

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 3 月 第 8 期 (总第 633 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 罍 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 3 月 15 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 软件测试风险识别与防控机制研究
..... 孙 娟
- 004 结晶器振动参数对铸坯表面质量影响
..... 李明新
- 007 自动焊接小车结构设计与运动学仿真
..... 苑留堂
- 010 高强钢船用零部件精密锻造变形规律及应用
..... 宫兆岩, 黄建波, 宫兆森
- 013 K5B 型计算机连锁软件换装施工方法技术研究
..... 赵伍洋

智能科技

- 016 电力工程施工中智能监测系统应用研究
..... 路广龙, 任怀佳, 相龙强
- 019 配电自动化架空线路故障定位与隔离研究
..... 王振乾
- 022 智慧消防系统在高层建筑火灾防控中的应用研究
..... 孙晓燕, 于 真
- 025 基于大数据分析的水资源调度优化方法与技术路径
..... 杨秀辉
- 028 智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用探讨
..... 徐金晖, 胡 蝶
- 031 复杂地质条件下地下工程施工的智能监测技术应用研究
..... 魏 星
- 034 电气化铁路接触网动态性能指数 (CDI) 分析及整治措施研究
..... 刘志敏

应用技术

- 037 预制装配式剪力墙结构抗震性能分析与优化
..... 郑嘉欣
- 040 建筑结构中混凝土材料裂缝的控制技术研究
..... 濮利荣

目录 Contents

043	装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术分析	张广涛, 徐正凯
046	桥梁桩基础在岩溶地层的施工难点与处理方案	夏海涛
049	建筑工程施工中预应力混凝土施工技术应用分析	宋文龙
052	旧城区配水管网改造的技术要点与施工管控分析	李 磊
055	老旧小区给排水系统改造中的常见问题分析与规范化设计对策	王传虎, 杨 蕾
058	市政排水管道顶管施工监理要点及管道接口防腐施工质量控制	王庆楼

科创产业

061	“双碳”目标下铁路供配电系统节能技术分析	戴 松
064	石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐措施探究	郭银龙
067	冷水表与热水表计量精度差异的影响因素分析	刘志杰, 张海鹏, 王小栋
070	风力发电系统中海上风机性能评估与运行优化研究	李 明, 王慧超
073	电气试验中电力变压器绕组错误接线及其检测研究	郑杰文
076	建筑装饰装修工程施工中 BIM 技术的创新应用与实践研究	衣昭宇, 劳洪亮, 孙 志
079	市政照明节能改造工程中智慧路灯施工工艺与物联网融合应用	顾 健

技术管理

082	预应力现浇箱梁的施工监理分析	吴仍武
085	高速公路路基防护施工技术分析	吴 侠
088	建筑施工管理的影响因素与对策研究	李 蕊
091	航站楼工程管理的核心内涵与关键要素	漆政亮
094	水厂给排水施工的质量管控要点与优化措施	黄晨晨
097	水利渠道施工管理中的边坡安全风险监理防控分析	王彦礼
100	高层建筑钢结构施工精度控制与安全管理措施分析	王 群
103	水利工程施工过程中的技术创新与施工安全风险研究	胡江武, 傅俊波, 章春雷

科学论坛

106	建筑工程电气系统安装与调试技术应用研究	宋 友, 于田景
109	建筑暖通工程中的常见问题及解决措施探讨	王嘉迪, 周忆宁
112	建筑工程施工质量控制中的关键影响因素研究	李宪猛, 韩金凤, 刘长宏, 田保全, 孟卫卫
115	工业园区环境污染风险防控与管理策略研究	代 伟
118	金属模锻件锻造和热处理过程中裂纹形成原因分析	侯敬都, 王禹婷
121	配电线路施工中常见质量问题的防控措施与实践研究	刘永峰
124	市政道路雨水花园施工技术优化与径流污染控制效果研究	董 伟, 刘 明, 刘 过

软件测试风险识别与防控机制研究

孙 娟

(南京紫金数云信息技术有限公司, 江苏 南京 211100)

摘 要 在软件研发全生命周期中, 软件测试是保障产品质量的关键环节, 但测试过程易受需求变更、资源约束、技术瓶颈等多因素影响, 滋生各类风险, 进而导致测试效率下降、成本超支甚至产品质量不达标。为有效规避上述问题, 本文开展软件测试风险识别与防控机制研究。首先梳理软件测试与风险管理相关理论基础; 其次构建包含风险分类、识别方法与指标体系的风险识别体系, 在此基础上建立风险评估模型, 明确评估维度、量化指标并确定风险优先级; 最后设计涵盖总体框架、分阶段策略、针对性措施及动态监控预警的风险防控机制。研究成果旨在为软件测试工作提供参考, 进而提升风险管控能力, 保障测试工作高效有序推进。

关键词 软件测试; 风险识别; 风险评估; 防控机制; 风险管理

中图分类号: TP311.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.001

0 引言

随着信息技术迅猛发展, 软件产品应用场景持续拓宽, 覆盖日常办公、工业控制、金融核心等关键模块, 用户对软件质量的要求也稳步提高, 软件测试对研发流程的重要性越来越凸显。软件测试环节有需求分析、用例设计、测试执行、缺陷修复等多个步骤, 容易被需求模糊、技术迭代、资源配置不当、跨团队协作不畅等内外部因素干扰, 催生各类风险, 最终引发测试周期滞后、成本增加或产品质量不达标等问题。多数企业做软件测试风险管控, 普遍有识别不周全、评估有偏差、防控措施滞后等不足, 无法匹配敏捷开发、DevOps 等新型研发模式需求。本文全面分析软件测试风险识别与防控体系, 构建科学识别体系、评估模型及防控机制, 实现测试风险全流程管控, 以期提升测试质量和效率、压缩研发成本、适配新型研发模式提供实践参考。

1 软件测试风险相关理论基础

1.1 软件测试核心概念与流程

软件测试即依照规定条件操作软件, 找出错误、判定质量、检查是否符合设计要求的流程, 核心方向是验证功能完整性、性能稳定性等关键指标, 为质量改进提供凭据。这套标准化流程涵盖测试计划制定、需求分析、用例设计、环境搭建、测试执行、缺陷管理与回归测试、测试总结等环环相扣的环节, 各环节分别发挥方向规划、边界明确、提供执行依据等核心作用^[1]。

1.2 风险与风险管理理论

风险即特定环境中事件产生的不确定性及潜在负面效应。软件测试风险是测试流程里可能引发目标未达成、质量下降、成本超支或周期延误的不确定因素, 有传播性、连锁性属性。风险管理理论核心流程为风险识别、评估、应对与监控形成的闭环管理, 逐一完成风险梳理、量化分级、针对性防控、动态跟踪调整, 守住风险底线。

2 软件测试风险识别体系构建

2.1 软件测试风险分类梳理

结合软件测试流程、项目规模及实际工作场景, 将软件测试风险划分为四大类, 分别为需求类风险、技术类风险、资源类风险与管理类风险。需求类风险主要源于需求不明确、需求频繁变更、需求文档存在歧义等, 这类风险易导致测试范围偏差、测试用例返工; 技术类风险包括测试环境搭建困难、测试工具适配性差、技术人员能力不足、自动化测试脚本开发受阻等, 直接影响测试效率与测试覆盖度; 资源类风险涉及人力、设备、时间等资源配置不合理, 如核心测试人员流失、测试设备性能不足、测试周期压缩等, 易造成测试工作停滞或质量下降; 管理类风险则包括测试计划不完善、沟通协调不畅、缺陷管理不规范、团队协作效率低等, 影响测试全流程的顺畅推进。各类风险相互关联、相互影响, 任一风险的爆发都可能引发连锁反应, 影响测试工作全局。

作者简介: 孙娟 (1981-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 软件测试。

2.2 软件测试风险识别方法选择与应用

结合软件测试工作特点、项目类型及团队构成,选用适配的风险识别方法,涉及文献研究法、头脑风暴法、德尔菲法和故障树分析法。采用文献研究法,梳理国内外相关文献、行业报告及项目案例,梳理既有软件测试风险类型与识别经验,为风险识别筑牢理论根基;以头脑风暴法组织测试、开发、需求、产品相关人员开展集中研讨,通过思维碰撞充分挖掘潜在风险,实现风险识别无死角;德尔菲法邀约行业专家和资深测试工程师实施多轮匿名评审,慢慢收拢风险认知偏差,保障风险识别客观精准;故障树分析法以“测试失败”或“产品重大缺陷漏测”作为顶事件,从后往前排查诱发该事件的中间事件和基本事件,精准锁定风险源头和传播路径。在实际应用中,要依据项目各阶段调整搭配多种方法,项目起步阶段采用文献研究法和头脑风暴法,项目中期采用德尔菲法和故障树分析法,增强风险识别的完整性和精准性^[2]。

2.3 软件测试风险识别指标体系构建

基于风险分类与识别方法,构建软件测试风险识别指标体系,明确各类风险对应的具体识别指标,为风险识别提供量化依据。具体指标体系如表1所示。

3 软件测试风险评估模型建立

3.1 风险评估核心维度与指标量化

软件测试风险评估的核心维度有风险发生概率和风险影响程度,两者一同判定风险的优先级。风险发生概率是特定风险在测试流程中出现的概率,需整合历史项目数据、团队经验及项目当前状态进行综合判

断;风险影响程度指风险出现后给测试目标、测试质量、测试成本和测试周期带来的负面影响大小,可从影响范围、影响时长、损失大小等维度评判。采用李克特5级评分法量化指标,把风险发生概率、影响程度各划分为5个等级,1级代表最低级别,5级为最高等级,对应发生概率极高、影响极大,以加权求和方式算出各风险综合评分,按各指标对测试工作的重要程度设定权重,依托层次分析法,组织多名行业专家及资深项目负责人打分得出权重值,保障权重分配科学且合理^[3]。

3.2 软件测试风险评估模型构建

参照风险评估核心维度和指标量化数值,打造多维度风险评估模型,风险识别指标体系作为模型输入,依靠量化评分计算各风险的综合风险值,综合风险值=风险发生概率评分×概率权重+风险影响程度评分×影响程度权重,按照综合风险值的大小,将风险归类为高、中、低3个等级,综合风险值≥4分归为高风险,2~3分判定为中风险,≤1分属低风险,该模型能实现各类风险的精准量化评估,为风险防控提供依据。

3.3 风险优先级排序方法

通过风险矩阵法给识别出的风险划分优先级,这个方法清晰明了、实操性强,贴合软件测试项目的风险管控,将风险发生概率作为横轴,风险影响程度作纵轴,搭建3×3风险矩阵,把横轴和纵轴全部分为3个等级:高、中、低,划分9个象限,归属于高概率—高影响象限的风险是最高优先级,需及时落实防控措施,防控风险爆发;落在高概率—低影响或低概率—高影响象限的风险,归为中优先级,需打造针对性防控方案并全程监控;低概率—低影响象限内的风险归为低优

表1 软件测试风险分类及特征表

风险类别	识别指标	指标说明
需求类风险	需求文档完整性、需求变更频率、需求理解偏差率	需求文档完整性指核心需求描述的全面程度;需求变更频率指测试阶段需求变更的次数;需求理解偏差率指测试人员与需求方对需求理解不一致的比例
技术类风险	测试环境搭建成功率、测试工具适配度、技术人员技能匹配度	测试环境搭建成功率指按要求完成测试环境搭建的比例;测试工具适配度指测试工具与被测软件的兼容程度;技术人员技能匹配度指测试人员具备的技能与测试需求的契合程度
资源类风险	人力资源缺口率、设备资源利用率、测试时间冗余度	人力资源缺口率指实际所需测试人员与现有人员的差值占比;设备资源利用率指测试设备的实际使用时长与可用时长的比例;测试时间冗余度指计划测试时间与预估最短测试时间的差值占比
管理类风险	测试计划完备率、跨部门沟通效率、缺陷修复及时率	测试计划完备率指测试计划中包含的关键要素(目标、范围、流程等)的完整程度;跨部门沟通效率指不同部门间信息传递与问题解决的平均时间;缺陷修复及时率指在规定时间内完成修复的缺陷占比

先级,可归入常规风险管理,降低防控资源浪费,为提升排序精准性,可结合项目核心目标微调风险矩阵。就时间敏感型项目而言,可适度上调“影响测试周期”类风险的权重,把防控资源都集中投去应对关键风险。

4 软件测试风险防控机制设计

4.1 风险防控机制总体框架

构建“事前预防—事中控制—事后改进”的全流程风险防控整体框架,事前预防阶段主打风险识别和评估,构建完备的识别体系与评估模型,先期识别潜在隐患,拟定预防办法;事中控制阶段核心推进风险动态监控和预警,实时跟进风险变动,即刻启动防控措施,制止风险扩散;事后改进阶段对风险防控效果做总结评估,总结经验教训,优化风险识别指标及防控方案,搭建风险管理闭环。

4.2 分阶段风险防控策略

围绕软件测试全流程各阶段核心任务和风险特征展开,制定分阶段风险防控举措,做到精准防控。测试计划阶段重点管控需求类风险与管理类风险,加大需求调研力度、召开多轮需求评审会、启用需求追溯矩阵,落实清晰明确的需求;同步优化测试计划,厘清各环节责任、资源配置与时间节点,防止计划缺漏。测试设计阶段紧盯技术类风险,提前检测测试工具和环境的适配程度,开展技术预研和可行性验证,给复杂测试场景配套专项技术方案;同步开展技术培训强化人员能力,把控测试设计质量,测试执行阶段重点管控资源类风险与缺陷管理风险,构建资源动态调配机制,结合测试进度和问题反馈调整人力、设备资源;规范缺陷提交、评审、修复与回归测试的操作流程,明确缺陷修复先后等级,杜绝缺陷积压;测试总结阶段对全流程风险防控效果做全面评估,总结经验教训,升级风险识别指标库与防控策略库,构建风险管理闭环,为后续项目筑牢基础^[4]。

4.3 典型风险针对性防控措施

聚焦不同类型的典型风险,定制专属防控办法,应对需求频繁变更风险,构建需求变更管控流程,理清变更审批权限和流程,评估变动对测试工作的作用;针对测试环境搭建困难风险,提前梳理测试环境需求,构建通用测试环境模板,安排专业技术人员承担环境搭建和维护工作;聚焦人力资源缺口风险,预先落实人员安排,构建内部人员培训和外部人员储备体系;应对沟通协调不畅风险,制定定期沟通会议制度,构建跨部门信息共享平台,保证信息传递无阻。

4.4 风险动态监控与预警体系

构建风险动态监控指标体系,围绕风险识别指标敲定关键监控点,实时汇聚各风险识别指标的相关数据,如需求变更次数、测试环境故障频率、缺陷修复时长等,通过风险评估模型实时核算各风险的综合风险值,出具风险动态监控报表,设定分级风险预警临界值,按风险等级划定一级(高风险)、二级(中风险)、三级(低风险)预警阈值,某一风险的综合风险值触及对应预警阈值时,自动启动预警机制,以邮件、短信、项目管理平台弹窗等多种方式告知相关责任人。责任人收到预警后,要按要求时限分析风险变化原因,高风险 2 小时内完成,中风险 12 小时内完成,调整防控举措报送处理进展,每周按期召开风险复盘会议,总结监控和预警实绩,优化监控指标、预警阈值及防控手段,增强风险管控的及时性、有效性和适应性^[5]。

5 结束语

软件测试风险管控是筑牢软件质量、提升研发效率的关键,也是适配新型研发模式的核心依托。本研究构建软件测试风险识别体系、风险评估模型、全流程风险防控机制,形成一套科学全面的软件测试风险管控方案。该方案明确了风险识别的具体指标和方法,实现风险精准评估及优先级排序,制定全流程分阶段防控策略和动态监控预警机制,可有效提高软件测试风险识别的全面性和评估的精准度,增强风险防控的针对性与及时性,协助企业解决测试周期延误、成本超支等问题。未来可进一步引入人工智能、大数据等技术,依托历史测试数据分析,提前识别风险并做智能评估;强化跨行业、跨项目的风险管控经验共享,推出标准化风险管控指引,为不同类型软件项目制定更匹配的风险管控方案,全面提升软件测试风险管理能力。

参考文献:

- [1] 周逸宁,池志杰.对软件项目管理里及风险评估的研究与探讨[J].网络安全技术与应用,2022(02):63-64.
- [2] 赵中芳,汪亦伦,苗森,等.一种软件需求变化的测试风险识别方法及装置:CN202310572602.3[P].2023-08-22.
- [3] 许晓飞,李昊.软件测试过程风险分析与预防探讨[J].现代通信技术,2021(01):25-27.
- [4] 段继鑫.嵌入式软件回归测试的风险控制策略研究[J].电子通信与计算机科学,2024,06(06):124-126.
- [5] 甘晨.探析软件工程中软件测试的重要性[J].数字化用户,2019,25(12):99.

结晶器振动参数对铸坯表面质量影响

李明新

(唐钢国际工程技术有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要 连铸坯表面质量直接决定产品合格率与生产效率, 结晶器振动参数是调控该质量的核心因素, 为消解参数匹配失当诱发的振痕、裂纹等缺陷, 针对 250 mm×280 mm 大方坯、覆盖高中低碳钢, 依托控制变量法布设多组振动参数试验, 整合热酸洗、超声波探伤等评价手段, 高碳钢适配正弦振动(频率 137~147 min⁻¹、NSR37%), 中低碳钢选用非正弦振动(偏斜率 0.1), 对应轧材探伤合格率可提升至 93.61%, 该参数优化方案旨在为连铸生产提质增效提供参考。

关键词 结晶器振动参数; 铸坯表面质量; 参数优化; 连铸生产; 缺陷控制

中图分类号: TG23

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.002

0 引言

结晶器振动作为连铸生产核心环节, 其参数直接影响铸坯脱模、润滑效果及表面缺陷生成。当前高效连铸对铸坯质量诉求持续攀升, 振动参数与钢种、拉速适配度不足, 常引发振痕加剧、裂纹等问题。立足绿色高效发展理念, 精准调控振幅、频率、负滑率等参数, 结合不同钢种凝固特性优化振动形式, 可从根源改善铸坯表面质量。依托试验数据揭示参数影响机理, 建立分钢种参数适配体系, 为连铸工艺优化提供实践指导。

1 结晶器振动原理及主要振动参数

1.1 结晶器振动的基本原理

结晶器振动通过周期性往复运动协调铸坯脱模与润滑作用, 为铸坯稳定凝固提供保障。振动过程中结晶器与凝固坯壳产生相对运动, 负滑脱阶段结晶器下振速度高于拉坯速度, 对坯壳施加压应力, 促进拉裂部位愈合并抑制振痕加剧; 正滑脱阶段结晶器上振速度低于拉坯速度, 形成的负压有利于保护渣流入间隙, 形成均匀液态渣膜, 降低坯壳与结晶器壁摩擦阻力, 规避粘连漏钢^[1]。正弦振动依托偏心轮驱动, 运动平稳、设备磨损小; 非正弦振动通过波形偏斜率调节运动轨迹, 控制负滑脱与正滑脱时间, 更适配高拉速生产, 两种振动形式可兼顾坯壳愈合、脱模效率与表面质量。

1.2 主要振动参数及其物理意义

振幅是结晶器振动的最大位移幅度, 直接决定液面波动程度与坯壳受力状态。针对 250 mm×280 mm 大方坯, 合理振幅可有效控制液面波动, 降低坯壳拉裂

风险, 并在高频率配合下将振痕深度控制在理想范围, 其取值需与铸坯断面相匹配, 大方坯生产中通常依据振程与拉速的比例关系设定^[2]。振动频率是单位时间内的振动周期数, 与拉速密切相关, 其计算公式为 $f=C_3+C_4 \times V_c$, 其中 C_3 为振频常数、 C_4 为振频系数。低碳钢拉速 2.0 m/min 时, 频率 150 min⁻¹ 配合 ± 4.0 mm 振幅可优化表面质量。负滑率包括速度负滑脱率(NS) 和时间负滑脱率(NSR), NS 一般取 30%~40%, NSR 在 37% 左右可保证有效脱模, 高碳钢中将 NSR 由 39% 调整至 37% 后, 铸坯表面裂纹明显消除, 轧材探伤合格率显著提升。

2 试验条件与研究方法

2.1 连铸机及工艺条件

试验采用 250 mm×280 mm 断面大方坯连铸机, 结晶器振动系统由镗目厂家提供, 采用电液伺服驱动模式, 其核心驱动装置结构如图 1 所示, 包含伺服电机、差动调节装置及振动发生装置, 可实现正弦与非正弦两种振动形式切换, 振幅调节范围 0~10 mm, 振动频率 0~400 c.p.m, 偏斜率 0~40%, 满足多工艺参数组合试验需求。在连铸过程中, 钢水经中间包通过浸入式水口注入结晶器, 结晶器有效长度 700 mm, 二冷区采用喷淋冷却方式, 冷却水量根据钢种调整。试验涵盖高碳钢(含 C 量 > 0.55%)、中碳钢(0.25 < C < 0.55%)、低碳钢(C < 0.25%) 三类钢种, 高碳钢工艺拉速 0.62 m/min, 中碳钢 0.70 m/min, 低碳钢 0.74 m/min, 保护渣选用适配各钢种的低黏度类型, 黏度控制在 0.15±0.05 Pa·s, 确保振动过程中润滑效果稳定。

作者简介: 李明新(1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 钢铁冶金。

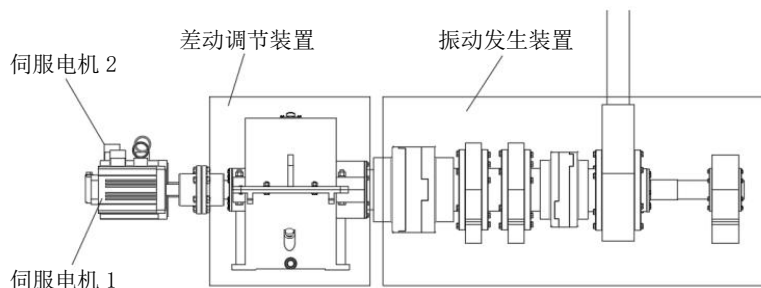


图 1 结晶器非正弦振动伺服驱动装置结构示意图

2.2 振动参数设置及试验方案

试验采用控制变量法, 依托振动参数设计理论, 围绕振幅、振动频率、负滑率、波形偏斜率四大核心参数构建多组试验方案。高碳钢采用正弦振动模式, 设置两组参数方案, 原工艺参数为 $C1=6$ 、 $C2=0$ 、 $C3=170$ 、 $C4=-15$ 、 $P=0.1$, 试验参数调整为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0$ 。中碳钢和低碳钢采用非正弦振动模式, 各设置三组方案, 原工艺参数 $C1=6$ 、 $C2=0$ 、 $C3=210$ 、 $C4=-15$ 、 $P=0.15$, 试验参数 1 为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0$, 试验参数 2 为 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 、 $P=0.1$ 。每组方案下连续浇注并截取 350 mm 长铸坯试样, 改变拉速与振动参数的匹配关系, 探究不同工艺条件下参数优化方向, 所有试验在相同浇注温度、冷却强度及保护渣加入量条件下开展, 保障变量单一性。

2.3 铸坯表面质量评价方法

铸坯表面质量评价采用宏观观察与微观检测相结合的方式, 对截取的 350 mm 长试样进行热酸洗处理, 去除表面氧化皮后借助高分辨率工业相机拍摄铸坯四个面的表面形貌, 测量振痕宽度、深度及间距, 统计角部横向裂纹、振沟等缺陷的数量及尺寸^[3]。针对浅皮下裂纹缺陷采用线切割方式对铸坯进行纵向剖分, 打磨抛光后观察皮下 2~5 mm 范围内的缺陷分布情况, 将试验铸坯进行轧制加工, 采用超声波探伤技术检测轧材黑皮表面缺陷, 统计一次合格率, 量化振动参数对最终产品质量的影响, 建立振痕深度、裂纹发生率、探伤合格率与振动参数的关联模型, 综合评价不同参数组合的优劣, 为参数优化提供量化依据。

3 结晶器振动参数对铸坯表面质量的影响

3.1 振幅对铸坯表面质量的影响

振幅改变结晶器液面波动幅度和坯壳受力状态, 直接影响铸坯表面平滑度与裂纹发生率, 较小振幅能有效抑制液面波动, 减少钢液卷渣风险, 让坯壳凝固过程更稳定, 铸坯表面振痕更浅且均匀, 同时降低坯壳拉裂可能性, 尤其适配高频率振动组合。针对 250 mm×

280 mm 大方坯, 振幅从原工艺较大值调整为适配值时, 铸坯角部振沟超深问题得到明显改善, 裂纹深度从 15 mm 以上降至无明显可见裂纹。振幅并非越小越好, 振幅不足会导致保护渣卷入量减少, 润滑效果下降, 坯壳与结晶器壁摩擦阻力增大, 反而引发粘连或浅皮下裂纹。不同钢种对振幅适配性存在差异, 高碳钢采用正弦振动时振幅需精准匹配拉速 0.62 m/min, 中低碳钢采用非正弦振动时振幅与波形偏斜率协同调整, 结合各自凝固特性与工艺需求, 才能实现表面质量最优。

3.2 振动频率对铸坯表面质量的影响

振动频率与振痕间距及坯壳愈合效率密切相关, 需遵循与拉速的动态匹配规律。高频率振动配合小振幅是改善铸坯表面质量的关键, 频率升高可细化振痕间距、减小振痕深度, 并缩短负滑脱时间, 避免振痕过度加深, 尤其适用于高拉速生产。低碳钢在拉速 2.0 m/min 时, 频率 150 min^{-1} 可将振痕深度控制在理想范围; 当频率低于 130 min^{-1} 时, 负滑脱时间变化陡峭, 振痕明显加深, 而频率高于 240 min^{-1} 后, 设备冲击负荷增大。高碳钢在拉速 0.62 m/min 条件下, 将频率调整至 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$, 可消除表面振纹重叠并显著提升探伤合格率。频率应通过公式 $f=C3+C4 \times V_c$ 精确计算, 并与钢种特性和设备承载能力协同匹配, 避免频率过高或过低引发新的表面缺陷。

3.3 负滑率对铸坯表面质量的影响

负滑率是平衡脱模效果与铸坯表面质量的核心参数, 其取值直接影响坯壳愈合程度与振痕深度。速度负滑脱率控制在 30%~40% 时, 结晶器下振最大速度与拉坯速度差值适宜, 既可提供足够压应力促进坯壳拉裂部位愈合, 又能避免振痕加深。时间负滑脱率 (NSR) 的影响更为显著, 高碳钢中将 NSR 由 39% 调整至 37%, 并配合负滑脱时间 0.16~0.18 s, 可使角部横向裂纹消除; 中碳钢在 NSR 约 37% 时表面振痕最为规整, NSR 超过 41% 振痕加深, 低于 36% 则脱模效果减弱, 易出现粘连。负滑率还与铸坯断面尺寸相关, 大方坯需适当提高负滑脱时间至 0.14~0.20 s, 小断面铸坯则应

控制负滑率在较低水平,以避免振痕过度积累。

3.4 振动参数综合影响分析

铸坯表面质量并非由单一参数决定,而是振幅、频率、负滑率及振动形式协同作用的结果,参数组合需遵循“高频率、小振幅、合理负滑率”的原则。高碳钢采用正弦振动,搭配适宜振幅、频率 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$ 、NSR 37%,表面探伤合格率由58.6%提升至93.61%。中低碳钢采用非正弦振动,波形偏斜率0.1、振幅 $\pm 4.0 \text{ mm}$ 、

频率 150 min^{-1} ,可同时满足脱模与润滑需求,使振痕深度和裂纹发生率显著降低。拉速作为重要关联因素,与振动参数形成动态匹配关系,拉速提高时需适当降低频率、增大振幅和非正弦振动因子,确保负滑脱时间稳定在 $0.16 \sim 0.18 \text{ s}$ 、正滑脱时间大于 0.24 s ,维持保护渣消耗与坯壳愈合的动态平衡。不合理的参数组合易引发连锁缺陷,参数协同优化后铸坯表面质量指标显著改善,具体对比结果如表1所示。

表1 振动参数优化前后铸坯质量对比表

钢种	评价指标	原参数状态	优化后状态	提升 / 改善幅度
高碳钢	轧材黑皮表面探伤合格率	58.60%	93.61%	提升 35.01%
高碳钢	角部裂纹深度 (mm)	> 15	无明显可见裂纹	完全消除
中碳钢	振痕深度 (mm)	较深 (无量化值)	较浅 (无量化值)	显著变浅
低碳钢	浅皮下裂纹发生率	较高 (无量化值)	较低 (无量化值)	明显降低

4 振动参数影响机理分析及工程应用

4.1 振动参数影响铸坯表面质量的机理分析

振动参数通过调控结晶器与坯壳的相对运动、润滑条件及坯壳受力状态,从微观层面影响铸坯表面缺陷的形成与演化。振幅直接决定液面波动强度,适宜小振幅可避免钢液剧烈翻腾,减少卷渣与皮下夹杂,降低坯壳交变应力以抑制裂纹萌生;振幅过大则加剧液面波动,导致坯壳凝固不均,振沟加深并形成应力集中,最终发展为横向裂纹^[4]。振动频率通过改变负滑脱时间和振痕形成周期起效,高频率振动可缩短负滑脱时间、减浅振痕,并促进保护渣均匀分布形成致密渣膜,降低摩擦阻力;低频率则易导致振痕过深和润滑失效。负滑率用于平衡脱模与坯壳愈合,合理取值可促进拉裂部位愈合并避免振痕加深^[5]。非正弦振动通过偏斜率调整运动轨迹,延长正滑脱时间、缩短负滑脱时间,从而减轻振痕并抑制缺陷产生。

4.2 工程应用与参数优化建议

基于试验结果与机理分析,工程应用中需针对不同钢种、铸坯断面和拉速,建立振动参数的精准匹配体系。高碳钢优先采用正弦振动模式,推荐拉速 0.62 m/min 、频率 $137 \sim 147 \text{ min}^{-1}$ 、负滑脱时间 $0.16 \sim 0.18 \text{ s}$ 、NSR 37%,以保证坯壳愈合与表面平滑。中碳钢和低碳钢采用非正弦振动,拉速分别为 0.70 m/min 和 0.74 m/min ,选用 $C1=5.2$ 、 $C2=0$ 、 $C3=60$ 、 $C4=124$ 的基础参数,中碳钢偏斜率取0.1,低碳钢配合振幅 $\pm 4.0 \text{ mm}$ 、频率 150 min^{-1} 。参数优化需遵循动态调整原则,拉速每提升 0.1 m/min ,频率降低 $5 \sim 10 \text{ min}^{-1}$ 、振幅增大 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 、非正弦振动因子增加 $0.02 \sim 0.03$,维持负滑

脱时间 $0.14 \sim 0.20 \text{ s}$ 。生产中应通过热酸洗和超声波探伤监测质量,当探伤合格率低于90%时优先调整负滑率和频率;针对 $250 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 大方坯,应重点优化角部振动参数,并配合二冷强度调整,实现表面缺陷有效控制。

5 结束语

结晶器振动参数的合理匹配是保障铸坯表面质量的关键。振幅、频率、负滑率及振动形式的协同优化,能有效抑制振痕、裂纹等缺陷,精准适配不同钢种的凝固特性。高碳钢适配正弦振动,中低碳钢采用非正弦振动,结合拉速动态调整参数,可显著提升铸坯表面平整度与探伤合格率。相关机理分析与工程优化建议,为连铸生产提供了精准的参数适配方案,对推动连铸工艺提质增效、降低生产成本具有重要的实践价值,也为高效连铸技术发展提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 郭银涛,贾丽慧.常规板坯低碳钢高拉速连铸用结晶器振动的分析与应用[J].连铸,2025,44(03):114-122.
- [2] 吴晨光.新型连铸结晶器振动驱动装置的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2024.
- [3] 张坤.连铸结晶器振动参数控制系统开发[D].沈阳:东北大学,2022.
- [4] 王海达,陈列,董贵文,等.结晶器振动参数对连铸坯表面质量的影响[J].特钢技术,2022,28(01):15-18.
- [5] 刘建洋.连铸结晶器振动工艺参数比较与分析[J].铸造技术,2021,42(11):976-978.

自动焊接小车结构与运动学仿真

苑留堂

(南京合信自动化有限公司, 江苏 南京 210007)

摘要 船体合拢焊接是船体制造的关键工序, 其焊接成型需由多层多道焊接完成, 传统人工焊接模式存在焊缝质量不稳定、效率低下、劳动强度大等问题, 难以适配规模化生产需求。本文基于船体合拢焊接工艺特性, 先分析其功能需求, 再完成自动焊接小车整体结构设计及关键子系统选型, 构建工作站运动学模型并开展仿真分析。研究表明, 所设计的自动焊接小车通过合理的结构布局与精准的运动控制, 可实现船体合拢焊缝自动多层多道焊接作业, 显著提升焊缝质量一致性与焊接效率, 为船舶行业自动化焊接提供技术支撑。

关键词 多层多道焊; 自动焊接小车; 仿真分析

中图分类号: TG43; TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.003

0 引言

随着船舶订单承接量急剧增大, 对各个造船企业的产能需求越来越高, 对各船厂的生产率提出了极大的挑战。而大部分船舶企业的焊接工作仍然是手工完成, 使得很多焊接人员不得不加班加点, 这样一来不但给操作人员带来了极大的工作负荷, 也间接影响了焊接过程质量。自动化焊接设备的研发, 有效补充了焊接操作人员的不足。自动化焊接设备焊接稳定性高, 避免了人工操作的不稳定因素, 使得焊接缺陷、报废率大大降低, 有效地避免了材料、能源的浪费以及返工、返修的时间成本, 显著提高企业的市场竞争力^[1]。

1 自动焊接小车需求分析

1.1 船体合拢焊接工艺分析

船体大合拢焊缝就是各分段或总段在船台上进行合拢后形成的焊缝, 当前在船体合拢时采用人工焊接^[2]。船体采用中厚钢板焊接成型, 合拢焊缝是多层多道焊接焊缝, 其焊接成型质量直接影响到船体结构强度。该焊缝在焊接工艺中进行了严格要求, 作业时减少接缝的内应力, 防止气孔、咬边、夹渣、未焊透、裂缝等缺陷的产生, 确保大合拢基准线不偏移, 船体合拢焊缝焊后不引起船体变形^[3]。船体合拢焊缝焊接工艺要求: 焊接方法选用熔化极气体保护焊(MAG焊), 保护气体采用 Ar+CO₂ 混合气体(比例 80:20); 多层多道焊接; 焊枪摆动角度: -90° ~ 90°; 焊接速度保持在 300 ~ 400 mm/min; 焊接电流控制在 280 ~ 320 A。

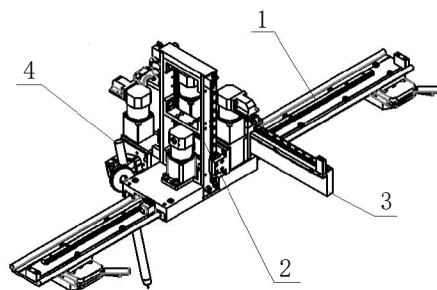
1.2 船体合拢焊接小车设计需求

船体合拢自动焊接小车基本技术要求: X 向运动范围: 0 ~ 8 500 mm; Y 向运动范围: 0 ~ 320 mm; Z 向运动范围: 0 ~ 190 mm; 焊枪旋转角度: -90° ~ 90°; 适应坡口: 对接单 V 型; 焊接形式: 多层多道自动焊接。为了实现多层多道焊接, 需要进行焊接小车底架组件设计、上下移动组件设计、水平移动组件设计、焊枪夹持设计及摆动组件设计。

2 自动焊接小车结构设计

2.1 机械结构设计

该自动焊接小车设计总体三维模型如图 1 所示。



1. 底架组件; 2. 上下移动组件;
3. 水平移动组件; 4. 焊枪夹持及摆动组件

图 1 自动焊接小车示意图

2.2 底架组件

底架组件主要用于焊接小车的承载以及滑动, 底架组件由磁性开关、齿轮齿条、行走电机以及导轨滑

作者简介: 苑留堂(1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程。

块组成。底座采用双导轨进行准确导向, 齿轮齿条与直流无刷电机进行精确步距控制, 整个齿条与导轨安装座的固定方式非常便携, 采用多支点磁铁吸附形式固定, 以便吸附在钢板上行走进行重直角焊缝的焊接。

该自动焊接小车的移动行走是由行走电机驱动齿轮齿条来完成的, 其中行走电机减速机的选型如下。

2.2.1 机械结构参数

机械机构参数如表1所示。

表1 行走电机减速机机械结构参数

机械结构参数	参数值
负载质量	$M=20 \text{ kg}$
负载运动速度	$V_0=18 \text{ m/min}$
齿轮模数	$m=1.5$
齿数	$z=15$
齿轮质量	$m_0=0.05 \text{ kg}$
启动加速度	$a=0.5 \text{ m/s}^2$
重力加速度	$g=9.8 \text{ m/s}^2$
π	$\pi=3.1416$
摩擦系数	$\mu=0.1$

2.2.2 电机减速机选型

选定直流无刷电机型号为: M3640-S24; 参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=20$, 机械效率 $\eta=0.9$; 折算到电机轴上的转矩 $T=0.018 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩} 0.027 \text{ Nm}$, 该电机选型满足使用要求。

2.3 上下移动组件

上下移动组件可用于调节焊接小车焊枪以及水平移动组件的高度。上下移动组件由直流无刷电机、齿轮齿条、导轨滑块以及架体等组成。直流无刷电机带动齿轮齿条啮合, 经导轨滑块准确的实现机构的上下移动功能。

直流无刷电机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=18 \text{ kg}$, 负载运动速度 $V_0=1.8 \text{ m/min}$ 。(2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24; 参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=400$, 机械效率 $\eta=0.9$, 安全系数 $S=2$ 。折算到电机轴上的转矩 $T=0.0236 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩} 0.027 \text{ Nm}$, 该电机选型满足使用要求。

2.4 水平移动组件

水平移动组件由水平移栽电机、水平导轨滑块、齿轮齿条等组成。直流电机带动齿轮齿条啮合, 通过导轨滑块的准确导向进行水平移栽, 可以设定焊枪夹

持组件的高度, 从而达到自动焊接小车的多层多道横焊的效果。

水平移栽电机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=11 \text{ kg}$, 负载运动速度 $V_0=18 \text{ m/min}$; (2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24。参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=40$, 机械效率 $\eta=0.9$, 安全系数 $S=2$; 折算到电机轴上的转矩 $T=0.021 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机的额定转矩} 0.027 \text{ Nm}$, 该电机选型满足使用要求。

2.5 焊枪夹持及摆动组件

焊枪夹持组件由直流无刷电机驱动夹持组件进行需要角度的旋转调整, 夹持组件夹紧或松开调整焊枪, 使得焊枪以最佳的姿态进行焊接。

电机减速机的参数如下: (1) 机械结构参数: 负载质量 $M=2 \text{ kg}$, 摆动速度 $v=6 \sim 5000 \text{ mm/min}$; (2) 电机减速机选型: 选定直流无刷电机型号为: M3640-S24。参数为: 电压24 V, 额定转矩0.027 Nm, 额定转速5 190 rpm, 额定功率14.9 W。取传动比 $i=1000$, 机械效率 $\eta=0.9$, 安全系数 $S=2$ 。其中, 传动比 $i=40$, 机械效率 $\eta=0.9$, 安全系数 $S=2$ 。折算到电机轴上的转矩 $T=0.009 \text{ Nm} < \text{直流无刷电机额定转矩} 0.027 \text{ Nm}$ 。该电机选型满足使用要求。

该焊接小车在进行多层多道焊接时, 焊枪需实时调整焊接位置, 即焊枪需能实现前后与左右方向行走, 且位置移动的精确性需有一定保证, 设计中采用了高精度直流无刷电机配合两级减速实现高减速比传动, 一级为行星减速, 二级为带自锁的蜗轮蜗杆减速, 传动精度提高, 该种形式的行走驱动方式稳定可靠。

3 自动焊接小车运动学仿真

3.1 运动学仿真

3.1.1 自动焊接小车运动学的建立

1. 模型层次划分及关系建立。根据装配好的自动焊接小车三维模型, 将设计模型按照仿真思维进行结构重构。将底层组建、上下移动件、水平移动件、焊枪夹持件、摆动件等进行模型重组, 并定义其层级关系。按照由底层到顶层的规划进行模型层次关联。

2. 运动副的建立。此焊接小车中存在两种运动副, 移动运动副及转动运动副。对于两个有相对转动的轴需要建立旋转副, 选择两个轴各自的回转轴线, 保证两个轴的轴线重合, 定义其转动关系及范围。当两个零件相对平移滑动时需要建立移动副, 选择两个零件平移相交的边线, 再选择与边线相连的两个面, 进行驱动长度的确定。

3.1.2 运动学仿真

当所有运动副的连接关系建立后,可以通过运动学仿真模块以及位姿姿态设置功能进行焊接小车的各个运动关节的运动学仿真,验证其在规划的运动行程中是否发生零件脱节、干涉等现象发生,通过运动学中设置的焊接小车旋转角度和移动范围,可以验证其可达性等性能。

当小车的运动学仿真建立完毕后,通过焊接小车的功能需求定义,配置不同的焊枪,实现焊接小车的动态仿真整体效果,可以清晰地显示不同运动模块的划分、机构的关联关系。通过以上的仿真设置,可以实现焊接小车空载状态下全部行程的仿真操作,通过每个自由度的调节,运动副参数的调整,可以实现全范围下的焊接小车动作示意,使得三维建模软件中的静态的模型成为可以自由运转的设备动态模型。

3.1.3 焊接过程仿真验证

通过焊接环境布局,自动焊接小车运动学设置,焊接工艺参数设置等,完成自动焊接小车的焊接过程仿真基础布置。然后结合焊接小车焊接过程,建立对应的智能组建以及过程操作,将这些焊接过程操作进行联动,以实现完整的焊接过程仿真。

3.2 仿真运动轨迹范围可视化

在自动化焊接小车仿真规划中,切合实际生产的运动轨迹能够更加有效、正确地指导自动化小车的作业,通过对自动焊接小车的仿真,着重观察自动焊接小车的可达性^[4]。

设计规划中的 X 方向可以沿导轨方向一直运行,直至设定的导轨长度尺寸,针对特殊大型焊接件,可以通过延长导轨长度以实现一次性焊接成型。对于自动焊接小车在 Y 方向的可达性,可以通过伺服电机以及螺杆进行调节,焊接小车在 Z 方向的驱动范围直接决定了焊枪对于焊缝的直接可达性,可以通过螺杆进行上下调节焊枪的高度,以及转动夹持机构进行焊枪角度的调整。

仿真结果如下: X 向运动范围: 0 ~ 8 500 mm; Y 向运动范围: 0 ~ 320 mm; Z 向运动范围: 0 ~ 190 mm; 焊枪旋转角度: $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

通过运动学仿真,可以验证小车的运动范围满足要求,与理论设计值吻合,满足多层多道自动焊接小车运行所需尺寸范围。

3.3 干涉检查及分析

在自动化焊接小车的装配过程仿真以及焊接作业仿真中,其可达性、可行性、合理性的判别标准主要

取决于焊接小车装配及作业过程中的干涉检查结果。通常的干涉检查分为两类:一类为静态干涉检查,另一类为动态干涉检查。静态干涉检查主要用于判断机械结构的可装配性,是否发生空间重用等现象,可以有效地发现零件设计不合理现象^[5]。

动态干涉检查包括对自动化焊接小车工作状态的过程检查,如果在自动化焊接小车焊接过程中,存在焊枪与工件、车间生产资源等其他物品发生干涉,则干涉零件会高亮(默认红色)显示并且停止仿真运动。

通过对机构干涉情况的分析,对相关零件、部件设计结构进行调整,或者对安装工艺进行优化等,确保机构能够正常有效的运行。

当发生焊枪无法按照工艺设定的焊缝进行有效焊接的时候,根据软件中设计的报警装置,可以使得焊接小车停止焊接运动并反馈显示出焊枪距离工件的间隙尺寸,使工作人员能够更便捷有效地进行焊接工作的调整。

4 结束语

本文主要结合船体大合拢横焊缝焊接需求,对船体合拢自动焊接小车进行结构与仿真。该自动焊接小车可实现多层多道焊缝的自动化焊接,设计中采用了直流无刷电机、高精度行星减速机实现其动力驱动,性能稳定。应用仿真软件 Process Simulate 进行自动化焊接小车的仿真环境构建,实现自动焊接小车的三维装配仿真,验证其装配序列干涉性。继而通过各个运动轴的运动副设置,对设计的机械机构进行运动学仿真,对其进行可视化仿真验证,并关联其相关的三维零件、装配资源等模型,进行焊接工艺参数设置,实现焊接过程仿真验证,完成三维装配过程的可视化输出。完成了自动化焊接设备的虚拟现实应用技术的突破,为实现智能数字化工厂提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 李宪政.国内焊接机器人应用的快速发展及认识误区[J].焊接,2019(04):5-15,65.
- [2] 张沈.船体分段吊装作业典型运动过程分析及仿真研究[D].大连:大连理工大学,2020.
- [3] 郑志军.船体分段装配过程的现场可视化应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [4] 张帆.船体分段吊装工艺设计系统关键技术研究与应用[D].大连:大连理工大学,2022.
- [5] 徐振宇.动态任务需求下船体分段制造的物流集成调度研究[D].上海:上海海事大学,2023.

高强钢船用零部件精密锻造变形规律及应用

宫兆岩, 黄建波, 宫兆森*

(青岛布林瑞特机械有限公司, 山东 即墨 266200)

摘要 高强钢船用零部件在海洋工程装备中占据着重要地位。精密锻造技术能够显著提升零部件的综合性能。通过系统研究高强钢材料在高温条件下的变形特性, 深入分析精密锻造过程中金属的具体流动行为, 建立温度、变形速度、模具摩擦等工艺参数对变形均匀性的影响规律模型。采用物理实验和数值模拟相结合的方法, 展示多因素耦合作用下材料变形的实际演化过程。基于上述一系列研究成果开展工程应用实践, 优化了船用典型零部件的锻造具体工艺参数, 显著改善了产品在实际生产中的变形均匀性, 有效提升了零部件最终呈现的成形质量, 旨在为高强钢船用零部件的精密锻造生产提供理论参考。

关键词 高强钢; 船用零部件; 精密锻造; 变形规律

中图分类号: U668; TG26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.004

0 引言

船舶工业朝着大型化以及高性能化的方向发展, 对船用零部件提出了更高的要求。高强钢材料凭借其优异的强度与韧性, 成为关键结构件的首选材料。传统锻造工艺存在变形不均匀和组织性能不稳定等问题, 难以满足高端船用零部件的性能需求。精密锻造技术通过精确控制成形过程实现材料的高效利用, 成为船用零部件制造的重要发展方向。当前对于高强钢精密锻造变形规律的研究相对分散, 缺乏系统性的理论指导。

1 高强钢精密锻造变形行为基础研究

1.1 高强钢材料高温变形特性

高强钢在高温环境中的变形行为有着显著的温度敏感性和应变速率依赖性特点, 它的流动应力会随着温度不断升高而逐渐降低。在 950 ~ 1 150 °C 这个温度区间, 高强钢的奥氏体组织会逐步出现软化情况, 晶界迁移速度会随着温度升高而不断加快, 启动动态再结晶过程。材料于热变形过程当中会引发动态回复以及动态再结晶这两种主要软化机制, 通过位错重排以及新晶粒的形核和长大过程来实现组织的完全更新^[1]。

1.2 船用零部件精密锻造变形过程分析

船用零部件在精密锻造时会经历复杂的三维塑性流动过程, 金属材料从坯料中心朝着模具型腔各个方向进行充填, 其流动路径会受到零件形状的限制。变

形初期阶段坯料与模具接触区域率先产生塑性变形。例如: 筋板交接处以及深腔部位这类难以充填的区域往往需要较大成形力才能完成充填, 这些位置容易出现充填不足或者折叠等工艺缺陷, 模具与坯料之间的摩擦作用对金属流动的阻碍效应十分显著^[2]。

2 精密锻造关键工艺参数对变形规律的影响

2.1 锻造温度对变形均匀性的影响规律

锻造温度是影响高强钢变形均匀性的关键工艺参数, 温度过低会致使材料塑性不足进而产生开裂倾向, 温度过高则容易引发晶粒粗化以及氧化脱碳等现象^[3]。在 900 ~ 1 000 °C 这个温度范围内, 材料的变形抗力比较大且金属流动困难, 容易在薄壁区域形成应变集中现象, 从而导致局部变形过度或不足问题。当温度提升到 1 050 ~ 1 100 °C 这个区间的时候, 材料流动性会显著改善且各区域应变分布趋于均匀化, 锻件内部组织会变得更加均匀细密, 温度场分布会受到模具预热温度、坯料初始温度以及变形过程中热量传递等多重因素影响^[4]。

2.2 变形速度对金属流动的影响规律

变形速度直接对金属流动动力学条件及微观组织演变路径起到决定性作用。低速变形条件下(应变速率小于 0.01 s⁻¹), 材料有充足的时间来进行动态再结晶过程, 金属流动处于平稳有序的状态。当变形速度提高到中等水平(应变速率 0.01 ~ 1 s⁻¹), 变形热效

作者简介: 宫兆岩(1980-), 男, 专科, 研究方向: 船舶与海洋工程装备配套技术。

***通信作者**: 宫兆森(1981-), 男, 专科, 副高级工程师, 研究方向: 船舶与海洋工程装备配套技术。E-mail: KXT-1231@163.com

应会逐渐显现，试样内部的温度会有所升高，此时动态再结晶与变形的竞争关系能达到最佳平衡状态。在高速变形时（应变速率大于 1 s^{-1} ），变形热积累会导

致局部温度急剧上升，如图 1 所示，不同变形速度下的等效应力分布存在显著差异，并且应力峰值位置发生明显偏移^[5]。

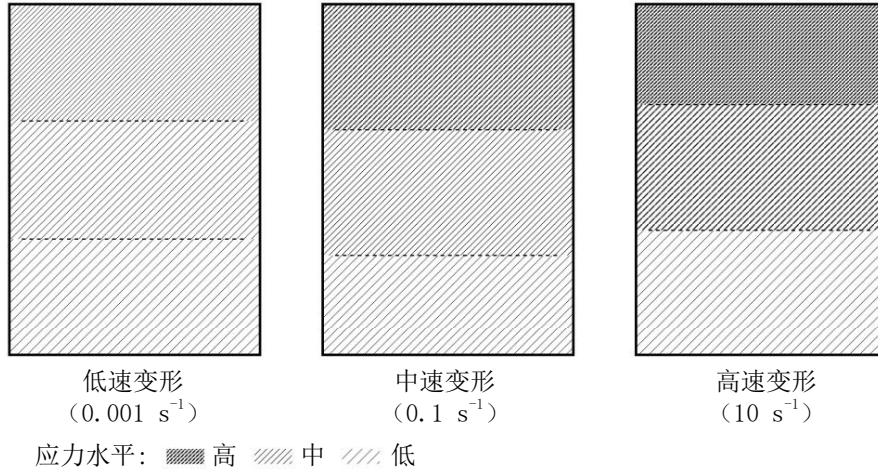


图 1 不同变形速度下锻件等效应力分布云图

2.3 模具摩擦对变形分布的影响规律

模具和坯料接触界面的摩擦状态对金属流动路径以及应力应变分布发挥着重要调控作用。摩擦力使接触区域金属流动受到阻碍进而形成难变形区，这会对锻件的质量产生影响。在高摩擦条件下（摩擦系数大于 0.3），坯料表层金属跟模具会发生粘着现象，该区域金属几乎不会流动而变形，主要集中在心部区域，表层与心部的应变差异十分明显。中等摩擦条件（摩擦系数 0.15 ~ 0.25）下，金属能够沿着模具表面产生一定程度的滑移，变形分布相对来说比较合理，既可以保证充型，又能避免过大的应变梯度。摩擦条件的控制通常是借助润滑剂的选择以及模具表面处理工艺来实现，其中石墨润滑剂的应用是最为广泛的。

2.4 多因素耦合作用下的变形演化规律

锻造的时候温度、变形速度以及摩擦条件同时作用于金属变形过程，这三者之间存在着复杂的相互影响与耦合关系，单因素优化很难获得最佳效果。温度升高会降低材料对变形速度的敏感性，同时改变摩擦界面的润滑状态，高温条件下润滑剂有效性下降，摩擦系数会相应增大。为综合评价多因素影响，引入变形均匀性系数进行定量分析：

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \quad (1)$$

式 (2) 中， η 为变形均匀性系数（无量纲）， n 为测量点总数， ε_i 为第 i 个测量点的等效应变， $\bar{\varepsilon}$ 为所有测量点等效应变的平均值。该系数值越接近 1 表示变

形分布越均匀、锻件质量越好，通过对不同工艺参数组合下的均匀性系数进行计算与比较，能够确定最优的工艺参数匹配方案。

3 变形规律在船用零部件精密锻造中的应用

3.1 变形规律指导下的工艺参数优化

根据前面研究得出的变形规律成果，为典型船用高强度钢零部件制定系统工艺参数优化方案，采用数值模拟和试验验证相结合的方法确定最佳工艺窗口。在优化过程中运用正交试验设计方法，研究温度、速度以及润滑条件之间的交互作用效应，得到各因素的显著性排序，明确主次影响关系。优化前后工艺参数的对比情况如表 1 所示，优化后零件的抗拉强度提高了 8%，延伸率提升了 12%，变形均匀性系数从 0.73 提高到 0.89，综合性能有了显著改善。

表 1 工艺参数优化前后对比

工艺参数	优化前	优化后	性能指标	优化前	优化后
锻造温度 / °C	1 050	1 100	抗拉强度 / MPa	850	918
变形速度 / (mm · s ⁻¹)	12	6	延伸率 / %	15	16.8
摩擦系数	0.30	0.20	均匀性系数	0.73	0.89

3.2 变形均匀性控制技术应用

变形均匀性控制技术的核心是通过合理工艺设计与过程调控，以此减小锻件内部应变梯度，实现组织

性能均匀分布。采用预锻—终锻两步成形工艺可有效改善金属流动状况，预锻阶段用较大变形量打破铸态组织，终锻阶段在较小压下量条件下完成锻件精确成形。变形过程监测系统能够实时采集压力机载荷曲线，及时发现异常变形情况并开展工艺调整工作，以此保证批量生产过程中产品质量的稳定性。局部加热技术对难变形区域进行补充加热，配合模具局部冷却技术对易过热区域作降温处理，实现温度场主动调控。

3.3 船用典型零部件锻造工艺应用案例

以某船用高强钢法兰类零件为研究对象来开展精密锻造工艺应用实践，此零件外径为450 mm且内径是

200 mm，高度达120 mm，其材料属于屈服强度690 MPa级别的高强度船用结构钢。采用优化之后的工艺参数将坯料加热温度控制在1 100 °C，把模具预热到380 °C并将变形速度设定为6 mm/s，图2所示为该零件锻造过程金属流线分布模拟结果，金属流线沿着零件轮廓呈现平滑流动状态，且法兰盘面区域与筒体连接部位应变分布均匀。实际生产结果显示锻件力学性能达到船用钢材技术规范要求。

3.4 基于变形规律的产品质量提升方法

产品质量的提升是建立在对变形规律深刻理解且精确控制基础之上的，通过构建工艺参数、变形行为

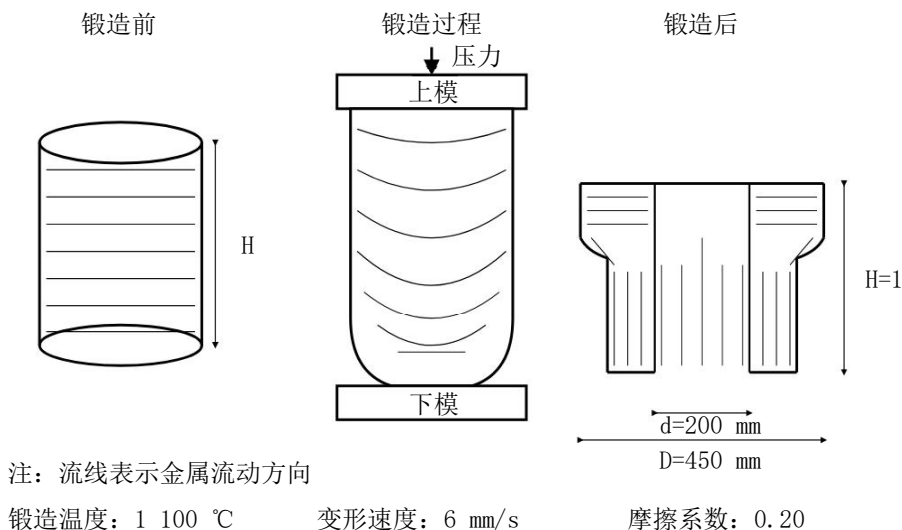


图2 船用法兰零件锻造金属流线分布图

与组织性能之间的关联模型来实现质量的预测与控制。开发基于有限元模拟的工艺设计平台，在实际投入生产之前对新产品的锻造过程开展虚拟试验，以此预测可能出现的缺陷类型以及具体位置。建立锻造过程数据库系统，记录不同产品在各种工艺条件下的变形特征以及质量指标，借助数据挖掘技术提取工艺知识，最终实现了产品合格率从85%提升至96%的显著改善效果。

4 结束语

高强钢船用零部件精密锻造变形规律研究获得系统性成果，建立了材料高温变形特性与锻造金属流动机制，明确了温度、变形速度、摩擦条件等工艺参数和变形均匀性定量关系。通过系统研究揭示了多因素耦合变形演化规律。工程应用实践表明，基于变形规律开发控制技术可有效改善零部件成形质量。后续研究应拓展到复杂形状零部件变形预测领域，开发智能

化工艺优化系统，推动高强钢船用零部件精密锻造技术数字化发展，为船舶工业提供有力的技术保障。

参考文献：

- [1] 曹睿,刘梓中. 高强钢焊缝金属强韧性研究进展 [J]. 金属学报, 2026,62(01):64-80.
- [2] 周雨婷,栾道成,樊华,等. 汽车用高强钢及其焊接研究进展 [J]. 焊接技术, 2025,54(10):1-6,145.
- [3] 梅晓雄. 锻造温度对25Cr2Ni4MoVCe 高强钢机械转子组织与性能的影响 [J]. 锻压技术, 2025,50(11):45-52.
- [4] 王作帅,左超,肖涵琛,等. 外部加压的某型船用钢铁磁腔体力磁耦合实验研究 [J]. 测试技术学报, 2025,39(03):284-290.
- [5] 张鹏,吴迪,翁羽,等. 高强度船用钢抗活性破片毁伤装甲防护试验 [J]. 中国舰船研究, 2024,19(S2):134-140.

K5B 型计算机连锁软件换装施工方法技术研究

赵伍洋

(中铁二十三局集团电务工程有限公司, 天津 300110)

摘要 针对 K5B 型计算机连锁软件版本碎片化、天窗紧张及数据一致性风险, 本文提出“预调试—现场切换—后验证”三阶段换装施工方法。该方法通过差异校验与增量迁移将数据错误率压至 1×10^{-4} 以下, 采用断点控制与灰度回退将现场切换窗口压缩至 120 min 并预留 20 min 回退裕量, 经接口—逻辑—性能三维验证实现响应时间 ≤ 150 ms、状态抖动 ≤ 20 ms。现场测试显示, 施工时长较传统流程缩短约 30%, 系统稳定性零越界, 以期为铁路信号软件在线升级提供可参考的工程范式。

关键词 K5B 型计算机连锁; 软件换装; 差异校验; 断点控制; 兼容性验证

中图分类号: TP31; U28

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.005

0 引言

铁路干线普遍部署的 K5B 型计算机连锁系统长期承担进路锁闭与信号控制任务, 随着操作系统停服、驱动停更及接口协议迭代, 版本碎片化带来的维护难度呈指数级放大^[1]。传统“整包替换”模式依赖超长天窗, 回退失败易中断行车, 难以适配密集运输需求。本研究立足于现场运维难点重构换装流程, 将风险前移到场外预调试, 细化数据迁移至条目级, 在各工艺环节嵌入兼容性验证, 形成可复制、可量化、可回退的技术路线, 为同类系统升级提供参考。

1 K5B 型计算机连锁软件换装施工的需求分析

K5B 型计算机连锁系统广泛应用于干线车站及编组站, 承担进路锁闭、信号机控制及现场设备状态监测等核心功能, 作为保障铁路运输安全高效的关键设备, 系统采用双机热备架构以提升运行可靠性, 控制循环周期约 50 ~ 100 ms, 可实现长期 7×24 h 连续稳定运行^[2]。早期版本因操作系统停服、驱动停更、板卡迭代致接口不兼容、协议栈差异及安全补丁难统一等问题日益突出, 版本碎片化现象加剧, 不仅增加了日常维护的人力与时间成本, 还显著提升了故障定位与排除的难度。软件换装需满足以下要求: 在短天窗或不停机条件下平稳完成版本替换与配置迁移, 最大程度减少对铁路运输生产的干扰; 换装时长严格控制在 120 分钟内, 并预留 20 ~ 30 分钟的应急回退时间以应对突发状况; 保障连锁逻辑与设备配置数据的高度一致性, 通过提前编制差异清单、执行双向校核流程及校验码比对等方式核查数据完整性; 采用灰度切换、主

备轮转等策略降低系统冲击, 同时兼顾相关周边设备的接口兼容性, 确保符合 EN 50129 界定的 SIL4 安全完整性等级标准。

2 K5B 型计算机连锁软件换装施工的关键方法设计

2.1 换装施工流程的优化设计

针对现行换装流程步骤叠加、跨工种交接不畅及天窗压缩导致的切换节奏紊乱问题, 将全流程拆解为预调试、现场切换、后验证三阶段。核心思路为前移关键风险、将现场动作压缩至可控窗口, 具体路径见图 1。预调试阶段开展全要素仿真, 构建与现场设备参数一致的模拟环境, 覆盖相关设备及 CTC 侧协议回放; 生成连锁数据库差异清单, 冻结配置基线并完成灰度包签名校验, 组织多专业联演, 固化步骤与回退点为可执行清单。现场切换阶段依托双机热备环境, 采用主备轮转及断点控制策略, 备机加载新版本并空载自检后, 小步递进接入单侧区段, 实时监测运行状态, 告警连发 3 次或关键测点超时超 200 ms 时触发回退, 全程控制在 120 分钟天窗内, 预留 20 ~ 30 分钟回退窗口。后验证阶段覆盖各相关层级, 开展功能、接口及性能检查, 通过自动化脚本生成记录, 归档指纹信息、形成可追溯工单, 更新运维相关文件, 实现换装闭环管理。

2.2 核心数据迁移方案的制定

在 K5B 型计算机连锁换装场景中, 核心数据具有高耦合与强时序特性, 连锁逻辑数据指向进路、道岔与信号之间的约束规则集合, 设备配置数据涵盖 I 或 O 映射、地址编码与阈值参数等工程化条目^[3]。针对旧版本差异累积、现场窗口紧张问题, 采用差异校验 +

作者简介: 赵伍洋 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 铁道信号。

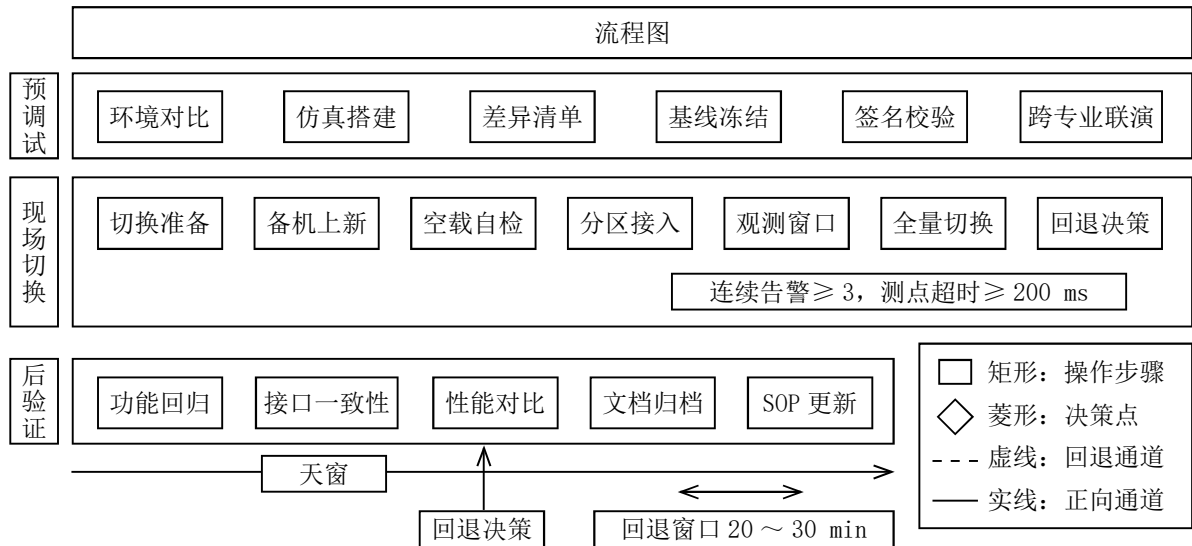


图1 K5B型计算机连锁软件换装优化流程图

增量迁移策略：固化旧库基线与新库目标模型，生成增量包并按依赖拓扑迁移，优先处理进路段以降低风险。迁移各环节嵌入质量约束，抽取阶段校核模式一致性，转换阶段采用语义规则哈希比对，加载阶段实施循环冗余校验码与双向回读校核，提前定位可恢复缺陷；将地址引用、设备资产编号与I/O通道绑定关系设为强约束字段，越界自动阻断导入。构建可复用工具链，通过自定义脚本执行提取转换加载，运行时生成差异清单、可回放日志，配合幂等开关实现无副作用重复执行。迁移前后生成版本指纹与数据包签名，工单固化校核口径、触发阈值及处置动作，表1所列校验项覆盖结构、语义等关键维度，以制度化工具与流程化执行，保障迁移一致性与完整性。

2.3 换装后系统兼容性验证方法

针对换装后K5B系统与存量现场设备以及调度侧应用之间的耦合关系，验证方法从接口、逻辑、一致性与性能四个维度展开^[4]。接口测试以道岔、电务I/O板卡等为对象，模拟现场实际运行中的电压波动与负载变化场景，采用真实电源与等效负载组合，核查电平、

极性关键参数及信号往返时延；逻辑测试围绕进路建立、信号机状态转换、锁闭解锁逻辑等核心功能细节，对照旧版本金标准进行场景重放，关注触发条件与执行结果的等价关系；上层应用测试面向CTC与ATS，验证报文编码格式与传输规则，监视会话重建过程与断点续传功能，确保数据交互的完整性与实时性；用例遵循边界优先与路径覆盖原则，纳入道岔异常转换、区段突发占用等极端场景，必测关键道岔节点与长距离闭塞区段；指标含响应时间、信号抖动、报文丢失率等，标准明确：单次响应 ≤ 150 ms、抖动 ≤ 20 ms、报文丢失率 $\leq 1e-4$ ；采用离线仿真预核、在线影子跟随、窗口期现场观察三段法分步实施，每阶段结束后进行阶段性评估与风险排查，依据阈值合规与事件无越界判定结果，保留回退条件、日志签名与工单闭环，控制兼容性风险。

3 K5B型计算机连锁软件换装施工方法的应用验证

3.1 现场测试方案的实施

在含12道到发场、28组道岔、36段轨道电路的中等规模车站，开展K5B型计算机连锁换装现场测试，

表1 K5B系统核心数据迁移校验结果对比表

校验项	比对对象	判定口径	结果字段	处置策略
结构一致性	模型定义与数据库结构	合法字段集合完全匹配	一致 不一致	中止并修正映射模板
语义一致性	进路逻辑与互锁条件	核心规则哈希相同	一致 不一致	回滚并标注差异清单
关联完整性	设备地址与I或O映射参照	外键引用无悬挂	通过 未通过	补录数据或修正绑定关系
值域与阈值	轨道电路参数与道岔阈值	落入工程红线范围	合规 越界	拒绝导入并触发会签流程
签名与版本	数据包签名与版本指纹	签名可验证且指纹匹配	可信 不可信	阻断加载并生成告警记录

含环境搭建、用例执行及异常处置。环境搭建采用测试与运营物理隔离，双机热备联锁服务器接入双交换机环网，VLAN 划分生产与测试平面，I/O 回路混接等效负载与现场继电器，CTC 及 ATS 由仿真终端注入业务报文，通过 PTP 或 NTP 统一对时，Syslog 集中采集日志。用例执行围绕列车运行工况，按上行到发、交叉通过、折返序列注入轨道占用与道岔位置反馈，观测进路及防护逻辑状态迁移，覆盖主备倒换等边界情形；计量指标为响应时间、状态抖动等，阈值明确为单次响应 ≤ 150 ms、抖动 ≤ 20 ms、错误率 ≤ 1e-4。异常处置时，若出现持续越界或互锁矩阵不闭合，立即切换旧版本备机，冻结变更并保全抓包与系统快照，工单标注触发条件及处置链路。测试采用用例、设备资产、版本指纹三元绑定，归档至测试台账，用于复核复测的因果追踪与差异定位^[5]。

3.2 应用效果的评估与分析

施工时长统计取准备解锁至功能回归有效时长，剔除干扰后用中位数抗干扰，关注节拍控制与回退效率。数据迁移准确率以联锁逻辑、I/O 映射、阈值参数为必核项，通过差异清单与双向回读生成误差清单，输出条目级错误率及缺漏分布。系统稳定性结合影子跟随与在线监测，记录状态抖动、故障计数，参考关键区段负荷轨迹判断负载承压能力。评估结合趋势与关联关系，审视施工时长缩短比例与脚本化覆盖率，结合校核口径一致性解释数据错误率下降，采用阈值合规与事件无越界双轨判定降低偏差，指标边缘状态纳入灰度回退与补充验收。该方法存在跨专业数据口径差异、现场告警编码不统一问题，后续将推进指标统计接口标准化，细化异常模式库。关键指标与判定口径见表 2，明确基线来源、目标区间及处置动作映射，方便复测复用。

表 2 K5B 型计算机连锁软件换装施工方法应用效果评估表

评估维度	指标定义	统计口径	基线参考	目标区间	判定规则	处置动作
施工时长	有效时长与天窗匹配度	中位数与四分位距	历史 3 次同规模换装平均值	不高于 120 min 且回退预留 20 ~ 30 min	达标 临界 未达标	节点压缩 灰度回退 二次验收
数据迁移准确率	条目级错误率与缺漏分布	错误条目数除以总条目数	基线库对照与旧版回放轨迹	条目级错误率不高于 1e-4 无未知字段	合规 警戒 不合规	拒绝上线 重做迁移 增强校核
系统稳定性	状态抖动与故障计数	抖动峰值与告警计数	影子跟随期间的历史曲线	抖动不高于 20 ms 告警无聚集 会话重建不高于每 2 h 1 次	合格 临界 不合格	负载降档 扩展观测 缺陷闭环
综合结论	趋势与阈值双轨汇总	维度加权与事件校验	基线阈值与工艺 SOP	各维度均不越界且关键路径无异常	通过 待改进 未通过	制定整改项 安排复测 更新 SOP

4 结束语

本文提出的三阶段换装方法，实现了风险识别、数据治理与现场执行的解耦，通过差异校验与灰度回退机制，在运输压力较大的到发场完成了零越界升级，验证了其对复杂场景的适配能力。后续应将接口标准化与异常模式库建设纳入持续改进循环，探索区域集中监测平台的远程协同能力，构建覆盖全生命周期的软件升级治理框架。

参考文献：

[1] 赵奇伟,刘星辰,康晋菊,等.基于编程组态软件的二总线图形建模及调试研究[J].电子技术应用,2024,50(12):92-97.

[2] 张广吉,万争,刘峻松,等.多功能以太网列车网络控制系统维护软件的设计与实现[J].智慧轨道交通,2024,61(06):15-20,31.

[3] 倪子威,马游春,郭鑫,等.基于 CH579 的高速串口服务器[J].仪表技术与传感器,2024(02):23-27.

[4] 伍丹琪,谢先当,付海清,等.基于国产 BIM 平台的铁路工程设计软件研究[J/OL].铁道标准设计.1-12.[2025-03-10][2026-01-29].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=A-1EuXenf_ok3aqRdxW74yXnKkJ_KTPknhZNE-c7moAC3Zu9ZEved1yRjNf1ilp1ieyvXpmMe6wo5Vf8Wr2-oPY_y2JaIIHFEMMxXOeNjvfGo5u9GN TBFsjVBzoU-nueHbW6ywy6tT7JjVW3G_xcrByhZtkKDMKSTAP52LAGpDK2XUzy9KPNkQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[5] 宋星宇,王深造.计算机实验室管理系统的研究与设计[J].信息记录材料,2025,26(07):65-68.

