函数实现，可输出包含误差补偿量和校正后位移值的二维结果。

2.2 数据集构建与预处理

基于上述模型构建的融合实测与仿真数据的多因素耦合误差数据集，不但能够确保数据的全面性与真实性，而且还能为后续模型训练提供可靠支撑。首先采用量程为 $0\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 、分辨率为 $0.01\ \mu\text{m}$ 的容栅传感器，精度等级为 $\pm 0.05\ \mu\text{m}$ 的精密位移台及温湿度箱采集 1 000 组实验数据；其次采用 MATLAB 搭建起容栅传感器误差仿真平台，通过构建模拟边缘效应、寄生电容、加工偏差的仿真模块模拟出共同的耦合影响。此外，再补充 200 组 $-10\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 极端温度及 $80\% \text{ RH}$ 极端湿度下的极端工况数据用于弥补实测数据极端工况覆盖不足的缺陷。

数据集预处理步骤分为以下四个方面：一是数据清洗，采用 3σ 准则剔除 12 组异常数据，避免异常值影响模型训练精度；二是利用归一化处理方式，采用 min-max 归一化方法，将所有数据映射至 $0 \sim 1$ 区间，该方式不但能够消除量纲差异，还能加速模型收敛；三是通过添加随机噪声、时序平移等方式实现数据增强，将总测量数据集扩充至 2 400 组以避免模型过拟合；四是通过对动态位移数据进行时序对齐处理，确保 LTM 输入数据的时序一致来提升时序误差建模精度；五是数据集按 7:2:1 比例划分为训练集（1 680 组）、验证集（480 组）及测试集（240 组）三个集合，综合实现对误差的补偿 [5]。

2.3 模型训练与优化

本文采用 TensorFlow/Keras 框架进行模型训练，首先，选用均方误差 MSE 为损失函数以衡量模型输出与真实值的偏差；其次，选用学习率为 0.001、迭代次数 100 次、批次大小 32、动量系数 0.9、权重衰减系数 0.001 的 Adam 优化器，该优化器的主要作用是避免模型

过拟合与训练震荡；再次，为抑制过拟合，在CBB层与LTM层之间再添加一层dropout正则化层，dropout系数设置为0.3用于随机丢弃30%的神经元，减少特征冗余与过拟合风险；最后，配合patience=10的早停策略，当验证集MSE连续10次不下降时则停止训练，以保存最优模型参数。实测中，当观察到模型训练集损失值逐步下降且验证集损失值趋于稳定时，验证集中MSE值为0.0018，决定系数 R^2 为0.9982，该数值表明模型拟合效果能够精准捕捉误差特征^[6]。

3 仿真与实验验证

3.1 仿真验证

基于MATLAB/Simulink搭建仿真平台，导入误差机理模型与CBB-LTM混合模型，仿真数据如表1所示。

表1 不同校正方法仿真效果对比表（单位： μm ）

校正方法	单一误差场景 （最大误差）	耦合误差场景 （最大误差）	动态误差场景 （最大误差）	MSE	R^2
多项式拟合	0.56	0.89	0.95	0.0126	0.0972
BP神经网络	0.31	0.45	0.52	0.0048	0.989
CBB-LTM混合模型	0.08	0.15	0.18	0.0017	0.998

（注：测试集300组数据统计结果。）

表2 不同校正方法实验效果对比表（单位： μm ）

校正方法	最大测量误差	平均测量误差	测量精度	实时响应时间
未校正	1.20	0.78	$\pm 1.2 \mu\text{m}$	—
多项式拟合	0.58	0.32	$\pm 0.6 \mu\text{m}$	5 ms
BP神经网络	0.32	0.18	$\pm 0.3 \mu\text{m}$	12 ms
CBB-LTM混合模型	0.09	0.05	$\pm 0.1 \mu\text{m}$	8 ms

（注：常温25℃、湿度60%RH，50组实测数据统计。）

校正后测量精度达到 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ，相比未校正精度提升了60%，而响应时间小于10ms，满足应用需求。

4 结束语

针对容栅传感器精度难以提升的问题，本文提出校正模型充分发挥了CBB与LTM的优势，主要将传感器误差产生的原理及规律进行捕捉，其推理型补偿方案对传感器精度补偿相较传统方案效果明显，同时兼顾了工程实现难度，在工程实现与精度提升之间达到平衡。虽然该方案可以有效提升容栅传感器非线性误差补偿效果，但是该模型仍然存在不足，无法解决极端环境下的精度补偿问题，未来将持续对模型进行优化，探索新一代混合测试模型，解决在极端环境下的精度校准问题，将校准方案推广至高端精密测量领域，为容栅传感器进一步发展提供有力保障。

仿真结果表明，该模型在校正精度、MSE与 R^2 上均优于传统方法，多误差耦合场景下精度较多项式拟合提升83.1%、较BP神经网络提升66.7%，泛化能力良好。

3.2 实验验证

搭建包括容栅传感器（ $0 \mu\text{m} \sim 80 \mu\text{m}$ ，分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ ）、精密位移台（ $\pm 0.05 \mu\text{m}$ ）、温湿度箱等的试验平台，构建基于Python的分析模型实现数据实时采集与校正。实验数据如表2所示。

通过实验结果可以看出，在 $-10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内，本模型温漂系数 $0.001 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ，与校准之前数据对比，该模型温漂降低了93.3%；与BP神经网络补偿后数据对比，该模型降低了66.7%。综合来看，本模型

参考文献：

- [1] 王赛飞. 容栅位移传感器技术研究及其应用量具开发[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [2] 苏自煜, 顾崇林, 郝一旭, 等. 基于容栅技术与改进LSTM的电梯制动器间隙监测预警方法[J]. 现代电子技术, 2026, 49(06): 77-82, 88.
- [3] 马世东. 多反射极相位补偿型容栅传感器位移测量方法及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [4] 侯贤琴, 徐光学, 乔小强, 等. 基于TCN-LSTM-CMA自编码器的无监督异常检测[J]. 计算机技术与发展, 2026(08): 139-153.
- [5] 郭甜甜, 赵海, 葛辛, 等. 基于容栅技术的位移数据处理专用芯片设计[J]. 空天预警研究学报, 2025, 39(04): 299-303.
- [6] 孔萌萌. 高分辨率电容位移传感器及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.

自动化改造对曝气沉砂池污泥抽吸效率及系统稳定性的提升研究

董 晶, 蔡志超

(西安净水处理有限责任公司, 陕西 西安 710086)

摘 要 曝气沉砂池作为污水处理厂预处理的核心单元, 其运行效率直接影响后续工艺的稳定性与能耗水平。传统曝气沉砂池桥式吸泥机多采用固定速度运行模式, 难以适应池内污泥浓度时空分布不均的复杂工况, 导致抽吸效率低下、能耗浪费及系统稳定性差等问题。本研究以西安市第六污水处理厂曝气沉砂池改造项目为依托, 通过部署实时污泥监测系统、引入变频调速技术及智能控制算法, 对传统吸泥机进行智能化升级。改造后运行数据表明, 污泥浓度波动幅度降低 56%, 标准偏差降低 62%, 抽吸效率提升 20% 以上, 节能效果超过 30%, 系统稳定性与运行经济性得到显著提升。本研究旨在为污水处理厂曝气沉砂池的智能化改造提供技术方案参考与工程实践范例。

关键词 曝气沉砂池; 桥式吸泥机; 自动化改造; 污泥抽吸效率

中图分类号: TU992.23

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.005

0 引言

城市污水处理厂是保障水环境质量的关键基础设施。曝气沉砂池作为污水处理预处理单元, 其稳定高效运行对后续处理工艺至关重要。曝气沉砂池作为去除污水中无机砂粒的核心设施, 通过曝气使污水产生螺旋状旋流, 利用重力与离心力分离砂粒与有机物, 具有沉砂有机物含量低、预曝气、脱臭等优点。然而, 传统曝气沉砂池配套的桥式吸泥机采用固定速度运行模式, 无法响应池内污泥浓度的动态变化。由于进水水质、流量波动及池内流体力学特性, 污泥在池底呈现时空分布不均现象, 传统固定速度运行模式导致高浓度污泥区抽吸不彻底、低浓度区无效空载运行, 造成能源浪费与设备磨损, 还影响砂粒去除率与系统稳定性^[1-2]。

随着智能传感技术和设备智能化技术的高效发展, 污水处理工艺向自动化及智能化发展, 逐渐成为该领域的发展动向^[3-4]。通过利用污泥浓度及界面传感器、变频调速技术及自动化控制策略对曝气沉砂池中桥式吸泥机运行效率进行提升, 进而实现能耗的降低以及高效污泥处理^[5]。与此同时, 为了确保西安市第六污水处理厂曝气沉砂池的桥式吸泥机在运行不间断过程中实施自动化改造, 需要基于不更改原先的 PLC 控制

系统, 在旁路增添新的控制柜, 实现污泥浓度、污泥界面的实时检测以及变速行进。对西安市第六污水处理厂曝气沉砂池的自动化改造不仅能降低运维成本, 还能够很大程度上实现污泥处理的可靠性, 进而使得污水处理工艺向智能化发展, 并为保障城市水环境可持续发展提供技术支撑。

1 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造目的

传统曝气沉砂池桥式吸泥机采用匀速模式, 使曝气沉砂池中存在如下问题:

1. 曝气沉砂池内污泥时空分布不均匀, 引发少部分区域污泥量堆积较多, 而剩余区域污泥量堆积量较低, 致使桥式吸泥机工作效率较低。此外, 当污泥量堆积严重时, 若人工不能及时完成抽吸, 则需要进行后续污水处理。

2. 曝气沉砂池桥式吸泥机采用恒定速度运行, 无法依据污泥浓度和污泥界面变频调速, 使得在低污泥低浓度区和低污泥界面区常常处于空载运行, 致使能耗浪费。此外, 还引发设备磨损严重, 后期运维成本高昂。

3. 传统曝气沉砂池桥式吸泥机运行系统无法实现污泥浓度及污泥界面实时监测, 其主要依赖人工凭借自身经验判断, 导致系统响应速度比较迟缓, 难以在高污泥浓度及污泥界面实现精准调控目标。

作者简介: 董晶 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污水处理运行。

2 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造关键技术方案

2.1 曝气沉砂池中污泥浓度及污泥界面监测系统

对桥式吸泥机双侧采用对称布置污泥浓度传感器和污泥界面传感器。污泥浓度传感器采用荧光示踪法,测量范围 0 mg/L ~ 2 000 mg/L,精度 $\pm 2\%$;污泥界面传感器采用超声波原理,测量范围 0.4 m ~ 10 m,重复性 $\pm 0.5\%$ 。此外,通过设计安装耐腐蚀固定装置(304 不锈钢+耐腐蚀塑料),用于支持传感器深度调节,采用快拆结构便于维护。通过安装高度优化实验,确定污泥浓度传感器最佳安装深度为液面下 4.0 m,污泥界面传感器为液面下 1.5 m,以减少曝气扰动影响,确保数据稳定性。在桥式吸泥机单侧左右两边各安装 1 套传感器,形成双侧监测系统,覆盖沉砂池关键区域,重点监测污泥堆积区。采用耐腐蚀电缆连接传感器,数据实时传输至 PLC 控制系统。传感器信号采用移动平均滤波算法处理,根据池内不同区域扰动程度调整滤波窗口与采样周期,强曝气区采用 7 个~10 个数据点窗口、0.5 秒~1 秒采样周期,稳定沉淀区采用 3 个~7 个数据点窗口、1 秒~5 秒采样周期。

2.2 桥式吸泥机行进装置变频调速系统

对原有吸泥机行进电机通过加装变频器实现吸泥机行进电机无级调速(调节范围 0% ~ 100% 最大速率)。目的为优化电机驱动系统,提升输出稳定性和响应速度,适应智能调速需求。自动化控制策略,使设备在高浓度区域降低行进速度,延长吸泥时间,确保充分抽吸。设备在低浓度区域提高行进速度,减少无效停留,提升运行效率。

2.3 数据采集与分析系统

系统以 PLC 为核心,集成数据采集、处理与指令输出功能,通过控制柜实现人机交互与设备监控。控制柜采用 IP55 防护等级的不锈钢柜体,内置触摸屏操作界面,可实时显示污泥浓度、界面高度、设备速度等参数,并支持历史数据查询与参数设置。数据采集模块实时获取污泥浓度及吸泥机运行状态数据;数据处理模块分析浓度分布并生成调速指令;控制输出模块动态调节吸泥机行进速度,实现智能化运行。系统自动存储浓度及运行参数,支持离线趋势分析,可监测浓度异常或设备故障。

触摸屏监测界面以数字形式清晰地呈现污泥浓度、界面高度等运行参数,并设有单位标注,方便操作人

员准确掌握设备状况。通过触摸屏可进入参数设置界面,调整变频器频率、浓度阈值及运行周期等参数。全部运行参数均设有限定阈值,防止误操作引发设备异常;关键参数修改需管理人员权限验证,确保系统安全稳定。操作人员可查询历史数据,借助数据演化规律掌握设备运行状态,为运行优化提供依据。

2.4 智能控制算法

系统采用四层递阶框架:数据采集层经 RS485 总线每秒采集污泥浓度与界面高度;信号处理层完成预处理与特征提取;控制决策层利用数据融合与模糊控制应对复杂工况;执行层通过 Modbus-TCP 协议与变频器通信,实现电机精准控制,各层通过标准化接口闭环传递信息。污泥负荷指数(SLI)通过下式完成定义:

$$SLI = \alpha \cdot (C/C_{\max}) + \beta \cdot (L/L_{\max}) \quad (1)$$

式(1)中: C 为曝气沉砂池当前的污泥浓度(mg/L); L 为曝气沉砂池当前的污泥界面高度(m); $C_{\max}$ 为污泥浓度量程上限,取 2 000 mg/L; $L_{\max}$ 为曝气沉砂池有效深度; α 、 β 为权重系数分别选取 0.7 和 0.3。

针对高负荷、中负荷、低负荷工况,采用三段式变频调速控制策略:

1. 高负荷工况($SLI \geq 0.8$):

$$v = 0 \text{ m/min} \quad (2)$$

$$t_{\text{del}} = k \cdot SLI \cdot t_{\text{base}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: v 为桥式吸泥机的运行速度; k 为控制系统的增益,一般选取 1.5 ~ 2.0; t_{base} 为停留时间。

2. 中负荷工况($0.3 \leq SLI < 0.8$):

$$v = v_{\max} \cdot (1 - 0.7 \cdot SLI) \quad (4)$$

式(4)中: $v_{\max}$ 为桥式吸泥机最大运行速度。

3. 低负荷工况($SLI < 0.3$):

$$v = v_{\max} \quad (5)$$

在低负荷工况下,桥式吸泥机需快速通过进而降低运行时间,并需将速度指令转换为电机频率:

$$f = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot v_{\max} v \quad (6)$$

式(6)中: $f_{\min} = 10 \text{ Hz}$ 为防堵转频率; $f_{\max} = 60 \text{ Hz}$ 。

该系统能够根据曝气沉砂池中污泥负荷自行转换运行速度:在高负荷工况以定点抽吸、中负荷工况以自适应调速、低负荷以快速通过。该系统不仅提升了污泥抽吸率,同时还降低了能耗。此外,整个控制系统利用信号处理技术能有效遏制由于曝气干扰所引发的处理误差,进而确保控制决策层的可靠性。

3 结果与分析

对比试验采用实时监测方式,在改造前后各进行 24 小时连续运行测试,两次测试时间相隔一周,确保进水条件和水质特征具有可比性。试验期间,利用新安装的污泥浓度传感器和污泥界面传感器完成数据采集,采样间隔设置为 1 分钟,共获得 2 880 组有效数据。传感器安装位置根据前期试验结果确定,污泥浓度传感器设置在液面下 4.0 m 处,污泥界面传感器设置在液面下 1.5 m 处,两个传感器均距离池壁 0.5 m 以上,以避免边界效应的影响。系统每分钟自动记录污泥浓度与界面高度数据,经移动平均滤波(窗口 10 点)实时处理,同时记录流量、曝气强度等参数。数据经 PLC 上传至中央系统,采用专用软件处理,并设有异常值自动检测与复核机制。

曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前 24 小时的测量时,池内污泥浓度在 480 mg/L ~ 1 050 mg/L 出现显著的波动,使得整个池内平均污泥浓度 820 mg/L,且污泥浓度标准差高达 215 mg/L,如图 1 所示。这是由于整个池内污泥浓度和污水场进水量呈现正相关,然而时间滞后 0.75 小时。在凌晨三点到五点低负荷时段,整个池内污泥浓度波动幅度在 $\pm 15\%$,其波动范围较为平缓;然而,在上午十点至十二点的高负荷时段,整个池内污泥浓度波动在 $\pm 32\%$,其波动较为明显。此外,在该时段,整个池内污泥界面高度在 1.2 m ~ 2.8 m,波动也较为明显,使得池内界面平均高度为 2.1 m。

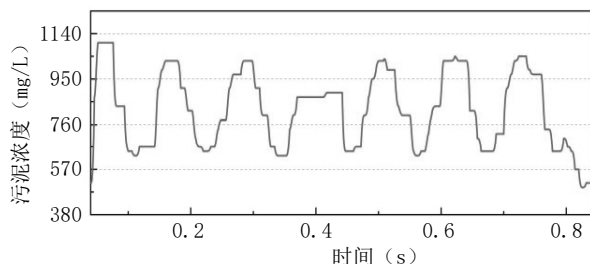


图 1 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前采样数据

由图 2 可知,曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造后整个系统运行较为平稳,池内污泥浓度波动范围为 40 mg/L ~ 295 mg/L,平均浓度为 520 mg/L,标准差降低至 95 mg/L。这是由于整个池内污泥浓度和污水场进水量的跟随性有了显著改变,其滞后时间缩短为 0.25 小时。在全天不同时段,整个池内污泥浓度波动能够被控制在 $\pm 10\%$ 以内,尤其是在高负荷时段,主要是因为系统能够通过变频调速桥式吸泥机实现污泥浓度的波动。与此同时,整个池内的污泥高度处于 1.8 m ~ 2.3 m 且平

均污泥界面高度为 2 m。与自动化改造前相比,整个池内的污泥浓度和污泥高度的时空分布有显著的改善。

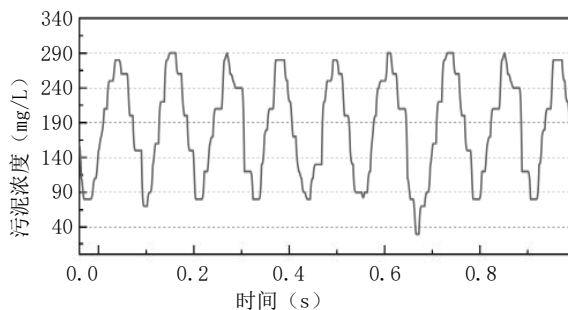


图 2 曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造后的采样数据

通过对比曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造前后采样数据表明,整个控制系统使得池内污泥浓度波动幅值降低了 56%,且标准偏差降低了 62%;整个系统对于污泥负荷响应时间缩短了 67%。整个池内平均污泥浓度提升了 7%,表明曝气沉砂池内污泥沉淀量得到了改善。曝气沉砂池桥式吸泥机自动化改造能显著提升曝气沉砂池运行稳定可靠性。建议后期在系统运维中还需优化控制参数,尤其在进水负荷较大时段,并适当地提高数据采集频率和控制鲁棒性。

4 结束语

本研究聚焦西安市第六污水处理厂的曝气沉砂池桥式吸泥机智能化改造,并有效解决了桥式吸泥机以传统固定速度运行模式所诱发的问题。在智能化改造完成后,曝气沉砂池中污泥浓度波动幅度降低了 56%,标准偏差降低了 62%,污泥抽吸率提高了 20%,且整个运行系统响应时间缩短到 15 分钟以内。研究结果表明,将实时监测、变频调速、智能控制技术用于曝气沉砂池桥式吸泥机改造效果显著,能够为污水处理厂智能化改造提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张伟,李建国.城市污水处理厂曝气沉砂池运行优化研究[J].给水排水,2021,47(06):112-116.
- [2] 王磊,刘洋,陈曦.基于模糊控制的污水处理厂节能运行策略[J].环境工程学报,2020,14(08):2154-2161.
- [3] 刘海涛,王建华.污泥界面在线监测技术在污水处理中的应用[J].自动化与仪器仪表,2019,36(04):78-81.
- [4] 周敏,赵宇.变频调速技术在污水处理设备节能改造中的应用[J].电气应用,2022,41(02):56-60.
- [5] 陈志刚,李娜.污水处理厂智能化控制系统的设计与实现[J].环境科学与技术,2021,44(05):98-103.

建筑电气智能化系统集成应用与工程实践

王宏俊, 纪栋祥

(上海航天建筑设计院, 上海 201100)

摘要 建筑电气智能化系统集成应用是推动建筑行业智能化、绿色化转型的核心路径, 其核心价值集中体现在提升系统运作水平、优化能源管理、降低运营成本三个关键维度。为实现这一价值, 系统集成需先整合照明、空调、安防等各类独立子系统, 再依托平台化集中管控与数据融合分析技术, 实现各设备与系统的协同联动, 进而破解传统子系统独立运行的壁垒。在实践层面, 通过商业综合体案例中的规范接口标准、构建智能分析模型等实操措施, 进一步验证了集成应用的可行性与实效性, 不仅为建筑电气智能化实践提供了可借鉴的思路与方法, 更能助力行业实现高效、节能、可靠的运营目标。

关键词 建筑电气; 智能化系统; 集成应用; 能源管理; 运营成本

中图分类号: TU855

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.006

0 引言

随着建筑行业智能化转型进程持续加快, 传统建筑电气系统中各子系统独立运行的模式已难以适配现代建筑的运营需求。这种独立运行模式直接导致各类子系统接口不兼容、数据无法互通, 进而造成管控效率低下、能源浪费严重、运营成本偏高的问题, 最终制约了建筑智能化价值的充分发挥。当前行业对高效、节能、智能的建筑电气管控需求日益迫切, 在此背景下, 开展建筑电气智能化系统集成应用研究, 明确集成应用的核心意义、探索科学可行的应用策略、结合实际案例优化实操细节, 成为破解行业痛点、推动建筑行业高质量发展的关键举措。

1 建筑电气智能化系统集成应用的意义

1.1 提升系统运作水平与用户体验

企业推动建筑电气自动化系统集成应用, 首要价值在于显著提升系统运作水平与用户体验。技术人员通过科学整合照明、空调、安防、消防等各类子系统, 能够实现各系统的自动化协同控制与场景联动, 打破传统各子系统独立运行的壁垒, 让整个电气自动化系统的运作更加高效、有序。这种集成化运作模式, 不仅能精准匹配居住者与办公人员的各类需求, 有效提升居住和办公环境的舒适性与便利性, 更能全面拓展建筑的核心功能, 让用户在使用过程中获得更便捷、更安心、更舒适的体验, 进一步凸显建筑的智能化价值。无论是日常办公中的照明与空调自动调节, 还是居住

场景中的安防与消防联动响应, 都能通过集成应用实现精准管控, 让建筑真正服务于人的需求^[1]。

1.2 优化能源管理与实现节能减排

集成后的能源管理系统可实时、全面地监测建筑内电力、水利、燃气等各类资源的消耗状态, 全程把控资源使用的每一个环节, 杜绝资源浪费的现象。在监测过程中, 系统依托先进的智能算法, 能够精准分析建筑物当前的内外部环境状况, 包括光照强度、环境温度、人员密度等因素, 自动调整各类电气设备的运行功率, 让设备始终处于最节能的运行状态。这种智能化的调节方式, 既能大幅降低建筑的能源消耗, 减少能源成本支出, 又能践行绿色低碳发展理念, 助力建筑行业实现节能减排的发展目标, 推动建筑行业向绿色化、可持续化方向转型。

1.3 降低运营成本与提高运作效率

通过集成监控系统、控制系统等多元化设备模块, 企业可实时监测各类电气设备的运行状态, 及时捕捉设备运行过程中的异常信号, 提前预警潜在故障, 从源头减少突发维修成本和设备停机时间。相较于传统的人工巡检模式, 这种集成化的监测与预警机制, 不仅能减少人工巡检的工作量和人力成本, 还能避免因设备突发故障导致的生产停滞、办公中断等问题, 保障建筑电气系统的连续稳定运行。同时, 集成应用还能优化设备的运行流程, 提升设备的运行效率, 进一步降低企业的整体运营成本, 推动企业实现高效、低成本的运营管理模式^[2]。

作者简介: 王宏俊(1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑电气与智能化。

2 建筑电气智能化系统集成应用策略

2.1 平台化集中管控

1. 标准化构建集中控制平台。企业需主动引进专业的集中控制平台,将其作为整个建筑电气智能化管控体系的核心载体,为后续的集成应用奠定坚实的基础。该集中控制平台必须具备高度的兼容性和扩展性,既能适配当前建筑电气智能化系统的各类需求,又能应对未来系统升级、设备新增带来的多样化需求,避免平台因兼容性不足而无法满足实际应用需求。在实践操作环节,企业要明确界定平台内各子系统之间、子系统与平台之间的接口标准,确保各类数据传输的准确性与稳定性,让不同厂商生产的智能化设备都能无缝接入平台,实现各设备、各系统之间的数据互通互联,打破设备与系统之间的信息壁垒^[3]。

2. 分层设计平台架构并整合系统。技术人员需对集中控制平台的架构进行科学的分层设计,明确划分数据采集层、数据处理层、应用服务层和用户界面层,确保各层次的功能清晰、职责明确。各层次之间通过标准化接口进行数据交互与信息传递,既能够保证系统的模块化开发,便于技术人员针对不同层次的功能进行单独优化与升级,又能降低后期系统维护的难度和成本,提高系统维护的效率。在系统整合方面,技术人员要对建筑内各类电气智能化系统进行全面梳理,重点梳理照明系统、空调系统和安防系统等核心系统,结合各系统的功能特性、数据需求以及运行规律,将其有序整合至集中控制平台架构中,实现对各类系统的集中监管和统一管理,让企业能够通过一个平台掌控整个建筑电气智能化系统的运行状态。

2.2 数据融合与智能分析

1. 数据清洗与标准化处理。基于前文构建的集成化集中控制平台,企业能够全面整合建筑电气智能化系统中的各类数据信息,为集成化控制提供丰富、全面的数据源支撑。在实际操作过程中,企业要优先对采集到的各类原始数据进行清洗与整理,通过设定合理的数据阈值和筛选规则,精准剔除数据中的噪声数据、重复数据和错误数据,从源头保证数据质量的可靠性,避免无效数据对后续分析工作造成干扰。数据清洗完成后,技术人员要对其进行标准化处理,严格依据统一的数据模板和编码规范,将不同来源、不同格式的数据转化为统一的标准格式,消除数据之间的语义差异和歧义,为后续的数据融合操作奠定坚实的基础,确保数据能够被高效利用^[4]。

2. 数据融合。在数据融合过程中,技术人员要灵

活运用多元数据关联技术,结合各类数据的时空属性和业务逻辑,建立起数据之间的紧密关联关系,将分散、孤立的各类数据整合为有机整体,形成全面、系统、完整的数据视图,为后续的智能分析工作提供丰富且准确的数据支撑。基于融合后的高质量数据信息,相关单位需积极引进智能分析模型,为集成控制提供科学的结构支撑。

3. 智能分析模型构建。智能分析模型构建的核心是结合实际需求科学选型,技术人员在模型选择环节,需紧密结合建筑电气智能化系统的具体应用需求和数据分析目标,既不能忽视系统的实际运行场景,也不能脱离预设的分析目标,同时要审慎考量模型的适用性、准确性和计算复杂度,兼顾实用性与高效性,避免选用过于复杂却不贴合需求的算法,也杜绝选用过于简单而无法满足分析精度的模型。在此基础上,技术人员需合理筛选适配的机器学习或深度学习算法,诸如知识计算、神经网络等常用算法,经过多维度比对与测试,最终构建起符合建筑电气智能化系统实际需求、能够精准响应分析目标的初始分析模型,为后续的训练与优化奠定坚实的基础。

4. 模型训练与优化评估。模型训练与优化评估是确保智能分析模型发挥实效的关键环节。在智能分析模型的训练阶段,技术人员必须准备充足且具有代表性的训练数据集,该数据集要全面覆盖系统在不同工况下的运行数据,既包含系统正常运行时的稳定参数,也涵盖负载波动时的动态数据,更要纳入故障预警等特殊场景的相关数据,才能确保模型全面学习到系统的运行特征,切实提升模型的适配性。随后,技术人员需将训练数据有序输入初始模型,通过迭代优化算法反复调整模型的各项参数,逐步缩小模型预测或分类结果与真实值之间的差距,让模型的准确性和泛化能力得到显著提升;模型训练完成后,技术人员则要同步建立完善的模型评估机制,依托交叉验证、误差分析等科学方法,对训练好的模型进行全面、准确的评估,再根据评估结果及时对模型进行优化调整,切实保障模型在实际应用中能够发挥出良好的性能,为建筑电气智能化系统的集成控制提供可靠支撑^[5]。

3 案例分析

某 12 万平方米的商业综合体集写字楼、商场、地下车库于一体,其原有建筑电气智能化系统包含监控、消防、门禁、电梯、智能照明、能耗管理等 10 余个独立子系统,涉及海康、大华、捷顺等 6 家不同厂商的设备。这些子系统各自独立运行且接口不兼容,导致数据无

法互通,管理人员需要切换多个系统才能完成日常管控。该综合体原有年耗电量约800万kWh,年用电成本约720万元,设备故障月均发生8次,每次故障响应时间平均28分钟,且能耗统计需要财务与物业人员对着大量报表核算3天才能完成,还容易出现数据误差,为解决这些实际运营难题,该综合体开展了建筑电气智能化系统集成工作。

3.1 平台化集中管控

1. 引进集中控制平台并规范接口标准。该商业综合体引进北京和欣IBMS综合管理平台,将其作为整个建筑电气智能化管控体系的核心载体。技术人员严格遵循IEC61850标准界定平台内各子系统之间、子系统与平台之间的接口,确保各类数据传输的准确性与稳定性,使得海康的监控设备、大华的门禁系统、捷顺的停车场管理设备以及格力的中央空调智能控制柜、施耐德的照明控制器等不同厂商生产的1200余台智能化设备都能无缝接入平台,打破了此前各子系统独立运行的数据壁垒。

2. 分层设计集中控制平台架构。技术人员对该集中控制平台进行科学的分层设计,明确划分数据采集层、数据处理层、应用服务层和用户界面层。数据采集层部署了200余个物联网传感器,覆盖各楼层的电气设备与环境参数。数据处理层采用边缘计算网关实时处理采集到的数据。应用服务层提供能耗监测、设备管控、应急处置等核心功能。用户界面层为管理人员提供可视化操作界面。各层次之间通过ModbusTCP协议进行数据交互与信息传递,既实现了系统的模块化开发,又降低了后期维护的难度与成本。

3.2 数据融合与智能分析实操细节

1. 数据整合与清洗处理。基于北京和欣IBMS综合管理平台,该商业综合体全面整合了建筑电气智能化系统中的各类数据,包括电压、电流、功率、设备运行状态、室外气温、室内人流、峰谷电价等,这些数据日均采集量达500万条,技术人员采用专业的数据清洗技术,通过缺失分析、异常值分析和专家知识平衡校验三种手段对原始数据进行校核修正,设定电流阈值为0A~50A、电压阈值为 $220V \pm 5\%$,精准剔除了其中1.2万条噪声数据和0.3万条重复数据,必要时还启用人工校正辅助传感器修正,从源头保证了数据质量的可靠性。

2. 数据标准化处理。数据清洗完成后,技术人员严格依据《智能建筑设计标准》(GB/T50314-2015)的编码规范,将来自不同子系统的XML、CSV、JSON等

不同格式的数据转化为统一的JSON格式,消除了数据之间的语义差异和歧义,为后续的数据融合操作奠定了坚实的基础。

3. 智能分析模型构建与优化。智能分析模型构建与优化始终围绕综合体的实际应用需求和明确的数据分析目标展开。技术人员首先结合场景特点选用LSTM神经网络算法,精心构建起针对中央空调冷量需求预测与设备故障预警的初始智能分析模型;随后精心筹备了涵盖系统正常运行、负载波动、故障预警等多种场景的10万条训练数据集,这些数据集全面且细致地覆盖了不同工况下的各类运行数据,为模型训练提供了充足的素材。接着,技术人员将训练数据有序输入初始模型,通过梯度下降算法持续迭代优化1000次,不断精细调整模型的各项核心参数,逐步缩小模型预测结果与实际真实值之间的差距;模型训练完成后,技术人员主动采用交叉验证方法对模型性能进行全面且严格的评估,特意选取5组验证数据集开展测试,最终使模型对中央空调冷量需求的预测准确率稳定达到92%,故障预警的准确率高达97.8%,预测误差也从初始的8.5%大幅降至2.3%,切实确保该模型能够在实际应用中稳定发挥良好性能,满足综合体的智能化运营需求。

4 结束语

建筑电气智能化系统集成的实践价值远不止于设备与系统的简单整合,其核心是通过系统性的架构设计、数据协同与技术优化,推动建筑电气系统从分散管控向集中智能管控转型。从实际应用效果来看,合理的集成策略能够有效破解传统系统的运行弊端,在提升系统运作效率、降低能源消耗与运营成本的基础上,进一步拓展建筑的智能化功能,满足现代建筑的多元化需求。

参考文献:

- [1] 牛志平,管涛.智慧建筑电气智能化弱电施工与机电安装[J].智慧中国,2026(02):126-127.
- [2] 苏楠,姚新红,马宁.数智化驱动的职业本科教学改革路径探索:以建筑电气与智能化专业课程体系重构为例[J].现代职业教育,2026(05):127-130.
- [3] 陈荣.建筑电气和建筑智能化建设的探究[J].城市建设理论研究(电子版),2026(04):74-76.
- [4] 史禹谷.大型公共建筑电气智能化系统施工技术研究[J].新城建科技,2026,35(01):161-163.
- [5] 孙德超,陈佳.智能化技术在建筑电气工程造价控制中的应用研究[J].散装水泥,2026(01):212-214.

高精度电子传感技术在机电运动控制中的应用

张朋亮¹, 张立琛²

(1. 杭州集益科技有限公司, 浙江 杭州 310012;

2. 杭州神踪科技有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 随着传感器元件性能的不断提高, 以及融合算法不断发展, 高精度电子传感推动高端机电设备向着智能化、超精密化方向发展。高精度电子传感技术是机电运动控制系统达成高精度定位以及动态稳定性的关键。本文对光栅编码器、磁致伸缩传感器、激光干涉仪和电容/电涡流传感器等主要传感技术进行系统的阐述, 分析了信号调理、温度补偿、动态匹配等精度保证方法, 并对多传感器融合、传感控制一体化、实时同步等系统集成结构进行了研究。结果表明, 在数控机床、工业机器人以及微纳制造等典型场景里, 该技术凭借改善反馈信息的质量来明显加强运动系统轮廓精度、重复定位水平和环境适应程度。

关键词 高精度; 电子传感技术; 机电运动控制; 高精度定位; 动态稳定性

中图分类号 TP212; TM921.5

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.007

0 引言

机电运动控制系统性能的提高, 使其对位置、速度、力的感知精度要求也越来越高。在这种情况下, 高精度电子传感技术成了形成闭环反馈的关键部分, 它的性能界限直接影响到整个系统的动态反应和稳定性。面对复杂的工况下非线性、多干扰的问题, 单个传感元件很难同时达到精度、鲁棒性、实时性这三个要求。因此, 对典型的高精度传感元件工作机理进行研究, 分析其精度保证的关键技术, 建立高效的传感器融合架构, 对于打破目前运动控制的瓶颈、推动高端装备的发展有着重要的理论和工程意义。

1 高精度电子传感技术的核心类型与原理

1.1 光栅编码器与精密位移感知

光栅编码器是目前机电运动控制系统中应用最广的高精度位移传感装置之一。其工作原理是利用莫尔条纹和光电转换作用, 当光栅尺和读数头之间有相对运动的时候, 透射或者反射形成的光强发生变化, 被光电元件接收后经过细分处理, 得到数字位移信号。光栅编码器的分辨率是由光栅刻线密度和电子细分倍数决定的, 目前主流产品已经可以达到纳米级的分辨能力。在直线运动控制中, 封闭式光栅尺可以很好地抵抗油污、粉尘等环境因素的影响, 配合高倍数细分芯片, 可以得到亚微米级的重复定位精度。旋转运动控制时, 圆光栅编码器利用全周刻线来检测角位移,

它的好坏直接关系到转台、机器人关节这些执行机构的运动品质。光栅编码器的测量范围大、动态响应快、数字输出方便接口, 但是它的安装精度要求高、对污染敏感等特点也给系统设计带来一定的限制^[1]。

1.2 磁致伸缩传感器与绝对位置检测

磁致伸缩传感器用威德曼效应和逆磁致伸缩效应做非接触式的绝对位置测量。传感器由波导丝、磁环和电子模块组成, 激励脉冲沿波导丝传播时, 磁环所在位置会产生弹性波, 用回波时间差来计算位置信息。该技术直接给出绝对位置值, 断电后不需要回零, 特别适合行程长、工况恶劣的液压缸、大型滑台等运动系统。相比于光栅编码器, 磁致伸缩传感器在抗污染、耐冲击、安装容差等各方面都比光栅编码器更好, 但是分辨率一般较低, 适合于对绝对位置可靠性和环境适应性要求较高、分辨率要求为微米级的场合。近年来, 由于信号处理技术的改善, 其分辨率逐渐提高, 部分高端型号已经可以达到亚微米级的测量精度, 在大型精密运动平台上得到了应用。

1.3 激光干涉仪与超精密测量

激光干涉仪利用光的干涉原理, 用波长作为测量基准, 可以达到纳米级甚至亚纳米级的位移测量精度。在机电运动控制系统中, 激光干涉仪一般被用作校准设备或者嵌入超精密运动平台上, 用以检验定位精度或者创建闭环控制回路。激光干涉测量最大的优点是

作者简介: 张朋亮 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 智能传感与控制技术。

测量基准稳定、非线性误差小、动态测量范围广。双频激光干涉仪采用塞曼效应产生两个频率接近的偏振光,用外差干涉法克服直流漂移问题,在高速运动测量时有较好的信噪比。但是激光干涉仪对环境温度、气压、振动等比较敏感,使用成本高,不能广泛应用于一般的工业设备中。在光刻机、超精密机床、计量仪器等对精度要求达到纳米级的领域中,激光干涉仪仍然是不能被取代的主要传感手段。

1.4 电容式与电涡流式位移传感器

电容式位移传感器是利用电极间的电容变化来反映位移量的,具有很高的分辨率和频率响应特性,适合于微小位移的测量以及精密对准。由于测量原理不同,传感器对被测表面的导电性、介电常数和环境湿度都有一定的要求,一般用于洁净环境下的精密运动控制。电涡流传感器是利用电磁感应原理来检测线圈的阻抗变化,从而得到位移信息的传感器,它具有非接触、响应速度快、耐油污等特点,在主轴跳动监测、振动控制等方面有广泛应用。这两种传感器的量程一般小于光栅尺、磁致伸缩传感器,但是对局部微小位移的高频动态检测有较好的效果。在机电运动控制系统当中,常常被用作辅助传感单元,用来补偿主反馈传感器的局部误差或者检测高频振动成分。

2 高精度电子传感的精度保障机制

2.1 信号调理与噪声抑制

高精度电子传感技术的实现不单依靠敏感元件本身性能的好坏,信号调理电路的品质也起着非常重要的作用。传感器输出的微弱电信号要经过放大、滤波、模数转换等环节,任何一个环节引入的噪声都会影响到最终测量的精度。低噪声放大器、差分传输结构、高分辨率模数转换器属于构成高精度信号链的主要部分。编码器信号处理中,正交编码信号的毛刺消除、相位偏差校正、细分误差补偿等技术直接决定角度或者位移的测量保真度。现代高精度传感系统大多采取数字信号处理技术,用数字滤波、自适应补偿算法进一步减小周期性干扰和随机噪声^[2]。

2.2 温度补偿与热稳定性控制

温度变化属于影响电子传感器准确度的主要环境因素之一。传感器材料的热膨胀、电子元件的温漂、光源波长的变化都会造成测量误差。高精度应用场合下,单靠材料本身的低热膨胀系数已经不能满足要求了,必须采用主动式的温度补偿方式。常用的温度补偿方法有:在传感器结构内部集成温度传感元件,建立热

误差模型,用实时补偿算法修正输出值;采用对称结构设计,使热变形相互抵消;对关键部位进行恒温控制。光栅编码器系统当中,栅尺和读数头之间的热匹配设计非常重要,一些高端产品使用零膨胀玻璃或者复合材料栅尺来减小热敏感性。温度补偿效果的好坏直接影响到传感器在变温工况下的长期稳定性^[3]。

2.3 动态响应与带宽匹配

高精度电子传感技术在保证静态精度的同时,也不能忽视动态性能。机电运动控制系统在高速启停、轨迹跟踪时,由于传感器输出滞后于实际运动造成相位裕度降低或者产生振荡。传感器的动态响应特性有截止频率、延迟时间、采样率等参数,要和伺服控制器的带宽相适应。高动态运动环境下信号传输延迟、滤波环节引入的相位滞后也要在系统设计中充分考虑。传感器和执行器、控制器之间时序同步成了高性能运动控制的重要技术之一,基于以太网的高速实时总线和同步采样机制被广泛地应用到多轴协同运动系统当中^[4]。

3 传感器融合与系统集成架构

3.1 多传感器融合策略

单一的传感器在量程、分辨率、动态响应、环境适应性等各方面都存在着固有的不足,不能满足各种工况下高精度的要求。多传感器融合技术把各种类型、各种特性不同的传感器信息进行协同处理,依靠各个传感器之间互相补充的优势来提高整个运动控制系统对环境的感知能力。典型的融合结构有以下几种形式:一是用绝对式传感器和增量式传感器组合起来,先用绝对式传感器获得初始位置,再用增量式传感器给出高分辨率的动态反馈。二是用大行程传感器和局部高精度传感器级联起来,在大范围运动中兼顾全程定位和局部微调的能力。三是用位置传感器和力/力矩传感器结合起来,实现位置控制和力控制的平滑切换。融合算法的关键是信息同步、数据配准、动态权重的合理分配,卡尔曼滤波、粒子滤波等估计理论在传感器融合中得到了广泛的应用。

3.2 传感与控制的一体化设计

传统的运动控制系统采用的是“传感器-控制器-执行器”串联的结构,各个环节都是独立设计的,接口处存在着信号转换延迟和噪声耦合的问题。将传感器的信息处理和控制算法的执行放在同一个硬件平台上,中间环节被去掉,系统变得更紧凑、反应也更快。集成化的方式有多种,把传感器细分电路和伺服驱动器结合在一起,缩短了模拟信号传输的距离,降低了

电磁干扰的风险。在驱动器里嵌入高精度的位置插补和闭环控制算法,形成了智能执行单元。在系统级芯片上集成传感接口、控制核心和通信模块,构建出高度集成的运动控制节点。一体化设计不但提高了系统功率密度和可靠性,也给实现更高一级的自适应控制、预测控制打下了基础。

3.3 工业通信与数据同步

分布式运动控制架构当中,各个传感节点同中央控制器之间数据交换依赖工业现场总线或者实时以太网。传感器数据的实时性、确定性、同步精度都会影响到多轴协同运动轨迹精度以及动态协调性能。目前主流的实时工业以太网协议(EtherCAT、PROFINET IRT、SERCOS III等)都具有分布式时钟同步的功能,可以达到微秒级的节点间同步精度。高精度电子传感器用集成的同步接口可以保证在同一个时间基准下输出采样数据,从而消除由于采样时刻不一致而造成的轮廓误差。

4 典型应用场景与效能分析

4.1 数控机床与精密加工

数控机床加工精度很大程度上受位置反馈系统分辨率和稳定性影响。高端数控机床大多采取全闭环控制架构,把高精度光栅尺或者激光干涉仪安放在工作台和床身之间,直接对末端执行器的位置实施检测,从而消除丝杠、导轨等机械传动环节造成的误差。实际使用中,光栅编码器的分辨率一般在 $0.1\ \mu\text{m}$ 到 $1\ \mu\text{m}$ 之间,配合高带宽伺服驱动器可以达到复杂的曲面加工高轮廓精度的目的。五轴联动机床的旋转轴用圆光栅编码器提供角度反馈,和直线轴一起构成完整的空间误差补偿系统。高精度电子传感技术的应用使得数控机床的定位精度由原来的丝杠级几十微米提高到现在的光栅级几微米,大大提高了加工表面质量以及尺寸的一致性^[5]。

4.2 工业机器人及伺服系统

工业机器人轨迹精度和重复定位精度是由关节位置反馈是否准确决定的。现代工业机器人每一个关节都装有高分辨率的多圈绝对式编码器,既能保证开机时就得到关节的角度,又能支持高速的动态响应。协作机器人对于力的感知能力要求较高,在关节处装有扭矩传感器,把位置传感和力传感的信息结合起来,从而达到柔顺控制以及人机安全交互的目的。伺服系统上高精度电子传感技术使电机控制由原来的半闭环变为全闭环,电机尾部编码器和负载端传感器一起形成双反馈回路,补偿了减速器和传动机构的弹性变形

和间隙误差。该技术路线大大提高了机器人末端的动态定位精度,给精密装配、激光加工等高附加值应用打下了基础。

4.3 精密定位平台与微纳制造

半导体制造、光学对准、生物芯片点样等微纳制造中,运动平台的定位精度要求达到亚微米甚至纳米级别。该类系统一般会使用到多层的传感结构,即宏动层用光栅尺或者磁栅尺来完成大行程粗略定位,微动层则用电容式传感器或者激光干涉仪来达成纳米级微调,两者之间依靠控制策略共同发挥作用。压电陶瓷驱动的纳米定位平台上的电容式位移传感器可以直接测量平台的位移,并且可以作为闭环控制回路的一部分,用来补偿由于压电材料迟滞、蠕变引起的非线性。在光刻机工件台上,多组激光干涉仪和平面光栅一起工作,实时解算出六自由度位姿,达到纳米级的定位和亚纳米级的稳定度。高精度电子传感技术在微纳制造领域中的应用,冲破了传统机械导向和传动方式的精度极限,促使制造技术向着微观尺度发展。

5 结束语

高精度电子传感技术正持续向更高分辨率、更强环境适应性与更深系统融合度发展。光栅编码器、磁致伸缩传感器、激光干涉仪、电容式位移传感器等元件各有优势,在信号调理、温度补偿、动态匹配等精度保证的基础上,给机电运动控制系统提供位置、速度反馈。多传感器融合和传感控制一体化设计,冲破了单个传感技术性能的束缚。它在数控机床、工业机器人、微纳制造等诸多方面起着举足轻重的支撑作用,其持续发展将有力推动高端装备向着更加精密、更加智能的方向迈进。

参考文献:

- [1] 王海鹏,郭瑜,尹兴超.工业机器人工况下的增量式光栅编码器误差补偿法[J].振动与冲击,2024,43(22):225-231.
- [2] 陈冠廷,魏海峰,闵琦.基于滑窗滤波器的改进MRAS转动惯量辨识[J].组合机床与自动化加工技术,2024(04):110-114,120.
- [3] 周学文,王彩年,毛范海,等.旋转主轴轴系温升预测模型[J].组合机床与自动化加工技术,2024(01):5-8.
- [4] 汪惟桢,张驰,李荣,等.直线电机高速高精运动分段式三元复合控制[J].组合机床与自动化加工技术,2024(01):114-117,122.
- [5] 司卫征,卫紫君,罗良传,等.高精度数控机床的导轨平行度测试方法研究[J].机床与液压,2024,52(15):128-136.

智能化机械设备电气自动化技术及其应用路径

杨正法, 饶梅贵, 尹超杰, 蔡前龙

(浙江长兴和良智能装备有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 311000)

摘要 随着工业4.0理念的日益普及, 智能制造相关技术在各行各业中得到进一步推广和利用。机电一体化技术融合机械、电气和控制等多领域理念和精华, 成为传统制造业升级和转型的关键支撑。传统制造业的生产管理方式已逐渐跟不上时代发展需求, 其存在的问题日益突出, 企业需加快技术改进与创新步伐。本文以某制造企业为案例, 指出企业生产线存在的问题, 提出将人工智能、物联网等先进技术融入生产线的具体路径, 构建智能化机械设备电气自动化体系, 推动生产迈向智能化方向, 分析技术应用效果, 旨在为促进该套技术方案进一步推广提供参考。

关键词 智能化机械设备; 电气自动化技术; 传感器; 人工智能技术; 物联网技术

中图分类号: TP29; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.008

0 引言

随着智能技术在制造行业的日益普及, 传统制造业正面临升级和转型需求。当前, 许多制造企业面临产能效率低、能源耗费高、产品品质不稳定等问题, 必须要加强技术革新, 才能破解难题。将电气自动化技术与人工智能和物联网等先进技术相结合, 可以推动机械设备对数据进行自动化采集, 对生产状况进行实时化监测, 结合实际情况做出决策和判断, 促进企业生产向智能化和自动化发展。

1 案例背景

某大型制造企业在正式改造前, 其主要生产线依然采用传统的电气控制模式, 需要人工干预, 自动化控制与生产水平较低, 对温度和压力等主要参数的把控不到位, 设备出现故障后才被发现, 无法及时对故障进行预判和处理, 能源消耗量大, 生产成本低, 对环境造成一定的污染, 产品质量不稳定。这是由于传统生产模式存在各种各样的问题, 很难满足现代制造业的发展需求。因此, 企业必须开展智能化改造, 推动企业实现顺利转型与升级。

为了解决企业生产线中存在的一系列问题, 该企业积极开展机械设备电气自动化改造, 引进先进的智能化技术和设备, 淘汰老旧设备, 对传统系统进行全

面升级。在本次改造中, 主要通过传感器采集信息, 利用人工智能技术开展决策, 借助物联网对设备进行联网, 打造一体化智能生产平台, 确保生产线的自动化水平得到提升, 提高产能和产品质量, 有效降低生产成本, 减少能源消耗, 提高企业的经济效益, 推动企业生产迈向绿色环保方向, 创造良好的社会效益。

2 智能化机械设备电气自动化核心技术的具体应用实践

2.1 部署传感器

企业对生产线进行改造时, 充分考虑到生产环境的恶劣程度, 如温度高、压力大、有较多粉尘、电磁干扰比较强, 从而专门设置与之相对应的传感器, 对生产全过程的参数进行精准化采集, 同时对生产过程进行不间断监控, 再将数据传回到系统中, 满足系统智能化调节需求^[1]。具体操作如下:

一是在重要工序中, 企业主要安装温度、压力和位置三种传感器, 对生产工艺参数进行全方位监测和采集。在加工设备的炉体侧壁和炉口出料位置等部位安装耐高温性能强的温度传感器, 对设备内部、炉内温度和成品温度数据进行不间断采集, 再将采集到的数据上传到中控室, 管理人员可随时查看数据。一旦温度超出标准范围, 系统会自动进行报警, 同时对关

作者简介: 杨正法 (1970-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机电一体化。

键参数进行联动调节,有效保证产品质量,减少设备由于高温而有损伤,延长设备的使用寿命。

二是在液压机和气压阀等关键设备上安装压力传感器,对油压和气压变化进行实时化监测,及时发现管路漏油、压力不稳定等问题。对产品进行定型加工时,压力传感器可对液压缸压力数据进行实时采集,一旦压力发生异常变化,系统可及时对液压泵的运行参数进行调整,避免产品出现开裂和变形等质量问题,有效保证产品质量。同时,系统可根据压力数据的变化情况,提前进行维护,及时发现零部件的磨损等问题,并在第一时间进行处理。

三是将高精度位置传感器安装在输送流水线和切割加工机床设备之上,结合电气自动化控制系统对设备的运行情况进行精准化控制。开展切割作业时,传感器可将刀具的实时坐标位置进行采集,并传回到系统中,系统根据数据分析结果,对切割路径进行自动化修正,合理控制运行速度,保证切割尺寸符合标准,减少人工调试所带来的误差,降低材料浪费。同时,这种方式将成品输送、定位和切割等工序进行有效衔接,无需人工操作即可实现自动化运行,提高生产效率。

四是为了提高电气自动化系统对数据感知的准确性,保证数据的采集更加全面,企业在烟道和高温管道等重要部位设置光纤传感器。该类传感器的抗干扰能力很强,检测灵敏度很高,测量范围广泛,适合在恶劣的环境下工作,不会轻易发生故障。企业可通过这一传感器所获得的数据对生产工艺进行优化,还可设置更加完善的环保指标,进一步规范生产行为。对精密的零部件进行检测时,企业将 MEMS 微型传感器嵌入零件内部,对部件的振动和温度等数据进行实时化采集,及时发现部件的磨损等问题,从而更换新的部件。

2.2 引进人工智能技术

企业结合自身生产需求与实际情况,将人工智能技术与电气自动化系统相结合,推动软件和硬件同步升级^[2]。具体举措如下:

一是企业采用深度学习技术搭建智能分析模型,专门对设备故障进行预测和判断。通过对传感器采集的相关数据和设备历史数据等内容进行整合,通过神经网络算法不断学习和更新,提高模型的精准度,从而及时发现潜在故障,对故障的类型和位置进行精准判断和定位。采用深度学习技术可进一步提高故障识别的准确度,还可及时发现微小问题和可能出现的隐患,

使维护人员制定合理的维护计划,减少停机情况^[3]。

二是企业使用强化学习算法,结合生产工艺要求与实际生产环境,构建专门的参数优化模型,对各道工序参数进行自动化调节。在实际生产过程中,温度和物料等参数会时常发生变化,通过新的模型随时采集现场环境和设备运行等数据,同时算法会不断学习与更新,进一步优化模型和控制策略,对关键参数进行自动调整。同时,系统还可结合高峰期和低谷期的电价差异性,通过错峰安排的方式,减少大功率耗电设备在高峰用电时段的运行次数,减少电费开支。

三是企业采用自然语言处理技术对中控操作界面进行升级改造,确保工作人员能够通过语音对设备进行操控,随时了解现场情况,保证操作更加便捷。系统能够精准识别操作人员下达的指令,自动完成相对应的操作。同时,系统会通过语音播报操作结果与设备的运行状态,回答操作人员提出的问题,并为其提供相应指导,减少误操作率^[4]。

2.3 采用物联网技术

该企业对生产线进行智能化升级时,利用物联网连接各种设备,将所有数据打通。企业原本独立运行和分散布设的各类加工设备,监测设备则控制设备均被物联网纳入统一的网络之中,彼此互联互通^[5]。

一是为保证设备彼此互联互通,企业设置专门的物联网通信模块,结合传感器采集的数据,将所有设备进行连接,对设备运行状态进行不间断监控。该模块运用先进的 5G 技术,信息传输速度快,反应延迟小,信号稳定可靠,数据可在第一时间得到上传,系统可随时了解设备运行状况。利用物联网技术手段,中控室可随时对设备的运行参数和状态进行查看和分析,无需人员频繁来到现场巡查,减轻工作强度,保证工作安全。

二是为保证生产得到精准调度,优化生产过程,企业将物联网、云计算技术相结合,打造专门的管控平台,平台可将生产过程中的数据进行全面整合,利用大数据技术展开进一步分析,平台根据分析结果对生产进行远程调度,实现过程优化。工作人员通过这一平台可随时了解生产进度、设备运行状态等信息,结合具体情况,下达指令,对参数进行调整,确保生产各个环节得到统一管理和控制。生产期间,一旦某一设备出现问题,或者某一环节有异常,工作人员可利用平台迅速锁定问题,分析问题产生的原因,及时

解决问题，不影响正常的生产进度，严格保障产品质量。同时，平台依托强大的云计算技术，能够将所有的生产数据进行汇总，从多个角度、不同层次展开分析，找出生产工艺存在的问题，及时对问题进行改进和优化，使管理人员能够做出科学、合理的决策。

三是企业积极推进仓储和物流工作迈向智能化方向，将物联网与AGV小车、电子物联网标签相结合，对各种物料进行自动化识别和搬运，自动清点货物。企业为所有物料设置物联网电子标签，这一标签内含有与货物相对应的信息，如规格、批次、工序等，利用读卡器可对信息进行迅速读取，精准锁定物料位置^[6]。AGV小车利用物联网接收指令，无需人工搬运，即可进行物料传送、转运、入库，提高工作效率，降低人工成本，避免产品在搬运过程中被损坏，保障人员安全。

四是企业正积极响应国家政策，推动节能减排技术的应用，通过物联网技术对生产过程中的各种能耗数据进行实时化采集，将数据上传到云端，展开进一步分析，对能源进行合理分配，保证能源得到合理利用，降低能耗。企业通过物联网传感器对每个生产环节中的能源消耗数据进行采集，再将数据上传到云计算平台。平台对数据进行汇总、整理和分类，展开深入分析，

识别出能耗高的环节、设备，制定针对性控制方案，保证能源得到有效回收和利用。

五是随着5G技术的日益普及，设备互联互通，数据传输更加便捷，同时促进维护人员通过远程维护和检修的方式迅速处理设备故障等问题，并利用数字孪生仿真技术搭建虚拟生产环境。具体来讲，企业将5G技术与物联网技术相结合，发挥二者的优势，使维护人员无需抵达现场就可以对设备进行远程监控和调试。利用数字孪生技术搭建与生产线相同的虚拟环境，帮助工作人员优化工艺参数和生产方案，有效提高生产质量和生产效率。与此同时，企业将防火墙、数据加密技术和用户权限管理等技术相结合，构建完善的网络安全防护体系，避免病毒和黑客入侵系统，保证数据安全可靠。

3 智能化机械设备电气自动化技术应用效果

该企业引入智能化机械设备电气自动化技术对生产线进行改造后，改造效果比较突出，从根源上解决了原有控制模式存在的问题，提高生产线智能化水平，保证生产加工更加精准，并以此推动生产向绿色化、低碳化方向发展。具体数据如表1所示。

将改造前和改造后的数据进行对比可知，改造后

表1 智能化机械设备电气自动化技术应用效果

评价指标	改造前（传统模式）	改造后（智能化模式）	提升幅度
核心生产效率（吨/小时）	120	150	25%
单位产品能耗（千克标准煤）	600	510	15%
设备故障率（次/月）	12	5	58.3%
产品合格率（%）	92	97	5.4%

的系统有突出的效果，各项指标均得到改善，说明该技术可有效提高生产效能，降低生产成本，有效保证产品质量，以此推动生产实现顺利转型。

4 结束语

通过对企业生产线进行智能化改造，充分表明智能机械电气自动化在推进工业转型升级的过程中起到至关重要的支撑作用。其中，传感器、人工智能和物联网三大技术可以有效保证产品质量和生产效率得到提升，降低生产成本，减少能源消耗。未来，企业要加大技术投入力度，结合相应的政策和企业生产情况，不断优化技术使用方案，提高企业的竞争力。

参考文献：

- [1] 申婷,孙亚群.智能化机械设备电气自动化技术及其应用研究[J].中国设备工程,2026(05):28-30.
- [2] 涂明东.智能化机械设备电气自动化技术探究[J].中国设备工程,2026(02):39-41.
- [3] 郑孝明,崔猛,马传杰.基于智能化的机械设备电气自动化技术应用研究[J].城市建设,2025(13):51-53.
- [4] 韩效成.基于智能化的机械设备电气自动化技术应用研究[J].冶金设备管理与维修,2025,43(03):73-75,78.
- [5] 刘建强,聂兴苏,王继瀚.智能化机械设备电气自动化技术研究[J].中关村,2024(08):122-123.
- [6] 叶禹和.智能化机械设备电气自动化系统优化研究[J].造纸装备及材料,2024,53(01):60-62.

智能建造在建筑工程全生命周期中的应用策略

马 添，齐成成

(山东宏祥工程项目管理有限公司，山东 东营 257091)

摘 要 智能建造技术是我国建筑行业智能化转型发展期间取得的重要成果，也是从根本上破解传统建造模式效率低下、资源浪费和管理粗放问题的核心举措。为推动建筑工程高质量发展，本文以建筑工程全生命周期为视角，阐述智能建造技术的概念内涵、核心技术与应用价值，重点从规划报建、工程设计、现场施工、运营维护四个阶段分析智能建造技术在建筑工程中的具体应用路径与实施方法，旨在为有效提升工程建设效率、保障施工质量与安全、降低资源消耗提供借鉴，进而实现建筑全生命周期的数字化、智能化管控。

关键词 建筑工程；全生命周期；智能建造

中图分类号：TU74

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.009

0 引言

我国建筑行业长期处于劳动密集、资源消耗大、管理粗放的发展状态，在项目规划、设计、施工、运维等全生命周期环节普遍存在信息断层、协同不足、效率偏低等问题。随着数字经济与新型工业化进程加快，以BIM、物联网、大数据、人工智能为核心的智能建造技术快速发展，为破解传统建造模式不足提供了全新技术路径。在此背景下，应积极引入智能建造技术，通过人机协同、数据驱动、智能管控，实现对建筑工程全过程的精准感知、动态分析与科学决策，推动建筑业转型升级，实现绿色低碳与高质量发展。

1 智能建造技术概述

1.1 智能建造技术概念

智能建造技术是新兴信息技术与传统工程建造技术的融合产物，作为一种人机协同建造模式，依托智能技术与先进装备，智能化管控建筑工程全生命周期的各项活动，构成“感知—分析—决策—执行”闭环管理机制，推动粗放式建造模式向精细化、智能化方向发展。目前，部分建筑企业都陷入认知误区，片面认为智能建造技术是大数据、物联网、人工智能等信息化技术的叠加，实际上是以数据为核心，完整收集建筑工程相关信息，如所在地区气象数据、现行规范文件、现场施工数据等，精准感知工程项目运行情况，识别异常问题，如安全违章行为、施工质量问题、能耗超标，将问题与解决建议推送至管理人员。

1.2 智能建造核心技术

智能建造技术属于综合性体系，由多项核心技术组成，各项技术相互协同，共同构成智能建造技术基础。其一，BIM技术，根据所掌握工程信息来构建三维模型，如场地模型、构件模型和建筑模型，直观呈现设计成果，根据实时收集施工数据来刷新模型状态，展示现场施工情况，后期还能作为运维管理平台，展示建筑结构健康状况、建筑系统运行状态。其二，物联网技术，具备“万物互联”的鲜明特征，部署大量传感器和其他智能终端，全部接入物联网平台，全面采集人员、设备、材料、构件等核心要素的实时数据，由在线监测模式取代低效落后的人工巡查模式，及时识别质量安全隐患和各类突发情况，协助管理人员迅速采取处治措施。其三，大数据技术，负责提供精准数据支撑，全面收集建筑工程相关数据信息，从中提取有效信息，挖掘数据背后规律，如汇总整理能耗数据，锁定能耗异常环节，深入分析能耗超标原因，且提出针对性节能建议。其四，人工智能技术，以自动化操作作为应用定位，具备强大环境感知和自适应控制能力，无需人工深度干预，即可自动完成一些复杂操作任务，主要用于初步合计、质量检测、隐患识别等场景，如精准总结工程建设需求，直接生成多套初步设计方案，经过迭代优化后，输出最终方案^[1]。

1.3 应用价值

随着智能建造技术投入应用，有利于解决建筑工程传统建造和运营管理模式存在的不足，应用价值体

作者简介：马添（1998-），女，本科，助理工程师，研究方向：建筑工程。

现在以下方面：其一，增强管理效能，由信息化、智能化和精细化管理模式，取代低效落后的人工管理模式，使得管理人员从现场巡查、报表编制、数据整理等烦琐工作中解放出来，工作重心转为把控管理方向及制定各项决策，利用技术助力，带动管理水平、管理时效性和决策精度全面提升。其二，保障建设质量，在施工现场部署高精度传感器，构成在线监测系统，跟踪监测施工过程，自行检测施工成果质量，识别到混凝土结构表面开裂、钢筋间距误差超标等问题后，自动发送报警信号，提醒施工班组返工整改。其三，保障施工安全，依托在线监测系统来实现，并植入视觉分析算法，从现场监控画面中识别安全隐患，常见隐患包括临边防护设施破损失效、现场人员未正确穿戴安全防护装备、地表沉降速率或是累计沉降量超标，即刻发送报警信号，必要时启动声光报警装置，组织现场人员设备安全退场。

2 智能建造技术在建筑工程全生命周期中的实践应用

2.1 规划报建阶段

规划报建阶段作为建筑工程建设起点，也是项目构想转换现实成果的合法性基础，明确项目定位，设定容积率和各项建设指标，并按照规定要求走完土地获取、规划许可等法定流程。早期建筑工程以“人工调研+主观判断”作为规划报建模式，常出现工作纰漏，伴随出现报建周期延长、规划方案缺乏可行性等一系列问题。为解决上述问题，需要主动引入智能建造技术，由数据驱动智能决策模式，彻底摒弃人工经验型决策模式，以数据采集、方案优化、报建审批作为核心应用场景，应用方法如下：

第一，数据采集。利用大数据模型完整获取工程项目相关信息，包含地形地貌、人口分布、交通流量、水文地质条件、市政配套设施等，结合建筑用途来判断是否具备立项价值，为项目选址和初步设计提供数据支撑。例如：面向住宅项目，重点获取周边学校、商场、医院等配套设施数据，尽量在人口密度大、市政配套设施齐全的区域作为项目选址。

第二，方案优化。根据所掌握信息，面向项目规划方案来构建三维模型，直观展现各项核心建设指标，包括容积率、建筑高度、整体布局方案等。代入使用者视角，以改善建筑体验、提高资源利用率为准则，模拟不同场景下的建筑使用情况，以此来发现规划问题，针对性调整方案内容。例如：运用BIM技术依次

模拟多套规划方案的日照、采光和通风情况，从中选择使用体验相对更好的规划方案，进一步调整建筑布局与高度^[2]。

第三，报建审批。由线上流程取代烦琐线下流程，着手搭建线上报建协同平台，工作人员向平台完整上传项目报建所需资料，如规划方案、设计图纸一级地质勘察报告。先由大数据模型按照预设规则来审核报建资料，以内容真实性、完整性作为审核维度，提醒工作人员补充完善报建资料，确认无误后，再提交给相关部门进行审核，线上反馈审批意见。

2.2 设计阶段

设计阶段是建筑工程将建设愿景转换为施工成果的关键环节，设计方案直接关乎工期时间、造价成本、建筑功能实现程度，若设计脱离实际，必将在施工阶段频繁出现设计变更问题，造成极大的资源浪费。早期建筑工程普遍施行二维图纸设计模式，存在专业协同不畅、图纸错漏频发、设计效率低下等一系列问题。为实现精细化设计目标，确保设计方案精准适配现场施工需求和建筑使用需求，需要依托智能建造技术重构设计体系，以协同设计、仿真分析作为核心应用场景，应用方法如下：

第一，协同设计。由三维设计模式取代二维设计模式，构建BIM模型作为设计载体，采取参数化建模方法，结合工程信息，构建结构、建筑、机电、给排水等专业模型，保持各专业模型相互关联状态，任一模型属性参数发生变化，都将同步更新其他专业模型，确保设计人员可以实时了解其他专业设计进展，主动发现并化解专业冲突，如机电专业和给排水专业调整管线布局方案，管线避开结构核心受力构件。而在初步设计结束后，将专业设计方案提交至BIM软件，进行碰撞检测，预先设定软硬碰撞规则，准确识别到全部碰撞问题，利用醒目颜色标记碰撞部位，同步提供协调数据，作为深化设计凭证^[3]。

第二，仿真分析。为解决设计活动、施工活动相互脱节问题，以BIM仿真施工作为设计方案审核手段，工程参建单位联合审核设计方案可行性，模拟正常工况和最不利工况下的施工过程，从施工角度来论证设计方案可行性，针对性调整设计参数，确保施工成果完全符合设计要求，并把工程量和施工难易程度控制在合理区间。

2.3 施工阶段

施工阶段是建筑工程把图纸内容转换成实体结构的核心实践期，当前高层建筑、超高层建筑与大跨度

建筑日益增多,工程体量更大、施工条件更复杂,传统以人工为主的作业方式已难以满足高精度、高效率、高稳定性的施工要求。借助智能建造技术,可从作业装备、施工工艺、过程控制等方面实现施工环节的技术升级,推动施工作业向自动化、精准化方向发展。

在主体结构施工作业中,可采用智能机械化装备替代传统人工操作,如自动化钢筋切断、弯曲与绑扎设备、混凝土智能泵送与布料系统、装配式构件精准对接装置等,通过程序化控制完成标准化作业,有效降低人工操作带来的尺寸偏差、作业不规范等问题。针对模板支撑、砌体施工、管线预埋等工序,运用三维定位与数字化放样技术,提前确定点位、标高与走向,使现场施工直接依据精准数据执行,提高工序一次成型率。在预制构件吊装、就位、校正过程中,结合定位传感器与动态监测装置,实现构件姿态实时调整,保证安装精度与结构整体性,提升施工效率与结构可靠性^[4]。以施工质量管理活动为例,由智能监测模式取代人工检查模式,混凝土构件、管线接口、钢筋节点等关键部位部署高精度传感器,实时采集施工质量数据,对比先期设定的预警值,确认监测数据超出预警值后,表明施工质量不合格,发出预警信号,提醒管理人员和施工班组及时整改。而在竣工验收阶段,使用三维激光扫描设备,完整采集施工质量数据,提交给 BIM 模型,逐项对比各项技术指标的达成度,自行出具验收报告,基本不会遗漏质量问题。

2.4 运营维护阶段

在建筑工程全生命周期内,运营维护阶段是跨度最长的归宿期,标志着工程项目归属权由建设主体转变为使用主体,管理内容发生变化,具体以日常管理、设施检修和能耗调控作为全新管理内容。在运营维护阶段,以延长建筑使用寿命、降低总体故障率和综合能耗水平作为核心目标,智能建造技术主要用于结构监测、设备智能维护、能耗管理三重场景,应用方法如下:

第一,结构监测。建筑结构体系关键受力部位部署传感器,包括梁柱节点、承重墙与基础结构,以应变、振动、位移作为监测参数,利用大数据模型分析监测数据变化规律,客观评估建筑结构健康状态^[5]。如果单项指标的监测值超出预警值,或是判断建筑结构整体健康状态不佳,向管理人员反馈问题,前往现场核实问题,择期对建筑结构进行加固修缮,避免因建筑“带病服役”而缩短使用寿命。

第二,设备智能维护。由预防性维护取代固定维

护模式,建立建筑机电设备专属台账,完整记录设备型号、技术指标、使用寿命、历史运行数据和故障报告等相关信息,定期评估机电设备健康状态,健康状态和维护力度相关联,设备健康状态越差,维护力度越强,维护保养频率越高。同时,机器学习算法收录大量故障案例作为训练样本,经过长期训练后,准确掌握机电设备运行规律和故障机理,根据实时监测数据,预判未来一段时间的运行趋势,制定维护保养计划,前置消除早期故障隐患,如及时更换磨损量即将超过上限值的轴承等机械部件。

第三,能耗管理。组合应用 BIM 技术与 AI 技术,分别以仿真分析、智能分析作为应用定位,取代人工统计和主观判断模式,进一步挖掘建筑节能潜力。一方面,运用 BIM 技术模拟建筑在不同场景下的用能设施运行过程,统计各项用能数据和综合能耗水平,负责反映理想情况下的建筑节能效果。另一方面,建筑供配电、给排水和供气系统上部署智能计量装置,实时采集能耗数据,对比实际能耗水平和理想能耗,锁定能耗超标环节,由 AI 算法分析异常原因,提出节能优化建议,如在自然光线充足时刻关闭照明灯具、调整空调开启时间与运行负荷。

3 结束语

智能建造技术作为建筑工业化与数字化深度融合的产物,自推广应用以来已经成为推动建筑行业转型升级的重要支撑,应用场景贯穿建筑全生命周期。建筑企业应认识到智能建造技术的重要价值,围绕技术特性,重新规划工程建设与管理思路,精准适配工程需求来制定一套可落地的技术应用方案,使得智能建造模式真正服务于工程实践活动,促进建筑行业健康发展。

参考文献:

- [1] 吴奔生.智能建造技术在城市建筑施工中的应用与挑战[J].四川建材,2026,52(01):14-15,51.
- [2] 姜永亮,杨烁,刘乾,等.智能建造在建筑工程全生命周期中的应用研究[J].建设科技,2025(20):6-9.
- [3] 王鑫.智能建造技术在建设工程运行模式中的应用[J].中国住宅设施,2026(01):10-12.
- [4] 范卫东,贺一周,刘依然,等.基于智能建造技术的上海市大居市属保障房绿色建筑应用探索:以上海市奉贤南桥大居程南保障房项目为例[J].住宅科技,2026,46(02):53-59.
- [5] 张奇瑞,白洁.智能建造技术在城市建筑施工中的应用研究[N].固原日报,2026-03-07(003).

