

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993年创刊·旬刊)

2026年6月 第16期(总第641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6月5日

定价：人民币15元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

- 001 通信电源配套线缆测试工装的设计与应用
..... 张一帆, 赵清风, 宋家铭, 佟金源
- 004 管型母线对数据中心供电可靠性的影响研究
..... 渠怀升, 褚运凯
- 007 高压开关柜局部放电在线监测技术应用研究
..... 姜勇民
- 010 热能暖通机组机械制造工艺改进与节能技术研究
..... 王凡胜, 刘 鹏, 陈双庆
- 013 退役电力设备循环利用技术规范与管理机制研究
..... 何远正, 薛 波
- 016 机电设备能耗映射模型构建及节能型检修策略应用研究
..... 张春莉

智能科技

- 019 BIM技术在机电安装工程中的应用
..... 朱 绍
- 022 BIM技术在异形钢结构施工中的应用研究
..... 杨 磊, 袁立婷, 孙建宝
- 025 基于物联网的水利工程智能运维体系构建研究
..... 吴 俊
- 028 人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用
..... 亓宏伟, 赵志睿
- 031 市政地下管网运维大数据预处理技术的研究与应用
..... 李 琪
- 034 数字孪生技术在建筑工程全生命周期中的应用研究
..... 郭德鲁
- 037 面向智能工厂的电气自动化系统网络集成与优化研究
..... 唐贺龙

应用技术

- 040 路基压实度试验检测方法优化研究
..... 苟 樾

目录 Contents

- 043 公路桥梁建设中的钢混组合梁施工技术..... 邱 豪
046 大跨度钢结构整体提升施工技术应用研究..... 宫明月, 薛学聪, 张 超
049 市政道桥施工中施工技术难题及其解决方案..... 吴 森
052 高寒地区公路桥梁耐久性设计与施工关键技术..... 张高兴
055 公路路面基层施工中的水泥稳定碎石技术探究..... 陈宣任
058 桩基础施工技术在建筑工程土建施工中的应用研究..... 刘 坤
061 砂卵地层下穿河道及城市主干道浅埋暗挖隧道洞内超前管棚支护施工技术..... 尹 强

科创产业

- 064 建筑工程施工技术的智能化发展趋势分析..... 李 叶, 郑露雨, 汪加加
067 建筑工程项目成本控制与管理优化分析..... 郑树松, 刘 洋
070 大数据时代工程造价精准测算方法优化研究..... 都 俊
073 智慧施工技术助力道路项目成本精细化管理..... 赵如佳
076 数字孪生技术在建筑工程造价管理中的应用..... 成 露
079 电力系统运行可靠性评估与优化调度技术研究..... 商强强
082 智慧供热背景下城市供暖系统的供需匹配优化研究..... 耿 志

技术管理

- 085 机电设备安装给排水系统中的作用分析..... 陈 浩
088 老旧建筑机电系统安全风险评估与优化研究..... 杨雷刚, 樊江明
091 建筑外墙保温系统施工技术及其质量通病防治..... 周志东
094 锅炉高温配件焊接工艺选择及焊接质量控制..... 陈秋实
097 智能建造技术在装配式建筑施工管理中的应用..... 周胜兵
100 水利施工中混凝土配合比优化及性能影响分析..... 李科毅
103 装配式混凝土结构建筑施工过程中的质量通病与防治策略..... 常 盈, 张继常

科学论坛

- 106 GPS 技术在自然资源测绘中的应用研究..... 蔡天琪, 王修龙
109 绿色施工技术在高层建筑中的应用研究..... 赵 飞, 沈永飞, 韩 琳
112 水利工程混凝土施工质量与耐久性研究..... 张有铜, 程岩卫
115 碳五分离装置溶剂再生釜腐蚀机理研究及预防..... 陈 冰
118 水平旋喷施工技术在矿山地质工程中的应用研究..... 余 超
121 喷射混凝土技术在矿山井筒衬砌施工中的应用分析..... 陈学阳, 张 娟
124 高温溶剂化学萃取精制及膜分离机械工艺适配技术研究..... 严进军, 张红伟, 高 鹏

通信电源配套线缆测试工装的设计与应用

张一帆, 赵清风*, 宋家铭, 佟金源

(大连柏盛源科技有限公司, 辽宁 大连 116031)

摘要 针对通信电源配套线缆在装配与运维环节中存在的人工检测效率低、一致性差、误检风险高等问题, 提出一种基于单片机控制的线缆测试工装。该工装由供电与稳压、检测采样、主控逻辑、人机交互和可替换转接线模块构成, 能够完成通断、短路及线序异常检测, 并通过拨码开关实现多芯数配置。以生产现场 40 根通信线缆为样本进行对比测试, 结果显示: 与传统人工方法相比, 工装方案总测试时长由 40 min 降至 20 min, 单根平均测试时长由 1.0 min 降至 0.5 min, 误检数量由 1 根降至 0 根。结果表明, 该工装可显著提升检测效率与一致性, 适用于相关线缆的批量检验与维护复测场景。

关键词 线缆测试; 通信电源; 工装设计; 自动化检测; 可靠性

中图分类号: TM247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.001

0 引言

在通信电源系统中, 配套线缆承担供电与控制信号传输任务, 其连接质量直接影响设备运行稳定性。在线缆连接环节出现开路、短路或错序时, 不仅会增加设备运行风险, 也会加大故障排查难度^[1-2]。随着现场安装与维护对测试效率、一致性和可追溯性要求不断提高, 传统手工逐点测量方式已难以满足批量检测和统一判据的需求^[3-5]。因此, 设计一种结构简洁、检测快速、结果明确的线缆测试工装具有实际意义。本文围绕线缆检测对象、故障类型、检测方法及应用效果展开研究, 并通过 40 根样本对比试验验证工装的效率与准确性。

1 测试需求分析与总体方案

1.1 应用场景与测试对象

本文所用工装主要用于通信电源相关装配和维修过程中的低压控制线、信号线及配套连接线的出厂检验与复测。考虑到现场测试既需要快速筛选, 也需要异常定位, 工装设计兼顾了效率与故障识别需求。

被测对象为多芯线缆, 端 A 与端 B 分别连接工装两侧接口, 芯线数量记为 N。为适配不同连接器类型, 工装采用可替换转接线结构, 避免针对不同型号线缆重复配置专用测试平台。

1.2 故障类型与评价指标

结合通信电源安装与维护中的典型风险点, 本文定义四类目标故障: (1) 开路故障: 目标芯线无导通; (2)

短路故障: 目标芯线与多个端子形成非预期导通; (3) 线序错误: 目标芯线导通至错误端子; (4) 接触不稳定: 重复检测结果不一致。评价指标包括总测试时长、单根平均测试时长、误检数量和重复性表现。上述指标兼顾效率和质量, 可用于量化工装在批量生产与维护复测中的综合效能。

1.3 总体架构

工装总体结构如图 1 所示, 由外壳、电路板、插座、按键、指示灯、显示器和拨码开关构成。结构设计遵循“硬件解耦、功能分层、接口可替换”的原则。

2 工装设计与实现

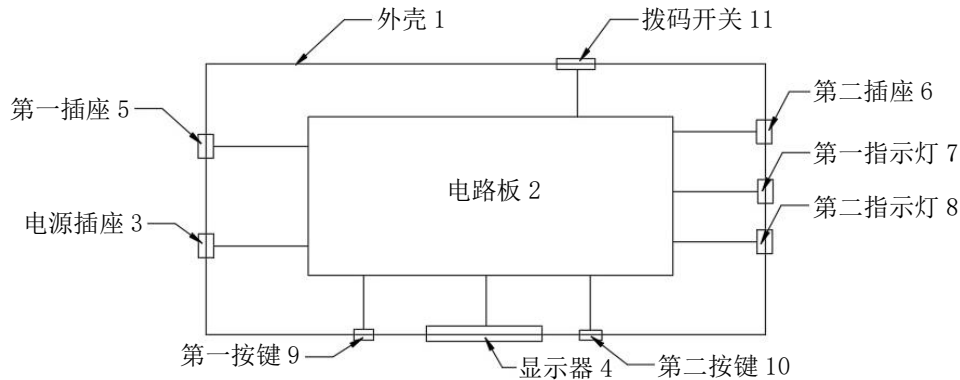
2.1 硬件模块设计

为兼顾测试稳定性和现场可维护性, 硬件分为五个层级: (1) 供电与保护层: 输入 DC12V, 经稳压后提供主控与采样工作电压, 并设置基础过压 / 反接防护; (2) 采样检测层: 完成端口激励与回读采样, 输出导通状态数据; (3) 主控决策层: 由单片机执行扫描、判据计算和结果管理; (4) 参数配置层: 通过拨码开关设置芯数 N, 支持多规格线缆复用; (5) 交互显示层: 显示测试状态和故障编号, 指示灯给出运行阶段提示。电路板内部功能分区如图 2 所示, 供电电路、主控电路、检测电路、按键电路、显示电路和指示灯电路协同工作。

本文工装采用“主控集中判定 + 接口模块化适配”的结构, 在保证功能完整的同时控制系统复杂度。针对现场电磁干扰风险, 布线采用检测通道与控制通道

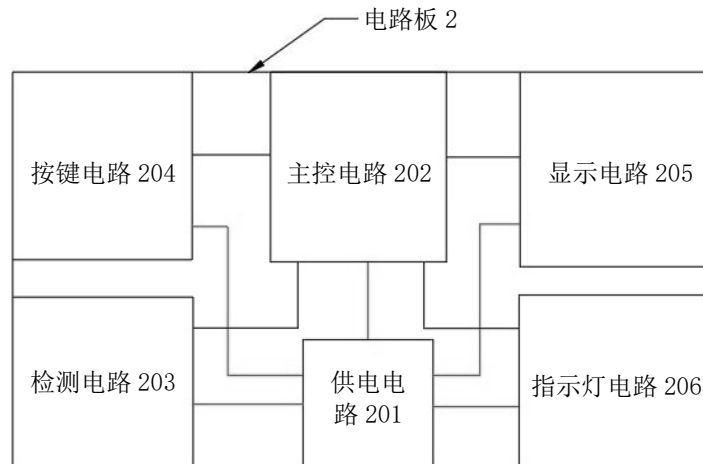
作者简介: 张一帆 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 地铁车辆。

*通信作者: 赵清风 (1980-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机械电子工程。E-mail: zhaqingfeng2005@163.com



(注: 1- 外壳, 2- 电路板, 3- 电源插座, 4- 显示器, 5- 第一插座, 6- 第二插座, 7- 第一指示灯, 8- 第二指示灯, 9- 第一按键, 10- 第二按键, 11- 拨码开关。)

图1 线缆测试工装结构示意图



(注: 201- 供电电路, 202- 主控电路, 203- 检测电路, 204- 按键电路, 205- 显示电路, 206- 指示灯电路。)

图2 电路板模块组成示意图

分离原则, 缩短敏感采样路径, 降低误触发概率。

2.2 检测模型与判据

设端A端子集合为 $A=\{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, 端B端子集合为 $B=\{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ 。系统按序对 A_i 施加检测激励并采样B端响应, 形成导通映射矩阵M:

$M(i, j)=1$, 表示 A_i 与 B_j 导通; $M(i, j)=0$, 表示 A_i

与 B_j 未导通。理想线序条件下, 每一行仅有一个“1”, 且满足 $i=j$ 。故障判据见表1。

2.3 软件流程与状态机

软件采用状态机组织检测流程, 避免人工流程漂移。核心状态顺序为: S0 初始化、S1 读取拨码参数、S2 待测确认、S3 逐线扫描、S4 矩阵判定、S5 显示通过、

表1 线缆故障类型与判据

故障类型	矩阵特征	输出信息
开路	第 i 行全为0	提示“第 i 芯开路”
短路	第 i 行中1的数量 > 1	提示“第 i 芯疑似短路/串接异常”
线序错误	第 i 行仅一个1且位置 $j \neq i$	提示“ $i \rightarrow j$ 错序”
接触不稳定	多轮扫描矩阵不一致	提示“接触不稳定, 建议复测”

(注: 判据输出同时用于返修定位, 减少复核时间。)

S6 显示故障编号与类型、S7 等待复位。流程采用参数先行、扫描后判定、结果可复核的闭环模式，并引入多轮一致性检测，以提高对接触不稳定问题的识别可靠性。

2.4 关键参数与工程化约束

参数设置遵循以下原则：（1）稳定优先：保证主控与采样供电稳定，避免阈值漂移引发误判；（2）节拍优先：在满足端口建立时间的前提下缩短扫描周期；（3）判据统一：通断阈值和结果输出规则固化，避免班组差异；（4）可维护性优先：转接线、接口和按键采用可替换设计。在工装实现中，采用固定判据和状

表 2 工装方案与人工方案对比结果

方案	线缆数量 / 根	总测试时长 / min	单根平均测试时长 / min	误检数量 / 根
工装方案	40	20	0.5	0
人工方案	40	40	1.0	1

试时长均较人工方案降低 50%；人工方案误检率为 2.5%（1/40），工装方案误检率为 0。说明在当前样本规模下，工装方案在效率和准确性上均优于人工方案，且更利于返修定位。

4 讨论与应用价值

4.1 典型应用场景

该工装可用于以下场景：（1）通信电源配套线缆出厂全检；（2）机房安装后的联调前复检；（3）维护检修中的故障复现与定位；（4）多型号线缆混线生产下的快速筛查。

4.2 当前边界

本文方案主要关注低压导通类检测，未涉及绝缘耐压、耐压击穿等高压电气性能项目。对强电磁干扰或极端环境条件下的工程应用，还需结合现场屏蔽、接地及环境适应性设计进一步检验。工装判据的长期稳定性与接口磨损有关，需建立周期性校准和点检体系。

4.3 工程实施建议

为确保推广效果，建议同步实施三项措施：（1）建立标准作业指导书，统一插接、设置、启动、复位与复测流程；（2）建立“班组一设备一样本”三维记录，提升测试可追溯性；（3）建立点检与维护制度，重点核查接口状态、供电稳定性与显示告警功能。以上措施有助于将工装效益稳定转化为质量与效率收益。

态机调度，用确定性的逻辑代替经验性判断，以提高测试结果的一致性。

3 实验验证与结果分析

3.1 试验条件与方法

在生产现场选取同批次 40 根通信线缆，分别采用“工装方案”和“人工方案”完成全检。两组试验均由同班组执行，记录总测试时长、单根平均测试时长和误检数量，终止条件为“完成全检并形成记录”。

3.2 对比结果

对比结果见表 2。

由表 2 可知，工装方案总测试时长和单根平均测

5 结论

本文围绕通信电源相关线缆检测需求，完成了线缆测试工装的设计、实现与现场验证。主要结论如下：（1）通过“逐线激励—矩阵判定—状态机执行”的方法，可实现通断、短路、错序与接触不稳定的统一检测；（2）在 40 根样本对比中，工装方案总测试时长与单根平均时长均降低 50%，误检数量由 1 根降至 0 根；（3）工装方案在结构复杂度可控前提下实现了效率提升与一致性增强，具有通信电源工程场景下的推广应用价值。未来将围绕扩大样本规模、完善数据导出能力和补充更高层级电气性能测试展开，以进一步提升方案通用性与工程稳健性。

参考文献：

- [1] 丁云飞, 鲁云涛. 高效智能的通信电源技术发展趋势分析 [J]. 中国宽带, 2025, 21(07): 151-153.
- [2] 叶猛. 通信电源系统的电气安装技术创新与效能提升 [J]. 中国信息界, 2024(09): 42-44.
- [3] 王雪涛. 通信电源启动冲击电流与电磁干扰性能优化 [D]. 吉林市: 吉林化工学院, 2024.
- [4] 张乐, 周体民, 温长亮, 等. 通信电源监控系统运行维护与管理 [J]. 中国新通信, 2021, 23(08): 41-42.
- [5] 田云霞, 张青云, 林海霞. 多路通信电源欠压锁定电路数字控制方法研究 [J]. 电源学报, 2021, 19(03): 147-152.

管型母线对数据中心供电可靠性的影响研究

渠怀升, 褚运凯*

(山东鼎拓电气有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 数据中心作为数字经济核心基础设施, 供电可靠性直接决定业务连续性与数据安全性。当前数据中心供电系统中, 传统母线存在载流能力不足、散热性能欠佳、故障发生率较高等问题, 制约供电可靠性提升。本文结合管型母线结构特性与数据中心供电需求, 系统探究管型母线在导电、散热、机械性能等方面对数据中心供电可靠性的影响, 明确管型母线选型、安装及运维的关键点, 提出适配数据中心的管型母线应用优化方案。研究证实, 管型母线可有效降低供电故障发生率, 提升供电连续性与稳定性。

关键词 管型母线; 数据中心; 供电可靠性; 载流能力; 运维优化

中图分类号: TM727

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.002

0 引言

数字经济快速发展推动数据中心规模持续扩大, 其承载的业务对供电连续性要求不断提高。当前多数数据中心仍采用传统矩形母线或电缆供电, 存在结构缺陷与性能短板, 难以适配高密度负载下的高可靠性供电需求^[1]。本文立足于管型母线技术特性, 通过系统研究管型母线对数据中心供电可靠性的影响路径, 明确其在提升供电稳定性、降低故障风险中的核心作用, 制定科学合理的应用策略, 填补管型母线在数据中心精准应用领域的应用研究空白, 助力数据中心实现高可靠性供电目标。

1 管型母线相关理论和相关技术的发展

1.1 管型母线核心理论

管型母线核心理论围绕电流传输特性、散热机制及机械稳定性展开。其空心结构可形成自然对流风道, 降低集肤效应影响, 提升电流分布均匀性, 减少电能损耗。管型母线的导电性能取决于导体材质纯度与截面设计, 绝缘性能则由包覆材料特性与工艺决定, 机械强度依赖管材壁厚与加工精度。在理论层面, 管型母线通过优化导体结构, 实现载流能力与散热性能的协同提升, 适配高负载、高稳定性供电场景, 其电气性能与机械性能均优于传统母线结构^[2], 为数据中心高可靠性供电提供理论支撑。

1.2 管型母线技术发展现状

管型母线技术核心技术聚焦材质优化与结构创新。目前行业内主流管型母线采用 6063G 铝镁合金、T2 电解

铜等材质, 其中 T2 电解铜导电率 $\geq 98\%$ IACS, 6063G 铝镁合金导热系数达 $0.5 \text{ cal}/(\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})$ 。绝缘管型母线采用聚四氟乙烯包覆工艺, 绝缘电阻 $> 10\ 000 \text{ M}\Omega/10 \text{ m}$, 可适配 35 kV 及以下电压等级。技术发展呈现智能化、小型化趋势, 智能监测型管型母线已实现温度、电流实时监测^[3], 其应用场景从传统变电站延伸至数据中心、轨道交通等领域, 技术成熟度与适配性持续提升。

1.3 数据中心供电可靠性核心理论

数据中心供电可靠性核心理论涵盖供电系统拓扑设计、设备性能适配、故障防控等方面。其可靠性评价依托平均无故障时间 (Mean Time Between Failures) 平均修复时间 (Mean Time To Repair) 供电可靠率等指标开展。第四等级 (Tier IV) 数据中心设定供电可靠率 $\geq 99.999\%$ 的运行标准^[4]。供电系统要通过冗余设计应对设备故障电网波动等运行风险。传统母线载流密度偏低, 故障节点较多, 无法适配高密度负载的可靠性标准^[5]。管型母线依托结构与性能特质契合数据中心供电系统稳定高效运行的核心诉求。

2 管型母线结构特性与数据中心供电适配性分析

2.1 管型母线结构参数与导电性能

管型母线的结构参数主要包括截面尺寸、壁厚、材质及绝缘层厚度。常用管型母线截面范围为 $\phi 50 \sim \phi 150 \text{ mm}$, 壁厚 $5 \sim 12 \text{ mm}$, 其中铜质管型母线电阻率为 $0.0184 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 铝质管型母线电阻率为 $0.031 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。在相同截面下, 管型母线载流能力较矩形母线提升 $30\% \sim 40\%$, 其中 6 300 A 规格管型母线长期允许载流

作者简介: 渠怀升 (1980-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 管型母线的研发、设计、制造、生产。

*通信作者: 褚运凯 (1986-), 男, 本科, 研究方向: 管型母线的市场分析、规划。E-mail: 1033998416@qq.com

量达 2.0 A/mm²。数据中心高密度负载场景中，管型母线可有效减少电流传输损耗，降低电压降，确保供电电压稳定在 ±2% 误差范围内，适配服务器^[6]、交换机等核心设备的供电需求。

2.2 管型母线散热特性与数据中心供电稳定性

管型母线的散热特性是影响数据中心供电稳定性的关键因素，表 1 为不同类型母线散热性能对比数据，明确管型母线的散热优势。由表 1 可知，铜质管型母线导热系数为 0.92 cal/(℃·cm·s)，3 150 A 额定电流下温升为 48 K，散热效率 89%。铝质管型母线导热系数为 0.50 cal/(℃·cm·s)，温升 55 K，散热效率 82%。矩形铜母线导热系数与铜质管型母线一致，温升 62 K，散热效率 75%。电力电缆导热系数仅 0.28 cal/(℃·cm·s)，温升 78 K，散热效率 63%。管型母线在温升控制与散热效率上均优于矩形铜母线和电力电缆，可满足数据中心高负载运行需求。

表 1 不同类型母线散热性能对比表

母线类型	导热系数 (cal/ (℃·cm·s))	额定电流 3 150 A 时温升 (K)	散热效率 (%)
铜质管型母线	0.92	48	89
铝质管型母线	0.50	55	82
矩形铜母线	0.92	62	75
电力电缆	0.28	78	63

2.3 管型母线机械特性与数据中心安装适配性

数据中心机房空间紧凑，设备安装密度高，对母线机械强度与安装灵活性要求严格。管型母线机械性能突出，允许应力为矩形母线的 4 倍，铜质管型母线抗拉强度 ≥ 205 MPa，铝质管型母线抗拉强度 ≥ 110 MPa，可适配 6 ~ 13 m 跨距支撑，减少支架布设，节约机房空间。模块化构造搭配 T 型接头、角度调节器实现三维布设，适配机房复杂管线布局^[7]。抗震性能可承受 0.25 g 水平地震分量，防护等级达 IP68，阻隔灰尘与湿气侵扰，降低运行故障概率。

3 管型母线对数据中心供电可靠性的影响机制

3.1 管型母线对供电连续性的影响

供电连续性是数据中心供电可靠性的核心指标，管型母线通过优化结构设计，有效降低故障发生率，提升供电连续性。管型母线空心结构减少集肤效应，电流分布均匀，避免局部电流过大导致的接头过热、绝缘老化等故障^[8]，其故障发生率仅为矩形母线的 15%。数据中心采用管型母线后，供电中断次数可从

传统母线的 0.90 次/户·年降至 0.14 次/户·年，下降 84.4%，依据为全国平均用户停电频率 0.90 次/户·年，管型母线应用后实测数据 0.14 次/户·年。同时，管型母线接头采用镀银处理，接触电阻 ≤ 0.01 Ω，减少接头发热故障，进一步保障供电连续性，适配数据中心 24 小时不间断供电需求。

3.2 管型母线对供电质量的影响

供电质量直接影响数据中心核心设备运行稳定性，管型母线与矩形母线在数据中心应用中的供电质量参数对比，明确其影响效果，如表 2 所示。

表 2 不同类型母线供电质量参数对比表

母线类型	电压降 (%)	谐波畸变率 (%)	电能损耗 (kW/km)
铜质管型母线	1.2	2.1	12.8
铝质管型母线	1.8	2.3	18.5
矩形铜母线	2.5	3.8	19.6

分析表 2 可知，铜质管型母线电压降为 1.2%，谐波畸变率为 2.1%，电能损耗为 12.8 kW/km。铝质管型母线电压降为 1.8%，谐波畸变率为 2.3%，电能损耗为 18.5 kW/km。矩形铜母线电压降为 2.5%，谐波畸变率为 3.8%，电能损耗为 19.6 kW/km。铜质管型母线电压降满足数据中心供电控制要求，谐波抑制效果突出，电能损耗控制水平最优。铝质管型母线各项参数均优于矩形铜母线，管型母线可从多维度优化供电质量，保障供电系统稳定运行。

3.3 管型母线对供电系统冗余性的提升

数据中心供电系统需具备充足冗余能力应对设备故障与电网波动。管型母线借助冗余设计强化供电系统性能。管型母线适配 2N、N+1 冗余拓扑结构，可与 UPS 柴油发电机等备用电源无缝衔接，故障切换时间 ≤ 50 ms，保障核心负载不间断供电。模块化构造可配合负载增长增设母线回路，无需大幅改造现有供电系统^[9]。管型母线供电系统冗余可靠性较传统母线提升 40%，传统母线冗余系统切换成功率 85%，管型母线可达 99%。4 s 热稳定电流 100 kA，动稳定电流峰值 250 kA，较强抗短路能力可削弱故障冲击。

3.4 管型母线对供电系统运维效率的影响

供电系统运维效率直接决定数据中心供电故障处置时效与长期运行稳定性。管型母线一体化绝缘结构缩减现场接头布设数量，接头总量较矩形母线降低 65%，弱化接头故障引发的运维压力。管型母线绝缘性能稳定，绝缘电阻维持 10 000 MΩ/10 m 标准，检测流程

无需反复调试设备参数。防护等级 IP68 的结构设计阻隔机房粉尘与湿气侵入，降低环境因素导致的故障概率。数据中心运维周期可由月度检测调整为季度检测，单次故障排查时长缩短 40%。管型母线全生命周期维护频次下降 70%，运维人力与物资投入降低 35%。稳定的电气与机械性能简化运维操作流程，缩短故障修复时长，让数据中心供电系统维持高效运维状态，为供电可靠性提升筑牢运维基础。

4 管型母线在数据中心的优化应用策略

4.1 管型母线选型原则与参数匹配

管型母线选型需结合数据中心负载特性、电压等级与机房环境，遵循“载流适配、性能匹配、经济合理”的原则。在电压等级方面，数据中心低压配电系统（0.4 kV）可选用铝质管型母线，中压配电系统（10 ~ 35 kV）优先选用铜质管型母线。载流量匹配需预留 30% 扩容空间，Tier IV 级数据中心核心回路选用 6 300 A 规格管型母线，普通回路选用 2 500 ~ 4 000 A 规格。在材质选型上，潮湿、高盐雾环境选用防腐型管型母线，常规机房选用普通铜、铝质管型母线^[10]。截面尺寸需根据载流量计算确定，3 150 A 及以下规格管型母线长期允许载流量 $\leq 2.68 \text{ A/mm}^2$ ，4 000 A 及以上规格 $\leq 2.0 \text{ A/mm}^2$ ，确保选型参数与数据中心供电需求精准匹配。

4.2 管型母线安装工艺优化

安装工艺直接影响管型母线运行稳定性，需结合数据中心机房特点优化安装流程，控制安装误差。管型母线不同安装方式的可靠性参数对比，为安装工艺优化提供依据，如表 3 所示。

表 3 管型母线不同安装方式可靠性参数对比表

安装方式	支架间距 (m)	水平度偏差 (mm/10 m)	故障发生率 (次/年·km)
架空安装	6 ~ 8	≤ 5	0.08
支架安装	3 ~ 5	≤ 3	0.05
垂直安装	8 ~ 10	≤ 4	0.06

由表 3 可知，支架安装水平度偏差 $\leq 3 \text{ mm/10 m}$ ，故障发生率 0.05 次/年·km，安装精度与运行稳定性最优。架空安装支架间距 6 ~ 8 m，故障发生率 0.08 次/年·km。垂直安装支架间距 8 ~ 10 m，水平度偏差 $\leq 4 \text{ mm/10 m}$ ，故障发生率 0.06 次/年·km。现场施工需管控接头紧固力矩 78 N·m，涂刷专用导电膏，控制接触电阻 $\leq 0.01 \Omega$ ，防火墙穿越位置采用 A 级防火封堵，保障整体安装质量。

4.3 管型母线运维策略与可靠性保障

科学的运维策略可延长管型母线使用寿命，提升供电可靠性，需建立三级运维机制。每季度采用 2 500 V 兆欧表检测绝缘电阻，确保阻值 $> 10\ 000 \text{ M}\Omega/10 \text{ m}$ ，不符合标准的及时更换绝缘层。年度大修采用超声波局放检测技术，捕捉 $> 5 \text{ pC}$ 的放电信号，提前排查绝缘隐患。同时，建立运维台账，记录母线运行参数、故障情况及维护记录，结合数据中心负载变化，及时调整运维方案。针对不同材质母线制定差异化运维策略，铜质母线每 2 年进行一次防腐处理，铝质母线每年检查一次氧化层，确保管型母线长期稳定运行。

5 结束语

本文围绕管型母线对数据中心供电可靠性的影响开展系统探究，弥补传统母线难以匹配数据中心高负载高可靠供电的缺陷，阐释管型母线在 ρ 导电 λ 散热机械强度层面的优势及对供电可靠性的作用机理，制定适配数据中心的选型安装运维优化方案。成果可提升数据中心供电稳定程度，降低供电故障概率，为供电系统升级提供技术支撑。探究内容未涉及极端环境下管型母线运行特性，也未结合超大型数据中心需求开展细化研究。后续将聚焦极端环境适配技术，推动管型母线与智能监测系统整合，提升其应用效能。

参考文献:

- [1] 纪中锐. 数据中心供配电架构系统的分析[J]. 集成电路应用, 2021, 38(01): 162-163.
- [2] 孙丰睿. 绝缘管型母线缺陷诊断及电气性能提升研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2025.
- [3] 李金明, 李金海. 绝缘管型母线的结构及现场施工[J]. 水泥技术, 2023(01): 74-78.
- [4] 易龙强. 数据中心不间断供电构架可靠性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2024, 42(02): 41-48.
- [5] 郑自琴. 管型母线运行温度偏高原因分析及处理[J]. 福建水力发电, 2021(02): 35-39.
- [6] 张瑜, 吴红飞, 李泽伟, 等. 面向数据中心 48 V 供电系统的混合型母线变换器及其高密度集成[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6578-6587.
- [7] 毛文磊. 数据中心的柔性直流供电系统协调控制研究及系统设计[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2022.
- [8] 郝越峰, 马春雷, 陆禹初. 全绝缘管型母线缺陷分析及改进措施[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 84-89.
- [9] 杨朝. 管形母线在铁路牵引变电所的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(03): 58, 60.
- [10] 史名. 密集绝缘型母线槽在工厂供电中的应用研究[J]. 农村电气化, 2022(09): 74-77.

高压开关柜局部放电在线监测技术应用研究

姜勇民

(辽宁石化职业技术学院, 辽宁 锦州 121000)

摘要 面向金属封闭高压开关柜内电磁屏蔽强、空间受限与噪声复杂的运行环境, 本文构建了超高频与超声一体化的局部放电在线监测技术体系, 形成传感器、采集与通信电源分层的硬件架构, 配套 FPGA 与 ARM 异构处理、PTP 对时与 IEC 61850 接入的软件链路, 并以小波多尺度去噪、相对对齐与多指标融合实现事件识别与定位。实验室舱体试验采用电晕与沿面缺陷模型和标准脉冲校准, 验证最小可检出放电量不高于 10 pC, 超高频对隐蔽缺陷更敏感, 超声对沿面活动更具响应。现场在某变电站 24 面柜体连续运行三个月, 数据传输成功率保持在 99% 以上, 分级预警准确率约 96%, 融合判据能有效抑制门禁与风机等机械噪声误触发, 并对电缆终端与母线室的弱放电实现稳定捕获与粗定位。结果表明, 本文所提方案兼顾早期缺陷发现、抗干扰与工程可实施性, 可为开关柜状态运维提供可量化支撑。

关键词 高压开关柜; 局部放电在线监测; 超高频; 超声; 多源融合

中图分类号: TM835

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.003

0 引言

局部放电是高压绝缘老化与失效的早期表征之一, 金属封闭开关柜长期承受电应力、热循环与振动, 受导电颗粒、尖端毛刺、表面潮湿污染及场畸变影响, 更易出现隐匿性放电活动。一旦持续发展, 将引发绝缘劣化、臭氧与局部热积累, 最终可能演化为相间短路事件。因此, 面向运行状态的在线监测与早期预警具有显著工程意义。然而, 封闭柜体构成屏蔽腔体, 工频与无线电干扰并存, 机械噪声与空间布局不规则, 使单一通道与单一判据的方法在灵敏度、抗扰性与定位能力上存在不足。超高频方法可在电磁域捕获放电脉冲, 超声方法可在声学域体现沿面与表面电晕特征, 将二者在硬件、时钟与算法层面深度融合, 有望在保证安装可行与运维便利的前提下, 提升缺陷覆盖范围与定位精度。基于此, 本文围绕多源传感、异构采集、同步对时与特征融合, 提出面向开关柜的在线监测系统, 并在实验室与现场开展效果验证, 以期为开关柜状态检修与数字化运维提供方法与实践参考。

1 高压开关柜局部放电在线监测的技术原理

金属封闭高压开关柜长期承受电应力、热循环与振动的影响, 局部放电被界定为绝缘在未完全击穿条件下发生于局部的微放电。其主要缘由囊括导体尖端

与毛刺、导电颗粒游移、固体绝缘微孔及表面潮湿污染, 触头接触不良与场畸变亦会诱发活动。持续放电会把绝缘碳化并产生臭氧与局部热, 进而降低介质耐受并诱发相间短路风险^[1]。围绕该机理, 在线监测以捕获放电伴生的电磁与声学信息为核心。UHF 法把瞬态电流视作激发源, 金属柜体构成屏蔽腔体, 天线或电场探头耦合获取 300 MHz ~ 3 GHz 脉冲, 凭借包络能量、脉冲计数与到达时间来开展识别与定位, 抗工频与广播干扰能力较强, 适宜封闭母线室与断路器室, 安装多采用电磁窗或电容耦合端口。超声波法把气隙崩裂与介质微振动产生的声波作为目标, 传感器对 20 ~ 300 kHz 更敏感, 可选接触式压电或空气耦合布置, 依据幅频特征与多点到达差进行定位, 对表面电晕与沿面放电响应更灵敏, 但易受机械噪声与路径遮挡影响。从集成应用角度看, UHF 利于隐蔽缺陷早期发现, 超声便于运维通道内快速筛查, 二者融合能同步提升检测覆盖与定位精度。

2 高压开关柜局部放电在线监测系统的构建

2.1 监测系统的硬件架构设计

封闭金属开关柜的强电磁与空间受限场景需求下, 硬件被划分为传感器模块、数据采集模块、通信模块以及电源模块, 构成近端敏感、前端抗扰、后端联接

作者简介: 姜勇民 (1977-), 男, 本科, 实验师, 研究方向: 电气供电。

的分层架构。传感器模块含超高频与超声两类：超高频选用电磁窗或缝隙耦合探头，带宽 300 MHz ~ 1.5 GHz，在探头端集成 20 dB 低噪放与限幅，把 50 Ω 同轴短引至采集前端，单柜在母线室与断路器室各布 1 点至 2 点；超声采用压电接触与空气耦合组合，灵敏带宽 20 ~ 300 kHz，配套差分前置与屏蔽双绞线，安装贴近电缆终端与门板内侧。数据采集模块在射频侧设置包络与到达时间双路径：包络路径由带通、检波与 14 bit 125 MS/s 模数转换构成，用于能量与计数提取，到达时间路径采用高速比较器与 100 ps 量化精度时间数字转换进行多探头时差测量；超声侧配置 16 bit 500 kS/s 通道，前置含可编程增益与抗混滤波。底层处理选用 FPGA 与 ARM 异构系统，完成多通道同步与特征提取，时钟由温补晶振与 PTP 对时维持。通信模块提供千兆以太网与光纤环网，站内支持 IEC 61850 MMS 与 Modbus TCP，另设蜂窝链路用于远程维护，接口采用光电隔离与浪涌抑制。电源模块把站用 DC 220 V 隔离降压至 24 V，再级联 12 V 与 5 V，加入 EMI 滤波、TVS 与 SPD，配备 24 V 7 Ah 后备电池或超级电容维持掉电缓冲，机箱按 IP54 防护并单点接地。为降低串扰，把射频同轴与超声线缆分层布线并远离功率走线，模块连接在架构上形成闭环。

2.2 监测系统的软件功能实现

围绕异构硬件，软件系统被组织为实时采集、信号分析、异常报警与历史查询四层^[2]。实时采集层在 ARM 侧配置 DMA 与环形缓冲，把 UHF 包络、到达时间和超声波形聚合成统一帧，时戳由 PTP 与本地时钟提供；驱动完成通道枚举与增益整定，以状态机对溢出、丢包和传感器开路进行自检与恢复。信号分析层由 FPGA 完成脉冲触发与粗筛，ARM 完成去噪、特征与融合：对 UHF 进行噪声门控与脉冲簇聚类，给出幅值、计数与脉宽并构建相位分辨局放图谱；对超声进行自适应增益与短时谱分析，提取幅频包络与到达时间差，借助多探头时差完成柜内粗定位，并把两类信息对齐后输出统一事件，同时设置广播频带抑制与机械噪声指纹比对以剔除非电气脉冲。异常报警层基于能量、重复率、相位分布与定位一致性形成多指标判据，阈值由设备基线与工况字典给定，分为提示、关注与告警三级，采用时间窗确认与抑制抖动策略，报警经 IEC 61850 MMS 与 Syslog 送至站控。历史查询层以时序库存储原始波形、特征与事件索引，建立站点一间隔一柜一传感器模型，提供按时间、柜号与级别的检索与 PRPD 回放，

同时选用分层压缩与按需回传并实施细粒度权限与审计，对外开放 MMS 与 REST 接口服务资产系统取数。

2.3 监测数据的预处理方法

鉴于金属封闭柜体内电磁耦合与机械噪声并存，预处理把原始通道数据进行去噪、干扰抑制、幅值与时基校准以及相位对齐，以支撑后续融合识别。UHF 通道先实施 300 MHz 至 1.5 GHz 带限并进行广播窄带抑制，超声通道选用 30 kHz 至 150 kHz 带限与自适应增益，再对两类数据开展基线漂移校正与饱和段剔除。核心去噪环节运用离散小波变换进行多尺度分解，结合中位绝对偏差估计噪声强度并对细节系数实施软阈值压缩，以在保留脉冲上升沿的同时抑制连续干扰。

$$c_{j,k} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{n-2jk}{2^j}\right) \quad (1)$$

式(1)中， $c_{j,k}$ 为尺度 j 与平移 k 下的小波系数， j 为分解层级， k 为离散平移索引， $x[n]$ 表示离散时间序列， $\psi(\frac{n-2jk}{2^j})$ 为母小波函数， n 为采样点索引。

重构信号在脉冲簇附近获得较高信噪比，事件门控与相位标注因此得以稳定开展^[3]。预处理再把各通道时间标记与工频相位对齐，依靠 PTP 授时与相量参考把脉冲映射至 0 ~ 360 度区间，并以分位数阈值形成自适应触发。特征提取围绕时域与频域双线索展开，时域侧计算峰值、脉宽、上升沿时长、脉冲能量、计数以及相位分布集中度，频域侧给出谱质心、有效带宽、谱峭度与分段能量占比，同时在超声通道依据短时傅里叶变换获得时间频率包络。最终把多通道特征以稳健 z 分数完成归一化并进行异常点抑制，生成面向融合判据的特征向量。

3 高压开关柜局部放电在线监测技术的应用效果评估

3.1 实验室模拟环境下的效果验证

在线监测需在可控电磁环境中对灵敏度以及类型区分能力进行量化评估，本研究把金属封闭舱体搭建为被测场景，舱体内部布置母线室与断路器室等等效腔室，并把超高频电磁窗探头以及压电接触与空气耦合超声传感器要固定在腔壁与电缆终端附近^[4]。高压源选用 50 Hz 工频交流，输出范围覆盖 0 ~ 30 kV，用于可重复条件下激发不同缺陷模型。电晕工况把不锈钢针板电极作为放电体，针尖半径约 20 μm，间隙约 10 mm；沿面工况把环氧板作为介质基体，尺寸约 200 mm × 200 mm × 10 mm，表面均匀铺设导电污染层并维持稳定

湿膜，以形成可控的沿面放电通道。依靠步进升压与稳态保持来控制放电活性区间，把 UHF 包络、到达时间以及超声时频频帧在统一时戳下进行采集，噪声门控、广播频带抑制以及机械噪声指纹比对在采集过程中保持开启。为对比电晕与沿面两类放电的响应差异，分析流程把 UH 脉冲计数、脉宽与相位分布集中度作为主判据，同时把超声谱质心、有效带宽以及分段能量占比纳入交叉验证，进而形成针对相位分辨图谱的识别框架。需重点关注的是，灵敏度校核采用标准脉冲校准器经由 50 pF 耦合支路注入等效电荷，分级设置 5 pC 以及 10 pC 级别，凭借事件门限、PRPD 簇稳定性以及多通道一致性作为通过判据，把最小可检测放电量不高于 10 pC 的目标转化为可检验的过程性要求。为评估抗扰场景适配性，在空载条件下引入舱体风机与继电器吸合等机械扰动，借助抖动抑制与时间窗确认对误触发进行审查，从而把系统在非电气脉冲背景下的触发稳定性纳入方法学验证范围。

3.2 现场实际应用中的效果分析

从园区的高负荷运行实际需求出发，本研究把某地江北新区高新变电站 10 kV 金属封闭开关柜作为应

用对象，覆盖母线、断路器与电缆出线共 24 面柜体，连续监测 3 个月^[5]。系统在站内以 IEC 61850 MMS 接入站控，采集 UHF 包络、到达时间与超声波形，依靠 PTP 授时完成相位对齐，并把分级告警上送。进一步观察发现，梅雨时段空气湿度升高使沿面活动更活跃，超声谱质心轻微上移，而 UHF 脉冲簇统计特性保持稳定，数据传输成功率维持在 99% 以上。需重点关注的是，融合判据把能量、重复率与定位一致性纳入联合约束后，对电缆终端与母线室内的弱电晕和沿面放电呈现更高敏感度，误触发主要来源于门禁闭合与风机启停的机械噪声，被时间窗确认与噪声指纹库有效抑制。从运维处置链条来看，预警准确率保持在 95% 以上，事件多集中于两处馈线间隔的电缆室，工单闭环把潮湿污染与接地不良作为主导风险。为便于复核，站端时序库按站点一间隔一柜一传感器组织索引，支撑 PRPD 图谱回溯与定位过程，关键统计见表 1。

4 结束语

本文提出了面向高压开关柜的超高频与超声融合在线监测方案，实现了传感器选型与布点、双路径采集、异构处理、时钟对齐与标准化通信的完整工程，

表 1 现场应用中局部放电监测数据统计

月份	监测时长 h	数据传输成功率 %	UHF 事件计数	超声事件计数	触发事件总数	产生预警条数	现场复核确认条数	预警准确率 %	误报条数	最小等效放电量 pC
2025-03	744	99.4	1 850	420	2 270	58	56	96.6	2	10
2025-04	720	99.2	2 120	560	2 620	71	68	95.8	3	10
2025-05	744	99.6	1 985	495	2 430	63	61	96.8	2	10

构建以小波多尺度去噪、噪声门控、相位分辨图谱与多指标融合的识别链条。实验室验证表明，系统在等效舱体内对电晕与沿面缺陷均保持稳定响应，最小可检出放电量不高于 10 pC，能够满足早期缺陷发现需求。现场三个月连续运行显示，数据链路稳定可靠，传输成功率超过 99%，融合判据在抑制机械噪声误触发的同时，维持约 96% 的预警准确率，对电缆终端与母线室弱放电实现了可复核的事件定位与回溯。研究为开关柜状态感知、告警分级与工单闭环提供了工程化路径，同时也暴露出传感器布点对定位精度的影响、环境噪声时变性对阈值自适应的挑战与长期运行下基线漂移等问题。后续工作将针对更宽频带与更高密度布点进行优化。

参考文献:

- [1] 李宣宸. 基于超声波的高压开关柜局部放电状态智能监测方法 [J]. 云南电力, 2026(02):29-35.
- [2] 陈蓉. 高压开关柜绝缘故障在线监测与安全预警技术研究 [J]. 产业创新研究, 2025(14):132-134.
- [3] 赵贤文, 马有德, 张远鸿, 等. 高压开关柜局部放电在线监测系统的分析与研究 [J]. 机器人产业, 2023(06):83-87.
- [4] 李钊枢, 林宪峰, 余佳玺, 等. 基于脉冲电流法的高压开关柜局部放电在线监测系统的设计 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(11):43-47.
- [5] 张精杉. 基于 VMD-PSOChOA-ELM 算法的高压开关柜内局部放电检测与模式识别研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.

热能暖通机组机械制造工艺改进与节能技术研究

王凡胜¹, 刘鹏², 陈双庆³

- (1. 济南市特种设备检验研究院, 山东 济南 250001;
2. 烟台裕峰专用机械设备有限公司, 山东 烟台 264006;
3. 胜利油田万和石油工程技术有限责任公司, 山东 东营 257200)

摘要 热能暖通机组是建筑供暖、通风、制冷的核心装备, 大量投用于住宅、商业楼宇、工业厂房等场景, 其制造工艺水平直接影响机组运行稳定性、能耗效率及使用寿命。现阶段热能暖通机组机械制造中广泛存在工艺精度不足、装配流程不规范、能耗管控不精细等问题, 造成机组运行能耗偏高、故障频发, 无法契合节能环保的行业发展需求。本文围绕热能暖通机组的结构特性与制造要求, 梳理机械制造工艺与节能技术的核心内涵, 剖析现有制造工艺的短板及节能堵点, 搭建系统完备的工艺改进与节能技术体系, 提出针对性的工艺改进方案与节能优化路径, 通过试验验证体系的可行性与有效性。试验数据显示, 改进后的制造工艺可大幅提高机组制造精度与装配效率, 配套节能技术可让机组运行能耗降低18%以上, 故障发生率下降85%, 实现制造过程与运行阶段的双向节能增效, 为热能暖通机组机械制造工艺升级与节能技术推广提供参考, 符合行业节能环保发展导向。

关键词 热能暖通机组; 机械制造工艺; 零部件加工; 节能技术; 能耗优化

中图分类号: TU83; TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.004

0 引言

热能暖通机组作为暖通空调系统的核心组成部分, 承担着室内温度调节、通风换气、能量转换的重要功能, 其制造质量与节能性能直接影响建筑能源消耗与使用体验。热能暖通机组结构复杂, 涵盖压缩机、换热器、冷凝器、风机等多个核心零部件, 制造过程涉及机械加工、装配、检测等多个环节, 对制造工艺的精度、效率及节能性提出较高要求。

当前热能暖通机组机械制造过程中仍存在诸多薄弱环节, 零部件加工精度不足导致装配间隙不合理, 装配流程混乱影响机组运行稳定性, 同时制造工艺与节能技术融合不够深入, 机组运行阶段能耗偏高, 难以满足当前节能环保的发展需求。

基于此, 聚焦热能暖通机组机械制造工艺短板与节能瓶颈, 开展工艺改进与节能技术研究, 优化制造流程、提升工艺水平、研发适配的节能技术, 实现机组制造与运行的双重节能, 成为解决当前行业困境的关键。

1 热能暖通机组机械制造与节能核心内涵及特征

1.1 核心内涵

热能暖通机组机械制造工艺是指围绕机组核心零部件(压缩机、换热器、冷凝器等)开展的机械加工、冲压、焊接、装配、检测等一系列系统性工艺的总称, 其核心目标是提升零部件加工精度、优化装配质量, 确保机组结构合理、运行稳定。节能技术则是指在机组制造与运行全过程, 通过优化工艺、改进结构、采用高效节能材料与设备, 降低能源消耗、提升能源利用效率的各类技术与措施的总和^[1]。二者相辅相成、有机融合, 制造工艺的改进可为节能技术的应用奠定基础, 提升节能效果; 节能技术的融入可优化制造过程的能源消耗, 推动制造工艺向绿色化、高效化升级, 最终实现热能暖通机组“制造节能、运行节能”的双重目标, 兼顾制造效率、产品质量与节能环保。

1.2 制造工艺与节能技术特征

热能暖通机组机械制造工艺具有鲜明的行业特征: 一是精度要求高, 机组核心零部件(换热器管路、压

作者简介: 王凡胜(1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 热能暖通。

缩机转子)的加工精度直接影响机组密封性能与能量转换效率,需严格控制加工误差;二是流程复杂性高,制造过程涵盖多个环节,各环节衔接紧密,任一环节出现问题都会影响整体制造质量;三是关联性强,零部件加工、装配、检测等环节相互影响,需实现全流程协同管控;四是绿色化需求高,制造过程中需减少原材料浪费、降低能源消耗,契合节能环保发展导向。

节能技术则具有适配性、系统性、高效性的特征:一是适配性,节能技术需结合热能暖通机组的结构特点与运行工况,针对性优化能量转换、传热传质过程,确保节能效果;二是系统性,节能技术贯穿机组制造、装配、运行全阶段,需从工艺、结构、材料等多方面协同优化;三是高效性,节能技术需在不影响机组运行性能、使用寿命的前提下,最大限度降低能耗,提升能源利用效率^[2]。

1.3 主要影响因素

热能暖通机组机械制造工艺与节能效果,受工艺、设备、材料、管理四大因素影响:一是工艺因素,加工工艺、装配工艺、检测工艺不合理,会导致零部件精度不足、装配间隙过大,增加机组运行能耗与故障风险;二是设备因素,制造设备精度不足、性能老化,会影响加工质量与制造效率,同时增加制造过程能耗^[3];三是材料因素,原材料质量不达标、节能材料应用不足,会降低机组密封性能与传热效率,导致运行能耗偏高;四是管理因素,制造流程管控不严格、作业人员操作不规范、节能管理意识不足,会导致工艺改进措施落实不到位,节能效果难以发挥。

2 研究方法与工艺改进及节能技术体系构建

2.1 研究方法

采用理论分析与试验研究相结合的方法开展研究:通过理论分析,明确热能暖通机组机械制造工艺的核心环节、现存短板及节能瓶颈,梳理工艺改进与节能技术的核心要点,构建工艺改进与节能技术体系框架;选取典型热能暖通机组(冷水机组、空气源热泵机组)作为试验对象,应用改进后的制造工艺与节能技术,设置传统制造与节能模式作为对照组,对比分析制造精度、装配效率、运行能耗、故障发生率等核心指标,验证体系的可行性与优越性,优化完善工艺改进方案与节能技术^[4]。

2.2 工艺改进与节能技术体系构建

2.2.1 体系框架

结合热能暖通机组制造需求与节能目标,构建“工

艺改进层—节能技术层—管控保障层”三层体系,各层协同联动、职责明确,形成“工艺优化—节能赋能—管控落地”的闭环管理,实现机组制造过程与运行阶段的双重节能增效,兼顾制造质量、效率与节能环保。

工艺改进层负责优化机组机械制造全流程工艺,解决加工精度不足、装配不合理等短板;节能技术层负责研发与应用适配的节能技术,降低制造与运行能耗;管控保障层负责人员、制度、设备、材料等全方位保障,确保工艺改进措施与节能技术落地见效,实现全流程协同管控。

2.2.2 核心工艺改进方案

1. 零部件加工工艺改进:针对核心零部件加工精度不足的问题,优化加工工艺参数,采用高精度切削、磨削工艺替代传统加工工艺,减少加工误差,将零部件加工精度控制在 ± 0.01 mm以内。对换热器管路采用精密冲压工艺,优化管路成型角度与壁厚均匀性,提升传热效率;对压缩机转子采用数控加工工艺,优化转子轮廓设计,减少运行过程中的能量损耗。同时,引入自动化加工设备,替代人工加工,提升加工效率与精度稳定性,减少加工过程中的原材料浪费与能源消耗。

2. 装配工艺改进:梳理传统装配流程的弊端,优化装配顺序与流程,采用“分组装配+精准定位”的装配模式,先对核心零部件进行分组检测,筛选合格零部件,再通过精准定位装置确保装配间隙合理,避免因装配偏差导致的密封不严、运行异响等问题。优化机组管路连接工艺,采用焊接机器人替代人工焊接,提升焊接质量与密封性,减少制冷剂泄漏导致的能耗增加。同时,建立装配质量检测机制,每道装配工序完成后进行严格检测,确保装配质量达标。

3. 检测工艺改进。建立全流程检测体系,完善检测方法及设备,在零部件加工阶段,选用高精度检测仪器(三坐标测量仪)对加工精度开展全程检测,及时排查并整改加工缺陷;在装配阶段,选用气密性检测、压力检测等手段,核验机组密封性能与运行稳定性;在机组出厂前,开展全负荷运行测试,监测机组能耗、运行噪声、故障情况等指标,保障机组符合节能与质量标准。

2.2.3 核心节能技术应用

1. 制造过程节能技术:完善制造设备运行参数,引入变频调控技术,根据加工需求调整设备运行功率,降低设备空载运行能耗;选用节能型加工设备与刀具,减少加工过程中的能源消耗与原材料损耗;完善车间

通风、照明系统,选用LED节能灯具与智能通风设备,降低车间辅助能耗,实现制造过程的绿色节能。

2. 机组运行节能技术:完善机组结构设计,选用高效换热器与冷凝器,提高传热传质效率,降低能量损耗;在压缩机中引入变频节能技术,根据机组运行负荷自动调整压缩机转速,避免机组满负荷运行造成的能耗浪费;选用新型节能制冷剂,替代传统高能耗制冷剂,提高制冷制热效率,降低运行能耗。同时,引入智能管控系统,全程监测机组运行参数,自动调整运行状态,保障机组在最佳节能工况下运行。

3. 节能材料应用技术:选用高强度、低损耗、高导热的节能材料,替代传统材料用于零部件制造,如选用铝合金材料替代钢材制作换热器管路,提高传热效率的同时减轻零部件重量,降低机组运行负荷;在机组外壳选用保温隔热材料,降低热量损耗,提高机组运行节能效果,同时减少制造过程中的材料消耗^[5]。

2.2.4 体系保障措施

为确保工艺改进与节能技术体系落地见效,采取四大保障措施:一是人员保障,加强作业人员与管理专业的培训,提升其工艺操作能力、节能意识与管理水平,定期开展工艺改进与节能技术培训,考核合格者方可上岗,明确各岗位责任分工,落实岗位责任制;二是制度保障,完善机械制造工艺管理制度、质量检测制度、节能管理制度等,细化管理流程,明确各项工作的具体要求与完成时限,定期对制度执行情况进行检查,及时修订完善不匹配生产实际的条款;三是设备保障,加大节能型制造设备、检测设备的投入,定期对设备进行维护保养,确保设备性能稳定,提升制造精度与节能效果,建立设备更新机制,及时淘汰老化、高能耗设备;四是材料保障,严格把控原材料质量,优先选用节能型原材料与零部件,建立原材料采购与检测机制,杜绝不合格材料进入生产环节,为工艺改进与节能技术应用提供物质支撑。

3 试验结果与讨论

3.1 试验结果

试验周期内,对比工艺改进与节能技术应用组(试验组)与传统制造与节能模式组(对照组)的核心指标,结果显示:试验组零部件加工精度达标率为99.2%,较对照组(82.5%)提升16.7%;试验组机组装配效率较对照组提升45%,装配合格率提升18.3%;试验组制造过程能耗较对照组降低22%,原材料浪费率降低30%;试验组机组运行能耗较对照组降低18.5%,故障发生率为0.7%,较对照组(4.7%)下降85.1%;试验组机组

运行稳定性与使用寿命均显著优于对照组,工艺改进与节能技术应用效果显著。

3.2 结果讨论

试验结果表明,构建的热能暖通机组机械制造工艺改进与节能技术体系具有显著的优越性,可有效解决传统制造工艺精度不足、装配不合理、能耗偏高等问题,其核心优势体现在精度提升、节能高效、稳定性强三个方面。

精度提升体现在通过优化加工、装配、检测工艺,引入高精度设备与技术,显著提升了零部件加工精度与装配质量,减少了因精度不足导致的故障风险;节能高效体现在制造过程与运行阶段的双重节能,通过工艺优化、节能技术应用与节能材料选用,大幅降低了制造与运行能耗,提升了能源利用效率;稳定性强体现在通过全流程管控与保障措施,确保了工艺改进与节能技术的稳定落地,提升了机组运行稳定性与使用寿命,契合行业节能环保与高质量发展需求。

4 结束语

针对热能暖通机组机械制造工艺短板与节能瓶颈,结合机组制造特点与节能需求,通过理论分析与试验研究,明确了制造工艺与节能技术的核心内涵、特征与影响因素,构建了“工艺改进层—节能技术层—管控保障层”三层体系,提出了针对性的工艺改进方案与节能技术应用路径,验证了体系的可行性与有效性。研究表明,改进后的制造工艺可显著提升机组制造精度与装配效率,配套节能技术可有效降低制造与运行能耗,减少故障发生率,实现双重节能增效,有效解决了传统制造与节能模式的短板,为热能暖通机组机械制造工艺升级与节能技术推广提供了科学可行的技术支撑与实践参考,对推动暖通行业绿色低碳、高质量发展具有重要作用。

参考文献:

- [1] 刘俊红,徐振红,袁静静,等.温湿度独立控制空调系统在数据中心的应用研究[J].暖通空调,2025,55(04):144-152.
- [2] 贺金,匡胜严,谢焱,等.离心式空压机余热制冷/热系统分析[J].暖通空调,2024,54(08):61-66.
- [3] 雷鹏,刘稼榕,王军,等.基于边缘计算的换热站控制系统的应用与分析[J].暖通空调,2024,54(S01):22-24.
- [4] 狄海燕,连大旗,刘方舟,等.绿色建筑技术在某中央厨房暖通空调设计中的应用[J].制冷,2025(03):14-19.
- [5] 骆世杰.建筑暖通空调工程节能技术的创新及应用分析[J].前卫,2024(07):177-179.

退役电力设备循环利用技术规范与管理机制研究

何远正, 薛波

(中国能源建设集团西北电力试验研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要 随着智能电网建设的推进与电力设备更新迭代速度的加快, 退役电力设备的数量逐年攀升。此类设备具有较高的剩余价值, 但当前循环利用过程中存在技术标准不统一、管理机制不完善等问题, 造成资源浪费与环境压力。本文结合输配电工程标准化建设要求、电力设备编目数据模型成果及物资循环利用实践经验, 系统梳理退役电力设备循环利用的核心技术环节, 构建科学的技术规范体系, 提出适配电力行业特点的管理机制, 以期为提升退役电力设备循环利用效率、推动电力行业绿色可持续发展提供参考。

关键词 退役电力设备; 循环利用; 技术规范; 管理机制; 标准化

中图分类号: X705

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.005

0 引言

电网企业作为设备密集型、资金密集型企业, 其电力设备技术寿命普遍在 10~20 年, 机械寿命可达 15~30 年, 部分核心设备经规范维护后使用寿命甚至可延长至 35 年以上。近年来, 随着智能电网建设提速、新型电力系统构建推进, 以及特高压、分布式光伏、储能等新业态的快速发展, 电力设备更新迭代周期显著缩短, 大量设备因技术升级、增容改造、区域电网规划调整、安全标准提升等原因提前退役。当前, 我国退役电力设备循环利用已具备一定实践基础, 除福建省电力有限公司外, 国家电网、南方电网等央企也逐步探索形成了各具特色的循环利用模式^[1]。但从行业整体发展水平来看, 退役电力设备循环利用仍处于初级阶段, 尚未形成全链条、标准化、规模化发展格局, 面临诸多瓶颈制约。在技术层面, 缺乏统一的退役设备检测、评估、修复及再利用技术标准, 不同厂家、不同批次设备的参数差异较大, 导致设备兼容性差、再利用风险高, 部分再利用设备因性能不稳定引发电网运行隐患。在管理层面, 存在编目数据不规范、全寿命周期管理缺失、交易机制不健全、激励约束不足等问题, 加之行业监管体系不完善、法律法规支撑滞后, 进一步制约了循环利用工作的规范化推进^[2]。基于此, 结合现有研究成果与行业实践经验, 针对性构建退役电力设备循环利用技术规范体系, 优化管理机制, 为推动行业循环利用标准化、规模化发展提供理论支撑与实践参考。

1 退役电力设备循环利用技术规范体系构建

1.1 退役检测技术规范

退役检测是循环利用的前提与基础, 其核心目标是全面掌握设备技术状态, 判定设备剩余价值与处置方向, 为后续评估、修复、再利用或拆解环节提供科学依据。需针对不同设备类型、不同退役原因, 制定专项检测标准, 明确检测项目、检测方法、试验条件与合格指标, 确保检测结果准确可靠、具有可比性。检测工作需由具备相应资质的专业机构开展, 检测人员需经专业培训考核合格后方可上岗, 检测过程需严格遵循操作流程, 同步记录检测数据与试验现象, 形成完整的检测报告, 确保检测过程可追溯、检测结果可验证^[3]。参考《电力变压器 第 1 部分: 总则》(GB/T 1094.1-2013)、《高压交流断路器》(GB/T 1984-2024) 等标准, 按设备类型分类制定检测技术规范^[4]。

1.2 价值评估技术规范

基于设备全寿命周期台账与标准化检测结果, 构建“技术剩余寿命—经济价值”双维度评估模型, 科学判定设备处置方向, 精准核算设备剩余价值, 为交易定价与资源调配提供依据。技术剩余寿命评估采用加权评分法, 结合设备检测结果、运行状态、维护历史等因素, 选取核心评估指标, 赋予合理权重, 量化评估设备技术状态与剩余使用寿命。为提升评估准确性, 可针对不同设备类型优化指标权重与评分标准。对变压器、断路器等主设备, 适当提高检测合格项占

作者简介: 何远正 (1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 汽轮机整套调试及性能试验。

比与故障历史指标的权重。对配网设备,可适当放宽运行年限指标的评分标准,重点关注绝缘性能与机械可靠性^[5]。同时,引入动态调整机制,根据设备再利用场景、运行环境等因素,对评估结果进行修正,如用于农网、临时供电工程的设备,可适当降低技术等级要求。用于核心电网区域的设备,需严格执行一级设备标准,确保运行安全。

1.3 修复与再利用技术规范

可修复设备需遵循“标准化修复、兼容性适配、质量可控”原则,明确修复工艺、质量要求与验收标准,确保修复后设备性能达标、运行可靠。修复工作需由具备相应资质的专业修复企业开展,修复企业需配备先进的修复设备、检测设备与专业技术人员,建立完善的修复质量管控体系,严格按照修复技术规范开展工作。修复前,需结合设备检测报告与评估报告,制定针对性修复方案,明确修复项目、修复工艺、修复材料、修复周期与质量控制点,修复方案需经设备所属单位与修复企业联合审核确认后实施。

再利用环节需遵循“梯次利用、适配场景、安全优先”原则,结合设备技术等级、性能指标与市场需求,科学划分再利用场景,优化资源配置效率。梯次利用需构建“高等级设备优先保障核心场景、低等级设备适配基础场景”的利用模式。一级设备多为技术状态良好、性能稳定的主设备,可调配至城市核心电网、工业园区电网等对设备性能要求较高的场景,作为主力设备使用,也可用于电网增容改造、新建项目配套,替代新设备采购^[6]。二级设备性能略低于一级设备,可调配至欠发达地区电网、农网、临时供电工程等场景,满足基础供电需求,降低建设成本。无法满足供电需求但结构完整、无安全隐患的设备,可改造为教学实训设备、科研试验设备,用于电力院校教学、企业员工培训与科研机构技术研发,实现价值再挖掘。

1.4 拆解回收技术规范

对无再利用价值的三级设备,需按“环保优先、资源回收、安全处置”原则,规范开展拆解回收工作,避免环境污染,提升资源回收利用率。拆解回收工作需由具备环保资质与拆解能力的专业企业开展,拆解企业需配备专业的环保设备、拆解设备与安全防护设备,建立完善的环保管理制度与安全操作规程,拆解人员需经专业培训考核合格后上岗,严格遵守环保与安全要求。拆解前,需对设备进行预处理,排空变压器油、SF₆气体、绝缘油等有害物质,分类收集、规范处置:变压器油经真空过滤、吸附、蒸馏等工艺净化处理后,符合标准要求的可用于其他设备或作为工业燃料再利用,无法净化利用的需作为危险废物交由具

备资质的单位处置,严禁直接排放。SF₆气体采用专业回收提纯设备回收,提纯后纯度达到99.9%以上可循环利用,无法提纯的需采用无害化处理工艺分解,避免泄漏造成温室效应^[7]。其他绝缘油、液压油等有害物质,需装入专用密封容器,张贴危险废物标识,交由专业单位处置。

2 退役电力设备循环利用管理机制优化

2.1 标准化编目管理机制

依托国家电网物资主数据管理系统,整合现有编目资源,构建退役电力设备专用编目数据模型,实现退役设备数据的标准化、规范化管理,打破“信息孤岛”,支撑跨区域、跨部门数据互通共享。编目数据模型构建需参考《军民通用资源数据模型编制要求》(GB/T 37944-2019),结合退役电力设备循环利用全流程需求,统一数据描述规则、编码规则与分类标准,确保数据的一致性、完整性与可扩展性。数据模型包含四大核心模块,覆盖设备全生命周期信息,实现数据从退役到循环利用的全程追溯。

设备基础信息模块,主要记录设备固有属性信息,包括设备唯一标识符、型号规格、生产厂家、生产日期、额定参数、材质信息、结构特征、出厂检测报告编号等内容。运行信息模块,记录设备运行全周期状态信息,包括投运时间、运行地点、运行年限、维护记录、故障历史、状态监测数据、退役原因等内容。检测评估信息模块,记录设备退役后的检测与评估信息,包括检测机构、检测时间、检测项目、检测结果、检测报告编号、评估单位、评估时间、技术等级、剩余寿命、评估价值、处置建议等内容。处置信息模块,记录设备后续处置全流程信息,包括处置方式、修复企业、修复方案、修复验收结果、再利用流向、拆解回收企业、资源回收种类与数量、有害物质处置情况、交易信息等内容。

2.2 全生命周期管理机制

构建“规划—采购—运行—退役—循环利用”全环节闭环管理体系,明确各部门、各单位职责分工,建立协同工作机制,实现退役电力设备全生命周期精细化管理。

规划阶段,将设备循环利用潜力纳入电网项目规划设计指标,推行电网项目标准化设计与模块化建设,提高设备通用性、可拆解性与可修复性,避免因设计不合理导致设备退役后难以循环利用。在电网规划方案论证中,增加设备循环利用可行性分析章节,预测设备退役周期与数量,提前规划再利用场景与拆解回收路径,为后续循环利用工作奠定基础。采购阶段,优化设备采购标准,将模块化设计、易拆解、可修复、

环保材料使用、全寿命周期成本等指标纳入采购评标体系,提高指标权重,优先选用符合循环利用要求的设备与生产厂家。

运行阶段,建立设备精细化运维体系,加强设备状态监测与定期维护,采用在线监测、红外测温、油中溶解气体分析等技术手段,实时掌握设备运行状态,及时发现并处理轻微故障,延长设备使用寿命。建立完善的设备运行台账,详细记录设备运行数据、维护记录、故障历史、状态评估结果等信息,为退役检测、评估提供完整的数据支撑。

退役阶段,严格执行“鉴定在先、处置在后”原则,建立规范的退役设备鉴定流程,由设备所属单位、运维单位、检测机构联合开展退役鉴定,结合设备运行状态、技术水平、安全标准等因素,确定设备退役合理性,避免设备过度退役或延迟退役。对确定退役的设备,及时完成数据台账更新与设备移交,明确移交双方责任,确保设备安全、完整移交至检测评估环节,同步提交设备运行台账、维护记录、故障报告等相关资料。

循环利用阶段,建立设备跟踪管理机制,对直接再利用、修复后再利用的设备,跟踪其运行状态、维护情况与使用寿命,及时更新循环利用数据台账。对拆解回收的设备,跟踪资源回收情况与有害物质处置情况,确保拆解回收工作规范开展。同时,建立全生命周期反馈机制,将循环利用过程中发现的设备设计、制造、运维问题反馈至规划、采购、运行部门,优化设备设计标准、采购标准与运维规程,形成“管理—实践—优化”的闭环循环,持续提升退役电力设备循环利用水平。

2.3 高效交易流通管理机制

搭建全国统一的退役电力设备网上交易平台,整合国家电网、南方电网及地方电力企业的退役设备资源,打造“信息发布、查询、竞价、交割、结算、物流对接、第三方检测认证”一体化服务平台,实现退役设备交易全流程线上化、规范化、透明化。平台需具备完善的功能模块:信息发布模块,供应单位按标准化格式录入设备基础信息、检测报告、评估报告、处置方式、最低交易价格等内容,经平台审核后发布,确保信息真实准确。信息查询模块,需求单位可按设备类型、技术等级、运行年限、价格范围等条件精准检索设备信息,查看相关检测报告与评估报告。竞价交易模块,采用“最低限价+公开竞价”模式,明确竞价规则、竞价周期与加价幅度,需求单位在线参与竞价,最高价者成交,平台实时公示竞价过程,确保交易公平公正。交割结算模块,明确交易双方权利义务,提供线上合同签订、货款结算服务,支持银行转账、电

子支付等多种结算方式,保障资金安全。物流对接模块,整合专业物流资源,为跨区域交易设备提供物流报价、运输跟踪、现场交接等配套服务,降低物流成本。

2.4 激励与监管机制

建立绩效激励体系,将退役设备循环利用率、成本节约金额等指标纳入电力企业绩效考核。对循环利用成效显著的单位给予资金奖励、评优优先等激励。对员工个人设立专项奖励,鼓励提出循环利用优化建议。推行税收优惠政策,对从事退役设备修复、再利用的企业减免增值税、企业所得税,激发市场主体积极性。完善监管机制,由电力监管部门、环保部门联合开展行业监管。明确再利用设备市场准入条件,严禁不合格设备流入电网。加强拆解环节环保监管,对违规排放、随意处置的企业依法处罚。建立信用评价体系,对交易双方进行信用评级,失信主体纳入黑名单,限制参与行业交易活动。

3 结束语

退役电力设备循环利用是电力行业实现绿色可持续发展的重要路径,其标准化、规范化发展离不开完善的技术规范与高效的管理机制。本文结合现有研究成果与实践经验,构建了覆盖“检测—评估—修复—再利用—拆解”全流程的技术规范体系,优化了编目管理、全寿命周期管理、交易流通管理、激励监管四大机制,为解决行业当前存在的标准不统一、管理不完善等问题提供了方案。未来,需进一步加强技术创新,研发高效检测、修复技术,提升设备再利用价值。完善法律法规体系,强化标准执行力度。电力行业各方需深化合作,共同推进退役电力设备循环利用标准化建设,为电力行业高质量发展注入绿色动力。

参考文献:

- [1] 余泽远,张继钢,钱瞳,等.数字孪生技术助推电力设备降本增效[J].中国电力企业管理,2022(21):62-63.
- [2] 田海波,何萍.基于实物唯一编码的电力设备退役处置全流程优化系统设计与实现[J].电气技术,2021,22(03):74-79.
- [3] 杨静,王震宇.智能电网背景下电力设备全寿命周期状态监测与故障诊断技术[J].产品可靠性报告,2025(12):107-109.
- [4] 谢从珍,钟安,王仕稳,等.退役电力设备用环氧树脂回收再利用研究进展及展望[J].高电压技术,2026,52(01):169-192.
- [5] 吴伟伟,张华荣,汤井乐.大型退役电网设备循环利用方法研究[J].中国市场,2025(20):46-50.
- [6] 张中印,袁洪跃.基于全生命周期的电力设备环境分析与综合性能评估[J].环境技术,2024,42(09):226-233,241.
- [7] 同[4].