电力工程施工中智能监测系统应用研究

路广龙¹, 任怀佳², 相龙强³

(1. 滨州市北海信和新材料有限公司, 山东 滨州 256600;

2. 山东裕龙石化有限公司, 山东 烟台 264000;

3. 滨州北海汇宏新材料有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 随着新型电力系统建设不断推进, 电力工程项目规模与技术难度持续增大, 传统监测方法在效率和预警时效性方面已显不足。本文围绕智能监测技术在工程实践中的运用, 剖析其“感知-网络-平台-应用”四层架构体系, 研究该系统在输电线路、变电站及地下电缆施工场景的实施方案, 通过三项工程实例应用效果验证, 针对技术适配与成本管控等关键问题提出可行的改进方案。研究表明, 整合物联网、人工智能及建筑信息模型与地理信息系统技术的智能监测系统, 能有效降低施工安全事故超过60%, 将工程效率提升接近50%, 为电力工程精益化管理奠定坚实的技术基础。

关键词 电力工程施工; 智能监测系统; 物联网; BIM技术; 安全管控

中图分类号: TM7; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.006

0 引言

电力工程是能源体系中的关键组成部分, 其施工质量以及安全状况直接关系到电网运行的可靠性。当下特高压输电和智能配电网项目持续向前推进, 施工环境存在高空作业、交叉施工、地下管线等多重高风险因素。传统人工巡检方式存在明显局限, 质量问题的整改成功率低于70%且多数安全事故源自风险预警滞后。随着数字经济与新型基础设施建设深度融合, 物联网、人工智能等技术在工程领域获得广泛应用, 智能监测系统凭借实时数据采集、智能分析和主动预警功能, 推动施工管理从依靠经验朝着数据驱动方向转变, 对于提高工程质量、保障施工安全、控制项目成本具有显著价值。

国内学者针对智能监测技术开展了多方面探索研究。蓝燕云(2025)提出“感知-网络-平台-应用”的分层架构体系, 同时指出该系统存在初期投入较大、数据集成困难等挑战。仝蕊(2025)结合BIM技术与物联网开发智能化管理系统, 并且在配电网工程实践中验证了其适用性。张国强团队(2024)设计基于BIM+IoT融合的监测方案, 有效提升了数据交互效率。现有研究主要针对单一技术或者特定场景展开, 缺乏对全生命周期应用策略的系统梳理, 而且在技术先进性与经济成本之间难以找到平衡点。本文基于最新工程实践构建完整的应用体系框架, 为实际应用提供更实

用价值的技术实施方案。研究内容包含系统核心框架的详细分析、典型施工场景应用的具体方法、实际项目效果的全面检验以及现存短板和对应的改进措施。实施路径严格遵循“理论铺垫-实证检验-持续优化”的原则, 首先深入解析关键技术之间的协同关系并构建系统的整体框架; 其次为三类典型场景量身定制具体的应用策略; 接着通过三个工程实例追踪项目实施的实际成效并量化评估改进效果; 最后从技术、管理、政策这三个维度提出具有针对性的改进建议。

1 电力工程施工智能监测系统核心技术架构

1.1 系统总体架构设计

智能监测体系采用的是分层设计方式, 其结构涵盖感知、传输、支撑以及应用这四大层级, 具备良好的扩展能力和快速响应特性, 能够灵活适配各类电力工程项目需求^[1]。感知层通过部署倾角监测仪、应力感应器以及位移采集终端等设备, 并且整合无人机航拍与智能穿戴设备, 采用“固定监测+移动巡检”协同工作模式, 实时获取铁塔基础沉降情况、导线受力状态及人员位置等关键数据。传输层构建融合5G高速通信、光纤专线、LoRa低功耗以及NB-IoT窄带物联网的多模态通信网络^[2]。根据现场作业环境智能选择最优传输路径, 通过专用加密协议确保数据传输安全。支撑层依托云计算与边缘计算的协同处理架构, 采用混合式数据库分别存储结构化数据与时间序列数据, 利

作者简介: 路广龙(1981-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

用边缘计算节点实现数据本地化预处理,有效减轻网络传输压力,通过大数据分析技术实现数据价值深度挖掘。应用层集成安全风险预警、工程质量监控及施工进度管理等核心功能模块,基于建筑信息模型(BIM)与地理信息系统(GIS)技术构建三维可视化交互平台,为项目各方提供差异化定制服务。

1.2 核心支撑技术

物联网技术通过基于统一通信协议达成设备的互联互通,在输电线路施工时能实时监测杆塔及导线运行状态,在变电站建设中可统一调配施工设备进而有效提升多方协作效率^[3]。AI算法借助运用卷积神经网络(CNN)实现质量缺陷图像的高精度识别(准确率超97%),结合长短期记忆网络(LSTM)对进度偏差进行预测,还通过强化学习优化资源配置从而显著增强决策的智能化程度。BIM+GIS融合技术利用建筑信息模型(BIM)构建三维数字化场景,凭借地理信息系统(GIS)提供空间地理数据,二者协同实现施工环境的全方位可视化展示并为方案模拟与冲突检测提供技术支撑。区块链技术依靠其数据不可篡改特性确保施工全过程的资料存证与质量可追溯,形成完整的追溯证据链并为责任界定提供可靠依据。

1.3 关键功能模块

安全风险预警模块借助实时信息流和智能算法,利用UWB人员追踪与设备状态监测完成风险等级预警,超出设定限值时通过多样化渠道发警报并推送处置方案。质量管控模块融合AI视觉识别与激光扫描技术,自动检测混凝土裂缝和焊接瑕疵等缺陷,实时比照施工参数与规范要求实现质量问题全流程管控^[4]。进度管理模块结合计划编排与信息采集功能,自动监测进度差异,剖析根源并预判走向,通过图形化界面辅助进行资源统筹。资源调度优化模块依托供需预测模型精准预估资源需求,制定高效调配策略,杜绝闲置消耗,提升资源周转效率。可视化监控模块以BIM+GIS为基础打造全景化平台,支持实时查勘现场状况、历史追溯与动态推演,为决策提供直观依据。

2 智能监测系统在电力工程施工中的应用策略

2.1 在输电线路施工中的应用

工程存在跨度范围广、地形条件复杂以及高空作业频繁等特点,所以系统核心致力于安全保障和质量监督方面,前期依靠BIM与GIS技术对路径规划进行优化,从而成功避开不利的地段^[5]。在基础施工环节布置沉降观测仪与角度监测器,按照每5分钟一次的频率来采集相关数据,若当日沉降量超过3毫米或者倾斜角度达到0.5度就会立即发出警报。例如:在某±

800千伏特高压项目中,该方法提前发现3处基础异常沉降,在杆塔架设过程中利用应力感应器实时监测结构受力具体情况,并且运用无人机拍摄配合人工智能技术检测螺栓紧固和焊接质量,使工作效率提高了3倍多。导线铺设阶段通过弧垂监测设备和振动感应装置调整施工相关参数,同时运用人员定位系统预防高空坠落事故发生。

2.2 在变电站施工中的应用

考虑到多专业交叉作业具有的特性,系统重点强化协同管理以及安装质量保障方面的工作。在施工准备阶段借助BIM模型开展方案模拟和冲突排查工作^[6]。例如:某220千伏变电站扩建项目借此识别出3处碰撞问题,有效避免了返工风险的出现。在土建施工环节实时监测混凝土养护相关数据,运用智能回弹仪快速评估结构强度状况。在设备安装阶段采用激光定位技术(精度达到±0.5毫米)确保安装精度达标,并通过振动传感器预防设备出现损伤情况。基于UWB定位与作业分配模块划分施工区域范围,某工程实现多工种高效协同作业,工期压缩了15%且资源利用率提高23%。在调试阶段通过参数自动比对方式,工作效率提升超过50%。

2.3 在地下电缆施工中的应用

考虑到地下环境复杂多变还暗藏潜在风险的情况,系统着重对环境安全和施工精度进行了提升。施工之前依靠地质雷达以及GIS技术来明确管线分布情况,进而合理规划电缆铺设的路径以避免和现有管线产生冲突。开挖阶段设置气体、水位还有沉降监测设备,建立全天候动态监控体系,若监测指标超出安全阈值,系统会自动断电并且发出警示,为作业人员提供双重防护保障。例如:在某市供电工程中,该方法成功防止了甲烷中毒事故发生。在电缆敷设进程中,分布式光纤传感技术实时监测电缆受力与弯曲状况,配合RFID标签实现从生产、铺设直至维护的全链条追溯管理。智能巡检机器人结合红外热成像技术,能够及时对设备温度异常发出预警,使巡检效率提升到原先的7倍。回填作业时,智能压实监测系统实时追踪压实度和土壤湿度,并且运用三维激光扫描技术验证回填质量,极大地降低了后期沉降风险,保证了地下电缆的长期稳定运行。

3 工程案例分析

3.1 案例一: ±800千伏特高压直流输电线路工程

工程线路的总长度达到326公里,穿越了多种不同的地貌区域,一共设置了78座铁塔,项目在2023年6月启动建设,预计到2024年12月能够完工,总的投资额达到了18.6亿元。系统部署了320套传感器、12台无人机以及86套智能穿戴设备,并且构建了云端数据

监控平台。投入使用之后，成功识别并且处理了42处安全隐患，重大风险得到了提前干预，事故发生率降低了68%，工程质量一次性验收的合格率达到99.2%，人工巡检的工作量大幅减少了60%，项目工期缩短了12%，实现了成本节约3.2%。

3.2 案例二：220千伏智能变电站扩建工程

项目把选址确定在市中心区域，计划新增加一台容量为180 MVA的主变压器，由于受场地紧凑以及多方施工并行等因素限制，工程在2024年初启动并在同年9月完成建设。在实施过程当中建立了三维建筑信息模型，并且布设了45个振动监测点、38处温度感应装置以及16个人员定位基站，同时还配套开发了协同管理软件。系统应用之后带来了非常显著的成效，减少了3次设计方案调整从而节省资金180万元，有效规避了5起交叉作业安全事故，设备安装精度控制在±0.3毫米范围之内且调试一次性合格率达100%，最终工期提前15天完成且劳动生产率提高25%。

3.3 案例三：城市地下电缆管网改造工程

对核心区域长达28千米的管网进行改造，该区域周边建筑物密集且管线复杂，于2023年10月开工并在2024年8月竣工，部署了62台气体传感器、48台水位传感器以及28套光纤传感设备，还配备8台巡检机器人和1200个RFID标签。应用之后发出有害气体超标预警16次、积水预警9次且无安全事故发生，电缆敷设合格率达到99.5%、接头故障率为0，巡检效率提升6倍、运维成本降低35%，供电可靠性得到显著提升。

4 智能监测系统应用存在的问题与优化路径

4.1 面临的主要挑战

从技术层面来讲，在特殊工况下，传感器会受到高低温以及强电磁干扰影响，容易出现数据偏移或者功能失效的状况。设备之间因为通信协议不兼容的问题形成信息壁垒，阻碍了数据的互通与共享。人工智能技术在处理多变量耦合且动态变化的复杂场景时，模型泛化能力有限，难以有效应对突发状况。从经济角度来说，前期研发、设备采购以及系统部署需要大量资金投入，这对资金实力较弱的中小企业构成较大的财务压力。部分技术研发由于市场需求波动或者技术路线偏离，未能转化为实际经济效益，造成了资源的浪费。从管理角度而言，既懂技术又熟悉业务的复合型人才相对比较匮乏，现场作业人员因为受教育程度和技能培训不同，技术水平存在差异，影响作业质量与效率，数据采集、存储和传输环节的安全保障机制不完善，存在数据泄露的风险。从标准角度来看，不同厂商的技术体系和数据格式缺乏统一接口标准，导致技术集成

难度大且兼容性差。科学合理的技术成效评价指标体系尚未建立，难以客观评估技术应用的实际价值与效益。

4.2 改进措施与方向

技术升级要开发适应严苛工况的传感装置，并建立标准化的接口协议与通信机制，同时优化人工智能算法在多样化场景的表现还要深化数字孪生技术的实际应用。成本优化需实施分级配置方案并推广模块化设备设计，同时创新“设备租赁+技术服务”的商业模式进而提高设备的成本效益比。人才发展应构建产学研协同培养体系，并强化现有从业人员的技术培训，同时建立科学的人才激励与留存机制。管理强化要完善数据安全防护体系并制定标准化的操作规程与应用指南，同时构建多层次的成效监测评估体系。政策保障需加快行业技术规范的制定进程，并推出针对性的财政扶持与税收减免政策，同时建设行业资源共享公共服务平台。

5 结束语

智能监测系统构建起四层体系架构，通过整合多种关键技术实现多功能集成应用，有效克服了传统监测方式的局限性。结合三类典型施工场景特点制定差异化实施方案，以此确保施工各环节实现精细化管理与控制。实际工程应用结果表明，该系统能明显提高施工安全性、质量水平和作业效率，同时有效控制成本并降低运维风险。但是，当前系统应用在技术实现、经济投入、专业人才、行业标准等方面仍存在挑战，需要多方面协同开展攻关工作。未来，智能监测系统将朝着自主决策与预测性维护的方向发展，通过打通全生命周期数据链构建数字孪生模型，同时开发轻便的移动终端应用助力行业向绿色低碳方向转型。后续研究可重点探索数字孪生的深度应用、AI算法的自优化升级、跨区域协同监测平台搭建等课题，为电力工程智能化进程提供更强大的技术支撑。

参考文献：

- [1] 蓝燕云. 电力施工监测软件如何助力高效安全的电力工程建设[J]. 中国电力企业管理, 2025(08):45-49.
- [2] 仝蕊. 智能化施工管理系统在电力工程项目中的实践研究[J]. 智能科技, 2025,07(21):31-34.
- [3] 张国强, 李娟. 基于BIM+IoT的电力工程施工智能监测系统设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2024,41(03):92-98.
- [4] 赵伟, 孙丽, 吴刚. 特高压输电线路施工智能巡检技术应用研究[J]. 高电压技术, 2024,50(07):2654-2662.
- [5] 李明, 王芳. 变电站施工多工种协同智能管理系统开发与应用[J]. 电力自动化设备, 2023,43(12):187-193.
- [6] 陈亮, 周强. 地下电缆施工安全智能监测技术研究[J]. 中国电力, 2023,56(09):168-175.

配电自动化架空线路故障定位与隔离研究

王振乾

(国网湖南省电力有限公司保靖县供电分公司, 湖南 湘西 416500)

摘要 本研究聚焦配电自动化背景下的架空线路故障快速定位及隔离技术,介绍了架空线路故障定位技术原理、实现方法与应用效果,对故障隔离技术的分类、实现方法以及发展趋势进行了探讨,并针对现有的技术缺陷提出了多源信息融合、自适应定位模型、改进的故障隔离控制策略等方法,以期为提高配电网智能化运维水平、增强供电可靠性提供参考。

关键词 配电自动化; 架空线路; 故障定位; 故障隔离; 智能监测

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.007

0 引言

配电网是电力系统面向用户的最终环节,其运行可靠性和供电质量直接关系到社会经济的发展和民生的改善。架空线凭借造价较低、易于施工安装和维护方便等优势,在配电网中占据较大比重。本文主要研究配电自动化架构下架空线路故障定位和隔离技术,对它的技术原理、实现方式和发展现状进行梳理,分析各种方案的利弊,并针对目前技术应用中遇到的问题,提出多源信息融合、自适应智能算法以及协同控制策略等改进方向。

1 架空线路故障定位与隔离技术概述

1.1 传统故障定位与隔离方法的局限性

受环境、技术、线路老化等因素影响,配电线路很容易出现断线、接地等事故,严重影响了配电网的安全效益和经济效益。为避免上述问题,配电网建设过程中需利用好智能装置,在配电自动化技术和 GIS 定位技术的基础上,实现故障区域快速定位、线路故障综合分析、故障断电自动恢复等,最大限度缩短线路故障断电时间,从根本上提升用户用电满意度。21 世纪以来,我国各地区配电企业不断加大对智能配网的投入力度,在配电自动化技术基础上推进配电网的数字化改造与系统优化,着力提升电网运行的稳定性、可靠性和智能响应能力。而传统故障定位多依赖人工巡查,受地形、天气影响大,如山区线路巡查需耗费大量人力时间,且隔离故障常需手动操作开关,延误供电恢复,难以适配当前配电网高效运维需求,凸显智能技术应用的必要性。

1.2 现代故障定位与隔离技术的发展

随着科技的发展,现代的故障定位和隔离技术逐渐发展起来。其中,利用行波理论进行故障定位的技术就是基于故障产生的行波沿线路传播这一特点来检测行波传播的特点进行故障定位的一种方式,其具有反应速度快、定位精确的优点。故障指示器技术就是把故障指示器装在配电线路上,能随时看线路里的电流、电压等,若发现有故障信号就马上让指示器动起来,这样就能给负责维护电力设施的人员提供清楚的故障所在之处。GIS 技术与智能算法相融合,将配电网空间数据和属性数据进行集成,并建立配电网的拓扑模型,在故障发生时采用智能算法分析故障电气量的变化情况,结合 GIS 数据对故障点进行快速定位。自动化隔离技术是结合智能检测、自动化控制和高级数据分析技术实现对故障的快速检测并完成自动隔离的一种技术,具备精准度高、操作方便、反应速度快的特点,将是今后配电系统故障隔离的主要趋势。

1.3 配电自动化在故障定位与隔离中的支撑作用

配电自动化系统集成成了计算机技术、通信技术、自动控制技术,可以对配电网中的设备运行状态进行实时监测、远程控制。发生故障时,配电自动化系统主要依靠馈线终端单元(FTU)、配电终端单元(DTU)等智能终端对线路的电流、电压、零序电流等电参量进行实时采集,再通过通信网络将数据上传至主站系统。主站系统根据采集到的故障信息,结合设备地理位置以及事先设定的故障判别逻辑,可以快速、准确地定位故障点。

在故障隔离环节,主站系统根据 FTU 反馈的状态

作者简介: 王振乾(1999-),男,本科,助理工程师,研究方向:配电自动化。

信息,远程开关控制指令,实现故障区段的自动隔离,对非故障区域快速恢复供电,从而大大提高配电系统的供电可靠性和抢修效率。配电自动化还具有故障预警功能,可以监测电网运行参数的异常趋势,识别潜在风险并提前干预,降低故障发生的概率。

虽然故障指示器仍然可以用来辅助故障检测,但是它的作用很有限,主要弥补 FTU 在一些盲区或者非监测节点上的信息缺失。总体来说,FTU 和 DTU 在配电网故障定位及处理流程中起着核心作用,已经成为配电网智能化运维不可缺少的重要设备。

2 架空线路故障定位技术

2.1 自动化终端行波定位技术的应用研究

在配电自动化系统当中,依靠行波理论的故障定位技术被整合到智能终端设备之中,大多依托馈线终端(FTU)等自动化终端对线路发生故障时产生的暂态行波信号予以迅速采集和处理。线路发生故障的时候,故障点会在很短的时间内向两端传送暂态电流行波,自动化终端凭借高速采样模块对行波特征展开监测,并把数据立即传送给主站。主站采用小波变换、傅里叶变换等数字信号处理算法,结合两侧终端的时间差数据进行精确的计算,可以快速地判断故障区段或者精确定位故障点^[1]。

为了提高系统的定位精度,就需要保证各个终端设备之间的时间是几乎同步的,一般能达到毫秒或者微秒级别,通常会使用 GPS 或者通信对时的方式。此外,双端定位能有效减少误差,并且适合于支路繁杂的架空配电线路,相较于传统的依靠人工巡检的方式,基于自动化终端的行波定位方式响应速度快、定位准确度高、自动化程度高等优点,极大地提高了配电网故障处理的效率以及智能化水平。但在实际使用中仍存在干扰源多、网络同步难等问题,从而保证行波数据的正确采集与判断。

2.2 基于故障指示器的定位方法研究

故障指示器是一种安装在配电线路上的智能设备,可以实时监测线路的电流、电压等重要参数。线路出现故障的时候,故障指示器就能够很灵敏地察觉到不正常的电气量发生变动,随后立刻触发相应的动作机制,依靠发光或者翻牌等较为直观的方式来显示故障发生的地点,从而给运维人员提供一些初步的故障信息。同时,故障指示器还可以通过先进的无线通信技术,把故障信息及时、准确地传递到主站系统。主站系统收到这些信息之后,会联系配电网络的拓扑结构展开分析,进而精确地找出故障发生的确切地点。该技术比较自动化,但实际使用时,其性能取决于指示器是

否准确可靠^[2]。此外,为了维持指示器始终处在良好运行状态,也要定时实施保养并更新零件,改进故障指示器的效能表现,采用更精准度的传感器来更好地把握电气参数发生改变的情况;还可以采用先进的通信技术,使故障消息在传送期间做到完备而且正确,从而为确定故障地点提供更为坚固的基础。

2.3 基于 GIS 的定位技术

GIS 技术把配电网的空间数据和属性数据深度融合,从而形成非常逼真的配电网拓扑模型。当发生故障的时候,这项技术会运用智能算法来分析故障时电气量变化的情况,再结合 GIS 数据快速找到故障点。具体实施时,首先要精心在 GIS 系统当中建立配电线路的地理信息模型,该模型要包含线路走向、线路长度以及杆塔位置之类的详细信息内容,从而保证模型的精确性及完备性。然后在线路上架设各种监测装置,对电气参数进行实时监测,并迅速传回主站。主站系统通过智能算法对采集的数据进行分析处理,正确地识别出故障发生的位置。最后利用 GIS 模型中的地理信息找到具体的故障点。最大的优点就是能够实现对故障的直观定位,运维人员根据定位结果可以快速前往故障现场进行处理,极大地提升了故障处理的速度与准确性。

2.4 基于智能算法的定位技术

基于智能算法的定位技术,对大量的故障样本深入学习训练后,可以建立非常准确的定位模型,具备很强的自适应与容错能力。人工神经网络能自动从电压电流波形中提取时空信息,经过对训练数据不断学习后,形成起输入参数与故障位置之间的复杂映射关系。在实际应用时,只需要把当前采集到的电气参数作为输入,输入已经训练好的神经网络模型中,就可以快速得到故障发生的位置。而遗传算法则是通过模拟自然选择过程,对故障位置的候选解进行优化,把故障定位问题巧妙地转化成了优化问题,并且不断迭代搜索最优解^[3]。为了提升智能算法的水平,需要大量的训练数据,这样可以有效地增强算法应用能力,使它在各种各样的复杂环境中都能够对故障进行精准地定位。

3 架空线路故障隔离策略

3.1 断路器隔离策略

断路器隔离在电网安全稳定运行体系中处于核心地位,是防范架空线路故障的关键防线。其工作原理是通过准确快速地断开故障线路的电气连接,从而将发生故障的区域从正常的电网中彻底地分离开来,为故障区域的修复和恢复正常供电提供有利的条件。当架空线路开始运行的时候,智能监测体系就像灵巧的

“触角”，随时察觉线路的情形，一旦发现故障信号，断路器就凭借着自身迅捷反应的优势，在极为短促的时间里动作起来，立即切断了故障电流，阻止了故障向其他部分扩展蔓延，防止给电网带来更大的危害损害，维持了电网大范围的安稳状况。该策略具有动作可靠、隔离效果显著的突出优点，若想实现断路器自动控制的目标，则可全面融合配电自动化技术，将断路器与智能监测设备以及通信设备进行紧密结合处理^[4]。智能监测设备碰到故障信号的时候，可以快速经由高速、稳定又牢靠的通信网络把关键的消息精准地送到主站体系。主站系统依靠先进故障定位算法所得出的成果，准确无误地向断路器下达控制指令，进而执行断路器的远程分合闸动作，有效地提升了对故障处理的速度及准确性。

3.2 负荷开关隔离策略

负荷开关隔离策略对于保证负荷侧稳定供电是不可或缺的，在切断故障线路与负荷的电气连接时，负荷部分不会受到故障的影响，保证了负荷侧的持续供电。负荷开关主要用来切断或接通正常的工频工作电流，由于它不能切断短路电流，在实际应用中，一般与熔断器串联。当线路发生故障时，由于熔断器的特性是能迅速地熔断，它首先切断短路电流，从而为后面切断故障创造了条件。之后负荷开关动作，完成故障区隔离，该策略的优点是结构简单、成本低，适用于对成本比较敏感，但对供电可靠性要求不是特别高的场合。要完成负荷开关的自动控制，可用电压一时间型或者过流脉冲计数型分段器^[5]，电压一时间型分段器依靠及时，准确地检测线路电压改变来执行分合闸动作，一旦线路失压持续时间达到预设值，分段器就会自行分闸；当线路重新有电供应之后，经过一段时间，分段器就会自行合闸。

3.3 隔离开关隔离策略

隔离开关在电网安全运行中具有十分关键的作用，它的主要功能是将发生故障的线路与其它线路有效隔离起来，以此避免故障向其他部分蔓延，进而保证整个电网处于安全稳定的状况之中。在对设备进行检修时，可以有效地把带电的部分和正在检修的部分隔离开来，给检修人员提供一个安全的检修环境，降低检修过程中的安全风险。在架空线路中，隔离开关一般设置在杆塔上或者变电站里，线路一旦出现故障时，应由人工操作拉开隔离开关，将故障线路从系统中隔离开来，从而避免故障扩展，保障系统其余部分的正常运行。为了提升隔离开关操作的效率与安全性，可以使用电动操作机构，这样就能远程操控隔离开关，

电动操作机构一投入使用，人工操作的麻烦和危险就减轻了，而且也提升了操作准确性和及时性，这样一来，工作人员就能在安全距离之外对隔离开关执行操作。

3.4 综合隔离策略

综合隔离策略是一种先进的、灵活的应对架空线路故障的方式，它可以充分利用各种隔离方式的优点，根据不同的故障类型、不同的故障位置、系统的不同运行状态来选择最合适的隔离方式，从而实现对故障的快速隔离。在实际应用当中，要针对不同的故障类型选用不一样的隔离方法。以永久性故障来说，采用断路器隔离策略就能够较快地切断故障电流，阻止故障持续对电网造成危害，防止故障范围继续扩散。而对于瞬时性故障，负荷开关隔离策略能够在故障消失后自行恢复供电，减小停电时间和范围，提升供电可靠性。遇到复杂的故障状况时，可以采取分层分区隔离的做法，把主要的故障部分先隔离开来，不让故障蔓延开去，然后再慢慢解决剩下的那些故障，这样就能提升解决问题的准确度和速度。另外，随着分布式电源在电网中的普及，综合隔离策略还需要考虑分布式电源的接入情况，协调分布式电源和配电网开关设备的动作，使得在故障发生时能迅速、准确地定位并隔离故障。

4 结束语

基于配电自动化的架空线路故障快速定位与隔离技术是保障配电网安全稳定运行并改善供电可靠性的重要技术。本文对架空线路故障定位与隔离技术进行了深入的研究，剖析了传统的局限性及现代的发展趋势，探究了以行波理论为基础的、以故障指示器为载体的、以 GIS 为平台的、利用智能算法的故障定位技术和断路器隔离法、负荷开关隔离法、隔离开关隔离法和综合隔离法。针对已有的技术存在的问题，提出改善的策略并进行了仿真实验来证明改良技术的可行性。

参考文献：

- [1] 王子康. 输电线路故障预测与智能诊断方法[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2024, 42(02): 34-37.
- [2] 贾毓彦, 贾飞. 智能化变电站监测与故障诊断系统的设计与优化分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(01): 41-44.
- [3] 蔡志坚. 智能化平台在输电线路运检系统中的应用研究[J]. 电工技术, 2023, 40(S1): 28-31.
- [4] 罗燕. 配电网故障快速定位与隔离技术研究[J]. 工程地质学, 2024, 43(09): 52-55.
- [5] 杨会元. 配电线路故障快速切除与隔离技术分析[J]. 产业经济, 2019, 38(12): 39-42.

智慧消防系统在高层建筑火灾防控中的应用研究

孙晓燕¹, 于真²

(1. 中安智慧(青岛)集团有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东泰景楼宇安全技术有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 高层建筑火灾呈现垂直蔓延快、疏散距离长、烟囱效应显著等特殊风险特征, 传统消防手段在超高层复杂环境中应对能力不足。智慧消防系统构建多层次探测网络识别火灾垂直传播路径, 运用实时定位技术优化人员疏散引导策略, 采用分层控制方式解决竖向烟气扩散问题, 电梯智能调度为高空救援提供技术支持。典型工程应用显示, 系统能够将火灾发现时间缩短至分钟级别, 疏散效率提升超过30%, 烟气蔓延控制效果明显改善。

关键词 高层建筑; 智慧消防; 垂直蔓延预警; 分层排烟; 消防电梯调度

中图分类号: TP27; TU976

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.008

0 引言

城市超高层建筑规模不断扩大, 其独特空间结构给火灾防控带来严峻挑战, 建筑内部竖井效应加速烟热气流上升, 人员疏散面临楼层高度障碍, 外部救援受装备作业高度制约^[1]。现有消防技术在处理高层建筑特殊燃烧传播机理时显现局限性, 智慧消防技术整合物联网感知与数据挖掘以及智能决策等手段, 为攻克超高层火灾防控难题开辟创新途径。研究智慧消防系统在高层建筑中的应用, 对提升城市超高层安全防护水平意义重大。

1 高层建筑火灾风险特征与智慧消防系统需求匹配分析

高层建筑火灾风险呈现独特复杂特征, 其竖向空间结构形成的烟囱效应使火灾烟气以每秒3~5米速度快速向上蔓延, 垂直传播速度远超水平扩散, 造成上层区域面临严重烟气威胁^[2]。超高层建筑长距离疏散路径显著增加人员撤离难度, 常规疏散指示系统缺乏火灾态势感知能力, 外墙幕墙材料受高温影响易破裂脱落, 产生多点燃烧, 超出常规探测范围, 超高层救援作业受设备举升高度制约, 外部扑救效能随建筑高度递减。针对上述风险特征, 智慧消防系统需具备三维空间火灾演进建模能力, 识别高层建筑独特燃烧传播规律, 解决传统消防设备在超高层环境中的性能局限性, 与数据感知、智能分析、动态响应等核心功能形成高度契合。

2 智慧消防系统在高层建筑火灾防控中的关键技术应用

2.1 高层建筑多层次火灾早期探测与垂直蔓延预警

高层建筑多层次火灾早期探测构建垂直分层的智能传感器网络架构, 每个楼层部署温度、烟雾、气体浓度、图像识别传感器组成的复合探测单元, 形成楼层间数据关联的三维感知网络。深度学习算法建立高层建筑火灾垂直蔓延预测模型, 分析楼层间温度梯度变化、烟气浓度分布规律、气流速度差异, 识别火灾沿竖井、电梯井、楼梯间等垂直通道的传播轨迹, 垂直蔓延速度预测引擎融合建筑结构参数、通风运行状态、气象条件等多维数据, 通过建立数学模型计算火灾向上层扩散的速率^[3]。火灾垂直蔓延速度预测公式为:

$$V_{vertical} = k \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot Q \cdot \Delta T}{T_0 \cdot A \cdot \rho \cdot c_p}} \cdot f(W, S) \quad (1)$$

式(1)中: $V_{vertical}$ 为火灾垂直蔓延速度 (m/s); k 为竖向通道修正系数; g 为重力加速度 (9.8 m/s^2); Q 为火源热释放速率 (kW); ΔT 为火源楼层与上层温差 (K); T_0 为环境温度 (K); A 为竖向通道截面积 (m^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); c_p 为空气比热容 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$); $f(W, S)$ 为风速和建筑结构影响函数。三级垂直蔓延风险评估机制设定楼层间温差超过 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 启动一级预警, 烟气浓度垂直梯度达到 50 ppm/层 触发二级预警, 气流速度超过 2.5 m/s 发布三级预警, 楼层间火灾传播时间窗口模型结合火源强度、建筑材料燃烧特性、竖

作者简介: 孙晓燕 (1983-), 女, 本科, 研究方向: 消防工程。

向通道阻力系数等参数，通过预测公式计算火灾到达上层楼面的时间节点。

2.2 垂直疏散路径智能引导与人员定位系统

垂直疏散路径智能引导构造室内高精度定位基础设施，在楼梯间与走廊以及电梯厅部署蓝牙信标网络，定位误差控制在 1 ~ 3 米范围内，三维疏散路径规划引擎基于火灾发生楼层、烟气蔓延方向、楼梯间通畅状况生成最优垂直疏散路线（如图 1 所示）。人员分布监测装置通过手机 APP、智能手环、RFID 标签等载体追踪建筑内人员位置，数据刷新频率达到每 3 秒一次，生成各楼层人员密度热力图^[4]。分流疏散调度机制结合人员位置分布、疏散路径拥堵程度、楼梯承载能力等要素，将人群分配至不同垂直疏散通道，楼层疏散优先级排序采用火源楼层上方人员向上疏散至避难层，火源楼层下方人员向下疏散至地面出口的超高层双向疏散策略，机器学习算法分析疏散人流模式并优化路径分配，疏散指令下发时间限制为 10 秒。引导显示终端基于路径计算结果展示方向指示、剩余疏散时间、目标楼层编号等

具体信息，语音播报装置发布楼层定向疏散指令内容。

2.3 高层建筑竖向烟囱效应控制与分层排烟技术

竖向烟囱效应控制构造分层压差调节机制，在建筑竖向通道部署智能风阀，调节各楼层间压差分布破坏烟囱效应形成条件，楼层间压差调节模型将火源楼层设定为负压状态，相邻楼层设定为正压状态，各楼层压差数值设定在 20 ~ 30 Pa 范围内，通过神经网络算法实时调节风阀开度。分层排烟装置构筑楼层独立排烟单元，每个楼层配置专属排烟风机、排烟风道、排烟口，建立楼层间烟气隔离机制，排烟设备启停调度程序结合火源位置、风向条件、建筑高度等关键要素，确定各楼层排烟设备运行序列，火源楼层风机全功率运行，相邻楼层风机 50% 功率运行，远离楼层保持待机状态^[5]。CFD 流体仿真平台构建烟气流动三维模型，仿真计算精度达到 0.1 m³/s，计算烟气在竖向空间中的扩散轨迹，AI 算法预测烟气流动趋势并指导排烟设备参数调节。竖向烟气阻隔装置部署可升降式挡烟垂壁，在电梯井口与楼梯间入口等关键部位设置自动伸

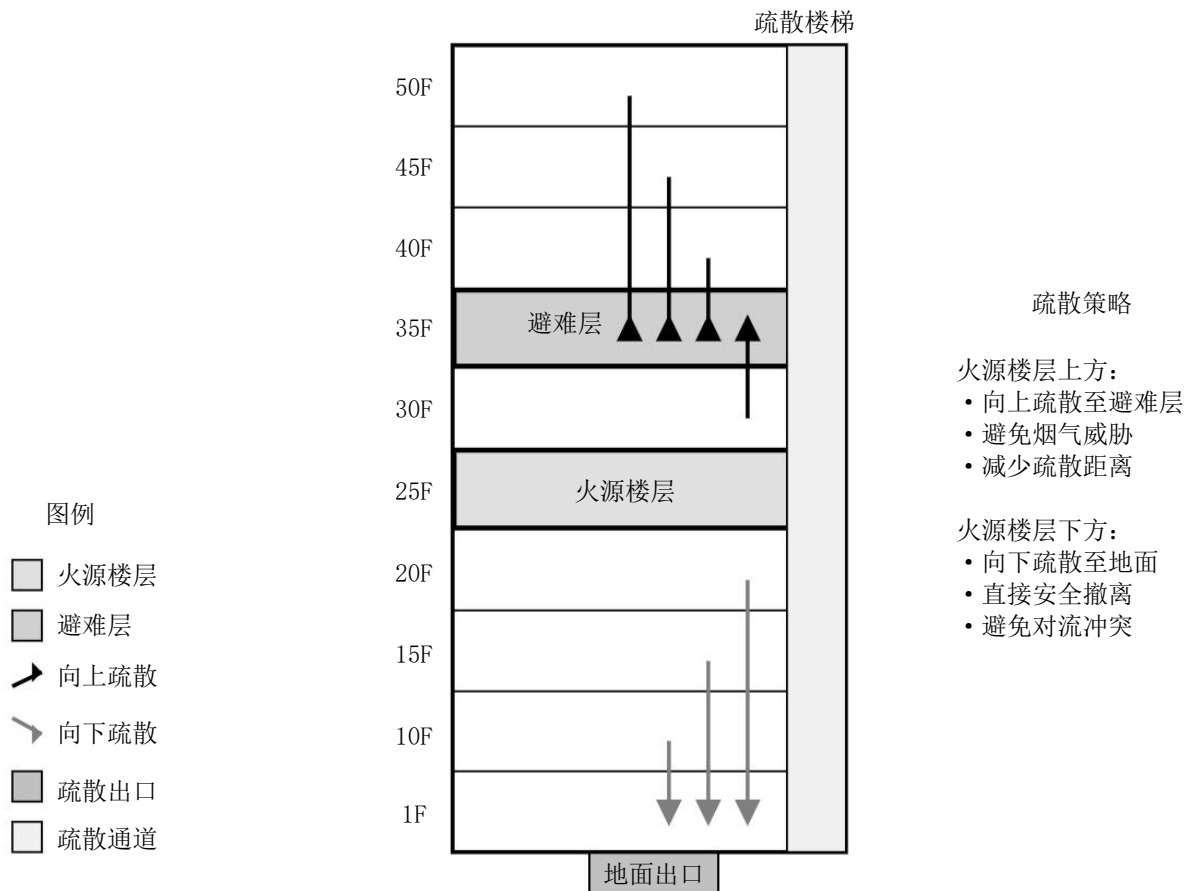


图 1 高层建筑双向疏散路径示意图

缩机构,火灾时展开建立高层建筑垂直阻隔系统。

2.4 消防电梯与救援设备智能调度系统

消防电梯智能调度构筑多电梯协同运行程序,结合火灾楼层分布、救援人员数量、疏散人员密度等要素分配运行任务,优先服务火源楼层与避难层及人员集中楼层,电梯响应时间限定为30秒。电梯轿厢内部署安全监测装置,当温度超过60℃或烟雾浓度达到阈值时,电梯运行至最近安全楼层,救援设备调度平台整合消防栓、灭火器、防烟面罩等物资信息,生成电子地图标注设备位置与规格以及存储数量等信息。物资配送调度程序规划配送路线,AGV机器人与无人机将救援物资运送至火灾现场、避难层、被困人员楼层,配送时间限定为5分钟,设备状态监控程序检测消防栓水压、灭火器压力等参数,设备异常时自动切换备用设备并发送维护信息。

3 智慧消防系统在高层建筑火灾防控中的应用与效果分析

3.1 典型高层建筑智慧消防应用案例分析

某超高层综合体智慧消防系统建设项目建筑高度超过200米,楼层数量达到50层以上,建筑面积约25万平方米,集办公与商业以及酒店功能于一体,项目实施背景源于建筑竖向空间复杂、人员密度高、传统

消防系统难以满足超高层火灾防控需求。建设方案采用整体规划、分区实施的部署策略,优先建设核心功能区域,逐步扩展至全楼覆盖,系统覆盖范围包括地下3层至地上50层全部区域,日常人员流量峰值超过6000人次,实施过程中重点解决系统集成兼容性、设备安装空间限制、施工期间安全保障等关键问题。创新特色体现在建立智慧消防与楼宇智能化系统深度融合架构,实现消防、通风、电梯、照明等多系统协同联动,项目建设周期历时10个月,分三个阶段完成系统部署与调试验收以及试运行优化,为超高层建筑智慧消防系统建设提供典型应用范例。

3.2 应用效果评估与系统性能优化策略

基于项目运行数据分析,智慧消防系统在高层建筑火灾防控关键环节表现出显著改善效果,通过建立量化评估体系,对比系统实施前后性能指标变化。

表1数据显示智慧消防系统显著提升防控效果,火灾确认时间缩短70%,疏散时间缩短30%,系统响应速度大幅提升,误报率降低85%。

4 结束语

智慧消防系统基于高层建筑火灾特殊传播规律,构建涵盖早期识别、智能疏散、气流调控、设备调度的防控体系。分布式传感网络提升火源定位精度,智

表1 智慧消防系统应用效果对比分析

评估指标	改造前数据	改造后数据	改善幅度
火灾信号确认时间	6~10分钟	2~3分钟	缩短70%
全楼疏散完成时间	25~30分钟	17~20分钟	缩短30%
排烟系统启动时间	8~12分钟	1~2分钟	缩短85%
消防电梯响应时间	5~8分钟	1分钟以内	缩短87%
供水系统压力稳定性	波动±0.12MPa	波动±0.03MPa	提升75%
误报警率	15~20次/月	2~3次/月	降低85%

能疏散装置缩短撤离时间,分层排烟机制抑制烟气扩散,设备联动调度保障救援实施。实践验证表明,智慧消防系统能有效改善高层建筑火灾防控水平,但在系统稳定性与设备兼容性等方面仍需优化,需要进一步完善技术方案以构建更加可靠的超高层消防安全屏障。

参考文献:

[1] 魏文超.高层建筑消防安全问题及对策研究[J].散装水泥,2025(06):189-191.

[2] 王相源.智能化消防系统在高层建筑火灾防控中的应用[J].新城建科技,2025,34(11):31-33.

[3] 辛欣.新质生产力在智慧消防领域提升火灾防控效能的应用[J].中国战略新兴产业,2025(33):35-37.

[4] 齐从月,谭清华,廖继.基于物联网的在建超高层建筑火灾防控技术[J].施工技术(中英文),2025,54(20):60-64,78.

[5] 刘利民.高层建筑智慧消防系统的设计与应用[J].建筑机械化,2025,46(10):21-24,80.

基于大数据分析的水资源调度优化方法与技术路径

杨秀辉

(桂林市水利电力勘测设计研究院, 广西 桂林 541000)

摘要 本文以大数据背景下水资源调度优化为研究对象, 首先从数据挖掘角度出发, 对基于大数据的水文预测模型进行了研究; 其次建立了实时动态调度方案生成模型; 最后通过对预测模型的效果评估和调度优化结果对比, 说明大数据分析对于水资源调度的作用, 并提出该类问题的技术路径, 以期为进一步提高水资源配置水平和用水效益提供参考。结果显示, 在线监测和预警平台的应用可使水利工程运行更加稳定可靠, 且能及时发现隐患并采取措

关键词 水利工程; 大数据分析; 水资源调度; 水文预测模型; 水资源配置

中图分类号: TP3; TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.009

0 引言

随着人口的增长和社会经济的发展, 水资源日益紧缺已成为一个普遍的问题。如何解决水资源不足这一问题成为人们共同关注的重大课题之一。而合理的水资源调度则是提高水资源利用率的关键环节, 也是保证供水可靠性和用水合理性的重要措施。传统的水资源调度方式主要是依靠经验和简单的数学模型来确定水量分配方案或调度参数, 很难适应复杂的水资源系统及其变化情况。本文探索以大数据的理念应用于水资源联合调度管理的新思路和新途径, 力求做到创新性工作的同时也能取得实际意义的应用效果。

1 大数据分析在水资源调度中的价值

1.1 提高数据处理的准确性和效率

水资源调度涉及大量的数据, 包括气象数据、水文数据、用水需求数据等。传统数据处理方法在处理这些海量、复杂的数据时往往效率低下且准确性不高。大数据分析技术能够快速、准确地处理和分析这些数据, 挖掘数据背后的潜在规律和关系, 为水资源调度提供更精确的信息。

1.2 实现实时监测和动态调度

通过大数据分析技术, 可以实时收集和分析水资源系统的各种数据, 及时掌握水资源的动态变化情况。基于实时监测数据, 水资源调度部门可以根据实际情况及时调整调度方案, 实现水资源的动态调度, 提高水资源的利用效率。

1.3 支持多目标决策

水资源调度通常需要考虑多个目标, 如满足用水需求、保障生态流量、提高供水可靠性等。大数据分析技术可以对多个目标进行综合分析和评估, 为决策者提供全面的决策信息, 帮助决策者制定科学合理的调度方案, 实现多目标的优化。

1.4 预测和预警功能

利用大数据分析技术可以对水资源系统的未来发展趋势进行预测, 如预测降雨量、河流水位、用水需求等。通过建立预测模型, 可以提前发现可能出现的水资源短缺、洪涝灾害等问题, 并及时发出预警, 为水资源调度和防灾减灾提供有力支持。

2 水资源调度优化模型构建

针对不同来源数据存在的时间-空间分辨率不一致及质量控制等问题, 要对各种原始数据进行适当的预处理以达到如下目的: 第一, 解决各组分间缺损现象; 第二, 实现多尺度间的有效耦合; 第三, 消除冗余量并保持数据的一致性。

该体系主要从两方面入手。首先, 对与水文学相关的主要变量进行观测和采集, 包括雨强(降水量)、蒸发量、径流量等反映当前水文状态的重要参数, 并且要求其具有较高的准确性; 然后, 收集并整合过去的一些关于流域的相关水文资料信息, 如河道断面面积、水库库容及蓄积量等这些相对稳定的数据。建模过程中使用 LSTM (Long Short-Term Memory) 来搭建

作者简介: 杨秀辉 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文与水资源工程。

模型架构。由于 LSTM 是一种专门用于处理时序性数据的深度学习算法，在 LSTM 的内部有一个特殊的存储机制称为 memory cell (记忆单元)，能够提取出隐藏层中每个时刻的信息并将之保存下来。设定水文预测模型的输入变量为前 n 个时刻的水文观测值序列 $X(t-n+1), X(t-n+2), \dots, X(t)$ ，预测目标为未来 m 个时刻的水文值 $Y(t+1), Y(t+2), \dots, Y(t+m)$ 。LSTM 模型的隐藏状态更新公式为：

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [ht-1, xt] + b_f) \quad i_t = \sigma(W_i \cdot [ht-1, xt] + b_i) \quad Ct = f_t * c_{t-1} + i_t * \tanh(W_c \cdot [ht-1, xt] + b_c) \quad (1)$$

式(1)中： f_t 为遗忘门， i_t 为输入门， Ct 为细胞状态， σ 为 sigmoid 激活函数， W 和 b 分别为权重矩阵与偏置向量^[1]。

3 调度优化实验测试与分析

3.1 实验环境与数据准备

针对典型的山区河谷型小流域，选取其 20 年来较为完整的水文气象资料作为本次实验的数据集。其中包括日降水量（雨和雪）、径流深、平均水位、实测洪峰流量等多个重要指标，总计有约 73 000 条数据组成。其中部分数据来源于国家基本水文站，还有部分来自民间水文网站及网络爬虫获取的数据源。整个项目使用到的硬件环境是基于 Hadoop 的 MapReduce 框架构建而成的一个小型集群，所有节点均为阿里云提供的 ECS 实例。每台 ECS 实例均配置 8 个 CPU 内核，且内存为 32GByte，并安装 Ubuntu 18.04 操作系统。每个 ECS 节点中部署了一个 TensorFlow 服务进程用于训练神经网络模型。而为了应对大量数据带来的读写压力问题，则采用了开源的 HDFS (Hadoop Distributed File System)，它能够提供高容错性并且高效的存储海量结构化或非结构化的数据块的能力^[2]。

3.2 预测模型性能评估

为证明本文提出的改进型 LSTM 模型的有效性和可行性，以比较各种预测算法的效果来达到此目的。通过反复推敲后选择了 RMSE、MAE 和 R 三个评价标准对模型进行了测试（其中 RMSE 越低说明拟合越好，R 越接近于 1 则表示相关性越高），并与基于 LSTM 的 RNN 预测模型相比，分别将其与其他两种预测模型 ARIMA 及传统的回归模型相比较（见表 1）。

结果显示，利用 LSTM 神经网络建立预测模型比传统的预测方法均方根误差 (RMSE) 下降约 39.8%，平均绝对误差 (MAE) 减少约 42.9%，并且相关性提高到 0.18，说明基于 LSTM 神经网络建立的预测模型更准确、稳定；通过将注意力机制及多尺度特征融合技术加入 LSTM 模型中进一步提升预测精度后，得到的误差更加集中且

峰值显著减小，表明经过改进的 LSTM 模型有更好的鲁棒性和稳定性；特别是在汛期高水位下的预测应用场景下，本文提出的模型可以有效将预测偏差控制在 5% 以内，为防洪调度决策提供了高质量的数据支持。

表 1 不同预测模型性能对比表

模型类型	RMSE	MAE	R
线性回归	12.34	9.87	0.73
ARIMA	10.52	8.23	0.78
LSTM	8.16	6.12	0.87
改进 LSTM	7.43	5.64	0.91

3.3 调度优化效果分析

选择近三年的调度运行资料进行对比研究，并以“水资源开发利用程度”“水生态环境质量变化情况”的相关评价指标为依据，主要对三个方面的具体效益进行了比较：一是从供水安全保障的角度来看，通过对近年来实际运行中各水库多年平均日保证率与基于模型计算结果进行比较发现，采用本方案所得到的结果较以往计算值提高了约 4%~5%；二是从工程防洪减灾的效果看，通过近几年汛期调度运行实践表明，由于采用了较为准确的预报成果及实时在线控制方式，不仅有效减少了洪水灾害的发生概率，而且对于可能发生的超标准洪水事件也能够采取相应的措施予以应对；三是从水环境治理效果上看，通过对近几年的库区水质监测数据分析可以得知，采用本方案后的调蓄利用过程更加合理化，其调控水平明显高于其他方案或常规模式下的调蓄状态，从而使得入库径流含沙量得到有效降低，入河泥沙总量大幅度减少^[3]。

从图 1 中可以看出，传统的调度方式的平均响应时

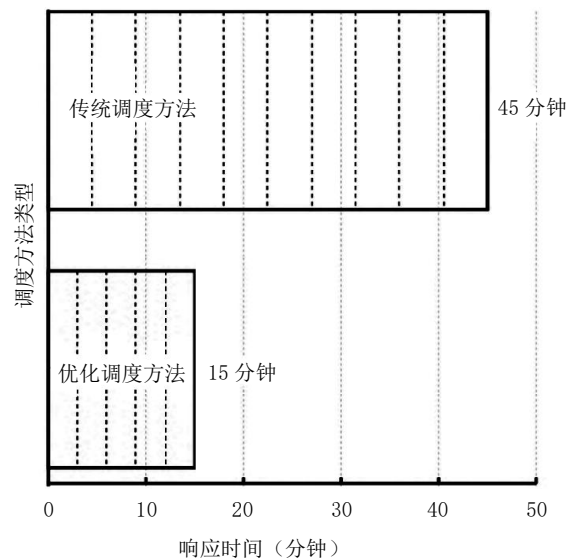


图 1 调度响应时间对比分析

间为 45 分钟左右；而采用大数据分析优化后的方法，则可以达到小于 15 分钟，显著提升了调度的及时性和有效性，在面对突发事件的时候，反应速度越快就越能更好地防范和减少损失。另外，优化后的调度方法可以使生态用水保证率达到 92.3%，比传统方法高出了 7.8%。这有利于维持河流生态系统平衡发展，并且在确保生活生产的同时兼顾了生态用水需求。

4 技术实现路径

4.1 构建水资源调度大数据平台

建立一个具有“全链路”的水务大数据平台。首先，建立数据层，数据层中对所有数据按照类型划分成三类：原生数据、中间处理数据和加工后数据，并且按照不同的组织方式存放在对应的数据集中。原生数据主要为业务系统产生的各类数据文件，在某些情况下也可能来自外部数据源；中间处理数据指由数据源经过清洗转换等操作得到的数据集或者部分数据集；加工后数据则是根据具体需求利用各种算法计算出来的新的数据集或者是直接展示给用户的数据表单。其次，在数据层之上搭建处理与分析层。这个层面包含了两部分内容：一是批处理，二是流式处理。前者主要用于一些长时间运行的任务，比如历史数据回放、模型训练以及未来场景模拟；后者则更多地应用于对当前时刻正在发生事件的检测、预警和近期水文情势变化的趋势预测。再次，面向应用的应用层，它负责向用户提供调度辅助决策、情景仿真、风险评估等功能模块，帮助管理者做出科学合理的判断。最后，服务与治理，主要包括权限管理、数据安全、元数据管理、接口规范化、协同机制等^[4]。

4.2 多源数据采集与整合

首先，集成多类型数据采集设备：包括城市供水管网中的各类型的计量仪表、阀门井盖监测装置、雨量站点、水质检测点等。其次，统一数据接口规范和技术标准：打破传统“烟囱式”的建设模式带来的数据壁垒效应；通过对不同来源数据的标准化转换，消除异构数据库之间的差异性，实现跨部门、跨地域的信息资源共享。最后，在硬件层面上，可以使用物联网技术来连接不同的感知节点从而构成无线传感网，并将这些传感器所获取的各种信号，通过网络传送到相应的服务器上并最终保存至云平台上。

4.3 模型开发与集成

利用大数据技术可以基于水资源系统的特性及调度的目标，建立相应的优化调度模型；同时将描述型分析、预测型分析与评价型分析等不同类型的模型融

合到一个大数据平台上，通过对模型不断的训练和迭代来提升其准确性以及可靠性的方法。例如：以机器学习为理论基础，结合已有的大量历史信息数据（包括气象条件、河道流量、水库蓄水量等），运用机器学习的方法构建出一套针对区域供水量的需求预测模型并将其嵌入调度决策支持系统之中，从而能够及时有效地指导具体的生产实践工作开展。

4.4 可视化与决策支持

利用大数据可视化的原理，把海量且复杂的资源转换成易于理解的信息图及动态图像的方式呈现给管理者，并对相关管理人员进行决策辅助服务。通过构建具有交互功能的可视化仪表盘，使决策人员能够直接获取当前水情概况、调度方案执行情况等相关内容并及时作出判断与调整；同时结合 FineBI 等主流大数据可视化工具实现大屏展现以及多元数据分析，提升决策水平^[5]。

5 结束语

本文针对现有水资源调度存在的问题，在国内外已有研究成果的基础上，以“互联网+”理念为基础，提出了一种基于大数据的水资源调度优化方法和技术路线，并进行了相应的理论推导及数学建模；通过实验测试验证其可行性并取得了良好的效果。试验结果显示，基于大数据的水资源调度优化方法能有效地提升水资源的利用率，确保供水安全性，给实际的水资源管理工作提供了科学的技术支撑。未来的研究工作需要继续扩展大数据在水资源调度领域的应用场景，并进一步探索大数据与物联网相结合的方式，利用物联网技术和设备对水利基础设施实施远程监测和自动控制。

参考文献：

- [1] 吴瑶,夏正豪,胡杨颂,等.基于数字化技术共建“和而不同”动态能力:2011~2020年索菲亚与经销商的纵向案例研究[J].管理世界,2022,38(01):144-163.
- [2] 张振刚,许亚敏,罗秦晔.大数据时代企业动态能力对价值链重构路径的影响:基于格力电器的案例研究[J].管理评论,2021,33(03):339-352.
- [3] 李延东,余博文,赵雪亮.基于数据特征的边缘云资源调度策略分析[J].广东通信技术,2025,45(01):21-24.
- [4] 周娜,李述,陈鹏,等.面向智慧水务的北京市水资源调度业务体系[J].中国水利,2023(14):61-65.
- [5] 谭凌照.水利工程设计中基于GIS技术的水资源调度与管理研究[J].水上安全,2025(02):169-171.

智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用探讨

徐金晖, 胡蝶

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司, 湖北 黄冈 438000)

摘要 在电力系统电气自动化控制中应用智能化技术, 能提升发电效率与新能源消纳能力, 强化电网安全与输电效率, 实现变电站无人化与智能化运维, 支撑分布式能源接入与主动配电网建设。应用智能化技术加强数据采集与感知、新能源发电功率预测、发电机组智能控制、智能巡检、故障诊断与定位、智能调压控制、分布式能源与虚拟电厂管控等, 能促进电力系统电气自动化控制水平显著提升。

关键词 电力系统; 电气自动化; 智能化技术

中图分类号: TM76; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.010

0 引言

电气自动化控制指电力系统发、输、变、配、用等环节对电气设备与系统运行状态进行实时监测、全面分析、自动控制, 其依靠全面状态感知、可靠信息通信、智能分析与控制、精准动作响应等, 实现电力系统的自主调节与快速响应。加强电气自动化控制, 能保障电力系统安全稳定运行, 也能提升供电可靠性与电能质量, 更能提升系统运行效率与经济性。

1 智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用价值

1.1 提升发电效率与新能源消纳能力

智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用, 能通过部署火焰图像识别系统、构建深度学习模型、建立设备参数预测模型等方式, 实现对锅炉燃烧的优化、对汽轮机转速的智能调节、对水电厂梯级联合调度的优化、对设备的预测性维护等, 最终达到降低火电煤耗、缩短机组调峰响应时间、提升水电厂发电量、减少设备非计划停机时间等作用, 有效提高发电效率。另外, 应用智能化技术还可通过功率预测模型、强化学习算法等, 对风电、光伏的功率进行预测, 对风机变桨与偏航进行智能控制, 对光伏逆变器最大功率点跟踪进行优化, 对新能源场站集群进行协同控制, 从而实现对风电与光伏功率的精准预测, 降低弃风弃光率, 缩减场站运维成本, 切实强化电力系统对新能源的消纳能力^[1]。

1.2 强化电网安全与输电效率

电网安全是电力系统电气自动化控制与管理的重点。在电力系统中应用智能化技术, 可通过无人机与机器视觉技术实现对电力线路的智能化巡检, 通过直升机激光雷达实现设备扫描, 通过传感器对线路温度以及弧垂进行在线监测, 从而显著提升巡检效率、降低人工成本、缩短线路故障发生时间, 为电网安全提供有力保障。另外, 智能化技术的应用还可促进柔性输电与电网潮流智能化控制, 通过电网数字孪生模型对潮流变化进行实时推演, 依托强化学习算法对柔性交流输电系统设备输出进行动态化、智能化控制, 从而推动输电效率提升。

1.3 实现变电站无人化与智能化运维

智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用, 能通过智能终端与合并单元实现一次设备与二次系统的数字化交互, 也能通过设备故障诊断模型实现对各种故障的动态监测和提前预测, 配合程序化操作、机器人巡检、故障自处理等, 支持变电站自动化、智能化控制。基于数据自动采集与机器学习模型的潜伏性故障自动识别技术, 能对变压器、断路器等核心设备的运行状态与寿命进行评估和预测, 同时自动生成差异化的维护计划, 支持设备预测性维护以及变电站智能运维。

1.4 支撑分布式能源接入与主动配电网建设

应用智能化技术, 可在配电站部署边缘计算节点, 配合数学模型对配电网控制算法进行预测, 根据光伏、储能以及电动汽车等的实际用电需求实现分布式能源

作者简介: 徐金晖 (1996-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气试验。

的协同控制,从而提高配电网供电可靠性,同时提高分布式能源渗透率,维持配电网稳定运行。分布式馈线自动化技术的应用,能通过对等通信对配电网故障进行快速定位,同时触发断路器动作进行隔离故障以及通过联络开关对非故障区段供电加以恢复,实现无需人工干预的配电网故障自愈,将故障停电时间缩短至秒级并降低用户停电损失^[2]。

2 智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用要点

2.1 发电侧电气自动化智能控制

1. 数据采集与感知。智能化技术的应用离不开数据的支撑。发电侧电气自动化智能控制需以对发电设备的全状态、高精度、实时监测为基础,构建多源异构传感网络,根据电网特性以及发电设备类型,合理部署不同传感器,采用“有线为主、无线为辅”的数据混合传输方案,在设备就地部署边缘计算节点以实现数据的预处理并减轻上行传输带宽压力,部署统一的数据中台实现对异构数据的融合存储与运用。传感器选择需优先考虑工业级、抗干扰、高精度的传感器,并且要统一传感器通信协议,确保传感器量程与精度适配设备运行参数范围,根据数据类型的时效性需求合理设定传感器采样频率,利用 GPS/北斗授时与精密时钟同步技术确保不同设备上传感器数据间时间戳一致,而且核心设备的关键参数需进行双传感器冗余配置^[3]。例如:针对锅炉设备,一般需配置温度传感器、压力传感器、振动传感器以及超声波传感器,从而实现炉膛温度、汽包压力、管壁温度、烟气成分、炉膛振动等参数的监测与采集;针对变压器,一般需配置温度传感器、绝缘传感器与振动传感器,从而实现绕组温度、顶层油温、套管绝缘、局部放电、油中溶解气体等参数的监测与采集。

2. 新能源发电功率预测。在电网建设与运行中,新能源发电规模持续扩大。新能源发电具有较强的随机性,必须做好相应的发电功率预测工作以支持电网供需平衡以及消纳能力提升。应用智能化技术进行新能源发电功率预测,可利用多源数据融合分析与先进算法保障预测精度。对风电/光伏输出功率、并网点电压、并网点电流、并网点有功/无功功率、风速、风向、光照强度、环境温度、降水、气压、湿度、风机转速、桨距角、偏航角度、光伏板清洁度、逆变器效率、汇流箱状态等数据进行采集,采用时序数据库对多源数据进行存储,可为新能源发电功率预测提供数据支撑。对采集的数据进行预处理,通过缺失值补全、异常值剔除、时间同步与数据对齐、数据标准化等手段,

有效消除数据噪声干扰并为后续的新能源发电功率预测奠定良好基础。合理采用时空图神经网络、长短期记忆网络等深度学习算法,构建气象大模型与深度学习模型,采用时间序列法进行数据集划分,通过均方误差、平均绝对百分比误差作为损失函数,采用时间序列交叉验证,再通过网络搜索、随机搜索、贝叶斯优化等方法进行超参数调优,采用集成学习方法进行模型融合,持续更新数据进行增量训练,从而构建相应的新能源发电功率预测模型^[4]。于发电厂本地部署边缘计算节点,在云端部署完整模型,将模型预测结果通过标准化接口与电网系统进行适配,规范模型预测结果输出格式,从而通过模型预测为电网日前调度、日内滚动调度、实时调度以及发电厂发电计划优化、储能系统充放电控制等提供依据,发挥新能源发电功率预测的作用并支撑电网调度。

3. 发电机组智能控制。智能化技术在电力系统电气自动化控制中的应用,发电机组智能控制是发电侧电气自动化智能控制的核心,其能有效解决传统控制系统在变工况、强扰动条件下精度不足与响应滞后的问题。火电/燃气轮机机组作为电网主力调节电源,其智能化控制需实现快速响应负荷、稳定参数以及高效低排放燃烧。系统对汽包压力、炉膛温度、氧量、转速、功率、主汽流量、频率信号等数据进行实时监测与分析,通过模型预测控制对机组的主汽压力、温度、负荷等变量进行滚动优化与约束控制,通过自适应 PID 进行变工况下的设备参数控制,通过模糊控制对燃烧、传热等非线性环节的参数进行精准控制,结合自适应励磁控制、非线性励磁控制、模型驱动的阀位控制、火焰图像识别系统、氧量在线监测仪、神经网络算法、强化学习算法、低氧燃烧控制等,可实现火电/燃气轮机机组的智能协调控制、智能励磁与调速控制、智能燃烧控制。水电/抽水蓄能机组作为电网的优质调节电源,其智能化控制需强调协同控制、快速启停与并网、工况自适应。采用自适应控制与模糊控制,接入流域水文预测系统,通过动态规划、粒子群优化算法,将转速调节响应时间压缩至秒级,制定标准化的机组停机、开机、励磁、并网全流程自动化规范,通过准同期控制进行并网管控,控制调速器在孤网运行条件下自动切换为频率主控制模式,可实现水轮机调速器智能控制与机组工况智能控制。风电/光伏作为新能源主力电源,其智能化控制需以最大功率点、电网友好并网及设备损耗抑制为重点。其中风机智能控制需基于数据进行变桨角与发电机转速的预测控制,通过强化学习算法进行基于振动反馈的塔筒共振抑制,设置变桨速率上限优化机械损耗,配合电网一次调频、

调压指令进行变桨控制与变频器调节。光伏电站智能控制则要通过组串级逆变器实现组串级最大功率点跟踪控制,结合光照预测数据提前调整逆变器工作模式实现平滑并网,基于电网调压指令动态调节无功输出,通过分布式控制架构实现光伏阵列的电压分层控制。

2.2 输电线路电气自动化智能控制

1. 智能巡检。应用智能化技术进行输电线路智能化巡检,能实现全天候覆盖、标准化检测、高精度识别、长期运维成本降低、运维效率提升、故障秒级响应、隐患提前预警等。搭载可见光相机、红外热成像仪、紫外成像仪、激光雷达等的多旋翼无人机、固定翼无人机、垂直起降固定翼无人机等,可沿线进行巡检,对绝缘子、导线、金具、树障距离等加以检测;杆塔挂载式的覆冰监测装置、微风振动监测仪、绝缘子泄漏电流监测仪、导线温度监测仪等,能实现对电网各项设备与运行参数的实时监测;直升机、机器人、巡线小车等,则能满足不同的自动化巡检需求^[5]。巡检数据通过4G/5G、NB-IoT、LoRa、光纤复合架空地线、巡检设备本地缓存等方式进行传输,经处理后通过卷积神经网络、点云分析、时序分析等方式,可基于数据分析实现缺陷自动识别、隐患分级预警、巡检路径优化、运维工单自动生成、设备健康状态评估等功能。

2. 故障诊断与定位。应用智能化技术,可实现对电力系统故障的自动诊断与定位。将数据监测与传统阻抗法相结合,能根据故障时的电压电流测量值计算故障回路阻抗,结合线路单位阻抗自动推算故障距离;将监测数据与行波法相结合,能基于故障产生的暂态行波传播的时间与波速计算故障距离,实现高精度故障定位;将监测数据与故障分析法相结合,能根据同步向量测量单元的同步数据,通过故障模型进行精准分析;应用搭载高清可见光相机与红外热成像仪的无人机,可配合电气量定位结果对导线断股、绝缘子击穿等故障进行定位;应用分布式光纤传感器技术,基于布里渊散射/拉曼散射,可对线路温度、应变、振动进行分布式监测并根据异常数据定位故障区间;应用多源数据融合技术,通过卷积神经网络、长期记忆网络、贝叶斯网络等,实现高精度诊断与定位^[6]。

2.3 配电侧电气自动化智能控制

1. 智能调压控制。应用智能化技术进行配电侧智能调压控制,相较于传统有载调压变压器与电容补偿相结合的调压方式而言,具有实时自适应控制、分布式多节点协同、覆盖全节点、满足不同场景、网损优化良好、响应速度达毫秒级等优势。智能调压控制建立在智能电表、馈线终端、配电终端、台区智能融合终端、分布式电源监控终端、同步向量测量单元等设

备之上,通过模型预测控制、下垂控制、强化学习算法、神经网络算法、多目标优化算法等,既可以由配电网主站统一计算全网调压策略并下发至各执行设备,又可以由各区域控制器本地计算调压策略且仅与相邻节点交互数据,还可实现主站优化全局、区域控制器负责本地精细调节。

2. 分布式能源与虚拟电厂管控。应用智能化技术实现分布式能源与虚拟电厂管控,能促进电力系统安全、消纳、经济、弹性等方面管控目标的实现。分布式能源与虚拟电厂管控模式能通过虚拟电厂实现统一聚合与分层协同控制,响应速度达毫秒级,强化源荷储协同以提升消纳率,并能参与辅助服务市场。虚拟电厂的聚合对象包括分布式光伏逆变器、分布式风电变流器、分布式储能系统、电动汽车充电桩、工业可调负荷、智能楼宇系统、固态变压器、动态静止同步补偿器等,通过台区智能融合终端、馈线终端、通信网络等进行有效聚合。智能电表、台区智能融合终端、分布式能源监控终端、同步向量测量单元、环境监测设备等可对分布式能源运行状态、负荷数据、配电网节点电压/电流/功率数据等进行采集,再经由模型预测控制算法、下垂控制算法、深度强化学习算法、多目标优化算法等,自动生成并网控制、负荷调度、电压调节、频率调节、孤岛运行与黑启动等控制指令,指令通过通信层下发至分布式能源本地控制器后驱动设备动作。

3 结束语

智能化技术为电力系统电气自动化控制的创新与升级提供了重要动力,并且其已经在发电、输电、配电等核心环节得到广泛应用。未来,随着人工智能、大数据、数字孪生等先进技术在电力系统中的深度协同应用,相关标准逐步完善,安全防护能力逐步增强,电力系统将更加智能、安全与高效。

参考文献:

- [1] 陈鹏飞. 电力系统运行中电气自动化技术的应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(05):121-123.
- [2] 吴燕峰. 智能化技术在电气自动化控制系统开发中的运用研究[J]. 设备监理, 2023(02):1-3,8.
- [3] 田振华. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用探讨[J]. 数字通信世界, 2022(11):137-139.
- [4] 刘俊峰. 电气自动化控制系统的应用展望[J]. 电子技术, 2021,50(06):170-171.
- [5] 林燕霞. 电气自动控制工程中智能化技术应用研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(02):221-223.
- [6] 马赫欣. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用探析[J]. 电子元器件与信息技术, 2021,05(02):133-134.