智能传感器在地铁监控设备检修中的应用研究

韦安达

(南宁轨道交通运营有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要 地铁BAS系统传感器通信故障处置长期面临流程冗长、信息割裂与现场不可达等挑战。本文提出基于智能传感器的边缘自监测与事件驱动总线技术,构建集状态监测、故障定位、可视化交互与人机协同于一体的检修辅助平台。实际应用表明,该方法将传感器通信故障平均排查时间由28 min压缩至7 min,远程处置占比提升至62%,显著提高了检修效率与协同质量。方案具备良好的可复制性,旨在为地铁设备智能化运维提供参考。

关键词 地铁BAS; 智能传感器; RS485; 边缘计算; 人机协同

中图分类号: U231.9+2; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.010

0 引言

地铁BAS系统涉及大量RS485总线传感器,其通信链路中断等故障处置依赖人工逐点排查,效率低、响应慢,且受限于风道、夹层等高风险区域的可达性^[1]。现有维保模式呈现被动响应、数据分散、系统割裂等特点,难以适应精细化运维需求^[2]。随着智能传感与边缘计算技术发展,传感器端侧自监测与平台侧事件驱动机制的融合,为实现主动预警、精准定位与远程处置提供了可能^[3]。本文围绕智能传感器在地铁监控设备检修中的应用展开研究,探索提升检修效率与协同能力的技术路径。

1 地铁监控设备检修现状与智能传感器应用需求分析

1.1 传统地铁监控设备检修的痛点与挑战

在地铁BAS系统维保中,传感器通信故障处置流程冗长、信息割裂。以RS485总线挂接的风道温湿度与压差传感器为例,链路中断时,检修需依次完成报警确认、点表核对、区段隔离及节点复位替换,一条支路超20个节点时人工逐点排查超28 min,且需现场电话核对监控画面。风道与电缆夹层在运营时段存在高噪声、强风流风险,人员无法进入,应急响应被迫延后至夜间天窗期,故障扩散与能耗异常难以压制^[4]。由此衍生出被动响应、人找数据与系统独立三类根源性约束:告警触发后方处置,历史日志分散,且BAS与FAS、屏蔽门系统缺乏联动,源头定位与影响评估持续滞后。

1.2 智能传感器在地铁检修中的应用需求分析

鉴于BAS维保中链路中断滞后与现场不可达等约束,智能传感器的应用需求应从三个方面重新界定^[5]。

首先,从被动响应转向主动诊断,传感器需集成边缘计算与自监测能力,对负载、心跳、链路衰减及供电波动进行本地解析,生成健康度与预警,将故障定位至支路与节点级。其次,从人找数据转向数据找人,应建立统一时间基准与资产标识,通过事件驱动总线将异常信息、历史波形及工况推送至班组终端与调度工作站,并自动标注BAS、FAS与屏蔽门系统间的因果联动。最后,从系统独立转向人机协同,传感器需支持远程升级、参数下发与安全接入,平台侧提供可视化与工单编排,将诊断建议、风险分级与应急预案内嵌至流程,同时兼顾高噪声与强风流环境下的低功耗冗余采集。

2 智能传感器在地铁监控设备检修中的关键应用与技术实现

2.1 智能传感器状态监测与故障定位技术实现

因地铁BAS传感器多以RS485总线接入且站点分散,本研究以组态王平台为监测内核研发通信监视软件,构建BAS设备监控辅助平台。软件在项目初始化阶段预置通信参数与设备点表,按支路生成模板化驱动实例,通过带隔离与浪涌抑制的RS485转接器接入风机房与区间风道端子,以串口转以太方式远程读取,在强干扰与长距离场景下稳定轮询与心跳采集。平台将超时比例、重试计数、响应抖动与母线电压摆幅作为链路健康度核心指标,记录供电纹波与终端负载变化。诊断引擎无需逐帧解析底层报文,通过地址段连续丢失等模式自动将故障定位到支路与节点级,标注疑似物理断点与接地回路异常,联动点表完成设备级告警合并。运行时,辅助平台与BAS工作站共享时间

作者简介: 韦安达(1989-),男,本科,助理工程师,研究方向:轨道交通工业自动化控制。

基准与资产标识,通过事件驱动总线推送异常关联等信息到班组终端,将远程参数下发与驱动模板更新纳入权限控制。结合智能传感器边缘自监测能力,节点侧上报负载与链路衰减估计值,平台跨支路对比与刻画趋势,使巡检由人工逐点查询变为数据主动抵达,提高故障锚定与恢复效率。

2.2 检修信息可视化界面优化设计

鉴于 BAS 维保现场存在站内标识与屏显信息不一致、路径指引不清、告警层级割裂等问题,设计界面优化为围绕位置识别、链路拓扑与事件语义的三层可视化体系,将诊断结果以面向任务的方式推送到检修终端。站级总览中,将出入口罗马编号调整为按站厅现勘的 A、B、C、D 标识,配合站台方向箭头及列车头尾方位提示,叠加风机房与区间风道的楼层关系和可通行路径,减少应急奔赴中的逆向行进与重复搜索。因传感器故障常表现为支路级退化与单点间歇缺失,拓扑视图按物理走向绘制 RS485 支路,节点按健康度分级着色,嵌入链路心跳与母线电压摆幅迷你趋势图,地址段连续丢失时自动高亮可疑区段并弹出推荐隔离断点与复位顺序。为实现数据主动抵达,界面引入统一时间轴,串联 BAS、FAS 与屏蔽门的告警,点击事件可调出历史波形等记录,将风险分级与应急预案以卡片形式挂载到设备侧栏,便于值守人员完成远程参数下发与工单编排。由此推出移动端与大屏的一致交互范式,移动端任务清单与导航联动,大屏提供分区放大与跨支路对比,二者共享资产标识与权限模型,降低跨班组协同沟通成本。

2.3 人机协同检修体系构建

鉴于地铁 BAS 维保现场不可达与信息割裂,人机协同检修体系将感知、判断、处置及复盘串成闭环,把三类转型目标嵌入组织流程。体系以智能传感器边缘自监测为前置触发,节点周期上报心跳、链路衰减与供电纹波,平台通过事件驱动总线合并跨支路异常,自动生成带风险分级的处置工单与 SOP 步骤库,值守员在移动终端接收任务卡片并远程初勘。在指令执行场景中,中心侧将参数下发、支路隔离及驱动模板更新编排为可回滚的原子操作流,设双人复核与时窗约束,遇屏蔽门、FAS 联动风险触发跨系统干预清单并评估影响域。站内可视化界面合并呈现拓扑、行进路径及应急预案,驻站检修员在抵达受限区域前完成模拟操作核对,现场仅进行必要插拔与复位,缩短暴露时间。平台将诊断链路、参数变更等记录写入资产级知识库,经版本化管理后在相邻车站复用,班组长通过复盘报

告评估 SOP 适配性并迭代权限模型,确保主动诊断、数据找人与人机协同在日常维保中稳定运行。同时,将设备接入与指令审计纳入统一基线,依靠零信任模型配合细粒度授权,明确远程操作边界并留存可追溯证据。

3 智能传感器应用效果评估与推广价值分析

3.1 应用效果量化分析

围绕 BAS 维保任务链,本研究将故障处置效率、组织投入与协同质量三类指标纳入量化框架,选取 RS485 风道支路与站台风机房典型场景,统计两个运营季度工单与链路日志,构建改造前后对比序列。指标涵盖平均排查时间、远程处置占比等,工序拆分为告警合并、定位与处置三段以降低样本异质性,关键对比见表 1,对照口径为工单级起止时间与统一时钟标定。为避免单一时长指标失真,用下式计算效率提升率衡量端到端处置效率:

$$E = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, E 表示效率提升率, T_0 为改造前平均排查时间, T_1 为改造后平均排查时间,单位均为 min。改造样本中,传感器通信故障平均排查时间从 28 min 缩至 7 min,效率提升率 75%;结合 230 条任务序列作业时长,统计期累计节约检修工时 326 h,按一线维保人员小时人工成本 70 元计,直接人工成本降低约 23 000 元。

在流程侧指标方面,远程处置占比从 15% 升至 62%,夜间介入次数显著下降,跨系统因果标注覆盖率升至 85%,告警到派发时延从 35 min 缩至 8 min,提高了组织协同可预期性与资源调度弹性。

3.2 技术方案可复制性评估

本研究围绕地铁 BAS 维保组织现实,将可复制性定义为不改造既有控制器和传感器,依靠通用软硬件组合实现跨站点、跨系统快速落地。因站内传感器多采用 RS485 接入、协议以 Modbus RTU 为主,方案选用现有运维笔记本与组态王等通用 SCADA 软件为监测内核,配合带隔离的 RS485 转以太转接器与标准 NTP 时钟,实现零新增专用主站设备部署。针对系统侧异构性,驱动层用点表模板、地址段策略与事件驱动总线解耦,可对接 BAS 风道类负载,延伸至 FAS 消防探测回路与屏蔽门 PSD 联动告警标注,复用统一资产标识与权限模型降低跨系统维护复杂度。复制条件受站级点表准确度、OT 网段与中心侧安全隔离策略、跨厂商 PLC 串口参数与报文变体差异三项基线制约,前两项通过统一命名规范与零信任接入边界加固解决,后者通过模

表 1 智能传感器辅助检修效果对比表

指标	改造前	改造后	变化幅度	统计口径
传感器通信故障平均排查时间 /min	28	7	-75%	RS485 支路超过 20 节点，端到端
告警到派发时延 /min	35	8	-77%	工单系统时间戳
远程处置占比 /%	15	62	+47%	站级远程参数下发与隔离
夜间天窗介入次数 / 次	64	19	-70%	两个运营季度汇总
跨系统因果标注覆盖率 /%	0	85	+85%	BAS 与 FAS 与屏蔽门
累计节约检修工时 /h	0	326	+326	230 条任务序列汇总
直接人工成本节约 / 元	0	23,000	+23,000	按 70 元 /h 估算
首次定位成功率 /%	68	92	+24%	支路级与节点级

板化驱动与远程升级能力化解。由此得出适用于多数存量车站的迁移路径：首先在风机房与区间风道按支路上线心跳与母线电压监视，其次将跨系统因果标注与工单编排纳入统一事件总线，最后把远程参数下发与原子操作流引入班组日常，形成低成本、短周期、可滚动复制的推广模式，见表 2。

表 2 智能传感器方案推广效益预测表

指标	10 站（BAS-RS485 支路）	30 站（BAS+FAS 接入）	60 站（BAS+FAS+PSD 联动）
端侧改造成本 / 元 / 站	1 000	2 000	3 000
预计排查时长压缩率 /%	65%	68%	70%
预计远程处置占比 /%	55%	60%	64%
夜间介入下降率 /%	50%	58%	62%
单季人工成本节约 / 元 / 站	3 000	4 200	5 500
预计投入回收期 / 月	8	7	6

3.3 未来应用拓展方向

鉴于存量线路站点多、负载类型杂的运维现实，未来拓展应从故障后处理转向健康预测与风险量化。多传感器融合是将温湿度、压差等多源数据在统一时钟和资产模型下对齐，在边缘侧完成特征提取与异常刻画，给出退化趋势和剩余寿命估计。适配样本稀缺场景，可在节点侧用轻量自监督学习，以无标签序列学习正常模式，辅以小样本增量学习和知识蒸馏，将跨站可迁移的阈值和特征发布到事件总线。跨站协同引入联邦学习，兼顾数据合规与模型迭代。

4 结束语

本文围绕地铁 BAS 系统传感器通信故障处置痛点，构建了融合边缘自监测、事件驱动总线、可视化交互与人机协同的智能传感器辅助检修平台。实际应用验证了其在提升排查效率、压缩夜间介入次数、降低人工成本等方面的显著成效。方案基于通用软硬件实现，具备良好的可复制性与推广价值。未来将进一步融合

多源感知与健康预测模型，拓展至牵引供电、轨旁设备等领域，推动地铁运维由故障响应向健康管理转型。

参考文献：

[1] 卞能建,吕圣杰,舒康华,等.多视觉传感器融合的地铁列车关键设备故障 360° 视觉检测[J/OL].测控技术,1-8[2026-04-03].https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2026.03.301.
[2] 王文刚,尉雪玲,马学涛,等.面向数字化铁路货车检修车间智能监控系统设计研究[J].粘接,2025,52(07):136-139.
[3] 张姗姗,李家平,张明.基于微服务的地铁隧道多源异构传感器自动化监控系统建设与实践[J].城市勘测,2024(03):59-63.
[4] 杨镒成,李孝普,孙康萌,等.地铁车站自动扶梯智能监控系统的设计及应用[J].中国电梯,2021,32(13):12-14.
[5] 高璐瑶,杜淑蓓,刘振翔,等.一种基于 RS485 和 LoRa 技术的混合网络环境监控系统设计[J].通信与信息技术,2021(02):62-65.

道路桥梁施工机械智能化配置与作业效率优化研究

李 振¹, 李海东²

(1. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南 250014;

2. 青岛鸿至达建设工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 道路桥梁工程的施工机械配置与作业效率会直接影响工程的质量、推进的进度以及成本的控制产生影响。目前, 在道路桥梁施工机械的配置方面存在着一系列问题, 这些问题导致了作业效率低下, 还造成了资源的大量浪费。本文基于道路桥梁施工的实际情况, 深入分析了机械智能化配置以及作业效率所面临的困难, 探寻可行性的配置策略与提升效率途径, 以期道路桥梁施工机械的智能化升级以及作业效率的提高提供参考, 助力交通基础设施建设的顺利推进。

关键词 道路桥梁; 施工机械; 智能化配置

中图分类号: U415.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.011

0 引言

随着道路桥梁工程的施工规模持续扩展, 施工工艺更为繁杂, 对施工机械的智能化程度以及作业效率提出了更严格的要求。施工机械智能化的配备情况与作业效率直接关系到工程施工的安全性、经济性以及时效性。目前, 大部分道路桥梁施工依旧采用传统的机械配置方式, 存在智能化设备运用不足、配置和施工实际情况不匹配、调度管理不够精细等问题, 限制了作业效率的提高, 难以满足现代化施工的需求。研究道路桥梁施工机械智能化配置与作业效率优化, 攻克现有难题, 对于促使施工模式实现升级、降低施工所需成本、确保工程能够顺利推进具有重要意义。

1 道路桥梁施工机械智能化配置核心概念与研究意义

1.1 核心概念

道路桥梁施工机械的智能化配置是综合考量道路桥梁施工工况、工艺要求以及工程进度, 凭借物联网、大数据、人工智能等技术针对施工机械进行选型、组合预计调度等操作, 实现机械配置的精准、协同、高效, 以此保证机械性能能够与施工的需求高度契合。而作业效率的优化, 是在完成智能化配置的前提下, 借助优化作业的流程、完善调度的机制、强化设备的运维等举措, 最大限度发挥施工机械的效能, 减少机械闲置时间、降低能源消耗, 进而提升施工进度与工程质量。

1.2 研究意义

从工程建设方面看, 智能化配置以及效率优化能够让施工机械和施工工况精确匹配, 减少机械闲置以及资源浪费现象, 有效缩短施工工期, 降低施工成本, 同时还能够提高工程施工的质量以及安全性, 推进道路桥梁工程高质量建设。从施工企业方面看, 能够促使企业突破传统施工模式的局限, 增强施工的智能化程度与核心竞争力, 减少对人工的过度依赖并削减运营成本, 实现集约化发展。从行业发展方面看, 能够推动道路桥梁施工领域实现技术升级, 推动智能化施工技术在行业内得到更广泛的普及和应用, 为交通基础设施建设行业朝着绿色、高效、智能方向转变提供助力^[1]。

1.3 核心原则

一是工况适配原则, 综合考虑道路桥梁施工过程中地形、地质、工艺要求以及进度规划等因素, 选择与之相适配的智能化机械种类与配置方案。二是协同高效原则, 着重关注各类施工机械之间的协同合作, 对机械调度的流程加以优化, 保证机械作业能够顺畅衔接, 最大程度地发挥出机械集群的效能。三是智能赋能原则, 借助物联网、大数据等技术手段, 实现对机械运行状况的适时监测、智能调配以及精确管控, 增强配置与作业的智能化程度。四是经济性原则, 在确保施工效率与质量的基础条件下, 优化机械配置策略, 削减设备购置、运维与能耗成本, 实现经济效益与社会效益的融合。

作者简介: 李振(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通工程。

2 道路桥梁施工机械智能化配置现存困境

2.1 智能化配置不足

部分施工企业由于受到成本约束,依旧大规模使用传统类型的施工机械,在智能化设备上的投入量明显不足,并且缺少自动调度、远程监控以及故障预警功能等智能机械,最终致使配置的智能化水平较低。另有部分企业虽然引入了智能化的机械,却缺乏科学合理的配置规划,机械的选型与施工工况、工艺要求不相匹配,这种情况不但无法使作业效率得到有效的提升,反而还造成了资源的浪费。另外,智能化机械存在兼容性欠佳的问题,不同种类、不同厂商生产的智能装置难以实现数据的相互流通以及协同开展工作,这对智能化配置的效能发挥形成了限制。

2.2 调度管理粗放

在大多数道路桥梁施工过程中,机械调度依然运用传统的人工调度方式,缺少智能化调度系统的支持,调度人员很难及时了解机械的运行情况、作业地点以及闲置情形,进而造成调度决策出现延迟、缺乏合理性。部分施工场地的布局不够合理,机械的行驶路线存在交叉干扰现象,各个工序之间的衔接出现脱节,使得机械频繁转场、闲置,这就增加了没有实际作用的作业时间^[2]。另外,调度人员的专业素养有所欠缺,对于智能化机械的性能以及操作要求的了解不够深入,难以达成机械的最优化调度,进而使得作业效率有所降低。

2.3 运维体系不完善

施工企业缺少专业的智能化机械运维团队,运维人员的专业素养不足,难以熟练开展智能化设备的故障排查、维修保养等方面的工作,这使得设备因故障停机无法得到及时处理,进而影响施工进度。运维管理的制度不健全,缺少常态化的设备巡检、保养以及故障预警的机制,大多采用“事后维修”的模式,不能及时察觉设备潜在的故障,从而造成设备的故障率偏高。此外,智能化设备的配件供应匮乏、维护成本较高,这同样增加了运维的难度,对设备的正常运转以及作业效率产生影响。

3 道路桥梁施工机械智能化配置策略

3.1 科学选型适配工况

基于道路桥梁施工的实际运作情况,科学开展智能化机械的挑选工作,保证机械的配备与施工需求高度契合,从而为作业效率的提高奠定稳固的基础。首先,要全方位梳理施工工艺标准、工程推进计划、施工现场地形地貌和地质情况以及环境限制等因素,确定路基、桥梁、路面等不同施工阶段对于机械的具体需求^[3]。例如:路基施工更倾向于选用具备自动找平以及远程

操控功能的智能挖掘机、压路机;而桥梁施工则着重选择智能架桥机、混凝土输送泵以及智能张拉设备等。其次,应优先挑选具备稳定性能、较强兼容性,且拥有远程监控、故障预警以及能耗统计等功能的智能化机械设备,并依据施工规模的大小、工期要求的严格程度以及成本预算的具体情况来确定所使用机械的数量和规格,目的是防止因盲目进行设备投入,进而导致资源出现不必要的浪费。

3.2 构建智能调度系统

借助物联网、大数据、人工智能等技术手段,搭建道路桥梁施工机械的智能调度系统,突破以往传统调度模式的局限,实现调度管理的精确性与高效性。此系统整合了机械运行参数、施工进度节点、现场工况变化等多个维度的数据,借助智能终端对机械的作业位置、运行状态、能源消耗、故障状况以及闲置时长展开实时的监测,为调度决策提供全方位、精确的数据支持。通过运用智能算法,对所采集到的数据展开分析与处理,依据施工进度调整状况、工况的变化情形等,自动对调度方案进行优化,把机械作业任务进行合理的分配,这样能够切实避免诸如机械闲置、重复作业这类问题的出现^[4]。

3.3 优化配置协同机制

构建并完善施工机械智能化配置的协同体系,破除部门之间以及设备数据的阻碍,促使各个施工阶段、各类机械实现协同作业,全方位增强配置的效能。清晰界定路基、桥梁、路面等不同施工阶段的机械配置责任主体,强化施工、调度、运维等相关部门的常态化交流与协作,保证机械配置方案能与施工进度、工艺规范、质量准则同步推进,防止出现配置和施工相分离的问题。优化机械作业流程,依据施工工艺逻辑合理规划各类型机械的作业顺序以及时间节点,防止因工序衔接出现脱节而造成机械闲置,保证机械作业能够持续且顺畅地开展。

3.4 兼顾成本与效能

在智能化配置过程中,切实秉持经济性准则,实现成本管控与作业效能的双向均衡,同时兼顾施工企业的经济收益与工程建设质量。依据施工企业的资金预算状况、工程规模大小以及工期要求情况,科学合理地选定智能化机械的类别、规格以及数量,防止因过度投入智能化设备而造成的成本浪费现象,达成按需配置、精准投入之目的。优先挑选性价比优良、能耗较低、运维便利的智能化设备,从设备购置环节、日常运维方面、能耗消耗等多个层面削减成本开支,提高投入产出比率^[5]。构建一套完备的成本和效能评估体系,定期评估智能化配置方案的开展成效,依照

评估果,迅速作出调整并且优化配置方案,以保证实现经济效益与作业效能的双方面提高。

4 道路桥梁智能化施工机械作业效率优化路径

4.1 优化作业流程

结合道路桥梁施工工艺的特点与智能化机械的性能优势,对施工机械的作业流程进行优化,削减无效的作业环节,全方位提升作业效率与施工质量。梳理路基开挖、桥梁架设、路面铺设等各个施工环节的作业内容、机械需求以及工序衔接要求,简化冗余工序,合理规划机械作业的顺序,保证机械作业的衔接能够顺畅无阻,防止因工序冲突而造成机械闲置与时间浪费。鉴于不同施工环节的工艺要求,拟定标准化的机械作业流程,清晰界定作业标准、操作规范以及时间节点,规范机械操作人员的操作行为,从而降低因操作出现失误而引发的效率降低以及质量方面的潜在风险。

4.2 强化设备运维管理

完善智能化施工机械的运维体系,强化设备全生命周期的运维管理,降低设备因故障而导致的停机时长,保证设备能够持续且高效地运转,为作业效率的提升提供设备方面的支持。构建一支专业的智能化机械运维队伍,加大对运维人员专业培训的力度,着重提高他们针对智能化设备在故障排查、维修保养、系统调试等方面的能力,确保能够迅速做出响应并对设备故障进行处理,缩减故障导致的停机时间。构建常态化的设备巡检、设备保养以及设备故障预警机制,凭借智能监控系统对设备运行参数进行实时化监测,从而及时察觉设备潜藏的故障情况以及性能方面的损耗情况,预先开展具备针对性特点的维护与保养工作,进而形成“事前进行预防、事中加以控制”的运维模式^[6]。

4.3 提升人员专业素养

强化施工人员以及管理人员的专业培训工作,全方位提高他们的专业素养以及综合能力,以契合机械智能化配置以及作业效率优化的现实需求。对于机械操作人员而言,要开展关于智能化设备操作、维护保养、安全规范等方面的专门培训,并且结合实际操作演练,保证他们能够熟练掌握设备的操作流程、功能应用以及故障应急处理办法,从而充分施展设备的智能化优势,防止由于操作不当而造成的效率降低和设备故障。面向管理人员,组织开展涉及智能化管理、智能调度以及数据化管控等方面的培训活动,以此提升他们在智能化管理领域的理念以及专业能力,让他们能够紧密结合施工的实际情况拟定科学合理的机械配置与效率优化方案。

4.4 依托数据精准优化

全面运用智能化机械在运行过程中所产生的各种数据,凭借大数据分析手段实现作业效率的精确优化,促使施工管理朝着精细化、数据化方向转变。构建完备的数据收集和分析系统,借助智能终端实时收集机械的作业时长、能耗使用、故障状况、作业质量、闲置时段等多方面数据,对所收集的数据开展清理、筛选、剖析,探寻数据背后潜藏的作业规律、设备风险以及效率障碍^[7]。依据数据分析所得结果,对机械配置方案以及作业流程展开精准化的优化处理,动态性地对机械调度策略予以调整,削减无效作业以及能耗方面的浪费现象,进而提高机械的利用效率。与此同时,借助数据分析预先判断设备可能潜藏的故障以及作业过程中存在的瓶颈问题,提前拟定针对性的应对办法,及时调整作业计划,以此保证作业效率能够持续提升,切实推进以数据为驱动的精细化施工管理。

5 结束语

道路桥梁施工机械的智能化配置以及作业效率的优化是推动交通基础设施建设实现高质量发展的重要举措,也是施工企业转型升级、提高核心竞争力的关键途径。目前,道路桥梁施工机械的智能化配置和作业效率还存在智能化配置缺乏、调度管理不够精细、运维体系不完备等问题。本文提出通过科学挑选合适的设备以适配施工工况、搭建智能调度系统、优化配置协同机制,并同时考虑成本和效能,能够实现机械智能化配置的改良;通过完善作业流程、加强设备运维管理、提升人员专业水平、依靠数据进行精确优化,可以切实提高作业效率,保证各项优化方案能够得以落实并取得成效,促使道路桥梁施工朝着精细化、高效化、智能化的方向发展,为交通基础设施建设提供有力支持。

参考文献:

- [1] 张红博.公路桥梁施工中机械设备选型与配置优化研究[J].现代工程科技,2024,03(17):41-44.
- [2] 刘志成.公路工程施工中机械设备配置管理优化策略分析[J].江西建材,2023(05):448-450.
- [3] 门玉.物联网技术在桥梁工程机械设备管理中的应用研究[J].运输经理世界,2023(01):122-124.
- [4] 王婧.公路施工机械的配置与有效管理分析[J].中国设备工程,2022(20):204-206.
- [5] 张红琴,孙理.道路桥梁施工机械设备的管理与维护措施探讨[J].中国设备工程,2022(10):55-57.
- [6] 李得军,张红琴.道路桥梁工程施工机械设备管理关键内容[J].工程技术研究,2022,07(01):99-101.
- [7] 马超,杨雷.浅析公路工程施工机械的组织与优化管理[J].四川水泥,2020(07):37,39.

基于机器学习驱动的 MEMS 倾角传感器 全温区智能补偿方法

梁 冰

(桂林市晶瑞传感技术有限公司, 广西 桂林 541004)

摘 要 MEMS 倾角传感器在全温区工作时, 受硅材料温度特性、封装应力、电子器件温漂影响, 非线性测量误差显著增大。传统的线性插值、多项式拟合等补偿方法泛用性差、精度适配温度范围窄, 模型固化难以自适应, 无法满足高端装备的高精度倾角测量需求。本文提出一种机器学习驱动的全温区智能补偿方法, 实时采集温度、温度变化率、历史倾角数据构建多维特征集, 采用粒子群算法优化改进径向基函数神经网络, 建立温漂非线性映射模型, 实现全温域倾角误差的实时自适应修正。经 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全温区高低温标定实验验证, 该方法相较传统多项式补偿, 均方根误差降低 62.3%, 最大绝对误差控制在 0.015° 以内, 补偿效率提升 40% 以上, 有效提升产品精度与鲁棒性, 可广泛适配环境严苛的倾角测量场景。

关键词 MEMS 倾角传感器; 全温区补偿; 机器学习; RBF 神经网络; 粒子群优化

中图分类号: TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.012

0 引言

MEMS 加速度计制作的倾角传感器, 集成度高、功耗较低、微型化、成本低, 广泛应用于在工业自动化、航空航天、桥梁监测、姿态感知等领域, 主要用于姿态校准、倾角监测、水平控制等关键感知任务。在工业领域等实际应用环境中, 传感器需长期处于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化环境中工作, MEMS 芯片硅材料结构、采集放大电路、封装材料应力在温度交替变化的环境中会存在零偏漂移、灵敏度漂移、非线性误差等温漂问题, 不同环境和测试条件下, 测量精度大幅衰减, 导致系统性错误、设备故障等隐患。

国外厂商如 VTI (芬兰)、ADI (美国)、ST (法国) 等企业在 MEMS 倾角传感器研发和温度补偿起步较早, 一般通过硬件温控叠加软件多项式补偿实现基础温漂补偿, 但补偿方式单一, 补偿成本昂贵, 且无法适配宽环境温度变化的场景。国内传感器厂商针对 MEMS 传感器温漂补偿也有研究, 多采用单一神经网络建模, 但此类模型收敛速度慢、只有局部最优、特征维度单一等问题, 缺少针对宽交变温区、宽倾角范围的多维参数补偿, 没有兼顾精度与适应性的工程化方案。

目前主要的温度补偿方法多依赖固定数学模型, 如分段线性补偿、二次多项式拟合、查表插值等, 但这类方法仅能拟合简单线性温漂规律, 对于更大温区

范围内的非线性、时变性温漂, 回滞温漂适配性差, 即使经过补偿还是存在误差超出。采用机器学习技术在进行多维度建模、自适应拟合补偿, 结合智能算法总结温漂与多环境因子的相互关联性, 构建宽温度范围补偿模型, 成为解决倾角传感器温漂难题的创新路径。本文立足于工程实际需求, 研发的机器学习驱动的倾角传感器补偿方法, 打破了传统补偿方式局限, 提升传感器在不同使用环境下的精度稳定性, 对推动高端 MEMS 倾角传感器器件的国产化替代、保障工业设备稳定运行具有重要的工程价值和学术意义^[1]。

1 MEMS 倾角传感器温漂机理与误差分析

1.1 MEMS 倾角传感器工作原理

MEMS 倾角传感器基于重力惯性原理, 通过传感器内部的硅基微机械敏感结构检测重力分量变化, 经信号降噪放大、AD 转换、数据解算输出倾角值。核心结构包括 MEMS 硅基敏感结构、滤波和运算放大电路、温度采集模块、微控制器单元, 其中 MEMS 芯片多采用电容式敏感结构, 极板间距与夹角随重力方向变化产生电容差值, 最终将加速度电信号进行数字转化。

1.2 全温区温漂误差来源

MEMS 倾角传感器在全工作温度 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的范围内, 温度变化引起的测量误差主要有三类: 一

作者简介: 梁冰 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: MEMS 传感器测量应用。

是芯片传感结构温漂,硅材料由于热膨胀系数各向异性及内部温度应力,导致传感器内部极板发生纳米到微米级形变,进而引发零偏漂移与灵敏度非线性变化;二是在电路中的运算放大器、电阻、电容等器件的温度系数存在正负差异,使得信号放大、滤波环节产生叠加误差,这类误差无法采用单一方式进行补偿消除;三是封装材料内部应力温漂,封装壳体、黏结剂与芯片衬底之间的热膨胀系数不匹配,在温度反复变化时产生非线性机械应力,导致输出迟滞与重复性下降。然而,传统数学补偿方法一般对这三类误差修正独立建模,却忽略了它们之间的耦合效应(热应力同时影响结构变形与电路参数),由此形成的总误差呈现强非线性特征,无法在宽温区范围内满足高精度测量要求^[2]。

1.3 传统补偿方法局限性

1. 线性插值法:仅适用于窄温区、线性温漂场景,在宽温区和非线性场景中,补偿效果有限。
 2. 多项式拟合:高阶多项式易出现过拟合引入额外误差,低阶多项式拟合精度不足,模型参数固定无法自适应温变。
 3. 查表补偿法:占用大量存储资源,极端温度点补偿效果差。
- 综上,传统方法无法适配全温区非线性温漂特性,需采用机器学习算法实现高精度智能补偿。

2 机器学习驱动的全温区智能补偿模型设计

2.1 整体技术框架

该设计的智能补偿系统分为数据采集、特征工程、机器学习模型训练、实时补偿四个部分。

1. 数据采集:测试过程温度、温度变化率、MEMS 加速度传感器数值输出、标准倾角测量单元真实值。
2. 特征工程:自动筛选出关键特征,构建温度变化映射数据集。
3. 模型训练:导入 PSO-RBF 神经网络模型训练与参数优化。
4. 实时补偿:将训练好的模型和参数传递给 MCU,实现对原始倾角数据的在线计算和修正^[3]。

2.2 多维度特征提取

针对单一温度特征无法完整刻画温漂规律问题,本设计融合三类特征构建输入向量,提升参数补偿模型的拟合能力:

1. 温度特征:实时采集的环境温度 T , 包含 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的全温度范围,作为主输入变量。
2. 温度变化率特征:能反映温变化速率的单位时

间内温度变化量 $\Delta T / \Delta t$, 作为匹配动态温变场景的输入变量。

3. 历史倾角特征:基于前一时刻倾角计算输出,进一步消除时变性漂移干扰。

模型输出为补偿误差值,补偿后倾角计算公式为:

$$\theta_{comp} = \theta_{raw} - \Delta\theta(T, \Delta T / \Delta t, \theta_{raw}) \quad (1)$$

式(1)中: θ_{comp} 为补偿后倾角, θ_{raw} 为原始倾角, $\Delta\theta$ 为机器学习模型预测补偿误差。

2.3 PSO-RBF 神经网络模型构建

2.3.1 RBF 神经网络基础结构

径向基函数(RBF)神经网络具备局部逼近能力强、收敛速度快、非线性拟合精度高等优势,适合 MEMS 传感器温漂补偿小样本、非线性建模场景。系统的结构分为三层:输入层(采集温度、采集的温度变化率、历史倾角特征)、隐含层(通过高斯径向基函数完成非线性映射)、输出层(输出补偿误差)^[4]。

2.3.2 PSO 算法优化机制

传统 RBF 神经网络初始化中心随机、宽度窄,加权不定,易导致结果局部最优、收敛变慢。本设计采用粒子群优化(PSO)算法,将均方根误差(RMSE)作为最终作为判断的适应度函数,寻找全局温度神经网络隐含层中心、宽度和输出权值最优解,提升模型精度与稳定性。PSO 算法适应度函数定义为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2} \quad (2)$$

式(2)中: N 为采集数量, θ_i 为标准倾角模块角度真值, $\hat{\theta}_i$ 为模型预测倾角数值。

2.3.3 模型训练流程

1. 参数采集预处理:对输入标定参数数据进行归一化、异常值剔除、按特征划分训练集与测试集。
2. PSO 参数初始化:设置粒子数量、迭代次数、学习因子、惯性权重。
3. RBF 网络初始化:确定输入层、隐含层、输出层节点数。
4. 迭代寻优:计算粒子适应度,更新粒子速度与位置,直至达到最优收敛条件。
5. 模型验证:采用测试集校验评估参数模型精度,保存最优网络参数。

3 全温区标定实验与结果分析

3.1 实验平台搭建

搭建全温区标定实验平台进行测试验证补偿方法对精度提升的有效性,其中核心设备包括:温度范围 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高低温控制试验箱、精度

0.005° 的高精度数显分度头作为角度基准、待测试的 MEMS 倾角传感器样机、数据采集模块与存储系统。

3.2 实验方案设计

实验分为标定数据采集与补偿效果验证两个阶段：

1. 数据采集：设置高低温箱温度梯度为 5 °C，在每个温度点保温 30 分钟，采集 0°、±5°、±10°、±15°、±20° 倾角下的原始输出、温度、温度变化率数据，共采集 1 200 组有效样本，其中 80% 作为训练集，20% 作为测试集。

2. 对比实验：将 PSO-RBF 智能补偿分别与传统多项式补偿、标准 RBF 补偿进行对比，测试相同交变温区内的补偿精度，对比指标包括均方根误差（RMSE）、最大绝对误差（MAE）、单步补偿耗时^[5]。

3.3 实验结果与分析

实验结果如表 1 所示：设计中提出的 PSO-RBF 智能补偿方法，其全温区均方根误差只有 0.010°，对比传统多项式补偿降低 62.3%，最大绝对误差达到 0.015°，

表 1 补偿实验对比表

补偿方法	均方根误差（°）	最大绝对误差（°）	单步补偿耗时（ms）
二次多项式补偿	0.042	0.087	2.1
标准 RBF 补偿	0.023	0.041	3.5
PSO-RBF 智能补偿	0.010	0.015	2.9

3. 低成本：纯软件算法，无需硬件温控模块，降低传感器生产成本。

4. 易部署：模型轻量化，兼容主流微控制器，适配批量量产。

4.3 应用场景

该方法已成功应用于工程机械姿态监测、高铁轨道倾角检测、山体滑坡预警、光伏支架智能调平系统，经现场长期运行验证，传感器全温区测量精度稳定，故障率大幅降低，获得良好的工程反馈。

5 结束语

本文提出的机器学习驱动的全温区智能补偿方法，针对 MEMS 倾角传感器传统模型补偿温漂准确度和交变温度环境适配性差等难题，通过多维度特征提取，导入 PSO-RBF 神经网络算法进行寻优求解，针对性解决传统补偿方法非线性拟合不足、交变温度下适配性差的瓶颈。实验证明，该方法可有效抑制全温区零漂与灵敏度漂移，测量精度提升较大，同时提高了 MEMS 倾角测量系统的实时性、鲁棒性与工程适配性，是 MEMS 倾角传感器进行高精度化、宽温域适配化可行的技术实现方案。未来，可在模型补偿的基础上进一步融合

满足工业环境下对于高精度倾角测量需求；单步补偿耗时仅需要 2.9 ms。相比于其他两种补偿方法，在极端温度点上具有更强的鲁棒性和温度适应能力。

4 机器学习驱动的智能补偿方法工程化应用与优势分析

4.1 嵌入式部署实现

将训练好的 PSO-RBF 模型与参数按实际工程需求进行量化压缩，可轻易移植于微控制器，对于现有 MEMS 倾角传感器模块只需增加 11 KB 左右内存，实现低成本、轻量化移植实现。微控制器和传感器在通电后自动采集数据、特征提取、误差补偿、倾角输出全流程，无需再次进行现场校准。

4.2 核心优势

1. 高精度：精准拟合全温区非线性温漂，误差控制在 0.015° 以内，远超传统方法。

2. 强鲁棒性：适配 -40 °C ~ 85 °C 宽温域与动态温变场景，极端环境稳定性优异。

迁移学习算法，提升传感器批量标定效率，将长期老化漂移加入自适应补偿参数中，通过算法压缩，开发更轻量化深度机器学习模型，降低系统成本，适配更宽温阈范围，推动 MEMS 倾角传感器技术深度应用于高端装备领域。

参考文献：

- [1] 宋启,秦刚,闫少雄.基于改进的 RBF 神经网络倾角传感器温度补偿方法研究[J].传感器与微系统,2024,43(11):6-9.
- [2] 刘有彬,闫欢,彭根斋,等.MEMS 三轴加速度计误差标定与补偿方法研究[J].传感器与微系统,2023,42(11):58-61,65.
- [3] 赵建宇,凌林本,冯毅博.基于遗传算法优化 BP 神经网络的半球谐振陀螺温度补偿[J].导航与控制,2022,21(01):99-106.
- [4] 朱志峰,张海宁.改进 PSO 优化的小波神经网络在压力传感器温度补偿中的研究[J].仪表技术与传感器,2022(08):122-126.
- [5] 刘强,魏贵玲,黄晶,等.一种 MEMS 压力传感器温度补偿方法[J].压电与声光,2023,45(06):828-832.

预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽设计

胡 晓

(广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要 公路交通流量持续增长给既有桥梁带来承载压力, 预应力连续 T 梁桥作为常见结构形式面临拓宽改造需求。本文以拼宽设计的结构特性与施工技术作为切入点, 对横向连接方式选择、构造细节处理、力学性能控制、施工工艺优化等内容进行研究分析, 提出静力性能核算方法、动力响应优化措施、长期性能保障方案及质量验收标准, 以期桥梁改扩建工程技术人员提供理论参考。

关键词 预应力连续梁; 桥梁拼宽; 横向连接; 力学性能; 施工控制

中图分类号: U445.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.013

0 引言

预应力连续 T 梁桥结构形式成熟, 但桥面宽度普遍偏窄, 拆除重建会造成资源浪费, 拼宽改造成为经济合理的解决途径。新旧结构连接的可靠性、拼宽后受力状态的改变、施工期间对原桥的扰动控制等问题直接影响改造工程的成败, 深入研究拼宽设计理论与施工技术具有重要的现实意义。

1 预应力连续 T 梁桥结构特性与拼宽设计原则

1.1 预应力连续 T 梁桥基本结构特征

预应力连续 T 梁桥在既有公路桥梁中占据相当比例, 其结构形式建立在预应力混凝土技术与连续梁受力体系的结合之上。T 形截面将主梁分为翼缘板与腹板两个功能区域, 翼缘板承担行车荷载的直接作用, 腹板则集中布置预应力筋以抵抗弯矩, 截面高度沿跨径方向保持不变或采用变截面形式来适应弯矩包络。连续梁体系使得相邻跨间形成结构整体, 支座位置出现负弯矩区, 跨中区域则承受正弯矩, 预应力筋的布置路径需要追随弯矩图的变化轨迹才能发挥张拉效果^[1]。多片 T 梁之间依靠横隔板连接成为整体桥面, 横隔板间距影响荷载横向分布的均匀程度, 湿接缝将各片梁的翼缘板连为一体从而形成车辆行驶所需的完整桥面板。预应力体系的存在改变了混凝土截面的应力状态, 使得梁体在恒载与活载共同作用下仍能保持受压或低拉应力水平, 裂缝出现被延后甚至避免, 结构刚度随之提升。

1.2 拼宽设计核心原则

拼宽设计需要在新旧结构之间建立合理的力学联系, 新建部分的结构选型应当接近原桥形式, 跨径布置、

梁高设置、支座类型等参数保持一致以减小新旧结构刚度差异, 避免接缝应力集中。横向连接方式的确定直接关系到新旧桥面能否协同受力, 刚性连接能让荷载在全桥面范围内重新分配, 柔性连接则允许两侧保持一定的变形独立性, 选择依据来源于原桥的实际状态评估结果。拼宽后的桥梁宽度增加, 原有下部结构的承载能力可能不足以支撑新增荷载, 桩基、承台、墩柱等构件需要经过复核计算, 承载力不足的部位要实施加固或新增基础来分担竖向力与水平力。

2 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽连接方式与构造设计

2.1 横向连接类型选择

新旧桥面的横向连接类型决定了拼宽后桥梁的整体工作性能, 选择过程需要根据原桥技术状况来判断连接刚度的合理区间。刚性连接将新旧翼缘板直接浇筑成整体, 湿接缝内布置的钢筋穿过新旧界面形成锚固, 接缝宽度通常控制在 80 cm 至 120 cm 之间以保证钢筋能够充分搭接, 接缝混凝土强度等级应高于或等于原桥翼缘板强度, 浇筑前需将旧混凝土表面凿毛并清理干净以增强黏结效果。刚性连接适用于原桥状态良好、承载能力富余较多的情况, 新增荷载可以依靠整体桥面的协同作用分散到各片梁上, 单片梁的受力增幅相对较小^[2]。柔性连接则在新旧桥面之间设置滑动层或弹性垫层, 允许两侧在温度变化、活载作用下产生相对位移, 连接构件仅传递部分剪力而不形成完全的刚性约束, 适用于原桥出现病害、承载力接近极限的情况, 新增荷载主要由新建部分承担, 避免对既有结构产生过大影响。

作者简介: 胡晓 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 桥梁工程。

2.2 连接构造设计要点

连接构造的细节处理直接影响新旧结构能否形成可靠的传力路径,湿接缝内的钢筋配置需要满足抗剪与抗弯的双重要求。纵向钢筋伸入新旧翼缘板的锚固长度应达到 $35d$ 以上, d 代表钢筋直径,锚固长度不足会导致钢筋过早滑移失去作用。横向钢筋布置间距宜控制在 15 cm 至 20 cm 范围,间距过大易致接缝薄弱、诱发裂缝,过小则钢筋过密影响浇筑质量^[3]。接缝混凝土应采用微膨胀型材料,硬化过程中的体积增长能够抵消部分收缩变形,新旧界面保持紧密接触状态,剪力传递更加可靠。横隔板在拼宽后需要增设或加强,原桥横隔板间距若超过 8 m ,应在新旧桥交界处增设加强横隔板以提升横向刚度,横隔板厚度不宜小于 20 cm ,内部配筋按照受弯构件进行设计,箍筋直径选用 $\phi 10$ 或 $\phi 12$ 以满足抗剪需求。

3 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽结构力学性能分析与控制

3.1 静力性能分析

拼宽后的桥梁结构在恒载与活载共同作用下的静力响应需要通过有限元模型进行精确计算,模型建立时应将新旧梁体的材料参数、截面尺寸、预应力配置等信息完整输入,边界条件设定要符合实际支座类型,固定支座约束三个方向位移,活动支座仅约束竖向位移并释放纵向自由度。荷载工况组合包括自重、二期恒载、汽车荷载、温度梯度等多种情况,计算时应按照最不利组合原则来获取控制截面的内力包络值,跨中正弯矩区与支点负弯矩区需要分别核算。新旧桥交界面的应力分布状态直接反映连接构造的传力效果,刚性连接时界面剪应力峰值通常出现在活载作用位置附近,峰值大小受湿接缝宽度影响,接缝宽度从 80 cm 增至 120 cm 后剪应力降幅可达 15% 至 20% 。挠度计算结果需要与规范限值进行对比,跨中挠度在活载作用下不应超过跨径的 $1/600$,拼宽后由于结构刚度改变,挠度值可能出现增大趋势,超限时应调整预应力配置或增设临时支撑来改善变形状态。拼宽后各片 T 梁的荷载分担比例可以通过横向影响线计算得出,边梁分担系数若超过内梁 1.3 倍以上,说明横向连接刚度不足,需要增设横隔板来强化荷载横向传递能力,使得各片梁受力趋于均匀。

3.2 动力性能优化

拼宽结构的振动特性受到质量分布与刚度分布双重因素影响,新旧桥面形成的非对称体系容易在车辆

激励下产生扭转振型,振幅过大会加剧疲劳损伤累积速度。为改善振动响应,横隔板的布置密度应在原桥基础上适当加密,跨中区域增设的横隔板间距控制在 6 m 左右,端部支座附近则缩短至 4 m 以提升约束刚度,横隔板厚度需达到 25 cm 以上才能形成有效的横向联系,内部主筋采用双层双向配筋形式。

阻尼比的提升依赖于耗能构件的合理设置,湿接缝内可埋设橡胶阻尼垫层,垫层厚度选用 5 mm 至 8 mm ,剪切模量控制在 1.5 MPa 至 2.0 MPa 范围,车辆荷载引起的微小相对位移能够激发橡胶材料的黏弹性耗能机制,结构整体阻尼比从拼宽前的 0.03 提升至 0.045 。支座的选型要兼顾竖向承载与水平耗能双重功能,盆式橡胶支座的橡胶层厚度设定为 40 mm 至 60 mm ,内部钢板嵌层数量达到 4 层至 6 层,支座在温度变化产生的位移循环中消耗部分振动能量,减少传递到下部结构的动力响应幅值。

3.3 长期性能保障措施

收缩徐变效应在拼宽结构中呈现出明显的时变特性特征,新建梁体在浇筑后的前两年内收缩变形速率最快,约束条件下会在混凝土内部产生拉应力,裂缝萌生风险随之上升。为控制收缩影响,湿接缝混凝土宜掺入 8% 至 12% 的膨胀剂,膨胀率测试值达到 0.025% 至 0.035% 时能够抵消大部分自收缩变形,浇筑完成后需持续湿养护 14 d 以上,保持表面湿润以延缓水分散失。

预应力损失的长期监测需要在关键截面埋设应变传感器,跨中正弯矩最大截面、支座负弯矩峰值截面、连接缝两侧各布置 3 个至 5 个测点,传感器采用振弦式或光纤光栅型以保证长期稳定性,每月读数一次并绘制应变时程曲线,曲线斜率变化超过 15% 时应启动详细检测程序^[4]。温度梯度在混凝土桥面板内产生的附加应力容易被忽视,夏季高温时段桥面板顶面温度可比底面高出 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差导致的竖向约束应力叠加在活载应力之上,顶板拉应力储备显著降低,铺装层应采用热反射涂料或浅色沥青以降低太阳辐射吸收率,桥面板顶面温度可下降 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度梯度效应随之减弱。

4 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽施工关键技术与质量控制

4.1 施工顺序与工艺选择

拼宽施工的启动阶段需先完成下部结构的加固或新建工作,桩基采用钻孔灌注桩工艺时,成孔过程要

避免对既有桩基产生扰动,新旧桩基净距不宜小于 3 倍桩径,护筒埋设深度达到 2 m 以上才能隔断地表水渗入,钢筋笼吊装就位后应立即浇筑混凝土,浇筑过程连续进行不得中断,桩顶浮浆清除干净后才能进行承台施工^[5]。

上部结构的梁体预制宜采用工厂化生产方式,预制场地布置在桥位附近以缩短运输距离,T 梁底模铺设钢板并打磨平整,侧模采用定型钢模板以保证截面尺寸精度,波纹管定位筋每隔 50 cm 设置一道,防止浇筑过程中管道上浮或偏移,混凝土浇筑从腹板两侧对称进行,振捣应均匀密实,至表面泛浆无气泡为止,预应力张拉在混凝土强度达到设计强度的 90% 后实施,张拉端与固定端对称布置以减少摩阻损失,持荷 5 min 后测量伸长值,实测伸长值与理论伸长值偏差不超过 6% 时视为合格。梁体架设采用架桥机逐孔推进,梁端就位精度横向偏差小于 10 mm、纵向偏差小于 15 mm,支座安装前应在墩顶预埋钢板上精确放样,支座中心与设计位置偏差控制在 5 mm 以内。

4.2 施工过程监测与反馈

原桥的应力状态在拼宽施工期间会因新增荷载而发生改变,支架搭设、梁体就位、湿接缝浇筑等工序产生的竖向力会传递到既有墩台,墩顶应变监测点布置在受力最不利的位置,采用电阻应变片粘贴在混凝土表面,数据采集频率设定为每小时一次,应变增量超过设计容许值的 70% 时应暂停施工并卸载^[6]。

梁体的挠度变化能够反映刚度退化程度,跨中截面下缘布设位移测点,测量仪器选用全站仪或激光测距仪,每日定时测量以消除温度影响,实测挠度与理论计算值的差异不应超过 15%,差异过大说明结构受力状态偏离预期,需要检查支座是否脱空或连接构造是否松动。裂缝宽度的监控贯穿整个施工过程,混凝土浇筑后 24 h 开始巡查,发现裂缝立即标记并测量宽度,宽度小于 0.2 mm 的裂缝属于正常收缩范围,宽度超过 0.3 mm 则需要分析成因,受力裂缝多出现在受拉区且走向垂直于主筋方向,温度裂缝则呈现不规则网状分布,针对裂缝成因采取相应的封闭或加固措施。

4.3 质量控制标准与验收方法

混凝土强度的达标情况直接关系到结构承载安全,每个工作班组浇筑的混凝土应留置一组标准养护试块,养护 28 d 后送至检测机构进行抗压试验,同批次试块强度平均值不低于设计强度等级的 1.15 倍,单组最低强度不低于设计强度等级的 0.95 倍时判定合格。预应

力张拉的伸长值是判断张拉效果的关键指标,应用公式 (1) 计算实际伸长值:

$$\Delta L = \sum PL / (EsA) \quad (1)$$

式 (1) 中: ΔL 为预应力筋实际伸长值 (mm); P 为预应力筋张拉力 (kN); L 为预应力筋长度 (mm); Es 为预应力筋弹性模量 (MPa); A 为预应力筋截面面积 (mm²)。

实测值与计算值比较时应扣除锚具变形、钢筋回缩等因素产生的偏差,比值控制在 0.94 至 1.06 范围内。湿接缝的密实度检验采用回弹法与钻芯法相结合,回弹仪在接缝表面每隔 1 m 测试一次,回弹值换算强度不低于设计强度的 95%,钻芯取样选择 3 个至 5 个代表性部位,芯样直径 100 mm、长度不小于芯样直径的 2 倍,芯样表面不得有明显蜂窝、孔洞、裂缝等缺陷,抗压强度测试结果作为最终评定依据。横隔板与主梁连接部位的钢筋焊接质量通过超声波探伤检查,焊缝长度大于 50 mm 的接头需要逐条检测,探伤仪探头频率设定为 2.5 MHz 至 5 MHz,缺陷当量直径超过 2 mm 时判定为不合格焊缝,返修后重新探伤直至达标。

5 结束语

预应力连续 T 梁桥拼宽改造需要在结构设计、力学分析、施工控制等多个环节实施精细化管理,横向连接方式的合理选择能够保证新旧桥面形成可靠的传力路径,构造细节的规范处理避免应力集中引发局部破坏。静力与动力分析为安全评估提供量化依据,长期性能保障与施工监测可及时发现并处置异常,严格的质量控制与验收则为工程交付提供保障,拼宽技术的持续改进将推动既有桥梁改造水平不断提升。

参考文献:

- [1] 孙雪宏,胡梦.预应力混凝土连续 T 梁桥荷载试验分析[J]. 工程质量,2025,43(07):99-102.
- [2] 李鑫,刘海东,王俊新,等.桥墩失效对连续 T 梁桥受力性能影响分析[J]. 运输经理世界,2025(03):104-106.
- [3] 陈强,王渠,杨文锦,等.拼宽长联预应力混凝土连续 T 梁桥受力性能研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(12):120-123.
- [4] 韩青松.支座病害对预应力连续 T 梁桥受力性能的影响及维护对策[J]. 交通世界,2024(13):178-180.
- [5] 廖文彬.改扩建高速公路新旧 T 梁桥拼接缝受力分析[J]. 中国高新科技,2023(24):117-119.
- [6] 郭燕.预应力混凝土连续 T 梁桥静动力性能分析[J]. 山东交通科技,2022(03):140-142.