机电设备能耗映射模型构建及节能型检修策略应用研究

张春莉

(宝鸡钛业股份有限公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要 本文围绕机电设备运行过程中的能耗形成机理和识别方法, 建立运行状态下的能耗映射模型。从电能到机械能的转换过程出发, 分析摩擦损耗、电磁损耗、系统阻力等主要来源, 确定能耗的构成基础; 整合运行参数、状态信息、控制变量, 建立多维数据关联结构, 提出同工况对比分析方法, 区分负荷变化和效率下降。在此基础上, 对高耗能问题的演化路径和类型进行划分, 提出面向能效提升的分级检修策略, 构建“识别—检修—验证”的闭环机制, 以期使能耗问题得以持续改善, 为机电设备节能管理提供可参考的分析路径。

关键词 能耗映射模型; 节能检修; 状态维护

中图分类号: TH17

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.006

0 引言

机电设备是工业系统中的重要能量转换部件, 运行状态好坏直接影响整个能耗水平。传统能耗分析大多以结果统计为主, 不能揭示能耗变化的内在机理, 造成高耗能问题识别存在偏差。设备在长时间运行过程中会受到磨损、控制偏差、系统阻力变化等各方面的影响, 容易产生隐性能耗, 增加运行成本。因此, 有必要从运行过程出发, 建立可以反映状态变化和能耗关系的分析方法。本文采用能耗映射模型, 利用多源数据整合和分层分析, 研究机电设备能效管理问题。

1 机电设备能耗映射模型的构建基础

1.1 机电设备能耗的形成机理

在机电设备在运行过程中, 其能耗本质上是电能向机械能、其他形式能量的转化。能量转换过程中除了有效输出外, 还会不可避免地产生机械摩擦损耗、电磁损耗、流体阻力损耗和控制调节过程中产生的附加损耗等。这些损耗一起成为设备实际能耗水平的重要组成。

从电气角度看, 设备的瞬时功率可由电参数表示为:

$$P = \sqrt{3}UI \cos\varphi \quad (1)$$

式(1)中, P 为有功功率, U 为电压, I 为电流, $\cos\varphi$ 为功率因数。该公式说明设备能耗水平和电流大小有关, 但还和电压稳定性和功率因数有关。当设备运行状态发生改变的时候, 上述参数也会随之变化, 进而体现出不同的能耗特点。

设备在一段时间内的能量消耗可表示为:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (2)$$

式(2)中, W 为设备在选定运行时段内的累计能耗, $P(t)$ 为设备在 t 时刻对应的瞬时功率, t 为时间变量, 积分区间对应所考察的设备运行时间范围, 该公式表明, 能耗就是功率随时间变化的累计。因此, 在对机电设备能耗进行分析的时候, 不能只看瞬时功率, 还要考虑运行时长、负荷的持续性以及运行模式的变化等, 才能得到对能耗特性全方位的描述^[1]。

1.2 能耗映射模型的基本内涵

能耗映射模型核心就是建立设备运行状态和能耗变化的对应关系, 从而实现了对能耗形成机理结构解构。不同于传统以统计结果为导向的分析方式, 它把运行过程当作切入点, 把各种数据整合起来并加以系统分析。就实际情况来说, 应该把运行参数、状态信息、控制变量和维护记录都纳入分析框架当中, 利用时间维度以及逻辑关系的结合, 找出各个因素对能耗变化的影响途径。在该体系中, 运行参数用来表征负荷水平, 状态参数反映设备健康状况, 控制参数体现运行调节策略, 维护信息记录设备干预过程。通过多维变量的交叉分析, 可以把能耗异常分解成效率下降、阻力增大或者控制偏差等问题, 从而大大提高问题识别的针对性和可解释性。该模型把能耗分析由单个结果判定转变为机理导向分析, 为检修决策提供直接支撑。

作者简介: 张春莉(1987-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械工程。

1.3 模型构建中的边界与对象划分

在创建能耗映射模型的时候,确定分析边界以及对象划分是保证模型有效性的前提条件。机电系统一般具有很强的耦合性,单台设备的能耗变化常常受到系统运行状态和上下游工况的影响。因此,如果只从单机的角度来分析,就会产生判断偏差,有必要从分层结构出发进行系统的建模。通常可以从设备层、工序层、系统层这三个方面进行划分。设备层主要是对单机运行特性以及局部效率问题进行分析,工序层主要是对设备在具体任务中所起的作用进行分析,可以找出不同的工况下能耗的差异,系统层主要是分析多设备协同运行的关系,可以评价整体的能效水平。使用分层建模的方法可以有效地将局部问题和系统性问题区分开来,避免出现分析片面化的状况,并且为之后检修策略的分级执行赋予结构化的依循准则^[2]。

2 基于映射模型的高耗能问题识别

2.1 负荷变化与效率下降的区分

在机电设备运行过程中,能耗增加并不一定意味着设备有异常,其原因既可以是任务负荷增加或者工况加强,也可以是由于设备效率下降造成的附加损耗。两者在表征上都表现为功率上升或者电耗增加,但是内在机理和处理路径存在本质的区别。前者属于需求侧的变化,需要结合工艺条件、运行强度、产出水平来综合分析;后者属于设备性能的变化,应该主要排查传动状态、部件磨损、系统阻力、维护质量等因素。根据能耗映射模型,可以比较相近工况下输入能量和有效输出,找出超出正常负荷范围的附加能耗。单位任务能耗不断偏高的时候,一般就表明设备已经偏离了合理的效率区间,应该进行有针对性的诊断。需要注意的是,只根据能耗绝对值来判断,很容易把负荷变化误判为效率下降,从而影响到检修决策的准确性。

2.2 高耗能问题的形成路径

机电设备高耗能问题一般不会突然产生,而是沿着“局部退化—性能下降—能耗放大”的路径慢慢发展。初期阶段主要为轻微的温升、振动波动或者响应迟滞等现象,对运行影响不大,容易被忽略。由于磨损累积、润滑失效、结垢堵塞、控制参数偏移等因素的不断加剧,设备内部能量损耗也越来越大,功率增大、效率降低、运行稳定性变差。若不及时干预,将演变为持续性高耗能问题。能耗映射模型的价值就在于可以对这个演化过程进行分阶段识别,把分散的异常信号纳入统一的分析框架中,从而实现从事后识别到提前预警的转变,提高问题处置的前瞻性、有效性。

2.3 高耗能问题的类型划分

为了使识别结果更有针对性,有必要根据形成机理将高耗能问题分类。一般可以分为设备效率下降型、控制失配型、系统阻力异常型和维护不足型。设备效率下降型主要是指在相同工况下能量消耗增大,多与磨损、老化、传动损失有关;控制失配型主要是由于设定值偏高或者调节逻辑不合理造成的,其本质就是运行方式不经济;系统阻力异常型多发生在泵、风机和管网系统中,表现为局部负荷被系统问题放大;维护不足型与清洁、润滑、校准不到位造成的长期内耗有关。

对高耗能问题进行机理分类,可以避免采用一刀切的处理方式所造成的决策偏差,也为后面制定不同的检修策略提供了依据^[3]。

3 节能型检修策略的构建与实施

3.1 检修目标的转变

节能型检修是恢复设备基本运行功能的同时,使设备运行效率得到同步提高的一种检修方式。传统检修一般以设备能够正常启动、运行、停机,满足基本负荷需求为检修目标,虽然可以保证生产连续性,但是忽略了设备在实际运行过程中的能效表现。实际上,一些设备处于可以运行的状态下,但其内部损耗过大或者能量利用率不足,存在隐性能耗。因此,检修目标应由“恢复运行”转变为“恢复高效运行”。设备效率可表示为:

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

式(3)中, η 为设备运行效率, P_{out} 为设备有效输出功率, P_{in} 为设备输入功率, $\times 100\%$ 表示将有效输出功率与输入功率的比值换算为百分数形式。该指标体现的是输入能量向有效输出的转化程度。检修时要结合效率变化对设备运行状态进行综合评价,不能只以设备是否恢复运行为唯一判据,实现检修由功能恢复向能效优化的转变。

3.2 分级检修策略

节能型检修并不意味着对所有的设备采取同样的措施,而应该根据能耗偏离的程度、状态异常的水平以及它对系统运行的影响来实行分级管理。对于能耗长期偏高、状态参数同步异常的设备,应作为重点对象进行处理,必要时对系统产生高耗能风险的局部问题进行停机检修。对于能耗呈现趋势性上升但还没有形成明显异常的设备,更适宜采取预防性维护方式,用局部调整和状态修复来提前控制问题。对于由于控制策略不合理造成的高耗能现象,首先应该从参数优

化、运行方式调整入手,不能直接进行结构拆检。

3.3 关键节能检修措施

节能型检修要以影响能量转换效率和运行阻力的有关因素为对象。从实际运行机理来说,大部分高耗能问题都是由于长时间的积累造成的隐性损耗。因此应该重点做好清洁疏通、润滑密封、传动校正等工作,消除结垢堵塞、降低摩擦损失、减少附加机械阻力,控制参数优化以避免设备在不合理设定下运行^[4]。

3.4 检修后的效果验证

节能型检修的有效性,不在于检修过程本身,而在于它能否在实际运行中达到能效改善的效果。如果没有系统的验证环节,检修工作就会停留在经验判断的层面,不能形成闭环管理。效果验证要从多个方面入手:一是近似工况下检修前后能耗的比较,看额外损耗是否得到控制;二是对关键状态参数的变化情况做核对,判断温升、振动、压差等是否同步变好;三是设备运行状态的周期性跟踪,防止短期改善后出现反弹。检修验证不能只当作一次性的验收手段,而应该成为模型修正的重要依据。

4 机电设备能耗映射模型应用路径分析

4.1 数据整合与基础支撑构建

在实际应用中,首先要对机电设备的相关数据进行系统化整合,不能简单地汇总。重点围绕运行参数、状态信息和维护记录做统一采集和标准化处理。具体而言,应当确定电流、电压、功率、流量、压力等主要参数的采集方式和采样频率,保证数据的时间上的连续性;对设备编号、系统归属、计量边界进行规范化的梳理,避免数据混用或者重复计量现象;异常数据还要进行筛查和修正,如传感器漂移或者停机状态下产生的异常记录等。数据整合的关键不在于规模,而在于质量和可用性。只有保证数据真实、准确、具有可比性,才能给后续模型分析、决策提供可靠的基础。

4.2 能耗映射模型构建与特征提取

在数据基础可靠的前提下,要针对不同的设备建立具有可解释性的能耗模型,而不是依靠复杂的计算方法。具体实施时,可以以负荷参数(流量或者转速)为被测变量,分析负荷参数的变化和功率之间的响应关系,从而确定出设备在不同的工况下正常能耗的区间。同时,还要结合温升、振动和压差等状态参数来判断能耗变化是否伴随着状态异常。关键之处在于创建“同工况对比”的机制,依靠横向比较找出异常偏离之处,而不是单纯依靠一个绝对值来判定,这样就能有效地避免把正常的负荷波动当成能耗异常^[5]。

4.3 高耗能问题识别与检修决策转化

在识别出能耗偏离特征后,应将分析结果直接转化为具体检修措施,而非停留于诊断层面。对在相同负荷下功率偏高的设备要重点检查润滑状况、传动对中、内部阻力的变化;对负荷较低但能耗仍偏大的情况,应先从控制参数是否被过度设定入手;当系统内多台设备同时出现能耗上升的时候,则应从系统阻力或者整体调节方式入手,不能盲目逐台拆检。通过建立“问题—措施”直接对应关系,可显著减少无效检修,提高检修工作的针对性与实施效率。

4.4 检修验证与闭环优化机制

检修完成后,应基于实际运行数据对节能效果进行验证,而不能仅依据检修完成情况进行判断。可以在相近工况下对比检修前后功率的变化,结合温升、振动等状态参数来综合评价检修的效果。能耗下降但是状态没有明显改善,说明问题还没有完全解决;如果短期改善后再次回升,就要进一步优化控制策略或者运行方式。更关键的是,应该把验证结果反馈到能耗映射模型当中,对原来的判断标准进行动态的修正,重新确定正常能耗区间。经过不断的反馈和迭代优化,可以使节能管理由经验驱动变为数据驱动,进而达到设备能耗长期稳定的优化。

5 结束语

机电设备能耗是由多种损耗因素共同影响的,负荷变化和状态、控制方式都会影响机电设备能耗。建立能耗映射模型,可实现运行状态与能耗变化的相关分析,进而提高高耗能问题识别的准确性。在此基础上,采用以问题类型为分类标准的分级检修方式,可以提高检修决策的针对性以及资源的利用率。节能型检修把效率恢复当作核心,用“识别—实施—验证”闭环体系来实现对能耗问题的持续改善。未来还需要继续提高数据质量以及模型适应性,从而支撑机电设备能效管理的长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 李阳,王超.变频器技术在机电设备节能改造中的实践分析[J].中国设备工程,2026(02):244-246.
- [2] 杨刚.机电设备协同控制在煤矿节能降耗中的应用[J].能源与节能,2026(01):78-81,225.
- [3] 段笑蔚.矿井主要机电设备能耗分析及节能措施研究[J].自动化应用,2020(10):57-58,64.
- [4] 陶涛.机电设备电气故障检测方法分析[J].电气传动自动化,2023,45(06):58-61.
- [5] 施冷恒.水利工程中泵站机电设备安装和检修措施研究[J].内蒙古水利,2023(01):74-75.

BIM 技术在机电安装工程中的应用

朱 绍

(安徽天祥药业有限公司, 安徽 亳州 236800)

摘 要 随着建筑行业数字化、智能化转型步伐持续加快, 机电安装工程对精细化施工、多专业协同的需求愈发迫切, 传统的施工模式已经很难适应行业高质量发展的要求。本文结合行业实际状况, 针对 BIM 技术应用过程中存在的难点, 提出了健全标准体系、培育复合型人才、优化协同机制以及量化价值评估等具有针对性的策略, 以期助力 BIM 技术与机电安装工程实现深度融合提供参考, 进而提升施工效率、优化成本管控的效果, 推动机电安装行业朝着精细化、数字化的方向实现高质量发展。

关键词 BIM 技术; 机电安装工程; 施工模式; 建模标准

中图分类号: TU85; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.007

0 引言

建筑行业朝着智能化、绿色化转型已成为行业发展趋势, 传统的二维设计与施工模式容易出现管线碰撞、效率低下等问题, 严重阻碍了工程质量的提升和进度的推进。国家不断推动智能建造的发展, 明确要求 BIM 技术在建筑全生命周期中进行集成应用。将 BIM 技术融入机电安装的各个环节, 不仅能够解决行业目前存在的难点, 还能推动施工模式的升级, 这对提升机电安装工程质量、促进建筑行业高质量发展具有重要的现实意义。

1 BIM 技术在机电安装工程中的应用要点

1.1 精准建模: 专业协同与标准统一并行

精准建模需先搭建统一的 BIM 建模标准框架, 明确机电各专业(暖通、给排水、电气)的建模精度、构件命名规则、图层划分及属性赋值要求。建模前组织各专业技术人员开展图纸会审, 梳理各专业管线走向、设备安装位置的核心需求, 借助 BIM 建模软件搭建基础模型, 同步建立专业协同沟通机制。在建模过程中, 电气专业优先完成桥架、管线的定位建模, 标注管线规格、敷设坡度及预留孔洞位置; 给排水专业同步建模, 重点明确管道接口类型、阀门安装节点及排水坡度; 暖通专业结合建筑空间布局, 精准建模风管、风机盘管等设备, 确保各专业模型在同一坐标系下精准对接。建模完成后, 通过专业碰撞检测工具排查建模偏差, 及时修正构件尺寸、位置错误, 同步更新模

型数据, 确保模型与现场施工需求、设计图纸高度一致, 为后续深化设计、施工实施奠定精准数据基础^[1]。

1.2 深化设计: 管线综合与净高优化并重

深化设计以精准建模为基础, 聚焦管线碰撞规避与建筑净高提升, 构建“先综合、后优化、再确认”的实操流程。先调取各专业 BIM 模型, 运用管线综合优化工具, 对建筑吊顶内、管井、设备机房等管线密集区域进行三维可视化排布, 优先梳理主干管线走向, 遵循“有压管让无压管、小管让大管、支管让主管”的原则, 调整管线间距、避让关键设备及结构构件, 彻底消除管线交叉碰撞、空间挤占等问题。针对净高不足的区域, 采用管线分层敷设、局部管线贴梁安装等方式, 结合建筑使用功能需求, 精准测算各区域净高限值, 优化管线排布高度, 确保吊顶标高满足设计要求, 同时预留检修空间。在深化设计过程中, 同步对接装修专业 BIM 模型, 协调管线与吊顶造型、灯具、风口的安装位置, 避免后期返工; 对优化后的管线方案进行多专业联合审核, 邀请设计、施工、监理单位共同确认, 形成深化设计图纸, 明确管线定位坐标、安装标高及连接方式, 将优化方案精准落地到施工环节^[2]。

1.3 智慧施工: 预制加工与模拟建造并举

智慧施工依托 BIM 模型数据, 推动机电施工从“现场粗放作业”向“工厂预制+现场装配”转型, 同步结合模拟建造规避施工风险。预制加工环节, 提取 BIM 模型中的管线、构件尺寸数据, 生成精准的预制加工

作者简介: 朱绍(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电工程。

图纸,明确构件规格、材质、接口参数及加工精度,将图纸同步传输至预制加工厂。加工厂通过数控切割、机械焊接等自动化设备,按照加工图纸批量生产管线、支架等构件,加工过程中同步录入构件信息,与BIM模型进行数据联动,确保预制构件与模型完全匹配。现场施工前,运用BIM模拟建造技术,还原机电施工全流程,重点模拟管线吊装、设备安装、管线连接等关键工序,排查施工空间不足、吊装路径不合理、工序衔接不畅等问题,优化施工方案,明确各工序施工顺序、人员配置及设备调度计划。现场施工时,施工人员对照BIM模型及预制构件信息,精准定位构件安装位置,通过装配式施工方式快速完成管线拼接、设备固定,提升施工效率与施工质量^[3]。

1.4 数字交付:竣工模型与运维数据并融

数字交付打破传统竣工资料与运维管理脱节的困境,构建“竣工模型+运维数据”一体化交付体系,实现机电工程全生命周期数据闭环。竣工阶段,施工单位对照现场实际施工情况,全面更新BIM模型,补充施工过程中的变更记录、隐蔽工程验收数据、构件安装检测报告等信息,删除施工过程中的临时构件、辅助模型,确保竣工模型精准反映工程实际状况。同时,梳理机电设备的技术参数、安装日期、调试报告、维保周期等运维核心数据,将数据与竣工模型进行关联,为每个设备、每段管线赋予唯一标识,实现“模型可视化+数据可查询”。在交付过程中,同步搭建数字化交付平台,将竣工模型、运维数据、施工资料等整合上传,明确交付标准与流程,对接建设单位、运维单位进行数据交接。运维单位接收后,可通过平台调取竣工模型及相关数据,快速定位设备位置、查询设备信息,依托模型数据制定维保计划、排查设备故障,实现机电工程运维的数字化、精细化管理,延长设备使用寿命,降低运维成本。

2 BIM技术在机电安装工程应用中的主要挑战

2.1 标准体系不健全,数据互通存壁垒

当前BIM技术在机电安装工程应用中的标准体系仍存在明显漏洞,不同地区、不同企业往往各自制定建模规范与数据标准,缺乏统一且权威的行业准则,建模精度、构件命名、数据格式等方面的要求差异较大。各专业在建模过程中只能按照自身遵循的标准开展工作,导致不同专业的BIM模型无法实现高效对接,数据传递过程中易出现丢失、偏差等问题。

2.2 人才储备不充足,复合能力有短板

机电安装工程领域的BIM人才缺口一直比较突出,现有从业人员大多只掌握单一领域技能,要么精通机电安装施工技术却不熟悉BIM软件操作,要么擅长BIM建模却不了解机电工程的施工流程与技术要点。这类人才难以满足实际应用需求,BIM技术在机电安装中的应用需要兼顾建模、施工、管理等多个环节,要求从业者既懂机电专业知识,又熟练掌握BIM软件操作,还具备一定的协同管理能力。

2.3 协同机制不完善,权责界面较模糊

BIM技术应用需要设计、施工、监理、建设等多方主体协同配合,但目前多数项目缺乏完善的协同机制,各方主体之间的沟通衔接不够顺畅,往往各自为政。设计单位侧重模型的设计层面,很少结合现场施工实际优化模型;施工单位关注现场施工进度,却忽视与设计单位的及时对接,遇到模型与现场不符的情况时容易出现推诿扯皮,不仅延误施工进度,还会影响BIM技术应用的整体效果,这也是很多项目都遇到的共性问题。

2.4 效益量化不清晰,投入信心受影响

BIM技术应用需要投入大量的资金用于软硬件采购、人才培训以及模型搭建,这些投入成本直观且明确,但应用后产生的效益却难以进行精准量化。很多企业在应用过程中只能感受到施工效率有所提升、返工率有所降低,却无法准确核算这些效益对应的具体数值,也难以将效益与投入成本进行合理对比。

3 深化BIM技术在机电安装工程中的应用优化措施

3.1 健全标准体系,打通数据互通瓶颈

健全标准体系需以行业实际应用需求为核心,由行业主管部门牵头,联合大型建筑企业、科研机构及软件厂商共同组建标准编制小组,摒弃以往单一企业制定标准的局限,结合机电安装工程的专业特性与BIM技术应用场景,制定覆盖建模、数据、协同、交付全流程的统一行业标准。编制小组先全面梳理当前各企业BIM应用中的痛点,调研不同专业、不同项目的应用差异,明确标准编制的核心方向与重点内容,同步参考国内外先进标准经验,结合我国机电安装行业现状优化完善,避免标准与实际应用脱节。标准编制过程中,重点明确各专业建模精度、构件命名规范、数据格式要求及跨平台流转标准,细化管线、设备等构件的属性赋值规则,明确模型对接的技术参数,同时制定标准动态更新机制,根据技术发展及应用反馈及

时修订完善。标准发布后,行业主管部门组织开展宣贯培训,指导企业精准落实标准要求,软件厂商同步优化软件功能,确保软件适配行业标准,企业则结合自身项目特点,制定标准实施细则,规范各专业建模与数据管理流程,从源头打通数据互通壁垒,实现各专业、各单位之间的模型数据高效流转^[4]。

3.2 强化人才培养,构建复合梯队支撑

强化人才培养需构建“校企协同+企业内训+实践历练”的培育模式,打破传统单一培训的局限,精准对接机电安装领域 BIM 人才的能力需求。高校可调整相关专业课程设置,增设机电安装施工技术、BIM 软件实操、协同管理等核心课程,将企业实际项目引入课堂,让学生在模拟实践中掌握专业知识与软件操作技能,同时与企业建立校企合作基地,安排学生进入企业实习,参与实际项目的 BIM 应用全流程。企业则建立内部培训体系,选拔具备一定机电施工经验或 BIM 基础的员工,邀请行业资深专家开展专项培训,重点讲解 BIM 技术在机电安装各环节的实操细节、数据应用技巧及协同管理方法,培训后安排员工参与重点项目,明确专人带教,让员工在实际工作中积累经验、提升能力。

3.3 优化协同机制,厘清多方权责界面

优化协同机制需以项目为核心,搭建统一的数字化协同平台,整合设计、施工、监理、建设等多方主体的资源,明确各方在 BIM 技术应用中的具体职责与工作流程,杜绝权责模糊、推诿扯皮的现象。建设单位作为协同主导方,牵头制定协同管理细则,明确各方沟通频次、数据传递要求及问题整改时限,统筹协调各方工作进度。设计单位需安排专人对接协同平台,及时接收施工单位反馈的模型问题,结合现场施工实际优化模型设计,同步更新模型数据并同步至平台,确保设计与施工精准衔接。施工单位负责现场 BIM 应用的具体实施,及时将现场施工情况、问题反馈至协同平台,配合设计单位完成模型优化,同时对接监理单位做好模型审核、施工验收工作。监理单位则重点监督各方协同落实情况,对模型优化、数据更新、问题整改等工作进行全程把控,及时反馈监督意见,通过协同平台实现各方信息实时共享、高效联动,确保 BIM 技术应用各环节有序推进^[5]。

3.4 量化价值评估,增强持续投入动能

量化价值评估需建立科学完善的评估体系,摒弃以往模糊化的评估方式,结合机电安装工程的特点,

明确评估指标、核算方法及流程,确保评估结果精准可参考。企业可组建专门的价值评估小组,结合项目实际设定评估指标,涵盖施工效率提升、返工率降低、成本节约、工期缩短等核心维度,每个指标均明确具体的核算标准与数据来源,避免评估流于形式。评估过程中,评估小组调取项目施工全过程数据,对比 BIM 技术应用前后的施工效率、返工成本、工期时长等核心数据,采用定量核算与定性分析相结合的方式,精准核算 BIM 技术应用带来的直接效益与间接效益,其中直接效益重点核算材料节约、人工减少、工期缩短带来的成本节约,间接效益则考量施工质量提升、运维成本降低等长期价值。评估完成后,形成详细的价值评估报告,清晰地呈现投入与产出的具体数据,直观展示 BIM 技术的应用价值,进而增强企业对 BIM 技术持续投入的信心与动能。

4 结束语

BIM 技术为机电安装工程的数字化、精细化发展增添了新的活力,其在管线优化、协同施工、成本管控等方面的应用价值已经获得了行业的广泛认可,有效解决了传统施工模式的许多难点。面对应用过程中的各种挑战,健全的标准体系、专业的人才梯队、完善的协同机制以及科学的价值评估,能够推动 BIM 技术与机电安装工程的深度融合。未来,随着智能建造战略的持续推进,BIM 技术将与物联网、大数据等新技术进行深度结合,不断对机电安装施工模式进行革新,持续提升工程质量和效益,助力建筑行业实现高质量的转型升级,推动我国建筑业朝着智能化、绿色化的方向稳步前进。

参考文献:

- [1] 冯彦利. BIM 技术在机电安装工程中的应用[J]. 绿色建筑与智能建筑, 2026(01):123-125.
- [2] 陈庆明. BIM 技术在复杂性建筑机电安装工程中的应用[J]. 工程与建设, 2025, 39(04):894-896.
- [3] 何仲虎. 基于 BIM 技术的机电安装工程的装配式施工技术[J]. 大众标准化, 2025(08):152-154.
- [4] 穆军峰. BIM 技术在建筑机电安装工程项目中的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(01):130-132, 150.
- [5] 高建. 探究 BIM 技术在装配式建筑机电安装工程中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(02):82-84.

BIM技术在异形钢结构施工中的应用研究

杨磊¹, 袁立婷², 孙建宝²

(1. 青岛鲁邦晟泰工程管理有限公司, 山东 青岛 266109;

2. 中达工程管理咨询有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要 异形钢结构因其造型复杂、节点多样, 在施工时会遇到精度控制、构件加工及现场协同等难题。本文探讨了BIM技术在异形钢结构施工全过程中的具体应用, 通过参数化建模实现深化设计, 借助数字化加工提升构件精准度, 利用可视化模拟优化施工方案, 并构建信息集成管控平台。实际工程案例验证显示, BIM技术能大幅提升施工精度、缩短施工工期并降低返工概率, 为异形钢结构施工提供有效的技术支持。

关键词 BIM技术; 异形钢结构; 参数化建模; 信息集成

中图分类号: TU758.11; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.008

0 引言

随着建筑形态向多样化和复杂化发展, 异形钢结构在大型公共建筑、场馆及地标性建筑中得到广泛应用。这类结构往往具备空间曲面造型、非标准节点连接和构件尺寸各异特征, 传统二维图纸难以确切呈现其空间关系, 造成施工过程中构件碰撞、安装误差累积等问题屡现。BIM技术以三维数字模型为载体, 集成几何信息、物理特性以及施工工艺参数, 能于虚拟环境中实现设计验证、加工指导及施工推演, 为异形钢结构施工难题提供了新途径。

1 BIM技术与异形钢结构概述

1.1 BIM技术体系与特点

BIM技术构建了涵盖设计、加工、施工及运维全生命周期的数字化体系。其核心要点是通过参数化建模建立三维信息模型, 该模型涵盖几何形状、材料属性以及构造关系, 促成多专业协同及数据共享。该技术具有可视化表达、信息集成、碰撞检测以及模拟解析等效能, 可将抽象的设计意图转变成直观的空间模型, 并助力施工方案动态优化^[1]。在异形钢结构领域, BIM技术能精准呈现复杂曲面、非标节点的空间定位关联, 利用参数驱动实现设计变更的迅速响应, 同时将模型数据直接传递给数控加工设备, 形成设计—加工—施工的闭环管理。

1.2 异形钢结构施工难点分析

异形钢结构施工面临三方面核心难题。在空间定位方面, 传统测量手段难以精确测准曲面构件的三维

坐标, 节点位置偏离易引安装失误, 构件制作环节, 品种多样且不重复, 依赖人工放样易造成累积误差, 焊接变形控制条件严格^[2]。现场施工阶段, 多工序交叉工作引发协调困境, 大型构件吊装路径规划复杂, 安装顺序不当可能会引发结构应力集中^[3]。这些难点本质是信息传递不畅以及精度控制能力欠缺, 需要建立贯穿全流程的数字化管控机制。

2 BIM技术在异形钢结构施工中的应用设计

2.1 参数化建模与深化设计

参数化建模是BIM技术应用于异形钢结构的前提条件。利用几何约束及参数关联, 可以对异形钢结构进行准确数字化呈现。以自由曲面网壳结构为例, 采用NURBS曲面建模方法, 由建筑造型控制点产生空间曲面, 再通过网格划分法决定杆件位置, 保证模型符合设计要求。在节点深化设计过程中, 建立节点板厚度 t 与杆件截面高度 h 的参数关联:

$$t = \frac{N_{max}}{f_y \cdot A_{eff}} \quad (1)$$

式(1)中: N_{max} 为杆件最大轴力, f_y 为钢材屈服强度, A_{eff} 为节点有效承压面积。通过参数化设计, 模型能够自动调整节点板尺寸, 确保连接强度满足受力要求。同时, 模型中集成了焊接等级、螺栓类型、坡口形式等施工工艺信息, 可以直接输出零件加工图、材料表、数控编程文件等, 避免人工绘图带来的误差。

碰撞检测是参数化建模重要扩展。在深化设计阶段, 将钢结构模型与其他如机电管线、幕墙结构以及装饰件等专业模型进行集成, 利用碰撞检测算法自动

作者简介: 杨磊(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

识别空间冲突,提前优化节点构造,防止日后现场返工。而对于一些较为复杂的节点,通过三维标注或者爆炸图等方式清晰呈现构件之间的组装关系,方便以后生产加工及安装。

2.2 构件数字化加工与预拼装

数字化加工是实现 BIM 模型数据到实物构件准确转化的重要步骤。利用 BIM 模型数据通过 IFC、STEP 等形式导出,传输至数控切割机、钻孔机以及机器人加工单元上,进行无图纸化加工。对于空间扭曲杆件等复杂构件,可从模型中读取三维控制点坐标以及切割角度等信息,编写相应的数控程序,精确控制切割轨迹以及坡口角度,加工精度可以达到 $\pm 1\text{ mm}$ 以上远远优于手工放样方法。而对于铸钢节点、相贯节点等复杂构件,则可以使用三维激光扫描仪对已经完成加工的产品进行全面检查。将扫描得到点云数据与原始 BIM 模型对比形成偏差色谱图,对超出公差部分进行返工,保证产品的形位精度符合安装需求。此外,对于大批量同类构件,可通过模型数据驱动柔性制造系统,实现多品种、小批量构件的自动化生产,提升加工效率与质量控制水平。

虚拟预拼装是数字化加工的有效辅助手段。在数字环境中,根据现场实际安装顺序对构件进行虚拟拼装,检查各杆件尺寸是否一致、节点孔位是否吻合、安装间隙以及焊缝坡口是否对中等问题。对于大跨度桁架类结构,通过有限元软件进行预拼装状态下结构变形,计算预起拱值:

$$\delta = \frac{5qL^4}{384EI} \quad (2)$$

式(2)中: q 为均布荷载, L 为跨度, E 为弹性模量, I 为截面惯性矩。依据计算结果确定构件预制尺寸,在加工过程中进行预先补偿施工中产生的弹性变形,从而达到保证结构合龙精度的目的。虚拟预拼装可以及时发现加工中存在的问题,还可节省实际预拼装所占用的空间以及所需的时间和人力等资源,显著降低施工成本。

2.3 施工过程可视化模拟

施工过程可视化模拟是 BIM 技术应用于施工组织优化的重要手段。基于 BIM 建立 4D 施工模拟,将时间纳入三维建筑信息模型中,实现异形钢结构从基础施工至主体安装整个过程的直观展示。在模拟过程中包含塔吊运行轨迹、构件吊装角度、高空作业平台布置、临时支撑布置以及拆除顺序等内容,通过对施工过程进行模拟可清楚了解不同的施工顺序对于结构安全性和施工进度影响。同时,采用碰撞检查功能提前识

别和解决施工期间可能发生的各种问题,如构件吊装路线与已有构件发生冲突、大型设备旋转范围与临时支撑相碰等问题,从而防止施工过程中出现停工或者返工的情况发生。

对于较为复杂的节点以及危险性较大的工序,可以编制安装动画或工艺示意图,具体说明螺栓拧紧顺序、焊接工艺流程、吊装平衡措施等内容,作为技术交底的可视化工具,提升作业人员对施工工艺的理解与掌握程度^[4]。此外,施工模拟还可以用来进行临时支撑设计及调整,在有限元软件中施加外荷载,模拟卸载过程中的内力变化以及位移情况,从而得出合适的卸载方式以及卸载数量,保证建筑物在拆除临时支撑之后能顺利进入正常的使用状况。

2.4 现场协同与信息集成管控

现场协同及信息集成管控是 BIM 技术应用于施工全生命周期管理的基础。搭建基于 BIM 施工管理系统,在其中整合进度管理、质量管理、安全管理、材料管理等功能模块,使施工管理信息化、可视化。现场施工人员用移动设备(平板电脑、智能手机等)查看 BIM 模型,检查构件安装位置、焊接参数、螺栓扭矩以及验收标准等信息,完成施工指导的数字化传递,代替原来的纸质图纸与经验判断。质量管理模块记录各重要部位实际测量值并自动生成偏差热力图,将超标部分高亮显示,方便相关人员发现问题及时处理。

在测量控制上,将全站仪、激光跟踪仪等测量仪器所获取的数据导入到 BIM 模型中,与设计坐标进行比较分析,在三维空间内查看实际安装位置与目标位置之间的差异,以便在现场调整^[5]。物料管理系统根据施工进度计划,在 BIM 模型中提取出需要的构件数量、尺寸大小以及安装顺序,对构件进行有序地存放以及有序地运输,避免二次搬运和现场堆积。利用云计算平台信息共享功能,所有参与者包括设计人员、生产厂家、施工单位、监理单位等均可及时了解到模型变化情况,设计变更也可立即传达到生产厂及施工工地,从而降低由于时间延误导致的信息错漏问题发生概率。二维码跟踪系统对每一个构件都有一个唯一的编号,通过扫二维码可以查找到该构件对应的 BIM 模型信息、加工情况、检测结果以及安装位置等全部内容,实现整个过程可追查。具体 BIM 技术应用流程见图 1。

3 案例应用与效果分析

3.1 工程概况

某文化中心主体结构采用异形钢框架支撑双曲面屋盖体系,总用钢量约 8 500 吨。屋盖由 1 200 余根

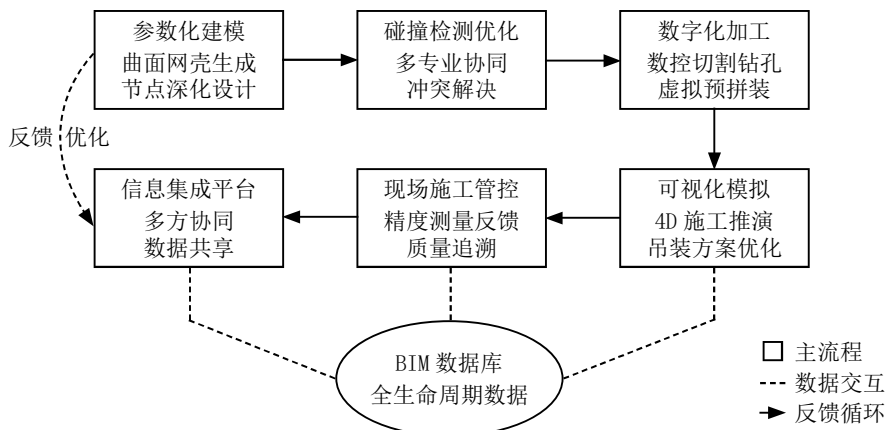


图1 BIM技术应用流程图

空间扭曲杆件组成，节点形式包括铸钢节点、焊接球节点及相贯节点三种类型，最大单根杆件长度18.6 m且无两根完全相同。建筑造型呈扭转曲面，屋面最大高差23 m，施工精度要求杆件安装偏差不得超过5 mm，节点位置偏差不得超过3 mm。传统施工方法难以满足精度控制与进度要求，项目团队决定全面应用BIM技术进行施工管控。

3.2 BIM实施流程与技术要点

项目实施分为三个阶段展开。模型构建阶段，基于建筑设计曲面建立精细化钢结构模型，包含2 300个节点与12 000个螺栓孔信息，完成机电管线综合碰撞检测，解决176处空间冲突。深化设计阶段，参数化生成1 200份构件加工图，铸钢节点通过3D打印制作实体模型验证浇筑工艺，虚拟预拼装发现并修正23处杆件长度偏差。施工阶段，利用模型规划8台塔吊的作业范围，模拟确定386个吊装批次的最优顺序，现场采用全站仪跟踪测量系统，实时采集节点坐标并与BIM模型对比，偏差超过2 mm时立即调整。建立构件二维码追溯系统，扫码关联模型信息实现精准定位安装。

3.3 应用效果评估

BIM技术应用取得显著成效。在精度控制方面，钢结构整体安装偏差把控在±2.8 mm以内，节点位置偏差均值为1.7 mm，较常规办法提升60%。在工期管理方面，通过优化吊装方案降低构件二次倒运，屋盖钢结构施工的计划周期由计划的150天压缩至118天。质量把控环节，构件返工率从传统方式的3.2%降低到0.6%，焊缝初次合格率升至97.3%，成本效益分析显示，即便增加BIM建模与软件方面投入，但通过减少返工次数、优化材料采购流程及压缩工期，综合成本降低。BIM技术与传统施工方法关键指标对比见表1。

表1 BIM技术与传统施工方法关键指标对比表

评估指标	传统施工方法	BIM技术应用	改善幅度
构件安装偏差(mm)	±7.2	±2.8	61.10%
施工工期(天)	150	118	21.30%
构件返工率(%)	3.2	0.6	81.30%
焊缝一次合格率(%)	89.5	97.3	8.70%

4 结束语

BIM技术为异形钢结构施工提供了从深化设计至现场管控全流程数字化解决方案。参数化建模实现复杂构件的精确呈现与迅速调整，数字化加工消除人工放样误差，利用可视化模拟改进施工组织方案，信息集成平台保障多方协同效率。工程实践证明，该技术体系能够将构件安装精度提至毫米级，施工周期缩短超20%，显著降低返工成本。未来应深化BIM与物联网、人工智能技术整合，发展基于实时监测数据的施工动态调控方法，构建异形钢结构智能建造体系。

参考文献:

- [1] 范晨旭,杨龙.BIM与AI融合技术在绿色建筑施工管理中的应用[J].石材,2026(01):164-166.
- [2] 刘廷,胡林,吴笛,等.基于BIM的智慧建造技术在航站楼修建中的融合应用[J].土木工程信息技术,2025,17(S1):1-5.
- [3] 罗冬进.钢结构安装技术应用与质量控制措施[J].中国建筑金属结构,2025,24(24):67-69.
- [4] 王大平,贾栋亮,季力,等.陶土饰面砖施工技术在异形钢结构中的应用[J].建筑技术,2025,56(21):2639-2642.
- [5] 李鑫涛.BIM技术在异形网架钢结构体育场馆施工中的应用:以雄安体育中心项目为例[J].工程建设与设计,2025(13):145-147.

基于物联网的水利工程智能运维体系构建研究

吴俊

(浙江钱塘江海塘物业管理有限公司, 浙江 杭州 310052)

摘要 水利工程属于庞大的组织结构, 通过打造智能运维体系来巩固水利工程各项施工建设工作, 将物联网科技和边缘计算技术等有效地运用起来, 更好地融合各项信息数据, 还可以全过程动态地运用算法, 科学地感知设备运行情况, 进行故障问题的检修, 准确地控制水位情况。本文分析了物联网技术在水利工程中的运用机制以及重要技术, 借助物联网平台, 以期有效提高水利工程的工作效率提供参考, 进而针对各项水利设备进行全方位的维护, 改善决策执行效力。

关键词 物联网; 水利工程; 智能运维体系

中图分类号: TV698.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.009

0 引言

物联网、数字化科技以及边缘计算等学科的融合, 大力促进了水利工程的智能化水平。由于水利工程需要考虑环境复杂、监测角度多样化等困境, 以往的系统运行还存在数据闭塞、响应停滞等问题。随着智能运维体系的建立, 物联网等科技的联合使用, 水利工程智能监测和管控水平有了显著提升, 并且可以动态地感知不同层级的情况, 实现了数据融合和运用的积极特点。本文将基于物联网具体分析如何更好地建构水利工程的智能运维系统, 使感知层、网络层、平台层和应用层都可以联动, 更好地提升运用效果。

1 物联网技术和水利工程运维的含义

1.1 物联网技术含义和组成

物联网技术包括信息传感设备和日常通信技术, 它可以把生产生活中的物体与网络连接起来, 更好地达到物与物的连接, 还可以做到物与人的连接, 真正地实现信息的交互融合, 它属于网络世界的进一步延伸。物联网技术要借助传感器、射频识别、定位装置和智能终端等系统, 根据特定的通信协议来改变现实世界的物体, 使之成为网络虚拟世界可以通行的物品, 更加智能和多样地识别、定位、追踪和监管这些物品。物联网体系包括感知层、网络层、平台层以及应用层, 感知层主要是收集各种信息和数据, 获取温度、湿度以及位置信息等, 直接获取物理世界的信息参数。网络层属于信息传输通道, 利用无线网、通信设备或者有线网来获取信息, 实现信息和设备的共通。平台层

属于中枢平台, 对全部信息进行保存和处理分析等, 更好地体现数据的处理和计算作用^[1]。应用层主要是将数据运用到实际生活中, 如水利工程的智能化服务或者多元解决方案等, 进而呈现物理世界和数字化技术的高度衔接。

1.2 水利工程智能运维体系建构的需求

当前, 水利工程的运行和管理需要工作人员做好相应的检测和监管工作, 可是水利工程的运行和维护管理比较复杂, 需要面对多方面的挑战, 如水利工程的设施状态无法全面呈现, 系统数据存在融通不畅、水利工程设施的智能化水平不高等问题。另外, 水利工程在实际施工和建设的时候还要面对多方面的需要, 需做好设施的维护工作, 及时地调节水位线, 做好水利结构的监测和优化升级等工作。水利工程设施设备的维护需要工作人员定期观察设备的使用情况, 然后开展事前保养工作; 还要结合气候变化情况, 及时地挑战水库的水位线等, 从而更好地开展水利工程的智能化管控^[2]。此外, 水利工程结构的监测要重点围绕大坝和水库的安全性; 需做好调度模型的优化升级, 并且全面考察信息数据, 更好地分配资源的使用范围。

2 智能运维体系架构

智能运维体系的建构包括五个层级, 分别是感知层、边缘计算层、网络传输层、数据中台层以及应用服务层, 每个层级都有具体的功能和属性。首先, 边缘计算层需要在现场部署边缘节点, 然后预处理本地数据, 还要及时地检测异常情况, 做出反馈。数据中

作者简介: 吴俊(1984-), 男, 本科, 研究方向: 水利工程。

心则是清洗数据、汇总数据、保存数据,实现数据的标准化。核心应用模块将有效地达到实时监控和可视化技术的运用,更好地展现设备运行状态。智能诊断与故障预警可以运用大数据算法来分类处理不同的故障问题。

3 基于物联网的水利工程智能运维体系建构设计

3.1 系统整体框架的设计

水利工程的智能运维体系包括感知层、平台层和应用层,每个层级都各自发挥着作用。感知层是水利设施的窗口,可以获取水利工程的最新状态,获取水利资料和环境数据等。感知层所配置的设备是压电应变传感装置、水位雷达装置、电磁流量感知装置和温湿度传感装置等,这些设备都属于精细化设备,测量误差比较小,数据的更新速率比较快,可以达到十秒钟一次。平台层使用较好的服务器,搭载了16核中央处理器、大容量存储芯片以及磁盘存储装置,能够更好地处理海量数据,还可以发挥建模、仿真模和实时分析等作用^[3]。应用层主要作用是运行调节和风险预警等,基于可视化平台,对上述数据进行分析,做好成果测试以及优化决策工作等,合乎系统技术的规范,能够各平台连接稳定且顺畅。应用层处于虚拟环境下开展模型和物体的分析工作,使用插值和状态调节法,确保虚拟仿真结果和运作结果一致。

3.2 重要模块的建构设计

水利工程的感知模块属于全方位的感知网络,它设置了不同的环境监测装置,分别是传感器,雷达测距装置、光纤应变仪器、倾角传感装置和全球定位导航仪等。数据收集装置使用的是32位微元素控制器,搭配全网通信模块以及大容量存储器。遥感监测装置运用的是多光谱电子理论和热成像原理,更好地完成高空巡航作业,还可以使用无线网络来传导图像信息。数据处理中心使用的是多线程的架构,运用神经网络模型来判断目标,并且对数据类型进行划分,从而更好地实现数据信息的有效汇总和统一处理^[4]。水利工程企业在开展数据分析上传和分析工作的时候要结合具体的数学模型,通过响应模块来获取高精度的仿真模型。

交互式全景展示模块将借助地理信息系统和建筑模型,全时段地展现水利工程设施设备的运行情况,通过决策模块来评估水利设施设备的运行情况,融合多种数据分析功能,更好地评估和判断水利工程的结构应力情况,并且做好降雨预测分析工作,还可以开

展水文响应工作,了解设施设备的能源消耗情况等,更好地提高水利工程的智能运维水平。安全模块属于边缘性计算,每个节点会搭载相应的处理器、内核以及高级固态硬盘,通过对数据信息的加密,更好地提升远程操作水平,还可以实现各项操作的合法与合规^[5]。

3.3 系统部署和集成技术的设计

水利工程企业的智能化运维体系建构需要做好系统部署以及集成技术的设计,由于智能运维体系内部包含较多的数据信息,数据类型分别是监控、水文、遥感和运维等信息,数据格式丰富多样。水利工程企业要在融合模块中使用框架技术来梳理数据,并且提取数据的特点,做好数据维度的整合工作。正确地使用空间数据融合技术,该技术基于空间坐标来重建算法模型,然后对三维坐标数据进行整理,将三维目标数据输入工程坐标体系中,还要正确地使用小波变换插值法,有效地排列时间序列值,这样一来,不同时段的数据都可以同步保存并且更新,更好地满足输入模型的一致性^[6]。系统接口和数据采集监视系统联合起来,实现数据的互联互通,利用通信协议来连接感知设备和控制单元,延续之前的逻辑框架,还可以扩大其功能类型。所以,水文系统的网络终端可以实现数据共享,把水流量、降水量和水位线等数据上传到物联网平台,然后做好仿真检验工作。该系统还支持跨平台的数据查找以及报警功能,可以操控数据采集和监视系统^[7]。

4 物联网重要技术在水利工程智能运维体系中的应用

4.1 全时段监测和异常反馈

水利工程的运行环境相对复杂,为了更好地保证水利设施的正常运行,就要借助高频传感装置,还要配合智能的算法模型,构建全时段的动态监测系统。监测系统需要布置在重点位置,包含应变计、水位雷达、加速度计以及渗压计等传感装置,能够收集更多精准的数据,然后运用数据处理集中,有效地进行整合和分析,充分借助融合算法,兼顾数据的时间性与空间性等,成立多源信息融合的建构模型,还有助于工作人员对异常情况进行反馈^[8]。系统可以主动地判断数据异常位置,借助向量机技术来分析异常类型,形成早期预警机制。另外,还要建立五级响应机制,保证各层级的相应,便于及时地做出控制,将警报信息及时地上传到管理平台或边缘控制端,确保预警到行动的完整性和全面性^[9]。

4.2 预测维护与全过程管控

基于物联网的水利工程智能运维体系构建需要借助状态评估模型,有效地预测疲劳量、载荷循环次数以及温度波动影响等情况,还要使用熵权法进行科学的划分,依据主要成分来达到数据降维的目的,使各项数据清晰有效,形成量化的考核参数。

水利工程企业要结合指数模型以及变参数模型等,了解数据的退化趋势,还要做好目标运行情况的分析工作,主动判断系统内部的周期性负载情况,还要找到异常干扰要素等,使用加权校正方法来处理数据波动变化的情况。然后将所有数据结果都导入数据模型,建立专门的样本分析路径,获取最新的数据结果。水利工程智能运维系统会使用多目标算法,部署全时段的维护计划,有效地整合粒子群,实现算法的优化升级。此外,利用目标函数进行成本、风险及资源等要素的计算,使用迭代法来获取最佳维修实践,实现多策略的重组^[10]。

4.3 智能决策支持和协调管控

水利工程的运维调度模块需要结合水利工程的运行情况,建立基于物联网的决策支持体系,需要清晰地界定水位边界线、水流边界线以及承载能力等数值。调度模型要运用状态转移图以及规则库等,还要实现每秒快速处理的效果,更好地更新和完善调度路线,实现大规模的运行^[11]。决策支持系统能够实时地获取数据,并对水温数据和运维数据进行监视,从而形成专门的监测资讯、操作规范和故障记录等。运用长短记忆网络建立分析模型,可以将预测结果和运行情况统一起来,做出全面且具体的风险评估,然后形成相应的调度指令。决策支持系统可以让操作界面更加可视,使用解释标签与可靠性评估来提高风险判断水平,更好地使用应对策略^[12]。

5 案例测试

某水库在开展具体实践工作的时候,通过构建智能运维体系能够实现多维数据的联合分析,还可以体现动态响应机制的优势。检测环境包括坝体、泄洪道和其他设施,分别安装了 230 个传感器装置,包括渗压计、加速度计和水位计等设备,这样可以达到全时段的有效监管。监测实践为 2022 年到 2025 年,对数据信息进行清洗之后,将数据分成训练集和测试集,然后依据数据安全等级,分成不同的等级标签。一般来说,正常数据需要控制在均值两倍左右,预警数据是单一数据持续两小时的超阈值。紧急数据是渗流量

突变率大于 5% 或者结构改变的数据,以上数据为水库处于汛期故障问题提供了信息基础,也有利于水利工程在降水环境下研究其运维数据,做好数据的溯源和分析工作。

6 结束语

物联网技术在水利工程智能运维体系中的运用将大大提升信息化处理水平,改变了传统的运维管理模式,形成数据驱动、模型配合和智能联动的控制系统。物联网技术可以应对水利工程的复杂结构和多元的变量等情形,促进了感知、建模和管控的连接,使水利工程的运行维护状态更加稳定,还具备未来趋势的预测能量。未来物联网技术将会进一步融合到水利工程运维管理工作中,建立数字化水利新模型,不断提高水利工程企业的精细化和智能管理水平。

参考文献:

- [1] 杨进山.提高水利工程机电设备运维管理水平方法的探讨[J].工程建设与设计,2025(04):251-253.
- [2] 郎启庄,郎启香,高宽.物联网技术赋能水利工程建设管理路径探索[J].水利建设与管理,2025,45(01):68-73.
- [3] 张旭哲,原鹏举,胡莎,等.物联网技术在智慧大坝中的应用现状及趋势[J].水电能源科学,2025,43(02):168-171.
- [4] 付希义,田亮,张庆萍,等.物联网技术在水利工程运行维护管理中的应用[J].水利水电快报,2024,45(S2):104-107.
- [5] 牛广利,李天旸,杨恒玲,等.物联网水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,40(03):181-185.
- [6] 王延宁,余健俊,周逸伦.基于 BIM 和 IoT 数据驱动的医院建筑智慧运维管理系统开发研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2024,46(06):686-695.
- [7] 吴立活.基于物联网的拉斯邦巴斯矿山数字运营中心运维实践[J].矿业研究与开发,2025,45(01):238-245.
- [8] 曾仕琪,苏栋,龚浩锋,等.物联网技术在城市地下空间运维阶段的应用与研究进展[J].隧道建设(中英文),2025,45(01):57-76.
- [9] 赵鹏,马伟斌.基于物联网的铁路隧道智能运维关键技术及实现方法研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(08):1697-1712.
- [10] 李宏川,赵宇,李彬,等.配电物联网边缘计算场景下基于改进 ANFIS 的电缆通道综合评估及智能预警方法研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):94-103.
- [11] 毕天平,王晓君,周莹.基于 CIM 的建筑运维管理平台构建研究[J].建筑经济,2023,44(11):95-100.
- [12] 谢百煌,李旭辉.基于物联网和传感器技术的电网二次设备信息智能移动系统[J].制造业自动化,2023,45(08):12-16,27.

人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用

亓宏伟, 赵志睿

(山东天丰新能源科技有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 自进入工业4.0时代以来,以人工智能为代表的新技术革命正以前所未有的深度和广度渗透到传统机械设备领域当中。本文主要围绕人工智能、机械设计制造和技术自动化三个方面进行详细讨论。首先从人工智能加持下的机械设备新特质出发,再介绍采用人工智能技术提高相关行业发展水平和技术研发能力的作用,最后着重介绍了人工智能技术应用于机械产品的智能化设计、智能化制造工艺和智能化控制系统三个方面的实践应用。实验证明,人工智能不仅能大幅提高生产效率、提升产品质量,而且对促进机械加工制造业向智能化、弹性化、绿色化方向发展有着举足轻重的作用。

关键词 人工智能; 机械设计制造; 自动化; 智能制造; 优化算法

中图分类号: TH164; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.010

0 引言

机械设计制造及其自动化专业人员长久以来一直在研究机械产品的结构设计、加工工艺以及自动控制等问题,而随着不断增长的客户需求以及多样化、个性化的小规模生产方式的出现,以往依靠经验和精确模型的传统手段变得越来越不适用,很难进行最优选择,并且无法应对变化。但是,近年来人工智能领域(机器学习、深度学习等),包括专家系统以及进化算法等方面的突破,给整个机械制造行业带来了全新的解决方案,通过对人的意识、判断和决策过程的学习,人工智能能够对传统上难以解决的复杂非线性问题进行求解,实现整个机械产品从设计到生产的全生命周期智能化。

1 人工智能赋能下机械设计制造及其自动化的新特点

1.1 设计过程的智能化与生成化

传统机械设计主要依赖设计者的经验总结和手工推算,过程十分复杂,而且容易陷入局部最优,而当加入人工智能之后,整个设计流程就变得非常智能了。通过使用生成型算法的设计平台,可以针对给定的限制因素(负载、材料、空间尺寸等)自动绘制出上万种满足力学性能要求的不同形式的结构方案,也就是所谓的“生成型设计”。它不仅解放了设计人员繁重的绘图任务,还突破了人类的思维方式,在此过程中产生了大量的仿生结构,如拓扑优化等,使得产品的设计更加轻便、高效。

1.2 制造过程的自主感知与决策

在生产中,人工智能使机器拥有了“眼睛”“大脑”,利用大量的传感器以及机器视觉系统实时监测着生产中的加工状况、工具损耗程度以及周围环境的温湿度等^[1]。借助深度神经网络模型,可以自行辨别此时的生产条件是否正常,并且可以根据采集到的数据自行调节加工参数,如主轴转速、进给速率等,以得到最佳的加工条件,从而实现了由被动式“机械化操作”到主动式“智能应对”的飞跃。

1.3 系统运行的协同化与自优化

智能制造控制系统大多由多个复杂的子系统构成,如物流系统、加工系统、装配系统等。人工智能的应用使得所有的子系统不再是单独存在的,而是以工业互联网的形式相互连接,在彼此间开展数据交换与合作,采用多智能体系统协调控制策略,每个制造单元可以相互交流信息,共同作出决定,灵活调整生产安排;并且通过不断采集数据来进行反复学习训练,使该系统具有自主改进能力,可随时间推移进行自我升级,提高工作效率。

2 人工智能在机械设计制造及其自动化中应用的重要意义

2.1 显著提升产品研发效率与创新质量

传统的机械设计过程是一个漫长的设计、仿真、试制、修改循环,研发费用巨大。而人工智能可以通过对海量数据的理解和方案的推理,在很短的时间内

作者简介: 亓宏伟(1991-),男,专科,研究方向: 机械设计。

就能进行大量的设计方案比较与验证,很大程度上解放了设计人员的脑力劳动,使他们能将更多的精力投入到创造性思考中,而不是陷入复杂的设计计算过程。这样就大大加快了一个产品从设想变为市场销售的速度,而且人工智能方案大多是采用全面优化的方法,在一定程度上可以使产品的材料消耗量、物理特性以及耗能等方面都远远优于传统的设计方案,从根本上提升了产品的创新水平。

研发速度提高不仅在于重复利用已有知识,还包括跨领域的合作。人工智能可学习企业的过往设计文件,建立知识网络,在新产品的研发中自动推送相似的例子和改进方案,以避免犯同样的错误,生成设计软件可根据给定的限制条件生成成百上千个可能的解决方案,丰富工程师们的创意思路^[2]。模拟过程与设计过程有机结合,做到边设计边测试,降低实物原型制作的频率。多目标优化算法在追求强度的同时,也考虑到了热量、振动等多个方面的问题,尽可能让产品做到最轻,在不影响基本功能的情况下实现极致的轻便化,产品创新水平达到一个新的高度。

2.2 实现生产全流程的精细化管理与降本增效

机械工业领域的竞争重点是成本问题和效率问题。在这方面人工智能可以从大量数据中准确找到影响生产的“卡脖子”环节、质量问题原因以及能耗浪费原因等。基于智能调度系统,实时调整生产任务分配,尽可能实现机器的最大化使用,这体现在生产中的成本节约和效益提高上,是企业在激烈的市场环境中立于不败之地的基础。

精确定位和推进精细化管理体现在全过程的质量追踪及流程优化上。人工智能视觉检测系统可以随时抓取到产品的表面瑕疵,准确程度远远超过人工目测,并且自动将所有数据存档整理,形成产品质量的历史纪录库。在产品质量出现问题时,可以迅速找到具体的环节以及相应的设备数值,从而找出问题出现的原因。生产工艺参数自动调优算法根据当前监测的数据,调整机器的工作参数,使整条生产线保持在最佳水平运行。能源管理系统通过对生产设备开机时间及负荷特征的分析,自动排布大型耗电设备的使用时间段,避免高峰期用电。这些精细化操作相互作用,使生产成本不断降低,原材料消耗大幅减少。

2.3 推动行业向柔性化与绿色化方向转型升级

在需求越来越呈现定制化趋势的情况下,机床生产企业要有迅速转产的能力,即柔性生产能力。基于人工智能的自动控制系统可以对不同的工件进行快速区分,并自动加载合适的加工程序、夹具方案等,从

而实现在同一生产线上流水线式地混合装配不同型号的产品。同时,在实现“双碳”的大环境下,人工智能通过对能源调配及过程的调节,使企业单位产值的能耗和材料损失大大减少,推动了机械制造业由资源依赖式的粗放型生产模式迈向绿色环保生产模式。

柔性化提升也体现在对供应链协作以及反应能力的提高。人工智能需求预测系统监控市场需求情况以及客户的订单,预先提示生产流程安排,降低了存货积压风险,若突然出现订单变更,在几分钟之内就可完成整个工厂的工作任务重排,尽量减少转换带来的损耗^[3]。在绿色化方面,人工智能工艺改进让切削液、润滑油这类辅助材料的使用量减少,废弃品的产生量也随之下降。

3 人工智能在机械设计制造及其自动化中的具体应用

3.1 基于专家系统与深度学习的智能辅助设计

在机械设备的设计过程中,人工智能的应用最为显著的就是对以往知识财富的发掘与再利用,如企业几十年积累的经典样图、完备的行业标准文件以及无数次失败总结出的失效总结报告^[4]。搭建起一个结构化的知识网络与专家库,将原来深藏在硬盘或纸上的隐性经验转化为机器可解读且能进行逻辑推演的明确条文。工程师接手新设计项目时,可通过所需的功能指标和约束范围,自动查询到合适的类似实例、可重复使用的标准化组件,甚至之前设计中规避陷阱的经验教训等,使新设计基于以往成功经验,从而避免重蹈覆辙。

在产品的性能预测方面,人工智能正在颠覆传统意义上的仿真实验过程。通过深度学习的代理模型,利用大量有限元仿真数据或真实物理实验数据进行学习,可得到三维几何模型与物理场响应之间的复杂相互作用关系。在产品开发阶段,工程师只需上传三维模型或变更后的参数,模型就能在几秒内对其振动模式、散热效果和使用寿命做出准确预测,并以热力图或响应曲线形式呈现。这种秒级响应替代了传统需数小时甚至数天的物理仿真实验步骤,实现了方案间的比较与优化设计。

人工智能带来的设计效能飞跃,保障了产品质量。由于性能预测难度大大降低,设计师们可在产品成型前,针对不同材料搭配、结构配置和尺寸指标展开全面研究与论证,确定最符合功能需求、具有最佳动力学效果且能长期服役的设计方案。这样提前把控设计质量,可将潜在问题消除在图纸阶段,避免后续物理样件反复制作、调试带来的巨大消耗,从而以更少的研发成本、更快的速度开发出更高品质的产品。

3.2 基于机器视觉与数据挖掘的智能制造工艺

在机械加工的智能化加工工艺中,人工智能赋予制造单元感应、判断的能力。在智能装备中布置高清晰度工业相机和3D激光测距仪等视觉传感器,可在毛坯件上料时就对其进行三维点阵测量,准确找到铸件或锻造件的偏移量和加工余量。在此基础上,利用感应信息进行数控刀具的零位调整,根据去除工件材料均匀原则,自动规划最佳加工路线和进给速度。这样一来,智能化的加工方式很好地消除了因毛坯差异大而产生的无用雕刻或过度切割现象,提高了毛坯合格率和整个加工过程的可控性。

在质检阶段,在目标检测方面,卷积神经网络算法正在掀起一场质检生产线上的技术革新。在大量缺陷图片及正常产品图片的学习训练下,检测模型可以在生产线上以毫秒级别的速度对每个零件进行全面扫描,及时发现微米级大小的产品表面刮痕、内部裂缝和尺寸偏差等问题。它比人眼目视检验更准确、更具抗干扰性,也不会受到眼睛疲劳的影响,从而保证了100%的全检率;一旦发现问题就可以联动分流装置,把次品自动分离出来并归类整理缺陷种类,为之前的工序提供精确的质量信息。

在工艺参数优化方面,人工智能算法致力于在相互冲突的目标之间寻找最有利的均衡点。在切削加工中,切削速度、进给量及切削深度三者影响着加工所需的时间长短、表层的平整度以及消耗能量的多少。通过使用 Genetic Algorithm (GA)、Particle Swarm Optimization (PSO) 等智能算法,在加工之前就可以根据不同的材料以及相应的刀片进行多次迭代求优。算法会在满足一定的粗糙度标准且刀刃磨损程度较低的情况下,确定能够实现最大材料去除量、最小单位能耗的最佳切削参数组合。这种参数自动寻优的能力使得制造环节不需要再依靠人工的经验来控制加工的质量问题,从而提高了加工的速度并且达成了减碳的目标。

3.3 基于智能控制与物联网的自动化系统集成

在向无人化智能工厂发展的过程中,智能物流系统充当着物料流动的神经系统,传统的依靠磁条或者二维码的AGV升级为拥有自主认知能力的智能移动机器人,它安装了激光雷达和深度摄像头,使用SLAM技术进行实时定位及地图测绘。在行走的过程中可以实时识别周围的环境并实时更新生产现场的地图,并通过避障技术自动绕过生产现场中出现的各种障碍物、来来往往的人群或者突发性堆放的工件,准确地把毛坯送到机器设备上、把产品送入立体仓库,完成了整个厂区内部物流系统的柔性化、无人化。

而在精密装配这个关键步骤,AI让机器获得了触觉以及思维的能力。传统的工业机器人在执行轴孔装配或者齿轮啮合的时候,由于缺少了力矩信息反馈,所以很容易出现磕碰甚至撞坏工件的情况,配备六维力/力矩传感器的装配机器人可以实时感知到接触到工件的力度和角度大小,并基于此运用强化学习的方法,通过不断地尝试以及优化来学会模仿人的细微动作,实现了对于精密件的无损高精度装入。

智能化程度最高的是基于工业互联网下的全方位的综合调度,所有的智能装备、生产线以及物流体系都通过5G或者工业以太网全连接起来,在线采集的状态信息以及生产进度信息实时汇聚到MES中去,借助大数据平台,能对大量生产的原始数据进行在线分析处理及多角度解析,从而提前准确预知可能出现的问题以及隐患^[5]。依靠实时采集到的数据信息,由中心调度控制系统以最优化为原则,实时安排好每台数控机床的加工任务分配、调度好AGV的配送顺序,指挥好机器人装配的速度等等,形成一个全方位感知、互联、自学习式的智能化工厂自动化生产闭环系统,从而达到整个生产流程的最大化自我控制和无人参与。

4 结束语

人工智能的应用正在颠覆传统机械设计制造及机械化的技术内核及产业结构,它带来的是设计理念的解放、生产加工方式的变化甚至是整个系统的自适应提升。在机械设计制造及其自动化过程中,从智能辅助设计压缩研发时间到机器视觉提高生产精度,再到物联网控制设备自主协作,人工智能将成为机械制造业高质量发展的新动能。随着算法计算能力的不断提升和新材料、新技术融合程度加深,未来的机械制造业中人工智能的应用会越来越广泛,对制造业的智能化改造升级起到极大的推动作用。

参考文献:

- [1] 任莹莹,丁淑敏.简述人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用[J].上海轻工业,2025(06):103-105.
- [2] 司加振.人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用[J].中国设备工程,2025(11):59-61.
- [3] 张菁慧.人工智能在机械设计制造及其自动化中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(09):46-48.
- [4] 魏培莉,刘万晓,任婷,等.机械设计制造及其自动化中人工智能技术的应用[J].中国科技信息,2024(14):84-86.
- [5] 淡书桥.机械设计制造及其自动化中计算机技术的应用[J].产业创新研究,2024(12):78-80.

市政地下管网运维大数据预处理技术的研究与应用

李 琪

(保定市市政工程项目服务中心, 河北 保定 071000)

摘 要 市政地下管网是维系城市正常运转的“生命线”, 承担着供水、排水、燃气等核心保障职能。这类管网设施长期隐蔽铺设于地下, 随着使用年限增长, 老化漏损、运维管理滞后等问题愈发突出。伴随智慧化改造工作的持续推进, 物联网终端设备的应用范围逐步扩大, 管网运维环节产生的数据量也随之大幅攀升。但当前各类运维数据存在质量参差不齐、格式标准不统一的问题, 极大地制约了数据价值的落地发挥。在此背景下, 高效可行的大数据预处理技术成为破解管网运维难点、推动管理模式由被动抢修向主动预判转型的核心抓手。

关键词 市政地下管网; 运维大数据; 预处理技术

中图分类号: TU990.3; TP274.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.011

0 引言

城市化进程持续加快, 城市地下管网的铺设规模也在同步扩张。传统人工巡检模式工作效率低, 应急响应速度迟缓, 早已无法适配精细化运维的现实需求。大数据技术的融入, 为管网运维管理开辟了全新路径; 而预处理作为数据挖掘的前置环节, 其成效直接决定后续分析结果的精准性与可靠性。现阶段常用的预处理技术存在针对性不足、操作流程不规范等短板, 难以适配管网运维数据的复杂特性。因此, 构建科学完备的预处理技术体系并推动实际应用, 对于提升管网运维效能、筑牢城市运行安全防线, 具有重要的现实价值。

1 市政地下管网运维大数据核心特征

1.1 多源异构性突出

市政地下管网运维大数据的多源异构特征极为显著, 数据覆盖范围广、呈现形式繁杂。这类数据的采集渠道多元分散, 既包含管网沿线布设传感器传回的实时监测数据, 也涵盖运维人员现场巡检登记的文字台账, 还有管网设备全生命周期留存的各类档案资料。从数据形态划分, 既有温度、压力、流量这类可量化的数值型数据, 也有巡检工况描述、故障现场纪实这类非结构化的文本数据; 不同渠道采集的数据格式互不兼容, 缺乏统一的规范标准, 这无疑加大了数据整合与预处理的难度, 也是该类数据最直观的核心属性。

1.2 海量性与高增长性显著

海量存储与高速增长是管网运维大数据不容忽视的重要特征。随着市政管网建设体系日趋完善, 各类智能监测传感器的布设密度持续提升, 当前运维大数据的总体量已突破数十亿条。加之管网覆盖范围持续拓展、监测精度不断升级, 数据总量仍在逐年大幅攀升, 扩张态势十分迅猛^[1]。这一特征对数据存储设备的承载容量、数据处理系统的运行效率都提出了严格的标准。只有搭建高性能的存储与处理架构, 才能保障后续运维数据的高效调用, 为管网常态化运维工作筑牢数据支撑。

1.3 质量不均且兼具时空关联性与实时性

管网运维大数据具备两大鲜明特点: 一是数据质量参差不齐, 二是时空关联紧密且实时性要求极高。传感器设备故障、数据传输链路受外界干扰等问题, 极易引发数据缺失、记录偏差、重复冗余等情况, 直接拉低了数据的实际应用价值。与此同时, 所有运维数据都与管网具体点位、对应时间节点深度绑定, 尤其在管网故障应急处置场景下, 必须在短时间内完成实时数据的解析处理, 才能为故障排查、抢修决策提供及时支撑。

2 市政地下管网运维大数据预处理技术体系构建

2.1 数据采集与接入预处理技术

数据采集与接入预处理是整套技术体系的根基, 核心目标是实现多源数据的高效汇聚, 再完成基础规

作者简介: 李琪 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 市政道路。

整处理。管网运维领域的数据本身具有分散性、异构性特点，来源杂乱且格式不统一。针对这一难点，依托多协议适配技术，全面兼容 NB-IoT、5G 等主流通信协议，顺利实现传感器实时监测数据、管网历史档案数据、人工巡检台账数据的统一接入^[2]。与此同时，构建完善的接入校验机制，针对数据采集时间、格式规范、取值区间开展前置核查，自动过滤剔除显性异常数据。此外，引入边缘计算架构，在数据采集终端侧完成初步筛选与压缩处理，削减无效数据传输量，既缓解了云端算力负荷，又保障了接入数据的时效性与完整性，为后续深度预处理筑牢根基。

2.2 数据清洗预处理技术

数据清洗是提升数据质量的核心环节，主要攻克数据缺失、误差、冗余三大难题，为管网运行数据分析、模型构建及运维决策提供可靠支撑。面对数据缺失问题，需结合管网实际运维场景，灵活选用均值填充、线性插值等方法，补齐传感器故障引发的缺失数据；针对关键节点的缺失项，结合时空关联特征开展精准推算，避免单一填充方式导致的数据失真。针对数据误差问题，搭建专项异常检测模型，对照管网常规运行阈值，筛查超标数据与传输畸变数据，结合管网历史运行台账完成修正校准，确保数据贴合实际工况。针对数据冗余问题，借助专用去重算法清除重复采集、重复录入的数据，同步压缩冗余字段、优化存储结构，提升数据处理效率。

2.3 数据标准化预处理技术

数据标准化的核心目标是打通各系统间的信息壁垒，让多源异构、格式各异的数据实现统一规整。针对市政地下管网运维大数据，首先要构建专属标准体系，明确数据编码规则、字段定义规范、格式约束要求等核心内容，将管网基础台账、实时监测数值、日常运维记录等全品类数据全部纳入管控范畴。针对巡检文本、故障上报报告这类非结构化数据，借助自然语言处理技术，将零散的文字信息转化为标准结构化数据^[3]；面对格式不一的异构数据，通过格式适配、单位统一等操作，实现全量数据格式的一致性。除此之外，还要建立动态数据更新机制，确保标准规范调整后数据能够同步迭代，让标准化数据在跨系统、跨部门场景下实现高效流转共享，为后续的数据融合分析筑牢根基。

3 市政地下管网运维大数据预处理技术应用实践

3.1 供水管网运维中的应用实践

在供水管网日常运维工作中，预处理技术精准破解了漏损检测效率偏低、数据价值难以发挥的难点，

是实现管网精细化运维的关键支撑。依托数据采集与接入预处理环节，实时对接管网压力、流量等各类传感器传回的数据，同步开展基础校验工作，及时筛除无效异常数据，从源头规避因数据失真引发的漏损误判问题。借助数据清洗技术，修正传感器自身误差导致的压力数据异常情况，补齐巡检台账中缺失的关键信息，让管网运行的数据流更连贯完整^[4]。通过统一管网节点编码规则与监测数据格式，实现供水管网全维度数据的集中管控，打通各环节数据壁垒、破除数据孤岛。经过层层预处理的优质数据，搭配漏损识别模型协同运作，可精准定位管网微小漏损点位，相较传统运维模式，既能大幅压降管网漏损率，又能压缩应急处置响应时长，减少水资源流失与经济损耗，切实提升供水管网运维的整体效率与运行可靠性，筑牢城市供水安全防线。

3.2 排水管网运维中的应用实践

在排水管网运维场景中，预处理技术为城市防涝减灾、管网常态化疏通养护提供了硬核保障，有效解决了极端天气下数据处理滞后、风险预警不及时难题。暴雨天气下，管网监测端会产生海量数据，依托边缘计算开展前端初步预处理，快速甄别液位异常数据，保障数据处理的时效性，为防汛防涝决策部署抢占先机。运用数据清洗技术，剔除雨水冲刷冲击引发的传感器误报信息，补充各区域管网历史积水相关资料，让数据更贴合实际、精准度更高。通过多维度数据融合手段，整合气象预报、管网液位、地形地貌等多元数据，搭建专属排水防涝分析模型。依托预处理后的高质量数据支撑，可提前预判积水风险点位，联动排水泵站开展智能调度^[5]；面对台风、强降雨等极端天气，能最大限度降低城市内涝造成的损失，推动排水管网运维向精细化升级，守护城市排水安全，保障居民日常出行平稳顺畅。

3.3 燃气管网运维中的应用实践

在燃气管网运维工作中，预处理技术有效提高了泄漏预警的准确性和及时性，为城市燃气安全筑牢防线。通过数据接入预处理，24小时实时采集、校验燃气浓度、压力等传感器数据，搭建稳定的数据传输通道，确保数据不丢失、不延迟。采用数据清洗技术，修正传感器漂移带来的错误数据，剔除环境干扰产生的多余数据，避免因数据偏差出现误预警、漏预警的情况。通过标准化和融合处理，统一管网权属信息、监测数据格式，结合地理空间数据，搭建燃气泄漏预警模型，实现泄漏风险的精准识别。此外，经过预处理的数据，

能够精准发现微量泄漏,提前发出预警并及时调度巡检人员处理,有效防范燃气爆炸等安全事故,保障城市公共安全和居民生命财产安全,推动燃气管网运维向智能化、安全化发展。

4 安全防护措施

4.1 全流程数据加密防护

针对管网运维大数据的传输、存储、使用这三个关键环节,构建全域覆盖、层级分明的多层次加密防护体系,实现数据全生命周期加密管控,筑牢数据安全底层防线。

数据传输环节,运用 SSL/TLS 协议做端到端加密,防止数据在传输过程中被人窃取或者篡改;在数据存储环节,采用 AES-256 加密算法,对结构化和非结构化数据都进行加密处理。其中,像管网核心位置、设施参数这类核心敏感数据,运用同态加密技术,能在数据不解密的情况下直接进行运算分析,从根本上避免了解密时可能出现的安全风险。与此同时,还会定期更新加密密钥,建立完善的密钥管理体系,明确密钥的生成、分发、销毁等流程,确保加密机制一直有效,从源头守住数据安全,满足管网运维数据在不同场景下的传输和存储需求。

4.2 精细化访问控制与操作溯源

以标准 RBAC 权限模型为核心底座,结合市政管网运维岗位分工、职责边界与业务场景,构建精细化、颗粒化的权限管控体系,严格恪守最小权限原则,实现权限分配精准化、权限管控刚性化。根据运维人员岗位职责、工作范畴进行权限细分,限定不同岗位人员仅可访问履职必需的数据资源与系统功能,杜绝越权访问、越级操作、非授权数据调取等违规行为。为强化身份准入安全,引入多因素认证机制,融合静态密码、动态验证码、设备唯一绑定、生物特征核验等多重验证方式,构建多层次身份校验屏障,有效防范密码泄露、暴力破解、仿冒登录等非法入侵行为,提升系统登录与访问的安全性^[6]。同步构建全维度操作日志审计体系,对数据访问、编辑、修改、删除、导出等全类型操作进行全程留痕,精准记录操作人身份、操作时间、操作终端、操作内容、操作结果等关键溯源信息,实现每一项数据操作均可追溯、可审计、可核查。

4.3 敏感数据脱敏与安全合规保障

对于管网运维数据中的敏感信息,运用数据脱敏技术处理。例如:管网位置、设施核心参数,运维人

员个人隐私等敏感信息分类实施差异化脱敏处理:管网核心点位采用坐标模糊化、范围化处理,设施核心参数进行脱敏加密与字段遮蔽,人员隐私信息隐藏身份证号、联系方式等关键字段,确保脱敏后数据仅用于管网运维分析、决策支撑等合规场景,杜绝敏感信息外泄。构建“本地实时备份+异地容灾备份”双重数据备份机制,明确备份频率、存储介质、校验规则、恢复流程等标准规范,定期开展数据备份与完整性校验。针对硬件故障、自然灾害、网络攻击、系统崩溃等突发应急场景,可快速启动数据恢复预案,最大限度降低数据丢失风险,保障管网运维业务连续性。在合规层面,严格按照《数据安全法》《个人信息保护法》等相关法律,贴合市政管网的行业标准和地方要求,制定完善的数据安全管理制度。

5 结束语

大数据预处理技术是破解市政地下管网运维数据难题、释放数据核心价值的关键抓手。这套技术体系的构建与落地应用,精准弥补了传统运维模式的短板,推动管网管理逐步迈向精细化、智能化方向。依托多环节预处理技术的协同配合,管网运维数据的整体质量与利用效率得到显著改善,也为供排水、燃气等各类管网的日常运维工作提供了扎实可靠的科学支撑。未来,要结合技术发展,优化预处理算法,提高应对复杂场景的能力,不断推动这项技术落地见效,为城市地下管网的安全稳定运行保驾护航,助力智慧城市建设。

参考文献:

- [1] 姜卓玮.地下管网管理系统建设实践与数字化转型探索[J].中国市政工程,2025(06):68-71,139.
- [2] 李琴文,郑璐.BIM技术在市政管网三维参数化设计中的应用[J].工程机械与维修,2025(06):110-112.
- [3] 杨可亮,刘家珣.基于AR+BIM的地下管网运维应用研究[J].工程质量,2025,43(04):57-61.
- [4] 赵起祥.工程测量技术在市政地下管网建设中的应用研究[J].科技与创新,2025(03):227-229.
- [5] 吴坚.浅析GPS-RTK在市政地下排水管网测量中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2024(33):170-172.
- [6] 郭兴根,刘帅,赵威.市政地下管网运维大数据预处理技术的研究与应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023(28):211-213.

