

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 8 月 第 24 期 (总第 649 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 墨 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 8 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（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 液压自平衡吊具自动化调平控制策略
..... 张朝亮
- 004 电梯曳引轮磨损与空载曳引失效分析
..... 林秀峰
- 007 水工混凝土钻芯法强度检测误差控制分析
..... 吴文君，周兴俊
- 010 超长距离 OTN 波分系统中的非线性效应补偿技术
..... 吴帅帅
- 013 新能源并网下电力设备谐波治理与运行稳定性研究
..... 于成飞，齐绍森
- 016 分布式光伏并网后台区线损异常反转现象剖析与应对
..... 高 源

智能科技

- 019 长尾分布下图像分类方法综述
..... 杨春晖
- 022 智能化背景下电气安装施工技术应用与实践
..... 邵士振，王 梅
- 025 基于工业互联网的机械设计协同创新策略研究
..... 宋晨华，张鹏飞，陈林林，崔 健，肖 亮
- 028 信息化技术在水工金属结构设计中的应用研究
..... 史天聪
- 031 井工煤矿智能化综采工作面无人化控制技术应用
..... 宋海波，张 海，杜琛豪
- 034 电气自动化控制系统在工业现场的可靠性优化策略
..... 神兴民，宋 建

应用技术

- 037 道路桥梁施工中的旋挖桩施工技术
..... 潘 矩
- 040 山区高陡边坡缆索吊装施工技术研究
..... 虞 朗

目录Contents

043	预应力混凝土连续梁桥施工技术要点分析	杨 烜
046	桥梁建设工程中的高墩施工技术要点	江 渝
049	高墩施工技术在公路桥梁施工中的应用研究	兰永安
052	道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术分析	田 磊
055	荷载试验在城市桥梁检测及加固决策中的应用研究	张旭景
058	复杂山区条件下磁悬浮 U 梁预制与架设施工关键技术——以凤凰磁浮文化旅游项目为例	徐叶晖

科创产业

061	大型容器制造车间生产调度智能化研究	李亚男
064	市政道桥施工项目进度管理优化方法探讨	童光金
067	装配式建筑工艺在房建施工中的推广运用	黄 江
070	信息化技术在水利工程施工管理中的应用研究	钱新艳
073	电能计量箱在智能电网中的应用及标准化研究	李宝权
076	智能电能计量箱的结构优化与可靠性设计研究	程铁钢, 张寿朋
079	BIM 技术在工程造价精细化管理中的应用与实践	朱 涛

技术管理

082	混凝土结构强度检测技术要点分析	王玉钺, 张昌军
085	水利工程施工中围堰施工技术研究	余 娟
088	水利工程钻孔灌注桩施工技术分析	王 程
091	隧道病害的主要类型和防治措施研究	肖朝升
094	土木工程建筑设计问题及优化措施	汶永涛, 李文军
097	港口与航道工程大体积混凝土裂缝控制	尹 鏖
100	水利工程施工过程中的安全隐患排查与治理	龙 凤
103	小型基建维修工程建设管理中存在的问题与策略	王雨楠, 梁富林, 房 菁

科学论坛

106	新形势下城市市政基础设施建设路径分析	刘林杰
109	超宽路面排水施工技术优化与排水效能研究	崔秀鑫
112	建筑给排水工程中防渗漏施工技术应用研究	谢敬茹
115	建筑消防联动控制系统施工调试技术要点研究	汪士龙
118	平原地区泵站工程的总图布置与土地利用研究	陈 童
121	常见薄膜沉积工艺中影响薄膜质量的主要因素探究	樊中军
124	工程测量在建筑物变形监测中的误差来源及改进措施	周 卷

液压自平衡吊具自动化调平控制策略

张朝亮

(穆钜(上海)动力技术有限公司, 上海 201101)

摘要 为实现构件吊装过程中的精准水平控制与安全提升, 本研究基于包含油箱框架、液压泵站、电气控制单元、传感器及多个千斤顶等核心组件的液压自平衡吊具装置, 提出一种通过传感器实时监测构件姿态与千斤顶行程、由电气控制单元处理传感器信号并输出指令至液压泵站、再由液压泵站驱动千斤顶协同伸缩以动态调整构件水平的自动化调平控制策略, 旨在为大型构件安装工程提供自动化解决方案参考。应用结果表明, 该液压自平衡吊具装置结构紧凑、集成度高且成本较低。

关键词 液压自平衡吊具; 自动化调平; 电气控制单元逻辑设计; 液压执行机构; 传感器监测

中图分类号: TH211.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.001

0 引言

大型构件安装工程领域, 构件的水平精确调整是保证整体结构安全与工程质量的关键步骤。当前行业普遍采用的传统方法主要为起重机配合钢丝绳或独立液压千斤顶作业的方式; 使用钢丝绳吊装时存在水平调整完全依赖操作人员手动调节各绳缆长度、过程繁杂且精度难以控制、往往需要多次试错并极易导致构件倾斜或位置偏差的问题, 采用独立千斤顶方案时存在每个千斤顶需单独设置液压管路与动力单元、安装复杂且协同性差、千斤顶之间动作不同步可能引起构件不稳定晃动甚至局部过载的情况; 面对上述传统方法存在的挑战, 行业亟须一种可提升作业可靠性的集成化、自动化调平解决方案。本研究旨在提出一种液压自平衡吊具的自动化调平控制策略, 通过创新设计实现构件吊装过程实时监测与精准调整, 对提高施工安全性与效率及降低成本具有重要工程价值。

1 液压自平衡吊具装置组成

1.1 关键组件功能描述

液压自平衡吊具装置的核心组成部分包括油箱框架、液压泵站及若干个千斤顶, 这些组件协同实现构件的自动化调平功能(如图 1 所示)。

图 1 中标号 1 所指示的是装置底部的支撑轮, 使设备具有移动以及定位功能。标号 2 是垂直地安装在设备两侧之处的立柱式执行机构, 其内部集成了液压油缸以及活塞杆, 从而构成了顶升负载的直接动力单元, 它通过法兰和主体框架相连接, 顶端承载面用来

支撑被调平的构件。标号 3 指向设备上表面中轴线位置的液压泵站, 它集成了电机、液压泵以及控制阀组, 是系统的动力源以及控制中枢。

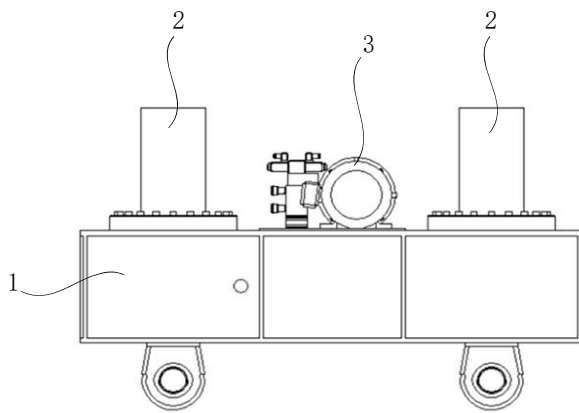


图 1 液压自平衡吊具装置

该系统的工作原理是: 液压泵站 3 按照控制方面的指令驱动液压油, 进而推动立柱执行机构 2 里面的油缸活塞进行运动, 以此来实现承载面高度的调节操作; 该装置凭借底部的支撑轮 1 移动到达工作的位置。整个整体的机械结构设计能够保障动力传递是直接的、结构响应是稳定的, 从而为自动化调平控制奠定了坚实的物理方面的基础。

1.2 装置工作原理

装置工作原理基于闭环控制逻辑, 当构件放置于千斤顶上时, 倾角传感器持续监测构件相对水平面的倾斜角度, 分辨率达 0.1° , 位移传感器同步采集每个千斤顶的伸缩行程, 精度为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。电气控制单元

