

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 2 月 第 5 期 (总第 630 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 2 月 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

# 目录 *Contents*

## 科技博览

- 001 燃气轮机变工况运行特性试验研究  
..... 王 爽
- 004 供水管网 PE 管热熔对接施工技术应用  
..... 张小飞
- 007 基于吊耳互换性的公差标注分析与应用  
..... 郑 舰, 罗 兵, 郝桂珍, 黎 玄
- 010 水利液塑限联合测定法的操作优化探讨  
..... 邓 琴
- 013 冲砂除尘设备的精细化运营管理模式应用  
..... 章宇轩
- 016 电力电容器的精准相控投切与过电压抑制  
..... 俞 峰, 范克剑, 陈杰萍

## 智能科技

- 019 综采工作面机电管理智能化建设研究  
..... 张海洋
- 022 大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的应用分析  
..... 门雷鸣, 薛光昌
- 025 大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用  
..... 邓仁奇
- 028 高精度 RTK 测量技术在自然资源确权登记界址点中的应用  
..... 张国平
- 031 基于无人机倾斜摄影测量的复杂地形三维建模精度评估研究  
..... 陆春伟
- 034 基于多源数据融合的不动产测绘成果质量智能检测技术研究  
..... 高 芳, 王加方

## 应用技术

- 037 内河航道护岸工程地基处理设计分析  
..... 王心雨

# 目录 Contents

040	水利工程中生态护岸施工技术应用探讨	李耀军, 陈正友
043	抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析	陈晓, 杨路, 孟方
046	塑性混凝土防渗墙技术在水库防渗中的应用	陈权
049	防水堵漏施工技术在建筑工程施工中的应用	赵东民
052	房屋建筑工程中复合地基施工技术应用研究	王孝升, 孙铭
055	建筑机电安装工程中的电气节能施工技术分析	解晓露
058	建筑工程装配式建筑结构外挂墙板施工技术分析	李夏玲

## 科创产业

061	玻璃加工废料循环利用技术研究	马心磊, 陈波, 杨昊
064	化工过程定量风险评估模型构建研究	刘琦
067	BIM 技术在城市道路旧路面再生利用中的应用研究	万阳永, 王永超, 鞠祥宇
070	建筑工程造价的影响因素及造价成本动态管控分析	孙建豪
073	检验检测机构样品流转环节质量风险识别与防控措施	李卫静
076	基于全过程管理的城市园林绿化工程质量控制体系研究	陈晨
079	EPC 总承包模式下工程建设项目的进度与成本协同管控研究	张爱明

## 技术管理

082	道路桥梁工程养护管理与技术优化研究	张纪产
085	市政道路工程施工质量控制及标准化管理	杨宁
088	建设工程施工管理的影响因素与对策分析	周薇
091	水利工程监理对施工安全的监督作用研究	胡金鹏, 刁强, 徐民顺, 牛晓君
094	铁路既有有线施工安全风险及管控措施分析	龙玉峰
097	城市轨道交通地铁施工安全管理优化研究	王健
100	输配电线路安全运行的影响因素及风险管理研究	王明睿

## 科学论坛

103	市政供热工程深基坑开挖支护关键技术探究	林天翔, 丁国尚
106	机械电气安装及系统维护中的防火安全措施	薛玉浩, 桑广坤, 张玲芝, 李小慧, 马联蒙
109	隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术研究	侯强
112	轨道交通盾构施工关键技术研究——以苏州轨道交通 7 号线为例	常康康
115	高原高海拔地区节段梁湿接缝蒸汽养护技术	潘亚杰, 黄雄文
118	大型水利工程混凝土施工质量控制与缺陷防治分析	谢春菊, 张慧
121	风电机组设备过热故障分析及检修技术关键点探讨	刘强
124	藏南某光伏场地季节性冻土冻融问题与致灾机理研究	潘冬, 单树成, 黄声林

# 燃气轮机变工况运行特性试验研究

王 爽

(江苏中科能源动力研究中心, 江苏 连云港 222000)

**摘 要** 本文以 F 级燃气轮机联合循环机组为对象, 开展变工况运行特性试验。依托标准构建试验平台, 控制 50%~100% 负荷、环境参数及燃料特性等变量, 采用规范数据采集与控制策略, 系统分析机组性能响应, 以期为机组调峰优化及电力系统调度提供有益参考。结果表明, 机组变负荷速率达 18.3 MW/min, 在宽温域及  $\leq 35\%$  掺氢、热值  $\pm 10\%$  波动工况下稳定运行, 性能偏差  $\leq 3\%$ 。

**关键词** 燃气轮机; 变工况运行; 运行特性试验

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.001

## 0 引言

随着新能源行业的持续发展, 更高比例新能源接入电网后, 电网振荡加剧, 调峰问题日益突出, 燃气轮机联合循环电厂可调范围宽、响应启动速度快、可靠性高, 快速增减负荷能力非常强, 对于维护电力系统稳定起到了积极作用, 通常被电网作调峰机组运行。燃气轮机联合循环机组基于其灵活性等特点可以更好地配合新能源, 实现电网的稳定运行和高效调度, 为新能源的大规模并网提供有力支撑。

## 1 机组概况

某 F 级燃气轮机联合循环机组采用单轴布置, 由燃气轮机、蒸汽轮机和余热锅炉组成, 燃气轮机额定转速 3 000 rpm, 压气机为 15 级轴流式, 压比 18.9, 采用环形燃烧室配置 24 个低 NO<sub>x</sub> 组合燃烧器, 透平为 4 级轴流式, 透平进口温度约 1 230 °C, 机组在 ISO 工况下, 燃气轮机单循环出力约 187 MW, 联合循环出力约 452 MW, 联合循环效率达到 58% 以上。机组具有快速启动能力, 从冷态启动到满负荷约需 3 小时, 热态启动仅需 1 小时, 变负荷速率可达 18.3 MW/min, 调峰性能优异, 机组燃用天然气, 采用干式低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术, NO<sub>x</sub> 排放低于 25 ppm, CO 排放低于 15 ppm, 满足环保要求。

## 2 变工况运行特性试验方案与实施

### 2.1 试验平台构建与测试系统设计

试验平台主要包括燃气轮机主体、试验台基架、进气装置、排气装置、引射装置、燃油撬、滑油撬、压缩空气系统、水力测功器和循环水系统等核心设备。

在试验区内, 燃气轮机主机和测功装置放置在试验台架上并固定, 排气装置位于燃气轮机主机尾喷口后部, 包括引射筒、排气筒和消音设备<sup>[1]</sup>。操作控制室内设有主控制台, 包含滑油控制模块、燃油控制模块、气源控制模块、冷却水控制模块、远程监控模块、数据采集模块、试车操纵控制模块和试车保护模块等多个功能模块。试验平台核心设备及测试系统模块如表 1 所示。

### 2.2 变工况试验条件的设定与控制

其一, 在负荷条件控制方面, 按照标准要求覆盖 50%~100% 额定负荷范围, 按 10% 间隔设置工况点, 每个工况点需通过调整燃料流量或导叶角度实现负荷变化, 稳定时间不少于 20 分钟。对于发电型燃气轮机, 还需要进行负荷突变试验, 包括突增负载、突减负载、紧急突卸负载等特殊工况的模拟。在试验过程中, 通过 HIL 实时仿真系统运行发电型燃气轮机、传感器、执行机构、发电负载等仿真模型, 模拟运行状态, 通过复杂的负载特性模拟、运行模式模拟、故障模拟相结合, 实现完整的控制策略验证。

其二, 环境参数控制主要包括进气温度、进气压力、大气湿度等条件的设定, 试验需要在标准规定的设计参数下进行, 如额定转速、额定燃料流量、设计进气温度等, 标准要求工况稳定时间不少于 30 分钟。关键参数波动需控制在允许范围内, 测量频次需加密至每 5 分钟一次, 确保捕捉稳定状态下的真实性能。对于联合循环机组, 还需要控制余热锅炉的散热损失, 在数据处理中进行专项修正, 确保误差识别的全面性<sup>[2]</sup>。

其三, 采用基于隐式的连续质量流量 (CMF) 方法

作者简介: 王爽 (1993-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 燃气轮机燃烧室试验。

表1 试验平台核心设备及测试系统模块

类别	组成部分 / 模块	主要功能 / 特点
试验平台核心设备	燃气轮机主体、试验台基架、进气装置、排气装置(含引射筒、排气筒、消音设备)、引射装置、燃油撬、滑油撬、压缩空气系统、水力测功器、循环水系统	构成试验物理基础, 提供燃气轮机运行所需的环境、动力、控制和辅助支持
操作控制室模块	主控制台(含滑油控制、燃油控制、气源控制、冷却水控制、远程监控、数据采集、试车操纵控制、试车保护模块)	集中监控和操作试验过程, 保障试验安全有序进行
测试系统模块化设计	主设备模块: 燃机箱体、进排气系统、通风系统、辅助系统	承载核心设备, 连接必要子系统
	燃料供应模块: 燃料减压撬、罐车、压力调节器、蒸汽发生器、压力传感器	提供稳定、可控的燃料供应
	耗电电阻模块: 输出电路、耗电电阻	模拟电站实际负载, 消耗燃气轮机输出功率
	电气控制模块: 协调控制各模块	实现系统集成控制与协调运行
高效低碳试验装置	压气机试验平台(驱动功率60 MW)、燃烧室试验平台(进口压力3.5 MPa、流量60 kg/s、温度600 °C)、透平试验平台(流量60 kg/s、最高温1 700 °C)、循环试验平台 公用系统: 测控分系统、燃料与工质分系统(天然气、合成气、氢气、CO、柴油等)、计量校准分系统、数据中心、多种工质供应(空气、氮气、蒸汽、O <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> )	代表国内顶尖水平, 具备工程模块化/多级压气机、全温全压燃烧室、透平性能及冷效、联合循环等综合试验能力 为各试验平台提供燃料、工质、测量、控制、数据管理和校准等全方位支持

的负荷控制策略, 结合开闭环控制模式, 在初始负荷变化阶段, 采用开环控制模式, 通过直接控制燃料供应量来调节涡轮转速, 避免传统闭环控制中的反馈调节滞后效应, 当系统进入稳定工况后, 切换至闭环控制模式, 通过PID控制器进行精确调整。

### 2.3 数据采集、处理与不确定度分析

根据《燃气轮机热力性能试验》(GB/T 28686-2012)标准要求, 数据采集系统需要采用高精度测量仪表, 对燃气轮机各截面的温度、压力、流量等参数进行实时测量, 测量参数包括压气机进出口温度压力、燃烧室出口温度、透平进出口温度压力、燃料流量、空气流量、排气温度、功率输出等。数据采集频率通常为每秒5~10次, 燃气发生器物理转速的采样周期为20 ms, 确保能够捕捉到快速变化的动态过程, 数据采集系统还需要具备同步时钟功能, 保证各测点数据的同步性, 避免因时间不同步引入的测量误差。

数据预处理环节, 首先进行数据清洗, 去除采集数据中的异常值、重复值和噪声, 提高数据质量。异常值剔除方法主要包括莱茵达准则、均值迭代法和C模糊聚类方法<sup>[3]</sup>。其中, 莱茵达准则通过计算数据的

平均值和标准差, 将超出三倍标准差范围的数据判定为异常值并剔除; 均值迭代法采用平均值迭代更新测量数据中的最大值和最小值, 以降低异常值对整个稳态数据的影响, 直到参数方差收敛于某一精度。

不确定度分析环节, 根据《燃气轮机热力性能试验》(GB/T 28686-2012)标准要求, 不确定度评估按A类(统计方法)与B类(经验方法)开展。A类评估通过多次重复测量计算标准差; B类则基于仪表校准证书的允许误差, 标准要求合成不确定度需包含所有影响因素, 如温度测量不确定度对热效率计算的传递系数, 最终扩展不确定度(k=2)需小于5%, 确保试验结果的可靠性。试验重复性验证要求同一工况下需进行3次重复试验, 其结果的相对偏差需小于1%, 若超出范围, 需排查仪器故障或操作问题, 重新试验, 对于联合循环试验, 还需要考虑余热锅炉的散热损失引入的误差, 在数据处理中进行专项修正, 确保误差识别的全面性<sup>[4]</sup>。

### 2.4 燃烧稳定性与振动特性监测

试验过程中同步开展燃烧稳定性与设备振动特性监测, 确保变工况下机组运行安全。燃烧稳定性监测采用多维度测试方法, 通过在燃烧室布置高频压力传感器,

实时采集燃烧压力脉动信号, 采样频率设为 1 kHz, 结合高速摄影法捕捉火焰形态变化, 分析火焰闪烁频率、燃烧压力波动幅度等关键指标。同时采用烟气分析仪法实时监测  $O_2$ 、 $CO_2$  浓度变化, 间接反映空燃比适配性, 当燃料特性波动或负荷调整时, 通过调整预混合气空燃比维持燃烧稳定, 避免熄火、回火等异常现象。振动特性监测依据 ISO 3977 系列国际标准要求, 针对机组 3 000 rpm 额定转速, 在主轴轴承座布置径向振动传感器, 在推力轴承座设置轴向振动传感器, 重点监测负荷变化、启停过程等非稳态工况下的振动响应, 振动有效值控制标准参照 ISO 7919-3 规定的工业燃气轮机振动限值。试验期间同步记录燃烧噪声水平, 通过声学测量法识别燃烧不稳定引发的异常噪声信号, 为燃烧调整提供依据。

### 2.5 动态响应与保护系统验证

动态响应特性测试采用时域测量法, 通过在负荷控制回路施加阶跃扰动信号, 模拟突增 20%、突减 30% 额定负荷等极端工况, 记录机组功率、转速、燃料流量等参数的时域响应曲线, 依据《同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则》(DL/T 1235-2019) 要求, 辨识调节系统响应时间、超调量等关键参数。试验结果显示, 机组负荷阶跃响应时间  $\leq 3$  秒, 转速超调量  $\leq 2\%$ , 符合调峰机组动态性能要求。保护系统验证严格遵循《防止电力生产事故的二十五项重点要求》, 采用双重化配置原则, 对超转、超温等关键保护回路进行“三取二”逻辑验证, 包括燃料阀位故障保护、熄火保护、可燃气体泄漏保护等 12 类保护功能。通过模拟传感器故障、燃料供应中断等场景, 测试保护系统动作可靠性, 确保保护动作响应时间  $\leq 100$  ms, 跳闸回路与断路器双跳闸线圈一一对应, 满足安全冗余要求。所有保护逻辑验证均形成完整试验记录, 确保变工况下机组异常时能快速切断危险源, 保障试验过程安全可控。

## 3 变工况运行特性试验结果与分析

### 3.1 不同负荷条件下的性能特性分析

该 F 级燃气轮机联合循环机组性能随负荷率变化规律显著, 与设计特性高度契合。ISO 工况 (进气  $15^\circ\text{C}$ 、压力 101.325 kPa) 下, 负荷率 50% ~ 100% 区间内, 燃气轮机单循环出力从 187 MW 降至 92.3 MW, 热效率从 39.2% 降至 31.5%; 联合循环出力从 452 MW 降至 228.6 MW, 效率从 58.3% 降至 47.8%。环境温度  $10^\circ\text{C}$  时功率热平衡值 289.37 MW、热耗 9 402 kJ/kW·h,  $40^\circ\text{C}$  时分别为 238.53 MW、9 846.18 kJ/kW·h, 每升温  $10^\circ\text{C}$  功率降低 9.18%、热

耗增 2.3%。机组变负荷速率 18.3 MW/min, 运行稳定无异常, 调峰适配性达标。

### 3.2 环境参数变化对运行特性的影响

进气温度对机组性能影响最显著, 与透平进口温度设计值及压气机特性相关。大气温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 联合循环出力降低 9%、效率降低 6%; 温变  $-20^\circ\text{C}$  至  $40^\circ\text{C}$  区间, 功率波动  $\pm 17\% \sim 30\%$ 、效率  $\pm 5\% \sim 8\%$ 。大气压力每降低 1 kPa, 出力降低 1%; 相对湿度影响可忽略。冬夏工况效率差 1.8%、功率差 42 MW, 机组宽温域适应性良好。

### 3.3 燃料特性变化下的机组响应与适应

燃料特性波动直接影响机组燃烧稳定性, 与 24 个低  $NO_x$  组合燃烧器设计适配性密切相关。天然气甲烷含量从 95% 降至 85%、氮气含量增至 10% 时, 低位热值从  $41.8 \text{ MJ/m}^3$  降至  $36.2 \text{ MJ/m}^3$ , 需按热值每降低  $1 \text{ MJ/m}^3$  增供 2.3% 燃料以维持额定出力, 透平进口温度稳定在  $1\ 220 \sim 1\ 235^\circ\text{C}$ 。在掺氢燃烧试验中, 氢气体积  $\leq 30\%$  时燃烧稳定,  $NO_x$  排放  $\leq 25 \text{ ppm}$ ;  $\leq 35\%$  掺氢及热值  $\pm 10\%$  波动区间, 机组运行稳定, 性能参数偏差  $\leq 3\%$ , 满足多燃料工况要求<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

燃气轮机变工况运行特性试验研究为机组运行优化和调峰调度提供了重要的技术支持, 通过建立燃气轮机变工况数学模型, 揭示了机组在不同负荷、环境温度、燃料特性等条件下的性能变化规律。该研究成果为燃气轮机联合循环机组在不同工况下的运行优化、参与调峰以及系统设计提供了实用和可信的参考依据, 对提升机组运行效率、保障电力系统稳定运行具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 李航, 龙建平, 李德忠, 等. M701F 燃气轮机联合循环机组变工况性能研究 [J]. 青海电力, 2025, 44(03): 32-41.
- [2] 叶漪茵, 韩巍, 李济超, 等. 基于机理修正的小型燃气轮机变工况神经网络模型构建方法研究 [J]. 动力工程学报, 2025, 45(04): 505-513.
- [3] 刘鹏, 李建强, 郭靖, 等. 燃气轮机变工况建模仿真及环境条件的非线性影响分析 [J]. 汽轮机技术, 2025, 67(02): 137-144.
- [4] 展君, 曹越, 孙韬志, 等. 燃气-串级超临界  $CO_2$  联合循环变工况策略研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(10): 27-34.
- [5] 梁芒, 应雨龙, 赵素强, 等. 瞬态变工况下电厂燃气轮机气路故障诊断方法研究 [J]. 热力发电, 2023, 52(05): 29-36.

# 供水管网 PE 管热熔对接施工技术应用

张小飞

(巢湖市水务局, 安徽 合肥 238000)

**摘要** 铸铁管网随着服役年限增长, 会产生腐蚀、渗漏等问题, 已无法满足现代农村对供水安全的实际需求。聚乙烯 (PE) 管凭借其优异的耐化学腐蚀性、良好的柔韧性、长使用寿命及便捷的热熔连接特性, 在供水管网新建与改造工程中得到广泛应用。本文以实际工程项目为例, 通过分析 PE 管热熔对接技术原理, 针对该技术在供水管网中的技术实施重点进行研究, 以期为同类供水管网工程提供技术参考。

**关键词** 供水管网; PE 管; 热熔对接; 对接工艺

**中图分类号**: TU990.3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.002

## 0 引言

随着农村基础设施建设的持续推进, 供水管网已成为保障农村正常运转的核心水源供应链条, 其中 PE 管的施工质量, 更是深刻影响着居民生活质量与农村发展效能。PE 管具有耐腐蚀、柔韧性强、使用寿命长、施工便捷等特点, 在供水管网建设及改造工程中得到广泛应用。热熔对接作为 PE 管连接重点技术, 其施工工艺的规范性与精准性直接决定了管道系统的密封性和结构稳定性。因此, 针对 PE 管热熔对接施工关键技术工艺展开研究, 以期为供水管网工程的质量保障提供技术参考。

## 1 PE 管热熔对接技术原理

PE 管热熔对接技术是根据热塑性塑料的热熔特性所研发的技术, 其利用加热板进行两根 PE 管端面的均匀加热, 确保 PE 管端面达到熔融状态后快速移开, 在压力作用下使两根 PE 管道熔融端面紧密贴合, 在保持一定压力后使接口冷却固化形成整体密封连接结构。该技术在应用中需要落实加热温度、加热时间、对接压力、冷却时间的全面控制, 使 PE 管热熔对接时分子充分扩散融合提高对接强度<sup>[1]</sup>。

PE 管热熔对接力学性能和施工参数存在直接关联, 针对不同规格、等级的 PE 管热熔对接参数有明显不同。本工程中所用 PE100 级管材的密度为  $0.941 \sim 0.965 \text{ g/cm}^3$ , 其在熔融对接时将温度设定为  $130 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$ , 并且 PE 管热熔对接时结合管材直径、壁厚等参数进行工艺参数调整, 确保热熔对接后连接达到质量要求, 禁止存在管道虚焊、未焊透或过度熔融等缺陷。

## 2 工程案例概况

某农村核心区域的老旧供水管网改造工程, 其改造管道总长为  $3\ 800 \text{ m}$ , 管径  $\text{DN}200 \sim \text{DN}300$ , 设计供水压力  $0.6 \text{ MPa}$ 。因为该管道位于农村核心地带, 其现场的供水管网主要为铸铁管, 并且使用年限超过 30 年, 管道存在腐蚀、渗漏等问题, 这造成水资源浪费严重, 且对于供水的安全性、稳定性造成危害。为有效解决上述问题, 本工程采用 PE100 级给水管材整体更换, 并选择热熔对接技术进行 PE 管材的连接, 其施工周期为 90 天, 要求施工过程中尽量降低对周边农村居民以及交通的影响。通过技术人员现场地质勘测确定为粉质黏土, 地下水埋深  $2.5 \text{ m}$ 、土壤含水率  $18\% \sim 22\%$ 。同时, 本项目施工所在农村区域地下管线虽分布相对分散, 但涵盖农用灌溉管、电力线、通信线缆等类型, 需在施工前对既有管线开展全面勘查与标识, 避免供水管网施工与既有管线发生冲突, 保障施工质量与安全。

## 3 供水管网 PE 管热熔对接施工技术的具体应用

### 3.1 施工准备

#### 3.1.1 管材与设备准备

本工程设计方案确定采用 PE100 级给水管材及配套管件, 管材进场前需进行严格检验: 确保管材外观无划痕、裂纹、凹陷等缺陷, 尺寸偏差符合《给水用聚乙烯 (PE) 管道系统第 2 部分: 管材》(GB/T 13663.2-2018) 标准要求; 管材公称压力、壁厚等参数与设计方一致, 且具备产品合格证、检测报告等完整质量证明文件。据本次供水管网 PE 管 ( $\text{DN}200 \sim \text{DN}300$ ) 热熔对

**作者简介**: 张小飞 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程建设管理、农村自来水供水管理。

接施工需求,现场选用 HDPE-355 型全自动热熔对接焊机,该设备适配管径范围为 DN110 ~ DN355,具备温度自动控制、压力显示、时间记录等功能,可完全满足本项目管径的热熔对接施工需求。焊机使用前需进行调试:确保加热板温度均匀,温度偏差控制在  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内;液压系统运行平稳、无泄漏。此外,根据现场施工需求,配置管材切割机、刮刀、记号笔、卷尺、水平仪等辅助工具,所有工具经检测合格后方可投入施工作业。

### 3.1.2 现场准备

本工程施工前按照设计方案进行测量放线,明确供水管网敷设位置、坡度以及接口位置,并且使用彩旗或石灰标记。鉴于本工程管材管径统一为 DN200 ~ DN300,沟槽开挖尺寸按对应管径精准控制:沟槽底宽统一设定为 1.2 ~ 1.5 m,既满足管材敷设操作空间需求,又可避免开挖量过大造成资源浪费;管道沟槽开挖深度结合管道埋设深度确定,一般需要在当地冰冻线以下 0.3 m 深度。而管道沟槽开挖环节采用机械开挖与人工修整组合的方式,确保在沟槽开挖环节不会出现超挖现象。如果沟槽开挖因为管控不严格引发超挖问题,需在现场使用级配砂石回填夯实且压实度超过 95%。供水管网沟槽开挖结束后进行平整夯实处理,并在沟槽底部铺设 10 ~ 15 cm 厚度粗砂垫层,使槽体承载力均匀,且供水管道铺设结束后不会出现地基不均匀沉降问题。同时,供水管网沟槽两侧设置排水沟以及集水井,将槽内积水排出达到干燥性要求<sup>[2]</sup>。

## 3.2 PE 管热熔对接关键施工工序

### 3.2.1 管材切割与端面处理

供水管网 PE 管在切割时选用专用切割机,并且由技术人员按照设计方案测量管材长度,需要预留足够切口余量以保证管材长度达到要求。在 PE 管切割时确保切割面和管材轴线垂直,其垂直度偏差在  $1^{\circ}$  以内。PE 管切割结束后使用刮刀将管材端面氧化层、杂质等清理干净,确保管材端面平整、光滑、无毛刺、无飞边。而对于 PE 管材厚度超过 10 mm 时进行坡口加工,坡口角度为  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,坡口深度为管材壁厚的  $1/3 \sim 1/2$ ,确保 PE 管在加热时达到均匀的要求<sup>[3]</sup>。

### 3.2.2 管材固定与对齐

PE 管端部处理结束后将其安装在热熔对接焊机夹具上,按照工艺方案调整夹具位置,确保管材中心轴线对齐,两端管材同轴度偏差为管材外径的 1% 以内。PE 管安装后使用水平仪检测管材水平度,确保两根管材在同一轴线上,防止管材对接时发生偏心情况。PE 管固定完成后使用记号笔在管材上标记加热长度以及对接位置,通常加热长度为 PE 管材壁厚的 10 ~ 15 倍。

### 3.2.3 加热过程控制

在 PE 管热熔对接施工过程中,加热板预热到规定温度后放入两根管材之间,并开启焊机液压系统时使管材端面和加热板紧密贴合。再施加一定的预热压力,使管材端面和加热板接触,其预热时间需结合 PE 管规格确定。如果 PE 管材端面存在均匀的熔融环时开始计时加热,加热时间执行工艺方案,禁止存在加热不足或过度加热影响 PE 管的热熔对接效果。在 PE 管加热过程中观察熔融环形成情况,保证 PE 管熔融环均匀、连续、无气泡、无裂纹。

### 3.2.4 对接与冷却

PE 管端部加热时间达到设定值后迅速移开加热板,并且开启焊机的液压系统,使两根管材以规定对接压力快速贴合,其对接压力需要大于预热压力,从而使 PE 管熔融界面充分融合。PE 管对接结束后保持对接压力不变进入冷却阶段,其冷却时间需要根据 PE 管材规格和环境温度确定。自然冷却时禁止移动 PE 管材或施加外力,防止造成 PE 管接口位置变形。PE 管冷却结束后拆除焊机夹具,并对 PE 管接口位置进行外观检查<sup>[4]</sup>。

### 3.2.5 施工参数优化

PE 管热熔对接时工艺参数对于连接质量有直接影响,本项目施工时结合不同管径 PE 管进行多次试验和调整,最终确定适宜参数见表 1。该参数根据 PE100 级管材的特点,考虑到本项目施工地质条件、环境温度  $15 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  制定,从而保证 PE 管热熔对接的质量达到工程要求。

由表 1 可知,随着管材管径和壁厚的增加,加热时间、冷却时间相应延长,对接压力和预热压力也需适当提高。这是因为管径和壁厚越大,管材端面的散热速度越快,需要更长的加热时间确保端面充分熔融,同时需要更大的对接压力使熔融界面紧密结合、更长的冷却时间保证接口固化成型。

## 3.3 PE 管热熔对接施工质量控制措施

### 3.3.1 接口外观质量控制

供水管网 PE 管热熔对接施工结束后,当管道对接部位冷却结束后进行外观检查。在该环节需要保证 PE 管对接接口处熔融环均匀、连续,宽度 2 ~ 4 mm、高度 1 ~ 2 mm;PE 管接口位置没有明显错位,并且错边量控制在 PE 管材厚度 10% 以内;PE 管接口表面无气泡、裂纹、凹陷、虚焊等缺陷。如果 PE 管热熔对接外观质量未达到要求,需要将其切除后重新焊接。

### 3.3.2 接口力学性能检测

本项目施工中按照国家标准抽取规定比例的 PE 管热熔对接接口进行力学性能检测,主要检测项目为拉

表1 PE管热熔对接最优施工参数表

管材管径(DN)	壁厚(mm)	加热温度(°C)	加热时间(s)	预热压力(MPa)	对接压力(MPa)	冷却时间(min)
110	10.0	210	60	0.3~0.4	0.6~0.8	15
160	14.6	210	90	0.3~0.4	0.6~0.8	22
200	19.1	210	120	0.3~0.4	0.6~0.8	30
250	23.8	210	150	0.3~0.4	0.6~0.8	38
300	28.5	210	170	0.3~0.4	0.6~0.8	45

伸强度和爆破压力试验。本项目总计抽取30个PE管接口进行检测,测定拉伸强度超过20 MPa、爆破压力超过1.2 MPa,符合《塑料管材热塑性塑料管材耐内压试验方法》(GB/T 19809-2005)标准要求,这说明PE管热熔对接质量满足供水管网的运行需求<sup>[5]</sup>。

### 3.3.3 施工过程质量控制

供水管网PE管热熔对接施工需要建设质量管理体系,在现场配置专职质量检查员对每道工序进行质量监督。在施工前落实人员技术培训,保证现场施工人员熟悉施工工艺和操作要点,并严格按照工艺参数开展各项施工作业。同时,本项目在PE管热熔对接施工中做好每道接口施工时间、加热温度、加热时间、对接压力、冷却时间的记录工作,并形成完善的质量追溯体系。此外,现场施工时落实安全管理,在现场设置安全警示标志以防发生安全事故。

## 4 PE管热熔对接施工过程中常见问题及解决措施

### 4.1 接口虚焊

供水管网PE管热熔对接施工中接口虚焊普遍,其主要表现形式为熔融环不连续、无光泽、接口强度不足,都容易引发供水管网渗漏。该问题的原因是加热温度不足、加热时间过短或对接压力不够,需要在现场施工中严格按照工艺参数落实加热温度与加热时间控制,保证PE管材端面充分熔融。同时,PE管对接时施加足够对接压力确保熔融界面紧密贴合。

### 4.2 接口错位

PE管热熔对接时接口错位表现形式为两端管材轴线不重合、错边量超出标准,其形成原因是管材固定不牢固、夹具调整不当或管材切割面不垂直。根据该问题表现,在PE管热熔对接时加强管材固定,确保设备夹具夹紧力达到标准;按照PE管热熔对接要求调整夹具位置,确保管材中心轴线对齐;PE管材切割时确保切割面和管材轴线垂直,切割后检查切割面垂直度。

### 4.3 熔融过度

供水管网PE管热熔对接中熔融过度表现形式为熔融环过宽、过高,管道接口存在鼓包、裂纹等缺陷,

其形成原因是PE管加热温度过高、加热时间过长或对接压力过大。根据该问题的原因,需要严格落实加热温度控制,防止PE管材热熔对接时温度超出上限;根据PE管材规格合理确定加热时间,禁止随意延长加热时间;PE管热熔对接时严格控制对接压力,防止对接压力过大导致熔融材料挤出过多。

### 4.4 接口冷却不良

供水管网PE管热熔对接时,接口冷却不良表现形式为接口固化不充分,其强度无法达到要求且容易发生变形现象。该问题形成原因是冷却时间不足、冷却过程移动管材、环境温度过低。根据该问题,在PE管热熔对接时考虑到管材规格、环境温度留有足够冷却时间,禁止提前拆除夹具;PE管热熔对接后冷却时禁止移动管材或支架;环境温度5℃以下时采取保温措施并延长冷却时间。

## 5 结束语

在供水管网建设工程中,PE管热熔对接是实现供水管网稳定运行的重要基础。本研究结合某农村老旧供水管网改造工程案例,针对PE管热熔对接施工关键技术展开探究,通过在工程施工中实施合理的技术方案,确保了PE管热熔对接的稳定,能减少接口虚焊、错位、熔融过度等问题,供水压力满足设计要求,取得了良好的应用效果。

## 参考文献:

- [1] 赵小虎. 房建给排水PE管热熔工艺研究[J]. 长春大学学报, 2019, 29(12): 14-17.
- [2] 游小鹭. 市政供水PE管道热熔连接关键技术及质量控制[J]. 四川水泥, 2022(11): 59-61.
- [3] 王仕杰. PPR给水管道热熔操作技术探讨[J]. 中国设备工程, 2024(06): 224-226.
- [4] 方伟恒, 李忠星, 赵乐宁. 供水用PE管热熔对接工艺研究[J]. 四川化工, 2023, 26(04): 40-43, 56.
- [5] 汤园. 武冈市乡镇11个供水工程PE供水管道施工质量提升对策研究[J]. 湖南水利水电, 2024(04): 8-10, 14.

# 基于吊耳互换性的公差标注分析与应用

郑 舰, 罗 兵, 郝桂珍, 黎 玄

(江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330024)

**摘 要** 吊耳是机载悬挂物与载机挂架之间唯一的机械对接接口, 其制造精度、装配精度决定了机载悬挂物的挂机及离机可靠性, 故对吊耳上涉及与载机挂架配合的尺寸进行约束, 针对影响配合关系的实体特征要素采用尺寸公差或位置公差样式进行标注。本文针对吊耳的安装互换性, 分别应用尺寸公差和位置公差计算吊耳互换条件, 选取较优方法应用于工程化生产中, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 吊耳; 悬挂物; 尺寸公差; 位置公差; 互换性

**中图分类号**: TG8

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.003

## 0 引言

吊耳是机载悬挂物不可或缺的部分, 它结构简单、体积小、承载量大、使用维护方便, 一般采用高强度钢锻造毛坯, 再通过机械加工成型<sup>[1-2]</sup>。吊耳要求能承受振动、冲击、瞬变载荷及温度效应, 还需足够的强度、刚度及使用寿命。此外, 吊耳的制造误差和装配误差对悬挂物与载机挂架之间的对接和分离可靠性有着决定性的作用, 故对吊耳本身及悬挂物<sup>[3]</sup>上吊耳安装部位的相关要素提出尺寸公差及位置度公差要求。本文根据某型产品的吊耳互换性需求, 基于数字量传递原理, 建立吊耳在悬挂物舱段上安装的尺寸链模型, 结合实例分析比较尺寸标注和位置度标注在工程化应用中的优缺点。

## 1 主要技术要求

吊耳安装于悬挂物某舱段上, 吊耳相对于舱段对称面的对称度  $T_e=0.3$ ; 吊耳下齿面距离水平基准面的尺寸  $L_7$  公差为  $0 \sim +0.5$ 。

## 2 指标符合性设计

### 2.1 吊耳安装对称度符合性设计

吊耳安装在悬挂物某舱体上, 通过两定位销确定与舱体的位置关系, 吊耳对称面相对于舱体对称面的对称度误差最大值为  $T_e=0.3$ , 实际装配的对称度误差值  $T_0$  有 4 个影响环节, 分别为: 吊耳定位销孔与吊耳中心对称面的尺寸  $L_1$ , 定位销同轴度误差  $L_2$ , 定位销小端直径  $d$  及舱体定位销孔直径  $D$  的配合间隙, 舱体定位销孔相对于舱体中心对称面的尺寸  $L_3$ 。

### 2.1.1 吊耳定位销孔与相对于吊耳对称面尺寸 $L_1$

根据吊耳尺寸标注, 吊耳两定位销孔中心距为  $a \pm 0.1$ , 将中心距标注形式转化为单侧尺寸标注形式, 则为  $L_1 = \frac{a}{2} \pm 0.05$ 。

### 2.1.2 定位销同轴度误差 $L_2$

定位销为阶梯销结构, 其大端与吊耳采用过盈配合, 配合尺寸为  $\phi DH8/u7$ , 其小端与舱体采用间隙配合, 配合尺寸  $\phi dH8/f7$ , 则舱体销孔直径  $D_1 = \phi d_0^{+0.022}(H8)$ , 定位销小端直径  $d_1 = \phi d_0^{-0.013}_{-0.028}(f7)$ , 定位销大端与小端同轴度误差为 0.03, 则记为  $L_2 = 0 \pm 0.015$ 。

### 2.1.3 舱体定位销孔相对于舱体对称面的尺寸 $L_3$

舱体吊耳安装槽两定位销孔中心距尺寸  $b \pm 0.1$ , 尺寸及公差与吊耳一致, 则舱体定位销孔距舱体中心对称面的尺寸为  $L_3 = \frac{b}{2} \pm 0.05$ 。

通过定位销确定吊耳与舱体之间的位置, 吊耳相对于舱体对称面的对称度误差值可以建立图 1 所示的尺寸链模型, 封闭环  $L_0$  即为吊耳相对于舱体对称面的对称度误差, 则根据极值法计算上偏差  $ES(L_0)$ :

$$ES(L_0) = ES(L_1) + \frac{1}{2} ES(D) - EI(L_3) - \frac{1}{2} EI(d) - EI(L_2) \quad (1)$$

经计算得上偏差  $ES(L_0) = 0.140$ 。

计算下偏差  $EI(L_0)$ :

$$EI(L_0) = EI(L_1) + \frac{1}{2} EI(D) - ES(L_3) - \frac{1}{2} ES(d) - ES(L_2) \quad (2)$$

经计算得下偏差  $EI(L_0) = -0.1215$ , 则吊耳相对于舱体的对称度误差为  $T_0 = 0.280$ ; 根据计算结果可知, 当前所给定的公差精度符合吊耳安装对称度要求。

**作者简介**: 郑舰 (1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 飞行器设计。

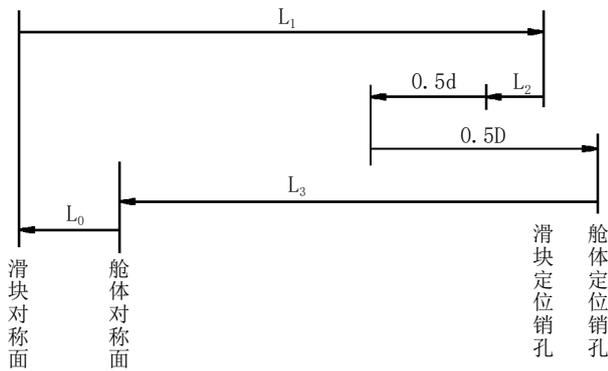


图1 吊耳装配尺寸链模型

## 2.2 吊耳安装高度

吊耳下齿面距离底面尺寸为  $L_5 \pm 0.1$ ；吊耳下齿面距离舱体水平基准面的距离需满足  $L_6^{+0.5}$ ，如图2所示，为满足互换性需求，则舱体吊耳安装面距离水平基准面之间的距离  $L_7$ ，可以通过建立尺寸链模型（见图3）计算得出。

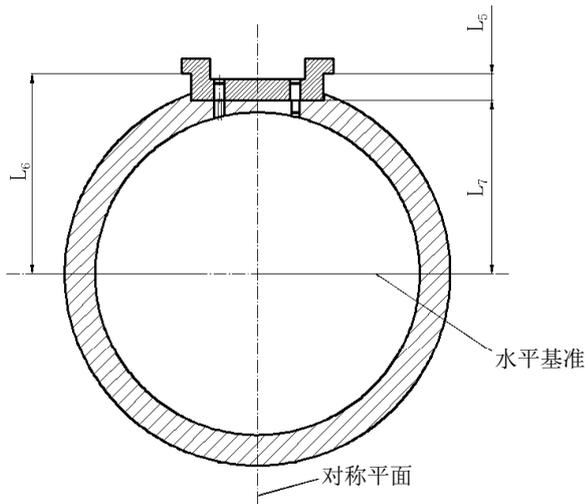


图2 吊耳安装尺寸图

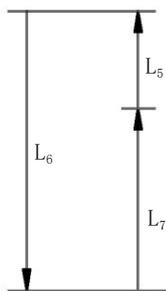


图3 吊耳安装尺寸链建模

根据上述尺寸链模型，尺寸  $L_6$  是由吊耳与舱体装配后形成，属于间接保证尺寸，故  $L_6$  属于封闭环，组

成环  $L_5$ 、 $L_7$  为增环，该尺寸链中无减环，故  $L_7$  上偏差为：

$$ES(L_7) = ES(L_6) - ES(L_5) \quad (3)$$

经计算可得  $ES(L_7) = +0.4$ 。

$L_7$  下偏差为：

$$EI(L_7) = EI(L_6) - EI(L_5) \quad (4)$$

经计算可得  $EI(L_7) = +0.1$ ，故吊耳安装面距舱体水平基准面为  $L_7 = L_{+0.1}^{+0.4}$  时，可保证吊耳与舱体具有完全互换性。

## 3 吊耳互换性计算

吊耳采用两个定位销实现与舱体定位，通过8组M8螺栓<sup>[4]</sup>与舱体连接，为便于定位销与精度孔的顺利配合，将其中一个定位孔制成腰型孔；吊耳与舱体的连接形式有两类，即HB6624所述的A类、B类连接；其中采用A类连接时，吊耳、舱体均设计为通孔，且在舱体内部增加衬板，变曲面接触为平面接触、便于螺母安装与防松，使螺栓组依靠螺栓/螺母啮合的螺牙受力，强度高；采用B类连接时，直接在舱体攻丝，通过8组螺栓组件将吊耳直接焊接安装于舱体上，依靠螺栓和舱体上啮合的螺牙受力，舱体体积大无法热处理，故连接强度降低。采用A类连接安全可靠，舱体内部安装衬板、螺母，连接处强度高，但是吊耳拆卸需要旋下内部的螺母与衬板，每次需断开舱段，方可进行拆装，难度较大、耗时较长；采用B类连接时，直接在舱体上攻丝，连接处强度降低，安全性、可靠性相对较差，但是吊耳换装便捷，从外部拆装螺栓即可实现吊耳拆装，具有很好的维修保障性；分别对采用A类、B类连接时舱体上连接孔定位公差进行计算。

### 3.1 A类连接

采用A类连接时，舱体上开设通孔，且舱体内部需增加衬板，方便螺栓组锁紧固定，吊耳、舱体、衬板上均开设通孔，如图4所示；其位置度公差或尺寸公差与B类连接时一致，每个孔的位置度为  $\phi 0.1414$ ，或是每个孔相对于对称面的尺寸误差为  $\pm \delta_L = \pm 0.05$ 。

吊耳、舱体、衬板上的螺钉连接孔的孔位特点属于位置成数排的孔，连接形式属于A类连接，且舱体、吊耳部位的螺钉连接孔需要以定位销孔为基准，故计算螺钉孔与螺杆之间最小间隙  $Z_{\min}$  应减半，具体公式如下：

$$\pm \delta_L = \frac{KZ_{\min}}{2\sqrt{2}} \quad (5)$$

代入孔位置的尺寸偏差  $\pm \delta_L = \pm 0.05$  计算可得  $Z_{\min} = 0.1414$ ；则吊耳、舱体、衬板需开设的最小孔径为  $\phi 8.15$  的通孔。

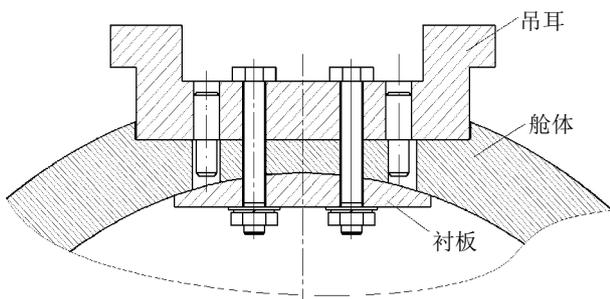


图 4 A 类连接形式

### 3.2 B 类连接

采用 B 类连接时, 舱体开设 8 个 M8 螺纹通孔, 用于固定吊耳, 采用尺寸公差标注 8 个孔的位置关系, 将尺寸公差转化为单侧公差方式, 每个螺钉孔沿航向、侧向的尺寸公差分量分别为  $T_x = \pm 0.05$ 、 $T_z = \pm 0.05$ ; 根据 HB6624 所述, 对航向、侧向公差进行合成, 则可得到每个螺钉孔的位置度公差为:

$$T_{xz} = \sqrt{T_x^2 + T_z^2} \quad (6)$$

代入式 (5) 计算可得  $T_{xz} = 0.1414$ ; 则螺钉孔采用位置度公差标注方式, 位置度公差取整为 0.15。

吊耳具备互换性<sup>[5]</sup>时, 螺栓连接孔最小直径可以根据如下公式计算, 尺寸 L1、L2、L3、L4 的极限偏差  $\pm \delta_L$  分为:

$$\text{A 类连接: } \delta_L = \frac{KZ_{\min}}{2\sqrt{2}}$$

$$\text{B 类连接: } \delta_L = \frac{KZ_{\min}}{4\sqrt{2}}$$

已知吊耳上的 8 个螺钉连接孔, 其孔位置特点属于“以两个相互垂直的平面的一孔或数孔”, 并且其中一个被连接件 (悬挂物舱体) 为螺纹孔, 故吊耳与舱体的连接形式属于 B 类连接, 安装形式如图 5 所示, 且所有螺钉孔轴线均以中心面为基准, 故吊耳螺钉连接孔与螺杆之间的最小间隙  $Z_{\min}$  应减半, 如下式:

$$\pm \delta_L = \frac{KZ_{\min}}{4\sqrt{2}} \quad (7)$$

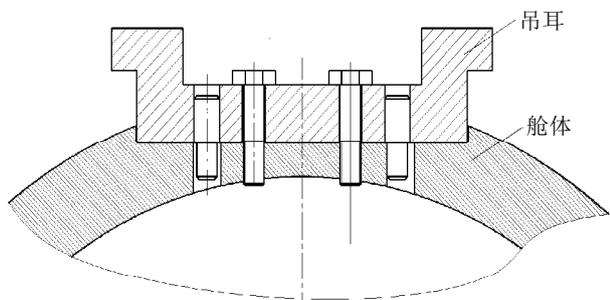


图 5 B 类连接形式

吊耳上 8 个螺钉孔是以对称平面为基准, 极限偏差为  $\pm 0.05$ , 代入式 (7) 可得:  $Z_{\min} = 0.2828$ ; 则吊耳具备互换性时, 螺钉连接孔最小孔径为  $\phi 8.3$ 。

### 4 结束语

本文论述的吊耳互换性分析计算中, 应用了尺寸公差<sup>[6]</sup>和位置公差标注<sup>[7]</sup>, 尺寸公差与位置公差均可应用于零部件实体特征标注。鉴于尺寸公差标注因简单明了, 在实际应用中更加广泛地用于长度、直径 (半径) 等特征要素的标注。而对于位置公差, 所有基本尺寸均为理论尺寸, 所有公差均一致, 因此, 回转特征、对称特征、轴线、孔阵, 外形轮廓等要素宜采用位置公差标注, 但位置公差检测复杂, 手工操作耗费工时多, 被测要素与基准要素需要通过测量多处点位拟合而成, 故位置度多采用三坐标进行测量, 显著提高检测成本。尺寸公差标注和位置公差标注各有所长, 在工程实际应用中, 应根据吊耳的结构特征、装配要求及生产经济性综合选择标注方式, 实现二者的优化搭配。对于关键配合部位的位置精度控制, 优先采用位置公差标注确保对接可靠性; 对于非关键的单一尺寸要素, 采用尺寸公差标注简化生产与检验流程。同时, 标注设计需兼顾低成本原则, 在满足吊耳互换性核心要求的前提下, 合理平衡制造难度与精度需求, 避免过度追求公差精度导致生产与检测成本激增。通过科学的公差标注策略, 既能保障机载悬挂物的使用安全性与可靠性, 又能提升生产效率、控制制造成本, 为吊耳的工程化批量生产提供切实可行的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 宋磊, 隗合怡, 聂青, 等. 机载飞行器挂机接口精度设计方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017(05):26-28,66.
- [2] 陈晓阳, 李佳慧. 通用武器接口在机载武器集成过程中的应用研究 [J]. 电光与控制, 2019,26(02):80-83,96.
- [3] 左虹, 左雪雯, 郭文利, 等. 机载悬挂物管理系统技术发展趋势 [J]. 电光与控制, 2020,27(02):51-54.
- [4] 袁钰坤, 王颌, 张鹏博. 低合金超高强度钢螺钉断裂原因分析 [J]. 金属加工 (热加工), 2020(06):49-53.
- [5] 陶浩浩, 李同杰, 王一鸣, 等. 浅析素质教育下互换性与测量技术的教学 [J]. 时代汽车, 2025(05):77-79.
- [6] 张庆夫. 基于尺寸工程的汽车零部件公差叠加分析应用 [J]. 汽车零部件, 2024(03):80-83.
- [7] 闫清东, 陈修齐, 魏巍, 等. 旋转机械轴系装配体位置公差预测方法与优化研究 [J]. 兵工学报, 2018,39(12):2298-2305.

# 水利液塑限联合测定法的操作优化探讨

邓 琴

(四川南充水利电力建筑勘察设计研究院, 四川 南充 637000)

**摘要** 液塑限是水利工程土性参数测定的核心指标, 其测试精度直接影响地基处理、边坡稳定设计等关键环节的安全性与经济性。现阶段针对粉土等常见土类适配性不足、数显仪器校准细节缺失、环境控制针对性不强、人员操作规范不明确等实践难点, 仍存在测试精度波动、结果重复性差等问题。本文基于《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 标准框架, 聚焦常规测试场景与常见土类需求, 从粉土专项预处理、数显仪器规范校准、场景化环境调控、数据处理标准化、操作技能量化五个维度构建实用化优化体系, 通过对比试验验证优化效果, 以期为水利工程常见土类液塑限精准测定提供参考。

**关键词** 水利工程; 液塑限联合测定法; 粉土适配; 数显仪器

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.004

## 0 引言

在水利工程建设中, 土的液塑限指标是划分土类、确定塑性指数、评估地基承载力及设计防渗结构的核心依据。《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 的实施, 规范了液塑限联合测定法的仪器参数、基本流程、数据处理等基础要求<sup>[1]</sup>, 使传统操作中的土样过筛、圆锥仪规格、含水率测定等基础环节得到标准化落地。然而, 水利工程中最常接触的土类为粉土和常规黏性土, 粉土因黏滞性低、颗粒细腻, 常规操作流程难以适配其特性, 易出现测试误差<sup>[2]</sup>; 同时, 现场广泛使用的数显类液塑限测定仪, 标准中缺乏针对性的校准细节与操作规范, 导致仪器间测试差异较大<sup>[3]</sup>。此外, 实验室与现场测试的环境控制差异、人员操作技能量化缺失等问题, 也制约了测试精度的提升。因此, 在《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 标准基础上, 针对常见土类与数显仪器的应用难点进行操作优化, 对提升水利工程土性参数测试质量、保障工程结构安全具有重要的现实意义。本文结合实验室常规测试与工程实践经验, 聚焦实用化需求, 提出相应的优化措施, 为相关测试工作提供参考。

## 1 水利液塑限联合测定法的原理延伸与标准应用现状

### 1.1 方法核心原理的常见土类适配延伸

《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 明确了液塑限联合测定法的核心原理, 是基于土的含水率与

圆锥入土深度的相关性, 规定 76 g 圆锥仪入土 17 mm 对应液限、2 mm 对应塑限, 该原理对黏粒含量较高的常规黏性土具有良好适配性。这类黏性土抗剪强度以凝聚分量为, 在双对数坐标下, 圆锥入土深度与含水率呈稳定线性关系, 能精准反映土的可塑性本质。但粉土的物理力学特性与常规黏性土存在本质差异, 其黏粒含量多处于 12%~15% 的临界范围, 颗粒比表面积小、黏滞性弱, 水分吸附能力远低于黏性土, 抗剪强度以摩擦分量为, 这导致相同含水率条件下, 粉土中圆锥入土深度易偏大, 且双对数坐标下线性拟合效果不佳, 部分试验点出现离散偏移, 直接造成液塑限测定值偏离真实塑性特征, 甚至引发土类定名与工程性质评估的矛盾。因此, 液塑限联合测定法的核心原理需向粉土等低塑性土类延伸适配。需通过黏粒含量预判试验适用性, 调整 3~4 mm 关键试验点选取范围, 优化圆锥质量或入土深度对应标准等方式, 构建针对性技术方案。而《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 未对这类适配细则作出明确规定, 导致实际测试中缺乏统一标准, 成为影响试验数据可靠性的核心实操难点。

### 1.2 标准应用现状与实操缺口

《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 实施以来, 实验室已普遍实现标准规定的基础操作: 采用 76 g 圆锥仪、2 mm 标准筛、105~110 °C 烘干法测定含水率等, 基本操作的标准化使测试结果的一致性得到提升<sup>[4]</sup>。但在针对常见土类的实操应用中, 仍存在

作者简介: 邓琴(1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程试验检测。

四大缺口：一是粉土测试缺乏针对性操作规范，标准未明确粉土的预处理方式、静置时间、圆锥仪适配规格等，导致测试结果离散度大；二是数显仪器校准细节缺失，现有数显液塑限测定仪的圆锥质量校准频率、测距精度校验方法、数据显示误差允许范围等未作具体规定，不同仪器测试偏差可达 1.5%~2%；三是场景化环境控制区分不明，实验室与现场测试的温湿度控制实操要求不清晰，粉土水分蒸发快，现场测试中缺乏简单有效的防蒸发措施；四是人员操作与数据处理缺乏量化标准，装模密实度、圆锥对中精度等操作细节未量化，异常数据判定与平行试验融合方法不明确，人为误差占比偏高。

## 2 水利液塑限联合测定法的现存核心难点

### 2.1 粉土预处理不当，测试偏差显著

粉土作为水利工程中最常见的特殊土类，其测试流程缺乏针对性规范，导致测定误差突出。粉土颗粒细腻，手动搅拌难以实现水分均匀分布，同一试样不同位置的含水率差异可达 1%~1.5%，直接造成圆锥入土深度偏差 2~3 mm；传统静置时间（24 h）不足以让水分充分渗透颗粒内部，导致液限测定值偏低 1.2%~1.8%；装模时采用击实法易造成局部密实度不均，密实度波动超过 0.02 g/cm<sup>3</sup>，进一步扩大塑限测试误差<sup>[5]</sup>。此外，部分实验室仍沿用常规黏性土的测试参数，未针对粉土黏滞性低的特点调整圆锥仪规格，导致测试结果与实际土性不符。

### 2.2 数显仪器校准不细致，系统误差累积

现场与实验室广泛使用的数显液塑限测定仪，因缺乏细化的校准规范，系统误差持续累积。圆锥仪质量校准不频繁，长期使用导致磨损，质量偏差超过 0.5 g，使入土深度偏差 0.3~0.4 mm；数显测距模块未定期用标准量块校验，显示误差可达 0.1 mm，直接影响液塑限判定精度；仪器放置不水平导致圆锥下落垂直度偏差，部分数显仪器无水平校准提示功能，倾斜角度超过 1° 时，测试误差增加 1%~1.2%；数据拟合算法未严格遵循标准线性回归要求，部分数显仪器默认采用非线性拟合，导致结果失真。

### 2.3 环境控制缺乏针对性，粉土水分流失严重

《土工试验方法标准》（GB/T 50123-2019）规定的测试环境温度 20±2 °C、相对湿度 60±5%，在实操中缺乏场景化适配措施，对粉土的影响尤为显著。现场测试中温湿度波动频繁，粉土表面水分蒸发速率是常规黏性土的 1.5~2 倍，测试过程中含水率下降 0.8%~1.2%；实验室测试中未设置局部防风措施，气流扰动导

致粉土试样表面结壳，阻碍圆锥下沉，入土深度偏小 0.5~0.6 mm；高温（≥28 °C）或低湿度（≤50%）环境下，未采取应急防护措施，导致粉土液限测定误差超过 1.5%，而标准中未给出简单可行的环境修正方法。

### 2.4 操作与数据处理不规范，人为误差占比高

人员操作缺乏量化标准，是导致测试误差的重要原因。粉土装模时未控制力度，密实度差异超过 0.02 g/cm<sup>3</sup>；圆锥仪对中依赖目视判断，对中偏差可达 1 mm；试样刮平不平整，表面高低差超过 0.2 mm，这些操作细节的差异导致人为误差占总误差的 30%~35%。在数据处理方面，标准未明确异常数据的判定标准，操作人员主观剔除数据现象普遍，同一组数据不同人员处理的液限差值可达 0.8%~1%；多组平行试验仅简单取平均值，忽略数据离散度影响，当变异系数超过 5% 时，仍未采取补做试验的措施，导致结果可靠性不足。

## 3 水利液塑限联合测定法的实用化操作优化方案

### 3.1 粉土专项预处理优化

针对粉土特性制定针对性预处理流程，提升测试适配性。调整圆锥仪规格，选用 100 g 圆锥仪替代传统 76 g 圆锥仪，适配粉土黏滞性低的特点，使入土深度更易区分液塑限临界点；优化水分处理流程，采用“分步补水—真空搅拌”方式，第一次补水至预估液限的 70%，静置 12 h 后补至目标含水率，再用真空搅拌机搅拌 3 min，搅拌转速 300 r/min，确保水分均匀分布；延长静置时间至 36 h，静置期间每隔 8 h 轻搅一次，促进水分渗透颗粒内部；装模时采用静压法，通过带刻度的压模装置控制压力，使密实度波动控制在 ±0.01 g/cm<sup>3</sup> 以内，避免局部密实度不均。

常规黏性土预处理同步优化，保持 76 g 圆锥仪规格，静置时间 24 h，采用手动搅拌+分层拌匀方式，确保水分分布均匀，装模时控制击实力度，避免过度压实。

### 3.2 数显仪器规范化校准流程

建立简单易操作的数显仪器三级校准流程，降低系统误差。日常校准每日测试前进行，用标准砝码（精度 0.01 g）校准圆锥仪质量，偏差超过 0.3 g 时及时更换或修补；用 0~20 mm 标准量块校准数显测距模块，显示误差超过 0.05 mm 时调整仪器参数。每周校准重点检查仪器水平度，采用气泡水平仪检测，确保仪器倾斜角度 ≤ 0.5°，否则调整支撑脚高度；检查圆锥自动释放机构的灵活性，确保下落无卡顿。每月校准采用已知液塑限的标准黏性土样进行验证，若测试值与标准值偏差超过 0.5%，重新进行日常与每周校准，直至偏差符合要求。

明确数显仪器使用要求,测试前必须完成水平校准,数据拟合严格选择线性回归模式,回归系数 $R^2 \geq 0.97$ ,否则提示重新测试,确保数据处理符合标准要求。

### 3.3 场景化环境控制实用化优化

区分实验室与现场测试,制定针对性环境控制措施。实验室测试时,在试样周围设置简易防风罩,采用精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温箱控制温度,相对湿度通过加湿器维持在 $55\% \sim 65\%$ ;在试样表面覆盖透气保鲜膜,仅暴露圆锥仪接触区域,减少粉土水分蒸发。现场测试时,配备便携式保温箱(控温范围 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ ),试样制备后放入保温箱存放,测试前 $10 \text{ min}$ 取出;携带简易湿度计,当环境湿度 $\leq 55\%$ 时,用喷雾器向测试环境少量喷水增湿,避免直接喷洒试样;高温环境( $\geq 28^\circ\text{C}$ )下,试样制备后 $3 \text{ min}$ 内完成测试,缩短暴露时间;低温环境( $\leq 15^\circ\text{C}$ )时,将试样预热至 $18 \sim 20^\circ\text{C}$ 后再测试,避免温度过低影响黏滞性。

针对粉土水分易流失的特点,统一规定试样从制备到测试的时间间隔:实验室环境下 $\leq 15 \text{ min}$ ,现场环境下 $\leq 5 \text{ min}$ ,确保测试时含水率与制备含水率一致。

### 3.4 操作量化与数据处理标准化

建立人员操作量化指标体系,降低人为误差。装模环节,粉土与常规黏性土均采用分层装模法,每层厚度控制在 $10 \text{ mm}$ ,静压时间 $5 \text{ s}$ ,密实度通过质量一体积法核验,误差 $\leq \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ ;圆锥对中采用简易激光对中装置,对中偏差 $\leq 0.5 \text{ mm}$ ;试样刮平使用专用水平刮尺,确保表面与试模顶面齐平,高低差 $\leq 0.1 \text{ mm}$ 。编制实操评分表,对装模、对中、刮平、仪器操作等环节进行量化评分,评分低于 $85$ 分的操作人员需进行专项培训,考核合格后方可上岗。

规范数据处理流程,异常数据判定采用格拉布斯准则,当数据点残差绝对值超过 $2.5$ 倍标准差时,判定为异常数据,需补做 $1$ 次平行试验;多组平行试验(不少于 $3$ 组)数据处理时,先计算变异系数,若变异系数 $\leq 5\%$ ,取平均值作为最终结果;若变异系数在 $5\% \sim 8\%$ 之间,增加 $1$ 组平行试验后取平均值;若变异系数 $> 8\%$ ,查找操作或仪器问题后重新制备试样测试。建立数据记录规范,明确记录仪器校准情况、环境参数、操作人信息,确保数据可追溯。

### 3.5 优化效果验证试验

选取粉土、常规黏性土两种常见土样,分别采用标准方法与优化方案进行对比试验,每组土样进行 $6$ 次平行测试,结果如表1所示。

表1 优化方案与标准方法测试结果对比表

土样类型	测试指标	标准方法 误差	优化方案 误差	误差降 低率
粉土	液限(%)	$\pm 1.6\%$	$\pm 0.3\%$	81.2%
粉土	塑限(%)	$\pm 1.4\%$	$\pm 0.2\%$	85.7%
常规黏性土	液限(%)	$\pm 0.8\%$	$\pm 0.15\%$	81.2%
常规黏性土	塑限(%)	$\pm 0.6\%$	$\pm 0.1\%$	83.3%

在现场测试验证中,在高温 $32^\circ\text{C}$ 环境下采用优化方案测试粉土,液限测定值与实验室标准环境测试值差值仅为 $0.3\%$ ,而标准方法差值为 $1.6\%$ ;在低湿度 $45\%$ 环境下,优化方案的塑限测定误差控制在 $0.25\%$ 以内,显著优于标准方法的 $1.3\%$ 。验证结果表明,优化方案无需依赖复杂设备,操作简便易行,能有效降低常见土类测试误差,提升结果的准确性与重复性。

## 4 结束语

本文在《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)基础上,聚焦水利工程中最常见的粉土与常规黏性土,针对数显仪器校准不细致、粉土预处理不当、环境控制针对性不强、操作与数据处理不规范等实操难点,构建了实用化的操作优化体系。通过粉土专项预处理、数显仪器三级校准、场景化环境调控、操作量化规范、数据处理标准化等措施,弥补了标准应用中的细节缺口,提升了液塑限联合测定法的实操性与精准度。试验验证表明,优化方案无需引入先进复杂的技术设备,完全适配当前测试条件,可使粉土与常规黏性土的液塑限测定误差显著降低,满足水利工程常规土类高精度测试的需求。未来,可进一步收集不同区域粉土的测试数据,细化适配参数;同时,将优化方案中的实操细节纳入行业标准修订建议,完善液塑限联合测定法的标准化体系,为水利工程质量安全提供更坚实的技术保障。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准(GB/T50123-2019)[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [2] 王晖明.石灰改良高液塑限黏土路用性能试验研究[J].科技创新与应用,2025,15(22):55-58.
- [3] 赵婧如,李嘉瀚,曹军,等.碱渣石灰土液塑限测试及影响规律研究[J].福建建筑,2025(03):65-67,77.
- [4] 张婷.运用联合测定法测定土工试验液塑限的研究[J].江西建材,2024(11):126-128.
- [5] 李季欣.石灰对不同区域红黏土液塑限的影响研究[J].北方交通,2024(11):31-33.

# 冲砂除尘设备的精细化运营管理模式应用

章宇轩

(上海振华重工(集团)股份有限公司长兴分公司, 上海 201913)

**摘要** 本文基于冲砂除尘设备系统构成及运行特性, 提出以精细化运营管理为核心的系统解决方案, 包括工况分级控制、全生命周期运维、数据驱动能耗排放协同、岗位职责标准化及绩效持续改进机制, 结合运行数据采集、关键指标动态管控、预防性维护与环保联动管理等技术手段, 构建精细化运营管理模式, 以期有效提升设备运行效率、降低能耗与排放波动, 并为工业除尘系统的安全、稳定及环保运营提供可推广的技术路径与管理参考。

**关键词** 冲砂除尘; 精细化运营管理; 运行参数控制; 预防性维护; 能耗排放管理

中图分类号: TB4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.005

## 0 引言

冲砂除尘设备作为工业粉尘治理的核心装备, 其运行效率和排放控制直接影响生产安全、能源消耗及环保合规性。传统管理模式多依赖经验操作和定期巡检, 存在参数调节不精细、维护滞后、能耗及排放控制不稳定等问题。随着工业自动化、物联网及数据分析技术的发展, 基于实时监测与数据驱动的精细化运营管理模式逐渐成为提升冲砂除尘设备运行效率、降低能耗及实现环保目标的有效手段。本文在分析冲砂除尘设备系统组成与运行特性的基础上, 提出包括工况分级控制、全生命周期运维、能耗排放协同管理及岗位职责标准化的精细化管理框架, 为设备高效、安全及环保运营提供系统解决方案。

## 1 冲砂除尘设备系统组成与运行特性分析

冲砂除尘系统主要由高压风机、旋风分离器、布袋除尘器、输送管道及控制系统组成, 运行特性体现为高负荷连续作业、粉尘颗粒细、风量波动大及设备负荷随砂量变化呈非线性特征。

典型工况下, 布袋除尘器处理风量可达 12 000 ~ 18 000 m<sup>3</sup>/h, 入口粉尘浓度约为 250 ~ 400 mg/m<sup>3</sup>, 出口排放浓度要求控制在 ≤ 50 mg/m<sup>3</sup>, 同时风机功率约为 45 ~ 75 kW, 系统能效因风量调节策略会有 15% ~ 20% 的波动<sup>[1]</sup>。旋风分离器和布袋除尘器联合作业时, 压差一般保持在 250 ~ 400 Pa, 压差变动直接体现滤袋堵塞状况与风机负荷, 风机和除尘器联动控制是精细化管理基础。此外, 系统启停频繁, 滤袋寿命在 3 500 ~ 5 000 h 之间, 设备维护周期和生产节奏关联紧密, 要

对运行工况与设备状态做实时监测和动态调节。

## 2 冲砂除尘设备精细化运营管理模式构建

### 2.1 精细化运营管理的总体目标与原则

冲砂除尘设备精细化运营管理旨在通过动态运行参数调节、数据驱动运维决策、岗位职责标准化及绩效持续改进, 实现设备高效、低能耗、稳定运行及环保排放合规。总体原则含工况适配性, 依据砂料粒径、湿度及进料量自动匹配风量、压差及排灰频率; 全生命周期管理, 把安装调试、日常巡检、预防性维护及报废更新归入统一体系; 数据联动驱动, 通过风机功率、滤袋压差、粉尘浓度及能耗数据优化运行参数; 责任界面清晰化, 确定生产、运维及环保岗位职责, 形成跨部门协同机制; 量化考核标准化, 设定单位砂料能耗 ≤ 1.5 kW·h/t、排放浓度 ≤ 50 mg/m<sup>3</sup>、滤袋压差 300 ~ 350 Pa、运维响应时间 ≤ 2 h, 实现运行、维护及环保管理的闭环状态。

### 2.2 基于工况分级的运行参数精细化控制模式

冲砂作业可依据砂料进料量、粒径及含水率划分为轻、中、重三类工况, 每类工况对应不同的风量、风机功率、压差及排灰周期, 实现针对性控制。如表 1 所示, 轻工况条件下, 风量设定为 12 000 m<sup>3</sup>/h, 风机功率 45 kW, 排灰周期每 120 分钟一次, 滤袋压差控制在 300 ~ 320 Pa; 中工况风量 15 000 m<sup>3</sup>/h, 风机功率 60 kW, 排灰周期 90 min 一次, 压差维持在 320 ~ 340 Pa; 重工况风量 18 000 m<sup>3</sup>/h, 风机功率 75 kW, 排灰周期 60 min 一次, 压差保持在 340 ~ 360 Pa<sup>[2]</sup>。借助压差传感器采集实时数据, 滤袋压差超设定值 10 Pa 时,

作者简介: 章宇轩 (1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 环保设备管理。

PLC系统自动触发增压或排灰操作，并调整风机频率，实现风量与除尘器的协同匹配。

表1 冲砂除尘设备不同工况下运行参数设定

工况等级	风量 (m <sup>3</sup> /h)	风机功率 (kW)	排灰周期 (min)	滤袋压差 (Pa)
轻工况	12 000	45	120	300 ~ 320
中工况	15 000	60	90	320 ~ 340
重工况	18 000	75	60	340 ~ 360

在实施过程中，系统要建立工况判别算法，把砂料进料量传感器、粒径在线分析仪及湿度计数据实时传输至DCS或PLC系统，通过边缘计算判别当下工况等级，自动调节风机频率与排灰周期。例如：进料量从5 t/h升至8 t/h时，湿度从2%升高到5%，系统自动从轻工况切换成中工况模式，把风机频率从45 Hz升至55 Hz，同一时间压差控制范围从300 ~ 320 Pa调整至320 ~ 340 Pa。

### 2.3 基于设备全生命周期的运维管理机制

精细化管理以设备全生命周期管理为核心，包含安装调试、日常巡检、状态监测、预防性维护、备件管理及报废更新，关键部件像滤袋、风机轴承及密封件需建立运行小时数与压差、振动阈值对应的维护计划，如滤袋运行3 500 h或压差 $\geq$ 400 Pa时安排更换，风机轴承运行5 000 h或振动幅值 $\geq$ 2 mm/s时执行检修。系统经PLC采集压差、振动及温度数据并记录累计运行时间，实现按部件状态及工况制定维护周期，减少非计划停机。

同时，构建维护数据管理平台，把巡检结果、故障记录、备件使用情况及压差波动趋势进行结构化存储，通过定期生成运行报告，为维护决策提供依据，比如每月汇总滤袋压差超阈值次数、风机振动超标时长及轴承温升曲线，且自动生成报警列表。在备件管理方面，系统设立库存阈值，滤袋库存不少于100套，轴承和密封件库存能满足未来30天运行需要，保证预防性维护按时开展，同时处于报废更新阶段，记载设备累计运行时长、磨损程度及维修历史，为寿命预测和更新决策提供数据支持。

### 2.4 数据驱动的能耗与排放协同管理体系

精细化管理借助物联网传感器实时收集风量、压差、粉尘浓度、风机功率及环境温湿度数据，把原始数据传输至边缘计算节点进行分析和工况匹配判定，在重工况下，系统靠压差反馈调节风机频率，将风量控制到目标值18 000 m<sup>3</sup>/h $\pm$ 5%，滤袋压差保持在340 ~ 360 Pa，单位砂料能耗精确控制在1.8 kW·h/t左右，

同时粉尘排放波动在 $\pm$ 2 mg/m<sup>3</sup>范围内<sup>[3]</sup>。边缘计算依照进料量和湿度数据自动生成调节指令，实现风机、排灰机构同除尘器协同。

数据分析模型依据历史运行数据构建压差、风量与功率的多维映射表，压差超过设定阈值时，系统自动触发风机频率调整或排灰操作，传感器数据采集频率设置为每5秒一次，DCS实时计算单位砂料能耗、压差梯度及风机负荷指数，并生成趋势图。异常数据像风机功率超过75 kW或压差波动超过 $\pm$ 15 Pa时，借报警系统告知操作员实施人工干预，系统记录异常时段及参数，给后续优化及精细化控制提供量化依据，实现能耗、排放及设备负荷的统一管理。

### 2.5 岗位职责细分与流程标准化设计

精细化管理细化了生产操作、设备巡检、环保监测、数据分析及维护计划岗位职责，明确了操作界限和责任链条，生产操作员负责进料量调节、风机启停及手动阀门操作；维护人员依照状态监测数据开展预防性检修，包含滤袋更换、轴承润滑和密封件维护；环保岗位负责粉尘排放数据采集与分析、异常排放报警及排灰周期调整。通过岗位分工，保证操作、维护和环保管理构成闭环，实现跨岗位数据共享。

标准化流程包含操作规程、巡检计划、维护计划及异常处理流程，如巡检表规定每日三次压差测量、振动传感器数据上传及异常记录，维护计划写明滤袋、轴承及密封件更换时机及步骤，环保流程把排放峰值超50 mg/m<sup>3</sup>的事件纳入自动记录与报警。流程执行状况通过管理信息系统实时记录，并与DCS、PLC数据联动，形成操作、维护与环保三方协作的闭环体系，保证信息流、物料流和工作流同步管理。

### 2.6 精细化绩效评价与持续改进机制构建

建立多维量化绩效体系，将单位砂料能耗、粉尘排放浓度、滤袋压差波动率、故障响应时间、备件使用效率及维护成本等纳入定量考核指标，系统借由DCS与管理信息平台每月自动汇总数据并生成趋势分析报告，列出各指标超出标准次数、平均偏离数值及波动比率。例如：单位砂料能耗偏离目标1.5 kW·h/t的次数、滤袋压差偏离300 ~ 350 Pa范围的累计时长、故障响应时间超过2 h的事件。

绩效数据可用于识别设备或操作环节瓶颈，通过参数调整、维护计划优化及巡检频率调整进行持续改进，系统把每月指标变化记进绩效数据库，将各岗位和工况做对比分析，形成“监测—分析—优化—验证”的闭环机制。例如：通过分析压差波动频率与风机功率关系，优化风机调速策略；结合滤袋使用期限与排

灰频次数据,更新维护周期。绩效评价体系和持续改进机制结合,实现数据驱动的精细管理闭环。

### 3 精细化运营管理模式的实施路径与技术支撑

#### 3.1 运行数据采集与监测系统建设

在冲砂除尘设备中,要布设多个点位传感器收集关键运行参数,有风量流速传感器、压差传感器、粉尘浓度监测仪、风机功率计及振动传感器,布设密度每 50 m<sup>2</sup> 安排一组,保证涵盖滤袋室、进出口风道及旋风分离器。传感器数据采集频率设置为每 5 秒一次,经工业以太网或无线工业协议(WirelessHART)传至边缘网关,边缘计算节点实时处理数据,计算单位砂料能耗、压差梯度及风机负荷指数,同时引发异常告警,系统用冗余存储和双路采集方式确保数据完整性及可靠性,构建历史数据库用于工况分析、参数优化及维护计划生成,给精细化运营方式提供实时监测和数据支持。

#### 3.2 关键运行指标(风量、压差、能耗等)动态管控

借助 PLC 或 DCS 系统把风机频率、风阀开度及排灰机构自动化控制,实现关键运行指标动态匹配,压差目标设定为 300 ~ 350 Pa,压差偏离  $\pm 5$  Pa 时,系统自动调节风机频率  $\pm 5$  Hz 或缩短/延长排灰周期 5 ~ 15 分钟,保证风量与除尘器负荷匹配。单位砂料能耗实时计算公式为  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t} = \text{风机功率}(\text{kW}) \times \text{运行时间}(\text{h}) / \text{砂料处理量}(\text{t})$ ,并和历史工况数据做比对,识别异常功率和过载状态,动态控制策略结合工况判别模型,能针对轻、中、重工况自动调节风机频率 45 ~ 75 Hz、风量 12 000 ~ 18 000 m<sup>3</sup>/h 及排灰周期 60 ~ 120 min,实现指标实时可控<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 预防性维护与状态检修技术应用

建立关键部件状态数据库,包含滤袋、风机轴承、皮带及旋风分离器磨损值、振动值及压差数据,和预设阈值对应生成维护计划,滤袋达到 3 500 h 或压差  $\geq 400$  Pa 提前更换,风机轴承运行 5 000 h 或振动幅值  $\geq 2$  mm/s 检修,皮带磨损超 10% 要调整或更换。状态检修结合红外热成像温度监测与振动分析,每小时采集轴承温升与振动幅值,用边缘计算判定异常趋势,实现故障预先判断并将停机响应时间缩短至 1 ~ 2 h,同时,维护计划能动态调整,依据实时工况及运行负荷自动更新滤袋、轴承及密封件更换周期,实现按状态维护而非固定时间维护。

#### 3.4 环保合规与设备运行联动管理机制

构建粉尘排放、压差、风量及能耗联动管理机制,把粉尘监测点数据实时接入 DCS,排放浓度超 50 mg/m<sup>3</sup>

时自动触发风机增压 5 ~ 10 kPa 及排灰加速,给操作员发送报警信息<sup>[5]</sup>。系统把排放数据和砂料进料量、湿度及粒径信息关联分析,依据工况判断自动调节风机频率 45 ~ 75 Hz、风量 12 000 ~ 18 000 m<sup>3</sup>/h 及排灰周期 60 ~ 120 分钟,实现排放控制与设备负荷匹配,历史排放和运行数据构成数据库,用来优化控制策略及排放趋势分析,保证环保监测和生产运行参数动态关联,建成排放峰值可控、设备参数可调、数据互通的管理机制。

#### 3.5 管理制度、操作规程与人员培训协同推进

制订统一操作章程、巡查规划、保养步骤及应急处置制度,把关键操作步骤、岗位职责及安全规范固化为制度文件,操作规程包括风机启停顺序、风阀调节策略、压差及粉尘异常处理步骤,巡检计划规定每日 3 次压差测量与振动监测。依照实际工作状况开展针对性培训,涵盖数据收集、运行参数调整、故障应对及预防性维护操作,培训涵盖边缘计算报警处理、DCS 数据分析和排放联动控制操作,保证操作员、维护人员和环保监测人员技能互补,形成标准、协同作业体系,给精细化运营管理落地提供制度保障及人员技术支持。

### 4 结束语

冲砂除尘设备精细化运营管理模式通过工况分级控制、全生命周期运维、数据驱动的能耗排放协同、岗位职责标准化及绩效持续改进,实现了从粗放管理向精准控制、从事后维护向预防性维护、从经验决策向数据驱动的转变。该模式通过传感器数据实时采集、动态参数控制、预防性检修及环保联动管理等技术手段,为冲砂除尘系统的高效、安全与环保运营提供了完整的技术路径和管理框架。

### 参考文献:

- [1] 程鑫祥.基于全流程平台控制的转炉干法除尘泄爆分析[J].山西冶金,2025,48(01):232-236.
- [2] 郭许亮.连续油管冲砂报废工艺技术现场试验[J].化学工程与装备,2025(02):64-67.
- [3] 王冠.钢铁工业除尘系统智能诊断技术与工程应用[J].环境工程,2024,42(01):72-75.
- [4] 陈小云.隔离式冲砂技术工艺在低压漏失煤层气井的应用[J].煤炭技术,2025,44(02):91-94.
- [5] 习兰.原料场除尘智能化管理及调控[J].低碳世界,2023,13(11):28-32.