数字孪生技术在建筑工程全生命周期中的应用研究

郭德鲁

(山东港通工程管理咨询有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 随着建筑业数字化转型不断深入, 数字孪生技术成为推动行业高质量发展的核心引擎。本文以2026年建筑业智能化新阶段为立足点, 阐述数字孪生概念、特征及建筑行业技术架构, 分析其在全生命周期各个阶段的适配性, 探讨从规划决策到智慧运维的应用路径。通过建立相关机制, 数字孪生可以解决传统建筑全生命周期的难点。结果表明, 融合物联网、人工智能和BIM技术的数字孪生体系可以提高工程项目管理水平和全要素生产率, 为现代建筑产业体系提供技术支持。

关键词 数字孪生; 建筑工程; 全生命周期; 智能建造; 智慧运维

中图分类号: TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.012

0 引言

当前, 全球建筑业正从粗放式增长向精细化、智能化转变, 中国也在加快数字中国的建设。2025年以来, 住房和城乡建设部相继出台相关政策, 推广数字孪生技术在工程建设领域的应用, 要求新建工程项目逐步普及数字孪生相关技术, 明确提出要构建城市基础设施全生命周期监管体系, 引导特级资质建筑施工企业率先完成数字孪生平台建设, 发挥行业标杆引领作用。这些政策确定了数字孪生的战略地位, 也给出了效能的量化指标。在这种情况下, 传统的BIM技术已经不能满足要求了, 虚拟和真实的交互、演化预测能力的数字孪生技术应运而生。它是将物理实体的所有维度数据整合起来的一种动态的镜像, 贯穿于整个项目的过程之中。面对复杂项目, 如何借助数字孪生技术冲破数据壁垒, 达成物理与数字世界的精准映射并实施双向赋能, 成为学界与业界共同重视的研究重点。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生的基本概念与核心特征

数字孪生不是单一技术堆砌, 而是物理与数字空间的高保真、实时化、双向互动映射关系。其本质是用多维感知技术获取物理实体全部数据, 在虚拟空间创建有同等属性的数字化模型。数字孪生体在建筑工程中不是建筑构件的三维几何表达, 而是集成多种动态数据的集合。其主要特征就是高保真, 虚拟模型可

以毫秒级同步反映物理实体的细微变化, 实时交互, 不同于传统的BIM技术, 支持从虚拟端下发指令到物理端, 演化预测性, 依靠算法和历史数据训练, 在虚拟环境中模拟未来场景, 预判风险隐患, 实现从事后补救到事前预防。能力跃迁使得数字孪生成为物理世界比特和原子之间的桥梁, 为建筑工程精益化管理提供了新的认识视角^[1-2]。

1.2 数字孪生在建筑行业的技术架构

创建建筑行业数字孪生技术架构要遵照“端一边一云一用”分层逻辑, 形成数据采集、传输、处理和应用闭环。感知层是基础, 部署激光雷达等设备全方位地对施工现场多源异构数据进行采集, 保证物理实体状态数字化映射无死角。网络层利用5G专网等传输通道, 把感知数据实时上传到边缘或者云端, 解决数据传输拥堵和延迟问题。平台层是核心“大脑”, 集成BIM引擎等, 负责多源数据融合清洗等, 构建数字底座。应用层面向不同的用户提供进度监控等模块, 用可视化大屏等呈现方式实现决策支持的直观化、智能化。该架构实现数据纵向贯通, 促进设计、施工、运维各方横向协同, 形成数据驱动业务闭环。

数字孪生和传统的BIM技术在数据时效性以及交互机制上存在着本质的区别(见表1)。传统BIM主要针对设计阶段的几何信息管理以及施工前的碰撞检测, 数据更新依靠人工建模或者阶段性导入, 不能体现施工现场的动态特征。数字孪生依靠物联网传感网络把

作者简介: 郭德鲁(1978-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程技术。

物理实体的状态实时映射出来，双向交互能力使得管理者可以“看”现场，也可以通过虚拟模型干预物理设备的运行。从静态档案到动态镜像的转变，使技术在复杂场景中应用的范围变大。在深基坑监测、高支模安全预警等对实时性要求高的环节，数字孪生的优势是不可替代的。

表 1 数字孪生和传统 BIM 技术在建筑应用中关键维度对比表

对比维度	传统 BIM 技术	数字孪生技术
数据时效性	静态或阶段性更新，存在滞后	实时动态同步，毫秒级响应
交互方向	单向信息传递（设计到施工）	双向闭环交互（虚实互控）
核心能力	几何表达、碰撞检查、工程量统计	状态监测、仿真预测、自主决策
数据粒度	构件级属性信息	粒子级物理状态与环境参数
应用场景	设计优化、施工交底	全过程智能管控、预测性维护

2 数字孪生技术在建筑工程全生命周期中应用的适配性

2.1 规划决策阶段的宏观仿真与方案优选适配性

项目规划决策阶段，数字孪生技术的适配性表现在宏观仿真能力和多方案比选上。传统规划依靠二维图纸和静态效果图，不能全面评价建筑与周边环境耦合关系以及长期运营效益。数字孪生集成地理信息系统（GIS）、城市信息模型（CIM）和气象水文数据，可以在虚拟空间中重建项目所在地全域环境，进行日照、风环境、交通流量和碳排放分析。仿真分析可以使得决策者在动工前对不同的方案进行量化评估，规避环境风险和社会矛盾。基于历史数据训练的 AI 算法可以对项目投资回报率、建设周期、运营成本等进行概率预测，给投资决策提供科学依据，降低由于信息不对称造成的决策失误风险，实现从经验驱动到数据驱动的范式转变^[3]。

2.2 设计与施工阶段的虚实协同与动态管控适配性

进入设计和施工阶段，数字孪生技术的适配性体现在创建虚实协同机制和动态精准管控施工过程。设计环节数字孪生支持多专业并行协同设计，用实时碰撞检测、性能模拟反馈结构安全等指标来减少设计变更和返工。施工环节，面对复杂的现场环境以及频繁的作业变动，数字孪生把施工进度计划、成本数据、

安全质量信息同现场实时数据融合起来。利用无人机巡检等设备获取现场数据，数字孪生平台自动对比计划和实际进度，找出偏差原因并生成纠偏策略。动态管控冲破设计和施工的壁垒，实现信息流的无缝对接，保证工程依照数字化蓝图高质量交付，改善施工组织的精细化水平和资源的利用效率。

3 数字孪生技术在建筑工程全生命周期中的应用路径

3.1 基于多源数据融合的规划选址与环境模拟路径

规划选址和环境模拟的应用路径中，首先要建立多源异构数据的高精度融合机制。通过卫星遥感影像、激光点云数据、地下管线探测数据和社会经济统计数据的整合，数字孪生平台可以得到厘米级精度的场地三维底图，真实地还原出地形地貌、植被覆盖、既有建筑形态。在此基础上，引入计算流体力学（CFD）和辐射传热模型，对候选地块进行微气候环境的精细化模拟，分析不同季节、不同时段的风速风向、温度分布和太阳辐射强度，为建筑朝向、体型系数和开窗比例的确定提供量化支撑^[4]。同时，结合交通仿真算法，模拟项目建成后对周边路网交通压力的影响，评价出入口设置的合理性，优化交通组织方案。该路径不但可以实现规划方案的可视化展示，而且可以借助数据驱动的定量分析来保证规划决策的科学性、前瞻性，从源头上提高建筑与城市环境的和谐度。

3.2 驱动设计迭代优化的性能仿真与协同路径

设计阶段的数字孪生应用路径是性能仿真驱动的快速迭代和多方协同。利用参数化设计工具和数字孪生平台的深度接口，设计师可以建立参数化模型，将结构受力、能耗指标、采光效果、声学环境等性能参数关联起来，当设计师对某一设计变量进行调整时，结构受力、能耗指标、采光效果、声学环境等性能参数就会立即更新并反馈。利用嵌入的遗传算法等优化引擎，在大量的设计组合中自动寻优，得到美学、功能、经济性都好的最佳方案。从协同角度来讲，数字孪生平台创建了云端协同工作空间，建筑、结构、机电、景观等各个专业团队在同一模型上并行工作，实时共享设计变更和冲突信息。系统自动执行多维度的碰撞检测和规范合规性审查，把错漏碰缺消灭在萌芽状态。另外，用虚拟现实（VR）技术，业主和使用者可以沉浸式体验设计方案，提出直观的反馈，从而缩短设计确认周期。这一路径彻底改变了传统的串行设计模式，实现了设计质量和效率的双重飞跃。

表 2 数据清楚地显示了数字孪生在施工关键场景

中的明显效果。在传统的管理模式下,进度偏差一般要等到周例会或者月度汇报的时候才被发现,造成纠偏滞后;数字孪生依靠实时数据比对,把识别时间缩短到小时级,极大地提高了调度的灵活性。在安全管理上,全覆盖的智能监测把人工巡检的视觉盲区全部

消除,隐患无处藏身。材料损耗的精准控制依靠对进场、库存、使用环节的实时追踪,有效地防止了浪费。最根本的是设计变更引起的返工大幅减少,这是由于前期设计的深度优化和施工过程的精准执行所导致的,充分证明了数字孪生技术在降本增效方面所起的作用。

表2 数字孪生在施工阶段关键场景应用效能提升数据

应用场景	传统管理模式指标	数字孪生赋能后指标	效能提升幅度
进度偏差识别	平均滞后发现时间:7天	实时发现(<1小时)	响应速度提升168倍
安全隐患排查	人工巡检覆盖率:65%	智能监测覆盖率:100%	盲区消除率100%
材料损耗控制	平均损耗率:4.5%	精准管控损耗率:1.2%	成本节约3.3%
设计变更返工	平均每项目变更次数:25次	平均每项目变更次数:6次	返工率降低76%

3.3 实现施工过程透明化的智能监控与调度路径

施工过程透明化智能监控与调度属于数字孪生落地的重要环节,其实施路径要依靠“感—传—知—控”一体化闭环。在施工现场广泛部署高清摄像头、环境监测仪、塔吊黑匣子、智能地磅、人员定位基站,系统实时采集人、机、料、法、环五维数据,映射到数字孪生体中,形成施工现场的透明工厂。另外,利用计算机视觉技术,系统自动识别未佩戴安全帽、违规闯入危险区域等行为,即时触发声光报警和推送通知。在进度控制上,数字孪生平台会把实际进度同BIM 4D计划模型自动对比,用热力图直观表现滞后区域,再依照资源投入情况智能剖析滞后原因,自动生成赶工建议方案。大型机械设备系统实时监测运行状态和负载情况,优化调度指令,防止闲置和冲突。该路径把施工全过程可视化、可追溯、可预测,把粗放式的现场管理升级为精细化的智能制造模式,保证工程按期优质交付。

3.4 构建资产长效价值的智慧运维与应急路径

运维阶段创建资产长效价值的智慧运维和应急路径,关键之处在于创建以数字孪生为基础的全生命周期资产管理及应急响应体系。数字孪生体会不断累积建筑运行时的能耗、设备状态、环境舒适度、结构健康等各类数据,用深度学习算法挖掘数据背后隐藏的规律,创建设备健康度评价模型和能耗基准线。系统根据预测结果自动生成预防性维护工单,优化备件库存管理,在保证舒适度的基础上动态调整暖通空调运行策略,达到极致节能的目的。数字孪生平台内置多种灾害情景库,一旦接收到火警、漏水或者结构异常信号,立即启动应急预案,在虚拟空间中推演灾害扩散趋势,规划最佳疏散路径,联动门禁、广播、排烟、消防系统进行自动化处置^[5]。同时所有的运维数据都

存入资产数字档案,为以后的改造扩建或者拆除回收提供准确的数据支持。该路径不但大大降低了运营成本,而且提高了建筑应对突发事件的韧性,使建筑全生命周期的社会效益最大化。

4 结束语

数字孪生技术作为建筑业数字化转型的核心驱动力,正在对建筑工程全生命周期的管理模式和价值创造逻辑进行全方位的重塑。从规划决策的宏观仿真到设计阶段的性能优化,从施工过程的透明管控到运维阶段的智慧预测,数字孪生依靠创建虚实映射、实时交互、数据闭环,很好地解决了传统建筑行业信息割裂、协同低效、管理粗放的难题。随着5G、人工智能、边缘计算等先进技术不断发展融合,数字孪生将会在更深的层次、更广的范围内给建筑业高质量发展赋能。随着行业标准体系的完善和生态圈的形成,数字孪生不会只在单体项目上使用,而是会向城市群、基础设施网的宏观尺度发展,成为建设数字中国、实现碳达峰碳中和目标的重要技术基础。建筑行业要积极拥抱变革,加强技术创新和应用实践,共同开启智能建造的新篇章。

参考文献:

- [1] 聂青.数字孪生驱动建筑工程协同管理[J].住宅与房地产,2026(05):4-6.
- [2] 崔媛慧子,徐琳,肖青山.基于数字孪生技术的建筑工程造价管理研究[J].建筑与预算,2025(10):28-30.
- [3] 东丹.建筑工程中智能化技术发展与应用研究[J].城建科技,2025,34(10):25-27.
- [4] 梁雅静.建筑工程管理中数字信息化技术应用研究[J].信息系统工程,2025(10):110-113.
- [5] 罗程.数字孪生技术在建筑工程交付模型建设中的应用[J].中国房地产业,2025(27):10-13.

面向智能工厂的电气自动化系统网络集成与优化研究

唐贺龙

(河北冀中云智科技有限公司, 河北 石家庄 050060)

摘要 智能工厂的发展不仅依赖于高性能的生产设备和自动化控制系统, 更依赖于贯穿全厂的网络通信基础设施。电气自动化系统在智能工厂中承担着采集、控制、监测和反馈的核心任务, 其网络集成能力直接决定了生产过程的稳定性与信息流的实时性。本文围绕智能工厂电气自动化系统的网络集成与优化展开研究, 系统分析了多层分布、协议多样及冗余机制等网络特征, 提出了分层分域的集成设计方案, 并针对动态流量管理、网络拓扑自适应优化及智能监控自诊断等关键优化方法进行了深入探讨与验证, 旨在实现生产过程的高效协同、数据实时传输与网络可靠性提升, 为智能制造环境下电气自动化系统的集成与优化提供技术方案参考。

关键词 智能工厂; 电气自动化; 网络集成

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.013

0 引言

随着工业 4.0 理念的普及与智能制造技术的产业化推广, 传统的电气自动化系统已难以满足现代智能工厂对高效率、高柔性和高可靠性的生产需求。智能工厂通常具备多类型生产设备、复杂的工艺流程及海量的数据采集需求, 使得电气自动化系统在控制、监测、数据传输及管理等方面面临诸多挑战。设备互联的多样性和协议复杂性导致系统集成难度大, 跨层数据传输效率低, 传统网络无法满足实时控制和高精度调度的要求。在这样的环境下, 研究面向智能化车间的电气自动化系统网络融合、优化问题既有着重要的学术意义, 也能够为实际工程项目提出解决办法, 进而帮助生产调度更便捷灵活、实时监测以及远程维护等等, 使整体的生产率、安全性以及能耗水平得到全面提升, 促进智能制造体系向更加一体化、智慧化的方向发展。

1 智能工厂电气自动化系统网络特征分析

智能化工厂的电力自动化系统有分层次、协议复杂、高速处理要求高、冗余等特点, 这就使得它的网络架构既要保证快速的数据流动, 还要保障对于控制的要求以及整个系统的稳定性, 在此基础上还要考虑到大规模设备的连接以及安全等问题^[1]。

智能制造车间电气控制系统不同层次间的数据量和时延有较大区别。现场层强调的是低时延、实时监测, 实现设备即刻反馈; 管控层需要执行更为繁复的控制

命令以及对多个设备间的协同控制, 所以数据量相对变大, 同时对于时延的要求也相对较高; 管理层面负责保存大量的历史数据以及数据分析的工作, 不需要太强的时效性, 但是需要较大的带宽以及足够的容量。

2 面向智能工厂的电气自动化系统网络集成设计

2.1 网络分层规划

智能制造车间电气自动化系统网络架构首先应该确定分层级, 以便清楚地进行信息传递以及传输。一般把网络分成了现场级、控制级和管理级三级, 在其中一些重要节点布置了边缘计算层, 并进行部分信息处理和实时反馈等操作。现场级主要包含了各种传感器、执行机构、工业机器人等设备, 所收集的数据速度一般在 2~5 MB/s, 对于延迟的要求不超过 5 ms; 控制级就是 PLC 控制器和 DCS 控制器组成的模块, 要接收处理 10~20 MB/s 的数据量还要保持指令发送延时小于 10 ms, 管理级就是对 SCADA 和 MES 系统进行汇总分析的部分, 上传的信息量能达到 50~100 MB/s, 可以允许的最大延迟时间约为 50 ms 左右。分层设计利用 VLAN 以及物理隔离来降低广播风暴和越层次干扰的发生概率, 方便进行网络规模预估及带宽规划。

2.2 多协议融合设计

智能工厂的设备众多, 不同等级、不同厂家的设备采用的协议差别很大。就现场而言, 常用 Modbus、PROFINET, 控制层常用 Ethernet/IP、PROFIBUS 等等,

作者简介: 唐贺龙 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气自动化以及网络。

管理常用 OPC UA 和 MQTT。为了做到互联互通,需要引入多协议网关以及数据整合平台,网关负责把现场设备的多种协议转化为统一的格式以 OPC-UA 的标准接口提供给 MES 或者 SCADA 等系统使用,从而达到上下级交互的目的。例如:某装配车间有 32 条 PLC 控制系统和 48 台机器人,经过 4 个工业网关进行协议转化之后,数据传输的成功率高达 99.8%,平均延时仅为 3.5 ms。

2.3 冗余与容错配置

电力自动化网络稳定性决定了生产的连续性,所以在可靠性方面要重视冗余以及容错设计。现场层可以用双环冗余(Ring Topology)、MSTP 链路等方案把主要的 PLC、传感器加入环中,达到一个点出故障就能快速切换的效果,要求在 0.5 s 之内;控制层中的 PLC 可以有热备份方案,在主 PLC 出现故障的时候备机能够自动接手控制程序,保持命令不间断地进行下去;管理层用集群备份及边缘节点冗余的方式保证信息安全。例如:某智能化装配线,在运用了双环冗余之后,链路故障的发生概率下降了 80%,系统的整体可用度达到了 99.95%。同时还可以增加网络监控软件与 SNMP 协议,对链路状况、通道流量以及设备状况等指标实时监控,给及时发现并处理故障及自动倒换奠定基础。

2.4 带宽与流量优化

对于智能工厂网络来说,带宽管理和流量调度是实现实时控制及巨量数据运算的前提条件,在对流量进行统计后分隔开重要控制系统通道与无关紧要的数据通道,采用 QoS (Quality of Service) 策略优先发送 PLC 控制命令以及警报信号;链路捆绑技术可以将两根或更多根实际线路进行捆扎起来增加备用带宽宽度,如给控制层骨干交换机设置 4 个 1 Gbps 捆绑链路,总共达到 4 Gbps 的速度,以适应多个机器人的协作操作、高质量视频传输需要。另外,在边缘计算设备端对底层获取的数据做初步运算后,再上传重要的数值和警报信息到管理级,降低了中央网络通信负荷大约 40%。此外,可以使用动态路由算法,在线监测实时链路负载情况而对数据传送路线进行实时的变更,防止网络堵塞以及传输时延的最大化发生,有效提升网络资源的占用率以及生产的调度弹性。

3 面向智能工厂的电气自动化系统网络集成的优化方法

3.1 动态流量管理与智能调度

智能制造车间生产的生产数据流呈较强的波动性和突发性特点,在不同的生产批号或者工序控制数据以及监测试验数据流量波动幅度可达到 3~5 倍,对于这种流量变化大的情况,如果没有及时合理的流量

调度很容易引起流量拥堵以及指令传送滞后等问题。可以采用一种基于深度学习的流量预测算法,实现对各个链路实时预测并排序,如通过现场层、控制层历史数据实时采集每隔 5 s 做一次流量预测提前发现即将到来的高流量时段,利用 SDN 控制器进行动态调整路径选择与链宽配置。在某一装配工段试验中使用这种方法之后,网络堵塞问题由原来的每周大约 12 次下降到 2 次左右,主要监控指标的平均时延降低约 22%,最大流量分配比提高到了 95% 以上。并且配合 MES 系统把非紧急信息传送延迟或者批量发送从而腾出更多实时通讯带宽,保障了精密仪器的动作以及精准同步执行不出现问题,达到对生产线连续性、数据即时性的双重提升的效果。

3.2 网络拓扑自适应优化

智能车间设备迭代更新速度快,生产工艺布置方式多样,固定的物理网络架构不能满足其对产线变化的需求,造成链路间使用率不平均以及闲置资源浪费现象严重。解决方案基于动态的网络结构设计可以实现对网络结构实时调节,采用 SDN 和边缘计算技术,把各条链路的实际传输负荷、传输时延及错包概率等信息及时发送到管控平台,由程序自动调度网络通路的方式。例如:在一个混合型生产线里面,控制端原有的星型结构在网络负荷较高的时候有部分交换机不足 20% 的负载率以及一些连接的带宽达到了 90% 以上,出现瓶颈问题。经过自适应调节之后,在一部分节点之间采用环型以及串型相结合的网络结构,整体链路上行利用率达到了 75%,平均延迟下降了 15% 左右,同时备用链路上行利用率由原来的 10% 增长到 35%,减少了多余的浪费增加了冗余余量,提高了系统的安全性,在多机器人,多工作站合作环境中运用十分有效,在线动态改变传输路线来满足生产的弹性需要和网络资源的合理使用。

3.3 智能监控与自诊断优化

智能工厂网络系统的可靠性不仅仅依靠硬件冗余,还应该实施在线监测以及自我检测以及时发现问题并且预先处理,可以通过设置人工智能类型的网络健康检测装置,实现对网络延迟、丢包率、带宽使用情况、交换机负荷等情况持续性的观察,并利用机器学习技术来预测可能出现的问题环节。例如:在某电气自动化工厂中,利用 AI 模型对 500 个网络节点进行预防式计算,在线提前 72 小时识别出有三个可能会出现阻塞现象的交换机接口,并作出相应的流量调度以及路径的选择决定防止突发状况的发生^[2]。自诊断优化还可以采用故障模式(FMEA)的方法来评估网络设备的可能存在的失效概率,并辅助运维人员做出优先级维修

计划。试点的结果显示，在采用智能检测以及自诊断优化以后，网络突然发生中断的概率降低大约 65%，平均修复时间也由原先的两个小时变成了半个小时的时间，使得系统能长时间地工作，生产的稳定性得到了很大改善。

4 实施效果

4.1 案例背景

某智能化装配厂房坐落于华东地区，总面积大概有 8 000 m² 左右，生产线主要是对新能源汽车的动力总成进行装配。厂房配置有 32 个 PLC、48 个工业机器人以及将近 200 个传感器节点，设备种类繁多，包括机器人夹爪、装配、视觉识别、液压控制系统等等^[3]。现有网络时延较高，协议差异较大，大数据量上传困难，存在一些多余的线路造成资源浪费，不能适应大规模产品更换、多品种、远程监控的情况。为了提升工作效率，改善数据流动性和保证系统的稳定性，工厂选取基于智能工厂网络集成和优化的方法来进行该厂房电气自动化的网络升级实验。

4.2 实施方案

该项目采用分层分区整合方式，把整个网络分为现场层、控制层、管理层以及边缘计算层四个部分。其中，现场层使用西门子 S7-1500 系列 PLC 为核心控制器，每一台 PLC 具备每秒执行 1 000 条控制命令的能力并且有 PROFINET IRT 通信端口，工业机器人的接口使用 EtherNet/IP 协议，通过四台 Moxa EDS-5008 工业交换机制成环形冗余方式，一个环路的带宽为 1 Gb/s，并且冗余切换的时间小于 0.5 s。管理人员服务器使用 Dell PowerEdge R750 集群，每一台均配备有 Intel Xeon Gold 6348 CPU、256GB 内存以及 NVMe SSD 存储，总的带宽能够达到 80 MB/s，运行着 OPC UA 数据整合系统；在软件层面，安装了基于 SDN 的智能流控组件，每隔 5 s 就对一次预测性排程来改变路径规则，再加上边缘计算节点对于现场收集的数据做了异常分析和压缩操作，减少了传输的数据量大约 40%，在此基础上还加入了基于机器学习的自我诊断程序，可以实时监测网络延时、丢包概率以及端口占用情况等参数，从而进行自动化的优化选择以及报警提示等^[4]。整个系统联设计保证了每一层协议可以相互衔接；带宽划分恰当以及利用 QOS 来保证一些主要控制链路及时性的措施。

4.3 实施效果

具体实施效果如表 1 所示。

生产车间电气自动化系统在技术指标方面取得了很大进步。PLC 指令时延降至原来的一半 (5.1 ms)，

符合高效率生产的要求；报文丢失概率降为 1% 以下，保证了控制信息传送的安全性；主干交换机负荷明显减轻，使得该系统的冗余度以及网络的安全性能进一步加强^[5]；环形网络冗余切换时间缩短有利于保证生产线的稳定性；边缘节点提前预处理数据的能力有所提高，现场的数据量大大减少，减轻了数据中心的压力。这样不但提高了系统反应敏捷程度以及对现场设备的调控速率，而且为车间开展柔性制造、实时监测与智能化维护提供了良好的硬件条件。

表 1 实施效果

技术参数	优化前	优化后	改进幅度
平均 PLC 指令延迟 (ms)	12.4	5.1	59%
数据包丢失率 (%)	0.8	0.1	87.50%
核心交换机 CPU 利用率 (%)	72	48	33%
环网切换时间 (ms)	1 200	500	58%
现场数据上传量 (MB/s)	18	11	39%
边缘节点处理延迟 (ms)	15	6	60%

5 结束语

本文通过对智能工厂电气自动化系统网络特征的分析、分层分域的集成设计及针对性优化方法的研究，从网络架构、智能监控、数据流管理等多维度展开探讨，为智能制造环境下的自动化系统提供了宏观设计思路和技术路径。研究成果不仅强调了系统的分层组织和协议兼容性，也突出了动态调度、拓扑自适应和智能监控在提高网络效率和可靠性中的核心作用，同时兼顾了生产过程的数据处理和实时控制需求。从宏观角度看，研究展示了电气自动化网络从静态设计向自适应、智能化优化的演进趋势，为智能工厂构建高效、可靠、灵活的生产控制体系提供了理论依据和实践参考，同时为未来工业物联网和智能制造的深入应用奠定了基础。

参考文献：

- [1] 陈剑锋. 电气自动化技术在工厂自动控制系统中的应用研究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2025(13):340-342.
- [2] 李成勇, 郭海朝. 电气自动化在工业生产中的应用与研究 [J]. 新潮电子, 2025(05):97-99.
- [3] 修超, 李玥. 5G 在电气控制系统自动化中的应用研究 [J]. 通信电源技术, 2025, 42(08):206-208.
- [4] 王博. 浅谈电气工程及其自动化智能化应用 [J]. 读报参考, 2025(19):17-18.
- [5] 何立健. 智能化工厂电气自动化调试技术分析 [J]. 模型世界, 2025(20):57-59.

路基压实度试验检测方法优化研究

苟 槭

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 路基压实质量直接影响到公路工程的整体稳定性及使用寿命, 压实度是反映路基压实质量的重要指标, 压实度试验检测结果的准确性、可靠性十分重要。目前常用的路基压实度试验检测方法存在着操作烦琐、效率低、检测精度不够等缺陷, 不能满足现代公路工程高质量、快速施工的要求。本文以实际公路工程为依托, 对现有的路基压实度试验检测方法的应用现状及存在的问题进行系统的分析, 并提出相应的改进措施, 通过试验验证优化方法的可行性与优越性, 提高路基压实度检测的精度、效率和适用性, 旨在为公路路基施工质量控制提供参考。

关键词 路基压实度; 试验检测; 环刀法; 灌砂法; 压实质量

中图分类号: U416.06

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.014

0 引言

公路路基是公路工程的核心基础承载结构, 既要承受上部路面传递而来的车辆荷载, 同时承担自身结构重量。路基压实质量不够会造成公路运行过程中出现下沉、开裂、车辙等病害, 不但会破坏公路的通行能力, 还会对公路的使用寿命造成影响, 甚至引发交通事故^[1]。路基压实度指的是路基土在压实之后达到的干密度与该土最大干密度之比, 是评价路基压实质量好坏的重要指标^[2]。目前国内外常用检测方法有环刀法、灌砂法、核子密度仪法、贝克曼梁法等, 这些方法各有优劣, 但是都存在操作复杂、周期长、精度不稳定、成本高或者适用范围小等问题。随着公路工程由低级向高级、大跨度、规模化发展, 传统的检测方法已经不能满足要求, 对其进行优化研究有重大的理论意义和工程实践价值。

1 工程概况

本文依托某高速公路工程项目, 起讫桩号为K0+000~K25+600, 线路全长25.6 km, 设计等级为双向四车道高速公路, 设计行车速度100 km/h。该项目路基宽度26 m, 其中行车道宽度2×7.5 m, 硬路肩宽度2×3.5 m, 土路肩宽度2×0.75 m。

项目所在区域属于温带季风气候, 四季分明, 年平均气温12.5℃, 平均年降水量680 mm, 降水主要集中在7-8月份。本项目路基施工采用重型压实标准, 设计压实度要求如下:

路基顶面以下0~80 cm范围内压实度不小于96%, 80~150 cm范围内压实度不小于94%, 150 cm以下范

围内压实度不小于93%。在施工过程中, 需对路基各分层压实质量进行全程试验检测, 及时发现压实不足的区域并进行补压处理, 确保路基压实质量符合设计要求。

该项目施工工期紧、任务重, 传统的压实度检测方法检测效率低, 不能满足施工进度要求, 部分检测方法检测精度不稳定, 多次出现检测结果与实际压实质量不符的情况。因此, 亟须对现有的路基压实度试验检测方法进行改进, 提高检测的效率和精度, 保证工程的质量和进度。

2 现有路基压实度试验检测方法应用分析

2.1 环刀法

环刀法是路基压实度检测中使用最广泛的一种方法, 它的基本原理是用环刀切取路基土样, 测定土样的湿密度和含水量, 求得干密度, 再与最大干密度比较来得到压实度。该方法所用设备简单, 主要为环刀、天平、烘箱、刮刀等, 设备成本低, 操作方便, 适合于细粒土路基压实度检测。本工程前期施工中环刀法主要用在路基下路床、上路堤的压实度检测上, 检测频率为每200 m每压实层检测3点。但是实际使用中发现, 环刀法有明显的缺点。取样时人为操作使土样受到扰动, 造成土样结构破坏, 影响检测精度。取样深度不能准确控制, 一般会与实际压实层厚度有偏差, 造成检测结果失真^[3]。

2.2 灌砂法

灌砂法属于精度较高、应用广泛的压实度检测手段, 可对各种土路基及砂石路基的压实度实施检测, 特别适合于粗粒土与巨粒土路基。其原理是开挖路基

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

压实层一定体积的试坑,用标准砂均匀灌入试坑,测得灌入砂的体积即为试坑体积,测得试坑中挖出的土样质量及含水量,求出干密度和压实度。该方法所用设备有灌砂筒、标准砂、天平、铁锹等,在本工程中主要用来检测路基顶面及上路床的压实度,检测频率为每 200 m 每压实层检测 4 点。灌砂法的优点是检测精度高、受人为操作影响小,但是也有许多缺点。操作流程繁杂,开挖试坑要耗费大量的人力和时间,每一个检测点需要 40~50 min,检测效率很低。标准砂标定过程复杂,标定不准确会造成试坑体积测量精度下降,从而造成压实度计算误差。

2.3 核子密实度仪法

核子密实度仪法是一种快速检测方法,其原理是利用放射性元素发射的射线穿透路基土层,通过测量射线的衰减程度来确定路基土的密度和含水量,进而计算出压实度。该方法所需设备为核子密实度仪,操作便捷,检测速度快,每检测一个点仅需要 5~10 min,适用于大面积快速检测,在本工程中主要用于路基压实质量的快速筛查。核子密实度仪法的优势是检测效率高,能够快速获取检测结果,便于及时发现压实不足的区域。但该方法也存在明显弊端:设备成本高,一台核子密实度仪价格在 10 万元以上,增加了工程检测成本;设备存在放射性,对检测人员的身体健康有一定危害,需要检测人员佩戴防护装备,且设备需要定期进行校准,校准成本较高。

2.4 贝克曼梁法

贝克曼梁法主要用于检测路基的回弹模量,间接反映路基压实质量,其原理是通过在路基表面施加一定的荷载,测量路基的回弹变形,根据回弹变形计算出回弹模量,进而判断路基压实度是否满足要求。该方法所需设备包括贝克曼梁、百分表、荷载装置等,在本工程中主要用于路基压实质量的辅助检测,与其他检测方法配合使用。贝克曼梁法的优势是能够间接反映路基的承载能力,检测结果与路基实际使用性能相关性较强。但该方法存在检测效率低、操作复杂等问题,每检测一个点需要消耗 1 h 左右,且检测结果受荷载大小、加载速度、检测人员操作技能等因素影响较大,检测精度稳定性差。

3 路基压实度试验检测方法优化方案

3.1 环刀法优化

针对环刀法取样扰动大、检测精度低、检测速度慢的问题,从取样工具、操作流程和数据处理三个方面进行优化。取样工具优化方面,将传统的普通环刀

替换为特制的螺纹环刀,螺纹环刀内壁设置细密螺纹,能够减少取样过程中土样与环刀内壁的摩擦,降低土样扰动,同时螺纹结构能够增强环刀与土样的结合力,避免土样脱落。螺纹环刀的直径改为 120 mm,高度改为 180 mm,增大土样体积,减少检测误差^[4]。操作流程优化方面,取样前先对路基表面进行清理,去除浮土和杂物,采用水平仪确保取样面平整。取样时将螺纹环刀垂直压入土中,避免倾斜,按压速度均匀,直至环刀完全进入土中,再用刮刀将环刀表面多余的土样刮平,确保土样饱满。取样后立即将环刀两端用保鲜膜密封,防止土样水分流失,影响含水量测量精度。数据处理优化方面,采用加权平均法计算土样含水量,选取环刀不同部位的土样进行含水量检测,每个土样检测 3 次,取加权平均值作为最终含水量,减少单一检测点的误差。同时,建立环刀法检测误差修正模型,根据路基填料类型和含水量,对检测结果进行修正,提升检测精度。

3.2 灌砂法优化

针对灌砂法操作烦琐、检测效率低、标准砂标定复杂的问题,从试坑开挖、标准砂标定和操作流程三个方面开展优化。试坑开挖优化采用特制开挖器替代铁锹,其直径与灌砂筒保持一致,确保试坑形状规则、上下口径统一。开挖深度依据路基压实层厚度确定,开挖中及时清理坑内残留土样,并用深度尺实时监测,保障开挖深度精准,减少体积测量误差。标准砂标定优化先采用烘干法将标准砂烘干至恒重,去除水分以保证密度均匀。标定选取不同体积容器,将标准砂均匀灌入后测量质量与体积,计算堆积密度,每个容器标定 5 次取平均值,同时建立堆积密度与环境温度的关联模型,根据检测温度修正参数,提升测量精度。在操作流程上,将灌砂筒与漏斗一体化设计,减少标准砂洒落,提高灌砂效率。灌砂时调整筒身高度,使下口与试坑上口平齐,待标准砂不再下沉后关闭阀门,测量剩余砂质量并计算试坑体积。同时采用精度 0.1 g 的电子天平替代传统机械天平,进一步降低质量测量误差,全面提升灌砂法的检测效率与精度。

3.3 核子密实度仪法优化

针对核子密实度仪法设备成本高、有辐射、检测精度受影响因素多的问题,从设备校准、检测参数和辅助修正三个方面开展优化。在设备校准优化中,将传统每半年一次的校准周期缩短至每三个月,确保设备检测精度稳定。校准选用已知干密度和含水量的标准土样,多次检测并调整参数,使结果与标准值一致;同时增加校准点,选取不同含水量、不同颗粒级配的

标准土样,扩大校准范围,提升设备对各类路基土的适应性。检测参数优化结合路基填料类型和压实层厚度,细粒土路基检测深度调整为10~20 cm、射线强度设为中档,粗粒土路基调整为20~30 cm、射线强度设为高档;同时将单次检测时间从5 min缩短至3 min,在保障精度的前提下提升效率。在辅助修正方面,建立检测结果修正模型,检测时同步测量路基土含水量和颗粒级配,结合参数通过模型调整压实度结果,有效减少检测误差^[5]。

3.4 综合检测方法优化

单一检测方法各有缺陷,无法全面兼顾路基压实度检测的精度与效率,因此结合各类方法优势,提出综合检测方法优化方案,实现互补使用。综合优化的核心是根据路基不同施工阶段和部位,选用适配方法并明确检测频率与标准。在路基施工中,采用核子密实度仪法快速筛查,每100 m每压实层检测3点,及时发现压实不足区域并补压;补压后用灌砂法精准检测,每200 m每压实层检测4点,保障压实度达标。细粒土路基采用优化后环刀法辅助检测,与灌砂法结果对比验证精度;路基顶面等关键部位,采用灌砂法与核子密实度仪法联合检测,取平均值提升结果可靠性。同时建立综合检测数据管理系统,统一管理分析数据、排查异常;明确检测人员岗位职责,加强技能培训,规范操作流程,减少人为误差,全面提升检测质量与适用性,适配工程施工需求。

4 优化方法试验验证

4.1 试验准备

试验依托某高速公路路基施工工程,选取K5+000~K5+200路段作为试验段,该路段路基填料为粉质黏土,压实层厚度为20 cm,设计压实度为96%。试验前,对试验段路基进行平整压实,确保路基表面平整,无浮土杂物,压实度初步达到设计要求。试验所需设备包括优化后的螺纹环刀、灌砂筒、核子密实度仪、贝克曼梁、电子天平、烘箱等,所有设备均经过校准,确保设备性能良好,检测精度符合要求。试验人员共6名,均经过专业技能培训,熟练掌握优化后的检测方法和操作流程,能够规范完成检测工作。试验前,制定详细的试验方案,明确试验目的、试验步骤、检测频率和数据处理方法,确保试验工作有序开展。同时,准备试验所需的标准砂、保鲜膜、深度尺、水平仪等辅助材料,标准砂经过烘干处理,确保堆积密度均匀。

4.2 试验结果与分析

试验选取试验段不同检测点,分别采用传统与优化后检测方法,对比分析检测精度、效率及适用性,

具体数据如表1所示。由表1可知,优化后各类检测方法的平均压实度均提升,标准差减小,检测精度显著提高;单点位检测时间大幅缩短,效率提升明显。其中核子密实度仪法效率提升最显著,灌砂法精度优化效果突出。综合来看,优化后的检测方法操作便捷、结果稳定,适用性更强,能够满足现代公路路基压实质量检测需求,可应用于实际工程。

表1 不同检测方法精度及效率对比表

检测方法	平均压实度 (%)	标准差 (%)	单点位检测时间 (min)
传统环刀法	95.2	1.3	32
优化环刀法	95.8	0.8	20
传统灌砂法	95.5	1.1	45
优化灌砂法	96.1	0.6	28

5 结束语

路基压实度试验检测是公路路基施工质量把控的重要部分,检测手段是否科学合理直接关系到检测成果是否精确可靠,进而对公路工程整体质量及寿命产生影响。本文以实际公路工程为例,对目前路基压实度试验检测方法应用现状及存在的问题进行系统的分析,并对环刀法、灌砂法、核子密实度仪法、贝克曼梁法四种常用检测方法的优缺点进行分析,提出相应的优化措施,建立综合检测方法互相补充的检测体系,提高检测精度和检测效率。试验结果表明,优化后的试验方法可以克服传统试验方法的诸多缺点,操作简便、成本低廉、结果可靠,可以广泛应用于公路路基压实度检测。未来可以结合不同的填料以及施工环境,对压实度检测方法进行优化,完善压实度检测标准,加强智能化检测技术的应用,使压实度检测技术不断发展。

参考文献:

- [1] 肖崇禹.路基压实度快速检测方法现场对比试验[J].时代汽车,2026(02):187-189.
- [2] 罗永升.灌砂法在公路路基压实度试验检测中的应用[J].产品可靠性报告,2025(08):201-202.
- [3] 张宇.路基压实度室内试验及现场自动连续检测[J].交通世界,2025(20):76-78.
- [4] 朱明开,张紫薇.公路工程试验检测常见问题及解决办法[N].科学导报,2025-05-08(B03).
- [5] 邓亚萍.公路路基压实度试验检测要点[J].运输经理世界,2024(22):59-61.

公路桥梁建设中的钢混组合梁施工技术

邱 豪

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 随着公路交通网络不断完善, 桥梁结构正向大跨径及装配化方向发展。钢混组合梁能够充分发挥钢材与混凝土材料受力优势, 具有结构自重轻、施工效率高等特点, 广泛应用于公路桥梁建设中。本文探讨了公路桥梁建设中的钢混组合梁施工技术, 借助工程施工技术分析, 系统总结了钢混组合梁结构构成、施工流程及关键施工环节的重点, 旨在为提高桥梁施工质量提供参考。结果表明, 规范钢梁拼装精度、优化吊装定位并加强连接构造质量管理, 可有效保证钢混组合梁的施工质量。规范施工技术可提高桥梁整体施工质量, 为公路桥梁工程安全提供技术参考。

关键词 公路桥梁建设; 钢混组合梁; 钢梁节段拼装; 桥面板安装; 剪力连接件施工

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.015

0 引言

钢混组合梁是一种融合钢材与混凝土双重材料优势的新型结构形式, 凭借受力合理及耐久性佳等核心特点, 逐渐成为公路桥梁主梁选型的主流方案之一, 在高速公路等各类桥梁工程中得到广泛应用。现阶段, 公路桥梁钢混组合梁施工技术虽已形成相对完善的体系, 但随着桥梁建设场景日趋复杂, 如何优化施工工艺流程, 攻克复杂工况下的施工难题, 仍是行业内亟待深化研究的核心问题。

1 钢混组合梁的基本介绍

1.1 钢混组合梁的构成

钢混组合梁是一种借助剪力连接构件连接钢结构与混凝土结构, 形成整体受力体系的桥梁结构形式, 能够充分发挥钢材抗拉性能强、混凝土抗压性能优的材料特性, 进而在满足承载能力要求的基础上减轻结构自重。其由钢梁、钢筋混凝土桥面板及剪力连接构件等部分组成。其中, 钢梁是钢混组合梁结构的主要承重构件, 主要承担桥梁结构中的拉应力与弯矩作用, 分为工字形截面与槽形截面结构, 且钢梁间设置横梁, 用于增强主梁间的横向联系, 提高整体结构稳定性。部分桥梁结构中, 横梁间存在小纵梁, 以进一步加强桥面结构受力均匀性。钢筋混凝土桥面板是组合梁结构中承受车辆荷载的重要构件, 是在钢梁顶面浇筑而成, 内部配置预应力钢筋。钢梁与混凝土桥面板之间使用剪力连接件焊钉或开孔板连接件进行连接, 以限制钢

梁与混凝土间的相对滑移, 提高组合梁的抗弯刚度^[1]。

1.2 钢混组合梁的适用条件

从工程实践看, 该钢混组合梁适用于跨径较大或中等偏大的桥梁工程, 能够以钢梁作为主要受力构件, 明显降低桥梁结构重量, 保持较高的结构刚度。由于钢混组合梁结构的钢梁构件在工厂分段加工, 现场施工阶段主要以拼装、吊装作业为主, 湿作业较少, 其也适用于城市道路桥梁工程, 能够缩短施工周期, 减少施工期间对既有交通系统的影响。在跨越铁路、公路主干道等工程中, 桥梁施工需要减少对既有设施运行的干扰。而钢梁结构自重相对较小, 可采用分段拼装方式进行架设, 依赖支架程度较低, 也适用于跨越条件复杂或施工窗口期受限的工程环境。总体来看, 钢混组合梁结构主要适用于城市大跨径或较大跨径的公路桥梁工程, 以及对施工周期、交通影响要求较高的工程环境。合理选择结构形式并结合工程实际条件组织施工, 能够提高桥梁工程的施工效率, 减少对周边交通环境的影响^[2]。

1.3 钢混组合梁施工基本工艺流程

钢混组合梁施工属于装配化结合现浇施工的结构施工形式, 涉及钢结构加工、构件吊装、桥面结构施工等多个环节。施工单位在实施该类桥梁工程时, 需按照既定施工顺序组织各工序衔接。一般以钢梁加工与焊接剪力连接件为起始工序。首先, 在钢结构加工厂分段制造钢梁, 并在加工过程中按照设计位置焊接剪力连接件, 运输至施工现场。随后, 进入架设阶段,

作者简介: 邱豪(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 技术现场管理。

以履带吊、汽车吊或架桥机等大型起重设备吊装钢梁节段至桥墩位置,进行定位安装。安装钢梁结构后,进入桥面结构施工阶段,需根据设计要求,安装预制混凝土桥面板或现浇桥面板,并预留板间接缝区域,为浇筑混凝土做好准备。混凝土浇筑施工过程中,还需连接混凝土与剪力连接件,保证钢梁与混凝土桥面板间的组合受力。同时,进行养护,待混凝土结构强度满足施工条件后,进行预应力钢束张拉施工,改善桥梁结构受力状态。最后,拆除施工过程中设置的临时支架,形成完整的钢混组合梁桥梁结构。

2 钢混组合梁施工技术要点

2.1 钢梁节段拼装

在钢混组合梁施工中,钢梁节段拼装直接影响后续架设精度及桥梁整体线形。受运输条件限制,组合梁钢主梁多由专业钢结构加工厂分段制造,在经专用运输设备运至施工现场后完成节段拼装。施工单位在此过程中,应系统化管理拼装场地条件、拼装设备及连接施工等方面,确保钢梁拼装精度满足设计要求。其中,施工单位需选择地基稳定、地势平整的位置作为拼装区域,根据钢梁重量验算承载力,明确拼装场地地基承载力高于150 kPa,必要时加固地基,防止局部沉降影响后续的钢梁拼装精度^[3]。同时,控制场地平整度在5 mm以内,设置稳定可靠的拼装胎架,使用水准仪进行精确调整,使胎架标高与设计梁底线形一致,为精确定位钢梁提供支撑条件。钢梁节段拼装过程中,施工人员需复核梁段编号、制造尺寸以及连接部位加工质量,清理拼接面油污、锈蚀及杂物,利用全站仪测量钢梁轴线,确保节段间轴线偏差不超过2 mm,同时利用千斤顶微调梁段高程,控制节段间的纵向错台小于1 mm,横向偏差不超过2 mm,以保证钢梁整体受力均匀,减少结构应力。钢梁节段拼装连接分为高强度螺栓连接与现场焊接两种。若使用高强度螺栓连接,施工人员应按照摩擦型高强度螺栓施工工艺进行操作,先是选取摩擦面抗滑移系数在0.45以上的螺栓,然后采用扭矩法或转角法扭紧螺栓,按照“初拧—复拧—终拧”顺序分级紧固。若采用现场焊接方式,则控制焊接环境、焊接顺序及焊缝质量,并在焊后进行超声波检测,确保焊缝内部质量满足结构安全要求。对于连续梁结构,施工单位更要重点检查节段连接位置的标高是否符合设计要求,保证钢梁结构线形平顺,为后续桥面板施工奠定基础。

2.2 精准吊装钢梁

完成现场拼装后,即进入架设钢梁阶段。钢梁具有大自重、高构件刚度及受风影响明显等特点,因此,

施工单位需在吊装作业中充分分析构件重量、吊装半径及施工场地条件,根据钢梁单节段或整体梁段重量、吊装半径选择设备。若钢梁单节段重量在80~150 t范围时,施工单位要选用300~500 t级履带式起重机;若钢梁整体节段重量达到200 t以上,或跨越既有道路等复杂环境,则使用专用架桥机或多机抬吊方式进行架设。吊装前,施工单位还要检测支承地基承载力,要求地基承载力不低于200 kPa,并铺设钢板分散荷载,以避免吊装过程中发生不均匀沉降^[4]。同时,校核吊索具,明确钢丝绳安全系数大于6,且根据钢梁重心位置计算吊点。钢梁起吊后,保持匀速提升,使用导向绳控制梁体摆动幅度,吊装至设计高度附近后,慢速平移至墩顶位置,检测梁体轴线与桥梁中心线相对位置。当钢梁逐步接近支座时,施工人员应降低下降速度至每分钟0.2~0.3 m,以便精细调整位置。除此之外,施工单位还需在支座位置预先设置临时支撑结构,且在支座位置布置三向千斤顶等调节装置,以便微调钢梁的标高、轴线及倾斜角度,控制钢梁落位后的标高误差在±3 mm以内。针对跨径较大的组合梁结构,施工单位则进一步检测梁体横向倾斜度,调整支座垫板进行修正。钢梁落位后,检测人员应检查各支座反力,避免出现个别支座受力过大现象,必要时复核钢梁轴线位置、梁顶标高及纵向线形,比对设计控制值,确认各项指标符合规范要求,为后续钢筋混凝土桥面板施工提供平顺稳定的承重基础。

2.3 桥面板安装

桥面板是钢混组合梁结构中直接承受车辆荷载的重要组成部分。桥面板施工一般分为预制安装与现浇两种,其中预制桥面板安装广泛应用在城市桥梁及装配化桥梁工程中。该施工环节要求施工单位在精准架设钢梁后进行测量复核,明确安装顺序,使桥面板与钢梁形成稳定、可靠的受力体系。安装桥面板前,施工单位需系统检查钢梁顶面,清理钢梁顶面的焊渣、油污及杂物,并复核剪力连接件焊接质量,确认连接件位置、数量及焊接质量方面的设计要求,进而使用栓钉形式连接剪力连接件,控制器高度为80~120 mm,间距在150~300 mm范围内。焊接栓钉完成后,施工人员还应进行弯折试验,且在钢梁顶面铺设10~20 mm的找平层,使桥面板底面密贴钢梁,避免局部空隙影响结构受力。同时,施工单位还要结合钢梁结构受力特点确定合理的安装顺序,采用由跨中向两侧逐步推进的方式,进行安装。在吊装作业过程中,还需使用履带吊实施,确认桥面板吊点位置与板体重心,在吊装过程中利用导向绳控制摆动幅度。板体与钢梁接触

后, 施工人员检查板底与剪力连接件间的配合情况, 保证栓钉顺利穿入预留孔洞, 且在发现局部干涉时, 及时调整板体位置, 保证连接构造完整。完成桥面板安装后, 在相邻桥面板间预留宽度为 200 ~ 300 mm 的湿接缝, 并在板边预留钢筋或连接钢筋套筒, 用于后续混凝土浇筑时连接板间整体。在桥面板安装过程中, 施工单位更需实时监测钢梁结构状态, 定期检测钢梁挠度和支座反力变化情况, 进而在监测数据出现异常时, 调整施工顺序, 防止结构变形, 提升钢混组合桥梁结构的整体施工质量。

2.4 剪力连接件施工

剪力连接件在钢混组合梁结构中, 是连接钢梁与混凝土桥面板的主要方式, 能够通过剪力连接件传递界面剪力, 有效限制钢梁与混凝土板间的相对滑移, 提高组合梁结构的整体刚度。剪力连接件分为栓钉式连接件与开孔板连接件, 其中栓钉连接件应用最广泛, 一般为低碳钢材质, 直径多为 16 ~ 22 mm, 常见规格为 $\phi 19$ mm, 高度为 80 ~ 120 mm。连接时, 要以 150 ~ 300 mm 为纵向间距进行排布。在栓钉焊接过程中, 施工人员需严格控制焊接参数, 根据栓钉直径合理调整焊接中的焊接电流、电压及焊接时间, 确保充分熔合焊缝, 形成完整焊环。完成焊接后, 施工人员还要在焊缝周围形成高度高于 1 mm 的均匀焊接金属环^[5]。随后, 利用弯折试验抽检栓钉焊接质量, 保证栓钉能够弯曲至 30° 而不出现裂纹。在发现栓钉脱落、弯曲或焊缝缺陷时, 施工人员还应及时采用与原焊接工艺相同的设备及参数进行补焊, 若局部偏位较小但不影响结构受力, 则调整桥面板预留孔位置进行处理, 以避免影响整体施工进度。对于组合梁结构而言, 剪力连接件承担着传递界面剪力的重要功能, 直接关系到钢梁与混凝土桥面板是否形成组合受力体系, 更承担着为后续桥面混凝土浇筑创造良好施工条件的任务。

2.5 浇筑湿接缝

湿接缝是钢混组合梁桥面结构形成整体受力体系的重要连接部位, 通过浇筑预制桥面板以及桥面板与钢梁间的连接区域, 使其成为一个整体结构, 从而参与组合梁结构受力。进行湿接缝施工前, 施工单位需以 5 ~ 10 mm 深度为限, 凿毛处理预制桥面板边缘以及钢梁顶面混凝土接触区域, 使混凝土表面形成粗糙界面, 并确保粗骨料部分外露, 以增强新旧混凝土间的机械咬合作用。完成凿毛后, 施工单位清除松散颗粒及粉尘, 采用高压空气冲洗结合面, 保持表面的清洁湿润状态, 且清理钢梁顶面区域的油污及锈蚀, 保

证混凝土能够有效连接剪力连接件及钢梁表面, 以更好地提高组合结构的整体工作性能。同时, 施工单位一般采用钢模板或组合模板形式, 以吊模方式安装于桥面板底部, 形成封闭浇筑空间。湿接缝宽度通常为 200 ~ 300 mm, 在安装模板后, 施工单位还需复核连接钢筋, 确认钢筋搭接长度不小于钢筋直径的 30 倍, 保证接缝区域能够形成连续受力结构。为减少收缩变形并提高早期强度, 施工人员还应使用微膨胀、早强型配合比的湿接缝混凝土, 且适量掺入膨胀剂, 控制坍落度在 160 ~ 200 mm 范围内, 使其能够充分填充湿接缝区域, 包裹连接钢筋及剪力连接件。在浇筑过程中, 为防止混凝土自重对钢梁产生附加荷载, 施工人员要结合结构受力特点合理安排施工顺序, 按照由跨中向支点逐步推进的方式进行浇筑, 逐渐向支座区域传递荷载分布, 减少钢梁局部受力集中现象。在浇筑过程中, 还能运用插入式振捣器振捣, 充分密实混凝土。浇筑完成湿接缝混凝土后, 则需在混凝土初凝前抹平处理表面, 在混凝土终凝后覆盖湿麻袋或土工布, 保持持续洒水养护 7 d。若温度过高, 便适当延长养护时间, 减少产生混凝土早期收缩裂缝的可能, 提高公路桥梁结构的使用安全性。

3 结束语

钢混组合梁是现代公路桥梁结构体系的重要形式, 其施工质量在很大程度上取决于施工环节的技术水平。“中国智慧桥梁 2025” 树立了桥梁发展新理念“可持续发展、绿色施工制造, 质量至上、重视耐久性, 全寿命经济性, 重视概念、美学设计。” 在该发展理念的引导下, 钢混组合梁施工既需关注结构安全, 更需要在施工全过程中强化质量管理, 以持续提升组合梁结构的工程品质, 从而推动公路桥梁建设向安全、耐久与高品质方向发展。

参考文献:

- [1] 黄祥. 上跨桥钢混组合梁顶推施工关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(12):212-216.
- [2] 曹卫军. 钢混组合梁高位顶推施工技术探讨[J]. 四川建筑, 2025,45(05):75-77,81.
- [3] 杨丰聚. 钢混组合梁跨越既有高速公路安装工艺[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2025,25(03):39-45.
- [4] 卢球星. 钢混组合梁桥施工控制技术研究[J]. 工程技术研究, 2025,10(16):84-86.
- [5] 朱慧明, 侯清, 王进, 等. 高速公路钢混组合梁吊装施工阶段划分技术探讨[J]. 山西建筑, 2025,51(09):130-134.

大跨度钢结构整体提升施工技术应用研究

宫明月, 薛学聪, 张 超

(中达工程管理咨询有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要 本文以某体育场馆大跨度钢屋盖工程为例, 系统探究整体提升施工技术的应用实践。通过建立提升力学模型以剖析结构受力特性, 设计多点同步提升控制体系, 实现 68 m 跨度钢桁架的精确提升。结果表明, 采用液压同步提升技术协同实时监测系统, 可将提升过程中的应力偏差控制到 8% 以内, 位移精度实现 ± 5 mm, 有效化解大跨度钢结构高空拼装技术难题, 为同类工程提供技术参考。

关键词 大跨度钢结构; 整体提升施工; 液压同步提升; 质量控制

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.016

0 引言

大跨度钢结构凭借其优越的跨越能力、良好的空间适应性及显著的材料利用效率, 已成为体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑的主要结构形式。随着我国城镇化进程持续推进, 大跨度钢结构工程数量不断增多, 对施工技术提出了更高要求。传统高空散装法存在高空作业风险大、焊接质量难以保证、施工周期长等问题^[1]。整体提升技术通过在地面完成钢结构拼装后整体提升就位的方式, 将大量高空焊接与组作业转移至地面完成, 从根本上改善了作业条件, 可显著提升施工质量与安全管控水平。本文结合工程实践, 深入探讨整体提升技术在大跨度钢结构施工中的应用方法与控制要点, 为该技术的推广应用提供理论依据。

1 工程概况

某综合体育馆主体钢屋盖采用正交正放网架结构, 平面尺寸为 68 m \times 54 m, 网架最大跨度达 68 m, 结构总重约 850 t。屋盖由上弦层、下弦层及腹杆共同组成空间三维受力体系, 采用周边支承方式, 支承柱顶设计标高为 28.5 m。钢材选用 Q345B 低合金高强结构钢, 节点连接以焊接为主, 焊缝质量等级要求达到一级标准, 关键节点区域须进行 100% 超声波探伤检验。结构平面内共设置 12 个提升吊点, 沿周边均匀布置, 采用计算机控制液压同步提升系统实施整体提升作业, 提升总高度为 26.5 m。本工程地处城区中心, 施工场地受限, 且结构体量大、构件节点密集, 若采用传统高空散装法, 不仅脚手架搭设量巨大, 高空焊接质量难

以保证, 工期亦将大幅延长。综合考量工程规模、现场条件及质量目标, 最终确定采用地面整体拼装后整体提升的施工方案。拼装场地标高设定为 +2.0 m, 施工前对拼装区域地基进行系统平整与分区加固处理, 保证地基承载力满足设计要求, 为后续整体提升作业提供了安全可靠的前提条件。

2 大跨度钢结构整体提升施工技术设计

2.1 整体提升施工技术原理与体系构成

整体提升技术以液压同步控制为核心原理, 依托计算机集中控制系统实现多吊点的协调联动。其基本工作机制是: 在地面完成钢结构整体拼装后, 通过布设于支承结构上方的提升设备, 以钢绞线为传力介质, 将结构体系由地面逐步提升至设计标高, 再精确就位固定。该技术的核心优势在于将高空散装作业大量转移至地面完成, 从而有效提升焊接质量、降低高空安全风险, 并显著缩短施工工期。与传统高空散装法相比, 整体提升技术在作业条件、质量可控性和施工效率三个维度上均具有明显优势: 作业人员在地面进行拼装焊接, 可最大限度利用固定设备和标准化操作条件; 质检人员能够对全部焊缝进行便捷的无损检测; 拼装与提升准备工作可与下部主体结构施工并行推进, 整体工期得以有效压缩。

整体提升系统由液压提升器、钢绞线、承重框架、传感检测系统和计算机控制单元五大核心模块构成, 各模块协同运行, 共同保障提升过程的安全与精度。液压提升器采用穿心式千斤顶结构, 通过上下两端锚具交替张紧与放松的循环动作, 实现对钢绞线的逐级夹持与上

作者简介: 宫明月 (1992-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

移, 单台提升器额定提升力为 320 kN, 可根据荷载需求并联组合使用。钢绞线选用直径 $\phi 15.2$ mm 的高强度低松弛预应力钢绞线, 极限抗拉强度为 1 860 MPa, 设计安全系数取 3.0, 确保在最不利工况下仍具有充足的承载储备。承重框架固定于混凝土支承柱顶, 通过高强预埋件与主体结构可靠锚固, 其承载力设计值按 1.5 倍提升荷载标准取值, 并经专项验算复核。传感检测系统在各提升点处配置高精度位移传感器与压力传感器, 实时采集各点的位移量、提升速度和荷载数据, 并将采集信号反馈至计算机控制单元进行闭环动态调节, 确保各吊点提升速度偏差不超过 2 mm/min, 相对位移偏差控制在 3 mm 范围以内, 从技术层面保障了多点同步提升的实现。

2.2 提升过程中的结构受力分析与控制

钢结构在提升过程中的受力状态与设计使用状态存在显著差异, 需进行专门的提升工况受力分析^[2]。在正常使用阶段, 网架结构的支承方式为周边柱顶固定支承, 荷载路径明确; 而在提升阶段, 结构支承条件转变为多点吊挂, 荷载通过钢绞线向上传递, 内力分布规律与使用阶段截然不同, 部分杆件可能出现内力反号现象, 需重点核查。为此, 本工程采用有限元分析软件建立三维空间网架模型, 系统模拟提升全过程工况, 重点考虑结构自重、提升动力放大系数(取 1.1)及施工期间风荷载的综合作用效应。在提升过程中, 整体结构可简化为多点弹性支承的空间网格体系, 各提升点的支反力分配取决于各点处的结构刚度与相对位移关系。力学计算表明, 提升点位置与间距对结构内力分布影响显著: 提升点数量不足时, 跨中弯矩将大幅增加, 导致部分杆件超出承载能力; 提升点设置过密则会因相邻点协调变形引起次应力, 同样不利于结构安全。

本工程通过参数化分析, 最终确定 12 个提升点沿结构周边均匀分布的优化方案, 使各提升点支反力趋于均衡, 荷载传递路径清晰合理, 有效避免了局部应力集中问题。在此布置方案下, 有限元计算结果显示: 网架上弦杆在提升工况下以受拉为主, 最大拉应力出现在跨中区域, 计算值达到 145 MPa; 下弦杆以受压为主, 最大压应力为 118 MPa; 两者均低于 Q345B 钢材的设计强度值 215 MPa, 应力比控制在合理范围内, 结构整体具有足够的承载安全储备。对于提升过程中因各点提升速度不同步可能引起的偏载工况, 在有限元模型中引入位移不均匀扰动进行敏感性分析, 结果表明当相邻提升点高差超过 8 mm 时, 偏载效应将显著放大

局部杆件内力。据此, 在结构薄弱区域(主要集中于角部节点和跨中下弦区域)增设临时加固杆件, 以承担因不同步提升产生的附加弯矩, 待提升完成并完成永久固定后予以拆除。通过上述综合措施, 实测荷载不均匀系数控制在 1.12 以内, 结构整体受力状态满足施工安全要求, 提升工况验算结论与工程实测数据高度吻合, 证明了受力分析方法的可靠性。

2.3 整体提升施工工艺与流程设计

整体提升施工工艺依次分为地面拼装、系统安装、试提升、正式提升和就位固定五个核心阶段, 各阶段相互衔接, 逐步推进。地面拼装阶段是整个技术流程的基础环节。拼装作业在专门搭设的组合胎架上进行, 胎架设计标高为 +2.0 m, 采用型钢立柱与满堂脚手架相结合的组合支撑体系, 整体承载力按结构重量的 1.3 倍安全系数设计, 并对胎架地基进行预压处理, 确保沉降均匀。网架拼装按区域分段进行, 各分区按照先下弦、后腹杆、再上弦的顺序依次拼装, 每段完成后均进行轴线偏差与标高偏差的测量校正, 累计偏差超限时须重新调整后方可进行下一段拼装, 最终实现整体测量误差控制在规范允许范围内^[3]。系统安装阶段须完成提升设备、钢绞线及传感器的全面安装与联调。液压提升器固定于承重框架上, 12 台提升器通过液压管路统一连接至控制总站; 钢绞线穿过结构预设孔洞后与提升器锚具连接, 初始张拉力按各点计算荷载的 1.1 倍施加以消除松弛量; 位移传感器与压力传感器分别安装于各提升点和液压回路关键节点处, 确保信号采集精度满足控制要求。

试提升阶段将结构提升 50 cm 后停止, 持续观测不少于 1 小时, 逐项检查液压系统压力稳定性、各吊点荷载分配均匀性、钢绞线受力状态以及承重框架变形情况, 同时对结构跨中和角部挠度进行测量, 与理论计算值进行对比验证。确认各系统工作状态正常、结构变形规律与计算预测相符后, 方可卸载归零, 转入正式提升阶段。正式提升采用分级提升方式, 每级提升高度 3 m, 提升速度 3~5 m/h, 在标高 +10 m、+18 m、+24 m 处设置停歇观测点, 全面检测结构状态。结构提升至设计标高后, 通过各吊点配置的独立微调装置进行精确定位, 使轴线偏差控制在 ± 3 mm 以内、标高偏差控制在 ± 5 mm 以内, 达到精度要求后依次完成结构与支承柱的永久焊接连接, 最后按照对称卸载原则逐步释放钢绞线荷载, 完成整体提升施工。整个工艺流程环环相扣, 各阶段质量目标明确, 为后续施工管控奠定了坚实的程序基础。

3 施工过程实施与质量控制

3.1 现场施工组织与协同管理

施工组织采用项目总负责制,下设技术组、设备组、监测组和安全组。技术组负责施工方案细化和技术交底,编制详细的作业指导书,明确各工序操作要点和质量标准。设备组负责提升系统的安装维护,建立设备运行日志,记录液压系统压力、油温等参数变化。监测组配备专业测量人员,采用全站仪和位移传感器进行双重监测,每提升1 m记录一次数据。安全组制定应急预案,配置备用动力系统和手动卸载装置,应对突发停电等异常情况。各组之间建立信息共享机制,通过无线对讲系统实现实时沟通,确保提升过程中指令传达准确及时,形成高效协同的管理体系。

3.2 施工过程中的监测与调整

监测系统包括位移监测、应力监测和设备状态监测三个子系统。位移监测在12个提升点及结构跨中布置测点,采用激光测距仪和位移传感器实时采集数据,监测频率10 s/次^[4]。应力监测在关键杆件粘贴应变片,监测实际应力与理论计算值的偏差。设备状态监测通过压力传感器和温度传感器跟踪液压系统工作参数。监测数据通过无线传输至控制中心,软件自动分析并生成实时曲线。当检测到某提升点位移超前时,系统自动降低该点提升速度,实现动态平衡调节。在标高+18 m处监测发现东南角提升点位移滞后5 mm,通过调整该点提升速度,历时15 min完成同步修正,确保了提升过程的平稳进行。

3.3 质量控制与安全保障体系

质量控制贯穿地面拼装、提升过程和就位固定全过程。地面拼装阶段执行三检制度,对焊缝质量执行全数外观检查,并按照规定要求进行超声波探伤抽检。提升过程中建立质量控制点,每提升3 m停止检查结构变形、连接节点状态和钢绞线张力均匀性。安全保障体系包括技术安全措施和组织安全措施。在技术措施方面,设置防坠落装置、限位装置和超载保护装置,钢绞线安全系数3.0,提升设备配置双重保险锁。在组织措施方面,建立三级安全教育制度,关键工序实施旁站监督,提升作业区域设置警戒线,严禁无关人员进入^[5]。整个施工过程未发生安全事故,实现了安全零事故的目标。

4 大跨度钢结构整体提升施工技术应用效果分析

工程实践表明,整体提升技术在大跨度钢结构施工中取得了显著成效。在施工工期方面,相比传统高空散装法缩短工期45天,提前实现了节点目标。在质量

方面,地面拼装焊缝一次合格率98.5%,较高空作业提升12%,结构就位精度轴线偏差 ± 2 mm,标高偏差 ± 4 mm,均优于规范要求。在经济效益方面,减少高空作业架体搭设费用约180万元,降低人工成本约120万元,综合经济效益显著。在安全方面,实现了零事故目标,高空作业时间减少80%,有效降低了安全风险。在环境效益方面,地面作业减少了高空焊接产生的烟尘扩散,改善了施工环境。监测数据显示,提升过程中结构最大应力实测值与计算值偏差7.8%,位移控制精度 ± 5 mm,验证了技术方案的可靠性,为大跨度钢结构整体提升技术的推广应用提供了成功范例(见表1)。

表1 整体提升施工关键技术指标对比表

技术指标	设计要求	实测值	备注
提升总重量	850 t	847 t	含临时加固构件
提升速度	3~5 m/h	3.8 m/h	平均速度
位移同步精度	± 5 mm	± 3 mm	各提升点偏差
荷载分配均匀度	≤ 1.2	1.12	不均匀系数
最大应力偏差	$\leq 10\%$	7.8%	实测与计算值对比
轴线就位精度	± 5 mm	± 2 mm	最终就位精度

5 结束语

本文通过工程实践全面探究大跨度钢结构整体提升施工技术,建立了完整的技术体系与质量控制方法。利用计算机控制液压同步提升系统,联合实时监测与动态调整机制,可实现大跨度钢结构的安全精准提升。此技术能够有效解决传统高空作业的质量及安全难关,具备突出的技术经济优势。工程应用验证了技术方案的可行性与可靠性,为同类工程提供了可借鉴的经验,进而推动钢结构施工技术的进步与变革。

参考文献:

- [1] 徐平飞. 大跨度悬空钢结构楼层整体提升施工技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(21):97-103.
- [2] 易军. 大跨度钢结构连廊整体提升施工中的应力监测与分析[J]. 城市建设,2025(19):71-73.
- [3] 张有银,王子尊. 大跨度工业厂房钢结构整体提升施工技术[J]. 山西建筑,2025,51(17):98-101.
- [4] 谷凯. 体育场馆大跨度钢结构整体提升施工技术研究[J]. 建筑技术,2025,56(14):1693-1696.
- [5] 陈利强,黄亮亮. 大跨度网架结构整体提升施工技术探究:以江阴市某羽毛球馆屋面工程为例[J]. 南通职业大学学报,2025,39(02):92-98.