沥青路面平整度试验检测技术应用

苟 樾

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 平整度是沥青路面核心服役性能指标, 其通过车路耦合振动效应直接决定行车安全舒适性、路面结构动力响应特性及全生命周期服役寿命, 试验检测技术的精准应用是路面施工质量全流程管控的核心。本文以某一级公路沥青路面工程为依托, 系统阐释 3 m 直尺法、连续式平整度仪法、激光平整度仪法、颠簸累积仪法的检测机理与数学模型, 开展各技术的测量不确定度评定与数据相关性分析, 完成检测全流程的误差溯源, 最终提出检测技术优化与精度管控体系, 旨在为沥青路面平整度精准检测、质量科学评价提供工程实践参考。

关键词 沥青路面; 平整度; 试验检测技术; 测量不确定度

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.014

0 引言

沥青路面因行车平顺性好、抗滑性能优异、施工便捷等优势, 已成为我国高等级公路的主流路面结构形式。路面平整度是表征路面纵断面凹凸特性的核心指标, 不仅直接影响行车安全与舒适性, 更会通过车路耦合振动放大路面动荷载冲击, 加速结构层疲劳开裂、车辙等病害发展, 大幅缩短路面服役年限^[1]。试验检测是沥青路面平整度量化管控的核心手段, 当前常用检测技术分为断面类直接检测与响应类间接检测两大体系, 各类技术的精度、效率与适用场景差异显著, 工程中普遍存在仪器校准不规范、操作流程不标准等问题, 导致检测结果偏差超标, 引发质量评价争议^[2]。基于此, 本文依托实际工程开展系统分析, 以期为深化平整度检测技术的工程应用提供参考。

1 工程概况

本文依托某一级公路沥青路面新建工程, 项目设计时速 80 km/h, 双向四车道, 路线全长 5.2 km。项目所在区域为亚热带季风气候, 夏季高温多雨, 对沥青路面平整度控制要求较高。路面采用半刚性基层沥青路面结构, 自上而下为 4 cm AC-13C 改性沥青上面层、6 cm AC-20C 中面层、8 cm AC-25C 下面层, 基层为 20 cm 水泥稳定碎石, 底基层为 18 cm 级配碎石^[3]。

根据《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1-2017) 规范与设计要求, 上面层平整度控制标准为: 国际平整度指数 $IRI \leq 2.0$ m/km, 连续式平整度仪标准差 $\sigma \leq 1.2$ mm, 3 m 直尺最大间隙 ≤ 2.5 mm。施工过程中对各结构层开展递进式平整

度检测, 结合施工工序需求, 采用 3 m 直尺法、连续式平整度仪法、激光平整度仪法、颠簸累积仪法, 构建“局部检测—整体检测—验收检测—快速筛查”的全流程检测体系。

2 沥青路面平整度核心检测技术的机理与应用

2.1 3 m 直尺法

3 m 直尺法是断面类直接检测的基础方法, 核心适用于施工过程局部质量控制, 尤其针对沥青路面施工缝、摊铺机搭接带等关键部位的细节检测。其检测机理为几何基准测量法, 以 3 m 长刚性直尺为纵向基准, 贴合路面后通过塞尺测量直尺与路面的最大间隙, 即为该测点平整度偏差值, 数学模型为:

$$h_{\max} = \max |z(x) - z_{\text{ref}}(x)|, x \in [0, 3m] \quad (1)$$

式(1)中: $h_{\max}$ 为最大间隙 (mm); $z(x)$ 为路面实测高程函数; $z_{\text{ref}}(x)$ 为直尺基准线高程函数。

该技术操作简便、成本低廉, 适用于局部点位检测, 工程应用中每个测点重复检测 3 次取平均值, 每 200 m 设置 1 个检测断面, 每个断面布设 5 个检测点位, 重点管控施工接缝等薄弱部位的平整度。其误差主要来源于直尺自身形位偏差、人工操作不规范与环境干扰, 需通过标准化操作降低随机误差。

2.2 连续式平整度仪法

连续式平整度仪法属于连续式断面类检测技术, 检测效率与数据全面性优于 3 m 直尺法, 适用于各结构层施工后的大面积整体平整度检测, 是工程中最常用的过程管控技术。其检测机理为位移传感连续测量, 通过牵引设备带动仪器匀速行驶, 测量轮随路面凹凸

作者简介: 苟樾 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

产生的垂直位移,经传感器转化为电信号后,输出平整度标准差 σ 、IRI 等核心指标,标准差计算模型为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(d_i-\bar{d})^2}\quad(2)$$

式(2)中: σ 为平整度标准差(mm); d_i 为第*i*个采样点位移测量值; $\bar{d}$ 为测量值算术平均值; N 为采样点总数。

本工程采用 3.6 m 轨式连续式平整度仪,采样间距 100 mm,检测前完成测量轮、位移传感器与数据采集系统的校准,检测时牵引速度严格控制在 5 km/h 匀速行驶,避免加减速引发的测量轮弹跳误差,每 100 m 输出一组平整度指标,实现路面平整度的连续化定量化表征。

2.3 激光平整度仪法

激光平整度仪法是高等级公路验收阶段的主流高精度检测技术,属于非接触式断面类检测技术,依托激光测距实现路面高程的高速、高精度连续测量,检测结果是路面平整度验收的核心依据。其检测机理为激光三角测距原理,车载激光传感器向路面发射激光脉冲,经反射后被传感器接收,结合激光传播时间差与三角几何关系计算垂直距离,再通过惯性导航单元修正车辆姿态误差,还原路面真实纵断面高程,最终通过 1/4 车模型计算 IRI,核心高程模型为:

$$h(x)=H-L(x)-\Delta h_{pose}(x)\quad(3)$$

式(3)中: $h(x)$ 为路面真实高程(mm); H 为传感器安装基准高度; $L(x)$ 为传感器实测距离; $\Delta h_{pose}(x)$ 为车辆姿态误差修正值。

本工程采用车载式八激光束平整度仪,采样频率 10 kHz,纵向采样间距 10 mm,检测前完成传感器测距精度校准与系统级精度验证,检测时车辆以 80 km/h 匀速行驶,每 10 m 输出一组检测数据。该技术检测效率较传统技术提升 15 倍以上,测量不确定度降低 30% 以上,是目前精度最高的路面平整度检测技术^[4]。

2.4 颠簸累积仪法

颠簸累积仪法属于响应类间接检测技术,通过车辆行驶振动响应间接表征路面平整度,检测效率高、成本低,适用于施工质量快速巡检与养护阶段大范围筛查,

可快速定位平整度超标路段。其检测机理基于车路耦合振动理论,路面凹凸引发车辆悬架垂直振动,通过位移传感器采集振动相对位移累积值(VBI),VBI 值与路面平整度呈正相关,核心单自由度车路耦合振动模型为:

$$m\ddot{y}+c\dot{y}+ky=kq(x)+c\dot{q}(x)\quad(4)$$

式(4)中: m 为车辆非悬挂质量; c 为悬架阻尼系数; k 为悬架刚度; y 为车身垂直位移; $q(x)$ 为路面高程激励。

在工程应用中,检测前完成传感器校准与 VBI-IRI 相关性标定,检测时车辆以 50 km/h 匀速行驶,每 100 m 输出一组 VBI 数据,通过标定模型转换为 IRI 值。该技术无法精准表征局部平整度细节,但可高效完成全路段整体评价,弥补了其他技术大范围巡检效率不足的短板。

3 检测技术的测量不确定度评定与数据相关性分析

3.1 测量不确定度评定

测量不确定度是表征检测结果分散性的核心参数,本文依据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1-2012)规范,采用 A 类与 B 类结合的方法,对四种技术的测量不确定度进行系统评定。A 类不确定度由重复测量随机误差导致,通过贝塞尔公式计算;B 类不确定度由系统误差导致,来源于仪器示值误差、校准误差、环境影响等,最终合成标准不确定度。

以本工程上面层 IRI 值检测为例,四种技术的扩展不确定度($k=2$,置信概率 95%)评定结果见表 1。结果显示,激光平整度仪法测量不确定度最小,检测精度最高,适用于验收阶段精准评价;3 m 直尺法相对不确定度最大,仅适用于局部施工过程控制;连续式平整度仪法与颠簸累积仪法精度居中,适用于施工过程大面积检测与快速筛查。

3.2 数据相关性分析

基于本工程全路段 52 组检测数据,采用最小二乘法建立各技术检测结果的线性回归模型,分析数据相关性,结果见表 2。

分析表明,四种技术的检测结果均具有显著线性相关性;3 m 直尺法与其他技术相关性相对较低,源于其局部检测的特性,无法反映路段整体平整度水平。

表 1 不同平整度检测技术的扩展不确定度评定结果

检测技术	测量平均值 (IRI, m/km)	合成标准不确定度 (m/km)	扩展不确定度 (m/km)	相对扩展不确定度
3 m 直尺法	1.82	0.164	0.328	18.02%
连续式平整度仪法	1.76	0.087	0.174	9.89%
激光平整度仪法	1.74	0.032	0.064	3.68%
颠簸累积仪法	1.85	0.126	0.252	13.62%

表 2 不同检测技术检测结果的相关性分析

回归模型	拟合方程	相关系数 R^2	显著性水平 P
激光 IRI- 连续式 σ	$IRI=0.862\sigma+0.714$	0.972	< 0.001
激光 IRI-3 m 直尺 h_{max}	$IRI=0.527h_{max}+0.486$	0.895	< 0.001
激光 IRI- 颠簸累积 VBI	$IRI=0.0021VBI+0.328$	0.926	< 0.001

工程中可通过拟合方程实现不同技术检测结果的相互转换，建立统一的平整度评价尺度。

4 沥青路面平整度检测精度提升的管控体系

4.1 仪器校准与性能验证体系

仪器性能是保障检测精度的核心前提，需构建“日常核查—周期校准—工程前标定”的三级管控体系。明确各类仪器校准周期：3 m 直尺每 3 个月开展日常核查，每年第三方校准；连续式平整度仪、激光平整度仪、颠簸累积仪每 6 个月开展第三方计量校准。每次检测前，在标准校准路段完成仪器性能验证，以校准后的激光平整度仪结果为基准，确保检测偏差在规范允许范围内，同时建立仪器全生命周期管理档案，实现仪器性能可追溯管控^[5]。

4.2 基于路面功率谱密度的检测数据处理与异常值识别技术

数据处理方法的科学性直接决定平整度评价结果的准确性，需摒弃传统的简单数据统计方法，构建基于路面功率谱密度（PSD）的精细化数据处理体系。

路面功率谱密度可表征路面纵断面凹凸不平度在空间频率上的分布特性，是比 IRI、 σ 更全面的平整度评价指标，可精准识别不同波长的路面不平顺成分。通过对检测得到的路面纵断面高程数据进行傅里叶变换，计算路面功率谱密度，划分短波长（ $< 0.5\text{ m}$ ）、中波长（ $0.5\text{ m} \sim 10\text{ m}$ ）、长波长（ $> 10\text{ m}$ ）不平顺成分，分别对应行车舒适性、车辆动荷载、路面结构响应的核心影响频段，实现平整度的多维度精细化评价。

同时，建立基于格拉布斯准则的异常值识别与剔除机制，对检测数据进行显著性检验，剔除仪器故障、操作失误、路面异物干扰导致的异常数据，避免无效数据影响整体评价结果。规范数据记录与存档要求，完整留存检测原始数据、环境参数、仪器校准记录、操作过程影像资料，建立检测数据电子档案，实现检测全流程的可追溯、可复核。

4.3 多技术融合的沥青路面平整度全施工周期动态管控体系

基于不同检测技术的技术特性与适用场景，构建“递进式、多维度、全周期”的平整度动态管控体系。

在底基层、基层施工阶段，采用 3 m 直尺法与连续式平整度仪法组合检测；在下面层、中面层施工阶段，采用连续式平整度仪法与颠簸累积仪法组合检测，实现大面积施工质量的连续管控与快速筛查，及时整改平整度超标路段；在上面层施工完成后，采用激光平整度仪法开展全路段高精度验收检测，结合 3 m 直尺法对施工接缝、局部点位进行细节复核，确保路面平整度全面满足设计与规范要求。

同时，建立平整度施工偏差溯源机制，根据检测结果分析平整度超标原因，针对性优化沥青混合料摊铺、碾压施工工艺，形成“检测—分析—优化—再检测”的闭环管控体系。

5 结束语

本文系统阐释了四类沥青路面平整度检测技术的检测机理与数学模型，依托实际工程完成了测量不确定度评定与数据相关性分析，最终构建了平整度检测精度提升的全流程管控体系。结果表明，激光平整度仪法检测精度最高，四类技术检测结果具有显著线性相关性，可通过拟合模型实现结果转换；通过仪器校准、操作标准化、全周期管控等措施，可有效降低检测结果的不确定度，提升检测精准性。未来，需进一步深化平整度检测与智能化技术的融合，建立平整度与路面服役寿命的量化关联模型，推动平整度检测从质量验收指标向全生命周期管控核心参数升级。

参考文献:

- [1] 贺登高.高速公路沥青路面试验检测技术的应用[J].大众标准化,2025(19):179-181.
- [2] 申万青.基于多传感器融合的路面平整度检测探析[J].交通世界,2025(17):40-42.
- [3] 李文.沥青公路路面试验检测技术应用分析[J].运输经理世界,2025(12):29-31.
- [4] 储浩.沥青路面平整度影响因素及控制措施[J].交通世界,2024(14):54-56.
- [5] 刘务波.公路工程沥青路面施工现场试验检测技术[J].工程建设与设计,2023(14):112-114.

高速公路高性能混凝土试验检测分析

皇舟龙

(云南交通土木工程检测有限公司, 云南 昆明 650500)

摘 要 随着我国高速公路建设规模的持续扩大, 工程结构对混凝土材料的强度、耐久性与稳定性提出了愈发严格的要求。高性能混凝土凭借其优异的力学性能与抗侵蚀能力, 在道路工程领域的应用日益广泛。为确保高性能混凝土的材料性能完全匹配工程建设标准, 需通过系统规范的试验检测流程对其质量进行全面评价。本文结合高速公路工程实践, 系统总结高性能混凝土试验检测的核心内容与关键技术要点, 以期为提升检测工作的精准性与可靠性提供参考, 最终实现增强高速公路结构耐久性能、延长工程使用寿命的目标。

关键词 高速公路; 高性能混凝土; 试验检测

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.015

0 引言

在高速公路工程建设中, 混凝土结构承担着桥梁、涵洞及附属构件等重要功能, 其材料性能直接影响工程质量与结构安全。随着交通荷载不断增加, 再加上服役环境日趋复杂, 传统混凝土在强度和耐久性方面已难以完全满足工程需求, 高性能混凝土因此得到广泛应用。然而, 高性能混凝土的材料组成复杂, 其性能受水泥、骨料、矿物掺和料及外加剂等多种因素共同影响, 需通过科学的试验检测手段对其性能进行系统评估, 为优化配合比设计并提升施工质量提供可靠依据。

1 高速公路高性能混凝土试验检测内容

1.1 抗压强度检测

抗压强度检测是高速公路高性能混凝土试验检测中的基础项目, 也是评价混凝土承载能力最直接的指标^[1]。通过抗压强度试验, 可以判断混凝土是否满足结构设计要求, 并为后续施工质量控制提供重要依据。高速公路工程中常用的高性能混凝土强度等级包括 C30、C40、C50 等, 不同等级混凝土的抗压能力直接关系到桥梁、涵洞以及附属结构的安全稳定, 必须采取规范化试验手段进行检测。试验通常采用标准立方体或圆柱体试件进行, 其中立方体试件尺寸一般为 150 mm×150 mm×150 mm, 圆柱体试件尺寸为 Φ150 mm×300 mm。试件按照设计配合比进行制作, 在标准养护条件下进行养护, 养护环境温度保持在 20±2 ℃, 相对湿度控制在 95% 以上, 养护时间通常为 28 d。达到规定龄期后, 将试件放入压缩试验机中进行加载测试。试验机需要

具备足够的承载能力, 并应满足现行标准对量程、精度等级及加载控制的要求, 以确保试验过程稳定可靠。试验过程中应均匀施加压力, 使试件在受压状态下逐渐产生裂缝并最终破坏, 同时记录试件破坏时的最大荷载值。根据试件受压面积和破坏荷载, 可以计算出混凝土的抗压强度值, 计算公式为:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式(1)中, f_c 为抗压强度 (MPa), P 为破坏荷载 (N), A 为试件受压面积 (mm^2)。检测过程中通常采用多组试件进行试验, 检测过程中每组试件通常取 3 个, 具体取样组数和代表值判定应结合检测批次及现行检验评定标准确定, 以减少个别试件偏差带来的影响。在高速公路工程质量控制中, 抗压强度检测不仅用于验证混凝土是否达到设计等级, 还能反映原材料质量、配合比设计和施工养护等多方面因素的综合效果。高性能混凝土的抗压强度评定应结合设计强度等级及现行检验评定标准进行, 以保证结构具有良好的承载性能和使用安全性^[2]。

1.2 力学性能检测

在高速公路高性能混凝土检测体系中, 除抗压强度外, 还需通过多项力学性能试验对材料的受力行为进行全面评价。高速公路在长期服役过程中不仅承受竖向荷载, 还会受到弯曲、振动以及温度变化等多种作用, 因此必须通过力学性能检测掌握混凝土在不同受力状态下的表现。常见检测项目包括弹性模量、抗折强度等指标, 反映混凝土在荷载作用下的变形能力及抵抗裂缝产生的能力^[3]。弹性模量是描述混凝土在弹性变

作者简介: 皇舟龙 (1990-), 男, 本科, 研究方向: 公路工程。

形阶段抵抗应变能力的重要参数,其大小直接影响结构刚度和变形控制水平。试验过程中应依据现行标准选用规定尺寸的试件。公路工程中抗压弹性模量试件常采用150 mm×150 mm×300 mm棱柱体,也可采用高径比为2:1的圆柱体试件,如Φ150 mm×300 mm,通过试验机施加荷载,同时记录应力与应变变化情况,根据应力—应变关系计算弹性模量,计算公式为:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2)$$

式(2)中, E 为弹性模量(GPa), $\Delta\sigma$ 为应力变化量(MPa), $\Delta\epsilon$ 为应变变化量。在高速公路工程中,不同强度等级混凝土的弹性模量存在差异,通常处于较高水平,能够反映混凝土在受力状态下保持结构稳定的能力。如果弹性模量偏低,结构在车辆荷载作用下会产生较大变形,从而影响桥梁及路面结构的使用性能。抗折强度试验则主要用于评价混凝土抵抗弯曲破坏的能力。试验通常采用100 mm×100 mm×400 mm矩形梁试件,在三点弯曲试验装置上进行加载,当试件产生裂缝或发生断裂时记录破坏荷载,并根据试验参数计算抗折强度,其计算公式为:

$$F_f = \frac{PL}{bd^2} \quad (3)$$

式(3)中, F_f 为抗折强度(MPa), P 为破坏荷载(N), L 为支座跨度(mm), b 与 d 分别为试件宽度和高度(mm)。抗折强度与混凝土抗裂性能密切相关,在桥面结构及路面构件中尤为重要。一般情况下,C30混凝土的抗折强度约为4 MPa~5 MPa,而C50混凝土可达到6 MPa~7 MPa。随着混凝土强度等级提高,其抗弯能力、抗裂能力也随之增强。通过弹性模量与抗折强度等指标的检测,可以更加全面地评价高性能混凝土在受力过程中的综合性能,使试验检测结果更符合高速公路工程实际使用需求。

1.3 耐久性能检测

1. 氯离子渗透性检测。氯离子渗透性是评价混凝土抵抗腐蚀介质侵入能力的重要指标^[4]。氯离子进入混凝土内部后容易引起钢筋锈蚀,从而影响结构安全,因此需要通过规范试验检测其渗透能力。公路工程中常用的抗氯离子渗透试件尺寸为Φ100 mm×50 mm,试验结果通常以氯离子迁移系数等指标表示。氯离子迁移系数越低,说明混凝土内部结构越致密,越能够有效阻止腐蚀性介质进入材料内部,从而延长结构使用寿命。

2. 抗冻融循环检测。在寒冷地区,高速公路混凝土会反复经历冻结与融化的环境变化,如果材料抗冻性能不足,容易产生表面剥落、内部裂缝,需要通过冻融循环试验进行检测。耐久性能试验现行国家标准已更新为《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2024),公路工程还可结合《公路工程水泥及

水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)开展检测。结合公路工程常用试验方法,快冻法通常采用100 mm×100 mm×400 mm棱柱体试件,每组3根。试件在达到规定龄期前4 d应置于20±2℃水中浸泡,且水面至少高出试件20 mm,随后开展冻融循环试验。检测过程中一般结合试件质量变化、相对动弹性模量变化及外观损伤情况,对混凝土抗冻性能进行综合评价。

3. 抗渗与耐磨检测。抗渗性能是衡量混凝土抵抗水分渗透能力的重要指标。检测时应依据现行标准采用规定试件型式进行试验,公路工程中常用的抗渗试件包括上口直径175 mm、下口直径185 mm、高150 mm的锥台试件,或直径与高度均为150 mm的圆柱体试件。试验过程中按规定加压程序进行检测,并结合试件渗水情况或抗渗等级评价混凝土抵抗水分渗透的能力。

4. 高温性能检测。在隧道或火灾环境中,高温会对混凝土结构产生影响,因此需要对其高温性能进行检测。试验时可结合研究目的和现行相关试验方法,将混凝土试件置于高温炉中进行升温处理,随后冷却并开展抗压强度、弹性模量及表面裂纹检测^[5]。高温作用后,应结合混凝土残余抗压强度、弹性模量变化及表面损伤状况,对其高温后性能进行综合评价。不同强度等级混凝土在高温环境下的性能衰减程度存在差异,因此需要结合试验结果具体分析其耐高温能力。

1.4 微观性能检测

在高速公路高性能混凝土试验检测中,微观结构分析能够进一步揭示材料内部结构特征,从而解释其宏观力学性能和耐久性能形成的原因^[6]。通过微观检测,可以观察混凝土内部孔隙结构、界面结合状态以及水化产物分布情况,为配合比优化、材料改进提供依据。扫描电子显微镜(SEM)是常用的微观检测技术之一,该技术利用电子束扫描样品表面,可以获得高分辨率图像,从而观察水泥浆体结构、骨料与浆体界面及微裂纹分布情况。基于SEM图像能够识别混凝土内部孔隙大小及分布状态,并评价其致密程度。高性能混凝土在加入硅灰、粉煤灰等矿物掺合料后,内部微孔数量会明显减少,材料结构更加致密。经过28 d标准养护后,微观结构分析表明混凝土内部孔隙结构能够得到明显优化,从而提升混凝土的抗渗能力。X射线衍射技术(XRD)主要用于分析混凝土中的矿物组成及水化产物变化,通过对衍射图谱进行分析,可以判断水泥水化反应的进行程度及C-S-H凝胶等主要产物的生成情况。随着矿物掺合料的加入,水泥体系中生成的C-S-H凝胶数量增加,使混凝土内部结构更加稳定,其强度水平也随之提高。在部分情况下,掺加硅灰后混凝土中C-S-H凝胶生成更加充分,有助于提升材料内部结构的

稳定性。此外,还可以利用电子探针分析技术(EPMA)对混凝土进行微区元素分析,该方法能够显示 Si、Al、Ca 等元素在水泥基体中的分布情况。元素分布越均匀,说明水化反应越充分,材料结构稳定性越高。基于 SEM、XRD 及 EPMA 等多种微观检测手段的综合分析,可以全面掌握高性能混凝土内部结构特征,从而解释其高强度、高致密性及良好耐久性能的形成机制,为高速公路工程混凝土材料优化提供可靠依据。

2 高速公路高性能混凝土试验检测要点

2.1 科学选择胶结材料

试验人员在材料选择阶段应对水泥及矿物掺合料进行检测,确保其强度等级满足工程要求。一般应优先选用强度等级不低于 P·O 42.5 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,以满足高性能混凝土的使用要求。由于高强度水泥在水化过程中容易产生较大的水化热,因此在保证混凝土强度的前提下,应合理控制水泥用量,以减少结构开裂风险^[7]。为了进一步优化胶结体系,可在混凝土中适量掺入粉煤灰或矿渣粉。I 级粉煤灰的掺量一般控制在 15%~25%,若使用 II 级粉煤灰,其掺量通常控制在 10%~15%。需要注意的是,当粉煤灰掺量超过 30% 时,混凝土碳化速度会加快,因此需通过试验调整水灰比进行控制。若采用高炉矿渣粉作为矿物掺合料,其掺量一般控制在 20%~25%,并需进行 28 d 抗压强度检测,以确认其满足工程使用要求。

2.2 优化骨料选择

在选择细骨料时,应优先选用颗粒级配合理、质地坚硬且洁净的天然中粗河砂,其细度模数通常控制在 2.6~3.2 范围内,以保证混凝土具有良好的密实性。如果需要使用机制砂,应选择颗粒形态较好、级配合理的中砂,以提升混凝土结构稳定性。在骨料来源方面,一般不建议使用山砂或海砂,避免其成分差异对混凝土性能产生影响。同时,还需要对细骨料中的有害物质含量进行检测。当混凝土强度等级<C30 时,含泥量应≤3.0%;当强度等级为 C30~C45 时,含泥量应≤2.5%;当强度等级≥C50 时,含泥量应控制在≤2.0%。此外,泥块含量、云母含量以及轻物质含量均应≤0.5%,氯离子含量应<0.02%,硫化物和硫酸盐含量(按 SO₃ 质量计)应≤0.5%。

2.3 合理选用减水剂

高速公路工程中通常采用聚羧酸系高性能减水剂,该类减水剂能在减少拌合用水量的同时保持混凝土良好的流动性。试验人员在使用减水剂之前,应对其减水率、凝结时间及对混凝土强度发展的影响进行检测,

并对其与水泥及矿物掺合料之间的适应性进行试验^[8]。在工程应用中,减水剂掺量一般控制在 0.8%~1.2% 范围内,通过调控掺量可将水胶比降低至 0.35~0.40,从而提高混凝土的抗压强度及抗渗性能。同时,减水剂还能改善混凝土拌合物的施工性能,使其在浇筑、振捣和抹面过程中更加顺畅。

2.4 配合比与性能控制

试验人员需要结合工程施工条件,对材料比例进行多次试验调整,以获得性能稳定的配合比方案。以 C50 高性能混凝土为例,其配合比设计应结合原材料性能、施工条件及目标强度等级进行优化确定,并通过试拌和性能检测不断调整水胶比、砂率及外加剂掺量。在试验检测过程中,需要通过抗压强度和耐久性能试验对该配合比进行验证。同时,通过优化骨料级配将砂率控制在 38%~42% 范围内,以提高混凝土界面结合强度和整体稳定性。在施工阶段还应加强振捣密实度控制,并适当延长养护时间,一般养护周期可控制在 14 d 以上,以促进矿物掺合料的二次水化反应,使混凝土后期强度持续增长。

3 结束语

通过对高速公路高性能混凝土试验检测工作的分析可以看出,只有在试验检测阶段对各类材料进行严格控制,并结合检测数据不断优化配合比方案,才能确保混凝土具有良好的耐久性能。随着检测技术不断发展,高性能混凝土试验检测将更加科学化、精细化,为高速公路工程结构长期稳定运行提供更加可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 何家杰.高速公路高性能混凝土试验检测研究[J].运输经理世界,2025(26):22-24.
- [2] 陈方友.高速公路工程高性能混凝土试验检测研究[J].汽车周刊,2025(07):210-212.
- [3] 袁天锋.基于科技创新驱动的高速公路高性能混凝土试验检测体系构建[J].张江科技评论,2025(02):90-92.
- [4] 李建娇.高速公路工程高性能混凝土试验检测研究[J].工程技术研究,2024,09(20):120-122.
- [5] 陈平.高速公路高性能混凝土力学性能及耐久性试验检测研究[J].交通科技与管理,2024,05(12):100-102.
- [6] 秦彩秋.高速公路隧道高性能混凝土耐久性试验检测研究[J].运输经理世界,2024(15):156-158.
- [7] 陈东浩.高速公路高性能混凝土强度试验分析[J].工程机械与维修,2023(01):90-92.
- [8] 高盼.高速公路高性能混凝土试验检测[J].交通世界,2022(13):143-144.

泡沫轻质土在公路路基修筑中的应用

林 星

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 随着公路建设向复杂地质区域延伸, 软基处理、高填方沉降控制及狭窄空间回填等难题日益突出。泡沫轻质土作为一种新型路基材料, 凭借其轻质高强、施工便捷等特点, 在公路路基工程中得到推广。本文阐述了泡沫轻质土的技术特性, 分析了其原材料组成及规格要求, 在此基础上重点探讨了泡沫轻质土路基的施工工艺, 涵盖施工准备、基础与边坡处理、面板安装、现场浇筑及养护等关键环节, 以期同类公路路基工程的施工提供参考。

关键词 泡沫轻质土; 公路路基; 软基处理

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.016

0 引言

公路路基作为公路工程的核心承重结构, 其施工质量直接决定公路的承载能力、行车安全性及长期服役寿命。在我国公路建设不断发展的背景下, 工程建设面临的地质条件愈发复杂, 对路基材料的性能提出了更高要求。而泡沫轻质土是指在胶凝材料中掺入发泡剂, 经搅拌、发泡、浇筑及养护形成的一种多孔轻质材料, 弥补了传统路基填料的不足, 成为解决复杂路基工程难题的理想材料。

1 泡沫轻质土特性及原材料

1.1 泡沫轻质混凝土特性

泡沫轻质土之所以能够在公路路基修筑中得到广泛应用, 关键在于其多种技术特性能够与复杂路基工况形成较高匹配度。与常规填土相比, 泡沫轻质土最突出的优势在于轻质性, 其密度通常控制在 $300 \text{ kg/m}^3 \sim 1\,200 \text{ kg/m}^3$, 明显低于普通路基填料约 $1\,800 \text{ kg/m}^3 \sim 2\,000 \text{ kg/m}^3$ 的水平, 这使其在填筑后能够显著减小路基对下卧地基产生的附加应力, 从而控制总沉降及差异沉降^[1]。在具备轻质优势的同时, 泡沫轻质土并非单纯追求低容重, 而是在轻质与强度之间建立合理平衡, 这正体现出其强度可控性, 施工中可调节水泥掺量、泡沫掺量及整体配合比, 使其抗压强度保持在 $0.3 \text{ MPa} \sim 5.0 \text{ MPa}$ 范围内, 以适应不同路基部位对承载性能和变形性能的差异化要求。除此之外, 泡沫轻质土在新拌状态下具有良好的流动性及自密实性, 材料经泵送后可在模板或受限空间内自行流展、找平并实现较为均匀的填充, 无需传统填土施工中的分层碾压与机械振捣, 这一特征使其尤其适用于桥台背后、挡墙后侧及

异形狭窄区域的回填作业, 有助于减少压实盲区 and 局部填筑不实问题^[2]。待材料固化后, 泡沫轻质土又具备一定的自立性及施工高效性, 可在一定条件下减小边坡放坡需求, 简化支挡及防护处理, 同时依托连续浇筑工艺提升施工效率, 降低现场机械反复作业强度。从长期服役表现看, 泡沫轻质土以无机胶凝材料体系为主, 具备较好的耐久性及环保性, 其抗冻融性、抗渗性和化学稳定性较为可靠; 在材料配制过程中, 还可合理掺入粉煤灰、矿渣粉等工业副产物, 在改善材料性能的同时资源再利用, 较好契合绿色公路的发展要求。

1.2 泡沫轻质土原材料

泡沫轻质土的基本材料主要由胶凝材料、发泡剂、水、掺和料及外加剂构成(如表1所示), 其中, 胶凝材料通常以强度等级42.5级及以上的硅酸盐水泥为主, 主要起到胶结、硬化和承载作用; 在部分工程或研究中, 也会掺入矿渣粉、粉煤灰等活性材料或工业副产物替代部分水泥, 以降低材料成本并改善综合性能。发泡剂则用于制备稳定泡沫, 使材料内部形成大量均匀封闭气孔, 从而达到轻质化效果, 常见类型包括过氧化氢溶液等化学发泡剂以及表面活性剂类物理发泡剂^[3]。水是泡沫轻质土制备过程中不可缺少的介质, 一方面用于与水泥等胶凝材料拌和形成浆体, 另一方面也参与发泡和硬化过程, 掺和料主要包括粉煤灰、矿渣粉、细砂、石灰石粉等, 其作用在于调节浆体性能, 减少水泥用量并提升后期耐久性, 外加剂则依据工程实际需求灵活选用。上述材料经科学配比、均匀搅拌及规范养护后, 最终形成具有轻质、高强和自密实等特征的泡沫轻质土。

作者简介: 林星(1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

表 1 泡沫轻质土原材料及规格要求

材料类别	具体材料	规格要求
胶凝材料	水泥	强度等级 ≥ 42.5 级，普通硅酸盐或复合硅酸盐水泥
	矿渣粉	S95 级以上，比表面积 $\geq 400\text{ m}^2/\text{kg}$
	粉煤灰	I 级或 II 级，细度 $\leq 25\%$
发泡剂	物理发泡剂	发泡倍数 ≥ 15 ，1 h 沉降距 $\leq 5\text{ mm}$ ，1 h 泌水率 $\leq 30\%$
	化学发泡剂	过氧化氢浓度 27.5% ~ 35%
水	拌和水	符合混凝土用水标准，无有害杂质
掺和料	细砂	粒径 $\leq 2.36\text{ mm}$ ，含泥量 $\leq 3\%$
	石灰石粉	CaCO_3 含量 $\geq 75\%$
	稳泡剂	提高泡沫稳定性，掺量经试验确定
外加剂	速凝剂	初凝 $\leq 30\text{ min}$ ，终凝 $\leq 60\text{ min}$
	防水剂	提高抗渗性，降低吸水率
	减水剂	聚羧酸系，减水率 $\geq 20\%$

2 泡沫轻质土路基施工工艺

2.1 施工准备

施工准备是泡沫轻质土路基质量控制的起点，其充分性直接决定了后续工序的顺畅程度及成型质量，若准备工作不充分，极易导致浇筑过程中出现密度波动、泵送中断或浇筑面结合不良等问题，进而影响路基整体均匀性^[4]。泡沫轻质土路基施工准备并非简单的材料进场及设备就位，而是围绕后续连续浇筑形成的一体化前置组织过程，施工单位应先结合设计文件、地勘资料及路基断面条件，再次核对泡沫轻质土适用区段，重点梳理软弱地基分布、桥台背衔接段、狭窄作业面及高差变化位置，明确各区段的填筑标高、厚度变化及边界约束形式，使施工准备精准对应具体路基工况。随后围绕配合比设计开展针对性试验，按照设计湿密度、流动度和强度指标，对水泥、发泡剂、掺合料及用水比例进行比选，重点验证泡沫稳定性、浆体均匀性及不同温湿环境下的适应能力，避免单纯依据经验参数组织施工。与此同时，施工准备阶段应同步建立数字化测控基础，利用无人机航测、三维地形复核或 BIM 断面校核方式，确认基底高程、边界线形及浇筑范围，使后续方量控制、分仓划分和浇筑顺序更具可视性。对原材料管理，也不能停留在常规验收层面，而应突出批次稳定性控制，重点核查水泥活性波动、发泡剂稀释比例和掺合料含水状态，保证现场制备参数具有可复制性。

2.2 基础与边坡处理

基础与边坡处理的本质是构建泡沫轻质土与原地基之间的可靠连接界面，保证两者协同受力，泡沫轻质土虽具有轻质性优势，但其与原地基的界面结合能

力仍取决于基底的处理质量。传统处理方法多为单纯的台阶开挖与基底整平，对轻质土与原地基之间的界面黏结缺乏系统考量，无法充分发挥泡沫轻质土轻质优势。当前先进做法是引入高压旋喷桩及 MJS 工法相结合的复合地基处理技术，在基底软弱区域预先形成水泥土增强体，既提升地基承载力，又通过桩体与轻质土的有效嵌固形成整体受力结构，使桩体与轻质土形成刚度梯度过渡层，消解差异沉降引发的应力集中。在边坡处理方面，摒弃传统单一台阶开挖方式，采用三维激光扫描引导下的精准开挖技术，依据地质雷达探测结果动态调整台阶位置与坡度，保证台阶面进入稳定持力层，同时利用点云数据生成开挖面三维模型，与设计模型进行实时比对，实现开挖精度的毫米级控制。为增强界面抗剪能力，在台阶面铺设高强土工格栅并喷涂界面增强剂，土工格栅采用双向拉伸型，抗拉强度不低于 80 kN/m，界面增强剂为水性环氧树脂改性材料，渗透深度可达 5 mm 以上，形成机械咬合与化学黏结的双重界面强化机制。基础处理完成后，采用连续压实检测系统全覆盖监测基底压实度，系统集成加速度传感器及 GNSS 定位模块，以每 5 cm 深度采集一组数据的方式生成压实度云图，替代传统的每 200 m 抽检一点的方式，保证每一处基础均达到设计承载要求。

2.3 面板安装

面板安装的根本目的在于为泡沫轻质土提供侧向约束条件，使其在自重及上部荷载作用下保持结构完整性。泡沫轻质土固化后虽具有一定的自立性，但作为一种类混凝土材料，其抗拉强度远低于抗压强度，若无有效的侧向约束，路基边缘易在温度变化、干缩或水平荷载作用下产生开裂甚至失稳，面板承担侧向

土压力、限制土体侧向变形,使泡沫轻质土处于三向受压状态,从而发挥其抗压强度优势^[6]。

面板安装的技术发展体现在预制装配化与结构功能一体化方向,其本质在于为泡沫轻质土提供可靠的侧向约束条件,使其在自重及上部荷载作用下保持结构完整性。当前主流设计采用高精度预制装配式面板系统,面板单元在工厂采用高强混凝土及自动化模具成型,混凝土强度等级不低于C40,尺寸精度控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,表面预留与轻质土体连接的抗剪键槽及锚固凹槽,抗剪键槽深度不小于 30 mm ,间距按 500 mm 均匀布置。安装过程中引入三维激光定位技术,利用全站仪及智能棱镜系统实时校正面板轴线与高程,安装误差控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,远低于传统施工 $\pm 20\text{ mm}$ 的控制标准。面板及面板之间采用榫卯式连接构造,凸榫与凹槽配合间隙不超过 3 mm ,配合高性能聚氨酯密封胶填充接缝,既保证结构整体性,又适应温度变形及轻微沉降。为提升面板与泡沫轻质土的整体受力性能,在面板背面设置多排连接钢筋网片,钢筋采用直径 12 mm 的HRB400级螺纹钢,间距按 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 布置,钢筋伸入轻质土浇筑层内长度不小于 500 mm ,形成可靠的锚固结构,使面板与轻质土在受力过程中协同受力。

2.4 现场浇筑

现场浇筑是泡沫轻质土路基结构成形的核心环节,其控制逻辑在于保证材料性能的均质性与结构成型的连续性。泡沫轻质土的性能高度依赖气泡分布均匀性,若浇筑过程中出现单点堆积、分层间隔过长或密度控制失当状况,易导致气泡上浮、密度分层或层间冷缝等问题,使路基局部区域出现强度薄弱带。

现场浇筑的技术突破集中于智能化泵送以及过程质量控制一体化,预设浇筑路径及分层厚度,由机械臂控制泵管移动均匀布料。浇筑过程中集成在线密度监测装置,实时采集湿密度数据并自动反馈至拌合控制系统,当密度偏离设定值时系统自动调整发泡剂掺量或水胶比,确保浇筑质量始终处于受控状态。分层浇筑的界面处理引入智能界面识别技术,利用红外热成像或超声检测判断下层终凝状态,自动确定最佳浇筑时机,避免因间隔过长产生冷缝或间隔过短导致气泡扰动。对于大体积填筑段,创新性地采用分层分块跳仓浇筑工艺,利用数字孪生模型优化分块尺寸与浇筑顺序,控制水化热积聚及收缩裂缝。浇筑过程中同步布设分布式光纤传感系统,将传感光纤埋入轻质土体内部实时监测温度场变化,为调整养护参数提供数据支撑。

2.5 养护

养护措施的核心在于为水化反应提供稳定的温湿度环境,延缓水分蒸发速率。从工程角度看,养护不

仅关乎材料最终强度是否达标,更直接影响路基抗裂性能及长期耐久性,养护工作执行程度决定了前期各工序投入能否转化为可靠的工程品质。养护的技术创新体现在智能感知与自适应调控方向,搭建基于物联网的智能养护系统,在浇筑层内预埋温湿度传感器及应变计,实时监测轻质土内部的温度、湿度及收缩变形数据,利用无线传输模块上传至云端养护管理平台。平台依据水化热演化规律、环境气象数据及内部应变反馈,自动生成养护策略,控制现场智能喷淋系统或雾化养护装置启停。对于大面积填筑段,创新性地采用养护膜及微渗管组合系统,在浇筑层表面铺设高分子养护膜,膜内布设微渗管道,使轻质土表面始终保持湿润状态,同时避免过量水冲刷造成表层劣化。在高温季节或干燥气候条件下引入蒸发抑制技术,喷洒高分子成膜养护剂,在轻质土表面形成透光不透水的封闭膜,而养护剂在 $7\text{天}\sim 10\text{天}$ 后自然降解,无需人工揭膜。养护期结束后,采用非破损检测技术综合评定轻质土强度及均匀性进行,结合养护过程数据生成养护质量报告为后续工序提供可靠依据。

3 结束语

泡沫轻质土作为一种兼具多重优势的新型路基材料,解决了公路路基修筑中软基沉降、狭窄空间回填、高填方变形控制等传统难题,在公路工程建设中展现出广阔的应用前景。在施工过程中,施工准备的充分性、基础与边坡处理的可靠性、面板安装的精准性、现场浇筑的均质性及养护的及时性,是保障泡沫轻质土路基性能的关键环节。随着材料科学及施工技术的不断进步,应进一步加强泡沫轻质土的性能优化研究,探索其在更复杂地质条件下的应用技术,为我国公路工程的高质量发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李华治.高速公路泡沫轻质土路基施工技术[J].交通世界,2025(32):60-62.
- [2] 陈燕芳.泡沫轻质土施工技术在公路提升改建工程中的应用[J].运输经理世界,2025(30):20-22.
- [3] 韩雨生,李志虎,程咏春.泡沫轻质土在路基拼宽及抬升改扩建中的应用研究[J].甘肃科学学报,2025,37(05):118-123.
- [4] 王普.公路改扩建项目中泡沫轻质土的应用效果分析[J].交通世界,2025(18):45-47.
- [5] 刘兆瑞.公路软基处理中的泡沫轻质土模拟研究[J].交通世界,2025(16):122-124.

超前支护技术在公路隧道施工中的应用

苏世鹏

(四川公路桥梁建设集团有限公司机械化施工分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 为应对公路隧道施工常伴随围岩破碎、坍塌问题, 本文依托文献分析等研究方法, 分析了常规施工条件下小导管注浆、管棚支护、超前锚杆等超前支护技术的应用。继而结合突水涌泥段、塌方破碎带段、滑腔软弱区段等特殊地质, 分析了全断面帷幕注浆、双层长管棚等技术的应用。由此, 揭示了超前支护在稳定掌子面、控制围岩变形方面的作用。结论表明, 超前支护技术能降低施工风险, 优化隧道开挖过程, 为公路隧道工程提供技术保障。

关键词 公路隧道施工; 超前支护技术; 超前小导管注浆支护技术; 管棚支护技术; 超前锚杆支护技术

中图分类号: U459.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.017

0 引言

随着我国交通基础设施建设的不断发展, 隧道工程面临的地质环境日益复杂。软弱围岩失稳、断层破碎带坍塌以及高地下水压引发突涌等地质灾害频发, 对施工安全构成了极大威胁。依据相关工程实践经验, 在软弱破碎地层、砂卵石层开展隧道施工活动时, 应借助辅助施工方法预先加固围岩并完成超前支护, 以保障施工的安全性, 同时遵循“先支护、后开挖、短进尺、弱爆破、快封闭、勤量测”的施工原则, 从源头控制失稳风险。

1 公路隧道施工预加固需求分析

公路隧道施工周围的岩石条件变化较为频繁, 施工团队难以完全借助前期的勘察全面掌握岩体结构的稳定性情况。因此, 在实际开挖中, 一旦触及围岩强度较低或存在破碎带、断层带的不良地质结构, 掌子面前方岩体就容易松动或失稳, 造成塌方、掉块的风险。因此, 需要在隧道开挖前加固围岩, 减少开挖过程中围岩应力释放造成的不利影响, 维持掌子面稳定。在软弱围岩、浅埋地段和富水地层之中, 围岩的自稳能力普遍较弱, 开挖扰动通常会造成较为明显的变形, 甚至诱发地表沉降等问题^[1]。为此, 需要利用管棚、小导管注浆或超前锚杆等预加固技术, 在掌子面前方形成加固区, 提高岩体的整体强度, 同时也降低地下水对围岩结构的影响, 为后续的开挖施工提供稳定的环境。

2 常规公路隧道施工中超前支护技术的应用方法

2.1 超前小导管注浆支护技术

超前小导管注浆支护技术是在隧道掌子面前方的一定范围内沿着拱部布设小直径钢管, 利用压力注浆把浆液注入围岩裂隙与孔隙中, 加固松散岩体。该技术常用于Ⅳ级、Ⅴ级围岩和断层破碎带、砂层等稳定性较差的地质条件^[2]。在具体施工过程中, 超前小导管一般使用外径 42 mm~50 mm、长度 3 m~5 m 的钢管, 钢管前端为尖头结构, 管壁按一定间距开设注浆孔, 孔径为 6 mm~10 mm。施工时, 沿隧道拱部 120°~180° 范围布设导管, 将环向间距控制在 30 cm~50 cm, 外插角为 5°~10°。钻孔直径要比导管直径大 10 mm 左右, 从而能顺利安装导管。导管插入后要使用水泥砂浆封口, 避免浆液回流。在隧道施工过程中, 施工人员按照设计要求控制好导管的布置角度和长度, 避免局部加固不足的问题。钻孔偏差要控制在 3° 以内, 使导管形成连续加固区。在富水地层, 需要依据地下水流动情况调整浆液配比, 提高浆液凝结速度。同时, 结合监控量测结果, 持续监测围岩变形、拱顶沉降的情况, 按照监测数据调整导管布置密度和注浆参数。

2.2 管棚支护技术

管棚支护技术是指在隧道掌子面前方沿拱部布设一定数量的大直径钢管, 形成连续的钢管拱架结构, 支撑上覆围岩, 形成具有承载能力的保护结构。管棚支护包含测量放样、钻孔施工、钢管安装、孔口封堵

作者简介: 苏世鹏 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

以及压力注浆多个步骤^[3]。施工前需依据隧道断面尺寸和地质条件确定管棚布置的具体形式,即扇形布置、半圆形布置、门形布置、全周布置和局部偏侧布置等。例如:拱部围岩稳定性较差时,采用扇形布置;起拱线以上围岩不稳定时,采用半圆形布置;膨胀性围岩地层要使用全周布置方式。钻孔施工还要严格控制钻孔的角度,外插角要控制在 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 内,为管棚提供稳定的支撑拱。钢管安装时要按照编号顺序分节接入,前期人工送管,后期使用钻机顶进直至预定的设计长度。相邻的钢管接头要错开布置,保证同一断面接头数量不超过一半的钢管总数,相邻接头之间的错开距离要 ≥ 1 m,提高结构的稳定性。

2.3 超前锚杆支护技术

超前锚杆支护技术也称为斜锚杆,是在掌子面周边沿开挖方向布设斜向锚杆,把锚杆一端锚固到前方稳定围岩中,另一端与钢拱架、钢筋网连接起来,在开挖前形成临时的支撑结构,承托掌子面上方围岩。该技术主要应用于IV~V级围岩的岩质地段,适用于围岩节理裂隙发育、结构面较多的隧道工程环境,从而在爆破前支撑围岩,提高围岩的整体稳定性,减少坍塌风险^[4]。该原理类似于两端支撑的梁结构,当围岩发生位移时,锚杆能够利用自身的抗弯刚度支撑围岩,以限制围岩变形。超前锚杆设计主要分为普通超前锚杆和超前自进式锚杆。普通超前锚杆常采用螺纹钢制作的全长黏结型锚杆,杆体直径一般为22 mm。岩体较完整时,也可选择18 mm~20 mm锚杆,而软弱破碎岩体施工就需要使用25 mm的锚杆来提高承载能力。锚杆的长度一般为3 m~5 m,具体使用时需要结合掌子面开挖高度、围岩的自稳能力综合确定其具体长度,同时,还要保证纵向搭接长度 ≥ 1 m。锚杆布设范围位于衬砌中线两侧 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 范围内,若地质条件明显不对称,可采取不对称的布置方式。环向间距通常为40 cm~50 cm,围岩稳定性较差时可缩小至30 cm~40 cm,而围岩条件较好时可扩大至50 cm~60 cm。钻孔直径比杆体直径大10 mm~15 mm,并用强度等级大于M30的水泥砂浆锚固。

3 特殊地质条件下超前支护技术的应用方法

3.1 突水涌泥段的超前支护技术

突水涌泥是公路隧道施工中一种风险极高的地质灾害,主要发生在断层破碎带、岩溶发育区等区域。该地质条件下,受到地下水与松散破碎体的共同作用,稍有不慎便会引发突泥涌水,造成人员伤亡^[5]。因此,突水涌泥段实施超前支护技术的核心就是“堵排结合、

以堵为主”,利用有效的止水加固圈,把水体封堵于开挖轮廓线之外,保证掌子面的稳定。

3.1.1 超前地质预报先行

正式实施超前支护前,施工人员需要利用“长短结合”的探查方式,精准查明水文地质条件。长距离探测是指采用TSP(隧道地震波探测)或BEAM(激发极化法)探测前方100 m~150 m范围内的断层、富水带位置;短距离探测要求工作人员利用地质雷达扫描前方30 m内范围,使用超前水平钻探获取岩芯,测定水压、涌水量。

3.1.2 全断面帷幕注浆技术

全断面帷幕注浆是应对富水断层、岩溶管道最有效的一种封堵手段。施工时,要在距断层或富水段5 m~8 m处建造厚度2 m~3 m的C20喷射混凝土止浆墙,必要时还可嵌入工字钢骨架,保证其能承受3 MPa~8 MPa的注浆压力。浆液最好选用水泥—水玻璃双液浆,这种浆液具有较为稳定的凝胶时间,同时其抗动水稀释能力强,适合富水条件;微裂隙发育段可添加超细水泥或化学浆液提高渗透性。注浆过程可采用前进式分段注浆的工艺,每段5 m~8 m,逐段钻进、逐段注浆,直达到设计终压和注浆量标准,形成连续的堵水帷幕。

3.1.3 联合应用超前大管棚与止浆系统

在突水风险极高的浅埋段,单一注浆一般难以满足施工要求,此时就需要联合使用大管棚形成刚性止水结构。例如:采用 $\phi 108$ mm~ $\phi 159$ mm的热轧无缝钢管为管棚,把环向间距加密到20 cm~30 cm,再根据富水段宽度确定管棚长度,一般为15 m~40 m。管棚之间还要嵌入钢板,焊接到钢拱架上,继而形成整体的钢质止浆系统,避免高压注浆时浆液从管棚间隙流失。安装好管棚后,利用管体向围岩二次压力注浆,浆液会从管壁预留孔中溢出,在管棚周边形成一圈胶结圈,使管棚与注浆体构成一个“钢拱+混凝土”的复合承载壳。针对已经发生的局部涌水点,需采取径向注浆与局部挤压注浆补强。

3.2 塌方破碎带段的超前支护技术

破碎带属于隧道施工过程中极具危险的地质环境,此区域岩石呈现高度破碎状态且节理和裂缝广泛分布,岩体自身具备的承载力处于较低的水平,容易引发掉块、局部塌方的问题。基于此,在此类地段开展公路隧道施工时,有必要依靠“超前加固+结构承载+动态控制”的综合支护思路,创造稳定的施工环境。

首先采用管棚支护技术形成预支护承载体系。在掌子面前方布设大直径钢管,形成连续的“棚状拱架”,从而把上覆松散围岩的荷载传递至已支护区域,以此

来减弱开挖面直接承受的应力集中问题。针对破碎程度较高的地段,可采用大范围扇形布置的方式,提高支护覆盖率,同时控制外插角与钢管间距,形成连续的受力结构,避免局部失稳问题。在此基础上,同步实施小导管注浆技术,加固破碎围岩。还可以在管棚间隙布设小导管,把浆液压入围岩裂隙中,胶结松散颗粒,提升围岩的稳定性。在塌方高风险区域,要提前加密布设并完成分段注浆,必要时可采用双液浆或早强浆液,提高凝结速度,从而在掌子面前方形成稳定的加固圈。针对裂隙发育明显的区域,还需要提前布设超前锚杆,将锚杆一端锚固定于相对稳定的围岩中,另一端链接钢拱架,使破碎围岩变成相对受控的整体,从而限制围岩位移与塌落趋势。

在施工过程中,要遵循“短进尺、弱爆破、强支护、早封闭”的原则。每循环开挖都要控制在 0.5 m~1.0 m 之间,匹配钢拱架间距,严禁超挖。爆破作业要利用微震控制爆破技术,控制单段起爆药量,避免扰动破碎围岩。开挖后立即封闭掌子面及拱部,架设钢拱架,复喷混凝土到设计厚度。在此基础上,需要形成高密度的监控量测体系,在塌方段加密布设监测断面。监测频率要控制在每 2 小时~4 小时一次,24 小时持续跟踪围岩变形动态。当拱顶沉降速率连续三日超过 5 mm/d 时,要立即实施加密小导管、补做径向注浆等措施,优化支护参数,保证施工安全。

3.3 滑腔软弱区段的超前支护技术

在公路隧道施工中,滑腔软弱区段是一种极为棘手的不良地质类型,该地质条件下的围岩通常强度低、自稳能力极差。高地应力会诱发塑性流变,造成围岩持续向洞内挤入、支护结构变形过大的问题,同时滑腔往往不规则分布,局部可能存在较大的空腔。在“滑移”与“流变”的双重作用下,一旦支护不当,极易诱发初支开裂、钢架扭曲问题。因此,滑腔软弱区段的超前支护技术运用必须遵循“强韧让压、柔性支护”的原则,提供足够的强度抵抗围岩压力,也保证围岩能在可控范围内释放应力,避免压垮刚性支护。

双层管棚技术是滑腔软弱区段超前支护的最常见手段。外层管棚要沿拱部轮廓线,以较大外插角布设,深入稳定围岩形成外部承载拱。内层管棚要在外层管棚的掩护下,沿开挖轮廓线以较小外插角布设,形成防护屏障。两层管棚之间需要注浆,以此形成复合加固圈,有效抵御围岩的不均匀滑移。管棚一般采用 $\phi 108$ mm 或 $\phi 127$ mm 的热轧无缝钢管,根据滑腔宽度确定具体长度,一般情况下是 15 m~30 m,双层管棚要交错布置,形成立体的防护体系。

为应对滑腔中常见的软弱破碎带,可以使用超前小导管注浆加固技术。在管棚施做完成后,于拱部 120° 内施做超前小导管。注浆材料的选择根据滑腔充填物性质决定,泥质充填的滑腔宜采用聚氨酯类化学浆液,这一类浆液具有渗透性好、凝胶时间可控的优势,能把泥化破碎体“焊接”成一个整体;砂质或碎屑充填的滑腔最好使用水泥-水玻璃双液浆。注浆压力需要控制在 0.5 MPa~1.5 MPa 之间,注浆后形成厚度约 2 m~3 m 的加固壳,避免掌子面上方的滑移。

在软岩大变形段,需采用“预留变形量+可缩性钢架”的让压支护策略。根据围岩变形监测数据,在初期支护与二次衬砌之间预留 15 cm~30 cm 的变形空间,保证围岩在可控范围内充分释放应力。另外,初期支护钢架连接处还需设置可缩性接头,采用 U 型钢配合滑动套管结构,让钢架能够在承受一定压力后继续沿接头方向滑动收缩,待围岩应力释放到一定程度后再锁固接头,实现支护体系的受力转换。由此,这一“先让后抗”的方法能有效释放高地应力,预防刚性支护被压溃的风险,适用于软岩大变形段的超前支护体系设计。

4 结束语

超前支护技术在公路隧道施工领域中具有广泛的实用性,其核心目标就是提升工程技术精细化管控水平,保障施工品质,提高公路隧道的整体稳固性。在公路隧道施工过程中,超前支护技术支持下的围岩可以与支护结构实现高度协同,使隧道开挖成为主动优化施工条件的过程。该技术思路融合了岩体力学原理与材料性能调控方法,能够为隧道施工中的风险管控提供坚实支撑。随着超前支护技术的深化应用,需要深入探究其在不同地质环境下的适应性,同时提高智能化施工监测水平,全面提升公路隧道施工的安全管控水平。

参考文献:

- [1] 何松建.高速公路隧道施工中的超前支护技术应用[J].汽车周刊,2025(10):115-117.
- [2] 冉座东.公路隧道施工中超前支护施工技术的特点及实践探析[J].汽车周刊,2025(10):213-215.
- [3] 睦世虎.高速公路隧道施工中超前支护施工技术的具体应用[J].汽车周刊,2025(06):99-101.
- [4] 张晨阳.公路隧道施工中超前支护施工技术措施[J].四川建材,2025,51(05):173-176.
- [5] 王让林.超前支护技术在高速公路隧道施工中的应用分析[J].城市建设,2025(04):95-97.

市政道路与桥梁工程施工质量控制要点分析

于 洋, 刘 洋

(青岛西海岸城市建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 市政道路与桥梁是城市交通体系的核心枢纽, 既承担着保障城市运行安全的重要职责, 也是展现城市经济发展水平与对外形象的重要窗口, 更是支撑城市可持续发展、提升城市综合承载力的关键基础设施要素。本文结合市政工程施工实践, 论述了道路与桥梁施工质量控制的重要意义, 全面剖析了当前施工过程中存在的人员专业素养不足、材料设备管理缺位等突出问题, 基于此提出强化人员专业能力建设、完善材料设备全流程管理、深化施工过程精细化管理、构建多元协同质量监督体系、建立全生命周期质量追溯机制等针对性优化措施, 并结合典型工程实例与核心质量控制指标, 对措施的实际应用有效性完成验证, 旨在为市政道路与桥梁工程的施工质量管理提供实操参考。

关键词 市政工程; 道路与桥梁; 施工质量; 质量追溯体系

中图分类号: U415.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.018

0 引言

城市建设是我国科技与经济发展最直观的体现, 市政道路、桥梁工程的建设规模也随之不断扩大。市政道路与桥梁工程作为城市交通体系的核心支撑力量, 不仅是保障居民出行、实现区域互联互通的重要基础, 更是城市品质提升的关键载体。施工质量的优劣直接决定城市整体交通运行品质, 也与城市居民的生活幸福感息息相关。但在实际市政道路、桥梁工程建设中, 不同程度的质量隐患仍存在, 施工过程质量管控不到位的情况较为普遍, 不仅会大幅增加后期运维维修成本, 还会对城市整体形象造成不良影响。基于此, 系统梳理施工质量控制要点, 精准排查并闭环解决现存问题, 对提升工程整体质量、保障基础设施长期安全稳定运行, 具有重要的现实意义。

1 市政道路与桥梁工程施工质量控制的重要性

1.1 保障交通安全

道路和桥梁属于城市交通系统的主体, 工程品质高低影响着城市交通安全的事故发生率。施工质量控制不到位容易造成路面沉降、裂缝、坑槽、桥梁结构开裂、支座松动等质量问题, 不但影响通行效率, 还会引发交通事故。加强施工全过程质量控制, 规范施工操作程序, 可以提高结构的稳定性、耐久性, 从源头上减少安全隐患, 给公众出行提供可靠的保障^[1]。

1.2 促进城市经济发展

一个城市的门面就在于城市的道路和桥梁建设, 其施工质量直接关系到城市交通网络的通畅性和承载力, 进而影响城市经济发展。高质量的道路与桥梁能够完善城市交通布局, 提升通行效率, 拉近区域之间的时空跨度, 降低物流货运成本, 为企业生产经营以及物资流通提供便利。支持招引企业和产业集群, 良好的市政道路与桥梁工程可以完善城市配套设施, 带动周边区域开发建设, 激活房地产、商贸、服务业等相关产业发展, 创造更多就业岗位, 拉动城市经济增长。此外, 耐用、安全的道路与桥梁可减少后期维修养护成本, 避免因质量问题导致的交通中断, 保障城市经济活动的正常有序开展。

1.3 提升城市形象

市政道路、桥梁是城市空间的重要组成部分, 是体现城市形象、发展水平的直观载体, 市政道路、桥梁建设的质量在很大程度上体现着城市规划、管理的精细化程度。高质量的工程不仅是结构安全、使用功能, 也包含路面平整度、标识规范性、排水系统完备性、桥梁景观协调性等。这些要素共同形成良好的城市视觉体验, 有利于提高城市整体品质, 增强市民的归属感和认同感。外来投资者和访客也能从整洁有序的基础设施环境中得到城市管理水平高、发展势头好的信息^[2]。

作者简介: 于洋 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

2 市政道路与桥梁工程施工质量控制中存在的突出问题

2.1 施工人员专业素养不足, 质量意识薄弱

施工人员是市政道路与桥梁施工的核心主体, 其专业度和对质量的把控直接决定工程品质。当前, 部分市政工程施工队伍中, 劳动者多为缺乏系统知识培训过的人, 对道路桥梁施工工艺、技术标准和质量规范的了解程度不足, 操作有不规范之处, 很可能出现工序衔接不当、施工误差过大之类的问题, 让施工质量产生问题。同时, 部分施工人员质量意识薄弱, 存在重进度、轻质量的思想, 在施工过程中敷衍了事, 忽略设计图纸的要求和工程管理条例, 甚至为了缩短工期、降低成本, 违规操作、偷工减料, 导致施工质量隐患。此外, 部分施工人员专业能力不足, 对施工过程中存在的问题无法识别, 无法判断, 导致进一步加剧了施工质量隐患^[3]。

2.2 施工材料与设备管控不规范

施工材料与设备是市政道路与桥梁施工的物质基础, 其质量直接影响工程整体品质, 而当前部分施工项目存在材料与设备管控不规范的问题。在材料管控方面, 一部分建筑施工单位为降开销, 选用质量不过关的原料、构配件, 对材料进场检验制度执行不严格, 对材料的规格、型号、性能等审核把关不严, 致使劣质原材料进场, 降低施工品质。同时, 材料储存、保管方式不当, 易造成材料变质、损坏, 降低材料性能。在设备管控方面, 部分施工设备老化、性能下降, 未及时进行维修保养, 施工的过程中容易出故障, 使施工进度和质量受到影响; 部分施工设备的选型不合理, 与施工工艺、工程规模不契合, 不符合施工质量要求。

2.3 施工工艺与流程管控不到位

市政道路与桥梁工程施工工艺复杂、工序繁多, 对施工流程的规范性和工艺的合理性要求较高, 而当前部分施工项目存在施工工艺与流程管控不到位的问题。另外, 一些施工方未能因地制宜, 结合当地内外环境合理安排施工方案, 施工工艺选定不适合, 不满足工程设计要求以及现场施工条件, 造成施工质量不合格。在施工流程方面, 工序衔接混乱, 缺乏有效的衔接机制, 前一道工序未完成验收就进入下一道工序, 易导致工序质量隐患叠加。同时, 对隐蔽工程的管控缺失, 隐蔽工程完工之后未马上开展检验验收, 易产生回填不实、钢筋间距不达标、混凝土浇筑不规范的情况, 后

期整改比较难搞, 使工程结构稳定性受到直接影响^[4]。

3 市政道路与桥梁工程施工质量控制措施

3.1 强化人员专业度, 提升专业素养与质量意识

施工单位应当从制度上建立起系统的人才选拔和培养体系, 把人员能力建设当作质量管理的基础性工作。在人员选用上, 应当先选配具有相应资质、有经验的技术人员和管理人员, 关键岗位实行持证上岗制度, 保证人员的能力与岗位的要求相适应。其次要建立常态化的培训体系, 就施工工艺流程、技术标准、质量规范和安全操作要求展开分层分类的培训工作, 用案例分析、现场实操和技术交底等途径来提升一线人员对于规范要求的认识和执行水平。对新工艺、新材料的使用应组织专项培训, 防止由于认识不到位而造成质量事故的发生。质量意识的培养要依靠制度约束和文化引导相融合的方式来加强全过程质量控制的理念。施工单位可以将工程质量指标纳入绩效考核体系当中, 细化到班组和个人, 建立以质量结果为依据的奖惩机制, 对施工质量好的人员进行奖励, 对违规操作的行为进行处罚, 以此来形成明确的导向。

3.2 严格材料与设备管控, 筑牢质量基础

严格材料与设备管控, 是保障市政道路与桥梁施工质量的物质前提。施工单位在材料管理过程中要建立完善的材料采购管理制度, 选择具有资质和信誉的供应商, 明确材料的质量标准, 从源头上杜绝不合格材料进入施工过程。材料进场时, 切实落实检验制度, 对材料的规格、型号、性能等做严格的检测, 检测判定合格之后才可进场使用, 杜绝不合格材料进入施工阶段。同时, 规范材料储存、保管流程, 根据材料特性采取相应的储存方式, 做好防潮、防晒、防损坏措施, 确保材料性能稳定。在设备管控方面, 结合工程施工需求, 合理选型施工设备, 确保设备性能与施工工艺、工程规模相匹配; 制定设备维修保养的制度, 定期对设备进行检修保养, 及时把老化、损坏的零部件换掉, 保证设备一直保持良好的运行状态; 加强设备操作人员培训, 提升其专业操作能力, 规范设备使用流程, 避免因操作不当影响施工质量^[5]。

3.3 完善施工过程管控, 强化细节质量控制

施工阶段是工程质量形成的重要阶段, 要不断健全全过程管理机制, 加强各方面的质量控制, 保证每一个工序都符合规定的标准。施工单位应根据项目实际情况, 合理制订施工组织方案, 明确施工工艺、施工

流程和质量控制要点,指导现场施工。切实落实工序验收制度,每一项工序施工完成之后,要经自检、互检、专检确认合格之后,才可开展下一道工序,避免工序产生质量相关的隐患。加大隐蔽工程的管控工作,安排专人现场监督,施工完成后及时进行检验验收,做好验收记录,确保隐蔽工程质量。强化施工细节管控,重点关注路基压实、路面摊铺、桥梁钢筋绑扎、混凝土浇筑等关键环节,严格控制施工误差,规范施工操作,及时发现和纠正施工中的细节问题,确保工程质量符合设计要求和相关标准。

3.4 加强质量监督力度

加强质量监督力度,是保障市政道路与桥梁施工质量的重要手段。施工单位应建立内部质量监督部门,配备专业的质量监督人员,厘清监督相关的责任,对施工的整个过程做常态化监督检查,重点排查施工质量相关的隐患,及时督促改进,保障施工质量。同时,接受建设单位、监理单位的监督,配合其开展质量检查工作,对提出的整改意见及时落实到位。主动接受行业主管部门的监督检查,严格执行相关法律法规和质量标准,规范施工行为。建立完善的质量问题登记

表 1 道路与桥梁工程关键质量目标与监控指标

工程类别	控制指标	目标值 / 标准	检测放方法
道路工程	路基压实度	$\geq 95\%$	灌砂法
	路面平整度	$\leq 3\text{ mm}$	平整度仪
桥梁工程	混凝土强度	$\geq$ 设计值	抗压试验
	主梁挠度	$\leq L/800$	位移计

施工工艺、强化过程监督,严格按表 1 中监控指标对每一道工序进行管控,让路基压实度处在规范的范围当中。同时,严格管控沥青、砂石等原材料质量,规范施工设备操作,最终工程一次性验收合格,投入使用后未出现路面破损、沉降等质量问题,通行体验良好。该案例表明,确立质量目标、加大指标监控、实施管控举措,可以有效提高道路工程施工质量,为同类市政道路工程质量管控提供实践方面的参考。

5 结束语

市政道路及桥梁工程施工质量控制是一项系统且复杂的工作,直接影响城市基础设施的安全稳定和城市高质量发展。市政道路与桥梁施工质量控制需贯穿施工全流程,强化人员、材料、设备、工艺等各环节,落实质量责任,才能有效规避质量隐患。未来要顺应行业发展趋势,结合新型建造技术与绿色发展要求,

制度,将发现的质量问题分类整理,确定责任单位、整改措施和完成时间,保证各类质量隐患及时得到整改落实,不断提高施工质量。

3.5 建立质量追溯体系,强化长效治理

建立质量追溯体系,是强化市政道路与桥梁施工质量长效性的重要举措,能够实现施工质量的全程可追溯、可管控。施工单位应结合工程特点,建立完善的质量追溯体系,明确追溯范围、追溯内容和追溯流程,覆盖施工全流程。对每一道工序、每一批材料、每一台设备详细记录做好,明确责任主体、施工时间和质量好坏,形成完善的质量追溯资料集,若检测到质量问题,可依靠追溯体系迅速找出问题的根源,避免质量问题扩大化。

4 道路工程质量控制案例分析

某城市主干道改造工程,全长 3.2 公里,主要涉及路基翻新、路面摊铺、排水系统改造等内容。该项目改造前出现过路基压实度不满足规范的问题,施工过程中严格落实前文所述质量规范要点,重点围绕关键质量目标开展管控工作,其关键质量目标与监控指标详见表 1。施工改造期间,通过强化人员培训、改良

优化质量管控模式,完善行业规范体系,提升规制水平,建设更多优质的市政工程,为城市发展以及市民的出行提供保障。

参考文献:

- [1] 陈明.市政工程施工道路与桥梁施工质量管理要点分析[J].中国建筑金属结构,2026,25(03):172-174.
- [2] 朱长远.市政工程施工道路与桥梁施工质量管理探析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(14):196-198.
- [3] 常学鑫.市政工程施工道路与桥梁施工质量管理探析[J].建材发展导向,2023,21(24):48-50.
- [4] 叶灿军.市政工程施工道路与桥梁施工质量管理探析[J].安徽建筑,2022,29(10):184-186.
- [5] 马泽林,尹月华,贾志贺.市政道路桥梁施工中现场施工技术的应用与管理[J].运输经理世界,2024(05):61-63.