# 电力电容器的精准相控投切与过电压抑制

俞峰<sup>1</sup>, 范克剑<sup>2</sup>, 陈杰萍<sup>3</sup>

- (1. 绍兴市上虞电力电容器有限公司, 浙江 绍兴 312300;  
2. 浙江福特机械制造有限公司, 浙江 绍兴 312300;  
3. 浙江春晖仪表股份有限公司, 浙江 绍兴 312300)

**摘要** 电力电容器精准相控投切是提升电网无功补偿精度的核心技术, 投切过程伴随的过电压问题制约技术应用实效。本文剖析精准相控投切的原理与关键电气参数匹配机制, 阐释相控触发同步、开关选型优化、控制算法设计三类关键技术, 深入解析暂态过程、相角偏差、谐波叠加诱发过电压的内在机理, 从串联电抗器设计、过电压吸收装置参数优化、控制策略预判抑制三个维度提出过电压抑制方案, 以期为电力电容器安全高效投切提供理论参考。

**关键词** 电力电容器; 精准相控投切; 过电压抑制

**中图分类号**: TM53

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.006

## 0 引言

电网无功功率平衡直接影响供电质量与系统稳定性, 电力电容器投切是无功补偿的主流技术手段<sup>[1]</sup>。传统随机投切方式存在暂态冲击大、补偿精度低等弊端, 精准相控投切技术凭借相位精准控制优势成为研究热点, 但其投切过程易因暂态特性、控制偏差及电网谐波产生过电压, 威胁电力设备安全运行。本文围绕精准相控投切原理、关键技术与过电压抑制展开研究, 旨在解决技术应用中的核心问题, 推动无功补偿技术升级。

## 1 电力电容器精准相控投切的原理

电力电容器精准相控投切的核心是控制投切开关动作时刻, 使电容器投入电网瞬间的电压、电流与电网参数匹配, 抑制投切暂态过电压、过电流现象。电网电压电流呈正弦变化特性, 传统随机投切因开关动作时刻不受控, 易在不利相位投入形成瞬时电位差, 引发电荷急剧转移与暂态冲击。精准相控投切通过实时采集并同步处理电网电压信号, 确定最优投切相位角, 确保开关在理想相位通断。理想投切条件为电容器预充电电压与电网对应相位电压幅值相等、相位相同, 此时投切回路电压差趋近于零, 暂态电流可控。基于电网电压正弦特性构建投切相位控制模型, 关系为  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ , 式中:  $u(t)$  为电网瞬时电压,  $U_m$  为电压幅值,  $\omega$  为角频率,  $\varphi_0$  为初始相位角。系统

实时检测相位参数, 触发开关在电压匹配时刻导通, 信号采集的实时性与相位判断的准确性直接决定了投切精度, 延迟会导致相位偏差, 需构建高精度信号采集与同步处理机制。

## 2 电力电容器精准相控投切的关键电气参数匹配机制

电力电容器精准相控投切的理想效果实现依赖于投切系统中核心电气参数的合理匹配, 这些参数涵盖电容器自身参数、投切开关参数与电网系统参数, 参数间的匹配度直接决定了相控投切的精准性与暂态抑制效果<sup>[2]</sup>。电容器电容量是核心参数之一, 其数值需根据电网无功补偿需求确定, 同时需与电网电压等级匹配, 电容量偏差会导致电容器等效容抗变化, 进而改变投切瞬间的电压匹配条件, 其与容抗的关系可通过公式表示:  $X_c = 1/2(\pi f c)$ , 式中:  $X_c$  为电容器容抗,  $f$  为电网频率,  $c$  为电容量。投切开关参数需与电容器参数及电网电流等级适配, 开关的导通压降、关断时间与通流能力, 需满足投切回路的电压电流特性, 若开关通流能力不足或关断时间过长, 会导致投切过程中出现开关损耗过大或暂态电压叠加问题。电网系统参数中的电压幅值、频率稳定性与谐波含量, 也会影响参数匹配效果, 电压幅值波动会改变理想投切相位的电压阈值, 频率偏移则会导致相控时刻计算偏差。表1列出核心参数匹配状态与对应投切效果的关联, 为参数匹配设计提供依据。

**作者简介**: 俞峰 (1968-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机械设计与制造。

表 1 电力电容器精准相控投切核心参数匹配状态与投切效果关联

核心参数	匹配状态	投切效果
电容器电容量	与电网无功需求、电压等级匹配	暂态电流小，补偿效果优
电容器电容量	偏离电网无功需求、电压等级	暂态电流增大，补偿精度下降
投切开关通流能力	匹配投切回路最大电流	开关损耗小，动作可靠性高
投切开关通流能力	低于投切回路最大电流	开关易过热，存在故障风险
电网频率	稳定在额定频率	相控时刻计算精准，投切同步性好
电网频率	出现明显偏移	相控时刻偏差，暂态冲击增大

### 3 电力电容器精准相控投切的关键技术

#### 3.1 相控触发信号的高精度同步

相控触发信号的高精度同步以电网电压信号为基准，通过信号采集、预处理与同步校准构建完整技术链路<sup>[3]</sup>。电压信号采集环节采用高精度电压传感器，确保采集信号能够真实反映电网电压的相位与幅值特性，信号预处理模块则对采集到的原始信号进行滤波去噪处理，消除电网谐波与电磁干扰对信号纯度的影响。同步校准环节通过锁相环技术实现触发信号与电网电压信号的相位锁定，锁相环能够实时跟踪电网电压的相位变化，动态调整触发信号的输出时刻。电网电压频率波动会导致相位跟踪偏差，因此需在同步校准环节引入频率自适应调节机制，使锁相环的跟踪范围覆盖电网正常频率波动区间，确保触发信号与电网电压信号保持严格的相位同步关系，为精准相控投切提供基础保障。

#### 3.2 投切开关器件的选型与性能优化

投切开关器件的选型需结合电力电容器参数与电网运行工况确定核心选型指标，包括通流能力、关断时间、耐压等级与导通压降等。晶闸管开关具备响应速度快、通流能力强的特性，适用于高频次投切场景，但其导通压降较大，易产生额外能耗；机械开关导通压降小、损耗低，却存在响应延迟问题，难以满足高精度相控投切的瞬时动作要求。混合开关通过晶闸管与机械开关的协同工作，兼顾响应速度与低损耗优势，已成为精准相控投切系统的主流开关选型。性能优化需针对开关器件的固有特性展开，对于晶闸管开关，可通过优化驱动电路参数降低导通压降；对于混合开关，需设计合理的换流控制策略，实现晶闸管与机械开关的平滑切换，避免切换过程中出现电压冲击或电流突变。

#### 3.3 精准相控投切的实时控制算法设计

精准相控投切的实时控制算法以电网电压相位检测结果为输入，核心功能是计算最优投切时刻并输出

触发指令。电压相位检测算法需具备快速响应能力，通过滑动窗口傅里叶变换实现电网电压相位的实时提取，该算法能够有效抑制谐波信号对相位检测精度的影响，提升相位检测的稳定性。最优投切时刻计算算法基于电力电容器投切的理想相位条件，结合电网电压幅值与频率动态调整投切相位角，确保电容器投入瞬间电压匹配。控制算法需引入预测补偿机制，考虑信号采集、算法运算与开关动作的延迟时间，通过提前预测电网电压相位变化趋势，补偿延迟带来的投切时刻偏差。算法的实时性通过硬件平台与软件优化协同保障，硬件层面采用高性能微处理器提升运算速度，软件层面通过精简算法复杂度、优化程序执行流程减少运算耗时。

### 4 电力电容器精准相控投切过程中的过电压产生机理

#### 4.1 投切瞬间的暂态过电压形成

电力电容器投切瞬间的暂态过电压源于电网与电容器之间的电荷快速转移，电容器在投入前内部电荷为零，电网电压则处于动态变化过程中，二者接触瞬间会形成巨大电位差。电位差驱动电荷在极短时间内流向电容器极板，该过程伴随剧烈的能量交换，电荷转移速度远超稳态运行状态，进而引发回路中的电流突变。电流突变会在回路阻抗上产生压降，阻抗压降与电网电压叠加后形成暂态过电压，其幅值与电位差大小、电荷转移速度呈正相关关系<sup>[4]</sup>。电容器投切回路中的电感元件会阻碍电流突变，电感元件产生的反电动势会与电网电压进一步叠加，同时电荷转移过程中的电磁振荡会延长暂态过电压的持续时间，振荡频率由回路中的电感与电容参数共同决定，振荡衰减速度则与回路电阻相关。

#### 4.2 相控角度偏差引发的过电压

相控角度偏差是精准相控投切系统过电压产生的重要诱因，理想相控角度以电网电压与电容器预充电

电压完全匹配为目标,实际运行中信号采集延迟会导致相控角度出现偏差。信号采集环节的传感器响应滞后会使检测到的电网电压相位滞后于实际相位,控制算法运算耗时会进一步扩大相位偏差范围,偏差角度直接改变投切瞬间的电位差大小。偏差角度越大,投切瞬间的电位差越大,电荷转移过程的能量交换越剧烈,过电压幅值也随之升高。开关器件的动作延迟会加剧相控角度偏差的影响,开关触发指令发出后,器件导通或关断存在固有时间延迟,该延迟会使开关实际动作时刻偏离指令时刻,等效于相控角度偏差进一步扩大。开关器件的动作一致性差会导致三相投切不同步,三相电压不平衡会引发零序电压分量,零序电压分量会与正序电压分量叠加形成过电压。

#### 4.3 电网谐波对投切过电压的叠加

电网谐波会改变精准相控投切过程中的电压特性,电网中的非线性负载会产生大量谐波电流,谐波电流流经电网阻抗会产生谐波电压,谐波电压与基波电压叠加形成畸变的电网电压。畸变电压使相控角度判断失去稳定基准,谐波电压的相位与幅值随机变化,控制算法难以精准捕捉理想投切时刻,投切瞬间的电位差因畸变电压存在而显著增大。谐波电压会使电容器投切回路产生谐振现象,当谐波频率与回路固有频率接近时,回路会发生串联谐振或并联谐振,谐振会放大回路中的电压与电流幅值,过电压幅值可达到基波电压的数倍。不同次数的谐波对投切过电压的叠加效果存在差异,低次谐波频率接近电网基波频率,易与回路固有频率产生谐振,高次谐波幅值较小,其叠加效果相对较弱,但高次谐波数量众多,多频次谐波的综合叠加会显著提升过电压的复杂性。

### 5 电力电容器精准相控投切过电压抑制策略

#### 5.1 串联电抗器的过电压抑制设计

串联电抗器通过改变投切回路的阻抗特性实现过电压抑制,电抗器的电感值需与电容器电容量及电网参数协同匹配,电感值过小则抑制效果不足,电感值过大则会增加回路无功损耗并影响补偿效果。电抗器的核心作用是限制投切瞬间的暂态电流上升率,电流上升率的降低能够减缓电荷转移速度,进而削弱暂态过电压的幅值,同时电抗器可调整回路固有频率,使回路频率偏离电网谐波频率以规避谐振风险<sup>[5]</sup>。电抗器的选型需重点考量额定电感值、额定电流与耐压等级,额定电流需满足投切回路的最大工作电流,耐压等级需高于电网最高运行电压与可能出现的过电压峰值。电抗器的安装位置需设置在电容器与投切开关之

间,该安装方式能够同时抑制投切开关动作与电容器充放电引发的过电压,电抗器的铁芯材质需选用低损耗硅钢片,以此降低电抗器在稳态运行过程中的能量损耗。

#### 5.2 专用过电压吸收装置的参数优化

专用过电压吸收装置的核心类型包括金属氧化物避雷器、阻容吸收器与非线性电阻吸收器,不同类型吸收装置的工作原理与适用场景存在差异,参数优化需围绕装置的核心性能指标展开。金属氧化物避雷器的参数优化聚焦于标称放电电流与残压,标称放电电流需匹配投切过电压的最大冲击电流,残压需控制在设备绝缘耐受电压范围内,同时需优化避雷器的响应时间,确保避雷器在过电压产生初期迅速动作。阻容吸收器的参数优化需兼顾电阻阻值与电容容量,电阻阻值需满足能量耗散需求,电容容量需与回路电容协同以调整吸收频率,二者的参数匹配需通过仿真计算确定,避免参数不匹配导致吸收装置失效或产生新的振荡。非线性电阻吸收器的参数优化针对非线性系数与通流容量,非线性系数决定电阻阻值随电压变化的速率,通流容量决定吸收装置的抗冲击能力,优化后的参数需确保吸收装置在正常运行电压下呈高阻态,在过电压状态下呈低阻态,以实现能量吸收。

### 6 结束语

电力电容器精准相控投切技术的实现需依托参数匹配机制与核心技术体系的协同作用,相控触发信号同步精度、开关器件性能、控制算法实时性直接决定了投切精准度。过电压的产生是暂态过程、相角偏差、电网谐波多因素耦合的结果,单一抑制手段难以实现全面防控。硬件配置优化与控制策略调整相结合的协同抑制体系,可有效降低过电压幅值与发生概率。

#### 参考文献:

- [1] 李洋. 电力电容器组常见故障原因及预防措施探讨[J]. 中国设备工程, 2025(23):166-168.
- [2] 马钊昊, 刘志林, 王琼, 等. 并联电容器过电压事故分析及其抑制措施现场测试验证[J]. 电瓷避雷器, 2025(05): 70-76.
- [3] 杨晓磊, 曲仕响. 电容器组安装优化策略及其对电力系统稳定性影响[J]. 电力设备管理, 2025(11):278-280.
- [4] 江兴考. 电力电容器在高温环境中的性能衰退与寿命预测[J]. 产品可靠性报告, 2025(03):101-102.
- [5] 江兴考. 电力电容器内部温度控制对电力系统稳定性的影响[J]. 灯与照明, 2025,49(01):146-149.

# 综采工作面机电管理智能化建设研究

张海洋

(安徽省淮北市淮北矿业许疃煤矿, 安徽 淮北 235000)

**摘要** 综采工作面机电管理智能化建设通过传感器网络、工业物联网与人工智能算法的系统集成, 构建设备状态全息感知与故障预测诊断体系, 为煤矿安全生产与降本增效提供技术支撑。实践案例表明, 采煤机定位精度误差控制在 4 cm 以内, 液压支架自动跟机率达 85%, 记忆截割率超 70%, 智能诊断系统基于 78 条专家规则与神经网络模型, 故障预判准确率达 98.6%, 预警时间提前 30 分钟至 90 分钟。改造后采掘工作面人均效率提高 40%, 单产效率提升 30%, 工作面作业人员从每班 20 人减至 15 人, 设备非计划停机时间下降 60% 至 80%, 维修成本降低 35%。

**关键词** 综采工作面; 机电管理; 智能化建设; 设备监控; 故障诊断

中图分类号: TD67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.007

## 0 引言

煤炭作为我国主体能源, 其开采方式正经历从机械化向智能化的深刻变革。综采工作面机电设备种类繁多、工况复杂, 传统管理模式存在信息孤岛、人工依赖度高、故障响应滞后等弊端。国家发改委等八部委联合印发的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》明确提出, 到 2035 年各类煤矿基本实现智能化。淮北矿业集团某矿作为安徽省首座国家级智能化示范矿井, 累计投入专项资金 2.03 亿元建设智能化项目 49 项, 通过物联网、大数据、人工智能技术的应用, 实现设备状态透明化感知、故障预测性维护、生产过程协同优化, 为综采工作面机电管理智能化建设提供工程实践参考。

## 1 综采工作面机电管理智能化体系构建

某矿智能化体系采用五层递进式架构, 在设备层通过部署振动、温度、压力等多类型传感器, 实现 468 项运行参数的毫秒级采集, 在数据采集层基于 EtherNet/IP 协议将 CAN、OPC UA、Modbus 等异构协议, 转换为工业以太网协议, 并构建万兆光纤环网配合 5G 基站, 实现数据传输带宽达 50 Mbps 且延迟小于 70 ms 的工作面无线通信全覆盖。在控制层构建响应时间控制在 50 ms 以内的智能化开采集控平台, 实现采煤机远程启停与液压支架群控功能, 在业务层融合 78 条专家经验规则与 K-means 聚类、神经网络等机器学习算法, 构建故障预判准确率达 98.6% 且预警时间提前 30 ~ 90 分钟的智能诊断模型。在展示层集成数字孪生仿真系统、移动互联运维系统、知识图谱决策支持系统, 形

成“运行一大脑、矿区一张网、数据一片云、资源一视图、生产一平台”的整体布局。

## 2 机电设备智能化技术应用实践

### 2.1 采煤机智能截割部署

采煤机智能截割系统的空间定位精确度对记忆截割功能发挥有决定性作用。例如: 某矿把 IMU 惯性导航与三维激光雷达两种定位技术结合起来, 成功将空间定位偏差控制在有效范围之内<sup>[1]</sup>。

如图 1 所示, 某矿采煤机截割作业启动阶段存在约 10 cm 初始定位偏差, 随着系统自学习算法不断完善以及惯导数据持续校正, 这个定位偏差逐步减小且最终稳定在 4 cm 范围之内, 通过融合红外传感器和轴编码器双路检测机制, 能够实时获取煤机位置信息, 并结合支架位移与高度参数综合分析, 进而完成自适应截割循环操作。滚筒高度自适应调节技术把截割高度稳态重复精度控制在 4 cm 以内, 最大牵引速度可达到 12 m/min, 记忆截割成功率超过 70%, 此精度完全能够满足基于煤层厚度、倾角及滚筒高度等多维参数, 构建截割路径模型的技术标准<sup>[2]</sup>。系统利用三维激光扫描仪获取工作面点云数据, 并与三维地质模型进行空间配准, 构建覆盖整个工作面的统一点云模型, 经动态校正算法对开采模型验证与优化之后, 系统输出精确截割指导指令, 使得综采装备具备智能决策与自主作业能力, 实现基于煤层地质条件的智能化开采, 惯性导航装置提供速度、位置及姿态数据, 与激光雷达测距信息相互融合, 构成闭环反馈控制系统。

作者简介: 张海洋 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 采煤机电。

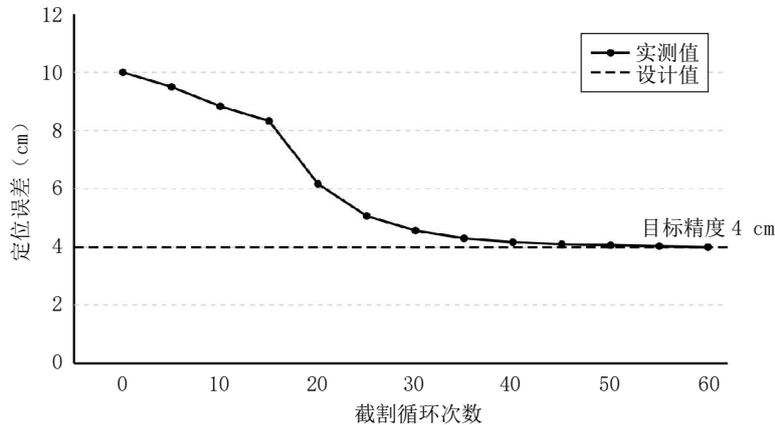


图1 采煤机截割定位精度变化曲线

## 2.2 液压支架群组控制实施

在某矿液压支架电液控系统自动跟机移架作业当中，单个支架完成降柱、移架、升柱完整流程所花时间是衡量该系统群体控制性能优劣的一个重要依据。依据现场采集到的实际数据显示，单架支架自动化作业的周期时长可表示为：

$$T=t_1+t_2+t_3 \quad (1)$$

式(1)中： $T$ 代表单台支架完成一次移架的耗时(s)， $t_1$ 代表降柱耗时(s)， $t_2$ 为推移耗时(s)， $t_3$ 表示升柱耗时(s)。

某矿现场实测数据显示，单架完成自动降移全流程耗时能控制在10 s以内，三架协同作业时总耗时不会超过27 s。依托多传感器数据融合的支架姿态闭环控制技术，达成了支架倾角检测误差0.14度、行程误差6.3 mm的高精度调节，经端头斜切功能优化后的跟机算法，让液压支架自动跟机率提升到了85%。该系统通过综合分析采煤机位置信息、推移量数据以及立柱压力数据，可自主调整支架跟机姿态，革新了传统人工逐架操作模式，并大幅减轻了操作人员的劳动负担<sup>[3]</sup>。

## 2.3 “三机”联动调度落地

某矿“三机”协同系统把采煤机所在坐标当作参照点来发出指令，以此引导液压支架集群依照既定流程自主完成跟机移架操作，同时还会联动刮板输送机的推溜装置来进行行程调节，其推进距离会依据采煤机割煤深度实时计算确定<sup>[4]</sup>。工作面直线度智能调节技术借助激光测距或者惯性导航手段监测支架间位置偏差，当直线度偏差超过±100 mm范围的时候，系统会自动修正各支架推移行程差值以实现工作面轨迹精准纠偏。集控平台具备一键顺序启停功能，设备启动次序是破碎机→转载机→刮板输送机→采煤机，停机次序则完全相反，并且支持故障情况下的自动顺序停机保护机

制，该一体化控制策略使工作面生产效率提升30%以上，实现“三机”设备深度协同的智能化开采目标。

系统依靠时间轴框架，结合设备传感器采集数据参数，将采煤机与液压支架动作事件关联整合。这些事件详细记录动作信息，涵盖事件名称、执行主体、指令类型、动作时长及采煤机位移动作轨迹等关键要素，以此确保设备间精准协同运行，由位移传感器、摄像设备、倾角检测装置和精密推拉机构构成三机联动系统，能高效实现刮板输送机、转载机和破碎机协同控制。在该系统里部署液压推移支架后，可以有效管控三机联动设备，完成对工作面机械装置实时监测与自动化调整，自动化传感系统运行时，各类传感器采集的数据需经平台分析处理，依据分析结果触发紧急停机、闭锁保护或报警等控制指令，方便操作人员迅速响应并处理故障<sup>[5]</sup>。

## 2.4 设备故障监测诊断

某矿构建“规则+模型”双驱动运行机制，有效提高了设备故障预警的前瞻性与及时性，这成为衡量其智能运维水平高低的重要尺度。

如图2所示，某矿故障诊断系统在93次预警中，

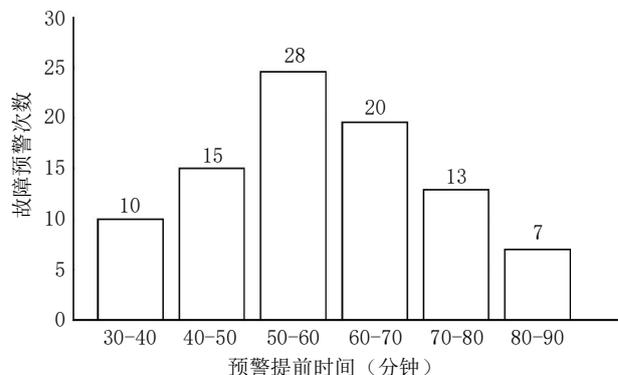


图2 设备故障预警时间分布统计

50 ~ 60 分钟区间出现 28 次, 平均预警提前 58 分钟且落点在系统设计 30 ~ 90 分钟区间内, 该系统以 9.4 亿条历史数据为基础, 运用 K-means 聚类算法识别异常状态, 再由神经网络模型精准分类故障类型, 预判准确率达 98.6%。专家规则库整合 78 条经验模型, 涵盖电机过热、液压压力异常、皮带跑偏等典型故障, 通过监测振动频率、温度曲线、电流波动等参数有效预防突发停机, 使非计划停机时间缩减 60% ~ 80%、维修成本降低 35%。系统实时推送预警信息到管理平台与移动终端, 全生命周期管理功能为备件调度与维护优化提供决策支持, 诊断结果可自动生成维修工单并分配至维护团队, 形成故障处理闭环。

### 3 智能化管理系统应用效果分析

#### 3.1 生产效率与人员配置优化

某煤矿完成智能化升级改造后, 采掘工作面人员效率显著提升了 40%, 与此同时单产效率也增长了 30%, 改造之前日产量为 8 000 吨, 现在已经增加到 10 400 吨, 月度综采单产量还突破了 5 200 吨大关。在工作面配置相关方面, 每班作业人员从 30 人精简到了 15 人, 再结合压风、供电、排水、运输等辅助岗位的优化, 累计减少固定岗位人员达到了 128 名, 全矿总用工数因此减少了 169 人, 智能装车系统投入使用之后, 单车装载时长从人工操作的 8 分钟压缩到 3 分钟, 并且装车精度严格控制在  $\pm 0.5$  吨误差范围以内。通过智慧物流系统进行部署, 井下物料运输效率提升了将近两倍, 矿车周转率同步提高了 50% 以上, 下料作业人员从 514 人减少到 312 人, 直接减少了 202 名作业人员, 这一系列优化成果充分证明, 智能化技术的深度应用不但有效提升了生产效能, 还实现了生产流程全面优化与人员配置科学化目标。

#### 3.2 安全防护体系运行效能

某矿部署超过 300 台数字化摄像机来构建 AI 视频智能识别系统, 以此确保井下有人作业区域和无人重点区域实现全面监控, 该系统能够实时识别人员未佩戴安全帽、自救器缺失等 11 类违规行为, 并且自动发出语音警示, 还运用五级筛查机制有效遏制作业违规情况。智能供电防误操作系统支持远程漏电试验以及防越级跳闸功能, 在井下供电出现异常时可以在 0.1 s 内完成故障定位与隔离, 把供电恢复时间从小时级缩短到分钟级, 综合信息融合平台整合设备运行、人员定位、环境监测以及应急系统等多维数据, 进而构建全工况安全防护体系。在瓦斯治理领域, 采用地面 L 型多分

支井技术, 单井最大抽采纯流量能达到  $36 \text{ m}^3/\text{min}$ , 抽采浓度可达 90%, 12 座瓦斯电站每年利用瓦斯 1 亿  $\text{m}^3$ , 发电超过 2 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ , 某矿连续安全生产周期超过 14 年, 成为安徽省首个国家级智能化示范矿井。

#### 3.3 设备维护成本控制成效

某矿在智能化建设方面累计投入 2.03 亿元专项资金, 并且成功实施了 49 个智能化项目, 其中, 设备全生命周期管理系统让设备意外停机时长缩减 60% ~ 80%, 同时使维修支出同步降低 35%。涡北选煤厂引入数字孪生系统之后, 故障诊断与药剂添加等流程效率提高 30%, 万吨事故台时从 0.55 降至 0.08, 使得运维成本下降 35% 且药剂消耗减少 45%, 每年节省电费超 200 万元, 临涣选煤厂智能配电系统将设备停电操作时间压缩 90% 以上。孙疃矿等 10 余处矿井应用智能选矸系统以后, 矸石含煤率被控制在 1% 以内, 矸石排出率达到 92% 以上, 通过提升煤质和精简人员每年创造上千万元经济效益, 这些成果充分证明, 智能化改造在降低运维成本时能显著提升经济效益。

### 4 结束语

综采工作面机电管理智能化建设通过五层架构体系与关键技术应用, 实现采煤机自主截割、液压支架群组协同、“三机”联动调度的智能化管控。该矿实践验证智能化系统使日产量由 8 000 吨提高至 10 400 吨, 全矿累计减员 169 人, 连续安全生产周期超过 14 年, 智能供电防误操作系统能在 0.1 s 内完成故障定位与隔离, AI 视频识别系统实时捕捉 11 类违章行为。面对复杂地质条件适应性、数据安全保障等挑战, 需持续深化算法优化、标准体系建设, 推动智能化建设从单点突破向系统协同发展, 为保障国家能源安全、实现双碳目标提供坚实的支撑。

#### 参考文献:

- [1] 石斌. 智能化综采工作面自动化技术的研究与应用[J]. 矿业装备, 2022(06):22-23.
- [2] 葛世荣, 王世博, 管增伦, 等. 数字孪生-应对智能化综采工作面技术挑战[J]. 工矿自动化, 2022,48(07):1-12.
- [3] 董红涛. 浅议综采工作面机电设备智能化管理[J]. 中国设备工程, 2022(18):46-48.
- [4] 孔庆宇. 智能化综采工作面自动化技术应用[J]. 机械管理开发, 2021,36(12):188-189,194.
- [5] 马桂云. 智能矿山建设环境下煤矿机电管理技术研究[J]. 工矿自动化, 2021,47(S2):103-104,108.

# 大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的应用分析

门雷鸣, 薛光昌

(鄂托克前旗长城六号矿业有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016215)

**摘要** 煤矿安全监测监控系统是保证煤矿生产安全的重要支撑, 大数据技术的深入应用, 使得煤矿安全监测监控系统由“数据采集”转变为“智能决策”。本文立足于煤矿安全监测监控的核心需求, 对大数据技术在系统中的应用进行系统的分析, 阐述大数据技术支撑煤矿安全监测监控系统运行的逻辑和基础, 分析大数据技术在环境监测、设备运维、人员管控等重要方面的应用路径, 探讨大数据技术凭借数据整合、智能分析、精准预警等特点来提高监测监控的效能和价值, 以期为促进煤矿安全监测监控系统智能化发展提供参考。

**关键词** 大数据技术; 煤矿安全; 监测监控系统; 智能分析

**中图分类号**: TP3; TD7

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.008

## 0 引言

煤矿生产环境的复杂性、高危性, 决定了安全监测监控工作在煤矿生产全过程中的基础性、关键性地位。传统煤矿安全监测监控系统可以完成基本数据的采集和传输, 但是在海量数据处理、风险精准预判、资源协同调度等几个方面存在明显的不足。随着大数据技术的飞速发展, 其海量数据存储、高速数据处理、多维度数据关联分析等核心优势, 给煤矿安全监测监控系统升级优化提供了一条全新的路径。大数据技术与煤矿安全监测监控系统深度融合, 可以冲破传统监测模式的数据壁垒, 实现对煤矿生产“人一机一环”全部要素的全方位、全时段智能监测, 促使安全管理由“被动应对”转向“主动预防”<sup>[1]</sup>。本文主要研究大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的具体应用, 分析大数据技术应用的逻辑框架和实践路径, 全方位体现大数据技术对煤矿安全监测监控效能的提升价值, 助力煤矿行业实现高质量安全发展。

## 1 大数据技术支撑煤矿安全监测监控系统的应用基础

### 1.1 煤矿安全监测多源数据的采集与整合基础

大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的运用, 最基本的前提就是建立一个全域、高效的多源数据采集整合体系。煤矿生产场景中的监测数据来源广泛, 包含井下环境参数、设备运行状态、人员作业信息等

各个方面, 不同类型的数据在格式、传输方式、更新频率等方面存在明显的差别。大数据技术依靠布置的兼容多种协议的智能采集终端, 对瓦斯浓度、顶板位移、通风风量等环境数据, 设备振动、温度、电流等运行数据, 人员定位、作业轨迹、生理状态等人员数据实施实时采集。在此基础上, 利用大数据分布式存储和数据融合技术, 对多源异构数据进行标准化处理和系统化整合, 消除数据冗余、格式差异, 建立统一的煤矿安全监测大数据资源池, 为之后的数据深度分析和智能应用奠定坚实的数据基础<sup>[2]</sup>。

### 1.2 大数据技术与监测监控系统的技术适配基础

大数据技术与煤矿安全监测监控系统相融合, 创建契合煤矿生产场景的技术支撑体系。大数据技术与5G、工业以太网这些高速传输技术相结合, 可以实现监测数据的低延迟、高可靠传输, 保证井下复杂环境下的数据传输稳定性以及实时性。在数据处理方面, 依靠大数据并行计算框架, 可以对大量的监测数据实施快速运算和深入挖掘, 冲破传统监测系统数据处理能力的束缚, 实现对数据价值的有效提取<sup>[3]</sup>。从技术协同角度来讲, 大数据技术与人工智能、物联网、数字孪生等技术存在协同联动关系, 依靠人工智能算法改善数据分析的智能化程度, 借助物联网实现监测终端的全域互联, 依靠数字孪生技术创建煤矿生产场景的虚拟映射, 全方位加强监测监控系统的感知、分析、决策能力, 实现技术优势的互补与叠加。

**作者简介**: 门雷鸣 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 煤矿安全。

### 1.3 煤矿安全监测大数据的治理体系基础

大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的有效应用,需要科学完善的数据治理体系来保证。数据治理体系包括数据质量控制、数据安全保证、数据全生命周期管理等主要环节。在数据质量控制方面,利用大数据清洗、去重、补全技术,去除无效数据和异常数据,保证监测数据的准确性、完整性、一致性<sup>[4]</sup>。就数据安全保障来说,按照煤矿安全监测数据的敏感程度和重要性采用数据加密、访问控制、安全审计等技术手段来构建从数据采集、传输、存储到应用的全流程安全防护体系,防止数据泄露、篡改、滥用。在数据全生命周期管理上,创建数据分类分级管理机制,确定各类数据的存储期限、使用权限和销毁程序,对监测数据实行规范化、精细化的管理,给大数据技术的持续应用提供安全、可靠的数据环境。

## 2 大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的应用

### 2.1 基于大数据的煤矿井下环境安全智能监测

大数据技术在煤矿井下环境安全监测中的应用,实现了对环境风险的精准预判和动态控制。通过对井下各个区域环境监测数据进行整合,采用大数据关联分析和趋势预测算法来挖掘环境参数之间潜在的联系,准确找到环境风险演变的规律<sup>[5]</sup>。对瓦斯浓度、通风风量、温度、湿度等各方面数据进行综合分析,可以实时判断瓦斯积聚的风险等级,提前预判瓦斯浓度异常升高的趋势,结合地质构造数据优化通风系统调控方案,实现对瓦斯风险的主动防控。根据顶板坍塌、水害等地质灾害风险,将顶板位移、应力变化、水文地质等监测数据整合起来,利用大数据机器学习算法建立风险预测模型,可以准确识别地质灾害的早期征兆,及时发出预警信号,给灾害防控和人员撤离争取足够的时间,全方位提高井下环境安全监测的智能化水平。

### 2.2 基于大数据的煤矿生产设备智能运维监测

大数据技术为煤矿生产设备的智能运维监测提供了一条全新的路径,把设备运维从“计划检修”转变为“预测性维护”。通过实时采集煤矿生产设备的电机转速、轴承温度、振动频率、能耗参数等运行数据,应用大数据技术对设备运行状态做全方位的分析评价,准确找到设备运行异常特征以及潜在故障。利用大数据构建设备全生命周期健康管理模型,根据历史运行数据、故障数据预测设备的剩余使用寿命以及可能出现的故障类型,提前制定有针对性的维护计划,防止由于设备突发故障造成生产停滞和安全隐患。同时,

利用大数据分析设备运行参数与生产效率的关系,优化设备运行参数,提高设备运行的稳定性、经济性,实现设备运维的智能化、精准化管理,为煤矿生产连续安全运行提供保障。

### 2.3 基于大数据的煤矿作业人员安全精准管控

大数据技术在煤矿作业人员安全管控中实现了对人员作业状态的全面、精准的监测。利用人员定位数据、作业轨迹数据、生理状态数据等众多信息,结合大数据技术创建人员安全管控模型,可实时掌握到工作人员的位置信息、作业范围以及作业进度,并可即时发现工作人员进入危险区、违规作业等安全隐患,及时地发出预警。针对井下作业人员的生理状况监测,对心率、血氧饱和度等生理参数的变化趋势进行大数据分析,可以预知人员疲劳状态及健康风险,及时提醒人员休息,防止因疲劳作业而发生安全事故。大数据对人员作业数据进行积累和分析,可以优化作业人员的排班方案和作业流程,提高人员作业的安全性、效率,形成人员、环境、设备三者相互配合的安全生产控制体系。

## 3 大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的实现路径

### 3.1 煤矿安全监测大数据平台的构建路径

平台构建要按照数据汇聚、数据处理、智能应用、服务输出的核心逻辑,采用分层架构设计,分为数据采集层、数据存储层、数据处理层、应用服务层<sup>[6]</sup>。数据采集层负责多源监测数据的实时捕获和传输;数据存储层用分布式存储技术,实现海量监测数据的安全存储和高效访问;数据处理层利用大数据计算框架和智能算法完成数据的清洗、整合、分析、挖掘;应用服务层根据环境监测、设备运维、人员管控等核心需求提供风险预警、决策支持、报表统计等个性化服务。平台创建时要重视与已有的监测监控系统之间的兼容性以及扩展性,使得数据资源可以实现相互沟通,各个功能模块也能够得到灵活的扩充,从而保证平台能够满足煤矿生产不断变化的需求。

### 3.2 大数据驱动的煤矿安全风险智能预警路径

创建大数据驱动的安全风险智能预警体系,是改善煤矿安全监测监控效能的重要途径。该路径依靠大量的监测数据,创建多维度的风险预警模型,从而实现对各种安全风险的准确识别并实施分级预警。首先,利用大数据技术对历史安全事故数据、监测数据、地质数据等进行挖掘,发现各类安全风险的特征指标及其变化规律,给预警模型的创建提供数据支持。其

次,利用机器学习、深度学习等智能算法来建立多维、多层次的风险预警模型,从而实现从瓦斯、顶板、水害等各种风险的实时监测和准确预测。最后,建立分级预警响应机制,按照风险等级的不同自动触发相应的预警信号和处置方案,利用终端设备、广播系统等多种渠道及时推送预警信息,保证相关人员可以迅速响应、有效处置,实现安全风险闭环管控。

### 3.3 大数据赋能的煤矿安全监测协同联动路径

大数据技术赋能的协同联动路径,就是打破煤矿安全监测各个环节、各个系统之间的信息壁垒,实现监测监控的全域协同。借助大数据技术整合煤矿生产各个环节的监测数据和管理数据,创建跨部门、跨系统的数据共享机制,从而实现安全管理、生产调度、设备运维等各个部门之间的信息交流以及协同联动。当监测系统发现瓦斯浓度异常时,大数据平台会立即把预警信息发送给生产调度部门和通风管理部门,调度部门可以及时调整生产计划,通风部门也可以快速地改善通风方案,从而实现各部门之间的协同处理。同时,大数据技术可以实现煤矿安全监测监控系统与应急管理系统、监管平台的协同联动,保证安全风险信息可以迅速上报、共享,提高应急处置的效率和科学性,构建全域覆盖、协同高效的煤矿安全监测监控体系。

## 4 大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的应用价值体现

### 4.1 提升煤矿安全监测的精准性与前瞻性

大数据技术的应用使煤矿安全监测的精确性和前瞻性得到明显提高,突破了传统监测模式重采集轻分析的局限。通过多源数据关联分析以及智能挖掘,可以精准识别出安全风险的核心诱因和演变趋势,从而实现安全隐患的早期发现与精准定位<sup>[7]</sup>。相比传统的监测模式依靠单一数据来做出判断,大数据技术可以整合多种数据,从各个方面考虑影响安全的各种因素,大大提高了风险判断的准确性。

### 4.2 优化煤矿安全管理的模式与效能

大数据技术推动煤矿安全管理模式由“经验驱动”向“数据驱动”转型,大大提高了安全管理的效能。大数据平台的数据分析和输出可以为安全管理决策提供客观、精确的数据支撑,避免传统管理决策依靠个人经验而造成主观性和局限性。同时,大数据技术使安全管理工作更加精细化、智能化,通过全方位监测人员、设备、环境,精准控制,优化管理流程,

提高管理效率。通过大数据设备预测性维护可以大大降低设备维修费用、减少故障停机时间;利用大数据对人员进行精准控制可以规范作业行为,提高人员作业的安全性。数据驱动的管理模式,可以全面提升煤矿安全管理的科学化、规范化水平。

### 4.3 筑牢煤矿安全生产的长效保障体系

大数据技术的深度应用为构建煤矿安全生产长效保障体系提供了核心支撑。利用大数据技术对煤矿生产全流程、全要素进行实时监测和智能控制,构建监测、分析、预警、处置、复盘的全闭环安全管理链条,形成持续改进的安全管理机制。同时,大数据技术积累起来的海量监测数据和管理数据,可以给煤矿安全管理的优化升级提供宝贵的经验支撑,通过对数据的不断挖掘和分析,不断完善安全风险预警模型和管控方案,提高安全管理的适应性、有效性。以大数据技术为依托的长效保障体系,可以给煤矿安全生产提供持续、稳定的科技支持,促使煤矿行业实现安全、高效、可持续发展。

## 5 结束语

大数据技术在煤矿安全监测监控系统中的应用,是煤矿行业智能化转型的重要方向,其最大的价值是对数据进行深入挖掘、智能利用,将煤矿安全监测从被动应对转向主动预防。从多源数据的采集整合到技术体系的适配构建,从环境、设备、人员多维度的应用落地到平台构建、智能预警、协同联动的路径实现,大数据技术正在全方位地重塑煤矿安全监测监控的模式和效能。

## 参考文献:

- [1] 孔磊,王凯,李海雄.大数据在煤矿安全监测监控系统中的应用研究[J].煤炭新视界,2025(02):16-18.
- [2] 李伟.数据挖掘在煤矿安全监测监控系统中的应用[J].陕西煤炭,2020,39(S2):209-213.
- [3] 贾兴会.煤矿安全监测监控系统难点与对策应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(21):103-105.
- [4] 高留刚.煤矿安全监测监控系统的设计与实现[J].内蒙古煤炭经济,2025(08):79-81.
- [5] 翟庆龙,代存海.基于物联网的煤矿安全监控系统研究[J].山东煤炭科技,2025,43(04):184-188.
- [6] 尹强.煤矿安全监测监控系统难点与对策应用研究[J].能源与节能,2025(01):279-283.
- [7] 贾林杰.数字化煤矿安全监测监控系统的应用分析[J].西部探矿工程,2024,36(11):122-124.

# 大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用

邓仁奇

(国网江西省电力有限公司宜黄县供电分公司, 江西 抚州 344400)

**摘要** 输配电工程是电力系统的重要组成部分, 其运行稳定关系到电力供应是否安全可靠。由于电力系统规模的不断增大, 输配电工程运行过程中产生的各种数据呈指数级增长, 传统的故障诊断和预警方法已经不能满足精准化、高效化的需求。大数据技术凭借其海量数据的处理能力以及深入分析挖掘的功能, 为输配电工程的故障诊断与预警提供了新的解决办法。本文以大数据技术在输配电工程故障诊断、预警中的应用为研究对象, 从大数据技术应用的意义入手, 分析大数据技术应用中存在的问题, 并提出针对性的对策, 以期为提高输配电工程故障诊断和预警的能力、保证电力系统的安全稳定运行提供有益参考。

**关键词** 大数据技术; 输配电工程; 故障诊断; 故障预警

**中图分类号**: TP3; TM72

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.009

## 0 引言

电力行业是国民经济发展的基础性行业, 输配电工程作为电力传输和分配的关键载体, 其运行状态直接影响电力系统的供电质量和安全性能。随着智能电网建设的推进, 输配电工程的智能化水平不断提升, 运行过程中积累的设备参数运行数据、环境感知数据、故障记录数据等各类数据日益增多。这些数据中蕴含着输配电工程运行状态的丰富信息, 是实现故障诊断和预警的重要基础。传统的输配电工程故障诊断和预警主要依赖人工巡检和常规监测设备, 存在诊断效率低、预警滞后性强、故障定位不准确等问题, 难以适应复杂多变的输配电网络运行需求。大数据技术能够对海量异构数据进行快速处理和深度分析, 从中挖掘出隐藏的故障特征和运行规律, 为故障的早期识别和提前预警提供有力支撑。基于此, 深入探讨大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用, 梳理其应用意义, 剖析存在的问题并提出优化策略, 对于推动输配电工程智能化发展, 提升电力系统安全稳定运行能力具有重要的现实价值。

## 1 大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用意义

### 1.1 提升故障诊断精准度, 保障抢修效率

提高故障诊断的准确度是大数据技术应用的主要意义之一。传统故障诊断方法大多依靠少量的监测数

据和人工经验, 很容易受到主观因素的影响, 造成故障误判、漏判。尤其是在复杂的输配电网当中, 单一的故障会引起诸多关联信号的异常状况出现, 人工诊断很难理清这些信号之间存在的内在联系, 常常要花费很多时间进行排查。大数据技术可以整合输配电工程全生命周期的各种数据, 包括设备出厂参数、日常运行数据、历史故障记录、环境监测数据等, 对数据进行多维度分析、关联挖掘, 准确识别故障类型、特征, 确定故障发生的具体位置。利用数据挖掘技术对大量的数据进行深入的梳理, 可以建立故障特征与数据信号的对应关系, 有效地将故障信号与干扰信号区分开来, 减少诊断过程中人为的误差。准确的故障诊断结果可以给故障抢修提供明确的方向, 使运维人员快速调配资源进行抢修工作, 从而大大降低故障处理的时间成本和经济成本, 减少因故障停电造成的损失。

### 1.2 强化故障预警前瞻性, 实现主动预防

强化故障预警的前瞻性是大数据技术应用的价值之一。输配电工程故障发生时常常伴随着一系列前兆特征, 这些特征信号比较微弱, 时间跨度较大, 传统预警方法由于数据处理能力的限制, 很难捕捉到这些微弱的特征信号, 造成预警滞后于故障的发展, 不能给运维处置预留充足的时间。大数据技术可以对输配电工程运行数据实施实时监测并展开动态分析, 通过构建实时数据采集与分析链路, 实现数据从采集、传

**作者简介**: 邓仁奇 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 输配电工程。

输到分析的全过程快速流转。根据历史故障数据以及实时的运行数据,能够挖掘设备运行状态变化规律,在故障发生前就能从设备运行的异常趋势中察觉并及时发出警报。这种前瞻性预警系统把输配电工程运维从被动抢修转变为主动预防,运维人员依照预警信息实施设备检修和隐患排查,降低了故障出现的概率,提高了输配电工程的运行稳定性和可靠性。

### 1.3 优化运维管理模式,降低运行成本

优化输配电工程运维管理模式是大数据技术应用的延伸意义。传统的输配电工程运维大多采取定期巡检的方式,这种模式存在明显的缺陷,一方面不能覆盖所有的设备和环节,容易造成巡检盲区;另一方面可能会出现过度维护或者维护不足的情况,有些设备还没有到检修时间就进行检修,增加运维成本;而有些存在潜在隐患的设备没有及时被发现。利用大数据技术对输配电工程运行数据进行持续的分析,可以全方位掌握设备运行状态、性能变化以及老化趋势,为设备全生命周期管理提供精准的数据支持<sup>[1]</sup>。运维人员根据数据分析结果制定个性化的运维方案,根据不同的设备运行状况合理安排巡检时间、检修内容,实现精准运维。大数据技术可以优化运维资源的分配,按各地区、各环节故障出现频率和运维需求的不同来合理调配人力物力资源,避免盲目运维、过度运维,提高运维管理精细化水平,降低运维成本,保证输配电工程长期稳定运行。

## 2 大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中应用存在的问题

### 2.1 数据整合效率低下影响故障诊断预警基础

输配电工程涉及多个环节、多个设备类型,不同环节、不同设备产生的数据来源分散格式各异,且数据标准不统一。当前,在大数据技术应用过程中缺乏有效的数据整合机制,难以实现各类数据的高效汇聚和规范处理。大量异构数据无法被充分整合利用,导致数据资源浪费,同时也使得故障诊断和预警所依赖的数据基础不够全面准确。

### 2.2 数据处理分析能力不足制约诊断预警效能发挥

输配电工程运行产生的数据具有海量性、高维性、动态性的特点,对数据处理分析的速度和深度提出了较高要求。当前大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用,存在数据处理分析能力不足的问题<sup>[2]</sup>。一方面,数据处理速度滞后,无法实现对实时运行数据的快速处理,导致故障发生后无法及时完成数据解析,影响故障诊断的及时性;另一方面,数据深度分

析能力欠缺,难以从海量数据中挖掘出有价值的故障特征和运行规律,多停留在数据的表面统计层面,无法为故障预警提供深层次的数据支撑,制约了大数据技术在故障诊断和预警中效能的充分发挥。

### 2.3 技术应用适配性不足导致诊断预警针对性欠缺

输配电工程的运行环境复杂多变,不同区域、不同类型的输配电工程在设备配置运行工况等方面存在较大差异,对故障诊断和预警的需求也具有个性化特点。当前大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用缺乏对不同输配电工程个性化需求的充分考量,技术应用方案较为单一固化。所采用的数据分析模型和预警指标体系通用性较强,无法精准适配不同输配电工程的运行特点,导致故障诊断和预警缺乏针对性。

## 3 大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中应用的策略

### 3.1 构建高效数据整合体系,提升故障诊断预警数据基础质量

依托数据关联整合的核心思路,通过构建统一的数据汇聚平台,实现输配电工程各环节各类数据的集中收纳。输配电工程数据来源广泛,涵盖发电侧、输电侧、配电侧等多个环节,涉及变压器、断路器、电缆等多种设备,不同来源的数据格式差异较大,包括结构化数据(如设备参数)、非结构化数据(如故障图像)、半结构化数据(如运行日志)等<sup>[3]</sup>。统一的数据汇聚平台需具备强大的兼容能力,支持多种数据格式的接入,同时建立标准化的数据处理流程,对异构数据进行规范化转换,消除数据格式差异带来的整合障碍。在数据整合过程中,需重点开展数据清洗工作,通过过滤、修正、剔除等方式,去除无效数据、冗余数据和错误数据,保留有价值的核心数据,提升数据质量。

建立分层级的数据整合管理机制,明确各层级数据整合的责任主体和工作要求。在设备层面,优化数据采集终端的配置,根据不同设备的运行特点和监测需求,合理布置传感器、智能监测终端等设备,确保数据采集的全面性和实时性,同时提升数据采集终端的稳定性和抗干扰能力,保障数据传输的可靠性。在平台层面,加强数据整合系统技术升级,采用分布式存储和计算技术来提升数据存储容量和处理效率以满足海量数据的存储分析需求;创建数据质量评价体系,定期对整合后数据质量做检查,根据数据缺失、数据偏差等问题采取相应办法持续提高数据质量。在管理层,健全数据整合相关的制度规范,明确数据采集、存储、传输、使用等各个方面的流程和安全要求,防

止数据的泄漏或者被滥用；构建跨部门协同工作的机制，明晰各部门在数据整合过程中所承担的责任以及具体的分工，加强部门间的相互配合，促进数据整合工作有序地开展。

### 3.2 强化数据处理分析能力，充分释放诊断预警效能

依靠数据高效处理和深度挖掘的基本逻辑，改进数据处理算法，加快数据处理的速度与效率，从而实现输配电工程实时运行数据的迅速分析、处理。输配电工程运行数据具有海量性、高维性、动态性等特点，传统的算法不能满足实时性、准确性要求<sup>[4]</sup>。需要引进并行计算、流式计算等先进的数据处理技术，创建高效的水处理技术数据处理体系，对大量的实时数据实施快速处理和分析。从数据深层次挖掘上看，创建分层次、分类别进行剖析的多维数据分析框架。由设备运行参数、环境影响因素、故障历史记录等各部分入手，寻找数据间的关系，精准地抽取故障特征信息以及运行异常趋势信号。

增加数据处理分析技术的研发投入，设立专项研发资金，支持数据处理分析技术的研究与创新，促进企业与科研机构合作，共同攻克数据处理分析环节的关键技术。采用先进的数据分析工具和技术手段，人工智能分析平台、大数据挖掘软件等来提高数据处理分析的智能化程度。创建动态的数据分析模型优化机制，按照输配电工程运行状况的变动以及故障类型的变化，及时对分析模型的参数加以调整，从而提升模型的适应能力与分析精确度。当增加新的设备类型或者出现新型故障的时候，及时增加相应的数据样本，对模型进行训练和优化，使模型可以识别出新型故障的特征。同时，加强运维人员的数据分析能力的培养，制定系统性的培训计划，定期组织运维人员参加数据分析技术培训和交流活动，提高运维人员使用数据分析工具的能力以及对数据分析结果的解读、应用能力。

### 3.3 打造个性化应用方案，增强诊断预警针对性

根据不同的输配电工程运行特点的精准掌握，工程的设备配置、运行工况、环境条件等实际情况来创建不同的数据分析指标体系以及预警阈值标准。不同的输配电工程，高压输电工程、低压配电工程，其设备种类、运行参数范围、故障类型不同；同一类型的输配电工程，在高温高湿地区、高寒地区、多雷区等不同的环境条件下，其运行状况和故障发生的规律也不同<sup>[5]</sup>。因此，个性化的应用方案必须考虑这些差异，不能使用统一的标准和模型。根据不同的故障类型来

创建个性化的故障诊断算法以及预警模型，如针对输电线路雷击故障，可以将雷电监测数据与线路运行参数相结合，建立专门的雷击故障诊断和预警模型，针对变压器绝缘老化故障，主要分析变压器油中溶解气体含量、绕组温度等参数，创建绝缘老化故障预警模型。

在技术应用前进行全面输配电工程调研，组建专业的调研团队，深入现场了解各工程设备配置、运行工况、环境条件、历史故障情况、运维需求等，建立详细的工程信息档案，为个性化应用方案制定提供充分依据。方案制定时要召集运维人员、技术专家等各方人员，充分听取各方的意见，保证方案的合理性与针对性。建立应用方案动态调整机制，定时对技术应用成效加以评定，评定指标涵盖故障诊断准确率，预警提前时间、运维成本削减幅度等，依照评定结果及工程运行状况的变动及时对方案加以优化调整。工程新增设备或者运行环境发生变化的时候，及时调整数据分析指标和预警模型参数，保证方案可以持续满足工程运行需求。加强技术应用过程中现场指导和反馈，派遣专业技术人员驻场指导方案实施，及时解决实施过程中出现的问题；建立现场反馈渠道，鼓励运维人员及时反馈方案实施过程中的问题和改进建议，对方案进行动态优化。

## 4 结束语

大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用，是智能电网建设的重要组成部分，对提升输配电工程运行管理水平，保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。当前大数据技术在应用过程中仍存在数据整合效率低下、数据处理分析能力不足、技术应用适配性不足等问题，制约了其应用效能的充分发挥。通过构建高效数据整合体系、强化数据处理分析能力、打造个性化应用方案等针对性策略，能够有效解决上述问题，提升故障诊断和预警的精准度、前瞻性和针对性。

## 参考文献：

- [1] 常峰,刘超.在输配电与用电工程中自动化技术的应用[J].中国科技信息,2025(23):55-57.
- [2] 冯敏.输配电工程管理风险评估与控制策略研究[J].电力设备管理,2025(22):263-265.
- [3] 李炜,邢王锋,赵娜.大数据技术在输配电工程故障诊断和预警中的应用[J].能源新观察,2025(09):35-36.
- [4] 张欣.信息化平台在输配电工程运维管理中的集成与应用[J].信息与电脑,2025,37(16):115-117.
- [5] 谭宏亮,马剑,马明,等.输配电及用电工程线路安全运行技术[J].电工技术,2025(S1):592-594.

# 高精度 RTK 测量技术在自然资源确权登记界址点中的应用

张国平

(海天地信科技有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要** 在自然资源确权登记的过程中, 为确保自然资源的界址点测量精度达到厘米级, 就需要使用 RTK 技术的高效率、便捷性、高精度特性满足自然资源确权登记界址点精度需求。基于此, 本文深入分析自然资源确权登记中界址点高精度 RTK 测量技术的应用价值, 从基准点布设、仪器校准、外业数据采集、内业数据处理等关键节点出发, 并提出规范流程和质量管理措施, 以期为确保自然资源确权登记界址点平面精度满足实际标准需要提供参考。

**关键词** 自然资源确权登记; 界址点; RTK 测量; 测量精度

中图分类号: P21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.010

## 0 引言

自然资源统一确权登记是实现生态文明建设的重要举措, 对构建完善的自然资源产权制度有重要作用, 而其核心在于确定各类自然资源的权属边界。自然资源确权登记中界址点是确定空间权属的法定坐标载体, 其在测量环节提高精度, 能够使自然资源确权登记具备法律效力, 也能促进自然资源管理水平的提升。以往在自然资源确权登记界址点测量中, 采用传统测量方法无法达到大范围、高效率、高精度要求, 这就需要动态差分 RTK 技术实现界址点测量的厘米级精度要求。然而很多地区自然资源处于山区、林区、河滩等复杂环境, 这对 RTK 测量的稳定性产生较大影响。因此, 自然资源确权登记中界址点高精度 RTK 测量技术应用具备极高价值, 为保障国家自然资源产权制度改革落地提供有力支撑。

## 1 高精度 RTK 测量技术相关理论

高精度 RTK 测量技术以载波相位实时差分作为基本原理, 其系统内设计一个基准站和一个或多个流动站共同组成。基准站安装在已经确定坐标的控制点上, 同步跟踪多系统导航卫星信号, 实时计算包含轨道误差、卫星钟差、电离层与对流层延迟在内的综合误差改正数。该改正数利用移动通信网络或电台等无线数据链传输到流动站, 流动站同步接收卫星信号与改正数, 并且通过求解双差观测方程固定整周模糊度参数, 进而在几秒内完成厘米级精度的三维坐标计算。而在坐标计算过程中, 其数据精度直接受到卫星空间几何

构型、多路径效应、大气延迟残余误差、数据链稳定性等影响。自然资源确权登记中采用网络 RTK 模式, 其通过连续运行参考站生成虚拟参考站或区域改正信息, 能够有效削弱空间相关误差、扩大作业半径, 从而提高自然资源确权登记中界址点测量精度<sup>[1]</sup>。

## 2 自然资源确权登记界址点确定要求

### 2.1 平面位置精度要求

自然资源确权登记界址点平面位置需满足如下精度要求: 界址点相对于邻近高等级控制点的点位中误差在平地、丘陵等地区控制在  $\pm 0.10$  m 以下, 山地、高山等地在  $\pm 0.15$  m 以下。针对涉及权属争议或重要管理边界的特殊界址点, 其测量精度确保达到点位中误差  $\pm 0.03$  m 以下。该精度能够明确标注自然资源权属边界, 能够有效防止相邻权利主体空间重叠或遗漏, 进而为自然资源监测、执法监管、生态补偿等提供空间精准数据。

### 2.2 高程精度要求

自然资源确权登记中界址点高程信息能够明确各类自然资源的边界点, 如确定水流、滩涂、山岭等资源垂向范围。自然资源界址点高程相对于邻近高程控制点的中误差在平地、丘陵等地区应在  $\pm 0.15$  m 以下, 山地、高山等控制在  $\pm 0.20$  m 以下。而在河湖管理范围海岸线以及水位密切相关的界址点, 需要采用更加严密的测量方法以提高界址点精度, 确保各类自然资源管理范围划定精准, 使其高程中误差在  $\pm 0.05$  m 以下。

作者简介: 张国平 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 测绘工程。

### 2.3 属性与拓扑关系要求

自然资源界址点除空间坐标外,还需要掌握完整、准确的属性信息。在自然资源的每个界址点中,需要关联其所属自然资源类型、权属主体、界址点类型、标定方式以及实地照片。同时,自然资源中所有界址点需要按照顺时针或逆时针方向形成闭合权属界限,其界限之间不得相交,相邻图斑公共界线重合以确保拓扑关系准确无误。而自然资源属性和拓扑关系完整性是确保登记簿册、数据库与图件“三符合”的核心,能够实现自然资源信息的动态更新与共享应用。

## 3 自然资源确权登记中界址点 RTK 测量要点

### 3.1 基准站布设

基准站布设是 RTK 测量精度的源头保障。优先采用省级或国家级 CORS 网络提供的虚拟参考站服务,确保数据源稳定可靠。在无 CORS 覆盖区域,需自设临时基准站。基准站必须架设在经检验合格的高等级控制点上,点位选择要求地势开阔,15° 以上高度角范围内无遮挡物,远离大面积水域、高压线及无线电发射源,以减少多路径效应与电磁干扰。基准站天线严格对中整平,对中误差小于 2 mm,天线量取三次,互差小于 3 mm,取中数记录。电台模式下,基准站与流动站距离不超过 10 km;网络模式下,需确保 4G 信号强度满足数据传输要求。基准站开机后需稳定观测 10 min 以上,待数据链正常、固定解状态稳定后,方可通知流动站开始作业<sup>[2]</sup>。此外,需同步做好基准站现场环境记录,标注周边干扰源位置及信号遮挡情况。作业期间安排专人值守基准站,实时监控设备工作状态与数据链稳定性,若出现失锁、信号中断等异常,需立即暂停流动站作业,待故障排除、固定解重新稳定后,方可恢复测量。

### 3.2 仪器校准

自然资源确权登记界址点测量前需进行 RTK 设备校准,这是外业作业前的必备工作。在 RTK 设备仪器校准时进行主机与手簿的蓝牙或网络连接测试,保证其通信达到畅通性要求。同时,校准流动站对中杆的圆水准器,使其在任意方向上达到精确置平。在仪器校准时关键步骤是量测并输入天线高,再利用专用量高尺从地面控制点标志中心垂直量至天线底部参考面,其读数精确度达到 1 mm,重复三次计算测量平均值。而在 RTK 测量时,每日作业前及作业中更换电池后需要重新量测天线高。此外,在已知坐标的控制点进行点校正或残差检验,确保平面残差 2 cm 以下、高程残差 3 cm 以下。如果测量后发现超限则需要重新检查

天线高输入、坐标系转换参数或设备状态。上述校准数据存储在手簿内,将其作为成果质量溯源依据<sup>[3]</sup>。

### 3.3 外业界址点数据采集

#### 3.3.1 点位选取

自然资源确权登记界址点选择极为重要,其需要根据确权登记工作底图以及权属调查成果确定。由测量技术人员进入现场勘察确认界址点位置,优先选择在稳固、易于长期保存的实体地物上,一般选择道路交叉口、围墙、拐角、独立树、永久性碑石等作为界址点。如果现场没有明显地物作为界址点,需要埋设混凝土界桩或刻石,并在现场拍摄包含周边环境、指北针、测量人员的全景照片。界址点点位需要避开信号遮挡严重区域,一般不设置在峡谷底部、密林深处、大型金属构筑物旁。如果由于自然资源存在权属指界或地形限制,不得将界址点布置在遮挡区域,需要记录 PDOP 值以及卫星数,并在开阔地重复测量或采用后处理动态 PPK 模式补充验证。此外,界址点编号采用“县(区)代码+自然资源类型代码+顺序号”组合方式,确保全域唯一。现场使用红漆在选定位置标注点号,字迹清晰、持久。每个界址点需测定三维坐标,平面采用 CGCS2000 坐标系,高程采用 1985 国家高程基准。观测时段选择卫星信号稳定、多路径效应小的 09:00 至 11:00 或 15:00 至 17:00 进行。采用双频 GNSS 接收机,静态观测时间不少于 30 min,采样间隔设为 5 s,截止高度角 15°。同一界址点至少进行两次独立观测,两次观测成果平面位置较差不得超过 0.10 m,高程较差不得超过 0.15 m。超限需进行第三次观测,并取得符合限差的两组成果平均值作为最终结果。

#### 3.3.2 观测方法

自然资源确权登记中界址点观测选择合适的方法,目前主要采用固定解状态下平滑采样模式。流动站天线精确对中于界址点标志中心,杆体保持垂直,且在操作时不会出现晃动或触碰。而在界址点观测前确认接收机获得固定解状态,同时 PDOP 值在 2 以下,符合条件后开启记录程序。自然资源确权登记中各个节点进行两次独立观测,两次观测时间间隔在 5 min 以上。而在界址点观测时持续时间应在 10 s 以上,通过手簿自动记录历元数据并计算坐标平均值。林区、峡谷、河滩等信号干扰较强的区域界址点,观测时间延长到 30 s 并在整个观测中监控解算状态。若观测过程中出现浮动解或单点解,则立即终止本次记录,待重新获得固定解后重新开始计时观测。所有观测数据实时存储于外业手簿,记录内容包括观测开始与结束时间、WGS-84 坐标、天线高、PDOP 值、有效卫星数量、解算

状态(固定/浮动/单点)、数据链类型及信号强度。每个界址点的两次观测数据分别存储为独立记录,不进行现场合并或筛选。观测结束后,操作员在手簿中填写点位描述、实地环境特征及照片编号<sup>[4]</sup>。

### 3.4 内业数据处理与成果输出

自然资源确权登记界址点测量结束后,需要将外业数据导入系统内进行完整性检查,重点检查界址点编号、坐标、天线高、观测时间等字段是否齐全。而在界址点测量数据导入时进行质量校核,确保同一界址点两次观测坐标的平面较差3 cm内、高程较差5 cm内。超限点位需要重新标注,并组织外业复测。而在界址点观测中,利用邻近控制点进行测量成果的整体精度评估,再精准计算点位中误差。测量合格数据根据统一坐标系统和高程基准进行转换与整理。界址点成果表包含点号、X、Y、H坐标、点之记、实地照片索引等信息。同时,界址点坐标导入GIS平台,并和权属界线矢量数据关联以形成标准分幅的自然资源确权登记图<sup>[5]</sup>。

## 4 工程实例分析

### 4.1 工程项目

某省重点流域自然资源统一确权登记工程量大,其确权对象包含一条跨区域重要河流以及管理范围。该项目全长达85 km。确权测量工作需要经过丘陵、平原、河谷等多种地形条件,河流两岸植被茂密,有些区段存在湿地和滩涂。按照自然资源确权登记工作要求,需要沿着河道管理线布设界址点2 136个,能够精准确定河道管理的范围边界。该项目界址点测量采用省级CORS网络的RTK差分服务,作业区域CORS站点平均间距32 km。该项目外业测量由三支测量团队同步开展,并在现场配置多系统多频RTK接收机。该项目界址点测量工作周期45 d,确保界址点平面精度 $\pm 3$  cm内、高程精度 $\pm 5$  cm内,且同步采集界址点属性信息以及现场影像资料。本项目界址点测量存在线路长、环境复杂、精度高、成果法律效力强等特点,需要使用高精度RTK技术提高自然资源确权登记界址点测量精度。

### 4.2 RTK关键技术应用

本项目在测量环节需严格执行RTK测量流程,从而确保RTK测量精度合格。该项目外业测量前技术人员使用卫星星历预报软件,确定测量时每日09:00~11:00、16:00~18:00为最佳观测窗口。该项目流动站使用2 m碳纤维对中杆,其顶部加装抑径板削弱河滩水面存在的多路径效应。同时,在现场测量时各界址点独立观测2次,每次平滑采样15 s,两次观测间隔在8 min以上。而在该项目林区密集段,测量人员将天线举升至树冠上方确保卫星信号接收数量超过12

颗、PDOP值在1.8以内。上述观测均利用CORS网络VRS模式完成,4G网络信号实现实时监控,低于-105 dBm时暂停作业。在每日测量结束后对当日检测数据进行内符合检核,如果存在超限则需要次日进行复测基准站稳定性,由项目部每周核查确保CORS站坐标无异常波动。

### 4.3 界址点成果分析

本项目顺利完成2 136个界址点测量,其内业检核显示2 118个界址点两次观测平面较差3 cm,合格率达99.2%。同时,现场随机抽取106个界址点进行静态GPS方法外符合精度检测。通过检测结果确定平面点位中误差 $\pm 2.3$  cm、高程中误差 $\pm 4.1$  cm,符合高精度测量要求。上述所有测量界址点坐标成果,经省级质检部门验收一次通过。成果数据成功导入自然资源确权登记数据库,与河道管理线矢量图层无缝衔接,拓扑关系正确,无自相交或缝隙。界址点属性信息完整,现场照片清晰可辨,可准确还原点位实地环境。项目成果已用于该河流的水域岸线保护、生态修复规划及行政执法,未发生因界址点精度问题引发的权属争议。实践验证了规范RTK作业流程在自然资源确权登记中的有效性与适用性。

## 5 结束语

自然资源确权登记是提高自然资源管理水平的关键,而通过高精度RTK技术提高界址点测量精度,能够有效提升自然资源确权登记的效率和数据精度。在自然资源确权登记界址点测量时,其工作处于复杂多变的野外环境,需要严格按照技术规范落实基准站布设、仪器校准、外业观测、内业处理等各环节监控,进而提高自然资源确权登记界址点测量精度,充分发挥RTK测量技术优势以提高自然资源管理水平。

## 参考文献:

- [1] 黄同新,王玉柱.网络RTK(VRS)技术在农村房屋不动产测绘中的应用[J].测绘与空间地理信息,2022,45(09):154-156,160.
- [2] 刘剑.测绘技术在自然资源确权登记中的应用[J].智能城市,2024,10(01):59-61.
- [3] 项翮.无人机倾斜摄影测量技术在农村不动产确权登记中的应用[J].测绘与空间地理信息,2023,46(01):205-207,210,214.
- [4] 丁旦旦.基于SLAM技术的自然资源统一确权登记方法探索[J].江西测绘,2022(02):47-50.
- [5] 刘海军,陈洋,严明波,等.测绘地理信息技术在自然资源确权登记中的创新应用[J].地理空间信息,2025,23(01):70-74.