作者简介: 张朝亮(1983-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 机电液智能控制。

的功能控制单元以 100 Hz 频率采样传感器数据, 比较当前姿态与设定水平阈值, 若倾斜超限, 控制算法计算所需千斤顶调整量, 生成 PWM 信号驱动液压泵站的功能阀组。电机泵组启动, 油液从框架油箱经泵加压后, 通过功能阀组分配至目标千斤顶油缸, 阀组中的比例阀调节油液流量, 控制千斤顶伸缩速度, 位移传感器实时反馈行程形成位置闭环, 确保多个千斤顶同步动作。在调平过程中, 倾角传感器数据与位移传感器数据融合, 避免过调或振荡, 当构件水平度达到允许范围, 系统进入保持模式, 液压阀组闭锁维持压力, 这种机电液一体化设计将机械支撑、液压动力与电气控制无缝集成, 调平响应时间小于 3 秒, 支撑稳定性高, 无需人工干预^[1]。

2 自动化调平控制原理

2.1 传感器监测机制

自动化调平控制的传感器监测机制构建了系统感知层, 其核心是倾角传感器与位移传感器的数据融合。倾角传感器直接安装于油箱框架上表面, 采用 MEMS 技术, 测量范围 $\pm 10^\circ$, 分辨率 0.01° , 能够实时监测承载构件的俯仰与滚转两个轴向的倾斜角度变化, 采样频率为 100 Hz, 数据通过 CAN 总线传输。四个千斤顶顶端内部各集成一个磁致伸缩式位移传感器, 测量行程 0 mm ~ 200 mm, 线性精度 $\pm 0.1\%$ FS, 实时反馈每个千斤顶活塞杆的精确伸缩位置。传感器全行程 200 mm, 系统通过温度补偿与非线性拟合算法, 将综合线性精度提升至 $\pm 0.05\%$ FS, 分辨率达 $1\ \mu\text{m}$, 其数字信号通过菊花链式 SSI 接口同步传输, 有效消除了多通道间的时间偏移。底层硬件采用基于 IEEE 1588 协议的精确时间同步, 统一各传感器的时标; 上层算法在控制单元内构建“传感—状态”观测器, 通过卡尔曼滤波对原始的倾角与位移数据进行时空对准、去噪与状态估计, 实时解算出承载平面的三维空间姿态及各支撑点的独立高程, 其输出不仅包含高置信度的状态值, 还提供估计协方差矩阵以表征不确定性, 为后续的鲁棒控制决策提供了准确、一致且具有明确置信度的多维度状态反馈。

2.2 电气控制单元逻辑设计

电气控制单元的逻辑设计是实现智能调平的核心, 其功能控制单元采用 32 位工业级微处理器, 运行实时操作系统。控制程序以 10 毫秒为周期运行, 其核心算法基于经典的离散 PID 控制形式, 并针对液压系统固有的非线性特性(比例阀的死区、流量—压力特性以及执行机构的摩擦)进行了针对性改进。改进的核心在于引入一个与综合控制偏差量 $e(k)$ 大小相关的可变增益项 $K_{adjust}(e(k))$, 以应对大偏差范围内需快速响应

与小偏差范围内需防止超调的矛盾, 算法集成了对液压阀死区的静态补偿前馈 U_{comp} , 改进后的控制算法输出千斤顶的位移调整量 $\Delta L(k)$, 其表达式为:

$$\Delta L(k) = K_{adjust}(e(k)) \cdot [K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \cdot \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] + U_{comp} \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta L(k)$ 为当前控制周期计算的千斤顶位移调整量, $K_{adjust}(e(k))$ 是可变增益系数, 为综合控制偏差量 $e(k)$ 的函数, K_p, K_i, K_d 分别为 PID 控制的比例、积分、微分增益系数, $e(k)$ 为当前采样时刻的综合控制偏差量, 由倾角偏差与位移偏差经加权融合得出, T 为控制系统的采样周期, 此处为 0.01s, $\sum_{j=0}^k e(j)$ 为从初始时刻到当前时刻 k 的综合控制偏差量的累加和。 U_{comp} 是针对比例阀死区的固定补偿量^[2]。

控制程序流程为不断地去读取倾角以及位移传感器所产生的数据, 对角度以及位移的偏差进行计算并且经过加权融合来生成 $e(k)$, 在依据改进之后的算法完成计算 $\Delta L(k)$, 按照 $e(k)$ 方向来确定需要动作起来的千斤顶的编号, 最终输出与之对应的 PWM 控制信号。在逻辑当中嵌入防振荡的算法, 当偏差进入死区的时候就自动地切换至低增益或者积分分离的模式, 以此防止系统在目标值的附近产生震荡。所有的控制参数能够通过无线手柄实现在线的修改, 从而适应不同刚度以及重量的构件所具有的调平需求。

2.3 液压执行机构控制流程

液压执行机构方面的控制流程是功能控制单元所发出的指令先是激活电机泵组, 电机启动之后带动齿轮泵自油箱框架当中吸油并且产生高压油液; 高压油液进入集成有四个独立的二位四通比例换向阀(每一个阀对应着一个千斤顶油缸)以及四个液控单向阀的功能阀组, 依据指令所指定的千斤顶编号以及伸缩方向, 相应的比例换向阀线圈通电, 阀芯移动到指定开度, 引导压力油进入目标千斤顶的无杆腔或者有杆腔。比例阀开度和 PWM 信号占空比呈线性相关, 实现油液流量精准控制, 调节千斤顶伸缩速度; 位移传感器实时监测活塞杆实际位移, 形成位置闭环, 确保位移调整量精准执行。系统采用“进油节流调速”这一方案, 压力油经过比例阀开口之后直接驱动活塞运动; 液控单向阀在比例阀失电之时立刻关闭, 形成液压锁保持位置。位置闭环实时性由位移传感器反馈予以保障, 反馈值和目标值在每一个控制周期之内进行比较, 偏差输入 PID 算法迭代计算, 动态调整 PWM 输出, 构成能够实时补偿油液压缩、泄漏以及负载变化等干扰的闭环伺服系统。针对多缸同步动作, 控制流程中嵌入了交叉耦合补偿算法, 通过实时比较各缸位移反馈,

对驱动流量进行微调,以抑制因制造误差或负载不均引起的同步误差,确保四个千斤顶在调平过程中的协同精度,最终实现构件姿态的高动态、高精度稳定调节。

3 液压自平衡吊具自动化调平控制策略实施与性能分析

3.1 系统集成与调试方法

系统集成遵循机电液一体化原则,硬件连接以油箱框架为结构基础。四个千斤顶通过法兰球铰安装于框架四角,液压管路采用高压软管连接千斤顶与泵站功能阀组,所有接头使用 24° 锥密封结构并施加 $35\text{ N}\cdot\text{m}$ 扭矩确保密封性。电气布线采用屏蔽双绞线,传感器信号线与液压泵站动力线分层敷设间距大于 150 mm ,减少电磁干扰^[3]。电气控制单元安装于防水箱内,其DI/DO模块通过航空插头连接位移传感器和倾角传感器,DO模块输出继电器信号控制电机泵组启停,AO模块输出 $\pm 10\text{ V}$ 模拟信号驱动比例阀。系统上电后执行硬件自检流程,依次检测蓄电池电压、各传感器通讯状态、液压系统压力。

软件调试在硬件集成完成后分阶段进行。第一阶段进行传感器标定,将装置置于水平平台,读取倾角传感器零点偏移值并软件补偿,对每个千斤顶执行全行程伸缩,记录位移传感器AD值与实际位移的线性关系,建立校准曲线。第二阶段测试单缸动作,通过无线手柄手动控制单个千斤顶伸缩,验证比例阀PWM控制信号与缸速的对应关系,并调整PID参数使缸体启停平稳无冲击。第三阶段进行四缸同步调试,给定相同目标位移,观测四个位移传感器反馈值的极差,通过修改PID算法中的同步补偿系数,将同步误差控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 内^[4]。最终阶段进行带载测试,使用标准负载模拟实际工况,验证系统在负载变化时调平控制的稳定性与响应速度。

