

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 7 月 第 21 期 (总第 646 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 7 月 25 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、印刷权和电子版（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 光伏-储能联合系统优化配置与运行策略研究
..... 何铁兴, 张文鹏
- 004 算力与电力协同视角下 IDC 供电系统优化措施
..... 胡铁峰
- 007 水电厂发电机组振动监测与故障预警系统的智能化技术研究
..... 季 莉
- 010 基于多传感器数据融合的水电厂水轮机故障智能预警与诊断方法
..... 王志勇
- 013 基于多材料复合结构的隔振器振动能量吸收性能与应用技术分析
..... 王小冬

智能科技

- 016 变电站 GIS 设备安装对接技术应用
..... 李正伟, 王城良, 吴 滔
- 019 智慧交通系统电力能耗优化与节能研究
..... 梁 浩, 申晓露, 王洪彬
- 022 智能化测绘技术在工程测量中的应用展望
..... 尹天成
- 025 配网工程电力电缆故障智能化诊断技术研究
..... 王晓慧, 杨 帅
- 028 多源信息融合的软岩隧道施工灾变预警研究
..... 曾艳芹
- 031 AI 技术在岩土工程勘察数据处理中的应用研究
..... 王献明, 宁浩宇, 孙炳学
- 034 BIM+ 物联网技术在输变电工程智能检查中的应用
..... 张 丽

应用技术

- 037 水利工程堤防防渗施工技术应用分析
..... 孙 艳

目录Contents

040	水利水电工程施工中的混凝土裂缝防治技术.....	黄小林
043	浅层土质滑坡中复合支护技术的应用研究.....	栗 扬, 程泽轩
046	公路桥梁隧道施工中注浆技术的具体应用.....	赵智兵
049	港口与航道工程钻孔灌注桩施工主要技术探讨.....	何 理
052	高速公路沥青路面车辙病害处治技术应用研究.....	曾文俊
055	水利工程软土地基处理工艺的改进与效果分析.....	刘 彪
058	市政道路桥梁施工中现浇箱梁施工技术应用分析.....	薛朋辉, 徐兴星

科创产业

061	建筑工程建设中节能环保施工技术的运用.....	陈 勇, 苏焱芳, 赵冰冰
064	地质技术服务工程项目全过程风险管理研究.....	谭 鑫
067	配电网电压波动机理分析与综合调控技术研究.....	李健勇, 武升照
070	基于 BIM 技术的绿色建筑工程项目成本精细化管理.....	齐成成, 马 添
073	老旧建筑外墙改造中反射隔热涂料的节能效果分析.....	汤加富
076	面向智慧城市的物联网电子信息系统集成模式创新研究.....	雷 鹏
079	“沙戈荒”大基地电氢协同技术经济分析及发展路径研究.....	姚 佳

技术管理

082	公路桥涵软土路基加固方法探讨.....	夏 艇
085	沥青路面施工技术要点及质量控制.....	梁海峰
088	湿拌砂浆生产与施工质量控制要点分析.....	吴慧玲
091	深基坑工程施工技术及风险防控措施分析.....	王 森, 徐宗峰
094	复合土工材料在建筑地基沉降控制中的应用.....	赵志勇, 赵景睿, 刘长静
097	10 kV 配电运行中故障产生的原因及防范措施.....	邱 鹏
100	建筑施工安全管理中的常见问题及对策研究.....	魏天文
103	高层建筑混凝土结构施工技术及质量控制分析.....	张永闯, 李永明

科学论坛

106	路基施工质量检测关键参数控制研究.....	艾 彬
109	钒钛磁铁矿工况衬板的表面强化工艺研究.....	张凤君, 宋晓明, 杜祥科
112	道路桥梁工程质量检测常见问题及对策研究.....	计文婷
115	高层建筑外墙单体变形缝设计与施工技术研究.....	孙 静
118	电气安装工程现场安全风险辨识与防控技术研究.....	司松松, 张延卫, 赵 磊
121	建筑给排水与暖通工程施工技术及质量控制研究.....	周 军, 刘 娟
124	吸附—两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂生产废水的效能研究.....	赵 丽

光伏 - 储能联合系统优化配置与运行策略研究

何铁兴, 张文鹏

(山东首瑞能源科技有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 在全球能源结构向清洁化转型过程中, 光伏发电的间歇性特征, 使其大规模并网应用存在诸多限制, 储能系统配套成为破解该问题的关键。当前光伏 - 储能联合系统存在配置与实际运行需求不匹配、能量利用效率偏低等问题。基于此, 本文提出适配的优化配置方法, 明确各核心设备参数匹配逻辑, 制定适配不同工况的动态运行策略, 通过多场景验证完善策略可行性, 以期为光伏 - 储能联合系统工程应用提供技术参考, 助力新型电力系统构建, 推动清洁能源高效消纳与利用。

关键词 光伏发电; 光伏 - 储能联合系统; 储能系统; 储能变流器

中图分类号: TM721; TM615

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.001

0 引言

清洁能源替代是实现“双碳”目标的核心路径, 光伏发电凭借资源丰富、清洁无污染的优势, 在我国能源结构中的占比持续提升。光伏出力受光照强度、环境温度等自然因素影响明显, 出力波动会冲击电网稳定, 降低能源消纳效率。目前多数系统存在配置参数不合理、运行策略僵化问题, 制约系统综合效能发挥^[1]。本文梳理系统核心理论与设备特性, 分析配置与运行中的核心矛盾, 结合实际参数优化配置方案, 制定动态运行策略, 通过数据验证确保方案可行, 为系统高效稳定运行提供技术参考。

1 光伏 - 储能联合系统理论基础

1.1 光伏发电核心理论

光伏发电依托光电效应完成能量转换, 半导体材料吸收光子能量后, 电子发生定向跃迁形成直流电, 完成太阳能到电能的转化。光伏组件能量输出与光照强度、环境温度呈非线性关联, 光照强度提升会增加光子数量, 提升电子跃迁频率, 输出功率随之增加。环境温度升高会缩小半导体禁带宽度, 降低组件开路电压, 影响输出稳定性^[2]。光伏系统能量传输需经过组件串并联、汇流箱汇流、逆变器转换等环节, 各环节能量损耗直接决定系统发电效率, 为后续优化配置提供理论前提。

1.2 储能系统协同理论

储能系统是光伏 - 储能联合系统的能量缓冲核心, 承担能量存储、峰值削填、波动平抑的作用, 运行逻辑

与光伏出力特性、负载需求高度适配。磷酸铁锂电池凭借循环寿命长、安全性高、能量密度适中的优势, 广泛应用于光伏配套储能场景。宁德时代量产的 587 Ah 储能电芯, 能量密度达 434 Wh/L, 初始能量转换效率 RTE 达 96.5%, 全生命周期衰减缓慢, 可有效匹配光伏出力的间歇性波动。储能系统通过储能变流器 (PCS) 实现与光伏系统、电网的能量交互, 充放电功率、响应速度需与光伏出力特性精准匹配, 最大化发挥协同效能。

1.3 系统协同理论分析框架

光伏 - 储能联合系统协同运行需构建光伏出力捕获 - 能量转换 - 储能缓冲 - 按需释放的闭环逻辑, 框架核心包含能量捕获层、转换层、存储层、调度层四个部分。能量捕获层由光伏组件构成, 负责太阳能高效捕获与初步电能输出。转换层由逆变器、PCS 组成, 完成直流电与交流电的转换及能量双向传输。存储层由储能电池及电池管理系统 (BMS) 组成, 实现能量安全存储与状态监测。调度层由能量管理系统 (EMS) 组成, 统筹协调各环节运行, 确保系统能量供需平衡^[3], 为后续优化配置与运行策略制定提供完整理论支撑。

2 光伏 - 储能联合系统架构与设备参数匹配

2.1 系统整体架构设计

光伏 - 储能联合系统采用交流耦合架构, 适配多数存量光伏项目改造与中大型工商业场景应用, 架构涵盖光伏子系统、储能子系统、EMS 及负载 / 电网接口四部分 (见图 1)。光伏子系统由 670 Wp 光伏组件、汇流箱、光伏逆变器组成, 组件采用 PERC+/N 型技术, 转换效率达

作者简介: 何铁兴 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 光伏发电。

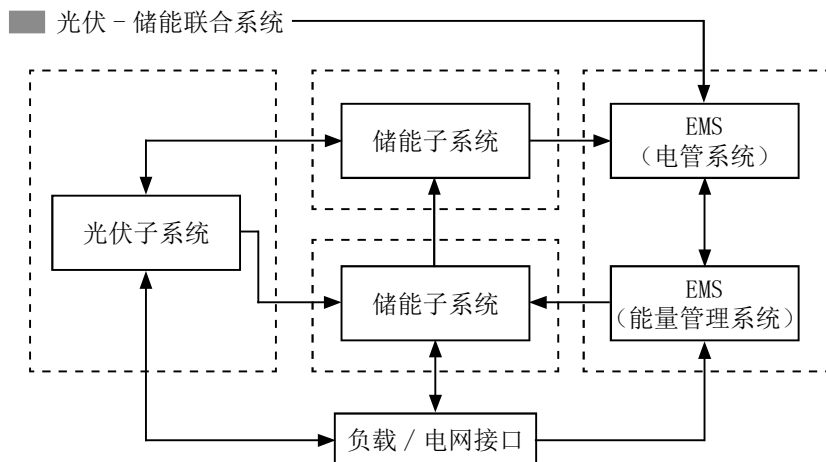


图 1 光伏-储能联合系统整体架构设计图

21.5%，首年衰减率 $\leq 2\%$ ，2025 年末输出功率 $\geq 84.8\%$ 。储能子系统由 587 Ah 磷酸铁锂电池、PCS、BMS 组成，PCS 额定功率与电池功率精准匹配，支持短时 110% 过载运行。EMS 负责实时监测各设备运行状态^[4]，实现能量智能调度与优化分配，架构设计兼顾兼容性与扩展性，可根据场景需求灵活调整设备配置。

2.2 核心设备参数匹配逻辑

设备参数匹配是系统高效运行的前提，需围绕光伏出力特性、储能容量、负载需求三者完成协同优化。光伏组件与逆变器的匹配需满足逆变器最大直流输入电压高于组件串最大开路电压，选用 1 500 V 级逆变器，最大转换效率 $\geq 99.0\%$ ，每路 MPPT 最大电流 25 A，确保光伏出力高效转换。储能电芯与 PCS 的匹配遵循功率与容量适配原则，587 Ah 电芯组成的储能模块，搭配对应功率 PCS，充放电转换时间 ≤ 200 ms，确保光伏余电快速存储、负载高峰及时放电^[6]。BMS 与 EMS 支持 Modbus TCP、CAN 等标准通信协议，数据采集周期 ≤ 1 s，实现储能状态实时反馈与调度指令快速响应。

2.3 系统协同运行框架构建

结合前文理论与设备参数，搭建光伏-储能联合系统协同运行框架，明确各环节能量流向与控制逻辑。光伏组件捕获太阳能产生直流电，经光伏逆变器转换为交流电后，优先供给本地负载使用。多余电能经 PCS 转换为直流电，存入储能电池模块，BMS 实时监测电池荷电状态（SOC），将 SOC 工作范围控制在 10%~95%，避免过充过放。光伏出力不足或负载高峰时，储能电池释放直流电，经 PCS 转换为交流电，补充负载供电。EMS 统筹光伏出力、储能状态与负载需求，动态调整能量分配策略，确保系统稳定运行。

3 光伏-储能联合系统优化配置方案

3.1 优化配置核心原则

光伏-储能联合系统优化配置需兼顾技术性与经济性，核心原则围绕场景适配、参数匹配、效能最大化三个维度展开。场景适配需结合户用、工商业、电网侧等不同应用场景的负载特性与光伏资源条件，确定光伏装机功率与储能容量的合理范围。参数匹配需确保各核心设备的功率、电压、响应速度等参数协同，避免设备冗余或性能不足导致的能量损耗。效能最大化通过优化配置提升光伏消纳率与储能利用率^[6]，降低系统运行成本，平衡短期投资与长期收益。

3.2 不同场景优化配置方案

结合我国光伏储能发展现状与公开参数，针对三类典型场景制定差异化优化配置方案。户用场景侧重自发自用与应急备用，配置 3 kW~20 kW 光伏组件与 5 kWh~30 kWh 储能模块，选用 5 kW 混合逆变器，带 UPS 功能，满足家庭日常用电与应急供电需求。工商业场景侧重削峰填谷与需量管理，配置 500 kW 光伏组件与 1 MWh 储能模块，搭配 500 kW PCS，支持并/离网切换，降低企业用电成本。电网侧场景侧重调峰调频与新能源消纳^[7]，配置 10 MW 光伏组件与 20 MWh 储能模块，接受上级 AGC/AVC 调度，提升电网稳定性。

3.3 配置参数优化逻辑

配置参数优化需基于光伏资源数据与负载需求特性，结合设备参数阈值开展测算。光伏装机功率根据场景可用面积、光照资源确定，避免过度装机导致的出力浪费。储能容量根据光伏日均发电量、负载峰谷差计算，确保储能模块能完全存储光伏余电，同时满足负载高峰供电需求。PCS 功率需与光伏装机功率、储

能容量精准匹配, 确保能量转换效率最大化, 减少转换损耗^[8]。参数优化平衡设备性能与运行成本, 实现系统综合效能最优。

3.4 不同场景配置参数对比与分析

表 1 数据均来自公开的光伏储能系统典型配置参数, 结合国家能源局发布的储能发展数据与企业公开设备参数确定。户用场景配置参数贴合家庭用电需求, 5 kW 光伏组件可满足日常用电, 10 kWh 储能模块可存储多余电能, 5 kW PCS 确保能量转换匹配。工商业场景 500 kW 光伏搭配 1MWh 储能, 可有效平抑负载波动, 降低需量电费, 500 kW PCS 支持大功率能量转换。电网侧场景 10 MW 光伏与 20 MWh 储能的配置, 可实现调峰调频功能, 10 MW PCS 满足大规模能量交互需求。三类场景的参数配置均遵循场景适配与参数匹配原则, 光伏装机功率与储能容量、PCS 功率的配比合理, 可最大化发挥系统协同效能, 适配不同场景的核心需求。

表 1 不同场景光伏-储能联合系统优化配置参数表

场景类型	光伏装机功率	储能容量	PCS 功率
户用场景	5 kW	10 kWh	5 kW
工商业场景	500 kW	1 MWh	500 kW
电网侧场景	10 MW	20 MWh	10 MW

4 光伏-储能联合系统动态运行策略

4.1 运行策略核心逻辑

光伏-储能联合系统运行策略以能量供需平衡为核心, 依托光伏出力实时波动、储能状态与负载需求变化, 实现动态调度。策略设计依托 EMS 的实时监测功能, 精准采集光伏出力功率、储能 SOC、负载功率等参数, 通过逻辑判断调整能量流向, 保障光伏出力高效利用、储能系统安全运行、负载供电稳定。运行策略兼顾灵活性及可靠性, 可根据不同工况自动切换运行模式, 适配光伏出力的间歇性与负载需求的随机性^[9]。

4.2 不同工况动态运行控制

结合光伏出力与负载需求的变化, 划分系统三种核心工况并制定差异化控制方式。光照充足工况下, 光伏出力大于负载需求, EMS 控制光伏逆变器优先为负载供电, 多余电能经 PCS 转换后存入储能电池, BMS 实时监测 SOC, SOC 达到 95% 时停止充电, 避免过充损坏电池。光照不足工况下, 光伏出力小于负载需求, EMS 控制储能电池经 PCS 放电, 补充负载供电缺口, 维持 SOC 不低于 10%, 保障储能系统安全。电网故障工况下, 系统切换至离网模式, EMS 控制光伏与储能协同为关键负载供电^[10], PCS 快速响应, 转换时间 ≤ 200 ms, 保障关键负载供电连续性。

4.3 运行策略可行性验证

结合国家能源局发布的 2025 年新型储能运行数据, 完成动态运行策略的可行性验证。2025 年全国新型储能等效利用时长达 1 195 h, 较 2024 年有所提升, 采用该动态运行策略, 可实现光伏消纳率提升, 储能利用率优化。工商业场景试点应用中, 500 kW 光伏+1 MWh 储能系统采用该策略运行, 可有效平抑光伏出力波动, 提升负载供电稳定性, 运行数据与策略设计预期一致。策略无需复杂控制模型, 依托现有 EMS 即可实现, 适配现有设备配置, 具备较强的工程可行性与推广价值。

5 结束语

本文围绕光伏-储能联合系统优化配置与运行策略展开研究, 针对系统配置与运行脱节、能量利用效率偏低等问题, 构建协同运行框架, 制定差异化优化配置方案; 提出适配不同工况的动态运行策略, 通过参数对比与数据验证, 确保方案可行有效; 解决不同场景下系统配置不合理、运行策略僵化的核心问题, 为系统工程应用提供技术支撑。但是, 本文的研究未充分考虑极端气候对系统运行的影响, 未来可结合数字孪生技术, 优化策略的动态响应精度, 推动光伏-储能联合系统在更多场景规模化应用。

参考文献:

- [1] 赵文武. 储能技术在分布式光伏发电调峰中的应用与效益评估[J]. 灯与照明, 2026, 50(02): 181-183.
- [2] 邢子涯, 刘玮, 耿俊成, 等. 融合储能的光伏发电系统优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(02): 591-593.
- [3] 何斐然, 康晓旭. 电力需求响应下的光伏发电储能配置优化技术[J]. 电气技术与经济, 2026(02): 128-131.
- [4] 王加童. 光伏发电系统与储能装置的协调运行及控制措施[J]. 灯与照明, 2025, 49(06): 83-85.
- [5] 熊芹, 王魁, 付礼雯. 基于混合跟踪的光伏发电散热系统效率优化技术[J]. 电工技术, 2025(23): 52-54.
- [6] 李进光. 光伏发电中储能系统的容量配置及运行技术研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(22): 96-98.
- [7] 樊小朝, 史瑞静, 徐立军, 等. 基于氢储能的光伏发电系统的设计与控制策略[J]. 电工技术, 2025(19): 47-53.
- [8] 孔令宽, 周旭东, 张经纬, 等. 基于大数据挖掘的光伏发电与储能电站安全智能控制系统[J]. 电子设计工程, 2025, 33(18): 96-100.
- [9] 陆雨婷. 光伏发电系统中的计算机控制优化分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(08): 236-237.
- [10] 程子源. 基于光伏发电的电力系统多元储能优化配置方法[J]. 自动化应用, 2025, 66(09): 115-117.

算力与电力协同视角下 IDC 供电系统优化措施

胡铁峰

(北京万国长安科技有限公司, 北京 100026)

摘要 面对数据中心算力规模不断扩大与电力供给短缺、能效管控日益严格之间的突出矛盾, 本文从算力与电力深度协同的视角出发, 构建以“负荷可预测、绿电可匹配、储能可调度”为核心的供电系统优化方案。实践研究证实, 算力与电力的协同管控, 可推动供电系统打破“被动适配”的传统运行模式, 转向“主动耦合”的新型运行逻辑, 有效提升供电效率、降低数据中心 PUE 值、提高绿电消纳水平与供电可靠性。

关键词 算力电力协同; IDC; 供电系统; 源网荷储; 绿电消纳

中图分类号: TM727; TP308

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.002

0 引言

当下, 数字经济与算力网络快速推进, 数据中心 (IDC) 作为承载云计算服务的关键基础设施, 呈现高密度、高功率、高能耗发展特征^[1], 用电规模持续攀升, 已成为全社会电力消耗增长最快的领域之一。传统供电模式采用固定冗余配置, 负荷匹配度低、绿电利用率不足、运行损耗高、可靠性管控薄弱, 难以适配新一代 IDC 发展需求。算力负荷的动态波动、时空分布、峰值特性与电力供给的时序特性、网架约束、电价机制存在强耦合关系^[2], 算力与电力协同调控成为破解 IDC 供电瓶颈的核心路径。

1 IDC 算力负荷与电力供给的耦合特性

IDC 供电系统优化的前提是精准解析算力负荷与电力供给的动态耦合关系。传统供电设计依赖经验冗余, 易造成容量过剩、轻载损耗、峰谷差过大等问题。准确预测高计算负荷区段进行算力供需动态均衡调整, 对于配用电终端的柔性配置具有重要意义^[3]。算力电力协同模式以多维度数据采集、负荷特征挖掘、时序规律分析为基础, 实现负荷与供给的精准匹配。算力负荷具备典型时空分布与动态波动特征, 云计算中心负荷昼夜波动明显, AI 训练集群长期高负载, 边缘 IDC 呈间歇性分散负荷, 负荷大小直接由服务器负载率、算力任务调度、业务峰值时段决定, 与用电功率呈强相关。电力供给侧受电源结构、电网容量、分时电价、绿电间歇性、需求响应机制约束^[4], 光伏、风电等清洁能源出力随机, 与 IDC 负荷存在时序错配, 市电存在峰谷价差与容量限制, 需依托储能、需求响应实现削峰填谷。算力与电力协同的本质是实现算力可调度、

负荷可调节、电力可优化、储能可充放的闭环运行, 推动供电系统从被动支撑转向主动适配、从固定配置转向动态优化、从单一市电转向多能互补^[5]。负荷分析的科学性直接决定供电架构选型、容量配置、设备选型与运行策略, 是算力电力协同优化的基础环节。

2 算力电力协同在 IDC 供电系统中的应用场景

2.1 算力负荷动态预测与供电容量优化

算力负荷动态预测是供电容量精准配置的核心场景, 依托时序分析与机器学习算法, 可实现短期、中期、长期高精度预测。采用 LSTM、GRU 神经网络对负荷时序数据建模, 融合 XGBoost 外部因素校正, 实现分钟级至日级负荷预测。依据预测结果动态调整 UPS 投入数量、变压器负载率、配电回路负载, 避免冗余供电损耗, 提升核心设备运行效率。

2.2 绿电深度消纳与多能互补供电

双碳目标下, 绿电成为 IDC 核心电力来源。算力电力协同实现绿电出力与算力负荷实时匹配, 在绿电充足时段提升算力负荷, 在出力不足时段降低非核心负荷, 最大化就地消纳。构建市电 + 光伏 + 风电 + 储能多能互补结构, 提升绿色化水平, 降低碳排放与用电成本。

2.3 源网荷储一体化协同调控

源网荷储协同是 IDC 供电高效运行的关键场景。“源”为市电与分布式绿电, “网”为内外供配电网络, “荷”为 IT 算力负荷与辅助负荷, “储”为电化学/飞轮储能装置。通过协同调控实现低谷电价储能充电、高峰放电, 电网紧张时参与需求响应, 电网故障时储能孤岛保核心算力, 可提升供电可靠性、降低用电成本、增强电网适应性。

作者简介: 胡铁峰 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: IDC 电气工程技术。

2.4 供电系统智能监测与故障预警

算力业务的持续稳定运行，高度依赖供电系统的安全可靠运行。依托多维度数据采集与智能分析算法搭建监测预警平台，对电压、电流、功率、温度、谐波及绝缘状态等关键参数进行全程在线监测。借助异常识别算法排查潜在隐患，利用故障诊断模型精准定位问题位置，达成事前预警、快速处理、预防性维护的目标，最大限度降低供电中断对业务运行造成的不利影响。

表 1 负荷数据处理关键技术

处理阶段	核心技术	输出形式	辅助工具	处理目标
数据采集	多源感知聚合	标准化数据流	MQTT/Modbus/IEC61850	全要素数据汇聚
数据清洗	异常值剔除 / 插值	规整数据集	Z-Score/SparkStreaming	提升数据质量
特征提取	特征向量化 / 频域分析	负荷特征矩阵	TF-IDF/ 时序特征提取	挖掘负荷规律
数据存储	分布式时序存储	高可靠数据块	InfluxDB/HDFS	支撑预测与决策

3.2 机器学习算法在负荷预测与协同调控中的应用

机器学习是算力电力协同的核心工具，在负荷预测、优化调度、故障诊断中发挥关键作用。LSTM 通过门控机制处理时序依赖关系，数学表达如下：

$$\begin{cases} i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \\ f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \\ o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \\ \tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \\ c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \\ h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \end{cases} \quad (1)$$

式（1）中： i_t 、 f_t 、 o_t 分别为输入门、遗忘门、输出门； $\tilde{c}_t$ 为候选细胞状态； c_t 为细胞状态； h_t 为隐藏状态； σ 为 sigmoid 函数； $\odot$ 为哈达玛积。

采用深度 Q 网络（DQN）实现储能充放电最优决策，回报函数如下：

$$R_t = -\lambda_1 C_{cost} - \lambda_2 P_{loss} + \lambda_3 \eta_{green} \quad (2)$$

式（2）中： C_{cost} 为用电成本； P_{loss} 为配电损耗； η_{green} 为绿电消纳率； λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为权重系数。

融合 LSTM-XGBoost 模型在工程现场实测精度最高，可满足实时调度与负荷匹配的现场要求。

3.3 源网荷储一体化协同控制框架

源网荷储一体化框架采用分层分布式架构，由感知层、控制层、配电层、应用层组成。感知层负责采集源网荷储全要素运行数据，控制层通过中央控制器与边缘控制器完成功率平衡、能量管理、负荷响应等核心逻辑运算，配电层包含高压配电、UPS 系统、智能母线、低压配电等执行单元，应用层面向运维人员提供调度决策、能效分析、碳排放统计、报表管理等功能^[6]。整套框架支持并网运行、孤岛运行、需求响应

3 算力电力协同下 IDC 供电系统优化关键技术

3.1 负荷数据采集与特征提取技术

负荷数据采集与预处理是协同优化的基础，分为数据采集、数据清洗、特征提取、数据存储四个阶段，关键技术如表 1 所示。

通过时序特征提取获得负荷峰值、谷值、波动率、周期特性，采用 InfluxDB 存储海量历史数据，为负荷预测、协同调控奠定高质量数据基础。

等多种工作模式，可实现毫秒级功率响应与秒级调度决策，保障供电系统稳定、高效、连续运行。

3.4 高效供配电架构与节能降耗技术

在供配电架构优化方面，结合 IDC 算力负荷特性与电力供给条件，采用高压直入供电方式减少降压层级，搭配模块化 UPS 与智能母线简化配电结构，降低多级变换带来的电能损耗，推广高压直流 HVDC 供电技术，减少整流逆变环节损耗。同时配置动态无功补偿装置 SVG 与有源滤波器 APF，改善供电电能质量，提升系统功率因数并抑制谐波分量，配合智能母线与智能断路器实现各配电回路负载状态实时监测与均衡分配，避免局部过载或轻载低效运行。

配电系统总损耗计算公式：

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_{UPS} + \Delta P_L + \Delta P_H \quad (3)$$

式（3）中： ΔP_T 为变压器损耗； ΔP_{UPS} 为 UPS 损耗； ΔP_L 为线路损耗； ΔP_H 为谐波损耗。

功率因数计算公式：

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

式（4）中： P 为有功功率； Q 为无功功率。

3.5 供电系统安全防护与可靠性保障

算力电力协同模式下 IDC 供电系统设备与控制节点增多，运行逻辑更复杂，需建立覆盖电气安全、设备安全、系统安全、网络安全的全方位防护体系，通过绝缘监测、接地监测、电弧故障检测以及温度在线监测装置防范电气安全隐患，基于状态监测数据建立 UPS、蓄电池、变压器、储能系统等关键设备的健康状态评估模型，实现寿命预测与预防性维护。系统层面采用

双回路供电、快速切换、备用电源自投以及储能不间断供电方案,确保市电中断时核心算力负载不中断。网络安全层面对智能配电系统与协同调控平台采取加密认证、分级权限管理、入侵检测等措施,抵御非法访问与网络攻击,关键场景可通过多重冗余配置与故障区段隔离技术,将供电系统可用性提升至99.999%以上,满足高等级算力业务连续运行要求。

4 IDC供电系统优化实施路径

4.1 规划设计阶段优化

在项目前期规划阶段,应基于算力负荷预测、电网接入条件、绿电资源禀赋及分时电价机制开展多方案技术经济比选,合理确定供电电压等级、配电拓扑结构、储能配置容量及充放电策略。将算力调度需求、负荷弹性调节能力、绿电消纳目标纳入整体设计,同步完成源网荷储协同控制系统架构、数据接口、调控逻辑与功能模块规划,实现供电系统与算力负荷、电力系统、储能装置的一体化设计,避免后期重复改造与资源浪费,为长期高效稳定运行奠定基础。

4.2 设备选型与技术改造

设备选型严格遵循高效率、高可靠、智能化、模块化原则,优先选用满足国家一级能效标准的变压器、UPS、智能配电柜及储能变流设备,全面提升硬件基础能效水平。对存量IDC实施分区分级、分步推进的节能改造,重点替换高损耗配电设备,完善谐波治理、无功补偿、绝缘监测与消防联动功能,同步加装智能传感、数据采集与远程控制单元,实现供电系统可测、可控、可调节。改造过程制定专项保障方案,确保业务不中断、运行风险可控。

4.3 运行调控与智能运维

建立算力-电力协同运行机制,按照负荷预测结果动态调整供电回路、储能充放电及绿电使用比例,实现削峰填谷、降低损耗、提升绿电消纳率。依托智能管控平台实现电压、电流、功率、温度、能耗、设备状态等参数实时监测与异常预警,推行状态检修与预防性运维,减少故障停机时间。定期开展能效核算、损耗分析与策略优化,持续提升配电系统负载率与运行效率,推动运维由被动处置向主动预判转变。

4.4 管理保障与制度建设

IDC供电系统的稳定高效运行,需要健全的管理体系与制度作为支撑。协同调控作业流程、能耗考核标准、安全操作规范以及应急处理预案均应逐一完善,岗位责任与管理要求也需清晰界定。针对绿电消纳比例、用电成本、供电可靠率、PUE等核心指标,应建立专项

统计与闭环考核机制,实现全流程闭环管控。运维团队的专业能力培训需常态化开展,强化智能配电操作、协同调度执行、故障快速排查等实战技能,保障各项优化方案真正落地见效。

5 实践应用效果分析

将上述优化措施应用于某省级算力枢纽IDC项目,该IDC总装机规模2000架,以AI计算与云计算为核心业务,采用市电+光伏+储能的多能互补供电模式,同步部署源网荷储协同控制系统与智能配电监测平台,项目投运后经连续6个月实测运行数据统计,供电系统平均负载率提升22%,供配电综合损耗降低15.3%,PUE值由改造前的1.48降至1.27,绿电本地消纳比例提升至36.4%,年减少碳排放约3120吨,通过储能峰谷套利与需求响应政策补贴,年均降低用电成本约186万元,供电系统故障预警准确率达到96.2%,非计划停电时间压缩至分钟级,供电可靠性与算力保障能力均达到设计指标。

6 结束语

算力电力协同打破传统供电被动适配模式,实现负荷可预测、绿电可消纳、储能可调度、能效可提升、安全可保障,是新型数据中心供电系统发展的必然方向。在实际工程应用中,应结合IDC业务类型、区域电力条件、绿电资源、政策要求开展差异化设计,持续优化算法模型与调控策略,提升系统适应性与鲁棒性。未来,随着算力网络、虚拟电厂、智能电网、新型储能技术快速发展,算力与电力协同将向更智能、更高效、更低碳、更安全的方向发展,为数字经济高质量发展与双碳目标实现提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 庞彬,王瑞东.基于云计算的通信IDC机房供电电源系统设计[J].通信电源技术,2025(01):117-119.
- [2] 孙晓伟.数字经济背景下算力协同理论机理与实践路径[J].合作经济与科技,2026(07):95-99.
- [3] 胡明,李晓华,蔡泽祥,等.基于计算负荷预测的配用电终端算力供需动态均衡方法[J].电力自动化设备,2024,44(12):52-60.
- [4] 周旭晖,赵以爽,裴培,等.面向智算的“算网电一体化协同”关键技术研究[J].通信世界,2026(03):52-55.
- [5] 林伯强,徐冲冲.支撑人工智能发展:算力与电力协同发展研究[J].世界社会科学,2026(01):127-141,238.
- [6] 谢人超,张嘉林,唐琴琴,等.电力算力协同系统及其关键技术[J].信息通信技术,2025,19(05):41-47.

水电厂发电机组振动监测与故障预警系统的智能化技术研究

季 莉

(大唐雅安电力开发有限公司, 四川 雅安 625000)

摘 要 振动监测技术作为评估发电机组运行状态的重要手段之一, 在故障诊断与预警系统中扮演着不可或缺的角色。传统的振动监测技术虽然具有一定的应用基础, 但随着电力设备复杂度的提升及运行环境的变化, 其局限性逐渐显现。智能化技术的引入为振动监测提供了更多的可能性, 特别是在数据分析、故障预测与决策支持等方面展示了显著的优势。本文通过对水电厂发电机组振动监测技术的研究, 探讨了智能化振动监测系统的组成、工作原理与实施策略, 同时分析了智能化技术及应用中的发展前景, 以期为推动水电行业智能化发展提供理论参考。

关键词 水电厂; 发电机组; 振动监测; 故障预警; 智能化技术

中图分类号: TM312; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.003

0 引言

随着全球能源需求的持续增长与环保意识的日益提升, 水电作为清洁能源, 在世界范围内得到了广泛关注。水电厂发电机组是水电系统中的核心设备, 它的运行稳定与否直接关系到电网安全和电力供应是否持续。在长时间的运行中, 发电机组很容易产生振动, 不仅会缩短设备的使用寿命, 还可能导致严重的故障, 从而造成重大的经济损失^[1]。水电厂发电机组的运行规模日益增大, 设备运行的安全性与可靠性成为保障电力供应稳定的重要课题。

1 水电厂发电机组振动监测系统的组成

1.1 传感器与数据采集系统

水电厂发电机组振动监测系统以传感器和数据采集系统为核心组成部分。传感器负责采集发电机组各部分振动信号以保证数据采集准确全面。常用振动传感器有加速度传感器、位移传感器和速度传感器^[2]。这些传感器基于不同工作原理及应用场景设置于发电机组关键部位, 以保证振动信息得到充分监控。加速度传感器常用于探测装置加速度变化情况, 并能准确捕捉到振动频率及强度; 位移传感器的主要功能是监控机组在运行过程中的位移状况, 从而辅助判断设备是否出现了显著的偏移或振动; 速度传感器的工作原理是通过测定振动的速度来评定设备的振动范围^[3]。这些传感器在实际使用过程中常采用多点布置方式来

保证机组各关键部位进行综合监测。该数据采集系统对各传感器输出信号汇总处理后形成了完整振动数据, 可作为后续信号分析及故障预警依据。

1.2 信号处理与分析模块

信号处理和分析模块在振动监测系统中起着核心作用, 它的主要工作就是对传感器所采集的振动信号加以处理和分析。由于传感器输出振动信号中一般含有大量噪声和冗余信息, 如何高效提取出有价值信号是信号处理中的一项重点工作。信号处理一般由滤波、去噪和特征提取几个环节组成, 以保证分析结果准确。在信号的分析过程中, 经常采用的方法有时域分析、频域分析、时频分析和小波变换等技术^[4]。时域分析主要是直接对振动信号波形进行分析来得到装置瞬时振动特性; 频域分析采用傅里叶变换技术, 将信号转化为频谱图, 从而揭示了设备的振动频率和其变化趋势; 时频分析综合考虑了时间和频率的变化, 从而能更精确地捕获瞬态振动信号; 小波变换特别适合处理复杂的信号, 并能对非平稳信号进行高效的分析。

1.3 预警与决策支持系统

在整个振动监测系统中, 水电厂发电机组的预警与决策支持系统扮演着至关重要的角色, 其主要职责是基于处理过的振动信号来进行故障的诊断和预警。该预警系统以智能化技术为支撑, 可以利用机器学习算法对设备故障可能存在的风险进行辨识, 在出现故

作者简介: 季莉 (1997-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水电厂机组智能监测。

障前发出预警信号以协助管理人员及时做出应对^[5]。在决策支持中,该系统既能依据当前振动状态评价设备,又能将历史数据和故障模式分析相结合以支持设备维修决策。通过对大数据进行分析,该系统可以对设备剩余寿命进行预测,为制定维修计划奠定基础。另外,该系统能够根据机组实际运行情况自动调节预警阈值以保证在各种运行条件下监测的准确性。

2 智能化故障预警系统的工作原理

2.1 故障预警的基本概念

故障预警系统对水电厂发电机组监测起到关键作用,主要目的在于通过实时监控与数据分析及时发现可能出现的故障征兆并发出报警信号,为设备维护与维修赢得时间,降低事故发生概率。区别于传统的以阈值为报警依据的报警机制,智能化故障预警系统将数据分析与模式识别结合在一起,可以更加准确地对振动信号进行异常情况识别。基于此,本系统采用机器学习与深度学习算法相结合的方式,从多维度数据分析入手,提升故障诊断灵敏度与准确性。该系统综合温度、压力、流量等各类数据增强故障识别能力,可基于实时与历史数据学习优化以达到准确预测不同运行状态下的故障。

2.2 智能算法在故障诊断中的应用

区别于传统监测方式,智能算法可以通过对振动信号的深度分析,提前识别出可能出现的故障模式甚至提前报警。目前流行的智能算法种类繁多,包括但不限于支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)、决策树、K-近邻算法(KNN)以及深度学习等技术。SVM通过在高维空间中构造超平面来实现不同振动模式的划分,从而有效地提高了划分精度。ANN能够应对复杂非线性问题、适应高噪声环境、并通过训练模型达到准确预测的目的。决策树和KNN通过对历史数据进行分类和邻近性分析,能够对设备的状态做出精确的评估。深度学习,特别是卷积神经网络(CNN)和递归神经网络(RNN),在振动信号分析方面展示了巨大的应用潜力。

2.3 数据融合与模型优化

水电厂发电机组振动监测一般要依靠多个传感器来收集振动、温度、压力等信息,存在时序性、异质性、冗余性等特点。有效地进行数据融合可以降低不同数据源所产生的不确定因素,增强故障诊断精度。常见融合方法有加权平均法、卡尔曼滤波、贝叶斯网络。卡尔曼滤波能估计出噪声干扰时系统的状态,适合实时监测时状态的更新和预报。贝叶斯网络利用概率推

断的方法对各种数据进行组合从而推算出设备部件健康状态,该优化融合模型可实现多种运行条件下的设备精准监测并进一步提升故障预警系统性能与可靠性。

3 智能化技术在水电厂振动监测中的挑战

3.1 数据质量与噪声干扰

振动信号自身易受环境噪声干扰,如外部机械设备振动,天气条件和温度变化均会影响所采集的信号,这些外部干扰信号和设备故障信号相互交织,造成原始数据不易区分。传感器性能差异、设备老化和保养不当等因素也会对振动数据精度造成影响,尤其当振动信号较弱或者设备运行环境恶劣时,所采集的数据品质不佳,不能有效地反映出设备的实际状况,影响故障预警精度。振动信号具有非平稳性,这也使得数据处理复杂度提高。装置在各种运行条件下振动模式都会发生改变,传统振动分析方法很难处理这些时变信号。在智能化技术不断推出的背景下,尽管深度学习和其他技术可以应对一些噪声和非线性,但是如何提升信号采集和分析的准确性仍是目前技术所面临的主要难题。

3.2 实时性与系统响应速度

在振动监测和故障预警系统中,实时性是其中一个核心需求。水电厂发电机组运行过程中,当振动出现异常时,如果不能快速做出反应和报警,就有可能造成故障扩散,甚至造成更为严重的设备破坏。但现有智能化监测系统通常面临数据处理速度不够快。当需要实时处理海量数据时,常规计算方法及硬件架构很难达到要求,造成系统响应速度慢、不能对故障进行及时报警等问题。尽管近年来计算能力有了显著提升,但随着监测数据的不断增加,尤其是当数据涉及多个维度时,如何在保证准确性的同时提升实时处理能力,仍然是系统设计中的难点。尤其对于大型水电厂,要求监测系统在数据量大、多点监控情况下高效低延迟地处理才能保证设备安全运行。

3.3 多源数据融合与信息整合

水电厂振动监测系统中所涉及的传感器类型较多,所生成的数据类型也较多,并且具有异构性。不同传感器的输出数据在格式、精度和频率上都会有差别,这些都使如何有效地对多源数据进行融合成为一个技术上的实现难点。现有的数据融合技术虽然能够在一定程度上将不同来源的数据进行整合,但面对大规模、复杂的水电厂环境时,现有的算法往往无法充分发挥其优势。水电厂的设备种类繁多,不同机组之间的振动特性差异也要求在数据融合时考虑设备的个性化差异。

4 智能化技术在振动监测中的优化策略

4.1 高效的数据采集与预处理技术

优质的数据采集是保证振动监测准确可靠的基础，所以选择合适的传感器是保证数据质量最重要的工作。水电厂这类复杂环境下振动信号受诸多干扰因素影响，传感器精度及抗干扰能力非常关键。为保证数据采集精度，要选用高精度和低噪声传感器，特别是风险大或者精度要求高的场合，更应该选用高灵敏度传感器、抗干扰性好的传感器来降低外界环境给数据采集带来的影响。

振动信号预处理是数据分析中不可缺少的一环，旨在改善信号质量、消除噪声及冗余信息并提取出有效特征。常用的信号预处理方法有去噪、滤波技术等。对于去噪，通常采用小波变换，它可以对振动信号进行有效分解，在去噪的同时保留有用信息。卡尔曼滤波作为一种依赖于递推算法的信号处理技术，有能力

在动态系统环境中进行噪声的估计和滤除，从而显著提高信号质量。利用这些高级预处理技术能够消除环境干扰，传感器误差及其他因素的影响，使后续分析与故障诊断更准确。

4.2 先进的智能算法与模型优化

在智能振动监测系统中，采用先进的算法和优化技术是提升故障诊断精度的关键。为了提高故障诊断的准确性，采用多种技术手段，如超参数调优、集成学习和迁移学习等，来优化算法模型。通过结合深度学习中的自适应特征提取能力，可以进一步减少对人工标注数据的依赖，提升模型的自学习能力。算法的并行计算和分布式处理技术，也能够有效提高处理效率，解决大规模数据带来的计算瓶颈（见表 1）。

在优化这些算法时，需通过不断调整参数和模型结构来提高诊断的准确性和稳定性。进一步结合深度

表 1 常用智能算法及其在故障预警中的应用效果

算法类型	应用领域	优点	挑战
支持向量机（SVM）	振动信号分类与模式识别	高准确度，适应性强	需要大量的训练数据，计算量大
人工神经网络（ANN）	故障诊断与预测	处理复杂非线性问题	网络训练时间长，可能过拟合
卷积神经网络（CNN）	信号特征提取与异常检测	自动特征学习，精度高	需要大量计算资源，模型复杂性高
决策树（DT）	故障模式分类与预测	解释性强，模型简单	处理复杂问题时准确性下降

学习技术，通过自动化的特征提取与模式识别，减少人工干预，实现更加精准的故障预警。

4.3 系统集成与平台建设

系统集成旨在把传感器采集、信号处理、数据分析、故障诊断和预警响应几个监测环节整合在一起，从而形成高效和稳定的系统、协同工作综合系统通过整合各技术模块可以显著改善系统整体性能和提高水电厂设备安全管理水平。

有效的数据存储架构可以保证数据的安全性和实时性，并对后续分析及决策起到辅助作用。在平台建设中，设备通信与数据传输是否稳定也是一个不可忽视的因素。实时性强、延迟小的通信系统对于远程监控、协同工作至关重要。随着科技的发展，对监测要求越来越高，要求系统必须有很好的扩展性才能满足新技术升级与功能扩展的要求。搭建开放式、模块化系统架构，能够有效地应对上述变革。采用模块化设计后，该系统可以根据实际需求灵活地扩展功能，增强了其长期可维护性与适应性。

5 结束语

随着智能化技术的不断进步，水电厂发电机组的振动监测与故障预警系统已经从传统的简单监测工具发展为综合的智能化系统。这一转变不仅提高了监测

精度与故障预测的准确性，也为水电厂的安全管理与设备维护提供了强有力的支持。尽管当前在数据质量、实时性、多源数据融合等方面仍面临挑战，但通过优化数据采集、应用先进算法以及加强系统集成，智能化振动监测系统的潜力无可限量。随着技术的进一步发展，智能化故障预警系统将在水电厂的运行管理中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 季军. 基于 RBF 神经网络算法的水电站发电机组振动故障监测方法 [J]. 水利技术监督, 2023(09):68-71.
- [2] 张飞, 刘兴华, 潘伟峰, 等. 水电机组振动监测与评价技术综述 [J]. 大电机技术, 2021(04):45-54.
- [3] 吉祥. 水电站调速系统关键部件故障诊断技术研究与应用 [J]. 电力设备管理, 2025(01):180-182.
- [4] 任岩, 张琳琳, 刘金伟, 等. 接入风光电的水电机组振动信号分析与故障诊断方法研究 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2022,08(04):98-102.
- [5] 高喜笙, 耿玉国, 余玲. 水电厂机组振动摆度在线监测系统的优化与应用 [J]. 信息产业报道, 2024(10):143-145.

基于多传感器数据融合的水电厂水轮机故障智能预警与诊断方法

王志勇

(大唐雅安电力开发有限公司, 四川 雅安 625000)

摘要 水电厂当前面临的运维压力持续攀升, 水轮机作为核心设备, 其运行安全性直接关乎整个系统的稳定与经济效益。面对日益复杂的工况环境与高度集成的技术系统, 仅依靠单一传感器采集的信息已无法满足高精度故障检测与诊断的需求。为提升预警响应效率与准确率, 本文系统探讨了基于多传感器数据融合的智能预警与诊断技术在水轮机设备管理中的应用路径与技术实现逻辑。通过分层次构建融合架构, 利用D-S证据理论、BP神经网络及Kalman滤波等多种算法实现异构数据的动态集成, 以期在无须大量增加传感器数量的前提下, 有效提升故障识别的时效性与鲁棒性。

关键词 水轮机; 多传感器融合; 故障诊断; 智能预警; 数据融合算法

中图分类号: TM312; TP277

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.004

0 引言

水轮机是水电厂发电系统动力的核心, 长期工作在高水压、高载荷、强振动和剧烈热交换等复杂环境下, 不确定的运行状况和频繁的外部扰动对故障监测提出了极高的要求。传统的依靠单一传感器信号进行监测的方法在多源扰动的背景下易产生误判和漏报现象, 从而造成维护响应延迟和设备健康评估失真^[1]。在数字化电力系统不断发展的时代背景下, 人工智能、大数据分析及信息融合等技术的进步为建立高精度和强鲁棒性故障识别及智能预警系统奠定了技术基础。

1 多传感器数据融合在故障诊断中的技术基础

1.1 多源数据类型与感知层结构

水电厂水轮机工作时, 一般都布置了多种类型的感知单元, 主要包括温度传感器、振动传感器、压力传感器、位移监测器、电流传感器和声音采集装置, 每类传感器所采集到的物理量各不相同且分布位置有差别, 其采样频率和信号特征表现出高度异构性^[2]。感知层是数据融合系统底层的基础, 担负原始数据采集、初步预处理和边缘特征提取的重点工作。由于传感器信号具有非线性、时延性以及易受环境干扰的特点, 需要在感知层构建具有抗噪能力和时间同步机制, 以保证数据上传的一致性和可比性。多源感知系统需要基于时间窗口设计滑动采样机制和信号同步算法对

多维数据进行时域对齐和小波变换、利用希尔伯特变换等技术, 成功地提取了特征频段, 并构建了一个适合上层数据融合处理的多维感知特征空间^[3]。

1.2 融合架构设计

多传感器数据融合系统一般按三层结构设计, 即数据融合层、特征融合层和决策融合层。数据层融合注重在原始信号水平上加强互补性, 主要利用最小二乘估计、加权平均和互信息熵进行信号数据初级集成; 特征层的融合方法是对从各种传感器中提取的特征数据进行整体处理, 如振动信号的包络谱、压力的变化速度以及温度梯度的波动范围等, 然后构造多特征联合向量来表征运行状态; 决策层融合是将各种特征结果经过逻辑判别和模型集成后构成最终状态识别结果和预警信号, 这一层可以引入模糊逻辑、贝叶斯推理, 神经网络集成方法, 增强了非确定性情况下模型推理能力^[4]。三层融合架构分工协同在提高系统对信号异常敏感程度的同时, 也有效地提高了多源信息条件下状态区分精度和响应鲁棒性(见图1)。

1.3 关键融合算法

在处理多传感器数据融合的算法体系里, D-S证据理论因其在处理不确定信息方面的优越性, 能够动态地分配不同传感器的信任度, 并最优地合成冲突信息, 适合在故障征兆阶段, 信号弱而不稳的情况下使用; BP神经网络拥有出色的非线性映射功能, 它能够在特

作者简介: 王志勇(1972-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水电厂设备智能监测。

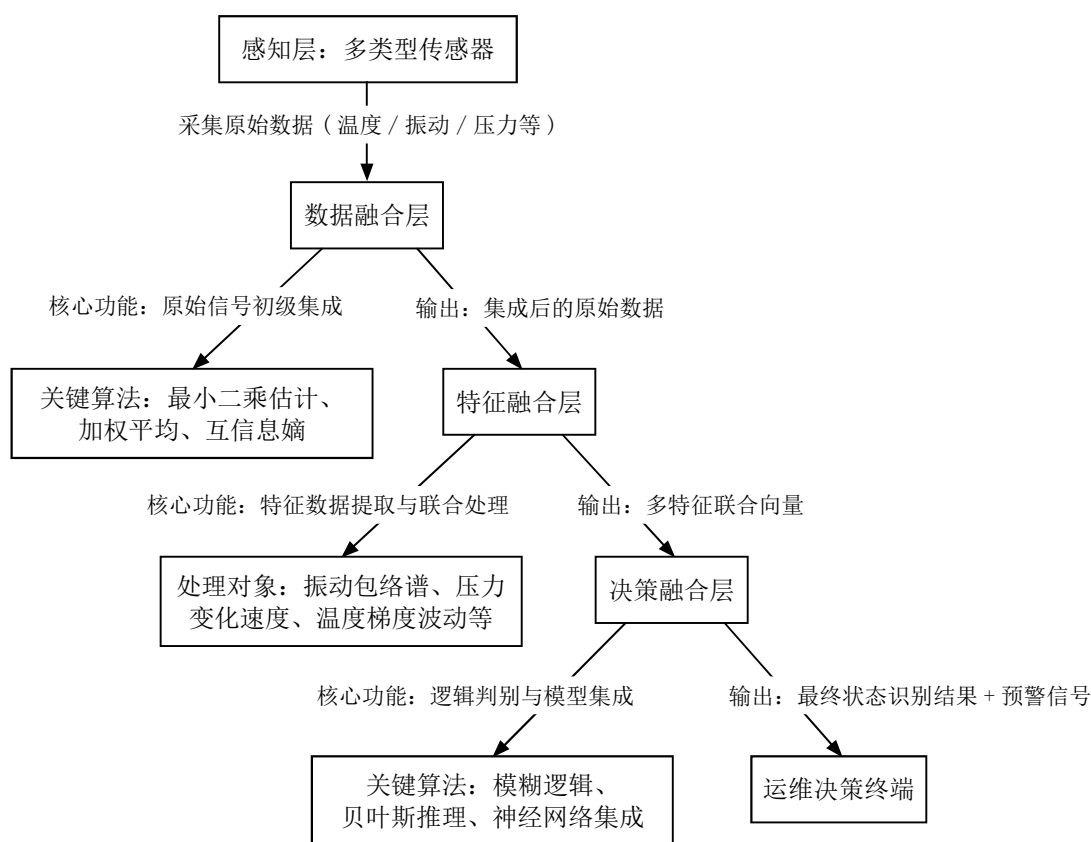


图 1 多传感器数据融合三层架构示意图

征层面对高维输入进行自我调整的训练，并捕获运行状态变动的深层关联模式^[5]。Kalman 滤波是动态系统状态估计的经典算法之一，它适合处理线性高斯噪声环境中信号的轨迹预测，可以对传感器噪声干扰环境中数据平滑和趋势预测起到一定的优化作用。三类算法分别在融合系统中担负着不同的作用，D-S 理论增强了系统的容错性和可信度管理，BP 网络对系统进行深度学习和非线性建模，Kalman 滤波对系统的时序预测和动态特征提取进行了优化。

2 水轮机故障诊断的智能化演化路径

2.1 从被动响应到主动预测：监测机制的转变

传统的故障诊断系统一般都是当设备出现异常运行或者停机事件时才开始工作，依赖于故障结果可视化或者报警机制来反馈信息，这一事后反应方式是面临高频率时、在多来源复杂干扰水轮机系统中，系统安全性高标准要求通常很难达到。在数据驱动建模技术及深度学习算法不断发展的背景下，设备状态监测已逐渐扩展到早期征兆感知及趋势预测，并通过多时段建模及时序模式识别来处理运行数据，实现微小变化连续跟踪和异常趋势提前识别。相关文献研究指出，

基于时间序列分析及自编码神经网络建立的预测模型能够有效地识别出振动频率、压力波动及温度梯度信号隐性异常，在没有到达临界点之前实现高可信度预警输出，减少了突发故障给系统带来的影响和损失。

2.2 从单点异常到系统建模：数据融合的集成路径

以往故障诊断方法主要集中于局部异常信号识别和孤立特征判读，该模型缺少多源干扰情况下全局视角，容易产生误判和信息冗余等干扰。在系统建模技术不断进化的过程中，整合多个子系统信息进行综合建模的方法已逐步成为增强诊断准确率和鲁棒性的重点发展方向。在多传感器融合的框架内，利用多个数据通道联合建模来构造跨域变量之间统计相关性网络和协同变化矩阵，既可以加强系统对复杂异常模式的感知，也可以在高维数据特征空间上形成一个稳定的状态区分边界。研究表明，利用主成分分析和贝叶斯网络联合建模技术融合策略，在多类故障信号迭加的情况下仍保持了较好的识别精度且工程适用性广。

2.3 从专家经验到知识图谱：诊断知识的结构化

水电系统长期以来依靠运维专家经验积累和人工判读来实现故障识别和处理决策，虽然在具体场景下

具备效率优势,但是面对高频数据流和多态复杂异常等实际需求,表现出明显知识获取局限和主观偏差风险。近年来,知识图谱技术兴起促使诊断知识表达结构化和逻辑化,可以从历史故障案例、运行参数和处理策略三个因素来构建实体关系网络以在语义层面上进行深度关联和推理。在这个基于图谱的智能诊断系统里,实体节点如“异常振动”和“转速偏移”,与属性关系的“关联特征”和“可能成因”共同构建了一个故障信息的全景图谱,使得诊断过程具有可解释性、可追溯性和自学习等特点,大大促进水轮机运维知识数字化转型过程。

3 提升预警诊断有效性的策略

3.1 推进融合算法的精准优化

在由多维感知和低频监测组成的复杂数据环境下,融合算法性能直接决定着故障识别系统敏感性和诊断结论精确度,需要基于工程应用场景这一核心基础,根据典型负载组合、异常特征演化路径和边界条件变化规律设计出具有较强泛化能力和逻辑解释能力的融合模型架构。对异构数据进行协同处理时,需要构造自适应权重调节机制以全面辨识各数据源间时间精度、物理量敏感性和采样稳定性等方面的差异,进一步地将注意力机制引入算法层面,增强了模型对于关键信号各维度的注意力,提高了异常状态早期信号较弱情况下检测的灵敏度。通过融合迁移学习和图神经网络等模型优化技术,不仅可以增强算法在复杂的拓扑结构中的表现,还为在多种机组结构中的迁移部署提供了坚实的算法支持。同时,要构建以实际运行数据为导向的大范围历史样本交叉验证机制和涵盖典型场景、多类异常与工况转换等多维模型的评价指标体系。

3.2 构建场景化模型训练体系

高可靠性智能预警系统有赖于复杂运行场景精准模拟和高质量样本全面学习,需要建设涵盖不同运行环境的智能预警系统、操作状态和外部干扰条件场景化模型训练体系,保证了模型对多样工况的鲁棒性和泛化能力。训练数据获取要包含稳定工况、负荷骤变、设备启停和突发扰动等场景,数据构建阶段要引入分类标签、异常注释和工况识别信息,在数据维度和语义层次上实现了全结构训练支持。模型学习的过程中要引入增强学习算法和构造动态反馈回路来不断优化模型训练时参数权重的分配以及增强策略选择的灵活度;在多机组或者跨系统部署场景中,综合运用迁移学习框架对现有模型权重映射结构和输入输出层之间的连接关系进行调整,迅速完成源域向目标域建模适应工作,降低了部署和调试周期。

3.3 完善标准化与规范化数据治理体系

多传感器数据融合系统能否长久稳定地运行,不仅仅取决于模型和算法是否准确,还需要建立一套科学完整的数据治理系统,对采集源头至应用终端进行全链条的数据质量管理和标准化流程控制。从数据标准上看,要建立统一采集协议、信号编码规则和标签分类体系以保证多类传感器设备和不同厂商采集接口上信息结构一致性和可互操作性。在元数据管理中,需要构建包含时间戳、空间位置、设备编号和运行状态等多个维度的元信息结构表以支撑后续数据溯源、异常溯因和系统恢复。在质量评估和清洗环节中,要构建动态评估机制来确定异常值、缺失点和冲突信息,并联动异常剔除算法和自动修复模块来提升系统整体数据的可信度。从数据共享机制层面来看,需要促进跨专业部门协同机制的构建,并形成运维技术团队、信息系统人员和管理决策层协同的数据治理组织架构,厘清责任边界、审计流程和版本控制标准。

4 结束语

构建基于多传感器数据融合的水轮机故障智能预警与诊断体系,是提升水电厂运行安全性、降低设备维护成本与推动智慧运维转型的关键技术路径。依托高质量的感知数据、科学合理的融合算法与可扩展的系统架构,该技术路径在多种复杂工况与数据异构背景下均表现出良好的鲁棒性与实时响应能力。未来仍需持续加强对融合算法模型的精准化迭代、场景数据训练体系的扩充与数据治理体系的制度化建设,构建更加完善、高效、智能的设备状态管理生态系统,为电力行业的数字化发展与能源系统的安全稳定运行提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 林志辉,秦照洋.基于多参数融合的智能在线油液监测系统研发及应用[J].水电站机电技术,2024,47(12):164-167.
- [2] 李太斌,张冲,颜天成,等.基于大数据的水轮机导叶开口不匀故障智能预警[J].科技创新与应用,2020(11):120-121.
- [3] 翟玉杰,陈浩,艾远高.水轮机导叶位置传感器信号控制逻辑分析[J].水电自动化与大坝监测,2021,07(03):84-87.
- [4] 陈勇旭,郝亚鹏.基于动态应变的水轮机顶盖运行状态测试研究[J].水电能源科学,2023,41(09):185-188.
- [5] 陈文明,唐文科.基于多源信息融合的水轮机温度监控及预警技术[J].水电与新能源,2024,38(02):21-24.

基于多材料复合结构的隔振器振动能量吸收性能与应用技术分析

王小冬

(辽宁光明隔振技术有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要 以天然橡胶、6061-T6 铝合金及聚氨酯阻尼胶为材料体系, 采用模压硫化工艺制备多材料复合结构隔振器试样, 通过动态力学分析、正弦扫频激励及冲击响应三类实验, 系统研究材料配比、界面结合方式与叠层层数对振动能量吸收性能的影响规律。结果表明: 橡胶与铝合金层厚度比 2:1 时损耗因子较单一材料提升 41.3%; 硫化黏合界面工艺使高频隔振效率达 88.4%; 6 层叠层结构为冲击吸能与结构质量的最优平衡点。基于上述结论, 提出结构参数优化设计方法、典型工况选型判据及质量控制方法。

关键词 多材料复合结构; 隔振器; 振动能量吸收; 动态力学性能

中图分类号: TH13.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.005

0 引言

随着机械装备朝着高速高精度方向不断发展, 振动问题对设备耐久性、工作精度以及人员舒适度的制约愈发显著, 传统单一材料隔振器由于阻尼效能不足、适用频带有限, 难以满足复杂工况下宽频隔振的实际要求, 多材料复合结构通过整合不同材料的弹性模量、阻尼特性以及密度参数, 能够在更宽频谱范围内实现高效的振动能量耗散, 现已成为隔振技术研究的核心发展方向。当前, 虽然国内外学者在复合材料本构模型、界面力学等领域取得了一系列突破, 但针对材料配比、界面工艺与几何构型对隔振性能协同影响的定量实验研究仍存在不足。需要通过系统化的实验设计, 定量解析关键参数对多材料复合隔振器吸能特性的作用规律, 从而为工程实践提供坚实的理论支撑。

1 多材料复合结构隔振器的实验方法

1.1 材料选取与试样制备

隔振器多材料复合结构的振动能量吸收能力关键在于材料体系科学配置, 主体材料采用天然橡胶 (NR) 与

氯丁橡胶 (CR) 的混合物, 将邵氏硬度控制在 45 ± 2 HA 且损耗因子 $\tan \delta$ 处于 $0.18 \sim 0.25$ 范围, 主要负责黏弹性阻尼耗能, 约束层选用弹性模量为 69 GPa、密度 2.71 g/cm^3 的 6061-T6 铝合金, 主要赋予结构刚度和弹性回复能力, 阻尼层采用损耗因子达 $0.45 \sim 0.62$ 的聚氨酯阻尼胶 (PU), 旨在提升层间振动能量的耗散效率^[1]。试样通过模压硫化工艺制备, 按照橡胶层与铝合金层 2:1 的厚度比例依次堆叠, 在 160°C 、15 MPa 条件下保压硫化 30 min, 最终制成 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的标准复合结构隔振器试样, 制备工艺流程如图 1 所示。

1.2 振动能量吸收性能的测试方法

为了系统评估多材料复合结构隔振器振动能量吸收特性, 综合运用动态力学分析、正弦扫频激励以及冲击响应这三种测试手段^[2]。

1. 通过 TA Instruments DMA Q800 型动态力学分析仪, 在 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 温度范围之内对试样施加 $0.1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ Hz}$ 的正弦动态载荷, 逐频测量储能模量 E' 、损

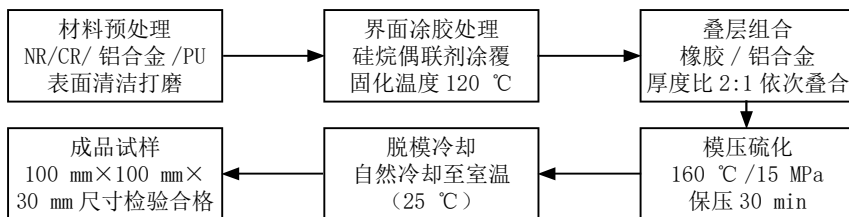


图 1 多材料复合结构隔振器试样制备工艺流程示意图

作者简介: 王小冬 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计。

耗模量 E'' 以及损耗因子 $\tan \delta$ ，定量分析材料对比对阻尼性能的作用规律。

2. 基于电磁激振台实验系统，对试样施加 500 N 静态预压载荷以模拟工程安装工况，同时输入 10 Hz ~ 2 000 Hz、激励幅值 0.5 g 的正弦扫频信号，利用隔振器输入端与输出端的加速度传感器同步采集响应数据，计算各频段振动传递率与隔振效率。

3. 采用落锤冲击装置对试样施加峰值加速度 30 g、脉宽 11 ms 的半正弦脉冲载荷，记录峰值加速度响应值及冲击能量吸收率。

1.3 实验数据处理方法

针对三类测试方法所获原始数据，采用系统化的数据处理流程以确保振动能量吸收性能分析结果的准确性与可靠性^[3]。在动态力学分析数据处理中，损耗因子 $\tan \delta$ 由损耗模量 E'' 与储能模量 E' 之比计算得出：

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (1)$$

式(1)中， E'' 为损耗模量 (MPa)，表征材料每周期耗散的振动能量； E' 为储能模量 (MPa)，表征材料储存的弹性应变能。

正弦扫频激励测试数据处理中，振动传递率 TR 由输出端与输入端加速度幅值之比直接确定：

$$TR = \frac{a_{out}}{a_{in}} \quad (2)$$

式(2)中， a_{out} 为隔振器输出端加速度幅值 (m/s^2)， a_{in} 为输入端加速度幅值 (m/s^2)，TR 为无量纲比值。

隔振效率 η 则由输入端幅值衰减量与输入幅值之比计算得出：

表1 不同材料配比下损耗因子与储能模量测试结果

层厚比 (橡胶 / 铝合金)	损耗因子 $\tan \delta$	储能模量 E' (MPa)	较单一材料提升幅度
单一橡胶	0.221	142	—
1:1	0.274	223	+23.9%
2:1	0.312	186	+41.3%
3:1	0.289	165	+30.8%

表2 不同界面结合方式下宽频段振动传递率测试结果

界面结合方式	低频段 TR 均值 (10 Hz ~ 500 Hz)	高频段 TR 均值 (500 Hz ~ 2 000 Hz)	高频段隔振效率
机械压合	0.384	0.269	73.1%
化学偶联剂处理	0.350	0.182	81.8%
硫化黏合	0.331	0.116	88.4%

$$\eta = \frac{a_{in} - a_{out}}{a_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

冲击响应测试中，冲击能量吸收率 η 按下式计算：

$$\eta = \left(1 - \frac{E_{out}}{E_{in}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中， E_{in} 为输入冲击能量 (J)， E_{out} 为输出端残余能量 (J)。

2 多材料复合结构隔振器的性能分析

2.1 多材料复合结构隔振器的振动能量吸收性能分析

对橡胶层与铝合金层三种厚度比例 (1:1、2:1、3:1) 的试样开展动态力学性能测试，测试结果显示材料对比对损耗因子和储能模量有显著影响^[4]。如表1所示，当层厚比为 2:1 的时候，损耗因子 $\tan \delta$ 的峰值达到 0.312，相比纯橡胶材料提高了 41.3%，同时储能模量 E' 为 186 MPa，达成了阻尼耗散能力与结构承载刚度的平衡，要是层厚比进一步增加到 3:1，损耗因子却出现下降，就表明橡胶层的比例存在最优值，超过这个比例会使约束效应减弱，阻尼性能无法继续提升。

2.2 界面结合方式对宽频段振动传递率的影响分析

界面结合方式直接影响层间应力传递路径，进而决定宽频段振动传递率的高低。对机械压合、硫化黏合、化学偶联剂处理三种界面工艺试样分别开展正弦扫频激励测试，测试结果如表2所示，硫化黏合处理的试件在 500 Hz ~ 2 000 Hz 的高频范围内，形成连续交联网络，有效抑制层间相对滑移，隔振效率达 87.4%，较机械压合提升 18.5%，表明界面结合质量对高频振动能量耗散具有决定性作用，低频段三种工艺差异相对较小。

2.3 复合结构几何构型对冲击能量吸收率的影响分析

复合隔振器的叠层数量可调控应力波在层间的反射与透射特性,进而决定冲击能量的逐级衰减效果,在维持橡胶与铝合金厚度比为 2:1 的条件下,针对 4 层、6 层以及 8 层试样实施了落锤冲击试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同叠层层数下冲击响应与能量吸收率测试结果

叠层总层数	峰值加速度响应 (g)	冲击能量吸收率 (%)	结构总厚度 (mm)
4 层	14.8	75.7	20
6 层	9.4	90.2	30
8 层	8.7	91.6	40

(注:峰值加速度响应值及冲击能量吸收率均为每组 3 次重复测试的算术平均值;输入冲击条件为峰值加速度 30 g、脉宽 11 ms 半正弦脉冲;冲击能量吸收率依据实测输入与输出端能量计算得出。)

橡胶与铝合金层厚度比、界面结合工艺及叠层层数纳入统一优化框架。依据目标频段设定损耗因子下限,固定层厚比为 2:1 以最大化阻尼耗散效果;高频振动环境优先采用硫化黏合工艺,确保振动传递率满足设计要求;冲击吸能率高于 90% 时叠层总数不少于 6 层,三项参数形成速查表,支撑设计人员快速匹配方案^[5]。

2. 典型工况选型依据激励频段与载荷特性制定差异化标准。稳态宽频振动工况优先采用硫化黏合界面工艺,确保高频段隔振效率达 88.4% 以上;瞬态冲击工况采用 6 层叠层结构,峰值加速度响应控制在 9.4 g 以内;宽频振动与冲击载荷并存的复合工况下,在满足隔振效率的前提下优先保证冲击能量吸收率达标。

3. 性能验证与质量控制贯穿产品全生命周期。出厂检测要求损耗因子不低于 0.30、高频隔振效率超过 88%、冲击能量吸收率不低于 90%;硫化黏合界面采用超声波无损检测,脱粘面积不超过总面积 3%;在役阶段每运行 500 小时抽检振动传递率,传递率较初始值下降超过 10% 时须立即更换,全程质量数据纳入产品档案,构建覆盖制备至在役监控的完整追溯体系。

4 结束语

针对多材料复合结构隔振器振动能量吸收性能的系统研究表明,材料配比、界面结合方式与叠层层数三项结构参数对隔振性能具有显著且规律性的影响。橡胶与铝合金层厚度比 2:1、硫化黏合界面工艺、6 层叠层结构的组合方案在损耗因子、宽频隔振效率与冲击能量吸收率三项指标上综合表现最优,上述实验结论已转化为工程优化设计方法与选型判据,并建立了

3 多材料复合结构隔振器应用技术分析

多材料复合结构隔振器的工程应用涉及结构参数优化设计、典型工况选型及性能验证与质量控制三个核心层面,三者相互衔接,共同构成完整的应用技术体系。

1. 结构参数优化设计以实验数据为定量依据,将

覆盖制备、出厂检验至在役监测的全周期质量控制体系。未来研究可在极端温度环境与多轴复合激励条件下进一步验证多材料复合结构隔振器性能的稳定性,深化界面应力传递机制的理论认识,推动多材料复合隔振技术的工程应用范围持续拓展。

参考文献:

- [1] 罗浩,徐峰祥,邹震,等.包裹成形折纸薄壁结构动态响应及能量吸收特性研究[J].塑性工程学报,2026,33(01):98-111.
- [2] 任俊铸,钮晨光,武兵,等.压-剪混合电流变弹性体隔振器设计与性能研究[J/OL].机械设计与制造,1-7[2025-12-23][2026-02-06].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=m07J8nP_wCGYRL-2Pb442dgoFZOvpMB3kHssePKvfxvYD1vtqBCvmvsJLk15a2TpJIsfKiCYO7vFXC1b7TUgJFbz_n6PsF0UBZIkOcv3K-R_ZM6_GZTZzJHkSQ3uKFIYy1oC4Lgcev5tKpMqo58HIdmYlFEeukuy1EmIotAfu1YyyWdbj1LHQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 李海燕,明世朝,周才华,等.基于格栅增强的端部折纸复合管件能量吸收性能研究[J].固体力学学报,2025,46(05):642-654.
- [4] 张武昆,谭永华,高玉闪,等.周期性轻质多孔结构在能量吸收和振动方面的研究进展[J].振动与冲击,2023,42(08):1-19.
- [5] 段霄.掘进机电控箱隔振器结构优化与分析研究[J].机械管理开发,2021,36(04):42-44.