道路桥梁工程中电力管线预埋施工技术研究

苏浩宇¹, 韩金辉²

(1. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南 250100;

2. 斯比凯可(山东)生物制品有限公司, 山东 日照 262300)

摘 要 在道路桥梁工程建设中, 电力管线的预埋施工工作是保障工程后续电力供应维持稳定状态、提升工程整体质量的重要环节。本文紧密结合道路桥梁工程施工的实际情况, 系统性梳理电力管线预埋施工前期需关注的准备要点, 分析测量放线、管线敷设等核心施工技术, 探讨管线偏移、破损、防腐失效等常见的质量隐患及其防控举措, 从施工流程、施工技术、管理体系三个层面提出相应的优化策略, 旨在规范预埋施工的流程, 提高施工的精准度与质量, 为道路桥梁工程电力管线的预埋施工提供参考, 推动相关施工技术朝着规范化、精细化的方向发展。

关键词 道路桥梁工程; 电力管线; 预埋施工; 施工质量

中图分类号: U415; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.019

0 引言

随着我国基础设施建设的不断推进, 道路桥梁项目的功能性要求持续提高, 电力管线是保障项目正常运转的配套设施, 其预埋施工的品质直接关乎项目的使用期限与使用感受。目前, 在部分道路桥梁项目的电力管线预埋施工中, 存在施工流程缺乏规范、技术运用不够到位、质量管控薄弱等问题, 容易引发管线偏移、破损、防腐功能失效等隐患, 对电力供应的稳定性造成影响。基于此, 探究道路桥梁工程中电力管线预埋的施工技术, 整理施工的关键部分、隐患防控办法以及优化举措, 对于提高工程整体的施工水平、确保工程长久稳定地运行具有重要意义。

1 电力管线预埋施工前期准备

1.1 图纸与材料准备

电力管线预埋施工前, 需严谨开展施工图纸的会审事宜, 安排技术人员、施工人员以及设计人员深入沟通, 清晰地确定管线预埋的地点、规格、走向以及深度要求, 认真核查管线和桥梁桩基、钢筋结构、排水管道等之间的位置关联, 及时察觉并修正图纸中存在的冲突与不合理之处, 保证施工图纸能够充分契合实际施工的需要, 从而为后续的施工提供精准参照^[1]。在材料领域, 要妥善开展施工材料的选型以及检验工作, 对于电力管线, 应选用强抗压、耐腐蚀、抗老化的材料, 在材料进场之前, 要严格审查其规格、型号

以及质量证明文件, 并对管材、接口配件等实施抽样检测, 杜绝将不合格的材料用于施工中。

1.2 人员与场地准备

在人员层面, 组建专业的施工技术团队, 清晰界定施工流程、技术规范以及质量准则, 着重增强施工人员操作的规范性和责任观念, 以保证施工中的各项技术得以有效落实。在场地方面, 切实做好施工场地的清理事宜, 移除场地内的杂物和障碍物, 为施工营造有利环境; 进行前期测量放线工作, 需运用高精度的测量设备确定管线预埋的基准线和标高, 准确标记关键位置, 为后续各个施工环节提供精确的定位参照, 从而保障施工能够有序进行。

2 电力管线预埋核心施工技术

2.1 测量放线技术

测量放线作为电力管线预埋施工的首要关键步骤, 其精准程度直接关乎管线预埋位置的精确情况, 有利于规避管线出现偏移、错位等问题。在施工之前, 应依据施工图纸以及现场的基准点, 运用全站仪、水准仪这类高精度测量仪器, 针对管线的走向、预埋的深度以及接口的位置进行测量放线, 并清晰标注出管线的中心线、开挖的边线以及高程控制点。在测量操作期间, 需要多次复核, 以此保证测量数据的准确性。针对桥梁段的管线预埋工作, 需着重留意桥面铺装层以及梁体结构中的管线定位情况, 要结合桥梁结构的

作者简介: 苏浩宇(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路桥梁。

受力特性, 避开受力集中的区域, 以此防止管线由于结构变形而受到损坏^[2]。

2.2 管线敷设技术

管线敷设需要依据道路桥梁不同的结构部位, 运用敷设工艺, 保证管线敷设的规范性与安全性。在道路路基段进行管线敷设前, 要进行沟槽开挖, 在开挖过程中, 要做好边坡的防护工作, 避免沟槽坍塌, 沟槽的底部需要进行平整与夯实, 然后铺设垫层, 从而防止管线因为受到尖锐杂物的挤压而破损。在管线敷设时, 需运用人工或者机械吊装, 以此保证管线能够平稳地被放置到沟槽里, 管线相互之间的接口应密封严实, 要使用专门的接口配件, 并且要做好防腐处理, 以此防止接口渗漏。在桥梁的梁体段区域, 管线需要沿着梁体预先留下的槽进行敷设, 要固定牢固, 防止因为桥梁的振动而致使管线移位、破损, 在敷设过程中需要避开梁体钢筋分布密集的区域, 如果需要穿过钢筋, 就需要提前预留出孔洞, 不可随意切割钢筋, 以此确保桥梁结构完整。当管线敷设结束之后, 需即刻复核, 详细检查管线位置、精确标高、接口的密封情况等方面, 从而保证其能够契合施工要求。

2.3 防腐处理技术

在道路桥梁工程领域, 电力管线长期处于地下或者露天的环境下, 非常容易受到地下水的侵害、土壤的腐蚀作用以及大气的侵蚀等不良影响, 进而造成管线破损、老化, 对电力供应的安全性产生影响。在施工过程中, 需要依据管线材质与施工环境, 选取合理的防腐处理工艺。对于金属材质的管线而言, 第一步要除锈, 把管线表面存在的铁锈、油污等杂物清理干净, 从而保证管线表面干净平整, 随后涂刷防腐涂料, 涂料的涂刷应做到均匀、饱满, 不能存在漏涂、有气泡等问题, 涂刷的层数以及厚度要与设计的要求相吻合。

2.4 回填压实技术

管线的敷设以及防腐处理结束之后, 应及时回填压实, 以此防止管线遭到外力的挤压而破损, 并保证道路桥梁结构稳定。在进行回填之前, 要将沟槽里面的杂物与积水清理干净, 从而保证沟槽内部处于干净且干燥的状态, 回填所选用的材料应该是级配状况良好、没有尖锐杂物并且渗透性佳的土料, 要避免使用像冻土、淤泥以及建筑垃圾这类不符合标准的材料^[3]。在回填的过程中, 要采用分层回填、分层压实的办法, 每层回填厚度要控制在合理区间内, 可使用小型压路机或者打夯机压实, 压实的程度需要满足设计要求, 避免回填土沉降致使管线受到压力而发生变形。当进行桥梁段管线的回填工作时, 应结合桥梁结构所具备

的特点, 对压实的力度加以控制, 防止在压实的过程中对桥梁结构造成损害。在回填压实结束之后, 要开展压实度的检测工作, 只有在检测合格后, 才能够进入下一工序, 以此保证回填的质量能够达到要求, 进而为电力管线提供优良保护。

3 电力管线预埋施工质量隐患及防控措施

3.1 管线偏移隐患

电力管线预埋施工中, 管线偏移属于常见的质量风险, 其产生主要是由测量放线存在偏差、施工期间管线发生移位、回填压实操作不当等因素所造成, 这会对后续的电力设备安装以及电力供应产生不良影响。要对这一情况进行防控, 需要从根源之处着手, 增强对测量放线精度的把控程度, 在施工开始之前, 要多次对测量数据进行复查核对, 保证基准线和标高精准无误。在施工进程中, 要安排专人对管线位置进行监督守护, 防止管线因受到碰撞、挤压而出现移位的状况。在回填压实的操作期间, 需进行分层式的压实, 同时要管控好回填土的水分含量以及紧实程度, 这样做的目的是避免出现因回填土发生下沉现象而致使管线移位, 并且在施工中, 要定时复查管线位置, 一旦察觉到管线移位, 就要及时进行调整处理, 以此保证管线预先埋设的位置能够契合设计要求, 从根源上防止管线移位风险的出现^[4]。

3.2 管线破损隐患

管线破损主要的呈现形式为管材发生破裂、接口出现渗漏等问题, 而造成这种破损情况的原因包含了多方面, 如材料质量未达到合格标准、施工操作未遵循规范要求、在沟槽开挖期间管线受到损伤、回填土中存在尖锐的杂物等, 此类破损状况会引发管线出现漏水、漏电的现象, 进而对电力供应的安全性产生影响。针对这些状况所采取的防控措施, 首先需要对材料质量进行严格的把控, 对于进入施工现场的材料必须经过全面的检验, 杜绝使用质量不合格的材料。在施工的整个过程中, 要规范管线敷设的操作流程, 避免出现野蛮施工的行为。在进行沟槽开挖作业时, 要做好充分的防护措施, 防止挖掘机械与管线发生碰撞。在管线的搬运过程中应小心谨慎、轻拿轻放, 以避免管材受到不必要的损伤^[5]。在开展接口施工工作的时候, 需保证接口能够实现高度严密的密封状态, 同时要妥善地完成防腐方面的处理工作, 在进行回填作业之前, 要对沟槽内部存在的尖锐类杂物进行清理, 接着开展分层的铺设工作。在回填过程中, 要防止尖锐类杂物对管线造成挤压, 定期检查管线的完整情况, 一旦发现有破

损出现,要在第一时间修复,以此确保管线完好无缺。

3.3 防腐失效隐患

管线出现老化、破损状况,且其使用寿命被缩短,这往往由防腐失效所导致,而防腐失效主要是因为防腐材料质量未达良好水平、防腐施工未遵循规范、后期维护工作存在欠缺等因素造成。针对这一情况,防控措施方面,要挑选质量性能优异的防腐材料,保证所选材料契合设计的具体要求以及相关的标准规定,要让防腐施工流程符合规范,严格依据施工技术标准来开展除锈工作、涂刷防腐涂料,保证涂料能够均匀地涂刷,且涂刷厚度达到规定标准,同时要确保接口的防腐密封工作做到位^[6]。当施工结束之后,要着重强化后期的维护工作,按照既定的时间安排,对管线的防腐层展开全面且细致的检查工作,一旦察觉到涂层出现脱落或者破损的状况,必须立刻修补,有效避免腐蚀性物质与管线相接触,进而增强管线的防腐能力,防止出现防腐失效等潜在的隐患问题。

4 电力管线预埋施工技术优化策略

4.1 施工流程优化

施工流程的优化是让电力管线预埋施工质量得以提升的根基,这需要与道路桥梁工程实际的具体工况相结合,构建起具备科学性与规范性的施工管理体系。要清晰界定测量放线、管线敷设、防腐处理、回填压实等各个核心施工环节的技术标准、责任分配以及时间节点,破除各工序之间存在的衔接阻碍,对施工过程中可能会出现工序断档、衔接不顺畅等状况提前作出预判,并且拟定具有针对性的应对举措,防止因为工序衔接方面的漏洞而造成施工延迟或者质量方面的潜在风险。与此同时,对施工流程中的冗余部分进行全方位梳理,简化没必要的操作步骤,优化工序的衔接次序,增强施工流程的合理性和高效性,保证各环节的施工能够有秩序地推进,为后续各类优化技术的落地实施提供稳固流程支撑,在提升施工质量的同时也提高施工效率。

4.2 施工技术优化

施工技术优化的主要目的是提高电力管线预埋施工的精确程度和工作效率,重点在于采用先进的施工技术以及专业的设备,摒弃传统人工操作存在的不足。选用高精度的测量仪器、自动化的管线敷设设备等,能够有效降低人工操作造成的误差,明显提高施工的精准程度。例如:利用无人机开展测量放线复核工作,不但可以极大地提升测量工作的效率,还能够保证测量数据的准确无误,为后续的施工提供可靠的支撑^[7]。

4.3 管理体系优化

管理体系的优化是让各项优化技术切实发挥成效的关键,这需要从人员管理以及质量管控这两个核心维度着手。对于人员管理而言,要强化施工人员的专业培训工作,依据电力管线预埋施工所涉及的技术要点以及规范要求,开展具有针对性的培训活动,着重提高施工人员的专业技能、操作的规范性以及责任意识,以此保证各项技术措施能够严格且准确地落实到位。在质量管控方面,要构建一套完善的全过程质量管控体系,加大对测量放线、管线敷设、防腐处理等关键施工环节的检测强度,定期进行质量的排查工作,及时察觉施工过程中出现的质量问题,并迅速进行整改,推动电力管线预埋施工朝着精细化、规范化的方向迈进,确保施工质量稳定可控。

5 结束语

电力管线预埋施工是道路桥梁工程建设中的重要组成部分,其施工质量会对工程的使用功能、运行的安全性以及使用寿命产生直接影响。本文通过对道路桥梁工程中电力管线预埋施工技术进行系统性的研究,明确了施工前期预备、核心施工技术、质量隐患防控以及施工技术优化等关键点。在施工前期,要做好像图纸会审、材料检验等准备工作,从而为施工奠定基础;在核心施工阶段,需要着重把控诸如测量放线、管线敷设等技术,以此确保施工合乎规范;针对各种常见的质量隐患,要采取具有针对性的防控手段来避免问题出现。通过对施工流程、施工技术、管理体系这三个维度进行优化,能够有效提高施工的质量与效率,为道路桥梁工程的安全高效运转提供支持,同时也为同类型的工程施工提供实践借鉴。

参考文献:

- [1] 胡丽丽. 电力管线顶管施工上方道路沉降变形预测分析[J]. 四川水泥, 2024(04):35-37.
- [2] 吴发展, 侯明鑫. 复杂城市环境地铁项目电力管线迁改[J]. 科学技术创新, 2023(13):156-159.
- [3] 陈磊. 深基坑开挖对既有电力管线影响的研究[J]. 江西建材, 2023(03):65-68.
- [4] 吴杰, 李志勇. 拖拉管等疑难隐蔽管线探测技术方法研究[J]. 中国高新科技, 2022(16):158-160.
- [5] 王斌彬, 阳潜. 市政道路电力管线迁改施工安全评估及控制研究[J]. 价值工程, 2022, 41(23):14-16.
- [6] 李金书. 顶管下穿运营高速铁路桥梁安全影响分析[J]. 铁道建筑技术, 2022(02):84-88.
- [7] 吴文娟, 王振飞. 公路隧道近距离下穿电力管线施工技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(05):220-225.

改性沥青材料在市政道路施工中的应用及性能分析

黄留男

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 231131)

摘 要 为解决传统沥青在市政道路施工中高温易软化、低温易开裂、抗水损害能力弱等问题, 适配不同场景道路建设需求, 本文以 SBS、SBR 改性沥青及改性沥青乳液等常用类型为例, 对改性沥青材料的特性、施工应用及性能展开系统研究。明确各类改性沥青的适配场景, 梳理其在路面面层、基层底基层及特殊场景的应用方法, 分析核心性能评价指标与施工中的性能影响因素, 提出针对性性能优化策略。结果表明, 改性沥青可显著提升道路抗车辙、抗裂等核心性能, 合理选用材料、规范施工工艺能有效延长道路使用寿命。

关键词 改性沥青材料; 市政道路施工; 性能评价; 绿色低碳

中图分类号: U416.217; U414

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.020

0 引言

当前我国公路交通朝着“一网四化”方向高质量发展, 重大公路项目建设持续推进, 重载交通、极端气候及绿色低碳需求对道路工程质量提出更高标准。传统沥青存在高温软化、低温开裂等固有短板, 已难以适配现代道路建设的多元场景。改性沥青通过改性剂优化配方, 可显著提升道路抗车辙、抗裂等核心性能, 契合交通强国战略下道路提质增效、安全韧性提升的发展要求。本文结合行业发展趋势与工程实际, 聚焦常用改性沥青类型, 探究其施工应用路径与性能特征, 分析影响因素并提出优化策略, 为道路工程高质量建设提供技术参考, 助力绿色、高效、耐用的现代化公路网络构建。

1 改性沥青材料的核心类型及特性概述

1.1 常用改性沥青材料类型

不同类型改性沥青材料基于改性剂差异, 形成适配不同施工场景的核心特性, 各类材料的改性原理与应用场景呈现明确的对应关系, 不存在功能重叠或冲突。SBS 改性沥青以弹性体为核心改性剂, 通过改变沥青分子结构增强材料弹性与韧性, 专门适配高速公路、重载交通路段等高负荷道路场景, 能有效抵抗车辆长期碾压产生的变形。SBR 改性沥青属于橡胶类改性材料, 通过橡胶颗粒的填充与交联作用, 重点强化沥青的抗

裂性能与抗老化能力, 多用于温差适中、对耐久性有基础要求的城市道路^[1]。改性沥青乳液以水为分散介质, 无需高温加热即可施工, 施工便捷性突出, 特别适配低温环境、应急抢修等需要快速施工的场景, 能缩短施工周期并减少能源消耗。

1.2 改性沥青材料的核心共性特性

改性沥青借助改性剂掺配, 明显优化传统沥青的关键性能, 满足道路施工高标准要求, 其共性特性围绕道路使用的核心需求展开, 相互补充并形成完整的性能体系。与传统沥青相比, 改性沥青的高温稳定性大幅提升, 借助改性剂与沥青分子的协同作用, 提高材料软化点与抗变形能力, 有效减少高温环境下车辆碾压带来的车辙病害, 延长路面使用寿命。低温抗裂性的增强核心是改性剂改善沥青的低温脆性, 使材料在温差较大的区域仍能保持较好的柔韧性, 避免低温收缩生成裂缝, 适配北方严寒地区与昼夜温差显著的山区道路施工。抗水损害能力的改善则借助优化沥青与集料的界面结合, 减少水分渗透对路面结构的破坏, 降低路面渗水、集料剥落等病害的发生概率, 适配多雨、潮湿地区的道路建设。黏结性能的强化进一步强化沥青与集料的结合度, 确保路面结构整体性, 减少松散、推移等问题, 为道路整体承载力提供基础保障, 适配各类等级道路的施工需求。

作者简介: 黄留男 (1982-), 女, 专科, 工程师, 研究方向: 市政路桥。

2 改性沥青材料在道路施工中的应用策略

2.1 在市政路面面层施工中的应用

改性沥青材料要与不同面层类型搭配起来,借助合理施工工艺把它的性能优势发挥出来,让面层质量得到提升,不同等级道路和特殊场景的面层施工,对改性沥青的性能侧重和应用有着显著区别。高速公路、一级公路的上面层直接承受车辆荷载和外界环境侵蚀,选高性能改性沥青并且优化施工工艺,重点加强材料的抗车辙和抗滑能力,保证路面在长期高负荷运行下能维持平整、耐磨,保障行车安全和舒适感^[2],次干道、支路面层施工要兼顾经济性和实用性,选性价比合适的改性沥青,在满足基本抗裂、抗老化需要的基础上,控制施工成本。适配城市支路、乡镇道路等交通流量适中的路段,路面铺装面层施工面对车辆冲击、雨水侵蚀和结构振动等多重挑战,需要选抗疲劳、黏结性强的改性沥青。通过精准控制摊铺厚度和碾压参数,减少路面裂缝、脱层等病害,避免因铺装损坏影响道路结构安全,实现路面铺装的长效稳定。

2.2 在路面基层与底基层施工中的应用

改性沥青材料运用在基层和底基层中可以使结构承载力得到增强,使道路整体使用寿命延长。基层和底基层作为道路结构的承重关键部位,承担着分散车辆荷载以及支撑面层的重大职责,其决定了道路的整体稳定程度和使用寿命。改性沥青的应用需符合不同结构层的功能要求,做到性能和功能间的精确配合,改性沥青稳定碎石基层通过将改性沥青与碎石均匀混合在一起,结合改性沥青的黏结力与韧性,优化碎石集料的级配特点,增强基层的强度以及抗变形性能。这样可以有效分散车辆荷载,让荷载均匀传到路基,降低基层沉降与开裂,为面层提供坚实支撑,防止由于基层损坏造成面层产生裂缝和沉陷等病害。改性沥青掺配在底基层中的运用更加强调改善基层整体性,底基层作为基层的支撑体系,它的整体性直接作用于基层的稳定程度,需严格控制改性沥青掺配比例,填充底基层集料空隙,加强集料间的黏结强度,减少裂缝出现与传递,防止底基层病害向上扩展影响面层结构稳定性。这有助于增强底基层的抗水损害性能,避免水分侵入引起底基层软化和松散。陡坡与弯道路段的基层施工面临更大剪切力以及侧向推力,这些路段车辆行驶过程中会产生额外侧向应力,容易造成基层滑动与变形,需要加强改性沥青的应用,选择高韧性以及抗剪切性能出色的改性沥青材料,改进拌

合与碾压工艺,提升基层抗剪切性能与整体性,防止基层滑动与变形,确保特殊路段道路结构的稳定性和安全性,避免由于基层不稳定带来的道路安全隐患。

2.3 在特殊场景道路施工中的应用

为了满足极端环境和特别功能上的需要,改性沥青材料能够通过定制化使用来解决特殊路段施工中遇到的难题。不同特殊场合的环境特点和功能需求存在差别,改性沥青的配比和应用方法要做到准确对应,才可以充分发挥材料的作用,保障道路施工品质和使用寿命。在高温地带道路施工过程中,高温环境持续影响会让沥青变得柔软、黏性下降,容易产生车辙、推移等道路问题。选用添加耐高温改性剂的定制化改性沥青,通过改变材料分子结构来提升高温稳定性和黏性,抑制路面车辙产生,能够加强材料的抗老化性能,确保道路在高温环境下依旧可以保持良好状态,适应南方夏季高温区域。寒冷地区道路施工要面对低温冻融循环的挑战,低温会造成沥青脆化,冻融循环会加剧路面裂缝的产生和延伸,要优化改性沥青低温抗裂配比,降低材料脆点、提高低温延展性,增强材料在低温环境中的柔韧性,减少冻融过程中出现的裂缝,避免裂缝扩展引发路面破坏,适应北方严寒地区冬季低温、春季冻融的气候特点^[3]。重载交通道路需要承担大型车辆的长期冲击和碾压,车辆荷载大、通行次数多,容易引起路面出现沉陷、裂缝、车辙等病害,选用高韧性、高承载力的改性沥青,提升材料的抗冲击能力和抗疲劳性能,抵抗重载车辆碾压带来的变形和损坏,延长重载路段的服役时间。透水路面施工过程中,改性沥青需要符合透水结构的要求,在保证黏结性和承载力的前提下,优化材料孔隙结构,确保路面具备良好的透水性能,迅速排除路面雨水,防止积水影响行车安全。这样还能够兼顾排水功能和路面强度,解决传统路面排水不畅的问题,提高道路通行安全性,满足城市海绵道路建设需要。

3 改性沥青材料的关键性能评价与优化方向

3.1 改性沥青材料核心性能评价指标

科学的性能评价指标能够准确判断改性沥青材料的适用性,为施工应用提供依据。各种评价指标对应改性沥青的核心性能,指标设置科学、准确,可以完整反映材料实际应用中的合适程度。高温性能评价以软化点、动稳定度作为核心指标,软化点直接体现材料在高温环境中的抗软化性能,动稳定度衡量材料在长期荷载作用下的抗变形能力,两者结合能准确评估

改性沥青的抗车辙能力,判断材料是否适合高温地区与高负荷道路施工。低温性能评价集中在脆点与低温延度,脆点体现材料在低温环境中的抗脆裂能力,低温延度表现出材料在低温下的柔韧程度,依据这两项指标可以清楚判断改性沥青的抗裂性能,为严寒地区道路施工的材料选择提供支持。水稳性评价采用浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验。浸水马歇尔试验检测材料在浸水状态中的强度保持比率,冻融劈裂试验评估材料经过冻融循环以后的抗裂性能,两项试验一起检测改性沥青的抗水损害能力,确保材料适合多雨、潮湿地区施工。黏结性能评价以黏结强度作为核心指标,直接衡量改性沥青与集料的结合效果,指标合格能够保障路面结构的整体性,避免出现集料松散、脱层等状况,为各类道路施工的材料应用提供基本判断依据^[4]。

3.2 施工过程中的性能影响因素分析

施工过程中各个步骤的操作规范程度直接关系到改性沥青材料性能的发挥,需要精准把握关键的影响因素,各类影响因素之间彼此关联,任何一个环节操作出现偏差都会导致材料性能无法得到充分发挥,甚至引起路面病害现象。改性剂掺配比例是核心影响因素,不同种类改性沥青的改性剂掺配比例都有明确标准,比例偏高会带来施工成本上升并且可能让材料脆性变大,比例偏低则不能达到预期改性效果,直接干扰材料的高温稳定性、抗裂性等核心性能。拌和温度与时间的把控极为关键,拌和温度偏高会损害改性剂与沥青的分子结构,造成材料性能下降,温度偏低则不能实现改性剂与沥青的均匀融合,出现拌和不均匀的状况。拌和时间不够会导致材料混合不充分,时间偏长则会引起材料老化,干扰改性沥青的最终性能。摊铺同碾压工艺的规范操作直接决定路面成型质量,摊铺速度过快、厚度不均匀会引起路面平整度差^[5]。碾压压力不足、次数不够会造成路面密实度不够,容易引发松散、车辙等病害,碾压过度则会破坏材料结构,降低路面柔韧性。施工环境中的温度、湿度同样干扰材料性能,高温、高湿环境会干扰材料凝结速度与成型质量,低温环境则会引起材料凝结缓慢,甚至出现冻裂问题,需要依据环境条件来调整施工参数。

3.3 改性沥青材料性能优化策略

面对性能不足和施工带来的各种影响,通过有针对性的改进,可以提高改性沥青材料的应用效果。改进措施主要包括材料配方、施工办法、环境管理和技术研究等方面,建立完善的改进机制。改动改性剂的

搭配方式是其中最关键的一步,要结合不同施工场合对性能的具体要求,定制专门的方案。例如:在温度高的地方,重点增加耐高温改性剂的比例,寒冷地区就多加入一些抗开裂的改性剂,对于重型车辆多的路段,则要加大弹性体改性剂的用量,做到材料性能和施工场合的准确对应。要实现施工工艺的规范化,需对拌和、摊铺、压实全流程的关键参数进行明确界定:针对不同类型的改性沥青,精准匹配拌和温度与时长;严格管控摊铺速度及厚度;通过试验确定最优压实压力与遍数。通过以上措施,杜绝不规范操作引发的材料性能衰减,确保改性沥青的路用性能得到充分发挥。强化施工环境管理需要提前预测环境的变化,避开高温、严寒、暴雨等极端天气施工,高温天气调整施工时间并且采取降温手段,低温天气做好保温防护,潮湿天气控制好施工湿度,减少环境因素对材料凝结和成型质量的干扰。开发新的改性剂可以从根本上提高材料的整体性能,要围绕环保、高效、耐用等方向,研发出新型环保改性剂来替换传统的高污染成分,提升材料抗老化、抗水损害的性能,同时加强材料的适用性,满足各种特殊场合的施工需要。

4 结束语

改性沥青材料凭借优化后的各项性能,有效弥补了传统沥青的应用短板,成为现代道路施工中适配不同场景、提升工程质量的核心材料,在高负荷、极端环境等不同道路施工场景中发挥着不可替代的作用。规范的应用策略与性能管控的结合,能最大程度地发挥材料优势,减少路面病害,保障道路结构稳定与长效使用。未来需持续优化改性剂配比与施工工艺,研发更环保、高效的特种改性沥青,结合不同地域环境与道路需求细化应用方案,进一步推动改性沥青材料在道路工程领域的高质量应用,助力道路建设提质增效。

参考文献:

- [1] 郭浩天.聚氨酯改性沥青材料在道路养护中的研究进展[J].合成材料老化与应用,2025,54(02):63-66.
- [2] 史亚峰.城市路面沥青材料的水稳性改造的意义与方法改进[J].合成材料老化与应用,2021,50(05):153-156.
- [3] 孟瑶,韩笑薇.城市道路沥青路面裂缝施工处理技术分析[J].四川建材,2021,47(10):141,143.
- [4] 卢义琴.市政道路施工中新材料的应用分析[J].运输经理世界,2021(25):146-148.
- [5] 万君伟.市政道路桥梁沉降段路基路面施工技术要点[J].工程建设与设计,2025(19):206-208.

铸造车间机械运维管理体系优化研究

卞永强, 杨广辉*, 蔡婉静

(济南慧瑞铸造机械有限公司, 山东 济南 250002)

摘 要 铸造车间机械装备是生产核心支撑, 其运维管理水平直接关联生产连续性与产品质量。当前铸造车间机械运维普遍存在模式滞后、标准不统一、管控不到位等问题, 制约行业高质量发展。本文通过梳理铸造车间机械运维现状, 剖析现存体系的核心短板, 结合行业实践经验与技术规范, 从运维模式、标准体系、管控机制三个方面提出优化措施, 完善运维流程与技术要求, 形成适配铸造车间生产场景的机械运维管理体系, 以期为铸造行业机械运维管理水平提升提供技术参考。

关键词 铸造行业; 铸造车间; 机械装备; 运维管理

中图分类号: TG23

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.021

0 引言

铸造行业作为装备制造业的基础环节, 机械装备的稳定运行是保障生产效率、降低生产成本的关键^[1]。随着铸造产业向智能化、绿色化转型, 传统机械运维管理体系已难以适配高温、高粉尘、高负荷的生产环境, 各类运维问题频发, 影响生产有序推进^[2]。本文针对当前铸造车间机械运维管理的突出矛盾, 通过系统分析运维体系的现存缺陷, 结合行业公开技术参数与实践案例, 制定科学可行的优化方案, 细化运维流程与管控要点, 构建高效、规范、可落地的机械运维管理体系, 助力铸造企业提升运维管理效能, 推动行业高质量发展。

1 铸造车间机械运维管理体系现状

1.1 运维模式现状

当前多数铸造车间仍沿用传统计划预期检修模式, 以固定时间周期为核心制定运维计划, 未充分结合设备实际运行状态调整。该模式依赖设备运转台时记录制定修理周期, 而台时记录多由操作人员填写, 存在及时性与准确性偏差, 易导致滞后修理或超项保养^[3]。部分车间采用事后维修模式, 故障发生后才开展抢修, 大型熔炼炉年均非计划停机时间可达 145 h, 其中因维护不当导致的故障占比超 60%, 严重影响生产连续性, 难以适配现代铸造生产的高效需求。

1.2 运维标准现状

铸造车间机械运维标准缺乏统一性与针对性, 不同类型设备的运维流程、技术参数未形成明确规范,

部分标准沿用老旧规范, 未结合新型铸造机械的技术特点更新。现有标准多侧重设备完好率指标, 忽视运维经济性与实用性, 生产线设备大修及日常维修费用年均可达 350 万元左右, 而设备完好率维持在 90% 左右, 投入与产出不成正比^[4]。同时, 运维标准未充分考虑铸造车间高温、高粉尘环境对设备磨损的影响, 导致标准执行难度大、适配性差。

1.3 运维管控现状

铸造车间机械运维管控机制不完善, 缺乏专业的运维管控团队, 操作人员与运维人员职责划分不清晰, 易出现推诿扯皮现象。运维过程缺乏有效的监测手段, 多数车间未引入智能化监测设备, 仅依靠人工巡检判断设备状态, 难以发现潜在故障隐患, 单机事故性小修频率偏高^[5]。运维数据管理不规范, 未建立完善的设备健康档案, 运维记录零散, 无法为后续运维决策提供有效数据支撑, 管控效能低下。

2 铸造车间机械运维管理体系现存问题分析

2.1 运维模式不合理

传统计划检修模式脱离设备实际磨损状况, 对铸造自动生产线上的不同类型设备强制执行统一保养周期与作业范围, 无法适配设备差异化运行需求。铸造设备现场工作环境多变, 操作人员水平、日常维护保养质量差异较大, 均会影响设备磨损程度, 固定周期运维易导致盲目修理, 既增加运维成本, 又无法有效预防故障^[6]。部分车间未推行预防性检查, 忽视设备

作者简介: 卞永强 (1977-), 男, 专科, 研究方向: 机械铸造。

***通信作者**: 杨广辉 (1975-), 男, 本科, 研究方向: 机械设计及制造。E-mail: 1033998416@qq.com

运行过程中的状态监测，导致故障突发性偏高，进一步影响整条生产线的运行效率。

2.2 运维标准不健全

运维标准缺乏系统性，未涵盖铸造车间各类机械装备的运维全流程，从设备日常点检、定期维护到故障维修，均未明确具体的技术参数与操作规范。例如：布袋除尘器运维未明确滤袋更换周期与清灰参数，导致设备阻力波动较大，部分车间设备阻力超过 1 200 Pa，能耗大幅增加。标准更新不及时，未结合国家最新环保与安全标准调整，部分熔炼炉运维标准未满足 $PM \leq 10 \text{ mg/m}^3$ 的超低排放要求，同时缺乏运维经济性评价指标，导致运维工作缺乏成本意识。

2.3 运维管控不到位

运维人员专业素养不足，缺乏系统的技术培训，对新型铸造机械的结构、原理及运维技术掌握不熟练，难以应对复杂故障维修需求。运维监测手段落后，未引入物联网传感器、可编程逻辑控制器（PLC）等智能化设备，无法实现设备运行参数的实时采集与分析，关键工艺参数采集频率不足，易导致数据失真。运维考核机制不完善，未将运维效率、故障发生率、成本控制等指标纳入考核，难以调动运维人员的工作积极性，管控流于形式。

3 铸造车间机械运维管理体系优化原则与核心方向

3.1 优化原则

铸造车间机械运维管理体系优化需遵循实用性原则，结合铸造车间高温、高粉尘、高负荷的生产特点，制定贴合实际生产场景、可落地的优化措施，避免形式化^[7]。坚持针对性原则，针对不同类型铸造机械的运行特性与故障规律，制定差异化的运维方案，重点关注造型机、混砂机、熔炼炉等核心设备。兼顾经济性与安全性，在提升运维效能的同时，控制运维成本，落实安全运维要求，杜绝安全事故发生，确保运维工作与生产工作协同推进。

3.2 核心优化方向

运维体系优化需围绕运维模式、标准体系、管控机制三大核心方向展开，结合设备运行状态与行业技术规范，明确各方向的优化重点与技术要求。不同类型铸造机械的运行特性差异较大，通过梳理核心设备的运维需求，确定各设备的优化重点，为后续优化措施的制定提供依据，核心设备运维优化方向及关键参数梳理见表 1。

表 1 梳理了铸造车间 4 类核心机械的运维优化方向及关键参数，覆盖造型、混砂、熔炼、除尘四大关键工序。造型机以状态监测为核心，将检查周期设定为

表 1 铸造车间核心机械运维优化方向及关键参数

设备名称	优化方向	关键参数	参考标准
造型机	状态监测 + 按需维保	检查周期 200 h，合模力 500 kN ~ 800 kN	国标 GB/T 34388-2017
混砂机	润滑优化 + 故障预判	润滑油黏度 40 ℃ 时 46 mm ² /s， 转速 15 r/min ~ 25 r/min	国标 GB/T 34388-2017
熔炼炉	高温防护 + 环保运维	烟气排放 ≤ 20 mg/m ³ ，炉壁温度 ≤ 60 ℃	国家超低排放标准
布袋除尘器	清灰优化 + 滤袋维护	除尘效率 ≥ 99%，设备阻力 ≤ 1 200 Pa	行业标杆案例参数

200 h，契合其高频运行特性，合模力控制在 500 kN ~ 800 kN，保障造型精度；混砂机重点优化润滑系统，润滑油黏度参数符合设备运行需求，转速控制在 15 r/min ~ 25 r/min，减少设备磨损；熔炼炉聚焦高温防护与环保要求，烟气排放与炉壁温度参数满足国家及行业标准；布袋除尘器通过优化清灰流程，确保除尘效率与设备阻力达标，降低能耗。

3.3 优化实施前提

优化实施前需完成全面的设备排查，对铸造车间所有机械装备的运行状态、使用年限、故障历史进行系统梳理，建立完整的设备台账，明确各设备的核心短板与运维需求^[8]。梳理现有运维资源，整合运维人员、设备、资金等资源，明确资源配置方案，确保优化措

施落地有保障。开展运维人员专项培训，重点培训新型运维技术、设备操作规范及参数监测方法，提升运维人员专业素养，确保优化后的运维体系能够顺利执行，为后续优化实施奠定基础。

4 铸造车间机械运维管理体系优化实施措施

4.1 运维模式优化

摒弃传统固定周期检修模式，推行“定期检查 + 定项修理”的动态运维模式，以设备实际技术状况为依据，开展状态监测与故障诊断，突破周期制约，按需定项修理^[9]。组建由专业技术人员、操作人员、运维人员组成的检查团队，划分日常检查、周期检查、重点检查三类，日常检查每日作业后开展，周期检查按设备类型设定，输送设备 600 h、造型主机 200 h，

重点检查针对周期检查中无法确定的故障隐患开展。引入可编程逻辑控制器（PLC）实现参数秒级采集，合模力、射出压力等工艺参数采集频率 0.5 s，确保设备状态数据精准。

4.2 运维标准完善

结合行业标准与铸造车间生产实际，构建完善的运维标准体系，覆盖设备日常点检、定期维护、故障维修、报废全流程，明确各环节的技术参数、操作规

范与责任主体。针对不同类型设备制定差异化标准，细化运维流程与质量要求。通过梳理优化后的运维标准核心参数，形成核心设备运维标准参数表（见表 2）。

表 2 明确了 4 类核心机械的日常点检项目、定期维护周期及故障维修响应时间。造型机每月开展 1 次全面维护，日常重点点检合模间隙与液压系统压力，故障响应时间控制在 2 h 内，保障造型工序连续性；混砂机维护周期缩短至每 15 天 1 次，重点关注润滑油位与

表 2 铸造车间核心机械运维标准参数表

设备名称	日常点检项目	定期维护周期	故障维修响应时间
造型机	合模间隙、液压系统压力	每月 1 次全面维护	≤ 2 h
混砂机	润滑油位、搅拌叶片磨损	每 15 天 1 次全面维护	≤ 1.5 h
熔炼炉	炉壁温度、烟气排放	每 7 天 1 次全面维护	≤ 1 h
布袋除尘器	滤袋张力、设备阻力	每 10 天 1 次全面维护	≤ 2.5 h

搅拌叶片磨损，快速响应故障需求；熔炼炉作为核心设备，维护周期设定为每 7 天 1 次，故障响应时间不超过 1 h，避免高温故障扩大；布袋除尘器每 10 天维护 1 次，重点监测滤袋与设备阻力，确保环保达标。各项参数结合设备运行特性设定，兼顾运维质量与效率。

4.3 运维管控强化

建立专业化运维管控团队，明确操作人员、运维人员、管理人员的职责分工，将运维工作落实到个人^[10]。引入物联网传感器实时监测设备运行参数，监测关键参数，预测滤袋寿命误差 ±72 h，实现故障提前预判。完善运维数据管理体系，详细记录运维过程、故障情况、参数变化等信息，断网 72 h 可维持数据零丢失，为运维决策提供数据支撑。建立完善的考核机制，将故障发生率、运维效率、成本控制等指标纳入考核，故障发生率较优化前下降 54%，依据行业公开优化案例数据设定，充分调动运维人员积极性。

5 结束语

本文围绕铸造车间机械运维管理体系优化展开研究，针对现存运维模式不合理、标准不健全、管控不到位等问题，结合行业公开数据与实践经验，从模式、标准、管控三个方面提出优化措施，构建了适配铸造车间生产场景的动态运维管理体系，解决了传统运维体系与实际生产需求脱节的核心矛盾。但是，研究还存在一定不足，未覆盖小型铸造车间的运维特点，优化措施的长期适用性有待进一步验证。未来，可结合智能化技术，进一步完善设备状态监测体系，为铸造行业机械运维管理高质量发展提供更全面的支撑。

参考文献:

- [1] 张陈超. 项目管理到运营管理: 基建项目“后期管理”的创新模式 [J]. 销售与管理, 2026(07):123-125.
- [2] 边伟伟, 董飞, 曹松涛, 等. 船舶机械能效提升与绿色运维协同优化策略研究 [J]. 船舶物资与市场, 2026, 34(02): 57-59.
- [3] 刘文波. 智慧悬臂造桥机智能集成与全周期运维研究 [J]. 建材世界, 2026, 47(01):64-68.
- [4] 李行, 张晋. 智能制造技术在现代机械工程中的应用 [J]. 凿岩机械气动工具, 2026, 52(01):223-225.
- [5] 劳嘉良, 胡常伟, 赵翼翔. 考虑模具约束和工装生产的铸造车间作业计划联合方法 [J/OL]. 工业工程, 1-12. [2026-01-07] [2026-03-22]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=QLLcG2L0r2o6x19wv5o26gTCQD8yPE5yC7sc4E-CTsM9J9p6H3d1crQt5m7bF3VwHkwt1pb5DTa2btgVZ_2lqoOj6kOzlKTpSmV5tjOLdQUOP7QUdhcLSaZYyFoXA9AHjuGzjsIoepHdsXURRvyzH2K3RbQOiwDa2FExBBMxUCEGFVAOCVgHQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [6] 裴沛. 某铸造车间伴生散发类颗粒物测试与分析 [J]. 山西冶金, 2025, 48(11):74-76.
- [7] 张慧杰. 铸造车间循环风作用下高温污染物浓度蓄积及热蓄积计算研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2025.
- [8] 吴云祥, 余博, 王浩然. 原有车间内新增电炉的工程设计 [J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60(03):24-28.
- [9] 冯志明, 张涛, 王浩, 等. 某铸造车间电炉变压器室通风系统设计方案 [J]. 中国铸造装备与技术, 2024, 59(06):72-75.
- [10] 庄加玮, 陈庚阳, 刘楠楠, 等. 铸造车间热工艺伴生散发类高温颗粒物的污染特征研究 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2024, 36(05):84-92.

火电厂锅炉燃烧优化及节能减排技术分析

姚卫涛

(济南热电集团有限公司, 山东 济南 250002)

摘 要 为了提高火电厂的能源利用效率, 减少污染物排放, 实现可持续发展, 本文阐述了火电厂锅炉燃烧的基本原理和影响燃烧效率的关键因素, 如燃料特性、空气供给、炉膛温度等。详细探讨了常见的燃烧优化技术, 包括燃烧器改造、配风调整、智能控制系统应用等。同时, 介绍了多种节能减排技术, 如燃料预处理、余热回收利用、烟气净化处理等。通过节能减排技术的综合应用, 旨在为有效提升火电厂锅炉的性能、降低能耗与污染排放提供参考。

关键词 火电厂; 锅炉; 燃烧效率; 燃烧优化; 节能减排

中图分类号: TM621.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.022

0 引言

在能源需求不断增长且环保要求日益严格的背景下, 火电厂锅炉燃烧效率不仅直接关系到能源的有效利用, 还对环境质量有着重大影响^[1]。然而, 当前火电厂锅炉燃烧中存在许多问题, 使得锅炉的燃烧效率很难得到有效提升。一方面, 由于低质量煤不能完全燃烧, 导致资源浪费; 另一方面, 由于送风量和燃煤之间的配比不合理, 导致锅炉内不能充分燃烧。同时, 原有控制方式为固定式控制, 不能及时地对实际情况做出调整。基于此, 开展火电厂锅炉燃烧优化及节能减排技术的研究具有重要的现实意义。

1 火电厂锅炉燃烧概述

火电厂锅炉燃烧是指将燃料所含有的化学能转变为热能的复杂过程, 其基本原理是在炉膛内燃料与空气混合后进行剧烈的氧化反应, 产生大量热量, 将水加热变成高温高压的水蒸气, 进而带动发电机发电。

对于燃料来说, 不同品种的燃料, 如煤、燃气等, 有着不同的燃烧性质, 其中煤中挥发分、固定炭等比例的不同, 会直接影响着火的难易程度和燃烧的稳定性的。高挥发分的煤很容易被点燃, 而且燃烧完全。而天然气有燃烧速度较快、清洁等优点。

空气供应是燃烧的重要因素。足够的空气可使燃料得到完全燃烧, 但空气量过大将带出大量热量, 降低锅炉的热效率; 空气量过小则会使燃料不能完全燃烧, 造成 CO 等有毒气体生成, 并影响其燃烧效率。因此, 对风粉比例进行精准控制, 是提高燃烧效率的关键^[2]。

在炉膛内温度方面, 足够的高温度可以加快燃料的着火和燃烧速度, 让燃料更加完全地发挥其作用。但温度过高会导致炉内结焦等情况的发生, 影响到锅炉的正常工作。此外, 燃料的粒度、形状等物理性质也会影响其燃烧效果, 粒度越小, 燃料比表面积越大, 与空气的接触越充分, 燃烧越快。

2 火电厂锅炉燃烧优化

2.1 燃烧器改造

在火电厂锅炉燃烧中, 对燃烧器进行改造后可改善这些问题的发生情况, 因此, 可通过喷嘴改进、燃烧器布置优化等方式实现燃烧效率提升目标。喷嘴改进可利用旋流喷嘴实现燃料与空气的有效混合。旋流喷嘴可以使进入的空气发生旋转, 增加空气与燃料之间的混合程度。旋转的气流使得燃料颗粒在炉膛中的分布更加均匀, 提高了燃料与氧气体积比, 增大了燃料与氧的接触面, 在一定程度上提升了燃料的完全燃烧情况。此外, 通过合理设置旋流强度以及旋流的方向, 可有效地控制火焰形状及火焰长度, 使得火焰更加平稳地在炉膛内进行燃烧, 进一步提高燃烧效率^[3]。

在燃烧器布置中, 可以通过对冲布置的方式实现, 即把前后墙燃烧器对冲布置, 在炉膛内部形成燃料及空气的强烈对撞以及混合作用。这种布置形式可以让燃料与空气得到更加充分的接触, 加强其稳定性与均匀性; 当两个方向上的气流发生碰撞的时候, 会形成一个强大的扰动作用, 促进煤粉均匀分布于炉内, 有利于完全燃尽。

作者简介: 姚卫涛 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热能动力工程。

2.2 配风调整优化

火电厂锅炉燃烧配风调整主要是根据锅炉运行工况、分级配风来调整。对于锅炉运行工况，负荷变动的时候配风也要随之发生改变，在锅炉低负荷工作的情况下，燃料也会相对地减少，这时应当减小一次风和二次风的风量，并确保空气中所占比例不会导致燃烧不稳定。锅炉满负荷后，在加煤的同时也要加大送入二次风，保证燃料完全燃烧。分级配风即将燃烧所需要的空气分为一次风、二次风甚至是三次风，并按照一定比例及送入时间进行送入，实现燃料能够实现分级燃烧（见图 1），这种方式可以有效降低氮氧化物（ NO_x ）的生成。其中，一次风先将煤粉送入炉膛中，供给一部分氧以供煤粉初步燃烧，二次风在适当位置及时间送入，能够提供燃烧所必需的大量氧气，促使燃烧的完全；三次风可以进一步调整燃烧过程，使燃烧更加稳定和高效。

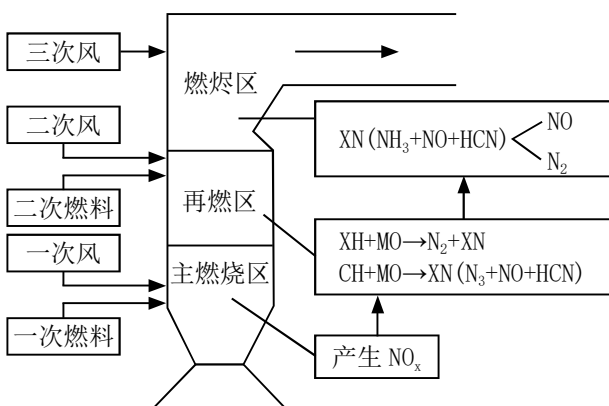


图 1 火电厂锅炉燃烧分级配风技术

2.3 智能控制系统应用

火电厂锅炉燃烧智能控制系统可对锅炉的运行参数（温度、压力、流量等）进行动态监控，并依据这些状态信息自动调节锅炉的燃烧状况，以达到最优燃烧状态。因此，可以采用分层式结构分为采集层、控制层和执行层进行智能化控制。

采集层的主要作用是实时、准确地采集锅炉各处的关键参数信息，包括温度、压力、流量、氧量、燃料量等，通过在锅炉不同的部位设置大量的高精度传感器，如在炉膛、过热器、省煤器等位置，保证数据可以全面、准确地获取各项数据。这些传感器将锅炉运行的细微变化及时转化为电信号或数字信号传输至控制层^[4]。

控制层接收到采集层传来的数据后，采用 PID 算法、模糊控制算法、大数据分析技术等，对锅炉运行参数进行深层次挖掘和分析，根据建立好的燃烧模型

模拟并预测不同条件下锅炉最优的燃烧情况。该模型会综合考虑燃料特性、空气供给、炉膛温度等多种因素，按照当前工况自动调节控制参数，实现最佳燃烧状态及最少污染排放量。

执行层按照控制层给出的命令，对燃烧器、风门、给煤机等实施控制。通过对燃烧器的喷油量和配风的比例及给煤机的给煤速度进行控制来达到对燃烧过程的控制。此外，执行层也具有一定的故障诊断和应急处理的功能，在发现有设备异常或者参数超过安全值的时候，可以及时做出相关处理，保证锅炉安全平稳运行。

3 火电厂锅炉燃烧节能减排技术

3.1 燃料预处理技术

为了提升火电厂锅炉的燃烧效果及降低污染气体的排放量，在实际运行中可采取对燃料进行预先处理的技术来实现这一目标。对于煤炭燃料，可通过洗选、制型煤以及制作水煤浆等方式对其进行预先处理。其中，洗选就是将煤块中所含有的矸石、硫分等杂质剔除出去，以达到提高煤炭质量、增加热值的目的，减少燃烧过程中 SO_2 等污染物的排放。型煤加工是指在粉煤中加入黏结剂等制成有一定形状及强度的型煤，以改善煤质的燃烧性状，使燃烧更为充分，减少烟尘排放量的过程。水煤浆制备则是将煤炭磨碎后与水、添加剂等混合制成水煤浆，具有良好的流动性和雾化性能，能提高燃烧效率，减少污染物生成^[5]。

天然气中通常会混有一些硫化物、水以及一些固体颗粒等，它们的存在会影响气体的燃烧效果，并对发动机造成腐蚀作用。因此，利用脱硫系统除去其中的硫化物，利用干燥系统将水分除去，再利用滤网清除掉其中的固体物质，则可以有效保证天然气的洁净程度，确保燃烧稳定性及充分性；结合锅炉燃烧工况特点对燃气中 CH_4 、 C_2H_6 等碳氢化合物进行控制，从而更好地满足燃烧需求，降低污染程度。

3.2 余热回收利用技术

火力发电厂锅炉余热回收利用，不仅能够提升能源利用率，还能够一定程度上降低能源浪费现象的发生概率，从而达到节能减排的目的。因此，可以采用烟气余热回收和排污水余热回收进行余热利用。

烟气余热回收是指利用热交换装置把锅炉排出的烟气所含有的热量传递给低温介质，在锅炉尾部的烟道上装设省煤器、空气预热器等装置来降低锅炉的排烟温度，提高空气和水的温度。其中，省煤器可以对烟气中蕴含的热量进行吸收，加热进入锅炉内部的给水，从而降低燃料使用量；而空气预热器则是将烟气

所蕴含的热量传递给锅炉所需要的燃烧空气，提高炉膛温度，加强燃烧，提高锅炉热效率。

排污水余热回收则是利用热交换的方式，把排污水中的热量传递给其他需要热量的介质。火电厂排污水一般都有很高的温度，蕴藏着很多的热量，可以通过安装合适的热交换装置，如板式热交换器等，将排污水中的热量传递给进锅炉的给水或者其他低温度的流体。这样一来，排污水温度下降的同时，被加热的介质温度上升，将这部分余热进行有效回收利用，既减少了排污水带走热量造成的损失，也减少了用来加热其他介质如给水所消耗的燃料，提高能源利用率。

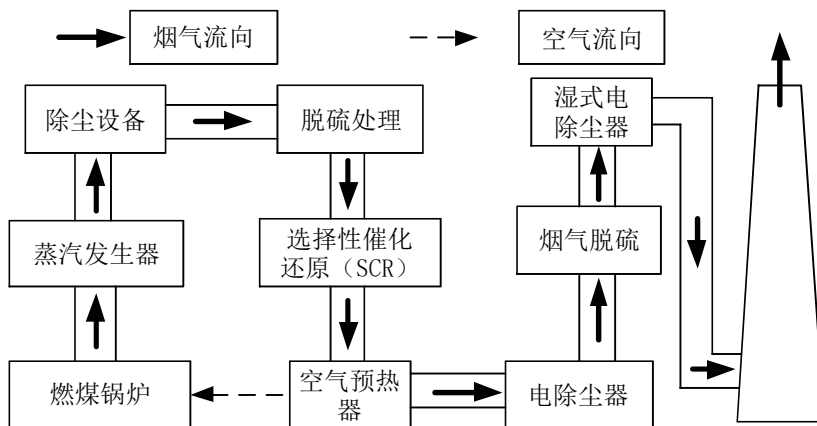


图 2 烟气净化处理流程

除去 SO_2 的方法，其特点是设备简单、占地少，但是脱硫率低。

脱硝技术主要分为选择性催化还原（SCR）和选择性非催化还原（SNCR），其中 SCR 就是利用催化剂，在催化剂作用下，将氨或者尿素作为还原剂，喷入烟气之中，使得 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O ，其脱硝效率可达到 80% ~ 90%；SNCR 是在较高温度下，将还原剂直接喷射到烟气之中，不需要使用催化剂。但脱硝效率偏低，一般为 30% ~ 50%。

除尘方式可分为静电除尘法和电袋复合除尘法。静电除尘法是利用高压电场使烟气中的颗粒物荷电，在电场力作用下被吸附在集尘板上而实现除尘的方法；电袋复合除尘技术将静电除尘及布袋除尘有机结合在一起，充分发挥各自的优势，进一步提升除尘效率，可实现更高的排放指标要求。

4 结束语

火电厂锅炉燃烧是一个复杂且关键的过程，涉及燃料、空气、温度等多方面因素。通过燃烧器改造、配风调整优化、智能控制系统优化等燃烧优化技术，

3.3 烟气净化处理技术

火力发电厂锅炉燃烧过程中会产生大量二氧化硫（ SO_2 ）、氮氧化物（ NO_x ）、颗粒物（PM）等，这些污染物对环境和人体健康造成严重危害。因此，采用高效的烟气净化技术进行处理。烟气净化处理技术主要有脱硫、脱硝和除尘三个方面（见图 2）。

脱硫可分为湿式脱硫及干式脱硫。湿法脱硫即使用碱性吸收剂，如石灰石—石膏法，将烟气中的 SO_2 经过吸收塔与吸收剂发生化学反应生成 CaSO_4 而被去除的技术手段。此方式脱硫效果较好，但设备投资大、运行费用高。干法脱硫是采用固体吸收剂或者吸附剂来

可有效提升燃烧效率。而燃料预处理、余热回收利用及烟气净化处理等节能减排技术，能在提高能源利用效率的同时，减少污染物排放。未来应持续深入研究这些技术，结合先进的科技手段，进一步优化火电厂锅炉燃烧过程，实现高效、清洁、绿色的发电目标，为能源可持续发展贡献力量。

参考文献：

- [1] 田琪. 基于火电厂锅炉燃烧优化技术的关键探究[J]. 科技与创新, 2026(04):210-212.
- [2] 戴江涛. 火电厂锅炉燃烧优化与能效提升[J]. 能源新观察, 2025(11):74-75.
- [3] 方路林. 火电厂锅炉燃烧优化调控技术在降低煤耗中的应用研究[J]. 锅炉制造, 2025(05):33-35.
- [4] 邱禄全. 基于人工智能的火电厂锅炉燃烧系统故障预测与诊断[J]. 现代制造技术与装备, 2024,60(10):131-133.
- [5] 乔建文. 火电厂锅炉节能减排技术研究[J]. 科技创新导报, 2019,16(19):122-123.

轨道交通供电系统可靠性与安全管理研究

王洪彬¹, 王瑾怡², 孙效飞³

(1. 莱西市交通运输局, 山东 青岛 266600;

2. 青岛青铁智慧城市服务运营管理有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 嘉祥光大环保能源有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要 本文围绕城市轨道交通供电系统运行可靠性保障与安全风险管控的核心工程需求, 全面梳理了轨道交通供电系统的整体架构与可靠性量化评价指标体系, 从设备本体、网架拓扑、运维管理、外部环境四个维度明确了制约系统可靠性的关键影响因素, 构建了涵盖网架结构优化、设备全生命周期管控、智能继电保护、闭环安全管理的可靠性提升与安全管理一体化技术体系, 确立了管控成效的量化评估方法。工程应用结果表明, 该体系能够显著降低供电系统故障发生频次, 提升系统供电可用率与故障应急处置效率, 可为城市轨道交通供电系统的安全稳定运行提供技术参考。

关键词 轨道交通供电系统; 供电可靠性; 安全管理; 风险识别; 继电保护

中图分类号: U231.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.023

0 引言

城市轨道交通供电系统是为列车提供牵引动力、为车站及区间运营负荷提供电力保障的核心能源基础设施, 其运行可靠性直接关系到轨道交通线路的运营安全、准点率与乘客服务质量。本文以轨道交通供电系统的可靠性核心特性为切入点, 系统阐述系统的核心组成与可靠性量化评定标准, 深入剖析了影响系统可靠运行与安全管控的各类关键因素, 构建一体化的可靠性提升技术框架与全流程安全管控机制, 确立管控成效的量化评估方法, 以期为轨道交通供电系统的设计优化、运维管理与安全防护工作提供参考。

1 轨道交通供电系统核心构成与可靠性评定指标

1.1 系统核心构成

轨道交通供电系统整体划分为外部电源系统与内部供电网络两个层级, 核心组成单元包括: 外部高压输电线路、主变电所、中压环网配电系统、牵引供电系统(含牵引变电所、整流机组、接触网/接触轨)、动力照明供电系统、继电保护与自动化监控系统、应急备用电源系统^[1]。该系统需要同时满足列车牵引过程中冲击性、波动性的负荷用电需求, 以及车站、区间动力照明等连续性负荷的稳定供电需求, 因此要求系统具备高运行可靠性、强抗外界干扰能力以及故障快速自愈能力。

1.2 可靠性核心量化指标

建立多维度的可靠性量化评定指标体系, 核心指标包括: 供电可用率, 即系统有效供电时间占总运营时间的比例, 城市轨道交通核心线路要求不低于 99.99%; 平均无故障工作时间(MTBF), 表征系统连续无故障运行能力; 平均故障修复时间(MTTR), 表征故障处置与恢复供电的效率; 牵引供电系统电压合格率, 要求控制在额定电压的 $\pm 5\%$ 范围内; 继电保护装置正确动作率, 要求不低于 99.95%; 年故障停电时间, 核心线路要求全年累计故障停电时间不超过 5 分钟。

2 供电系统可靠性与运行安全的核心影响因素

2.1 设备因素

设备是系统可靠性的基础单元, 核心影响包括: 设备元器件质量与设计裕度不足, 导致设备先天可靠性缺陷; 设备长期运行后的老化劣化, 绝缘性能下降、机械特性漂移, 引发设备故障; 设备选型与运行工况适配性不足, 牵引整流机组、变压器等设备无法适配负荷冲击与波动, 长期处于过载或低效运行状态; 设备配套的辅助系统故障, 如冷却系统、操作电源故障, 引发主设备停运^[2]。

2.2 网架结构与系统配置因素

网架结构决定了系统的供电冗余与故障隔离能力, 核心影响包括: 外部电源供电冗余不足, 单电源线路故

作者简介: 王洪彬(1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通工程。

障导致主变电所全停；中压环网结构不合理，环网分段、联络开关配置不足，故障影响范围无法有效隔离；牵引变电所、主变电所备用互供能力不足，单所故障后负荷无法有效转供；继电保护配置与定值整定不合理，存在保护拒动、误动、越级跳闸风险，扩大故障影响范围。

2.3 运行与运维管理因素

运维管理是系统长期可靠运行的核心保障，核心影响包括：检修策略不合理，定期检修模式存在过修或欠修问题，无法及时发现设备隐性缺陷；运维作业不规范，违规操作、误操作引发人为电气故障；隐患排查与风险管控不到位，无法提前识别并消除潜在安全隐患；人员技能水平不足，无法精准处置设备异常与突发故障，导致故障处置时间延长。

2.4 外部环境与工况因素

外部因素是系统运行安全的重要诱因，核心影响包括：外部电网故障、电压波动、谐波污染，传导至轨道交通内部供电系统，引发设备保护动作；自然环境因素，雷击、暴雨、地质沉降、高温高湿环境，导致设备绝缘损坏、线路短路；异物侵入、外力破坏，引发接触网短路、电缆故障；列车运行工况变化，高峰时段高密度行车引发牵引负荷骤增，导致供电设备过载、电压跌落。

从国内城市轨道交通已投运线路的运维统计数据来看，绝大多数供电系统停运故障并非单一影响因素独立引发，而是设备、网架、运维、外部环境四类因素耦合叠加形成的连锁失效。设备绝缘老化带来的性能劣化，会大幅放大雷击、外部电网波动等外部冲击的故障风险；网架结构冗余度不足的先天缺陷，会让单台设备故障快速扩散至整条供电分区，扩大停电影响范围；而运维检修不到位导致的隐性缺陷未及时处置，更是绝大多数故障从隐性隐患演变为显性事故的核心推手。当前国内部分早期投运的轨道交通线路已进入设备老化集中期，叠加网络化运营后客流持续攀升带来的牵引负荷增长，供电系统的可靠性管控压力持续加大。传统碎片化、被动式的故障处置与管控模式，已无法适配新形势下的安全运营需求，亟需构建全流程、一体化的可靠性提升与安全管控体系，从根源上化解系统运行的各类风险。

3 轨道交通供电系统可靠性提升技术体系

3.1 网架结构优化与冗余配置技术

以“分区供电、冗余互备、故障隔离、快速转供”为核心优化网架结构：外部电源采用双回路独立电源供电，两路电源来自不同区域变电站，避免同塔架设，保障外部电源可靠性；主变电所采用两台主变压器分

列运行、互为备用，相邻主变电所之间设置联络通道，实现故障情况下的负荷转供；中压环网采用双环网结构，合理设置分段开关与联络开关，实现故障区段快速隔离，非故障区段持续供电；牵引变电所采用双机组冗余配置，单台整流机组故障时，剩余机组可满足高峰时段牵引负荷需求，保障牵引供电连续性^[3]。

3.2 设备全生命周期可靠性管控技术

构建覆盖设备选型、安装调试、运行监测到退役更换的全生命周期管控体系：设备选型阶段，采用高可靠性、免维护或少维护设备，明确可靠性指标要求，开展型式试验与可靠性验证；安装调试阶段，严格执行施工验收规范，开展绝缘试验、耐压试验、保护定值校验，保障设备安装质量；运行阶段，搭建设备状态在线监测系统，对变压器、整流机组、高压开关柜、电缆等核心设备的温度、局放、绝缘参数、机械特性进行实时监测，实现健康状态动态评估；基于设备健康状态推行状态检修模式，替代传统定期检修，精准消除隐性缺陷，避免过修与欠修。

3.3 继电保护与故障快速自愈技术

优化继电保护配置，构建“主保护、后备保护、异常告警”三级保护体系：牵引供电系统采用光纤差动保护作为主保护，故障动作时间控制在30 ms以内；中压环网配置自适应过流保护、零序保护，优化备自投装置逻辑，实现故障隔离后负荷自动转供，转供时间控制在200 ms以内；搭建故障智能定位系统，基于行波法、阻抗法实现电缆、接触网故障点精准定位，定位误差控制在5 m以内，缩短故障排查时间；构建智能自愈控制架构，实现故障自动识别、自动隔离、自动恢复，最大限度缩小故障停电范围^[4]。

3.4 智能化监控与预警技术

升级供电监控系统，构建“边缘感知—边缘计算—云端管控”的智能化监控体系：基于SCADA系统整合设备状态监测、继电保护、电能质量监测数据，实现全系统运行状态集中监控与统一调度；搭建供电系统数字孪生模型，模拟不同工况下的系统运行状态，开展故障仿真与风险预判，提前识别系统薄弱环节；采用人工智能算法构建设备故障预警模型，基于历史与实时数据预测设备劣化趋势，提前发出预警信号，实现从“事后处置”向“事前预防”的转变。

3.5 电能质量优化与抗扰动技术

针对牵引整流机组非线性负荷产生的谐波污染、无功功率波动，以及外部电网电压扰动引发的系统可靠性问题，构建全流程电能质量治理体系。在牵引变电所配置有源电力滤波器与静止无功发生器，实现谐

波动态治理与无功功率就地平衡,将系统谐波总畸变率控制在 5% 以内,功率因数稳定在 0.95 以上,消除谐波引发的设备附加损耗、绝缘老化与保护误动风险。在关键负荷节点配置动态电压恢复器,抑制电压暂降、暂升对敏感控制设备的影响,提升系统抗电网扰动能力。同时,建立电能质量在线监测系统,实现谐波、电压偏差、三相不平衡度等指标的实时监测与动态治理,从电能质量维度筑牢系统运行可靠性基础。

4 供电系统全流程安全管控体系构建

4.1 全周期闭环安全管控机制

构建覆盖设计、施工、运维、退役全生命周期的闭环管控机制:设计阶段开展系统可靠性仿真与安全风险评估,优化系统设计,预留充足安全裕度;施工阶段严格执行安全技术交底与隐蔽工程验收制度,杜绝施工质量隐患;运维阶段建立“作业有票、操作有令、过程有控、事后有评”的作业管控机制,严格执行工作票、操作票制度,规范现场作业行为;退役阶段对老旧设备开展安全评估,制定更换计划,避免设备超期服役引发安全风险^[5]。

4.2 风险分级管控与隐患排查双重预防机制

建立双重预防机制,实现安全风险源头管控:基于系统风险辨识结果划分风险等级,制定分级管控措施,明确管控责任主体,实现重大风险重点管控;建立常态化隐患排查治理机制,制定隐患排查清单,开展日常排查、专项排查、季节性排查,对排查出的隐患实行闭环管理,做到责任、措施、资金、时限、预案“五落实”,实现隐患动态清零。

4.3 应急处置与联动管控体系

构建系统化应急处置体系,提升突发故障应对能力:制定分级应急预案,针对外部电源故障、主变电所全停、牵引供电系统故障等不同场景,制定专项处置方案,明确处置流程与责任分工;定期开展应急演练,提升运维人员故障处置能力与应急响应速度;建立与电网企业、轨道交通运营、应急管理部门的联动机制,实现故障信息快速共享与协同处置,最大限度降低故障影响。

4.4 人员与制度保障体系

完善安全管理制度体系,制定涵盖设备管理、运维作业、安全管控、应急处置的全流程管理制度,明确各岗位安全职责;建立常态化人员技能培训体系,开展设备操作、故障处置、安全防护等专项培训,定期开展技能考核,提升运维人员专业能力与安全意识;落实安全生产责任制,将安全管控责任分解到各岗位、各环节,形成全员、全过程、全方位的安全管控格局。

5 管控效果量化评定方法

构建多维度的管控效果量化评定体系,采用层次分析法确定各指标权重,开展综合评定。核心评定维度包括:可靠性指标提升率,重点考核供电可用率、MTBF、故障发生率的变化情况;安全管控合规率,考核制度执行、作业规范、隐患整改的合规情况;故障处置效率提升率,考核 MTTR、故障定位时间、负荷转供时间的优化情况;电能质量达标率,考核电压偏差、谐波畸变率、三相不平衡度的合规情况。通过优化前后的指标对比,扣除外部工况变化的影响,量化评定可靠性提升与安全管控的实际效果,实现管控体系的持续迭代优化。在实际工程应用中,可将上述量化指标纳入月度运维考核体系,结合线路客流变化、设备老化程度动态调整管控重点,定期复盘典型故障处置流程,不断完善应急预案与检修计划,使管控体系始终适配线路的实际运营需求。

6 结束语

本文围绕轨道交通供电系统的运行可靠性保障与安全风险管控需求,全面梳理了系统的核心组成架构与可靠性量化评价指标体系,深入剖析了四大维度的关键影响因素,构建了融合网架结构优化、设备全生命周期管控、智能继电保护与闭环安全管理的一体化技术体系,确立了管控成效的量化评估方法。该体系覆盖源头设计、过程管控、智能预警与应急处置全流程环节,能够显著提升供电系统的运行可靠性,有效降低各类故障发生风险,最大限度缩小故障影响范围,为城市轨道交通线路的安全、稳定、高效运营提供坚实的技术支撑。未来研究可深入推进人工智能与数字孪生技术在供电系统全生命周期管控中的融合应用,研究轨道交通供电系统与新型电力系统的协同运行与互动机制,构建更具智能化、高效化与韧性的轨道交通供电安全管控体系。

参考文献:

- [1] 左大军.地铁供电系统的可靠性和安全性分析方法研究[J].冶金管理,2023(17):82-84.
- [2] 王昶.城市轨道交通直流牵引供电系统杂散电流危害分析及对策[J].电气时代,2026(02):101-104.
- [3] 裴艳霞.基于 ICPT 的轨道交通非接触式牵引供电系统可靠性研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [4] 王先磊.城市轨道交通通信智能运维系统体系构建关键技术研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(07):217-221.
- [5] 潘泉良,田名扬,肖晓琳.地铁接触轨供电系统故障诊断与快速恢复策略[J].现代城市轨道交通,2025(11):119-121.