3.2 调平效果评估指标

调平效果评估基于重复性实验,测试条件为在坚实水平地基上放置液压自平衡吊具装置,其上承载重量 20 t 的钢结构梁,初始状态通过垫块人为设置最大倾角 2.5° 的倾斜工况。每次测试记录从系统启动到调平完成的全部数据,采样间隔 100 ms 。评估指标主要包括调平时间、调平精度、同步性误差及系统稳定性。调平时间定义为从控制指令发出到倾角传感器读数持续 3 s 稳定在目标阈值内的时间段。调平精度以最终稳定后的倾角传感器读数为准。同步性误差取调平过程中任意时刻四个千斤顶位移读数的极差最大值^[5]。系统稳定性通过连续 10 次重复测试结果的标准差来评估。测试数据记录如表1所示。

表1 液压自平衡吊具调平性能测试结果

测试序号	初始倾角 ($^{\circ}$)	调平时 间(s)	最终水平精 度($^{\circ}$)	最大同步误 差(mm)
1	2.50	8.20	0.08	1.20
2	2.50	7.90	0.06	1.00
3	2.40	8.50	0.09	1.30
4	2.60	8.10	0.07	1.10
5	2.50	7.80	0.05	0.90
平均值	2.50	8.10	0.07	1.10
标准差	0.07	0.26	0.015	0.15

数据分析表明,该液压自平衡吊具系统调平时间平均值 8.10 s ,标准差 0.26 s ,重复性良好。最终水平精度平均值 0.07° ,显著优于设计指标($\pm 0.1^{\circ}$),证明控制策略有效。最大同步误差平均值 1.10 mm ,显示四个千斤顶协同动作精度高,避免了因不同步导致的构件内部应力。所有测试批次数据标准差均处于低位,说明系统运行稳定可靠,具备工程应用价值。

4 结束语

本研究所提出的液压自平衡吊具及其自动化调平控制策略通过高度集成油箱框架、液压泵站、电气控制单元、传感器与执行千斤顶构建完整机电液一体化调平系统,基于倾角与位移传感器实时数据融合并经由电气控制单元智能算法处理精准驱动液压执行机构实现四缸协同动作,成功实现大型构件吊装过程中快速高精度自动化调平,有效克服传统调平方法精度低、风险高、效率差的固有缺陷,显著提升施工安全性与作业效率,为大型构件安装工程提供创新且具广泛应用前景的解决方案。

参考文献:

- [1] 林朝,王衍英,张耀东,等.基于IGWO-BP-PID的管廊吊具液压缸同步控制研究[J].机床与液压,2024,52(07):80-86.
- [2] 田政平,王朝辉,刘健,等.铝扁铰液压吊具液压系统的研发[J].上海电气技术,2023,16(04):68-71.
- [3] 王刚锋,杨军康,侯润锋,等.基于改进PSO模糊PID的管廊吊具同步控制[J].液压与气动,2023,47(12):115-123.
- [4] 王志金,张义,田世宽,等.高空精调吊具的设计与应用研究[J].公路,2023,68(10):49-56.
- [5] 王明华.基于液压比例驱动的双摇臂抱杆姿态自适应调节[J].轻工科技,2026,42(01):90-92,135.

电梯曳引轮磨损与空载曳引失效分析

林秀峰

(福建省特种设备检验研究院宁德分院, 福建 宁德 352100)

摘要 曳引轮绳槽出现磨损情况致使槽底变宽且槽壁变薄、切入角增大, 这使得当量摩擦系数降低从而引发空载工况下曳引失效问题。空载曳引失效呈现出启动迟缓、钢丝绳打滑、运行抖动以及溜车等故障现象。通过分析绳槽磨损特征与失效机理来建立定期检测制度, 保持钢丝绳张力均衡并及时更换磨损部件, 能够有效预防曳引失效情况发生。维保单位应该依据标准要求定期检测绳槽磨损深度和钢丝绳张力, 把磨损控制在安全范围之内。

关键词 曳引轮磨损; 绳槽变形; 空载曳引失效; 钢丝绳打滑

中图分类号: TU857

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.002

0 引言

曳引轮依靠绳槽和钢丝绳之间的摩擦来让轿厢实现升降。在运行过程中, 绳槽表面承受挤压和摩擦作用进而产生磨损, 这种磨损会改变槽型几何参数并降低当量摩擦系数。当磨损达到一定程度时, 空载上行工况下轿厢与对重侧张力比会超出曳引能力范围, 这会导致钢丝绳出现打滑现象从而引发溜车、冲顶等事故。系统分析绳槽磨损规律与空载曳引失效机理对保障电梯安全运行具有重要意义。

1 曳引轮绳槽磨损的典型表现

曳引轮磨损与空载曳引失效的完整因果关系如图1所示。

1.1 绳槽槽底磨损变宽

绳槽出现磨损情况使得钢丝绳在槽内产生下沉现象, 维保单位运用深度测量探头对绳槽底部与钢丝绳外缘间隙测量。检测标准规定未磨损状态下绳槽底部到钢丝绳外缘最大间距为6 mm, 当间距缩小到3 mm以下时就需要严密进行监测^[1]。槽底磨损造成钢丝绳中心位置出现下移, 改变了绳槽的有效工作深度状况, 当钢丝绳完全触底的时候, 绳槽两侧壁面失去对钢丝绳正常包络作用, 当量摩擦系数会急剧出现下降, 曳引能力会大幅被削弱, 此时必须马上更换曳引轮或者重新车削绳槽^[2]。

1.2 绳槽槽壁磨损变薄

槽壁厚度减薄属于长期摩擦作用于绳槽侧面所产生的典型磨损形态。钢丝绳在运行过程中会对绳槽两侧

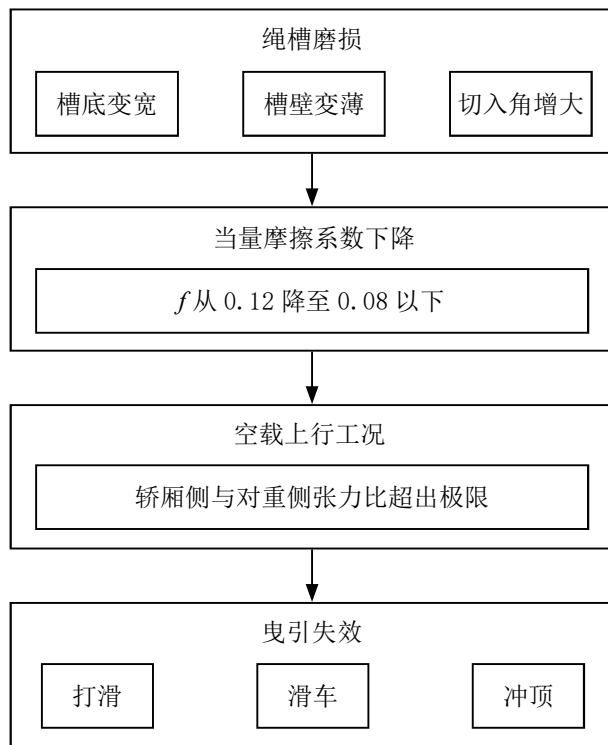


图1 曳引轮绳槽磨损导致空载曳引失效机理流程图
壁面施加持续的挤压力, 槽壁材料在接触应力作用下会逐步剥离进而导致绳槽宽度增加^[3]。槽壁变薄会使钢丝绳在绳槽内的嵌入程度降低, 接触比压分布会发生变化, 原本集中在槽壁中部的压力会向两侧分散, 单位面积压强减小会导致钢丝绳与槽壁间摩擦力下降, 降低曳引传动效率, 在极端工况下容易引发钢丝绳打滑现象。