# 基于无人机倾斜摄影测量的复杂地形 三维建模精度评估研究

陆春伟

(南京建力测绘勘察院有限公司, 江苏 南京 211500)

**摘要** 复杂地形区域地貌起伏大且地物类型多样, 为提升模型精度和表现力, 本文以无人机倾斜摄影测量为基础, 设计多视角航摄与像控点布设方案, 获取高分辨率影像数据, 并构建三维模型, 结合空三处理、密集匹配和模型优化方法开展精度评估与误差分析。结果表明, 该方法在复杂地形下具备较高建模精度与几何完整性, 对数字地形建模与自然资源调查具有应用价值。

**关键词** 倾斜摄影测量; 三维建模; 复杂地形; 精度评估

中图分类号: P23; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.011

## 0 引言

在地理信息获取与三维重建需求日益增长的背景下, 传统测绘手段在复杂地形区域的效率与精度已难以满足实际需求, 无人机倾斜摄影测量技术具备灵活以及高精度等优势, 成为地形建模与地物识别的重要手段。复杂地形区域存在高差悬殊和地表破碎等问题, 影响模型重建质量与精度控制。本文围绕高精度建模需求亟需构建适应地形特征的测量流程与评估体系, 针对典型复杂地形区域开展系统建模与精度分析, 为精细化地理建模与测绘工程实践提供技术支撑。

## 1 复杂地形三维建模方案设计与数据获取

### 1.1 研究区域概况与复杂地形特征分析

研究区域位于西南地区典型山地地貌带, 海拔变化范围在 560 米至 980 米之间, 区域内山势陡峭, 沟壑纵横, 地表覆盖类型呈现明显差异, 包含裸岩、林地、农田以及部分居民点。由于长期自然侵蚀与构造运动的叠加作用, 地形结构破碎, 局部区域存在岩坎与塌陷地形, 地貌单元复杂交错。高程起伏超过 420 米的地段广泛分布于主山脊两侧坡面, 使得常规航空摄影难以获得统一质量的影像数据。受地形影响, 地表反射特性在不同坡向差异显著, 阴影与遮挡问题突出, 对三维重建的影像匹配与深度估计产生干扰。

### 1.2 无人机航摄方案设计

航摄平台采用四旋翼倾斜摄影无人机系统, 配备五镜头相机组件, 单镜头像素为 2400 万, 传感器尺寸

为 36 毫米 × 24 毫米。在实际飞行中, 规划航线高度根据地形高差动态调整, 从起始点最低 560 米抬升至 980 米以上区域, 确保航带重叠度与侧向覆盖均满足后期重建需求。航向间距控制在 110 米左右, 单条航带平均飞行长度超过 1 200 米, 侧向间隔调整至 85 米以适应地形起伏。飞行速度设定为每秒 6 米, 有效减少因动态模糊带来的图像质量损失。倾斜角设为 45 度, 兼顾立面信息获取与视觉重建的稳定性。每次飞行任务覆盖面积不超过 0.8 平方公里, 并分批实施多区域航摄, 避免因环境变化造成图像条件不一致。

### 1.3 像控点布设方案与地面测量

控制点布设依据影像覆盖范围与地形特征进行分区设计, 总体布设控制点 24 个, 检查点 10 个。控制点分布优先考虑影像边缘与高差突变地段, 平均间距约为 200 米, 在陡坎、转折地形以及林缘地带加密布设。使用高精度 GNSS 设备进行静态观测, 每个点采集时间不低于 15 分钟。点位布设前对地面稳定性与可识别性进行评估, 选用颜色反差明显的标志布点材料, 保证在所有倾斜视角中清晰可见。控制点测量数据采用 WGS84 坐标系并转换为国家高程基准统一管理, 为后续空中三角测量提供精确支持。

### 1.4 多视角影像数据与辅助数据获取

影像采集使用五镜头同步曝光机制, 单次飞行获取有效影像数量超过 1 200 张, 前后交叠大于 80 张, 侧向覆盖在 60 张以上。多视角影像覆盖同一地物单元,

作者简介: 陆春伟 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程测绘。

使得在高低起伏区域形成丰富的视差信息,为后续密集匹配提供条件。影像分辨率为地面采样距离2厘米,具备识别微小地物结构的能力。除主影像外,采集高程辅助数据包括公开DEM与地面测点信息,用于初步模型构建与匹配误差控制。部分区域采用手持相机进行补拍,针对阴影严重与遮挡较多的地段进行补充图像获取。数据采集过程中设置影像质量控制环节,剔除模糊图像及过曝图像,保障建模输入数据的一致性与稳定性<sup>[1]</sup>。

## 2 复杂地形三维分析

### 2.1 数据预处理与检查

数据预处理阶段以提升建模输入数据的稳定性与一致性为目标,针对原始影像进行系统性检查与标准化处理。影像资料导入后,需进行相机参数一致性校验与文件完整性检验,剔除模糊、偏移或重影图像,确保数据链条完整且可溯源。针对地面控制点数据,实施坐标格式统一、空间基准对齐与误差初筛,避免因坐标系不一致引发模型偏移。图像重心分布评估采用均值重心算法,借助计算各张影像中心位置的标准差,判断是否存在航线漂移问题。图像亮度与对比度调整采用灰度拉伸法,提升影像特征点提取质量。在特征点匹配前,引入SIFT算法进行初步特征点筛选,并借助比值约束法剔除低质量匹配,保留高置信度影像对组合,匹配比值计算公式为:

$$R = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

式(1)中, $d_1$ 表示最近邻特征点距离, $d_2$ 为次近邻距离。当比值 $R$ 小于阈值0.8时认为匹配可靠,最终预处理结果需满足影像重叠区域分布均衡、控制点空间分布合理与图像清晰度达标等条件。

### 2.2 空中三角测量与密集匹配

空中三角测量是三维重建的核心环节,决定模型整体的空间精度与相对稳定性。影像导入后借助自动特征点提取算法进行图像匹配,结合控制点与POS数据构建初始空三网络。在计算中采用光束法平差方法,借助最小二乘准则求解外方位元素并优化影像间几何关系。解算过程中引入加权约束模型对像控点进行控制,平差残差控制在2像素以内。完成空三处理后生成稠密点云,密集匹配采用Semi-Global Matching算法对影像对进行像素级深度估计,依据图像灰度一致性与几何约束关系计算每个像素的视差值,匹配结果形成结构化点云数据。在复杂地形区域内,匹配精度受到阴影遮挡与坡面朝向的干扰,需结合视角冗余进

行多角度融合,最终输出的稠密点云数据量超过2800万点,为后续网格构建提供基础空间信息<sup>[2]</sup>。

### 2.3 三维网格与纹理映射生成

三维网格构建以稠密点云为基础,采用Poisson重建算法将离散点集转化为连续曲面。该方法基于多尺度八叉树结构构建空间函数,重建出具有拓扑连续性的三角网格模型。在网格生成过程中对点云法向量进行平滑处理,提升重建表面的一致性与稳定性。复杂地形表面存在大量细小起伏与高差突变区域,网格细节保留策略采用自适应分辨率控制,在平缓区域生成大面单元,在突变区域细化至平均边长不足6厘米的三角形单元。纹理映射阶段选择图像投影误差最小的主影像作为纹理基准,并对不同视角下的纹理进行拼接融合。映射方式采用全自动UV展开算法,将影像信息准确贴合至三维网格面片上,实现高保真度的模型表现还原。

### 2.4 模型后处理与优化

模型后处理环节面向实际应用需求对初步生成的三维模型进行结构调整与视觉优化。面向地形重建的几何精度优化采用误差分析与局部修复相结合的方式,检测点云边界裁切误差并对网格边界进行闭合处理。冗余面片与噪声点剔除以空间邻域一致性与纹理突变检测为依据,清理模型中孤立面片与高度异常点。纹理优化环节采用图像光照均衡与颜色平滑算法消除不同角度影像融合产生的色差边界,提升整体视觉一致性。对于局部失真区域结合手工控制点与辅助影像重建小范围局部模型并进行融合更新。在模型导出阶段,对三角网格进行多级简化压缩,将面数控制在220万以内,以满足多平台浏览与实时加载要求,最终模型具备完整地形形态表达与真实表面纹理再现,为精细化地理分析提供可靠空间基础<sup>[3]</sup>。

## 3 三维模型精度评估与分析

### 3.1 精度评估方案设计

三维模型的精度评估从空间定位和几何结构与视觉质量三个维度展开,综合反映了模型在空间复原及形态表达与视觉表现等方面的可靠性,评估体系包括控制点与检查点的空间残差分析,点云密度与一致性的几何结构分析,以及纹理还原效果的图像评价指标计算。评估数据来源包括控制测量成果和原始影像数据及建模结果与辅助参考模型,空间精度采用三维坐标残差作为主要评价指标,几何完整性使用模型内部点间距一致性与表面连续性作为判据,视觉质量依据影像清晰度及纹理接缝与色彩过渡判断<sup>[4]</sup>。

### 3.2 基于检查点的绝对精度评估

绝对精度评价基于外业布设的 10 个检查点，借助对比模型中同名点坐标与实测坐标之间的误差，计算三维空间偏差。检查点覆盖研究区域不同高程与地貌特征段，确保评估具有代表性。误差计算采用欧氏距离测量方式，对每个检查点计算其 XYZ 三个方向上的误差值，并结合均方根误差进行综合表达。在检查点编号为 CP05 与 CP08 的位置上，Z 向误差分别达到 0.26 米与 0.31 米，是误差最大的两处，主要分布在高陡坡面与林缘转折区。其余检查点误差集中在 0.11 米至 0.24 米之间，模型整体 Z 向误差控制水平优于 XY 向。综合评估结果表明模型在空间定位方面满足高精度测绘应用要求。

### 3.3 模型内部相对精度与几何完整性分析

模型内部精度主要依赖于稠密点云的分布均匀性与网格结构的几何连续性。随机抽取模型中 5 个子区域进行点间距统计与边长变化分析，对应的数据列于表 1。

表 1 模型子区域内点间距与三角网边长统计表

区域编号	平均点间距 (米)	点间距标准差 (米)	平均边长 (米)	最大边长 (米)
A01	0.072	0.013	0.085	0.142
A02	0.068	0.010	0.079	0.136
A03	0.081	0.015	0.090	0.158
A04	0.076	0.014	0.088	0.149
A05	0.069	0.012	0.081	0.132

从表 1 中可见，五个区域的平均点间距集中在 0.068 米至 0.081 米之间，点间距标准差最大值为 0.015 米，说明点云分布较为均匀。三角网平均边长变化范围在 0.079 米至 0.090 米之间，最大边长未超过 0.160 米，表明网格构建过程中未出现显著的间隙与断裂，整体结构连续性良好。

### 3.4 模型纹理质量与视觉逼真度评估

纹理质量评估以图像清晰度、颜色还原度与缝合过渡平滑度为核心指标。采用图像梯度均值作为清晰度参考，在模型主要展示区域中选取典型纹理片段进行统计，最大梯度值达到 82.5，最低为 61.3，说明纹理贴图具备较强细节表现能力。色彩一致性评估对比多个视角拼接区域中 RGB 通道标准差，最高为 4.8，色差控制在较小范围内，未出现明显色带与色温漂移，纹理拼接边缘采用平滑加权融合算法处理，有效消除了不同影像亮度差异带来的缝隙问题。整体观测模型表

面色彩自然，图像无明显伪影，具备较高视觉还原效果，适用于展示类平台与城市三维可视化系统部署<sup>[5]</sup>。

### 3.5 不同地形特征区域的精度对比分析

将模型划分为五类典型地形单元进行对比，包括陡坎区、林地带、破碎带、坡地段与平台区，每类选取 3 个代表区域进行平均 Z 向偏差与点云密度统计，对比结果如表 2 所示。

表 2 不同地形特征区域建模精度对比表

地形类型	平均 Z 向误差 (米)	点云密度 (点 / 平方米)
陡坎区	0.29	1 436
林地带	0.24	1 210
破碎带	0.27	1 085
坡地段	0.18	1 568
平台区	0.13	1 675

数据分析显示平台区的 Z 向误差最小，仅为 0.13 米，点云密度也达到 1 675 点每平方米，是表现最优的区域。陡坎区误差达 0.29 米，密度下降至 1 436 点每平方米，受地形起伏与投影变形影响较大，破碎带因地物复杂与遮挡严重，点云密度最低，仅为 1 085 点每平方米且精度水平波动明显。

## 4 结束语

本文围绕复杂地形条件下的三维建模展开系统研究，构建以无人机倾斜摄影测量为核心的作业流程，涵盖数据获取和建模处理与精度评估各个环节。结果表明，该方法在高差大与地表复杂区域具备良好的几何还原能力与纹理表达效果，研究成果可为复杂地形下的地理建模与自然资源监测提供实践参考。

### 参考文献:

- [1] 姜磊,梁聪,赵旭,等.消费级无人机倾斜摄影在弃土土方测量中的应用[J].山西建筑,2025,51(24):153-156,161.
- [2] 高学森.倾斜摄影测量技术在城市大比例尺测图中的应用研究[J].工程建设与设计,2025(22):103-105.
- [3] 霍福广,黄延庆,由博,等.机载 LiDAR 融合倾斜摄影在高压线塔三维建模中的应用[J].能源技术与管理,2025,50(05):10-13.
- [4] 王懂懂,刘春.基于无人机航摄与分阶段空三的古民居实景三维建模方法[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2025,37(03):292-298,316.
- [5] 曾捷.无人机倾斜摄影测量技术在房产测绘中的应用:以住宅项目为例[J].居舍,2025(35):30-33.

# 基于多源数据融合的不动产测绘成果质量智能检测技术研究

高芳<sup>1</sup>, 王加方<sup>2</sup>

(1. 东营利久信息技术有限公司, 山东 东营 257200;  
2. 东营市七星地产评估测绘有限责任公司, 山东 东营 257200)

**摘要** 多源数据融合技术在不动产测绘质量检测中的应用逐渐成为提升成果精度与可靠性的关键途径。结合遥感影像、激光点云、地面测量与行政数据, 可构建统一的数据表达体系, 实现空间要素间的自动比对与异常识别。依托智能分析模型, 对测绘成果中的几何偏差、属性一致性及数据完整性实施快速判别, 从而显著提高质量检测效率。该技术体系能够在多类型数据协同条件下增强误差感知能力, 为不动产测绘成果的高质量生产提供有益参考。

**关键词** 多源数据融合; 不动产测绘; 质量检测; 智能分析; 数据一致性

中图分类号: P21; P29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.012

## 0 引言

随着测绘领域多源数据的快速累积, 不动产成果质量检测正逐步从传统人工核查模式向智能化方向升级。过去的检测阶段易受人经验束缚, 面对复杂地物结构和大规模数据的情况一般很难兼顾效率与稳定性。依托遥感、点云、物联网与数据库技术的不断升级, 多元渠道的数据可在统一体系下达成整合, 为打造自动化识别与校验机制打下根基。采用智能检测模型, 可将空间几何关联、属性逻辑框架与时间序列变动纳入综合判别系统, 优化误差识别的灵敏特性及适配能力。该技术路径同时也优化了质量监测手段, 有效推动不动产测绘成果在精度与可靠性上实现双重提升。

## 1 不动产测绘成果质量面临的核心技术瓶颈

不动产测绘成果在生产与质量控制过程中长期受到多重技术限制的影响, 其中最突出的问题来源于数据来源的差异性与独立性。各类测绘数据在空间精度、采集方式、更新频率及表达格式上往往存在明显差别, 导致同一地物的空间表征难以保持统一<sup>[1]</sup>。遥感影像分辨率受影像获取条件影响, 激光点云呈现非均匀密度, 地面测量受环境遮挡约束, 行政数据库中属性字段的更新周期又难以同步, 使得不同数据源在融合前就已存在先天矛盾。这样的差异不断累积, 使成果中几何形态与属性逻辑无法完全对应, 增加了质量检测中判断误差边界的复杂度。

随着不动产测绘成果的业务范围不断扩大, 地物类型呈现结构复杂、数量庞大、尺度跨度大的特点, 传统质量核查方式无法应对如此高密度的数据交互关系。空间对象之间存在重叠、嵌套、邻近、拓扑冲突等多种影响因素, 在成果检测阶段容易形成隐藏误差, 并且难以被人工经验快速识别。测绘成果通常涉及地籍宗地、建筑物轮廓、权属界址点、房屋结构部件等多维信息, 不同类型对象之间存在严格的空间逻辑关系, 一旦任一数据出现偏移或缺项, 整体数据链条便出现断裂, 进一步增加了成果一致性审查的难度。此外, 数据传输环节常见的格式转换、投影变换与坐标系统不统一, 也会引入系统性偏差, 使得质量识别模型难以准确捕捉误差来源。在大规模数据环境下, 数据采集、处理与成图之间的时间差易导致“时间错位”: 不同部门、批次或设备获取的数据处于不同时相, 难以同步反映地块分割、建筑改扩建等现实变化, 使质量检测难以区分真实变化与数据缺陷。此外, 现场作业中传感器姿态不稳、测量轨迹密度不足、激光点云回波受材料反射特性干扰等问题, 易引发局部噪声、边界顿挫或结构不连续, 对智能检测的识别精度提出更高要求。

## 2 多源数据融合在质量认定中的关键衔接方式

在城市不动产测绘模型构建中, 多源数据融合技术的数据筛选与前置处理是达成高精度和高效率模型搭建的核心步骤, 数据选取的科学性及合理性直接影

作者简介: 高芳 (1991-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 测绘工程 (不动产测绘)。

响后续模型的精准度与可信度,在筛选的阶段内,需整合考量数据的时间有效性、覆盖维度、精细度与来源可靠程度。多源数据在不动产测绘质量认定领域形成的核心价值,体现为其可构建更完备的空间表征体系,但需要达成这一流程,数据间的连接模式应具备稳定性及可操作性,不同渠道的数据在空间基准、尺度分辨率及表达结构层面通常有差异,为此必须通过统一坐标基准、参数化变换模型和精细化配准策略来搭建可融合的基础平台<sup>[2]</sup>。遥感影像和激光点云的匹配常以特征点识别、密度均衡及表面重建为手段,完成对同一地物的尺度对齐,行政属性数据和地面测量成果的衔接对接更侧重借助逻辑字段的映射与编码校验,让空间实体能同步具备几何位置及权属属性的双重呈现,给后续质量审核提供可信辅助。

在多源融合实施阶段里,数据间存在的异构现象是制约质量认定成效的核心要点,旨在降低差异的累积,必须得构建多源数据的结构化模型,将点云、影像、栅格及矢量信息整合入统一的数据框架之中;地物对象能借助拓扑关系、空间邻域约束、语义分类规则等路径构建关联,促使系统实现识别地物间各类地物内部联系的目标。通过融合模型的动态权重调整,可根据数据可靠度、采集时间、空间精度等指标优化不同数据源的占比,使最终融合结果兼具稳定性和敏感性。在这一过程中,数据噪声抑制与异常点剔除策略也发挥重要作用,通过滤波算法、点云重投影和空间一致性校核,可显著减轻原始数据质量差异带来的影响。

质量认定的最终落脚点在于对融合数据的逻辑一致性与几何准确度进行自动判断,因此衔接方式必须服务于智能检测策略的运行机制。为了让模型具备更高的识别精度,需要在融合阶段预先嵌入空间规则约束,如建筑轮廓的闭合性、宗地界线的拓扑连续性、房屋结构部件与主轮廓之间的层级关联等。从多源数据中提取出的高维特征经过统一表达后,可输入到智能分析模块,实现几何偏差分析、属性匹配判别与结构稳定性识别等任务。当融合方式能够保证空间结构的完整表达与数据间逻辑的连贯性,质量认定过程才能发挥预期的精度水平,使不动产测绘成果在复杂场景下仍具备清晰的检验依据与可靠的识别结果。

### 3 智能检测模型的构建与误差识别策略

智能检测模型在不动产测绘质量判定中的构建依赖多维特征的深度表达与空间规则的结构化编码。融合后的多源数据需要经过特征提取、尺度还原与语义分层,将点云几何形态、影像纹理信息、矢量结构关

系及属性字段内容转化为可计算的特征矩阵。通过建立多通道卷积结构、图神经网络拓扑编码单元以及基于注意力机制的权重分配模块,可让模型在处理复杂空间对象时保持对关键细节的敏感度,并能够捕捉地物间的内在逻辑关系<sup>[3]</sup>。建筑物轮廓的边界形态、宗地界址点的拓扑稳定性、房屋部件的层级结构等信息在模型中以结构化方式嵌入,使系统具备针对性判定能力,为后续的误差识别提供可靠的数据基础。

在误差识别过程中,模型需要对多源数据中的几何偏移、属性冲突与结构性异常进行分类判别,并针对不同类型误差建立独立的识别路径。几何误差的提取通常依赖空间距离计算、坡度变化检测与点云密度分布分析,通过将实际测绘数据与融合后的空间参照模型进行逐点对比,可识别偏移、错位、变形等问题。属性层面的矛盾则通过语义一致性校核与字段逻辑推断实现辨识,系统在读取权属信息、地类编码或建筑属性字段时,可依据规则集判断是否存在冲突或逻辑断层。对于空间结构异常,模型会利用拓扑关系矩阵与图结构分析技术检测断裂、重叠、空洞或缺环等问题,使数据中潜在的结构性风险得以暴露。

为了提高模型对复杂场景的适应能力,需要构建动态更新机制,使系统能够在处理不同地区、不同批次、不同数据源时保持稳定性能。通过在线学习策略与自适应阈值调控模块,模型可以根据数据环境调整判断灵敏度,使误差识别在高密度建筑区、地形起伏区或数据噪声较大的区域仍能保持有效响应。对低质量点云的补偿、影像纹理模糊区域的强化、矢量数据断裂位置的边界延伸推断等技术,可进一步提升模型对异常信息的捕捉能力,使误差识别过程呈现出更强的精细化与自动化特征,为不动产测绘质量检测提供稳定的技术支撑。

### 4 融合数据驱动下的成果质量校核流程优化

在实施城市不动产测绘模型的系统功能检验流程之际,采用的多源数据组涵盖实测数据和网络公开数据集,合作的城市规划部门是实测数据的核心供给主体,囊括了前沿的遥感影像以及GIS地理信息,保障数据的实时状态与精准度;获取公开数据集是从国际地理信息数据仓库实现,涵盖全面的城市规划及土地利用方面的资讯,为模型提供多层面的验证方式。融合数据驱动支撑下的成果质量校核流程在构建环节需将多源信息的协同效能最大化,使得校核环节能在统一框架下实现连续且精准的质量判定,融合后的数据在空间表达、语义关联及精度管控层面具备较强契合

性,能够作为审核流程核心依据<sup>[4]</sup>。借助融合数据充当对照标杆,质量校核系统导入测绘成果后能自动完成初步筛查,把宗地边界、建筑物轮廓、界址点坐标与属性字段等所有内容同融合模型逐条对接,点云与影像融合形成的高精度空间框架可助力系统捕获微小的边界位移,矢量数据与行政信息的联合展示可发现字段间的逻辑矛盾,让校核流程在数据接入系统的初始阶段就拥有较强的异常甄别能力。

当校核流程进入中段环节,需要通过规则库、统计模型与智能分析模块构建多层次的校核机制。空间拓扑校核以融合数据为基础,通过邻接关系、面域完整性、线面一致性以及地物间的依附结构判断成果数据中是否存在形态破裂或结构冲突。几何精度校核则依托误差阈值模型,将原始成果与融合基准进行偏差量化,形成偏移矩阵,为系统提供是否超出容差范围的依据。属性校核依托字段逻辑模型与语义规则集,通过字段交叉比对判断地类编码、面积数值、权属信息是否存在冲突、缺项或不合理变动。在这些过程中,融合数据起到强化检验基础的作用,使不同层级的校核结果具备更高的参考精度。

在最终阶段,校核流程需要通过集成分析机制将分散的校核结果转化为可执行的质量判定输出。系统根据融合数据构建的多维质量指标体系,将几何偏差、属性矛盾与结构异常进行综合加权,生成对成果的完整质量评价。融合数据在这一阶段发挥的数据补偿功能,可帮助系统在局部缺失、噪声集中或时序不一致的区域进行再次校核,通过补充点云高程、影像纹理与矢量边界信息,实现空间表达的精确重构。经过优化后的校核流程具备连续性、高灵敏度与强鲁棒性,使成果质量的评估过程能够在复杂场景中保持稳定输出,为不动产测绘成果的准确性与可靠性提供充分的技术支持。

## 5 基于融合与智能检测的成果质量提升总结

基于多源融合与智能检测技术构建的质量提升体系,使不动产测绘成果在空间表达、属性一致性与结构完整性方面获得更高的稳定性。融合数据的引入改变了传统质量控制依赖单一信息源的局面,通过整合影像、点云、矢量与行政属性,实现多维度、多角度的综合校核,使成果能够在更丰富的空间特征支撑下接受质量检验<sup>[5]</sup>。多源特征在融合框架中的协同运作,使细微边界偏移、局部噪声干扰、逻辑字段错配等问题在早期阶段即可被识别,从而减少后续加工环节可

能产生的误差累积,提升整体质量控制链条的稳定性。

智能检测模型的嵌入进一步强化了成果质量提升的技术路径。模型依托深度特征表达、空间规则约束与拓扑结构编码,使系统能够在高复杂度场景中保持精准判断能力。建筑物轮廓的形态异常、宗地界址点的偏移、属性字段的矛盾关系及地物结构的断裂现象均可通过模型实现自动化识别。随着在线学习机制与动态阈值调节策略的应用,模型对不同地区、不同数据源的适应性持续增强,使质量检测不再受限于固定参数,而是能够根据数据特征自动调整检测强度。

集成数据与智能识别的结合,促使质量校核过程呈现出系统化、自动化以及精细化的特点,校核流程依托统一数据基准开展实施,借助分层校核、交叉验证与误差定位相关技术手段,优化成果复核的全面性与精准性,结构化的质量指标体系赋予各类误差以可量化、可追踪的判定标准,给质量管控搭建了透明化的数据支撑基础,凭借结合数据的弥补能力以及智能模型的高灵敏性,以往难以明确的空间异常实现有效甄别,处于复杂场景时成果的质量实现增强,让不动产测绘成果在日益扩大的应用需求里维持稳健可靠的表现,为高水平测绘系统的搭建提供坚实后盾。

## 6 结束语

多源数据融合及智能检测技术的协同应用,助力不动产测绘成果的质量管控体系构建起更全面的技术链条,信息融合后的一体化呈现提升了空间数据的稳固性,智能识别模式强化了误差检测的精细度,让质量复核拥有更高的可靠度。依托多类数据的协同支撑,不动产测绘成果可在复杂场景里实现准确性与一致性,为高质量测绘作业提供持久动力。

## 参考文献:

- [1] 周洁,连欣.不动产测量中测绘工程技术的应用分析[J].数字技术与应用,2025,43(10):135-137.
- [2] 温贵忠.不动产测绘图像高清晰度增强处理技术研究[J].科技资讯,2025,23(20):188-190.
- [3] 卢春燕,卢萌萌.基于多源数据融合技术的城市不动产测绘模型构建研究[J].智能城市,2025,11(08):86-88.
- [4] 温贵忠.不动产登记中测绘与规划面积的差异[J].大众标准化,2025(12):115-117.
- [5] 祝太岳.基于数字孪生的多源数据融合不动产测绘可视化系统[J].北京测绘,2024,38(08):1146-1151.

# 内河航道护岸工程地基处理设计分析

王心雨

(华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210001)

**摘 要** 本文基于典型内河航道地质、水文条件及现有护岸工程实际情况, 对地基力学特性进行了系统分析, 并提出护岸工程地基处理设计原则。针对土体加固、排水降水、桩基与复合地基等技术方法, 结合实际参数与施工条件进行设计探讨, 强调设计目标、技术选择原则、规范标准应用及环境经济影响评估。通过专业化设计方法, 旨在为内河航道护岸工程地基处理提供有益参考。

**关键词** 内河航道护岸工程; 地基处理; 桩基; 土体加固; 排水降水

**中图分类号**: TV8

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.013

## 0 引言

内河航道护岸工程作为水运基础设施的重要构成部分, 其结构稳定性直接依赖地基承载能力和抗沉降性能。随着航道通航能力提升以及岸线加固需求增多, 护岸工程施工面临软土层厚、地下水位高、沿岸荷载复杂等问题。以典型长江中下游航段为例, 护岸地基平均土层厚度能达 6 ~ 15 m, 当中粉质黏土占 50% ~ 70%, 地下水位离地面 0.8 ~ 2.0 m, 标准贯入试验 (SPT) 数值  $N=2 \sim 8$ , 说明土体软且可塑性强。本文针对地基承载力欠缺、沉降和滑移风险, 从地质、水文、力学特性以及现有护岸工程问题着手, 剖析地基处理设计方法, 为后续施工提供科学依据。

## 1 内河航道护岸工程地基现状分析

### 1.1 地质条件及水文特征

护岸沿线大多处在河漫滩沉积区域, 地层主要是第四系冲洪积层, 含有粉质黏土、粉砂以及部分砂层, 平均土层厚度 6 ~ 15 m, 地下水位高, 季节波动显著, 夏季水位能到离地面 0.5 m 处, 冬季降到 1.5 m。地质钻探数据表明黏土液限  $WL=35\% \sim 45\%$ , 塑限  $WP=20\% \sim 25\%$ , 塑性指数  $IP=15 \sim 25$ , 表明软土可塑性强、易出现长期沉降, 河道水流速约 0.8 ~ 1.2 m/s, 洪水期可达 3 m/s, 对岸坡稳定性提出很高要求, 该区域冲刷与淤积交替出现, 河床容易出现坡脚侵蚀, 增加护岸地基承载风险<sup>[1]</sup>。

### 1.2 地基力学特性分析

典型软土抗压强度  $\sigma_c$  约为 50 ~ 120 kPa, 剪切强度参数内摩擦角  $\phi=18^\circ \sim 25^\circ$ , 黏聚力  $c=20 \sim 40$  kPa,

弹性模量  $E=3 \sim 10$  MPa, 压缩模量  $E_s=2 \sim 5$  MPa。标准贯入试验 (SPT) 表明  $N$  值大多低于 10, 沉降系数大概是 0.05 ~ 0.15 cm/kPa, 长期沉降明显, 承载力计算采用 Terzaghi 极限承载理论及浅基础经验系数, 预计在荷载 200 kPa 情形下可能产生总沉降 50 ~ 120 mm, 且伴随差异沉降 15 ~ 30 mm, 有潜在滑移风险存在<sup>[2]</sup>。地基孔隙比  $e$  取值范围是 0.7 ~ 1.2, 饱和度近乎 100%, 说明软土渗透程度低, 降水和加固措施必要。

### 1.3 现有护岸工程问题与风险分析

现存混凝土板桩或石砌护岸普遍有板桩沉降不均、滑移以及局部破坏情况, 主要因地基软、承载力不够以及地下水冲刷。例如: 30 ~ 50 m 长护岸段在高水位时沉降累积有 50 ~ 100 mm, 局部滑移角约  $3^\circ \sim 5^\circ$ , 桩顶高差能到 0.08 ~ 0.15 m。护岸基础大多是浅基础或轻型复合基础, 没充分顾及软土长期固结沉降以及孔隙水压力变化, 致使结构应力集中, 风险分析表明, 要是不做系统地基处理, 护岸在洪水冲刷及船舶波浪荷载作用下会出现裂缝、滑移和整体失稳<sup>[3]</sup>。

## 2 护岸工程地基处理设计原则

### 2.1 设计目标与基本要求

护岸地基处理设计核心目标是确保结构长期稳固、沉降可控以及荷载传递可靠, 兼顾施工可行与经济, 具体要求包含承载力要满足设计荷载不低于 250 ~ 300 kPa, 确保护岸板桩或复合基础在船舶波浪和洪水荷载作用下不出现局部破坏; 总沉降控制在 50 mm 以内, 差异沉降小于 15 mm, 防止板桩错位或护岸裂缝; 桩基或复合地基纵向沉降差不超 1/300, 确保整体平整性; 施工周期要和河道航运窗口适配, 减少对通航影响, 施工时

**作者简介**: 王心雨 (1998-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 船闸与航道工程结构设计及概预算编制。

要严格把控环境指标,例如:粉尘排放 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ 、施工噪声 $\leq 75 \text{ dB(A)}$ ,结合现场监测调整施工节奏,实现安全、经济以及环境友好型地基处理。

## 2.2 地基处理方法选择原则

地基处理方法选择需遵循“安全可靠、技术成熟、经济合理、施工便捷”的原则,结合软土力学特性和河道工程特点做决策,软土加固能用高模量水泥注浆、深层搅拌桩或预压固结技术,其中搅拌桩桩径 $0.6 \sim 1.0 \text{ m}$ 、间距 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ ,能大幅提升土体承载能力与刚度;排水降水措施要结合地下水位高程、渗透系数 $k=1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 及季节性水位波动来设计,确保孔隙水压力有效降低;桩基及复合地基适用于承载力低于 $200 \text{ kPa}$ 或沉降控制要求严格的段落,要综合考量土层厚度、桩长以及桩间距,同时比选多方案,综合施工难度、成本、环保影响以及技术风险,确定最优处理方案<sup>[4]</sup>。

## 3 内河航道护岸常用地基处理方法设计

### 3.1 土体加固技术

软土加固常用方法包括深层搅拌桩(DSS)和高模量水泥土注浆,这些方法主要针对软弱黏土层厚度 $6 \sim 12 \text{ m}$ 的护岸段,施工前要做钻探和标准贯入试验(SPT)或静力触探(CPT)明确土层厚度、土体类别、承载特性以及地下水位状况,并结合土体含水程度、液限以及压缩模量设计桩径 $0.6 \sim 1.0 \text{ m}$ 、桩间距 $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ 的加固布置方案,保证覆盖全部软弱土层。深层搅拌桩施工顺序是桩位测量 $\rightarrow$ 搅拌桩机下入土层 $\rightarrow$ 分层注入水泥浆或水泥粉煤灰混合浆体 $\rightarrow$ 搅拌均匀,每层浆体厚度 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ ,浆体水灰比 $0.35 \sim 0.45$ ,加入粉煤灰或矿渣 $20\% \sim 30\%$ ,能让搅拌桩抗压强度达到 $2 \sim 5 \text{ MPa}$ ,弹性模量 $E=50 \sim 150 \text{ MPa}$ 。施工时要监测桩体水平偏移 $\leq 50 \text{ mm}$ 、垂直度 $\leq 2^\circ$ 、桩顶高差 $\leq 10 \text{ mm}$ ,以免桩体错位致使承载力不均或局部沉降有差异<sup>[5]</sup>。如表1所示,桩径大、浆体配比合理,搅拌桩抗压强度和弹性模量越高,能有效提升软土承载能力。

施工控制包含浆体注入量以及搅拌参数管理,每根桩要记录浆体注入量(一般控制在 $0.8 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{m}$ 桩深)以及注浆压力 $0.6 \sim 1.2 \text{ MPa}$ ,搅拌转速能依照土体阻力以及浆体流动性来调节,保证浆体和土体充

分混合,防止出现空洞或分层状况。加固完要做原位承载力检测,如低应变波速检测、圆柱体抗压试验或现场静载试验,依据桩强度和土体刚度调整后续施工次序,施工顺序依照“由下至上、由远及近、分区施工”,每一区段完成后需进行沉降监测和孔隙水压力监测,必要时结合预压固结技术提高早期刚度,特别是在高液限黏土区域,能设置桩间排水砂井或垂直排水管,加快孔隙水释放,确保土体应力状态可控。

加固施工管理还包含材料质量以及环境控制,水泥浆和掺合料要符合标准规范,水泥强度等级 $\geq \text{P} \cdot 042.5$ ,粉煤灰要细度 $> 400 \text{ m}^2/\text{kg}$ ,防止浆体泌水以及早期流失,施工现场要对桩机位置、桩体垂直度、浆体注入压力及流量做连续记录,并建立施工日志,实现过程可追溯。施工时粉尘排放 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ 、噪声 $\leq 75 \text{ 分贝(A)}$ ,结合河道航运窗口组织分段施工,保证施工安全、技术参数可控以及施工过程标准化。

### 3.2 排水与降水技术

在内河护岸施工中,软土厚度大且地下水位高,要布置纵向排水管(砂管或毛管)以及地表排水系统,排水管设计间距 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ ,长度覆盖软土厚度,孔径 $10 \sim 15 \text{ mm}$ ,渗透系数 $k=1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ,保证降水均匀。施工前要做地下水位测量以及土体渗透系数测试,还布置施工监测点,利于随时知晓孔隙水压力和水位变动,施工顺序是测量布点 $\rightarrow$ 安装滤砂套管 $\rightarrow$ 下放抽水管 $\rightarrow$ 并联机组抽水,水泵抽水能力按设计流量 $Q=50 \sim 100 \text{ L/s}$ 配置,根据土层厚度和地下水位调整井点数量及深度。管道末尾要设置滤网,防止细土堵塞,施工期定期检查并清理,确保系统稳定运转。

排水系统施工需与护岸结构施工协调,预防桩基或加固桩施工和排水管道布置产生冲突,施工时可采用原位渗透系数测试结果调整排水管间距或布置密度,保证每米护岸段降水均匀,施工中应记录抽水量、泵速及水位变化,结合土体沉降监测做动态调整,防止局部降水过多或土体受扰。针对厚度超 $6 \text{ m}$ 的软土区域,要分层监测沉降速率和差异沉降,必要时设临时排水沟或集水井辅助排水。

排水施工结束后,要在护岸结构下面设置长期排水设施,像排水层、毛管或集水沟,确保基底孔隙水长久管控,施工进度材料挑选要符合耐腐蚀与渗透性能需求,

表1 深层搅拌桩施工参数与力学性能

桩径(m)	桩间距(m)	浆体水灰比	掺合料比例	抗压强度(MPa)	弹性模量E(MPa)
0.6	1.5	0.35	粉煤灰20%	2	50
0.8	2	0.4	矿渣30%	3.5	100
1	2	0.45	粉煤灰+矿渣25%	5	150

砂管或毛管孔径 10 ~ 15 mm, 管材耐压 ≥ 1.5 MPa, 滤砂套管孔径 1.0 ~ 1.5 mm。施工中所有水位和孔隙水压力数据需归档, 用于后续沉降分析和土体状态评估, 同时保证施工环保要求达标准, 减少河道水位波动及周边环境的影响。

### 3.3 桩基及复合地基技术

在承载力小于 200 kPa 或沉降控制要求严格的护岸段, 应采用预制混凝土桩、灌注桩或钢管混凝土桩, 如表 2 所示。桩径设计为 0.4 ~ 0.8 m, 桩长覆盖软土层到基岩或密实砂层, 桩间距 1.5 ~ 3.0 m, 具体间距能依照桩承载力与土体承载等级来调整。施工前需对桩位进行高精度测量, 桩基施工顺序是桩位放样 → 钻孔或静压桩 → 灌注或就位预制桩 → 桩顶连接及桩帽板施工, 桩顶高差控制 ≤ 20 mm, 桩身垂直度 ≤ 2°,

保证整体沉降均匀, 桩施工能用静压桩机或振动下桩, 施工时要装 Osterberg 仪测桩端承载力, 计算设计承载力和安全系数 1.2 ~ 1.4, 监控桩身承载性能。施工要记录桩沉降量、桩身垂直度、桩顶高差和桩端承载力, 确保施工数据能追溯, 根据地下水位和孔隙水压力实时调整施工参数, 防止桩身受水压作用致使施工出现异常情况。

复合地基施工要对桩间土体加固和回填密实度做精细化控制, 桩间回填土一般厚度是 0.3 ~ 0.5 m, 每层回填土需夯实至干密度 95% ~ 98%, 同时监测桩间孔隙水压力, 防备局部沉降扎堆或土体搅扰, 桩帽板施工前, 应测量桩顶标高, 并借桩帽调节板面高程, 必要时在桩间做注浆加固, 保证桩土板整体刚度均匀。施工时要同步记录桩顶高差、回填土密实程度以及桩

表 2 内河护岸桩基主要参数

桩型	桩径 (m)	桩长 (m)	桩间距 (m)	桩端承载力 (kPa)	安全系数	桩顶高差 (mm)	垂直度 (°)
预制混凝土桩	0.4 ~ 0.8	覆盖软土至基岩	1.5 ~ 3.0	200 ~ 400	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2
灌注桩	0.5 ~ 0.8	12 ~ 18	1.5 ~ 2.5	250 ~ 450	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2
钢管混凝土桩	0.4 ~ 0.6	10 ~ 15	1.5 ~ 2.0	220 ~ 400	1.2 ~ 1.4	≤ 20	≤ 2

端承载能力, 并结合地下水位监测数据, 控制桩基施工过程中土体受水压力变况, 防止局部液化或孔隙水压力异常, 复合地基施工顺序要依照“分区施工、先中心后周边、由下至上”的原则, 每一区段完成后进行沉降及应力监测, 给后续护岸结构施工提供精准基础参数, 确保桩—土—板体系施工精度合乎设计要求。

### 3.4 环境与经济影响分析

地基处理施工要综合考量环保要求与经济合理性, 在土体加固施工中, 水泥浆用量 ≤ 300 kg/m<sup>3</sup>, 并可掺入 20% ~ 30% 粉煤灰或矿渣, 来降低碳排放且提高材料利用率, 桩基施工用预制桩, 能让工期缩短 20% ~ 30%, 降低河道施工扰动, 并降低施工现场占地面积。排水降水能搭配回用系统, 把抽完水的地下水用于施工灌浆或土体加湿, 降低河道水位波动以及对周边生态造成的影响。

在经济分析中, 地基处理中的土体加固施工成本约 1 500 ~ 2 500 元/m<sup>2</sup>, 桩基及复合地基施工成本约 2 000 ~ 3 000 元/m<sup>2</sup>, 按照土层厚度、软土性质和荷载等级动态调整处理方案, 施工方案挑选要经多方案比选, 综合施工难度、材料消耗、设备需求、环保措施及河道航运窗口影响, 保证地基处理技术优化、施工经济合理, 同时符合护岸设计承载能力、沉降控制以及施工可行要求, 实现技术、经济与环境兼顾。

## 4 结束语

内河航道护岸工程地基处理设计需综合地质、水文、土力学特性及现有护岸问题, 明确设计目标和沉降控制要求, 选择安全、经济、可施工的地基处理方法。通过土体加固、排水降水及桩基复合地基等技术手段, 可系统提高护岸地基承载力, 降低沉降和滑移风险。设计中应严格控制施工精度、监测地下水位及孔隙水压力, 确保地基处理措施科学合理, 为内河航道护岸工程长期稳定提供技术保障。

### 参考文献:

- [1] 牛芸, 吕义港. 长螺旋钻孔灌注桩在内河航道养护工程中的设计研究 [J]. 珠江水运, 2020(22):65-66.
- [2] 乐星华, 魏必文. 航道护岸软基处治中土工格栅加筋技术的应用 [J]. 珠江水运, 2023(19):33-35.
- [3] 唐凤肖, 吕思宜. 内河航道软基处理方案比选研究 [J]. 珠江水运, 2025(12):107-109.
- [4] 蔡志斌. 劲性复合桩在船闸地基处理施工中的应用 [J]. 珠江水运, 2025(17):37-39.
- [5] 洪晶晶, 赵嘉俊. 在建隧道上方航道护岸软弱地基处理方案研究 [J]. 中国水运, 2025(16):74-75, 78.

# 水利工程中生态护岸施工技术应用探讨

李耀军<sup>1</sup>, 陈正友<sup>2</sup>

(1. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉 430040;

2. 南水北调中线水源有限责任公司, 湖北 十堰 442700)

**摘要** 在水利工程中, 传统刚性护岸结构虽然具备较强的防护能力, 但容易破坏河道自然生态系统, 不利于生物多样性维持。基于此, 本文以某流域治理工程为例, 深入研究了生态护岸施工技术方案, 详细探讨了生态袋堆放工艺, 包括基面处理、袋体填充、分层堆砌、锚固与排水等技术要点。工程实践经验表明, 生态护岸在防洪抗冲刷、水质改善、植被恢复及生物多样性提升方面均取得显著成效, 经济成本较传统护岸降低约15%, 具有良好的生态效益和经济效益。

**关键词** 水利工程; 生态护岸; 生态袋; 坡面排水; 植被施工

**中图分类号**: TV5

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.014

## 0 引言

随着我国经济社会的持续发展与生态文明建设战略的全面推进, 水利工程不仅承担着防洪排涝、供水灌溉与水资源综合利用等传统职能, 也被赋予了生态保护与环境修复的重要使命。在水利工程建设过程中, 护岸工程作为保障河道稳定、防止水土流失和维持堤防安全的关键环节, 长期以来多采用浆砌石、混凝土等刚性护岸结构, 此类护岸结构在结构强度、防护效果等方面具有一定优势, 但往往忽视了河流自然演替规律和生态环境需求, 易造成河道景观单一、水生生物栖息环境破坏和护岸生态系统退化等问题<sup>[1]</sup>。在“绿色水利”“生态优先”的理念指引下, 生态护岸技术引发广泛关注。生态护岸即在满足护岸工程基本功能前提下, 综合利用植物、土工材料和自然基质等措施, 构建与自然相协调的岸带防护体系<sup>[2]</sup>, 不仅可有效降低水利工程建设对河道生态系统的破坏, 还能恢复和重建水生生物栖息环境, 实现水利工程护岸工程防护功能与生态效益的统一。

## 1 工程概况

某水利工程位于某流域中游河段, 属于中小型河流域治理工程。该工程的治理河段全长10.0 km, 流域面积为17 183 km<sup>2</sup>, 年均降水量为400~600 mm, 蒸发量为1 500~2 000 mm。河道地貌为冲击河谷, 河道平均宽度为120 m, 纵比降为2.3%, 河道流速为4.0~6.0 m/s。流域河道河床主要砂卵石构成, 渗透性强, 易出现冲刷变形现象。

工程设计采用生态护岸施工技术进行河道整治, 工程建设目标包括恢复水利流域生物多样性、增强水体自净能力。通过对比常见生态护岸结构型式, 包括植被型生态混凝土护坡技术、网格生态护坡技术、三维植被网护坡技术、厚层基材喷播技术等, 该工程确定植被型生态混凝土护坡技术, 采用柔性生态袋和三维植被网垫组合技术提升水体自净能力和自然生态<sup>[3]</sup>。

## 2 水利工程中生态护岸施工方案设计

### 2.1 技术要素

在工程中, 技术方案由植被护岸、护岸基质材料和护岸结构形式三部分组成。

植被护岸采用植物喷播技术, 先锋种选用草木樨与披碱草, 喷播厚度为10.0~20.0 mm, 草种喷播密度为25 g/m<sup>2</sup>。先锋草种可在播撒30 d覆盖率达70%。固土草种选用香根草和野牛草, 固土草喷播密度为30~35 g/m<sup>2</sup>。固土草根系深度可达1.2 m, 可满足河岸护坡固土性能要求。

生态袋选用柔性、高密度聚乙烯材料编制而成, 具有抗紫外线、抗老化、抗酸碱盐、抗微生物侵蚀等特点。同时, 生态袋具备透水不透土过滤功能, 既能防止填充物流失, 又能确保水分交换, 满足植物生长所需水分要求。在工程中, 设计采用2.0~5.0 mm厚生态袋, 内部填充粒径2.0~5.0 mm级配砂砾(砂与种植土比例为3:7), 生态填充后尺寸为580 mm×320 mm×145 mm(长×宽×高)。

三维植被网采用聚丙烯材料编制而成, 网片开孔

**作者简介**: 李耀军(1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水利工程建设与管理。

率为 90%，抗拉强度为 40 kN/m，与生态护岸植被结合后形成加筋复合结构<sup>[4]</sup>。

护岸坡脚采用生态袋碎石垫层，按 1.25 坡度设置 900 mm×340 mm×150 mm 生态袋护岸，堆砌至 2.15 m 高度后按 0.7 坡度生态袋挡墙至 3.2 m 高程。其中，坡脚 2 层为生态袋碎石垫层，碎石垫层上堆砌砂石填料生态袋。

## 2.2 生态护岸设计

为确保生态护岸方案的科学性，从抗滑稳定性、抗冲刷能力、经济性等方面进行计算验证。

根据工程设计方案，可计算生态护岸抗滑稳定性系数  $K_s$ ：

$$K_s = \frac{cL + W \cos \theta \tan \phi}{W \sin \theta} \quad (1)$$

式(1)中， $c$  为土体黏聚力，取值 18 kPa； $L$  为滑动面长度，取值 8.5 m； $W$  为边坡重力，计算值取值 52.6 Kn/m； $\theta$  为边坡倾角，取值 26.6°； $\phi$  为内摩擦角。取值 28°。

根据式(1)，计算生态护岸抗滑稳定性系数  $K_s$  为 1.42，满足抗滑稳定性大于 1.25 要求。

生态袋抗冲刷能力验证采用曼宁公式计算，可表示为：

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)中， $v$  为生态袋抗冲刷设计流速； $n$  为曼宁系数，即生态袋表粗糙系数，取值 0.035； $R$  为水力半径，取值 800 mm； $J$  为纵坡度，取值 0.0 024。

根据式(2)计算得出生态袋护坡冲刷流速为 1.93 m/s，抗冲刷强度设计值为 20.0 kg/m<sup>2</sup>，满足设计要求。

在验证生态护岸设计可行性的基础上，生态袋成本按 30 元/m<sup>2</sup>，三维植生网垫按 15 元/m<sup>2</sup> 计算，单位面积成本为 45 元，显著低于硬质护岸成本 53.0 元/m<sup>2</sup>，表明生态护岸技术方案经济效益良好。

## 3 生态护岸施工技术应用研究

### 3.1 施工准备

根据工程岩土勘察文件和工程设计，生态护岸基础设计埋深为 1.2 m 时可满足最大冲刷深度要求。根据工程设计，该工程河堤坡脚设计采用生态碎石垫层，按设计坡度 0.4 堆砌挡墙至 2.15 m。2.15 m 至坡顶按 0.7 坡度堆砌生态挡墙。其中，坡脚挡墙 2 层堆砌生态碎石垫层，生态袋内装填碎石后码放，坡脚挡墙以上坡顶装填砂土混合料生态袋<sup>[5]</sup>。

施工前，施工单位抽水疏浚河道，整平并夯实护岸基面。现场放线确定生态袋位置和标高。为提高护岸

基层抗侵蚀性能，施工单位在护坡清表时按 5% 比例掺入石灰稳定剂。护岸基面处理完成后，调整生态袋线形，按坡面分级结构划分种植区域，分级坡高 500 mm，宽度 2 000 mm。

本工程施工中，为确保生态袋挡墙稳定性，施工单位采用 ZDY-3500 型钻机取样护岸基层土壤并进行土壤分析，根据抗冲刷性要求，掺入 5% 石灰固化剂进行护岸表层土壤改良，将护岸基层强度提高至 1.8 MPa。基层改良处理后，采用 YZD-100 型压实机分层压实护岸，分层压实厚度为 150 ~ 200 mm，压实度要求 ≥ 95%，防止后续生态袋堆砌施工发生不均匀沉降<sup>[6]</sup>。

### 3.2 生态袋堆放施工

生态袋堆放施工是生态护岸建设的核心环节，其施工质量直接决定了护岸结构的稳定性和后期生态效益。在本工程中，施工单位结合区域水文地质条件，制定了较为完善的生态袋堆放工艺与质量控制体系，主要包括袋体填充、分层堆砌、锚固措施及现场监测等环节。

#### 3.2.1 生态袋装填施工

护岸基面清理完成并经石灰固化处理后，施工单位进行生态袋的填充与运输工作，袋体内填充材料采用 2 ~ 5 mm 的级配砂卵石和种植土混合料，比例控制在 3:7，以保证生态袋既具备足够的抗冲刷能力，又能为植物生长提供必要的养分。填充后的生态袋重量保持在 40 ~ 45 kg 之间，通过机械压实和人工辅助整形，确保袋体敦实饱满。袋内填充材料级配均匀，避免袋体受力不均而出现局部滑移失稳现象。

生态袋的填充质量是堆砌效果的前提。袋体应在施工现场统一进行装填与检测，混合料含水量保持在最佳含水量的 ±2% 范围内，以避免袋体因过湿而沉降或因过干而无法成型。袋口通过黑色抗紫外线扎口带扎紧，并采用双线缝合，以保证袋体在运输与堆砌过程中不出现开裂或漏料现象<sup>[7]</sup>。

#### 3.2.2 生态袋堆砌施工

生态袋堆砌过程中，坡脚部位设置 2 层碎石生态袋垫层，作为整体结构的承重与排水基础。其余各层则采用填充砂土混合料的生态袋，以“一丁一顺”方式交错堆砌，形成交错结构，确保生态袋挡墙分层有效分散应力，避免形成贯通性薄弱面。每层堆砌完成后，均需进行机械夯实。为确保生态袋挡墙稳定，防止生态袋失稳，施工单位分层打设  $\phi 16$  mm 钢锚杆，间距控制在 1.0 ~ 1.2 m，以增强整体结构的抗滑移性能。堆砌过程中，生态袋之间通过聚丙烯材质的高强度连接扣固定，形成整体化的受力体系。

待袋体堆砌至 2.15 m 高程后，施工坡比由 1:2.5 逐渐调整至 1:0.7，形成生态袋挡墙，再向上至 3.2 m

时恢复为1:2.5坡比。堆砌施工过程严格执行“逐层夯实、逐段施工、动态监测”的原则,确保工程整体线形顺直、稳定。生态袋挡墙堆砌过程中,为确保线形平顺,防止出现“鼓肚”或“凹陷”现象,现场施工人员随时调整生态袋位置,确保挡墙结构整体美观与受力均匀性。

考虑到工程段内河流流速较大,对生态袋挡墙冲刷作用显著,为提高生态袋挡墙稳定性,在生态袋堆砌完成后,施工单位采用钢锚杆与连接扣形成多向加固。连接扣采用具有倒钩特性的棘爪设计,可保证生态袋在受力过程中紧密咬合,并能够防止因不均匀沉降或水流冲击导致的整体滑移。根据相关试验数据,单个棘爪的抗剪切力不小于360 N,可满足本工程的抗冲刷与抗滑移需求。为避免生态护岸挡墙局部锚固不到位出现滑移现象,施工单位在坡脚位置加密锚杆布设,并在关键节点采用钢筋网加固,以此增强护岸挡墙整体抗滑移性能。

### 3.2.3 坡面排水与防渗施工

为防止护坡坡体内部积水对生态袋产生额外静水压力,施工单位在坡顶设置截水沟,并在护坡内部设置横向盲沟,以减小静水压力和实现快速排水。坡体回填材料采用透水性较强的砂砾土,在生态袋与土体结合处增设三维植被网垫,以增强坡体抗剪强度和排水能力。

### 3.3 植被施工与养护

待生态袋堆放施工完成后,施工单位及时开展护坡植被撒播和养护管理,通过恢复护坡植被固结坡面岩土、控制水土流失并增强边坡稳定性。植被播撒施工采用机械喷播和人工点播结合方式,常水位以上区域机械喷播高羊茅、黑麦草和三叶草混合草种,草种喷播量为 $25\text{ g/m}^2$ ,喷播完成后覆盖30 mm稻草层保湿促进草种萌发;常水位区域采用人工点播方式栽植水葱(4~8丛/ $\text{m}^2$ ,每丛10~15株,株行距30~40 cm)、再力花(1~3丛/ $\text{m}^2$ ,每丛10~15株,株行距30~40 cm)、水烛(9~25株/ $\text{m}^2$ ,株行距20~30 cm)等水生植物,人工点播时挖15~25 cm浅穴,每穴植入1丛后覆土压实,栽后保持水文稳定(无法保持常水位时定期浇透水),栽后1~2周内遮荫保湿,并视情况间苗、补植处理。为提高护岸植物成活率,施工单位加强护坡植被养护管理。栽后0~6个月重点落实保湿、除草、补植等工作;栽后6~24个月,加强促生、控草和适度施肥;栽后24个月后加强汛期巡查、防灾,汛期前在冲刷风险较大的坡角、常水线位置增设无纺布,降低汛期冲刷作用影响。汛期后检查植被冲刷、倒伏、缺株断垄情况并及时补植。

## 4 生态护岸施工技术应用效果分析

本工程施工完成后,经连续180 d连续监测,该工程生态效益显著:

1. 防洪与抗冲刷能力。生态护岸施工完成后,汛期监测洪峰流量为 $450\text{ m}^3/\text{s}$ ,最大冲刷深度0.75 m,均低于设计极值( $500\text{ m}^3/\text{s}$ 、0.78 m),表明通过实施生态护岸挡墙工程,有效降低了汛期冲刷作用影响,提高了护岸挡墙结构安全性。

2. 植被恢复与生态效益。生态护岸施工完成后30 d,护岸植被覆盖率由56%提升至83%,6个月后提升至92%,表明生态护岸施工技术有利于促进生态环境恢复。

3. 水质改善作用。生态护岸施工前,水体溶解氧为 $5.2\text{ mg/L}$ ,氨氮浓度为 $2.3\text{ mg/L}$ 。生态护岸施工30 d后,溶解氧指标升至 $6.8\text{ mg/L}$ ,氨氮浓度指标降至 $1.2\text{ mg/L}$ ,表明河道自净能力增强。

4. 经济与社会效益。护岸工程施工完成后,经工程成本测算,相较于浆砌石、混凝土护岸施工方案相比,采用生态护岸施工方案成本降低约15%,施工技术方案技术效益良好。

## 5 结束语

结合工程施工经验,生态护岸施工技术具有提升护岸防洪抗冲、植被恢复、生物多样性等应用优势,兼具显著生态、经济与社会效益。在工程施工中,为提高生态护岸施工质量,施工单位应加强施工方案设计,并加强生态袋堆放施工、坡面排水和防渗施工、植被施工与养护等关键工序施工管理,以此确保护岸工程防洪功能和生态功能目标实现。

## 参考文献:

- [1] 徐伟.生态护岸设计探讨[J].中国水运,2022,22(14):100-101,104.
- [2] 张琳琳.上海市生态护岸建设中生态袋关键材料参数试验研究[J].城市道桥与防洪,2021(07):142-146.
- [3] 董文凯.生态袋在上海市河道护岸中的应用分析[J].城市道桥与防洪,2021(01):134-136.
- [4] 石永超,张琳琳,翟晶.生态袋护岸的设计要点探讨[J].城市道桥与防洪,2020(10):108-110,129.
- [5] 张帆.甘肃省洮河流域生态护岸技术应用研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- [6] 谢东.植物与土工合成材料相结合生态护岸的应用分析[J].价值工程,2019,38(22):105-106.
- [7] 覃贤.生态挡土墙在航道护岸工程中的应用[J].西部交通科技,2019(05):182-184.

# 抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析

陈晓, 杨路, 孟方

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要** 本文以辽宁某抽水蓄能电站为研究对象, 根据工程安全监测月报的实测数据, 采用宏观、细观、微观多尺度监测分析的方法, 对地下厂房围岩稳定性进行研究。宏观控制地质构造全局, 采用遥感解译、地面测绘等方式构建区域地质框架, 细观控制结构面动态演化, 确定关键节理和断层发育区, 微观控制岩体损伤萌生扩展, 用高精度传感设备捕捉微观应变。电站地下厂房围岩应力变化范围为  $-1.09$  MPa 到  $7.91$  MPa, 位移月变化量在  $-0.21$  mm 到  $1$  mm 之间, 渗透压力为微水或者无水状态, 整体稳定性良好; 针对节理发育断面的应力累积现象, 提出锚杆加密布置、预应力动态调整、施工时序优化的协同管理建议, 以期对抽水蓄能电站地下厂房围岩安全管控和大坝与厂房系统的安全联动提供技术参考。

**关键词** 抽水蓄能电站地下厂房围岩; 稳定性监测; 大坝安全联动; 支护优化; 监测数据反演

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.015

## 0 引言

抽水蓄能电站是能源系统调峰填谷、储能备用的关键性设施, 在新型电力系统建设中起着重要的作用, 它的运行安全关系到区域电力供应的稳定可靠。地下厂房是集中布置发电机组、主变压器等主要设备的枢纽, 其围岩稳定关系到设备的安全, 也影响到电站运行安全以及大坝的协同工作。辽宁某抽水蓄能电站为一等大(1)型工程, 装机容量  $1\ 300$  MW, 地下厂房埋深超  $300$  m、洞室规模巨大, 围岩主要为花岗岩, 局部有节理、断层发育, 受复杂地质条件、施工开挖扰动、运行期机组振动、水位交替变化等多种因素叠加影响, 稳定性控制难度很大。本文根据 2025 年 11 月该电站连续完整的监测数据, 从多尺度监测分析、动态荷载下评价优化和工程实证验证三个主要方面, 系统研究围岩稳定性, 精准揭示围岩变形演化规律和失稳机理, 提出科学、合理、安全的控制措施, 为类似深埋地下厂房工程稳定性保障提供理论参考。

## 1 围岩稳定性多尺度监测与分析方法

### 1.1 宏观尺度: 地质勘察与围岩监测一体化

地质一监测协同勘察技术是以电站工程地质条件为依托, 将上水库、下水库、输水系统、地下厂房作为一个协同监测单元, 对围岩、坝体、边坡等重点部位进行全覆盖, 形成地质条件、监测布点、数据反馈一体化的体系。具体实施时, 用地面地质测绘、钻孔

勘探、地质雷达物探等方法准确找到不良地质体分布; 根据地质勘察结果, 按照洞室开挖进度动态调整监测点位, 保证监测点准确覆盖风险区。

### 1.2 细观尺度: 结构面监测与岩体力学参数校准

结构面动态监测, 在主厂房厂左  $0+121.00$  断面水平节理发育, 局部有断层破碎带的复杂地质条件下, 创建“点一线一面”三维监测网。用高精度锚杆应力计(测量精度  $0.01$  MPa)监测结构面滑移受力状态, 在节理交汇关键点位加密布置; 采用多点位移计监测不同深度岩体位移, 捕捉节理变形累积特征; 搭配测缝计实时监测结构面开合度变化。

### 1.3 微观尺度: 损伤演化监测与数值模拟耦合

损伤演化监测技术, 使用孔隙水压力计、光纤光栅应变计等高精度仪器, 创建起“微观传感、宏观响应”的损伤演化监测体系, 对围岩渗透性及微观损伤过程进行监测。光纤光栅应变计测量精度很高( $\pm 1\ \mu\epsilon$ )、抗干扰能力强, 能及时反映岩体内部微观应变的变化情况; 孔隙水压力计能测量孔隙水压力  $0$  MPa 到  $2$  MPa 之间的变化情况, 可以反映围岩损伤和渗流通道的情况。

## 2 动态荷载下围岩稳定性监测评价与支护优化

### 2.1 动态荷载监测与特征提取

动态荷载是决定抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性的主要因素, 各个工程阶段荷载的特性不一样, 必须采取针对性的监测并加以提取。施工期以爆破振动(频

作者简介: 陈晓(1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水电水利工程、海上风电工程安全监测。

率 5 ~ 50 Hz, 峰值加速度 0.1 ~ 1 g) 和机械开挖扰动为主; 充水准备期和首次充水期主要关注库水压力传递引起应力重分布和渗流荷载; 机组调试期主要以机组振动(频率 10 ~ 100 Hz, 峰值位移 0.01 ~ 0.1 mm) 和水位周期性变化动水压力为主<sup>[1]</sup>。据此制定不同的监测频率和数据采集方式, 施工期围岩内部变形监测每星期 1 次, 爆破前后加密到每天 2 次; 充水准备期渗流监测频次提高到每天 1 次; 机组调试期监测频次提高到 2 ~ 6 次/天, 采用 100 Hz 高频采集。

## 2.2 稳定性监测评价指标体系

为了全面准确地评价围岩的稳定性, 建立了以应力、位移、渗流、锚固状态这四个方面的评价指标体系, 各个方面的指标都根据工程实际和规范要求来确定量化标准及安全等级。应力指标用锚杆应力变化量来确定, 主厂房的应力变化量在安全区间内为 1.09 ~ 7.91 MPa, 主变洞的应力变化量在安全区间内为 0.4 ~ 2.14 MPa; 同时, 限定应力变化率的阈值(Ⅱ级围岩小于等于 5%/月, Ⅳ级围岩小于等于 3%/月); 位移指标用多点位移计的月变化量和累计变形量双重控制, 主厂房的月变化量允许范围为 -0.21 mm 到 1 mm; 累计变形量不超过 30 mm; 同时要求变形速率呈衰减趋势; 渗流指标包括孔隙水压力允许的变化量  $\pm 5$  kPa, 渗流量增量不大于 10 L/(m·d); 重点监测数据突变; 锚固状态指标用锚索荷载损失率和锚杆应力均匀性系数, 主厂房的荷载损失率范围为 0.54% 到 3.67%; 主变洞的荷载损失率范围为 0.07% 到 7.58%; 锚杆应力均匀性系数不小于 0.8。用层次分析法确定各个指标的权重, 用模糊综合评价法量化评分, 达到全方位多维度的稳定性评价。

## 2.3 支护优化设计与监测反馈

根据主厂房节理发育断面的应力累积情况, 开展相应的支护优化设计。利用数值模拟分析原支护方案下的应力分布, 准确找到最大应力大于 8 MPa 的集中区; 根据应力集中程度和节理发育情况来优化锚杆布置和参数, 将应力集中区域锚杆间距从 2.5 m×2.5 m 减小到 2 m×2 m, 采用“梅花形”布置提高约束的均匀性, 并且把锚杆预应力由 50 kN 提高到 60 kN, 增强对围岩的主动约束<sup>[2]</sup>。在节理密集带增设全长粘结型锚杆, 长度由 6 m 增加到 8 m, 穿透节理面传递应力, 加强受力关键区支护强度, 有效分散集中应力, 降低失稳风险。

创建起监测数据、数值模拟、方案调整的闭环支护效果监测反馈体系, 从而达成支护方案的动态改良。在优化支护区域中将锚杆应力计、多点位移计布设密

度提高 50%, 监测频次提高到每天一次, 实时跟踪支护结构受力和围岩变形。利用监控中心的数据分析平台, 将监测数据和数值模拟预测结果进行实时对比, 误差大于 15% 时重新校准模型参数; 出现变形速率增大、锚杆应力异常升高的情况时立即组织专家论证调整支护参数。主厂房顶拱 12 个支锚索测力计重点观测, 数据显示优化后的锚索荷载分布均匀, 荷载损失率在 3% 以内, 可以证明支护方案的合理性, 保证支护效果的持久可靠。

加强施工协同管理, 建立监测系统同施工协调的控制机制, 避免施工活动对监测设备和围岩稳定造成干扰。编制详细的施工组织方案, 确定监测仪器布设区域的施工禁区和限制条件, 锚杆钻孔、爆破作业等与监测仪器保持不小于 3 m 的安全距离。爆破前将仪器和线缆用柔性防护材料包扎好, 爆破后及时检查仪器的工作情况; 创建施工和监测数据共享平台, 施工单位上传进度和爆破参数, 监测单位传送数据, 发现异常马上停工检查风险<sup>[3]</sup>。提高施工人员对监测系统保护意识和安全控制能力的认知, 保证监测数据的连续性和可靠性, 给支护优化、稳定性评价提供完整的监测数据。

## 3 案例实证: 辽宁某抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析实践

### 3.1 项目背景

电站与大坝枢纽概况: 辽宁某抽水蓄能电站是辽宁省“十四五”能源规划重点项目, 工程等级为一大(1)型, 总装机容量 1 300 MW, 装设 4 台 325 MW 可逆式水轮发电机组, 年发电量 22.8 亿 kW·h, 年抽水电量 30.4 亿 kW·h。电站采用单库双洞式布置, 主要建筑物有上水库(总库容 1 097 万 m<sup>3</sup>, 正常蓄水位 890 m)、下水库(总库容 1 184 万 m<sup>3</sup>, 正常蓄水位 450 m)、输水系统(引水隧洞长 2 800 m、尾水隧洞长 2 600 m)、地下厂房及地面开关站。地下厂房为一洞三机布置, 尺寸 210 m×26 m×52 m, 主变洞平行布置尺寸 180 m×18 m×25 m, 两者用母线洞连接。地下厂房、大坝枢纽组合在一起工作, 监测部位为围岩、岩壁吊车梁、机组结构、大坝渗流等重要部位, 保证工程整体安全。

地质与监测基础条件: 地下厂房围岩主要为燕山期花岗岩, 岩石致密坚硬, 饱和抗压强度 80 ~ 100 MPa, 但区域有三条主要的断层(F1、F2、F3), F1 断层破碎带宽 1.5 ~ 3 m, 含断层泥和角砾岩, F2、F3 断层规模小, 但与 F1 相交。主厂房厂左 0+121.00 断面还

存在水平节理（间距 0.5 ~ 2 m）<sup>[4]</sup>。原有监测系统已布设多点位移计 68 套、锚杆应力计 85 套等各类仪器 256 套，仪器完好率 100%，但是存在三个痛点，即多类型监测数据独立分析没有融合、监测频次没有动态匹配荷载变化、数据和数值模拟脱节。因此本研究增加 30 个光纤光栅应变计、15 套振动传感器来创建数据融合分析平台提高监测系统智能化程度和精度。

### 3.2 实施过程

布置好监测系统：按分层分区、重点突出、全域覆盖的原则，将监测区分为核心区（厂房顶拱、边墙、断层影响带），关联区（主变洞、母线洞）和联动区（输水系统的进出口、大坝渗流点）<sup>[5]</sup>。核心区增加 30 套光纤光栅应变计进行微观应变监测，增加 15 套振动传感器监测机组振动荷载传递，原有仪器间距从 2.5 m 缩短到 1.5 m；关联区补充 12 套锚索测力计，在母线洞接口布设测斜仪监测变形协调；联动区对接大坝监测系统实现数据共享。所有的仪器都采用有线和无线双传输的方式，建立 24 小时不间断的采集系统，核心区 100 Hz 高频监测，关联区和联动区 10 Hz 常规监测，配套数据质量控制体系保证数据准确。

数据融合和数值模拟：建立多源数据融合平台，把应力、位移、渗流等各种类型的监测数据综合起来，用加权平均法处理同一断面数据，用卡尔曼滤波算法处理各种类型的数据，去掉冗余误差提取主要特征。利用融合数据来建立地下厂房、主变洞和输水系统三维耦合数值模型，模型范围为洞室周围 5 倍洞径，单元数超过 100 万个，考虑岩体非线性、断层剪切变形和渗流、应力耦合效应。将 2025 年 10 ~ 11 月监测数据代入参数校准，校准后的模拟与实测数据平均误差 ≤ 8%。模拟不同的工况下围岩的响应，施工期主厂房多点位移计月变化量 -0.21 ~ 1 mm，主变洞锚索荷载 1 211.50 ~ 1 623.54 kN，各工况均无异常风险。

### 3.3 效果评估

稳定性状态：通过优化之后监测系统连续数据与数值模拟结果综合分析得知，辽宁某抽水蓄能电站地下厂房围岩整体稳定性好，各项关键指标都在安全阈值之内。应力上主厂房 -1.09 ~ 7.91 MPa、主变洞 -0.4 ~ 2.14 MPa，分布均匀无明显集中，顶拱局部拉应力经支护优化已受控；位移上主厂房月变化量 -0.21 ~ 1 mm、累计最大 8.2 mm，主变洞月变化量 0.02 ~ 0.73 mm、累计最大 6.5 mm，变形速率呈衰减趋势，符合深埋洞室变形规律；渗流上孔隙水压力月变化量 0 ~ 0.3 kPa，

渗流量稳定无突增，围岩完整性好；锚固状态上锚索荷载损失率、锚杆应力均匀性均合格。模糊综合评价得 92 分，属于稳定等级。

监测有效性，在优化过的监测系统中可以精确的获取多尺度、多种类型的监测数据，并且得到充分验证。就数据的完整性来说，各仪器有效采集率大于 98%，不存在长时间的停止；对于数据的准确性来说，经现场校准和数值模拟检验，平均误差仅在 8% 以内，完全符合工程精度要求；预警系统可以及时捕捉 2 次由施工扰动引起的应力突变并发出预警，通过临时支护措施减少风险；各监测点的数据也可以相互关联、综合分析以展现大坝及厂房安全情况。监测数据给参数校准、模拟优化、支护调整提供可靠的依据，形成监测、分析、优化、验证的闭环管理，充分发挥工程价值<sup>[6]</sup>。

## 4 结束语

抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性控制，是地质勘察、监测技术、数值模拟、支护设计等诸多学科融合而成的系统工程，必须依靠多尺度监测和数据驱动优化策略，从“被动防控”走向“主动预警”。辽宁某抽水蓄能电站的实践证明，创建宏观—微观—微观一体化监测体系，可以全面地捕捉到围岩的动态变化，创建应力—位移—渗流—锚固状态四维动态评价指标体系，可以实现围岩稳定性的精确量化评价，创建基于监测反馈的支护优化机制，可以提高围岩稳定性。本研究的创新点是多尺度数据和模拟的深度融合、差异化分级和阈值联动、厂房—大坝协同预警。

## 参考文献：

- [1] 李锦飞,肖海波.对抽水蓄能电站关键工程地质因素的一些认识[J].西北水电,2024(04):50-55.
- [2] 王波,王灵,任永政,等.扰动荷载作用下抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定性分析[J].华北科技学院学报,2023,20(03):49-59.
- [3] 王兰普,吕凤英,王波,等.丰宁抽水蓄能电站二期地下厂房施工期围岩变形规律分析[J].水电与抽水蓄能,2023,09(02):106-114.
- [4] 戚海峰.抽水蓄能电站地下厂房洞室围岩稳定性监测与分析[J].中国设备工程,2022(13):248-250.
- [5] 何一纯,丁秀丽,吕凤英,等.大型抽水蓄能电站地下厂房围岩变形时效特征和反馈分析[J].长江科学院院报,2020,37(11):172-179,186.
- [6] 高乔,马克,唐春安,等.荒沟抽水蓄能电站地下厂房开挖过程微震活动特征与围岩稳定性研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(05):775-782.