市政道桥施工中施工技术难题及其解决方案

吴 森

(皖建生态环境建设有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 为提升市政道桥施工质量与管理水平, 本文针对市政道桥施工技术难题和应对措施展开研究。通过分析市政道桥施工中地质条件复杂、工期紧张、环保要求高、材料质量控制难、安全风险高等技术难题症结, 提出改善地质条件影响、优化施工进度管理、加强环境保护措施、严格材料质量控制、提升安全管理水平等解决方案, 旨在为有效应对市政道桥施工难题提供有益参考, 进而保障工程顺利推进。

关键词 市政道桥施工; 地质条件; 施工进度管理; 环境保护; 施工材料

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.017

0 引言

在当前城市化进程高速发展的背景下, 城市规模不断扩张, 人口大量涌入, 城市交通需求呈爆发式增长。为缓解交通拥堵, 提升城市运行效率, 市政道桥建设项目数量激增、规模不断扩大。但市政道桥施工过程困难重重, 一方面, 不同城市甚至同一城市不同区域的地质状况千差万别, 给施工基础作业带来诸多挑战。另一方面, 为尽快发挥市政道桥的交通疏导作用, 施工工期通常被压缩得极为紧张。此外, 随着环保理念深入人心, 社会对施工过程中的环境保护提出了严格要求。与此同时, 施工材料种类繁多, 质量参差不齐, 把控难度大, 而安全事故隐患也时刻威胁着工程顺利推进。这些问题严重制约着市政道桥施工的高效开展, 亟待系统性解决。

1 市政道桥施工中的技术难题

1.1 地质条件复杂

市政道桥工程往往遍布城市各个区域, 不同地段的地质条件差异巨大。在一些山区城市, 可能遭遇岩石硬度高、地质构造复杂的情况, 地下岩石层的走向和分布不规则, 给桥梁基础的钻孔灌注桩施工带来极大困难。坚硬的岩石使得钻孔进度缓慢, 且容易造成钻头磨损, 增加施工成本与时间。而在平原软土地区, 土壤的承载能力低, 地基沉降风险高。道桥的自重以及后续运营中车辆荷载的作用, 可能导致地基不均匀沉降, 进而引发路面开裂、桥梁结构变形等严重问题。此外, 部分地区还可能存在地下溶洞、暗河等特殊地质构造, 若在施工前未详细勘探查明, 施工过程中一

旦遭遇, 极易引发塌陷事故, 危及施工人员安全, 严重影响工程进度。

1.2 施工工期紧张

市政道桥作为城市交通的重要基础设施, 为了尽快缓解城市交通压力, 早日实现交通通畅, 建设工程普遍安排较紧。一方面, 项目的前期规划和审批程序比较烦琐, 耗时较长, 留给实际建设的时间不多^[1]。另一方面, 在建设过程中, 可能会遇到一些不可预知的因素, 如天气、政策等。例如: 雨季施工过程中, 由于下雨, 混凝土浇筑质量会受到影响, 必须暂停施工, 从而使有效施工时间进一步压缩。与此同时, 城区内施工场地狭小, 堆放材料和机械设备的空间有限, 不同施工工序间的衔接极易出现问题, 导致平行作业不能高效率地进行, 会导致工期延误。另外, 施工单位为赶工期, 可能会加大人力物力投入, 造成施工组织混乱, 降低施工效率, 使工期紧张的问题变得更加突出。

1.3 环境保护要求高

当前社会对环境保护日益关注, 相关法规标准也逐步提高, 城市道路桥梁建设必须满足更严格的环境保护要求。施工期间, 各类土方挖掘、建材运输和重型机械运行等环节, 容易引发粉尘、噪声及废弃物料等污染问题。粉尘污染不仅会降低城市空气品质, 还可能损害附近居民的身体健康。工地上的设备运转以及爆破等操作产生的噪声, 一旦超出允许范围, 将扰乱周边居民的正常作息与工作秩序。施工过程中产生的大量废弃建材, 如果处理不当, 随意堆积会占用宝贵的土地资源, 甚至可能污染土壤和附近水源。此外,

作者简介: 吴森(1981-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 市政道桥施工。

道路桥梁建设有时需要跨越河流湖泊或影响周边自然生态系统,如果没有采取有效的生态保护手段,可能破坏水生生物的栖息环境,扰乱生态系统的稳定,引发连锁性的生态危机,这无疑加大了施工过程中的环保挑战。

1.4 施工材料质量控制难度大

市政道桥工程所需的施工材料种类繁多,涵盖钢材、水泥、砂石料、外加剂等,且用量巨大。市场上的材料供应商众多,产品质量参差不齐,这给施工材料质量控制带来了极大挑战。首先,部分供应商为追求利润最大化,可能会提供质量不达标的材料,如钢材的强度不足、水泥的凝结时间不符合标准等^[2]。其次,材料在运输和存储过程中也容易出现质量问题。例如:水泥受潮后会结块,影响其性能;砂石料在露天堆放时,可能会混入杂质,改变其级配。而且,有些施工现场缺乏专业的材料检测设备和人员,难以对每一批次的材料进行全面、准确的质量检测。一些施工单位为了降低成本,可能会忽视材料质量,采用低价劣质材料,这将严重影响市政道桥的工程质量。

1.5 施工安全风险高

城市桥梁与道路建设面临多样化的作业环境,隐藏着多种潜在危险。首先,在桥梁上部构造等高空施工环节,工人常需进行模板搭设、钢筋固定等任务,一旦防护措施不足,极易酿成坠落风险。其次,各类重型机械(起重装置与挖掘设备等)的大量投入,若因机械故障或操作不当,可能造成设备相撞或翻倒等意外。临时供电系统若管理疏漏,则会增加触电风险^[3]。对于老旧桥梁拆除或道路升级项目,地下管网布局往往错综复杂,施工中若意外损及燃气、电力或通信线路,可能触发火灾、爆炸或信号中断等连锁反应。加之施工现场人员密集,多工种协同作业频繁,若协调管理存在漏洞,极易导致人员受伤,对劳动者安全构成严重威胁。

2 市政道桥施工技术难题的解决方案

2.1 改善地质条件影响

由于地质条件复杂,施工前必须对工程地质进行全面、深入地调查研究。利用地质雷达、钻孔取样等先进地质探测技术,精确掌握地下岩层分布、土层性质及特殊地质结构等信息。在调查结果的基础上,进行有针对性的处理。在高硬度地区,可以通过预裂爆破等技术,先将岩石破碎,降低钻孔难度提高施工效率;同时,选择高强耐磨的钻头,合理调整钻进参数,降低钻头磨损。对于软土地基,可以采用搅拌桩、堆载

预压法或桩基等方法进行加固。深层搅拌法是将水泥、石灰等固化剂与软土进行强制拌合,使之具有整体性、水稳性及一定强度,从而提高地基承载力;堆载预压法是将荷载作用于地基上,使地基产生排水和固结,提前完成大部分沉降;桩基是一种能够将上部结构荷载传递至较深的土层或地层中,是控制基础沉降的一种有效方法。对于有溶洞和暗河的地区,可以采用填充法、跨距法等方法来处理,填充法即使用混凝土、片石等材料来填充溶洞,跨越法是指在溶洞和地下河中设置桥梁等结构物,以保证施工安全和工程质量。

2.2 优化施工进度管理

项目开始阶段,编制一套系统而可行的工程时间表至关重要。通过采用专业项目管理工具,如Primavera P6,对整体建设任务进行细致的任务层级划分(WBS)研究,确定不同施工环节的先后逻辑、所需周期及其相互依赖关系,形成以天为单位的详细排期。此外,需提前预估前期审批所需时长,并考虑天气变化、政策调整等不确定因素,适当设置缓冲时段。在项目推进期间,构建顺畅的协作反馈体系,使施工团队内部各单元之间,以及与业主、设计方、监理方等外部参与方保持高效互动,快速应对现场突发状况,防止因信息滞后造成的时间损失^[4]。科学规划作业区域布局,划分材料存储区、设备安置区等专门区域,提升场地使用效能,保障各项工序顺畅过渡,实现多任务同步推进。实施进度动态跟踪机制,按期核对实际进展与预定目标,若发现滞后现象,立即查明缘由并采取补救方案,如增派资源、调整作业流程或改进技术方法等,以保证项目按期完成。

2.3 加强环境保护措施

为减轻工程建设对生态系统的负面作用,必须全方位强化环保管理。针对扬尘问题,作业区域实施全封闭运作,搭建隔离设施,对易起尘的土方及建材实施遮盖或封闭存储,定期喷洒水雾抑制扬尘,配置雾炮车循环作业。运输车辆加装封闭装置以防物料散落,出入口配备自动冲洗设备,确保离场车辆洁净,杜绝泥土污染道路。在噪声治理上,优先选用低噪音施工机具,并加强设备检修,削减运行声响。科学安排作业时段,避开居民休息期进行高噪声工序,如需夜间施工,须提前报备并公告周边社区^[5]。针对爆破等特殊工艺,引入微差爆破等先进技术,控制单次炸药用量,有效抑制噪声与振动。建筑废弃物实行分类管理,设立不同存放区,钢材、木料等可循环材料统一回收,不可利用废料及时运至指定处置点,严禁无序堆积。

涉及水域穿越或生态敏感区施工,编制专项生态修复方案,采取生态护岸、构建鱼类通道等举措,保障水生生物栖息环境,促进生态系统的稳定。

2.4 严格施工材料质量控制

构建全面的建材质量监管机制,从采购环节入手严格把关。优先选取资质完备、声誉良好的供货商,组织实地调研,评估其生产规模与质量管理体系,确保原材料来源可靠。采购协议中需清晰界定品质指标与验收细则,对不合格品的处置办法作出明确规定。材料运抵现场后,实施严格的检验流程,配备专业检测人员及精密仪器,逐批开展全方位测试,涵盖钢材强度试验、水泥特性分析、骨料粒径分布等项目^[6]。检测未达标的物料一律清退,禁止投入项目施工。在运输与仓储阶段落实有效防护手段。水泥须存放于干燥通风的库房,底部架空防潮;砂石按规格分区堆置,搭设防雨设施防止污染^[7]。同步建立质量可追溯体系,详细记录每批材料的采购、流转、贮存及使用信息,发现问题时可快速定位源头,及时采取纠正措施,保证市政道桥工程建材品质达标,为整体工程质量提供支撑。建立供应商动态评价体系,定期对供货商的产品质量、供货效率、售后服务等进行综合评估,对评价不合格的供应商及时剔除出合作名单,持续优化采购渠道。同时,加强对施工过程中材料使用的管控,安排专人监督材料的领用、配比和使用,杜绝偷工减料、以次充好的行为,对现场材料的消耗进行统计核算,确保材料使用符合施工设计要求,从生产到使用的全流程保障材料质量。

2.5 提升施工安全管理水平

为全面保障施工安全,必须建立系统化的管理机制。首要措施是强化安全知识普及,通过定期举办专题学习活动,向作业人员传授操作规范与典型事故教训,增强其风险防范与自救能力。新入职员工需完成三级安全教育方可参与施工。应建立健全的规章制度与突发事件应对方案,清晰界定各岗位安全责任,推动现场管理标准化。针对高空作业、设备故障、电气风险、火情等常见隐患,需拟定具体处置流程并组织模拟训练,提升应急响应效率。现场需布置醒目的警示标识,对高危区域采取物理隔离,如安装护栏、防护网等防坠落设施。大型机械需实施专项管控,安排定期检测与养护,保证设备运转正常,操作者须持证并遵守规程。临时用电应规范布置,采用 TN-S 制式,执行“单机单闸单箱单漏电保护”原则,定期排查线路隐患,杜绝漏电风险^[8]。进行地下管线作业前,须

调阅档案、协同管理部门确认管线走向,采用人工勘探等谨慎工法,避免损毁管线,确保人员安全与工程进度。推行施工现场安全网格化管理,将施工区域划分为若干安全网格,每个网格设置专职安全员,负责网格内的安全隐患排查、现场安全监督和作业人员安全提醒,实现安全管理无死角。同时,引入智能化安全监控手段,在高空作业区、大型机械作业区等关键位置安装监控摄像头、红外线报警装置等,实时监控施工安全状况,对违规操作和安全隐患及时预警,借助科技手段提升安全管理的智能化和精细化水平。

3 结束语

市政道桥施工面临地质条件复杂、工期紧张、环保要求高、材料质量控制难及安全风险高等诸多难题。为应对这些难题,施工前要全面地质勘察,针对不同地质采用相应处理技术;借助项目管理软件制定合理进度计划,加强沟通协调与动态监控;通过多种措施降低施工对环境的影响;建立完善体系严控材料质量;构建全方位安全管理体系保障施工安全。未来,随着科技进步,更加先进的地质勘察技术、环保施工工艺及智能安全监控系统将不断涌现,助力市政道桥施工更好地解决现有难题。

参考文献:

- [1] 陆海涛. 钻孔灌注桩施工技术在市政道桥工程中的实践研究[J]. 四川建材, 2024, 50(11): 187-189.
- [2] 李威. 市政道桥工程沥青路面裂缝施工处理技术分析[J]. 新城建科技, 2024, 33(10): 148-150.
- [3] 张希. 加强市政道桥施工质量管理措施研究[C]// 广西信息化发展组织联合会. 第四届工程技术管理与数字化转型学术交流会论文集. 兰溪市城投市政养护有限公司, 2024.
- [4] 周文. 市政道桥施工技术要点的有效控制分析[C]//《建筑科技与管理》组委会. 2020年9月建筑科技与管理学术交流会论文集. 安徽省路网交通建设集团股份有限公司, 2020.
- [5] 徐耀辉. 市政道桥工程中沉降段路基路面施工技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(01): 155-157.
- [6] 王泽珊. 市政道桥工程沉降段路基路面的施工技术研究[J]. 散装水泥, 2022(05): 165-167.
- [7] 刘军. 市政道桥与供水管道协同施工的效率提升方法研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(08): 81-84.
- [8] 沈鹏. 绿色节能理念在市政道桥施工中的应用与实践[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(01): 109-111.

高寒地区公路桥梁耐久性设计与施工关键技术

张高兴

(四川顺恒勘察设计有限公司, 四川 成都 611100)

摘要 高寒地区具有海拔高、纬度偏北的地理特征, 气候上呈现冬季漫长严寒、昼夜温差和年际温差显著、冻融循环频发的特点, 同时面临盐冻侵蚀、强紫外线辐射等恶劣环境。公路桥梁长期处在这种极端条件下, 极易出现混凝土剥落、钢筋生锈、基础冻胀融沉等耐久性病害, 不仅大幅度缩短桥梁的使用年限, 还会增加养护维修的成本, 影响区域交通的畅通和安全。基于此, 亟需构建一套针对性的耐久性设计与施工技术, 从根源上解决高寒地区公路桥梁建设及长期运维中的难题。

关键词 高寒地区; 公路桥梁; 耐久性设计; 引气混凝土专项施工技术; 结构裂缝防控施工技术

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.018

0 引言

公路桥梁是高寒地区交通基础设施的核心, 其耐久性直接关系到交通网络的稳定运行, 也关系到公众出行的安全。当前, 我国交通建设的重点正在向西部高寒地区转移, 但现有的技术大多还是沿用通用规范, 没有充分考虑高寒地区的特殊环境, 导致桥梁耐久性不足的问题特别突出。因此, 明确设计原则、掌握关键技术、强化质量控制, 建立一套完善的耐久性技术体系, 对于提高桥梁的抗劣化能力、降低运维成本、保障工程长期安全有着非常重要的现实意义。

1 高寒地区公路桥梁耐久性设计原则

1.1 环境适配原则

开展高寒地区桥梁设计前, 必须精准摸排区域内极端环境参数, 重点掌握最低气温阈值、冻融循环频次、冻土厚度、盐冻侵蚀等级以及昼夜温差幅度等核心指标。唯有熟练掌握各类环境制约条件, 才能精准规避高寒环境引发的结构损坏风险; 结合当地冻土特性、气象分布差异, 优化桥梁结构选型与材料配比方案, 让设计思路贴合地域自然禀赋, 从源头降低冻融破损、盐蚀侵害等问题的发生概率^[1]。与此同时, 兼顾工程与生态的协调性, 杜绝桥梁建设对周边生态环境造成不可逆破坏, 平衡结构耐用性与生态保护需求, 保障桥梁在极端高寒环境下实现长期稳定服役。

1.2 全生命周期耐用原则

高寒桥梁设计需立足于全生命周期视角, 统筹兼顾施工建设、运维管理、后期养护三大阶段的实际需求。

设计既要保障现场施工的便捷性, 更要考量后期养护的可操作性与经济性; 结构选型与材料选用优先聚焦抗冻性强、耐腐蚀性优、易养护维护的品类, 以此缩减后期维修频次、控制运维成本。此外, 需提前预留养护检修作业空间, 为后续结构耐用性监测、病害整治修复提供便利条件, 最大限度延长桥梁设计使用年限。全程把控全周期成本与耐用性平衡, 避免因前期设计疏漏, 导致后期运维成本激增、结构寿命折损。

1.3 安全冗余原则

高寒地区极端天气频发, 桥梁结构长期承受冻胀力、温差应力、盐冻侵蚀等多重荷载作用, 设计阶段必须预留充足的安全冗余。针对结构强度、抗冻性能、抗腐蚀能力等关键指标, 严格遵循行业规范要求, 适度提升设计标准, 确保桥梁在极端低温、反复冻融等恶劣工况下, 依旧满足承载安全与正常使用标准。针对桥面、墩柱、基础等易损关键部位, 强化专项结构防护, 增设针对性防护举措, 防范突发病害引发安全隐患, 筑牢桥梁全天候运行的安全防线。

2 高寒地区公路桥梁耐久性设计关键技术

2.1 高性能抗冻材料优化技术

材料是桥梁耐用性的根本, 要重点做好混凝土和钢筋的性能优化, 适配高寒地区的恶劣环境。混凝土配合比设计时, 要采用低水胶比, 再掺进粉煤灰、矿渣粉、硅灰这类高活性矿物掺合料, 这样能减少混凝土内部的孔隙, 让孔隙结构更细密, 从而降低水分渗透的能力。同时, 还要加入适量的引气剂, 让混凝土

作者简介: 张高兴(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

内部形成均匀分布的微气泡, 这些气泡能缓冲水分结冰膨胀时产生的压力, 把混凝土的抗冻等级提高到 F300 以上^[2]。在钢筋方面, 要选用不锈钢钢筋、环氧涂层钢筋或者耐候钢, 这样能抵御氯离子的侵蚀, 延缓钢筋生锈。对于桥梁关键的受力部位, 采用阴极保护法, 通过外加电流或者牺牲阳极的方式, 防止钢筋氧化锈蚀, 从根源上提升材料的抗老化、抗劣化能力。

2.2 抗冻胀结构优化设计技术

结合高寒地区土壤冻胀、融沉的特点, 优化桥梁基础和上部结构的设计, 减少冻胀力对桥梁结构的影响。基础设计要根据场地的冻土类型、冻层厚度, 合理选择基础形式: 季节性冻土地区, 采用深基础, 把基础底面放在冻层下限以下; 多年冻土地区, 采用保温基础或者主动降温基础, 设置保温层或者热管装置, 维持冻层的稳定, 防止基础出现融沉问题。同时, 回填非冻胀性土壤, 降低土体的冻胀性。上部结构优先选用连续梁桥、刚构桥这类整体性好、抗变形能力强的桥梁形式, 合理设置伸缩缝和支座, 选用耐寒、耐老化的材料, 确保在低温环境下, 结构能自由伸缩、受力均匀, 减少因为温差和冻胀变形带来的结构损伤。

2.3 复合防护体系构建技术

构建“外防内排”的立体复合防护体系, 全方位抵御高寒环境对桥梁结构的破坏。在表面防护上, 混凝土表面会涂刷聚脲、氟碳这类高性能防护涂层, 形成一层致密的防护膜, 把水分、氯离子等有害物都挡在外面。桥面铺装则选用耐候又耐磨的材料, 还会设置防水层, 防止桥面的水渗到主梁结构里。渗透防护采用硅烷/硅氧烷浸渍技术, 能在混凝土的毛细孔壁上形成一层憎水层, 降低混凝土的吸水性和氯离子渗透性, 而且不会影响它的透气性。在排水防护方面, 要完善桥面和桥体的排水系统, 及时把雨水、融雪水排走, 减少水分在结构内部堆积, 避免冻融循环和盐蚀作用进一步加剧, 这样就能形成多层次、全方位的防护效果^[3]。

2.4 温差应力控制设计技术

高寒地区昼夜、年际温差大, 针对这个特点, 采用专门的温差应力控制技术, 防止桥梁结构开裂。在结构设计时, 会合理设置施工缝和后浇带, 采用分段分层的设计方式, 减少结构约束, 让温差产生的应力能及时释放。对于大体积混凝土构件, 会优化截面设计, 增加散热面积, 缩小构件内部和表面的温差。同时, 选用热膨胀系数小、抗裂性能好的材料, 减少温度变化带来的结构变形。在转角、倒角这些容易产生应力集中的部位, 会采用圆弧过渡的设计, 降低应力集中

的程度, 防止冻融循环和温差应力共同作用下, 结构出现裂缝并不断扩大, 保障桥梁结构的完整性。

3 高寒地区公路桥梁耐久性施工关键技术

3.1 低温环境混凝土浇筑与养护技术

低温环境下, 混凝土浇筑和养护的质量一定要严格把控, 这样才能避免早期冻融对其造成损伤。浇筑之前, 要把拌合水和骨料加热, 控制好混凝土的出机温度, 确保入模时温度不低于 5℃。尽量不要在零下 10℃ 以下的极端低温天, 或者寒潮来袭的时候, 浇筑薄壁结构和大体积混凝土。运输过程中要用保温罐车, 减少热量流失; 浇筑作业需选用高频插入式振捣器, 操作时务必遵循快插慢拔的要领; 把控好振捣时长与范围, 既要杜绝过振导致骨料离析, 也要避免漏振留下隐患, 防止内部气泡无法排出, 或是出现蜂窝、孔洞等质量问题。

养护环节可选用蓄热法或暖棚法, 依托水泥水化反应释放的自身热量, 搭配保温材料进行全覆盖包裹, 以此延缓热量流失, 维持构件内部温度稳定。

3.2 引气混凝土专项施工技术

引气混凝土是提高桥梁抗冻性的关键, 施工的整个过程都要严格把控质量。搅拌时要用强制式搅拌机, 按照配合比准确投放引气剂, 控制好搅拌时间和投料顺序, 不能过度搅拌, 否则会导致气泡合并、流失。运输过程中要保持平稳, 减少颠簸, 避免气泡跑掉; 浇筑时要合理控制浇筑速度和厚度, 防止气泡堆积在一起。施工过程中要多检测几次含气量, 确保出机、入泵、入模这几个环节的含气量都符合设计要求, 入模时的含气量至少要达到设计下限的最低标准。振捣完成后, 要及时把表面抹平、压光, 避免表面起砂、起皮, 这样才能保证引气混凝土的抗冻性能和结构密实度, 让那些微小气泡充分发挥缓冲作用。

3.3 结构裂缝防控施工技术

针对高寒地区特殊的施工环境, 结构裂缝防控必须贯穿全流程落实到位, 这是保障工程长期耐久性能的核心前提。混凝土浇筑前期, 要先细化优化施工方案, 科学规划施工缝与后浇带的布设位置, 采取分段分层浇筑的作业模式, 严控单次浇筑体量与分层厚度, 以此保障混凝土内部热量顺利散出、结构应力平稳释放, 从源头降低裂缝产生风险。浇筑作业期间, 要依托信息化手段开展全程温度监测, 在结构内部、表层及周边环境合理布设测温点位, 实时追踪温度场动态变化^[4]。一旦监测数据出现异常, 立即调整养护管控手段, 缩小混凝土内外温差差幅, 规避温度裂缝的产生。进入

养护环节后,持续做好保湿养护是关键,可选用湿土工布全覆盖包裹,或是喷洒专用养护剂,抑制混凝土因干燥收缩引发开裂。针对结构易开裂的薄弱部位,可更换纤维增强混凝土材料,或是增设加强筋加固,进一步提升结构整体抗裂能力。

3.4 防护层施工关键技术

防护层施工需严格遵循设计标准执行,全程把控施工质量,确保防护效果达标。开展混凝土表面防护施工前,要先彻底清理表层浮尘、油污及松动骨料,对细微裂缝做专项修补处理,保证基面平整干燥,为防护涂层牢固附着筑牢基础。涂刷防护涂层时,精准把控涂层厚度与涂刷均匀度,杜绝漏涂、流挂等问题,确保形成致密连续的防护膜;开展硅烷、硅氧烷浸渍作业时,严控浸渍深度与材料用量,保证渗透效果均匀一致,充分发挥材料的憎水防护功效。桥面防水层施工前,保证基层平整干燥,防水层铺设要平整无破损,搭接宽度严格遵照规范要求执行。防水层铺设完毕后,及时开展闭水试验,试验合格后方可推进桥面铺装施工,通过全流程管控,全面提升结构抗侵蚀、耐老化性能。

4 高寒地区公路桥梁耐久性施工质量控制与检测

4.1 原材料质量控制与检测

建立原材料全流程的质量管控体系,从源头筑牢质量防线,保障桥梁的耐久性。原材料进场的时候,严格检查水泥、砂石、钢筋、外加剂、防护材料这些核心材料的性能,重点看混凝土原材料的抗冻、抗腐蚀能力,钢筋的耐腐蚀效果,还有外加剂的相容性和引气效果。只要是不符合要求的原材料,一律不准进场使用。在施工过程中,还要定期对原材料进行抽检,跟踪检查水泥和外加剂能不能很好兼容、骨料级配是否合理、矿物掺合料的活性这些关键指标,发现问题就及时调整配合比。同时,要做好原材料台账,把进场批次、检测结果这些信息都详细记下来,做到质量可追溯,确保原材料性能一直符合高寒地区桥梁耐久性的设计标准。

4.2 施工过程质量控制与检测

要强化施工全过程的质量管控,重点关注关键工序和容易出问题的薄弱环节。混凝土施工时,要实时检测坍落度、含气量、入模温度这些指标,确保施工参数和设计要求一致;振捣环节要全程监控,不能出现过振或者漏振的情况,保证混凝土密实。钢筋加工和安装的时候,要检查钢筋的规格、间距、保护层厚度以及连接质量,关键部位要用无损检测技术,排查

钢筋锈蚀、连接不牢固等隐患。防护层施工完成后,要检测涂层厚度、附着力,浸渍类防护要检查渗透深度,桥面防水层要检测密封性^[5]。发现不合格的部位,要及时整改到位,确保每一道施工工序都符合质量要求,为桥梁耐久性筑牢基础。

4.3 成品质量检测与隐患排查

桥梁整体施工完毕后,必须全面推进成品质量核验与安全隐患排查,全力保障桥梁满足长期耐久使用的标准。采用无损检测技术开展核验,重点把控混凝土核心性能,细致检测强度、密实度与碳化深度,精准排查内部裂缝、空洞等隐蔽缺陷;同步核查钢筋锈蚀状况,判定钢筋保护层的防护效能是否达标。针对桥面、墩柱、基础等核心受力部位,要加大排查力度,重点核查防护层完整性、排水系统通畅度,及时预防并消除冻胀、盐蚀等各类潜在风险隐患。与此同时,建立健全成品检测台账,对核验发现的各类问题,专项制定整改处置方案,清晰划定整改时限,整改完毕后必须组织复检复核,确保所有问题闭环整改、不留死角。除此之外,还要构建长期动态监测体系,在桥梁结构内预埋温湿度、应变计、氯离子传感器等监测设备,实时跟踪桥梁耐久性能状态,一旦捕捉到早期病害信号,第一时间启动处置流程,严防小隐患演变成大问题。

5 结束语

高寒地区公路桥梁的耐久性设计与施工,必须紧密结合当地极端环境的特点,严格遵循适配性、全生命周期和安全冗余这三项原则,熟练运用材料优化、结构防护、温差控制等关键技术,同时强化施工全过程的质量管控与检测工作。只有把设计、施工、质量控制这三个环节有机结合起来,有效解决冻融、盐蚀、温差应力等核心难题,才能显著提高桥梁的抗劣化能力,延长其服役寿命,保障高寒地区交通网络持续稳定畅通,为区域基础设施建设的高质量发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 范桂英.高原高寒地区公路病害成因与养护技术探究[J].价值工程,2025,44(27):39-41.
- [2] 冉从翔.高海拔高寒地区公路桥梁预制梁施工工艺分析[J].交通科技与管理,2024,05(17):140-142.
- [3] 潘昌辉.高原高寒地区公路沥青混凝土的耐久性性能优化分析[J].江西建材,2024(07):338-340.
- [4] 孟宪达.高海拔高寒地区公路桥梁预制梁施工工艺[J].设备管理与维修,2023(14):156-157.
- [5] 李露业.高寒地区公路桥梁健康监测技术应用探讨[J].青海交通科技,2022,34(01):114-118.

公路路面基层施工中的水泥稳定碎石技术探究

陈宣任

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 为提高公路路面基层结构的稳定性, 本文围绕公路路面基层施工中的水泥稳定碎石技术展开研究。通过分析公路基层结构的技术要求, 系统探讨了原材料质量控制、混合料配合比设计等关键施工环节。结果表明, 科学控制水泥剂量, 严格规范施工工艺流程, 能够提高基层强度, 有效增强路面结构的承载能力; 强化施工质量控制与技术管理, 能发挥水泥稳定碎石技术的优势, 提升工程质量。

关键词 公路路面; 基层施工; 水泥稳定碎石技术

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.019

0 引言

公路路面基层是路面结构的核心受力组成部分, 其施工质量直接决定公路整体的服役性能与使用效果。水泥稳定碎石基层因具有强度高、整体性好等特点, 被广泛应用于各类公路工程建设中。然而, 在实际施工过程中, 受材料配比、施工工艺等多种因素影响, 基层质量仍可能出现不稳定问题。因此, 围绕公路路面基层施工中的水泥稳定碎石技术展开系统研究, 能够提高基层结构的稳定性。

1 公路路面基层的技术要求

公路路面基层是道路承重结构的关键层次, 位于面层之下、底基层之上, 主要承受由面层传递的车辆荷载, 并将其扩散分布在下层结构。由于基层的技术性能直接关系到路面结构的使用寿命, 因此必须满足以下系统性技术要求^[1]。

1. 强度与刚度要求: 基层作为路面结构的主要承重层, 必须具备足够的抗压强度与整体刚度, 有效抵抗行车荷载反复作用产生的压应力与剪应力, 避免出现过大塑性变形、沉陷及开裂等病害。以水泥稳定碎石基层为例, 其设计强度需结合公路技术等级、交通荷载等级及环境条件综合确定, 工程中通常要求 7 d 无侧限抗压强度代表值控制在 3.0~5.0 MPa 范围内, 以满足长期服役条件下的结构稳定性与承载能力。

2. 水稳定性与耐久性要求: 基层材料长期处在路基湿度场和大气环境的共同作用下, 必须具有良好的

水稳定性。水泥稳定碎石在水浸泡条件下需保持强度不显著衰减, 浸水抗压强度与标准养生强度之比需满足规范限值。此外, 基层材料还需耐冲刷, 避免在动水压力作用下产生细料流失, 使得结构松散。

2 水泥稳定碎石施工技术要点

2.1 原材料质量控制

原材料质量控制是保证混合料性能符合设计要求的先决条件, 其技术指标要严格遵循相关规定。原材料品质直接影响混合料强度、收缩特性, 因此需建立覆盖水泥、粗集料、细集料的系统性质量控制体系^[2]。

1. 水泥。水泥在混合料中承担胶结骨架的关键作用, 其产品种类、强度等级等性能指标, 会直接影响最终成型混合料的整体黏结强度。施工时优先选用初凝时间超过 3 h、终凝时间不低于 6 h 的普通硅酸盐水泥, 以此保障混合料在搅拌、运输及摊铺等环节拥有充足的作业时长。水泥强度等级以 32.5 级为宜, 施工过程中禁止使用快硬型水泥与早强型水泥。水泥剂量要按干质量百分比控制, 具体用量要依据目标配合比设计确定的强度指标。水泥进场验收要按每 200 t 为一个检验批次, 不足 200 t 时亦按一批次计算。检验项目包括凝结时间、安定性、胶砂强度及细度, 各项指标应满足《通用硅酸盐水泥》中对应强度等级的技术要求。

2. 粗集料。在粗集料的生产制备环节, 应优先选用反击破碎及冲击破碎类设备进行加工处理。为有效

作者简介: 陈宣任 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

控制集料洁净程度,生产全过程需设置相应除尘设施,减少集料表层粉尘附着量。粗集料粒径需严格管控,最大粒径不得大于31.5 mm,超出该粒径的颗粒比例需控制在5%以下。压碎值作为判定粗集料力学性能的重要依据,对高等级公路尤为关键。高速公路与一级公路基层所用粗集料,其压碎值需控制在26%以下;二级及以下等级公路可适当放宽,压碎值不大于30%。此外,集料中针片状颗粒占比不得高于20%,含泥量需控制在1%以内。粗集料要按粒径分档堆放,一般划分为0~4.75 mm、4.75~13.2 mm、13.2~31.5 mm三档。各档集料之间要设置隔离墙,防止窜料混杂。

3. 细集料。细集料主要起填充粗集料间隙、改善混合料的作用,核心控制指标有砂当量、塑性指数及0.075 mm以下粉粒含量。细集料要采用石灰岩、玄武岩等硬质岩石加工而成。砂当量不低于60%,塑性指数不大于17。细集料中0.075 mm通过率要控制在10%以内,当采用机制砂时应严格控制石粉含量^[3]。

2.2 混合料配合比设计

水泥稳定碎石的配合比设计是确定混合料组成参数的核心技术环节,其目标是满足工程需求优化材料组合,以降低收缩开裂风险,提高施工和易性。其技术要点如下:

1. 水泥剂量控制要点。水泥剂量是决定水泥稳定碎石强度形成与收缩特性的关键参数。依据规定,水泥剂量要控制在混合料总质量的3%~6%范围内,然后选取满足设计强度要求的最小剂量,可根据目标剂量增加0.5%~1.0%,以补偿拌和过程中的计量误差、材料变异性带来的离散性影响。

2. 含水量控制要点。含水量是影响混合料压实成型与水化反应进程的核心控制指标。在施工过程中,混合料的实际含水量要在最佳含水量的基础上,提高1%~2%。增加的水分用于补偿混合料在运输、卸料及摊铺过程中因水分蒸发造成的损失,以保证碾压开始时,混合料仍处于最佳含水量状态。

3. 级配控制要点。集料级配是混合料骨架嵌挤作用与密实填充效果的技术基础。水泥稳定碎石的级配要符合《公路路面基层施工技术细则》要求。合成级配曲线要控制在规范范围内,让粗集料能够形成良好的骨架嵌挤结构,其中4.75 mm通过率直接影响粗集料含量与骨架形成能力,0.075 mm通过率则显著影响混合料的收缩特性^[4]。

2.3 混合料拌和

混合料拌和是水泥稳定碎石施工的关键工序,其技术状态直接影响混合料的均匀性、稳定性。混合料

拌和要在具备自动计量系统的强制式拌和楼中进行。拌和楼要安装在平整坚实的场地上,料场要硬化处理并设置排水设施。依据设计配合比精准称量水泥、粗集料、细集料与水。水泥剂量误差控制在±0.5%以内,各档集料剂量误差控制在±2%以内,加水量误差控制在±1%以内。各冷料仓需设置隔板防止串料,水泥罐设置破拱装置,以保证供料的连续性。拌和时,采用先干拌后湿拌的工艺流程,先将粗集料与细集料投入拌和仓,干拌5 s以上,初步混合粗细集料;再加入水泥继续干拌5~10 s,使水泥颗粒均匀裹覆在集料表面;最后加入拌和水进行湿拌,湿拌时间要保证混合料在拌和仓内停留时间不少于35 s。拌和过程中要依据天气状况与原材料含水量变化,动态调整加水量。出料混合料含水量要按最佳含水量提高1%~2%控制。完成拌和的混合料应色泽均一,无灰条、灰团与花面现象^[5]。

2.4 混合料运输

混合料运输是连接拌和与摊铺的关键纽带,其技术状态直接影响混合料的温度、施工连续性。混合料运输要综合考虑拌和能力、摊铺速度等,并建立匹配的运输保障体系。其中,混合料运输要采用车况良好、车厢密封性能良好的自卸汽车。车厢底板平整、光滑,无凸起尖锐物,防止损坏混合料。运输能力配置要保证摊铺机前始终保持3~5辆车待卸状态,保证摊铺作业连续进行。装料时要采取防离析措施。车辆要在拌和楼出料口下分三次前后移动装料,经过分次移动装料,在车厢内初步混合粗细集料,减少装料过程中因重力落差造成的集料离析现象。

混合料装车后要立即用篷布覆盖。篷布需选用防水、防晒的材料,覆盖时完全遮盖车厢并捆扎牢固,防止运输途中篷布被风吹起。覆盖篷布的目的是减少水分蒸发,保持混合料含水量稳定,防止扬尘污染环境。其间要严格控制运输时间,从混合料拌和出料到摊铺完成的时间不应超过水泥初凝时间,一般不宜超过3 h。当气温高于30℃时,运输时间要缩短到2 h以内;当气温低于10℃时,可适当放宽到3.5 h。运输途中要避免急刹车、急转弯,防止混合料在车厢内产生离析。运输车辆到达摊铺现场后,需在专人指挥下倒车进入卸料位置。卸料时要一次升起车厢将混合料全部卸入摊铺机料斗,卸料完毕后车辆应立即驶离,避免影响后续车辆卸料。

2.5 混合料摊铺

混合料摊铺技术状态直接影响基层的平整度、厚度均匀性。摊铺作业要配备性能稳定的摊铺设备,严格

控制松铺厚度、摊铺速度,保证混合料均匀平整地铺筑在下承层上。混合料摊铺前要全面检查下承层,保证其表面平整、密实。摊铺前要在下承层上洒水湿润,以增强层间黏结,同时按设计宽度与高程设置基准线,基准线张拉力不小于 800 N,相邻支架间距不宜大于 10 m。

摊铺机进场后要精确调试,检查各工作装置运行状态,调整熨平板初始工作角。熨平板要在摊铺前加热至 100 ℃ 以上,加热时间不少于 30 min,防止混合料在低温熨平板表面黏结、拉毛,保证摊铺层表面平整光滑。摊铺过程中要随时用挖坑法检测松铺厚度,及时校准偏差。摊铺机的摊铺速度一般控制在 2~3 m/min 范围内,摊铺速度一经设定要保持稳定,保证混合料在熨平板下停留时间一致,减少因速度变化引起的预压实度波动。摊铺过程中要安排专人跟随摊铺机观察混合料状况。发现局部离析现象时,立即采用人工处理措施:粗集料集中部位应挖除后换填新料,并人工整平;细集料集中部位可翻拌均匀;严重离析且无法处理时应暂停摊铺,查明原因消除后方可继续作业。

2.6 碾压成型

碾压成型决定基层的压实度、整体强度、平整度及抗裂性能。碾压作业需在水泥稳定碎石混合料的最佳含水量 $\pm 1\%$ 范围内开展,且必须在水泥初凝时间前完成全部碾压工序。施工前需检测混合料含水量,含水量不足时采用雾状喷水法补洒水分,含水量过大时适当摊铺晾晒。

1. 碾压机械选型: 碾压机械需依据基层施工厚度、混合料特性选型,采用重型压路机为主、轻型压路机为辅的组合方式,遵循“先轻后重、先静后振、先边后中、低速匀速”的碾压原则。基层施工厚度 ≤ 18 cm 时,采用“轻型钢轮压路机初压+重型振动压路机复压+重型胶轮压路机终压”的组合;厚度为 18~25 cm 时,采用分层碾压工艺,每层厚度控制在 10~15 cm,且上下层碾压接缝需错开 50 cm 以上。

2. 碾压施工工艺: 混合料摊铺整平后立即开展初压,采用 6~8 t 轻型钢轮压路机进行静压,碾压遍数为 1~2 遍。碾压时压路机驱动轮朝向摊铺方向,相邻碾压轮迹重叠宽度 ≥ 30 cm,路肩及边缘区域需多压 1~2 遍,初压后及时检查基层平整度。初压整平后立即进行复压,采用 18~22 t 重型振动压路机,开启高频低幅振动模式碾压,碾压遍数为 3~4 遍。复压过程中需连续检测压实度,采用灌砂法每 200 m 检测 1 处,保证压实度检测数据真实反映基层成型质量。复压达标后采用 26~30 t 重型胶轮压路机进行静压

终压,消除复压产生的振动轮迹,使基层表面平整密实。碾压完成后需及时检测基层各项技术指标,指标不合格处需立即进行返工处理。

2.7 接缝处理

接缝处理影响基层结构的整体性和荷载传递能力,针对横向施工缝与纵向施工缝分别采用标准化处理工艺,消除接缝处的质量缺陷,保证接缝平顺密实。其中,横向施工缝采用分段施工。施工中混合料摊铺搭配端部时,及时用切割机切割规整断面,清除端部松散混合料,保留垂直的断面;接茬摊铺前,在旧茬表面均匀涂刷水泥净浆,增强新旧混合料黏结性,新铺混合料需略高于旧基层 2~3 cm,碾压时压路机跨缝碾压,重叠宽度不小于 50 cm,由旧茬向新铺层逐步碾压至平顺。纵向施工缝仅在分幅摊铺时设置,采用垂直接缝工艺,严禁留斜缝。分幅摊铺时,相邻幅间距控制在 2~3 m,先铺幅边缘采用方木支挡成型,保证断面垂直;后铺幅施工前,清除先铺幅边缘松散料,涂刷水泥净浆后摊铺混合料,碾压时先对接缝处静压 2 遍,再正常碾压,保证接缝处压实度与设计要求一致。

3 结束语

水泥稳定碎石基层的施工工艺,在现代公路工程建设中占据重要地位,对增强路面整体结构强度、延长道路使用寿命有着极为重要的意义。随着我国公路工程建设范围与规模持续拓展,水泥稳定碎石基层施工技术也将向精细化方向发展,需提高基层结构性能,为现代公路工程建设提供更加可靠的技术支撑,进一步提升基层施工的标准化水平,保障公路工程建设质量以及长期使用效果。此外,还应加强融合应用新材料及智能监测技术,更好地满足现代公路建设高质量发展的现实需求。

参考文献:

- [1] 李晓军. 公路路面工程水泥稳定碎石基层施工技术要点[J]. 四川建材, 2025, 51(08): 165-168.
- [2] 周峰. 水泥稳定碎石基层在高等级公路路面施工中的应用[J]. 中国建材, 2025(05): 116-118.
- [3] 汪庭. 公路路面基层施工中的水泥稳定碎石技术探究[J]. 中国高科技, 2025(03): 111-113.
- [4] 马丽霞. 公路路面基层施工中水泥稳定碎石技术的分析[J]. 科技资讯, 2024, 22(19): 162-164.
- [5] 蓝庆红. 公路路面水泥稳定碎石基层施工技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2024(25): 16-18.

桩基础施工技术在建筑工程 土建施工中的应用研究

刘 坤

(安徽笔木建设科技集团有限公司, 安徽 合肥 233000)

摘 要 桩基础施工技术是当前工程中比较常用的一项施工技术。在现阶段工程项目快速增多的背景下, 人们对于工程质量提出较高要求, 而桩基础施工有效应用是提高工程质量的关键途径, 尤其是针对土质松软或者是承载力较低区域。基于此, 本文主要针对桩基础施工技术常见类型进行概述, 并探讨在土建施工过程中桩基础施工技术的实践应用要点, 以期为企业提供参考。

关键词 桩基础施工技术; 建筑工程; 静力压桩; 预制桩; 钻孔灌注桩

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.020

0 引言

桩基础凭借优异的抗压承载力与抗倾覆性能, 已在各类建筑工程中得到广泛应用, 在地质条件差及多层软土地区的工程中使用更为频繁, 其功能是将建筑荷载有效传递到深处稳定土岩层, 从而保证建筑物的整体安全稳定和长久性。近年来, 随着工程项目的不断发展, 桩基工程的技术施工取得较大进步与发展, 越来越精细化、专业化。因此, 为确保工程质量达标并且能够满足安全使用的规范, 应对桩基础施工技术要点进行明确把握, 进而提高工程质量。

1 桩基础技术在工程施工中的常见类型

1.1 静力压桩施工技术

静力压桩施工技术主要是利用静力压桩机将预制混凝土桩沉入土层当中, 从而增强地基承载能力的一种施工技术, 在进行压桩作业过程中, 它是依靠静动力原理进行施工, 其施工噪声较小, 并且在实际应用的过程中使用大多为预制件, 这些预制件多由工厂集中生产而成, 具有较强的稳定性, 节约资源消耗^[1]。该桩基施工方式相比于其他桩基施工方式来说操作起来较为容易, 并且对工作场地的要求以及工作人员的专业素质要求不高, 但要注意保证连续性的工作流程以免发生因停止作业而造成的土质松散或者水位上升等问题。

1.2 预制桩基础施工技术

预制桩基础施工是将预制好的桩按照程序安装在设计位置上, 因其在施工中具有便于操作、能加快施

工进度等优势得到广泛应用。因此, 要做好预制桩的质量管理, 就应该关注于如何定位桩位以及打桩工艺质量的有效把控, 从而提高质量管理的效果及针对性^[2]。通常来说, 采用金属或混凝土来制作预制桩的主体, 可以增强其承载能力, 并增加整体的适用性以及有效性, 为建筑提供一个可靠的持力层支撑。在材料的选择方面, 要结合实际情况进行选择钢结构或是混凝土作为原材料, 在考虑气候变化尤其是温度变化对混凝土产品的影响的同时, 在施工过程中一定要按照指定的位置及方向进行操作, 并且严格按照一定的顺序来进行浇筑。从而保证预制柱达到相应的质量标准及规范的要求。

1.3 钻孔灌注桩基础施工技术

钻孔灌注桩是基础承重构件中的一大类, 特别是其中的钻孔灌注桩这一工艺已经较为成熟并有着极为广阔的应用前景。按照打孔方式的不同划分, 打孔灌注桩可分为两类: 第一类为泥浆护壁的方式实现稳定。第二类为采用干燥方法完成成孔以及灌注施工, 在明确适宜的成孔工艺后还应根据是否具有地下水开展分析, 掌握其特性以便于选择适宜的成孔工艺, 同时按照施工工序实施成孔操作。在选定适宜的成孔工艺后则应对地下水特征及影响程度加以综合考量。

2 土建施工中桩基础施工技术实践应用要点

2.1 处理地基基础

在开展桩基础施工技术应用的前期准备工作时, 要做好实地考察, 充分了解施工现场的地层土质、水

作者简介: 刘坤(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

文状况及周边环境。根据场地土质情况及密实度、含水率等相关指标值，参照地质柱状图所反映的岩性特征，对桩基础的持力层及稳定性做定性判断。以某一高层土建工程项目施工为例，在进行前期勘察过程中，工程区域发现有上百处岩溶洞穴，并且受地表水及地下水的影响，发育形成的土洞也比较常见。在这种环境下，岩体稳定性受到的危害十分明显，若处置不当会引发后期的地基、基础桩施工过程中的流沙、偏桩等事故；当建筑物投入使用后，则可能演变成产生差异沉降甚至局部倒塌的危害源。在本项目中，通过分析土壤和岩石中存在的孔隙、溶洞的深度及尺寸以及其中充填物性质，并据此决定采取何种加固方法进行处理。对于存在堵塞物的溶洞区域采用水泥、砂、膨润土按一定比例混合，采用该类物质注浆固结处理，提高其承载力；对于未见充填的溶腔则先布置一排风眼及两排砂石料注入管，选用标准 $\Phi 168$ mm 钻头进行钻孔施工，并在主管外侧加装导流器，再采用高压压力灌浆工艺形成稳固永久固结体。对于深度较大和发展较快的浅层土洞，则视现有材料条件采用多层填土（先填土后填碎石或小石块再填大石块）或清渣回填碎石及粗砂夯实的方法，并做好排水疏干以维持地下水流速通畅。这样能明显提高原地基的基础稳定性以及抗压能力。

2.2 选择施工工艺

结合复杂的地质条件对建筑工程建设中的基础施工特征进行全面分析，在实际的地基处理技术以及成桩工艺的应用中，要充分关注溶洞或者土洞等问题对桩基施工造成的影响。在结合实际施工需求及指标的基础上，将针对正循环钻进法、反循环钻进法、冲击钻孔法、人工挖孔法、螺旋钻机成孔法这几种常见的钻孔灌注桩成孔工艺展开纵向对比分析，具体参数如成孔深度、成孔口径等等。对合适的地层及对周边的影响效果（噪声级别、振动大小等）进行了充分研究分析，并结合实际，确定以冲击反循环钻孔灌注桩工艺为主要工艺手段，充分利用其高效、低噪、稳定性强的优势，确保工序顺利进行。

2.3 钢护筒埋设

在建筑施工中运用全站仪以及水准仪等精密设备工具，依据桩基平面定位及高程进行测绘，在施工现场进行测量，采用复核的方法确定桩基位置，并设立监控网。结合设计标准将每根桩位纵向编号，并且确保桩头高度比施工深度深出 1 m 以上。在进行初步计算后，依据表 1 中的技术标准对标号结果进行检测，

确认其准确性，在完成此项工作后方可开展钢护筒安装作业。需要注意的是，优质的大直径钢材制成的钢护筒能够有效提高钻孔成型质量，减小外力操作对孔壁稳定性的影响。为确保钢护筒的准确就位，在实际工作中，利用科学的测设技术和定位技术，依据设计标准超前开挖出宽于钢护筒直径约 450 mm 的预埋沟槽，采用黏土等材料层层填充底部及四周部位，利用机械碾压稳固固定；同时，还建议将整体护筒直接深埋至地面以下深度约为 1.8 m 处。这样能增强防渗漏能力，避免后期施工中可能出现的问题。精准测量钢护筒中心位置并进行控制，在该过程中应尽量使其与桩基的设计坐标重合，偏差不应大于 ± 20 mm；进行桩基定位及开钻施工，将护筒顶端控制在离地 30 ~ 50 cm 左右的位置，结合图 1 完成钢筋笼的焊接及固定。对有偏斜的桩基，应采用准确测定并调整位置的方法，保证垂直度偏差 $\leq \pm 1\%$ ，待混凝土强度达到 25% 设计强度后方可拔出护筒。

表 1 桩基类型桩位偏差

桩基类型	带基础梁的桩	承台桩
检查项目	垂直基础梁中心线	沿着基础梁中心线
	1 ~ 3 根桩	4 ~ 16 根桩
	≤ 100 mm	≤ 150 mm
允许偏差	≤ 100 mm	≤ 100 mm
	$\leq 1/3$ 桩径或边长	$\leq 1/2$ 桩径或边长
	中间桩	1/2 桩径或边长

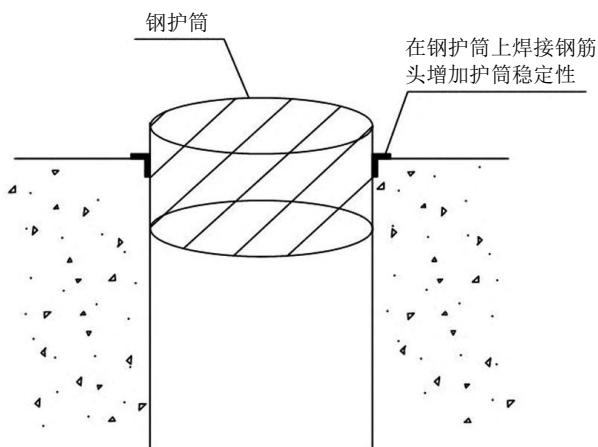


图 1 钢护筒钢筋焊接示意图

2.4 钻进成孔

结合项目实际，在确定钻机良好的操作性及精准就位性和稳定性后，使用放置在钻孔作业面上的垫块

帮助完成钻机的精准就位,并再次校正钻头方向,确保成孔轨迹满足与基础中心偏差不大于 ± 20 mm的要求。

实践中可以采用调节冲击参数的方法来提高钻孔质量,在松软土层中选用小冲程为0.6 m;而坚硬地层

则选取大冲程为1.0 m,开始阶段可采用小冲程进行试打,并适量掺入黏土颗粒、细砂、砾石等。这样就构成一个稳定而不会损害墙壁的泥浆体系(具体参数见表2),这种泥浆可以减少孔壁坍塌并提高钻孔质量。

表2 泥浆性能参数

项目	黏度	含砂率	胶体率	失水量	稳定性
指标	10 ~ 25 s	< 6%	> 95%	< 3 mL (30 min)	< 0.03 g/cm

在钻孔达到3~4 m时,需立即进行孔内清理操作,及时将钻孔产生的垃圾以及粉尘清理出去。进入基岩区域后,应加大清洁频率,每钻进0.8 m左右进行一次清理作业。对于一些特殊地质条件,如漂石层或软弱地带,这些地方的钻进速率控制在每天4~10 cm。在对孔的位置进行检查后,若其位置发生偏离,则需用碎石进行填补,在原孔口以上约40 cm处继续钻进。借助泥浆循环系统不断清除孔内沉淀物,同时确保孔内水位比地下水位高1.8 m以上。当清洗液中悬浮颗粒含量低于4%时,可认为其达到终孔标准。

2.5 吊装钢筋笼

此次施工项目主要采用热轧钢棒焊制作钢筋笼骨架,并按表3规范严格检查其主筋间距、箍筋排布和尺寸,同时注重在外侧喷涂防腐漆以增强防腐效果。吊运时,用螺丝将钢筋笼一端固定连接^[3]。并在上部制作专用吊耳;四周对称布置保护垫木,并控制其高度不大于1.8 m。采用空中翻转法找到6个吊装吊点并进行安装就位,按程序完成整体组立工作。

采用平板车运输钢筋笼至施工现场,布置塔式或履带式起重机进场并对吊钩及吊索具、钢丝绳等重要部位进行性能试验和检查^[4]。采用双钩同步起吊的方法,慢速匀速地进行吊装作业,在距地面约0.4 m处观察钢筋笼变形及稳定性,保证始终保持垂直状态。解除副钩并缓慢释放主钩,配合卷扬机钢丝绳及人工缓缓放入孔中,在测量定位校正后再调至设计深度,并固定于设计中心线上。

表3 钢筋笼质量检验标准

项目	检查内容	允许偏差	检查工具
主控项目	主筋间距	± 10 mm	钢尺
	钢筋骨架长度	± 100 mm	钢尺
	钢筋长度	设计要求	送检
一般项目	钢筋间距	± 20 mm	钢尺
	直径	± 10 mm	钢尺

2.6 浇筑混凝土

以C30混凝土为目标配合比,选取材料用量进行试拌,检验工作度及坍落度大小控制在180~220 mm之间;生产过程中采用外径略大于内径壁厚管5 mm的无缝钢管做导管。一般设置的长度是2.5~4 m^[5]。在进行混凝土灌注时,要先将导管埋入距孔底约40~45 cm并量好初灌面高度后,在实际操作过程中再适当上下调整其深度,使其始终处于灌注层以下不少于2~6 m;如因场地限制达不到此要求,可以增加打孔深度或者是加大打孔数量的方式来进行工程方案的优化工作,并且在进行浇筑过程中如果发现打孔顶部的混凝土超出设计标准高度0.8 m的情况后一定要立即停止灌装的工作,直到由专业的检验人员完成完好的质量评定以及审查以后才可以将超出的部分混凝土拆除。

3 结束语

在土建施工项目中,桩基础施工质量直接影响建筑整体性能及安全性,为确保工程质量达到高标准,需要明确掌握桩基础施工技术要点,并结合实际项目系统化制定施工方案,并结合现场实际条件优化工艺参数设计。通过科学评估方案可行性,从而有效保障建筑结构的安全性与稳定性,强化施工管理,为企业带来较高的经济效益。

参考文献:

- [1] 陈思隆. 建筑工程土建施工中桩基础施工技术要点及质量控制[J]. 建筑机械, 2025(07):106-110,114.
- [2] 王星军. 建筑工程土建施工中桩基础施工技术的应用探究[J]. 建材发展导向, 2025,23(05):55-57.
- [3] 孙小强. 建筑工程土建施工中桩基础技术的应用分析[J]. 建材发展导向, 2025,23(01):109-111.
- [4] 代春宇. 住宅建筑工程土建基础施工中深基坑支护施工技术分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(30):127-129.
- [5] 高慧田. 关于建筑工程土建施工中桩基础技术的实践探究[J]. 建材发展导向, 2024,22(15):80-82.

砂卵地层下穿河道及城市主干道浅埋暗挖隧道洞内超前管棚支护施工技术

尹 强

(合肥市轨道交通集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 成都地区广泛分布的砂卵石地层具有结构松散、自稳能力差等特点, 在该类地层中进行浅埋暗挖隧道施工, 尤其是在下穿河道、城市主干道及重要管线等复杂环境时, 面临着围岩易扰动、沉降控制难、施工风险高等严峻挑战。本文针对成都地区砂卵地层中下穿河道及城市主干道、同时下穿重要管线的浅埋暗挖隧道的洞内超前支护, 对原设计支护方案及隧道常用小导管、超前锚杆等支护形式进行对比研究, 通过不断的试验, 验证超前管棚在该种复杂环境下围岩支护的可行性。

关键词 浅埋暗挖; 河道; 管线; 道路

中图分类号: U455.48

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.021

0 引言

目前, 地铁暗挖隧道的施工方法主要有浅埋暗挖法、矿山法、盾构法等, 矿山法隧道适用于各类地质条件, 对沉降控制效果好, 对地面交通影响较小, 在区间隧道施工中应用广泛^[1]。

隧道超前支护主要方式有管棚、小导管、超前锚杆等, 已形成完善施工工艺。管棚注浆法可抑制软弱破碎围岩变形, 改善支护结构受力, 避免塌方; 超前小导管注浆支护能提高围岩稳定性, 减少洞室变形和塑性区, 环向分布范围、管径等是主要加固参数; 超前锚杆管径小于小导管, 在砂卵地层应用广, 但支护效果不如小导管。目前, 超前支护是隧道穿越软弱破碎围岩的关键措施, 其设计十分重要。现有超前支护设计研究多集中于方案优化分析或单一参数优化设计, 对合适支护方式及合理参数范围选择的研究较少。隧道超前支护设计在某些条件下过于保守, 不适用于现场施工, 造成浪费, 然而在有些条件下又由于隧道结构设计过于薄弱而存在较大的安全隐患, 给隧道工程的建设和后期的运营带来较大的安全风险^[2]。因此, 有必要对如何选择合适的隧道超前支护方式及合理参数范围进行深入研究。

1 工程概况

成都轨道交通 9 号线一期工程 5 标武青车辆段出段线位于机投镇站~武青北路站正线区间西侧, 同时位于在建成浦铁路桥附近。

矿山法施工里程为 CDK0+340.291~CDK0+753.000, 长 412.709 m, 隧道大里程 CDK0+753.000~CDK0+880.000 采用明挖法施工, 与市域铁路代建段相接。矿山法区间 3 次上跨盾构, 2 次下穿二道河。主体位于通行的武青北路下方, 武青北路为双向 6 车道主干道, 两侧人行道及非机动车道下方有重要管线。

隧道埋深 8~12 m, 洞身主要处于中密~密实卵石土中, 局部松散, 卵石含量 55~75%, 粒径 2~15 cm 为主, 最大粒径大于 20 cm, 偶见漂石, 含量约 5%~6%, 卵石间有细、中砂充填, 成分以岩浆岩、变质岩为主, 级配差, 呈次磨圆状, 局部夹透镜状砂层, 均匀性差、连续性好, 表层中等压缩性, 下层低压缩性, 整体强度高, 为强透水层和主要含水地层。

因卵石透水性强、富水性好、自稳定性差, 矿山法施工抽排地下水易使细颗粒流失, 导致卵石土结构松散、发生固结, 造成掌子面垮塌甚至地面塌陷, 危及基坑及周边安全。

二道河两次横穿线路, 穿越里程分别为出段线 CDK0+609~CDK0+615、CDK0+698~CDK0+721, 原沿武青北路铺设, 宽约 5 m、深 3 m, 为水泥驳岸且做防渗处理, 后因成蒲铁路修建改移为临时沟渠, 未做防渗。河道水量小、水位稳定, 河底有淤泥质粉质黏土、粉质黏土, 属微~不透水层, 但沟帮条石砌筑已变形, 有局部渗漏, 对隧道有一定影响。

作者简介: 尹强(1987-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程。

2 砂卵石暗挖隧道的预加固方案比选

砂卵石地层隧道的超前支护方案关键在于是否能够有效封挡漏砂,减少坍塌,从而有效地控制地层的结构变形,保证上方围岩稳定,保证上部结构物(道路及管线、河道)的安全。结合同类型隧道施工经验,同时在武青暗挖隧道(未穿越段)进行各种超前支护类型的试验施工。对R32N自进式中空超前锚杆(原设计)、 $\Phi 25$ 超前锚杆、 $\Phi 89$ 中管棚、 $\Phi 108$ 大管棚、 $\Phi 42$ 超前小导管进行试验(见表1),确定最优支护方案。

表1 常用超前支护施工验证对比表

序号	超前支护措施	施工方法	设置规格	施工情况	支护后开挖情况	优先情况
1	R32N自进式中空超前锚杆	十字钻头自进式成孔		成孔深度仅0.8~0.2 m	超前风钻应对围岩扰动较明显,开挖过程坍塌严重	不适用,围岩扰动较大;垮塌严重
2	$\Phi 25$ 超前锚杆	风管预吹孔法	每循环25孔3.5 m,可开挖4幅	砂卵自稳差、无法成孔、随钻进随塌孔	在纯砂层中可成孔2 m左右,但开挖后支撑力小,出现锚杆一下即坍塌情况	仅适用于拱顶纯砂层,支护效果不稳定
3	$\Phi 42$ 超前小导管	$\Phi 50$ 风钻成孔			无法成孔,不具备可行性	不适用
4	$\Phi 89$ 中管棚	导向跟管钻	每循环30孔9 m,可开挖14幅	受市场现有材质影响仅能钻进9 m	支护效果较好,开挖过程管棚脱落。管棚上方基本无坍塌。	一般,每循环施工时间较长,工期不优
5	$\Phi 108$ 大管棚	导向跟管钻	每循环30孔15 m,可开挖26幅	R780材质,每环钻进15 m		优先选用

前段深度掌子面、管棚后端支撑在已完成的拱架上方,能够有效地承载住开挖面上方围岩^[3]。

管棚间距设置为250 mm,净距离为142 mm,相邻管棚的扩散浆液能够有效地固化中间砂层,形成整体帷幕效果。

管棚的平面布置根据隧道穿越河道、武青北路、重要管线的平面位置,灵活设置,每循环在9~15 m,合理布置避免在管线及河道下方停滞施工管棚。管棚工作室利用管棚外倾角与开挖拱架之间逐步形成的高差,进行逐步扩挖,工作室长度5 m,采用双层拱架,快速形成支护,本循环管棚施工完成后再补充架设正常拱架。

3.2 管棚的施工步骤

洞内隧道开挖施工时在上循环施工的初支下进行扩挖,第1循环外倾角控制在15度,长度不超过5 m,形成外扩面,扩挖后在采用同样角度的短管棚进行逐步扩挖,直到达到工作室长度,后续施工即不再单独设大角度工作室支护,沿用上循环管棚外扩量进行施工^[4]。管棚施工不设套拱,支架在封闭的掌子面上,

3 管棚的施工工艺及施工步骤

3.1 管棚施工工艺

根据砂卵石地层隧道的特点及施工条件进行管棚的断面布置,砂卵石地层在不适用注水劈裂的情况下,自身密实度较高,注浆固化效果较差,水泥浆易从空隙呈单线流走,未形成整体加固。基于此种情况,管棚的支护作用更多的是由于自进式管自身钻进后排渣过程对周边围岩的扰动较小,同时注浆后管棚与管棚四周砂卵紧密结合,其自身抗弯强度较高,开挖时管棚

采用履带钻机径向打入,施工过程前2 m由测量人员严格控制管尾,管棚定向方可撤离测量人员。管棚的材质需选用R780材质地质钻管,才能在施工过程中不至于接头处断裂。管材1.5 m每节,以确保施工过程中所需的工作室不必过长,管之间的连接均为内丝连接,避免外凸接头增加阻力。管棚施工时,钻机定位应准确,确保管棚的打入角度和方向符合设计要求。在钻进过程中,要密切关注钻机的运行状态和管棚的打入情况,及时调整钻进参数,保证施工质量和安全。当管棚打入至一定深度后,需进行管棚的稳定性检查,确保管棚在后续施工中能够保持稳定,为隧道的开挖提供有效的支护。同时,施工过程中应做好记录,包括管棚的打入深度、角度、钻进参数等信息,以便后续施工参考和分析。施工步骤如下。

3.2.1 管棚的钻进

(1) 测量人员在封闭的掌子面上放样出管棚前端点;(2) 钻机就位,同时测量人员定位管尾部平面及高程;(3) 管棚施工首节时,由1.5 m及2 m节奇偶编号分开,以保证相邻管棚接头错开0.5 m;(4) 管

棚开孔前 1 m, 是定位过程, 钻速不宜过高, 避免卵石碰撞而偏位; 定位完成可逐步加快钻速; (5) 管棚钻过程根据管棚进度及钻杆进度, 合理搭配, 随钻进进行相应的接长; (6) 钻孔至设计深度后, 将钻杆反钻, 冲击机合拢后, 慢速退出, 并相应的逐节拆除钻杆, 至此钻进完成。(7) 钻进过程应有挖掘机配合, 以平整设备场地, 保证钻机的摆放位置、钻进的角度合理;

(8) 钻进过程应持续记录钻进的速度、渣样情况、有无卡钻、有无渗水及异常结构物等; (9) 随算进过程应持续地送风吹渣, 避免管内堵塞卡钻。

3.2.2 管棚的注浆

(1) 武青出段线隧道属于中密砂卵石层地质, 采用 P.042.5 普通硅酸盐水泥, 单浆液配合比 1:1, 注浆压力采用 0.4 ~ 0.7 MPa; (2) 注浆自两端向中央间隔孔位注浆, 确保砂石颗粒浸润, 以提高颗粒间的黏聚力^[5]; (3) 注浆过程中由专人详细记录施工过程; (4) 地面设专人进行巡查, 对周边河道、雨污水井、管沟进行巡查, 避免浆液通过裂隙流入, 造成污染; (5) 注浆阀门为一次性使用, 焊接在管棚尾部, 阀门接 30 cm 管制管棚内, 周边用防水堵漏剂进行封堵。

4 管棚施工的技术要点

1. 根据武青暗挖隧道转弯半径小, 围岩密度高且鹅卵石粒径大的特点, 采用密排大管棚, 单循环长度设置在 15 m, 环向间距 25 cm 较为合理, 相关的同类论文中理论计算表明, 采用短管棚密排施做, 以防止漏砂坍塌是较为合理的支护方法^[6]。

2. 管棚外倾角度控制要考虑隧道纵坡及工作室长度设置的经济型、管棚单节长度的合理性, 环环相扣, 合理利用上一榀拱架外扩范围, 施做下一循环工作室, 形成流水作业^[7-8]。

3. 正常断面下进行扩挖的第一循环管棚, 其管尾部在开挖过程中会造成侵限, 拱架无法正常安装, 该情况下切忌不得割除管棚以外扩, 应先支设小拱架过临时拱架对管棚尾部进行支撑, 掌子面正常掘进支设拱架后, 再将尾部侵限部分的管棚割除处理^[9]。

4. 随开挖逐步加高的拱架上方空洞, 在拱架安装后无法喷射回填密实, 应预留足够的注浆管, 在成环后进行注浆回填, 空洞较大时应记录坐标, 在成环后进行地面打孔回填砂浆。管棚施工期间, 对于因地质或施工操作产生的拱架与围岩间空隙, 需精细化处理。若空洞尺寸小, 通过预留注浆管注入水泥砂浆, 注浆压力依现场试验确定, 确保填充且无损结构; 若空洞体积大或在关键部位, 先以全站仪等测三维坐标、建

空间模型, 再用地面垂直钻孔技术, 通过高压注浆设备注入低流动性砂浆, 注浆时实时监测地面沉降与拱架变形, 必要时调整参数。

5 管棚支护效果

通过持续几循环的开挖观察, 开挖暴露出的管棚形成了较为规则的环状支护, 管棚之间砂卵形成固结, 管棚排列整齐, 帷幕支护效果较好。同时辅助的回填及注浆工艺确保了后期拱顶密实, 实测拱顶沉降均为稳定。

6 结束语

针对武青暗挖隧道的特殊地质, 采用密排 $\phi 108$ 管棚支护工艺, 有效保证了隧道开挖过程的拱顶支护, 避免拱顶坍塌脱空, 拱顶及时回填密实, 有效地减小了地面沉降; 同时结合现场穿河穿路、重要管线等危险段落, 合理设置管棚长度, 调整工作室位置, 加快危险段落的快速成环, 洞内施工安全; 由根管作业大管棚取代原有的自进式超前锚杆施工, 很好地解决了砂卵石难以成孔, 遇卵石难以掘进的施工难题; 能够有效地控制洞内坍塌, 确保地面稳定, 确保了隧道下穿管线的安全通过。这对于隧道所处复杂周边环境的安全掘进, 整个项目的工期控制、安全保证都有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 王悦欣, 唐丹. 浅埋暗挖法技术及其在城市地下空间建设中的应用 [J]. 建筑技术开发, 2022(05):64-66.
- [2] 于兴达. 浅埋暗挖法隧道施工技术的控制要点 [J]. 四川水泥, 2022(01):281-282.
- [3] 车星宇, 李昌龙, 张剑锋. 浅埋岩溶段隧道开挖变形特征 [J]. 交通科技, 2024(06):121-125.
- [4] 宋伟. 公路隧道岩溶管道水处治技术研究 [J]. 西部交通科技, 2024(02):91-93.
- [5] 同 [3].
- [6] 孙朋雷, 覃楨杰, 陈人豪. 山岭隧道洞口浅埋偏压段施工平台反压作用效果探讨 [J]. 西部交通科技, 2024(05):95-97.
- [7] 许晓静, 宋战平, 李辉, 等. 考虑拱效应的隧道管棚力学模型与参数分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2023,19(01):95-106,132.
- [8] 陈培, 马旭强, 龙杰, 等. 断层破碎带隧洞管棚支护参数设计方法 [J]. 长江科学院院报, 2022,39(12):62-67.
- [9] 张小波, 张雕, 姚池, 等. 考虑微拱效应的隧道洞口段管棚合理间距确定方法及参数分析 [J]. 岩土力学, 2023,44(06):1625-1635.