作者简介: 林秀峰(1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电梯检验检测。

1.3 绳槽角度磨损增大

绳槽角度参数包括槽型角 γ 值与切入角 β 值, 电梯运行一段时间后槽面磨损使曳引绳在绳槽中下沉, β 角有所增大, 但 γ 角基本保持不变。V 型槽的槽型角通常设计为大于 35° , 随着磨损进行, 槽壁倾斜角度逐渐增大, 槽型向半圆形过渡^[4]。带切口半圆槽的切入角 β 值最大不能超过 106° , 相当于槽下部 80% 被切除。角度磨损改变了钢丝绳在绳槽内的受力状态, 曳引能力依据欧拉公式计算:

$$T_1 \leq T_2 e^{f\alpha} \quad (1)$$

式(1)中: T_1 为轿厢侧钢丝绳张力, T_2 为对重侧钢丝绳张力, f 为当量摩擦系数, α 为钢丝绳在曳引轮上的包角。当量摩擦系数随槽型角度变化呈单调递减趋势, V 型槽磨损后槽型逐渐接近带切口半圆槽, 当量摩擦系数 f 从 0.12 快速减小至 0.08 以下, 导致 $e^{f\alpha}$ 值降低, 曳引能力下降显著。

表 1 空载曳引失效特征参数汇总

故障现象	特征参数	正常值	失效值	单位
钢丝绳打滑	轿厢位移偏差	< 5	20 ~ 100	mm
轿厢抖动	峰值加速度	≤ 0.05	0.15 ~ 0.25	m/s^2
溜车 / 冲顶	溜车距离	—	50 ~ 300	mm
摩擦系数下降	当量摩擦系数 f	0.12	< 0.08	—

指令后, 曳引电机要提供更大转矩克服静摩擦阻力, 电机从静止加速到设定速度过渡时间超过正常 2 倍至 3 倍。变频器输出频率信号与编码器反馈实际转速显著滞后, 控制系统增大转矩补偿参数仍因曳引轮与钢丝绳摩擦力储备不足难以缩短启动延迟。技术人员应观察轿厢启动过程, 并核对编码器转速反馈与轿厢实际位移。出现启动响应延迟且伴随钢丝绳相对曳引轮滑移时, 应结合绳槽磨损程度、钢丝绳张力及空载曳引能力试验结果进行判定, 不宜仅依据启动电流变化确定曳引失效。

2.2 钢丝绳在绳槽内发生打滑

钢丝绳打滑会产生尖锐摩擦声响频率集中 800 Hz 至 1 200 Hz 机房可清晰识别。曳引轮表面温度迅速升至 60°C 以上, 红外测温显示局部热点超 80°C 。编码器轿厢位移数据与平层感应器反馈实际楼层有 20 mm 至 50 mm 偏差, 多次打滑累积超过 100 mm 触发校正保护。钢丝绳在绳槽微滑移时槽面有细密纵向条纹曳引轮与绳接触面摩擦系数, 从 0.12 降至 0.08 以下曳引能力降超 30%。

1.4 绳槽表面出现沟痕或剥落

绳槽表面质量劣化是磨损中后期典型标志。钢丝绳往复运动夹带磨粒在槽面形成微观切削, 使槽面粗糙度增大且局部有纵向沟痕。曳引轮槽面材质要均匀且同一轮上硬度差不超过 15HBS。材质不均或热处理不当的绳槽在应力集中区产生剥落缺陷形成不连续接触面, 使钢丝绳运行受周期性冲击载荷加速绳股疲劳损伤^[5]。用图像识别技术检测绳槽表面量化沟痕深度与剥落面积, 表面缺陷深度超 0.5 mm 或剥落面积占比超绳槽接触面 10% 应重点监测。

2 空载曳引失效的故障现象

空载曳引失效各故障现象的特征参数如表 1 所示。

2.1 轿厢空载上行时启动迟缓

空载上行时轿厢与对重侧钢丝绳张力比接近曳引极限, 启动响应时间明显延长。驱动控制器发出启动

2.3 轿厢运行中出现异常抖动

轿厢运行时产生周期性振动, 抖动频率和曳引轮转速线性相关, 额定速度 1.0 m/s 工况下振动频率约 3 Hz 至 5 Hz。加速度传感器装在轿厢底部中心, 实时采集振动幅值数据, 峰值加速度达 0.15 m/s^2 至 0.25 m/s^2 , 超正常运行 0.05 m/s^2 阈值 3 倍以上。钢丝绳张力传感器监测显示各绳张力波动, 相邻绳张力差从正常 3% 扩至 8% 至 12%, 张力不均加剧绳槽磨损不对称。轿厢抖动经导靴传至导轨系统, 导靴与导轨间隙从标准 0.5 mm 扩大至 1.5 mm, 乘坐舒适性严重下降。

2.4 空载上行时发生溜车或冲顶

空载轿厢上行到顶层附近时曳引轮两侧张力比超临界值, 钢丝绳瞬间失曳引力轿厢在对重拉力下反向滑移, 溜车距离 50 mm 到 300 mm 不等。制动器响应延迟使溜车距离进一步扩大, 制动器完全抱闸时轿厢偏离预定平层位置, 平层精度误差超过 50 mm。极端工况下曳引失效与制动延迟叠加, 轿厢以 0.3 m/s 至 0.5 m/s 速度冲向顶层端站, 触发上限位开关切断主电源。轿厢惯性运动未停继续上行 15 mm 至 30 mm 触碰缓冲器, 产生剧烈冲击电梯进入故障保护状态。

3 曳引轮磨损的预防措施

曳引轮磨损的检测与维保工作应按照图2所示流程规范执行。

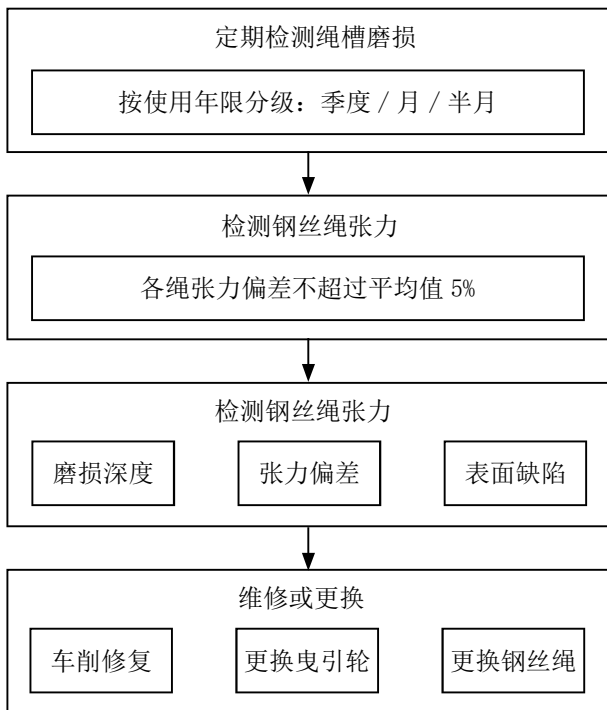


图2 曳引轮绳槽磨损检测与维保流程图

3.1 建立绳槽磨损定期检测制度

维保单位要依据电梯使用年限制定分级检测制度，新装电梯运行前两年需每季度检测一次，运行两年后要每月检测一次，运行五年以上的电梯每半月检测一次。用深度测量探头配合游标卡尺量化测量绳槽底部到钢丝绳外缘间隙，下沉量从初始6 mm缩减到3 mm时列入重点监测对象，缩减到1.5 mm时启动曳引能力验证试验。用工业相机采集绳槽表面图像，通过特征提取网络模型自动识别沟痕深度与剥落面积，表面缺陷深度超0.5 mm或剥落面积占比超10%时列入重点监测对象。