# 塑性混凝土防渗墙技术在水库防渗中的应用

陈 权

(安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230022)

**摘 要** 塑性混凝土防渗墙是现代水利工程施工中重要的防渗构件类型之一, 凭借其优异的变形协调能力与抗渗性能, 在水库防渗工程中得到广泛应用。本文结合塑性混凝土的技术特点, 简述塑性混凝土的主要技术优点, 论述了塑性混凝土防渗墙在水库防渗应用中存在的主要技术问题, 并提出相应的质量控制和施工优化措施。通过合理控制槽孔深度、把好原材料质量关、准确把握配合比、做好称量和入管前的检查等工作, 以期为保障水库防渗体系的长效稳定、安全可靠提供参考。

**关键词** 塑性混凝土; 防渗墙技术; 水库防渗

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.016

## 0 引言

水库是水資源調控和防洪減災的重點工程, 其結構安全直接影響區域生態安全 and 社會經濟穩定。塑性混凝土防渗墙柔性刚度适中、抗拉裂性强, 已成为高水头、软弱地基、地震活跃区水库防渗的优选方案。该技术通过降低弹性模量和提高极限应变能力, 有效协调坝体与地基间的不均匀沉降, 抑制坝体裂缝的发展。然而, 在实际工程施工中, 存在材料配比不稳定、施工工艺控制不严格等问题, 使塑性混凝土的防渗效果并不理想。深入剖析塑性混凝土的性能机理与施工控制要点, 对推动其在水库防渗领域的高质量应用具有重要意义。

## 1 塑性混凝土的优点

### 1.1 有效减缓和抑制裂缝的扩展

塑性混凝土通过掺入膨润土、粉煤灰等矿物掺合料, 取代了水泥和天然骨料, 大幅降低其弹性模量, 使其在受力状态下呈现非脆性破坏特征。在结构内部出现细微裂纹时, 材料内部的塑性流动可吸收部分能量, 延缓裂缝尖端应力集中, 从而可阻止裂缝进一步扩展。相较于普通混凝土, 其裂缝宽度发展速率明显降低, 能更好维持防渗墙体的连续性。

### 1.2 具有较高的延展性

延展性是评估材料在断裂前承受塑性变形能力的重要指标, 塑性混凝土通过优化胶凝材料体系与骨料级配, 其极限拉应变可达到普通混凝土的3~5倍。因此它在受到地基沉降、地震动荷载及温度作用等情

况下, 塑性变形较大, 可以通过自身的形变释放内应力, 避免突发性开裂, 提升结构韧性。

### 1.3 较好的抗渗性能

尽管塑性混凝土弹性模量较低, 但其致密的微观结构与低水胶比设计保障了良好的抗渗能力。膨润土遇水后形成凝胶相, 起到填充孔隙通道的作用; 粉煤灰二次水化反应生成的C-S-H凝胶可使孔径分布更细化。在多因素协同作用下, 可使渗透系数控制在 $10^{-8}$  cm/s的数量级内, 满足水库防渗墙的设计要求。

### 1.4 良好的变形能力

塑性混凝土的应力—应变曲线表现出明显的塑性平台区, 在达到混凝土峰值强度之后, 仍能保持较大的承载力和一定的位移变形能力。这一特性使其能够适应坝基复杂的应力场变化, 尤其适用于坝基变形很大的软弱夹层、断层破碎带或高地震烈度区域的水库工程, 有效避免因刚度突变引发的结构破坏。

### 1.5 更容易施工成型

塑性混凝土拌合物具有良好的流动性与悬浮稳定性, 坍落度通常控制在180~220 mm, 扩展度大于450 mm, 便于在深窄槽孔中自密实成型。其初凝时间可通过外加剂灵活调节, 适应不同气候条件下的连续浇筑需求, 减少冷缝产生风险, 提升墙体整体性。

## 2 塑性混凝土防渗墙技术在水库防渗中的应用问题

### 2.1 槽孔成型质量不稳定

由于地质条件、成槽设备及操作工艺等各方面的原因, 在施作塑性混凝土防渗墙施工时, 槽孔成型的

作者简介: 陈权(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

质量会受到不良影响,在复杂地层中,如遇到软硬夹层和孤石层,易导致槽壁偏斜、缩径或者塌孔,进而影响墙体连续性和完整性。个别工程采用抓斗或者冲击钻进方式施工时,因参数控制不好或者是泥浆护壁不到位,造成槽孔垂直度超限或者是局部地方扩径,造成后面无法将混凝土浇筑到墙内,形成薄弱区域<sup>[1]</sup>。此外,成槽后清孔不彻底,残留沉渣厚度超标,则墙体与基岩或土体会有空隙,将会减弱墙体与基岩或土体的连接力,进而降低防渗的整体效果。如果现场没有做好监控措施,在浇筑完后才发现这些问题,返工成本高且工期延误风险大。

## 2.2 原材料性能波动大

塑性混凝土防渗墙对原材料稳定性要求较高,但实际工程中水泥、膨润土、砂石、外加剂等组分常存在批次差异。由于各产地或不同供货商,膨润土的膨胀率、胶体率有所不同,直接影响泥浆黏度与悬浮能力。细骨料含泥量及级配不同,会改变混凝土的流动性与抗离析性能。水泥活性不稳定,会使凝结时间出现异常或早期强度不够。以上因素均会造成拌合物的工作性能不一致,进而影响墙体密实度及防渗性能。

## 2.3 混凝土配合比执行偏差

配合比是确保塑性混凝土具备适宜流动性、低弹性模量及良好抗渗性的基础,但在现场实际使用过程中,存在配合比执行偏差的现象,部分施工单位为追求施工便利,擅自增加水量或者减少膨润土掺量,使混凝土的坍落度与设计值产生偏差。另外拌合站的操作人员对配合比掌握不清,或者是配料系统的参配比没有更新,亦会造成组分比例失准<sup>[2]</sup>。雨季施工如果不能及时根据砂石含水率情况调整用水量也会使误差变大,这类偏差在每次的检测当中不易被发现,但累积效应显著,长此以往会导致墙体局部强度偏高且脆性增大,或混凝土流动性不在导致导管堵管、浇筑间断等,使墙体整体破坏,削弱长期防渗功能。

## 2.4 称量系统精度不足

塑料混凝土各组分计量精度是影响拌合物性能稳定性的主要因素之一,但是现场称量系统由于设备老化、缺少校准或受到外界环境影响造成误差超标。部分中小工程采用简易电子秤或者机械磅秤,其重复性与灵敏度难以满足规范要求,尤其在如膨润土、外加剂等微量组分称量时偏差更为明显。传感器受潮、振动和粉尘污染亦会影响读数准确性。称量不准导致最终配合比与设计值相差较大,混凝土流变性质失控,轻则影响浇筑顺畅性,重则造成墙体内部结构不均,

形成渗流通道,严重制约防渗墙服役寿命。

## 2.5 入导管前质量失控

混凝土自搅拌完成至导入导管前的转运、暂存环节,常成为质量监管盲区。运输过程中若等待时间过长或环境温度过高,拌合物可能发生初凝或离析,尤其在高温或大风条件下水分蒸发加速,坍落度损失显著。部分工地为赶进度,在未复测工作性能情况下直接入管浇筑,导致导管堵塞或墙体冷缝。转运容器清洁不彻底,残留杂质混入新拌混凝土,亦会引入薄弱界面。此类过程失控虽不直接体现在配合比或原材料上,却对墙体连续性与密实度构成实质性威胁。

## 3 塑性混凝土防渗墙技术在水库防渗中的应用措施

### 3.1 槽孔深度控制

在施工过程中,槽孔深度直接影响着墙体的连续性和整体防渗的效果,也决定着塑性混凝土防渗墙是否能达到隔断渗流通道的目的,因而施工前需根据收集的完整的地质勘察资料及工程设计要求,确定合理的槽孔终孔深度。另外还需先对拟建部位的地层构造情况进行研究,弄清其中各种岩土层的空间位置及分布特点,同时着重分辨透水性强的砂砾层、软弱夹层、风化层以及基岩面的位置和起伏情况等,然后确定槽孔底部要深入透水层以下较稳定的不透水层或者是岩体比较完整的稳定基岩中,构成封堵严密、连续、稳定可靠防渗墙。成槽阶段用测量垂度仪器、超声波测径仪、深度传感器等设备进行槽孔的垂直度、孔壁的稳定性、孔深的检测,实施全程动态跟踪纠偏,防止出现孔斜、扩径或者超挖等问题形成墙体薄弱区或渗漏路径<sup>[3]</sup>。当遭遇孤石群、溶洞、断层破碎带等复杂地质条件时,可根据实际情况,采取预爆破法、套打法复钻、局部加深、注浆法加固等技术处理措施,保证槽孔达到设计深度及成槽的质量标准。终孔后需要将孔内的沉渣清理干净,利用泵吸或气举的方法将孔底沉渣排净,再用测绳或者电子测深仪校核孔底高程,达到规范及设计的嵌岩深度要求。邻近槽段搭接位置是防渗体系的薄弱环节,因此要求搭接长度和工艺要严格控制,避免出现冷缝、搭接不足现象,从而保障防渗墙在平面上的整体性和竖向上的连续性,最终实现高效、持久的水库防渗目标。

### 3.2 塑性混凝土原材料质量控制

塑性混凝土防渗墙的性能主要取决于原材料的质量问题,需要建立起一套完整的材料进料检验制度。水泥应该选择标号适中、水化热较低、安定性较好的品种,不能使用受潮、结块、过期的水泥。骨料需严格控制

粒径级配,其中粗骨料的粒径不宜大于40 mm,细骨料应选用水洗砂,且应满足规程规定含泥量和有机质含量的限量要求。掺合料采用粉煤灰或矿渣微粉时,其活性应该稳定,不应含有有毒物质,且其细度、烧失量需通过实验验证。外加剂宜选择减水率高、塌落度损失小,且与胶凝材料适应性强的类型,应在搅拌站试配合格后方可在现场使用。进场材料均按批抽样送检,检测内容包括物理指标、化学组成、有害物质含量等,不合格材料严禁入场使用。材料应分类堆码、防水防潮、不得混杂。尤其在气温较高或寒冷时应做好骨料温度控制,防止混凝土出机温度异常。

### 3.3 严格执行混凝土混合比

塑性混凝土配合比是保证塑性混凝土力学性能和变形适应性的关键因素,要根据工程地质条件、墙体功能要求以及施工场地情况合理设计并严格执行,其配合比设计应达到低弹性模量、高极限应变、良好的抗渗性等性能,在满足强度的基础上尽量减少水泥用量,增大掺合料比例提高体积稳定性。保持水胶比处在合理的范围内,过高的水胶比将会减小塑性混凝土抗渗能力,过低的水胶比又会影响塑性混凝土的施工流动性<sup>[4]</sup>。严格控制骨料级配,使骨料空隙率尽可能地小些,以增加密实度。正式施工前应经过多组试验得到基准配合比,然后结合施工现场环境对配合比水和外加剂进行适量调整,不能调整胶凝材料总量及骨料比例。搅拌站操作人员应培训,掌握配合比参数和调整方法,严禁凭经验随意增减材料。每次开料前应对计量设备进行检查,重新标定合格方可投入使用。浇筑时定时留样测定坍落度、扩展度及容重,保证拌合物满足配比要求。塑性混凝土配合比一经确定,不得随意改动,如发现偏离配合比数值较大时,应及时记录并调查原因,若实际数据不满足要求,则应暂停施工。

### 3.4 确保称量系统准确可靠

称量系统的准确可靠是保证塑性混凝土质量一致性的关键环节,所有原材料都必须单独进行称量,严禁用目测体积或经验估计的方法上料,称量装置在使用前须经法定计量部门检定合格,定期做期间核查,尤其是连续上料或温湿度剧烈变化时必须增加校准频次。传感器、料斗、输送管道要保持干净,以免上次上料的余料影响此次称量。外加剂一般使用液体状,需要有较高精度的流量计或者容积式计量泵才能准确地实施微量添加。控制系统的功能要有数据存储和打印出料的功能,每盘混凝土的称量记录须完整保存,作为质量追溯依据。若是遇到极端天气状况,即当天

气寒冷管路结冰,或者是天气炎热温度上升导致骨料含水量发生变化时,称量系统应联动含水率测定仪自动修正用水量,维持水胶比恒定。

### 3.5 塑性混凝土入导管前的质量控制

塑性混凝土在进导管前的状态会直接影响墙体的连续浇筑以及密实度,此阶段需实施多重控制措施。混凝土从搅拌站出机到进入导管前的时间要尽量缩短时间,采用专用搅拌运输车运输,并保证罐体匀速旋转,防止离析和坍落度损失大。到达浇筑平台后应马上检测混凝土的工作性能,如坍落度、扩展度、泌水率及和易性等指标,不合格的拌合料严禁入管。导管安装前应检查导管的密封性、垂直度以及内壁清洁度,是否无杂物,无变形<sup>[5]</sup>。首浇时宜采用隔离球或者砂浆垫层,防止泥浆进入墙底。浇筑时应该保持导管的埋深,防止其拔脱或堵管。每车混凝土入管前需核对配合比标识与实际材料一致性,杜绝错用或混用。现浇过程中要准备备用电源和备用搅拌设备,以应对突发中断。取样要严格按照规定频率进行,留置试件后期用于测定强度和弹性模量。如遇室外环境温度小于零下摄氏度或大于30℃时,应按要求采取保暖或降温措施,控制混凝土入管温度。

## 4 结束语

塑性混凝土防渗墙技术以其独特的力学与耐久性能,为水库防渗工程提供了高效可靠的解决方案。其核心价值在于通过材料柔化实现与地基变形的协同响应,从根本上提升防渗墙的刚度随基础条件变化而变化,能够有效提高防渗系统的适应性和耐久性。未来,随着智能传感、数字孪生等技术的融合,进一步提高塑性混凝土防渗墙施工精度和自动化水平,持续推进材料创新与工艺优化,是保障国家水安全战略实施的重要技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 旦朝金. 水库除险加固工程中塑性混凝土防渗墙技术的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(11): 124-127.
- [2] 年立强, 朱宏松. 塑性混凝土防渗墙技术在水库防渗中的应用[J]. 治淮, 2024(11): 68-70.
- [3] 李佳乐. 浅谈堤防加固工程中防渗墙技术的应用[J]. 水上安全, 2024(02): 184-186.
- [4] 姚任峰. 混凝土防渗墙技术在水利工程的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2020, 49(02): 46-59.
- [5] 常东明, 蒋亚涛, 赵孟伟. 塑性混凝土防渗墙技术在新城调蓄水库工程中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(06): 45-47.

# 防水堵漏施工技术在建筑工程施工中的应用

赵东民

(安徽建工(宿州)投资发展集团有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要** 渗漏水问题作为建筑工程常见质量隐患, 易造成钢筋腐蚀、结构损坏、机能下降等严重后果, 且具有分布广、表现形式多样等特点。本文聚焦建筑工程防水堵漏施工技术, 系统研究其工作原理及工程应用。首先阐述了现有的主流防水堵漏方式及主要特性, 包括铺贴卷材覆盖层、涂抹涂膜填充剂等新方法, 并对各种工艺的技术原理、操作步骤、控制要点等进行分析; 其次介绍了具体应用方法, 即施工前的方案规划、施工现场的管控策略、后期检测维修管理等; 最后构建了一套涵盖技术、管理与维护的全方位保障体系, 以期为建筑工程防水堵漏施提供实践参考。

**关键词** 建筑工程; 防水堵漏; 卷材防水; 涂膜防水; 注浆堵漏

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.017

## 0 引言

防水堵漏施工是建筑工程中保证建筑性能和使用品质的关键工序, 其重要性越来越突出。工程投入使用后, 由于材料老化、结构缺陷等造成工程渗漏的问题时有发生, 不仅给建筑物的安全稳定带来隐患, 影响正常使用功能, 而且造成业主或者使用者的财产损失。因此, 对防水堵漏技术进行深入的研究, 并科学地加以运用, 已经成为提高工程质量、延长建筑使用寿命的一个重要途径, 深入分析防水堵漏施工技术具有重要的理论和现实意义。

## 1 建筑工程防水堵漏施工的重要性与常见问题

### 1.1 防水堵漏施工的重要性

防水堵漏施工在建筑工程中具有非常重要的战略意义。从建筑结构安全角度看, 水分渗入会引发混凝土内钢筋锈蚀, 使其体积增大, 从而破坏整体构件的强度, 大大降低承载力, 甚至会引发一系列严重的安全隐患, 极端情况下还会造成工程坍塌。

从建筑的功能属性上来说, 渗漏水问题对于室内环境质量的影响较大。屋面漏水会造成外部水分渗入内部空间, 使地面湿滑, 无法正常通行; 墙体渗水会造成墙面发霉脱落, 影响美观, 也会影响居住的舒适度; 对于精密设备, 如电气设备、高精度仪器等, 渗漏水会造成短路故障或者物理损坏, 影响设备的正常工作, 给使用者造成经济损失和操作上的不便等许多问题。

高质量的防水堵漏工程可以提高建筑结构的耐久性。水分是引发建筑材料老化的重要因素之一, 它会

破坏材料性能并缩减使用寿命。而先进的防渗技术可以阻止外部水源的渗透, 减缓材料的退化速度, 延长整个结构的服役寿命, 大大减少维修费用和人工成本, 给业主提供更经济的选择。

### 1.2 常见防水堵漏问题

建筑工程中渗漏情况比较普遍, 渗漏部位及表现形式各不相同。就渗漏部位来说, 屋面是易出现渗漏的部位之一。由于长时间暴露在自然环境之中, 受到日晒、雨淋、风雪等的侵蚀, 屋面防水层容易老化、开裂, 造成雨水渗透。地下室处于地下, 四周土壤含水量大, 如果防水处理不好或者防水层有破损, 地下水就会进入室内空间。卫生间用水频率高, 管道多, 防水施工不到位也会出现渗漏问题。

渗漏的形式也是多种多样的, 点渗漏是指渗漏部位比较集中, 一般由防水层局部破损或孔洞造成, 表现为单个滴水现象。线渗漏一般沿着裂缝或者管道周围出现, 呈线状分布, 可能是结构开裂或者管道连接不严密造成的。面渗漏是指渗漏面积较大, 整个区域潮湿、渗水, 一般是由整体防水失效或者大面积损坏引起的<sup>[1]</sup>。

## 2 建筑工程常用防水堵漏施工技术

### 2.1 卷材防水施工技术

卷材防水是建筑领域应用较多的一种防水技术。其中沥青类防水卷材成本低、耐候性好, 但是低温脆性大、抗拉强度低等缺点比较明显; 高分子类防水卷材延展性好、耐久性能好, 占绝对优势, 虽然价格高一些, 但是弥补了部分传统材料的不足。

作者简介: 赵东民(1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

该施工工艺流程包含很多重要的环节。基层处理,基面应平整、密实、干净,清除尖锐突起物及杂物,对不规则部位用水泥砂浆找平,油脂污染用专用清洁剂清除。卷材铺设时,按工程特点选择铺贴方法(满粘法、空铺法或点粘法),展放平稳,无扭曲。搭接操作是保证防水效果的重要步骤,搭接宽度必须满足设计规范要求,长边搭接不小于70 mm,短边搭接不小于100 mm,所有搭接处均应涂刷密封胶进行连接,防止渗漏<sup>[2]</sup>。

施工技术规范规定严格控制环境温湿度参数,操作温度最好在5℃到35℃之间。卷材铺贴方向根据屋面坡度来定:坡度小于3%时,适合平行于屋脊铺设;坡度大于15%时,更适宜垂直于屋脊铺设。在转角处以及变形缝等容易发生渗漏的地方,要加设一道。关键是,事先检测材料质量,剔除破损或者缺陷材料;施工时做好防护工作,防止受到物理损伤(被尖锐物刮花);工程竣工验收之后安排成品保护计划,防止后期工序破坏防水层。

## 2.2 涂膜防水施工技术

涂膜防水施工所用的涂膜材料有合成高分子防水涂料、聚合物水泥防水涂料等。合成高分子防水涂料拉伸强度大、弹性好、耐老化;聚合物水泥防水涂料黏结性好、耐水性强、环保。

施工工艺主要分为刷涂和喷涂两种。刷涂适用于狭小空间或者复杂结构表面的涂刷作业,可以保证涂层厚度分布均匀,但是工作效率较低;喷涂适合大面积工程,工作效率高,但是对涂层厚度控制不精准。

施工质量控制的关键因素就是涂膜厚度和均匀性。根据设计规范的要求,合理选择涂层的层数及单层厚度,防止过厚或者过薄而产生开裂,失去防水的作用。实际操作中要重点保证涂膜分布均匀,不能出现漏涂、流淌等质量问题。成型后养护时段也要注意,严禁人员踩踏,防止外来的水源侵入,达到预期的标准水平。

## 2.3 注浆堵漏施工技术

在注浆堵漏工程里,主要材料分为化学浆液和水泥基浆液两类,各有优势,适用于不同渗漏场景。

化学浆液黏度小、流动阻力小,能顺利渗透到细微处,渗透性好,可以深入微细裂缝进行填充封堵。其固结时间可以灵活调节,针对不同宽深裂缝,准确调节固结时间,充分填充固化,解决渗漏。对防水要求高、裂缝复杂的精密建筑结构,化学浆液封堵效果最好。

水泥基浆液力学性能优良,固化后可以承受较大的压力应力,给结构提供可靠的支撑加固。它耐久性好,可以长期抵抗环境的侵蚀,保持性能的稳定,封

堵效果持久。另外,还具有成本低的特点,在大工程中可以控制成本,适合处理大尺寸的裂隙。大型地下、水利工程的大裂缝、空洞,用水泥基浆液可以高效、经济地封堵治理。

注浆堵漏工程有严格的流程,钻孔、安装注浆管、注浆等。钻孔为根基,准确度关乎之后成果。钻孔前要根据裂缝分布及深度分析测量,确定坐标和倾角,用专用设备技术保证准确穿过目标区。复杂的地下结构,裂缝不规则,就需要施工人员有较好的经验技术,准确地确定钻孔的位置角度。

注浆管的安装质量好坏直接关系到浆液能否顺利注入和注浆的稳定性。要装得稳固可靠,施工时不能移动掉落,用恰当的固定连接技术固定,并且要仔细检查测试密封性。对施工质量要求高的工程会多重固定并进行压力测试,保证安装质量达到标准<sup>[3]</sup>。

注浆是核心,要根据材料性质和工程要求来控制压力参数以及注入量。不同浆液的流动性和固化特性不同,压力和注入量也要不同,否则会造成溢出浪费、污染环境或者封堵效果差。施工人员要具备经验、判断力,随时调整。如注化学浆液,黏度小、渗透性强的用低压力、小注入量;注水泥基浆液,黏度大,就适当提高压力和注入量,使浆液在裂缝中形成均匀致密的填充结构,获得最佳的密封效果。

## 2.4 其他防水堵漏技术

刚性防水技术主要是防水混凝土、防水砂浆等。防水混凝土通过改变混凝土配合比、添加外加剂等方式提高抗渗性能,常用于地下室、水池等地下防水工程;防水砂浆是在水泥砂浆中加入防水剂,提高砂浆的防水能力,常用于墙面或地面防水处理。

密封防水技术有密封胶密封、止水带密封等。密封胶密封可用于门窗框与墙体之间、管道穿过墙壁处的缝隙等各类缝隙的密封防水;止水带密封主要是对混凝土结构中的变形缝、施工缝等部位进行防水处理,防止水分从变形缝中渗透。

# 3 建筑工程防水堵漏施工技术应用要点

## 3.1 施工前准备要点

施工准备时,技术人员要仔细查看并理解设计图纸,重点放在建筑各个功能区的防水技术指标上,防水等级怎么划分,用什么材料,性能参数怎样,构造层次怎么设置等重要信息。根据工程实际情况及规范要求来制定详细可行的技术计划,技术计划中包含工艺流程规划、具体操作步骤说明、质量控制手段、安全防护措施等内容,为后面的工序执行提供明确的指引。对复杂屋面防水工程,要确定卷材铺贴方向、顺序,

对女儿墙、檐口边缘、变形缝等部位做出专门处理。

防水堵漏工程效果的好坏取决于材料质量,因此必须严格实行进场检验程序。对于各种防水材料,要全部查看质保文件是否齐全,然后根据规范要求做物理化学性能检测工作。对抽样的样品进行准确的测定拉伸强度、断裂伸长率、低温柔性等各项指标,并且保证各项指标符合设计标准及行业规定的需要。卷材类产品更要重视耐久性、密封性,保证施工效果和预期功能<sup>[4]</sup>。

材料储存和运输也十分重要,各种材料、规格的防水材料应分开存放,不能混淆。储存环境要干燥通风,避免材料受潮变质。沥青类防水材料不能在高温下直接暴晒,高分子防水卷材不能被尖锐物体划伤。运送时也要做好防护工作,保证材料不受到损坏,卷材运送时要平放,不可倾斜或弯曲。

基层处理是防水施工的基础,基层要平整、牢固、干净,不能有尖锐凸起物。基层表面裂缝、孔洞等缺陷用水泥砂浆等材料修补找平。基层表面有油渍、灰尘等杂质时,用清洁剂清除。对混凝土基础表面还要进行凿毛处理,提高防水层与基面之间黏结强度。

施工环境条件对防水施工质量影响较大,必须控制施工环境温度、湿度等。一般防水施工环境温度不得低于 5℃,不得高于 35℃。施工时遇湿度较大的环境应做好相应的除湿措施,保证基层含水率符合要求。如遇雨季施工时应搭设防雨棚,防止雨水淋湿基层和已施工完毕的防水层<sup>[5]</sup>。

### 3.2 施工过程控制要点

施工人员必须按照既定的工艺流程进行施工,不得擅自改变、省略任何一项工艺。以卷材防水为例,应按基层处理、涂布底层、铺放卷材材料、搭接密封等步骤依次进行,每道工序完成之后要经检查合格才能进入下一道工序。

施工时要加强各工序的交接检查。上一道工序完成,由本班组自检合格后报项目质检员检查验收。质检员检查合格后填写工序交接检查记录并签字,才能交给下道工序施工班组。防水层施工完成后应做蓄水试验或淋水试验,检查有无渗漏,试验合格后方可做保护层等。

施工过程中要定时对防水工程质量进行检测,主要检测指标有防水材料的厚度、均匀度和黏结性等。对于涂膜类防水层,要用专门的测厚仪器检测实际厚度是否符合设计要求;对卷材类系统,要检查搭接缝宽度和密封处理效果。并要建立完备的施工日志制度,记录作业时间、工艺流程、技术手段、质量评判结果等信息,给工程追溯提供可靠依据。

### 3.3 施工后验收与维护要点

防水堵漏工程结束之后,应当依照有关技术标准以及设计文件所规定的条款开展验收工作。验收评价指标主要是防水层外观状况及功能表现。外观上防水层必须平整,不能有裂纹、鼓包、脱胶等现象,功能上通过蓄水试验或者淋水试验来检查是否渗漏水。具体操作时可以采用肉眼观察、尺子量度或者现场模拟等几种方法综合判断。屋顶蓄水时间不少于 24 小时,最低蓄水量不少于 20 mm,卫生间提倡淋水 10 分钟以上达到密封<sup>[6]</sup>。

工程竣工验收合格之后,要采取科学的成品保护措施,防止防水层被破坏。施工保护层时不能用尖锐物体划伤防水层。若采用卷材做防水材料,在卷材上铺设一层隔离膜(如塑料薄膜)。同时要严格控制后续工序的荷载分布情况及作业活动情况,不得在上面堆放重物,不得进行焊接等可能破坏基层的作业。

为了使防水堵漏工程长久有效,必须要建立科学的保护和检测体系。按计划既定的安排开展专门考察,及时发现并解决问题。雨季来临之前,对屋面防水层进行全面检查,清理排水管道内的积存物,保证流水畅通;地下空间防水构造,要关注地下水位上升的趋势,避免水力冲刷造成性能下降。

## 4 结束语

建筑工程防水堵漏施工属于系统工程,涉及前期设计规划、现场管理以及后期检测维护等诸多环节。各个环节能互相联系,彼此合作,只要有一个环节出现疏忽就会影响整体的效果。只有对各种防水堵漏技术进行全面了解,严格按照有关标准执行科学操作程序,才能避免建筑渗漏水现象的发生,保证建筑结构安全稳定,提高建筑使用功能质量,延长建筑使用寿命,创造良好的居住环境,推动建筑业高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 李聪宝. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术探究[J]. 中国高新科技, 2022(19):125-127.
- [2] 罗永伟. 建筑工程施工中的防水防渗技术应用[J]. 江苏建材, 2022(05):87-89.
- [3] 文逸. 建筑工程施工中防水防渗施工技术应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(21):150-152.
- [4] 张体萌. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术解析[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(15):174-176.
- [5] 刘佳佳. 防水防渗施工技术在建筑工程中的应用与分析[J]. 房地产世界, 2022(14):108-110.
- [6] 李德刚, 曹富, 张钦龙. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2021(09):104-105.

# 房屋建筑工程中复合地基施工技术应用研究

王孝升<sup>1</sup>, 孙 铭<sup>2</sup>

(1. 东营通诚土地房地产资产评估有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东鲁正工程咨询有限公司, 山东 东营 257000)

**摘 要** 复合地基是房屋建筑工程中软土地基处理的重要技术类型, 相比强夯、垫层等传统工法, 在控制地基沉降、提升承载能力方面优势显著, 直接关系到建筑结构长期安全稳定。为满足现代房建工程对基础施工的要求, 切实提高地基处理质量, 本文围绕复合地基施工技术展开研究, 从理论层面分析置换强化、协同承载、土体改良三大核心作用机理; 在实操层面, 结合散体材料桩、胶结材料桩等常见复合地基类型, 选取碎石桩、水泥土搅拌桩、灰土挤密桩及注浆加固等代表性技术, 详细阐述施工流程与关键工艺要点, 以期为现场规范化作业提供实操参考。

**关键词** 房屋建筑; 复合地基施工技术; 碎石桩; 水泥土搅拌桩; 灰土挤密桩

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.018

## 0 引言

随着我国城镇化进程加快, 房屋建筑工程数量持续增长, 高层化、大跨度成为主流发展趋势, 对地基承载能力和稳定性的要求日益提高。天然地基往往因承载不足, 易引发建筑不均匀沉降、结构开裂等病害, 严重影响建筑使用安全与耐久性。复合地基凭借“增强体+桩间土”的协同作用, 能有效改善软土地基工程特性, 当前工程实践中, 复合地基技术类型多样, 需明确复合地基作用机理, 根据不同类型技术的适用场景, 规范施工操作流程, 强化施工管控, 保障工程质量, 为房建工程基础施工提供可靠的技术支撑。

## 1 复合地基作用机理

### 1.1 置换强化

置换强化是通过喷浆搅拌、振动沉桩、注浆加固等技术手段, 在天然地基结构内设置增强体, 选用力学性能优异的级配碎石、水泥土、灰土作为置换材料, 通过改变土体性质来实现加固目的。从受力角度来看, 增强体在地基结构内呈现规则分布状态, 作为地基承载骨架, 负责承受大多数竖向荷载, 增强体间天然土体被称为桩间土, 利用桩间土侧向约束增强体, 杜绝倾斜失稳问题发生, 二者形成“骨架—基体”稳定结构<sup>[1]</sup>。

### 1.2 协同承载

协同承载是复合地基与天然地基的核心区别, 施作多根桩体, 可选钻孔灌注桩、混凝土管桩、水泥土

搅拌桩和粉煤灰碎石桩, 桩体和桩间土保持协同受力状态, 共同承担上部结构荷载, 桩体主要承担 40%~80% 不等的竖向荷载, 由于桩体刚度远超地基土体, 二者基本保持一致沉降步调, 且总体沉降量不超出设计容许范围。如果上部荷载规模较大, 或是对地基沉降提出严格要求, 则以桩顶增设褥垫层、桩端后注浆作为补充措施, 进一步改善协同承载效果。

### 1.3 土体改良

土体改良机理适用于软土地基, 具备高压缩、高含水率的工程特性, 土体物理力学性能较差, 通过挤压密实效应、排水固结效应或是化学胶结效应, 从根本上改变土体物理力学性质, 从而增强地基承载能力。其中, 挤压密实效应是采取碎石桩振动沉管或是灰土桩沉管挤密工法, 径向挤压桩周土体, 通过提高密实度、减小孔隙比来提高土体抗剪强度。排水固结效应是把散体材料作为增强体, 在地基结构内构建竖向排水通道, 利用上部荷载或是临时堆载, 引导土体孔隙水向外排出, 提前完成绝大多数工后沉降量。化学胶结效应适用于注浆加固和水泥土搅拌桩技术, 水泥浆和土体颗粒均匀混合, 进行一系列化学反应, 以利用水化产物把土体颗粒胶结形成密实结构。

## 2 房屋建筑复合地基类型

### 2.1 散体材料桩复合地基

散体材料复合地基是选用无胶结强度散体材料作为增强体, 如碎石和砂石, 采取振动沉管成桩方式或

作者简介: 王孝升(1989-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

是冲击成孔成桩方式,在天然地基内强制打入散体颗粒形成桩体,通过承担主要上部结构荷载,间接改善地基受力状态和强化承载能力。现场施工期间,主要采取碎石桩复合地基技术,选用 20~50 mm 粒径碎石作为散体颗粒,要求碎石含泥量低于 5%,桩体密实度超过 0.7,按照桩径值和地基类型来选择成桩方式,适用于普通多层住宅建筑和其他荷载较轻的房屋建筑工程。

## 2.2 胶结材料桩复合地基

胶结材料桩复合地基凭借化学胶结效应来实现地基加固目的,选用水泥、石灰等胶凝材料作为地基处理材料,强力搅拌地基土体,打破土体原状结构,同步喷射搅拌胶凝材料,胶凝材料和土体颗粒接触后进行一系列物化反应,最终固化形成特定形状尺寸、具备较高强度的刚性增强体<sup>[2]</sup>。胶结材料桩复合地基技术路线众多,包括水泥石搅拌桩、水泥粉煤灰碎石桩等,适用于不同地质条件,无论是大荷载房屋建筑、高水位施工场景还是湿陷性黄土地基等特殊地基,都满足复合地基施工条件。

## 2.3 灰土桩复合地基

灰土桩复合地基是把石灰作为土体改良材料,根据 2:8 或是其他体积比,持续拌合灰土和地基土,先后进行水化反应、离子交换反应和胶凝反应,利用大量胶凝产物把松散地基土体胶结形成稳定结构,处理后的地基承载力达到 150~250 kPa 水准。目前,灰土桩复合地基主要用于解决湿陷性黄土、膨胀土在内的不良土层,桩径值控制在 0.3~0.45 m,桩距保持在 2~2.5 倍桩径值,操控沉管桩机在地基内打入钢管,分层回填夯实灰土,并在顶端铺设灰土垫层。

## 2.4 注浆加固复合地基

注浆加固复合地基本质上属于柔性增强体地基,向地基土体内高压注入水泥浆或是其他种类的化学浆液,浆液填充土体孔隙,胶结土体颗粒,从而提高土体抗剪强度和切断地下水渗流路径。此类复合地基主要用于已有建筑地基不强、不均匀地基处理等少数施工场景,作为一项辅助处理技术,以地基局部加固作为施工准则。

# 3 房屋建筑复合地基施工关键技术

## 3.1 碎石桩

碎石桩复合地基施工阶段,以振动沉管作为首选成孔方式,适用于松散砂土、粉质黏土等地基,技术要点如下:第一,桩机沉管。现场架设全站仪,按照设计图纸逐一测设各处桩位,桩位误差不得超过  $\pm 50$  mm。

首处桩位部署振动沉管桩机,按照桩径值来选择相应振动频率与激振力的桩机,测量调整桩机水平度、桩管垂直度,以水平度误差小于 0.5%、垂直度误差小于 1% 作为合格标准。启动桩机,匀速把桩管下沉至持力层,松散砂土层沉管速度为 1~1.2 m/min,粉质黏土层沉管速度为 0.8~1 m/min,沉管深度偏差不得超过  $\pm 100$  mm,并在桩管抵达设计位置后,持续振动 30 s 来穿透持力层表面松散层<sup>[3]</sup>。第二,填料入管。桩管就位后,衔接开展填料入管作业,尽量选用 20~50 mm 粒径花岗岩碎石当作填料,以含泥量低于 5%、饱和单轴抗压强度超过 30 MPa 作为合格标准。分多次向桩管内投入填料,实际填料量控制在 1.2 倍桩管容积,且实际填料高度保持在 1.5 m 以上。第三,振动拔管。交错开展填料、拔管作业,填料后启动振动锤,持续振动 10 s,解决填料堆积偏斜和卡料问题,再按照 1~1.5 m/min 速度拔管,每拔管 1 m,开展 1 次补料作业,始终保持管内填料饱满状态。第四,桩顶处理。完全拔出桩管后,桩顶预留松散砂土层,预留厚度为 0.3 m,切换小型冲击夯,分层开展夯击作业,单层夯击遍数为 3 遍,先后保持轻夯模式和重夯模式,直至桩顶压实度超过 0.95。

## 3.2 水泥石搅拌桩

第一,桩机就位。优先配备 SJB-II 型桩机,带有双螺旋搅拌叶片,有助于强化搅拌效果和成桩速度。按照设计图纸测设各处桩位,桩位中心点打入木桩作为施工标识,确认成桩顺序。首处桩位上部署深层搅拌桩机,调整桩机水平度与垂直度,设置注浆管,注浆管连接输送泵,以桩机平面位置误差小于  $\pm 50$  mm、水平度误差小于 0.5%、搅拌轴垂直度误差小于 1% 作为合格标准。第二,浆液制备。按照现场施工进度来决定制备时间,选用 42.5 级普通硅酸盐水泥即可,水灰比保持在 0.5~0.7 区间,水泥掺量控制在 15% 土体质量,持续搅拌 2 min 以上时间,利用滤网滤除杂质,并把浆液存放时间限制在 2 h 内。第三,搅拌成桩。启动桩机下沉搅拌地基土体,搅拌转速保持在 30~50 r/min,下沉速度保持在 0.5~1 m/min,同步向外喷射浆液,注浆压力保持在 0.3~0.5 MPa,注浆量偏差限制在 5% 以内。搅拌轴顺利抵达桩底位置后,原位继续旋转搅拌叶片和喷射水泥浆,原位保持时间为 30~60 s,直至水泥浆和土体颗粒均匀混合。反向启动搅拌电机,向上提升搅拌轴和继续喷射水泥浆,注浆压力保持不变,提升速度控制在 0.3~0.5 m/min,持续提升至桩顶位置,原位保持 30~60 s 旋转喷浆,完成单次提

升搅拌过程<sup>[4]</sup>。重复上述操作,开展复搅作业,复搅次数越过,成桩效果越好,但也会延长工期时间,正常工况下,采取二搅二喷工艺,必要时采取四搅四喷工艺。

此外,面向黏性土、粉土等正常地基,则采取干法搅拌桩技术,即为粉喷桩,利用干燥无结块水泥粉替换水泥浆,配备PH-H型粉喷桩机替换SJB-II型深层搅拌桩机。现场施工期间,按照标准工艺做法把桩机部署就位,省略浆液制备环节,选用42.5级水泥粉,以粒径小于0.08 mm作为质量要求,水泥掺量增加至15%~20%土体质量。准备工作完成后,启动桩机下沉搅拌,搅拌转速为30~50 r/min,下沉速度为0.5~1 m/min,抵达桩底上方0.5 m位置后,利用空压机高压喷入水泥粉,喷粉量为15~20 kg/m,桩底原位喷粉搅拌30 s。衔接开展搅拌提升作业,提升速度保持在0.3~0.5 m/min,喷粉量保持不变,提升至地面后二次下沉复搅,复搅深度控制在2/3桩长位置。

### 3.3 灰土挤密桩

第一,桩机就位。现场配备DZ-40振动沉管桩机,操控全站仪测设桩位,桩机部署就位,保持机身水平和桩管竖直状态,桩管中心点和桩位中心点完全重合。第二,沉管挤密。启动桩机,凭借桩机重量和振动能量来突破桩管入土阻力,沉管速度稳定维持在0.3~0.5 m/min,并保持15~20 Hz振动频率,一次性完成沉管作业,顺利抵达桩底标高位置,桩端进入持力层深度超过0.3 m。原位振动20~30 s后,匀速向上拔除桩管,拔管速度为0.5~0.8 m/min,暂时形成桩孔。第三,填料夯实。提前拌合灰土,以生石灰和粉质黏土作为原材料,筛除杂质后,按照2:8或是3:7的体积比进行拌合,拌合时间超过3 min。桩孔成型后,立即填入灰土,分层开展填料夯实作业,单层厚度为0.2~0.3 m,选用1 t以上夯锤,夯锤落距设定为2~3 m,单层夯击次数控制在6~8击,以锤击下沉量小于20 mm、压实系数超过0.95作为结束标准。第四,铺设垫层。用于强化灰土挤密桩和桩间土的协同受力条件,确保桩身承受主要竖向荷载。桩顶预留5 cm压实余量,铺设灰土垫层,垫层厚度为0.3~0.5 m,无需调整灰土配比,操控小型压路机连续碾压多遍垫层,以垫层压实系数超过0.95、标高误差小于20 mm作为合格标准<sup>[5]</sup>。

### 3.4 注浆加固

房屋建筑地基注浆加固施工阶段,按照地基类型来选择注浆技术,主流技术包括渗透注浆、劈裂注浆等,工艺做法略有不同。以渗透注浆技术为例,适用于高

透水性土层,利用较低压力引导浆液渗透填充土体颗粒间隙,保留土体原状结构,形成网状胶结体系。劈裂注浆则适配低透水性软黏土层,通过提升注浆压力使浆液劈裂土体形成浆脉,与原状土结合形成复合固体,施工前需现场做注浆试块,确定劈裂压力与浆液扩散半径关键参数。地基薄弱部位钻设孔洞,孔内插入无缝钢管作为注浆管,末端按照梅花形开设5~8 mm直径的注浆孔,同步制备水泥浆,要求初凝时间超过45 min,终凝时间小于10 h。注浆管安装后需对孔壁进行封孔处理,采用水泥砂浆封堵孔口0.5~1 m范围,防止注浆过程中出现浆液冒浆、串浆问题,保障注浆压力稳定。准备工作完成后,分段开展注浆作业,单段注浆长度为1.5~2 m,注浆压力保持在0.5~1.5 MPa,注浆速度保持在0.5~1 L/min,各段注浆方法保持一致。注浆施工遵循由下至上、隔孔跳打的原则,相邻注浆孔施工间隔不低于4 h,避免相邻孔位浆液相互干扰,确保注浆加固的均匀性与完整性。最终以注浆压力达标并稳定保持30 min以上、实际注浆量超过1.2倍设计值作为终止注浆条件,孔内填入水泥砂浆进行封堵处理。

## 4 结束语

复合地基作为房屋建筑施工体系的重要内容,也是保障地基承载能力、长期维持上部结构稳定状态的重要支撑。在房屋建筑高层化、大跨度发展背景下,建筑施工人员应加强复合地基施工技术应用力度,全面推行标准化施工模式,熟练掌握各项复合地基施工技术的正确工法,积累施工经验,凭借技术助力,推动房屋建筑工程建设质量稳步提升。

## 参考文献:

- [1] 宋建国,刘杰,徐炳强.房屋建筑工程中复合地基施工技术应用[J].中国建筑装饰装修,2025(17):184-186.
- [2] 房慧,王海霞.市政建筑工程地基施工技术的关键点分析[J].居业,2025(07):49-51.
- [3] 张第,刘宏昊.岩溶地区建筑工程CFG桩复合地基施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):128-130.
- [4] 张辉,陶庆洋.管桩与塑性混凝土增强型复合地基施工技术研究[J].治淮,2025(05):58-61.
- [5] 钱新文,杜玉芬.高层建筑钢筋混凝土桩复合地基施工技术[J].科技创新与应用,2023,13(30):177-180.

# 建筑机电安装工程中的电气节能施工技术分析

解晓露

(安徽鑫合机电设备有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要** 随着绿色建筑理念的普及和“双碳”目标的深入实施, 电气节能施工技术已成为建筑机电安装工程领域的重要研究方向。在推进建筑行业发展过程中, 机电安装工程是其中的重要一环, 加强电气节能施工技术的应用, 对满足建筑机电安装实际需求起到了重要的作用。本文对建筑机电安装工程的电气节能施工技术进行分析, 重点探讨设备选型、电气线路布局优化、电力系统节能控制等方面, 以期为提升电气节能施工的效果及质量提供借鉴, 进而更好地满足建筑行业发展需要。

**关键词** 建筑机电安装工程; 电气节能施工技术; 照明系统; 供配电系统; 动力系统

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.019

## 0 引言

在全球能源危机日益严峻及“双碳”目标深入推进的背景下, 建筑行业作为能源消耗的重点领域, 如何推进建筑节能降耗发展, 成为建筑行业发展领域关注的一个重要内容。其中, 建筑机电安装工程作为建筑工程的核心组成部分, 其耗能在建筑总耗能中的占比高达 30%~40%。因此, 如何做好建筑机电安装工程的节能降耗设计, 对于促进建筑行业长远、可持续发展而言, 有着十分重要的意义。本研究围绕建筑安装工程中的电气节能施工技术应用问题进行探索分析, 注重结合具体的工程案例应用经验, 优化节能施工, 针对性提升建筑电气节能施工效率及质量, 促进建筑行业的长远、可持续发展。

## 1 建筑机电安装工程中电气节能施工关键技术分析

### 1.1 照明系统节能施工技术

照明系统是建筑电气能耗的重要组成部分之一, 其节能技术的应用, 有助于降低电能消耗。照明系统节能施工技术应用时, 主要围绕高效节能光源选择、照明器具的优化配置、照明控制方式改进等方面, 最大限度地减少照明系统的电能消耗<sup>[1]</sup>。

1. 节能光源的选择及施工。在照明系统设计及应用时, 传统的白炽灯、荧光灯等光源有着能耗高、寿命短等问题, 对此, 利用高效节能光源, 对传统的照明设备替换, 有助于降低电气能耗。现阶段, 高效节能光源包括 LED 灯、紧凑型荧光灯等, 并且不同照明设备的应用, 取得的节能效果存在一定的差异<sup>[2]</sup>。关

于不同光源选型及照明光源性能参数, 具体如表 1 所示。

结合表 1 的数据统计来看, 在建筑照明系统光源选择及应用时, 通过改变传统的白炽灯应用, 有助于降低电能消耗, 提升设备使用寿命, 对于促进建筑持续发展而言, 有着重要意义。

2. 照明控制方式优化施工分析。建筑照明过程中, 除了做好设备选择外, 还需要降低照明能耗。这一过程中, 可以根据光环境的光照强度、活动情况等, 对照明系统运行状态进行自动化调整。从传统的控制方式来看, 主要包括光控、声控、人体感应控制、智能分组控制方式等。在实际施工过程中, 对不同控制方式的特点予以把握, 并结合建筑机电安装工程的整体情况, 对照明控制方式科学、有效选择, 以保证照明效果<sup>[3]</sup>。在智能照明控制系统设计及应用过程中, 围绕“应用层—网络层—感知层”的三层级结构设计, 实现对照明系统的科学控制目标, 提升照明控制的质量, 并满足节能降耗的建筑需求。

### 1.2 供配电系统节能施工技术分析

供配电系统是建筑电气系统的核心所在, 其负责将电能从电网传输到各类用电设备当中, 从其能耗损失情况来看, 主要涉及了线路损耗、变压器损耗等问题。在开展供配电系统节能施工技术应用时, 注重从优化供配电设计、选择高效节能设备、减少线路损耗等方面入手, 以提升节能效果。

1. 高效节能变压器的选择及应用。变压器是供配电系统中的关键设备, 其耗能在供配电系统中占据着

作者简介: 解晓露 (1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机电工程。

表1 不同光源选型及节能参数对比统计表

光源类型	光效 (1 m/W)	寿命 (h)	显色指数 (Ra)	适用场景	能耗等级
白炽灯	10 ~ 15	1 ~ 2 k	95 ~ 100	室内照明	高
紧凑型荧光灯	50 ~ 80	6 ~ 10 k	80 ~ 85	住宅、办公建筑照明	中
LED 灯	80 ~ 140	20 ~ 50 k	80 ~ 95	建筑室内外照明	低
高压钠灯	80 ~ 120	10 ~ 20 k	20 ~ 30	道路、广场室外照明	低

较大的比例。现阶段,建筑机电变压器应用,主要以传统的S9系列变压器为主,这一类型变压器耗能高,逐步被取代。从变压器设备选型来看,应注重对高效节能变压器的有效应用,如S11、S13系列的油浸式变压器与SCB11、SCB13系列干式变压器<sup>[4]</sup>。在变压器选择及安装过程中,应把握以下施工要点:

(1) 注重对建筑的用电负荷特性进行评估分析,对变压器容量、选用台数进行科学确定,确保变压器容量的适宜性,保证设备运行状态及性能水平。在面对用电负荷较大的建筑时,注重采取多台变压器并联运行的模式,并根据负荷变化对运行台数针对性调整,以实现节能降耗的运行目标。(2) 注重对变压器安装位置进行科学的设计。这一过程中,变压器安装位置选择时,应注重远离易燃易爆物品,并保证设备空间有良好的通风,降低因散热不良引发的事故。(3) 对变压器的高低压线路进行正确连接,尤其是对线路接线端子做好处理及控制,避免因损耗增加引发的安全问题。(4) 注重安装相应的保护装置,如避雷针、熔断器的设计,以满足变压器安全运行的需要。

2. 供配电线路节能施工分析。建筑机电安装工程施工过程中,供配电线路的损耗及线路电阻、电流平方成正比,通过减少线路损耗,有助于合理控制电流密度,降低能耗。在施工过程中,供配电线路节能施工应围绕以下几个方面展开:

(1) 对导线截面及材质进行科学的选择。导线截面大小会对电阻大小产生重要影响,通过应用经济电流密度法对导线截面科学选择,并在材料选用上,优先选用铜芯导线,这一材料的电阻更小,并且损耗更低。

(2) 注重对线路敷设方式进行优化。线路敷设施工时,应对建筑结构特点及使用需求进行分析,尽可能地缩短线路长度,减少导线的弯曲次数,以降低线路电阻<sup>[5]</sup>。

(3) 对线路做好绝缘处理及敷设保护工作,避免因线路绝缘损坏导致的漏电损耗增加,并加设线路防护装置,提升线路的导电性能及使用寿命。

3. 无功补偿装置的安装及调试。在供配电系统当

中,大量感性负载会消耗无功功率,导致功率因数降低,进一步增加线路损耗及变压器负担。对此,通过采取无功补偿装置的应用,有助于提升功率因素,减少无功功率的传输。在实际施工过程中,应围绕以下几点展开:

(1) 注重对无功补偿装置进行科学、合理地选择,并确定装置的容量和安装位置,确保功率因数达到0.9以上。(2) 正确地安装无功补偿装置的线路,针对性地处置好电容器的接线,有效降低短路或接触不良事故的发生率。(3) 针对性地开展无功补偿装置的调试工作,注重结合建筑物机电系统的运行情况,调节补偿装置的投入容量,确保补偿效果处于稳定状态。

### 1.3 动力系统节能施工技术分析

建筑机电动力系统主要包括水泵、风机、压缩机等设备,其能耗在总能耗占比权重仅次于照明系统。针对动力系统节能施工技术应用时,我们应注重从设备选择、设备运行方式优化、变频调速调控等方面展开。

1. 高效节能动力设备的选用及安装。高效节能动力设备的选用及安装,能够有效解决传统动力设备能耗高、效率低等问题。在设备选择时,可以选用高效节能水泵、高效节能风机等设备,这些设备采用优化的叶轮结构及电机设计,提升设备运行效率,并降低设备能耗<sup>[6]</sup>。动力设备选用及安装时,应注重以下几点:

(1) 注重把握好动力系统的工作需要,对设备的型号、规格、扬程、功率等进行针对性选择。(2) 对设备安装位置予以把握,确保其符合设计要求,并保证设备运行处于稳定、可靠的状态。(3) 注重对设备的进出管道、电气线路做好正确连接,避免出现泄漏问题。

2. 变频调速技术的应用及施工分析。变频调速技术的应用,关系到电气节能效果及质量。在技术应用及施工过程中,应注重把握以下几项内容:

(1) 注重对变频器的型号及容量进行科学、针对性选择,保证变频器的容量与电机的额定功率、额定电流等参数信息保持一致性,满足电机运行的需要。同时,注重对设备运行环境予以把握,对变频器类型

做好选择及应用。(2) 正确地安装变频器。这一过程中, 结合建筑电机安装工程的实际情况, 变频器应安装在通风良好、干燥、无粉尘的环境下, 避免阳光直射。(3) 连接变频器与电机的线路, 做好线路的屏蔽处理工作, 有效地减少磁干扰对其他设备的影响<sup>[7]</sup>。

除此之外, 注重对变频器的参数做好针对性调整, 以确保变频器处于良好、稳定的运行状态。

## 2 电气节能施工技术应用案例分析

### 2.1 案例概况

本项目为大型商业综合体项目, 项目建筑总面积为 12 万平方米, 地上 15 层, 地下 3 层。该综合体项目机电安装工程施工时, 包括了照明系统、动力系统等, 采取集中供电方式, 照明系统包括商业照明、办公照明、室外景观照明; 动力系统则包括了空调水泵、通风风机、电梯等设备。在项目施工建设时, 注重将多项节能施工技术进行应用, 以满足电气安装工程施工质量要求。

### 2.2 电气节能施工技术应用分析

1. 照明系统节能施工。该项目施工建设时, 照明系统采用 LED 高效节能灯具。商场营业厅选择高光效、高显色性的 LED 射灯和平板灯; 办公区域选择 LED 格栅灯; 室外景观照明则选用 LED 洗墙灯与投光灯。同时, 在照明方式选择及应用时, 根据不同区域的使用情况, 采取多种照明控制方式。在商场区域照明控制时, 采用智能分组及光控控制相结合的方式; 办公区域则采用人体感应控制与定时控制相结合的方式; 走廊、楼梯间控制时, 采用声控控制与人体感应控制相结合的方式。

2. 供配电系统节能施工。该项目施工建设时, 应用 2 台 SCB13 系列 1000kVA 干式变压器, 其能耗相对于传统变压器降低 30% 能耗, 负载损耗可降低 15% 左右。在施工时, 将变压器安装在地下 3 层设备机房内, 并在机房中设置强制通风系统, 保证变压器有一个良好的散热。在供配电线路施工时, 选用铜芯导线, 并根据各区域的负荷电流、传输距离情况等, 做好导线截面选择, 缩短线路长度, 以实现降低线损的目标。同时, 在大型感性负在设备附近安装无功补偿装置, 以针对性提升功率因素, 有效地减少该综合体项目的无功损耗。

3. 动力系统节能施工。在动力系统节能施工过程中, 主要针对空调水泵、通风风机进行施工。在设备选择上, 均选用高效节能的设备, 并设置变频调速装置。同时, 针对动力系统节能施工时, 加设智能控制系统, 采用楼宇自动系统对电气系统、动力系统进行集中控制, 实现对设备运行状态数据的监测分析, 并根据实际需要做好动力系统运行调节, 以减小能源损耗问题。

### 2.3 节能效果分析

在该项目施工建设过程中, 电气节能施工技术应用后取得了良好的节能效果。具体节能效果如下:

(1) 该建筑综合体的照明系统能耗降低 45% 左右。其中, 采用的 LED 灯具与智能化控制方式结合, 减少照明能耗。(2) 供配电系统能耗大幅度降低, 约为 20% 左右。通过应用 SCB13 系列高效节能变压器及无功补偿装置的应用, 降低变压器损耗与线路损耗, 供配电系统总损耗降低 6.4% 左右。(3) 动力系统能耗降低 30%。通过对高效节能的动力设备及变频调控技术进行应用, 减少水泵、风机的能耗, 并提升设备运行效率。如空调水泵运行效率由原来的 75% 提升到 85%, 通风风机的运行效率由原来的 70% 提升至 82%。

## 3 结束语

在新的社会经济发展形势下, 建筑机电安装工程中的电气节能施工技术应用, 对于降低建筑能耗、推动建筑行业绿色、可持续发展而言有着十分重要的意义。在此过程中, 建筑机电安装工程中电气节能技术应用, 需要遵循安全性、功能性、经济性及高效性的原则, 以保证系统安全、稳定、可靠运行。同时, 在推进工程项目施工建设过程中, 要注重选择高效节能设备, 并优化施工工艺, 加强智能化控制方式的应用, 以降低各系统的能耗。此外, 还要进一步加强施工过程的质量控制, 确保电气节能施工技术得到有效应用, 以确保工程项目建设具有良好的经济效益和环境效益。

## 参考文献:

- [1] 徐昌林, 邓群, 伍阳. 建筑机电安装工程电气火灾隐患智能预警系统的设计与应用 [J]. 安装, 2025(11):70-72.
- [2] 李珍福. 建筑机电设备安装的问题及质量控制方法 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(20):127-129.
- [3] 全辉跃. 智能建筑机电安装工程施工及质量控制探讨 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(29):72-74.
- [4] 张立君, 张杨, 王志勇, 等. 建筑机电安装工程中的电气节能施工技术分析 [J]. 工程建设与设计, 2025(16):132-134.
- [5] 李如新. 建筑机电设备安装工程施工中的质量控制要点与实践 [J]. 散装水泥, 2025(04):58-60.
- [6] 丁晓苗. 建筑机电安装工程中电气节能施工技术应用策略研究 [J]. 房地产世界, 2025(05):161-163.
- [7] 杨红春. 建筑机电安装工程中的电气节能施工技术分析 [J]. 大众标准化, 2023(07):105-107.

# 建筑工程装配式建筑结构 外挂墙板施工技术分析

李夏玲

(芜江建设工程有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 随着建筑行业的发展以及绿色建筑理念的深入, 建筑工程建设时广泛采用装配式建筑结构, 促进施工效率和质量显著提升。在装配式建筑结构中, 外挂墙板是核心部件, 其施工工艺可直接影响整个工程的质量及安全性。因此, 本文在介绍装配式建筑结构外挂墙板优势的基础上, 结合工程案例分析了外挂墙板具体的施工技术, 旨在为外挂墙板实际施工提供技术参考。

**关键词** 建筑工程; 装配式建筑结构; 外挂墙板; PC板加工; 保温层安装技术

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.020

## 0 引言

在建筑工程领域, 装配式建筑是一种常见的建筑工业化建造方式, 其施工流程较为简单, 节能环保性能优异, 与当前行业绿色节能的发展方向高度契合。装配式建筑结构施工时, 外挂墙板施工是重要环节, 其施工质量不仅直接影响建筑性能, 同时会极大地影响建筑外观的美观效果。因此, 探讨装配式建筑结构外挂墙板如何高质量地施工, 对提升建筑工程整体施工质量至关重要。

## 1 装配式建筑结构外挂墙板的优势

### 1.1 施工效率高

传统外墙施工法存在诸多的不足, 突出表现为工期难以控制、施工效率低下, 而外挂墙板的应用可有效规避这两大问题。外挂墙板生产时, 主要方式是工厂预制, 完成后再运输到施工现场, 开展吊装、定位、连接操作, 这种干法作业模式使交叉作业冲突有效地减少, 并明显缩短工序等待时间, 进而大幅提高施工效率<sup>[1]</sup>。在传统外墙施工中, 以手工操作为主, 需大量的熟练技工, 但外挂墙板的安装由专业吊装团队负责, 所需的辅助人员数量较少, 在标准化施工作业下, 依赖现场劳动力的程度有效降低, 同时, 高空作业强度也显著降低, 提升施工安全性。此外, 外挂墙板预制生产期间, 可同步开展主体结构施工, 且预制完成后, 无需等到主体结构完全封顶再安装, 促进施工进度有效地加快, 提高施工效率。

### 1.2 质量稳定可靠

外挂墙板工厂化生产时, 车间内生产环境稳定, 不会受到自然因素的干扰, 且标准化的生产流程可实

现严格地控制生产质量, 保障墙板尺寸误差处于合理范围, 使构件具有一致的精度。工厂预制方式下, 门窗框预埋、保温层复合等工序可集成化生产, 有效规避传统外墙存在的质量通病, 如墙面开裂、窗框渗漏等, 并提升墙板的抗渗、防水性能。另外, 外挂墙板的生产工艺规范, 采用的材料质量优质, 再加上节点采用柔性连接方式, 促进墙板的抗震性能、抗风能力显著提升, 有利于延长使用寿命。

### 1.3 绿色低碳环保

建筑行业绿色发展趋势下, 绿色环保的特性成为外挂墙板的一大核心竞争力。首先, 外挂墙板在工厂集中生产, 这有助于对粉尘、噪声的排放做出有效控制, 同时, 也显著减少了产生的建筑垃圾量, 减轻环境污染的程度; 干法作业无法现场搅拌混凝土和砂浆, 碳排放及能源消耗均进一步降低<sup>[2]</sup>。其次, 工厂化生产过程中, 配料非常精准, 提高了材料利用率, 减少损耗率, 且部分墙板构件采用再生骨料, 能够回收再利用, 与循环经济发展理念相符。最后, 外挂墙板采用结构层—保温层—饰面层复合结构, 具有优异的保温隔热性能, 建筑建成投入使用后, 可显著降低能耗, 实现绿色建筑目标。

## 2 建筑工程装配式建筑结构外挂墙板的施工技术

### 2.1 工程概况

本文选取某大型建筑工程为案例, 其占地面积约为 35 360 m<sup>2</sup>。在地上部分, 高层住宅楼建设 8 栋、配套公共建筑建设 2 栋, 二者建筑总面积 76 225.52 m<sup>2</sup>。

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

在地下部分,建设 1 座地下车库,使居民停车需求充分满足。该工程建设时,采用装配式结构的为 4 号建筑,此建筑设计使用年限为 50 年,抗震设防烈度设计为 7 度,耐火等级地上、地下设计为不同等级,前者为一级,后者为二级。另外,4 号建筑地下部分的防水标准设计为一级。4 号建筑施工中,采用外挂墙板。

## 2.2 现场施工准备

外挂墙板施工时,现场准备工作良好开展具有关键性的作用。首先,设计图纸全面且细致地分析,结合施工现场实际情况,精确定位安装位置,高质量的完整管线预埋,保障后续施工顺利开展。在施工现场勘察过程中,技术人员可借助仿真模拟软件等现代化技术,模拟外挂墙板的安装过程,分析是否存在质量问题,如有则及时做出调整,保障施工质量符合要求。其次,外挂墙板预制完成后,质量检查需严格开展,如有质量缺陷存在,予以退回厂家处理,禁止在建筑工程中使用<sup>[3]</sup>。最后,积极组织技术沟通会议,确保技术交底工作全面地开展,使所有施工人员均能充分了解各项施工技术,

## 2.3 外挂墙板连接节点处理

从地震荷载出发,外挂墙板节点连接时,应选择柔性连接方式,同时形式设计为两种,一种是平移,一种是旋转。如果 PC 板的高度小于宽度,连接节点的形式主要是旋转,但若高度大于宽度,连接扁平结构的形式则采用平移。在节点位置,通过移滑垫片实现连接件的连接,确保墙板具有符合要求的抗震性能。本工程处理连接节点过程中,先计算地震荷载,即地震作用系数与 PC 板自重的乘积,之后结合 PC 板尺寸、形状等,将连接点位置、数量合理地确定。连接点如发挥承重作用,数量不超过 2 个,非承重的数量也要超过 4 个。同时,根据基本要求,科学确定滑动孔尺寸,控制偏差不得超过 5 mm。

## 2.4 PC 板加工工艺

本工程外挂墙板主要是 PC 板,且在工厂内预先完成了生产加工。根据本工程建设要求,按照模块化理念,结合标准规范尺寸设计墙板,确保墙板的尺寸、形状完全一致于设计图纸。在 PC 板生产时,连接装置、配件均设置在板体背面。按照 4 号建筑的实际情况,PC 板的尺寸规格共有 6 种,分别是 2.95 m×2.34 m、2.95 m×2.19 m、2.95 m×2.11 m、2.95 m×1.85 m、2.95 m×1.74 m、2.95 m×1.48 m,这 6 种规格的厚度均为 0.3 m,重量处于 1.9~2.5 t 之间,总数量共 34 个。

PC 板加工过程中,切割方式按照结构位置、精度等选择,如结构位置有复杂的形状要求,且相对有较

高的精度,应选择激光切割,但若结构位置较为简单,则选择切割机切割<sup>[4]</sup>。接着,钻孔、热弯成型等工序依次进行,完成基础加工。最后,工厂组装 PC 板,固定方式通常采用铆钉结合螺丝的方式。出厂前,抽样检查 PC 板的质量,利用卡尺详细地检查 PC 的尺寸参数,并用肉眼观察的方式检查 PC 板表面,确认尺寸符合要求,且无气泡或划痕存在于表面,即可运输到施工现场。

## 2.5 保温层安装技术

保温板安装时,在外墙结构表面涂刷砂浆,注意涂抹均匀,且厚度控制在 3 mm 左右,之后再砂浆涂抹到保温板的背面,要求涂抹面积达到板总面积的 40% 以上,完成后即可粘贴。粘贴操作按照由上到下的顺序进行,每块保温板安装到定位框中后,施工人员轻轻地按压,让其紧密贴合到外墙上,也避免空隙或气泡留存在保温板与外墙之间。保温板拼接过程中,施工人员应控制相邻两块的缝隙,保持在 5 mm 以内。全部安装完成后,利用水平仪检查表面平整度,如板与板的差异超过 3 mm,应立即予以调整。钻孔作业于静置 24 h 后开展,在定位点上安装螺栓等锚固件,固定保温板。最后,保温板表面再次均匀地涂抹一层粘砂浆,同时在砂浆中粘贴、浸入网格布,网格布搭接时,宽度控制为 100 mm,施工人员边作业边观察表面,褶皱未明显存在情况下,实施抹面作业,并予以养护。

## 2.6 安插连接件

本工程涉及的连接件类型较多,包含后置锚固连接件、预埋式连接件等,在施工时,将其安插在外挂墙板上预埋的对应的套筒内,并利用螺栓紧固,使连接效果稳固的形成。主体结构彻底清理干净后,细致检查基层情况,确认损坏问题未明显存在情况下,利用弹线方式按照设计图纸定位,注意控制偏差在 3 mm 以内。同时,连接件设置在相邻的板材间,内置连接件数量至少 4 个,以能达到有效连接 PC 板的效果,保证结构紧密地形成。连接件安插过程中,施工人员要持续的监测外立面接缝情况,根据接缝变化,合理控制定位误差,避免误差超出允许范围。待安装完所有连接件,PC 板整体连接质量全面检验,且检验工作由专业技术人员开展,确保其质量符合要求。

## 2.7 PC 板吊装

在外挂墙板施工中,PC 板吊装是最重要的环节之一,其施工质量可直接影响墙板整体质量,故应严格掌握吊装作业技术<sup>[5]</sup>。本工程 PC 板吊装时,根据施工要求,起吊方式选择 4 吊点式。吊装施工期间,施工人员先要搭建支撑结构,将现场清理干净,同时以支架实际布局需求为依据,确定各立杆的位置,保证立杆

结构与设计要求相符,并实现稳定的支撑。开始吊装后,PC板按照吊装顺序依次摆放在地面,且摆放方向与设计图纸一致,接着施工人员在PC板外伸筋上绑扎塑胶绳,绳的长度需达到1.5 m,并保证绑扎牢固,在绳的作用下,PC板安装中基本方向能够准确地确定。为避免滑脱问题出现,吸盘应紧密地贴合在PC板上,如果平衡梁并不存在,吊索与PC板夹角要维持超过60°。在PC板提升过程中,速度应缓慢,同时板材需始终处于水平状态,弯曲或倾斜现象避免出现,当升高200~300 cm,提升操作先停止,细致的检查吸盘、钢丝绳的状态,确认状态正常后再继续提升。到达安装位置高度后,PC板先悬停,让其与安装位置间保持1.5 m的距离,之后进行方向的调整与修正,确保方向正确。最后,PC板再提升20 cm,运送至安装位置上方,施工人员精准对线后,起吊机缓慢降下PC板。在PC板安装过程中,偏差应控制在5 mm以内。

PC板安装完成后,需认真核对其标高,同时复核定位整体的轮廓线。本工程复核时,工具除水平尺外,还采用激光水平仪。复核前,要先全面清理安装现场,避免障碍物等存在于地面,防止影响复核精度。复核时,根据设计图纸、施工方案,现场校验相应的数据,如标高控制点、轴线等,在此过程中,将激光水平仪放置在距离PC板0.5 m处,弹出安装轮廓线,定位测量水平线、垂直线等各线。接着,施工人员用水平尺复核这些轮廓线的位置,按照复核结果,判断PC接缝对齐与否。同时,在PC上准确的标记接缝位置、固定件安装位置等,如果发现轮廓线的偏差超出允许范围,调整立即开展,直至符合要求。确认质量无误后,后续PC板安装施工可继续进行。

## 2.8 PC板接缝防水处理

PC板的接缝原本不具备防水性能,为满足防水性的建设要求,需在接缝位置打密封胶。施工前,要严控作业环境。适宜温度区间为5℃至35℃,且空气湿度应低于70%。并且,该项工作应严禁开展于雨天、大风天气或沙尘天气,以避免水汽杂质侵入,影响粘结强度。施工时,施工人员要先将接缝清理干净,避免残留的杂质影响密封胶的封闭效果。可酌情根据清理效果,使用专用中性清洁剂对接缝处进行擦拭,确保表面不存在霉斑、油污等顽固污渍。接着选择密封胶,应是高分子高性能的,且具备优异的耐老化、耐高低温、抗紫外线性能,还要充分的协调于墙面。工程人员需展开基材相容性测试。首先,取少量胶样涂抹于PC板边角位置,静置24小时后观察其是否出现变色、鼓泡等异常现象。打密封胶过程中,胶的宽度需合理控制,本工程设计为60 mm,打入深度设计为宽度的1/2。打

胶之前,缝隙含水率应精准检测,低于8%才能实施打胶操作。密封胶的注入操作利用胶枪进行,胶枪与缝隙间应保持斜切45°,注入速度保持匀速,一次打胶完整,中间不可停止。注胶完成后,等待10 min,之后用刮刀将胶的表面滑平,处理后继续静止12 h,让密封胶固化。固化后,需要展开淋水实验,向接缝处持续采用高压水枪进行喷淋,确保其无渗漏现象。若出现渗漏问题,需及时定位渗水点,并剔除旧胶,按照施工规范重新补胶。

## 2.9 拆除临时支撑及外挂墙板保护

临时支撑拆除操作需在混凝土强度达标后开展,拆除顺序为先斜撑件后紧固件。外挂墙板施工时,由于仅能在有限的空间中作业,施工条件相对较差,因此,拆除过程中,使用的设备可选择小型挖掘机,通过切割机依次切割支撑件,让其逐一脱落,最后再清理施工现场。

外界因素很容易影响外挂墙板成品,导致各种质量问题产生,如错位、裂缝、防水失效等,使建筑工程整体质量受到严重影响。对此,可通过一些保护措施保护外挂墙板成品,如PC板吊装结束后及时在上面覆盖透气无纺布,避免被污染;PC板安装结束后将木制L型护角或PVC护角安装到板上,防止磕碰损坏。

## 3 结束语

建筑工程建设时,装配式结构外挂墙板优势众多,如节能环保性能显著、可控性良好、施工效率高等,广受青睐和认可。在外挂墙板实际施工过程中,应根据工程建设要求、施工现场实际情况等,严格控制运输、吊装、接缝防水等施工环节,精准把握各环节施工技术的要点,最大限度减少施工质量隐患,提升施工质量,进而显著提高建筑整体的性能与安全性,有力地促进建筑工程高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 魏治有. 外挂墙板施工技术在房建工程装配式建筑结构的应用探究[J]. 建材发展导向, 2025, 23(14): 94-96.
- [2] 段兴发. 浅析房建工程装配式建筑结构外挂墙板施工技术[J]. 住宅与房地产, 2025(17): 44-46.
- [3] 侯晓宇. 装配式建筑外挂墙板热工性能研究[J]. 广东建材, 2024, 40(08): 138-140.
- [4] 李朋朋, 何爱诚. 装配式建筑施工技术关键及质量控制方法[J]. 散装水泥, 2024(03): 70-72.
- [5] 窦正富. 高层建筑装配式外挂墙板施工技术[J]. 建筑机械化, 2024, 45(06): 136-139.