基于 BIM 技术的工业厂房建筑与电气系统协同设计

邹宗保¹, 尹纪涛¹, 张凯²

(1. 青岛一建集团有限公司, 山东 青岛 266031;
2. 中交(青岛)城市建设有限公司, 山东 寿光 262700)

摘要 工业厂房建筑设计与电气系统设计彼此之间存在着较强的关联性以及多专业相互交叉的特性, 协同设计的质量会直接对项目全生命周期的效益产生决定性作用。本文以 BIM 技术作为支撑力量, 对工业厂房建筑以及电气系统的协同设计体系进行重新构建, 着重阐述具体的协同策略, 从前期规划、模型构建两个核心维度出发, 将工业建筑设计的规范以及真实的参数标准结合起来, 提出了建立跨专业协同组织、统一标准、同步构建模型、前置预控冲突等措施。通过增强 BIM 技术在核心设计阶段的适配性运用, 突破专业之间的阻碍, 实现建筑专业与电气专业的深层次融合, 以期提升工业厂房设计的质量与效率提供参考。

关键词 BIM 技术; 工业厂房建筑; 电气系统; 跨专业协同组织; 前置冲突预控

中图分类号: TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.024

0 引言

工业厂房作为生产的关键承载主体, 建筑设计和电气系统设计之间的协同状况会直接对投产运营之后的安全程度、稳定状况以及经济收益产生影响。伴随数字化技术的广泛传播, BIM 技术依靠其具备的可视化、参数化以及信息集成等特点, 成为解决跨专业协同方面难题的关键工具。本文基于工业厂房的设计需要, 以 BIM 技术的应用为核心来构建具体的协同设计策略, 借助对设计流程进行优化、增强专业之间的联动, 实现建筑设计与电气系统设计的深度协同, 为工业厂房设计向着数字化方向转变提供实际操作层面的支持。

1 BIM 技术基础及协同设计价值

1.1 BIM 技术核心特性

BIM 即建筑信息模型, 是依托数字化技术搭建起来的一种三维可视化的信息承载物, 其核心特性能够为协同设计提供技术方面的支持。多维度的协同特性可以让建筑、电气等多个专业的人员凭借同一个模型同时开展作业, 实时地进行数据共享、意见反馈, 将孤立作业的障碍打破, 特别适合工业厂房复杂的专业交叉方面的需求^[1]。全信息集成特性能够将几何尺寸、设备参数、材料性能等图形以及非图形的信息整合起来, 建立一个完整的数据库。在该数据库里, 电气设

备需录入额定电压、额定电流、防护等级 (IP54 及以上的防护等级适合工业厂房的粉尘环境)、绝缘等级等关键的参数; 建筑构件需标注耐火极限 (厂房主体结构的耐火极限不能低于 2.0 h)、荷载等级 (生产车间楼面活荷载不能小于 5 kN/m²), 从而实现设计信息在整个周期内的重复使用。

动态化的管理特性能够保证设计变更在实时状态下同步到整个模型之中, 并且将同步情况反馈给各个专业, 从而避免因信息滞后而引发的衔接方面的问题。与此同时, 模型的精度应达到 LOD300 至 LOD400 的标准 (在初步设计阶段需达到 LOD300, 在施工设计阶段需达到 LOD400), 以此为协同设计稳固地筑牢技术方面的根基。

1.2 工业厂房建筑与电气协同设计的核心价值

工业厂房的电气系统呈现出复杂的特性, 包含了 10 kV 高压供电、380 V/220 V 低压配电以及应急照明等多个不同的子系统, 该电气系统的布局和建筑结构、空间规划存在着高度的关联性。基于 BIM 驱动的协同设计方式, 能够实现建筑专业和电气专业之间精确的对接, 在前期就避免出现管线和梁柱发生碰撞、设备安装空间不够等状况^[2]。在此过程中, 高压电缆桥架的敷设应和建筑梁柱维持不小于 0.5 m 的安全距离,

作者简介: 邹宗保 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

低压配电房的净空高度应达到不低于 3.5 m 的标准, 应急照明回路需进行独立的设置, 在断电之后的切换时间不能超过 0.5 s。

与此同时, 协同设计可对设计流程予以优化, 削减专业之间重复沟通所产生的成本, 保证设计方案契合厂房生产工艺的要求, 如重型机械生产车间需预留专门的动力电缆沟, 其宽度应不小于 0.8 m、深度应不小于 1.0 m, 并且需和设备基础维持 1.2 m 以上的间距, 为后续的施工、运维工作提供统一的信息支持, 实现项目在质量、成本、工期方面的协同管控。

2 基于 BIM 技术的协同设计前期规划策略

2.1 建立跨专业协同组织

在项目前期应组建一个专项协同小组, 该小组由建筑、电气、工艺、结构等多个专业的人员共同构成, 需清晰地界定各专业的职责范围以及协同工作时的权力和责任, 同时设立一位总协调人, 由其全面统筹设计进度以及信息的流转情况。每周需召开一次协同推进会议, 每三天需通过特定平台同步设计的进展状况, 由建筑专业发挥牵头作用, 对厂房的空间布局、结构的选择、功能的划分等核心需求进行系统梳理, 需明确生产车间的柱距(常见的规格为 6 m×6 m、8 m×8 m)、跨度(范围在 18 m 至 30 m 之间)、层高(高度不能低于 6 m)等关键的参数信息。同时, 电气专业需同步提供供电负荷(该负荷需要按照厂房的具体类型进行核算, 如机械加工厂房大约为 80 W/m² 至 120 W/m², 化工厂大约为 100 W/m² 至 150 W/m²)、管线的走向、设备的安装等基础参数, 尤其需重点标注变压器、配电柜等大型设备的尺寸(10 kV 变压器的外形尺寸大约为 2.5 m×1.8 m×2.2 m)以及安装时的承重要求(承重不能低于 20 kN/m²)。借助 BIM 协同平台来举办需求对接会议, 进而达成统一的设计目标以及技术方面的共识, 及时地解决设计前期所存在的需求冲突状况与参数适配难题, 以保证各个专业的设计走向保持一致^[3]。

2.2 统一协同设计标准体系

确定一套统一的 BIM 建模以及协同方面的标准, 是确保协同设计高效开展的重要因素。清晰地规定构件的命名准则: 对于建筑构件而言, 按照“专业—类型—编号”的方式来命名(JZ-Z-001 所代表的是建筑专业里面的 001 号柱体); 对于电气构件, 则标注“专业—设备类型—回路号”(DQ-PDB-01 表示的是电气专业的配电箱 01 回路)。建模的精确程度依据不同阶段进行划分, 在初步设计阶段达到 LOD300 的标准, 此时需完成构件基本的几何形状以及位置的标注工作; 在施工

设计阶段达到 LOD400 的标准, 需补充构件的材质、规格以及安装工艺等相关细节内容。

信息录入的规范应当进一步细化: 对于电气设备而言, 需录入型号、额定参数、防护等级以及安装方式(包括壁挂式、落地式等)这些全量的信息内容; 而在建筑墙体方面, 需标注诸如厚度(外墙为 370 mm、内墙是 240 mm)、材料(蒸压加气混凝土砌块)、耐火等级等相关参数。应选用适合工业厂房设计的 BIM 软件(Revit、Bentley 等)来搭建一个统一的协同设计平台, 在该平台上需设置好模型的访问权限以及修改权限, 从而达到设计数据能够实时共享、版本可以回溯追踪的效果, 以此避免由于标准不统一而引发的模型冲突以及信息混乱的状况。

2.3 前期工艺与设计协同适配

基于工业厂房生产工艺的具体需求, 开展建筑设计与电气设计的前期协同工作。建筑专业参照工艺流程图, 对厂房的空间布局进行优化, 为电气设备安装区域、管线井、电缆沟等关键部位预留位置, 同时需充分考虑设备运输的通道以及维护所需的空間; 电气专业根据工艺负荷的特性, 对供电回路以及配电房的位置进行规划, 需提出关于电源接入点、接地系统等方面的设计要求, 以此保证电气系统能够与生产工艺相适配。借助 BIM 模型所具备的可视化这一显著特性, 对不同工艺场景之中的设计方案展开模拟操作, 达到建筑需求、电气需求与工艺需求之间的深度适配效果。

3 模型协同构建与优化策略

3.1 建筑与电气模型同步构建策略

以“同步建模、实时联动”的方式来推进建筑和电气模型的构建工作。建筑专业部门首先着手搭建厂房的主体结构模型, 将墙体、楼板、梁柱等关键构件搭建出来, 楼板的厚度依据不同区域进行设定, 其中生产车间的楼板厚度不小于 150 mm, 办公区域的楼板厚度不小于 100 mm; 梁柱的截面尺寸需根据荷载情况进行核算, 柱子的截面通常为 500 mm×500 mm、600 mm×600 mm。在建筑专业部门完成上述操作后, 马上借助协同平台将成果分享给电气专业部门。

电气专业部门以建筑模型作为基础, 同时开展电气系统的建模工作。在电缆桥架的选择方面, 采用槽式桥架, 其宽度需依据线缆的具体数量来进行核算(若为单回路电缆, 选用规格为 200 mm×100 mm 的桥架; 若为多回路电缆, 则选用 300 mm×150 mm 的桥架), 电缆桥架的敷设高度, 距离楼板不能小于 0.8 m, 水平敷设时的间距不得小于 0.3 m。在进行建模的整个过程

当中,电气专业应精确地契合建筑结构的布局情况,对电缆桥架、管线以及配电箱等各类构件加以布置,并且录入设备的相关参数以及管线的具体规格(动力电缆选用YJV22-10kV系列,照明电缆选用BV2.5 mm²~4 mm²系列)。若是建筑专业需要对结构布局做出调整,应在第一时间告知电气专业部门,同时对模型进行更新,以此实现建筑模型与电气模型之间的信息联动,防止在后期出现返工的情况^[4]。

3.2 多维度模型协同优化方法

凭借BIM模型来开展多维度的协同优化工作,以此增强设计方案的合理程度。在空间协同领域,着重对电气设备和建筑空间的适配状况予以优化,结合工业厂房所具有的层高、柱距等特性,精确地对配电房以及电缆桥架的安装位置进行规划。例如:配电房应保证其操作空间能够契合相关规范要求,电缆桥架应避免建筑的梁柱以及通风管道,借助模型的可视化功能来对构件的位置和走向加以调整,同时需考虑空间的利用效率以及后期检修的便利情况,特别是针对重型的电气设备,需预留出充足的吊装和维护空间。

在参数协同领域,构建建筑构件与电气构件之间动态的参数关联关系,达到设计变更的自动协同联动效果。例如:当楼板的实际厚度发生改变时,能够自动且同步地对管线的敷设深度以及套管的具体规格进行调整;而在电气设备的功率出现变更的情况下,会联动对供电回路的截面大小、开关的具体型号以及保护参数等进行优化处理。与此同时,积极开展跨专业的模型审核工作,召集建筑专业和电气专业的设计人员一同对模型展开核查,从施工的实际可行性、运维的便捷程度以及规范的符合情况等多个角度出发,对设计方案进行优化,以此保证设计细节能够精确无误地得以落实^[5]。

3.3 前置冲突预控与协同整改策略

将冲突检测融入整个模型构建的过程当中,达到前置预控的目的。借助BIM软件所具备的冲突检测功能,设定检测规则:硬碰撞检测的标准是构件之间的间距小于0(电缆桥架和梁柱不存在重叠情况、管线和楼板没有贯穿冲突);软碰撞检测的标准是电气设备的操作空间小于规范所规定的值(如落地式配电柜四周的操作空间不能小于1.5 m×1.0 m,壁挂式配电箱下方需预留出不小于0.8 m的操作空间),电缆桥架和通风管道的水平间距应不小于0.5 m,垂直间距应不小于0.3 m。

在实时状态下,对建筑模型以及电气模型开展自动化的检测工作,迅速辨别出诸如硬碰撞(管线和梁柱

之间发生的碰撞)、软碰撞(设备操作空间不够)等问题。当生成冲突检测的报告之后,协同小组需针对该问题拟定整改方案,清晰地确定责任专业以及整改的时间期限。例如:当电气管线和建筑梁柱出现碰撞的状况时,电气专业应对管线的走向加以调整,采用穿梁套管的办法(套管的直径要比管线的直径大20 mm),建筑专业则配合预留套管的孔洞。在整改工作完成之后,需重新进行检测,从而形成“检测—整改—复核”闭环式的管理模式,以此保证在设计阶段冲突的解决比例达到100%,并且在整改之后应符合电气施工规范《建筑物防雷设计规范》(GB 50057-2010)、《爆炸危险环境电力装置设计规范》(GB 50058-2014)的相关要求。

4 结束语

本文搭建了依托BIM技术的工业厂房建筑和电气系统协同设计的策略架构,将侧重点置于前期规划、模型搭建两个关键维度,融合工业建筑设计规范以及真实的参数准则,提出了一套涵盖组织、标准、技术方面的完备实践方案。结果表明,以BIM技术为依托的协同策略能够切实打破各专业之间的壁垒,实现建筑设计与电气设计信息的即时联动、流程的高效衔接,通过清晰界定建模的精细程度、参数的标准以及施工的适配要求,能够大幅提高设计的精确程度、优化设计的流程,减少因参数出现偏差而引发的施工方面的问题。未来,需要更进一步加深BIM技术与工业厂房设计场景的契合度,结合不同种类厂房(机械类、化工类、电子类等)的不同需求来优化参数体系,加强多专业的深度融合,促使工业厂房设计向着数字化、协同化的方向升级,从而为工业建筑行业的高质量发展提供技术方面的支持。

参考文献:

- [1] 李蓓.工业厂房建筑中电气节能设计的应用探析[J].科技资讯,2025,23(18):153-155.
- [2] 邱少丹,沈兴,程立,等.BIM在大型工业厂房管综数字深化设计中的应用研究[J].中国设备工程,2024(20):106-108.
- [3] 赵苏雅,陈政,史杏春,等.基于BIM技术的大型工业厂房设计与施工交接点研究[J].机电工程技术,2024,53(01):264-267.
- [4] 王天笑.BIM技术在工业厂房设计中的应用探索[J].居业,2022(07):13-15.
- [5] 李明子.工业厂房建筑电气设计及其节能措施分析[J].建筑技术开发,2019,46(18):18-19.

矿井通风系统优化设计与 开采环境改善实践探析

林永森¹, 兰红波², 侯振江³

(1. 陕西铁航教育科技集团有限公司, 陕西 西安 710018;

2. 陕西华泰矿建工程有限公司, 陕西 西安 710018;

3. 浙江兴安建设集团有限公司, 浙江 温州 325800)

摘要 在深部煤矿开采条件下, 通风系统承担着瓦斯稀释、粉尘控制、热湿调节与灾变控风等任务, 传统经验调阻与静态配风方式已难以满足高效、安全的生产要求。本文以某高瓦斯矿井东翼采区为对象, 针对采掘接续紧张、主回风段阻力偏高、局部风量不足及粉尘热害叠加问题, 构建了需风量重算、风网结构重构、关键阻力段降阻、监测解算联动和开采环境协同治理为主线的优化方案。实践结果表明, 优化后矿井总回风量由 12 840 m³/min 增至 13 690 m³/min, 矿井总阻力由 3 120 Pa 降至 2 680 Pa, 主扇效率由 71.8% 升至 79.6%, 综采工作面回风巷 CH₄ 体积分数由 0.74% 降至 0.46%, 作业点呼吸性粉尘质量浓度由 34.6 mg/m³ 降至 20.8 mg/m³, 平均作业温度下降 2.6 ℃。结果表明, 通风系统优化需与粉尘、热湿及异常诊断协同实施, 才能形成稳定、节能的环境改善效果。

关键词 矿井通风系统; 按需供风; 开采环境; 粉尘治理

中图分类号: TD724

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.025

0 引言

矿井通风系统是井下安全生产基础系统, 运行状态直接影响瓦斯稀释、粉尘扩散、温湿调节和人员作业舒适性。随着开采深度增加、采区布置复杂化和采掘节奏加快, 传统以经验调节风门、人工旬检风量和局部补偿治理为主的方式暴露出风流分配滞后、阻力控制粗放、环境指标波动大等问题。近年来, 矿井智能通风理论、实时解算和精准监测研究为通风系统由静态设计向动态优化转变提供了支撑^[1]。但从工程实施看, 单纯提高主扇能力难以同步解决局部高阻、漏风、热害和粉尘叠加问题, 必须以采区风网重构为核心, 将风量供给、阻力调控和环境改善纳入统一框架。尤其在深部高瓦斯矿井中, 风量不足与回风阻力偏高常伴随温升、湿度上升和粉尘再悬浮, 导致安全与职业健康问题叠加。因此, 通风系统优化需由单一配风计算转向面向生产全过程的综合治理, 并以有效风量稳定兑现为核心评价目标。基于此, 本文以某高瓦斯矿井东翼采区为对象, 对通风系统进行优化设计, 并结合现场治理结果分析其对开采环境的改善机制。

1 工程条件与问题辨识

1.1 矿井概况

研究对象为年产 4.50 Mt 的井工煤矿, 采用中央并列式通风, 东翼采区布置 1 个综采工作面、2 个掘进工作面 and 若干辅助硐室。采区埋深 780 m ~ 910 m, 煤层平均厚度 5.2 m, 原煤瓦斯含量 8.7 m³/t, 正常生产期间东翼采区绝对瓦斯涌出量为 28.4 m³/min。原通风系统采用主进风大巷—采区进风上山—工作面—回风上山—总回风巷串并联混合网络, 受接续调整影响, 3105 综采工作面与 3107 掘进头共用部分回风通道, 局部巷段断面缩颈、支护构件外露和风门串联设置现象突出。2025 年 4 季度测定结果显示, 东翼采区总进风量为 4 020 m³/min, 其中综采工作面实际配风 1 430 m³/min, 低于按瓦斯、温度和风速核定的需求值。

1.2 通风失衡及环境约束

现场测试表明, 采区回风上山与总回风巷交汇段阻力占东翼采区总阻力 31.7%, 成为限制风量提升的关键瓶颈。由于局部风阻高、漏风点多和调节设施位置不合理, 3105 综采工作面存在进回风压差波动大、回

作者简介: 林永森 (1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。

风巷 CH_4 体积分数高峰接近 0.80%、转载点及司机侧粉尘积聚等问题。掘进工作面表现为压入式局扇送风射流衰减快,迎头有效风速不足,导致高温高湿空气滞留。基于上述判断,优化目标确定为提升有效风量、降低关键阻力、抑制漏风短路、改善粉尘与热湿环境,并增强异常工况下的调控能力。

2 通风系统优化设计

2.1 需风量核算与风网重构

按照采区生产布局重新核算需风量时,以瓦斯涌出、同时作业人数、设备散热和最小风速要求中的最大值作为依据。综合抽采后剩余瓦斯释放量、工作面温升和断面风速约束,确定 3105 综采工作面、3107 掘进头、3111 掘进头、胶带运输巷和泵房硐室目标风量分别为 $1\,620\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $680\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $620\text{ m}^3/\text{min}$ 、 $460\text{ m}^3/\text{min}$ 和 $220\text{ m}^3/\text{min}$ 。为保证配风实现,首先取消原网络中的 2 处串联调节窗,将回风上山中段 340 m 高阻巷道扩刷至 14.6 m^2 有效断面,并将 3 组双向风门改造为低阻连锁风门。为提高风量测算精度,在 6 个关键断面布置超声波全断面测风装置,并以实时风量数据校核风网解算结果,使静态设计参数与动态工况保持一致^[2]。各用风地点目标值确定后,以“减串联、增并联、缩短回风线、减小无效循环”为原则重组东翼采区网络,避免一个地点提风后挤占相邻地点有效风量,并以关键支路压降复核。

2.2 阻力控制与设备匹配

在风网重构基础上,以降低无效压降和提升主扇工况匹配度为目标开展阻力控制。通过对东翼采区 32 条分支进行阻力复算,发现单位长度阻力偏大的巷段主要集中在回风交汇区、转载点附近和局扇出风扰动区。针对这些部位分别采取顶帮整形、底鼓清挖、管线贴帮吊挂、风筒悬吊直线化和非生产期风门常闭等措施。主通风机侧引入频率分级调控策略,将高频运行方式调整为按班次和采掘组合进行 $41\text{ Hz} \sim 46\text{ Hz}$ 区间控制,使风压供给与井下实际阻力更加匹配。优化后矿井总阻力下降 14.1%,等积孔由 2.53 m^2 提高至 3.11 m^2 ,说明系统通风能力建立在降阻基础上。相关研究指出,智能通风关键在于把监测、分析、决策和执行嵌入统一流程^[3]。

2.3 监测与调控策略

考虑到深部矿井工况扰动频繁,优化设计不仅要满足正常生产期配风,还要具备偏差识别和快速纠偏能力。本文在东翼采区建立通风参数日分析制度,采集风量、风压、 CH_4 体积分数、 CO 体积分数、温度、相对湿度和设备状态等信息,通过 5 min 滚动解算获取

关键支路风量偏差率和阻力变化趋势。当系统判定某支路风量偏差持续超过 8% 时,优先局部调节;当回风巷 CH_4 体积分数与温度同步抬升且压差异常时,则触发高阻或漏风复核。结合矿井智能通风流程化建设经验,形成了监测感知、模型判断、方案推送、执行反馈和复核评价的闭环调控链条^[4]。闭环控制实施后,东翼采区关键分支风量波动幅值由 12.6% 收敛至 6.1%。

3 开采环境改善实践

3.1 粉尘与瓦斯协同治理

3107 掘进头原采用单纯压入式通风,迎头回流和司机侧滞尘明显。优化后改为长压短抽局部通风除尘方式,将压风口布置在司机前方约 1 m 处,抽尘口靠回风侧布置,并将压抽比控制在 1.30 ~ 1.35 区间,使高浓度粉尘在大范围扩散前被短抽系统及时捕集。该参数选择与综掘工作面长压短抽除尘性能研究结论一致,有利于减少司机和行人呼吸带粉尘暴露^[5]。在综采工作面,则通过降低上隅角漏风、优化采空区抽采负压和稳定回风巷风速,减少瓦斯在回风转角区滞留。现场连续 30 d 监测结果显示,综采工作面回风巷 CH_4 体积分数均值由 0.74% 降至 0.46%,司机处呼吸性粉尘质量浓度由 $34.6\text{ mg}/\text{m}^3$ 降至 $20.8\text{ mg}/\text{m}^3$,粉尘与瓦斯叠加风险减弱。

3.2 热湿环境改善与人员作业区优化

东翼采区优化前存在排水沟淤塞、回风巷积水蒸发和电机设备散热集聚等问题,使掘进头与转载点区域相对湿度长期处于 90% 以上。通过增加有效风量、清挖排水沟、对高温设备区实施导流隔热并改善回风组织,作业带空气更新速度加快。优化后综采工作面平均温度由 $31.2\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $28.6\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度由 92% 降至 84%,掘进迎头最小风速稳定在 0.34 m/s 以上,作业区热湿负荷明显缓解。

3.3 效果评估

为验证优化设计稳定性,本文对东翼采区进行了 90 d 跟踪。结果表明,优化后各主要用风地点实测风量与目标风量偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,班中人工调风次数由月均 23 次降至 8 次,瓦斯超限预警次数下降 64.7%。按月统计,3105 综采工作面风量达标率由 82.4% 提升至 96.8%,3107 掘进头风量达标率由 76.1% 提升至 95.3%。主要用风地点风量优化结果见图 1,主要技术指标见表 1。相关研究表明,异常诊断能力是决定智能通风能否由设计成果转化为企业效益的关键环节^[6]。从本次实践看,只有把异常诊断嵌入日常通风管理,持续识别局部阻力回升和漏风复发问题,优化后的低阻高效网络才能保持稳定。

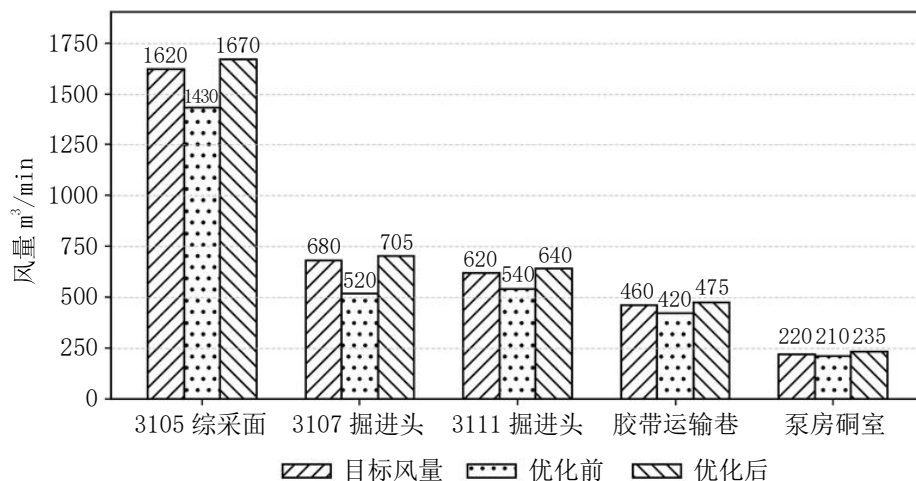


图 1 各用风地点风量优化结果

表 1 优化前后主要技术指标对比表

指标	单位	优化前	优化后	变化幅度
矿井总回风量	m³/min	12 840	13 690	+6.6%
矿井总阻力	Pa	3 120	2 680	-14.1%
等积孔	m²	2.53	3.11	+22.9%
主扇效率	%	71.8	79.6	+7.8
3105 面回风巷 CH₄ 体积分数	%	0.74	0.46	-37.8%
司机处呼吸性粉尘质量浓度	mg/m³	34.6	20.8	-39.9%
综采面平均温度	℃	31.2	28.6	-8.3%
班中人工调风次数	次/月	23	8	-65.2%

4 经济与安全综合分析

通风系统优化的价值不仅体现在指标改善,更体现在安全冗余和运行经济性提升。依据主扇功率实测曲线和全年生产负荷折算,优化后吨煤通风电耗由 4.28 kWh/t 降至 3.91 kWh/t,按年产 4.50 Mt 计,年节电量约 1.67×10^6 kWh。由于关键高阻段得到治理,主扇长期高负荷运行时间缩短,风门冲击和局扇异常停机次数减少,设备维护工时下降。从安全角度看,系统风量冗余度提高后,采区在检修、倒面和局部通道短时受限等非稳态条件下仍能维持关键地点最低供风标准,抗扰动能力增强。

5 结束语

本文针对某高瓦斯矿井东翼采区通风失衡、阻力偏高和环境指标波动问题,构建了需风量重算、风网重构、关键降阻、监测解算联动和环境协同治理方案。实践表明,优化后矿井总阻力明显下降,主要用风地点配风更接近目标值,主扇效率、粉尘控制效果和热湿环境均改善。结果表明,矿井通风系统优化设计的

关键不在于单纯扩大风量,而在于通过结构重构和动态调控提高有效风量占比。对于深部采区,通风优化只有与瓦斯治理、粉尘控制、热湿改善和异常诊断协同推进,才能形成可持续、可复制的环境改善路径。

参考文献:

- [1] 周福宝,辛海会,魏连江,等.矿井智能通风理论与技术研究进展[J].煤炭科学技术,2023,51(01):313-328.
- [2] 宋涛,王建文,吴奉亮,等.基于超声波全断面测风的矿井风网实时解算方法[J].工矿自动化,2022,48(04):114-120,141.
- [3] 魏连江,周福宝,夏同强,等.矿井智能通风与灾变应急决策平台[J].中国安全科学学报,2022,32(09):158-167.
- [4] 张浪,刘彦青.矿井智能通风与关键技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(01):178-195.
- [5] 江丙友,王一凡,林汉毅,等.煤矿综掘工作面长压短抽除尘性能与尘源移动路径关系[J].煤炭学报,2024,49(07):2973-2985.
- [6] 魏连江,沐兴旺,唐琳,等.矿井通风系统异常诊断研究进展与展望[J].中国矿业,2025,34(04):116-125.

数字化技术驱动下建筑造价全生命周期管理创新研究

余苗苗

(上海上咨工程造价咨询有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230011)

摘要 建筑造价全生命周期管理是建筑工程项目管理的重要组成部分, 贯穿项目各环节, 其管理质量影响项目的经济效益与实施质量。当前, 传统造价管理模式面临数据割裂、动态响应滞后、精细化程度不足等痛点, 而数字化技术为破解行业痛点、推动造价管理模式革新提供了核心支撑, 可提升管理精细化水平与效率。本文研究数字化技术在造价全生命周期各阶段的应用, 明确管理重点、分析应用价值、探索应用路径, 以期为建筑行业造价管理数字化转型提供实践参考。

关键词 数字化技术; 建筑造价; 全生命周期管理

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.026

0 引言

建筑造价管理的科学性与高效性是保障工程项目顺利推进、控制成本、提升效益的关键。传统造价管理模式以阶段性核算为核心, 存在信息割裂、管控滞后、价值维度单一等问题, 难以适配当前建筑项目成本管控需求。全生命周期管理可实现项目全过程造价管控, 提升管理整体性。数字化技术凭借其在数据集成、智能分析、动态预测、信任构建等方面的独特优势, 为全生命周期造价管理的创新发展提供了核心支撑, 为建筑行业实现精细化成本管控提供了可行路径。

1 建筑造价全生命周期管理中各阶段的管理要点

1.1 决策阶段

决策阶段造价管理的核心是对项目可行性进行深入研究, 并在此基础上制定科学的造价管理计划。决策方案应对项目的市场前景、技术方案、经济效益以及社会影响等方面全面评估, 以确保项目的可持续发展。投资估算应充分考虑建设规模、材料价格、人工费用以及不可预见费等因素, 并采用参数估算、类比估算或详细估算等方法, 提高估算的可靠性^[1]。

1.2 设计阶段

项目最终造价的高低, 由设计阶段的造价管理工作直接决定, 将造价控制要求融入设计全过程、通过优化设计方案实现造价合理控制, 是这一阶段的主要任务。设计人员开展工作时, 需结合决策阶段确定的

投资估算, 在满足项目使用功能与质量要求的前提下优化设计方案, 保障设计的经济性与合理性, 通过全面分析各类设计方案的造价差异, 筛选出符合项目实际需求与投资预算的最优方案, 确保设计阶段造价控制在合理范围, 为后续造价管控指明方向。

1.3 招投标阶段

招标文件编制、工程量清单编制和投标报价审核, 是招投标阶段造价管理的主要内容, 每一项工作的质量都影响招投标工作的规范性与项目造价的合理性。依据设计图纸明确的技术参数与项目实际建设情况, 工作人员要编制详细完整的工程量清单与招标控制价, 明确招标要求与计价标准, 保障招投标工作公平、公正、公开开展, 同时严格审核投标单位的投标报价, 分析报价的合理性与可行性, 确保中标价格符合项目实际造价水平, 为后续造价控制做好铺垫。

1.4 施工阶段

建筑工程项目的造价消耗主要集中在施工阶段, 对施工过程中的各项成本进行动态管控、确保成本不超出项目预算, 是该阶段造价管理的重点。工作人员需实时监控施工过程中人工、材料、机械等各项费用的消耗情况, 严格把控工程变更与现场签证流程, 确保各项变更与签证符合项目实际需求且经过规范审批, 及时核算已完成工程量、做好成本核算与分析, 调整管控方式以保障施工阶段造价处于预算范围内, 确保项目建设顺利推进^[2]。

作者简介: 余苗苗 (1985-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

1.5 竣工结算阶段

竣工结算阶段作为建筑造价全生命周期管理的最后一个环节,其造价管理主要是对项目实际造价进行全面细致的核算,编制完整准确的竣工结算报告,保障结算数据的准确性与完整性,为项目最终验收与资金支付提供可靠依据。工作人员需全面收集施工过程中各类与造价相关的资料,基于这些资料详细核算项目实际成本,对比预算与实际造价的差异并分析具体原因,确保每一笔核算准确无误,保障竣工结算工作顺利完成,实现造价管理的闭环。

2 数字化技术在建筑造价全生命周期管理中的应用价值

2.1 提升造价管理的精细化水平

数字化技术在造价全生命周期管理中的应用,能有效提升管理的精细化水平,其价值体现在造价数据的精准处理与细节管控上。建筑工程项目的造价数据繁杂且范围广泛,数字化技术可全面精准地采集这些分散的数据,经系统整理与科学分析,将复杂杂乱的数据转化为可量化、可分析的清晰信息,实现对造价管理每个细节的精准管控,提升造价核算的准确性与精细化程度,保障造价管理工作的严谨性与科学性,确保项目造价每一笔支出合理合规。

2.2 提高造价管理的工作效率

建筑造价全生命周期管理涉及大量造价数据与相关资料,这些数据资料的处理效率决定造价管理的整体效能。数字化技术改变了传统人工处理数据的模式,实现造价数据的自动化处理,大幅减少人工干预,降低人工处理的工作量与时间成本,高效完成海量数据的分类、整理、分析及各类造价报告的编制,节省工作人员的时间与精力、缩短造价管理周期,推动各项造价管理工作有序推进,提升整体效能,为项目顺利推进提供保障。

3 数字化技术驱动下建筑造价全生命周期管理的创新应用路径

3.1 决策阶段:数字化技术助力投资估算精准化

开展投资估算相关工作时,可充分借助大数据技术的优势,全面收集整理各类与项目造价相关的有效数据,包括同类建筑工程项目的造价构成数据、各类建筑材料与人工的市场价格波动数据,以及与项目建设相关的政策法规、行业标准等相关数据,将这些分散在不同渠道、杂乱无章的信息进行系统整合与筛选验证,构建完善且贴合实际应用需求的投资估算数据库。数据库内的每一组数据都经过严格的筛选与校验,能够真实反映不同类型、不同规模建筑工程项目的造价构成规律、价格波动特点,以及政策调整对造价的

影响。工作人员结合当前项目的建设规模、建设标准、功能定位、建设地点等具体实际情况,通过对各类数据的多维度对比分析,精准测算项目的投资额度,让投资估算成为具备明确数据依据的精准数值,大幅提升投资估算的针对性与实用性。

BIM 技术的融入进一步丰富了投资估算的呈现形式与精准程度,构建的项目初步三维模型,将项目的建设规模、结构形式、装修标准、设备配置等各类关键信息全面融入其中,借助模型的可视化优势清晰呈现项目各组成部分的造价构成,让项目决策层能够直观了解每一项成本的来源、构成比例与具体金额。人工智能技术的深度应用,可对收集到的各类数据进行深度挖掘与智能分析,精准识别影响项目造价的各类关键因素,预判项目造价的整体变化趋势,通过对材料价格、人工费用、机械使用费等核心影响因素的动态跟踪与分析,提前预判项目建设过程中可能出现的成本波动情况,制定相应的动态调整方案,确保投资估算能够适应项目建设的动态变化^[3]。

3.2 设计阶段:数字化技术推动设计与造价协同优化

BIM 技术作为设计阶段数字化应用的核心载体,构建的三维可视化建筑模型,将设计图纸中的各类技术参数、构件信息、尺寸规格、材质标准等全部转化为可直观查看的三维数据,工作人员通过这一模型,能够清晰掌握建筑构件的布局方式、材质选择、连接方式、尺寸精度等每一个细节,精准判断设计方案中可能存在的造价浪费隐患,及时进行针对性的优化调整。BIM 模型可根据设计图纸的变化自动生成完整的工程量清单,实时核算当前设计方案的造价金额。

设计人员优化设计方案时,借助大数据技术收集同类项目的设计参数与造价数据,分类整理后形成完善的参考体系,对比不同设计形式、不同材质选择、不同结构方案的造价差异,结合当前项目的实际需求与投资预算,选择性价比更优的设计方案,在满足项目使用功能与质量标准的前提下,最大限度降低项目造价,实现设计方案的经济性与合理性的平衡。数字化设计平台的应用,进一步强化了设计人员与造价人员的协同工作能力,双方通过平台实现设计与造价数据的实时共享,实时沟通设计方案的造价细节,针对设计过程中出现的造价超标问题,共同探讨优化方案、调整设计细节,借助数字化设计的可修改性与可追溯性,确保设计与造价始终保持协同一致^[4]。

3.3 招投标阶段:数字化技术提升招投标工作规范性

数字化平台内置的标准化模板,能够确保招标文件内容的完整性与规范性,避免遗漏关键条款、表述

模糊等问题。平台的自动数据校验功能,可对编制完成的招标文件与工程量清单进行全面校验,及时发现数据误差、条款冲突等问题,确保招标文件内容的准确性与工程量清单的精准性,减少人工编制过程中的疏漏与误差。数字化平台可实现招标文件线上发布、投标文件线上提交与线上审核,简化招投标的整体流程,其自动化审核功能,还能对工程量清单进行全面细致的校验,及时发现清单中的数据误差与遗漏。

人工智能技术在招投标阶段的应用,可对投标单位提交的投标报价进行全面的智能分析,逐一拆解报价构成,对比计价标准与市场价格水平,判断投标报价的合理性,精准识别报价中的异常情况,有效防范恶性竞争行为的发生,确保最终确定的中标价格与项目实际造价水平相符。数字化技术实现的招投标全过程动态留痕,对招标、投标、评标等各个环节的操作流程、数据信息、决策过程进行完整记录,形成可追溯的数字化档案,确保招投标工作的透明化,提升招投标工作的规范性与公信力。同时实现投标单位的资质审核自动化,通过对接相关数据库,自动核实投标单位的资质等级、业绩情况、信用记录等信息,确保投标单位具备相应的施工能力与履约能力。

3.4 施工阶段:数字化技术实现造价动态管控

物联网技术作为施工阶段数字化管控的重要手段,可对施工过程中的人工、材料、机械等各类资源进行实时监控,在施工现场部署的各类传感器,能够收集施工过程中的各项运行数据,包括材料的进场数量、存储情况、消耗速度,人工的出勤工时、工作效率、工种分配,机械的使用时长、运行状态、维护情况等,所有收集到的数据都会实时传输至造价管理平台,工作人员通过平台能够实时掌握各项成本的支出情况,及时发现成本消耗过程中的不合理之处,为成本管控提供及时、准确的数据支撑。

BIM技术与施工进度管理的深度结合,可实现造价与进度的协同管控。工作人员通过BIM模型能够清晰查看施工进度与对应阶段的造价支出情况,实时核算已完成工程量的造价,对比实际成本与预算成本的差异,深入分析差异产生的具体原因,及时采取针对性的调整措施,确保成本偏差得到有效控制。数字化平台实现了工程变更与现场签证的线上规范化处理,工作人员通过平台提交工程变更与现场签证申请,上传相关的证明资料、变更图纸等,经过规范的审核流程,确保每一项变更与签证都经过严格审批、符合项目实际需求,平台同时能够实时核算变更与签证对应的造价,明确变更与签证对项目总造价的影响,让工作人员能够及时掌握造价变化情况,合理调整成本管控方案^[5]。

3.5 竣工结算阶段:数字化技术提升结算效率与准确性

工作人员借助数字化平台,可全面收集整理施工过程中的各类相关资料,包括设计图纸、工程量清单、工程变更文件、现场签证记录、工程验收报告、材料进场记录、人工与机械使用记录等所有与造价相关的资料,通过平台实现各类资料的数字化归档与分类管理,建立完善的资料数据库,数据库内的资料按照类别、时间、用途等进行分类整理,标注清晰、查询便捷,方便工作人员在结算过程中快速查询、调用各类所需资料,减少资料查找与整理的工作量。

数字化技术实现的竣工结算自动化核算,通过将BIM模型与实际施工数据进行精准对比,自动核对已完成工程量与设计工程量的差异,核算项目的实际造价,细化各项成本的支出明细,减少人工核算过程中的误差,提升结算数据的准确性。大数据技术的应用,为竣工结算的审核工作提供可靠参考,可收集同类项目的竣工结算数据,通过对比分析同类项目的造价构成、结算标准、成本差异等,为当前项目的结算审核提供参考依据,判断结算数据的合理性,确保结算结果符合项目实际造价水平。数字化平台实现的结算审核线上协同,让审核人员通过平台实时查看结算资料与核算数据,在线提出审核意见,与相关工作人员实时沟通调整,加快结算审核的进度,缩短结算周期。

4 结束语

数字化技术的快速发展,为建筑造价全生命周期管理的创新发展提供了新的机遇与支撑,推动建筑造价管理从传统的人工管理模式向数字化、智能化管理模式转型。建筑企业应推动数字化技术与造价管理的深度融合,构建完善的数字化造价管理信息平台,加强人才培养与制度建设,探索创新应用场景,持续提升造价管理整体水平,增强企业核心竞争力。

参考文献:

- [1] 折志梅.房屋建筑土木工程造价全过程控制策略[J].建材发展导向,2025,23(01):124-126.
- [2] 黄少琼.基于住宅建筑工程造价的全过程管理方法探讨成本优化控制策略[J].居舍,2024(36):167-170.
- [3] 王龙.建筑工程项目管理全过程造价及成本研究[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司.2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(三).吉安市城投资产管理有限公司,2024.
- [4] 张玉慧.建筑工程造价中全过程成本控制策略探讨[J].工程建设与设计,2024(15):219-221.
- [5] 李明瑶.基于全生命周期理论的建筑造价成本控制策略[J].建材发展导向,2025,23(17):61-63.

面向抽水蓄能电站需求的“一矿多用”资源综合评价体系构建与应用

宾梹源

(湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南 长沙 410014)

摘 要 本文针对湖南省攸县抽水蓄能电站配套建筑石料矿勘查中因地质条件突变导致主矿体资源量锐减、剥采比过高、设矿风险较高的问题, 以湖南省攸县广寒坪矿区为例, 构建了“一矿多用”资源综合评价体系。采用“地质建模—性能测试—分类测定—资源量估算”方法, 遵循“需求导向”与“分级评价”原则, 将泥盆系上统余田桥组中满足大坝填筑料技术要求(饱和抗压强度 ≥ 30 MPa)的石英砂岩与砂质板岩等圈定为可综合利用资源。结果表明, 该方法使矿区可利用资源总量提升约 25%, 剥离比从 0.870:1 降至 0.486:1 (m^3/m^3), 显著提升了矿床开发可行性, 保障了电站砂石骨料与填筑料的稳定供应, 节约工程建设成本约 3.3 亿元, 具有显著的经济与环境效益。

关键词 建筑石料用灰岩; 抽水蓄能电站; 一矿多用; 资源综合评价; 广寒坪矿区

中图分类号: TV743

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.027

0 引言

“湖南省攸县广寒坪矿区建筑石料用灰岩矿详查”是湖南省“十四五”能源规划重点建设项目—攸县抽水蓄能电站工程的配套项目, 勘查成果直接服务于电站工程建设^[1]。矿区位于攸县黄丰桥镇广和村(东经 $113^{\circ} 40' 46'' \sim 113^{\circ} 40' 31''$; 北纬 $27^{\circ} 19' 36'' \sim 27^{\circ} 19' 19''$), 交通便利。

根据前期可行性论证及详查设计, 原目标层位为泥盆系中统棋梓桥(D2q)的灰岩和白云岩。然而, 项目组实施后发现, 矿区地质条件与前期认识发生了巨大变化, 棋梓桥组与上统余田桥组(D3s)的地层界线西移 50 m $\sim$ 80 m, 导致主矿体分布范围缩小, 资源量锐减。若按原设计方案设矿, 资源难以满足电站需求。同时, 第四系覆盖层平均达 12.23 m, 远超预期的 2 m, 上述变化导致矿床剥离量巨大, 剥离比高于一般工业指标, 设矿风险升高。

鉴于电站前期工作已全面展开。重新选址将造成重大经济损失和工期延误, 为此, 攸县抽水蓄能公司提出“专矿专用、物尽其用”的思路, 在保障混凝土骨料供应的同时, 对余田桥组中满足大坝填筑料专项技术指标(饱和抗压强度 ≥ 30 MPa)的石英砂岩、板岩等进行综合利用评价^[2], 项目组据此编制补充勘察设计, 在原有工程的基础上通过加密工程对余田桥组

各类岩石进行控制。基本查明了矿区资源分布与质量特征, 为电站建设提供了可靠保障。

1 “一矿多用”综合评价体系的构建

1.1 评价原则

本综合评价体系遵循“需求导向”与“分级评价”原则。根据电站建设对大坝填筑料和混凝土骨料的差异化需求, 分别制定评价标准: 对棋梓桥组灰岩、白云岩按《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685)等现行国家标准进行评价^[3], 圈定主矿资源; 对余田桥组石英砂岩、砂质板岩则以“饱和抗压强度 ≥ 30 MPa”为指标, 筛选可综合利用岩性层。

1.2 评价方法与工作流程

为实现上述评价原则, 项目组建立了一套“地质建模—性能测试—分类圈定—资源量估算”的工作方法, 该方法突破了以往勘查中按固定层位或岩性圈定矿体的惯性思维, 以岩石实测物理和化学性能参数为依据, 判定其资源属性, 划分可利用类别并分别估算资源量, 从而对全矿区的岩石实施精准、动态的综合评价。具体工作流程如下:

1. 地质模型构建: 综合运用无人机倾斜测量及人工 RTK 测量技术, 绘制高程模型底图和正射影像图, 结合地表地质填图、钻孔编录及实测剖面资料, 绘制

作者简介: 宾梹源(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地质调查与矿产勘查。

反映地层序列、构造特征及岩性空间展布的勘查线剖面图,为岩石单元的识别和分类奠定了基础。

2. 性能测试:在查明棋梓桥组和余田桥组空间分布的基础上,依据岩性、风化程度及构造特征进行系统采样,对棋梓桥组灰岩、白云岩严格按照现行国家与行业规范开展物理力学性能测试和化学分析;对余田桥组岩石,先宏观剔除强—全风化等强度明显不达标的岩性段,对可能满足要求的岩性段实施分层连续采样,在常规测试的基础上加密对其饱和强度的测定,以满足专项评价要求。

3. 分类圈定:依据测试结果对岩矿石进行分类圈定。按照《矿产地质勘查规范 建筑用石料类》(DZ/T0341-2020)等规范^[4],将满足工业指标要求的灰岩和白云岩圈定为主矿体;将余田桥组中饱和抗压强度 ≥ 30 MPa的岩性段圈定为“可综合利用岩石”。其余未达上述要求的第四系覆盖层、风化层及各类夹石统一划为剥离物。初步圈定后,结合矿区构造特征与地层产状进行剖面线纵、横向对比连接;不连续单元则按外推法圈定为透镜体状资源块段。

4. 资源量估算:对不同类别的资源块段分别估算,层位稳定、形态规则的主矿体,采用平行断面法进行估算;呈透镜体状、分布不稳定的可综合利用岩石则依据工程控制程度采用适宜方法保守估算。最终汇总主矿体和可综合利用资源量,为“一矿多用”的开采规划与经济评价提供定量地质依据。

2 广寒坪矿区资源禀赋与评价基础

矿区位于华南加里东褶皱带攸兰断拗北部,主要出露地层为泥盆系中统棋梓桥组(D2q)及上统余田桥组(D3s),整体为一走向北东、倾向南东的单斜构造,倾角 $25^{\circ} \sim 74^{\circ}$,局部发育轴向北东的紧闭向斜,矿区整体构造复杂程度中等。

2.1 主矿体及矿石特征

矿区内矿体赋存于泥盆系中统棋梓桥组(D2q)中,属台地相碳酸盐岩沉积型矿床,岩性为灰白—灰黑色白云岩及灰—暗灰色灰岩,层内不含夹石。矿体以地层界线为界,主要分布于矿区的北西侧。整体呈厚层状产出,平均厚度130.24 m,厚度变化系数15.01%,形态稳定,连续性较好,经系统取样测试,其水饱和抗压强度47.3 MPa $\sim$ 147.8 MPa,平均76.5 MPa;压碎值、坚固性、有害组份含量及放射性比活度等指标均满足《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685-2022)中II类及以上标准,可作为优质混凝土骨料。

2.2 可综合利用岩性层及岩石特征

泥盆系上统余田桥组(D3s)分布于矿区南东侧,为一套岩性复杂、受构造与风化作用改造强烈的碎屑

岩—浅变质岩—碳酸盐岩组合。主要包括石英砂岩、砂质板岩、粉砂质泥岩及沿地层界线分布的灰岩、白云岩透镜体。相较于棋梓桥组稳定、均一的主矿体,该套岩系岩性横向变化大、空间分布不连续、风化壳深厚(局部超百米)。尽管部分样品物理力学性能满足相关规范要求,但其资源分布的可靠性与质量稳定性难以满足矿体圈定要求。

为此,本次工作围绕攸县抽水蓄能电站对大坝填筑料的专项技术标准(饱和抗压强度 ≥ 30 MPa),对余田桥组各类岩石进行了系统采样与性能测试(表1、表2),共圈定3层符合该技术标准的岩性层(Tz-1号、Tz-2号、Tz-3号),均呈透镜体状分布于矿区南东侧,其空间展布主要受地层与构造控制^[5]。其中,Tz-1号岩性层以砂质板岩为主,夹少量泥质粉砂岩与砂质泥岩,平均厚度33.01 m;Tz-2、Tz-3号层则以石英砂岩为主,局部夹少量泥质粉砂岩与砂质泥岩,平均厚度分别为5.55 m和28.41 m。

3 综合评价体系在矿区的应用实践

在广寒坪矿区,项目组按照综合评价工作流程,在广寒坪矿区对棋梓桥组和余田桥组的各类岩石进行了系统性的应用实践。

首先,基于地质资料加密勘查工程。在余田桥组(D3s)岩性复杂区加密部署勘查线与钻探,提升空间控制程度;同时利用高精度地形模型和钻探数据,分段布置基本分析样和岩矿鉴定样,重点查明棋梓桥(D2q)与余田桥组地质界线,为资源量估算提供依据。

其次,实施了“按需采样、分级测试”方案。对棋梓桥组灰岩、白云岩按规范要求系统采样,测试其建筑骨料性能指标。对余田桥组各类岩石,则依据岩性露头 and 钻孔岩芯,以寻找满足填筑料强度指标的岩石为目标进行重点追踪和分层连续采样,重点测试其饱和抗压强度,辅以岩矿鉴定、小体重、吸水率等基础物性测试。

4 综合资源评价成果与效益分析

4.1 综合资源评价成果

本次勘查工作基本查明了矿区地层、构造及矿体地质特征。根据“一矿多用”综合评价体系,针对泥盆系中统棋梓桥组主矿体,基本查明了其空间展布、规模形态、产状、矿物成分、结构构造、主要物理力学性能及化学成分,其矿石质量稳定,满足《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685-2022)II类标准。对泥盆系上统余田桥组,以饱和抗压强度 ≥ 30 MPa为核心,大致查明了可综合利用岩石(石英砂岩与砂质板岩)的分布规律、岩性组合、物理力学性能、主要化学成分及放

表 1 可综合利用砂质板岩测试数据与工业指标对照表

分析项目	单位	测试结果			数量（件）	质量指标类别及样品数量			
		最大值	最小值	平均值		I 类	II 类	III 类	不合格
水饱和抗压强度	MPa	143.4	34.6	68.9	30		15		15
体积密度（小体重）	g/cm ³	2.82	2.48	2.70	30		/		/
吸水率	%	3.74	0.17	1.14	12	6	5		1
坚固性	%	5.6	0.8	2.4	29	28	1		
压碎值	%	38.5	9.3	16.6	29	2	20	4	1
表观密度	g/cm ³	2.80	2.50	2.66	11		10		1

表 2 可综合利用石英砂岩测试数据与工业指标对照表

分析项目	单位	测试结果			数量（件）	质量指标类别及样品数量			
		最大值	最小值	平均值		I 类	II 类	III 类	不合格
水饱和抗压强度	MPa	203.6	33.8	106.3	29		27		2
体积密度（小体重）	g/cm ³	2.72	2.33	2.59	27		/		
吸水率	%	9.03	0.52	2.33	11	3	4	2	2
坚固性	%	3.2	0.5	1.8	27	27			
压碎值	%	26.1	8.9	13.3	27	4	21	2	
表观密度	g/cm ³	2.71	2.35	2.58	10		6		4

射性水平等。经估算，矿区内建筑石料用灰岩矿保有资源量 897.3 万 t，可综合利用砂质板岩推断资源量 202.3 万 t，可综合利用石英砂岩推断资源量 24.3 万 t，剥离量为 199.7 万 m³，剥采比为 0.486:1（m³/m³）。通过综合利用余田桥组岩石，矿区可利用资源量增加约 25%，为电站建设提供了可靠保障。

4.2 效益分析

矿山设计开采规模为 498 万 t/a，服务年限 2.1 年，总投资 10 181.2 万元，生产期内总生产成本约 40 660 万元。根据《株洲市攸县广寒坪抽水蓄能项目配套建筑石料用灰岩矿开采规划区块设置可行性论证报告》测算，若采用外购砂石方案，工程总成本约 7.36 亿元。对比表明，设置配套矿山较完全外购方案可节约工程建设成本约 3.3 亿元。同时，资源综合利用减少了废石排放与排土场压力，契合抽水蓄能电站土石方综合利用要求^[6]，实现了经济、环境效益协同发展，践行矿产资源绿色勘查与综合利用理念。

5 结束语

本次勘查因地质条件变化，主矿资源量减少，初始剥采比高达 0.870:1，设矿风险较大。通过“一矿多用”综合评价体系，将余田桥组饱和抗压强度≥30 MPa 的

岩石圈定为可综合利用资源，新增资源量 84.3 万 m³，使剥采比降至 0.486:1，满足工业指标要求，矿区具备开发可行性。该方法保障了电站砂石骨料与填筑料的稳定供应，节约成本约 3.3 亿元，为同类配套石料矿勘查与绿色开发提供了技术参考，也为抽水蓄能电站资源高效利用提供了实践借鉴。

参考文献：

[1] 湖南省水文地质环境地质调查监测所.湖南省攸县广寒坪矿区建筑石料用灰岩矿详查报告[R].长沙:湖南省水文地质环境地质调查监测所,2025.

[2] 周志强,张承伟,谢启鹏.矿产资源综合利用与绿色勘查技术研究[J].中国金属通报,2025(10):103-105.

[3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.建设用卵石、碎石:GB/T 14685—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.

[4] 中华人民共和国自然资源部.矿产地质勘查规范 建筑用石料类:IDZ/T 0341-2020[S].北京:地质出版社,2020.

[5] 同[4].

[6] 阳凤,蔡德文,郝连安.抽水蓄能电站土石方综合利用、弃渣场选址与措施布局[J].水电与新能源,2024,38(07):51-54.

水利工程精细化管理实践与应用

朱兴波

(水发数字科技有限公司, 山东 青岛 266101)

摘要 本文以水利工程管理高质量发展为核心, 针对传统模式下管控粗放、资源配置低效、协同不足、全生命周期管理脱节等痛点, 结合精细化管理的标准化、数字化、动态化、全流程管控理念, 系统探究其在工程设计、施工、运维、水资源调度等环节的实践路径。研究采用案例分析与实践验证法, 梳理各环节应用机理, 构建“标准引领+数字赋能+动态管控+协同共治”的水利工程精细化管理新模式, 重点拆解数字化监测、智能调度、标准化运维、精准成本管控的实操方法, 以期为破解水利工程管理粗放难题提供参考。结果表明, 该模式可将施工质量缺陷率降低70%以上, 水资源利用效率提升30%, 工程运维成本降低25%, 综合管理效率较传统模式提升50%。

关键词 水利工程; 精细化管理; 数字赋能; 全生命周期; 水资源调度

中图分类号: TV98

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.028

0 引言

水利工程作为民生保障与生态建设的核心基础设施, 涵盖防洪、灌溉、供水、生态补水等多重功能, 其管理水平直接关系到工程运行安全、水资源利用效率与生态保护成效。随着我国水利工程向大型化、复杂化、多功能化发展, 传统管理模式的短板日益凸显: 施工阶段依赖人工巡检与经验调度, 质量与安全管控缺乏量化支撑; 水资源调度凭经验开展, 难以实现按需精准配水; 各参建单位与管理部门信息传递脱节, 协同管理效率低下; 工程设计、施工、运维阶段数据割裂, 全生命周期管理效能未充分发挥。精细化管理作为现代工程管理的核心理念, 契合水利工程高质量发展的需求, 已成为水利行业转型升级的重要方向。近年来, 国内多地在灌区、水库、调水工程中探索精细化管理实践, 通过数字孪生、物联网、智能监测等技术与管理深度融合, 实现了工程管控的精准化与水资源调度的科学化。本文结合近三年水利行业精细化管理实践, 系统分析其在工程各管理环节的应用要点, 通过工程案例验证应用效果, 提出落地保障措施与优化建议, 为水利工程精细化管理的规模化应用提供参考。

1 水利工程管理现存问题与精细化管理的适配性

1.1 传统水利工程管理的核心痛点

传统水利工程管理面临四大核心问题, 制约行业高质量发展。其一, 管控方式粗放, 施工阶段质量检测、

安全巡检依赖人工, 数据记录不完整, 隐患发现滞后, 易引发工程质量问题与安全事故; 运维阶段缺乏标准化流程, 设备维护凭经验开展, 故障率较高。其二, 水资源调度低效, 缺乏精准的水情、墒情监测数据支撑, 灌溉、供水仍以“大水漫灌”为主, 水资源浪费现象突出, 难以适配节水型社会建设需求。其三, 协同管理不足, 设计、施工、运维、管理部门之间缺乏统一的信息交互平台, 数据标准不统一, 信息传递失真、滞后, 导致工程改造与调度决策缺乏科学依据。其四, 全生命周期管理脱节, 设计阶段的工程数据未有效传递至施工与运维阶段, 运维阶段的运行数据也未反向指导设计优化, 工程全生命周期价值难以发挥。

1.2 精细化管理与水利工程管理的适配性

精细化管理的标准化、数字化、动态化、协同化特性, 与水利工程管理的精准化、高效化、智能化需求高度适配, 可从根源上解决传统管理模式的痛点^[1]。其一, 标准化管理可构建覆盖设计、施工、运维全流程的管理标准与操作规范, 明确各环节管控指标与责任分工, 实现工程管理的规范化、流程化, 减少人为操作误差。其二, 数字赋能可通过物联网、卫星遥感、智能监测等技术, 构建“天空地水”一体化监测体系, 实现水情、工情、墒情数据的实时采集与传输, 为精准调度与动态管控提供量化依据。其三, 动态管控可通过实时数据监测与智能分析, 实现工程质量、安全、运维的事前预警、事中调控、事后复盘, 及时发现并

作者简介: 朱兴波 (1987-), 男, 本科, 研究方向: 水利工程。

解决管控漏洞。其四,协同共治可搭建统一的信息管理平台,整合各部门、各阶段数据资源,实现信息实时共享与高效传递,打破信息壁垒,提升多主体协同管理效率。

2 水利工程精细化管理的实践应用要点

2.1 设计阶段:标准化设计与方案优化

设计阶段是水利工程精细化管理的源头,核心在于通过标准化设计与数字化模拟,从根源上提升工程设计的科学性与合理性^[2]。构建水利工程标准化设计体系,明确灌区、水库、堤防等不同类型工程的设计指标、构件参数、工艺要求,实现设计成果的规范化与模块化,减少设计偏差。利用数字孪生、BIM 等技术构建工程三维模型,对工程结构受力、水流演进、水资源调度进行仿真模拟,优化工程布局与设计方案。针对大型调水工程、复杂灌区等项目,通过模型模拟不同工况下的工程运行效果,提前发现设计缺陷,优化输水线路、闸门布置、量测水设施配置等关键环节,确保设计方案与工程实际运行需求高度匹配,为后续施工与运维奠定基础。

2.2 施工阶段:质量、安全与进度的精准管控

施工阶段是水利工程精细化管理的核心环节,通过“数字监测+现场管控+标准执行”的联动模式,实现质量、安全、进度的精准化管控。在质量管理方面,构建全过程质量检测体系,通过智能传感器、无人机巡检等技术,对工程混凝土浇筑、渠道衬砌、桩基施工等关键工序进行实时监测,采集质量数据并与标准指标对比,对质量偏差及时预警并整改;建立质量档案数字化管理系统,记录各工序质量检测数据、材料检测报告,实现质量问题的可追溯。在安全管理方面,对深基坑、高边坡、围堰施工等危险性较大的环节,开展施工方案仿真模拟,优化安全防护措施;通过人员定位、视频监控等技术,实现施工现场危险区域的实时监控,对违规操作自动预警,杜绝安全事故。在进度管理方面,结合工程施工计划与现场实际情况,构建动态进度管控模型,实时采集施工进度数据,对比计划进度与实际进度,对进度偏差分析原因并调整施工方案,优化资源配置,确保工程按期完工^[3]。

2.3 水资源调度:精准监测与智能调配

水资源调度精细化是水利工程发挥效益的核心,通过“精准监测+智能分析+科学调度”,实现水资源的优化配置与高效利用。构建一体化水情墒情监测体系,在江河、渠道、灌区布置智能量测水设施、墒

情监测站、视频监控设备,通过 5G 网络实现水流速度、水位、土壤墒情、作物需水等数据的实时采集与传输,确保调度数据的精准性。搭建水资源智能调度平台,整合监测数据、气象数据、工程运行数据,通过大数据分析构建水资源调度模型,实现灌溉、供水、生态补水的智能化调配。针对灌区工程,根据土壤墒情与作物需水规律,将“大水漫灌”转变为“精准滴灌、按需配水”,缩短灌溉周期,提升水资源利用效率。

2.4 运维阶段:标准化运维与数字化管理

运维阶段的精细化管理直接关系到水利工程的运行寿命与效益发挥,核心在于构建“标准化运维+数字化管控+全生命周期管理”的运维体系。制定水利工程标准化运维规范,明确闸门、泵站、渠道等设施的日常巡检、维护、保养流程与指标,将运维责任落实到人,实现运维工作的规范化、常态化。搭建工程运维数字化管理平台,整合工程设备参数、维护记录、运行数据,实现设备全生命周期管理;通过智能监测技术实时采集设备运行状态数据,对设备故障提前预警,制定预防性维护计划,降低设备故障率与运维成本。将施工阶段的工程数据、质量档案与运维阶段的运行数据整合,形成工程全生命周期数据档案,为工程改造、翻新、升级提供科学依据,实现设计、施工、运维的闭环管理^[4]。

3 工程案例验证与应用效果分析

3.1 工程案例概况

以湖北襄阳引丹灌区工程为研究对象,该工程设计灌溉面积 210 万亩,是鄂北地区粮食安全保障的核心水利工程,涵盖渠道、泵站、闸涵等多种水利设施,施工工艺复杂,水资源调度与工程运维难度大。项目以精细化管理为核心,构建“标准引领+数字赋能+协同共治”的管理模式,搭建智慧灌区管理平台,布设 88 套视频监控、10 套量测水监测站、15 处固定墒情监测站,实现水情、工情、墒情的实时监测与智能调度,将精细化管理深度融入工程施工、水资源调度、运维管理全流程,重点监测水资源利用效率、工程运维成本、施工质量缺陷率、灌溉保障率等指标,验证精细化管理在水利工程中的应用效果。

3.2 应用效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统管理模式对比,精细化管理在该工程中的应用取得显著成效。在施工管理方面,通过标准化施工与数字监测,工程施工质量缺陷率降低 75%,工程质量验收一次合格率达 100%,

施工进度偏差控制在4%以内,较传统模式缩短施工周期15%。在水资源调度方面,依托智能调度平台实现精准配水,灌区水资源利用效率提升35%,新增节水能力5 877万立方米,灌溉周期从传统的15天~20天缩短至8天~12天,在2025年水资源总量减少30%的极端情况下,成功保障160万亩农田灌溉用水,实现“大旱之年无大灾”。在运维管理方面,通过标准化运维与数字化管控,工程设备故障率降低60%,骨干渠道综合完好率提升至90%,工程运维成本较传统模式降低28%;依托全生命周期数据档案,工程改造方案设计效率提升80%,改造成本降低20%。在协同管理方面,通过智慧管理平台实现各部门信息实时共享,沟通效率提升90%,调度决策审批周期缩短65%,多主体协同管理效率显著提升。项目通过精细化管理的应用,累计新增粮食生产能力7 598万公斤,创造直接经济效益超亿元,综合管理效率较传统模式提升55%,成为灌区工程精细化管理的标杆案例。

4 水利工程精细化管理落地的保障机制与优化建议

4.1 技术应用落地的保障机制

为确保精细化管理在水利工程中有效落地,需从组织、制度、人才三个维度构建完善的保障体系。在组织保障方面,成立由水利管理部门牵头,设计、施工、运维、科研单位参与的精细化管理专项小组,明确各单位职责分工,建立定期沟通协调机制,统筹推进精细化管理在各环节的应用。在制度保障方面,制定水利工程精细化管理实施办法,明确标准化设计、施工管控、智能调度、运维管理的具体标准与考核指标,将精细化管理应用效果纳入各单位绩效考核,实行奖惩分明^[5]。在人才保障方面,开展精细化管理与数字技术专项培训,针对水利工程设计人员、施工管理人员、调度运维人员开展差异化培训,提升从业人员的标准化操作能力与数字技术应用水平。

4.2 技术应用优化建议

结合水利工程行业特性与精细化管理应用现状,提出针对性的优化建议,推动精细化管理向更深层次、更广范围发展。一是推动技术融合创新,加强精细化管理与数字孪生、人工智能、北斗定位、物联网等技术的集成应用,构建“精细化管理+智慧水利”的管理体系,实现工程管控与水资源调度的智能化、自动化。二是统一数据标准与平台,由水利行业主管部门牵头,制定全国统一的水利工程数据采集、传输、共享标准,搭建区域性水利工程精细化管理平台,实现各部门、

各阶段数据的无缝对接与共享,解决信息孤岛问题。三是因地制宜分级应用,针对大型灌区、跨区域调水工程等复杂水利工程,全面推行全流程精细化管理;针对小型水库、农村供水工程,简化管控流程,聚焦核心环节实施精细化管理,提升管理的针对性与实效性^[6]。四是强化政策引导与支持,水利行业主管部门进一步完善精细化管理相关政策,扩大精细化管理示范应用范围,对精细化管理示范项目给予政策扶持与资金奖励,引导更多水利工程推行精细化管理模式。

5 结束语

水利工程精细化管理是推动水利行业现代化、高质量发展的必然趋势,其核心价值在于通过标准引领、数字赋能、动态管控、协同共治,打破传统水利工程管理的粗放化格局,实现设计、施工、水资源调度、运维全生命周期的一体化精准管控。本文通过系统分析精细化管理在水利工程各管理环节的应用要点,构建了精细化管理的保障体系与优化策略,有效解决了传统水利工程管理中管控粗放、调度低效、协同不足、全生命周期脱节等痛点。随着我国水利行业数字化转型的不断深入,精细化管理的应用将向更智能、更深度、更广泛的方向发展。未来,应进一步推动精细化管理与新兴数字技术的融合创新,完善行业标准与应用体系,加强复合型人才培养,推动精细化管理在水利工程中的规模化、标准化应用。通过精细化管理的深度学习,持续提升水利工程管理效率与水资源利用效率,降低工程建设与运维成本,保障工程运行安全,为我国水安全保障、粮食安全供给与生态环境保护提供坚实的管理支撑。

参考文献:

- [1] 江涛.水利水电工程施工中的信息化技术应用与优化管理研究[J].治淮,2024(01):38-39.
- [2] 毛易达.水利水电工程施工质量控制与动态监管研究[J].中国品牌与防伪,2025(08):146-148.
- [3] 蔡笑枫.水利水电工程施工过程质量监督管理工作的探讨[J].新潮电子,2023(03):118-120.
- [4] 陈森.影响水利工程施工质量控制的主要因素及对策措施研究[J].水上安全,2023(16):142-144.
- [5] 于兴华.水利工程施工质量控制措施探究[J].治淮,2023(02):39-40.
- [6] 张旭.水利工程施工质量控制及管理措施[J].智能城市应用,2023(08):39-41.