复杂地质条件下地下工程施工的智能监测技术应用研究

魏 星

(天津盛发管道工程有限公司, 天津 300450)

摘 要 复杂的施工环境给地下工程建设带来了围岩塌方、涌水突泥以及周边地质灾害群发连带效应等问题, 如何保障施工安全是关键, 而对工程进行准确有效的监测是其重要途径之一。然而, 常规的监测手段无法实现对复杂环境下工程监测信息的快速响应及早期预警的要求。智能监测技术是基于高精度传感器、物联网、大数据分析等先进科学技术, 具有强环境适应性、实时感知、智能预判等特点。基于此, 本文结合复杂地质条件核心要素及危险源的特点对智能监测技术的适用性进行探讨, 总结关键适用技术的应用注意事项, 分析目前存在的应用难点, 并提出有效的改进措施, 以期为促进智能化监控量测技术在复杂地质条件下岩土工程中的应用提供参考。

关键词 复杂地质; 地下工程; 施工安全; 智能监测; 风险管控

中图分类号: TP2; TU94

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.011

0 引言

近些年, 智能监测技术凭借其自动化、智能化、高精度的核心优势, 逐步成为破解复杂地质监测难题的重要手段。但复杂地质条件对智能监测技术的环境适应性、数据可靠性、预警精准性提出了更高要求, 现有技术应用仍存在适配性不足、技术融合不深入等问题。因此, 深入研究复杂地质条件下智能监测技术的应用逻辑与实践路径, 破解技术应用瓶颈, 对于提升复杂地质地下工程施工安全管理水平、推动地下工程建设高质量发展具有重要的现实意义。

1 复杂地质条件核心特征与智能监测适配性要求

1.1 复杂地质条件核心特征

复杂地质条件涵盖多种不利地质类型的叠加与组合, 核心特征主要体现在三个方面: 一是地质构造破碎化, 多存在断层、破碎带、节理密集区等, 围岩完整性差、稳定性极低, 易发生坍塌、剥落等灾害; 二是水文条件复杂化, 地下水赋存状态多变, 存在潜水、承压水等多种类型, 易引发涌突水、突泥等风险, 且地下水活动会进一步加剧围岩失稳; 三是力学性质差异化, 不同区域围岩力学参数差异大, 变形规律复杂且非线性特征显著, 增加了风险预判难度; 四是环境干扰多元化, 施工区域易受地下应力场变化、周边水体渗透等因素影响, 进一步放大施工安全风险^[1]。

1.2 复杂地质对智能监测的适配性要求

针对复杂地质条件的核心特征, 智能监测技术需满足四项核心适配要求: 一是强环境适应性, 监测设备需耐受高湿度、高水压、强振动、粉尘污染等复杂环境, 确保在极端条件下稳定运行; 二是高监测精度与灵敏度, 能够精准捕捉复杂地质条件下围岩微小变形、应力突变等早期风险信号, 避免因监测精度不足导致风险漏判; 三是实时动态响应, 具备快速数据采集与传输能力, 及时跟踪地质条件与施工状态变化, 为风险预警预留充足处置时间; 四是多源数据融合分析能力, 能够整合地质勘察、施工参数、水文监测等多维度数据, 实现对复杂风险的综合研判与精准预判。

2 复杂地质条件下地下工程智能监测核心技术应用实践

2.1 高精度抗干扰传感技术应用

传感器作为复杂环境下岩土工程智能化监测的关键组成部分之一, 决定了监测结果的准确性和对潜在危险的识别能力, 所以提高传感器在恶劣环境下的稳定性和提升传感器测量准确性至关重要。根据复杂的工程地质条件的不同特点来选择合适的传感器类型以及布置方法。针对岩溶、高水压等地质条件对设备环境适应性强的要求, 优先采用具有较强环境适应能力的抗干扰传感技术, 该类技术可抵抗潮湿、高压、腐

作者简介: 魏星(1983-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 复杂地质下工程施工技术和安全体系保障。

蚀等环境影响,保证对围岩变形、应力、渗压等重要指标采集的准确性及可靠性。针对破碎带、软岩等易出现大变形的地质情况,应优先选用大范围、高精度传感器,并采用合理的埋置方法,尽可能减少开挖活动对仪器的影响,从而实现整个围岩位移过程的有效监控。对于采空区等极为不稳定的地点,宜采取密集型分布式布置形成三维传感体系,确保风险区全面覆盖,不漏掉重要的风险点^[2]。另外,针对传感器在恶劣环境下的随机故障现象,应设计传感器数据补偿功能以及采用传感器冗余技术以保证传感器采集信息的准确性,从而保障后期风险评估的质量。

2.2 稳定高效的传输技术适配

由于地下环境具有地质情况复杂、空间狭小、信号遮挡严重以及施工扰动大等特点,严重影响了数据的可靠传输,如何实现可靠的数据传输是实现智能监测的重要保障。根据地质特点设计相应的传输方式来解决数据传输问题。对于一些深埋地下的项目或者信号屏蔽非常严重的场所,单线传输方式无法保证信息传输的稳定性,应该采取“光纤传输+无线传输”的两种传输方式,通过光纤传输的大带宽、高稳定的特性来确保主要数据的有效传输,而无线传输则起到一个辅助的作用,从而避免出现由于光纤断裂而导致的信息丢失现象的发生。对于涌突水风险较大的区域来说,传输设备及传输线路的防水性非常重要,应使用全防水密封型的传输设备以及传输线路来增强传输系统对水的抵抗能力,防止由于被水浸泡而造成传输系统的故障。同时,为了提高系统的反应速度,可以利用边缘计算的方式,在地下的施工现场将收集到的原始信息先进行一次预处理,过滤无效信息、排除噪声数据,在减轻后续的数据传输压力及处理负荷的同时,保证重要风险信号能够及时上传并触发预警响应机制,为风险处置赢得时间窗口期。

2.3 多源数据融合与智能预警技术应用

由于影响地下工程的风险因素较多,在复杂的地质环境下,很难从某一单一的数据中准确地判断出地下工程所处的实际风险状态,这就需要利用大数据分析以及综合预测系统来辅助地下工程施工中的风险识别以及预警工作。在大数据分析方面,首先要搭建一个综合性数据库,收集包括地质信息、工程测量资料、地下水资料、天气预报资料等相关数据。其次,对数据进行预处理工作,如清洗、归一化处理等操作,去除异构数据中的格式不统一性及冗余性等问题,提高数据质量,为下一步融合打下坚实的基础。运用机器学习以及深度学习的方法挖掘多种数据之间的关系,

并建立适合于复杂地质条件下的风险预测模型,达到超前预测预报围岩失稳、涌突水等关键性风险的目的。由于不同类型的复杂地质风险发育演化的机理不尽相同,因此应制定不同的临界值及相应的预警级别,并根据地质状况的变化及时更新预警指标,避免出现固定的临界值引起的预警失误或者预警不及时的情况发生。其次,在提高预警结果可视化的方面,建立可视化预警系统,实现动态监测成果与隧道三维地质模型的叠加显示,直观反映危险区的空间位置及演化情况,辅助领导层及时了解险情程度,并作出合理判断^[3]。

2.4 动态自适应监测系统优化

在复杂地层中,开挖隧道的地质条件以及开挖状态是时刻变化着的,并非一成不变,在此情况下制定的监测措施也无法满足其变化的要求,所以需建立一种能够自我调节的监测体系,从而对监测工作进行合理安排并不断提升监测质量。根据实际监测信息提供的反馈,灵活调整监测点布置密度及监测频次,在风险高值区增加监测点、提高监测频率以保证对风险演化过程的有效把握;在安全稳定区间可以适当减少监测量级,实现监测效率的最大化。形成监测系统定期复测机制,配合地质超前预报取得的新地质资料,动态修正监测模型及预警指标,提高监测系统对于地质条件变化的适应能力,并加强监测系统与施工管理系统之间的融合,将施工机械设备状态、人员位置等数据纳入其中,形成联动机制,在监测系统出现风险提示时可以自动触发施工机械停工、人员疏散等一系列应对策略,大大提高风险处理的安全性和速度性,“测—警—处”一体化管理闭环。

3 复杂地质条件下智能监测技术应用的挑战

3.1 极端地质环境下技术适配性仍存在短板

面对超深地下工程、高水压岩溶、强地震活动区等极端复杂地质条件,现有监测仪器仪表的环境适应性尚不充分,容易造成传感器失准、电缆断裂等故障。另外,极端地质环境下地层参数变化机理复杂多变,现有风险预报方法不能涵盖所有复杂情况,造成预警准确率不高,个别项目还存在误预警、漏预警的情况。

3.2 多源数据融合与共享机制不完善

地质勘察、施工、监理、设计等多个主体的数据分别储存在不同的平台中,并且这些数据格式不统一、标准不一致,很难进行有效的融合分析;同时数据没有共享机制,在多个主体间存在着信息壁垒,使得地质数据、施工数据及监测数据不能很好地联系起来,影响风险综合研判能力的提高。另外,一些监测数据还存在隐私和安全性担忧,不利于数据共享工作的开展。

3.3 技术成本与专业运维能力不足

智能监测技术适合于复杂地层的高精度智能化监测仪器及系统的开发投入大,在同类型的工程中相比监测费用明显上升,对小型项目而言是一笔沉重的投资负担。另外,针对复杂地层的监测系统维护也需要掌握地质勘探学、传感学、信息处理学等方面知识的综合性人才,目前业内缺乏相关综合人才,造成一些项目监测系统维护管理不够到位,仪器标定不及时、数据异常不能及时处理,影响监测系统的正常运转及使用效果等问题。

3.4 标准规范与技术体系不健全

目前,对复杂地质条件下的智能监测技术应用相关标准的研究制定工作相对缺乏,没有形成一套统一的智能监测设备选用标准、监测点布置标准、预警值设定标准,造成各项目的监测方案不尽相同,监测数据不具备较高的可比性和通用性;智能监测技术与复杂地质勘察、施工工艺相互融合的机制不完善,缺少统一的技术应用指引,技术应用不规范、不科学。

4 复杂地质条件下智能监测技术优化应用策略

4.1 强化核心技术研发,提升极端环境适配性

加大复杂特殊环境下智能监测核心研发力度,重点攻克高强度传感器、抗干扰通信终端等技术难题,提高设备抗高压、防震动、耐高低温性能及寿命;开展地质力学与智能分析融合研究,建立不同类型复杂地质条件下的专属风险预警模型,提高预警准确率。

4.2 构建统一数据融合共享平台,打破信息壁垒

搭建跨主体、跨部门统一的数据融合共享平台,形成统一的标准数据格式、标准数据接口及数据共享方式,实现地质勘察、施工、监测、监理等各类数据的一体化存储、共享利用;应用数据安全加密技术确保数据共享的安全性、保密性,避免对数据共享产生顾虑。基于该平台进行多元数据分析,研究分析数据之间的联系性,强化风险的综合性判断。加强监测数据与其他施工管理平台、应急管理平台的数据融合,实现数据化的智能施工及风险处理^[4]。

4.3 优化成本管控,加强专业运维体系建设

通过技术创新与规模化应用降低监测成本,加大国产化高精度监测设备研发与推广力度,减少对进口设备的依赖,提升设备性价比。针对不同规模、不同地质复杂程度的项目,设计差异化监测方案,在保障核心风险监测效果的前提下,合理优化监测点布设与设备配置,控制成本投入。加强专业运维体系建设,建立专业化运维团队,定期开展设备检修、校准、系统升级等工作。

通过校企合作、职业培训等方式,培养具备跨学科知识的复合型运维人才,提升行业整体运维能力。同时,推广远程运维技术,降低现场运维成本与安全风险。

4.4 完善标准规范体系,推动技术规范应用

加快推进复杂地质条件下智能监测技术应用标准规范的制定与完善,明确不同复杂地质类型的监测设备选型标准、监测点布置原则、数据采集精度要求、预警阈值设定方法、系统建设与验收规范等内容,为技术应用提供统一指导^[5]。构建技术应用评价体系,开展复杂地质条件下的智能监测技术应用效果评价工作,规范并引导技术应用标准;加大行业间沟通力度,分享典型项目的智能监测技术应用成果,形成技术交流平台,实现先进技术和经验的传播及共享,促进智能监测技术在复杂地质地下工程中的广泛应用。

5 结束语

在复杂地质条件下,地下工程施工安全风险高、管控难度大。智能监测技术作为精准感知风险、有效防控灾害的主要手段,应用价值和重要性日益突出。针对复杂地质条件下的破碎化、水文复杂、力学差异大等关键特征,智能监测技术应具有强环境适应性、高精度性、实时响应等关键能力,基于高精度抗干扰传感技术、稳定传输技术和多源数据融合分析技术,形成风险监测闭环链路。当前,复杂地质条件下智能监测技术应用仍面临极端环境适配性不足、数据共享机制不完善、成本与运维压力大、标准规范不健全等挑战。未来,需通过强化核心技术研发、构建统一数据共享平台、优化成本管控与运维体系、完善标准规范等多维度发力,提升智能监测技术对复杂地质条件的适配性与应用效果。相信随着技术的不断创新与体系的逐步完善,智能监测技术将在复杂地质地下工程施工中发挥更大作用,为提升工程施工安全水平、推动地下工程建设高质量发展提供坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 詹立敏.建筑基坑工程施工智能监测技术应用探析[J].张江科技评论,2025(03):50-52.
- [2] 姜晓冬.铁路施工中的智能监测技术及其在高铁项目中的应用[J].山西建筑,2025,51(01):121-124.
- [3] 尹春维.智能化监测在建筑结构安全施工中的应用研究[J].广东建材,2024,40(12):167-169.
- [4] 周丽平.智能全站仪在建筑工程变形监测中的应用[J].经纬天地,2024(01):36-39.
- [5] 吴瑜灵,王远利.BIM-IoT技术在轨道交通工程智能化施工中的应用研究[J].广东土木与建筑,2024,31(02):20-24.

电气化铁路接触网动态性能指数 (CDI) 分析及整治措施研究

刘志敏

(中国铁建电气化局集团第五工程有限公司, 四川 成都 610031)

摘要 在我国高速铁路网络中, 接触网是为电力机车提供动能的载体, 其动态性能的稳定性直接决定了电力机车运行的安全性与能效水平。本文聚焦接触网动态性能指数 (Catenary-pantograph Dynamic Index, CDI) 的量化分析体系与工程整治技术, 通过整合动态检测数据与现场复检验证, 构建了多维度的 CDI 评价模型, 旨在为电气化铁路接触网的精准运维、性能优化提供参考。

关键词 高速铁路; 接触网; 动态性能; CDI 指数; 运维整治

中图分类号: U28

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.012

0 引言

接触网作为电气化铁路的关键供电装置, 其与受电弓的动态耦合性能是影响列车运行品质的核心因素。传统采用的接触网运行质量指数 (CQI) 在动态工况适应性、评价维度全面性等方面存在局限, 难以满足高速列车对供电稳定性的严格要求。为此, 在 CQI 评价框架基础上, 通过引入层次分析法优化指标权重分配, 改进评价函数的非线性拟合精度, 提出了接触网动态性能指数 (CDI), 实现对接触网动态运行状态的精准量化评估^[1]。

1 接触网动态性能指数 (CDI)

1.1 指数定义

接触网动态性能指数 (CDI) 是表征接触网—受电弓耦合系统动态运行状态的综合量化指标, 其核心特征在于实现对弓网关系与受流质量的多维度评价。该指数选取动态拉出值、接触线高度平顺性、弓网接触力稳定性及燃弧率四个关键检测参数, 基于各参数对系统运行的影响权重, 通过层次分析法确定指标系数, 构建综合评价模型, 计算公式如下:

$$CDI = 0.18CDIS + 0.36CDIH + 0.36CDIF + 0.1CDIA \quad (1)$$

式(1)^[2]中, CDIS 为动态拉出值分量; CDIH 为动态接触线高度分量; CDIF 为弓网接触力分量; CDIA 为燃弧率分量。

1.2 CDI 分量研究

1.2.1 CDIS: 动态拉出值分量

$$CDIS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_s^2 (S_{\max-i})}{n}} \quad (2)$$

式(2)中: n 为评价单元的具体跨数; i 为评价单元内, 每跨的位置标识, 第一跨位置标识为 1; $S_{\max-i}$ 为评价单元内第 i 跨中最大的动态拉出值; f_s 为评价单元内各跨动态拉出值评价函数。

解析: 动态拉出值是反映接触网空间位置稳定性的核心参数, 根据评价函数特性, 当跨内最大动态拉出值控制在 150 ~ 350 mm 区间时, 该分量贡献值为 0。

1.2.2 CDIH: 动态接触线高度分量

$$CDIH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_H^2 (H_{std-i})}{n}} \quad (3)$$

式(3)中: H_{std-i} 为评价单元中第 i 跨的动态接触线高度标准偏差; f_H 为评价单元内各跨动态接触线高度评价函数。

解析: 接触线高度标准偏差是反映导高平顺性的关键统计指标, 其物理意义为测量数据偏离均值的离散程度。标准偏差计算公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\chi_i - \bar{\chi})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(\chi_1 - \bar{\chi})^2 + (\chi_2 - \bar{\chi})^2 + \dots + (\chi_n - \bar{\chi})^2}{n-1}} \quad (4)$$

作者简介: 刘志敏 (1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气化铁道接触网。

式(4)中, S 为标准偏差; n 为试样总数或测量次数, 一般 n 值不应少于 20 ~ 30 个; i 为测量数据中某数据的排序, 1 ~ n。(可利用 EXCEL 表格标准偏差函数 STDEV. S 研究和计算标准偏差)

1.2.3 CDIF: 弓网接触力分量

$$CDIF = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_F^2(F_{std-i})}{n}} \quad (5)$$

式(5)中: F_{std-i} 为评价单元内第 i 跨受电弓—接触网接触力标准偏差; f_F 为评价单元内各跨受电弓—接触网接触力的评价函数。

解析: 接触力标准偏差反映弓网接触压力的稳定性, 该分量优化的核心在于缩减跨内接触力波动范围。通过改进接触网悬挂结构弹性特性、优化受电弓碳滑板材质等技术手段, 可有效降低接触力波动幅度, 提升 CDIF 分量指标。

1.2.4 CDIA: 燃弧率分量

$$CDIA = f_A(NQ) \quad (6)$$

公式(6)中: NQ 为评价单元内的弓网燃弧率; f_A 为评价单元内弓网燃弧率的评价函数。

解析: 燃弧率是反映受电弓从接触网获取电流质

量的关键指标, 以评价单元为基本单位进行计算。在受电弓常规运行工况下, 弓网燃弧率一般低于 0.1%, 对应 CDIA 分量值小于 0.1, 而且该指标权重仅为 0.1, 对 CDI 总指数影响有限。

综上所述说明, 接触网 CDI 指数优化的优先级排序为: 首先是跨内高差调整, 其次是动态接触力范围控制, 最后是最大拉出值调整。其中跨内高差与接触力范围的调整可协同实施, 主要是对接触网定位点与跨中吊弦线夹位置的导高精准调控^[3]。

2 案例分析

2.1 典型 CDI 缺陷案例

以南昆客专下行线路 K194.524-K195.785 区段的 CDI 整治为例, 该评价单元全长 1.261 km。2021 年 8 月国铁集团 CRH380AJ-0201 综合检测列车两次检测结果显示, 该评价单元的 CDI 管理值为 2.1, 超出规定的 2.0 的安全控制标准值, 为提高弓网受流质量, 因此需要对该单元进行整治。

首先要对该单元 CDI 各分量的构成占比进行分析工作, 找出造成本单元 CDI 管理均值扣分高的原因, 以此作为整治的方向重点, 经过分析, 该单元各分量的占比数据如表 1 所示。

表 1 整治前 CDI 各分量占比分析表

项目	起始里程 (km)	终止里程 (km)	CDI _s (拉出值)	CDI _H (导高)	CDI _F (接触力)	CDI _A (燃弧)	CDI
分量			0.0 297	1.8 271	1.3 212	9.9 566	2.1
权重系数			0.18	0.36	0.36	0.1	1
加权后 CDI	194.524	195.785	0.0 053	0.6 577	0.4 756	0.9 956	2.1 343
占比			0.25%	30.82%	22.28%	46.65%	100%

由表 1 可以看出, CDI_H 占比 30.82%, CDI_F 占比 22.28%, 而 CDI_A 占比高达 46.65%, 拉出值分量占比非常小可以忽略不计, 可以看出, 燃弧是造成 CDI 管理值扣分高的主要原因, 其次是导高平顺性不足及接触力缺陷的问题。

2.2 主要影响因素分析

1. 接触线内应力: 采用接触网张力测试仪对该锚段的接触线进行张力检测, 测试结果表明该锚段接触线的张力差值均控制在允许范围内, 排除因补偿装置卡滞或定位装置失效导致的应力不均原因^[4]。

2. 专业结合部: 通过进一步分析对应区段的轨道线路的 TQI 检测数据(轨道质量指数), 结果显示各项指标均满足线路标准, 无明显几何偏差。同时, 结合线路平面线形与纵断面坡度分析, 排除因线路基础变形引发的弓网耦合不良的问题。

3. 导高平顺性: 通过对这个单元锚段 8 月份的两次 1C 动态检测数据的对比分析, 发现该单元的动态燃弧分量 CDIA 值为 9.9 566, 主要问题体现为整个接触网锚段存在多处燃弧点, 同时通过现场的静态测量发现, 该锚段存在 12 处相邻定位点导高差值超过 50 mm 的超标处所, 其中最大高差竟达 72 mm, 形成明显的 V 型或倒 V 型的缺陷, 导致动车组通过时受电弓对接触线的冲击加剧, 引发了燃弧现象。

4. 接触线平直度: 对比《高速铁路接触网运行维修规则》的接触线平直度标准要求(平直度 ≤ 0.1 mm/m), 采用接触网平直度检测仪对该锚段进行平直度测量, 发现该锚段硬点集中区段存在 23 处平直度超标, 最大值达 0.7 mm/m, 接触线表面存在明显的机械损伤与局部变形, 是导致该锚段弓网离线燃弧的直接原因。

通过以上检测分析表明, 该单元 CDI 指数超标是

接触线平直度不达标与导高平顺性不足协同作用的结果，其中平直度缺陷为主要影响原因。

2.3 整治措施

1. 导高平顺性处置：根据现场测量的静态参数进行调整，主要是将定位点、吊弦点的导高调整至允许的误差范围内，杜绝V字和倒V字，现场作业尽量将相邻定位点、吊弦点的导高差控制在2 mm内。

2. 接触线平直度处置：（1）确保接触网补偿装置的有效性：检查补偿装置转动灵活性，松开补偿框架锁定装置，确保任何时间补偿坠砣串均可随线索的延展而自由升降。（2）对平直度超标处所整治作业：采

表2 整治前后 CDI 各分量占比的对比数据

项目	起始里程 (km)	终止里 程(km)	检测车	1C 动态检 测时间	CDI _s (拉出值)	CDI _h (导高)	CDI _F (接触力)	CDI _A (燃弧)	CDI	变化 幅度
整治前	194.524	195.785	CRH380AJ-0201	8月9日	0.0 297	1.8 271	1.3 212	9.9 566	2.1	—
整治后			CRH380AJ-0201	12月9日	0.0 935	1.2 654	0.9 096	3.1 769	1.1	-47%

形图上可以看出，其各参数的波形已得到明显改善。

2.5 影响因素综合分析

1. 设计影响因素：接触网中锚在轨道线路上的设置位置直接影响接触线张力分布，故建议在图纸审核阶段时需对中锚张力差开展检算，优化中锚布置位置。

2. 材料影响因素：接触线绕盘时需严格其张力大小，避免线索产生永久性变形；同时应对线索表面进行抛光处理，消除毛刺、坑点等缺陷。

3. 施工机械影响因素：（1）接触线恒张力架线车在大坡道区段作业时，需确保放线张力稳定；（2）在接触线展放过程中，架线车的张力需线性加载，减少硬点形成与线索内应力残留^[5]。

4. 施工质量影响因素：（1）接触线展放时，临时悬挂点较少，接触线未进行超拉释放其应力，不及时安装定位及吊弦，在接触线自重的影响下，易造成接触线扭面或不平顺；（2）安装精度不足、接触网参数调整不到位，导高参数较差，受电弓在高速行驶时易造成“离线”或冲击接触线从而导致燃弧及接触力、硬点等问题；（3）下锚补偿装置卡滞、线锚、承锚大小轮满圈或空槽，腕臂偏移因补偿卡滞导致接触网张力不均衡，也可能导致接触网及接触力问题^[6]。

3 结束语

本文通过理论建模与工程实践相结合，构建了完善的 CDI 指数评价体系与整治技术框架，实现了接触网动态性能的精准评估与高效提升。研究表明，CDI 指数能够有效表征接触网—受电弓系统的动态运行状态，

用五轮液压整弯器，从中锚向两端下锚方向进行单向的平推作业，施加均衡压力，每完成一个跨距立即恢复安装定位线夹及吊弦，严禁跨距内往复作业。

2.4 整治效果

2021年12月9日、20日国铁集团综合检测列车对南昆客专下行线路进行检测，其中K194.524-K195.785评价单元的 CDI 管理值已经下降为1.1分，整治取得明显效果，整治前后各 CDI 分量对比情况见表2。

从表2的两组数据对比可以看出，该单元的 CDI 均值由整治前的2.1下降到了整治后的1.1，下降幅度47%，特别是 CDI 燃弧分量的下降幅度最大，从检测波

其核心影响因素包括接触线平直度、导高平顺性与接触力稳定性，通过针对性的工艺改进与参数优化，可实现 CDI 指数的显著降低。南昆客专的工程案例验证了本文提出的整治技术方案的有效性，通过导高精准调整与接触线平直度修复，实现了 CDI 指数47%的降幅，为同类工程提供了可参考的技术经验。未来研究可聚焦三个方向：一是极端气候条件（高温、高寒、强风）下 CDI 指数的动态变化规律，建立适应性评价模型；二是开发接触网动态性能自动化监测系统，实现缺陷的实时预警与精准定位；三是探索新型复合材料与智能结构在接触网中的应用，进一步提升系统动态性能与耐久性。

参考文献：

- [1] 冷旭. 高速铁路接触网系统关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
- [2] 王婧, 张文轩, 王斌, 等. 弓网运行质量指数评价函数优化研究[J]. 中国铁路, 2020(08):1-6.
- [3] 乔凯庆, 汪海瑛, 杨志鹏, 等. 接触网动态性能评价指标应用研究[J]. 中国铁路, 2021(04):80-84.
- [4] 杨宾汇, 杨志鹏, 王婧, 等. 基于 CDI 分析的接触网整锚段燃弧诊断及精调整治[J]. 电气化铁路, 2023,34(S1):132-136.
- [5] 任朋顺. 铁路接触网悬挂施工技术研究[J]. 工业 A, 2016(07):104.
- [6] 周玉伟, 泉金龙, 朱政, 等. 电气化铁路接触网附加导线覆冰舞动等状态监测技术研究[J]. 电气化铁道, 2025,36(S1):120-124,139.

预制装配式剪力墙结构抗震性能分析与优化

郑嘉欣

(温岭市建筑设计研究院有限公司, 浙江 温岭 317500)

摘要 装配式建筑因节能环保、施工高效等显著优势, 推广应用范围不断扩大。预制装配式剪力墙结构作为主流抗侧力体系, 在地震多发区域的应用场景愈发广泛。然而, 该结构存在三大关键难点: 连接节点受力机制复杂、构件装配精度要求严格、抗震性能易受多重因素制约, 这些问题导致其在实际施工中极易形成抗震薄弱部位, 给工程安全带来潜在隐患。鉴于此, 本文结合工程实际工况, 系统梳理预制装配式剪力墙结构在抗震方面的核心问题, 深入分析问题成因, 有针对性地提出科学可行的应对策略, 旨在优化结构抗震性能, 规避施工中的抗震薄弱环节, 为装配式建筑工程的安全保障提供理论参考。

关键词 预制装配式; 剪力墙结构; 抗震性能

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.013

0 引言

抗震性能是建筑结构安全的核心保障, 提升预制装配式剪力墙结构的抗震能力, 对保障人民生命财产安全、推动装配式建筑持续健康发展具有重要的现实意义与工程价值。作为装配式建筑的主流结构形式之一, 预制装配式剪力墙结构兼具施工高效、节能环保等优势, 但在高烈度地震作用下, 其抗震薄弱问题仍需重点突破。明确该结构的核心组成部分、科学分析方法、关键影响因素及针对性优化策略, 可为工程设计与施工提供可靠的科学参考, 有效破解抗震短板, 助力预制装配式剪力墙结构在高烈度地震区安全、广泛应用, 为建筑行业高质量发展筑牢安全根基。

1 预制装配式剪力墙结构组成与构造特点

1.1 核心组成体系及构件分工

预制装配式剪力墙结构以预制剪力墙板、连接节点、楼板及各类配套构件为核心组成, 各部分协同工作, 共同承载建筑竖向荷载与水平地震作用力。预制剪力墙板作为主要抗侧力构件, 分为承重与非承重两类, 均在工厂预制完成, 运至施工现场后直接吊装拼接; 连接节点是力的传递关键环节, 涵盖竖向连接与水平连接两大类型, 浆锚搭接、套筒灌浆属于竖向连接形式, 螺栓连接、后浇混凝土暗梁则归为水平连接, 其施工质量直接决定整个结构的整体性。楼板多采用预制叠合板, 通过预埋件与剪力墙衔接, 保障楼盖整体刚度。该组成体系实现了构件标准化生产与现场快速装配,

既保障结构安全, 又提升施工效率; 各构件分工明确, 力的传递路径清晰, 为建筑抗震性能筑牢基础^[1]。

1.2 关键构造设计核心特征

预制装配式剪力墙结构的构造设计, 聚焦抗震安全与装配便捷两大核心目标, 主要体现在节点构造、墙板构造和防裂构造三个维度。节点构造严格遵循“强节点、弱构件”设计原则, 连接处预留充足钢筋锚固长度, 通过后浇混凝土或灌浆材料实现力的可靠传递; 同时增设密封胶防渗, 增强节点延性。墙板构造兼顾轻量化与高强度需求, 板内配置双层双向钢筋网, 边缘部位设置暗柱、暗梁强化局部承载力, 墙板预制阶段提前预留孔洞, 便于后期管线铺设与现场连接。防裂构造针对装配缝隙布设伸缩缝、沉降缝, 墙板拼接处采用柔性连接材料, 缓解温度变化与沉降变形引发的裂缝问题, 确保结构在地震作用下保持完整, 延长建筑使用年限。

2 预制装配式剪力墙结构抗震性能分析方法

2.1 静力弹塑性分析方法

静力弹塑性分析是预制装配式剪力墙结构抗震性能分析中常用的方法, 核心思路是通过逐步加大水平荷载, 模拟结构在地震作用下从完好的弹性阶段慢慢进入弹塑性阶段, 直到最终破坏的整个过程。做这项分析时, 需先构建结构的精细化计算模型, 明确预制墙板及连接节点等关键部位的力学参数; 随后将地震作用力转化为水平推力, 并按特定的加载模式(倒三

作者简介: 郑嘉欣(1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 结构设计。

角形分布或者均匀分布)施加至结构的每一层。之后,通过分析结构的荷载一位移曲线、层间位移角,还有各个构件什么时候开始屈服这些关键指标,就能判断结构是否符合抗震设防的要求,也能精准找出结构的薄弱环节。这种方法的好处是计算量不算大,物理意义也很直观,能清楚地反映出结构在弹塑性阶段的受力情况,适合用来评估结构在中强地震作用下的承载能力和变形性能,为抗震设计提供可靠依据^[2]。

2.2 动力时程分析方法

动力时程分析方法是基于结构动力学原理的,简单说就是输入实际发生过的地震波,或者人工模拟的地震波,计算结构在地震动作用下的瞬时响应,能精准还原结构的动力特性和抗震表现。采用这种方法时,要挑选符合场地类别、设防烈度的地震波,比如天然地震波或者人工合成的地震波;再结合结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵,通过数值积分的方式,算出结构在每个时刻的位移、速度、加速度以及内力响应。针对预制装配式剪力墙结构,重点要模拟好连接节点的动力特性,充分考虑节点的刚度、阻尼,还有非线性变形对整个结构响应的影响。这种方法能全面捕捉结构在地震作用下的瞬时受力和变形状态,分析结果也更贴近实际工程情况,一般用在重要建筑的抗震性能精细化评估中^[3]。

2.3 等效静力分析方法

等效静力分析方法是一种简化的抗震分析手段,其核心原理在于通过谱值转换机制,将地震动产生的动力效应转换成静态的水平荷载,进而基于弹性分析来评估结构的抗震性能。该方法的步骤很清晰,先确定结构的自振周期、振型这些动力参数,再结合场地的地震反应谱,算出各楼层的水平地震作用标准值;之后按照规范要求组合,分析结构构件的内力和位移情况。对于预制装配式剪力墙结构,要考虑到预制构件和连接节点的刚度折减问题,合理选取等效刚度系数,这样才能保证分析结果的准确性。它最大的优势就是计算简便、效率高,能快速判断结构在小震作用下的弹性受力状态,满足常规预制装配式剪力墙结构抗震设计初步评估的需求,为结构方案优化提供快速的参考依据。

3 预制装配式剪力墙结构抗震性能影响因素分析

3.1 连接节点力学性能相关问题

连接节点是预制装配式剪力墙结构传力的核心枢纽,其力学性能直接决定整个结构的抗震成效。核心

症结集中于三方面:节点连接方式的合理性、连接材料力学特性的达标性、节点构造细节的科学性。套筒灌浆连接、浆锚搭接连接、螺栓连接等不同方式,在传力效率、刚度特性与延性上存在显著差异;如何结合结构抗震设防等级选用适配的连接方式,确保节点在地震作用下可靠传递剪力、弯矩与轴力,是首要解决的问题。连接所用灌浆料、锚固钢筋、密封胶等材料,其强度、耐久性及变形能力需满足地震工况下的使用要求,材料性能衰减可能直接导致节点承载力下降。节点构造中,钢筋锚固长度、预留孔洞尺寸、后浇混凝土厚度等细节设计,需规避应力集中现象,防止节点过早失效。上述问题均直接影响结构的抗震整体性与抗倒塌能力^[4]。

3.2 预制构件自身特性相关问题

预制构件自身特性是保障预制装配式剪力墙结构抗震性能的基础前提。核心问题主要涉及预制剪力墙板的截面尺寸与配筋设计、构件生产精度与施工质量控制、构件材料性能稳定性三大维度。预制剪力墙板的截面厚度、高宽比,需契合抗震设计规范,确保在地震作用下有效抵御水平荷载,避免发生剪切破坏或弯曲破坏;墙板内部钢筋的配置数量、间距及锚固方式需科学合理,钢筋骨架需具备良好整体性,保障结构屈服后仍拥有充足的延性与耗能能力。构件工厂生产阶段,模具精度、混凝土浇筑质量、养护条件等关键环节需严格把控,防止出现裂缝、蜂窝、露筋等质量缺陷;构件尺寸偏差会直接影响现场装配精度。预制构件所用混凝土、钢筋等主材,性能需保持稳定,强度波动需控制在允许范围之内;在长期使用过程中,材料性能退化可能降低构件的抗震承载力。

3.3 结构整体布置与场地条件相关问题

结构整体布置与场地条件对预制装配式剪力墙结构抗震性能的影响具有系统性。核心问题涵盖结构平面与竖向布置的合理性、结构刚度分布的均匀性,以及场地震动特性的适配性。在结构平面布置中,剪力墙的间距与布置形式需对称均匀,规避扭转效应;凹凸不规则、楼板局部不连续等平面不规则情况,易导致地震作用下结构受力集中。在结构竖向布置中,需避免楼层刚度突变,上下层剪力墙的截面尺寸与配筋需协调匹配;刚度突变、承载力突变等竖向不规则问题,可能引发薄弱层破坏。结构整体刚度需与场地震动特性适配,场地类别、土层分布会放大或衰减震动强度,结构自振周期需避开场地卓越周期,防止产生共振。此外,楼盖刚度、构件装配精度等因素

会影响结构整体协同工作效果,若导致各构件受力不均衡,将进一步降低结构整体抗震能力^[5]。

4 预制装配式剪力墙结构抗震优化策略

4.1 优化连接节点设计,强化传力可靠性

连接节点的抗震优化,核心在于提升节点延性、传力可靠性及整体稳定性。需结合结构抗震设防等级与实际受力工况,制定针对性优化方案。设计过程中严格遵循“强节点弱构件”原则,重点完善节点配筋构造。在节点核心区域,额外增设横向箍筋与纵向钢筋,可有效提高节点抗剪承载力和变形能力,避免地震作用下节点过早发生剪切破坏。对于套筒灌浆连接,必须严格控制灌浆料强度等级,规范施工流程,确保钢筋锚固牢固可靠。同时,优化套筒尺寸及布置方式,缓解节点区域应力集中问题;可在节点处设置后浇混凝土暗梁,进一步增强节点整体性。针对水平连接节点,采用螺栓连接与后浇混凝土相结合的形式,既能提升节点抗拔、抗剪性能,又可通过设置柔性密封材料,适应地震作用下的结构变形,防止连接部位出现开裂渗漏。通过上述节点优化措施,保障地震力有效传递,进而提升结构整体抗震性能^[6]。

4.2 优化预制构件设计,提升构件抗震能力

预制构件的抗震优化,核心围绕提升构件强度、延性、耐久性及装配便捷性开展,从截面设计、配筋优化、材料选取等多维度发力,全面强化构件抗震性能。优化预制剪力墙板截面尺寸,合理控制墙板高宽比与厚度,确保墙板在地震作用下以弯曲破坏为主,规避剪切脆性破坏风险。在高烈度地震区域,可采用双拼墙板或带暗支撑的墙板形式,增强构件抗侧刚度与承载能力。优化墙板配筋设计,采用双层双向钢筋网布置,加密边缘暗柱、暗梁的钢筋配置,提升构件边缘约束效果,增强构件延性与耗能能力。钢筋锚固长度需严格符合规范要求,保障钢筋与混凝土协同工作。材料选取方面,优先选用高强度、高延性的混凝土与钢筋,混凝土强度等级不低于 C30,钢筋采用 HRB400 及以上级别,提升构件材料性能的稳定性与抗损伤能力^[7]。

4.3 优化结构整体布置,实现抗震性能均衡

结构整体布置抗震优化的核心是降低结构不规则性,实现刚度与承载力的均衡分布,结合场地条件与建筑功能需求,优化整体结构方案。优化结构平面布置,确保剪力墙对称且均匀分布,减小平面凹凸尺寸,避免楼板出现局部不连续情况。若存在平面不规则问题,需增设抗扭构件或调整剪力墙布置,降低结构扭转效

应,保障各楼层水平地震作用均匀传递。优化结构竖向布置,严格控制楼层刚度与承载力变化,避免上下层出现刚度突变、承载力突变现象。对于结构薄弱层,适当加大剪力墙截面尺寸或增加剪力墙数量,提升薄弱层承载能力与刚度,使结构竖向受力更趋均衡。结合场地地震动特性优化结构刚度,通过调整剪力墙间距、截面尺寸,使结构自振周期避开场地卓越周期,避免发生共振,提升结构抵抗地震响应的能力。此外,优化楼盖设计,采用预制叠合板时,确保楼板与剪力墙、梁之间连接可靠,增强楼盖整体性与水平刚度,保障各抗侧力构件协同工作。

5 结束语

提升预制装配式剪力墙结构的抗震性能是一项系统工程,需统筹考虑其结构组成、分析手段与影响因素等核心环节。通过科学的优化连接节点设计以增强传力可靠性,改进预制构件性能以提升个体抗震能力,以及调整结构整体布置以实现刚度与承载力的均衡分布,方能切实提升该结构体系的整体抗震水平。合理的构造设计、精准的性能分析与针对性的优化策略相结合,可有效补强结构薄弱环节,保障其在地震作用下的安全性与稳定性。未来,应结合实际工程情况,不断完善相关的技术思路,为装配式建筑安全推广、高质量发展打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 邹延松,金涛,周义涛,等.预制装配式剪力墙结构在高层住宅中的应用与优化[J].建筑机械化,2024,45(09):121-124.
- [2] 赵承玉.预制装配式剪力墙结构连接构造优化及抗震性能研究[J].砖瓦,2024(04):74-76.
- [3] 刘新之.预制装配式剪力墙结构竖向套筒灌浆连接技术[J].安装,2023(10):102-104.
- [4] 汪莹倩.预制装配式剪力墙连接的抗震机理分析[D].苏州:苏州科技大学,2023.
- [5] 杨涛.预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J].建筑与预算,2023(02):70-72.
- [6] 陈亚辉,余勇胜,颜桂云,等.预制装配式剪力墙结构发展动态与结构创新体系研究[J].福建建筑,2023(01):47-51.
- [7] 龚厚松,孙金坤,汪小平,等.预制装配式剪力墙结构接缝的研究现状[J].四川建筑,2022,42(04):183-186.

建筑结构中混凝土材料裂缝的控制技术研究

濮利荣

(江苏金海宁新型建材科技有限公司, 江苏 南京 211500)

摘 要 混凝土作为建筑结构的主要承重材料, 其裂缝问题一直是影响工程耐久性和结构安全性的主要障碍, 裂缝的萌生、扩展、演化容易造成钢筋锈蚀、结构刚度降低等连锁病害, 严重时会导致结构失效。本文根据工程实践的特点, 对混凝土裂缝的固有特性及多元成因类型进行系统的分析, 从材料匹配、施工控制、结构设计、环境调节四个方面入手, 研究具有针对性和创新性的裂缝控制技术, 旨在解决不同场合下裂缝防控的技术难题, 为提高建筑结构混凝土构件的抗裂性能、延长工程服役寿命提供借鉴。

关键词 建筑结构; 混凝土材料; 裂缝特性; 裂缝类型; 控制技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.014

0 引言

混凝土由于抗压强度高、取材方便、可塑性好等优点, 在现代建筑工程中被广泛地用于高层建筑、桥梁、工业厂房等各种结构构件上。但是混凝土材料本身具有脆性, 在材料制备、施工成型、使用运维的全生命周期内, 受到多种因素耦合作用很容易产生裂缝, 不仅影响结构外观的完整性, 而且会降低构件的承载能力、抗渗性能和抗侵蚀性能, 增加工程维修成本和安全风险。随着建筑工程向大跨度、超高层、复杂环境方向发展, 混凝土裂缝的防控难度越来越大, 传统的防控手段已经不能满足高标准工程的使用需求。因此, 深入探究混凝土材料裂缝的特性、种类和控制技术, 冲破传统技术的束缚, 构建契合复杂工程场景的裂缝防控体系, 对改善建筑工程质量、保证结构长久稳定具有十分重要的现实意义。

1 建筑结构中混凝土材料裂缝的特性

建筑结构混凝土裂缝特性主要表现在多因素耦合诱发、动态演化规律复杂、危害传导具有隐蔽性三个方面, 其萌生和扩展不是单一机制作用的结果, 而是材料本构特性、外部荷载、环境作用、施工扰动等多维因素叠加的结果。裂缝的动态演化具有明显的阶段性, 早期主要是微观孔隙的扩展, 肉眼很难察觉, 此时如果不及时处理, 会在应力集中或者环境侵蚀的作用下逐渐发展成宏观裂缝, 裂缝的扩展速率和方向受混凝土内部骨料分布、界面黏结强度、外部约束条件

的影响而呈非线性变化。与其它材料裂缝不同的是, 混凝土裂缝的危害具有传导性, 宏观裂缝形成之后会破坏构件内部的受力平衡, 引起局部应力重分布, 同时给水分、氯离子等侵蚀介质提供渗透通道, 加快钢筋锈蚀和混凝土碳化的速度, 形成裂缝扩展、侵蚀加剧、结构损伤的恶性循环^[1]。另外, 混凝土裂缝的可控性有很强的场景依赖性, 不同工程类型、使用环境下裂缝的特性不一样, 给裂缝防控技术的精准适配带来困难, 要根据工程实际准确把握裂缝演化的规律, 才能实现有效控制。

2 建筑结构中混凝土材料裂缝的类型

2.1 材料自身引发的裂缝

材料自身引起的裂缝源于混凝土内部组分匹配失衡和体积变形不协调, 不是单纯由材料质量缺陷造成的, 主要原因是胶凝材料水化反应失衡、骨料与胶凝体系界面相容性不好、外加剂匹配不当等。胶凝材料水化时释放的水化热不能及时散发, 会造成混凝土内部与表面产生温差应力, 如果此时混凝土还没有形成足够强度, 就会产生温度收缩裂缝, 温度收缩裂缝多为不规则网状或放射状, 水化后期容易随体积收缩而扩展。骨料的级配、粒径和矿物成分对裂缝的形成有很大影响, 连续级配缺乏或者骨料粒径过大都会使混凝土内部密实度不均, 形成应力薄弱区, 而骨料与水泥石界面黏结性能不足, 在干燥收缩过程中由于界面剥离会产生微裂缝, 这些微裂缝虽然初期影响不大,

作者简介: 濮利荣 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 混凝土质量控制。

但会成为宏观裂缝的萌生起点。外加剂的不当使用会增加材料自身裂缝的风险,缓凝剂用量过多会延长水化时间,使混凝土早期强度增长缓慢,不能抵抗收缩应力。高效减水剂与胶凝材料适应性不好会导致离析、泌水,使混凝土表层形成疏松层,降低抗裂能力。这类裂缝的防控核心在于优化材料组分匹配,提高内部结构稳定性。

2.2 施工过程产生的裂缝

施工过程中产生的裂缝具有时效性以及人为扰动相关性,多出现在混凝土浇筑、振捣、养护、模板拆除等重要工序中。裂缝的产生与施工工艺参数控制、操作规范性、工序衔接合理性密切相关,而且容易因为施工的隐蔽性而造成后期难以整改。浇筑时布料不均会造成混凝土局部堆积或振捣盲区,引起密实度不均,在凝结硬化过程中产生收缩裂缝。振捣过度会破坏骨料级配,使水泥浆与骨料分离,表层水泥浆过厚,干燥收缩时产生起皮裂缝。模板支撑体系稳定性及拆除时机控制不当是造成裂缝的原因之一,支撑变形会使混凝土构件在凝结过程中受到附加应力,过早拆除模板会使混凝土强度不够,不能承受自身的重量和施工荷载,产生受力裂缝,这类裂缝多沿构件受力主筋方向延伸^[2]。养护不及时或者养护方式不合理会加剧裂缝的产生,混凝土浇筑完成后如果不能及时覆盖保湿,表层水分会迅速蒸发,造成干燥收缩速率过快,产生贯穿性裂缝。低温环境下养护措施不到位,会使混凝土受冻产生冻胀裂缝。这类裂缝的防控需要强化全工序工艺控制,实现施工参数与混凝土凝结特性精准匹配。

2.3 使用环境诱发的裂缝

使用环境诱发的裂缝是混凝土构件在使用过程中,由于外部环境因素的长期作用而产生的一种损伤。裂缝的形成与环境介质的性质、作用周期、构件的位置有关,裂缝的发展具有明显环境依赖性。干湿交替环境中,混凝土内部水分反复蒸发和渗入,引起体积胀缩循环,长期作用下会使内部微裂缝逐渐扩展,地下结构、屋面构件等地方尤其突出,并且容易和侵蚀介质一起加剧损伤。高温或者严寒环境会引发温度型环境裂缝,高温环境下混凝土表层因为热膨胀受到内部约束产生拉应力,严寒环境下内部孔隙水结冰膨胀会破坏混凝土微观结构,反复冻融后形成网状裂缝,降低构件整体性。腐蚀性环境通过化学作用诱发裂缝,工业环境中的酸性介质、海洋环境中的氯离子等,会

和混凝土中的成分发生化学反应,生成膨胀性产物,造成内部应力累积而产生裂缝,这类裂缝一般会伴随混凝土强度下降,防控难度比普通环境下的裂缝要大得多,需要根据环境特性采取相应的防护措施。

2.4 结构受力导致的裂缝

结构受力产生的裂缝是混凝土构件在荷载作用下,内部拉应力超过材料抗拉强度而产生的损伤,裂缝形态、位置与荷载类型、受力状态有关,裂缝扩展与荷载作用周期有明显的相关性。静力荷载作用下,受弯构件在受拉区容易产生垂直于主筋方向的正截面裂缝,裂缝从构件边缘向中和轴方向延伸,宽度随荷载增加而增大,当荷载超过设计限值时,就会发展成贯穿性裂缝,降低构件的承载能力。剪切荷载作用下,构件会出现斜裂缝,多呈 45° 左右倾斜角度,多见于梁端、柱节点等剪力集中部位,斜裂缝的扩展容易造成构件发生剪切破坏,危险性比正截面裂缝高^[3]。长期反复荷载作用下,混凝土会产生疲劳裂缝,疲劳裂缝初期宽度小,扩展慢,但是随着荷载循环次数的增加,裂缝会慢慢变深变宽,在应力集中部位容易产生,如构件孔洞、截面突变处。结构不均匀沉降会产生附加应力,使构件产生沉降裂缝,此类裂缝大多为贯穿性,方向与沉降变形方向一致,防控重点是改善结构受力设计,提高构件抗裂承载力和变形适应性。

3 建筑结构中混凝土材料裂缝的控制技术

3.1 材料优化适配技术

材料优化适配技术的核心是通过调整混凝土组分比例、改善材料性能,在源头上提高抗裂能力,打破传统单一材料调整的局限,实现组分协同优化和性能精准匹配。采用复合胶凝材料体系是重要技术路径,用矿粉、粉煤灰等掺合料按合理比例替代水泥,不仅可以降低水化热释放速率,减少温差应力,还可以改善混凝土的微观结构,提高界面粘结强度,抑制微裂缝的产生。针对骨料优化,采用连续级配骨料,合理调整粒径区间,掺加石粉,提高混凝土的密实度,选用与胶凝体系相容性好的骨料,通过表面改性处理提高骨料与水泥石的黏结性能,减少界面剥离裂缝。外加剂的精准适配是技术关键,根据工程需求选择高性能复合外加剂,通过试验确定最佳掺量,实现缓凝、减水、保塑等功能协同,避免单一外加剂使用带来的性能缺陷,同时可以掺入纤维材料,如钢纤维、聚丙烯纤维,利用纤维的桥接作用抑制裂缝扩展,提高混凝土抗拉韧性,从材料层面构建抗裂防护体系。

3.2 施工工艺管控技术

施工工艺管控技术以全工序参数精准控制为重心,根据混凝土凝结硬化规律来改进施工流程,削减人为扰动和工艺缺陷造成的裂缝,实现施工过程与材料性能的动态匹配。浇筑工艺采用分层布料、分层振捣,结合实时监测技术控制振捣频率和时长,防止振捣不足或者过度,同时大体积混凝土用跳仓浇筑技术,设置后浇带释放温度应力,配合预埋冷却水管系统,精准控制内部水化热散发速度,缩小内外温差^[4]。模板工程管控以支撑体系稳定性、拆除时机为核心,采用模块化支撑结构,加强节点固定,根据混凝土强度增长数据来确定合理的拆除时间,避免过早拆模造成的受力裂缝,优化模板周转工艺,减少模板变形对混凝土成型质量的影响。养护工艺要精细化管理,根据环境温度、湿度来调整养护方式,采用保湿覆盖材料结合喷淋养护技术来延长保湿周期,保证混凝土强度稳步增长。低温环境下采用保温养护措施,高温环境下采取遮阳降温措施,抑制温度和干燥收缩裂缝,形成全流程工艺控制闭环。

3.3 结构设计强化技术

结构设计强化技术通过改善结构布置、改进构件设计来提高结构整体抗裂能力,克服传统设计重承载轻抗裂的缺点,实现承载性能和抗裂性能的同步提高。优化结构受力布局,规避应力集中区域,在构件孔洞、截面突变处做圆角处理或者增加加强肋,分散局部应力,抑制裂缝萌生,采用协同受力设计理念,通过构件间合理传力来减少单一构件的受力负荷。改进构件截面设计,对于受弯、受剪构件,采用双层双向配筋,增加构件受拉区抗拉能力,合理控制配筋率,避免配筋不足或者配筋过量造成的裂缝。大跨度构件使用预应力技术,预先加压应力来抵消使用时产生的拉应力,从源头上抑制裂缝的产生。结合结构服役环境及荷载特性进行抗裂专项设计,地下结构增加抗渗配筋、屋面构件强化温度应力抵抗设计,预留合理的变形空间,减小结构约束带来的附加应力,提高结构对裂缝的容错能力。

3.4 环境适配调控技术

环境适配调控技术根据使用环境特点采取相应的防护和调控措施,切断环境因素对混凝土的侵蚀途径,抑制环境诱发型裂缝产生和扩展,使结构与环境相适应、相共生。对于干湿交替、腐蚀性环境,采用表面防护技术,在混凝土表层涂刷高性能防腐涂层、渗透

结晶型防水材料,形成致密的防护层,阻断水分和侵蚀介质的渗透通道,同时可以采用混凝土表面硅烷浸渍处理,提高表层的憎水性和抗侵蚀能力。在高温、严寒环境中使用温度调节技术,屋面、外墙构件增设保温隔热层,减小环境温度变化对混凝土内部温度的影响。严寒地区对暴露构件采取防冻保护措施,防止冻融循环引起裂缝。高温地区采用遮阳、通风设计,降低构件表面温度,减小温度应力。对长期处在复杂环境中的结构,构建环境监测及动态调控体系,对环境温湿度、侵蚀介质浓度等参数展开实时监测,依据监测数据来调节防护措施。对已经出现的微小环境裂缝,采用灌浆修补技术及时处理,防止裂缝继续扩大,构建主动防控和被动修补相结合的环境适配体系^[5]。

4 结束语

建筑结构混凝土裂缝的控制是一项系统工程,涉及材料、施工、设计、环境等诸多方面,关键之处在于准确掌握裂缝的特性及成因,构建全生命周期、多维度协同的防控体系。混凝土裂缝的防控不能依靠单一的技术手段,要结合工程实际情况,实现材料优化、工艺控制、结构设计、环境调控的有机融合,冲破传统技术的局限,革新防控思路和方法,才能从源头上抑制裂缝的产生,阻止裂缝的扩展。随着建筑结构越加复杂,标准也越来越高,因此对于混凝土裂缝控制技术也提出了新的挑战。未来需要加强对多学科交叉的研究,采用新型材料以及智能检测等技术来提高对混凝土裂缝的预防性。不断改进裂缝控制技术,完善防控体系,提高建筑结构的耐久性、安全性,延长工程的服役寿命,给建筑工程质量的提高提供有力保障,促进建筑行业的高质量发展。

参考文献:

- [1] 何梦诗. 建筑工程基坑支护结构钢筋混凝土支撑拆除技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(01): 64-66.
- [2] 刘晨. 建筑结构设计混凝土结构的优化设计[J]. 新疆钢铁, 2025(04): 110-112.
- [3] 朱兴. 纤维增强混凝土材料在建筑结构中的应用研究[J]. 居舍, 2025(08): 84-86.
- [4] 姬广锋, 邵帅, 徐健鹏. 钢筋混凝土材料在建筑主体结构中的施工技术研究[J]. 居舍, 2025(04): 49-52.
- [5] 张坤. 建筑工程大体积混凝土材料的性能与结构施工工艺研究[J]. 居舍, 2023(22): 56-58.

装配式建筑钢结构梁柱节点 焊接施工技术分析

张广涛, 徐正凯

(山东鑫通钢结构工程有限公司, 山东 聊城 252000)

摘 要 本文针对装配式建筑钢结构梁柱节点在焊接施工过程中质量控制不稳定和工艺标准不统一的关键技术难点问题, 提出技术控制、焊后质量检验、工艺参数优化等施工技术方案。结果表明: 明确节点功能和结构特点、规范焊接施工原理和质量标准、配合无损检测和工艺参数的动态调整, 可以显著增强梁柱节点焊接可靠性、耐久性和施工效率, 为装配式钢结构安全使用提供保障。

关键词 装配式建筑; 钢结构梁柱节点; 焊接施工技术

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.015

0 引言

装配式建筑钢结构凭借其施工效率高、环保节能的优势, 在现代建筑领域得到了日益广泛的应用。梁柱节点是关键传力部位之一, 焊接质量的好坏直接关系到整体结构安全稳定^[1]。但目前节点焊接还存在着施工标准化不到位、质量控制困难、部分工艺适应性差的问题, 容易造成焊缝缺陷和应力集中的潜在风险^[2]。本文系统地分析梁柱节点的设计特点、焊接原理及技术标准, 并探讨施工关键技术, 旨在为促进焊接工艺规范化和最优化提供参考。

1 装配式建筑钢结构梁柱节点设计特点

装配式钢结构梁柱节点设计不是一个单纯的构件连接问题, 需考虑结构体系的传力路径、节点刚度要求、抗震延性、构件加工的便利性和现场安装焊接的可操作性, 是受多重因素影响而产生的复杂的工程问题。节点设计的主要目的是在确保建筑结构的安全性基础上, 遵循“节点强, 构件弱”的抗震设计哲学, 并确保满足装配施工的高效率和精确性需求^[3]。梁柱节点的功能与结构作用首先体现在其作为框架中梁与柱的交接点, 是水平荷载(风荷载、地震作用等)与竖向荷载传递与重新分配的关键枢纽。节点域受弯矩时受到较大剪力; 受梁端剪力和轴力的影响, 要求节点将力可靠地传递给柱身。所以, 节点设计时一定要确保节点有足够的强度、刚度、变形能力来协调梁柱构件受力和变形, 避免罕遇地震作用下节点出现脆性破坏。

由结构作用机理可知, 典型刚性连接节点需要保证梁端弯矩能有效地传递到柱体上, 这种传递一般是通过梁翼缘和柱体直接焊接、腹板用高强螺栓联接或者焊接等方式进行, 从而构成一条可靠的弯矩传递路径。同时, 节点区域的构造细节, 如加劲肋的设置(在梁翼缘的相应部位布置柱水平加劲肋等)、节点域的加强措施(贴焊补强板、设斜向加劲肋、使用箱形柱等)等, 均为避免节点域钢板产生过大剪切屈曲或者层状撕裂而保证其塑性变形能力^[4]。

常用梁柱节点主要依据连接构造和力学特性分为全焊连接节点、栓焊混合连接节点和近年来开发的新型装配式节点等。全焊连接节点即梁体上、下翼缘和腹板都用焊缝和柱相连, 具有刚度大、承载力高、整体性强等优点, 但是对于焊接工艺而言、对焊接顺序和残余应力的控制提出了极其严格的要求, 且焊接工作量较大, 对热影响区的影响明显。栓焊混合连接节点应用最为广泛, 一般梁翼缘和柱体之间用坡口熔透焊进行连接来传递弯矩, 梁腹板用高强螺栓摩擦型与焊接在柱体上剪力板或者连接板相连来传递剪力。该形式将焊接连接刚度较大与螺栓连接安装方便, 适应现场条件等优点相结合、提高施工效率。

2 梁柱节点焊接施工原理与技术标准

焊接作为通过加热、加压或者二者并用等方式使被分离金属原子之间产生永久性组合的连接技术, 被应用于钢结构梁柱节点连接, 其实质就是在节点区域

作者简介: 张广涛(1973-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 钢结构梁柱节点焊接施工技术。

内经过冶金过程,使梁和柱中钢材融合成一个连续整体。焊接连接基本原理涵盖电弧物理、冶金化学、传热学、力学等诸多学科。在电弧焊中,电弧产生的高温(可达3 000 ℃以上)使焊条(或焊丝)与母材局部熔化形成熔池,随着电弧移动,熔池冷却结晶形成焊缝金属,将工件连接起来。钢材的结合方式主要分为熔合区(焊缝金属)、热影响区(HAZ)和未受影响的母材区。熔合区性能由填充金属和母材化学成分及焊接工艺决定;热影响区则因经历了不同的热循环,其组织与性能(韧性、硬度等)可能发生显著变化,是焊接接头中的薄弱环节之一,尤其需要关注其淬硬倾向与冷裂纹敏感性。对于梁柱节点常用的低合金高强度钢(Q345、Q390等),焊接时需特别注意预热、层间温度控制及后热消氢处理,以降低冷却速度,防止冷裂纹产生^[5]。

为保证焊接质量符合结构安全的要求,在焊接施工过程中必须按照严格的质量控制要求和技术标准体系进行施工。质量控制渗透在焊前、焊中、焊后的整个过程。焊前控制包括:对母材和焊接材料进行质量复验,以保证化学成分、力学性能满足设计要求;焊接工艺评定(WPS),通过试验确定适用于具体工程钢材、节点形式与焊接方法的工艺参数(电流、电压、焊接速度、热输入等),并编制焊接工艺规程;焊工的技能评定和持证上岗保证了操作人员有相应的资格;接头坡口的准备和装配质量检查,确保坡口角度、钝边尺寸、间隙和错边量等均在容许公差之内;焊前清洗,除去油污、铁锈、水分和其它有害物质。焊中控制核心在于对焊接工艺参数的严格执行与过程监控,包括热输入的控制(对热影响区的性能和焊接变形有影响)、焊接顺序的合理安排(为使焊接应力和变形趋于均衡,对对称截面往往采取对称施焊)、多层多道焊的层间清理与温度控制等。焊接后的控制主要集中在焊缝外观的检验、尺寸的测定以及对其内部质量的无损检查上。在技术规范方面,我国已经构建一套相对完整的钢结构焊接标准体系,如《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205-2020)、《钢结构焊接规范》(GB 50661-2011)^[6]。

3 装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工关键技术

3.1 焊接过程技术控制要点

焊接过程作为决定梁柱节点终极品质的核心步骤,技术控制重点复杂而细腻,需要系统化管理和精准化作业。第一,选择焊接方法是关键。对于梁柱节点中要求熔透的对接焊缝(梁翼缘和柱之间的联接),首选手工电弧焊(SMAW)、实芯或药芯焊丝二氧化碳气

体保护焊(GMAW/FCAW-G)以及埋弧焊(SAW,适合于工厂平焊的地方)。其中气体保护焊由于具有效率高、熔敷迅速、焊接变形比较小的优点而被越来越多地用于现场施工。厚板焊接和窄间隙焊接这种高效优质的技术也逐步地被采用^[7]。第二,科学地规划焊接顺序是焊接应力和变形控制的关键。对于H型钢梁与柱的刚性连接,通常遵循“首先焊接收缩量较大,约束较强的焊缝”以及“对称施焊”的原则。以栓焊混合节点为例,一般都是完成梁翼缘和柱体坡口熔透后再焊腹板连接板或者螺栓连接。在焊接翼缘时宜先焊接下翼缘再焊接上翼缘;对单根翼缘焊缝而言,如果是V型或者X型坡口则可以进行多层多道焊接,并且由中间到两边对称地进行分段退焊或者跳焊来散热和减小横向收缩及角变形。第三,严格地控制焊接工艺参数和层间温度,是保证节点焊缝性能最关键的一环。焊接电流、电压、速度、气体流量必须准确地与母材钢号、厚度、焊材类型、接头形式相匹配,且在施焊全过程都要保持稳定。对厚板多层多道焊缝特别要求有严格的层间温度管理制度。过高的层间温度容易使接头区出现粗大晶粒和韧性降低,而过低的温度又会促使氢致裂纹出现。所以,需要用测温仪实时监测,以保证它一直在工艺评定指定的范围。在每道焊道结束时,都要用专用工具彻底清理焊渣、飞溅、可能出现的缺陷等,通过目视或者无损检测对其进行初步鉴定,为确保焊缝金属的纯净性和紧密性,下一层的焊接工作是可以进行的。同时,焊工操作技能也很关键,要稳定均匀地运条或者焊枪走行,以保证电弧一直覆盖在熔池前缘,使得坡口两侧母材得到很好的融合,从而从源头上避免了未焊透、未熔合、夹渣的质量隐患^[8]。

3.2 焊后质量检验与无损检测方法

检验分为非破坏性检验(无损检测)和破坏性检验(通常用于工艺评定)。检查包括:焊缝表面有无裂纹、气孔、夹渣、咬边、焊瘤、弧坑及其他缺陷;用焊缝检验尺检验焊缝的余高、宽度、焊脚尺寸是否满足设计要求。外观符合标准后,方可无损检测内部质量。常见的无损检测方法有超声波检测(UT)、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)等。对于梁柱节点中需要熔透的对接焊缝(一级或二级焊缝),超声波检测和射线检测是检测内部体积型缺陷(气孔、夹渣、未焊透等)和面积型缺陷(裂纹、未熔合等)的主要方法。超声波检测因其灵敏度和穿透力较高,对于危害性较大的平面型缺陷有很高的检出率,且现场适用性好,不伤害人体,成为钢结构焊缝内检测中应用最为广泛的手段。它的基本原理是利用高频

声波传播到焊缝中遇有缺陷时会产生反射、折射的特点,并对回波信号进行分析,从而判断出缺陷的部位、尺寸及性质^[9]。无损检测的实施需严格按照相关国家及行业标准(《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205))执行。对于一级焊缝,需要与母材具有相同强度的全熔透对接焊缝,通常需要进行 100% 的超声波检测。射线检测是一种常用于对特定结构区域或对超声波检测结果存在疑虑的焊缝进行复验的方法,它提供直观的缺陷影像记录,但是对于裂纹等面状缺陷在特定方向上的检测灵敏度可能会受到限制,而且还存在辐射安全管理的特殊需求。另外,磁粉检测和渗透检测多应用于焊缝表面和近表面缺陷检测。磁粉检测对铁磁性材料具有很好的适用性,可以有效地检测出表面裂纹和未熔合现象;渗透检测方法特别适合于检测各类金属材料表面的开口缺陷。在梁柱节点区域,常在焊后及重要工序(矫正、加载等)后,对焊缝热影响区及母材进行磁粉或渗透抽检,以排除表面微裂纹。所有无损检测都要由具有相应资格的人来进行操作和评价。当检测发现超标缺陷后,须按核准的返修工艺清理和补焊,返修部位和受灾面积须再检测至合格。

3.3 焊接工艺选择与工艺参数控制

选择焊接工艺和精准控制工艺参数是确保梁柱节点焊接质量和性能的科学基础,决策须以焊接工艺评定和大量工程实践数据为依据,且能得到试验优化验证。针对装配式钢结构常用钢材(Q235、Q345、Q390等)和典型节点形式(栓焊混合节点的全熔透对接焊等),工艺选择与参数控制研究至关重要。以一个实际工程项目中厚度为 20 mm 的 Q345B 钢梁的翼缘与柱的 V 型坡口对接焊接为案例,使用药芯焊丝二氧化碳气体保护焊(FCAW-G)来进行工艺的优化实验。试验设计若干组工艺参数组合系统地研究焊接电流(I),电弧电压(U),焊接速度(v)和层间温度(Ti)等工艺参数对焊缝成形、力学性能、缺陷率等性能的影响。实验数据显示,在焊接电流维持在 220 ~ 260 A、电弧电压范围为 28 ~ 32 V、焊接速度介于 25 ~ 35 cm/min,以及预热和层间温度维持在 100 ~ 150 °C 之间的条件下,能够生成形状优良、内部质量出色的焊缝。在特定的参数组合条件下,对焊接试样进行无损检测(UT+RT),结果显示焊缝的一次性合格率高达 99.2%,这明显超过常规参数组大约 95% 的合格率。取合格样品进行力学性能测试,数据表明焊缝金属抗拉强度均值 565 MPa,满足母材标准值 1.15 倍多;夏比 V 型缺口在 -20 °C 时,冲击功均值达到 78 J,大大高于规范中不少于 34 J 的

规定;接头在 180° 弯曲试验中没有产生裂纹。显微硬度测试表明:热影响区的最大硬度值应控制在 HV320 的范围内,从而有效地减少冷裂的风险。进一步的焊接变形测量表明,通过优化焊接顺序(采用双人对称施焊)与参数(控制在较小热输入 25 kJ·cm 左右),由梁翼缘对接焊产生的柱翼缘外翘变形量由平均 3.5 mm 降低至 1.2 mm 范围内,大大减少了后续修正的工作量^[10]。

4 结束语

通过对装配式钢结构梁柱节点焊接施工工艺进行系统的分析发现,在焊接过程中严格把控工艺要点、合理选取工艺参数,通过运用超声波和射线等多种无损检测技术,能够显著降低气孔和未熔合等缺陷的出现,从而将焊缝的合格率提升至 98% 或更高。未来需对智能焊接机器人及自动化监测系统应用于装配式钢结构梁柱节点焊接进一步探究,从而促进施工精度和效率的提高以及工艺控制智能化的升级改造。

参考文献:

- [1] 杨德成,魏晓东,王冠,等.钢结构焊接施工技术中焊缝缺陷检测试验[J].安装,2025(12):70-72.
- [2] 谢杭波.钢结构工业厂房建筑主体与基础施工关键技术分析[J].石材,2025(12):70-72.
- [3] 陈昌远,贾马,王振江,等.大跨度裙房钢结构施工技术研究[J].工程建设与设计,2025(22):130-132.
- [4] 柯友华.口岸建筑钢结构屋盖吊装焊接施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(18):16-18.
- [5] 高德禄,孔令平.自动焊接技术在装配式钢结构梁柱节点焊接施工中的应用[J].今日制造与升级,2025(09):86-89.
- [6] 张可辉.大型公共建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术研究[J].建设科技,2025(09):73-75.
- [7] 杨清茹.装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术[J].城市开发,2025(08):144-146.
- [8] 琚金建,杨小三,廖明生.装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术研究[J].建设机械技术与管理,2024,37(06):112-114.
- [9] 金威.装配式钢结构梁柱节点焊接施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(11):15-17.
- [10] 周予启,詹必雄,任耀辉,等.复杂弧形劲性钢结构综合施工技术研究与应用[DB/OL].中建一局集团建设发展有限公司,2025-03-10. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=OLEU9YGVhk1aUajIKsyhpnxldO234BZA7-caj9PIdTtU9qsi1M2LzRhpiaYMPXIDLVI1JyZ98YgQqNtSfvn38s2XWDZiPPDhWljwqbOJkQaau9jw1MQDNB7BLDfRwcfFfw0sLkXKMaQKsH31Xk0Bjo4b9HVVybVQPd5xO4MLzwckSxp5gGheMyfg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.

桥梁桩基础在岩溶地层的施工难点与处理方案

夏海涛

(安徽省交控建设管理有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 岩溶地层地质条件繁杂、形态多变,在地下水长期作用下,会给桥梁桩基础作业带来诸多困扰。本文结合陆水河特大桥、中老铁路桥梁等工程案例,聚焦作业过程中地质不确定性、溶洞形态分化及地下水引发的各类难题,梳理地质钻探、物探探测与原位测试的协同勘察思路,并阐述泥浆造壁、钢护筒跟进等作业方案,明确卡钻、漏浆、埋钻等问题的处置路径,以期同类岩溶地层桥梁桩基础作业提供技术参考,进而强化作业安全性、高效性与质量管控,降低风险隐患及资金投入。

关键词 岩溶地层; 桥梁桩基础; 泥浆造壁法; 密闭压浆法

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.016

0 引言

交通基础设施逐步向复杂地质区域延伸,岩溶地层桥梁桩基础施工作业愈发常见。岩溶地层结构松散、溶洞形态多样、地下水动态起伏不定,易滋生塌孔、漏浆、卡钻等事故,干扰作业推进与质量管控,潜藏安全风险。同时,施工技术与复杂岩溶条件的适配性面临多重阻碍,需理清核心难点、完善技术策略并结合工程实例,结合多项工程实操经验,剖析作业难点、勘察路径及技术手段,为岩溶区域桥梁工程提供理论与实践双重支撑。

1 岩溶地层桥梁桩基础施工难点分析

1.1 地质条件复杂性带来的施工阻碍

岩溶地层地质条件繁杂,地层结构存在不确定性与不稳定性,不同区域岩溶发育强度、覆盖层属性差异显著,作业管控难度同步攀升。例如:中交四航局陆水河特大桥桥址区覆盖层为15~25 m砂砾层,无粘聚性、透水性佳、自稳能力弱,颗粒级配失衡易引发钻孔局部坍塌,下方溶洞与砂砾层直接贯通,构成“覆盖层—溶洞”联动风险格局,最大钻孔深度达75 m,远超常规桥梁桩基范畴,作业全程需维持孔内泥浆压力稳态,孔壁失稳极易诱发整体坍塌^[1]。中老铁路沿线桥梁岩溶发育处于中等至强烈区间,钻孔见洞率49%,岩芯破碎导致RQD值多低于30%,岩层完整性难以精准判定,部分区域分布斜面岩、凸起块石等特殊地质体,斜面岩最大倾角35°,凸起块石直径介于0.5~1.2 m,显著提升桩基钻进阻力,易造成钻头偏移,加大导向管控难度,需反复调整钻进参数,拖累作业进度。

1.2 岩溶形态多样性引发的施工难题

岩溶形态繁杂多样,作业难题同步升级,不同规模、类型与连通程度的溶洞,对作业工艺、设备甄选、质量管控的作用各不相同;多数伴随充填体滋生,给成孔及后续浇筑带来多重阻碍。例如:陆水河特大桥经超前勘察探明溶洞377处,形态涵盖孤立型、串珠型、连通型等,以串珠状垂直分布为主,最多叠加8层,单个溶洞最高22.5 m、最小0.8 m,部分呈全空状态,部分填充流塑粉质黏土或碎石,多层连通的复杂构造抬升成孔与充填难度,易诱发漏浆、塌孔问题。中老铁路桥梁岩溶形态划分为四类,高度超5 m的Ⅲ型串珠状溶洞及Ⅳ型地下水流通通道,连通性能优异、空间构造繁杂,不仅易引发塌孔,还会造成后续混凝土灌注超耗,最高超设计用量40%。醴娄高速公路湘江特大桥主墩桩基遭遇的串珠状溶洞最多8层,溶洞间连通通道狭窄,充填体稳固性欠佳,单根91.45 m深桩基受其干扰,需反复回填写复钻29次,回填料累计达120 m³,作业耗时183天,较常规桩基施工周期超出两倍以上,大幅增加作业成本与安全风险。

2 岩溶地层地质勘察方法

2.1 地质钻探法

地质钻探法作为岩溶地层勘察核心技术,可精准捕捉溶洞区位、体量、充填物品类及岩层物理力学指标,为作业方案拟定、设备选配、风险预判提供数据支撑。勘察精准度直接决定后续作业安全性与适配性。陆水河特大桥作业前期,选用XY-4型岩芯钻机实施超前钻

作者简介: 夏海涛(1993-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:道路与桥梁方向。

探, 孔间距管控在 5 ~ 8 m, 岩溶发育疑似区域加密至 3 m, 累计完成钻探孔 126 个, 明确溶洞填充物品类、洞高及连通状态, 划分全空、粉质黏土充填、碎石充填三类工况, 为钢护筒设计长度、钻进工艺参数设定提供核心支撑。长箐岩隧道勘察阶段, 钻孔 ZK1 搭载金刚石取芯钻头, 探测到 D3K413+850 桩位前方 11.8 m 处存在 2.5 m 高空洞, 洞顶岩层厚度 2.3 m, 与物探预测结果契合, 印证钻探法对小型溶洞定位及顶板厚度判定的可靠性能, 钻探需重点把控岩芯采取率, 破碎岩层采用双层岩芯管取芯技术, 搭配泥浆护芯工艺, 岩芯采取率从常规 65% 提升至 85% 以上, 保障对岩溶发育边界、岩层完整性及承载力特征的判定, 为后续作业规避重大风险。

2.2 物探探测法

物探探测法兼具大范围、非接触、高效能优势, 可快速划定岩溶异常区域, 弥补地质钻探法单点勘察、效能不足的短板, 为钻探点位优化提供方向。构建“物探圈定一钻探验证”协同勘察模式, 陆水河特大桥水上群桩作业中, 采用跨孔弹性波 CT 探测技术, 选取 10 个代表性桩位布设探测孔, 孔距控制在 2 ~ 3 m, 发射并接收弹性波信号, 分析波速变化特征, 划定岩溶发育异常区, 理清溶洞连通通道走向与宽度, 为后续钻探点位优化提供科学支撑。削减无效钻探孔数量, 勘察效能提升 30%, 该桥同步运用高密度电阻率法, 探测浅部 0 ~ 30 m 范围岩溶及土层分布状况, 电极间距 1 m, 分辨率达 0.5 m, 识别隐蔽溶沟、溶槽及砂砾层薄弱区

域, 缩小勘察盲区^[2]。物探与钻探的融合应用, 相较传统单一钻探法更具优势, 可强化岩溶勘察的全面性与精准度, 压缩勘察投入。陆水河特大桥依托该组合方法, 累计削减钻探工作量 20%, 勘察周期缩短 15 天, 为后续作业顺利开展筑牢根基。

2.3 原位测试法

原位测试法可于场地原生地质条件下直接获取地层力学指标, 规避室内试验样品扰动产生的偏差, 为勘察结果校验、施工参数设定、桩基承载力评定提供现场数据支撑, 是岩溶地层勘察的关键技术手段。陆水河特大桥在溶洞充填体区域开展标准贯入试验 (SPT), 完成 32 组测试工作, 试验深度覆盖 12 ~ 68 m, 结合不同深度充填体特性调整试验参数, 采用 63.5 kg 锤重、76 cm 落距标准, 得出充填粉质黏土标贯击数 N 值介于 8 ~ 15 击, 依托地区经验公式判定承载力特征值 120 ~ 180 kPa, 理清充填体承载能力边界, 为桩基持力层甄选提供核心支撑。中老铁路桥梁勘察阶段, 针对破碎岩层及溶洞顶板开展重型动力触探试验 (DPT), 触探深度达 75 m, 采用 100 kg 锤重、100 cm 落距试验标准, 通过锤击数变化曲线研判岩溶顶板厚度与完整性, K128+450 桩位处, DPT 试验显示顶板厚度仅 3.2 m, 锤击数骤降至 5 击以下, 判定顶板承载力不足, 及时调整桩基作业方案, 将原设计天然地基桩基改为嵌岩桩, 规避顶板坍塌隐患, 原位测试数据与钻探、物探结果相互校验, 强化勘察精准度, 为完善施工方案提供科学依据 (见表 1)。

表 1 勘察方法关键指标汇总表

勘察方法	工程案例	核心参数	提升效果
地质钻探法	陆水河特大桥	孔距 3 ~ 8 m, 采取率 ≥ 85%	采取率提升 20%+
物探探测法	陆水河特大桥	孔距 2 ~ 3 m, 分辨率 0.5 m	效率 +30%, 钻探量 -20%
原位测试法	陆水河特大桥	标贯击数 8 ~ 15 击, 承载力 120 ~ 180 kPa	误差降低 40%+
原位测试法	中老铁路桥梁	触深 75 m, 锤重 100 kg	准确率 ≥ 90%

3 岩溶地层桥梁桩基础核心施工方案

3.1 泥浆造壁法

泥浆造壁法作为岩溶地层桩基成孔基础工艺, 通过优化泥浆配比及性能指标, 在孔壁形成致密稳固泥皮, 维持孔内水压稳态, 阻隔地下水渗透与孔壁泥沙渗漏。适配岩溶地层强透水性、孔壁稳定性薄弱的特质, 陆水河特大桥针对砂砾层与溶洞贯通、透水性极强的地质状况, 经室内试验及现场试钻, 确定膨润土 +CMC+ 纯碱复合泥浆体系。管控泥浆核心指标: 比重 1.2 ~ 1.3g/cm³、黏度 22 ~ 28 s、含砂率 ≤ 2%、胶体率 ≥ 95%,

掺入 0.5% 聚丙烯酰胺强化泥浆黏结性能与护壁成效, 形成的泥皮厚度 2 ~ 3 mm, 可有效阻拦砂砾层颗粒流失。施工现场布设泥浆搅拌站及检测实验室, 每小时监测泥浆指标并及时调整配比, 破解砂砾层孔壁易坍塌难题, 该桥 32 根试验桩成孔合格率达 100%, 孔壁坍塌率控制在 0.3% 以内, 低于行业常规 3% 的风险阈值^[3]。中老铁路桥梁在破碎岩溶区域作业时优化泥浆工艺, 将胶体率提升至 95% 以上, 持续补浆使孔内水头高于地下水位 1.5 ~ 2.0 m, 形成稳定水压差, 阻隔地下水渗透, 规避泥浆渗漏引发的孔壁失稳, 为后续成孔及浇筑筑牢基础。

3.2 密闭压浆法

密闭压浆法适配溶洞充填体及岩层裂隙处置,高压作用下促使浆体充分渗透充填体孔隙与岩层裂隙,固化后形成整体稳固承载构造,强化地层承载效能。封堵渗漏路径,规避后续作业漏浆、混凝土渗漏问题。贵广高铁阳朔段桥梁作业区溶蚀裂隙密集分布,宽度 $0.1\sim 0.8\text{ mm}$,部分与地下水贯通,易造成混凝土大量渗漏,选用水泥—水玻璃双液浆压浆工艺,以P.042.5级水泥配制水泥浆,与水玻璃按1:0.5体积比混合,水玻璃模数管控在 $2.4\sim 3.0$,压浆压力调控在 $2.5\sim 3.0\text{ MPa}$,既保障浆体渗入细微裂隙,又可规避压力过高损毁岩层构造。压浆孔按 1.5 m 间距梅花形布设,累计压浆量达 $1\ 200\text{ m}^3$,压浆后取芯检测结果显示,溶洞充填体抗压强度从 0.8 MPa 攀升至 8.5 MPa ,裂隙封堵率超98%,有效填充各类裂隙,杜绝后续混凝土渗漏隐患。陆水河特大桥针对高度 $\leq 3\text{ m}$ 小型溶洞采用后压浆工艺。桩基浇筑7天后开展压浆作业,此时混凝土强度达设计强度70%,足以抵御压浆压力,压浆管延伸至溶洞区域。分级升压确保浆体充分扩散,桩基竖向承载力提升30%以上,契合设计标准。

4 施工过程中常见的问题及应对措施

4.1 卡钻问题及处理

卡钻属岩溶地层桩基作业高发故障,溶洞内凸起块石、破碎岩芯淤积、钻头嵌顿溶沟或泥浆黏度失常均可能诱发,处置核心在于规避强行提钻,防止钻头损毁、护筒形变或孔壁坍塌,需结合故障成因拟定针对性方案,兼顾问题解决与作业安全^[4]。中老铁路桥梁作业因岩溶发育繁杂,发生6起卡钻事故,4起源于破碎岩芯淤积,岩芯碎片粒径 $2\sim 10\text{ cm}$,在钻头周边堆积形成卡阻,采用“低压慢转+反向提拉”方式处置,钻机转速调控至 $5\sim 8\text{ r/min}$ 、提拉速率 0.1 m/min ,同步加大泥浆循环流量冲洗淤积区域,注入稀释泥浆将黏度从 28 s 降至 20 s ,削弱对岩芯的吸附作用,使岩芯随泥浆排出,平均处置时长控制在8小时内,孔壁保持完整状态,剩余2起为钻头嵌顿溶沟,溶沟狭窄且壁面坚硬,强行提拉易加剧钻头卡紧程度,在卡钻位置侧方布设2个注浆孔,注入水泥—水玻璃双液浆加固周边岩层,待浆体固化强度达 8 MPa 后,缓慢松动钻头并逐步提拉取出,规避孔壁坍塌风险,成孔质量不受干扰,管控钻进速率可降低卡钻概率,遇岩层突变时减速至 0.5 m/h ,每小时监测泥浆指标,及时微调黏度与比重参数^[5]。

4.2 漏浆问题及处理

漏浆为岩溶地层作业高发问题,溶洞连通性能强、岩层裂隙发育充分、孔壁泥皮破损均可诱发,按漏浆量划分为轻微漏浆($\leq 1\text{ m}^3/\text{h}$)与严重漏浆($> 5\text{ m}^3/\text{h}$)两类,需采取针对性处置手段,快速封堵漏点的同时保障孔壁稳态。陆水河特大桥作业期间累计出现28处轻微漏浆点,多集中在裂隙发育岩层区域,采用提升泥浆比重至 $1.3\sim 1.4\text{ g/cm}^3$ 、掺入0.3%锯末的方式封堵裂隙,锯末强化泥浆黏结性能,填补细微裂隙并形成致密泥皮,封堵成功率达100%,且成本低廉、耗时短,单处漏点平均处置时长仅30分钟^[6]。严重漏浆区域共计6处,最大漏浆量达 $8\text{ m}^3/\text{h}$,采用“抛填黏土+碎石混合物+压浆封堵”综合工艺,黏土与碎石体积比控制为2:1,选用塑性指数 ≥ 18 的优质黏土,碎石粒径 $5\sim 15\text{ cm}$,抛填厚度 $5\sim 8\text{ m}$ 构建临时封堵层,再以 $2.0\sim 2.5\text{ MPa}$ 压力高压压浆,注入水泥浆固化处理,将漏浆量管控在 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 以内。湘江特大桥串珠状溶洞区域提前布设预防措施,在孔周按 2 m 间距布设注浆孔,预注浆封堵溶洞通道,从源头削减漏浆事故,发生率较未预注浆区域降低75%,大幅提升作业效能。

5 结束语

在岩溶地层桥梁桩基础施工中,需综合考虑地质繁杂、形态多样及地下水作用影响。勘察精准度与施工方案适配性构成核心保障,“勘察—施工—故障处置”全流程管控模式下,结合工程实例优化勘察技术、甄选适配作业工艺,可有效规避各类安全与质量风险。泥浆造壁、钢护筒跟进等核心技术的合理应用,搭配卡钻、漏浆等常见故障的针对性处置,大幅强化作业质量与效能。未来,需深耕勘察与施工技术的融合创新,为更复杂岩溶地层桥梁桩基础作业提供可靠技术支撑。

参考文献:

- [1] 齐明山,王祥,王春凯.复杂岩溶地层盾构隧道施工变形分析[J].施工技术(中英文),2025,54(21):123-130.
- [2] 陈波,刘汉波.岩溶地层大直径钢管桩施工技术研究[J].山西建筑,2025,51(22):69-72,78.
- [3] 许增智,马如龙,薛亚东,等.岩溶地层盾构隧道下穿既有地铁隧道影响分析[J].现代隧道技术,2025,62(S1):497-505.
- [4] 崔泳炎,陈佳飞.桥梁桩基础钻孔灌注桩施工技术探讨[J].交通科技与管理,2025,06(13):93-95.
- [5] 贾凡鑫.岩溶地区公路桥梁桩基础设计浅析[J].江西建材,2025(10):201-203.
- [6] 吴晓生.公路桥梁桩基础施工中旋挖钻技术的应用分析[J].汽车周刊,2025(07):64-65.