3.2 保持钢丝绳张力均衡

钢丝绳张力不均使各绳槽受力分布失衡，张力大的钢丝绳对绳槽挤压力更大加速磨损。《电梯安装验收规范》（GB/T 10060-2023）规定单根钢丝绳张力与平均值偏差不超5%，维保单位用张力测量仪检测，通过调绳头螺母位置或用液压平衡装置实现张力均衡。曳引比2:1电梯先调一侧使张力差小于3%，空载运行数次后再调另一侧反复调整至两侧达标。安装张力在线监测装置用压力传感器实时采集各绳作用力，张力偏差超阈值自动报警。

3.3 及时更换磨损钢丝绳

钢丝绳自身磨损劣化会直接影响绳槽磨损速率，表面钢丝磨平后有效接触面积减小使单位压强增大，加速绳槽材料剥离。钢丝绳报废判定依据有直径减小超公称直径10%，一个捻距内断丝集中在一两个绳股超16根、均匀分布各绳股超32根。用游标卡尺对钢丝绳直径多点测量，用磁力探伤仪检测内部断丝与腐蚀状况。钢丝绳使用3年至5年时应重点评估更换必要性，载荷频繁变化的高速电梯更换周期缩短至2年至3年。

3.4 合理控制电梯启停频次

启停时曳引轮承受交变载荷，启动瞬间电机输出转矩突增使钢丝绳对绳槽产生冲击应力，频繁启停致绳槽表面疲劳损伤累积。变频调速系统用S曲线加减速控制，将启动加速度限在 0.8 m/s^2 至 1.2 m/s^2 、制动减速度控在 0.6 m/s^2 至 1.0 m/s^2 以降低冲击载荷幅值。电梯群控系统据楼层呼叫分布优化调度策略，减少空载运行次数，且高峰优先响应同方向连续呼叫。维保计划记录月均启停次数，商业综合体电梯日均启停300次至500次、住宅电梯日均100次至200次，依实际使用频次调整润滑维护频率。

4 结束语

曳引轮绳槽磨损使当量摩擦系数下降削弱曳引能力，空载上行工况易引发钢丝绳打滑轿厢溜车等事故。预防关键是建立科学检测制度定期监测绳槽磨损与钢丝绳张力，及时发现超标隐患。维保单位要严格执行国标控制绳槽下沉量和钢丝绳张力差，确保曳引能力达到安全要求。合理控制启停频次、优化维护及更换磨损部件，可延长曳引轮寿命，降低故障率，保障电梯安全。

参考文献：

- [1] 肖承垠,聂敏,王佳宁,等.浅析电梯曳引轮槽磨损机理危害及其应对措施[J].上海轻工业,2025(06):145-147.
- [2] 侯博奇.电梯曳引轮的轮槽磨损原因及其检验[J].模具制造,2025,25(08):252-254.
- [3] 李德庚.曳引轮和钢丝绳磨损对曳引参数的影响[J].起重运输机械,2025(07):40-45.
- [4] 张政伟.曳引轮轮槽磨损对电梯曳引能力的影响分析[J].今日制造与升级,2024(03):153-156.
- [5] 卢咸定,周叶平,兰清生,等.曳引驱动电梯对重反绳轮轴断裂失效原因分析[J].科技创新与应用,2022,12(32):78-80,84.

水工混凝土钻芯法强度检测误差控制分析

吴文君¹, 周兴俊²

(1. 江苏中准工程质量检测技术有限公司, 江苏 无锡 214142;

2. 江苏祥通建设有限公司, 江苏 无锡 214142)

摘要 钻芯法能够直接获得水工混凝土实体抗压强度, 是大坝、闸墩、厂房基础及输水建筑物质量复核的重要手段。水工结构体量大、骨料粒径大、长期处于潮湿或饱水环境, 芯样代表性容易受到浇筑分层、钻取扰动、尺寸加工和加载操作影响。本文围绕检测原理, 分析钻芯位置、钻取损伤、芯样加工及抗压试验形成误差的机理, 并从布点、设备参数、端面验收、含水状态和数据复核等方面提出控制方法, 以期为水工混凝土强度判定提供参考。

关键词 水工混凝土; 钻芯法; 强度检测; 检测误差

中图分类号: TV41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.003

0 引言

水工混凝土承担挡水、泄水、支承和抗冲磨等作用, 其实体强度会受到原材料波动、温控措施、分层浇筑及长期环境作用影响。标准试件只能反映取样时的拌合物质量, 回弹或超声检测又依赖经验关系, 当检测结果存在争议时, 钻芯法常被用于直接验证。然而, 钻芯取样具有局部破损性, 任何环节的偏差都可能被带入最终强度值。检测结论还直接影响加固范围和运行安全判断。因而, 有必要按照误差传递路径设置控制界限, 使检测结果能够反映结构真实状态。

1 水工混凝土钻芯法强度检测的技术基础

1.1 钻芯法检测原理

钻芯法以金刚石薄壁钻头从结构内部取得圆柱体芯样, 经切割、磨平和尺寸验收后, 在压力试验机上沿芯样轴线加载至破坏^[1]。其测得的是取芯位置在检测龄期、实际含水状态和既有损伤条件下的实体抗压性能, 与标准养护立方体试件并不完全相同。检测前应结合设计分区、施工仓面和运行环境划分同类检测单元, 再用钢筋扫描、超声或雷达了解内部构造。对最大骨料粒径为 40 mm 的混凝土, 按芯样直径不小于骨料粒径 3 倍的原则, 直径宜达到 120 mm 以上; 当骨料粒径更大且结构条件不允许取大芯时, 应通过专项对比试验确定小直径芯样的适用性, 不能直接套用普通混凝土参数。

1.2 芯样强度计算方法

芯样抗压强度按破坏荷载与实际受压面积计算。设芯样破坏荷载为 F , 平均直径为 d , 则强度 f_c 按式 (1)

计算。直径应在芯样中部两个相互垂直的方向测量并取平均值, 荷载由经校准的压力试验机读取。对于高径比接近 1.0 的标准芯样, 所得值可直接用于实体强度评价; 高径比偏离规定范围时, 端部约束和细长效应会改变破坏形态, 应按有效规程或专项试验修正。

$$f_c = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (1)$$

由于受压面积与直径平方成正比, 尺寸误差会被放大。忽略高阶小量时, 荷载和直径对强度的相对误差可按式 (2) 估算。

$$\frac{\Delta f_c}{f_c} \approx \frac{\Delta F}{F} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

式 (2) 中, f_c 为芯样抗压强度, F 为破坏荷载, d 为平均直径, Δf_c 、 ΔF 和 Δd 分别为相应量的测量偏差。以直径 100 mm 的芯样为例, 若直径被多测 1 mm, 而荷载读数正确, 计算强度约低估 2%; 若试验机荷载误差为 1%, 两项同向叠加后偏差可接近 3%。因此, 尺寸测量、设备校准和端面质量应作为同一条误差链控制。

2 水工混凝土钻芯法强度检测的误差来源

钻芯法的误差由结构非均质性与检测操作共同形成^[2]。如图 1 所示, 位置选择决定样本是否具有代表性, 钻取过程影响芯样完整性, 加工质量控制受压几何条件, 加载操作决定荷载是否均匀传递。四类误差会在强度计算中叠加, 其中有些造成系统性偏低, 有些增大离散性, 只有沿全过程追溯才能判断数据能否用于强度推定。