建筑工程管理问题及应对措施研究

苏文波, 苏广安

(山东旭华园林工程有限公司, 山东 东营 257091)

摘要 建筑工程管理贯穿项目立项、施工建设到竣工验收全流程, 是把控工程质量、控制建设成本、保障施工安全、推进项目有序落地的核心环节, 直接关系到工程项目整体成效与行业发展质量。当前建筑工程管理仍存在体系不完善、管控模式粗放、技术应用滞后、环保意识薄弱等问题, 制约项目效能提升。本文在明确建筑工程管理核心价值的基础上, 梳理行业管理工作中的突出问题, 结合工程实操要求, 提出优化管控效能的具体措施, 以期为规范工程管理流程、化解管理痛点、推动建筑行业高质量发展提供参考。

关键词 建筑工程管理; 质量管控; 精细化施工; 绿色施工

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.029

0 引言

建筑行业是国民经济发展的重要支柱产业, 工程建设周期长、涉及专业多、现场管控环节复杂、影响因素多元, 管理工作覆盖质量、安全、成本、进度、环保等多个方面。任何环节管控缺位, 都会影响项目整体推进, 甚至引发工程质量隐患与安全风险。行业发展要求不断提升, 传统粗放式管理模式已难以适配现代化工程建设需求, 梳理管理短板、优化管控模式、完善管理体系, 是提升工程项目综合效益的必要路径, 对保障工程品质、规范行业秩序、推动建筑行业可持续发展意义重大。

1 建筑工程管理的核心价值

1.1 守护公众生命财产安全

建筑工程的最终使用主体是社会公众, 工程质量与安全直接关系到公众切身利益, 完善的工程管理是筑牢安全防线的基础。全流程规范管控能够严格把控施工操作、材料质量、结构安全等关键环节, 规避质量缺陷、安全隐患, 确保工程项目交付后符合安全使用标准, 避免因管理缺位引发安全事故, 切实保障社会公众的生命与财产安全, 维护社会公共利益^[1]。

1.2 提升工程使用价值与经济效益

高效的工程管理能统筹协调项目进度、成本与质量的关系, 在保障工程质量达标的前提下, 合理控制建设成本, 减少材料浪费、工期延误、返工重修造成的经济损失。规范管控施工流程、优化资源配置, 可提升项目建设效率, 确保工程项目按期交付、达标使用,

延长工程使用寿命, 提升工程整体使用价值, 实现项目建设经济效益与实用效益双提升。

1.3 推动建筑行业稳步转型发展

建筑工程管理水平直接反映行业整体发展质量, 优化工程管理体系, 推广精细化、信息化、绿色化管控模式, 能带动行业整体管理理念与实操水平提升。规范的管理模式为行业项目建设提供标准化参考, 助力行业摆脱传统粗放发展模式, 向高质量、高效率、低能耗方向转型, 适配行业现代化发展要求, 推动建筑行业整体稳健有序发展。

2 建筑工程管理工作的现存短板

2.1 质量管控体系缺乏系统性与规范性

不少建筑工程项目在质量管理环节缺少成体系、可落地的标准化管控框架, 多依赖临时管控要求, 缺乏贯穿全流程的固定制度支撑。项目内部管理权责划分不清晰, 岗位与岗位、部门与部门之间的质量管控边界模糊, 出现问题易相互推诿, 质量管控责任难以真正压实到具体班组、具体个人, 无法形成责任闭环。施工推进中, 质量检查、分项验收、复核复检等核心管控环节多流于形式, 未严格按照既定标准逐一核查落实, 缺乏全过程动态质量监督机制^[2]。

2.2 管理模式粗放, 精细化管控落实不到位

现阶段, 多数建筑工程项目仍延续传统粗放式管理思路, 自上而下缺乏全流程精细化管控意识, 未针对施工全周期制定细致管控规划, 对各类资源、各个环节的把控仅停留在表面, 难以实现精准管控。在施

作者简介: 苏文波 (1973-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程管理。

工材料管理上,从采购计划制定、进场验收,到现场存储保管、领用发放,均缺少量化管控标准和台账约束,材料采购量与实际需求不匹配、进场材料抽检不到位、在现场存储不当造成损耗、领用无记录造成浪费等问题频发。在现场人员管理上,未明确细化各岗位工作职责、操作标准和考核细则,施工人员、管理人员的责任意识参差不齐,专业能力与岗位需求不匹配,人员调配不合理,施工效率难以提升。在施工技术管控上,缺少标准化操作流程和现场监督机制,技术交底不透彻,现场施工操作随意性强,关键工序管控缺位,既影响施工进度,也无法保障施工质量,整体管理效能偏低^[3]。

2.3 信息化手段应用不足,管理效率偏低

部分建筑工程项目管理仍过度依赖人工统计、人工巡查、人工上报的传统模式,数字化、信息化管理工具普及率不高,应用深度也远远不够。施工现场各环节、各专业之间的信息传递,多依靠口头沟通、纸质单据流转,信息传递滞后、误差较大,数据无法实时共享,上下游环节信息衔接存在明显断层,易出现信息不对称引发的管理失误。即便部分项目引入信息化管理系统,也多停留在基础数据录入的浅层应用,未充分发挥系统在进度跟踪、成本核算、质量监管、安全隐患排查等方面的核心功能,数据整合分析、风险预警等价值未得到体现。信息化手段未真正融入管理全流程,仍依靠人工经验开展管控,管理精准度和整体效率,无法适配现代化建筑工程高效建设、规范管控的实际需求。

2.4 绿色施工重视不够,环保管控存在缺位

很多项目管理团队在施工过程中,将重心全部放在工程质量、施工进度和成本控制上,对绿色施工、生态环保的管控重视不足,未将环保要求纳入日常管理核心范畴,也未建立专项绿色施工管控机制。施工现场各类污染防控措施不完善,施工扬尘、粉尘等空气污染治理流于形式,洒水降尘、物料覆盖等措施执行不到位;施工产生的各类固体废弃物随意堆放、混放,未做好分类处置和回收利用,既浪费资源,又污染场地及周边环境;施工噪声管控不规范,高噪声设备无防护、施工时间规划不合理,对周边居民正常生活和周边环境造成明显干扰。

3 建筑工程管理水平提升的具体实施路径

3.1 构建健全完善的标准化质量管控体系

解决质量管控短板,需结合项目实际规模、施工特点和规范要求,构建覆盖施工全周期、全环节的标

准化质量管理体系,摒弃零散、临时的管控模式。在体系构建中,重点明确各部门、各岗位、各施工环节的质量管控职责,细化责任分工,消除权责模糊地带,将每一项质量管控责任落实到具体负责人和操作人员,形成权责清晰、层层压实、闭环管理的管控格局。同时,制定统一、可执行的质量管控标准、工序操作规范和分项验收准则,让每一道施工工序、每一项质量检查都有明确依据。强化施工全过程动态质量监督、常态化检查和多级复核,配套建立质量问题台账、整改跟踪和责任追溯机制,对施工各环节全程跟踪管控,发现隐患立即督促整改,整改不到位绝不进入下一道工序,从源头把控工程质量,确保项目全程质量可控、最终达标交付^[4]。

3.2 全面推进全流程精细化管理模式

3.2.1 施工材料全流程精细化管控

施工材料管控是精细化管理的核心,需针对材料全生命周期开展闭环管控,从源头把控质量、控制损耗。采购环节需结合施工图纸和现场进度,精准核算各类材料实际需求量,制定科学采购计划,避免盲目采购、过量采购造成积压浪费,同时严格筛选供应商,把控材料出厂质量。材料进场环节严格执行进场验收和抽检流程,核对材料规格、型号、质量证明文件,不合格材料一律清退出场,严禁投入使用。现场存储环节按照材料特性分类分区存放,做好防潮、防锈、防火、防损耗防护,规范堆放标识,避免材料变质、损坏。领用使用环节建立完善登记台账,实行限额领用制度,精准记录每一批材料的领用数量、使用部位,杜绝随意领用、浪费损耗,切实降低材料成本,保障施工用料质量。

3.2.2 施工现场人员精细化管控

人员管控直接影响管理落地效果,需建立完善的人员管理、培训与绩效考核机制,明确各岗位人员的工作职责、操作标准和行为规范,让每一位工作人员都清楚自身岗位职责和工作要求。定期开展专业技能培训和责任意识教育,覆盖施工操作、安全规范、质量管控等内容,稳步提升施工人员和管理人员的专业素养与实操能力,杜绝因人员能力不足、意识薄弱引发的管理问题。实行定岗定责、专人专岗,结合人员专业能力合理调配岗位,配套完善绩效考核制度,将工作质量、施工效率、责任落实情况与绩效考核挂钩,奖惩分明,充分激发工作人员的积极性和责任心,规范现场施工和管理行为,减少人为因素导致的各类问题,提升现场施工和管理效率。

3.2.3 施工技术全过程精细化管控

施工技术管控是保障工程质量的关键,需推行全过程标准化、精细化管控,杜绝技术操作随意性。施工正式开展前,组织技术人员、施工班组做好全面技术交底,详细讲解施工工艺、技术标准、操作要点和质量要求,确保每一位施工人员吃透技术方案、掌握操作规范。在施工过程中,严格按照既定技术方案和规范流程推进,安排专业技术人员常驻现场,开展实时技术指导和全程监督,及时纠正不规范操作,排查技术隐患。针对特殊工序、关键施工部位和复杂工艺,单独制定专项技术管控方案,加大管控力度,做好技术参数复核和施工质量验收,确保每一项施工技术落实到位,以严谨的技术管控筑牢工程质量基础。

3.3 深化信息化技术融合,提升管理智能化水平

紧跟建筑行业现代化管理发展趋势,摒弃传统人工管控模式,将信息化、数字化技术全面融入工程管理全流程,补齐管理效率短板^[5]。结合项目管理需求,搭建一体化工程信息管理平台,整合质量管控、进度跟踪、成本核算、安全管理、人员调配、材料管理等各类数据,实现施工现场各环节、各专业信息实时上传、数据共享,打破信息壁垒,解决信息传递滞后、不对称问题。充分利用信息化管理平台、数字化管控工具,开展动态进度跟踪、实时成本核算、远程质量监管、现场安全巡查等工作,借助数据整合分析实现管理风险提前预警,减少人工管控失误和漏洞,简化管理流程,提升管理精准度和工作效率,推动工程管理从传统人工模式向智能化、高效化、数字化模式转型,适配现代化工程建设管控需求。

3.4 强化绿色施工管控,落实环保建设要求

3.4.1 施工现场空气污染专项治理

将空气污染管控纳入日常施工管理重点,制定专项防控方案和执行标准,全程落实扬尘、粉尘治理措施。施工现场安排专人定时洒水降尘,保持场地湿润,减少扬尘产生;裸露土方、易产生扬尘的建筑材料,全程采用防尘网全覆盖,杜绝粉尘飘散;施工车辆、运输车辆进出施工现场,必须经过冲洗除尘,避免车辆带泥上路、沿途抛洒。规范现场粉尘作业流程,尽可能降低粉尘扩散,严格管控施工现场空气质量,最大限度减少施工对周边大气环境的污染。

3.4.2 施工固体废弃物分类管控与资源化利用

规范施工现场固体废弃物管理,建立分类处置、回收利用的管控机制,减少环境污染和资源浪费。施工现场划分专门垃圾存放区域,对施工废料、建筑垃圾、

生活垃圾分类存放、标识清晰,避免混放和随意堆放。对可回收利用的建筑废料、边角料,安排专人统一收集、整理,交由专业机构回收再利用,提升资源利用率;不可回收的建筑垃圾和生活垃圾,按照当地环保要求,委托专业单位规范清运、合规处置,杜绝垃圾乱堆乱放、随意丢弃,保持施工现场整洁,降低固体废弃物对环境的负面影响。

3.4.3 施工噪声污染专项防控

结合项目周边环境和施工需求,合理规划施工时间,避开居民休息时段开展高噪声施工工序,从源头减少噪声干扰。优先选用低噪声、低振动的施工设备和工艺,对切割机、搅拌机等高噪声设备,搭设隔音棚、安装隔音棉等降噪设施,降低噪声传播。加强现场设备维护保养,避免设备故障产生异常噪声,同时规范现场施工行为,减少人为敲击、喧哗产生的噪声,严格控制施工噪声分贝,确保符合环保管控标准,避免影响周边居民正常生活,践行绿色施工、文明施工要求。

4 结束语

建筑工程管理是覆盖全流程、多方面的系统性工作,直接影响工程项目质量、安全、效益与行业发展态势。面对当前管理工作中体系不完善、模式粗放、信息化滞后、环保管控薄弱等问题,需立足于行业发展与项目实操需求,针对性优化管控措施。完善质量管理体系、推行精细化管理、深化信息化应用、强化绿色施工管控,能全方位提升工程管理效能,化解各类管理痛点,保障工程项目有序推进、质量达标。持续优化工程管理模式,既能提升项目综合效益,也能推动建筑行业摆脱粗放发展模式,向高质量、绿色化、现代化方向稳步发展。

参考文献:

- [1] 林东伟. 建筑工程施工安全管理问题及应对措施研究[J]. 房地产世界, 2023(12):76-78.
- [2] 陆晓宇. 建筑工程质量安全监督管理问题及应对措施[J]. 中国住宅设施, 2025(09):173-175.
- [3] 杨广志. 论绿色建筑工程管理中的问题与应对措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(06):35-37.
- [4] 杨帆. 住宅建筑工程施工项目管理中存在的问题及应对措施探析[J]. 居舍, 2025(27):165-168.
- [5] 潘月. 建筑工程管理问题及应对措施探究[J]. 房地产世界, 2023(21):109-111.

BIM技术在建筑施工安全管理中的应用分析

何振伟¹, 王晓帅²

(1. 山东垦水路桥工程有限责任公司, 山东 东营 257500;

2. 东营市垦利区水利工程公司, 山东 东营 257500)

摘要 建筑施工安全是工程建设的底线,直接关系到施工人员的生命财产安全、企业的经济效益与社会声誉,更是建筑行业高质量发展的核心前提。本文主要以建筑施工安全管理中应用BIM技术实践为重点,首先对BIM技术核心特性进行分析,其次从施工前期准备阶段、施工过程管控阶段、应急管理阶段、总结复盘阶段等方面深入探讨,最后分析其相较于传统管理模式的核心优越性,旨在为相关研究提供参考。

关键词 BIM技术; 建筑施工; 安全管理

中图分类号: TU17; TU75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.030

0 引言

我国构建了以《安全生产法》为核心,《建设工程安全生产管理条例》等行政法规为配套的安全生产法律体系,不断强化建筑施工安全监管力度,但建筑施工安全事故仍时有发生,高空坠落、坍塌、物体打击、触电等事故类型频发,暴露出传统安全管理模式的局限性。而BIM技术作为一种新型数字化管理工具,可构建三维可视化模型,整合建筑工程的几何信息、物理信息、施工信息等多维度数据,实现了施工过程的全程模拟、协同管理与精准管控。因此,相关人员需基于BIM技术的核心特性,分析其在建筑施工安全管理中的实践应用与优越性,进一步提升安全管理效果、降低事故发生率,推动建筑施工安全管理朝着数字化、智能化方向发展。

1 BIM技术核心特性

BIM技术核心非常契合建筑施工安全管理需求,具体体现在:(1)可视化,可构建三维模型,更具体展现建筑结构、施工程序、风险区域等,做到“所见即所得”,有利于工作人员第一时间掌握隐患情况。(2)参数化,模型构建涵盖诸多参数,BIM技术可精准验算风险,还能实时更新,和施工保持同进步^[1]。(3)协同性,能创建统一系统,为建设、施工等主体共享安全信息提供支持,不仅改变信息壁垒局面,更推动协同管控成效。(4)模拟化,模拟施工程序、应急场景等,提前判定潜在风险,进一步优化方案,还能进行模拟演练,全面增强应急效果。(5)可追溯性,全程记录施工期间的安全资料,汇总成管理档案,出现异常方便追溯、认定责任。

2 建筑施工安全管理中BIM技术的实践应用

依据上文提到的BIM技术多元核心特点,BIM技术在建筑施工安全管理工作中具有非常高的应用价值,可进一步弥补传统安全管理的不足。为实现对施工安全的全程管控、精准防患,立足于建筑施工全周期,从以下四个阶段,详细探讨BIM技术在安全管理中的实践应用,清楚每个阶段技术应用重点,最大化发挥BIM技术优势,为建筑施工安全管理提供具有操作性的实践指引。

2.1 施工前期准备阶段: 风险预判与方案优化

施工前期做的准备是安全管理的重要根基,直接决定后续施工安全管控成效。这一阶段引入BIM技术,可做到隐患前置防治,如在风险预判过程中,基于BIM三维模型整合地质、设计、规范等诸多信息,对施工现场进行整体分析,精确定位出风险源^[2]。例如:深基坑施工前进行开挖过程的模拟,参考地质条件对边坡稳定性进行研判,预先判定坍塌隐患;在高空及起重作业涉及的区域,通过模型标记防护点、模拟机械的运行轨道,找出坠落及碰撞潜在的风险,凭借参数化分析量化风险等级,为精准管理提供资料,真正获取安全管理的主动权。在施工方案优化方面,依靠BIM技术对方案做模拟验算,优化工序,降低风险,如在高支模施工中,采用三维模型对承载力和稳定性做验算,优化搭设布局,防止因支架搭建不合理造成坍塌;交叉作业时模拟各工种施工流程,科学分割作业时间和范围,降低冲突所致的物体打击、坠落等风险。以某大型城市综合体项目为例,运用BIM技术对深基坑

作者简介: 何振伟(1989-),男,本科,工程师,研究方向: 建筑工程。

支护与高支模方案进行优化,预先消除 3 处重大安全风险,夯实施工安全保障。在安全交底阶段,BIM 以可视化模式替代传统纸质与口头交底,管理人员借助模型呈现施工步骤、风险点位、防护措施,使施工人员掌握安全要点,如脚手架搭建之前,以模型展示搭设的标记和细节,使作业人员直观明晰规范要求^[3]。与传统方式相比较,BIM 可视化交底可有效提升理解的程度显著降低由交底不清造成的违规操作,为施工整个进程的安全提供有力保障。

2.2 施工过程管控阶段:动态监控与隐患闭环

施工过程作为安全事故出现的高发环节,也是安全管理的重点,该阶段应用 BIM 技术实现动态监控、提升隐患排查效果,真正实现闭环管理,增强安全措施有效性。在动态监控方面,BIM 可衔接物联网、传感器等,创建智能系统完成动态管控,如深基坑施工期间,利用位移传感器、应力传感器将数据上传 BIM 模型,方便负责人员清楚掌握变形、受力状况,一旦超阈值会自动报警;起重机械中安装视频监控、GPS,将运行轨迹同步到模型,能有效预防超载现象、碰撞情况;高空作业中,可利用智能设备,在模型上精准标记人员区域,随时监测其是否存在违规行为、有无佩戴防护。同时也可关联 BIM 技术与大数据分析技术,对监控数据进行实时研判,精准识别隐患发展趋势,提前发出预警信号,实现隐患从“被动整改”向“主动防控”转变;联动现场管控人员,快速推送预警信息,第一时间下达处置指令,进一步提升动态管控的前瞻性、及时性,筑牢施工过程安全防线。在隐患排查方面,利用 BIM 模型创建新体系,管理人员可通过模型标注隐患区域、类型等,系统自动生成排查清单;施工人员可利用移动端和模型进行对比排查,随时同步信息,保证所有工作、信息留痕^[4]。同时信息可与各单位主体共享,真正做到全范围排查。在闭环管理方面,应用 BIM 系统实现对隐患的全程追踪,一旦发现隐患,系统会自动派发工单,整改结束后会及时上传有关信息,管理人员可根据模型进行核查,合格以后进行销号,否则退回。以某一地铁项目为例,应用这一模式隐患平均整改时间大幅缩减,重大风险点几乎全部覆盖,隐患闭环率也达到百分百。

2.3 应急管理阶段:模拟演练与快速处置

建筑施工中易出现坍塌、火灾、高空坠落等突发安全事故,应急管理水平直接影响事故损失大小。在应急管理阶段,BIM 技术主要应用在以下三个方面,有力提高应急处置的科学性与高效性。在启动应急方案制定时,依托 BIM 三维模型去整合场地布局、风险分

布及救援资源等相关信息,制定针对性的相关预案,模型可以清晰地标注火险点、消防设施、疏散通道与救援路线;针对深基坑坍塌情况,可以模拟事故现场当下的态势,规划人员疏散、基坑加固和伤员救助办法,不断提升方案的实操可行性。在应急模拟演练中,借助 BIM 虚拟仿真事故出现、蔓延及救援的整个进程,施工及救援人员可掌握处理流程、路线和办法,与传统现场演练比较,BIM 演练成本不大、安全性好、可反复实施,可不断完善方案。例如:某项目借助于 BIM 模拟演练,使人员应急处置能力提高了五成以上,并且在火灾中快速处理,避免了人员伤亡和重大财产的损失^[5]。针对事故出现时,BIM 技术可以迅速定位事故所在点位、类型,收集周边结构、人员和资源的相关信息,为指挥决策提供数据支撑。例如:基坑坍塌时,能快速明确支护情形、人员分布与最优救援路线;高空坠落出现时可马上定位现场,进而调配医疗资源。此外,BIM 可完整记录处理的全过程,为事故调查以及责任认定提供可信赖的依据,极大地提升建筑施工应急管理能力。

2.4 总结复盘阶段:经验积累与管理优化

施工项目竣工,可利用 BIM 技术对施工全程安全管理进行汇总,确定不足之处并进行完善,持续提升安全管理水平。一方面,在经验累积上,可凭借 BIM 模型记录施工期间的各项安全内容,如隐患排查整改记录、风险识别记录、应急处置等,整理成安全管理档案;深入分析档案内容,整理出具有时效性的安全管理方案,如隐患整改的高效流程、某类风险防控方案等,以此推动安全管理更标准。例如:某一超高层项目,应用 BIM 技术得出高空作业安全管控规范流程,将这一内容应用到之后相似项目,高空坠落事故得到显著管控。另一方面,在管理优化上,深入分析 BIM 模型记录所有安全信息,锁定安全管理方面的不足,如隐患排查滞后、安全培训单一等,根据问题制定优化策略,持续健全安全管理体系。例如:通过分析隐患排查信息,发现项目某区域多次出现隐患,说明这一区域安全管控效果不佳,可聚焦方案优化、人员培训、设置监控等,全方位提升安全管控效果^[6]。也可利用 BIM 技术比较各方案性价比、安全效果,在完善安全管理举措的同时减少安全管理成本。此外,复盘阶段的一个重点是实现安全管理闭环与升级,应用 BIM 技术可追溯性、数据整合功能,为复盘工作提供支持。凭借 BIM 模型存储全周期安全数据,创建一个专属项目的安全管理数据库,汇聚各施工环节、各风险种类的管理经验,通过分类进行归档,打造成标准安全管理典型案例库,为以后相似工程提供参考。同时,利用

BIM技术可对比、深入分析项目安全管理数据,深层次分析共性问题、差异之处,总结出契合各工程、各施工场景的安全管控工作重点,推动安全管理迈向可持续优化的良性阶段。

3 建筑施工安全管理中应用BIM技术的优势

建筑施工安全管理中应用BIM技术,可实现安全管理的模式创新、效率提升与质量优化,其优势主要体现在以下几个方面,能够有效解决传统安全管理痛点,提升安全管理水平。

3.1 提升风险防控能力,实现主动预防

传统安全管理模式中,风险识别长期采用人工巡查、经验判定,具有一定滞后性,无法提前预判风险易出现安全事故。引入BIM技术后,凭借其多元化特征,能提前预判施工期间可能出现的安全风险,进入主动预防阶段^[7]。施工前期可应用BIM技术搭建模型并模拟施工过程,识别施工中深基坑坍塌、高支模失稳等潜在风险,提前制定预防举措;施工期间也可应用动态监控系统,动态掌握风险点变化,若发现异常会触发预警,第一时间采取防控策略。数据显示,建筑项目应用BIM技术,有效降低了安全事故发生概率,安全隐患排查率提升超90%,进一步提高了风险防控水平。

3.2 提高安全管理效率,降低管理成本

传统安全管理模式一般采用人工巡查、纸质记录等,工作量大且易出现错误,容易产生额外安全管理成本。引入BIM技术后,凭借数字化、智能化方式,一方面简化安全管理程序,另一方面在确保管理效率的基础上节省管理成本。在隐患排查工作中,应用BIM技术可实现数字化排查工作,施工人员可在APP上传各项信息,管理人员凭借模型能随时掌握隐患整改实际情况,不仅能提升隐患排查效率,更能保证整改效率;在动态监控工作中,整合BIM技术和物联网、视频监控等,可自动监控施工全过程,减少工作量,降低人工管理成本。据统计,应用BIM技术后,安全管理人工成本减少约30%,隐患整改效率提升一半以上,由此看出该技术为安全管理带来的优势。

3.3 强化多方协同管控,打破信息壁垒

建筑施工安全管理涉及诸多环节,传统管理模式中各方信息传递滞后,难以达成高效协同。应用BIM技术创建信息共享平台,打破信息壁垒,促使各主体达成协同管控。各参与方可利用BIM平台,随时获取施工安全信息,如设计方能依托模型完善设计方案,监理方可依托模型动态监管安全措施执行效果,施工方能依托模型进行安全交底等。通过多方协同,进一

步明确各方应负责的安全职责,出现问题能第一时间确定负责人员,进一步提升协同管控水平。以某地铁项目为例,应用BIM系统平台,促使建设、施工、监理、设计各主体动态沟通、协同工作,显著提升安全管控效率,有效避免了责任推诿问题的发生。

3.4 优化安全培训效果,提升安全意识

以往安全培训多数采用授课、手册等,内容单一,削弱培训效果,但引入BIM技术后,发挥其模拟化、可视化功能,进一步创新了安全培训成效。应用BIM三维模型,可更具体地呈现施工期间的安全防护措施、风险点等,促使施工人员更真切地感受到安全事故带来的损害;进行模拟演练,带领施工人员浸入虚拟环境,通过安全演练掌握作业程序、牢记安全注意内容、增强应急处置能力等。同时,也可依据施工各岗位制定培训方案,如高空人员培训内容可倾向高空防护知识,起重机械人员培训内容可倾向机械操作要求等。通过实践表明,应用BIM技术能大幅提升安全知识培训效果,从根本上减少违规行为。

4 结束语

BIM技术在建筑施工安全管理各环节的实践应用成效显著,凸显技术优势,从根本上弥补了传统管理的不足,尤其在风险防控、效率提升上体现出显著优越性。未来,建筑企业更需紧跟技术发展脚步,探索BIM技术在建筑施工安全管理中的实践路径,一方面为建筑行业高质量发展筑牢根基,另一方面构建智能化安全管理新格局。

参考文献:

- [1] 胡军,徐向鹏,张哲,等.基于BIM技术与风险评估体系的装配式建筑施工安全管理研究[J].中国住宅设施,2025(12):103-105.
- [2] 甄雪.大数据背景下智能监控在建筑施工安全管理中的应用研究[J].江苏建材,2024(03):146-148.
- [3] 李慧香,彭洋,龚健.BIM与AI技术在建筑施工安全管理中的应用分析[J].房地产世界,2025(09):158-160.
- [4] 刘国,魏楠,侯亚明.基于EPC工程总承包模式的装配式建筑施工安全管理策略分析[J].中华建设,2025(05):63-65.
- [5] 汪慧,谢波.基于BIM技术和关联分析的装配式建筑项目施工安全管理方法研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(04):100-103.
- [6] 薛钢.信息技术模型在建筑工程施工安全管理中的应用研究[J].工程建设与设计,2024(18):79-82.
- [7] 刘伟惠,黄耀,唐韬,等.BIM技术在建筑施工邻房安全防护方面的应用:以上海市浦东新区前滩国际商务区54-01地块为例[J].建筑科技,2024,08(08):108-110.

绿色施工理念在建筑工程管理中的应用探讨

徐坤峰

(亳州市谯城区重点工程建设管理服务中心, 安徽 亳州 236800)

摘要 在建筑工程管理实践中, 绿色施工理念落地不到位的问题较为突出, 极易引发现场生态扰动、资源低效浪费等连锁问题, 不仅直接制约工程管理综合效益的提升, 也与建筑行业可持续发展的导向相悖。本文结合建筑工程管理实际, 探讨绿色施工理念的核心价值, 剖析当前应用中存在的管理意识薄弱、管理体系不完善、技术应用不足及资源保障欠缺等问题, 针对性提出强化理念认知、完善管理体系、推广绿色技术、强化资源保障等优化策略, 旨在对实现绿色施工理念与工程管理全流程深度融合有所裨益, 提升工程生态、经济与社会效益, 推动建筑行业可持续发展。

关键词 绿色施工理念; 建筑工程管理; 智能建造; “双碳”目标; 可持续发展

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.031

0 引言

随着“双碳”目标深入推进, 建筑行业进入绿色化、智能化转型关键期, 零碳建筑、智能建造成为行业发展主流, 绿色施工已从政策倡导转向强制落地要求。当前建筑工程管理中, 绿色理念践行仍存在诸多短板, 部分项目沿用传统施工模式, 不仅造成资源浪费、生态污染, 也难以适配建筑行业高质量发展需求。在政策推动与技术革新双重驱动下, 将绿色施工理念深度融入工程管理全流程, 破解应用中的各类瓶颈, 成为建筑企业提升核心竞争力、实现可持续发展的必由之路。本文结合当前行业发展新形势, 立足于工程管理实际, 探讨绿色施工理念的应用路径。

1 绿色施工理念在建筑工程管理中的核心价值

1.1 提升工程管理的生态效益

绿色施工能够显著减轻工程建设活动对自然环境的负面影响, 促进建筑项目与生态系统的和谐共生。该理念在工程管理的各个阶段均具有重要指导意义, 体现了可持续发展思想与项目管理实践的有机结合。在建造过程中, 常会出现粉尘、噪声及废水等环境污染问题, 而绿色施工通过采用先进的管理方法和工艺优化, 有效控制这些污染物的产生和扩散, 从而在初始阶段就减轻对周围生态的损害, 防止施工行为对空气和水资源造成持久性破坏。此外, 绿色施工还特别关注作业区域附近的植物群落和土地资源的维护, 通过明确施工范围、实施植物迁移和土地保护方案, 最

大限度地减少对当地生态结构的干扰, 保持地域生态系统的稳定性。

1.2 优化工程管理的经济效益

绿色施工借助资源节省和能耗下降, 可以优化工程管理成本, 提高项目综合效益, 打破以往建筑工程“高能耗、高浪费”的成本困境, 为工程管理经济效益提高提供新路径。节能施工技术的推广使用, 能够有效减少施工环节的电力、燃油等能源消耗, 同时削减项目运营环节的能耗支出, 从整个生命周期角度降低工程整体能耗成本, 提高成本管控的科学性与合理性。建筑废弃物的回收利用可以削减建筑材料的浪费, 降低废弃材料的处理成本, 同时将回收材料经过加工处理之后再次投入施工环节, 进一步压减材料采购成本, 实现资源循环使用与成本节省的双重目标。绿色施工所传递的环保理念与可持续发展思路, 也能提升项目品牌价值, 增强企业在建筑市场中的核心竞争能力, 帮助企业赢得更多市场资源与合作机会, 推动工程管理经济效益与品牌效益的协同提升^[1]。

1.3 完善工程管理的社会效益

绿色施工理念与可持续发展理念非常契合, 可以提升工程管理所取得的社会认可度, 推动整个行业可持续健康发展, 充分显示出建筑工程管理的社会价值和责任担当。传统建筑施工经常带来噪声和扬尘等问题, 对附近居民日常起居和居住环境造成很大影响, 绿色施工则借助优化施工方案、采取降噪降尘手段,

作者简介: 徐坤峰 (1971-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理。

改善施工区域附近的人居环境,减少施工活动对居民生活的影响,从而提升居民对工程建设的认可度和满意度。企业践行绿色施工理念,主动把环保责任扛起来,将绿色发展融入工程管理全过程中,能够贯彻落实环保理念,树立起负责任的企业形象,增强企业在社会上的公信力。

2 在绿色施工理念建筑工程管理中应用的现存问题

2.1 绿色施工管理意识薄弱

工程管理各主体对绿色施工理念的认识不足,导致理念落地缺乏思想支撑,这是当前绿色施工理念在建筑工程管理中应用受阻的核心症结之一。工程管理人员作为理念落地的核心执行者,对绿色施工的核心要求、技术标准掌握不全面,无法准确把握绿色施工与传统施工的差异,难以在管理过程中精准落实绿色施工要求,甚至出现管理偏差。施工人员作为一线作业者,绿色施工意识欠缺,在实际操作中仍沿用传统施工习惯,存在违规操作、资源浪费等问题,忽视绿色施工的细节要求,导致理念落地流于形式。企业管理层过度关注短期经济效益,将成本控制重点放在材料采购、人工支出等传统环节,忽视绿色施工的长期价值,认为绿色施工会增加前期投入,不愿主动投入人力、物力推动绿色施工理念落地,进一步加剧理念应用的滞后性。

2.2 绿色施工管理体系不完善

管理机制与标准不够健全,使得绿色施工理念在管理过程中难以有序带进,不容易形成规范化、系统化的绿色施工管理格局。多数建筑企业没有设立专门的绿色施工管理部门,也没有明确各个岗位在绿色施工管理中的责任,出现管理责任含糊、相互推诿扯皮等状况,绿色施工管理缺少专门的统筹和指导,无法实现全流程管控,绿色施工的考核评价标准不清晰,缺乏可操作性,既没有清晰的考核指标,也没有科学的评价手段,不能对绿色施工实施效果加以精准评估,不容易发挥考核评价对绿色施工的引导和约束作用。施工全过程的绿色管控流程不规范,从施工准备阶段的方案设计,到施工实施阶段的过程管控,再到竣工交付阶段的验收评估,都存在管控盲区,使得绿色施工理念无法贯穿工程管理全过程,应用效果大打折扣。

2.3 绿色施工技术应用不足

绿色施工技术推广与实际应用存在滞后的情况,限制了绿色施工理念在工程管理中真正落地取得的效果。技术支撑不全面是绿色施工理念应用中的一个关

键瓶颈,节能、节水、环保等绿色施工技术推广动力不足,应用范围只局限在少数大型项目中,多数中小型建筑项目仍然在沿用传统施工技术,无法将绿色技术与施工环节进行深度融合,难以充分发挥绿色技术的环保和节能价值。企业对绿色施工技术的研发与资金投入不够,缺少自主创新意识和能力,多数绿色技术需要依赖从外部引进,而且引进的技术与项目的适配性比较差,难以结合项目的实际需要进行优化调整,这会影响技术运用的效果^[2]。施工人员对绿色施工技术的操作熟练程度不够,缺乏系统性的技术训练,无法熟练掌握绿色施工技术的操作流程和核心要点,导致技术运用过程中出现操作不规范、技术发挥不充分的状况,进一步限制了绿色施工理念的落地。

2.4 绿色施工资源保障不足

人力资源、财力投入及物资供应等基础保障未能全面到位,导致环保型施工原则难以在实践中充分贯彻。资源层面的薄弱环节是实施绿色建筑的主要制约因素。推行环保施工必须依赖具备专业管理素养和技术专长的人员队伍,然而当前人才储备明显不足。现有从业人员大多缺乏绿色施工管理的实操经验,或未掌握相关技术能力,难以满足环保施工理念实际应用对专业人才的刚性需求。绿色施工相关的资金投入不足,企业没有把绿色施工资金纳入专项预算,资金投入主要集中在传统施工环节,造成绿色技术研发、设备更新、人才培养等环节缺乏资金支撑,无法顺利推进^[3]。绿色建材和节能设备这类物资供应不足,而且质量好坏不一,部分绿色建材价格偏高,企业为了控制成本不愿意选用,同时部分供应商提供的绿色建材和节能设备不符合相关标准,无法满足绿色施工的技术要求,进一步影响绿色施工理念的有效应用。

3 绿色施工理念在建筑工程管理中的应用策略

3.1 强化绿色施工管理意识

宣传培训可有效提升各主体绿色施工意识,为该理念落地奠定坚实的思想基础,破解当前理念认识不足的困境。针对工程管理人员,开展绿色施工理念与技术标准专项培训,聚焦绿色施工的核心要求、管理要点与技术规范,提升管理人员的专业素养,确保其能够在管理过程中精准落实绿色施工要求,统筹推进绿色施工各项工作。加强企业绿色文化建设,将可持续发展理念融入企业发展战略,引导企业管理层转变发展观念,摒弃短期利益导向,充分认识绿色施工的长期价值,主动推动理念落地。加大绿色施工宣传力度,

通过企业内部宣传栏、线上宣传平台、专题讲座等多种形式,普及绿色施工理念及其重要意义,营造全员参与的绿色施工氛围,引导施工人员转变操作习惯,自觉规范施工行为,形成上下联动、全员参与的绿色施工格局。

3.2 完善绿色施工管理体系

建立一套完善的管理体系与操作规范,以统一绿色施工的实施流程,能够确保环保理念得到有序推行,最终构建标准化、体系化的管理框架。成立专职的绿色施工管理机构,明确部门职能与各岗位职责,形成权责分明、协作有序的组织架构,由该部门统筹推进绿色施工相关事务,承担施工全周期的环保监督、技术支持和绩效评定工作,防止管理职责不清、相互推卸责任的现象发生。制定合理且易于执行的绿色施工评估准则,清晰界定评价指标、考核方式及激励约束措施,将绿色施工要求融入工程管理评价体系,具体细化扬尘治理、资源利用、污染防治等考评内容,使评估工作有据可依、有规可循,充分发挥其对于绿色施工的导向与约束功能^[4]。统一施工全流程的绿色管理程序,涵盖前期准备、中期实施及后期验收等各个阶段,明确各阶段的环保要求与管理重点,扫除监管死角,保障绿色施工理念渗透至工程管理的每一环节。

3.3 绿色施工技术的推广应用

加大力度研发和推广绿色施工技术,提升技术应用的实际水平,这样能够强化绿色施工理念落地生根的技术支撑,破解技术应用滞后的现实难题。企业应该增加绿色施工技术研发方面的投入,设立专门的研发资金,鼓励技术研发人员开展节能、节水、环保等绿色技术的研发工作,还要加强与高校、科研机构的合作,借助科研机构的技术优势,推动绿色施工技术的创新与升级,开发出适配建筑工程实际需求的绿色技术。积极推广节能、节水、环保、节材等绿色施工技术,扩大技术应用范围,引导中小型建筑项目主动采用绿色施工技术,将绿色技术和施工工艺进行深度融合,充分发挥绿色技术的环保价值和节能作用,提升工程管理的绿色化水平^[5]。加强施工人员绿色施工技术的培训工作,结合项目实际需求,开展有针对性的技术培训,提升施工人员的技术操作熟练程度,确保他们能够熟练掌握绿色施工技术的操作流程和核心要点,保障技术应用的实际效果,推动绿色施工理念落地生根。

3.4 强化绿色施工资源保障

完善人力、资金、物资等资源的保障体系,可以为绿色施工理念落到实处提供有力支撑。破解资源上

存在的短板制约,加强绿色施工专业人才培养。一方面要联合高校、科研院所来开展定向培养,培养出具备绿色施工管理与技术能力的专业人才;另一方面要加大人才引进力度,引进具备丰富绿色施工经验的管理与技术人才,建立完善的人才梯队,满足绿色施工理念落到实处的人才需求。加大绿色施工资金投入,企业要把绿色施工资金放进专项预算里,明确资金使用范围,保障绿色技术研发、设备更新、人才培养、物资采购这些环节的资金需求,同时积极争取政府相关扶持资金,缓解资金压力,推动绿色施工各项工作顺利推进。规范绿色建材、节能设备这些物资的采购和管理,建立严格的物资采购审核机制,优先选用质量合格、符合绿色施工标准的建材与设备,同时加强物资存储与使用管理,确保物资质量,保障绿色施工顺利推进,推动绿色施工理念有效落地。

4 结束语

绿色施工理念融入建筑工程管理,是建筑行业践行可持续发展理念的必然选择,也是提升工程质量管理、实现生态与产业协同发展的关键路径。绿色施工理念的核心价值体现在生态保护、成本优化与社会认可的多重提升,但其落地过程仍面临诸多现实阻碍,需立足于工程管理各环节精准破解。理念践行并非一蹴而就,需企业、管理人员与施工人员协同发力,将绿色理念贯穿施工全流程,持续优化管理模式、升级施工技术、完善资源保障。唯有如此,才能破解传统施工的诸多弊端,实现工程建设与生态环境的和谐共生,推动建筑工程管理向绿色化、规范化、可持续化转型,为建筑行业高质量发展注入持久动力。

参考文献:

- [1] 蒋国祥.基于绿色施工理念建筑工程管理创新研究[J].散装水泥,2025(01):237-239.
- [2] 陈莉,韦彦伊.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径[J].建材发展导向,2025,23(02):124-126.
- [3] 刘广鹏.绿色施工理念下建筑工程管理创新分析[J].新城建科技,2024,33(12):189-191.
- [4] 吕平,付学文.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新[J].四川水力发电,2024,43(05):129-131.
- [5] 郑小志.基于绿色施工理念的建筑工程管理创新模式分析[J].大众标准化,2024(16):98-100.

建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施探讨

周旭然

(中国中材海外科技发展有限公司, 北京 100073)

摘要 在国民经济体系中, 建筑工程行业的重要性不言而喻。随着建筑工程项目数量增多, 建筑工程企业为了提升市场竞争力, 争取更多的市场订单, 需要进一步加强建筑工程技术管理能力, 利用完善的技术管理体系来控制建筑工程项目实施阶段的关键环节, 确保建筑工程质量满足标准要求, 同时也可为建筑工程企业经济效益和社会效益提升奠定坚实的基础。基于此, 本文对建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施进行全面探析, 以期为相关人员提供参考。

关键词 建筑工程; 技术管理; 资源配置; 技术创新

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.032

0 引言

在建筑工程项目实施阶段, 技术管理水平的高低直接关系到建筑工程企业的经济收益以及项目建设质量^[1]。建筑工程技术管理人员需要加大对技术管理方面的研究力度, 并根据建筑工程实际需求合理配置各类资源, 提升资源利用率, 将技术管理的作用最大限度地发挥出来, 对提升建筑工程项目实施进度以及保障建筑工程建设质量起到十分重要的作用。

1 提升建筑工程技术管理质量的意义

1.1 为建筑工程质量提升构筑坚实根基

建筑工程技术管理工作关系到建筑工程的整体建设质量。在建筑工程项目实施初期, 技术管理人员要仔细审核图纸, 并对参建工程各方进行技术交底, 同时精细化地管控各个施工关键, 确保建筑工程建设质量可以满足竣工验收要求。与此同时, 通过提升建筑工程技术管理水平, 可以保证建筑工程的结构安全性能满足标准要求, 并且可以减少施工质量问题, 确保建筑工程全生命周期的安全性。

1.2 提升资源配置效率

建筑工程项目实施阶段会使用与消耗大量资源, 如果资源配置效率不合理, 则会导致建筑工程施工成本增加, 从而影响建筑工程企业的经济收益。因此, 通过提升建筑工程技术管理水平, 可以确保用于建筑工程项目的各类资源得到优化配置, 避免出现资源浪

费问题。与此同时, 借助现代化信息技术, 建筑工程企业可以对施工过程进行模拟, 避免工序冲突问题, 及时对施工计划进行优化, 以此来进一步提升施工效率, 同时也可降低施工材料损耗程度, 帮助建筑工程企业降低成本, 对提升建筑工程企业市场竞争力起到重要作用。

1.3 推动技术创新与产业升级

在“双碳”背景下, 建筑工程技术管理水平的提升与建筑工程行业未来发展方向相契合。例如: 借助人工智能、BIM技术, 建筑工程企业可以对整个施工过程进行模拟, 从而动态化地完成资源调配, 可以提升资源利用率, 减少工程成本。信息化技术的应用, 可以帮助建筑工程企业对现场施工数据进行收集与整理, 强化施工现场技术管理力度, 及时发现并解决现场所出现的技术问题。

2 建筑工程技术管理的控制要点

2.1 施工准备阶段的技术管理要点

在施工准备阶段, 技术管理工作的实施要点为:

(1) 在施工开始前, 技术管理人员要对施工现场进行深度勘察, 掌握施工现场基础信息, 并对与建筑工程项目有关的资料进行收集与整理, 明确关键施工节点, 同时积极与设计单位加强沟通, 针对项目施工细节内容进行反复探讨, 以此来完成施工组织方案的编制工作。另外, 技术管理人员需要对相关技术文件进行妥

作者简介: 周旭然 (1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 工程管理与设计。

善保管,方便及时完成关键信息的检索与查询^[2]。(2)在准备阶段,技术管理人员要对施工图纸进行深度审核,并根据图纸要求完成技术交底工作。另外,技术管理人员要对图纸设计内容进行深度剖析,掌握具体施工要求,及时与参加各方进行技术交底,确保现场人员了解施工技术应用要点。在图纸审核过程中,技术管理人员如发现问题,则要及时与设计方进行沟通,确保技术问题可以得到有效解决,促进后续施工作业顺利实施。

2.2 项目实施阶段的技术控制要点

项目实施阶段的技术控制要点为:(1)混凝土施工技术控制。在建筑工程项目中,混凝土是广泛使用的原材料,在制备混凝土过程中,建筑工程企业需要按照要求的配比来完成混凝土的制备,保证混凝土的各项性能可以满足建筑工程建设要求。其中,技术管理人员要对原材料的质量进行把控,严格控制混合料的配比,并对混凝土制备过程进行严格管控。在搅拌混凝土时,相关技术管理人员要明确搅拌时间,并对实际搅拌过程进行监管,保证混凝土搅拌时间符合相关规范、标准的要求。在搅拌时,搅拌力度要严格控制,并对混凝土搅拌现场做好清洁,避免混凝土在搅拌时出现凝结。(2)钢筋施工技术控制。在建筑工程项目中,施工阶段会大量使用钢筋,所以为了保证钢筋施工质量符合要求,需要技术管理人员针对钢筋施工环节加大质量控制力度。在钢筋连接环节,技术管理人员要对机械连接面积与焊接接触面积进行检查,确保机械连接面积与焊接接触面积不低于相关规范、标准的要求,同时要对绑扎接头面积进行管控,如果绑扎接头面积大于 50%,则要立即返工。通常来说,直螺纹接头在施工现场的应用最为频繁,相关技术管理人员要对接头质量进行严格把控,待接头质量检查无误后方可继续施工。(3)模板施工技术控制。在建筑工程施工阶段,技术管理人员要对模板表面的清洁度进行检查,同时要保证模板的平整度符合要求。如果模板表面存留混凝土,则要第一时间完成清理工作,以便提升脱模效率。在脱模过程中,脱模剂的选择要与施工实际需求保持一致。在模板施工前,技术管理人员要做好技术交底,确保现场施工人员了解模板安装要求以及注意事项,特别是模板安装的关键节点,技术管理人员要反复检查,保证模板的安装不会出现漏浆问题。在完成模板安装作业后,技术管理人员要对模板衔接位置的密封情况进行检查,保证模板的密封质量符合施工规范要求。待拆模时,技术管理人员要完善模板拆除质量管理细则,合理确定拆模时间,保证模板拆

除作业流程符合标准要求,避免拆模阶段出现模板损坏问题。(4)材料检验技术控制。在开始施工前,技术管理人员要做好施工材料质量抽查工作,保证进入施工现场的施工材料各方面性能满足建筑工程要求,最大限度地消除材料质量隐患。

2.3 项目竣工验收阶段的技术控制要点

在竣工验收阶段,技术管理人员要组织参加各方实施竣工质量验收工作。其中,技术管理人员要以施工合同、图纸以及规范等文件为参照,对所有施工环节进行审核,保证建筑工程项目施工所有环节均满足标准要求。在完成自检工作后,技术管理人员需要配合第三方机构再次对建筑工程施工质量进行检查,同时完成竣工验收资料的收集与归档等工作^[3]。

3 建筑工程技术管理的优化措施

3.1 完善技术管理制度

在技术管理过程中,相关技术管理人员需要根据实际工程情况来及时调整技术管理理念,并对技术管理方法进行持续优化,保证技术管理工作可以得到针对性的实施。另外,建筑工程施工阶段,建筑工程企业要明确技术管理职责,将具体责任落实到相关人员,确保技术管理工作可以得到有效落实。在建筑工程施工过程中,建筑工程企业要指派专业人员对技术管理制度的落实情况进行跟踪,并加快完成奖惩制度的制定,针对表现出众的技术管理人员要给予相应的嘉奖,反之则要予以一定程度的惩罚,以此来提升技术管理人员工作积极性。在编制技术管理制度过程中,需要以相关技术标准作为参照,保证技术管理制度与技术标准保持一致,同时注重将节能减排措施融入技术管理制度中,以此来降低建筑工程施工期间的能耗支出,并且也可更好地维护周边生态环境质量。与此同时,在技术管理工作中,相关人员需要增强责任意识,及时排查潜在的技术问题,并且为了更好地应对突发情况,技术管理人员需要提前完成紧急处置预案的编制,保证建筑工程项目可以有序实施。

3.2 多举措提升现场管理成效

在建筑工程实施阶段,为了提升技术管理水平,除了要编制完善的技术管理制度外,还需要对技术管理要点进行明确,并要加快技术管理模式创新力度,使技术管理成效快速显现出来,具体实施路径为:(1)在项目执行阶段,技术管理人员可以根据实际项目需求,积极地对施工管理模式进行优化,加大材料管控力度,提前对建筑材料供应商进行全面考核,保证供应商所供原材料质量符合图纸要求。此外,在材料进

场前,建筑工程企业要对材料性能进行复验,避免不合格的材料进入施工现场。(2)在施工阶段,技术管理人员要对施工现场进行监管,不断提升监管力度,及时发现并处理施工阶段所出现的问题,梳理施工流程,降低施工质量问题出现概率,同时也可提升施工效率。(3)建筑工程企业要对技术管理人员加强管理,采取措施提升技术管理人员专业技能应用水平。例如:建筑工程企业要定期组织技术管理人员参加专业培训,保证技术管理人员能够深度掌握专业知识,相应的技术管理技能也会得到加强,确保技术管理制度可以在施工现场得到有效落实,对提升技术管理成效起到积极作用。

3.3 创新技术管理理念

在建筑工程项目实施阶段,技术管理水平高低与技术管理人员的管理理念是否科学有直接关系。因此,为了提升技术管理水平,技术管理人员需要摒弃传统工作理念,利用现代化技术管理理念来开展相关工作,关注工作态度的严谨性,加大技术管理理念创新力度,为技术管理工作高水平实施奠定基础。其中,在创新技术管理理念过程中,技术管理人员要树立正确且积极的创新观,以实际建筑工程项目需求为基础,汲取传统管理理念的优势,对技术管理理念进行持续优化完善,为建筑工程项目顺利实施奠定基础^[4]。另外,在实际工程项目中,技术管理工作需要提升精细化水平,并在建筑工程全生命周期内积极落实技术管理体系,以现代化技术管理理念为依托,及时对技术管理知识进行更新,确保建筑工程技术管理工作模式创新可以迎合未来建筑工程行业需求。

3.4 新型管理技术的应用

在建筑工程行业发展进程中,信息化技术的引入,无疑为建筑工程行业提供了关键动能。在技术管理模式中,关注信息化技术的发展,可以将技术管理的应用价值得到进一步显现。以BIM技术为例,将BIM技术与建筑工程技术管理工作相结合,可以降低技术管理人员工作强度,使技术管理工作更加便捷,降低人为因素对技术管理实施成效的影响。在建筑工程项目实施前期,技术管理人员可利用BIM技术完成建筑工程三维模型的构建,通过分析模型来了解建筑工程项目实施要点,并完成工程量的计算,根据工程量计算结果来构建科学的技术管理模式。另外,借助BIM技术所构建的模型,技术管理人员可利用BIM技术中的模拟功能来对施工过程进行模拟,从而快速发现施工阶段可能出现的问题,及时对施工流程以及图纸进行调整,保证施工可以有序推进。此外,BIM技术的应用,

同样可以帮助技术管理人员更好地分配不同阶段所需要的施工资源,提升施工资源分配与利用的合理性,避免因资源利用不足而影响工程进度,同时也可避免资源浪费问题出现,使施工资源得到最大限度的利用。

3.5 关注工程质量检验

在建筑工程整体施工结束后,技术管理人员需要对工程施工质量进行严格检验,避免因施工质量问题而影响建筑工程的使用质量与使用安全性。在实施工程质量检验工作时,技术管理人员要做好前期技术资料的收集与整理,以相关技术资料为基础,全面且细致地对建筑工程施工质量进行评估^[5]。需要注意的是,在工程质检环节,技术人员要选取科学的检验方法,保证检验结果的真实性,根据检验结果来对施工质量进行精准判定。技术管理人员可以将多种检测技术相结合,从而全面、精准地获取检测结果。在质检工作中,如果发现质量隐患问题,需要及时锁定责任方,并快速完成整改方案的编制,确保所有质量问题可以得到有效解决。

4 结束语

面对快速发展的建筑行业,建筑工程企业为了提升自身市场竞争力,需要在明确建筑工程技术管理控制要点的基础上,积极制定出合理的技术管理优化措施,保证建筑工程施工质量可以得到严格管控,对提升建筑工程企业经济效益和社会效益具有积极的意义。随着BIM、人工智能等数字化技术的深度应用,建筑工程技术管理将向更加智能化、精细化的方向持续发展,推动项目管理模式全面升级。同时,建筑工程企业还应注重技术管理人才梯队建设,强化全员质量与安全意识,形成制度、技术、人才协同发力的长效管理机制,为建筑工程行业实现绿色、低碳、高质量发展目标提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 潘斌.建筑工程技术管理中的控制要点与优化探讨[J].散装水泥,2026(02):190-192.
- [2] 吴清华.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施[J].住宅与房地产,2025(35):110-113.
- [3] 项永明.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析[J].中国住宅设施,2025(06):109-111.
- [4] 赵炳均.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施[J].新城建科技,2023,32(23):151-153.
- [5] 马相似.建筑工程技术管理中的控制要点与优化措施分析[J].大众标准化,2024(08):52-54.

建筑工程施工质量控制关键问题与优化策略研究

魏阿垒

(安徽兴慎工程建设管理有限公司, 安徽 阜阳 236200)

摘要 为解决建筑工程施工质量管控中存在的人员、材料设备、工艺流程及监管制度等方面的突出问题, 本文结合建筑工程施工实际情况对施工质量控制关键问题展开深入分析, 梳理各环节管控漏洞及核心症结, 提出强化人员管控、完善材料设备管理体系、规范施工工艺流程、健全质量监管保障制度的优化策略, 以期为提升建筑工程施工质量、规避质量隐患、保障工程结构安全与使用性能提供实践参考, 助力建筑工程行业高质量发展。

关键词 建筑工程; 施工质量控制; 施工材料; 质量监管

中图分类号: TU712.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.033

0 引言

当前建筑行业聚焦高品质发展, “好房子”建设要求不断提升, 《住宅项目规范》全面实施, 城镇住宅工程质量专项整治深入推进。建筑工程施工质量直接关系到人民群众的生命财产安全, 是践行以人民为中心发展思想的重要体现。面对智能建造、绿色建造推广背景下的新要求, 部分项目仍存在人员素养不足、材料管控不严、工艺执行不规范等问题, 制约工程品质提升。立足于行业最新发展形势, 剖析施工质量控制核心症结, 探索针对性优化路径, 对落实质量责任、规避安全隐患、推动行业高质量发展具有重要的现实意义。

1 建筑工程施工质量控制关键问题分析

1.1 施工人员质量管控问题

施工人员的专业能力与责任意识不足, 直接影响施工各环节质量达标率, 这是建筑工程施工质量控制的首要核心问题, 核心逻辑在于施工人员作为施工活动的直接执行者, 其能力与意识直接决定工序完成质量与整体工程品质。从业人员专业资质不达标, 技能水平参差不齐, 部分施工人员未取得对应岗位必备资质, 缺乏系统的施工操作训练, 对施工规范、质量标准的理解存在偏差, 难以精准落实设计要求^[1]。质量责任意识薄弱, 违规操作现象频发, 部分施工人员存在侥幸心理, 为追求施工进度简化操作流程, 忽视质量细节, 未充分认识到自身操作对工程质量的决定性作用。岗前培训不到位, 缺乏系统的质量管控知识储备,

多数施工单位未建立完善的岗前培训体系, 仅进行简单的安全告知, 未针对质量管控要点、规范要求开展专项培训, 导致施工人员无法掌握关键质量控制方法, 难以主动规避质量隐患。

1.2 施工材料与设备质量管控问题

材料与设备质量管控存在漏洞, 是工程质量隐患形成的核心原因。建筑工程以材料与设备为承载基础, 其质量直接决定结构安全与使用性能, 管控环节存在漏洞, 会从源头埋下工程质量风险。材料进场检验执行不到位, 不合格材料可进入施工流程, 部分施工单位为控制成本, 降低材料进场审核标准, 对材料规格、性能及合格证明未开展全面核查, 强度不足、性能不达标材料被用于工程施工, 直接影响工程质量^[2]。材料储存与养护未按规范执行, 材料性能出现衰减, 各类建材对储存环境与养护条件均有明确要求, 部分施工单位未规范划分储存区域, 未有效控制温湿度, 未落实常态化养护措施, 致使建材受潮、变形、老化, 丧失原有性能。施工设备存在老化问题, 日常维护工作开展不及时, 设备精度与施工效率受此影响, 难以满足施工要求, 部分单位长期使用老化设备, 未建立定期维护制度, 设备运行精度下降, 无法匹配施工工艺标准。此类问题既会影响施工质量, 也可能诱发施工安全事故。

1.3 施工工艺与流程管控问题

施工工艺执行缺乏规范, 流程管控不够严格, 会使施工质量无法满足设计标准。这一问题是施工流程

作者简介: 魏阿垒 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程施工。

质量控制的主要短板。规范的施工工艺与严谨的管理流程,可为施工质量提供关键支撑。任一管控环节缺失,均会造成工程质量出现偏差。施工工艺未严格遵循设计要求,易出现流程简化与违规作业现象。部分施工人员为压缩工期,擅自简化工序并降低工艺执行标准。施工人员未按设计图纸要求落实作业方法与技术参数,致使工序质量无法达标。建筑工程施工涉及专业多且流程复杂,科学的施工计划可保障各环节有序推进。部分施工单位未制定科学施工计划,各工序之间缺乏有效沟通。交叉作业未开展清晰的责任划分,工序衔接处易出现质量漏洞。施工过程质量巡检开展不及时,隐患整改无法形成闭环管理。部分施工单位未建立常态化巡检机制,巡检频次与覆盖范围均存在不足。发现质量隐患后,未对整改责任与完成时限进行明确。隐患问题无法得到及时处置,会对整体工程质量造成直接影响。

1.4 施工质量监督与制度问题

监管体系不完善、制度执行不到位,无法形成有效质量约束。这一问题构成工程质量控制的管理瓶颈。完善的监管体系与严格的制度执行,可对质量提升形成有效支撑。体系不完善与执行不到位,会使质量管控工作流于形式。质量监管机制存在不足,监管职责划分不够清晰。部分项目未对建设、施工、监理等单位的监管责任进行明确^[3]。监管工作易出现重叠或空白区域,质量问题发生后易出现责任推诿。此类情况会制约全方位、全过程监管工作的开展。多数施工单位已制定质量管理制度,但制度落地效果不佳。制度内容未细化至具体岗位与施工工序,执行过程缺乏监督手段。制度仅停留在文本层面,无法在施工管理中发挥实际作用。第三方监管参与不足,会降低质量评价的客观性与公正性。部分项目未引入第三方专业机构,仅依靠内部监管开展工作。内部监督存在固有局限,评价结果易受主观因素影响,工程质量真实状况无法通过此类评价得到准确反映。

2 建筑工程施工质量控制优化策略

2.1 强化施工人员质量管控

通过资质审核、技能培训与责任绑定,提升施工人员质量管控能力,这是优化施工质量控制的核心抓手。其核心逻辑在于从人员源头提升专业素养与责任意识,让施工人员主动践行质量要求,从“要我重视质量”转变为“我要保证质量”,从根本上减少人为因素导致的质量问题。严格控制从业人员资质审核,建立合格人员准入机制,施工单位需对所有进场施工

人员的专业资质进行全面核查,拒绝无资质、资质不符、过期资质人员进场作业,同时建立人员档案,动态跟踪人员岗位适配情况与技能提升进度,确保各岗位人员具备相应专业能力,适配岗位需求。开展常态化技能与质量培训,提升专业素养与责任意识,结合施工岗位需求与工程特点,定期开展施工规范、质量标准、操作技能专项培训,通过理论讲解与实操演练结合的方式,让施工人员精准掌握质量管控要点与操作规范,树立“质量第一、终身负责”的责任意识。建立质量责任追溯体系,将质量绩效与薪酬挂钩,明确各岗位人员的质量责任,细化质量考核指标,对施工质量达标、无质量隐患的人员给予奖励,对因违规操作、责任缺失导致质量问题的人员进行处罚,实现质量责任可追溯、奖惩分明,倒逼施工人员规范操作。

2.2 完善施工材料与设备管控体系

构建全流程材料设备管控机制,可从源头保障施工质量,是优化工程质量控制的基础策略。管控工作需覆盖采购、进场、储存与使用全过程,以此识别并消除各环节质量隐患,材料设备全生命周期质量可得到有效保障,进而为工程质量提供稳定支撑。施工单位需建立材料供应商筛选与评估机制,对供应商资质与信誉进行严格审核。采购合同需对质量标准与违约责任进行明确,从源头控制材料供应质量。材料进场时需逐批开展核查,对规格、性能及合格证明进行查验,必要时可委托专业机构开展抽样检测,防止不合格材料进入施工环节。材料储存与养护工作需按规范执行,同时定期对材料性能开展检查。储存区域可按材料类型与规格进行划分,并配备相应防护设施^[4]。施工单位需制定常态化养护计划,由专人负责落实相关工作。对出现变质、老化或锈蚀的材料及时处置,维持材料原有性能。施工单位需加强设备全生命周期管理,做好定期维护与设备更新工作,为各类设备建立专属档案,明确使用年限、维护频次与维护标准,由专业人员对设备开展检修、校准与保养,及时排查并处理设备故障,对无法满足施工要求的老化设备及时更换,保障设备运行精度与稳定性。稳定可靠的设备条件,可为规范施工提供必要支撑。

2.3 规范施工工艺与流程管控

优化施工工艺并强化流程管控,可使施工过程与质量标准保持一致。这一思路是施工过程质量控制的主要改进方向。借助标准化工艺与规范化流程,可对施工行为进行有效约束。人为因素造成的质量偏差能够得到控制,各工序质量可满足既定要求,进而实现施工过程精细化管控。施工单位需对施工工艺标准进

行明确,依据设计要求开展规范化施工,结合设计图纸、行业规范与项目实际情况,编制详细施工工艺方案。方案中需对施工方法、技术参数、质量标准、操作要点及验收要求予以明确。施工单位需组织人员开展学习,确保相关人员熟练掌握工艺内容。施工过程需严格遵循既定工艺要求开展,不得擅自简化工序、降低标准或更改参数^[6]。优化施工流程,加强各环节衔接和交叉作业管控,制定科学的施工进度计划,明确各工序的起止时间、衔接节点和责任主体,建立工序衔接沟通协调机制,交叉作业时明确责任分工、质量要

求和 safety 注意事项,避免工序衔接处出现质量漏洞和责任盲区^[6]。建立常态化巡检和隐患整改机制,实现质量问题闭环管理,安排专业巡检人员按规定频次开展全流程、全方位巡检,详细记录巡检发现的质量隐患,明确整改责任人、整改措施和整改时限,整改完成后由专人进行复核验收,确保隐患全部清理完毕,避免隐患积累对工程质量造成影响(见图 1)。

2.4 健全施工质量监管与保障制度

完善监管体系、强化制度执行,构建全方位质量约束机制,可为质量控制提供长效保障。管理模式需

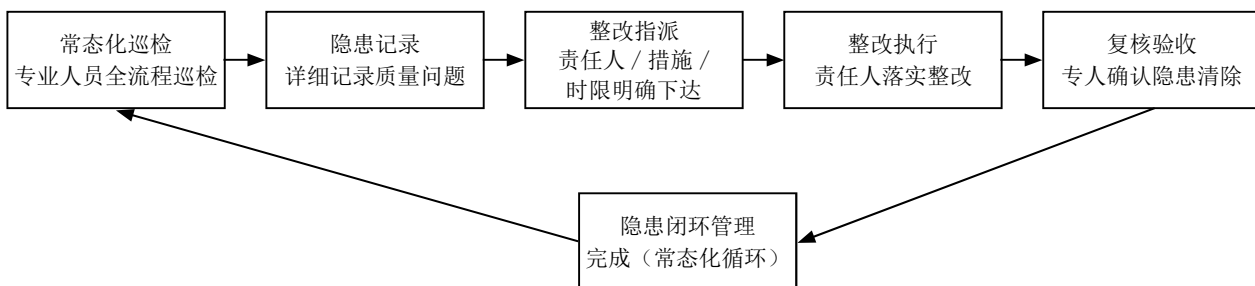


图 1 质量问题闭环管理流程图

突出多方协作、责任清晰、监管到位与奖惩分明,以此推动质量管控工作落地实施,实现工程质量全过程与全方位管控^[7]。监管职责分工需进一步明确,多方协作的监管体系可逐步搭建。建设、施工、监理等参建单位的质量责任需逐一界定,监管范围、工作内容与履职标准也要予以明确。监理单位应履行独立监管职责,施工单位需落实内部监管工作,建设单位则承担监督管理责任。多方协作监管机制可有效形成合力,通过定期联合检查消除监管空白与重叠问题。质量管理制度需持续细化,制度执行与监督考核力度应同步加强。管理制度需结合项目实际,细化至具体岗位与施工工序,明确执行要求、操作标准与考核指标。可成立专门监督小组,对制度落实情况开展定期检查^[8]。对违反制度与违规施工的行为从严处理,保障制度刚性执行。引入第三方专业监管机构,可提升质量评价的客观性与权威性。第三方机构独立于建设与施工单位,可依据行业规范开展公正监管。第三方机构对工程质量开展全面核查,出具客观真实的评价报告,为质量管控提供专业支撑,同时形成稳定外部约束。

3 结束语

建筑工程施工质量是工程安全与使用价值的核心支撑,直接关系到行业发展根基与社会公共利益。施工质量控制是一项系统性、全过程的工作,需直面人员素养、材料设备、工艺流程、监管制度等多维度挑

战,统筹兼顾各环节管控要点。本文梳理的关键问题与优化策略,贴合工程施工实际需求,可针对性破解现有管控瓶颈。未来需结合不同项目特点灵活调整落实,持续完善管控机制,推动施工质量管控向精细化、规范化发展,切实提升建筑工程整体品质,为行业可持续发展筑牢质量根基。

参考文献:

- [1] 张晋.数字化技术在建筑工程施工质量控制中的应用[J].中国建筑装饰装修,2025(02):81-83.
- [2] 莫智谋.装配式建筑工程施工质量控制与监理对策分析[J].新城建科技,2024,33(09):185-187.
- [3] 张小明.装配式建筑工程施工质量控制与监理对策[J].陶瓷,2024(05):234-236.
- [4] 鱼宝丽.高层建筑工程施工质量控制要点与管理措施研究[J].房地产世界,2023(21):139-141.
- [5] 江立秋.EPC模式下建筑工程施工质量控制研究[J].北方建筑,2023,08(03):69-73.
- [6] 罗蝶兴.探讨建筑工程施工质量控制的有效措施[J].城市建筑,2025,22(03):207-209.
- [7] 侯文人.BIM技术在建筑工程施工质量控制中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(12):79-81.
- [8] 莫智谋.装配式建筑工程施工质量控制与监理对策分析[J].新城建科技,2024,33(09):185-187.