变电站 GIS 设备安装对接技术应用

李正伟, 王城良, 吴 滔

(丽水正阳电力建设有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘 要 电网运行可靠性的保障工作中, 变电站 GIS 设备是气体绝缘金属封闭开关设备的重点构成要素, 安装对接质量极为重要。本文注重 GIS 设备安装时的基础定位偏差、气室密封失效、导电杆插入深度不足及环境洁净度控制等关键技术问题, 系统地分析了问题产生的病因机理, 给出了基础槽钢精密测量、母线筒体三维定位、法兰密封工艺控制及导电杆对中插入等详细工法技巧, 并融合 110 kV 变电站工程实践说明了技术应用要点, 以期对 GIS 设备安装提供了技术参照。

关键词 GIS 设备; 安装对接; 法兰密封; 导电杆对中; 气室洁净度

中图分类号: TM564; TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.006

0 引言

城市电网建设规模持续扩大, 气体绝缘金属封闭开关设备凭借结构紧凑、运行可靠、占地面积小等优点, 在变电站建设中获得大量应用。GIS 设备利用 SF₆ 气体充当绝缘介质, 内部电场强度分布以及气室密封性能密切相关, 设备安装对接质量直接决定投运后的绝缘强度以及长期稳定性。由于 GIS 设备各气室之间凭借法兰连接形成整体, 母线筒体对接精度、密封面处理质量及内部洁净度控制等环节存在多重技术难点, 安装工艺不当会引发局部放电、气体泄漏等故障隐患, 所以深度探究 GIS 设备安装对接技术, 提出针对性的工艺控制方法, 能提高变电站建设质量, 具有较高的工程价值。

1 变电站 GIS 设备安装缺陷成因分析

1.1 设备基础预埋件定位偏差累积机理

在设备安装固定方式方面, 变电站 GIS 设备安装使用基础预埋件与设备支脚螺栓连接的固定方式, 预埋件在土建施工阶段埋设, 平面位置偏差以及标高误差会在设备就位阶段产生累积效应, 土建施工期间, 预埋件定位依托经纬仪测量, 因混凝土浇筑期间出现振捣扰动, 预埋件在初凝前易发生水平位移, 造成相邻预埋件中心距偏差超过设计允许值。GIS 设备多个间隔单元连续排列时, 单点预埋件偏差会在母线筒体对接期间形成线性传递, 使远离基准点的间隔单元产生明显位置偏移。在基础槽钢安装思路分析方面, 若未实行水平度复测, 槽钢上表面不平度超过允许范围, 会使得设备本体安装后出现倾斜, 造成法兰对接面产生附加应力, 长期运行期间可能引发密封圈变形失效。

1.2 气室法兰面密封失效诱因

在密封结构以及工艺控制方面, GIS 设备气室依托法兰连接形成封闭空间, 法兰密封依托 O 形密封圈以及密封槽的配合精度, 法兰面密封失效多因密封面处理不当与螺栓紧固力矩控制不精确, 密封面运输可能产生磕碰损伤, 现场安装前若未细致检查, 微小划痕会变成 SF₆ 气体泄漏通道。法兰面清洁处理时使用不当溶剂可能损伤密封圈材质, 使得橡胶老化加速, 螺栓紧固若未按对角交叉顺序施力, 会造成法兰面受力不均, 局部间隙过大使密封圈压缩量不足, 户外安装昼夜温差引起的热胀冷缩会使法兰连接处产生周期性应力变化, 若初始紧固力矩不足, 长期运行后螺栓松动将引发慢性漏气。

2 GIS 设备安装对接工艺控制技术

2.1 基础槽钢水平度精密测量工法

在安装基准方面, 基础槽钢是 GIS 设备的安装基准, 水平度控制用精密水准仪配合平尺测量, 测量前需用钢丝刷清除槽钢表面的浮锈以及混凝土残渣, 并在槽钢纵向每隔 1 m 标记测点, 框式水平仪放置于槽钢上表面, 沿纵向以及横向两个方向分别测量, 记录各测点读数。长度超过 5 m 的槽钢, 需用光学水准仪实行复测, 在槽钢两端及中部设置三个基准测点, 依托调整垫铁使槽钢上表面的水平度误差控制在 1 mm/m 以内, 全长范围累计误差不超过 2 mm, 槽钢调整到位后, 用力矩扳手紧固地脚螺栓, 紧固力矩设置为 80 N·m, 使用对角交叉方式分两次紧固, 避免槽钢产生变形。最后, 在槽钢上表面划出 GIS 设备的中心线标记, 用墨斗弹

作者简介: 李正伟 (1977-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

线保证线条清晰平直，作设备就位时的视觉基准^[1]。

2.2 母线筒体三维空间定位技术

母线筒体就位利用激光经纬仪建立三维坐标控制网完成空间定位，GIS 室地面设置两个相互垂直的基准轴线，全站仪把轴线投测至墙面并标记，母线筒体吊装前，筒体外壁标记纵向中心线与径向思路线，吊装就位后，激光经纬仪对准筒体标记线，校正筒体水平位置，使筒体中心线以及地面基准线重合度偏差控制在 2 mm 以内。筒体标高凭借调节底部支撑螺栓实现，水准仪测量筒体法兰面中心高程，保证与相邻设备法兰中心高差不超过 1 mm，筒体思路校正使用楔形垫片，测量法兰面垂直度，确认筒体在水平状态，垂直度偏差控制在 0.5 mm/m 以内（见表 1）。母线筒体临时固定使用可拆卸式卡具，卡具以及基础槽钢凭借螺栓连接，允许微调但限制大幅位移。

表 1 母线筒体安装允许偏差控制参数

控制项目	允许偏差	测量方法
中心线位移	$\leq 2 \text{ mm}$	经纬仪测量
法兰标高	$\pm 1 \text{ mm}$	水准仪测量
法兰垂直度	$\leq 0.5 \text{ mm/m}$	框式水平仪
同轴度	$\leq 1 \text{ mm}$	激光对中仪
水平度	$\leq 1 \text{ mm/m}$	水准仪

2.3 法兰密封胶涂覆工艺控制

法兰密封防护使用专用硅酮密封胶配合 O 形密封圈实现双重密封，涂胶前用丙酮清洗法兰密封槽以及密封面，清除表面油污以及灰尘，用无尘纸单向擦拭防止二次污染，密封胶涂覆使用连续均匀的方式，于密封槽内圈开始，沿顺时针方向匀速挤出，胶条直径控制在 3 mm 至 4 mm 范围内，保证胶条与密封槽底部贴合无气泡。涂胶完成后 5 min 内完成法兰对接，防止胶层表干减少密封效果，法兰螺栓紧固用力矩扳手分三步完成：第一步，按对角顺序把螺栓预紧至 40 N·m；第二步，复紧至设计的力矩 80 N·m；第三步，按同样顺序完成力矩校验，紧固完成后用塞尺检查法兰间隙，保证各处间隙均匀且不超过 0.5 mm。密封胶固化期间防止法兰受到振动或者冲击载荷^[2]。

2.4 导电杆对中插入操作要领

工艺操作环节，导电杆插入前用游标卡尺测量导电杆的外径以及触头的内径，确认配合间隙符合设计值，一般控制在 0.5 mm 至 1.0 mm 范围。表面处理环节，导电杆表面用无水乙醇清洁，去除运输产生的氧化层，检查镀银层的完整性，破损区域用导电膏局部处理。操作实行双人配合方式，一人在筒体内部观察导电杆

以及触头的相对位置，另一人在外部缓慢地推送导电杆，当导电杆前端进入触头导向口后，轻微地旋转导电杆消除配合间隙里的空气阻力，匀速助推直至导电杆端部以及触头底部接触。插入深度依靠导电杆外表面标记线实行目视确认，标记线应以及触头端面平齐或者按设计要求凸出 1 mm 至 2 mm。质量验证环节，插入完成后用双臂电桥测量回路电阻，阻值应小于设计值的 1.2 倍，若阻值偏大则应退出导电杆，重新检查触头内部^[3]。

3 GIS 设备安装技术在工程中的应用

本工程为 110 kV 变电站新建项目，设备布置使用户内 GIS 布置方案，安装双母线接线 GIS 设备共 8 个间隔，包含 2 回主变进线间隔、4 回出线间隔、1 回母联间隔以及 1 回电压互感器间隔，设备额定电压 126 kV，额定电流 2 500 A，母线使用三相分箱式结构，断路器气室以及母线气室依托波纹管连接。设备基础为现浇混凝土结构，预埋 M24 地脚螺栓，设备区域全长 28 m，宽度 8 m，室内配置 2 台 5 t 行车用于吊装作业。

3.1 设备基础复测与基准线标定

土建工程交接阶段的测量工作，使用全站仪复测设备基础，在 GIS 室纵向中心线位置架设仪器，建立以主变进线间隔中心为原点的独立坐标系，沿纵向每 4 m 设置一个测量断面，复测数据说明，第 3 号间隔与第 4 号间隔预埋件中心距有 5 mm 偏差，依托修正基础槽钢安装位置实行补偿^[4]。槽钢安装使用精密水准仪控制标高，在两回主变进线间隔处设置永久水准点作为高程基准，其余间隔标高均凭借这两点传递测量，槽钢上表面用经纬仪投影中心线，线宽控制在 1 mm 以内，中心线延长线在墙面标记，便于设备就位时目视对中。基础复测数据说明（见表 2），全线 8 个间隔槽钢上表面水平度最大偏差为 1.8 mm，符合设备安装要求。

3.2 断路器间隔吊装就位技术

断路器间隔单元安装时需考虑该单元的重量约 3.5 t，使用行车配合专用吊具实行吊装，吊装前在断路器支脚底部粘贴 3 mm 厚的橡胶垫板，缓冲就位时的冲击力，行车吊钩挂载后，使用水平仪检查设备的悬挂状态，依托调节吊绳长度使设备保持水平。设备缓慢地下降至基础上空 200 mm 高度时暂停，操作人员使用导向杆调节设备方向，使支脚螺栓孔与基础地脚螺栓对中，设备落座后使用垫片调节设备标高，使断路器气室中心线以及母线筒体的设计中心线重合，调节完成后紧固地脚螺栓，紧固力矩设定为 100 N·m。断路器就位后使用激光对中仪检查以及相邻间隔的同轴度，偏差控制在 1.5 mm 以内，保证后续母线筒体可以顺利对接。

表2 110 kV 变电站 GIS 设备基础复测数据

间隔编号	中心线偏差/mm	标高偏差/mm	水平度/mm·m ⁻¹	相邻间隔中心距/mm
1号主变进线	+1.2	+0.5	0.6	4 002
2号主变进线	-0.8	-0.3	0.8	3 999
3号出线	+2.0	+1.0	0.5	4 005
4号出线	+1.5	+0.8	0.7	3 998
5号出线	-1.0	-0.5	0.9	4 001
6号出线	+0.5	+0.2	0.6	3 997
7号母联	-0.5	-0.8	0.8	4 003
8号PT	+1.0	+0.6	0.5	—

3.3 母线筒体对接与密封处理

在防尘棚环境控制工作中,母线筒体对接作业需在配备空气净化装置的密闭空间内开展,维持棚内正压状态,吊装前需清理筒体内壁灰尘,使用沾有无水乙醇的无尘纸单向擦拭绝缘子表面,擦拭途径严格遵循从中心向外围的操作规范。导电杆需预先置入母线筒体内部,凭借绳索临时固定避免滑脱风险,对接过程中,把两法兰面间距调控至2 mm左右,借助定位销保证同轴度后平稳地助推,使导电杆准确地嵌入相邻气室触头,法兰闭合前需二次核查密封圈状态,保证O形圈居中且无扭转。法兰螺栓的紧固严格遵循对角分次原则,力矩依次设定为40 N·m、70 N·m、100 N·m,每阶段紧固后均用塞尺检测法兰间隙。作业收尾阶段,在法兰外缘均匀地涂抹防水密封胶,胶层厚度需完全包含外沿5 mm范围,杜绝户外工况下的雨水渗漏隐患^[5]。

3.4 气室抽真空及SF₆气体充注

母线筒体对接完成后的后续处理流程,先是开展气室密封性的处理工作,在气室抽真空作业时,使用真空泵将真空度抽至133 Pa以下并维持2 h,通过观察真空表指针无回升现象来确认气室密封性良好,针对抽真空管路的连接,使用不锈钢波纹管当作连接管道,并在接头处缠绕聚四氟乙烯密封带,杜绝抽真空时外部空气渗入。当真空保持试验合格后,凭借SF₆充气装置向气室充入额定压力气体,充气速率严格地控制在0.1 MPa/h以内,避免因气流过快给设备内部元件造成冲击,待充气至额定压力0.5 MPa并静止24 h后,使用SF₆检漏仪对所有法兰连接部位实行扫描检漏,检漏仪灵敏度设定为0.1 μL/L,若未出现报警信号则说明气室密封符合标准。最后,使用微水测试仪对气体含水量实行检测,保证数值控制在150 μL/L以下,满足设备投运的技术要求。

4 结束语

变电站GIS设备的安装对接技术包含基础测量、筒体定位、法兰密封及气务处理等多个关键环节,每一道工序的精度控制均直接决定设备长期运行的可靠性,实行基础槽钢精密测量工法,能消除土建施工偏差带来的设备就位问题。母线筒体三维空间定位技术的应用,保证了多间隔连续排列时的同轴度要求。法兰密封工艺的控制与导电杆对中插入操作,在绝缘以及导电两个维度保障了设备内部性能。工程实践证明,使用系统化的安装对接技术,可将GIS设备投运后的故障率控制在较低水平,为变电站安全稳定运行提供坚实的技术保障。随着智能变电站建设不断推进,GIS设备安装技术将向模块化、预制化方向发展,需继续研究大型模块整体吊装及自动化对接技术,满足电网建设需求。

参考文献:

- [1] 宋宇飞,刘绚,郑豪丰,等.边缘计算下智能变电站物联网设备报文安全卸载与调度[J/OL].电力系统自动化,1-11[2026-03-28].<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260305.1705.004>.
- [2] 崔秀峰.基于图像分割和加权融合算法的变电站继电保护室设备巡检研究[J].电子设计工程,2026,34(05):192-196.
- [3] 李璐璐,张治,罗素杰,等.基于红外图像的变电站设备状态智能监测系统[J].电子设计工程,2026,34(05):177-181,187.
- [4] 张策,于家英,亓亮.国网宁夏电科院顺利完成妙岭750kV变电站330 kV新扩建HGIS设备冲击耐压试验[J].宁夏电力,2026(01):2.
- [5] 曹沁婕,王明霞,何林岚,等.变电站二次设备智能巡检模式探究[J].山东电力高等专科学校学报,2026,29(01):27-30.

智慧交通系统电力能耗优化与节能研究

梁 浩¹, 申晓露², 王洪彬³

- (1. 滨州国投测绘有限公司, 山东 滨州 256600;
2. 济南翱瀚动力科技有限公司, 山东 济南 250013;
3. 莱西市交通运输局, 山东 青岛 266600)

摘 要 针对智慧交通系统全场景电力能耗管控的核心需求, 本文系统分析了智慧交通系统电力能耗的构成单元与负荷特性, 厘清了设备能效、系统调度、供配电网架、运行工况四大维度的核心影响因素, 构建了覆盖设备级、系统级、供配电级、全周期管控的一体化电力能耗优化与节能技术体系, 明确了优化方案的分阶段实施路径与量化评定方法。结果表明, 该技术体系可实现智慧交通系统综合节电率 20% 以上, 有效解决系统内设备空载能耗高、多系统协同效率低、供配电损耗大等核心问题, 为智慧交通系统的低碳化、高效化运行提供系统性技术支撑。

关键词 智慧交通系统; 电力能耗; 能耗优化; 节能技术; 能效管控

中图分类号: U116; U491.1+7; TM732 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.007

0 引言

智慧交通系统是集感知、通信、计算、控制于一体的复杂交通管控体系, 其稳定运行高度依赖电力能源的持续供给, 电力能耗的管控水平直接决定系统的运行经济性与低碳化程度。本文围绕智慧交通系统的电力能耗核心特征, 系统梳理其能耗构成与影响机制, 构建全维度的能耗优化与节能技术体系, 明确优化方案的实施路径与效果评定规范, 为智慧交通系统的能效提升与节能改造提供技术参考。

1 智慧交通系统电力能耗构成与负荷特性

1.1 核心能耗单元构成

智慧交通系统的电力能耗可划分为五大核心单元, 各单元的能耗特征与占比存在显著差异。一是交通管控与信号系统, 包括路口信号机、区域控制器、匝道控制设备, 能耗以恒定基础功耗叠加动态工作功耗为主, 是交通管控的核心耗能单元; 二是智能感知与车路协同系统, 包括视频监控设备、毫米波雷达、路侧通信单元 RSU, 多为 24 小时连续运行, 是系统内能耗占比最高的单元之一; 三是智慧道路照明系统, 包括道路 LED 路灯、隧道智能照明、匝道补光设备, 能耗具有显著的时间节律特性, 占道路配套系统总能耗的 60% 以上; 四是通信与计算系统, 包括边缘计算节点、路段通信基站、中心机房服务器及配套设备, 能耗以

恒定基础负载为主, 受数据处理量与传输规模影响显著; 五是供配电与辅助系统, 包括配电变压器、高低压配电柜、UPS 电源、输电线路, 能耗以线路阻性损耗、变压器空载与负载损耗为主^[1]。

1.2 核心负荷特性

智慧交通系统的电力负荷呈现三类典型特性。一是时序特性, 可划分为三类负荷: 恒定负荷, 包括机房设备、感知监测设备, 全天负载波动幅度小于 10%; 周期性波动负荷, 包括照明系统、信号控制系统, 负荷随昼夜、季节变化呈现规律性波动; 随机波动负荷, 随实时交通流量变化动态调整, 平峰与高峰时段负载差异可达 50% 以上; 二是空间分布特性, 呈现点状集中与线状分布结合的特征, 路口节点、长隧道、高架路段为能耗密集区, 单路口能耗密度可达普通路段的 8 倍~10 倍; 三是能效耦合特性, 多系统能耗存在强耦合关系, 实时交通流量的变化会同时影响信号配时策略、感知设备采样帧率、道路照明亮度, 单一系统的参数调整会引发全系统能耗的联动变化, 需通过协同管控实现整体能效最优。

2 智慧交通系统电力能耗核心影响因素

2.1 设备层面因素

设备自身能效水平与运行模式是能耗管控的基础变量。一是设备能效等级差异, 符合国家 1 级能效标

作者简介: 梁浩 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

准的设备与老旧高耗能设备相比,基础功耗可降低30%以上,电源转换效率提升20%,低能效设备的空载损耗、待机损耗是无效能耗的核心来源;二是设备运行模式适配性不足,多数终端设备采用固定满负荷运行模式,无法根据交通工况、环境条件动态调整运行参数,低流量时段空载、轻载能耗占比可达总能耗的60%以上;三是设备全生命周期运维水平不足,老化设备的能耗较额定值上升15%~30%,设备故障、接触不良、参数漂移等问题会引发额外能耗,运维缺失会导致系统能效持续下降。

2.2 系统层面因素

系统架构与调度策略决定了整体能效的上限。一是多系统协同调度能力不足,交通管控、照明、感知、通信系统多为独立建设、独立运行,数据壁垒导致无法实现工况联动,难以形成全局最优的能耗控制策略;二是计算与通信架构不合理,集中式计算模式导致大量无效数据向云端传输,中心机房服务器长期处于高负载运行状态,无效数据传输与冗余计算占比可达总计算能耗的40%以上;三是控制策略精细化程度不足,固定信号配时、固定照明亮度、固定采样帧率等粗放式控制模式,无法适配交通流量的时空分布差异,造成大量无效能耗^[2]。

2.3 供配电系统因素

供配电系统的能效水平直接决定电能的利用效率。一是网架结构设计不合理,长距离低压供电、线缆截面选型不当,会导致线路阻性损耗显著增加,部分老旧路段线路损耗占比可达供电总量的10%以上;二是变压器运行效率偏低,变压器容量配置与实际负荷不匹配,长期处于30%以下的低负载率区间,空载损耗占比显著提升,运行效率远低于最优区间;三是电能质量问题,系统内大量非线性负载产生的谐波污染,会引发设备附加损耗与发热,无功功率不足导致功率因数偏低,增加线路与变压器的无功损耗,进一步降低电能利用效率。

2.4 运行工况与环境因素

外部工况与环境条件是能耗波动的重要诱因。一是交通流量的时空分布差异,城市道路平峰、夜间低流量时段占比可达全天的60%以上,设备仍保持满负荷运行,是能效浪费的核心场景;二是气候与光照条件变化,未根据自然光照强度、天气状况动态调整照明亮度与补光策略,阴雨天气、昼夜交替时段易出现无效能耗;三是冗余设计导致的低效运行,为保障极端工况下的系统可靠性,多数设备采用过度冗余设计,

日常运行中长期处于低效负载区间,造成持续的能效浪费。智慧交通系统的能耗管控逻辑,也已从传统零散的设备端节能替换改造,转向覆盖全系统、全业务链条的能效协同优化。从国内已投运项目的现场运维数据来看,智慧交通系统的能效损耗与能耗浪费,极少由单一因素独立引发,工程中绝大多数的能效短板,本质上是设备、调度、供配电、运维等多维度影响因素耦合叠加形成的系统性问题。设备端自身能效不足,会直接放大粗放式调度策略带来的无效能耗;供配电系统的线路与变压损耗,会大幅抵消系统协同优化带来的节能收益;而全生命周期运维管控的缺位,会让前期落地的各项优化措施效果持续衰减,最终无法实现长期稳定的节能目标。目前国内多数智慧交通建设项目仍普遍存在“重功能落地、轻能效管控”的通病,缺乏覆盖全生命周期的系统性能效管控机制,单一、碎片化的节能措施难以实现全局能效最优,亟需构建一体化的能耗优化与节能技术体系,破解多系统协同管控的核心痛点。

3 智慧交通系统电力能耗优化与节能技术体系

3.1 设备级源头节能优化技术

设备级优化是能耗管控的基础,核心是实现源头降耗。一是高效设备适配与替换,选用符合国家1级能效标准的低功耗终端设备,替换老旧高耗能设备,重点推广高光效LED照明灯具、低功耗边缘计算节点、高效信号控制设备,从硬件层面降低设备基础功耗;二是设备动态功率调节与智能休眠,基于实时交通流量数据,动态调整感知设备采样帧率、路侧单元发射功率、控制器运行频率,夜间低流量时段使非核心设备进入低功耗休眠模式,仅保留基础感知与管控能力,消除空载无效能耗;三是设备全生命周期能效管控,建立单设备能效档案,通过智能电表实现终端设备能耗的精细化计量,实时监测设备能效变化,及时更换老化、能效超标设备,降低运维环节的无效能耗^[3]。

3.2 系统级协同调度节能优化技术

系统级优化是能效提升的核心,核心是实现多系统协同提效。一是交通流适配的动态协同控制,以实时交通流量数据为核心,构建多系统联动控制模型,同步优化信号配时方案、视频感知帧率、道路照明亮度,实现“流量适配、按需供能”,在保障系统服务能力的前提下,最大限度降低运行负载;二是计算与通信架构优化,采用“边缘计算+云端协同”的分布式架构,将数据预处理、本地控制、实时响应功能下沉至边缘

节点,仅向云端传输有效特征数据,减少无效数据传输与云端冗余计算,降低中心机房与通信系统能耗;三是一体化能效管控平台搭建,整合各子系统的能耗数据、运行数据、工况数据,建立全局能效优化模型,实现全系统能耗的集中监测、协同调度与动态优化,打破子系统的数据壁垒,实现全局能效最优^[4]。

3.3 供配电系统能效提升技术

供配电系统优化的核心是降低传输与转换损耗,提升电能利用效率。一是网架结构优化与线路损耗治理,优化供配电线路设计,缩短低压供电半径,选用大截面低损耗线缆,降低线路阻性损耗;对老旧线路进行改造,消除漏电、接触不良等问题,降低线路附加损耗;二是变压器与无功优化,选用高效节能型变压器,根据实际负荷特性合理配置变压器容量,使负载率稳定在 40%~70% 的高效运行区间,降低空载与负载损耗;加装智能无功补偿装置,实现无功功率就地平衡,将系统功率因数提升至 0.95 以上,降低无功损耗;三是谐波治理与电能质量提升,针对非线性负载加装有源电力滤波器,将系统谐波畸变率控制在 5% 以内,消除谐波引发的设备附加损耗与发热,提升设备运行效率;四是分布式光储一体化应用,在路口、机房、高架路段布设分布式光伏电站,配套电化学储能系统,实现光伏发电就地消纳,降低电网购电量,同时利用储能系统平抑负荷峰谷差,提升变压器运行效率,构建源网荷储一体化的能源供给体系。

3.4 全周期能效闭环管控体系

构建“监测—分析—优化—验证—迭代”的全周期能效管控闭环,通过布设智能电表、能耗传感器,实现全系统能耗数据的实时采集、分项计量与可视化展示;基于数字孪生技术搭建智慧交通系统能耗数字孪生模型,模拟不同优化策略的节能效果,确定全局最优运行参数;通过持续的能耗数据监测,验证优化方案的实际效果,迭代更新控制策略与运行参数,实现系统能效的持续提升。

4 优化方案实施路径与效果评定方法

4.1 分阶段实施路径

针对智慧交通系统的建设与运行阶段,采用分阶段实施路径,实现节能效果的阶梯式提升。第一阶段为存量系统快速改造阶段,针对已投运系统,优先开展低成本、快见效的优化措施,包括设备运行模式优化、控制策略精细化调整、无功补偿与谐波治理,同步替换超高耗能老旧设备,快速实现能效提升;第二阶段

为系统协同管控升级阶段,搭建一体化能效管控平台,实现多系统数据互通与协同调度,优化计算与通信架构,推广边缘计算应用,实现系统级的深度节能优化;第三阶段为低碳化能源系统重构阶段,规模化布设分布式光伏与储能系统,实现清洁能源就地消纳,构建源网荷储协同的能源供给体系,实现系统的深度低碳化运行^[5]。

4.2 节能效果量化评定体系

建立多维度、量化的节能效果评定体系,核心评定指标包括综合节电率、单设备能效提升率、供配电系统损耗降低率、单位交通流量能耗强度、碳排放削减量。评定方法采用基准对比法,以优化前连续 3 个月的稳定运行能耗数据为基准,通过回归分析扣除交通流量、气候、光照等外部因素的影响,计算优化后的实际节电率;采用分项计量法,分别评定设备级、系统级、供配电级的节能效果,明确各优化措施的贡献度;采用现场实测与仿真验证相结合的方式,验证优化方案的长期节能效果与系统运行稳定性。

5 结束语

本文针对智慧交通系统的电力能耗管控需求,系统分析了其能耗构成、负荷特性与核心影响因素,构建了覆盖设备级、系统级、供配电级、全周期管控的一体化能耗优化与节能技术体系,明确了分阶段实施路径与量化评定方法。该技术体系从源头降耗、协同提效、能源优化三个维度,解决了智慧交通系统运行过程中的能效浪费问题,可实现系统综合节电率 20% 以上,为智慧交通系统的高效、低碳运行提供了系统性技术支撑。未来研究可进一步深化人工智能在能耗动态优化中的深度应用,探索车路协同系统与新型电力系统的双向互动机制,研发自供能、超低功耗的智慧交通终端设备,持续推动智慧交通系统的零碳化转型。

参考文献:

- [1] 张戢.轨道交通牵引供电系统的设计与优化运行研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [2] 梁建英.城市轨道交通牵引能耗多系统耦合节能优化技术[J].北京交通大学学报,2025,49(05):123-131.
- [3] 蒋颖.城市轨道交通供电系统的节能减排与能耗优化研究[J].工程管理,2023(11):202-204.
- [4] 陆超,詹研.超低能耗居住建筑技术体系优化与工程实践[J].建设监理,2025(S1):51-53.
- [5] 张敏,王雁河,孙周,等.交能融合应用场景与技术体系研究[J].综合智慧能源,2025,47(02):13-28.

智能化测绘技术在工程测量中的应用展望

尹天成

(安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

摘要 随着科技的不断发展, 智能化测绘技术应运而生, 并逐步在工程测量领域发挥关键作用。本文聚焦智能化测绘技术在工程测量领域的应用前景展开研究。首先, 系统阐述智能化测绘技术的核心特点与技术优势; 其次, 结合工程全生命周期, 详细分析其在规划设计、施工建设、运营维护等不同阶段的具体应用场景与实践价值; 最后, 从先进科技融合、测量精度与效率提升等维度, 对智能化测绘技术的未来发展趋势进行展望, 旨在为推动该技术更广泛、更深入地应用于工程测量领域提供理论参考。

关键词 智能化测绘技术; 工程测量; 建筑物变形监测; 设施设备状态监测; 测量精度

中图分类号: P2; TU198

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.008

0 引言

工程测量作为工程建设的基础环节, 其技术水平的高低直接影响着工程的质量与进度, 传统的测绘技术已经难以满足复杂的工程环境和高精度的测量需求, 智能化测绘技术为工程测量带来了新的机遇与挑战。智能化测绘技术利用先进的传感器、计算机以及数据分析技术等, 可以实现自动、快速、准确的测量, 不仅可以保证测量的正确性和稳定性, 还可以大大减少测量周期, 降低人工成本。基于此, 研究智能化测绘技术在工程测量中的应用具有重要的现实意义。

1 智能化测绘技术概述

1.1 智能化测绘技术的定义

智能化测绘技术是利用现代信息技术、传感器技术、人工智能等与传统测绘技术相结合, 实现测绘数据自动采集、智能处理、深度分析及应用的一种新的技术系统。基于高精度定位终端、卫星遥感影像、无人化移动测量平台及云端数据处理平台, 可全天候全地形快速获取大量的地理空间信息, 利用算法模型实现地物识别、变化监测及三维建模等, 此技术大大提高了数据采集速度及结果准确性, 可用于辅助工程勘察、施工放样、变形监测以及智能化管理等一系列工作, 促进了测绘服务由人工化、粗放式、间断式、无导向化向自动化、精细化、动态化、智能化的方向发展。

1.2 智能化测绘技术的特点

智能化测绘技术具有自动化程度高、测量精度高、数据处理速度快等特点。自动化程度高体现在测量设

备可以自动识别目标、选择路线、获取信息、即时传输以及进行初步的分析, 减少人为因素的影响和劳动的强度; 测量精准度高得益于高精度惯性导航系统、多传感器融合定位技术以及自适应滤波技术的综合应用, 有效降低外界的干扰, 确保地理空间数据的有效性; 数据处理速度快依靠边缘端的数据处理能力轻量化建模技术, 可以对大量的点云数据以及图像进行实时的解算、三维重建、变化监测, 为现场及时判断、做出相应的行动提供支持。

1.3 智能化测绘技术的发展历程

智能化测绘技术的发展经历了由传统测绘技术到智能化测绘技术的重大转变。早期的测绘技术主要是基于人工进行测量及手工绘制图纸, 靠经验来判断, 周期长、工作量大、成果更新不及时而且准确率低。随着计算机技术及传感器的发展, 产生了数字化测绘技术, 在野外实现了自动采集数据、在室内完成了成图一体化以及空间信息的有序存储以及快速查找。近年来, 人工智能的发展进一步促进了智能化测绘技术的发展, 综合利用多源遥感、北斗导航、激光雷达以及深度学习等技术使测绘设备和系统具有感知周围环境、识别目标物体、发现变化和作出实时决定的能力^[1], 大大提高了测绘的自动化程度、精确程度和服务响应速度。

2 智能化测绘技术在工程测量规划设计阶段的应用

2.1 地形地貌数据采集与分析

在工程测量的规划设计阶段, 精确的地形地貌资料是基础。智能化测绘技术可以利用无人机、卫星遥

作者简介: 尹天成(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程测量。

感等手段获得大范围的地形地貌数据,无人机携带高精度的摄像设备可以在短时间内得到高清晰度的影像资料,再经过专业的软件进行处理就可以得到高精度的数字高程模型(DEM)以及正射影像图(DOM)。这些资料可以清楚地反映出工程所处地的地形情况,给规划设计提供详尽的基础资料。智能化测绘技术还可以对这些地形地貌的数据进行分析,如坡度分析、坡向分析等,使得设计者能够更清楚地认识到工程所在地的地形特点,从而完善设计方案。

2.2 地质条件探测

地质条件对工程建设的安全性和稳定性有很大影响。智能化测绘可以采用地质雷达、地球物理勘探等方法对工程区域进行地质调查。地质雷达通过发射高频电磁波来探测地下介质的分布情况,能够发现地下空洞、断层等地质缺陷^[2]。地球物理勘探则是通过检测地球物理场的变化来推测地下地质结构以及岩石的性质。这些探测结果对于工程基础设计起到了很重要的作用,从而保证了工程的安全和稳定。

2.3 规划方案模拟与优化

智能化测量技术在三维绘图软件中可以对工程项目进行模拟与改进。结合地物地貌数据、地质条件数据、工程设计数据,创建三维建模,设计人员就可以形象地看到工程项目在实际环境中的位置及效果。利用其仿真分析功能,可以对该工程项目进行不同的模拟实验,如水流模拟、风场模拟等,验证该项目是否可行、合理,根据仿真的结果,设计者可以对方案进行改进,提高项目的经济效益和社会效益。

3 智能化测绘技术在工程测量施工建设阶段的应用

3.1 施工场地测量与定位

在施工建设期间,精确的场地测量以及定位是保证工程顺利进行的必要条件。智能化测绘技术集成了全球定位系统、全站仪、三维激光扫描仪及惯性导航装置等设备,实现多种数据源的同时采集。GPS 提供大范围高精度的空间基准,全站仪完成局部详细的放线与变形监测,而三维激光扫描仪生成高精度的实景三维模型,智能软件自动解算、验证、显示,在 BIM 上更新最新测量结果。现场工人使用移动终端及时查阅设计模型及实测数据对比信息及时修改施工进度,整体方案大大增加了工作的流畅度,避免了人为的错误发生,缩短了工期,给全面的精细化建造提供了准确的空间信息保障^[3]。

3.2 施工进度监测

智能测量技术可使传感器网络和实时监控系统的结合更加紧密,从而做到对项目的全过程全方位监控。

对于建筑工程,安装在主要结构位置的位移传感器、应变传感器、倾斜仪不断获取变形的信息;并配备北斗高精度定位装置,达到毫米级沉降及位移监测。系统自动比对设计模型与实测数据,发现偏差规律并及时发出隐患预警。同时,装备多光谱相机的无人机按照预定的航线定时拍照,生成正射影像以及三维场景模型,清晰地看到土方开挖、主体封顶、外立面施工等各个阶段的进度。所有的数据集中在同一个系统中,方便远程协同决策和循环管理,从而大大提高项目管理的精度、速度以及安全系数。

3.3 施工质量控制

智能测绘技术对施工质量监控起着重要作用,它能够精确、及时地获取施工数据并进行处理,自动生成对比信息,做到全程闭环管理。在公路建设方面,车载三维激光扫描设备和惯性导航系统联合运行,不断记录路面平整度、坡度及平整度等参数,自动发现偏差并报警;在建筑行业内,无人机倾斜摄影与 BIM 模型互动,及时检测建筑物尺寸大小、楼层高低、构件位置等等,配合智能传感器及图像识别软件,可以无损鉴别混凝土表面质量、钢筋间距及保护层厚度等,帮助材料进场检测以及隐蔽工程检查等工作,大大提高了质量监管工作的公正性、及时性以及可追溯性。

4 智能化测绘技术在工程测量运营维护阶段的应用

4.1 建筑物变形监测

在工程的运行维护阶段,建筑物的变形监测是保证建筑物安全的重要措施。智能化测绘技术可以使用高精度的测量工具和监控系统来监控建筑物的变形情况,如利用全站仪、水准仪等设备定期对建筑物的沉降、倾斜等方面进行测量,经过对结果的整理分析得出建筑物的变形发展趋向。智能化测绘技术也可以利用传感器以及物联网技术进行对建筑物的变形的实时监控报警,在变形达到预定值时发出警报,从而引起相关人员的注意。

4.2 设施设备状态监测

工程项目中设施设备(桥梁、隧道、管道等)的工作状态对于保障项目的正常运作起着至关重要的作用。智能化测绘结合高精度定位、三维激光扫描及物联网感知能力,通过安装应变片、加速度传感器、倾斜仪、光纤光栅、温湿度测量模块等方式对结构物的变形情况、应力情况、动力响应及环境交互的影响进行实时连续监测^[4]。基于端侧计算与云端大数据平台,系统可以自动捕捉异常变化,精确锁定病害发生的位置,辅助科学评定结构物的健康状态。因此而产生的

预见性维护方案大大提高了维护的响应速度,减少意外事件的发生,有效地延长了设备设施的使用寿命,提升了基础设施服役的安全性和韧性。

4.3 灾害预警与应急响应

智能化测绘技术集成卫星遥感、气象监测、无人机航拍以及物联网传感器,实现对自然灾害的全过程全方位监控,可以清晰判断洪水淹没范围、震后地面变化、山体滑坡情况、森林火灾情况等,自动生成风险程度示意图,分级报警。在应急响应阶段,基于高精度三维地理信息平台,汇聚地形地貌、道路畅通情况、房屋类型、人口热力图及救援资源所在位置等各种信息,进行灾害情景模拟推演,帮助指挥中心更好地设置疏散路线、合理布置救援力量、及时安排物资配送计划等,大大提高了灾害评估的可靠性和应急处置的有效性。

5 智能化测绘技术在工程测量中的发展趋势

5.1 与新兴技术的融合

智能化测绘技术将与人工智能、大数据、物联网等新兴技术相结合。人工智能应用于影像解译、三维模型构建和变化检测中,完成对地理要素的自动提取及语义理解;大数据用于多种不同类型测绘数据集成、管理、关联分析,获取空间信息的潜在价值;物联网将无人机、卫星、传感器、移动终端互联互通,形成全方位立体式感知网络,组合式创新带来自动化采集、智能化诊断、动态更新、闭环反馈的新形态,大大增强了测绘服务的即时性、辅助决策和空间表现能力。

5.2 测量精度的提升

随着科技的发展,智能化测绘技术的测量精度越来越高。高敏感度的多元集成传感器、抗干扰的激光雷达、小型化的惯性导航模块等新产品的不断更新换代大大加强了在复杂条件下的获取数据的能力^[5]。人工智能控制的自适应滤波算法、多尺度特征匹配技术、实时动态平差方法深入融合到了数据的处理过程中,可以有效地去除噪声的影响,保证结果的一致性和可靠性。边缘计算及云端协同机制加速了数据的解算和回传效率,完成从采集到应用的闭环优化。测量精度的大幅提高,不仅完善了工程项目勘察、设计、施工的各阶段的数据基础,而且极大地推动了城市更新、交通枢纽、防灾减灾等重大工程的精细化管理和可持续发展。

5.3 应用领域的拓展

智能测绘技术应用范围将会不断扩大。除了传统的工程测量领域外,还会涉及城市规划、生态环保、

农业、林业、应急救援、自然资源管理及文物古迹保护等领域的应用。在城市规划中,利用高精度的三维建模以及实时的动态监测功能,为城市空间布局的优化和道路的智能化规划提供参考;在生态环境保护上,通过多源卫星遥感影像以及无人机航拍的方式进行污染蔓延路径跟踪,生态系统破坏检测及生物多样性评价;在农业及林业方面,准确把握土壤湿度、农作物生长状况及树木植被的变化情况,帮助智能化农业生产及合理开发利用;在应急救援中,及时绘出受灾损失图等为相关部门科学调配资源和做出准确判断提供支撑;在自然资源监督执法及古建筑测绘中,提供一个丰富、多时空尺度、高频率的空间数据库。

6 结束语

智能测绘技术贯穿工程全寿命周期,在各阶段均发挥着关键作用:在规划设计阶段,为地形分析、地质勘探提供高精度数据支撑;在施工建设阶段,实现精确位置测定、施工进度动态监控与工程质量实时保障;在运营维护阶段,承担结构变形监测、设施健康状态评估及灾害预警等核心功能。随着AI、5G、北斗卫星导航系统等先进技术的深度融合,智能测绘的精度持续提升,应用场景也不断拓展。然而,其规模化推广仍面临多重挑战:高端测绘设备成本高昂,制约了中小项目的技术普及;测绘数据的安全防护与保密管理体系有待完善;兼具测绘专业能力与信息技术素养的复合型人才短缺,成为技术落地的重要瓶颈。面对机遇与挑战并存的发展格局,需从多维度协同推进:一方面,加大核心技术研发投入,优化设备性价比;另一方面,完善数据安全监管制度,构建全流程防护体系;同时,加快复合型人才培养,打通产学研用通道。通过推动智能测绘与工程建设的深度融合,为工程领域的高质量发展筑牢技术根基。

参考文献:

- [1] 于丽.智能化测绘技术在工程测量中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(08):27-29.
- [2] 任彭睿智.智能化测绘技术在工程测量中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(01):52-54.
- [3] 高光伦,邓国震.测绘工程中高精度测量技术的应用与发展趋势研究[J].美食,2024(23):117-118.
- [4] 吴金明.数字化测绘技术在工程测量中的运用研究[J].科技资讯,2023,21(06):23-26.
- [5] 毛文亮.智能化发展下工程测量中的数字化测绘技术探析[J].水上安全,2023(14):64-66.

配网工程电力电缆故障智能化诊断技术研究

王晓慧¹, 杨 帅²

(1. 山东中茂实业集团有限公司宁津分公司, 山东 德州 253400;

2. 德州市光明电力服务有限责任公司宁津分公司, 山东 德州 253400)

摘 要 面对日益紧张的全球能源供需矛盾, 为保证社会生产生活的有序进行, 稳定充足的电能供应至关重要。在此背景下, 电力系统的建设规模逐渐扩大, 复杂程度显著提升。特别是作为电力系统的末端环节, 配网的运行质量直接影响到电能的输送, 开展电力电缆故障智能化诊断, 成为提升配网运维水平、筑牢供电安全防线的必然趋势。本文首先从配网工程电力电缆故障类型与诱因入手, 随后讨论了主要的智能化诊断技术, 最后对配网工程电力电缆故障智能化诊断技术发展趋势展开了分析, 以期对相关运维工作提供参考。

关键词 配网工程; 电力电缆; 智能化诊断

中图分类号: TM755

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.009

0 引言

在配网工程中, 电力电缆以其可靠性高、受外界影响小、占地面积少等优势得到了广泛的应用。在科技不断发展、智能电网建设水平逐步提升的推动下, 对于配网电力电缆故障诊断工作提出了更高的要求, 通过智能化诊断技术的运用, 能够有效提升配网的运维管理水平, 为电力的安全、稳定供应提供保障。

1 配网工程电力电缆故障类型与诱因

1.1 电缆故障类型

1. 接地故障。接地故障主要指的是电缆一相或多相导体与大地或其他接地体之间发生电气连接, 造成了电流的泄漏。在配网电缆中, 接地故障主要涉及单相接地故障、两相接地故障、三相接地故障。其中, 单相接地故障主要是受到电缆绝缘层破坏或者老化以及外力破坏等因素的影响; 两相接地故障与三相接地故障是在电缆遭受严重外力破坏或绝缘性能严重下降的情况下所产生的^[1]。

2. 短路故障。短路故障主要由于电缆两相或多相导体之间直接接触, 或通过电弧等介质形成电气连接, 最终造成电流的急剧增大。通常相间短路故障和相对地短路故障较为常见, 相间短路故障主要受电缆绝缘层击穿、导体裸露、外部破坏等因素的影响; 相对地, 短路故障主要是受导体与大地之间电气连接问题的影响。

3. 断线故障。断线故障出现的主要原因是电缆的一根或多根导体出现断裂问题, 影响了电流的正常传

输, 通常与电缆遭受外力拉扯、疲劳断裂、挤压等因素有关, 不仅会造成供电的中断, 同时还会影响用户的正常用电^[2]。

4. 闪络性故障。闪络性故障问题主要由于电缆在高压作用下绝缘层出现了局部击穿问题, 最终形成间歇性电弧放电。并且, 此种故障问题隐蔽性较强, 定位难度较大, 通常在电缆的终端头、中间接头等区域出现较多, 与绝缘层受潮、老化或缺陷等因素有关。

5. 绝缘故障。在电缆绝缘性能下降的过程中, 将会引发绝缘故障, 造成电流的泄漏或绝缘电阻的降低。当电缆长期运行受到潮湿、老化以及化学腐蚀等因素影响的过程中, 绝缘故障发生率较高, 一旦处理不及时, 不仅会发展为接地故障或短路故障, 同时将对电缆的安全运行产生严重威胁。

1.2 电缆故障主要诱因

通过上述对电缆故障类型的分析可知, 造成电缆故障的主要原因涉及以下几个方面: 从绝缘老化层面来讲, 在长期运行的过程中, 电缆绝缘材料受到温度、湿度、电场等多种因素的影响, 逐步出现老化、变质等问题, 影响绝缘性能。特别是在高温、潮湿、腐蚀等恶劣环境下会加快电缆的绝缘老化。从外力破坏角度来看, 由于电缆深埋地下, 当受到外界挖掘、撞击、施工等破坏的影响, 会造成电缆故障问题, 比如说车辆撞击电缆沟、电缆井, 将造成电缆损坏, 在开展城镇化建设的过程中, 施工阶段缺少对电缆走向情况的综合了解, 挖掘过程中无意间造成电缆的破坏。从受

作者简介: 王晓慧 (1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 配网工程。

潮进水层面进行分析,如果电缆的终端头、中间接头等部分出现密封不严的情况,就会为水分的浸入提供机会,造成绝缘层受潮,影响绝缘性能,特别是在电缆敷设的过程中,如果受到水源和潮湿土壤的影响,将直接造成绝缘层受潮。从过电压角度来看,网系统中存在雷电过电压、操作过电压等多种过电压因素,会造成电缆绝缘层击穿,进而引发故障问题,特别是在雷电活动频繁的区域,电缆遭受雷电过电压袭击的概率更高。从维护角度来讲,由于电缆维护管理不到位,缺少定期的检查和及时的维修,造成电缆故障的出现,比如说如果长期未进行电缆终端头、中间接头等部位的检查维护,就会出现发热、松动等情况,进而加大故障问题发生的可能^[3]。

2 配网工程电力电缆故障智能化诊断技术的具体应用

2.1 人工智能算法在故障诊断中的应用

1. 机器学习算法的应用。机器学习算法是借助数据进行学习分析的方式,可完成数据特征的自动化提取,并进行预测模型的构建。在进行电缆故障诊断的过程中,支持向量机、决策树、随机森林是较为常用的机器学习算法。例如说:利用支持向量机法,可寻找最优分类超平面,并完成故障数据与正常数据的精准分类,提升电缆故障诊断的精准度和科学性。总的来讲,机器学习算法具有泛化能力强、分类精度高的特点,在电缆故障分析与识别过程中应用较为广泛。

2. 深度学习算法的应用。深度学习算法是一种依赖于人工神经网络的算法,通过构建多层神经网络模型,可完成数据的深度特征提取和分析工作。在进行电缆故障诊断的过程中,卷积神经网络、循环神经网络是常见的深度学习算法。比如说其中的卷积神经网络算法,借助卷积层、池化层等结构,可完成电缆故障数据特征的自动提取,并进行准确诊断。特别是对于复杂的电路故障来讲,此算法特征提取和分类优势显著^[4]。

3. 专家系统的应用。专家系统主要依托相关基础知识,通过进行不同领域专家知识与经验的转化,完成对电缆故障的诊断与决策。通常专家系统由知识库、推理机、解释器等部分组成。在进行电缆故障诊断工作的过程中,专家系统能够根据所输入的故障现象和数据,借助推理机完成推理和判断工作,获得故障的诊断结果以及处理建议。该系统具有推理过程透明、表达直观的优势,但在更新速度和知识获取方面还有待优化。

2.2 物联网技术在故障诊断中的应用

1. 智能传感器网络的应用。智能传感器网络的应用主要是通过温度传感器、湿度传感器、电流传感器、电压传感器、局部放电传感器等布置在电缆的关键部位,完成对电缆运行状态数据的实时采集。虽然上述传感器体积小、功率低,但是整体精度较高,能实现无线传输,可完成对电缆运行状态的实时感知,作用强大。

2. 无线通信技术的应用。无线通信技术具有覆盖范围广、可靠性强、传输速度快等优势,为数据的实时传输与共享提供重要支持,保证了信息交互的便捷性,提升系统响应速度。借助WiFi、5G、蓝牙等无线通信技术,能够帮助智能传感器进行各种环境设备数据的高效采集,并向云端平台或本地监控中心高效稳定地传输。

3. 物联网平台的应用。借助物联网平台的数据存储、管理、分析和应用功能,可完成海量电缆运行数据的高效采集、科学存储和全面管理。尤其是在大数据分析技术和人工智能算法结合应用的过程中,可通过数据的进一步处理,提取故障特征,确保能够精准判断故障类型以及所在位置,并借助可视化界面向工作人员展示具体的诊断结果,提出相应的决策建议,保障问题处理效率^[5]。

2.3 大数据分析技术在故障诊断中的应用

1. 数据的清洗与预处理。在故障诊断过程中,大数据分析技术的运用,能够完成对数据中噪声缺失值、异常值的清洗和预处理。数据清洗过程中可以有效去除数据中的噪声和异常值。数据补填的过程中能够实现数据缺失情况的精准补充,通过开展数据的标准化管理能有效消除数据的量纲影响,为后续的分析 and 挖掘提供支持。

2. 特征的提取与选择。从海量的电缆运行数据中提取与故障相关的特征是大数据分析的关键。通过采用主成分分析、独立成分分析等特征提取方法,将高维数据转化为低维数据,提取数据中的关键特征。通过采用信息增益、卡方检验等特征选择方法,选择与故障相关性较高的特征,提高故障诊断的准确性与效率。

3. 故障的诊断与预测模型构建。在大数据分析技术和人工智能算法结合运用的过程中,可完成电缆故障诊断和预测模型的构建。通过进行历史故障数据与实时运行数据的分析学习,模型能够完成故障特征的自动化识别,并精准判断故障位置以及类型情况,预测未来故障发生的可能以及整体趋势。

2.4 数字孪生技术在故障诊断中的应用

1. 数字孪生模型构建。通过对电缆设计参数、制造技术、运行数据等信息的分析,可构建更为完善的电缆数字孪生模型,以真实反映电缆结构、材料参数、温度等物理状态和运行特征。

2. 实时数据融合与分析。在进行实际电缆运行数据与数字孪生模型分析比对的过程中,可根据具体的数据差异完成电缆故障问题的判断,当实际数据与模型预测数据差异较大时,则表明电缆可能存在故障问题,需做好后续的诊断与分析工作。

3. 故障模拟与预测。借助数字孪生模型,可完成对不同故障情况下电缆运行状态以及故障演化过程的模拟,将故障类型、故障位置、故障程度等参数输入模型当中即能进行故障发展趋势以及影响范围的预测,为后续进行故障的处理以及恢复供电提供参考依据^[6]。

3 配网工程电力电缆故障智能化诊断技术发展趋势

3.1 技术融合趋势

在时代不断发展进步的过程中,配网工程电力电缆故障智能化诊断技术需要逐步朝着多技术融合方向迈进,通过综合应用人工智能、大数据、物联网、云计算、数字孪生、5G 等先进技术,可构建更为完善、高效的智能化诊断体系。例如:5G 技术的高速度、低延迟特性将为物联网数据传输提供更有力的支持,使得电缆运行状态数据能够实时、准确地传输到云端平台;数字孪生技术与人工智能算法的结合,将实现对电缆故障的更加精准的模拟与预测;大数据分析技术与物联网技术的融合,将能够对海量的电缆运行数据进行更深入的挖掘与分析,发现更多潜在的故障特征与规律。

3.2 智能化与自主化趋势

在人工智能技术不断发展的推动下,配网工程电力电缆故障诊断技术的智能化、自主化发展已经成为一种必然趋势。系统将具备更强的自主学习、自主决策、自主诊断能力,可基于电缆的运行状态和环境情况,完成诊断策略和模型参数的自动化调整,提高故障诊断的精准性和高效性。与此同时,系统还可自动生成故障处理建议,并同配网自动化系统展开联动,不仅能确保故障的自动隔离,同时还具备恢复供电的作用,有效提升了配网自动化的可靠性水平^[7]。

3.3 预防性与预测性趋势

智能化诊断技术的预防性作用至关重要,不仅可以传统的事后处理转向事前预测,同时通过对电缆运行状况的实时监测,并配合数据的精准分析,可提前了解故障问题的发生,根据具体的走向趋势提供更

具针对性的预防性维护决策指导。例如:对电缆温湿度情况、局部放电情况展开分析的过程中,可精准预测电缆绝缘老化情况,以此为依据,向相关工作人员发送维护和更换提醒,降低故障问题不良影响的同时,更保证了电缆运行的安全性和稳定性。

3.4 标准化与规范化趋势

为实现配网工程电力电缆故障智能化诊断技术的灵活应用,需有完善的技术标准和规范作为支持。通过进行统一化智能诊断技术标准体系的构建,规范数据采集、通信协议、故障诊断模型等环节,实现不同厂商、不同型号智能化诊断设备的数据共享。另外,制定运维管理规范体系,加强对智能化诊断、系统安装、设备调试、运行维护等不同环节的管理工作,保障系统的安全可靠运行。总的来讲,未来的标准化与规范化发展趋势将推动配网工程电力电缆故障智能化诊断技术的协调、健康发展^[8]。

4 结束语

在配网工程电力电缆故障智能化诊断过程中,通过物联网、大数据、人工智能、云计算等先进技术的融合应用,能有效提升故障诊断工作的高效性和精准性,实现对问题的精准分析。随着科技的不断发展与社会用电需求的升级,智能化诊断技术需紧跟行业发展,以更高的适配性应对复杂多变的配网环境,向更高效、更智能的方向不断发展,为我国电力系统的安全稳定运行与电力事业的高质量发展提供重要的技术支持。

参考文献:

- [1] 叶丽莎,商志伟,许正涛.高压地下电缆对地铁通信的影响与保护技术研究及应用[J].电气开关,2025,63(04):68-72.
- [2] 付佳佳,李玉洁,刘彩霞.城市电网地下电力电缆典型故障定位方法分析与展望[J].电工技术,2025(15):83-86.
- [3] 周志军,周娅彤.基于物联网和传感技术的电缆防破坏预警系统[J].电世界,2025,66(04):1-4.
- [4] 张羽翔,胡雨时,张宏志,等.基于深度学习的电力电缆故障诊断与定位策略研究[J].微型电脑应用,2025,41(06):20-25.
- [5] 马奇友.电力电缆电气参数及电气特征研究[J].现代盐化工,2025,52(03):50-52.
- [6] 卜威,王韬,普凯.电力电缆故障诊断技术在智能电网中的应用研究[J].机电信息,2021(17):23-25.
- [7] 赵晓宇.基于人工智能电网故障诊断技术的研究现状及未来发展趋势[J].通讯世界,2023,342(11):151-152.
- [8] 陈敬德,盛戈彤,吴继健,等.大数据技术在智能电网中的应用现状及展望[J].高压电器,2022(01):35-43.

多源信息融合的软岩隧道施工灾变预警研究

曾艳芹

(四川路桥华东建设有限责任公司双流分公司, 四川 成都 610200)

摘要 临近断裂带软岩隧道施工面临围岩大变形、塌方等灾变风险, 传统监测手段存在实时性差、数据孤立、预警精度不足等问题。本文基于多源信息融合技术, 构建涵盖地质、变形、应力等多维度的监测体系, 研发“多源信息熵—风险概率”映射模型与深度强化学习预警算法, 形成“监测—融合—预警—支护”闭环响应机制; 通过搭建低功耗低延时监测网络, 优化数据预处理与融合流程, 实现风险分级预警与动态支护参数调整, 旨在为软岩隧道施工安全提供技术参考。

关键词 多源信息融合; 软岩隧道; 灾变预警; 施工监测; 动态支护

中图分类号: U455; TV554+.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.010

0 引言

随着交通基础设施建设向复杂地质区域延伸, 临近断裂带软岩隧道的建设需求日益增多。软岩具有强度低、变形大、遇水软化等特性, 叠加断裂带地质扰动影响, 施工过程中极易发生围岩失稳、塌方、涌水等灾变事故, 严重威胁施工安全与工程进度^[1]。当前软岩隧道施工监测多依赖全站仪、收敛计等传统设备, 存在实时性差、数据覆盖不全面等局限。多源监测数据分散独立, 缺乏有效融合分析, 导致灾变预警滞后^[2]; 预警模型多基于单一指标构建, 难以反映围岩复杂力学响应; 支护设计多依赖经验参数, 缺乏动态调整能力, 易出现过度支护或支护不足的问题。基于此, 本文开展多源信息融合的软岩隧道施工灾变预警研究, 整合地质雷达、三维激光扫描、光纤传感等多类监测数据, 构建科学的融合模型与预警体系, 实现灾变风险的精准预判与动态支护响应, 攻克软岩隧道施工安全管控瓶颈, 为同类工程提供参考。

1 工程概况

本文依托某高速公路临近断裂带软岩隧道工程, 隧道全长 2 860 m, 为双向四车道分离式隧道, 设计时速 100 km/h。隧道最大埋深 180 m, 最小埋深 25 m, 属于浅埋偏压隧道。隧道穿越侏罗系软质砂岩与泥岩互层, 岩体完整性差, 节理裂隙发育, 且临近区域性断裂带, 断层宽度 5 m~15 m, 主要为泥质充填, 稳定性极差。

隧道施工采用 CRD 法开挖, 初期支护为喷射混凝土+锚杆+钢拱架组合体系, 二次衬砌采用模筑混凝土。施工过程中面临多重风险: 一是软岩围岩抗压强度低,

开挖后易产生大变形, 初期支护易出现开裂; 二是断裂带富水性强, 存在涌水突泥风险; 三是浅埋偏压导致围岩应力分布不均, 塑性区扩展范围大; 四是施工扰动与断裂带活动叠加, 易引发围岩失稳塌方^[3]。

该隧道传统监测手段仅能实现位移和应力的定时监测, 数据更新滞后, 灾变预警准确率不足 70%, 曾发生两次小规模塌方事故, 造成工期延误与经济损失。基于此, 依托本项目开展多源信息融合灾变预警技术研究, 以解决施工安全管控难题。

2 多源信息融合监测体系构建

2.1 监测指标选取

结合软岩隧道灾变演化规律与断裂带地质特征, 选取四类核心监测指标。地质信息指标通过地质雷达、瞬变电磁法、超前钻探获取, 包括围岩岩性、裂隙发育程度、断层产状、地下水分布等, 用于预判地质风险源。变形监测指标涵盖隧道初支收敛变形、地表沉降、洞身深部位移、衬砌变形, 反映围岩与支护结构的力学响应状态。应力监测指标包括锚杆轴力、钢拱架应力、衬砌内力、围岩接触压力, 监测支护结构受力与围岩应力重分布情况。环境监测指标包括隧道内温湿度、涌水量、瓦斯浓度, 保障施工环境安全。

各类指标相互补充, 形成“地质—变形—应力—环境”四维监测体系, 全面覆盖软岩隧道施工灾变的关键影响因素, 为预警模型提供完整数据支撑。

2.2 监测设备部署

遵循“全面覆盖、重点突出、低耗高效”原则, 进行监测设备部署。地质雷达采用 SIR-4000 型, 探测

作者简介: 曾艳芹 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

深度 0 m ~ 30 m、分辨率 0.1 m，与瞬变电磁仪沿隧道纵向每 50 m 布置一个监测断面，断层影响区加密至 20 m，用于超前地质预报与掌子面地质评价。三维激光扫描仪选用 LeicaP40，扫描速度 100 万点 / 秒、精度 ± 2 mm，每 30 m 布置一个监测断面，实时采集隧道轮廓变形数据^[4]。

在变形监测方面，地表沉降监测点沿隧道中心线两侧各 30 m 范围内布置，间距 20 m；洞内初支收敛监测采用自动化收敛计，每 20 m 一个断面，每个断面布设 3 对监测点；深部位移监测采用滑动测斜仪，在断层影响区及浅埋段布设，监测深度达隧道底板以下 15 m。应力监测采用分布式光纤传感器与振弦式应力计组合，光纤传感器采用 BOTDA 技术、测量精度 $\pm 0.1\%$ FS、监测频率 1 次 / 分钟，沿钢拱架全长布设、每 2m 设置一个监测点；振弦式应力计布置在关键断面的拱顶、拱腰、边墙位置，每断面布设 6 个 ~ 8 个，锚杆轴力计选用振弦式、量程 0 kN ~ 500 kN、精度 $\pm 0.5\%$ FS。环境监测设备在隧道内每 100 m 布设一套温湿度、瓦斯浓度传感器，涌水量监测在隧道排水沟设置流量计量装置。

所有监测设备通过工业以太网与无线传输模块结合，实现数据低延时传输，传输延时控制在 5s 以内，满足实时监测需求。

2.3 数据预处理技术

多源监测数据存在噪声干扰、尺度不一致、数据缺失等问题，需进行预处理。采用小波阈值降噪法对地质雷达信号、应力应变数据进行降噪处理，选用 db4 小波基、分解层数 3 层，阈值选取基于 Birgé-Massart 准则，去除施工振动、设备干扰等噪声影响，保留有效信号特征。针对不同监测指标的量纲差异，采用 min-max 标准化方法进行归一化处理，公式为：

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式 (1) 中， x 为原始数据， x' 为归一化后数据， $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为该指标的最小值和最大值，将数据映射至 [0, 1] 区间，消除量纲影响。

对于数据缺失问题，根据缺失数据类型采用不同补全方法：连续型数据（如位移、应力）采用线性插值法，离散型数据（如地质分类）采用 K 近邻算法补全。同时建立数据质量评价体系，通过 3σ 准则异常值检测算法识别无效数据并剔除，确保数据可靠性，为多源信息融合奠定基础。

2.4 多源信息融合模型

构建“数据层—特征层—决策层”三级融合模型。数据层融合采用加权平均法，对同一监测指标的多设备数据进行融合，根据设备精度分配权重，提高数据

可信度。特征层融合通过卷积神经网络提取各监测指标的深层特征，构建 128 维特征向量，实现多维度信息的特征融合，突出灾变前兆特征。

决策层融合基于“多源信息熵—风险概率”映射模型，引入信息熵量化多源数据的不确定性，通过熵值计算反映各指标的风险贡献度。将特征层融合结果输入映射模型，结合深度强化学习算法，构建含 3 个隐藏层的神经网络预警模型，隐藏层节点数分别为 64、32、16，激活函数采用 ReLU 函数，输出层采用 Softmax 函数，建立监测数据与灾变风险概率的对应关系，实现多源信息的深度融合与风险量化评估。融合模型能够有效整合异构监测数据，克服单一指标预警的局限性，提升风险识别的全面性与准确性。

3 灾变预警模型与动态支护响应

3.1 预警指标阈值确定

结合隧道施工规范、工程经验与数值模拟结果，确定三级预警指标阈值。黄色预警对应潜在风险，位移速率大于 0.5 mm/d、应力变化率大于 10%/d、地质雷达检测发现轻微裂隙发育；橙色预警对应较高风险，位移速率在 1.0 ~ 2.0 mm/d 之间、应力变化率在 10%/d ~ 20%/d 之间、出现局部围岩掉块；红色预警对应极高风险，位移速率大于 2.0 mm/d、应力变化率大于 20%/d、监测到大规模裂隙扩展或涌水迹象^[5]。

阈值设定充分考虑软岩特性与断裂带影响，通过 3DEC 离散元数值模拟分析不同断层形态、支护参数下的围岩稳定状态，模拟工况涵盖断层宽度 5 m ~ 15 m、倾角 30° ~ 60° 等多种组合，结合同类工程 12 起事故案例统计，对阈值进行 3 轮校准优化，确保预警的科学性与实用性。

3.2 灾变预警模型构建

针对工程灾变演化过程的非线性、强耦合与强不确定性特征，本研究基于深度强化学习框架搭建灾变预警模型，模型以多源监测信息融合处理后的特征向量为输入，以对应工况下的灾变风险等级为输出。模型训练数据集采用工程现场累计归档的 3 万组有效监测历史数据，搭配数值模拟生成的 5 万组极端工况虚拟样本，兼顾了现场实际工况的真实性与极端灾变场景的覆盖度，保障训练样本的完备性。在训练过程中，以风险识别准确率为核心构建奖励函数，初始学习率设置为 0.001，采用自适应矩估计优化算法完成参数迭代，经过 500 轮迭代训练后模型达到稳定收敛状态，验证集综合识别准确率可达 94.3%。

该预警模型在工程应用端形成了全流程闭环预警能力，核心实现三大核心功能。一是实时风险动态评估，

依托模型的轻量化实时推理能力,每5分钟完成一次全维度数据更新与风险等级判定,保障风险识别的时效性;二是灾变发展趋势预判,嵌入LSTM时序预测模块,可对未来24小时内的灾变风险演化趋势进行滚动预测,经测试预测值与实测值的相对误差稳定控制在5%以内;三是分级预警精准推送,可根据风险等级划分结果,通过配套的工程预警管理平台,将预警信息定向推送至对应层级的管理与现场处置负责人。经多组现场工程实测试验验证,模型整体预警准确率达92%以上,误警率控制在8%以内,各项性能指标均满足工程现场灾变预警管控的实际需求。

3.3 动态支护响应策略

建立与预警等级对应的动态支护响应策略,实现“预警—支护”闭环控制。

在黄色预警状态下,维持原支护参数,加密监测频率至每30分钟一次,增加人工巡查次数至每2小时一次,重点关注异常监测断面的围岩状态;橙色预警状态下,启动一级响应,调整支护参数,锚杆预紧力从100 kN提升至120 kN~130 kN,钢拱架间距由0.8 m加密至0.6 m,采用分层注浆工艺加固围岩,注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆,注浆压力控制在1.5 MPa~2.0 MPa,注浆孔间距1.5 m,控制塑性区扩展。

在红色预警状态下,启动紧急响应,立即停止开挖作业,人员设备撤离至安全区域,采用大管棚超前支护+径向注浆联合加固措施,大管棚采用 $\Phi 108\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 无缝钢管,环向间距30 cm,倾角 $1^\circ\sim 3^\circ$,注浆材料水灰比1:1,凝胶时间30 s~60 s,待围岩稳定性恢复后,调整施工方案重新开挖。

支护响应策略充分体现分阶段调控理念,初期采用刚性支护控制围岩变形,变形阶段通过柔性调整适应围岩变形,稳定阶段进行补强支护确保结构安全,结合预应力锚杆—可缩式钢拱架组合支护体系,提升支护结构的自适应性及抗偏压能力。

3.4 预警平台开发

开发软岩隧道施工灾变预警平台,集成数据采集、融合分析、风险预警、支护决策等功能。平台采用B/S架构,支持电脑端与移动端访问,实现数据自动采集与实时上传。平台核心功能包括数据可视化模块,以折线图、热力图等形式展示多源监测数据与风险等级分布;风险预警模块,自动生成预警报告并通过短信、APP推送;支护决策模块,根据预警等级推荐最优支护调整方案;历史数据查询模块,支持监测数据与预警记录的检索分析。

本平台采用MySQL与MongoDB双库协同的混合存储架构,实现隧道工程全类型数据的差异化存储管理。

其中,监测指标阈值、支护设计参数等结构化程度高、逻辑关联性强的业务数据,统一存储于MySQL数据库,保障数据检索、调用的高效性与一致性;隧道三维扫描点云、现场地质图像等体量庞大、结构松散的非结构化数据,存储于MongoDB数据库,适配海量非结构化数据的灵活存储与动态扩展需求。数据传输采用MQTT通信协议,兼顾隧道现场低功耗部署要求与数据传输的高可靠性。平台前端基于Vue.js框架开发,后端采用SpringBoot架构搭建,可稳定支撑现场多终端的高并发访问。同时,平台深度集成BIM技术与数字孪生功能,搭建隧道全段三维可视化模型,实现监测数据与模型构件的深度绑定,完成风险点位的精准定位与可视化呈现。平台操作简便,内置一键式风险评估与支护方案自动生成功能,可有效赋能现场施工管理,大幅提升隧道灾变预警与应急处置效率。

4 结束语

本文针对临近断裂带软岩隧道施工灾变预警难题,开展多源信息融合技术研究,构建了涵盖监测体系、融合模型、预警算法、支护策略与平台开发的完整技术体系。通过选取“地质—变形—应力—环境”四维监测指标,部署低功耗低延时监测网络,研发“数据层—特征层—决策层”三级融合模型与深度强化学习预警算法,建立分级预警阈值与动态支护响应策略,开发智能化预警平台,实现了软岩隧道施工灾变风险的精准预判与高效管控。未来研究可进一步深化数字孪生与智能化自适应支护技术的融合应用,实现支护参数的实时动态调整;拓展多源信息融合的维度,整合施工机械运行状态、人员定位等数据,构建更全面的安全管控体系;加强模型在不同地质条件下的泛化能力研究,推动技术的广泛应用,为我国复杂地质隧道建设提供更有力的安全保障。

参考文献:

- [1] 王彬.智能化多源信息监测在盾构隧道风险管理中的应用[J].绿色建筑与智能建筑,2025(12):84-86.
- [2] 龙贵云,刘有梦,王艳宁,等.基于多源信息融合的深长隧道坍塌风险评估[J].安全与环境工程,2025,32(06):191-203.
- [3] 曹鑫.断裂构造区大跨度软岩隧道施工质量控制与技术优化研究[J].中国品牌与防伪,2025(08):125-127.
- [4] 罗飞轮,熊亮.大口径长距离顶管结构安全多源信息监测技术研究[J].四川水利,2025,46(01):158-161,180.
- [5] 张世珠,王鹏,张开,等.基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法[J].岩石力学与工程学报,2025,44(04):838-849.

AI 技术在岩土工程勘察数据处理中的应用研究

王献明^{1, 2}, 宁浩宇³, 孙炳学³

- (1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;
2. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 北京 100101;
3. 三亚城市投资建设运营集团有限公司, 海南 三亚 572000)

摘要 针对岩土工程勘察数据存在的多源异构、基准不一、短距突变等问题, 本研究提出一套基于人工智能的数据处理框架。以某沿海填海区基坑勘察项目为工程背景, 采用孤立森林算法实现无监督异常值检测, 构建一维卷积神经网络预测压缩模量与不排水抗剪强度, 并集成 GIS 与 BIM 平台开展可视化决策, 以期 AI 技术在岩土勘察领域的工程化落地提供技术参考。应用效果表明, AI 流程相较传统方法处理时长缩短 91.7%, 加权平均绝对相对误差降低 15%, 综合成本下降 20%。

关键词 人工智能; 岩土工程勘察; 多源异构数据; 异常值检测; 深度学习预测

中图分类号: TU195; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.011

0 引言

岩土工程勘察数据涵盖钻孔编录、室内试验与静力触探等多源异构信息, 常面临坐标高程基准不一、单位体系差异、采样扰动及层状介质短距突变等挑战。传统数据处理依赖人工筛选与经验图表, 面对上百个钻孔与上千组试验时, 效率低下且稳健性不足^[1]。近年来, 人工智能在特征学习、异常识别与参数预测方面展现出显著适配性^[2]。本研究以某沿海填海区地下空间基坑勘察为工程案例, 系统阐述 AI 在异常检测、参数智能预测及可视化决策中的关键应用, 评估其效率、精度与成本效益, 并探讨数据治理、模型泛化及组织落地等挑战与未来方向。

1 AI 技术在岩土工程勘察数据处理中的应用基础

1.1 岩土工程勘察数据的特点与处理痛点

岩土工程勘察数据在采集来源与时空尺度上呈现异构性, 钻孔与岩土编录形成文本与离散层位, 室内试验输出数值记录, 原位测试为在场地直接测定力学指标的作业, 涵盖静力触探与旁压, 三者坐标基准、深度参照与单位体系上常不一致。观察发现, 采样扰动、仪器漂移与描述用语差异把噪声与缺测引入数据链, 层状介质的非均质与各向异性又使同类参数在短距离内突变^[3]。传统处理多依靠人工筛选与经验相关图表, 把异常识别、数据对齐与层位比对拆解为分步操作, 面向上百个孔与上千组试验时, 效率与稳健性难以兼

顾。以某沿海填海区地下空间基坑勘察为例, 布设 48 眼钻孔与 36 处静力触探点并配套室内强度试验, 受填海软土夹砂透镜体与高程基准并存影响, 进而使设计参数选取与工期组织承担额外不确定性。

1.2 AI 技术在数据处理中的适配性分析

立足于某沿海填海区勘察中 48 眼钻孔与 36 处静力触探并行采集所暴露的坐标与高程基准不一与短距突变, AI 技术的适配性体现在异构融合、表达与可迁移建模。表征学习把文本编录、室内试验和原位测试映射到统一特征空间, 并在嵌入层完成坐标与深度对齐; 多模态融合与度量学习把单位体系与仪器漂移纳入统一校准。图神经网络与概率图模型把层位接触、孔间邻域和地层衔接编码为图结构, 从而支撑跨孔比对与层系追踪。缺测与扰动由自编码与生成式插补恢复; 在样本规模与场地异质性约束下, 自监督与迁移学习把邻近工点经验迁移到新场地。需关注的是, 物理约束学习与可解释性技术把有效应力路径与强度包络注入模型, 并输出特征归因。由此把参数筛选、层位比对与设计值区间建议合并为全流程模块, 嵌入 GIS 与 BIM 形成跨尺度场地级数据中台^[4-5]。

2 AI 技术在岩土工程勘察数据处理中的关键应用

2.1 基于机器学习的勘察数据异常值检测

鉴于某沿海填海区联合勘察数据在坐标、高程与单位体系上有差异且短距突变显著, 本研究以孤立森

作者简介: 王献明 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 轨道交通勘察设计。

林算法为核心无监督异常值检测模型，用于在钻孔编录、室内试验与静力触探多源数据中识别仪器漂移、扰动采样与基准错配等异常。该算法通过随机子采样与随机划分构建孤立树，依据样本平均路径长度短易被划分的特性给出异常评分，避免依赖先验标签，契合场地数据标注稀缺情况。

实现路径依托场地级数据中台，先对齐钻孔与触探记录的坐标和深度，统一高程基准、换算单位，用稳健缩放抑制极端值影响；接着构建深度归一化的触探端阻、侧阻与摩阻比特征，联合土工试验指标，以岩性词项嵌入与孔间空间关系的邻域统计将层位语义与空间耦合为数值特征，邻域半径选 20 m。

模型配置采用 300 棵孤立树与每棵 256 样本的子采样策略，用基于中位绝对偏差的污染率估计设定阈值，在剖面方向引入形态学平滑抑制孤立尖峰。部署时以批处理与滑动窗口沿深度扫描，生成异常评分序列及位置索引。

后处理阶段以有效应力路径与层序连续性为约束，构建规则库筛查可疑点，将异常类型标注为仪器漂移、取样扰动与基准错配三类；引入少量专家确认样本微调阈值，形成模型与人工复核闭环，将异常定位、原因归因与修正建议集成为可复用模块，便于嵌入 GIS 与 BIM 执行跨孔核验与设计参数前置校核。

2.2 深度学习驱动的岩土参数智能预测

结合某沿海填海区场地多源编录与试验并行采集的语境，本研究把压缩模量与不排水抗剪强度作为核心目标，构建沿深度序列运行的一维卷积神经网络模型，以钻孔、静力触探与室内试验联合形成的多通道特征向量作为输入，把含水率、液限、塑性指数、端阻、侧阻、摩阻比以及岩性词项嵌入进行统一表达，同时以高程与深度基准对齐作为前置校准环节。进一步观察发现，层状介质的短距突变会放大大局统计波动，因而在网络结构上引入残差卷积与可分离卷积组合，配合深度方向的滑动窗口与扩张卷积进行感受野扩展，使模型在 2 m 尺度内对层间过渡的敏感性得到提升，并且以分层归一化抑制孔间差异的转移偏差，把跨孔泛化能力纳入结构设计之中。

从训练管线来看，数据切分遵循按孔留出策略以避免空间信息泄漏，损失构造以均方误差为基础项，并在有效应力路径一致性与抗剪强度包络的软约束下进行联合优化，同时把相对误差上限设定为不超过 5% 作为上线约束。为描述该基础项的计算方式，损失函数表达式给出如下：

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

式(1)中， L 表示均方误差损失项， n 表示样本数量， y_i 表示第 i 个样本的目标参数真实值，单位与目标参数一致， $\hat{y}_i$ 表示第 i 个样本的预测值。训练阶段以余弦退火学习率调度与权重衰减来进行优化稳定性控制，联合蒙特卡洛丢弃层输出预测区间以服务设计值区间建议，并且通过岩性类别的代价敏感加权降低软土薄夹层的长尾影响。为便于工程上线审核，表 1 给出传统经验相关法与卷积神经网络在压缩模量与不排水抗剪强度上的准入性指标对比，用于指导模型迭代与参数校核流程的阈值设定。

表 1 岩土参数预测模型性能对比表

参数	传统方法 MAE	传统方法 RMSE	CNN 模型 MAE 目标	CNN 模型 RMSE 目标
压缩模量 Es/MPa	2.40	3.10	0.80	1.20
不排水抗剪强度 Su/kPa	7.50	10.20	2.50	3.60

2.3 基于 AI 的勘察数据可视化与决策支持

本研究立足于某沿海填海区联合勘察的多模态数据形态，构建面向场地级的 AI 可视化与决策模块，把钻孔编录、静力触探与室内试验经坐标与高程统一后的结构化要素接入 GIS 与 BIM 一体化前端，形成平面与剖面联动的可视分析。系统以深度学习与异常检测结果作为上游输入，把压缩模量、不排水抗剪强度及摩阻比转化为网格化栅格与连续等值线，叠加不确定性带与层位边界，提供热力图、雷达图与剖面走查三类视图。界面支持按深度滑动窗口与按孔留出过滤，支持按岩性词项与邻域半径进行条件检索，并把规则库中的物理约束进行可视提示，形成参数预测、异常归因与地层追踪的综合表达，从而把数据到设计的逻辑链条在同一屏幕内闭合呈现。

从工程决策流程来看，系统在基坑初设阶段把热力图用于识别软弱夹层与低刚度透镜体的空间聚集区，辅助围护等级划分与降水井布置优化；在参数复核阶段，把分区雷达图用于对比 A1 至 B2 四个施工分区在含水率、塑性指数、端阻与强度指标上的综合差异，联动阈值提醒输出需补充取样与复测的孔段；在施工期动态决策中，依靠与监测平台的数据回写，把预测区间超限区域标注为高风险斑块，并给出支护内力敏感区的剖面段落供会签使用。

3 AI 技术应用效果评估与未来展望

3.1 AI 技术应用效果的量化评估

鉴于某沿海填海区场地存在坐标与高程基准不一与短距突变并存的现实情境，本研究把量化评估框架

定位为效率、准确性与成本三维度的运营指标体系，并把按孔留出切分与场地级数据中台日志当作用于统计的统一口径。进一步观察发现，异常检测与参数预测模块联动后，能够把多源对齐、阈值复核与区间化输出纳入同一流水线，因而在处理时长、相对误差与人力投入上呈现显著差异。需重点关注的是，指标计算采用单批次 48 孔与 36 点的并行采集规模，把平均绝对相对误差定义为压缩模量与不排水抗剪强度加权的误差项，把人力与算力折算的综合成本指数当作成本指标，并以同一工况的数据闭环作为归一基准。由此推导出 AI 流程相较传统流程在处理时间上实现数量级压缩，在精度上相对改善约 15%，在成本上降低约 20%，见表 2。

表 2 AI 技术与传统方法应用效果对比表

评估维度	指标定义	统计口径	传统流程值	AI 流程值	相对变化
效率	数据处理时长	单批次 48 孔 +36 点全流程，从数据对齐至参数出表	72 h	6 h	-91.7%
准确性	平均绝对相对误差，Es 与 Su 加权	按孔留出切分，统一量纲与基准	12.0%	10.2%	-15.0%
成本	综合成本指数	人工工时与算力费用折算，统一价目	1.00	0.80	-20.0%

性量化稳定边界段预测。面向组织落地，本研究把特征归因与可解释报告接入 GIS 与 BIM 前端，建立专家复核闭环与阈值微调机制，配套数据管理员与岩土负责人分工、模型登记与版本回滚，以及贯穿施工周期的漂移监测与告警策略。

3.3 未来发展方向与应用前景

鉴于某沿海填海区多源采集的经验，未来演进应把 AI 由单点工具扩展为贯穿调查、设计、施工的智能勘察体系。数字孪生将构建时空耦合的场地孪生体，把钻孔、静力触探、旁压及现场监测数据的实时反馈融入三维时序模型，依靠物理约束学习与不确定性传播表达变形、孔压与强度演化，并把敏感性分析与风险预警纳入日常决策。边缘计算将把轻量模型下沉至勘探装备端，对端阻与剪强进行在线推断，凭借 5G 回传与滑动窗口质控组织近实时校核与自适应采样，压缩滞后。面向大模型，需在岩土工程专业文本及规范上进行训练，把编录语义解析、试验方案生成与异常归因解释整合到统一代理，并以知识图谱与规则库约束输出边界。由此推导，联邦学习与隐私计算将承担跨项目经验的迁移，配合标准化本体、元数据版本与模型登记的治理，形成与 GIS 及 BIM 协同的闭环流程，服务设计参数前置与全寿命期风险管理。

3.2 应用过程中的关键挑战与解决策略

鉴于某沿海填海区多源并行采集带来的基准错配与短距突变，应用过程呈现数据治理、模型泛化与组织落地三类瓶颈。进一步观察发现，非标准编录、单位混用与标定不足会把噪声与缺测扩散至全流程，训练阶段还易因孔间信息泄漏与薄夹层长尾诱发过拟合，决策端对黑箱输出的采纳存在规范约束。需重点关注的是，数据侧应把坐标与高程基准登记、单位字典与版本化编录纳入场地级治理，建立来源追溯与校准记录并行的质控清单，并以规则库对有效应力路径与层序连续性开展前置核查。由此推导，建模侧宜选用按孔与按分区双重留出抑制泄漏，联合自监督预训练与迁移学习承载邻近工点经验，并以物理约束与不确定

4 结束语

本研究基于某沿海填海区工程实践，构建了覆盖异常检测、参数预测与可视决策的岩土勘察数据 AI 处理框架。孤立森林与一维 CNN 模型有效解决了多源对齐、短距突变与层位追踪难题，显著提升了处理效率与预测精度，降低了综合成本。然而，基准错配、薄夹层长尾及模型可解释性仍是当前主要挑战。未来应发展数字孪生驱动的时空耦合模型、边缘计算支持的在线校核以及岩土大模型与知识图谱融合的智能代理，推动 AI 从单点工具向全寿命智能勘察体系演进。

参考文献:

- [1] 赵亮,谢朝俊,张霖,等.数据挖掘与融合技术在岩土工程勘察中的应用探讨[J].地下水,2025,47(02):248-252.
- [2] 顾方一舟.人工智能驱动下的岩土工程勘察数据智能分析与精准决策研究[J].中国信息化,2025(07):78-79.
- [3] 龙涛.智能技术在岩土工程勘察中的应用[J].中华建设,2026(02):159-161.
- [4] 巢哲.BIM技术在岩土工程勘察中的应用分析[J].科技与创新,2025(21):219-222.
- [5] 韩晓彤,白立科.GIS技术在岩土工程勘察中的应用[J].智慧中国,2025(09):100-101.