# 玻璃加工废料循环利用技术研究

马心磊<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 杨昊<sup>2</sup>

(1. 山东温声玻璃科技股份有限公司, 山东 济南 250000;

2. 济南市产品质量检验院, 山东 济南 250000)

**摘要** 针对玻璃加工废料加工难度大、利用率不高造成资源浪费、环境污染等问题, 本研究对玻璃加工废料的来源、分类、理化特征进行系统梳理, 提出包含物理法直接使用、热熔回用法、化学活化法等多层次循环使用技术路线, 从技术经济性和环境影响角度比较不同路线的优劣和生命周期的尝试性。研究结果表明, 化学活化法制备高附加值建材具有显著潜力, 但是各种技术都面临着成本、工艺、市场接纳度的产业化瓶颈, 需要进一步从政策引导和技术优化等方面促进规模化应用。

**关键词** 玻璃加工废料; 循环利用技术; 资源浪费

中图分类号: TQ171

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.021

## 0 引言

玻璃加工业在快速发展的过程中也会产生大量的废料, 传统的处理方法主要是填埋, 既占用土地又造成资源浪费和潜在的环境风险。促进玻璃加工废料循环利用, 已经成为产业可持续发展中亟待解决的问题。本研究对玻璃加工废料来源、分类、性质进行系统解析, 总结物理法、热熔法、化学法回收技术的主要路线, 对技术经济性和环境影响进行全面评估, 以期对相关工艺的筛选、优化及产业化推进等提供理论参考, 从而推动玻璃行业绿色转型和循环经济的发展。

## 1 玻璃加工废料的特征与预处理

### 1.1 废料来源与分类

玻璃加工废料生产贯穿玻璃制品自原片至成品深加工链条中, 来源复杂多变、属性不一。根据发生过程, 大致可以分为如下几种类型: 第一, 切割和磨边废料: 最大量发生于建筑玻璃加工、家具玻璃与汽车玻璃在裁切与边部精磨时产生大量大小不等的玻璃碎屑与粉状磨料的混合物; 第二, 钻孔及雕刻废料, 如玻璃面板开孔和艺术玻璃雕刻时, 都有特定玻璃颗粒和粉尘; 第三, 钢化、夹层、镀膜等深加工生产出来的次品或者不合格废料, 这些废料通常形貌完好却有内部应力不均匀、气泡、膜层有缺陷; 第四, 对清洗、抛光等工序所产生的含有玻璃微粉污泥进行处理。根据其物理形态和污染程度, 又可将这些废料粗略划分为洁净碎玻璃(大规格边角料等)、污染碎玻璃(表面黏附

油污、胶黏剂、金属涂层等)以及玻璃粉(通常情况下, 粒径小于 1 毫米的是细粉或者粉尘)<sup>[1]</sup>。

### 1.2 理化特性分析

玻璃加工废弃物的物理和化学属性构成其资源再利用的核心。从物理特性上看, 它主要体现在硬度大、脆性强、形貌不规则等。尤其是机械加工后生成的玻璃粉体粒径分布广、外形多为尖锐棱角、堆积密度小, 不仅增加贮存、运输难度, 而且影响它们在一定利用途径上的工艺性能<sup>[2]</sup>。它是否能得到有效利用, 其化学特性至关重要。玻璃本质上是一种过冷液体, 具有非晶态(长程无序)结构, 化学组成以二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )为主网络形成体, 并含有氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )、氧化钙( $\text{CaO}$ )、氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )等多种网络修饰体氧化物。这种成分使其展现出较高的化学稳定性和惰性, 能够在常温下抵抗酸碱侵蚀, 但也意味着在常温常压条件下, 它很难进行化学反应并被转化为其他物质。对镀膜、印刷、夹胶后的污染废料表面会吸附一些有机聚合物、金属氧化物、硫化物之类的杂质, 热处理时可能会生成有害气体或者对反应进程造成化学处理干扰<sup>[3]</sup>。

## 2 玻璃加工废料循环利用技术路径

### 2.1 物理法直接利用

物理法直接利用就是对玻璃废料进行破碎、筛分、清洗、表面改性, 而无需改变其化学组成及晶相结构, 将其作为骨料或填充料直接应用于其他产品中。多采用当前技术最成熟、费用比较低廉的利用方式。它的

作者简介: 马心磊(1984-), 男, 专科, 研究方向: 玻璃深加工。

主要用途有：第一，用作混凝土或者沥青混合料中骨料或者掺合料<sup>[4]</sup>。通过使用特定粒径的清洁玻璃碎片替代部分天然砂石来制作混凝土，可以增强混凝土的防渗和耐用性。但是，需要警惕玻璃骨料与水泥浆体界面可能出现的碱—硅酸反应（ASR），这可能导致混凝土的膨胀和开裂。通常来说，可通过采用低碱性水泥、添加矿渣、粉煤灰等火山灰质物质，或者对玻璃表面进行预先的涂层处理来实现抑制效果。就沥青混合料而言，玻璃骨料可以改善路面抗滑性能及耐磨性。第二，将其用作人造石材或者玻璃陶瓷骨料。把彩色玻璃碎粒和树脂复合在一起可制得美观大方、装饰性人造石材。在粘土和其他材料中掺入特定粒度玻璃粉进行烧结可制得特殊质感玻璃陶瓷砖<sup>[5]</sup>。第三，作为建筑的保温隔热材料。通过对玻璃废料进行粉碎和发泡等处理，生产出多孔轻质泡沫玻璃，这种玻璃拥有出色的保温、隔热、吸声、防火特性，因此，在建筑墙体和屋顶的节能隔音项目中得到广泛的应用。另外，玻璃微粉还可以用作填料混入保温砂浆或者涂料，以增强材料的隔热性和耐久性。物理法直接利用工艺成熟、成本低，是实现玻璃废料资源化处理的一种重要手段，在建材领域有着广阔的应用前景。

## 2.2 热熔回用法

热熔回用法，又称重熔法，是借鉴废旧玻璃（碎玻璃）回收的传统工艺，将玻璃加工废料经分选、清洗、除杂后，作为原料投入玻璃熔窑中，在高温（通常1 400 ~ 1 600 °C）下重新熔制成新的玻璃制品。该方法在理论上能使玻璃闭环循环运行，是一种最理想的资源效率途径。热熔回用按照回用目标及废料品质的不同可以划分为“同级回用的”与“降级返回使用”两种。同级回用是指将成分匹配的高质量加工废料（浮法玻璃原片的边角料）回用于生产同类型玻璃产品，这对废料的纯净度、颜色与化学组成的一致性有极其严格的要求，需要进行严格的光学分选和磁选预处理。降级再利用的要求相对较为宽松，如可以将多种颜色混合的废料用于制造玻璃纤维、玻璃马赛克、泡沫玻璃、有色瓶罐玻璃等对颜色和透明度要求不高的产品。热熔回用核心优点是能够充分利用废料原有硅酸盐网络结构，显著减少新玻璃制造过程中所需原料消耗以及熔化能耗。研究发现，当碎玻璃的掺入量增加10%时，熔制过程中的能量消耗大约可以减少2% ~ 3%。

## 2.3 化学活化法

化学活化法作为近几年备受瞩目的高价值利用技术途径，其核心理念是利用玻璃废料，尤其是那些难以通过物理或热熔法处理的微细玻璃粉（GLP），以硅

铝质为前驱体在碱刺激或酸刺激下发生化学反应解聚和重新组合生成胶凝性能良好的产品，如地质聚合物（Geopolymer）或者碱刺激胶凝材料。玻璃的非晶态结构使其在强碱（NaOH、KOH）或强碱硅酸盐溶液（水玻璃）的激发下，表面的硅氧键和铝氧键更容易断裂，溶解后的硅酸根和铝酸根离子会进行缩聚反应，形成三维网状结构的硅铝酸盐凝胶。这种凝胶具有将骨料与其他填充材料紧密结合的能力，并在硬化后展现出与水泥石相似的性质。化学活化法向玻璃加工废料特别是堆存较多的玻璃粉尘打开了一条很有前景的资源化出口途径。它的主要用途有：地质聚合物混凝土、砂浆、砌块等；固化/稳定化是对重金属污染的土壤或者危险废物进行胶凝处理的一种材料；防火、耐腐蚀涂层材料；多孔吸附材料、催化载体。相较于传统的波特兰水泥，使用玻璃粉作为原料生产地质聚合物不需要经历“两磨一烧”的高能耗和高碳排放阶段。这种制备方法通常可以在低于100 °C的环境中完成，并据估计可以使二氧化碳的排放量降低到60% ~ 80%之间。

## 3 玻璃加工废料循环利用技术经济与环境影响综合评价

### 3.1 不同技术路径对比

系统比较以上三大技术路径，有利于依据废料特性、区域条件、市场需求作出合理的选择。在技术成熟度和适用性方面，物理法直接利用是目前最成熟的方法，适合处理组分简单、污染较小的块状、粗颗粒废料且工艺门槛较低。热熔回用法技术成熟但要求严格，尤其适用于有稳定回用渠道（自有熔窑）的大型玻璃加工企业处理洁净的同质废料。化学活化法则作为一项新兴的技术手段，尤其适用于处理难以处理的玻璃微粉问题，具有高度的技术灵活性，但其生产工艺还需要进一步的优化和标准化。在经济性方面，物理法的初始投资及运行成本最小，但是产品利润单薄、缺乏经济驱动力。热熔回用法的经济效益高度依赖预处理成本和碎玻璃的市场价格，当原生原料（纯碱、石英砂）价格高时优势明显，但高质量分选设备和能源成本是主要负担。化学活化法的原料成本低（废料近乎零成本），但激发剂成本和粉磨能耗构成主要成本，目前其产品因性能优势可能享有一定溢价，但是市场还有待培育，总体的经济性还需要在规模化生产、技术优化之后才能进一步凸显。由资源环境效益评价可知，热熔回用法对于节约原生资源，减少熔制能耗的效益最为直接显著，趋近于闭环循环。化学活化法则在固碳和减少排放方面具有巨大的潜力，同时也实

现废物的高价值转化。物理法在环境效益上虽不及前二者，却能避免填埋对环境产生的负外部性问题，而且工艺能耗最小。

### 3.2 生命周期评价 (LCA) 初步分析

生命周期评价 (LCA) 是一种综合性的方法，用于全面评估产品、工艺、活动在从原材料获取到最终处理的整个生命周期中对资源消耗、能源消耗、环境排放的影响。玻璃加工废料循环利用技术的 LCA 尝试性分析可量化对比不同途径下全链条环境绩效。将生产一吨建筑材料作为一个功能单位，对其加以分析。对于物理法 (作为混凝土骨料)，其系统边界包括废料收集、运输、破碎筛分等过程，主要环境影响来自于电耗和运输产生的间接排放，但是由于它代替天然砂石进行开采加工，整体上可以显著降低生态破坏、粉尘排放、能耗。对热熔回用法而言，系统边界需要覆盖废料分选、清理、输送、重熔等工序。LCA 研究结果一般表明，虽然分选和清洗工艺耗费水电，但是用碎玻璃代替原生原料可以显著减轻石英砂开采和纯碱生产这类能耗大、排放多的环节所带来的负担，总体而言，这有助于减少全球变暖潜力 (GWP)、酸化潜力 (AP) 以及初级能源消费 (PED)。影响结果的关键参数是碎玻璃的掺入比例和熔窑的能源结构 (天然气 versus 电)。对化学活化法而言，系统边界主要由玻璃粉粉磨、激发剂制作、混合搅拌和维护等工序组成。其 LCA 研究的焦点往往在于激发剂 (尤其是 NaOH) 生产的高能耗高排放，以及粉磨玻璃粉的耗电量。然而，由于其完全避免水泥熟料烧成 (温度约 1450 °C) 这一碳密集型过程，绝大多数研究结论表明，即使考虑激发剂的影响，地质聚合物产品碳足迹亦远远小于普通硅酸盐水泥混凝土碳足迹。另外，地质聚合物所具有的耐腐蚀性可能会延长结构的使用寿命并产生附加环境效益。初步 LCA 分析表明，三种循环利用路径在“摇篮对坟墓”整个过程视角下都较传统填埋处置有明显环境优势，其中，热熔回用、化学活化等技术对气候变化响应的促进作用尤其明显。

### 3.3 产业化瓶颈分析

尽管玻璃加工废料循环利用的技术路径日益清晰，环境效益得到认可，但其大规模产业化仍面临一系列系统性瓶颈。从技术工艺层面看：第一，高效智能化分选技术仍然是产业难点。现有的光学、密度、电磁等分选设备在除去玻璃中痕量陶瓷、金属、不同色彩玻璃时，分离效果以及成本效率都需要提高。第二，对于化学活化法，反应过程的稳定性控制、激发剂的

优化与替代 (探索利用工业副产物作激发剂)，以及产物性能的长期可靠性验证仍需大量研究与工程实践。在经济成本层面，回收体系设置及运营成本较高。玻璃加工企业星罗棋布，废料收集、分类、运输等物流成本比重较大。高品质预处理 (深度清洗、精细分选等) 进一步推高回收料成本，使其在与廉价原生原料竞争时处于劣势。同时，再生产品市场尚未完全打开，消费者和建筑设计师对含再生玻璃的产品 (特别是结构材料) 存在性能疑虑，导致市场接纳度低、价格上不去。在政策标准和市场机制方面：目前存在的最大限制。一方面，由于没有强制性玻璃废料分类收集法规以及清晰的“生产者责任延伸”，造成废料来源混杂、质量不高。另一方面，再生产品 (玻璃骨料混凝土、地质聚合物制品等) 的行业标准严重缺失或滞后，无法进入主流建筑设计规范和采购目录。第三，实质性经济激励政策不足，如对于利用再生材料生产的产品税收减免、补贴、绿色采购优先权以及对于填埋处置收取高额处理费，都未能有效地调控市场。

## 4 结束语

循环利用玻璃加工废料是减轻资源压力、环境负荷的一个重要手段。本文对不同技术路径进行了系统分析，结果表明各种方法具有适用性、经济性、环境效益等特征。化学活化法显示高值化利用的良好前景，但技术标准欠缺、处理成本过高、市场机制不够健全等问题仍然是目前制约产业化发展的瓶颈问题。未来要强化跨领域技术融合并健全政策激励和标准体系，促进形成涵盖分类收集、高效处理及产品应用等环节的产业链，从而使玻璃加工废料得到大规模、高值化回收。

### 参考文献:

- [1] 黄民才,刘中安,杨泉.一种用于钢化玻璃加工废料回收设备:CN202320890979.9[P].2023-04-20.
- [2] 唐道会.一种具有废料收集机构的玻璃加工平台:CN202220811882.X[P].2022-04-11.
- [3] 王泽斌.高放射性核废料玻璃固化及成分设计[J].玻璃搪瓷与眼镜,2022,50(10):37-43.
- [4] 杨贵龙,耿东凯.一种玻璃加工用废料收集装置:CN20220910494.7[P].2022-12-13.
- [5] 张宇轩,马瑞,崔秀涛,等.硼硅酸盐核废料玻璃在深地质处置过程中腐蚀机理研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(05):1749-1760.

# 化工过程定量风险评估模型构建研究

刘琦

(江苏吉安安全科技有限公司徐州分公司, 江苏 徐州 221000)

**摘要** 针对某炼厂苯乙烯装置传统 HAZOP 无法量化泄漏频率与个体风险的缺陷, 本研究构建“数据、机理、场景”耦合定量风险评估模型。整合 OREDA 2019 与厂内 MIS 数据, 引入现场微泄漏事件完成贝叶斯更新获装置特异性泄漏频率; 建立 Fay spreading+Spill 源项与重气箱—高斯瞬态切换扩散模型, 计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 代理模型, 将单场景计算耗时缩至 2 min; 通过 Probit 函数与  $5 \times 10^4$  次 Monte Carlo 抽样得个人风险 IR, 识别红区 6.8 ha。现场验证平均相对误差 12.7%, 满足 AIChE 准则; 成本效益分析显示, P-101 泵出口增设  $\leq 10$  s 远程切断阀 CER 最低 ( $2.3 \times 10^6$  元 / (人 · a<sup>-1</sup>)), 削红区 79%。“季度数据—年度模型”闭环机制与 Flask Web 工具旨在为同类装置提供可参考的 QRA 方案。

**关键词** 苯乙烯装置; 定量风险评估; 贝叶斯更新; 重气扩散; 成本—效益优化

中图分类号: TQ02

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.022

## 0 引言

炼化一体化规模扩大使苯乙烯等易挥发有毒介质泄漏风险日益突出。传统 HAZOP 分析虽能系统识别偏差, 但缺乏泄漏频率、暴露剂量及多米诺骨牌效应的数值度量, 导致风险管控经验化, 既增加了投资, 又遗留了不可接受残余风险<sup>[1]</sup>。国内外倡导以定量风险评估 (Quantitative Risk Assessment, QRA) 支撑最低合理可行原则 (As Low As Reasonably Practicable, ALARP) 决策, 然而现有 QRA 多依赖通用失效手册、采用静态高斯模型低估近场浓度、CFD 模拟耗时限制蒙特卡洛应用<sup>[2]</sup>。因此, 构建兼顾数据特异性、机理准确性与计算效率的闭环 QRA 模型, 对提升化工装置风险管控的科学性与经济性具有重要意义。

## 1 问题提出与总体技术路线

在炼化企业苯乙烯装置运行过程中, 传统危险与可操作性分析 (Hazard and Operability Study, HAZOP) 方法主要依赖于定性描述工艺偏差, 虽能系统识别潜在危险, 却难以提供泄漏频率、毒物扩散范围及个人风险等量化指标, 导致风险管控长期停留于经验判断层面。这不仅可能造成安全投入的盲目性, 也使残余风险处于不可控状态<sup>[3]</sup>。定量风险评估 (Quantitative Risk Assessment, QRA) 通过系统整合设备失效数据、泄漏源项模型、大气扩散模拟及剂量—响应关系, 将风险转化为年均死亡概率等可度量指标, 从而科学弥

补 HAZOP 在量化决策支持方面的不足<sup>[4]</sup>。本研究针对苯乙烯介质连续泄漏可能引发的急性中毒与闪燃事故, 以个人风险值  $IR=1 \times 10^{-5}$  人 · a<sup>-1</sup> 为不可接受阈值, 构建“数据、机理、场景”耦合模型, 闭环流程为: 采集炼厂独有数据、训练贝叶斯更新与代理扩散模型、生成联合场景、计算网格化风险、优选保护层并回流数据, 实现模型进化与风险持续降低。

## 2 定量风险评估模型构建

### 2.1 泄漏频率数据库与贝叶斯更新

针对炼化苯乙烯装置传统 HAZOP 定性偏差、风险管控经验化问题, 构建“数据、机理、场景”耦合 QRA 模型。融合 OREDA2019 通用失效数据与厂内 MIS 检修/事件日志, 经贝叶斯更新获装置特异性泄漏频率; 采用 Fay 液池扩展+Spill 挥发源项模型, 结合重气箱—高斯瞬态切换扩散方程, 通过计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 代理模型将单场景计算从 180 min 缩至 2 min; 基于 Probit 剂量响应与  $5 \times 10^4$  次蒙特卡洛抽样得个人风险, 识别红区 6.8 ha。成本效益分析显示, P-101 泵出口  $\leq 10$  s 远程切断阀方案 CER 最低 ( $2.3 \times 10^6$  元 / (人 · a<sup>-1</sup>)), 削红区 79%。建立“季度数据—年度模型”闭环机制与 Flask Web 工具, 为同类装置提供可复制的 QRA 方案, 提升风险管控的科学性与经济性。基于 Gamma-Poisson 共轭特性, 采用贝叶斯框架更新先验, 得到后验泄漏频率  $\lambda_{post}$ , 其表达式如下:

作者简介: 刘琦 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化学工程与工艺。

$$\lambda_{post} = \frac{\alpha_0 + n}{\beta_0 + T} \quad (1)$$

式(1)中,  $\lambda_{post}$  为后验泄漏频率, 单位次/年;  $\alpha_0$  为 Gamma 先验形状参数, 无量纲, 控制分布峰度;  $\beta_0$  为 Gamma 先验尺度参数, 单位年, 反映先验数据时间跨度;  $n$  表示现场观测到的泄漏次数;  $T$  为对应观测时间长度, 单位年。更新后超参数  $\alpha = \alpha_0 + n$ 、 $\beta = \beta_0 + T$  兼具先验知识与现场证据, 可在小样本条件下保持稳健<sup>[5]</sup>。该方法解决了传统手册数据“水土不服”问题, 使后续 QRA 场景频率与炼厂真实可靠性水平保持一致, 为个人风险计算提供可信输入。

### 2.2 泄漏源项与扩散耦合模型

针对苯乙烯常压 35 °C 储运的泄漏特性, 构建两阶段源项—扩散联合模型以支撑定量风险评估。第一阶段耦合 Fay 液池扩展方程与 Spill 挥发模型, 引入地面导热及空气对流换热系数, 同步求解液池厚度、表面温度及挥发速率, 覆盖不同地表热边界差异; 第二阶段基于苯乙烯重气特性, 采用 Richardson 数 ( $Ri < 0.15$ ) 触发的重气箱—高斯瞬态烟团切换模型, 结合 Monin-Obukhov 长度修正大气稳定度参数, 实现近场重力下沉与远场被动扩散的平滑过渡。通过 CFD 代理模型训练, 单场景计算耗时从 180 min 降至 2 min, 兼顾精度与效率, 为后续剂量—响应及个人风险计算提供高时空分辨率浓度场支撑。重气—高斯切换判定准则如下:

$$Ri = \frac{g(\rho_s - \rho_a)H}{\rho_a u_*^2} \quad (2)$$

式(2)中,  $Ri$  为 Richardson 数, 无量纲;  $g$  为重力加速度, 单位  $m/s^2$ ;  $\rho_s$  为气云密度, 单位  $kg/m^3$ ;  $\rho_a$  为环境空气密度, 单位  $kg/m^3$ ;  $H$  为特征云高, 单位  $m$ ;  $u_*$  为摩擦速度, 单位  $m/s$ 。当  $Ri < 0.15$  时, 模型由重气箱切换至高斯瞬态模式。为缩短计算耗时, 采用 CFD 快照样本训练基于深度前馈网络的代理模型, 在保持 90% 以上相关系数的前提下, 单次场景运算时间由 180 min 降至 2 min, 满足实时风险评估需求。

### 2.3 剂量—响应与个人风险计算

在获得高时空分辨率的苯乙烯浓度场后, 需将其转化为健康危害概率以实现定量风险评估。本文选用 Probit 模型描述急性中毒剂量—响应关系, 该模型假设死亡率与毒物摄入量呈对数正态分布, 可较好地反映苯乙烯对中枢神经的急性抑制效应。暴露时间固定为 10 min, 以体积分数  $C$  代表瞬时平均浓度, 则死亡概率计算式如下:

$$P = \Phi(k_1 + k_2 \ln(C^n t)) \quad (3)$$

式(3)中,  $P$  为个体死亡概率, 无量纲;  $\Phi$  表示标准正态累积分布函数;  $k_1$ 、 $k_2$  为 Probit 系数, 分别对应毒物特异性截距与斜率, 苯乙烯急性吸入推荐值取  $k_1 = -6.8$ 、 $k_2 = 1.8$ ;  $C$  为体积分数, 单位 ppm;  $n$  为浓度指数, 取 1.0;  $t$  为暴露持续时间, 单位 min。将 2.2 节输出的三维浓度场与装置周边 100 m × 100 m 人口栅格叠加, 可得到每名网格受体点的  $C(x, y, t)$  序列。随后执行 Monte Carlo 抽样, 每次模拟随机组合泄漏源强、风速、风向及点火时间, 共运行  $5 \times 10^4$  次, 获得剂量—响应概率的统计分布。个人风险定义为年均死亡概率, 其空间积分表达式为:

$$IR(x, y) = \int_0^T f_{rel} \cdot P(x, y, t) \cdot f_{ign}(t) dt \quad (4)$$

式(4)中,  $IR(x, y)$  为网格点个人风险, 单位  $a^{-1}$ ;  $f_{rel}$  为设备年泄漏频率, 由 2.1 节后验频率提供;  $P(x, y, t)$  为对应时空死亡概率;  $f_{ign}(t)$  为延迟点火概率密度函数, 采用指数模型表征。积分结果按 1 m × 1 m 网格输出后, 绘制装置外 1 km 范围风险等高线图, 可直观识别  $IR \geq 1 \times 10^{-5}$  的“红色区域”, 为保护层布置提供量化边界。

## 3 模型验证与风险决策应用

### 3.1 现场监测数据对比验证

为验证扩散子模型可靠性, 于 2023-09-12 在苯乙烯装置开展计划性小泄漏实验, 通过调节泵出口节流阀模拟持续 3 min、源强约 0.15 kg/s 的液相泄漏。在下风向 200 m、500 m、800 m 轴线处布设 3 台光离子化检测器, 采样频率 1 Hz, 同步记录气象塔风速 2.3 m/s、大气稳定度 D 类。实验获得各点浓度时序, 峰值分别出现在泄漏开始后 130 s、220 s、380 s, 对应最大体积分数 4.8 ppm、2.1 ppm、1.0 ppm。将同期气象与源项参数输入 2.2 节耦合模型, 得到对应位置预测峰值 5.3 ppm、2.4 ppm、1.2 ppm。三测点相对误差依次为 10.4%、14.3%、20.0%, 平均 12.7%, 低于 AIChE 导则对 QRA 模型 30% 的可接受偏差限, 表明重气箱—高斯切换框架及 Monin-Obukhov 长度修正可合理再现苯乙烯近场下沉与远场扩散过程, 为后续风险等高线计算奠定可信基础。对比结果汇总于表 1。

表 1 监测点浓度对比结果

测点距离 /m	实测峰值 /ppm	预测峰值 /ppm	相对误差 /%
200	4.8	5.3	10.4
500	2.1	2.4	14.3
800	1.0	1.2	20.0

由表1可知,随距离增加误差略有放大,但仍处于工程可接受范围,证明模型具备外推至1 km尺度能力。

### 3.2 保护层成本-效益优化

为削减  $IR \geq 1 \times 10^{-5}$  的红色区域(基准 6.8 ha, 个人风险积分  $1.7 \times 10^{-3}$  人·a<sup>-1</sup>), 对比三种保护层方案: A 在 P-101 泵出口增设响应时间  $\leq 10$  s 的远程切断阀, 红色区域降至 1.4 ha (削减 79%), 年风险积分  $3.0 \times 10^{-4}$  人·a<sup>-1</sup>, 年折算成本 23 万元, CER  $2.3 \times 10^6$  元/(人·a<sup>-1</sup>); B 布置高压水幕喷淋, 红色区域 3.9 ha, 年风险  $8.1 \times 10^{-4}$  人·a<sup>-1</sup>, 年成本 45 万元, CER  $4.7 \times 10^6$ ; C 增设防爆墙, 红色区域 4.5 ha, 年风险  $9.3 \times 10^{-4}$  人·a<sup>-1</sup>, 年成本 58 万元, CER  $5.9 \times 10^6$ 。依据 ALARP 原则, CER 最低且技术可行的方案 A 为最优, 其  $\leq 10$  s 的快速响应特性有效缩短泄漏持续时间, 实现风险与成本的最优平衡。对比结果见表 2。

由表 2 可知, 方案 A 以最低 CER 实现最大风险削减, 满足企业 ALARP 要求。

表 2 保护层方案成本-效益对比表

方案	措施描述	红色区域 /ha	年风险积分 / 人·a <sup>-1</sup>	年折算成本 / 万元	CER/ 元·人 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup>
A	远程切断阀 $\leq 10$ s	1.4	$3.0 \times 10^{-4}$	23	$2.3 \times 10^6$
B	高压水幕喷淋	3.9	$8.1 \times 10^{-4}$	45	$4.7 \times 10^6$
C	钢筋混凝土防爆墙	4.5	$9.3 \times 10^{-4}$	58	$5.9 \times 10^6$

表 3 闭环更新实施路线

阶段	时间窗口	关键任务	输出产物
数据采集	每季度	检修记录、LDAR 数据、事件报告	更新失效样本库
模型刷新	年度	贝叶斯更新、代理模型重训练	新 $\lambda_{post}$ 、新扩散代理
风险评估	年度	场景抽样、IR 积分、等高线绘制	年度风险一张图
决策支持	年度	ALARP 论证、保护层优选	成本-效益报告

估(QRA)框架,实现单场景 2 min 计算,预测误差  $< 13\%$ 。经成本效益分析,最优方案以  $2.3 \times 10^6$  元/(人·a<sup>-1</sup>) 的最低 CER 削减 79% 红区面积。建立“季度数据-年度模型”闭环与 Flask Web 工具保障动态进化,未来将拓展爆炸碎片与长期健康效应,推广至更多化工单元支撑行业风险基准管理。

### 参考文献:

[1] 陈文涛,杨茗锐,王文和,等.基于SDG和CBR的化工过程风险评价[J].中国安全科学学报,2025,35(03):77-84.  
 [2] 朱君焯.时序数据驱动的化工过程风险动态预警研

### 3.3 闭环更新与管理建议

验证实验生成的 28 条泄漏事件按设备类别与工况特征纳入失效数据库,同步更新 Gamma 先验超参数以实现贝叶斯迭代。为维持模型时效性,建立“季度数据-年度模型”滚动机制,其每季度采集检修、LDAR 及事件记录,年末统一完成贝叶斯更新、代理模型重训练与风险等高线重绘,确保参数匹配最新可靠性水平。配套开发基于 Python Flask 的轻量级 QRA Web 工具,前端集成 Leaflet 地图引擎实现浓度场、人口栅格与风险等高线实时叠加的“一张图”可视化,后端封装计算模块支持一键导出 ALARP 论证报告。通过“定量评估-工程改进-数据反馈”闭环,企业可在成本最优下持续降风险,该模式可推广至同类苯乙烯装置,提供标准化实施模板。闭环更新实施路线见表 3。

### 4 结束语

本研究针对苯乙烯装置构建集成贝叶斯频率更新、重气-高斯耦合扩散与 Probit 剂量响应的定量风险评

究[D].昆明:昆明理工大学,2023.  
 [3] 柳楠.基于动态模拟的化工过程安全预测预警研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.  
 [4] 王连彪.化工过程的故障诊断和动态风险评估研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.  
 [5] 应急管理部化学品登记中心,中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院,清华大学,等.化工过程安全评估[M].北京:化学工业出版社,2020.

# BIM 技术在城市道路旧路面再生利用中的应用研究

万阳永<sup>1</sup>，王永超<sup>2</sup>，鞠祥宇<sup>3</sup>

(1. 北京中昌工程咨询有限公司青岛分公司，山东 青岛 266000;

2. 青岛森茂常源生态建设有限公司，山东 青岛 266400;

3. 北京中昌工程咨询有限公司青岛分公司，山东 青岛 266000)

**摘要** 随着城市化进程不断加快，城市道路建设及维护的需求也不断攀升，旧路面的再生利用成为核心要点。本研究聚焦 BIM 技术在城市道路旧路面再生利用中的应用，探究其在旧路面数据收集与建模、方案设计优化、施工过程仿真、质量把控及后期养护管理等方面的应用优点和实施办法，通过案例分析说明，BIM 技术能够提升旧路面再生利用的效率与质量，为城市道路建设的可持续发展提供有力支撑，具有重要的实践意义以及推广价值。

**关键词** 城市道路；旧路面再生利用；BIM 技术；可持续发展

**中图分类号**: TP3; U416

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.023

## 0 引言

随着城市化进程的不断推进，交通基础设施建设需求日益增长，大量旧路面处理成为迫切需要解决的难题。传统路面处理办法既消耗资源，又影响周边环境，旧路面再生利用凭借其经济、环保等优点备受关注。BIM 技术作为先进的信息化管理手段之一，可完成道路工程全生命周期的数字化管控，将该技术应用到城市道路旧路面再生利用中，可处理传统路面处理方法信息不透明、协调性欠佳等问题，提高旧路面再生利用整体成效，推进城市道路建设向智能化、绿色化和可持续健康发展。

## 1 BIM 技术与城市道路旧路面再生利用概述

### 1.1 BIM 技术的概念与特点

建筑信息模型技术 (Building Information Modeling, BIM) 是依靠数字化三维模型的综合管理系统，将工程项目的多样信息进行整合，构建包含建筑、结构、设备等多方面信息的三维数据库。BIM 技术具备可视化、协调性、模拟性、优化性以及可出图性等特性。可视化可以将抽象设计理念借助三维模型直观地呈现，方便工程建设各参与方理解与沟通相关设计详情；协调性可化解不同专业间的冲突，提高工作效率；模拟性可对施工、运营等情况做模拟分析，预先发现问题并

制定处理方案；优化性结合项目实际对设计方案做调整与完善；出图性可实现工程图纸和报表的输出，为项目实施提供依据。

### 1.2 城市道路旧路面再生利用的意义与实际现状

城市道路旧路面实施再生利用有显著的经济和环境效益，通过减少新路面材料的用量，减少建设成本支出，削减废弃物处理开支，节约自然资源，减少对生态的破坏。但旧路面再生利用实际实施中面临再生技术普及度不高、再生质量不稳定的问题，应加大政策扶持力度，普及成熟的再生工艺，强化质量监管，推进产学研深度结合，加速实现技术标准制定与施工规范更新，完善财政与金融激励机制，推进示范工程实施。

### 1.3 城市道路旧路面再生利用采用 BIM 技术的必要性

传统城市道路旧路面再生利用途径存在信息分散、管理效率低下等问题，各方的信息沟通存在障碍，易引发决策上的失误和资源的浪费，采用 BIM 技术可有效处理这些问题，各参与方可借助 BIM 模型实时分享旧路面信息，如病害状态、材料特性等。方案起始设计阶段，BIM 技术能开展多方案的对比与优化，提高设计的科学性及其合理性；施工开展期间，能实现进度、质量、安全的实时监督控制，保证施工质量和进度。

**作者简介**: 万阳永 (1993-)，男，本科，工程师，研究方向：城市轨道交通项目管理。

## 2 BIM技术在旧路面数据采集与建模过程中的应用

### 2.1 旧路面数据采集方法

BIM建模的基础是旧路面数据采集。常用方法为现场勘察、无损检测以及历史资料收集。现场勘测利用全站仪、水准仪等测量仪器去获取路面几何尺寸、平整度、高程、坡度等信息；无损检测技术可检测路面内部的病害，如裂缝、空洞等；收集有关道路设计图纸、施工记录、养护报告等历史资料<sup>[1]</sup>，可对数据采集进行补充。BIM技术将激光扫描、无人机影像、地质雷达等多个源头的数据融合，可构建高精度的三维模型，还原路面形态和地下格局，识别裂缝、沉陷、空洞等病害，为道路结构分析、病害诊断与养护决策提供精准的凭据。

### 2.2 基于BIM的旧路面三维模型构建

充分收集旧路面数据后，通过专业的BIM软件构建三维模型。依据测量的路面几何数据构建路面基础三维模型，将无损检测所检测出的病害信息添加到模型中，采用不同颜色或符号表示不同的病害，构建直观精准的旧路面三维BIM模型，为方案设计、分析及路面施工、养护提供参考<sup>[2]</sup>。模型可实现多专业协同配合、施工过程全流程信息集成与共享，优化施工工艺与材料配置，提高决策的科学水平。基于BIM技术与大数据模型，可精准模拟施工进度进而预测成本，提高项目管控水平。

### 2.3 数据采集与建模的质量控制

为保障旧路面数据采集与建模的质量，需建立严格的质量控制体系。数据采集阶段，按一定周期校准检查测量仪器，保证数据采集精准可靠；采用高精度传感器加实时监测技术，提高数据的稳定性；对无损检测设备操作人员开展专业培训，使操作流程更规范，提高检测结果的准确性。在模型构建的过程中，确定统一的建模标准及规范，明晰数据格式、坐标系统及参数的设定，保障模型具备一致性与准确性。采用多级审核制度，对模型开展交叉验证及实地比对，即刻修正差错和偏差，保障数据采集与建模成果科学实用。

## 3 BIM技术在旧路面再生利用方案设计优化中的应用

### 3.1 基于BIM模型的再生利用方案设计

借助构建好的旧路面BIM模型开展再生利用方案的优化设计操作，按照路面病害的类型、分布情形和交通荷载要求，评价厂拌热再生、就地热再生、冷再生等技术的适用性。在BIM环境里对各再生工艺施工流程及其结构层变化动态模拟，对材料参数、层厚和结构组合做出科学调整。预估再生路面的力学性能、

平整度与耐久性。集中工程量统计、材料消耗、施工周期与成本的各项数据，实施多方案筛选和经济性对比分析，通过BIM三维可视化功能，直观呈现各方案的实施成效和长期特性，辅助决策者选择最佳的再生方案，提升旧路面改造的质量和效率。

### 3.2 多方案比选与优化

利用BIM技术对多个再生利用方案实施比选及优化，综合评估不同方案在技术、经济和环境方面的可行性、合理性及影响，选定最佳方案。在技术可行性方面，分析路面病害处理效果以及再生后路面的性能指标<sup>[3]</sup>；在经济合理性方面，将建设成本、运营成本等作比较；在环境影响方面，对资源消耗与环境污染状况进行评估。通过BIM模型开展模拟分析，优化调整相关方案，实现最优的综合效益。

### 3.3 方案设计与优化中的协同工作

旧路面再生利用方案设计与优化涉及多专业和多部门协同。BIM技术可以为参与各方打造集成化协同平台，实现设计、施工、管理信息的可视化共享和实时动态更新。设计单位按照施工单位现场条件及工艺反馈，即时优化再生工艺以及结构层设计；施工单位凭借模型预先发现施工难点，如模拟摊铺及压实这两个工序，提高作业的精准水平；业主借助BIM平台对进度、成本、质量加以监控，支撑科学决策的实施。各参与方在统一模型环境下开展协同工作，减少信息断层与沟通差错，提高方案的可行性与实施效率，推动工程精细化、智能化，实现工程效益最大化。

## 4 BIM技术在旧路面再生利用施工中的应用

### 4.1 施工进度模拟与管理

采用BIM技术对旧路面再生利用施工环节实施进度模拟，将时间维度（4D）与三维模型相融合，构建可直观展示的施工进度管理平台。在BIM模型中添加各工序持续的时间、施工顺序及资源需求，设定进度规划，开展摊铺、铣刨、再生处理等关键环节的动态模拟，呈现各阶段时间的安排及作业事宜。施工期间即时采集现场数据，更新模型所呈现的进度状态，把实际进度与计划进度相比较，若发现进度滞后需及时分析原因，优化资源布局或调整工序的衔接。通过运用BIM技术实现进度把控，提高施工效率与组织协调水平，保证项目按计划高质量完工。

### 4.2 施工质量控制与安全管理

在施工质量控制方面，BIM技术可以将质量标准以及验收规范嵌入模型构件属性里，实现数据可视化的管控。施工人员借助移动终端查看工序质量要求、材料参数以及验收节点，如将无人机与物联网传感器结

合到一起<sup>[4]</sup>。BIM平台将关键部位进度和质量进行对比,自动对偏差进行预警并生成整改明细。针对安全管理,运用BIM技术做施工前的安全模拟,找出高处作业、机械碰撞等风险隐患,提升施工方案安全系数。现场智能安全警示标识与BIM模型实施联动,施工人员可以通过扫码,从而获取施工区域风险提示、应急行动措施和个人防护要求,提升安全交底实效,实现施工现场质量安全管控精细化和智能化升级。

#### 4.3 施工资源管理

借助BIM技术可实现施工资源的有效管理,将材料、设备、人员等资源信息整合进BIM模型,和施工进度计划(4D模拟)建立起关联,实现资源需求动态估算及可视化管控。依照工程进度安排资源进入的时间、数量和堆放处,优化现场的空间布局。实时采集现场数据和模型进行对照,对材料消耗情况、设备运行和人力投入进行监控,及时调整和优化方案,减少物资闲置与浪费。

### 5 BIM技术在旧路面再生利用后期养护管理中的应用

#### 5.1 基于BIM技术的道路养护信息管理系统

开发基于BIM技术的道路养护信息管理系统,把旧路面再生后的养护信息和三维BIM模型进行关联,实现全生命周期的信息管理数字化。系统集成路面病害的类别、分布位置、严重程度、养护记录以及维修方案相关数据,可实现多维度查询与可视化展示。养护人员在BIM模型里点击路段,可查看结构层的实际状态、检测具体时间、病害演变趋向和历史维修细节。系统采用数据分析算法,依据交通荷载、气候情况和病害发展走向,预测路面性能的衰减态势,生产预防性养护计划且作出预警,提高养护决策的科学性与响应效率,促使公路养护向数字化、智能化阶段发展。

#### 5.2 养护方案制定与优化

依托道路养护信息管理系统数据和BIM模型开展养护方案的制定与优化,实现病害信息空间可视化及数据的关联互动。基于路面损伤程度、病害类型和交通荷载等条件,适配预防性、修复性养护技术,筛选适宜的养护材料。借助BIM平台对不同方案施工过程进行模拟,考量技术可行性、结构耐久性与全生命周期经济性,采用比选和成本效益分析找出最优方案,养护工作实施结束后,把检测得出的数据反馈系统,实施BIM模型的更新,实现养护策略闭环式管控与持续优化。

#### 5.3 预测性养护与决策支持

基于BIM技术和养护信息管理系统数据,能实现预测性的养护实施,对路面结构、交通荷载、气候环

境和历史病害等多源数据进行集成分析,建立路面性能退化的预测模型。利用模型预估未来病害的类型、发展速度与分布走向,规划预防性养护的时机及方案,提高养护的前瞻性与针对性<sup>[5]</sup>。系统将预测结果、材料老化规律与全生命周期成本相结合,评估维修、罩面、重建这些策略的经济性与耐久性,辅助管理者实施决策。经由BIM平台模拟养护计划及比选备选方案,推动养护从被动应对转向主动管控,延长道路使用寿命,减少养护费用和社会通行成本。

### 6 结束语

本研究聚焦BIM技术在城市道路旧路面再生利用场景中的应用实践展开系统性探讨,明确BIM技术与旧路面再生工艺融合的技术价值及现实必要性。在数据采集与建模阶段,本研究明确了数据的标准化采集方法与参数化建模流程,保障基础数据与BIM模型的一致性、可靠性。在方案设计 with 优化阶段,依托BIM模型的参数化模拟与多专业协同设计平台,开展再生方案的多维度比选,实现决策过程的量化支撑;同时通过BIM技术的4D施工模拟、实时进度追踪、质量安全预警及资源动态调配功能,提升项目全流程管控效率,降低决策偏差与资源浪费风险。在后期养护阶段,基于BIM系统构建的路面性能监测,实现养护方案的智能生成、动态优化与预测性维护,推动道路养护模式从“被动修复”向“主动预防”转变,通过全周期性能数据的积累与分析,有效延长路面服役寿命。当前BIM技术在该领域的应用仍面临技术标准体系不完善、跨主体应用能力不均衡等现实挑战。未来,应健全BIM技术在旧路面再生领域的专项标准规范,提升不同主体的协同应用水平,扩大与新兴技术的融合应用,加大全生命周期应用的深化力度,实现城市道路旧路面再生工程的提质增效,助力城市交通系统的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 闻文,黄佳兴.基于BIM技术的路面智能化设计优化研究[J].现代工程科技,2025,04(18):57-60.
- [2] 杨沛进.老旧公路路面再生技术在养护中的应用研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(08):232-234.
- [3] 邓岩涛.路面再生技术在旧路改造工程设计中的应用探讨[J].数码设计(电子版),2024(05):40-42.
- [4] 危达成.高速公路路面再生料技术研究[J].运输经理世界,2024(29):43-45.
- [5] 高世强.浅谈路面基层再生技术在公路工程中的运用及未来发展前景[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(11)[2024-11-01].<https://www.cqvip.com/doc/journal/1000004213395>.

# 建筑工程造价的影响因素及 造价成本动态管控分析

孙建豪

(浙江金穗工程项目管理有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要** 随着经济不断发展, 民众对物质生活的需求持续增加, 追求优质居住空间。为保障经济利益, 建筑企业想要在竞争中立足, 提升建筑质量是赢得客户与市场认可的关键, 打造高质量项目可吸引客户、提升知名度, 对造价实施动态管理至关重要。企业需转变运营模式, 摒弃传统管理方式与运营策略, 顺应社会趋势, 引入先进管理理念与技术手段, 优化内部管理流程, 以提升核心竞争力。

**关键词** 建设工程; 造价成本动态管控; 大数据技术; AI 技术; BIM 技术

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.024

## 0 引言

建设工程造价动态管理是从动态化发展的角度对建筑工程的造价进行分析, 在整个建筑工程的过程中会受到很多动态因素的影响, 而动态控制的主要目的是掌握变化情况, 并做好费用的控制工作。相关的人员应该充分了解对建筑工程项目造价造成影响的各种因素, 如市场的原材料价格、人工费、施工技术、施工进度等。对出现的问题应分析原因, 并立即进行整改, 避免问题扩大化。通过这些措施, 可发挥人力、物力、财力资源最大效能, 实现合理分配、充分利用和科学配置, 有效控制成本, 避免过度支出, 提升建筑承包单位的经济效益, 使其在市场竞争中更具优势。

## 1 建筑工程造价动态管理的意义

在建筑工程造价动态管理全过程进行造价管理工作具有重要意义, 应充分合理地分析建筑工程施工过程中的各项因素, 包括施工技术、施工进度以及施工人员等, 并对资金的有效性进行严格把控, 按照预算及实际所需分配资金, 减少不必要的支出, 防止建筑原材料的浪费现象, 从而降低工程成本、提高承包企业经济利益与市场价值。做好设计、施工、竣工检查阶段的管理和分析工作。设计阶段严格审核方案, 确保质量与造价合理; 施工阶段实时监督进度与质量, 调整资金和资源分配; 竣工检查阶段核算与评估造价。通过有效管理, 减少企业不必要的支出。例如: 管理建筑施工原料时, 造价管理人员要调查施工现场周边环境, 了解地理、交通状况, 剖析供应商生产资质,

预估其供应能力。施工单位除拟定合同文件外, 还要审核供应商文件, 比较原料差异, 选择符合标准的原料。选择时考量交通运输状况, 优先选距离近的供应商, 降低运输成本、保障施工周期。实施动态管理, 管理人员要全面调研市场, 了解原料价格、劳动力成本、设备租赁行情等, 做好预算管理与控制, 依市场调研调整预算。因此, 做好建筑工程动态管理工作尤为关键。施工单位要科学预估原料使用情况, 合理安排施工人员, 发挥人力、物力、财力最大效能。施工现场管理人员要做好事前、事中、事后管理工作, 事前制定计划和预算、制定应对措施, 事中监督调整, 事后检查评估, 使资金运用更科学有效, 精准把控施工进度。

## 2 影响工程造价动态管理的因素分析

### 2.1 设计因素

在竞标活动中, 施工企业为脱颖而出获取项目, 通常核算成本较低的方案。建设方选用方案时也重视成本, 确定设计方案后会明确建筑材料等资源的使用成本。然而, 实际施工中成本低的材料常常难以满足施工标准, 这主要是因施工企业恶性竞争, 为中标过度压缩造价成本, 选用低价低质材料。因此, 中标企业常常难以提供符合要求的方案, 往往变更设计方案, 这会引发设计漏项、图纸复用等问题, 影响施工进度和质量。若建设单位审查不严, 后续施工需不断调整方案, 工程变更涉及多环节, 不仅可能导致质量问题, 还会造成成本浪费, 影响建筑工程造价的动态管理, 使造价难以按计划控制与调整<sup>[1]</sup>。

作者简介: 孙建豪 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 造价咨询。

## 2.2 管理人员因素

工程造价管理工作贯穿建筑工程建设全过程，其涵盖的内容较多，涉及多个方面及领域，并且在项目前期设计规划阶段至项目中期施工建设阶段以及后期项目竣工验收阶段都与工程造价管理工作有着密切联系。一旦在施工过程中任一阶段或某一环节出现问题都有可能对整个工程造价管理工作的开展效率造成一定影响。各个环节的实际操作信息较为繁杂，涉及工程资料、工程费用以及市场变动等。这些都需要造价人员进行专业的分析来掌握其造价信息及成本趋势，这对相关人员的专业水平以及管理能力都有很高的要求。造价管理人员一方面要跟踪了解工程建设情况，深入现场掌握进度、质量和变更，及时调整管理策略；另一方面要不断学习新知识、积累经验，紧跟行业发展，提升专业水平。

## 2.3 市场因素

首先，市场环境会对工程造价产生很大影响。因为随着市场环境的变化会导致建设材料的价格出现波动，而且这种波动是不确定性的，具有突发性，在短时间内可能会大幅度地发生变化，这就需要工作人员认真考虑这一因素，因为它对于整个工程造价的成本预算以及实际的支出有着重要的意义，只有充分考虑到这个因素才可以避免在进行成本预算和实际支出的时候偏差过大。如果材料价格提高，则可能导致原定预算的成本较低，出现施工费用不足，影响施工。此外，不同地区材料或产品价格有差异，受地区经济、交通、资源等因素影响，同一地区工程造价也受市场管理影响。因此，为使预算与施工成本匹配、动态管理结果符合实际，需将工程项目动态造价管理与市场成本预算有机融合，在动态造价管理中考虑市场成本预算并随市场价格调整，在市场成本预算时结合动态造价管理要求，确保预算科学合理。

## 2.4 施工因素

在造价管理体系中，施工阶段至关重要，很大程度上决定了造价管理水平。建筑工程施工时，造价费用确定、费用划分等影响整体造价，造价管理工作需重视这些情况。施工组织是施工过程整体架构。建筑工程复杂、规模大、耗时长，施工中材料按需采购。因市场动态变化，价格会变动，材料使用量增加会使造价上升，因其成本占比大。建筑工程建设难免有变更，会引发连锁反应。一是延长施工周期，打乱进度；二是改变施工计划，需重新调整安排。这些变化会导致造价升高，如周期延长增加人工、设备租赁成本，计划改变可能产生额外费用。

## 3 加强造价动态管理的相关措施

### 3.1 做好设计阶段的审核工作

建筑工程单位要甄选最优方法设计施工方案，落实限额设计。研究显示，设计费用在工程总投资中占比小，但影响大，所以必须重视设计阶段的造价控制。选择设计单位时，要严格审查资质，优化设计方案，参照指标分析总平面图与建筑空间平面设计。设计中要运用限额设计控制造价。限额设计是依据可行性分析控制投资估算，提供初步设计方案，结合概算设计施工图纸，保障建筑功能的同时做好限额控制。要控制不合理变更，确保总投资合理<sup>[2]</sup>。

### 3.2 提高管理人员素质

加强工程造价动态管理工作的实施力度，提高工程造价管理人员的整体素质至关重要。针对现有的造价人员，应该大力开展相关专业的培训工作，并且不能流于表面，应认真设计培训方案，包括相关的最新知识以及新的思想和观念等内容，增强他们的专业能力，让他们能够熟练地解决各种复杂的工程造价问题，树立正确的动态管理理念，让其意识到造价是根据多方面进行实时变化的。与此同时，为提高建筑工程造价动态管理效果，要积极引进高素质专业人才，提高人才准入门槛，制定严谨招聘标准，选拔专业水平高、实践经验丰富的人才，为管理注入新活力与理念，引入先进方法与技术，推动管理更高效精准。

### 3.3 完善造价动态管理体系

在建筑工程建设复杂进程中，因涉及多行业多领域，需动态工程造价管理体系管控造价。企业构建完善造价动态管理体系，要借鉴其他企业成功经验，结合自身经营管理实际，构建适配管理制度并细化，增强可操作性。制度制定要契合项目造价动态管理要求，实施中可实时调整，及时解决影响因素。造价动态管理制度制定以合同为起点，协调各方力量参与成本控制，优化施工方案及造价内容<sup>[3]</sup>。在工期管理上，工作人员要严格按施工要求工作，具备质量意识，企业内部做好宣传，让工作人员认识动态管理价值，保障施工安全、优化成本资源利用，实现工程效益最大化。

### 3.4 施工过程造价控制

在建筑工程造价管理体系中，施工阶段的造价管控工作处于核心地位，尤其在当下各建筑工程单位积极探寻高品质、高效率发展路径的趋势下。实际施工时，既要确保工程质量符合标准、完善工程功能，又要降低成本投入。在整个建设周期内，施工阶段的造价控制工作要预先全面收集项目基础信息，如地质条件、社会环境等，增强项目可行性报告的完整性、可靠性

和全面性。在此基础上，建筑工程单位应安排专业预算人员参与决策评估，从技术和经济两方面优化施工方案并确定最优方案。同时，建筑工程单位要切实开展施工过程的造价管理，包括材料采购、人工劳务、机械使用等费用，规避不必要支出，严格控制造价成本，保障资金合理有效利用<sup>[4]</sup>。

## 4 技术革新驱动下的管理创新

### 4.1 大数据技术在工程造价中的应用

大数据是新时代的重要组成部分，在工程造价中应用具有重要意义。一方面，有助于提升工作效率、节约资源、精准判断并预测工程项目开展情况。另一方面，大数据的应用范围广泛，能够迅速有效地整合大量关于工程造价的数据资料，并对这些资料进行储存，如以往的工程造价经验、各类建筑材料及机械设备的价格以及人力资本等。以上信息经过进一步的分析研究，可为新建项目的概预算、控制造价及风险预警工作提供帮助。利用历史成本数据建模构建成本预测模型，对工程造价作出合理的预测控制，提高新建项目投资估算准确性及可靠性；还可帮助企业实时掌握市场价格的变化情况，并针对实际的情况做出企业采购行为上的相应变动。优化成本结构，减少采购成本，提升造价估算精确性，加强成本管控力度，保障项目在预算范围内竣工投产，并为企业带来经济利益。

### 4.2 AI技术助力工程造价管理

当今是科技迅猛发展的时代，人工智能（AI）技术特别是机器学习、深度学习等新技术越来越广泛地应用于工程造价管理中，并发挥着重要作用。AI技术具备强大的数据处理能力和数据分析能力，能够深度挖掘并学习大量的工程造价数据信息，利用先进的算法及模型对工程造价进行自动化的精准识别，如价格波动造成的市场风险、技术复杂造成的成本风险等，还可以科学预判风险，为公司提供相关信息，提前采取措施，减少损失<sup>[5]</sup>。例如：采用机器学习方法对过往工程变更情况进行统计，可以准确判断哪些部位会发生工程变更以及发生的概率有多大，在施工过程中，公司就可以加强对此类部位的关注和控制，比如加大审核力度、聘请第三方进行审核等，控制价格攀升，保证项目的正常实施。同时，AI技术可以应用到工程造价的审核环节当中，在结算文件处理上能够提供智能审核服务，对结算文件中的数据进行迅速准确地判断，发现其中存在的数字计算不正确以及费用支出不符合规范等情况，并及时做出反馈，提升审核工作质量及效率，减少人为因素造成的失误和偏差。BIM技术

应用于工程造价管理，是工程造价管理智能化、高效化的必然趋势，也是新的发展机遇和变革。

### 4.3 BIM技术与工程造价的融合

建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）是一种先进的工程建设管理技术，也是建设领域的核心技术之一。BIM模型能将工程项目的实体对象、工程材料及机械设备等在同一虚拟三维空间里集中展现出来，并以该模型作为载体，促进工程项目各参与方之间信息充分沟通协作，提高交流合作水平。BIM技术应用于工程造价中，可促进造价管理的变革。在设计阶段，在BIM模型中能够根据三维模型迅速准确地统计出工程量，并预测整个工程的成本，以便于设计师团队进行不同设计方案的造价比选，从而作出最优的选择，完成设计优化工作<sup>[6]</sup>；在施工阶段，在BIM模型中可以及时反映工程进度以及工程资源使用状况，结合造价数据链接以及信息化技术，实现对造价进行动态监控和管理，项目团队可以在设计阶段根据数据及其分析结果做出合理的判断，在施工过程中发现造价偏离及时进行修正，防止超支，合理控制工程造价。

## 5 结束语

在工程造价管理过程中，应当将动态化管理模式广泛推行。在建筑工程中，承包商要加强对价格的有效管控，避免出现不合理的变动及虚高情况，促进资金的科学使用以及效用发挥的最大化，保证企业的经济利益。在进行工程造价动态管理的过程中，相关管理人员肩负的责任较大，应当利用信息管理系统、分析模型等相关技术手段，做好预算分析管理。合理运用预算，按预算分配和使用资金，提高投资效果和企业经济效益，增强企业管理能力和市场竞争能力。

### 参考文献：

- [1] 王纪平. 建筑建设项目全过程工程造价预算控制方法[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(06): 196-198.
- [2] 杜娟. 工程造价预结算审核在建筑工程管理中的应用[J]. 中国住宅设施, 2024(04): 99-101.
- [3] 刘勤. BIM技术在房建工程成本控制与效率管理流程应用的实证研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(07): 160-162.
- [4] 吕怀雷. 浅谈建筑工程造价的影响因素及其降低工程造价的对策[J]. 装饰装修天地, 2019(14): 55.
- [5] 李国英. 建筑工程造价影响因素分析及降低工程造价措施[J]. 装饰装修天地, 2019(11): 136.
- [6] 张金生. 建筑工程造价影响因素分析及效果评价[J]. 装饰装修天地, 2019(11): 25.

# 检验检测机构样品流转环节 质量风险识别与防控措施

李卫静

(肥城质安建设工程质量检测有限公司, 山东 泰安 271600)

**摘要** 检验检测机构在样品流转环节中面临多重质量风险, 包括样品标识混淆、环境条件变化造成的理化性质偏移, 以及交接记录不规范引发的溯源困难。样品在不同岗位之间的流转频率高、过程链条长, 使潜在误差更易累积放大。围绕这一关键环节构建风险识别体系, 有助于及时发现影响检测结论准确性的隐性因素。通过在流转链中融入数字化追踪、状态监控、双重核查机制以及流程可视化管理, 可显著降低环节性失误的发生率。强化岗位协同、责任界面与异常处置机制, 可进一步提升样品管理的整体可靠性, 从而确保检测活动的公正性与数据质量的稳定性。

**关键词** 样品流转; 质量风险; 风险识别; 检验检测机构

**中图分类号**: F273.2

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.025

## 0 引言

样品在检验检测活动中承担着承载信息的核心角色, 其流转过程的稳定性直接影响数据的精确性与结论的可信度。随着机构业务量增长与检测流程精细化程度提高, 样品从接收、登记、保存到分发的各环节逐渐呈现高频、多点、动态的运行特征, 使潜在风险更具隐蔽性与复杂性。质量风险一旦在流转链条中形成, 将可能在后续检测阶段被放大, 进而影响整体质量管理水平。围绕样品流转构建系统化的风险识别与防控思路, 有助于从源头稳定关键环节, 推动检测全过程的规范化与透明化, 为提升检测准确度与机构公信力奠定坚实的基础。

## 1 样品流转环节质量风险的主要表现与成因

### 1.1 流程节点复杂导致的识别性风险

样品在不同岗位和设备之间流转时, 会经过接收、登记、编码、分发、转储、检测前处理等多类节点, 每个节点都依赖信息准确传递与标签清晰匹配。随着样品数量增加与检测业务类型多样化, 流转路径呈现多方向并行状态, 编码体系、分类方式和存放位置如果缺乏统一标准, 极易出现识别混乱。部分检测类别对样品外观区分度较低, 增加了标签依赖程度, 一旦标签脱落、字迹模糊或记录方式不一致, 就可能造成样品之间的混淆<sup>[1]</sup>。节点之间的交接方式若缺乏可视化记录或过程透明度不足, 也会削弱信息链条的连续

性, 使识别风险在流转初期就埋下隐患, 进一步影响后续环节的准确性与稳定性。

### 1.2 环境与操作条件变化引发的稳定性风险

不同类型的样品在流转过程中对温度、湿度、光照、振动及洁净度等条件具有特定要求, 任何条件变化都可能影响其理化性质或生物学特征。若在转运或暂存过程中未保持稳定环境, 易出现成分挥发、降解、吸湿、氧化、污染等现象, 导致检测参数发生偏移。部分样品对时间敏感, 超过规定时限可能发生不可逆变化, 使检测值脱离真实状态。操作方式若不符合规范, 如容器开闭频率过高、转运工具清洁不充分、保存温度波动过大, 也会加剧样品的不稳定性。由于流转路线可能跨越多个场所或设备, 条件变化的累积效应更易被忽视, 使潜在风险在多环节叠加并放大, 对最终检测结果造成影响。

### 1.3 交接记录缺失造成的溯源性风险

样品在各环节间转移时, 需要形成完整、连续且可追溯的记录链条, 包括时间节点、状态描述、交接方式、责任岗位及相关操作信息。若记录不完整、格式不统一或填写不规范, 将导致关键信息缺失, 使样品在流转路径中的定位变得模糊。一旦发生数据偏差、结果异常或样品状态变化, 就难以从历史记录中准确锁定问题环节, 影响溯源判断的有效性。部分场景中纸质记录或分散式登记方式, 易出现遗漏、延迟录入或内容不一致等情况, 加剧信息断层。缺乏严格的记录

**作者简介**: 李卫静 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 质量工程、检验检测。

核查机制，也可能导致交接环节的实际操作与记录不符，使风险点难以识别。溯源链条的脆弱性不仅影响流程管控，还可能削弱质量管理体系的稳定运行能力。

## 2 关键风险点的识别路径与评估方法

### 2.1 基于流程拆解的风险定位方式

样品流转链条可通过逐段拆解的方式将整体流程细化为若干可观察、可描述的独立节点，从而明确每个节点的操作内容、输入与输出状态。对接收、登记、标签生成、存储、转运、分发以及前处理等环节逐一梳理后，可识别出存在延误、误记、混放或不规范衔接的潜在位置。流程拆解能够揭示隐藏在节点转换处的薄弱环节，使风险定位从经验判断转向结构化识别<sup>[2]</sup>。当流程呈现支路较多或跨区域流转特点时，通过拆解方式形成节点图谱，有助于发现信息中断点、责任交叉区以及记录不连续区域，从而为后续控制措施提供精准目标。

### 2.2 基于状态监控的风险判定机制

样品在流转过程中会呈现温度、湿度、密封性、保存时间、位置变化等可监控状态参数，这些参数能够反映样品在传递路线中的实际受控程度。通过在关键节点设置状态监测装置或记录程序，可实时捕捉偏离正常范围的异常情况。状态数据的连续采集能够形成轨迹曲线，使风险判定不再依赖单一时间点，而是基于变化趋势识别潜在失控信号。部分样品对环境敏感度较高，通过监控数据可提前识别保存条件波动、设备运行不稳或操作不规范造成的异常状态，从而确立风险程度并明确可能影响质量的节点位置。

### 2.3 基于数据一致性的风险评估要点

样品在不同环节间产生的编号信息、状态记录、交接数据及操作痕迹，需要保持完整且一致的结构，以确保流转链条的可验证性。若同一样品在多个记录介质中出现编号不符、时间节点冲突、状态描述差异或缺失字段，说明信息链条存在断裂风险，可据此判断潜在质量隐患。在评估过程中，可通过比对电子系统与纸质记录、监控数据与交接表单、节点时间顺序与操作逻辑，检验各类数据间的匹配度。一旦出现不能形成闭环的数据缺口，即表明该环节存在风险点，需要进一步确认其对样品完整性与检测可靠性的影响程度。

## 3 样品流转链条中的过程控制措施设计

### 3.1 构建标准化流转规则

样品在进入流转链条后，需要依托统一、明确且可操作的规则体系来规范各类行为。标准化流转规则应

覆盖接收、编码、登记、存放、转运及交接全流程，使每一节点均具备清晰的操作步骤与判定依据。不同样品类型的分类编码方式、容器要求与标签格式必须统一，以减少因记录方式差异造成的识别偏差<sup>[3]</sup>。流转路径中若涉及多部门协同，应通过固定化指令流程和责任范围界定，确保信息在节点间顺畅传递。针对高频或高风险环节，可设置特殊操作规范，如独立存放、专用通道或固定交接窗口，以提升流转链条的稳定性与可控性。

### 3.2 强化双重核查与责任界面

样品流转过程中若缺少有效的核查机制，则易产生遗漏、错记或混放等质量风险。双重核查制度可通过两级信息确认方式，将编码、规格、数量、状态等关键内容进行重复校验，使潜在偏差在早期得到识别。责任界面在制度设计中具有关键作用，通过明晰每一节点的岗位职责、操作边界及交接条件，使操作链条保持清晰的责任指向。交接过程可采用对照核查、扫码确认、签名验证等方式，形成可追踪的责任记录。对复杂样品或批量流转情境，还可设置复核岗位或专职监督节点，以进一步提升核查的可靠性与严谨度。

### 3.3 优化环境与保存条件的动态控制

样品在流转期间对外部环境的敏感程度各不相同，因此需要针对温度、湿度、光照、洁净度等条件建立动态调控机制。可通过运输箱、恒温设备或密封容器保持稳定状态，并对关键参数设置实时监控，以便及时发现偏离设定范围的变化。部分样品在保存时限方面存在严格要求，可结合倒计时提示、自动提醒或时限锁定等功能，加强时间维度的管理力度。对于跨区域流转的场景，可依据路线特点匹配相应保护措施，减少震动、暴露或污染风险。环境控制措施在逐节点实施过程中需保持连续性，使样品在整个路径中的状态维持在可控范围内。

## 4 数字化手段在风险防控中的应用策略

### 4.1 样品全流程追踪系统的构建

样品全流程追踪系统通过对流转路径的数字化记录，使样品在接收、登记、编码、存放、转运、分配到检测前各环节形成连续的数字链条。系统可为每个样品生成唯一标识，并结合条码、RFID或定位技术，实现位置、状态与时间信息的实时采集。流转节点在扫描或录入后自动记录轨迹，减少人工记录造成的遗漏与差异。系统界面可显示样品当前所在位置、历史操作记录及计划路径，使流转过程清晰透明<sup>[4]</sup>。对具有特殊要求的样品，还可设置专用流转逻辑或限制条件。通过统一化的数据结构，系统能将不同岗位间的

操作关联起来,使流转信息在平台内完整呈现,为风险识别和过程监督提供准确依据。

## 4.2 异常识别与预警机制的嵌入

流转过程中产生的温度波动、保存超时、路径偏离、信息缺失等现象,可通过数字化系统建立自动识别规则,从采集的数据中发现不符合设定条件的状态变化。系统可依据阈值判断、模式识别或逻辑比对,在关键参数出现异常趋势时即时发出预警提示,使异常在形成影响前得到处理空间。不同类型的样品可设置差异化的预警标准,使风险判断更契合其特性。预警信息可对应到具体节点,使潜在问题的来源更易锁定。对于重复出现的异常类别,系统还可生成统计图表,揭示隐性规律,为后续流程改进和风险点强化提供参考依据。通过自动化监控方式,使风险控制从被动发现转向实时识别。

## 4.3 数据可视化在流转管理中的作用

流转过程中产生的大量数据若以表格形式呈现,则较难直观地反映趋势、异常或节点分布情况。通过可视化技术,可将样品数量变化、操作频次、节点耗时、环境参数波动等信息转化为图形化界面,使流程运行状态在时间维度和空间维度上更易理解。可视化仪表盘能够展示关键指标,如平均流转时间、异常触发率、节点拥堵情况,使管理重点直观呈现。对样品流转路径可生成动态流向图,使流转链条在系统中的路线与节点衔接一目了然。若出现信息中断或数据不一致,通过图形标识即可快速识别偏差点。可视化工具还能支持多维度筛选,实现按样品类型、日期或区域的差异化分析,为风险控制提供结构化的数据依据。

## 5 质量风险防控体系的持续强化路径

### 5.1 完善培训与能力建设机制

质量风险防控体系的稳定运行依赖于对岗位人员能力的持续强化。培训内容应围绕样品流转规范、风险识别方法、异常处理流程以及数字化系统使用技巧展开,使各类岗位具备对风险点的敏感度与处理能力。能力建设可采用情景模拟、案例拆解、操作演练及考核评价等方式,使规范要求在实际场景中得到巩固<sup>[5]</sup>。对于承担关键节点的岗位,可设置专项提升课程,覆盖高风险环节的控制要求与标准化操作要点。培训体系可建立周期更新机制,根据新技术、新流程和新设备不断调整内容,使技能水平与制度要求保持一致。通过能力矩阵的建立,可评估各岗位适配度,为人员配置提供依据。

### 5.2 推动岗位协同与流程优化

样品流转链条由多岗位共同完成,协同程度直接影响风险控制效果。通过建立清晰的衔接规则、对接

方式与信息传递路径,可减少因岗位间沟通不畅造成的延误或误解。流程优化可通过对现有环节进行节点分析,梳理出重复操作、无效步骤或潜在堵点,再以精简方式重构流转路径,使链条更加顺畅。协同机制中可设置共享信息平台,使样品状态、待办事项与交接记录在各节点间同步展示。对承担连续作业的岗位,可通过并行化策略或岗位互补方式提高流转效率。流程优化还可结合数据分析结果,对高风险节点调整配置,使整体链条具备更高的稳定性。

### 5.3 提升风险管理闭环的运行效率

风险管理闭环由识别、评估、控制、验证及改进等环节组成,各环节之间若缺乏顺畅衔接,会削弱风险控制效果。通过建立异常事件快速上报机制,使风险信息能够在最短时间进入处理流程,使风险评估基于实时数据进行判断。控制措施执行后,可结合监测记录、追踪数据与核查结果,对措施的有效性进行验证。对于存在反复出现的风险类别,可设置纠正与预防措施库,使处理方式形成标准化模板,加速响应速度。闭环运行效率的提升还依赖信息系统的支撑,通过自动记录、自动比对、自动预警等功能减少人工环节,提高处理的准确性与及时性。随着闭环机制的不断迭代,风险处理流程将逐步形成结构化、规范化的运行模式。

## 6 结束语

检验检测机构在样品流转过程中面临的质量风险呈现多元化与隐蔽化特点,需要在体系层面构建贯穿识别、评估与控制的综合防控框架。通过标准化流程、数字化追踪、动态环境管理与责任界面的强化,可使样品在全链条运行中保持稳定状态。随着检测需求不断提升,风险管理模式也将向智能化、协同化方向发展,依托数据分析、自动预警与过程可视化技术,推动质量控制体系持续完善。未来,在制度建设、技术创新和能力提升等方面的进一步深化,将为检验检测活动的可靠性与专业化发展提供更坚实的支撑。

### 参考文献:

- [1] 龚明,霍铭发,兰书元,等.浅谈检验检测机构质量管理体系的实施与改进研究[J].陶瓷,2025(12):9-11.
- [2] 董翠玲.检验检测机构水平在煤炭质量管理中的重要性[J].机械工程与自动化,2025,54(S1):20-21,24.
- [3] 牛高茜.检验检测机构质量管理体系内部审核策略研究[J].标准生活,2025(07):81-83.
- [4] 刘铭豪,刘云峰,陈鹰,等.检验检测机构样品管理过程实践与探讨[J].中国标准化,2023(23):214-217,231.
- [5] 商晓晨.检验检测机构样品管理工作中常见问题分析和改进措施探讨[J].中国标准化,2020(07):229-232.

# 基于全过程管理的城市园林绿化工程质量控制体系研究

陈晨

(南京睿艺环境工程有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要** 在生态文明建设和城市高质量发展的背景下, 城市园林绿化工程关乎生态效益和社会效益。由于传统质量控制模式存在局限, 难以保障绿化工程建设质量, 本研究旨在构建一个基于全过程管理的质量控制体系, 以系统提升工程质量。采用问题诊断与系统构建相结合的方法, 剖析从决策设计、施工到养护各阶段的典型质量问题, 进而设计融合组织、制度、技术与信息要素的总体框架及各阶段质量控制子体系, 旨在为提升城市园林绿化工程的综合质量提供有益参考, 进而促进其高质量发展。

**关键词** 城市园林绿化工程; 全过程管理; 质量控制体系

中图分类号: TU986

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.026

## 0 引言

随着我国生态文明建设的深入推进以及人民对美好生活需求的日益增长, 城市园林绿化工程从单一绿化功能向提升生态韧性、促进公众健康、塑造城市特色等综合功能深刻转型, 其质量水平直接关系到城市可持续发展的底色与成效。但当前实践中普遍采用以施工阶段监管和竣工验收为核心的传统质量控制模式, 难以覆盖项目立项、设计、施工、养护等全生命周期质量生成过程, 导致存在前期决策科学性不足、设计意图与现场施工脱节、建设成果在后期养护中难以维持等诸多系统性短板。

## 1 城市园林绿化工程质量控制现状与全过程视角的问题诊断

### 1.1 现行质量控制模式与实践调研

当前城市园林绿化工程的质量控制实践, 普遍遵循一种以施工阶段为核心的被动反应式管理模式。该模式的运行高度依赖施工单位的现场作业与监理单位的旁站监督, 其质量控制活动绝大部分压缩在工程建设的施工周期内, 并以最终的实体工程观感验收作为质量判定的终极依据。前期决策阶段缺乏科学的质量目标论证, 功能定位与生态适宜性考量往往让位于短期的形象需求, 为后续设计施工埋下隐患。

### 1.2 基于全过程链条的典型质量问题剖析

#### 1.2.1 图纸深度不足

设计图纸的深度与精度缺陷是引发后续一系列质量问题的源头性因素, 其本质是设计成果的“不可施工性”。许多绿化工程设计图未能实现从方案创意到技术指令的根本性转变, 图纸中存在模糊的定性描述而缺乏精确的量化标准。植物配置图常仅标注树种名称, 对决定即时景观效果的苗木干径、冠幅、分枝点高度、主干形态等关键规格参数语焉不详, 对影响长期生态稳定的苗木产地、移植次数、土球标准等鲜有规定。

#### 1.2.2 材料工艺不达标

材料品质与施工工艺的把控不严是导致工程实体质量低下的直接原因, 其背后是成本压缩导向与过程监管失效共同作用的结果。在材料层面, 劣质苗木是最为普遍的问题, 市场上存在通过“杀头截干”方式冒充全冠苗的树木, 其树形与生态功能已遭破坏, 而土壤改良介质往往以普通种植土甚至建筑垃圾土滥竽充数, 有机质与养分含量远未达到植物健康生长的基本要求。铺装石材的厚度与强度不足, 透水铺装材料的孔隙率不达标, 这些隐蔽的材料缺陷在验收时难以直观判断, 却直接决定了工程的使用寿命与安全。

#### 1.2.3 标准模糊且养管脱节

质量标准体系的模糊性与建设养护周期的割裂,

作者简介: 陈晨(1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

共同导致园林绿化工程质量在时间维度上的不可持续性。现行质量验收规范大量使用“生长健壮”“树形优美”“土壤疏松”等主观性描述,缺乏可量化、可测量的客观技术指标,致使验收评价充满弹性,容易滋生权力寻租,也为质量妥协提供了便利<sup>[1]</sup>。更深层次的矛盾在于,建设期的质量标准与养护期的养护标准分属两套话语体系,二者在目标、内容和考核方式上严重脱节。

### 1.3 管理体系责任不清

质量责任在项目全生命周期各参与主体间的模糊、重叠与断裂,是导致所有表层问题难以根治的深层制度性缺陷。当前的管理体系是一种基于阶段分隔的线性责任模型,每个参建方只对合同约定的自身工作阶段负责,缺乏对工程最终长期质量负责的连带责任与追溯机制。建设单位的目标常转化为“按时竣工”,其质量责任在实践中被简化为对监理报告的签字确认。设计单位在交付施工图后便基本退出,对现场的技术交底流于形式。

## 2 基于全过程管理的质量控制体系总体构建

### 2.1 体系构建的目标与原则

构建基于全过程管理的质量控制体系,其根本目标在于彻底转变当前园林绿化工程领域普遍存在的“重施工、轻全程,重结果、轻过程”的被动管理模式,建立起一种具有前瞻性、系统性与自优化能力的质量管理新范式。该体系旨在将质量控制从一个孤立的、局限于施工阶段的检查活动,提升为一项贯穿项目全生命周期的核心战略职能,从而确保工程从概念诞生、蓝图设计、实体建造到长期运营的每一个环节,其质量生成过程都处于受控、可知、可追溯的状态。

### 2.2 体系的总体框架及核心构成要素

基于全过程管理的质量控制体系,其总体框架是一个以“大质量”观为引领,以流程再造为核心,以信息化平台为纽带,深度融合管理活动与技术活动的立体化网络结构。该框架的顶层是源于城市发展战略、地块生态本底与具体使用功能需求的层级化质量目标体系,为全过程所有质量控制活动提供了统一的导向与最终的衡量基准。

该质量控制体系从理论框架转化为实践效能,依赖于组织保障、技术标准、制度规范和信息集成四大核心构成要素的协同支撑与深度融合,如图 1 所示。这四大要素共同作用于项目全过程,为质量目标的实现提供了系统性的保障,其逻辑关系可概括为:以组织为驱动核心,以技术为实施工具,以制度为运行基础,

以信息为联通纽带。组织管理要素是体系的骨架与动力源,它要求建立超越传统线性项目结构的、以质量为导向的集成化项目组织<sup>[2]</sup>。

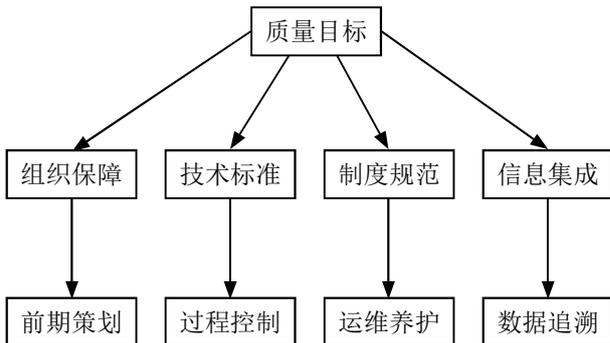


图 1 基于全过程管理的城市园林绿化工程质量控制体系总体框架图

## 3 全过程各关键阶段质量控制子体系设计

### 3.1 前期决策与设计质量控制子体系

#### 3.1.1 项目可行性研究与质量目标定位

前期决策阶段的质量控制是整个体系的源头,其核心在于将质量观念植入项目的基因。这一阶段的重点并非传统可行性研究中的经济与技术比选,而是进行深入的“质量可行性”论证,系统性地识别并定义那些决定项目的关键质量特性。这要求研究工作必须超越简单的功能与投资估算,转而全面评估场地的生态本底条件,包括土壤理化性质、地下水位、微气候、现有植被以及周边环境对项目的潜在胁迫,因为这些自然要素是园林绿化工程赖以生存的不可更改的基底。

#### 3.1.2 设计任务书的质量导向与设计成果评审

设计任务书是连接质量目标与设计蓝图的关键桥梁,其核心职能是将抽象的目标翻译为具体的设计约束与技术指引。一份具备质量导向的设计任务书,应明确规定设计所必须遵循或参考的技术标准与规范名录,并对影响最终品质的关键材料与工艺提出明确的档次要求与性能参数,如指定主要景观乔木的胸径、冠幅、全冠等具体规格,规定铺装材料的厚度、耐磨度、透水系数,以及土壤改良的深度与有机质含量标准。

### 3.2 施工准备与过程质量控制子体系

#### 3.2.1 施工组织设计与专项方案预控

施工准备阶段的质量预控,其效能集中体现在对施工组织设计与专项技术方案的审查上。此环节的质量控制活动,本质是对施工单位即将展开的整个施工作业流程进行一场沙盘推演,提前发现并消除潜在的质量风险<sup>[3]</sup>。审查的重点在于判断方案的“针对性”与“可操作性”,

即其是否完全针对本项目的特定场地条件、设计要求和质量目标而编制，而非套用千篇一律的模板。

### 3.2.2 材料、设备与分包商准入控制

工程实体的物质基础与实施主体直接决定了质量的最终上限，因此对材料、设备及分包商的准入控制构成了施工阶段质量保障的基石。这一控制必须建立在制度化、程序化的基础上，形成不可逾越的刚性门槛。对于材料，特别是对景观效果和生态功能有决定性影响的苗木、种植土、景观石材、木材及水电管线等，必须建立严格的“看样一封样一见证取样复试”制度。

### 3.2.3 施工工序、工艺与现场关键点控制

现场施工是质量形成的实体环节，其控制精髓在于对关键工序与特殊工艺实施聚焦的、动态的、嵌入式的管理。平行检验是监理单位独立进行的检测活动，如对回填土压实度、砂浆强度的抽测，用以验证施工单位自检数据的真实性。施工最终质量是作业人员的技能水平与责任心、使用材料的质量、施工机具的性能与作业环境条件、施工方法与工艺等多种因素综合作用的结果<sup>[4]</sup>。关键施工工序（以乔木种植为例）质量控制点及检查方法如表1所示。

表1 关键施工工序（以乔木种植为例）质量控制点及检查方法

控制点	质量标准要求	检查方法	检查工具 / 依据
树穴开挖	直径比土球直径大 40 ~ 60 cm，深度比土球高度深 20 ~ 30 cm，穴底土壤疏松	尺量检查、观察检查	钢卷尺、设计图纸
土壤改良	回填土为按比例的改良配方土，有机质含量 ≥ 5%，无建筑垃圾	检查配比单、抽样送检	土壤检测报告、配比通知单
栽植	树木主干垂直，观赏面朝向合理，土球包装物已解除，根系舒展，分层回填夯实	旁站观察、尺量、轻摇树干检查稳固性	线锤、感官检查
支撑固定	支撑物牢固，绑扎处加衬垫，不损伤树皮，支撑角度、高度统一，满足抗风要求	观察、手试牢固度	感官检查、设计或方案要求
定根水浇灌	浇透水，直至树穴周围见明水，并检查有无积水、塌陷	旁站观察、检查	感官检查

### 3.3 竣工验收与后期养护质量控制子体系

竣工验收并非质量管理的终点，而是建设期质量控制成果的全面检验与养护期质量维护的起始交接。此阶段的验收工作必须实行“实体质量”与“内业资料”的双重审查。实体质量检查需依据合同、图纸及验收规范，采用实测实量、功能测试、观感评定等方法，对地形地貌、植物种植、园路铺装、景观构筑物、水电设备等进行全面核查<sup>[5]</sup>。内业资料审查则是对整个建设过程质量行为的追溯，要求施工、监理资料齐全、真实、同步，能完整反映从材料进场到工序验收的全过程，这是质量可追溯性的文件基础。养护期是工程成果从“交付状态”转向“可持续理想状态”的关键过程，其质量控制核心在于从“施工交付”到“全生命周期状态维护”的管理范式转变，旨在实现园林景观的生态、景观与社会功能的持久性。可通过标准化作业指导书与现场记录，将养护质量目标分解为可量化、可检查的日常操作。

预防为主和全过程覆盖为核心原则，设计前后衔接的质量控制子体系，为从根本上解决设计深度不足、材料工艺失控、养护责任悬空等行业顽疾提供系统性的方法论与可操作的实施路径，对推动园林绿化工程质量管理从粗放、被动、片段化向精细、主动、一体化转型，确保工程的长效生态效益与景观价值，具有重要的理论创新与工程实践指导意义。

### 参考文献：

[1] 李雯. 城市园林绿化工程施工技术及质量控制策略[J]. 房地产世界, 2025(16):167-169.  
 [2] 方志艳. 城市园林绿化工程施工及质量管理研究[J]. 城市开发, 2025(16):34-36.  
 [3] 李姝颖, 陈倩影. 新时期的市政园林景观绿化工程施工技术探讨[J]. 科技资讯, 2025,23(16):175-177.  
 [4] 常云杰, 石梦鸽. 反季节种植技术在城市园林绿化工程中的应用[J]. 现代园艺, 2025,48(16):70-72.  
 [5] 冯小洮. 城市园林绿化工程现场施工及管理研究[J]. 四川建材, 2025,51(07):144-146.