2.1 钻芯位置选择误差

水工结构不同部位的混凝土并非均质材料。坝体上下游面、闸墩边角、施工缝附近及长期渗水区的密

作者简介: 吴文君 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利施工、水利工程检测。

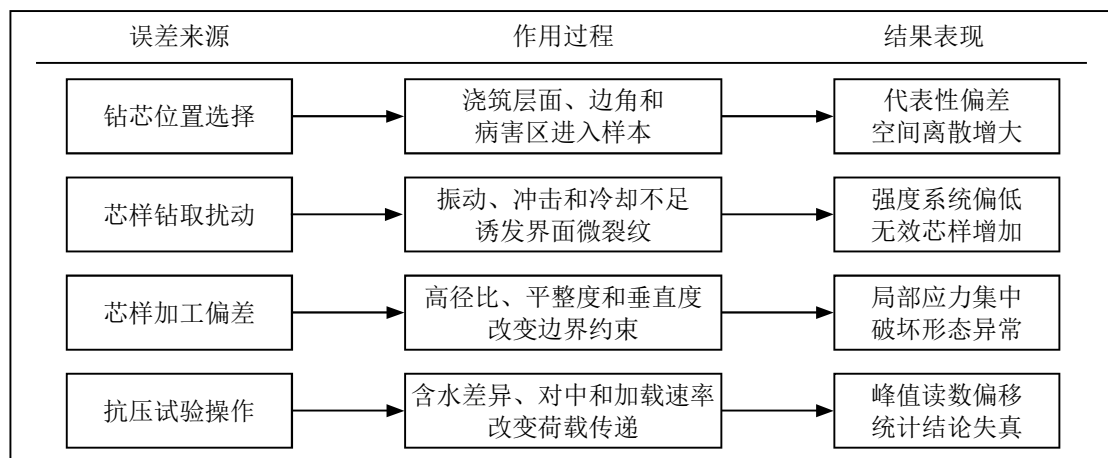


图1 水工混凝土钻芯检测误差传递路径

实度和损伤程度可能明显不同,钻芯位置过度集中会使局部特征被当成整体水平。钻头穿过钢筋、冷却水管或预埋件,不仅改变有效受压面积,还可能在取样时产生裂纹^[3]。

2.2 芯样钻取损伤误差

钻取损伤主要来自钻机晃动、进尺过快、钻头磨损和冷却不足。钻机底座未固定时,钻头产生径向摆动,芯样外缘会出现环状划痕、掉角或肉眼难以发现的微裂纹;遇到大骨料后强行加压,骨料与浆体界面可能被拉开,使抗压值偏低。冷却水流量过小会升高钻头温度并使浆体表层受热,流量过大又可能冲刷软弱夹层。取芯后若用撬杠侧向折断芯样,根部会形成弯拉裂缝,即使芯样外观完整,也不适合用于抗压强度判定。

2.3 芯样加工处理误差

芯样加工误差集中在直径、高度、端面平整度和轴线垂直度。切割位置不当会保留表层浮浆、施工缝或钻取根部损伤,造成试件本身不具代表性。端面存在0.5 mm局部凸起时,初始荷载会集中在很小的接触区,裂纹提前扩展,最终强度明显降低。水泥浆、硫磺胶泥等补平材料若强度不足或厚度不均,也会产生附加变形^[4]。芯样中含有沿轴向分布的钢筋、贯穿孔洞或长度较大的裂缝时,其受力状态已经偏离圆柱体试件假定。加工阶段若只追求达到尺寸而忽视缺陷记录,试验结果虽能计算,却缺乏工程解释。

2.4 抗压试验操作误差

抗压试验误差主要与含水状态、对中、加载速率和设备量程有关。水工混凝土长期处于潮湿或饱水环境,芯样取出后在室内风干,孔隙水状态发生改变,同批样品放置时间不同会增加离散性。试件中心未与

压板中心重合,或上下端面不平行,会使轴向压力转化为偏心压力,破坏面常呈单侧劈裂。记录人员只抄取峰值荷载,未观察破坏形态,难以及时识别端面压碎、局部剪切和钢筋影响等无效结果,后续统计可能把操作异常误判为结构强度不足。

3 水工混凝土钻芯法强度检测的误差控制

误差控制应覆盖方案、取样、加工、试验和复核五个阶段,并形成可追溯记录。各环节的验收结果需要反馈到下一步;芯样一旦在前一环节不合格,应及时补取或重新加工。主要量化控制要求见表1,实际工程可结合结构等级、骨料级配和现行标准细化。

3.1 科学确定钻芯位置

合理布点的前提是明确检测目的,用于验收争议时,应在同强度等级、同配合比和相近龄期的区域随机取样;用于病害评估时,则需同时布置受损区和对照区,避免把环境劣化与原施工强度混为一谈。检测人员可先绘制仓块、高程、浇筑方向及已知缺陷分布图,再依据无损检测结果选取高、中、低三个强度水平的代表位置。钻孔中心应避开主筋、止水、锚固件和冷却管,并远离明显裂缝交汇处;确需评价施工缝时,应另设专项芯样,不与普通芯样合并统计^[5]。每个钻孔应记录坐标、高程、取芯方向、构件表面状态和附近渗水情况。通过空间分层与随机抽取结合,可减少人为选择“好位置”或“差位置”造成的系统偏差,也便于在异常结果出现后追溯同仓次施工资料。

3.2 规范控制钻取过程

稳定钻进比单纯提高取芯速度更重要,作业前应检查钻机主轴跳动、钻头磨损和供水系统,采用锚固或真空底座使机架保持刚性,并在开孔阶段低速轻压

表 1 钻芯法强度检测主要量化控制要求

控制环节	量化要求	控制说明
芯样直径	标准芯样宜为 100 mm，且不小于最大骨料粒径 3 倍	大粒径水工混凝土应增大直径或专项换算
高径比	0.95 ~ 1.05	减少端部约束与细长效应
冷却水	3 L/min ~ 5 L/min，出水温度不高于 30 ℃	限制热损伤并及时排屑
承压面	平整度偏差不大于 0.1 mm，垂直度偏差不大于 1°	降低偏心和局部应力集中
试验机	1 级精度，量程使用 20% ~ 80%	降低荷载读数相对误差
加载速度	C30 ~ C60 宜为 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s	保持破坏过程可比
样本数量	检测批宜不少于 15 个，单个构件宜不少于 3 个	降低偶然取样影响

形成导向槽。钻进遇到粗骨料或阻力突增时，应降低进尺并保持连续冷却，不得通过摆动钻机扩大孔径。钻头直径应依据最大骨料粒径确定，条件允许时优先采用 100 mm 及以上芯样；水工大粒径混凝土无法满足 3 倍粒径要求时，应增加芯样直径或建立项目换算关系。芯样接近钻孔底部后可降低推力，使用专用取芯器平稳取出，禁止侧向敲击。取出后立即标明上、下游方向和钻孔编号，用湿布或密封袋保持原有含水状态，并在孔洞清理后按设计要求采用不低于原结构强度等级的材料修补。

3.3 提高芯样加工质量

加工质量应通过尺寸验收来控制，切割前先剔除钻头入孔段、根部裂损段及不具代表性的表层，再按目标高径比预留磨削量。两端宜采用金刚石锯切后机械磨平，补平材料只在无法磨平时使用，并验证其早期强度和刚度。标准芯样高径比宜控制在 0.95 ~ 1.05，承压面平整度偏差宜不大于 0.1 mm，端面与轴线的垂直度偏差宜不大于 1°。直径至少在两个互相垂直方向测量，高度沿周边对称位置测量；发现椭圆、斜切或局部缺损时，应重新加工。含钢筋芯样要记录钢筋直径、数量和位置，钢筋靠近端面、与轴线近似平行或引起裂缝时不应作为有效强度试件^[6]。完成验收后，同批芯样应采用一致的保湿、饱水或规定环境处理，统一放置时间，避免含水差异超过加工误差本身。