建筑工程施工中预应力混凝土 施工技术应用分析

宋文龙

(中资建设(内蒙古)有限公司, 内蒙古 赤峰 024300)

摘 要 钢筋混凝土作为现代工程结构的核心承重材料, 其力学性能与耐久性直接决定了建筑结构的安全性与使用寿命。然而, 该材料存在抗拉强度低、易开裂、自重较大等固有缺陷, 需通过材料性能优化与施工工艺创新实现优势互补, 以提升结构整体性能。本文探讨了预应力混凝土施工技术在现代建筑工程中的应用机理、工艺要点及质量控制策略, 以期为提升建筑结构耐久性与经济性提供有益参考。

关键词 建筑工程; 预应力混凝土; 先张法; 混凝土养护; 后张法

中图分类号: TU757

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.017

0 引言

预应力混凝土是一种在混凝土构件承受使用荷载之前, 预先施加压应力的先进建筑材料与结构形式。其基本原理是利用高强度钢筋或钢绞线作为预应力筋, 借助特定的机械手段对其进行张拉, 并将其锚固于混凝土构件中, 使混凝土在承受荷载之前就处于受压状态。预压应力能够全部或部分抵消外荷载所产生的拉应力, 从而延缓混凝土裂缝的出现与扩展, 充分发挥高强度混凝土抗压性能以及高强度钢材抗拉性能的优势。预应力混凝土结构与普通钢筋混凝土相比, 具有抗裂性能好、刚度大、耐久性好、截面尺寸小、自重轻、材料节约等显著优点。该技术已经被广泛地应用到大跨度桥梁、工业与民用建筑的屋盖、楼板、吊车梁、轨枕、压力管道、储液罐以及特种结构工程各个领域, 是现代土木工程领域不可缺少的重要技术^[1]。

1 预应力混凝土工程施工难点

1.1 材料配制困难

预应力混凝土对原材料性能要求很高。混凝土本身应具有高强度、低收缩、低蠕变、高耐久性。一般设计强度等级不小于 C40, 采用低水胶比, 一般在 0.34~0.40。水泥强度等级不低于 42.5 的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥, 骨料级配良好、质地坚硬, 含泥量严格控制。另外, 需要掺加高效减水剂以保证工作性, 常常掺入优质矿物掺合料(粉煤灰、矿渣粉等)来改善混凝土微观结构, 降低水化热和长期收缩徐变。预应力筋应选用高强度、低松弛的钢绞线、钢丝或者精轧

螺纹钢筋, 其抗拉强度标准值要达到 1 860 兆帕。同时, 对锚具、夹具、连接器等硬度和静载锚固性能、疲劳性能等也有国家标准严格规定。材料配制的难题就是通过准确的配合比设计, 协调高强度、工作性、早强、低收缩之间的矛盾, 保证所有材料性能的匹配和稳定。

1.2 底板施工难以达到要求

首先, 预应力混凝土结构, 特别是大跨度、大体积的底板施工时, 质量控制比较困难。底板结构钢筋密集, 预应力波纹管定位安装空间狭小, 极易造成管道位置偏差、堵塞、破损。其次, 大体积混凝土浇筑时水化热造成内部温度急剧上升, 若温控措施不到位, 内外温差过大易产生温度收缩裂缝, 这些裂缝会贯穿预应力管道, 对预应力施加效果和结构耐久性造成严重影响。再者, 底板浇筑面积大, 需要保证混凝土浇筑的连续性、均匀性, 防止产生冷缝。最后, 平整度控制也是一大难点, 过大的表面不平整会影响后续施工以及预应力筋的精准定位。施工中要采取分层分段浇筑、埋设冷却水管、覆盖保温养护等综合措施, 对混凝土入模温度、内部温度进行实时监测, 技术要求高, 管理难度大。

1.3 预应力安装质量难以控制

预应力安装是关键工序, 预应力安装质量好坏直接决定预应力建立成功与否, 难点主要体现在以下几个方面: 预应力筋下料长度要精确计算, 要考虑张拉端工作长度、孔道曲线长度、张拉伸长值、锚具尺寸等因素, 下料误差控制严格。波纹管或者预埋管道的安装要保证位置准确、线形圆顺、固定牢固, 浇筑混凝土时不得发生移位、上浮或者压扁。竖向坐标偏差

作者简介: 宋文龙(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑与市政工程。

一般控制在5毫米之内。锚垫板应垂直于预应力筋束，牢固地焊接在钢筋骨架上，保证张拉时受力中心与孔道中心线重合。预应力筋穿束过程复杂，特别是长束、多波曲线束，容易发生绞线、缠绕，摩擦阻力增大。这些都是隐蔽工程，混凝土浇筑完成后发现问题，修复非常困难，甚至会造成构件报废。

1.4 预应力混凝土养护困难

预应力混凝土的养护要求比普通混凝土高，其特殊性在于养护不但影响混凝土强度的发展，而且直接影响收缩徐变性能，收缩徐变是造成预应力长期损失的主要因素。为了加快台座或模板的周转，常要求混凝土早期强度快速增长来达到放张或者张拉的条件，需要采用蒸汽养护或者加入早强剂。但是，若升温、降温速率控制不好，就容易造成混凝土微结构损伤，从而降低后期强度和耐久性。养护要保证足够的时间和湿度，减少塑形收缩和干燥收缩。大型工程或者高空作业时，全覆盖、不间断的湿养护很难实现。对于后张法有粘结预应力，孔道压浆前养护非常重要，混凝土强度未达到设计要求不能张拉，张拉后也应立即压浆封锚，否则预应力筋极易锈蚀。养护的困难是保证质量的同时还要平衡进度、成本、复杂现场条件的关系。

2 建筑工程作业中预应力混凝土先张法施工技术应用

2.1 先张法中混凝土的浇筑

混凝土浇筑前必须对预应力筋的张拉力值、位置及固定情况做全面检查，并确认台座、模板、钢筋和预埋件等都符合设计要求。浇筑时应从台座一端开始向另一端顺序进行，不能碰撞预应力筋。振动器使用时不能碰触预应力筋，以防其位置移动或者受到损坏。对于叠层生产的构件，下层构件混凝土强度必须达到设计要求强度后才能浇筑上层混凝土。混凝土的坍落度不能太大，一般控制在80毫米到120毫米之间，以防出现离析和过大收缩。浇筑过程要连续进行，振捣密实，锚固区及钢筋密集处要形成良好的粘结锚固^[2]。

2.2 混凝土养护

先张法构件一般用蒸汽养护来加快速度增长，提高生产效率。养护制度要科学合理，升温阶段温度升高不能太快，一般不超过每小时20摄氏度，以免造成预应力筋和台座之间温差过大产生附加应力损失。恒温阶段最高温度不能超过60度，否则预应力筋的应力松弛损失就会增大。降温阶段要缓慢进行，防止构件开裂。自然养护时，在混凝土浇筑完成后要及时覆盖保湿，洒水养护时间不得少于14天。养护期间要监测混凝土试块强度，作为放松预应力筋的依据。

2.3 预应力筋放松

放松预应力筋时，混凝土的立方体抗压强度应满足设计要求，当设计无要求时，不得低于设计混凝土强度等级值的80%。放松顺序应符合设计规定，设计未规定时，应分阶段、对称、交错地放松，防止构件在放松过程中产生翘曲或者开裂。常用的放松方法有千斤顶整体放张、砂箱放张、楔块放张和细钢丝用氧乙炔焰切割。放张过程要平稳缓慢，不能对混凝土造成冲击。放张后，应检查构件的起拱度、有无裂缝，按要求切割外露的预应力筋^[3]。

3 建筑工程作业中预应力混凝土后张法施工技术应用

3.1 后张法混凝土施工作业要点

后张法混凝土施工的关键是预留孔道的成型和保护。孔道成型可以采用预埋金属波纹管、塑料波纹管或抽芯管等方法。波纹管安装必须按设计坐标定位，用钢筋支架固定，间距不大于0.8米，曲线段应适当加密。管道连接要严密，防止漏浆。浇筑混凝土时，禁止用振动棒直接敲打波纹管，派专人检查管道位置、完好性，防止移位、破损而堵塞。混凝土要振捣密实，特别是锚垫板周围。构件或者结构浇筑完毕以后要及时清理孔道，为穿束做好准备。穿束可在浇筑前或浇筑后进行，长束穿束需用牵引设备。

3.2 后张法混凝土控制要点

张拉控制是后张法的关键。张拉时混凝土强度应达到设计规定值，一般不低于设计强度等级值的75%。张拉设备要配套校验，张拉力和仪表读数关系曲线要准确。张拉程序应符合设计及规范要求，一般采用 $0 \rightarrow$ 初应力 $\rightarrow 1.05\sigma_{con}$ （持荷2分钟） $\rightarrow \sigma_{con}$ 锚固或 $0 \rightarrow 1.03\sigma_{con}$ 锚固。张拉顺序要遵循对称、均衡的原则，防止结构产生过大的次应力。张拉时应实测预应力筋的伸长值，与理论计算值比较，其偏差应在-60%到60%之间。张拉完毕后应尽快进行孔道灌浆。灌浆材料宜用专用灌浆料或水泥浆，水灰比不宜大于0.45，强度不应低于30兆帕。灌浆要缓慢、均匀、连续进行，排气要通畅，直到出口排出浓浆后封闭。灌浆后应做好锚具的封闭保护，防止锈蚀^[4]。

4 工程作业中预应力技术应用

4.1 在建筑工程加固施工中的应用

既有建筑结构加固改造工程中，由于预应力技术具有主动、高效的特点，所以它是首选的一种加固改造方案。当既有梁、板、框架等构件由于使用功能变更、荷载增加、材料老化或者设计标准提高而出现承载力不足、裂缝过宽或者挠度过大的时候，采用预应力加

固法可以产生立竿见影的效果。其主要原理是利用新增的体外或者体内预应力钢束,给原结构施加一个与外荷载效应相反的力,从而减小原结构关键截面的应力水平,提高其开裂荷载和极限承载力。常见的应用形式有体外预应力加固法、预应力拉杆撑杆加固体系。对于承载力不足的混凝土大梁,在梁底或者梁侧增加高强度钢丝束或者钢丝束组成的体外索,两端锚固在梁端的锚固块或者相邻的可靠构件上。张拉体外索之后,梁体获得了向上的等效荷载,部分抵消了自重和活荷载产生的弯矩。实践数据表明,采用合理的体外预应力加固方案,钢筋混凝土梁的抗弯承载力可以提高 30% 到 60%,同时能够明显减小原有的裂缝宽度和跨中挠度,效果比粘贴钢板或者碳纤维布的方法要好得多。框架结构加固时,也可在柱间增设交叉拉杆或者水平撑杆,采用预应力技术提高结构整体抗侧刚度和抗震性能。此方法的主要优点是施工时基本不中断建筑正常使用,加固效率高,材料利用充分,技术经济性好。

4.2 在受弯构件中的应用

在新建建筑工程中,预应力技术在受弯构件中应用最广、最成熟,主要应用在楼盖体系上。传统的钢筋混凝土楼板和次梁在跨度增大时,为了满足变形和裂缝控制的要求,截面高度必须大幅度增加,从而造成结构自重增大并影响建筑净高。预应力技术的引入完全改变了这种状况。通过张拉楼板或者梁中的预应力筋,在承受使用荷载之前就预先承受压应力,可以完全或者大部分抵消荷载产生的拉应力,从而采用预应力技术来实现更小的构件截面高度和更大的跨高比。预应力混凝土平板结构的跨高比可以达到 40 ~ 45,普通混凝土平板只有 30 ~ 35。在公共建筑和工业厂房中广泛使用的预应力混凝土双 T 板、空心板,其标准跨度可达 12 米至 24 米或更大。预应力叠合板结合了预制和现浇的优点,预制底板在工厂张拉成型,现场安装后浇筑叠合层,共同受力,施工速度快、整体性好。从数据中可以看出,在正常使用极限状态下,预应力受弯构件的裂缝宽度一般可以控制在 0.1 毫米以内,远小于普通钢筋混凝土构件的限值,大大提高了构件的耐久性和使用性能。另外,预应力反拱效应可以计算出抵消部分长期荷载所引起的挠度,保证楼盖平整。采用抛物线型或者折线形布筋方式,预应力筋的矢高被充分利用,用最少的材料实现了弯矩图的最优平衡,达到了材料用量和结构性能的最佳组合。

4.3 在混凝土框架中的应用

预应力混凝土框架结构适合作为大柱网公共建筑、工业厂房和仓储设施。它把预应力技术应用到框架主梁,有时也用到框架柱,从而创造出开阔无阻的灵活

空间。预应力混凝土框架中的关键构件为预应力框架梁,截面形式多为矩形、T 形、工字形等,跨度一般设计在 15 米到 30 米之间,甚至更大。预应力筋在框架梁中按弯矩包络图布置,一般为连续的多波曲线束。通长预应力筋从梁的一端张拉,穿过中间支座,锚固在另一端,在梁的全长范围内建立起有效的预压应力。可以同时平衡跨中正弯矩区、支座负弯矩区两处内力。张拉时预应力产生的等效荷载为向上力,直接抵消了恒载的一部分,使施工阶段及施工初期梁的挠度大大减小。经过计算分析和工程实践证明,预应力框架梁的截面高度比同等跨度的普通钢筋混凝土框架梁少 20% 至 30%,混凝土用量减少 15% 至 25%,钢材总用量也更经济。预应力混凝土框架节点的设计和施工为技术核心。节点区钢筋密集,预应力筋孔道、锚具、普通受力钢筋、箍筋的空间交错关系要妥善处理,保证节点核心区的抗剪强度和整体性。一般需要进行详细的节点三维放样,采用扁形锚具或者扩大节点区尺寸等方法。后张有粘结预应力技术在框架中应用较多,因为其具有较好的结构延性及恢复性能。预应力混凝土框架结构实现了大跨度和较好的经济指标的平衡,其良好的抗裂性、刚度也给建筑提供了长期使用性能,是解决现代建筑大空间需求的重要技术体系^[5]。

5 结束语

预应力混凝土施工技术是现代建筑工程领域的重要技术,具有独特的优势,应用范围广,对提高工程质量、增强结构的安全性、耐久性起到了重要的作用。尽管在材料配制、底板施工、预应力安装、混凝土养护等各方面存在很多困难,但是通过科学合理的施工工艺和严格的质量控制措施,这些难点都可以被克服。从先张法、后张法到建筑工程加固、受弯构件、混凝土框架中广泛应用,预应力技术不断推动着建筑工程技术的发展。随着材料科学与施工技术的发展,预应力混凝土施工技术将会在更多的领域体现其应用价值,为建设更安全、经济、耐久的建筑工程提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 迟名臣. 建筑工程施工中预应力混凝土施工技术的应用研究[J]. 住宅与房地产, 2024(09):179-181.
- [2] 李娟. 建筑工程施工中预应力混凝土施工技术应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(02):129-131.
- [3] 吴升宇. 建筑工程施工中预应力混凝土施工技术应用[J]. 佛山陶瓷, 2022, 32(08):138-140.
- [4] 陶小寺. 建筑工程施工中预应力混凝土施工技术应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2021(32):91.
- [5] 孙永佳. 建筑工程结构施工中预应力混凝土技术的应用与思考[J]. 信息化建设, 2021(08):155.

老旧城区配水管网改造的技术要点与施工管控分析

李 磊

(阜阳市供水有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘 要 为解决老旧城区配水管网服役久、病害突出、运维困难等问题, 结合老旧城区建筑密集、地下管线复杂、交通繁忙的特点, 对配水管网改造技术要点与施工管控展开研究。从管网现状评估与病害诊断、改造技术选型与适配应用、管网优化设计与功能提升三方面明确技术核心, 针对性提出开挖式与非开挖式改造技术的适用场景及优化方案。施工管控聚焦前期准备与方案制定、过程质量与工序把控、进度与现场协调三大环节, 配套建立全流程质量验收、安全风险防控及后期运维衔接机制, 旨在精准破解老旧管网改造中的盲目施工、质量隐患、扰民等难题, 为提升供水稳定性、保障管网长期可靠运行提供参考, 助力老旧城区供水系统升级。

关键词 老旧城区; 配水管网改造; 施工管控; 智慧运维; 技术适配

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.018

0 引言

城市更新进程中, 老旧城区配水管网老化问题日益凸显, 服役年限久、病害隐患多、运维难度大等问题直接影响供水安全与民生体验。2026年我国持续推进地下管网更新改造, 明确要求统筹工程质量与便民需求, 为老旧管网升级划定方向。老城区建筑密集、地下管线交织、交通繁忙, 改造易面临盲目施工、安全隐患及扰民等困境, 智慧化探测与精准管控成为破局关键。本文立足于实际工况, 聚焦管网现状诊断、技术适配选型、施工全流程管控及运维衔接, 探索贴合城区特点的改造方案, 破解技术适配与现场协调难题, 为提升供水稳定性、推动基础设施迭代升级提供实践参考。

1 老旧城区配水管网改造技术要点

1.1 管网现状评估与病害诊断

精准评估与诊断是改造方案制定的核心依据, 为技术选型和施工规划提供支撑。老旧城区配水管网服役年限久、隐蔽性强, 仅凭肉眼观察无法全面掌握实际状况, 需依托专业探测技术构建完整管网档案。工作人员借助管线探测仪与地质雷达, 精准定位管网埋深、走向及节点位置, 同步核查管材类型、敷设年代等基础信息, 通过材质硬度检测、锈蚀层厚度分析判断老化等级, 区分铸铁管、镀锌钢管等易腐蚀管材与

PE管、球墨铸铁管等耐用管材的老化差异。结合管网长期运行的流量、压力、漏损率等数据, 精准诊断病害类型与成因, 泄漏问题可通过压力波监测锁定漏点范围, 腐蚀问题需区分内壁结垢腐蚀与外壁土壤腐蚀的不同影响, 结构性破损则重点排查管道裂缝、接口松动等隐患。

1.2 改造技术选型与适配应用

依照管网当前状况和城区实际条件挑选合适的技术, 同时考虑改造结果和施工可操作性。技术选择需要基于老旧城区建筑数量多、地下管线复杂、交通繁忙这些主要特点, 形成有区别的改造思路。针对使用时间超过三十年、材料老化明显并且结构损坏经常出现的管网, 优先考虑开挖式替换技术, 完全去掉旧管道, 换上有更好耐腐蚀和抗压能力的球墨铸铁管或PE管, 从根本上处理管网运行风险, 确保供水系统长期可靠。这类技术虽然对地面影响比较明显, 但适合周围没有重要地下设施、建筑密度不高的地方, 替换之后管网整体性和耐用性更有保证^[1]。对于老城区中心商业区、历史街道等不方便大范围开挖的区域, 选择非开挖修复技术, 涵盖定向钻进、内衬修复、缠绕修复等具体方法, 借助很小的工作坑完成管道修复或替换, 尽可能降低对交通运行、居民日常以及周边环境的干扰, 兼顾改造速度和城区正常运作。

作者简介: 李磊(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政公用工程。

1.3 管网优化设计与功能提升

借助优化设计来加强管网适配能力以及供水效果, 贴合老旧城区发展需要。老旧城区原本的管网路线大多跟着建筑布局随意铺设, 容易与现有地下电力、通信、燃气管道产生冲突。优化设计应该结合城区整体规划, 重新整理管网路线, 避开老旧建筑地基、文物保护单位以及重要地下设施, 降低后期运维与城市更新之间的矛盾。管径规格匹配要基于水力计算结果, 结合区域人口密度、用水需求增长走势, 合理确定管径大小, 既要防止管径太小造成高峰时段供水不够, 也要避免管径过大带来水资源与建设成本浪费, 达成水力输送效率跟经济性的平衡。管网节点优化同步开展, 增设或更新多功能阀门, 提高管网分段控制能力, 方便后期故障排查与维修, 减小停水范围。更换老化消火栓, 确保其水压达标、出水顺畅, 贴合城市消防应急需要。考虑到老城区供水水质保障需求, 在管网设计里预留水质监测点位, 为后续水质实时管控提供条件, 借助路线、管径、节点的全方位优化, 使改造后的管网不但满足当前供水需要, 更贴合老旧城区未来发展的功能定位。

2 老旧城区配水管网改造施工管控要点

2.1 施工前期准备与方案管控

充分的前期准备与科学方案是保障施工有序推进的前提。施工前期需开展全面现场勘察, 联合市政、电力、通信、燃气等部门完成地下管线交底, 绘制详细的地下管线分布图, 精准标注各类管线位置、埋深、材质及功能, 明确施工边界与潜在冲突点, 避免施工中破坏周边管线设施。勘察工作还需兼顾地面条件, 排查施工区域内老旧建筑、道路状况、交通流量等因素, 为施工区域划分、作业时间规划提供依据^[2]。基于勘察结果编制针对性施工方案, 明确各工序施工流程、技术标准、人员配置及设备调度计划, 细化工序衔接节点, 避免工序脱节导致施工延误。方案中需同步制定应急处置流程, 针对暴雨、管线破损泄漏等突发情况, 明确应急物资储备、响应机制及处置措施, 保障施工安全。施工材料与设备管控贯穿前期准备全过程, 对管材、阀门、水泥等核心材料, 严格核查生产厂家资质、产品检测报告, 进场前进行抽样复检, 确保材质符合设计标准与国家规范; 对挖掘机、钻机、试压设备等施工机械, 提前完成调试与维护, 排查机械故障隐患, 保证施工中设备稳定运行。

2.2 施工过程质量与工序管控

严格把握各个施工工序的质量, 避免施工偏差带来的管网运行风险。核心工序管控集中在开挖、管线

铺设与修复、接口处理这些关键环节。开挖施工要准确控制开挖深度和坡度, 防止超挖引起地面沉降, 对靠近建筑物或管线的位置, 采取钢板桩支护一类防护手段, 确保施工安全和周边设施稳定。管线铺设和修复需要严格控制安装精度, 管道敷设坡度、轴线位置要符合设计要求。非开挖施工中借助实时监测调整钻进方向, 防止管道偏移。接口处理是质量管控的一个重点, 不同管材采用适配的接口工艺, 球墨铸铁管采用橡胶圈密封连接, PE 管采用热熔对接, 施工中要清理接口杂质、控制连接力度和温度, 保证接口密封性, 杜绝后期泄漏。管网基础处理和回填质量直接决定管道使用寿命, 基础浇筑要保证强度均匀, 防止管道受力不均引起破损; 回填土要分层夯实, 选用粒径合适的土壤, 避开石块、建筑垃圾等杂物, 避免后期地面沉降挤压管道^[3]。施工过程中同时开展冲洗和试压工作, 管道安装完成后用清水冲洗内壁杂质, 再进行水压试验, 监测管道密封性和耐压性能, 试验合格后才能进入下一道工序, 全程做好质量记录, 及时整改工序偏差, 确保施工质量符合设计标准。

2.3 施工进度与现场协调管控

动态管理施工进度, 加强现场协调配合, 减少对城区正常运转带来的影响。进度管理要结合施工规模与工序需要, 制定分阶段进度安排, 明确每个阶段施工内容、完成时间及负责人员。把整体目标分解成具体可以落实的节点任务, 建立进度动态跟踪方式, 每天检查工序完成状态, 对比实际进度和计划进度的差距, 分析差距产生原因, 有针对性地调整施工安排。对落后工序优化人员与设备安排, 加快施工速度, 同时避免一味赶工影响施工质量。现场协调工作要多个方面一起行动, 事先与市政部门沟通施工期间交通管理方案, 合理规划施工区域和通行路线, 设置临时绕行标志, 降低对城市交通的干扰; 与电力、通信等部门建立联动方式, 事先避免交叉施工冲突, 如需临时移动管线, 事先协商制定移动方案与时间节点, 保证施工顺利推进。针对居民生活保障, 合理规划施工时间, 避开夜间、午休等休息时段, 减少施工噪声和粉尘污染; 在施工区域设置围挡和警示标志, 保障居民出行安全, 同时做好施工公示, 及时告知居民施工进度和临时供水方法, 争取居民理解。

3 老旧城区配水管网改造工程质量和安全保障措施

3.1 工程质量验收与管控

建立全流程质量验收体系, 确保改造工程符合设计标准与运行要求。质量验收贯穿施工全过程, 落实

分项工程自检、互检与交接检制度,施工班组完成一道工序后开展自检,核查工序质量是否符合技术标准,自检合格后交由相邻班组开展互检,排查隐蔽性质量问题,最后通过交接检确认后,方可进入下一道工序。关键节点验收重点把控,管网接口、基础浇筑、水压试验等核心节点,需组织技术人员、监理人员联合验收,形成验收记录,对不合格节点立即整改,直至验收合格。验收工作需依托专业检测手段,管网压力试验采用分级升压方式,监测管道耐压性能与密封性,确保无渗漏、压力稳定;水质检测重点核查管网内壁清洁度与出水水质指标,符合饮用水安全标准后方可投入使用^[4]。工程资料归档同步推进,收集整理施工方案、材料检测报告、工序验收记录、检测数据等资料,按规定分类归档,确保资料完整、准确、可追溯,为后期质量复核与运维提供支撑。质量管控需强化责任落实,明确各岗位质量职责,建立质量问责机制,对验收中发现的质量问题,追溯责任主体,督促整改到位,通过全流程、多层次的验收管控,筑牢工程质量防线。

3.2 施工安全风险防控

对施工安全风险进行全面排查与管控,确保人员安全和周边环境稳定。施工之前进行全面的安全隐患排查,针对老城区地下管线复杂、地面交通繁忙的特点,重点排查管线破损泄漏、地面坍塌、机械伤害等潜在风险。建立隐患清单,明确整改措施和整改时限,对各类隐患实行闭环管理。现场安全防护措施也要同步落实,施工区域设置标准化围挡,划分作业区和通行区,在危险区域设置明显警示标识和防护设施,夜间施工配备充足照明与警示灯,防止安全事故发生。施工人员的安全管理同样重要,开展针对性安全培训,讲解施工流程、安全规范以及应急处置方法,重点培训高空作业、机械操作、管线处理等危险工序的安全要点,考核通过后才能上岗作业;作业中要求施工人员规范佩戴安全帽、安全带等防护用品,严格遵守作业流程,杜绝违规操作^[5]。突发事件应急处置预案要提前制定,针对火灾、管线破损泄漏、地面沉降等突发情况,明确应急响应流程、人员分工以及物资调配计划,储备灭火器、堵漏器材、应急照明等物资。定期开展应急演练,提升应急处置能力,确保突发情况发生时能够快速响应、有效处置,最大限度降低安全风险。

3.3 后期运维衔接管控

做好施工与运维之间的衔接,为管网长期稳定运行提供保障。工程完工后要马上向运维单位交付完整资料,需要包括:管网分布图、管材规格、接口工艺、

检测数据、设备参数等核心信息,同时也要移交施工过程中形成的隐患排查记录与整改情况,让运维单位可以全面掌握管网的实际状况。运维设施要一起部署,结合管网的改造规划,在关键节点装上流量、压力、水质等监测设备,建立起智能化的运维数据支撑体系,做到管网运行状态可以实时监测,及时对异常情况发出预警,提升运维的精准程度。技术交底工作要深入展开,组织施工技术人员与运维人员开展专项交底,详细讲解管网设计特点、关键节点位置、维护注意事项以及常见故障处理方法。针对复杂工序与特殊节点,进行现场实操指导,帮助运维人员快速熟悉管网运维要点,同时规范后期的巡检与养护流程。协助运维单位制定有针对性的运维计划,明确巡检频次、巡检内容还有养护标准,指导运维人员掌握管网日常维护技巧,包括阀门调试、管道清洁、泄漏排查等工作。

4 结束语

老旧城区配水管网改造是保障城市供水安全、适配城区更新发展的基础性工程,兼具技术复杂性与现场管控难度。改造工作需立足管网实际病害与城区客观条件,统筹技术适配性与施工可行性,既通过科学评估、精准选型、优化设计筑牢技术根基,也依靠全流程施工管控、质量安全保障及运维衔接守住工程底线。唯有将技术要点与管控要求贯穿改造全过程,才能从根本上解决老旧管网漏损、水压不足、安全隐患等问题,实现供水系统提质增效。本文梳理的改造路径与管控方法,可为同类老旧城区管网改造工程提供参考。后续需结合智能化运维趋势,进一步完善管网监测与长效管理机制,为城市基础设施迭代升级注入持续动力。

参考文献:

- [1] 张剑.高密度城区超大型百万吨级现代化水厂设计建造实践[J].给水排水,2024,60(S1):500-504.
- [2] 林泽奇.城市供水输配套改造中的管网顶管施工技术应用[J].云南水力发电,2024,40(04):130-133.
- [3] 梁薇.供水设施改建工程中供水管网改造方案设计研究:以亳州市某配套供水设施改建工程为例[J].工程与建设,2022,36(03):788-790,794.
- [4] 羌梁.城镇生活污水配套管网建设管理的不足及对策初探[J].皮革制作与环保科技,2024,05(03):149-151.
- [5] 蒋玖璐.以辽西北供水配套管网工程为例谈长距离输水管线设计要点[J].中国市政工程,2021(02):35-37,123-124.

老旧小区给排水系统改造中的常见问题分析与规范化设计对策

王传虎¹, 杨 蕾²

(1. 深圳中海世纪建筑设计有限公司济南分公司, 山东 济南 251400;

2. 青岛东盛建筑设计股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 城镇老旧小区改造是重大的民生工程与发展工程。其给排水系统因建设年代早、标准低、老化失修, 普遍存在供水水质安全隐患、排水不畅或雨污混流、系统跑冒滴漏和异味泄漏等“老大难”问题。本文基于《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)、《住宅项目规范》(GB 55038-2025)等核心规范, 结合地方最新技术指南与实践案例, 系统剖析了老旧小区给排水系统的问题根源。从保障供水安全“最后一公里”、实施彻底的雨污分流改造、构建防臭与防漏技术体系以及建立“改造—移交—运维”长效机制四个方面提出了一套以规范为基准、可操作性强的综合改造设计策略, 以期为相关人员提供参考。

关键词 老旧小区改造; 给排水系统; 供水安全; 雨污分流; 长效运维

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.019

0 引言

我国大量建成于 2000 年以前的老旧小区, 其给排水基础设施已进入“老年期”。在供水方面, 铸铁管、镀锌钢管锈蚀导致“黄水”“红水”现象频发, 二次供水设施卫生堪忧, 水压不稳; 在排水方面, 雨污合流、管道淤塞坍塌导致排水不畅、雨天内涝, 化粪池渗漏与污水管臭气外溢严重扰民。这些问题不仅严重影响居民的日常生活品质与健康安全, 也成为制约城市水环境提质增效的瓶颈。近些年, 从国家到地方层面密集出台了一系列政策与技术标准, 将老旧小区改造推向深入。《住宅项目规范》(GB 55038-2025)对住宅给排水系统的安全、卫生与节水提出了更高要求^[1]。

1 老旧小区给排水系统核心问题剖析

1.1 供水系统: 从源头到龙头的多重安全威胁

老旧小区供水系统的隐患贯穿从源头到龙头的全流程。第一, 小区及入户管道大量使用已淘汰的铸铁管、镀锌钢管, 这类管材的抗腐蚀性较差, 内壁腐蚀结垢严重, 长期使用后的内壁易产生铁锈、水垢, 滋生细菌等微生物, 管道锈蚀严重处还会出现渗水、漏水现象。这些不仅是水质污染的源头, 也是高漏损率的症结。第二, 二次供水设施问题突出: 水箱(池)材质不达标、密封性差、缺乏定期清洗消毒和维护, 水箱的内壁涂层

脱落、积淤严重, 成为水质污染的重要源头。居民用水常出现浑浊、有异味等情况, 严重威胁饮用水安全^[2]。水泵机组效率低下、能耗高且噪声大; 水箱及水泵缺乏必要的水质监测与消毒设施, 供水安全完全依赖人工管理, 风险较高。第三, 早期的给排水设计缺乏统一规划, 计量方式较为落后, 部分小区给水支管敷设随便, 管道走向杂乱, 穿墙穿楼板处均未做有效防护, 容易出现管道松动、渗漏。大多数老旧小区仍采用“总表计量”, 居民户内水表很多位于不便抄表处, 不仅容易引发水费纠纷, 也掩盖了户内管道的渗漏问题。而且老旧水表的计量精度低及老化失灵, 存在“跑冒滴漏”现象, 不仅造成了水资源浪费, 也进一步增加了居民的纠纷; 部分供水阀门锈蚀卡死, 无法正常启闭, 出现故障时难以快速停水检修, 扩大漏水损失。

1.2 排水系统: 雨污合流、功能衰退与异味扰民

1. 排水系统问题更为复杂立体。在管网功能上, 历史原因造成的雨污管网混接、错接是较为普遍的现象, 导致生活污水直排河道或雨水管网, 而雨水又倒灌进入污水系统, 加剧了污水处理厂的运行负荷。在管网结构上, 混凝土管、陶土管等旧式管材接口易脱节、管体易破裂, 造成地下水入渗和污水外渗, 不仅污染地下水, 也增加了污水总量。在用户使用上, 排水管径偏小淤积、坡度不当导致排水不畅、返水堵塞是常

作者简介: 王传虎(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政给排水设计。

见的问题。特别是地漏水封干涸、排水管道通气系统不合理或失效，导致臭气通过排水口返臭入室，已成为严重影响居民生活质量的痛点。另外，居民在生活中随意倾倒厨余垃圾、油污、毛发等杂物，也会加剧排水管道堵塞，导致卫生间、厨房返水，严重影响居民生活质量。

2. 屋面及阳台排水设计缺陷，易引发积水内涝。老旧小区屋面雨水斗老化、堵塞，雨水立管管径偏小，屋面排水不畅容易造成屋面积水，积水渗透会导致屋顶漏水、顶层住户渗水；部分老旧小区阳台未设置独立的排水立管，阳台洗衣机排水直接接入雨水管，导致洗衣废水直接排入雨水系统，造成了水体污染。

1.3 管理机制：权责不清与长效运维缺失

硬件问题的背后是软件管理的瘫痪。老旧小区普遍存在物业失管的情况，给排水设施作为专业设备，长期处于“有人用、无人养”的状态。产权归属模糊（业主、物业、原产权单位），导致改造决策难、资金筹集难。改造完成后，若无明确、专业的接收运维主体，数年之后必将重蹈覆辙，陷入“改造—老化—再改造”的恶性循环。

2 以规范为基准的系统化改造设计对策

2.1 供水系统改造：聚焦水质安全与精准计量

供水改造的目标是打造“从水厂到住户水龙头”的全流程安全屏障，核心是贯彻“一户一表、水表出户、供水管水到户”的模式。

(1) 管道与材料更新：小区管网以及入户管应全部更换为符合国家标准的不锈钢管、球墨铸铁管或优质PE、PP-R管等耐腐蚀、卫生性能好的管材。设计应严格按照《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)进行水力计算，确保供水压力均衡，消除低水压区。(2) 二次供水设施升级：对泵房进行标准化改造，优先采用节能高效的变频加压设备。增设紫外线或氯制剂等消毒设备，并安装余氯、浊度等水质在线监测仪表，数据可传输至供水企业监控平台。生活水箱应选用食品级不锈钢材质，配备自清洁装置和智能安防系统^[3]。(3) “一户一表”改造：将水表集中设置于建筑楼外地下式或户外嵌墙式水表箱内，实现“抄表不入户”。将供水企业的管理和服务责任从小区总表延伸到用户表前，为长效安全供水奠定基础^[4]。

2.2 排水系统改造：根治雨污混流与功能缺陷

排水改造的核心是“雨污彻底分流、维持管网通畅”，并积极应对臭气问题。(1) 雨污分流系统性重构：其不仅是局部换管，还需对小区整个排水管网进行系统性排查、诊断和再设计。完全废除合流管，新

建独立的雨水、污水两套管网系统。污水应全部接入市政污水管网，雨水则结合海绵城市理念，就近排入河道或雨水调蓄设施。广州市荔湾区“排水单元达标”改造即为此类系统性工程的典范^[5]。(2) 臭气防治的规范设计：将臭气防治纳入设计的前端。严格按照规范设置通气管系统，对可能产生负压的排水立管顶部设置自动通气阀。高度重视地漏等存水弯的水封保护，推荐使用具有防干涸功能的地漏。重庆发布的《城镇排水管渠臭气防治技术标准》^[6]应在改造设计中予以落实。(3) 化粪池与管网修复：对原有砖砌化粪池进行防渗漏改造或更换为成品玻璃钢化粪池。对于结构性缺陷尚可修复的旧管道，可采用非开挖内衬修复技术，以减少开挖面、节省投资和工期。

2.3 构建“改造—移交—运维”一体化长效机制

技术改造需配以机制创新，方能持久。(1) 明确移交与运维主体：改造前即应明确，改造后的小区公共给排水设施（含泵房）统一移交至属地供水企业、排水公司或政府指定的专业运营单位，实行专业化、规范化管理。十堰、济南等地的方案均强调了这一点^[7]。

(2) 设计为运维赋能：在设计阶段就考虑运维需求。例如：为关键管节点、检查井预留智能监测设备安装条件（液位计、流量计等）；泵房设计满足远程监控、无人值守的要求；图纸资料应数字化，便于纳入城市地下管线信息系统^[8]。(3) 资金与公众参与：探索“政府补贴、企业投资、居民合理分担”的多元资金筹措模式。设计过程中应通过社区公示、居民意见征询会等方式加强沟通，减少施工阻力。

3 改造工程的精细化实施、创新探索

在完成系统化的问题诊断与规范化设计后，改造工程的成功落地与长期效能，高度依赖于精细化的施工实施、对新材料新技术的创新性应用，以及对未来发展趋势的前瞻性考量。本文聚焦从图纸到实物的关键跨越，探讨在复杂的老旧小区环境中如何能够保障施工质量并引入创新技术，展望未来改造工作的发展方向，从而形成从诊断、设计、实施到未来适配的完整闭环。

3.1 精细化实施要点：应对老旧小区特殊环境

老旧小区改造工程是在人口密集、空间局促、地下情况不明的情况上做“手术”，其施工复杂性远高于新建项目。精细化实施是避免“好心办坏事”、减少扰民和二次损害的关键。

1. 非开挖与微开挖技术的优先应用：对于地下管线复杂、路面狭窄或绿化保护要求高的小区，应优先采用非开挖修复技术。对于入户支管的更换，可采用

定向钻或微型顶管技术, 精准导向, 避免对建筑基础和道路的反复施工以及破坏。

2. 全过程管线探查与保护: 老旧小区地下不仅存在待更换的给排水管道, 往往还有混乱的电力、通信、燃气等管线。施工前, 必须采用物探(地质雷达)与人工探挖相结合的方式, 对施工区域进行“透视”, 绘制详细的现状地下管线综合图。在施工过程中, 对需要保留的相邻管线, 特别是燃气管、高压电缆, 需制定专项保护方案, 设置物理隔离和监测点, 防止挖断、压损导致重大安全事故。

3. 分阶段施工与居民协调的精细化组织: 改造工程不能“一刀切”地全面开工, 需编制科学的分区分段施工组织设计。例如: 以单个门栋或小型组团为单元, 完成该单元从供水、排水到路面恢复的全流程作业后, 再转入下一单元。建立透明的沟通机制, 如设立项目公示牌、建立楼栋微信群, 提前 24 小时通知停水、排水等关键节点, 并明确预估恢复时间。设立现场居民接待点, 及时处理因施工造成的个别住户漏水、堵塞等突发问题。

3.2 技术与管理创新探索: 提升改造效能与长期价值

在遵循核心规范的基础上, 因地制宜地引入经过验证的新技术、新材料和新管理模式, 可以显著提升改造工程的综合效益。

1. 装配式模块化技术的应用: 将传统现场砌筑、焊接的大量工作转为工厂预制、现场装配, 能极大地提升质量、速度和环保性。例如: 推广使用一体化预制泵站, 将水泵、管道、阀门、控制柜和通风系统在工厂集成于一个筒体内, 现场只需开挖基坑、吊装连接, 工期可缩短 70% 以上, 且外观美观、密闭性好、噪声低。同样, 装配式检查井、一体化水表箱等产品的应用, 也能解决现场砌筑质量参差不齐、养护周期长的问题。

2. 智能化感知系统的同步建设: 改造不仅是“旧管换新管”, 更是为小区水系统装上“感知神经”。例如: 在小区供水总入口、二次供水水箱、易涝低洼处、重点排水接驳口, 安装无线远传压力传感器、液位计、水质监测仪等。数据实时上传至区级或市级智慧水务平台, 或简化为接入物业中心显示屏, 实现供水压力异常、管网漏损预警、积水内涝预报的早期发现与快速响应。这相当于为新建系统购买了“长期健康保险”, 也是实现《住宅项目规范》中“提升住宅设施智能化水平”要求的具体举措。

3. “海绵城市”理念的有机融合: 排水改造不应仅满足于“快速排走”, 而应与海绵城市建设结合。在小区条件允许的情况下, 设计可将屋面、路面雨水

有组织地导入下凹式绿地、雨水花园或渗透塘, 进行滞蓄、净化和下渗, 补充地下水, 削减峰值径流量。将老旧混凝土路面更换为透水铺装, 既解决了积水问题, 又提升了小区生态环境。这种“灰色基础设施”(管网)与“绿色基础设施”(海绵设施)的结合, 提升了改造项目的综合生态效益。

4 结束语

老旧小区给排水系统的改造, 不仅仅是简单的管线替换, 更是一项涉及技术更新、规范落实、管理重构的系统工程。设计师需坚持问题导向与规范引领, 以国家标准《建筑给水排水设计标准》与《住宅项目规范》(GB 55038)等核心规范为设计基石, 同时充分吸纳如青岛市市政公用工程质量安全监督站发布的《排水管网改造及运维技术指南》、重庆市住房和城乡建设委员会发布的《臭气防治技术标准》(DBJ 50/T-488-2024)等地方最新实践成果。成功的改造设计应实现四个目标: 一是通过管道更新与“一户一表”实现供水水质与计量安全; 二是通过系统性分流与管网修复实现排水顺畅与环境友好; 三是通过防臭设计和材料优选实现室内外空间无异味; 四是通过明确的移交协议和专业运维设计实现设施长效健康运行。未来, 随着物联网、大数据技术的发展, 在老旧小区改造中前瞻性地嵌入智能传感器, 建设小型智慧水务模块, 实现对流量、压力、水质、液位的实时监测与预警, 将是提升运营效率、保障长效性的重要发展方向。只有将扎实的规范化设计、适宜的先进技术与可持续的管理机制紧密结合, 才能真正攻克老旧小区给排水的“老大难”问题, 让改造成果长久惠及于民。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部.住宅项目规范(GB55038-2025)[S].2025.
- [2] 青岛市水务管理局.青岛市建筑与小区排水管网改造及运维技术指南(试行)[Z].2025.
- [3] 河北省质量信息协会.高层建筑给排水系统运行维护技术规范(T/HEBQIA 383-2025)[S].2025.
- [4] 济南市人民政府办公厅.济南市居民住宅小区供水设施改造实施方案[Z].2024.
- [5] 广州市荔湾区水务局.关于荔湾区政协第十六届五次会议第165217号提案答复的函[Z].2025.
- [6] 重庆市住房和城乡建设委员会.城镇排水管道渠臭气防治技术标准[Z].2024.
- [7] 十堰市人民政府办公室.市中心城区2025年居民小区供水设施改造提升工作试点方案[Z].2025.
- [8] 大连市住房和城乡建设局.对市政协十四届四次会议第0122号提案的答复[Z].2025.

市政排水管道顶管施工监理要点及管道接口防腐施工质量控制

王庆楼

(安徽南巽建设项目管理投资有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘 要 市政排水管道工程中采取顶管施工工艺, 可有效排除开挖工艺形成的不良影响, 规避对地下管线、城市道路及周边建筑形成的过分干扰, 在当前的城市发展中应用广泛。然而, 该技术的应用会受到地质条件、操作规范性等因素的影响, 而且若是不做好管道接口防腐处理, 极容易影响工程质量及管道的使用寿命。基于此, 本文以市政排水管道工程施工质量管理为核心, 围绕施工监理及管道接口防腐展开深入探究, 以期为提高工程耐久性 & 管道运行稳定性提供借鉴。

关键词 市政工程; 排水管道工程; 顶管施工; 接口防腐; 施工监理

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.020

0 引言

在城市发展过程中, 市政排水管道作为重要的基础设施, 与城市防洪排涝能力及水环境质量间有着紧密关联。对比其他管道施工技术来看, 顶管施工优势明显, 既不会过分影响到地面交通或周边构筑物, 也能够有效提高施工效率。但该技术的操作流程较为复杂, 且隐蔽性较强, 较容易出现质量隐患。而管道也极易受施工工艺及土壤腐蚀性影响, 是工程人员需着重关注的防腐管控环节。因此, 在排水管道顶管施工过程中, 工程人员既要建立完善的监理体系, 也要做好管道接口防腐施工。

1 市政排水管道顶管施工

顶管施工是一种非开挖型管道铺设技术。该技术的核心原理体现在, 以顶管机的切削破碎功能, 对地层进行开挖, 辅以千斤顶设备以及后背墙提供的反作用力, 平稳顶入预制管道, 使之填充于孔洞中, 形成连续且密闭的排水管道系统。该技术多适用于穿越城市主干道、既有建筑物或桥梁桩基的复杂地段。对比传统开挖工艺, 顶管工艺可有效降低对地下管线、周边建筑及城市交通造成的影响和破坏, 也可控制噪声污染或扬尘污染, 高度契合于当下的精细化、绿色化施工要求^[1]。在市政排水管道顶管施工中, 工程人员需要全面开展地质勘察工作, 并以勘察结果为核心依据, 合理设计管道材质、管径大小, 生成科学施工方案, 以支持施工质量效率稳步提高。

在市政排水管道顶管施工中, 施工流程较繁琐且环环相扣。在准备环节, 工程人员需展开全面的地质勘察工作, 科学进行设备选型, 并彻底展开场地清理; 在测量放线环节, 需精准定位管道轴线及高程; 在后背墙施工作业中需要做好支护作业, 确保反力充足; 在管道顶进作业中, 需提前安装并调试设备, 实时监测轴线偏移情况; 在管节连接作业中, 要严控密封性防渗漏。在各环节工作的层层递进中, 切实提高工程质量及安全效益。

2 市政排水管道顶管施工监理要点分析

2.1 施工准备监理要点

施工准备是市政排水管道顶管施工的起始环节, 直接影响着后续的施工质量。在该环节的监理工作中, 监理人员需要把握以下三个要点。

首先, 需着重进行施工方案审查。判断其中的地质勘察资料是否完整, 顶进工艺选择是否合理, 施工进度计划是否可行。同时, 需要审查施工团队设计的安全保障措施是否具有针对性。在此基础上, 对方案的论证结果进行检查。针对工程中涉及的地质复杂地段, 如流沙层或软土, 需及时联系施工单位, 对相应的应急处置措施进行整改优化。其次, 需着重核查施工资源的配置情况, 如千斤顶、顶管机、泥浆泵等关键设备的型号性能。也需要对设备的校验报告进行检查, 确保设备符合施工要求, 且运行状态稳定。在此

作者简介: 王庆楼 (1974-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 市政工程监理。

基础上, 还需对顶管机操作人员、质量员及安全员进行资质审查, 确保其施工经验丰富, 且能够持证上岗。最后, 需对现场施工条件进行确认, 着重检查各类临时工程的布设情况, 如施工围挡、临时用电、排水设施, 确保其符合规范要求。针对基坑开挖范围、后背墙位置也需要逐一核实, 确保其能够与地下管线或周边构筑物保持安全距离, 避免对周边环境造成破坏。

2.2 测量放线监理要点

在排水管道顶管施工中, 测量放线环节直接影响着施工进度。在该环节的监理工作中, 监理人员需把握以下三个关键点。

首先, 需着重审查测量方案。对全站仪、水准仪等关键测量仪器的校验证书进行仔细确认, 确保仪器质量精度符合施工要求。其次, 需要严格复核施工放线结果。在此期间, 着重参考城市规划部门提供的基准点, 并且对高程控制线、管道轴线放线精度也要逐一复核, 确保偏差处在 ± 5 mm 范围内。完成复核工作后, 监理人员需签署确认文件, 安排施工团队进行施工作业。若期间发现放线偏差超出规定范围, 需及时联系施工单位, 重新进行放线作业, 并再次进行复核, 直至复核通过。最后, 在顶管施工环节, 监理人员需展开动态化测量监测, 在每完成一节管节顶进作业后需复核一次轴线高程, 若工程中涉及长距离顶管作业, 还需酌情增加负荷频次, 辅以激光导向仪, 对顶管机的掘进方向加以实时监控^[2], 以此及时察觉并处理偏差, 避免在后续作业中出现管道偏移或错口问题。

2.3 顶进设备监理要点

顶进设备的性能是对顶管施工质量造成影响的一大要素。在该区域的监理工作中, 监理人员需把握进场验收、安装调试、运行监控三大要点。

首先, 在设备进场时, 监理人员要着重核查设备的相关资料, 如出厂合格证、性能检测报告。同时要对比施工方案, 对设备的型号参数加以逐一核定, 确保其满足施工需求。若工程中涉及二手设备或经过大修的设备, 也需着重检查对应的维修记录及复检报告, 避免现场存在不合格设备, 引发施工隐患。其次, 在设备安装阶段, 监理人员需全程参与监督管理工作, 着重检查机械设备的安装位置、水平垂直度、布设方式以及受力平衡情况, 确保设备稳定安装, 能够安全运行。最后, 在设备调试阶段, 监理人员需组织施工人员进行空载实验与负载实验, 检查设备在空载或负载状态下是否能够正常运行, 各参数是否会发生异常变化, 确保问题及时发现、及时整改^[3], 以合格的设备支持顶进工作的安稳推进。

2.4 顶进过程监理要点

顶进作业是市政排水管道顶管施工的核心环节。在监理工作中, 监理人员需全程参与, 着重观察顶进参数、泥浆配比、管节连接以及地层稳定情况。

首先, 在参数管控方面, 监理人员要着重关注顶进推力、出土量、掘进速度等指标, 参考地质资料及施工方案, 对参数合理性加以分析。若工程中存在流沙层或软土地基, 监理人员需立即暂停施工作业, 安排施工团队调整顶进速度, 以减小顶进推力, 规避地层扰动问题。若出土量偏差过大, 超出理论值 10%, 则需立即展开现场排查, 判断是否存在关节偏移或塌方问题。其次, 在泥浆配比管控方面, 监理人员需要以地质情况为基准, 对配比方案加以审核。其间需着重检查原材料的质量及泥浆关键指标, 如黏度比重、含砂率, 确保其具有较强的润滑作用及支护作用, 防止在顶管作业中出现管节磨损或地层沉降问题。再者, 在管节连接管理层面, 需着重检查接口的平整度、清洁度, 要求施工单位严格按照相关规范进行密封处理。使用橡胶密封圈时, 还需对密封圈的质量进行检查, 确保其安装到位无破损。最后, 在地层稳定管控方面, 监理人员需着重观察基坑周边的裂缝或沉降问题, 并定期组织施工人员对地下管线周边构筑物变形量加以监测计算。若发现变形量超出预警值, 需立即停工, 以调整泥浆配比或注浆加固的方式进行整改, 直至地层稳定, 方能恢复施工。

2.5 基坑背墙监理要点

在市政排水管道顶管施工中, 基坑及后背墙起到了重要的支撑作用, 也直接影响着施工作业的安全性。在监理作业中, 监理人员需着重关注基坑开挖环节, 对开挖方案的合理性进行审核, 判断开挖坡度、分层开挖厚度参数是否合规。若工程中涉及软土地区, 监理人员需要求施工人员控制开挖速度, 并严禁采用一次性开挖方案, 防止诱发基坑坍塌风险。此外, 还需对基坑排水设施的布设进行检查, 确保在顶管作业中基坑内积水能够及时排出, 避免其与管道设备接触, 致使土体失稳, 管道腐蚀。

3 市政排水管道接口防腐施工质量把控要点

3.1 做好材料筛选

选用高质量的防腐材料是提高排水管道接口防腐性能的最直接手段。在市政排水顶管作业中, 工程人员需基于项目全生命周期推进材料管理工作。

在材料入场阶段, 需着重检查防腐密封类材料的出厂合格证书、性能检测报告, 如防腐涂料、橡胶密

密封圈、密封胶、防腐胶带等^[4]。同时需对材料的耐高温性能、耐腐蚀性能及附着力进行审查,严格参考设计要求,识别材料型号规格,避免质量不达标的材料入场;针对防腐涂料,需额外审查其环保指标,确保符合市政环保要求,践行绿色环保倡导;针对橡胶密封圈,需着重检查其外观,判断是否存在气泡或破损问题。

材料全部入场后,工程人员需按照材料特性进行分类存储。例如:需将防腐涂料放置在通风、阴凉、干燥位置,并避免阳光直射,远离火源、热源;需将橡胶制品放置在5~25℃的空间内,并避免接触油脂、酸碱一类的腐蚀性物质而出现变质老化问题。此外,在材料使用前,施工人员需要检查材料的使用有效期,坚决使用过期变质材料,确保性能达标。

3.2 处理接口表面

接口表面的处理质量直接影响排水管道接口防腐性能,也会影响防腐层与管道接口的结合状态。在防腐施工作业中,工程人员需做好管道表面清洁工作,确保接口处不存在油污、焊渣或灰尘。在此环节,可采用人工打磨或高压水枪冲洗的方式,对接口表面进行清洁处理。若接口存在油污严重问题,还需使用中性和洗涤剂进行清洗,并利用清水进行冲洗,防止油污影响降低防腐层附着力。

完成表面清洁作业后,工程人员需对管道接口进行除锈处理,基于接口材质选择不同的除锈方式,如手工除锈、机械除锈或喷砂除锈。对比来看,喷砂除锈效果最佳,多用于防腐要求较高的市政排水管道工程。完成除锈作业后,需再一次检查接口表面粗糙度,判断是否满足防腐材料施工要求。同时需对接口的除锈彻底性进行检查,确保不存在铁锈、旧防腐层残留或氧化皮。为避免接口再次生锈,工程人员需在完成除锈作业后,立即进行防腐工作。最后,工程人员需确保经过除锈后的接口表面干燥,以热风烘干、自然风干的方式,控制接口表面含水率,使之处在8%标准以下^[5]。若施工环境中空气湿度较大,或处在地下水水位较高的位置,还需采取适当的防潮措施,避免经过干燥处理后的管道接口再次受潮,影响防腐效果。

3.3 优选防腐工艺

在防腐施工作业中,针对不同的防腐方式有不同的质量管控方法,工程人员需要做好细节性处理。

首先,在涂料防腐作业中,工程人员需严格遵循底涂、中涂、面涂的顺序进行操作。并且,在进行每一道涂层施工作业前都需要对上一层涂层的干燥情况

进行检查,确保其完全干燥固化且厚度均匀。同时需要对上一层的涂层质量进行检查,判断是否存在气泡、漏涂、流挂问题,及时处理,避免后续返工。涂刷期间,工程人员需合理控制涂刷速度以及涂刷力度,确保涂料能够与管道接口紧密结合。针对涂刷范围,需设定在超出接口边缘50mm以上,以形成完整的防腐覆盖层。其次,在胶带防腐作业中,工程人员需优先采用螺旋式缠绕工艺进行胶带缠绕。同时需要合理控制缠绕张力,确保其均匀。为提高防腐效果,还需对胶带搭接宽度进行调整,确保其不小于胶带宽度的1/2。在缠绕胶带前,工程人员同样需要对接口表面的干燥情况、清洁情况进行检查。缠绕期间需控制速度,避免出现胶带破损或褶皱问题。整体缠绕工作结束后,需检查胶带与接口表面的贴合度,确保不存在空鼓现象。若采取该工艺时,施工团队选用玻璃纤维布或无纺布作为主要缠绕材料,工程人员需对缠绕密度及层数加以适当控制,必要时可结合涂料防腐工艺。例如:先缠绕一层防腐胶带,而后涂刷一层防腐涂料,以此提高防腐层强度及耐腐蚀性,确保施工符合规范要求。

4 结束语

在市政排水管道施工中,优化顶管施工监理及管道接口防腐是切实提高工程质量、延长管道使用寿命的重要举措。本文以顶管施工全流程监理为切入点,对各环节的监理要点及防腐施工要点展开深入论述。在监理工作中,监理人员需做好施工准备、测量放线、设备运行、顶进过程及基坑后背墙施工监理任务;在接口防腐施工中,工程人员需做好材料筛选、表面处理等工作,需使用正确的施工工艺,高质量推进防腐层检测。以完善的管控体系,显著降低施工隐患,提高工程耐久性能。

参考文献:

- [1] 邓永彬.顶管施工技术在市政大型排水管道工程中的应用研究[J].居业,2025(01):13-15.
- [2] 李熙浩.浅析简析市政道路排水管道顶管施工技术的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024(24):103-105.
- [3] 金鑫.顶管施工技术在市政道路给排水管道中的应用研究[J].现代工程科技,2025,04(06):141-144.
- [4] 张爱国.市政排水工程中小型管道顶管施工技术研究[J].工程技术研究,2024,09(23):99-101.
- [5] 林灿.市政排水工程中污水管道顶管施工技术分析[J].建材发展导向,2025,23(21):124-126.

“双碳”目标下铁路供配电系统节能技术分析

戴 松

(四川蜀道电气化建设有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 在“双碳”目标背景下,为解决铁路供配电系统能耗偏高等问题,展开对节能技术应用及运行机制的探究尤为重要。本文分析了铁路供配电系统运行特征,梳理了主动调控及协同联动等节能技术运行方式,并结合无功补偿及智能调压等技术进行系统研究。结果表明,应用节能技术可有效降低系统综合能耗,提高能源利用效率。在“双碳”目标约束下,推进铁路供配电系统节能技术应用,对实现铁路绿色低碳及安全高效运行具有重要价值。

关键词 铁路; 供配电系统; 节能技术

中图分类号: U22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.021

0 引言

“双碳”目标的提出推动了交通行业加速绿色转型。铁路作为低碳交通骨干,其供配电系统能耗问题愈发凸显,制约着行业低碳发展。当前铁路供配电系统在能源利用效率及节能技术应用方面仍有优化空间。基于此,深入探究铁路供配电系统节能技术,可为铁路行业践行“双碳”目标,为安全及低碳运行提供有力支撑。

1 “双碳”目标下铁路供配电系统节能技术应用价值

1.1 降低系统综合能耗,助力铁路低碳转型

“双碳”目标是我国提出的碳达峰碳中和战略目标的简称,其核心要义是推动经济社会发展全面绿色转型,构建低能耗及低排放的生产生活模式。铁路作为国家综合交通运输体系的骨干,其供配电系统的能耗水平关系着行业低碳转型进程。降低系统综合能耗,是铁路供配电系统节能技术的应用价值之一,这一价值的落地可减少铁路行业碳排放总量,助力行业在“双碳”目标约束期限内,完成减排任务。铁路电力系统为铁路站房和沿线列车运行设备提供电能,其中站房用电是铁路电力系统电能消耗的主要部分。站房配电系统的负荷主要有照明插座及通信监控等。这些手段在现阶段都起到了很好的节能效果,但始终没有起到优化能源结构的作用。而铁路供配电系统节能技术突破了传统节能措施的局限,在降低能耗的前提下,推动能源结构向清洁化方向升级,为铁路行业践行“双碳”目标提供关键技术支撑^[1]。

1.2 提高能源利用效率,优化铁路运营成本

节约优先是我国推进碳达峰碳中和的重要方针,《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》将绿色转型、安全发展作为基本原则,并专章部署“贯彻落实碳达峰碳中和要求,全面推进绿色低碳转型”。提高能源利用效率是铁路供配电系统节能技术的关键目标,可直接降低能源消耗成本,优化运营成本结构,从而增强铁路运输行业的经济竞争力。同时,契合国家节能降碳相关政策导向,借助资源集约利用推动铁路行业高质量发展,为“双碳”目标下铁路行业的可持续运营提供政策呼应^[2]。

1.3 增强系统运行韧性,保障铁路供电安全

在“双碳”目标引领铁路行业绿色低碳转型的进程中,供电安全是铁路稳定运行的重要前提^[3]。应用铁路供配电系统节能技术,可以增强系统运行韧性,从而为保障铁路供电安全提供不可或缺的支撑。节能技术借助优化系统能量流分布,提高系统对外部环境变化及内部运行波动的适应能力,减少因能耗失衡引发的系统运行风险。同时,稳定的供配电系统是铁路践行“双碳”目标的基础支撑。唯有保障供电安全,才能持续推进铁路运输生产,为铁路行业绿色低碳转型提供可靠的能源保障。

2 铁路供配电系统节能技术运行方式解析

2.1 主动调控式节能技术工作逻辑

主动调控式节能技术的工作逻辑,以“双碳”目标为导向,依托铁路供配电系统运行特性,构建动态调控体系。其可实时感知系统能量代谢状态,预判能

作者简介: 戴松(1973-),男,专科,工程师,研究方向:铁路工程设计施工。

耗变化趋势,提前触发调控机制,规避非必要能耗产生。该技术借助能量流优化算法,动态校准系统运行参数,使供电系统始终维持在低耗高效运行区间。该逻辑贯穿全流程,涵盖状态感知及趋势预判等环节,利用闭环调控,提高能量利用效率。同时,契合铁路供电系统节能降耗的需求,为“双碳”目标下铁路供电系统低碳运行提供技术逻辑支撑。该技术不依赖外部被动响应,凭借主动干预,构建稳定低耗的运行模式^[4]。

2.2 被动适配式节能技术响应规则

被动适配式节能技术响应规则,以“双碳”目标下节能降耗需求为遵循,依托铁路供电系统实时运行状态触发响应。其不主动干预系统运行参数,而是准确识别系统负荷波动及电压变化等运行变量。在变量超出预设节能运行阈值时,启动适配调节机制。凭借自适应匹配系统运行状态及节能需求,使供电系统在负荷动态变化的过程中维持低能耗水平。该响应规则聚焦系统运行状态及节能目标的动态适配,为“双碳”目标下铁路供电系统节能运行提供被动调控支撑,保障系统在不改变主动运行逻辑的前提下优化能耗。

2.3 协同联动式节能技术交互架构

协同联动式节能技术交互架构围绕“双碳”目标下节能降耗需求,衔接铁路供电系统各节能技术模块。其建立技术间的动态交互通道,实时感知并共享各模块运行状态。利用交互机制协调不同技术的运行节奏,使主动调控及被动适配等技术形成运行合力。该架构弱化单一技术的独立运行局限,强化多技术间的互补适配。在系统整体能耗优化的目标指引下,保障各技术模块协同响应供电系统运行变化,推动“双碳”目标下铁路供电系统高效节能运行,整体降低系统能耗水平^[5]。

3 “双碳”目标下铁路供电系统节能技术的应用

3.1 牵引供电无功补偿技术

无功功率是电力系统中不对外做功的功率,会增加线路损耗。牵引供电无功补偿技术的核心是借助接入补偿装置平衡牵引供电系统中的无功功率。该技术基于电磁感应及功率平衡原理调整系统功率因数。在“双碳”目标导向下,其原理应用聚焦降低牵引供电系统能耗,减少电能传输过程中的损失。该技术借助动态调节无功功率分布,使牵引供电系统运行状态贴合节能需求,契合铁路供电系统低碳运行的探究方向。

应用牵引供电无功补偿技术,需要遵循负荷适配、精准调控及闭环协同的逻辑。前期需开展全周期负荷特性勘测及参数预设,针对牵引供电系统的负荷波动规律,完成摸底监测,重点采集列车运行不同阶段的

负荷变化特征,基于监测数据确定补偿装置的容量等级、响应阈值及调控精度参数,保证补偿装置准确匹配系统负荷特性。在此基础上,推进补偿装置的选型及集成部署,结合牵引供电系统架构,选取适配的补偿装置类型,将装置接入牵引变电所核心供电回路,完成装置与原有供电系统的电气连接及通信适配,搭建起补偿装置及系统控制中心的信息交互链路,完成运行状态的实时反馈及参数远程调控。基于装置部署完成动态调控及闭环优化,借助补偿装置的快速响应能力,实时追踪牵引负荷的动态变化,并自适应输出无功功率,凭借功率平衡算法动态校准补偿参数。同时,构建闭环调控机制,持续监测系统功率因数及电压稳定性等核心指标,基于监测结果动态优化补偿策略,及时修正补偿阈值及响应参数,保证系统始终维持在低耗高效的运行状态,降低因无功失衡引发的线路损耗,保障牵引供电系统的稳定节能运行。

3.2 站场配电智能调压技术

电压偏差会增加站场用电设备能耗。智能调压是依托智能感知及调控手段,动态适配用电负荷变化的电压调节方式。站场配电智能调压技术凭借实时监测站场配电系统电压状态,依据负荷变化,自适应调整输出电压。该技术依托电压及负荷的适配关系,使供电电压始终贴合设备最优运行需求。在“双碳”目标下,稳定电压可以避免设备产生额外能耗,助力铁路供电系统实现低碳运行。

应用站场配电智能调压技术,需要以负荷精准感知、参数科学配置及动态自适应调控为导向,围绕站场配电负荷特性及电压调控需求,分层推进实施过程。开展站场用电负荷全维度普查,梳理照明等各类负荷的分布情况,划分不同功能区域的负荷类型,明确各区域负荷的昼夜波动规律及电压适配需求。同步在站场配电关键节点布设电压监测装置,建立全区域电压监测网络,持续采集各时段、各区域的电压数据,凭借数据关联分析绘制负荷变化及电压波动的对应关系曲线,为后续调压参数设定提供数据支撑。基于负荷普查及电压监测结果,结合不同功能区域的用电特性,准确设定分时段调压基准值,筛选核心配电节点作为智能调压装置的安装点位。完成装置选型与安装后,搭建调压装置及站场配电监控系统的通信链路,让装置运行状态实时交互调压数据。借助多轮模拟负荷测试,反复校准调压参数,优化装置响应逻辑,保证调压策略匹配实际负荷变化,最终达到电压自适应调控效果。在技术应用全过程中,需要持续监测站场配电系统的电压稳定性及能耗变化,动态微调调压参数,

保障供电电压始终维持在设备最优运行区间,有效规避因电压偏差产生的额外能耗,强化站场配电系统的节能运行水平,为“双碳”目标下铁路站场配电升级提供可行路径。

3.3 光伏储能耦合供电技术

光伏供电是利用光伏组件,将太阳能转化为电能的供电形式。储能技术可以储存并释放电能,缓解能源供应波动。光伏储能耦合供电技术,凭借整合两种形式的特性,形成互补供电模式。该技术可将光伏产生的电能,优先供给铁路站场负荷,多余电能储存备用。同时,这种耦合模式还能提高清洁能源利用占比,减少传统电能消耗,推动铁路供电系统低碳转型。

应用光伏储能耦合供电技术,需要立足于铁路供电系统的“双碳”目标,推动能源结构的清洁化升级,按照资源勘测、方案规划、系统集成及调控优化的逻辑落地。前期开展站场光伏资源及负荷需求勘测,测算年均日照时长等数据,梳理不同时段用电负荷特性,明确峰谷分布规律及负荷供电保障要求。在此基础上规划光伏组件布局及储能配置,结合站房屋顶等空间承重采光条件,确定组件铺设容量及位置。基于负荷与光伏出力波动,选型储能电池类型及容量,保障系统匹配。实施阶段搭建协同耦合控制系统,融入负荷预测算法及能量管理方式,明确光伏电能优先供给、余电储能原则,细分峰谷时段设定充放电阈值,划定负荷供电顺序保障可靠性。完成集成后推进耦合系统及原有配电网络对接调试,配置并网切换装置及备用回路,构建协同架构,平稳切换供电模式。布设能源监测节点,实时采集发电、储能及负荷数据,借助数据分析优化调控参数,匹配供需需求。全过程强化运行监测维护,保障系统稳定高效,提高清洁能源占比,降低传统电能消耗,为“双碳”目标下铁路供电能源结构优化提供支撑。

3.4 系统能耗在线监测技术

在线监测是利用传感及数据传输技术,实时感知对象状态的技术形式。系统能耗在线监测技术针对铁路供电系统能耗状态布设监测节点,可以实时采集各环节的能耗数据,经数据处理后,呈现系统能耗分布情况。依托这些实时能耗信息,能准确定位高耗能环节,为开展针对性的节能调控及高效管理提供即时的数据支撑。

在铁路供电系统中应用系统能耗在线监测技术,需围绕精准感知能耗及节能调控目标进行推进。实施过程按照体系规划、设备部署、网络搭建、平台构建及运维保障的逻辑分层落地。开展供电系统架构梳理,

明确牵引供电等不同环节的监测范围,结合各环节能耗特性,规划监测节点的布设位置及覆盖范围,保证监测覆盖系统全链路能耗环节。基于规划方案部署监测设备,选用适配的电流电压传感器及能耗采集终端,按不同环节能耗波动特点,设定差异化的数据采集频率,保障能耗数据采集的针对性。搭建稳定的数据传输网络,结合系统覆盖范围,选用合适的传输介质及网络架构,配置信号增强设备,解决长距离传输中的信号衰减问题,让采集终端高效对接后端监测平台。在监测平台融入数据处理及分析功能模块,预设能耗异常判定标准,针对不同能耗异常场景,建立预警机制,明确预警响应流程及责任主体,保证及时处置异常情况。为保障数据可靠性,建立设备校准及备份机制,定期校准传感器精度,在关键监测节点配置双备份采集设备。同时,搭建后台及现场的双向通信通道,开发便捷的监测终端,支持运维人员实时查看能耗数据、接收预警信息并反馈处置结果,协同管理能耗监测及现场运维。全过程强化系统运行维护,定期核查监测设备状态及数据传输质量,动态优化监测参数及预警标准,保证监测体系持续稳定运行,为铁路供电系统节能调控及高效管理提供持续的数据支撑。

4 结束语

在“双碳”目标驱动下,探究并应用铁路供电系统节能技术,是铁路行业落实绿色发展理念的必要举措。相关技术的落地能够夯实铁路低碳转型基础,强化能源利用效能,筑牢供电安全防线。未来,可进一步深化多技术协同创新,拓展节能技术应用场景,推动铁路供电系统向更高效低碳的方向发展,全面实现“双碳”目标。同时,应重视节能技术与设备运行管理的结合,借助优化运行制度,以及提高操作规范性,使节能效果长期稳定,形成技术及管理双向支撑,为铁路供电系统低碳高效运行提供持久保障。

参考文献:

- [1] 闫小伟.高速铁路电力供电智能运维系统设计[J].电子技术,2025,54(06):174-175.
- [2] 余翔.光水电循环系统在铁路配电系统的应用研究[J].铁道工程学报,2025,42(02):80-84.
- [3] 陈世民.基于关联规则算法的铁路供电系统故障数据自动识别方法[J].电工技术,2024(16):137-139.
- [4] 黎宁昊.双碳目标下铁路供电系统设计与节能技术[J].电气技术与经济,2023(04):243-247.
- [5] 吕钢,尹明铨,腾飞.数字电流保护在铁路配电系统中的应用[J].电气化铁道,2022,33(S1):133-137.