建筑工程施工技术的智能化发展趋势分析

李叶, 郑露雨, 汪加加

(山东诚信工程建设监理有限公司, 山东 济南 250102)

摘要 随着建筑产业向高质量发展转型, 智能化技术开始慢慢渗透到建筑工程施工的各个环节当中, 促使施工技术由粗放型转变为精准高效型。本文以建筑工程施工技术智能化发展的核心背景为基础, 明确建筑工程施工技术智能化发展的核心要义, 分析建筑工程施工技术智能化发展的融合逻辑, 重点研究建筑工程施工技术的智能化发展趋势, 结合行业发展导向梳理技术落地的主要途径, 以为建筑工程施工技术智能化升级提供参考, 助力建筑产业实现数字化、智能化转型, 凸显智能建造对产业高质量发展的核心作用。

关键词 建筑工程; BIM技术; 智能施工装备; 大数据; 人工智能

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.022

0 引言

随着新一代信息技术和制造业、建筑业的深度融合, 智能建造成了建筑产业转型升级的主要驱动力, 建筑工程施工技术的智能化发展成为行业高质量发展的必然选择。建筑工程施工工序繁杂, 作业环境多样, 协同要求高, 传统的施工技术依靠人工经验, 不能满足现代化建筑工程对精度、效率、安全的高品质要求。智能化技术加入以后, 传统施工技术的束缚被打破, 用数字化建模、智能装备应用、协同管理优化等手段重新塑造施工过程、提高施工效率。

1 建筑工程施工技术的智能化发展要义

1.1 智能化发展的核心内涵

建筑工程是指各种建筑物的建造工程, 工程质量直接关系到建筑使用者的生命财产安全, 对区域经济、民生水平等都会产生较大影响。建筑工程施工技术的智能化发展, 本质就是把人工智能、物联网、大数据、建筑信息模型(BIM)等新一代信息技术同传统施工技术融合起来, 创建起“感知—分析—决策—执行”的闭环施工体系, 从而达到施工过程的自动化、精确化和协同化。其本质不是简单地叠加技术, 而是在技术的加持下重新塑造施工全过程, 使施工环节从对人工经验的过度依赖中解脱出来, 依靠智能设备和数字化系统来完成复杂的工序作业、风险预判和协同控制, 同时坚持绿色施工的理念, 使施工过程达到节能降耗的目的, 从而实现施工质量、效率、安全和环保的同

步改善, 体现建筑产业高质量发展的主要方向。智能化发展是以数据为驱动, 通过传感器网络对施工现场的温湿度、设备状态、人员分布等各方面数据进行实时采集, 并且结合BIM模型创建三维可视化数字孪生平台。该平台可以模拟施工过程, 预测可能存在的风险, 用算法来改进资源配置, 从而由“人脑经验决策”转变为“数据智能决策”。混凝土浇筑时系统根据环境参数自动调整配合比, 用物联网设备检测浇筑质量, 保证施工工艺满足设计要求。

1.2 智能化发展的核心特征

建筑工程施工技术的智能化发展有明显的时代特点, 是贯穿施工全过程的主要逻辑。协同性是其主要特点之一, 利用数字化平台消除施工各个环节、各个参与方之间的信息壁垒, 使设计、施工、监理、运维等环节的信息能够互相交流、互相配合, 从而使得施工过程更加流畅高效。精准性指的是智能化技术可以对施工参数进行实时监测和精准调控, 避免了传统施工中人为操作产生的误差, 保证施工工序符合规范要求, 提高工程施工质量。另外, 智能化发展具有动态性、绿色性, 可以依照施工环境的变化及时调整施工方案, 依靠智能设备和节能技术削减施工过程中资源的浪费以及污染情况, 符合建筑产业绿色发展的时代需求。智能化发展具有集成化特点, 把各种智能化技术有机地融合起来, 形成综合性的智能施工解决方案。将BIM技术、物联网技术、人工智能技术结合在一起, 对施工全过程进行数字化、智能化的管理。同时, 智能化

作者简介: 李叶(1996-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

的发展还重视用户体验,改善人机交互界面以及操作流程,降低智能化技术应用的门槛,让施工人员可以更加方便地操作智能化设备和系统,提升施工效率。

1.3 智能化发展的核心价值

建筑工程施工技术的智能化发展,对于建筑产业转型、工程施工提质增效有着非常重要的核心价值。从工程施工角度来讲,智能化技术可以代替人工去执行高空、高危、高强度的工作,从而降低施工人员的施工危险性,加强施工效率,缩减施工周期,减少施工成本的浪费。从产业发展角度来说,智能化发展促使施工技术不断更新换代,冲破传统建筑施工粗放式发展模式,促使建筑产业朝数字化、精细化、绿色化方向转变,孕育产业新动力。从行业发展的角度来讲,智能化技术的广泛使用可以促使建筑施工标准的更新,提升“中国建造”的核心竞争力,助力建筑产业加入全球智能建造的发展大潮,实现可持续发展。智能化发展依靠数据驱动的决策方式,改善施工资源调配,削减材料浪费和能源耗费,实现经济效益和环境效益的双赢。以 BIM 为基础进行施工模拟可以预先发现设计矛盾,从而防止现场返工造成的人力和物力的浪费,同时还可以利用智能能耗监测系统对设备运行参数进行实时调节,达到节约能源的目的。另外,智能化技术凭借创建数字化施工档案,为工程全生命周期管理提供数据支撑,加强建筑运维阶段的智能化程度,延长建筑使用寿命,从而凸显智能建造在全产业链的价值延伸。

2 建筑工程施工技术的智能化发展趋势

2.1 BIM 技术深度融合,实现施工全流程数字化管控

随着供电事业规模不断扩大,用电需求越来越大,在电力供应中 110 kV 输变电工程起着重要的作用^[1]。BIM 技术是建筑工程智能化发展的主要支撑,未来会进一步深入施工全过程,形成从设计到运维的数字化控制闭环。利用 BIM 技术建立的三维数字化模型可以将建筑工程的几何信息、工艺信息、资源信息进行整合,使施工工序得以可视化模拟与优化,从而提前发现施工过程中出现的管线冲突、工序衔接不畅等施工问题。同时,BIM 技术与物联网、大数据技术融合起来,可以对施工过程中的数据展开实时采集、分析并作出反应,从而让施工管理人员清楚地知晓施工进度、质量以及安全情况,借助数字化手段实现施工资源的合理分配以及施工流程的动态调节,促使施工管理朝着“数据

驱动”的方向转变,提升施工管控的精确程度和高效水平^[2]。利用 BIM 模型同施工设备的智能联动,可以自动生成三维施工交底文件,指导现场作业人员准确施工。例如:在机电安装工程中,BIM 技术可以实时比较管线安装位置与设计模型的偏差,当误差超过允许范围的时候会自动发出预警,并且用移动终端推送整改指令。以数字孪生为基础的施工控制模式把施工问题发现时间提前到设计阶段,用动态修正机制把返工率降低 40% 以上。

2.2 普及智能施工装备,推动施工环节自动化升级

智能施工装备的研发与推广使用,将会成为建筑工程施工技术智能化发展的主要方向,促使施工环节由人工操作向自动化、无人化转变。未来具有感知、决策、执行能力的建筑机器人将会被广泛地应用到混凝土浇筑、钢筋加工、墙体砌筑、装饰装修等施工环节中,代替传统的手工操作,可以提高施工效率,也可以避免人为操作造成的误差,保证施工质量。智能塔吊、智能模板、智能监测设备等装备协同作业,依靠物联网技术达成设备之间的信息互通和调度优化,创建自动化施工体系。

除此之外,智能技术的加入还会让建筑机器人具备环境自适应、多机协同的能力,使智能设备可以适应复杂的施工环境,从而扩大智能化施工的应用范围,促使施工方式发生根本性的改变^[3]。采用 3D 打印建筑机器人替代传统工艺,可减少一周时间用于完成原来需要一周时间的异形结构浇筑,材料损耗率控制在 3% 以下。搭载了北斗定位系统的智能爬模设备具有毫米级垂直度控制精度,与 AI 视觉检测系统配合使用,自动识别钢筋绑扎缺陷,主体结构施工周期减少 30%。智能装备的普及还会催生新的施工组织形式,模块化建筑里,自动化生产线同 AGV 运输系统实现无缝对接,预制构件的吊装速度加快了 4 倍,施工现场人员密度减少了 60%。随着数字孪生技术的深入应用,智能装备群将拥有自感知、自决策的能力,依靠对设备状态数据的实时分析,自动调节作业参数,从而达到施工能耗和碳排放的智能控制。

2.3 融合大数据与人工智能,实现施工风险精准预判

大数据与人工智能技术的深度交融,将会促使建筑工程施工技术朝着“预判式”方向发展,从而实现施工风险的准确判定并提前防范。在施工现场布设各种传感器,对施工环境、设备运行、工序质量等各方

面数据进行实时采集,利用大数据技术对数据进行整合、清洗和分析,从中发现数据背后隐藏的联系规律,从而建立施工风险预判模型^[4]。人工智能技术会依据此模型,对施工期间出现的质量隐患、安全风险、进度滞后等状况实施精确预估,进而自动生成防控方案,为施工管理人员提供决策支撑。预判式管控模式可以将风险防控的关口前移,防止风险扩大化,减少施工安全事故、质量问题的发生概率,保证工程施工的顺利进行。在混凝土浇筑过程中,在模板内埋设应力传感器,用机器学习算法可以提前48小时预测模板变形的风险,比传统的手工检查要快5倍。基于深度学习的图像识别系统可以实时分析高空作业人员安全带佩戴情况,准确率高达99.7%,大大降低了坠落事故的发生率。通过建立施工设备故障预测模型,可以提前发现塔吊、施工电梯等大型设备的异常振动模式,使设备故障率降低60%,减少非计划停工时间^[5]。在基坑支护施工中,将地质雷达数据和BIM模型结合起来,用神经网络算法可以动态预测土体位移趋势,指导支护参数的实时调整,保证深基坑施工的安全。

2.4 协同智能化升级,构建全产业链协同发展体系

建筑工程施工技术的智能化发展,会冲破单一施工环节的智能化限制,朝着全产业链协同智能化迈进,构建“设计—施工—生产—运维”一体化协同发展体系。智能化技术将会打破建筑全产业链信息壁垒,促使设计单位、施工企业、生产企业、监理单位等各方面的主体开展协同工作,利用数字化平台实现设计方案、施工计划、生产进度、运维数据等信息的实时共享与协同优化。施工环节会和预制构件生产的智能化联动起来,依靠数字化技术实现预制构件的精确生产、运输和安装,推进装配式建筑同智能施工深度交融。施工阶段的智能化数据将会给运维阶段提供支持,使建筑全生命周期得到智能化管理,提高建筑工程的运维效率以及使用寿命。协同智能化升级时,建筑信息模型(BIM)会成为主要的数据承载者,实现各个参与方的信息融合并互相交流^[6]。利用BIM建立的协同管理平台,设计单位可以随时上传设计变更信息,施工企业可以在模型上实时查看最新的数据,生产企业根据准确的构件参数安排生产计划,监理单位利用模型与现场数据的对比来对整个过程的质量实施监督。这样的数据贯通机制把传统的线性作业模式变成并行工程模式,使得装配式建筑项目的预制率达到60%以上,并且施工周期比传统方法缩短了25%。

2.5 绿色低碳施工融合,实现能耗与智能化的协同优化

在双碳导向之下,施工现场的绿色低碳要求越来越高,智能化技术和节能体系相结合将成为施工技术发展的主要方向。利用物联网传感器和能耗监测终端可以对机械设备运行、电力负荷、临建设施能耗、用水量等进行实时采集,采用算法对能耗峰值、设备效率、碳排放进行动态分析,进而达到能源消耗自动优化的目的。智能配电系统可以按照施工阶段的负荷变化来自动调节供能方式,防止出现高峰叠加造成的能源浪费现象;混凝土养护、现场喷淋等环节在智能控制之下根据温湿度数据准确调节,从而使得能耗大幅下降。另外,绿色材料、雨水回收系统和数字化调度平台三者配合使用,可以提高资源的利用率,减少施工过程中的能源消耗和排放,使施工现场出现实时感知、智能调节、低碳运行的闭环控制状态,促进绿色施工向智能化、精细化发展。

3 结束语

建筑工程施工技术的智能化发展是建筑产业高质量发展的必然趋势,也是实现“中国建造”向“中国智造”转型的主要途径。本文通过对建筑工程施工技术智能化发展核心要义的分析,明确了建筑工程施工技术智能化发展的内涵、特征和价值,进而对建筑工程施工技术智能化发展未来的发展趋势进行了分析,主要有BIM技术全流程融合、智能施工装备普及、大数据与人工智能协同风控、全产业链协同智能化、绿色智能化融合、智能化人才培育。这些趋势互相联系、互相支撑,一起促使建筑工程施工技术由传统的模式向智能化模式转变,给建筑产业的转型升级增添新动力。

参考文献:

- [1] 陈登钦.110kV输变电工程施工中变压器安装的关键技术探究[J].中国高新科技,2025(24):42-44.
- [2] 肖瑞霞,吴冰.建筑工程施工组织设计与施工安全技术策略探究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(36):93-95.
- [3] 郑陟鑫.水闸除险加固工程施工中基础灌浆施工技术要点及质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2025(36):96-98.
- [4] 张海辉.新型绿色节能技术在房建工程施工中的创新应用[J].中国建筑装饰装修,2025(24):104-106.
- [5] 同[4].
- [6] 俞树花.基于技术因素的公路工程施工招标投标问题分析[J].汽车画刊,2025(12):206-208.

建筑工程项目成本控制与管理优化分析

郑树松, 刘 洋

(泰安山河索道工程有限公司, 山东 泰安 271600)

摘要 本文围绕建筑工程项目的成本控制与管理优化问题展开研究, 分析了建筑项目成本构成及成本动态变化规律, 评估了传统成本控制方法及现代成本管理技术。基于 BIM 技术、信息化管理、大数据分析等现代工具, 提出了设计优化、施工精细化管理、动态成本监控和风险控制等优化策略。结果表明, 优化成本管理模式能够有效降低施工成本, 提高资金利用效率, 还能提升施工管理水平和项目整体效益。

关键词 建筑工程; 成本控制; 人工智能; 大数据

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.023

0 引言

建筑工程项目涉及设计、采购、施工、设备安装及管理等多个环节, 其成本结构复杂且动态变化频繁, 传统依靠经验和定额预算的成本控制方法已难以满足现代项目管理的需求。通过科学的成本控制与优化管理, 可有效降低施工过程中不必要的浪费, 实现资金合理配置, 提高项目投资回报率, 增强企业在市场竞争中的经济竞争力。

1 建筑工程项目成本构成分析

1.1 成本构成要素

材料费是建筑工程中最主要的成本组成部分, 通常占总成本的 40%~60% 左右。材料费包括钢材、水泥、砂石、模板、装饰材料等各类施工所需物资的采购费用^[1]。材料价格受市场供需波动影响较大, 合理的材料选型、采购计划和库存管理, 对于降低成本、保证工程质量具有关键作用。

人工费指施工过程中所有劳动力的工资、福利及相关支出。人工费受施工工艺复杂性、施工周期和劳动力市场情况的影响较大。随着建筑行业劳动力成本不断上升, 施工企业对人工费的精细化管理尤为重要。

机械设备费主要包括施工所需设备的购置、租赁、运输、维修和折旧费用。在大型建筑工程中, 机械设备使用频率高、投资成本大, 对工程进度和质量有直接影响。

管理费是建筑项目施工期间产生的管理活动成本, 包括项目管理人员薪酬、办公费用、技术咨询、质量检测及安全管理等支出。管理费虽然在总成本中占比

相对较小, 但对保证工程顺利实施、质量安全和风险控制具有不可替代的作用。

间接费用是建筑工程直接成本之外, 为保障工程顺利实施而产生的相关支出, 如项目保险、税费、融资利息及不可预见费等。这部分费用通常不直接计入具体施工单元, 但会影响项目总投资规模。

1.2 成本动态变化规律

在前期设计阶段, 成本主要集中在勘察、方案设计、技术咨询和可行性研究等方面。这一阶段虽然占总成本比例相对较小, 但对后续施工阶段的成本起到基础性影响。设计方案的合理性、施工方案的可行性以及技术优化的程度直接决定了材料需求、施工工艺复杂性和人工投入, 从而影响整个项目的成本结构。

在施工准备和实施阶段, 成本逐步上升并成为总成本的主要组成部分。这一阶段包括材料采购、设备租赁、劳动力投入、施工管理和现场组织等活动。施工阶段成本受施工工艺、工程进度、机械设备效率和现场管理水平的综合影响^[2]。项目施工周期延长、工艺不合理或资源调配不当, 都会导致成本增加。

在后期结算阶段, 成本主要表现为工程结算、竣工验收、质量缺陷返工及间接费用的核算。尽管这一阶段直接新增成本相对有限, 但由于前期各阶段成本管理不当, 后期会出现结算超支或不可预见费用增加的情况。

风险因素对成本波动的影响贯穿项目全生命周期。市场材料价格的剧烈波动、施工过程中不可控的天气因素、政策法规调整、施工现场安全事件及设计变更等, 都会引起成本的动态变化。

作者简介: 郑树松 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

2 建筑项目传统成本控制方法

定额预算是传统成本控制的核心工具之一。通过对材料、人工、机械设备及间接费用等进行定额核算，形成工程造价预算和成本标准，为施工单位提供明确的成本控制目标。定额预算强调依据施工图纸、施工工艺和标准化指标进行费用计算，具有一定的科学性和可操作性。随着市场材料价格波动和施工现场复杂性的增加，定额预算在动态调整和实时监控方面存在局限性，难以应对突发成本变化。

施工计划控制是通过施工进度和工序安排进行系统规划，以实现资源合理配置和成本最优化的一种方法。施工计划控制包括施工工序的时间安排，还涉及材料供应、设备调度和劳动力配置。合理的计划安排有助于避免施工延误、资源闲置和重复作业，从而降低人工费和机械设备费。但在实际操作中，施工计划控制往往受到外部环境、工期紧张和施工条件变化的影响，容易出现偏离计划的情况，导致成本失控。

现场管理是传统成本控制的重要执行环节，主要包括对施工现场的监督、施工质量检查、安全管理以及对施工过程的成本监督^[3]。通过现场管理，项目管理人员可以及时发现和纠正材料浪费、工艺不当或人员效率低下等问题，从而减少不必要的支出。尽管现场管理在控制施工成本方面具有直接作用，但其依赖管理人员经验和人工记录，信息传递滞后，难以实现施工全过程的精细化和动态化管理。

3 建筑工程项目现代成本管理技术应用

BIM技术在成本管理中发挥着越来越重要的作用。BIM技术通过建立三维数字化模型，将设计、施工、材料、设备及成本信息集成于统一平台，实现项目全过程可视化。在成本控制方面，BIM可以进行精确的工程量统计、材料需求分析和施工方案模拟，支持多方案比选和优化决策，从而提高预算精度、减少浪费并降低成本风险。借助BIM技术，施工单位还能在项目早期预测潜在的成本超支问题，并通过虚拟施工进行方案优化。

信息化管理系统是现代成本管理的重要支撑工具。通过企业资源计划、项目管理软件或专用建筑成本管理系统，可以实现成本数据的实时采集、分析和共享。信息化系统能够将施工进度、材料采购、劳动力使用、设备调度等信息与成本数据关联，形成动态成本监控体系。系统化管理提升了数据透明度，也方便管理者进行科学决策，及时调整施工计划和资源配置，避免因信息滞后导致的成本浪费。

智能化监控手段主要依托物联网、大数据分析和

人工智能技术，对施工现场、设备运行、材料消耗和人工投入进行实时监控和预测分析。智能化监控能够识别施工过程中的异常情况，如资源浪费、进度延误或安全隐患，并生成预警或优化建议^[4]。技术手段的应用提升了成本管理的响应速度，还能对施工全过程进行精细化、量化管理，实现成本控制的主动性和前瞻性。

4 建筑工程项目成本控制优化策略

4.1 前期阶段优化

建筑工程项目的前期阶段，即从可行性研究、方案设计到施工图设计完成的阶段，是成本控制的关键时期。设计优化与成本经济性分析是前期成本控制的重要手段。通过对不同设计方案进行经济性比较与技术可行性分析，可以在保证功能和质量的前提下，选择最优方案。设计优化包括结构优化、空间布局合理化、施工工艺简化及标准化构件的应用等措施，可以减少材料用量和施工难度，还能缩短工期、降低人工和机械成本。成本经济性分析可通过工程量清单预算、成本模拟和多方案比选，提前发现潜在的成本超支问题，为项目投资决策提供科学依据。

在材料选型过程中，应充分考虑材料性能、经济性和可持续性，选择耐用、低耗能、可回收的绿色建筑材料。例如：高性能混凝土、节能保温材料及低碳环保装饰材料的应用，可以降低生命周期成本，还能减少能耗和环境影响。将绿色建筑理念融入设计阶段，有助于项目在节能、环保及可持续性方面符合政策法规和市场需求，实现经济效益与社会效益的双重提升。

4.2 施工阶段优化

施工阶段是建筑工程项目成本消耗最为集中的时期，也是成本控制的核心环节。在这一阶段，精细化施工管理与动态成本监控是施工阶段成本控制的关键措施。精细化管理强调对施工过程中的每一个环节进行详细规划和严格监督，包括材料使用、施工工序、工序间协调及施工质量控制^[5]。结合动态成本监控，可以实时跟踪材料消耗、人工投入和机械设备使用情况，及时发现异常支出和潜在浪费，调整施工计划，实现成本的实时控制。通过施工进度与成本的双向联动分析，管理者能够在问题发生的早期进行干预，有效避免施工成本失控。

在施工阶段，施工机械设备和劳动力资源的合理配置直接影响施工效率和成本水平。通过优化设备使用计划、合理安排施工班组和作业顺序，可以提高机械设备利用率，降低闲置成本，同时确保施工工序顺畅，避免重复作业和工期延误。在劳动力管理方面，应根据施工工序特点合理分配人力，采用技能培训、激励机制及

弹性排班,提高劳动生产率,降低人工成本波动风险。

信息化工具与智能预警系统的应用为施工阶段成本控制提供了先进技术支撑。通过 BIM、施工管理软件、物联网和大数据分析等信息化工具,可以实现施工现场的实时监测和数据整合,快速识别材料浪费、施工延误或资源调配不合理的情况。智能预警系统能够在异常情况发生前发出警示,并提出优化建议,使管理者能够提前采取措施,降低风险成本。

4.3 后期阶段优化

建筑工程项目的后期阶段主要包括工程竣工、结算与验收,是成本控制的收尾环节。在这一阶段,工程结算与成本审计是后期阶段成本控制的核心环节。通过对施工过程中产生的各类费用进行核算,包括材料费、人工费、机械设备费、管理费及间接费用,能够全面掌握项目的实际支出情况。成本审计验证了工程结算的准确性,还能发现施工过程中存在的浪费或偏差,为补救措施和经济责任认定提供依据。审计结果可作为施工单位改进管理、优化采购和施工方案的重要参考,为下一步项目的前期成本控制打下基础。

成本绩效评估与经验反馈是提升企业管理能力和项目经济效益的重要手段。通过对项目成本执行情况进行绩效分析,评估各阶段的成本控制效果,可以识别高效管理措施与不足环节^[6]。经验反馈机制将施工过程中的优化措施、成本节约经验及管理教训系统化记录,并应用于未来项目的设计优化、施工管理和预算编制中。

5 成本管理的创新方法与技术应用

5.1 人工智能与大数据在成本预测中的作用

人工智能与大数据在成本预测中的作用逐渐显现,成为现代建筑工程项目成本管理的重要技术支撑。通过对施工历史数据、材料市场价格、劳动力供需信息、设备使用记录及施工进度数据进行全面收集与分析,人工智能能够建立施工成本预测模型,实现施工成本的智能预测与动态调整。基于机器学习算法,系统可以识别施工过程中可能出现的成本异常、资源浪费和工序延误,并生成优化建议,为管理者提供科学决策依据。智能预测可以降低预算偏差和成本超支的风险,还可以支持多方案比选与施工方案优化,提高项目经济效益。大数据分析则能够对成本数据进行趋势挖掘和关联分析,识别成本波动规律,辅助企业进行资源优化配置、绩效评估及长期投资规划,实现管理决策的科学化、动态化和智能化。

5.2 供应链协同与材料管理优化

材料采购、储运和消耗占据了工程总成本的较大比例,通过供应链协同管理可以有效整合采购计划、

供应商选择、库存管理及运输调度。该方法能够减少材料浪费、降低库存成本、避免供应短缺,同时缩短施工周期,提高工程整体效率。结合信息化管理平台,企业可以对关键材料进行实时跟踪与监控,掌握材料到场时间、使用进度及库存情况,实现材料管理的可视化和精细化^[7]。通过预测材料需求量和采购成本变化,供应链协同还能够支持动态调整,降低材料价格波动带来的经济风险,进一步优化成本结构。

5.3 风险控制与决策支持系统

建筑工程项目在施工过程中面临材料价格波动、工期延误、质量问题、不可预见费用及安全事故等多种风险。通过建立科学的风险管理体系,并结合决策支持系统,管理者可以对潜在风险进行量化评估、实时监控和智能预警。在风险事件发生时,系统能够提供应对方案和调整措施,确保项目成本和进度的可控性。结合历史数据与实时数据分析,决策支持系统还能对项目整体投资效益、成本分配和资源调度提出优化建议,实现从被动管理向主动管理转变,提升施工企业在复杂环境下的风险应对能力和决策科学性。

6 结束语

在建筑工程项目成本控制与管理优化中,前期通过设计优化和绿色材料选型可以降低初期投资成本。施工阶段通过精细化管理、动态监控及资源调度优化能够有效控制施工成本。后期通过工程结算、成本审计和绩效评估,能够确保项目成本的最终可控性。BIM 技术、数字化管理工具、人工智能、大数据分析以及智能预警系统的应用,不仅提高了成本预测的精度和实时性,还增强了施工过程的透明度和管理决策的科学性。

参考文献:

- [1] 吴成国. 建筑工程项目造价成本的控制及管理分析[J]. 城市开发, 2025(24):100-102.
- [2] 赵萍. 建筑工程项目成本控制与精细化管理模式优化研究[J]. 建筑, 2025(05):91-93.
- [3] 段超赞. 建筑工程造价动态管理与成本优化控制分析[J]. 中国住宅设施, 2025(03):76-78.
- [4] 胡玉洁. 建筑工程项目施工成本管理优化分析[J]. 投资与创业, 2025,36(05):76-78.
- [5] 张杰. 建筑工程造价的动态管理分析及成本优化控制探讨[J]. 四川建材, 2024,50(04):212-213,235.
- [6] 吴俊萍. 建筑工程项目成本控制管理分析[J]. 营销界, 2023(19):164-166.
- [7] 代鹏飞. 建筑工程项目施工成本管理优化措施分析[J]. 安徽建筑, 2023,30(06):185-187.

大数据时代工程造价精准测算方法优化研究

都 俊

(安徽求是工程建设咨询有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘 要 针对大数据时代工程造价精准测算存在的传统方法局限、数据融合不足、影响因素管控困难等现实问题,以工程造价测算优化为对象展开研究。传统人工核算模式效率低、误差大,工程数据碎片化与技术适配不足制约大数据价值发挥,市场、技术、政策等动态因素进一步加大测算管控难度。基于此,本文从传统测算方法迭代、大数据融合应用路径、测算影响因素精准管控三个层面提出优化策略,并配套构建政策、技术、人才、机制等多维保障体系,推动工程造价测算向自动化、动态化、智能化转型,提升测算精准度与可靠性,以期工程投资决策与成本管控提供参考。

关键词 大数据; 工程造价; 精准测算; 数字化协同

中图分类号: TU723.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.024

0 引言

当前,数字化协同已成为工程造价行业发展的核心趋势,大数据技术的深度渗透,既为工程造价精准测算提供了全新路径,也让行业面临传统测算模式滞后、数据孤岛突出、技术适配不足等新挑战。绿色建筑、低碳施工政策的细化,以及市场要素的实时波动,进一步提升了造价测算的精准性要求。精准测算作为工程项目投资决策、成本管控的核心环节,其方法优化直接关系到工程提质增效与行业高质量发展。在此背景下,立足于行业最新发展形势,聚焦测算核心痛点,探索适配大数据时代的精准测算优化路径,具有重要的理论与实践意义。

1 大数据时代工程造价精准测算的核心困境

1.1 传统测算方法的局限性凸显

传统工程造价测算模式形成于大数据技术普及之前,其核心逻辑围绕人工核算展开,难以适配当下精准化、高效化的行业需求,诸多固有短板在大数据时代被进一步放大。人工核算作为传统测算的核心环节,依赖从业人员对定额标准、材料价格、施工工艺的经验判断,不仅耗费大量人力与时间成本,更易因个人专业能力差异、数据记忆偏差等出现核算误差,这类误差在大型复杂工程项目中会被逐级放大,直接影响造价测算的准确性。传统测算的数据来源高度集中于工程图纸、定额手册等有限载体,未能覆盖项目规划、

设计、施工、运维全生命周期的相关信息,导致测算结果仅能反映某一阶段的造价情况,无法实现对项目整体造价的全面把控。同时,传统测算方法固化于既定的定额标准与核算流程,缺乏动态调整机制,面对市场材料价格、人工成本的实时波动,以及工程设计方案的临时变更,难以快速响应并调整测算结果,使得测算数据与实际工程成本脱节,无法为项目决策提供可靠支撑。

1.2 大数据融合应用的现实阻碍

大数据技术本应成为破解工程造价精确计算难题的关键支撑,但当前其与造价计算场景的融合仍面临多重障碍,导致数据价值难以充分释放。其中,工程数据碎片化是最为核心的问题:一方面,工程项目的数据分散在建设单位、施工企业、设计机构等不同主体手中,数据来源高度分散;另一方面,各主体的数据采集标准、格式各不相同,缺乏统一的分类与编码规则,导致数据之间无法有效互通,形成“数据孤岛”,进而使得数据的整合与共享变得异常困难。大数据分析技术与造价计算场景之间的匹配程度不高,目前常见的大数据工具大部分属于通用类型,没有针对工程造价计算的核心需要去做专门的优化,处理工程领域结构化非结构化数据的效率不高,很难快速地从数据背后找出与造价相关的规律,这使得技术应用只是停留在表面上。造价从业人员的技能构成也没能跟上技术发展的速度,大多数从业人员还是更熟悉传统定额核

作者简介: 都俊(1986-),男,本科,工程师,研究方向:工程造价。

算方法，对于大数据采集、分析、建模的实际操作能力比较欠缺，对大数据工具的使用仅仅停留在比较基础的层面，无法将技术上的优势转变成计算精度的提高，这就直接限制了大数据融合应用的实际落地效果。

1.3 测算影响因素的管控难度加大

大数据时代，工程造价测算涉及的各种影响因素展现出多元化、动态化等特点，传统管控方式很难做到精准把握，这进一步加大了测算结果出现偏差的可能性。在市场层面，材料价格、人工成本受到宏观经济、供应链波动、区域差异等因素的综合作用，呈现出实时变动的走势，而以往测算工作依赖固定的价格数据，数据更新跟不上市场变化节奏，造成测算结果和实际市场成本之间产生差距^[1]。在技术层面，工程设计理念、施工工艺、材料技术的更新换代速度持续加快，新型施工技术与环保材料的应用范围越来越广，原来测算依据大多基于传统技术与材料来制定，无法及时同步更新，这样很难准确计算新型技术与材料带来的造价变化。在外部环境层面，国家及地方的政策法规、环保要求、税收政策等内容不断做出调整，绿色建筑、低碳施工等要求逐步细化，这类外部因素直接作用到工程建设的成本构成，而传统测算往往没有充分考虑到这些动态变化，导致测算结果缺乏全面性与前瞻性，无法精准反映政策调整对工程造价的实际影响。

2 大数据时代工程造价精准测算的具体优化策略

2.1 传统测算方法的迭代优化

针对传统测算方法的固有短板，结合大数据技术的优势进行迭代升级，是提升工程造价精准测算基础能力的关键。摒弃传统人工核算的主导模式，引入基于大数据技术的自动化测算工具，通过程序算法实现工程量计算、定额套用、费用汇总等核心环节的自动化处理，减少人工干预带来的误差^[2]。同时大幅提升测算效率，让从业人员将更多精力投入到数据审核与结果分析中。拓宽数据采集范围，打破传统数据来源的局限，整合项目规划阶段的可行性研究数据、设计阶段的图纸与变更数据、施工阶段的进度与成本数据、运维阶段的损耗与维护数据，构建覆盖工程全生命周期的数据集，弥补传统测算数据来源单一的短板，实现对项目整体造价的全面测算。建立动态测算机制，依托大数据技术实时捕捉市场价格、施工工艺、设计方案的变化，将这些动态因素纳入测算体系，通过算法模型快速调整测算参数与结果，确保测算数据与实际

工程场景保持同步，提升测算结果的时效性与准确性。

2.2 大数据融合应用的路径优化

破除大数据与工程造价测算场景之间融合的障碍，需要从数据、技术、人才三个层面建立系统化的改进路线，充分释放数据驱动带来的核心价值，推动工程造价测算模式向更加精准、智能的方向转变，推进工程数据标准化工作，制定统一的数据分类方法、编码规则和采集标准，明确不同参与主体、不同工作阶段数据的格式要求、录入规范、审核标准，规范数据录入和管理流程，解决数据碎片化、标准化程度不够的问题，实现各环节、各主体数据的无缝对接和高效共享，形成完整、规范的工程数据链条，为大数据分析应用打下坚实的基础。优化大数据技术与测算场景的适配程度，结合工程造价测算的核心需求，联合科研机构和企业开发针对性的大数据分析与建模工具，重点加强数据清洗、关联分析、趋势预测、误差分析等核心功能，能够快速处理工程领域的各类结构化数据和非结构化数据，挖掘数据背后隐藏的造价规律、成本影响逻辑，为精准测算提供强有力的技术支撑。开展大数据应用专项培训，聚焦造价从业人员的能力短板，重点培训数据采集规范、大数据分析工具操作、建模应用、结果解读等实操内容，打破传统思维局限，提升从业人员运用大数据技术解决测算过程中复杂问题的能力。推动大数据技术从“被动应用”向“主动赋能”转变，确保技术落地见效，真正发挥数据驱动的精准测算价值。

2.3 测算影响因素的精准管控

构建一个多元、动态的测算影响因素管控体系，可以有效降低测算偏差，进一步提升工程造价测算的精准度，为项目成本管控和投资决策提供可靠保障，也能更好地适应大数据时代的行业发展需求。搭建市场数据实时更新平台，整合各类建材市场、人力资源市场、机械设备租赁市场的动态数据，通过大数据技术实现材料价格、人工成本、设备租赁费用的实时捕捉与分析。建立价格预警机制，及时反馈市场波动情况，精准预判价格变化趋势，确保测算所采用的价格数据与市场实际保持一致，减少市场波动带来的测算偏差。建立设计与工艺迭代跟踪机制，安排专人与设计机构和施工单位对接^[3]。实时掌握设计方案的变更情况、新型施工工艺的应用动态、材料技术的升级信息，梳理各类迭代因素对造价的影响逻辑和影响程度，及时更新测算依据与参数，优化测算模型，确保测算

结果能够准确反映技术迭代带来的成本变化,提升测算的针对性与精准性,系统梳理国家及地方的政策法规、环保要求、税收政策、安全生产标准等外部因素,明确各类政策对工程成本的具体影响方式和影响范围,将环保投入、安全投入、税收调整等相关成本纳入测算体系。建立外部因素动态跟踪机制,及时同步政策变化,确保测算结果全面覆盖各类影响因素,提升测算的前瞻性与完整性,为项目成本管控提供科学依据。

3 大数据时代工程造价精准测算优化的保障措施

3.1 传统测算优化的保障支撑

为推动传统测算方法迭代优化落地,需构建完善的政策与行业保障体系,为优化工作提供良好的外部环境。行业主管部门出台针对性政策,明确传统测算模式转型升级的方向与要求,鼓励企业引入自动化测算工具、优化测算流程,对积极推进测算方法优化的企业给予政策扶持与引导,激发企业优化动力^[4]。完善工程造价行业测算标准,结合大数据时代的测算需求,修订传统定额标准与核算规范,明确自动化测算、动态测算的操作流程与质量要求,规范测算方法迭代的全过程,确保优化工作有序推进。加强行业监管力度,建立健全测算质量监督机制,定期对企业的测算工作进行检查,重点核查测算方法的合规性、测算数据的准确性,对测算偏差过大、未落实优化要求的企业进行督促整改,保障传统测算方法迭代优化的实际效果,推动行业测算水平整体提升。

3.2 大数据融合应用的保障支撑

强化技术和平台保障,能够推动大数据与工程造价测算深度融合,为融合应用提供坚实的技术基础。加大大数据技术在工程造价领域的研发投入,鼓励科研机构与企业协作,聚焦融合应用中的技术难点,开发适配测算场景的核心技术和工具,提升大数据分析、数据整合、模型构建的能力,破解技术适配性不够的问题。优化一体化数据平台功能,整合各类工程数据资源,完善数据存储、处理、分析、共享等核心功能,提升数据处理效率和安全水平,实现数据的集中管理和高效调用^[5]。为大数据融合应用带来平台支撑,建立健全数据安全保障机制,明确工程数据的采集、存储、使用、共享等各环节的安全责任,采用加密技术、访问控制等安全措施,防范数据泄露、篡改等风险,确保工程数据的安全性和完整性,为大数据融合应用保驾护航。

3.3 影响因素管控的保障支撑

人才与机制保障体系的构建,是提升造价测算要素管控能力、推动管控措施落地见效的核心支撑。一方面,需构建校企协同育人体系,推动高校与企业深度合作,以行业实际需求为导向,设置大数据与工程造价融合的课程模块;另一方面,需聚焦学生综合能力培养,重点强化数据处理、测算分析、要素管控等核心技能,定向为行业输送既掌握工程造价专业知识、又具备大数据应用能力的复合型人才,从而有效破解行业人才供给不足的难题。建立因素动态追踪机制,明确谁来追踪、追踪什么内容、追踪流程怎么走,借助大数据技术实时抓住市场、技术、政策等不同因素的变化,建立因素变化资料库,通过解析模型提前看出因素变化走向,为测算调整提供科学依据。提升管控的主动性和准确性,加强行业内部的沟通和协作,搭建行业交流平台,鼓励企业分享因素管控的方法与经验,推动行业内部的技术沟通和经验互相借鉴,带动行业整体管控水平提升,为工程造价做到精准测算提供坚实支撑。

4 结束语

大数据技术为工程造价精准测算革新提供了重要支撑,也对行业传统工作模式提出了全新要求。工程造价精准测算的优化,并非简单技术叠加,而是方法、数据、管理与人才的系统性升级。只有持续推进传统测算模式迭代,统一数据标准、深化技术适配、强化人员能力,构建覆盖全生命周期的动态测算与因素管控体系,才能真正破解测算精度不足的难题。随着大数据与工程造价领域深度融合,行业将逐步形成数据驱动、智能高效、精准可控的造价管理新格局,为工程项目提质增效、实现可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 张艳梅.大数据时代住宅工程造价精准估算模型构建与应用[J].居舍,2025(11):169-172.
- [2] 周文瑞.基于人工智能算法的工程造价精准预测模型构建及应用研究[J].信息记录材料,2025,26(04):75-77.
- [3] 邹世桥,刘全东,王红坛.基于改进BP神经网络的公路工程造价精准预测研究[J].建筑机械,2025(02):226-230.
- [4] 高观浩,王雨佳,黄佳雯,等.电力工程造价精准管控大数据平台构建研究[J].建筑经济,2023,44(S2):270-274.
- [5] 吕金玉,谢欣宇.工程造价精准化的优势分析[J].湖北农机化,2020(08):31.

智慧施工技术助力道路项目成本精细化管理

赵如佳

(广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530200)

摘要 针对广韶高速改扩建 JA3 标运营条件复杂、导改频繁的的施工挑战, 构建了基于 BIM-5D 的成本动态管控体系, 融合物联网追溯与 AI 调度技术, 实现进度与成本的挣值联动。系统将拌和站、仓点及机械台班数据实时入库, 打通计量支付与产值确认流程。经 6 个月样本期评估, 月均综合成本由 5 147.45 万元降至 4 828.31 万元, 节约率 6.2%, 材料浪费率由 8% 降至 3%, 人工与设备成本分别下降 12.0% 和 5.8%, 投入产出比达 1: 5.37。研究结果表明, 该体系可在多工点交叉条件下实现成本偏差日级纠偏, 为道路改扩建提供可参考的路径。

关键词 智慧施工; BIM-5D; 物联网; 挣值管理; 成本精细化

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.025

0 引言

随着高速公路改扩建工程常态化, 如何在运营条件下实现成本精准管控成为行业难题。传统成本管理依赖离线台账, 数据滞后、信息割裂, 导致材料浪费、设备利用率低、计量支付与产值确认脱节等问题突出^[1]。本文以广韶高速 JA3 标为依托, 构建 BIM-5D 与物联网、AI 技术融合的成本动态管控体系, 通过统一 WBS 与 CBS 编码、实时数据采集与智能调度, 实现进度与成本统一度量、日级纠偏。该研究旨在破解复杂场景下成本精细化管理瓶颈, 提升工程资源优化配置能力, 为同类工程提供可复制的技术路径与管理范式。

1 广韶高速公路改扩建项目 JA3 标工程概况

1.1 项目基本情况

JA3 标位于广东省韶关市境内, 改扩建里程 12.8 km, 作为广韶高速提质增效的关键单元。项目总投资 15.6 billion CNY, 计划工期 24 months, 建设目标聚焦通行能力提升与结构耐久性增强, 同时兼顾运营干扰控制与施工安全。工程内容涵盖路基改扩建、桥梁加固与新建、涵洞通道整治、排水防护完善、路面结构升级以及交通安全设施更新。鉴于既有高速在运营条件下组织施工, 场地受限、交通导改频繁与材料供应协同叠加, 对进度、质量、成本三类目标的协同提出更高要求^[2]。需重点关注的还有互通节点、跨线桥与河道桥群等关键工点的专业交叉。鉴于上述情境, 项目把 BIM、物联网与大数据等智慧施工手段当作核心抓手,

围绕设计、采购、施工与运维交接建立贯通的数据链, 为后续成本精细化管理提供可落地的场景与技术基础。

1.2 成本管理现状与难点

鉴于 JA3 标在运营条件下改扩建的组织特性, 现行成本管理仍以离线台账和人工汇总开展, 劳务计量与机械台班数据平均滞后 7 d 以上, 使目标成本对现场消耗的偏差难以及时校准。从现场业务流程来看, 物料编码未与工作分解 WBS 和成本分解 CBS 建立一体化映射, 把拌和站与沿线仓点的账物卡关系割裂, 材料浪费率约 8%, 周转料具周期延长。需重点关注的是, 交通导改与雨季把工序推进打散, 关键工点交叉频繁, 设备利用率仅 65%, 机械折旧与待机成本难以在责任单元内精细分摊。由此推导, 进度计划与成本控制缺乏联动, 挣值指标以已完工作对应预算衡量进度绩效却未嵌入生产调度, 计量支付、产值确认与采购兑现周期错位, 钢材与水泥价格波动的风险传导延迟, 进而放大月度两算对比的波动^[3]。

2 智慧施工技术在 JA3 标成本精细化管理中的应用

2.1 基于 BIM 的成本动态管控系统构建

针对 JA3 标运营条件下改扩建工程的组织特点, 本研究构建了基于 BIM 的 5D 成本动态管控系统。通过将工程量清单、预算定额与合同清单在 BIM 环境下统一建模, 形成构件级成本对象, 并对 WBS 与 CBS 进行一体化编码映射, 贯通设计、采购与施工全流程。系统实时接入拌和站生产、仓点出入库及机械台班数据,

作者简介: 赵如佳 (1998-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路工程。

规则引擎依据定额与合同库计算构件费用，并结合钢材、水泥行情价滚动预测成本，最终形成目标、合同与预测三线对比的闭环视图。在进度—成本联动方面，系统将施工计划分解至构件层级，通过移动终端采集作业量并同步更新4D模型，超耗构件在BIM中高亮预警。偏差度量采用挣值管理指标，作为预警阈值触发条件，核心公式为：

$$CV=BCWP-ACWP \quad (1)$$

式(1)中， CV 表示成本偏差， $BCWP$ 为已完工作预算费用， $ACWP$ 为已完工作实际费用，单位均为CNY。服务层部署规则引擎与预警中心，应用层提供成本驾驶舱及分包协同门户，实现工序验收与材料领用、机械台班确认的实时对齐。该系统可在日常调度中输出偏差信号，辅助管理人员优化资源投入，形成进度、成本与质量的协同管控。

2.2 物联网+AI的材料与设备成本优化

针对JA3标运营条件下施工与导改频繁的特点，本研究将物联网感知与AI算法耦合，实现材料与设备成本的日级闭环管理。材料侧，通过雷达料位计、RFID等终端采集数据，AI需求预测模块结合配合比、天气等生成滚动需求与安全库存阈值，规则引擎自动预警超耗并联动采购策略，提升库存周转率(表1显示优化后月均节约230万元)。设备侧，基于GNSS、油耗计等传感器数据，调度引擎运用约束满足与强化学习优化协同排程，结合能耗与健康状态给出保养建议，成本数据写入5D驾驶舱并按构件自动分摊，实现计量支付与产值确认的时间对齐。物联网数据经边缘网关回传至时序数据库，并与WBS/CBS主数据绑定，形成可追溯的数据底座。

2.3 大数据驱动的施工进度与成本联动管理

针对JA3标多工点交叉作业与运营干扰频繁的特点，本研究构建了基于大数据的进度—成本联动管理机制。通过将4D进度、物资消耗、机械台班及价格数据汇聚至项目数据湖，并以工点与构件为粒度建立统一索引，实现了多源数据的时空对齐。为解决导改与雨季造成的计划偏差，系统将挣值法嵌入滚动调度，核心指标计算如下：

$$EV=已完工作量 \times 预算单价 \quad (2)$$

式(2)中， EV 表示挣值，已完工作量为按WBS核算的合格工程量，预算单价为绑定CBS条目的预算单价。

从计划执行偏移的角度来看，系统把计划工作预算费用同上一式联动，进而给出进度偏差：

$$SV=EV-计划工作预算费用 \quad (3)$$

式(3)中， SV 表示进度偏差， EV 同上，计划工作预算费用为考核时点的计划预算费用。服务层通过时序聚类与关键路径重估对偏差进行归因，将导改窗口、设备约束与物料到货作为决策变量，自动生成微区段的资源合并与工序调整方案。应用层采用雷达图对计划完成率、挣值、成本偏差、设备利用率等指标进行耦合态势可视化，辅助管理人员同步校正交通导改、设备待机及采购节拍。由此将进度控制与成本控制纳入同一调度回路，实现对关键工点与工序的分层闭环管控^[4]。

3 智慧施工技术应用效果评估与价值分析

3.1 成本管控效果数据对比分析

针对JA3标运营条件下导改频繁、雨季扰动及多工点约束并存的特点，本研究以WBS/CBS绑定的月度维度统一核算成本，选取导改方案稳定后连续6个月

表1 JA3标材料消耗优化前后对比表

材料类别	优化前月均消耗量/t	优化后月均消耗量/t	浪费率优化前	浪费率优化后	成本单价/CNY/t	月度节约成本/CNY
钢筋	1 200.0	1 140.0	8%	3%	4 200	252 000
水泥	25 000.0	23 750.0	8%	3%	420	525 000
矿粉	8 000.0	7 600.0	8%	3%	260	104 000
沥青	6 000.0	5 700.0	8%	3%	3 500	1 050 000
外加剂	500.0	485.0	8%	3%	1 800	27 000
碎石	30 000.0	28 500.0	8%	3%	90	135 000
砂	25 000.0	23 750.0	8%	3%	80	100 000
乳化沥青	1 000.0	961.786	8%	3%	2 800	107 000
合计	—	—	—	—	—	2 300 000

为应用期，构建可比数据集。对比显示（见表 2）：人工成本下降 12.0%，源于工序验收联动使班组投入与作业面匹配，减少返工等待；材料成本下降 8.5%，由称重闭环与需求预测驱动，拌和站节拍与库存阈值动态校正；设备成本下降 5.8%，归因于调度引擎对通行窗

口与作业优先级的重排，合并异常待机；间接费用增长 4.0%，系临时交通组织与平台运维新增所致。综合节约率达 6.2%，材料端贡献约七成，表明进度—成本联动调度已将主要浪费场景纳入可控区间，成本两算偏差月度波动幅度收敛。

表 2 JA3 标智慧施工技术应用前后成本指标对比表

成本项	基期月均成本 / 万元	应用后月均成本 / 万元	变动率 / %	月度节约 / 万元
人工成本	800.00	704.00	-12.0	96.00
材料成本	2 706.00	2 476.00	-8.5	230.00
设备成本	600	565.20	-5.8	34.80
间接及其他	1 041.45	1 083.11	+4.0	-41.66
合计	5 147.45	4 828.31	-6.2	319.14

3.2 投入产出比评估

针对 JA3 标运营条件下的复杂约束，本研究按投资决策口径进行投入产出评估。前期一次性投入（软硬件、平台定制及培训等）合计 180 万元。以导改稳定后的样本期为窗口，基于 WBS/CBS 统一口径核算，5D 成本驾驶舱、物联网追溯与 AI 调度带来的净节约（已扣除间接费用增量）为 967 万元，投入产出比达 1:5.37，显著促进了现金流与成本效率。结合月均净节约 319 万元测算，静态投资回收期不足 1 个月，有效降低资金沉淀与实施风险。敏感性分析表明，当钢材与水泥行情在 ±5% 区间波动时，滚动预测与合同对冲可使投入产出比稳定在 1:4.9 ~ 1:5.6 的可接受区间。此外，拌和站等设备可迁移、平台规则库可在项目群复用，进一步摊薄边际成本，从全寿命周期视角强化了投入产出表现。

3.3 推广应用建议

针对 JA3 标在多工点交叉推进中的实践经验，提出面向道路改扩建场景的推广建议。首先应以主数据治理为先导，建立覆盖构件、材料与合同的统一编码及版本管理，将行情价与合同价联动嵌入滚动预测。在人员层面，围绕项目经理、造价工程师及现场管理员构建分层培训体系，统一挣值口径与物资追溯范式。在技术架构上，采用“一云多站”数据中台，以模块化组合对接 ERP 与财务系统，按“关键工点试运行—分区段扩容—全线复制”节奏推进。在安全合规方面，实施多租户隔离、权限分层与离线容错，适应山区断续通信条件。在产业层面，联合高校共建可迁移的算法与规则库，在同一项目群内复用账户与设备，持续

摊薄边际成本，并将成本偏差信号纳入地区级调度例会，促成跨项目协同常态化运转^[5]。

4 结束语

本文以广韶高速 JA3 标为依托，构建了 BIM-5D 与物联网、AI 融合的成本动态管控体系，实现了 WBS 与 CBS 贯通、计量支付与产值确认同步、成本偏差日级纠偏。该体系在多工点交叉、导改频繁的复杂施工条件下，有效提升了资源优化配置能力与成本协同管控效能。后续将以主数据治理与数据中台建设为抓手，按关键工点分步复制，强化数据安全与系统可用性，联合产学研持续迭代算法与规则库，推动项目群层面的协同与规模化复用，为道路改扩建工程提供可复制的技术路径与管理范式。

参考文献：

- [1] 何冠局. 基于 BP 神经网络的高速公路运营管理成本预测及控制研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [2] 张钊. 基于多源数据的高速公路全周期成本核算技术 [J]. 数字经济, 2025(12):117-118.
- [3] 康华江. 高速公路路基工程施工项目成本管理研究 [J]. 运输经理世界, 2021(03):19-20.
- [4] 杨守峰. 高速公路工程施工阶段成本控制优化策略探索 [J]. 青海交通科技, 2025, 37(04):82-86.
- [5] 廖文燕. 高速公路工程项目成本管理策略研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 04(22):177-180.

数字孪生技术在建筑工程造价管理中的应用

成 露

(浙江西建工程管理有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要 针对传统建筑工程造价管理存在信息孤岛、动态控制滞后等问题, 本文提出数字孪生技术的应用路径。通过构建物理感知层与虚拟模型层双向映射的技术架构, 剖析数据采集、模型构建及多源信息融合过程, 并从设计优化、施工管控、结算核验及运维管理等环节阐述具体应用场景。结果表明, 数字孪生技术可实现成本数据与工程实体的实时关联, 推动造价管理由静态核算向动态预控转变, 有效提升工程量核算准确性与成本响应速度, 为建筑行业造价精细化管理提供新的技术思路与解决路径。

关键词 数字孪生; 造价管理; 全生命周期; 动态控制

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.026

0 引言

建筑工程造价管理是建筑工程造价管理贯穿于项目决策、设计、施工到运营全过程的管理活动, 其管理水平直接影响到项目的投资效益和盈利空间。但是, 传统的造价管理方式一直存在着信息传递断层、动态控制滞后等问题, 各阶段的成本数据分散在不同参与方手中, 造成信息孤岛, 无法为全过程成本追溯提供连续的数据支持。施工过程中变更签证频繁出现, 造价核算仍然采用月度统计和事后结算的方式, 造成成本超支风险不能被及时发现和干预。近年来, 伴随着建筑信息模型技术的普及以及物联网传感设备的迅猛发展, 以数字孪生为代表的数字化映射技术逐步渗透到工程管理当中。该技术通过创建出与物理实体同步的虚拟空间里的数字化镜像, 从而为成本要素的即时感知、动态模拟和闭环控制提供了技术可能。因此, 在此情况下, 将数字孪生技术与造价管理深度融合, 对建筑成本控制具有重大的理论意义和实际价值。

1 数字孪生技术在工程造价管理中的应用机理

1.1 数字孪生技术核心概念

数字孪生技术是将多物理场、多尺度、概率性仿真和动态数据融合结合的一种数字化映射方法, 主要目的是创建物理实体在虚拟空间里的高保真数字化镜像。该技术依靠物联网泛在感知网络实时收集物理对象的几何尺寸、状态参数以及环境信息, 再经由建筑信息模型和大数据分析平台达成物理实体同虚拟模型之间实时的数据交互及动态双向映射。数字孪生体不

但可以表现物理实体的几何结构和功能特性, 而且借助机器学习算法以及仿真推演的方法, 对物理实体在全部生命周期内的行为规律进行模拟、推演并加以检验, 从而形成由数据感知、模型创建、决策改良到物理实体的闭环技术体系^[1]。

1.2 数字孪生赋能造价管理的机理

数字孪生对造价管理的机理主要是从数据融合、模型联动和决策闭环这三个方面来体现的。数字孪生技术依靠物联网传感器、射频识别、三维扫描设备 etc 对施工现场人、材、机消耗数据以及环境参数展开持续采集, 并且与 BIM 模型里的几何信息、定额单价以及合同条款实施异构数据融合, 从而产生包含时间戳和空间属性的成本数据集。数字孪生体把物理建筑实体和虚拟模型用双向映射的方式动态关联起来, 使得造价管理由依靠静态图纸的工程量核算转变为依靠实时进度数据的成本动态核算, 从而达到进度节点和成本支出精准对应的目的。在决策闭环方面, 数字孪生平台将仿真推演算法融入进去, 对不同的施工方案、设计变更或者资源调配策略展开成本影响的模拟预估, 将预警信息发送到管理终端, 形成从状态感知、成本分析到控制指令回馈的闭环流程, 进而实现造价管理由事后核算转向事前预控的转变。

2 基于数字孪生的造价信息采集与动态模型构建

2.1 物理建筑的信息化感知

物理建筑的信息化感知是建立数字孪生造价管理数据基础的重要手段, 它将施工现场的物理状况转变

作者简介: 成露(1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

为可以计算的数据流,依靠泛在传感网络。在施工作业面上,在混凝土结构内部布置温度传感器、应变计可以实时检测养护条件,这些数据直接影响冬季施工措施费的计取和混凝土强度达龄期的成本确认。物料管理环节,塔吊吊钩和材料堆场的射频识别读写器以及称重传感器,可以自动采集钢筋、砌块等大宗材料的进场批次、验收数量、消耗部位等信息,并与模型构件建立关联,形成物资消耗台账。

另外,依靠三维激光扫描仪或者无人机倾斜摄影系统定时采集的施工现场点云数据,可以真实再现土方开挖、主体结构施工的实际进度,再同设计模型展开对比分析,便可自动生成完成工程的实物工程量清单。该感知体系形成以后,原先依靠人工填写的进度报表和材料单据就变成了物理世界直接产生的数字信号,大大缩减了造价数据采集的滞后情况并削减了由于人为因素所造成的误差。

2.2 虚拟孪生模型的构建

虚拟孪生模型是基于物理感知来创建承载全部成本信息的数字模型,该过程先利用建筑信息模型技术建立建筑的几何结构和构件层次关系,得到模型的几何骨架。在此基础上,造价信息的挂载是实现孪生模型经济属性的重要环节,需要将工程量清单计价规范与模型构件进行语义关联,使墙体、梁、柱等构件均能关联并继承对应的综合单价、人工工日消耗量、材料市场价格等造价信息,实现模型构件与造价数据的一体化绑定。

为了使模型与不同参与者之间进行有效交互,需要对包含几何、成本等信息的原始模型进行减面处理和数据压缩,在移动端和网页端都可以及时查看构件的属性。虚拟孪生模型是在工程建设过程中不断细化形成的,在设计阶段表现为概算指标的方案模型,在施工阶段表现为挂载合同单价、分包成本的实际成本核算模型,在竣工阶段表现为承载全生命周期成本数据的资产交付模型^[2]。

2.3 多源异构数据的融合与存储

多源异构数据融合与存储属于物理感知层和虚拟模型层之间数据的枢纽,主要解决不同来源、不同结构的数据语义冲突和时间对齐问题。从数据来源来说,造价管理所需数据包括:物联网设备的实时流式数据、BIM 软件的几何模型数据、计价软件的定额数据库、项目管理系统的人工填报记录等。数据格式、精度、更新频率等存在很大差别,需要建立统一的数据融合体系。具体来说,用标准的数据接口协议把传感器监测

设备运行时长和模型中的机械台班定额项联系起来,将物料过磅数据和模型中对应的构件材料消耗量自动匹配,形成统一的项目分解结构,使各个时间点数据可以按施工段和实际进度对齐。融合后的数据存放在支持时空数据管理的建筑大数据平台上,该平台不但具有海量数据存储的能力,还需建立数据之间的关联索引,使造价管理人员在查询构件成本时,可以同时调取其设计参数、施工记录、实际消耗量以及实时监测数据,从而为成本分析和模拟推演提供完整的数据。

3 数字孪生技术在造价管理全过程中的具体应用

3.1 设计阶段的成本动态优化

设计阶段用数字孪生技术创建包含成本属性的虚拟建筑模型,从而达到设计方案经济性动态优化和实时校核的目的。当设计师对建筑形体、围护结构或者设备选型进行调整时,数字孪生平台会依据挂载在构件上的工程量计算规则以及市场价格数据库,立刻做出反应并重新计算出土建工程量增减、材料成本变动和设备采购费用的变化,将成本核算周期由数日缩短到实时。支持多方案并行比较,用同一个孪生环境同时显示不同的设计路线所对应的几何效果和概算值,使设计师和造价工程师可以共同推算成本目标,找出影响造价的主要设计参数^[3]。

3.2 施工阶段的精细化成本控制

3.2.1 进度—成本联动控制

进度—成本联动控制是在传统建筑信息模型的基础上进一步发展,其主要目的是创建时间维度和成本维度之间的动态耦合关系。在数字孪生环境中,施工进度计划把构件当作基本单元,与模型挂钩后产生出计划成本曲线。在实际操作中,物联网系统实时收集的施工进度数据促使孪生模型随之发生演进,系统会立刻找出当期已经完成的构件,并按照这些构件所挂载的合同单价以及资源消耗定额来进行即时计算,从而得出已完工程的预算成本和实际成本。该机制使挣值管理自动执行,通过对计划成本、实际成本和挣值这三组数据进行实时比较,可以对进度滞后或者成本超支的影响范围进行量化分析。当偏差超过设定的阈值时,数字孪生平台可以对不同的赶工方案或者资源调配策略做成本影响模拟,为管理者选择最佳的纠偏路径提供数据支持。

3.2.2 物资精细化管理

物资精细化管理用数字孪生技术来对工程材料、设备资源进行全过程的跟踪和动态调配。物资进场时,

在施工现场入口处设置射频识别读写器和车牌识别系统,自动记录运载车辆信息以及所载物资的规格、数量,并且与采购订单数据进行自动核验,核验无误后更新虚拟仓库库存模型。仓储管理上利用堆场区域视频监控和重量传感器来实时监测材料存量的变化,当库存降到安全阈值以下时系统会自动生成补货预警并推送给采购部门,防止由于材料短缺造成停工待料的情况发生^[4]。根据孪生模型中施工进度和构件关联的材料定额,系统可以自动计算出理论消耗量,再和搅拌站或者加工车间反馈的实际出库数据进行比较,及时发现异常损耗并找到具体的施工部位。该机制把物资流、信息流和资金流三者统一起来进行控制,从而降低库存资金占用、提高材料周转速度。

3.2.3 变更与索赔数字化管理

变更和索赔数字化管理依靠数字孪生模型的可追溯性和仿真能力,来提高工程变更响应速度和索赔依据的严谨性。当施工现场出现设计变更或者施工条件发生变化时,管理人员可以在孪生环境中调整几何参数与施工工艺,系统会立即找出变更所影响的构件范围,然后按照内置的计价规则与合同条款来重新计算工程量的增减量以及费用的变化,此过程还生成变更前成本对比分析报告,为变更方案的经济性评价及批准决策提供量化的参照。数字孪生平台对施工日志、环境监测数据、设备运行状态、指令下达时间等信息进行了完整的记录,当出现不利地质条件、设计图纸延误、指令增加工作内容等情形时,系统可以依据时间轴回溯事件的原因、影响范围以及造成资源闲置或者返工损失的情况,生成带有模型截图和数据凭证的索赔支持文档,从而提高索赔谈判过程中证据的可信度。

3.3 竣工结算与运维阶段的资产管理

3.3.1 竣工结算的快速核对

竣工结算快速核对依靠数字孪生模型和实测数据的自动对比,大大提高工程量核算的速度和准确度。工程实体完工后,采用三维激光扫描仪或无人机倾斜摄影系统得到建筑竣工状态的点云数据,再经过处理得到反映真实施工结果的实景模型,并与BIM模型进行自动配准和差异分析,系统可以准确找到实际完成的界面和设计图纸之间的几何偏差,根据模型构件挂载的工程量计算规则,自动提取出已经完成工程的数量。对有设计变更或者现场签证的部位,数字孪生平台保存了变更实施时间、审批过程以及对应的模型版本,每一个工程量的改变都有据可依。该机制把传统

依靠人工现场丈量、图纸核对的结算方式转变成以三维数据为基础的自动化核算流程,缩减了发承包双方对于工程量争议的核对时间,并且创建出带有模型截图和数据来源的结算报告,明显加强了结算依据的可信程度^[5]。

3.3.2 运维阶段的资产价值管理

运维阶段的资产价值管理依靠创建承载全生命周期成本数据的数字孪生档案,从而达成建筑资产价值的动态评价并持续改进。工程竣工交付时,把设备采购成本、安装费用、初始调试记录和供应商信息等全部纳入到资产数据与建筑信息模型中,从而创建起包含暖通空调、给排水、电气照明等各种系统在内的全部数字化资产台账。重要设备上的传感器会一直记录运行时长、耗电量和故障报警等信息,系统根据内部事先设置的折旧公式、维护成本记录等不断更新各资产的当前价值和剩余使用年限。设备出现故障或者进行预防性保养时,数字孪生平台可以结合维修记录、备件更换费用和同类设备平均故障时长等信息,让运维管理人员针对性开展维修和更换工作。

4 结束语

数字孪生技术通过物理实体与虚拟模型的实时双向映射,有效打通了建筑工程各阶段、各参与方之间的信息壁垒,实现了造价数据与工程实体的深度绑定与动态同步。依托多源数据融合与全过程模拟推演,传统造价管理得以从静态、事后核算向动态、事前预控转型,显著提升工程量核算精度与成本响应效率,为建筑工程全生命周期造价精细化、智能化管控提供技术支撑。随着物联网、人工智能和大数据技术的不断融合,数字孪生技术在建筑全生命周期成本决策与造价管理方面将发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 崔媛慧子,徐琳,肖青山.基于数字孪生技术的建筑工程造价管理研究[J].建筑与预算,2025(10):28-30.
- [2] 李小莲,黄文杰,黄冰,等.信息化技术在工程造价管理过程中的研究与应用[J].装备制造技术,2025(10):142-145.
- [3] 廖伟新.“智链”工程造价新业态:BIM与AI的协同创变[J].城市建设,2025(05):25-27.
- [4] 李修强.数字孪生技术在建筑工程造价管理中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024(07):127-129.
- [5] 李雁.数字孪生技术为造价管理提供强大动力[J].中国商界,2023(03):117-118.

电力系统运行可靠性评估与优化调度技术研究

商强强

(无棣县鑫苑热力有限公司, 山东 滨州 251900)

摘要 本文围绕电力系统运行可靠性评估与优化调度两个核心问题展开研究。构建以 LOLP、EENS、SAIDI 等为核心的可靠性指标体系, 建立负荷波动正态分布模型与新能源出力 Weibull、Beta 概率模型, 采用蒙特卡洛模拟与解析法混合框架进行量化评估。在此基础上, 建立计及功率平衡、爬坡、备用约束的机组组合与经济调度模型, 构建运行成本与可靠性的多目标协调优化框架, 引入储能与柔性负荷提升调度灵活性。采用改进 PSO 算法求解, 并在 IEEE RTS-24 系统上进行仿真验证。结果表明, 所提方法可将 LOLP 与 EENS 降低约 70%, 效果显著。

关键词 可靠性评估; 优化调度; 蒙特卡洛模拟; 机组组合; 多目标优化

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.027

0 引言

随着电网规模持续扩大与新能源大规模并网, 电力系统运行的不确定性显著增加, 可靠性问题日益突出。传统调度方法主要以经济性为目标, 对系统可靠性约束考虑不足, 难以应对复杂运行场景下的潜在风险。因此, 如何科学评估系统可靠性、准确定位薄弱环节, 并在此基础上制定兼顾经济性与可靠性的优化调度策略, 已成为电力系统领域的重要研究方向, 已有研究对可靠性评估方法进行了系统梳理^[1], 但针对高比例新能源场景下评估与调度的协同优化仍有待深入。本文针对上述问题, 系统开展可靠性评估方法与优化调度模型的研究, 以期为电网安全运行提供理论支撑与方法参考。

1 电力系统运行可靠性评估

1.1 可靠性指标体系构建

电力系统可靠性评估的前提是建立一套科学、完整的指标体系, 依据评估对象的差异, 可靠性指标一般分为充裕度指标和安全性指标两类。充裕度指标能

反映系统在稳态条件下满足负荷需求的能力; 安全性指标则可衡量系统在扰动发生后维持运行的能力。两类指标相互补充, 共同构成对系统可靠性的立体化描述, 缺一不可, 实际工程中常用的核心指标如表 1 所示。

1.2 概率化建模与不确定性处理

电力系统在运行过程中存在两类主要不确定性来源, 分别是负荷侧的随机波动以及新能源出力的间歇性。随着风电和光伏装机容量持续不断地扩大, 新能源出力的随机性对系统可靠性的影响愈发显著, 必须通过建立精确的概率模型进行量化描述, 这样才能为后续评估提供可靠的输入基础。对于负荷波动情况, 鉴于实际负荷在预测值附近呈现出对称分布的状态, 通常采用正态分布模型来加以描述, 假设系统在时段 t 的负荷预测值为 μ_t , 预测误差标准差为 σ_t , 那么实际负荷 L_t 的概率密度函数为:

$$f(L_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{(L_t - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right) \quad (1)$$

式(1)中, μ_t 为 t 时段负荷预测均值, σ_t 为对应标准差, 反映预测不确定性的大小, 对于风电出力,

表 1 常用电力系统可靠性评估指标

指标	全称	含义	单位
LOLE	电力不足期望值	系统日均供电不足的期望小时数	h/年
EENS	电量不足期望值	单位时间内系统期望缺供电量	MWh/年
SAIDI	系统平均停电持续时间	用户年均停电持续时间	h/户·年
LOLP	电力不足概率	系统出现供电不足状态的概率	—

作者简介: 商强强 (1979-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

风速通常服从 Weibull 分布, 其概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式(2)中, k 为形状参数, 反映风速分布的集中程度; c 为尺度参数, 反映该地区的平均风速水平, 对于光伏出力, 辐照度在 $[0, 1]$ 区间内通常服从 Beta 分布, 其形状参数 α 与 β 能够通过历史数据拟合来确定, 上述概率模型通常假设各时段独立, 未考虑时序相关性; 可通过卷积理论和高斯 Copuda 对净负荷相关性进行刻画^[2], 可进一步减少灵活性需求量化误差。

1.3 蒙特卡洛模拟与解析混合评估

采用蒙特卡洛模拟与解析法相结合的混合评估框架对系统可靠性做量化计算, 蒙特卡洛模拟通过对系统状态进行大量随机抽样, 统计各类故障场景的发生频率, 从而估计可靠性指标的期望值。经过 N 次抽样后, LOLP 的估计值为:

$$\hat{P}_{LOLP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1(G^{(i)} < L^{(i)}) \quad (3)$$

式(3)中, 条件表达式 $G^{(i)} < L^{(i)}$ 成立时取 1, 否则取 0; N 为总抽样次数。针对网络拓扑相对简单的局部子系统, 配合解析法直接计算状态概率, 以此避免蒙特卡洛模拟在小概率事件下收敛慢的不足, 进而在保证计算精度的同时提升整体计算效率。

2 面向可靠性提升的优化调度建模

2.1 机组组合与经济调度模型

机组组合决定各个发电机组在每个时段的启停状态, 经济调度在这个基础上确定各机组的具体出力水平, 机组组合和经济调度共同构成一个混合整数优化问题, 该问题需要在满足系统运行约束的前提下实现运行成本最小化。

以 T 个调度时段、 N 台机组为研究对象, 系统运行的总成本由燃料成本和启停成本这两部分构成, 目标函数如下:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{i,t} \cdot C_i(P_{i,t}) + S_{i,t}(1 - u_{i,t-1})u_{i,t}] \quad (4)$$

式(4)中, $u_{i,t} \in \{0, 1\}$ 为机组 i 在时段 t 的启停状态变量; $P_{i,t}$ 为机组 i 的有功出力; $C_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i$ 为燃料成本函数; $S_{i,t}$ 为启动成本。

上述目标函数须满足以下约束条件。功率平衡约束要求系统在每个时段内总发电出力与总负荷需求相等:

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,t} = D_t, \forall t \quad (5)$$

式(5)中, D_t 为 t 时段的系统总负荷需求, 机组出力同时受上下限约束 $u_{i,t} P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_i^{\max}$ 与爬坡约束 $|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq \Delta P_{i \max}$ 的共同限制, 为了确保机组能够在额定范围内平稳运行, 为了应对负荷预测误差以及机组突发故障情况, 系统必须保留一定的旋转备用容量, 备用约束如下:

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} (P_i^{\max} - P_{i,t}) \geq R_t^{\min}, \forall t \quad (6)$$

式(6)中, R_t^{\min} 为 t 时段所需的最小旋转备用容量, 通常取系统最大负荷的一定比例, 上述约束体系从功率平衡、设备能力与运行安全三个层面共同保障了调度方案的可行性。

2.2 运行成本与可靠性的多目标协调

单纯以经济性为目标的调度方案往往以牺牲可靠性为代价, 而片面追求可靠性则会导致运行成本大幅攀升, 因此, 需要在两者之间寻求合理的协调平衡, 构建为多目标优化问题加以求解。

以系统运行总成本 f_1 与电量不足期望值 EENS 作为可靠性目标 f_2 , 建立双目标优化模型, 考虑到工程实践中决策者通常对两目标有明确偏好权重, 采用线性加权求和法将双目标转化为单目标:

$$\min F = \omega_1 \cdot \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \omega_2 \cdot \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (7)$$

式(7)中, ω_1 与 ω_2 分别为经济性与可靠性的权重系数, 满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$; 分式部分为各目标的归一化处理, 确保两个量纲不同的目标具有可比性。进一步引入 Pareto 多目标优化框架, 通过求解 Pareto 前沿揭示成本与可靠性之间完整的权衡曲线。若不存在任何可行方案能同时改善 f_1 与 f_2 , 则该方案为 Pareto 最优解, 全体 Pareto 最优解构成的前沿为决策者提供了一组非劣调度方案集合。

2.3 储能与柔性负荷的灵活性建模

随着储能系统与柔性负荷资源的规模化应用, 调度灵活性得到显著提升, 储能系统可在新能源出力充裕时段吸收多余电量、在出力不足时段释放电量, 有效平抑功率缺口; 柔性负荷则通过需求响应机制主动调整用电时序, 从需求侧为系统提供调节能力, 需求响应机制包括价格型和激励型两类, 其在降低峰值负荷、提升资源配置效率方面的有效性已在 IEEE 39 节点系统中得到验证^[3]。两类资源协同作用, 能够从供需两侧同时缓解薄弱时段的可靠性压力。

对于储能系统, 其荷电状态的动态变化是建模核心, 相邻时段间的能量平衡关系为:

$$E_t = E_{t-1} + \eta_c P_t^c \Delta t - \frac{P_t^d}{\eta_d} \Delta t \quad (8)$$

式(8)中, E_t 为 t 时段末的储能能量; P_t^c 与 P_t^d 分别为充电与放电功率; η_c 与 η_d 分别为充放电效率; Δt 为时段长度, 储能系统同时须满足容量上下限约束与充放电不同时约束, 避免同一时段内同时充放电造成能量损耗。

3 调度优化求解与仿真验证

3.1 智能优化算法设计与改进

优化调度模型包含整数变量与非线性约束, 属于混合整数非线性规划问题, 传统梯度类方法难以有效求解。为此, 本文采用粒子群优化算法(PSO)作为主体求解框架, 并针对机组组合问题的特点进行改进, 标准 PSO 通过模拟粒子在解空间中的群体协作搜索行为寻找最优解, 每个粒子代表一组调度方案。除粒子群算法外, 其他启发式算法如鲸鱼优化算法也被用于电力系统调度寻优^[4]。本文侧重对 PSO 的离散化与自适应惯性权重改进, 依据个体历史最优与群体全局最优位置更新自身速度与位置, 然而标准 PSO 在处理整数变量时容易陷入局部最优。为此, 引入两项改进: 一是对启停变量采用离散化处理, 通过 sigmoid 函数映射至 $\{0, 1\}$ 空间; 二是引入自适应惯性权重机制, 在迭代初期增强全局探索, 后期加强局部开发, 从而在搜索广度与收敛速度之间取得平衡。

3.2 仿真测试系统搭建

采用 IEEE 可靠性测试系统(IEEE RTS-24)作为仿真验证平台, 该系统包含 24 个母线节点、38 条输电线路、32 台发电机组, 总装机容量 3 405 MW, 峰值负荷 2 850 MW, 是电力系统可靠性研究的标准测试基准。在此基础上接入风电与光伏机组以模拟高比例新能源场景, 风电与光伏出力分别依据 Weibull 模型与 Beta 分布模型生成, 储能系统的充放电策略及可靠性评估中基于序贯蒙特卡罗的方法^[5], 充放电效率取 0.95, 容量配置为峰值负荷的 5%; 柔性负荷比例设定为总负荷的 10%, 最大响应系数 ρ 取 0.15, 调度周期为 24 小时, 时间分辨率为 1 小时。

3.3 调度策略对比与结果分析

为验证本文所提方法的有效性, 设置三种调度策略进行对比: 策略一为仅考虑经济性的传统调度(基准方案); 策略二为涉及可靠性约束但不含储能与柔性负荷的优化调度; 策略三为本文所提含储能与柔性负荷的完整优化方案。三种策略均在 IEEE RTS-24 系

统上运行, 采用相同的负荷曲线与新能源出力场景, 仿真结果如表 2 所示。

表 2 三种调度策略可靠性与经济性指标对比表

指标	策略一 (基准)	策略二(含可 靠性约束)	策略三(本 文方法)
LOLP	0.0 312	0.0 187	0.0 093
EENS (MWh/年)	856.4	512.3	241.7
运行总成本(万元)	184.2	197.6	205.8
旋转备用裕度(MW)	142.5	198.3	267.4

由表 2 可见, 与基准策略相比, 策略二引入可靠性约束后 LOLP 降低 40.1%、EENS 降低 40.2%, 运行成本上升 7.3%; 策略三进一步引入储能与柔性负荷, LOLP 较基准降低 70.2%、EENS 降低 71.8%, 运行成本仅上升 11.7%, 可靠性提升幅度远大于成本增加幅度, 体现出储能与柔性负荷在提升系统灵活性方面的显著优势, 体现出储能与柔性负荷在提升系统灵活性方面的显著优势, 可靠性提升效果与第 1 章评估所识别的高风险时段高度吻合。

4 结束语

本文构建了电力系统可靠性评估与优化调度的完整研究框架。基于概率化建模与蒙特卡洛混合评估实现了可靠性有效量化, 所建多目标优化模型兼顾经济性与可靠性, 储能与柔性负荷的引入进一步拓展了调度灵活性。IEEE RTS-24 仿真结果表明, 本文方法可在成本增幅约 12% 的条件下实现 LOLP 与 EENS 降低 70% 以上, 后续可进一步研究极端天气场景下的鲁棒调度优化与大规模电网的算法效率提升问题。

参考文献:

[1] 刘波. 电力系统运行可靠性与关键技术综述[J]. 工研自动化, 2023,49(S2):135-138.
 [2] 杨帆, 彭浩, 邓一帆, 等. 基于时序-卷积概率模型的电力系统灵活性优化调度[J/OL]. 高电压技术, 1-18[2026-03-17]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20251308>.
 [3] 杨硕, 杨宇荃. 基于需求响应的电力系统优化调度模型研究[J]. 中国高科技, 2025(21):89-91.
 [4] 左雅, 王华春, 周金双, 等. 基于神经网络模型的新型电力系统优化调度方法仿真[J]. 电气技术与经济, 2025(11): 110-113.
 [5] 张黎明, 李浩, 吴亚雄, 等. 基于运行优化的含储能电力系统可靠性评估方法[J]. 中国电力, 2022,55(09):23-28.