3.4 严格规范抗压试验

抗压试验前应核对试验机校准状态、量程和压板清洁度，预计破坏荷载宜处在所选量程的 20% ~ 80%。放置芯样时利用同心圆或定位尺完成对中，先施加小于预计破坏荷载 5% 的初始荷载，确认两端接触均匀后再连续加载。对于常见 C30 ~ C60 水工混凝土，可按 0.5 MPa/s ~ 0.8 MPa/s 控制应力增长速度，并在达到峰值前保持速率稳定。试验中同步记录峰值、破坏持续时间和裂缝

形态；出现单侧压碎、明显偏心、端面补层先破坏或钢筋主导破坏时，应判为异常并复核。数据处理不能只比较平均值，还应查看极差、标准差和变异系数。单值明显偏离同组数据时，先核查取芯记录和试件照片，再依据统计规则决定是否剔除；不得为了满足设计强度任意删除低值。最终报告应列出原始尺寸、荷载、换算过程、不合格芯样和孔洞修补情况，使结论能够复算。

4 结束语

钻芯法的直接性并不意味着结果天然准确。水工混凝土的分区浇筑、大粒径骨料及长期饱水环境，会把取样代表性问题放大；钻机振动、端面偏差和加载偏心又会把局部损伤转化为强度误差。检测工作应使误差来源与控制措施逐项对应，通过分层随机布点、稳定钻取、严格加工、统一含水状态和规范加载形成闭环。只有保留完整的原始记录，并结合无损检测与施工资料解释异常值，钻芯结果才能用于结构强度评价和修复决策，也可减少无效补芯和重复试验。

参考文献：

- [1] 先钊铭. 建筑混凝土强度检测技术应用探究[J]. 工程建设, 2023, 06(06): 136-138.
- [2] 孙学龙. 回弹-钻芯法在混凝土抗压强度检测中的应用研究[J]. 北方建筑, 2024, 09(06): 36-40.
- [3] 杨连喜. 基于钻芯法检测水利水电工程混凝土强度的实验研究[J]. 建材发展导向, 2024, 22(08): 70-72.
- [4] 方化龙. 钻芯法检测混凝土抗压强度精度分析与优化[J]. 建筑设计与研究, 2024, 05(24): 16-18.
- [5] 千明德, 王梓晨, 刘宁. 钻芯法检测混凝土强度中欧标准比较研究[J]. 四川水泥, 2025(04): 61-64, 67.
- [6] 杨英. 混凝土结构钻芯法强度检测精度影响因素分析[J]. 工程建设, 2025, 08(06): 48-50.

超长距离 OTN 波分系统中的非线性效应补偿技术

吴帅帅

(中国广电山东网络有限公司潍坊市分公司, 山东 潍坊 261000)

摘要 超长距离 OTN 波分系统是现代光通信网络骨干传输的核心载体, 其传输性能直接决定全网业务的稳定性与可靠性。光纤传输过程中产生的非线性效应, 随着传输距离延长和信号速率提升不断累积, 成为限制系统传输距离、降低信号质量的核心瓶颈。本文围绕超长距离 OTN 波分系统中的非线性效应补偿技术展开研究, 梳理系统基础架构与非线性效应机理, 分析现有补偿技术的性能与不足, 设计新型补偿技术并提出优化策略, 以期提升超长距离 OTN 波分系统传输性能提供技术参考。

关键词 超长距离 OTN 波分系统; 非线性效应; 补偿技术; DSP 算法; 光电协同

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.004

0 引言

随着数字经济快速发展, 高清视频、云计算、大数据等业务对光通信网络的传输容量、距离和可靠性提出更高要求。OTN 波分系统凭借大容量、高带宽、低时延的优势, 成为骨干网超长距离传输的首选方案。但在超长距离传输场景中, 光纤介质的非线性特性会引发多种非线性效应, 导致信号畸变、频谱展宽、信道串扰, 严重影响系统传输质量。传统补偿技术难以适配高速率、长距离的传输需求, 无法彻底抵消非线性效应带来的损伤。开展非线性效应补偿技术研究, 优化补偿方案, 突破传输瓶颈, 对推动超长距离 OTN 波分系统发展、支撑数字通信网络升级具有重要的现实意义。

1 超长距离 OTN 波分系统基础理论与非线性效应机理

1.1 超长距离 OTN 波分系统核心架构

超长距离 OTN 波分系统核心架构以光传输链路为基础, 整合光发射端、光接收端、光放大单元、光交叉连接单元及监控单元, 形成完整的信号传输与管控体系。光发射端完成业务信号的编码、调制与合波, 将多路不同波长的信号整合为一束光信号注入传输光纤; 光放大单元采用 EDFA 放大器与拉曼放大器协同工作, 补偿光纤传输过程中的衰减, 维持信号功率稳定, 避免信号因衰减导致的失真; 光接收端负责分波、解

调与解码, 将多路波长信号分离并还原为原始业务信号; 光交叉连接单元实现不同波长信号的灵活调度, 提升系统组网灵活性; 监控单元实时监测链路功率、信噪比、色散等关键参数, 为补偿技术的动态调整提供数据支撑^[1]。该架构无需频繁设置中继节点, 可实现数千公里的无中继传输, 核心在于通过各单元协同工作, 平衡信号功率与传输质量, 减少各类传输损伤。

1.2 光纤传输中的非线性效应分类及特性

光纤传输中的非线性效应源于强光作用下介质的非线性极化, 主要分为散射效应与克尔效应相关效应两大类。散射效应包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS), SBS 由泵浦光与声子相互作用产生, 门限较低, 会导致信号功率向后向散射转移, 引发信道串扰与能量损失; SRS 与硅原子振动模式相互作用, 属于宽带效应, 短波长信号会被衰减而长波长信号得到增强, 门限较高, 在波数增加、传输距离延长时发生概率显著上升。克尔效应相关效应包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM), SPM 由光信号自身强度变化导致光纤折射率改变, 引发光谱展宽与脉冲展宽, 在超长距离、高色散光纤中表现更为明显; XPM 由多信道间光强相互作用产生, 信道间隔越小, 效应越显著, 会导致相邻信道干扰; FWM 由不同波长光波相互耦合产生新的混频产物, 在信道间距小、色散足够小且满足相位匹配时, 会成为非线性串扰的主要来源, 造成信号能量损失与严重串扰。

作者简介: 吴帅帅(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 光缆传输与 OTN(光传送网)领域。

1.3 超长距离 OTN 波分系统中非线性效应的影响规律

超长距离 OTN 波分系统中,非线性效应的影响随传输距离、信号功率、信道间隔及光纤类型的变化呈现明确规律。传输距离越长,非线性效应的累积效应越明显,信号畸变程度随之加剧,当传输距离超过 1 000 km 时,SPM 与 XPM 引发的频谱展宽会导致信道间重叠,严重影响信号接收质量。信号功率与非线性效应强度正相关,为补偿光纤衰减而提升光功率时,会显著增强各类非线性效应,形成“功率提升—非线性加剧”的矛盾。信道间隔越小,XPM 与 FWM 效应越突出,密集波分系统中,信道间隔接近 10 GHz 时,FWM 会成为主要干扰因素;信道间隔大于 100 GHz 时,可有效缓解 SBS 引发的串扰。光纤类型对非线性效应影响显著,G.653 光纤等效芯径小,易产生 SRS 与 FWM 效应;G.652 与 G.655 光纤色散特性更优,可有效抑制部分非线性效应,其中 G.655 光纤在 1 550 nm 窗口色散较小,更适配超长距离高速传输^[2]。