住宅小区 10 kV 配电室电气施工技术 及质量控制研究

鲁 斌

(合肥城改投资建设集团有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘 要 住宅小区 10 kV 配电室承担着电能分配、电压转换与负荷调控的关键功能, 其施工质量直接决定了居民用电的安全性、稳定性与持续性, 更是保障城市电力系统末端网络可靠运行的核心基础。本文聚焦住宅小区 10 kV 配电室电气施工全流程展开系统性研究, 探讨前期准备、设备安装、母线及电缆施工等关键技术, 结合专业数据增强指导性, 剖析常见质量问题并提出解决方案, 以期为提升施工质量、保障电力系统稳定运行提供参考。

关键词 住宅小区; 10 kV 配电室; 电气施工技术; 设备安装; 母线

中图分类号: TM727.2

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.034

0 引言

截至 2025 年末, 国家统计局发布的全国常住人口城镇化率已达 67.89%, 住宅小区规模扩大且功能多样化, 居民用电需求持续增长。新建住宅每户用电负荷达 6 kW~8 kW, 较十年前增长显著。10 kV 配电室作为电力分配核心, 施工质量直接关系到用电安全与公共设施稳定。近三年住宅供电故障中, 主要源于配电室施工缺陷, 其中设备安装偏差、电缆绝缘损伤等问题占比超七成, 易引发事故和损失。随着智能电网与绿色建筑标准普及, 配电室施工需兼顾供电需求、能耗控制和智能监控等新要求。目前施工存在新技术应用不足、精度欠缺、质控不系统等问题, 仅 35% 项目采用 BIM 技术, 设备定位偏差率 6%~9%, 电缆绝缘损伤率高达 22%。因此, 深入研究配电室电气施工技术与质量控制对推动行业规范化、保障用电安全至关重要。

1 住宅小区 10 kV 配电室电气施工关键技术要点

施工关键技术的精准落实是保障 10 kV 配电室施工质量的核心所在, 需从前期准备、设备安装、线路施工这三大核心环节着手, 细化技术参数与操作规范, 确保各环节施工质量符合标准。

1.1 施工前期技术准备与深化设计

施工前期技术准备与深化设计是保障施工顺利推进的基础, 需结合项目实际工况以及规范要求, 确保设计方案得以精准实施。

图纸会审环节需重点聚焦核心参数核查, 以确保设计方案的可行性与安全性。重点核查配电室平面布局的

合理性, 高压柜操作间距需不小于 1.2 m, 低压柜操作间距不小于 0.8 m, 检修通道宽度不小于 1.5 m, 避免因空间不足对后期运维造成影响; 电缆桥架选型需与载流量需求相匹配, 10 kV 电缆桥架横截面积应为电缆总面积的 2.5 倍~3 倍, 桥架转弯半径不小于 600 mm, 确保电缆敷设过程中无过度弯曲损伤; 设备选型需预留负荷冗余, 变压器容量需按当前负荷的 1.2 倍~1.3 倍进行配置, 以应对未来 5~8 年用电负荷的增长, 高压开关柜短路耐受电流需不小于 25 kA, 保障故障状态下的承载能力^[1]。

深化设计阶段应采用 BIM 技术提升精准度, 通过三维模型实现设备安装坐标精准定位 (误差 ± 2 mm 以内), 并模拟电缆敷设路径以规避冲突, 可降低管线冲突整改率 80% 以上。电缆敷设方案应优化: 10 kV 交联聚乙烯电缆弯曲半径不小于 20D (D 为电缆直径), 聚氯乙烯电缆不小于 15D; 每减少一次 90° 弯曲可降低损耗约 0.3%, 整体损耗可减少 3%~5%。铜排母线搭接面需打磨并搪锡, 厚度不小于 0.5 mm, 确保接触电阻不超过 10 $\mu\Omega$ 。关键工序参数须明确: 设备安装时垫铁平整度误差 ≤ 2 mm/m, 垂直度偏差 ≤ 1.5 mm/m; 电缆牵引速度不超过 5 m/min, 牵引力不大于 10 N/mm², 并需制定专项方案与应急预案^[2]。

1.2 核心设备安装关键技术

10 kV 配电室的核心设备包括变压器、高压开关柜、低压配电柜、直流屏等, 其安装质量直接决定供电的稳定性, 因此需严格控制安装精度和工艺标准。

作者简介: 鲁斌 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电工程。

变压器安装要点：开箱检查时，要核对设备型号和附件的完整性；器身检查应重点检查铁芯绝缘电阻和绕组直流电阻。使用 2 500 V 兆欧表测量铁芯绝缘电阻，读数应不低于 1 000 M Ω ；绕组直流电阻不平衡率不超过 2%，以确保核心部件无损伤。就位安装前，垫铁选用 Q235 钢材，规格为 100 mm $\times$ 50 mm $\times$ 10 mm，铺设平整度误差不超过 2 mm/m。变压器就位后，水平度偏差不超过 1 mm/m、垂直度偏差不超过 1.5 mm/m，使用水平仪每 0.5 m 测量 1 点，偏差超限时通过调整垫铁厚度进行修正。在附件安装中，套管安装倾斜度不超过 0.5 mm，密封胶涂抹厚度不小于 3 mm，以确保无渗漏；油枕油位需与环境温度相适配，25 $^{\circ}\text{C}$ 时油位处于 1/2 $\sim$ 2/3 区间，避免油温变化导致油位异常；冷却装置安装后需测试散热效率，满负荷运行时油温不超过 65 $^{\circ}\text{C}$ ，冷却风机启停响应时间不超过 3 s。试验调试阶段，绝缘电阻测试应不低于 1 000 M Ω ，变比误差不超过 $\pm 0.5\%$ ，耐压试验施加 17.5 kV 电压，持续 1 min 无击穿、无闪络，以确保变压器性能达标^[3]。

高压开关柜安装要点：基础型钢选用 10# 槽钢，安装前需进行调直处理，水平度偏差不超过 1 mm/m、全长偏差不超过 5 mm，安装完成后接地电阻不超过 4 Ω 。开关柜就位采用激光投线仪定位，相邻柜体间距偏差不超过 2 mm，垂直度偏差不超过 1.5 mm/m，柜体固定采用 M12 膨胀螺栓，紧固力矩不小于 45 N $\cdot$ m。柜内设备安装需精准把控参数，断路器分合闸行程误差不得超过 3 mm，接触电阻不超过 10 $\mu\Omega$ ，采用回路电阻测试仪检测；电流互感器极性正确率需达到 100%，误差符合 0.5 级精度要求，电压互感器变比误差不超过 $\pm 0.2\%$ ；避雷器在 10 kV 电压下泄漏电流不超过 10 μA 。接地系统采用截面不小于 25 mm² 的铜排连接，连接点螺栓紧固力矩不小于 40 N $\cdot$ m，接地连续性测试电阻不超过 0.1 Ω 。试验调试阶段，绝缘电阻不低于 1 000 M Ω ，1 min 耐压试验 17.5 kV 无闪络；保护装置动作准确率 100%，模拟短路故障时跳闸响应时间不超过 0.1 s^[4]。

低压配电柜与直流屏安装要点：基础安装精度与高压开关柜相同，柜内布线需横平竖直，导线弯曲半径不小于 6D（D 为导线直径），接线端子采用铜质材料，压接力矩按导线截面精准控制，2.5 mm² 导线不小于 8 N $\cdot$ m、4 mm² 导线不小于 12 N $\cdot$ m、16 mm² 导线不小于 25 N $\cdot$ m，以确保连接牢固。低压断路器整定电流需与设计负荷相匹配，过载保护动作时间不超过 10 s，短路保护动作时间不超过 0.1 s。直流屏作为控制与应急电源，安装后需测试充电装置输出电压波动不超过 $\pm 1\%$ ，蓄电池组容量误差不超过 5%，浮充电电压控制在 2.25 V/

单体，应急供电时长不小于 2 h，以确保市电中断时正常供电^[5]。

1.3 母线及电缆工程施工技术

母线和电缆是电力传输的核心，母线的施工质量直接影响到电力传输的稳定性和安全性，因此需严格把控各个环节的技术要求。

母线施工要点：住宅小区的 10 kV 配电室通常采用硬母线（铜排），材质为 T2 紫铜，导电率不低于 98%。下料时使用数控剪板机，精度误差需控制在 ± 1 mm 以内，切口需保证垂直，偏差应控制在 0.5 mm 以内，切口处不得存在毛刺与飞边。

母线连接是关键环节，搭接面需用砂纸打磨至粗糙度 $R_a \leq 6.3 \mu\text{m}$ ，清除氧化层后进行搪锡处理，搪锡厚度应大于或等于 0.5 mm，冷却后不得出现气泡和裂纹。螺栓连接应使用高强度镀锌螺栓，规格需与母线截面相匹配，60 mm $\times$ 6 mm 母线应使用 M12 螺栓，80 mm $\times$ 8 mm 母线应使用 M16 螺栓。紧固力矩需按标准进行控制，M12 螺栓的紧固力矩应大于或等于 45 N $\cdot$ m，M16 螺栓的紧固力矩应大于或等于 80 N $\cdot$ m。需使用扭矩扳手进行检测，紧固后应标记防松标识。

母线安装完成后需进行绝缘处理，应采用阻燃绝缘护套，厚度应大于或等于 1.5 mm。使用 500 V 兆欧表测量绝缘电阻，其值应大于或等于 100 M Ω 。同时，需设置清晰的相位标识，A 相使用黄色，B 相使用绿色，C 相使用红色^[6]。

电缆施工要点：10 kV 电缆应选用 YJV22-8.7/15kV 型交联聚乙烯电缆，该电缆耐温 90 $^{\circ}\text{C}$ ，具备阻燃防水性能。敷设前需核查电缆型号和规格，使用 2 500 V 兆欧表测量绝缘电阻，其值应大于或等于 500 M Ω 。电缆外观不得有损伤，绝缘层不得老化。敷设通道需清理干净。在电缆桥架内敷设时，支架间距不得超过 1.5 m，电缆排列应整齐，并列敷设间距应大于或等于 30 mm，交叉敷设净距应大于或等于 50 mm，以避免相互挤压。敷设时应采用机械牵引，牵引头需加装防护套，牵引力应控制在 8 N/mm² $\sim$ 10 N/mm²，牵引速度不得超过 5 m/min，以防止过度拉伸导致绝缘层损伤。转角处需安排专人进行监护，确保弯曲半径符合要求。

电缆头制作应使用热缩式电缆头，剥切外护套时，深度应控制在 1.2 mm $\sim$ 1.5 mm，需使用专用剥切刀，以避免损伤绝缘层。剥除绝缘层后，导体连接应使用压接端子，压接深度应大于或等于端子深度的 2/3，压接力矩应大于或等于 30 N $\cdot$ m。热缩管加热温度为 120 $^{\circ}\text{C}$ $\sim$ 140 $^{\circ}\text{C}$ ，加热时间按直径计算，每 10 mm 加热 30 s，应从中间向两端均匀加热，以确保密封严密、无褶皱^[7]。

2 住宅小区 10 kV 配电室电气施工质量问题分析与防治措施

在住宅小区 10 kV 配电室电气施工过程中,受施工人员操作水平、工艺把控、环境因素等影响,容易出现各类质量问题,需要精准分析成因并采取针对性的防治措施。

2.1 常见质量问题分析

结合多个住宅小区 10 kV 配电室施工项目的调研数据,常见质量问题及发生率如下:一是设备安装偏差,发生率为 18%,主要表现为变压器水平度超标(偏差 $>1.5\text{ mm/m}$)、开关柜排列不齐、柜内设备接线松动等,成因多为施工人员未按精准定位要求操作,水平度、垂直度检测不细致;二是母线连接不良,发生率为 15%,表现为接触电阻 $>10\text{ }\mu\Omega$,运行中发热超 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,核心成因是搭接面打磨不彻底、搪锡厚度不足、螺栓紧固力矩未达标;三是电缆绝缘损伤,发生率为 22%,多因敷设通道清理不彻底、牵引力控制不当(超过 10 N/mm^2)、弯曲半径不足导致,表现为绝缘电阻 $<500\text{ M}\Omega$,易引发短路故障;四是接地电阻超标,发生率为 12%,接地体埋深不足 0.8 m 、间距过小($<5\text{ m}$)是主要成因,接地电阻大于 $4\text{ }\Omega$ 时,就无法保证故障电流顺利排出,存在触电危险。

2.2 质量问题防治措施

针对母线连接不良问题,需细化加工与检测流程。对搭接面进行打磨后,使用粗糙度仪进行检测,确保 R_a 值不超过 $6.3\text{ }\mu\text{m}$;利用测厚仪检查搪锡厚度,厚度至少达到 0.5 mm 方可进行连接。螺栓紧固应依据规格匹配相应力矩, $M12$ 螺栓力矩至少为 $45\text{ N}\cdot\text{m}$, $M16$ 螺栓力矩至少为 $80\text{ N}\cdot\text{m}$,紧固完成后做好防松标记。连接结束后,使用回路电阻测试仪检测接触电阻,若超过 $10\text{ }\mu\Omega$,则需重新处理。

电缆绝缘损伤的防治需关注全流程细节。敷设前应彻底清理通道杂物,对尖锐边角加装防护套;在牵引过程中,实时监测牵引力,将其控制在 8 N/mm^2 至 10 N/mm^2 范围内,牵引速度每分钟不超过 5 m ,在转角处安排专人进行监护,确保弯曲半径符合要求(交联聚乙烯电缆弯曲半径至少为 $20D$)。敷设完成后,全面检测绝缘电阻,若小于 $500\text{ M}\Omega$,需排查损伤部位,情况严重时更换电缆段。

对于接地电阻超标问题,要规范施工工艺。接地体选用 $\phi 16\text{ mm}$ 镀锌钢管,埋设深度至少为 0.8 m ,间距至少为 5 m ;在土壤电阻率较高的区域,使用降阻剂(降阻率至少为 40%),敷设完成后使用接地电阻测试仪进行检测,若电阻值大于 $4\text{ }\Omega$,需增加接地体,直

至达标。同时,规范接地连接工艺,确保接地体与连接线焊接牢固,焊缝长度至少为钢筋直径的 6 倍,焊接完成后进行防腐处理。

此外,要加强人员培训与过程管理。施工人员需经过专业培训且考核合格后,方可上岗作业,重点培训核心技术参数与操作规范;建立“自检—互检—交接检”三检制度,每道工序完成后须检验合格,方可进入下一道工序,检验数据应留存归档,以实现质量问题的可追溯性。

3 结束语

住宅小区 10 kV 配电室电气施工质量直接关系到居民用电安全与电力系统的稳定运行,施工技术的精准实施与质量问题的有效管控是核心保障。结果表明,施工前期的深化设计(依托 BIM 技术提升精准度)、核心设备安装的参数把控(变压器水平度偏差每米不超过 1 mm 、高压开关柜接地电阻不超过 $4\text{ }\Omega$)、母线及电缆施工的工艺规范(母线接触电阻不超过 $10\text{ }\mu\Omega$ 、电缆牵引力不超过 10 N/mm^2)是提升施工质量的关键环节。针对设备安装偏差、母线连接不良等常见质量问题,通过双检测定位、细化加工流程、全流程管控等针对性措施,可有效降低质量隐患的发生率。本文所提出的施工技术要点与质量防治措施,可为住宅小区 10 kV 配电室施工实践提供参考,有助于推动电气施工行业的规范化、精细化发展,保障居民用电的安全稳定。随着智能监测技术的发展,可进一步将物联网、大数据等技术融入施工与运维过程,实现施工质量的实时监测与动态管控。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.20kV及以下变电所设计规范(GB 50053-2013)[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [2] 国家能源局.配电系统电气装置安装工程施工及验收规范(DL/T 5759-2017)[S].2017-12-27.
- [3] 国家能源局.电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范(DL/T 5899—2025)[S].2025-09-28.
- [4] 江晓东.住宅小区10kV配电室电气安装技术[J].四川建材,2022,48(12):184-185.
- [5] 任智立.10kV配电室电气安装施工技术探析[J].电力设备管理,2024(24):219-221.
- [6] 王闯.10kV变电室电气设备安装施工质量控制及验收要点探讨[J].门窗,2023(07):157-159.
- [7] 郝亚强.10kV配电室电气安装施工技术探析[J].建材与装饰,2025,21(36):139-141.

建筑工程给排水系统施工技术研究

苏广平, 李宛凝

(山东旭华园林工程有限公司, 山东 东营 257091)

摘要 给排水系统是建筑工程中不可或缺的配套设施, 其施工质量优劣、技术落实程度直接关乎建筑建成后的供水稳定性与排水通畅性, 影响建筑整体使用安全, 更是保障建筑正常运转的关键所在。建筑给排水施工涵盖管线布置、设备安装、试验验收等诸多环节, 对专业性与实操性要求高, 任何一道工序的技术把控出现疏漏, 都可能引发渗漏、堵塞、供水异常等问题。本文结合建筑工程施工规范与现场实际施工需求, 梳理给水、排水两大系统的具体施工技术要点, 并提出针对性的施工管理优化举措, 旨在规范施工流程、严格把控质量、降低后期运维成本, 为提升建筑工程配套建设水平提供参考。

关键词 建筑工程; 给排水系统; 给水管道; 排水管道; 供水泵站设备

中图分类号: TU82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.035

0 引言

给排水系统贯穿建筑主体结构和内部各个功能区域, 主要负责生活供水、污水排放、雨水疏导等工作, 是建筑工程中的重要组成部分。建筑给排水施工涉及多专业协同, 工序衔接环环相扣, 且常与土建、室内装修等工程交叉作业, 施工环境复杂, 需把控的细节繁多。现阶段对建筑使用标准要求越来越高, 对给排水系统的供水水质、排水效率、防渗漏能力和使用年限都提出了更高要求, 过去粗放式的施工方式很容易留下质量隐患, 影响建筑后期正常使用。所以, 只有从施工全过程严格把控技术细节, 完善现场管理体系, 才能保证给排水系统施工质量, 让系统长期稳定运行, 这对提升建筑整体建设质量具有重要的现实意义。

1 建筑给排水系统施工的核心价值

1.1 保障供水质量与系统运行稳定性

给排水施工规范严谨, 才能确保建筑生活用水达标, 保障供水系统长期稳定运行, 这也是筑牢日常用水安全的第一道防线。施工时, 从管材管件的选择、管线铺设的位置、接口密封处理, 到水压试验, 每一个环节都要严格把控, 这样才能从根本上避免因材料不合格、安装不规范、接口密封不好而导致的水质二次污染、管网渗漏、供水压力不稳定等问题, 确保送到各个用水点位的自来水符合生活饮用水标准, 满足建筑内部日常用水需求。只有全程严格把控施工质量, 才能有效避免因施工问题出现供水中断、水压

不足、水质超标等情况, 保证供水系统连续稳定运行, 切实保障使用者的用水安全 and 基本权益^[1]。

1.2 筑牢建筑整体结构与使用安全防线

给排水系统施工质量和建筑整体安全紧密相关, 系统运行的每一个环节, 都离不开施工质量的支撑。如果施工时留下管道渗漏、排水坡度不够、污水回流、管线破损等问题, 使用过程中会不断侵蚀建筑墙体、楼地面、梁柱等主体结构, 慢慢造成墙体受潮霉变、混凝土开裂、内部钢筋生锈等无法修复的损坏, 既会留下结构安全隐患, 也会带来卫生安全问题。按照高标准完成给排水全流程施工, 做好管道防渗漏、防堵塞、防腐防锈、防回流等处理, 可有效阻止水对建筑结构的侵蚀, 避免污水淤积滋生有害物、影响室内环境, 全方位保护建筑结构完整和使用安全, 延长建筑的使用年限。

1.3 提升建筑整体居住与使用舒适度

给排水系统的使用体验直接影响建筑内部居住、办公的舒适度, 而系统运行效果主要取决于前期施工质量。施工时, 合理规划管线布局, 精准控制安装精度, 做好管道降噪、保温防冻、防抖动等细节工作, 再配合规范的系统调试, 可实现供水压力稳定、排水顺畅不堵塞, 同时减少供水、排水时的管道噪声, 避免冬天管道冻裂、堵塞的问题^[2]。根据使用者的使用需求和建筑的功能定位, 精细化施工可以改善给排水系统长期使用体验, 减少日常使用中的故障和不便, 符合

作者简介: 苏广平 (1975-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程给排水。

现代建筑人性化、高品质的使用需求，切实提高建筑的居住和使用舒适度。

2 建筑给排水系统施工关键技术要点

2.1 给水系统施工关键技术要点

2.1.1 给水管道布设与安装

给水管道安装前，要结合建筑结构和设计图纸，精准确定管线走向和安装位置，避开承重结构、电气管线和其他交叉设施，确保管线布局合理、走向顺畅^[3]。铺设管道时，要严格控制管线的坡度和标高，符合设计和规范要求，固定支架要安装牢固，间距也要合理，防止管道晃动、移位。安装管道要提前预留沟槽和孔洞，尺寸要精准、位置要规整；明装管道要排布整齐，方便后期检修。施工时要遵循先主管后支管、先地下后地上的顺序，确保安装流程规范，不出现混乱。

2.1.2 给水管道连接施工

管道连接是给水系统防渗漏的关键，要根据管道材质，选择合适的连接工艺，重点把控连接精度和密封性。连接管道前，要把接口处的杂质、毛刺清理干净，保证接口平整光滑；连接时，力度要均匀，操作要规范，避免出现接口开裂、松动、密封不严等问题。连接完成后，要仔细检查接口的密封性和平整度，彻底消除渗漏隐患，确保管道连接牢固，能满足供水压力要求，保障给水系统密闭性达标。

2.1.3 供水泵站设备安装

泵站设备是给水系统的核心动力设备，安装前要核对设备的型号、规格，确保和设计要求一致，同时检查设备是否完好，有没有破损、故障。安装时，要精准控制设备的安装位置 and 水平度，底座要固定牢固，减震处理要到位，防止设备运行时移位、震动过大。设备的管路连接要顺畅、密封严密，配套的电气接线要规范。安装完成后，要进行单机调试，检查设备运行状态和水压控制效果，确保设备运行稳定、参数达标，能满足建筑供水压力和流量需求。

2.1.4 管道保温与防腐施工

给水管道的保温和防腐处理直接关系到系统的使用年限，也是保障冬天正常运行的关键。对于室外、地下和阴冷区域的管道，要选择合适的保温材料，包裹要严密，厚度要符合要求，不能出现保温层脱落、缝隙过大的情况，防止冬天管道冻裂、结露。管道防腐要覆盖整个管线，除锈要彻底，防腐涂层要均匀牢固，要根据管道铺设的环境，选择耐腐蚀、耐潮湿的防腐材料，避免管道长期使用后出现锈蚀、破损，延长管道使用寿命。

2.1.5 给水系统通水试验

给水管道和设备全部安装完成后，要进行通水和压力试验，检验系统的密封性、供水稳定性和承压能力。试验时，要严格按照规范标准控制水压，保持稳压时间达标，全程检查管道接口、阀门、设备连接处，看有没有渗漏、滴水的情况，检测供水压力、流量是否符合设计要求。试验合格后，要清理管道内部的杂质，对系统进行冲洗消毒，确保水质达标之后才能完成给水系统的施工验收，避免后期运行出现渗漏、供水异常等问题。

2.2 排水系统施工关键技术要点

2.2.1 地下排水管道布设

地下排水管道铺设前，要做好沟槽开挖和基底处理，严格控制沟槽的深度、宽度和坡度，基底要平整夯实，承载力要达标，防止后期沉降导致管道变形、断裂。铺设管道时，要保证管线走向和坡度符合排水顺畅的要求，不能出现倒坡、坡度不足的情况，管道底部的垫层要铺设均匀、支撑到位，避免管道受力不均出现破损。地下管道周边的回填土要符合要求，分层夯实，防止回填不当挤压管道，确保地下排水管线结构稳定、布设规范^[4]。

2.2.2 排水管道安装施工

排水管道安装要按照设计标高和走向要求，合理规划立管、支管的布局，保证管道的垂直度和水平度达标，支架、吊架要安装牢固，间距要符合规范，支撑力度要均匀，防止管道下垂、移位。室内排水管道要避免承重墙和关键设施，预留好检修口和疏通口，位置要合理，方便后期运维。安装过程中，要对管道进行临时封堵，防止杂物进入管道造成堵塞，全程把控安装精度，确保排水管线排布规整、排水顺畅。

2.2.3 排水管道连接处理

排水管道连接，既要保证密封性，也要保证排水顺畅。根据管道材质，选择专用的连接配件和工艺，接口要密封严密，不能出现渗漏、错位的情况，连接部位的内壁要平整顺滑，没有凸起、毛刺，避免影响排水速度。立管和支管的连接角度要合理，符合排水水流方向，减少水流阻力，防止管道淤积堵塞。连接完成后，要检查接口的外观和密封性，确保没有裂缝、松动、渗漏问题，保障排水系统整体密闭、排水通畅。

2.2.4 排水检查井安装施工

排水检查井的安装位置要符合设计要求，一般选在管线转弯、分支、坡度变化的关键部位，方便后期检修和清淤。井体砌筑或安装要规范，内壁要平整，

密封性要好,井盖要和井口匹配牢固,高度要和周边地面协调,避免出现积水、塌陷的情况。检查井和排水管道的连接要严密,不能出现渗漏、错位,井内的流槽要顺畅,符合排水流向要求,确保检查井能正常发挥检修、疏导作用,满足排水系统后期运维需求。

2.2.5 排水系统通水通球试验

排水系统施工完成后,要进行通水和通球试验,检验排水通畅性和系统密封性。通水试验时,向系统内持续注水,观察各管道接口、检查井有没有渗漏,检测排水速度和通畅度,没有积水、没有倒灌、没有渗漏,即为合格。通球试验要选用合适规格的试验球,确保试验球能顺利通过管道全程,没有堵塞、卡顿的情况,以此验证管道内部没有杂物堵塞、管径通畅。只有两项试验都达标,才能完成排水系统的施工验收。

3 给排水系统施工全过程管理优化路径

3.1 做细做实前期施工筹备工作

前期筹备工作做得好不好,直接影响后续施工能不能顺利推进,所以要围绕给排水施工全流程,做细做实各项准备工作,避免仓促开工带来的各类问题。首先要吃透施工图纸和专项设计要求,逐一核对给排水管线的走向、标高、管径、设备安装位置和技术参数,梳理出管线交叉、隐蔽施工、特殊部位安装等难点环节,结合现场实际施工情况,制定专项施工方案和应急处置办法,避免图纸和现场脱节,确保施工有章可循。同时,要做好现场勘察,复核建筑结构预留孔洞、预埋套管的位置和尺寸,排查现场施工条件,提前和土建、电气、暖通等交叉专业沟通协调,明确各专业的施工范围和衔接节点,统筹规划施工顺序和作业空间,从源头避免施工冲突和返工问题。在材料和人员筹备方面,要严格挑选符合设计和规范要求的管材、管件、阀门及配套设备,进场前逐一核查质量证明文件和规格型号,抽样检查外观和性能,不合格的材料坚决不能进场使用;还要组织施工和管理人员开展技术交底,详细讲解施工流程、操作规范、质量要求和安全注意事项,确保每一位作业人员都清楚施工要点,提前调试好施工机具,合理安排人员分工,让人员、材料、设备、技术都落实到位,为后续规范施工打好基础。

3.2 强化施工全过程动态质量管控

施工过程中的质量管控,是保障给排水施工质量的关键,要实行全程动态监督、闭环管理,把质量责任落实到每一道工序、每一位作业人员^[5]。施工现场要安排专业的技术和质量管理人员全程驻守巡查,重

点关注管道铺设定位、接口密封、保温防腐、设备固定、支吊架安装等关键工序,实时检查施工操作是否符合规范和设计要求,发现违规操作、工艺不达标等问题,要及时纠正,把质量隐患消除在施工过程中,不留给后期运维。建立完善的施工质量台账,详细记录每一道工序的施工情况、质量检测数据和验收结果,尤其是隐蔽工程,必须全程旁站监督、专项验收,留存完整的验收记录,没有通过验收的隐蔽工序,坚决不能覆盖,也不能进入下一道工序。除了质量管控,还要兼顾现场安全和施工进度,规范现场作业流程,做好临边防护、用电安全、机具操作等安全措施,防范施工安全事故;根据整体工程进度计划,合理调整给排水施工节奏,协调好各分项工序的衔接,避免施工滞后或超前打乱整体部署,确保给排水施工和土建、装修等工程同步推进,实现施工有序、高效、高质量开展,同时保证施工质量和进度达标^[6]。

4 结束语

建筑工程给排水系统施工细节要求高、专业性强,贯穿建筑施工的全过程,其施工质量直接决定系统后期运行稳定性和建筑整体使用品质。开展给排水施工,首先要明确这项工作的重要意义,严格按照给水、排水两大系统的技术要求施工,从管线规划铺设、设备安装调试,到后期试验验收,每一道工序都要规范操作、严格把关,再配合完善的前期筹备和全过程动态管理,从源头减少渗漏、堵塞、运行异常等常见质量隐患。做好给排水施工技术把控和现场全过程管理,不仅能保证系统长期稳定运行,满足建筑日常用水和排水需求,还能夯实建筑配套工程质量,为建筑后期安全、舒适、长期使用提供可靠保障。

参考文献:

- [1] 陶彦.建筑给排水系统安装工程施工技术分析[J].产业与科技论坛,2024,23(21):34-36.
- [2] 戴宏宇.建筑工程给排水施工中消防水系统的安装技术分析[J].居业,2025(10):25-27.
- [3] 季孟臣.节能节水技术在建筑给排水工程中的应用研究[J].房地产世界,2025(01):149-151.
- [4] 袁凯.建筑给排水施工技术及注意要点研究[J].现代工程科技,2025,04(01):37-40.
- [5] 赵红霞.建筑给排水工程施工质量与安全管理优化措施[J].城市建设理论研究(电子版),2025(04):71-73.
- [6] 王法,孙景博.基于防渗漏技术的建筑给排水管道施工方法研究[J].新城建科技,2025,34(06):144-146.

环境工程中污水处理过程监测与效果分析

马 超

(宣城市宣州区生态环境分局, 安徽 宣城 242000)

摘 要 为提高污水处理系统运行分析的针对性与精细化水平, 本文围绕污水处理过程监测对象识别、监测体系构建、处理效果分析及优化路径展开研究。在明确 COD、氨氮、总磷、悬浮物及 pH 等核心监测指标的基础上, 构建“进水口—关键单元—出水口”的全过程监测体系, 并结合运行参数监测对系统处理效果进行分析。结果表明, 过程监测能够反映各处理单元作用差异和系统运行状态, COD 与 SS 控制相对稳定, 氨氮和总磷对工况变化更为敏感。针对进水波动、生化运行、除磷管理及数据应用等环节提出优化建议。研究验证表明, 过程监测有助于提高污水处理系统运行判断的及时性和调控措施的针对性, 对污水处理设施稳定运行和精细化管理具有参考价值。

关键词 环境工程; 污水处理; 过程监测; 监测点位布设; 在线监测

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.036

0 引言

污水处理是环境工程中的关键环节, 其运行效果不仅关系到污染物削减水平, 也直接影响区域水环境治理成效。随着污水处理设施运行要求不断提高, 单纯依靠末端出水指标评价处理效果已难以满足精细化管理需要^[1]。相比结果性判断, 过程监测能够更及时地反映来水负荷变化、关键单元运行状态及异常工况特征, 对保障系统稳定运行具有现实意义。当前部分研究更关注工艺流程和终端达标情况, 对监测点位设置、过程数据应用及处理效果关联分析重视不足, 导致研究成果在工程实践中的针对性仍有提升空间^[2]。基于此, 本文围绕污水处理过程监测对象识别、监测体系构建、处理效果分析及优化建议展开研究, 以期污水处理系统的稳定运行和精细化调控提供参考。

1 污水处理过程监测对象与关键环节

1.1 核心水质指标识别

过程监测先要解决“看什么”的问题。就污水处理运行而言, COD、氨氮、总磷、SS 和 pH 是最需要优先掌握的几类指标。COD 主要看有机物负荷变化, 氨氮和总磷更能反映营养盐去除状况, SS 常用来判断沉淀和分离环节是否正常, pH 虽然不是去除指标, 但对反应环境是否平稳有较强指示作用^[3]。这几项指标放能够反映污染削减情况和工艺运行状态。

1.2 关键处理单元监测重点

点位布设不在于多, 而在于是否落在关键位置。按常见污水处理流程, 进水口、生化处理段和深度处

理后出水口应作为重点监测部位。进水口主要看来水强度和波动情况, 生化处理段反映主体工艺运行是否正常, 出水口则直接对应最终处理结果。把这几个节点串起来看, 不仅能看出污染物沿流程的变化过程, 也更容易判断问题究竟出在前端负荷、主体处理, 还是末端控制环节。

1.3 运行状态参数监测要求

只看水质结果, 很多时候还不够。在实际运行中, 一些指标波动并不是单纯由进水变化引起, 而是与溶解氧、污泥浓度、药剂投加量、流量变化等运行参数直接相关。这类参数本身不表示污染物高低, 却能帮助判断系统有没有偏离正常工况。把水质指标和运行参数结合在一起分析, 往往更容易看清波动原因, 也更便于后续调整运行方式。

1.4 异常工况识别要点

从现场运行看, 比较常见的问题主要是进水冲击、生化反应不稳、沉淀分离效果变差以及除磷波动等。这些问题一开始未必都会表现为出水明显超标, 但相关指标通常会先出现短时偏移或阶段性异常。过程监测的意义就在于尽早发现这些变化, 及时判断受扰动的单元位置, 避免小幅波动逐步演变成更明显的运行问题。

表 1 反映了关键监测点位的主要指标变化情况。沿处理流程看, 各项污染物总体呈下降态势, 说明工艺链条在削减污染物方面是持续起作用的。其中, 主体处理单元承担了主要去除任务, 后续处理环节更多

作者简介: 马超 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 环境工程。

体现为对出水的进一步稳定和收口。就这一点而言,对关键节点开展过程监测,不只是为了记录数据,更是为了明确各单元的实际作用。

表 1 污水处理过程主要监测指标变化情况

监测点位	COD (mg/L)	氨氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	SS (mg/L)	pH
进水口	268.4	27.6	3.42	186.5	7.1
生化处理段后	71.5	6.3	1.08	42.7	7.2
深度处理后 出水	31.6	3.4	0.62	13.8	7.1

2 污水处理过程监测体系构建

2.1 监测点位布设原则

污水处理过程监测体系的建立,应先解决点位设置是否合理的问题。布点不宜过多过散,而应围绕处理流程中的关键节点展开,按照“进水口—关键单元—出水口”的链条式思路进行布设。进水口用于把握来水水质和负荷变化,关键单元用于识别主体工艺运行状态,出水口用于检验最终处理水平^[4]。通过前后衔接的点位设置,可使监测结果更具代表性和可比性,并较完整地反映污水处理全过程的变化特征,同时为后续运行分析和单元效果判别提供清晰的依据。

2.2 在线监测与人工检测结合

单靠一种监测方式,往往难以把运行情况看全。在线监测的优势在于连续,指标一有波动,系统就能较快作出反应,适合监测运行过程;但有些项目受设备稳定性、现场条件等影响,长期连续监测并不理想,这时还得靠人工检测补上。人工检测虽然频次不如在线监测高,却更适合做关键指标复核,也能对部分在线数据起到校正作用^[5]。两种方式结合使用,更贴近污水处理现场实际,既能看变化,也能看数据是否可靠。

2.3 数据采集与质量控制

监测数据能不能用于分析,关键不在于数量多,而在于数据本身是否可靠。在实际工作中,采样频次不能一概而论,要结合工艺运行节奏和波动特点来定;仪器校准、日常维护和运行检查也不能流于形式,否则后续分析很容易失去基础。除此之外,平行样复核、原始记录核查和异常值筛查也很重要,这些工作看起来琐碎,却直接关系到结果能否真实反映处理过程状态。只有把采集和质控这两道关守住,监测数据才可能真正用于后续判断和调整。

2.4 监测数据应用方向

如果监测数据只是停留在台账记录层面,其作用其实很有限。过程监测更重要的地方在于把数据和运

行判断联系起来。例如:某一阶段指标连续偏移,是前端来水变了,还是中间单元出了问题,单看结果往往不好下结论,但把趋势变化、参数波动和点位信息放在一起分析,问题位置通常会更清楚。也正因为如此,监测数据不应只用于事后统计,还应服务于异常识别、趋势判断和运行调节,使现场管理逐步从“看结果处理问题”转向“看过程提前应对”。

3 监测结果与处理效果分析

3.1 主要污染物去除特征

从监测结果看,污水经各处理单元逐级处理后,主要污染物均得到有效削减,说明现有工艺对有机物、悬浮物及营养盐具有较好的综合控制能力。就指标表现而言,有机污染物和悬浮物下降更为连续,反映出主体处理工艺和固液分离环节运行基础较稳;营养盐指标虽总体处于受控状态,但对运行条件变化更为敏感,表明不同污染因子在处理过程中的响应特征并不一致。

3.2 运行稳定性与波动表现

连续监测结果表明,系统大部分时段保持平稳运行,出水指标总体处于可控区间,说明工艺链条具备一定稳定性和抗扰动能力。但从阶段性变化情况看,个别指标仍存在小幅波动,反映出系统在进水负荷变化、局部单元调节偏差或运行条件轻微波动时,会产生一定的过程响应^[6]。由此可见,对污水处理效果的判断不能只看平均结果,还应结合波动过程分析系统的真实运行状态。

3.3 处理效果影响因素

处理效果出现差异,很多时候并不只是工艺本身的问题,更常见的是运行条件没有及时跟上。进水负荷波动会改变各单元承受的处理压力;曝气状态和污泥活性不稳,生化反应效率也会受影响;药剂投加控制不到位,则常直接反映在营养盐去除效果上。实际运行中,氨氮和总磷对这些变化更敏感,尤其在曝气不足、污泥状态波动或加药偏差增大时,更容易先表现出异常^[7]。因此,分析处理效果时,不能只盯末端结果,还要把运行条件一并纳入判断。

3.4 综合评价与短板识别

从去除效果、波动程度和达标表现综合来看,系统整体运行基础较稳定,常规污染物控制也基本正常,说明现有工艺具备一定的持续处理能力。但如果把不同指标放在一起比较,可以看出营养盐控制仍是相对薄弱的环节,特别是在工况起伏较明显时,这一问题更容易暴露出来。也就是说,后续优化不能只看出水是否达标,还要把注意力前移到关键参数变化和敏感环节控制上,这样系统运行的稳定性才更有保障。

表2把几项主要指标的处理水平、波动程度和运行表现放在了一起。从表中可以看出,不同指标并不是同步变化的:有的去除率较高、波动也较小,有的

虽总体可控,但稳定性上仍有短板。正因为如此,污水处理效果不能只按末端是否达标来判断,还得结合过程变化一起看,才能更接近系统的真实运行状态。

表2 主要污染指标处理效果模拟分析

指标	进水均值 (mg/L)	出水均值 (mg/L)	平均去除率 (%)	波动系数 (%)	达标情况
COD	268.4	31.6	88.2	9.4	稳定达标
氨氮	27.6	3.4	87.7	13.1	基本稳定
总磷	3.42	0.62	81.9	15.6	个别波动
SS	186.5	13.8	92.6	10.2	稳定达标

4 过程监测驱动下的优化建议

4.1 强化进水波动预警

不少运行波动并非起于处理单元内部,而是先由来水变化传入系统。进水负荷一旦明显起伏,后续单元往往会被动响应,进而带动整条处理链波动。因此,优化工作应适当前移,重点发挥调节池均质均量作用,并将流量异常、浓度突升和阶段性水质偏移纳入预警范围。监测进水变化,能够为后续曝气、回流和加药调整争取时间。

4.2 优化生化运行控制

生化处理单元是影响COD和氨氮去除效果的关键部位,其运行状态直接关系到整体处理水平。在实际运行中,曝气强度、污泥浓度和停留时间不能长期按固定值控制,而应随工况变化及时调整。尤其在供氧不足、污泥负荷失衡或反应时间偏离正常区间时,处理效率往往会先出现变化。过程监测的价值就在于尽早识别这些偏移,使生化单元尽量维持在较合适的运行状态。

4.3 细化除磷与深度处理管理

营养盐控制比常规污染物控制更容易受工况变化影响,其中总磷波动更为明显。这说明除磷和深度处理环节不能只靠经验维持,而要把控制做得更细。在实际管理中,加药时机、投加量与水质变化是否匹配,会直接影响总磷去除效果;深度处理单元若出现偏移,也会放大末端波动。因此,应把监测重点进一步落到加药控制和后续处理环节上,必要时根据阶段性结果及时调整策略。

4.4 完善监测数据应用机制

过程监测有没有实际作用,关键不在于数据记了多少,而在于能否用来判断问题、指导调整。若监测结果只停留在记录和报表层面,其价值会大打折扣。后续应把异常识别、趋势分析、参数调整和效果验证串联起来,让监测数据真正进入运行管理过程^[8]。一旦某项指标连续偏移,应尽快对对应到可能的单元位置和影响因素,再结合运行参数作出调整,逐步形成闭环应用。

5 结束语

本文围绕污水处理过程监测对象识别、监测体系构建、处理效果分析及优化路径进行了系统梳理。结果表明,过程监测能够较好地反映污水处理各单元的运行状态及污染物变化特征,相比单纯依赖末端出水指标,更有利于识别工艺波动和判断问题来源。从分析结果看,COD和SS控制相对稳定,说明主体处理工艺和固液分离环节运行基础较好;氨氮和总磷对工况变化更为敏感,表明营养盐控制仍是运行管理中的重点与难点。针对进水波动、生化运行、除磷管理及数据应用等环节提出的优化建议,具有一定的工程针对性和实践参考价值。未来研究可结合智能传感、异常预警和多指标联动分析,进一步提高过程监测的实时性、精细性和调控支撑能力,为环境工程中污水处理系统的稳定运行和优化管理提供参考。

参考文献:

- [1] 张祥霖. 水处理运行与管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023.
- [2] 徐久哲. 基于时序特征深度学习的污水处理厂智能运行决策系统研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2024.
- [3] 石宏瑞. 出水目标约束下的智慧污水厂故障诊断及处置系统[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2022.
- [4] 陈莉苹,张舟. 城市污水处理厂网一体化监测点位布设研究[J]. 安徽科技,2022(02):52-55.
- [5] 叶刚. 数据驱动的废水处理过程水质与能耗预测建模研究[D]. 广州:华南理工大学,2024.
- [6] 应莉雅,虞祥芬,戴对武,等. 多级A/O工艺在污水处理厂的应用及运行稳定性分析[J]. 化学工程与装备,2025(07):133-136.
- [7] 陈娟娟,李伟斌,黄鸥,等. 基于降本增效目标的污水处理厂低碳运行调控策略[J]. 工业水处理,2024,44(08):53-60.
- [8] 程洪超. 数据驱动的污水处理过程监测与故障诊断研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

建筑施工中的污水处理设施质量控制和检测

李彬¹, 王雪²

(1. 青岛西海岸公控生态环境检测有限公司, 山东 青岛 266500;

2. 山东天和气象灾害防御技术有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要 建筑施工阶段污水来源复杂, 包括基坑排水、混凝土养护废水、车辆及机械清洗废水和生活污水。若污水处理设施在设计规划、现场施工或后期检测管理环节存在疏漏, 极易出现出水水质不达标、排水管网堵塞淤积等问题, 不仅会引发周边水体与土壤环境污染, 还会直接影响工程项目绿色施工评价成效与环保竣工验收进度。基于施工污水水量波动大、悬浮物高、间歇排放和设施临时性强等特点, 本文围绕污水处理质量控制、现场施工要点、水质检测方法、系统运行评价及工程案例闭环管理展开系统分析, 以期对施工污水规范化治理与绿色施工管控提供实践参考。

关键词 建筑施工; 污水处理设施; 防渗系统; 工艺单元布置; 管网衔接

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.037

0 引言

在建筑施工过程中, 污水处理设施往往容易被视为临时配套内容, 实际却直接关系到施工现场环境管理水平和工程实施的合规性。相较于固定式市政污水处理系统来说, 施工现场污水处理设施具有布置受约束、来水波动大、启停频繁、工况变化快的特点, 容易出现池体渗漏、设备失灵、药剂投加比例不当、污泥清掏不及时和出水不达标之类的问题, 尤其是在深基坑相关、高层建筑群体、大型综合体以及市政配套同步施工这些项目中, 污水成分一般会更加复杂。按照现行《城镇污水排入排水管网许可管理办法》, 排入城镇排水管网的污水, 应满足相应排放标准, 并按规定建设预处理设施、检测井及必要的计量设施, 意味着施工污水处理设施不能只求“有”, 更要做到“建得对、管得住、测得准”。

1 建筑施工污水处理设施质量控制的基本要求

建筑施工污水处理设施的质量控制, 关键在于源头分类, 而不能将各类污水简单混合后统一处理。基坑降水、砂石冲洗水、混凝土废水、设备清洗水和生活污水在含砂量、含油量、酸碱性以及排放规律方面差异十分明显, 前端分流相关工作落实差, 易使得后续沉淀不足、加药不稳定进而造成设备堵塞, 要确定雨污分流、清污分流及生活污水与生产废水分流的原则, 科学安排格栅、调节、沉淀、混凝、生化和消毒等单元, 设施选

址要综合考量排水高程、清掏检修、供电条件以及防洪防渗的要求, 防止布置于低洼积水或者重载的区域, 池体、管道、泵阀和电控系统还应结合实际工况做校验, 防止有裂缝、渗漏、沉降以及安装不正确情况^[1]。

2 建筑施工污水处理设施的施工质量控制要点

2.1 土建构筑物和防渗系统的施工控制

施工污水处理设施能否长期稳定运行, 池体和基础质量是最基础的一环。很多现场问题并不是出在工艺本身, 而是出在池底标高控制不准、池壁蜂窝麻面、穿墙管封堵不严和防渗层施工粗糙等细节上。就钢筋混凝土结构这种池体来说, 要控制好基底承载力、垫层平整度、钢筋保护层厚度、施工缝止水和混凝土振捣养护质量, 避免早期裂缝、不均匀沉降而造成渗漏, 对于装配式箱体、一体化处理设备基础和钢制池体来说, 还要对地脚螺栓定位、二次灌浆的密实程度与底部找平加以控制, 保证设备的受力是均匀的。施工现场经常能见到的简易沉淀池, 采用砖砌或钢板拼装形式的话, 更需注意内衬的防渗、防腐, 做好转角部位加强处理, 不可只图短期使用就无视安全冗余。

2.2 工艺单元布置与设备安装质量控制

施工现场污水处理设施的质量, 不仅取决于池体是否完好, 更取决于工艺链是否合理、设备安装是否到位。如图 1 所示, 一套较为完整的施工污水处理流程, 可以根据现场条件设置格栅、调节池、混合反应池、

作者简介: 李彬 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污水处理。

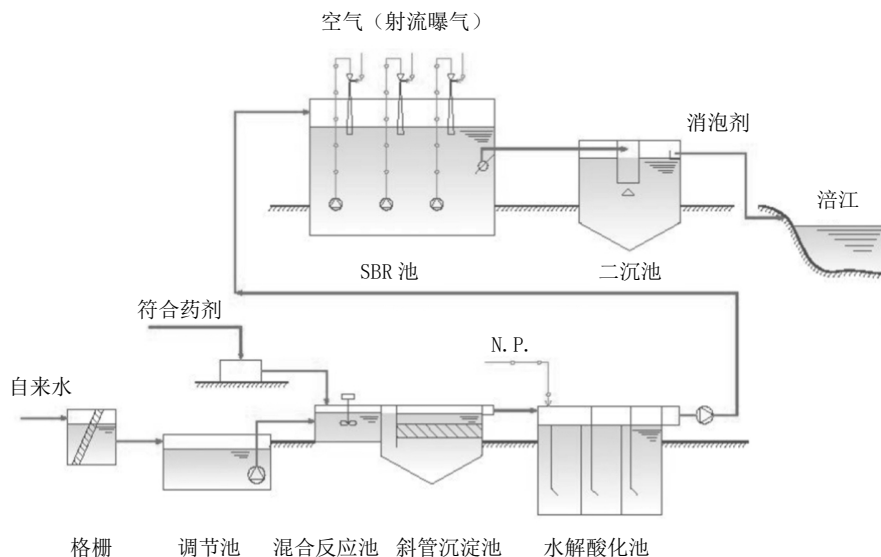


图 1 施工污水组合处理工艺示意图

斜管沉淀池、水解酸化池、SBR 池和二沉池等单元,并结合复合药剂、消泡剂和曝气系统实现分段处理。该类流程的优点在于前端先削减大颗粒悬浮物和水量波动,中段通过混凝沉淀去除泥砂、胶体和部分污染物,后段再通过生化处理提高出水稳定性,比较适合污水成分较复杂、间歇排放明显的施工现场。图中所示处理流程属于组合式工艺布置,控制重点不在于单个池子的“有没有”,而在于各单元之间的衔接是否顺畅、回流路径是否明确、药剂投加点是否合理、停留时间是否满足要求。设备安装阶段还应重点检查提升泵进出口方向、液位控制、加药桶防腐、搅拌机同轴度、曝气头密封和电控箱防雨防潮措施,避免后期出现频繁跳停、空转、堵塞和加药失准^[2]。

2.3 管网衔接与运行调试控制

建筑施工现场污水处理设施一个很突出的特点是工艺本身往往并不复杂，真正容易出问题的是前后端衔接。前端要是不能做到雨污分流，下暴雨时大量清洁的雨水进入处理系统，会让设施运行的负荷过大；后端要是没有检测井、截流阀和应急旁通方面的管理，当出现异常时很难及时去处置，管网衔接要做到来水口明晰、溢流口可把控、排泥路径独立、出水口方便取样，同时于关键节点设置检查井与阀门。调试阶段不能只看设备有没有启动，而要继续观测不同工况时进出水的变动，主要把握调节池液位的改变、药剂投放量、沉淀成效、污泥上浮情况和出水透明度，含泥量较大的施工废水要先使前端沉淀和清掏机制运行顺畅，再进行后续深度处理。运行调试中形成的参数记录十分关键，包括提升泵启停水位、加药浓度、污泥

清掏周期等，这些数据既是优化运行的依据，也是后续质量责任追溯的重要资料。

3 建筑施工污水处理设施的检测与质量评价

3.1 原材料、设备和安装过程检测

对于土建部分,应检查水泥、钢筋、防水材料、防腐涂层和预埋件质量。对于设备部分,应核验水泵、搅拌机、风机、加药装置、液位计和电控柜的型号参数是否与设计一致。对于隐蔽工程,则应重点检查池底防渗层、穿墙套管、排泥管、回流管和电缆预埋路径,防止后期难以拆检。安装完成后,应进行单机试运转和联动调试,检查设备转向、电流、电压、振动、噪声和密封性,尤其对长期间歇运行的施工现场设备,更要核实频繁启停条件下的稳定性。很多工程表面上设备齐全,但实际上液位控制失灵、加药泵流量漂移或风机供气不足,最终都会体现在处理效果波动上^[3]。

3.2 运行指标检测与水质评价方法

运行阶段检测是判断污水处理设施是否真正发挥作用的关键。施工现场常用的指标主要包括 pH 值、悬浮物、化学需氧量、氨氮、石油类以及浊度,要是污水排到城镇排水管网,仍应根据主管部门要求,规范采样位置、检测频次,做好结果留存,相关管理要求说明,施工污水处理设施不但要可以运行,还要有便于采样、计量、实施监管的条件,在实际开展检测的过程中,应结合施工阶段、天气的变动和作业高峰开展分时段的检测,防止因单一的采样时段使结果失真。对于以沉淀、混凝为主的系统,应重点关注悬浮物、浊度和泥水分离效果,还应同步关注氨氮和有机物去除稳定性。

3.3 常见质量问题识别与原因判定

建筑施工污水处理设施在运行中出现问题,大多不是某一个环节完全失效,而是多个小问题叠加后的结果。最常见的现象有:一是前端截污不到位,造成格栅和提升泵频繁堵塞;二是调节池容积不足或液位控制不灵,导致来水波动直接冲击后续单元;三是药剂配比不合理,出现絮体松散、沉降速度慢和上清液浑浊;四是污泥不及时排放,沉淀池有效容积下降,甚至发生翻泥跑泥;五是生化段曝气不均或停运时间过长,造成菌群活性下降,出水指标波动。对这些问题的判断,不能只凭肉眼观察,而应把现场现象与检测数据结合起来。例如:出水浑浊并不一定是药剂问题,也可能是进水含泥量突增或沉淀池短流;氨氮偏高也不一定是生化系统失效,可能是前端进水比例变化太大、停留时间不足或曝气量跟不上^[4]。

3.4 验收检测与闭环管理机制

污水处理设施的质量控制,最终要落实到验收和闭环管理上。很多项目在设施建成后做过一次检测,结果合格后就放松管理,等到后期被投诉或抽检异常才重新处置,这种做法往往代价更高。比较合适的办法是把验收分为三个方面:一是做实体质量的验收,重点审视池体、设备、管线和电控系统是否按设计做好;二是进行功能性的相关验收,着重看系统可不可以连续稳定运行,是否具备调节、沉淀、排泥、加药和应急切换方面的能力;三是做出水效果的验收工作,重点看检测结果是否满足排放去向的相关要求。国家现行的排放相关标准对污水排放管理、建设项目环保设施验收和投产后的排放管理都有明确的适用规定,而排入城镇排水管网的管理规定,进一步对预处理设施、专用检测井和现场核查要求予以强调,在已有的基础上,施工单位还要建立运维台账,把设施运行添加到项目环境管理例会。

4 建筑项目施工污水处理设施质量控制案例分析

某综合建筑项目总建筑面积较大,施工阶段同时存在基坑开挖、主体结构施工、车辆冲洗和生活区排水等多种污水来源。项目初期虽然设置了沉淀池和简易排水沟,但由于前端分流不清、调节能力不足,加之雨后地表径流混入较多,现场曾出现沉淀池泥砂淤积快、出水浑浊和排水口检查困难等问题。后续项目部组织人员对污水处理系统进行优化,对生产废水和生活污水采取分开收集,给车辆冲洗水、基坑排水和施工清洗水安排独立的预处理路径,另外新增了调节池、混合反应单元和斜管沉淀设施,对生活污水占比高的区域,补充增加水解酸化和小型生化处理单元,

使系统由单一的沉淀处理转为组合式的处理。在项目施工推进过程中,项目团队着力抓了三项工作:一是进行实体质量方面的控制,对池体防渗、设备基础、穿墙管封堵和出水检查井开展复查工作,特别对之前出现渗漏的部位做了修补和再次检验;二是开展运行参数整定,通过不断查看不同施工时段的来水变动,再次对提升泵启停水位、药剂浓度和排泥周期加以调整,使调节池以及沉淀池的负荷更加稳定;三是实施检测闭环管理举措,现场以周检查、月检测这种方式来开展巡检,对悬浮物、pH 值和化学需氧量予以跟踪,并且把异常天气、夜间施工和集中洗车等影响因素一起记录,开展整改之后,设施运行稳定性有显著提高,前端泥水分离效率有了提升,出水外观以及检测结果都比前期更稳定,施工现场排水相关的投诉明显降低。从该项目看,施工污水处理设施并不是一次搭建完成后就能长期有效,真正决定成效的是质量控制是否细到池体、设备、管线和运行参数各个层面,检测管理是否真正落实到日常。尤其对于建筑施工这种工况变化快的场景,设施必须留有调节余量,检测必须具有连续性,管理必须形成闭环,才能把临时设施真正做成可用、可靠、可验收的系统^[5]。

5 结束语

建筑施工中的污水处理设施,表面看是现场环保配套,实质上已经成为施工质量管理和文明施工管理的重要组成部分。只有把前端分类收集、设施施工质量、设备安装精度、运行参数控制和检测评价机制统筹起来,才能保证设施在复杂工况下稳定发挥作用。未来,在同类建筑工程建设中,应进一步强化治污方案前置设计、全过程质量检测与全周期运维闭环管理,着力破解临时污水设施普遍存在的“重搭建、轻运行、弱检测”痛点问题,持续提升施工现场污水治理的标准化、规范化与长效化水平。

参考文献:

- [1] 马志刚,芦秀青,王静,等.三峡库区农村生活污水一体化处理设施效果评价[J].人民长江,2024,55(02):238-244.
- [2] 徐国平.污水处理厂智慧化路径探讨[J].工业安全与环保,2023(S1):1-3,23.
- [3] 程俊,何帅,杨涛.基于数理统计和数值分析的污水处理厂处理效果评估方法[J].净水技术,2024,43(02):112-118.
- [4] 霍磊,李邦仁,焦克滨.污水处理厂新建工程中多模式 AAO 工艺的应用[J].建筑结构,2022(14):22-24.
- [5] 汉京超.污水处理厂海绵城市设施设计方案研究与探索[J].净水技术,2022,41(11):154-159.