智慧供热背景下城市供暖系统的供需匹配优化研究

耿志

(济南热力集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要 智慧供热时代,城市供热系统面临需求快速变化以及对能源的需求较大等问题,导致传统的管理方式不能保证其良好运行。本文以解决供需平衡为核心目标,提出一种基于实时数据采集、负荷预测及优化控制等手段进行智慧供热供需协同的方法,在此基础上利用多种来源的信息进行动态需求辨识提高需求侧的变化响应能力,对整个热源—管网—用户进行协调优化以达到供方负荷分配的精确性,建立供需匹配的效果评估标准,从而对城市供热节能减排以及供热质量改善起到指导作用。本文旨在为城市供热在智能化的基础上提出新的管理模式以及提高能源使用效率的方法论和途径参考。

关键词 智慧供热; 城市供暖; 供需匹配; 负荷预测

中图分类号: TU833.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.028

0 引言

随着城市的不断发展,供热系统负荷变化幅度大、调节滞后造成的问题日益突出,而且存在大量的能源浪费现象。智慧供热的发展为上述问题带来了新希望。在此基础上,利用物联网感知技术、智能算法及数据驱动的方法可以更好地识别出用户的实际热量需求,并根据实际情况灵活调整供给量,从而使得供热效率得到提高。在供需匹配方面开展的相关工作越来越多地受到人们的关注,成为智慧供热的一个重要研究热点,而其核心就是寻找一种可以较好预测用户实时热需求以及能够在不同工况下有效进行调度的方法。因此,对于城市环境下适合的供需匹配方法及算法的研究有利于促进供热系统的精确化以及节能化发展。

1 城市供暖供需不平衡的主要矛盾与表现

为实现节能目标,城市集中供暖系统的设计除了要满足人们的供暖需求以外,还要保证设计的合理性和科学性,尽可能以较低的成本设计出实效性更高的供暖系统。否则,在运行的过程中势必会出现各种问题,后续还会浪费更多能源和资源,增加维护成本。城市供暖在高负荷运行阶段常出现供需节奏脱节的情况,体现在热源输出难以同步响应需求波动。随着智慧供热技术的应用范围不断扩大,供暖系统内部的矛盾愈加突出,其中最典型的是需求侧变化速率与供给侧调

节能力之间的差距^[1]。城市用户呈现出明显的负荷差异,居住建筑、商业建筑及公共设施的热需求随气候、时段和使用行为不断变化,而传统供暖模式的指令链路较长,调控节点有限,导致热源输出与实际负荷之间出现偏差。管网系统的热惯性进一步放大了供需失衡的影响,热量在传输过程中受管道老化、换热效率下降及调压迟滞等因素影响,使热量分布无法及时适应用户侧变化。

在供热空间布局不断扩大的背景下,城市管网呈现区域差异性明显的问题,部分区域因热密度较高而持续出现超负荷运行,另一部分区域则因用户密度相对较低而形成热量富余。管网水力特性的不均衡加剧了供需矛盾,流量分配与温度控制难以兼顾,使得某些区域存在阀门调节空间不足、回水温度偏高、局部压差异常等情况。系统高峰时段的负荷集中更易造成热源启停频繁、调节指令拥堵以及局部管网响应迟缓等问题,使得调度中心难以及时依据当前情况进行有效调度。随着智慧供热的发展,这种问题已经成为影响供热质量的主要障碍。

由于城市中老旧小区占比大、用户行为方式多元化等原因造成的供需不平衡还体现在需求预测与供热行为上存在偏差。传统的固定供热量难以体现不同用户在严寒天气或突然降温时对供热量的需求增大而导致用户端室温波动大的问题。部分区域仍采用较为粗

作者简介: 耿志(1995-),男,本科,助理工程师,研究方向:集中供热。

糙的方法进行调节,使得智慧供热所采集的数据不能很好地反映出真实的热需求变化情况,从而造成预测结果与实际情况不符。这也就使得供需矛盾加剧进一步增加耗煤量并加大了供暖工作的难度,形成冷热不均、温差拉大以及调控困难的问题。

2 智慧供热条件下需求侧动态特征的识别方法

在智慧供热环境中,需求侧具有较强的动态性和多样性,对用户的热行为进行识别需要有较强的数据获取能力。物联网传感设备对室温、流量、阀门开度、气象条件等各方面不间断地采集信息,让系统得到大量实时的数据,在此基础上分析其时间特性就可以发现不同种类用户在不同时间段内的热需求变化规律^[2]。由于建筑物本身的特点不同、保温效果不同以及人们的作息习惯不同等因素的影响,导致需求侧负荷具有很强的不确定性和波动性,而传统的静态估计方法不能很好地反映这一变化的趋势。在这种情况下,基于数据的方法来实现对需求侧特征的动态辨识就成为智慧供热的一个重要方面,从而能够使需求侧的信息从多种来源的数据中被提取并量化。

在动态特征识别中,负荷预测模型的设计起到至关重要的作用。随着机器学习、深度学习的发展,可以将用户的热需求看作是时间序列,在此基础上利用长短时记忆网络、卷积神经网络或者梯度提升树等方法建立负荷模式。而天气条件具有较强相关性,外界气温、风速、湿度的变化都会影响到人们的热需求,因此在模型中应将它们作为输入变量来进行特征编码,以增强预测的效果。另外,建筑类型的不同也会影响人们对热量的需求,如商业建筑会存在一定的规律,而居民用户早晨和晚上会有较大的需求变化,同时公共建筑也有着明显的高峰时间段等都会给预测带来一定的影响,通过对不同用户进行划分并聚类可以提高模型对于不同情况下的识别能力,进而使预测更具有合理性并且适用范围更广。

在需求侧动态识别的应用过程中,数据融合程度影响到该模型的有效性。单一方面的数据不能很好地完成精确识别工作,而多种传感器采集的数据、以往用电量以及地理位置的信息集成可以形成全方位的需求表示形式。智慧供热根据各个时间段的数据进行对比分析以及异常检测,可以发现短时间内负荷突然上升、某处热量需求改变或者某个区域的需求发生变化等情况,从而有利于供用双方协调一致。当越来越多的新鲜数据出现之后,该需求侧识别的方法就可以做到自我学习进而改善自身性能,在遇到寒冬、恶劣气候或者其他意外情况的时候,该供热系统更加稳定灵活,

这就为其进一步改进控制方案打下了良好的基础。

3 供给侧热源与管网调控的智能优化路径

在目前城市集中供暖系统设计中,热网设计是至关重要的内容,但同时由于热网设计也受到很多限制因素的影响,如地质情况、地理环境以及气温等,从而造成能源浪费现象的发生。虽然不能够完全消除这种浪费现象,但是可以通过采用热网节能技术来缓解这些不利影响。供给侧在智慧供热体系中起着决定作用,能够根据需求变化及时调整热源及管网协调工作。热源供给受到机组负荷率、燃料性质、设备启停费用等多种因素影响,传统的盲目方法不能够达到要求的效果。随着信息化的发展,在热源端可利用能效评估方法、动态出力调整曲线及机组灵活性研究来进行不同机组之间的梯级调度^[3]。通过对锅炉效率进行在线检测,以及对换热站换热能力和回水温差进行监控,就可以建立一个完整的热源—换热站反馈回路,从而使供热更接近实际情况所需。基于预测负荷的热源调节方式可以提前做好最优出力安排,在保证可靠性的基础上节约不必要的开支。

管网侧的优化路径重点体现在水力平衡与热量输配效率的提升上。城市管网呈现结构复杂、阻力差异大、供回水温度梯度明显等特征,在高负荷运行条件下更容易出现局部压差失衡与热量传递滞后。智慧供热系统引入管网仿真模型与数字孪生技术,使管网运行状态能够被实时映射,通过对流量、压力和温度分布的模拟分析,为阀门调节与泵站运行提供决策依据。动态调节二网循环泵频率、优化主干管流向和调整分支节点阀门开度,可显著改善水力分布不均的状况,使热量更高效地传输至需求集中的区域。结合自适应调控算法,还可在天气突变或局部负荷骤升时实现快速响应。

在供给侧整体优化中,热源与管网的协同调度是提升系统运行质量的重要环节。智慧控制平台通过整合热源运行数据、管网状态信息与需求侧预测结果,构建跨层级的协调控制模型,使热量生产与输配过程形成完整链路。优化路径不仅依赖单点调节能力,还需要实现全局调控,如在负荷高峰期通过适度降低部分区域温度偏差容忍度来增强系统稳定性,或在热量富余时调整管网循环模式以减少热损失。随着智能化调控策略的不断深入,供给侧能够在复杂工况中保持更高的调节灵活性,为供需匹配的实现提供坚实的技术基础。

4 供需匹配的综合优化模型与协调机制构建

供需匹配的综合优化模型以系统整体协调为核心,通过将热源、管网和用户侧的动态特征纳入统一框架,实现供暖过程中的多层次耦合调控。在智慧供热环境

中,不同环节的数据结构存在差异,时间尺度不一致,必须通过统一的数据接口和模型结构实现信息共享。将负荷预测结果、热源机组运行状态以及管网水力参数作为模型输入,可形成覆盖生产端、输配端与消费端的多变量优化体系^[4]。模型对供热过程中的非线性特征进行表达,包括热量传递的滞后性、水力分布的耦合性及需求变化的随机性,从而为后续的优化算法提供准确的结构基础。通过构建可量化的目标函数,如能耗最小化、供热偏差最小化和水力稳定性最大化,可为系统运行提供明确的数学约束。

对于所用优化方法而言,供需匹配模型应具有及时性和全面性。在智慧供热过程中,不同位置处需求变动速度不同,需要对局部进行及时调整的同时又要考虑整体供热均衡问题,因此可以使用混合优化的方法,即利用启发式算法的全局搜索能力和梯度优化算法的快速收敛性来使得模型能在较短时间内得到最优解。另外,将数字孪生管网仿真实验的结果与优化模型相结合,在每次优化时都对其所提建议是否可行进行验证,从而防止由于模型误差导致的问题(温度过高或过低以及压差过大等)发生,提高优化效果的稳定性。

供需协调机制重视各部分之间协同工作,把模型得到的结果转换成具体措施。智慧调节平台可以根据优化结果自动下发控制命令,如热源出力变化、换热站阀门开度以及管网循环水泵转速等,使供热系统能够根据实际需要作出相应改变。系统内部有反馈回路对调控后温度场、流量及回水温差是否符合预期进行检测,如果超出范围,则再次进行干预以保证供需协调稳定。

5 智慧供热供需匹配优化的运行成效与实践启示

智慧供热条件下的供需匹配优化在实际应用中取得良好效果,热源出力更加符合实际需要,锅炉启停次数降低。利用负荷预测及调节方法相结合的方式,热源效率不断提高,过多供热导致资源浪费显著下降。从运行结果来看,在恶劣天气情况下,优化后系统能够迅速给出应对方案,在对热源逐级分配的同时调整各个换热站参数,使温差处于可接受范围内^[5]。从而提高了整个供热系统的可靠性和安全性,在各种复杂工况下实现不间断供暖。由于智慧供热平台对信息汇集能力较强,使得运行过程更加公开透明,调节能效也能更快被发现并改进。

管网输配环节的运行表现在优化机制推动下更加平稳。动态水力平衡策略使各区域流量与压差趋于稳

定,局部高压点与低压区段的显现频率大幅下降。数字孪生模型与调控算法的协同作用,使管网运行参数能够被准确预测,从而在高负荷区段提前实施调节。管网热损失因循环路径优化与流向调整而减少,供回水温度梯度更符合负荷需求,使热量分配更加精准。多区域协同补偿机制在局部需求突增时发挥作用,使热量能够跨区流动,从而缓解局部超负荷问题。管网的整体压差水平在此基础上保持平稳,使系统在峰值负荷阶段依旧具备较强的调节能力。

从运行实践中可以看到,智慧供热的供需匹配优化不仅改善了能源利用效率,也推动了管理方式与调控模式的转变。调度中心在智能平台支持下,能够通过多维监测数据进行决策,摆脱传统依赖经验判断的方式,使运行管理更加科学化。负荷预测、实时监控、模型优化及自动执行相结合,使供热系统形成以数据为依据的联动机制,降低人为因素引起的不确定因素。用户对供热质量的感受更平稳,温度变化控制在合理范围内,供热服务质量提高。随着智慧供热的应用日益广泛,对供需关系优化的结果逐步加强,在能源短缺、大负荷以及恶劣天气等多重不利条件下仍能良好运行,为今后的发展提供了一条可借鉴的道路。

6 结束语

智慧供热在城市供暖系统中的应用,使供需匹配由原来的静态调整发展到以数据为基础的动态优化。供给侧协同调控、管网侧精确输送、需求侧及时获取构成一个整体,使整个系统在各种情况下都能保证正常运行并且高效。实践证明,智慧供热大大提高了能源利用率和供热质量,为城市供暖方式改革提供了有力支撑,并为技术的进一步发展打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 周璐,房帅.智慧供热技术在城市供热管理中的应用与挑战[J].内蒙古科技与经济,2025(18):147-151.
- [2] 高婷婷.智慧供热系统优化策略及能效提升研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(09):50-52.
- [3] 刘喆.城市集中供暖的节能技术应用途径分析[J].产业创新研究,2025(08):114-116.
- [4] 王毅.基于分布式智慧供热数据信息中央控制系统的设计与实现[J].信息记录材料,2025,26(04):187-190,193.
- [5] 乐增孟,潘清华,王勇,等.智慧供热大数据监测平台的研究及应用[J].自动化应用,2024,65(05):38-40.

机电设备安装给排水系统中的作用分析

陈 浩

(秦皇岛排水有限责任公司, 河北 秦皇岛 066100)

摘 要 随着城市建设规模日益扩大与基础设施不断完善, 机电设备安装施工在给排水系统中愈发重要, 其直接决定水能否得到顺利输送以及系统运行的稳定性。本文以实际案例为研究背景, 首先明确机电设备在给排水系统中的安装思路, 进而从水质提升、保障供水稳定性、降低能耗和提高系统运行效率入手, 探讨其在给排水系统中的作用; 其次从设备选型与系统设计、设备运行维护、政策法规、专业技术人才培养四个层面提出针对性保障策略, 旨在对更好地发挥机电设备安装的作用有所裨益, 进而推动城市给排水系统建设向高质量、智能化、可持续方向升级。

关键词 机电设备安装; 给排水系统; 设备选型

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.029

0 引言

给排水系统在现代城市发展中起到至关重要的作用, 与群众的生活息息相关。在给排水系统中, 机电设备直接关系到水能否顺利输送和排放。对供水和排水进行合理管理, 可以减少对水资源的浪费。随着智能技术的迅速发展, 在机电设备安装中应用自动化控制技术, 可以有效改善水质, 提高供水的稳定性, 减少对电能的消耗, 保证系统运行效率得到提升。

1 案例背景

以某中等规模城市为例, 该城市人口约为 80 万人, 随着城市发展速度越来越快, 各行各业的需求不断增长, 传统给排水系统逐渐跟不上当前的发展速度, 并呈现出许多问题。一是在早晚用水高峰期, 水压忽高忽低, 有些区域的水量很小, 甚至出现停水情况。二是原有的污水厂和排水设备比较陈旧, 对污水的处理速度较慢, 处理效果不佳, 部分污水的水质在尚未达标的情况下就得到排放。三是系统每天耗费大量的能源, 运行成本较高。为了解决前面提到的问题, 就要对给排水系统进行改造, 完善机电设备, 合理安装, 同时引进先进的智能化控制技术, 对给排水系统进行全面优化, 提高系统的运行效率和稳定性, 降低能源浪费。

2 机电设备安装给排水系统中的配置思路

2.1 设置智能化过滤装置与消毒设备

其一, 某自来水厂引进先进的机电设备, 搭配设置自动化控制系统, 无需人工持续操作和监控。由于

原水中夹杂许多细小的泥沙和杂质, 针对这一问题, 该厂专门引进多级过滤设备, 先将大颗粒杂质进行过滤, 再将细小杂质进行过滤, 逐步将水中的杂质和颗粒物去除, 有效改善水质^[1]。在给水管网中, 加装自动化加滤设备, 该设备可结合细菌含量和水质优劣, 对加氯量进行自动化调整, 既能将细菌杀死, 又可避免出现药剂过量的情况, 避免对水质造成影响。其二, 水厂安装专业的在线水质监测传感器, 对水的浑浊度、余氯量进行不间断监测, 将数据自动发送至控制系统, 无需工作人员进行手动调节, 系统可根据数据完成自动化控制和调整。当进来的水突然变得浑浊, 水质下降, 系统能够立刻做出反应, 进一步提高过滤强度, 对消毒剂投入量进行自动化调整, 确保最终流出的水质达标。通过这种方式可以将传感器、电控、阀门和过滤设备进行组合利用, 提高设备的自动化程度与水质处理效率。其三, 水厂通过对原有污水处理系统进行改造, 技术人员使用一体化污水处理设备, 搭配使用高级净化工艺, 如膜过滤技术和活性炭吸附技术, 将废水中的污染物去除, 保证处理后的水质符合再次使用的标准, 可将处理后的水用于绿化灌溉、工业冷却等。其四, 在重要位置安装水质在线监测传感器, 对水中有机物含量、pH 值和水的浑浊度进行实时化监控, 并利用智能化监控平台对数据进行分析, 一旦发现异常现象, 系统会提前发出预警, 若水质突然变差, 系统能够自动进行调整, 或告诉工作人员问题所在, 保证其能够迅速处理。

作者简介: 陈浩(1983-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 机电工程。

2.2 优化设备配置

水厂对机电设备进行合理配置,保证整个系统运行更加稳定,水压和水量不再出现忽高忽低的情况。技术人员安装变频调速水泵,在用水高峰阶段,水泵的运转速度会变快;在用水低谷阶段,水泵的运转速度会变慢。水泵会根据时间段对水量进行合理分配。同时,在输水管道的重要位置安装自动调节的电动调节阀,对水管内的压力进行精准控制,减少水压波动,避免出现水锤,延长管道的使用寿命。在整个供水系统中,水厂引入自动化控制系统,对水泵的运转状态、水管内水压、水流量进行实时化监测。系统会对收集到的数据进行自动化分析,当一台设备运行时,其它设备也可得到自动化调节。一旦系统出现异常情况,能够在第一时间提醒工作人员,并自行调整参数,保证系统稳定运行,满足居民和企业的用水需求^[2]。

2.3 结合多种策略

水厂在给排水系统中,通过多种策略保证系统运行速度更快,运行状态更加稳定,节省更多电能,降低运行成本。一是选择可以节省更多电能的设备,如变频泵和智能控制阀门,在保证水可以满足正常需求的前提下,减少对电能的浪费。这些设备能够结合用水量和用水情况的变化,对运行参数进行自动化调整,不管在何种情况下,均能维持理想的工作状态。二是对系统进行合理设计与布局,保证水泵和阀门等机电设备在运行时无需耗费更多功率,提高其工作效率。例如:对管道的走向和粗细程度进行合理安排;科学选择抽水和送水的站点位置,通过这种方式既可以减少水流的能量消耗,又可以减少能量在传递时所面临的损耗。利用水自身的重力使其流动,或通过地形的高低差,使水流不再依靠水泵等机械动力加以驱动,实现自然流动和传输,减少水泵的运行频率和电能消耗。采用先进的智能控制技术与监测设备,随时对设备的运行情况进行监控,并将监测到的数据反馈给控制系统,系统会根据数据对自身运行方式进行自动化调整。利用智能化管理系统中的大数据技术和智能算法对设备调度方案进行优化,制定合理的设备维护计划,减少不必要的能源消耗,保证设备实现高效、稳定运行^[3]。

3 机电设备对给排水系统的作用

3.1 改善水质

水厂采用先进的机电设备,并对设备进行合理布局,调节设备的运行参数,可以保证给排水系统中的水

质更加干净,满足居民的用水需求,保障其自身健康;同时对水质进行更加高效的处理,确保排出的水至符合要求,不会对自然环境造成污染。在先进机电设备的支持下,城市也可以实现节约用水,确保水得到有效的循环利用,促进城市实现可持续发展,更加方便居民的生活,提高居民的生活质量^[4]。

3.2 增加供水稳定性

通过对上述策略进行综合利用,能够有效提升给排水系统的能源利用效率,减少运营成本,实现可持续发展的目标。采用先进的技术手段可以保证整个供水系统运行更加稳定,避免水压、水量和水质波动,并减少突发状况对供水造成的不利影响,避免出现大面积停水等问题,保证供水的连续性、水质安全性与系统可靠性的全面提升。

3.3 降低能耗与提升系统运行效率

通过采用多种策略,可以保证给排水系统的电能消耗更少,提高系统运行效率,减少系统出现故障的概率,降低维护成本,保证水资源得到更加持久的利用,满足城市环保和绿色发展的需求。

4 机电设备配置与管理保障

4.1 设备选型与系统设计

对于整个给排水系统而言,设备的类型与系统的设计方案将直接关系到系统能否正常、高效和节能运行。在选择设备时,技术人员要考虑到以下几方面因素:一是系统需要的流量、能承受的水压、用途。二是设备运行的稳定性、设备故障率高低、设备能否达到使用要求。三是设备能否适应水厂和泵站的环境,能否承受污水所带来的腐蚀和外界温度的变化。选择设备时,还要考虑到两方面的要求:需保证设备充分满足系统运行的主要需求,能够承受足够的流量和水压,确保水能够顺利输送,满足使用需求;设备要充分耐用,可充分抵抗来自污水的侵蚀,减少设备的更换和维修成本。除了满足上述要求之外,选择设备时,还要重点考虑其能效水平。拥有良好节能效果的设备不仅可以减少用电量,降低系统运行成本,还能减少对能源的消耗以及环境污染,符合可持续发展战略的要求^[5]。

对系统进行设计时,要保证设计科学合理,确保所有设备互相配合与协同,确保系统顺利运行。同时,要对整个系统的布局进行合理规划,重点关注两方面内容:其一,避免将管道铺设过长,或者布局不合理。其二,避免能耗过大,影响水质。在给排水系统设计中,引入先进的自动化控制技术,对所有设备的运行

状态进行实时化监控,并结合具体情况对设备参数展开自动化调节,既能保证设备以更加高效的方式运行,又能提高设备运行的稳定性,减少出现故障的概率。对给排水系统进行设计时,不仅要考虑到当前的用水与排水需求,还要考虑到未来发展。例如:为了进一步扩大系统的使用规模,要提前留出相应的空间、设备与控制接口,一旦需求发生变化,就可以对系统进行顺利升级,无需进行大规模改造。

4.2 机电设备运行维护

工作人员要高度重视对机电设备的运行和维护,一旦水泵和阀门等设备并未得到有效的保养与维护,就可能会降低整个系统运行的稳定性和节能效果^[6]。因此,工作人员要定期对设备进行检查,按时保养,一旦发现问题或安全隐患,就要提前进行维护,避免设备突然发生故障,无法正常运行。工作人员要为每一台设备建立维护档案,对设备的启动时间、维护时间、保养时间进行记录,一旦后续出现问题,就能及时查出原因,或进一步改进维护保养方法。通过引进先进的监控技术,可以持续对设备的运行参数进行监测,了解水流的变化、水压情况和温度情况,确保设备始终处于最合适的状态。涉及主水泵和主控制器等关键设备时,要开启备用措施,一旦某一台设备出现故障,就要及时启动备用设备,避免出现停水情况。由于每一种设备有不同的操作方法和保养步骤,维护人员要严格按照相应的规范进行操作,延长设备的使用寿命。

在日常工作中,工作人员要提前备好常用和重要的零部件,如水泵零件和阀门等。一旦设备出现故障,就可以及时更换零部件,无需拖很久,不影响正常供水。通过制定完善的维护管理体系,采用先进的信息技术展开记录和管理,可以保证整个系统运行速度更快、更加稳定,减少系统出现故障的概率。

4.3 制定完善的政策法规

为保证机电设备得到合理的选择与安装,提高其运行水平,国家和相关部门应出台相应的规定、标准与法律。一是制定统一的标准,确定设备选型要求、设备安装与施工要求、设备保养与运行要求。从源头上予以把关,有效保证设备质量,保证系统运行更加安全可靠。二是制定完善的行业监管机制,由专门的人员进行检查,对设备采购、施工过程和后期保养等环节进行全面监督,避免影响系统的运行效果。三是政府要结合环保和节能等方面的要求,制定相应的激励政策,如鼓励企业积极引进先进的节能设备,为其提供相应的奖励,加大扶持力度,确保给排水系统更加节能和环保。

4.4 加强专业培训

为了有效保障给排水系统运行得到优化,提高系统运行的稳定性,降低其运行成本,要加强对专业人员的培训。由于机电设备的种类日益增多,更新速度很快,大多数操作以智能化和自动化为主,一旦工作人员不了解设备的使用方法,那么很难发挥设备的作用。因此,要保证操作人员既了解技术应用,又要学会开展设备管理。定期组织人员参与到学习和训练之中,举办多种技术交流活动,使工作人员了解设备的操作方法,学会查找设备故障,熟练使用智能化系统开展控制,保障操作安全。通过系统的学习和实践,操作人员的实际操作能力得到提升,拥有更加扎实的专业知识和更高的管理水平,既能对操作流程进行规范,又能减少误操作情况,还可及时发现安全隐患,对故障进行妥善处理,最终提高给排水系统运行效率。

5 结束语

在给排水系统中,以水泵和阀门为代表的机电设备在系统中起到至关重要的作用。合理使用设备不仅可以提高水质与供水的稳定性,还能减少电能浪费,提高系统运行效率。科学选择设备,对系统进行合理设计与布局,可以减少对水资源的浪费,降低企业的运营成本。通过引进先进的自动化和智能管理技术,可以对水质、水压和流量等参数进行实时化监控,保证水资源得到合理利用。本文的研究旨在推动机电设备得到更加合理的搭配与利用,将多种系统进行整合,提高使用效率。同时,相关部门要制定完善的政策,企业要加强对工作人员的培训,保证设备得到更加合理的利用,推动给排水系统迈向现代化。

参考文献:

- [1] 梁耀绅.给排水机电设备节能运行参数调控优化研究[J].粘接,2026,53(02):522-525.
- [2] 王国胜.高层住宅给排水机电设备安装施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(14):37-39.
- [3] 兰荣盛,徐昊,时广伟,等.机电安装工程给排水施工关键工序控制与管理策略[J].中国设备工程,2023(21):202-204.
- [4] 吕伟坚.机电安装工程给排水施工关键工序管控措施[J].城市建设理论研究(电子版),2023(07):26-28.
- [5] 胥兵周.机电工程中的给排水设计与施工技术分析[J].集成电路应用,2023,40(01):280-282.
- [6] 周永彪.城市给排水泵站机电安装施工质量控制策略[J].湖北农机化,2021(14):120-121.

老旧建筑机电系统安全风险评估与优化研究

杨雷刚, 樊江明

(易腾工程技术(西安)有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要 本文围绕老旧建筑机电系统的安全风险评估与优化展开研究。首先, 分析了城市化进程中老旧建筑机电系统的现状, 指出其存在“三重三轻”问题, 且一线城市核心区老化问题更为突出; 其次, 阐述了机电系统安全风险对建筑运维的影响, 通过具体案例揭示了风险的隐蔽性、系统性和突发性; 再次, 识别了老旧建筑机电系统的典型构成、老化特征、风险因子, 并介绍了风险数据采集方法。在此基础上, 构建了包含安全性、可靠性、经济性等指标的评估体系, 采用AHP-熵权法确定指标权重, 结合风险等级划分与模糊综合评价进行风险评估; 最后, 从优化原则、技术层面和管理层面提出了机电系统的优化策略, 以期为老旧建筑机电系统的改造提供参考。

关键词 老旧建筑; 机电系统; 安全风险评估; 风险识别

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.030

0 引言

随着城市建成区的持续扩张与存量建筑的自然老化, 服役年限超20年的既有建筑占比逐年攀升。此类建筑的机电系统(含供配电、给排水、暖通空调、消防等核心子系统)普遍进入性能衰退周期。受限于早期设计标准偏低、长期运维管理缺位等历史因素, 系统设备存在严重的物理损耗与效能衰减, 部分关键部件的可靠性已无法满足现行安全规范要求。多系统耦合失效引发的连锁风险尤为突出, 不仅暴露了老旧建筑风险的隐蔽性与复杂性, 更对城市公共安全构成潜在威胁。因此, 亟须构建一套精准化的风险评估体系, 通过多维度指标量化识别关键风险因子, 实现存量建筑的安全韧性提升与城市可持续发展目标的协同推进。

1 城市化进程中老旧建筑机电系统及安全风险

1.1 城市化进程中老旧建筑机电系统现状

在快速推进的城市化进程中, 城市建筑存量持续扩容, 其中建成时间超过20年的老旧建筑占比逐年攀升。这类建筑的机电系统普遍进入老化衰退期。对老旧建筑机电系统进行分析, 多数建筑在投用后未执行系统性维护计划, 设备有超期服役现象; 早期设计使供配电系统变压器负载率低于正常值, 暖通空调系统COP值(性能系数)低于现行标准; 各子系统改造缺乏协同性。例如: 一些一线城市核心区老旧建筑机电系统老化问题也尤为突出。部分20世纪80年代建成的住宅建筑中, 供配电系统存在电缆绝缘层老化问题, 给排水管道因腐蚀存在漏损现象。

1.2 安全风险对建筑运维的影响

机电系统安全风险已成为威胁建筑运维的关键因素。近年来, 全国建筑安全事故统计显示, 直接或间接源于机电系统故障原因的事故中, 电气火灾占比较大^[1]。例如: 某建成于1995年的办公楼发生火灾。事后调查显示, 事故根源为: (1) 供配电系统母线槽绝缘老化导致短路; (2) 消防系统因管道锈蚀堵塞, 喷淋装置失效; (3) 暖通空调系统风管积尘加速火势蔓延。该事故暴露了老旧建筑多系统协同失效的连锁风险。老旧建筑机电系统风险的隐蔽性、系统性和突发性, 凸显了建立科学评估体系的迫切性。

2 老旧建筑机电系统风险识别

2.1 典型机电系统构成与老化特征

老旧建筑机电系统主要由供配电系统、给排水系统、暖通空调系统和消防系统四大核心部分组成, 各系统在长期使用中呈现出不同的老化特征。

1. 供配电系统由变压器、高低压配电柜、电缆线路等设备构成。随着使用时间的增长, 变压器的绝缘性能逐渐下降, 易出现过热现象; 电缆线路的绝缘层会因老化而开裂, 增加短路风险; 配电柜内的元器件也会因氧化、磨损等问题导致接触不良。

2. 给排水系统包含给水泵、管道、阀门、水箱等设施。金属管道易受腐蚀, 内壁会产生水垢, 影响通水能力; 阀门密封性能下降, 容易出现漏水; 水箱若维护不当, 会滋生细菌, 影响水质安全。

3. 暖通空调系统由冷水机组、风机盘管、风管、

作者简介: 杨雷刚(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电智能控制。

空调箱等组成。冷水机组的换热器会因结垢而降低换热效率；风管内部易积尘，不仅影响空气质量，还会增加能耗；风机盘管的电机老化会导致运行噪声增大，制冷制热效果减弱。

4. 消防系统包括喷淋泵、报警装置、消火栓、烟感探测器等。喷淋管道可能因锈蚀而堵塞，导致喷头无法正常出水；报警装置的灵敏度会随时间下降，可能出现误报或漏报；消火栓的阀门可能因长期未使用而锈死，影响应急使用。

2.2 风险因子分类

老旧建筑机电系统的风险因子可从设备层、运行层和管理层三个层面进行分类。设备层主要涉及设备自身的物理状态变化。设备在长期使用过程中，会出现腐蚀、绝缘老化、机械部件磨损等问题。例如：金属管道的腐蚀会降低其结构强度，电气设备的绝缘老化会增加触电和短路风险。运行层侧重于系统运行过程中的性能变化，包括能效衰减、控制失灵、协同性差等情况。随着设备老化，系统的能耗会逐渐上升，运行效率降低；控制装置可能出现故障，导致系统无法按照设定参数运行；各子系统之间的联动可能出现问题，影响整体功能发挥。管理层与系统的维护和管理相关，常见的风险因子有维护缺失、档案不全、人员操作不当等。若缺乏定期的维护保养，设备的老化速度就会加快；档案资料不全，会给系统的检修和改造带来困难；运维人员操作不规范，可能引发设备故障或安全事故^[2]。

2.3 风险数据采集方法

为准确识别老旧建筑机电系统的风险，需要采用科学合理的数据采集方法，其中无损检测技术应用广泛。（1）红外热成像技术：通过检测物体表面的温度分布，能够快速发现电气设备的过热部位、管道的保温缺陷等问题。该技术无需接触设备，可在不影响系统运行的情况下进行检测，适用于供配电系统、暖通空调系统等的风险排查；（2）超声波探伤技术：利用超声波在材料中的传播特性，可检测管道、容器等设备的内部缺陷，如裂缝、腐蚀减薄等。对于给排水系统的管道和消防系统的压力容器，超声波探伤能够有效评估其结构完整性。此外，还可通过现场勘查、设备运行记录分析、专家访谈等方式收集风险数据，结合无损检测技术的结果，全面掌握机电系统的风险状况。

3 安全风险评估模型构建

3.1 评估指标体系设计

构建科学的评估指标体系是进行安全风险评估的基础，可从一级指标和二级指标两个层级展开。一级

指标包括安全性、可靠性和经济性。安全性指标主要衡量系统对人员和建筑结构的安全保障能力；可靠性指标反映系统在规定条件下正常运行的能力；经济性指标则考虑系统的运行成本、维护费用等经济因素。二级指标是一级指标的细化。安全性指标可细化为故障率、事故发生率等；可靠性指标包括平均无故障运行时间、系统恢复能力等；经济性指标涵盖能耗指数、维修成本、设备更新费用等。通过明确各级指标的含义和计算方法，能够为风险评估提供具体的量化依据。

3.2 基于 AHP-熵权法的组合权重计算

为提高评估指标权重确定的科学性，可采用 AHP（层次分析法）与熵权法相结合的组合权重计算方法。AHP 法通过建立层次结构模型，邀请专家对指标的重要性进行两两比较，构建判断矩阵，计算出各指标的主观权重。该方法能够充分体现专家的经验 and 判断，但可能存在一定的主观性。熵权法根据指标数据的离散程度确定客观权重，数据越离散，指标的信息量越大，权重越高。该方法基于实际数据计算，客观性较强，但可能忽视指标的内在重要性。将两种方法计算得到的权重进行组合，既考虑了专家的主观判断，又结合了数据的客观特征，使权重分配更加合理。

3.3 风险等级划分与模糊综合评价

风险等级划分和模糊综合评价是对风险进行量化和定性描述的重要环节。风险矩阵通过分析风险发生的可能性和后果的严重性，构建风险矩阵。将可能性分为极高、高、中、低、极低五个等级，将严重性分为严重、较严重、一般、较轻、轻微五个等级，两者的组合可确定风险等级，如极高风险、高风险、中风险、低风险等。由于风险评估中存在许多模糊因素，采用模糊数学的方法对风险进行综合评价^[3]。首先确定评价因素集和评价等级集，然后通过隶属度函数计算各因素对不同评价等级的隶属度，结合指标权重进行模糊合成，最终得到系统的综合风险评价结果。通过风险等级划分和模糊综合评价，能够清晰地呈现老旧建筑机电系统的风险水平，为后续的优化决策提供依据。

4 机电系统优化策略

4.1 优化原则

老旧建筑机电系统的优化需遵循安全性优先与经济性平衡的原则。安全性作为不可逾越的底线，需根据系统的功能重要性实施分级保障。对于直接关联生命安全的消防系统和供配电系统，应通过结构强化和功能冗余设计消除潜在隐患，确保在极端情况下仍能维持基本防护能力；对于影响居住或使用舒适度的给

排水、暖通空调系统,则以控制故障影响范围为核心,避免局部问题扩散为系统性事故。经济性考量应突破短期投入的局限,转向全生命周期成本核算。需综合评估设备更换、系统改造与长期能耗、维护成本的关联,结合建筑剩余使用年限制定适配方案,既避免过度改造造成的资源浪费,也防止因投入不足导致短期内重复维修,通过科学测算实现成本与效益的动态平衡,确保优化方案的可持续性。

4.2 技术层面优化

技术层面的优化主要包括设备更新和系统重构。对于性能严重衰减且安全风险较高的设备,应优先替换为能效更高的新型产品,从根本上提升系统运行的稳定性;对于尚能维持基本功能但效率下降的设备,可通过核心部件翻新延长使用寿命,在控制成本的同时延缓老化进程。同时,引入智能监测元件,实时捕捉设备运行参数,实现异常情况的早期预警,减少突发故障的发生概率。系统重构要结合建筑自身特点与能源供应条件进行统筹设计。例如:对于存在多回路交叉供电的老旧建筑,可通过负荷重新分配与智能断路器的加装,构建具备动态调整能力的供配电网,提升供电可靠性;在空调系统改造中,采用变频技术与分区控制相结合的方式,根据不同区域的实际需求调节运行参数,降低无效能耗。此外,针对老旧建筑管线老化、布局混乱的问题,需进行系统性梳理与改造,采用耐腐蚀、寿命长的新型管材,并通过BIM技术对管线走向进行优化设计,减少施工对建筑结构的影响,同时为后续维护提供清晰的数据支持。对于消防系统,应升级为智能报警与联动控制模式,将烟感探测器、喷淋系统与消防泵组通过物联网技术互联互通,实现火情的快速定位与自动响应,最大限度缩短应急处置时间。整合分布式能源系统,如太阳能光伏发电、地源热泵等,减少对传统能源的依赖,提升能源利用效率;优化管网布局与设备配置,消除各子系统间的协同障碍,增强整体运行的协调性。通过技术整合,使机电系统在满足功能需求的同时,更好地适应现代建筑的节能与环保要求,实现性能全面提升^[4]。

4.3 管理层面优化

借助BIM技术构建可视化运维平台,将建筑设计资料、设备参数、运行数据等信息整合到三维模型中,形成全面的管理数据库。通过三维模型可直观呈现系统布局与设备状态,便于快速定位问题和制定维护计划,大幅提升管理的效率与精准度。平台还能实现数据的实时更新与共享,为决策提供及时有效的支持。

建立完善的预防性维护制度,根据不同系统的运行特性制定个性化维护方案。定期开展设备检查、清洁与保养,及时处理潜在故障,避免小问题演变成大事故;加强运维人员的专业培训,提升其操作技能与应急处理能力,确保在突发情况发生时能迅速响应、有效处置。通过规范化管理,降低人为因素导致的故障风险,延长设备使用寿命,保障系统长期稳定运行^[5-6]。

5 结束语

本文针对老旧建筑机电系统的安全风险评估与优化展开研究,通过对风险的识别、评估模型的构建和优化策略的探讨,取得了以下成果:明确了老旧建筑机电系统的典型风险因子,包括设备层、运行层和管理层的各类风险;构建了包含安全性、可靠性、经济性等指标的评估体系,并采用AHP-熵权法和模糊综合评价等方法进行风险评估;提出了技术层面和管理层面的优化策略,为老旧建筑机电系统的改造提供了理论和技术支持。未来的研究可进一步探索数字孪生技术在老旧建筑机电系统风险预测中的应用。数字孪生技术能够构建与实体系统完全一致的虚拟模型,通过实时采集实体系统的运行数据,在虚拟模型中模拟系统的运行状态和故障演化过程,实现对风险的提前预测和预警。此外,还可结合人工智能、大数据等技术,提高风险评估的准确性和优化策略的科学性,推动老旧建筑机电系统的智能化运维和可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈淑伟. 建设单位视角下老旧小区综合整治项目全过程造价管理研究[J]. 工程抗震与加固改造,2023,45(04):183.
- [2] 王轶宏. 老旧建筑健康智能监测评估体系与安全性数值预测研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [3] 朱正言. 建筑结构动态监测技术研究及其若干应用[D]. 成都:四川大学,2022.
- [4] 高敬. 老旧建筑机电系统改造安装技术要点与应用研究//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛:绿色智造·采购革新专题(第二册)[C].《中国招标》期刊有限公司,2025.
- [5] 苗智慧. 基于BIM的建筑设备可视化运维管理系统研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2022,14(01):119-125.
- [6] 翟越,雷尚学,王轶宏,等. 基于数字孪生的老旧建筑结构安全性定量预测方法[J]. 中国安全科学学报,2024,34(09):69-77.

建筑外墙保温系统施工技术及质量通病防治

周志东

(安徽致畅建设有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 建筑外墙保温系统施工质量直接关系到建筑节能效果与结构安全性。当前工程实践中仍存在保温层空鼓脱落、开裂、保温效果不达标等质量通病,影响系统使用寿命与使用性能。本文结合工程施工实际,对建筑外墙保温系统核心施工技术进行梳理,分析保温材料选型、基层处理、保温层施工等关键环节要点,剖析各类质量通病的形成原因,从施工前期准备、过程控制、节点工艺优化、后期维护四个维度提出针对性防治策略,以期为建筑外墙保温系统施工质量提升提供实践参考,保障保温系统长期稳定发挥节能与防护作用。

关键词 建筑外墙保温;保温材料;基层处理;保温层;绿色节能

中图分类号: TU761.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.031

0 引言

在“双碳”战略深入推进、五部门联合出台建筑保温材料行业新规的背景下,建筑节能成为绿色建筑发展的核心抓手。外墙保温系统作为建筑节能的关键环节,其施工质量直接关系到建筑能效提升、结构安全及居住体验。当前工程实践中,保温层空鼓脱落、开裂等质量通病仍屡有发生,不仅影响系统使用寿命,更埋下安全隐患。结合最新行业规范要求与工程事故案例,梳理外墙保温核心施工技术,剖析质量通病成因,探索针对性防治策略,对推动保温行业提质升级、保障建筑绿色安全长效运行具有重要的现实意义与实践价值。

1 建筑外墙保温系统核心施工技术

1.1 保温材料选型与处理技术

保温材料科学选型与规范处理是保障保温效果的基础,需结合工程需求与材料特性合理把控。建筑外墙保温材料的选型需立足于工程实际场景,匹配对应节能标准,不同类型材料的适用场景存在明确差异:挤塑板导热系数低、抗压性强,适合屋面及外墙保温;岩棉板阻燃性能优异,多用于高层建筑外墙;聚氨酯保温效果突出,适配各类复杂墙体结构。材料进场阶段需执行严格检验流程,逐批次核查外观完整性、规格尺寸偏差,重点检测导热系数、密度、抗压强度等核心性能指标,确保所有指标符合设计文件要求,杜绝不合格材料流入施工环节。针对不同材料的固有特性,需采取针对性预处理措施:有机保温材料需提前通风干燥,控制含水率至合理范围。

1.2 基层处理与界面处理技术

基层与界面做到平整和牢固,这是防止保温层出现脱落或者空鼓现象的重要基础。墙体基层表面上的杂物、浮灰以及油污会直接干扰保温层实际的黏结效果,施工前需要彻底清理,使用高压水枪冲洗配合人工清扫,清除基层上面会干扰黏结效果的杂质。针对基层墙体上存在的裂缝、不平整位置,需要做精细修补:宽度超过 0.3 毫米的裂缝,采用聚合物砂浆来填充,表面再铺上耐碱网格布用来增强抗拉性能;不平整的地方借助水泥砂浆来找平,确保基层平整度偏差处在规范所允许的范围内,还要保证基层墙体强度能够达到施工要求,避免后续因为基层松动引发保温层脱落^[1]。界面处理这个环节需要涂刷专用界面剂,界面剂能够有效改善基层表面附着力,增强基层和保温层之间的黏结力。

1.3 保温层施工核心技术

对于保温层铺设和固定工艺,要严格遵照规范来执行,控制好施工过程中的偏差,这样才能确保保温层具有连续性和稳定状态。保温层铺设工作需按照材料种类来挑选合适的固定手段,黏贴式固定比较适合用在轻质保温板材上,需要做到粘贴面积不能低于规范内给出的数值,进行黏贴操作时采用点黏与满黏相结合的办法,防止出现黏结上的盲区;锚固式固定更多地被用在高楼建筑里,锚固钉的深度必须穿透保温层一直到达基层墙体,它们之间的间距要控制在 500 ~ 600 毫米范围内,以保证锚固足够牢靠,避免保温层发

作者简介:周志东(1979-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程。

生脱落,混合式固定则是把两种办法的优点结合起来,适合那些对保温层稳定性有更高要求的项目。保温层拼接缝隙的处理是保证保温效果的重点环节,进行拼接时需要采取错缝搭接的办法,缝隙宽度控制在2~3毫米,缝隙里面要填上专用的密封材料,防止通缝和空隙的出现,从而避免形成热桥进而影响保温效果。

2 建筑外墙保温系统常见质量通病及成因分析

2.1 保温层空鼓、脱落

保温层空鼓、脱落主要源于黏结不牢固、基层处理不到位及施工操作不规范,直接影响保温系统的结构稳定性。基层处理不到位是核心诱因之一,基层表面杂物、油污未彻底清理,会导致保温层与基层之间无法形成有效黏结,长期受力后易出现空鼓;界面处理不当,未按要求涂刷界面剂或界面剂涂刷不均匀,会大幅降低黏结力,无法支撑保温层的自身重量。施工操作不规范进一步加剧空鼓、脱落问题。例如:保温材料粘贴面积不足,未达到规范要求的黏结比例,或锚固钉间距过大、锚固深度不足,导致保温层固定不牢固;保温层拼接不规范,未采用错缝搭接,拼接处受力不均,长期受温度变化、风雨侵蚀影响,易出现空鼓甚至脱落。

2.2 保温层开裂

保温层开裂问题通常是因为材料本身特性、施工工艺、温度变化带来的收缩等方面共同作用,这会直接使保温系统的保温性能与结构性能受到负面影响。保温材料自身性能不足是一个关键因素,有的保温材料收缩比例偏高,在制作成型以及后续使用阶段容易形成收缩带来的内部力量,当这种内部力量超出材料本身能够承受的拉力极限,裂缝就会显现出来;还有部分保温材料抵抗开裂的能力不够强,难以应对温度起伏引发的形状改变,比较容易出现开裂情况。施工过程中操作不够规范会进一步加大开裂出现的可能性,墙体基层表面平整程度差异明显,造成保温层厚度分布不均匀,受力情况失去平衡,比较薄弱的区域就容易产生裂缝。最外面的防护层铺设的网格布如果操作不符合要求,如布与布之间重叠的宽度不够、铺设时没有铺平整,就没有办法很好地分散内部应力,也就起不到抵抗开裂的作用^[2]。

2.3 保温效果不达标

保温效果不达标核心在于材料质量、施工偏差还有节点处理不当,这使得保温系统难以满足预设节能设计需要。材料质量不达标是根本原因,部分保温材料没能达到国家相关标准,导热系数超过标准,保

温隔热性能不够,难以有效阻挡热量传递。部分材料密度、抗压强度不符合要求,使用过程中容易出现压缩变形,造成保温层厚度变薄,进一步导致保温效果下降。施工偏差会直接影响保温效果,保温层施工厚度没达到设计标准,无法形成有效的保温屏障。保温层拼接缝隙没有进行有效密封,出现通缝、空隙,形成热桥,造成热量大量流失。节点部位处理不当是关键诱因,门窗洞口、阴阳角、女儿墙等节点部位结构复杂,如果保温构造设计不合理,没有采取针对性保温措施,或者施工时没有严格按照规范操作,造成节点部位保温层不连续、存在缝隙,会成为热量流失的主要通道。

2.4 饰面层损坏

饰面层产生起砂、脱落、变色现象,根本原因在于施工工艺不到位、材料之间适配性不好以及后期维护缺位,它们对保温系统的外观品质和防护功能都会带来影响。施工工艺不到位是直接引发问题的关键因素,如防护层还没有完全干透就进行饰面层施工,饰面层与防护层之间容易形成水汽聚集层,造成饰面层出现起鼓、脱落的情况^[3];饰面层施工过程中没有把握好平整度和厚度控制,表面不够平整就容易产生应力集中的现象,长期受力后就会出现开裂、起砂的问题。涂料施工时稀释比例没有掌握好、喷涂不够均匀,面砖施工时黏结剂用量不够、勾缝不够严密,这些都会让饰面层损坏变得更严重。材料适配性不好同样是重要原因,饰面层材料与保温系统之间不匹配,两者热胀冷缩系数差别比较大,长期使用过程中容易发生剥离,黏结力不够导致饰面层脱落。部分饰面层材料耐候性、抗老化性能达不到要求,不能适应室外复杂多变的环境,容易出现变色、粉化的现象。

3 建筑外墙保温系统质量通病防治策略

3.1 强化施工前期准备管控

做好施工前期的材料、人员、方案管控,能从源头规避保温系统质量隐患,为施工质量提供基础保障。材料管控需建立严格的进场检验制度,明确检验标准、检验流程及责任人员,对每批次进场的保温材料、黏结剂、界面剂等进行全面检测,重点核查材料性能指标、规格尺寸,只有检测合格的材料才能投入使用。建立材料存储管理制度,根据材料特性合理存储,避免材料受潮、变质。人员管控需聚焦施工人员专业能力提升,针对保温施工核心工艺、操作规范、质量标准开展专项培训,培训后进行考核,考核合格后方可上岗作业,同时明确各岗位人员职责,杜绝违规操作。施工方案管控需结合工程实际情况,编制专项施工方案,明确

施工流程、各工序质量控制要点、施工进度安排及安全保障措施,方案编制后需经过审核论证,结合审核意见优化施工细节,针对不同施工场景、不同材料类型制定差异化施工措施,确保施工方案具有针对性和可操作性,为后续施工提供科学指导。

3.2 规范施工过程质量控制

强化施工各环节的过程控制,规范操作流程,及时纠正施工中的偏差,这是确保保温系统施工质量的核心所在。施工过程中需要严格依照专项施工方案来推进,重点把握好基层处理、保温层铺设、防护层及饰面层等关键工序环节。每道工序施工结束之后,要进行质量自我检查,自检通过之后报给监理单位进行验收,验收合格之后才能进入下一道工序,防止不合格工序遗留到后续环节。建立完整的施工巡检制度,安排专业巡检人员定期巡查施工现场,重点查看施工操作的规范性、材料使用的合理性以及施工偏差情况^[4]。及时发现空鼓、开裂、拼接不规范等初期隐患,明确整改责任人和整改时限,跟踪整改落实情况,确保隐患得到彻底消除。施工环境控制同样不可忽视,根据施工工艺的具体要求,合理选择施工时段,避免在温度过低、过高或湿度较大的环境下开展施工,施工过程中做好防雨、防晒、防冻等防护措施,针对不同天气条件适当调整施工工艺,确保施工质量不会受到环境因素的干扰,从而保障保温系统各工序施工质量达到标准。

3.3 优化节点部位施工工艺

对于容易出现质量问题的节点位置,采取有区别的防治手段,能够有效降低热桥和质量隐患,提高保温系统整体质量。节点位置保温构造设计要进一步优化,门窗洞口、阴阳角、女儿墙等容易产生热桥的地方,需要增加抗裂层和密封层,抗裂层使用耐碱网格布和聚合物砂浆复合施工,增强节点位置抗拉和抗裂能力;密封层采用专用密封胶,保证节点位置没有缝隙,避免雨水渗透和热量流失,节点位置保温层铺设和固定必须严格遵守规范,借助错缝搭接方式,增加保温层连续性,锚固钉间距适当缩小,确保保温层固定牢固,防止出现空鼓和脱落^[5]。节点位置防水处理需要加强,如门窗洞口与墙体衔接处、阴阳角等部位,必须涂刷防水涂层,面砖饰面节点要做好勾缝处理,使用防水勾缝材料,保证密封严密,避免雨水渗透导致保温层损坏。优化节点位置施工工艺,有针对性地解决节点位置容易出现的质量问题,减少热桥效应,提高保温系统的整体性和稳定性。

3.4 完善施工后期维护与管控

后期维护以及质量验收工作做得好,就能让保温系统的使用期限得到延长,并确保保温效果在长时间内保持稳定。质量验收应当建立完整的验收制度,采取分阶段验收的方法,基层处理、保温层、防护层、饰面层等每一道工序完成以后都要进行工序验收,全部施工完成后再进行竣工验收,验收过程中要严格按照设计标准和规范要求,对施工质量进行核查,不合格的地方严禁通过验收,必须责令限期整改,直到验收合格为止。后期维护需要制定专门的维护方案,明确维护周期、维护内容和维护责任,定期对保温系统做全面检查,重点检查饰面层是否完整、保温层有没有出现空鼓开裂、节点部位是否密封严密。对损坏部位及时进行修复,避免损坏范围进一步扩大,这有助于加强对使用单位的维护指导。明确日常使用需要注意的事项,禁止人为破坏保温系统,指导使用单位做好日常巡查,一旦发现问题及时联系专业人员处理。借助完善的后期维护和管控,能够确保保温系统长期稳定地发挥保温作用,并延长其使用年限。

4 结束语

建筑外墙保温系统施工技术的规范应用与质量通病防治,是实现建筑节能目标、保障建筑使用安全的重要举措,涉及材料、施工、维护等多个环节,需统筹把控、精准施策。合理选用保温材料、规范各工序施工操作,能从源头上减少质量隐患;针对性解决节点部位施工难题、强化过程巡检与后期维护,可有效规避常见质量通病,延长保温系统使用寿命。未来施工中,需结合工程实际场景优化施工工艺,强化全员质量意识,严格落实各项防治措施,持续提升建筑外墙保温系统施工质量,推动建筑节能事业高质量发展,为建筑工程的绿色、安全、长效运行提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李忠瑞,闫文彬.建筑外墙保温系统构造与施工技术研究[J].新城建科技,2025,34(02):46-48.
- [2] 李瑛.建筑外墙外保温系统节能施工技术探析[J].广东建材,2024,40(06):120-122.
- [3] 张冀男.建筑外墙外保温系统施工工艺和技术要点[J].居舍,2023(16):57-59,180.
- [4] 苏黎文.建筑工程外墙保温系统一体化施工技术质量问题分析[J].技术与市场,2022,29(09):119-121.
- [5] 湛孝华.建筑外墙外保温系统节能技术及施工工艺分析[J].房地产世界,2022(04):134-136.

锅炉高温配件焊接工艺选择及焊接质量控制

陈秋实

(济南奥能环保锅炉有限公司, 山东 济南 250300)

摘要 锅炉高温配件长期服役于400~1 000℃高温、高压及腐蚀性工况, 焊接接头易出现偏析、裂纹等缺陷, 严重影响设备运行安全性与使用寿命。为解决焊接工艺适配性不足、质量控制精度低等问题, 本文结合高温合金焊接特性, 优化工艺选择流程, 完善质量管控体系, 通过参数优化、过程管控及检测升级, 实现焊接缺陷率降低与接头性能提升。通过适配锅炉高温配件的焊接工艺方案与全流程质量控制规范, 旨在为同类配件焊接提供技术参考, 进而提升锅炉设备长期运行可靠性。

关键词 锅炉高温配件; 焊接工艺选择; 焊接质量控制; 焊缝缺陷

中图分类号: TK226.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.032

0 引言

锅炉作为能源、电力等行业的核心设备, 其高温配件承担热量传递与压力承载功能, 服役环境严苛, 对焊接质量要求极高。当前焊接实践中, 工艺选择缺乏针对性, 易出现焊接接头力学性能不达标、缺陷检出不及时等问题, 导致配件提前失效, 引发设备故障与安全患^[1]。本文针对上述问题, 结合高温焊接理论与工程实践, 优化工艺参数, 构建全流程质量控制体系, 通过试验验证与数据论证, 提出工艺选择与质量控制方案, 填补同类配件精准焊接技术空白, 保障锅炉设备安全稳定运行。

1 相关理论和相关技术发展

1.1 锅炉高温配件焊接核心理论

锅炉高温配件常用材料以奥氏体不锈钢(TP347H)、铁素体耐热钢(P5、12Cr1MoVG)为主, 焊接核心理论围绕高温下金属熔合特性与组织演变规律展开。在高温焊接过程中, 熔池金属快速熔化与凝固, 合金元素扩散速率直接影响接头组织均匀性, 易因元素分布不均产生偏析缺陷。焊接接头热影响区需承受长期高温蠕变, 需通过合理工艺控制晶粒尺寸, 避免碳化物析出导致的脆化。焊接接头力学性能需满足高温强度 ≥ 650 MPa、高温蠕变断裂时间 $\geq 1\ 000$ h^[2], 确保适配服役工况需求。

1.2 焊接工艺技术发展现状

当前锅炉高温配件焊接技术以氩弧焊(GTAW, Gas Tungsten Arc Welding)、埋弧焊(SAW, Submerged

Arc Welding)为主, 两种工艺各有适配场景。氩弧焊凭借加热均匀、焊缝成形优良的优势, 在薄壁高温配件焊接中应用占比达68%, 可有效减少枝晶偏析; 埋弧焊效率高、热输入稳定, 适用于厚壁配件焊接, 焊接速度可达10~15 mm/min。随着技术升级, 窄间隙埋弧焊、脉冲氩弧焊逐步推广, 脉冲氩弧焊可将热影响区宽度缩小至2~3 mm, 较传统氩弧焊降低40%^[3], 显著提升接头高温性能。

1.3 焊接质量控制技术发展

焊接质量控制已从传统事后检测向全流程管控转变, 形成焊前、焊中、焊后闭环体系。焊前材料检验采用光谱分析技术, 可精准检测焊材中C、S、P等元素含量, 检测精度达0.001%; 焊中实时监控技术通过电弧传感系统, 实现焊接电流、电压波动控制在 $\pm 5\%$ 范围内。无损检测技术不断升级, 相控阵超声(PAUT)检测灵敏度较传统超声检测提升30%, 可检出 ≤ 0.5 mm^[4]的内部微裂纹, 当前在高温配件焊接质量检测中应用占比已达75%。

2 锅炉高温配件焊接工艺选择

2.1 焊接材料选择

焊接材料选择需与母材成分、服役工况精准匹配, 核心是保证焊缝金属与母材的高温性能一致性。奥氏体不锈钢配件优先选用镍基合金焊材(ERNiCr-3, 镍铬合金焊丝), 可有效阻止碳迁移, 减少脱碳层与增碳层形成。铁素体耐热钢配件选用匹配成分的低合金焊材, 如12Cr1MoVG母材对应R307焊条, 其Cr含量1.0%~

作者简介: 陈秋实(1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 热能与动力工程。

1.5%、Mo 含量 0.4% ~ 0.6%，确保接头高温蠕变性能与母材一致。焊材纯度需满足 S、P 杂质含量 $\leq 0.025\%$ ^[5]，避免杂质在晶界聚集导致裂纹，焊材烘干温度控制在 350 °C，保温 2 h，去除水分减少气孔缺陷。

2.2 焊接方法选择

焊接方法选择需结合配件厚度、结构及服役要求，形成差异化方案。薄壁高温配件（厚度 ≤ 10 mm）如炉管，选用氩弧焊（GTAW），焊接电流 80 ~ 120 A，电压 12 ~ 15 V，焊接速度 3 ~ 5 mm/min，保护气体采用纯度 99.99% 的氩气，流量 8 ~ 10 L/min，可有效控制熔池尺寸，减少热影响区脆化。厚壁配件（厚度 > 10 mm）如锅筒封头，选用埋弧焊（SAW），焊接电流 500 ~ 600 A，电压 30 ~ 35 V，焊接速度 8 ~ 10 mm/min，焊剂选用 HJ431，粒度 10 ~ 40 目，确保焊缝成型良好且接头强度达标。异种钢焊接（TP347H 与 P5）采用氩弧焊打底 + 埋弧焊盖面^[6]，减少碳迁移缺陷。

2.3 焊接工艺参数优化

焊接工艺参数直接决定焊缝质量，基于正交试验优化得到适配不同配件的最优参数组合。表 1 为不同厚度 12Cr1MoVG 配件氩弧焊工艺参数优化结果，为工艺选择提供数据支撑。

表 1 不同厚度 12Cr1MoVG 配件氩弧焊最优工艺参数表

配件厚度 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹
6	80	12	3
8	100	13	4
10	120	15	5

由表 1 数据可知，配件厚度与焊接电流、电压呈正相关，与焊接速度呈负相关。厚度 6 mm 配件采用 80 A 电流、12 V 电压、3 mm/min 速度，可避免熔池过大导致的烧穿；厚度 10 mm 配件需提高电流至 120 A、电压至 15 V，降低速度至 5 mm/min，确保焊透且无未熔合缺陷。该参数组合经试验验证，焊缝成形系数控制在 1.2 ~ 1.5，接头抗拉强度 ≥ 650 MPa^[7]，满足高温服役要求，较优化前缺陷率降低 60%。

3 锅炉高温配件焊接质量控制

3.1 焊前质量控制

焊前质量控制的核​​心是消除源头隐患，重点落实材料检验、坡口处理与装配管控。母材与焊材需经光谱分析验证，确保成分符合《压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收》（GB/T 150.4-2024）标准要求，12Cr1MoVG 母材 C 含量控制在 0.08% ~ 0.15%，Cr 含量 1.00% ~ 1.50%。

坡口加工采用机械切削方式，角度控制在 $60^\circ \pm 5^\circ$ ，钝边 2 ~ 3 mm，坡口表面需清除氧化皮、油污等杂质，清理范围为坡口两侧至少 20 mm，表面粗糙度 $\leq Ra6.3 \mu\text{m}$ 。装配对口错边量按《压力容器 第 4 部分：制造、检验和验收》（GB/T 150.4-2024）要求，厚度 ≤ 12 mm 时不大于 3 mm，装配间隙控制在 2 ~ 4 mm^[8]，避免间隙过大导致未焊透。

3.2 焊中质量控制

焊中质量控制需聚焦工艺参数与熔池状态的实时监控，维系焊接过程的稳定运行。作业过程需严控焊接电参数波动，保障保护气体供给稳定，规避气体供给不足引发的焊缝缺陷。需精准管控焊接层间温度，及时清理层间熔渣，防范夹渣问题出现。厚壁配件施焊需执行多层多道焊工艺，降低焊缝应力集中风险。全过程参数管控可规避各类焊接缺陷，保障焊缝成型质量与构件使用性能。

由表 2 可知，焊中关键参数监控标准划定各监控项目的管控范围与监测频次。焊接电流管控范围 80 ~ 120 A，单道焊缝监测 3 次，允许偏差 ± 5 A。层间温度管控范围 200 ~ 250 °C，单道焊缝监测 1 次，允许偏差 ± 10 °C。保护气体流量实施全程监控，管控范围 8 ~ 10 L/min，允许偏差 ± 1 L/min。该标准落地可将焊中缺陷发生率控制在 5% 以内，缺陷发生率较未开展监控的状态降低 70%，为后续焊后检测工作奠定坚实的质量基础。

表 2 焊中关键参数监控标准表

监控项目	控制范围	监控频率	允许偏差
焊接电流	80 ~ 120 A	每道焊缝 3 次	± 5 A
层间温度	200 ~ 250 °C	每道焊缝 1 次	± 10 °C
保护气体流量	8 ~ 10 L/min	全程监控	± 1 L/min

3.3 焊后质量控制

焊后质量控制的核​​心是消除残余应力、检测焊接缺陷与优化接头性能。焊后热处理采用高温回火工艺，温度 680 ~ 720 °C，升温速度 50 °C/h，保温 3 h，降温速度 40 °C/h，可将残余应力降低 60% ~ 70%，避免应力集中导致的裂纹。焊后清理需去除焊渣、飞溅物，焊缝余高控制在 0 ~ 3 mm，咬边深度 ≤ 0.5 mm，无表面气孔、裂纹等缺陷。无损检测采用相控阵超声（PAUT）与射线检测（RT）结合方式，PAUT 检测内部裂纹，RT 检测未焊透、夹渣，检测标准符合 NB/T 47013 III 级验收要求^[9]，确保缺陷检出率达 99% 以上。

3.4 焊接人员与作业环境管控

焊接作业人员需持有适配高温配件焊接的资质证书,上岗前完成 12Cr1MoVG、TP347H 等母材焊接专项实操培训,掌握工艺执行要点。作业现场环境温度需维持在 5℃及以上,相对湿度不超过 85%,环境风速控制在 2 m/s 以内。户外施焊需设置防风、防雨防护装置,阻断外界环境对焊接过程的干扰。操作人员全程恪守工艺文件要求,不得擅自更改焊接参数。现场环境数据逐次记录归档,形成完整质量追溯链条。人员与环境的双重管控,直接降低人为失误与环境干扰引发的焊接缺陷,稳固焊接作业质量基础。

4 焊接质量检测与缺陷处理

4.1 焊接质量检测方法选择

结合锅炉高温配件焊接缺陷类型,采用分层检测方案,兼顾表面与内部缺陷检测。表面缺陷检测采用磁粉探伤(MT)与渗透探伤(PT)结合,MT采用湿法连续磁化工艺,磁悬液浓度 1.2~2.4 mL/100 mL,可检出表面开口裂纹、夹渣等缺陷;PT按 ASTM E165 执行 I 型荧光渗透剂处理,显像时间 10~60 min,检测灵敏度达 0.1 mm。内部缺陷检测采用 PAUT 与 RT 结合,PAUT 采用 64 阵元探头,实现 S 扫查覆盖全焊缝体积,RT 采用 160~320 kV 管电压配合 Ir-192 γ 源双壁单影透照^[10],可精准定位内部缺陷位置与尺寸。

4.2 焊接缺陷检测结果与分析

选取 100 件锅炉高温配件焊接试样,采用上述检测方法进行质量检测,缺陷类型及检出情况如表 3 所示,为缺陷处理提供数据支撑。

表 3 100 件焊接试样缺陷检测结果表

缺陷类型	检出数量 / 件	缺陷率 / %	检出方法
气孔	3	3	PT、RT
未焊透	2	2	PAUT、RT
裂纹	1	1	MT、PAUT
夹渣	2	2	RT、PAUT

由表 3 数据可知,100 件试样总缺陷率为 8%,其中气孔缺陷占比最高(3%),主要因焊材烘干不彻底或保护气体不足导致;未焊透、夹渣各占 2%,源于焊接参数不合理或层间清理不彻底;裂纹缺陷占比最低(1%),为焊后应力未完全消除导致。PT、MT 对表面缺陷检出率达 100%,PAUT、RT 对内部缺陷检出率达 100%,检测方法适配性良好,可有效识别各类焊接缺陷,为缺陷处理提供精准依据。

4.3 焊接缺陷处理方案

针对不同类型缺陷,采用差异化处理方案,确保处理后接头性能达标。气孔缺陷采用角磨机打磨去除缺陷区域,打磨深度超过缺陷边缘 2 mm,清理后采用补焊工艺,补焊参数与原焊接参数一致,补焊后重新检测。未焊透、夹渣缺陷采用碳弧气刨清除缺陷,刨削深度至缺陷完全消除,坡口修整后进行补焊,补焊后需进行热处理,消除补焊应力。裂纹缺陷需彻底清除裂纹及周围脆化区域,打磨后进行渗透检测确认无残留缺陷,补焊后采用高温回火工艺,确保接头力学性能与母材一致。缺陷处理后,复检合格率达 100%,满足锅炉高温配件服役要求。

5 结束语

本文针对锅炉高温配件焊接工艺适配性不足、质量控制精度低等问题,结合高温焊接理论与工程实践,完成工艺选择优化与质量控制体系构建。明确不同材质、厚度配件的焊接材料、方法及参数,提出差异化工艺方案;建立焊前、焊中、焊后全流程质量控制规范,结合分层检测与精准缺陷处理,实现焊接缺陷率降至 8% 以下,接头高温性能达标。该研究存在试验样本覆盖范围有限的不足,后续将扩大配件类型与工况模拟范围,结合智能化检测技术,进一步提升工艺适配性与质量控制精度,为锅炉高温配件焊接提供更全面的技术支撑。

参考文献:

- [1] 秦萍丽. 电站锅炉高温受热面用 S30432 不锈钢管焊接制造质量管理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [2] 李昱伟, 张骁勇, 周勇, 等. 高温锅炉管 T22/IP347H 异种钢焊接接头早期失效原因 [J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(01):61-64.
- [3] 袁怀中. 锅炉高温过热器焊缝裂纹的原因分析与处理 [J]. 设备管理与维修, 2022(16):61-63.
- [4] 徐卫军. 锅炉异种金属焊接的缺陷思考 [J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51(08):94-96.
- [5] 黄国兴. 锅炉制造过程中环焊缝质量控制 [J]. 锅炉制造, 2021(06):51-52, 61.
- [6] 刘雨均, 刘课秀, 封小亮. 某电站锅炉异种钢焊接高温再热器爆管原因分析 [J]. 特种设备安全技术, 2024(04):1-4.
- [7] 滕金冰, 王晓东, 刘巧平. 锅炉容器管道材料与焊接质量的在线监测技术 [J]. 中国质量监管, 2024(06):67-69.
- [8] 程佳, 孙锦辉, 李彝. 锅炉专用高温材料及焊接技术的发展研究 [J]. 冶金与材料, 2021, 41(05):47-48.
- [9] 宁亮亮. 电站锅炉低压高温再热器异种钢吊挂管焊接工艺 [J]. 国网技术学院学报, 2020, 23(03):44-47.
- [10] 蒋林弟. 锅炉高温再热器异种钢焊接工艺研究 [J]. 中国新技术新产品, 2020(09):91-92.