石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐措施探究

郭银龙

(中石化英力士(天津)石化有限公司, 天津 300450)

摘要 石油化工设备在生产运行中面临着严峻的腐蚀挑战, 腐蚀问题不仅会显著缩短设备的使用寿命、降低生产效率, 更可能引发严重的安全事故, 给企业带来巨大的经济损失, 并对社会造成不良影响。本文深入剖析了石油化工设备常见的腐蚀原因, 涵盖环境因素、材料因素、应力因素和微生物因素等多个方面。针对这些复杂多样的腐蚀原因, 系统阐述了相应的防腐措施, 包括材料选择、表面处理、工艺控制、电化学保护以及微生物控制等, 以期石油化工设备的防腐工作提供实践参考。

关键词 石油化工设备; 腐蚀原因; 防腐措施; 材料选择; 电化学保护

中图分类号: TE98

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.022

0 引言

石油化工行业是国民经济的关键支柱产业, 其生产过程涵盖诸多繁杂的化学反应及工艺流程, 需大量不同种类、不同功能设备支撑。石油化工设备运转中时常受到各类腐蚀因素侵害, 这些腐蚀因素互相作用、互相影响, 致使设备性能逐步变差、使用寿命大幅变短。更严重的情形是, 设备遭腐蚀易引发泄漏、爆炸等安全事故, 让企业承受巨大的经济亏损, 甚至对周边环境以及人员生命安全构成严重威胁。因此, 深入探究石油化工设备的腐蚀缘由, 且实施有效的防腐办法, 对石油化工安全生产、稳定生产、高效生产具有重要的现实意义与深远的社会影响。

1 石油化工设备常见腐蚀原因

1.1 环境因素

1. 化学介质腐蚀。石油化工生产所用原料、中间产品及最终产品大多腐蚀性强, 原油含有的硫化物、氯化物、环烷酸等成分, 在特定温度、压力、湿度的条件里, 会与设备金属材料发生化学反应, 进而导致设备腐蚀。以硫化物为例证, 高温环境之中, 硫化物分解会产生硫化氢, 硫化氢呈现出酸性与还原性, 它可与金属起反应生成金属硫化物^[1]。这种金属硫化物的结构相对松散, 易从金属表面脱离, 让金属不断遭受消耗, 继而损害设备。

2. 大气腐蚀。多数石油化工设备露天放置, 空气

所含氧气、水分、二氧化碳等成分会与设备金属表面产生电化学腐蚀反应。在湿润的空气环境里, 金属层会生成一层薄水膜, 氧气和二氧化碳在这层水膜中被溶解, 生成了电解质溶液。金属做阳极会出现氧化反应, 因失去电子而遭腐蚀, 工业大气里存有硫化物、氮氧化物等污染物。

3. 土壤腐蚀。石油化工生产中常见设备类型为埋地管道, 土壤含有的水分、氧气、盐类等成分会与管道金属发生电化学腐蚀反应。土壤成分及性质在不同地区差异明显, 这造成土壤腐蚀性各有差异, 含盐量大、酸性程度高、透气性差的土壤腐蚀性强。在盐分含量高的土壤里, 盐类于管道表面生成电解质溶液, 导致电化学腐蚀, 酸性土壤提供氢离子, 促使金属溶解。土壤透气不好会让氧气供应不均, 管道表面形成了氧浓差电池, 加大局部锈蚀。

1.2 材料因素

1. 材料选择不当。石油化工设备设计与选材时, 要是设备运行环境及腐蚀介质了解不充分, 选用了不抗腐蚀的材料, 会导致设备在使用中易遭腐蚀。在含硫化氢的介质中, 若选用普通碳钢, 鉴于碳钢耐硫化氢腐蚀的性能欠佳, 硫化氢会迅速跟碳钢中的铁起反应, 产出硫化亚铁等腐蚀物, 致使设备迅速被腐蚀穿孔, 影响设备正常工作及使用时长。

2. 材料质量缺陷。材料于生产、加工及运输时或有若干质量问题, 如夹杂、气孔、裂纹等, 这些缺陷

作者简介: 郭银龙(1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 过程装备与控制工程。

会引发腐蚀的开端,加大设备的腐蚀,即材料中存在的异类物质会损毁金属的连贯性,促使腐蚀介质更易渗入金属内部。气孔是材料里面含有的气体孔洞,它会给腐蚀介质提供储存及扩散的空间,推动腐蚀的进程。裂纹是材料中的薄弱部位,应力作用下易扩展,同时也会成为腐蚀的渠道,材料的表面状况会对其耐腐蚀特性产生影响^[2]。

1.3 应力因素

1. 工作应力。石油化工设备运转期间要承担各种工作应力,如压力、拉力、扭矩等,工作应力超过材料屈服强度时,材料出现塑性变形,引发设备结构破坏,工作应力将与腐蚀介质一起作用,加剧设备的锈蚀。这种腐蚀称作应力腐蚀,在含有氯离子的介质当中,不锈钢设备受拉应力影响易出现应力腐蚀开裂,氯离子会损害不锈钢表面的钝化膜。把金属置于腐蚀介质里,拉应力施加后,金属内部晶格出现畸变,产生出滑移带。

2. 残余应力。设备制造、加工及安装时会生成残余应力,如焊接残余应力、冷加工残余应力等,残余应力会让材料耐腐蚀性能变差,推动腐蚀出现和发展,尤其是焊缝周边。鉴于焊接过程中局部加热及冷却,会引发较大的焊接残余应力,这些残余应力会让焊缝周边金属呈高能态,易与腐蚀介质发生化学反应,残余应力可增大金属内部的电位差,形成腐蚀电池,造成焊缝产生腐蚀。

1.4 微生物因素

石油化工生产环境里有大量微生物,如硫酸盐还原菌、铁细菌等,设备表面会有微生物附着发育,生成生物膜,生物膜里的微生物通过代谢活动改变设备表面微环境,推动腐蚀现象出现。硫酸盐还原菌于缺氧环境可把硫酸盐还原成硫化氢,金属会与硫化氢发生反应,造成设备锈蚀。铁细菌可把亚铁离子氧化成铁离子,形成氢氧化铁的沉淀。

2 石油化工设备防腐措施

2.1 合理选材

1. 根据腐蚀环境选材。在选择石油化工设备材料时,要充分顾及设备运行环境与腐蚀介质特性,针对不同的腐蚀介质,应选用对应的抗腐蚀材料。在存有硫化氢的介质中,应选取抗硫化氢腐蚀的材料,如不锈钢、镍基合金之类,不锈钢中含铬、镍等元素会在金属表面形成一层密实的氧化膜,阻挡硫化氢与金属进一步反应^[3]。镍基合金在耐腐蚀方面表现更佳,可在更恶劣的硫化氢环境里使用。在含有氯离子的介质当中,应选用抗氯离子腐蚀的材料,如双相不锈钢、

钛合金等。双相不锈钢把奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢优点集于一身,呈现出优良的耐氯离子侵蚀性能以及力学性能。钛合金有着卓越的耐腐蚀特性,能在高浓度氯离子介质中长期应用。

2. 考虑材料的综合性能。除了耐腐蚀性这一特性外,还应顾及材料的其余性能,包含力学性能、加工性能、成本等方面,若设备符合耐腐蚀要求,应择取力学性能佳、加工性能好、成本低的材料,增强设备的性价比。就一些承受较大负载的设备而言,应当选取强度高、韧性优的材料,如低合金高强度钢。低合金高强度钢经由添加少量合金元素,增强了钢的强度与韧性,兼具出色的耐腐蚀性能和加工性能,符合设备的使用标准。针对部分形状繁杂的设备,应选取加工性能良好的材料,铝合金呈现出优良的塑性及可加工性,可通过铸造、锻造、挤压等工艺制造出各类复杂形状的零件。同时拥有一定的耐腐蚀能力,适宜用来制造某些对重量与耐腐蚀性能有需求的设备。

2.2 表面处理

1. 涂层保护。于设备表面涂覆耐腐蚀涂料的做法称为涂层保护,将设备金属与腐蚀介质隔离开,借此发挥防腐功能。常用耐腐蚀涂料包含环氧树脂涂料、聚氨酯涂料、氯化橡胶涂料等。环氧树脂涂料具有良好的附着性、耐化学腐蚀性以及机械性,可用于多种腐蚀环境里。聚氨酯涂料呈现出卓越的耐候性、耐磨性以及耐腐蚀性能,适合户外设备及部分对表面性能要求较高的设备。氯化橡胶涂料具备干燥迅速、施工便捷、耐腐蚀性能优良等优势,一般用于某些中等腐蚀环境中的设备防护。选择涂料时,要综合考量设备运行环境、腐蚀介质性质及施工条件等因素^[4]。

2. 衬里保护。衬里保护是于设备内表面衬一层耐腐蚀的非金属材料,如橡胶、塑料、玻璃钢等,防止腐蚀介质接触设备金属。衬里材料应具备良好的耐腐蚀特性、粘结特性以及机械特性,橡胶衬里呈现出良好弹性以及耐腐蚀性能,可适应设备的形变及振动,一般应用于某些化工设备和储罐的内衬。塑料衬里具有良好耐腐蚀性、质量轻、易安装等优势,应用于一些对重量有规定要求的设备。玻璃钢衬里具备高强度、良好耐腐蚀性能、较好耐温性能等特性,常应用于高温、高压以及强腐蚀环境中的设备。

3. 金属镀层保护。金属镀层保护即于设备表面镀一层耐腐蚀金属,如锌、铬、镍等,增强设备的耐腐蚀性能。一般的金属镀层方式有电镀、化学镀、热喷涂等。电镀运用电解原理给设备表面镀上一层金属镀层,具有镀层均匀、结合力佳等优势,常应用于小型零件及精密设备的防腐处理。化学镀依靠化学反应在设备表面

镀上一层金属膜, 无需额外电源, 可在形状复杂的设备表面生成均匀镀层, 适用在一些难以电镀的设备上。

2.3 工艺控制

1. 降低介质腐蚀性。通过工艺变动减小腐蚀介质腐蚀性, 是预防设备腐蚀的关键举措之一。在原油加工的过程中, 采用“一脱四注”技术, 涵盖原油脱盐、塔顶注氨、注碱、注水与注缓蚀剂, 能切实降低常压塔顶冷凝系统的腐蚀。原油脱盐能把原油中的盐类去掉, 减少设备受盐类的腐蚀。氨在塔顶注入可中和原油中的酸性物质, 提升介质 pH 值, 阻止腐蚀现象出现。注碱能进一步清除介质中的硫化物等腐蚀性物质。注水可让介质浓度变低, 降低腐蚀介质的量。往金属表面注入缓蚀剂可形成一层保护膜, 阻拦腐蚀介质接触到金属, 抑制腐蚀速率。就含硫原油加工而言, 实施加氢脱硫工艺, 减少原油中的硫含量, 减少硫化氢的生成数量, 进而降低设备的腐蚀。加氢脱硫工艺通过高温、高压与催化剂来达成, 把原油中的硫化物转变为硫化氢, 接着借脱硫装置除掉硫化氢, 以降低原油腐蚀性^[5]。

2. 控制设备运行参数。合适的调控设备的运行参数, 如温度、压力、流速等, 可降低设备的腐蚀程度, 同时降低设备的运行温度, 减缓化学反应的速率, 降低腐蚀的速率。多数化学反应的速率受温度影响呈正比, 反应速度变缓, 腐蚀情况会相应减弱。把控介质的流速, 阻止介质对设备表面的冲刷腐蚀, 介质流速要把控在适宜区间, 也不能太低。流速太高会让介质对设备表面的冲刷作用变大, 破坏设备表面的保护膜, 流速太低的话, 介质中的杂质以及腐蚀产物会在设备表面堆积, 造成局部腐蚀情形, 也会增强腐蚀程度。

3. 定期清洗和排污。定期实施设备清洗与排污工作, 可以清理设备表面的腐蚀产物及沉积物, 缩短腐蚀介质在设备表面的留存时长, 以此降低设备的腐蚀程度。就换热器而言, 要定期实施清洗, 除掉换热管表面的污垢, 增进换热功效, 同时还可降低设备的腐蚀程度。换热器运作期间, 介质里的杂质及腐蚀产物会在换热管表面附着, 形成脏污层, 污垢层会让换热效率变低, 还会给腐蚀介质创造隐匿之所, 加速换热管遭受腐蚀。定期对换热器进行清洗, 可以采用化学清洗或者物理清洗办法。化学清洗借助合适清洗剂溶解污垢, 物理清洗运用高压水冲洗、机械清洗等办法来除掉污垢。

2.4 电化学保护

1. 阴极保护。阴极保护通过为被保护设备通直流电流, 把设备变为阴极, 以此抑制设备腐蚀现象。牺牲阳极法与外加电流法是阴极保护的两种方式, 牺牲

阳极法要把电位更负的金属(锌、铝、镁等)与被保护设备相接, 用作牺牲阳极。牺牲阳极不断溶蚀, 向被保护设备供应电子, 实现设备防护, 外加电流法把被保护设备接到直流电源负极, 同时把辅助阳极与直流电源的正极连接起来, 利用外加电流保障设备。

2. 阳极保护。把被保护设备连接到外加直流电源的正极, 让设备表面生出一层细密的氧化膜, 进而阻止腐蚀介质与设备金属的后续反应, 实现设备保护的目标。阳极保护对具有钝化特性的金属适用, 如不锈钢、钛合金这类材料。开展阳极保护时, 要严格掌控设备电位, 使其在钝化范围, 否则会使设备腐蚀加速。

2.5 微生物控制

1. 杀菌处理。采用化学杀菌药剂或物理杀菌手段。去除设备表面微生物, 破坏生物的膜结构, 由此减轻微生物侵蚀。常用化学杀菌剂有氯气、次氯酸钠以及季铵盐等, 紫外线杀菌、超声波杀菌等属于物理杀菌手段。

2. 改善设备运行环境。凭借优化设备的运行环境, 如控制介质的温度、pH 值以及含氧量等, 遏制微生物生长繁殖, 提升介质温度可杀死部分微生物; 使介质的 pH 值降低能抑制硫酸盐还原菌生长, 减少介质内的氧含量, 抑制好氧微生物生长。

3 结束语

石油化工设备遭受腐蚀是复杂状况, 受多种因素作用, 为能切实防范设备遭腐蚀, 应从材料挑选、表面处理、工艺调控、电化学保护与微生物控制等多个方面入手, 采取综合性防腐措施。在实际应用过程中, 要依据设备实际状况及腐蚀环境, 选择合适的防腐办法, 并予以合理组合, 实现最佳的防腐作用。需强化对设备腐蚀的监测及管理, 及时发现与处理设备腐蚀状况, 保障石油化工设备安全稳定高效运转。随着科技的不断发展, 新型防腐技术材料相继涌现, 为石油化工设备的防腐工作提供了更多可选方案。

参考文献:

- [1] 刘琪. 化工设备换热器的常见腐蚀问题与防腐措施探讨[J]. 中国设备工程, 2025(04):185-187.
- [2] 任美霞. 化工设备换热器的常见腐蚀问题及防腐措施探讨[J]. 中国设备工程, 2025(03):151-153.
- [3] 王繁华. 石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐措施研究[J]. 中国设备工程, 2024(20):179-181.
- [4] 刘佳菊. 石油化工设备常见的腐蚀原因及防腐策略[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(14):19-21.
- [5] 张睿, 韩军. 石油化工设备常见腐蚀原因及防腐策略实践[J]. 清洗世界, 2023, 39(10):196-198.

冷水表与热水表计量精度差异的影响因素分析

刘志杰, 张海鹏, 王小栋

(山东寿光检测集团有限公司, 山东 寿光 262700)

摘要 水表作为水资源计量与收费结算的核心器具, 其计量精度直接关系到供水企业与用户的切身利益, 对水资源高效利用与节水管理具有重要意义。冷水表和热水表因工作介质温度、使用环境和技术设计的不同, 在计量精度的表现上存在明显不同。本文对二者的基本特性进行对比, 从计量精度差异的直接技术因素、外部间接影响条件和计量标准与检测方法的不同出发, 根据具体的参数表格来深入论述, 说明温度、材料、环境、标准等各方面因素对于计量精度的作用机理, 以期水表选型、安装运维以及精度提高提供参考。

关键词 冷水表; 热水表; 计量精度; 传感器结构; 计量标准

中图分类号: TH71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.023

0 引言

随着城市化进程加快与水资源管理制度的完善, 水表的计量准确性愈发受到重视。冷水表广泛用于居民生活用水、工业冷却用水等场合, 介质温度一般保持在 $0 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间; 热水表主要用于供暖、生活热水供应等场所, 介质温度多为 $40 \sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 部分高温场景可达到 $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度差异造成介质物理性质发生变化, 再加上使用环境、材料选择、计量标准等各方面的因素, 使冷水表和热水表的计量精度稳定性和误差分布规律产生明显的差别。当前, 节水型社会建设对于水表计量精度的要求越来越高, 特别是智能水表的大范围使用使精度控制成为技术升级的主要方向, 分析两类水表计量精度差异的影响因素, 对提高计量器具可靠性、规范计量管理、保障供需双方权益有重要的现实意义。

1 冷水表与热水表的基本特性对比

1.1 工作原理差异

冷水表和热水表的主要工作原理都是利用流体力学的动量守恒和容积计量原理, 但是传感方式、动力结构的设计上有所改进^[1]。冷水表主流采用旋翼式或

者螺翼式的结构, 依靠水流冲击叶轮旋转来实现, 把水流的速度转变成叶轮的转速, 经过齿轮传动变为累计流量, 多采用机械或机械—电子混合计数, 结构简单、成本低, 适合于常温稳定的水流。热水表由于介质温度较高, 叶轮采用耐高温轻质合金或者陶瓷材料, 部分智能热水表使用电磁感应或者超声波传感技术代替传统的机械传动方式, 加强密封结构的耐高温设计, 减小高温对计量的影响。两款水表的工作原理不同是介质温度适应性技术上的差别, 不同的温度工况下计量精度的稳定性受到影响。

1.2 使用环境适应性

冷水表的使用环境温度范围狭窄, 大多在室内常温或者室外保温井内, 温度变化小, 对材料的耐温性、抗老化性能要求不高, 只需常温耐腐蚀性及结构稳定, 适应水质广泛。热水表使用环境高温并且温度变化大, 需要经受介质的高温及温差变化, 对材料耐高温、热稳定、抗蠕变的要求很高, 热水系统中有大量的杂质, 水表必须有更高的抗污性。为了表现两种水表在环境适应性上的差异, 下面列出核心的适应性参数对比。

由表 1 可知, 热水表在温度适配范围与波动承受

表 1 冷水表与热水表使用环境适应性参数对比表

适配参数	冷水表	热水表
介质温度范围	$0 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (常规), 最低可达 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (防冻型)	$40 \sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (常规), 最高可达 $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (高温型)
允许温度波动幅度	$\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$	$\pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ (特殊结构可达 $\pm 15 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$)
耐腐蚀性要求	耐常温自来水腐蚀, 部分适配轻度工业废水	耐高温水与微量水垢腐蚀, 需抗氧腐蚀

作者简介: 刘志杰 (1992-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 质量工程。

能力上显著优于冷水表，这一差异源于材料选型与结构设计的针对性优化，同时也使得热水表的制造成本与技术门槛高于冷水表，进而影响其计量精度的控制水平。

2 计量精度差异的直接技术因素

2.1 温度对介质物理特性的影响

温度是造成冷热两用表计量精度差异的主要直接因素，它通过对水流的粘度系数、密度等物理性质的影响来改变计量元件所受的力和运动状态。水的粘度系数随着温度的升高而急剧下降，20℃时的动力粘度为1.002 MPa·s，80℃时降至0.355 MPa·s，黏度降低使得叶轮转速增大，在对高温工况进行校准时，则会出现正偏差；温度升高后水的密度变小，会阻碍叶轮转动，两者相反而向叠加，最后计量误差由水表结构对这两个效应的平衡来决定。冷水表工作温度稳定，黏度和密度变化小，叠加效应可以忽略不计，计量精度容易控制；热水表工作温度跨度大，如果传感元件未采用温度补偿技术，则在不同的温度下计量误差会波动很大，在高温临界值附近容易超过允许的范围^[2]。

2.2 传感器材料与结构差异

传感器是水表计量的核心部件，它的材料和结构设计决定了计量的精度，冷热水表在这方面的差别比较大。冷水表传感器大多为普通的黄铜、塑料等，叶轮用的是工程塑料或者铸铁，结构设计上注重低成本和流通性，传动采用普通齿轮组，不考虑高温的热胀冷缩，但是材料在高温下容易变形、磨损，在热水环境下会使得精度下降。热水表传感器要耐高温、抗热膨胀、抗老化，叶轮用不锈钢、陶瓷或者高温尼龙，热膨胀系数小，传动采用间隙补偿设计来抵消热胀冷缩的影响，防止卡滞或者传动失效；智能热水表的电磁、超声波传感器采用耐高温芯片和密封材料，通过温度传感器采集温度进行动态补偿。

2.3 流速与流量范围适配性

冷热两用表的流速和流量范围存在差别，会影响不同的工作状况下计量精度的稳定性。水表计量精度在规定的流量范围内，在最小、分界、常用、最大流量范围内均能保证，超过此范围误差会变大。冷水表的流量范围一般为0.05 m³/h到10 m³/h，适合于居民和小型商业等低流速、变流量工况，叶轮对中低流速进行优化，最小流量以下由于水流动力不足导致叶轮转动滞后，产生负偏差。热水表用在采暖、集中热水供应等地方，流量变化大，一般流量范围为0.1 m³/h~20 m³/h，部分工业热水表流量更大，结构上侧重于中

高流速的适应性，加强叶轮刚性和传动效率，减小高流速时的振动和磨损，采用宽量程传感技术提高精度范围。热水系统存在瞬间大流量冲击，热水表需要更强的抗冲击能力，防止叶轮变形或者传感器故障，冷水表对于瞬间大流量不适应，容易造成短期精度偏差。

3 外部条件对计量精度的间接影响

3.1 安装环境差异

安装环境差异造成水表的工作状态受到影响，从而使得冷热水表的计量精度不一样。冷水表的安装环境比较稳定，一般在室内水表井、墙角等地方，远离热源和振动源，多为水平安装，管道应力较小，可以避免水流扰动对计量造成影响。热水表大多装在锅炉、换热器附近，环境温度高、振动大，部分安装位置受限制，可能倾斜安装、前后直管段不够。高温引起的热胀冷缩会使水表与管接头受到不均匀的拉伸而产生变形，水流动受阻；振动会加大叶轮的振动频率，干扰转动速度，使传感器信号发生变化，从而使计量精度下降^[3]。

3.2 水质条件适应性

水质条件对于冷、热水表计量精度影响的路径及程度不同，主要是热水系统温度高容易造成水质恶化和杂质沉积。冷水表适合于国家标准的自来水，悬浮物及杂质含量少，对于表内流道和叶轮的磨损、堵塞风险较小，但是长时间使用之后由于杂质沉淀会使得叶轮转动阻力变大，产生计量负偏差。在热水系统中，高温促使钙、镁离子析出并形成水垢，附着在水表流道、叶轮和传感器表面，减小了流道截面，改变了水流速度分布，使得叶轮转速与实际流量不相适应，还会遮盖住传感器的探测面，阻断信号的接收和传递，造成计量误差。另外，高温会加快水中的氧气对金属件的腐蚀作用，生成铁锈等杂质，加重部件磨损和堵塞，影响计量精度。

3.3 维护周期与校准需求

冷热水表维护周期和校准要求不同，是由它们的工作环境以及部件损耗速度的不同所导致的，从而间接影响到长期计量精度的稳定。冷水表因工作条件温和，部件磨损、老化速度慢，所以常规维护周期可以定为6~8年，校准周期一般和维护周期一致，须定期检查密封性、清理表内杂物即可保持精度；对机械冷水表而言，长时间使用之后齿轮传动机构的磨损是造成精度下降的主要原因，校准的重点在于调整齿轮间隙和叶轮平衡。由于热水表受高温、高湿和水质腐蚀的影响，部件损耗速度明显增大，密封件老化、叶

磨损、传感器性能下降等现象更容易发生。一般的维护周期要短于 3~5 年,校准周期不能大于 2 年。校准的内容不单是机械部件的间隙调整和平衡校准,也要对智能热水表的温度补偿模块、信号采集模块进行调试,保证其在不同的温度工况下补偿精度。如果维护、校准不及时,则热水表的计量精度会很快偏离允许范围,而冷水表的精度衰减过程比较缓慢,对计量结果的影响有滞后性。

4 计量标准与检测方法的差异

4.1 国际 / 国内标准体系对比

冷、热水表的计量标准体系根据其适用场景和技术要求的不同,在精度分级、技术指标设置上有所区别,从而决定了两种水表精度控制的方向。国内冷水表按照计量精度分为 1 级和 2 级,对不同的流量点给出了误差允许范围,并对水表的密封性、耐久性、抗干扰能力等指标做出了规范,适用于介质温度 $\leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境;热水表按照《热水水表》(GB/T 32224-2015)标准,分成 1 级和 2 级精度,但是对于高温环境下做了耐热性、热稳定性和温度影响误差等专项规定,要求水表在规定的温度范围内计量误差波动符合要求。另外,还对材料的耐高温性能及密封结构作了更加严格的技术要求。国际标准上冷水表采用的是 ISO 4064 系列标准,热水表是在 ISO 4064 的基础上加上了 ISO 7278 系列标准的专项要求,主要是提高高温条件下计量稳定性和寿命指标。两种标准体系的不同之处使热水表在生产制造过程中要符合更多的专项技术要求,精度控制的复杂性比冷水表高^[4]。

4.2 检测环境模拟差异

冷、热水表计量精度检测由于环境模拟及检测参数设置的不同而造成检测结果不准确以及针对性不足。冷水表检测一般在常温($20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)常湿条件下进行,模拟正常的使用环境,检测介质为自来水或者去离子水,主要检测不同流量点的静态误差和动态误差,并做密封性、耐久性试验,不考虑温度变化及高温的影响。热水表检测要建立高温模拟环境,按照标准要求设置不同的温度梯度($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$)来模拟实际使用时的温度变化工况,介质应为与实际出水水质接近的水体(含有少量杂质和矿物质),除了检测常规流量点误差外,还需做专项温度对计量精度影响误差、温度波动适应性误差等指标的检测,并测试高温下密封性和耐久性的检测,保证水表在全温度量程内精度不变。智能热水表还需对温度补偿模块的校准精度和信号传输稳定性进行检测,检测过程及

技术标准比冷水表更加复杂,检测设备的精度以及环境控制能力也更高。

4.3 误差允许范围界定

冷热水表误差允许范围的界定依据的是它的使用场合和技术特点,在不同的流量点和温度工况下会有差别,从而决定两种水表的计量精度水平。冷水表的误差允许范围在常温下设定,1 级水表在最小流量到分界流量区间内,允许误差为 $\pm 5\%$,在分界流量到最大流量区间内为 $\pm 2\%$;2 级水表对应的区间允许误差分别为 $\pm 10\%$ 、 $\pm 2\%$,误差范围不随温度变化而改变。热水表的误差允许范围要根据温度工况来定,在常规温度($40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,1 级、2 级水表的流量点误差允许范围同冷水表一样,但是高温工况($\geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的误差允许范围可以适当放宽(1 级水表最小流量区间误差允许放宽到 $\pm 6\%$),并给出了温度影响误差的允许值,即在规定的温度范围内,温度的变化引起的附加误差不能超过 $\pm 1\%$ ^[5]。

5 结束语

冷水表和热水表的计量精度不同是由温度、材料、结构、环境、标准等因素造成的。温度是决定介质物理特性的重要因素。传感器材料和结构设计属于精度控制的关键部分,外部安装和水质环境保证精度稳定,计量标准、检测方法提供精度认定的依据。热水表由于在高温环境下工作,在精度控制、维护、技术要求上都比冷水表要高得多。精度优化主要针对温度补偿、耐高温材料研究、抗垢结构设计等;冷水表需要提高低流速计量精度和长期运行稳定性。智能计量技术的发展可以集成多参数传感与动态补偿算法,减小冷热表的精度偏差,提高智能化和可靠性。未来要健全计量标准体系、改进检测方法,按照节水需要推进水表技术革新和精确计量,支持水资源的高效使用。

参考文献:

- [1] 宿彬.高精度超声波智能水表关键技术及应用研究[D].杭州:中国计量大学,2023.
- [2] 杨智朋.水表高精度检定关键技术研究[D].烟台:烟台大学,2023.
- [3] 张军.相关性的 ADC 技术在超声波智能水表上的应用[J].数字技术与应用,2022,40(01):120-122.
- [4] 陈妃奋.基于深度学习的字轮式水表读数识别研究与应用[D].桂林:桂林电子科技大学,2021.
- [5] 王宗辉,陈富光,汪芳君,等.差分升级在物联网水表上的实现与应用[J].仪表技术,2021(04):10-13,35.

风力发电系统中海上风机性能评估与运行优化研究

李明¹, 王慧超^{2*}

(1. 浙江浙能嘉兴海上风力发电有限公司, 浙江 嘉兴 314050;
2. 桐乡市电力工程有限责任公司, 浙江 嘉兴 314050)

摘要 海上风机长期运行于高湿、高盐及风况剧烈波动的环境之中, 性能衰减与运行失稳问题呈现出隐蔽化与累积化特征, 对风力发电系统的安全性与发电效率形成持续约束。本文立足于海上风机结构构成与运行特性, 依托多源运行数据与状态参数, 构建覆盖功率输出、运行稳定、设备健康与风险预警的性能评估体系, 并在评估结果反馈基础上结合变桨控制、偏航响应、结构振动调控与智能闭环管理等技术路径展开运行优化分析, 以期为海上风机性能管控与运维决策提供技术参考。

关键词 海上风机; 性能评估体系; 运行优化技术; 状态监测; 智能控制

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.024

0 引言

在新能源装机规模持续扩展的背景下, 海上风电逐步向大容量、远海化方向发展, 风机运行工况随之呈现出更强的不确定性与复杂性。海上环境中的湍流扰动、盐雾腐蚀与载荷叠加效应, 往往诱发功率波动、结构疲劳与控制响应失衡等问题, 使传统以经验参数为主的运行管理方式难以维持稳定效率。围绕风机实际运行状态构建可量化的性能认知, 并将评估结果嵌入运行调控过程, 逐渐成为提高海上风电系统可靠性与经济性的关键技术方向。

1 风力发电系统中海上风机的核心组成及运行特性分析

1.1 海上风机核心结构组成

海上风机结构配置需兼顾承载稳定性、环境适应性与远程运维条件, 整体由基础结构、塔筒、机舱系统及控制监测单元构成, 基础形式依托海底地质条件选用单桩、导管架或吸力筒结构, 其中单桩直径多处于5~8 m区间, 入土深度通常控制在20~35 m范围内, 用于分散轴向载荷与倾覆力矩。塔筒采用分段式锥形钢结构, 与机舱形成刚性连接, 承担风轮重力与振动传递任务, 机舱内部集成主轴、齿轮箱、发电机、偏航与变桨系统, 齿轮箱多为三级斜齿结构, 传动比

常见于1:80~1:100区间, 兼顾升速效率与可靠性, 控制监测系统依托SCADA与CMS模块完成运行数据采集与状态反馈, 为性能评估提供基础数据支撑。

1.2 海上风机运行特性及影响因素

海上风机运行呈现明显的非线性与时变特征, 功率输出在额定风速附近易受风切变与湍流扰动影响而产生波动, 对控制系统响应精度提出更高要求。运行性能受风资源波动、设备服役状态、海洋环境干扰及控制延迟等因素共同制约, 其中齿轮磨损、轴承间隙变化与叶片疲劳裂纹往往引发输出不稳定^[1]。为缓冲工况突变带来的冲击, 工程实践中倾向于在转速、桨距与功率限值设置动态冗余区间, 并结合风场尺度下的尾流效应进行协同调控, 以维持机组长期运行的稳定边界。

2 风力发电系统中海上风机性能评估体系构建

2.1 评估指标体系的维度划分与参数设定

海洋风电机组运行情况复杂多样, 单一性能参数无法描述机组整个运行过程中的状态变化与衰退演变过程, 适合建立包含功率性能、运行可靠性、机组健康水平与故障预判能力在内的四元性能评价指标体系, 代表性指标有风速-功率偏差度、主轴承转速波动幅度、齿轮箱振动均方根(RMS)以及综合报警频次等。它们的提取依据及判断策略如表1所示。

作者简介: 李明(1970-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 风力发电、海上风电、海上风电运维。

*通信作者: 王慧超(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输变电工程、新能源发输电、智能电网。E-mail: 164062289@qq.com

表 1 风力发电系统中海上风机性能评估指标示意表

评估维度	指标名称	数据来源	单位	常用设定范围	异常阈值判定依据
功率输出	风速—功率偏移率	SCADA	%	±5%	超出 ±10%
运行稳定性	主轴转速波动率	SCADA	rpm/s	≤ 0.8 rpm/s	> 1.2 rpm/s
设备健康状态	齿轮箱振动均方根值 (RMS)	CMS	mm/s	≤ 2.0 mm/s	> 3.5 mm/s
故障预警	复合报警频率	控制器日志	次 / 24 h	≤ 2 次	≥ 5 次 / 24 h, 持续两天以上

以风速—功率偏移率 δP 为例, 需将实时功率 P_t 与理论功率 P_{th} 差值归一化为:

$$\delta P = \frac{P_t - P_{th}}{P_{th}} \quad (1)$$

其波动均值与置信区间是作为状态辨识的主要依据, 各个参数须根据机种大小、运行海域以及控制方法的不同设置浮动上下阈, 并建立可调用参数词典库, 成为模型的输入结构来源^[2]。

2.2 运行数据多源融合与异常过滤机制设计

风机评价系统的正常运转离不开多种数据协同配合, 常用的有 SCADA (风速、发电量、电流、电压等)、CMS (轴承及齿轮箱振动) 和第三方气象数据接口 (风向、湿度、气压等), 各系统采集频率并不一致, 需要通过滑窗与线性插值来同步时间轴, 建议以 10 s 或者 60 s 周期为单位形成基础数据帧架构, 数据处理流程如图 1 所示。



图 1 海上风机性能评估数据处理与分析流程

图 1 中的流程展示了原始数据采集、清洗到生成特征指标及评分模型的过程, 在此基础上, 为了增强数据的稳定性与可控性, 推荐使用 IEC 61400-25 协议标准, 搭建标准化接口框架, 并且构建“特征指标层—时间窗口层—模型调用层”的三级嵌套体系, 实现对高频数据模块化的抽取以及准确的模型调用。

2.3 综合评估模型构建与权重确定方法

完成指标体系建立、数据预处理之后, 应建立具有自学习、可解释性能评价模型。常用的策略是先用熵值法赋予初步权重、之后结合人工神经网络基于往期数据进行误差反向传递调整校正, 最后获得权重矩阵和绩效分值输出。熵值法可以利用指标变化幅度来判断它所携带的核心信息含量大小以此制约权重偏离的合理性。人工神经网络也可灵活捕捉各项指标间随不同运营状态下的复杂非线性映射规律, 令模型拥有对各类工况场景的迁移学习能力。

为避免因某一指标值异常使得整体评分失衡, 可采用归一化加权评分机制, 并将模型输出设置为连续型评分区间 (0 ~ 100 分), 再结合运行等级划分标准设定五类健康状态等级 (优、良、中、临界、异常), 建模阶段建议引入时间滑窗机制, 使模型在处理动态序列时保留短期趋势信息, 同时可在异常事件反演分析中作为因果链条重建的辅助^[3]。模型训练完成后, 应定期进行再评估, 验证其在不同风场与不同运行季节中的泛化适应性, 并对误判率较高指标重新调整阈值或分组逻辑。

2.4 性能退化趋势预测与预警触发机制

为增强评估系统的前瞻性, 需在静态评分基础上引入时间序列预测模块, 构建性能衰退趋势曲线并联动早期预警机制。该模块通常采用 ARIMA 模型捕捉线性演化趋势, 再叠加 LSTM 结构识别非线性演化段落, 使得评估分值既能反映目前状态, 又能提前预测未来数天或数周的风险节点^[4]。为增强短时预测精度, 应重点训练模型识别“评分连续小幅下滑 + 关键指标间歇偏离”的复合征兆, 以区分随机波动与实质退化。

预警触发机制设计时不宜采用单一阈值设定模式, 而应根据机组运行年限、风场风况稳定性与历史故障频度进行差异化配置, 建议设定多级预警等级 (轻度预警、中度干预、严重停机建议), 每一等级对应具体操作建议, 如远程重启、人工巡检或预调度维保。另外, 预警结果需利用 SCADA 系统联动主控模块同步下发至值班终端界面, 并记录处置过程与反馈效果, 作为模型精度再训练与判别策略优化的样本输入。

3 风力发电系统中海上风机性能增强的运行优化技术

3.1 基于风况自适应的变桨控制策略优化

海上风况频繁扰动, 风速轻微变化便可能引起功率波动与主轴扭矩失衡, 尤其在额定功率区段, 传统固定参数变桨控制难以适应风速非线性跳变, 往往在风轮转动惯量剧烈波动时出现响应延迟或控制过冲。变桨策略宜基于短周期风速预测结果构建自适应控制逻辑, 在多维传感器支持下生成实时桨距调整指令, 借助模糊控制与多段式目标函数动态组合形成控制面, 系统常以桨距—风速关系为核心变量, 构建如下目标函数:

$$J(t) = \min[\omega(t) - \omega_{ref}]^2 + \lambda \cdot [\theta(t) - \theta_{ref}]^2 \quad (2)$$

式(2)中, $\omega(t)$ 为主轴转速, $\theta(t)$ 为目前桨距角, λ 为权重系数, 用于平衡转速偏差与桨距响应间的调节优先级, 为防止机械冲击与桨叶根部超载, 系统同步设置桨角变化速率限值 $\Delta\theta/\Delta t \leq 5^\circ/\text{s}$, 并配置齿轮保护装置, 优化后变桨响应时间可控制在 2.1 s 以内, 功率偏移率收敛至 $\pm 3\%$, 对阵风扰动抑制能力增强。

3.2 风机偏航响应系统的响应精度与抗干扰性能增强

风向偏移未能及时跟踪, 是引发风机功率损失与叶轮受力不均的核心诱因之一。常规偏航系统以固定时间步长执行调整, 未能识别短周期风向抖动与主导风向迁移趋势, 易致使风轮夹角持续偏离最优点位。优化路径可从传感器阵列、响应逻辑与控制执行三方面着手, 构建高灵敏度—高冗余—高抗扰的偏航系统^[5]。风向识别模块建议叠加三轴陀螺仪、双路风向标与叶轮输出偏移趋势指标, 借助局部数据熵变化识别风场扰动源; 控制逻辑上采用滑动窗口回归与趋势预测函数合成偏航目标角, 动态调节响应区间; 执行层面引入变频电机+高扭矩齿圈结构, 搭配扭矩一位移双闭环, 增强负载识别与方向修正能力。

3.3 塔架振动与负载分布的主动调控技术

海上风机高耸结构在强风振动与塔顶荷载周期变化作用下易引发低频共振与疲劳裂纹, 尤其在变桨调节频繁、风速快速拉升时段更易出现结构应力集中, 为延缓结构退化与避免振动超限, 可引入“结构响应识别—主动阻尼干预—载荷分配调整”一体化控制系统。振动识别层借助高灵敏 MEMS 加速度计与转角速率传感器获取塔顶响应频谱, 频域滤波后提取 1~3 Hz 主模态激励信号并生成抑制指令。在塔体结构中布设可调式阻尼装置(调谐质量阻尼器 TMD), 由控制逻辑实时调节阻尼系数与位移响应参数, 使其产生反相干扰力降低共振效应, 配合叶片桨距不对称调节策略, 将塔顶横向载荷沿叶轮轴对称方向转移至非共振区段,

完成动载分流与疲劳风险错位分摊, 该方式在大型 6~8 MW 级别机组中应用时, 可使塔顶振动峰值下降约 27%, 叶根应力变化率控制在 $\pm 12\%$ 以内, 结构服役周期延长约 3~4 年。

3.4 运行优化系统的智能化闭环管理机制

在系统架构层面, 风机性能优化不应止步于局部算法调节, 更需构建具备自感知、自判断与自适应能力的闭环控制系统。该系统以 SCADA 与边缘计算模块为数据采集与初判通道, 中枢平台则集成状态识别模型、优化策略库与执行反馈通道, 形成“五段式”闭环流程: 状态识别—趋势预测—策略匹配—控制执行—效果回溯。状态识别层结合深度学习与多尺度滑窗算法, 融合历史功率曲线、异常振动信号与控制偏差数据输出目前工况标签^[6]。策略匹配层采用规则树与强化学习协同机制, 根据当下负载状态、风况等级与目标输出匹配调节动作序列; 执行层利用同步接口将控制参数直接写入偏航与变桨模块; 反馈层实时读取策略效果与功率响应, 形成调整—验证—修正的多轮闭环。系统在运行过程中具备策略演化与规则迭代能力, 适用于复杂非平稳风场环境下的长周期稳定调控场景, 在多海域实测中展现出强适应性与算法收敛效率。

4 结束语

海上风电系统的运行稳定性与性能边界正被不断重构, 风机作为耦合结构、控制与环境的复合体, 其运行潜能的释放需依托状态认知能力与控制响应机制的同步增强。在多维数据感知体系与智能策略联动机制驱动下, 风机将具备动态自调节、自恢复与自决策特性, 逐步摆脱静态参数约束与被动响应逻辑。在风况复杂、工况多变的真实场域中, 唯有构建具备学习能力的运行优化闭环系统, 才能支撑未来高密度海域风电场的集约化管控与可预期运营。

参考文献:

- [1] 陈杨明, 李刚, 刘博, 等. 海上风机共享锚的共享模式与适用性分析[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(24): 28-35.
- [2] 汪伟, 陈淑玲, 叶海滨, 等. 海上风机叶片仿生结构设计及气动力性能研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(01): 24-32.
- [3] 庄宁, 龚波, 许明宇, 等. 风雨场中海上风机气动性能数值模拟研究[J]. 水道港口, 2024, 45(05): 755-763.
- [4] 喻西崇, 刘超, 刘小燕, 等. 海上风电运维技术和运维策略特点分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(03): 18-21.
- [5] 王天宇, 侍红南. 海上风机整机安装现状及发展趋势[J]. 船舶标准化与质量, 2024(04): 50-56.
- [6] 李志平, 朱建国, 杨金虎, 等. 单一荷载作用下海上风机桩基承载性能研究[J]. 江西建材, 2024(05): 178-180.

电气试验中电力变压器绕组错误接线及其检测研究

郑杰文

(宁波恒信工程检测有限公司, 浙江 宁波 315207)

摘要 绕组是电力变压器的核心部件, 在电气试验中发挥着重要作用。绕组错误接线会造成试验数据失效, 严重时会引起故障甚至发生事故。本文阐述了电气试验及电力变压器错误接线的基本原理, 强调正确接线对电气试验安全与电网稳定运行的重要意义, 在此基础上探究直流电阻法、低压电抗法、单相电源法等绕组错误接线检测技术, 以期对相关从业人员提供参考。

关键词 电力变压器; 电气试验; 绕组错误接线; 检测技术

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.025

0 引言

随着现代工业不断发展, 日常生活、生产对于电力供应的需求不断攀升, 对电网运行质量也提出了更高的要求。电气试验作为检测电力设备结构与性能的重要手段, 应用也越来越广泛。绕组是电力变压器的核心导电部件, 其连接状态直接影响变压器正常工作, 也关系到电力试验能否顺利、安全地完成。如果出现错误接线, 会损害设备本身, 导致试验结果失真或试验工作中断, 甚至对人员安全造成威胁。绕组接线异常可能由外部机械力挤压、回路电阻异常增大等因素引起, 导致局部电阻上升, 引发过热, 若不及时处理, 将对变压器造成实质性损害。因此, 为保障电气试验的有效进行以及设备与人员安全, 需对绕组错误接线及其检测技术进行深入研究与分析。

1 电气试验

电气试验是电气设备及其线路运维中常用的检测方法, 可以分成破坏性试验与非破坏性试验两种类型。前者的目的是测试电气设备在极限工作状态下的性能参数, 包括直流、交流耐压试验等, 试验过程通常会对设备结构、性能造成损坏, 且高负荷状态下进行试验测试, 带来的风险也较大, 对操作者专业水平及实践经验有较高要求。若破坏性试验中出现绕组错误接线, 可能引发设备故障, 威胁人员安全。非破坏性试验则一般在较低电压下开展, 危险性相对较小, 不会对设备造成实质性损坏。若试验中出现绕组错误接线, 可能会影响测试结果的精确度。

2 电气试验中电力变压器绕组错误接线的发生原理与危害性

2.1 发生原理

电力变压器绕组错误接线的发生原理主要是电气试验中绕组在电动力、机械力协同作用下发生不可逆的形变或者位移。其具体表现通常可以分成三种类型: 变压器整体位移; 绕组轴向尺寸改变或径向尺寸改变; 绕组出现鼓包、扭曲、匝间或相间短路等^[1]。以频率响应法为例, 绕组接线错误如图 1 所示, 在绕组一端注入扫频信号, 产生不同频率的电压激励, 利用记录装置同步检测并记录各扫描频率下绕组两端的对地电压信号 $U_o(n) \setminus U_i(n)$, 进而处理检测数据, 得到以分贝 (dB) 为单位的传递函数^[2]:

$$H(N)=20I_g\{U_o(n)/U_i(n)\} \quad (1)$$

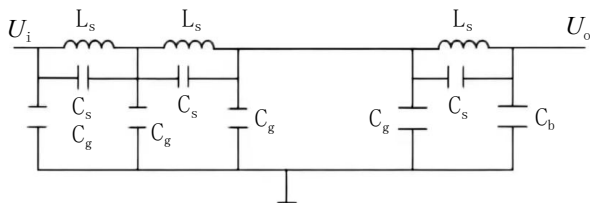
该电气试验方法主要是利用扫频测量技术, 通过测量绕组在不同频率下的响应情况, 并对结果进行横向、纵向比较, 从而评估出绕组的结构与性能情况。如果绕组存在接线错误, 将直接影响后续数据分析的可靠性。以图 1 所示的错误接线为例, 测量得到的谐振峰频率及电感值会明显偏高, 导致试验精度下降, 所得数据无法作为后续工作的有效依据。

2.2 危害性分析

在电气试验中, 变压器发挥着非常关键的作用, 关系到各项操作的安全性, 也便于操作人员进行整体控制。一旦其绕组接线出现错误, 不仅可能影响试验精度,

作者简介: 郑杰文 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电气试验。

导致试验失效，还可能引发设备故障，造成经济损失，甚至引发安全事故，危及人员安全。例如：如果变压器遭受到外力挤压，可能导致绕组线圈发生变形、扭转等问题，进而导致线圈的实际电阻出现变化，与设计值出现偏差，严重干扰试验结果。若试验中操作人员未能及时发现这类绕组接线错误，实验过程的电能消耗就会出现异常，比如理论上消耗量为10 kW·h，实际却可能达到14 kW·h，导致试验数据失去参考价值，甚至设备烧毁。因此，在电气试验时，操作人员需要高度重视变压器绕组错误接线问题，以保证试验过程安全、结果精确。



注： C_s 为串联的饼间电容， C_g 为对地电容， C_b 为套管对地电容， L_s 为线圈电感。

图1 效率响应法绕组错误接线示意图

3 电气试验中电力变压器绕组错误接线的检测技术

3.1 直流电阻法

在电气试验中，绕组直流电阻的检测是评估绕组绝缘状况及电流回路连接情况的关键项目，能够有效反映引线连接、绕组接线以及整个导电回路的完好状态。由于变压器绕组回路结构复杂、时间常数较大，常规测量往往耗时较长。为缩短测量时间，可采用助磁法进行测试，通过串联高、低压绕组以加速铁芯磁饱和，从而提升测量效率。依据国家标准，直流电阻不平衡率 δ 计算公式^[3]为：

$$\delta = \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{R_{\text{IV}}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中， R_{\max} 为相间或线间电阻的最大值， R_{\min} 为最小值， R_{IV} 为线间电阻的平均值。如果计算得到的直流电阻差异超出允许范围，则需进一步分析原因：若所有绕组电阻普遍偏大，多提示回路连接不良或引线存在断裂；若仅部分电阻偏大，通常与分接开关或分接引线接触不良有关；若绕组发生匝间短路且涉及匝数较多，直流电阻会显著下降，若短路匝数较少，则仍需结合直流电阻测试进行综合判断。

3.2 低压电抗法

低压电抗法检测变压器绕组错误接线的原理主要是通过实测电抗值与标准额定值进行横向或者纵向的比较，如果二者差异较大，说明绕组接线可能存在问题。

横向对比就是比较同一变压器中三相绕组的参数差异。一般情况下，如果变压器额定电压低于220 kV且容量小于100 MVA，其三相参数之间的差值不应超过2.5%；如果变压器额定电压高于220 kV、容量大于100 MVA，这个差值应该在2%以内^[4]。在实际检测过程中，如果发现三相参数之间的差值超过以上标准，就可能存在接线错误，需及时进行处理。纵向对比则是把当前检测数据和这一变压器过往同样条件下的测试数据进行比较，通过观察二者之间的差值，来判断有无接线错误。一般情况下，额定电压、容量低于220 kV、100 MVA的变压器，这个差值应该在2%以内；额定电压、容量超过220 kV、100 MVA的变压器，这个差值应该在1.6%以内。若超出以上标准，则可能存在绕组错误接线^[5]。

3.3 单相电源法

单相电源法是检测变压器是否有绕组错误接线情况的常用手段，其接线方法主要有两种：一种是先将本侧绕组端子两两短接(B-C、C-A、A-B)，随后把单相电源依次接入对应的短接端子，形成闭合回路。通电后分别测量各绕组的电气参数，观察参数是否发生明显的变化即可以判断出绕组接线是否正确。如果检测后发现参数有剧烈的变化，则表明可能存在接线错误。另一种接线方法是先将变压器对侧绕组端子分别与中性点短接(a-0、b-0、c-0)，然后把单相电源依次接入本侧绕组的各端子(B-C、C-A、A-B)。测量并记录绕组的复合参数，根据参数变化情况判断接线状态。如果参数出现明显异常，就可能存在接线错误。

3.4 三相四线法

与单相电源法相比，三相四线法需要对所有侧绕组端子进行短接，然后接入三相电源，从而对绕组的电压、电流、功率等各项参数进行精确测量(如图2所示)。当绕组存在内部匝间短路或连接错误时，会导致三相空载电流不平衡、空载损耗异常增大。这种方法具有更高的工作效率，适合用于对绕组错误接线的初筛。在实际应用中，为优化整体工作条件，需选择合适的时间进行端子短接操作。

3.5 介质损耗因数测量

介质损耗因数是评估变压器绝缘状态的重要指标，其异常变化往往预示着变压器绕组或整体绝缘存在缺陷。在标准测试方法中，被测绕组应进行短接，高压试验电压施加于该绕组，非被测绕组则需可靠接地。实际操作中的一个常见错误是未对绕组进行短接，导致试验时绕组的电感构成回路，从而在变压器前后产生附加电压差，干扰介质损耗因数的准确测量，使实

测值显著大于真实值。如果在试验前正确短接绕组，测得的介损值与实际状况基本相符，可有效减少偏差。因此，绕组是否短接以及由此产生的损耗变化，都会直接影响电气设备试验的最终结果。

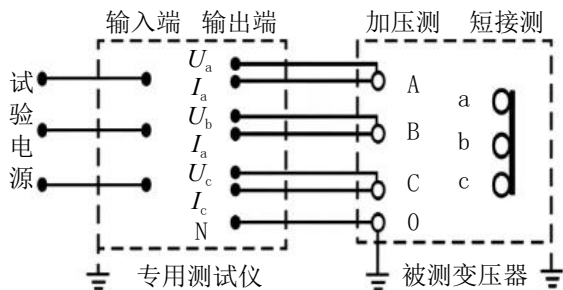


图 2 三相四线法接线示意图

4 电气试验中电力变压器绕组错误接线及其检测的案例验证分析

在实际应用中，需根据变压器类型及监测需求，合理选择检测方案或组合使用多种检测手段，以提升绕组错误接线的检测准确性。以某高压变电站中 220 kV 主变压器的电气试验为例，由 5 名专业技术人员组成试验小组，依次采用低压电抗法、单相电源法、三相四线法进行检测，每种方法重复两次。考虑到该变压器与较高母线电压连接，为保障验证过程安全，现场增设专用防护设备及辅助变压器，以确保在紧急情况下能够有效降低主变压器电压，避免设备损毁及人员伤害。

试验结束后，对各检测方法的数据进行分析与验证，主要结论如下：（1）使用单相电源检测时，所得参数波动明显。两次测量值的变化幅值分别为 8.7% 和 9.6%，均超出 5% 以内正常标准范围，表明存在绕组接线错误。（2）使用低压电抗检测时，横向对比显示三相测量值与原始数据差异达 4.7% 和 5.2%，超出 2.5% 的正常值范围；纵向对比差异分别为 6.3% 和 5.9%，超出 2.5% 的正常值范围，进一步确认绕组接线存在问题。

（3）采用三相四线检测时，参数同样呈现明显异常，两次测得的变化幅值分别为 12.9% 和 13.3%。整合三种检测方法的结果数据可见，该变压器绕组错误接线确实存在。

5 电气试验中的安全保障措施

5.1 加强人员安全教育

电气试验是一项具有一定危险性的工作，众多实际案例显示，多数电气试验事故是因为人员操作不规范所致。因此，提升试验安全性的关键是强化人员培训，确保人员持证上岗，熟悉试验设备，掌握仪器的性能及操作要求，并能熟练、规范地进行操作。在正式开

始电气试验前，可以利用模拟演练的方式检查、巩固相关人员的实操技能，保证各项操作的安全和规范，牢固树立安全生产意识，确保所有人员均能严格遵循标准作业流程。

5.2 明确安全注意事项

在正式开始电气试验前，需充分明确安全注意事项，确保所有人员严格执行安全规程。特别需要注意以下几点：（1）试验前应先测量绝缘电阻，确保带电部分与人体隔离，试验完成后须进行充分放电。（2）高压条件下的电气试验时，必须确保电气设备外壳可靠接地。（3）进行加压操作前，应仔细检查仪器与接线状态，确认无误后再执行。

5.3 加强试验过程安全控制

电气试验本身具有一定的安全风险，实验过程中可能有各种不确定因素，因此，除了做好前期准备、保证规范操作之外，还需要在试验过程中加强对风险因素的控制。其关键在于及时、准确地识别出风险点，并及时进行控制和处理。例如：在进行高风险的电气试验操作时，需要尤其注意保持安全作业距离，保证所有人员均在距离试验点足够远的安全范围，防止事故发生；进行破坏性电气试验时，尤其需要检查各人员的绝缘防护情况以及引线、地线连接情况，确保电流泄放通路顺畅，预防触电风险。

6 结束语

在电力变压器电气试验中，绕组接线是否正确直接关系到试验精确性和安全性。因此，在开展电气试验前，试验人员需充分做好准备工作，制定安全可行的试验方案，并严格执行操作规程。建议采用两种或两种以上的检测方法对绕组接线状态进行验证，以便及时识别接线错误，并安排修复或更换设备，确保试验过程安全、顺利地进行。

参考文献：

- [1] 杨静,李锴绩,岳增伟,等.电气试验中电力变压器绕组错误接线研究[J].电力设备管理,2025(10):75-77.
- [2] 段次祎,田甜,叶超凡.电力变压器绕组错误接线的诊断与分析[J].科学技术创新,2019(03):33-34.
- [3] 杨节.基于深度学习的电力变压器接线错误自动识别方法[J].自动化应用,2025,66(19):130-132.
- [4] 谢希.电气试验中电力变压器绕组错误接线的分析[J].中国新技术新产品,2020(23):59-61.
- [5] 白森文,姬陟,高洋,等.配电网变电站电气试验中变压器绕组错误接线的分析[J].电力设备管理,2024(23):234-236.

建筑装饰装修工程施工中 BIM 技术的 创新应用与实践研究

衣昭宇¹, 劳洪亮², 孙志³

- (1. 山东泰航环保新材料有限公司, 山东 烟台 264000;
2. 山东德林工程项目管理有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 山东科桂环保建材有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 建筑装饰装修工程具有设计个性化强、材料类型多样、多工种协同复杂等鲜明特征, 传统施工模式普遍面临设计与施工脱节、质量管控难度大、成本与进度失衡等突出问题。本文基于工程实践视角, 系统分析 BIM 技术在装饰装修工程全生命周期中的应用逻辑, 重点探讨三维可视化建模、多专业协同优化、施工过程动态管控、成本精准核算等核心应用场景的创新路径。通过结合实际工程案例, 验证 BIM 技术在解决设计冲突、提升施工效率、降低资源浪费等方面的实践价值。研究表明, BIM 技术的深度应用可实现装饰装修工程设计、施工、管理的一体化协同, 显著提升项目质量管控水平与综合效益, 为行业数字化转型提供技术支持。

关键词 建筑装饰装修工程; BIM 技术; 协同施工; 质量管控; 成本优化

中图分类号: TU767; TP3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.026

0 引言

随着建筑行业全方位进入数字化时代, 装饰装修工程往定制化、高品质且高效益的方向开始转型。在当下项目实施的过程当中, 设计难度明显增大、工期比较紧张, 并且多专业交叉作业协调起来很困难等问题日益突显, 传统二维设计手段已经难以满足精细化管理的实际需求。BIM 技术作为数字化转型的关键技术, 依靠其可视化、参数化以及协同化等显著优势, 为装饰装修工程提供全流程的技术支撑服务。该技术成功打破传统技术的应用界限范围, 整合项目从设计环节直至运维阶段的全过程数据, 搭建起统一化的数字化协作平台, 促进设计方、施工方、监理以及业主等多主体开展协同作业。深度探索 BIM 技术的创新应用新路径, 采用理论研究和实践案例相结合的方式, 构建适用于装饰装修工程的 BIM 应用全新框架, 为行业发展提供实施指南, 推动建筑装饰装修行业朝着更高水平发展。

1 建筑装饰装修工程施工特点与现实挑战

1.1 工程施工核心特点

现代装饰装修工程特别讲究个性化展现, 不管是商业建筑、住宅还是公共场馆, 其装饰风格与功能需

求存在明显差异, 哪怕是同类型建筑业主也常要求定制化设计方案。设计过程中需要综合考量美观、实用性、安全性与经济性, 涉及空间规划、材料筛选、色彩协调、机电管线整合等多方面, 方案一般要反复优化调整使得每个项目都具独特性, 这使设计流程变得复杂, 对设计精度与协同配合提出更高要求^[1]。工程项目使用的材料种类相当繁多, 既包括传统建材, 又涵盖新型材料, 如墙面、地面、吊顶装饰材料以及智能环保节能材料等多达数百种。不同材料在物理特性、施工方法和适用场景上各不相同, 部分新型材料应用技术还不够成熟, 同时材料质量等级与价格差距也比较大, 供应链涉及众多厂家和经销商。所以, 如何在预算范围内选择满足设计要求且质量可靠的材料, 确保按时供应、妥善存储和高效利用, 成了项目管理重点难题。

装饰装修一般是处于建筑工程的后期阶段, 工期要求相当严格。对于商场、酒店、办公楼这类商业项目来说, 业主为了能够早日投入使用并且产生收益, 往往对施工周期有着极高的期待, 要求在有限时限内完成高难度的装饰工作。施工过程当中需要协调多个工种并行开展作业, 同时还容易受到材料供应延迟、设计方案调整以及现场突发状况等外部因素的干扰, 这给进度控制带来巨大挑战。所以, 如何在确保工程

作者简介: 衣昭宇 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

质量的同时有效提升施工效率、压缩项目周期,已经成为施工企业亟待解决的关键难题。该环节涉及装饰、电气、给排水、暖通空调、智能化系统等多个技术领域,各专业的施工内容紧密关联且相互制约。在传统施工模式下,由于各专业之间缺乏高效的协作机制,常会出现工序安排冲突、空间布局不合理等现象,进而引发施工中中断或者返工情况,最终对工程进度和整体质量造成不利影响。

1.2 工程施工主要挑战

装饰装修工程目前面临着四大管理方面的难题。首先是施工品质很难进行有效把控,因为工序特别繁琐还主要依赖人工操作,施工品质容易受到人员技术水平、材料实际品质以及现场环境等多种因素制约,传统的事后检验方式很难快速发现其中存在的问题。部分企业存在施工不规范、用次等材料充好、隐蔽工程质量不合格等现象,容易导致墙面出现裂缝、地面产生空鼓、防水功能失效等质量常见问题,这不仅会影响美观和正常使用,还会造成工程返工,延长工期并且增加费用成本^[2]。其次是信息流转的效率十分低下,项目涉及多方的协作配合,信息传递主要依赖各类文件,但传统的方式像纸质文档、口头通知以及邮件往来等,常常存在信息滞后、内容失真和有所遗漏等问题。例如:设计变更没有及时传达给施工团队,导致现场施工情况与设计方案不符,材料供应信息反馈延迟,打乱了正常的施工安排,各方对项目信息理解存在差异引发矛盾,进而拖延了项目的整体进度。再次是成本控制的效果不太理想,超支现象普遍存在。最后是安全管控的风险较为突出,工地环境十分复杂,高空作业、动火作业、临时用电等高危作业比较密集,多工种交叉作业导致人员流动频繁,管理难度较大,再加上部分单位安全意识比较淡薄^[3]。安全体系和防护手段方面存在明显缺陷,具体体现为脚手架搭建不符合相关标准、电力线路铺设呈现杂乱无章状态以及消防器材配备处于不足情况,这些问题很可能会导致高空坠落、火灾爆发以及触电事故的发生,不仅会对作业人员的生命安全造成严重威胁,还会使得整个项目的进度被明显拖延。

2 BIM 技术在建筑装饰装修施工中的创新应用路径

2.1 设计阶段: 精准化设计与协同优化

BIM 技术依靠三维可视化模型打破传统二维图纸限制,能直观展示装饰装修设计具体方案,设计人员可在虚拟环境里灵活调整空间布局、风格和材料搭配,还能实时预览效果并准确把控空间尺度大小,模型当中内嵌了材料物理特性、环保参数以及价格相关信息,

方便快速对比不同材料应用效果与成本情况,结合预算和功能需求来优化材料选型工作,能为业主提供决策方面的参考依据。该技术可把建筑、结构、机电以及装饰等各个专业模型整合到统一平台之上,通过碰撞检测算法自动识别空间当中存在的冲突问题。基于时间维度构建的 4D 施工模拟模型^[4],能够在设计阶段对施工流程、顺序以及资源配置开展虚拟仿真工作,提前预判施工过程中的难点和潜在问题,如复杂造型施工可行性、材料运输路径以及工种交叉作业协调性等,进而有针对性地对方案进行优化调整。

建筑信息模型把项目全部构件以及物料数据整合起来,链接到成本数据库之后就能在设计阶段马上完成费用核算。要是设计方案作出修改,系统会同步反馈费用波动情况,这样能有效防止出现预算超支的问题。例如:更换墙面材料或者调整地面铺设面积的时候,程序会自动计量材料用量差异并且刷新预算数据^[5],以此辅助实现成本控制的目标。除此之外,该模型还可以输出精确的材料明细表,为后续采购环节提供可靠的参考依据。

2.2 施工阶段: 动态化管控与效率提升

BIM 技术构建出来的 4D 施工动态模型可以编制精细化进度安排并和三维设计模型相关联,以此达到可视化的进度管控目的。项目管理者能够实时掌握工程进度状况,通过比对实际进度和计划进度之间的差异,及时分析问题根源并采取相应纠偏措施。当某个施工环节出现滞后情况时,可迅速调整后续工序安排以及人力物力分配,保障整体工期不会受到影响,同时系统可向各施工团队推送具体计划与任务指令,明确工作范围以及时间节点,有效提升多方协同工作的效率。

BIM 技术实现对装饰装修材料从采购到报废的全周期管理,在施工启动前可根据模型自动生成精确的材料采购清单,详细列出所需材料的种类、规格、数量及进场时间,有效防止材料积压或短缺情况,通过与供应链管理系统的集成可以实时追踪采购订单的执行情况与库存变动,确保材料供应的及时性。

根据工程现场的实际情况,BIM 技术能构建三维安全管理模型来识别潜在风险,通过模拟高空作业、动火作业区域以及临时电路布置等场景,可以明确划分出安全警示区域。平台集成了安全管理制度、操作规程还有应急预案,便于施工人员随时进行查阅学习。针对危险作业环节依靠三维模型开展技术交底^[6],清晰说明安全防护措施与操作要点,同时借助移动终端实时采集现场隐患数据并上传到管理平台,由管理人员制定整改方案并全程跟踪落实,以此形成完整的安全管理闭环。

2.3 协同管理：一体化平台与信息共享

BIM技术能有效消除装饰装修工程中的信息孤岛情况，打造出集中化的协作环境供各方使用。设计方、施工方、监理方、材料供应商以及项目业主等参与主体能够即时获取并同步更新设计图纸、工程变更、施工进度、质量检查结果和材料供应等关键数据，并且通过在线交流快速响应各类问题。这种机制不仅加速了信息流转的速度，也保障了信息的准确性，为后期运维与审计提供可靠的数据支撑。信息透明度显著提高后，使决策更加科学及时，同时增进了各方之间的互信，有效降低了争议发生的风险。

3 BIM技术在建筑装饰装修施工中的实践案例

3.1 案例一：城市商业综合体装饰装修工程

某商业综合体建筑规模达到12万平方米，涵盖购物餐饮办公及地下停车等多元功能，其装修投入高达3.8亿元。面对设计方案呈现多样化、机电设备系统较为复杂、180天工期非常紧迫以及多专业协作难度极大等挑战，传统管理模式难以满足项目实际需求。为此，施工方构建基于BIM的全过程协同管理体系，在设计环节通过多专业协同设计与碰撞检测发现并解决126处问题，利用三维模型优化沟通效率加速方案确认，在施工阶段将4D进度计划细化至每日作业班组，通过关键工序虚拟施工优化资源配置，结合BIM生成的精确采购清单整合供应链使材料损耗率降低8%，质量管控方面采用BIM移动终端实时采集数据形成闭环管理。通过BIM平台实现多方协同沟通，使信息传递效率提升50%以上。项目最终175天完工，比计划提前5天，返工率控制在2.3%，节约成本1200万元，质量验收一次性达标获得各方高度评价。

3.2 案例二：高端别墅装饰装修工程

该栋别墅的业主针对设计风格、空间规划以及用料提出了既独特又严格的高标准，且配备了智能系统、定制部件以及绿色建材等高端配置，常规施工方式无法实现高精度和多工种之间的协作。于是项目引入了BIM技术，在设计环节建立三维仿真模型，按照需求灵活地优化方案并及时呈现出视觉效果，对特殊造型吊顶、艺术装饰面这类定制部件进行参数化建模，同时开展多专业交叉检查来完善空间分配。施工阶段依据BIM输出技术文件，依靠模型精确定位，把复杂部件安装偏差控制在2毫米范围之内，通过模型计算材料需求并联动厂商进行生产配送，降低损耗和延误的风险。在协调管理方面，利用BIM平台支持多方进行实时沟通，高效处理方案修改、材料代换等相关事宜，比如快速

回应业主关于墙面材质的调整要求并同步呈现效果与成本差异，最终项目达成个性化设计精准呈现的目标，获得业主高度认可，工期缩短了20天，材料浪费率不超过3%，节省成本大约80万元。BIM模型还为后续物业管理留存了数字化资料，使运营维护效率得到优化。

4 结束语

BIM技术在建筑装饰装修工程施工中的应用，能化解设计环节个性化需求和复杂构造间矛盾，用三维可视化呈现、结构冲突预检和虚拟建造推演等手段提升设计精确度，削减工程变更和重复施工频次。施工阶段该技术有助于实现项目进度、工程品质、成本投入和作业安全精细化动态化管理，优化人力物力等资源分配，提升工程效率和最终品质。基于BIM的协同协作平台能破除参与方之间的信息孤岛，加快信息流转速度，增强决策透明度，保障多方在高效协同环境中工作。随着信息技术持续发展，BIM技术在该领域的应用会向更深层次、更广范围发展。未来发展方向集中在以下几个方面：一是强化和大数据、人工智能、物联网等先进技术融合创新，打造智能化施工管理新范式，如用人工智能算法优化项目进度与资源分配，通过物联网技术实现施工现场实时监控和智能调度；二是推动BIM技术在绿色建筑装饰装修领域的实践应用，通过数字化模拟辅助优化节能型材料筛选和施工工艺制定以降低能源消耗；三是推进行业标准化进程，完善BIM数据交互接口和技术规范，为专业软件及参与主体无缝对接创造条件。与此同时，要重视专业人才培养和储备，提升行业从业人员运用BIM技术的综合素养，促进该技术在中小型装饰装修企业中的普及应用。随着技术创新突破和实践应用深化，BIM技术将引领建筑装饰装修行业向数字化、智能化和绿色化方向实现根本转型。

参考文献：

- [1] 李建明,张思远.BIM技术在建筑装饰工程中的协同应用研究[J].建筑技术开发,2024,51(08):124-126.
- [2] 王莉娜,陈晓峰.基于BIM的装饰装修工程质量与成本协同控制研究[J].工程管理学报,2023,37(03):98-103.
- [3] 赵文博,刘佳琪.商业建筑装饰装修工程中BIM技术的创新应用[J].建筑科学,2023,39(05):167-172.
- [4] 孙晓阳,周雨桐.高端住宅装修中BIM技术的个性化设计与施工应用[J].住宅科技,2022,42(12):78-82.
- [5] 陈海涛,吴敏.BIM技术在装饰装修工程安全管理中的应用研究[J].安全与环境工程,2022,29(04):189-194.
- [6] 黄志华,林晓东.BIM与物联网融合在装饰装修施工动态管控中的应用[J].施工技术,2024,53(11):89-93.