后浇带施工技术在建筑工程中的应用要点分析

程春木¹, 王 卉²

(1. 德州市城乡建设融合发展中心(德州市城建档案馆), 山东 德州 253000;

2. 德州市房屋建设综合开发集团有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 后浇带施工技术作为建筑工程中解决结构沉降差、温度应力及收缩裂缝问题的关键技术手段, 在现代大型、超大型建筑项目中应用广泛。本文基于后浇带施工技术的核心原理, 从施工型式分类、工艺技术要点、工艺流程控制三个核心维度展开分析, 系统梳理后浇带施工各环节的关键控制要点, 以期为建筑工程中后浇带施工技术的规范应用提供理论参考。

关键词 建筑工程; 后浇带施工技术; 后浇带支撑体系; 模板预置; 后浇带钢筋处理技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.038

0 引言

随着建筑行业的快速发展, 建筑结构形式日趋复杂, 体量不断增大。在施工及使用过程中, 建筑结构受温度变化、混凝土收缩、地基不均匀沉降等因素影响, 易产生裂缝等质量隐患, 影响其安全性、稳定性及耐久性。后浇带施工技术通过在建筑结构关键部位设置临时施工缝, 待结构沉降稳定、温度应力释放后再进行二次浇筑, 有效化解上述不利因素带来的负面影响, 是保障大型复杂建筑结构质量的核心技术之一^[1]。当前, 后浇带施工技术在各类建筑工程中得到广泛应用, 但在实际施工过程中, 受施工工艺、材料选择、流程控制等多方面因素影响, 仍存在诸多问题。基于此, 系统分析后浇带施工技术的应用要点, 规范施工流程, 提升施工质量, 对推动建筑工程行业高质量发展具有重要的现实意义^[2]。

1 后浇带施工工艺原理与基本型式

1.1 核心工艺原理

后浇带施工工艺以“分期浇筑、延时闭合”为核心原则, 其核心逻辑在于通过时间维度的调控, 化解建筑结构在施工及运营阶段面临的多重应力挑战。具体而言, 需先依据建筑结构设计图纸在预设位置精准设置临时施工缝, 将整体连续的结构科学划分为多个相对独立的浇筑单元, 随后按照施工流水段规划依次完成各单元主体结构的混凝土浇筑作业。在完成分块浇筑后, 需严格遵循预设的延时等待要求, 待结构沉降达到稳定状态、混凝土收缩变形基本完成、温度应力

充分释放后, 再对施工缝界面进行系统性的清理与处理作业, 清除界面处的浮浆、杂物及松动骨料, 确保界面洁净且具备良好的黏结条件。最后, 采用强度等级更高、具备微膨胀性能的专用混凝土进行二次浇筑, 实现结构的整体闭合与受力贯通。该工艺的核心优势在于通过合理的时间差设计, 有效释放结构内部的温度应力与收缩应力, 规避因应力集中引发的裂缝缺陷, 同时通过二次浇筑的整体性处理, 保障结构的承载能力与空间整体性不受影响。在实际应用中, 其工艺流程需严格契合设计文件要求, 明确分块浇筑、延时等待、界面处理、二次浇筑等各阶段的时间节点控制标准、施工操作规范及质量验收要点, 确保各环节衔接顺畅、质量可控, 为后续施工环节的顺利推进奠定基础^[3]。

1.2 基本型式

1.2.1 后倾沉降区

后倾沉降区主要应用于地基承载力差异较大、结构沉降不均匀风险较高的建筑工程, 如高低层连体建筑、复杂地质条件下的大型建筑等。其核心设计思路是通过在高低层结构衔接处设置倾斜式沉降过渡区域, 利用结构自身的受力特性和沉降规律, 引导结构完成阶段性沉降, 减少高低层结构间的沉降差对整体结构的影响。后倾沉降区的设置需结合地质勘察报告、结构沉降计算结果确定, 明确倾斜角度、范围及二次浇筑时机, 确保沉降过渡平稳, 避免产生附加应力。

1.2.2 后浇带

后浇带是最常用的基本型式, 根据功能不同可进一步分为伸缩后浇带、沉降后浇带及收缩后浇带三类。

作者简介: 程春木(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

伸缩后浇带主要用于化解温度变化和混凝土收缩产生的应力,通常设置在结构温度应力集中部位;沉降后浇带用于协调结构各单元间的沉降差异,多设置在高低层结构分界处、主楼与裙楼衔接处等;收缩后浇带则聚焦缓解混凝土硬化过程中的收缩变形,适用于大体积混凝土结构。各类后浇带的设置位置、宽度、间距及浇筑延时要求均需严格遵循设计规范及结构计算结果,确保功能发挥到位。

2 后浇带施工技术

2.1 后浇带支撑体系的施工技术

后浇带支撑体系是保障施工过程中结构稳定性的关键,其施工核心在于确保支撑的强度、刚度及稳定性,避免因支撑失效导致结构变形或坍塌。施工前需结合结构荷载、施工荷载等进行支撑体系承载力计算,确定支撑立杆的间距、步距、扫地杆设置及剪刀撑布置方案。支撑体系施工需严格按照计算方案执行,立杆底部需设置垫板,确保受力均匀;立杆与横杆、剪刀撑的连接需牢固可靠,形成完整的受力体系。同时,后浇带支撑体系需实行独立设置,严禁与其他区域支撑体系连接,且在后浇带二次浇筑混凝土达到设计强度前,不得拆除,确保支撑作用持续有效^[4]。

2.2 模板预置工程的工艺技术

模板预置工程的核心要求是保证模板的密封性、刚度及表面平整度,避免二次浇筑过程中出现漏浆、模板变形等问题,影响混凝土成型质量。模板材质选择需结合后浇带的结构形式、尺寸及施工环境确定,确保满足受力及使用要求。模板安装需严格按照放线位置进行,拼缝处需采用密封措施,防止漏浆;模板支撑需与后浇带独立支撑体系协同配合,确保整体稳定。同时,需预留必要的清理口和振捣口,方便后续施工缝清理和混凝土振捣作业,施工完成后及时封堵。

2.3 后浇带钢筋处理技术

后浇带区域钢筋处理直接影响结构的整体性和承载能力,核心要求是确保钢筋连续、锚固可靠,避免锈蚀。钢筋布置需严格遵循设计要求,不得随意截断;若因施工需要必须截断,需在二次浇筑前进行焊接或机械连接恢复,确保连接质量符合规范要求。钢筋连接需选择合适的连接方式,焊接接头需进行探伤检测,机械连接接头需进行力学性能试验。同时,在施工过程中需对钢筋进行防护处理,避免混凝土浇筑、清理过程中造成钢筋损伤或锈蚀;后浇带留置期间,需对钢筋进行覆盖防护,防止杂物污染和锈蚀。

2.4 后浇带混凝土施工技术

后浇带混凝土施工是实现结构闭合的关键环节,核心要求是确保混凝土强度、耐久性符合设计要求,且与原有结构结合紧密。混凝土选材需优先选用高强度、微膨胀、低水化热的混凝土,其强度等级需比原有结构混凝土强度等级提高一级,确保承载能力匹配;微膨胀特性可有效补偿混凝土收缩,避免产生新的裂缝。混凝土搅拌需严格控制配合比,确保搅拌均匀;运输过程中需防止离析,保证混凝土和易性。浇筑前需对施工缝进行彻底清理,清除杂物、浮浆,并用清水湿润;浇筑过程中需分层振捣,确保混凝土密实,避免出现蜂窝、麻面等缺陷。浇筑完成后需及时进行养护,控制养护温度和湿度,延长养护周期,确保混凝土强度稳步增长和水化热充分散发。

3 后浇带施工工艺流程的控制要点

3.1 后浇带的平面布置

后浇带平面布置是保障施工质量和结构安全的前置性关键环节,需结合结构受力特性、温度应力分布规律、地基沉降差异等多重核心因素进行综合研判与精准确定,其核心要求是严格避开结构关键受力部位,优先设置在应力集中区域以外的缓和部位,最大程度降低后浇带设置对结构主体受力性能的影响。平面布置需严格遵循“对称布置、均匀分布”的核心原则,间距参数需严格参照现行设计规范及专项结构计算结果确定,坚决避免因间距过大导致结构内部应力叠加集中,进而引发裂缝等质量隐患;后浇带宽度需根据结构类型(框架结构、剪力墙结构、大体积混凝土结构等)、构件尺寸及现场施工操作空间需求综合核定,常规情况下取值范围为 800 mm ~ 1 200 mm,确保后续清理、钢筋处理及混凝土浇筑等作业能够顺利开展^[5]。同时,平面布置需充分兼顾施工便利性,合理避开梁、柱等关键承重构件的核心受力区域,避免对构件截面性能造成削弱;并与施工流水段划分方案协同配合,使后浇带设置能够适配施工进度计划,减少对整体施工流程的干扰。所有平面布置方案均需通过专业结构计算软件进行模拟验证,确保其能够有效化解结构运营过程中的温度应力、收缩应力及沉降差异带来的附加应力,保障结构整体稳定性。

3.2 后浇带基础内力的计算

后浇带基础内力计算是保障结构承载安全与稳定运营的核心前提,必须依托详实的地质勘察报告、精准的结构荷载参数及预判的沉降特性,采用符合行业

标准的专业结构计算软件进行精细化模拟计算。计算内容需实现全周期覆盖,重点涵盖后浇带设置阶段(主体结构分块浇筑期间)和二次浇筑完成后(结构形成整体受力体系后)两个关键阶段的基础内力分布状态、构件承载力储备及整体稳定性指标。在计算过程中,需全面考量施工阶段的临时荷载、环境温度变化引发的温度应力、地基不均匀沉降产生的附加应力以及混凝土收缩变形带来的应力叠加效应等多重影响因素,通过多工况模拟分析确保计算结果的全面性、准确性与可靠性。依据计算结果,可进一步优化后浇带的具体布置位置、截面尺寸、浇筑延时周期等关键施工参数,从源头规避因内力分布不合理导致的结构裂缝、构件变形甚至承载力不足等安全隐患。同时,计算结果需组织专业技术团队进行多级复核验证,对照现行设计规范及工程实际工况进行全面校验,确保计算结论能够精准指导施工实践,为后浇带施工及结构整体安全提供坚实的技术支撑。

3.3 后浇带施工中的选材

后浇带施工选材质量直接决定施工效果与结构耐久性,需严格遵循“优质达标、性能适配、耐久可靠”的核心原则,确保各类材料的性能参数与施工技术要求、结构设计标准高度匹配。其中,作为结构闭合核心材料的二次浇筑混凝土,需优先选用高强度等级、微膨胀特性、低水化热的专用品种,其强度等级需比原有结构混凝土提高一级及以上,既保证与原有结构的承载能力匹配衔接,又通过微膨胀性能有效补偿混凝土硬化过程中的收缩变形,从根本上避免新的裂缝产生。钢筋材料需严格选用符合设计文件规定的牌号、规格及性能等级,其屈服强度、抗拉强度、焊接性能及塑性指标等均需满足现行行业规范要求,确保钢筋骨架的承载能力与整体稳定性。模板材料需根据后浇带的结构形态、受力特点及施工环境精准选型,重点保障材料具备足够的强度、刚度及表面平整度,同时需具备优良的密封性能,避免浇筑过程中出现漏浆现象。支撑材料需选用承载力稳定、力学性能可靠的钢材或经过强度校验的优质木材,确保支撑体系能够有效承受施工荷载及结构自重。所有进场材料必须执行严格的质量检验流程,逐一核出厂合格证、性能检测报告等质量证明文件,对关键材料需按规范要求抽样复验,经检验不合格的材料严禁投入施工使用,从源头把控施工质量。

3.4 后浇带的防水与养护

后浇带区域因存在施工缝界面,且经历两次浇筑施工,是建筑防水体系的天然薄弱环节,其防水与养

护工作需贯穿施工全过程,需严格遵循“多道设防、刚柔结合、全程管控”的原则,确保防水效果与结构耐久性。在防水处理方面,需重点强化施工缝界面的防水构造设计与施工质量控制,可根据工程防水等级及工况需求,选用遇水膨胀止水条、止水钢板、防水密封胶等多种防水构造措施组合应用,形成多道防水防线,显著增强施工缝界面的抗渗能力;二次浇筑混凝土时,需确保振捣密实,彻底消除界面孔隙、气泡等缺陷,避免形成渗水通道。在养护工作方面,需实现全周期覆盖:后浇带留置期间,需对区域内的钢筋、模板采取严密的覆盖防护措施,防止杂物堆积污染、雨水侵蚀及机械损伤;二次浇筑完成后,需及时启动专项养护方案,根据环境温度、湿度条件选用覆盖保湿、喷淋养护、保温养护等适宜方式,严格控制混凝土内外温差在规范允许范围内,延长养护周期至不少于14天(特殊工况需适当延长),确保混凝土强度稳步增长,充分散发水化热,有效规避因养护不当导致的收缩裂缝,保障混凝土结构的强度与耐久性。

4 结束语

后浇带施工技术在解决建筑结构沉降差、温度应力及收缩裂缝问题中发挥着不可替代的作用,其应用质量直接决定建筑结构的**安全性、稳定性及耐久性。本文从施工型式、工艺技术、流程控制三个核心维度,系统分析了后浇带施工技术的应用要点,明确了各环节的核心要求和控制重点。结果表明,只有严格遵循设计规范,精准把控后浇带的布置设计、支撑体系施工、钢筋处理、混凝土浇筑及防水养护等关键环节,才能充分发挥后浇带施工技术的优势,保障建筑工程质量。随着建筑技术的不断发展,后浇带施工技术将进一步优化升级,需结合工程实际不断总结经验,推动施工技术的规范化、精细化发展,为建筑工程行业的高质量发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李鹏伟.后浇带施工技术在房建施工中的应用分析[J].四川建材,2023,49(03):166-167.
- [2] 林航.分析后浇带施工工艺在建筑工程中的应用技术要点[J].陶瓷,2024(10):231-233.
- [3] 白俊红,谢鑫,魏首相.后浇带技术在房屋建筑工程施工中的应用分析[J].工程建设与设计,2022(16):128-130.
- [4] 梁发荣.后浇带施工技术在建筑工程中的应用要点分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(05):55-57.
- [5] 林航.分析后浇带施工工艺在建筑工程中的应用技术要点[J].陶瓷,2024(10):231-233.

抽水蓄能电站输水发电系统的渗流分析

陶永杰

(中国水利水电第三工程局有限公司, 甘肃 兰州 710038)

摘要 抽水蓄能电站作为电力系统重要的调节电源, 其输水发电系统的渗流安全直接关系到电站的长期稳定运行。本文针对绩溪抽水蓄能电站高水头、长隧洞及复杂地质条件的特性, 建立了包含输水隧洞、地下厂房及主要断层构造的三维有限元渗流分析模型, 设定了正常运行、检修放空及极端暴雨三种典型计算工况。结果表明, 正常运行期, 高压引水隧洞内水外渗形成局部高压区, 但在衬砌与围岩联合作用下, 渗透坡降处于安全范围; 检修放空期, 隧洞衬砌结构承受较大的外水压力, 需重点防范外压破坏; 地下厂房区的排水孔幕与排水廊道形成了有效的降水漏斗, 显著降低了厂房边墙的外水压力。

关键词 抽水蓄能电站; 输水发电系统; 渗流分析; 外水压力

中图分类号: TV743

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.039

0 引言

随着国家“双碳”战略的深入实施, 新能源装机规模持续扩大, 电力系统对调峰填谷的需求日益迫切。抽水蓄能电站凭借其启动灵活、储能效率高等优势, 成为构建新型电力系统的关键组成部分。输水发电系统作为连接上、下水库的核心枢纽, 承受着频繁变动的内水压力, 其渗流特性直接影响围岩稳定性、衬砌结构安全及地下厂房的运行环境。特别是在高水头、地质构造复杂的电站中, 渗流控制不当可能引发管涌、结构开裂甚至渗透破坏等工程事故。因此, 深入剖析输水发电系统的渗流场分布特征, 评价防渗排水系统的有效性, 具有重要的工程实践意义。

1 工程概况与水文地质条件

1.1 绩溪抽水蓄能电站工程概况

绩溪抽水蓄能电站位于安徽省绩溪县, 是一座日调节纯抽水蓄能电站, 总装机容量 1 800 MW。枢纽建筑物主要由上水库、下水库、输水发电系统及地下厂房组成。输水发电系统布置于上、下水库之间的山体内部, 采用二洞四机布置形式。引水系统由上水库进/出水口、引水主洞、引水岔管及高压支管组成, 主洞直径 6.5 m, 采用钢筋混凝土衬砌与钢板衬砌相结合的支护形式; 尾水系统则连接机组尾水管与下水库。地下厂房位于输水系统中部, 采用中部开发方式, 洞室群规模巨大, 包括主厂房、主变洞、尾闸洞等, 主厂房埋深约 400 m。由于电站额定水头高达 600 m 级, 输水系统长期处于

高压运行状态, 对围岩及衬砌结构的抗渗能力提出了极高要求。

1.2 输水发电系统区域地质条件

输水发电系统穿越的地层主要为震旦系休宁组砂岩、砂砾岩及南沱组泥质砂岩, 岩体完整性总体较好, 以 II、III 类围岩为主。然而, 输水线路穿越 F1、F2、F3 等多条区域断层, 断层带内充填构造角砾岩、碎裂岩及断层泥, 透水性强, 构成了主要的渗流通道。地下厂房区位于背斜核部, 节理裂隙较发育, 岩体具有各向异性渗透特征。根据钻孔压水试验成果, 断层破碎带岩体的透水率 q 值普遍大于 10 Lu, 属中等透水层, 而完整性较好的微新岩体透水率多小于 1 Lu, 视为相对隔水层。初始地下水位调查显示, 厂房区地下水位较高, 且受降雨入渗影响明显, 具备形成高外水压力的地质背景。

1.3 水文地质参数选取

渗流分析的准确性高度依赖于水文地质参数的取值。基于详勘阶段的钻孔注水试验及室内渗透试验, 结合工程经验类比, 对计算模型中的渗透系数进行了分区赋值。对于微风化至新鲜砂岩岩体, 渗透系数取 5.0×10^{-6} cm/s; 断层破碎带及影响带, 考虑其导水作用, 渗透系数取 5.0×10^{-4} cm/s; 钢筋混凝土衬砌结构, 考虑混凝土浇筑质量及微裂缝影响, 渗透系数取 1.0×10^{-7} cm/s; 高压固结灌浆后的围岩圈, 渗透系数取 1.0×10^{-6} cm/s。

作者简介: 陶永杰 (1986-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 工程技术。

2 渗流分析模型构建

2.1 数学模型与计算原理

岩体渗流主要沿裂隙网络进行,但对于工程尺度的区域渗流分析,等效连续介质模型仍具有较好的适用性。本文基于达西定律,建立非均质各向异性三维稳定渗流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

K_x, K_y, K_z

式(1)中, H 为水头函数, K_x 、 K_y 、 K_z 分别为三个主方向的渗透系数。考虑到绩溪电站输水系统沿线岩体陡倾角裂隙发育,计算中设定垂直层面的渗透系数为水平方向的1/5,以反映渗透各向异性。数值求解采用有限单元法,利用专业渗流分析软件进行迭代计算,收敛准则设定为前后两次迭代水头差小于0.01 m。

2.2 几何模型建立与网格剖分

为消除边界效应,模型计算范围涵盖了输水发电系统及周边主要地质单元。水平方向以地下厂房为中心,向上、下游各延伸500 m,左右侧边界取至沟谷分水岭;垂直方向自地表向下延伸至相对隔水层底板以下100 m,高程覆盖范围约为-200 m至800 m。模型精细刻画了引水洞、尾水洞、地下厂房洞室群、断层F1-F3、防渗帷幕及排水孔幕等关键构造。其中,断层采用实体单元模拟,根据其产状进行空间定位;排水孔幕采用以管代孔的“排水子结构法”模拟,以准确反映排水孔的降压效果。网格剖分选用空间八节点六面体单元,并在隧洞衬砌、断层带及排水孔附近进行了加密处理,总节点数约28万个,单元数约26万个^[1]。

2.3 边界条件与计算工况

根据电站运行调度特点,设定三种典型计算工况:

工况一:正常运行期。上水库水位为正常蓄水位,下水库水位为正常蓄水位,引水洞内承受全水头内水压力,尾水洞水位按机组发电流量对应的水位计算。

工况二:检修放空期。模拟单条引水洞放空检修,洞内无水,其余洞室正常运行。此工况下需校核衬砌结构在渗透压力作用下的抗浮稳定性。

工况三:极端暴雨工况。在正常运行基础上,考虑遭遇50年一遇持续暴雨,山体地下水位大幅抬升,评估防渗排水系统的安全裕度。

模型边界条件设定为:模型底部为隔水边界;两侧分水岭边界给定初始地下水位水头;上、下水库岸坡面按定水头边界处理;地表边界设定为降雨入渗边界,工况三中入渗量按设计暴雨强度折算。

3 输水发电系统渗流场分布特征分析

3.1 正常运行期渗流场分析

在正常运行工况下,引水系统内部充水,由于内水压力远高于周边山体地下水位,水流呈现出由洞室向围岩渗透的趋势,即“内水外渗”。计算结果显示,高压引水洞周围形成了明显的压力梯度带,靠近洞壁的孔隙水压力急剧升高。钢筋混凝土衬砌段,由于衬砌渗透系数较小,承担了约40%的水头差,有效降低了作用在围岩上的渗透压力。然而,在穿越F2断层段的引水洞区域,受断层高透水性的影响,水头损失较小,导致断层带内水力梯度局部集中,最大渗透坡降达到4.5,虽未超过断层填充物的临界破坏坡降,但需关注长期运行下的渗透变形风险。地下厂房区受排水孔幕保护,其周边地下水位显著低于引水洞区域,形成了以厂房为中心的低位汇水区,保证了厂房干燥的运行环境^[2]。

3.2 地下厂房区渗流场特征

地下厂房是电站运行的核心场所,其渗流控制至关重要。模拟结果揭示,设计方案中的排水廊道与排水孔幕构成了立体排水网络,极大地改变了渗流场的形态。在主厂房边墙外侧,地下水位普遍低于厂房顶拱高程,自由面呈漏斗状下凹。孔隙水压力等值线在排水孔附近密集分布,表明排水孔幕有效截断了来自上游引水洞及山体深部的渗流。厂房顶拱处的最大渗透压力约为0.12 MPa,远小于围岩压力,说明厂房区的防渗排水系统设计合理,能够有效控制外水压力。但在主变洞与尾闸洞之间的岩柱区域,由于排水孔布置相对稀疏,存在局部地下水位滞留现象,建议在施工期加强该部位的随机排水孔布设^[3]。

3.3 检修放空期渗流场变化

检修放空期是渗流控制的关键时刻,此时隧洞内部无水,周边岩体中的地下水向洞内渗透,衬砌结构承受全水头外水压力。计算表明,当引水洞放空后,围岩中的地下水迅速向洞室汇集,衬砌外侧水压力迅速升高。特别是在高压支管段,由于上游阀门关闭,外水压力最大值接近1.0 MPa。对于采用透水性较差的混凝土衬砌结构,外水压力直接作用于衬砌外壁,可能导致衬砌被压碎或崩裂^[4]。

4 渗流控制措施效果评价与优化建议

4.1 现有防渗排水系统效果评价

第一,针对高压引水隧洞的防渗效果,计算结果显示,在正常运行工况下,高压引水隧洞周围形成了

明显的内水外渗压力梯度场。设计采用的“高压固结灌浆+钢筋混凝土衬砌”组合结构发挥了显著的阻水作用。然而,在穿越F2断层带附近,由于岩体破碎且渗透性具有明显的各向异性,尽管整体坡降可控,但局部监测点的流速矢量仍显示存在集中渗流通道的趋势。

第二,针对地下厂房区的排水系统效能,模拟结果表明,设计布置的三层排水廊道及边墙排水孔幕构成了高效的立体降压网络。在未启用排水系统的工况模拟中,主厂房边墙最大外水压力水头高达180 m,这将给衬砌结构带来巨大的荷载负担;而在排水系统正常运行状态下,厂房周边地下水位被有效控制在厂房顶拱以下,形成了以厂房为中心的低位降落漏斗。主厂房边墙的外水压力普遍降至20 m~35 m水头范围内,排水系统的减压效率超过80%^[5]。

第三,现有防渗排水系统整体上能够满足电站安全运行要求,但仍存在局部薄弱环节。一是在极端暴雨工况下,山体地下水位大幅抬升,导致尾水隧洞区域涌水量激增,排水廊道负荷增大,部分排水孔出水口流速超过设计预期,存在淤堵风险;二是在检修放空工况下,引水隧洞衬砌外侧外水压力迅速回升,部分管段衬砌外压安全系数偏小,仅为1.05,安全储备略显不足。

4.2 渗流控制措施的优化建议

第一,强化断层破碎带的针对性防渗处理。针对F2断层及影响带区域,建议在原设计高压固结灌浆的基础上,实施“加密加深”处理措施。具体而言,将断层带两侧各5 m范围内的灌浆孔间距由原设计的2.0 m优化为1.5 m,并增加深孔帷幕灌浆,深度穿过断层下盘完整岩体不少于10 m,以形成封闭的“筒状”防渗结构。同时,在断层穿越隧洞段,建议在混凝土衬砌内侧增设高密度聚乙烯防水板或采用高性能抗渗混凝土,阻断内水沿断层带溶蚀扩展的路径,防止长期运行中因断层充填物渗透破坏导致隧洞结构失稳。

第二,优化检修放空工况下的外水压力控制策略。鉴于数值模拟显示部分管段检修期外压安全系数偏低,建议在引水隧洞衬砌设计中引入“减压排水”理念。对于外水压力较高的管段,可在衬砌背后设置系统减压排水孔或环向排水盲管,通过引导外水压力释放来改善衬砌受力状态。此外,应制定严格的放空检修操作规程,控制隧洞内水位下降速度不超过0.5 m/h,避免因围岩内孔隙水压力消解滞后产生巨大的渗透力冲击衬砌结构。在检修过程中,应加强对衬砌裂缝及渗漏点的监测,及时进行化学灌浆封堵。

第三,完善地下厂房排水系统的长效维护机制。考虑到电站长期运行中,地下水携带的矿物质及岩粉可能造成排水孔淤堵,导致排水效能衰减,建议在排水廊道内预留足够的清洗与疏通通道。在设计上,可将部分排水孔改为可更换滤芯式结构,或在排水孔末端安装反滤装置,防止细颗粒流失引起围岩空洞化。同时,建立排水量与地下水位的相关性预警模型,当监测发现排水量异常减少或地下水位异常升高时,立即启动应急疏通预案。

5 结论

本文以绩溪抽水蓄能电站为工程依托,综合运用水文地质分析与三维有限元数值模拟方法,对高水头输水发电系统的渗流场分布规律及渗控措施效果进行了系统研究,主要得出以下结论:

1. 绩溪抽水蓄能电站输水发电系统渗流场受地形地质条件及建筑物布置影响显著。正常运行期,高压引水隧洞存在明显的内水外渗现象,渗透坡降在断层破碎带较为集中;地下厂房区受排水系统控制,形成了稳定的低水位区。模拟结果揭示了渗流场在空间上的非均匀分布特征,为防渗设计提供了理论依据。

2. 现有防渗排水系统整体设计合理,效果显著。高压固结灌浆有效降低了断层带的渗透坡降,保障了渗透稳定;地下厂房排水孔幕将边墙外水压力削减了80%以上,极大地改善了结构受力条件。但在检修放空工况下,部分衬砌结构抗外压安全储备不足,且断层带仍存在集中渗流风险,需引起高度重视。

参考文献:

- [1] 阳志诚,劳俊源.抽水蓄能电站输水发电系统的渗流分析[J].红水河,2024,43(02):91-96.
- [2] 林文,徐力群.某抽水蓄能电站输水发电系统渗流场与渗控措施研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(03):20-26.
- [3] 杨海滔,刘丹,卢斌,等.汪清抽水蓄能电站输水发电系统渗控效果数值模拟研究[J].水电能源科学,2024,42(06):129-133.
- [4] 李锋,杨雨,温立峰,等.抽水蓄能电站输水系统渗控效应及排水措施敏感性分析[J].长江科学院院报,2024,41(12):109-116,132.
- [5] 付鹏,陈孝兵,涂小丽,等.某抽水蓄能电站地下厂房渗流特性及渗控效果研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(04):10-15.

水利水电工程钢筋混凝土施工技术分析

陈金波, 王 蒙

(东营市垦利区水利工程公司, 山东 东营 257500)

摘 要 在水利工程中, 利用钢筋混凝土施工技术有利于降低建设成本、满足施工要求、建撤后维修成本。本文分析了水利水电工程钢筋混凝土施工技术要点, 包括模板工程、钢筋施工、混凝土工程三大部分, 同时针对钢筋混凝土施工中混凝土裂缝、钢筋锈蚀等常见问题提出防治建议, 以期对充分发挥钢筋混凝土施工技术的优势作用有所裨益, 保障水利水电工程质量, 避免在实际施工和后续使用中出现问题, 提高水利水电工程设施的耐久性。

关键词 水利水电工程; 钢筋混凝土; 模板工程; 钢筋施工; 混凝土工程

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.040

0 引言

在水利水电工程建设中, 钢筋混凝土施工技术发挥着重要的作用, 其施工质量关系到整体工程结构的稳定性和耐久性。在水利水电工程的大坝和水闸以及输水隧洞等部位广泛应用钢筋混凝土, 这是因为钢筋混凝土的抗压性和可塑性比较强, 可以适应各种复杂的荷载环境, 但是水利水电工程施工环境十分复杂, 很容易影响钢筋混凝土结构的耐久性。如果在实际施工中没有严格执行模板工程和钢筋连接以及混凝土浇筑等环节, 将会严重影响施工质量。因此, 研究水利水电工程钢筋混凝土施工技术具有重要的意义, 有利于提高水利水电工程质量, 保证工程运行的稳定性, 延长水利水电设施的使用寿命。

1 水利水电工程钢筋混凝土施工技术要点

1.1 模板工程

1.1.1 模板类型和选择

在钢筋混凝土施工中, 模板工程属于重要的一部分, 合理选择模板类型, 有利于提高施工质量和效率。不同模板的材质和结构具有较大的差异性, 施工单位要结合工程特点和适用场景合理选择^[1]。木模板加工过程比较灵活, 整体投资较小, 适用于小型水利水电工程。但是木模板缺乏耐久性, 在实际应用中很容易出现受潮问题, 不适合长期水工建筑。钢模板具有较高的强度, 可以多次周转利用, 同时可以保证模板尺寸的精准性, 适用于大体积混凝土结构, 如可以在大坝和溢洪道等部位中利用钢模板。胶合板模板具有较高的平整度, 同时可以重复利用, 在水利水电工程逐渐推广应用。在实际施工中, 施工单位要结合工程规

模和结构形式以及施工环境等因素选择合适的模板类型, 不仅要符合施工要求, 还要保障工程综合效益。

1.1.2 模板安装和拆除

在钢筋混凝土施工中, 模板安装质量关系到混凝土成型效果, 因此施工单位要严格执行模板安装流程, 结合施工规范操作每个施工环节^[2]。在模板测量放线中, 施工单位要精准定位模板位置, 如果出现偏差问题, 将会影响整体结构尺寸的精准性。在搭设支撑体系的过程中, 施工单位要检查支架结构的稳定性, 否则将会引发模板变形等问题。

在模板安装中可以利用滑模工艺, 在安装模板之前开展现场测量工作, 结合设计图纸在施工现场合理设置控制点位, 有利于在安装施工中严格控制模板的垂直度和高程等参数, 提高施工误差调整的便利性。在安装底模阶段, 施工单位要注意加固地模和基础部分, 综合利用螺栓和扁铁以及拉筋拼接模板, 同时根据现场实际情况合理添加基土, 提高模板结构的稳定性。在利用螺栓固定中, 要综合利用“3”型扣和螺母施工, 提高模板拼缝质量^[3]。利用扁铁和拉筋焊接钢筋网结构, 同时设置斜拉撑进一步固定, 有利于进一步定位和调整模板, 如图1所示。

此外, 还要合理选择模板拆除时间和顺序, 避免破坏成型的混凝土结构, 顺利推进后续施工。施工单位要结合混凝土的强度确定拆模时间, 当混凝土强度达到设计值的50%时, 施工单位可以拆除非承重模板, 当混凝土强度达到设计值75%时, 施工单位可以拆除承重模板。在模板拆除过程中要执行先支后拆的顺序, 避免影响混凝土结构。

作者简介: 陈金波 (1987-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

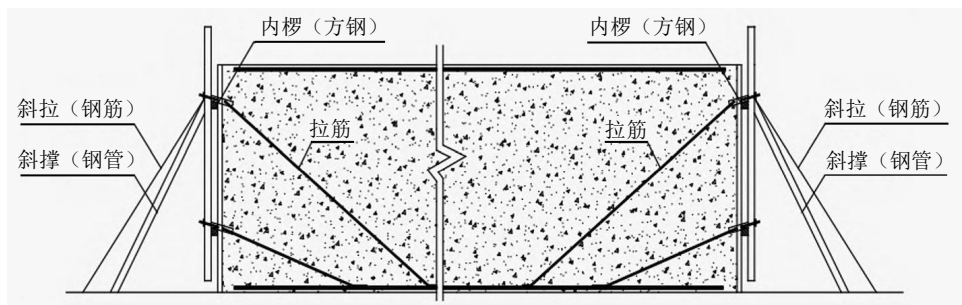


图 1 底模安装施工模型

1.2 钢筋施工

1.2.1 钢筋处理

在搭建钢筋骨架的过程中, 施工单位要控制钢筋直径在 12 mm 左右, 同时结合施工标准执行钢筋切割和拉伸以及弯曲等操作, 避免影响材料性能。施工单位要结合图纸要求调整钢筋规格和形状等, 保障钢筋达到良好的使用状态, 顺利开展钢筋绑扎工作^[4]。施工单位要在冷拉状态中落实钢筋预处理工作, 控制同一区域受拉和受弯区接头在 25% 范围内, 同时要控制受压区接头在 50% 范围内, 注意要交叉处理钢筋接头, 有利于提高钢筋网的稳定性。在使用钢筋材料之前要注意开展除锈工作, 利用打磨机清除钢筋表面的锈迹, 并均匀地涂抹防锈材料, 可以发挥保护作用, 有利于延长钢筋使用寿命。

1.2.2 钢筋安装

在安装钢筋之前, 施工单位要提前在钢筋底板设置混凝土垫层, 完成浇筑工作之后, 再完成 36 h 的养护工作, 施工单位才可以安装底板钢筋网架。为了提高网体的稳定性, 施工单位要精准放样钢筋安装部位, 每隔 2.5 m 利用直径 25 mm 的钢筋制作加固撑脚, 每隔 1.2 m 布置混凝土砌块, 有利于对钢筋网结构发挥保护作用。随后在安装底板钢筋阶段, 施工单位要合理控制钢筋间距, 保证钢筋结构部位和搭接施工的精准性, 最后对钢筋网的平顺性进行检测, 如果发现平顺性不符合标准, 要对钢筋位置和间距合理调整, 在调整中利用专业测量设备检测, 为了规避后续施工干扰钢筋网, 要在关键节点布置临时固定装置, 提高钢筋结构的抗变形能力。施工单位要注意对每次调整数据详细记录, 为后续施工质量检测 and 验收提供参考。

安装底板钢筋之后, 施工单位要开展钢筋垂直工作, 结合设计要求控制竖向钢筋直径在 16 mm 以内, 在绑扎钢筋之前, 在底板合理选择标识钢筋, 发挥校正定位的作用, 以此为基础精确建筑立面各种数据, 提高整体钢筋施工质量^[6]。随后要交错绑扎水平钢筋

和垂直钢筋, 同时利用钢管制作斜向支撑, 构建稳定的钢筋结构, 以此为基础有序安装梁、柱、板的钢筋。

1.3 混凝土工程

1.3.1 混凝土配制

在钢筋混凝土施工中, 混凝土配制发挥着重要的作用, 直接关系到混凝土性能和施工质量。混凝土的原材料包括水泥和骨料以及掺合料等, 原材料的质量和比例关系到混凝土的强度和耐久性等。在选择原材料的时候, 施工单位要结合工程要求确定水泥品种和强度等级, 在水利水电工程中适合利用中低热硅酸盐水泥, 有利于控制水化热, 避免产生混凝土裂缝问题。选择骨料阶段要综合考虑其级配和粒形, 提高骨料级配的科学性, 有利于保障混凝土结构的密实度和抗压性。此外, 通过合理使用掺合料和外加剂, 可以改善混凝土性能。例如: 合理掺加粉煤灰, 有利于控制混凝土的水化热, 降低裂缝问题发生率。而加入引气剂有利于提高混凝土的抗冻性和抗渗性。在混凝土配制中, 施工单位要做好配合比设计工作, 在保证混凝土强度和耐久性的基础上合理减少水泥用量, 提高配合比设计的科学性, 可以优化混凝土性能, 保障整体工程质量。施工单位要注意控制拌和时间, 具体参数如表 1 所示, 根据 4% 的掺量加入粉煤灰, 有利于充分释放混凝土的热量, 改善混凝土性能。

表 1 混凝土材料的搅拌参数

混合料体积 /L	拌和时间 /min
> 30	4 ~ 5
30 ~ 50	5 ~ 9
50 ~ 75	9 ~ 12

1.3.2 混凝土浇筑和振捣

混凝土浇筑和振捣质量关系到整体混凝土的密实度和美观性。施工单位要结合结构形式和混凝土供应能力以及施工环境确定混凝土浇筑方式。常用的浇筑方法为分层浇筑方式, 指的是分层摊铺和逐层振捣混

凝土,有利于顺利排出混凝土内部气泡,保证振捣的密实度,注意控制每层浇筑厚度在30 cm~50 cm范围内。在大面积和厚度较薄的板状结构中适合利用斜面浇筑方式,指的是在斜面方向浇筑混凝土,有利于提高混凝土的流动性,合理控制阻力,保障施工效率。选择任何浇筑方式,施工单位都要控制浇筑速度,规避模板变形等问题。

选择的振捣工艺关系到混凝土的密实度,通过振动作用可以排除混凝土内部的气泡,并且在模板空隙完全填充混凝土,保障混凝土的强度。在大体积混凝土振捣施工中适合利用插入式振捣器,在施工中根据振捣设备作用半径的1.55倍作为间距合理设置振点,同时保证振捣棒插入作业面超过8 cm,每点振捣时间要超过30 s,当不再出现气泡之后即可拔出振捣设备,继续开展下一点的振捣施工。在薄板结构振捣施工中适合利用平板振捣器,通过充分接触振捣器底部和混凝土表面,提高振捣施工的均匀性。在实际施工中,施工单位要平稳移动振捣器,规避漏振或者过振问题。控制振捣时间在 $15\text{ s/m}^2\sim 20\text{ s/m}^2$ 范围内,可以结合混凝土坍落度和施工环境合理调整具体时间。完成振捣施工之后,施工单位要进行抹平处理,提高整体混凝土的平整度。

1.3.3 混凝土养护

在混凝土养护中,施工单位要严格控制养护时间和湿度等,正常地发展混凝土强度,避免产生裂缝问题。施工单位要结合工程特点和气候条件以及施工工期要求等因素确定养护方式。常用的养护方式为自然养护,指的是在混凝土结构表面覆盖湿布,或者通过洒水的方式提高湿润度,合理控制混凝土水分蒸发速度。在预制构件和冬季施工中适合利用蒸汽养护,利用蒸汽提高养护温度,有利于保障混凝土强度。但是,在利用蒸汽养护阶段,施工单位要注意控制升温 and 降温的速度,避免产生裂缝问题。此外,可以利用覆盖养护措施,在混凝土结构表面覆盖塑料薄膜,同时发挥保温和保湿作用。在养护施工中,施工单位要控制养护时间超过7天,保证混凝土的强度。

2 钢筋混凝土施工常见问题的解决措施

2.1 混凝土裂缝防治

为了防治混凝土裂缝问题,施工单位在选择原材料的过程中,要利用低水化热水泥,同时对骨料级配和质量严格控制,有利于控制混凝土的温升和干缩变形。合理掺加粉煤灰或者矿粉渣,有利于优化混凝土的性能,降低裂缝问题发生率。此外,还要合理调控

混凝土的水灰比和砂率等,有利于提高混凝土的抗裂性。在施工工艺方面,要对混凝土浇筑温度和养护条件严格控制,如利用分层浇筑和二次振捣技术,避免在混凝土内部积聚热量,否则将会产生裂缝问题。同时,要做好混凝土的养护工作,提高混凝土湿度和温度的合理性,有效防止干缩裂缝。

2.2 钢筋锈蚀预防

为了防止出现钢筋锈蚀问题,首先要合理处理钢筋表面,并均匀地涂刷环氧树脂,或者选用镀锌钢筋,有利于隔离空气和钢筋表面,降低锈蚀问题发生率。定期清洁和检查钢筋,及时处理发现的表面缺陷,提高钢筋的抗锈蚀能力。另外,提高混凝土保护层的质量,也可以防止钢筋锈蚀。施工单位要严格控制保护层的厚度和质量,科学地设计混凝土配合比,提高混凝土保护层的抗渗性和抗碳化性,优化保护层防护效果。此外,要加大环境控制力度,如果施工环境的湿度较大,同时具有很强的腐蚀性,施工单位要设置排水系统,同时配置通风设施,降低环境的侵蚀作用,延长混凝土结构使用时间。

3 结束语

钢筋混凝土施工技术在水利水电工程中发挥了重要的作用,因此施工单位要加强分析技术要点,保障整体施工质量。技术人员要积极探索,完善钢筋混凝土施工技术应用过程,优化技术使用效果,逐步提高水利水电工程施工水平,合理利用水资源,促进能源生产可持续发展。随着科学技术不断发展,施工单位要积极引入智能化技术和自动设备等,同时要融合绿色环保理念,优化钢筋混凝土的材料和施工技术选择,降低实际施工对周围环境的影响。只有持续改进施工技术体系,才可以适应水利水电工程未来发展需求,推动水利水电工程高质量发展。

参考文献:

- [1] 胡春红,郝明亮,王瑞恒.水利河堤工程涵洞地基钢筋混凝土加固施工技术[J].工程机械与维修,2026(01):113-115.
- [2] 张朋虎.水利水电工程中的混凝土施工技术与质量控制研究[J].水上安全,2025(23):188-190.
- [3] 黄敬平.水利水电工程混凝土施工技术的应用与展望[J].湖南水利水电,2025(05):7-10.
- [4] 董兴明.水利水电工程中的混凝土施工技术与质量控制[J].智慧中国,2025(03):86-87.
- [5] 张家成.水利水电工程中混凝土施工技术的创新应用与实践[J].工程机械与维修,2024(07):37-39.

水利工程基坑施工的防渗处理技术与实践应用

柏翔翔

(阜阳市颍泉水利建筑有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 本文结合水利工程基坑施工实操经验, 梳理基坑渗漏的主要类型、成因及防控原则, 构建柔性、刚性、复合三类防渗技术体系, 明确各技术的应用要点, 并结合小型水库基坑实例, 验证防渗技术的实用性。基坑渗漏是水利工程的“顽疾”, 处理不当易引发边坡失稳、地基破坏等隐患, 本文提出的防渗方案贴合一线施工实际, 兼顾可行性与经济性, 旨在为同类水利工程基坑防渗施工提供实操参考。

关键词 水利工程; 基坑施工; 防渗处理技术; 渗漏防控

中图分类号: TV551.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.041

0 引言

基坑施工是水利工程建设的基础环节, 而防渗处理则是保障基坑施工安全的“生命线”。水利工程多地处地下水位高、地质复杂区域, 基坑开挖后极易出现坡面、基底、接缝等各类渗漏问题, 若处理不及时, 会导致边坡坍塌、管涌翻砂, 不仅延误工期、增加成本, 还会留下工程安全隐患。当前, 部分工程因防渗技术选择不当、施工操作不规范, 渗漏问题频发。基于一线施工实践, 本文系统梳理基坑防渗处理技术, 结合工程实例分析应用成效, 为规范基坑防渗施工、提升防控效果提供实操支撑, 助力水利工程基坑施工安全有序推进。

1 水利工程基坑渗漏类型及成因分析

1.1 基坑渗漏主要类型及特征

结合现场施工经验, 基坑渗漏主要有三种类型, 每种类型的特征都很明显, 一线施工时很容易区分。第一种是坡面渗漏, 主要出现在基坑边坡上, 大多是因为边坡开挖坡度不合理, 或者坡面防护不到位, 雨水冲刷、地下渗水顺着坡面缝隙渗出, 表现为坡面湿润、有细小水流, 严重时会出现坡面冲刷沟, 甚至局部土体滑落, 这种渗漏在雨季特别常见, 处理不及时会加剧边坡失稳。第二种是基底渗漏, 也就是基坑底部出现渗水, 这种情况多发生在地下水位高、地基土层透水性强的区域, 表现为基底局部积水、有冒水点, 严重时会出现翻砂、管涌现象, 就是地下水带着泥沙从基底冒出, 若不及时处理, 会导致地基承载力下降, 影响后续基础施工。第三种是接缝渗漏, 主要出现在

基坑支护结构的接缝处、施工缝或者穿墙管周围, 因为这些部位施工时衔接不到位, 存在缝隙, 渗水会顺着缝隙渗出, 这种渗漏虽然流量不大, 但不容易被发现, 长期渗漏会腐蚀支护结构, 埋下安全隐患。

1.2 渗漏产生的核心成因剖析

渗漏产生的原因主要是地质、施工、设计三个方面。从地质条件来看, 若基坑所在地的土层透水性强, 比如砂层、砾石层, 地下水丰富且水位高, 开挖后地下水很容易渗透到基坑内, 这是先天因素, 也是最难控制的。还有一些区域存在断层、裂隙, 这些都是渗水的天然通道, 若施工前勘察不到位, 很容易出现渗漏问题。施工因素是最常见的原因。例如: 开挖过程中, 边坡坡度挖得太陡, 超过土体的稳定极限, 坡面防护不及时, 雨水一冲刷就会出现缝隙, 引发渗漏; 还有施工缝处理不到位, 浮灰没清理干净、振捣不密实, 导致接缝处存在空隙; 另外, 防渗材料质量不达标, 如土工膜有破损、灌浆材料配比不合理, 施工时操作不规范、灌浆压力不够、土工膜铺设不平整, 这些都会导致防渗效果大打折扣, 进而产生渗漏。设计因素也不能忽视, 若设计时没有结合现场地质条件, 选用的防渗技术不合理, 或者防渗结构设计存在缺陷, 如防渗墙厚度不够、排水系统设计不完善, 也会导致施工后出现渗漏^[1]。

1.3 防渗处理的核心原则与防控要点

基坑防渗处理的核心原则有: 一是“堵排结合、因地制宜”, 二是“预防为主、及时处理”。堵排结合就是既要堵住渗水通道, 又要及时排出基坑内的积

作者简介: 柏翔翔 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

水,不能只堵不排,也不能只排不堵,不然都达不到防渗效果;因地制宜就是根据现场地质条件、渗漏类型,选择合适的防渗技术,不能盲目照搬其他工程的方案,如砂层地基和黏土地基,适用的防渗技术就不一样。

在防控要点方面:首先,施工前要做好地质勘察,把地下水位、土层分布、断层裂隙等情况摸清楚,这样才能制定合理的防渗方案;其次,施工过程中要加强过程控制,比如边坡开挖后及时防护,施工缝、穿墙管等关键部位重点处理,防渗材料进场前严格检验,避免使用不合格材料^[2];再次,要加强监测,安排专人定期查看基坑坡面、基底和接缝处,一旦发现渗漏迹象,及时采取处理措施,不能拖延,不然小渗漏会发展成大隐患;最后,施工人员的操作水平也很关键,要做好岗前培训,确保施工人员熟悉防渗技术的操作要点,避免因操作不当导致渗漏。

2 水利工程基坑施工防渗处理技术体系及应用要点

2.1 防渗技术体系构建原则

构建基坑防渗技术体系的核心就是结合工程实际,确保技术可行、经济合理、效果可靠。首先,要坚持“适配性”原则,根据基坑规模、地质条件、渗漏类型,选择合适的防渗技术。例如:小型基坑、渗漏量小的区域,可采用简单的柔性防渗技术,大型基坑、地质复杂的区域,就需要采用复合防渗技术;其次,要坚持“经济性”原则,在保证防渗效果的前提下,尽量选用成本低、施工简便的技术,避免过度设计,增加工程成本;最后,要坚持“安全性”原则,防渗技术不仅要能防止渗漏,还要能兼顾基坑的稳定性,避免因防渗施工影响基坑支护结构的安全,这一点在深基坑施工中尤其重要^[3]。

2.2 柔性防渗处理技术及应用要点

柔性防渗技术是现场施工中最常用的,优点是施工简便、成本低、适应性强,适合大多数中小型基坑,尤其是渗漏量不大、地质条件相对简单的区域。常用的柔性防渗技术主要有土工膜铺设、黏土铺盖、膨润土防水毯铺设三种。土工膜铺设是最普遍的,操作也简单,但必须注意:一是土工膜的质量要过关,进场后要抽样检验,不能用有破损、漏洞的膜;二是铺设前要清理坡面和基底,去除尖锐杂物,避免刺破土工膜,铺设时要拉平、拉紧,不能出现褶皱;三是接缝处要采用热焊接,焊接时要控制好温度和压力,焊接后要进行抽样检测,确保接缝处不漏水。黏土铺盖适合黏土层丰富的区域,就地取材,成本很低,铺设时要分层压实,压实度要达到设计要求,不然黏土本身透水

性强,起不到防渗效果。膨润土防水毯铺设,适合地下水位较高的区域,它遇水膨胀,能自动封堵缝隙,铺设时要注意搭接宽度,搭接处要压实,避免出现缝隙。

2.3 刚性防渗处理技术及应用要点

刚性防渗技术主要用于渗漏量较大、地质条件复杂的基坑,比如深基坑、砂卵石地基,优点是防渗效果好、耐久性强,缺点是施工复杂、成本较高。常用的刚性防渗技术有防渗墙、灌浆防渗两种。防渗墙施工主要用于阻断地下水位较高的渗水通道,比如砂层、砾石层地基,施工时采用钻机成槽,然后浇筑混凝土,形成连续的防渗墙。需要注意的是,成槽时要控制好槽壁的稳定性,避免槽壁坍塌,浇筑混凝土时要连续浇筑,不能出现断桩、冷缝,不然会影响防渗效果。灌浆防渗适合存在断层、裂隙的地基,通过钻机钻孔,向裂隙或土层中注入灌浆材料,填充缝隙,形成防渗帷幕。灌浆时要控制好灌浆压力和灌浆量,根据地质条件调整灌浆材料的配比,灌浆后要进行压水试验,检验防渗效果,若不合格,就要重新灌浆。

2.4 复合防渗处理技术及应用要点

复合防渗技术就是把柔性防渗和刚性防渗相结合,取长补短,适合地质条件复杂、渗漏风险高的大型基坑,比如水库基坑、大型水闸基坑。该技术的核心是“刚性堵水、柔性补缝”,比如先施工防渗墙,阻断主要渗水通道,然后在防渗墙表面铺设土工膜,封堵防渗墙的接缝和细小裂隙,这样既能保证防渗效果,又能适应地基的轻微变形,避免防渗结构开裂。

应用时要注意,两种防渗技术的衔接要到位,比如防渗墙顶部和土工膜的搭接处,要进行密封处理,避免出现渗水通道;另外,要根据现场渗漏情况,调整两种技术的组合方式,不能千篇一律^[4]。例如:在某水库基坑施工中,采用“防渗墙+膨润土防水毯”的复合防渗方案,防渗墙阻断深层渗水,膨润土防水毯封堵浅层缝隙,最终防渗效果很好,基坑内几乎没有出现渗漏现象。

2.5 辅助防渗与排水技术

辅助防渗与排水技术虽然不是主要的防渗手段,但在实际施工中必不可少,能有效提升防渗效果,减少渗漏隐患。常用的辅助技术有井点降水、集水明排、排水盲沟三种。井点降水适合地下水位较高的基坑,通过井点抽取地下水,降低地下水位,减少渗水压力,从源头减少渗漏,施工时要控制好井点的间距和深度,确保降水效果均匀。集水明排适合基坑内积水较多的情况,在基坑底部设置排水沟和集水井,将基坑内的

渗水和雨水收集起来,然后用抽水设备排出,避免积水浸泡地基,加剧渗漏。排水盲沟适合基底透水性较强的区域,在基底铺设盲沟,填充碎石等透水性材料,将渗水引导到集水井,再排出基坑,既能排水,又能辅助防渗,减少基底渗漏。需要注意的是,排水系统要定期清理,避免堵塞,不然会影响排水效果,导致基坑内积水。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某小型水库扩容改造工程基坑施工项目,该水库位于山区,主要用于灌溉和防洪,基坑开挖深度 8.5 m,开挖面积约 1 200 m²。现场地质勘察显示,基坑所在地土层主要为砂层和黏土层,地下水位较高,距地表约 3.2 m,土层透水性较强,存在轻微断层裂隙,施工过程中容易出现坡面渗漏和基底渗漏,结合工程实际,制定了“复合防渗+井点降水”的防渗方案。

3.2 防渗技术应用过程

施工前,先对基坑周边进行清理,做好地质复测,确认地下水位和土层分布情况,然后开始井点降水施工,在基坑周边设置轻型井点,间距 1.5 m,深度 10 m,持续抽水 3 天,将地下水位降至基坑底部以下 0.5 m,减少渗水压力。接着进行刚性防渗墙施工,采用冲击钻机成槽,槽宽 0.8 m,深度 12 m,浇筑 C25 混凝土,形成连续的防渗墙,浇筑过程中严格控制浇筑速度,避免出现断桩,浇筑完成后养护 7 天^[5]。

防渗墙施工完成后,进行柔性防渗处理,在基坑坡面和基底铺设 HDPE 土工膜,坡面铺设前先清理坡面,去除尖锐杂物,铺设时拉平拉紧,接缝处采用热焊接,焊接后抽样检测,确保无渗漏;基底土工膜铺设后,覆盖 5 cm 厚的黏土保护层,防止土工膜被后续施工损坏。同时,在基坑底部设置排水盲沟和集水井,盲沟间距 2 m,集水井间距 10 m,及时排出基坑内的渗水和雨水,辅助防渗。在施工过程中,安排专人每天监测基坑渗漏情况,发现坡面有细小渗漏点,及时采用密封胶封堵,确保防渗效果。

3.3 应用成效分析

该工程基坑防渗施工完成后,经过一个月的监测,基坑坡面、基底和接缝处均未出现明显渗漏现象,地下水位控制在设计范围内,基坑边坡稳定,无坍塌、管涌等隐患。在施工过程中,未因渗漏问题导致施工停滞,工期比计划提前 3 天,成本控制在预算范围内。后续基础施工顺利推进,混凝土浇筑质量达标,经过后期验收,防渗效果符合设计要求,满足工程使用需求。

从实际应用来看,制定的“复合防渗+井点降水”方案,完全适配该工程的地质条件和渗漏类型,刚性防渗墙阻断了深层渗水通道,土工膜封堵了浅层缝隙,井点降水和排水系统减少了渗水压力,三者协同作用,达到了良好的防渗效果。同时,施工过程中注重细节控制,比如土工膜焊接检测、防渗墙养护,这些都是保证防渗效果的关键,也为后续同类工程提供了实操经验。

3.4 案例启示

第一,基坑防渗施工,前期地质勘察一定要充分,全面查明地质条件和地下水位情况,才能制定合理的防渗方案,避免盲目施工;第二,防渗技术的选择要因地制宜,不能照搬其他工程的方案,要结合基坑规模、渗漏类型,选择合适的防渗技术,必要时采用复合防渗方案,提升防渗效果;第三,施工过程中的细节控制至关重要,如防渗材料的检验、施工缝的处理、土工膜的焊接,任何一个环节出现问题,都会影响防渗效果;第四,要加强施工监测,及时发现渗漏迹象,及时处理,避免小渗漏发展成重大隐患;第五,施工人员的操作水平直接影响施工质量,要做好岗前培训,确保施工人员熟悉操作要点,规范施工。

4 结束语

水利工程基坑防渗处理是保障工程安全的关键,其核心在于立足现场地质条件、渗漏类型,遵循“堵排结合、因地制宜”原则,科学选用适配的防渗技术。当前基坑渗漏主要源于地质、施工、设计三方面因素,柔性、刚性、复合防渗技术各有适配场景,辅助排水技术可进一步提升防渗效能。结合工程实例验证,合理搭配防渗技术、严控施工细节、强化过程监测,能有效杜绝渗漏隐患,确保基坑施工安全。

参考文献:

- [1] 郭浩,沈利.水利工程施工中渗水原因及防渗技术研究[J].城市建设,2026(01):63-65.
- [2] 张润超.防渗处理施工技术在水利工程中的具体应用[J].价值工程,2025,44(11):151-154.
- [3] 李相奇.水利工程施工中渗水原因及防渗技术研究[J].水上安全,2025(11):182-184.
- [4] 周建,何英建,潘春强.膜袋灌浆法在深基坑施工中的应用[J].四川水力发电,2024,43(05):42-44.
- [5] 杜玲,曾令冬.分析水利工程基坑排水施工要点:结合华水防渗复合板产品设计优化[J].数码设计(电子版),2024(11):167-170.

水利水电工程施工过程中高边坡治理技术研究

叶旭明

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 水利水电工程多位于地形起伏较大的区域,大规模的土石方开挖会形成高边坡,而这类边坡的岩土体通常存在显著的结构差异,极易引发滑动、变形等地质问题,对施工安全构成严重威胁。鉴于此,本文首先明确高边坡的定义与判定标准,系统梳理其在水利水电工程中的典型特征;其次深入剖析当前工程施工中常用的高边坡治理技术;最后从施工准备、分级开挖等方面提出针对性的技术应用措施,以期为全面保障高边坡的稳定性提供借鉴,进而为水利水电工程的高质量建设与安全运行提供坚实的支撑。

关键词 水利水电工程;高边坡治理技术;施工准备;分级开挖

中图分类号:TV551.2

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.042

0 引言

高边坡稳定性管控是水利水电工程施工管理的核心内容之一。随着工程建设规模持续扩大,土石方开挖深度与范围不断增加,岩体卸荷效应与地下水渗流作用的耦合影响日益显著,导致边坡稳定条件始终处于动态变化之中。传统依赖经验的粗放式处置方法已难以适应当前精细化、智能化的建设要求。在此背景下,施工单位要聚焦高边坡治理技术,完善施工控制路径,为工程长期稳定运行提供可靠技术支持。

1 高边坡概述

在水利水电工程施工过程中,高边坡是因地形条件或开挖活动形成的高差较大的岩土体结构,多分布在峡谷地带或河谷两侧,坡体高度较高,空间范围较大,且岩体内部结构较为复杂。自然状态下,岩体内部保持相对稳定的受力平衡,一旦施工开挖改变原有的应力条件,坡体内部就会出现应力重新分布现象,致使局部区域产生松动或变形趋势。从结构特征来看,岩体完整程度、结构面方向以及组合形式直接影响边坡稳定状况,若结构面与坡面方向形成不利关系,就会增加沿结构面滑动的风险,而且地下水渗入岩体后会改变孔隙水压力,降低抗剪强度,进一步加大边坡失稳可能^[1]。在施工过程中,边坡表面呈现分级开挖形态,各级平台与坡面组合形成较为复杂的空间结构,需严格要求支护方式。从工程角度分析,高边坡内部一般可划分为表层松动区、中部影响区以及深部稳定区,不同区域的力学性质存在差异,需结合实际地质条件与施工阶段综合判断稳定性。

2 水利水电工程施工过程中高边坡治理技术

2.1 锚固技术

锚固技术基于岩体结构特征,结合节理裂隙发育情况,确定锚固深度、倾角及间距,在坡体内部布置锚杆与预应力锚索,连接表层松动岩体与深部稳定岩体,形成整体受力结构,可以有效提高边坡稳定性^[2]。在施工过程中,施工单位需要结合稳定性分析结果布设孔位,保持孔壁稳定,避免干扰周围岩体。锚索安装阶段强调张拉控制,可以施加预应力,让锚固结构提前参与受力,从而抑制位移发展。注浆环节,施工单位应采用水泥基浆液,保证浆体在孔内形成良好包裹,提高锚固体与岩体之间的结合程度,以此增强整体稳定性。从作用机理来看,锚固技术可以改变岩体内部受力状态,分散潜在滑动面上的应力,提高抗滑能力,又加上锚索拉力与岩体自重形成共同作用,能够增强边坡整体刚度,控制变形,减弱局部失稳风险。在实际应用中,施工单位需要结合现场情况调整锚固参数,布设应力监测装置,持续记录锚索受力变化及边坡变形,按照监测结果优化张拉力,以促使加固效果更加稳定可靠。

2.2 抗滑结构技术

抗滑结构技术借助抗滑桩、挡土结构及重力式支挡体系,建立具有较高刚度的工程结构,可以有效阻挡潜在滑动体,让边坡滑动力成为结构内力,以此提高坡体抗滑能力。在设计层面,施工单位应结合边坡几何形态、滑动面位置及岩土力学参数布置抗滑结构,明确桩体埋置深度,保证结构进入稳定岩层区域,形

作者简介:叶旭明(1988-),男,本科,研究方向:水利水电工程。

成可靠的支承条件,并依据内力计算结果确定结构截面尺寸^[3]。在施工过程中,由于抗滑桩成孔质量影响整体稳定效果,施工单位需要保持孔壁稳定,防止出现塌孔或偏位现象,保持连续的桩身混凝土浇筑过程,维持结构的整体性。与此同时,桩体与周围岩土体之间需要形成紧密接触,如此荷载传递路径便可清晰可靠。从力学作用角度分析,抗滑结构可以提供反力抵抗滑动体下滑趋势,稳定分布边坡内部应力,并把滑动力传递到稳定地基,形成完整的受力体系,以有效约束坡体变形,维持边坡整体稳定状态。

2.3 坡面防护技术

高边坡表层岩体开挖后容易出现结构松动现象,若缺乏有效防护,会逐渐剥落表层物质,进而影响深部结构稳定,而坡面防护技术建立覆盖层与支护结构相结合的防护体系,可以减缓风化作用持续侵蚀坡体表面的影响^[4]。在技术实现过程中,坡面处理以挂网喷射混凝土为主要形式,在坡面布设钢筋网片,配合高强度喷射混凝土形成连续覆盖层,可以有效约束表层岩体。为了让防护层与基岩形成稳定结合,施工单位应依据岩体风化程度调整喷射混凝土厚度,保证覆盖层具备良好黏结性能,并在裂隙较为发育区域,提前清理裂隙。在坡面防护体系中,施工单位要设置钢丝绳网或高强度防护网,拦截潜在松动块体,降低落石风险,以持续维持坡面稳定状态,避免刚性结构产生应力集中现象。从整体效果来看,坡面防护技术可以保持稳定的边坡表面状态,并为深层结构稳定提供良好外部条件,有利于高边坡安全稳定。

2.4 排水技术

受降雨入渗与地下水活动共同影响,高边坡区域水分沿裂隙与结构面渗流,可以改变有效应力分布,降低抗剪强度,持续干扰边坡稳定性,而排水技术有序疏导地表水以及地下水,可以降低孔隙水压力,稳定岩土体力学状态。在工程实施过程中,施工单位在坡顶区域设置截水沟,把上部汇水引导到安全区域,可以避免雨水直接冲刷坡面,同时在坡面布设排水沟以及导流槽,能沿既定路径排出径流,减轻表层冲刷作用^[5]。坡体内部需要布设水平排水孔,将导出滞留于岩体中的渗水,保持孔隙水压力在较低水平,从而改善整体稳定条件。同时,施工单位需要结合岩体结构特征合理布设排水孔,并保持孔道通畅,依据渗透特性控制孔径与间距,以持续稳定排水效果。从作用机理角度分析,排水技术可以降低孔隙水压力,提高有效应力水平,恢复岩体抗剪强度,并减轻水力侵蚀作用,避免坡面防护结构受冲刷影响,进而维持长期稳定状态。在实际应用过程中,施工单位要借助监测

手段动态评估排水效果,连续观测渗流变化,及时调整排水孔布置,保持良好的排水体系,为高边坡提供持续可靠的安全保障。

2.5 减载与反压技术

在边坡加固的过程中,减载的首要目的是减小下滑的力度。通常采取切割滑坡体后缘部分岩体的方法来实现,但单独减载的效果不明显,所以最优方案是将减载后的土石堆至边坡(坡体)前缘,以实现减载,并增强抗滑性能。在实施过程中,施工单位要结合边坡几何形态与岩体结构特征优化设计减载作业,控制削坡坡率,促使坡体整体轮廓更加平顺,避免局部陡坎形成新的应力集中区。反压技术则在坡脚或滑动体前缘设置反压体,增加抗滑阻力,让边坡形成稳定支撑条件,采用块石填筑或混凝土结构形式,基于其自重形成抵抗滑动力,待反压体基础进入稳定地基层,受力路径便可清晰可靠,长期保持支撑作用。从力学机制来看,减载措施可以降低驱动力来源,加上反压结构提供抵抗力,两者共同作用,便可提高边坡安全系数,推动整体结构表现出更高的抗扰动能力,最终在复杂地质环境下保持持续稳定状态。

3 水利水电工程施工过程中高边坡治理技术应用措施

3.1 施工准备

施工准备阶段,施工单位需要聚焦边坡稳定控制目标,依据工程设计文件,核对边坡几何参数等数据,明确重点加固区域与控制断面,以保证治理措施与实际条件相一致。施工单位应建立完整的技术交底体系,细化说明锚固布置方案、抗滑结构位置及排水系统走向,顺畅衔接各工序,并同步展开测量控制工作,利用全站仪布设坡面控制点,形成精确坐标体系,为钻孔定位提供可靠基准。为了避免扰动坡体结构,施工单位应同步推进场地整平与施工通道布置,让机械设备稳定进入作业区域。与此同时,施工单位需要检验锚索钢绞线、注浆材料及喷射混凝土原材料质量,保证力学性能符合规范要求,并调试校验钻机设备,提前准备排水设施所需管材。另外,施工单位要结合边坡稳定分析结果,划定危险区域,布设警示标识,保持有序的施工过程状态,提前布设监测系统,连续记录边坡变形,为施工过程提供数据支持。

3.2 分级开挖

高边坡若一次性形成大面积裸露面,将会迅速改变岩体内部原有应力平衡,引发局部失稳现象,施工单位需要采用分级开挖方式合理划分开挖范围,让坡体形成新的稳定结构。为保证开挖后坡体稳定,施工

单位应依据边坡高度及岩体条件划分层级,设置分级平台,促使每一级坡体都处于可控范围内,并结合岩体完整性指标设计平台宽度,沿自上而下方向推进开挖顺序,逐渐释放上部荷载,避免集中扰动下部坡体。在开挖过程中,施工单位应精细控制钻爆参数,合理选择孔距,在限定范围内释放爆破能量,防止扰动周围岩体,让机械开挖与爆破作业相互配合,保持坡面较为整齐的形态,防止形成过度破碎区域。分级开挖过程中,各级坡体开挖完成后需检查稳定性,按照监测数据判断是否进入下一阶段施工,实时分析位移变化情况,及时调整开挖深度,让施工过程始终处于可控状态。从整体效果来看,分级开挖可以控制开挖过程,持续保障边坡稳定性,可有效降低施工风险,为高边坡治理提供实施基础。

3.3 坡面控制

开挖后的高边坡容易形成不规则破碎带,局部区域出现凸出体,若未及时整治,将影响整体稳定,施工单位需要精细化处理开挖界面,保持边坡表层连续性。在具体实施中,为了让表层结构紧密贴合基岩主体,施工单位要严格按照设计坡率修整坡面轮廓,控制坡角以及平台边界,保持边坡外形规整,并清理坡面,去除松散岩块。就裂隙较为发育区域而言,施工单位要结合岩体结构特征局部修整,保持坡面形态与内部结构相协调。在施工过程中,施工单位要合理控制爆破作业参数,优化装药结构,保持爆破作用范围在设计控制区域内,防止破坏坡面完整性,同时展开机械修坡作业,保持连续施工节奏,促使坡面形成稳定几何形态,避免因停工间隔加剧岩体风化程度,从而影响表层稳定性。

3.4 支护结构施工

支护结构施工要建立可靠受力体系,有效连接坡体松动区域与稳定岩层,让整体结构形成连续受力状态,并要求施工阶段紧密衔接开挖进度,及时介入支护措施,促使边坡始终处于受控状态。施工单位要采用测量控制系统精确定位钻孔,依据设计要求,保持孔壁完整,避免扰动周边岩体结构,从而保证后续注浆。锚杆或锚索安装过程中,施工单位需要严格控制插入深度以及角度,使其能够进入稳定岩层区域,形成有效锚固段,并施加设计预应力,让支护结构提前参与受力,以此抑制坡体变形发展。为紧密结合锚固体与岩体,选用需具备良好流动性的浆液,在孔内形成均匀包裹结构,其中喷射混凝土施工则与钢筋网片结合,可以提高表层抗剪能力,保持稳定的边坡表层状态。

3.5 布置排水设施

施工阶段需依据边坡地形特征以及水文条件,整体规划排水体系,形成连续通道,避免水流聚集在局

部区域。坡顶区域设置截水沟,控制汇水路径,把上部来水引到安全排放区域,避免雨水直接进入坡面范围。而且,施工单位要按照降雨强度确定截水沟断面尺寸,保证排水能力满足施工需求,设置导流槽,沿既定路径快速排出地表水,减少水流冲刷坡面的影响,同时保持坡面结构完整。此外,施工单位应设置水平排水孔,结合岩体裂隙发育方向来调整,并依据渗透系数控制孔径以及间距,持续稳定排水效果。施工单位要稳定开挖沟槽,避免干扰坡体,选择满足耐久性要求的排水管材选择。

3.6 运行监测体系

运行监测体系基于自动化监测设备,可实时记录坡体位移、锚索应力及孔隙水压力等关键指标,动态反映边坡内部变化过程。施工单位需要结合边坡结构布设监测系统,在坡面、坡体内部及关键控制部位设置多类型的监测点,采用GNSS定位技术,高精度测定表层位移变化,同时借助深部位移计获取坡体内部变形信息,让浅层与深层响应形成对比关系。数据处理环节,施工单位要采用数值模拟方法,综合研判监测结果,量化表达边坡稳定趋势,并建立阈值控制标准,识别异常变化,若位移速率或应力变化超出控制范围,系统及时发出预警信号,为施工调整提供决策支持。此外,为保证高边坡稳定控制更加精细,施工单位需定期校验设备精度,保证监测结果具备较高可信度,推动监测体系逐步向智能化方向发展。

4 结束语

构建跨部门、全流程的协同控制机制,能够系统性优化边坡受力状态,有效提升水利水电工程的整体耐久性能。未来,施工单位需要进一步融入智能分析手段,准确识别风险,同时施工组织方式向精细控制转变,强化全过程技术联动,从而增强治理措施的针对性,推动水利水电工程可持续发展。

参考文献:

- [1] 王剑书.水利水电工程中的高边坡加固与治理技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(35):187-189.
- [2] 张文涛.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].工程建设与设计,2025(18):20-22.
- [3] 熊长军.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].水上安全,2024(22):133-135.
- [4] 卢绍文.水利水电工程中高边坡的加固和治理研究[J].冶金管理,2022(23):65-67.
- [5] 林君.水利水电工程高边坡的加固与治理[J].科技創新与生产力,2022(11):55-57.