智能建造技术在装配式建筑施工管理中的应用

周胜兵

(杭州滨江房产建设管理有限公司, 浙江 杭州 310016)

摘要 装配式建筑施工管理涉及多环节、多主体、多专业的协同配合, 传统管理模式难以适配其精细化、系统化的管理需求, 而智能建造技术为破解装配式建筑施工管理难点提供了核心支撑。本文围绕智能建造技术在装配式建筑施工管理中的应用展开, 阐述此类技术应用于施工管理环节的核心优势, 并提出优化技术落地成效的实施路径, 以期为装配式建筑施工管理的智能化升级与建筑行业高质量发展提供参考。

关键词 智能建造技术; 装配式建筑; 施工管理; 数字化转型

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.033

0 引言

建筑行业是我国国民经济的重要支柱产业, 在推动新型城镇化建设、促进经济社会发展、改善民生居住条件等方面发挥着不可替代的作用。在双碳目标持续深化与产业结构转型升级的背景下, 传统高耗能、低效率、粗放式的建造模式已无法适配新时代建筑行业的发展要求, 向工业化、数字化、智能化转型已成为行业发展的必然趋势。国家及地方层面出台多项政策, 明确提出要推动智能建造与建筑工业化协同发展, 大力发展装配式建筑, 提升施工管理的数字化、智能化水平, 为行业转型划定了清晰的发展路径。智能建造技术的科学应用能够打通装配式建筑施工管理全流程的信息壁垒, 实现管理要素的数字化、管理流程的可视化、管理决策的科学化, 重构装配式建筑的施工管理逻辑, 破解传统管理模式的核心痛点。

1 装配式建筑施工管理中应用智能建造技术的优势

1.1 优化施工统筹规划, 提升管理部署科学性

施工统筹规划是装配式建筑施工管理的前置环节, 规划方案的科学性与前瞻性, 决定了后续施工全流程的推进效率与落地效果。智能建造技术能够搭建起全要素、全周期的数字化统筹管理框架, 将施工管理中的场地布置、进度计划、资源调配、工序衔接等核心内容全部纳入统一的数字化体系中。通过数字孪生技术能够对施工全流程进行多方案模拟推演, 结合项目

工期要求, 对各工序的作业时间、衔接节点进行精细化排布, 提前识别进度计划中的潜在冲突, 对施工方案进行前置优化调整, 保障进度计划的可落地性。大数据技术能够整合合同类型项目的历史施工数据, 为进度计划编制、资源投入规划、成本管控方案制定提供全面的数据支撑, 降低单纯依赖经验判断带来的决策偏差, 让管理决策更具科学性。物联网技术能够实现对施工资源的实时定位与动态追踪, 管理人员可实时掌握人员、机械、物料的进场情况与使用状态, 根据施工进度的实时变化, 动态调整资源调配方案, 实现人力、机械、物料的精准匹配, 避免资源闲置或供应短缺问题, 从根源上提升施工管理前期部署的科学性与过程管控的灵活性。以南京未来出行产业园项目为例, 该项目全面应用 BIM 技术贯穿设计、生产、施工全过程, 在设计阶段各专业设计师基于 BIM 模型协同作业优化管线布置, 在机电管综工程中以 1:1 比例还原管线布局进行施工前模拟, 有效避免“错漏碰撞”; 施工完成后通过 BIM 模型与实际安装结果比对确保细节准确无误。该项目还运用无人机航拍与虚拟仿真技术优化塔吊等设备布置方案, 保障了现场施工的合理性与安全性^[1]。

1.2 强化构件全程管控, 保障构件应用可靠性

装配式建筑的预制构件种类繁多、数量大, 从生产到装配需要跨越工厂、物流、现场等多个场景。智能建造技术能够为预制构件打造从生产到装配的全生命

作者简介: 周胜兵 (1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 结构工程。

周期数字化管控链条,实现构件全流程状态的可追溯、可监控、可管理。在构件生产环节,通过数字化生产系统,能够实现设计图纸的精准下发、生产工序的标准化管控、生产质量的实时检测,构件生产过程中的原材料参数、生产工艺、质量检测数据等核心信息,可实时上传至统一管理平台,实现生产过程的全程留痕,确保构件生产完全符合设计标准与项目需求。在进场验收与现场存放环节,通过射频识别技术,能够实现构件信息的快速核验与精准定位,管理人员可快速掌握构件的生产信息、质量状态、进场时间、存放位置等核心内容,实现构件的精细化台账管理,避免构件错放、混用、丢失等问题。在装配施工环节,将三维激光扫描与建筑信息模型技术结合能够对构件的装配精度进行实时校核,及时发现并修正装配偏差,保障构件安装的精准度。

1.3 提升现场协同效率,增强施工衔接流畅性

装配式建筑的现场施工涉及土建、机电、装修等多个专业,同时涵盖建设、施工、监理、设计、构件生产厂家等多个参与主体,施工工序环环相扣,各专业、各主体之间的配合衔接紧密,对协同管理的效率与精度提出了极高要求。智能建造技术能够搭建起多方协同、实时共享的数字化管理平台,打破各专业、各主体之间的信息壁垒,实现施工信息的实时共享、高效传递与协同处置。基于统一的数字化建筑模型,各参与方能够同步获取施工进度、设计变更、工序安排、质量验收等核心信息,无需通过多层级传递即可实现信息的同步更新,大幅降低信息传递过程中的偏差与滞后,让各参与方能够基于同一数据基准开展工作,避免因信息不对称引发的管理矛盾。针对施工过程中出现的技术问题、工序冲突、设计变更等各类情况,各相关方可在数字化平台上进行实时沟通与协同处置,相关问题的上报、流转、处置、验收全流程均可在平台上完成,缩短问题响应与解决的周期,避免小问题延误整体施工进度。

1.4 完善安全管控体系,提高施工管理安全性

装配式建筑的现场施工涉及大型构件吊装、高空作业、临边防护、交叉作业等多个高风险环节,安全风险点多、管控难度大,对安全管理的全面性、实时性、前瞻性提出了严格要求。智能建造技术能够推动装配式建筑施工安全管理,从传统的事后整改向事前预防、事中实时管控转型,构建起全方位、全时段、全流程的智能化安全管控体系,全面提升施工安全管理水平。

通过施工现场的视频监控系统与人工智能行为识别技术相结合,能够对施工现场的人员不安全行为、环境不安全状态进行实时识别与预警,针对未按规定佩戴安全防护用具、违规进入危险作业区域、吊装作业警戒范围违规闯入、高空作业违规操作等常见违规行为,系统可实时发出预警,提醒管理人员及时处置,将安全隐患消除在萌芽状态^[2]。借助物联网传感技术,能够对大型吊装机械、高空作业平台等特种设备的运行状态进行实时监测,对设备的负载情况、运行参数、故障隐患进行实时监控与提前预警,及时发现设备运行过程中的异常情况,督促相关人员开展检修维护,避免设备带病运行引发的安全事故。

2 优化智能建造技术在装配式建筑施工管理中应用的建议

2.1 深化技术场景融合,贴合施工管理实际需求

将智能建造技术与管理场景深度融合能够充分发挥技术的核心优势,真正破解装配式建筑施工管理的实际痛点。一方面,立足于装配式建筑施工管理的全流程环节,系统梳理前期统筹规划、预制构件全链条管控、现场多专业协同施工、安全生产闭环管理等不同场景的核心管理需求与现存痛点,针对性匹配对应的智能建造技术,制定贴合项目实际的技术应用方案,避免技术应用与实际管理需求脱节的情况,让技术落地能够直接解决管理过程中的实际问题,真正实现技术为管理赋能^[3]。另一方面,推动不同智能建造技术之间的融合应用,打破单一技术的应用壁垒,实现建筑信息模型、物联网、大数据、人工智能、数字孪生等技术的协同联动,搭建一体化的数字化施工管理体系,实现施工管理全链条数据的互通共享与高效流转,让各类技术的应用形成合力,最大化发挥技术集成的优势,全面提升施工管理的整体效能。

2.2 加强专业人才培养,提升技术应用综合素养

专业施工人才的综合素养与能力决定了技术应用的深度与最终效果,必须构建系统化、多层次的人才培育体系,为智能建造技术在装配式建筑施工管理中的深度应用提供充足的人才支撑。首先,推动高校与职业院校完善相关专业的人才培养体系,结合行业发展趋势与企业实际用人需求,优化专业课程设置,将智能建造、装配式建筑、数字化施工管理等相关内容全面融入专业教学体系,打破传统专业之间的学科壁垒,注重理论知识与工程实践的深度融合,培育兼具

建筑工程专业基础、施工管理能力与数字化技术应用能力的复合型人才,为行业发展持续输送优质的新鲜血液^[4]。其次,完善行业在职人员的系统化培训体系,针对施工企业的管理人员、技术人员、现场作业人员等不同群体,制定分层分类的专项培训方案,对管理人员重点培训智能化管理体系的搭建、数字化决策能力与全流程统筹管理能力;对技术人员重点培训各类智能建造技术的实操应用、数字化系统的运维与优化能力;对现场作业人员重点培训智能化设备的操作规范、基础数字化管理流程与安全作业要求,提升行业从业人员的综合素养,适配行业智能化转型的发展需求。

2.3 更新施工管理模式,顺应智能建造发展趋势

打破传统管理模式桎梏,建立适配智能化技术应用的新型施工管理模式,能够充分释放智能建造技术的核心优势。一方面,重构施工管理的组织架构,打破传统管理模式中多层级、条块分割的组织模式,建立扁平化、一体化的数字化管理架构,减少信息传递的层级壁垒,实现管理决策的快速下达与现场信息的高效反馈,适配智能化管理实时、高效、协同的核心要求,同时明确各岗位在数字化管理体系中的职责定位,建立权责清晰、协同高效的管理团队,保障智能化管理模式的有效落地^[5]。另一方面,优化施工管理的流程体系,基于智能建造技术的应用特点,对装配式建筑施工管理的全流程进行系统性梳理与重构,剔除传统流程中冗余、低效的环节,建立全流程数字化的管理流程,实现从前期规划、构件生产、物流运输、现场装配到竣工验收的全流程闭环数字化管理,让管理流程与技术应用深度适配,最大化发挥数字化管理的效率优势。

2.4 健全施工标准规范,保障技术应用有序推进

完善标准规范体系是智能建造技术规范化、规模化应用的重要制度保障。首先,加快完善智能建造技术在装配式建筑施工管理中应用的国家标准与行业规范,结合行业技术发展与应用实践,明确技术应用的基本要求、实施流程、数据标准、质量管控、验收准则等核心内容,统一不同技术、不同环节的数据格式与交互标准,打破不同企业、不同系统之间的数据壁垒,为技术的跨平台、跨项目、跨区域应用奠定基础,让技术应用与管理工有章可循、有规可依。其次,推动各地方结合区域行业发展实际,制定适配本地的实施细则与管理办法,细化技术应用的落地要求与激励政策,针对装配式建筑施工管理中的不同场景,出

台具体的技术应用指引,引导施工企业规范、高效地应用智能建造技术,同时结合区域内的项目实践经验,持续优化地方标准规范,提升标准的适用性与可操作性,推动智能建造技术在区域内的规模化推广^[6]。最后,引导行业与企业完善内部的管理标准与技术应用规范,结合企业自身的业务特点、项目类型与管理需求,制定企业内部的智能化施工管理流程、技术操作规范、岗位责任制度、考核评价体系等,将国家标准与行业规范的要求,细化落实到施工管理的各个环节与各个岗位,实现技术应用与管理工作的标准化、规范化,保障智能建造技术在装配式建筑施工管理中的有序、规范、高质量应用。

3 结束语

智能建造技术为装配式建筑施工管理的转型升级提供了技术支撑,能够从施工统筹规划、构件全周期管控、现场协同效率提升、安全管控体系完善等多个维度破解传统施工管理模式的痛点与短板,提升装配式建筑施工管理的科学化、精细化、智能化水平,为装配式建筑的高质量发展注入强劲动力。随着新一代信息技术的持续迭代,以及行业应用实践的不断深化,智能建造技术将全面融入装配式建筑发展的全流程与全链条,推动建筑工业化与数字化的深度融合,助力建筑行业实现更高质量、更有效率、更加安全、更可持续的发展,为新型城镇化建设与双碳目标的实现提供坚实的行业支撑。

参考文献:

- [1] 南京市建邺区人民政府.这一重大项目,月底全面封顶[EB/OL].(2025-10-22).https://www.njjy.gov.cn/jyyw/202510/t20251022_5674252.html.
- [2] 颜亨迈.智能建造技术在装配式建筑工程中的应用与效益分析[J].科技与创新,2026(02):221-224.
- [3] 范凯兴,梁田,石鲁豫.基于智能建造技术的装配式建筑施工管理研究[J].城市建设理论研究,2025(32):38-40.
- [4] 何玉凤,陈彬,郭亮.智能建造背景下装配式建筑人才培养模式的创新与实践[J].内江科技,2025,46(07):7-9.
- [5] 刘锐,王勇,杨兴,等.智能建造技术在装配式建筑施工现场的应用效果分析[J].科技创新与生产力,2025,46(09):100-102,107.
- [6] 王诗慧.装配式建筑智能建造中的结构节点数字化设计与施工技术[J].智能建筑与智慧城市,2025(12):102-104.

水利施工中混凝土配合比优化及性能影响分析

李科毅

(四川南充水利电力建筑勘察设计研究院, 四川 南充 637000)

摘要 水利工程混凝土结构承担挡水、防渗、承重等核心功能,其性能直接决定工程整体稳定性与使用寿命。混凝土配合比是影响其性能的核心因素,不合理的配合比易引发强度不足、耐久性差、经济性不佳等问题,难以适配水利工程复杂严苛的施工环境与长期运行要求。本文以某水库除险加固工程为依托,严格遵循《水工混凝土配合比设计规范》(DL/T 5330-2015)基本原则,梳理水利施工中混凝土配合比的设计要点与现存问题,从原材料选型、参数调整等方面提出优化方案,通过试验分析配合比优化对混凝土核心性能的影响,旨在为同类工程配合比优化提供参考。

关键词 水利施工; 混凝土配合比; 混凝土性能; 性能影响

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.034

0 引言

水利工程是国民经济和社会发展的基础性工程,涵盖水库、堤坝、水渠等各类结构,长期处于水下或潮湿环境,面临水流冲刷、渗透、冻融等多重作用。混凝土作为水利施工中应用最广泛的建筑材料,其性能直接关系到工程的安全运行和使用寿命。混凝土配合比即水泥、砂、石、水及外加剂等原材料的配比关系,直接决定混凝土强度、耐久性等核心性能,同时直接影响工程施工成本。《水工混凝土配合比设计规范》(DL/T 5330-2015)(以下简称《规范》)明确了水工混凝土配合比设计的核心原则,为配合比优化工作提供了根本遵循^[1]。

当前水利施工中,部分工程仍沿用传统经验法设计配合比,未结合工程实际工况与原材料特性开展针对性优化,导致混凝土强度达标率低、抗渗抗冻性能不足、施工和易性差等问题频发,不仅增加了工程维修保养成本,更埋下了安全隐患。因此,严格遵循《规范》要求开展配合比优化研究,探究配合比对混凝土各项性能的影响规律,兼具重要的理论意义与工程实践价值。

1 工程概况

本文依托某中型水库除险加固工程展开研究,该水库始建于1978年,以防洪、灌溉、供水为主要功能,总库容1200万 m^3 ,大坝为均质土坝,最大坝高28m,坝顶总长860m。本次除险加固内容主要包括大坝防渗

处理、溢洪道改造、输水洞修复及附属设施完善,工程混凝土总用量约8500 m^3 ,主要用于溢洪道闸室、输水洞衬砌及大坝护坡等部位^[2]。

工程所在区域为亚热带季风气候,降水集中在夏季,水文地质条件复杂,地下水水位较高,水质呈弱碱性,对混凝土存在一定侵蚀性。工程设计混凝土强度等级分为C25、C30、C35三级,其中溢洪道闸室与输水洞衬砌采用C35混凝土,大坝护坡采用C25混凝土,附属设施采用C30混凝土,所有混凝土均需满足抗渗、抗冻、抗冲耐磨等耐久性要求,适配水下潮湿及冻融交替的运行环境。

在施工过程中,传统配合比设计的混凝土出现和易性差、浇筑困难、后期强度达标率偏低、抗渗抗冻性能不达标等问题,严重影响施工进度与工程质量,亟需开展配合比优化工作。

2 水利施工中混凝土配合比优化分析

2.1 混凝土原材料选型优化

原材料质量是配合比优化的基础,结合本工程混凝土性能要求,对各类原材料开展针对性选型优化。水泥选用42.5级普通硅酸盐水泥,其强度高、凝结硬化速度适中、水化热较低,抗渗抗冻性能适配水利工程施工要求。细骨料选用当地天然中砂,细度模数2.2~3.0,含泥量 $\leq 2.0\%$,级配良好无杂质,可有效提升混凝土和易性与强度。粗骨料选用5~31.5mm连续级配碎石,含泥量 $\leq 1.0\%$,压碎值 $\leq 12\%$,颗粒

作者简介: 李科毅(1982-),男,专科,工程师,研究方向:水利工程质量检测。

坚硬洁净,可强化混凝土骨架结构,提升强度与耐久性。拌合用水采用符合标准的饮用水,无有害杂质,避免对混凝土性能产生不利影响。外加剂选用高效缓凝减水剂,减水率 $\geq 20\%$,缓凝时间 $6\sim 12\text{ h}$,可有效改善混凝土和易性,减少拌合用水量,降低水化热,防控裂缝产生,提升混凝土耐久性。

2.2 混凝土配合比参数优化

结合本工程选定的各类原材料,针对项目前期传统配合比设计暴露的性能短板,严格遵循《规范》基本原则,围绕泵送施工的核心工艺要求,对混凝土配合比核心参数开展系统性优化调整,确保混凝土工作性能、强度与耐久性满足工程建设要求,适配现场泵送施工的和易性与流动性需求^[3]。

《规范》明确,在满足强度、耐久性及其他要求的前提下,应选用合适的水胶比,同时宜选取最优砂率,且宜选用粒径较大的骨料及合适的级配比例。基于此,水胶比作为决定混凝土强度与抗渗耐久性的核心指标,针对传统配合比水胶比偏大引发的强度不足、抗渗性能不达标的问题,按不同强度等级精准下调水胶比,C25、C30、C35 混凝土水胶比分别由 0.65、0.60、0.55 优化至 0.58、0.55、0.50,同时满足《规范》中不同部位、不同强度等级混凝土的水胶比最大允许值及初选范围要求。

按优化后水胶比与强度要求,确定各等级混凝土胶凝材料用量分别为 340 kg/m^3 、 380 kg/m^3 、 420 kg/m^3 ,其中水泥占比控制在 $85\%\sim 90\%$,保障混凝土强度发展与长期耐久性。结合泵送工艺要求及《规范》最优砂率选取原则,将 C25、C30、C35 混凝土砂率分别调整至 42%、41%、40%,同步优化粗细骨料用量,选用粒径 $5\sim 31.5\text{ mm}$ 的连续级配碎石,确保混凝土流动性与结构强度兼顾;外加剂掺量按胶凝材料总量的 $1.2\%\sim 1.5\%$ 控制,充分改善混凝土拌合物和易性,符合《规范》中通过外加剂改善混凝土性能的要求。

2.3 混凝土配合比优化流程

本工程混凝土配合比优化严格遵循《规范》规定的设计流程与要求,确保优化方案科学、合理、可行。首先,全面收集原材料相关资料,按标准完成水泥、掺合料、外加剂、粗细骨料及拌合用水的性能检测,明确各类材料的核心性能参数,确保原材料质量符合规范要求,为配合比优化提供准确的基础数据。其次,收集工程设计资料,明确混凝土强度、抗渗、抗冻等核心性能指标,以及拌制、运输、施工工艺对应的工作性要求,结合工程不同部位的性能需求,划定水胶比、胶凝材料用量、砂率等核心参数的合理范围。

按照《规范》核心步骤开展配合比设计:一是结合强度保证率要求确定配制强度,根据强度与耐久性要求选定水胶比;二是根据施工工作度要求与骨料最大粒径选定用水量和砂率;三是采用绝对体积法计算各组成材料用量;四是通过试验室试配与现场调整,确定最终配合比。试配环节设计 $3\sim 4$ 组不同配合比开展试验,检测拌合物工作性指标,针对试配问题调整参数并复配,直至满足设计要求;再通过复核试验验证混凝土各龄期抗压强度、抗渗、抗冻、抗冲耐磨等性能,最终筛选出性能达标、经济合理的配合比作为工程用配合比。在施工过程中,根据骨料含水量、超逊径等原材料状态变化,及时调整施工配合比,确保适配现场施工条件。

3 混凝土配合比性能影响分析

3.1 对混凝土强度的影响

混凝土配合比优化对其强度具有显著影响,核心在于严格遵循《规范》中强度保证率及标准差计算要求,通过调整水胶比等参数改善混凝土内部结构,提升强度性能。《规范》明确,混凝土配制强度需满足 95% 的强度保证率要求,需根据设计强度等级合理选取抗压强度标准差,无同品种混凝土强度统计资料时,按规范要求取值,施工中再根据现场强度统计结果动态调整。

试验选取工程中常用的 C25、C30、C35 三种强度等级混凝土,分别采用传统配合比和优化后配合比进行试配,成型标准试件,在标准养护条件下,检测 7 d、28 d 抗压强度,对比分析配合比优化对混凝土强度的影响。优化后三种强度等级混凝土的 7 d、28 d 抗压强度均明显提升,C25 混凝土 7 d 抗压强度提升 8.9%,28 d 提升 10.3%;C30 混凝土 7 d 提升 9.2%,28 d 提升 10.8%;C35 混凝土 7 d 提升 9.5%,28 d 提升 11.2%^[4]。

水胶比降低是强度提升的核心原因,优化后水胶比减小,且满足《规范》中不同强度等级混凝土的水胶比初选范围及最大允许值要求,水泥水化反应更充分,混凝土内部孔隙率减少,结构更致密,粘结力增强。胶凝材料用量的合理调整和骨料级配的优化,进一步增强了混凝土骨架作用,提升了混凝土整体强度,确保混凝土强度满足水利工程设计要求及《规范》的强度保证率规定。

3.2 对混凝土耐久性的影响

水利工程混凝土长期处于复杂水文环境中,耐久性是保障工程长期稳定运行的关键,配合比优化主要从抗渗、抗冻、抗侵蚀三个方面提升混凝土耐久性。

选取工程中应用最广泛的C30混凝土,采用传统配合比和优化后配合比进行耐久性试验,检测抗渗等级、抗冻等级及抗侵蚀性能,试验数据如表1所示。

表1 不同配合比混凝土耐久性对比表

配合比类型	抗渗等级	抗冻等级	28 d 强度损失率 %	28 d 质量损失率 %
传统配合比	P6	F150	8.5	3.8
优化后配合比	P8	F200	4.2	1.9

由表1可知,优化后混凝土抗渗等级由P6提升至P8,抗渗性能明显增强,这是因为水胶比降低,混凝土内部孔隙减少,连通孔隙率降低,有效阻挡水分渗透。抗冻等级由F150提升至F200,抗冻性能显著提升,优化后的配合比通过掺入高效缓凝减水剂,改善混凝土内部结构,减少冻融循环过程中内部水分结冰产生的膨胀应力,降低混凝土破坏概率。在抗侵蚀性能方面,优化后混凝土在弱碱性侵蚀环境中,28 d 强度损失率由8.5%降至4.2%,质量损失率由3.8%降至1.9%,抗侵蚀能力明显提升,胶凝材料用量的优化和骨料级配的改善,增强了混凝土内部结构的致密性,减少侵蚀介质对混凝土的破坏。

3.3 对混凝土工作性的影响

混凝土工作性直接影响施工浇筑质量和效率,配合比优化通过调整砂率、外加剂用量、骨料级配等参数,显著改善混凝土工作性。试验选取三种强度等级混凝土,分别检测传统配合比和优化后配合比混凝土的坍落度、扩展度、凝结时间及泌水率,分析配合比优化对工作性的影响。

优化后,三种强度等级混凝土的坍落度均控制在120~160 mm之间,符合水利施工浇筑要求,相比传统配合比,坍落度波动范围减小,流动性更稳定。扩展度由传统配合比的350~400 mm提升至450~500 mm,混凝土流动性和扩散性更好,便于浇筑密实,尤其适用于输水洞衬砌、溢洪道闸室等复杂部位施工。凝结时间优化合理,初凝时间控制在8~10 h,终凝时间控制在12~14 h,避免初凝过快导致浇筑困难,终凝过慢影响后续施工进度。泌水率由传统配合比的2.5%~3.0%降至1.0%~1.5%,混凝土保水性和黏聚性明显提升,有效避免浇筑过程中出现离析泌水现象,减少混凝土内部蜂窝麻面等缺陷,提升浇筑质量。

3.4 对混凝土经济性的影响

配合比优化在提升混凝土各项性能的同时,有效提升工程经济性,通过优化原材料用量,降低混凝土

拌合成本。结合工程实际混凝土用量8 500 m³,分别计算传统配合比和优化后配合比的原材料用量及单方成本,分析配合比优化对经济性的影响^[5]。

优化后,水泥用量相比传统配合比减少5%~8%,C25混凝土单方水泥用量减少20 kg,C30减少25 kg,C35减少30 kg,水泥作为混凝土中成本较高的原材料,用量减少显著降低单方成本。外加剂用量虽略有增加,但总体胶凝材料用量优化后,单方外加剂成本增加幅度较小,远低于水泥用量减少带来的成本节约。砂石子用量优化后,单方用量略有调整,但选用当地易得骨料,运输成本未增加,且骨料级配优化减少了骨料浪费。

经计算,优化后混凝土单方成本相比传统配合比降低8~12元,工程总混凝土成本节约7.6~10.2万元,同时混凝土性能提升,减少后期维修养护成本,进一步提升工程整体经济性,实现工程质量和经济效益的双重提升。

4 结束语

水利施工中混凝土配合比优化,是提升混凝土性能、保障工程质量的关键举措,也是控制工程成本、提升经济效益的重要途径,其核心在于严格遵循《水工混凝土配合比设计规范》的基本原则,落实强度保证率等核心要求。本文结合某水库除险加固工程实际,开展了混凝土配合比优化及性能影响分析,从原材料选型、参数调整、设计流程等方面构建了针对性优化方案,通过试验验证了优化方案对混凝土强度、耐久性、工作性及经济性的提升效果。未来可结合不同水利工程的工况条件与性能要求,适配新型原材料与外加剂,进一步完善配合比优化方法,为水利工程高质量建设提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张朋虎. 水利水电工程中的混凝土施工技术与管理控制研究[J]. 水上安全, 2025(23):188-190.
- [2] 姜军委, 郑建花. 水利工程混凝土施工裂缝成因分析与智能温控防裂技术[J]. 智慧中国, 2025(11):53-54.
- [3] 钱桂花. 水利施工中混凝土防裂缝施工技术应用分析[J]. 散装水泥, 2024(05):85-87.
- [4] 陈刚. 水利工程喷射混凝土配合比设计与施工工艺试验[J]. 四川水泥, 2024(03):161-164,167.
- [5] 李凤来. 水利枢纽工程面板混凝土配合比与施工技术分析[J]. 黑龙江水利科技, 2022,50(10):50-53,75.

装配式混凝土结构建筑施工过程中的质量通病与防治策略

常 盈, 张继常

(山东泰安建筑工程集团有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要 装配式混凝土结构凭借施工高效、绿色环保、质量可控等优势, 成为建筑工业化发展的核心方向, 但施工环节受构件生产、吊装安装、节点连接等多重因素影响, 易出现各类质量通病, 直接危及结构安全与使用性能。本文结合国内装配式建筑专项检测数据, 系统梳理预制构件、安装定位、节点连接、防水防渗等方面的典型质量通病, 深入剖析问题根源, 提出针对性防治策略, 补充长效管控措施, 并结合实际工程案例验证防治效果, 以期提升装配式混凝土结构施工质量、推动行业规范化发展提供实践参考。

关键词 装配式混凝土结构; 施工质量通病; 检测数据; 协同管理; 长效管控

中图分类号: TU756

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.035

0 引言

在建筑工业化与“双碳”目标持续推进下, 装配式混凝土结构应用范围不断扩大, 施工质量管控成为行业发展的核心难点。据安徽省住建厅 2025 年建筑工程质量“双随机、一公开”专项检查^[1]、大连市 2025 年装配式建筑专项督查^[2]、沧州市 2025 年装配式工程质量巡查^[3]等多地抽检结果显示, 套筒灌浆、构件安装、节点施工依旧是质量高发环节, 多项实体检测合格率偏低, 凸显当下行业施工管控短板。本文依托 2025 年住建系统最新官方抽检数据, 剖析各类质量通病、深挖问题成因、制定针对性防治对策, 为装配式建筑施工质量提升提供时效性强、贴合行业现状的实践参考。

1 装配式混凝土结构施工常见质量通病及检测数据分析

1.1 预制构件自身质量通病

预制构件是装配式结构的基础, 常见通病集中在外观缺陷、尺寸偏差、性能不达标三个方面。据沧州市住建局 2025 年装配式建筑专项巡查数据, 受检 18 个单位工程中, 11 个存在构件混凝土强度抽测偏低问题, 占比达 61.1%; 大连市 2025 年专项督查显示, 23% 的项目存在预制构件性能检验报告缺失、进场验收流于形式问题。行业同步抽检数据显示, 预制构件外观破损、缺棱掉角问题占比 14.2%, 构件对角线、平整度

偏差超规范限值 (≤ 3 mm) 项目占比 27.6%, 钢筋保护层厚度设计值 20 mm、实测不足 16 mm 的不合格率达 19.3%, 直接影响构件受力性能与结构耐久性。

1.2 构件安装定位质量通病

安装定位偏差是装配式施工高频通病, 核心表现为平面位移、垂直度超标、标高失控。据安徽省住建厅 2025 年建筑工程质量抽检数据, 28.7% 的装配式项目存在预制构件安装定位偏差问题, 其中预制墙板水平错位超 5 mm、竖向垂直度偏差超 6 mm 的占比 24.1%; 叠合板安装后高低差超 10 mm、远超规范 3 mm 限值的问题占比 18.3%。部分项目现浇基层标高控制失误, 导致预制剪力墙水平拼缝宽度超标至 6~7 cm, 不仅破坏节点受力性能, 还大幅提升外墙渗漏风险, 后期返工整改成本高、难度大^[4]。

1.3 节点连接施工质量通病

节点连接是装配式结构核心, 也是质量管控重灾区, 套筒灌浆连接缺陷尤为突出。据 2025 年全国装配式建筑专项督查汇总数据, 套筒灌浆饱满度抽检平均合格率仅 69.4%, 分仓不规范、封堵不严导致的漏浆、空腔问题占比 31.7%; 灌浆料强度、流动度不合格率达 12.2%, 直接削弱节点连接性能。同时, 后浇节点钢筋排布混乱、锚固长度不足、箍筋缺失问题占比 28.3%, 19.6% 的项目存在梁柱节点钢筋碰撞后随意割断主筋问题, 严重破坏结构受力完整性, 埋下重大安全隐患。

作者简介: 常盈 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

1.4 防水防渗与现浇段质量通病

防水防渗与现浇段质量问题，是当前装配式建筑使用功能通病高发区。据2025年全国多地住建部门装配式工程检查数据，31.4%的项目外墙拼缝、门窗洞口存在渗漏隐患，违规采用浆料替代密封胶+PE棒防水构造的现象频发。现浇节点质量同样不乐观，据广州市花都区2025年第一季度建筑工程实体抽测数据，混凝土强度、钢筋保护层厚度不合格项中，装配式后浇段占比达42%；现浇段振捣不密实、蜂窝孔洞、漏浆问题占比32.5%，钢筋接头布设不规范、保护层偏差超标问题占比25.1%，大幅降低结构整体性与抗震性能。

2 装配式混凝土结构施工常见质量通病产生的原因分析

2.1 前期准备与深化设计不足

深化设计缺失是通病源头，部分项目构件拆分图未经原设计单位审核，节点钢筋排布、预埋件定位未细化，导致现场钢筋碰撞、接驳器无法使用；构件生产图纸深度不足，粗糙面、键槽设置不规范，影响节点黏结力。前期准备不到位体现为施工方案针对性差，灌浆、防水专项方案编制滞后，技术交底流于形式；构件进场验收流于形式，未开展外观、尺寸、性能复检，不合格构件直接用于施工，埋下先天性质量隐患^[5]。

2.2 施工工艺与操作不规范

施工工艺执行不到位是通病直接诱因，套筒灌浆未按规范分仓、注浆压力控制不当，封堵不及时导致漏浆；构件吊装未采用专用吊具，吊装速度过快、定位不准确，未校正完成即拆除临时支撑；防水施工时接缝清理不彻底，密封胶涂刷不均、PE棒填充不到位；现浇段混凝土浇筑振捣不规范，养护不到位导致强度不足。同时，施工人员专业素养不足，灌浆、吊装等关键工序人员无证上岗，操作随意性大，进一步加剧质量问题发生。

2.3 质量管控与检测体系不完善

质量管控体系缺失体现在全过程管控缺位，建设单位首要责任落实不到位，监理旁站流于形式，关键工序无全程监督；见证取样制度不落实，试块养护不规范，检测数据失真。检测手段滞后，套筒灌浆饱满度多依赖事后抽检，难以实现全过程监测；检测标准执行不统一，部分项目擅自降低验收标准，质量问题整改不彻底。此外，成品保护意识薄弱，构件堆放、吊装过程中磕碰破损，后续施工破坏已完成节点与防水构造^[6]。

2.4 专业协同与管理机制不健全

装配式施工涉及设计、生产、施工、监理多方主体，协同机制不健全导致信息脱节，设计与施工、生产与

现场需求不匹配。施工单位缺乏装配式专项管理经验，工序交接验收不严格，各专业交叉施工干扰大；人员培训体系不完善，施工、管理人员对规范、工艺不熟悉，质量意识淡薄。部分项目盲目压缩工期，未按合理工序施工，构件未灌浆即拆除支撑、混凝土未达强度即进行下道工序，引发连锁质量问题。

3 装配式混凝土结构施工常见质量通病防治策略

3.1 强化前期管控，筑牢质量基础

完善深化设计体系，委托原设计单位牵头完成构件拆分、节点深化、预埋件定位等全流程设计，细化钢筋接驳、防水收口、粗糙面构造等细节，通过BIM技术进行三维模拟碰撞检查，提前规避现场钢筋打架、套筒错位等问题。严格构件进场验收流程，建立“外观检查+尺寸复测+性能抽检”三重验收机制，逐件核查构件合格证、出厂检测报告，对保温隔热、受力钢筋等关键指标同步送检，对裂缝、缺棱掉角、尺寸超差的构件一律退场封存。编制专项施工方案，细化灌浆、吊装、防水、现浇节点等关键工序工艺，明确技术参数、验收标准与应急预案，开展全员分级技术交底，留存交底记录并考核，考核合格人员方可上岗作业。

3.2 规范施工工艺，严控过程质量

构件安装采用“放线定位+临时固定+动态校正”标准化工艺，吊装前复核楼面控制线与标高，吊装时选用专用平衡吊具，匀速起降避免构件磕碰，安装后用靠尺、全站仪实时监测垂直度、水平位移，偏差校正合格后锁紧斜撑，待灌浆料强度达到设计值75%以上方可拆除临时支撑。套筒灌浆施工实行“专人专岗、全程旁站、视频留痕、灌浆令”制度，按规范划分注浆仓段，严控灌浆料搅拌时间与流动度，注浆压力保持在0.5~0.8 MPa，封堵密实无漏浆，灌浆完成后采用钻孔内窥镜法+超声波法双重检测饱满度，不合格部位及时返工。防水施工严格执行“基层清理→PE棒填缝→密封胶施打→闭水检验”工序，外墙拼缝、门窗洞口等部位选用耐候中性硅酮胶，涂刷均匀无断点，完工后做24 h闭水试验，杜绝渗漏隐患^[7]。

3.3 完善管控体系，强化检测验收

建立“建设单位负总责、施工单位主责、监理单位旁站监督”的全过程质量管控体系，监理对套筒灌浆、防水施工、现浇节点浇筑等关键工序全程旁站，留存影像与验收记录，推行举牌验收制度，实现质量问题可追溯。优化检测手段与频次，采用回弹法、钻芯法检测现浇段混凝土强度，超声波检测灌浆密度，钢筋扫描仪检测保护层厚度与钢筋间距，严格按规范

比例抽检,检测数据留存归档。加强成品全流程保护,构件堆放采用柔性垫块,吊装使用防滑吊索,已安装构件做好边角防护,后续交叉施工严禁磕碰、凿击构件与防水节点,完工部位及时覆盖保护,避免二次损坏。

3.4 加强协同管理,提升专业素养

建立设计、生产、施工、监理、运维多方协同机制,每周召开专项协调会,同步图纸变更、构件供应、现场施工进度,及时解决工序交叉、技术衔接问题。依托 BIM 信息化平台,实现构件生产、运输、进场、安装、验收全流程溯源,实时更新质量管控数据。强化人员专业培训,针对吊装、灌浆、防水等特种工序开展实操演练,组织学习规范标准与施工要点,考核合格后持证上岗;定期开展质量警示教育,提升全员质量责任意识。科学编排施工工期,预留充足养护与检测时间,严禁盲目赶工、工序倒置,严格执行“上道工序不合格、下道工序不施工”的交接制度,严把工序质量关^[8]。

4 工程案例

4.1 项目概况与初期质量问题诊断

济南市某装配式剪力墙住宅工程项目,总建筑面积 3.2 万 m²,地上 26 层、地下 2 层,结构预制率 40%,主要预制构件包括预制剪力墙、叠合楼板、预制楼梯及空调板,采用套筒灌浆连接、后浇节点现浇工艺。施工至 8 层主体结构阶段性验收时,第三方专项检测暴露多项质量通病:套筒灌浆饱满度抽检合格率仅 65%,12 个检测套筒中有 4 个存在空腔漏浆;预制墙板垂直度最大偏差 8 mm,超规范允许 5 mm 限值;外墙拼缝、门窗洞口渗漏率 12%;后浇节点混凝土回弹强度合格率 71%,钢筋保护层厚度偏差超标率 23%,直接影响结构安全与防水性能,需立即专项整改。

4.2 防治措施实施与技术管控要点

针对质量问题,项目组结合防治策略落地闭环整改:深化设计环节用 BIM 精细化模拟钢筋排布、套筒定位与吊装路径,提前规避钢筋碰撞、接驳错位问题;构件安装采用专用定位夹具+全站仪动态校正,临时支撑固定后双检合格再推进下道工序。套筒灌浆执行专人专岗、分仓注浆、全程旁站、视频留痕,严控灌浆料配比与注浆压力,用内窥镜实时检测饱满度;防水施工按“基层清理→PE 棒填充→密封胶施打”标准化作业,外墙拼缝全数做闭水试验。后浇段优化混凝土配合比,规范振捣与保湿养护,强化钢筋排布与保护层管控,落实举牌验收与工序交接制度。

4.3 整改后检测成效与验证结论

整改完成后,第三方机构对项目主体结构进行全面复检,关键质量指标均达标且优于规范要求:套筒灌

浆饱满度合格率升至 98%,无漏浆、空腔缺陷;墙板垂直度偏差控制在 3 mm 内,叠合板安装高低差 ≤ 2 mm;外墙闭水试验无渗漏,渗漏率归零;后浇节点混凝土强度合格率 100%,钢筋保护层厚度合格率 97.6%。项目后续施工全程沿用该管控模式,未再出现同类质量通病,顺利通过主体验收与竣工验收,充分验证本文防治策略实操性强、治理效果显著,可在同类装配式混凝土结构工程中推广应用。

5 结束语

装配式混凝土结构施工质量通病防控是一项系统工程,贯穿设计、生产、施工、验收全流程,核心在于精准把控关键工序、健全管控体系、构建长效机制。结合实测数据与工程实践可知,套筒灌浆、安装定位、防水防渗是质量管控重点,通过强化前期设计、规范施工工艺、完善检测验收、加强多方协同,可有效消除各类质量通病。随着装配式建筑行业持续发展,需不断优化施工技术与管控模式,提升从业人员专业素养,推动装配式混凝土结构施工质量稳步提升,助力建筑工业化高质量发展。

参考文献:

- [1] 安徽省住房和城乡建设厅.关于 2025 年度建筑工程质量“双随机、一公开”监督检查情况的公告[EB/OL].2025-12-22.<https://dohurd.ah.gov.cn/ztl/gdzt/ssjykgai/58096191.html>.
- [2] 大连市住房和城乡建设局.关于大连市 2025 年建筑节能、绿色建筑和装配式建筑检查情况通报[EB/OL].2026-01-05.https://js.dl.gov.cn/art/2026/1/5/art_4965_2494216.html.
- [3] 沧州市住房和城乡建设局.关于 2025 年市区装配式建筑工程质量专项巡查情况的通报[EB/OL].2025-08-05.<https://zjj.cangzhou.gov.cn/zjj/add100897/202508/232a165d03d748cf82ead0b9bdf11067.shtml>.
- [4] 李波.高层建筑混凝土质量通病及防治措施[J].建材发展导向,2024,22(09):25-28.
- [5] 刘君.房建施工中混凝土施工质量通病及其防治探讨[J].房地产世界,2024(03):131-133.
- [6] 任军平.建筑施工中混凝土质量通病与预防措施[J].江苏建材,2023(05):130-132.
- [7] 曹磊,王盛,王生彦,等.房屋建筑装配式混凝土结构的深化设计及关键施工技术分析[J].四川水泥,2024(02):101-103.
- [8] 杨辉.房屋建筑装配式混凝土结构施工的关键技术研究[J].佛山陶瓷,2024,34(05):159-161.

GPS技术在自然资源测绘中的应用研究

蔡天琪, 王修龙

(山东万相资产评估事务所(普通合伙), 山东 东营 257000)

摘要 自然资源管理对空间数据的精度、时效性要求不断提升, 传统测绘手段面临作业效率低、覆盖范围有限等突出问题。本文以卫星定位技术在资源测绘领域的应用作为切入点, 对其在土地调查、矿产勘查、森林清查、水资源监测、灾害防治等场景中的具体实施方法进行研究分析, 提出构建多源数据融合体系、完善技术标准规范、加强专业人才培养等优化措施, 以期为自然资源测绘工作提供理论参考。

关键词 GPS技术; 自然资源测绘; 高精度定位; 数据融合; 技术规范

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.036

0 引言

自然资源作为国民经济发展的物质基础, 其科学管理依赖于准确的空间信息支撑, 测绘工作在资源调查、权属确认、动态监测等环节中发挥着基础性作用。传统测绘方法在山区、林地等复杂环境下存在通讯困难、作业周期长等局限, 难以满足大范围资源普查的时效要求。卫星定位技术凭借全天候观测、快速定位、覆盖范围广等特点, 为解决上述难题提供了有效途径, 探索其在不同资源类型测绘中的应用方法具有重要的现实意义。

1 GPS技术在自然资源测绘中的应用优势

1.1 有助于实现高精度定位, 保障数据准确性

自然资源测绘对坐标定位的精确度要求始终处于较高水平, 传统测绘手段在复杂地形条件下往往难以满足厘米级甚至毫米级的定位需求。卫星导航定位系统依托多颗卫星的信号交汇解算出目标点的空间位置, 其定位误差可控制在极小范围内, 即便在山区、林地等地貌复杂区域也能保持稳定的测量精度。载波相位差分技术的引入使得实时动态定位精度得到进一步提升, 测绘人员在采集地籍边界、矿产资源分布点时能够获得更为可靠的坐标数据。数据准确性的提高直接减少了后期成果校核、返工修正的频次, 高精度坐标数据为空间数据库建设提供了可靠的数据基础。

1.2 有助于优化作业流程, 提升测绘时效性

自然资源调查项目通常涉及大面积区域的外业采集工作, 传统作业模式需要布设控制网、架设仪器、多次搬站, 整个流程耗时较长且人力投入较大。卫星

定位接收机开机后即可快速捕获卫星信号完成初始化, 测绘人员携带设备直接前往目标地点采集坐标, 省去了烦琐的前期准备环节^[1]。实时差分模式下设备能够即时输出高精度成果, 外业人员当场判断数据质量是否达标, 发现问题立即补测, 避免了返回内业后才发现错误的情况。作业效率的提升使得同等时间内完成的测量任务量明显增加, 对于时效性要求较高的土地变更调查、灾害应急监测等工作场景尤为适用^[2]。

2 GPS技术在自然资源测绘中的应用领域

2.1 土地资源调查与确权登记中的应用

地籍调查需要准确界定每宗土地的空间位置及权属边界, 传统指界方式容易产生纠纷且缺乏客观依据。作业人员携带差分定位接收机前往实地, 在权利人指认的界址拐点处架设对中杆, 待设备完成固定解算后记录该点坐标, 同时在手簿中录入界址点编号、土地用途等属性信息, 相邻界址点按顺序连接即可形成宗地边界闭合图形。采集过程中需注意观察卫星信号质量, 当固定解指标低于设定阈值时应延长观测时间或更换测站位置, 确保每个界址点坐标精度满足不动产登记规范要求。

控制测量基础较薄弱的区域需先建立局部坐标基准, 选择视野开阔、地势稳定的位置埋设控制点标石, 利用静态观测模式连续采集多小时卫星数据, 解算后获得各控制点在国家坐标系下的精确坐标。后续地籍测量以这些控制点为起算依据, 采用实时动态定位方法逐宗采集界址信息, 既保证了成果的统一基准, 也避免了误差累积扩大的问题^[3]。

作者简介: 蔡天琪(1992-), 女, 专科, 研究方向: 自然资源工程—测绘工程类。

2.2 矿产资源勘查与开采监测中的应用

矿区勘探网点的合理布设直接影响资源储量评估的准确性,地质人员在进入作业区前需先规划勘探线间距、点位密度等参数。实际布点时应手持定位设备按照预设方案行进至目标位置,设备屏幕实时显示当前坐标与设计点位的偏差距离,作业员根据偏差值调整行走方向,待误差缩小至容许范围内停止移动完成布点。钻孔、探槽等勘探工程施工前要在开工位置再次采集坐标,确保实际施工点与设计点位重合,防止勘探成果出现空间错位。

开采过程中矿山企业需定期监测开采边界是否超出批准范围,监测员应沿露天采坑边缘行走一周,连续采集坑壁顶部边界点坐标,形成闭合的开采轮廓线。内业人员将本期采集的边界线与上期成果叠加对比,量算两期之间的面积变化量,判断开采活动是否存在越界行为。地下开采引发的地表沉降问题需要布设固

定监测点,在沉陷区内按网格布设观测墩,每月定期采集各监测点高程数据,连续多期观测后绘制沉降曲线,为采空区治理、建筑物搬迁提供依据。

2.3 森林资源清查与生态保护中的应用

森林资源调查采用抽样调查方法,需要在林区内按照规定间距布设固定样地,调查人员依据地形图确定样地中心理论坐标后携带定位设备进山。林下卫星信号易受树冠遮挡影响,作业时应选择林窗或林缘相对开阔位置初始化设备,不同地表覆盖类型对卫星信号接收质量的影响程度差异明显,表 1 列出了典型环境下的观测性能参数。待定位精度稳定后徒步导航至样地中心附近,结合罗盘、皮尺等工具辅助确定准确位置。样地中心桩埋设完成后记录实测坐标,该坐标作为样地永久标识写入调查档案,后续复查时可直接导航至原样地开展工作,避免因位置偏移导致监测数据不可比。

表 1 典型环境 GPS 观测性能对比表

环境类型	平均可见卫星数	PDOP 均值	固定解获取率	建议措施
开阔地	14 ~ 18	1.2 ~ 1.8	≥ 98%	常规作业
稀疏林地 (郁闭度 < 40%)	10 ~ 14	1.8 ~ 2.5	90% ~ 95%	适当延长观测
密林区 (郁闭度 > 60%)	5 ~ 8	3.5 ~ 5.0	60% ~ 75%	选择林窗或采用 PPP 模式
山谷峡谷	4 ~ 7	4.0 ~ 6.5	50% ~ 70%	多星座融合观测
高层建筑区	6 ~ 10	2.5 ~ 4.5	65% ~ 85%	抗多路径天线

林地边界的精确测定需要沿林地外围实地走线,巡查人员手持定位终端沿林缘行进,设备自动记录轨迹点坐标,遇到界址转折处需停留数秒增加采点密度^[4]。外业采集的轨迹数据导入地理信息系统后生成矢量边界线,叠加土地利用现状图即可判断是否存在违规占用林地情况。病虫害监测点的布设同样依赖精确定位,发现虫害发生区域后技术人员在疫情中心、扩散边缘分别设立监测点,定期观测记录虫害蔓延动态,为制定防治方案提供空间分布依据。

2.4 水资源监测与流域管理中的应用

河道管理范围需以河道岸线为基准向外延伸一定距离,岸线位置的准确测定直接关系到水域保护红线的划定。测绘人员选择枯水期开展外业工作,沿河道一侧自上游向下游行进,在水陆交界线处每隔一定距离采集坐标点,转弯、汇流等形态变化显著位置应加密观测。两岸岸线数据采集完毕后连线成面,计算得到河道现状面积,与历史数据对比可掌握河床淤积、岸线蚀退等变化情况,为河道断面分析与冲淤量计算提供本底数据^[5]。

水位站网建设需在流域内选择代表性断面设立监测站点,站点选址既要考虑水文特征,也要满足定位观测条件。站房建成后在顶部安装定位天线,采用连续运行模式获取站点精确坐标,该坐标作为水位观测基准点长期保存。流域分水岭的界定采用差分定位技术沿山脊线采集坐标,结合数字高程模型自动提取的分水线进行校核,确保流域边界划分的科学性,据此计算的流域面积、河网密度等参数才能真实反映区域水资源禀赋。

2.5 地质灾害预警与防治中的应用

滑坡体的稳定性监测需在坡体不同部位埋设位移监测点,勘查人员现场踏勘后选择滑坡后缘裂缝、坡体中部、前缘剪出口等关键位置,在基岩稳定区域浇筑观测墩作为参考基点。监测设备采用强制归心装置固定在观测墩上,首次观测时延长静态采集时长以获得高精度初始坐标,此后按照监测方案规定的频次重复观测,每期解算结果与初值比对即可获得监测点的位移矢量^[6]。当监测点在滑动方向上的累计位移达到临界值,或相邻两期位移速率突然增大时,预警系统根据位移阈值自动触发报警信号。

泥石流沟道的活动性评价需查明沟道纵坡、汇水面积等地形参数,外业测量时沿沟道中心线从沟口向上逐段采集坐标点,每个特征断面处增设横断面测点以获取沟道宽度、堆积厚度等信息。采集的离散点坐标经处理后构建沟道三维模型,计算得出纵坡比降、弯曲系数等定量指标,结合区域降雨资料评估泥石流发生概率,为泥石流危险区划定提供地形参数依据。

3 GPS技术在自然资源测绘中的应用优化

3.1 构建多源数据融合体系,提升测绘信息集成能力

单一数据源难以满足复杂地形环境下的测绘精度需求,信息集成能力的提升需要建立多源数据协同机制。技术人员应当配置兼容多个卫星导航系统的接收设备,在作业时同步接收北斗、伽利略等不同星座信号,解算软件根据各卫星的几何分布、信号强度自动筛选优质观测值参与定位计算,山谷、城区等遮挡严重区域因可见卫星数量增加而获得更稳定的定位结果。

影像数据与定位坐标的关联能够丰富测绘成果的信息维度,外业采集时可在接收机上连接数码相机或搭载摄像模块,每次采集坐标的同时自动触发拍摄功能,照片文件名中嵌入对应测点编号,后期整理时即可快速建立影像与空间位置的对应关系。激光测距仪测得的距离数据结合定位坐标能够推算出隐蔽点位置,作业人员站在已知点架设设备,瞄准无法直接到达的目标点测量斜距、垂直角,软件根据三角函数关系自动计算出目标点三维坐标,悬崖、陡坡等危险区域的测绘作业因此具备了安全可行的实施方案。

3.2 完善技术标准与规范,推动测绘作业规范化建设

作业流程的规范化需要明确各环节的质量控制指标,管理部门应当组织编制涵盖设备检验、外业观测、数据处理全过程的操作细则。设备启用前的检验环节需规定天线高量取方法、对中误差允许值等具体参数,作业人员使用钢卷尺从天线相位中心至地面标志顶面往返丈量,两次读数之差不得超过3 mm,量高记录表应由观测员、检查员双人签字确认。观测时段的时长设定需结合定位精度等级分档规定,不动产测量要求平面精度优于5 cm时静态观测不少于45 min,地籍图根控制测量允许精度放宽至10 cm时可缩短至20 min,避免盲目延长观测造成人力浪费。

数据质量检核标准应当量化各项指标的合格阈值,处理软件输出的基线解算报告中需重点检查固定解比例、同步环闭合差等参数。固定解时段占总观测时长

的比例应达到85%以上,低于此标准的基线需重新观测或剔除,同步环坐标闭合差在平面方向、高程方向分别不超过2 cm、3 cm时方可判定观测质量合格。成果资料归档前需填写完整的元数据信息,每条基线的观测日期、仪器型号、天线高、解算模式等要素录入数据库,为日后成果溯源、精度评估提供依据。

3.3 强化技术能力建设,保障测绘成果质量

测绘人员的技能水平直接影响定位成果质量。作业人员应系统掌握卫星轨道运行规律、信号传播误差来源等基础知识,理解载波相位差分定位原理,能够在外业作业中准确判断接收机的解算状态,识别浮点解与固定解的差异并作出相应处理。

在实操技能方面,作业人员需熟练完成设备架设、参数配置、天线高量取、观测记录等标准流程,能够根据卫星几何分布与信号质量指标判断观测条件是否满足精度要求。数据处理环节要求掌握从原始观测文件导入、基线解算、网平差到坐标成果输出的完整流程,具备基线质量检核、粗差探测与剔除的基本能力。

4 结束语

卫星定位技术在自然资源测绘领域的应用已从单纯的坐标采集拓展至多源数据融合、动态监测预警等深层次方向,其高精度、高效率的特性显著改善了资源调查的数据质量,拓宽了监测覆盖范围。当前实践中仍存在技术标准执行不统一、专业人才储备不足等问题,需要建立健全质量控制体系,加强从业人员技能培训,推动多系统兼容设备的普及应用。随着北斗全球组网完成,国产卫星导航系统在资源测绘中的作用将更加凸显,结合人工智能算法优化数据处理流程、融合遥感影像增强信息提取能力,将成为技术发展的重要方向,为自然资源精细化管理提供更坚实的数据保障。

参考文献:

- [1] 张博,宋驰,张庆山.自然资源工程测量中的高精度地形测绘技术方法分析[J].无人机,2025(12):71-73.
- [2] 陈双森.自然资源调查中的测绘新技术应用研究[J].科技与创新,2025(18):210-212,219.
- [3] 林宪光,朱波.自然资源测绘工程中无人机遥感技术的应用分析[J].中国宽带,2024,20(11):88-90.
- [4] 闫保群.自然资源管理中的测绘技术创新与应用[J].中国战略新兴产业,2024(11):155-157.
- [5] 铁中彪,赵臻.基于地理信息测绘方法的自然资源污染范围研究[J].环境科学与管理,2022,47(12):173-178.
- [6] 陈桦,李安康.探析GPS土地测绘精度的影响因素[J].大众标准化,2022(18):196-198.

绿色施工技术在高层建筑中的应用研究

赵 飞, 沈永飞*, 韩 琳

(青岛海元建设集团有限公司, 山东 青岛 266100)

摘 要 随着城镇化进程的不断推进, 高层建筑数量急剧增加, 建筑施工造成的资源消耗和环境污染问题也越来越突出。绿色施工技术是建筑行业可持续发展的主要途径, 对于缩减碳排放、节省资源、改良建筑全生命周期的管理都有着不可替代的作用。但是目前绿色施工技术在高层建筑中的应用还存在着标准体系不健全、技术成本过高、人员素养不足的问题。本文在系统论述绿色施工技术应用价值的基础上, 对绿色施工技术应用现状及存在的问题进行了详细的分析, 从节能减排技术集成、绿色建材和资源循环利用、智能化施工管理等方面提出了具体的实施途径, 以为高层建筑绿色施工的开展提供参考, 进而促进建筑行业绿色低碳转型。

关键词 绿色施工技术; 高层建筑; 节能减排; 可持续发展; 智能化管理

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.037

0 引言

目前, 我国建筑业正处在转型升级的重要时期, 高层建筑的大规模建设在促进城市发展的同时, 也带来能源消耗大、建筑垃圾多、环境污染重等问题。绿色施工理念的提出为破解这一困境提供了重要路径。把绿色施工技术系统融入高层建筑中, 既是对国家“双碳”目标现实要求的回应, 又是建筑行业高质量发展内在要求的体现。本文拟从绿色施工技术应用的意义出发, 探究其推广应用的途径, 从而为相关实践提供借鉴。

1 绿色施工技术应用于高层建筑的意义

1.1 降低建筑全生命周期的资源消耗与碳排放

高层建筑体量大、建设周期长, 对能源和原材料的消耗极大。绿色施工技术把资源投入控制在设计、建造、运行各个环节上, 从源头上减少由于浪费造成的资源消耗。节能围护结构、可再生能源利用等技术手段的综合应用, 可以大幅度减少建筑运行阶段的碳排放总量, 对建筑领域实现“双碳”目标起到积极的作用。与此同时, 绿色施工技术的推广使用可以促使建筑企业形成全生命周期成本管理观念, 从全局角度安排资源分配, 对于改善当下能源紧张和气候变化状况有着十分重要的现实意义^[1]。

1.2 推动建筑行业绿色转型与可持续发展

建筑行业一直以来都采用资源消耗大、粗放式发展的模式, 而绿色施工技术的应用给行业转型带来了

新的机遇。将绿色理念融入工程建设的全过程之中, 可以促使建筑企业自觉地改善施工工艺、革新管理方式, 从而产生出内在的发展动力。这不但可以提高企业自身的市场竞争力, 也可以带动上下游产业链一起向绿色低碳方向发展。随着绿色建筑政策法规的不断完善, 具有绿色施工核心竞争力的企业在未来建筑市场竞争中将占据更优位置, 对建筑行业高质量、可持续发展起到引导性的作用^[2]。

1.3 提升高层建筑的环境适应性与社会价值

绿色施工技术的运用可以明显改善高层建筑对周边自然环境的影响, 用噪声控制、扬尘治理、水资源循环利用等手段来减少施工期间给周围居民生活带来的影响。绿色建筑由于具有较好的室内环境品质、较低的能耗成本, 给使用者带来更好的、健康舒适的空间体验, 从而提高建筑的社会认可度和综合使用价值。绿色施工理念的全面推行有益于在全社会营造绿色建造的良好风气, 促使城市人居环境得到整体改善和品质提高, 实现经济效益和社会效益的有机融合^[3]。

2 绿色施工技术在高层建筑中的应用现状与问题

2.1 绿色施工标准体系尚不完善

目前, 我国绿色施工领域虽然已经初步形成了一套比较完整的标准规范体系, 但是整个体系还不完善, 各个地区、各个环节之间存在着明显的衔接断层。现行标准对于技术指标的设定缺少针对性和操作性, 部分条文过于原则化, 不能给高层建筑施工提供准确的

作者简介: 赵飞(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑设计。

*通信作者: 沈永飞(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工。E-mail: 784704332@qq.com

技术指导。同时,标准的修订更新速度赶不上绿色施工技术发展的速度,造成新型技术缺少相应的规范依据,施工企业实际操作时常常处于“无标可依”或者“标准模糊”的状况之中。由于各地配套细则的差别很大,绿色施工标准的落实执行效果受到影响,在某种程度上阻碍了绿色施工技术的推广和规范化使用。标准体系滞后、碎片化已经成为目前影响高层建筑绿色施工整体水平提高的主要障碍^[4]。

2.2 技术应用成本高且推广难度大

绿色施工技术一般涉及到新型材料采购、先进设备引进和专项技术培训等诸多方面的支出,初期建设成本远高于传统的施工方式。在市场竞争日趋激烈,利润空间越来越小的情况下,许多施工企业出于短期经济利益考量,对绿色施工技术持观望态度,主动应用的积极性不高。尤其是中小型建筑企业,自身资金实力和技术储备都比较薄弱,承担绿色转型成本的能力更小。除此之外,绿色施工技术的综合效益一般要经过较长时间的考察才会体现出来,短期内很难产生直接的经济效益,从而降低企业推广使用该技术的内在动力。高成本和低回报之间的现实矛盾,使得绿色施工技术的规模化推广在很长一段时间内还会受到很大的阻碍^[5]。

2.3 施工人员绿色技术素养与执行能力不足

绿色施工技术的落实靠的是施工一线人员的规范操作和执行。但是目前建筑行业的从业人员绿色技术素养普遍较低,很多施工人员对于绿色施工的理念认识不清,对相关技术规程的掌握也较少。部分项目虽然已经制定出绿色施工方案,但是由于人员培训制度不健全、考核监督不到位等原因,造成方案在实际执行过程中只是停留在表面,技术要求不能得到很好的落实。与此同时,基层管理人员的绿色意识薄弱,在日常施工组织中缺少把绿色理念融入管理决策中的自觉性,造成绿色施工整体执行水平高低不一。人员素养不足的问题如果不能得到有效的改善,将会一直阻碍绿色施工的各项技术措施取得实际效果,是造成行业绿色转型深层障碍的因素之一。

3 绿色施工技术在高层建筑中的应用策略

3.1 节能减排技术的系统集成与优化应用

推进高层建筑绿色施工,首先要创建起节能减排技术的系统集成应用体系,把各种节能技术有机地融合起来,形成协同增效的施工方案。施工组织上要根据工程特点制定出精细化的节能施工方案,科学安排

高能耗设备的使用时间,减少施工高峰期的电力消耗,达到能源的均衡分配。从施工工艺上来说,积极推行数字化模拟技术,对施工工序进行预演优化,减少由于方案不合理造成的返工浪费。同时,大力推行装配式建造方式,把主要构件转移到工厂预制生产,可以减少现场湿作业量、减少建筑垃圾产生、缩短施工工期、节约综合建设成本。从设备能效管理角度来讲,要大力推广使用变频节能设备和智能用电管理系统,对施工现场的塔吊、电梯、照明等主要用电设备实行动态监测和精确调节,从而有效地提高能源利用率。另外,还应该充分利用可再生能源为施工现场提供辅助能源供应,减少对传统化石能源的依赖程度,从工艺、设备、设计、现场管理等各个方面提高高层建筑施工阶段的绿色化水平。采用以上多种节能技术进行系统集成、协同配合,可以促使施工团队产生节能降耗的管理自觉,使绿色施工由被动执行转变为主动作为。

以某高层建筑项目为例,在施工期间针对施工现场能耗分散、管理粗放的问题,制定了一套节能减排系统集成方案。项目管理人员先对全场用电设备进行梳理,把塔吊、混凝土泵送设备等高耗能设备统一接入能耗监控系统,利用实时数据采集掌握各个设备的用电规律,进而合理安排作业计划以达到错峰的目的,避免出现多台高耗能设备同时运转导致电力浪费的情况。同时,项目部把部分标准层预制构件的生产转移到工厂进行,现场只负责吊装和拼接,大大减少了现场混凝土浇筑量和模板使用量,施工垃圾产生量明显减少。施工临时照明全部换成感应式节能灯具,非作业区实行自动断电。经过一个施工周期的运行,该项目的综合能耗比同类传统的施工项目低很多,节能减排的效果非常明显,为绿色施工目标的实现打下了坚实的基础。

3.2 绿色建材与资源循环利用体系构建

绿色建材的推广使用以及资源循环利用体系的构建,属于高层建筑绿色施工的关键部分。施工单位按照工程实际需要选择认证的低碳、低污染、可再生建材做施工材料,从源头上减少施工过程中有害物质的排放。从采购管理角度来说,要创建绿色建材采购制度,确定各种建材的环保技术指标,把绿色性能当作供应商挑选的关键考量标准,促使整个供应链实现绿色转型。从资源循环利用的角度出发,要建立完善的施工废弃物分类收集和再利用体系,对施工现场产生的余料和废料制定专门的回收方案,达到废弃物减量化、资源化的处理效果。施工用水实行循环利用,设置现

场雨水收集系统及废水处理设施, 养护用水、洗车用水等净化处理后循环使用, 减少施工阶段水资源消耗, 还要加强周转材料的精细化管理, 延长脚手架、模板等周转材料的使用寿命, 减少一次性材料的消耗比例, 形成一个完整的高层建筑施工绿色材料管理闭环。绿色建材的推广以及资源循环利用体系的形成, 要依靠建设单位、施工单位和材料供应商三者共同推动, 任何一个环节的缺失都会影响到整个体系的运作效率。

以某高层建筑项目为例, 在推行绿色施工时, 就创建了施工废弃物分类处理及资源循环利用的机制。项目部在施工现场设置分类收集区, 把混凝土余料、废旧钢筋、木方边角料、废弃包装材料等分类存放, 并与有关回收企业签订协议, 定期将可再生废料运出处理。现场剩余的混凝土经过专用设备破碎后, 用作路面垫层材料重新铺在场内道路; 废旧钢筋集中起来, 送到钢材回收企业进行熔炼再利用。项目部建立了施工用水循环系统, 将混凝土养护产生的废水、车辆冲洗用水集中到沉淀池中, 经过滤净化后再利用到现场洒水降尘、绿化养护上, 从而达到施工用水闭路循环的目的。通过以上措施的综合使用, 本项目施工废弃物外运量大大减少, 水资源消耗量明显下降, 资源循环利用率得到提高。

3.3 智能化施工管理与绿色监控机制建立

智能化技术与绿色施工的深度整合, 是改善高层建筑绿色施工管理水准的关键途径。施工现场管理上要积极引进物联网、云计算等新一代信息技术, 创建起覆盖施工全过程的智能化绿色监控平台, 在施工现场布置扬尘、噪声、能耗等环境监测传感器, 对各类环境指标实施实时采集和动态剖析, 一旦监测数值超过设定界限, 系统就会发出预警信号并启动相应的管控举措。从项目管理角度来讲, 要充分挖掘出数字化技术在施工组织、协调方面所具有的核心价值, 对施工方案展开预演改良工作, 提前发现并消除由于施工而造成的资源浪费问题。从绿色施工评价角度出发, 创建动态评价体系, 就各个施工阶段的绿色指标达成情况展开定时考核并加以量化评定, 把评价成果与项目管理团队的绩效考核相联系起来, 从而建立一种有效的激励约束机制。另外, 还要加强施工人员的系统培训, 把绿色施工理念和操作规程列入岗前培训必修内容, 切实提高一线施工人员的绿色技术素养, 构建实时监测、动态预警、及时整改、持续优化的闭环管理体系。需要指出的是, 智能化监控平台的创建是手段, 把平台数据真正变成管理决策依据, 实现绿色施工由经验管理到数据驱动管理的根本转变才是重点。

某高层建筑项目在施工管理中引入智能化绿色监控系统, 实现了施工现场环境监测、施工过程管理等各方面的数字化。项目部在施工现场各个重要区域设置扬尘浓度、噪声分贝、能耗等数据采集终端, 所有监测数据及时上传至项目管理平台, 管理人员通过电脑或者移动端随时了解各个区域的环境指标的变化情况。当某个区域的扬尘浓度超过设定的阈值时, 系统就会立刻发出预警信息给责任人, 并且自动开启周边喷淋设备进行降尘, 不需要人工操作, 响应速度大大加快。项目部用数字化模型对各个楼层的施工工序进行预排演, 改善材料吊运路线及作业顺序, 缩减无效工序和物料二次搬运。项目管理团队每个月根据平台数据对各个分项绿色指标的完成情况进行打分, 把打分结果作为班组绩效考核的依据, 有效地调动了一线人员落实绿色施工要求的积极性。智能化监控体系的创建大大提高了该工程项目绿色施工管理的精确度和执行速度。

4 结束语

绿色施工技术 in 高层建筑中得到了广泛的应用, 这是建筑行业践行可持续发展、积极响应“双碳”战略的重要方式。面对标准体系不健全、推广成本过高、人员素质欠缺等现实问题, 建筑行业的各个主体应该共同努力, 依靠节能减排技术的系统整合、绿色建材和资源循环利用体系的创建、智能化施工管理机制的建立, 促使绿色施工观念由顶层设计向实践落地。只有把绿色发展理念真正融入工程建设的各个环节之中, 高层建筑绿色施工才能实现从被动应对到主动作为的根本转变, 为建筑行业的高质量发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 单川, 张章, 刘佩, 等. 绿色施工技术在高层建筑中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(23):83-85.
- [2] 孙吉雷, 冯霄. 绿色施工技术在高层建筑中的应用研究 [J]. 中国厨卫, 2024, 23(07):268-270.
- [3] 龙健. 绿色施工背景下建筑工程管理模式创新策略 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(16):196-198.
- [4] 孙波, 张粟瑞. 高层房建工程中的钻孔灌注桩地基施工技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025(13):157-159.
- [5] 李坤. 绿色施工技术在高层建筑节能建造中的应用研究 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(11):134-137. <https://www.cqvip.com/doc/journal/100004471760?sign=8a55ecb6e55782e69214ecc0f64c772fac9ba f0ad8fd0a21f284ac8487fb474&expireTime=1795510771707&resourceId=1000004471760&type=1>.