BIM+ 物联网技术在输变电工程智能检查中的应用

张 丽

(国网青海省电力公司建设公司, 青海 西宁 810008)

摘 要 针对输变电工程传统监理模式效率低、精度不足的问题, 本文提出基于 BIM+ 物联网技术的智能检查方案。通过构建“端—边—云”三层架构, 实现多源传感器数据的实时采集与预处理, 采用独热编码与光学畸变校正技术处理异构数据, 建立 BIM 模型与施工数据的动态关联机制。设计多层次监理规则库与智能检查系统, 形成“数据采集—规则检查—偏差预警—整改反馈”的闭环管理流程。实际应用表明, 该系统可将监理复核周期缩短至 18.4 天, 偏差识别精度达 0.2 mm, 显著提升了输变电工程的智能化管理水平。

关键词 BIM 技术; 物联网; 输变电工程; 智能监理; 数据融合

中图分类号: TM769; TU17; TP391.45 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.012

0 引言

输变电工程属于电力系统的重要基础设施, 其施工质量直接影响到电网能否安全稳定地运行。随着智能电网建设不断推进, 以往依靠人工巡检的监理模式已经无法适应大型复杂工程的质量控制需求, 存在不少问题, 如数据采集迟缓、检查标准不统一、难以追溯问题根源等。BIM 技术具有可视化建模的特点, 而物联网具备即时感知的能力, 这两者结合起来, 就能找到解决这些问题的办法。按照该技术融合方法, 构建输变电工程的智能检查系统, 利用多源数据整合并依靠智能规则执行验证, 实现对施工进程的实时观察和精确管理, 从而为输变电工程质量保障提供技术支持。

1 数据采集与预处理技术

1.1 多源传感器部署方案

在输变电工程施工过程中, 要随时监测设备安装精度和线路敷设质量, 依靠“端—边—云”架构形成的物联网数据采集体系能够实现全方位感知。在施工现场设置温度传感器、湿度传感器、电流传感器、电压传感器以及图像传感器等多种源头感知设备^[1]。这些传感器按照每 2 分钟一次的采样频率采集数据, 并通过物联网网关进行数据汇集。网关会在数据传送之前执行信号转换和噪声抑制处理, 利用 LoRa 和 ZigBee 低功耗广域网协议来传送数据, 最后通过 RS485 接口

上传到本地数据中心。这种部署方案可以实现对施工区域内温度、湿度、设备运行参数以及现场图像等大量数据的同步采集, 为后续的监理复查提供充足的数据支持。

1.2 异构数据处理方法

数值型数据和图像数据的特性存在差异, 所以要采取不同的处理策略。数值型数据采用独热编码法, 通过物联网网关状态寄存器对 12 个关键指标进行编码, 每个数据指标对应寄存器中的一个位, 其编码规则见表 1。依靠这种编码方式能够实现数据的快速查找和分类保存。至于图像数据, 则要采用光学畸变参数处理法, 解决因光照和色彩差异造成的画面不一致问题^[2]。先计算中心像素点邻域的均值和方差, 再按照灰度级数变换公式对图像进行匀光匀色处理, 使处理过的图像在色彩和亮度上一致, 从而为后面的图像分析提供优质的图像数据。

表 1 展示了输变电工程关键数据指标的独特编码规则, 通过 12 位二进制码实现 12 种数据类型的唯一标识, 便于后续数据检索与模型关联。

1.3 数据传输与存储架构

传感器采集到的原始数据经过网关预处理后, 会通过工业以太网传送到本地数据中心。利用分布式存储架构来实现海量数据的可靠保存。数据存储系统采用分层结构设计, 实时数据存入内存数据库, 以确保

作者简介: 张丽 (1998-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 输变电工程建设管理。

高并发访问的性能；历史数据则归档到关系型数据库中^[3]。为了保证数据的完整性，采用数据校验机制对传送过程中的数据包进行完整性校验，利用循环冗余校验算法来识别数据传输时产生的错误，并建立数据备份机制，每天进行增量备份，每周做一次全量备份，从而保障施工期间数据具有可追溯性。数据存储架构可按照时间戳、数据类型以及设备编号等诸多维度进行检索，为后续 BIM 模型关联和规则库核查提供高效的数据访问支撑。

表 1 数据指标编码表

数据指标	独热编码
变压器油温	000000000001
变压器绕组温度	000000000010
断路器触头温度	000000000100
隔离开关温度	000000001000
避雷器泄漏电流	000000010000
电容器电压	000000100000
电抗器电流	000001000000
母线电压	000010000000
线路电流	000100000000
杆塔倾斜角度	001000000000
绝缘子污秽度	010000000000
环境温度	100000000000

2 BIM 模型构建与数据集成方法

2.1 三维模型构建技术

按照骨架设计原理形成输变电工程三维模型，并用 Revit 软件来创建这个模型，把全局骨架当作最高层级的设计单元，给各个零件单元输送设计信息，依照构件特点和装配关系来做本层骨架的定位与定型。模型塑造过程包含三个阶段：第一，遵照设计图纸提取构件轮廓，参照基准以及空间布局之类的概念信息；第二，创建构件的参数化族库，界定构件的几何属性和关联关系^[4]；第三，利用从上层传递过来的设计信息去完成本层骨架模型的塑造。这种方法能够实现模型的参数化驱动，一旦设计参数有所改变，模型就会自动更新，从而保证设计信息的统一性。模型塑造流程见图 1，经由此流程可高效塑造包含杆塔、导线、绝缘子等关键构件的三维模型。

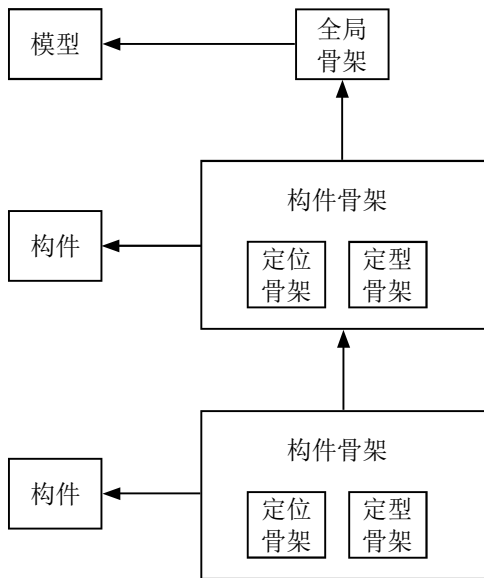


图 1 工程构件模型设计过程

2.2 坐标转换与系统集成

为实现施工数据与 BIM 模型的精准关联，需进行坐标系转换。将构建的 BIM 模型加载至具有局部笛卡尔空间映射关系的坐标系中，通过系统变换矩阵对模型进行坐标转换，转换公式如下：

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式（1）中， θ 表示模型原始坐标系相对于笛卡尔坐标系旋转的角度， R 为变换矩阵。采用世界坐标系作为数据集成的统一坐标系，以坐标原点为集成样本的初始中心，通过坐标变换实现施工数据与 BIM 模型构件的动态关联^[5]。关联过程通过构建关联函数实现： $BM = (D, R) \{c1, c2, cM\}$ ，其中 D 表示施工过程的数值数据和图像数据集， cM 表示第 M 个构件的几何属性， BM 为构件与模型的关联函数。该方法可确保施工数据与模型构件的实时映射，实现模型的动态更新。

2.3 施工数据融合算法

基于 BIM 的工程数据集成技术通过物联网持续自动采集施工数据，以云计算平台为支撑实现数据管理。数据融合过程综合考虑模型碰撞区域的重叠体积、涉及构件的总体积、工程计划周期、施工任务数量及实际进度等多维度参数，融合算法表达式为：

$$X = \frac{\gamma}{P} \times \frac{\eta}{\varepsilon} \times \kappa \quad (2)$$

式（2）中， X 表示数据集成结果， γ 为模型碰撞区域的重叠体积， P 为涉及构件的总体积， η 为工程的计划周期， ε 为施工任务数量， κ 为实际进度。通过该

算法实现施工过程数据与BIM模型的深度融合,形成完整的工程信息模型。融合后的数据可支持施工进度模拟、质量检测及安全分析等多方面应用,为监理复核提供全面的信息支持。

3 智能监理规则库与系统实现

3.1 多层次规则库设计

利用Revit软件的Model Checker插件创建多层次监理复核规则库,把构件属性完整性检查、几何合规性检查当作基本检查项,结构安全专项检查、机电合规专项检查属于合成检查项^[6]。规则库采取四级分类体系,其中一级规则着眼于工程安全性,二级规则着重工程质量,三级规则提升施工效率,四级规则达成数据融合改善,经由Model Checker Configurator工具来编写规则库,该规则库包含项目整体情况、基础施工状况、杆塔组装情形(导线架设状况以及变电设备安装情况)等诸多方面,从而构建起完善的监理复核标准体系。

3.2 智能检查系统架构

智能监理复核系统采取“云—边—端”三层架构,边缘层置于施工现场,依靠物联网网关达成传感器数据的即时采集及预处理。云层依托Autodesk BIM 360平台形成,做到BIM模型的运作和规则库的核查,终端层给出Web和移动端应用,供监理人员随时查看复核结果,系统通过API接口完成物联网云平台 and BIM 360平台的数据交换,并将处理过的施工数据与BIM模型相关联,按照规则库自动开展核查工作。

3.3 偏差识别与闭环管理

系统依靠多层次规则库来自动审查施工过程,从而做到智能识别偏差,一旦监测数据超出规则库所定阈值,系统就会自动发出警报,并确定偏差的位置,其偏差识别精度可达到0.2 mm这个级别。识别结果会及时更新到工程经营平台当中,进而形成“数据采集—规则检查—偏差预警—整改反馈”这样一种循环运作的流程,系统具备查询偏差历史数据以及执行趋势分析的能力,通过比较不同施工阶段的偏差数据,可以找出质量控制存在的不足之处,实际情况显示,这个系统能够将监理复查工作的历时始终控制在30天之内,平均下来只需要18.4天,极大地提高了监理的工作效率及管理水平,偏差识别的效果见图2,和传统方法相比,证实了该系统在识别准确度和稳定性方面确实存在一些优势。

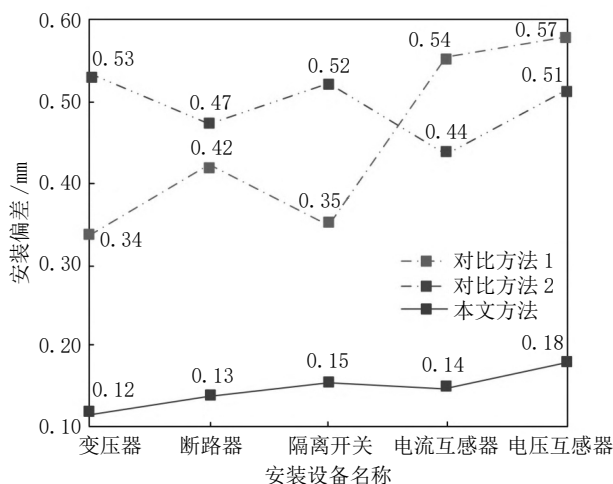


图2 工程偏差识别结果对比

4 结束语

本文形成了BIM+物联网技术相融合的智能检测体系,实现了对输变电工程施工过程各要素的全面感知以及精确控制。相关研究显示,依靠“端—边—云”架构的多源数据采集计划能够有效地支持施工数据的随时获取,独热编码加上光学畸变校正技术保证了异构数据得到标准化处理,多层次的规则库和循环管理机制优化了监理工作的智能化水平。在实际应用时,该系统将监理复查的时间缩减到18.4天,偏差识别的准确度达到0.2 mm,这证实了技术方案具有可行性和优势。未来可进一步探究AI算法在偏差预测和风险提示方面的作用,推动输变电工程智能建造朝着积极防范的方向发展。

参考文献:

- [1] 袁斌华.物联网技术在输变电设备资产管理与优化决策中的作用[J].财富时代,2025(09):47.
- [2] 袁斌华.物联网技术在输变电设备预防性维护管理中的应用[J].财富时代,2025(10):84.
- [3] 贾伟,吴旭,王磊,等.面向输变电一次设备的启动方案优化与校核算法[J].电子设计工程,2026,34(07):192-196.
- [4] 华雪莹,姚为方,徐鹏,等.物联网技术在输变电工程水土流失监测中的应用[J].科技与创新,2024(04):166-169.
- [5] 方舟,沈丽娜.物联网技术在输变电设备状态监测中的应用[J].智能城市,2020,06(10):57-58.
- [6] 李海钢,刘阳.基于数字孪生映射的电力系统输变电设备运行监测[J].机电技术,2025(06):99-103,116.

水利工程堤防防渗施工技术应用分析

孙 艳

(山东省龙口市宏润城市建设工程有限公司, 山东 龙口 265701)

摘 要 在水利工程领域, 防渗施工对于保障工程的安全稳定运行有着极为重大的意义, 一旦堤防出现渗漏情况, 不仅会降低工程的整体效能, 还可能引发严重的安全事故。本文针对水利工程堤防防渗施工技术展开了深入探讨, 详细阐述了垂直防渗施工技术、水平防渗施工技术、复合防渗施工技术以及新型防渗施工技术的要点和运用价值。探讨了依据地质条件选择合适防渗技术、各施工阶段技术之间的有效配合、特殊水利环境下的应用技巧以及质量控制检测手段等应用方法。通过合理地选择防渗技术, 注重各个阶段技术之间的协同合作, 运用特殊技巧来应对复杂的水利环境, 并严格把控质量检测环节, 以期有效提升水利工程的防渗能力、确保工程实现长期稳定运行提供参考。

关键词 水利工程; 防渗技术; 堤防施工; 垂直防渗; 水平防渗

中图分类号: TV871

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.013

0 引言

水利工程作为国家基础设施建设的关键组成部分, 对于防洪、灌溉、供水以及发电等方面均具有重大意义。在水利工程建设进程中, 防渗施工属于保障工程质量与安全的核心环节。倘若堤防出现渗漏问题, 那么不仅会使工程效能降低, 而且还可能引发安全事故, 对周边地区人民群众的生命财产安全构成威胁。伴随水利工程技术的持续发展, 防渗技术也在不断进行创新与完善。深入探究水利工程施工中的防渗技术, 剖析不同防渗施工技术的特点与适用条件, 研讨其在实际工程中的应用方法, 对于提高水利工程防渗能力、确保工程长期稳定运行具备重要的现实意义。

1 水利工程堤防防渗施工技术的应用价值

水利工程堤防防渗施工技术对于保障工程安全以及稳定运行而言极为重要。堤防作为水利工程抵御洪水等自然灾害的关键防线, 其防渗性能会直接对工程的防洪能力产生影响。有效的防渗施工能够减少堤防内部的水分渗透, 降低土壤的含水量, 增强堤防的抗剪强度与稳定性, 防止因渗透变形而引发滑坡、坍塌等灾害。同时, 良好的防渗可以减少水资源的浪费, 提高水资源的利用效率, 保障水利工程的灌溉、供水等功能得以正常发挥。防渗施工技术的应用能够延长水利工程的使用寿命, 降低后期的维护成本, 为水利工程的可持续发展提供有力支撑^[1]。

2 水利工程堤防防渗施工技术

2.1 垂直防渗施工技术

垂直防渗施工技术的目的是在堤防内部构建垂直方向的防渗结构, 以此阻断地下水的渗透通道, 进而保障堤防的安全。帷幕灌浆作为常见方法之一, 施工时需先按照设计要求进行钻孔, 其孔径和孔深要依据地质条件来确定。配置好的浆液会通过灌浆泵注入地层, 在压力作用下, 浆液会填充土体孔隙, 从而形成连续且致密的防渗帷幕。该技术适用于多种地质情况, 在砂砾石地层中能够有效减少渗漏量, 在岩层破碎带则可增强岩体的完整性。高压喷射灌浆是利用高压喷射流冲击破坏土体, 使浆液与土体充分混合并凝固成防渗体。施工时, 先通过钻机引孔至设计深度, 再将喷嘴送入孔底, 高压喷射浆液或水泥浆, 同时旋转提升喷杆, 最终形成圆柱状防渗体。此技术施工速度较快, 对地层的适应性较强, 能够在复杂地质条件下快速形成防渗屏障。

2.2 水平防渗施工技术

水平防渗施工技术是通过在堤防的迎水坡或者背水坡铺设防渗材料, 进而形成水平防渗层, 以此来阻止地表水和地下水的渗透。土工膜属于常用的防渗材料, 它是以聚乙烯等高分子聚合物为原料制作而成的, 具备良好的柔韧性, 能够适应堤防的变形情况, 其抗拉强度较高, 不容易被拉破, 防渗性能十分优异, 可

作者简介: 孙艳 (1979-), 女, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程。

有效阻止水分的渗透。在施工时,首先要将堤坡表面进行整平处理,清除其中的杂物,接着铺设土工膜,采用热熔焊接或者胶黏剂黏结的方式来连接各幅土工膜,以此确保连接紧密且无渗漏。复合土工膜是由土工膜和土工布复合而成,土工布能够起到保护土工膜、增强抗拉强度以及排水的作用。在铺设过程中,土工膜需朝向迎水侧,土工布朝向土体侧,这样既能实现防渗又能进行排水。黏土作为传统的防渗材料,具有取材方便、成本较低的特点,不过其防渗性能相对较弱。施工时,需要对黏土进行筛选和拌和,控制好含水量,然后进行分层铺设并夯实,每层的厚度不宜过大,从而保证夯实效果^[2]。在水平防渗施工当中,要依据工程地质条件和水文情况,合理地选择防渗材料和铺设方式,确保防渗效果能够满足设计要求。

2.3 复合防渗施工技术

复合防渗施工技术把垂直防渗与水平防渗技术进行有机结合,充分发挥二者优势以提升堤防整体防渗性能。在实际工程当中,可先运用帷幕灌浆或者混凝土防渗墙开展垂直防渗工作。帷幕灌浆能够在堤防内部形成一道连续的防渗帷幕,有效降低地下水位并减少堤防背水侧的渗流量,混凝土防渗墙具备较高的强度和防渗性能,能够承受较大的水压力。完成垂直防渗之后,再于堤防迎水坡铺设土工膜或者复合土工膜实施水平防渗。土工膜或复合土工膜能够阻止地表水直接渗透到堤防内部,与垂直防渗结构共同形成多道防渗防线。这种组合方式可依据工程具体要求以及地质条件进行灵活调整^[3]。例如:在地质条件复杂、渗漏风险较高的地段,可以增加垂直防渗的深度和密度,同时选用性能更优的水平防渗材料。通过综合运用多种防渗技术,能够有效解决单一防渗技术存在的局限性。

2.4 新的防渗施工技术

伴随科技的持续发展,新型的防渗施工技术不断地涌现出来。塑性混凝土防渗墙技术选取塑性混凝土作为防渗墙的材料,和传统混凝土相比,塑性混凝土具有弹性模量低以及适应变形能力强的特点。当堤防受到荷载或者水位变化的影响而产生变形时,塑性混凝土防渗墙能够和周围土体协同进行变形,以此减少应力集中的情况,避免墙体出现开裂现象,进而提高防渗墙的耐久性。在施工的时候,要先开展成槽施工工作,之后把塑性混凝土通过导管注入槽内,从而形成连续的防渗墙体。自凝灰浆防渗墙技术借助自凝灰浆在凝固的过程中形成具备一定强度的防渗体。自凝灰浆是由水泥、膨润土、水等材料按照一定比例配制而成的,具有较好的流动性和触变性^[4]。施工时,通

过成槽设备形成槽孔,将自凝灰浆注入槽内,灰浆在凝固过程中会逐渐硬化,最终形成防渗墙。

3 水利工程中堤防防渗施工技术的应用方法

3.1 根据地质选择防渗技术

水利工程所处地区的地质条件呈现出复杂多样的特征,不同的地质条件对于防渗技术的选择具有重要影响。在砂砾石地层当中,鉴于土体颗粒相对较大且渗透性较强的特点,可以采用帷幕灌浆或者混凝土防渗墙等垂直防渗技术,以此形成连续的防渗帷幕,进而阻断地下水的渗透路径。在黏性土地层里,由于土体的渗透性相对较弱,可采用水平防渗技术,如铺设土工膜或者复合土工膜,从而增强堤防的防渗性能。对于软土地基而言,需要充分考虑地基的沉降和变形问题,可以采用塑性混凝土防渗墙等适应变形能力较强的防渗技术。在进行防渗施工之前,需要对工程地质展开详细的勘察工作,并且根据具体的地质条件来选择合适的防渗技术。

3.2 各个施工阶段的技术配合策略

1. 施工准备阶段。施工准备阶段作为水利工程防渗施工的基础,技术配合起着至关重要的作用。首先需开展场地平整工作,要依据设计图纸以及现场实际情况,对场地内的杂物与障碍物进行清除,针对凹凸不平之处进行填挖处理,以此确保场地平整度能够满足施工要求,进而为后续设备安置和材料堆放提供稳定的基础。在材料采购方面,要依照防渗施工方案,精准计算所需各类材料的数量和规格,选取质量可靠且符合标准的供应商。例如:帷幕灌浆所需的水泥、外加剂等材料,要保证其性能指标达到标准。设备调试同样不可忽视,要对灌浆泵、搅拌机等施工设备进行全面检查和调试,确保设备能够正常运行,避免在施工时出现故障而影响施工进度。

2. 基础处理阶段。基础处理阶段的技术配合需与地质条件紧密结合。若地基属于软弱土层,可运用夯实法,借助重锤或振动器对地基实施夯实操,以此提高土体的密实度,进而增强地基的承载能力。对于存在不良土质的状况,换填法是较为常用的处理手段,需将不良土质挖除,换填级配良好的砂石、碎石等材料,并进行分层压实。在处理过程中,技术人员要对地基的各项指标(压实度、承载力等)进行实时监测,以确保达到设计要求。施工人员要严格依照操作规程开展施工,控制好换填材料的厚度以及压实遍数。

3. 防渗体施工阶段。防渗体施工阶段作为整个防渗工程的核心部分,对技术配合的精准度有着极高要

求。以帷幕灌浆施工为例,施工人员需严格把控灌浆压力,依据地层实际情况以及设计具体要求,对压力大小进行合理调整,若压力过小,将无法使浆液充分扩散,而压力过大则可能造成地层劈裂或者浆液浪费。浆液浓度同样是关键参数,需根据施工进度以及地层吸收情况适时作出调整,以此保证浆液的流动性和凝固时间能够符合相关要求。在混凝土防渗墙施工过程中,成槽施工要确保槽壁的垂直度和稳定性,采用适宜的成槽设备与工艺。浇筑混凝土时,要对浇筑速度和高度加以控制,避免出现离析现象。

4. 施工后期阶段。施工后期的技术配合工作主要围绕防渗体的养护与保护展开。在养护方面,针对混凝土防渗墙,需在浇筑完成之后及时开展覆盖与洒水养护工作,以此保持混凝土表面处于湿润状态,进而防止裂缝出现,且养护时间必须符合规范要求。对于通过灌浆形成的防渗体,要严格控制其周围环境的温度与湿度,避免浆液出现过早干燥或受冻的情况。保护工作同样不可忽视,在防渗体强度尚未达到设计要求之前,应设置明显的警示标志,禁止车辆和人员在其上通行,防止防渗体受到外力破坏。另外,还要加强对周边环境的监测,如地下水位、堤防变形等情况,及时发现可能影响防渗效果的因素并采取相应的应对措施。

3.3 特殊水利环境下的应用技巧

在高水位、强渗透以及复杂地形等特殊水利环境下,防渗施工会面临更为严峻的挑战,故而需要运用特殊的应用技巧。当处于高水位条件下开展施工时,必须采取行之有效的降水措施,以此降低地下水位,从而为防渗施工营造干燥的作业环境。在强渗透地层当中,可以采用多级灌浆、化学灌浆等方法,进而提高灌浆效果,增强防渗能力。针对陡坡、深坑等复杂地形,需要依据地形特点对施工工艺和设备进行调整,以确保防渗施工能够顺利推进。在陡坡地段可以采用分段施工的方法,先于坡脚设置临时支撑,然后再开展上部的防渗施工。

3.4 质量控制的检测手段

1. 施工过程无损检测手段。在施工过程当中运用无损检测技术,能够在不破坏防渗体结构的情况下洞察其内部状况。超声波检测作为一种常用方法,通过向防渗体发射超声波,接收反射波并且分析其传播时间、幅度等相关参数,以此判断内部是否存在裂缝、孔洞等缺陷,同时还能够大致确定缺陷的位置和大小。雷达检测则是利用电磁波的反射原理,对防渗体进行扫描,依据反射信号的特征来分析其内部结构,能够快速发现不密实区域或者异物。这些无损检测手段可

以对施工过程进行实时监测,及时发现问题并调整施工工艺,从而保障防渗体的质量。

2. 特定防渗结构检测手段。针对不同的防渗结构存在特定的检测方法。对于帷幕灌浆而言,检查孔取芯是一项重要的检测手段,需在灌浆区域钻取岩芯,以此观察浆液的填充情况以及结石的密实度,从而直观地判断灌浆质量。压水试验需在检查孔中进行,通过加压注水的方式,测定单位吸水量,吸水量越小则表明灌浆密实度和防渗效果越好。对于混凝土防渗墙,钻孔取芯能够获取墙体的混凝土样本,进而检测其强度、均匀性等指标。声波投射法是在墙体两侧发射并接收声波,依据声波的传播特性来判断墙体内部是否存在缺陷,以此保障防渗墙的质量^[5]。

3. 施工完成质量验收手段。施工完成之后需要展开全面的质量验收工作,要针对防渗工程的各项指标开展详细的检测与评估,如检查防渗体的厚度和平整度是否契合设计要求。采用现场试验和仪器检测相结合的方式,对防渗性能进行测试,可以借助注水试验、渗流监测等手段,测定工程的实际防渗效果。同时,要检查施工记录、材料合格证等相关资料,以此确保施工过程规范、材料质量合格。只有当各项指标均满足设计标准时,才能够认定工程质量合格,进而保证水利工程能够长期稳定运行,提升其可靠性和安全性。

4 结束语

水利工程施工中的防渗技术是保障工程质量与安全的关键环节,借助垂直、水平、复合以及新型防渗施工技术展开研究与应用,能够依据不同工程的地质条件以及水文状况,挑选合适的防渗技术来提升堤防的防渗性能。在防渗施工进程中,需要注重各个施工阶段的技术配合,运用特殊水利环境下的应用技巧,并且强化质量控制与检测,以此确保防渗施工质量。

参考文献:

- [1] 王靖. 水利工程堤防防渗施工技术的应用研究[J]. 水上安全, 2025(19):181-183.
- [2] 郭浩, 沈利. 水利工程施工中渗水原因及防渗技术研究[J]. 城市建设, 2026(01):63-65.
- [3] 诸炯森. 水利工程中堤防防渗施工技术的应用[J]. 中国科技纵横, 2026(03):109-111.
- [4] 格日乐, 方伟. 水利工程中堤防防渗施工技术分析与应用[J]. 大众标准化, 2025(05):59-61.
- [5] 曹梦辉. 水利工程中堤防防渗施工技术的应用研究[J]. 水上安全, 2025(02):70-72.

水利水电工程施工中的混凝土裂缝防治技术

黄小林

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 水利水电工程是关乎国计民生的基础性工程, 混凝土则是其核心构筑材料, 而裂缝问题是施工过程中最常见且危害深远的质量隐患。本文结合水利水电工程施工特点, 分类阐述三种主要混凝土裂缝的形成机理、形态特征及产生时间规律, 在此基础上从优化混凝土配合比、控制混凝土温度、规范浇筑及振动工艺以及选择合适养护措施四个维度, 提出针对性的裂缝防治技术方案, 以为水利水电工程混凝土施工质量控制提供参考。

关键词 水利水电工程; 混凝土裂缝防治技术; 混凝土配合比; 混凝土温度

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.014

0 引言

在水利水电工程建设中, 混凝土以其优异的力学性能及耐久性成为修建大坝、水电站等水利设施的首选材料。然而, 混凝土裂缝会直接破坏混凝土结构的完整性, 继而引发渗漏、钢筋锈蚀等一系列问题, 这些问题直接威胁水利水电工程的安全运行。因此, 加强研究混凝土裂缝防治技术, 对于保障水利水电工程的稳定性及安全性具有现实意义。

1 水利水电工程施工中混凝土裂缝的类型

1.1 温度裂缝

在水利工程项目建设过程中, 混凝土施工部分极易出现温度裂缝, 对于水利工程危害性较高^[1], 温度裂缝的出现同水泥水化反应过程中释放的大量热量直接相关, 混凝土浇筑后, 水泥与水发生化学反应, 这一过程会持续产生热量, 对于大坝等大体积混凝土结构, 由于其断面尺寸巨大且一次性浇筑方量多, 热量累积效应尤为显著。由于混凝土本身导热性能较差, 热量无法迅速散发到外部环境中, 导致结构内部温度明显高于表面温度。内部处于受热膨胀状态, 表面却因热量散失较快而温度相对较低, 这种内外温差会在混凝土内部形成温度梯度。温度梯度带来的直接后果是产生温度应力——内部压应力与表面拉应力并存, 当表面混凝土承受的拉应力超过其自身的抗拉强度时, 便从表面萌生裂缝并向内部延伸。

1.2 收缩裂缝

混凝土浇筑后, 内部多余的水分不断向表面迁移并蒸发到空气中, 毛细孔中的水分减少导致毛细孔压

力增大, 进而引起混凝土体积收缩, 这一过程被称为干燥收缩。与此同时, 水泥水化反应不断消耗拌和水, 水化产物的绝对体积小于反应前水泥与水的总体积, 由此产生的收缩被称为自生收缩, 两种收缩效应叠加, 使混凝土在硬化期间持续缩减体积。与此同时, 收缩裂缝的形成与约束条件密切相关混凝土结构通常与地基、模板、钢筋或已浇筑的相邻块体连为一体, 这些外部约束限制了混凝土的自由收缩^[2]。在大体积混凝土结构中, 这种约束问题更为突出, 水坝基础混凝土受到基岩的强约束, 坝体内部先浇混凝土对后浇块也形成约束, 当收缩变形受到约束时, 拉应力更容易集中并引发裂缝。收缩裂缝的形态多表现为表面细而浅的网状或龟裂状分布, 裂缝宽度通常较小, 但分布密度较高。

1.3 沉陷裂缝

混凝土在浇筑后的初凝至终凝期间仍处于塑性状态, 内部结构尚未形成足够的强度来抵抗外部变形, 此时若地基发生不均匀沉降、模板支撑体系产生松动或下沉、钢筋网片发生移位, 混凝土内部便会产生相对运动。这种运动在混凝土不同部位之间形成拉应力或剪应力, 当应力超过塑性混凝土的极限变形能力时, 随即产生裂缝。沉陷裂缝的形成位置及受力状态具有一定的规律性, 地基不均匀沉降引起的裂缝多出现在结构断面变化较大、荷载分布不均或地基承载力差异明显的部位^[3]。对于大体积混凝土而言, 由于单次浇筑方量大且自重荷载显著, 地基承受的压力更为集中, 若坝基处理不到位或存在软硬不均的地质条件, 将明

作者简介: 黄小林 (1976-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

显增加不均匀沉降风险, 容易在坝体底部或坝肩等约束较强的部位引发沉陷裂缝。此外, 混凝土分层浇筑时, 若下层混凝土已初凝而尚未终凝时进行上层浇筑, 两层之间的结合面也容易出现沉陷裂缝, 这类裂缝通常呈穿透性或半穿透性, 裂缝宽度较大且方向性较为明确。

2 水利水电工程混凝土裂缝防治技术措施

2.1 优化混凝土配合比

混凝土配合比的设计方案直接决定了材料内部的先天抗裂能力, 水泥用量越大, 水化反应释放的热量就越集中, 结构内部的温度峰值随之攀升, 导致内外温差引发的拉应力容易超过材料自身的抗拉强度。调整水泥及矿物掺合料的比例, 能削减水化热总量, 延缓热量释放的速度。粉煤灰、矿渣粉等掺合料在混凝土中起到填充作用, 改变浆体的微观结构, 抑制硬化过程中体积收缩。优化配合比是多种材料之间的协同配合, 使混凝土在满足强度要求的前提下, 获得更低的水化热、更小的收缩率以及更高的抗裂韧性。

对于水坝大体积混凝土浇筑而言, 减少水泥用量并掺加矿物掺合料是最直接的降热防裂手段, 水坝大体积混凝土极易因水化热积聚导致内外温差过大产生温度裂缝。因此, 在满足水坝设计强度、抗渗性及耐久性要求的前提下, 掺入优质粉煤灰、矿渣粉或硅灰等矿物掺合料替代部分水泥, 可显著降低水化热峰值, 规避大体积混凝土的温度裂缝风险。而选用低热水泥是水坝大体积混凝土浇筑中另一项关键降热措施, 该类水泥中高放热的铝酸三钙及硅酸三钙含量较低, 而放热较慢的硅酸二钙含量较高, 能延缓水坝大体积混凝土的升温速率, 为坝体热量散发争取更充裕的时间窗口, 尤其适用于浇筑坝体基础、坝身等核心厚实部位。在水坝大体积混凝土浇筑中, 降低水化热的同时掺加抗裂纤维, 可从微观层面提升材料的抗裂韧性, 弥补大体积混凝土抗拉强度低、易开裂的短板。在水坝溢洪道、隧洞衬砌等关键部位掺入聚丙烯纤维或钢纤维, 这些纤维在大体积混凝土中形成三维随机支撑网络, 当坝体因温度应力、干缩应力产生拉应力时, 纤维跨越裂缝两侧传递荷载、分担部分应力, 从而阻止微裂缝扩展为宏观裂缝, 保障坝体结构的完整性及防渗性。由此可见, 水坝大体积混凝土浇筑中, 配合比优化的各项措施各有侧重又相互配合, 共同构筑起水坝大体积混凝土裂缝防治的第一道防线, 为水坝工程的长期稳定运行提供保障。

2.2 控制混凝土温度

水泥水化反应属于放热过程, 热量在结构内部不断累积, 而表面与空气接触后散热较快, 这种温度分布的不均匀性直接导致内表温差。控制原材料温度可以从源头降低混凝土的初始热量, 而分层分块浇筑策略改变了热量聚集的模式, 较薄的浇筑层有利于热量及时散发, 避免内部温度持续攀升。通水冷却技术在混凝土内部埋设循环水管, 主动导出积聚的热量, 从而控制温度峰值的出现时间^[4]。控制温度的目的是让混凝土内部各点的温度变化尽可能平缓, 避免急剧的升降产生过大的温度梯度, 从而减少因温度变形受阻而产生的拉应力。

水坝大体积混凝土浇筑体量巨大且结构厚实, 水泥水化释放的热量易在内部积聚形成内外温差, 进而产生温度应力引发裂缝, 原材料预冷是从源头降低水坝大体积混凝土初始温度的核心手段, 水坝浇筑所用粗骨料体量庞大, 经过风冷或水冷工艺处理后, 温度可稳定降至 10℃ 以下减少骨料自身携带的热量; 拌和水中部分采用碎冰替代, 结合水坝大体积混凝土单方用量大的特点, 每立方米混凝土加冰量可达 20 kg ~ 40 kg, 利用冰的融化潜热快速吸收水化反应初期释放的大量热量, 从源头遏制内部温升。除此之外, 水坝工程的骨料堆场需搭设大型遮阳棚, 避免阳光长时间直射导致骨料升温, 骨料输送皮带也需采取全覆盖隔热措施, 防止预冷后的骨料在输送过程中回温, 为后续浇筑奠定基础。同时, 结合水坝结构设计, 设置横缝、纵缝或施工缝, 将庞大的坝体大体积混凝土分割成 30 m ~ 50 m 的小块体, 既能切断热量在坝体内部的传递路径, 又能释放温度约束应力, 避免因整体体积过大以及应力集中引发裂缝。在此基础上, 水坝大体积混凝土浇筑需配套采用智能通水冷却技术, 这是精准控制坝体内部降温速率以及防止裂缝的关键手段, 在混凝土浇筑过程中预埋温度传感器及循环水管, 传感器实时采集坝体内部不同深度、不同部位的温度数据, 并同步传输至控制系统; 系统根据实测温度以及预设目标温度差值自动调节冷却水的流量、流速以及进水温度, 将坝体内部降温速率严格控制在 0.5℃/d ~ 1.0℃/d 的安全范围内, 避免降温过快产生温度应力, 从根本上规避温度裂缝风险, 保障水坝长期安全运行。

2.3 控制浇筑及振动速度

浇筑及振动的速度安排直接影响混凝土在成型过程中的均匀性, 浇筑速度过快时, 新拌混凝土在短时间内大量堆积, 下层混凝土在上层重压下产生变形,

而上下层之间的硬化进度差异容易引发沉降不均。分层浇筑能够使每一层混凝土在相对稳定的条件下完成初步沉降,避免一次性堆积过高导致的内部变形集中现象。浇筑速度及振动速度之间存在着联动关系,前者决定了混凝土的供给节奏,后者负责消除供给过程中带入的空气及局部不均匀性,合理的速度安排使混凝土在硬化前获得均匀致密的结构状态,减少因沉降、离析或气泡滞留引发的内部缺陷。

控制浇筑速度是水坝大体积混凝土防止温度集中及冷缝产生的关键,水坝大体积混凝土仓面面积大且浇筑方量集中,浇筑速度过快时,单位时间内进入仓面的混凝土方量过大,水化热在坝体局部迅速积聚,同时大量浆体在短时间内覆盖下层,无法在振捣过程中充分上浮排出气泡,影响水坝抗渗性能。此外,过快的浇筑速度会使水坝模板侧压力急剧增大,水坝模板多承受大体积混凝土的侧向推力,超出设计承载范围时可能引发模板变形甚至爆模,影响坝体成型质量。浇筑速度应结合水坝坝体截面尺寸、大体积混凝土初凝时间及现场气温条件综合确定,一般控制在每小时 $0.5\text{ m}\sim 1.0\text{ m}$ 的上升高度范围内,以避免因浇筑过快产生冷缝或温度集中区域。上层混凝土必须在下层混凝土初凝之前完成覆盖,否则两层之间会形成冷缝,破坏坝体结构整体性,影响抗冲抗渗能力。振捣操作应遵循“快插慢拔”的原则,振捣点间距不超过振捣棒作用半径的1.5倍,通常为 $30\text{ cm}\sim 40\text{ cm}$,漏振会导致水坝大体积混凝土内部残留大量空气,形成蜂窝状薄弱面影响结构强度;过度振捣则会使粗骨料下沉、浆体上浮,产生离析现象引发沉缩裂缝。判断振捣时间以混凝土表面泛出均匀浆体且无明显气泡溢出为准,一般每个点持续振捣 $20\text{ s}\sim 30\text{ s}$ 。在混凝土初凝之前,约在首次振捣后 $1\text{ h}\sim 2\text{ h}$ 之间进行二次振捣,消除水坝大体积混凝土已形成的沉缩裂缝。

2.4 选择合适的养护措施

养护阶段的环境条件决定了混凝土硬化过程中水分及温度的保持程度,水分蒸发速度直接关系到表面收缩裂缝的产生概率,表层失水过快时毛细孔内的水膜变薄形成负压,收缩变形受到内部约束后便产生拉裂。覆盖保湿材料能降低表面水分向空气中散失的速度,使表层及内部的水分分布趋于均衡^[5]。及时覆盖保湿养护是水坝大体积混凝土抑制干缩裂缝的基础手段,契合其体量庞大、水化热持续释放、表面易失水的特点,混凝土初凝后应立即覆盖土工布、节水保湿养护膜或湿麻袋,使表面持续处于湿润状态。而确定

养护时间需要结合水泥品种以及结构类型,一般结构不少于14天,大体积混凝土则需延长至21天以上,这一时间跨度的设定基于混凝土强度增长与收缩变形趋于稳定的客观规律。对于高空作业面或大坡度表面,喷涂成膜养护剂提供了替代方案,高分子成膜养护剂喷洒后在混凝土表面形成致密保护膜,保水率可达90%以上,从而抑制干缩裂缝的形成。温度养护及保湿养护需要同步推进,尤其是在大体积混凝土以及寒冷地区施工条件下,闸墩、大坝等厚大结构拆模后表面散热速度远快于内部,容易形成反向温度梯度并引发温度裂缝。立即包裹保温被或粘贴聚苯乙烯泡沫板,能减缓表层热量散失,缩小内表温差,防止寒潮袭击或昼夜温差过大导致表面温度骤降开裂。拆模时机同样影响裂缝生成概率,过早拆模会导致混凝土表面失水过快或承受自重荷载而产生变形,应依据混凝土强度发展及环境温度综合确定拆模时间,一般侧模在混凝土强度达到 2.5 MPa 以上方可拆除,承重模板则需达到设计强度要求。合理选择养护措施使混凝土在硬化期间获得稳定的水热环境,减少因干湿交替及温度波动引发的裂缝问题。

3 结束语

水利水电工程混凝土裂缝防治是一项贯穿材料选择、施工控制以及后期养护的技术工作。在实际工程施工中,混凝土裂缝的形成受地质条件、环境因素等多种复杂因素影响,不存在统一的防治模式。施工单位应结合工程实际情况,因地制宜地制定个性化的裂缝防治方案,严格落实各项技术措施,加强施工全过程的质量管控,及时发现并处理施工中出现的各类隐患,不断优化施工工艺。同时,应加强研究混凝土裂缝防治技术,结合新型材料以及智能施工技术进一步提高裂缝防治的科学性。

参考文献:

- [1] 王昕. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(33):202-204.
- [2] 常磊金. 水利工程施工中混凝土裂缝防治技术分析[J]. 中国设备工程,2025(S2):264-266.
- [3] 石宝林. 水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[J]. 水上安全,2023(15):28-30.
- [4] 薛俊斌. 水利水电工程施工中混凝土裂缝的防治技术[J]. 大众标准化,2022(07):74-76.
- [5] 肖兵. 解析水利水电工程施工中混凝土裂缝处理技术[J]. 长江技术经济,2022,06(S1):83-85.

浅层土质滑坡中复合支护技术的应用研究

栗 扬, 程泽轩*

(四川省第四地质大队, 四川 成都 610000)

摘 要 本文结合攀枝花市花城外国语学校旁浅层土质滑坡治理工程, 在分析工程地质条件、复合支护设计与施工过程的基础上, 采用“适当削坡+锚杆格栅+植生袋护坡”组合支护方案, 并结合现场实际确定施工参数、技术要求及质量控制措施。结果表明, 该复合支护可发挥协同作用, 有效释放边坡应力、提升浅层土坡整体稳定性。锚杆格栅形成刚性抗滑体系, 植生袋实现生态修复与长期防护。经治理, 滑坡体稳定系数达到安全标准, 未出现变形失稳, 治理效果良好。

关键词 浅层土质滑坡; 复合支护技术; 锚杆格构梁; 植生袋护坡; 边坡稳定性

中图分类号: TD353

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.015

0 引言

我国西南山区受地形、地质及气候条件影响, 浅层土质滑坡灾害频发。该类滑坡以第四系填土、粉质黏土等松散土层为主, 厚度小、稳定性差, 在降雨与人为活动影响下易失稳, 严重威胁周边建(构)筑物、人员及交通设施安全^[1]。滑坡治理需采用合理支护技术提升边坡稳定性, 单一支护难以兼顾短期加固与长期防护需求。本文以攀枝花市花城外国语学校旁浅层土质滑坡为研究对象, 该滑坡防护对象特殊、危害较大。通过对“削坡+锚杆格栅+植生袋护坡”组合支护技术的应用要点、施工参数及技术要求进行分析, 总结其治理成效, 可为西南山区同类滑坡治理工程提供参考, 推动复合支护技术在浅层土质滑坡防治中的应用。

1 案例概况

工程位于攀枝花市东区炳三区新丰路 198 号, 前缘是花城外国语学校, 后缘是东华派出所建设工程项目部, 南临新盛路路基外侧, 北靠新丰公路南挡土墙, 地理坐标为东经 101° 43' 40' 28', N' 26' 33' 31.75'。滑坡平面形态为“圈椅”型, 纵长 30 m~35 m, 横断面 70 m~80 m, 面积约 3 200 m², 主滑动方向为 248° 和 300°。滑体厚度 1.2 m~7.7 m, 平均 6.2 m, 体积约 2×104 m³, 按《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864-2016) 确定, 该滑坡属小型浅层滑坡。

该滑坡危害与防治工程等级均为 III 级, 主滑方向 248° 威胁 200 名师生生命财产安全, 300° 方向存在行人及车辆安全隐患, 潜在经济损失约 900 万元。工

程区位于四川盆地西南缘, 属亚热带立体气候, 雨季降雨集中, 是滑坡主要诱发因素。场区地处城市腹地, 交通及水电条件便利, 为治理施工提供良好条件。结合地质特征、灾害等级与周边环境, 采用“适度削坡+锚杆格栅+植生袋护坡”复合支护技术, 兼顾边坡加固安全与长期生态防护。

2 浅层土质滑坡的复合支护技术

2.1 适当削坡

削坡作为浅层土质滑坡治理的前道工序, 其核心目标是降低坡面坡降, 清除坡体松散土体, 减轻坡体自重应力, 减轻坡体前缘的临空效应, 为后续锚碇格构梁支护创造有利条件。本项目按照“尽可能少削, 分段施工, 因地制宜”的原则, 将边坡按边坡地质条件分为 A 区和 B 区, 各边坡区的放坡比为 1:1.75, A 边坡区平台宽度为 2.0 m, B 边坡区平台宽度为 2.0 m~3.0 m, 在原有坡度的基础上, 结合坡顶线和坡底线, 进行平整处理。

采用人工与机械结合的方法清除坡表, 首先用小挖土机将坡面上松散的填土、浮岩清理干净, 然后人工修整坡面, 保障坡面的平整度符合后续支护施工的要求^[2]。边坡削坡施工严格遵循自上而下的施工顺序, 每一次开挖高度控制在 3 m 以内, 每一次削坡结束后都要及时检查坡面, 以防止连续削坡造成坡体局部失稳。本次削坡工程共完成挖方量 6 500 m³, 开挖弃土外运至仁和区南山取土场一大箐沟, 行程 12.0 km, 是一项很有意义的工作。

作者简介: 栗扬 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文地质调查、岩土工程勘察、地质灾害治理勘查设计。

*通信作者: 程泽轩 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程勘察、地质灾害治理勘查设计。E-mail: amy2818139@163.com

2.2 锚杆与格构梁支护

锚杆与格构梁联合支护是该复合支护技术的核心刚性支护系统,锚碇通过深部稳定地层提供抗拔力并向深部稳定岩体传递应力,格构梁将离散锚固成一个整体,形成面状支护结构,均匀分散边坡荷载,二者协同作用,实现边坡整体加固。

2.2.1 锚杆支护

本项目锚杆采用全长黏结型锚杆,水平、竖向间距 2.5 m,锚杆长度根据边坡实际深度确定 12 m~16 m,

锚杆采用 2Φ20HRB400 三级钢筋作锚杆杆体,锚杆孔径设计为 Φ130 mm,入射角 20°,钻孔采用 130 mm 风动潜孔锤钻进成孔,为预留沉渣空间,钻孔深度超钻 20 cm。为保障水泥砂浆与锚杆杆体及孔壁土体紧密结合,提高锚杆锚固力,采用孔底灌注法灌浆,注浆压力为 0.2 MPa~0.4 MPa,锚杆采用 M30 水泥浆进行注浆,共消耗 37.3 m³ 水泥砂浆,锚杆注浆配制参数如表 1 所示。

锚杆施工严格按照“原材料准备—孔位放线—钻

表 1 锚杆注浆材料配比参数

材料名称	规格型号	配合比(质量比)	水灰比	外加剂
水泥	P.0 42.5 普通硅酸盐水泥	1	0.45~0.50	减水剂(掺量 0.5%)
中砂	含泥量≤3%,粒径≤3 mm	1.2~1.5	/	/
水	市政饮用水	按水灰比配比	/	/
水泥砂浆	强度等级 M30	水泥:砂:水 = 1:(1.2~1.5):(0.45~0.50)	0.45~0.50	高效减水剂

孔—清孔—锚杆制作与安装—注浆—养护”的施工工艺,在杆体安装前,先调直、除锈、除油,钻孔后用高压风清孔,清除孔内岩粉、碎渣,防止影响注浆质量^[3]。安装锚杆时,为了确保杆体对中,在杆体长度上每 1.5 m 焊接一对定位支架,同时将灌浆管和杆体一起下到孔底 10 cm 处,在注浆的过程中,随着灌注砂浆的缓慢匀速拔出灌浆管,保障孔中砂浆饱满,没有空洞、脱节现象。本项目共施工 Φ130 锚杆孔 2 808.0 m,采用 HRB400 钢筋 14.42 t,灌注 M30 水泥砂浆 37.3 m³,锚杆施工完成后养护时间不少于 3 天,养护期间严禁敲击、摇动杆体及悬挂重物。

锚杆(索)锚固体与岩土层间的长度应满足以下公式:

$$l_a \geq \frac{KN_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \quad (1)$$

式(1)中: l_a 为锚杆锚固段长度(m); K 为锚杆锚固体抗拔安全系数; N_{ak} 为锚杆轴向拉力标准值(kN); D 为锚杆锚固段钻孔直径(m); f_{rbk} 为岩土层与锚固体极限粘结强度标准值(kPa)。

本工程边坡支护采用全长粘结型锚杆,按公式(1)进行锚固段长度验算:取锚杆轴向拉力标准值 $N_{ak}=180$ kN,抗拔安全系数 $K=2.0$,钻孔直径 $D=0.13$ m,岩土层极限粘结强度标准值 $f_{rbk}=70$ kPa,代入计算得所需最小锚固段长度 $l_a=12.6$ m,本工程实际设计锚固段长度为 14 m,大于最小值 12.6 m,满足工程需求。

2.2.2 格构梁支护

格构梁支护与锚杆施工协同工作,分为框架梁、地梁两个区段。框架梁采用 HRB400 Φ20 钢筋、HPB300 Φ8 箍筋、0.4 m 纵向钢筋和 HPB300 Φ8 箍筋,纵向钢筋采用 HRB400 Φ20,箍筋为 HPB300 Φ8,框架梁和地梁的钢筋保护层厚度均设为 5.0 cm。

格构梁和地梁采用现浇 C25 混凝土浇筑,其灌浆配制参数如表 2 所示,其中格构梁的截面尺寸 0.3 m×0.3 m,地梁的截面尺寸 0.4 m×0.4 m,共完成了格构梁的 136.4 m³、地梁的 C25 砼浇筑 21.24 m³,地梁的钢筋配置与格构梁相同,格构梁和地梁的钢筋保护层均为 5.0 cm。在施工过程中,格构梁拉通编制,只在伸缩缝处断开,每隔 15 m 设 1 条 2 cm 缝,缝中填充沥青麻丝,无底梁的竖梁嵌入地下 10 cm,格构梁顶端可根据坡面实际情况灵活调节,保障与坡面紧密贴合。

格构梁施工前先测量放样,确定梁的位置,锚固端弯不少于 20 cm,并与格构梁主筋焊接,确保锚固件与格构梁可靠连接。梁体钢筋在制作和安装过程中应错开布置,同一截面上的钢筋数量不能超过 2/3,焊接节点的截面间距不小于 1 m。

格构梁施工和锚杆施工同步开展,经检查合格的锚杆端头与格构梁主筋焊接牢固,焊接长度达到规范要求后,再绑扎钢筋,安装模板,采用小块钢模板,用短锚杆固定于坡面,防止模板在浇筑时发生位移^[4]。混凝土采用商品混凝土浇筑,采用分层振捣的方法,特别是锚孔附近钢筋密集的部位要加强振捣,确保混

表 2 格构梁支护注浆材料配比参数

材料名称	规格型号	配合比（质量比）	坍落度	外加剂
水泥	P.O 42.5 普通硅酸盐水泥	1	120±20 mm	缓凝剂（掺量 0.3%）
中砂	含泥量≤ 3%，细度模数 2.3 ~ 3.0	1.45 ~ 1.55	/	/
碎石	5 mm ~ 25 mm 连续级配，含泥量≤ 1%	2.8 ~ 3.0	/	/
水	市政饮用水	0.4 ~ 0.45	/	/
C25 商品混凝土	强度等级 C25	水泥：砂：碎石：水=1: (1.45 ~ 1.55): (2.8 ~ 3.0): (0.4 ~ 0.45)	120±20 mm	缓凝型高效减水剂

混凝土的密实度，防止产生蜂窝、孔洞等质量问题；为了保障混凝土的强度满足设计要求，混凝土浇筑后应及时养护，至少要养护 7 天以上。

2.3 植物袋护坡技术

以格构梁框架内的植生袋为核心，利用植物根系固土效应，提高边坡的长期稳定性，并改善边坡生态环境。植生袋采用绿色涤纶纤维材料，规格不少于 180 g/m²，将种植土填充到植生袋中，为了防止种草从袋里掉出来，在填土的过程中，种子层的一面垫上一层薄木板，填土后取出木板，确保草种分布均匀^[5]。植生袋按 0.6 m×0.4 m 的规格人工堆放，堆放完毕后，在坡面上挂 50 mm×50 mm×2.5 mm 规格的 8 号机制镀锌钢丝网，并将其固定于格构梁框架内，以防止因雨水冲刷而导致袋体滑落。本项目拟采用适合攀枝花市气候特点的本地草本草种，以确保造林成活率和固土效果，完成生态袋 9 815 袋，填土 471.1 m³，铺设 2 355.5 m² 镀锌铁丝网^[6]。

3 项目成果

本项目实践结果表明，滑坡体水平位移和竖向沉降都在 3 mm 以内，未出现明显的变形失稳迹象，边坡稳定系数由治理前 0.85 提高到 1.35，满足《滑坡防治工程设计与施工技术规范》（DZ/T 0219-2006）Ⅲ类防治工程的要求。植草袋植后，成活率达 90% 以上，坡面植被覆盖率较好，可有效降低降雨对坡面的冲蚀，达到工程加固和生态修复双重目的。

在施工过程中没有出现安全事故和质量问题，经过竣工验收，工程质量达到设计与规范要求。从工程效益上看，该浅层土质滑坡对周边学校、行人和车辆的安全威胁将被完全消除，确保周边居民的生命财产安全和交通顺畅，同时还能通过植生袋护坡对坡面进行生态修复，使其与周边城市环境和谐统一，具有较好的安全、生态和社会效益，验证了该技术在浅层土滑坡治理中的适用性和可靠性。

4 结束语

本项目以攀枝花市花城外国语学校旁浅层土滑坡为研究对象，以“适当削坡+锚格梁+植生袋护坡”为核心的复合支护技术，通过削坡降低坡体滑动力，采用锚杆格构梁形成深层刚性支护，结合植生袋护坡实现浅层生态防护和植被固土，各工序协同作用，优势互补，有效提高浅层填土滑坡整体稳定性。在施工过程中，严格控制锚杆成孔、注浆工艺、格构梁焊接、混凝土浇筑质量、植生袋的选择、安装和植物选择等关键工序的工艺参数和关键点，确保工程的安全和效率。通过本项目的成功应用，证实了该复合支护技术在浅层土质滑坡治理中的可行性和优越性。与传统单一支护技术相比，该方案具有力学稳定性强、能有效抵御浅层填土滑坡失稳风险、生态效益好等特点，可实现边坡治理和生态修复同步开展，满足现代地质灾害防治工程生态化发展的需要。

参考文献：

[1] 余易豪. 滑坡治理中勘察要点及支护结构稳定性分析[J]. 江西建材, 2024(01):204-206.
[2] 林程, 张桂荣, 孔洋, 等. 滑坡生态-支护结构联合防护机理研究[J]. 水利水电工程学报, 2025(03):95-106.
[3] 罗应芬. 滑坡体加固中桩锚支护技术的应用[J]. 交通世界, 2023(16):25-27.
[4] 印振华, 赵云川, 饶传友. 滑坡支护设计的几个问题的探讨[J]. 世界有色金属, 2021(20):191-192.
[5] 乐涛. 复杂地质条件下边坡稳定性分析与支护技术[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15):163-165.
[6] 徐金欣, 吉祝喜, 申元明. 抗滑桩支护加固技术在岩土工程施工中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(12):79-81.

公路桥梁隧道施工中注浆技术的具体应用

赵智兵

(青海省兴利公路桥梁工程有限公司, 青海 西宁 810000)

摘 要 随着国内交通工程建设的快速推进,公路桥梁与隧道工程的建设需求显著增长。注浆技术作为地层改性、结构补强与工程质量管控的核心技术手段,已成为该类工程施工体系中不可或缺的关键工艺。本文系统梳理注浆技术的理论内涵与工程应用价值,依托实际工程案例,明确其在公路桥梁与隧道施工中的具体工艺路径与关键管控要点,可为同领域工程实践提供技术参考。

关键词 公路桥梁;隧道工程;喷射注浆;灌浆材料

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.016

0 引言

公路桥梁与隧道是公共交通网络的关键组成部分,对区域互联互通、社会经济协同发展起到重要的支撑作用。近年来我国交通基建规模持续扩大,桥隧施工技术也得到了长足发展,当前行业在推进高效化、低成本建设的同时,工程质量管控的优先级不断提高,桥隧施工技术的提质升级已成为行业关注的核心方向。注浆技术作为桥隧工程中用于地层改良、结构补强的核心工艺,本文通过对公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用分析,旨在为提高注浆施工效率、确保工程施工质量提供参考。

1 注浆技术概述

注浆技术的应用历史可追溯至19世纪初,经过不断发展,已形成涵盖材料研发、工艺优化、设备迭代的完整技术体系。我国自20世纪50年代将注浆技术应用于矿山、隧道工程,如今该技术已广泛普及至公路、桥梁、水利等多个工程领域。随着基础设施建设向复杂地质区域延伸,注浆技术的地位愈发重要,成为保障工程安全、提高施工效率的核心技术之一^[1]。

1.1 注浆技术的概念

注浆技术主要指的是将防渗材料注入土层之中,通过这些材料填充土壤中的孔隙、缝隙,提高土壤的强度与防渗效果。这种技术在当前适用于各种不良地质条件和工程类型之中,特别是在地基处理、防渗修复、桥梁、隧道等领域,效果明显。在公路桥梁隧道工程中,注浆技术主要应用于地下深基坑施工、隧道空隙填充以及地基加固等领域。

1.2 注浆技术的价值

1. 注浆技术能提高工程结构密度和强度。在公路桥梁隧道工程施工中,通过注浆技术能让土壤中的空隙快速被填充,减少和消除工程结构收缩裂缝的出现,提高结构的整体抗裂性能,延长工程结构的使用寿命。

2. 减少工程漏水和裂缝的出现。在公路桥梁隧道工程施工的时候,注浆技术的应用能够在混凝土结构层表面形成致密的保护层,防止水分渗漏和化学反应的出现,在降低混凝土开裂和收缩的同时,降低工程整体施工难度。另外,注浆技术还能够与预埋钢筋、预制构件等工程结合,进一步缩减工程施工工期。

3. 提高工程施工安全。在公路桥梁隧道工程施工中,通过注浆技术填充混凝土结构空隙,能减少和消除混凝土结构收缩裂缝的出现,降低因温度变化而造成的应力集中,防止裂缝和结构变形的发生,确保后期工程施工安全。另外,注浆技术的应用还能及时对地下水进行封闭处理,防止地下水对混凝土的侵蚀与冲刷,确保工程施工安全^[2]。

2 公路桥梁隧道工程中注浆技术的具体应用要点

2.1 工程概况

G109小峡口(王家庄至昆仑路段)改建工程位于青藏高原青海省海东市平安区小峡镇、西宁市,整体地势由东向西倾斜,东北高、西南低,海拔在2 157 m~2 509 m之间,项目施工内容涉及隧道、桥梁、路基、土石方以及涵洞等多种类型。工程所在路段的总体长度为7.02 km,路线所经区域内地貌单元主要为河流侵蚀

作者简介: 赵智兵(1984-),男,本科,工程师,研究方向:公路施工技术。

堆积地貌、剥蚀构造中低山地貌,隧道围岩埋深为 3 m~320 m,洞身通过的主要地层为第四系冲洪积卵石、黄土状土、强风化花岗闪长岩,节理裂隙发育、结构松散,围岩稳定性较差,施工拱部无支护时可产生坍塌、滑坡现象,因此采取注浆施工技术非常必要。

2.2 施工准备

1. 设计准备。在该项目开展施工之前,先对工程施工参数进行了深入、细致的调研,得出了相对客观的调研结果,主要是大量工程施工数据的收集,并对施工现场周围的地质条件进行了详细勘察,确保后期选择的注浆方式符合项目施工需要。除此之外,还结合相关施工标准综合考虑,包含了注浆材料、注浆施工量、注浆范围等,针对不同的施工范围和环境,选择了相应的施工方法。在这个阶段,需要注意施工目标和技术要求,遵守相应的工程施工规范,确保注浆施工顺利进行。在成孔阶段,结合工程现场实际对钻头直径进行控制,考虑到该项目所在区域地质条件复杂,对打捞砂筒加以优化,将钻机送入不良土质中,及时钻进。在封堵孔口环节,结合施工技术规范采取科学措施优化,避免沙土进入沙筒之中。在搅拌环节,结合项目现场实际选择搅拌工具和时间,采用从上向下的注浆施工方式,确保注浆量满足工程最终的注浆量^[3]。

另外,在开展具体施工工作之前,提前对工程现场环境进行调研,确保后续施工工作的顺利进行和施工安全。在初步拟定项目施工计划之后,由专业技术人员对设计方案进行确认,避免一些施工技术问题的发生。由于项目所在区域软土众多,加之公路本身对承载要求严格,在这个环节重点对注浆技术进行确认,确保注浆技术满足施工要求的同时,从经济成本角度分析施工技术选择的可行性,避免增加工程施工成本。

2. 注浆材料与设备选择。注浆材料的选定与制备是注浆施工得以顺利开展的物质基础,在施工中需要避免材料不当而造成的施工问题。在目前公路桥梁隧道工程中,注浆施工材料主要有化学浆液和非化学浆液两种,其中化学浆液的性能优势相对突出,如有机化学浆液能够结合工程施工需求而选择;非化学浆液则以水泥为主。该项目施工中,考虑到工程所在区域降水量比较少,气候干燥,因此选择了非化学浆液,即普通硅酸盐水泥,强度等级控制为 42.5。对于地基土层稳定性较好的区域,采用水玻璃提升浆液的凝固速度。水泥浆液的配比按照项目施工现场实际进行确认,分别为水:灰=2:1、1:1、1.5:1 等。黏土与水泥比例按照 1:2.6 的比例,浆液比重控制为 1.3 g/cm~

1.60 g/cm,马氏漏斗黏度则按照 40 s~45 s 进行确认。

在该项目施工中,根据浆液类型以及配比确定具体施工设备。在泥浆泵选择方面,结合项目现场实际选择活塞式泥浆泵;搅拌机选择高速旋转型,搅拌时间在 30 s 以上。在注浆施工时,能够及时过滤掉浆液中的各种杂质以及大颗粒和不溶解物质,浆液配置完成之后在 4 h 之内快速进行施工。保持泥浆管的通畅,使泥浆管能够承受的压力为自身的 1.5 倍^[4]。

3. 施工参数的设置。在公路桥梁隧道施工中,结合施工现场情况将注浆孔排间距控制在 1 m,孔距控制在 1.5 m 左右。为了提高工程施工进度,根据现场土质条件确定具体的孔径和孔深,该工程的孔径为 11 cm,桥梁区域的孔深比原来的桥墩基础承台高出 6 m。注浆压力控制在 0.7 MPa~1.1 MPa 之间,避免由于注浆压力过大或者多小而影响浆液注入岩土体层中的效果,同时要尽量采用静压力,最大程度地降低注浆压力对岩土体层结构的影响。在后期施工中,根据施工要求和注浆施工技术标准,采用分层、分段浇筑施工方式,注浆施工长度控制在 1.5 m~2 m 左右,当浆液流量<5 L/min 时,可停止注浆。

2.3 钻孔施工

在注浆施工开展之前,提前做好机具设备、材料等准备工作,检查施工人员的资质,确保施工人员专业能力符合工程实际。在基本工作准备完成之后,对施工材料和设备进行检查,确保材料合格、施工设备运行正常。在该项目施工中,具体施工流程为:孔位确定→钻孔设备就位→钻孔→压水试验→插管→套管提升→注浆管安装→浆液配制→注浆→提管和回填。

在施工时,提前标记出吊装机械钢丝,按照标号顺序有序进行施工。冲孔环节,及时将孔洞内的杂物、垃圾清理干净,控制好钻进速度、频率与次数。在操作中,还要保证注浆的速度、密度和强度,整个操作流程由施工经验丰富的工作人员进行操作,确保成孔环节的施工质量和进度。在施工操作的时候,充分考虑工程现场的实际情况,按照设计方案和注浆施工标准进行钻孔、凿空和注浆等,提前确定科学的注浆区域、注浆速度、注浆半径等性能参数,并结合现场实际及时调整注浆工艺。在注浆阶段,需要提前做好外排孔施工方案,减少泥浆外露的同时,将注浆时间间隔控制在 3 h 以上,减少因为注浆时间过快而出现的窜浆问题。如果已经出现了窜浆,则将注浆压力下调至 0.2 MPa,水灰比例取值 1.0,水泥量 65 kg/m,施工过程中需要时时刻刻关注浆液表面的稳定情况,保证浆液的扩散

有效直径为0.6 m~1.2 m,全面控制浆孔满足施工要求,提升整体工艺的稳定性 and 可靠性^[5]。

该项目注浆施工的时候,应当重点关注注浆现场测量、钻孔、注浆等。在施工作业的时候,合理控制注浆技术能提高桥梁、隧道基础的稳定性,进而确保施工效率和安全性。为了提升工程整体效益,还需结合现场实际增添了新型、功能强大的注浆设备。测量涉及导线测量、高程测量、测量标志保护和测量数据复验环节旨在建立施工测量控制网,精确测量需要利用经纬仪、全站仪、水准仪等高精度仪器,在公路桥梁项目施工中结合实际情况进行注浆区域划定和注浆施工方案的制定;高程测量进行的是水准基点的复测对于闭合差进行认真严格的控制,工程施工中所有的标志物必须牢固可靠,不受施工影响,增大对测量点的控制力度,安排好控制时间,做到万无一失;构建公路桥梁施工测量控制网需要以首级导线点作为控制中心,突破特殊地域或者注浆条件的限制,做好精确控制。

在注浆施工之中,需要实现缝隙的完全填充,只有这样才能达到最理想的加固效果。但是,在具体施工的时候,经常会因为施工技术、施工质量控制等问题而出现孔洞情形,影响到最终的施工质量。工作人员需要充分发挥自身施工积极性,协调成孔和注浆管之间的关系,针对施工环境相对恶劣、容易混入泥沙的区域,提前加设相应的保护设施,实现对注浆管道的有效保护。为了提升工程施工效益,还安装了花管,花管的安装实现了注浆效果的优化,安装规格为10 mm左右。

在施工完成之后,在确保注浆饱满性的同时,科学控制封口工作,一旦短时间内无法完成封孔,就很容易影响到最终的施工质量。为此,在完成基础性封口工作之后,要及时地推进相关检查工作,确保检查工作一天之内能够完成,进而及时对注浆孔进行封孔。当然,在检查环节,如果存在施工质量问题,如浆液下降等,要及时地进行补浆处理,补浆材料要与原先的注浆材料一致,同时对补浆高度进行控制,满足相关施工标准。在完成补浆工作后,还要推进相关的动态监测工作,一旦出现施工问题,就要及时进行反馈和处理。

2.4 施工注意事项

在公路桥梁隧道注浆施工过程中,注浆技术看似简单,但也蕴含了诸多技术标准和关键技术。项目设计人员需要充分考虑局部、整体施工难题,及时地分析这些困难并有针对性地加以解决,缩减工程施工工

期的同时,确保工程整体质量。在实际施工中,根据工程施工现场条件和施工标准做到以下注意事项。第一,加强浆液配比的合理性,依据施工实际情况控制浆液的析水率,加大浆液的流动速率需要对水泥和粉煤灰的比例进行适当调整。第二,有效控制浆液扩散的半径范围,注浆的扩散半径大小对于浆液在岩土中的凝固效果有着非常重要的影响,施工人员要结合公路桥梁结构设计的压力和承受能力以及岩土本身的性质进行优化管理,保证注浆的质量推动整个注浆施工过程得以顺利推进,防止发生不必要或者意料之外的操作以及施工事故而延误正常的工期^[6]。第三,科学控制注浆压力,注浆压力很大程度上决定了注浆效果,建筑结构的稳固性、密实度均与注浆压力密切相关。可以说,压力是注浆技术的核心要素。在具体施工中,很多因素都可能会对注浆压力产生影响,比如土质特点、注浆材料、注浆方式等。为了更好地控制注浆压力,使之满足施工质量要求,如果在浅层地层施工,注浆压力就会相对较小,为了增加注浆压力,可以适当降低土层的渗透系数,让浆液和土体能够充分黏合。

3 结束语

公路桥梁隧道工程作为我国公共交通的重要组成部分,保证了我国交通运输行业的顺利发展,因此加强公路桥梁隧道施工质量有着非常重要的作用。注浆法作为当前公路桥梁隧道施工中最常见的方法,对我国公路桥梁隧道工程施工质量的提高有着重要帮助,在施工的时候要充分结合工程现场实际和施工特点,掌握注浆法施工相关技术要点与注意事项,这样才能确保工程整体质量,为公路桥梁隧道工程施工提供更加先进的技术参考。

参考文献:

- [1] 张腾.浅析公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用[J].中华建设,2025(09):127-129.
- [2] 许晓天.注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用探究[J].科技资讯,2025,23(14):119-121.
- [3] 达姜维.注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用探究[J].产业创新研究,2024(02):106-108.
- [4] 陈永宝.公路桥梁隧道现场施工中注浆技术工艺的实践应用[J].城镇建设,2025(03):163-165.
- [5] 陈焕美,苏文煊,叶沐浪.探析注浆法在公路桥梁隧道施工中的应用[J].土工基础,2025,39(01):35-38.
- [6] 相玉鹏.浅析公路桥梁隧道施工中注浆技术的应用[J].现代交通与路桥建设,2024,03(02):1-3.