市政照明节能改造工程中智慧路灯 施工工艺与物联网融合应用

顾 健

(江苏赛鸥电气集团有限公司, 江苏 扬州 225600)

摘 要 在“双碳”目标与新型智慧城市建设背景下, 市政照明节能改造成为城市绿色发展的重要抓手。智慧路灯作为改造核心载体, 其施工工艺与物联网技术的融合应用是提升改造效能的关键。本文立足于市政照明节能改造实践需求, 概述了智慧路灯与物联网核心技术, 详细分析了智慧路灯施工前期准备、核心施工环节及调试验收的工艺要点, 并从感知层、网络层、应用层三个维度探究了与物联网的融合应用路径, 提出技术、质量、运维、安全四大保障措施, 以期为市政照明节能改造工程中智慧路灯的规范化施工与智能化应用提供实践参考, 进而推动城市照明体系向节能化、智能化、精细化转型。

关键词 市政照明; 节能改造; 智慧路灯; 物联网

中图分类号: TU995

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.027

0 引言

市政照明系统是城市基础设施的核心构成部分, 传统照明设施普遍存在能耗高、管控滞后、运维成本高的问题, 无法满足新型智慧城市发展需求。物联网、大数据、新能源等技术不断迭代升级, 智慧路灯依托节能降耗、多功能集成、智能化管控等优势, 成为市政照明节能改造的核心趋势。规范的智慧路灯施工工艺, 是工程质量的直接保障, 和物联网技术深度融合, 是实现智能管控、功能拓展的核心支撑。部分市政照明节能改造工程存在三大问题: 智慧路灯施工和物联网融合不到位、工艺标准不统一、应用效能未完全发挥。系统探究智慧路灯施工工艺和物联网融合应用途径, 落实保障手段, 能切实助力提高市政照明节能改造质量、压缩运维成本、构建智能化城市照明体系, 本文依托这一背景, 结合工程实践进行了深入探究。

1 市政照明节能改造工程核心技术概述

1.1 智慧路灯核心技术

智慧路灯是兼具照明控制、信息感知、数据传输、多功能集成的新型城市基础设施, 核心技术囊括节能照明技术、智能控制技术和多功能集成技术。节能照明技术以 LED 光源为核心支撑, 和传统高压钠灯比, 能耗降低超 50%, 寿命增幅达 3~5 倍, 搭配智能调光模块可结合环境光照、车流量调整亮度; 智能控制技

术借助嵌入式芯片和传感器, 实现路灯远程开关操控、运行状态监测、故障提前预警; 多功能集成技术可聚合充电桩、环境监测、视频监控、信息发布等功能, 做到“一杆多用”, 强化城市资源利用效能^[1]。

1.2 物联网核心技术

物联网技术是智慧路灯智能化管控的核心依托, 核心覆盖感知层、网络层与应用层三大技术体系。感知层调动光照传感器、温湿度传感器、车流量传感器等各类传感器, 采集路灯运行状态、环境参数等数据, 支撑数据采集开展; 网络层采用 5G、NB-IoT、LoRa 等无线通信技术, 实现感知层数据高效传输, 维持数据传输的稳定和实时; 应用层借助大数据分析、云计算等技术, 应用经处理、分析后的传输数据, 为路灯赋予远程管控、能耗统计、故障预警、资源调度等智能功能, 为市政照明管理决策供给数据支撑。

2 市政照明节能改造中智慧路灯施工工艺要点

2.1 施工前期准备

施工前的筹备工作是保障智慧路灯施工质量和效率的关键, 核心覆盖现场勘查、方案优化、材料设备检验三大关键环节。现场勘查需组建专业勘查团队, 通过全站仪、管线探测仪等专业设备, 精准核对施工区域的地形地貌、地下管线分布(电力管线、通信管线、给排水管线、燃气管线等)、周边建筑物分布及交通

作者简介: 顾健(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 智慧路灯施工、物联网照明、节能改造工程管理。

流量,绘制细致的现场勘查图纸,标记各类障碍物位置,杜绝施工和现有设施出现冲突;优化方案需匹配勘查结果和节能改造目标,用BIM技术搭建施工区域三维模型,模拟路灯安装地点、距离、高度及管线布设路径,同步统筹物联网感知设备和通信模块的安装点位、布线路径,优化方案经多轮论证,保障施工方案具备可行性、经济性、安全性^[2]。

2.2 核心施工环节工艺

核心施工环节直接决定智慧路灯安装质量和后续运行稳定性,涵盖基础施工、灯杆安装、管线敷设、设备集成四大工艺要点,具体细节见表1。

2.3 调试与验收工艺

调试和验收是维持智慧路灯正常运行和物联网功能有效实现的核心环节,需严格遵守“分步调试、全面验收”的规矩,调试工作划分为三个阶段:单机调试、分系统调试和整体系统调试。(1)单机调试要逐一检测路灯照明功能(开关、调光、色温调节)、传感器数据采集精度(误差控制在设计允许范围)、通信模块信号强度和连接稳定性;(2)分系统调试需单独对每个系统——照明系统、感知系统、通信系统开展专项调试,核查各子系统内部设备的协同运行成效;(3)调试整套系统要搭建物联网管控平台,验证各子系统与平台的数据通信稳定性,检测远程管控、故障预警、能耗统计、亮度自适应调节等智能化功能的实际表现,调整平台参数配置,保证系统响应延迟不超3秒。验收工作必须严格遵循《城市道路照明工程施工及验收规程》《智慧路灯系统技术要求》《市政工程质量验

收统一标准》等多项标准,成立由建设单位、施工单位、监理单位、设计单位及第三方检测机构组成的验收小组,先检查施工资料(施工方案、材料检验报告、调试记录、隐蔽工程验收记录等)的完整度和合规性,再现场检测路灯安装质量、照明效果(平均照度、照度均匀度要符合城市道路照明等级要求)、节能效率(实际能耗要比改造前低30%以上)及物联网功能实现情况,针对验收不合格项下达具体整改通知,确定整改要求和时限,整改完成后开展复核验收,保障工程质量全部达标^[3]。

3 智慧路灯施工与物联网的融合应用路径

3.1 感知层与施工工艺融合

感知层是物联网数据采集的核心节点,它和施工工艺的深度融合要覆盖施工全流程,维持数据采集的精准与稳定。施工前期筹备阶段,结合感知设备类型和功能需求改进施工方案,针对光照传感器、车流量传感器、温湿度传感器等各类设备的安装要求;灯杆设计阶段,预设专用安装接口和标准化布线通道,明确接口规格和布线路径,防止后期凿改灯杆破坏结构稳定性和防水性能;核心施工阶段,各类感知设备的安装和固定同步完成,严格把控安装精度,光照传感器需安装在灯杆顶部无遮挡区域,保证采集数据如实反映环境光照状态,车流量传感器要装在道路侧方灯杆的合适高度,做到检测范围覆盖目标车道,全部传感器接线需和路灯线路同步安设、规范连通,借助防水接头和绝缘套管做好绝缘和防水处理,接头部位需预留一定冗余长度,便于后续维护。

表1 智慧路灯核心施工环节工艺要求与质量控制要点

施工环节	核心工艺要求	质量控制要点
基础施工	按设计尺寸开挖基坑,铺设垫层并夯实;绑扎钢筋骨架,安装预埋件,确保预埋件水平度偏差 $\leq 2\text{ mm}$;浇筑C30混凝土,振捣密实后覆盖养护,养护时间不少于7天	基坑尺寸、深度符合设计要求;预埋件位置精准,与基础连接牢固;混凝土强度达标,无裂缝、蜂窝等缺陷
灯杆安装	采用起重机吊装灯杆,吊装过程中设专人牵引扶正;灯杆就位后与预埋件精准对接,调整垂直度(垂直度偏差 $\leq 1\%$),并用螺栓紧固;安装完成后拆除吊装固定件,清理基础周边杂物	灯杆垂直度符合标准;螺栓紧固力矩达标,无松动现象;灯杆表面无损伤、变形
管线敷设	电力管线与通信管线分开敷设,间距不小于30 cm;采用PE管作为保护管,埋深不小于0.7 m,穿越道路时需加设套管防护;管线接头采用密封连接件,做好防水处理;敷设完成后进行压力测试与通断测试	管线敷设路径符合设计要求;防水、防护措施到位;管线连接牢固,无渗漏、断路现象
设备集成	依次安装LED光源、智能控制器、传感器、通信模块,确保设备接线规范,极性正确;连接线路采用绝缘导线,做好绝缘处理;安装完成后梳理线路,固定于灯杆内部,避免线路杂乱受力	设备安装位置合理,固定牢固;接线规范,无短路、虚接现象;设备绝缘性能达标

3.2 网络层与施工工艺融合

网络层承担数据传输，与施工工艺结合的核心是保障通信链路稳定可靠。管线敷设阶段，同步规划通信管线敷设路线，单独铺设专用通信管线（如光纤套管、NB-IoT 专用管线）和电力管线，防止电磁干扰；依据施工区域环境挑选适配的通信模块（如城市核心区域采用 5G 模块，郊区采用 LoRa 模块，为通信模块在灯杆内部预留安装空间，保证模块安装牢固、信号无遮挡；调试实施阶段，校验通信模块的信号强度、数据传输速率与稳定性，调校通信参数，搭建冗余通信链路，规避单链路故障引发数据传输中断，维持智慧路灯和物联网管控平台稳定互通。

3.3 应用层与施工成果融合

应用层是物联网技术实现价值的核心载体，它和施工成果的融合要聚焦智能化功能的实际应用，施工收尾后，把智慧路灯施工成果（设备参数、安装位置、管线分布等）录入物联网管控平台，构建设备档案，实现设备全周期管控；依靠平台汇总感知层采集的路灯运行数据、环境数据，依托大数据分析调整照明亮度（车流量大时调高亮度，夜间无车辆通行时降低亮度），精准统计分析能耗、智能预警故障；围绕城市管理需求，延伸应用层功能边界，诸如通过平台执行路灯能耗考核、运维工单派发等，让市政照明管理从“被动维修”切换到“主动预警、精准运维”模式^[4]。

4 智慧路灯施工与物联网融合应用的保障措施

4.1 技术保障

建立技术保障体系，组建由施工技术人员、物联网技术专家、设备厂家技术人员组成的技术团队，全程参与施工方案优化、技术难题攻克与调试指导；严格遵循相关技术标准与规范，制定智慧路灯施工与物联网融合应用的专项技术方案，明确技术参数与操作流程；加强技术培训，提升施工人员的物联网技术应用能力与施工规范意识，确保施工与融合应用的技术可行性。

4.2 质量保障

打造全流程质量管控体系，施工前细查材料设备质量，禁止不合格产品进入；施工阶段布置质量检查节点，对基础施工、灯杆安装、管线敷设、设备集成等关键环节做专项检查，落实检查记录，查出质量问题马上整改；验收阶段对照标准完成全面核验，请第三方检测机构实施质量检测，保障施工质量与物联网融合应用效果合格；构建质量追溯体系，追查施工质量问题源头并问责相关方^[5]。

4.3 运维保障

组建专业运维团队，厘清运维职责和流程，定期对智慧路灯和物联网设备开展巡检、维护与校准；借物联网管控平台掌握设备运行状态实时数据，构建故障预警和快速响应机制，故障发生后即刻派单、极速维修；搭建运维档案，登记设备运维情况、能耗数据、故障处理结果等信息，为运维优化和决策供应数据支撑；加大运维人员培训力度，增强智能化设备运维和应急处置能力。

4.4 安全保障

抓实施工和运行全周期安全管理，施工前开展施工人员安全培训，配齐安全防护用品，规范施工用电、吊装等操作步骤，防范安全事故；施工阶段做好地下管线防护，切勿损毁燃气、电力等危险管线；设备运行期间定期核查电气安全性能，完成防雷、防水、防漏电处置，保障设备安全运行；筑牢物联网平台安全防线，设定访问权限，对数据加密传输，防范数据泄露和被恶意攻击。

5 结束语

实施市政照明节能改造工程期间，融合运用智慧路灯施工工艺和物联网技术，是城市照明体系智能化升级的核心途径。本文对相关核心技术进行梳理，落实施工工艺细节，探索感知层、网络层、应用层与施工的融合渠道，制定四项保障举措，提出了一套完整度较高的融合应用方案。合规的智慧路灯施工工艺是融合应用的核心支撑，深度运用物联网技术是提效改造的核心。技术不停迭代升级，要进一步优化施工工艺和融合应用模式，驱动智慧路灯往多功能集成、全生命周期智能化管理迈进，给新型智慧城市建设夯实基础设施支撑，推动城市实现绿色低碳、高效智能的发展目标。

参考文献：

- [1] 林海平, 胡文飞, 张雅洁. 城市智能路灯照明系统的设计与实现[J]. 温州职业技术学院学报, 2018, 18(03): 38-41.
- [2] 杨亚豪, 马理想, 王小妮, 等. 基于物联网技术的城市路灯智能控制系统设计[J]. 黄河科技学院学报, 2022, 24(02): 36-43.
- [3] 王飞文. 基于物联网的城市路灯智慧照明控制系统研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [4] 杨文强. 智慧城市路灯安全防控技术研究与应[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [5] 代永海, 李俊峰, 章超平. 城市智慧路灯技术应用研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(12): 76-79.

预应力现浇箱梁的施工监理分析

吴仍武

(广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘要 预应力现浇箱梁施工工序多、作业环境复杂, 支架稳定性、混凝土成型质量及预应力施工精度直接关系到桥梁结构安全与使用性能。本文结合工程实践, 对预应力现浇箱梁施工监理的关键控制环节进行系统分析, 以期同类桥梁工程监理实践提供可借鉴的技术思路。研究表明, 通过构建施工全过程监理体系, 可有效降低施工阶段结构变形、裂缝及预应力损失等质量风险, 保障现浇箱梁施工安全、成桥质量稳定。

关键词 预应力; 现浇箱梁; 施工监理

中图分类号: TU757

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.028

0 引言

预应力现浇箱梁以整体性好、结构受力合理、线形连续等优势, 被广泛应用于城市快速路和高速公路匝道桥工程。然而, 该类结构在施工阶段普遍面临支架体系复杂、混凝土体量大、预应力施工精度要求高等技术难题, 任何一个环节控制不当, 均可能引发线形失控、裂缝增多甚至结构安全风险。传统以经验管理为主的监理方式已难以满足现阶段高标准桥梁工程建设需求。基于此, 有必要从施工全过程出发, 对预应力现浇箱梁监理控制要点进行系统梳理分析, 构建更加科学精细的监理控制体系, 以提升桥梁工程施工质量的稳定性。

1 工程概况

本工程依托深圳至中山跨江通道项目 S07 合同段实施, 施工范围位于横门互通 A、B 匝道区间。横门互通 A 匝道 A29#-A35# 墩及 B 匝道 B0#-B6# 墩上部结构为预应力现浇连续箱梁体系, 均处于半径 120 m 圆曲线上。现浇箱梁全长 210 m, 梁高 1.8 m, 主梁顶宽 10 m, 底宽 6.32 m, 处于半径 120 m, 为大跨度、宽箱室、多腹板形式, 整体线形控制精度要求高, 施工安全风险等级被认定为重大(危险性较大)工程。现浇箱梁施工需在高空及复杂交通环境下完成, 对支架体系稳定性、混凝土成型质量和预应力施工精度提出了较高技术要求。本标段匝道现浇箱梁施工采用满堂支架体系进行整体现浇, 施工阶段全部荷载通过支架体系传递至地基, 对地基承载力及支架整体刚度控制标准严格。施工组织文件明确指出, 支架基础应达到承载力不低于 180 kPa 的控制要求, 而且要通过逐孔预压的方法

来验证支架整体稳定性, 给模板标高和预拱度的调整提供依据。梁体结构复杂, 腹板高、顶底板宽, 混凝土侧压力大, 锚固区、横梁区等部位应力集中很显著, 这就使得现浇箱梁施工对模板体系强度、混凝土振捣密实度和预应力张拉精度的要求比普通桥梁工程要高得多。工程实施时, 须同步把测量线形控制、混凝土温控养护、预应力张拉与压浆等关键工序协同组织起来, 给施工监理的全过程控制能力提出了更高要求。

2 预应力现浇箱梁的施工监理措施

2.1 施工测量监理

预应力现浇箱梁属于大跨度、大体量的整体结构, 施工阶段线形控制难度大, 任何细小偏差在后续张拉、体系转换过程中都会被不断放大, 因此测量控制质量直接决定最终成桥线形是否符合设计要求^[1]。监理工程师在施工准备阶段应审核测量控制网的布设成果, 对平面坐标和高程基准点进行复测确认, 确保控制点稳定可靠, 避免因原始测量误差导致梁体轴线和标高整体性偏移。在支架搭设并完成逐孔预压后, 监理应组织测量单位对模板底模标高和预拱度进行复核, 根据预压沉降实测数据动态修正模板标高, 使梁体在浇筑前的几何状态与设计线形保持一致。混凝土浇筑前, 监理应要求施工单位对梁体轴线、侧模顺直度和关键断面标高进行全面复测, 作为浇筑签认的重要依据; 浇筑过程中, 需通过跟踪测量及时掌握模板受力变形情况, 防止因侧压力变化引发微小位移而逐渐积累为成梁线形偏差。预应力张拉完成后, 还应对象体竖向挠度、纵向线形进行复测分析, 并与设计值进行对比, 作为压浆及后续工序的重要依据。同时, 监理工程师

作者简介: 吴仍武(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 公路工程施工监理。

还应结合现浇箱梁施工阶段荷载演变特点,对支架体系受力状态进行动态研判。在混凝土分层浇筑、施工设备集中作业及预应力张拉前后等关键时段,重点关注支架立杆轴力变化及节点连接受力情况,防止因施工荷载阶段性叠加导致局部构件超限受力。必要时可通过复核支架计算书参数、抽查关键杆件截面尺寸和连接构造,验证其与实际工况的一致性。对连续梁曲线段及高墩区域支架,监理应强化横向稳定性检查,防止因偏载或侧向力作用引发整体失稳,为现浇箱梁安全成型提供可靠支撑条件。

2.2 地基及支架施工监理

预应力现浇箱梁施工时,所有施工荷载最终都必须靠支架体系传递至地基。因此,地基是否稳定、支架承载能力是否符合要求,决定了梁体能否安全成型。监理工程师在施工准备阶段,应把地基处理质量当作首要控制点,全面查看施工区域,重点查看软弱土层分布、回填区域压实情况以及排水状况,对有承载隐患的地方,及时让施工单位采取换填、夯实或者加固的处理办法,避免后期因不均匀沉降而影响支架的稳定性。支架基础的承载力必须达到 180 kPa 以上才能进入搭设工序,而且监理得通过现场检测来掌握地基沉降速率和沉降量的变化状况,才能判断其长期稳定性是否符合现浇箱梁施工的要求^[2]。在支架搭设时,监理工程师应重点查看立杆的纵向距离、步距的设置、剪刀撑的布置及节点连接的构造,保证支架体系能形成稳定的空间受力结构,既要防止局部受力过于集中,还不能让传力路径不清楚。搭设完毕后,应组织逐孔满载预压,预压荷载不能低于施工阶段最大设计荷载的 120%,而且应分级加载、稳压和卸载全过程记录支架的沉降量与回弹值,依据实测数据对模板标高、预拱度加以修正,为后续梁体线形控制提供可靠依据。在施工时,还应对重点孔跨以及受力敏感的地方布设沉降观测点,对支架体系进行连续监测,动态地分析沉降速率的变化状况。若发现沉降发展趋势有异常,或者出现不均匀沉降的情况,就得赶紧启动停工复核和加固处置程序,避免支架体系在浇筑混凝土和预应力张拉阶段出现失稳风险。

2.3 模板工程施工监理

监理工程师在模板工程实施之前,要对模板设计方案予以系统审核,重点查看模板体系有没有充分考虑混凝土自重、施工荷载以及振捣冲击等不利工况,且要复核模板挠度控制指标,保证模板在受力时仍能保持良好的几何稳定性。模板进场之后,监理要仔细核查模板的平整度、刚度以及拼缝止浆构造,要对那

些变形、锈蚀或者拼缝不严的模板坚决置换,从源头把漏浆、跑模之类的问题加以杜绝。在模板安装阶段,监理工程师须用全站仪等测量仪器对底模标高、侧模顺直度和预拱度设置进行复核,保证模板尺寸偏差控制在 0~5 mm 以内,拼缝间隙不能超过 1 mm,这样就能保证梁体线形与设计值保持一致^[3]。对腹板、横梁等受侧压力较大的部位,要让施工单位合理安排对拉螺杆并加密支撑构造,提高模板的整体刚度,避免在混凝土浇筑时出现胀模、错位或者局部变形问题。模板安装完毕之后,监理要组织专门的验收工作,把预埋件、预留孔洞以及支座垫石模板的位置逐个核查,只有确认无误之后,才能进入混凝土浇筑工序。在拆模的时候,监理工程师要严格把控拆模的时刻与顺序,防止早拆模破坏梁体棱角或出现裂缝。模板拆除规定为:构件跨度未超过 8 m 时,需待混凝土强度达到设计强度的 75% 方可实施拆除。构件跨度超 8 m 时,混凝土强度得达到设计值的 100% 以上才能拆除。拆模时,监理人员须全程旁站,督促施工单位按“先非承重、后承重”的原则有序拆除,避免梁体二次扰动。

2.4 钢筋工程施工监理

监理工程师在钢筋施工作业前,应从材料源头开始把关,逐批核实进场钢筋的规格、级别及力学性能,确保屈服强度、抗拉强度等关键指标符合设计要求,同时要特别关注钢筋表面状态,禁止任何带有锈蚀、油污或机械损伤的钢筋进入施工区域。在钢筋加工时,监理需关注钢筋下料长度、弯折角度以及成型尺寸是否符合图纸要求,避免加工有误差,从而保证安装后的钢筋受力位置不会发生偏移^[4]。监理工程须按照设计图纸,逐根对主筋、分布筋和构造筋的数量、间距以及布置位置加以核对,保证受力钢筋的间距、排布方式和设计相符。焊接钢筋对施工质量极为重要,监理得按规范抽检焊接头,核查焊缝外观、长度与强度,焊缝长度不能少于 10 d (d 为钢筋直径),还得通过抽样拉力试验来确认焊接强度是否符合使用要求。在腹板、横梁等钢筋密集之处,监理要重点关注钢筋和预应力波纹管的相互位置关系,督促施工单位合理安排构造筋的布置,防止因空间冲突、擅自割除主筋而违规的情况发生,所有调整都必须有书面技术确认。另外,监理工程师应检查垫块的材质、规格及布设间距,要保证保护层的厚度符合设计要求,避免因保护层太薄而让钢筋锈蚀风险变大。在钢筋隐蔽之前,监理须组织隐蔽工程验收,对钢筋型号、间距、接头位置以及保护层厚度逐一复核,确认无误后,才能进入下一道混凝土浇筑工序。

2.5 混凝土浇筑监理

监理工程师在混凝土浇筑前,须对混凝土配合比做专项审查,重点查看水胶比、外加剂掺量以及骨料级配是否符合设计要求,还要靠现场抽检控制混凝土坍落度稳定在 180 ± 20 mm的范围,保证混凝土和易性良好。监理还需对运输时间及入模温度变化予以监控,防止等待过久或温度过高导致坍落度损失、初凝加速,以此保障连续浇筑的材料稳定性。在浇筑时,监理工程师必须严格遵循分层、分段、对称推进的施工原则,按从中间向两侧、从低处向高处的顺序来组织浇筑,浇筑速度不能超过 2 m/h ,防止混凝土局部堆积,避免出现离析或者应力集中的情况^[5]。振捣质量与梁体内部密实程度直接相关,监理必须督促施工人员按振点间距不超过振捣器作用半径1.5倍这一原则布点,单点振捣时长要控制在20秒到30秒,让混凝土内部气泡充分排出,特别要对腹板、横梁和锚固区等应力集中处重点振捣,防止出现蜂窝、麻面、孔洞等隐蔽缺陷。在温控与养护工作之中,监理工程师须依照大体积混凝土施工的特性,在关键梁段设置测温点,对混凝土内部和表面的温差予以动态监测,保证温差在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,避免因温度应力集中而出现早期裂缝。浇筑完毕后,监理得督促施工单位及时开展覆盖保湿与喷淋养护工作,让混凝土在早龄期一直湿润,确保水化反应均匀开展。

2.6 预应力施工监理

在预应力施工期间,监理工程师必须在设备、材料、工艺这三个方面,进行系统管控。核查千斤顶、油泵及压力表的标定状态,确保张拉设备计量误差不超过1%,避免设备失准引发实际张拉力偏离设计值,进而造成结构隐患。要对钢绞线与锚具的外观质量、规格型号以及力学性能逐批验收,且严禁在施工时存在锈蚀、夹片损伤、型号混用等问题。在波纹管与钢束的安装期间,监理工程师应着重查看管道线形是否平顺、曲线过渡是否连续,然后开展通孔试验,保证孔道里没堵塞、没变形,给后续张拉压浆提供畅通的通道。在张拉工序开始之前,监理人员需要确认混凝土的强度及龄期已符合设计要求,并且完成孔道清理及端部封闭等准备工作,方可进行签认进入正式的张拉工序^[6]。张拉时要实行张拉力和伸长量双控原则,监理必须实时记录各级张拉数据,把实测伸长量和理论值进行对比,保证张拉力误差在 $\pm 5\%$ 以内,伸长量偏差不得超过6%。若是伸长量有异常、滑丝或者断丝的情况出现,就应立即暂停作业,然后组织技术复核,防止预应力损失进一步增大。压浆工序是保障预应力筋长期防腐且受

力稳定的重要环节,监理工程师应重点检查浆体配合比、流动度和稳压时间,督促施工单位按工艺要求完成排气、稳压和封锚处理,确保孔道饱满密实,防止形成空洞或离析区域。

2.7 施工资料管理

监理工程师应将资料管理作为施工质量控制体系的组成部分,在施工全过程中建立实体、数据、记录一一对应的质量档案体系。地基承载力检测成果、支架预压沉降记录、模板测量复核数据、钢筋隐蔽验收单、混凝土试验报告、张拉压浆原始记录等资料,均应与对应梁段、工序时间和责任主体明确关联,确保任何一个构件都具有可核查、可追溯的技术依据^[7]。当现场出现沉降异常、线形偏差、伸长量异常或混凝土表观缺陷等问题时,监理工程师应同步形成整改通知单、技术处理单和复验记录,将整改前后的关键数据纳入原有档案体系,构成问题闭环链条,为桥梁运营阶段的检测评估、病害分析和养护决策提供可靠的数据基础。

3 结束语

预应力现浇箱梁施工质量的形成并非单一工序决定,而是地基处理、支架搭设、模板钢筋安装、混凝土浇筑、预应力张拉压浆等多环节协同作用的结果。监理工作只有嵌入施工全过程,才能真正发挥风险预控与质量保障的技术价值,从而有效降低施工阶段的结构变形、裂缝及预应力损失风险,显著提升现浇箱梁成桥质量稳定性。相关监理分析结论对同类型桥梁工程具有良好的推广意义,可为后续工程监理精细化管理提供有益参考。

参考文献:

- [1] 范大伟.预应力现浇箱梁的施工监理技术[J].大众标准化,2025(06):51-53.
- [2] 胡红波,林胜凯.洪都高架工程重难点监管管控技术措施的研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(09):145-147.
- [3] 叶中华.浅谈钢箱梁施工监理质量控制要点[J].建设监理,2023(07):38-39,67.
- [4] 薛东起.桥梁现浇箱梁后张法预应力混凝土施工中的工程监理问题研究[J].交通世界,2021(19):165-166.
- [5] 郭克晶.连续箱梁挂篮施工监理控制要点[J].建材与装饰,2020(15):15,17.
- [6] 唐德宏.现浇连续箱梁施工质量监理分析[J].建材与装饰,2020(15):213,217.
- [7] 范彼.市政桥梁现浇箱梁后张法预应力混凝土施工监理控制[J].建材与装饰,2020(10):256-257.

高速公路路基防护施工技术分析

吴 侠

(中铁二十三局集团第三工程有限公司, 四川 成都 610072)

摘 要 随着高速公路建设规模的不断扩大, 路基工程的结构复杂性日益提升, 对施工安全也提出了更高要求。本文着重探讨了清云高速公路路基防护施工方面的技术措施, 通过对不同类型路基防护要求进行分析, 提出了对应的施工技术方案, 以期为促进高速公路施工提供有益参考。实践表明, 清云高速公路路基防护施工中运用多种防护措施, 如填方路堤喷播植草、骨架植草、浆砌片石护坡等, 结合生态恢复与景观美化要求, 最大程度地减少传统防护措施的应用, 提高边坡生态效益。挖方路堑防护依据土质和岩质情况, 采用植草、防护墙、锚杆框架梁等技术, 以保证施工的安全、环保。清云高速公路借助多项技术综合运用, 高效地完成了路基防护施工。

关键词 清云高速; 路基防护; 填方路堤; 挖方路堑

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.029

0 引言

交通运输业快速发展的同时, 高速公路建设也面临着越来越多的工程技术难题, 路基防护施工尤为突出。路基防护不仅与道路的长期稳定性、安全性息息相关, 甚至关系到环境保护。在清云高速公路的建设之中, 路基防护施工技术对诸多技术手段加以集成, 如土壤加固、植被恢复、结构防护等方面均已涵盖。清云高速公路路基防护施工中, 应用了各种创新技术、生态防护手段, 提高了边坡的稳定性, 有效减少水土流失, 保护了生态环境。因此, 分析清云高速路基防护施工技术, 有益于推动高速公路建设的科技进步, 为高速公路路基防护施工积累经验。

1 工程概况

清云高速公路 TJ12 合同起始号桩号为 K16+30 至 K123+40, 路线全长达 7.287 km, 途经都杨镇, 主要控制性工程项目包含将军山隧道 1 座 (单洞 1 835 m)、梅坑大桥与格塘大桥等桥梁工程, 主线桥梁总长为 890.7 m/3 座, 桥梁总长 961.36 m/4 座, 且设置都杨互通 1 处。本合同段路基工程分布、类型复杂, 主线路基占路线总长的 63%, 共 2 963.5 m, 受 3 个桥梁和 1 个隧道分隔, 形成多段施工单元。结合土石方调配与现场管理需求, 将路基划分为起点至将军山隧道进口、梅坑大桥至格塘大桥、格塘大桥至都杨互通、都杨互通至终点四个施工段。路基工程量大, 挖方以利用土石方为主, 挖弃土方 196 124 m³、挖利用土方 1 627 268 m³, 挖弃石方 50 853 m³、挖利用石方 208

709 m³; 填筑工程中利用土方 1 200 719 m³、利用石方 226 846 m³, 并配套台背回填 47 599.45 m³ 及锥坡填土 6 600.6 m³。工程同时包含双向格栅 194 529 m²、换填石屑 46 882 m³ 等特殊地基处理措施, 以及 359 137 m² 喷播草灌护坡、10 093 m³ 骨架浆砌片石护坡和 5 334.4 m³ 混凝土挡土墙等防护结构。受桥隧交叉、软基处理和高填深挖段落集中影响, 路基施工组织协调难度较大, 深路堑最高边坡达 59.1 m, 高填路基最高达 28.1 m。

2 路基防护施工技术

2.1 填方路堤边坡防护施工

2.1.1 防护要求

填方路堤的边坡防护设计需要根据路基边坡的高度、地质条件及水文条件来选择合适的防护形式^[1]。对于高度不超过 6 m 的边坡, 主要采用喷播植草防护 (见图 1)。该种防护方式成本较低, 施工简单, 且具有良好的生态效果, 通过喷播草种、覆盖土壤表面, 草根可扎根固定土层, 防止水土流失。

对于高度在 6~8 m 之间的边坡, 采用骨架植草防护, 骨架结构可以增强边坡的稳定性。骨架植草防护一般采用钢筋混凝土或钢结构骨架, 主骨架净距一般为 4 m, 确保草种覆盖面积足够, 骨架也能提供稳固的支撑。

对于填方高度超过 8 m 的路堤边坡, 防护形式的选取需结合填土自重、坡面附加荷载及潜在滑动面的受力特征进行综合分析。根据施工组织设计及现场地

作者简介: 吴侠 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程。

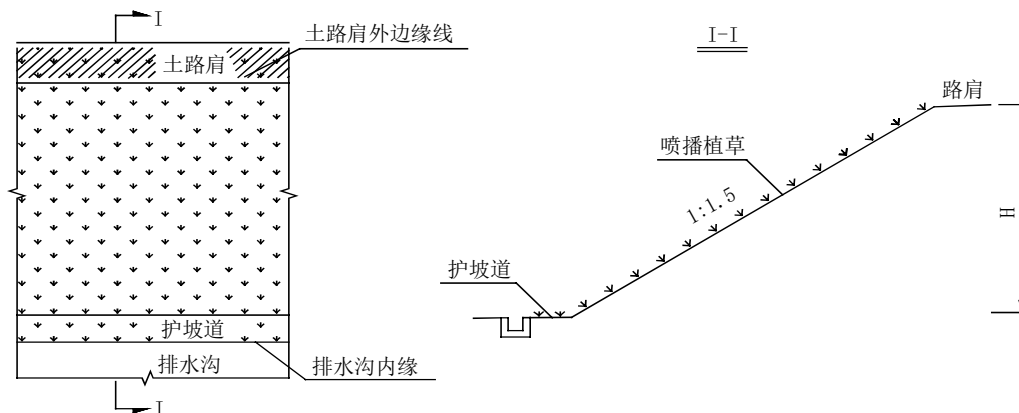


图1 喷播植草防护图

质条件，高填路堤填料以土石混填为主，其单位体积重约为 $18 \sim 20 \text{ kN/m}^3$ ，在重力作用下边坡内部易形成以坡脚为控制点的圆弧滑动趋势。通过分级放坡与设置平台，可有效降低单级边坡高度，减少滑体自重产生的下滑力矩，使坡体稳定安全系数显著提高。分级边坡长度控制在 2.5 m 以内，可使坡面法向应力重新分布，减小坡脚集中剪应力。同时，在平台位置设置检查踏步并兼作急流槽，有利于迅速排除坡面径流，降低雨水入渗引起的孔隙水压力，从受力机理上削弱滑动面的不利工况，提升高填路堤边坡整体稳定性。

2.1.2 施工工艺与材料控制

在填方路堤边坡防护的施工过程中，骨架植草的工艺要求必须严格控制。骨架植草的设计净距为 4 m ，骨架的稳固性直接关系到植草效果，因此骨架的材料选择至关重要。常见的骨架材料有钢筋混凝土和钢结构，材料选择要确保强度高、耐久性强，能够经受住风雨侵蚀^[2]。施工时，应在各级别边坡上设置检查踏步，检查踏步不仅有益于后期维护检查还有助于急流槽使排水，防止水流冲刷边坡。浆砌片石是常见防护材料，尤其在护脚和护肩施工时，用 M7.5 浆砌片石，其砌体强度高，施工方便。浆砌片石表面以 C25 砼预制块镶面，能增加防护的坚固性，防止石材被风化或其他外力破坏。施工期间，砂浆使用须饱满，缝隙应错开，避免出现空隙或通缝，以保障整体结构完整。操作过程中，选择立杆挂线以保证线形平顺，施工时砌体的平整度也得以保证。

同时，在骨架植草和浆砌片石护坡施工过程中，还应重视施工过程中的质量控制。施工单位在施工前应对基底进行清理和整平，确保坡面稳定、无松散土体，以保证防护结构与坡体紧密结合。在骨架结构浇筑完成后，应及时进行养护处理，避免混凝土在早期出现

开裂或强度不足的情况。对于浆砌片石护坡，应严格控制石料尺寸及摆放方式，使石料相互咬合、结构稳定，从而提升整体防护效果。此外，在边坡施工过程中还应同步设置临时排水措施，避免雨水直接冲刷未完成的坡面结构，以减少施工期间边坡失稳的风险。

2.1.3 特殊路段防护

对于路堤边坡中的浸水区域、桥台锥坡等特殊路段，防护措施应做到更精细。针对水浸润的路堤边坡，采用 30 cm 厚的 M7.5 混凝土砂浆砌片石加以防护，以阻止被水流侵蚀，保障边坡免受水流直接冲击，维持土壤稳定^[3]。桥台锥坡的防护应采用预制六棱块，既方便了施工，又可提供较高的抗压强度，保障桥台稳定性。在桥头路段设置检查踏步，既方便日常检查，又能充当急流槽，可有效助排水，防止水流集中桥面，导致桥台不稳定。对于受地形地貌影响的路段，尤其填方路基较薄路段，应采用护肩、护脚或挡墙来压缩坡脚，以减少坡脚的松动与滑移，提升边坡稳定性。

2.2 挖方路堑边坡防护

2.2.1 土质或类土质路堑边坡防护

对土质或类土质挖方路堑边坡，防护施工首要任务是保证边坡稳定，应尽量采用生态化防护措施，以减少圬工防护工程量，让边坡景观与周边环境相协调。当路堑边坡高度不超过 6 m 时，以植草防护为主要防护形式。植草防护方法简单，施工方便，生态效果较好，把草种覆盖在边坡表面，草根可有效固定土壤，防止水土流失。土质路堑边坡高度超过 6 m 时，应采用骨架植草防护。此方法可增强边坡稳定性，提供足够支撑力，利于草种生长并固定土壤。骨架植草施工应先设置钢结构或混凝土骨架，然后把草种和土壤覆盖在骨架上，保障草种与土壤紧密相连，提高防护效果^[4]。骨架设计规定主骨架净距通常为 4 m ，且需在各边坡平

台处检查踏步,以满足日常检查及排水需求。这类防护主要应用于高土质边坡,可有效防止雨水冲刷导致的土壤滑坡。

2.2.2 岩质路堑边坡防护

岩质路堑边坡防护,应考虑岩层产状、节理裂隙发育状况及水文地质条件。在强风化花岗岩等岩质路边坡,必须依据具体坡率、岩石风化程度及冲刷风险决定。若边坡坡率不陡于 1:1,可采用骨架植草防护法,在边坡上设置骨架结构,使其具备支撑作用,在骨架内部种植草皮,靠草根固定增强土壤稳定性。其他强风化岩段、中风化岩质边坡,客土喷播植草防护是首选。客土喷播时,要将改良土壤喷洒在边坡表面,养护后草种可在此处生长,形成有效的植被覆盖层,防止水流冲刷,使边坡土层保持稳定。岩质边坡若出现小规模崩塌、碎落等不稳定状况,需采用锚杆框架梁植草进行防护。锚杆框架梁把锚杆打入岩体后,再靠钢筋框架加固边坡,最后与植草层整合起来,形成一道强大的防护屏障,防岩块滑落、崩塌。

2.2.3 深路堑边坡防护

深路堑边坡高度若超 20 m,防护施工就必须依据工点的实际情况来专门处理。在这种情形下,边坡防护的主因是确保大规模采挖后边坡的稳定,防止大气降水、地下水渗透、风化等自然因素对边坡造成过大影响。深路堑边坡的防护,一般会采用更精细的施工方,如分级边坡设计、加固结构以及完善的排水系统^[5]。在防护方式的选取上,一般会依照岩质和土质路的特性,采用骨架植草、防护墙及喷播植草等综合防护手段。特别深且稳定性不佳的路堑,应采用锚杆支护或钢架结构支撑加固措施来强化边坡稳定性。深路堑边坡防护施工中,工程技术必须精细,而且应配合施工现场的水文地质条件来实时监测,保证防护措施在施工全时段和后期运营时有效。施工管理应确保土石方及时调配并实施分段作业,以降低对周边环境的影响,保障工程顺利开展。

2.2.4 路基防护结构受力分析与稳定性验算原则

清云高速公路 T12 合同段路基工程中的高填、深挖段落较为集中,边坡高度大,工作状况复杂,路基防护结构选型与施工安排不能仅依经验,还必须依据边坡受力状况及稳定性验算来确定。在施工组织设计阶段,针对不同类型的路基边坡,以及岩土体自重、坡面附加荷载、地下水及降雨入渗等不利情况,对潜在滑动面进行稳定性分析,进而确定相应的防护形式与结构参数。

对于高填路堤边坡,主要受力特征为填土自重造

成的下滑力和坡脚区域剪切破坏风险。对填筑高度超 12 m 的路段进行稳定性判别,采用放坡分级与平台设置的方法,降低单级滑体高度,减小滑动力矩,提升整体抗滑安全系数。在此基础上,对骨架植草、防护墙或护脚结构加以配置,让坡面荷载能分散传递,形成由坡体自稳与结构约束共同承担的受力体系。

挖方路堑与深路堑边坡开挖后,原应力平衡被破坏,边坡稳定性主要靠岩土体抗剪强度和节理裂隙发育程度控制。深挖路段最大边坡高度达 59 m,施工时遵循“分级开挖、分期支护”原则,采用锚杆、锚索及框架梁等加固手段,对潜在滑动体实施受力约束。锚杆与锚索把滑动体和后方稳定岩体连接起来,以承担主要的拉力作用,框架梁可用来分配坡面荷载、限制局部变形,从受力方面改善了边坡的整体稳定性^[6]。

在挡土墙与护脚等防护结构设计及施工时,要重点校核其抗滑、抗倾覆以及地基承载力。要确保在长远荷载与不利水文状况下,结构能一直稳定工作,就必须靠结构自重以及基底摩擦力来抵抗填土侧向压力,防护结构设置位置和规模应依据现场地形、填挖状况及稳定性计算结果综合判定。

3 结束语

清云高速公路路基防护施工技术以综合性、生态化为特色,通过多层次、多手段的防护方案,有效应对不同地质条件和复杂的气候环境。施工中不仅考虑到安全稳定,还注重对环境的影响,确保生态系统得以恢复并强化保护。通过合理选择防护形式和施工工艺,保证工程质量的同时可提升公路沿线的生态环境质量。未来,随着环保要求的不断提升,路基防护施工技术将继续朝着绿色、可持续发展的方向发展,推动高速公路建设在环境保护方面的创新发展。

参考文献:

- [1] 胡莉.影响高速公路路基防护质量关键因素及解决措施[J].产品可靠性报告,2025(12):68-69.
- [2] 徐正.高速公路高填路基及边坡防护施工技术探讨[J].交通科技与管理,2025,06(07):152-154.
- [3] 张梦柯.高速公路路基边坡防护及支护施工技术研究[J].工程建设与设计,2025(06):184-186.
- [4] 王军.高速公路路基高边坡防护施工技术研究[J].运输经理世界,2024(28):47-49.
- [5] 李锦.高速公路路基防护与加固处理技术研究[J].汽车周刊,2024(10):255-257.
- [6] 赵丽.高速公路路基防护的施工技术探讨[J].交通科技与管理,2024,05(16):150-152.

建筑施工管理的影响因素与对策研究

李蕊

(甘肃盛世龙腾电子科技有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要 随着我国城镇化的持续推进, 建筑行业也迎来了新的发展机遇, 不同类型的建筑工程项目数量在不断增加, 施工规模逐渐扩大, 施工难度也不断提升。建筑施工管理是工程实施中的核心环节, 决定了最终的工程质量及施工安全, 更是保障建筑工程未来可持续发展的重要支撑。本文基于当下建筑工程施工管理影响因素深入探索, 提出针对性改进措施, 旨在为提高建筑施工企业管理水平提供有益参考。

关键词 建筑施工管理; 人员管理; 材料管理; 管理体系

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.030

0 引言

建筑行业是我国经济发展的重要支柱产业, 发展的质量关系到国民经济的稳定进步以及人民群众的生命财产安全。建筑施工管理贯穿工程全过程, 涵盖质量、安全、进度等各个管理维度, 具有复杂性、综合性以及动态化特点。在实施项目工程中, 施工管理工作的效果直接影响工程整体效益, 高效的施工管理能够优化资源配置和施工流程, 规避施工风险。

1 建筑施工管理的重要意义

1.1 确保工程质量合格

对于建筑工程项目本身来说, 科学高效的施工管理可以保障最终工程建设质量, 建筑工程质量也关系到人民群众的生命财产安全。落实严格有效的质量管控, 可以规避各种工程质量隐患, 能够保证工程项目符合设计要求, 具有完善的使用功能, 进而延长使用寿命。除此之外, 施工管理还能够尽量防范各方面安全风险, 在施工中涉及高空作业、临时用电以及动火作业等一些风险较高的环节, 这些环节都需要较为完善的安全管理体系以及更加严格的管控措施, 进而有效规范施工人员操作行为, 排查各种安全隐患, 杜绝安全事故^[1]。施工管理还能够保证工程项目按照预期时间竣工交付, 制定更加完善的进度计划, 安排施工顺序, 优化资源配置, 可以尽量规避这些进度滞后的问题, 进而保障建设单位按时使用工程项目, 也能够尽量避免因为进度滞后而产生的经济损失。

1.2 决定企业的核心竞争力

对于施工企业的发展来说, 施工管理水平的高低决定了企业核心竞争能力, 面对激烈的市场竞争, 企

业想要占据优势, 立足市场发展, 就需要逐渐提高施工管理水平。当下要逐渐优化管理流程, 减少施工成本, 还要提高施工质量, 保证施工效率, 有效提高企业的市场竞争力。与此同时, 高效良好的施工管理还能够塑造企业积极的品牌形象, 减少质量事故以及安全事故, 也能够进一步加强建设单位, 还有社会各界对于企业的认可, 为企业赢得更多发展机遇, 帮助企业占据更多市场份额。完善的施工管理还能够进一步规范企业日常的运营管理, 保证企业获取的经济效益以及管理工作的开展效率, 进而促使企业达到可持续发展目标。

1.3 推动行业高质量发展

对建筑行业的发展来说, 施工管理水平的全方位提升, 能够推动行业达到高质量发展的目标^[2]。当下, 我国建筑行业正处于转型升级的关键时期, 从以往粗放式的发展向精细化以及标准化的发展转变, 而施工管理是达到这一转变目标的核心抓手。通过快速提高施工管理水平可以逐渐规范市场秩序, 也能够尽量减少行业内的恶性竞争, 有序推动行业技术进步, 加强管理创新, 进而促使建筑行业与绿色建筑、智能建筑等各个新兴领域深层次融合, 实现建筑行业的可持续发展, 也能够为我国经济的增长提供更多支持。

2 建筑施工管理的主要影响因素

建筑施工管理在推进过程当中受到各种因素的影响, 需要尽量结合施工实际情况, 梳理影响的具体因素, 各因素都直接作用于施工全流程, 也会对最终管理的成效造成影响。

作者简介: 李蕊(1981-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

2.1 人员因素

人员是施工管理工作推进的核心主体，也直接决定最终管理效果，管理人员自身的专业素质不足，也欠缺丰富的管理经验，无法熟练掌握施工规范以及具体的流程，所以无法制定较为合理科学的管理方案，并且还有一部分工作人员自身的责任意识淡薄，在现场没有落实严格有效地管控工作。这些技术人员能力欠缺，技术交底不准确，因此无法顺利解决施工中面临的各种复杂技术问题，质量检测把关不严格。施工人员以农民工为主，整体素质相对较差，也没有系统完善的培训，操作推进并不规范，安全意识淡薄，经常有违规操作的情况，还会出现偷工减料，这直接影响工程最终质量、施工整体安全以及施工进度，是最为关键的影响因素之一。

2.2 材料因素

材料是施工开展的重要物质基础，材料的质量以及对材料的管理水平关联最终工程的整体质量以及施工整体成本^[3]。一些施工企业为了能够减少成本消耗，在施工中违规应用一些劣质的材料，并且没有进行材料检验，导致大量不符合规范要求材料进入施工现场，留下了严重质量隐患。材料采购和管理工作不规范，供应商筛选并不严格，采购的具体流程也非常混乱，很容易出现材料短缺，货物积压的情况，这也导致成本和进度风险持续增加，仓储保管措施落实不到位，材料受潮和变质损坏，这些问题频频出现，也造成了严重的浪费。除此之外，材料规格和设计要求两者存在矛盾，就需要进一步采购或返工，这也会延误施工进度，导致最终成本消耗持续提升。

2.3 技术因素

技术是施工管理的主要支撑，技术水平会对最终的施工效率和质量造成影响，很多企业在施工中仍然沿用以往传统的施工技术，这些工艺技术非常落后，施工效率较低，并且质量控制的难度较大，自然无法适应现代化工程需求，技术交底不规范也不全面。一些施工人员无法精准掌握技术要点，也无法达到相应质量要求，很容易出现操作失误。企业的技术创新能力较差，对于新的技术以及新的材料，包括新的工艺的引进与应用不够，质量检测技术落后，设备陈旧，检测人员自身的专业能力较差，也经常出现漏检、误检的现象，无法第一时间发现这些质量隐患。

2.4 管理体系因素

完善高效的管理体系是管理工作顺利推进的重要保障。一些施工企业的管理制度并不完善，缺乏针对

性以及系统性，其中涵盖质量、安全、进度等多个维度，这些维度的管控标准也不明确，并且这些制度流于形式，执行并不到位。管理机构不健全，部门设置安排也不合理，各个岗位的具体职责相对模糊，没有充足的人员配备，多个部门之间没有顺畅地沟通协调，经常出现推诿扯皮的现象，自然无法形成管理合力。在综合管理模式落后的情况下，很多工作人员缺乏精细化管理意识，无法充分利用信息化技术，对施工全过程动态化管控不足，整体管理效率较低，无法满足施工设计需求。

3 优化建筑施工管理的针对性对策

针对上述分析的四方影响因素，需要有效结合建筑施工管理的具体情况，针对性地提出优化对策，旨在完善施工管理体系，有效提高整体管理水平，确保工程项目顺利实施，以期借此推动建筑行业的高质量发展^[4]。

3.1 强化人员管理，提升人员整体素质

人员才是施工管理的核心，提高人员整体素质是优化管理效果的关键。首先要加强管理人员的队伍建设，要形成更加完善的选拔培养及考核机制，主动选拔出专业素质更高、责任意识更强的优秀管理人员。也要定期组织这些管理人员学习施工规范以及新的技术工艺和管理方法，将管理成效与薪酬以及晋升紧密联系，强化管理人员的责任意识以及创新能力。其次要培养技术人员的专业能力，提高人才引进力度，定期展开技术培训，建立考核机制，确保技术交底以及质量检测等各项工作规范到位，解决施工现场的复杂技术问题。最后要规范施工人员的具体管理，建立系统岗前和在岗培训体系，给工作人员讲解操作技能以及安全规范，推进安全警示教育，完善管理制度。要将施工质量和安全操作以及薪酬挂钩，杜绝违规行为，同时还要持续改善作业生活环境，以更高的薪酬待遇加强施工人员的归属感，尽量减少人员流失情况。整体要形成分层分类以及全员覆盖的人员管理体系，也能够借此破解人员素质参差不齐的问题。

3.2 规范材料管理，保障材料质量与供应

材料也是施工开展的物质基础，规范材料管理是保障质量，控制最终成本，推进施工进度的核心。一是要严格把控材料的质量关，要建立更加完善的采购制度，主动筛选资质齐全以及信誉良好的供应商，也要签订正式采购合同，明确这些施工材料的质量标准。在材料采购过程当中加强监督，尽量杜绝各种暗箱操作。还要建立严格的材料检验制度，配备更加专业的

人员及先进设备,全方位检验进场的施工材料,不合格的材料一定要杜绝进入施工现场,并且还需要主动追究各方责任。二是优化采购及仓储管理,要结合施工进度,制定完善合理的采购计划,尽量避免出现材料短缺或积压的情况,确保这些施工材料按时进入施工现场。在材料管理中也要合理规划材料堆放场地,分类存放,并且还需要针对性采取防护措施,防止材料损坏。对于每个环节的施工,要主动建立限额领用制度,加强仓储和领用监督,盘点工作落实到位,确保账目符实。三是规范材料使用强化技术交底,明确使用要求,要规避随意更换材料规格的情况,同时还要加强现场的监督。对于因使用不当而导致出现的质量问题要第一时间返工,并且做好追责。除此之外,还需要加强和供应商的沟通联系,保证所用材料符合设计要求。

3.3 提升技术水平,强化技术创新与应用

技术是施工管理的主要支撑,提高技术水平和强化技术的创新应用是保障管理效能的关键^[5]。一是要更新施工技术工艺,尽量摒弃传统落后的工艺,积极引进装配式建筑、绿色建筑等新的技术以及新材料、新工艺,发挥高效优质以及低成本、低风险等各方面优势。还要强化施工技术研发以及技术攻关,结合实际情况解决复杂技术难题,定期组织工作人员学习新的技术,确保工作人员能够熟练掌握应用。二是要规范技术交底工作,健全完善交底制度,明确流程内容以及主要要求,落实分层次交底,确保每位施工人员都能够充分掌握技术要点以及质量要求,包括安全注意事项。可以通过书面形式以及签约存档的方式进行交底,技术人员在施工现场还需要加强指导,及时纠正各种不规范操作。三是要强化技术创新,加强质量检测,创新投入要逐渐提高,主动组建一支专业优秀的创新团队。还需加强和科研机构的合作交流,鼓励全体工作人员参与创新,并且给予这些工作人员更多表彰与奖励。质量检测体系的完善和落实也非常重要,要配备更多专业的先进设备,安排专业工作人员,规范检测流程,强化检测人员培训考核,尽量杜绝漏检和误检的情况,并且还需要及时整改各种质量隐患,确保工程质量达标。

3.4 完善管理体系,提升管理规范化水平

完善高效的管理体系,是施工管理工作有序推进的保障重点。从制度、机构和模式这三个方面出发进行优化:首先要健全施工管理制度,结合企业的实际情况,包括项目具体特点,主动建立涵盖质量、安全以及进度、成本等全维度的管理制度,明确具体管理流程,包括各方面标准,增强管理工作开展的针

对性以及管理的可操作性。定期修订管理制度,还要强化制度执行和监督考核,对各种违规行为要严肃追责,确保制度落地见效。其次要逐渐完善管理机构设置,结合实际管理需求,合理划分多个部门,明确不同管理岗位的具体职责,配备更多充足的管理人员,避免出现职责不清和推诿扯皮的情况。还要主动建立部门间的沟通协调机制,加强各部门的协调配合,从而形成管理工作开展合力。需设置专门的质量管理部门及安全管理部门,定期组织这些部门召开沟通协调会议,及时解决管理工作中各项难题。最后要逐渐创新优化施工管理模式,主动摒弃以往粗放式的管理模式,树立精细化管理理念,引进全面质量管理与精益管理等先进的管理理念。除此以外,还要持续推进信息化建设,引入BIM技术与智慧工地等各种先进管理系统,实现施工现场的实时监控,加强对施工整个过程的动态化管理,进而有效提高决策开展科学性以及决策及时性,持续优化管理流程,提高最终管理效率,进而保障管理效果。

4 结束语

建筑施工管理是建筑工程项目的核心环节,直接决定了工程质量以及施工安全,对施工企业未来的发展和建筑行业高效进步具有关键意义。随着我国建筑业的发展和转型升级,建筑施工管理会面临更多新的发展机遇,也会面临更多的发展挑战。未来,新技术、新材料和新工艺会不断发展创新及应用,建筑施工领域中信息化和智能化技术也在不断深度融合,建筑施工管理整体朝着精细化、信息化和智能化的方向发展。施工企业应该主动适应行业发展趋势,不断创新施工管理理念,优化管理方法,强化技术创新,加强人才培养,进而完善管理体系。我国建筑行业的管理水平会不断提高,行业也会朝着更加健康可持续的方向不断进步。

参考文献:

- [1] 谢林宏. 建筑工程施工管理的影响因素及解决对策[J]. 散装水泥, 2025(06):210-212.
- [2] 唐文世. 建筑工程施工管理的影响因素及解决对策[J]. 全面腐蚀控制, 2025,39(10):230-232.
- [3] 周强民, 徐云. 建筑工程施工管理的影响因素与对策研究[J]. 陶瓷, 2025(04):215-217.
- [4] 马勇, 赵建兵. 建筑工程施工管理的影响因素及解决对策[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(16):139-141.
- [5] 胡桂兰. 建筑工程施工质量影响因素及管理对策分析[J]. 房地产世界, 2024(15):83-85.

航站楼工程管理的核心内涵与关键要素

漆政亮

(东部机场集团南京禄口国际机场, 江苏 南京 210000)

摘要 航站楼作为航空运输体系的核心枢纽, 其工程建设具有规模大、技术复杂、多方参与、功能多元等显著特征, 工程管理水平直接决定项目建设质量、效率与运营效能。本文基于航站楼工程建设的特殊性, 系统剖析工程管理全生命周期管控、多目标协同、多方协同的核心内涵, 重点梳理设计管理、质量与安全管理、进度与成本管理等相关要素, 结合行业发展趋势提出健全管理体系、强化团队建设、推进数字化应用等实践保障建议, 并辅以相关图表明晰逻辑关系, 以期提升航站楼工程管理水平、实现建设与运营高质量衔接提供参考。

关键词 航站楼工程管理; 全生命周期; 设计管理; 协同管理; 运维前置管理

中图分类号: V35

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.031

0 引言

随着航空运输业的快速发展, 航站楼作为集交通换乘、商业服务、安全检查等多功能于一体的综合性建筑, 其建设规模与技术难度不断提升。相较于普通建筑工程, 航站楼工程不仅要求满足基本的结构安全与使用功能, 还需兼顾运营效率、服务体验、绿色节能、智能便捷等多重目标, 这对工程管理提出了更高要求。部分航站楼工程建设阶段出现功能设计偏离运营需求、多方协作受阻、进度成本不匹配等问题, 影响项目建设质量和后续运营效能。深挖航站楼工程管理的核心要义, 分析关键管理要素, 建立科学高效的管理体系, 能为航站楼工程高质量建设提供重要助力。本文结合航站楼工程建设特性, 聚焦管理内涵、关键要素及实践保障开展深度探究, 以期相关人员提供有益参考。

1 航站楼工程管理的核心内涵

1.1 全生命周期管控的系统性内涵

全生命周期的统筹管控, 就是航站楼工程管理系统性核心的体现, 覆盖项目策划、设计、施工、验收、运维等全流程环节, 各阶段紧密相连、相互衔接, 要构建闭环管理体系, 和普通工程不一样, 它不聚焦施工阶段管理, 航站楼工程需在项目策划阶段统筹兼顾运营需求, 把运维理念前置加入设计和施工环节, 实现建设和运营的无缝衔接。设计阶段需提前规划行李输送系统、旅客引导系统的布局与技术参数, 施工阶段需保证相关系统安装和主体结构建设协同开展, 验收阶段要配合运营单位开展功能调试, 保障项目交付

后可快速匹配运营需求, 全生命周期管控需破除各阶段的管理障碍, 达成信息共享与流程协同, 强化项目整体建设和运营成效^[1]。

1.2 多目标协同的综合性内涵

航站楼工程管理带有鲜明的多目标协同特质, 要在结构安全、功能适配、建设质量、施工进度、投资成本、绿色节能、智能便捷等多重目标间达成平衡, 结构安全和建设质量为工程的核心准则, 功能适配是支撑运营服务的核心基础, 进度和成本管控直接关乎项目经济效益, 现代航站楼以绿色和智能为发展指引。这些目标既有关联, 也相互约束, 太看重施工进度易有质量隐患, 随意压缩成本会波及功能配置和材料品质, 航站楼工程管理应构建综合管控观念, 依靠科学的管理方法和技术手段, 协调各目标的彼此关系, 实现“安全、优质、高效、经济、绿色、智能”的综合建设任务, 各目标的协同关系详见表 1。

从表 1 可得, 航站楼工程管理各目标彼此支撑、彼此约束, 结成有机整体, 安全与质量是绝对不可逾越的核心准则, 功能适配是项目建设的核心方向, 进度和成本要实现动态平衡, 绿色和智能是现代化航站楼的关键升级方向。

1.3 多方协同的复杂性内涵

航站楼工程建设牵涉多个参与主体, 涉及建设单位、设计单位、施工单位、监理单位、勘察单位、设备供应商、运营单位及政府监管部门等, 不同参与方的职责与诉求有区别, 让管理协同复杂度偏高, 建设

作者简介: 漆政亮 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程管理。

表1 航站楼工程管理多目标协同关系表

目标类型	核心内涵	与其他目标的关联
安全与质量	保障工程结构稳定、使用安全，符合质量验收标准	核心基础，为其他目标实现提供前提保障
功能适配	满足旅客出行、运营服务等核心使用需求	核心需求，决定项目建设方向，引导其他目标配置
进度与成本	合理控制建设周期与投资规模，提升经济效益	效益保障，需在安全质量前提下实现动态平衡
绿色与智能	践行节能环保理念，提升智能化运营服务水平	提升维度，与其他目标协同助力高质量发展

单位牵头统筹协调项目，设计单位落实功能与技术设计事项，施工单位承担工程实体建设，监理单位把控建设质量和进度，运营单位提交运营需求反馈，政府监管部门主管监督管理工作。多方协同的核心是搭建高效的沟通协调机制，界定各参与方的职责边界，调和利益矛盾，凝聚建设力量，设计阶段需推进设计与运营单位深度协作对接，保证设计方案契合运营需求；施工阶段需统筹施工单位与设备供应商的进度衔接，保障设备安装和施工工序齐头并进。

2 航站楼工程管理的关键要素

2.1 设计管理：功能适配和技术创新的核心依托

设计管理为航站楼工程管理的首要环节，直接划定项目的功能定位、技术路线与建设质量，核心要点分两部分：一是功能适配设计，要结合航站楼的航线布局、旅客吞吐量、运营模式等要素，科学规划出发层、到达层、中转层的空间排布，合理调配值机柜台、安检通道、行李转盘、商业服务等功能区块，保障旅客流线和行李流线完全分隔，拉高运营效率 升级服务体验；二是技术创新实践，主动采用先进建筑技术和材料，诸如大跨度钢结构技术、绿色节能材料、智能建筑技术这类，增强工程结构安全性与耐久度，减少运营能耗，设计管理需抓好设计评审和变更管控，打造多专业协同设计体系，防止因设计缺陷造成工期延误和成本增加。

2.2 质量与安全管理：工程生命线防护

质量及安全管理是航站楼工程管理的核心要求，直接关乎旅客生命财产安全和工程使用寿命，质量管理模块，要搭建全流程质量管控体系，纳入原材料进场检验、施工工序质量控制、分项分部工程验收等环节，重点加大对大跨度结构施工、机电设备安装、装饰装修等关键环节的质量监管力度，严格执行质量验收规范，保障工程质量契合设计要求和相关规范。安全管理模块，要树立“安全第一、预防为主”的理念，构建齐全安全管理规范，抓实安全责任，做好施工现场安全防护与隐患排查，聚焦管控高空作业、深基坑施工、起重吊装等危险作业的安全风险，抓实施工人员安全

培训和教育，提升安全意识与应急处置本领，管控施工现场安全状态^[2]。

2.3 进度与成本管理：效率与效益的平衡抓手

进度与成本管理是实现航站楼工程经济效益的关键抓手，需在保障质量与安全的前提下，实现二者的动态平衡。进度管理方面，需结合项目规模与建设需求，制定科学合理的进度计划，明确各阶段的施工任务与时间节点，重点梳理关键线路与关键工序，加强进度动态监测与调整。针对航站楼工程施工工序复杂、交叉作业多的特点，需优化施工组织方案，协调各施工班组的作业衔接，避免工序冲突导致的进度延误。成本管理方面，需建立全生命周期成本管控体系，在项目策划阶段做好投资估算，设计阶段推行限额设计，施工阶段严格控制工程变更与现场签证，加强材料与设备采购成本管理，避免不必要的资金浪费。同时，通过动态成本分析，及时发现成本偏差并采取纠偏措施，确保项目投资控制在预算范围内。

2.4 协同管理：多方联动的关键保障

协同管理是破解航站楼工程多方参与、复杂管控难题的关键保障，需建立多层次、常态化的协同机制。一是建立多方协同沟通机制，定期召开协同会议，通报项目进展情况，协调解决建设过程中存在的问题，确保信息传递及时、准确；二是明确各参与方的职责边界与协同流程，制定协同管理细则，避免出现责任推诿与工作脱节现象；三是推动信息共享平台建设，整合设计、施工、监理、运营等各方信息资源，实现项目信息的集中管理与高效共享，提升协同管理效率。例如，通过协同平台实现设计图纸的在线评审与变更流转，缩短审批周期；实现施工进度与设备供应信息的实时同步，保障供应链稳定^[3]。

2.5 智能与绿色管理：现代化工程的关键指引

智能和绿色管理是契合现代建筑发展走向、优化航站楼工程品质的关键指引，智能管理模块，优先推广智能建筑技术应用，涉及智能安防系统、智能旅客引导系统、智能能耗监测系统、BIM技术应用等，依托

BIM 技术管控工程设计、施工、运维全流程的数字化全周期,升级设计精度提升施工效率;用智能安防系统对航站楼重点区域实施实时监控,筑牢运营安全防线;靠智能旅客引导系统提升旅客出行便捷度,绿色管理模块,落实绿色建筑理念,运用节能门窗、保温材料、太阳能光伏发电等绿色节能技术及产品,减少工程能耗与碳排放;强化施工现场扬尘、噪声、污水等污染管控,落实绿色施工;规范统筹绿化空间,升级航站楼生态环境水准。

2.6 运维前置管理:建设与运营的无缝衔接

运维前置管理是实现航站楼建设与运营无缝衔接的关键要素,核心在于将运营需求提前融入项目建设各阶段。在项目策划阶段,邀请运营单位参与项目论证,明确运营功能需求与管理标准;在设计阶段,组织运营单位开展设计方案评审,重点审核功能布局、设备配置、运维通道等是否符合运营需求;在施工阶段,运营单位提前介入施工现场,熟悉工程结构与设备安装情况,参与设备调试与验收工作;在项目验收阶段,制定针对性的验收标准,将运营功能符合性作为重要验收指标。通过运维前置管理,可有效避免建设与运营脱节问题,减少项目交付后的改造调整成本,提升运营初期的服务效能^[4]。

3 航站楼工程管理的实践保障建议

3.1 健全管理体系与制度建设

完备的管理体系与制度是保障航站楼工程管理工作有序开展根基,搭建全生命周期管理架构,明确项目各阶段如策划、设计、施工、验收、运维的管理目标、工作内容及流程规范,建立阶段衔接审核机制,设置专职衔接专员跟进各阶段交接工作,确保信息传递完整、责任划分清晰,达成各阶段无缝衔接及闭环管控;健全配套管理规章,涉及质量安全管理规程、进度成本管理方案、协同管理细则、设计变更管理规定等,界定清楚各参与方职责及权限,规整管理举措,引入动态调整机制,结合项目实施过程中的实际问题及行业政策更新,及时优化制度条款,提升制度适配性;构建考核评估体系,将管理成效同各参与方绩效相挂钩,增强管理积极性及执行力。

3.2 强化专业管理团队建设

航站楼工程管理复杂,对管理团队专业能力要求高,应组建一支由工程管理、设计、施工、监理、运营等多类别专业人才构成的管理团队,提高团队的综合把控能力,加强人才选拔与培养,招纳掌握大型工程项目管理经验的专业人士,重点吸纳具备弱电智能

化、机场不停航施工管理等专项能力的复合型人才,优化团队人才结构;按时开展业务培训,增强团队成员专业技能及管理水平;加强团队协作能力打造,利用团队建设活动、协同工作演练等途径,提高团队成员沟通协作水平,汇聚工作合力,建立常态化沟通例会制度,及时协调解决跨专业协作难题;邀约行业专家介入项目管理咨询,给项目建设给予专业技术支持^[5]。

3.3 推进数字化管理手段应用

数字化管理手段是增强航站楼工程管理效率及精度的重要依托,着重推动 BIM 技术、智慧工地平台、信息共享平台等数字化工具运用,运用 BIM 技术做到工程设计的可视化、协同化及精细化,开展多专业管线碰撞检测与施工模拟,提前规避设计缺陷与施工冲突,增进设计水准;通过智慧工地平台对施工现场实时监控、采集分析数据,实现质量安全隐患的自动预警与闭环整改,精准把控施工进度偏差,加强质量安全及进度把控;靠信息共享平台使各方信息高效流转及共享,增进协同管理效率,增强数字化技术应用培训效果,增强管理团队的数字化操作水平,使数字化管理手段充分发挥功效。

4 结束语

航站楼工程管理属于复杂综合的系统性工作,其核心内涵体现为全生命周期管控的系统性、多目标协同的综合性以及多方协同的复杂性。设计管理、质量与安全管理、进度和成本管理等关键要素相互关联、相互依托,一同决定项目建设质量与运营效率。在实践进程中,应通过健全管理体制、加强团队构建、推进数字化应用等保障手段,分析管理要点,解决管理难题。随着建筑技术与管理理念不断创新,航站楼工程管理将往数字化、智能化、绿色化方向发展,为航空运输业高质量发展提供更坚实的助力。

参考文献:

- [1] 丁小涵. 低碳理念下的航站楼建筑设计方法[J]. 智慧中国, 2024(04):68-70.
- [2] 朱子凡. 试析机场航站楼电气设计[J]. 中国高新科技, 2023(23):86-88.
- [3] 叶锋. 物联网技术在智慧机场航站楼中的应用[J]. 电子技术, 2023,52(07):58-60.
- [4] 罗俊良. 某机场航站楼施工关键技术与难点分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(03):102-104.
- [5] 蔡勇冬,熊炬原,过依婷,等. 基于航站楼不停航施工的技术要点与组织分析[J]. 民航管理, 2020(03):53-58.