## 4 结束语

本研究通过系统剖析当前城市园林绿化工程在决策、设计、施工、养护各环节存在的质量管控问题，创造性构建贯穿项目全生命周期的质量控制体系。以

# EPC 总承包模式下工程建设项目的 进度与成本协同管控研究

张爱明

(盐城新城人力资源有限公司, 江苏 盐城 224000)

**摘要** EPC 总承包模式作为工程建设领域主流承包方式, 实现进度与成本的协同管控是保障项目效益的核心关键。本文以 EPC 总承包模式特性为切入点, 分析当前项目进度与成本管控现状及存在的协同不足问题, 从管控机制、技术应用、团队建设三个维度提出优化策略, 旨在为提升 EPC 总承包项目协同管控水平、实现进度与成本动态平衡提供参考。

**关键词** EPC 总承包; 工程项目; 进度管控; 成本管控; 协同优化

**中图分类号**: TU723

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.027

## 0 引言

随着工程建设行业市场化改革深化, EPC 总承包模式因具备集成化、一体化管理优势, 被广泛应用于各类工程项目中。在该模式下, 总承包商承担设计、采购、施工全流程责任, 进度与成本管控的关联性愈发紧密, 二者的协同效果直接决定了项目成败。当前部分 EPC 项目存在进度与成本管控脱节问题, 引发工期延误、成本超支等风险。基于此, 本文聚焦 EPC 总承包模式下进度与成本协同管控, 剖析现存问题并提出优化路径, 对提升项目管理效益、推动行业高质量发展具有重要的现实意义。

## 1 EPC 总承包模式下进度与成本管控的理论基础及现状

### 1.1 EPC 总承包模式的核心特性

EPC 总承包模式的核心特性体现为全流程集成管控、责任主体集中及风险高度聚合。与传统承包模式相比, 该模式实现了设计、采购、施工环节的深度融合, 总承包商作为核心责任主体, 统筹项目全生命周期管理, 有效减少了各参与方之间的沟通壁垒与责任推诿。从进度与成本管控视角来看, 这种集成化特性使得进度计划的调整直接影响成本支出, 而成本预算的约束又反作用于进度安排, 为二者协同管控提供了天然的整合基础。同时, EPC 模式下总承包商需承担项目实施过程中的多数风险, 进度延误与成本超支风险的叠加效应, 进一步凸显了二者协同管控的必要性。

### 1.2 进度与成本协同管控的内在逻辑

进度与成本协同管控的核心逻辑在于实现二者的动态平衡与相互适配, 本质是通过科学的管控手段, 让项目进度推进与成本投入保持合理配比。在 EPC 项目全生命周期中, 设计阶段的方案优化既影响后续施工进度, 又决定项目初始成本基数; 采购阶段的材料设备供应进度直接关系施工工期, 其价格波动则影响成本控制; 施工阶段的进度调整往往伴随额外成本支出, 而成本超支又可能限制进度推进资源的投入<sup>[1]</sup>。二者相互制约、相互促进, 协同管控需打破“重进度轻成本”或“重成本轻进度”的单一管控思维, 通过全流程动态联动, 实现资源最优配置与项目效益最大化。

### 1.3 EPC 项目进度与成本管控现状

当前 EPC 总承包项目进度与成本管控整体呈现“局部有效、协同不足”的现状。在进度管控方面, 多数项目依托进度计划编制开展管控, 但计划执行过程中缺乏动态调整机制, 对设计变更、材料供应延迟等突发情况应对不足, 易导致工期延误。成本管控则多集中于预算编制与事后核算, 对项目实施过程中的动态成本监控力度不足, 难以实时响应进度调整带来的成本变化。在二者协同层面, 普遍存在管控体系割裂问题, 进度管控与成本管控分属不同部门负责, 数据共享不及时, 导致进度调整时未能充分考量成本影响, 成本管控也无法有效约束进度推进, 协同管控效能未能充分发挥。

**作者简介**: 张爱明 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土建及安装工程施工、房地产开发运营管理 (含成本合约管理)。

## 2 EPC 总承包模式下进度与成本协同管控存在的问题

### 2.1 协同管控机制不完善

当前多数 EPC 总承包项目缺乏系统完善的进度与成本协同管控机制，这成为限制协同效果提高的关键难题。一方面，缺乏统一的协同管控目标体系，项目推进里面进度目标和成本目标常常独立来定，没有足够重视它们之间的相互联系，造成目标指引出现偏离。例如：一些项目为了赶着提前完工，不顾一切加大资源投入忽略了成本预算限制，最后带来成本超出预算的问题。而另一些项目则为了严格把控成本，过分减少资源配置，使得施工进度拖后，协同管理控制的流程和责任分配不够明确，设计、采购、施工每个环节的进度和成本管理控制连接不顺，缺少清晰的协同决策流程和责任承担者，当进度和成本发生矛盾时，各个部门彼此推脱责任，很难迅速找到有用的解决办法，更进一步加大了工期和成本方面的风险，再加上没有一套有效的协同激励和约束办法，未能把协同管理控制的成果与团队以及个人绩效联系起来，造成相关人员在协同管理控制上缺乏足够动力<sup>[2]</sup>。

### 2.2 动态管控能力不足且数据共享不畅

EPC 项目推进过程里环境复杂且变化多端，设计变更、地质条件变化、材料价格波动等因素均会影响进度与成本，而当前项目的动态管控能力不足，难以实现二者的实时协同调整。在进度管理方面，多数项目还在沿用传统的横道图、网络图这类工具做计划制定与追踪，很难实时发现进度差异并分析它对成本带来的作用。成本管理则以固定预算为重点，对实际推进过程中的动态成本资料搜集不够快、分析不够透，无法为进度调整提供准确的花费依据，数据互通机制不健全更进一步加重了动态管理的难题<sup>[3]</sup>。项目各阶段的进度资料与成本资料分开存放在不一样的系统或单位里，缺少统一的数据互通平台，造成资料传递滞后、信息不一致。例如：施工单位的进度差异信息没有及时传到成本管理单位，成本管理单位来不及计算差异引发的花费影响，采购单位的价格起伏资料没有及时分享给进度管理单位，使得进度计划调整缺乏合理根据。

### 2.3 协同管控专业团队建设滞后

EPC 总承包模式的集成化管理特性，要求进度与成本协同管控团队需要跨领域、复合型专业素养以及高效协同协作能力，但当前多数项目管控团队建设严重滞后，很难满足实际管控需求，成为制约协同管控水平提升的一个关键瓶颈。一方面，团队专业结构存在

明显不足，表现出“单一化、碎片化”特征，进度管理岗位人员大多具备施工技术和进度计划编制背景，但普遍缺少系统成本管理知识，对成本构成、预算编制、成本分析这些核心内容了解不够深入，在制定和调整进度计划时，无法准确预判资源投入增加带来的成本变化，也难以发现进度优化过程中成本节约空间。成本管理岗位人员则更多擅长财务核算和预算控制，但对工程施工工艺、进度计划逻辑、技术方案优化这些方面认识不够。在实施管控措施的时候，常常会忽略掉对施工进度的潜在影响，甚至可能因为过度压缩成本，造成施工工序没办法正常推进。设计、采购这些环节的专业人员，缺少和进度、成本管控的协同意识，只在意自己专业领域的工作，不能主动融入协同管控体系。团队协同协作机制不够健全，跨部门、跨岗位的沟通协作存在明显障碍，各部门经常以自己分管的工作为核心，形成“本位主义”，进度部门和成本部门之间缺少常态化的沟通协调机制，设计部门和施工、采购部门之间的技术衔接和信息传递不够顺畅，导致协同管控工作很难形成合力。

## 3 EPC 总承包模式下进度与成本协同管控的优化策略

### 3.1 构建完善的协同管控机制

构建完善的协同管控机制是实现进度与成本有效协同的基础保障，也是破解当前 EPC 项目管控脱节问题的核心抓手。首先，要设立统一并且可以量化的协同管控目标体系，在项目前期策划环节，结合项目合同里约定的内容、业主的核心需要、项目技术难度还有市场环境等多方面因素，统筹安排进度目标和成本目标，明确二者之间优先级如何排以及动态平衡的原则，避免目标设定过于片面，同时，把总体协同目标一层一层分解到设计、采购、施工等各个环节以及各个管控节点，细化每个阶段的进度管控阈值和成本控制区间，确保各个部门管控方向保持一致，目标能够协同。其次，优化协同管控流程并且清晰划分责任边界，全面梳理项目全生命周期内进度与成本管控的关键节点，构建“目标制定—计划协同编制—过程动态监控—偏差协同分析—策略调整—复盘总结”的闭环协同流程，明确设计、采购、施工、成本、进度等各部门以及各个岗位在协同管控中的具体职责和权限，设立跨部门的协同管控协调小组，由这个小组牵头处理进度和成本之间出现的冲突问题，确保出现分歧时可以快速响应，高效做出决策，避免部门之间互相推诿。最后，建立健全协同激励和约束双重机制，把协同管控成效与团队以及个人绩效考核直接挂钩，细化考核指标，

对在协同管控中表现突出,有效规避工期延误和成本超支风险的团队和个人给予物质和精神两方面的奖励;对因管控脱节,沟通不畅导致项目损失的相关责任人严格问责,通过奖励和惩罚并重的方式,充分调动全员参与协同管控的主动性和积极性。

### 3.2 提升动态管控能力并构建数据共享平台

提升动态管控能力并构建一体化数据共享平台,是实现进度与成本实时精准协同的关键路径,也是适配 EPC 项目复杂多变特性的必然要求。在系统性强化动态管控能力建设方面,积极带进并推广先进的协同管控方法与工具,其中挣值管理法作为核心工具,可借助对已完成工作的预算费用、实际费用与计划工作预算费用的精准核算与对比分析,实时量化进度偏差与成本偏差,精准判断二者的协同匹配状态,并科学预测项目后续进度与成本走势,为管控策略的及时调整给出数据支撑与科学依据<sup>[4]</sup>。同时,建立全流程风险预警与应对机制,全面梳理项目实施过程中可能影响进度与成本各类风险因素,包括设计变更、地质条件突变、材料设备价格波动、政策调整等,明确各风险的预警阈值与判断标准,提前制定针对性的应对预案,确保风险发生时能够快速响应,最大限度降低对进度与成本协同管控的冲击。构建覆盖全流程的统一数据共享平台,整合设计、采购、施工、成本、进度等各环节的核心数据资源建立标准化的数据库。明确数据采集范围、格式与更新频率,带进进度数据与成本数据的即时共享、同步刷新与集中管理,借助大数据、物联网、BIM 等先进技术,带进对施工进度、材料消耗、设备运行状态、成本支出等数据的自动采集、即时传输与智能分析,明显提高数据处理的速度与精确程度。借助数据共享平台打破各部门之间的信息障碍,保证进度管控与成本管控团队可以即时拿到完整、可靠的相关数据,为二者的动态协同调整提供有力的数据支撑。

### 3.3 加强协同管控专业团队建设

加强协同管控专业团队建设,是提升 EPC 项目进度与成本协同管控水平的核心支撑,也是保障管控策略有效落地的人才基础。优化团队专业结构与人员配置,组建兼具进度管理、成本管理、工程技术、合同管理、供应链管理等多领域专业知识的复合型协同管控团队,明确各专业人员的岗位职责、协作流程与沟通机制,确保团队成员能够互补短板、协同发力,在人员招聘与配置过程中,优先选拔具备 EPC 项目全流程管控经验、熟悉协同管控理念与方法的专业人才,同时依据项目规模与复杂程度,合理配备团队人员数量保障管

控工作的全面覆盖与高效推进。强化团队协同协作意识与全局思维培养,借助定期开展跨部门沟通会议、协同管控案例研讨、团队建设活动等形式,打破部门壁垒与本位主义<sup>[5]</sup>。引导团队成员充分认识到进度与成本协同管控对项目整体效益的决定性作用,树立“全局观”与“协同观”,主动加强跨岗位、跨部门的沟通协作,形成管控合力,加大专业培训与能力提升投入。制定系统的培训计划,定期组织团队成员参加 EPC 模式下进度与成本协同管控相关的专业培训,内容涵盖先进管控理念、挣值管理法等工具应用、BIM 技术实操、风险预判与应对等核心内容。同时,建立内部经验共享机制,鼓励团队成员分享管控实践中的经验与教训,开展模拟演练提升实操能力,持续提升团队整体的协同管控专业素养与实操水平,确保能够高效应对项目实施过程中的各类复杂问题,保障进度与成本协同管控目标的顺利实现。

## 4 结束语

在 EPC 总承包模式中,进度与成本的协同管控是保障项目顺利推进、提升项目效益的关键。当前项目在协同管控过程中仍存在机制不够完善、动态管控能力跟不上、数据共享不够顺畅以及专业团队建设比较滞后等问题,限制了协同管控效能的发挥。通过构建完善的协同管控机制、提升动态管控能力并构建数据共享平台、加强协同管控专业团队建设优化措施,可以有效解决当前的协同管控困境,实现进度与成本的动态平衡与高效协同。未来,随着工程建设行业的持续发展与技术的不断进步,EPC 总承包项目进度与成本协同管控模式会持续完善,需要进一步结合项目实际情况,不断优化管控策略,推动协同管控水平持续提高,为行业高质量发展提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 史志通,李永波,李永福.EPC 总承包模式下工程项目绿色施工成本管理[C]//《建筑科技与管理》组委会.2020 年 12 月建筑科技与管理学术交流会议论文集.济南舜联建设集团有限公司,山东建筑大学管理工程学院,2020.
- [2] 吴柱棚.建筑项目 EPC 总承包模式下工程造价控制措施[J].中华建设,2020(11):38-39.
- [3] 卜祥明.EPC 总承包模式下工程项目投资及风险管控路径阐释[J].价值工程,2020,39(21):50-51.
- [4] 周小豪.建筑项目 EPC 总承包模式下工程造价控制要点探讨[J].中国建材科技,2020,29(03):156-157.
- [5] 夏建旺.EPC 总承包模式下工程项目的采购风险管理[J].工程技术研究,2020,05(04):198-199.

# 道路桥梁工程养护管理与技术优化研究

张纪产

(安徽省滨江路桥工程有限公司, 安徽 安庆 246200)

**摘要** 随着交通运输流量持续攀升, 桥梁结构损耗速率显著加快, 传统养护管理模式的局限性逐渐凸显, 难以满足现阶段工程实践的现实需要。本研究聚焦道路桥梁工程养护管理体系构建与技术升级路径两大核心问题, 核心目标在于提升桥梁运营安全水平、结构抗损性能及服役周期, 系统剖析当前养护管理工作存在的问题, 依托先进技术提出针对性优化策略, 并探索智能化养护管理体系的构建路径, 结合具体工程实践案例论证各项优化措施的实施可行性与实际应用成效, 旨在为后续道路桥梁养护管理工作的开展提供有益参考。研究结果证实, 科学完善的养护管理方案与技术创新手段的有机结合, 可大幅提升桥梁工程的运营效能与综合经济效益。

**关键词** 道路桥梁; 养护管理; 智能化技术; 智能监测系统; 养护决策支持系统

中图分类号: U418; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.028

## 0 引言

交通运输行业发展对基础设施的需求持续扩大, 道路桥梁作为交通网络的关键组成部分, 承载的通行任务日趋繁重, 而随着服役年限的累积, 桥梁结构损伤老化问题愈发显著, 传统养护管理手段已难以匹配现代化交通体系的运行要求。桥梁养护工作既关乎交通运输过程中的人员与车辆安全, 也对社会经济效益提升及资源高效配置产生直接影响, 如何强化养护管理工作成效、延长桥梁实际服役年限, 成为当下行业发展亟待攻克的关键难题。新材料研发与新技术应用的步伐不断加快, 智能化养护管理模式的研究与推广逐渐进入行业视野, 为桥梁维护领域带来全新发展思路, 推广此类创新技术成果, 有望推动桥梁养护管理工作朝着科学化、精准化与智能化的方向稳步迈进。

## 1 道路桥梁养护管理现状分析

### 1.1 道路桥梁养护管理的现有问题

道路桥梁传统养护管理模式以周期性检查维修为核心执行路径, 这类操作模式存在诸多固有缺陷, 难以适配持续增长的交通承载压力以及桥梁延长服役周期的现实需求, 传统养护方案多建立在时间周期基准之上, 配套应用的监测技术手段缺乏科学性与系统性, 大量养护作业环节依托人工现场勘查与过往经验判断推进, 直接造成养护流程耗时偏长、问题响应存在明显滞后性, 部分桥梁即便已经出现较为严重的结构损

伤, 对应的修复处置工作也未能及时启动, 最终造成桥梁结构损伤持续累积并不断劣化, 对交通运输安全构成潜在威胁。

养护资金投入与专业人力资源配置存在客观限制, 诸多地区在推进养护管理工作过程中, 普遍出现资源配置不合理引发的浪费现象。针对桥梁运行过程中潜藏的各类风险隐患, 无法实现精细化、靶向性管理。依据交通运输部颁布的《桥梁养护管理规程》相关要求, 桥梁养护管理工作需严格遵循定期检测评估、分级分类判定、损伤及时修复的核心原则, 但在具体实践操作环节, 由于缺乏高效监测技术手段与实时数据支撑, 大量桥梁难以依照规范标准落实科学化养护措施, 进而对桥梁运行安全性与实际服役寿命产生不良影响。

### 1.2 国内外养护管理的研究进展

在国外, 欧美等交通运输发展水平较高的地区, 在桥梁养护管理领域的理论研究与工程实践积累已趋于成熟完善。在美国发布的《桥梁管理系统指南》中, 构建了一套系统化、全流程的桥梁管理实施框架, 着重强调对桥梁全生命周期的动态管控。该管理系统通过在桥梁关键结构部位布设各类监测传感器, 实时捕捉桥梁运行过程中的健康状态数据, 结合大数据分析技术手段, 能够精准预判桥梁养护作业的最佳时间周期。来自美国交通部的统计数据显示, 应用该桥梁管理系统的区域, 桥梁维修作业周期缩短幅度达到30%左右, 养护管理综合成本降幅超过20%。对比国际先进

作者简介: 张纪产(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

技术水平,我国在桥梁养护管理领域的研究与应用起步相对较晚,尽管近些年在桥梁安全性能评估、结构健康监测等细分领域取得了阶段性成果,但整体技术发展水平与国际先进标准仍存在一定差距。

《中国交通建设年度报告》所公布的数据显示,国内现有桥梁中约 70% 尚未配套安装智能化监测系统,接近 50% 的桥梁养护管理决策仍依赖人工经验判断。国内桥梁养护管理工作在标准化、规范化建设层面同样面临诸多挑战,部分地区的养护作业开展未能严格遵照《公路桥梁养护技术规范》(JTG/T D60-01-2015)等行业标准要求,直接导致养护工作质量参差不齐,尽管近年来我国逐步将无人机巡检、地面雷达探测等现代化技术引入桥梁养护管理领域,但整体智能化应用水平与自动化运行程度仍需进一步优化升级<sup>[1]</sup>。

## 2 技术优化在道路桥梁养护中的应用

### 2.1 新材料在桥梁养护中的应用

高性能混凝土(HPC)作为一类新型建筑材料,目前已被广泛纳入桥梁建设与养护工程实践中。相较于传统混凝土材料,高性能混凝土具备更为优异的力学强度、结构耐久性与抗渗性能,高性能混凝土的推广应用,能够有效延长桥梁实际服役年限,尤其在抗开裂、抗冻融、抗腐蚀等关键性能指标方面表现突出。根据《桥梁工程混凝土技术规范》(JTG/T D62-2004)中的明确规定,高性能混凝土的抗压强度标准值需达到 50 MPa 以上,远超传统混凝土 30 MPa 的抗压强度水平,能够显著增强桥梁结构的承载能力与抗震性能。

防腐涂层材料是保护桥梁钢结构免遭腐蚀侵害的重要防护材料,广泛应用于钢梁、支撑构件等桥梁钢结构部位。防腐涂层产品种类丰富多样,其中环氧树脂涂料、聚氨酯涂料以及锌基涂料三类产品,在桥梁钢结构防护领域应用频次较高。按照《公路桥梁养护技术规范》(JTG/T D60-01-2015)的相关要求,防腐涂层厚度需结合具体使用环境条件灵活调整,常规厚度区间控制在 100 ~ 300  $\mu\text{m}$ ,可有效阻断水、酸碱等腐蚀性物质的渗透路径,从而实现延长桥梁服役寿命的目标。桥梁结构修复技术领域近些年涌现出多项先进工艺方法,碳纤维增强复合材料(CFRP)便是其中的典型代表,该材料凭借优异的力学强度与抗腐蚀性,在桥梁修复工程中得到广泛应用,碳纤维增强复合材料的抗拉强度可达 3 000 MPa,约为普通钢材的 5 倍,能够高效提升受损桥梁结构的承载能力。

### 2.2 智能化技术在养护管理中的应用

在信息技术快速发展的背景下,智能化技术逐步融入桥梁养护管理工作各环节,显著提升了养护管理工作的精准度与执行效率。传感器监测技术是智能化养护管理体系构建的核心组成部分,通过在桥梁关键结构点位部署应变传感器、加速度传感器、温湿度传感器等多类型监测设备,能够实时捕捉桥梁运行过程中的健康状态数据。

依托物联网技术架构,可实现桥梁各类监测传感器与后台数据处理平台的无缝对接,对桥梁健康状态远程实时监控。物联网技术同时具备与其他终端设备的联动功能,能够自动触发风险警报、养护任务派单乃至部分自动化养护操作,大幅提升养护管理工作的响应速度与处置时效。数据分析技术与智能决策系统的有机融合,推动桥梁养护管理模式朝着精准化、科学化方向转型升级,通过对传感器采集的海量数据开展深度大数据分析,能够实现对桥梁健康状态的全面评估与趋势预测<sup>[2]</sup>。

## 3 智能化养护管理模式的构建与实现

### 3.1 智能监测系统的设计与实现

加速度传感器、位移传感器、温湿度传感器等多类监测终端,用于采集桥梁在不同荷载条件与环境因素影响下的运行状态数据,传感器捕捉的各类数据,可借助无线通信技术或有线传输模式汇总至集中式数据处理平台,为后续的结构状态分析与养护决策制定提供全面数据支撑。依据《桥梁健康监测系统技术规范》(JTG/T D60-01-2015)相关条款,传感器数据采集频率需结合桥梁实际使用环境与监测任务需求灵活设定,常规工况下应变传感器采集频率不得低于 10 Hz,位移传感器采集频率则应维持在 5 Hz 以上,为保障监测数据的精准度与可靠性,各类传感器的测量误差范围需严格控制在 2% 以内。

数据采集与处理平台是智能监测系统稳定运行的基础硬件设施,承担着数据存储、运算处理与综合分析的核心职能,该平台可对收集到的海量监测数据开展预处理操作,通过滤除噪声干扰与无效数据,输出更为精准的桥梁健康状态评估结论。平台具备桥梁健康状况实时可视化展示功能,一旦监测数据超出预设安全阈值便会自动启动警报程序,当桥梁结构应变数值突破设定安全区间时,系统可即刻触发预警机制,第一时间通知养护人员赶赴现场开展专项检查<sup>[3]</sup>。

### 3.2 基于大数据的养护决策支持系统

基于大数据技术的养护决策支持系统，以桥梁健康监测系​​统采集的海量运行数据为基础，结合现代数据分析技术手段，为养护管理人员提供科学决策依据，该系统的核心功能聚焦对桥梁健康状态开展定量评估，并精准预测桥梁结构剩余服役寿命。系统搭载的数据分析方法涵盖时间序列分析、回归分析、聚类分析及机器学习算法等多元技术，能够从复杂的监测数据中挖掘提炼桥梁结构损伤演化规律与发展趋势，借助回归分析方法，系统可基于历史监测数据构建桥梁损伤程度与服役年限、交通荷载等影响因素间的关联模型，进而实现对桥梁未来损伤发展趋势的预判。根据《桥梁养护技术规范》（JTG/T D60-01-2015）要求，系统经数据运算处理后输出的桥梁剩余寿命预测结果，误差范围需控制在5%以内。

依托上述技术路径，养护管理人员能够提前规划针对性养护措施，有效规避因突发结构损伤引发的安全风险。决策支持系统以大数据技术与人工智能算法为核心构建逻辑，可根据桥梁实时健康状态自动生成养护实施方案建议，通过整合分析海量历史数据与实时监测信息，系统能够输出最具性价比的养护优化方案，当系统监测到某座桥梁疲劳损伤累积达到临界值时，会自动推荐采取加固补强或局部结构修复措施；对于运行状态良好的桥梁，则建议适当延长检测周期<sup>[4]</sup>。

## 4 案例分析与技术优化效果评价

### 4.1 某市桥梁养护管理案例分析

某市城区内的核心交通桥梁始建于20世纪90年代，随着服役年限的增加，桥梁结构出现不同程度的损伤病害，主要表现为混凝土构件开裂、内部钢筋锈蚀以及桥面铺装层老化破损，依据《公路桥梁养护技术规范》（JTG/T D60-01-2015）规定，此类桥梁应每两年组织一次全面详细检测，以此评估结构安全性能。

针对该桥梁的实际病害情况，当地养护管理部门制定实施了综合性技术优化方案，具体包括采用高性能混凝土开展结构修复、更新桥梁钢结构防腐涂层以及安装智能监测系统，施工环节重点对桥面裂缝区域采用碳纤维增强复合材料进行加固处理，对钢结构构件则选用环氧树脂涂料实施防腐修复作业，同时在桥梁关键应力点位布设监测传感器，构建智能监测数据平台，实现桥梁运行状态数据的实时采集与动态分析。养护优化措施实施后的监测数据显示，桥梁整体安全性能

得到了显著提升，混凝土裂缝扩展速率降幅超过30%，钢结构构件腐蚀速率降低20%。

### 4.2 技术优化对桥梁寿命和经济效益的影响

技术优化措施的落地实施，对延长桥梁长期服役寿命起到了显著的推动作用。监测数据显示，经过修复加固的桥梁结构健康状态评分提升15%，预计服役寿命可延长15年。智能监测系统的应用，推动了桥梁养护管理模式从传统定期检测向实时动态监控转变，有效规避了多起突发性结构故障，大幅降低了因早期损伤未及时处理而产生的高额修复成本。

从经济效益维度分析，技术优化措施使桥梁年均维修成本降幅超过20%，通过提升养护工作效率、减少非必要紧急修复作业，桥梁养护资金配置更加科学合理，以该市该桥梁为例，智能监测系统的投入使用使其每年养护成本减少约150万元；而桥梁寿命延长带来的社会效益同样显著，包括交通通行效率提升、交通事故发生率降低等，经测算年均社会效益可达500万元<sup>[5]</sup>。

## 5 结束语

本研究通过梳理道路桥梁养护管理现状、深入探讨技术优化路径，指出传统养护管理模式存在诸多固有缺陷，亟待引入新技术手段与智能化管理体系。新材料的推广应用与智能监测系统的构建，为破解桥梁养护管理难题提供了切实可行的解决方案。依托大数据分析技术与智能决策支持系统，养护决策的科学性与精准度显著提升，桥梁结构安全性与服役寿命得到有效保障。案例分析结果表明，技术优化措施不仅增强了桥梁结构耐久性，更创造了可观的经济效益与社会效益。未来，智能化养护管理模式将成为道路桥梁养护领域的主流发展方向。

## 参考文献：

- [1] 钟智鹏. 道路桥梁隧道工程施工中的难点和养护技术研究[J]. 汽车画刊, 2025(09):140-142.
- [2] 任平勇. 基于精细化管理在道路桥梁工程养护中的应用分析[J]. 运输经理世界, 2025(24):115-117.
- [3] 刘鑫. 道路桥梁隧道工程施工中的难点和养护技术分析[J]. 汽车周刊, 2024(10):124-126.
- [4] 徐来明. 道路桥梁隧道工程施工中的难点与养护技术分析[J]. 散装水泥, 2024(04):74-76,82.
- [5] 盛建军, 苏卫. 道路桥梁隧道工程施工中的难点和养护技术[J]. 中国高科技, 2024(03):146-148.

# 市政道路工程施工质量控制及标准化管理

杨 宁

(济南市平阴县锦水街道办事处, 山东 济南 250400)

**摘 要** 为提升市政道路工程建设质量, 需构建科学高效的施工管理与质量控制体系, 以保障市政道路工程的可持续发展。市政道路施工质量受多维度因素影响, 其复杂性与技术难度呈现上升趋势。施工企业应建立健全质量监管机制, 优化项目管理流程, 依据高标准、严要求的质量标准体系实现市政道路建设目标。基于此, 本文对市政道路施工特征、影响因素进行分析, 并提出质量控制和标准化管理的具体措施, 以期为提升市政道路工程质量提供借鉴。

**关键词** 市政工程; 道路施工; 事前预控; 事中监控; 标准化管理

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.029

## 0 引言

市政道路工程作为城市基础设施建设的重要组成部分, 其施工质量管理是保障工程品质的核心要素。通过持续优化质量监管体系、强化安全管理机制、创新进度管理模式, 可有效提升施工管理效率与工程质量, 为城市经济社会发展奠定坚实的基础。随着城市化进程加速推进, 市政道路施工管理面临新的挑战与机遇, 亟需探索科学化、系统化的管理路径以满足新时代发展要求。

## 1 市政道路工程施工的主要特征

### 1.1 社会关注度高

市政道路工程一般是由政府部门主导实施, 具有公益性的特征, 并且社会关注度比较高。在施工过程中, 需要严格遵循技术规范标准, 从源头控制施工风险, 降低安全事故发生率, 不断提升工程建设综合效益。由于市政道路工程一般是位于人口密集区域的, 施工活动会严重影响社会生产生活及日常出行。因此, 需要对施工工期进行科学的规划, 提升交通疏导方案的合理性。

### 1.2 技术复杂程度高

市政道路工程是有效连接城市各功能的重要系统纽带, 需要不断完善公共交通体系, 满足城市绿化要求。在施工实践的过程中, 施工企业需综合考虑公共交通、路面工程、排水系统、照明设施等多重功能需求。施工过程中涉及多专业、多工种的协同作业, 对施工人员的专业技能和管理水平提出了较高要求。为保证城市交通网络的正常运行, 需严格控制施工周期, 科学组织施工区域划分与任务分配。

### 1.3 工程投资规模大

市政道路工程投资规模较大, 其中原材料成本占工程总造价的 60% ~ 80%。需通过科学的成本预算编制和精细化管理, 有效控制材料损耗。由于材料成本占比高, 必须严格把控原材料性能指标与质量标准, 确保工程建设顺利实施。

### 1.4 施工工序复杂多样

市政道路施工包含土方工程、管道施工、路面铺装等多个专业工序, 需要从质量、成本、进度等多维度进行综合管理。同时, 市政道路施工具有间断性、分散性特点, 施工范围广、地点多, 要求对工程质量进行系统性、全方位的管控。

## 2 市政道路工程施工质量的关键影响因素

### 2.1 施工计划编制不科学

一方面, 市政道路工程施工计划的制定缺乏系统性考量。若在制定工程施工计划时, 未针对工程的施工特点、现场条件以及各种资源的配置进行综合分析, 并且未针对各个专业工程的施工时间、施工顺序做出明确且合理的安排, 很容易在实际施工中出现施工秩序混乱、不同专业施工相互冲突的问题, 从而影响施工质量与施工工期。另一方面, 设计变更管理机制不完善。在进行市政道路工程实际施工的过程中, 频繁地进行设计变更, 并且缺乏对其的有效监管, 很容易干扰正常的施工节奏, 对施工质量与施工工期造成较大影响。如果在进行设计变更时, 未能够对其进行严格的论证与审查, 还容易导致新质量隐患的出现<sup>[1]</sup>。

作者简介: 杨宁(1984-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 工程建设。

## 2.2 质量管理体系不健全

施工质量管理体系不健全是影响工程质量的关键因素之一。在管理体系中未对各参与方的质量控制与管理职责做出清晰的划分,一旦发生质量问题,容易出现相互推卸责任的情况,并且严重影响着质量控制与管理工作的全面落实。另外,还缺乏全方位的道路工程施工监管,对重点施工环节与关键部分施工缺乏及时且严格的有效监督<sup>[2]</sup>。部分监理人员责任意识较为薄弱,未能够全面地履行施工监管职责,导致隐蔽工程质量问题难以及时发现和处理,严重影响工程整体质量。

## 2.3 材料设备管理不规范

在进行市政道路工程施工质量控制与管理的过程中,材料设备管理是质量控制的重要环节。当前存在的主要问题包括:(1)材料采购环节供应商筛选不严格,进场检验制度执行不到位,导致质量不达标的施工材料投入到工程施工中,从而影响施工质量。(2)设备选型与工程实际需求不匹配,未能够结合道路工程施工的需求合理地选择施工设备的类型,导致部分施工设备的性能与施工需求不相符。例如:在道路压实施工过程中,选择使用的压路机吨位与施工需求不相符,很容易致使路基压实度不达标,严重影响着道路工程投入使用后的稳定性。(3)设备维护保养制度缺失。在施工中缺乏对施工设备的定期保养与维护,导致设备老化,故障频发,不仅影响道路施工的效率,还会对施工质量造成影响<sup>[3]</sup>。如果施工设备带病运转,很容易造成施工精确度降低,致使实际施工与设计要求出现偏差。

## 2.4 人员技术水平参差不齐

施工人员技术水平直接影响工程质量,部分施工人员在入职时并未接受系统化的岗前培训,导致其对专业知识以及技能的掌握不够熟练。在引进新施工工艺时,也未能够及时组织施工人员进行相关的培训,致使施工人员在实际操作的过程中,很容易出现操作不规范的情况。如果在进行混凝土浇筑施工的过程中,部分施工人员专业技术水平不佳、质量控制意识较弱,混凝土的振捣不够密实,致使其存在麻面、蜂窝等质量缺陷。这部分施工人员在实际施工中,经常出现敷衍了事的情况,并未严格地按照施工要求进行施工,导致道路施工中存在较多的质量隐患。

## 3 市政道路施工的标准化要点

### 3.1 构建全生命周期标准化管理体系

想要实现标准化管理,就需要施工单位优化顶层设计,立足工程整体视域,构建贯穿项目招投标、施工准备、过程实施、竣工验收至后期运维全生命周期的标准化管理体系。在施工准备阶段,明确图纸会审

的深度与流程、施工组织设计与专项方案的编审标准,确保技术准备的充分性。在过程实施阶段,应针对可能影响结构安全、使用功能、工程质量的各道工序,制定科学、严谨的闭环管理标准,包括施工前准备、工艺参数、操作重点、质量验收等各个环节。竣工阶段,应统一验收程序、检测方法、资料归档与工程移交的标准化管理规范,最大限度地减少施工管理的随意性、模糊性,保证工程建设始终处于受控状态<sup>[4]</sup>。

### 3.2 推行标准化施工工艺与技术

标准化的施工工艺与施工技术管理,是将技术规范转化为现实质量的核心环节,应根据各施工技术的应用要点,基于本工程建设要求,制定标准管理规范。例如:在路基填筑施工中,应明确规定不同填料的最佳含水量与最大干密度控制标准、每层虚铺厚度、碾压设备组合方式、碾压遍数、行进速度以及压实度的现场检测频率与方法。在沥青面层施工中,应明确规定混合料拌和、出厂、到场、摊铺与碾压等各个阶段的温度控制区间,同时,严格规定摊铺机的作业速度与振捣频率、压路机的碾压组合方式、遍数及轮迹重叠宽度等细化参数,使其满足工程建设要求。对于检查井周边回填此类薄弱环节,应制定专项标准,明确所用回填料性能指标,规定振捣、夯实等工艺细节,以此类精细化的指导标准保障施工质量。

### 3.3 建立材料设备标准化管控机制

材料与设备的标准化管控是保障工程质量的物质基础。在材料管理领域,构建包含供应商评估、采购、验收、复检、储运以及领用发放的闭环式控制流程,推行动态考核机制,严格遵循“先检后用”的进场验收制度,针对沥青、钢筋等关键材料,可以采取盲样送检策略,保证检测结果的客观性与公正性。根据不同材料、设备的性质差异,建立标准的储运管理规范,组建一支专门的材料设备管控队伍,切实强化现场仓储管理力度。此外,在进行设备管理的过程中,需要推行“一机一档”的管理制度,进行关键机械设备的建档工作,记录其使用状况、维护保养计划以及维修记录等方面的信息,使各施工设备始终保持最佳工作状态。

## 4 市政道路施工的质量控制措施

### 4.1 强化事前预控,夯实质量管理基础

事前控制是质量保障体系的第一道防线,通过周密的前期策划与准备,将风险防控前移,从源头上消除潜在的质量风险。首先,优化设计交底与图纸会审环节。正式开工前,由建设单位组织施工队伍、监理单位、设计部门等各参建方展开深入的图纸会审以及设计交底工作。要求各部门认真、全面地对设计文件

展开研读, 精准把握设计意图, 细致核查设计图纸中可能存在的错、漏、碰、缺等问题以及复杂工序节点处可能存在的设计冲突问题, 以此确保能够解决在设计阶段的潜在问题, 规避后期由于理解偏差、图纸缺陷等原因而导致的返工重修问题。其次, 编制精细化施工方案与质量控制计划。针对工程中软基处理、大体积混凝土浇筑、大型沥青面层连续摊铺等的重难点, 制定具有高度针对性和可操作性的专项方案, 明确质量控制的重点、预防管控措施、关键技术参数、验收标准以及应急预案。在此基础上, 基于项目整体, 编制质量控制计划, 在各环节, 确立清晰、明确的质量管理目标, 明确各级质量管理的组织架构、职责权限, 落实责任制, 使方案、计划有序落实。再次, 严格审查分包商资质, 确保各分包单位能力过硬、经验丰富, 具备相应的业绩与管理水平。特种作业人员必须持证上岗, 并接受系统的岗前培训和考核。最后, 针对材料、设备供应商的管控与审查, 应以实地考察为主, 综合评估其生产许可、质量保证体系及社会信誉, 从源头保证供应链的稳定与入场材料、设备的总体质量<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 加强事中监控, 确保过程质量受控

事中控制是质量控制的主阵地, 通过对施工现场实施不间断的实时监测与数据采集, 配合数据分析、反馈机制与整改措施, 使各道工序、流程按规执行, 即可实现对施工过程的精准管控。首先, 严格落实“三检制”, 针对每一道工序, 制定包含自检、交接检与专职专检的三级检查制度, 确认该工序的执行情况已通过多次审查, 经书面确认后, 可认为其通过质量检验。在施工时, 上述三道程序需严格执行, 责任到人, 未通过质检的项目不得进入下道工序, 将质量管理压实到每一个作业层面。其次, 加强测量、试验检测工作, 并落实全程监理制度。测量与试验是实施质量控制不可或缺的技术手段, 必须配备精度可靠、检定合格的测量仪器与试验设备。在施工过程中, 要求现场人员基于场地特征、施工设计图纸的要求, 对平面位置、高程、平整度等关键参数、几何尺寸进行精准的测量放样与复检复核操作, 确保测量、试验检测结果精准无误。同时, 建立旁站监理、重点监控机制, 对路基碾压、沥青面层摊铺、预应力张拉等, 关乎工程最终建设质量的决定性工序及各类隐蔽工程实施严格监管, 以便及时发现并纠正不规范行为, 为施工质量提供坚实保障<sup>[6]</sup>。最后, 合理运用现代信息技术, 使其辅助质量控制, 进一步提升工程质量管理效能。例如: 在压路机上安装智能压实控制系统, 使其实时显示碾压遍数、轨迹, 自动检测面层压实度, 验证其参数是否达标; 应用无损检测技术探测路基密实度、结构层厚度,

分析路基内部是否存在隐蔽缺陷, 验证道路工程建设质量; 使用无人机航拍技术, 获取大范围的现场动态图像, 即可检测现场施工情况, 及时发现异常情况, 对当前施工进展做出精准判断, 以保障施工质量控制的效率、精度与覆盖面。

#### 4.3 完善事后评价, 建立质量追溯机制

事后控制可以检测工程建设是否达到预期标准, 为项目的长期性能提供持续性保障, 也是总结施工经验, 验证质量管理有效性并促进管理体系改革的关键。首先, 严格按照国家规范、施工标准与设计文件中的要求, 对工程建设质量实施系统、严格的质量检验, 可委托专业检测机构, 采用专业设备, 检测路面的平整度、弯沉值、抗滑性能等重要指标, 确保各道工序、各个结构施工质量达标。验收过程及结果, 需形成完整、签章齐全的书面报告, 作为工程交付与备案的法定依据。若验收中发现质量缺陷, 需立即查出原因, 制定专项方案并实施整改, 直至质量验收合格为止。其次, 为工程项目建立贯穿始终的、可追溯的质量档案系统, 完整记录施工各环节的质量信息, 确保后期道路运营时出现质量问题, 可及时通过档案中的历史记录, 快速定位问题根源、成因, 界定责任, 并制定出科学、有效的修复方案。

### 5 结束语

市政道路工程作为城市基础设施的重要组成部分, 其建设质量直接关系到城市交通系统的运行效率、居民的生活品质和城市的整体形象。随着城市化进程的深入推进, 市政道路工程建设面临着更高的质量要求和更复杂的施工环境。未来应进一步加强对新材料、新工艺、新技术的研究应用, 推动市政道路工程质量管理向智能化、信息化、标准化方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 黄林楨, 陈卫, 刘东亮. 市政道路桥梁施工质量通病及改进措施探索 [J]. 新城建科技, 2024, 33(12): 165-167.
- [2] 李科强. 关于市政道路施工建设中的质量控制的思考 [J]. 大众标准化, 2024(23): 35-37.
- [3] 宁雨鹤. 市政道路工程施工管理与质量控制问题分析 [J]. 大众标准化, 2024(23): 38-40.
- [4] 梁慧. 市政道路工程施工管理及质量控制的措施研究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(23): 17-19.
- [5] 薛紫文. 市政道路工程施工管理及质量控制研究 [J]. 建筑机械, 2025(09): 16-20.
- [6] 薛庆丰. 市政道路工程施工管理及质量控制研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(15): 240-242.

# 建设工程施工管理的影响因素与对策分析

周 薇

(兰州开元工程监理有限责任公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要** 建设工程施工管理是保障工程质量、进度、安全及效益的核心环节,其管理成效受多重复杂因素制约。本文以建设工程施工管理实践为出发点,系统梳理施工过程中的核心影响因素,涵盖人员配置、材料管控、技术应用、环境条件等维度,深入剖析各因素对施工管理的作用机制。在此基础上,针对性提出优化人员管理、强化材料管控、革新技术应用、完善环境适配等对策,以期提升建设工程施工管理水平、推动工程建设高质量发展提供理论参考。

**关键词** 建设工程施工管理; 人员管理; 材料管控; 风险防控体系

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.030

## 0 引言

随着我国基础设施建设与城镇化进程的持续推进,建设工程规模不断扩大,施工复杂度显著提升,对施工管理提出更高要求。施工管理作为工程建设全流程的关键支撑,直接关系到工程质量安全、施工进度管控及投资效益实现。当前,部分建设工程在施工管理中仍存在人员专业能力不足、材料管控不严、技术应用滞后等问题,制约了工程建设质量的提升<sup>[1]</sup>。因此,系统探究建设工程施工管理的影响因素,精准提出针对性优化对策,对规范施工管理流程、降低工程风险、保障工程建设目标实现具有重要的现实意义,也是推动建设行业转型升级的必然要求。

## 1 建设工程施工管理的影响因素

### 1.1 人员因素

人员是建设工程施工管理的核心主体,其专业素养、责任意识及协作能力直接决定了施工管理成效。部分工程因管理人员权责划分不清晰、作业人员岗前培训不足,导致施工指令传达不畅、操作失误频发,引发质量隐患或进度延误。同时,人员流动性大、团队协作性差等问题,也会破坏施工管理的连续性与稳

定性,增加管理难度。不同类型人员的核心能力要求、常见问题及影响程度具体如表1所示。

### 1.2 材料因素

建筑材料是工程建设的物质基础,材料质量、供应及时性及管控有效性对施工管理产生关键影响。材料质量直接决定了工程结构安全与使用性能,若选用不合格材料或材料进场检验缺失,极易引发质量事故,增加返工成本与工期延误风险<sup>[2]</sup>。同时,材料供应计划不合理、供应链不稳定等问题,会导致施工材料短缺或积压,短缺将造成施工中断,影响进度。此外,材料存储、运输过程中的管控不当,可能导致材料损耗、变质,进一步加剧施工管理难度,影响工程整体效益。

### 1.3 技术因素

施工技术保障工程施工顺利推进的核心支撑,技术方案的科学性、技术应用的适配性及技术创新能力均对施工管理产生重要影响。在技术应用层面,传统施工技术的局限性与新技术、新工艺推广应用不足会制约施工效率提升;而技术人员对新技术的掌握不熟练可能引发操作失误,影响工程质量。同时,技术交底不充分、技术资料管理混乱等问题会导致施工过程中技

表1 不同类型人员因素影响分析表

人员类型	核心能力要求	常见问题	影响程度
管理人员	专业决策、资源调配、风险管控	权责不清、经验不足	高
技术人员	技术方案设计、现场指导	技术更新滞后	中高
作业人员	规范操作、安全意识	技能不足、操作不规范	高

作者简介:周薇(1984-),女,本科,工程师,研究方向:建设工程管理。

术指导缺失,进一步影响施工管理成效。各类施工技术的应用优势、推广难点及对管理的影响如表 2 所示。

### 1.4 环境因素

建设工程施工环境具有复杂性、多变性特点,自然环境、施工场地环境及政策环境等均会对施工管理产生显著影响。在自然环境方面,高温、暴雨、严寒、大风等恶劣天气会直接影响施工进度,增加施工安全风险,甚至导致施工中断。施工场地环境方面场地狭小、周边建筑物密集、交通拥堵等问题会制约施工机械部署、材料运输及施工流程开展,增加现场协调管理压力<sup>[3]</sup>。在政策环境方面,环保要求提升、施工审批流程调整等政策变化可能导致施工方案优化、施工工序调整,影响施工管理计划的执行。

## 2 加强建设工程施工管理的对策

### 2.1 优化人员管理体系

需构建全流程人员管理体系,提高员工综合素质,增强团队协作精神。制定严格的招聘制度,明确管理人员、技术人员及作业人员的资质要求,通过专业化的考试选拔优秀的人才,保证员工的业务素质与职位的需要相匹配<sup>[4]</sup>。同时,健全激励和约束机制,将工程质量、安全业绩与薪酬、升职挂钩,激发职工工作积极性;明确各岗位权责划分,防止权利与义务的重

叠或遗漏,保证施工指示的有效传递和执行。此外,强化团队文化,提高团队合作精神,降低员工流动性,保证建筑工程的持续管理。具体的人员管理环节、措施、目标及责任主体如表 3 所示。

### 2.2 构建全流程材料管控机制

为破解材料因素带来的管理难题,需建立从材料采购、进场检验到存储使用的全流程管控机制。采购环节推行阳光采购模式,选择资质齐全、信誉良好的供应商,签订规范采购合同,明确材料质量标准、供应时限及违约责任,从源头保障材料质量与供应稳定性。进场检验环节严格执行材料进场验收制度,对材料的规格、型号、质量证明文件进行全面核查,必要时委托第三方机构检测,杜绝不合格材料进场。存储环节根据材料特性制定科学存储方案划分专属存储区域,做好防潮、防火、防腐等防护措施,减少材料损耗;建立材料库存动态管理台账,实时监控材料消耗与库存情况<sup>[5]</sup>。使用环节推行限额领料制度,严格按照施工方案控制材料用量,避免浪费,同时加强施工过程中材料使用的监督检查,确保材料合理利用。各管控阶段的核心措施、标准及工具如表 4 所示。

### 2.3 推进技术创新与应用管理

以科技创新为动力,强化项目施工过程管理,实现科学高效。加强施工技术方案的前期论证,要根据

表 2 各类施工技术因素影响分析表

技术类型	应用优势	推广难点	对管理的影响
传统施工技术	操作成熟、人员适配度高	效率低、能耗高	管理成本高
新型装配式技术	效率高、质量可控	前期投入大、技术要求高	需强化流程管控
智能化施工技术	精准度高、安全系数高	人员技能不足、设备昂贵	需加强技术培训管理

表 3 人员管理环节、措施、目标及责任主体

管理环节	具体措施	实施目标	责任主体
人员准入	资质审核、专业考核	保障人员专业适配性	人力资源部门+项目管理部
培训教育	常态化技能、安全培训	提升全员综合素质	项目管理部+技术部门
激励约束	绩效挂钩、权责划分	激发积极性、规范管理	项目管理部+财务部门

表 4 全流程材料管控核心措施、标准及工具

管控阶段	核心措施	管控标准	管控工具
采购阶段	阳光采购、供应商审核 (供应商资质通过率≥95%)	符合国标、工程设计要求,材料合格率 100%,供应延误率≤2%	采购合同、供应商评价体系
进场检验	全面核查、第三方检测 (抽检比例不低于 5%)	质量合格、资料齐全,检验不合格材料退场率 100%	检验报告单、验收台账
存储使用	分区存储、限额领料 (超耗预警阈值设为 5%)	损耗率≤3%、用量精准,材料周转率提升 15% 以上	库存台账、领料单

工程地质情况、工程规模和工期的需要制订出一套科学、合理的施工工艺方案。同时，完善技术交底制度，在施工之前组织技术人员对施工团队进行了详细的技术交底，对施工流程、工艺要点及质量标准有明确认识，保证技术要求准确落实。此外，加强技术资料管理，建立和完善技术数据的归档和获取机制，确保工程设计资料的完整性、标准化，为工程建设管理工作提供技术支持。技术管理各环节的具体措施、所用工具及预期成效如表5所示。

### 2.4 建立环境适配与风险防控体系

建立环境适配与风险防控体系，减少对工程建设的负面影响。在自然环境方面，建立常态化天气与地质监测机制，依托气象部门、地质勘察机构获取实时数据，事先对恶劣天气、地质灾害的风险进行预测，

并制订出特殊的应急计划<sup>[6]</sup>。在施工场地环境方面，优化施工总平面布置，对施工机械的停放，物料的堆放和工作场所进行合理的安排，提高场地的使用效率；与周围社区及交通部门加强联系，制定合理的施工运输路线与时间，降低对周围环境和交通的冲击。在政策环境方面，安排专人对产业政策的变动进行跟踪，及时解读环保、审批等政策要求，根据公司的要求，对项目进行前期的规划和管理，以保证项目的顺利进行。不同环境类型的防控措施、应急预案及责任部门具体如表6所示。

### 3 结束语

建设工程施工管理是一项系统性、复杂性的工作，其工程成效受人员、材料、技术、环境等多重因素的综合影响，各因素相互关联、相互作用，直接关系到

表5 技术管理环节、措施、工具及预期成效

技术管理环节	具体措施	技术工具 / 方法	预期成效
方案论证	前期调研、专家评审 (评审通过率≥95%)	方案可行性分析报告	方案科学合理，施工风险降低50%以上，工期偏差控制在±5%内
新技术应用	技术引进、专项培训 (培训考核通过率≥95%)	BIM技术、智能化 施工设备	施工效率提升30%以上，材料损耗率降低25%，工程质量合格率达100%
技术交底与资料管理	分层交底、规范归档 (资料归档及时率100%)	技术交底记录、 电子档案系统	技术要求落地准确率100%，资料可追溯性提升，技术问题响应时间缩短50%

表6 不同环境类型的防控措施、应急预案及责任部门

环境类型	防控措施	应急预案	责任部门
自然环境	实时监测、计划调整	恶劣天气、地质灾害应急预案	安全管理部+施工班组
场地环境	优化布置、沟通协调	场地拥堵、周边投诉应急预案	项目管理部+协调部门
政策环境	政策跟踪、方案调整	政策变动应对方案	行政部+项目管理部

工程建设的质量、安全、进度与效益。本研究通过对施工管理影响因素的系统剖析，针对性地提出了优化人员管理、强化材料管控、推进技术创新、完善环境适配等对策，构建了全方位的施工管理优化体系。在实际工程实践中需结合工程具体情况灵活运用各项对策，动态调整管理策略，不断完善施工管理机制。未来，随着建设行业的不断发展，还需持续探索工程施工管理的新模式、新方法，推动施工管理向智能化、精细化方向转型，进一步提升建设工程施工管理水平，为我国建设行业的高质量发展奠定坚实的基础。

四川建材,2022(06):20-21.

[2] 李旺红.融合BIM技术的土木工程施工质量与安全管理措施研究[J].房地产世界,2022(09):131-133.

[3] 李正军.浅析土木工程项目施工进度和施工质量管理[J].居舍,2022(13):132-134.

[4] 刘露.建设工程检测管理存在的问题和对策[J].工程建设与设计,2024(13):253-255.

[5] 王亿柱.建设工程质量安全监督管理存在的问题及应对[J].产品可靠性报告,2024(03):37-38.

[6] 蔡菲.工程质量管理与计划管理深度融合的研究与实践[J].中国住宅设施,2024(10):55-57.

### 参考文献:

[1] 李荣丽.浅析土木工程施工管理及质量控制措施[J].

# 水利工程监理对施工安全的监督作用研究

胡金鹏<sup>1</sup>，刁强<sup>1\*</sup>，徐民顺<sup>2</sup>，牛晓君<sup>2</sup>

(1. 山东恒浩水利工程有限公司，山东 东营 257000;

2. 金正建设咨询集团有限公司，山东 济南 250014)

**摘要** 为提升水利工程施工安全管理水平，本研究系统分析了监理安全监督的作用机制与实施路径。通过构建时间—强度—范围三维理论模型，阐明了监理审查、巡查、验收三层职责体系及“信息采集—风险识别—指令下达—整改验证—持续改进”的闭环传导机制；梳理了准备期、实施期、收尾期全过程监督框架，提炼了深基坑、高边坡、模板支撑等关键环节控制要点；提出了网格化精准管控、分级能力培训、智能技术应用、制度保障完善等强化策略，以期完善水利工程安全监管体系、提升监理履职效能提供参考。研究表明，监理通过否决权、停工权、报告权的有效行使，可以将被动应对转化为主动预防，形成对施工安全风险的全方位管控。

**关键词** 水利工程监理；施工安全；监督作用

中图分类号：TV5

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.031

## 0 引言

水利工程具有施工周期长、技术难度高、作业环境复杂等显著特征，深基坑开挖、高边坡处理、水下作业等高危工序贯穿施工全过程，安全风险管控难度大。监理作为工程建设领域的第三方监督力量，在施工安全管理中承担着重要职责，但当前监理监督作用发挥仍存在职责边界模糊、技术手段滞后、制度保障不足等问题，导致安全隐患识别不及时、整改措施落实不到位的现象时有发生。因此，系统研究监理安全监督的作用机制与实施路径，探索技术手段创新与管理体制优化方向，对于构建科学高效的水利工程安全监管体系、降低施工安全事故发生率具有重要的理论价值与现实意义。

## 1 监理对施工安全的监督作用机制

### 1.1 监理安全监督的职责定位

监理在水利工程施工安全监督中承担审查、巡查、验收三层核心职责。审查职责体现在施工组织设计、专项安全方案、应急预案的技术把关，通过对方案可行性与风险预控措施充分性的评估，将安全隐患阻断于施工前端。巡查职责贯穿施工全过程，监理人员采用定时检查与随机抽查相结合的方式，对现场安全防护设施、作业人员操作规范、危险源动态变化实施持续跟踪，及时发现并责令整改违规行为。验收职责聚

焦隐蔽工程、分部分项工程及关键工序完成节点，通过实体质量与安全措施双重验收，确保每道工序符合规范标准方可进入下一阶段<sup>[1]</sup>。

### 1.2 监督作用的传导路径

监理安全监督作用遵循“信息采集—风险识别—指令下达—整改验证—持续改进”的闭环传导路径。监理人员通过现场巡视、旁站监督、影像记录等手段获取施工动态信息，结合施工方案与规范标准进行对比分析，识别出潜在安全风险点。风险识别后立即启动分级响应机制，一般隐患以监理通知单形式要求限期整改，重大隐患通过监理工程师通知单责令停工整改，紧急情况下直接行使安全否决权并向建设单位报告。施工单位接收指令后组织整改，监理对整改过程实施跟踪监督，通过现场复查与资料审核双重验证整改效果。验证合格后解除管控措施，不合格则重新进入整改循环。整改数据汇总分析后形成安全月报与专题报告，为后续监督策略调整提供依据。

### 1.3 监督作用理论模型构建

基于系统论与控制论，建立水利工程监理安全监督作用的三维理论模型。横轴为时间维度，划分为施工准备期、施工实施期、竣工验收期三个阶段，不同阶段监理监督重点存在差异性转移。纵轴为监督强度维度，根据工程危险性等级与施工难度设定常规监督、

作者简介：胡金鹏（1990-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程。

\*通信作者：刁强（1992-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程。E-mail: 708832166@qq.com

重点监督、旁站监督三级强度梯度，高风险作业区段自动触发强度升级机制。纵深轴为监督范围维度，涵盖人员资质审查、设备设施检验、施工方案论证、现场作业管控、应急演练评估五个监督领域，各领域通过检查清单实现标准化覆盖。模型核心引入反馈调节机制，将安全检查发现问题数量、整改闭合率、事故发生事件发生频次作为动态输入参数，当某项参数超出预警阈值时，系统自动提升该区域监督强度或扩大监督范围。通过建立时间—强度—范围的立体监督网络，监理能够根据工程实际动态调整监督策略，避免重点失焦与资源浪费，实现有限监理力量的最优配置，形成对施工安全风险的全方位、全过程管控格局<sup>[2]</sup>。

## 2 监理安全监督的实施体系与方法

### 2.1 全过程监督体系框架

监理安全监督体系按照施工时序构建准备期审查、实施期管控、收尾期验收三段式架构。准备期监督聚焦资质审核与方案把关，监理组建专项审查小组，对施工单位安全生产许可证、项目经理及安全员资格证书、特种作业人员操作证进行逐一核验，对施工组织设计中安全技术措施的针对性与可操作性开展技术评审，重点审查深基坑支护、高边坡防护、大体积混凝土浇筑等专项方案的计算依据与应急预案完备性。实施期监督建立日常巡查、专项检查、旁站监理三级管控网络，日常巡查覆盖全施工区域，专项检查针对基坑开挖、脚手架搭设、起重吊装等危险性较大作业，旁站监理锁定混凝土浇筑、水下作业、爆破施工等关键工序。收尾期监督强化隐蔽工程验收与安全设施拆除管理，监理对已完工程的安全防护措施保留情况进行检查，确保后续维护检修通道安全可靠，对临时用电线路拆除、脚手架拆卸等作业实施全程旁站，防止赶工期导致的违规操作<sup>[3]</sup>。

### 2.2 关键环节监督控制要点

深基坑施工监督要点在于支护结构验收与变形监测，监理在基坑开挖前核查支护桩施工记录与混凝土强度报告，开挖过程中每日检查坡顶裂缝发展、支撑轴力变化，降水井水位与周边建筑沉降数据超过设计预警值时立即发出停工指令。高边坡施工监督侧重锚杆锚索检测与坡面防护质量，监理现场见证锚杆拉拔试验，抽检数量不少于总数的5%，对喷射混凝土厚度采用钻孔取芯验证，确保坡面防护层与岩体结合紧密。模板支撑系统监督把控立杆间距、水平杆步距、扫地杆设置三项核心参数，监理使用钢卷尺逐跨测量架体尺寸，检查扣件紧固力矩是否达到规范要求，大跨度梁

板模板安装完成后组织预压试验，观测支撑体系变形情况。起重吊装作业监督关注吊装方案执行与作业区域警戒，监理核实起重机械检验合格证与司机持证情况，吊装前检查钢丝绳磨损程度、吊钩保险装置完好性，吊装过程中监督警戒范围设置与监护人员到位情况。

### 2.3 监督技术手段与工具

视频监控系统在施工现场主要出入口、塔吊作业区、深基坑周边布设高清摄像头，监理通过监控中心实时查看现场动态，AI识别算法自动捕捉未佩戴安全帽、高处作业无防护等违规行为并触发报警。无人机巡查技术应用于大型水利枢纽工程，监理每周开展一次航拍作业，获取施工全景影像与高边坡三维模型，通过前后期影像对比分析边坡变形趋势，发现人工巡查难以到达区域的安全隐患。物联网传感器布设于基坑支护结构、边坡锚索、大坝廊道等部位，实时采集位移、应力、渗压数据并传输至监理监控平台，数据异常时系统自动推送预警信息至监理手机终端。BIM技术在施工方案审查阶段发挥作用，监理将施工单位提交的脚手架、模板支撑方案导入BIM平台进行三维建模，模拟荷载作用下的结构受力状态，直观判断方案安全性。移动检测设备包括混凝土回弹仪、钢筋保护层厚度测定仪、接地电阻测试仪等，监理携带设备开展现场抽检，检测数据即时录入平板电脑形成电子台账<sup>[4]</sup>。

## 3 监理安全监督作用的强化策略

### 3.1 监督体系优化路径

将传统分散式监督转化为网格化精准管控模式，按照施工区域划分若干监督网格，每个网格配备责任监理工程师，网格边界根据基坑、边坡、高边坡等危险源分布进行动态调整。建立网格监督电子台账，记录每日巡查路线、发现问题、整改验证全过程，监理总监通过移动终端实时查看各网格监督动态，发现某网格问题高发时立即增派监督力量。开发安全监督信息管理平台，接入视频监控、传感器监测、无人机航拍等数据源，平台自动生成施工现场安全风险热力图，红色区域表示高风险需加强监督，黄色区域表示中等风险需定期检查，绿色区域为常规巡查区域。监理根据热力图调整日常巡查频次与重点，将有限人力精准投放至高风险作业面。建立监督效能量化评估机制，以隐患发现率、整改闭合率、安全事故控制率三项指标考核监理履职情况，评估结果与监理费支付挂钩，倒逼监理提升监督质量。网格化管理与数据驱动决策相结合，监督工作从粗放式覆盖转向精细化管控，监理人员工作量减少但监督效能提升。

### 3.2 监督能力提升措施

实施监理人员分级培训计划,总监理工程师参加水利工程安全生产标准化培训,掌握危险性较大工程专项方案审查要点与应急处置流程;专业监理工程师针对混凝土工程、土石方工程、起重吊装等专业领域开展技术培训,学习最新施工规范与安全技术措施;监理员接受现场安全检查实操训练,熟悉脚手架、模板支撑、临时用电等常见隐患识别方法。建立监理专家库,吸纳具有一级建造师、注册安全工程师资质且有大型水利工程经验的人员,在基坑开挖、高边坡处理、围堰拆除等高危作业前,邀请专家库成员到场指导监理开展专项检查。推行案例教学法,定期组织监理人员分析典型安全事故,从监理监督角度剖析事故发生前哪些环节存在监督盲区,哪些隐患未被及时发现,总结监督工作改进措施并编制案例手册。开展跨项目交流学习,监理单位选派人员到已完工的优质工程观摩安全监督台账、旁站记录、监理日志等资料,学习成熟的监督方法与经验。通过理论培训、实操演练、案例分析、经验借鉴多维度能力建设,监理人员风险识别准确率与处置能力显著提高。

### 3.3 监督技术创新方向

研发基于计算机视觉的违规行为自动识别系统,在施工现场部署边缘计算摄像头,实时识别人员未佩戴安全帽、高处作业无安全带、机械作业区域有人穿越等违规行为,识别到违规行为后系统自动截取现场照片并推送至监理手机,监理根据推送信息立即到场核实处理,识别准确率达 85% 以上时可替代部分人工巡查。应用倾斜摄影测量技术建立施工现场三维实景模型,监理每周通过无人机采集影像数据更新模型,将实景模型与 BIM 设计模型叠加比对,自动识别边坡开挖是否超挖、回填是否到位、临边防护是否缺失,比对结果以差异云图形式呈现,红色区域即为需整改部位。引入可穿戴设备监测作业人员生理状态,在高温、高海拔施工环境下,作业人员佩戴智能手环监测心率、血氧、体温等参数,数据超过安全阈值时设备自动报警并通知监理,监理要求作业人员撤离休息,避免疲劳作业引发事故。开发监理移动检查终端,集成混凝土强度检测、钢筋保护层厚度测量、接地电阻测试等功能,检测数据自动上传云端形成电子台账,替代传统纸质记录,数据可追溯性与准确性大幅提升。技术创新将人工经验判断与智能算法分析结合,监督工作从依赖个人能力转向技术赋能<sup>[5]</sup>。

### 3.4 制度保障机制完善

制定监理安全监督负面清单,明确列举监理不得实施的行为,包括未经审查批准施工组织设计即允许开工、发现重大安全隐患未及时下达停工令、对施工单位拒不整改行为未向建设单位报告等,对违反清单内容的监理人员及监理单位承担相应法律责任。建立监理安全监督免责机制,监理已按规范要求履行审查、巡查、验收职责并留存完整记录,因施工单位违规操作或隐瞒事实导致安全事故的,监理可免除连带责任,该机制通过合同条款明确约定并报行业主管部门备案。完善监理费动态调整办法,根据工程规模、技术难度、危险性等级确定基准监理费,对安全监督效果突出的监理单位在下一年度招标中给予加分,对发生安全事故的监理单位扣减当期监理费并列入行业黑名单。推行监理安全监督报告公示制度,监理每月向建设单位提交的安全监督报告同步上传至工程所在地水利主管部门监管平台,接受行业监管与社会监督,报告内容包括检查次数、发现问题、整改情况、事故隐患等,公示倒逼监理认真履职。制度层面的约束与激励双向发力,监理安全监督的规范性与主动性持续增强,监督作用得到制度化保障。

## 4 结束语

深基坑、高边坡等关键环节的量化控制标准,视频监控、无人机、物联网等技术手段的综合应用,以及网格化管理、分级培训、智能识别等创新措施的提出,为监理安全监督效能提升提供了可行路径。未来应进一步深化人工智能在隐患识别中的应用研究,探索监理、施工、建设多方协同的安全管理新模式,完善监理法律责任与激励机制,推动水利工程安全监督向数字化、智能化、精准化方向发展,为保障水利工程建设安全、促进行业高质量发展提供有力支撑。

### 参考文献:

- [1] 周明月. 水利水电工程施工安全监理工作分析[J]. 居舍, 2021(11):126-127.
- [2] 赵华安, 陈崇德. 水利工程建设施工监理安全检查及其评价方法[J]. 水电与新能源, 2020, 34(08):44-48.
- [3] 张帅. 水利水电工程施工安全管理研究[J]. 水上安全, 2025(07):157-159.
- [4] 郑洁婷. 多议水利水电工程施工安全监理工作要点[J]. 中华建设, 2023(07):74-76.
- [5] 王发兵. 水利水电工程施工安全监理工作分析[J]. 大众标准化, 2021(15):195-197.