港口与航道工程钻孔灌注桩施工主要技术探讨

何 理

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610036)

摘 要 钻孔灌注桩是港口与航道工程中高桩码头、船坞等结构常用的基础形式, 由于其能够较好地适应复杂水工地质条件, 具备较强的承载能力以及良好的抗风浪和抗侵蚀性能, 在水运工程建设中应用较为广泛。本文结合港口与航道工程的特殊工况, 探讨钻孔灌注桩施工的基本原理及类型特征, 重点分析施工平台搭建、钢护筒埋设、钻孔等核心工序的技术要点, 旨在为同类工程提供技术参考。

关键词 港口与航道工程; 钻孔灌注桩; 埋设钢护筒; 钻孔

中图分类号: U655.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.017

0 引言

港口与航道工程作为水运基础设施的重要组成部分, 其结构安全性及耐久性直接关系到水运通道的畅通。高桩码头、船坞等水工建筑物在基础选型时, 广泛采用钻孔灌注桩作为承载结构, 这一选择源于其对复杂工况的适应能力。然而, 港口与航道工程所处的施工环境具有显著特殊性: 潮汐涨落导致水位频繁变化, 波浪及水流共同作用形成复杂的水动力条件, 表层分布深厚的淤泥层及松散回填层, 这些因素叠加在一起, 使钻孔灌注桩施工面临严峻挑战。

1 钻孔灌注桩施工的基本原理

1.1 钻孔灌注桩的工作原理

钻孔灌注桩的工作原理在于利用现场成孔及混凝土浇筑, 形成一根与周围土体紧密接触的钢筋混凝土柱状结构, 进而将上部结构荷载可靠传递至深层稳定地层。在港口与航道工程中, 高桩码头、船坞等结构物的桩基需要穿越海水层、淤泥层及砂土层, 进入承载力较高的砾石层或风化岩层, 这一传递过程涉及桩身材料、桩—土界面与地基土层的协同工作^[1]。当荷载作用于桩顶时, 桩身首先发生弹性压缩变形, 这种微小的变形促使桩侧表面与周围土体之间产生相对位移趋势, 侧摩阻力由此被激发, 侧摩阻力的发挥遵循“位移协调”原则, 桩身某截面处的位移量直接决定了该处侧摩阻力被调动的程度, 二者呈现非线性相关关系。随着荷载逐级增加, 桩身上部的侧摩阻力率先达到极限值, 荷载传递路径随之向桩身下部延伸, 桩端阻力也开始逐步发挥作用^[2]。

1.2 钻孔灌注桩的类型及适用范围

钻孔灌注桩的类型可从成孔工艺、成孔机械及受力性质三个维度加以划分(见表1)。按成孔工艺分类, 干作业成孔灌注桩适用于地下水位较低、土质稳定的填土、黏性土及粉土地层, 无需泥浆护壁, 工序简洁流畅; 泥浆护壁成孔灌注桩则适用于地下水位较高、土质松散或易塌孔的砂土地层, 利用泥浆循环维持孔壁稳定, 正循环与反循环两种工艺在排渣效率上各有侧重; 套管护壁成孔灌注桩以套管作为护壁材料, 地层适应性广, 软土、湿陷性黄土等易塌孔地层均可适用, 桩身质量更为稳定。按成孔机械分类, 螺旋钻机成孔桩适用于均质土层, 成孔直径 150 mm ~ 2 000 mm、钻深 20 m ~ 30 m; 冲击钻机成孔桩对卵石、岩层等坚硬地层具有不可替代的穿透能力, 成孔深度可达 100 m ~ 150 m; 回转钻机成孔桩适用于黏性土、砂土及软岩等多种土层, 桩长可达 200 m; 潜水钻机成孔桩则适用于软土地层, 成孔质量较好。按受力性质分类, 端承桩、摩擦桩及摩擦端承桩分别对应不同的荷载传递机制以及持力层条件。

2 港口与航道工程钻孔灌注桩施工技术要点

2.1 搭建施工平台

搭建施工平台根据水深条件及地质状况采用不同的结构形式, 水深小于 5 m 且流速较小的水域, 采用筑岛围堰法施工, 在桩位区域填筑黏性土形成人工岛, 顶部铺设碎石垫层后浇筑 150 mm ~ 200 mm 厚混凝土面层, 平台顶面高程按施工期最高潮位加 1.5 m ~ 2.0 m 控制。水深 5 m ~ 15 m 的水域采用钢管桩平台, 选用

作者简介: 何理 (1992-), 男, 专科, 研究方向: 港口与航道工程。

表 1 钻孔灌注桩主要类型及适用特征

分类维度	类型名称	适用地层条件	关键特征
按成孔工艺	干作业成孔灌注桩	地下水位低、土质稳定的填土、黏性土、粉土	工序简单、成孔快，无需泥浆护壁
	泥浆护壁成孔灌注桩	地下水位高、土质松散的砂土、淤泥、碎石土	泥浆循环护壁，分正循环与反循环工艺
	套管护壁成孔灌注桩	软土、湿陷性黄土等各类易塌孔地层	套管护壁，桩身质量稳定，施工成本较高
按成孔机械	螺旋钻机成孔桩	均质土层，干作业或浅层泥浆护壁	成孔直径 150 mm ~ 2 000 mm，钻深 20 m ~ 30 m
	冲击钻机成孔桩	卵石、岩层等坚硬地层	穿透能力强，成孔深度 100 m ~ 150 m，效率较低
	回转钻机成孔桩	黏性土、砂土、软岩等多种土层	成孔直径 0.8 ~ 1.2 m，桩长可达 200 m
	潜水钻机成孔桩	淤泥、淤泥质土等软土地层	钻机潜入泥浆作业，成孔质量好，设备成本高
按受力性质	端承桩	桩端持力层为坚硬岩层或密实土层	荷载主要由桩端阻力承受
	摩擦桩	桩端持力层较软或桩身较长	荷载主要由桩侧摩擦力承受
	摩擦端承桩	兼具上述两种地质特征	荷载由桩侧摩擦力和桩端阻力共同承担

直径 426 mm ~ 529 mm、壁厚 8 mm ~ 10 mm 的钢管桩作为支撑结构，按桩位布置图打设钢管桩，根据地质条件计算确定桩入土深度，一般要求进入持力层不小于 3 倍桩径^[3]。钢管桩打设完成后，在桩顶焊接工字钢横梁与纵梁形成格构式框架，梁顶铺设厚度 12 mm 的防滑钢板，平台周边设置高度 1.2 m 的防护栏杆及踢脚板。平台搭设完成后进行荷载试验，采用静载法在钻机就位位置施加 1.2 倍钻机自重荷载，观测平台沉降量以及变形量，要求沉降量不大于 10 mm、相邻高差不大于 5 mm。平台使用期间每日测量潮位变化，当潮位超过平台设计高程时停止钻孔作业，并检查平台锚固系统及连接节点的稳定性。

2.2 埋设钢护筒

埋设钢护筒前先在施工平台上放出桩位中心点及十字线控制桩，采用导向架精确定位，导向架采用型钢焊接而成，高度 2.5 m ~ 3.0 m，内径较护筒外径大 20 mm ~ 30 mm，导向架四角设置调平螺栓用于调整垂直度。钢护筒选用厚度 10 mm ~ 16 mm 的钢板卷制而成，内径较设计桩径大 200 mm ~ 400 mm，护筒长度根据地质条件及水深确定，一般要求底端进入不透水层或黏性土层不少于 2.0 m。护筒埋设采用振动锤下沉工艺，80 t 履带吊吊起护筒放入导向架内，沿护筒顶口对称布置两台经纬仪监测垂直度，垂直度偏差控制在 1/200 以内。振动锤夹持护筒顶口缓慢下沉，每下沉 2 m 暂

停一次复核垂直度及平面位置，发现偏差时技术调整振动锤偏心块方向或吊车位置进行纠偏，护筒下沉至设计标高后，在护筒顶口焊接吊耳与支撑梁，将护筒固定在平台结构上防止下沉或偏位。

2.3 钻孔作业

钻孔作业根据地质条件选择适宜的成孔方法，在黏性土、粉土及砂土层中，采用回转钻机成孔，钻机转盘驱动钻杆与钻头旋转切削土体，同时通过泥浆循环携带钻渣出孔。回转钻进分为正循环及反循环两种工艺：正循环钻进时，泥浆由泥浆泵经钻杆内腔送至孔底，携带钻渣后沿钻杆与孔壁之间的环状空间上返至沉淀池，适用于细颗粒地层且设备配置相对简单；反循环钻进时，泥浆由孔口补充流入孔内，在砂石泵或空压机作用下，携带钻渣的泥浆经钻杆内腔向上抽出，适用于砂层、砾石层及大直径深孔钻进。在钻孔过程中根据地层变化及时调整钻进参数：黏性土层中控制转速 20 r/min ~ 30 r/min；砂层中适当降低转速至 15 r/min ~ 20 r/min，控制钻压在钻具总重的 50% 以内；进入岩层后更换滚刀钻头或牙轮钻头，钻压提高至钻具总重的 70% ~ 80%。钻进过程中每 5 m 测量一次孔斜度，采用测斜仪进行检测，孔斜率应控制在 1% 以内，保持钻机空转 10 min ~ 15 min 进行扫孔，清除孔壁附着泥皮及探头石，为后续清孔作业创造良好条件。

2.4 清孔作业

钻孔完成后,孔底不可避免地沉积着钻渣及沉淀物,这些沉渣若未彻底清除将在桩底形成软弱夹层,所以钻孔至设计标高后应立即采用气举反循环工艺进行清孔作业。在钻杆内安装风管,风管下端距离钻头 2 m~3 m,空压机输出风压 0.7 MPa~0.8 MPa、风量 $6\text{ m}^3/\text{min}$ ~ $9\text{ m}^3/\text{min}$ 。开启空压机向钻杆内送气,压缩空气及泥浆混合后在钻杆内形成密度低于钻杆外泥浆的气液混合物,由此产生的压力差驱动钻杆内泥浆向上流动,将孔底钻渣携带排出。清孔过程中持续向孔内补充性能良好的新泥浆,保持孔内液面稳定在护筒顶口以下 0.5 m 位置。清孔时间应根据孔深及地层情况确定,一般不少于 30 min,直至排出的泥浆比重降至 $1.10\text{ g}/\text{cm}^3$ ~ $1.15\text{ g}/\text{cm}^3$ 、含砂率不大于 4%^[4]。清孔完成后采用沉渣厚度检测仪测量孔底沉渣厚度,使用测锤法同步复核,沉渣厚度要求不大于 50 mm。沉渣厚度超出标准时,采用导管二次清孔法处理:将导管下放至距孔底 0.3 m~0.5 m 处,导管顶部连接泥浆泵,通过泥浆泵大流量循环置换孔底泥浆,循环时间不少于 20 min,直至沉渣厚度满足设计要求。

2.5 钢筋笼制作安装

钢筋笼的制作安装质量直接关系到桩身结构的受力性能及耐久性能,港口与航道工程处于海洋或淡水环境中,氯离子侵蚀、冻融循环等劣化因素对钢筋混凝土结构构成长期威胁,保护层厚度的均匀性成为控制桩身耐久性的关键参数。钢筋笼在专用加工胎架上分节制作,胎架采用型钢焊接成弧形槽,槽底每隔 2 m 设置一道横向定位筋,保证主筋间距与螺旋筋间距符合设计要求。加工时将主筋端头切平后用丝机加工螺纹,螺纹长度与套筒长度匹配,加工后的螺纹用螺纹环规检验,通规通过、止规旋入不超过 3 扣为合格。主筋与套筒连接时施加扭矩,直径 25 mm 钢筋扭矩不小于 $250\text{ N}\cdot\text{m}$,直径 28 mm 钢筋扭矩不小于 $320\text{ N}\cdot\text{m}$ 。螺旋筋与主筋之间采用梅花形点焊,焊点间距不大于 300 mm,焊接电流控制在 120 A~150 A,避免烧伤主筋。吊装采用 80 t 履带吊,吊点设置在加强箍筋位置,起吊时采用两点起吊法,吊点处设置吊耳与卸扣,缓慢提升至竖直状态。钢筋笼下放过程中保持慢速平稳,遇阻时上下提动后缓慢下放严禁强行下冲。钢筋笼下放至设计标高后,用 4 根直径 HRB300 钢筋作为吊筋将钢筋笼悬挂在护筒顶口,吊筋长度根据实测孔口高程与设计桩顶高程计算确定,误差控制在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内。在桩头破除过程中,可能会产生较大的冲击力影响桩身主筋,为避免此类损伤可在桩顶高程以上部分套上 PVC 管保护主筋不被破坏。

2.6 水下混凝土灌注

水下混凝土灌注采用导管法,导管选用直径 250 mm~300 mm 的丝扣连接式无缝钢管,壁厚不小于 10 mm,每节导管长度 2 m~3 m,底节导管长度 4 m~5 m 并加装喇叭口。导管安装前进行水密性试验,将导管封闭后注水加压至 1.0 MPa,稳压 15 min 无渗漏为合格。导管下放时用吊车逐节安装,导管底端距孔底距离控制在 0.3 m~0.5 m,导管顶口设置料斗及隔水塞,隔水塞采用橡胶球胆或钢板加橡胶垫片制作^[5]。混凝土配合比设计时掺入缓凝型高效减水剂,初凝时间不小于 8 h,坍落度控制在 $200\pm 20\text{ mm}$,扩展度不小于 500 mm。混凝土采用混凝土搅拌运输车运至现场,泵送入料斗,初灌量计算应保证导管首次埋入混凝土面以下不小于 1.0 m。灌注过程中保持导管埋深 2 m~6 m,每灌注 3~5 车混凝土测量一次混凝土面高度,采用测绳配重锤多点测量取平均值,拔管时根据测量结果计算导管埋深,每次拆管长度控制在 2 m~3 m,拆管时间不超过 15 min。桩顶超灌高度按设计要求执行,一般不小于 0.8 m~1.0 m,用以保证桩顶混凝土强度满足设计要求。灌注完成后缓慢拔出导管,清洗后分类堆放,桩头浮浆层待混凝土强度达到设计强度 50% 后采用环刀法。

3 结束语

港口与航道工程钻孔灌注桩施工技术,始终在复杂水文地质条件约束以及工程结构安全要求之间不断优化,潮汐水位的周期性波动、软硬交替地层的随机分布以及水下混凝土灌注的不可视性,共同构成了这一技术领域的核心挑战。随着港口与航道工程不断发展,数字化成孔检测、超声波测壁技术等新技术正在推动钻孔灌注桩施工从经验依赖型转变为数据驱动型。未来,可进一步融合物联网感知及大数据分析手段,为水运基础设施的长期安全服役提供更为坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 夏杰.港口航道工程中钻孔灌注桩施工技术应用[J].价值工程,2026,45(03):115-117.
- [2] 罗飞飞.港口与航道工程钻孔灌注桩施工技术应用要点分析[J].运输经理世界,2025(20):132-134.
- [3] 陈钟.港口航道工程中钻孔灌注桩施工技术应用[J].运输经理世界,2024(35):154-156.
- [4] 刘嘉辉.港口航道工程建设中的钻孔灌注桩施工技术分析[J].珠江水运,2023(13):38-40.
- [5] 盛一蛟.港口航道工程建设中的钻孔灌注桩施工技术[J].中国高新科技,2022(15):96-97.

高速公路沥青路面车辙病害处治技术应用研究

曾文俊

(湖南高速公路集团有限公司衡阳分公司, 湖南 衡阳 421000)

摘 要 随着高速公路交通量持续增长和重载车辆比例不断提高, 沥青路面车辙病害已成为影响道路服役性能和行车安全的重要问题。本文围绕高速公路沥青路面车辙病害治理展开研究, 在分析交通荷载、结构层性能、层间状态、施工质量及高温环境等主要致因的基础上, 系统梳理了抗车辙结构强化、分层铣刨重构、界面恢复、压实重建及复合治理等关键技术路径, 旨在为高速公路车辙病害的科学处治与养护决策提供参考。

关键词 高速公路; 沥青路面; 车辙; 病害处治

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.018

0 引言

沥青路面因平整度好、行车舒适、施工维修方便等特点, 被我国高速公路大量采用。车辙作为沥青路面最典型的结构性破坏形式之一, 其生成机理受多维度因素共同作用, 尤其近年来国内路网交通荷载持续攀升, 叠加重载交通反复作用、极端高温环境影响、路面结构性能自然衰减等多重条件耦合, 车辙病害越来越严重。车辙不但会破坏路面的整体性, 还会引起裂缝、拥包、积水等次生病害, 缩短道路的使用寿命。因此, 有必要从成因机理和治理技术两方面, 对高速公路沥青路面车辙病害进行系统的探究。

1 案例概况

本文以衡大高速衡阳段为研究对象。该路段于 2003 年 7 月开工、2005 年 12 月通车, 路线全长 25.93 km, 采用双向四车道高速公路标准, 路基宽 26 m, 设计速度 100 km/h, 路面结构为 4 cm SBS 改性沥青 AC-13 上面层、5 cm AC-20 中面层、6 cm AC-25 下面层、36 cm 水泥稳定碎石基层和 20 cm 水泥稳定碎石底基层, 总厚度 71 cm。2020-2024 年 AADT 分别为 14 645、14 804、13 307、14 997、15 187 辆/d, 2022-2024 年增长明显。2024 年该路段 PQI 为 93.53, RDI 为 94.45, 但异常路段集中在上行 K021+000~K023+000、下行 K000+862~K002+000 等区间, PCI 下降明显。取芯结果可知, K3+250、K12+715、K14+900 等车辙点多为中面层厚度不够、孔隙大、层间无黏结; K23+200 与 K10+400 波峰波谷对

比又显示, 上中面层变形大、下面层变化小, 说明衡大高速车辙主要是上中面层失稳变形和压实不足造成的。

2 常见的沥青路面车辙病害形成原因

2.1 交通荷载持续增长与重载车辆反复作用

交通荷载增长是造成沥青路面车辙的直接外部原因。衡大高速衡阳段 2020-2024 年年平均日交通量分别为 14 645、14 804、13 307、14 997、15 187 辆/d, 虽然 2020-2022 年受外部环境影响出现短期波动, 但 2022-2024 年又快速回升, 说明该路段始终处于较高交通荷载水平。2024 年车型构成中, 特大货车占 9.33%, 集装箱车占 2.34%, 大于 25 t 车辆合计 11.67%, 虽然没有超过 20%, 但是由于长期、重复、连续的轴载作用, 仍然会对轮迹带区域产生较大的竖向压缩和水平剪切应力。相关资料表明, 衡炎高速 2024 年特大货车和集装箱车合计占总交通量的 14.71%, 说明该区域高速公路货运交通压力大。车辆荷载反复叠加不但会加快沥青层永久变形累积, 还会使路面由局部压密慢慢发展成明显的车辙。

2.2 路面结构层厚度不足与中上面层抗变形能力偏弱

车辙病害不是只表现在表面凹陷上, 它是路面结构层受力失衡、抗变形能力差所致。衡大高速原设计路面结构总厚度为 71 cm, 上面层 4 cm、中面层 5 cm、下面层 6 cm。现场取芯结果表明, 大部分典型的病害点上中面层厚度小、孔隙大、整体强度差。K3+250

作者简介: 曾文俊 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 高速公路建设、高速公路养护。

车辙点为“轮迹带芯样上中面层厚度小、孔隙大”，K12+715、K14+900 车辙点为“上中面层开裂、中面层有孔隙，设计结构厚度与之存在差异”。对 K23+200、K10+400 车辙、拥包断面的波峰、波谷取芯对比可知，波峰、波谷之间上中面层厚度有较大差异，而下面层变化不大，说明车辙多发生在上中面层。由此可见，上中面层结构厚度不够、骨架稳定性差的时候，路面在交通荷载的作用下容易出现失稳流动、压密变形^[1]。

2.3 层间黏结不良与结构协同工作能力下降

层间黏结状况影响沥青路面多层结构能否形成整体受力体系，也是车辙病害发展变化的主要内部因素。病害路段普遍存在着“无黏结”或者“黏结差”的情况。K1+300 横向裂缝、拥包点在中面层发展层位，记录为无黏结；K6+480 车辙、裂缝点发展到基层，也显示为无黏结；K22+230 车辙、拥包点则表现为层间黏结差，中下面层取不出。由此可以看出面层、中面层和下面层之间没有形成有效的协同传力，车辆荷载不能均匀地向下扩散，造成应力集中在局部层位上，使轮迹带区域更容易发生横向流动和局部失稳^[2]。尤其在层间黏结不足的情况下，上中面层在受剪时首先会出现滑移、剥离、开裂的现象，车辙也不再是单纯的压密，而会和拥包、裂缝等复合病害一起出现。

2.4 施工压实不足与混合料离析导致的压密型变形

压实度不够、混合料分布不均都会造成压密型车辙。衡大高速车辙深度小于 15 mm 的病害，经过多年的运营以后基本可以判定为压密型车辙，其形成机理主要是由于施工阶段混合料摊铺温度低、压实遍数不够、初始压实度不够造成的。对典型病害点的取芯调查发现，多处芯样存在孔隙大、芯样整体强度低、中面层含泥量大、徒手可捏碎等现象，说明部分路段在施工过程中已经埋下了密实性差、材料离析的隐患。其次，拥包的形成原因有“沥青混合料摊铺不均匀，局部细料集中”和“基层或者下面层未压实，强度不够，发生变形位移”。在这种情况下，通车后反复的车轮作用会造成沥青层再次压实，使局部轮迹带继续下沉，慢慢形成车辙。因此，施工质量缺陷不会立刻完全显现出来，而是在运营期通过压密型变形慢慢暴露出来^[3]。

2.5 高温环境与裂缝反射共同诱发复合型车辙病害

温度敏感性是沥青材料的基本特性，高温环境会使混合料的黏度和抗剪强度降低，从而产生失稳型车辙。高温季节如果沥青混合料高温稳定性差，重型车辆荷载会造成结构内部出现剪切变形和侧向流动，最后形成两侧隆起的 W 形车辙。衡大高速典型病害调查

也发现，车辙常常和纵横向裂缝、拥包等病害一起出现。K1+200、K6+100、K10+120、K24+870 等处车辙和裂缝同时存在，裂缝可以延伸到中面层、下面层甚至基层。重度横向裂缝一般贯穿整个路面结构，属于半刚性基层反射裂缝；纵向裂缝多在轮迹带，呈上宽下窄的形态，主要是由于超载、高胎压以及表面剪应力过大造成的。高温软化、裂缝反射、层间受损三者共同作用的时候，路面结构的完整性会进一步降低，车辙也会从单一变形发展成裂缝、拥包、车辙并存的复合病害^[4]。

3 高速公路沥青路面车辙病害处治技术应用

3.1 面向重载交通作用的抗车辙结构强化技术

高速公路车辙治理中重载交通长期作用技术的应用，就是提高路面结构对重复轴载、高剪应力的适应性。国内工程实践一般不会按照原设计标准对路面进行恢复，而是根据运营期的交通组成重新计算结构的承载水平，然后采取相应的抗车辙加强措施。上面层多用 SBS 改性沥青 AC-13C、SMA-13 等高温稳定性能好的混合料，中面层为抗车辙主功能层，一般采用 AC-20C、高模量沥青混合料或掺加抗车辙剂的改性混合料，提高抗剪强度及抵抗轮迹带侧向流动的能力。重载路段处治后一般要求车辙试验动稳定度不小于 3 000 次/mm；重载交通、高温区工程控制值一般提高到 6 000 次/mm 以上，特重载区还会提高。如果调查结果显示主要行车道的受力远远大于超车道，则会采用不同的结构设计来处理，对于行车道的轮迹带进行局部加厚或者中面层加强，形成表层抗滑、中层抗剪、下层承载的分工体系。该类技术的本质就是用材料等级提高、层厚优化、交通适应性设计来保证处治后结构在更高的荷载作用下仍能保持稳定^[5]。

3.2 面向结构薄弱层位的分层铣刨与厚度重构技术

对于中上面层厚度不够、结构功能衰减严重的路面路段，一般采用分层铣刨和厚度重塑技术来恢复路面各层的受力平衡和变形控制能力。该类技术的关键并不在于简单的“刨除—摊铺”，而在于根据病害层位诊断的结果来准确地确定铣刨深度、重铺层次和材料组合。一般情况下，如果病害主要在上面层，可以采用 4 cm 左右的表层铣刨后重铺功能层；如果车辙已经波及中面层，通常会进行上中面层联合铣刨，重新铺筑 4 cm 上面层加 5 cm ~ 6 cm 中面层；如果下面层的承载能力也被影响到，那么就需要扩大处治范围，形成上中下面层的整体恢复模式。处治过程中各层厚度的恢复不是简单的复原原断面，而要根据目前的交通等级和服役要求来适当提高中面层厚度或者使用更

高等级的材料提高其抗剪稳定性。施工完成后,应通过钻芯检测厚度、压实度、层位均匀性来保证新结构符合设计要求。分层铣刨和厚度重构可以改善轮迹带区域的结构连续性以及应力扩散情况,属于治理中重度车辙、防止深层继续变形的重要技术途径。

3.3 面向层间失效的界面恢复与黏结增强技术

车辙治理的效果很大程度上取决于新旧层之间能否重新形成稳定的黏结和传力关系。因此,界面恢复、黏结增强已经成为国内高速公路车辙病害处治的常规技术之一。具体应用时,铣刨后原路面必须先做精细化处理,即清除粉尘、松散颗粒、残余浆皮、污染物,保证界面粗糙度和清洁度符合要求;然后喷洒黏层材料,常用的有普通乳化沥青、改性乳化沥青、高黏界面剂等。按照常见的施工控制要求,黏层油喷洒量一般控制在 $0.3\text{ L/m}^2 \sim 0.6\text{ L/m}^2$,保证不出现过量形成滑移面,也不出现过少造成界面脱空的情况。重载、高温、频繁制动的路段可以使用高黏高弹型界面材料来提高层间的抗剪强度。原结构存在明显的滑移、层间剥离等现象时,宜采用局部翻修的方法进行处理,不能用简单的表层黏结来恢复。部分工程还会在病害多发区设置应力吸收层、防反射裂缝层或者增强型黏结层,从而减小层间剪应力的集中。该技术的核心就是把车辙处治由单层修复提高到多层协同受力的重建层面,从而大大提高处治后整体稳定性、耐久性。

3.4 面向压实重构的混合料优化与施工控制技术

车辙病害治理中重新形成均匀、密实、骨架稳定的混合料结构,在工程中占有非常重要的作用。因此,以混合料优化和施工控制为基础的压实重构技术被广泛地应用到压密型车辙以及局部离析路段的处治上。在具体应用中,首先要对原路面材料进行抽提、筛分、配合比复核,重新校核油石比、矿料级配、骨架密实性,防止因配合比简单沿用原配合比而造成病害重现。处治后的混合料一般空隙率控制在 $3\% \sim 5\%$,沥青饱和度控制在 $65\% \sim 75\%$,马歇尔稳定度不小于 8 kN ,流值控制在 $2\text{ mm} \sim 4\text{ mm}$ 之间,兼顾高温稳定性与耐久性。施工环节中,拌和温度、运输保温、摊铺温度和碾压温度必须形成一个连续的控制链,防止由于温度损失过快或者碾压时机滞后造成新的压实不足。高速公路养护工程一般要求压实度达到最大理论密度的 93% 以上或者试验室标准密度的 98% 以上,用钻芯检测和现场密度测试进行复核。对出现局部细料富集、粗料架空的路段要重点控制摊铺均匀性,必要时采用分仓供料、连续摊铺工艺减少离析。

3.5 面向高温与裂缝耦合作用的复合治理技术

对于同时存在高温流动变形和裂缝扩展风险的路段,一般采取高温稳定性改善与裂缝控制并重的复合治理技术。表层和中面层优先选用高温性能更好的改性沥青体系,即SBS改性沥青、高黏高弹改性沥青或者掺加抗车辙剂的混合料,以提高软化点、黏度和弹性恢复能力,减小夏季高温条件下黏塑流动倾向。同时,对伴生横向裂缝、纵向裂缝或者反射裂缝的路段,根据裂缝来源设置抗裂层、应力吸收层、防反射裂缝层或者玻纤格栅等中间功能层,减小裂缝向上扩展和轮迹带裂缝再开裂的可能。高温区、长大纵坡区的工程中还会在中面层加强抗剪结构,在表层兼顾抗滑和耐久要求,形成高温抗流动、界面抗裂缝、结构抗剪切的复合控制模式。技术评价除了常规平整度、压实度外,还要对动稳定度、冻融劈裂残留强度比、渗水系数、后期RDI、PCI的变化情况进行综合分析,从而判断处治效果。该类技术的应用价值在于,不把车辙和裂缝分开进行治理,而是依靠材料、结构、功能层三者共同配合来提高高速公路复杂病害条件下整体治理水平。

4 结束语

高速公路作为国家路网的重要组成部分,其路面的健康状况直接关系到行车安全及运输效率。高速公路沥青路面车辙病害具有形成机理复杂、影响因素多元和发展过程累积性强等特征。针对不同致因,应在充分诊断病害性质和结构状态的基础上,合理选择抗车辙结构强化、层位重构、界面恢复、压实优化及高温裂缝复合治理等技术路径。只有坚持“成因分析—技术对应—精准处治”的治理思路,才能有效提高车辙病害治理质量,延长高速公路路面使用寿命,并为后续养护管理提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄烽. 沥青路面车辙病害成因及铣刨加铺技术[J]. 大众标准化, 2026(06):58-60.
- [2] 张阳, 杨超平. 沥青路面早期车辙病害影响因素与控制措施[J]. 城市建设, 2026(06):112-114.
- [3] 胡潇, 徐超超. 高速公路沥青路面车辙病害处治措施[J]. 工程技术研究, 2026, 11(02):145-147.
- [4] 梁德强, 谢严君, 王凯, 等. 沥青路面早期车辙病害影响因素分析[J]. 建材世界, 2024, 45(06):102-105.
- [5] 杨润泽, 李尽旺. 高速公路改扩建既有沥青路面病害处治技术研究[J]. 建筑机械, 2023(12):16-21.

水利工程软土地基处理工艺的改进与效果分析

刘 彪

(临泉县杨桥闸管理所, 安徽 阜阳 236400)

摘 要 我国沿海、沿江及三角洲地区软土分布面积超 100 万 km^2 , 此类地基因“孔隙比大、压缩性高、承载力低、渗透性差”等特性, 成为水利工程建设的核心技术难题。在软土地基工程事故中, 沉降超标占比达 65%, 严重威胁水闸、泵站、航道等设施的长期安全运行。本文系统梳理水利工程软土地基处理的传统工艺局限, 重点分析搅拌桩技术、预压加固技术、防渗围封技术等核心工艺的改进路径, 结合典型工程案例验证改进技术的应用效果, 构建“勘察精细化—工艺复合化—监测智能化”的技术体系, 以期为水利工程软土地基处理提供技术参考。

关键词 水利工程; 软土地基; 搅拌桩加固; 防渗围封; 预压加固

中图分类号: TV55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.019

0 引言

水利工程是国民经济的基础性设施, 其建设质量直接关乎水利安全、水资源调配与区域经济发展。我国软土分布面积达 100 万 km^2 , 这类土壤天然含水率 40% ~ 80%, 压缩系数 $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 天然地基承载力仅 50 kPa ~ 80 kPa, 远难以满足水工结构荷载需求。依据《建筑地基基础设计规范》, 软土区工程必须处理地基并严控工后沉降, 水闸、泵站等核心构筑物的工后沉降需 $\leq 30 \text{ mm}$, 差异沉降 $\leq 5 \text{ mm}$ 。传统单一处理工艺存在适配性差、效率低、管控难等问题, 52% 工程因技术套用失效, 38% 因勘察不足设计粗放, 60% 缺乏动态监测。如今大直径双向搅拌桩等创新技术的应用, 使地基承载力提升 40% 以上, 工后沉降控制在 25 mm 内。本文结合行业标准与典型案例, 分析工艺改进路径与应用效果, 为同类工程提供参考。

1 水利工程软土地基处理传统工艺及局限

1.1 传统核心处理工艺

水利工程传统软土地基处理工艺主要有换填垫层法、预压地基法、水泥搅拌桩法及钢板桩防渗法, 各类工艺依加固原理不同, 适用于特定场景。换填垫层法通过挖除 3 m 内浅层软土, 回填级配砂石、灰土等压实成承载垫层, 施工简便、成本较低, 适配浅软土小型构筑物基础, 但处理深度有限, 无法加固深层软土。预压地基法含堆载与真空预压, 通过外荷载加速软土

排水固结, 适用于航道、堤坝等大面积地基加固, 且需较长固结周期, 低渗透性软土区真空预压可达 180 天, 难以满足紧工期需求。水泥搅拌桩法将水泥浆液与软土强制搅拌成桩, 提升承载力, 适配 3 m ~ 15 m 中深层软土处理, 但传统搅拌桩存在搅拌不均、浆液流失问题, 桩体强度离散。钢板桩防渗法通过施打钢板桩形成连续防渗墙, 阻断地下水渗透, 适用于水闸、泵站等基础防渗, 但其施工依托人工定位, 垂直度精度低, 单独使用时耐久性、强度不足, 易因土体变形开裂。

1.2 传统工艺核心局限

1.2.1 技术适配性不足

传统的软土工艺方案呈现出较为单一的状况, 没有充分地适配软土分层特征、含水率差异以及有机质分布等相关地质条件。在高含水率 (大于 60%) 的软土区域, 如果套用普通的 CFG 桩技术, 就容易引发桩体出现失稳的情况; 在深层软土区域采用浅层换填的方法, 难以从根本上治理深层沉降的隐患问题。例如: 某水闸工程由于没有探明 8 m 深处的泥炭层, 按照经验把 CFG 桩设计成 12 m, 最终导致桩基承载力出现不足的状况, 返工成本超过了 2 000 万元。有机质含量大于 5% 的特殊软土, 会使得沉降量增加 30% 以上, 并且会使沉降时长延长 50%, 传统工艺对于此类软土的管控效果非常差。

1.2.2 施工质量控制难度大

在地基施工过程中, 传统工艺存在缺乏精准管控

作者简介: 刘彪 (1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 堤防涵闸管理。

的问题,由此使得工程质量的离散性变得很明显。在进行水泥搅拌桩施工时,传统的钻头搅拌方向单一,浆液和软土拌和不均匀,常引发翻浆、抱钻、塌孔等问题,桩体合格率大概为85%。在进行钢板桩施工时,依靠人工扶着定位,垂直度偏差达3%~5%,严重影响防渗效果和结构稳定性。对于预压地基法当中的堆载预压,存在着荷载不均匀、固结速度缓慢的问题,并且孔隙水压力没有办法进行实时的监测,加载速度过快容易导致土体出现剪切破坏^[1]。

2 水利工程软土地基处理工艺的核心改进路径

2.1 搅拌桩加固工艺的改进

2.1.1 多轴双向搅拌技术

基于传统三轴水泥搅拌桩,创新研发“大直径双向搅拌三轴工艺”,新增两根搅拌轴并扩大叶片直径,实现多向搅拌,大幅提升浆液与软土混合均匀度。响水船闸项目应用后,浆液扩散半径提升30%,破解传统工艺浆液流失、翻浆难题,桩体一次验收合格率从85%升至96.8%。配套智能化监控系统,实时调控水泥掺量(误差 $\leq \pm 2\%$)与搅拌速度(0.8 m/min~1.2 m/min),保障桩体强度均匀,单桩承载力达180 kPa~220 kPa,较传统工艺提升超40%。

2.1.2 三维立体钻头与固化剂优化

针对具有高含水率以及高有机质特点的软土加固方面存在的难题,开展研制工作来制造出三维立体样式的搅拌钻头并且配备与之专用的固化剂,从而实现从多个方位进行铣削搅拌操作。让底部的叶片进行破土工作,上部的两组叶片和竖向的两组铣轮一起协同配合,在三维方向上对浆液和土体进行充分搅拌,使得均匀程度提升了50%。把固化剂按照水泥和专用添加剂以1:1的比例进行掺和,能够让软土的含水率降低30%~40%,进而加速固结过程。将该技术运用到珠海市石角咀水闸重建工程当中,成桩芯样的完整程度达到了98%(和传统工艺相比提升了23%),让施工的效率提高了40%,工期缩短了71天^[2]。

2.2 防渗围封工艺的改进

2.2.1 水泥搅拌桩—塑钢板桩复合防渗技术

采用一种“围封起来的水泥搅拌桩加上塑钢板桩”的复合结构进行创新:水泥搅拌桩以咬合单排的方式进行布置(桩的直径是500 mm,桩与桩之间的距离是400 mm),塑钢板桩实施打桩操作在水泥搅拌桩的边沿位置(桩与桩之间的距离是690 mm),这两者的优势相互补充。水泥搅拌桩增强防渗墙的强度和耐久性,塑钢板桩提高抗裂性能,弥补了传统水泥土防渗

墙容易开裂、钢板桩防渗墙耐久性不足的缺陷。检测显示,这种复合墙的渗透系数低至 1.52×10^{-6} cm/s,与传统方案相比,其渗透系数提升了74%,建造成本降低了15%~20%。

2.2.2 施工定位与固定装置创新

开展研制塑钢板桩夹桩扣以及定位装置的工作,解决传统施工中垂直度难以控制、效率比较低的麻烦问题。夹桩扣采用能够进行调节的设计方式,依靠上下夹桩板、搭扣还有防滑胶条来进行紧固操作,从而适配不同宽度的塑钢板桩,让装拆效率提高3倍;定位装置是由定位组件和帽型限位件所构成的,能够让垂直度偏差小于或者等于0.5%,把损坏率从8%降低到1.2%。该设备在珠海市天生河泵站项目当中得到应用,使得施工效率提升45%,节省成本86.43万元^[3]。

2.3 预压加固工艺的改进

预压加固工艺的改进集中于真空—堆载联合预压优化与冻融—热真空预压复合技术。前者采用“分阶段升压+动态加载”模式,真空度逐步升至80 kPa以上,堆载按10 kPa/天分级施加,搭配间距1.2 m的加密塑料排水板,保障排水通畅。例如:某航道工程应用后,固结周期从180天缩至90天,工后沉降 ≤ 25 mm,效率较传统工艺翻倍。后者针对含水率超80%的超软土地基,融合冻融与热真空预压技术,经冷冻胶结土颗粒、提升渗透性后加速固结,使固结速率提升60%,承载力从50 kPa升至120 kPa,拓展了预压法适用范围,为高含水率软土处理提供新路径。

2.4 施工与监测智能化改进

施工与监测智能化改进聚焦智慧施工管理平台与分层动态监测体系两大核心。智慧施工管理平台融合物联网、5G与BIM技术,构建“五位一体”架构,实现施工全要素动态感知与智能管控。响水船闸项目中,BIM正向设计搭建地基处理三维模型,贯穿全生命周期;物联网设备实时采集12项关键参数,数据延迟 ≤ 1 s,异常预警响应 ≤ 5 分钟,大幅提升施工可控性与安全性。分层动态监测体系构建“表层沉降+深层变形+孔隙水压力”三位一体网络,科学布设观测点与监测设备。自动化监测使施工期每2天、工后期每15天监测一次,数据实时上云。基于BP神经网络的沉降预测模型,提前7天~10天预警风险,精度超95%。例如:某水利枢纽工程应用后,规避了3次沉降突变风险,工后沉降控制精度提升了30%,为软土地基处理提供了坚实的技术支撑^[4]。

3 水利工程软土地基处理改进工艺的工程应用效果验证

3.1 大直径双向搅拌三轴水泥搅拌桩工艺应用

响水船闸项目地处江苏东部沿海软土区,地基承载力仅 60 kPa ~ 70 kPa,土体流动性强,施工需应对地基失稳、沉降超标等难题。项目采用大直径双向搅拌三轴水泥搅拌桩工艺,搭配智慧施工管理平台,实时调控水泥掺量与搅拌速度。

应用改工艺后,地基承载力提升至 185 kPa,满足 II 级航道船闸荷载要求;工后 12 个月沉降量 22 mm、差异沉降 3 mm,远低于规范限值。施工周期较传统工艺缩短 40 天,水泥损耗率降至 8%,节约成本 120 万元。项目斩获 6 项国家专利、1 项部级工法,获评江苏省平安百年品质工程,成为内河航道软基加固示范样板。

3.2 复合防渗围封技术应用

石角咀水闸重建工程位于含水率 72% 的高含水率软土区,传统防渗工艺易产生裂缝与渗漏。项目创新采用“水泥搅拌桩+塑钢板桩复合防渗技术”,搭配三维立体钻头与专用固化剂,打造一体化防渗体系。监测显示,复合防渗墙渗透系数达 1.48×10^{-6} cm/s,符合水利一级防渗标准;地基承载力提升至 170 kPa,工后沉降 20 mm,施工周期缩短 71 天,节约成本 137.51 万元。工程投用 3 年,无渗漏与结构开裂情况,防渗墙耐久性优良,获得珠海市水务局与质监部门认可。

3.3 真空一堆载联合预压技术应用

该工程软土厚 12 m,天然含水率 68%,传统真空预压法固结周期偏长。项目优化采用“分阶段升压真空一堆载联合预压工艺”,配套加密塑料排水板与智能化监测系统。应用该技术后,固结周期从 180 天缩至 85 天,工后沉降 23 mm;地基均匀性显著提升,压缩系数降至 0.32 MPa^{-1} ;工程成本降低 18%,弃土经资源化处理后用于航道岸坡回填,实现“零外运”,减少环境扰动。

3.4 效果综合评价

三大典型工程实践显示,改进工艺在技术性能、经济指标与环境效益上均获显著提升。在技术层面,地基承载力平均提高 40% 以上,工后沉降控制在 25 mm 内,防渗系数降低 70%,充分满足水利工程对地基稳定性与耐久性的严格要求。在经济方面,施工周期缩短 30% ~ 40%,材料损耗率降 8% ~ 12%,工程成本节约 12% ~ 20%,后期维护费减 60% 以上,综合效益突出。在环境保护方面,弃土资源化利用与低扰动施工减少生态破坏,某项目构建 10 公里绿色生态廊道,降低汛期水土流失风险,实现工程建设与生态保护协同发展。

4 水利工程软土地基处理工艺发展趋势

水利工程软土地基处理工艺将会朝着材料创新、智能化升级、工艺复合化、标准体系完善这四个大的方向加快发展。在材料创新方面,主要将注意力集中在超高含水率以及高有机质的软土上,运用纳米材料、生物酶对水泥基固化剂进行改良,研发高效且环保的产品,努力使固化剂的掺加量降低 20%,桩体的强度提升 30%,同时兼顾固化的效率和耐久性,减少水泥的使用量和碳排放。

智能化升级依托 BIM、物联网和大数据构建数字孪生模型,实现勘察、设计、施工、监测整体生命周期的可视化管控,模拟固结的演化情况,优化相关参数,预先判断沉降的风险,推动从“经验驱动”向“数据驱动”转型。工艺复合化针对复杂地质状况,构建“搅拌桩+预压+防渗”等协同体系,在超深软土区域采用“深层搅拌桩+真空预压+复合防渗墙”的方案,实现承载力、沉降控制和防渗的一体化^[5]。

5 结束语

采用搅拌桩技术进行多轴双向搅拌并优化固化剂、利用防渗围封技术进行复合结构创新、运用预压技术进行联合加载以及开展智能化监测等路径,有效突破了传统技术瓶颈。从典型工程的应用情况来看,经过改进的工艺能够让地基的承载力提升 40% 以上,把工后沉降控制在 25 mm 以下,让施工的周期缩短 30% ~ 40%,使得工程的成本节约 12% ~ 20%,技术性能、社会效益以及经济效益实现显著提升。随着高效环保固化剂的研发、BIM 和数字孪生技术融合、多工艺协同加固体系得到完善,该领域将会朝着“精准化、智能化、绿色化”的方向迈进,为软土区水利工程高质量建设筑牢技术根基。

参考文献:

- [1] 李雨才. 水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2025(S2):266-269.
- [2] 李义方. 岩土工程施工中软土地基处理的方法与应用研究[J]. 建筑技术开发, 2019,46(18):141-143.
- [3] 荣庆. 水利工程软土地基处理施工质量管理探讨[J]. 居业, 2021(11):198-199.
- [4] 张旭林. 水利水电工程施工中软土地基处理技术分析[J]. 科技资讯, 2025,23(08):163-165.
- [5] 程晓航, 孟才. 水利工程软土基础上泵站更新改造的策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(21):223-225.

市政道路桥梁施工中现浇箱梁 施工技术应用分析

薛朋辉¹, 徐兴星²

(1. 新疆公路工程监理中心有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 浙江交科工程管理有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘 要 在市政道路桥梁工程中, 现浇箱梁技术由于整体性好、刚度大、适应复杂线形等特点被广泛使用。本文对施工工艺进行详细的分析, 包括支架搭设、模板安装、钢筋加工、混凝土浇筑和预应力张拉等主要工序。对各个工序的技术参数和操作细节进行阐述, 研究提高箱梁结构承载能力和稳定的办法。分析过程以施工现场实际工艺流转为主, 重视各个环节之间的衔接逻辑, 给类似市政桥梁结构的建造提供技术借鉴, 进而提高工程结构耐久性和施工工艺科学性。

关键词 市政桥梁; 现浇箱梁; 预应力技术

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.020

0 引言

在现代城市交通网络建设当中, 市政道路桥梁结构形式越来越多样化。现浇箱梁作为可以跨越城市复杂地形、满足曲线线形要求的一种结构形式, 在市政立交、跨线桥和景观桥梁中占有很重要的地位。由于市政工程现场环境复杂, 地下管线多, 地面交通压力大, 现浇箱梁施工存在空间受限制、工艺环节衔接紧密等问题。对现浇箱梁地基处理、架设、梁体成型全过程技术进行详细的分析, 对保证桥梁主体结构受力均衡、线形美观具有重大意义。

1 现浇箱梁支架体系搭设及预压处理

市政道路桥梁现浇箱梁施工的第一步就是地基处理和支架搭设。地基应清除表层, 换填碎石土, 用机械压实达到架体荷载要求, 四周设排水沟防止积水软化基层。支架一般为碗扣式或者盘扣式, 立杆纵横间距根据箱梁截面自重来模数化设计, 横杆步距控制在1 200 mm。搭设完毕后要进行系统预压, 加载物料一般采用钢绞线或者砂袋, 加载顺序为60%、100%、120%三个阶段。利用全站仪实时监测架体顶部沉降量, 得到支架弹性变形值和非弹性变形值, 根据这两个值准确地设置模板的预拱度, 使箱梁底模卸落后能达到设计要求的线性弧度, 消除架体变形对结构线形的影响。

2 现浇箱梁模板安装与钢筋加工工艺

2.1 底模与侧模安装精度控制

底模安装前应根据预拱度设置结果, 用调节支架顶部可调托座精确调整底板标高。底模一般用18 mm厚优质覆面建筑木模板, 接缝处用双面胶带或填缝腻子粘贴, 保证平整度误差 ≤ 3 mm。侧模安装用定型钢模板或者加厚木模板, 用侧向斜撑固定, 顶部设对拉螺杆平衡混凝土侧压力^[1]。对曲线段箱梁, 侧模要进行放样切割, 用加密支撑点的分布来拟合设计线形, 保证箱梁侧面轮廓的圆滑。模板内侧应均匀涂刷脱模剂, 防止混凝土表面粘连造成外观质量不合格, 在模内底部留有清扫孔, 及时清理施工过程中产生的杂物。

2.2 钢筋骨架制作与波纹管定位

钢筋加工应集中于加工场内制作, 运至现场后在底模上按顺序绑扎。先绑扎底板钢筋, 然后用钢筋支架固定腹板钢筋骨架。钢筋交叉处用梅花形扎丝扎牢, 不得漏扎造成受力不均。波纹管定位为关键工序, 按照设计图纸坐标设置定位钢筋, 垂直间距控制在500 mm, 水平间距按管道弯度加密。波纹管接头用大一号套管连接, 两端用胶带缠绕严密。绑扎时不能让电焊火花碰到波纹管, 以免造成管壁穿孔造成后期漏浆堵塞孔道。底板和腹板交接处的钢筋要进行加强焊接, 提高

作者简介: 薛朋辉(1987-), 男, 本科, 研究方向: 道路与桥梁工程。

整体骨架的稳定性,在混凝土冲刷时不会出现移位。

2.3 支座安装与防漏浆构造处理

箱梁支座安装前应将垫石表面凿毛清洗,用环氧砂浆找平。支座中心线应与设计位置严格对正,锚栓孔位深度要符合设计要求。支座顶部与箱梁底板的连接处应设不锈钢板或特制模板,保证接触面平整严密。为了防止混凝土浇筑时浆体进入支座活动空间,用泡沫填缝剂或者胶布将支座与模板之间的缝隙封住。箱梁伸缩缝处模板排布要留出后期安装槽口,槽口尺寸偏差要严格控制。箱梁底板泄水孔和通风孔的埋设位置要准确,用塑料管贯穿底板并固定在钢筋上,管口用布条塞紧防止杂物掉入。

2.4 预应力管道安装精度保障

预应力管道的线形对后部预应力力学效果产生影响。腹板钢筋绑扎完成后,用经纬仪对管道进行三维坐标复测,主要校核最高点和最低点的高程。定位筋的焊接要保证牢固,防止混凝土浇筑振捣时由于浮力的作用使波纹管上浮或者变形。管道和钢筋相碰时,可以微调普通钢筋的位置,但是不能切断受力主筋^[2]。孔道两端应设置锚垫板,锚垫板平面应垂直于管道轴线,偏移角度不大于 3 度。锚垫板和波纹管之间用螺旋筋加强局部抗压。所有的预埋排气管、泌水管都要引出梁体顶部,做好标记以备压浆时排气。

2.5 腹板钢筋绑扎与内模支撑

腹板钢筋绑扎应在内模安装之前进行,用挂钩式钢筋卡具控制保护层厚度。内模一般用模块化组合木模或者轻质中空模板,用方木和钢管组成内部支撑系统。为了防止混凝土分层浇筑时内模上浮,在内模顶部设置压杠并和外侧支架锚固。内模与外模之间通过塑料垫块保持 50 mm 的间距。箱梁顶板受力处内模支撑应加密布置,保证顶板混凝土施工荷载能有效传递。对设置横隔板的部位,内模应分段安装,留有人进出孔洞,便于内模拆除。内模底部应留设排水孔,防止养护水积聚在箱室内加重桥墩负担。

3 现浇箱梁混凝土浇筑及振捣成型技术

3.1 混凝土配合比性能及入模要求

市政现浇箱梁一般使用 C50 及以上强度商品混凝土,坍落度控制在 120 mm 左右。混凝土进场后要严格检测其和易性和含气量,不得在施工现场私自加水。施工时采用两台或多台混凝土泵车同时工作,泵管出口距离模板表面自由落差不大于 1.5 m。落差太大时需要设溜槽。入模温度不宜大于 18 ℃,防止大体积混凝土内部温升过快而产生温度裂缝。对钢筋密集处,用

细石混凝土封底一层,保证底板底部密实。每车混凝土的浇筑时间间隔不得大于其初凝时间,保证梁体结构整体性。

3.2 阶梯式分层浇筑与振捣工艺

混凝土浇筑要遵照对称平衡原则,由一端向另一端呈阶梯状纵向推进。浇筑顺序严格按先底板、后腹板、最后顶板的顺序进行,纵向梯队长度控制在 5 m 到 8 m 之间。腹板区域用斜向分层浇筑法,每层摊铺厚度不超过 500 mm,减小混凝土对内模的侧压力,加快内部空气随振捣排出的速度^[3]。底板和腹板交接处的腋角受力关键部位,应适当减慢下料速度,配合人工布料,防止混凝土在重力作用下产生离析现象,保证下层混凝土初凝之前被上层料流覆盖,保持梁体结构整体的物理属性。

振捣用高频插入式振动棒,运行频率为 30 Hz。作业时要遵守快插慢拔的原则,插入点应呈梅花状均匀分布,间距不能大于振捣棒有效作用半径的 1.5 倍。振捣棒应垂直插入,深度到下层 50 mm 以上,使上下两层之间有物理咬合力,防止出现冷缝。对预应力锚固区等钢筋特别密集的地方要换小直径振动棒进行补强振捣。顶板作业时配合平板振动器进行二次提浆,然后进行不少于两次的压光抹面,闭合表面收缩裂缝。振捣到表面不再明显下沉、无气泡冒出、泛浆厚度均匀一致为止,不得对波纹管、钢筋骨架和支座组件进行触碰。

3.3 箱梁顶板抹面及二次压光处理

顶板混凝土初凝前,应按预先设置的高程控制线进行找平,用铝合金刮尺刮除多余的浆体。初凝之后、终凝之前,用人工进行不少于两次的压光收浆处理,消除表面塑性收缩裂缝。市政桥梁顶板表面一般要进行拉毛处理,提高后期沥青铺装层的黏结力。拉毛深度控制在 2 mm 左右,方向垂直于行车方向,间距均匀。对预留孔洞、泄水管周围做细致的修整,防止积水渗漏。施工期间光照强或者风力大时要及时用塑料薄膜覆盖保湿,减缓水分蒸发速度,减小表面干缩。

3.4 混凝土养护温控及拆模标准

混凝土浇筑完成后立即进行养护,顶板用土工布覆盖并洒水养护。养护周期不少于 7 d,确保混凝土强度稳步增长。箱室内通风不良,水分蒸发慢,但是需要检测内部温度,防止内外温差大于 25 ℃。拆除侧模时,混凝土强度要达到 2.5 MPa,保证棱角不被破坏。底模、内模拆除必须在混凝土强度达到设计强度 100% 和预应力张拉完成后进行。卸架顺序按跨中到支点、中间到两侧对称的顺序进行。卸落时应分次循环,每次卸落的高度不宜过大,以免造成应力重分布引起瞬间荷载冲击,使结构产生内伤。

3.5 裂缝预控技术与孔道清理

箱梁腹板与横隔板交界处容易产生收缩裂缝,在该处增设细直径抗裂钢筋网片。施工缝处剔除浮浆,露出坚硬的石子,浇筑前将接缝面湿润,并涂刷水泥净浆^[4]。混凝土达到规定的强度以后,用高压水枪或者人工将预应力孔道内的积水和零星碎浆清除干净,保证孔道的畅通。清理完毕后用密封塞堵住管口,防止二次污染。

4 现浇箱梁预应力张拉与孔道压浆工艺

4.1 预应力筋下料与穿束施工要点

预应力钢绞线下料前必须做好表面外观质量检查工作,不得有机械损伤或者深度锈蚀。下料长度计算要准确算出孔道曲线段实际展开长度,再把锚具厚度、千斤顶行程空间、钢材回缩量等重要参数加进去。切割作业必须使用专用砂轮切割机,严禁用电弧焊处理,防止钢绞线受热而造成组织改变及力学性能降低,保证材料的抗拉强度指标不发生变化。

穿束前应使用通孔器清除管道中的积水和碎浆。钢绞线编束要保持顺直、排列整齐,用特制导向帽由穿束机配合人工慢慢推入,防止钢束在孔道内扭结。对超长跨径箱梁,在浇筑前预埋钢束,但应在管口设严密的密封构造以防止渗浆。

4.2 智能张拉设备校准及两端对称张拉

当混凝土强度和弹性模量达到设计要求的100%且龄期大于7 d时,才能进行张拉。使用智能张拉系统时,千斤顶和油泵必须由有资质的单位进行标定。张拉顺序严格按照设计图纸进行,一般采用左右对称、由下到上的方式。初始应力取设计应力的15%,此时测量伸长值起始点^[5]。张拉过程分为15%、50%、100%及1.1倍超张拉持荷阶段。持荷时间一般为5 min,用来抵消由于钢绞线松弛所造成的影响。两端千斤顶同步顶进,同步误差不超过5%,用智能控制系统自动调节压力、流量,保证预应力合力中心不偏位。

4.3 张拉力与伸长值双控实施流程

预应力施工采用张拉力为主、伸长值校核为辅的双控程序。实际伸长值和理论伸长值之差不能超过6%。如果偏差超出了范围,就要立即停止作业,分析管道摩擦力过大、锚具夹片回缩量超标或者钢绞线弹性模量异常等造成的原因。达到100%张拉应力后,锚固前要测量夹片瞬间回缩量。发生滑丝时,用小千斤顶卸掉锚固力后更换夹片再进行张拉。张拉完成后多余钢绞线的余留长度不得小于30 mm,用砂轮锯切除。

4.4 孔道压浆密实度与封锚操作

张拉完成后应在24 h内进行孔道压浆。压浆料为高性能无收缩浆体,强度不小于50 MPa。压浆前用高压风吹干管道水分,采用真空辅助压浆工艺。真空泵先将管道内的气压抽到-0.02 MPa,然后打开压浆泵从低端往高端连续灌浆。当高端排气孔出现浓浆并且稠度和进浆口一致的时候,关闭排气阀,继续稳压到0.8 MPa,持压3 min。

4.5 压浆后期养护与架体卸落工序

压浆后的养护工作关系到浆体强度的增长与管道防腐。孔道浆体强度达到设计要求后,才能进行支架最后卸落^[6]。卸落时用千斤顶协同调节底模高度,分跨依次进行。卸落后应实测梁体挠度,核对与设计值的符合情况。支架拆除之后,对梁底出现的细小接缝处做打磨修补工作。市政桥梁梁体外观美化工作是之后的重点,需要对拉杆孔洞进行封堵。卸落时对桥墩位移进行观测,保证箱梁在受力平衡转换的过程中不产生侧移。

5 结束语

市政道路桥梁现浇箱梁施工属于高度集成的技术工程,它所控制的主要是支架稳定、模板准确、混凝土均匀以及预应力有效值。通过对各个阶段工艺要点的系统分析可以得出支架预压是消除非弹性变形的基础,分层浇筑和双控张拉是保证结构质量的关键。在实际使用中,根据城市环境特点对每一个施工环节进行细致处理,主要对波纹管的定位、真空压浆工艺进行改进,可以大大改善梁体耐久性。不断加强现浇箱梁工艺的研究,不但可以提高市政基础设施建设水平,而且能为以后更高跨径、更复杂的线形城市交通枢纽建设提供技术保障。

参考文献:

- [1] 张家宇.市政道路桥梁施工中现浇箱梁施工技术应用分析[J].运输经理世界,2026(02):108-110.
- [2] 陈益周.现浇箱梁中抱箍钢管柱贝雷梁支架施工技术研究[J].产品可靠性报告,2025(11):186-188.
- [3] 吴林军.桥梁工程现浇箱梁施工技术研究[J].运输经理世界,2025(27):109-111.
- [4] 王涛.桥梁施工中现浇箱梁施工技术[J].交通科技与管理,2025,06(07):110-112.
- [5] 董耀森.市政道路桥梁施工中现浇箱梁施工技术应用分析[J].运输经理世界,2025(10):75-77.
- [6] 王红.道路桥梁施工中现浇箱梁施工技术分析[J].四川建材,2024,50(05):139-141.

建筑工程建设中节能环保施工技术的运用

陈 勇¹, 苏焱芳², 赵冰冰^{2*}

(1. 青岛派尼尔环保技术有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 潍坊和生工程建设有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘 要 在“双碳”战略及绿色发展的大趋势下, 建筑业正在加速向低碳化、可持续的方向发展。施工过程是建筑工程整个生命周期中至关重要的一环, 在施工过程中采用节能减排的技术措施对降低工程碳排放量以及提高资源利用率起到决定性作用。本文主要介绍建筑工程节能环保施工技术的意义, 并对其所涉及的节能材料的应用、绿色施工技术、资源再利用以及智能化管理等方面进行详细论述, 在此基础上总结目前存在的问题并提出相应的建议, 以期为促进建筑行业的绿色施工、减少污染提供参考。

关键词 建筑工程; 节能环保施工技术; 绿色建造; 资源循环利用

中图分类号: TU75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.021

0 引言

建筑业是能源消耗以及碳排放的重要领域, 在传统高耗能、高排放、低效率施工方式下已不能适应社会发展需求, 虽然施工过程只占整个建筑物寿命周期中碳排放量的 10%~20%, 但是却是决定后续使用过程中碳排放量大小的一个重要时期, 对整个建筑节能减排起到决定性的影响作用。目前很多工程中还存在着缺乏节约环保的技术手段, 造成严重的资源浪费以及环境保护不到位的现象, 阻碍了建筑业的可持续发展。因此, 本文针对建筑工程中节约环保施工技术进行研究, 明确其重点内容及方法, 以期为促进建筑工程高质高效绿色发展提供参考。

1 建筑工程节能环保施工技术实施的意义

节能环保施工技术是建筑行业贯彻绿色发展理念的重要抓手, 在实际应用中发挥着重要作用, 主要有以下三个方面内容, 明确展示了这项技术带来的益处以及作用。首先, 节省资源能源消耗, 解决资源短缺问题。建筑活动需要大量的材料、能源及水等, 而利用节能环保施工技术, 比如使用再生骨料混凝土、推行装配式施工方式、加强水资源再利用等方法, 可以大大减轻对自然资源的需求, 节约能源, 提高资源利用率, 符合我国建设资源节约型社会的要求^[1]。其次, 减轻污染排放, 保护环境。传统的建筑施工会产生大量的粉尘、噪声、污水、建筑废弃物等, 影响周围的

环境以及人们的日常生活。而采用节能环保施工技术, 比如进行扬尘控制、对污水进行无害化处理、用建筑废弃物进行再加工、采用低噪声机械等手段就可以有效地减少污染的产生, 有利于环境保护和建设生态文明城市。最后, 提高工程项目整体收益, 促进行业健康发展。节能环保施工技术不仅可以节省工程施工费用、降低后期运行维护所耗电量, 还可以提高建筑物品质量和延长使用寿命, 增加项目的经济和社会价值, 同时也促进了建筑业的技术进步和发展转型, 有利于实现“双碳”。

2 建筑工程节能环保施工核心技术路径

建筑工程节能环保施工技术覆盖材料选用、工艺创新、资源循环、管理优化四大维度, 各技术相互协同、有机整合, 形成完整的技术体系, 具体实施要点如下。

2.1 节能环保建材选用与应用技术

建材选型是节能环保施工的基础, 核心是优先选用绿色环保、低碳节能、可循环利用的新型建材, 替代传统高能耗、高污染建材。推广节能型墙体材料, 如加气混凝土砌块、轻质隔墙板, 其重量轻、保温隔热性能优异, 可减少墙体砌筑材料消耗与后续保温层施工成本; 应用绿色环保混凝土, 通过掺入粉煤灰、矿渣等工业废料替代部分水泥, 采用再生骨料制备混凝土, 降低碳排放与资源消耗, 同时提升混凝土耐久性。此外, 选用断桥铝型材、Low-E 中空玻璃、岩棉板、聚

作者简介: 陈勇 (1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 环保工程。

*通信作者: 赵冰冰 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。E-mail: 181912577@qq.com

氨酯泡沫等高效保温隔热材料,应用于门窗、墙体等部位,减少建筑运营阶段冷热能耗,其中 Low-E 中空玻璃可反射红外线,降低太阳辐射热进入与室内热量外泄,保温性能较普通玻璃提升 50% 以上。

2.2 绿色施工工艺优化与应用技术

施工工艺的绿色化改造是降低施工阶段能耗与排放的关键,核心是通过工艺创新、流程优化,减少施工过程中的资源消耗与污染产生^[2]。推广装配式施工技术,将墙体、梁柱、楼板等构件在工厂预制,现场拼装,减少现场湿作业与材料浪费,降低扬尘、噪声污染与能源消耗。例如:某项目应用该技术后,现场焊接量减少 90%,焊接电耗下降 80%;优化混凝土、砂浆施工工艺,采用预拌砂浆+气力输送系统,减少现场搅拌产生的粉尘与能耗,应用 BIM 技术进行材料精准排版,提升材料利用率,钢材利用率从传统 80% 提升至 95% 以上;同时,推行干法施工,减少水的使用量,避免废水污染,针对脚手架、模板等周转材料采用标准化、可循环利用体系,降低材料损耗。

2.3 资源循环利用与节能技术

资源循环利用是实现节能环保的重要途径,核心是构建“收集—处理—回用”的资源循环体系,提高资源重复利用率。(1)水资源循环利用,在施工现场设置雨水收集池、沉淀池,收集基坑降水、雨水及施工废水,经处理后回用于混凝土养护、场地降尘、绿化灌溉等,如某住宅项目雨水回收系统每月可回收利用雨水 3 000 吨,施工用水重复利用率达 80% 以上;推广智能节水系统,通过电磁流量计、智能水表结合用水定额管理软件,实现用水精细化管控,识别管道泄漏,提升节水效率。(2)能源高效利用,施工现场优先采用光伏临时用电系统,替代传统柴油发电机,某项目应用该技术后,施工用电量减少 28%,碳排放降低约 220 吨;合理利用地源热泵、余热回收等技术,为临时办公区、施工设备提供供暖、制冷服务,减少市政能源消耗。(3)建筑垃圾资源化利用,建立建筑垃圾“分类收集—筛分处理—再生利用”体系,将渣土、混凝土块、钢筋等分类回收,经破碎、筛分后再生为再生骨料,用于路基填筑、再生砖生产,实现建筑垃圾减量化、资源化,遵循估算先行、源头减量、分类管理等原则,减少填埋量。

2.4 智能管控与信息化节能技术

智能管控是提升节能环保施工效率与精准度的重要手段,核心是借助信息化、智能化技术,实现施工过程的动态监测与优化^[3]。应用 BIM 技术,在施工前

进行能耗模拟、场地规划、材料优化,减少施工偏差与资源浪费,结合 BIM+ 智慧工地协同管理平台,实时监控施工进度、质量、能耗与环保指标,实现动态管控;部署物联网监测系统,对施工现场扬尘、噪声、废水排放、能耗等进行实时监测,联动扬尘喷淋、照明、通风等设备,实现扬尘超标自动降尘、区域无人自动调光,PM10 浓度稳定 $< 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$;推广智能照明系统,采用 LED 灯具结合感应控制,区域无人时自动调光,降低照明能耗,某项目应用后照明能耗下降 40% 以上。

3 建筑工程节能环保施工技术应用现存问题

3.1 技术应用认知与能力不足

部分施工单位对于节能环保施工技术重视程度不够,在施工过程中一味强调工期以及经济效益,而忽略环保及节约能源的要求,“重施工、轻环保”,“重成本、轻技术”。同时,施工人员及技术人员技术素质不高,在新型节能环保材料、工艺、智能化管理技术上了解不多,违章操作现象严重,造成技术不能很好地发挥其应有的节能降耗作用。

3.2 技术选型与集成应用不合理

部分项目存在选择节能降耗技术不合理的问题,所选的技术与工程实际情况及当地自然条件不符合。例如:在寒冷地区使用保温效果不佳的材料,在多雨地区不重视利用雨水进行收集等,造成技术与现场需求相悖。另外,技术的应用不够全面系统,各技术之间的配合度不高,只是一味地采用一种节能或者环保的技术而忽视其他相关联的技术,不能做到“材料—工艺—资源—管理”的整体技术方案来降低项目对环境的影响。

3.3 资源管理与环保管控不到位

在资源管理上,部分施工企业对于资源节约和循环利用缺乏有效的制度措施,在建筑材料的采购、储存及使用过程中监管不足,导致材料浪费严重、损耗率过高;对水资源的使用缺少整体安排,在节水、节电等方面缺乏有效的循环再利用设施,养护用水以及降尘用水浪费严重^[4]。在环境保护上,扬尘、噪声、污水等污染治理不到位,比如扬尘仅仅采取简单的遮盖方式,而无智能化喷淋装置;污水未经处理即排放至环境中;建筑废弃物未做到分类处理,大部分被随意丢弃,造成很大的环境压力。

3.4 制度保障与监管机制不完善

部分施工单位没有完善的节能环保施工管理措施,没有编制专门的施工方案、技术要求以及考评办法,

技术运用缺乏指导性意见。另外,监管制度不完善,在施工期间的质量检查、环境保护等环节走过场,对于技术运用不当、浪费资源、污染物排放过多等方面缺少有效的管理和改进措施,使得节能环保施工技术不能够落到实处。

4 建筑工程节能环保施工技术改进与优化措施

4.1 优化技术选型与集成应用,提升技术适配性

一方面,加强技术前期论证工作,在不同类型工程、不同地域环境、不同施工条件下进行技术比较、专家论证等方式选出最合适的节能环保技术,尽量采用成熟可靠、效果良好、适用的技术而不盲目使用。例如:在北方寒冷地区主要使用高效保温材料以及地源热泵技术,在南方多雨地区主要使用雨水收集再利用技术等。另一方面,大力推广技术集成应用,“节能材料+绿色工艺+资源循环+智能管理”综合性技术方案,把 BIM 技术、装配式施工、再生骨料混凝土、雨水收集系统、智能检测设备等有效结合在一起,发挥各自优势共同发力,最大限度节约能源降低排放,如某综合项目通过技术集成应用能耗下降 30%~45%,碳排放降低 35%~50%。加强过程管理和控制,节约资源减少污染。

从资源管理上讲,制定“采购—存储—使用—回收”的全过程资源管理制度,严格控制材料损耗率,利用 BIM 进行材料下料优化,减少锯切损耗;推广预拌砂浆、装配式构件,减少施工现场材料损耗;实行精细化水资源管理,配置相应的计量设施,确定合理的用水指标,提倡节水器具及重复利用技术的应用,提高水资源循环利用效率^[5]。在环境保护方面,执行防尘、降噪、污水处理以及建筑垃圾处理的相关规定,采取封闭施工、设置隔声屏障、设置喷淋降尘设备等措施防止扬尘和噪声污染;施工现场产生的污水经过沉淀池、过滤器等处理后再进行回用;建筑垃圾进行分拣、再利用,坚持“就近处理、限量排放”,使资源化率达到 70% 以上。

4.2 加强人员培训与技术推广,提升专业能力

建立定期培训机制,对施工工人、技术人员、管理人员进行节能环保施工技术、规程、标准学习,着重学习新型材料性能、绿色施工工艺、智能化管理手段以及环境保护要求等内容,请业内资深人士、技术人员进行讲解。另外,还要注重技术传播与交流,在施工现场参观学习绿色环保工程,互相交流经验,宣传先进的节能环保工法,提高整个行业的技术水平,使节能环保施工技术得到广泛使用并且实现标准化。健全相关制度并加强监督管理工作,让这些技术真正发挥作用。

建立健全建筑节能、环保施工管理规定,编制专项施工方案、技术操作规程以及考核评价办法,明确各部门及个人工作职责,把建筑节能、环保目标纳入到考核当中,增强施工人员的责任感。加强监督与管理,做到“事先防范、事中控制、事后检查”,在施工之前做好技术交底和技术方案审核,在施工期间严格执行“三检制”,由专人巡查并且使用智能化监测设备对施工现场进行监控,发现问题立即整改,在施工完成后进行节能验收、环保验收,对能耗、碳排放量、资源消耗率、污染物排放等情况进行全面检测,不合格项目不得交付使用。此外,还应建立健全质量管理追溯制度,对项目施工全过程实施标准化、规范化的记录管理。从施工准备、材料进场验收、工序交接、隐蔽工程施工,到关键节点验收、设备运行及人员操作等各个环节,均需做到实时记录、有据可查。记录内容应详实完整,明确时间、责任人、操作流程及检验结果,形成完整可追溯的质量档案链条。一旦工程出现质量隐患或问题,可依托追溯体系快速定位环节、查清责任、分析根源,及时采取整改与补救措施,有效防范质量风险,保障工程质量稳定可控,为后续质量改进和责任界定提供依据。

5 结束语

在建筑工程中,施工阶段虽仅占建筑全生命周期碳排放的 10%~20%,却是决定运营阶段能耗水平的关键,直接影响建筑整体节能效果。建筑工程节能环保施工技术是促进建筑业低碳发展、践行绿色发展理念的有效途径,合理应用可以节约大量资源能源、减轻污染排放、提高工程建设整体经济效益等。未来应加大节能环保施工技术研发力度,积极采用新技术、新工艺,健全相关制度,使建筑朝着绿色化、低碳化、智能化的方向发展以支持“双碳”目标的完成。

参考文献:

- [1] 刘鹏. 建筑工程建设中节能环保施工技术的运用[J]. 空中美语, 2022(10):205-207.
- [2] 孙高升, 王清涛. 建筑工程建设中节能环保施工技术的运用[J]. 城市建筑与发展, 2023, 04(14):76-78.
- [3] 孙钰. 建筑工程建设中节能环保施工技术的运用[J]. 中华传奇(中旬), 2021(02):31-32.
- [4] 张如庆. 试论节能施工技术在建筑工程施工中的运用[J]. 工程建设(2630-5283), 2022(02):5.
- [5] 同[3].