水厂给排水施工的质量管控要点与优化措施

黄晨晨

(阜阳市阜水实业有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 本文聚焦水厂给排水施工中渗漏、精度偏差、隐蔽工程隐患等质量问题,以水厂给排水工程施工为研究对象,围绕材料设备、测量放线、关键工艺、隐蔽工程、施工缝接口五大核心环节,梳理各环节质量管控要点。结合工程实际工况,从全链条管控、技术赋能、流程优化、专项治理等维度提出针对性优化措施,构建覆盖施工全周期的质量管控体系,以期提升工程耐久性与运行稳定性提供有益参考,进而保障供水系统安全可靠运行。

关键词 水厂给排水施工; 质量管控; 隐蔽工程; 渗漏治理; 全周期管控

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.032

0 引言

水厂给排水工程是城镇供水系统的核心载体,其施工质量直接决定供水安全性、稳定性及工程耐久性,关乎民生保障与城市运行根基。当前,智慧水务建设提速,绿色施工与精细化管控成为行业发展主流,传统施工中渗漏、隐蔽工程隐患、精度偏差等问题愈发凸显,制约工程效能提升与行业高质量发展。立足水厂特殊工况与最新行业要求,聚焦材料设备、关键工艺、隐蔽工程等核心风险点,强化各环节质量管控。通过技术赋能与流程优化,构建全周期管控体系,对破解施工质量难点、筑牢供水安全防线具有重要的现实意义。

1 水厂给排水施工质量管控核心要点

1.1 材料与设备质量管控

材料与设备是工程质量根基,直接决定工程耐久性与运行稳定性。水厂给排水系统工况特殊,长期承受水压力、水质侵蚀等作用,材料与设备的质量缺陷会引发渗漏、运行故障等连锁问题,甚至缩短工程整体使用寿命。材料进场环节需执行严格检验与留样制度,逐批次核查规格参数、力学性能及出厂合格证明,重点把控管材、密封件等核心材料的抗腐蚀、抗老化能力,杜绝不合格材料流入施工环节^[1]。设备选型需精准适配水厂工艺需求,结合水处理量、水质标准等核心指标,筛选性能匹配、运行可靠的设备类型,同时严控设备出厂检测报告的完整性与真实性,核查关键部件的精度参数。设备安装前的调试校验不可忽视,对水泵、阀门等核心设备进行空载、负载测试,排查

部件松动、密封不严等初期质量隐患,确保设备安装后能快速适配施工进度,为后续系统试运行筑牢基础。

1.2 测量放线与标高精度管控

精准测量放线是施工的基准,直接关系到构筑物与管道安装是否符合规定。水厂给排水工程涉及大量管道铺设和构筑物浇筑,每个环节之间衔接的精度要求特别高,测量数据如果出现偏差,就会带来管道坡度误差、构筑物对接错位的情况,这会影响到给排水效率,甚至可能造成积水、渗漏等问题。测量工作需要使用高精度的全站仪、水准仪,还要定期校准,将校准数据和周期详细记录,保证工具精度满足施工规范。要严格按测量放线流程,先到现场踏勘定位,结合设计图纸上标出的坐标和标高,完成初步放线并做好记录,同时安排复核,防止单次测量的误差积累。对于地形复杂、构筑物多的区域,交叉点位的标高控制是关键,这类地方管线密布、构筑物高低交错,需要把测量节点分得更细,对管线交汇处、构筑物连接位置多做几次复核,明确每个点位允许的标高偏差范围。

1.3 关键施工工艺标准化管控

规范关键工序操作是根本,可以很好预防渗漏、结构不稳定等主要问题。水厂给排水工程关键工序包括管道铺设、构筑物浇灌、设备安装等,每一道工序的操作是否规范直接影响到工程质量。管道铺设要严格管理铺设坡度和连接质量,依据管材种类挑选科学的连接办法。钢管焊接要保证焊缝充实没有气泡,塑料管粘接要确认接口干净、粘接匀称,并且做好管道防腐工作,采用刷漆、包裹防腐层等途径,抵抗土

作者简介: 黄晨晨(1993-),女,本科,工程师,研究方向:给排水施工。

壤侵蚀和水质腐蚀。构筑物浇灌重点掌握防渗和保养工序,模板装设要确认牢固和平整,混凝土浇灌过程中把握振捣密度,防止产生蜂窝、麻面等瑕疵,浇灌结束以后按标准进行保养任务,把握保养温度和湿度,保证混凝土结构强度和防渗能力。泵站、阀门等主要设备装设要遵照工序规范,阀门装设之前检查密封性能,泵站设备定位要精确,保证运转振动达标。

1.4 隐蔽工程全流程管控

隐蔽工程留下的隐患不容易被发现,需要做好全流程质量管控,避免出现需要返工的情况。水厂给排水工程中有大量埋在地下、藏在结构里的管道和部件,一旦施工结束,后续出现质量问题,再去检查和修补不仅要耗费人力物力,还可能会损坏其他构件和构筑物。因此,隐蔽工程施工过程中,应安排具备专业资质的人员全程驻场监督,详细记录施工步骤、材料使用及操作规范性,并同步留存影像资料(照片或视频),确保全过程可追溯^[2]。必须严格执行“上一步验收通过后方可进行下一步”的管控原则,细化验收标准,针对不同隐蔽部位明确具体检查内容及要求。例如:地下管道要看铺设的坡度准不准、接头封得严不严,预埋的部件要看装的位置对不对、固定得牢不牢,要是验收没通过,马上就要改,直到再次检查合格才行。施工过程中要特别留意隐蔽部位的精度,地下管道铺的时候不能跑偏或者变形,预埋部件安装要跟图纸上保持一致,同时还得做好保护,防止在施工中被碰坏。

1.5 施工缝与接口密封管控

施工缝以及接口位置是渗漏易出现的地方,必须加强专门的管理控制来保证密封效果。在水厂给排水项目里,施工缝由于混凝土结合面强度不够、接口因为密封处理没有到位,容易变成渗漏的突破口,渗漏不仅仅干扰工程正常运转,还有可能对周边结构造成侵蚀,带来安全上的风险。

施工缝的处理要规范操作流程,浇筑之前完全清除结合面上的杂物和浮浆,采取凿毛处理来提升混凝土之间的粘结力,必要时加入止水带、止水条这类加强手段,保证连接位置密封到位。密封材料的选择需要适应水厂的工作条件,结合水质特点、水压力等要素,选择抗腐蚀、耐老化、密封性能好的材料,防止由于材料选择不合理造成密封失去作用。密封材料的施工要严格控制工艺标准,按照比例调配材料,保证涂抹均匀、压实到位,接口位置要确保贴合紧密,没有缝隙、气泡这类问题。

2 水厂给排水施工质量管控对应优化措施

2.1 材料设备管控优化措施

全链条管控优化能够筑牢材料设备质量防线,提升管控实际效果。材料设备质量管控需要突破传统分段管理方式,构建从采购到维保的全周期管控体系,建立材料设备供应商准入与评价体系,明确准入条件,核查供应商生产资质、技术能力、过往供货业绩,筛选具备稳定供货能力与优质产品质量的合作方。同时,定期开展供应商评价,淘汰质量不稳定、服务不到位的合作对象。优化材料设备进场检验流程,在自检基础上带进第三方检测机构加强核验,第三方机构需要具备相应检测资质,针对核心材料与设备开展专项检测,给出权威检测报告,弥补自检环节的局限性^[3]。完善设备全生命周期管理,打破“重安装、轻维保”的误区,设备安装后建立专属档案,记录运行参数、维护记录、故障处理情况等信息,定期开展预防性维保,及时更换老化部件、排查潜在故障,同时强化采购环节管控,结合工程进度制定合理采购计划,避免材料积压变质,设备采购需要明确技术参数与质量要求,签订规范采购合同,明确质量责任划分。

2.2 测量精度管控优化措施

技术与流程两个方面的改进可以促进测量放线准确程度的提升,确保施工基准达标。测量精度控制要同时兼顾技术和流程,从开始就降低错误。借助智能测量手段和数字化建模方法,替换以往人工测量做法:使用 GPS 定位手段、激光扫描手段达成测量信息的迅速收集和传递;配合 BIM 数字化建模,让测量信息与设计图纸准确对接,直接展示测量差异。降低人工计算和判断带来的错误,设立测量信息双人核对和存档机制,清楚核对责任,测量结束之后由两位专业工作人员分别进行核对工作,检查信息一致性,核对没有问题之后输入系统存档,形成不能修改的测量记录,为后面追查提供依据。强化测量工作人员专业训练,有重点地组织智能设备使用、测量标准、错误分析等专门训练,提高工作人员动手能力和校正水准,考查通过以后才能开始工作,防止由于工作人员操作不正确带来的测量差异。改进测量流程,结合工程实际情况细化测量环节,对复杂地方、关键位置增加测量次数,提前估计地形、天气等条件对测量精度带来的影响。

2.3 关键工艺管控优化措施

技术创新与标准化升级能优化关键工艺管控,提升施工质量稳定性。关键工艺管控需突破传统操作模

式,以创新技术与标准化体系提升管控水平。推广新型环保施工材料与高效工艺,替代传统落后技术,选用高强度、耐腐蚀的新型管材与混凝土材料,提升工程耐久性,采用管道非开挖敷设、混凝土智能振捣等高效工艺,减少施工对周边环境的影响,同时提升施工效率与质量^[4]。制定工艺操作标准化手册,结合水厂给排水工程特点,细化各关键工艺的操作步骤、质量标准、注意事项,明确操作禁忌,让施工人员有章可循,避免因操作随意性导致的质量波动。开展全员工艺培训考核,覆盖施工、技术、管理等各岗位人员,讲解标准化操作流程与技术要点,定期组织考核,将考核结果与岗位绩效挂钩,倒逼人员规范操作。引入工艺过程智能监测设备,对管道焊接温度、混凝土浇筑强度、防腐层厚度等关键参数进行实时监测,同步设置预警阈值,参数超标时及时发出预警,便于工作人员快速调整操作。

2.4 隐蔽工程管控优化措施

流程的细化跟技术上的赋能能够破解隐蔽工程管控的难题,做到全周期可追溯。隐蔽工程管控要打破过去那种“重视验收、忽略过程”的模式,建立过程和验收并重的全周期管控体系。搭建隐蔽工程数字化管控平台,将施工记录、影像资料、验收报告这些数据整合起来,做到施工过程全程可追溯,平台可以实时上传数据,管理人员能够远程查看施工进度跟质量情况,及时看到并纠正违规操作。验收流程要优化,明确建设方、施工方、监理方这三方的验收责任主体,细化各个主体的验收职责,制定有差异的验收标准,针对不同类别的隐蔽工程明确核心验收指标,验收的时候需要同时核查过程记录和影像资料,确保验收结果真实可靠,建立验收考核机制,对验收人员的履职情况做评估,对弄虚作假、履职不到位的人员进行严肃追责^[5]。加强隐蔽工程后期巡检,工程完工后定期开展专项巡检,借助无损检测技术排查地下管道、预埋构件的潜在隐患。建立隐患闭环整改机制,发现问题后明确整改责任、整改时限,整改完成后安排复核,确保隐患彻底消除,流程细化与技术赋能两者结合,破解隐蔽工程管控的盲区,做到从施工到运维的全周期质量追溯。

2.5 施工缝接口管控优化措施

针对性地优化密封管控方案,能够有效破解渗漏这个难点,带动接口施工质量的提升。施工缝和接口渗漏管控要立足于工况特点,从材料、流程、检测这三个角度构建针对性优化体系,研发适合水厂工况的

新型密封材料,结合水质腐蚀特性、水压力等级等条件,优化材料配方,提升材料的抗腐蚀、耐老化性能与密封稳定性,确保材料在长期复杂工况下依然可以保持良好密封效果,取代传统密封材料容易老化、密封性能不够的弊端。制定施工缝与接口处理专项管控方案,细化操作流程,施工缝处理前明确清理标准与凿毛深度,衔接时控制混凝土浇筑速度与振捣密度,接口处理时规范材料涂抹厚度与压实方式,避免流程疏忽造成密封缺陷^[6]。科学应用渗漏检测新技术,取代传统水压试验的局限性,借助超声波检测、红外成像检测等无损检测技术,精准排查接口与施工缝内部的微渗漏隐患,检测范围覆盖施工全过程,施工中同步检测、完工后专项检测,确保隐患早一点发现、早一点处理。建立密封质量追溯体系,记录密封材料使用、施工操作、检测结果等数据,明确各环节责任人员,形成完整管控链条,针对性优化管控方案,精准破解渗漏难点,全面提升施工缝与接口施工质量^[7]。

3 结束语

水厂给排水工程质量直接关乎供水系统长期运行安全,质量管控需贯穿施工全流程、覆盖各核心环节。五大管控要点直指工程质量关键风险点,配套优化措施则从源头、过程、末端形成闭环治理,破解传统管控中的难点与盲区。技术创新与流程标准化的融合,既能强化质量防控能力,又能提升施工效率与工程耐久性。后续需结合水厂工况迭代升级管控手段,持续优化材料、工艺与检测技术,明确各主体责任,让质量管控落地见效,为水厂稳定运营筑牢工程根基,助力供水行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 陆凯杰.顶管技术在市政给排水施工中的应用探讨[J].工程技术研究,2024,09(24):51-53.
- [2] 郭刘岩.高层建筑给排水系统施工中的常见质量问题及预防措施[J].陶瓷,2024(12):143-146.
- [3] 李帅.建筑给排水施工中虹吸式雨水排水技术的应用[J].四川建材,2024,50(12):238-240.
- [4] 张钦鑫.污水处理工艺在市政给排水施工中的应用[J].高科技与产业化,2024,30(11):83-84.
- [5] 郑荣明.基于智能控制的建筑给排水工程施工技术[J].建设科技,2024(22):81-83.
- [6] 欧阳升.给排水工程现场施工进度管理优化策略研究[J].水上安全,2025(22):145-147.
- [7] 侯卫国.智能水务系统在城市给排水施工管理中的应用研究[J].陶瓷,2025(12):165-167.

水利渠道施工管理中的边坡安全风险监理防控分析

王彦礼

(浙江凌丰工程管理有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要 水利渠道建设是保障水资源、防洪排涝的关键, 其中边坡安全风险是整个渠道施工中不可忽视的核心问题。边坡所存在的不稳定性会直接导致渠道施工事故、环境破坏, 严重的还会发展成一系列的工程隐患。基于此, 本文针对水利渠道施工管理中的边坡安全风险监理防控进行分析研究, 并依此提出科学的管理与技术措施, 旨在为进一步提升此类工程施工的可靠性和安全性提供有益参考。

关键词 水利渠道施工管理; 边坡; 安全风险; 监理防控

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.033

0 引言

水利工程是关系到社会民生的基础工程, 主要具备工程复杂、工期长、规模大等特点。现阶段, 水利渠道作为水资源调配的基础设施, 实际施工质量的高低直接关系到经济发展、人民健康稳定生活。但从现阶段的实际情况来看, 水利渠道施工中的边坡安全风险经常被忽视, 尤其是在相对复杂的地质条件、气候环境影响下, 经常会发生崩塌、滑坡等情况。因此, 为充分保证水利渠道建设工程的安全性, 需要加强对边坡安全风险监理防控的重视, 确保通过多元化管理措施实施, 应对施工期间各种复杂情况。

1 水利渠道施工管理中的边坡安全风险特点

为保证水利渠道工程投入使用后能够发挥其应有的社会效益和经济效益, 边坡开挖过程中相关技术人员必须确保施工监控工作到位。水利渠道施工管理中, 边坡主要具备复杂多变的特点, 主要表现在以下三个方面: (1) 边坡地质条件因水利工程的不同展现出各自差异, 且内部物质组成十分复杂, 主要包含岩石、土壤等, 从而直接造成边坡稳定性差异偏大; (2) 边坡、会受到多种外界因素的影响, 不管是水流的浸泡还是冲击, 都会降低土体抗剪强度, 由此急剧增加滑坡与塌方的风险; (3) 水利工程通常会进行开挖作业, 对周边土体扰动较大, 会引发边坡失稳^[1]。这些边坡安全风险特点对于工程的安全管理提出了新的要求, 需要在施工期间, 充分认识到影响周围边坡稳定性的实际因素, 从而提出针对性地开挖、保护、支护等技术,

以此来全方位保证水利渠道施工安全与工程质量。

2 水利渠道施工中的边坡安全风险来源

2.1 地质条件

通常情况下, 水利渠道线路会穿梭在泥岩、砂岩、石灰岩等多种类型的地质层当中, 而这些不同的地质材料会在多种压力与温度下, 展现出各自所具备的独有抗压强度与稳定性^[2]。例如: 泥岩在湿润条件下会发生软化情况, 由此直接削弱了支撑能力, 使其滑坡风险逐渐增加; 砂岩如果长时间处于干燥条件, 那么就会出现裂缝, 从而造成整体稳定性的降低。因此, 需要施工方在实际施工期间, 全面设计详尽的地质勘查方案, 针对周围是否适合施工进行分析, 确保边坡的安全性。

2.2 降雨和渗透

降雨会直接导致土壤饱和度的提升, 从而增加土体重量, 使其整体抗剪强度不断降低。基于此情况下, 如果没有采取排水措施, 会引发滑坡情况。或是, 所采取的排水措施不到位、不合理, 同样会造成渠堤或边坡积水。渗透作用有助于全方位带动水体向下施加压力, 但与此同时也会引发土体内孔隙水压力逐渐增加, 从而会造成土体的整体稳定性不断降低。

2.3 人为因素

水利渠道施工阶段, 操作不规范、不遵守设计标准、检测缺失都会造成管理上的漏洞, 这也是人为因素发生的主要原因。例如: 在基坑开挖期间, 施工人员没有遵守所制定的施工工序进行施工, 会直接加剧对邻近结构以及上下游环境的严重干扰。不仅如此, 相关

作者简介: 王彦礼 (1970-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水利工程建设管理。

施工管理人员缺少专业培训,导致对边坡安全风险认识不足,从而诱发一系列潜在安全隐患的发生,当险情发生时难以第一时间有效处理。

2.4 气候变化

近年来,因全球气候变化频率的与日俱增,使得干旱、暴雨等各种极端天气经常出现,而这些极端天气将会对边坡的稳定性带来重要影响^[3]。暴雨往往会伴随强风,而这对于没有落实具体支护措施的边坡来说,会产生较强的威胁,且干旱也会造成土壤干裂,将直接影响到承载能力与力学性能。气候变化带来的不确定性会对现有的施工带来更高难度,同样也会使传统防护模式面临全新挑战。

3 水利渠道工程边坡开挖和防(支)护技术应用分析

3.1 边坡开挖技术

1. 土方开挖技术。边坡地面以土质为主,而土方开挖技术是当前的主流方式,其中践行了“自上而下”的原则,主要从先从上方出发,从而逐步向下推进,这样的方式可以精准控制土体的稳定性,便于安装临时支护设施。在具体实操期间,应针对土质的实际情况进行全方位的了解与评估,明确作业环境的复杂性与土质情况,当机械设备难以展开操作时,即可运用人工方式进行局部开挖。同时,水平方向上的施工同样需要遵守“先边坡后基槽”的原则,有必要针对边坡的部分展开清理与整形,之后再进入基槽实施施工。整个实施阶段,应时刻清理夯实出的泥土,避免对整体的施工质量与安全带来不利影响,最大限度地保障人员与设备的安全性。

2. 石方开挖技术。边坡地面以岩石为主时,应尝试运用石方开挖技术,为此可以对坚硬岩体进行处理,所以会运用液压钻机将岩石表面遮挡物移除,使其暴露在表面,方便后续操作^[4]。对于岩石区域的处理,将会运用碎石锤子常见的方式,从而粉碎较大的岩块。同时,对于岩体坚硬、难以通过普通工具的处理的特殊情况下,运用爆破方式实现迅速清理,但需要严格遵照相关规范操作进行,这样即可避免各种意外情况的发生,充分降低潜在隐患。不管运用哪种方式,都应当依照当下施工的实际环境进行,以保证所选择方式与技术手段的针对性。

3.2 边坡防(支)护技术

1. 钢筋网安全辅助技术。该技术是一种相对常见且有效的边坡防护方式,十分适用于不断变化地质条件的中型、大型水利工程。而在具体的施工阶段,应综合考察该地区的实际情况,确定钢网铺设的面积,

从而将钢网与苗鼓螺旋焊接成为一个整体,由此全方位保证防护系统的稳定性^[5]。这一方式不仅可以促进边坡保护强度的提升,同时还能够降低水流对边坡所带来浸泡、冲刷危害,显著增强防护效果。

2. 喷射混凝土防护技术。该技术包含锚喷、喷射、钢纤维喷射、钢丝网等多种形式。而在具体实施前期,有必要针对障碍物以及潜在的安全隐患认真排查,做到及时清理。喷射混凝土过程中,应保证设备始终满料,从而严格控制好骨颗粒径,为此充分保证混凝土的实际质量。此外,根据自上而下的顺利,科学开展分段、分层、分片的喷射方式,确保每一层始终都能够在前一层的混凝土终凝之后进行,进而充分提升耐久性与固结强度。

3. 锚杆支护技术。该技术主要在空间受限的区域广泛运用,其中的适用性主要源自岩层的稳定性。在稳定性相对较强的岩层当中,可以开展方型锚杆排列形式,条件较差的区域可以选择五花型排列形式。当正式进入钻孔阶段,需要根据设计图纸,在初喷面上明确不同锚杆的位置,以便于之后进行安装^[6]。需要注意的是,锚杆安装时应预留50 mm的锚杆头,一旦完成锚杆施工,需按照相关规范实施抽样抗拔试验,以保证每根锚杆具有足够承载能力与稳定性。对于注浆工艺,一般采用反向压浆的方法,将压力控制在0.4~0.5 MPa之间,以获得最佳支撑效果。

4 水利渠道工程边坡施工监理控制要点

4.1 工程测量监理控制要点

水利渠道工程边坡施工监理期间,监理部有必要配备专职的测量工程师,以保证最终工程测量的可靠性与精准性。(1)坐标与水准基点管理。监理部配合业主组织好坐标控制点与水准基点的移交,从而充分明确施工单位对控制桩与水准点所应采取的保护方式,避免施工期间的关键点受到损害;(2)现场勘测与地形图绘制。针对现场的实际地质情况展开勘查,从而测量得出现状坡面,依照情况绘制出精准的地形图,便于为之后的施工提供支撑;(3)定线数据复核。对原始定线数据进行复核,保证整体情况的有效性与精准性,避免对之后作业带来误差,确保满足行业相关标准;(4)成果监督与审查。不管是全过程监督还是复核施工方,所提供的开挖断面控制线、边坡坡率等测量结果,都需要进行相关的检查与验证,以此来保证信息的可靠性,促进施工质量提升。

4.2 边坡开挖及防(支)护监理控制要点

边坡在进行开挖、防护、支护施工期间,监理有必要时刻紧抓工程控制进度、质量控制、投资控制、

安全文明施工控制等多个监管工作。而在具体的施工之前, 监理部需要构建多种类型的控制方案, 确保整个工程的施工质量、进度、投资及安全均处于受控状态。

1. 事前监理控制要点。施工前期, 监理部门需要全面开展以下工作: 针对边坡开挖方案、防护、支护结构设计等相关方案, 需要展开细致认真地核查, 以确保各个方案均可以满足设计标准; 认真检查施工质量控制的实际标准, 确保具备良好的可操作性, 由此为之后现场施工指导提供依据; 对于总体进度计划, 同样需要进行审核, 保证计划始终处于合规、可控的范围内, 不断促进各方施工单位的协调发展; 对于边坡开挖、防护、支护等安全措施, 以及必要的应急预案, 应全面进行审核优化, 保证在危险来临之际, 能够得到迅速响应。

2. 事中监理控制要点。施工作业期间, 监理部门也应格外加强对以下注意事项的关注: 派遣专业监理人员进行现场旁站管理, 从而保证所有施工作业的设计都符合实际要求; 加强对现场放线的审核复核, 并且保证所有测量得出的数据都更为精准; 定期做好对进度的检查与多元化动态跟踪, 为此依照实际情况进行优化与调整, 避免对之后的工期带来影响; 始终将安全放在发展的首位, 不定期针对具体情况实施安全检查, 如果发现存在危险行为, 就需要立即采取应急预案处理方式^[7]。而当发现施工中存在裂缝、位移远超出允许值状态下, 有必要提出停止施工作业指令, 从而降低事故发生的概率。

4.3 安全监测中监理控制要点

水利渠道施工管理中, 身为监理人员应全面加强安全监测与巡视检查, 从而全方位保证边坡的稳定性与安全性。其中主要控制要点包含以下方面: (1) 边坡变形监测。着重加强对边坡变形情况的关注, 进而通过定期的测量与记录, 发现可能存在的滑坡与坍塌隐患, 确保施工更为顺利; (2) 裂缝与掉渣检查。对边坡展开巡视, 从中检查是否存在裂缝、掉渣、掉块等多种现象, 这样即可提示土体所存在的不稳定性, 让其引起高度重视; (3) 表面状态观察。加强对边坡表面是否存在隆起与下沉情况进行观察, 这些情况很可能会因地下水位波动、土壤排水不畅引起, 由此导致施工难以顺利进行; (4) 排水系统检查。保证在施工阶段, 排(截)水沟始终畅通无阻, 降低积水对土体带来的不利影响, 充分减轻潜在的滑坡风险; (5) 防护与支护结构监测。针对防护与支护的整体结构进行定期检查, 明确其中是否存在开裂、变形、位移等多种变换情况, 进而充分保证有效性与稳定性; (6) 变形桩布置。在相对重点的边坡部位, 应设置变形桩,

以便于用于测量平面与高程变形^[8]。而其中所得出的数据能够及时对边坡周围的安全状况进行评估, 从而增强施工工程的顺利进行。

4.4 风险等级划分要点

水利渠道施工管理阶段, 通过对所识别出的问题, 以及可能会产生后果展开分析, 主要可以将风险结合严重性、发生的实际概率来进行多个等级划分, 这样的划分方式能够充分保证之后监测与防控的针对性, 从而做到各种潜在影响较大问题的优先处理。而在此期间, 风险等级划分时, 也应着重考虑到各个层次利益相关者的实际观点, 由此促进决策公信力与透明度的提升。在高中低等级中, 高级别风险需要采取加强监测、施工方案调整对策; 中级别风险实际上是通过各个流程的优化来减轻; 低级别的风险虽然影响力较小, 但依然需要展开不定期监测。通过科学的风险等级划分, 有助于实现对各种潜在问题的精准识别, 进而为之后工程顺利推进提供科学依据。

5 结束语

水利渠道施工阶段, 边坡安全风险监理防控会直接影响到工程的安全性, 而通过全方位对其进行风险评估, 能够从根本上防止边坡失稳事故的发生, 有效促进整体工程建设的顺利开展, 为提升施工的安全性提供全面保障。未来, 需要持续实现监理制度的优化, 并从中结合新的技术手段, 提升水利工程建设的安全性、稳定性, 为良好生态环境的建设奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王晨. 强化人为失误识别与防控, 降低水利工程安全风险[J]. 楼市, 2025(10):32-35.
- [2] 洪健聪. 水利基础设施运维质量风险防控的标准化体系建设与品牌影响力提升策略[J]. 中国品牌与防伪, 2025(11):178-180.
- [3] 陈献文, 翁资博, 程相臣, 等. 水利泵站深基坑工程施工安全技术研究[J]. 生态与资源, 2025(07):37-39.
- [4] 娄谦, 靖静, 靖庆生. 水利工程建设与运行中的安全风险识别与防控机制研究[J]. 水上安全, 2025(03):59-61.
- [5] 高伟. 农田水利工程中防渗渠道施工技术应用研究: 以某农业大县灌溉主干渠工程为例[J]. 城市建设, 2025(27):65-67.
- [6] 史冲, 于彦博. 浅谈水利工程边坡施工技术及其监理控制要点[J]. 治淮, 2022(09):69-70.
- [7] 刘瑞宁, 李萍. 农田水利工程防渗渠道施工的关键技术和质量控制措施[J]. 农村科学实验, 2025(16):94-96.
- [8] 李小艳, 孔敏, 李俊, 等. 水利施工中衬砌渠道施工技术研究[J]. 水上安全, 2024(06):175-177.

高层建筑钢结构施工精度控制与安全管理措施分析

王群

(菏泽城建工程发展集团有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要 本文聚焦高层建筑钢结构施工精度控制的核心要素以及安全风险隐患, 基于从高层建筑钢结构构件制造到现场安装, 再到焊接连接的完整链条, 构建“数字化预控, 动态监测, 实时纠偏”的精度保障体系, 并且融合BIM技术、智能传感装置以及焊接机器人等创新应用, 同时建立“技术支撑, 智能预警, 责任到人”的安全管控机制, 重点覆盖吊装防护、高空作业以及应急处理等关键场景。经过某都市圈环线项目、某金融中心等工程实践的检验, 该体系能够把吊装定位误差控制在 ± 3 毫米的范围之内, 焊接一次检测合格率达到98%以上, 而且实现了安全事故零发生的目标。该成果旨在为高层建筑钢结构的施工质量与安全管理提供技术参考。

关键词 高层建筑; 钢结构施工; 精度控制; 安全管理; 智能建造

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.034

0 引言

超高层建筑大多采用钢结构体系, 该体系依靠承载力强、自重轻、建造速度快等特点, 成为大型地标项目的主流选择方式。然而, 当建筑高度超过300米的时候, 钢结构施工会面临不少挑战, 如单体构件重量大(单根钢柱可达50吨)、节点连接复杂(单个节点需容纳34根钢筋)、高空作业比例超过60%等, 这些问题使得精度误差逐步不断累积, 安全隐患叠加效应愈发显著。传统施工方法中, 依靠人工测量产生的定位偏差超过8毫米, 焊接变形量达到5毫米/米, 这不仅造成40%的节点返工, 还可能引发结构安全方面的问题。

目前, 智能建造技术和钢结构施工有机结合, 正推动该领域快速数字化升级。BIM技术通过三维建模功能, 完成从设计施工到维护全周期协同管理与施工环节模拟推演。物联网系统持续追踪施工现场环境机械设备及预制部件等核心指标, 为精准决策提供依据。自动化焊接设备以高效作业方式保证焊接质量, 同时减少人为失误。本文围绕技术落地和管理制度两个方面, 系统阐述覆盖方案设计、现场监督、质量检测等环节的精度保障方案, 建立涵盖风险防控、紧急处理技能培训的安全保障机制, 以为钢结构项目构建兼具创新性和可操作性的实施方案, 并为同类项目积累可借鉴的参考经验。

1 高层建筑钢结构施工精度控制的核心技术体系

1.1 构件制造阶段的精度预控技术

制造环节的精度控制从工厂化生产开始便要重视, 必须构建起从设计参数到加工工艺再到出厂检测的全过程数字化管理机制。在某金融中心工程实施过程中, 针对四百五十余个特殊连接部位, 借助BIM技术开展深化设计并获取三维坐标数据, 其精度能够达到0.1毫米。这些数据直接输入数控加工设备, 确保连接板孔径误差控制在正负0.5毫米范围之内。重要部件采用三坐标测量仪进行质量检测, 出厂前通过数字化虚拟拼装提前发现并解决安装冲突, 让预拼装时间缩短了六成。材料特性和加工精度有着直接关联, 对于厚度超过50毫米的钢板, 焊接前必须完成工艺性验证, 选用低氢型焊条(要求扩散氢含量不超过5毫升/100克), 并经过350摄氏度保温1小时的干燥处理, 有效降低了焊接缺陷和变形出现的风险。研究显示, 通过统筹优化设计与工厂化生产, 可使构件制作优良率超过98%, 进而为后续现场安装精度提供可靠保障^[1]。

1.2 现场吊装的动态定位技术

吊装是精度传递的核心步骤所以要构建“BIM定位—智能监测—实时调整”闭环管控体系。某都市圈环线项目借助BIM模型获取构件三维坐标, 并输入测角精度为 $\pm 0.5''$ 的全站仪, 同时在构件表面布设3个监测靶点, 采用“双机抬吊配合辅助牵引”作业方式

作者简介: 王群(1988-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

调整姿态, 确保初步就位偏差小于 5 毫米。高空对接过程中系统每 5 秒采集一次靶点坐标数据, 与 BIM 设计值对比后生成调整指令, 通过调节精度达 ± 0.5 毫米的螺旋千斤顶及张力误差控制在 ± 5 kN 的缆风绳完成三维定位, 并将误差控制在 ± 3 毫米范围内。当遭遇 10 米/秒以上强风时, 风速传感器会触发联动预警机制, 暂停吊装作业并固定构件。待风力减弱后, 利用北斗定位系统进行校核, 保证偏差不会超限。某金融中心创新实施“精准测量四步法”, 即通过经 GPS 校核的高精度控制网、三级测量验收机制、内外双层控制网及 50 米转换层复核来阻断误差累积, 让 180 米高的塔楼顶部累计偏差控制在 30 毫米以内。

1.3 焊接连接的变形控制技术

焊接变形是造成精度偏差的关键重要因素, 需要依靠“预设补偿—分步焊接—事后调整”组合方案来控制^[2]。在某超高层建筑项目中, 依据焊接试验所得到的数据(每米焊缝收缩 0.8 毫米), 于材料切割阶段预先留出 1 毫米/米的收缩补偿量。针对厚板焊接采用多层多道焊接技术, 保证每层厚度不超过 3 毫米, 焊接顺序是先完成内部 2/3 厚度的焊接, 等冷却至 60 摄氏度以下再焊接外部, 最终让变形量减少了 40%。智能装备的运用切实提高了焊接的精确程度, 在某都市圈环线工程里面, 使用了配备焊缝跟踪功能的焊接机器人, 单台机器的日焊接效率为人工操作的 3~5 倍, 焊接材料的消耗降低了 10%, 并且首次检测的合格率能达到 98% 以上。施工过程中通过布置应变片和红外测温设备, 把层间温度维持在 150~250 摄氏度之间, 一旦检测到角变形超过 3 毫米/米, 马上采用 600~650 摄氏度的局部加热进行反向矫正, 使变形量削减了一半。焊后的校准工作采用机械与热处理相结合方法, 当错边量处于 1~2 毫米之间时, 使用液压千斤顶进行校正(精度控制在 ± 0.5 毫米)。对于整体弯曲变形采用 700~800 摄氏度的火焰加热, 借助百分表进行实时监控直至达标。研究证实采用智能化焊接技术可将焊接变形控制在 2 毫米/米以内, 进而显著减少二次修复的工作量。

1.4 全过程精度监测与数据管理

某都市圈环线工程运用数字孪生技术建立施工全周期监测机制, 开发出综合关键指标的数据驾驶舱。该驾驶舱综合顶进距离、顶进速率及受力状态等关键指标, 依托大数据分析来实现趋势预判与主动控制。针对结构竖向变形监测这个情况, 项目采用分层布点方式即每五层设置测点的方式, 并且融合温度传感信息构建变形预测模型, 预先修正构件尺寸从而消除变形误差。在精度数据方面执行“一构件一档案”制度,

利用 RFID 芯片追踪构件从生产到安装全流程的偏差数据, 并且对接智慧工地平台以此确保数据可追溯。信息化管理让精度问题追溯效率提高了 80%, 为后续工序优化提供了数据依据^[3]。

2 高层建筑钢结构施工安全管理的关键措施

2.1 吊装作业的安全防护体系

吊装安全的根本保障贯穿在设备选用、工况监控和应急防范这三个关键环节。设备选型要结合构件重量以及吊装高度来确定, 起重设备的额定载重量必须达到构件实际重量的 1.2 倍以上。采用塔式起重机时, 需同步实施地基沉降监测工作, 其连接加固装置要每 20 层进行一次承压测试。某环形工程采用智能同步顶推技术, 构建全程监测预警加重防护机制的立体安全体系, 通过动态数据采集和风险分析, 确保各类风险始终处于可控状态, 为吊装作业提供全方位的安全保障。

起吊之前必须完成安全性能核算工作, 对于超过 60 吨的重型构件要预先搭建临时支撑结构, 其承重能力不能低于构件自身重量的 1.2 倍, 以此规避吊装时因塑性变形导致的脱落危险^[4]。高空作业区域必须实施物理隔离并设置警示标识, 同时配备专职指挥人员和绑扎作业人员, 通过无线通信设备保证指令能够精准传达, 杜绝因交叉施工而引发的碰撞事件。

2.2 高空作业与临边防护技术

高空作业的安全保障依靠“防护设施—智能监测—个人防护”协同运作的管理模式。作业层要搭建标准化操作平台, 其护栏高度不能低于 1.2 米且防滑钢板脚手板需稳固。平台承重上限经精确核算后, 要以标牌形式明确展示出来。在某金融中心项目建设过程中, 针对附着式塔吊与核心筒结构施工, 通过严密工序衔接管控实现塔吊顶升与钢构安装同步化, 有效缩短临边区域危险暴露时长。在作业平台上布设高精度的倾角及荷载监测设备, 能够对设备运行状况进行实时追踪工作。平台倾斜角度超出 3 度或者承载量达到额定值的 80% 时, 系统会立刻触发声光警报并自动断电, 以此有效防止因设备失稳或者超载所导致的各类安全事故。施工人员所佩戴的智能安全帽配备了厘米级定位模块和紧急呼叫功能, 当人员意外进入高危区域时, 安全帽会通过震动和语音发出即时警报。若发生突发意外情况, 管理人员可以利用定位系统快速确定人员具体位置, 为救援行动争取到宝贵时间, 进而大幅提升施工现场的安全管理水平和应急处理效能。

2.3 焊接作业的安全管控措施

焊接作业要重点防范火灾触电以及中毒事故, 工作场所应当配备便携式的灭火设备, 并且确保和易燃

物间距不小于5米^[5]。高空焊接作业需要安装接火斗,同时铺设防火布且下方禁止堆放易燃物品。焊接设备必须采用三级配电两级保护的措施,电缆应当架空敷设以此防止其出现破损情况。操作人员必须穿戴绝缘防护的相关装备,在潮湿环境下还需要额外增设绝缘垫板。针对高空封闭空间开展的焊接作业,需要使用轴流风机来进行强制通风,同时要实时监测有害气体的具体浓度(一氧化碳含量要控制在30毫克/立方米以下),并且配备防毒面具以及紧急供氧装置。在某都市圈环线工程当中,已经采用焊接机器人替代人工开展箱型结构内部焊接工作,这一举措既提高了作业的精度,又消除了人员在有限空间内操作的安全隐患,研究表明智能化设备的应用能够让焊接作业的安全事故发生率下降九成以上。

2.4 智能安全预警与应急管理

打造具备“感知—分析—预警—处置”功能的智慧安全管控系统,依托物联网感知设备、无人机巡查以及视频监控技术来完成风险即时监测^[6]。在钢结构重要部位安装应变监测装置,当数值达到设计阈值的80%时,系统自动向管理人员发送警报并附带相应处置方案。应急管理工作遵循“一事一预案”原则,针对起重倾覆、火灾、人员坠落等突发情况组织定期模拟演练,配备液压顶升设备、破拆工具、医疗用品等应急物资并与周边医疗机构建立快速响应通道,确保事故发生后15分钟内能够开展救援。某都市圈环线工程借助智能预警与应急演练的双重保障,达成施工期间安全事故零发生的目标。

3 工程案例验证

3.1 某都市圈环线钢箱梁工程

某都市圈环线钢箱梁工程将数字孪生和智能装备结合技术方法创新性地整合运用BIM虚拟拼装工艺,实现了毫米级精准控制,确保构件误差限定在±1毫米区间内。在顶推施工环节,借助智能同步操控系统将纵向偏差精确控制在±2毫米,横向偏差维持在±1毫米,此项指标达到行业前沿水准。安全管理机制显著强化,部署全方位智能监测系统,实时收集顶推参数及结构应力信息,构建包含预警响应处置三个层级联动机制,有效抵御12米/秒强阵风侵袭。整个项目执行期间,保持零安全事故记录,依托数字化施工管理手段,工期压缩超30%,为大跨度钢箱梁工程建设树立新的技术典范。

3.2 某金融中心钢结构工程

某金融中心钢结构工程,为解决节点构造复杂以及空间精度传递困难问题,创新构建了“BIM三维深化

设计+双层控制网”技术体系。利用BIM技术针对452个特殊节点开展参数化建模与虚拟预拼装工作,并配合地面与高空双重测量控制网,达成毫米级精度控制目标,最终特殊节点首次安装合格率达到98.3%,塔楼结构垂直度偏差控制在4.8毫米且优于1/22 000设计规范。在安全管理层面,项目针对核心筒与钢结构交叉作业风险隐患,创新实施“生命线防护线—作业警戒红线—材料堆放黄线”三级管控体系,同时应用智能安全帽定位系统,对1 200余名施工人员进行实时位置监控和危险区域预警,确保高空作业实现零事故。通过技术创新与精细化管理双重保障,项目主体钢结构工程比预定工期提前15天完成封顶,为后续机电安装和幕墙施工奠定良好基础。

4 结束语

保障高层建筑钢结构施工质量和安全的关键是将技术创新和管理改进深度融合。借助数字化制造手段,依靠BIM模型和物联网技术实现吊装精确定位,运用自动化焊接机器人改良焊接工艺,能确保安装精度达到毫米级标准以保障结构连接稳固。通过智能监控系统实时采集分析施工全流程数据,规范临边防护和高空作业平台等防护设施设计标准,建立跨部门高效应急响应机制,可提前识别防范高空坠落和构件失稳等风险。未来发展方向是推广数字孪生技术在施工场景应用,构建包含设计优化施工模拟及运维监测的全生命周期管理平台。同时要加大研发力度,开发适用于强风高温等极端环境的智能吊装设备,以及具备自适应调节能力的大型焊接机器人,推动高层建筑钢结构施工朝全面自动化和智能风险预警方向发展,进而提升工程质量和施工安全保障水平。

参考文献:

- [1] 张红,杨少军,冯昊,等.智能建造技术在超高层钢结构施工中的应用研究[J].工程研究前沿,2025,02(05):113-120.
- [2] 中建三局.智控毫米级精度!三局“钢构桥建”经验亮相全国观摩会[J].建筑施工,2025(12):45-48.
- [3] 毛鹏程.高层建筑钢结构施工关键技术及精度控制研究[J].建筑科学,2025,41(12):78-85.
- [4] 李明华.建筑施工中超高层钢结构吊装精度控制与焊接变形矫正技术应用[J].施工技术,2025,54(07):62-67.
- [5] 胡伟.180米钢结构精细化施工管理实践:以信阳金融中心项目为例[J].工程管理学报,2025,39(09):91-95.
- [6] 王建国.高层建筑钢结构施工安全智能监测技术与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2024.

水利工程施工过程中的技术创新与 施工安全风险研究

胡江武, 傅俊波, 章春雷

(浙江东洲建设咨询有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 水利工程施工具有施工环境复杂、安全风险高度集中的典型特征。本文立足于水利工程施工的理论框架与工程属性, 梳理复杂地质与水文条件、高风险施工环节, 以及施工组织与人员行为可能诱发的安全隐患, 并从技术创新视角进一步讨论 BIM 施工模拟、智能感知监测及新型施工工艺与高性能工程材料在施工过程中的作用机理。结果表明, 通过技术创新与安全风险管理的协同推进, 结合风险分级管控、动态监测预警与人员培训管理, 可显著强化水利工程施工安全风险防控能力, 为水利工程施工安全管理提供参考。

关键词 水利工程; 施工安全; 技术创新; BIM 技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.035

0 引言

随着水利工程建设规模的持续扩展以及施工环境的复杂化演进, 传统施工管理模式在安全风险防控方面逐渐显露出适应性不足的问题。在此背景下, 如何在保障施工效率的同时更有效地控制安全风险, 已成为水利工程建设领域较多关注的现实议题。依托引入现代施工技术与信息化管理手段, 将技术创新与安全风险逻辑有机融合, 不仅有助于提升施工过程的可控性与透明程度, 也对推动水利工程施工管理模式的转型升级具有重要意义。

1 水利工程施工的理论特点

水利工程施工以水力学、岩土工程、结构工程及工程安全管理理论为主要支撑, 这些理论共同揭示了施工过程系统性强、受自然条件影响显著以及风险可控要求较高的基本特征, 其中水力学理论为施工期导流与水流控制提供依据; 岩土工程理论为基坑开挖、边坡处理与基础加固提供支撑; 结构工程理论对施工阶段结构受力与稳定控制具有指导作用; 工程安全管理理论则强调通过系统识别与控制施工风险, 使安全管理环节前置展开, 这些理论共同构成水利工程施工的理论基础框架。

水利工程项目大都沿着江、河、湖等自然水体修建, 其建设位置大多偏僻险要, 并且很容易受到建设区域气象、水文、地理地质因素的影响。加之我国水利资源分布不均, 很多大型水利工程需要跨省、市, 跨流域,

服务的对象也复杂繁多, 导致很多水利工程建设协调部门多、周期长、施工难度大。水利工程项目从设计到施工的过程中受自然地理环境因素和社会法律因素的影响最为明显, 因此在施工全过程中需注重技术措施与安全管理的协同推进。

2 水利工程施工中存在的安全风险

2.1 复杂地质与水文条件带来的不确定性

水利工程往往建设于河道及地质条件复杂区域, 施工阶段易受地层结构差异、地下水位波动以及河道来水不稳定等因素干扰, 从而诱发基坑渗流、边坡失稳及地基承载力不足等安全风险。在深基坑开挖与围堰施工过程中, 若对地质勘察成果掌握不充分或水文变化预测存在偏差, 极易引发管涌、突涌水与局部坍塌等事故, 对施工安全形成直接威胁, 增加应急处置的复杂程度。

2.2 高风险施工环节中的事故隐患问题

水利工程施工过程涵盖多类高风险作业环节, 例如大体积混凝土浇筑、高边坡施工、水下作业及大型起重设备运行等, 这些工序对施工技术参数控制水平要求较高, 一旦温控措施、支护结构或工序衔接出现缺口, 往往容易触发结构开裂、边坡滑移或设备倾覆等事故。此外在导流与截流施工阶段, 水流控制若发生失误, 可能造成施工区域被淹没, 增加人员伤亡与设备损坏风险^[1]。

作者简介: 胡江武 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

2.3 施工组织与人员行为引发的安全隐患

施工组织安排不合理与人员操作不规范, 同样构成水利工程施工中不可忽视的风险来源, 在多工序交叉作业条件之下, 若施工进度统筹缺乏科学性或现场管理协调力度不足, 容易出现作业面冲突与安全防护缺失等问题, 同时部分施工人员安全意识薄弱, 对新技术、新设备操作掌握不充分, 违规操作与疲劳作业现象仍然存在, 使事故发生概率进一步上升。

3 水利工程施工过程中的技术创新

3.1 基于BIM的施工模拟与方案优化

在水利工程施工推进背景下, 凭借BIM技术开展的三维建模与施工模拟, 逐步演化为施工方案比选与调整中的关键支撑路径, 借助覆盖地形地貌、水工建筑物、施工设备及临时工程的多维模型构建过程, 导流方案、围堰布置以及施工工序得以被纳入同一分析框架中展开动态推演。在施工准备阶段, 结合BIM开展施工时序模拟, 关键工序持续时间往往倾向于被精细化管理。例如: 将混凝土分层浇筑周期限定于10~12 h区间内, 以降低温差应力集中带来的结构风险, 同时模型联动地质与水文参数后, 不同施工方案下的结构受力特征与稳定状态得以横向对照分析, 从而为方案调整与取舍提供更具针对性的技术参考。国内某中型水利工程实施过程中, 工程内容涵盖围堰施工与大体积混凝土浇筑, 施工环节交叉复杂, 项目团队在施工准备及实施阶段引入BIM施工模拟技术, 对导流方案、施工时序及资源配置展开整体统筹, 并贯穿全过程应用实践, 现场调整频次明显下降, 施工组织效率与安全管理水平同步增强, 相关技术指标对比结果见表1。

3.2 智能感知与实时监测相结合的安全预警

智能感知技术的应用, 为水利工程施工安全风险动态识别与预警机制构建了稳定技术基础, 在深基坑、高边坡以及围堰结构中布设位移、应力与渗压传感器后, 关键部位运行状态能够实现连续化监测, 举例来说位移监测精度通常维持在0.5 mm/s以内, 应力

与温度监测误差控制于±0.3 °C区间内, 为结构安全评估形成可靠数据来源, 在数据传输层面, 采用LoRa等低功耗通信方式, 15~20 km范围内的稳定传输得以保障, 从而适配偏远施工区域的监测条件^[2]。在系统运行过程中, 监测数据按照既定阈值进行分级处理, 当指标呈现异常波动趋势时, 预警信息可经由移动终端推送至管理人员端口, 为现场处置决策提供即时参考, 在恶劣天气或夜间施工条件之际, 系统仍可保持在-20~50 °C环境区间内稳定运行, 施工安全管理的实时性与可靠性由此得到进一步强化。

3.3 新型施工工艺与高性能工程材料创新

在水利工程施工实践背景下, 新型施工工艺与高性能工程材料的引入, 对施工质量控制与安全保障体系形成了明显支撑, 以大体积混凝土施工为例, 通过对配合比进行系统调整并引入低水化热材料, 混凝土内部温差得以被限制在合理区间内, 裂缝产生的潜在风险随之降低, 同时配合温控管与循环冷却工艺运行, 混凝土养护温度通常维持在0~7 °C范围内, 结构性稳定性因此得到保障, 在围堰及地下结构施工中, 新型防渗材料的应用使渗透系数控制在10⁻⁷ cm/s量级, 防渗能力显著增强。此外高性能工程材料在耐久性与环境适应性方面表现突出, 即便处于-40~120 °C工况条件下, 力学性能仍可保持稳定, 从而削弱材料老化对施工安全的不利影响^[3]。

4 水利工程施工安全风险管控策略

4.1 建立安全风险分级管控机制, 实现精准防控

在水利工程施工安全管理体系中, 依托量化指标构建风险分级管控机制, 往往被视为精准防控的重要技术路径, 该机制通常遵循“风险源识别—指标量化评估—等级划分—分级管控”的逻辑链条展开, 以施工工序为基本单元, 对基坑开挖、围堰施工、高边坡作业及大型设备运行等环节展开风险源识别; 随后结合结构稳定系数、允许位移值与安全系数等指标, 对风险状态进行量化评估, 例如将基坑水平位移限定在设

表1 基于BIM施工模拟与方案优化前后技术指标对比

对比指标	BIM应用前	BIM应用后
混凝土分层浇筑周期	14~18 h	10~12 h
关键工序衔接等待时间	6~8 h	2~3 h
施工方案现场调整次数	每月3~4次	每月1次以内
高峰期施工设备投入数量	波动较大, 协调难度高	数量稳定, 调度明确
作业空间冲突情况	局部频繁发生	基本消除
施工进度偏差控制	偏差较大	控制在计划范围内
结构受力校核效率	依赖人工复核	模型自动校核

计允许区间内,并将边坡变形速率控制在 0.5 mm/s 以内^[4]。依据评估结果对风险等级加以划分,并针对高等级风险配置更为严格的技术控制措施,比如将巡检频率提高至每 4~6 小时一次、缩短监测数据更新周期等,通过明确不同风险等级所对应的技术指标与响应路径,施工安全风险得以实现分层管控与精准干预。

在某国内大型水利工程施工过程中,施工区域地质条件复杂且高风险作业相对集中,传统统一管理模式下难以适配现场安全需求,项目在施工初期引入风险分级管控机制,对基坑开挖、围堰施工及高空作业等关键环节开展系统性风险识别,并依据风险等级制定分层管理方案。实施阶段由专职安全管理人员牵头,组织技术、施工与监测部门协同推进,逐步形成动态更新的风险清单,随着机制持续运行,现场安全管控重点更加清晰,高风险作业受到有效约束,施工过程中突发安全事件明显减少,整体施工安全水准随之增强。

4.2 完善施工安全监测体系,提升动态预警能力

施工安全监测体系的完善,往往构成水利工程施工风险动态预警能力强化的重要技术支点,该体系多依照“监测对象确定—传感器布设—数据采集与传输—阈值设定—预警响应”的逻辑链条加以构建。在施工现场,围绕基坑位移、边坡稳定状态、围堰渗流情况及结构应力分布等关键指标布设监测设备,对位移变化、应力波动以及水位起伏展开连续采集,位移监测精度通常控制在毫米级范围内,应力与温度监测误差维持在 ± 0.3 °C 区间,并借助无线传输方式实现 10~20 km 范围内的数据稳定回传,当监测参数接近预设安全阈值或呈现异常变化趋势时,系统会及时触发预警信息,为施工调整、技术加固或临时停工决策提供可靠参考^[5]。

在国内某水利工程施工实施阶段,项目施工区域分布零散,现场监管难度相对较高,为增强安全管理成效,施工单位构建以现场监测为核心的安全预警体系,对重点结构与高风险作业区域实施连续监测。在运行过程中,监测数据统一接入管理平台,由专人负责预警信息分析与处置,并将结果反馈至施工一线,随着体系持续运行,现场管理人员能够及时掌握关键部位运行状态,提前采取调整措施,风险扩散趋势得以有效抑制,施工过程的连续性与安全性因此获得保障。

4.3 加强人员安全培训管理,降低人为事故发生率

在水利工程施工安全风险控制实践中,人员安全培训管理通常需要依托明确的技术参数与操作指标展开,该管理过程一般涵盖岗位风险分析、技术指标明确、

培训实施以及考核反馈等多个环节,基于施工技术方案,对不同岗位所涉及的关键操作参数与安全控制指标加以明确,例如设备运行电流区间、允许作业风速或适宜温度条件等;随后围绕设备操作流程、关键工序控制点及应急处置要求开展针对性培训,使作业人员清楚理解技术边界与安全限值。借助设置操作考核标准与现场抽查机制,作业人员对技术指标的掌握程度得以验证,并随着施工阶段变化及时更新培训内容,从而削弱因操作失当或技术认知不足引发安全事故的发生概率^[6]。

国内某水利工程施工引入新设备与新工艺后,原有人员技能结构难以完全匹配施工实际需求,项目在施工前期组织开展分岗位安全培训,对关键工序操作流程进行系统讲解,并在施工推进过程中结合现场实际持续开展针对性培训,培训实施由项目管理层统一统筹,施工班组具体落实,并借助现场示范与交流反馈不断调整培训内容。经由上述管理措施,作业人员对施工风险的认知明显增强,违规操作行为得到有效控制,人为因素诱发的安全事故显著减少。

5 结束语

水利工程施工安全水平的提升依托于技术创新与风险管理体系的协同推进,未来伴随水利工程建设环境持续复杂化,施工安全管理将更加侧重信息化、智能化与精细化的发展取向,一方面新一代信息技术、智能感知与数据分析手段的深度融合,有助于施工风险的动态识别与主动防控;另一方面施工管理模式逐步由经验驱动转向数据支撑,安全管理决策因而更趋科学高效。依托持续深化技术创新成果在工程实践中的落地应用,可为水利工程高质量、安全、可持续建设提供稳固支撑。

参考文献:

- [1] 李翔晖,周坤峰.水利工程施工中土石方开挖技术与安全措施研究[J].水上安全,2025(12):184-186.
- [2] 汤磊,徐晖.基于信息化技术的水利工程施工质量安全管理方法[J].大众标准化,2025(03):170-172.
- [3] 李娟.水利工程堤防防渗施工技术及管理研究[J].水上安全,2024(16):148-150.
- [4] 黄雨娟.水利工程施工技术优化与质量管理体系的构建及实践研究[J].水上安全,2025(10):85-87.
- [5] 姜燕,刘玉兰.水利工程施工中堤防及护岸工程施工技术研究[J].水上安全,2025(06):97-99.
- [6] 王永亮.水利工程施工技术措施与水利工程施工技术管理[J].水上安全,2025(02):22-24.

建筑工程电气系统安装与调试技术应用研究

宋友¹, 于田景²

(1. 青岛恒硕建设有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 山东德正公路工程有限公司, 山东 济南 250014)

摘要 电气系统作为实现建筑功能的关键重要环节, 其安装与调试技术的科学性对建筑运行效率、安全保障和节能表现起着决定性作用。本文依据《建筑电气工程施工质量验收规范》(GB 50303-2025), 并融合预制装配、物联网应用以及模块化集成等先进技术, 对电气系统安装与调试的核心环节开展了系统性研究, 通过对低压配电、智能照明以及消防电气等系统的安装工艺进行优化探讨, 构建包含“预制化生产、模块化安装、智能化调试与全周期质量控制”的综合技术体系, 通过实际工程案例对其应用成效进行了检验。实践数据显示, 该优化技术能使安装效率提高30%以上, 可将故障发生率降低45%, 并且实现能耗减少28%, 进而为建筑电气工程高标准建设提供有力支撑。

关键词 建筑工程; 电气系统; 安装技术; 调试工艺

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.036

0 引言

随着建筑领域朝着绿色化、智能化、工业化方向不断发展, 建筑电气系统已从单纯具备供电功能拓展成“能源供给、智能控制、安全防护、节能降耗”一体化综合体系。作为工程实施核心环节, 电气系统安装调试质量直接决定建筑物投运后运行稳定性、使用安全性及经济合理性。当前电气系统呈现设备集成化程度高、控制逻辑复杂、能源类型多样化等特征, 传统施工工艺中存在管线布局冲突、调试流程不规范等问题愈发突出, 制约了工程品质与施工效率提升。在“双碳”目标及新型城镇化建设推动下, 行业对电气安装调试工作提出更高标准, 既要满足新型规范与技术要求, 又要达成施工过程节能环保与资源优化配置目标。通过引入预制装配技术、BIM可视化手段及物联网监测等创新方法, 为解决传统施工难题提供可行方案。本文结合工程实践经验, 系统探讨电气系统安装调试领域关键技术创新与应用实践, 构建完善的技术应用框架, 为同类工程实践提供借鉴。

1 建筑工程电气系统安装与调试技术现状及问题

1.1 技术发展现状

建筑电气安装技术正朝着“工厂化预制、组件化拼装、自动化施工”的方向不断发展, 在低压配电系统当中, 工厂化生产的预制构件使用率呈现持续攀升

态势, 智能系统依靠传感器网络实现自动管控功能, 调试技术呈现出“数字化检验、智能分析、协同验收”的全新特征。随着《建筑电气工程施工质量验收规范》(GB 50303-2025)标准的推行实施, 安装精度与绝缘性能等指标被设定了更高要求标准, 这有力地促进了行业的技术革新进程, 同时绿色施工理念也要求安装调试环节更加注重节能减排工作^[1]。

1.2 现存主要问题

首先, 安装工艺和新型设备兼容性差, 依赖传统人工操作难以适应高精度设备装配需求, 进而引发接触不良、温度异常等现象; 其次, 各专业间协作失调情况严重, 因协同规划不足导致管线排布冲突和预留孔洞偏差, 只能进行返工处理; 再者, 调试过程缺乏统一标准规范, 常出现操作顺序混乱、检测指标遗漏及数据记录不完整等问题; 最后, 绿色施工技术应用存在一定局限, 现场建筑垃圾量大、材料浪费严重, 且可再生能源系统整合调试技术尚不成熟。

2 建筑工程电气系统安装关键技术创新与应用

2.1 预制装配式电气管线安装技术

依靠工厂化预制还有现场精细化施工, 有效克服传统管线安装精度不足弊端, 在预制环节用数控设备来制造构件, 管线与配件按600毫米、900毫米等规格批量下料, 把接口误差限定在正负0.5毫米范围之内,

作者简介: 宋友(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气安装。

还配套唯一标识系统实现全流程管控。现场作业依托 BIM 模型来进行空间协调,将定位误差控制在 10 毫米以内,配合激光测距仪等工具实现快速安装,单个接头作业耗时只需 2 分钟至 3 分钟,针对特殊工况在潮湿区域选用防水接头并做防腐处理,室外管线增设防晒保护层,最终检测要求绝缘电阻值不低于 1 兆欧^[2]。某商业综合体项目实践显示该方法使管线安装工效提高 35%,材料损耗率从 8% 压缩到了 3%。

2.2 模块化配电设备安装技术

把开关柜、变压器这些设备统一设计成标准化模块,以此支持工厂化预制以及现场快速拼装工作,按照功能单元来划分模块,通过标准化接口保证各部件能够实现互换。其中开关柜采用抽屉式结构,母线槽接触电阻要控制在不超过 50 微欧的范围,变压器运行噪声需控制在 55 分贝以下,单个模块重量不能超过 2 吨^[3]。现场安装的时候先使用预埋螺栓固定基础且将误差控制在 ± 5 毫米以内,利用专用吊具开展吊装作业, M10 螺栓的紧固扭矩设定在 35 牛·米至 45 牛·米。例如:某绿色办公大楼应用该技术之后,配电系统的安装时间从 45 天减少到了 20 天,合格率达到 100%,故障处理时间缩短了 60%。

2.3 智能照明系统安装技术

通过融合物联网技术和智能控制算法来达成照明的精准管控与高效节能,系统构建“感知层—网络层—控制层”这样的三层架构^[4]。感知层配置光照度及人体红外探测装置用于信息采集,网络层利用 RS485 总线完成数据传递以保障信息流通,控制层负责远程操作与智能逻辑处理来实现有效控制。施工阶段借助 BIM 技术优化设备布局以提升施工合理性,光照度传感器安装高度设定为 2.5 米且允许误差 ± 5 厘米保证安装精度,控制器与灯具采用即插即用设计方便安装与维护,线缆选用低烟无卤阻燃材料提高使用安全性,调试环节对传感器进行校准确保数据准确并配置多种照明场景方案,实际项目节能效果提升 35% 以上体现节能成效。

3 建筑工程电气系统调试关键技术实践

3.1 低压配电系统调试技术

按照先空载运行后带负荷、先分项系统后整体系统步骤分四个阶段开展测试,第一阶段用 2500 V 兆欧表检测绝缘电阻要求不低于 1 M Ω ,同时额外检测变压器吸收比 R60/R15 需达 1.3 以上;第二阶段进行空载测试要求变压器空载电流控制在 2%~4% 范围,母线槽连接部位温升不超过 30 K;第三阶段逐步增加负荷量确保三相电压不平衡度不超过 2%,电压偏差在 $\pm 5\%$

以内且功率因数不低于 0.9;第四阶段进行联动测试重点检查与消防、安防系统配合情况,确认应急照明能在 0.5 秒内启动。

3.2 消防电气系统调试技术

在火灾报警系统当中,探测器的响应时间要控制在不超过 30 秒的范围内,控制器的备用电源需维持运行至少 180 分钟^[5]。对于联动控制部分要模拟火情情况,要让排烟风机在 30 秒以内启动起来,防火卷帘要下降到 1.8 米的高度,应急广播的转换用时不能超过 5 秒,应急照明装置在断电之后要在 5 秒内启动发光,疏散通道的照度要不低于 1.0 勒克斯,楼梯间的照度要不小于 5.0 勒克斯,备用电源要保障供电时长达到 90 分钟。

3.3 智能化系统集成调试技术

构建能支持 BACnet、Modbus 等多种协议的统一通信框架,借助数据采集网关达成各系统之间的无缝对接。调试阶段要先保证单一系统实现稳定运行,接着开展各系统之间的联动测试,能源管理平台依靠优化变压器负载分配发挥作用,楼宇自控系统则实现照明与空调的协同控制功能。经过测试可知,数据传输可靠性达到 99.9% 以上的水平,电压电流测量精度误差不超过 $\pm 1\%$ 的范围,远程指令响应时间控制在 3 秒以内的标准。

4 工程案例

4.1 工程概况

某大型综合商务中心建筑面积 35 万平方米,由 34 层高的主楼以及裙楼共同构成,建筑总高度为 144 米,其中电气工程的投资额占到了总投资的 12%。电气系统总的设计容量是 42 000 kVA,涵盖了低压配电、智能照明、消防电气等内容,还有分布式光伏发电系统(装机容量 1 200 kWp)以及储能系统(容量 500 kW·h),年度设计用电量为 680 万 kW·h。

4.2 安装与调试技术应用

施工环节选用模块化配电装置包含 8 组开关柜单元、4 组变压器单元等以及预制装配化管线,其中总计有 12 000 余套标准部件。借助 BIM 模型技术消除空间冲突,智能照明系统部署了 320 个亮度采集器和 180 个红外感应探测装置。调试阶段测试显示低压配电系统三相压差为 1.2% 且功率系数达 0.92,消防系统警报警触发耗时平均 22 秒且应急照明激活时间控制在 3 秒内,智能化平台数据传输成功率为 99.95% 且远程操作响应时间为 2.3 秒。

4.3 应用效果

电气系统安装工期从原先的 60 天压缩到了 38 天,调试耗时从 15 天减少至了 8 天,工作效率提高了 35%,

安装质量达到了100%达标状态。设备连续6个月稳定运行未出现任何故障,智能照明系统节省电力达到了38%,光伏设备年度发电量达132万kW·h(占总用电量的19.4%),每年可减少碳排放1056吨,运维过程中故障排查时间缩短了70%,所需人力减少了30%,年度运维开支节省240万元。

5 建筑电气系统安装与调试质量控制体系

5.1 施工前质量控制

在技术准备阶段要以BIM深化设计作为根本依托,通过借助三维建模手段来汇集各专业信息,编制出科学合理的施工组织设计以及专项方案,以此保障作业流程能够合理且顺畅^[6]。同时要同步组织设计、施工和监理这三方进行图纸会审工作,重点复核设计参数、节点做法和技术规范的协调性,尽早发现并消除设计矛盾与潜在的问题。在材料设备入场的时候必须仔细查验质量证明材料,对于核心设备还需要执行开箱验收程序,逐一核对型号、规格以及配件是否齐全,对于线缆等材料要按照规范比例进行抽检,确保其性能能够达到标准要求。施工与调试人员必须接受系统化的专业培训,培训内容包含理论知识和实操技能,考核通过之后才可以上岗工作,严禁无资质人员进行操作。针对新技术、新工艺的运用情况,应该提前协调设备厂家的专业技术人员驻场给予指导,提供相应的技术支持和示范操作,确保施工质量与工艺要求能够落实到位。

5.2 施工过程质量控制

要认真去落实“三检制”工作,针对管线连接与设备安装等关键施工环节,需科学合理规划专项管控点,并且安排专业技术人员在现场全程监督,以此有效保障施工质量。隐蔽工程必须通过多方联合检验达标,还要签署相关文件之后,才能够开展后续的施工工作,接地电阻一定要符合相应规范要求,普通建筑接地电阻应不超过4欧姆,防雷建筑接地电阻则需小于1欧姆,要结合现场实际环境状况,切实做好防潮防晒防尘等防护工作,同时要加强对高空作业的安全管理,确保安全防护设施配备齐全且使用规范,保障施工全程安全有序开展。

5.3 调试阶段质量控制

要保证检测设备的精确度就得遵循规范调试程序,系统会自动采集绝缘电阻、电压及泄漏电流等关键数据,并且实时传输到加密存储系统,建立完整可追溯测试记录,以此确保信息的真实性和可追溯性。如检测到参数异常或者数值超出阈值,技术人员要按照三级流程来展开排查。第一步是核对仪器连接和校准的具

体状况,第二步是评估环境温湿度等方面的外部影响,第三步是对设备核心部件实施无损检测工作。依据排查结论来制定相应的改进措施,比如更换老化部件或者优化电路布局,整改之后需要重复进行三次连续的测试,最终提升电力设备运行的持久安全与稳定性能。

5.4 验收阶段质量控制

验收工作会按照“分步测试、整体联动、最终交付”这样规范的程序来开展。在分步测试这个环节当中,施工方需要逐个完成各单元的功能验证工作,测试达标之后就要马上报请监理方进行专业审核,监理工程师会对照设计要求与技术规范对测试结果做系统性核查。整体联动阶段,建设单位会召集施工、监理、设计团队以及技术人员组建联合验收组,来开展综合性联动测试工作,重点考察系统间的数据传递情况、协作能力以及综合运行效能。最终交付阶段,施工方应该提供全套的技术资料,这些资料要涵盖设计方案、设备配置、测试报告、操作指南等内容,并且要保证资料的合规性与齐全性。

6 结束语

建筑电气系统安装调试技术不断革新,为建筑业高质量发展提供有力保障。本研究聚焦预制装配模块化及智能化等先进技术路径,全面梳理电气各分项工程调试操作步骤并建立全程质量监督体系。实践案例表明,该技术应用后施工效率提升超过30%,工程质量达标率达98%,且能耗减少28%。未来,随着人工智能大数据等新一代信息技术广泛应用,电气安装调试领域将朝智能决策数字管理及绿色建造方向加速发展。施工企业应强化技术研发投入,加速成果落地,健全质量监管机制,持续优化电气工程施工水平与综合效益,以促进建筑行业可持续发展。

参考文献:

- [1] 王川. 建筑电气工程安装及调试要点研究[J]. 门窗, 2025(20): 196-198.
- [2] 杨晓伟. 建筑电气工程中低压配电系统的安装与调试[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(05): 154-157.
- [3] 朱磊, 董国庆. 建筑电气工程中低压配电系统安装与调试技术[J]. 科学技术创新, 2025(11): 180-183.
- [4] 郭亚楠. 建筑电气工程中低压配电系统的安装与调试[J]. 房地产世界, 2024(22): 122-124.
- [5] 吴洪英. 建筑电气工程中低压配电系统安装与调试[J]. 工程建设与设计, 2024(18): 113-115.
- [6] 田瑞玲. 建筑电气工程安装及调试研究[J]. 电气技术与经济, 2024(04): 320-323.

建筑暖通工程中的常见问题及解决措施探讨

王嘉迪, 周忆宁

(东营市东营区油城热力有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 随着我国社会经济的持续发展和城市化进程的稳步推进,暖通工程作为建筑工程体系中的重要组成部分,正面临多重挑战。如何在有效控制成本的前提下,既保障室内环境舒适度,又兼顾生态保护的双重目标,成为当前亟待解决的重要课题。基于此,本文对建筑暖通工程中的常见问题进行了探讨,系统分析了目前存在的问题,并提出了相应的解决措施,旨在为相关领域的工作人员提供有益的参考。

关键词 暖通工程; 暖通管道安装; 风口安装; 供暖; 保温施工

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.037

0 引言

目前,我国针对暖通工程的建设出台了相关的施工技术规范作为工作指导,但是受建筑物类型不同的影响,暖通施工工艺也会产生相应的改变,部分施工人员对于重要的技术要领缺少扎实的掌握,导致施工环节频繁出现各类问题,不仅造成工作大量返工,同时还会影响室内外装修面层和结构基层,造成通风不畅等各种问题,影响居住者的正常使用。基于此,本文对暖通工程施工过程中的技术要点进行分析,同时研究施工环节及经常出现的问题,并根据问题提出具体的解决对策,以期相关的暖通工程施工人员提供借鉴,有效推动暖通工程施工质量的整体提升。

1 暖通工程施工中技术要点

1.1 暖通管道安装

在暖通工程施工环节,管道的安装质量影响到整个系统的运行工作效果,所以这也是施工环节中的重要部分^[1]。进行管道安装时,首先要完成总管道的安装工作,然后再进行立管的安装和施工。对于空调系统内部管道的安装,为了保证管道安装的稳定性和准确性,一般需要先对支架进行安装和固定,然后再开展管道安装。管道安装环节需要对管材进行切割和加工,在开展切割作业时,要对管道内部检查其清洁度,确认没有杂质且干净之后才能够开展切割作业,以避免异物进入管道内,影响管道系统的正常使用。在管道安装工程完工之后,要立即对管口进行临时封堵措施,避免杂质或杂物掉入管道,导致管道出现堵塞或

污染的情况,同时在工程开展前期,应当委托具有专业资质的设计团队来对管线进行严谨的设计,保证管路的布局是科学且合理的,这不仅能够为接下来的安装施工创造良好的基础,同时也能够避免在后期投入使用后,系统运行出现冷热不均等效能问题。

1.2 供暖和调试

在初次启动供暖系统的时候,一般会通过向地暖系统中注入流动水的方式来测试管道的畅通性,排查是否存在堵塞等情况,在这一过程中要特别注意控制好流动水的速度,注入的流动水速度不要过高,因为如果水流过高,很可能会影响系统的排气,造成气体无法顺利排出^[2]。当注水完成后,应当立刻通过调节分水器放风阀门来进行排气操作,当空气完全排出之后,要及时关闭阀门。另外,针对供暖管道的注水操作,要提前制定详细的试压方案和工作流程,并安排专业且具有资质的技术人员全程进行监督,保障操作的规范性。

1.3 风口安装

在进行风口安装作业之前,施工人员必须认真检查与核对施工图纸以及相关的设计技术文件,准确把握风口的具体位置以及安装工作要求,同时要室内装饰施工进行配合,确定风口和内饰之间的相对位置关系,当风口安装完成后要对其安装质量进行复核,确认风口位置和固定方式等和设计图纸的技术规范相符,只有在验收工作通过之后才能够开启风口。此外在施工过程中,严禁出现擅自修改或调整设计方案的情况,避免对整体暖通系统的正常运行造成影响^[3]。

作者简介: 王嘉迪(1995-),男,本科,研究方向: 供热通风及空调工程。

1.4 保温施工

如果保温施工的工艺水平不符合设计的标准和规范,很容易导致各类运行故障,其中最为典型的表现是冷凝水滴漏问题、水资源浪费问题等^[4]。在供暖系统的施工建设环节,水系统施工作业是属于技术密集型和重要的工作节点,施工难度比较大,只有施工人员严格遵照既定技术规程进行施工,并且管理人员加强全过程的质量监督,对各项施工工序进行精细化的质量管控,这样才能够保证保温层施工满足最终的设计工作目标。另外还要注意,在施工环节中所产生的各种暂时不使用的预留孔洞,应当及时采取封堵措施,以消除潜在的质量隐患。

2 建筑暖通工程中的常见问题分析

2.1 图纸设计不合理

目前某些施工单位在制定暖通工程施工图纸的过程中,因为设计工作人员专业能力欠缺、工作态度不认真或者出现设计疏漏等各类因素的影响,最终导致完成的施工图纸有很多不合理的地方,如部分暖通工程的设计图纸和现场实际的施工状况之间有着明显的偏差,而施工人员进行作业之前没有严格的对施工设计文件进行认真的复核与审查,而是根据施工图纸进行施工,导致建设环节经常出现各种问题,频繁地进行返工修补,从而造成工程进度严重拖延。另外,还有一些暖通工程的设计图纸在细节的处理上存在很多问题,没有进行全面的考虑,影响了后续的现场施工工作的正常进行。

2.2 管线位置设置不合理

当前建筑暖通工程的设计工作普遍依靠CAD软件完成,但是在实际的操作环节,部分设计人员只会将图纸上将暖通管线的标高数据进行标注,而在图纸设计完成之后没有进行相应的检查与审核。这种工作流程上出现的疏漏,直接导致了在施工图纸中管线高度标注不准确、不同系统管线之间出现交叉等相关的技术问题,从而阻碍了后续的施工作业正常进行^[5]。如果施工人员在开始作业之前没有对设计图纸进行仔细的核对,在管线综合布局方案没有明确的状况下就进行施工作业,虽然短期内会使管道的安装过程显得比较快速,但是会对管线系统后期的运维以及检修工作埋下隐患,这种做法不仅提高了对管线系统日常维护和保养的工作难度,同时还会因为管线位置的混乱、标高错乱造成暖通系统运行效能受到限制。如果情况严重,需要重新进行返工,造成不必要的经济损失与工期延误。

2.3 暖通空调系统设备噪声过大

在暖通系统运行环节,噪声较大是比较常见的技术问题,虽然近些年随着制造技术的不断提升,市场上各种暖通空调系统的性能和参数都达到了相关的规范和要求,但是一个不容忽视的现实是,设备实际运行所产生的噪声指数明显高于产品样本中的理论参数。比如所选择的设备本身噪声就比较大,或者设备的容量和建筑实际的需求不匹配,就会导致设备在运行时噪声非常大。或者管道风机等设备在安装时不够牢固,并且工作人员也没有发现这一状况,时间一长就会导致其在运行过程中出现很多噪声。另外设备长时间没有进行维修和保养,整体的运行效能下降,就会导致噪声加剧。

2.4 水循环系统易出现故障

在暖通工程体系中,水循环系统是非常重要的,该系统的运行状态以及可靠性,直接影响了整个暖通工程系统各个功能能否得到充分的展现。如果水循环系统出现故障或者发生异常,将会影响整个暖通系统的正常运作。在水循环系统运行过程中有可能出现的各种问题和故障中,管道堵塞是经常出现且普遍存在的一种故障,通过分析该故障出现的原因可以看出,出现这种问题的源头在于初期管道线路布局规划存在不科学和不合理的情况,所以当系统在实际的运行中,如果发现这种堵塞的隐患时,应当及时地采取工作措施来进行处理,对当前的管道线路进行全面的优化和调整。如果对于这种问题没有及时进行处理或者拖延处理,将会导致情况越发严重,从而影响水循环系统的正常运行。另外,在暖通空调系统运行过程中,如果运维人员没有建立明确的管道设施维护机制,并且没有进行定期的维护和保养,同样会导致水循环系统出现故障,影响暖通空调系统正常的循环流动。

3 建筑暖通工程问题的解决措施

3.1 统一规范图纸要求并严抓图纸审核

暖通工程图纸的设计要按照工程目前实际的施工条件和我国现行的相关标准和规范,在正式开始项目施工之前,负责施工任务的技术人员以及作业人员应当全面细致地进行图纸的研读工作,理解设计文件中的理念以及技术导向,对其中的设计意图和工艺要求进行把握,同时详尽掌握图纸中明确规定的各种建筑材料、设备参数、规格以及具体的使用要求^[6]。在进行施工时,要及时比对现场实际施工状况和设计图纸的内容,如果发现存在偏差或者有疑问,应当立刻和设计单位进行技术方面的沟通和协调,通过规范化的沟

通渠道, 及时开展技术论证, 保证各种潜在的技术问题能够及时地被识别并得到妥善的解决, 从而避免问题的累积造成更大的损失。另外在工程正式开工之前的准备阶段, 必须要由建设单位牵头组织, 召集设计、施工、监理等各方的参建责任主体, 共同参与并开展图纸会审工作, 对会审过程中所形成的所有技术意见、修改建议和方案等进行详细的记录和整理, 在经过各方代表签字盖章确认后, 对文件内容进行归档和保存。开展图纸会审工作的重要目的在于对工程设计文件中所涉及的各种关键的技术参数、性能指标以及工作做法是否满足我国现行的规范和标准进行核查。另外要根据图纸要求, 提前通知各相关方准备齐全施工所需的设备和材料, 为暖通工程的正常施工创造良好的条件。特别是要认真检查管线的综合排布是否科学和合理, 以及建筑、设备和管线综合等各个专业图纸之间是否出现冲突或者矛盾的情况, 只有在施工准备环节, 把上述问题都进行有效的解决, 才能够保证暖通工程施工过程顺利进行。

3.2 合理配置管线布局

建筑暖通工程的实施工作, 不仅要保证系统性能和工程质量符合设计标准, 同时也要兼顾建筑物外立面的视觉美感和协调性。所以要求施工队伍要对各种设备管线进行科学合理的空间配置和系统性的布局优化, 如果在设计环节没有对管线进行科学的布局, 并且工作人员没有考虑到建筑结构的具体条件和一些限制因素, 不仅会导致管线排布非常混乱无序, 甚至可能引发施工现场管理和所制定的设计方案之间的冲突^[7]。所以, 施工人员进行作业时要严格遵循已经获得批准的设计方案来进行管道的铺设工作, 在管线实际的铺设过程中, 经常出现的技术难点在于不同系统管线之间存在空间交叉的冲突。为了避免这种问题的出现, 施工之前必须对管线走向、标高等重要参数进行清晰的标识和标注, 为接下来的施工作业提供明确的技术指引。

3.3 噪声的处理措施

在暖通工程安装环节, 项目的技术负责人必须对全体安装作业人员开展系统性的施工培训。在施工过程中, 现场管理人员要建立常态化的巡检机制, 通过定期对现场进行检查, 如果发现有不规范的安装行为, 要及时地进行制止, 并督促其整改, 从而避免因施工操作不规范成为噪声来源, 影响整体的工程质量。而对于已经出现的噪声超标情况, 安装技术人员要对这一问题进行深入调查, 找出噪声产生的根本原因,

从而制定出具有针对性的技术改进方案以及工作处理措施。例如: 当发现并确认风扇输出功率和暖通空调系统的实际要求不匹配时, 可以通过更换合适规格的设备来有效的解决噪声的问题。

3.4 水循环系统运作故障预防措施

冷冻水系统管道的畅通性是保障暖通水循环系统正常运作的重要因素, 而管道堵塞是引发水循环故障的主要原因, 出现这一堵塞问题主要来自两方面: 一是在管道排布施工阶段, 由于管线空间没有进行科学的规划, 造成不同管路之间出现交叉, 从而形成堵塞; 二是管道日常维护管理不到位, 内部有较多的杂质没有及时进行清理, 长时间的累积导致流通截面阻断。为了从源头上避免水循环运行故障的出现, 必须在施工以及后期的运维环节采取有效的措施进行改进。例如: 在管线设计环节, 要对管路的标高和坡度参数进行科学的规划, 保证管线布局合理有序, 从源头上避免交叉堵塞的情况出现; 另外要在管道系统内配置自动排污和排气装置, 并建立定期管道清洗维护机制, 通过主动进行维护降低水循环系统出现故障的概率。

4 结束语

暖通工程作为当代建筑工程体系中的重要组成部分, 技术的复杂性和施工难度比较突出。在实际的项目实施环节, 参建各方必须严格遵循相关的技术规范以及操作规程, 对施工作业进行科学合理的安排。并且针对施工环节有可能出现的各种问题进行前瞻性分析和处理, 从源头上保障暖通工程实施过程的科学性和规范性, 以提升暖通工程的建设质量, 推动我国建筑行业实现更好的发展。

参考文献:

- [1] 郭辉. 智能建筑暖通工程管道监控系统构建[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(12): 103-105.
- [2] 王凯, 白庚宇. 住宅建筑暖通工程中防排烟系统常见质量问题分析[J]. 居舍, 2025(05): 160-163.
- [3] 汪妍. 建筑暖通工程的管道防腐保温技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(03): 41-43.
- [4] 蔡跃波. 暖通空调施工过程中常见质量问题及技术改善措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(17): 184-186.
- [5] 钱通. 建筑暖通工程中容易出现的问题分析[J]. 建材发展导向, 2024, 22(06): 77-80.
- [6] 刘楠. 建筑暖通工程施工中的关键技术问题研究[J]. 广东建材, 2023, 39(12): 102-105.
- [7] 胡宗, 徐云凯. 建筑工程项目暖通空调节能设计的相关问题[J]. 低碳世界, 2023, 13(08): 88-90.