# 铁路既有线施工安全风险及管控措施分析

龙玉峰

(中铁二十三局集团第四工程有限公司, 四川 成都 610031)

**摘要** 铁路既有线施工需在保障铁路正常运营的前提下开展, 其安全管理涉及运营与施工双系统协同, 面临多主体耦合、风险叠加、时空约束等特殊挑战。本文以将黑线铁路专用线新建二线及电气化改造工程为背景, 系统梳理既有线施工安全风险的核心特征, 从多主体协同、动态风险分级、时空作业管控、应急体系建设四个维度构建针对性的安全管理要点体系, 旨在为铁路既有线施工安全管理提供理论参考, 进而保障既有铁路运营安全与施工过程安全。

**关键词** 铁路既有线; 施工安全管理; 风险管控; 协同机制

**中图分类号**: U215

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.032

## 0 引言

铁路既有线施工是铁路扩能改造、技术升级的关键环节, 其核心矛盾在于施工活动与既有铁路运营安全的协同统一。相较于新建铁路, 既有线施工需面对运营设备干扰、行车组织约束、多主体交叉作业等复杂场景, 任一管理疏漏均可能引发行车事故或人员伤亡, 直接威胁铁路运输安全与社会公共利益<sup>[1]</sup>。当前部分既有线施工项目存在协同机制不健全、风险管控静态化、应急响应滞后等问题, 凸显了系统化安全管理的迫切性。本文结合将黑线铁路专用线施工实践, 剖析既有线施工安全风险的独特性, 提炼可落地的安全管理要点, 以期填补既有线施工安全管理理论与实践的衔接空白, 推动铁路既有线施工安全管理水平的系统性提升。

## 1 工程概况

本次研究依托的将黑线铁路专用线新建二线及电气化改造工程, 位于我国新疆地区, 线路起于将军庙站 K1+164, 止于北山站 K56+600, 总建设里程 55.436 km, 合同金额暂定为 46 667.6 902 万元。工程核心内容包含两部分: 一是将军庙站东端至北山站既有线路电气化改造, 覆盖里程 49.851 km, 涉及通信、信号、电力及牵引供电系统的全链条升级; 二是石钱滩站至金沟站增建二线, 长度 17.074 km, 含路基、桥涵、轨道等主体工程。

项目主要工程规模涵盖: 路基工程填方 74.71 万 m<sup>3</sup>、挖方 14.84 万 m<sup>3</sup>, 路基加固及附属圪工 1.605 万 m<sup>3</sup>;

桥涵工程新建特大桥 2 座、中桥 3 座、涵洞 21 座; 轨道工程铺设 17.07 km 有砟轨道, 同步实施全线“四电”系统集成。

从安全管理视角看, 项目具有典型的既有线施工特征: 一是作业空间紧邻运营线路, 17.07 km 增建二线及 49.851 km 电气化改造均邻近既有将黑铁路、将淖铁路及将戈专用线, 部分工点需封锁既有线路施工; 二是跨域环境复杂, 2 座特大桥均跨越省道 S327, 北山东五号中桥为既有涵改桥工程, 需在不中断既有行车的前提下实施结构转换; 三是气候与地理条件严苛, 项目地处亚热带季风气候区, 夏季高温高湿、冬季严寒, 且频发大风、沙尘暴等灾害性天气, 对露天作业安全构成直接影响; 四是大型设备作业集中, 涉及架桥机、铺轨机、长轨车等特种设备, T 梁运输需穿越 260 km 多煤运输车辆干扰的路段, 进一步放大安全管理复杂度<sup>[2]</sup>。

## 2 铁路既有线施工安全风险的核心特征

### 2.1 多主体协同的复杂性风险

铁路既有线施工涉及施工单位、铁路运营单位、设备管理单位、监理单位等多主体, 各主体权责边界与管理目标的差异易引发协同风险。从权责维度看, 施工单位需聚焦施工进度与作业安全, 运营单位需保障线路通行能力与行车安全, 设备管理单位需维护既有设备稳定, 三者作业时间、空间、资源分配上易产生矛盾。例如: 在既有线电气化改造中, 施工单位需接触网停电作业, 而运营单位需平衡运输计划, 若协同机制缺失, 易导致停电时间与施工需求不匹配,

**作者简介**: 龙玉峰 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通工程。

被迫压缩作业时间引发违章操作。从信息传递维度看,多主体间信息不对称加剧风险,如设备管理单位未及时提供既有光电缆径路数据,施工单位动土作业易造成线路中断;驻站联络员与现场防护员沟通不畅,可能导致列车接近时作业人员未及时下道,造成人身安全隐患<sup>[3]</sup>。

## 2.2 环境与作业的耦合性风险

既有有线施工安全风险并非单一因素作用,而是环境条件与施工作业的深度耦合结果,呈现“环境触发—作业放大”的风险传导特征。从自然环境看,项目所处区域的气候条件直接影响作业安全:夏季高温易导致人员疲劳,增加误操作概率;冬季积雪融化引发路基浸泡,可能导致既有线路基失稳,进而影响邻近施工的基坑安全;大风天气不仅威胁高空作业安全,还可能吹动物料侵限,干扰既有有线行车。从既有设备环境看,运营中的线路、信号、供电设备构成作业边界约束,施工机械与既有设备的安全距离控制成为关键,若因作业偏差突破安全阈值,可能引发设备损坏或触电事故<sup>[4]</sup>。

## 2.3 时空约束下的风险叠加性

既有有线施工受“时间封锁、空间受限”双重约束,导致风险在有限时空内高度叠加,放大安全管控难度。在时间约束方面,既有有线施工多依赖天窗封锁时间,作业时间压缩使工序衔接紧张,易出现“抢进度、轻安全”的违规行为。例如:在涵改桥工程中,若封锁时间内未能完成既有涵洞拆除与临时防护,需延长作业时间,而列车接近预警可能迫使人员仓促撤离,遗留防护不到位隐患。在空间约束方面,既有有线两侧作业空间狭窄,大型机械与既有线路的距离控制难度大,易出现机械侵限风险;同时,多工序交叉作业使不同风险源在同一空间叠加,增加风险识别与管控的复杂度。

## 2.4 应急响应的特殊性风险

相较于新建铁路,既有有线施工应急响应需兼顾“施工安全”与“运营安全”双重目标,应急处置的时效性与精准性要求更高,且应急失误可能引发次生运营事故。从应急场景看,既有有线施工常见应急事件需在最短时间内处置,否则可能导致列车停运。例如:施工机械意外侵入限界,需在列车到达前完成清障,应急响应时间窗口远短于新建工程。从应急协同看,应急处置需联动运营单位、设备管理单位、施工单位,若协同流程不畅,易出现应急指令传递延迟。例如:接触网断线事故,需供电段与施工单位协同抢修,若抢修方案沟通不一致,可能延长停电时间。

## 3 铁路既有有线施工安全管理具体措施

### 3.1 构建多主体协同管理机制

多主体协同是化解既有有线施工协同风险的核心,需从权责界定、信息传递、流程管控三方面建立体系。首先,明确多主体权责边界与协同流程,施工前需与铁路运营单位、设备管理单位签订《施工安全协议》,明确施工范围、安全责任划分、应急联动职责;建立“施工单位—设备管理单位—运营单位”三方周例会制度,协调解决封锁计划、设备占用、交叉作业等问题。例如:每月召开风险协调会,确定下月涵改桥、接触网改造等关键工序的协同方案。其次,完善信息传递体系,落实驻站联络员与现场防护员“双防护”制度,驻站联络员负责与车站调度沟通列车动态,每3~5分钟与现场防护员核对信息,确保列车接近时及时预警;构建多主体信息共享平台,整合施工计划、既有设备数据、应急资源信息,实现“施工申请—审批—执行—反馈”的全流程信息化,避免信息不对称导致的协同失误。最后,强化协同监督考核,由设备管理单位、运营单位、施工单位的共同上级单位铁路局统筹,将设备管理单位的现场盯控、运营单位的调度配合情况与施工单位的作业质量一同纳入考核体系,对因协同不到位导致的安全隐患,由铁路局对相关责任单位进行问责;同时,建立协同激励机制,对高效完成协同作业的团队,由铁路局给予奖励,推动多主体从“被动配合”向“主动协同”转变。

### 3.2 实施动态风险分级管控

首先,开展全维度风险辨识。结合工程特点与既有有线环境,按施工作业类、机械设备类、环境类、应急类划分风险类别,形成覆盖全工序的风险清单。例如:将涵改桥施工坍塌、接触网改造触电、T梁运输倾覆等纳入重大风险清单。其次,采用科学方法进行风险评估。优先选用作业条件危险性评价法量化风险等级,结合既有有线运营安全要求,将风险划分为重大、较大、一般、低风险四级,对应红、橙、黄、蓝四色标识。例如:涵改桥工程因涉及既有线路基稳定,经评估确定为较大风险,需专项管控。再次,制定差异化管控措施。重大风险需编制专项施工方案并组织专家论证,落实“一机一人”专职防护;较大风险需明确管控责任人与监控频率;一般风险需纳入日常巡检;低风险需进行常态化提醒。最后,建立风险动态更新机制。风险动态更新机制的构建需紧密贴合铁路既有有线施工风险随工况实时演变的特性,形成“触发—辨识—评估—更新”的闭环流程。当施工工序发生转换时,如从路基帮宽作业转向涵改桥施工、接触网改造等关键

工序,需重点补充既有线路基开挖引发的失稳风险、接触网停电作业与行车调度的协同风险,避免工序衔接中的风险遗漏;当环境条件变化时,针对项目所处区域的高温、大风、沙尘暴等气候特征,需新增人员高温疲劳误操作、机械受风荷载影响的侵限风险、露天物料被吹落的安全隐患等辨识内容;当设备状态调整时,如新增架桥机、长轨车或T梁运输设备参数变更,需重新评估设备操作规范适配性、与既有线设备的安全距离控制要求。更新过程中需采用作业条件危险性评价法重新量化风险等级,同步调整管控措施的责任人与监控频率,更新后的风险清单需及时传达至施工班组、防护员等一线岗位,确保风险管控措施与实际工况精准匹配,杜绝因静态管理导致的安全漏洞<sup>[5]</sup>。

### 3.3 强化时空作业精准管控

基于既有线施工的时空约束特征,需从时间计划、空间隔离、作业规范三方面实施精准管控。(1)在时间管控方面,科学制定封锁施工计划,根据既有线运输需求与施工工序要求,合理申请天窗时间,明确“封锁前准备—封锁中作业—封锁后验收”各阶段时间节点。例如:涵改桥封锁施工需提前1小时完成防护设施布设,封锁时间内完成既有涵洞拆除与临时支撑,封锁后30分钟内完成验收并开通线路;同时,建立时间管控预警机制,对超时作业实施分级预警,避免因超时引发列车延误;(2)在空间管控方面,落实物理隔离措施,在施工区域与既有线路间设置硬隔离,高度不低于1.2 m,并悬挂警示标识;严格控制施工机械与既有设备的安全距离,大型机械作业时需设置专职防护员,实时监测机械位置,防止侵限;对于跨公路、跨既有线等特殊空间作业,采用“物理隔离+电子监控”双重防护,如特大桥跨省道施工设置视频监控,实时监测车辆通行与施工安全;(3)在作业规范方面,推行“作业票”制度,所有既有线作业需凭经审批的作业票开展,明确作业内容、安全措施、责任人;强化特种作业人员管理,特种设备操作人员需持证上岗,且经项目专项培训后方可作业;落实“工完料尽场地清”要求,每次封锁作业后需彻底清理施工废料,检查防护设施完整性,确保既有线运营环境无遗留隐患。

### 3.4 完善专项应急体系建设

针对既有线施工应急响应的特殊性,需构建“预案—资源—演练—复盘”全链条应急体系。首先,编制差异化应急预案,结合既有线施工常见应急场景,制定综合应急预案、专项应急预案与现场处置方案,专项预案需明确各主体的应急职责分工。例如:机械侵限预案中,施工单位负责现场清障,运营单位负责调

度列车避让,设备管理单位负责既有设备检查;现场处置方案需细化操作流程,确保应急处置标准化。其次,配置适配的应急资源,在既有线邻近工点设置应急仓库,储备防侵限器材、急救设备、通信设备,并定期检查维护;建立应急资源共享机制,与设备管理单位、就近医院、消防站签订应急联动协议,确保应急时资源快速调配。再次,开展针对性应急演练,结合既有线施工节奏,制定年度演练计划,演练类型覆盖常见应急场景,且演练需模拟真实运营环境。例如:每季度开展1次机械侵限应急演练,检验“预警—清障—恢复运营”全流程响应能力;演练后需形成评估报告,梳理问题并整改,持续优化应急流程。最后,建立应急复盘机制,对各类应急事件进行复盘,分析事件原因,总结管控经验,更新应急预案与风险清单,实现“应急—复盘—改进”的闭环管理,提升应急响应的精准性与效率。

## 4 结束语

铁路既有线施工安全管理是“运营安全”与“施工安全”协同统一的系统工程,其核心在于精准识别多维度风险特征,构建适配既有线场景的管控体系。本文结合将黑线铁路专用线工程实践,揭示既有线施工多主体协同、环境作业耦合、时空风险叠加、应急响应特殊的风险特征,提出多主体协同、动态风险分级、时空精准管控、专项应急建设四大管理要点,形成“风险识别—管控实施—应急保障”的全链条管理逻辑。研究表明,既有线施工安全管理需突破传统“单一施工方管控”模式,通过多主体协同化解权责矛盾,以动态风险分级应对复杂风险,用时空精准管控适配约束条件,靠专项应急体系保障双重安全。本文的研究成果旨在为同类铁路既有线施工安全管理提供理论参考与实践范式,助力推动铁路既有线施工安全管理从“经验驱动”向“体系驱动”转型,为我国铁路扩能改造工程的安全实施提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 邱坤. 上跨铁路既有线转体桥施工安全管理与风险控制策略[J]. 汽车周刊, 2025(09):240-242.
- [2] 张建伟. 既有线铁路大修列车换枕施工安全管理研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [3] 李璘. 浅析铁路既有线供电线改造施工安全管理[J]. 工程机械与维修, 2023(01):208-210.
- [4] 赵学峰. 铁路既有线施工安全管理存在的薄弱环节及对策探索[J]. 四川水泥, 2019(12):240.
- [5] 陈智广. 铁路既有线施工的安全管理与控制[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019(26):51,5.

# 城市轨道交通地铁施工安全管理优化研究

王 健

(中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030032)

**摘 要** 地铁施工安全管理是城市轨道交通工程建设的核心环节, 直接关系到工程建设质量、人员生命安全和城市运行秩序。鉴于地铁施工存在空间局限性强、技术工艺复杂、水文地质条件恶劣等固有特征, 传统粗放式安全管理模式已难以满足复杂施工场景的管控需求。本文立足城市轨道交通建设实际, 分析地铁施工的典型特征与安全管理现存问题, 从制度完善、人员管控、风险防控、技术升级四个维度提出针对性优化措施, 旨在对保障城市轨道交通工程的顺利推进有所裨益。

**关键词** 城市轨道交通; 地铁施工; 安全管理

中图分类号: U215

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.033

## 0 引言

随着我国城市化进程的持续加快, 城市轨道交通凭借大运量、高效率、低污染的优势, 成为缓解城市地面交通拥堵的重要支撑, 其建设规模与覆盖范围不断扩大。但地铁工程多处于城市核心区域, 施工活动以地下作业为主, 施工过程中安全风险隐患点多、面广、线长, 基坑坍塌、涌水涌砂、机械伤害等安全事故时有发生。基于此, 要加大地铁施工安全管理力度, 结合地铁施工特征与管理重难点, 探索构建全流程、精细化、智能化的安全管理体系, 提升城市轨道交通工程安全管理水平, 保障工程建设顺利推进。

## 1 城市轨道交通地铁施工特点

### 1.1 空间局限性强

地下施工活动集中开展于地下空间, 具备有限性、封闭性的鲜明特性, 作业空间狭窄, 人员与设备、设备与设备之间未能保持安全距离, 常出现机械伤害、物体打击等安全事故。结合往期工程案例来看, 地铁隧道断面宽度普遍为 5~6 m, 隧道高度为 4~5 m, 基坑宽度仅为 20~30 m, 作业空间十分有限。例如: 在地铁隧道盾构施工阶段, 盾构机自身长度达到 10~15 m, 占据绝大多数隧道空间, 施工人员利用盾构机尾部狭小空间, 开展管片拼装、注浆等多项作业, 一旦操作不当, 极易被管片砸伤或是被盾构机碰伤<sup>[1]</sup>。此外, 地铁路线途径人居密度高的核心城区, 地铁隧道沿线密集分布市政管线, 包括燃气管道、给排水管

网等, 如果不能主动避让、迁移市政管线, 并采取注浆加固地层、设置缓冲垫等专项技术措施, 在施工扰动下, 就会频繁出现市政管线破损泄漏等问题, 严重影响周边居民日常生活, 并在破坏重要市政管线时, 伴随出现安全事故, 如燃气泄漏、爆炸、人员触电。

### 1.2 施工技术复杂

地铁施工活动具备极高技术含量, 涉及多种施工技术, 涵盖土方开挖回填、基坑支护、盾构掘进、轨道铺设、机电安装等若干分部分项工程, 任一工序环节出现违反技术规范和施工准则的错误操作行为, 都会造成微小施工误差和安全隐患, 随着时间推移, 逐渐演变成重大安全事故, 伴随出现多项施工问题。例如: 在基坑支护阶段, 常见问题包括支护不及时导致基坑暴露时间超标、支护形式选型有误导致缺乏足够支护强度, 将引发安全风险。

### 1.3 水文地质条件恶劣

地铁施工范围在空间层面上呈现线性分布状态, 沿途穿越多种地质环境, 局部区域面临极度恶劣的水文地质条件, 穿越富水地层、软弱地层或是面临其他不良地质问题, 常规施工工法未能适应此类特殊施工场景, 中途出现隧道围岩变形失稳、隧道坍塌、涌水涌砂等安全事故。例如: 在某城市轨道交通工程, 地铁基坑开挖阶段, 因遭遇强降雨, 且地下水位本身保持高位, 未能及时启动降水系统, 地下水位急剧上升, 致使基坑内部大面积涌水, 涌水流量超过 50 m<sup>3</sup>/h, 最终导致基坑边坡坍塌事故。

**作者简介:** 王健(1988-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 城市轨道交通安全管理。

## 2 城市轨道交通地铁施工安全管理问题

### 2.1 制度体系不完善

目前,部分城市轨道交通工程仍沿用早期管理制度,制度内容和地铁施工安全管理情况不一致,未能发挥出应有作用,容易引发多项管理问题。例如:管理制度针对性不足,忽略不同工程背景和现场管理需求,基本沿用通用建筑施工安全管理制度,未能贴合地铁施工情况,对制度内容进行针对性补充,如地铁施工空间狭窄,通风采光条件较差,没有适配狭小空间施工特征来制定安全管理规范,缺少作业人员转入条件、安全防护措施、应急处置方法等具体管理内容<sup>[2]</sup>。

### 2.2 人员安全意识淡薄

目前,部分城市轨道交通工程均存在人员安全意识淡薄的共性问题,一线施工人员文化水平偏低,缺少系统性培训教育,未能树立自我保护意识,也不具备各项安全技能,频频出现错误操作行为和安全违规行为,不断形成安全隐患,常见问题包括私自取下安全帽等安全防护装备、违规私自搭电。此外,人员流动性过强,在地铁施工期间,不断流失施工人员和引进全新人员,由于专职管理人员数量有限,满足日常管理需求的前提下,无法长期抽调多名管理人员组织开展安全教育培训活动,安全交底作业不完善,导致施工工艺和施工标准掌握不足。

### 2.3 风险防控机制缺位

结合往期工程案例来看,基坑坍塌、涌水涌砂、隧道围岩失稳等安全事故都存在清晰脉络,掌握安全隐患形成规律,及时察觉前期异常征兆,即可精准判定安全事故类型、出现时间地点和危害程度,辅以防治处理措施。但在现实层面上,部分城市轨道交通工程仍秉持被动管理理念,施工安全管理体系缺少风险管控内容,安全巡查等常规管理手段仅能发现一部分安全隐患,无法前置消除施工风险。同时,一些城市轨道交通工程建立风险管控机制,但由于管理经验不足和管理技术落后,存在风险辨识不全面、风险评估结果有误、风险管控措施缺乏针对性的问题,实际收效甚微。

### 2.4 安全技术支撑不足

面对复杂的施工形势,传统管理技术存在滞后性,无法满足实际管理需求。以现场巡查技术为例,早期以人工巡查方式,定期巡视检查施工现场各处区域,以安全防护装备穿戴情况、安全设施使用情况、工程机械运行状况、施工操作是否违规作为巡查内容,整体巡查效率低下,抽调大量管理人员,虽然可以提高

巡查效率,识别更多安全隐患,但也会导致其他管理工作停摆,无法提高整体管理效能。

## 3 城市轨道交通地铁施工安全管理体系的优化措施

### 3.1 完善安全管理制度体系

针对地铁施工复杂工况,施工单位需立足现场作业实际,健全覆盖全工序的安全管理制度体系,通过细化管控标准、强化监督考核,确保制度落地执行,切实提升安全管理效能。

第一,细化施工全工序安全管控要求。施工单位需系统收集同类地铁工程施工案例,组织技术人员、一线施工班组开展专题调研,全面梳理现行制度与现场施工的适配性问题,重点摸排狭小空间作业、盾构掘进、深基坑支护等高危工序的管理漏洞。基于调研结果,修订完善安全管理制度,补充各工序专项管理细则。例如:针对地下狭小空间作业场景,编制《地铁狭小空间施工作业安全管理细则》,明确作业人员准入资质、气体检测频次、通风照明设备配置标准、安全防护装备穿戴要求等内容,严格限定同一作业面的人员数量与机械设备台套数,保障作业空间内人员与设备的安全间距<sup>[3]</sup>。第二,强化制度执行的监督考核力度。施工单位需构建“项目部—工区—班组”三级安全责任体系,逐层签订安全生产责任书,明确各级管理人员与作业人员的安全职责。将安全管理执行情况纳入绩效考核范畴,定期对各工区、班组的制度落实情况进行检查,重点核查工序安全交底记录、隐患整改闭环情况、特种作业人员持证上岗情况等内容<sup>[4]</sup>。对严格落实安全管理制度、及时排查处置安全隐患的班组与个人给予专项奖励;对违反制度规定、违规操作引发安全隐患的责任主体,采取通报批评、经济处罚等措施,情节严重的责令停工整改,倒逼全体人员履行安全职责,推动安全管理责任落实到每一道施工工序、每一个作业岗位。

### 3.2 强化人员安全管理

工程人员安全素养是决定管理效果和施工安全的核心因素,唯有确保全体工程人员都能树立安全生产意识,主动配合管理活动开展,自发识别安全隐患并上报问题,才能杜绝安全事故发生。为实现上述目标,必须强化人员安全管理力度,具体从分层分类安全培训、人员资质审核两方面入手。

第一,分层分类安全培训。按照所属岗位职能和具体工作内容,把工程人员划分为若干层级,差异化制定培训计划,确定安全培训内容,以实操内容为主,理论知识为辅。针对普通作业人员,把安全基础知识、

安全操作规程、安全隐患识别处置方案和安全管理制度作为培训内容。针对特种作业人员,以本工种安全操作技能、工程机械标准化操作方法与维护保养方法作为培训内容。针对管理人员,则以新型管理理论、现代管理技术和安全管理知识作为培训内容。第二,人员资质审核。建立特种人员作业档案,入岗前审核资质证书,不予录用资质证书过期、资质类型和从事特种作业类型不相符的特种作业人员。如果缺乏足够时间开展安全教育培训活动,直接对特种作业人员的操作技能与安全知识进行考核,通过考核后,直接分配工作岗位,后期利用空闲时间补充开展安全培训作业<sup>[5]</sup>。

### 3.3 全流程风险管控

为前置消除风险隐患,需建立全流程风险管控机制,包含风险辨识、风险评估、风险防治三道环节,管理方法如下。

第一,风险辨识。组合采取专家论证法和 BIM 模拟施工方法,全面收集工程资料信息和相似工程施工案例,专家小组凭借自身经验,全要素辨识地铁施工阶段可能存在的风险隐患,共同对风险隐患出现概率进行评价打分。同步构建 BIM 模型,先后模拟多种工况场景下的地铁施工活动,专家评价结果和 BIM 仿真施工结果相互论证。第二,风险评估。由定量评价方法取代定性评价方法,着手设立多项核心指标,包括风险事件发生概率、有无人员伤亡、存在时间、影响范围等,量化计算各项风险问题的危害程度,进行优先级排序,划分为若干等距,具体分为重大风险、较大风险、一般风险与低风险四个等级,差异化选择风险响应力度。第三,风险防治。深入分析各类风险事件的形成机理和发展规律,针对性采取多项防治措施。以基坑涌水事故为例,形成原因在于遭遇强降雨和地下水位急剧上升,需要额外部署降排水系统,利用排水设施来阻隔地表径流,实时监测地下水位,部署降水井点,确认地下水位即将超过警戒值后,立即启动降水系统,持续抽采地下水。

### 3.4 推进施工安全管理技术智能化升级

施工单位需以技术创新驱动安全管理效能提升,聚焦地铁施工高危工序与风险点,构建智能化、信息化安全监测与管控体系,通过技术手段弥补人工管理的局限性,实现安全风险的提前预警与精准处置。

施工单位应针对深基坑支护、盾构掘进、狭小空间作业等核心工序,部署全维度在线监测系统。在深基坑边坡布设位移传感器、沉降传感器与孔隙水压力传感器,在盾构机刀盘及管片区域安装应力传感器与姿态传感器,在狭小空间作业面配置气体浓度传感器

与人员定位终端;同时,在施工现场关键节点布设 AI 智能摄像头,实现对人员违规操作、设备运行状态的实时可视化监控。同时,构建施工安全风险数据库,整合同类地铁工程的安全事故案例、风险辨识清单与应急处置方案,基于机器学习算法对监测数据与监控画面进行智能分析,建立风险识别模型,明确不同监测数据阈值对应的风险等级<sup>[6]</sup>。

在地铁施工全过程中,传感器实时采集的地层变形、结构应力、气体浓度等数据,以及 AI 摄像头捕捉的画面信息,均会传输至安全管理平台。当监测数据超出安全阈值,或 AI 算法识别出未系安全带、违规动火等操作行为时,系统会自动判定风险等级,第一时间向管理人员移动端推送预警信息;针对重大安全隐患,系统可联动施工现场的声光报警装置与人员定位系统,自动触发报警程序,精准定位危险区域内的作业人员,提醒其迅速撤离。此外,施工单位可依托 BIM 技术构建施工场景数字孪生模型,将监测数据与模型深度融合,模拟风险发展趋势,为管理人员制定应急处置方案提供数据支撑,实现从“被动处置”向“主动预防”的安全管理模式转变。

## 4 结束语

城市轨道交通地铁施工安全管理是一项兼具复杂性与系统性的工作,其管理成效直接关乎工程建设成败、人员生命安全和城市公共利益。在地铁施工中,要构建科学高效的地铁施工安全管理体系,立足工程实际,从制度、人员、风险、技术四个维度协同发力。通过完善贴合现场施工需求的管理制度,强化分层分类的人员安全培训,建立全流程风险管控机制,推动管理技术向智能化、信息化方向升级,方能实现安全管理的精细化与常态化。

## 参考文献:

- [1] 刘东升.地铁施工安全管理的影响因素及优化措施[J]. 居业,2024(01):152-154.
- [2] 韩伟.城市轨道交通地铁工程施工安全管理研究[J]. 住宅与房地产,2021(31):168-169.
- [3] 同 [2].
- [4] 李洪恩.城市轨道交通地铁施工安全管理研究[J]. 时代汽车,2021(23):189-190.
- [5] 袁宏涛,田泽民.城市轨道交通地铁施工安全管理措施研究[J]. 云南水力发电,2024,40(12):126-128.
- [6] 洪昌.地铁施工安全管理的影响因素及优化措施:从人因干预到技术赋能的安全风险防控体系构建[J]. 中国科技论文在线精品论文,2025,18(03):169-171.

# 输配电线路安全运行的影响因素及风险管理研究

王明睿

(国网江西省电力有限公司宜黄县供电分公司, 江西 抚州 344400)

**摘要** 输配电线路作为电力系统的核心载体, 其安全稳定运行直接关系到能源供应的可靠性和社会经济的可持续发展。本文基于国家能源局、电网企业及科研机构的公开数据与研究成果, 系统分析了输配电线路安全运行的主要影响因素, 包括自然环境、设备质量、运维管理、技术标准等, 并结合风险管理理论提出分层防控策略, 以期提升输配电线路安全水平提供参考。

**关键词** 输配电线路; 安全运行; 风险管理; 极端天气灾害; 设备老化

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.034

## 0 引言

随着我国电网规模的快速扩张和新能源的大规模接入, 输配电线路的复杂性和运行风险显著增加。根据国家能源局2024年发布的《电力设施保护专项报告》, 近五年全国输配电线路故障停运次数年均增长4.3%, 其中自然灾害与设备老化问题占比超过60%。在此背景下, 深入研究输配电线路安全运行的影响因素及风险管理策略, 对保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

## 1 输配电线路安全运行的影响因素分析

### 1.1 极端天气灾害

我国各地区的环境不同, 加之输配电线路长期在室外, 在这种情况下就容易受到雷电、洪水等问题的影响, 直接影响其运行安全。其中, 覆冰对输配电线路造成的影响尤其大, 非常容易引起跳闸, 如果覆冰的厚度超出线路设计标准, 还会出现断线问题; 雷电容易导致绝缘子脱落, 可能引发永久故障; 台风往往伴随暴雨, 不仅会影响线路基础, 而且可能引发倒塌问题。雷击、山火、冰灾等自然灾害对输配电线路的破坏具有突发性和复杂性。山火不仅直接烧毁线路本体, 还会通过热辐射导致杆塔结构强度下降, 同时烟雾中的导电颗粒可能引发绝缘子表面污闪。在冰灾环境下, 导线覆冰导致机械载荷剧增, 易引发断线、倒塔等连锁故障, 且覆冰不均匀会加剧导线舞动幅度, 形成动态应力集中。此类灾害的频发与全球气候变化导致的极端天气事件增多直接相关, 其空间分布特征与输电走廊规划存在显著空间叠合风险<sup>[1]</sup>。

### 1.2 设备质量与老化问题

1. 设备制造缺陷。输配电设备制造环节的质量控制漏洞直接影响线路长期可靠性。绝缘子制造过程中, 原材料纯度不足或烧结工艺偏差易导致零值绝缘子出现, 其机械强度与电气性能的劣化具有不可逆性。金具连接部位的铸造缺陷可能引发局部应力集中, 加速疲劳裂纹扩展。在导线制造中, 铝锭成分偏析或绞合工艺不当会造成抗拉强度下降, 服役过程中易发生断股事故。此类缺陷的隐蔽性使得常规检测手段难以及时识别, 需通过无损检测技术与全生命周期质量追溯体系实现过程管控<sup>[2]</sup>。

2. 设备老化加速。电力设备长期暴露于复杂环境导致性能退化呈现非线性特征。金属部件在电化学腐蚀、机械振动及温度交变作用下, 微观结构发生相变与晶格畸变, 宏观表现为机械强度衰减与导电率下降。有机绝缘材料受紫外线、臭氧及湿热环境作用, 发生交联密度降低与分子链断裂, 导致绝缘击穿场强下降。老化设备的剩余寿命评估需综合考虑服役时间、环境应力与负载率等多维因素, 传统定期检修模式难以适应老化速率的时空差异性, 亟需建立基于状态监测的动态寿命预测模型。

### 1.3 运维管理不足

1. 巡检效率低下。传统人工巡检模式受限于地形复杂性与劳动强度, 难以实现全线路周期性覆盖。山区线路通道狭窄、植被茂密区域存在视觉盲区, 杆塔高处部件检查需依赖登塔作业, 单次巡检耗时长达数

作者简介: 王明睿 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 输配电线路安全运行。

小时。缺陷识别依赖人工经验判断,易出现漏检与误判。智能化巡检技术虽已引入无人机与红外热像仪,但多源异构数据的融合分析与缺陷智能诊断算法尚处于工程验证阶段,实际应用中存在误报率偏高与定位精度不足等问题。

2. 应急预案不完善。应急预案体系的有效性取决于风险预判与处置流程的标准化程度。多数单位应急预案缺乏动态修订机制,未充分考虑极端天气复合灾害场景下的多环节联动需求。应急物资储备存在区域分布不均与品类缺失问题,关键抢修设备如带电作业车、应急发电机的调配响应时间超出预期。演练场景设计偏重程序性操作,对复杂故障模式下的协同决策与资源调度缺乏实战检验,导致实际突发事件处置效率低于理论预期<sup>[3]</sup>。

#### 1.4 生态保护与线路走廊矛盾

输电线路建设与生态敏感区保护的冲突日益突出。线路路径规划需规避自然保护区、水源涵养区等生态红线区域,但地形限制常导致线路被迫穿越生态脆弱区,引发植被破坏与水土流失。鸟类活动引发的线路短路事故频发,防鸟害装置安装与生态友好性之间的平衡亟待解决。噪声污染与电磁辐射对周边居民健康的影响评估体系尚不完善,公众对输电设施的接受度成为项目推进的重要制约因素。

## 2 输配电线路风险管理框架构建

### 2.1 风险识别与评估

1. 数据驱动的风险建模。输配电线路风险建模需整合多源异构数据,构建时空关联的动态评估体系。基于历史故障记录、气象监测数据、地理信息图谱及设备状态参数,建立线路风险概率分布模型。通过卫星遥感技术获取地表温度、植被覆盖度等山火风险因子,结合激光雷达扫描生成的厘米级地形高程数据,实现线路走廊三维空间风险可视化。机器学习算法可挖掘气象参数与故障发生的非线性关系,建立基于随机森林或长短期记忆网络的预测模型,动态生成风险热力图。此类模型需定期通过交叉验证与实际故障数据对比校准,确保预测精度满足工程需求。

2. 设备状态分级评价。设备状态评估需建立多维度指标体系,涵盖电气性能、机械特性及环境适应性等参数。采用层次分析法确定各指标权重,通过模糊综合评价法将定量数据与专家经验结合,实现设备健康状态分级。针对关键部件如绝缘子、导线接续管等,建立退化速率模型,结合剩余寿命预测算法,划分风险等级。红色等级设备需执行立即停运、解体检查等

强制措施,黄色等级设备纳入重点监测清单,实施周期性带电检测与预防性试验。评估结果需同步至资产管理系统,为设备更换与改造提供决策依据。

### 2.2 风险防控技术措施

1. 智能化监测系统。在线监测装置通过部署分布式光纤测温、微气象站及振动传感器,实时采集导线温度、风速、覆冰厚度等参数。采用边缘计算技术实现数据本地化处理,异常工况触发阈值告警后,通过 5G 专网传输至调控中心。无人机巡检系统搭载高分辨率可见光相机与红外热像仪,规划自主巡检航线,利用深度学习算法自动识别绝缘子破损、导线断股等缺陷。机器人巡检技术突破复杂地形限制,配备激光雷达与机械臂,实现杆塔攀爬与局部放电检测,显著提升高危区域巡检效率与安全性<sup>[4]</sup>。

2. 防雷与防污技术。防雷系统优化需结合雷电定位系统数据,开展线路雷击风险区段划分。采用差异化防雷措施,在高雷暴区域架设耦合地线,安装智能型避雷器并配置动作计数器。接地装置改造采用降阻模块与离子接地极组合方案,定期进行导通性检测与接地电阻测量。防污闪治理需建立污秽度监测网络,通过等值盐密与灰密检测确定污区等级,选用硅橡胶复合绝缘子与防污涂料,制定基于气象预报的清扫周期。对于重污秽区域,推广配置泄漏电流监测装置,实现污秽闪络风险动态预警。

### 2.3 风险管理体系优化

风险分级管控体系需建立五级分类标准,依据风险值大小实施红、橙、黄、蓝、绿分级标识。针对不同等级制定管控清单,明确责任部门与处置时限。隐患排查治理采用 PDCA 循环模式,通过移动巡检终端实现隐患上报、派单、整改、验收全流程数字化。建立隐患数据库,运用关联规则挖掘技术识别共性隐患,优化设备选型与施工工艺。定期开展风险评估复盘,动态调整管控策略,形成“识别—评估—控制—反馈”闭环管理机制。

构建多层次应急指挥体系,整合气象预警、卫星监测与现场巡检数据,实现灾情态势实时感知。制定标准化应急预案库,涵盖山火、覆冰、外力破坏等典型场景,明确响应流程与资源调配方案。建立跨部门应急联动平台,打通电力与应急管理、气象、林业等部门数据接口,实现应急物资联储联备与快速投送。定期组织多场景应急演练,重点检验通信中断、道路损毁等极端条件下的指挥协调能力。推广无人机物资投送与应急通信车组应用,提升抢修队伍复杂环境作业能力。

## 2.4 技术标准与制度保障

加快制定输配电线路抗灾设计标准,明确不同气候区划下的风速、覆冰、雷电防护等级。统一设备状态监测装置技术规范,规定传感器精度、数据传输协议及接口标准。修订反事故措施导则,针对新型风险源如新能源场站谐波、直流偏磁等制定专项防控要求。推动标准国际化对接,吸收IEEE、CIGRE等国际组织最新成果,提升标准前瞻性与适用性。建立线路全寿命周期管理制度,涵盖规划设计、建设施工、运维检修与退役报废各环节。推行设备主人制,明确设备全流程责任人,实施绩效考核与责任追溯。完善外包队伍准入机制,建立安全信用评价体系,实施黑名单动态管理。探索基于区块链技术的设备履历管理,确保数据不可篡改与可追溯性。加强新技术应用伦理审查,制定人工智能算法可解释性标准,防范技术滥用风险。

## 3 关键技术与实践路径

### 3.1 智能化技术应用

数字孪生技术通过高精度三维建模与多源数据融合,构建输电线路的虚拟镜像系统。基于激光雷达扫描与卫星遥感数据,建立厘米级精度的线路走廊三维地理信息模型,集成气象监测、导线应力、杆塔倾斜等实时动态参数。通过物理引擎模拟极端天气场景下的线路响应,预测覆冰厚度、风偏位移等关键指标,为防灾减灾提供量化依据。该技术支持在线仿真分析,可在虚拟环境中验证检修方案可行性,优化停电计划与资源调配策略。

机器学习算法在设备状态预测中发挥核心作用。通过分析历史巡检数据、环境参数及故障记录,构建绝缘子劣化、导线断股等典型缺陷的预测模型。采用长短期记忆网络(LSTM)处理时序数据,捕捉设备性能退化的非线性特征,实现剩余寿命的精准估算。基于强化学习的智能决策系统可动态调整巡检周期与维护策略,针对高风险设备自动生成预防性检修工单,降低突发性故障概率。

### 3.2 标准化建设

制定覆盖设计、施工、运维全链条的行业标准体系。在防雷领域,明确不同气候区划的避雷线配置标准与接地装置技术参数,规范雷电定位系统与故障录波装置的接口协议。针对绝缘子选型,建立污秽等级与爬电距离的量化对应关系,规定硅橡胶复合绝缘子的机械强度与耐老化性能指标。通过标准化设计减少因技术参数不匹配导致的系统性风险,提升设备兼容性与互换性。构建设备全流程追溯体系,从原材料采购到退役报废实现数据闭环。应用区块链技术记录设

备出厂试验、安装调试、预防性试验等关键节点数据,确保信息不可篡改。建立设备健康指数评价模型,综合机械状态、电气性能与环境损伤因子,动态划分设备健康等级。制定差异化运维策略,对高故障率设备实施重点监测与缩短试验周期,对低风险设备延长维护间隔,实现资源优化配置<sup>[5]</sup>。

### 3.3 人员能力建设

开发分层分类的培训课程体系,涵盖无人机操作、红外热像仪判读、智能监测系统维护等核心技能。设置虚拟仿真培训模块,模拟复杂地形巡检与高空作业场景,提升人员应急处理能力。建立跨专业轮岗机制,促进输电、变电、调度等专业人员的知识融合。引入国际认证的特种作业资质考核标准,强化高空作业安全规范与精密仪器操作技能。构建双重预防机制下的绩效考核体系,将风险分级管控与隐患排查治理成效纳入KPI指标。设置线路跳闸率、缺陷消除及时率、应急预案启动响应时间等量化考核维度,实施月度动态评估与年度综合考评。建立安全信用档案,对重复性隐患责任人实施分级惩戒,对风险管控创新成果给予专项奖励。

## 4 结束语

输配电线路的安全稳定运行是保障电力系统可靠性的关键环节。面对自然环境、设备老化、运维管理等多重挑战,必须构建全链条风险管理体系,通过智能化监测、防雷防污技术升级和标准化建设提升线路安全水平。未来应重点突破新能源接入下的动态风险评估技术,完善跨部门应急联动机制,推动风险管理从被动应对向主动预警转变。同时,加强设备全生命周期管理,深化人员专业技能培训,形成技术与管理协同驱动的安全防线。唯有持续创新风险管理模式,才能为构建新型电力系统提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 许嘉辉,王岩.输配电及用电工程线路安全运行技术研究[J].电力设备管理,2025(18):234-236.
- [2] 陈晓辉.电力输配电线路故障排除与运行维护策略[J].光源与照明,2025(09):150-152.
- [3] 陈宗来.电力工程中的输配电线路安全运行及其检修维护探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(20):1-3.
- [4] 高炎,冯依凯.输配电及用电工程线路安全运行技术[C]//江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济技术研讨会论文集.浙江诚信人力资源交流服务有限公司,2025.
- [5] 吴同勇.电力输配电线路中的运行与故障对策分析[J].中国设备工程,2024(24):142-144.

# 市政供热工程深基坑开挖支护关键技术探究

林天翔<sup>1</sup>, 丁国尚<sup>2</sup>

(1. 青岛能源热电集团有限公司, 山东 青岛 266000;  
2. 青岛迪蓝市政工程设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要** 深基坑开挖支护是市政供热工程施工的核心环节, 受高敏感周边环境、线性长条状基坑形态及复杂水文地质条件等因素影响, 该环节施工难度大、安全风险高。本文结合市政供热工程的特殊性, 分析深基坑施工的三大核心特性, 从开挖与支护两个维度阐述分层分段开挖、边坡临时防护、特殊工况施工、基底处理等开挖关键技术, 以及土钉墙、地下连续墙、钢板桩三类支护技术的工艺要点与实操标准, 旨在为市政供热工程深基坑安全高效施工提供技术参考。

**关键词** 市政供热工程; 深基坑开挖支护; 分层分段开挖; 边坡临时防护; 特殊工况施工

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.035

## 0 引言

市政供热管网是保障城市居民生产生活的重要基础设施, 其施工区域多位于城市核心建成区, 深基坑工程作为管网敷设的前置工序, 施工条件远复杂于普通房建及市政工程。当前, 市政供热工程深基坑面临周边建筑物密集、管线交错、基坑呈线性长条状延伸、水文地质条件多变等现实难题, 传统深基坑施工技术难以直接适配, 易引发基坑失稳、地面沉降、管线破损等安全事故。基于此, 需结合市政供热工程深基坑施工的具体需求, 明确其区别于常规工程的施工特性, 采取针对性的开挖与支护技术, 严格按照规范操作, 以提升市政供热工程深基坑施工的安全性与可靠性。

## 1 市政供热工程深基坑施工特性

### 1.1 高敏感周边环境

市政供热工程施工普遍位于城市核心区域, 沿市政道路连续敷设供热管网, 或是在城市地下管廊内集中敷设供热管线和其他类型的水电电缆, 周边环境密集分布市政管线、建筑物和构筑物, 一旦作业范围超出红线或施工扰动超标, 都可能出现周边地面沉降、临近建筑物/构筑物基础沉降失稳、市政管线破损位移等问题。从现场施工角度来看, 受限于高敏感周边环境, 在市政供热工程深基坑施工阶段, 提出场地布置微型化、管线保护精准化、民生干扰最小化的特殊要求, 大幅提高施工难度。其中, 场地布置微型化是部署小型施工机械, 合理规划材料堆放区域和机械作

业路线, 部署可移动围挡, 灵活调整围挡位置、变更场地空间格局。管线保护精准化是提前采取地质雷达等新型探测技术, 精准探测施工场地市政管线分布位置, 确认管线种类, 制定专项保护方案, 尽量避让管线位置, 或是对管线进行迁移保护处理<sup>[1]</sup>。民生干扰最小化是现场作业时段避开周边居民日常作息时段, 在保证施工安全的前提下, 最大限度提高施工效率、缩短工期时间。

### 1.2 线性长条状基坑

房建工程深基坑形态为方形/矩形大跨度断面, 大体保持均衡受力状态, 基坑结构自身具备一定的稳定能力, 施工难度系数较低。相比之下, 市政供热工程保持“线性延伸、断面单一”的基坑形态, 受力状况较为复杂, 在侧向土压力和降水影响下, 较高概率会出现基坑整体失稳问题。深基坑施工阶段, 为保障现场作业安全, 必须采取“分段化、快节奏”施工方式, 分段开挖基坑土体, 交错搭设各层支护体系, 各段开挖完毕后 2 d 内必须完成支护作业, 并在长条状基坑内设置中间支撑, 用于增强整体抗滑移稳定性。

### 1.3 复杂水文地质条件

结合往期工程案例来看, 市政供热工程普遍面临复杂多变的水文地质条件, 城区范围内地下水埋深在 1~5 m 不等, 在降雨补给影响下, 水位变化频繁, 地基土层则以杂填土为主, 局部分布软土、粉质砂土等不良土层, 现场施工期间, 极易出现边坡坍塌、局部差异沉降、基坑涌水等工程事故, 严重威胁现场作业安全。

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

## 2 市政供热工程深基坑开挖施工关键技术

### 2.1 分层分段开挖

市政供热工程需采取分层分段开挖方式,从上到下逐层开挖基坑,各层开挖完毕后,衔接搭设支护体系,稳定基坑侧壁结构。从实操角度来看,深基坑分层分段开挖环节,重点掌握以下技术要点。

第一,参数设定。主动贴合市政供热工程深基坑施工特性,合理设定各项开挖参数。在正常工况下,市政供热管网基坑形态为长条形,基坑宽度为3~5 m,按照地层类型选择分层厚度、分段长度和边坡坡度。对于粉质黏土、砂土等稳定地层,单层开挖厚度不得超过1.2 m,分段长度控制在10~15 m,边坡坡度控制在1:0.75~1:1.5。对于杂填土和软土等不良地层,则把单层开挖厚度限制在0.8 m以内,分段长度缩小为5~8 m,边坡坡度控制在1:1.2~1:1.5。第二,开挖顺序。以深基坑两端作为起始点,保持一致步调,持续向中间部位分层开挖基坑土体,以“先坡后底”作为施工准则<sup>[2]</sup>。具体来讲,控制挖掘机沿基坑外侧行走,开挖首层土体,初步开挖边坡轮廓线,修整边坡坡度,继续开挖基坑中部土体。重复上述操作流程,并把上层边坡支护完毕作为下层开挖前置条件,不得出现交叉作业问题。第三,组合开挖。组合采取机械开挖和人工开挖方式,做到对施工效率、开挖精度的完美兼顾。现场配备小型机械设备,充分适配狭窄场地条件,具体选用履带式挖掘机或是反铲挖掘机,前期以机械开挖方式为主,基底设计标高上方预留20 cm土体,切换至人工开挖方式,基底平整度误差小于±10 mm,重点提升开挖精度,预防基坑超挖、欠挖问题出现。

### 2.2 边坡临时防护

深基坑开挖易出现边坡失稳滑坡问题,需交错开展基坑开挖和边坡防护作业,各层基坑开挖结束后,即刻搭设临时防护体系,确保边坡暴露时间不超过48 h,并根据边坡土体类型来选择防护技术。以软土边坡和杂填土边坡为例,采取“沙袋堆护+土钉加固”复合防护方案,沿边坡分层堆砌内部装满黏土的沙袋,单层堆砌厚度为0.3 m,各层保持错缝搭接状态,同步设置多根土钉,土钉长度为3~4 m,土钉间距控制在1.5 m,保持15°~20°倾角插入边坡结构,孔内注入水泥浆,浆液固化后大幅提高土钉抗拔强度<sup>[3]</sup>。

### 2.3 特殊工况施工

第一,软基开挖。软土地基具备高压缩性、高含水量的工程特性,实际含水率超过30%,承载力特征值普遍低于80 kPa,在施工荷载作用下出现固结沉降现

象。分层分段开挖基坑,单层开挖厚度小于0.8 m,单段长度小于5 m,挖除软弱土体,原位换填级配碎石作为垫层,垫层经过夯实处理后,压实度超过0.95,实际承载力超过120 kPa,并在边坡轮廓线上连续插打多根钢板桩,同步安装内支撑,形成连续防护体系。第二,管线密集区域开挖。提前探测市政管线分布位置,沿线设置多组沉降观测点,管线外侧套设钢管套管,套管内部填充聚氨酯泡沫作为缓冲层,周边注入浆液来加固土体,解决沉降问题。基坑施工期间,跟踪监测地表沉降量,确认沉降速率超出2 mm/d,或是累计沉降量大于20 mm,暂停现场作业,避免因过度沉降而导致管线受损。第三,高地下水开挖。基坑开挖前1~3 d,组织开展降排水作业,基坑外围分散布置多座轻型降水井点,启动潜水泵持续抽采地下水,同步挖设环形明沟、基底横向支沟作为排水设施,拦截地表径流。确认地下水位回落安全区间,且基坑土体含水率达标后,即可着手开挖基坑,全程跟踪监测地下水位,要求实际水位低于基底下部1.5 m。

### 2.4 基底处理

基坑开挖完毕后,清理基底垃圾杂物,对平整度误差超标部位进行找平处理,操控平板振动夯反复压实松散部分,并在基底铺设碎石垫层,垫层厚度控制在12~15 cm。施工人员需重点查验基底是否存在软弱夹层、暗浜等不良地质情况,若发现局部承载力不足区域,应立即采用换填级配碎石或注浆加固的方式进行处理;铺设垫层时需分层摊铺、分层夯实,每层摊铺厚度不超过8 cm,确保垫层密实均匀。在正常工况下,以基底标高和垫层厚度误差小于±10 mm、基底坡度误差小于±0.1%、承载力特征值超过120 kPa、垫层平整度误差小于±8 mm作为合格标准。

## 3 市政供热工程深基坑支护施工关键技术

### 3.1 土钉墙支护

土钉墙支护是在基坑坡面上打入多根土钉,继续在坡面上刮设钢筋网与喷射混凝土面层,利用面层封闭松散边坡,保持协同受力状态,长效维持边坡稳定,解决落石问题和抑制滑坡过程。目前,土钉墙支护技术主要用于基坑开挖深度小于12m、地层具备良好稳定性、周边无敏感市政管线的市政供热工程,施工流程由坡面修整、土钉安装、挂网喷三道工序环节组成,技术要点如下:

第一,坡面修整。各层基坑开挖完毕后,迅速修整边坡坡面,粉质粘土坡面坡度控制在1:0.75~1:1.0,砂土

坡面坡度控制在 1:1.0 ~ 1:1.5, 坡度误差小于  $\pm 5^\circ$ , 坡面平整度误差限制在  $\pm 10$  mm 内, 清理坡面松散石块, 利用同类土回填补平坑洼部位。第二, 土钉安装。坡面上按照网格状等距标记多处孔位, 部署轻便式螺旋钻机, 采取机动成孔方式, 钻头对准孔位中心点, 一次性顺利成孔, 成孔倾角控制在  $15^\circ \sim 20^\circ$ , 以孔深误差小于  $\pm 50$  mm、孔位误差小于 100 mm、孔径误差小于  $\pm 10$  mm 作为合格标准。清理孔内沉渣, 居中插入土钉并注入水泥浆液, 浆液完全填充钻孔, 静置 24 h 等待浆液固化成型<sup>[4]</sup>。第三, 挂网喷射。土钉外露部位挂设双向钢筋网片, 钢筋网紧密贴合坡面, 焊接连接钢筋网和土钉。选用强度等级不低于 C20 的细石混凝土作为面层材料, 按照从上到下顺序, 在坡面上连续喷射面层, 喷射压力保持在 0.5 MPa, 喷射距离控制在 1.0 m, 单层喷射厚度为 40 ~ 50 mm, 喷射次数为 2 次, 面层总体厚度超过 80 mm, 反复抹压面层, 消除表面细微裂纹。

### 3.2 地下连续墙支护

地下连续墙是在基坑外围分段开挖槽段, 槽内放置钢筋笼和现浇混凝土, 形成若干墙段, 利用接头把全部墙段连接形成连续墙体, 长期抵抗外部土压力和阻拦地下水侵蚀, 具备挡土、止水和承重功效。目前, 地下连续墙支护技术主要用于基坑开挖深度大于 15 m、周边管线密集的市政供热工程, 重点掌握成槽、混凝土浇筑、接头处理三道环节的工艺要点。第一, 成槽。现场配备抓斗式成槽机作为机械设备, 深基坑沿线划分若干槽段, 单段长度为 4 ~ 6 m, 宽度为 0.6 ~ 1.0 m, 槽段避开市政管线位置, 弹放开挖边线。逐段开挖槽段, 槽段内部注入膨润土泥浆起到护壁作用, 泥浆液面高于地下水位, 并通过置换泥浆来清理槽底沉渣, 以沉渣厚度小于 100 mm、槽深误差小于  $\pm 50$  mm、槽壁垂直度误差小于 0.5% 作为合格标准。衔接开展清槽作业和居中放入钢筋笼, 测量调整钢筋笼位置, 禁止槽壁长时间暴露<sup>[5]</sup>。第二, 混凝土浇筑。采取导管法浇筑混凝土, 单个槽段内放入 2 ~ 3 根导管, 匀速浇筑混凝土, 混凝土液面上升速度超过 3 m/h, 分多次上提导管, 始终把导管埋入混凝土内部, 并在槽体顶端超高浇筑混凝土, 超灌高度控制在 0.5 ~ 1 m。第三, 接头处理。推荐采取具备良好止水效果的工字钢接头, 所有槽段端部埋设工字钢, 保持接头平整、垂直状态, 槽段成槽后, 焊接连接钢筋笼主筋和工字钢, 焊接长度必须超过 10 cm, 并在接头外侧插入注浆管, 注入双液浆, 彻底封堵接头缝隙。

### 3.3 钢板桩支护

钢板桩支护原理和地下连续墙较为相似, 基坑边缘连续插打多根钢板桩, 采取锁扣连接方式, 并对连接间隙进行封堵处理, 由大量桩身组成连续刚性挡墙结构, 承受外部土压力, 维持基坑侧壁稳定状态。目前, 钢板桩支护技术主要用于基坑开挖深度不足 8 m、地下水位较高的市政供热工程, 现场施工期间, 重点掌握钢板桩插打、支撑安装两道环节的技术要点。第一, 钢板桩插打。现场架设全站仪, 按照设计图纸, 标记各处桩位, 基坑一端作为起始点, 向另一端延伸打设各根钢板桩。钢板桩垂直起吊悬停在桩位上方, 桩尖对准桩位中心点, 采取振动沉桩方式, 缓慢把桩身压入土层, 打桩速度维持在 1 ~ 2 m/min, 利用撬棍调整锁扣位置, 保持相邻桩身锁扣紧密咬合状态, 最终以桩位偏差小于 10 mm、桩顶标高偏差小于  $\pm 100$  mm、垂直度误差小于 0.5% 作为合格标准。第二, 支撑安装。以改善受力状态、抑制钢板桩变形作为功能定位, 钢板桩上横向安装多道支撑, 选用 H 型钢或是钢管作为支撑件, 支撑间距控制在 3 ~ 4 m。具体以围檩内侧作为安装位置, 支撑两端焊接连接围檩, 垂直度误差小于 1%, 水平度误差小于 0.5%。

## 4 结束语

市政供热工程深基坑施工体系过于复杂, 施工难度偏高, 粗放型施工模式未能满足现场施工需求。施工单位需结合工程水文地质条件、周边环境敏感程度及基坑形态特征, 科学匹配开挖与支护技术, 建立“勘察—设计—施工—监测”全流程动态管控机制, 通过实时监测数据优化施工参数。施工单位必须提高对深基坑开挖支护施工活动的关注程度, 主动了解现场施工情况, 明确施工需求, 合理选择工艺做法, 为深基坑施工安全与工程建设质量提供技术保障。

### 参考文献:

- [1] 毕延伟, 吕杰. 市政工程深基坑开挖与支护关键技术研究 [J]. 工程与建设, 2025, 39(03): 568-570, 579.
- [2] 瞿强. 市政工程施工深基坑开挖支护关键技术应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(35): 214-216.
- [3] 郑轩. 市政工程中深基坑开挖支护技术的重要性及应用分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(05): 34-36.
- [4] 邵帅, 任雅辉. 市政工程中深基坑开挖支护技术的应用探析 [J]. 中国住宅设施, 2025(04): 60-62.
- [5] 胡文迪. 市政工程施工中深基坑开挖支护关键技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(26): 103-105.

# 机械电气安装及系统维护中的防火安全措施

薛玉洁<sup>1</sup>, 桑广坤<sup>2</sup>, 张玲芝<sup>3</sup>, 李小慧<sup>2</sup>, 马联蒙<sup>4</sup>

(1. 青岛市园林环境规划设计院有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山西晋防人防工程咨询检测有限公司, 山西 太原 030032;

3. 中创蓝谷建设有限公司, 山东 青岛 266200;

4. 中暖新能源(青岛)有限公司, 山东 青岛 266599)

**摘要** 机械电气系统的稳定运行直接关系到工业生产的连续性与资产保全, 而火灾隐患是其中最具破坏性的物理风险, 电气连接点的高温氧化、绝缘材料的老化击穿以及机械摩擦产生的过热积聚, 均是引发明火的主要物理诱因。在安装阶段, 必须从源头控制线路敷设工艺与设备布局, 阻断热传导路径; 在维护阶段, 需依托物理检测手段及时发现潜在的热失控点, 深入剖析机械电气系统中的起火机理, 探讨针对性的硬件安装规范与系统维护技术, 通过优化接触面处理、强化散热构造及实施精准的绝缘监测, 能够有效遏制火灾事故的发生, 提高系统的可靠性。

**关键词** 电气火灾; 机械安装; 过载保护; 系统维护

**中图分类号**: TU85

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.036

## 0 引言

工业化进程的加速推动了机械电气设备向高功率、高集成度方向发展, 设备内部的能量密度显著提升, 伴随而来的热耗散问题日益突出。在复杂的工况环境下, 机械应力与电应力的双重作用使得设备及其连接部件极易处于临界负荷状态。一旦安装工艺存在微小瑕疵或维护手段未能及时介入, 电弧短路、接触电阻过大引发的焦耳热效应便会迅速演变为火灾源。探究电气安装与系统维护中的防火技术, 不再局限于简单的灭火器具配置, 而在于深入设备构造内部, 通过严格的工艺控制和物理状态监测, 消除热能非正常积聚的物理条件, 构建具有自我防御能力的硬件系统。

## 1 机械电气设备安装环境与基础布局优化

在机械电气设备的初始安装阶段, 物理环境的构建与基础布局的合理性是预防火灾的第一道屏障, 安装空间必须具备良好的空气流通特性, 以防止设备运行时产生的热量在局部空间内形成热堆积, 对于大功率电机及变压装置, 基础底座需采用阻燃耐火材料构建, 且必须保证设备周边预留足够的散热间距, 严禁在散热孔道附近堆放易燃遮挡物。在多台设备集中布置的电气室, 需根据设备的热辐射强度进行分区排列, 避免高热源设备过度集中导致环境温度急剧升高从而降低绝缘材料的耐受阈值。底座固定的平整度直接影

响机械运转的震动幅度, 安装时需使用水平仪进行精密校准, 确保机脚螺栓紧固力矩一致, 防止因震动摩擦产生的高温火花引燃周边的油污或粉尘, 通过物理空间的科学规划与安装基面的刚性处理, 可从环境层面阻断火灾发生的客观条件<sup>[1]</sup>。

## 2 电气线路系统的防火构造与敷设技术

### 2.1 电缆选型与载流量冗余控制

电气线路是火灾事故的高发环节, 电缆选型的核心在于确保导体截面能够承受最大负载电流并保留足够的冗余度。在安装设计时, 需精确计算回路的额定电流并根据敷设环境的温度校正系数进行降容处理, 选用耐火等级符合现场要求的交联聚乙烯绝缘电缆。对于长期处于满负荷运行的主干线路, 应适当增大导体截面积, 降低电流密度从而直接减少线路本身的焦耳热损耗, 在高温或存在腐蚀性气体的区域, 必须选用矿物绝缘电缆或具有金属护套的特种线缆, 利用无机材料的不可燃性来抵御外部火源的侵袭, 同时防止因绝缘层碳化而引发的二次短路, 通过物理层面的选型优化, 确保线路在极限工况下的热稳定性。

### 2.2 导管敷设与封堵隔离工艺

穿管敷设是保护电线电缆、防止机械损伤及火势蔓延的有效手段, 在金属导管的连接处, 必须采用螺纹连接并进行跨接接地, 确保管路电气连续性, 防止

**作者简介**: 薛玉洁(1986-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程。

故障电流导致管壁带电产生对地放电火花，导管内部的穿线率需严格控制在规范范围内，留出足够的散热空间。更为关键的是管口的封堵技术，凡是穿越墙体、楼板或进入配电箱的管口，必须使用防火胶泥或防火枕进行严密填塞，这种物理隔离措施能够阻断氧气的供给，防止由于烟囱效应导致火焰沿管路迅速向上层建筑或相邻区域扩散。对于并在桥架内的多根电缆，需设置防火隔板将动力电缆与控制电缆物理分隔，避免动力线路故障引燃控制线路，导致系统全面瘫痪。

### 2.3 线路连接点的接触电阻抑制

电气连接点的松动与氧化是导致局部高温的典型原因，在安装接线端子时，必须使用力矩扳手按照设备说明书规定的扭矩值进行紧固，确保导体与端子之间的接触面压力均匀，使微观接触点最大化从而降低接触电阻。对于铜铝过渡连接，严禁直接搭接，必须采用铜铝过渡线夹或搪锡处理，防止电化学腐蚀在接触面形成氧化膜层，导致电阻急剧升高。在多股导线的压接过程中需使用相匹配的冷压端子，避免因线芯散乱导致有效载流截面减少，所有的接线盒内部严禁出现裸露的导电部分，接头处需缠绕多层绝缘胶带并加装热缩套管，确保连接点的绝缘强度高于线缆本体，从微观连接工艺上消除热源点<sup>[2]</sup>。

### 2.4 过载与短路保护装置的级联配置

熔断器与断路器是切断故障电流、防止线路起火的最終防线，在系统配置中必须确保上下级保护电器的动作特性具有选择性，即下级回路发生短路时，仅由下级断路器跳闸，避免越级跳闸扩大停电范围。断路器的额定分断能力必须大于安装点的预期短路电流，防止在切断大电流时触头熔焊或电弧喷出引燃周边物体。对于电机回路，需配置热继电器进行过载保护，其整定电流应根据电机实际运行电流进行精细调节，而非简单依据铭牌数据。同时，引入剩余电流动作保护装置，实时监测线路的泄漏电流，一旦检测到绝缘破损导致的对地漏电，如  $> 300 \text{ mA}$ ，立即切断电源，防止持续的漏电电弧引燃易燃装饰材料。

### 2.5 谐波治理与中性线过热防护

随着变频器、整流装置等非线性负载的大量应用，电网中的高次谐波含量显著增加，高次谐波会因集肤效应增加导体的等效电阻，导致线路发热量呈几何级数增长，尤其是在三相四线制系统中，三次谐波会在中性线上叠加，致使中性线电流可能超过相线电流。在安装此类系统时，中性线的截面积应设计为与相线相同甚至更大，严禁减径。同时，在配电系统的进线端加装无源滤波器或有源电力滤波器，滤除特定频率

的谐波分量，净化电源波形，对于变压器绕组，采用 D, yn11 接线组别以利于三次谐波的流通与消耗，通过治理电能污染，消除隐形的热源，防止因谐波过载导致的隐蔽性火灾。

## 3 机械运转部件的温控与阻燃技术

### 3.1 轴承润滑与摩擦热控制

机械转动部件的摩擦是产生高温的直接物理过程，轴承作为核心支撑部件，其工作状态决定了热量的产生速率，在安装过程中，必须严格控制轴承的游隙，过紧会导致滚珠摩擦力增大，过松则会引起撞击。润滑脂的选用需根据设备转速与工作温度确定，对于高速运转的机械，应选用耐高温、抗氧化的锂基或复合钙基润滑脂并严格控制填充量，通常为轴承室空间的  $1/3$  至  $1/2$ ，润滑不足会导致干摩擦迅速升温，而润滑过多则会因搅拌阻力产生内部液体摩擦热，需建立定期的润滑补充机制并关注轴承座的密封性能，防止粉尘进入润滑系统导致磨粒磨损，通过降低物理摩擦系数来从源头控制热能转换<sup>[3]</sup>。

### 3.2 旋转电机的主动散热系统维护

电机作为电能转换为机械能的枢纽，其自身的散热效率至关重要，安装时需确保电机尾部的冷却风扇完好无损，且风罩网孔无堵塞，对于采用强迫风冷的变频电机，必须保证独立风机的电源回路可靠，使其在低速运转时仍能维持足够的风量。在多尘环境中需定期清理电机外壳散热筋片上的积灰，灰尘覆盖层相当于保温层，会严重阻碍热量向大气的辐射与对流。对于水冷电机，需监控冷却水管路的通畅性与流量，防止因水垢堵塞导致换热效率下降，若电机运行环境温度持续较高，应考虑加装外部通风管道或空调降温装置，确保电机绕组温度始终处于绝缘等级允许的范围内（如 F 级绝缘不超过  $155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。

### 3.3 静电积聚的导除与接地

在输送带、粉体传输管道等机械系统中，物料的快速流动与摩擦极易产生高电位的静电积聚，当静电电压达到击穿空气的阈值时，产生的静电火花足以引燃周边的可燃粉尘或挥发性气体。在安装此类机械设备时，必须实施全系统的等电位联结，使用金属导线将所有独立的金属部件连接至接地干线，对于非金属输送带，应选用含有导电纤维的抗静电材质，或采用导电涂料处理，传输管道的法兰连接处，若接触电阻不符合要求，需加装跨接铜排，接地电阻需符合规范要求（通常  $< 10 \text{ } \Omega$ ）并定期进行测试，通过构建低阻抗的泄放通道，将摩擦产生的静电荷实时导入大地，消除静电放电火灾隐患。

### 3.4 机械震动监测与紧固件防松

机械设备的持续震动不仅会破坏结构完整性,更是引发电气火灾的潜在因素。强烈的震动会导致电气连接点的螺栓松动,使接触电阻不稳定,产生电弧;也会导致电缆绝缘层与金属外壳摩擦破损,引发短路,在机械安装中需在底座与基础之间加装减震垫或减震弹簧,削减震源的传递。对于连接电气线路的接线盒,需采用防松螺母或涂抹螺纹紧固胶,对于震动幅度较大的设备,应定期使用测振仪检测振动烈度,一旦发现振动异常增大(如速度有效值超过4.5 mm/s),应立即停机检查动平衡及对中情况,通过控制机械震动幅度,维持电气连接的物理稳固性,防止因机械松动诱发的电气故障火灾<sup>[4]</sup>。

## 4 系统运维中的隐患物理检测与消除

### 4.1 红外热成像技术的全场扫描

传统的接触式测温难以覆盖所有电气节点,而红外热成像技术能够实现非接触式的全场温度分布可视化,在系统带负荷运行期间,利用高分辨率红外热像仪对配电柜、电缆沟、电机轴承及接线端子进行扫描。通过捕捉设备表面的红外辐射,生成温度色谱图,能够精准定位温度异常升高的热点(Hot Spot),对于三相电气设备,重点比较三相温度的差异,若某相温度明显高于其他两相,即便未达到绝对高温限值,也表明该处存在接触不良或负载不平衡,定期建立热像档案,对比不同时期的温度变化趋势,在绝缘材料碳化变质之前识别出潜在的过热隐患,实施精准的预防性维修。

### 4.2 绝缘电阻与介质损耗的周期性测试

绝缘材料的老化是不可逆的物理过程,定期的绝缘性能测试是评估系统防火能力的金标准,利用兆欧表对线缆及设备进行绝缘电阻测试,重点关注吸收比与极化指数,这两个参数能反映绝缘受潮与老化的深层状态。对于高压设备,需进行介质损耗因数( $\tan \delta$ )测试,该参数对绝缘内部的气隙放电与油脂劣化更为敏感,一旦发现绝缘阻值低于规范值,如低压线路 $< 0.5 \text{ M}\Omega$ ,必须立即查明原因,明确是由于表面积灰受潮还是绝缘层本体开裂。对于已经老化的线路,严禁带病运行,必须按计划进行整体更换,通过量化的物理参数监测,确保电气隔离层的有效性,防止漏电起火<sup>[5]</sup>。

### 4.3 导电粉尘与杂物的深度清理

在工业环境中,金属粉尘、纤维毛絮等杂物极易进入电气柜内部,这些物质沉积在电路板或绝缘子上,在潮湿环境下会形成导电通道,引发爬电闪络,在系统维护中,必须定期对电气设备内部进行深度清理。

严禁使用普通压缩空气直接吹扫以免将水分油污带入或将灰尘吹入接触器缝隙,应使用工业吸尘器配合防静电毛刷进行物理吸除,或使用干燥的氮气进行清洁,对于沉积在散热器缝隙中的油泥,需使用专用的精密电器清洗剂进行溶解清洗,同时,检查配电箱的密封条是否完好,更换老化的滤网,通过保持电气环境的微观清洁,阻断固体颗粒物诱发的短路与电弧。

### 4.4 紧固件热胀冷缩后的二次加固

机械电气系统在启停过程中会经历反复的温度变化,金属材料的热胀冷缩效应会导致原本紧固的螺栓连接逐渐松弛,这种现象在铜铝连接处尤为明显,维护计划中必须包含周期性的紧固作业,特别是针对母线槽连接器、大电流电缆接头及电机接线盒。作业时不能凭手感判断,需再次使用力矩扳手核对紧固力矩,对于关键部位,可在螺栓与连接件上做好漆封标记,巡检时通过观察标记是否错位来快速判断松动情况,对于因过热变色或表面氧化严重的弹簧垫圈与平垫,应直接废弃更换,恢复连接组件的机械弹性,通过对抗热循环带来的机械疲劳,维持电气通路的低阻抗状态。

## 5 结束语

机械电气安装及系统维护中的防火措施,实质上是对热能生成与传递过程的物理干预,从安装阶段的基础环境构建、线缆冗余选型、接触面微观处理,到维护阶段的红外热像监测、绝缘量化评估与粉尘深度治理,每一个环节都是为了阻断电能向破坏性热能转化的路径。摒弃粗放的经验主义,转而采用精密化的安装工艺与基于物理参数的维护策略,是确保系统安全的核心,唯有将防火技术落实到每一个螺栓的力矩、每一根电缆的载流余量以及每一次设备巡检的数据分析中,才能真正构建起一套由物理规律支撑的防火防御体系,确保机械电气设施在全生命周期内的稳定运行,杜绝火灾事故的发生。

## 参考文献:

- [1] 张浩,张硕.机械电气设备安装技术及施工保障措施研究[J].中国设备工程,2025(16):217-219.
- [2] 赵凌浩.机械电气设备安装技术及施工保障措施分析[J].中国设备工程,2025(14):13-15.
- [3] 林川.智能传感技术在机械电气安装精度控制中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(05):88-90.
- [4] 孙鑫宇.冶金机械电气设备安装的关键问题及发展趋势分析[J].中国金属通报,2025(04):10-12.
- [5] 魏述亮,王林学,刘振忠,等.机械电气安装及系统维护中的防火安全措施[J].自动化应用,2023,64(08):221-223,226.

# 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术研究

侯 强

(中交一公局第一工程有限公司, 北京 102205)

**摘 要** 二衬施工是隧道工程中最关键的一个环节, 施工中经常存在拱顶空洞和因空洞导致厚度不足等质量缺陷。在现有施工中, 已通过工装设备和工艺、配比优化改造解决了逐孔注浆、混凝土流动性差、泵送压力及次数不足等缺陷, 但仍存在因冲顶过程中隧道拱顶封入了空气囊和混凝土泌水气囊产生“饱和”假象造成拱顶脱空的情况。基于此, 本研究借鉴软基处理中塑料排水板工程原理, 通过现场应用, 提出采用“拱顶安设插塑板+拱顶带模注浆”联合工艺, 旨在对有效解决隧道工程空洞问题有所裨益, 进而提升二衬施工质量。

**关键词** 衬砌混凝土; 插塑板; 带模注浆; 溢浆

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.037

## 0 引言

二衬施工拱顶空洞现象频发, 表层原因包括未逐孔冲顶、冲顶混凝土流动性不足、泵送压力及次数欠缺等, 根本原因是拱顶无排气排水通道, 气囊与水囊无法排出导致浇筑不密实。需建立有效通道, 保障混凝土泵送饱满。

隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术充分利用软基处理塑料排水板的原理, 在隧道拱顶形成连续的排水、排气通道, 确保一次性冲顶饱满, 同时结合隧道拱顶带模注浆工艺, 彻底消除拱顶脱空隐患。

## 1 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术原理及特点

### 1.1 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术原理

1. 可沿拱顶防水板纵向连续铺设塑料排水板, 确保与防水板紧密贴合。将拱顶存在的密闭气囊进行联通排放。

2. 塑排板安装方便快捷, 只需简单培训工人就可以进行安装作业。

3. 通过对插塑板端头排水情况进行观察以判断隧道拱顶冲顶饱满程度, 降低误判的概率。

4. 厚度较薄、宽度较窄的塑料排水板不会构成削弱二衬截面及受力的影响。在冲顶结束后, 由于水泥浆充盈了大部分的芯材内部空间, 因此不会留下造成拱顶的有害空间。

5. 带模注浆采用 RPC 管进行注浆, 通过法兰盘进行连接, RPC 管在台车就位混凝土浇筑前进行预埋, 二衬混凝土浇筑完成后 1~2 小时内开始径向带模注浆,

注浆材料采用具有微膨胀性、凝结后强度高、高流动性、不泌水收缩、操作时间长等特性。

### 1.2 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术特点

1. 塑料排水板材质较轻、具有一定松弛度和柔性, 随着混凝土浇筑紧贴防水板, 充分发挥排水、排气作用。

2. 塑料排水板具有滤水特性(液体能透过外包土工材料而砂粒及以上直径的固体物质不能透过), 在其被浮浆包裹的情况下, 仍对拱顶混凝土浮浆具有浓缩作用, 减少浮浆的水灰比、提高浆体强度、减少浮浆固结收缩产生的拱顶微量脱空<sup>[1]</sup>。

3. 衬砌台车上的 RPC 管和排气孔可以兼作观察孔, 管控二衬冲顶是否饱满。

4. 采用 RPC 注浆管、专用注浆料、双液注浆机, 施工作业简便。在混凝土初凝前进行注浆填充, 能够使二衬混凝土与注浆填充物有效结合为一个整体, 确保二衬拱顶无空洞。

## 2 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺流程

隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺流程围绕联合工艺展开, 依次完成插塑板定位与安装、二衬钢筋铺设、台车关模、混凝土浇筑冲顶, 再进行 RPC 管预埋、注浆连接件安装、制浆及注浆作业, 最后完成设备拆卸、脱模养护与无损检测处置, 如图 1 所示。

## 3 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术要点

### 3.1 插塑板定位

隧道中线、左线线路中线、右线线路中线位置分别设置一条, 在隧道中线与左线线路中线、右线线路

作者简介: 侯强(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 隧道与地下工程。

中线之间加密设置一条, 共计五条插塑板, 插塑板由测量人员通过全站仪在防水板上进行定位<sup>[2]</sup>。

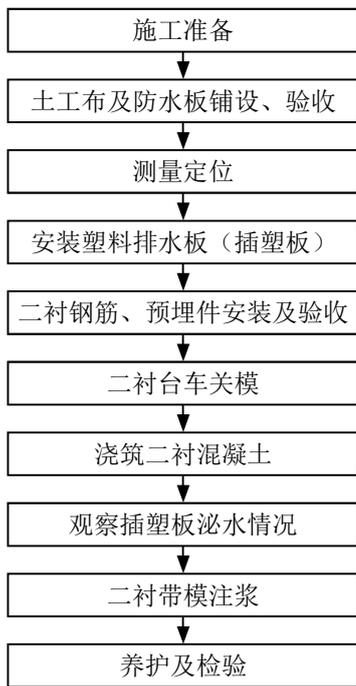


图1 工艺流程图

### 3.2 安装排水板

插塑板按照定位位置进行安装, 安装时在衬砌台车端头外露不少于 50 cm, 同时在二衬软搭接位置和衬砌中间桩号位置拱顶范围分别环向设置 1 道。

### 3.3 安装二衬钢筋

按照设计图纸安装衬砌钢筋, 钢筋间距、层距、保护层厚度等均应满足设计及规范要求, 钢筋安装完毕, 经自检合格、监理报验合格后方可进行移动台车定位。

### 3.4 二衬台车关模

台车定位后, 安装端头模并进行台车整体加固。端头模板采用可视化高分子堵头, 能够有效地观察混凝土浇筑情况, 辅助判断拱顶混凝土浇筑饱满度。

### 3.5 混凝土浇筑及冲顶

二衬混凝土浇筑采取四窗振捣、八窗浇筑工艺(四窗布料: 一层和二层设置八窗, 利用二衬台车布料系统隔窗布料; 八窗振捣: 一层和二层设置八窗, 逐窗振捣), 混凝土浇筑至拱顶位置时, 混凝土塌落度按不小于 200 进行控制, 同时降低混凝土浇筑速率, 确保插塑板具有足够的排水、排气时间, 同时通过台车端头可视化高分子堵头对混凝土冲顶情况进行观察, 当发现冲顶饱满时暂停 10 min 后再次泵送, 以此循环

3 次以上<sup>[3]</sup>, 结合实践情况, 得出以下判断标准: 持压 10 min, 插塑板端头滴水间隔  $\geq 2$  s 时, 可判定二衬混凝土冲顶饱满。

## 4 带模注浆施工技术要点

### 4.1 技术要求

1. 结合实际情况, 选择径向带模注浆工艺, 在衬砌台车上设置注浆孔, 二衬混凝土施工前安装 RPC 专用注浆管, 在拱顶混凝土浇筑完成 1~2 h 内进行拱顶带模注浆作业。注浆料采用专用注浆料。

2. 在注浆过程中, 注浆压力控制在 0.5~1.0 MPa, 当注浆压力超过 1.0 MPa, 而端头无浓浆溢出时, 应换孔注浆。

3. 注浆效果检查可以通过地质雷达方法进行检测, 对衬砌背后存在空洞的部位进行钻孔注浆处理<sup>[4]</sup>。

### 4.2 施工程序及工艺流程

施工程序如下: 台车定位→RPC管安装→衬砌浇筑→注浆件安装→制浆→注浆→拆卸→脱模→蒸汽/喷淋养护→无损检测→缺陷处置(如图2所示)。

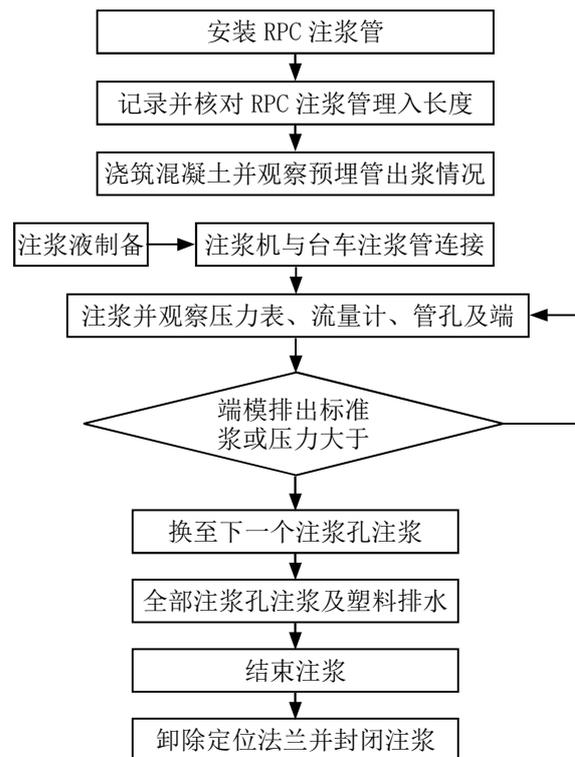


图2 施工程序图

### 4.3 带模注浆施工工艺

#### 4.3.1 衬砌台车注浆孔设计

衬砌台车设计长度为 12.1 m, 拱顶设置 4 个孔径

4 cm 的径向带模注浆孔。1 号孔距软搭接侧施工缝位置 1 m, 4 号孔距端模侧 1.5 m, 2、3 号孔均匀布置。采用法兰盘焊接的方式将注浆孔与模板连接, 法兰盘厚度为 1 cm。螺栓采用 70 mm 的 M22 螺栓。

#### 4.3.2 预埋 RPC 注浆管

台车就位后, 预埋 RPC 管, RPC 管靠防水板管顶为十字形口, 口深 5 cm, 宽 3 cm。安装前, 复核衬砌厚度, 从而确定 RPC 管安装长度。RPC 管通过法兰盘垂直安装, 上部紧贴防水板。

#### 4.3.3 混凝土泌浆记录

注浆管安装完成后进行混凝土浇筑, 冲顶浇筑时, 观察注浆孔是否出现漏浆现象, 满足要求后结束冲顶。冲顶结束后安装径向注浆连接件, 为径向带模注浆做好施工准备。

#### 4.3.4 注浆连接件

本注浆连接件包含: 连接套管、止浆球阀、注浆压力表、快速接头和注浆软管。

#### 4.3.5 制浆

1. 注浆料: 注浆料采用专用注浆料, 或者采用不低于 M20 的水泥砂浆 (水泥采用微膨胀水泥)。

2. 制浆前, 先启动搅拌机, 加入注浆料后启动下料振动电机, 再加入所有的拌和用水, 搅拌 2~3 分钟, 最后加入剩余注浆料, 搅拌均匀后停止搅拌。

3. 打开制浆桶卸料阀门, 使浆体快速流入储浆桶, 然后关闭制浆桶卸料阀门。

4. 按照 2、3 步骤循环制浆。

#### 4.3.6 注浆

1. 将注浆软管末端与注浆连接接头连接, 并将注浆软管与台车固定, 确保注浆稳定。

2. 开启注浆泵进行径向带模注浆作业, 注浆按照从低向高的原则依次进行, 逐孔注浆。

3. 注浆时需要衬砌台车顶部压力监测表、端模溢浆情况及插塑板泌浆情况进行观察, 如果端头顶部出浆, 同时插塑板泌出浓浆, 则停止此孔注浆, 转入下孔注浆作业, 以此类推直至注浆结束, 注浆过程中如果台车顶部压力监测表压力超过 1.0 MPa, 则立即停止注浆转入下孔注浆作业<sup>[5]</sup>。

4. 结束注浆。所有注浆孔注浆结束后, 端头最高处流出与储浆桶相同浓度浆液时, 结束注浆。

5. 留样试验。在注浆管端头和制浆机中进行取样、浆液浓度监测, 浆液浓度与配比相差不得超过  $\pm 1.5\%$ 。同时, 在注浆管端头取样进行抗压强度试验和抗折强度试验。

#### 4.3.7 注浆结束

1. 注浆结束后, 剩余浆液集中处理, 专用注浆料返回仓库进行干燥储存。

2. 清洗带模注浆设备, 严格按照清污分流原则, 将清洗用水通过污水沟排入洞口沉淀池和污水处理站。

3. 待浆体初凝后, 拆卸连接接头, 及时堵塞 RPC 注浆管管口。

## 5 隧道二次衬砌拱顶防脱空工艺技术应用效果及经济效益

1. 应用效果。根据项目施工情况, 采用拱顶带模注浆单一措施共施工 30 板二衬 (约 360 m)。经第三方检测拱顶脱空达率 10%, 采用“插塑板+拱顶带模注浆”拱顶防脱空技术共施工 40 板二衬, 经第三方检测未发现拱顶脱空, 合格率 100%, 应用效果良好。

2. 推广应用前景。目前隧道拱顶防脱空工艺主要有拱顶径向带模注浆、拱顶纵向注浆两种, 经过实践和研究, 以上两种工艺无法有效解决拱顶因封闭气 (水) 囊造成的脱空问题, 而衬砌质量缺陷问题频繁。项目提出的“插塑板+拱顶带模注浆”联合工艺, 有效解决了以上问题, 保证了二衬施工质量, 且质量效益明显, 具有良好的推广应用前景。

## 6 结论

通过两种工艺对比, 采用拱顶带模注浆单一工艺时, 拱顶脱空二衬处理成本相对较高, 同时根据业主质量管控要求, 拱顶脱空且衬砌厚度不足时需要拱顶 120° 范围混凝土凿出重新浇筑, 二衬拱顶脱空处理代价巨大。项目采用“插塑板+拱顶带模注浆联合工艺”联合工艺后, 成效突出。因此, “插塑板+拱顶带模注浆”联合工艺具有较高的推广应用价值。

## 参考文献:

- [1] 赵晓春, 刘瑞敏, 严帮伟, 等. 隧道二次衬砌拱顶防脱空注浆材料研究现状及发展趋势 [J]. 江西建材, 2024(02): 9-11.
- [2] 王立川, 葛立辉, 王海彦, 等. 隧道二次衬砌拱部脱空纵向同步灌浆施工方法 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61(06): 269-277.
- [3] 戴帅. 二衬带模注浆预防拱顶脱空技术在铁路隧道施工中的应用 [J]. 工程技术研究, 2021, 06(08): 97-98.
- [4] 陈涛. 二衬浇筑防脱空新方法的应用研究 [J]. 铁道运营技术, 2023, 29(02): 22-24.
- [5] 张庆雨. 隧道二次衬砌防脱空综合施工技术探讨 [J]. 四川水泥, 2022(09): 141-143.