地质技术服务工程项目全过程风险管理研究

谭 鑫^{1, 2}

- (1. 湖南省核地质与核技术应用中心, 湖南 长沙 410006;
2. 湖南省电离辐射计量与仪器工程技术研究中心, 湖南 长沙 410006)

摘 要 针对地质技术服务工程中风险因素复杂及全过程管理难度大的问题, 本文结合工程实例对全过程风险管理方法进行了研究, 以邵阳市桃花新城 1-10# 地安置地项目为例, 在分析场地岩溶发育、杂填土厚度变化大及地形起伏明显等地质条件的基础上, 系统识别了勘察、设计及施工阶段的主要风险类型。基于勘察数据, 采用风险矩阵法对风险进行定性与半定量评估, 构建了全过程风险管理技术路线, 并提出针对性的控制措施, 以期相关人员提供参考。

关键词 地质技术服务; 风险管理; 岩溶; 桩基础; 全过程控制

中图分类号: P624; TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.022

0 引言

复杂地质条件下工程建设的安全性及稳定性在很大程度上依赖于地质技术服务的支撑水平。随着矿产开发、地下工程建设及城市基础设施建设的不断推进, 地质技术服务工程在工程决策、设计优化及施工安全保障中的作用日益凸显。然而, 受地质体隐蔽性强、岩土介质非均质性显著及水文条件动态变化等因素影响, 工程场地地质条件往往具有较强的不确定性。同时, 工程扰动作用又进一步加剧了地质环境的复杂性, 使得地质技术服务工程在实施过程中面临多阶段、多类型的风险问题。尤其在岩溶发育区、厚层填土区及地形起伏较大的场地条件下, 风险具有空间离散性强、演化过程复杂等特点。现有研究多聚焦单一阶段或单一类型风险分析, 缺少结合工程实践的全过程风险管理研究。因此, 有必要结合具体工程案例, 从全过程视角出发, 对地质技术服务工程项目中的风险识别、评估及控制方法进行系统分析。基于此, 本文以邵阳市桃花新城 1-10# 地安置地项目为依托, 在总结场地工程地质条件特征的基础上, 对全过程风险进行系统识别与评估, 并提出针对性的风险控制措施, 以期类似复杂地质条件工程提供参考。

1 工程概况与地质条件

1.1 项目基本情况

桃花新城 1-10# 地安置地项目位于邵阳市桃源路附近, 为多栋住宅建筑组成的集中安置区。拟建建筑

以多层住宅为主, 结构形式为底框一砖混结构, 建筑高度约 18.45 m, 基础形式以桩基础为主。据工程勘察资料, 项目场地共布置钻探点 266 个, 勘察等级为乙级。工程重要性等级为三级, 场地复杂程度及地基复杂程度均为二级, 属于具有一定复杂性的岩土工程勘察项目。

1.2 场地地形地貌与环境条件

拟建场地位于丘陵地貌区, 原始地形主要由田埂、民房及小型山包组成, 经前期场地平整后整体起伏仍较明显。勘察资料显示, 场地地面高程约为 247.42 m~276.65 m, 最大高差达 29.23 m, 地形变化较大。区域气候属亚热带季风湿润气候, 降雨量充沛且季节性明显, 其中 3-8 月为主要降雨期。受降雨影响, 场地雨季易形成土层滞水, 对基础施工与地基稳定性产生不利影响。总体来看, 场地地形起伏较大、气候水文条件复杂, 对工程建设及地质风险控制不利。

1.3 地层结构特征

根据勘察成果, 在本项目勘察深度范围内, 场地地层自上而下主要分为三类:

1. 杂填土层。该层分布于场地大部分区域, 厚度变化较大, 约为 0.50 m~27.30 m。土体结构松散, 组成复杂, 主要为黏性土夹碎石及建筑垃圾, 具有高压缩性和不均匀性, 工程力学性质较差, 不能作为天然地基持力层。

2. 黏土层。该层为残积成因黏土, 呈可塑至硬塑状态, 具有中等压缩性, 土体相对均匀, 可作为基础持力层, 但受水影响明显, 遇水易软化。

作者简介: 谭鑫 (1973-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 管理科学与工程。

3. 中风化灰岩层。该层为场地下伏基岩, 岩体整体较完整, 承载力高, 变形性小, 可作为良好的持力层。但由于其为可溶性岩石, 在长期地质作用下形成不同程度的岩溶发育现象, 对地基稳定性产生一定影响。

2 地质技术服务工程项目全过程面临的风险

2.1 基础地质资料失真与风险源识别不足

在地质技术服务中, 基础地质资料的准确性直接决定后续风险识别与控制效果。地质体普遍具有非均质性和潜伏性特征, 单纯依赖有限钻孔、槽探或区域资料, 容易造成关键不良地质体识别偏差。以桃花新城 1-10# 地安置地项目为例, 场地上覆杂填土厚度变化范围约为 0.50 m ~ 27.30 m, 空间分布不均匀, 增加了地层判定的复杂性。同时, 根据勘察统计结果, 整体场地见洞隙率约为 29.7%, 岩溶发育受节理裂隙控制呈明显离散分布特征, 在有限勘探点条件下, 仍存在局部岩溶漏判或识别不足的风险^[1]。在此情况下, 一旦前期资料对地层结构参数、水文地质条件及岩土力学指标揭示不充分, 将直接影响后续风险评价与技术方案制定, 使工程在初始阶段即存在系统性不确定性。尤其是在岩溶发育及地层变化较大的场地条件下, 该类风险更为突出^[2]。

2.2 技术方案适配不足与过程参数失控

地质技术服务工程项目不是静态的, 它的方案设计、技术路线、实施参数要同现场揭露条件保持高度一致。前期技术方案对地层条件、施工扰动方式、地下水响应规律、周边敏感目标考虑不周, 很容易造成项目实施过程中技术适配性降低。结合本项目实际情况, 场地地形起伏较大, 最大高差约为 29.23 m, 同时地层结构变化明显, 上覆杂填土厚度差异较大且下伏灰岩存在不均匀岩溶发育。在此条件下, 若勘探布置密度、测试方法或参数选取未充分反映地层变化特征, 将导致风险评价结果与实际工况偏离。对需要现场跟踪服务的项目来说, 一旦推进速度、注浆压力、监测频率、支护时机或者排水强度等重要参数控制不当, 就会造成变形异常、渗流失稳、地表沉降、围岩松动乃至灾害链式放大^[3]。

2.3 监测预警滞后与风险演化研判不足

在本项目中, 虽然勘察期间未揭露稳定地下水, 但考虑区域气候条件, 在降雨集中时段场地可能形成上层滞水, 对土体强度及地基稳定性产生影响。如果监测体系仅依赖局部点位观测或周期性人工巡查, 难

以及时捕捉位移、孔隙水压力及渗流变化等多因素耦合特征。地质风险一般不是突然形成, 在荷载变化、开挖扰动、地下水位变化、降雨入渗、设备运行偏差等因素共同作用下逐渐积累到一定程度, 才会达到危险的临界点。若监测体系仅局限于局部点位观测、人工周期性巡查、单一参数采集, 难以及时识别位移、土压力、孔隙水压力、渗流量、振动频率、设备工况等多因素异常联动^[4]。在城市敏感区、软弱地层、深埋工程以及富水断裂带等场合, 风险演化速度很快, 预警窗口很短, 如果监测频率、传输速度和分析能力跟不上, 很容易错过早期处置的良机。

3 地质技术服务工程项目全过程风险管理措施

3.1 岩溶风险控制措施

针对本项目场地岩溶发育特征, 结合勘察成果, 在工程实施中宜采用以桩基础为主的处理方式, 通过桩体穿越岩溶发育区, 将荷载传递至稳定的中风化灰岩持力层。为保证基础稳定性, 应控制桩端进入完整中风化灰岩的深度, 一般不小于 3 ~ 5 倍桩径且不小于 5.0 m。对于局部发育的溶洞及溶槽等不良地质体, 可根据其规模及充填情况, 采取水泥压力注浆等加固措施, 以改善地基整体性并提高承载性能^[5]。

此外, 基于本项目钻探资料、原位测试结果及室内岩土试验成果, 结合现场地质特征分析及工程经验, 并参考相关规范与地区经验, 对各岩土层主要工程参数进行综合确定, 其建议取值见表 1。

3.2 杂填土处理措施

针对本项目场地上覆杂填土厚度变化较大(约 0.50 m ~ 27.30 m)且结构松散、压缩性高的特点, 应采取针对性的地基处理措施, 以降低地基不均匀变形风险。对于厚层杂填土区域, 可根据填土厚度及工程要求, 采用挖除换填、分层压实或桩基础穿透等处理方式, 以提高地基承载力并改善整体均匀性。其中, 当杂填土厚度较大且不具备整体处理条件时, 宜优先采用桩基穿透处理, 将荷载传递至下伏稳定地层。在桩基施工中, 为保障成孔质量与孔壁稳定性, 应按地层条件采用钢护筒或泥浆护壁, 合理控制孔底沉渣厚度, 减小对桩端承载性能的不利影响。

3.3 桩基施工风险控制措施

针对本项目施工阶段可能出现的塌孔、卡钻及岩溶不良影响等风险, 应结合场地地基条件及工程经验, 采取针对性的桩基施工控制措施, 以确保成桩质量与

表 1 各岩土层岩土工程参数建议值

土层名称及层号	承载力特征值(kPa)	天然（饱和）重度（kN/m³）	黏聚力标准值（kPa）	内摩擦角标准值（°）	压缩模量（MPa）	岩土对挡土墙基底的摩擦系数 μ
杂填土①	80	18.0（18.5）	7.0（4.0）	9.0（7.0）	3.0	/
黏土②	180	18.7（19.0）	35.4（32.0）	14.8（12.0）	7.75	0.25
中风化灰岩③	6 000	25.0	1 000.0	40.0	6 000*	0.65

（注：1. 带 * 为变形模量；2. 表中杂填土的承载力及压缩模量供地基处理时采用；3. 杂填土①及中风化灰岩③的抗剪强度为经验值，黏土②的抗剪强度试验方法为直接快剪法；4. 表中“（ ）”外的抗剪强度指标为一般工况时的数据，“（ ）”内的数据为暴雨工况时的数据。）

基础稳定性。在一般地层及松散杂填土条件下，施工过程中宜采用泥浆护壁或钢护筒护壁措施，并结合分级成孔技术，以提高孔壁稳定性并减少塌孔风险。在岩溶发育区施工时，针对溶洞及溶槽等不良地质体，可采用回填片石或注浆加固等方式进行处理，以提高桩基成孔稳定性及整体承载性能^[6]。结合本项目地层结构特征及邻近工程经验，桩基形式可优先考虑旋挖灌注桩或机械冲孔灌注桩。两种桩型均可穿越上覆杂填土与黏性土层，嵌入下伏中风化灰岩持力层，适应性良好。其中，旋挖灌注桩施工效率较高、适应性强，但对孔底沉渣控制要求较高；机械冲孔灌注桩成桩质量稳定、适用范围广，但施工周期相对较长。在具体工程中，应结合施工条件及进度要求合理选用桩型。

根据勘察资料，中风化灰岩作为主要持力层，其基岩面起伏较大且呈倾斜分布。为保证桩基受力稳定性，应适当增加桩端嵌岩深度，并控制相邻桩基桩端高程差满足规范要求。同时，由于该层为可溶性岩石，在岩溶发育区施工前应结合逐桩施工勘察成果，确保桩端置于稳定持力层中，桩端进入有效持力层深度宜控制为 3 倍～5 倍桩径且不小于 5.0 m。

局部区域以黏土层为桩端持力层时，为避免下伏岩溶对桩基稳定性的不利影响，应对下部基岩溶洞进行注浆加固，提升地基整体稳定性。

3.4 地下水控制措施

在雨季施工条件下，应设置截水沟、排水沟及集水井等设施，及时排除地表水及滞水，防止地基软化及施工环境恶化。地下水易导致桩孔壁侧阻力降低、桩底持力层软化；对桩基设计的影响主要体现在设计参数选取，对施工的影响主要为孔壁坍塌、孔壁与桩底持力层受浸软化，进而降低桩基承载力、增大灌注施工难度，因此桩基达到设计持力层标高后，应及时验槽与灌注。取土桩应强化护壁措施，防止施工中孔

壁垮塌。场地地下水采取降、排水措施时对周边环境有一定影响，基础施工时建议对场地周边的地下水位进行监测，以及时了解施工对周边地下水位的影响，并采取相应的处置措施。

4 结束语

在岩溶发育及厚层杂填土等复杂地质条件下，风险具有显著的不确定性和阶段性特征，其中岩溶发育及杂填土为主要控制性风险因素。通过构建“风险识别—风险评估—风险控制”的全过程管理技术路线，并结合工程实际提出桩基穿越、注浆加固及施工过程动态监测等措施，可有效降低地质风险并提高工程实施的安全性及稳定性，验证了全过程风险管理方法在复杂地质条件下的适用性。未来同类工程中，可进一步融合多源勘察手段与动态监测技术，强化风险信息实时获取与反馈机制，持续提升风险管理精细化、系统化水平，更好地保障复杂地质条件下工程建设安全实施。

参考文献：

[1] 张 汭,王琳.金属矿山地质环境问题及治理措施分析[J].世界有色金属,2024(23):112-114.

[2] 同 [1].

[3] 沈仕沐,郑钦灶.广东省龙川县老隆镇地质灾害风险评估与防控策略探讨[J].地质灾害与环境保护,2025,36(02):40-49.

[4] 于涛.医院财务成本核算与控制研究[J].中国品牌与防伪,2024(11):122-124.

[5] 吴晨晨.金属矿山地质环境恢复治理模式[J].世界有色金属,2024(19):112-114.

[6] 牟文波.金属矿山地质环境保护与恢复技术研究[J].中国金属通报,2025(02):228-230.

配电网电压波动机理分析与综合调控技术研究

李健勇，武升照

(山东明泉智控运维科技有限公司，山东 泰安 271400)

摘 要 本文研究了配电网电压波动的机理与调控技术，分析了电压波动的基本概念、产生原因及其对电网稳定性和电力质量的影响。通过构建电压波动的数学模型，并结合常用仿真工具进行动态分析，验证了电压波动的传播特性及典型波动源。提出了综合调控技术，通过结合传统调控方式与电力电子技术，并应用智能控制和大数据分析，优化电压波动调控系统的性能。经济性分析显示，综合调控技术具有良好的成本效益，为配电网的高效运行提供了可行的解决方案。

关键词 配电网电压波动；电压调控技术；仿真分析；智能控制；经济性分析

中图分类号：TM714

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.023

0 引言

随着配电网越来越复杂，电压波动成了影响电网稳定、电力质量的重要问题。电压波动会造成设备不能正常工作，并造成能源的浪费以及电力供应不稳定。传统的调节技术已经不能很好地应对复杂的电网环境下频繁、剧烈的电压波动，所以需要发展更加高效、精准的调节手段。本文通过分析电压波动机理并进行仿真研究，提出了一种将传统和现代电力电子技术相结合的综合调节方案，对它的经济性进行了评价，给电压波动问题提供了一种可行的解决办法。

1 配电网电压波动的基本概念与理论基础

1.1 电压波动的定义与分类

电压波动指的是配电网电压随时间的变化过程，虽然变化幅度小但是比较频繁。电压波动分为瞬时波动和长期波动两种。瞬时波动一般是由短时负荷波动或者设备启停造成的，电压出现快速变化；长期波动则是由于负荷持续变化或者气候等外部因素的影响，造成电压波动的幅度和频率逐渐变化。电压波动会对配电网的稳定性、电力质量、居民用电舒适度造成较大的影响，尤其对于设备的运行、能效的利用、居民用电的舒适度而言更是如此^[1]。

1.2 电压波动产生的原因分析

电压波动的产生原因分为外部因素、内部因素两种。外部因素有负荷波动、气候变化等，气温变化引起负荷增加或者减少，电力负荷突变（大型设备启动、停止）等。内部因素主要是由于配电网结构、设备特性

以及控制策略所造成的。例如：配电网中因为设备工作不稳、线路电阻、电抗发生变化都会造成电压的波动。这些因素对于电压波动的分析、控制来说都是有利的。

1.3 电压波动的度量指标与影响分析

电压波动度量指标有电压幅度、偏差、频率。电压幅度体现电压波动的强弱，电压偏差表示电压波动同理想电压值之间的偏离情况，电压频率体现电压波动出现的频次。影响电压波动的范围一般会波及一定的地理区域，时段性的波动是由负荷的变化所引起的周期性变化，昼夜之间的负荷差别就是其中的一个例子。电压波动给电力质量造成诸多影响，可能会致使设备遭到破坏、能源被浪费或是电力供应变得不稳，需要借助有效的调控手段来加以改善。

2 配电网电压波动机理分析

2.1 电压波动的传输特性与传播机理

电压波动在配电网中传输的特性及传播机理，是与电网结构、负荷分布、设备特性等有关的。电压波动在电网中一般要经过电网的电气阻抗以及网络拓扑结构才能被传播。当电压波动源出现在某个节点的时候，由于线路的电阻、电抗以及电容效应，该节点产生的波动会沿线路传播。波动的传播速度、衰减情况、频率范围都会受到配电网结构和负荷状况的影响。长距离输电线路、负荷密集区等都会使电压波动衰减缓慢，影响范围也大。电网并联连接会造成各个地区电压波动相互影响，进而造成电压波动整体传播方式的变化^[2]。

作者简介：李健勇（1975-），男，本科，工程师，研究方向：工厂供配电及运行维护管理。

2.2 配电网中典型电压波动源的分析

配电网的电压波动源有非线性负荷、负荷突变、配电网设备故障等。非线性负荷,即电力电子设备(变频器、整流器等)以电流的非线性吸收方式来产生电压波动。负荷突变,在大型电动机启动的时候就会出现瞬时电压下降的情况,从而对周围的设备造成干扰。配电网设备发生故障或者保护动作时,会造成电压突然下降或者波动,从而影响电网的稳定性。配电网老化设备、非理想保护系统都会加重电压波动问题,降低电力质量及供电可靠性。

2.3 电压波动的区域性与时段性特点

电压波动具有明显的区域性、时段性特征。区域性特点即电压波动范围,与负荷集中度和电网结构有关。例如:在大型工业区或者居民区,电压波动会比较大,在负荷比较低的时候,电压波动会小一些^[3]。时段性特点同负荷变化的周期性有关,白天和晚上由于用电负荷的波动,电压波动的幅度和频率也会有所不同。高峰负荷期间电压波动会更加频繁、剧烈。理解这些特点可以准确找到电压波动的原因,也可以给调控策略提供依据。

2.4 电压波动对电网稳定性与电力质量的影响

电压波动对电网稳定性、电力质量的影响不能小视。过大的电压波动会造成电网上的变压器、电动机、照明系统等设备性能下降,严重时还会造成设备的损坏,缩短设备的使用寿命。电压波动过大容易造成设备的不稳定运行,提高设备故障率,降低电力系统可靠性。电压波动还会造成电力质量问题,即设备误动作、生产效率降低、不稳定的用电体验。特别是在工业、商业用电方面,电压的波动都会对生产线造成影响,进而引起生产效率降低甚至停产。加强电压波动的调节,对保证电力质量、设备安全起着重要的作用。

3 配电网电压波动的建模与仿真分析

3.1 电压波动的数学模型

配电网电压波动的数学模型主要是用建立电压波动的动态方程来描述电压随时间的变化过程。在模型建立时要考虑到电网的拓扑结构、电气阻抗(电阻、电感、电容)和负荷特性等各方面的影响。电压波动的因素有负荷波动、设备特性、环境因素、电网结构等。这些因素可以用参数化建模来模拟电压波动的大小、频率等。常用的建模方法有基于电力系统分析的稳态模型和动态模型,结合负荷建模和设备模型,可以很好地反映配电网中电压波动变化的规律,给后面调控策略的设计、优化提供理论依据。

3.2 基于仿真平台的电压波动分析

在配电网电压波动的仿真分析过程中,通常采用 MATLAB/Simulink、PSCAD/EMTDC 和 DIgSILENT PowerFactory 等主流仿真工具。MATLAB/Simulink 主要用在电力系统动态仿真上,可以准确地分析出负荷波动、负荷突变对电压波动的影响,PSCAD/EMTDC 适合于高频、瞬时电压波动的模拟,特别适合于快速变化的电压响应,DIgSILENT PowerFactory 更加强大,能进行复杂的电网稳定性分析,给出准确的电网模型,评价电压波动对系统的影响。利用仿真工具可以模拟出不同的负荷、设备故障等情况造成的电压波动,给调控技术的改进提供数据支撑。

电压波动的动态仿真要依照配电网实际运行参数来创建详细的电气网络模型。在仿真时,先将配电网拓扑结构、电气参数(电阻、电感、电容等)和实际负荷曲线导入进来,再设置工况条件,即负荷变化、电力电子设备的干扰或者电网故障等,从而模拟出电压波动的过程。仿真软件利用计算各个因素在网络中传播时对电压的影响来得到电压波动的大小、频率和波动时间。利用仿真可以得到各种条件下电压波动的变化规律,进而提出合理的电压调节策略^[4]。

为了保证仿真结果的正确性,一般要将仿真所得的数据和实际案例中所测得的数据加以比较。以某工业区为例,仿真得到的电压波动数据和现场实际监测的电压数据比较,误差小于 5%。通过对比可以检验仿真模型的有效性,仿真可以真实地反映电网中电压波动的情况,在不同的负荷、不同的电网故障条件下,仿真结果与实际情况基本一致。通过对上述两种调控方案的比较,可以对不同的调控方案实际的应用效果进行评价。为了提高仿真模型的准确性,将电网阻抗、负荷变化速率、设备响应特性等参数做实际数据的调整。经过优化后的模型能更准确地反映出电网运行时实际电压波动状况,给后面电压波动调节技术设计、优化提供更加准确的数据支撑和理论依据,保证调节方案在实际应用中可以有效提高电网稳定性以及电力质量。

4 配电网电压波动调控技术

4.1 电压波动的常见调控策略

电压波动的常规控制手段有变压器抽头调节、调压装置等。这些技术是通过改变配电网的电压水平来解决由于负荷变化、电压不稳定所造成的用电问题。变压器抽头调节就是改变变压器的接点来调节电压输出,以满足不同的负荷下电压的变化。调压装置一般是由自动调压器(AVR)和稳压设备组成,可以对电压

进行实时监测,并且可以自动调节,保证电网电压在合理的范围内。传统的控制方式简单、可靠,但是当负荷波动大或者电网结构复杂的时候,就会出现响应迟缓、调整范围小的情况。

随着电力电子技术的迅速发展,电压波动调节手段也越来越多地使用了先进的电力电子设备,比如静态无功补偿装置(SVC)、FACTS(灵活交流输电系统)等设备。SVC可以控制无功功率的供给和吸收,对电压波动做出迅速反应,保证系统电压稳定。FACTS设备就是调节电压、无功功率、电流等参数来改善电网运行状况,减小电压波动的影响。这些电力电子技术比传统的控制方式要快、准,更适用于对高负荷变化、复杂的电网进行调节。

由于智能化技术的发展,电网自动化、智能控制系统成了电压波动调节的主要方式。电压调节自动化系统可以利用智能算法对电网电压进行实时监测,并根据负荷预测以及实时数据来自动调节变压器、调压装置等调控设备的工作状态,从而提高电压调节的响应速度和准确性。智能调控策略用大数据、人工智能等技术,对电压波动进行预测和优化调节,达到电网电压智能化、精细化管理的目的。这些智能调控手段既可提升调控速度,又可在电网实际运作情况之下作出相应改变,从而保证电压稳定以及电力品质。

4.2 综合调控技术的提出与发展

由于电力系统越来越复杂,传统的单一调控技术已经不能满足配电网中电压波动的高效调节要求。因此,综合调控技术应运而生,依靠各种调控手段的协同作用来达到电压波动的综合控制。该种技术一般会把传统的调节手段(变压器调节、无功补偿装置)同新的电力电子技术(FACTS、SVC设备)结合起来,用多层次、多维度的调节方法来改善电压波动的反应。负荷高峰时传统的调控方法可以调节整体电压水平,但是电力电子技术能提供精细的无功功率调节,保证电压迅速稳定。综合调控技术可以达到更好的适应性,使电网在负荷变化时有较好的电压稳定^[5]。

利用大数据以及人工智能技术可以对电压波动进行智能预测和调控。通过电网运行数据的实时采集、分析,采用机器学习算法对电压波动的发生趋势、频率进行预测,进而提前采取措施进行调控。预测性控制提高了电压调节的速度,并且可以根据历史数据以及实时负荷情况来自动地调整控制策略。智能算法可以自行对各个调节设备进行配置和运行方式的改变,减少人工干预,从而提高整个电网的自愈能力和稳定性,在电力系统中对电压波动进行有效的控制。

4.3 电压波动调控系统的优化与经济性分析

电压波动调控系统优化主要是提高系统响应速度、精度、稳定性。随着电网运行越来越复杂,传统的调节设备不能满足快速变化的负荷需求,所以综合调控技术、智能化调度策略被用作改善系统性能的主要手段。利用动态调节电压调节设备的工作状态,配合电力电子技术,在很短的时间内对电压波动进行准确的控制,防止电压波动给电力质量以及设备带来不良的影响。优化调控系统还能降低设备运行负荷、减少不必要的能源消耗,使电压调节更加高效、节能,从而提高电网运行效率。

调控系统投入和运行成本的分析,是评判其经济性的一个重要标准。新型调控技术(电力电子设备、智能控制系统等)可以明显提高电压调节的效率,但是它们的初始投资大,维护成本高。因此,成本效益分析就显得特别重要。在经济性分析中要考虑到系统初期投资、长期运行维护费用以及能效提高所节约的费用。将它同传统的控制方式加以比较,就可以评判它对于电压波动的调节效果。根据综合考虑调控效果和成本来制定合理的调度策略、设备选型,可以降低运营成本,保证电网在电压波动的时候高效稳定地运行。

5 结束语

本文通过研究配电网电压波动的机理以及综合调控技术,对电压波动的定义、产生原因及对其电网稳定性、电力质量的影响进行分析。利用建立的电压波动数学模型和仿真分析来验证不同的调控技术效果,提出综合调控技术的优化方案。综合调控技术是将传统的控制方法同现代的电力电子设备结合起来,依靠智能控制以及大数据分析来对电压波动进行准确的调节。就经济性来说,尽管初始投资较大,但是它显著改善了电网的调控水平及系统的稳定性,给电网的经营带来长久的经济效益以及可靠性改善。

参考文献:

- [1] 岳柒睿,马学超.分布式能源并网对电压质量的影响与优化策略[J].光源与照明,2025(12):161-163.
- [2] 邢宁宁,孙跃强,李琳.配电网中分布式发电系统的电压波动抑制技术研究[J].电气技术与经济,2025(12):7-10.
- [3] 周要.基于边缘网关的分布式光伏自动电压控制技术研究[J].价值工程,2025,44(17):144-146.
- [4] 周绍昕.智能配电网的电压稳定性分析与控制技术[J].灯与照明,2025,49(03):138-140.
- [5] 谢鹏腾,张宝生,翟鹏明.配电网中三相电流不平衡对电压质量的影响[J].云南电力,2025(04):6-10,21.

基于 BIM 技术的绿色建筑 工程项目成本精细化管理

齐成成, 马 添

(山东宏祥工程项目管理有限公司, 山东 东营 257091)

摘 要 为提高建筑全生命周期管理效率, 实现运维阶段成本管控与设备管理的精细化、智能化, 本文以 BIM 技术为支撑, 利用平台数据回写与历史数据追溯功能开展成本后评估工作。通过对比实际运行成本与设计预测成本, 自动生成成本偏差分析矩阵, 并基于偏差数据完成模型参数回溯与预算库动态修正。同时, 借助 BIM 三维可视化优势, 实现各类设备空间位置、运行状态及基础信息的直观展示, 有效提升设备运维管理的效率与精准度。结果表明, 该方法可为建筑运维阶段的成本控制、设备管理及决策优化提供有效技术支持。

关键词 BIM 技术; 绿色建筑; 成本精细化管理; 全生命周期

中图分类号: TU17; TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.024

0 引言

随着“双碳”目标的持续推进, 绿色建筑凭借在节能减排、提升建筑品质等方面的显著优势, 已成为我国建筑业转型升级的重要发展方向。与此同时, 绿色建筑项目具有技术集成度高、新型材料使用多、机电系统复杂等特点, 在成本管理上存在难点, 如设计变更频繁、工程量清单编制困难、各专业之间相互影响等。传统的粗放式成本管理模式已经不能满足绿色建筑精细化管理的要求。建筑信息模型 (BIM) 技术具有可视化、协调性、模拟性、可出图性和信息集成性等特点, 为绿色建筑全生命周期成本精细化管理赋予了新的技术途径。本文结合具体工程项目实例, 对 BIM 技术在绿色建筑各阶段成本管理中的具体应用要点进行分析, 为类似项目的成本优化和控制提供参考。

1 项目概况

某市科技创新中心办公楼总面积约为 4.8 万 m^2 , 地上 12 层, 地下 2 层, 为三星级绿色建筑。项目将低碳、节能、舒适作为设计目标, 广泛使用高性能围护结构、地源热泵空调系统、光伏一体化屋顶和智能照明控制等绿色技术。项目总投资约为 2.6 亿元, 绿色建筑增量成本预算约为 1 800 万元。由于绿色技术集成度高、新型材料应用多、机电系统复杂, 项目在成本管理方面存在设计变更频繁、工程量清单编制困难、各专业协调要求高等诸多问题, 需发挥 BIM 技术优势, 采取

精细化成本管理方式, 保证绿色目标的实现和投资效益的最大化。

2 绿色建筑工程项目成本管理难点

2.1 绿色新技术应用导致清单漏项多

本项目使用地源热泵系统、光伏一体化屋顶、高性能三银 Low-E 玻璃幕墙等绿色建筑新技术。虽然提高了建筑节能性, 但是工程量清单编制上存在巨大的困难。部分绿色技术在本地的应用还不成熟, 缺少可以参照的定额标准和市场计价依据, 造成清单编制过程中出现漏项、错项的情况。光伏一体化屋顶包含光伏组件、逆变器、并网柜等许多设备, 安装工艺繁杂, 辅材用量很难准确预估, 前期清单里漏掉了一些电气接线盒和防水处理工序, 后期补充签证导致成本增加约 120 万元。除此之外, 地源热泵系统埋管换热器部分由于地质条件的不确定性, 实际钻孔深度和数量均大于设计预估, 清单中没有充分考虑到地质勘探不到位造成的工程量变化风险, 增加成本控制难度^[1]。

2.2 多专业交叉施工, 设计变更频繁

该项目绿色建筑技术集成度很高, 包含建筑、结构、暖通、给排水、电气、智能化等各个专业深度耦合。地源热泵系统和新风热回收系统的管线布置同结构梁、建筑幕墙等存在大量的空间交叉。施工过程中由于各专业设计图纸之间未能有效协同, 在现场经常会出现管线碰撞、预留洞口位置偏移等问题, 不得不进行设

作者简介: 齐成成 (1995-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程管理。

计变更。根据统计可知,地下室设备夹层区域累计发生管线综合调整变更 30 余项,只此区域由于拆改造成直接损失就超过了 80 万元。另外,光伏一体化屋顶安装应同幕墙专业紧密配合,但光伏组件尺寸改变造成幕墙龙骨重新加工,不但增加材料成本,而且影响关键节点的工期,从而间接提高管理成本和人工成本。由于多专业交叉施工的复杂性,传统事后成本控制模式无法应对变更问题。

2.3 绿色建材价格波动大,预算控制难

绿色建筑项目使用新型环保建材和高性能设备,这些材料没有形成大规模生产以及完善的市场供应能力,价格受原料价格、政策补贴、市场需求等因素影响较大,波动也比较大。本项目中三银 Low-E 玻璃幕墙单价在招标阶段为 980 元/ m^2 ,但是由于镀膜工艺需要的稀有金属价格上升,实际采购单价上涨为 1 150 元/ m^2 ,超出预算约 210 万元。光伏组件价格受行业补贴政策变动的影响较大,给采购造成一定的成本压力。另外,部分绿色建材(高性能隔音砂浆、环保型保温材料等)本地供应商很少,议价能力弱,采购成本难以控制。传统的预算编制方式是以静态的价格为依据,缺少对价格走势的动态跟踪和预警,造成预算控制处于被动的地位^[2]。

3 基于 BIM 技术的绿色建筑成本精细化管理要点

3.1 设计阶段的 BIM 绿色方案比选与限额设计

在设计阶段,将绿色建筑的性能模拟与成本数据结合,从而达到方案比选量化决策目的。传统模式下,绿色建筑方案选择更多地从技术指标、节能效果等角度出发,对于不同方案所对应的增量成本没有直接的对比,容易造成设计方案超出投资预算现象,利用 BIM 平台可以将建筑构件的几何信息、能耗参数和成本数据上传至三维模型中,从而创建出可视化的成本决策支持系统。以本项目光伏一体化屋顶为例,用 BIM 模型分别建立单晶硅、多晶硅、薄膜三种光伏组件的三维模型,关联组件效率、使用寿命、市场价格等数据,快速生成三种方案在 2025 年运营周期内发电总量、初期投资成本和投资回收期对比表,最终选择的单晶硅方案实现了技术性能和经济性的最佳匹配。

限额设计是控制绿色建筑增量成本的重要手段,BIM 技术为限额设计提供专业化的数据支持。绿色建筑项目中节能目标与成本目标互相制约,传统模式下各专业设计人员只在自己的领域内进行限额指标分解,缺少跨专业之间的联动以及实时反馈。以 BIM 为依托的协同设计平台,可以将项目总成本限额逐层分解到

各专业、各系统以及各重要构件上,在设计过程中随时观察成本消耗状况^[3]。本项目中项目团队在 BIM 模型上设置地源热泵系统的成本上限为 950 万元,当暖通专业设计人员调整埋管深度和数量时,BIM 模型会联动工程量并更新成本数据,如果接近或者超过限额,系统就会发出预警提示,从而避免了设计完成后才发现成本超限的被动局面。

3.2 施工阶段的 BIM 5D 的动态成本控制

施工阶段是绿色建筑成本实际发生的阶段,BIM 5D 技术将三维模型同进度计划(4D)、成本数据(5D)结合起来,达成施工成本的动态化、精细化管理。传统施工成本管理中,工程量计算、进度款支付、材料采购这些环节常常互相分割,数据更新缓慢,不能迅速察觉成本偏离问题。以 BIM 5D 平台为基础,项目组可以按照施工进度自行产生各个阶段的工程量清单以及资金安排,从而达到量价双控的目的。本项目中对于绿色建筑特有的高性能三银 Low-E 玻璃幕墙,BIM 模型根据施工流水段将每一个区域的玻璃规格和数量精确提取出来,与采购订单、进场验收、安装进度相联动,当实际用量超过模型理论用量 5% 时,系统会发出报警信息,提醒管理人员去检查是否存在损耗超标或者施工失误的情况,从而有效地降低了材料成本超支的风险。

同时,基于 BIM 5D 技术建立物料消耗记录和限额领取机制,实现对高价环保建材的准确核算,如光伏组件、节能保温板材等产品,并在模型参数中嵌入定额耗损量,实现领用、消耗、结余全程线上溯源。根据现场劳动力排班表和机械台班数据,对人工和设备的动态费用进行实时汇总,并自动产生阶段性成本分析报表,准确锁定超支和亏损节点,方便管理者对施工队伍调配和机械进场计划进行优化。在此基础上,还可以将整个绿色建筑材料市场的价格信息进行整合,预测绿色建材市场价格变化,并通过批量集采、错峰备货等手段来缩小采购的差价,从而强化工程动态价格调整 and 风险控制能力。

绿色建筑项目中,机电系统复杂、专业交叉多,施工过程中出现的碰撞、变更等都会造成成本失控,BIM 技术的碰撞检测、变更管理功能可以在施工前就发现并解决设计冲突,大大降低现场返工的成本。本项目地下室设备夹层区域用 BIM 技术做管线综合碰撞检测,共发现暖通管道和结构梁、电气桥架和消防管道之间的硬碰撞点 127 处,在施工前完成管线排布优化,防止现场拆改。另外,利用 BIM 技术进行变更管理,所有设计变更通过模型模拟,掌握变更工程量和对成本的影响,经过多方确认后才能实施。项目共处理变

更签证 56 项, 平均响应时间由原来的 7 天缩短到现在的 2 天, 由于变更造成额外成本比同类项目低约 18%。

3.3 运维阶段的 BIM 绿色运营成本预测

绿色建筑的运营成本在整个生命周期中所占比例比较大, 传统运维管理模式, 设备信息分散在纸质文档或者电子表格中, 没有形成统一的数据平台, 运营成本的预测和控制很大程度上依靠经验判断。BIM 技术将竣工模型和运维数据结合, 为绿色建筑运营成本精细化管理赋予了信息集成平台。本项目中, 项目组将地源热泵机组、光伏逆变器、新风机组等重要设备的型号、生产厂家、安装时间、保修期限、维修周期等信息输入 BIM 模型中, 创建数字化设备资产信息数据库^[4]。依托 BIM 平台的数据回写与历史数据追溯机制, 开展成本后评估工作, 可将实际运行成本与设计预测值进行对比分析, 并在平台内自动生成成本偏差分析矩阵。相关偏差数据可用于模型参数回溯与预算库动态修正。运维人员可通过 BIM 模型直观查看各类设备的空间位置、运行状态及基础信息。系统根据设备的运行时长和维护周期自动产生预防性维护计划, 并预测每次维护需要的人工和材料成本, 实现了由被动维修到主动预防的转变, 大大延长设备的使用寿命, 降低由于突发故障造成的高额维修费用。

BIM 技术对于运营能耗成本预测有着重要的作用, 可以和楼宇自控系统 (BAS) 的数据进行对接, 从而达到能耗数据的可视化监控以及精细化分析的目的。绿色建筑中的太阳能光伏系统、地源热泵系统等可再生能源设施的运行效率直接影响到运营成本, 传统的能耗数据是以月度总表的形式, 不能对高能耗的区域和时段进行定位。BIM 模型同能耗监测平台达成数据互通, 可以及时显示各个楼层、各个区域的能耗分布状况, 用热力图的形式表现能耗异常区域。运维人员发现地下二层新风系统能耗比设计值高 22%, 经排查是由于传感器故障造成新风阀常开, 修复后每月节约电费约 1.8 万元。另外, 用历史能耗数据和气象预测做 BIM 平台下一年度运营能耗成本预测, 给物业管理部门编制年度预算提供依据, 提高绿色建筑运营成本可控性、透明度。

3.4 全生命周期的 BIM 协同平台信息共享机制

绿色建筑项目包含建设单位、设计单位、施工单位、造价咨询单位、绿色建筑咨询单位等诸多主体, 传统模式下各个主体各自使用不同的软件系统以及数据格式, 信息传递存在着严重的壁垒, 成本管理当中出现的数据孤岛问题更为严重。BIM 协同平台依靠创建统一的数据交换标准和云端协作环境, 使项目全生命

周期信息得到整合共享。本项目创建以云为架构的 BIM 协同管理平台, 所有参建方可以在平台上查看模型、管理文档、进行流程审批和录入成本数据。绿色建筑咨询单位将节能计算参数和设备选型要求上传到平台, 造价咨询单位可以从 BIM 模型中提取工程量并进行清单编制, 避免由于图纸版本不一致造成的重复计算和计价错误, 提高成本数据的准确性、一致性。

此外, 创建信息共享机制, 可以提高数据传递的速度, 改善成本管理过程中的决策水平。绿色建筑项目增量成本认定和绿色专项奖励资金申报过程中, 一般要由多方共同对绿色技术的实施情况以及成本投入进行确认, 在传统的模式下, 各个方面的资料分散保存, 信息不对称容易造成争议和扯皮^[5]。根据 BIM 协同平台, 所有的设计变更、技术核定单、现场签证、设备采购合同等资料实现电子化归档, 与模型构件一一对应, 形成完整的成本追溯链条。本项目绿色建筑三星级认证申请时, 评审机构要求提交绿色技术增量成本的详细证明材料, 项目团队利用 BIM 平台迅速调取与各个绿色技术有关的模型构件、采购合同、施工记录和成本数据, 完整地展示了增量成本构成, 顺利通过评审。

4 结束语

本文以某三星级绿色办公楼项目为研究对象, 基于 BIM 技术的绿色建筑成本精细化管理要点做了详细的阐述。从研究结果可知, BIM 技术可以贯穿项目全生命周期。在设计阶段用方案比选和限额设计实现成本前置控制; 在施工阶段用 BIM 5D 平台做动态成本监控和变更管理, 大大减少返工和资源浪费; 在运维阶段通过与楼宇自控系统的集成, 为运营能耗预测和设备维护提供数据支持。全生命周期的 BIM 协同平台打破了信息壁垒, 保证成本数据的精确且能够追溯。

参考文献:

- [1] 钟月生. BIM 技术在绿色建筑工程造价控制中的应用研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(11): 178-180.
- [2] 段孟, 王彬, 康燕敏, 等. BIM 技术在绿色建筑工程造价控制中的应用研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(06): 21-23.
- [3] 赵悦. 新型绿色建筑工程造价预算与成本管理研究[J]. 绿色中国, 2025(04): 160-162.
- [4] 杨改静, 时海铭. 试析新型绿色建筑工程造价预算与成本管控[J]. 中国住宅设施, 2024(03): 4-6.
- [5] 李晓艺. 绿色建筑工程造价预算及其成本管理[J]. 四川水泥, 2020(06): 219.

老旧建筑外墙改造中反射隔热涂料的节能效果分析

汤加富

(上海建工四建集团有限公司, 上海 201103)

摘要 针对老旧建筑薄抹灰外保温系统出现的起皮、空鼓与剥离等问题, 本研究以安全为前提, 采用铲除失效层、双遍抗裂砂浆压入网格布、涂覆高反射与高发射呼吸型隔热涂层等措施, 构建系统性外墙更新路径。通过参数化选型与过程控制, 结合稳态能量模型、现场测试与能耗模拟评估效果。结果显示, 外表面温度由 45℃ 降至 32℃, 等效传热系数由 0.8 W/(m²·K) 降至 0.5 W/(m²·K), 夏季空调用电由 790 kWh 降至 650 kWh, 节能率达 17.7%, 室温回落 2℃~3℃, 每户年减排 CO₂ 约 60 kg~90 kg。结果表明, 该方案在湿热气候下兼具安全、耐久与节能优势, 为老旧高层外墙修缮提供了可复制的路径。

关键词 反射隔热涂料; 外墙修缮; 薄抹灰外保温; 热湿耦合; 夏季节能

中图分类号: TU767; TU56+1.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.025

0 引言

老旧建筑薄抹灰外保温系统在热湿耦合与界面老化作用下, 普遍出现起皮、空鼓、剥离等问题, 既影响建筑安全, 也加剧夏季空调负荷^[1]。既有高层外墙更新需兼顾结构安全、界面耐久与运行节能^[2]。反射隔热涂料因高反射与高发射特性, 可有效抑制表面温升, 施工扰动小、经济性好, 但其长期效能受基层强度、含湿与节点防水影响^[3-4]。本研究以上海市闵行区典型高层住区为对象, 构建从基层修复到表层涂装的系统化更新路径, 结合参数化选型、施工控制与实测评估, 探索适用于湿热气候区的外墙修缮策略, 为老旧小区节能改造提供工程依据。

1 工程概况

1.1 项目背景与现状问题分析

上海市闵行区爱博六村(2012年建成)与爱博七村(2013年建成)均为13层高层住宅, 外墙采用无机保温砂浆薄抹灰外保温系统。该材料因多孔结构及现场湿作业特性, 在热湿耦合与界面老化作用下耐久性问题突出。现场排查显示, 涂料起皮、粉刷层开裂与空鼓普遍, 空鼓率分别为18.2%和14%, 局部超46%; 保温层拉伸黏结强度仅0.01 MPa~0.03 MPa(远低于0.10 MPa), 抗裂防护层厚度2.0 mm~2.2 mm(未达3 mm~5 mm), 且网格布搭接与压入不规范, 削弱防

护层连续性与抗裂性能。由此导致雨水渗入与热循环放大层间剥离及饰面脱落风险, 并增加夏季空调负荷与运维成本^[5]。

1.2 修缮方案总体设计思路

鉴于既有外墙薄抹灰系统存在层间剥离及抗裂层偏薄等失效问题, 本研究以安全为前置约束, 围绕耐久与夏季节能协同目标, 对外立面实施系统性更新。将原有保温及疏松粉刷层整体铲除至坚实基层, 清理并封闭界面后, 分两遍抹压聚合物改性抗裂砂浆(总厚≥3.0 mm), 压入耐碱玻纤网格布, 搭接不小于100 mm, 洞口及阴阳角等部位双层加强。构建呼吸型反射隔热涂层体系, 底涂增强附着, 中涂采用高太阳反射率与高半球发射率配方, 面涂具备耐污耐候性能。细部节点完善滴水线、泛水构造, 并复合密封处理; 全过程依据相关规程控制基层含水率与环境温湿度, 实现结构安全、界面耐久与节能目标的协调统一。

2 反射隔热涂料改造方案与技术要点

2.1 反射隔热涂料的性能参数与选用依据

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村外墙薄抹灰系统层间剥离与抗裂层偏薄问题, 将反射隔热体系作为与基层修复协同的表层构造, 在双遍聚合物改性抗裂砂浆与耐碱网格布形成稳定界面后, 选用太阳反射比不低于0.85、半球发射率不低于0.80的呼吸型水

作者简介: 汤加富(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城市更新。

性涂层，该取值符合《建筑反射隔热涂料节能检测标准》（JGJ/T 287-2014）的相关检测要求，旨在通过高反射与高辐射散热降低涂层吸热，并利用水汽透过与抗污保持能力削弱夏季表面温升、层间受潮与黏结衰减的耦合效应。为适配上海湿热气候与更新后基层物理特性，参数体系需同时覆盖光学性能、界面力学、耐候稳态与湿部通透性，具体性能参数见表 1。

表 1 反射隔热涂料性能参数表

参数	选用指标	试验方法	适配性说明
太阳反射比	≥ 0.85	ASTM C1549	降低吸收辐射热，减弱表面温升
近红外反射率	≥ 0.90	ASTM C1549	针对上海夏季强日照的主频段
半球发射率	≥ 0.80	ASTM E408	提升夜间与阴影条件下散热能力
反射保持率	≥ 0.80 经过 1 000 h 加速老化	GB/T 1865	保持长期节能效益与色稳性
太阳反射指数 SRI	≥ 100	ASTM E1980	综合反射与辐射，表征温升潜力
拉伸粘结强度	≥ 1.0 MPa 对水泥砂浆基层	GB/T 5210	匹配双遍抗裂砂浆界面强度
水汽透过率	≥ 900 g/(m²·24h)	ASTM E96/E96M	减少残余潮气引致的鼓泡与剥离
毛细吸水系数	≤ 0.10 kg·m ⁻² ·h ^{-0.5}	EN 1062-3	抑制雨淋状态下的渗入途径
耐污性	反射率衰减 ≤ 15% 人工污染后	企业方法参照 EN 1062	减缓表面变灰导致的热吸收回升
加速耐候性	1 000 h 粉化 ≤ 1 级色差 ΔE ≤ 1.5	GB/T 1865	适应华东高湿高温循环
生物耐久性	霉菌生长等级 0	GB/T 1741	降低北向与背阴面微生物风险
VOC 含量	≤ 50 g/L	HJ 2537	满足既有居住区施工环境要求
推荐干膜厚度	200 μm ~ 300 μm	—	实现反射与遮蔽协同的必要厚度

底中面顺序施工，干膜厚度控制 70 μm 至 100 μm。窗框、穿墙管等节点采用密封胶与泛水板加强防水，变形缝设弹性密封胶。全过程控制温度 5℃至 35℃、湿度 85% 以下，关键工序抽检附着着力并记录参数。

2.3 反射隔热涂料节能原理与理论计算模型

鉴于上海市闵行区爱博六村与爱博七村夏季日射负荷集中且外立面已由薄抹灰体系更新为抗裂砂浆加反射隔热涂层的复合表层，本研究把节能机理归纳为减少短波吸收与增强长波辐射两条路径，叠加较高水汽通透度以抑制含湿导致的导热系数上升，从而把外表面温度与墙体导入的热通量同步降低。基于稳态能量平衡，可把外表面温度满足的平衡关系写为下式，式中把辐射项与对流项共同表征为外表面的散热能力：

$$\alpha I = h_c(T_s - T_a) + \varepsilon \sigma(T_s^4 - T_e^4) \tag{1}$$

式（1）中， α 表示日射吸收率，无量纲， I 为太阳辐照度（W/m²）， h_c 为对流换热系数（W/(m²·K)）， ε 为半球发射率，无量纲， σ 为斯特藩常数（W/(m²·K⁴)），

2.2 外墙改造施工工艺与关键节点控制

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村外立面失效问题，施工工艺分为去除、修复、增强与表层构筑四个阶段形成闭环控制。铲除既有保温层至坚实基层后，清理并涂刷界面底涂，找平平整度偏差不大于 3 mm。抗裂层采用双遍聚合物砂浆与耐碱网格布，总厚不小于 3 mm，网格布搭接不小于 100 mm。反射隔热涂层按

T_s 为外表面温度（K）， T_a 为环境空气温度（K）， T_e 为等效辐射温度（K）。

在获得外表面温度后，结合由混凝土或砌体、找平层与内抹灰构成的一维稳态传热路径，可把由室外向室内的穿墙热通量按总热阻法进行估算，其计算式如下：

$$q = \frac{T_s - T_i}{R_w} \tag{2}$$

式（2）中， q 表示穿墙稳态热通量（W/m²）， T_i 为室内侧空气温度（K）， R_w 为外墙从外表面到室内侧表面的总热阻（m²·K/W）。

从机理上看，选用高太阳反射比以降低并把入射短波吸收项明显压低，同时配置高半球发射率以提高辐射散热项的权重，可把平衡温度拉低并使墙体传入热通量按比例衰减；当涂层保持较高水汽透过且控制毛细吸水后，材料含湿与导热联动被减弱，上述两个公式中的温度与热阻取值更趋于稳态设定，进而与本工程对峰荷削减与围护耐久协同的目标相契合。

3 反射隔热涂料节能效果评估与分析

3.1 改造前后外墙热工性能测试结果分析

针对上海市闵行区爱博六村与爱博七村夏季强辐射高湿环境,研究在晴热典型日对南西向立面进行红外成像与热流计实测,对比改造前后外表面温度与传热系数。观测结果表明,改造前外表面平均温度约 45℃,形成大面积高温带;改造后高反射高发射表层使峰段温度降至 32℃,热场分布均匀。该温降缩小了外表面与空气温差,拉平了墙体内部温度梯度,有效抑制穿墙导热驱动力,从而减少室内净热得量。通过 24 h 稳态热流反演,外墙传热系数从改造前约 0.8 W/(m²·K) 降至改造后约 0.5 W/(m²·K),这源于界面层次重建后含湿水平下降及导热路径重整,叠加表层反射辐射使外表面接近室外气温边界条件。同时,改造前窗间墙

与阳角处热斑在网格布双层加强及泛水细部完善后得以消除,边缘热失配明显缓解,为后续夏季空调负荷评估提供了物理依据。

3.2 夏季空调能耗节约效果评估

运用监测校准的能耗模拟与账单核对双轨法,基于上海典型气象年条件评估上海市闵行区爱博六村与爱博七村改造后夏季空调能耗节约效果。改造前每户空调电耗约 800 kWh,改造后降至 640 kWh 至 680 kWh,节能率稳定在 15% 至 20% 区间,面积归一化强度亦协同下降(见表 2)。节能率定义如下:

$$\eta = \frac{E_{\text{before}} - E_{\text{after}}}{E_{\text{before}}} \quad (3)$$

式(3)中, η 表示节能率,无量纲, E_{before} 为改造前夏季空调用电量,单位为 kWh, E_{after} 为改造后夏季空调用电量,单位为 kWh。节能收益归因于高反射高发

表 2 改造前后夏季空调能耗对比表

小区	样本户数	户型面积 /m ²	改造前电耗 /kWh	改造后电耗 /kWh	节能率 /%	电耗强度前 /kWh/m ²	电耗强度后 /kWh/m ²
爱博六村	120	90	800.0	660.0	17.5%	8.9	7.3
爱博七村	110	80	780.0	640.0	17.9%	9.8	8.0
综合平均	230	85	790.0	650.0	17.7%	9.3	7.6

射削减显热吸收、界面含湿下降降低导热系数、热斑消除优化冷负荷峰谷差,共同实现电耗与强度协同降低。

3.3 改造后综合效益分析

改造后综合效益体现在负荷、舒适与耐久三个维度协同改善。按户计量口径折算,年节约电耗约 120 kWh 至 160 kWh,单位建筑面积年节约约 1.3 kWh/m² 至 1.7 kWh/m²,冷负荷峰谷波动显著趋缓,配电侧需管理空间得到有效释放。按华东电网边际排放因子折算,每户年减排约 60 kg 至 90 kg 二氧化碳当量,小区尺度汇聚形成可度量需求侧碳减排增量。室内舒适度方面,西南向客厅晴热日运行温度回落约 2℃ 至 3℃,空调压缩机运行时间缩短,夜间残余热清空加快,噪声与冷风不适感缓解。耐久层面,抗裂砂浆加网格布复合界面降低二次开裂与剥离概率,呼吸型涂层拆解含湿导热耦合链,渗水节点系统围合控制坠落与渗漏风险。反射隔热涂层使用寿命不低于 15 年,外立面再涂周期有望延长至 10 年至 12 年,维护成本与扰民频次同步下降,为老旧高层成套更新提供可复制路径。

4 结束语

本研究针对老旧高层住宅薄抹灰外保温系统的典型失效模式,提出了从基层加固、抗裂增强到高反射表层涂装的系统性修缮路径。通过将结构安全、界面

耐久与夏季节能目标集成于同一构造体系,实现了外立面性能的整体提升。实测结果表明,该方案在降低外表面温度、改善室内热环境与延长再涂周期方面协同有效,为湿热气候区既有建筑外墙更新提供了工程范式。施工中应重点关注抗裂层施工质量、细部防水构造与界面黏结强度控制。未来可围绕涂层老化规律、色彩热工权衡及全寿命经济性开展深入研究,以支撑反射隔热涂料改造方案与技术更广泛场景下的推广与标准化应用。

参考文献:

- [1] 黄金福.建筑外墙保温节能技术在建筑施工中应用分析[J].中国住宅设施,2025(10):170-172.
- [2] 李俊恺,高飞龙.关于建筑外墙透明隔热反射涂料的技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(01):4-6.
- [3] 陈志佳.辐射型反射隔热涂料热特性分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(11):29-31.
- [4] 王瑾.建筑外墙用反射隔热涂料节能效果的研究[J].福建建材,2023(05):81-84.
- [5] 李金洋,张淳劼,范程龙,等.夏热冬冷地区建筑外墙反射隔热涂料施工技术[J].绿色筑,2022,14(06):87-90.

面向智慧城市的物联网电子信息系统集成模式创新研究

雷 鹏

(安徽达尔智能控制系统股份有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要 在智慧城市建设背景下, 物联网电子信息系统集成面临碎片化壁垒、传统模式适配不足、安全运维薄弱等现实难题, 制约城市数字化治理效能释放。本文聚焦全域协同、智能升级的核心目标, 针对系统集成的现存困境展开深度剖析, 立足于架构、协同、驱动三大维度搭建创新集成框架, 构建全域一体化架构、生态化协同体系、智能化驱动机制, 同步配套标准化、资源统筹、全周期安全运维三类落地保障策略。这套创新模式打破行业与数据壁垒, 优化软硬件协同效能, 补齐安全运维短板, 推动物联网系统从零散拼接向有机融合转变, 以期为智慧城市精细化、智能化治理提供路径参考, 助力城市治理体系提质升级。

关键词 智慧城市; 物联网; 电子信息系统; 系统集成

中图分类号: TP393.4; TU984

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.026

0 引言

随着数字经济与城市治理深度融合, 智慧城市已成为现代化城市建设的核心方向, 物联网电子信息系统作为智慧城市的底层支撑, 其集成水平直接决定城市治理的精准度与高效性。当前各地智慧城市建设步入深水区, 物联网终端规模持续扩张、应用场景不断丰富, 但传统集成思路与建设模式难以适配多元化治理需求, 资源割裂、效能低下、安全隐患等问题日益凸显, 成为制约智慧城市高质量发展的瓶颈。在此背景下, 突破固有集成思维, 探索适配智慧城市发展的新型系统集成模式, 破解建设痛点、打通协同堵点、筑牢安全防线, 实现物联网资源全域整合与价值最大化释放, 是当下智慧城市建设亟待攻克的关键课题, 对推动城市治理数字化转型具有重要的现实意义。

1 智慧城市物联网电子信息系统集成现存困境剖析

1.1 碎片化建设导致的资源壁垒问题

在智慧城市建设进程中, 各领域独立推进的碎片化布局, 催生了难以破除的资源壁垒, 直接压制物联网电子信息系统集成的整体效能, 让全域协同治理的目标难以落地。当前交通、安防、政务、民生等细分场景的系统建设大多遵循领域专属规范, 终端接入协议、数据传输格式、平台架构标准各行其是, 不同系统之间的接口适配存在天然障碍, 即便具备硬件连通

条件, 也无法实现数据与业务的顺畅对接, 形成大量孤立运行的信息烟囱。数据层面的权属划分缺乏清晰界定, 公共数据、行业数据、商用数据的归属权、使用权、共享权限没有统一规范, 跨部门、跨层级的数据流通面临权责争议与审批壁垒, 海量感知数据被困在单一系统内, 无法发挥全域分析价值。

1.2 传统集成模式的适配性短板

长期以来, 单一化、线性化的传统集成模式已难以适应智慧城市多样化、动态化的发展需要, 成为系统更新升级的核心障碍。传统集成理念过于看重硬件设施的大规模堆叠, 将物联网系统建设等同于终端安装、线路布置这类实体工程, 忽视了软件平台的融合开发与算法优化, 造成系统只能做到基础的数据收集和指令传递, 缺少自主分析、智能调度的核心能力, 智能化程度远远达不到智慧城市治理的标准。更关键的是, 传统模式秉持被动式响应的逻辑, 系统运行完全依靠人工发起的指令, 缺少对城市运行状态的实时察觉和预判机制, 面对交通堵塞、应急突发事件等动态情况, 无法提前做出预警和调节, 只能在事后被动处理, 响应速度和处置成效大打折扣^[1]。

1.3 安全与运维体系的薄弱环节

安全防护的碎片化与运维机制的滞后性, 已成为物联网电子信息系统集成项目推行的主要障碍, 严重削弱了系统运转的平稳性与可靠性。在智慧城市市场景

作者简介: 雷鹏 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电子信息。

中,物联网终端设备呈现数量庞大、分布零散的特征,不少终端没有配专门的安全保护模块,如身份验证、数据加密这类基本防护手段普遍缺失,这便给网络攻击提供了可乘之机;一旦终端被攻破,可能导致感知数据被篡改、用户信息外泄等安全问题,甚至危及整个城市信息系统的运行安全。当前运维方式仍停留在粗放型管理思维,依赖人工巡检和故障报修再处理的流程,缺少全区域实时监控能力,排查故障耗时久、系统修复和功能重启的速度慢,局部小故障很容易扩散蔓延,引发全系统瘫痪。更为关键的是,长效运维机制的缺位进一步放大了运行风险,运维团队缺乏统一操作规范,系统漏洞修补、软件升级、硬件维护等工作缺乏长期规划,面对技术更新与场景扩展难以及时调整,导致系统可持续运行的能力不断下滑,安全隐患和运维漏洞相互交织、恶性循环,让创新集成模式的推进困难重重。

2 智慧城市物联网电子信息系统集成模式创新核心方向

2.1 全域一体化集成架构创新

构建全域统筹、层级清晰的一体化集成架构,是破除资源壁垒、实现全域协同的核心路径,能够弥补碎片化建设的弊端,让物联网电子信息系统形成有机整体。搭建统一感知接入层作为架构底层支撑,摒弃分领域独立接入的模式,兼容各类物联网终端的接入协议与数据格式,实现交通感知、安防监控、环境监测、民生服务等多类型终端的一站式汇聚,消除终端接入的硬件壁垒,保证前端数据采集的全域覆盖。打造中台化数据支撑层作为架构核心枢纽,整合分散在各部门、各领域的感知数据,建立统一的数据清洗、解析、存储标准,打通跨层级、跨领域的数据共享通道,实现数据资源的集中管理与按需调用,让零散数据转化为可支撑全域决策的有效资源^[2]。构建场景化应用层作为架构输出端口,依托底层感知数据与中台数据支撑,打破业务系统边界,整合政务服务、城市管理、应急调度、民生保障等多业务模块,实现多业务系统的联动调度与协同响应,针对不同城市治理场景快速适配功能需求,让集成架构真正服务于智慧城市精细化治理目标,实现从数据汇聚到价值输出的全链路贯通。

2.2 生态化协同集成模式创新

通过多元主体协同构建共建共同的生态化整合体系,可以填补单个主体搞建设的不足,聚合各方面资源推动物联网电子信息系统整合提质增效。首先,需理顺政府、企业、社会三方面联动的分工机制,政府

聚焦整体规划与监督管理核心权责,做好顶层设计与过程监管;企业明确技术研发、项目推进、运行维护的工作范围,发挥技术与市场优势;赋予社会组织、普通群众参与监督、需求表达的渠道,形成权责清晰、各司其职的建设格局,避免主体缺失或者权责重叠带来的建设进度慢。其次,加深产业链上下游之间的配合协作,联合硬件设备生产商、软件研发商、技术服务商、运营单位等多方力量,推动前端终端研发、中端平台建设、后端应用开发全链条衔接,实现软硬件一体化适配与供给,解决传统模式中产业链断开、供应需求不配套的问题,提升整合建设的速度和质量。最后,推动开放接口与行业标准的共建共享,搭建开放式的整合平台,向第三方技术团队、中小微企业开放合规接口和基础数据,吸引社会力量参与场景应用开发、功能优化改进,不断扩展生态体系范围,让整合方式不再限制在政府主导的单一建设路径,形成多方参与、互惠互利的良性生态,为系统整合的持续改进加入动力^[3]。

2.3 智能化驱动集成模式创新

通过深度融合数字智能技术,构建智能化驱动的集成方式,赋予系统自主精准运行能力,精准匹配智慧城市动态治理的核心要求。借助人工智能算法提高全链路数据解析能力,依靠机器学习、深度学习技术对大量感知数据做分类、挖掘和研判,从中提取城市运行态势、民生需求变化、风险隐患预警等关键信息,代替人工完成数据分析与决策辅助,大幅增强集成系统的自主决策与精准调度本事,摆脱传统方式依赖人工操作的局限。把边缘计算和云计算技术融合起来优化数据处理流程,利用边缘计算实现终端侧数据的就近处理,减少数据传输延迟,提高实时响应速度。依托云计算完成海量数据的集中存储与深度分析,实现边缘端与云端的分工协作、优势互补,兼顾数据处理效率与分析深度,解决传统系统数据处理滞后、算力不足的问题。引入数字孪生技术搭建物理城市与数字系统的映射体系,实时复刻城市基础设施、物联网终端、业务流程的运行状态,实现虚拟空间与物理实体的同步联动,借助数字孪生平台模拟治理方案、预判运行风险,让系统集成从被动响应转向主动预判、动态调控,全面提高智慧城市治理的智能化与精细化水平。

3 创新集成模式落地实施保障策略

3.1 标准化体系搭建保障

完善统一、规范的标准化体系,是创新集成模式落地生根的底层支撑,能够消除技术壁垒与建设乱象,

保证系统集成的规范性与兼容性。制定全域统一的终端接入、数据传输专项标准,明确物联网终端的硬件参数、接入协议、身份认证规范,划定数据采集格式、传输加密、编码规则的统一要求,杜绝分领域标准不一导致的适配难题,让各类终端、各环节数据能够顺畅融入一体化集成架构。建立覆盖全流程的系统集成验收与运维标准体系,细化项目建设、功能测试、安全评估、运维管理的考核指标,明确验收流程、运维频次、故障处置的操作规范,让集成建设与后期运维有章可循,避免建设质量参差不齐、运维管理无规可依的问题^[4]。推动跨区域、跨领域标准对接与互认,打破地域壁垒与行业壁垒,整合地方标准、行业标准的核心内容,形成适配全域智慧城市建设的通用标准规范,实现不同区域、不同领域系统集成的无缝对接,为生态化协同集成、跨区域数据共享提供制度保障,确保创新集成模式在各类场景中均可稳定落地。

3.2 资源统筹配置保障

优化全域资源调配机制,使人力、财力、物力资源能够高效整合起来,可以为创新集成模式的高效落地提出坚实的资源保障。统筹财政资金,做到精准投入,把重点放在核心集成项目建设上,合理分配资金用于架构搭建、技术研发、安全防护等关键环节,避免资金分散投入和重复建设带来的浪费,优先保障一体化架构、智能化模块等核心内容的资金需求,提升资金使用效益,全面盘活存量设备与数据资源,对现有物联网终端、软件平台加以排查评估,对可适配改造的设备进行升级复用,对存量数据加以梳理整合,将优质存量资源带进新的集成体系,减少不必要的新增投入,降低集成建设的整体成本^[5]。同时,盘活沉睡数据资源,放大数据价值。搭建分层分类的专业人才培养体系,聚焦物联网技术、系统集成、智能运维、安全防护等核心领域,联合高校、企业开展定向培养,打造兼具技术研发与实践操作能力的专业团队,补齐智慧城市物联网集成领域的人才短板,同时建立人才流动与共享机制,破解区域人才分布不均的难题,为创新集成模式的落地与长期运营提供人才支撑。

3.3 全周期安全运维保障

打造全流程和闭环式的安全运维体系,能够为创新集成模式的运转筑起一道坚固防线,确保系统长期保持稳定和安全,设置分级分类的全链路安全防护机制,针对物联网终端、传输网络、数据平台、应用场景分别划定防护级别,给终端装上安全防护模块、加强网络传输的加密措施、建设数据安全防火墙,完成

从前端感知到后端应用的全方位保护,精准防范数据泄露、网络攻击、系统入侵这类安全风险。建设智能化运维平台来取代过去那种粗放式运维方式,整合全域终端运行状态、系统故障信息、资源消耗数据,做到实时监控、自动发出预警,借助智能算法快速找到故障根源、形成处置方案,缩短故障排查和修复的时间,提高运维响应效率和处置准确度,健全安全应急与长效运维机制,制定各类安全事故、系统故障的应急处置预案,明确应急流程、责任主体和处置时限,增强突发状况的应对能力,这有助于建立常态化运维升级计划,定期开展系统检测、漏洞修复、功能迭代,依据智慧城市发展需要不断优化运维方案,确保集成系统能够适应新技术、新场景的变化,实现安全运维与系统升级的同步推进,为创新集成模式的长效运行提供保障。

4 结束语

智慧城市物联网电子信息系统集成创新,是打破数字化治理桎梏、激活城市数据价值的核心举措,更是推动城市治理模式迭代升级的必然选择。本文立足于实际建设痛点,重构集成框架与实施路径,跳出传统硬件堆叠、线性推进的固化思维,以全域协同、生态共建、智能赋能为核心,构建全维度、可落地的创新集成体系,兼顾技术适配性、资源高效性与安全可靠。这套模式不仅能破解碎片化建设、模式滞后、运维薄弱等顽疾,更能推动物联网系统从被动支撑向主动赋能转变,释放数据要素价值。未来需结合不同城市发展禀赋,细化落地细则、优化适配方案,持续迭代技术与机制,让创新集成模式真正扎根智慧城市建设,为城市数字化、智能化、精细化治理注入持久动力。

参考文献:

- [1] 樊杰.人工智能领域中通信技术与电子信息技术的融合应用[J].中国宽带,2025,21(12):157-159.
- [2] 喻文琦.智能通信技术在电子信息工程中的应用[J].集成电路应用,2025,42(11):604-605.
- [3] 喻文琦.5G通信技术在电子信息传输系统中的应用[J].集成电路应用,2025,42(10):298-299.
- [4] 武韬,李方文,刘默.电子信息技术赋能电商直播场景化营销路径探索[J].天津开放大学学报,2025,29(03):102-104.
- [5] 李秀忠.电子信息工程在智慧城市建设中的应用研究[J].中国新通信,2025,27(18):9-11.