水利工程混凝土施工质量与耐久性研究

张有铜¹, 程岩卫²

(1. 中国葛洲坝集团路桥工程有限公司, 湖北 宜昌 443002;

2. 山东禹科检测技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 混凝土施工质量直接决定水利工程承载能力、运行安全与使用寿命, 耐久性是其抵御复杂水环境侵蚀、长期稳定运行的关键。为解决水利工程混凝土强度不足、裂缝、密实度不够等问题, 本文探究其施工质量影响因素与控制要点, 分析耐久性衰减机制, 提出针对性控制措施与提升技术。通过正交试验优化混凝土配合比, 明确施工关键控制参数, 经抗渗、抗冻、抗腐蚀性性能测试验证技术有效性。结果表明, 优化配合比使混凝土 28 d 抗压强度提升 12.3%, 抗渗等级达 P8 以上, 抗冻循环超 300 次; 严格落实施工控制可显著降低裂缝等缺陷发生率, 提升结构整体性; 结合表面防护与内部改性, 可延长混凝土使用寿命 15% 以上。

关键词 水利工程; 混凝土施工; 施工质量控制; 耐久性

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.038

0 引言

混凝土凭借其强度高、整体性好、可塑性强、造价低廉等优势, 成为水利工程主体结构的核心材料, 广泛应用于大坝、溢洪道、涵闸、渠道等各类水利设施中。水利工程长期处于复杂水环境中, 面临水压力、冻融循环、水质侵蚀、干湿交替等多种不利因素作用, 混凝土施工质量与耐久性直接关联工程结构的安全性、稳定性及使用寿命。混凝土施工是一个系统性过程, 涉及配合比设计、原材料选用、搅拌、运输、浇筑、振捣、养护等多个环节, 任一环节出现疏漏, 均会导致混凝土强度不足、密实度不够、裂缝等质量缺陷^[1], 进而降低结构耐久性, 引发工程安全隐患。同时, 水利工程混凝土长期受外界环境侵蚀, 易发生碳化、氯离子渗透、碱-骨料反应等现象, 导致混凝土强度下降、表面剥落、钢筋锈蚀, 最终影响工程正常运行。本文聚焦水利工程混凝土施工质量与耐久性核心问题, 通过试验探究施工质量影响因素与耐久性衰减机制, 优化施工工艺与配合比, 提出针对性的质量控制与耐久性提升措施, 构建完善的控制体系, 解决施工中的质量难题, 保障水利工程长期稳定运行。

1 水利工程混凝土性能试验研究方案

1.1 试验原理

水利工程混凝土施工质量的核心评价指标包括抗压强度、抗拉强度、密实度、抗渗性等, 耐久性主要评价指标包括抗冻性、抗渗性、抗腐蚀性、抗碳化能

力等, 两者相互关联、相互影响: 施工质量达标是保证耐久性的前提, 而耐久性提升可进一步巩固施工质量, 延长工程使用寿命。

试验的核心原理是通过优化混凝土配合比, 调控原材料用量与比例, 提升混凝土密实度与力学性能; 通过规范施工各环节操作, 减少质量缺陷, 确保混凝土结构完整性; 通过抗渗、抗冻、抗腐蚀等性能测试, 验证混凝土耐久性, 明确影响耐久性的关键因素; 结合表面防护与内部改性技术, 抑制环境侵蚀作用, 提升混凝土长期耐久性。

针对水利工程混凝土的工作环境特点, 重点探究冻融循环、氯离子渗透、碱-骨料反应对混凝土耐久性的影响机制: 冻融循环会导致混凝土内部孔隙水结冰膨胀, 产生内应力, 引发裂缝; 氯离子渗透会导致钢筋锈蚀, 破坏混凝土与钢筋的黏结力; 碱-骨料反应会产生膨胀性产物, 导致混凝土开裂、剥落, 最终降低结构耐久性。

1.2 试验仪器与试剂

1.2.1 试验仪器

试验所用仪器均经定期校准, 精度符合试验要求, 主要包括: 电子万能试验机、混凝土抗渗仪、冻融试验机、氯离子渗透仪、碳化试验箱、混凝土搅拌机、振动台, 以及电子天平、坍落度筒、各类标准试块等常规仪器, 分别用于混凝土力学性能、耐久性测试及试块制备、配合比调配。

作者简介: 张有铜 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利施工。

1.2.2 试验试剂与原材料

试验所用原材料均符合水利工程混凝土施工相关标准：水泥采用 P.0 42.5 级普通硅酸盐水泥；粗骨料为 5~25 mm 碎石，含泥量 \leq 1%、压碎值 \leq 12%；细骨料为中砂，细度模数 2.3~3.0，含泥量 \leq 3%；拌和用水为标准饮用水；外加剂选用高效减水剂（减水率 \geq 20%）、引气剂；掺合料采用 II 级粉煤灰、矿渣粉；试验试剂为氯化钠、氢氧化钠等分析纯试剂，用于耐久性相关测试。

1.3 试验样品

试验样品为模拟实际施工工况的混凝土试块，按正交试验设计制备不同配合比试块，每组 3 组平行样，试块尺寸匹配对应测试指标。所有试块按规范浇筑、振捣、养护，养护温度 20 ± 2 °C、相对湿度 \geq 95%，养护时间设 7 d、28 d、90 d，用于不同龄期性能测试。

1.4 试验方法

1.4.1 混凝土配合比优化试验

采用正交试验设计，选取水胶比、水泥用量、高效减水剂掺量、粉煤灰掺量 4 个因素，每个因素设置 3 个水平，探究各因素对混凝土 28d 抗压强度、坍落度及抗渗性的影响，优化确定最佳配合比。正交试验因素与水平如下：水胶比（0.45、0.50、0.55），水泥用量（ 320 kg/m^3 、 340 kg/m^3 、 360 kg/m^3 ），高效减水剂掺量（0.8%、1.0%、1.2%），粉煤灰掺量（15%、20%、25%）。通过极差分析与方差分析，明确各因素对混凝土性能的影响程度，确定最佳配合比参数。

1.4.2 施工质量控制试验

模拟水利工程混凝土实际施工流程，分别设置规范施工组与对照施工组，对照施工组不严格控制施工环节，规范施工组严格落实各环节质量控制措施，具体包括：原材料检验与控制（严格筛选原材料，控制含泥量、级配等指标）、搅拌控制（控制搅拌时间、投料顺序，确保搅拌均匀）、运输控制（控制运输时间 \leq 1.5 h，防止混凝土离析）、浇筑控制（控制浇筑厚度、浇筑速度，避免分层离析）、振捣控制（采用插入式振捣器，振捣至混凝土表面泛浆、无气泡为止，避免漏振、过振）、养护控制（养护时间 \geq 14 d，根据环境温度调整养护方式，高温洒水养护，低温保温养护）^[2]。对比两组混凝土试块的质量缺陷发生率、力学性能及耐久性指标，验证施工质量控制措施的有效性。

1.4.3 耐久性测试方法

（1）抗渗性测试：按照《混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》（GB/T 50082-2024）标准，采用

混凝土抗渗仪逐级加压，从 0.1 MPa 开始每 8 h 升压 0.1 MPa，直至试块渗水，记录压力值确定抗渗等级。（2）抗冻性测试：采用快速冻融法，将 28 d 龄期试块放入冻融试验机，设定 -20 ± 2 °C 冻结 4 h、 20 ± 2 °C 融化 4 h，每 25 次循环测试质量与强度损失率，达标后停止试验并记录循环次数。（3）氯离子渗透测试：按《混凝土抗氯离子渗透能力电气指示的标准试验方法》（ASTM C1202）标准，采用氯离子渗透仪，测试 60 V 直流电压下 6 h 内通过试块的氯离子电量，评价抗渗透能力。（4）抗碳化测试：将 28 d 龄期试块放入碳化试验箱（温度 20 ± 2 °C、湿度 $70\pm 5\%$ 、 CO_2 浓度 $20\pm 3\%$ ），定期采用酚酞滴定法测定碳化深度，评价抗碳化能力。

1.4.4 耐久性提升技术试验

选取优化后的最佳配合比混凝土试块，分别采用内部改性与表面防护两种耐久性提升技术，设置空白对照组、内部改性组、表面防护组，对比三组试块的耐久性指标。内部改性采用掺加矿渣粉与引气剂的方式，改善混凝土内部孔隙结构；表面防护采用涂刷渗透型防水涂层的方式，阻隔外界水分与有害物质渗透。通过抗渗、抗冻、氯离子渗透等测试，验证耐久性提升技术的效果。

1.4.5 质量控制措施

试验过程中采取严格的质量控制措施，确保试验结果的准确性与可靠性：原材料进场前严格检验，不合格原材料严禁使用；配合比严格按设计要求调配，准确计量各原材料用量，计量误差 \leq $\pm 2\%$ ；试块制备、浇筑、振捣、养护严格遵循规范要求，避免人为操作误差；每组试验设置 3 组平行试块，测试数据取平均值，若某组数据偏差过大（偏差 $>$ 10%），剔除该数据后重新测试；试验仪器定期校准，确保测试精度；同步记录试验过程中的温度、湿度等环境参数，避免环境因素对试验结果的影响。

2 水利工程混凝土质量控制与耐久性试验研究

2.1 混凝土配合比优化结果

正交试验结果表明，各因素对混凝土 28 d 抗压强度的影响程度从大到小依次为：水胶比 $>$ 水泥用量 $>$ 粉煤灰掺量 $>$ 高效减水剂掺量；对混凝土抗渗性的影响程度从大到小依次为：水胶比 $>$ 粉煤灰掺量 $>$ 水泥用量 $>$ 高效减水剂掺量。通过极差分析与方差分析，确定水利工程混凝土最佳配合比为：水胶比 0.48，水泥用量 340 kg/m^3 ，高效减水剂掺量 1.0%，粉煤灰掺量 20%。

最佳配合比下，混凝土坍落度 180 ± 10 mm，工作

性能良好; 28 d 抗压强度 48.6 MPa, 较基准配合比提升 12.3%, 抗渗等级达 P8, 氯离子渗透电量 850 C, 抗渗抗蚀能力较强。水胶比过大易降低密实度与性能, 过小则影响流动性, 适量掺加粉煤灰与减水剂可兼顾性能与经济性。

2.2 施工质量控制效果分析

规范施工组与对照施工组的对比试验结果显示, 规范施工组混凝土试块的质量缺陷发生率仅为 3.2%, 远低于对照施工组的 18.7%, 主要质量缺陷(裂缝、蜂窝、麻面)的发生率显著降低。力学性能测试表明, 规范施工组混凝土 28 d 抗压强度平均值为 47.9 MPa, 变异系数为 2.8%, 对照施工组为 42.3 MPa, 变异系数为 6.5%, 规范施工组混凝土强度更高、稳定性更好。

耐久性测试显示, 规范施工组抗渗等级 P8、抗冻循环 320 次、氯离子渗透电量 880 C、28 d 碳化深度 2.1 mm, 均优于对照施工组(抗渗 P6、抗冻 210 次等)^[3]。可见规范施工可减少缺陷、提升性能, 其中振捣与养护影响最显著, 需严格规范操作。

在施工各环节中, 振捣与养护对混凝土质量的影响最为显著: 漏振、过振会导致混凝土密实度不足、表面蜂窝麻面, 甚至产生裂缝; 养护不及时、养护时间不足, 会导致混凝土表面失水过快, 产生收缩裂缝, 降低强度与耐久性。因此, 施工过程中需重点控制振捣与养护环节, 确保操作规范、到位^[4]。

2.3 耐久性影响因素分析

试验结果表明, 水利工程混凝土耐久性主要受水胶比、施工质量、环境因素、原材料性能等因素影响: 水胶比是影响混凝土耐久性的核心因素, 水胶比越大, 混凝土内部孔隙越多, 密实度越低, 抗渗、抗冻、抗腐蚀能力越弱; 施工质量不佳, 会导致混凝土存在裂缝、蜂窝等缺陷, 为外界水分与有害物质渗透提供通道, 加速耐久性衰减; 冻融循环、氯离子渗透、碳化等环境因素, 会持续侵蚀混凝土结构, 导致混凝土强度下降、表面剥落、钢筋锈蚀; 原材料性能不合格, 如骨料含泥量过高、水泥安定性不良, 会直接影响混凝土质量与耐久性^[5]。

2.4 耐久性提升技术效果验证

耐久性提升技术试验结果显示, 与空白对照组相比, 内部改性组与表面防护组混凝土的耐久性均显著提升: 内部改性组混凝土抗冻循环次数达到 380 次, 较空白对照组提升 21.9%; 氯离子渗透电量为 620 C, 较空白对照组降低 27.1%; 28 d 碳化深度为 1.5 mm, 较空白对照组降低 28.6%。表面防护组混凝土抗冻循环

次数达到 360 次, 较空白对照组提升 15.6%; 氯离子渗透电量为 680 C, 较空白对照组降低 20.0%; 28 d 碳化深度为 1.7 mm, 较空白对照组降低 23.8%。

3 结论

本文聚焦水利工程混凝土施工质量与耐久性核心问题, 通过正交试验、对比试验等方法, 系统探究了混凝土配合比、施工环节、耐久性影响因素及提升技术, 构建了一套科学可行的施工质量与耐久性控制体系, 得出以下主要结论:

1. 优化后的水利工程混凝土最佳配合比为: 水胶比 0.48、水泥用量 340 kg/m³、高效减水剂掺量 1.0%、粉煤灰掺量 20%。该配合比下混凝土工作性能、力学性能与耐久性均满足水利工程施工要求, 可实现经济性与实用性的统一。

2. 施工质量控制是提升混凝土耐久性的关键, 严格落实原材料检验、搅拌、运输、浇筑、振捣、养护等各环节质量控制措施, 可显著降低混凝土质量缺陷发生率, 提升混凝土力学性能与耐久性, 确保工程结构完整性。

3. 水胶比、施工质量、冻融循环、氯离子渗透是影响水利工程混凝土耐久性的主要因素, 采用内部改性(掺加矿渣粉与引气剂)与表面防护(涂刷渗透型防水涂层)相结合的技术, 可有效提升混凝土抗渗、抗冻、抗腐蚀能力, 延长工程使用寿命。

本文为水利工程混凝土施工质量与耐久性控制提供了技术参考, 但水利工程工况复杂, 不同地区、不同类型的水利工程混凝土施工面临的环境条件与质量问题存在差异, 未来可结合具体工程实际进一步优化施工工艺与耐久性提升技术, 探索新型混凝土材料在水利工程中的应用, 不断完善施工质量与耐久性控制体系, 确保水利工程长期稳定、安全运行, 充分发挥其水利调控、防洪减灾等综合效益。

参考文献:

- [1] 冯旭. 混凝土早期养护质量管控与裂缝防治技术研究[J]. 中国品牌与防伪, 2025(08):122-124.
- [2] 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(09):181-184.
- [3] 郭佳伟. 混凝土施工技术 with 质量控制研究[J]. 土木工程, 2025, 14(12):2897-2902.
- [4] 元悦成. 混凝土防裂技术在水利工程施工中的应用[J]. 中国厨卫, 2025, 24(02):282-284.
- [5] 刘佳茹. 高性能混凝土在水利工程施工中的应用研究[J]. 科海故事博览, 2025(18):115-117.

碳五分离装置溶剂再生釜 腐蚀机理研究及预防

陈冰

(中韩(武汉)石油化工有限公司, 湖北 武汉 435000)

摘要 本文基于碳五分离装置的工作原理及操作条件, 针对系统溶剂精制单元的关键设备——溶剂再生釜出现的腐蚀减薄现象进行深入分析, 揭示了其腐蚀机理: 萃取系统所使用的循环溶剂 DMF 与流程中的残余水在高温条件下发生水解反应, 生成甲酸等酸性物质, 而甲酸对设备所采用的碳钢材质具有显著的腐蚀性。由于生产需要, 再生釜长期维持在高温条件下运行, 不仅加速了 DMF 的水解速率, 也加剧了甲酸对设备的腐蚀作用, 导致溶剂再生釜出现严重的腐蚀减薄现象。基于此, 本文提出了针对性的预防措施, 从温度压力控制、系统水含量管理等方面进行优化, 以期有效降低 DMF 水解程度、减缓甲酸腐蚀速率、延长设备使用寿命提供参考, 进而保障碳五分离装置长周期安全稳定运行。

关键词 腐蚀机理; 高温水解; DMF 溶剂; 碳钢设备

中图分类号: TE65

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.039

0 引言

碳五分离装置作为乙烯装置重要的下游配套单元, 主要以乙烯装置副产的裂解碳五馏分为原料, 采用先进分离工艺将高附加值的双烯烃组分(主要为异戊二烯、环戊二烯、间戊二烯)从复杂混合物中高效分离。当前工业应用中, DMF(二甲基甲酰胺)萃取法因其优异的分选性能和经济性而成为主流工艺^[1], 中韩(武汉)石油化工有限公司碳五分离装置亦采用此成熟技术进行异戊二烯的工业化生产。DMF 是一种有机化合物, 其分子式为 C_3H_7NO , 是一种在化工生产中常用的有机溶剂, 具有沸点高、稳定性好等优点, 除卤代烃以外能与水及多数有机溶剂任意混合, 对多种有机化合物和无机化合物均有良好的溶解能力, 因此在石油石化行业中已经得到了广泛的应用。DMF 萃取法自提出至今已有几十年的历史, 经过长期充分的实践已经验证了其在化工生产中的实用价值。在该工艺流程中, 异戊二烯在 DMF 溶剂中溶解度大, 并且有着损耗较少、成本较低、选择性良好的优点, 纯 DMF 溶剂在常温常压下对碳钢设备几乎不产生腐蚀, 在异戊二烯分离过程中, DMF 表现出优异的选择性和较低的溶剂损耗, 同时可协同分离环戊二烯、间戊二烯等多种高价值副产品, 具有良好的经济效益。然而, 在实际工业运行中, 溶剂再生系统长期处于高温、含水的复杂环境中, DMF 的化学稳

定性受到挑战, 从而引发设备腐蚀问题, 这一现象值得深入研究与系统解决。

1 DMF 水解诱导的腐蚀机理与长周期影响分析

1.1 工艺流程与腐蚀现象

碳五分离装置以 DMF 作为溶剂进行相关组分的萃取分离, 溶剂再生釜的工作是将萃取单元的循环溶剂 DMF 通过高温分离, 解析出其中所含焦质, 并在氮气保护下排至废渣桶, 然后再送至厂外处理, 通过再生釜得到的粗溶剂进入溶剂精制塔内进一步精制处理, 经过精制并冷凝后的 DMF 进入萃取单元继续作为循环溶剂使用。溶剂再生釜采用减压蒸馏操作, 日常操作温度 $100 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$, 压力 -0.082 MPa , 真空系统由真空泵维持。DMF 在中性、常温、常压工作条件下化学性质稳定, 对设备管线等不具有腐蚀性。

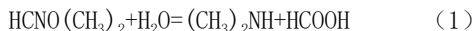
某公司碳五分离装置在 2022 年 7 月 3 日对溶剂再生釜进行日常切换排焦操作过程中, 发现其中一台溶剂再生釜 E-501S 腐蚀严重, 已出现减薄穿孔情况, 存在物料泄漏的相关风险, 对于日常生产有较大的安全隐患, 亟需查明原因。

1.2 水解反应机理分析

溶剂再生釜本身材质为碳钢, DMF 本身并不具有腐蚀性, 深入研究表明, 虽然 DMF 化学性质较为稳定,

作者简介: 陈冰(1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 石油化工。

但在高温条件下遇水则易发生水解反应,进一步生成甲酸和二甲胺等产物。溶剂再生釜由于生产需要长期维持在 100 °C 以上的高温操作条件,因此会极大地促进该反应进行,该反应的方程式如下:



该反应的产物之一(甲酸)是一种有机物,其官能团为羧基,属于羧酸,其化学式为 HCOOH,在常温、常压下为无色有刺激性气味的液体,具有较强的腐蚀性,其水溶液呈现弱酸性,在水中电离产生 H^+ ,与金属材料发生化学反应,对设备管线等危害极大,长期运行必然会导致设备腐蚀,不仅会缩减设备运行周期,对于日常生产更是存在着较大的安全隐患。为验证上述机理,对再生釜内残留物进行了化学成分分析。实验结果显示,残留物中甲酸含量高达 0.85 wt%,pH 值降至 3.2,同时检测到大量 Fe^{2+} 离子。电化学测试表明,在含 0.8% 甲酸的水溶液中,碳钢在 95 °C 下的腐蚀速率达到 1.28 mm/a,远高于装置设计允许的 0.1 mm/a。甲酸对碳钢的平均腐蚀速率与温度有关,在甲酸浓度一定时,其平均腐蚀速率在 20 ~ 90 °C 温度范围内逐渐增大,在 90 °C 时平均腐蚀速率达到最大值,之后趋于平稳^[2]。由于溶剂再生釜日常操作温度大于 90 °C,此时甲酸对于设备的平均腐蚀速率最大,对于设备运行影响也最大。

1.3 腐蚀影响机理

腐蚀过程本身产生的 Fe^{2+} 离子,不仅是腐蚀产物,更扮演了催化剂的角色。研究明确指出, Fe^{2+} 离子对釜内残余的双烯烃(如异戊二烯)聚合反应具有显著的催化作用。这种催化聚合导致再生釜内结焦现象加剧。生成的焦质附着在加热盘管及釜壁,严重恶化传热效率。为维持设定的分离效果,操作上往往被迫提高加热蒸汽量或温度,这反过来又进一步加速了 DMF 的水解和甲酸的生成速率。如此便形成了一个难以打破的“腐蚀(产生 Fe^{2+})→催化结焦→传热恶化→温度升高→加速腐蚀(产生更多 Fe^{2+})”正反馈恶性循环,使得设备状态急剧恶化。整个影响过程如图 1 所示。

从该流程可以看出,DMF 在高温下发生水解生成了甲酸,甲酸本身的酸性和腐蚀性会对设备运行状况造成影响,进而影响系统长周期运行。而腐蚀导致的铁离子浓度升高会加速双烯烃聚合,造成结焦堵塞,同样也会影响系统的长周期运行。因此,针对该腐蚀过程进行预防,尽可能减小设备腐蚀程度,对于延长再生釜的运行周期,维持系统的长期稳定运行有着重要意义^[3]。

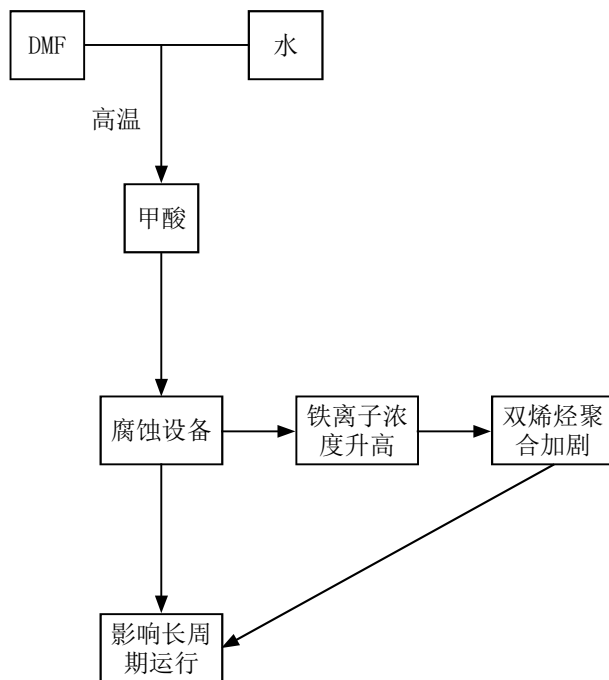


图 1 DMF 水解对设备长周期运行的影响

2 腐蚀预防与长周期运行保障措施

2.1 优化操作参数

1. 减压蒸馏。研究表明,DMF 发生水解反应的反应速率受温度影响较大,当温度上升时,该水解反应速率上升,而在常温下 DMF 几乎不发生水解。实验证明,DMF 在 90 °C 以下时水解程度较低,对系统的影响较小,因此可以通过控制操作温度来抑制 DMF 水解。溶剂再生釜主要作用是将循环溶剂蒸馏来达到分离提纯的效果,DMF 沸点为 154 °C,在该温度下 DMF 发生水解反应速率较快。因此,在常温、常压环境下通过控制操作温度来抑制 DMF 水解的可行性较小。但通过真空系统维持的负压操作,可有效降低操作温度,在保证分离效率的同时抑制水解反应。碳五分离装置溶剂再生釜真空系统由两台液环真空泵 PK-413 AX/SX 提供。建议进一步优化真空度控制策略,将操作温度严格控制在 90 °C 临界点以下,从源头上减少甲酸生成,进而降低产物甲酸对于设备的腐蚀。

2. 优化汽提塔参数。汽提塔的主要作用是对溶剂混合物进行分离提纯,除去溶剂中所含的其他物质,在该过程中,水在气提塔内也被脱除。气提塔的调整主要通过灵敏板的温度的监测来进行:灵敏板温度低时,对相关组分的分离不彻底,导致塔釜内烃及水的含量超标;灵敏板温度过高时,容易在塔内导致溶剂水解及双烯烃聚合,且易使溶剂蒸至塔顶造成溶剂损

失及产品质量波动。因此,需要精细控制汽提塔灵敏板温度在 140 ~ 163 °C 最佳区间,提高脱水效率,同时避免温度过高引发溶剂水解及双烯烃聚合。

2.2 系统水含量管理

水是 DMF 发生水解反应的必要条件,其含量对于该腐蚀过程也有着较大影响,水作为 DMF 溶剂水解反应的原料,其含量增大时会导致该水解反应正向移动,甲酸生成增多,反应速率加大,进一步导致溶剂再生釜腐蚀情况加剧。系统中水的来源主要为上游原料中含水及新鲜溶剂带水,对于原料及新鲜溶剂中的水含量的多少难以进行控制,但可以通过工艺流程中的相关操作脱除进入系统中的水,进而减小对于系统的影响。

水是 DMF 水解的必要反应物,系统水含量直接决定腐蚀程度。因此,为尽量抑制甲酸生成,减少其对设备的腐蚀,需要进一步严格控制溶剂系统水含量指标,针对原料带水及新鲜溶剂含水等不可控因素,建立全方位水分管控体系。

碳五分离装置储罐设有脱水包,脱水包液位由现场玻璃板液位计及远传液位计进行监测。日常发现水包液位异常上升时,操作人员对罐进行密闭脱水操作,排出的水进入地下密闭放净系统统一处理。进一步完善储罐脱水包液位监测机制,建立定时、定量脱水操作规程,确保含水物料及时分离。

2.3 缓蚀剂应用技术

目前设备所采用的碳钢材质极易被甲酸腐蚀,而甲酸的产生在当前操作条件下难以完全杜绝,因此可以采用加入缓蚀剂的方式来降低甲酸对设备的腐蚀程度,进而达到预防的效果。

此前已有实验论证了缓蚀剂对甲酸水溶液腐蚀速率的影响。实验数据显示,使用苯甲酸钠、硫脲、六次甲基四胺、十二烷基磺酸钠和苯并三氮唑进行配置的缓蚀剂对甲酸缓蚀效率能够达到 95.7%^[4],因此加入缓蚀剂能够极大程度上减轻甲酸对设备的腐蚀。建议开展工业级缓蚀剂筛选与评价,制定科学的加注方案,并建立缓蚀效果监测机制。

2.4 材质升级与表面处理

当工艺优化无法完全消除腐蚀风险时,对高风险区域进行设备材质升级是保障设备本质安全的重要手段。碳钢在含甲酸的高温含水环境中腐蚀速率极高,年腐蚀速率可达 1.28 mm/a,远超设计允许值。因此,针对腐蚀最严重的部位,如再生釜底部、加热盘管、溶剂再生塔底贫液出口管道及泵体等,推荐采用耐蚀性能

更优的金属材料。实践证明,奥氏体不锈钢 316L 在含氯离子等腐蚀介质的环境中表现出良好耐蚀性,年腐蚀速率可低于 0.01 mm,使用寿命较碳钢显著延长^[5]。

2.5 智能监测与预警系统

在明确碳五分离装置溶剂再生釜的腐蚀机理基础上,开展系统的腐蚀风险评估与管理策略研究,是衔接机理分析与防控实践的关键环节。设备的服役寿命与其所处环境下的腐蚀速率呈显著负相关,通常可通过腐蚀速率—壁厚损耗模型进行预测,构建基于物联网技术的腐蚀监测网络,在再生釜关键部位安装超声波测厚传感器和 pH 值在线监测探头,结合大数据分析建立腐蚀速率预测模型。当监测数据偏离正常范围时,系统自动触发预警,提示操作人员及时调整工艺参数或采取维护措施,实现腐蚀风险的主动防控。确立“预防优于更换”的主动运维理念,通过前端干预降低腐蚀发生概率与速率。

3 结束语

本文通过系统分析碳五分离装置溶剂再生釜的腐蚀失效案例,揭示了 DMF 高温水解—甲酸腐蚀的机理链条,并提出了多维度协同防控策略。实践证明,通过工艺参数优化、水分精准控制、缓蚀技术应用及设备材质升级等综合措施,可显著延长再生釜使用寿命,保障装置安全稳定运行。研究成果对于同类型以 DMF 为溶剂的萃取分离装置具有广泛的借鉴意义。未来研究将聚焦工业级缓蚀剂筛选与评价及智能腐蚀监测系统的构建,为碳五分离装置的长周期高效运行提供更加完善的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张宏宇,韩德求,许凌子,等.烷烃类混合碳五馏分分离工艺模拟与优化[J].石油炼制与化工,2024,55(11):144-148.
- [2] 王兆旭.石油化工企业高酸原油高温部位设备腐蚀防护研究[J].中国设备工程,2026(S1):79-82.
- [3] 赵建武,和冰涛,马猛.碳五分离装置溶剂再生釜长周期影响因素分析[J].石油化工应用,2020,39(12):114-116.
- [4] 王佳.杂环化合物与表面活性剂复配在甲醇/甲酸介质中的缓蚀作用[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2022.
- [5] 杜晨阳,刘畅,张铭,等.甲酸浓度对 316L 不锈钢腐蚀钝化—活化转变行为的影响[J].工程科学学报,2022,44(08):1379-1385.

水平旋喷施工技术在矿山地质工程中的应用研究

余超

(安徽圣合建设工程有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 随着建筑行业的蓬勃发展与新型材料的不断涌现, 施工技术正经历持续革新与优化进程。水平旋喷施工工艺作为一项新型施工技术, 表现出高效快捷、成本低的特点, 在工程施工中得到认可并被广泛应用。矿山地质工程由于施工地势较为复杂, 施工环境相比传统工程较差, 所以在技术应用上选择水平旋喷施工技术可以实现有效加固作用, 防止结构出现异常变化, 进而保证工程稳定性及安全性。基于此, 本文针对水平旋喷施工技术进行概述, 并探讨在矿山地质工程中水平旋喷施工技术应用要点, 以期为推动矿山地质工程的健康发展提供参考。

关键词 水平旋喷施工技术; 矿山地质工程; 止浆墙; 钻孔; 双浆液

中图分类号: TD265.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.040

0 引言

矿山地质工程项目安全防护体系存在的任何缺陷, 都会直接干扰工程建设进程, 推高项目建设成本, 还会对现场作业人员的人身安全与项目周边生态环境造成威胁。水平旋喷施工作为一种新型技术, 具有较高适用性及高效性, 能够有效提升不同土体的各项物理性能, 使得岩体的整体性得以增强, 在保障建筑安全的情况下还能在确保施工质量的基础上, 实现有效、稳定的施工周期控制。因此, 针对水平旋喷施工技术在矿山地质工程中的应用进行研究具有重要的现实意义。

1 水平旋喷施工技术概述

1.1 技术原理

水平旋喷施工技术是在特定平面(模板表面或地面)上, 通过精确调节喷头的倾斜角度与旋转速率, 并结合设定的喷射范围, 实现混凝土材料的高效分布, 形成均质化结构层的关键工艺方法^[1]。根据工程需要, 在施工现场或基坑底设置模具设施及其支撑架, 设置好混凝土喷射机械以及运送工具, 在其内部倒入混合均匀的混凝土, 通过高压气体将其高速喷出, 喷向模板表面或者地面, 采用即时封闭及连续保湿养护的方式直到达到规范的标准质量等级^[2]。

1.2 应用特点

水平旋喷施工技术在应用过程中表现出以下特点:

(1) 经济高效: 应用水平旋喷技术能够缩短工程工期,

并且该类型操作强度较高, 具备经济价值优势; 与以往普通形式的混凝土相比较而言, 表现更为优异, 在固化后形成稳固连接状态有利于增强基础整体稳定性及牢固程度^[3]。(2) 节约成本: 该施工方法较传统混凝土施工具有较高的工作效率, 且能够降低人工成本及材料消耗量。(3) 稳定性高: 采用水平旋喷技术能够有效改善混凝土质量及匀质性, 在提升混凝土强度的基础上还能保障结构稳定性。(4) 适用范围广: 该方法主要适用于混凝土墙板、梁柱以及楼板等部位, 同时还能够对一些形状不规则或者性质不均质的构件进行应用, 并且主要在体积较大及形式复杂的混凝土工程中使用较多。

2 水平旋喷施工技术应用原则

2.1 旋喷施工时成桩效果控制

要保证旋喷桩的质量, 在旋喷桩施工过程中应对主要性能指标进行全方位测试, 主要有抗压强度、桩身直径以及注浆量这些重要指标。旋喷桩应具有较大的强度并且连续性较好。在灌注混凝土的时候必须要准确地称量出所用到的水泥的重量, 并合理调节一些工艺参数使桩径达标。另外, 还要注意相邻之间的桩体之间留有一定的重叠部分以提高其结构的整体性, 使得每一个桩体都能够达到理想的效果, 对此需按照以下原则进行: (1) 压力表应进行检测标定, 在注浆过程中可显示 35 MPa 或更高恒压值。(2) 严格按设

作者简介: 余超(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质工程。

计配比拌制水泥浆（水灰比为 1:1），并严格按照误差在 ± 10 kg 的标准进行投放。（3）施工旋喷桩时，按照实验情况调节转速以及提升速度，保证各项指标达到规定的要求及设计的需求^[4]。

2.2 旋喷时返浆量的控制

当进行旋喷注浆工作时，通常存在两种情况：若发生非返浆现象，则为以下两种原因：一是因返浆管路阻塞导致实际不返浆的现象；二是钻进前方或周边有空隙需要用注浆料填充。如果返浆量较大，则会造成浆液大量流失，回收难度及处理难度大，容易造成浪费及污染环境；此时钻进过程中可能出现瞬时扭矩剧增的现象，易发生卡钻现象^[5]。若是采取不返浆的方式，则可能增加灌注用水量，增大施工压力，还存在地基沉降及邻近建筑物影响的风险；建议在施工过程中实时监测其沉降量、管位偏移量等参数，以确保施工质量与安全。及时对施工方案进行优化，在信息反馈的基础上实现动态调整，确保能够进行精准化控制。

2.3 施工技术应用注意事项

为确保项目连续性，应结合前一次桩体固化情况确定适宜间隔点，每间隔 1-3 个桩位实施即可；在 2 个及以上桩基联合施工过程中，需预留出 200 mm 以上的联结距离，在综合考量混凝土初凝时间等因素后实现全部桩基理想化施工。

旋喷注浆时应注意的事项有：（1）连接钻杆一定要平稳快捷，并注意清除连接部位端面的脏物，以防杂物进入而造成喷管堵塞。（2）要确保循环介质出流畅通，严禁旋喷施工中出现堵管现象，出现堵管后可适度松动密封结构，同时将反冒浆量控制在设计允许范围 20% 以下。（3）当喷射施工过程中出现故障停机后，则应按照应急方案进行处理：当机器及电气运行受阻影响正常生产时，应及时排除故障并尽快恢复正常；若停工时间超过两小时则需按预设方案采取相应措施以降低损失。在喷射重启以后，使用钻头深入 30 cm 位置进行新旧材料之间的黏结效果的检查工作。（4）对于喷射过程中出现明显冒浆的情况，则需采用自上而下封闭的方式来进行解决；如若出浆量较大则需及时对注浆泵压力及喷射速度进行调节，并适当加大速凝剂用量来改善其流动性。

3 水平旋喷施工技术在矿山地质工程中的应用

3.1 水平旋喷桩设计

技术负责人应提前认真研读设计文件，充分理解设计意图及遵循的设计规范和技术标准以及相关要求，

并将图纸中的疑问点和可优化之处做好系统记录；在此基础上，业主组织召开一次图纸会审会议，确保各方都有充分的时间进行讨论达成共识。及时对施工方案进行变更和完善，在设计交底及图纸会审过程中发现的问题也应纳入变更范围，以增强其可操作性及实施可行性，使其适应工程实践的要求。具体应用流程如下：（1）桩体孔距：一般情况下，将矿山地质工程条件的保护范围设为 0.5 ~ 1.0 m 内。从实际工作环境以及安全性角度出发，常选取 $R=0.25$ m, $L=0.3$ m 的值作为设计参数，但在矿山岩土工程的应用中，“C30 喷射混凝土 + 钢筋网”的方法能够抵抗静水压力，不过在前期硬化过程中，旋喷桩身较大的变形在 24 小时内会达到约 5 cm 并伴随面层喷射混凝土开裂等情况。由于进行注浆回填后，原采用旋喷桩作为支护体系出现了变形减缓的趋势并趋于稳定状态，结合该工艺特点，将“40 cm 厚旋喷桩实体 + 超前注浆小导管”进行复合加固，在采区中获得对覆岩静止土压力有效承载的作用。（2）桩外插角（仰角）：将 DK355+494 至 DK355+517 段旋喷桩中间位置改为 $H=23$ m；该区域已进行过加固处理，受旋喷机钻探速度、动力配置等因素影响，在 DK355+494 处旋喷桩的中间位置距原一衬墙实际间距约 15 cm；到达 DK355+517 后，旋喷桩底边刚好与前一防护工程外侧边线重合。（3）桩体直径：从该矿山地质情况看，可选用单管、双管及三管旋喷桩施工工艺。经现场勘察分析，该矿山南北方向主要以砂性土为主，同时含有少量黏土地层；结合实际工况及试验结果，建议采用双管进行旋喷作业。对黏土地基来讲，应将旋转喷射施工中钻入击数控制为 6 ~ 10；对砂性土来讲，则应将钻入击数控制为 11 ~ 21。（4）布置桩位：依据实地勘察结果明确支护区范围，能够对施工中钻喷桩的具体位置进行明确，采用精确方法测定桩距、超径、长径以及桩径等相关参数信息，就能够对钻喷桩设计中的关键指标进行全面了解。结合项目具体需求以及施工现场的实际建设情况制定桩位布置方案，能够有效地提前加固矿区岩体，从而降低矿山地质灾害发生率，还可以提升整体的质量水平。

3.2 施工工艺要点

针对矿山地质工程施工而言，水平旋喷施工技术应用要点如下。（1）设止浆墙：确定旋喷桩的倾斜角度。操作步骤包括：使用旋喷设备深入止浆帷幕层，精准地将导管放置在预定位置，然后通过高压泵注入水泥—水玻璃混合浆液，其施加压力应保持在 0.8 MPa 左右，以保证浆液能均匀地填补导管与帷幕之间的空隙。开挖

前采用超前加固措施,通常采用挂设网旋喷混凝土的方式提升初期支护强度,避免因高压喷射而引起面下沉的问题。选用 $\phi 20$ mm钢筋,长度60 cm的钢筋作为锚杆按照梅花型布置于掌子面上,间距需控制在 $150\text{ cm}\times 200\text{ cm}$ 范围内。另外,还需在掌子面上口及下口处各增设一道 $Q10$ mm钢格栅网作为辅助支撑框架。(2)机械就位:为了确保施工稳固及安全,在进行旋喷施工前需使用多台旋喷机来回在道路轨迹上运行,并使用压路机将此路段碾压至满足后续工程设备通过标准。在此期间需用水准仪精确控制旋喷设备标高。依据设计孔位坐标值,采用相应测距设备测算出钻塔与地表的高度及夹角等参数,保证钻塔中心轴位于预设外插角中间区域,误差应 $\leq \pm 1^\circ$;对于上部1号孔需利用经纬仪对方位进行校正。以上全部工作完成后才能开始进行正式的旋喷桩施工定位工作,通常在每一个横截面中设置大约30个的旋喷孔用作参考点。(3)钻孔:按照矿山地层的土质来确定钻孔速度及顶推力。主要的土质为砂土以及黏性土,所以在这个工程当中,选择钻孔的速度不低于 2 m/min ,顶推力不得少于 5 kN 。在施工过程中,要采用较小的流量帮助其进行钻进工作,避免不可分解的物质进入喷嘴内部导致设备出现故障的概率增大;在安装钻杆接头的过程中要注意将接头上的杂物清除干净,并确保钻头的密封装置完好无损;采用低速旋转的方法完成连接操作;并经检验确认连接稳固后方可开钻。(4)调制双浆液:旋喷桩工程中采用高效搅拌机,选用R(SiO₂)N型P.042.5等级硅酸盐水泥为原材料,严格按照设计配比及充分搅拌。本项目浆液比重控制在 $(0.8\sim 1):1$,必要时可适量掺加外加剂改善性能。建议采用单向持续匀速搅拌方式,避免搅拌过度或不充分的现象发生,最佳搅拌时间为 $5\sim 8\text{ min}$ 。另外,为了避免因杂质造成的管道堵塞现象,在输送管线入口处设置过滤网装置。(5)旋喷作业:旋喷施工前应全面检查高压注浆泵压力值是否合适(最佳为 $45\sim 50\text{ MPa}$),并仔细检查管路是否存在漏损隐患及喷嘴有无阻塞等情况,在确保各机械运转正常且成孔深度满足设计深度要求的情况下方可进行旋喷作业。待各项检验合格,并达到开采设计标高后进行旋喷施工。将旋喷机管插入土体深处约 $3\sim 5\text{ min}$ 后再匀速拔出喷嘴,每提升 1 m 回抽 20 cm ,在持续加压下喷射。为了获得良好的旋喷质量,先小范围旋转喷射约三十秒钟后,再向前慢走 $1\sim 2\text{ m}$,走动速度为 $15\sim 20\text{ cm/min}$,在走动的同时将旋喷转速下调到 35 R/MIN 直至达到 20 m^2 面积时即应停止前

移并校正旋喷机头部的收卷速度。在实践过程中还需要专业的技术人员对高压注浆机压力值进行实时监测,在观察其呈现出逐步下降以及稳定状态后,当钻头达到岩层及止水墙接触点的时候应及时地将旋喷停止,并将送浆管关掉,将整个钻杆全部拔出,保证下一道工序孔口处理工作顺利进行。(6)封堵孔口:在旋喷完成后应立刻将旋喷管拔走,并在此过程中停止对它的回抽工作,待可以连续转动旋喷头并且没有水泥浆流出时方可取出旋喷管;与此同时还应及时连接好注浆管道并回到旋喷桩顶端处,以便开启注浆机对旋喷头再次进行转压处理。每个孔的出口均应在距离旋喷桩旋喷头 1 m 的位置,最后慢慢将钻头提出孔内,并封堵住该孔口以免出现泄漏情况^[6]。(7)钻具清洗:当完成旋喷施工以后,应及时实施旋喷管道拔出操作,在此环节中先暂停回抽作业,并多次旋转旋喷机具,确保内部未残留任何浆液后再实施拆解处理;为保证有效施工深度,应在拔出旋喷管道后及时将输浆管接入并紧密衔接于旋喷桩主体上。同时,观察供浆系统的工作状态以及连续旋喷情况,在旋喷深度达到设计位置减去 1 m 处可以逐步提钻并及时封住孔口以防浆液外溢造成浪费或是影响后续工作面施工效果。

4 结束语

水平旋喷施工技术是近几年工程施工中逐渐广泛应用的地质加固施工技术,能够保证不同地址地层强度得到提高,并在提高工程施工安全性的基础上,促使施工周期顺利完成。施工期间水平旋喷成形的固结体提高了桩身围岩强度,经实践证明,采用水平旋喷加固技术取得了良好的效果,可有效处理该类工程难题,在一定范围内有推广意义及实用价值。

参考文献:

- [1] 刘林.隧道工程细砂地质水平旋喷桩施工技术分析[J].工程机械与维修,2021(06):129-131.
- [2] 贾良.隧道工程施工中高压水平旋喷桩超前支护技术的应用研究[J].粘接,2021,47(09):189-192.
- [3] 李杰.过街暗挖通道中水平旋喷施工技术应用研究[J].建设科技,2021(16):89-91,96.
- [4] 周益兵.富水含泥粉细砂层隧道水平旋喷加固施工技术[J].城市道桥与防洪,2019(10):145-147,19-20.
- [5] 陈程,邱涛.水平旋喷搅拌技术在地铁工程中的应用[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2018(12):147-148.
- [6] 魏贤坤.水平旋喷工艺在砂层暗挖工法中的应用初探[J].山西建筑,2016,42(06):88-89.

喷射混凝土技术在矿山井筒衬砌施工中的应用分析

陈学阳¹, 张娟²

(1. 山东胜利建设监理股份有限公司, 山东 东营 257000;

2. 青岛建通浩源集团有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要 矿山井筒是矿井的咽喉工程, 其衬砌质量直接关联矿井安全运行。喷射混凝土技术凭借凝结迅速、围岩适应能力强、施工流程简便等特点, 在井筒衬砌施工中展现出显著应用价值。本文针对井筒施工遇到的围岩稳定性差、涌水环境复杂等难题, 系统分析喷射混凝土技术的应用机理与施工要点, 通过优化配合比、分层喷射工艺及质量控制体系的建立, 形成完整的技术应用方案, 以期为同类型工程提供实践参考。

关键词 喷射混凝土技术; 矿山井筒; 衬砌施工; 支护结构

中图分类号: TD262.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.041

0 引言

随着矿山开采深度的持续增加, 井筒施工面临高地应力和强涌水等复杂地质条件的严峻挑战。传统的砌筑衬砌施工方法存在工期长、干扰大等固有缺陷, 已难以适应当前快速安全施工的工程需求。相比之下, 喷射混凝土技术能够及时构筑密实的支护结构, 有效封闭围岩并控制变形, 为复杂地质条件下的井筒衬砌工程提供了切实可行的技术方案。

1 喷射混凝土技术概述

喷射混凝土技术是利用压缩空气将混合料通过喷射管以高速喷向受喷面, 依靠动能压实并形成支护层的施工方法。该技术分为干喷、湿喷和潮喷三种工艺类型, 其中湿喷工艺因粉尘少、回弹率低、混凝土质量稳定而成为井筒施工的主流选择^[1]。喷射混凝土在高速撞击下产生的压实作用使其与围岩形成有效的锚固结合, 同时速凝剂的加入实现了快速凝结硬化, 这种“喷射—压实—速凝”的三重机制确保了支护体系能够及时发挥承载作用, 有效控制围岩的松动变形。

2 矿山井筒衬砌施工中的常见问题分析

2.1 井筒围岩稳定性差

深部井筒开挖后, 围岩应力重新分布导致塑性区范围扩大, 破碎带厚度可达 1.5 ~ 2.0 m。在软岩或节理发育地段, 围岩自稳能力极差, 开挖后数小时内即

出现明显的片帮冒落现象。这种快速失稳特性要求支护必须及时跟进, 传统支护方式因准备工序烦琐而错失最佳支护时机^[2]。围岩的持续蠕变还会对支护结构产生长期荷载, 若初期支护强度不足或与围岩结合不良, 将导致支护层开裂甚至整体失效, 严重威胁井筒施工安全。

2.2 涌水高湿环境影响

含水层发育的井筒施工中, 涌水量可达每小时数十立方米, 水流沿井壁下淌形成水膜, 严重影响混凝土与围岩的黏结。在高湿环境下, 普通混凝土难以正常凝结, 即使勉强附着也因水泥浆流失而导致强度大幅降低。涌水还会冲刷新喷混凝土, 造成局部厚度不足或形成空洞, 削弱支护的整体性^[3]。在冻结法施工井筒中, 融化期涌水问题更为突出, 水温接近冰点使混凝土凝结时间显著延长, 给施工组织带来极大的困难。

2.3 传统工艺局限性大

砌筑式衬砌需要搭设模板、绑扎钢筋、浇筑混凝土等多道工序, 施工周期长达数天甚至数周, 此期间围岩持续暴露导致应力释放过度。模板支撑系统占据井筒空间, 影响通风排水, 增加了作业风险。浇筑过程中混凝土自重对模板产生侧压力, 在破碎围岩地段容易引发局部坍塌。混凝土养护期间需要保持适宜的温湿度条件, 在井筒特殊环境下难以实现, 导致衬砌质量波动较大。

作者简介: 陈学阳 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

3 喷射混凝土技术在矿山井筒衬砌施工中的具体应用

3.1 配合比设计优化

面对井筒高湿涌水环境，配合比设计的核心目标是提升抗渗性与早期强度。采用强度等级 52.5 的普通硅酸盐水泥，掺 10% 硅灰优化孔隙结构，严格控制水胶比不超 0.40。骨料采用 5~10 mm 粒径的碎石和中砂，泥分占比不超 1%，保障和水泥浆牢固结合^[4]。根据围岩涌水情况，动态调整速凝剂掺量，一般控制在胶凝材料总量的 6%~8%，使初凝时间缩到 3~5 min。破碎围岩段增配钢纤维，掺加量 30~40 kg/m³，纤维长度比 30~50，增强混凝土的韧性与抗裂能力。

3.2 分层喷射施工

分层喷射工艺将总厚度 200 mm 的支护层分为三次施工完成，避免了一次喷射过厚导致的自重脱落问题。第一层厚度控制在 50 mm，采用较高的速凝剂掺量和较低的喷射速度，重点解决围岩封闭和初期支护问题。喷射时喷嘴与受喷面保持 0.8~1.0 m 距离，喷射角度接近垂直，确保混凝土充分压入围岩裂隙。第二层在第一层初凝后 2~4 h 进行，厚度增加至 70 mm，此时可适当提高喷射速度以提高施工效率。第三层作为最终防护层，厚度达到 80 mm，注重表面平整度控制，通过刮板及时修整确保厚度均匀。层间结合采用拉毛处理和喷水湿润相结合的方法，前一层表面在终凝前用钢刷拉出粗糙纹理，喷射前充分湿润但不得有明水，使新旧混凝土形成牢固的咬合连接（见图 1）。

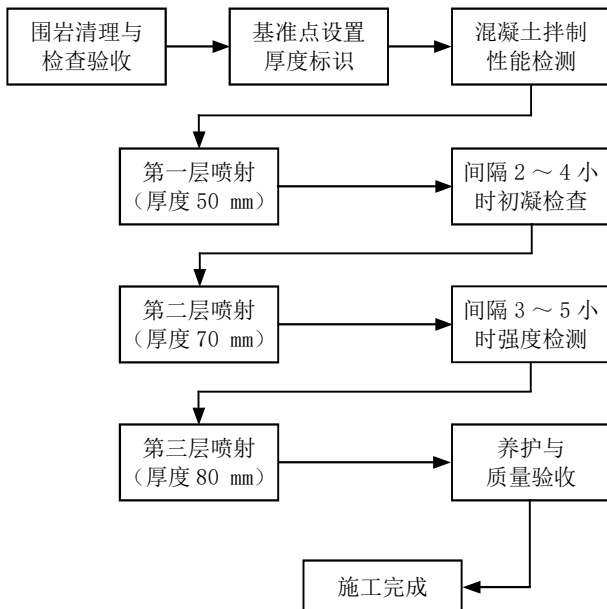


图 1 喷射混凝土施工工艺流程图

3.3 喷射参数控制

喷射参数的精确控制直接决定混凝土的密实度和回弹率。工作风压须保持在 0.4~0.6 MPa 之间，风压较小情况下混凝土喷射速度缓慢、能量不足，无法有效压实使成型密实；而过大风压会使较多骨料反弹，造成浪费并且影响喷层平顺性。输料管道总长不应大于 80 m，弯头数量不应多余 3 个，减少摩擦力，避免混凝土离析以及堵塞。喷射手必须经过专业培训并且取得相应资格证书方可操作，用螺旋形方式缓慢移动，每次停留时间不能超过 1 s，使喷射厚度一致、表面光洁。涌水处施工前先使用速凝堵水材料封闭大量流水位置，之后再行大面积喷射；对于漏水严重的部位，在其内部预设排水管，将水引流到集中排水沟内，防止流水冲击未初凝混凝土表面对其造成损害。喷射工作要分段进行，每一段长度为 2~3 m，由下至上逐层喷射，确保喷射质量可控。

4 施工质量控制与常见问题处理

4.1 强度与厚度控制

强度检测采用钻芯取样及回弹仪结合方式，在每 100 m² 范围内至少需取 3 组芯样进行抗压试验，同时以 2 m×2 m 间距布置回弹点进行回弹值测量并绘制强度分布图以便查找较弱部位。施工现场每个班组应制备至少 2 组同条件养护试件。厚度检查通过预埋钢筋实现，在 1.5 m×1.5 m 范围内均匀布置，钢筋顶端距离围岩为设计厚度，以此作为喷射厚度依据。施工过程中使用激光测距仪进行跟踪测量，每向上喷射 1 m 高时进行截面扫描，根据实际情况调整喷射参数防止厚度超厚或者过薄^[5]。对于厚度不够位置，在初凝之前进行补喷；而厚度过大地方，则先将其分段切除后再进行喷射作业，使厚度差控制在 ±10 mm 以内。所有的检测记录均纳入质量追踪系统进行管理。

4.2 裂缝与脱落防治措施

裂缝与脱落是喷射混凝土常出现的质量问题，在施工中应从配合比选择、喷射方法以及养生等各个方面进行预防。对于裂缝，加入占胶凝材料总质量 8% 膨胀剂以补偿收缩变形，减少干缩裂缝产生；同时，严格控制第一层厚度不超过 50 mm，分层间隔 2~4 h，防止层间脱离；喷射完成后喷雾养生至少 7 天以上。已经产生的裂缝分级处置：裂缝宽度小于 0.2 mm 用表面封闭法处理，宽度大于 0.2 mm 用压力注浆法修补，注浆压力为 0.2~0.4 MPa。脱落主要是由于围岩处理不当或者喷射参数不合理造成的，在喷射前将松动围

岩、浮石及油渍清除,在破碎部位打入锚杆并铺设钢筋网;喷射过程中保持压缩空气压力在 0.4~0.6 MPa 之间,喷头距受喷面距离为 0.8~1.0 m,尽量使喷头垂直面向喷射,保证混凝土密实度高。采取“预防—控制—处理”的方式可以很好地保证支护质量和寿命。

4.3 材料与设备质量控制

材料和设备的稳定性是喷射混凝土施工质量的基础。在材料上,水泥、骨料、速凝剂等进入施工现场需检查合格证及相关资料并且取样复试,水泥应采用强度等级不低于 52.5 的普通硅酸盐水泥,储存超过三个月需要重新测定安定性;骨料含泥量不大于 1%,含水量变化在 $\pm 0.5\%$ 范围内要相应改变加水量;速凝剂必须与水泥做相容性试验,保证其初凝时间为 3~5 分钟。在设备方面,每天工作前要对喷射机、空压机、输料管道以及机械手进行全面检查,空压机出风口压力变化不超过 ± 0.05 MPa,输料管线长度不超过 80 m,弯头不应超过 3 个,每班次完毕后用高压风吹净管内混凝土,以防堵塞。喷射机械手要定期标定臂架位置和喷嘴角度传感器,计量器具电子秤误差不能大于 $\pm 1\%$,强制式搅拌机每盘搅拌时间不少于 60 秒。通过“材料源头管控+设备预防维护”的双重保障机制,有效降低质量风险。

5 工程应用案例分析

5.1 案例概况

某矿副井井筒设计深度 680 m,井筒净直径 5.5 m,穿越侏罗系砂泥岩互层和奥陶系灰岩含水层。井筒在

470~520 m 段遭遇强涌水层,涌水量达到 $15 \text{ m}^3/\text{h}$,围岩破碎严重,自稳时间不足 6 h。该段原设计采用砌式混凝土衬砌,但模板支护困难且施工周期过长,经专家论证后改用喷射混凝土支护方案。施工采用湿喷工艺,配备两台自动化喷射机械手交替作业,配合比按照前述优化方案执行,速凝剂掺量提高至 8% 以适应强涌水环境。

5.2 技术应用效果评估

在施工过程中,通过实时监测围岩变形和支护层应力状态,数据显示喷射混凝土支护后围岩变形速率迅速下降,24 h 内收敛率达到 85%,7 天后基本稳定。支护层厚度检测结果显示,95% 的区域厚度偏差在 ± 8 mm 以内,满足设计要求。钻芯取样抗压强度测试表明,28 天强度平均值为 32.5 MPa,超过设计强度等级。与原砌式方案相比,喷射混凝土施工使该段工期缩短 40 天,降低了工程成本约 18%。施工过程中回弹率控制在 12% 以内,明显低于干喷工艺的 25%~30%。井筒投入使用两年来,衬砌状态良好,未出现渗漏、开裂等质量问题,充分验证了喷射混凝土技术在复杂地质条件下的适用性和可靠性(见表 1)。

6 结束语

喷射混凝土技术依托高效施工、良好适配表现和可靠的支护效果,已成为矿山井筒衬砌施工的重要手段。通过优化配合比、改进分层喷射工艺、落实严格质量控制,有效解决深井复杂地质条件下的支护难题。工程实践证明,在保证施工质量的前提下显著缩短了

表 1 不同喷射工艺性能对比表

工艺类型	回弹率 (%)	粉尘浓度 (mg/m^3)	28 天强度 (MPa)	施工效率 (m^2/h)	适用环境
干喷法	25~30	80~150	25~28	15~20	干燥低湿环境
潮喷法	18~22	50~80	28~32	20~25	一般湿度环境
湿喷法	10~15	15~30	30~35	25~35	高湿涌水环境

工期、削减了成本,具有良好的推广实用价值。未来需深化智能化喷射装备和在线监测技术的研究,提高施工自动化程度和质量管控精度。

参考文献:

- [1] 覃柏钧,蒋寅豪,梁龙群.大型地下洞库高延展复合纤维混凝土喷射施工技术探析[J].人民黄河,2025,47(S2):129-131.
- [2] 徐浩田,张金龙,马伟斌,等.基于三维激光扫描的隧

- [3] 程伟峰,杨虹,仝德华,等.现场喷射成型双掺硅粉和钢纤维湿喷混凝土弯曲韧性研究[J].岩土工程学报,2025,47(05):1073-1081.
- [4] 李增林,张东升,王锐,等.大断面斜井富水砂化层段注浆改性及围岩控制技术研究[J].煤炭工程,2024,56(08):38-46.
- [5] 梁旭,席义苗,王小勇,等.多壁碳纳米管影响喷射混凝土力学性能研究[J].陕西煤炭,2024,43(05):41-45.

高温溶剂化学萃取精制及膜分离 机械工艺适配技术研究

严进军, 张红伟, 高 鹏

(济南瑞东实业有限公司, 山东 济南 250013)

摘要 针对高温溶剂化学萃取精制体系与膜分离机械工艺耦合过程中相态失稳、膜性能不可逆衰减、工况匹配性不足等核心问题, 本文系统解析了高温非水相萃取体系的工况边界与耐温膜分离工艺的性能特征, 构建了涵盖热力学适配、材料性能适配、流体力学适配三大核心维度的工艺适配技术体系, 建立了萃取—膜分离单元的多参数联动调控模型与污垢协同防控机制, 以期在高温溶剂萃取—膜分离耦合工艺的稳定运行提供理论参考。通过连续化工况测试, 优化后的适配体系可实现目标组分精制纯度 $\geq 99.2\%$, 连续运行120 h内膜通量衰减率 $\leq 4.2\%$, 溶剂回收率 $\geq 98.8\%$, 明确了参数适配对耦合体系稳定运行的核心调控机制。

关键词 高温溶剂萃取; 膜分离; 工艺适配; 耦合体系; 耐温膜材料

中图分类号: TQ028.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.042

0 引言

本研究聚焦高温溶剂化学萃取精制过程与膜分离机械工艺的耦合适配核心科学与技术问题, 以体系热力学平衡、材料工况耐受性、工艺连续化运行稳定性为核心研究维度, 系统解析耦合体系的多参数关联机制, 构建全流程适配性调控方法, 明确工艺适配的核心控制边界。本研究的核心范畴限定于非水相高温溶剂体系的萃取精制单元与加压错流膜分离单元的工艺适配, 不涉及水相体系、低温萃取体系及非膜法后续精制工艺的相关研究。

1 高温溶剂化学萃取精制的核心工况边界解析

1.1 高温萃取体系的热力学与传质动力学特征

高温溶剂化学萃取精制的核心原理是利用高温条件下溶剂对目标组分与杂质的溶解能力差异化, 实现选择性分离与组分富集。其核心工况参数包括萃取温度、溶剂固液比、萃取停留时间、体系饱和蒸气压, 四大参数共同决定了萃取体系的出料状态与后续膜分离单元的进料适配性。针对非水相高温萃取体系, 当萃取温度控制在溶剂常压沸点以下 $10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 区间时, 溶剂的溶解选择性达到最优区间, 同时可将体系饱和蒸气压稳定控制在 $0.3 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 范围内, 为后续膜分离单元提供稳定的进料压力基础。萃取停留时间需匹

配目标组分的溶解动力学平衡, 控制在 $30 \sim 90 \text{ min}$, 确保目标组分萃取率 $\geq 99\%$, 同时避免过长停留时间引发的溶剂热降解^[1]。

在溶剂筛选环节, 需同步兼顾萃取分离效率与后续膜分离工艺的适配性, 优先选择溶解度参数与膜材料溶解度参数差值 $\geq 2.0 \text{ (cal/cm}^3\text{)}^{1/2}$ 的溶剂体系, 从源头降低溶剂对膜材料的溶胀侵蚀风险; 同时控制溶剂的表面张力范围在 $25 \sim 35 \text{ mN/m}$ 区间, 确保溶剂在膜孔道内的润湿性能稳定, 避免因界面张力不匹配导致的膜分离有效孔径收缩、实际截留率偏离设计值的问题。

1.2 萃取出料的适配性参数控制阈值

萃取体系的出料参数是实现与膜分离工艺适配的核心前提, 需建立严格的参数波动控制阈值。其中, 出料温度波动范围需控制在 $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 避免温度突变引发溶剂溶解能力变化, 导致溶质析出造成后续膜孔道堵塞; 出料体系需经前置预过滤单元处理, 确保 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 以上固相杂质截留率 $\geq 99\%$, $5 \text{ }\mu\text{m}$ 以上固相杂质截留率 $\geq 95\%$, 体系黏度控制在 $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以下, 降低高黏度、高固相含量对膜元件造成的不可逆污堵风险^[2]。

同时, 需严格控制萃取溶剂的热稳定性, 要求溶剂在萃取工况下的热降解率 $\leq 0.5\%/h$, 确保溶剂在后续膜分离循环过程中理化性质稳定, 无降解副产物生成

作者简介: 严进军 (1978-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化学工程。

引发的膜材料侵蚀与孔道污染。此外,需控制萃取出料体系中目标组分的浓度处于饱和溶解度的 60%~80% 区间,为后续膜分离单元的浓缩过程预留充足的热力学安全边界,避免浓缩过程中溶质饱和析出。

2 膜分离机械工艺的耐温工况与分离性能调控

2.1 耐温膜材料与组件的适配性结构设计

针对高温非水相萃取体系的适配需求,膜分离单元的核心分离介质需满足耐温、耐有机溶剂溶胀、机械强度稳定三大核心要求。本研究选定聚醚醚酮(PEEK)有机复合膜与氧化铝陶瓷基复合膜为核心分离介质,两类材料的长期耐受温度均 $\geq 180\text{ }^{\circ}\text{C}$,在目标溶剂体系中的溶胀率 $\leq 3\%$,拉伸强度 $\geq 80\text{ MPa}$,可在高温高压有机溶剂环境中保持稳定的分离性能与机械结构完整性^[3]。

在膜材料微观结构设计层面,需针对高温萃取体系的溶质分子量分布,实现膜孔径的精准分级调控:针对精制体系中目标组分分子量与杂质分子量差异 ≥ 3 倍的工况,优先选用窄孔径分布的复合膜,孔径分布跨度控制在 $\pm 5\text{ nm}$ 以内,可在保证目标组分高透过率的同时,实现杂质的精准截留,避免宽孔径分布引发的分离精度波动。同时,针对高温非水相体系的污垢特性,对膜表面进行低表面能改性,改性后膜表面与萃取体系的接触角控制在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 区间,可显著降低有机杂质与固相颗粒在膜面的吸附黏附力,从材料层面降低不可逆污垢的发生概率。膜组件采用错流过滤结构设计,流道宽度控制在 $2\sim 5\text{ mm}$,内置弧形湍流促进器可将膜面流速提升至 $1.5\sim 2.5\text{ m/s}$,有效降低浓差极化效应;组件密封结构采用耐高温氟橡胶材质,适配 $-40\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况范围,确保高温高压下的密封稳定性。

2.2 膜分离工艺的工况参数适配基础

膜分离单元的核心操作参数包括操作压力、进料温度、错流流速、浓缩倍数,其参数区间需与萃取单元的出料参数形成精准匹配,是构建适配技术体系的基础。其中,膜单元进料温度需与萃取出料温度的偏差控制在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,避免温度波动造成溶剂溶解能力突变,引发溶质析出污染膜面;操作压力需与萃取体系的饱和蒸气压形成梯度匹配,操作压力需高于体系饱和蒸气压 $0.2\sim 0.5\text{ MPa}$,确保体系在膜分离全过程中保持均一液相状态,无溶剂汽化、气液两相流现象发生。

错流流速需根据萃取出料的固含量与黏度进行动

态匹配,当体系固含量 $\leq 0.1\%$ 时,错流流速控制在 $1.0\sim 1.5\text{ m/s}$;当体系固含量在 $0.1\%\sim 0.5\%$ 区间时,错流流速控制在 $1.5\sim 2.5\text{ m/s}$,避免固相颗粒在膜面沉积形成滤饼层。浓缩倍数控制在 $5\sim 10$ 倍区间,需结合萃取出料的目标组分浓度设定,确保浓缩后体系中目标组分浓度仍低于对应工况下的饱和溶解度,避免溶质析出。

3 萃取—膜分离耦合工艺的适配技术体系构建

3.1 耦合体系的多维度适配评价体系

本研究构建了三大核心适配维度,形成可量化的耦合工艺适配性评价体系,明确适配边界与控制阈值,为工艺优化提供量化依据。一是热力学适配,核心评价指标为体系相态稳定性,要求全工艺过程中体系保持均一液相,无溶质析出、溶剂汽化现象,温度与压力的匹配偏差不超过设定阈值的 10% ,体系中目标组分浓度始终低于对应工况下饱和溶解度的 90% ,建立温度—压力—溶解度的三元关联相图,明确耦合体系的热力学安全操作区间。二是材料性能适配,核心评价指标为膜材料溶胀率、溶剂降解率与膜性能稳定性,要求连续运行 72 h 内,膜材料在工况体系中的溶胀率 $\leq 3\%$,溶剂热降解率 $\leq 0.5\%/h$,膜纯溶剂通量衰减率 $\leq 5\%$,目标组分截留率波动幅度 $\leq \pm 2\%$,溶剂回收率 $\geq 98\%$,建立膜材料性能与萃取溶剂理化性质的适配性关联模型,明确材料选型的核心边界条件。三是流体力学适配,核心评价指标为膜面浓差极化度、系统总压降与传质效率,要求膜面浓差极化度 ≤ 1.2 ,萃取单元与膜单元的系统总压降 $\leq 0.3\text{ MPa}$,膜面传质系数 $\geq 2.0\times 10^{-5}\text{ m/s}$,确保工艺连续运行的能耗与稳定性可控,建立错流流速—固含量—浓差极化度的关联方程,为流体力学参数优化提供理论支撑。

3.2 工艺参数联动调控模型与闭环控制

基于三大适配维度,本研究建立了萃取单元与膜分离单元的多参数联动调控模型,明确核心参数的联动匹配关系,实现耦合工艺的协同优化。当萃取温度提升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,同步调整膜单元操作压力提升 $0.15\sim 0.2\text{ MPa}$,抵消温度升高带来的体系饱和蒸气压升高的影响;同时将膜面错流流速提升 0.3 m/s ,抵消温度升高引发的体系黏度下降、溶质扩散系数变化带来的浓差极化效应,保持分离性能稳定。

当萃取体系固液比提升、出料固含量升高 1% 时,同步将膜单元错流流速提升 0.2 m/s ,同时降低膜单元浓缩倍数 $1\sim 2$ 倍,避免固相颗粒在膜面沉积与溶质

饱和析出。当萃取体系停留时间调整、目标组分萃取率变化时，同步优化膜单元的渗透液回流比例，保持全流程物料平衡与体系浓度稳定^[4]。

基于参数联动调控模型，本研究进一步构建了耦合工艺的三级闭环自动控制逻辑：一级预警为参数波动幅度 $\leq 5\%$ 的常规波动区间，系统通过PID自动调节模块，对膜单元操作压力与错流流速进行微调，维持分离性能稳定；二级预警为参数波动幅度 $5\% \sim 10\%$ 的异常波动区间，系统同步触发萃取单元进料参数与膜单元运行参数的双向联动调整，同时启动在线低压冲洗程序，避免参数偏差累积引发的系统失稳；三级预警为参数波动幅度 $\geq 10\%$ 的超限区间，系统触发紧急保护程序，自动降低萃取单元加热功率与膜单元操作压力，同步开启物料内循环模式，避免极端工况对膜组件与萃取设备造成不可逆损伤。

3.3 膜污堵协同防控与溶剂循环适配优化

针对耦合体系的膜污堵核心痛点，基于适配性工艺设计，构建了源头控制—过程调控—在线清洗协同的污堵防控体系。源头控制环节，通过萃取单元出料参数的精准控制，严格限制固相杂质含量与溶质过饱和度，从源头减少污堵源的产生；过程调控环节，通过错流流速的动态匹配与湍流促进器的结构优化，强化膜面剪切力，减少颗粒与杂质在膜面的沉积；在线清洗环节，利用高温萃取溶剂本身作为清洗介质，在膜分离单元运行24 h后，采用0.5 MPa的逆流冲洗方式，冲洗时间15 min，可使膜通量恢复率 $\geq 95\%$ ，无需引入额外清洗试剂，避免溶剂体系污染与交叉影响^[5]。

同时，优化溶剂循环路径，将膜分离单元的渗透液直接回流至萃取单元作为新鲜溶剂补充，形成闭环循环体系，溶剂循环利用率 $\geq 99\%$ ，大幅降低工艺运行成本与溶剂损耗；针对循环溶剂中的微量降解副产物，设置旁路吸附精制单元，当循环溶剂中降解副产物含量 $\geq 0.1\%$ 时，启动旁路吸附处理，确保循环溶剂的理化性质稳定，维持全工艺的长期适配性。

4 耦合适配体系的性能验证与机制分析

基于上述构建的适配技术体系，在实验室连续化装置中进行全流程性能验证，明确适配体系的调控机制。萃取体系选用高温邻苯二甲酸二丁酯（DBP）溶剂体系，设定萃取温度 $160\text{ }^\circ\text{C}$ ，操作压力0.6 MPa，停留时间60 min，固液比1:10；膜分离单元选用50 nm孔径氧化铝陶瓷复合膜，设定操作压力0.9 MPa，进料温度 $158\text{ }^\circ\text{C}$ ，错流流速2.0 m/s，浓缩倍数8倍。

连续运行120 h的测试结果表明：耦合体系的目标组分精制纯度 $\geq 99.2\%$ ，杂质去除率 $\geq 98.7\%$ ，膜通量稳定在 $85 \sim 90\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 区间，通量衰减率 $\leq 4.2\%$ ，溶剂回收率 $\geq 98.8\%$ ，各项指标均达到设计预期，验证了适配技术体系的稳定性与可行性。对照测试结果显示，当工艺参数偏离适配边界时，如操作压力低于体系饱和蒸气压0.1 MPa以上，会出现溶剂局部汽化现象，膜通量衰减率提升至 $18\%/24\text{ h}$ ；当膜单元进料温度与萃取出料温度偏差 $\geq 8\text{ }^\circ\text{C}$ 时，会出现溶质局部析出现象，连续运行24 h后膜不可逆污堵率 $\geq 22\%$ ，进一步验证了参数精准适配对耦合体系稳定运行的核心调控作用。机制分析表明，适配技术体系通过热力学参数的匹配，维持了体系的均一液相状态，避免了溶剂汽化与溶质析出；通过材料性能的适配，降低了膜材料的溶胀侵蚀与性能衰减；通过流体力学参数的适配，抑制了膜面浓差极化与污堵形成，三者协同实现了耦合工艺的长期稳定运行。

5 结束语

本文针对高温溶剂化学萃取精制与膜分离机械工艺的耦合适配核心问题，系统解析了萃取体系的工况边界与膜分离工艺的性能特征，构建了涵盖热力学、材料性能、流体力学三大维度的适配技术体系，建立了工艺参数联动调控模型与污堵协同防控机制。研究表明，通过萃取与膜分离单元的参数精准匹配与联动调控，可有效解决高温非水相体系耦合过程中的相态失稳、膜性能不可逆衰减、溶剂降解等核心问题，实现耦合工艺的长期稳定运行。本研究构建的适配技术体系与量化评价方法，可为高温溶剂萃取—膜分离耦合工艺的工业化放大与应用提供核心理论支撑与技术参考。

参考文献：

- [1] 薛浩,李滨洋,赵小辉,等.活性炭吸附法处理选矿废水VOCs废气的研究进展[J].净水技术,2025,44(10):11-20.
- [2] 姚思齐,燕永利,张随望,等.纳米 SiO_2 表面改性稳定非水相泡沫的实验研究[J].日用化学工业(中英文),2024,54(08):903-910.
- [3] 张佩亮,燕永利,吕博,等. CaCO_3 纳米晶体稳定非水相泡沫实验研究[J].日用化学工业(中英文),2023,53(06):642-648.
- [4] 张一敏,胡鹏程,薛楠楠,等.钒浸出液单金属分离回收技术进展[J].有色金属(冶炼部分),2025(07):94-109.
- [5] 孙树卿,袁瑞,高莉,等.疏水烷基链对邻苯类增塑剂增塑性能的影响[J].塑料,2025,54(06):89-94.