# 轨道交通盾构施工关键技术研究

## ——以苏州轨道交通7号线为例

常康康

(中铁十二局集团有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要** 随着城市化进程不断加快,城市轨道交通建设已成为缓解交通压力以及促进城市发展的关键举措。本文聚焦苏州轨道交通7号线,深入探讨其盾构施工关键技术。通过对工程概况、盾构区间风险源的分析,详细阐述了盾构始发、掘进、到达等阶段的技术要点,以及针对施工重点难点提出的技术措施,旨在为类似工程提供参考,进而保障施工安全与质量,推动盾构施工技术发展。

**关键词** 轨道交通;盾构技术;盾构施工;盾构机

中图分类号:U215

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.038

### 0 引言

盾构法凭借高效、安全且对周边环境影响较小等优势,在城市地铁交通项目施工建设中,各类工程普遍采用了盾构技术这一先进手段,但面对复杂的地质条件和周边环境,施工过程中也遇到了不少挑战,技术要求较高,风险较大<sup>[1]</sup>。苏州轨道交通7号线作为苏州市轨道交通线网的关键线路,其盾构施工面临诸多挑战。深入研究苏州轨道交通7号线盾构施工关键技术,对保障施工安全、提升工程质量以及推动盾构施工技术发展有关键现实意义。

### 1 工程概况

苏州轨道交通7号线呈现出整体南北走向的态势,属于苏州市轨道交通线网里的关键骨干线路,它将相城区、工业园区以及吴中区等多个城市中心连接起来,苏州市轨道交通7号线工程土建施工V II-TS-07标段含有三个车站,分别是作为换乘站的群星二路站、林家潭路站以及郭巷站,以及三个盾构区间,依次是群星二路站至林家潭路站区间、林家潭路站至郭巷站区间以及郭巷站至尹中路南站区间。车站运用明挖法以及半盖挖方式施工,区间主体借助盾构法来施工,所使用的ZTB6830盾构机,其整机总长大概为95 m,重量约为550 t,水平转弯半径是250 m,主机总长约9 m,给施工提供了有力的设备支撑。

### 2 盾构始发技术

#### 2.1 始发段试掘进

##### 2.1.1 始发掘进

在初始发掘推进阶段,刀盘的转速被严格设定为每分钟1.0转,掘进的速度维持在每分钟5~8 mm,这样的参数设定是综合考虑了盾构机的性能以及地质条件后得出的,其作用在于能保证盾构机顺利地破土前行,又能防止因速度过快致使掌子面失去稳定,当盾尾进入洞门密封区域时,同步开展注浆作业,这是极为关键的环节<sup>[2]</sup>。注浆可填充盾尾与洞门之间的空隙,防止土体出现坍塌以及地下水发生渗漏,需要密切留意洞门密封的状况,一旦察觉到有泄漏现象,要即刻进行封堵,以此保障施工的安全。

鉴于盾构机有特殊的构造,无法直接对掌子面的情形进行观察,借助出渣量来推断掌子面的状况成为关键的方式。若出渣量过大,有可能意味着掌子面发生了坍塌,这会对施工的安全以及进度产生严重的影响,如果出渣量过小,则或说明掌子面存在空洞或者裂隙,严格把控出渣量对于保证开挖面的稳定而言非常关键<sup>[3]</sup>。

##### 2.1.2 始发段确定

决定始发段长度的因素主要存在两个方面:一方面是衬砌与周围地层之间的摩擦阻力,这种摩擦阻力越大,那么盾构机向前推进时所需的推力也就越大,

作者简介:常康康(1986-),男,专科,助理工程师,研究方向:地铁施工。

相应地始发段长度也会受到一定影响；另一方面是盾构机的总长度，较长的盾构机在开始启动时需要更长的稳定段来保障其可正常运行<sup>[4]</sup>。作业启动环节顺利落幕，立刻启动负环管片、反力架和临时支撑的拆除工程，这是后续掘进顺利进行的必要条件。盾构掘进的反作用力主要依赖衬砌与周边地层的摩擦力来承受，注浆后的衬砌与地层摩擦力必须超越盾构推进力，否则可能导致盾构机无法正常推进，甚至引发安全事故。

## 2.2 盾构始发段掘进施工

### 2.2.1 刀盘转动

刀盘启动时，必须先以低速转动。这是为了让刀盘逐渐适应土层，同时观察刀盘扭矩等参数是否正常，以及土仓内土压变化是否稳定。待各项参数正常后，再逐步提高刀盘转速。若刀盘启动困难，应尝试正、反转刀盘，帮助其摆脱困境。在操作过程中，要严密监控刀盘扭矩等参数，一旦某参数报警，应立即停机检查，查明原因并修理，待参数恢复正常后方可继续掘进。刀盘转动时，盾构机可能会出现侧倾现象，当侧倾较大时，应反方向转动刀盘，使盾构机恢复到正常姿态，一般每推进一环，刀盘根据盾构偏转角度调整一次旋转方向<sup>[5]</sup>。

### 2.2.2 千斤顶顶进

在掘进过程中，各组千斤顶应保持均匀施力，严禁松动千斤顶。考虑到盾构机自重，掘进时盾构机下部千斤顶推力应略大于上部千斤顶推力，这样可以保证盾构机的稳定前进。初始段刀盘通过土层加固区时，千斤顶的推力设定应小于正常推力，遵循低速切削的原则，防止出现大块土体影响施工。在掘进施工中，千斤顶行程差应控制在 50 mm 内，且单侧推力不宜过大，以避免挤裂管片。

## 3 盾构掘进技术

### 3.1 掘进流程

盾构掘进属于一项系统工程，其中覆盖了盾构掘进、管片拼装、材料运输、掘进注浆以及管线延长等诸多环节，这些环节彼此关联且相互制约，只要有任何一个环节出现问题，就可能对整个施工进度以及质量产生影响。例如：如果材料运输不够及时，就会致使盾构机停机等待，影响掘进效率，若管片拼装质量欠佳，会对隧道的整体稳定性以及防水性能造成影响。各环节要协调配合，以此保障施工可顺利开展。

### 3.2 盾构掘进测量

由于本区间隧道施工工期紧、测量任务重，采用人工测量盾构瞬时状态会给测量工作带来较大压力，且

人工测量速度慢、易出错。因此，本区间隧道盾构配置盾构姿态自动测量（见图 1）系统，该系统可快速、准确、实时地给出盾构机空间位置与方位姿态，包括与线路中线的平面偏离、高程偏离、纵向坡度、横向旋转和切口里程的测量。通过输入所有管片中心坐标或隧道线形，系统处理后可在显示屏上显示实时盾构姿态，为施工人员提供准确的信息，以便及时调整盾构机姿态。

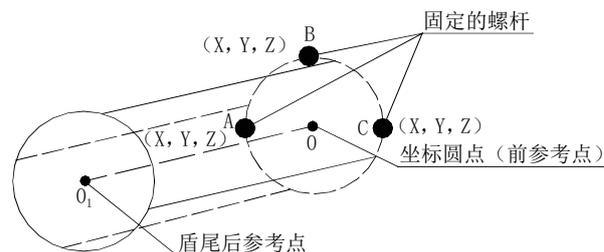


图 1 盾构姿态测量示意图

## 4 盾构施工重点难点及技术措施

### 4.1 盾构进出洞施工安全

在盾构进出洞施工过程中，保持洞口土体稳定是最大的风险。本工程盾构进出洞地层为粉砂夹粉土、黏质粉土、粉质粘土地层，需进行有效的端头加固。端头加固技术可采用旋喷桩、搅拌桩等方法，提高土体的强度和稳定性。加固效果检查可通过钻孔取样、标准贯入试验等方式，确保加固质量满足要求。若加固效果不好，会造成洞门的流水、流砂，甚至坍塌。钢套筒接收技术可提供密闭的接收环境，防止土体和地下水进入隧道，保障施工安全。施工步骤包括安装钢套筒、在钢套筒内破除洞门、回填低强度材料等。

### 4.2 盾构穿越粉砂地层

1. 地层特点及施工难点。粉砂地层中，盾构机的姿态不易控制、推进阻力大，富水粉砂地层地质条件敏感，盾构机掘进参数控制不好容易引起地面沉降，甚至危及地面建筑物和地下重点管线的安全。粉砂地层颗粒较细，透水性较强，在盾构掘进过程中，易发生流砂现象，导致土体失稳。

2. 沉降及轴线控制技术措施。为控制沉降和轴线，需严格控制掘进参数。刀盘转速应根据地质情况调整，一般控制在 1~2 r/min，避免过高转速导致土体扰动过大。推进速度保持在 3~5 cm/min，确保土体有足够时间排土和形成支护。土仓压力应与地层土压力和水压力平衡，防止地层塌陷或涌水。注浆量要根据地层损失情况合理确定，及时填充间隙。同时，加强监测，根据监测数据及时调整参数，确保施工安全。

### 4.3 盾构小半径曲线掘进

1. 小半径曲线施工特点。在小半径曲线段掘进时,盾构机的姿态需要动态调整。由于曲线半径小,盾构机在前进过程中容易偏离设计轴线,因此需要不断调整姿态以保证隧道轴线精度。

2. 姿态预偏和掘进速度控制。在常规隧道挖掘工程过程中,需确保盾构机沿水平方向向曲线内侧适当偏移,尤其是在半径较小的弯曲地带,盾构姿态通常需向内弧线偏移约10 mm。沿曲线轨迹引导盾构设备进行,确保管片拼接时其轴线位于弧线内侧,自管片自盾尾滑落之后,侧向分力的存在使得物体向外侧发生偏移,科学配置初始偏差量,便于在急曲线内进行纠偏。同时,合理控制掘进速度,避免速度过快导致盾构机失控。

## 5 盾构下穿既有技术措施

### 5.1 既有线路情况分析

郭巷站~尹中路南站在区间盾构下穿既有线路,2号线延伸线郭巷站为单柱双跨箱型结构,底板下标高-13.861~-16.861范围内采用 $\phi 850$ 三轴搅拌桩加固,加固范围为坑底以下3 m,  $q_u \geq 1.0$  MPa;盾构机穿越范围围护结构采用玻璃纤维筋地连墙,地连墙墙厚800 mm,混凝土设计强度等级为C35。不同地层对盾构掘进的影响不同,粉质黏土层相对稳定,但粉土夹粉砂层和粉砂夹粉土层富水性强,易发生流砂现象。

### 5.2 既有线路保护措施

当盾构机穿越既有线路时降低推进速度是极为关键的环节,一般将推进速度控制在正常速度的70%~80%,要严格把控盾构姿态以及纠偏情况,防止频繁且大幅度的纠偏致使土体受到扰动,依据监测获取的数据以及设计分析反馈回来的信息,及时对盾构推进速度、刀盘转速、正面土仓压力、出土量、同步注浆量等施工参数作出调整。如果监测发现地表沉降过大,那就应当适度降低推进速度,并增加注浆量,要保证盾构机可平稳地穿越有线路,以此保障既有线路的结构安全以及正常运营。

## 6 盾构到达施工工艺技术

### 6.1 钢套筒接收

为了确保盾构接收阶段的顺利开展,本区域所采用的是封闭式接收装置的接收技术方案。郭巷站尾端的地墙厚度为1 200 mm,盾构机的切削刀盘已与地层壁面接触,立即启动钢套筒的安装程序。在钢制套筒

内实施洞门拆除作业,拆除工程进展至剩余600 mm厚度的关键阶段,向钢套筒内填充低强度材料并确保压实。随后,向接收端钢套筒内注入与土仓切口相等的预压力。接着,盾构机可直接进入钢制外壳内进行隧道挖掘。执行盾尾部位的浆料填充修补工作,浆液固化步骤已确定,依次拆除钢套筒和盾构机,将此物吊离现场,作业接收环节得以顺利完成。钢套筒接收能有效防止土体坍塌和地下水渗漏,保障施工安全。

### 6.2 盾构到达段掘进施工

在盾构机尚未进场前,以实地测量数据为研究支撑,精确测定盾构刀盘前端与桩体接触的确切里程长度。盾构机穿越至既定施工里程的指定区域,立即转为挖掘作业状态。此时需指派专人轮值,每日对地面沉降进行两次细致的跟踪监测。依托监测数据,迅速执行补浆等必要手段。即将进入第三十圈的比赛圈,对盾构机姿态进行再确认,确保其沿预定轴线顺利穿出洞窟。精确的测量和监测能及时发现问题盾构机姿态偏差,通过调整千斤顶推力等参数,使盾构机准确出洞。

## 7 结束语

苏州轨道交通7号线进行盾构施工时面临着复杂的地质状况以及环境方面的挑战,经过对盾构始发、掘进、到达等关键技术展开研究,并且针对施工重点难点采取有效的技术手段,可保障施工安全以及工程质量。本文所提出的各项技术手段和监控要点,为类似工程提供了有益参考,可提升盾构施工水平,推动盾构施工技术持续发展。在实际施工过程中,要严格按照技术要求来操作,加强监测与管理,保证城市轨道交通建设顺利开展,为城市发展提供有力支撑。未来,随着技术不断进步,盾构施工会更加安全、高效且环保。

### 参考文献:

- [1] 马彬友.盾构下穿既有地铁车站施工技术研究[J].安徽建筑,2023,30(02):49-51.
- [2] 梁景一,王建.盾构近距离穿越房屋群施工技术研究[J].江苏科技信息,2023,40(02):56-59.
- [3] 张博.岩溶区地铁盾构隧道施工关键技术研究[J].中华建设,2024(02):110-112.
- [4] 袁伟嘉.复杂地质条件下的市政地铁隧道盾构施工技术研究[J].工程机械与维修,2024(02):120-122.
- [5] 刘顺涛.盾构浅覆土小间距上跨既有地铁施工技术[J].技术与市场,2023,30(11):113-117.

# 高原高海拔地区节段梁湿接缝蒸汽养护技术

潘亚杰, 黄雄文

(中交一公局第一工程有限公司, 北京 102205)

**摘要** 混凝土养护通常根据环境温度及湿度条件采用对应的养护措施, 常规环境下的养护技术已经较为成熟, 在高原该海拔地区预制箱梁蒸汽养护技术应用也较为广泛。但是针对高原高海拔地区节段梁湿接缝的养护技术仍处于探索研究阶段, 采用传统的覆盖洒水保湿包裹加热保温等措施, 养护效果难以保证, 施工质量难以控制, 尤其是在冬期施工作业中, 质量保障更是困难; 采用整孔梁包裹进行梁蒸汽养护的措施, 常规的工装配置难以实现且施工难度大, 高空作业的危险性较大且不具备经济效益。基于此, 本文以某大桥 40 m 节段梁预制及架设施工为研究对象, 开展高原高海拔地区节段梁湿接缝蒸汽养护技术的应用研究, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 铁路桥梁; 节段梁; 湿接缝; 节段梁湿接缝养护棚

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.039

## 0 引言

高原高寒地带, 昼夜温差大, 环境干燥, 水分蒸发快, 冬春季节分界不清; 冬期施工环境恶劣, 极低的温度和复杂的环境变化对室外且高空施工混凝土养护工作造成了较大的困难。干燥又水汽散发迅速的环境使混凝土水汽散发过快发生缺水情况, 致使已经生成胶凝体的水泥颗粒不能完全水化, 水泥颗粒不能转变成稳定的晶体并且缺少足够的沾着力, 混凝土表层出现片状剥落情形, 这种片状剥落接着变成粉末掉落现象, 水分提前蒸发会使混凝土出现收缩变形, 从而产生干缩裂缝, 也会引起混凝土强度不足等问题。为经济有效地解决高原高海拔地区节段梁湿接缝的养护问题, 消除湿接缝混凝土裂缝, 确保节段梁湿接缝混凝土质量问题; 项目自主创新节段梁湿接缝蒸汽养护装置对湿接缝进行蒸汽养护。

## 1 工程概况

某大桥 40 m 节段预制组装简支箱梁按照设计规定, 主线梁被设计成单箱双室预应力混凝土简支梁, 而站台梁则被设计成单箱单室预应力混凝土简支梁, 主线梁具有很多重要的尺寸, 其中, 梁顶宽度分为两种类型, 一种是 16.12 m, 这种类型包含有站台区域, 另一种则是 17.62 m, 此类型没有设置站台区域, 梁底宽度固定为 11 m, 箱梁端部支点处横向支座间的距离达 5 m, 梁的高度是 3.3 m; 站台梁也有一定的规格, 其顶面宽度为 8.5 m, 底面宽度为 4.5 m, 而且站台梁两端支撑

点与横向支座之间的距离为 3.7 m, 梁的高度为 2.6 m。

40 m 节段预制拼装箱梁, 每跨采用奇数分块, 跨中部设置湿接缝, 对称布置; 主线梁分为 9 个节段, 设 8 个湿接缝, 站台梁分为 7 个节段, 设 6 个湿接缝, 湿接缝长 80 cm, 全桥主线梁 225 节, 站台梁 168 节, 共计 393 个节段。

## 2 节段梁湿接缝养护

### 2.1 环境气候调查分析

本工程位于海拔约 3 500 m 的高原高寒地区, 区域以高山峡谷地貌为主, 气候干燥多风, 年、日温差大, 水分蒸发迅速, 年平均蒸发量约 838.7 mm, 极端最高气温达 39.4 °C, 最低气温达 -26.0 °C<sup>[1]</sup>, 无霜期约 124 d。受高海拔及复杂地形影响, 冬期施工时间长达 5 个月 (10 月至次年 3 月), 全年约 50% 的施工周期处于低温或温差剧烈变化环境。在此条件下, 混凝土易出现早期失水、温差应力增大等问题, 采用常规覆盖洒水等养护方式难以稳定控制湿接缝混凝土的温湿度环境, 难以满足质量控制要求。

### 2.2 冬期施工规定

铁道混凝土工程施工作业依照规程中规定的环境日平均气温展开, 此处的环境日平均气温是指一天里最高气温与最低气温的平均数, 也可以用当地的时间 6 点来表示, 在户外分别于 14 点和 21 点测温然后求平均值, 混凝土工程作业有其特定的条件, 检测地点应位于距离地面 1.5 m 高的地方并且远离热源, 如果平

作者简介: 潘亚杰 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程施工。

均气温连续三天低于 5℃ 而且最低气温低于 0℃ 的时候,就要按照冬季施工准则来进行,这样可以保证冬季施工的质量,进而保障整个工程的质量。

### 2.3 节段梁湿接缝蒸汽养护装置

#### 2.3.1 蒸汽养护装置设计

针对节段梁湿接缝养护环节存在的技术难题,项目团队立足工程实际需求,自主完成节段梁湿接缝蒸汽养护装置的设计,为湿接缝养护提供了高效解决方案。该装置通过外设蒸汽发生器产生高温蒸汽,经专用输送管路精准泵入养护罩内部,再由罩板预设的蒸汽喷射孔均匀喷入节段梁湿接缝养护位置。装置核心的套装式蒸汽养护组件,可实现对湿接缝的全包裹密封,确保蒸汽被约束于养护区域内,能够同步作用于每一处接触面,实现均匀加温与湿润养护。

此套自主研发装置的应用,不仅大幅提升了湿接缝蒸汽养护的作业效率,更关键在于解决了传统养护方式中接触面温湿度分布不均的难点。通过蒸汽的全域均匀覆盖,使湿接缝各部位的温湿度指标趋于一致,为水泥水化反应创造了稳定适宜的环境。养护效果改善保障粘结质量,进而有力地保障水泥水化反应完全度,从而给节段梁工程结构稳定性和耐久性提供可靠支撑,技术革新显示出对工程质量提升的帮助作用,这种帮助作用是十分关键的<sup>[2]</sup>。

#### 2.3.2 湿接缝养护装置架体结构数值计算

节段梁湿接缝蒸汽养护装置采用 ANSYS 2021 R1 软件开展模拟剖析,继而对架体实施结构核验。相关材料用量见表 1。

表 1 湿接缝保温棚材料构成

序号	产品名称	规格型号	单位	数量
1	蒸养框架	40*60 方钢	吨	3
2	隔水帆布	加棉	m <sup>2</sup>	65
3	填充橡胶	/	米	50
4	U 型卡	/	套	50

荷载说明:(1)恒载:养护装置架体自重  $G_1$ ,篷布管路配件等自重  $G_2$ ,恒载分项系数取值 1.2。(2)活载:养护时的冲击荷载  $P_1$ ,人员机具荷载  $P_2$ ,活载分项系数取值 1.4。

组合工况总荷载  $F_1=1.2 \times (G_1+G_2)+1.4 \times (P_1+P_2)$ ,通过程序对模型施加重力加速度模拟  $G_1$  计算施加荷载  $F_2=1.2 \times G_2+1.4 \times (P_1+P_2)=15\ 000\text{ N}$ 。

约束说明:通过对模型施加位移约束的方式模拟养护架吊点的约束。

直接应力:梁单元中遇到的轴向载荷引起的应力分量。构件的弯曲载荷会产生局部 Y 和 Z 方向的弯矩。这导致以下四个弯曲应力:顶部/底部的 Y 弯曲应力和顶部/底部的 Z 弯曲应力。最大最小弯曲应力表示四种弯曲应力极值情况,其中包含最大值也含有最小值,最大复合应力为一种合成形式,这种合成是轴向应力与最大弯曲应力的线性组合;极小复合应力是一种应力,它是轴向应力与极小挠曲应力的线性组合;该指标用以评估材料的内力水平,整体变形情况见图 1。

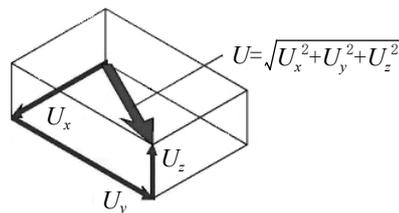


图 1 整体变形示意图

计算结果显示,结构整体变形满足规范限值要求: X、Y、Z 三向最大位移分别为 0.30 mm、2.97 mm、0.027 mm,均小于 L/400 控制标准。综合应力与变形分析表明,架体主要受力参数满足钢结构许用设计值及相关规范要求,能够满足现场蒸汽养护施工的安全使用条件<sup>[3]</sup>。

#### 2.3.3 蒸汽养护设备应用

针对湿接缝养护需求,配置 2 台 150 kW 蒸汽发生器为采用 2 条主管道为蒸养棚输送蒸汽,根据现场实测,温度能稳定保持在 20~25℃,湿度达到 95% 以上,满足施工养护需求。在高原海拔大于 3 000 m 以上的节段拼装梁蒸汽养护温度宜控制在 10~25℃,湿度达到 90% 以上。

### 2.4 节段梁湿接缝蒸汽养护措施

#### 2.4.1 蒸汽养护原理

通过蒸汽养护棚,减缓混凝土表面的热量消散,提升周围节段梁体的温度,降低节段梁与周围介质之间的温差,降低梁体混凝土内外温差及混凝土补偿收缩产生的自应力,延缓节段梁湿接缝前期的降温速率,增加热量散发时长,充分发展混凝土前期强度的增长潜力和材料的松弛特性<sup>[4]</sup>,达到湿接缝各项混凝土质量通病防治的目的。

蒸汽发生器通过一套自动控制系统,控制水泵抽水、蒸汽输送、水温控制等,通过蒸汽养护棚内温湿度反馈数据进行智能调节,保证蒸汽养护效果。

#### 2.4.2 蒸汽养护施工

湿接缝浇筑完成后,针对高原地区混凝土养护需求,应立即对湿接缝混凝土进行养护,为保证前期混凝土强度增长,采取蒸汽带模养护;针对大于 3 000 m 海拔地区,带模养护时长应不小于 60 h。总体养护时长不低于 14 d。

湿接缝浇筑选取当日温度较高的白天进行,降低混凝土自身水化热的丧失。

1. 静停保温阶段。静停保温阶段应保证施工环境温度及介质温度不低于 10 °C,若冬施环境温度较低(低于 10 °C),应提前配置暖风炮对模板及施工环境进行预热,边浇筑混凝土边通入蒸汽,保证混凝土处于 10 ~ 20 °C 的环境中。

2. 匀速升温阶段。湿接缝浇灌完毕后温度上升,升温速率不超出 10 °C/h,通常以 5 ~ 10 °C/h 持续匀速升温,接着在 2 ~ 4 h 内让养护棚里的温度达到 20 ~ 25 °C,湿气能达到 95% 以上<sup>[5]</sup>。升温时期要管控蒸汽运送,升温之际每 0.5 h 观测并记录温度,倘若升温速度超过 10 °C/h 就需即刻管控。

3. 恒温恒湿阶段。当蒸汽棚内的温度达到设定温度 20 ~ 25 °C 后,通过蒸汽发生器智能温控系统,对棚内温湿度进行恒定控制,保证养护温湿度满足要求(带模不小于 60 h),每 0.5 h 观测记录一次,确保湿接缝蒸汽养护温度。

4. 匀速降温阶段。在气温降低阶段挑选一日当中温度处于最高的时段,降温的速度通常把控在 5 ~ 10 °C/h,也能够依据棚内和大气之间的温度差值做适度的调整。节段梁湿接缝拆除保温装置时,应保证节段混凝土箱内与箱外、表层与环境芯、部与表层温差均不超过 15 °C。

#### 2.4.3 质量控制要点

静停阶段:湿接缝灌注环境温度管控影响灌注品质,温度需调控在 10 ~ 20 °C,而且升温期间升温速率不能超过 10 °C/h,恒温恒湿阶段要切实保障蒸汽养护棚的状态,既要让棚内温度始终保持在 20 ~ 25 °C,也要保证棚内有 90% 以上(≥ 90%)的恒湿状况,降温的时候也要控制好降温速率,速率不能大于 10 °C/h,等到大气与棚内温差小于或者等于 10 °C 的时候再拆掉养护棚。

### 3 节段梁湿接缝蒸汽养护技术效益分析

#### 3.1 社会效益

节段梁湿接缝蒸汽养护工艺革新采用养护设备,这种设备的应用效果很好,所以得到建设等有关单位

的一致好评,它的建设成果显著,不但花费的成本低,而且建设的速度快,工程质量达标。节段梁湿接缝蒸汽养护工艺的发展,促使蒸汽养生技术更加完善。

#### 3.2 经济效益

在高原地区梁体养护施工中,传统养护方式存在投资成本高、施工周期长的短板,且难以充分保障梁体养护质量。相比之下,蒸汽养护技术的推广应用优势显著,不仅能有效节约施工成本、缩短养护周期,还能大幅提升养护质量,降低各类不均匀、不稳定因素的干扰,确保梁体强度均衡稳定达到设计标准<sup>[6]</sup>。该技术可从根源上避免因质量缺陷导致的梁体报废问题,进一步降低综合经济成本。本项目涵盖 49 孔梁、344 个湿接缝,通过应用蒸汽养护技术,实现了工期与人工费用的双重节约,创造出十分显著的经济效益。

### 4 结束语

针对高原高海拔地区特殊气候条件,以及冬季施工期间气温偏低、环境工况复杂多变的现实难题,节段梁施工质量稳定性难以得到有效管控的问题尤为突出。为此,本项目聚焦现场施工难点开展技术攻关,自主创新研发节段梁湿接缝蒸汽养护专用装置,同时结合工程实际制定针对性的专项蒸汽养护方案,对湿接缝施工全过程实施标准化、精细化的蒸汽养护作业。从节段梁湿接缝质量检测结果来看,该应用成效十分显著,不仅能够切实保障湿接缝施工质量符合设计及规范要求,还能大幅提升现场作业工效。相较于传统常规养护方式,蒸汽养护技术在质量稳定性、施工效率等方面优势突出,能加快施工进度,兼具良好的社会效益与经济效益。

### 参考文献:

- [1] 张维东. 混凝土预制箱梁蒸汽养生施工质量控制研究[J]. 交通世界,2022(34):114-117.
- [2] 尤琦,陈飞翔,明鑫,等. 蒸汽养护条件下混凝土节段梁水化热仿真计算[J]. 施工技术(中英文),2023,52(10):41-45.
- [3] 颜奎,崔超,郑辉. 超高性能混凝土预制节段梁接缝抗剪性能尺寸效应试验[J]. 绿色科技,2023,25(22):208-214.
- [4] 赵帮轩. 高寒地区混凝土箱梁施工关键技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(06):163-168.
- [5] 刘海青,高昭龙. 冬季桥梁墩柱混凝土蒸汽养护温湿控制研究[J]. 科技创新与应用,2024,14(25):53-58.
- [6] 吴志波. 预制T梁蒸汽养护技术研究[J]. 运输经理世界,2025(26):130-132.

# 大型水利工程混凝土施工质量 控制与缺陷防治分析

谢春菊<sup>1</sup>, 张慧<sup>2</sup>

(1. 东营市众润市政工程有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东浩景建设有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要** 本研究聚焦大型水利工程混凝土施工质量控制与缺陷防治, 系统分析了混凝土施工在水利工程中的特殊性, 深入探讨了质量控制技术、常见缺陷及其成因, 并提出了针对性防治措施与技术优化方案以减少缺陷发生。通过结合实际案例分析, 展示了如何通过强化质量管理、实施精细化温控措施和建立及时有效的检测机制, 确保混凝土施工质量, 避免工程质量问题的蔓延。研究结果旨在为大型水利工程项目提供有效的质量控制参考, 进而提升水利工程结构耐久性与安全性。

**关键词** 大型水利工程; 混凝土施工; 缺陷防治; 信息化管理

**中图分类号**: TV5

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.040

## 0 引言

大型水利工程混凝土施工质量直接影响工程安全与耐久性。由于施工环境复杂, 控制混凝土质量尤为重要。本文针对大型水利工程混凝土施工环节, 系统研究质量控制技术与缺陷防治措施, 提出可行性技术方案。该方案不仅可以有效提升工程质量, 还能同类工程实践提供可借鉴的技术指导与经验支撑, 可以有效保障工程的顺利推进与长期稳定运行。

## 1 大型水利工程混凝土施工质量的特殊性与基本要求

大型水利工程具有规模庞大、施工环境复杂和周期长等特点。在施工过程中, 通常需要应对恶劣的自然环境条件, 如水位波动、泥沙流动以及地下水渗透等, 这些因素对混凝土的施工质量提出了极高的要求。施工周期长、工程内容多样化, 使得每一个阶段的质量控制都需特别注意, 以确保混凝土在长期使用中的稳定性与耐久性<sup>[1]</sup>。混凝土在大型水利工程中起着至关重要的作用, 它不仅是承载结构的主体材料, 还对工程的耐久性、防水性及抗冻融性等方面提出了严格要求。高强度和防渗透性能是水利工程中混凝土的关键需求, 而这些性能直接影响到工程的安全性与长期运行的稳定性。因此, 确保混凝土的施工质量, 不仅是为了满足工程的设计要求, 也是确保水利工程可持续性与安全性的重要保障。

## 2 大型水利工程混凝土施工质量控制技术与方法

### 2.1 材料质量控制

1. 混凝土原材料的选择与检验。混凝土的质量直接受到水泥、骨料和外加剂等原材料的影响。因此, 选择合格的原材料是确保混凝土质量的基础。水泥应符合国家标准, 并经过必要的检验以确保其强度和耐久性; 骨料需要筛选和清洗, 以去除杂质, 保证粒径均匀; 外加剂的使用必须根据项目需求选择, 且应经过充分测试, 确保其对混凝土性能的积极作用。材料的质量检验要包括强度、密实性、耐久性等方面的评估。

2. 材料性能的优化与配合比设计。为了优化混凝土的性能, 合理的配合比设计至关重要。通过合理选择水泥、骨料和外加剂的比例, 能够有效提高混凝土的强度、工作性和耐久性。在设计配合比时, 需要考虑环境条件、施工要求及混凝土的使用寿命等因素, 同时进行多次试验验证, 以确保配合比能够满足工程设计标准和质量要求。优化的配合比不仅有助于提升混凝土的综合性能, 还能降低成本。

### 2.2 施工过程中的质量控制

1. 浇筑过程中的操作规范与注意事项。在混凝土浇筑过程中, 严格遵守操作规范是确保质量的关键。第一, 振捣是防止混凝土出现蜂窝状空洞的有效手段, 振捣时应避免过度或不足, 确保混凝土密实性。第二,

**作者简介**: 谢春菊 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

合理的养护措施可以保证混凝土的强度增长和避免裂缝产生,尤其在高温或低温环境下,必须保证适当的湿度和温度条件。第三,温控也是至关重要的,特别是在大体积混凝土施工时,温控不当可能引发温差裂缝<sup>[2]</sup>。

2. 施工环境对混凝土质量的影响。施工环境对混凝土质量的影响不可忽视。温度的波动会影响混凝土的凝结时间及强度发展,尤其是在高温或低温环境下,混凝土容易出现早期干裂或强度不达标。因此,在极端天气条件下,需采取相应的温控措施,如遮阳、保温或加速养护,以确保混凝土强度的正常增长。湿度过低或过高也可能导致表面干裂或养护不当,需在施工过程中严格控制环境条件。

3. 施工人员的技术培训与质量意识提高。施工人员的技术水平与质量意识直接影响混凝土的施工质量。定期的技术培训可以帮助施工人员掌握正确的施工方法与技术,特别是在振捣、浇筑、养护等关键环节上。提高施工人员的质量意识至关重要,他们需充分认识到施工质量对工程安全和耐久性的重要性。通过提高其对质量控制的重视程度,能够确保施工过程中的每个环节都符合标准要求,从而提升整体施工质量。

### 2.3 后期养护与检测

1. 养护措施与强度测试方法。混凝土的养护是保证其强度和耐久性的重要环节。合理的养护可以有效防止水分蒸发过快和温度波动过大,从而避免混凝土出现裂缝。常见的养护方法包括保持湿润养护、覆盖养护和喷雾养护等,尤其是在高温或低温环境下,养护措施更为重要。强度测试是评估混凝土性能的关键,常用的测试方法包括抗压强度测试、拉伸强度测试等。通过定期检测,能够有效掌握混凝土强度的增长情况,并根据测试结果调整施工方案<sup>[3]</sup>。

2. 混凝土的质量检测与评估技术。混凝土的质量检测技术可以帮助及时发现潜在的质量问题。超声波检测是一种非破坏性检测方法,能够通过声波在混凝土中的传播速度变化,评估混凝土的密实度、强度和均匀性。抗压强度测试则是通过测试样本的抗压能力来评估其承载力,通常作为混凝土质量验收的标准。还可以采用钢筋探测、回弹法等技术对混凝土进行全面评估,确保其符合设计要求和使用标准。

## 3 混凝土施工缺陷的类型、成因与防治措施

### 3.1 常见混凝土施工缺陷及其影响

常见的混凝土施工缺陷主要包括裂缝、蜂窝、气泡和空洞等。裂缝通常分为温差裂缝和收缩裂缝,温差裂缝多发生在大体积浇筑过程中,由于内部和表面

温差过大,产生应力集中;而收缩裂缝是硬化过程中体积收缩所致。蜂窝现象则由振捣不充分或材料分布不均引起,形成内部空隙。气泡和空洞主要由于浇筑不当或混凝土含气过多,导致结构不密实。这些缺陷会显著影响混凝土的强度、密实性和耐久性,进而影响工程的安全性。

### 3.2 混凝土施工缺陷的成因分析

混凝土施工缺陷的产生,通常由材料、施工工艺和外部环境等因素共同作用。材料问题如水泥质量不合格或骨料粒径不均,容易导致混凝土强度不足或密实度差。施工工艺中的振捣不密实、浇筑不均匀等问题会导致气泡、空洞和蜂窝等缺陷,影响混凝土的整体结构和承载能力。外部环境因素,如温差过大或湿度过低,会加剧裂缝的形成或影响混凝土强度的增长,特别是在恶劣天气下,温控和养护不当容易导致质量问题。

### 3.3 缺陷防治的技术措施

1. 材料选用与配合比优化。混凝土的质量始于材料的选择与配合比的优化。选用合格的水泥、骨料及外加剂是确保混凝土强度与耐久性的基础。水泥的质量应符合国家标准,骨料应去除杂质并控制粒径分布,以保证混凝土的密实性和均匀性。合理设计配合比,确保水泥、骨料和水的比例合适,可以满足强度、流动性和耐久性等多方面要求。通过试验优化配合比,减少水泥用量,降低成本的同时,提高混凝土的工作性和长期稳定性。材料的科学选用和配比设计是防止施工缺陷发生的重要前提<sup>[4]</sup>。

2. 施工过程中的控制措施。施工过程中,严格控制各项操作是防止混凝土缺陷的关键。振捣能保证混凝土的密实度,过程中需要注意避免过度振捣或振捣不足两种情况,确保混凝土与钢筋之间无空隙,从而提高结构的稳定性。合理的温控措施能防止温差裂缝的产生,尤其是在大体积混凝土浇筑时,需要控制温度梯度,避免过快冷却或过高温度引起应力集中。施工环境也需要适当调控,确保混凝土在合适的湿度和温度条件下凝固与硬化,从而提高其整体质量。

3. 防治裂缝的具体措施。裂缝是混凝土施工中常见的缺陷之一,而有效的裂缝防治措施是确保结构长期稳定性的关键。(1)合理的养护措施。该技术可避免水分蒸发过快,导致产生收缩裂缝。(2)对于大体积混凝土,应采取防温差措施,如分层浇筑、保温覆盖等,确保内部温度均匀,防止温差裂缝的形成。对于已产生的裂缝,可采用裂缝修复技术,如注入树脂、灌浆或表面封闭处理等,确保裂缝不会进一步扩展,恢复混凝土的结构完整性与耐久性。

## 4 大型水利工程混凝土施工质量管理体系与监督机制

### 4.1 质量管理体系

大型水利工程混凝土施工的质量管理体系应当有明确的组织架构与责任分配。项目的质量管理部门通常由项目经理负责,并设有专门的质量控制人员,明确划分各岗位的职责与权限。施工前,应制定详细的质量控制计划,并依据施工的每个阶段设立质量目标,确保每项施工活动符合规范要求。在实施过程中,施工单位需要按照预定的质量标准进行操作,并进行自检、互检和第三方检测。质量控制的实施步骤包括从材料采购、配合比设计、施工过程控制到最终的验收,所有环节都要有清晰的质量标准和有效的监督措施。

### 4.2 质量监督与验收

大型水利工程混凝土施工的质量监督与验收是确保工程质量的关键环节。项目质量检查通常分为自检、互检和第三方检测三个层次。自检是施工单位自我检查,确保施工过程符合质量要求;互检是不同施工队伍之间的质量交叉检查,互相监督以提高施工质量;第三方检测则是通过独立的质量检测机构对关键环节进行客观公正的检查,确保施工质量的透明性与准确性。在施工过程中,缺陷排查与整改机制至关重要,项目经理应根据检查结果及时发现质量问题并采取有效的整改措施,确保问题得到有效解决,避免对后续工程产生影响,最终通过验收合格后才能进入下一个施工阶段。

### 4.3 信息化管理在质量控制中的应用

随着数字化技术的快速发展,信息化管理在大型水利工程混凝土施工中的应用越来越广泛,成为提升质量控制效率和准确性的关键工具。数字化监控与预警系统通过实时采集施工现场的数据,能够动态监测温度、湿度、混凝土强度等关键参数。一旦系统检测到异常值,便可立即发出预警,及时采取措施调整施工方案,避免质量问题的发生<sup>[5]</sup>。大数据与物联网技术的结合可以实现多维度的数据分析,优化施工过程中的资源配置,提高施工效率和质量。通过信息化手段,可以实现全面、精确、透明的质量监控和实时追溯,减少人工操作带来的误差和延误,大大提高施工管理水平和工程质量。

## 5 案例分析

在某大型水利工程项目中,施工团队在混凝土浇筑过程中遇到了温差裂缝问题。该项目位于气候较为极端的山区,项目要求进行大体积混凝土浇筑<sup>[6]</sup>。由于未充分考虑到温度变化对混凝土强度的影响,浇筑

过程中出现了较大的内部温差,及表面与混凝土内部温差过大,进而形成温差裂缝。

为解决这一问题,项目团队迅速启动了质量控制应急预案。第一,通过现场温控系统对混凝土浇筑过程中的温度进行实时监测,并实施了覆盖保温措施,减缓了温差产生。第二,施工人员加强了对混凝土的振捣和养护工作,确保混凝土的密实度和湿度在适宜的范围内,避免了由于干裂导致的强度不足,并且加强了养护过程中对温湿度变化的监控,确保养护效果最佳。项目组还利用第三方检测机构对出现裂缝的区域进行了强度测试和后期修复,采用灌浆修复技术有效恢复了混凝土的承载力,确保了工程的稳定性与安全性,避免了结构性缺陷对整体施工进度和质量的影响<sup>[7]</sup>。

最终通过及时的质量检查与整改,项目避免了更严重的质量问题,并确保了工程的顺利进行。该案例表明,针对大体积混凝土施工中的温差问题,合理的温控与养护措施是避免裂缝的关键,特别是在极端天气条件下,控制温度梯度至关重要。而及时的质量检测和整改机制也能有效防止质量问题的扩大,避免了后期更为复杂的修复工作。

## 6 结束语

大型水利工程混凝土施工质量控制至关重要。通过严格的材料选择、优化配合比设计、规范施工过程及完善养护措施,可以有效防止缺陷。质量管理体系、信息化技术和监督机制的应用,为工程质量提供保障。案例表明,温控、及时检测与整改措施能有效避免裂缝等问题。未来,应继续加强技术与质量控制体系,提升工程的安全性与可持续性。

## 参考文献:

- [1] 徐建,杨莉,孙国煊.水利工程混凝土施工质量控制技术研究[J].现代工程科技,2025,04(09):181-184.
- [2] 李松涛.水利工程混凝土施工技术及其质量控制的策略[J].水上安全,2025(01):94-96.
- [3] 杨阳.水利工程混凝土施工技术及其设备质量控制对策分析[J].中国设备工程,2024(14):229-231.
- [4] 慕跃飞.水利工程混凝土施工技术及其质量控制策略[J].工程与建设,2024,38(02):412-413,439.
- [5] 高歌.水利工程混凝土施工技术及其质量控制策略研究[J].城市建设理论研究(电子版),2022(34):139-141.
- [6] 李泽优,吴佳辰,孙雨淳.水利工程钢筋混凝土施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(35):88-90.
- [7] 张羽中.混凝土防渗墙施工技术在水利工程施工中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(34):152-154.

# 风电机组设备过热故障分析及检修技术关键点探讨

刘 强

(国能内蒙古电力蒙西新能源有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘 要** 风电机组作为风力发电的核心设备, 其运行稳定性直接关系到风电系统的整体效能。然而, 由于风电机组长期暴露于复杂多变的环境工况下, 设备过热故障频发, 已成为制约风电产业高质量发展的关键问题。本文通过系统性故障分析, 提出风电机组过热故障检修的关键技术要点, 旨在为运维实践提供有益的技术参考, 进而保障风电机组运行的稳定性和安全性, 提高风力发电系统运行的可靠性和经济性, 实现风力发电可持续发展目标。

**关键词** 风力发电; 风电机组设备; 过热故障; 检修技术

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.041

## 0 引言

在能源需求持续增加和环保关注度提升的背景下, 风力发电凭借其清洁特性, 成为优化能源结构并控制碳排放的关键解决方案, 不仅可以优化整体能源结构, 同时可以控制碳排放。在风力发电过程中, 风电机组是核心设备, 风电机组运行稳定性关系到风电场的发电效益。但是风电机组运行环境复杂, 在实际运行中很容易受到复杂气象条件和机械负荷影响, 频繁发生设备过热故障, 对机组运行的正常性造成影响。出现过热故障不仅会降低发电效率, 同时会快速老化设备, 影响设备使用寿命, 甚至会引发严重的故障。因此, 需要深入分析风电机组过热故障的原因和检修技术关键点, 有利于提高风电场运行的稳定性和经济性。

## 1 风电机组设备过热故障分析

### 1.1 发电机过热故障分析

1. 电腐蚀失效原因。针对变频器供电双馈发电机, 电流通过轴承之后会引发电腐蚀失效情况。通常是在滚动体和滚道之间接触区域产生这一问题。产生电流路径之后, 将会引发轴承内部局部放电和高温问题, 从而损伤材料。在电机绕组中, 变频器输出的 PWM 电压将会输出高频电流分量, 通过电容耦合向轴承引入高频电流, 因此产生闭合回路。此外轴承结构设计也会引发电腐蚀<sup>[1]</sup>。例如: 滚动轴承内外圈之间存在绝缘间隙, 通过电流之后将会形成闭合回路。此外, 轴承结构设计也关系到电腐蚀的产生, 将会缩短轴承使用寿命, 降低发电机性能, 甚至引发安全事故。因此,

在设计过程中要优化电流路径, 采取合适的绝缘措施, 对电腐蚀发挥减缓作用。

2. 温度过高因素。发电机绕组和轴承温度过高, 将会提高过热故障发生率。过热故障的成因非常复杂, 同时具有多样性特点。首先, 接线回路问题将会提高绕组温度, 如接线端子出现松动问题, 或者出现接触不良的情况, 将会增大电阻, 同时会产生较多的热量。同时接线错误, 不利于均匀地分布电流, 加剧升温情况。其次, 水冷系统出现故障, 将会影响发电机温度控制效果。如果冷却液流量不足, 或者出现管道堵塞问题, 将会降低散热能力, 无法及时排出发电机内部热量。此外, 也要重视传感器故障, 如温度传感器出现偏差, 不利于将发电机的实际温度状态反映出来, 延误故障处理时机。润滑系统失效直接关系到轴承温度过高, 如润滑油脂出现变质情况, 将会增加摩擦系数, 会快速提高轴承温度。总之, 发电机过热故障是因为电气和机械管理等方面因素, 需要采取针对性地解决措施。

### 1.2 齿轮箱过热故障

1. 润滑系统问题。为了维持齿轮箱运行的正常, 需要优化润滑系统, 对润滑系统定期检查和维修, 避免出现齿轮箱过热问题。如果该系统出现油量不足和油质劣化等问题, 会对齿轮箱运行造成影响。首先, 出现润滑油量不足问题将会减小齿轮啮合面的润滑膜厚度, 加剧磨损问题, 最终会提高齿轮箱温度<sup>[2]</sup>。其次, 发生油质劣化问题会导致齿轮箱过热。在实际运行中, 因为氧化或者污染等问题, 对润滑油的润滑性能造成

作者简介: 刘强 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 风力发电、风机运行。

影响, 不仅会加快磨损齿轮和轴承, 还会破坏整体油膜, 直接接触金属表面, 将会产生较多的热量。此外, 出现油路堵塞问题会加剧润滑系统问题, 如油路中存在杂质对润滑油的流动性造成影响, 不利于充分的润滑, 将会引发局部过热问题。

2. 齿轮磨损和过载。齿轮箱过热的重要原因是齿轮磨损和啮合不良以及过载运行。首先, 齿轮磨损导致齿廓变形, 降低啮合精度, 齿面的滑动摩擦和能量损耗因此增加, 加快磨损齿轮, 同时会产生较多的热量, 进一步磨损齿轮, 快速提高齿轮箱的温度。其次, 啮合不良的诱因为安装和齿轮制造不精准, 不利于均匀接触齿面, 还会引发偏载问题。在这种状态中, 会集中局部区域应力, 同时会增加摩擦热, 快速提高齿轮箱的温度。另外, 过载运行也会影响齿轮箱的温度。在高风速工况中, 齿轮箱承受的扭矩负荷较大, 超过齿轮和轴承的承载力, 将会引发过热问题。因此, 需要对齿轮箱结构参数合理设计, 同时对运行负载严格控制, 并且提高维护力度, 可以规避齿轮箱过热问题。

### 1.3 轴承过热故障分析

1. 润滑失效。出现润滑失效问题将会引发轴承过热问题, 首先, 润滑油脂不足将会减小轴承滚动体和滚道之间的油膜厚度, 在提高摩擦系数的同时会产生较多的热量。出现油脂不足问题是因为供油不足, 或者损坏了密封件, 尤其在高温和高湿等环境中, 将会快速消耗润滑油脂。其次, 润滑油脂变质将会影响轴承运行状态。例如: 在使用油脂的时候可能会出现氧化和污染等问题, 对润滑性能造成影响, 不仅会加快磨损轴承, 还会破坏润滑膜, 引发过热问题<sup>[3]</sup>。此外, 没有选择合适的润滑油脂, 导致油脂黏度和抗氧化性不符合实际工况, 将会影响润滑效果快速提高轴承温度。因此, 在选择润滑油脂阶段, 需要全面分析轴承工作环境等, 充分发挥润滑作用。

2. 安装和负载问题。轴承安装和配合间隙不合理, 将会引发轴承过热问题, 这些问题的原因为机械设计和安装工艺不合理。首先, 在安装轴承的时候产生误差不利于均匀地分布内部应力, 加剧磨损问题。例如: 在安装中对轴承轴向和径向间隙没有进行调整, 在后续运行中将会引发轴承偏斜等问题, 从而演变为过热故障。其次, 没有合理选择配合间隙会影响轴承温度特性。如果配合间隙比较小, 轴承出现过热膨胀温度, 对其自由的伸缩造成影响, 产生摩擦热。如果配合间隙比较大, 将会引发轴承松动问题, 提高冲击荷载, 轴承温度上升。此外, 轴承负载过大, 也会引发过热问题。在风电机组运行中如果轴承超负荷运行, 将会

增加滚动体和滚道的接触应力, 快速磨损材料, 最后引发过热问题。因此, 在安装轴承的过程中, 要保证安装精度, 配合间隙合理控制, 不能出现轴承过载运行情况, 保障轴承稳定运行。

## 2 风电机组设备过热故障检修技术关键点

### 2.1 预测性检修技术

在进行预测性检修时, 必须对整个装置的状况进行全方位的监控, 并对出现的问题进行准确的预报, 以便及早采取有针对性的维修对策, 以防止出现过热问题。在维修过程中, 采用多个传感器对线圈的温升、电流等多个参量进行全面的测量, 并采用机器学习的方法对其进行建模。当有异常的资料发生时, 会及时发出警报<sup>[4]</sup>。例如: 持续升高定子绕组的温升, 一旦超出设定的5%, 就会向运行维护人员发送报警信息。当检测到温度差大于40℃/m时, 维修人员应及时对现场状况进行分析。另外还要经常对制冷装置进行检修, 以确认制冷风机及散热器的工作状况。通过对进口和出口制冷剂的温度进行比较, 若两者相差超过80%, 则应及时进行清洁或更换。采用预测性检修技术, 对装置进行精确的监测, 并将其与大数据分析相结合, 判断其有没有发生过热问题, 并采取有针对性的预防维修行动, 最大限度地缩短停工期, 有效使用风力发电机的资源, 确保其稳定运转。

### 2.2 预防性检修技术

预防性检修就是为了防止风机设备发生过热而对电气设备进行合理的设计和配置。

1. 根据电子元器件的特性及工作条件, 对其内部的温度、电流等进行了分析。例如: 将定子绕组的温升上限设定为130℃, 而设定的跳闸值设定为150℃, 将过流保护作用发挥到最大, 使运行电流达到额定值的1.2倍。

2. 采用现场试验与理论分析相结合的方法, 对激励回路及功率因数进行了适当的调节<sup>[5]</sup>。

3. 定期对风电机组各项指标合理分析, 保证各种参数符合要求。如果发现了问题, 可以对变流器合理调整, 或者设置滤波设备。在使用滤波设备的过程中, 要结合风电机组实际运行情况和电气参数, 合理选择滤波设备的型号。在安装过程中, 要结合设备安装说明书, 正确地连接滤波设备和风电机组电气系统, 提高线路连接的稳固性, 同时要优化绝缘效果。完成安装工作之后, 要立即调试滤波设备, 工作人员要利用专业检测仪器对其运行参数进行监测, 优化整体工作状态。在日常工作中要检查维护滤波设备, 确定表面

是否存在损坏和异常发热问题，同时对滤波效果进行检测，如果降低了滤波性能，要及时调整设备，并且将相应的部件进行更换，充分发挥滤波设备的作用，保证风电机组电气系统运行的稳定性。

4. 预防性维护电气连接，工作人员要对端子和避雷器等部件定期检查，做好相应的紧固措施，同时对接地电阻合理测试。表 1 为风电机组电气连接检修项目和周期。

表 1 风电机组电气连接检修系统项目和周期

检修项目	检修内容	周期(月)	要求
端子紧固	检查电缆连接头和螺栓等	6	接地电阻 $\leq 0.1 \text{ M}\Omega$
接地电阻测试	测量塔筒、机舱等部位的接地电阻	12	接地电阻 $\leq 4 \text{ }\Omega$
避雷器检查	检查绝缘外观，测量泄漏电流	12	泄漏电流 $\leq 100 \text{ }\mu\text{A}$
变压器绝缘	测量变压器绕组对地绝缘电阻	24	绝缘电阻 $\geq 1 \text{ G}\Omega$

### 2.3 修复性检修技术

当发生了过热扩张之后，需要立即对故障发生原因进行分析，落实针对性地处理措施。具体实施流程如下：

当发生过热故障之后，首先要分析故障录波数据，确定故障类型。如果在一分钟以内快速提高内绕组温度，当温度超过了  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，可以确定出现了绕组匝间短路问题。如果电流不平衡度 ( $\varepsilon$ ) 超过了 5%，确定出现了转子断条问题，如公式 (1) 所示：

$$\varepsilon = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{avg}}} \quad (1)$$

式 (1) 中， $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 、 $I_{\text{avg}}$  分别代表三相电流最大值和最小值以及平均值。

明确具体故障问题之后，有必要进行有针对性的检修工作。例如：在测量绕组的匝间短路时，应采用电阻抗电桥装置来测量各绕组间的电阻，从而准确地判断出短路点。修理时对加热的温度进行严格的控制，修理完毕后进行绝缘电阻的测试，确保绝缘电阻大于  $5 \text{ M}\Omega$ <sup>[6]</sup>。对于转子断条，可以通过工频耐压测试或采用电磁辐射测试的方式来检查断条的部位，并在此基础上，对转子铜条进行及时的替换，或者采用注胶法进行修补。

在工频耐压性试验中，可以在专门的试验台上放置转子，保证转子的稳固性和水平性。可以结合规定参数调试试验设备，缓慢提升试验电压到规定值，并且维持这一电压值 1 min，在这一阶段要对转子一行放电和击穿等现象进行观察。注意保证试验环境的干燥性和洁净度，降低外界因素的干扰。结束试验之后，

要详细记录和分析各种试验数据，精准判断转子故障。

利用电磁感应探伤方法的过程中，首先沿着转子铜条表面缓慢移动电磁感应探伤仪的探头，合理控制探头和铜条表面的间距，从而获取准确的检测信号。在探头移动中，需要检测探伤仪显示的信号，如果出现异常波动，说明这一部位出现了断条问题<sup>[7]</sup>。然后标记该部位，对后续确认和处理工作提供便利。同时要多次开展检测工作，避免漏检问题，获取可靠的检测结果。

在检修过程中，要做好防尘工作，利用吸尘器和锚栓等设备开展清洁工作，及时清除表面的灰尘。在防潮工作之后，工作人员可以利用除湿器控制环境湿度在 60% 范围内。在防腐工作中，需要将防锈漆涂抹在易腐蚀部位，避免出现锈蚀问题<sup>[8]</sup>。在防锈工作中，需要在裸露的金属表面均匀地涂抹润滑油，避免出现锈迹问题。最后要做好防损工作，利用专用工具，同时要做到轻拿轻放，避免在表面产生划痕和凹陷问题。

### 3 结束语

风电机组过热故障原因复杂，需要综合利用预测性和预防性以及修复性检修技术，避免出现过热故障，通过分析可知，合理设定温度和振动等参数的监测阈值，开展多参数协同监测工作，可以及时发现异常问题，在源头防控风电机组设备过热故障。在风电发展过程中，需要加强研究风电机组过热故障预警技术，提高故障预测的准确性。同时要推动检修技术智能化发展，综合利用大数据和人工智能技术等，完善高效检修系统。

### 参考文献：

- [1] 赵建民,王亮,张震,等.海上风电机组高压设备智慧安防系统关键技术研究[J].华东科技,2025(06):134-136.
- [2] 牛婧.提升海上风电机组电气设备性能的策略研究[J].煤炭加工与综合利用,2025(03):116-120.
- [3] 冯超.风电大规模并网时机组级电压控制技术分析[J].电力设备管理,2025(02):141-143.
- [4] 韩雪,张文慧,高杨,等.风电机组齿轮箱润滑油使用寿命影响因素及延寿策略[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(24):16-18.
- [5] 周益正.基于深度学习的风电机组电气设备状态检修系统设计[J].电气技术与经济,2024(12):237-239.
- [6] 童怡恺.风电机组电力设备过热故障的预防与检修[J].造纸装备及材料,2024,53(12):54-56.
- [7] 李晓璐,王苛,赵冰,等.面向风电机组运维数据的知识图谱构建方法[J].动力工程学报,2024,44(06):886-894.
- [8] 张秀琦,胡学超,李勇.风电机组设备可靠性分析及提升方法研究[J].内蒙古电力技术,2024,42(03):8-12.

# 藏南某光伏场地季节性冻土冻融问题与致灾机理研究

潘冬, 单树成, 黄声林

(四川省第七地质大队, 四川 乐山 614000)

**摘要** 青藏高原高海拔地区光伏电站的快速发展, 对季节性冻土区的工程地质稳定性评价提出了迫切需求。本文以西藏山南市乃东区一座海拔 5 046 ~ 5 222 m 的光伏电场为研究对象, 通过现场地质调查、长期地温监测、路基变形测量及室内资料分析, 系统研究了该场区季节性冻土的发育特征、冻融过程及其对工程的潜在危害。本研究结论证实, 在类似乃东区的高寒、干旱、粗粒土广泛分布的地区, 季节性冻土并非光伏电站建设的限制性因素, 但需在设计中考虑其周期性变形特性。本研究旨在为青藏高原同类新能源建设的场址选择与地基设计提供有益参考。

**关键词** 光伏场区; 季节性冻土; 冻胀融沉; 高海拔工程

**中图分类号**: TM61

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.042

## 0 引言

青藏高原作为全球气候变化敏感区和我国重要的生态安全屏障, 同时也是清洁能源富集区。近些年, 高原光伏发电产业迅猛发展, 大量光伏电场建于高海拔山区, 这些区域广泛分布着季节性冻土。季节性冻土周期性的冻融作用通过冻胀和融沉效应<sup>[1]</sup>, 严重威胁着路基、边坡及建筑物基础的稳定性, 是寒区工程建设面临的核心地质问题之一。然而, 以往研究多集中于多年冻土区, 对于海拔超过 5 000 m、气候干旱、以粗粒碎石土为主的高山地区的季节性冻土研究相对薄弱。西藏山南乃东区某光伏场地海拔 5 046 ~ 5 222 m, 是研究此类特殊环境下季节性冻土问题的理想案例。前期工作初步认定该光伏场区冻土危害小, 但缺乏系统的学术分析与理论探讨, 本文通过详细的现场观测数据, 深入剖析该场区季节性冻土的冻融特性与灾害发育机制, 并综合评估其工程适宜性, 能够填补相关研究上的空白, 指导高原新能源基础设施的规划与建设, 具有一定的理论和实践意义。

## 1 研究区基本特征概述

### 1.1 工程属性

本次研究对象为光伏场区, 光伏场区阵列工程采用微孔灌注桩和螺旋钢管桩基础形式, 其长度为 2 m, 地上 0.3 m, 地下 1.7 m, 均按照原始地貌进行建设,

现已建成, 未破坏原始地形地貌。另外, 光伏场区施工道路工程现已建设完成。光伏场区整个场地地形平缓, 地势相对较高, 属于西藏高海拔地区新能源建设的典型工程。

### 1.2 地质概况

研究区出露地层主要为第四系全新统残坡积层碎石土和三叠系上统江雄组砂质板岩夹变质砂岩。其中浅表层为残坡积碎石土, 杂色, 松散状, 架空现象明显。粒径  $\Phi > 20$  mm 含量约占 56.6%; 角砾成分主要为板岩、变质砂岩等, 中~微风化, 棱角状; 无定向排列, 分选较差, 广泛分布于研究区。下覆基岩为江雄组砂质板岩, 深灰色, 主要成分为砂质板岩, 夹薄层变质砂岩等, 具中薄层板状构造, 层厚约 1 ~ 200 mm, 节理、裂隙较发育, 岩体破碎~极破碎状, 短柱状, 锤击声较清脆, 为 IV ~ V 类岩体。地层轻度变质, 广泛分布于研究区。

研究区域内三叠系上统江雄组变质砂岩、板岩等在附近褶皱、断裂构造的影响, 岩层整体发生倒转, 整体向南倾斜, 岩层产状  $180^\circ \sim 270^\circ \angle 20^\circ \sim 65^\circ$ , 优势岩层产状为  $240^\circ \angle 35^\circ$ 。岩层中主要发育两组节理, L1 产状为  $34 \ 555$ , 延长 0.5 ~ 10 m, 间距 0.1 ~ 0.3 m 不等, 少量泥质充填, L2 产状为  $8 \ 580$ , 延长 0.5 ~ 5 m, 间距 0.1 ~ 0.3 m 不等, 少量泥质充填。

**作者简介**: 潘冬 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文地质、工程地质与环境地质。

### 1.3 气象、水文特征

冻土首先是温度等于或低于摄氏零度时才可能产生<sup>[2]</sup>。研究区地处内陆,冬、春季节水汽来源主要为中纬度偏西风的输送,但因喜马拉雅山脉屏障作用,低层气流难以直接到达,造成河谷区域水汽不足,干季水汽条件差,同海拔覆冰程度较盆地边缘山区及川西南地区显著减轻。

光伏场区位于青藏高原中部的乃东区南侧山顶,属高原温带半干旱气候。年平均气温介于 $6.0\sim 8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温达 $-18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全年冻结期长达5个月(12月至次年4月)。场区海拔高,空气稀薄,太阳辐射强烈,昼夜温差大。据实地调查和历史资料考证,区内周边山上曾不同程度发生过树枝覆冰现象,覆冰类型为湿雪,沿线公路的电线或通信线上个别年份发生过薄冰现象,河谷内积雪深度不超过10 cm。研究区昼夜温差大,天气变化大,垂直分带明显,因此气象条件完全满足工程区冻土冻融地质灾害的形成。

光伏场区地下水类型主要为松散层孔隙水及基岩裂隙水,第四系松散岩类孔隙水主要赋存于角砾、碎石土中,属上层滞水,接受大气降雨、融雪及地表水体的补给。基岩内基岩裂隙水埋深较大,主要受到降雨、融雪补给。根据已有资料分析,研究区地下水埋深较大,超过约15 m,全年地下水位涨幅约 $1\sim 2\text{ m}$ 。

## 2 研究方法 with 成果分析

### 2.1 本研究采用的研究方法

本研究综合运用现成调查与测绘、长期原位监测与多源资料分析相结合的研究思路,系统性地探究光伏场区工程地质环境特征及其动态变化规律。

1. 现场调查与测绘。在光伏场区及其周边区域开展全面的野外实地调查与工程地质测绘工作,详细记录光伏场区地貌、地层、水文地质条件及光伏场区内施工道路的变形迹象<sup>[3]</sup>,如不均匀沉降、裂缝、鼓包等,并标注其位置、规模与形态特征,为后续分析提供详实的一手基础资料。

2. 长期原位监测。在光伏场区内布设监测点<sup>[4]</sup>,于2024年2月、5月、8月、11月四个典型时间点进行观测。监测内容:一是进行地温监测,主要记录地表及浅层地温变化;二是变形监测,采用水准测量方法,监测路基的垂直位移—冻胀与沉降情况<sup>[5]</sup>;三是进行含水率测试,在监测点附近的路基填料中采集未扰动的碎石土原状样品或按规定方法取代表性试样,随后采用烘干法或其他标准试验方法,测定其体积含水率。

3. 资料分析。结合《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》及区域地质资料,进行综合分析。

### 2.2 季节性冻土基本特征

光伏场区冻土类型主要为季节性冻土,寒季冻结,暖季融化,土体在自身重力的作用下容易产生沉陷。结合《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》(地矿眉山工程勘察院2016年)<sup>[6]</sup>,研究区季节性冻土的标准冻结深度为 $50.1\sim 100\text{ cm}$ 。现场调查表明,光伏场区及周边天然地表和已建道路未见明显的裂缝、鼓包、塌陷等冻融灾害现象,直观显示灾害发育微弱。

研究区光伏场地分布的冻土类型属于典型的季节性冻土,这类冻土对温度变化响应极为敏感,其核心特征是伴随年际气候节律发生周期性的相变循环<sup>[7]</sup>:在寒季,当气温稳定低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,土体中的孔隙水与地下水逐渐冻结形成冰晶体,导致土体体积膨胀、强度增高;进入暖季,随着气温回升,冰晶体融化,土体含水率升高、强度显著弱化,并在自身重力及外部荷载作用下发生固结排水,从而容易产生不均匀沉陷。冻融过程的年复一年循环,是引发场地变形、构筑物破坏等一系列寒区工程地质灾害的根本原因。为定量评估本区域的冻融灾害潜势,研究引用了《西藏自治区季节性冻土标准冻深分布图》(地矿眉山工程勘察院,2016年)的权威数据。根据该图件的界定,研究区所处的季节性冻土标准冻结深度范围为 $50.1\sim 100\text{ cm}$ 。这一数据从理论上揭示了本场地具备发生显著冻胀与融沉变形的的基本气候条件。

然而,详细的现场调查结果显示,场地的实际冻融灾害发育程度与理论潜势存在明显差异。在光伏场区内部、周边天然地表以及已建设的场区道路范围内,均未见明显的地表裂缝、鼓包(冻胀丘)、塌陷(热融洼地)等典型的冻融灾害地表形态标志。这种宏观现象的缺失,直观地表明在当前自然条件下,研究区的冻融灾害发育程度整体微弱,尚未形成对地表结构与工程设施具有显著影响的地质灾害。

### 2.3 冻融变形监测结果

为进一步完成本次研究工作,研究小组于2024年2月8日、5月14日、8月2日和11月26日分别对光伏场区进行现场试验和监测,实验成果见图1。

图1中的监测数据揭示了清晰的冻融变形规律。在冻胀阶段,当地表温度降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后,光伏场区内路基开始冻胀。冻胀量在严冬季节(2月)达到峰值,最大冻胀量为 $1.2\text{ cm}$ 。在融沉阶段,春季气温回升,光伏场区内冻土层自上而下融化,产生融沉。至夏季(8月),融沉基本完成,最大融沉量为 $0.5\text{ cm}$ 。总体来说,光伏场区内道路路基的沉降变形主要发生在道路建成后的第一个冻融周期内,随后趋于稳定。而冻胀变形

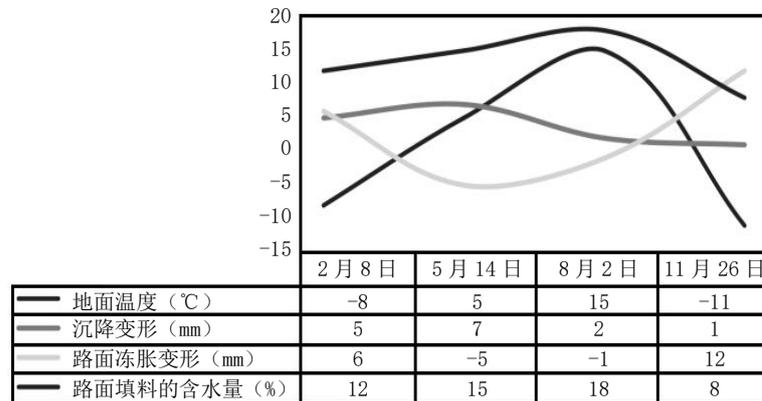


图1 试验成果

则呈现显著的年周期性，其幅度与冬季负温累积值和路基土体的含水率直接相关。

#### 2.4 光伏场区冻融灾害发育条件分析

本研究从光伏场区冻融灾害形成的三个基本条件进行分析。一是冷源条件充分。光伏场区内漫长的冬季和 $-18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端低温，为土体冻结提供了充足的冷源；二是水源条件匮乏。这是导致光伏场区冻融灾害不发育的关键制约因素。极大的地下水埋深(大于15 m)和透水性好、保水性差的碎石土地层，使得毛细水补给几乎不存在，土体天然含水量低，极大地限制了冻结过程中水分迁移和冰透镜体的形成，从而抑制了冻胀；三是土体条件有利。光伏场区内的浅层土体为粗颗粒的碎石土，其内部骨架为冻胀提供了内部空间约束，其本身冻胀敏感性远低于粉质黏土等细粒土。

### 3 讨论

#### 3.1 灾害危害程度小的成因机制

本研究认为，乃东区该光伏场区季节性冻土危害程度小的根本原因在于强冷源与弱水源的耦合效应。尽管气候寒冷提供了强烈的冻结驱动力，但极度干旱的水文地质条件和非冻胀敏感性的碎石土地基，共同构成了抑制冻融灾害的天然屏障。这使得土体在冻结过程中缺乏水分迁移和成冰的物质基础，因此仅产生幅度有限(厘米级)的整体胀缩，而非破坏性的不均匀冻胀。

#### 3.2 对光伏项目实践的启示

基于本次研究成果，对光伏场区类似工程得出三个方面的启示。一是本场区地基条件适宜，无需采取昂贵的换填、保温板等特殊防冻胀措施。光伏支架基础可采用浅基础，但需考虑其与碎石土地基的锚固性能；二是施工道路的路面结构应具备一定的柔性，以适应年度的冻融循环变形。在工程施工中，应重点应做好路面排水，防止外部地表水入渗增加路基含水量；

三是需进行长期监测工作，尽管当前危害程度小，适宜建设光伏工程，但在气候变化和工程活动背景下，建议建立长期监测系统，关注冻融动态的潜在变化。

### 4 结论

1. 研究区冻土类型属季节性冻土，冻结深度为 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ ，综合判定为不冻胀、不融沉。

2. 研究区冻融灾害不发育的主控因素是光伏场区内极度干旱和地基土体为透水性的碎石土，二者共同限制了冻胀所需的水分来源。

3. 现场监测表明，光伏场区冻融变形表现为年周期性，最大冻胀量 $1.2\text{ cm}$ ，最大融沉量 $0.5\text{ cm}$ ，属于可控的弹性变形范围，对工程稳定性不构成实质性威胁，适宜建设光伏工程。

4. 该案例表明，在高寒干旱、以粗粒土为主的高海拔地区，季节性冻土并非光伏电站建设的绝对限制因素，具备良好的工程适宜性。研究成果对青藏高原新能源基础设施的科学发展具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] 李瑞涛,袁其华,范庆华,等.寒冷地区季节性冻土路基土强度与冻胀敏感性的关联规律研究[J].时代汽车,2025(20):19-21.
- [2] 何蓓蓓,雷文君,郑盐源.西藏阿里地区气候变化及其对季节性冻土的影响[J].陕西农业科学,2025,71(12):70-77.
- [3] 雷成林.季节性冻土区公路路基冻融病害机理及养护修复技术研究[J].运输经理世界,2025(36):111-113.
- [4] 李静,白利舫,刘辉,等.季节性冻土冻融周期多场地球物理探测与监测[J].地球物理学报,2025,68(08):3011-3024.
- [5] 苏玉涛.季节性冻土区路基主动保温层厚度优化设计与施工工艺[J].交通世界,2025(34):120-122.
- [6] 同[1].
- [7] 同[2].