“沙戈荒”大基地电氢协同技术 经济分析及发展路径研究

姚 佳

(大唐甘肃发电有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘 要 在“双碳”目标推动能源体系向新能源主导转型的背景下,我国“沙戈荒”地区大型新能源基地面临风光发电间歇性、波动性与电网消纳、外送要求之间的核心矛盾,电氢协同成为破解该矛盾、实现新能源高质量消纳的关键路径。本文以宁夏腾格里“沙戈荒”能源大基地为研究对象,系统分析电氢协同系统的技术架构与组成特征,从弃电制氢、“电—氢—电”、“电—氢—化”三条核心路线开展技术经济性测算,结合国内最新工程实践与产业数据验证其可行性,并提出电氢协同技术发展路径,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 沙戈荒大基地; 电氢协同; 绿色氢能; 技术经济分析; 新型电力系统

中图分类号: TM621; TK91; F426.61 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.027

0 引言

我国能源资源与负荷中心的逆向分布特征,决定了“西电东送、北电南供”的能源战略格局,西北、华北等“沙戈荒”地区凭借丰富的风光资源,成为我国大型新能源基地的核心布局区域。截至 2025 年底,我国风电、光伏累计装机容量已达到 18.4 亿 kW,“沙戈荒”地区贡献了绝大部分新增装机,成为新能源规模化发展的核心阵地。但风光发电固有的间歇性、波动性特征,叠加高比例电力电子设备接入导致的系统等效转动惯量下降,使得“沙戈荒”大基地面临严重的弃风弃光问题,2024 年甘肃省弃光率仍高达 8.7%,同时给特高压跨区输电通道的安全稳定运行带来严峻挑战。碳达峰、碳中和目标的推进,要求能源体系从“化石能源主导”向“新能源为主体”转型,而新型电力系统的构建,必须解决大规模新能源的消纳与外送难题。氢能作为能量密度高、可长期储存、跨介质灵活转换的二次能源,成为“沙戈荒”大基地实现电氢协同发展的核心媒介,通过构建“新能源发电—电解制氢—氢能利用—电能回馈”的闭环系统,可实现风光能源的时空转移与稳定输出。

1 “沙戈荒”大基地电氢协同系统技术架构与核心特征

“沙戈荒”大基地电氢协同系统是融合新能源发电、电氢转化、氢能储运、氢能多场景利用的综合能源系统,核心实现“电—氢—电”与“电—氢—化”的深度耦

合,打破传统电力系统的能量形式单一性,实现新能源的多路径消纳与价值提升^[1]。该系统以“沙戈荒”地区风光新能源场站为能量源头,以电解水制氢为核心转换节点,配套储氢装置、输氢管道等基础设施,结合氢能发电、绿色化工、氢能交通等多元利用场景,形成“源—网—储—荷—化”一体化的能源生态,其核心技术架构具备系统性、耦合性、灵活性三大特征。

系统的核心组成包含六大关键模块,各模块相互衔接、协同运行,构成完整的电氢能量转换链条。风光新能源场站作为基础能源模块,为整个系统提供清洁电力,是绿氢生产的能量源头,宁夏腾格里示范基地已建成超 500 万 kW 风光装机,为电氢协同提供充足的绿电支撑;电解水制氢装置是电氢转换核心模块,承担着将富余电力转化为绿色氢能的功能,腾格里基地配套标准 48 000 m³/h 的电解水制氢产能,可实现弃电的规模化转化;储氢与输氢模块是系统的能量缓冲与传输载体,腾格里基地配置 12 台 1 875 m³ 高压储氢球罐,结合区域性输氢管道,实现氢能的储存与跨场景输送。

电氢协同系统的核心运行逻辑遵循“宜电则电、宜氢则氢、氢电互补”的原则,实现新能源电力的动态优化配置^[2]。当风光出力高于电网消纳能力及外送通道容量时,系统将富余电力导向电解水制氢装置,生产绿氢并储存,此时氢能成为新能源的“储能载体”,有效解决弃风弃光问题;当风光出力不足,电网面临

作者简介: 姚佳(1993-),男,本科,工程师,研究方向: 新能源开发。

功率缺口时，储存的绿氢通过氢燃气轮机、燃料电池系统转化为电能，补充电网电力，此时氢能成为“电源补充”，保障电力系统功率平衡；当氢能市场需求较高时，系统将绿氢优先输送至合成氨、合成甲醇装置，实现氢能的化工利用，提升能源利用的经济价值，形成“电力消纳+氢能利用”的双重收益。

2 “沙戈荒”大基地电氢协同技术经济性量化分析

2.1 弃电制氢经济性分析：电价为核心影响因素

弃电制氢是电氢协同系统的基础环节，其成本水平直接决定后续氢能利用的经济可行性，而弃电电价是影响制氢成本的核心变量。测算结果显示，当弃电电价在 0 元 / kWh ~ 0.2 元 / kWh 区间波动时，“沙戈荒”大基地制氢总成本呈现显著的线性变化，区间内制氢总成本为 5.81 元 / kg ~ 18.46 元 / kg，电费占制氢成本的比重超 70%，成为最主要的成本构成。

当弃电电价降至 0.1 元 / kWh 以下时，制氢成本可低于 1 元 / Nm³，该成本水平已低于当前煤制氢的成本（约 1.2 元 / Nm³），绿氢制氢在成本上具备显著的市场竞争力。这一测算结果表明，“沙戈荒”大基地丰富的风光资源带来的低电价弃电，为绿氢生产提供了得天独厚的成本优势，通过规模化消纳弃电制氢，可实现绿氢的低成本生产，打破氢能产业发展的成本瓶颈。

2.2 “电—氢—电”转化路线经济性：场景差异显著

“电—氢—电”转化路线是实现氢能电能回馈的核心路径，主要包含燃煤机组掺烧绿氢、质子交换膜燃料电池发电两大应用场景，不同场景的技术经济特征差异显著，具体测算数据如表 1 所示。

从测算结果来看，燃煤机组掺烧绿氢的经济可行

表 1 “沙戈荒”大基地“电—氢—电”转化路线经济性测算表

应用场景	核心成本变化	度电成本 (元 / kWh)	适用场景	经济可行性
燃煤机组掺烧 10% 绿氢	全厂度电成本增加 0.0143 ~ 0.1001 元	0.32 ~ 0.39	电网调峰、基础电力供应	较高，可依托现有煤电系统改造，改造成本低
质子交换膜燃料电池发电	无基础改造成本，直接产生度电成本	0.43 ~ 1.20	电力现货市场、电网紧急支撑	一般，成本较高，仅在电价高位时实现盈利

表 2 “沙戈荒”大基地“电—氢—化”转化路线经济性测算表（单位：元 / t）

产品类型	无碳价时总成本	100 元 / t 碳价时总成本	传统煤制工艺成本	碳价加持下成本优势
绿氨	2 204 ~ 5 224.2	1 774 ~ 4 794.2	约 4 500	中高电价区间持平，低电价区间显著低于煤制
绿醇	2 738.9 ~ 5 897.4	2 488.9 ~ 5 647.4	约 5 200	中高电价区间持平，低电价区间显著低于煤制

性显著高于燃料电池发电，该模式依托现有煤电系统进行灵活性改造，无需新建发电装置，改造成本低，度电成本增幅可控，适合作为电网调峰、基础电力供应的补充手段。而燃料电池发电因核心装备成本较高、系统集成难度大，度电成本处于较高水平，当前阶段仅适合在电力现货市场报价较高时高负荷发电，或在电网面临紧急功率缺口时提供应急支撑，通过价格差与应急服务收益覆盖发电成本。

2.3 “电—氢—化”转化路线经济性：碳价加持下优势凸显

“电—氢—化”转化路线是氢能高价值利用的核心方向，主要包括绿氢合成绿氨、绿氢合成绿醇两大路径，该路线将氢能转化为高附加值的化工产品，实现能源与化工的跨界融合，其成本水平受弃电电价与碳价政策双重影响，具体测算数据如表 2 所示。

测算结果显示，在无碳价政策时，绿氨、绿醇的总成本随弃电电价波动较大，仅在弃电电价低于 0.1 元 / kWh 的低电价区间，成本可接近或低于传统煤制工艺；当引入 100 元 / t 的碳价政策后，绿氨、绿醇的总成本平均下降 400 元 / t ~ 500 元 / t，此时在 0.1 元 / kWh ~ 0.15 元 / kWh 的中电价区间，绿氨、绿醇成本即可与传统煤制工艺持平，而在低电价区间，成本优势进一步凸显。这一结果表明，碳价政策的落地是推动“电—氢—化”路线商业化的重要推手，随着我国碳市场的不断完善，传统煤制氨、煤制醇工艺的碳排放成本将持续增加，而绿氨、绿醇作为零碳排放产品，将在市场竞争中占据显著优势。

2.4 示范系统整体经济性：低电价下盈利性显著

以宁夏腾格里“沙戈荒”能源大基地电氢协同示范系统为测算对象，该基地 10% 弃电制氢量为 2.56 万 t/a，

制氢优先满足绿氨、绿醇生产, 剩余绿氢用于燃煤掺氢发电与燃料电池发电, 在弃电电价按 0.1 元/kWh 计、绿氨绿醇参考国际交易价格的前提下, 示范系统整体经济性表现优异。

系统全年总营收达 54 151 万元, 总运营成本为 40 422 万元, 实现年净利润 13 729 万元 (1.37 亿元), 各子模块均实现正向盈利, 其中绿氨制取年利润 6 087 万元, 绿醇制取年利润 5 873 万元, 两大绿色化工模块贡献了系统近 87% 的利润, 是电氢协同系统的核心盈利点; 燃煤掺氢发电年利润 914 万元, 燃料电池发电年利润 855 万元, 两大发电模块虽利润占比不高, 但实现了氢能的全量消纳, 保障了系统的运行稳定性。

3 “沙戈荒”大基地电氢协同技术发展路径

3.1 绿电氢储耦合路径: 打造电网稳定型储能枢纽

储能是解决新能源波动性的核心手段, 而氢能凭借长时储能、大容量储能特征, 成为“沙戈荒”大基地规模化储能的重要方向^[3]。以“风光绿电—电解制氢—高压储氢—氢燃气发电”为核心链条, 聚焦电网侧长时储能与稳定支撑需求, 打造兼具储能功能与电网支撑能力的电氢储能枢纽。其核心在于依托“沙戈荒”大基地的规模化风光装机, 建设大功率、一体化的电解水制氢与储氢系统, 配套 30 MW 及以上等级的纯氢燃气轮机, 实现“储氢为储能、释氢为发电”的功能转换。内蒙古鄂尔多斯已建成全球首个 30 MW 级纯氢燃气轮机氢储能示范项目, 该项目配套 505 MW 风光制氢系统, 实现了绿电氢储的闭环运行, 每小时可发电 4.8 万 kWh, 年消纳风光弃电超 1.5 亿 kWh, 减少二氧化碳排放约 20 万吨。

3.2 绿氢化工融合路径: 构建风光氢氨醇一体化产业

依托“沙戈荒”大基地的低电价弃电资源, 规模化生产绿氢, 将绿氢与氮气、二氧化碳等反应, 合成绿氨、绿醇等绿色化工产品, 既实现了氢能的高价值消纳, 又推动了传统化工产业的清洁化转型。李灿院士团队研发的“液态阳光甲醇”技术是该路径的核心代表, 该技术利用绿氢与二氧化碳合成绿甲醇, 既消纳了风光弃电, 又实现了二氧化碳的资源化利用, 全球首套千吨级“液态阳光甲醇”示范工程已在甘肃兰州落地, 10 万吨级工业化项目在内蒙古鄂尔多斯加速推进。构建绿氢化工产品的外运通道, 将“沙戈荒”地区打造为西北绿色化工产品生产基地, 实现“绿电变绿氢、绿氢变绿品”的价值提升^[4]。

3.3 多能互补协同路径: 打造源网储荷一体化能源生态

“沙戈荒”大基地能源资源丰富, 除风光资源外, 还具备煤电、抽水蓄能等调节资源, 多能互补协同路径以电氢协同为核心, 整合风光、煤电、抽水蓄能、储能等多种能源资源, 打造“源—网—储—荷—化”一体化的多能互补能源生态^[5]。当风光出力充足时, 优先消纳绿电制氢, 剩余电力通过特高压通道外送; 当风光出力不足时, 通过煤电灵活性改造、抽水蓄能发电、氢燃气发电补充电力缺口, 保障电网稳定运行。宁夏腾格里“沙戈荒”示范基地已构建该类多能互补系统, 配套调峰燃煤电厂、抽水蓄能电站与电氢协同系统, 实现了多种能源的协同运行, 每年可多消纳新能源电量超 1 亿 kWh。

4 结束语

“沙戈荒”大基地作为我国新能源规模化发展的核心阵地, 其电氢协同发展是破解新能源消纳难题、构建新型电力系统、推进“双碳”目标的关键举措。“沙戈荒”大基地电氢协同的发展, 需进一步加强氢能全产业链“卡脖子”技术攻关, 突破纯氢燃气轮机、电解槽、输氢管道等核心装备技术; 加快绿色氢氨醇碳核算体系与定价机制建设, 明确绿氢产品的绿色属性; 完善电力市场与氢能市场的协同机制, 让电氢协同的调峰价值、环保价值得到合理的经济体现。通过技术突破、机制完善、产业协同, 将“沙戈荒”地区打造为我国电氢协同发展的核心示范区, 为新能源高质量发展与新型电力系统构建提供坚实支撑, 助力“双碳”目标如期实现。

参考文献:

- [1] 祝亮, 赵永锋, 鲍春竹, 等. “沙戈荒”大基地项目全生命周期评价研究 [J]. 能源科技, 2026, 24(01): 58-61, 96.
- [2] 严新荣, 董联鑫, 赵大周, 等. 多能互补新能源大基地的三阶段多模式优化运行研究 [J]. 发电技术, 2026, 47(01): 26-37.
- [3] 凌波, 张军, 韩一杰, 等. “沙戈荒”大基地电氢协同技术经济分析及发展路径研究 [J]. 中国煤炭, 2025, 51(07): 93-103.
- [4] 白西平. 考虑电氢转化的送端新能源基地配置与运行优化研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- [5] 刘泽洪, 孟婧, 张瑾轩, 等. 电-氢-碳耦合促进新能源基地开发模式研究 [J]. 全球能源互联网, 2024(05): 473-491.

公路桥涵软土路基加固方法探讨

夏 艇

(核工业西南建设集团有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要 软土路基在公路桥涵工程中易出现沉降过大、承载力不足等问题, 软土广泛分布区域的公路桥涵工程建设常面临工期延误与成本超支的困境。本文针对公路桥涵场景下的软土路基加固技术, 分析传统方法实操局限, 结合材料革新与工艺优化梳理针对性技术路径。经试验与实操验证, 复合加固技术可有效平衡加固效果与环保要求, 适用于高等级公路桥涵及沿海软土地区基建工程, 可为施工方案的制定提供借鉴。

关键词 公路桥涵; 软土路基; 加固技术; 参数控制; 适配优化

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.028

0 引言

软土路基低强度、高压缩性的固有特征, 易导致公路桥涵运营期出现桥头跳车、结构开裂等病害, 严重影响通行安全与工程耐久性。现行技术标准中部分加固方法参数设定笼统、场景适配性不足, 传统工艺还面临环保与成本的双重约束, 不少工程因技术选型不当出现二次返工问题。基于行业实操痛点, 本文聚焦软土路基加固的落地路径, 拆解技术细节、优化操作流程, 为工程实践提供技术参考, 破解不同地质条件下加固效果与经济性的平衡难题。

1 软土路基加固技术的基础适配逻辑

1.1 地质勘察与加固目标的精准匹配

地质勘察数据的完整性直接影响加固方案的落地成效, 需重点采集软土厚度、含水率、孔隙比等核心指标。前期工程实践中仅依据规范推荐值设计方案, 实际应用中易出现加固过度或不足的情况, 后续结合现场原位测试数据完成参数优化。勘察过程需覆盖桥涵基础影响范围, 每个测试点间距控制在10米~15米, 确保数据具备现场代表性。但需注意的是, 地质条件的空间变异性可能导致局部数据失真, 可通过加密测试点修正, 加密间距可缩小至5米, 只是加密作业会增加少量勘察工期与成本^[1]。

1.2 加固方法的核心适用边界划分

不同加固技术的适配场景存在显著差异, 工程方案选择需兼顾地质条件与施工条件双重因素。换填法适用于软土厚度小于3米的区域, 但其对填料质量与压实标准要求严格, 料源缺乏地区会大幅提升施工成

本。强夯法施工速度快, 却因振动与噪声污染, 无法在城区及临近构筑物区域应用。排水固结法加固效果稳定, 却需预留充足预压时间, 对工期紧张的项目形成明显制约。从实操层面看, 单一加固方法难以满足复杂地质条件需求, 需根据现场具体情况组合应用, 组合过程中还需考虑各技术的施工衔接性。

1.3 环境约束下的技术选择原则

环保要求已成为加固方案设计的重要考量因素, 传统弃土回填模式面临显著的生态压力。采用工业固废作为加固材料时, 需先完成有害物质含量检测, 确保指标符合现行环保标准。临近水源地施工时, 需避免加固材料渗漏污染水体, 优先选择环保型固化剂, 只是环保型材料的采购成本略高于常规材料。施工过程中产生的扬尘、噪声需控制在限值内, 夜间施工需采取降噪措施, 这些约束条件会增加施工复杂度, 却能显著降低工程的生态影响, 仅需额外投入少量环保监测成本。

2 主流加固技术的实操优化与细节控制

2.1 换填法的施工工艺改进与参数细化

换填法是公路桥涵软土路基加固的基础工艺, 关键通过替换软弱土层、优化压实参数实现承载力精准提升, 实操优化聚焦填料选型、分层施工与质量管控三大环节。参考公路路基施工技术规范, 针对桥涵路基荷载集中、沉降控制严格的特点调整填料标准, 优先选用级配良好的砂石混合料或水泥改良土, 含泥量控制在5%以内(现场试验确定, 检测允许 $\pm 1\%$ 偏差), 最大粒径不超过垫层设计厚度1/3。施工采用分层开挖

作者简介: 夏艇(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程施工。

回填, 每层厚度 30 厘米 (依填料类型可调整 ± 5 厘米), 选用 20 t 振动碾以 2.5 千米 / 小时碾压不少于 4 遍, 压实度达 95% 以上; 换填深度超 1.5 米设台阶式搭接, 搭接宽度 ≥ 0.5 米。前期采用统一压实参数, 发现深层填料压实度不达标, 后通过现场试验调整碾压遍数与速度解决问题。该方法技术成熟、施工便捷, 但软土厚度较大时, 填料用量与开挖深度增加, 会显著提升施工成本、延长工期, 需结合工程经济性综合考量, 部分项目会因成本过高放弃该方案^[2]。

2.2 复合地基法的增强体选型与布置优化

复合地基法通过在软土路基设置增强体, 与天然软土形成协同受力体系, 提升路基承载力与抗沉降能力, 实操优化核心为增强体选型、布置参数与施工质量控制, 工艺流程如图 1 所示。参考建筑地基处理技术规范, 针对公路桥涵路基受力特征适配调整增强体方案, 避免照搬建筑工程参数。碎石桩适配渗透性较好的软土, 可加速孔隙水排出; 水泥土搅拌桩适用于饱和黏性软土, 通过固化反应形成高强度桩体。桩径 550 毫米 (10 组原位测试确定, 施工允许 ± 20 毫米偏差), 桩间距 1.8 米 ~ 2.2 米呈等边三角形布置, 桥涵拐角处需人工微调, 施工效率略有下降。施工控制桩身垂直度偏差 $\leq 1\%$, 桩长穿透软土层并嵌入下卧硬土层 ≥ 0.5 米。前期采用常规搅拌速度, 出现桩身搅拌不均、断桩隐患, 后调整搅提升速率并增加复搅工序解决。该技术加固效果显著, 但施工质量隐蔽性强, 桩身完整性难以直观检测, 抽样检测虽能把控质量, 却存在一定的漏检风险。

2.3 排水固结法的预压系统优化与时效控制

排水固结法通过布设排水系统加速软土孔隙水排出, 促进土体固结, 提升承载力。实操优化重点在于排水系统布置、预压方案设计与时效控制。前期采用单一堆载预压, 固结周期过长无法满足工期要求,

后优化为堆载与真空联合预压方案。排水系统选用宽 100 毫米、厚 4 毫米塑料排水带 (采购允许 ± 2 毫米偏差), 插入深度穿透软土层至下卧硬土层, 间距 1.2 米 ~ 1.5 米, 呈正方形布置。真空预压阶段膜下真空度稳定 ≥ 80 kPa, 采用双层密封膜防止漏气; 堆载预压按 ≤ 20 kPa/d 分 3~4 级加载, 避免超孔隙水压力导致路基失稳。固结时间依监测数据确定, 沉降速率连续 7 天 < 0.5 毫米 / 天、孔隙水压力消散率 $\geq 80\%$ 时停止预压。施工中实时监测沉降与孔隙水压力, 异常时减缓加载或加密排水带, 虽能保障效果但会增加少量材料成本。该方法加固稳定、环保性好, 且对场地要求高, 需预留充足预压空间, 预压周期较长, 不适用于工期极度紧张的工程^[3]。

2.4 新型固化技术的应用与适配调整

新型固废基固化技术以工业固废为主要原料, 搭配专用激发剂制备固化剂, 无需高温煅烧, 兼具环保性与经济性, 适配公路桥涵软土路基低碳加固需求, 实操优化聚焦固化剂配比、搅拌工艺与质量控制^[4]。参考相关研究成果, 针对桥涵路基承载要求调整配比, 固化剂与软土混合比例 10% ~ 15%, 激发剂掺量为固化剂总量的 8% ~ 12%, 确保固化土无侧限抗压强度 ≥ 1.5 MPa。施工采用原位固化工艺, 选用深层搅拌桩机, 搅拌速度 1.2 米 / 分钟、提升速度 0.8 米 / 分钟 (施工允许 ± 0.1 米 / 分钟偏差), 搅拌均匀度 $\geq 90\%$ 。前期发现软土含水率超 40% 时固化效果显著下降, 后增加脱水预处理工序, 将含水率控制在 30% ~ 40%, 虽提升效果但增加少量施工时间。该技术无需大量开挖回填, 施工效率高且实现固废资源化利用, 但对软土含水率、有机质含量敏感, 施工前需开展现场工艺试验确定最优参数, 试验虽需少量投入, 却能避免固化土强度不足的问题。不同公路桥涵软土路基加固技术核心性能对比如表 1 所示。

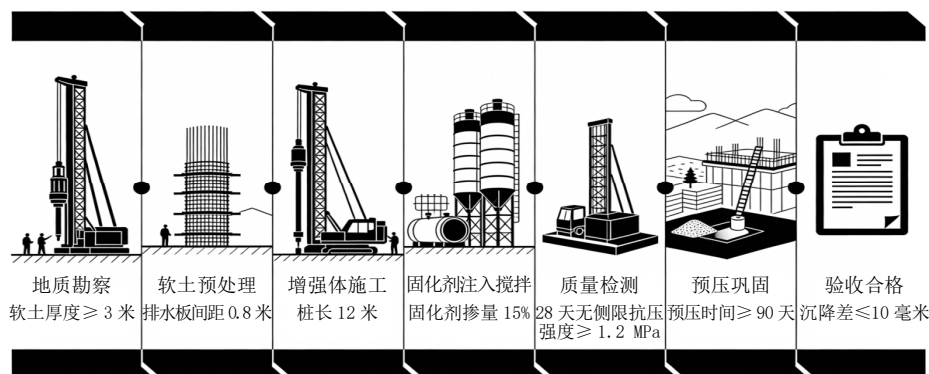


图 1 公路桥涵软土路基复合加固—预压一体化工艺流程图

表1 公路桥涵软土路基加固技术核心性能对比表

加固技术	适用软土厚度（米）	承载力提升幅度	工期影响	环保性
换填法	≤ 3	30% ~ 50%	较短	一般
复合地基法	3 ~ 10	50% ~ 100%	中等	较好
排水固结法	≥ 5	40% ~ 80%	较长	良好
新型固化法	2 ~ 8	60% ~ 90%	中等	优秀

（注：承载力提升幅度基于天然软土承载力特征值 100 kPa 测算，实际数值受地质条件影响存在 ±10% 偏差。）

3 加固效果的监测与优化调整路径

3.1 监测指标体系的构建与实施

加固效果监测需全面覆盖承载力、沉降、稳定性等核心指标，前期工程实践中仅设置沉降监测点，发现难以全面反映加固质量，后续补充了孔隙水压力与水平位移监测指标。沉降监测采用沉降板，布置间距为 20 米~ 30 米，监测频率为施工期间每 3 天一次、运营初期每月一次。沉降监测数据需实时上传至管控平台，若遇极端天气，监测频率需适当加密，实际操作中存在一定的灵活性^[6]。承载力通过静载荷试验检测，试验点数量不少于总加固面积的 0.5%，试验过程需严格遵循规范要求，避免操作不当导致试验数据失真。孔隙水压力监测采用孔隙水压力计，埋置深度根据软土分层确定，水平位移监测选用测斜仪，布置在路基边缘关键位置。监测数据需实时分析，发现异常及时调整施工参数，如沉降速率超标时需暂停加载，暂停加载会对工期产生一定影响。

3.2 施工过程中的动态优化机制

当沉降速率超过预警值时，需暂停施工或减缓加载速率，待监测指标恢复正常后再逐步复工；在复合地基施工中，若检测发现桩身完整性不足，需调整搅拌参数或增加桩体数量，增加桩体数量会小幅提升工程成本。在排水固结过程中，若孔隙水压力消散缓慢，需加密排水板或延长预压时间，延长预压时间需结合工程工期要求综合考量。从实际操作来看，动态优化机制的落地效果依赖监测人员的专业能力，需开展不少于 3 次的现场实操培训，培训工作需提前规划，避免影响施工进度。该机制能有效规避加固质量问题，却对现场管理的精细化程度提出了更高要求。

3.3 常见问题的处置与预防措施

针对压实度不足的问题，可采用增加碾压遍数或更换压实机械的方式处理；更换压实机械时需考虑设备调配的便捷性。对于桩体缺陷，需采用注浆补强或补打桩体的措施，注浆补强时需控制注浆压力与注浆量，避免二次损伤路基。排水系统出现堵塞时，需及

时清理疏通，必要时更换排水带，更换排水带会增加少量施工工序。在预防措施方面，施工前需进行工艺试验，确定最优参数；施工中加强工序验收，上道工序不合格不得进入下道工序，工序验收会增加少量现场管理工作量。结合行业实际，这些问题的发生多与参数控制不当或施工操作不规范相关，需强化过程管控。但部分地质条件下，即使严格按规范施工，仍可能出现局部加固效果不佳的情况，需预留应急处置方案，如局部注浆补强，应急方案需提前编制并做好材料储备。

4 结束语

本文拆解主流加固技术的操作细节，优化参数控制体系与施工流程，提出复合加固思路与动态调整机制，以期在公路桥涵工程中有效提升加固效果与工程经济性；明确了不同加固技术的适用边界与实操局限，为工程方案选择提供了参考，解决传统技术选型笼统、适配性不足的行业痛点。但软土路基的地质复杂性决定了加固技术仍需持续优化，当前技术在深厚软土加固中仍存在效率偏低的问题，极端恶劣环境下的技术适配性也需进一步提升。同时，现有监测技术的精准度与评价标准的完善度仍有提升空间，现阶段的复合加固技术在深海软土区域的应用，还需更多现场试验验证参数适配性，后续研究可重点围绕这些难点展开技术攻关与试验研究。

参考文献：

[1] 李传信.公路桥梁中桥涵软土地基施工处理策略研究[J].运输经理世界,2023(02):70-72.

[2] 杨海峰.公路桥梁工程中桥涵软土地基施工处理策略研究[J].建筑技术开发,2020,47(06):154-155.

[3] 吴登跃.公路桥梁工程桥涵软土地基施工处理方法[J].工程技术研究,2020,05(02):83-84.

[4] 王少林.软土地基公路桥涵构造物路基过渡段的施工与质量控制[J].交通世界,2019(15):84-85.

[5] 林淑强.公路桥梁工程中桥涵软土地基的施工处理方法[J].交通世界,2019(16):104-105.

沥青路面施工技术要点及质量控制

梁海峰

(泰安市城市管理综合服务中心, 山东 泰安 271000)

摘要 沥青路面凭借平整度优、行车舒适性好、耐磨耗性能强、施工便捷等突出优势, 在公路与城市道路工程中得到大规模推广应用。本文结合沥青路面一线施工实践经验与现行行业规范要求, 系统梳理了沥青路面施工全流程中的核心技术要点, 明确了各环节需重点管控的质量管理关键问题, 针对当前施工场景中普遍存在的技术难点与质量管控短板提出优化对策, 以期构建覆盖沥青路面施工全周期的完善质量管理体系提供参考。

关键词 沥青路面; 原材料; 沥青混合料拌和; 路面耐久性; 行车安全

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.029

0 引言

在公路及市政道路建设过程中, 沥青路面是应用最广泛的路面类型, 而沥青路面的质量决定着道路的使用寿命以及行车安全性。近年来, 由于交通量日益增长、重载车辆不断增加, 导致沥青路面容易产生各种病害, 如裂缝、车辙、坑槽等, 主要是由于施工技术不过关、质量控制不到位的原因造成的。一些项目中存在着原材料选用不当、施工方法不合理、养护不足的现象, 从而对路面质量造成不良影响。基于此, 本文就沥青路面施工技术和质量管理进行探讨, 以期施工实践工作提供参考。

1 沥青路面施工核心内涵及质量控制的重要意义

沥青路面施工是以沥青作为结合料, 将沥青混合料经过拌和、运输、摊铺、压实等步骤, 铺设形成具有一定强度、平整度以及抗滑性的路面结构, 关键是通过各个环节的技术要求来保证路面密实、平整、稳定以达到行车荷载及环境要求^[1]。沥青路面施工质量控制是对整个施工过程进行的一项连续的工作, 重点在于从材料、工艺、现场管理等方面出发采取相应的办法防止出现各种问题, 保证路面的质量。而它的意义主要有以下三个方面:

一是保证道路的服务水平, 好的施工质量和管理水平可以使得沥青道路有足够的强度、平整性和抗滑性, 从而避免出现车辙裂痕等问题。

二是可以提高道路的耐久性, 合理的技术手段以及全程的质量把控可以使道路免受雨水冲刷、重载车辆反复碾压的影响, 从而减少道路损坏的概率, 节约后期修复的资金。

三是可以促进项目的社会效益和经济效益, 在质量优良的沥青道路上行驶可以节省大量的燃油并且对车辆有保护的作用, 同时也符合绿色交通的发展理念, 有利于公路和城市道路的高质量建设。

2 沥青路面施工核心技术要点

沥青路面施工技术包括从材料选择到混合料拌和、运输、摊铺、压实以及后期维护等所有过程, 每个步骤都有很高要求并且相互紧密联系, 必须严格按照相关规定操作, 抓住重点, 各步密切配合, 保证工程质量。

原材料准备的技术要求、原材料质量是决定沥青路面施工质量的重要因素, 主要在于对沥青、集料、填料等原材料的质量控制上。沥青应采用 AH-70 或者 SBS 改性沥青, 应满足软化点不小于 45 °C, 延度大于 100 cm 的要求, 以保证其良好的高温性能及较低温脆性; 集料应选择具有良好棱角性和良好级配碎石, 针片状含量不超过 15%, 通过 0.075 mm 筛粉胶比应处于 1.0 ~ 1.5 范围内, 以保证良好的骨架嵌挤作用; 填料应选用水泥或磨细石灰, 应符合相应的纯净度以及细度要求, 不得使用含有大量杂质的填料。

沥青混合料拌和技术要点, 拌和质量决定沥青路面的密实性和稳定性, 在此基础上要重点抓好拌和温度、时间和均匀度的控制^[2]。拌和温度应保持在 140 °C ~ 160 °C 范围内, 防止过高造成沥青老化或者温度低而不能把集料裹覆好; 拌和时间不应小于 30 s, 以使沥青能良好地包裹集料且无花白料以及离析出现; 同时还要随时检查混合料级配及油石比是否满足规定的要求, 即级配误差应在允许偏差之内, 如 0.075 mm 筛下的通过量偏差不大于 2% 等。

作者简介: 梁海峰 (1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城市道路与交通工程。

沥青混合料运输技术要求主要是控制温度降低、避免混合料离析。运输车辆为密闭保温车厢,并覆盖保温篷布以降低运输过程中的热量散发,使运至施工现场的混合料温度不低于 130°C ;装料时采取分层的方式进行堆放,限制每层的高度以防粗细集料分离;尽可能缩短运输距离,在最短的时间内完成从拌和站到摊铺现场的过程,一般为1小时以内,使混合料处于理想的工作状态,到场后立即对其检查温度,不符合规定的不得使用。

3 沥青路面施工质量控制现存问题

根据目前沥青路面工程施工情况,在各种施工工艺已经广泛使用的情况下,但是在技术实施以及质量管理上还存在着许多问题,影响道路施工质量和使用寿命的问题,可以总结为四个方面,分析问题表现和主要原因,以便下一步改进措施制定。

1. 原材料质量控制不到位,部分施工单位为了节省成本而使用不合格原材料,比如沥青标号不合格、集料级配不合理、填料中杂质过多等问题都会造成沥青混合料的质量降低,从而产生路面裂缝、车辙等病害;而且原材料进场检查流于形式,未能按规定对材料进行检测,对于不合格的材料没有及时清场,从源头上影响工程质量^[3]。

2. 施工工艺不当,各工序中存在操作不正确的问题:拌和过程中温度、时间控制不当造成混合料裹覆不均、离析;摊铺过程中速度变化大、平整度控制不好造成波浪、坑槽等;压实过程中温度低、次数少造成路面密实度差,以后会出现松散、沉陷等;接缝处质量差,纵向、横向接缝不紧密易发生裂缝。

3. 质量控制制度不够健全,有的施工企业没有完善的全过程质量管理措施,在施工前没有编制专门施工方案或者方案不切实际;施工期间的质量管理不到位,不能及时检查混合料温度、密实度、平整度等情况,对于施工中的问题也不能及时纠正;完工后也不进行认真的验收工作,不能很好地检测路面厚度、密实度、抗滑性等方面的情况,造成一些不良工程投入使用。

4. 施工人员技术水平不高,沥青路面施工对人员的技术水平有较高的要求,需要既有施工技术又有质量管理的综合性人才,但是目前一些施工人员技术水平不高,对于施工技术要点及操作规程了解不够,随意施工情况严重。

4 沥青路面施工质量控制优化措施

为解决沥青路面施工质量问题,在总结施工经验和参照有关标准的基础上,从原材料管理、施工方法合理应用、质量管理体系建设以及人才队伍建设等方

面入手进行改进和完善,形成全面、系统的质量管理方案,提高沥青路面施工质量^[4]。

4.1 强化原材料全流程管控,筑牢质量基础

建立原材料进场检验制度,对沥青、集料、填料等原材料进行检查,符合要求后方可允许进入施工现场,不符合要求原材料坚决清场;强化原材料保管工作,沥青存放密闭,防止受潮、老化,集料分开放置,不能混淆;不定期对储存原材料进行抽查,保证原材料质量,以及合理选择混合料比例,在考虑现场施工情况及气候状况基础上,经过试验确定最佳混合料比例,使混合料满足设计标准。

4.2 规范施工工艺应用,提升施工质量

编制专项施工方案,根据工程实际情况确定每一道工序施工技术参数、作业标准以及质量要求,使方案具有针对性、可行性;加强各道工序施工管理,在拌制过程中控制好温度、时间等,保证混合料均匀无离析;在摊铺时以稳定速度进行连续摊铺,保证摊铺温度和平整度;压实环节合理选择合适的压实机械,控制好压实温度及遍数,保证路面密度要求;做好接缝工作,纵向接缝处用热接缝法,横向接缝处采用直角相接方式,以使接缝部位紧密结合,避免出现裂缝等现象;加强整个施工过程质量管理。

建立“事前预防、事中控制、事后验收”质量管理体系,贯穿整个工程施工过程,在施工前严格审查专项施工方案,并进行详细的施工方案交底工作,使每一位施工人员了解施工工艺和技术要求以及施工方法^[5]。在施工过程中实行“三检制”,设置专人负责各道工序的质量检验工作,使用核子密度仪、贝克曼梁弯沉仪等仪器来检测混合料温度、压实度、平整度等情况,及时做好相关记录,发现问题及时处理;完工后加强质量验收工作,对道路的厚度、压实度、摩擦系数、平整度等方面进行全面检查,不符合要求部分不得进入下一道工序,同时建立质量追溯制度,把施工全过程都进行记录,以便出现问题可以查清原因并进行纠正。

4.3 加强专业人员培养,提升管控水平

建立常态化培训制度,不定期地对施工人员、技术人员、质检员进行培训,着重讲解沥青路面施工的技术要点、操作规程、质量管理的要求及检测的方法等,邀请行业内专家进行现场教学,提高施工人员的专业水平;引进复合型专业技术人才,加强技术管理和质量监督的力量,尤其要招聘能够掌握施工技术和

质量管理的人才;设立考核激励机制,对于技术精湛、尽职尽责的员工予以表扬并进行物质奖励,对于违反规定、不负责任造成质量问题的相关责任人给予处罚,以增强施工人员的质量意识,不能只关注工期而忽视了工程质量。

5 沥青路面施工质量控制保障措施

为保证沥青路面施工技术要点得到充分执行、质量控制措施得以有效实施,促进路面施工质量不断提高,在组织、制度、技术、物资四个方面加强落实工作,以支持施工顺利进行。

1. 加强组织保障,组建沥青路面施工质量管理小组,以项目经理为组长,技术人员、质检员及施工人员等共同参与,统一部署施工技术应用以及质量管理相关事宜;明确各职能部门以及各岗位工作人员具体分工,形成合力,做好相互之间的配合与协作,有效解决施工过程中出现的技术问题及质量问题;严格控制施工现场,指定专人负责温度监控、质量检查等任务,保证所有要求落到实处^[6]。

2. 完善制度保障,出台沥青路面施工管理规定、质量管理细则、原材料检验办法、质量检查办法等系列文件,规范施工过程、技术要求、质量标准以及责任追究,让施工及质量管理做到有法可依;成立质量监督小组,施工方每周至少进行一次自查,项目经理部每月至少进行一次拉网式检查并记录在册,发现质量问题立即整改;加强停工、复工管理,暂停或延迟建设项目的道路应采取保护措施,在恢复施工之前应对该路段的质量进行全面检查以保证其安全性。

3. 加强技术力量,与科研院所、高等院校开展合作,引入先进的沥青路面施工技术和质量检测技术,如智能化压实监控技术、路面雷达检测技术等,在施工中根据实际情况调整施工方案;安排专业技术管理人员进行现场指导,及时解决施工过程中出现的技术问题,改进施工方法尤其是在一些复杂的条件下施工技术上的难题,提供技术支持;实行技术交底制度,在施工之前向工人做好技术交底工作,使工人按章作业。

4. 加强施工物资供应管理,为冻土路基处治施工提供坚实保障,避免因物资短缺或质量不达标影响施工进度与质量。施工前结合处治工艺需求与施工进度计划,制定详细的物资采购方案,及时采购施工所需各类材料,重点采购沥青、集料、抗冻填料等核心材料,同时配备充足的施工机械与测量设备,确保物资供应充足、种类齐全。采购过程中严格执行质量验收标准,

对各类材料的规格、性能、抗冻性进行严格检测,杜绝不合格材料进场,确保材料质量达标,适配冻土环境施工要求。合理调配施工机械,根据施工工序与进度,科学安排拌和机械、摊铺机、压路机等设备的进场与作业时间,避免机械闲置或调度不当。建立规范的材料管理台账,详细记录材料采购量、进场量、消耗量及库存情况,实时监控材料消耗动态,根据施工进度及时补充材料,优先保障关键工序的材料供应,避免因材料短缺导致施工中断。针对冻土地区冬夏季极端天气特点,强化施工机械冬夏季专项保养,冬季做好机械防冻、保暖措施,加注抗冻燃油与润滑油,防止机械冻裂、启动故障;夏季做好机械降温、防尘处理,定期检查冷却系统,避免机械过热损坏,从根本上防止因机械问题造成的施工延误或工程质量隐患,保障施工顺利推进。

6 结束语

沥青路面施工技术要点以及质量管理对保证道路的服务水平、延长公路使用寿命具有重要意义,而施工质量直接影响行车安全及项目的经济利益。从严格把好原材料关、合理组织施工、建立健全的质量管理体系、重视人才培养等方面着手并配合一系列的人力资源、物力资源、技术支持等措施可以有效提高沥青路面施工质量,减少路面病害的发生。未来应结合实际工作不断改进和完善施工技术以及质量管理方法,推广应用新技术、新工艺,使沥青路面施工逐步向科学化、精细化、智能化发展。

参考文献:

- [1] 赵海均. 沥青路面施工技术要点及质量控制措施研究[J]. 交通科技与管理, 2025(17):52-54.
- [2] 江传胜. 沥青路面工程施工技术及质量控制要点探讨[J]. 工程管理, 2025(02):78-80.
- [3] 黄森. 沥青路面施工技术要点与质量控制分析[J]. 产品可靠性报告, 2025(11):179-180.
- [4] 杨一男, 陈伟, 郭强, 等. 大宽度沥青路面摊铺技术与过程控制[J]. 工程机械与维修, 2025(06):26-27.
- [5] 许琦. 公路工程沥青路面施工技术及其质量控制要点[J]. 运输经理世界, 2025(04):55-57.
- [6] 王正. 公路工程沥青路面施工技术及其质量控制要点研究[J]. 越野世界, 2025(18):57-59.

湿拌砂浆生产与施工质量控制要点分析

吴慧玲

(临沂丰多建材有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 湿拌砂浆凭借质量稳定、施工便捷以及绿色环保等特点, 在华南地区以及贵州、四川、山东等多个区域的建筑工程中得到了广泛应用。湿拌砂浆作为一种工厂化预拌砂浆, 其生产、运输、储存及现场施工的全过程均会对最终硬化砂浆质量产生直接影响。在实际生产应用过程中, 砂浆原材料的品质、配合比设计、生产工艺、储存环境条件、施工操作及养护等因素, 都可能导致砂浆出现和易性差、保水性不足、凝结时间异常以及空鼓、开裂及起砂等质量缺陷。本文结合工程实践, 对湿拌砂浆在生产制备、运输储存、现场施工以及质量通病防治等方面的关键要点进行分析与总结, 提出相对应的控制措施, 以期对湿拌砂浆的规范化应用提供参考。

关键词 湿拌砂浆; 生产控制; 运输过程控制; 现场储存; 施工质量

中图分类号: TU712.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.030

0 引言

在建筑行业不断向工业化、绿色化转型的背景下, 预拌砂浆中的湿拌砂浆逐渐取代传统现场搅拌砂浆, 成为砌筑、抹灰及地面找平工程中的主要材料。湿拌砂浆由专业化生产企业按照事先设计的配合比, 将胶凝材料、骨料(天然砂及机制砂)、水以及外加剂均匀搅拌而成, 通过专用运输设备送至施工现场的储存池, 交付建筑工人由料斗小车通过货梯送至建筑工程各楼层直接使用^[1]。与传统现场搅拌砂浆相比, 湿拌砂浆具有配比精准、性能稳定、节约材料、减少污染等优势, 但同时也对生产运输、现场储存及施工作业提出了更高要求。对湿拌砂浆生产与施工环节的关键问题开展系统性研究, 具有重要的现实意义。

1 湿拌砂浆生产过程中的控制要点

1.1 原材料质量管控与问题分析

1. 水泥: 应选用正规厂家生产的合格产品, 重点检测胶砂强度、安定性与凝结时间。严禁使用受潮、结块或存放超期的水泥。

2. 粉煤灰: 采用市售的一级灰或二级灰均可, 粉煤灰颜色不能发黑, 无浮油、以灰白颜色为好。实践证明, 黑色的粉煤灰(一般烧失量偏大、含碳量高)会造成砂浆黏性差、抗流挂性能差, 容重高, 往往会造成新拌砂浆出现离析泌水现象, 究其原因是黑色粉煤灰中含有未燃尽碳粒及有机杂质, 吸附外加剂能力

较强, 严重干扰引气保塑组分与醚类保水组分的正常发挥, 导致浆体结构松散、界面黏结力骤降。

3. 石灰石粉: 石灰石粉颗粒比粉煤灰粗, 比砂细, 可以有效地填充粉煤灰与砂子之间的空隙率。石灰石粉浆体的黏性比粉煤灰好得多, 上墙抗流挂性比较好, 更容易抹灰上墙使用^[2]。石灰石粉进厂检验指标: 亚甲蓝值(控制含泥量), 细度。

4. 细骨料: 宜选用级配良好、含泥量较低天然砂、机制砂及铁尾矿砂搭配使用。天然砂进场前需检测含水率、含泥量、泥块含量及颗粒级配, 细度模数 $M \times$ 不超过 2.6。天然砂外型成圆形或椭圆形, 0.315 mm 筛孔的累计筛余量控制在 10% ~ 15% 的天然砂, 配制出的砂浆与外加剂相适应, 新拌砂浆手感轻盈, 保水性好, 一般不会出现离析泌水现象, 经时稳定性优越, 拌制出的砂浆容重 24 h 内不会出现太大的波动。如果天然砂 0.315 mm 筛孔的累计筛余量在 10% 以下, 可以加铁尾矿砂来弥补细颗粒砂的缺失, 但 0.315 mm 筛孔的累计筛余量最大不要超过 15%, 细颗粒太多, 砂浆需水量大、收缩大, 不利于砂浆的最终工程质量。机制砂颗粒偏粗, 粒型有棱角, 级配差、空隙率高, 配制的新拌砂浆容易出现离析泌水的现象^[3]。可以采用机制砂、河砂、铁尾矿砂三者搭配使用, 各类砂子互相填充, 可以有效地弥补拌和用砂级配的不足^[4]。

5. 保塑剂: 保塑剂一般应包括保水剂、引气剂及增粘剂等。缓凝剂, 一般为糖类或葡萄糖类, 不得随意替换品种或加大掺量。因湿拌砂浆要求开放时间较

作者简介: 吴慧玲(1980-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 预拌砂浆与混凝土。

长（一般在 24 h 之内），湿拌砂浆很多指标（保水率、容重、凝结时间等）需要长时间的监测、复测，如果盲目地中途替换保塑剂，可能短时间各指标看不出来，但时间一长，湿拌砂浆的性能下降，会给生产企业造成很大的损失。

6. 拌和用水：应满足混凝土拌和用水标准，不得使用含有杂质或酸碱度超标的水源。如果用罐车冲洗用水，废浆废液用水应做实验，满足砂浆各项指标要求方可使用。

1.2 配合比设计与动态调整

湿拌砂浆的配合比应根据砂浆使用部位（砌筑、抹灰或地面）、砂浆强度等级、环境温度以及开放时间要求进行专门设计。在湿拌砂浆正式生产前，必须通过试拌确定最佳配比，保证湿拌砂浆具备良好的稠度、保水率和黏结性能。在生产过程中，应适时监测砂的含水率变化，砂浆容重变化、含气量变化、稠度变化，并根据检测结果及时调整用水量、外加剂用量，各种砂子之间的搭配比例，确保湿拌砂浆工作性稳定。在高温（30℃～35℃）或低温季节（5℃～10℃），还应适当调整外加剂掺量，合理控制开放时间，避免砂浆过早凝固造成损失或长时间上墙不硬化塌墙的风险。表 1 为某企业湿拌砂浆配合比。

1.3 生产设备与搅拌工艺

湿拌砂浆宜采用专用搅拌设备进行生产，计量装置应定期校验，保证称量精度符合规范要求。搅拌时间应充足，一般不应低于 120 s，确保各类材料混合均匀，避免出现离析、结块、泌水等现象。每批次砂浆生产前，应进行开盘鉴定，检测湿拌砂浆稠度、湿表观密度及保水率，合格后方可批量生产。生产过程中应做好详细记录，实现产品质量可追溯，便于后期问题排查。

表 1 某企业湿拌砂浆配合比（kg/m³）

标号	水泥 P.042.5	粉煤灰 I 或 II 级	石灰石粉 A 级 45 μm 方孔筛筛余 ≤ 15%	黄砂 d ≤ 4.75 mm	聚醚羧酸保 水剂（液体）	时间调节剂春 秋～夏季	水
M5	190	50	40	1 340	10	4～5	200～220
M7.5	210	60	40	1 340	10	4～5	200～220
M10	230	70	30	1 340	10	4～5	200～220
M15	260	60	30	1 340	10	4～5	230～240
M20 地面	300	30	30	1 340	10	4～5	230～240

（注：（1）M5、M7.5、M10、M15 适用于砌筑砂浆和抹面砂浆。抗压强度试模用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。（2）湿拌砂浆的湿表观密度一般要 ≥ 1 800 kg/m³（用 1 L 容量筒称重即可）；（3）湿拌砂浆的稠度出厂一般控制在：砌筑砂浆 90 mm～100 mm；抹灰砂浆 90 mm～110 mm；地面砂浆 100 mm～120 mm。根据季节和天气（温度、湿度），单方砂浆用水量可调整。）

1.4 出厂质量检查

湿拌砂浆出厂前，应对每车产品进行外观检查和性能抽检，出现离析、泌水、过干或过稀等情况不得出厂。同时，应在运输单上明确标注砂浆类型、强度等级、开放时间及使用时限，提醒施工现场按时使用。一般情况下，湿拌砂浆从出厂到用完不宜超过 24 h，高温天气应缩短使用周期，避免因超时使用导致砂浆凝固。

2 湿拌砂浆运输与现场储存注意事项

2.1 运输过程控制

湿拌砂浆应使用具备搅拌功能的专用罐车运输，运输途中保持低速搅拌，防止砂浆分层离析或水分散失。运输路线应提前规划，尽量缩短运输时间，减少路途颠簸。高温天气罐车应采取遮阳措施，低温天气做好保温防护，避免砂浆受高温失水或低温受冻。运输途中严禁私自加水，如需调整稠度，必须在技术人员指导下进行操作。

2.2 现场储存要求

湿拌砂浆运至施工现场后，供应商与施工单位应先进行交货验收，核对供货信息无误。湿拌砂浆存放池应具备不吸水、防渗、塑料布遮阳覆盖等条件，不同种类、不同强度的湿拌砂浆应分开存放并做好标识。现场储料池应避免阳光直射、大风直吹或雨水冲刷。使用时应遵循先进先用的原则，超过开放时间或已经初凝的砂浆，不得再次加水搅拌使用。

3 湿拌砂浆常见质量问题及预防措施

3.1 和易性不良

湿拌砂浆和易性不良的原因包括砂子含水率波动、级配不良，黑色粉煤灰，保塑剂掺量不合理，驾驶员私自加水等。预防措施：加强原材料进厂检测，生产

过程检测,及时调整砂浆配合比,控制运输时长,严禁驾驶员私自加水,到场后充分搅拌均匀后再使用。

3.2 空鼓与开裂

抹灰砂浆空鼓多由基层界面处理不到位、一次抹灰过厚、养护不足、超时使用砂浆黏结力不够等造成。砂浆开裂的主要原因有:胶凝材料过高,砂子含泥量过高,砂子偏细,没有按照规程覆贴网格布等。预防措施:控制原材料进厂检测,优化生产配合比,强化基层界面处理,严格分层施工,覆贴网格布,保证养护时间。

3.3 表面起砂

表面起砂通常与砂浆配合比不合理、水泥用量偏低、保塑剂用量过高、砂浆含气量过高,成型砂浆后期泌水、收光时机不当、养护不到位等有关。应通过优化砂浆配比(适当降低粉煤灰用量)、保证良好的保水率、准确掌握收光时间、加强养护进行控制。

3.4 开放时间异常

开放时间异常的主要原因有:水泥凝结时间异常,砂子含泥量过高,缓凝外加剂掺量不当、现场储存时间过长,现场未做好防风、防渗、防高温措施。应根据气温调整外加剂掺量,严控原材料,合理安排运输,现场严格执行先到先用制度,现场做好防风、防渗、防高温措施。

3.5 砂浆上墙流挂差

砂浆上墙流挂差的主要原因有:砂浆黏性差,一次抹灰过厚,基层界面处理不到位,基层毛刺过于光滑;基层混凝土强度太高,混凝土表层浆体过于光滑,没进行毛化处理及挂钢丝网,极易造成砂浆上墙之后塌落。应根据砂浆施工规范,界面剂处理,分层抹灰;过于光滑的混凝土界面应进行挂钢丝网、界面剂毛化处理后再抹灰施工。

4 现场施工环节的质量控制要点

4.1 基层处理要求

抹灰作业施工前必须对墙体基层进行彻底清理,去除浮灰、油污、松动混凝土及杂物,保证基层坚实、干净、粗糙。墙体基层应涂刷界面处理剂,界面剂毛刺超过0.5 cm,毛刺不能是个光滑鼓包,等界面剂达到一定强度,界面剂毛刺用手掰不断时才可进行抹灰施工;混凝土剪力墙建议用挂铁网挂浆拍毛工艺,提高砂浆与基层的附着力,减少空鼓脱落。严禁用预拌砂浆充当界面剂直接拍毛,因界面处理剂要求黏结拉力0.5 MPa以上,预拌抹灰砂浆最大要求黏结拉力才

0.25 MPa,预拌抹灰砂浆黏结拉力低,起不到界面剂的作用,容易造成抹灰砂浆空鼓脱落严重,造成质量问题^[5]。砌体施工时,砌块应提前泡水湿润,避免砌块或烧结砖快速吸收砂浆水分导致黏结力下降。

4.2 施工操作要点

砌筑作业时,灰缝厚度应均匀饱满,铺浆长度不宜过长,保证灰缝密实,避免出现瞎缝、假缝、通缝。抹灰应分层进行,单次抹灰厚度不宜过大,待前一层基本硬化后再进行下一道工序,防止因一次抹灰过厚造成收缩下垂、开裂、塌墙。尽量避免内墙外墙抹灰作业同时进行,因外墙砂浆一般有保温、防水等特殊技术要求,避免混用。地面砂浆施工时,应先处理好结合层(清洁、润湿及界面处理),摊铺后及时找平、压实、收光,把握好压光时间,防止表面起砂泛灰。湿拌砂浆施工环境温度宜控制在5℃~35℃之间,高温、大风、雨雪天气不宜进行室外作业。施工过程中不得随意加水,避免降低砂浆强度。施工完成后,应做好成品保护,及时养护,未达到强度前禁止踩踏、冲击或堆放重物,防止表面破损。

5 结束语

湿拌砂浆的质量控制贯穿生产、运输、储存、施工全过程,是一项系统性工作。生产企业应严格控制原材料与配合比,规范生产工艺;施工单位应重视现场湿拌砂浆的储存、砌筑及抹灰作业的基层处理、操作工艺与养护工作。只有全面落实各环节的控制要点,及时预防和解决常见质量问题,才能保证湿拌砂浆发挥良好的工程性能,提高建筑工程的整体施工质量,推动建筑行业向绿色、高效、规范化方向持续健康发展。

参考文献:

- [1] 贵州省住房和城乡建设厅.湿拌砂浆应用技术规程(DBJ52/T 119-2025)[S].贵阳:贵州省住房和城乡建设厅,2025-04-27.http://zfcxjst.guizhou.gov.cn/jszx/gggs/qt/202504/t20250429_87604165.html.
- [2] 蒋金明,陈逸晖,罗城,等.不同掺合料对湿拌砂浆性能影响的探究[J].广东建材,2025,41(09):63-65.
- [3] 闫军南,祝雯,张超,等.机制砂岩性和颗粒级配对砂浆流变性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2025(10):22-26.
- [4] 张林啸,邵炜,宁长城,等.铁尾矿粉对湿拌砂浆性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2025(05):92-95.
- [5] 天津市住房和城乡建设委员会.天津市预拌砂浆技术规程(DB/T 29-130-2024)[S].天津:天津市住房和城乡建设委员会,2024-08-01.https://zfcxjs.tj.gov.cn/ztl_70/bzgf/bzgg/202404/t20240416_6602270.html.

深基坑工程施工技术及风险防控措施分析

王 森¹, 徐宗峰^{2*}

(1. 西安铁一院工程咨询管理有限公司, 陕西 西安 710000;

2. 青岛震泓建设开发有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 随着地下空间进一步开发, 深基坑工程项目规模日益增大、环境愈加复杂, 其施工技术和风险管理是当前岩土工程亟待解决的问题。本文基于围护结构施工、地下水控制以及土方开挖与支撑体系三个方面对关键技术进行阐述, 在此基础上从地质条件、支护结构、周围环境三个方面总结常见问题并给出相应对策建议。结果表明, 深基坑工程施工必须实现技术选择与风险防范相结合, 在充分开展详细勘查工作基础上实施全程跟踪检测并严格把控工程质量, 能够有效减少事故的发生, 提高工程的安全性。

关键词 深基坑工程; 围护结构; 地下水控制; 土方开挖; 风险识别

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.031

0 引言

深基坑工程广泛应用于高层建筑、城市轨道交通等城市建设项目中。而随着地下空间开挖深度的进一步提高, 基坑出现“深、大、紧、近”, 即深度更深、规模更大、环境约束更紧、临近现有建筑物更近的情况, 这对施工提出了更高的要求, 不确定因素也相应增多。近年来, 基坑围护结构失稳、基坑底部隆起、周围地面沉降严重甚至坍塌等问题屡见不鲜。因此, 总结归纳深基坑施工技术, 辨识施工过程中的各种隐患并采取合理预防措施非常有必要。

1 深基坑工程施工关键技术分析

1.1 围护结构施工技术

围护结构是深基坑第一道防线, 在挡土的同时起到防水作用并承受周边水土压力。常用的围护结构有地下连续墙、钻孔灌注桩排桩、SMW 工法桩和钢板桩等。地下连续墙适用范围广, 尤其适合深度较大、周边环境要求较高的大型基坑, 开挖成槽后下放钢筋笼并灌注混凝土而成, 墙体整体性强、刚度大、防渗效果佳^[1]。钻孔灌注桩排桩施工方便, 适应性强, 但由于桩间存在渗漏问题需要结合高压旋喷桩或者搅拌桩形成一道防水屏障。SMW 工法桩是在三轴搅拌桩内插入型钢起到挡土和防渗作用, 施工速度较快而且型钢可以循环使用, 经济效益较高。围护结构施工主要针对槽段垂直度控制、泥浆护壁质量和接头防水问题, 任何一个方面出现问题都会造成围护结构漏水或者位移过大。

1.2 地下水控制技术

地下水是影响深基坑施工安全的重要因素。地下水控制的主要目的是使基坑内地下水位低于开挖面, 而不至于使坑外地下水位降低太多造成周围地面沉降。降水方法有管井降水、轻型井点降水和喷射井点等, 其中管井降水用于渗透性较好的砂土地层, 而井点降水用于粉土、粉砂地层。当要求限制外部水位降落时, 可采用落底式止水帷幕结合坑内降水的方法, 即用地下连续墙或者深层搅拌桩将基坑与外界隔离开来, 在基坑内部进行降水。另外, 对于承压含水层还需要设置减压井降低承压水位, 以免发生基坑底部突涌现象。地下水控制主要是合理确定降水井位置、适当控制排水量以及对周围水位变化情况进行有效监控。

1.3 土方开挖与支撑体系施工技术

土方开挖以及支撑施工是深基坑工程施工的重要内容, 应以“分层、分区、对称、平衡”的方式进行土方开挖。在分层方面, 一层高度不超过 2 m ~ 3 m, 防止一次挖穿造成围护结构荷载突变; 在分区方面, 较大范围内采用分块开挖方式, 利用分隔墙或者中部岛式土体控制围护结构位移发展^[2]。支撑主要有两种类型: 一种是钢筋混凝土内支撑, 其特点是刚度大, 整体性强, 适用于形状不规则或有严格沉降要求的基坑工程; 另一种是钢管支撑, 便于安装和拆卸, 可以利用轴力预紧装置进行预紧, 适用于狭长形基坑, 如地铁车站等。支撑施工应与土方开挖紧密结合, 遵循“先

作者简介: 王森(1998-), 男, 本科, 研究方向: 建筑工程。

*通信作者: 徐宗峰(1977-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程。E-mail: 3525099600@qq.com

撑后挖”的原则,即在开挖至支撑设计标高后立即进行支撑并施加预应力,然后才能继续往下开挖。支撑节点连接强度、预应力施加准确性和支撑拆除时换撑方法是控制基坑变形关键技术问题。

2 深基坑工程施工典型风险分析

2.1 地质条件引发的施工风险

地质条件复杂性和不确定性也是造成深基坑施工风险的因素之一。软土地区由于其含水量大、压缩性高、强度低以及触变性,在开挖卸载的情况下容易出现较大的围护结构侧向位移以及坑底隆起,极端情况下甚至会出现围护结构失稳倾倒的情况。砂土地层中如果地下水流动速度较快就会出现管涌或者流砂的现象,也就是坑底土体在动水压力的作用下失去有效应力从而形成一个通向地面的涌水涌砂通道,使得基坑内外部相通,进而引起围护结构外侧的大量失土。承压水对坑底土的压力不能忽视,一旦开挖深度较大以至于上面覆盖层自身的重量不能抵消承压水水头的压力,则有可能造成坑底突发性的涌出现象,也就是坑底隆起裂缝并有大量的水溢出。而填土层、暗浜、古河道等地质缺陷的位置具有随机性,如果勘察不能够准确地查明它们的位置及属性,在施工过程中就有可能发生局部坍塌或者漏水等事故。

2.2 支护结构施工与受力风险

支护结构自身施工质量和受力情况对基坑工程至关重要。在围护结构施工过程中,地下连续墙成槽时,若槽壁稳定控制不好,就容易出现局部塌孔现象,造成墙体夹泥,钢筋笼不能顺利放入,从而形成墙体薄弱位置;钻孔灌注桩存在沉渣厚、桩身缩径或者断桩问题,都会影响桩基承载能力和止水效果^[3]。在支撑体系中,钢支撑预应力不足或者损失过多,不能起到限制围护结构变形作用;钢筋混凝土支撑如果未达到一定龄期就进行下面土方开挖,支撑强度不够,在受力初期就会产生裂缝甚至压溃。而在基坑开挖过程中,随着开挖深度加大,围护结构所受力也在不断发生变化。若土方开挖顺序不合理、分层厚度过大或者支撑设置滞后,都会使围护结构发生较大变形,严重时会造成材料强度而损坏。

2.3 周边环境变形与破坏风险

深基坑施工会不可避免地会对周边环境造成一定影响,主要包括由于地层移动引起地面沉降、建筑物倾斜开裂以及地下管道变形破坏等。基坑开挖相当于给土体提供一个卸荷的空间,在围护结构侧向位移以及坑底隆起作用,周围土体会向基坑内部方向移动而形成沉降槽。如果毗邻现有建筑基础处于该沉降槽的

影响区,则会产生不同的沉降而导致建筑物倾斜、墙体裂缝或结构受损。地下管道对于地层变化非常敏感,特别是年代久远的铸铁管、混凝土管或者陶瓷管,由于其自身的韧性较差,很小程度的不同沉降都会造成接口处漏水或者管体破裂。地铁隧道、地下通道等现有的地下构筑物对于附加变形有着较高的标准限制,而深基坑施工引起的侧向土体位移可能会使其产生收敛变形或者纵向的不均匀沉降。另外,降水造成的地下水面降低会使土体的有效应力增加,从而发生固结压缩进而产生较大面积地面沉降,而且这种沉降是延后并且长期进行的过程,在施工后还会继续发展。

3 深基坑工程施工风险防控措施

3.1 施工前地质勘察与风险评估体系构建

准确的地质勘探是风险防范的基础,其程度以及范围大小对后续的设计参数有重要影响。勘探应根据基坑影响深度范围内不同土层分别进行详细描述,利用静力触探、标准贯入试验以及室内土工试验取得软土地层灵敏度、无侧限抗剪强度、砂土地层相对密度、水平和垂直渗透系数、承压水层厚度及其年内变化情况等信息;对于暗浜、古河道或者障碍物等不良地质体,可采取钻探加地球物理探测手段,如地质雷达或者跨孔地震波CT,来确定它们的平面位置以及纵向延伸长度,防止支护结构穿过软弱地带;而对于周围条件比较复杂的深基坑,则须做抽水或者微渗试验等专门性水文地质测试,以了解土层中的储水能力、透水性和越流量等信息,从而确定合理的降水井深度及排水量。

根据上述勘察结果,需要制定系统的风险评价方法来实现分类管理。采用故障树的方法,以基坑失稳为顶事件,依次拆分出勘察失误、设计错误、施工不当、监测失效等基本事件,计算各个基本事件对顶事件的影响程度;或者采用层次分析法建立目标层、准则层、指标层的关系,由专家给出各个指标的重要性,据此得到各种风险因素的重要程度^[4]。按风险发生的可能性与损失的大小相乘的结果进行分级,高风险事件发生的可能性大于10%,并且有可能造成人员伤亡或巨大的经济损失。对于承压水突涌、围护结构失稳、支撑破坏等高风险事件,应编制专项应急预案,详细规定注浆堵漏、坑内反压、回灌保压等应急处置措施的启动条件及操作步骤,明确应急物资(如快硬水泥、聚氨酯堵漏剂、备用泵)的存放位置和数量,人员疏散路线及集中地点等。勘察资料的完整性和风险评价的准确性影响后续控制措施的效果和成本。

3.2 支护体系全过程质量控制措施

支护体系质量控制须从设计、施工到使用,每一个环节都不能放松,否则就会造成整个支护体系失效,

在设计时要根据地质勘察所提供的土层条件以及基坑开挖深度、邻近建筑物沉降控制目标等,经过多种方案比较选择最合适的围护结构形式(地下连续墙、钻孔灌注桩排桩加止水帷幕、SMW 工法桩等)、支护方式(钢支撑、钢筋混凝土支撑或者两者结合)。同时,在设计过程中应对开挖、降水、支撑拆除等各种情况下的受力和变形进行验算,宜采用弹性地基梁法或者有限单元法进行计算分析,还要考虑到施工中超载、土压力变化、温度作用等因素最不利的情况并加以适当的安全余量,一般不应小于 1.2 倍。

施工期间对各种围护结构有不同要求,在地下连续墙施工中,要严格控制成槽垂直度(不超过 1/300)、泥浆比重(新浆为 1.03~1.05,循环浆不应大于 1.15)黏度(在 30 s~40 s 之间)、混凝土灌注速度(不得低于 2 m/h)、导管埋置深度(一般为 1.5 m~3 m),并进行成槽后槽壁稳定性检查,防止出现坍塌现象。在钻孔灌注桩施工中,要控制好桩底沉渣厚度不大于 50 mm,用超声波检测法或者低应变动测法检测桩基质量,Ⅰ类桩率不小于 90%。支撑施工时,钢支撑要分段张拉至设计值的 80%~100%并固定,安装轴力监测装置监控其轴力变化情况。钢筋混凝土支撑要在达到规定的强度后才能拆模,拆模前先对同条件养护试件强度进行检测。在开挖期间,要依据监测结果及时调整开挖速度及支撑预应力大小。当围护结构位移以两天为一个周期连续两天大于 3 mm/d 或总位移接近报警值时,应停止开挖并采取坑底加固或增加支撑等加固措施。

3.3 周边环境动态监测与保护技术

动态监控是了解基坑及其周围情况最有效的途径,而其监控结果的准确性和及时性又直接影响到可能出现问题的处理效果,因此必须做好这项工作。监测内容包括围护结构顶部水平位移及沉降、围护结构深层侧向位移(测斜)、支撑轴力、坑内外地下水位、周边地面沉降、邻近建筑物沉降与倾斜、地下管线位移等^[5]。监测点布置要保证能反映变形的空间分布特点,在基坑纵向方向上,监测点之间距离不应大于 20 m;在需要重点防护的地方(文物古迹、地铁隧道、高压电线杆等)以及地质条件发生改变的位置(暗浜边缘、不同土层接触面等),应更密集,不超过 10 m。同时,还要根据工程进展进行调整。在土方开挖与降水过程中,由于坑内土壤卸载速度快,水位下降幅度大,应增加频率至每天一次甚至两次;而在主体结构回填时,由于底部和楼层刚度越来越大,变形越来越小,可以降低频率至每隔三天一次。

自动化监测技术大大提高了数据获取及时性和准

确性。使用静力水准仪对各个监测点之间相对沉降进行不间断精确监测(精度为 0.1 mm),固定式测斜仪沿着竖直方向分段量测水平位移,振弦式轴力计测量支撑受力情况。所有的传感器数据由数据采集装置通过 4G 或者无线局域网上传到云上监测平台。在该平台上设置不同级别警报:黄色警报(累计变形达到设计控制值的 70%,超过三天);橙色警报(达到 85%);红色警报(达到 95%)。一旦出现警报,平台就会自动给项目经理、工程师、安全员发送短信以及 APP 消息提醒。对于靠近重要的建筑物或地铁隧道等需要重点防护的目标物,可以采用隔离桩阻止变形传播、跟踪注浆补充土体流失、增加地下连续墙深度进入相对较隔水层的方法来进行防护。在地下水治理过程中采取回灌方式,在坑外布置回灌井,并且保持回灌水的压力和抽取量一致,来防止周围地表下沉。回灌水的质量要符合不能造成含水层堵塞的浑浊程度以及细菌数量的要求。

4 结束语

深基坑施工是一项技术含量高、危险性大的工程。从技术角度来说,围护结构、地下水控制以及土方开挖与支撑体系这三者之间互相影响,“先撑后挖、分层分区”并配合进行是防止变形的有效手段。从风险角度来看,复杂的地层条件、支护质量不稳定性和周围环境的脆弱性构成了最主要的风险来源,并且还有叠加放大的作用。在预防方面,做好施工前详细的勘探分析与评价工作、全过程的质量把控以及实时监控预报形成了全方位防范机制。大多数问题都是由于采取的技术措施与面临的风险特点不相适合所导致,在施工中必须做到“因情施策、适时调整、信息化施工”,根据监测结果不断优化方法。

参考文献:

- [1] 王正帅,许涛涛,陈帅.深厚软土深基坑开挖支护技术在岩土工程施工中的应用探究[J].石材,2026(04):120-122.
- [2] 王鹏飞.深基坑支护施工技术在高层建筑工程中的应用[J].散装水泥,2026(03):41-43.
- [3] 刘琳.深浅交互超大深基坑开挖与支撑协同施工关键技术[J].建筑科技,2026,10(03):147-152.
- [4] 杨林,郭小伟,廖尧凝,等.尼苏尔隧道泵房深基坑止水帷幕施工技术研究[J].建筑机械化,2026,47(03):110-113.
- [5] 伊新妍.深基坑支护施工技术在建筑工程施工中的应用[J].中华建设,2026(03):126-128.