建筑工程施工质量控制中的关键影响因素研究

李宪猛¹, 韩金凤¹, 刘长宏¹, 田保全¹, 孟卫卫²

(1. 山东呈汇建筑工程有限公司, 山东 潍坊 261000;

2. 盛鸿建设发展有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266000)

摘要 建筑工程施工质量关系到建筑结构安全、使用功能和城市空间形象, 已成为工程建设的核心议题之一。本文在界定施工质量内涵与评价维度的基础上, 从人员、材料、施工工艺及技术、管理体系及组织架构、施工环境与外部约束五个方面梳理关键影响因素, 结合案例分析施工质量在实际工程中的成因与教训, 揭示人员决策、材料管控、工艺路径、制度设计及宏观政策之间的互动逻辑, 并提出质量风险前移、要素耦合管控和制度环境优化的策略, 以期为建筑工程施工质量治理提供可操作的分析框架与实践启示。

关键词 建筑工程; 施工质量控制; 质量风险; 数字化工艺

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.038

0 引言

建筑工程施工质量关系到建筑物的结构稳定性与使用年限, 是保障社会公共安全和经济可持续发展的关键因素。优质的施工不仅能够提高建筑物的耐久性、减少维护和修缮成本, 还能够通过优化资源利用率, 提升工程的经济效益与环境友好性^[1]。在实际工程中, 质量问题多由人员、材料、工艺、管理及外部环境等因素交织诱发, 且具有隐蔽性与累积性。为提升质量控制的针对性与前瞻性, 有必要从关键影响因素入手, 理清其互动关系与风险传导路径, 构建可落地的全过程控制框架, 为工程质量提升提供决策依据。

1 建筑工程施工质量的概念与评价框架

1.1 施工质量的基本内涵

施工质量可视作建筑工程在施工阶段按规范和合同完成后呈现出的综合状态, 集中反映结构是否安全可靠、功能是否满足使用需求以及构造细部是否处理妥当。其内涵既涉及混凝土强度、钢筋位置、结构整体刚度等硬指标, 也涵盖观感质量和节能防水性能等软指标, 体现技术标准与使用体验的统一。施工质量形成过程贯穿测量放线、材料验收、工艺执行、检验签认等环节, 某一处控制失当便可能在运营期显现为裂缝渗漏或不均变形, 因此实践中常把施工质量视为工程安全和耐久水平的直观映像, 同时也是企业品牌和项目管理能力的外在名片^[2]。

1.2 施工质量的评价维度

建筑工程施工质量的评价一般从若干互相关联的维度展开, 避免单一指标左右结论。安全性侧重结构

在设计荷载作用下保持稳定的能力, 构成质量底线; 适用性关注平面布置、空间尺度是否支撑预定功能; 耐久性强调在约定年限内抵御环境侵蚀和材料劣化的能力, 与现行绿色建筑和结构耐久标准保持呼应。观感质量体现构件成型精度与细部做法水准, 经济性着眼于在合理成本内取得相应质量表现, 环境友好与节能水平则显示工程同周边生态和城市景观的协调程度^[3]。多维度综合判断既勾勒施工质量的整体轮廓, 也提醒项目管理者识别并优先整改其中的薄弱环节。

施工质量是一种兼具技术属性与使用属性的综合状态, 其生成依赖施工全过程的连续控制。以安全性为底线, 以适用性和耐久性为核心支柱, 并辅以观感、经济性及环境绩效等维度构建评价框架, 能够为后续关键影响因素识别提供统一尺度, 也为质量风险前移管控奠定逻辑基础。

2 建筑工程施工质量控制中的关键影响因素及特性分析

2.1 人员因素

施工活动以人作为核心执行主体, 质量水准在相当程度上取决于管理团队的决策能力、技术骨干的专业判断和一线工人的操作熟练度。技能欠缺、责任意识弱化、班组协同失衡, 容易在钢筋绑扎、模板加固、混凝土振捣等细部环节埋下隐患^[4]。在武汉火神山、雷神山医院建设过程中, 中建三局在极短时间内组织上万名技术人员和工人抵达现场, 实行“党员突击队+专业工长+多工种协同”模式, 关键工序由经验丰富

作者简介: 李宪猛(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

班组负责, 管理层实行多级平行交底和全天候巡查, 十天内完成高标准交付, 工程质量得到多方核查认可, 满足传染病医院的严格功能要求。这一实践表明, 当人员选配、责任分工和价值激励形成合力时, 质量控制可以在高压工期下保持稳定水准, 人员因素不再只是风险源, 而是质量提升的关键抓手。

2.2 材料因素

建筑材料构成工程实体的物质基础, 强度、耐久性和环境适应能力直接体现在结构安全和使用性能上。近年来, 国家市场监督管理总局持续开展建筑材料产品质量国家监督抽查, 2022 年对 1704 家企业 1920 批次产品检测, 发现 111 批次存在强度、耐久指标等方面问题, 不合格率为 5.8%, 防水卷材等品种问题较为集中。海南公布的典型违法案例中, 某混凝土企业在生产商品混凝土时使用不合格砂, 监管部门依据《建设工程质量管理条例》对其进行处罚并责令整改, 该案被列入全省质量安全违法行为通报, 对地区企业及工地采购环节形成强烈警示。从质量控制视角看, 材料问题一旦进入结构, 后期补救代价极高, 倒逼建设单位和施工单位在原材选用、进场复验、供应链管理方面建立更细致的闭合链条。

2.3 施工工艺及技术因素

施工工艺体现工程技术路线和现场操作方式, 带有明显过程性特征, 对截面尺寸、几何偏差、节点密实度等指标影响显著。传统工艺依赖现场经验, 容易在复杂造型和异形构件中出现偏差放大现象。雄安新区在城市建设中大规模推广数字化工艺和新型技术路径, 在“雄安之翼”等项目上采用三维设计、3D 打印构件和建筑机器人安装, 通过毫米级打印精度与数字化放样控制, 显著减小安装误差, 保障大跨度空间结构成型质量。同时, 雄安 CIM 数字化建设协同平台整合 GIS、BIM 与规划数据, 实现构件信息溯源和施工过程可视化, 为复杂工艺的质量控制提供实时比对和碰撞检查支撑。经验显示, 当工艺设计与数字技术结合得当, 质量控制由“事后验收”转向“过程校准”, 技术因素开始扮演质量风险前移和误差吸收的角色。

2.4 管理体系及组织因素

质量管理体系决定各类资源如何在项目层面汇聚并运转。制度不清、责任边界模糊时, 即使有良好材料和先进工艺, 质量控制也容易流于形式。江苏在智慧工地建设中选取多个项目试点, 发布典型应用清单, 其中梅园地块建设项目依托智能劳动力管理系统落实实名制考勤、工种配置和培训记录, 质量监督站可实时调取关键岗位履职情况, 对异常出勤和持证情况进行核查。昆山市 2023 年房屋建筑工程综合大检查中,

对 84 个在建工程开展现场巡查, 发出质量整改通知书 33 份、停工通知书 8 份, 对未按要求整改的项目实施约谈和信用惩戒, 倒逼施工、监理、建设单位完善内部质量管理链条。从这些做法看, 管理体系一端连着制度设计, 一端连着现场执行, 当监督、考核和激励协同运转时, 组织结构可以把分散的质量行为收拢到可控轨道。

2.5 施工环境与外部因素

施工环境既包含气候、水文、地质等自然条件, 也涵盖监管政策、市场秩序和社会期望等外在约束。高温、高湿、强风等条件对混凝土养护、防水施工、幕墙安装提出额外要求, 若施工计划和工序安排缺少针对性调整, 质量隐患容易在季节交替阶段集中显现。同时, 外部监管氛围对质量控制有明显导向作用^[5]。湖南、广西等地住建主管部门近年以“四不两直”方式开展建筑工程质量安全专项检查, 随机抽取在建项目, 现场检测混凝土强度、钢筋保护层厚度, 对存在隐患的工程责令停工整改并通报全省, 把质量责任从文件层面拉回到具体工地。上海浦东等地区每年发布工程质量抽查数据, 对不合格材料和质量通病进行公开曝光, 合格率达到九成以上的同时, 典型问题也被清晰标注。这些实践说明, 当自然环境风险被纳入施工组织考量, 外部制度环境形成持续压力时, 项目内部质量控制更容易形成常态化自觉。

综合以上分析, 建筑工程施工质量由多要素共同塑造, 人员素质和组织能力决定执行深度, 材料与工艺勾勒质量上限, 管理体系和外部环境则调整各要素的组合方式和运行节奏。不同因素在具体项目中权重有所差异, 但从系统视角看, 任何单点改进若缺少其他环节的呼应, 收效都会大打折扣。将五类因素纳入同一分析框架, 有助于在后续讨论中把质量风险链条梳理得更清楚, 也为寻找综合治理的切入点提供较为坚实的基础。

3 建筑工程施工质量影响因素的内在联系及作用机制

3.1 因素间的互动关系

施工质量来源于多种要素的耦合状态, 很少由某一单点因素单独决定。人员判断左右材料选用和工艺执行节奏, 管理方式影响隐患信息能否在组织内部顺利传递, 外部监管强度又会改变企业对质量投入的态度^[6]。湖南长沙“4·29”居民自建房倒塌事故, 就呈现出结构设计薄弱、违法加层、日常维护缺失和监管缺口叠加的典型图景。事故调查显示, 原有五层房屋结构合理性差、承载储备不足, 在多次违法加层扩建后荷载大幅增加, 二层柱墙承压超限, 局部破坏持续

扩展,最终触发整体倒塌,监管部门在自建房规划、审查和排查中存在责任缺位,房主在出现明显裂缝等预警信号时拒绝疏散也是重要诱因。从这一链条可以看出,结构方案、施工质量、使用行为和监管力度彼此牵连,任何一环松动都会改变整体受力状态和安全边界,质量控制只有立足系统视角,把这些因素放在同一逻辑框架下统筹,才有可能真正压实安全底线^[7]。

3.2 质量风险的形成机制

质量风险多在长期累积中缓慢酝酿,在某个触发点上集中释放。工程从方案变更、结构改造到局部维修,每一次看似细微的处理,都有可能改变受力路径和构造协同关系。福建泉州欣佳酒店“3·7”坍塌事故具有典型示范意义。官方调查报告指出,该建筑原为四层厂房,在多层违法改建中增加夹层并扩建至七层,承载能力长期接近极限,事发前又在底部钢柱上实施违规焊接“加固”,改变截面受力状态,最终导致支承构件失稳,引发连锁坍塌。同时,相关检测、设计和审批机构在技术把关中出具失真材料,使高风险状态长期隐藏在“合格”外壳之下。由此可见,质量风险的形成往往经历“违规变更削弱冗余—检验失真掩盖缺陷—局部扰动触发失稳”的过程,控制思路就应前移到变更管理、检测公信力和关键工序干预上,避免项目运行长期处在临界状态。

3.3 宏观环境的调节作用

宏观制度环境通过法规标准、专项整治和信息化监管,对施工质量行为形成外部约束和激励,在一定程度上改写了各类影响因素的组合方式。上海发布建筑施工安全生产治本攻坚三年行动实施方案,提出建立危大工程清单和专家论证数据库,把专项施工方案论证、事中检查和信用约束纳入统一链条,借助数据平台推动重大事故隐患“动态清零”,质量控制由分散执法转向全流程治理。浦东新区在此基础上出台施工领域安全生产专项整治方案,强调对建设单位、施工总承包单位和分包单位实施全覆盖监管,用挂牌督办、约谈警示和事故隐患内部报告奖励机制,压实主体责任,鼓励一线人员主动上报隐患。在更大尺度上,国家适应气候变化战略2035提出对重大工程实施气候风险区划和“监测—传递—评估—调度”全链条管理,引导基础设施在规划阶段就考虑极端天气影响。这些举措共同作用,一方面提高违规成本,迫使项目参与方重新审视质量投入,另一方面提供政策支撑和技术工具,为施工现场形成稳定的质量控制生态创造条件^[8]。

纵观三方面内容,施工质量的生成机制呈现出多层嵌套特征:微观层面,因素在项目内部交织为一条持续作用的链条;中观层面,风险在多次细微变更和

局部操作中积累,在特定时刻被触发;宏观层面,制度与政策又不断校正各主体的行为边界。只有在这一整体框架下统筹考虑人员、材料、工艺和管理,并将重大事故的警示转化为前端治理的动力,质量控制才有机会从被动应对走向主动塑形,使建筑工程在安全底线之上形成更稳健的运行格局。

4 结束语

建筑工程施工质量是一种由多要素叠加形成的综合状态,既受结构设计和材料性能制约,又依赖人员素质、施工工艺、管理制度及外部环境的共同支撑。从人员、材料、工艺技术、管理体系和施工环境五个维度看,任何一类要素出现偏差,都可能在运营阶段转化为开裂、渗漏、变形乃至整体失稳。火神山、雷神山项目表明,当组织架构高效运转、关键岗位责任明确、技术路线匹配工程需求时,高强度工期下依旧可以保持较高质量水平;长沙和泉州事故则说明,违规改造、检测失真和监管失守一旦叠加,局部扰动足以触发灾难性后果。经验表明,施工质量控制需要从单点治理转向系统治理。一方面要在项目内部强化人才培养、严格材料准入、细化工艺管控、压实管理责任,让每一道工序都处在透明、可追溯状态;另一方面要借助智慧工地建设、专项整治行动和气候风险管理等举措,塑造稳定可靠的制度环境,提高违规成本,扩大优质项目的示范效应。只有在“要素优化—机制联动—环境约束”这一循环中形成常态化运行格局,建筑工程施工质量才能真正稳固在安全底线之上,并在此基础上追求更高层次的功能价值与城市品质。

参考文献:

- [1] 郑耀,李军,马辉. 建筑工程施工质量控制关键技术研究[J]. 现代工程科技,2025,04(05):145-148.
- [2] 吴万龙. 建筑工程施工质量控制存在的问题及策略[J]. 建筑与预算,2022(11):1-3.
- [3] 欧峻领. 房屋建筑工程中的施工质量控制关键因素总结[J]. 中国设备工程,2021(22):258-259.
- [4] 陈伟雄. 浅析建筑工程施工质量控制要点[J]. 四川水泥,2021(12):31-32.
- [5] 王岩. 加强建筑工程管理及施工质量控制的重要性及有效策略[J]. 住宅与房地产,2024(23):110-112.
- [6] 方伟敏. 建筑工程施工阶段工程质量控制措施[J]. 居业,2024(12):101-103.
- [7] 李静媛. 建筑工程管理和施工质量控制措施研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(11):47-49.
- [8] 林得意,林萌鑫. 建筑工程管理及施工质量控制的有效策略分析与研究[J]. 陶瓷,2023(11):203-205.

工业园区环境污染风险防控与管理策略研究

代伟

(涡阳县经开区生态环境保护工作站, 安徽 亳州 233600)

摘要 本文围绕工业园区环境污染风险防控与管理策略展开研究, 基于工业生态学相关理论, 分析我国工业园区在风险防控体系、区域协同、监管模式、基础设施及多元共治五个维度存在的相关问题。针对上述问题, 提出了构建系统性风险防控与应急体系、建立区域协同治理机制、推动监管智慧化转型、强化绿色技术应用及健全多元共治机制等一体化策略, 旨在为实现工业园区绿色高质量发展提供参考思路, 进而推动其从末端治理向全生命周期系统性防控的转变。

关键词 工业园区; 工业生态学; 环境风险防控

中图分类号: X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.039

0 引言

工业园区是国民经济快速发展的重要载体和经济增长的重要动力, 但是工业园区的发展也会加快产业聚集程度, 给区域环境带来一定的污染压力。近年来, 我国工业园区环境治理取得了一定的成绩, 但总体上存在风险防控不足、跨区协同不够、监管力度较弱等问题, 而随着生态文明建设的深入推进, 工业园区高质量发展与生态环境高水平保护需要协调统一, 这也是需要解决的现实问题。本文基于工业生态学和循环经济理论, 分析工业园区风险防控不足的问题, 并从体系建设、机制创新、技术赋能、社会共治等维度探索系统化、智慧化的园区治理模式, 提升工业园区绿色可持续发展能力。

1 研究背景

在我国全面推进高质量发展的背景下, 工业园区作为产业集聚地, 是经济增长的核心载体, 其环境治理水平也成为衡量区域可持续发展能力的关键指标。长期以来, 部分园区仍沿袭粗放型发展模式, 采用“先污染、后治理”的传统路径, 资源消耗大、污染排放高, 导致严峻的资源环境问题。因此, 工业园区需转向全过程、全生命周期的生态化管理。

我国在推动工业园区绿色转型方面出台多项政策, 在试验制度、资源节约、产业升级方面积累了很多经验。我国工业园区历经 40 余年的漫长发展岁月, 已经进入产城融合发展的复合型园区建设阶段^[1], 但也出现了一些新情况。例如: 试点园区标准高、条件好, 容易形成聚集优势, 但是也有可能将污染严重、达

不到要求的企业向周边监管较松的地区转移, 造成污染转移; 在基层, 也存在着“散乱污”企业回潮等问题。这也说明目前工业园区治理体系在处理复杂、动态的污染来源时效果不理想, 解决工业园区环境问题不能只靠事后追责, 更应从日常生产环节提前防范环境风险, 建立配套管理体系。

在制定环境治理政策时不能只从某个区域的园区, 而是要加强区域协同联动, 使生态效益得到公平分享; 要兼顾工业园区的发展和生态环境保护, 环境治理要向系统化转变, 政策的区域影响、基层治理的技术支撑、全生命周期的风险防控等都存在一定新的要求, 系统研究其环境污染风险防控及管理策略具有重要的理论意义及价值。

2 生态视角下工业园区环境管理的理论构建

2.1 深度融合工业生态学的系统循环思维

工业生态学是指导工业园绿色发展的方法论, 即工业系统是自然生态系统的一部分, 工业园区需要全生命周期的环境管理和技术创新, 同时还可以保护环境, 改善生态^[2]。工业生态学的思路是基于自然生态系统的物质循环和能量流动规律, 通过建立企业间核心产业共生的废物利用来实现资源配置最优化。通过建立生态闭环循环系统, 使某些企业生产中前端的原材料投入、中间的物质转化和后端的废弃物排放形成良性循环, 生产过程中的产品或废弃物尽可能排放到工业园区, 从而达到减少环境负荷的同时创造更高的经济边际产出的目标。实践证明, 工业共生模型的建立能够通过不断优化产业结构和空间结构, 进而推动

作者简介: 代伟 (1980-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 工业园区环境污染风险防控。

工业园区的低碳化建设,在大幅减少环境负荷的同时创造更大的经济边际产出^[3]。

2.2 严格遵循循环经济的三R原则导向

“三R”原则是指减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle);循环经济理论是实现工业园区绿色转型与全生命周期系统性防控的行动指南。在管理实践中,必须严格遵守并落实“三R”原则,推动园区生产方式的绿色变革。减量化原则是要求从生产前端加强源头管控,严格限制高耗能、高排放工艺及企业的准入,或者让该企业严格进行废弃物管控;再利用原则要求必须通过基础设施共享与企业间协同管理,延长资源在生产系统内的运行周期与服务寿命;再循环原则则聚焦于废弃物的末端再生与多级循环利用,将副产物转化为可再生资源。相关分析表明,通过执行循环策略,构建“工业共生”网络,能够实现资源效率的最大化和废弃物排放最小化,树立了良好的生态工业形象^[4]。

2.3 构建生态效率的量化评估与标准化管理框架

生态效率是以最小的资源环境代价创造最大的经济价值的观念,必须用一个具体、可量化的管理工具来实现。因此,需要建立以生态效率为目标的标准化管理架构;应该考虑的是该架构是以系统思维为导向,建立资源消耗强度(能源、水耗等)、污染排放绩效(碳排放、特征污染物排放等)、循环利用水平(固废综合利用率、中水回用率等)、生态承载能力等多维度的量化指标体系,并通过引入科学模型将这些指标组合成“目标层—准则层—指标层”三级评价体系。将可持续发展的宏观目标转化为可检测、可考核、可改进的具体管理任务。构建全生命周期系统性防控量化评估体系,一方面为识别环境风险源,动态评估园区生态绩效提供科学依据,另一方面为驱动产业结构优化、绿色技术应用提供方向。实证研究表明,生态工业园区的建设不仅提升了本地环境绩效,更通过引入标准化、指标化的管理,促进了资源配置的二次优化与产业的迭代升级^[5]。

3 工业园区企业环境保护存在的问题

3.1 风险防控体系碎片化,应急响应能力薄弱

在工业园区建设过程中,园区内的内部企业忽略了环境污染,调查显示,园区内的内部企业的环境危害预防能力和应对能力严重落后于生产需求,以舟山市定海工业园区为例,编制环境风险应急预案的企业比例仅为68%,而真正能够定期组织开展实操性、实战化演练的企业比例仅为54%^[6]。如果这种预防意识不足将导致企业在面对极端气象灾害或环境工程设备的突发故障,缺乏相应的应急物资储备和技术措施;另外

工业园区内部管理层的支撑力也极其薄弱。以定海工业园区为例,企业重发展轻保护,监管执法力量弱,信息公开不充分,这种监管力量的稀缺与信息流动的迟滞,使得环境风险大幅提高,导致管理工作长期处于被动应付的救火状态^[7]。

3.2 政策空间负外部性凸显,区域协同治理缺失

政策规制非对称导致区域空间存在溢出效应,引发环境治理不平衡。试点园区通过政策与资源吸引大量绿色优质生产要素在本地进行绿色转型,但在环境绩效考核压力下,部分不符合高标准环保要求的重污染、高耗能企业被迫向低标准、弱规制的欠发达地区流动,邻壑而治的空间负外部性背离了区域协同治理、整体可持续发展的初衷,导致了经济发展的瓶颈。

3.3 传统监管模式效能低,难以应对复杂污染态势

工业园区的发展和园区内企业的生产需求是日益复杂,而传统的周期性人工巡查、点位监测已经无法满足执法需求。基层监管实践中,发现、交办、整改已经形成闭环制度,仍然无法应对隐蔽性强、流动性大的违法排污,无法形成集约化、全时段智能化动态感知网络,在污染溯源、证据链固定、实时预警等方面存在很大的技术延时,执法难以对违法排污行为形成有效的震慑。

3.4 环保基础设施运维不善,绿色技术应用滞后

环境保护基础设施是工业园区的生态安全基础,目前工业园区基础设施的技术和装备水平普遍较低,技术迭代的滞后使得园区在面对资源枯竭与碳减排双重压力时,缺乏足够的应对工具。一些枢纽设施一旦失去了治理作用,则极易引起渗漏或超标排放,形成二次污染源。例如:当工业废水中含有重金属、高浓度有机污染物的时候,如果不大力推广应用膜生物反应器等深度处理技术,污水口的水质就不能够保证稳定,可能存在渗透污染,对附近地表水系和地下水生态系统具有威胁。

3.5 多元共治机制较为弱或,企业主体参与不足

园区环境管理的多元共治还有待探索,公众参与不足是影响治理效果的隐性障碍。根据已有统计,园区周边居民对环境质量与管理信息的知晓率普遍低于35%,而近一年实际参与生态环境相关活动的居民比例不足15%^[8];这些数据表明园区环境防护信息流通不畅,导致环境监管的社会链条失链,当园区周边的居民公众缺乏知情权和参与渠道时,环境监管的社会基础难以确定,且部分企业社会责任感弱,降低了公众对园区环境风险防控的信任,使园区在邻避问题和项目落地时面临较高的社会协调成本和舆情风险。

4 基于理论指导的环境污染风险防控及管理体系构建

4.1 构建系统性风险防控与应急能力强化体系

应急能力分散、反应速度慢,要以工业生态学的系统防控思维和标准化管理闭环思路为指导,建立起覆盖全园区的成体系防控机制。要求企业针对自身风险特点制定实战导向的专项预案,将演练常态化(半年一次企业级综合演练和年度跨企业联合演练)、演练的效果纳入企业环保信用评价,并作为激励或惩戒的内容。园区层面要强化专业监管队伍建设,开展常态化排查,配备专职环境风险管理人员及采用标准化检查清单,将隐患从发现到整改形成闭环。

4.2 建立区域协同治理机制以化解空间负外部性

一个区域的严格管控往往带来周边“污染转移”或“政策洼地”,这就要求治理的视角不能局限于特定区域范围。可通过跨行政区的治理协调,统一重点行业的准入和排放,联合执法,避免企业在规则宽松的地区聚集;也可以通过市场化的区域生态补偿制度,利用财政转移支付、绿色项目等补偿为保护环境、承接产业调整而受到发展约束的地区,缓解地方间的利益冲突;或者发挥先进园区“绿色辐射”:以技术输出、管理经验交流以及产业链合作带动周边产业绿色转型,从而在更大空间尺度实现生态效益均衡化。

4.3 推动监管模式智慧化转型以提升执法效能

技术赋能成为提升生态监管效能的有力手段。本文建议通过搭建集成式“智慧环保”监管平台,通过在线水质/气质监测、视频监控、无人机巡查等实现全天候立体感知,利用大数据与AI智能对监测数据进行实时分析与异常识别,实现污染溯源、精准布控。实践案例显示,如亳州市依托水质自动监测站建立的异常预警体系,就在污染排查与溯源方面显著提高了执法效率,表明了技术与组织协同能带来工业园区生态环境的实质性进步。

4.4 强化基础设施运维与绿色技术推广应用

要让环保治理的效果长久保持,离不开两方面:一是公共环保设施的稳定运行,二是绿色技术的广泛使用。为此,建议从两个方向同时推进:第一,让环保设施专业、智能地运行。应明确每一项公共环保设施由谁专门负责运行维护,同时运用在线监测和智能调度系统,防止设施自身成为新的污染源。第二,加快绿色技术的应用与研发。通过政策鼓励,推广清洁生产与深度治理技术。可以设立园区绿色技术推广基金,帮助企业进行环保改造,从而提高资源利用效率和污染治理能力。

4.5 深化多元共治格局与企业社会责任履行制度

治理的社会基础决定制度能否长期有效,实现政府主导、企业主体和社会参与的理念制度安排与制度工具。一是建立企业环保信用评价制度,并与银行贷款、项目审批等实现市场化挂钩,形成“守信激励、失信惩戒”的市场化保障;二是依法公开环境信息,利用统一平台对企业排污数据、在线监测结果及园区环境质量情况等进行公示,确保公众知情权;三是拓展公众参与渠道,通过环境决策听证、环保监督员、有奖举报等形式,把周边社区和公众逐步转变为协同治理的主体,促使企业在行为上内化环境成本,实现各主体在治理过程中的长期良性互动。

5 结束语

本文根据生态文明建设的需要,找准工业园区环境风险防控存在的五大短板,在理论指引下采取相互关联的五种整合对策进行归纳:通过建立区域协作机制,来解决污染可能波及周边地区的问题;通过引入智慧化监管手段,来突破传统监管方式的限制;通过推广绿色技术和保障设施稳定运行,来夯实环保治理的基础;通过鼓励企业、公众等多方参与,来凝聚社会共治的合力。这些不是一些孤立的单项工程,而是需要政策设计、技术支撑与社会参与三个方面同步推进的系统工程。今后的工作主要是将上述原则转化为可行的指标、试点路径,并且通过实践的反馈不断完善制度细节,达到工业园区生态风险防控长期稳固的目标。

参考文献:

- [1] 武亚迪.生态视角下工业园区低碳发展特征与优化路径:以苏州工业园区为例[J].城市建筑,2025,22(23):122-126,141.
- [2] 危庆国.工业园区建设项目的环境影响预测与应对措施分析[J].皮革制作与环保科技,2025,06(22):169-171.
- [3] 刘伟.工业园区环境质量综合评价体系标准化构建[J].中国品牌与防伪,2025(06):200-202.
- [4] 王明权,李国峰,杨伟强,等.基于工业革命视角下的工业生态学研究进展[J].科技风,2025(13):139-141.
- [5] 张子略.国家级生态工业园区试点对城市生态效率的影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2024.
- [6] 丁建平,顾信娜,周显.定海工业园区循环经济产业示范区生态环境监管研究[J].中国资源综合利用,2024,42(06):241-243.
- [7] 同[6].
- [8] 同[6].

金属模锻件锻造和热处理过程中 裂纹形成原因分析

侯敬都, 王禹婷

(章丘市宝华锻造有限公司, 山东 济南 250200)

摘要 本文对金属模锻件锻造及热处理裂纹产生的原因、诊断方法及控制策略进行了系统分析。金属模锻件锻造和热处理过程中的裂纹主要源于锻造缺陷(过热、过烧、折叠等)和热处理缺陷(淬裂等),其产生与工艺参数不当、材料敏感性、应力集中密切相关。采用宏观形貌观察、微观组织分析、断口分析相结合的方法,可以有效地识别裂纹的类型及产生原因。最后,从系统性预防、过程监控与检验、纠正改进三方面提出控制策略,旨在提升工艺稳定性与产品质量,为实际生产提供理论参考。

关键词 模锻件; 锻造; 热处理; 裂纹成因

中图分类号: TGI

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.040

0 引言

金属模锻件锻造和热处理是促进金属零件性能提高的关键工艺,但是在工艺中容易出现裂纹缺陷,极大地影响产品的可靠性和使用寿命。裂纹产生的原因比较复杂,它涉及材料特性、工艺参数、外部应力的多重影响。目的是对锻造过程中过热、过烧、折叠、淬裂缺陷产生机理进行系统阐述,同时对裂纹的识别诊断进行介绍。通过对裂纹宏观和微观特征的深入剖析,对其防治策略做进一步探索,以期达到优化工艺,减少缺陷的目的,并对工程实践有一定借鉴意义,有助于制造业质量控制和技术创新。

1 金属模锻件锻造缺陷与热处理缺陷

1.1 过热、过烧

过热和过烧都是锻造加热阶段由于温度控制失当造成的严重组织缺陷,二者无论从程度还是后果都有本质的不同。过热是金属材料锻造加热过程中温度高于其合理锻造温度区间的上限值,且在该温度停留的时间太长,造成奥氏体晶粒异常粗化。粗大奥氏体晶粒可使材料塑性和韧性显著下降,并在随后锻造变形或者冷却时加大开裂倾向,称为“过热脆性”。虽然通过后续的热处理(再正火、再正火几次等)有可能细化因过热而粗化的晶粒,恢复部分性能,但这无疑增加工艺复杂性和成本,且对某些材料效果有限^[1]。而且过烧是更严重,更不可逆转的缺陷。加热温度比过热

温度高得多,在固相线附近或到达固相线后,不但奥氏体晶粒变得异常粗大,而且其关键在于,晶界将被氧化乃至部分熔化。氧化性气氛下,氧沿着粗大晶界渗透,生成低熔点氧化物或者共晶体,极大地减弱晶界结合力;当发生局部熔化时,晶界的连续性会被直接打破。过烧材料晶界强度很低,受到微小锻造变形力或者内应力时就会沿着晶界产生裂纹,断口呈现出粗糙“石块状”或者“冰糖状”等特征,且其力学性能,尤其是塑性和韧性,会发生灾难性下降,材料只能报废^[2]。

1.2 锻造裂纹

锻造裂纹就是锻造变形时或者变形不久后在锻件表面或者内部出现的一种裂纹。它是由变形抗力、材料塑性、温度场、应力场等因素综合作用而成的。根据其成因,主要可分为以下几类:第一,由材料冶金缺陷引发的裂纹,如钢中的非金属夹杂物(尤以铝酸盐、硅酸盐等脆夹的含量最高)、严重的碳化物偏析、残余缩孔或疏松等。锻造变形过程中,上述缺陷处容易出现应力集中现象,是裂纹起裂的根源,有可能沿着变形方向延伸^[3]。第二,由于工艺不当而产生裂纹,如加热不均匀造成锻件各段塑性相差较大、变形不和谐等;过快的变形速度使变形的热效应显著,会引起局部的过热乃至过烧;变形量分布不合理,对低塑性区变形过大,或者临界变形度时造成晶粒粗大;锻造温度过低,物料进入冷脆状态而塑性锐减。第三,终锻温度过低或冷却过快,对于某些空冷淬硬倾向较大

作者简介:侯敬都(1996-),男,本科,研究方向:锻件、法兰盘的热处理。

的材料（高碳钢、高合金钢等），若锻后置于地面或空气中快速冷却，可能会出现组织应力和热应力的叠加而造成表面或者内部的开裂，这类开裂有时被认为是淬火开裂，但是根本原因在于锻造工序的影响^[4]。

1.3 折叠

折叠是锻造过程中一种特有的表面缺陷，但其根部往往是应力集中点，极易在后续热处理或服役中发展为裂纹源。折叠的实质就是锻件表面已经氧化的金属经过急剧塑性变形后挤压到锻件本体上，从而产生类似于分层状缺陷。究其原因，主要是模具设计、坯料形状、锻造操作等因素有关。例如：坯料尺寸选择不当（过小），需经过大的墩粗来填充模腔，易在棱角处产生对流而形成折叠；模具的设计不尽合理，如圆角半径太小、拔模斜度不够等，造成金属流动不畅和充填时表面金属向内挤压；操作失误，如单次锤击时给压下量过大或者砧子外形不当造成金属流动不均等。折叠从宏观上看是和表面成一夹角的间隙，内壁往往附着一层氧化皮或者脱碳层而和基体组织不联系。在随后的热处理尤其是淬火过程中，由于尖锐缺口效应，折叠根部将出现较大的应力集中现象，远超材料强度极限而诱发淬火裂纹，或者在服役过程中过早萌生疲劳裂纹^[5]。

1.4 淬裂

淬裂在热处理特别是淬火时是最为典型而又危险的裂纹缺陷。它是工件在奥氏体化温度下迅速冷却（淬火）时产生的，其主要原因是较大的热应力和组织应力的综合影响。热应力来源于工件截面内、外温差，使表面先冷后缩，心部冷却后缩，形成表面拉应力和心部压应力瞬间状态。组织应力则源于奥氏体向马氏体转变时发生的体积膨胀，由于转变非同步（一般情况下，表面是马氏体转变），导致表面膨胀受心部制约而产生压应力，心部则受表面膨胀的拉扯而产生拉应力。冷却过程中一定阶段两种应力将相互叠加。对大多数钢件来说，淬裂一般出现在冷却的后期，工件表面的温度已经很低时塑性很差，内部则是马氏体的转变引起体积膨胀，使得已经变硬的表面受到过大的拉应力作用，当这种拉应力大于材料在此温度范围内的断裂强度，就会发生淬裂。淬裂的敏感性受到很多因素的影响，如材料自身高碳高合金化趋势使淬透性增大，马氏体硬度提高，而韧性下降；工件截面尺寸的突变、尖锐棱角、孔槽的存在以及其他几何因素的影响，导致应力集中；淬火介质选择不当（冷却能力过强）、介质温度控制不均或搅拌不良；奥氏体化温度过高会使晶粒粗大而使断裂强度下降；原材料上有上述锻造折叠，夹杂物和其他缺陷。

2 金属模锻件裂纹的鉴别诊断与分析方法

2.1 宏观形貌观察

宏观形貌观察在裂纹分析中占有首要地位，它是最为直观和迅速地获得信息的方法。主要是靠肉眼、放大镜、体视显微镜从整体上考察裂纹及裂纹附近的范围^[6]。观察的重点内容包括：裂纹的位置与分布（是发生在应力集中部位还是截面突变处，是在表面上还是在内有无规律）；裂纹的宏观走向（它是否沿着晶界呈网状分布，并沿着变形方向扩展，或者与主应力的方向垂直）；裂纹的形态特征（直的、弯的、分叉的、龟裂的、弧线状的）；裂纹的开口情况（宽窄、是否充满氧化物、边缘是否圆钝）；与裂纹相关的其他表面特征（有无折叠、皱纹、压痕、氧化皮脱落、颜色不正常等）。如锻造过烧裂纹常以网状或龟裂的形式存在于锻件的表面，断口晶粒较粗；淬火裂纹一般较笔直，从尖角、孔边开始，向刚健方向发展；当进行锻造折叠时，它呈现为与表面形成尖锐角度的裂缝。通过宏观观察，初步判断裂纹产生的工艺阶段（锻造过程、热处理过程或后续），并为后续的取样和微观分析指明方向。

2.2 微观组织分析

微观组织分析充当宏观形态与材料内部变化之间的连接纽带，主要是通过光学显微镜和扫描电子显微镜，来对含有裂纹的样本进行金相分析和观察。这一阶段的中心工作是揭示裂纹和材料微观组织间的相互关系。分析者需准备含有裂纹尖端及其两侧区的典型金相试样并进行研磨、抛光、腐蚀等处理，然后进行观测。关键分析点包括：裂纹的扩展路径（是沿着晶界延伸、穿晶延伸，还是沿着夹杂物和偏析带等具体组织延伸）；裂纹两侧及尖端的组织状态（有无过热粗晶、过烧熔化晶界、脱碳、氧化、增碳、非马氏体组织及其他异常现象）；裂纹内部是否存在外来物（氧化产物、熔渣、模具材料等）；基体材料的组织是否正常（晶粒度、相组成、第二相的分布情况）。

2.3 断口分析

断口作为裂纹扩展过程中遗留下来的自然记录，携带断裂过程中的重要信息。断口的详细分析，特别是通过扫描电子显微镜进行的微观层面的断口研究，被认为是识别断裂模式和成因的最有效手段。对已经出现裂纹的工件要尽量将裂纹张开，并对新鲜断口进行观测。分析时需注意：先进行低倍观察，了解断口的宏观形貌（纤维区与放射区和剪切唇之比以及放射纹所指），判断断裂源的位置。再分别对断裂源区、扩展区、瞬断区进行高倍观察以确定其微观形貌特征。常见的微观断裂特征包括：解理台阶和河流花样（脆性穿晶断裂）、韧窝（微孔聚合型延性破裂）、沿晶界分离（晶

脆性断裂)、疲劳辉纹(疲劳断裂)等。如淬火裂纹断口常表现为准解理或者沿晶脆性,并可伴随少量撕裂棱;在过烧裂纹沿晶断口处,可能会发现有熔融球状物或者氧化物;如果裂纹是由于服役过程中的疲劳而扩展的,断口中就有可能发现贝纹线或者疲劳辉纹。结合能谱分析还可鉴别断口中夹杂物和腐蚀产物的成分并溯源。断口分析和金相组织分析互为补充,共同建构对裂纹萌生,扩展整个过程的全面理解。

3 金属模锻件锻造和热处理过程中裂纹预防与控制策略

3.1 系统性地预防

系统性预防为金属模锻件裂纹控制奠定了基石,其目的在于从根本上杜绝或者降低裂纹发生的危险。第一,需对材料有深入的认识,根据部件的使用环境和性能标准,进行科学的选择,并对原材料,包括其化学成分,进行严格的质量控制、纯净度(控制夹杂物的层次与形貌)、原始组织及表面状态。第二,根据材料特性及零件形状对其进行精密工艺设计。锻造方面:建立合理加热规范并采取阶梯加热以防止热应力过大,严格控制始锻和终锻的温度区间以避免过热和过烧;对变形工艺和模具进行设计和优化,保证金属流线的合理性,避免折叠和回流缺陷的出现,对复杂件可以通过多次锻造和合理安排中间退火来消除加工硬化现象。热处理方面:根据材料 CCT/TTT 曲线和零件尺寸,设计恰当的奥氏体化温度与时间、淬火介质(油、水、聚合物溶液等)、冷却方式(分级淬火、等温淬火等)以及回火工艺;对于易裂件可以考虑特殊的工艺进行预热、预冷淬火、带温入炉。

3.2 过程监控与检验

无论多么完善的工艺设计,都必须有严格的工艺实施作为保障。过程监控和检验是保证过程稳定,发现问题及时解决的重要途径。过程监控包括对关键工艺参数的实时监测与记录,如加热炉的炉温均匀性、工件实际温度(用红外测温、埋热电偶测温)、保温时间、冷却介质温度及搅拌状态,锻造设备打击能量或者压力。利用数字化、智能化监控系统能够自动采集数据、超限报警、趋势分析等功能,增强监控精确性。过程检验又渗透在各过程间。锻造后,应对锻件进行外观检查(目视,磁粉或者渗透探伤等)以发现表面裂纹、折叠;重要零件采用超声波探伤,检验其内部缺陷。热处理前后也应进行外观和尺寸检查,热处理后可利用硬度测试、无损探伤(磁粉、涡流等)进行初步质量评估。对大批量生产来说,首件检验与定期抽检制度的建立是关键。全部监控及检验数据要完整地保存并形成可追溯质量记录,以便为质量分析及工艺优化提供数据支撑。

3.3 纠正与改进

在检查中发现金属模锻件裂纹或者潜在的风险后,就需要开始纠正和改进程序。第一,立即对有缺陷的产品进行隔离,避免进入下一道工序或者出厂。然后,组织跨部门团队(由工艺、质量、生产、材料部门组成)进行根本原因分析。分析应基于前述的裂纹诊断方法(宏观、微观、断口分析),结合过程记录数据,系统地排查材料、工艺、设备、操作、环境和其他一切可能的因素决定引起裂纹的根源。依据分析结果制定和执行有针对性地纠正措施:调整工艺参数,对设备进行检修或校准,改善操作手法和更换物料批次。第二,纠正措施的落实需要小批量试生产来证明。更要把个例分析得出的经验与教训反馈给工艺文件、操作规程、质量控制计划等系统性预防性改进,对 FMEA(失效模式及影响分析等)库进行更新,对工艺窗口进行优化,并对检验标准进行了完善。这种基于“找出问题—分析原因—采取对策—验证效果—固化标准”的闭环管理,是推动工艺能力持续提升、实现裂纹问题根治的核心机制。

4 结束语

金属模锻件锻造及热处理工艺裂纹预防与控制是一个系统性工程,必须从成因分析、诊断与检测、预防与控制等各方面入手。本文论述了裂纹产生的主要原因、鉴别方法以及系统性预防、过程监控和持续改进的策略。未来,要进一步将智能化监测和工艺优化有机结合起来,以提高裂纹控制精准性和效率。只有不断地加深理论研究和实践应用才能够有效地减少产品的缺陷率和保证产品的质量,促进锻造和热处理技术朝着更高效、可靠的方向不断地发展。

参考文献:

- [1] 沈忱,郭凝,夏蓉,等.锻造更强铝合金:探秘中间形变热处理工艺对7050铝合金微观组织和性能的影响[J].金属世界,2025(06):76-82.
- [2] 李磊,裴家伟,孔佳.锻造与热处理工艺对2Cr13组织及性能的影响[J].热加工工艺,2025,54(13):175-182.
- [3] 朱梦颖,程和法.热处理锻造工艺对6016铝合金汽车板力学性能的影响[J].太原学院学报(自然科学版),2025,43(03):53-59.
- [4] 王莹莹,刘海江,赵文斌,等.锻造和热处理工艺对35CrNi3MoV锻件冲击性能的影响[J].锻压技术,2025,50(03):137-143.
- [5] 杨涛,尹奏凯,丁屹墀.双重退火热处理对TC6锻造叶片组织和性能的影响[J].航空动力,2024(05):75-78.
- [6] 徐临超,叶赛男,王文权,等.热处理工艺对锻造430F铁素体不锈钢组织和性能的影响[J].特殊钢,2024,45(06):83-87.

配电线路施工中常见质量问题的防控措施与实践研究

刘永峰

(临沂超越电力建设有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 配电线路是建筑能源供应的关键通道, 其施工质量会直接影响电气系统运行的可靠性、安全性以及耐久年限。本文针对当前建筑工程中配电线路施工实际情况, 系统归纳导线连接、管线敷设、接地装置及绝缘处理等环节常见缺陷, 分析这些缺陷的形成机理, 通过构建“精确预制、智能监控、规范施工、全程管控”综合性质量控制体系, 提出具体解决方案, 并借助实际项目案例验证该方案有效性。实践表明, 采用该优化技术体系后, 配电线路施工一次性验收合格率达到 99.2%, 系统运行故障率下降 52%, 后期维护开销降低 30%, 为提升建筑配电线路施工水平提供技术保障。

关键词 配电线路; 导线连接; 管线敷设; 接地装置; 智能监测

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.041

0 引言

在建筑业朝着工业化与智能化转型的进程中, 配电线路作为能源输送的核心关键环节, 承担着为建筑各个功能区域提供电力保障的重要任务, 其施工品质直接影响建筑的安全运行以及能源消耗效率。随着建筑体量不断增大、电力需求持续攀升以及新型用电设备广泛投入使用, 配电线路施工面临着布设环境多变、线路分布密集、技术标准严格等诸多挑战。传统施工方式由于工艺不规范、管理存在疏漏而引发的质量问题经常出现, 严重削弱了电气系统运行的稳定性。现阶段, “双碳”目标的推进以及新型电力系统的构建对配电线路施工提出了更高标准要求, 不仅要确保配电线路运行安全可靠, 还需要实现节能减排、绿色环保等多元化目标。最新行业标准的颁布实施为配电线路施工的技术参数和质量验收提供了更为细致的规范指引。本研究结合现场施工实际经验, 深入剖析配电线路施工过程中常见的质量缺陷及其产生根源, 探索创新性的质量控制技术与施工管理有效手段, 建立覆盖施工全过程的品质保障机制, 并通过实际工程案例检验其应用取得的成效, 为类似项目提供参考。

1 配电线路施工常见质量问题及成因分析

1.1 常见质量问题分类

导线接续部位常出现接触电阻偏高、接头锈蚀氧化以及压接力不足等现象, 运行时接头温度异常升高

超出环境温度 30 K, 还可能伴随局部放电或烧损情况。此类故障在配电网总故障中占比达 38%, 问题多发于铜铝过渡端子、分支连接点及导线末端, 严重时会导致系统跳闸。管线铺设存在走向偏移、支撑固定不牢、弯曲半径过小等问题, PVC 管路易产生裂缝且接合处密封不良, 金属管路存在毛刺未打磨、防腐措施未落实等情况, 管路交叉处缺乏有效防护易造成线缆绝缘层损伤, 占施工质量问题的 29%。接地装置焊接工艺不达标存在焊缝长度不足、未做防腐处理情况, 接地阻值超标一般建筑 $> 4 \Omega$ 、防雷建筑 $> 1 \Omega$, 防雷引下线与配电线路间距不足、避雷带固定间距超限, 可能造成设备雷击损坏或人员触电风险, 此类问题占比 17%。线缆选型未考虑环境适应性、高温潮湿场所未使用专用绝缘导线, 绝缘层存在机械损伤或老化现象、绝缘阻值低于 $1 M\Omega$ 经 2 500 V 兆欧表检测, 占质量问题的 16%, 易引发漏电或短路事故^[1]。

1.2 问题成因分析

首先, 从技术角度来分析, 施工人员技术水平有限, 没能充分掌握行业新标准与先进工艺, 进而导致手工操作误差较大; 其次, 在管理方面, 质量监督体系存在不少漏洞, 三级检查制度落实情况不够得力, 隐蔽工程验收环节基本就是走过场; 再次, 材料存在问题, 部分进场材料不符合既定质量要求。例如: 线缆绝缘层偏薄且连接件精度不达标, 环境因素如高温高湿及

作者简介: 刘永峰 (1975-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

作业空间狭小等条件,加剧了施工过程中的复杂程度,相应防护措施未能及时配备到位;最后,在设计层面图纸深化设计工作做得不充分,管线布局和其他专业图纸存在明显冲突,预留孔洞的位置也出现了一些偏差。

2 配电线路施工质量问题核心防控技术创新

2.1 导线连接标准化施工技术

为了解决导线连接方面的质量问题,我们实施“精准选材—规范压接—智能管控”综合技术方案。首先依据导线材质(铜或铝)以及截面积($1.5 \sim 240 \text{ mm}^2$)合理选用对应连接件,针对铜铝混接情况采用特制过渡端子防止电化学腐蚀发生,在压接作业环节采用液压式压接工具^[2],依据导线规格设定适宜压力参数(16 mm^2 导线压接压力不小于 60 MPa),通过 $2 \sim 3$ 次重复压接操作保证压接部位充分接触,同时运用红外测温技术实时追踪接头温度,借助超声波检测手段评估内部连接状况,发现不合格产品立即进行修复处理。该技术方案在某住宅工程应用之后,导线连接一次验收合格率从原来的 82% 提高到 99.5% ,并且实现接头运行故障零纪录目标。

2.2 管线敷设智能化防控技术

运用BIM技术来开展管线深化设计工作,提前识别并解决与给排水、暖通等专业交叉矛盾问题,进而形成三维形式的施工图纸。管线预制依靠数控切割设备实现精确下料操作,接口采用承插式方式并加装密封胶圈来保障密封,PVC管弯曲半径必须达到10倍管径以上的标准要求,金属管内壁经喷砂除锈处理后涂刷防腐层以防止生锈。现场安装借助激光投线仪进行精准定位,固定支架间距需符合规范要求即水平敷设不超过 1.5 m 、垂直敷设不超过 2 m ,管线交叉位置要加装绝缘保护套来避免安全隐患,利用管线探测仪实时监测安装精度状况,当偏差超出 $\pm 5 \text{ mm}$ 时就要立即进行校正处理,该技术的应用使管线返工率从 15% 下降至 3% ^[3]。

2.3 接地与防雷系统优化防控技术

把接地装置的施工方法进行改进,选用厚度不小于 4 mm 的热镀锌扁钢以及规格为 $L50 \times 5$ 的角钢当作接地材料,焊接作业的时候要采用双面施焊的方式,并且焊缝长度要达到扁钢宽度的6倍以上,焊接完成之后需马上涂刷沥青来进行防腐处理。在现场使用接地电阻测试仪开展测量工作,能够通过增加接地极数量或者添加降阻剂等措施来保证接地电阻符合相关标准,一般建筑要把接地电阻控制在 4 欧姆 以内,防雷建筑则需达到 1 欧姆 以下,防雷引下线 and 配电设施之

间要保持 1 m 以上的安全间距,避雷带的固定点间隔不能超过 1 m ,并且在转角处要适当加密到 0.5 m ,利用接地故障检测仪进行模拟试验,以此验证防雷系统与电力线路的协同保护性能^[4]。

2.4 绝缘防护精准防控技术

面对高温、潮湿或者腐蚀等特殊工况情况,就应该选用与之适配的专业线缆,像在高温环境当中推荐使用硅橡胶绝缘线缆,处于潮湿场所则需配备防水型线缆,线缆入场之前必须完成绝缘电阻检测,其要求是检测结果不低于 $1 \text{ M}\Omega$ ^[5],同时还要进行外观质量检查。施工的过程当中需要加装线缆保护套,以此防止线缆的绝缘层受到损伤,敷设完毕之后应该再次进行绝缘性能测试,并且在分支接头、终端头等关键部位增设绝缘防护装置。通过部署在线绝缘监测系统能够实时掌握设备运行状况,当检测到绝缘性能下降的时候可以及时发出预警,该措施能够有效将绝缘故障的发生率降低 65% 。

3 工程案例分析

3.1 项目背景

智慧社区项目总的建筑面积达到了 28 万平方米 ,其中涵盖了 12 栋高层住宅、 3 栋商业建筑以及地下车库,配电线路的总长度为 18 600 m ,供电容量的设计是 35 000 kVA ,系统采用TN-S接地形式,并且严格遵循《电气装置安装工程 电缆线路施工及验收标准》(GB 50168-2024)、《建筑物防雷设计规范》GB 50057-2010等国家规范,由于配电线路包含室内暗敷、室外直埋及桥架安装等多种工艺,施工条件比较复杂,对质量管理提出了较高要求。

3.2 技术应用措施

施工阶段通过BIM技术来深化配电线路设计,提前处理了 32 处管线冲突,导线连接采用标准化压接工艺,配备了 8 台液压压接设备和 4 台红外测温仪,还对 12 名施工人员完成了专项培训,管线安装引入预制化加工与激光定位技术,配备了 3 台数控切割设备和 6 台激光投线仪。接地系统选用热镀锌材质配合降阻剂施工,确保防雷引下线与配电线路的安全间距,绝缘防护采用环保防水型线缆,同步安装了 20 套在线监测装置。

3.3 实施成效评估

项目配电线路施工周期从原定的 55 天压缩到 38 天,工效提高了 31% ,质量检测数据显示导线连接合格率为 99.8% 、管线安装合格率为 99.5% 、接地系统合格率达到 100% 、绝缘防护合格率为 99.2% ,整体施工质

量合格率达 99.3%。项目投运 6 个月内仅发生 2 起线路故障,故障率较同类项目降低 52%,智能监测系统成功预警绝缘异常 3 次,有效规避了重大事故,年度运维成本较传统工艺减少 30%,节能效果十分突出。

4 配电线路施工质量全流程防控管理体系

4.1 施工前防控管理

在技术筹备这个环节要系统性开展图纸会审与技术交底工作,协调设计、施工以及监理等多方单位一起核查设计文件,精准识别出技术方面的重点与难点并实施分层次技术交底,以此确保施工团队能全面理解工艺要求。材料设备入场的时候必须执行双重检验制度,先核验生产许可、合格证明以及检测报告等文件的有效性与其合规性,接着依据标准规范对主要材料和核心设备进行抽样检测,确保检测覆盖性能指标与规格参数等关键内容^[6],严禁不合格产品进入工地。施工人员必须完成系统的专业技能培训并通过考核,取得上岗资格之后才可以参与作业,其中特种作业人员需要持有效资格证书并按规定定期更新资质。在采用新技术、新工艺之前,应该组织相关人员进行模拟操作训练,验证技术可行性并优化操作流程,保障施工过程安全可控且质量达标。

4.2 施工过程防控管理

在工程质量管理工作中推行“三检制”和现场巡查相融合管控方式。操作时先让施工队伍开展自我检查以确保工序达标,接着安排技术人员实施互相检查通过交叉核查识别隐患,最终由质检部门开展专业检测从技术层面把控品质。针对导线压接和接地焊接等核心环节,配备资深技术员全程值守,实时监控作业流程及时纠正不当操作,同时建立系统质量追踪机制,为每道工序设置唯一编码,完整记录施工参数作业人员及检验数据等信息,便于质量问题发生时迅速追溯责任源头。依托信息化管理平台,施工资料与检测数据即时上传,使质量管理人员动态掌握项目动态。一旦发现异常,则通过平台发出整改指令,并指派专人跟进落实整改情况,构建“发现—处理—确认”闭环控制流程全方位确保工程质量。

4.3 验收阶段防控管理

隐蔽工程验收要严格遵循分级验收流程,需等上一阶段验收通过之后才能开展后续作业,绝对不允许出现未经合格验收就擅自施工的情况。分项工程验收需要重点检查导线连接的具体情况,要确认其紧固程度、接触电阻以及相位匹配等各项指标。接地电阻检测必须选用四极法等高精度的检测手段,以此确保接

地系统安全且有效。竣工环节要汇总完备的技术资料,这些资料要涵盖隐蔽验收记录、材料检验报告、设备调试数据以及竣工图纸等文件,从而保障资料齐全又准确。质量验收采用抽样检测和复核验证并行的方法,抽样要覆盖各个分项工程,并且样本量不能低于 30%,对于关键区域和易出问题的部位要增加检测频率,通过规范抽样确保验收结论能真实反映工程质量。

4.4 运维阶段防控管理

为了保障配电线路能够安全可靠地运行,需要构建起完整的运行监管档案,全面记载线路各项技术参数、过往维修记录以及设备当前状况,必须定期开展专业检测工作,每季度至少完成一次红外测温,以便及时发现线路异常发热问题,合理设定故障报警标准以实现异常状况自动预警;需要完善应急处理方案,清晰规定故障处置流程和人员具体职责,每半年安排一次模拟应急演练,通过还原各类故障情境增强运维人员应急反应与解决能力,进而提升供电的稳定性。

5 结束语

保证配电线路施工质量是维持建筑电气系统安全运行的关键要素。本文通过剖析施工过程中常见质量缺陷及其根源,创新性引入规范化连接工艺、智能化铺设方案和精确化防护策略等关键技术,在此基础上建立覆盖施工全流程的质量监管机制。实际项目经验充分验证,这些技术与管理手段可行有效。未来,随着数字化智能化技术更多融入建筑领域,配电线路质量控制将朝着“预先预警,精准控制,智能维护”模式发展。施工单位要大力推动技术革新与人才队伍建设,完善质量保障制度,持续优化施工水平,为建筑业持续健康发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 张磊.建筑配电线路施工质量问题及防控措施研究[J].电气技术,2025(08):142-145.
- [2] 李艳秋.配电线路施工中的常见质量隐患及防治对策[J].工程建设与设计,2025(12):168-170.
- [3] 王建国.建筑电气工程配电线路施工质量控制要点[J].科学技术创新,2024(30):191-194.
- [4] 刘敏.配电线路施工质量问题防控技术的应用实践[J].房地产世界,2024(16):138-140.
- [5] 陈志强.建筑配电线路安装质量隐患及防控措施[J].全面腐蚀控制,2024,38(09):172-175.
- [6] 赵静.配电线路施工标准化与质量防控体系构建[J].电气技术与经济,2023(06):289-292.

市政道路雨水花园施工技术优化与径流污染控制效果研究

董伟, 刘明, 刘过

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 本文以市政道路雨水花园施工技术 with 径流污染控制为研究对象, 针对传统工艺存在的结构稳定性不足、径流净化效率低、施工适配性差等难点, 结合市政道路“高流量、强扰动、空间受限”的特性与海绵城市建设要求, 系统探究施工技术优化路径与径流污染控制机理。通过文献研究法、试验对比法与工程案例分析法, 从结构体系优化、填料配比改良、施工工艺精细化、智能监测管控四个维度构建全流程技术体系, 重点分析新型复合结构、功能型填料与精准施工对径流削减及污染净化的协同提升作用, 以期为解决市政道路径流污染难题提供参考, 进而推动海绵城市高质量发展。

关键词 市政道路; 雨水花园; 施工技术优化; 径流污染控制; 海绵城市

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.042

0 引言

市政道路作为城市径流污染的主要来源之一, 其路面雨水径流携带的 COD、SS、TN、TP 等污染物, 直接威胁城市水体生态安全。雨水花园作为海绵城市建设的核心低影响开发设施, 通过“渗、滞、蓄、净”协同作用, 可有效削减径流量与污染物负荷, 同时兼顾生态景观功能, 在市政道路建设中应用广泛。然而, 市政道路雨水花园施工面临显著复杂性: 施工区域多位于道路红线内, 空间狭窄且受交通流量干扰大; 传统施工技术存在结构设计不合理、填料配比单一、施工工艺粗放等问题, 导致雨水花园易出现堵塞、坍塌、净化效果衰减等现象。据研究数据显示, 传统雨水花园径流量削减率仅 37.64%, 污染物平均削减率不足 30%, 且易出现 TP“源效应”(削减率为负), 难以满足市政道路污染控制需求。本文结合近三年海绵城市建设实践成果, 从施工全流程角度开展技术优化研究, 构建适配市政道路场景的雨水花园技术体系, 通过工程案例验证其应用效果, 为同类工程提供技术参考。

1 市政道路雨水花园施工与污染控制的核心问题与影响因素

1.1 施工与污染控制的核心难点

市政道路雨水花园施工与径流污染控制面临三大核心难点。其一为结构稳定性与道路适配性不足, 传

统雨水花园多照搬绿地场景设计, 未考虑市政道路车辆荷载、路基沉降等扰动因素, 常出现过滤层塌陷、溢流口堵塞等问题, 据统计传统工艺结构破损率超 30%。其二为径流污染净化效率低且不稳定, 传统填料以单一砂石为主, 吸附与净化能力有限, 对 TN、TP 等营养盐污染物削减率仅 20%~30%, 且易因填料堵塞导致净化效果逐年衰减。其三为施工工艺粗放与质量管控滞后, 传统施工中填料铺设不均、分层压实不到位, 导致过滤层渗透系数差异达 1~2 个数量级。

1.2 施工质量与污染控制的关键影响因素

市政道路雨水花园施工质量与径流污染控制效果是结构、材料、施工、环境等多因素协同作用的结果, 核心影响因素可归纳为四类。结构设计因素是基础, 雨水花园的长宽比、深度、坡度、溢流口位置直接影响径流停留时间与收集效率, 不合理的结构设计会导致径流短路, 停留时间不足 10 分钟, 大幅降低净化效果; 过滤层、排水层的厚度与级配设计则影响渗透性能与结构稳定性^[1]。材料性能因素是核心, 填料的颗粒级配、比表面积、吸附容量直接决定污染物净化能力, 传统单一填料比表面积小 ($\leq 1.5 \text{ m}^2/\text{g}$), 对污染物吸附饱和速度快。施工工艺因素是关键, 填料铺设的均匀度、压实度控制不当, 会导致渗透系数不均, 局部区域积水或干旱; 道路与雨水花园衔接处施工不

作者简介: 董伟 (1979-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 城市道路与交通工程。

平整,易形成径流死角。环境与运行因素是重要外部变量,市政道路径流污染物浓度波动大,超出传统雨水花园净化负荷;降雨强度与频率影响径流冲刷强度,强降雨会缩短水力停留时间,降低净化效率。

2 市政道路雨水花园施工技术优化路径

2.1 结构体系优化与道路适配设计

结构体系优化的核心是提升雨水花园与市政道路场景的适配性,兼顾结构稳定性与径流净化效率^[2]。在平面与竖向设计方面,采用“狭长型+分级汇流”布局,适配道路红线狭窄空间,长宽比控制在3:1~5:1,深度优化为0.8~1.2 m,纵向坡度设置为1%~2%,确保径流均匀分布;在雨水花园入口设置5~8 m长的预处理段,内置截污格栅(间隙≤5 mm)与沉沙池,有效拦截路面大颗粒泥沙(粒径>2 mm),降低填料堵塞风险。

在复合结构设计方面,创新采用“预处理层+复合过滤层+生态溢流层”三层结构:预处理层采用粒径10~20 mm的砾石,厚度15 cm,起到沉沙与初步截污作用;复合过滤层厚度60~80 cm,分为上中下三层,增强净化与渗透性能;生态溢流层设置在过滤层中上部,采用生态混凝土砌筑,溢流口标高低于道路路面5~10 cm,确保超标雨水有序排放,避免道路积水。在结构稳定性强化方面,雨水花园侧壁采用C25钢筋混凝土模块化挡墙,内侧铺设土工布防止填料流失;底部设置Φ100 mm透水盲管,间距1.5~2 m,与道路雨水管网连通,提升排水稳定性,适应市政道路高径流强度场景。

2.2 功能型填料配比改良

填料配比改良是提升径流污染净化效率的核心,目标是研发“高吸附、高渗透、抗堵塞”的复合功能填料^[3]。在填料组分优化方面,采用“天然骨料+功能改性材料”复合配比,表层种植土选用改良型田园土,混合20%的椰糠与10%的珍珠岩,提升保水能力与透气性;中层功能填料采用“沸石+生物炭+陶粒”复合体系,三者体积比为5:3:2。在填料性能优化方面,控制复合填料渗透系数在 $1\times 10^{-2}\sim 1\times 10^{-3}$ cm/s之间,孔隙率≥45%,既保证径流快速下渗,又延长水力停留时间(≥25分钟)。在植被选型方面,选用耐干旱、耐污染、根系发达的本土植物(鸢尾、菖蒲、狼尾草等),形成混合种植模式,通过植物根系吸附与微生物协同作用,强化氮磷污染物去除。

2.3 施工工艺精细化与质量管控

施工工艺精细化是保障雨水花园结构稳定性与净化效果的关键,构建“精准放线—分层施工—严格验收”的全流程管控体系。在施工准备阶段,结合市政道路施工进度制定错峰施工方案,避开交通高峰期;对施工区域进行地下管线探测,确保雨水花园与管线间距≥1.5 m,避免施工冲突;采用全站仪精准放线,误差控制在±5 cm,确保结构尺寸符合设计要求。在分层施工工艺方面,基底处理采用机械压实与人工找平结合,压实度≥93%,防止后期沉降;填料铺设严格遵循“分层铺设、分层压实”原则,每层铺设厚度≤20 cm,采用小型振动碾轻压(压实度≥85%),避免过度压实影响渗透性能;土工布铺设采用搭接法,搭接宽度≥15 cm,并用钢钉固定,防止填料流失;植被种植选择春秋季节施工,种植密度控制在3~5株/m²,种植后及时浇定根水,确保存活率≥90%。在施工质量验收方面,建立三级验收制度,施工班组自检、技术部门抽检、监理单位专检相结合;重点检测填料级配、渗透系数、压实度等指标,其中渗透系数采用双环法检测,每100 m²设置1个检测点,确保达标后方可进行下道工序;对溢流口标高、盲管连通性进行专项验收,避免排水不畅。

2.4 智能监测与运行维护体系构建

构建“实时监测—数据预警—精准维护”的智能管控体系,提升雨水花园运行稳定性与污染控制效果^[4]。在监测系统配置方面,安装多参数水质监测仪、流量传感器、土壤湿度传感器,实时采集径流流量、COD、SS、TN、TP浓度及填料湿度数据,采样频率为1次/小时;在雨水花园入口、出口及内部设置监测点,形成全流程监测网络。在数据处理与预警方面,监测数据通过无线传输模块上传至云端平台,平台内置污染控制效果评价模型,自动计算径流量与污染物削减率。在运行维护方面,制定差异化维护方案,雨季前清理截污格栅与沉沙池,每年清理填料表层淤积泥沙;每3~5年对中层功能填料进行部分更换,避免净化效果衰减;定期修剪植被,补种死亡植株,确保植被覆盖度≥85%。

3 工程案例验证与应用效果分析

3.1 工程案例概况

以济南市经十路海绵城市改造工程为研究对象,该项目为城市主干路,全长6.8 km,双向八车道,在道路两侧绿化带内建设雨水花园共12处,总建设面积约8 600 m²。项目区域年均降雨量680 mm,路面径流

主要污染物浓度为COD 350~550 mg/L、SS 200~350 mg/L、TN 20~35 mg/L、TP 2~5 mg/L, 交通流量大(日均8万辆), 施工与运行环境复杂。项目采用本文优化的雨水花园技术体系, 包括复合过滤层结构、功能型填料配比、精细化施工工艺与智能监测系统, 重点监测径流量削减率、污染物削减率、结构稳定性等指标。

3.2 应用效果量化分析

通过1年的现场监测与数据统计, 优化技术体系取得显著成效。在径流污染控制方面, 雨水花园平均径流量削减率达68%, 其中中雨事件(降雨量10~25 mm)削减率超75%, 暴雨事件(降雨量>50 mm)削减率仍达55%, 较传统技术(37.64%)提升80.7%; 污染物削减效果显著, COD、SS、TN、TP平均削减率分别为58%、72%、45%、40%, 均优于传统雨水花园(平均28.32%), 且未出现TP“源效应”, 污染控制稳定性大幅提升。在结构稳定性方面, 施工后1年监测显示, 雨水花园无塌陷、堵塞等问题, 填料渗透系数保持在 5×10^{-3} cm/s左右, 结构完好率达100%; 道路通行未受施工影响, 施工区域交通拥堵指数较同期未施工路段降低15%。在经济性与生态效益方面, 雨水花园建设成本较传统工艺增加12%, 但因运行维护成本降低35%, 全生命周期成本降低20%。

4 技术落地保障机制与应用推广建议

4.1 技术落地的保障机制

为确保市政道路雨水花园优化技术有效落地, 需从组织、制度、人才三个维度构建保障体系。在组织保障方面, 成立由建设、设计、施工、监理、运维单位组成的专项工作组, 明确各方职责, 建立“设计—施工—运维”一体化协同机制^[5]。在制度保障方面, 制定市政道路雨水花园施工技术规程, 明确结构设计标准、填料配比要求、施工工艺参数与质量验收指标; 建立材料进场检验制度, 对功能型填料、土工布、植被等关键材料进行复检, 确保性能达标; 将雨水花园建设与运行效果纳入海绵城市建设考核体系, 强化责任落实。在人才保障方面, 开展专项技术培训, 内容涵盖结构设计、填料配比、施工工艺、智能监测设备操作等, 提升从业人员专业技能。

4.2 技术应用推广建议

结合市政道路类型、地域气候差异, 提出针对性应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案, 针对北方干旱地区, 增加雨水花园蓄水层厚度(≥ 30 cm),

选用耐旱植被; 针对南方多雨地区, 强化溢流系统设计, 采用“雨水花园+调蓄池”组合模^[6]; 针对老城区道路改造, 推出小型化、模块化雨水花园方案, 适配狭窄空间。二是推动技术标准化与政策支持, 建议地方住建部门出台激励政策, 对采用优化技术的项目给予资金补贴或评优加分, 鼓励海绵城市技术应用。三是强化示范引领与产学研协同, 选择典型市政道路项目打造示范工程; 推广“雨水花园+透水铺装+生态植草沟”组合模式, 构建全域径流污染控制体系。四是完善运维管理机制, 建立市政道路雨水花园运维数据库, 记录监测数据、维护记录等信息; 鼓励采用市场化运维模式, 引入专业运维单位, 提升运维效率与质量。

5 结束语

市政道路雨水花园施工技术优化与径流污染控制是海绵城市建设的重要组成部分, 需立足于“结构适配、材料创新、工艺精细、智能管控”的全流程思路, 实现结构稳定性与污染控制效果的协同提升。本文通过整合复合结构设计、功能型填料配比、精细化施工与智能监测技术, 构建了适配市政道路场景的雨水花园技术体系。工程案例验证表明, 该体系可显著提升径流量与污染物削减效率, 解决传统工艺难点。随着海绵城市建设的深入推进, 雨水花园技术将朝着功能复合化、施工模块化、运维智能化方向发展。未来应进一步推动新型绿色填料研发, 降低建设成本; 结合人工智能、大数据技术优化监测预警模型, 实现精准运维; 完善技术标准与人才培养体系, 推动优化技术在市政道路工程中的规模化应用, 为改善城市水环境质量、提升城市生态品质提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 胡云春. 海绵城市理念下市政道路给排水设计中的应用分析[J]. 居业, 2023(07):100-102.
- [2] 胡晓惠, 刘艳涛, 史成波, 等. 海绵城市理念在市政道路给排水设计中的应用[J]. 中国住宅设施, 2023(05):103-105.
- [3] 黄玉琢. 基于海绵城市理念的老旧小区排水系统改造策略[J]. 山西建筑, 2025, 51(19):122-125.
- [4] 杨成慰, 郭玉琴, 兰千, 等. 基于海绵城市理念的市政给排水设计优化研究[J]. 中国住宅设施, 2025(07):66-68.
- [5] 王凯. 海绵城市理念在市政给排水设计中的应用探讨[J]. 砖瓦世界, 2024(23):97-99.
- [6] 姜丽. 海绵城市理念在市政道路给排水设计中的应用[J]. 中州建设, 2025(02):80-90.