复合土工材料在建筑地基沉降控制中的应用

赵志勇, 赵景睿, 刘长静*

(德州景泽土工材料有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 建筑地基沉降是岩土工程领域的常见隐患, 易引发结构开裂、功能失效, 缩短工程使用寿命并威胁安全。针对传统沉降控制方法适配性不足、效果有限的问题, 本文结合复合土工材料的加筋、排水、防渗特性, 通过理论剖析、参数优化与工程实测, 构建适配不同地基类型的材料选型、铺设方案及沉降控制体系, 明确材料性能与沉降控制效果的关联规律, 以期为建筑地基沉降控制提供技术参考。

关键词 复合土工材料; 建筑地基; 沉降控制; 选型优化

中图分类号: TU531.7; TU433

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.032

0 引言

建筑地基沉降控制是岩土工程的核心技术方向, 软土、岩溶等复杂地质区域中, 地基土压缩性与渗透性易诱发不均匀沉降, 直接影响建筑结构稳定与使用安全^[1]。传统沉降控制手段存在施工工序复杂、工期冗长、成本偏高的问题, 难以匹配现代建筑对沉降控制的高精度要求^[2]。本文聚焦复合土工材料的功能特性, 以理论分析为基础、工程实测为支撑, 探索其在地基沉降控制中的应用路径, 优化技术方案并验证应用成效, 为同类工程提供可借鉴的实践思路。

1 复合土工材料与建筑地基沉降的核心理论基础

1.1 复合土工材料的分类及核心性能

复合土工材料由两种及以上单一土工材料经复合工艺整合而成, 按功能可分为三类核心产品。加筋类以土工格栅为核心, 常见聚酯 PET (Polyethylene Terephthalate) 和玻璃纤维 GF (Glass Fiber) 两种材质, 二者受力特性各有适配场景, 可根据地基加筋需求灵活选用, 打破传统单一材质格栅的适配局限。排水类由土工布与排水板组合, 长丝针刺土工布作为核心组件, 可助力地基土体排水, 缓解土体软化^[3]。防渗类以高密度聚乙烯复合土工膜应用最广, 依托自身材质阻隔地下水渗透、保障地基稳定, 这种选型也兼顾了施工便捷与工程实用。

1.2 建筑地基沉降的形成机理及影响因素

建筑地基沉降源于荷载作用下地基土的压缩变形, 核心为土颗粒间孔隙水排出、孔隙体积逐步缩减, 这一变形过程可划分为瞬时沉降、固结沉降与次固结沉

降三个连续阶段。影响沉降的关键因素涵盖地基土自身属性、施加荷载的规模、施工工艺的实施细节及地下水的赋存状态^[4]。软土地基因土体结构特性, 沉降发生的概率与幅度相对偏高。研究中发现, 传统分析多割裂各因素间的联动关系, 本文将地基土属性与荷载工况动态关联, 更贴合实际工程的沉降演化规律。

1.3 复合土工材料控制地基沉降的理论分析框架

复合土工材料通过加筋、排水、防渗的协同作用实现沉降控制, 本文构建了“性能适配—机理阐释—效果预判”的理论分析框架。加筋作用依托材料与土体的摩擦嵌锁效应, 分散地基应力并提升土体抗剪强度; 排水作用加速孔隙水消散, 缩短土体固结周期; 防渗作用减少地下水渗透, 避免土体软化变形。框架以分层总和法为基础, 结合复合地基沉降计算模型, 引入沉降计算经验系数 ψ , 依据压缩模量 E 取值完成沉降量精准预判, 为后续技术方案设计提供核心理论支撑。

2 复合土工材料的选型优化及性能适配分析

2.1 不同地基类型的复合土工材料选型原则

复合土工材料选型需锚定地基土性质、沉降控制需求与工程成本, 遵循性能匹配、经济合理、施工便捷的核心准则。软土地基优先选用排水型与加筋型复合材料, 搭配长丝针刺土工布与双向 PET 土工格栅; 岩溶地基重点采用防渗型 HDPE (High-Density Polyethylene) 复合土工膜, 辅以加筋材料提升结构整体性; 砂土地基选用高强度土工格栅, 增强土体抗液化能力^[5]。选型过程需验证材料抗拉强度、渗透系数等核心参数, 确保与地基处理需求精准契合。

作者简介: 赵志勇 (1976-), 男, 专科, 研究方向: 机织高强聚酯土工布的性能。

***通信作者**: 刘长静 (1977-), 女, 本科, 研究方向: 机织高强聚酯土工布的性能。E-mail: 1033998416@qq.com

2.2 复合土工材料核心性能参数的优化设计

针对不同工程场景开展材料参数优化,软土地基排水用长丝针刺土工布选用 200 g/m² 规格,断裂强度不低于 10.5 kN/m, CBR (California Bearing Ratio) 顶破强力不低于 1.8 kN; 加筋用双向 PET 土工格栅标称强度取 20 kN/m ~ 30 kN/m, 网格尺寸设定为 20 mm × 20 mm。防渗用 HDPE 复合土工膜膜厚 0.5mm, 密度不低于 940 kg/m³, 拉伸屈服强度不低于 7 N/mm。参数取值同步匹配现行土工合成材料测试规范, 同批次材料需完成平行试验验证, 将参数离散性控制在工程允许区间内。参数优化需结合地基荷载计算结果开展, 避免过度设计造成成本浪费, 或参数不足导致沉降控制失效。

2.3 复合土工材料的兼容性及适配性验证

复合土工材料与地基土、施工工艺的适配性直接决定沉降控制效果, 需通过室内试验完成兼容性验证^[6]。在软土地基场景中, PET 土工格栅与粉质黏土的摩擦系数 ≥ 0.5, HDPE 复合土工膜与土体的黏结强度 ≥ 25 kPa; 岩溶地基场景下, HDPE 复合土工膜与注浆材料的黏结强度满足施工要求, 无剥离现象发生。试验过程同步控制环境温湿度与土体含水率, 最大程度还原工程现场土体的真实赋存条件。适配性验证采用室内剪切试验与现场试铺相结合的方式, 确保材料在实际工程中稳定发挥功能。

3 复合土工材料在建筑地基沉降控制中的施工工艺及应用

3.1 施工前期准备及地基预处理工艺

施工前期需完成地基勘察、材料进场检测与场地平整, 地基预处理工艺需依据土性特征针对性开展^[7]。软土地基采用换填垫层处理, 换填厚度 0.5 m ~ 1.0 m, 选用级配砂石作为垫层材料, 压实系数 $\lambda_c \geq 0.95$; 岩溶地基采用注浆加固工艺, 注浆压力控制在 0.3 MPa ~ 0.5 MPa, 注浆孔间距 1.5 m ~ 2.0 m。注浆完成后需开展钻孔取芯检测, 核验注浆体完整性与地基土体的加固效果。材料进场需检测抗拉强度、渗透系数等核心参数, 不合格材料严禁入场使用, 检测标准严格遵循相关标准, 保障施工基础满足设计要求。

3.2 复合土工材料的铺设工艺及关键控制要点

铺设工艺需结合材料类型制定差异化方案, 土工格栅采用纵向铺设方式, 搭接宽度不小于 150 mm, 搭接处通过缝合连接, 缝合间距控制在 200 mm 以内, 铺设时张拉应力维持材料抗拉强度的 30% ~ 50%。HDPE 复合土工膜铺设采用平铺法, 搭接宽度不小于 100 mm, 通过热焊工艺完成连接, 焊接温度控制在 180 °C ~ 220 °C, 焊接强度不低于材料自身强度的 80%。排水型土工布铺设需与排水板配合, 排水板间距 1.0 m ~ 1.5 m, 插入深度直达硬土层, 确保排水通道畅通无阻。

3.3 复合土工材料应用的工程实测及数据对比

选取软土地区住宅地基与岩溶地区厂房地基开展工程实测, 分析复合土工材料的沉降控制效果。实测采用沉降观测仪, 观测周期为施工完成后 6 个月, 记录不同时段沉降量, 同步采集未采用复合土工材料的传统地基沉降数据, 通过对比明确材料应用价值。表 1 为两类工程的实测数据统计, 直观呈现复合土工材料的沉降控制成效。

从表 1 数据能直观地看到, 软土地基采用 PET 土工格栅与长丝土工布复合应用后, 6 个月累计沉降量降至 28 mm, 沉降速率 0.15 mm/d, 相较于传统工艺沉降量大幅缩减; 岩溶地基采用 HDPE 复合土工膜与 GF 土工格栅后, 累计沉降量 19 mm, 沉降速率 0.10 mm/d, 沉降稳定性显著提升。两类地基的实测结果表明, 复合土工材料可有效抑制沉降发展, 降低沉降速率, 且适配不同地质条件, 应用效果稳定可靠, 完全符合工程设计要求。

3.4 施工过程中的质量控制及常见问题处理

施工质量控制聚焦材料铺设、连接与地基压实三个核心环节, 铺设前需清理场地杂物, 避免尖锐物体刺破材料; 连接部位需开展抽样检测, 确保连接强度达标^[8]。现场安排专人全程跟进作业全流程, 对铺设、焊接、碾压等关键工序完成逐段逐项的复核。施工中常见问题包括材料搭接不规范、焊接不牢固、地基压实不足, 针对此类问题需重新搭接缝合、补焊处理, 对压实不足区域开展二次碾压, 保障压实系数满足设

表 1 不同地基类型复合土工材料应用沉降实测数据

地基类型	复合土工材料类型	6 个月累计沉降量 (mm)	沉降速率 (mm/d)
软土地基	聚酯土工格栅 + 长丝土工布	28	0.15
软土地基 (传统工艺)	无	65	0.36
岩溶地基	HDPE 复合土工膜 + 玻璃纤维格栅	19	0.10
岩溶地基 (传统工艺)	无	42	0.23

计标准。质量控制需全程跟踪检测，留存完整检测记录，确保施工质量符合规范要求。

4 复合土工材料沉降控制效果评价及优化策略

4.1 沉降控制效果的评价指标及评价方法

沉降控制效果评价选取累计沉降量、沉降速率、不均匀沉降差三个核心指标，评价标准遵循建筑地基基础工程施工质量验收规范^[9]。累计沉降量需控制在设计允许范围，软土地基允许沉降量≤30 mm，岩溶地基允许沉降量≤20 mm；沉降速率稳定后需≤0.2 mm/d；不均匀沉降差需≤0.002。观测点位布设覆盖建筑角点、

中点及荷载突变位置，按固定周期完成连续数据采集。评价采用现场观测与理论计算结合的方式，对比实测数据与设计值，分析材料应用效果，判断是否满足工程使用需求。

4.2 不同工况下复合土工材料的沉降控制效果对比

选取不同荷载、地质工况开展对比分析，明确复合土工材料的适配性特征。表2为不同工况下的实测数据统计，为材料选型与工艺优化提供数据支撑。

表2呈现的不同工况数据显示，低荷载软土地基累计沉降量18 mm，不均匀沉降差3.2 mm；高荷载工

表2 不同工况下复合土工材料沉降控制效果对比

工况类型	复合土工材料类型	累计沉降量（mm）	不均匀沉降差（mm）
低荷载（20 kPa）软土地基	聚酯土工格栅+长丝土工布	18	3.2
高荷载（40 kPa）软土地基	聚酯土工格栅+长丝土工布	28	4.5
裂隙发育岩溶地基	HDPE复合土工膜+玻璃纤维格栅	22	2.8
裂隙不发育岩溶地基	HDPE复合土工膜+玻璃纤维格栅	15	2.1

况下累计沉降量升至28 mm，不均匀沉降差为4.5 mm，荷载增加带来沉降量上升，不过数值仍在设计允许范围内。裂隙发育岩溶地基累计沉降量22 mm，不均匀沉降差2.8 mm；裂隙不发育工况下累计沉降量15 mm，不均匀沉降差2.1 mm，裂隙发育会加剧沉降量与不均匀性。不同工况下复合土工材料均能有效控制沉降，高荷载、裂隙发育工况下需针对性优化材料参数，进一步提升控制效果。

4.3 复合土工材料沉降控制的优化策略及应用展望

高荷载软土地基选用高强度PET土工格栅，标称强度提升至30 kN/m~40 kN/m，搭配加厚型土工布，增强加筋与排水效果；裂隙发育岩溶地基采用双层HDPE复合土工膜，增加防渗层数与结构整体性^[10]。优化后需通过室内试验与现场试铺验证效果，确保沉降控制指标达标。通过工程实践发现，传统沉降控制仅关注静态参数设计，忽略动态工况影响，通过传感器实时采集沉降数据，动态调整材料铺设参数，拓展复合土工材料在复杂地质场景中的应用范围，提升沉降控制的精细化与长效性。

5 结束语

本文围绕复合土工材料在建筑地基沉降控制中的应用展开研究，解决了传统沉降控制方法适配性不足、效果有限的核心问题，通过工程实测验证了材料的应用成效。构建了“理论分析—选型优化—施工控制—效果评价”的完整技术体系，为建筑地基沉降控制提供了技术参考，但是对极端地质条件下材料的长期稳

定性研究还不够深入。未来将聚焦复杂地质场景，结合新型复合土工材料研发，完善技术体系，提升沉降控制的长效性与可靠性。

参考文献:

[1] 王艳,曹林佳.水利工程用土工膜材料与施工导流方案优化设计[J].粘接,2026,53(03):755-758.
[2] 王之辉.建筑施工中的地基处理与基础施工技术研究[J].城市建设,2026,23(04):221-224.
[3] 刘善华.橡胶复合土工材料在边坡防护工程中的加固效果与耐久性[J].中国轮胎资源综合利用,2026(02):132-134.
[4] 刘立亭,杜辉.复合土工膜在小水库坝体防渗加固中的应用分析[J].河南水利与南水北调,2025,54(12):39-41.
[5] 李凤会.土工合成材料在防洪堤防溢流防护中的应用研究[J].水利科学与寒区工程,2025,08(08):104-107.
[6] 高珍珍,章纬之.粘性土地基下高层建筑基础沉降不同计算方法与实测对比分析[J].广东建材,2025,41(08):107-110.
[7] 危福兵,曹健辉.高层建筑地基长期沉降评价研究[J].四川建材,2025,51(06):140-142.
[8] 路世龙.复合土工膜施工技术及其质量控制探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(05):66-68.
[9] 秦浩.建筑地基沉降检测与加固处理措施研究[J].新城建科技,2025,34(04):138-140.
[10] 朱广鳌.特殊地质条件下高层建筑物地基沉降分析[A]2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册)[C].《施工技术》杂志社,施工技术编辑部,2024.

10 kV 配电运行中故障产生的原因及防范措施

邱 鹏

(北京大学动力中心, 北京 100871)

摘 要 10 kV 配电系统作为电力传输的核心环节, 其稳定运行直接关系到区域供电的可靠性与经济性。本文深入剖析设备线路缺陷、自然环境影响、外力破坏三类核心故障的产生机理, 结合具体技术参数与运维数据展开研究。结果表明, 强化设备全周期运维、融合新技术装备、完善自然风险预警、精准管控外力破坏, 可有效降低故障发生率, 缩短故障修复时长, 提升 10 kV 配电系统运行的稳定性与安全性。

关键词 10 kV 配电运行; 设备线路; 自然因素; 外力破坏; 故障预警

中图分类号: TM755

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.033

0 引言

随着电力需求的持续增长, 10 kV 配电系统覆盖范围不断扩大, 运行环境愈发复杂, 各类故障频发不仅影响电力正常供应, 还可能造成经济损失与安全隐患。10 kV 配电运行故障指系统在输电、配电过程中, 因各类因素导致设备、线路无法正常工作, 进而引发供电中断或异常的现象。深入研究其故障产生原因并制定针对性防范措施, 能够优化运维策略、减少故障损失、提升供电保障能力, 对于推动配电系统高质量运行具有重要的现实意义。

1 10 kV 配电运行中故障的产生原因

1.1 设备线路引发的故障

10 kV 交联聚乙烯电缆接头制作工艺的规范性缺失, 搭配配电设备运维管控的疏漏, 共同催生了配电网运行中的各类设备线路故障。导体压接电阻超出 $5\text{ m}\Omega$ 且绝缘层搭接长度不足 15 mm 时, 接头处电场强度会较正常工况提升 2.3 倍, 长期运行后绝缘介质损耗角正切值会从初始的 0.002 逐步升至 0.015 以上, 最终引发绝缘击穿。在 10 kV 配电设备运行中, 真空断路器触头接触电阻超过 $100\text{ }\mu\Omega$ 时会出现局部发热, 温升速率可达 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, 触头烧蚀深度超过 1.5 mm 则分合闸可靠性下降 40%; 运行年限超 20 年的 10 kV 柱上断路器, 绝缘套管击穿电压较额定值 (42 kV/min) 降低 30% 以上, 未及时开展预防性试验和更换的设备, 直接导致 10 kV 配电线路接地故障、相间短路故障频发^[1]。

1.2 自然因素导致的故障

极端自然环境的反复作用, 会对 10 kV 配电线路的结构完整性和绝缘性能造成不可逆的影响, 进而诱发各类运行故障。8 级及以上大风天气中, 10 kV 架空线路导线摆动幅度超过 300 mm 时, 导线与杆塔横担之间的摩擦会导致绝缘层破损速率提升至每年 0.2 mm/处 , 如某山区 10 kV 线路在 2024 年夏季台风期间, 瞬时风速达 32 m/s , 导线与树枝碰撞摩擦后, 绝缘层破损长度累计达 1.2 m , 引发 3 处相间短路故障。在雷击场景下, 10 kV 线路绝缘子若未采用防污型设计, 雷电冲击耐受电压低于 50 kV 时, 雷击闪络率可达 8 次 / ($100\text{ km}\cdot\text{a}$), 加装金属氧化物避雷器的线路, 雷击过电压幅值可从 150 kV 降至 35 kV 以下, 雷击故障发生率降低 76%^[2]。

1.3 外力破坏导致的故障

从 10 kV 配电运行实际运维数据来看, 外力作用引发的故障占比居高不下, 且多与施工操作不规范、周边环境管控不到位密切相关。在城市道路施工中, 挖掘机、吊车等大型机械作业时, 若与 10 kV 架空线路的安全距离小于 1.5 m , 机械金属部件接触导线后会引发相间短路, 单次碰撞可能导致导线断裂, 断裂拉力达 12.8 kN 的 10 kV 钢芯铝绞线, 修复时间平均需 6 h。10 kV 线路周边漂浮物 (彩钢瓦、塑料薄膜、风筝线等) 缠绕导线后, 若漂浮物重量超过 0.5 kg , 会导致导线弧垂下降 200 mm 以上, 引发相间短路。线路保护区内违规植树时, 树木生长至与导线距离小于 0.8 m 时,

作者简介: 邱鹏 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力运维与安全。

树枝与导线的放电距离不足,雨季时会引发接地故障,单条 10 kV 线路周边违规树木每年引发故障次数达 0.9 次 /km,对配电网运行经济性影响较大。

2 10 kV 配电运行中故障防范措施

2.1 设备线路维护维修提质增效

2.1.1 配电设备定期巡检与状态管控

运维人员需依托红外测温、局放检测等专业技术手段,构建覆盖 10 kV 柱上断路器、电缆分支箱、环网柜等核心设备的全方位巡检网络,重点监测真空断路器触头接触电阻、电缆接头压接阻值、设备绝缘介质损耗角正切值等关键参数^[3]。结合设备运行年限与负荷等级制定差异化巡检周期,新投运设备每季度开展一次全面检测,运行年限超 15 年的老旧设备缩短至每月一次,同步建立完善的设备状态台账,对检测中发现的触头烧蚀深度超 1.5 mm、绝缘套管击穿电压低于 29.4 kV、介质损耗角正切值超 0.01 等异常情况,在 24 h 内启动隐患处置流程。

2.1.2 线路内部设计细节优化升级

设计阶段需结合线路敷设环境、负荷增长趋势与地形地貌特征,优化电缆路径规划与杆塔布局,在电缆接头密集区域采用分段绝缘设计,通过增设绝缘屏蔽层、优化接头结构降低接头处电场强度峰值,依据《10kV 及以下电缆运行规范》明确电缆导体压接电阻、绝缘层搭接长度等核心工艺参数,要求接头压接电阻严格控制在 5 mΩ 以内、绝缘层搭接长度不低于 15 mm。施工过程中引入标准化作业流程,对电缆剥切、压接、绝缘恢复等关键环节进行全程旁站监督,杜绝因操作不规范导致的接头绝缘衰减问题,针对架空线路,优化导线弧垂设计与杆塔横担间距,根据线路所在区域风速、覆冰厚度等参数,将导线安全摆动幅度控制在 300 mm 以内,升级线路金具与绝缘子选型,采用耐候性更强的复合绝缘子与防污型瓷绝缘子,提升线路抗老化、抗污秽能力,延长设备线路使用寿命。

2.2 新技术设备深度融合应用

2.2.1 真空断路器赋能线路运维管控

运维团队依托真空断路器的规范化使用构建线路运维安全管控体系,针对 10 kV 配电线路关键节点合理配置真空断路器,结合线路负荷等级与运行环境,选用小电流的适配型号,将其精准部署于电缆分支箱、环网柜及线路分段处,形成分级保护网络,见图 1。在每台真空断路器上配置状态监测模块,实时采集触头温度、分合闸线圈电流、灭弧室气压等关键参数,故障发生时,真空断路器可在 0.02 s 内快速分闸,切断

故障线路与正常线路的连接,避免故障扩散蔓延。通过真空断路器的智能联动控制,实现线路故障的快速隔离与分段供电,减少故障停电范围,同时定期对真空断路器进行预防性试验,检测灭弧室绝缘性能与机械操作可靠性,及时更换触头烧蚀深度 > 1.5 mm、绝缘老化的部件,优化运维流程^[4]。

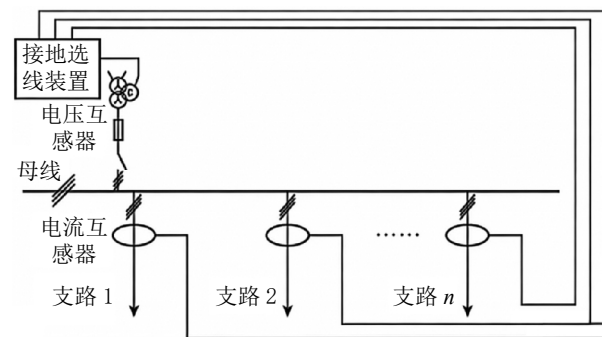


图 1 小电流接地自动选线装置工作原理

2.2.2 运行状态自动化监测体系构建

以传感器采集为核心,在电缆接头、断路器、绝缘子等关键部位部署温度、电流、泄漏电流、局放等类型传感器,通过无线通信技术将监测数据实时传输至后台监控平台,电缆接头温度监测采用红外温度传感器,监测精度达 ±0.5 °C,当接头温度超过额定运行温度 15 °C 时,系统自动触发预警信号并推送至运维人员移动终端,绝缘子泄漏电流监测传感器实时捕捉电流变化,当电流值突破 20 mA 阈值时,系统同步启动故障溯源分析,结合历史数据预判绝缘劣化趋势。监测数据处理中引入功率损耗计算模型对电缆接头、导线接头的功率损耗进行动态核算,见式(1):

$$P = \frac{I^2 R}{t} \quad (1)$$

式(1)中,P为电缆接头、导线接头的功率损耗,单位为瓦特(W);I为通过接头的电流值,单位为安培(A);R为接头的接触电阻,单位为欧姆(Ω);t为电流通过接头的时间,单位为秒(s)。

当单位时间损耗值超过 0.2 W 时,提示运维人员排查接触不良问题,后台平台依托大数据分析算法,对监测数据进行趋势分析与异常关联挖掘,自动生成设备运行状态报告,实现故障提前预警与精准处置,缩小设备故障响应时间,降低故障影响范围。

2.3 自然因素预警防范体系完善

2.3.1 线路防雷防护能力强化

针对雷击高发区域优化线路防雷装置布局,在每基杆塔处加装金属氧化物避雷器,避雷器额定电压选取 17 kV,持续电流控制在 5 kA 以下,确保雷电过电

压快速泄放,对线路绝缘子进行升级改造,采用雷电冲击耐受电压不低于 50 kV 的防污型复合绝缘子,替代传统瓷绝缘子,提升线路抗雷击闪络能力。架设架空地线,地线架设高度高于导线 1.5 m,有效拦截直击雷,降低雷击导线的概率,在电缆线路段,采用电缆终端头加装防雷保护装置,与电缆本体的绝缘防护体系形成协同,建立防雷设备定期检测制度,每年雷雨季节前对避雷器绝缘电阻、动作次数进行检测,对绝缘电阻低于 10 MΩ 的避雷器及时更换,确保防雷装置始终处于有效工作状态。

2.3.2 气象监测预警与应急适配

运维部门联合当地气象部门搭建线路专属气象监测网络,在线路沿线关键节点安装风速仪、雨量计、雷电定位仪等设备,实时采集瞬时风速、降雨量、雷电强度、覆冰厚度等气象数据,同时在各监测节点、线路杆塔及风险路段同步设置标准化气象警示标识,搭配箭头指示风险区域与避险方向,直观传递气象风险信息,见图 2。监测数据传输至气象预警平台后,通过算法模型进行分析研判,当监测到瞬时风速达 20 m/s、8 级及以上大风、降雨量超 50 mm/h 等临界值时,平台自动触发分级预警信号,通过短信、APP 推送等方式向运维人员推送预警信息及风险路段提示^[5]。

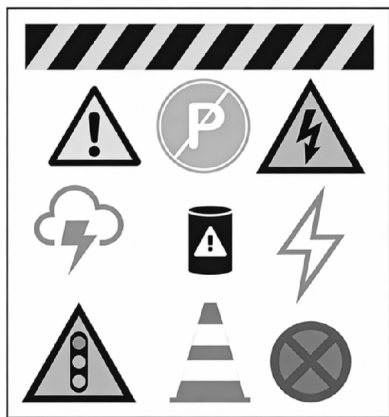


图 2 警示标志

2.4 外力破坏事故精准管控

2.4.1 交通事故类外力破坏防控

在城市道路施工、车辆通行密集的线路路段,设置明显的线路安全警示标识,标识间距不超过 500 m,标注线路走向、电压等级、安全距离等关键信息,联合交通管理部门,在事故高发路段增设交通警示标志与减速带,规范车辆行驶路线,对线路保护区内的施工工地,要求施工单位提前办理线路保护手续,签订安全防护协议,明确施工机械与线路的安全距离不低

于 1.5 m,安排专人进行现场监护,及时制止违规操作行为,建立交通事故类故障应急处置机制,故障发生后,运维人员依托 GPS 定位与现场勘查,快速确定故障类型与影响范围,优先采取临时停电、故障隔离等措施控制故障扩散,对导线断裂、杆塔倾斜等严重故障,调配应急抢修队伍与物资,按照“先恢复供电、后彻底修复”的原则,在 6 h 内完成临时抢修,恢复区域供电,建立事故复盘机制。

2.4.2 建筑设施类外力破坏治理

明确 10 kV 配电线路保护区范围,依据相关规范,10 kV 架空线路保护区为导线边线向外侧水平延伸 5 m、垂直地面向上 10 m 的区域,电缆线路保护区为线路两侧各 0.75 m 的区域,通过现场划定、标识牌标注、线上公示等方式,明确保护区边界,严禁在保护区内进行建筑施工、堆放易燃易爆物品、违规植树等行为,联合城管、住建等部门,建立线路保护区施工联合审批机制,对保护区内的建筑项目,在审批前征求供电部门意见,要求施工单位制定线路保护方案,落实防护措施,在建筑施工工地周边设置防护围栏与警示标识,对施工机械进行全程管控,避免机械碰撞线路,定期开展线路保护区专项整治行动,清理违规搭建的建筑设施、树木等障碍物,对违规行为依法依规处理,优化线路与建筑设施的间距设计。

3 结束语

本文围绕 10 kV 配电运行故障,从设备运维、技术应用、自然预警、外力管控四个维度提出针对性防范措施,形成完整的故障防控体系。未来可进一步结合智能运维技术,深化大数据、人工智能与配电运行的融合应用,优化故障预警与溯源精度,探索更具适配性的个性化防控方案,持续提升 10 kV 配电系统的智能化、精细化运行水平,更好地满足电力供应的高质量需求。

参考文献:

- [1] 李坤.10kV 配电线路故障原因分析及运行维护措施[J]. 电力设备管理,2024(22):41-43.
- [2] 刘靖平.10kV 配电线路故障原因分析及运行维护[J]. 电力设备管理,2024(22):68-70.
- [3] 黄文明.10kV 配电运行中故障的产生原因及防范[J]. 电气技术与经济,2023(08):307-309.
- [4] 唐朝栋.10kV 配电设备运行故障及解决方案[J]. 电子技术与软件工程,2021(23):204-206.
- [5] 贾冬霞.10kV 配电线路故障与其自动化运行维护研究[J]. 电力设备管理,2021(09):57-58.

建筑施工安全管理中的常见问题及对策研究

魏天文

(山东沂承建设工程有限公司, 山东 临沂 273300)

摘要 建筑施工行业具有户外工作、高空作业多、交叉作业繁杂、人员流动性大等行业特点, 施工现场发生事故屡见不鲜, 成为阻碍该行业发展的一大难题。基于此, 本文针对建筑施工现场进行研究, 探讨提高施工现场安全管理的重要性, 分析在管理方面存在的问题, 以及在人员素质、防护措施和外界环境等方面存在的问题, 并提出加强责任制建设、重视培训教育、加强现场防护、改善施工环境的具体建议, 以期对提高施工现场的安全管理水平有所裨益。

关键词 建筑施工; 施工现场; 安全管理; 人员素质; 安全培训

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.034

0 引言

建筑业是我国的支柱产业, 其安全生产状况关乎劳动者的生命安全以及行业的持续健康发展。近年来, 随着城市化的推进与基础设施建设步伐的加快, 各类建筑工地数量众多, 工程量大, 施工技术要求高, 给安全管理工作带来很大压力。从数据上看, 建筑工程领域发生的各类生产安全事故数量仍然较大, 高空坠落、物体打击、坍塌、机械伤害等常见的事故频繁发生, 反映出施工现场的安全管理工作还十分薄弱。施工现场是建筑生产的主战场, 也是各种危险源最集中、最难管控的地方。由于施工现场自然环境不断变化, 工作环境具有临时性和流动性, 人员组成复杂, 因此很难实现有效的安全管理。一些施工单位为了赶进度、图利益, 忽视甚至放弃安全管理, 安全隐患未消除、整改措施不到位、责任不明确的现象十分普遍。因此, 研究施工现场安全管理中存在的问题并提出解决办法, 对防止事故发生、保障工人人身安全、促进建筑业健康有序发展具有重要意义。

1 加强建筑施工现场安全管理的重要意义

1.1 保障作业人员生命安全的必然要求

建筑施工一线作业人员经常处在高处作业、临边、洞口以及各种机械设备附近的工作环境中, 随时有生命危险。施工现场安全管理就是发现并消除各种隐患, 在保证工人按章操作的前提下提供良好的保护措施, 降低事故发生率。做好施工现场安全管理, 建立健全防范机制是对每一个工人的生命健康负责, 也是以人为本思想的具体表现。

1.2 提升企业经济效益与管理水平的内在需要

安全事故对施工企业造成的影响是广泛的, 不仅有直接经济损失(赔偿费、医药费、停工损失等), 还有由于工期延误导致的二次投入增加、企业声誉受损、难以获得新的工程项目机会等无形损失^[1]。而有效的安全管理则能避免事故发生后所产生的一系列问题, 保证工程顺利进行, 合理使用资源。此外, 安全管理水平也是评价一家施工单位好坏的标准。通过对施工现场的安全管理, 可以使企业不断优化自身的组织管理、技术交底以及过程管控等工作, 进而促进整个企业的发展。

1.3 维护行业形象与社会稳定的现实要求

建筑施工行业一直被称为“高危行业”“事故频发”。这样的行业形象不利于吸引优秀人才加入, 也对行业发展造成一定阻碍。一旦发生重大安全事故, 往往会受到全社会的高度关注, 甚至成为焦点问题, 给政府主管部门带来很大的工作负担。提高施工现场管理水平, 减少事故发生, 是改变行业不良印象, 赢得公众信任的有效手段。而从更高层次讲, 建筑工地安全情况也是衡量一个国家和地区治理能力的一个重要方面, 关乎社会稳定大局。

2 建筑施工现场安全管理中的常见问题

2.1 管理制度执行层面存在的突出问题

施工现场普遍存在的问题是施工现场的安全管理制度难以落实到位。一些施工单位虽然制定了较为完善的安全生产管理体系, 但是在实施过程中大打折扣。安全检查只走过场, 检查记录表上勾勾画画、签字齐全,

作者简介: 魏天文(1986-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程。

但是施工现场问题依然存在：安全技术交底走过场，交底内容脱离实际工作，工人不了解交底的具体内容；隐患排查治理闭环管理不到位，发现隐患后的处理责任人不明确、监督检查不到位，相同的问题屡次发生。而且有些施工现场的生产安全事故责任追究制度流于形式，项目经理、安全员、班组长等主要负责人之间的安全生产责任不清，出现问题互相推诿，造成施工现场无法进行有效的处罚。

2.2 人员素质与安全培训方面的突出问题

施工现场作业人员以农民为主体，这一直是常态，而这些农民普遍学历较低、流动性较大以及缺乏安全生产知识和技能^[2]。首先，企业组织的安全教育流于形式，内容枯燥、方法单调，通常采取集中上课、朗读的方式进行，不能引起工人的兴趣，也未能使其足够重视；其次，培训时间不足，有的新工人不到半个小时就匆匆上场干活，在不了解自己工作的危险性、不懂操作规则的情况下工作；再次，特种作业人员持证上岗制度落实不到位，无证操作、证件过期、人证不符等问题屡见不鲜；最后，管理人员素质不高，有些项目经理缺乏必要的专业知识，不能准确辨识出安全隐患。

2.3 现场安全防护措施层面的突出问题

施工现场安全防护设施设置存在较多问题。临边、洞口防护上，防护栏杆缺失、高度不够、固定不牢，甚至用一些简单的木棍、铁丝绑扎等方式代替，其安全性无法保障；脚手架工程中，连墙件设置数量不足、剪刀撑搭设不符合要求、脚手板未铺满、安全网破烂不堪等情况较为常见；高处作业吊篮以及附着式升降脚手架等大型设备，缺乏日常巡检和维修保养工作，安全锁、防坠落等重要部位出现问题也不进行更换；临时用电管理方面，电线乱拉乱接、“一闸多机”现象普遍，缺少接地措施，电缆破损漏电等问题经常发生；消防安全管理方面，动火审批不到位，易燃物品堆放杂乱无章，灭火器配备不足或已经过期失效，存在较大安全隐患。

3 加强建筑施工现场安全管理对策

3.1 健全并严格落实现场安全管理制度

对于制度落实不到位问题，则需要从制度建设以及制度实施监督等方面进行完善。在制度建设方面，要根据现场实际，编制切实可行、量化的安全管理规定，防止制度规定过于原则化^[3]。明确项目经理、项目总工、安全员、班组长以及一线工人各自安全责

任，签订安全责任书，做到“横向到边、纵向到底”。在此基础上，还要对每个岗位具体工作内容做出详细分工，比如项目经理每月至少开展一次全面安全检查，项目总工需在专项施工方案内单独编写安全技术措施篇章，安全员每天做好巡查记录并签字留存。同时，规章制度也要有明确时间点及数量要求。例如：“高处作业人员每天上班前自己对自己所佩戴劳动保护用品进行检查，班组长检查人数不得少于 30%”“临时用电线路每隔两周对其绝缘电阻测试一次，并将结果记录保存以备查阅”。如此，将责任拆解为具体任务、明确到人、限定时间节点，并通过流程记录与定期反馈实现全链条追踪，才能让制度真正落地生根。

在执行监督方面，建立健全常态化安全检查制度，采取定期检查与不定期抽查相结合的方法，特别是对重要工序以及重要部位进行全过程监控。推行隐患整改“销号制”，对于存在的问题要落实责任人、整改时限及验收标准等，做到闭环管理。设立奖惩机制，将安全管理工作成绩纳入项目经理绩效考核以及分包商准入条件中，增加制度执行力。同时，在实际工作中实行“日巡查、周检查、月评比”的三级管理模式：每天至少进行两次全面检查，对于一般安全隐患立即督促整改；每周由项目经理带领相关人员进行一次综合检查，覆盖所有施工区域并记录成文；每月对各班组的安全工作进行评分，最后一名的班组必须接受培训。隐患整改“销号制”是指每一个问题从被发现到整改完毕都必须在系统内有迹可循，逾期未处理的问题会由系统自动提醒上级领导。奖惩制度要具有时效性和差异性，对于及时发现并且消除较大安全隐患的工人给予物质奖励，而对于屡次发生相同问题的工作小组加倍处罚并且约见其所属分包商负责人。

3.2 强化施工现场人员教育培训实效

提高人员安全素质是解决安全管理问题的重要一环。培训内容要具有针对性和实用性，针对不同的工种、不同的岗位所面临的风险编写不同的教材，重点讲述本岗位的操作规定、危险源辨识的方法、应急避险的方法等。培训方式应多种多样，在传统的课堂授课的基础上增加案例分析、现场演示、VR 事故体验以及实际操作考核等形式，使培训更有吸引力也更有效果。例如：对钢筋工人的培训，培训教材应该围绕钢筋绑扎过程中的具体风险展开。搬运长料时的转体动作、柱箍筋安装时的临时固定方法、机械连接过程中的防护罩使用要求等，而不是面面俱到的安全知识。而 VR 事故体验设备可以模拟高空坠落、物体打击、触

电等情况,使工人身临其境感受到违章带来的后果,这明显要比单纯地说教好得多。实际操作考核部分则是让工人上台演练灭火器的使用、安全帽的正确佩戴、漏电保护器的工作情况等,由考官逐项评判,不合格的一律不予结业。

严格培训时间规定,新进入工地人员必须经过规定的岗前安全教育培训并经考核合格后方可上岗,严禁“先上岗、后培训”。建立作业人员安全教育培训档案,记载其每次参加教育培训情况以及考核结果,特别是流动性较大工人实行“一人一档”管理^[4]。加强特种作业人员资质审查及继续教育工作,确保证件合法有效,技术水平满足要求。同时,还要重视对项目经理等项目管理人员业务能力培养,定期开展安全法律知识、技术规范、风险管控等方面的学习培训。对于流动性较大的工人,培训档案要随之流动,在他们进场时检查上一个单位培训情况,如三个月以上,则对他们进行全面再培训。特种作业人员操作证有效期为六年,每隔三年需接受一次继续教育,项目经理部应在证件到期前两个月完成续证手续,防止因证件过期造成工人无证上岗。对项目经理等项目管理人员的安全教育培训不能仅局限在会议室里讲授,要组织他们去无安全事故施工项目参观学习,了解他们的临边防护措施、可视化安全技术交底方式等,每半年对安全法律法规进行一次闭卷测试,成绩计入个人年终考评。

3.3 规范施工现场安全防护设施管理

安全防护设施布置合理、到位,并且日常保养到位,这是最后一道防线。对于临边、洞口防护,根据相关规定使用工具化、定型化防护栏杆及盖板进行防护,不得用木棍、铁丝等代替,经验收合格后再使用。工具化防护栏杆应用钢管或者铝合金组装而成,立杆间距不大于2 m,横杆上下两道,下杆离地不大于600 mm,所有部件均通过扣件或者插销连接,不得现场焊接或者绑扎。楼板预留孔洞尺寸小于1.5 m时应采用定型化盖板覆盖,盖板边缘要比孔洞每边宽出至少50 mm并且设有防滑扣以防位移;而大于1.5 m时,则需在其周围搭设防护栏杆并安装水平防护网。所有防护设施安装完毕后由项目经理部技术人员负责检查验收,对杆件间距、连接牢固程度以及盖板承载力逐一检查,验收结果拍照存档。

脚手架工程必须严格把材料进场关、搭设关以及验收关,连墙件、剪刀撑、扫地杆等构造措施均须满足设计要求,脚手板应铺设严密并固定牢靠,外侧密目

式安全网必须封闭严密^[5]。高处作业吊篮、附着式升降脚手架等设备,必须有相应资质单位进行安装与拆除,在投入使用之前需经过满负荷试运行及各种安全设施性能检测,并做到每日工作开始前检查以及定时保养维护。脚手架钢管壁厚不应小于3.25 mm,扣件需做扭力矩检验,不合格产品一律清退出场。在搭设过程中,连墙件应以两步三跨为间距设置,剪刀撑应在立杆间每隔5根~7根设置一个,且其夹角应在45°~60°之间,扫地杆距离地面不得超过200 mm。密目式安全网应用阻燃材料制成,网目数应不小于2 000目/100 cm²,相邻网片搭接宽度应不小于200 mm并用专用扎带固定。吊篮的安全锁标定期限不得超过一年,每次移动位置都应重复做一次自由坠落试验。临时用电系统应采用TN-S接零保护系统,必须实行三级配电两级保护,电缆线整齐有序布置,禁止私自乱拉电线。对于防火工作,要合理设置施工现场临时消防车道以及易燃物存放地点,配备足量消防器材并定期检查有效期,执行动火审批手续及现场监管制度。一切防护设施拆除之前均需办理相关手续,任何人不得私自拆除或者毁坏。

4 结束语

建筑施工安全管理是一项系统工程、长期任务,在于制度刚性落实、培训准确到位以及防护措施得当,三者相辅相成。目前,建筑施工安全管理存在制度执行力差、员工能力不高、防护不到位的情况,要完善相关规章制度、加强教育训练、做好防护工作,把重点放在基层一线、责任落到每个环节上。未来可以借助BIM技术、物联网监控、智能化报警等方式,把安全管理从被动应对转变为主动防范、从人防到技防,不断提高本质安全性。

参考文献:

- [1] 王昊煜.建筑监理在施工阶段安全管理中的关键问题与对策[J].建材发展导向,2025,23(19):94-96.
- [2] 伊明强.探析建筑施工脚手架安全管理中存在的问题及解决对策[J].散装水泥,2024(05):151-153.
- [3] 郭起长.建筑工程施工安全监督管理中存在的问题及对策分析[J].中国住宅设施,2025(07):215-217.
- [4] 龚柯.建筑工程施工现场安全管理中存在的问题及处理对策[J].城市建设理论研究(电子版),2023(11):67-69.
- [5] 吴扬铭.建筑施工管理中常见的问题与解决对策[J].散装水泥,2024(04):159-161.

高层建筑混凝土结构施工技术及质量控制分析

张永闯¹, 李永明^{2*}

(1. 荣华建设集团有限公司, 山东 莱西 266600;
2. 吉林市畅泽服务有限公司, 吉林省 吉林市 132000)

摘 要 高层建筑的蓬勃发展对混凝土结构施工技术及质量控制提出了更高要求。当前, 施工中面临着结构复杂、材料性能要求高、工艺集成度强等诸多挑战。本文系统分析了模板工程、高性能混凝土施工及特殊节点处理等关键技术, 并构建了覆盖全过程、聚焦重点环节的质量控制体系, 旨在为提升高层混凝土结构工程的安全性、耐久性及建造效率提供有益参考。

关键词 高层建筑; 混凝土结构; 模板工程设计; 高性能混凝土; 裂缝控制

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.035

0 引言

随着我国城市化进程持续推进, 高层建筑已成为城市建设中最常见的建筑类型。混凝土凭借高承载力、低成本的优势, 在高层建筑工程中得到了广泛的应用。但是, 随着建筑物的高度提升以及功能的增加, 也为施工带来高层泵送、大体积混凝土防裂、复杂节点施工等问题。这些问题都会对工程质量、寿命以及经济效益产生影响, 因此对施工技术进行研究并提出有效的精细化管理方法是非常必要的。

1 高层建筑的发展趋势与特点

目前, 高层建筑的发展日益趋向多样化、智能化与绿色化。一是建筑越来越高, 建筑形式也越来越多, 如“框架—核心筒”, “巨型框架—核心筒”, 以达到更好的抗震、抗风效果; 二是功能越来越多, “垂直城市”的理念也越来越受重视, 在一幢建筑物内可包含办公、居住、酒店、商业等多种用途, 对建筑的灵活性、承重能力提出更高要求。而新工艺的应用使高强混凝土、高性能钢材以及碳纤维等新型材料得到广泛应用, 显著改善了建筑物的经济性和安全性。在建筑业中, 工业化、智能化施工是趋势, 在高层建筑中大量采用液压爬模、预制构件、智能混凝土泵送以及建筑信息模型(BIM)等, 大大提高了施工效率与质量, 在环保、可持续发展上也贯穿整个高层建筑生命周期。例如: 节能玻璃、可再生资源利用以及智能化物业管理系统等都是为了节约能源和降低环境影响。所以可以说, 目前的高层建筑是技术力量的展示, 是高效空

间使用、先进技术和环境保护相结合的城市综合体, 同时也是社会发展、经济繁荣和技术进步的结果^[1]。

2 高层建筑混凝土结构关键施工技术分析

2.1 模板工程设计与施工技术

在高层建筑混凝土结构施工过程中, 模板工程是保证构件尺寸正确的前提, 在施工中起到非常关键的作用, 同时也是影响施工质量与安全的重要方面。由于现代社会对于高层建筑外观越来越重视, 对外墙垂直度和平整度也提出更高标准, 所以选择何种模板体系以及模板设计就成为一大问题。目前传统散拼模板已不再适合高速、高质量施工需求, 而液压爬模以及铝合金模板等新型模板体系已被大量使用。特别是液压爬模, 是以已完成墙体作为支撑点自行向上提升, 大幅度减少对高处塔吊使用次数以及周转材料数量, 加快核心筒等竖向结构施工进度。铝合金模板因其精度高、周转率高、混凝土成型效果好, 在以标准层为主的住宅类高层建筑中被大量采用。但做好模板工程, 需要有好的设计以及过程控制。设计时应考虑混凝土侧压力、施工荷载及风荷载等对模板的要求, 使模板具有足够的强度、刚度、稳定性。施工中从放线、模板安装直至脱模清理等工作都应按要求执行。

2.2 高性能混凝土的配制、输送与浇筑技术

高层建筑混凝土结构对于所用材料要求较高, 这对高性能混凝土的制备、长距离运输以及准确浇筑都是一种挑战。由于泵送高度通常超过百米甚至更高, 因此对混凝土强度、流动性及体积稳定性有较高要求,

作者简介: 张永闯(1991-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程。

*通信作者: 李永明(1989-), 男, 本科, 研究方向: 建筑工程。Email: 312741549@qq.com

所以配合比设计非常重要,在满足较低水胶比的同时又能让混凝土易于泵送并且后期具有较好耐久性的前提下,需要适当增加胶凝材料用量(加入硅灰、粉煤灰等矿物掺合料)、高效减水剂并科学控制骨料级配比例。混凝土运输相当于为这座建筑物进行“输液”,而大体积高强混凝土泵送技术则是重中之重。这需要泵送设备有足够的出口压力以及合理的管道布置,尽量少用弯头降低阻力损失,采用抗磨损性能良好的高压管材。而在浇筑时主要是在保证混凝土均匀、密实、连续成型的基础上避免温差导致的内应力产生裂缝,在施工中一般分区域分层逐次完成,同时注意每层浇筑厚度及上下层之间的时间间隔以免产生冷接头,在核心筒或者巨型柱等部位需用高频振动棒振实以使混凝土密实^[2]。

2.3 特殊部位、复杂节点施工与监测控制技术

高层建筑混凝土结构中存在大量受力较为复杂的区域或节点,如核心筒与楼板连接处、巨型转换层、型钢混凝土组合节点及超长体积混凝土后浇带等,其质量优劣将对整个建筑物的安全传力及抗震性能造成重大影响,而且技术难度大,施工困难。例如:在型钢混凝土组合结构中,钢结构与钢筋、模板之间联系极为密切,在深化设计过程中需要进行三维放样,解决钢筋与钢骨之间的矛盾,同时保障有足够的混凝土浇筑空间及振捣空间。对于跨度大、荷载大的转换层,因为模板支撑架需要承受较大施工荷载,所以需要进行专门设计以及专家论证,甚至需要采用分层浇筑或预施反拱等方法以保证安全,同时控制其沉降量。在高层建筑施工期间对施工安全监控及沉降控制也是十分重要的,在施工过程中广泛应用信息化监控技术,在结构关键部位布置应变片、位移计和GPS监测点等仪器仪表来监测混凝土硬化收缩、结构竖向位移和平面位移以及风荷载、温度影响下结构响应。

3 高层建筑混凝土结构施工质量控制策略

3.1 基于全过程精细化的施工前控制策略

高层建筑混凝土结构工程施工质量控制是从工程初期就开始,在这个过程中的质量规划与准备工作为整个工程奠定坚实的基础。施工前的质量控制就是把质量控制放在首位,通过质量的事先策划、准备、检查等方式尽可能减少以后可能出现的问题。首先体现在对设计图纸以及施工方案的理解上。项目部应组织各方对图纸进行会审,主要关注结构受力是否合理、复杂的部位能否施工、各专业管道预埋是否有冲突等问题。对于超高层建筑所面临的特殊问题,如大体积

混凝土底板、巨型转换层或复杂型钢混凝土节点等,需制定专门施工方案并组织专家论证,以保证该施工方案的安全可靠及施工方法科学合理。

材料、设备质量预控也是施工前一项必要的工作。混凝土是最主要的材料,对其质量控制要从源头开始。施工单位应对商品混凝土搅拌站进行仔细审查和评估,对它的资质、质量管理能力和供应能力进行检查,在混凝土配合比选定之后,依据工程实际需求、强度等级、耐久性、泵送高度等因素反复试配并检验,满足工程施工所需工作性能、强度增长以及体积稳定性等方面的要求。对于钢筋、木模板、外加剂等其他材料也要做好进场前验收和报检工作,有合格供应商名单。从设备方面看,大型塔吊、超高压混凝土输送泵、液压爬模系统等所处位置、固定方式等都需经过精确计算、模拟,保证它们能发挥应有的功能而且基础稳定;其次,认真做好技术交底和人员培训也是施工前质量管理必不可少的环节,在各个层面、各专业之间进行技术交底时要把设计理念、技术要求、施工重点等内容准确无误地传达给每一位一线管理人员和作业工人,让所有施工人员对工程质量有一致的认识^[3]。

3.2 以工序管理为核心的施工过程动态控制策略

当工程进入施工阶段,则质量管理的重点转向对每道工序的及时、动态检查与管理,在施工过程中注重“过程精品”,这就要求有一套完善的工序交接验收制度以及全过程的现场监督体系。混凝土工程施工包含模板支设、钢筋绑扎、混凝土浇筑、养护等各个步骤,而其中任何一个环节出现问题都会在未来的工作中被无限放大,进而对整个工程造成不良影响,因此必须实行“三检制”(自检、互检、专检)以确保每一项工作都经过验收后方可进入下一道工序。例如:在钢筋施工过程中要对钢筋规格、数量、间距、锚固长度、保护层厚度以及复杂部位钢筋布置与设计要求的 consistency 进行检查;而在模板施工中则需对模板轴线位置、截面尺寸、垂直度、平整度以及支撑系统稳定性进行检查。

混凝土浇筑与养护是工程施工中一个很重要的实体成型过程,在此期间必须全程旁站监督并及时处理出现的问题。浇筑前需检查浇筑令、核对标号混凝土配合比及运输单、测量混凝土坍落度及入模温度等是否符合要求。浇筑时应注意浇筑顺序及速度,采取分层下料、分层振捣的方法施工以避免出现冷缝或离析等问题。对于大量混凝土还需做好测温工作,根据需要调整保温养护措施,使内外温差不大于规定值以防温度裂缝产生。振捣工作须由有经验的人完成,“快

插慢拔、均匀分布”，使混凝土密实。

3.3 针对关键技术要点的专项质量控制策略

高层建筑混凝土结构施工存在很多技术难度大、风险高的环节，在此对相应部位采取有效的质量控制手段是解决问题、保障结构安全的重要保证。而这种质量控制应高于一般的工序检查，是对某一技术问题制定一套包括方案、执行以及检查的质量控制方式。首先要重视的是大体积混凝土工程质量。由于水泥水化放热导致温差引起应力容易造成有害裂缝，因此对其质量控制就是一种“监测—预警—调控”的过程。在施工之前进行热工计算得出温度场及应力场进而得到最优配合比（采用低热水泥，加一定量的粉煤灰、矿粉等）、合理的分层分块方法以及布置冷却水管的位置等。施工时，在混凝土中预埋温度计进行实时监测并且根据实际情况调整保温层厚度或水量以使混凝土内部温度与外部温度之差、降温速率符合规定的要求，在养护期间也应适当延长养护期并且保持混凝土湿润^[4]。

对超高泵送混凝土施工而言，专项控制主要是针对混凝土可泵性和管道安全性的问题，在配合比的基础上进行专门泵送适应性试验以使混凝土具有良好的粘聚性和流动性，避免堵塞；而对于超高压输送管道必须做严格的耐压试验并且合理设置，尽量减少弯头并加以固定。在泵送过程中应注意观察泵压的变化及连续均匀供料。而在型钢混凝土或预应力构件等复杂结构中，专项控制的重点是如何解决钢筋与钢骨、预应力筋与普通钢筋的位置关系以达到混凝土的充实程度。这需要在较好的 BIM 技术水平基础上，进行三维碰撞检查、施工模拟，对节点进行优化设计并绘制钢筋下料及绑扎顺序图。浇筑时，应采用自密实混凝土或在钢骨上开设浇筑孔，用小振捣棒仔细振捣^[5]。

3.4 依托信息化与标准化的集成管理控制策略

在当前工程项目建设过程中，仅靠人员经验进行质量管理已不能适应时代要求，必须运用信息技术与标准化相结合手段，形成一套科学合理、公开透明、可追溯的质量综合管理系统，以此为基础对工作流程固定化、以数据为依据、信息交流互通，提高工作效率和管理水平。信息化即建设覆盖从设计到施工再到验收全过程一体化数字化质量管理系统。使用 BIM 技术可在施工前进行可视化交底以及仿真施工以预防可能出现的质量问题。把施工方案、技术要求、验收标准等都加入模型中就可以指导施工人员正确施工，在施工过程中利用物联网技术，对重要部位的构件进行

RFID 标识，则可以对其生产与运输、安装及检测等情况进行监测，在手机上安装 APP，质量检查人员可随时随地将现场检查情况、照片等资料上传至互联网便于及时发现问题并下达任务进行处理，从而提高工作效率及响应速度^[6]。

标准化起到的作用就是把好的施工方法、管理方法固化成一个标准、可复制的操作模式。例如：从原材料堆放、钢筋加工到混凝土养护等一系列标准化工作流程，制定重要的分部分项工程标准化工艺卡及图文并茂的操作说明，使得工人们每一项工作都有据可依。根据不同的季节、不同的构件部位分别有不同的标准化养护方案并且明确养护的时间、方式、要求以及责任人，就可以有效避免养护不到位的情况出现。而更进一步的集成管理则是将质量控制与进度、成本等方面结合起来考虑。通过大数据平台能够分析混凝土强度离散性、钢筋安装合格率等质量指标与施工班组、时间段、材料批次之间的关系，找出问题所在，从而改进作业方式、合理安排人力物力；所有施工过程、试验报告、验收资料均录入计算机中保存为一套完整的电子档，便于日后查询以及后期维护等工作。

4 结束语

高层建筑混凝土结构施工是一项涉及材料学、结构力学及精细化管理等多方面的综合性工程，在对关键技术进行分析的基础上提出相应对策可有效解决施工中所面临的问题，同时提高管理水平。未来，随着智能施工技术以及绿色建材应用日趋普及，施工质量管理将更趋智能化、精细化，从而推动我国高层建筑向着更高安全性能、更优品质以及更可持续发展的方向发展。

参考文献：

- [1] 任亚莉, 张文丽, 陕艳娟. 某高层建筑楼板裂缝成因及质量控制措施分析 [J]. 砖瓦, 2024(02):117-119.
- [2] 张豪. 高层建筑钢结构施工技术及其质量控制研究 [J]. 陕西建筑, 2024(03):25-30.
- [3] 冯宗焱. 高层住宅建筑施工中的关键技术与质量控制研究 [J]. 住宅与房地产, 2025(05):117-119.
- [4] 王永堂. 高层建筑现浇混凝土框架结构高大模板支撑体系施工技术 [J]. 四川水泥, 2026(06):158-159, 162.
- [5] 冯宗焱. 高层住宅建筑施工中的关键技术与质量控制研究 [J]. 住宅与房地产, 2025(05):117-119.
- [6] 鱼亚洲. 高层建筑钢筋混凝土结构耐久性设计优化 [J]. 中国建筑装饰装修, 2026(11):183-185.

路基施工质量检测关键参数控制研究

艾彬

(安徽交检交通发展研究中心有限责任公司, 安徽 合肥 230051)

摘要 依托 S235 淮北一级公路项目, 路基施工质量控制重点放在压实度、用灰剂量、弯沉及地基承载力等核心参数的检测标准和采样频率上, 建立了涵盖人员、机械、材料、技术、环境和测量的六维管控体系。在整个过程中实施多层次检测方法, 结合信息管理方法, 对测量数据的统计分析验证了关键参数控制方法的有效性。结果表明, 工程控制理论与实际监测信息的有机结合, 可以形成超越常规检查的预测性维护视角, 显著提高路基施工质量控制的准确性, 为公路工程的耐久性和安全性提供更坚实的保障。

关键词 路基工程; 质量检测; 关键参数; 压实度; 过程控制

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.036

0 引言

路基作为公路的承重结构, 其施工质量直接决定了路面的使用性能与道路的整体服役寿命。然而, 路基工程具有施工战线长、地质条件复杂、隐蔽工程多、质量控制难度大等特点, 传统的质量控制模式往往存在信息滞后、监管盲区等问题, 难以实现对施工过程的精准管控。如何科学界定并有效控制路基施工质量的关键参数, 构建全过程、多维度的质量检测体系, 已成为工程管理领域亟待解决的重要课题。本文以 S235 淮北段一级公路 (S235 濉唐路三期工程) 项目为依托, 结合《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1-2017)、《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610-2019) 等规范要求, 深入分析路基施工质量检测的关键参数及其控制要点, 探讨全过程质量检测体系的构建与应用, 以期提升路基施工质量提供技术支撑。

1 工程概况

S235 濉唐路是安徽省国省干线公路网的重要组成部分, 其建设填补了 G237 与 G3 京台高速之间南北向干线公路的空白, 对优化区域路网结构、促进沿线经济发展具有重要意义^[1]。S235 淮北段一级公路 (S235 濉唐路三期工程) 路线全长 47.239 公里, 起点位于宋疃镇西侧 S101 与梧桐南路交叉口, 终点位于陈集东南侧 X009 上濉溪与怀远交界处。项目采用一级公路标准建设, 设计速度 80 km/h, 穿村庄路段限速 60 km/h, 一般路段路基宽度 24.5 m 和穿村庄路段 26 m。全线共设桥梁 35 座, 其中大桥 2 座, 浍河大桥长 711 m, 青

芦运煤铁路上跨桥长 591 m。地质条件复杂, 路基填筑量大, 对施工质量控制提出了较高要求。为保障工程质量, 项目设立了独立于施工和监理的中心试验室, 负责全线路基、桥涵等工程的原材料及实体质量的独立抽检和验证^[2]。

2 路基施工质量检测关键参数控制要点

为确保路基施工质量, 需建立科学的质量检测体系, 明确关键参数的控制标准、检测方法及频率。基于本项目检测方案, 关键参数的控制要点主要体现在以下几个方面。

2.1 压实度控制

压实度是衡量路基填土密实程度的核心指标, 直接影响路基的强度、稳定性及工后沉降。本项目对土质路基和结构物台背回填等不同部位的压实度均提出了严格要求。检测方法主要采用灌砂法, 对细粒土也可采用环刀法。依据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450-2019) 和《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1-2017) 的规定, 灌砂法取样时要求取至层底, 确保检测深度覆盖整个压实层; 环刀法取样时, 应使环刀中部处于压实层厚的 1/2 深度, 以保证检测的代表性。中心试验室对压实度的抽检频率严格按照“不低于承包人自检频率的 20%”执行^[3]。根据项目检测方案中的相关规定, 压实度检测采用随机取样方法, 灌砂法取样时取至层底。对于结构物台背回填这一关键薄弱部位, 同样按不低于自检频率 20% 的比例进行加密抽检, 确保其压实度满足设计要求。为验证压实

作者简介: 艾彬 (1987-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 交通运输工程 (道路与桥梁工程)。

度控制效果，选取 K25+000 ～ K30+000 段路基填筑施工过程中中心试验室抽检的压实度检测数据进行统计分析。该段落共抽检压实度 136 点，涵盖 93 区（路床）、

94 区（上路堤）和 96 区（下路堤）三个压实区。检测结果均满足设计要求，合格率达到 100%。各压实区的检测数据统计分析如表 1 所示。

表 1 路基压实度检测数据统计表

检测部位	设计压实度 (%)	检测点数	平均值 (%)	最小值 (%)	最大值 (%)	标准差	变异系数 (%)	合格率 (%)
93 区（路床）	≥ 93	45	94.6	93.5	96.2	0.71	0.75	100
94 区（上路堤）	≥ 94	48	95.2	94.1	97.0	0.68	0.71	100
96 区（下路堤）	≥ 96	43	96.1	95.0	97.8	0.82	0.85	100
合计	—	136	95.3	93.5	97.8	0.80	0.84	100

从表 1 数据分析可知：93 区压实度均值为 94.6%，高于设计值 1.6%，标准差为 0.71，变异系数为 0.75%，表明压实控制精度高，填筑质量均匀；94 区压实度均值为 95.2%，高于设计值 1.2%，标准差 0.68，变异系数 0.71%，数据离散性小；96 区压实度均值为 96.1%，高于设计值 0.1%，标准差 0.82，变异系数 0.85%，虽略高于其他区域，但仍处于优良水平。从整体来看，压实度控制稳定，施工质量均匀性良好，有效保障了路基的承载能力和稳定性。

2.2 灰剂量控制

对于石灰改善土路基，灰剂量是控制其强度和稳定性的关键参数。依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTG 3441-2024）的规定，采用 EDTA 滴定法进行灰剂量检测。取样应在松铺层中下部随机抽取，以保证检测的代表性。每种剂量的改善土均需通过试验绘制灰剂量标准曲线，作为现场检测的基准。中心试验室对灰剂量的抽检频率同样按照“不低于自检频率的 20%”执行^[4]。对 K18+000 ～ K25+000 段石灰改善土施工过程中中心试验室抽检的灰剂量检测数据进行统计分析。该段落共抽检灰剂量 102 点，设计灰剂量为 5.0%。检测数据统计分析如表 2 所示。

从表 2 数据分析可知，灰剂量整体平均值为 5.12%，略高于设计值，表明控制水平良好。从各批次检测数据看，98 个点的灰剂量位于设计值的 ±0.5% 范围内，占比

96.1%；灰剂量低于设计值的点数为 2 个，占比 2.0%，均经补灰处理达到合格标准；高于设计值的点数为 2 个，占比 2.0%。灰剂量检测的合格率为 98.0%，变异系数为 5.2%。各批次数据标准差在 0.14 ～ 0.19 之间，变异系数在 2.7% ～ 3.7% 之间，表明灰剂量控制相对稳定，拌和工艺和现场摊铺均匀性较好。对低于设计值的检测点进行追溯分析，发现主要原因为拌和机出料口取样时局部灰量不足，经调整拌和时间 and 加强现场摊铺均匀性控制后，后续批次灰剂量合格率明显提升^[5]。

2.3 弯沉值与地基承载力控制

弯沉值反映了路基顶面的整体承载能力，是评价路基强度和刚度的重要指标。依据《公路路基路面现场测试规程》（JTG 3450-2019）的规定，在路基顶面采用落锤式弯沉仪（FWD）或贝克曼梁法进行检测，通过均匀布点评估路基的整体强度。根据项目检测方案中的要求，路基顶弯沉检测采用贝克曼梁法或 FWD 法进行均匀布点检测。地基承载力主要针对涵洞、挡土墙等结构物基础，依据《公路工程地质原位测试规程》（JTG 3223-2021）规定，采用动力触探法（N10）进行检测，贯入深度一般不大于 4 m。对关键结构物基础进行 100% 覆盖检测，确保地基承载力满足设计要求。检测过程中严格执行《建筑地基检测技术规范》（JGJ 340-2015）的相关要求，对检测数据进行实时记录和分析，发现承载力不满足设计要求的点位，立即通知

表 2 灰剂量检测数据统计表

施工批次	设计灰剂量 (%)	检测点数	平均值 (%)	最小值 (%)	最大值 (%)	标准差	变异系数 (%)	合格率 (%)
第一批	5.0	25	5.08	4.8	5.4	0.18	3.5	96.0
第二批	5.0	26	5.11	4.9	5.3	0.15	2.9	100.0
第三批	5.0	25	5.14	4.9	5.5	0.19	3.7	96.0
第四批	5.0	26	5.15	5.0	5.4	0.14	2.7	100.0
合计	—	102	5.12	4.8	5.5	0.27	5.2	98.0

施工单位进行地基处理,处理完成后重新检测验证,直至满足设计要求。

2.4 全过程质量管控与信息化管理

为实现对路基施工质量的精准控制,项目构建了“人、机、料、法、环、测”六位一体的质量控制体系,该体系通过强化人员素质、保证设备精度、严控原材料质量、规范检测方法、改善试验环境和优化检测手段,全面保障检测数据的真实性和可靠性。智能施工现场的建设依赖于智能检测设备实时自动收集和上传测试数据,并将测试检测平台与BIM技术平台连接起来,构建基于信息化的工程质量动态管理系统^[6]。平台能够将检测结果快速反馈给管理决策层,实现质量问题的动态预警和闭环处理流程,从而显著提高管理活动的效率和所获数据的真实性。BIM模型承载的几何和物理信息、物联网收集的实时施工数据以及项目质量管理的标准化流程的有机整合,实现质量问题的动态预警和闭环处理提升管理效率。

3 路基施工质量检测关键参数控制成果

在S235淮北一级公路项目中,关键参数控制系统的实施使路基施工质量显示出显著的控制效果。传统的质量控制模式已经从被动的后验证转变为主动的过程预控。系统建立了严格的原材料准入机制和标准的检测验证程序,从源头上防止不合格材料进入施工现场。中心实验室对进入现场的每批热轧带肋钢筋进行拉伸试验等一系列试验,系统测量水泥细度等多项关键指标,确保填料的性能符合设计和规范要求。借助智能检测设备和综合信息管理平台,提高了检测工作的效率和生成数据的真实性,为建立质量问题快速响应机制提供了技术基础。项目报告的路基压实度试验合格率已达到100%,灰剂量合格率也保持在98.0%。实施密集取样策略,提高对易发生后沉降的结构平台回填等薄弱环节的质量管理精度。施工质量的稳定并非仅源于对最终结果的反复核查,更依赖于对生产过程中每个相互作用要素的持续干预与校准。信息化动态管理平台的真正价值,或许不在于生成更多的数据点,而在于如何将这些离散的证据碎片编织成一张能够揭示工程实体内部真实应力与演化趋势的认知之网。图1展示了本项目试验检测工作的全过程程序。

4 结论

本文以S235淮北段一级公路项目为依托,对路基施工质量检测关键参数的控制进行了系统研究,得出以下结论:



图1 中心实验室材料试验工作程序图

1. 压实度、填料性质(灰剂量)、弯沉值和地基承载力是控制路基施工质量的核心参数,必须对其进行重点监控。这些参数分别从密实程度、材料性能、整体强度和基础稳定性等维度反映了路基的工程质量。

2. 全过程、多层次的检测体系是质量保障的关键。从施工准备阶段的标准试验验证,到施工阶段的过程抽检,再到缺陷责任期的调查分析,形成了完整的质量控制闭环。抽检频率不低于承包人自检20%的规定,确保了抽检的覆盖面和代表性。

3. “人、机、料、法、环、测”六位一体的质量控制体系与信息化管理是提升管理效能的有效手段。通过规范人员行为、保证设备精度、严控材料质量、标准化检测方法、优化检测环境和引入智能化检测技术,有效保障了检测数据的真实可靠,实现了质量管理的动态监控和可视化管理。

4. 数据分析验证了关键参数控制方法的有效性。压实度和灰剂量检测数据的统计分析表明,关键参数控制良好,合格率高,变异系数小,施工质量均匀稳定。科学管理带来了显著的质量效益,为类似大型公路工程的质量管理提供了可借鉴的成功经验。

参考文献:

- [1] 吴永煤,杨硕,杨家鸿,等.基于冲击荷载法的路基质量检测机理与现场应用研究[J].公路,2025(07):50-56.
- [2] 唐春学.公路路基路面检测中回弹弯沉检测方法对比试验探讨[J].交通科技与管理,2025,06(08):134-136.
- [3] 独小军.路面平整度试验检测技术在公路工程施工及养护管理中的应用探讨[J].科技与创新,2025(10):208-211.
- [4] 罗恺彦,甫尔海提·艾尼瓦尔,练强,等.基于行车振动数据的超高速路面平整度质量要求研究[J].公路交通科技,2023,40(S1):143-149.
- [5] 刘亮.市政道路建设工程施工技术与质量管理[J].工程设计与施工,2025,07(02):59-61.
- [6] 李周.基于BIM的公路工程路基试验检测技术分析[J].四川建材,2025,51(05):230-232.

钒钛磁铁矿工况衬板的表面强化工艺研究

张凤君¹, 宋晓明², 杜祥科³

(1. 承德市安全生产技术服务中心, 河北 承德 067000;

2. 河北石油职业技术大学, 河北 承德 067000;

3. 宽城双兴矿山设备制造有限公司, 河北 承德 067600)

摘要 钒钛磁铁矿作为我国战略性矿产资源的重要组成部分, 在其开采、破碎、磨选等过程中, 由于长期受到高强度冲击载荷、摩擦磨损、弱碱性介质腐蚀的影响, 很容易出现早期失效的现象。服役行为不但会对生产系统连续运行造成威胁, 还会使运维成本迅速上涨。基于此, 本文对喷丸强化处理、等离子喷涂堆焊工艺和激光熔覆修复等三种主要的表面强化技术在特定工况下进行研究, 采用理论分析和实验验证相结合的方法, 为提高钒钛磁铁矿矿山设备运行效率、降低成本提供有益参考。

关键词 钒钛磁铁矿工况衬板; 表面强化; 喷丸强化; 等离子堆焊; 激光熔覆

基金项目: 2023 年度承德市应用技术研究与开发暨可持续发展议程创新示范区专项科技计划项目 (项目编号: 202305B023)。

中图分类号: TD453; TG174.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.037

0 引言

钒钛磁铁矿是一种富含钒、钛、铁等多种金属元素的复合型矿产资源, 是我国特有的优势矿产。这类矿产资源广泛分布于攀西地区, 储量丰富, 具备显著的综合利用价值, 在钢铁工业及高端装备制造领域发挥着至关重要的战略支撑作用。本文主要针对钒钛磁铁矿开采场景特点展开研究, 对多种表面强化工艺技术可行性进行详细的分析, 并且利用系统优化工艺参数的方法来解决衬板早期失效问题, 为相关行业实现节能减排目标、提高经济效益提供重要的理论基础和技术支持。

1 钒钛磁铁矿工况特点及衬板失效机理

1.1 钒钛磁铁矿工况特点

钒钛磁铁矿选矿工艺所处的设备运行环境具有很强的复杂性、极端性, 主要是高强度机械应力、剧烈振动和多种腐蚀介质的共同作用, 而且受到矿物组分异质性的深刻影响。在这种情况下, 衬板材料要同时具有很好的力学强度、优秀的抗磨性、良好的耐化学腐蚀性以及良好的疲劳韧性, 才能满足实际工业使用的要求。从矿物学角度来讲, 该矿石的总体硬度在 6 级~7 级之间 (莫氏硬度), 钛铁矿、钒钛磁铁矿和赤铁矿等高硬度矿物的含量占到 35%~45%。

破碎设备的衬板受冲击载荷峰值达到 15 千焦~25 千焦时, 冲击载荷峰值每分钟 8 次~12 次。虽然每次冲击的能量很大, 但是由于作用时间很短, 所以对材料的抗疲劳性能要求不高。磨矿工序中衬板所受的冲击载荷强度明显减小 (2 千焦~5 千焦)^[1]。但是, 在高硬度矿石、研磨介质和衬板之间高速相对运动的情况下, 再加上频繁而密集的接触特点 (接触频率达到每分钟 30 次~50 次), 这样长期重复加载的机制很容易造成材料内部逐渐积累疲劳损伤, 进而引起表层剥落现象, 明显增大了衬板失效的概率。

1.2 衬板失效机理分析

通过对钒钛磁铁矿实际生产中失效衬板的宏观特征、扫描电子显微镜 (SEM) 形貌观察和能量散射谱仪 (EDS) 元素成分检测数据进行分析可知, 该衬板失效机理不是单一因素造成的, 是多维效应共同作用的结果。磨损为主, 疲劳损伤为辅, 腐蚀又加重了材料的劣化程度。复杂的交互作用大幅缩短了衬板的使用寿命, 在一般情况下不到一个月就明显变差, 不能满足正常的生产要求。

磨蚀是造成衬板失效的主要原因, 其作用机理可以分为切削型和凿削型两种主要模式, 两者常常是互相促进、互相影响的。切削型磨蚀主要是由于粒径在 0.1

作者简介: 张凤君 (1979-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机电及安全工程。

毫米~1毫米的细小硬质矿物颗粒造成的。当颗粒和衬板表面发生相对运动的时候,在接触处就会产生类似机械加工中微切削的效果,形成宽度在20微米~50微米之间、深度在5微米~15微米之间的细长犁状痕迹。随着作用时间的延长,这些微小的犁沟慢慢展开并互相连通起来,最后表层材料就以薄片的形式被剥离下来。凿削型磨蚀是大尺寸(5毫米~10毫米)矿石颗粒在高速度(8米/秒~12米/秒)下撞击衬板表面造成的,此时所受压力达到200 MPa~300 MPa。在此时衬板表面就会出现直径大约为1毫米~3毫米、深度约为0.5毫米~1毫米的凹陷坑,而且周围材料因为受到高压的作用而产生明显的塑性变形,这就是硬化效应。当腐蚀和磨损同时发生时,它们的复合效应会使衬板提前失效的时间比只考虑任一因素的情况快1.2倍~1.5倍^[2]。

2 表面强化工艺试验结果与分析

2.1 喷丸强化工艺试验结果与分析

喷丸强化处理研究显示,实验参数喷丸压力、喷丸时间、弹丸流量等都会对衬板表面硬度、疲劳特性产生影响。随着喷丸压力的逐渐增大,衬板表面硬度呈先快后慢的趋势上升,在0.5 MPa时硬度最大(洛氏硬度HRC62)。如果压力继续增大,那么增幅会越来越小,而且还会增大材料表面的塑性变形以及产生微裂纹的风险。喷丸时间的变化规律和硬度响应比较一致,在约20分钟的时候形成了稳定的硬化层厚度约为0.8毫米的状态;超过这个范围虽然可以使硬度有所提高,但是会导致表面粗糙度明显增大,从而降低抗疲劳性能^[3]。

从微观组织结构上看,经喷丸强化处理后的衬板表面存在厚度一致、结构致密的变形硬化层。该区域内部位错密度增大,晶体结构发生明显的畸变,晶粒尺寸减小到亚微米级,这些都是提高材料表面硬度的因素之一。喷丸效应所引起的残余压应力可以有效地抑制服役过程中由于交变载荷而产生的拉应力,从而减缓裂纹源的产生和扩展速度,提高衬板的抗疲劳性能,疲劳寿命比未经处理的状态高出了60%以上。虽然喷丸技术可以提高机械强度,但是对材料耐蚀性的影响不大,在中性盐雾腐蚀实验后仍然有少量的腐蚀现象^[4]。

2.2 等离子堆焊工艺试验结果与分析

用等离子喷涂堆焊技术做实验研究。实验中用Fe-Cr-C-V-B合金粉末(Cr20%, C3%, V5%, B1.5%)作为堆焊材料,基体材料为Q235钢(该材质因为优异的耐磨性,

在衬板制造上被广泛使用)。对焊接电流、焊接电压、送粉速度这三个主要的工艺参数影响效应进行详细的分析,用正交试验法选出最佳工艺组合。进一步对得到的堆焊层显微组织特征、微观相变行为及抗磨蚀机理进行系统的表征和验证。

经过研究可知,焊接参数会对堆焊层厚度、稀释率、显微硬度、结合强度、耐磨性等性能产生明显的影响。焊接电流是决定性的主导因素,焊接电压和送粉速度通过协同作用来提高各个性能指标的表现水平。根据正交试验结果,本文最终确定的最优工艺参数组合为焊接电流200 A、电压30 V、送粉速率30克/分钟。在该条件下制备的堆焊层具有很好的整体性能,厚度稳定在4.0毫米~4.2毫米之间,厚度误差小于±0.2毫米,稀释率约为8%,有效防止了基材过度熔化的情况发生,显微硬度达到HRC65级(HV值约为680),比基体材料提高2.6倍~3.2倍,结合强度大于350 MPa(实测范围为352 MPa~365 MPa),说明涂层和基材已经形成了良好的冶金结合^[5]。

2.3 激光熔覆工艺试验结果与分析

研究结果表明,在激光功率为3 000 W、扫描速度为10毫米/秒和送粉率为20克/分钟的情况下,得到的熔覆层具有最好的性能。此时熔覆层厚度保持在2毫米左右,热影响区宽度控制在0.5毫米以下,显微硬度值为850 HV0.2,接头结合强度达到420 MPa。与未加强的基材相比,采用本方法可使材料耐磨性提高3倍以上,耐腐蚀性提高80%。如果激光功率设置过低,就会造成合金粉末不能充分熔化,界面结合力降低;如果过高,就会造成熔池烧穿、裂纹产生,热影响区明显增大,基体整体力学性能变差。扫描速度对于成形质量也有影响,过快容易引入微观残余应力和缺陷,而较慢的时候虽然可以抑制晶粒粗化倾向,但是会降低复合材料整体的硬度水平。改善配送粉率以及相关工艺参数属于保证高质量涂层的重要因素之一。

根据微观组织分析结果可知,激光熔覆层和基体之间具有典型的冶金结合特点,界面过渡区平滑没有气孔、夹杂物等缺陷。从显微结构上可以发现熔覆层是由铁素体和板条状马氏体组成的,均匀地分布着细小的(Ti、V)C碳化物强化相,粒径在1微米~2微米之间。该种特殊的组织结构大大提高了材料的硬度,但是又保持了良好的韧性。当钛元素的质量分数达到大约14.7%的时候,强化相的数量达到了最大值,从而提高了涂层整体的抗磨蚀性能。

根据对三种表面强化技术试验数据的系统整理和对比分析可知,各种工艺在强化效果、经济效益、生

产效率等方面存在较大的差别,并且表现出与钒钛磁铁矿应用环境相适应的技术特点。从强化性能的角度来分析,激光熔覆技术具有较好的整体效果,在微观硬度提高、摩擦磨损抑制、抗腐蚀保护等方面都优于其他两种方法,大大提高了衬板的使用寿命。

3 表面强化工艺的优化与应用建议

3.1 强化工艺参数优化

从实验数据分析可知,要使性能优化和经济效益达到最佳平衡,就要对三种表面强化技术的参数进行优化研究。喷丸强化工艺的最优加工条件为喷射压力为 0.5 MPa、作用时间控制在 20 分钟以内、弹丸供给速率 40 克/分钟,该条件下目标试样的表层洛氏硬度可达 62 HRC,疲劳寿命比基材提高约六成,成本低,适合做辅助性强化方案使用。等离子喷涂堆焊技术应按照以下规范执行,焊接电流为 200 A,电弧电压为 30 V,粉末送进速度为 30 克/分钟,得到厚度约为 4 毫米、熔合比约为 8% 的理想堆焊过渡层结构,所形成的防护涂层可以很好地满足钒钛磁铁矿采选过程中所遇到的各种恶劣工况要求,具有较高的生产效率,特别适合于大规模工程改造场景的应用。

本研究用激光熔覆工艺进行参数优化,激光功率为 3 kW,扫描速度为 10 毫米/秒,送粉速率 20 克/分钟,得到厚度约为 2 毫米的熔覆层。在这种情况下制备的涂层具有良好的综合性能,完全满足关键零部件耐磨性加强的要求。通过精确调节合金粉末的组分比例,可以进一步提高它的强化效果,在等离子喷涂专用合金粉末中加入适量的钛(Ti)元素,可以原位生成(Ti,V)C 类硬质相,大大提高堆焊区的抗磨性能,在激光熔覆用粉末体系中加入一定量的钒(V)元素,可以细化晶粒结构、均匀分布硬质相、提高熔覆表层的韧性指标。多种先进强化手段的协同使用也十分重要,将喷丸预处理技术同传统的等离子喷涂或者激光熔覆工艺结合起来,在施加机械外力的同时加入残余压应力,这样可以改善基体组织微观状态,提高材料疲劳寿命,延长衬板实际使用寿命。

3.2 工程应用建议

根据钒钛磁铁矿选矿工艺的特点以及三种典型的强化技术的优势,提出以下工程优化方案,根据衬板在不同的工况下所发生的失效机理以及服役条件,制定出相应的强化措施。破碎阶段由于受到高强度冲击载荷的作用,容易产生严重的磨损问题,建议用等离子喷涂技术提高抗冲击性能和耐磨性;磨矿工序中需要综合考虑滑动摩擦和腐蚀效应的影响,在关键部位

采用激光熔覆工艺,在一般区域采用等离子喷涂工艺,实现成本控制和功能需求的平衡。为了提高衬板整体的服役可靠性,还要做好前期的预处理以及后期的表面改性工作,即彻底清除表面的油污、氧化物和锈蚀痕迹,保证涂层和基体之间有良好的结合,精密切削减小表面粗糙度,低温回火处理释放内应力,从而提高强化层的综合机械性能。

建立系统化、规范化的质量控制体系来改善工艺流程,首先要准确地控制好主要工艺参数,使用周期性的检测来加强层的硬度、界面结合强度以及其他重要的性能指标,从而有效地防止未熔合、气孔、裂纹等常见的缺陷产生。在复合强化技术的应用上,可以将喷丸预处理和等离子堆焊工艺结合起来,使衬板的抗疲劳韧性、耐磨性得到明显提高,进而延长衬板的使用寿命,对磁性材料基体进行强化时,也可以采用等离子喷涂或者激光熔覆等先进的方法来提高耐磨性。

4 结束语

针对钒钛磁铁矿作业环境衬板容易失效的技术瓶颈,本文对喷丸强化、等离子喷涂、激光熔覆三种主要的表面改性技术进行了系统的分析和研究。通过实验研究发现,激光熔覆处理能明显提高材料的硬度、耐磨性、耐蚀性,特别适合于高应力集中的部位防护。等离子喷涂操作简单、适应性强,是大面积修复的理想方法,喷丸强化通过控制基体残余应力来提高构件的抗疲劳性,可用于辅助强化。根据各种技术协同或者梯度复合的应用策略来设计,可以提高衬板在极端工况下的服役稳定性,并且达到经济收益和使用寿命的优化目的。

参考文献:

- [1] 梁庆林,邓家鑫,于宋月,等.攀西红格钒钛磁铁矿床铂族元素赋存状态研究[J].岩石学报,2026,42(03):835-849.
- [2] 柏中杰,高剑峰,朱维光,等.攀西地区钒钛磁铁矿床PGE及S同位素研究:对伴生Co、Ni金属富集及深部PGE成矿潜力的制约[J].岩石学报,2026,42(03):821-834.
- [3] 何汉江,刘金龙.酸溶-电感耦合等离子体质谱法测定钒钛磁铁矿中15种稀土元素[J].冶金分析,2026,46(02):18-24.
- [4] 杨鑫.毕机沟矿区低品位钒钛磁铁矿富集技术研究[J].冶金与材料,2026,46(02):190-192.
- [5] 薛忠言,袁英杰,李从德,等.攀西地区某钒钛铁精矿提质降杂工艺试验研究[J].现代矿业,2026,42(02):74-78.

道路桥梁工程质量检测常见问题及对策研究

计文婷

(安徽国顺交通建设试验检测有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要 道路桥梁工程质量检测是保障工程安全运行、规范行业发展的核心环节, 当前检测工作中存在技术应用不规范、人员专业能力不足、管理制度不完善、环境管控不到位及行业监管与企业重视不足等突出问题, 严重影响检测数据真实性, 难以支撑工程质量管控。本文结合道路桥梁工程检测实际, 深入分析各类问题的具体表现及产生根源, 从规范检测技术应用、提升人员专业能力、完善检测管理制度、强化环境管控、落实行业监管与企业责任五个方面制定针对性解决对策, 以期提升道路桥梁工程质量检测水平、消除工程质量隐患、推动行业规范化发展提供参考, 确保检测工作充分发挥质量管控效能。

关键词 道路桥梁; 质量检测; 检测技术; 行业监管

中图分类号: U446

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.038

0 引言

道路桥梁作为交通基础设施的核心组成部分, 直接关系到公共安全与民生福祉, 其质量管控离不开科学的质量检测。当前, 我国公路桥梁建设持续推进, 数字化、智能化检测技术快速应用, 《公路水运工程质量检测管理办法》《低空无人机应用公路桥梁巡检技术指南(试行)》等政策相继落地, 行业发展水平不断提升。但在实践中, 检测工作仍面临诸多瓶颈, 技术适配不足、人员素养不均、制度执行不严等问题依然存在, 制约检测数据真实性与权威性, 难以满足新时代工程质量管控需求。基于此, 结合当前行业发展新形势与工程检测实际, 剖析现存问题、探寻解决路径, 对提升检测水平、消除质量隐患、推动道路桥梁行业高质量发展具有重要的现实意义。

1 道路桥梁工程质量检测常见问题

1.1 检测技术应用不规范

检测技术应用不规范是道路桥梁工程质量检测工作中最为突出的问题, 直接导致检测结果出现偏差, 无法真实反映工程实际质量状况。检测方法的选择需紧密贴合工程类型、结构特点及检测目标, 当前部分检测工作中, 技术选用存在明显不合理性, 要么沿用滞后的检测技术, 难以精准捕捉现代道路桥梁工程的质量隐患, 要么盲目选用高端冗余技术, 不仅增加检测成本, 还会因技术适配性不足影响检测效率。检测操作环节缺乏统一标准约束, 检测人员在实操过程中

往往凭经验操作, 未严格遵循行业规范要求, 人为失误频发, 比如样本采集位置偏差、检测仪器操作不当等, 都会干扰检测数据的客观性。同时, 检测设备的校准与维护工作落实不到位, 多数检测机构未建立常态化校准机制, 设备长期运行后精度下降, 无法提供准确的检测数据, 进一步加剧检测结果的失真问题, 难以作为工程质量管控提供可靠支撑。

1.2 检测人员专业能力不足

检测人员专业能力是决定检测工作质量与效率的关键因素, 当前行业内人员整体素质参差不齐、专业能力薄弱问题显著, 已成为制约检测工作规范化发展的主要瓶颈。部分检测人员未接受系统专业培训, 对道路桥梁结构原理、检测技术标准、新型检测设备原理与操作掌握不扎实, 面对复杂工况与异常数据时无法准确判断, 难以熟练应用智能化、数字化检测技术开展工作^[1]。现场实操能力不足, 易出现操作失误、流程遗漏等问题, 降低检测数据可靠性。部分人员责任意识与职业素养淡薄, 对工程质量安全缺乏敬畏, 检测过程敷衍应付, 甚至存在迎合验收需求篡改、伪造检测数据等违规行为, 导致工程质量隐患无法及时发现, 严重威胁道路桥梁运营安全, 扰乱行业发展秩序。

1.3 检测管理制度不完善

检测管理制度不健全、执行不到位, 导致检测全过程缺乏有效约束与指引, 工作流程混乱, 质量管控效能难以发挥。检测流程缺乏标准化规范, 样本采集、

作者简介: 计文婷(1982-), 女, 专科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

现场检测、数据记录、结果上报等关键环节未形成统一操作要求,不同人员、不同机构作业方式差异较大,检测结果不具备横向可比性,难以实现统一质量管控。检测过程复核与监督机制缺失,未建立全过程监督体系,检测行为与数据真实性缺乏有效校核,部分检测工作流于形式。检测数据管理混乱,未建立标准化归档、存储、查询与溯源体系,数据复用率低,出现工程质量纠纷时无法实现溯源追责,严重削弱检测工作的权威性与实用性。

1.4 检测环境管控不到位

检测环境条件是保障检测结果真实可靠的重要前提,环境管控缺失会直接干扰检测设备运行与检测操作,造成数据偏差。现场检测多处于露天开放环境,温度、湿度、粉尘、振动等外界因素对设备精度与检测过程影响显著,但多数项目未采取针对性防护与调控措施,在不满足规范要求的环境下开展检测,导致结果与实际质量状况存在偏差^[2]。实验室检测环境管理疏漏,温度、湿度、洁净度等指标未稳定控制在标准范围内,影响试验数据准确性。检测现场安全防护体系不完善,安全警示标识、防护设施配备不足,作业秩序不规范,检测人员人身安全无法得到有效保障,易因安全事故中断检测流程,影响检测工作连续性与质量。

1.5 行业监管与企业重视程度不足

行业监管效能不足与企业主体责任落实不到位,共同导致检测工作规范化水平偏低,质量管控作用难以有效发挥。行业监管体系存在漏洞,检测机构资质审核流于形式,日常运营、检测流程、数据真实性等关键环节缺乏常态化、精准化监管;对违规行为处罚力度偏轻,违法成本低,无法形成有效震慑,部分机构与企业为追求经济利益擅自简化流程、篡改数据,破坏行业公平秩序。多数建设与检测企业重经济效益、轻质量管控,对质量检测工作重视不足,刻意压缩检测投入,检测设备更新滞后、人员培训缺失,将检测视为工程验收的程序性环节。行业内“质量优先、诚信为本”的共识尚未形成,检测管控形式化问题突出,难以为道路桥梁工程质量提供可靠保障。

2 解决道路桥梁工程质量检测问题的对策

2.1 规范检测技术应用

规范检测技术应用是提升道路桥梁工程质量检测数据准确性的核心举措,需从技术选择、操作流程、设备管理三个维度协同发力,确保检测工作贴合工程

实际需求。结合道路桥梁工程的类型、结构特点及检测目标,科学筛选适配的检测方法与技术,摒弃滞后且不适配的检测手段,避免盲目选用高端冗余技术,实现检测技术与工程实际的精准匹配,在保障检测质量的同时控制检测成本。积极推广无损检测、雷达探测、无人机巡检、智能传感等先进技术,提升对桥梁裂缝、路基沉降、结构内部缺陷等隐蔽问题的识别能力,提高检测效率与覆盖范围。制定统一的检测操作规范,明确样本采集、检测实施、数据记录等各环节的操作标准,要求检测人员严格按照规范执行,减少人为操作失误,确保检测流程的规范化、标准化。建立检测设备定期校准与维护制度,明确校准周期与维护标准,安排专业人员负责设备的日常检查、校准与维护,及时排查设备故障,确保检测设备始终处于精准运行状态,为检测数据的准确性提供硬件支撑,让检测结果能够真实反映工程质量状况^[3]。

2.2 提升检测人员的专业能力

构建“培训+考核+追责”三位一体的人员能力提升体系,打造高素质专业化检测队伍。

一是建立常态化培训机制,围绕道路桥梁工程理论、最新规范标准、新型检测技术、智能化设备操作、数据处理与报告编制等内容,开展理论授课、现场实操、案例教学等多元化培训,定期更新人员知识结构,提升业务技能与问题处置能力。鼓励检测人员参与行业学术交流、技能竞赛与继续教育学习,拓宽专业视野,紧跟行业技术发展步伐。

二是严格从业准入与考核管理,明确检测人员从业资格与能力门槛,强化岗前资格审查;建立定期技能考核与绩效评价机制,将考核结果与岗位聘任、薪酬待遇、晋升发展挂钩,激发人员自我提升动力^[4]。

三是强化职业道德与责任意识教育,通过典型案例警示、职业诚信宣讲、质量安全责任培训等方式,树立人员诚信检测理念;健全责任追溯与处罚机制,对敷衍检测、数据造假、出具虚假报告等行为严肃追责,取消从业资格并纳入行业黑名单,坚守检测工作公正性底线。同时,建立师徒帮带制度,由资深人员带领新员工快速熟悉现场作业,缩短适应周期,提升整体实操水平。

2.3 完善检测管理制度

以全流程、标准化、可追溯为核心,构建覆盖检测全过程的管理制度体系。

一是细化检测流程规范,明确样本采集、检测实

施、数据审核、报告出具、档案管理等环节操作要求,统一作业标准与技术路径,实现不同人员、不同机构检测行为标准化、结果可对比。结合数字化管理平台,将检测流程嵌入信息系统,实现流程线上化、节点可控化。

二是建立质量复核与全程监督机制,设立独立监督部门与专职监督员,对检测方案、现场操作、检测结果进行全程监督,实行数据双人校核、报告多级审核制度,及时纠正不规范行为,保障检测数据真实准确。

三是健全数据与档案管理体系,建立标准化电子与纸质档案并行的归档制度,规范数据存储格式、查阅权限、使用流程,实现检测数据全程可追溯、可复用,为工程质量管理与纠纷处理提供权威依据。同时,完善检测工作台账,对每一项检测任务进行全程记录,做到任务可查、责任到人、过程可追、结果可验。

2.4 强化检测环境管控

针对现场与室内检测环境特点,实施精细化环境管控,消除环境因素对检测工作的干扰。

一是明确环境控制标准,根据不同检测项目技术要求,制定现场检测与实验室检测环境参数控制指标,规范温度、湿度、粉尘、振动等管控范围。

二是落实环境调控措施,现场检测配备防尘、控温、减震、防风等防护设施,避开恶劣环境作业;实验室定期监测环境参数,配备恒温恒湿、净化通风设备,确保试验条件稳定达标^[5]。

三是加强现场安全管控,规范设置安全警示标识,配齐安全防护用品,梳理现场作业流程,做好高空、临边、用电等风险点防控,保障检测人员人身安全,确保检测工作连续有序开展。

四是建立环境监测记录制度,实时记录环境参数与调控情况,留存环境管控资料,实现检测环境全过程可追溯,为检测结果的有效性提供环境依据。对特殊检测项目制定专项环境保障方案,确保极端条件下检测数据依然可靠。

2.5 强化行业监管与企业责任落实

坚持监管与自律并重,构建政府监管、机构自治、行业自律的协同治理格局。

一是完善行业监管体系,加强检测机构资质动态核查,运用信息化、智能化平台实现检测全过程在线监管,实时监控检测行为与数据流向,提升违规行为发现效率。

二是加大违规处罚力度,提高违法违规成本,对

数据造假、虚假报告等严重违规行为,从严处罚机构与责任人,清退出检测市场,形成强力震慑。

三是强化企业主体责任,引导建设单位与检测机构树立质量优先理念,加大检测投入,保障设备更新、技术升级与人员培训经费,将检测工作纳入工程质量核心管控体系。

四是建立质量信用评价机制,将检测工作质量与企业信用等级、市场准入、项目招投标挂钩,定期公示行业信用名单,倒逼企业规范检测行为,营造诚信守法、重视质量的行业生态。推动行业协会发挥自律作用,开展诚信承诺与质量公约活动,共同维护检测市场秩序与公信力。

3 结束语

道路桥梁工程质量关系到社会公共安全与群众切身利益,质量检测作为工程质量管理的核心技术手段,其规范化、精准化、科学化水平直接影响工程建设品质与长期运营安全。当前我国道路桥梁工程质量检测工作在技术、人员、制度、环境、监管等方面仍存在诸多亟待解决的问题,不仅制约检测工作自身发展,更给工程质量安全带来潜在风险。解决上述问题是一项系统工程,需要行业监管部门、检测机构、工程建设单位多方协同、持续发力。检测机构应聚焦短板弱项,严格落实技术规范、强化人员培养、完善管理制度、严控环境条件,全面提升检测工作质量;行业监管部门应健全监管体系、加大执法力度、引导行业自律,营造公平规范的市场环境;工程建设单位应压实主体责任,重视检测工作价值,保障检测投入与执行到位。唯有凝聚各方合力,持续优化检测体系、规范检测行为、提升检测能力,才能充分发挥质量检测在工程质量管理中的监督保障作用,有效消除质量安全隐患,推动道路桥梁工程行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 王明明.道路桥梁工程材料质量检测优化建议[J].运输经理世界,2025(20):135-137.
- [2] 邱婷,谢书建.市政道路桥梁工程材料质量检测控制优化策略的探究[J].建材发展导向,2025,23(03):4-6.
- [3] 李文学.道路桥梁工程路基路面压实质量检测技术研究[J].运输经理世界,2024(26):95-97.
- [4] 张强.道路桥梁工程材料质量检测重要性及要点分析[J].安徽建筑,2024,31(03):183-184.
- [5] 唐鑫鹏.道路桥梁工程材料质量检测的重要性及要点分析[J].散装水泥,2022(04):179-181,184.

高层建筑外墙单体变形缝设计与施工技术研究

孙 静

(临沂市公共资源交易中心, 山东 临沂 276000)

摘 要 本文围绕高层建筑外墙单体变形缝展开研究, 分析其受力、温度与沉降作用下的变形特性, 明确应力集中与位移规律。结合工程实际, 从防水构造、热工防结露、抗风压抗震三个方面提出优化设计方案, 梳理特殊部位处理、质量检验等施工要点, 规范止水带、盖板、密封胶嵌缝等核心工艺, 以期提升变形缝适用性与耐久性, 解决渗漏、开裂、密封失效等问题提供参考。

关键词 高层建筑; 变形缝; 变形特性; 止水带安装; 盖板安装

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.039

0 引言

高层建筑高度大、受力复杂, 外墙变形缝是结构防护与功能保障的关键部位, 易受温度变化、结构沉降、风荷载与地震作用影响, 出现开裂、渗漏、密封老化等问题。当前部分工程存在设计针对性不足、施工工艺不规范等情况, 影响建筑安全与使用年限。本文结合实际工程需求, 分析变形缝受力变形特征, 优化设计方案, 细化施工技术要点, 完善质量控制措施, 旨在提升外墙变形缝整体性能, 为高层建筑安全稳定运行提供技术支撑。

1 高层建筑外墙单体变形缝的受力与变形特性分析

1.1 温度变化对高层建筑外墙单体变形缝的变形影响

温度变化是导致高层建筑外墙单体变形缝产生变形的最主要因素之一, 其影响贯穿建筑施工全过程及使用年限。高层建筑外墙暴露在自然环境中, 昼夜温差、季节温差都会使墙体材料发生热胀冷缩, 而变形缝作为墙体结构的断开处, 承担着吸收此种形变的作用。当环境温度升高时, 外墙墙体材料受热膨胀, 变形缝会被挤压, 缝宽减小, 此时变形缝两侧墙体可能产生挤压应力, 若挤压应力过大, 会导致变形缝边缘墙体出现开裂、破损。当温度降低时, 墙体材料收缩, 变形缝会被拉伸, 缝宽增大, 此时变形缝处的密封材料会承受拉伸应力, 长期反复的拉伸与挤压, 会导致密封材料老化、开裂, 失去密封和形变吸收能力。温度变化的幅度越大、频率越高, 变形缝的变形量就越大, 对变形缝的设计和施工质量要求也就越高^[1]。

1.2 结构沉降对高层建筑外墙单体变形缝的影响特性

高层建筑自身重量大、基础埋深较深, 在施工及使用过程中, 会因地基承载力不均、上部结构荷载分布差异等因素产生结构沉降, 这种沉降会直接影响外墙单体变形缝的变形特性。不同沉降量会导致变形缝出现不同程度的错位变形, 当建筑整体均匀沉降时, 变形缝的变形量较小, 对结构影响不大, 但当出现不均匀沉降时, 变形缝两侧墙体就会产生相对位移, 导致变形缝被拉伸、挤压或扭曲。这种相对位移会使变形缝处的墙体、密封材料及连接件承受额外的剪切应力和拉伸应力, 严重时会导致变形缝两侧墙体开裂、密封失效, 甚至影响整个外墙的结构稳定性。结构沉降的影响具有长期性和隐蔽性, 在变形缝设计和施工过程中, 需充分考虑地基沉降特性, 预留足够的变形空间, 避免沉降变形对变形缝造成破坏^[2]。

2 高层建筑外墙单体变形缝的优化设计研究

2.1 防水构造设计

高层建筑外墙单体变形缝的防水构造设计, 是保障建筑使用安全的核心环节, 直接关系到建筑内部环境的稳定性和耐久性。设计人员在开展设计工作时, 需充分考虑变形缝的伸缩、沉降变形量, 结合建筑高度、外墙材质及当地降雨情况, 采用分层防水的设计思路。首先要在变形缝基层设置防水垫层, 选用与外墙基层贴合性好、抗老化能力强的材料, 确保基层防水无渗漏隐患。其次, 需设置中间防水层, 采用柔性防水材料, 适配变形缝的动态变形, 避免因结构变形导致防水层

作者简介: 孙静 (1976-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

开裂。最后,要做好表层密封处理,密封材料需具备良好的黏结力和伸缩性能,覆盖变形缝全部缝隙,同时与外墙装饰层衔接紧密,防止雨水从缝隙渗入。防水构造设计需兼顾实用性和施工便利性,应避免采用复杂结构,降低施工难度,确保防水效果长期稳定^[3]。

2.2 热工与防结露设计

高层建筑外墙单体变形缝的热工与防结露设计,需结合建筑节能要求和当地气候条件,重点解决变形缝部位热桥效应突出、易产生结露的问题。热工设计的核心是减少变形缝部位的热量传递,设计人员可通过选用导热系数低的保温材料填充变形缝,且填充材料需紧密贴合缝隙两侧墙体,避免出现空隙而形成热桥。同时,设计人员要优化变形缝构造,合理设置保温层厚度,确保变形缝部位的传热系数符合建筑节能规范要求。防结露设计则需控制变形缝内部的湿度和温度,避免空气中的水蒸气在缝隙内部凝结。设计人员可通过设置透气构造,让变形缝内部空气保持流通,及时排出水蒸气,同时在变形缝内侧设置隔汽层,阻止室内水蒸气渗透到缝隙中。热工设计与防结露设计需相互配合,既要满足建筑节能要求,又能有效避免结露对墙体结构和室内环境造成的不良影响。

2.3 抗风压与抗震构造设计

高层建筑受风压和地震作用的影响较为显著,外墙单体变形缝的抗风压与抗震构造设计,需充分考虑这两种外力作用,确保变形缝在极端条件下仍能保持结构完整性。在抗风压设计方面,设计人员需根据建筑高度、所在地区的基本风压值,确定变形缝的抗风压等级,选用强度高、刚度适中的构造材料,以此增强变形缝的整体抗风能力。同时,变形缝的连接部位需设计得牢固可靠,避免在强风作用下出现松动、变形甚至脱落的情况。在抗震构造设计方面,设计人员需严格遵循抗震设计规范,确保变形缝能够适应地震时的结构位移,减少地震作用对变形缝及周边墙体的破坏。设计人员可在构造上采用柔性连接方式,允许变形缝在水平和竖向产生一定的位移,同时设置抗震支撑构件,增强变形缝的抗震稳定性。抗风压与抗震构造设计需结合建筑结构类型,做到与整体建筑结构协调一致,保障建筑在各种外力作用下的使用安全^[4]。

3 高层建筑外墙单体变形缝施工的技术要点

3.1 特殊部位处理

高层建筑外墙单体变形缝的特殊部位,因其构造复杂、受力集中,是施工过程中的重点与难点,处理不当易引发渗漏、开裂等质量问题。水平缝与垂直缝

交叉形成的十字缝、T型缝,是变形缝应力集中的关键节点,施工人员需针对此类节点采用加强处理措施。施工人员需先根据节点构造尺寸,预制定制化金属连接件或角钢,将连接件与主体结构通过螺栓锚固或焊接方式牢固连接,确保连接件安装牢固、位置准确,以此分散节点处的应力,避免节点因结构变形产生开裂。变形缝端部的收口处理,尤其是女儿墙顶部与建筑勒脚部位的收口,直接影响变形缝的防水效果与外观质量。女儿墙顶部的变形缝,施工人员需设置金属压顶,压顶需与女儿墙结构牢固连接,压顶边缘需进行滴水处理,防止雨水沿缝渗入墙体;建筑勒脚部位的变形缝,施工人员需增设耐腐蚀金属护板,护板需覆盖变形缝端部,同时与勒脚墙面紧密贴合,抵御外界机械碰撞与潮气侵蚀。当幕墙横梁、立柱穿越变形缝时,施工人员需预留足够的变形余量,在穿越部位设置滑动支座或弹性补偿构件,确保结构沉降、伸缩时,幕墙构件能够自由位移,避免变形缝的结构变形挤压幕墙,保障幕墙系统的稳定性与安全性^[5]。

3.2 质量控制与检验标准

为保障高层建筑外墙单体变形缝的施工质量,施工单位必须建立起覆盖施工全流程的质量控制体系,严格按照既定的检验标准执行,对施工过程中的每一个环节实施全面且细致的管控。在整个施工过程中,质量管理人员要全程跟进,重点对原材料进场、各工序施工、节点处理等关键环节进行实时监督管控:原材料进场阶段,工作人员需仔细核查密封胶、背衬材料、金属构件等核心材料的产品合格证、性能检测报告,逐一确认材料的各项指标符合设计规范及实际施工要求;每一道工序施工完毕后,必须开展工序交接检验工作,只有上一道工序检验合格,才能进入下一道工序的施工,从根本上杜绝不合格工序遗留问题影响整体施工质量。变形缝全部施工完成后,需组织开展全面的质量检验工作,此次检验主要涵盖外观检验与功能性测试两个核心部分。外观检验环节,质量管理人员通过目视观察、尺量检测等方式,重点检查变形缝构件的安装位置、固定方式是否与设计图纸要求一致,构件表面是否平整光滑、无破损、无变形,密封胶填充是否饱满、连续,无气泡、无开裂等质量缺陷。功能性测试的核心是淋水试验,试验时需采用专用喷淋设备,对变形缝及周边墙面进行持续喷淋,喷淋时间、水压大小需严格遵循检验标准,试验结束后,仔细检查室内侧墙面是否出现渗漏情况,以此判断变形缝的防水性能是否达标。

4 高层建筑外墙单体变形缝施工的核心工艺

4.1 止水带安装工艺

止水带安装是高层建筑外墙单体变形缝防水防渗的核心工序,施工单位的安装质量直接决定外墙整体防水系统的稳定性,必须结合工程实际需求,挑选合适类型的止水带并严格规范施工。在实际施工中,施工单位多选用中埋式或可卸式橡胶止水带,此类止水带具备良好的弹性、耐磨性和抗老化性,能够适应主体结构变形时产生的拉伸与压缩作用,有效保障防水效果的持久性。安装前,施工人员需对进场止水带进行全面质量检验,细致排查表面是否存在破损、裂纹、气泡等质量缺陷,对于不合格的止水带,严禁投入施工使用。固定环节,施工人员需按照设计图纸精准定位,确保止水带中心线与变形缝中心线完全重合,固定点间距设置均匀、力度控制适中,避免止水带出现扭曲、褶皱等影响防水效果的问题。搭接部位需采用专用黏结剂处理,保证黏结牢固,搭接长度严格遵循施工规范要求,同时对搭接处进行压实、密封处理,防止雨水通过缝隙渗入主体结构。安装完成后,需及时采取保护措施,避免后续施工工序对止水带造成碰撞、损坏,确保其能够正常发挥防水防渗作用^[6]。

4.2 盖板安装工艺

高层建筑外墙变形缝施工中,施工人员常用滑杆式与弹簧式两种盖板。二者伸缩性能优良,可有效适配主体结构的沉降、伸缩及振动变形,保障变形缝正常使用功能。安装前,施工人员需核对盖板规格尺寸,确认其与变形缝实际宽度、深度完全匹配,同时彻底清理缝内杂物,为后续安装扫清障碍。滑杆式盖板安装时,施工人员先固定滑杆装置,细致调整其灵活度,确保滑杆可自由伸缩,随后安装盖板并检查,确认其能沿滑杆顺畅滑动。弹簧式盖板安装需精准固定弹簧组件,严格把控安装精度,保证弹簧弹性符合设计标准,使盖板随主体结构变形时,可通过弹簧伸缩实现复位。安装完成后,施工人员按设计要求预留变形间隙,严控尺寸偏差,避免间隙不当影响变形缝功能;同时细致检查盖板与基座的连接密封性,防止杂物进入缝内,杜绝其对变形缝正常使用造成影响,确保盖板安装质量达标,保障变形缝长期稳定发挥作用。

4.3 密封胶嵌缝工艺

密封胶嵌缝是提升高层建筑外墙单体变形缝防水性能、增强变形缝结构密封性的重要补充工序,施工人员在施工过程中需重点把控胶缝参数设置与打胶工

艺规范,有效避免密封不严、脱胶等质量问题的出现。密封胶嵌缝作业开展前,施工人员对变形缝的缝隙进行彻底清理,清除缝隙内部的灰尘、杂物及残留水分,确保缝隙内部干燥、洁净,为密封胶与缝隙基层的良好黏结提供有利条件。在嵌缝作业过程中,施工人员应严格控制密封胶的嵌缝深度,结合施工规范要求合理设计胶缝的宽厚比,确保宽厚比既能够保证密封胶的黏结强度,又能够适应主体结构的变形需求,避免密封胶因结构变形出现开裂现象。打胶作业时,施工人员应采用专业打胶工具,保持匀速推进的打胶速度,确保密封胶能够均匀填充整个缝隙,无气泡、空隙及断胶等情况。施工人员在打胶过程中需特别注意,避免密封胶出现三面黏结现象,因为三面黏结会限制密封胶的伸缩变形能力,进而导致密封胶开裂、脱胶,影响变形缝的防水效果。打胶作业完成后,施工人员应对胶缝表面进行修整处理,使胶缝表面平整、光滑,与高层建筑外墙表面保持齐平,同时做好密封胶的养护工作,养护期间严禁对胶缝进行碰撞、挤压,确保密封胶充分固化,从而有效发挥其密封防水作用。

5 结束语

高层建筑外墙单体变形缝的设计与施工直接关系到建筑结构安全、防水效果与使用耐久性。本文通过特性分析、设计优化与工艺梳理,形成适配高层结构的变形缝技术体系。在实际工程应用中,需结合场地条件、结构形式与气候特点,落实节点处理、材料选型与过程管控。未来,可结合新材料与新工艺,进一步提升变形缝的适应性与可靠性,为高层建筑外墙防护体系完善提供持续技术支持。

参考文献:

- [1] 刘智君.房屋建筑工程中的变形缝施工技术研究:以广州市白云沙亭岗新社区棚改项目为例[J].房地产世界,2023(19):136-138.
- [2] 闫永琪,杨鹏飞,钱闯,等.两工程地下室交界变形缝防水深化设计分析[J].建筑施工,2023,45(01):52-55,63.
- [3] 苏建锋,邢文杰.装配式混凝土剪力墙结构变形缝模板加固技术[J].建筑技术,2022,53(11):1443-1445.
- [4] 喻发.装配式建筑外墙PC构件现浇加固施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025(04):100-102.
- [5] 张玲.被动低能耗装配式建筑外墙防水设计与施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2024(12):100-102.
- [6] 赵盘珠.混凝土装配式建筑施工技术的优势浅析[J].四川建材,2024(05):79-80,83.

电气安装工程现场安全风险辨识与防控技术研究

司松松¹, 张延卫², 赵磊³

(1. 肥城市王瓜店街道应急安全保障中心, 山东 泰安 271608;

2. 山东智通能源科技有限公司, 山东 滨州 256600;

3. 盛城建工集团有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要 电气安装工程施工现场的安全风险复杂多样, 传统的风险管理方式已经不能满足当前的建筑电气工程项目安全管理需求。本文对电气安装工程现场的主要安全隐患进行了全面剖析并介绍了危险源辨识以及风险等级评价的方法, 在此基础上详细说明了防止触电、隔离防护、环境监测及应急响应等主要防范措施的作用机理及其应用情况, 并提出了安全技术管理制度、人员培训技术和信息化管理等实施保障措施, 以期为相关人员提供参考。

关键词 电气安装; 安全风险; 辨识技术; 防控技术; 信息化管理

中图分类号: TU714; TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.040

0 引言

电气安装工程是建筑施工领域典型的高风险作业环节。结合近年建筑施工安全统计数据, 触电事故在全行业伤亡事故中占比处于较高区间, 其中电气安装施工阶段发生的触电事故, 在全流程电气类安全事故中占比超过半数。与此同时, 电气施工现场还面临火灾、机械伤害、高空坠落等多重风险。传统安全管理是以事后处理及经验总结为主, 缺少主动预防以及科学决策的技术支持, 在现代电气安装工程项目的安全管理上迫切需要构建一种以风险辨识、实时监控以及智能化报警为一体的全方位防控机制。本文的研究目的是对电气安装工程现场的安全风险进行识别技术和防控技术的探讨, 为施工安全管理工作提供参考。

1 电气安装工程现场主要安全风险及其危害分析

电气安装工程施工现场存在较大的安全隐患, 其特点是不易察觉、危害大、后果严重, 在建筑施工伤亡事故中, 触电事故占 58%, 火灾事故占 19%, 机械伤害及高处坠落事故各占 15% 和 8%。触电主要是由于临时用电布置不合理以及防护措施不到位, 按照 IEC 标准规定, 人体安全电压为 36 V (交流), 超过 50 V 时触电死亡率急剧升高, 在潮湿环境中 (相对湿度大于 75%) 人体电阻只有 1 000 Ω 左右, 24 V 电压就足以对人体造成威胁。火灾隐患主要来自电线电缆过热、短路或者接触不良等问题^[1]。

2 电气安装工程安全风险辨识的技术方法

2.1 危险源识别技术

危险源辨识是风险控制的前提条件, 在国际标准 ISO 12100 中有系统的危险源辨识方法, 而电气安装工程中的危险源辨识主要是三个方面。作业活动危害分析法 (JHA) 通过将施工过程划分成一系列的操作步骤, 然后对每一个步骤中存在的潜在风险进行逐一排查, 如线路敷设一般分为放线、定位、穿管、接线、绝缘处理、通电测试等 6 ~ 8 个环节, 每一个环节有 3 ~ 5 个风险点^[2]。

故障树分析方法 (FTA) 是逆向思维的方式, 由不希望发生的事故开始, 逐级寻找其原因。以触电事故作为顶事件, 可将其分为直接接触带电体、间接接触故障电压、静电放电等中间事件, 再进一步细分为设备故障、防护缺陷、操作失误等基本事件。FTA 可以找出造成事故的主要因素, 有利于及时进行防范工作。数字化巡检及实时监控系统运用物联网技术, 在工地安装各种传感器, 用温度传感器对电缆接头温度进行监控 (异常温度高于 60 $^{\circ}\text{C}$), 用电流互感器对线路负荷情况进行监控 (过载大于 20%), 用绝缘电阻测试仪对绝缘状况进行实时监控 (绝缘电阻小于 0.5 M Ω 报警), 以上信息即时传送到管理中心, 做到对潜在危险的预先发现。

作者简介: 司松松 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设工程电气安装。

2.2 安全风险分级评估技术

风险分级评估是量化的决策支持工具,在全球范围内广泛应用的风险评估公式为 $R=P \times S \times E$, P 代表发生概率、 S 代表严重程度、 E 代表暴露频率。定量风险评估模型基于历史事故数据进行构建。在触电方面,依据国家建筑业施工统计数据,触电事故发生率是 3.2×10^{-6} 次/人·年,严重程度得分 9/10(极易致死),而暴露频次则由带电操作工人人数以及工作时间决定,对于一支有 50 名电工的施工队而言,每月平均工作时间为 800 小时,则其风险值就是 $3.2 \times 10^{-6} \times 9 \times 800 = 0.023$,在可接受范围内(风险可接受阈值 ≤ 0.05);但是如果缺少防护措施,则风险值会增加到 0.12,超出可接受范围。安全评分系统和风险矩阵分析相结合的方式把定性和定量的方法结合起来,把风险划分为五个等级:极高风险(风险值 > 0.1)、较高风险(0.05~0.1)、一般风险(0.01~0.05)、较低风险(0.001~0.01)、极低风险(< 0.001)。现场检查员可以利用风险矩阵迅速确定某一特定风险等级并据此做出是否继续作业或者需要采取什么预防措施等决定^[3]。

3 电气安装工程现场防控的核心技术

3.1 触电防护关键技术

接地接零保护装置是防止触电的第一道屏障,在 IEC 60364 中规定了建筑工地必须使用 TN-S 制(三相四线加保护地线)或者 TN-C-S 制,当发生漏电流大于 30 A 时,空气开关迅速跳闸断开电源。接地电阻一般不大于 4 Ω (临时施工用电为 10 Ω),可以将触电危险减少 94%,而漏电保护器(RCD)则是防范间接接触电击的重要装置。现代 RCD 采用电磁感应原理,当正常工作时进线和出线电流相等,铁芯中磁通量为零;当发生漏电时,两路电流不相等,产生的不平衡磁通感应出电压,触发脱扣机构,高灵敏度 RCD 的动作电流仅需 10 mA~30 mA,动作时间 < 30 ms,可有效防止触电致命^[4]。研究表明,配备 RCD 的施工现场触电事故率比未配备的现场低 92%。个人防护装备(PPE)包括绝缘手套、绝缘鞋、安全帽和防护眼镜等,现代智能防护装备集成了传感器,可实时监测绝缘手套的绝缘性能(任何漏洞会触发声光告警)、工作人员的心率和血氧饱和度,当检测到异常(心率超过 120 bpm 或接近触电)时,立即触发急救通知。

3.2 安全隔离与设备防护技术

临时用电布置及防护隔离系统严格遵守《建设工程施工现场供用电安全规范》(GB 50194-2014)标准,施工现场临时用电需做到三级配电(总配电箱、分配电箱、

开关箱)并编制专项方案,由具备建筑工程施工资质的电气工程师设计。隔离防护分为物理隔离(以临时围挡隔离高危作业区)、电气隔离(利用隔离变压器或者便携式隔离电源等方法)以及时间隔离(限定在一定时间内开展带电操作),实际应用中采取了三种方式联合使用的工地发生事故的比例较单一的方式下降超过 60%。

工作票制度与能量隔离技术(LOTO)是重要的管理防护手段,LOTO(Lockout/Tagout)要求在维修或改造电气设备前,必须切断电源、上锁、挂警示标签,防止无关人员误启动设备。在电气安装工程中每个施工班组应配备专门的 LOTO 工具箱,每次作业前进行能量隔离检查。绝缘工具及防护材料质量把关属于细节防护,绝缘工具(绝缘螺丝刀、绝缘铜棒)要进行定期测试其绝缘强度(工作电压的 1.5 倍、持续时间为 5 s),防护材料(绝缘胶带、热缩管)应选用低烟无卤(LSZH)阻燃材质保证电缆完整,抽样检验合格的防护材料能减少由于绝缘破损造成的事故率达 73%^[5]。

3.3 施工环境监控与预警技术

物联网传感器网络应用于工地已经十分普遍,一般布置在配电箱、电缆沟、作业区等位置安装温度传感器(精确度 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$)、湿度传感器(精确度 $\pm 2\%$ RH)、接地电阻检测仪以及漏电流检测仪,以上各种类型的传感器以无线或者有线的方式接入监控中心进行全天候不间断监控。对环境因素进行实时监测的重要参数是电缆接头温度(正常值为 40 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$,大于 60 $^{\circ}\text{C}$ 报警)、施工现场环境相对湿度(高于 75%时触电危险成倍增加)、接地电阻(临时用电标准小于 10 Ω)及绝缘电阻(小于 0.5 M Ω 报警)。研究数据显示,在事故发生前可以提前 24 小时到 48 小时发现隐患并及时处理,避免事故发生的概率高达 78%。

AI 视觉识别系统与人员行为预警利用深度学习技术识别施工现场的危险行为,通过在关键作业区域安装高清摄像头和部署 AI 识别模型,系统可自动识别工作人员是否佩戴绝缘手套、是否进入隔离区域、是否规范操作设备等。当检测到违规行为时,系统即时发送警报至现场管理人员和工作人员的移动设备,实验数据显示,部署 AI 预警系统的施工现场违规操作率下降 88%,无违规操作相关的安全事故发生。

3.4 应急救援与风险应对技术

触电急救技术关键是及时切断电源以及进行心肺复苏(CPR),从医学角度来说,在触电之后 4 min 内实施 CPR 的存活率约为 50%,而超过 6 min 则下降至 10% 以下。现代工地应当配备自动体外除颤器(AED),

它是一种便于携带的医疗器械,可以自动判断心脏节律异常并给予电击治疗,使用者只需要听从语音指导即可完成操作。据研究显示,安装有AED的工地位于触电事故中死亡人数可减少40%。消防应急响应及危险化学品处理包括扑灭电气火灾的内容。由于水会导电因此不能用水来扑救电气火灾,应该使用干粉灭火器或者二氧化碳灭火器。工地在用电密集的地方要放置足够的灭火器(每100 m³建筑面积一个4 kg干粉灭火器)并且要经常检查是否过期。工人要接受消防安全教育,了解如何使用灭火器以及逃生路线等。

应急预案编制及演练评价要求每个工地都有详尽的应急预案,有组织机构、应急处置程序、通讯录、医疗救助等内容。预案要涵盖触电、火灾、机械伤害等各种情况下的应急预案。经常性的演练(不少于每半年一次)可以大大提高应急能力。

4 电气安装工程安全防控的实施策略与保障

4.1 安全技术管理体系的构建

分阶段风险管理流程应贯穿整个项目的设计、施工准备、施工以及验收全过程,在设计上要制定临时用电方案并确定接地系统及保护装置,在施工前要对防护设施、检测仪表和劳动防护用品进行检查验收,在施工过程中要做到定期巡视和不定期的测试(每周对接地电阻、绝缘电阻进行全面检测),在竣工后要做综合性能试验以保证所有的防护措施到位。安全操作规程(SOP)编写修订制度规定了根据不同的工作内容编写具体的SOP,如电缆敷设SOP中有环境检查(温度、湿度、防水)、工器具准备(测试仪表、劳保用品)、作业程序(放线、定位、穿管、接线、绝缘处理)、检验标准(绝缘电阻、接地电阻)、应急预案等内容,SOP每年更新一次,并加入新的技术和规范要求。承包商资质与技术能力审查制度要求承包商提供电气资质证书、安全生产许可证、主要管理人员的岗位证书复印件,同时进行技术交底评估,通过笔试或现场提问考核管理人员对规范的理解度,合格分数线为85分以上。

4.2 人员安全素质提升的技术支撑

虚拟现实(VR)模拟培训与实景演练利用沉浸式三维环境再现施工场景,学员可在虚拟环境中体验触电、火灾等危险情景,学习应急处置方法,零风险地获得实际经验,研究表明,接受过VR培训的工作人员安全事故率比只接受传统课堂培训的降低41%。安全知识库系统与移动学习平台建立企业级的知识库,收录行业规范、典型案例、最佳实践等资源,通过手

机应用程序,员工可随时随地学习,培训记录系统可追踪每名员工的学习进度和考核成绩,对不合格人员发出重新培训通知。安全考试系统与持证上岗管理规定电气施工人员必须持证上岗,证书每两年复审一次,考试包括笔试(60道题,70分合格)和操作考试(5个标准操作,不出现致命错误),通过率控制在70%~80%,保证考试的严格性。

4.3 施工现场信息化管理技术

建筑信息模型(BIM)应用于电气安装方面有施工前管线碰撞检查及优化布局,在BIM模型中,电气工程师可以及时发现电缆与其他管线相交问题并进行调整,避免后期返工以及安全隐患。移动端管理平台结合实时数据采集采用专门的施工管理系统APP,工人每天填写安全检查表、工作日志、隐患整改通知单等上传到云端服务器上,信息流转由日报变为即时报告,处理突发事件的时间由一天缩短为半小时左右。施工现场安全档案与可追溯体系建立针对每个工作人员、每个作业区域、每套设备的电子档案,档案记录工作人员的资质证书、培训记录、违规情况;作业区域的环境监测数据、防护措施检查结果;设备的购置日期、检测报告、维修记录。一旦发生事故可迅速追溯问题根源,支持责任认定和改进决策。

5 结束语

电气安装工程现场安全风险需全方位进行,采用合理的危险源辨识以及风险评价方法能够准确找出施工场所主要的风险点;采取有效的防触电措施、防护隔离措施、环境监测以及应急救援等主要防控手段能将风险降低到可接受的程度;建立健全的安全管理制度、员工教育培训及信息化管理可以实现全面立体化的安全管理。未来要不断加强新技术在安全管理中的应用,进一步提升对风险的认识程度及防范能力。

参考文献:

- [1] 刘海青,马明星,路京鹏.基于风险评估的电气安装施工现场安全管理策略研究[J].消费电子,2026(01):44-46.
- [2] 刘黎明.机电工程项目电气设备安全管理、安装调试和风险管控[J].上海电气技术,2025,18(01):57-64,93.
- [3] 李元超.“双碳”目标下电力工程施工安全风险动态管控机制[J].大众标准化,2026(03):78-80.
- [4] 李亮.电气自动化在机电安装工程安全管理中的应用[J].能源新观察,2025(02):57-60.
- [5] 杨国栋,辛在玲,陈加辉,等.高压电力工程电气安装质量控制与安全防护技术[J].消费电子,2025(06):98-100.

建筑给排水与暖通工程施工技术及质量控制研究

周 军¹, 刘 娟²

(1. 北京绿都锦绣建设集团有限公司, 北京 101299;

2. 北京宏宇翔市政工程有限公司, 北京 101118)

摘 要 本文以建筑给排水及暖通工程为研究对象, 深入分析管道安装、设备布设等施工技术要点, 系统梳理材料、工艺、工序、管控等维度的质量问题及成因, 提出全流程标准化、数字化融合的质量控制方法, 融合 BIM、物联网等数字化技术, 兼顾节能降耗与施工安全, 破解隐蔽工程管控难题, 以期提升工程施工精度、降低质量缺陷率、延长系统服役周期、推动建筑机电工程高质量和可持续发展提供理论参考。

关键词 建筑给排水; 暖通工程; 全过程质量管控; 多专业工序衔接

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.041

0 引言

在建筑行业数字化转型与“双碳”目标深入推进的背景下, 绿色建筑、装配式建筑快速普及, 对给排水及暖通工程的施工技术、质量管控提出更加严格的标准。该类工程作为建筑功能保障的关键环节, 具备隐蔽性强、工序交叉多、专业协同要求高的特性, 当前施工环节仍存在技术落地不足、质量隐患频发等问题, 亟须探索科学管控策略, 规范施工流程、提升工程质量。

1 建筑给排水工程及暖通工程施工技术要点

1.1 建筑给排水工程施工核心技术

建筑给排水工程承担建筑内部供水循环、污水水排放及雨水资源化利用的核心功能, 施工技术的精细化实施直接决定管路系统的密闭性、流通效率与长期运行稳定性, 施工全过程围绕管材选型、接口连接、定位校准、防护封堵等关键环节执行标准化作业, 契合建筑机电安装的规范要求与实际使用场景^[1]。建筑内部排水管路优先选用高密度聚乙烯管材, 该材质具备优异的抗老化与耐腐蚀性能, 可适配建筑全生命周期的使用工况。管道连接采用电熔焊接工艺, 焊接温度稳定控制在 220℃至 240℃, 接口成型后拉伸强度可达管材本体强度的 80% 以上, 从根源上规避接口渗漏问题。排水立管通过导向定位工具校准, 垂直度单

米偏差 ≤ 3 mm, 5 m 以上总长累计偏差 ≤ 15 mm, 每层按 3 m 间距设置检修口, 便于后期维护疏通。地下室排水管路加装启动压力 0.02 MPa 的防返溢装置, 阻断雨季水体倒灌。卫生间同层排水采用超薄型施工体系, 结构开凿深度控制在 50 mm, 穿楼板管道采用耐火极限不低于 1.5 h 的防火封堵材料, 生活污水管道静音运行, 噪声控制在 45 dB 以下。

1.2 暖通工程施工关键技术

暖通工程施工涵盖通风空调布设、供暖系统搭建、制冷设备安装及管道保温防护等核心内容, 施工技术的规范应用直接影响室内温湿度调控效果、系统能效水平与运行安全状态, 施工过程聚焦风管加工、设备定位、管路连接、系统调试等环节落实精准化作业, 顺应绿色建筑与节能降耗的行业发展趋势。通风管道采用模块化数控加工工艺, 制作精度控制在 1 mm 以内, 风管选用免焊接槽式法兰连接, 整体承压能力达 1.6 MPa, 减少现场焊接带来的质量波动。通风管道吊装采用承重不低于 200 kg 的组合式减振吊架, 降低设备运行振动与噪声传递。风机盘管借助模块化定位工装安装, 中心线偏差控制在 ± 3 mm, 保障室内送风均匀性与温控稳定性。空调冷媒管道采用无缝铜管, 焊接过程以氮气保护清除管内氧化杂质。制冷设备整体吊装就位, 冷水机组加装弹簧减振器, 运行背景振动速度控制在 0.8 mm/s 以内, 维持系统稳定运行状态^[2]。

作者简介: 周军 (1979-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑给排水。

2 给排水及暖通工程施工质量问题及成因分析

2.1 材料进场与运维管控缺失引发质量隐患

建筑给排水及暖通工程所用材料的性能指标直接决定系统整体运行质量,材料进场环节的检验流程缺位会让不合格品流入施工环节,现场仓储与使用阶段的管控疏漏会进一步放大材料性能缺陷,最终形成持续性质量隐患。给水管材进场时未开展壁厚与耐压性能检测,部分管材壁厚偏差超出0.5 mm,在0.6 MPa试验压力下出现管壁开裂风险。阀门类配件未进行密封性能核验,密封面贴合度不足导致管路运行中出现渗漏。管件与阀门缺少独立身份标识,施工中无法实现批次追溯,材料混用会直接降低管路系统的密闭性与稳定性。

2.2 施工工艺执行不规范导致系统运行故障

施工工艺是保障给排水及暖通系统稳定运行的核心支撑,现场作业人员未严格遵循工艺标准开展操作,会让关键工序的质量控制失效,进而引发各类系统运行故障。管道焊接作业中电流参数波动超出 ± 5 A,焊接接头出现气孔与夹渣缺陷,接口渗漏概率大幅上升。排水管道敷设时未精准控制坡度参数,管路出现反坡现象,污水无法顺畅排放形成淤积^[3]。风管法兰密封施工中密封材料涂抹宽度未达到标准要求,风管系统漏风率超出10%的限值,通风效率持续下降。暖通设备安装时未完成精准对中,联轴器对中偏差超出0.01 mm,设备运行中产生剧烈振动,长期运行会造成管路松动与部件损坏。各类工艺参数的偏离均会破坏系统运行稳定性,缩短设备与管路的服役周期。

2.3 多专业工序衔接不畅造成交叉施工质量问题

给排水与暖通工程涉及土建、电气、装修等多个专业协同作业,工序衔接流程缺乏统筹规划会引发空间冲突与时序错位,交叉施工环节极易产生不可逆的质量问题。暖通风管与给排水管道在同一空间内未进行排布优化,管线碰撞率超出合理范围,后期拆改会破坏已完成施工面。穿墙套管施工未与土建工序同步推进,套管偏心距超出5 mm,管道穿设后无法完成有效封堵。装修阶段吊顶标高与暖通设备安装标高未提前核对,风口定位偏差超出3 mm,影响室内美观与送风效果。各专业工序交接缺少确认环节,前道工序遗留的偏差未及时修正,后续施工会持续放大缺陷。如表1所示,交叉施工引发的质量问题均有明确参数限值,衔接失控会直接突破限值要求。

2.4 全过程质量管控体系不完善降低管控效能

全过程质量管控是规避给排水及暖通工程施工缺陷的重要保障,管控体系存在漏洞会让监督、验收、整

表1 交叉施工质量问题控制参数

交叉施工环节	允许偏差参数	超标后质量风险
管线碰撞	碰撞率 $\leq 5\%$	管路拆改、结构损伤
套管偏心	偏心距 ≤ 5 mm	封堵失效、渗漏
风口定位	偏差 ≤ 3 mm	送风不均、美观缺陷

改环节失去效力,整体质量管控效能持续降低。隐蔽工程施工完成后未开展独立验收,管线偏移与保温破损等问题被掩盖,后期整改周期超出72 h。施工过程中未建立实时监测机制,焊接电流、管道坡度等关键参数未被采集,质量缺陷无法提前预警^[4]。作业人员资质管理缺少核验流程,特种工种人员未取得对应资格便开展承压管路作业,施工精度无法保障。质量问题整改缺少闭环管理,整改结果未经过复核便投入下道工序。

3 建筑给排水及暖通工程施工质量控制措施

3.1 落实材料全周期管控,夯实工程质量基础

材料全周期管控贯穿采购选型、进场核验、仓储养护、现场领用至竣工追溯的完整链条,管控动作以量化性能指标为执行依据,以闭环处置为操作路径,剔除不合格材料,为工程构建稳固的硬件质量基础。采购阶段依据全生命周期成本分析完成主材与设备选型,低温辐射供暖管材完成2 000次热循环性能验证,保障60℃工况下长期稳定服役。进场核验执行逐批次物理性能检测,给水管材壁厚偏差控制在0.3 mm以内,静水耐压测试压力值设定为1.0 MPa,保温材料导热系数检测值不高于0.034 W/(m·K),阀门密封性能测试保持无渗漏状态。仓储区域布设智能环境监测装置,环境温度维持在18℃至25℃,空气相对湿度控制在55%以下,金属管件放置于专用防潮支架,隔绝地面潮气侵蚀。单件管件及设备绑定独立电子编码,编码关联出厂检测报告、性能参数及安装技术要求,现场领用通过扫码完成信息核对,规避材料混用风险。不合格材料当场封存,24 h内完成退场处置,退场记录同步上传项目管理平台。

3.2 推行标准化施工工艺,规范现场作业流程

标准化施工工艺将行业规范转化为现场可执行的量化操作标准,统一施工工具配置,固化工艺参数阈值,规范工序执行节奏,降低人工操作带来的质量偏差。管道焊接作业启用智能焊接设备,电流波动范围控制在 ± 3 A,焊接接头完成无损检测,保障接头内部无缺陷。排水管道敷设借助激光坡度仪完成校准,管路坡度设定值不低于0.5%,保障污水顺畅排放。风管法兰密封施工采用定量涂胶工具,密封胶体宽度控

制在 8 mm 至 10 mm, 胶体连续均匀覆盖密封面, 降低风管系统漏风风险。风机盘管安装依托模块化定位工装完成固定, 设备中心线偏差控制在 ± 2 mm, 保障室内送风均匀性。镀锌钢管沟槽连接使用数显扭矩扳手, 螺栓紧固力设定为 45 N·m, 保障接口密封性能。工艺交底采用三维可视化呈现形式, 清晰展示工序操作要点、参数控制标准及验收要求。单道工序完成后执行量化自检, 自检数据实时上传项目管理终端, 参数未达标工序立即暂停施工, 完成整改并复核达标后, 继续推进后续施工环节, 通过明确质量要求、层层把关, 确保施工过程中的每一个环节都符合质量标准^[5]。

3.3 优化多专业工序衔接, 化解交叉施工矛盾

多专业工序衔接以三维前置策划为核心手段, 优化施工时序排布, 强化界面交接核验, 统筹各专业空间布局与作业节奏, 消除交叉施工引发的质量缺陷。施工前期依托三维模型完成全专业管线综合排布, 自动识别管线空间碰撞点位, 调整管线走向及安装标高, 规避空间冲突。工序编排采用节拍化平衡技术, 明确各专业作业时序及操作窗口期, 冷却水管试压工序提前 72 h 完成, 预留充足的设备安装操作空间。穿墙套管预埋与土建结构施工同步实施, 套管安装采用北斗定位终端记录空间坐标, 偏心距控制在 3 mm 以内, 管道穿设后完成密实封堵, 杜绝缝隙渗漏^[6]。吊顶标高、风口定位与装修施工参数提前核对, 风口安装偏差控制在 3 mm 以内, 兼顾室内空间美观度与通风效果。专业界面交接执行双签确认流程, 给排水与暖通施工班组共同核验套管安装精度、管线布设位置, 交接记录实时留存至项目管理平台。各专业工程师参与界面联合签证, 重点核验专业接口部位施工质量。如表 2 所示, 衔接管控环节设定量化控制指标, 指标达标后启动下一道工序施工。交叉施工矛盾化解过程中, 同步优化施工组织安排, 缩短专业界面交接时长, 避免后期拆改引发的结构损伤及施工成本损耗。

表 2 多专业交叉施工衔接控制参数

衔接管控环节	量化控制指标	管控目标
管线综合排布	碰撞点位零新增	规避空间冲突
穿墙套管安装	偏心距 ≤ 3 mm	封堵严密无渗漏
风口定位安装	偏差 ≤ 3 mm	送风均匀美观
工序交接时长	单界面 ≤ 0.5 d	提升施工效率

3.4 构建数字化全过程管控体系, 提升质量管控水平

数字化全过程管控体系融合三维建模、物联网监测、数字孪生及区块链技术, 实现施工全流程数据实

时采集、质量风险提前预警、施工过程全程追溯、问题整改闭环处置, 推动质量管控模式向事前预控转型。隐蔽工程施工采用三维扫描设备采集现场实景数据, 与设计模型完成实时比对, 偏差超出 5 mm 触发现场预警, 保障管线定位精度。压力试验布设智能监测终端, 每 5 min 自动记录压力与温度数据, 生成连续变化曲线, 系统依据曲线状态判定试验结果, 替代人工记录产生的误差。关键工序参数通过物联网终端完成实时上传, 焊接电流、管道坡度等数据全程留痕, 参数超出设定阈值自动暂停现场作业。质量档案依托区块链技术完成上链存储, 材料证明、工艺记录、验收报告等资料不可篡改, 实现质量责任全程追溯。现场质检人员使用移动端巡检终端, 覆盖全部关键质量控制点, 现场上传图文检测数据, 系统自动生成质量评估报告并推送整改指令。质量整改执行闭环管理流程, 整改结果经复核通过后完成销项, 杜绝同类问题重复出现。系统调试采用数字孪生双轨模式, 先在虚拟环境模拟运行参数, 再指导现场调试操作, 保障系统能效符合设计标准。数字化管控手段覆盖隐蔽工程全流程, 精准定位施工偏差, 提升整体质量管控效能。

4 结束语

建筑给排水及暖通工程的施工技术优化与质量控制, 是保障建筑整体品质、契合行业绿色智能发展的核心举措。依托标准化施工、数字化技术赋能, 可有效破解材料、工艺、工序、管控层面的质量难题, 提升系统运行稳定性与节能效益。未来需持续深化 BIM、物联网等技术在施工与管控中的融合应用, 完善全生命周期质量管控机制, 推动施工技术与管理模式深度协同, 为建筑机电工程高质量、可持续发展筑牢根基。

参考文献:

- [1] 李燕, 黄伟峰. 建筑给排水管道安装施工技术及其质量控制[J]. 汽车世界, 2019(15):66.
- [2] 黄玉林. 建筑工程中的给排水施工技术及其质量控制方法分析[J]. 中国厨卫, 2025, 24(10):228-230.
- [3] 唐朝晖. 建筑暖通工程施工技术及其质量控制措施[J]. 门窗, 2025(17):52-54.
- [4] 同[3].
- [5] 郭栋. 建筑给排水工程现场施工技术及管理分析[J]. 石化技术, 2025, 32(03):443-444.
- [6] 马旭亮. 建筑给排水管道安装施工技术及其质量控制探讨[J]. 产品可靠性报告, 2023(04):110-111.

吸附—两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂生产废水的效能研究

赵丽

(杭州泽元安全科技有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要 针对磷系阻燃剂废水的处理需求, 本研究采用吸附—两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂废水。通过系统筛选适配的吸附材料和絮凝剂, 重点研究了吸附材料投加量、反应 pH 值、反应时间和絮凝剂投加量以及处理材料投加方式对总磷去除效果的影响。结果表明: 在 pH 值为 5、投加量为 1 wt%、动态反应 2 h 的条件下, 活性炭对总磷的去除率可达 35.1%; 活性炭预处理后进行两步絮凝剂的使用对磷系阻燃剂废水总磷的去除效果最佳, 废水总磷去除率可达 97.7%。

关键词 吸附; 絮凝沉淀; 多步法; 磷系阻燃剂废水

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.042

0 引言

阻燃剂是用于抑制高分子材料被点燃或延缓火焰蔓延的助剂。其中, 磷系阻燃剂凭借阻燃效率高、发烟量少、毒性低且燃烧时不释放腐蚀性气体等优势, 在各类阻燃助剂体系中的重要性持续提升。磷系阻燃剂品类丰富, 目前应用最为普遍的主要为磷酸酯类与麟酸酯类^[1-2]。市售的阻燃剂一般是以其中一种类型为主体, 另一种组分作为辅助, 其中以无机磷阻燃剂为主体的磷酸铵盐较为常用, 这一类含磷阻燃剂的废水中磷主要以聚磷酸铵 (APP)、三聚氰胺聚磷酸盐 (MPP) 等形式存在, 少量以有机态的磷形式存在, 无法用传统用于除正磷酸根的沉淀法直接除磷^[3], 而采用 Fenton 法^[4]或者单纯活性炭进行吸附^[5]效果良好, 但价格比较昂贵。选择吸附—两级絮凝沉淀工艺处理此类废水, 通过少量吸附材料吸附废水中有机磷与聚合态无机磷, 经两道絮凝沉淀冲洗吸附材料使其再生并沉降无机磷, 实现总磷高效去除。试验对比了常见吸附材料与絮凝剂的除磷效果, 现将结果汇报如下。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

1. 吸附材料: 膨润土 (Bent), 凹凸棒石 (ATP), 沸石粉 (Zeo), 硅藻土 (Dia), 活性炭 (AC), 以上吸附材料均为 200 目。

2. 絮凝剂: 聚合氯化铝 (PAC), 聚合硫酸铁 (PFS),

聚合硅酸铝铁 (PSAF), 聚氯化铝铁 (PAFC), 以上絮凝剂均满足工业生产标准。

3. 仪器: JJ224BC 型电子天平, 雷磁 PHS-25 型 pH 计, 101-1AB 型鼓风干燥箱, HZQ-X300C 型恒温振荡器, 722S 可见分光光度计。

1.2 废水水质

磷系阻燃剂废水取自海宁市某纺织公司二沉池出水, 外观澄清无色底部有少量杂质, 中性 (pH 值约为 7.5), 无味, 总磷浓度 13.1 mg/L, 其中有机磷 2.9 mg/L (要求处理后总磷浓度 < 0.5 mg/L)。

1.3 试验方法

1.3.1 吸附材料的预处理

在开展试验前, 先采用质量浓度 3% 的盐酸溶液对吸附材料浸渍处理 60 min, 再以同浓度氢氧化钠溶液浸泡相同时长以脱除杂质, 之后用去离子水反复淋洗至体系呈中性, 置于 105 °C 环境中烘干至质量不再变化, 备用。

1.3.2 废水的吸附

1. 最佳吸附材料及其最佳投加量的筛选。准确称取 0.5 wt%、0.8 wt%、1 wt%、2 wt% 和 3 wt% 水样质量的 5 种预处理后的吸附材料, 分别放入装有含磷废水的烧杯中, 调 pH=7, 置于 160 r/min 摇床中, 2 h 后取样, 调 pH 至中性, 过滤取滤液测总磷。筛选得到最佳吸附材料及其最佳投加量。作为对比, 最佳吸附材料进行静置反应条件下的吸附实验。

作者简介: 赵丽 (1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环保安全咨询服务。

2. 最佳吸附 pH 的筛选。准确称取上文中最佳吸附材料及其最佳投加量，分别放入装有含磷废水的烧杯中，调不同 pH，置于 160 r/min 摇床中，2 h 后取样，调 pH 至中性，过滤取滤液测总磷。筛选得到该材料最佳反应 pH。

3. 最佳反应时间的筛选。准确称取最佳吸附材料及其最佳投加量，放入装有含磷废水的烧杯中，调 pH 至的最佳 pH，置于 160 r/min 摇床中，0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h、3 h、4 h 后取样，调 pH 至中性，过滤取滤液测总磷。筛选得到该材料最佳反应时间。

1.3.3 废水的絮凝沉淀

取 1.3.2 中筛选出的最佳吸附材料及反应条件进行吸附实验，向待测样本中加入适量絮凝试剂，进行 30 min 的静置，调节溶液 pH 至中性，通过离心分离获取上层清液并检测总磷浓度，最终确定效果最佳的絮凝剂用量。

1.3.4 废水的二次絮凝沉淀

取 1.3.3 筛选出的最佳絮凝剂及其最佳投加量进行一次吸附 + 絮凝反应实验，静置反应 30 min，随后

加入同等絮凝剂，再静置反应 30 min，调 pH=7，分离上清液，测定其总磷浓度。

作为对比，最佳条件吸附处理后的废水加入上述同样总量的絮凝剂，静置反应 1 h，调 pH=7，分离上清液，测定其总磷浓度进行对比实验。

作为对比，采用两步絮凝 + 吸附在同样条件下进行实验。

1.4 分析方法

总磷浓度的检测严格依照《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》（GB 11893-1989）标准，选用钼酸铵分光光度法完成测定。

2 结果与分析

2.1 吸附材料及最佳反应条件的筛选

2.1.1 最佳吸附材料及其最佳投加量的筛选

分别选用预处理后膨润土、凹凸棒石、沸石粉、硅藻土和活性炭作为吸附材料，进行不同投加量下的动（静）态实验，实验结果见表 1，总磷去除率见图 1。

由图 1 数据可见，活性炭在所有吸附剂中达到了最

表 1 不同加药量下各吸附材料的总磷吸附效果

加药量 (wt%)	总磷浓度 (mg/L)					
	膨润土 (动)	凹凸棒土 (动)	沸石粉 (动)	硅藻土 (动)	活性炭 (动)	活性炭 (静)
0.5	12.9	12.7	12.8	12.5	12.5	12.7
0.8	12.9	11.9	12.6	12.3	11.3	12.5
1.0	12.7	11.9	12.4	12.2	10.0	12.4
2.0	12.6	11.8	12.3	11.9	9.5	11.5
3.0	12.2	11.4	11.9	11.3	8.8	10.9

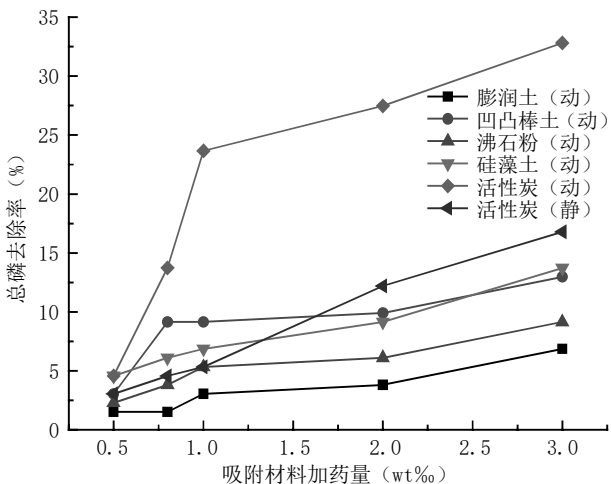


图 1 不同吸附材料对总磷去除率的影响

优的总磷去除效果，考虑与其比表面积大，可更多的吸附水体中的有机污染物^[6]，故相对于其它吸附材料，

活性炭的除磷效果最好。同时，动态条件下活性炭的吸附效果远高于静态条件下。动态条件下活性炭与含磷污染物的接触概率增加，有助于增加活性炭的吸附效果。考虑到活性炭的综合成本及其对该废水的处理效果，优选 1 wt% 进行后续的实验。

2.1.2 最佳吸附 pH 的筛选

图 2 为加药量为 1 wt% 时不同 pH 下活性炭的除磷效果，由图 2 可知，随着 pH 的增加，除磷效率逐渐下降至平衡。

研究表明，活性炭悬浮物的 pH 明显地影响着活性炭粒子表面的带电性，溶液偏酸性时炭粒表面带正电，易吸附溶液中带负电的磷酸根^[7]；随着溶液 pH 逐渐增加，炭粒表面带负电，对溶液中磷酸根吸附能力降低^[8]。但是对于实际水处理工程来说，若单纯用酸调 pH=2 左右进行活性炭吸附不现实，因为后续为了满足出水 pH 达标，还要回调 pH 至中性，故考虑到实际情况以及活

性炭对该废水的总磷去除效果,优选 pH=5 作为后续实验的最佳 pH。

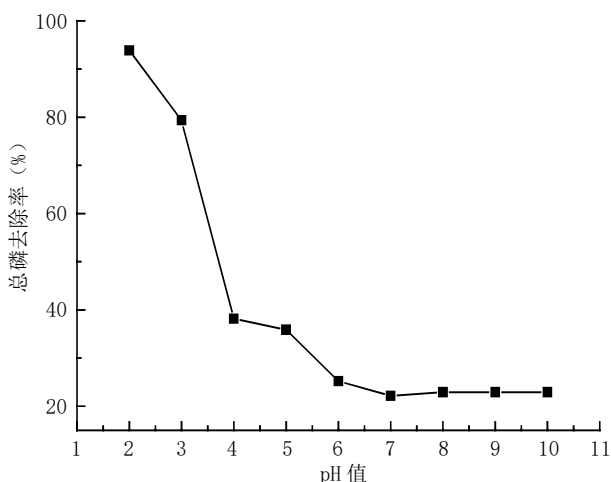


图2 不同 pH 下活性炭对总磷去除率的影响

2.1.3 最佳吸附时间的筛选

活性炭的吸附和解吸是一个可逆的平衡过程^[9],即活性炭在吸附污染物的同时也伴随部分污染物从活性炭表面析出,直至达到污染物的平衡状态。

活性炭在去除总磷过程中表现出优良的吸附动力学特性,实验结果显示,吸附进行 2 h 后即达到平衡状态,此时总磷去除率为 35.1%,水样中剩余磷含量不再发生明显变化。

2.2 絮凝剂及最佳加药方式的筛选

2.2.1 最佳絮凝剂的筛选

由前文可知,采用活性炭一步法处理该废水在合理条件下不能达到预期的效果,故接下来考虑多步法处理该废水。

活性炭预处理后采用不同絮凝剂进一步处理,聚合硫酸铁作为絮凝剂对总磷去除效果最明显,并且在加药量大于 1.0 wt% 后效果基本趋于稳定,总磷去除率可达到 94.7%。

2.2.2 最佳加药方式的筛选

活性炭+聚铁两步法处理该含磷废水取得了较好的效果,为了进一步加强除磷效果至达到标准,采用了不同的加药方式来验证其对除磷效果的影响。加药方式如下:1.0wt% AC+1.0wt% PFS+1.0wt% PFS,总磷浓度:0.3 mg/L;1.0 wt% AC+2.0 wt% PFS,总磷浓度:0.5 mg/L;1.0 wt% PFS+1.0 wt% PFS+1.0 wt% AC,总磷浓度:0.6 mg/L。

在加药量和部分反应条件相同情况下,吸附一两级絮凝沉淀工艺处理此类废水的效果最佳。活性炭优

先吸附废水中大部分有机磷和少部分聚合态无机磷达到平衡状态,后续聚铁的加入和颗粒较大的活性炭接触概率大,故先絮凝活性炭表面的无机磷,使活性炭又有了新的吸附点位去吸附残留的污染物,从而逐步降低水中总磷含量;而先用絮凝剂处理该废水,产生的大量絮体会优先被活性炭吸附,削弱活性炭对总磷的吸附能力。故吸附一两级絮凝沉淀工艺处理磷系阻燃剂废水的效果优于其他方法。

3 结论

1. 吸附实验表明,在预处理含磷系阻燃剂的废水时,活性炭表现为最优吸附介质,当 pH 控制为 5、投加比例 1 wt%、持续反应 2 h,可达 35.1% 的总磷去除效率。

2. 将聚合硫酸铁与活性炭联用,在处理磷系阻燃剂废水时,对总磷的去除效果明显更好。1 wt% 活性炭 + 1 wt% 聚合硫酸铁两步法对总磷的去除率可达到 94.7%。

3. 活性炭预处理后进行两步絮凝剂的使用对磷系阻燃剂废水总磷的去除效果优于其他加药方式,该处理工艺步骤简便、成本低廉,总磷去除率高达 97.7%,具备较高的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 邵路山,姚忠樱,冯秀艳,等.有机磷系阻燃剂阻燃热塑性聚酯的研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(05):171-180.
- [2] 王琦,刘甘,童张法,等.磷系阻燃剂协同三氧化二锑在 ABS 中的应用及其阻燃机理[J].塑料工业,2025,53(09):126-134,152.
- [3] 朱峥嵘,吴艳,肖继波,等.磷酸氨镁沉淀法回收新型碳材料生产废水中的氨氮[J].环境保护科学,2025,51(05):82-89.
- [4] 唐林旺,农运礼,梁秀霞,等.焦磷酸钠/Fe²⁺ 芬顿法强化处理锡多金属选矿废水性能研究[J].电镀与精饰,2025,47(10):17-25.
- [5] 秦玉莹,李豪飞,陈方方,等.活性炭孔结构对吸附除磷的影响[J].应用化工,2022,51(06):1624-1628.
- [6] 张丽,张丹,潘红艳,等.磷酸法低灰分活性炭的制备研究[J].无机盐工业,2024,56(02):95-103,120.
- [7] 季红军,童裕佳,李佳尧,等.粉末活性炭集成 MBR 膜处理农药废水研究[J].膜科学与技术,2022,42(01):115-120,128.
- [8] 赵俊昌.高悬浮物矿井水治理及资源化利用技术研究[J].中国煤炭地质,2022,34(02):48-50,80.
- [9] 王彬,王亚非,查飞,等.磷酸活化花椒籽制备活性炭及其对亚甲基蓝的吸附[J].应用化工,2023,52(12):3297-3302.