2 超长距离 OTN 波分系统现有非线性效应补偿技术分析

2.1 线性补偿技术及其局限性

线性补偿技术是早期超长距离 OTN 波分系统中应用最广泛的补偿方式,核心针对光纤色散等线性损伤,间接缓解部分非线性效应带来的影响,主要包括色散补偿光纤(DCF)补偿、光纤布拉格光栅(FBG)补偿两种方式。DCF 补偿通过采用负色散光纤抵消常规光纤的正色散,减少色散引发的脉冲展宽,间接降低 SPM 效应的叠加影响,但会引入额外插损,每公里插损不低于 0.5 dB,需配合 EDFA 放大器补偿,且固定补偿值难以适配动态变化的传输场景,可调 DCF 模块成本高昂。FBG 补偿通过布拉格光栅反射特定波长,延迟高速波长分量以对齐低速分量,适用于局部色散补偿,但其补偿带宽有限,无法应对超长距离传输中多种非线性效应的协同影响。线性补偿技术的核心局限性在于仅能处理线性损伤,无法直接补偿 SPM、XPM、FWM 等非线性效应,随着传输距离延长和信号速率提升,其补偿效果急剧下降,难以满足现代超长距离 OTN 波分系统的传输需求。

2.2 非线性补偿技术分类及原理

现有非线性补偿技术主要分为光域补偿、电域补偿两大类,两类技术依托不同原理实现非线性损伤的抵消,适配不同的传输场景。光域补偿技术直接在光域对非线性效应进行抑制或抵消,无需进行光电转换,核心包括拉曼放大补偿、光相位共轭(OPC)补偿。拉曼放大补偿通过泵浦光激发光纤中的拉曼散射效应,

实现信号光的分布式放大,提升信噪比的同时降低入纤功率,减少非线性效应的产生,其放大带宽宽、噪声低,可有效抑制 SBS 与 SRS 效应,但泵浦光功率控制难度大,易引入额外噪声。OPC 补偿通过将信号光的相位进行反转,使传输过程中产生的非线性相位畸变在后续传输中相互抵消,可有效补偿 SPM 与 XPM 效应,但对相位匹配要求极高,系统复杂度高,且受信道数量影响较大,多信道场景下补偿效果下降。电域补偿技术通过光电转换将光信号转换为电信号,利用数字信号处理(DSP)算法实现非线性损伤的补偿,核心包括数字反向传播(DBP)算法、自适应均衡算法,其中 DBP 算法通过建立信道模型,模拟与实际链路相反的虚拟链路,抵消非线性积累损伤,自适应均衡算法通过实时调整均衡系数,补偿非线性效应引发的信号畸变,电域补偿技术适配性强,可通过算法升级优化补偿效果,是当前主流的非线性补偿方式^[3]。

2.3 现有补偿技术的性能对比与评估

现有各类非线性补偿技术在补偿效果、系统复杂度、成本、功耗等方面存在显著差异,适配不同的超长距离 OTN 波分系统传输场景。拉曼放大补偿在抑制 SBS、SRS 效应方面优势明显,可使非线性抑制增益达到 6.5 dB,传输距离提升 35%,但泵浦系统复杂度高,功耗较大,成本高于线性补偿技术。OPC 补偿对 SPM、XPM 效应的补偿效果突出,可有效降低信号畸变,但相位匹配难度大,多信道场景下补偿精度下降,且设备成本高昂,难以大规模应用。DBP 算法作为主流电域补偿技术,可同时补偿多种非线性效应,补偿精度高,但计算复杂度极高,会引入较大时延,功耗是简化方案的 5 倍,商用场景中需进行复杂度优化。自适应均衡算法计算复杂度低,时延小,适配动态传输场景,但其补偿效果受算法精度限制,在超长距离、高速率场景下,补偿增益低于 DBP 算法与拉曼放大补偿。综合来看,单一补偿技术难以兼顾补偿效果、系统复杂度与成本,拉曼放大补偿更适用于长距离低速率场景,电域 DSP 类补偿技术更适用于高速率、多信道场景,实际应用中多采用多技术协同补偿的方式。

3 新型非线性效应补偿技术设计与优化

3.1 新型补偿技术的设计目标与约束条件

新型非线性效应补偿技术的设计目标围绕提升补偿精度、增强适配性、降低系统复杂度与功耗展开,核心是实现超长距离、高速率场景下多种非线性效应的高效补偿,同时兼顾实用性与经济性。具体目标包括:将非线性抑制增益提升至 10 dB 以上,传输距离提升 50% 以上;适配单波 400 G 及以上速率、多信道密集波

分传输场景；降低补偿时延与功耗，DSP算法复杂度较现有方案降低40%以上；提升自适应能力，可实时适配链路参数动态变化^[4]。设计过程中需遵循三大约束条件：在硬件约束方面，需兼容现有OTN波分系统架构，避免大规模改造硬件，控制设备成本；在性能约束方面，补偿过程中不能引入额外信号失真与噪声，确保系统信噪比不低于现有水平。

3.2 基于改进DSP算法的非线性补偿技术设计

基于改进DSP算法的非线性补偿技术以现有DBP算法为基础，通过优化算法架构与计算流程，在降低复杂度的同时提升补偿精度，适配超长距离高速率传输需求。算法优化核心集中在两个方面：一是简化非线性薛定谔方程的求解过程，采用分段迭代求解方式，减少迭代次数，同时引入神经网络模型拟合非线性响应，替代传统复杂的数值计算，将算法复杂度降低40%以上，有效减少时延与功耗。二是增加自适应参数调整模块，结合监控单元采集的链路实时数据，动态调整算法的迭代步长与均衡系数，实时适配信号功率、色散、信道间隔的变化，提升补偿精度。该技术在接收端完成光电转换后，先通过时钟恢复、色散补偿模块处理线性损伤，再通过改进型DSP算法抵消SPM、XPM、FWM等非线性效应，最后通过判决译码输出高质量电信号^[5]。与现有DBP算法相比，改进后算法的补偿精度提升2 dB以上，时延降低30%，功耗控制在商用可接受范围，无需改造现有硬件，仅通过固件升级即可实现部署，适配性更强。

3.3 光域—电域协同补偿技术设计

光域—电域协同补偿技术打破单一补偿技术的局限，实现光域拉曼放大补偿与电域改进DSP算法补偿的深度联动，发挥两类技术的优势，提升整体补偿效果。该技术架构分为光域预处理与电域精细化补偿两个阶段，光域预处理阶段，采用分布式拉曼放大技术，动态调整泵浦光功率，将入纤功率控制在非线性阈值范围内，减少非线性效应的产生，同时补偿光纤传输衰减，提升信号信噪比；通过光相位预补偿模块，在发射端对信号相位进行预失真处理，提前抵消部分传输过程中产生的非线性相位畸变。电域精细化补偿阶段，接收端将光信号转换为电信号后，通过改进型DSP算法对剩余的非线性损伤进行精准补偿，同时利用自适应均衡模块，校正光域补偿过程中引入的微小畸变，实现非线性效应的全方位抵消^[6]。协同控制模块负责统筹光域与电域补偿参数，根据链路实时监测数据，动态调整拉曼泵浦功率、预补偿相位与DSP算法参数，确保两者协同工作，避免相互干扰。该技术可使非线性抑制增益达到12 dB以上，传输距离提升60%，有效解决单一补偿技术难以兼顾多种非线性效应的问题。

3.4 补偿技术的优化策略

新型补偿技术的优化策略围绕参数优化、算法优化与系统协同优化展开，进一步提升补偿性能与实用性。在参数优化方面，建立链路参数与补偿参数的关联模型，通过机器学习算法训练，实现补偿参数的精准匹配，根据传输距离、信号速率、信道数量的不同，自动生成最优补偿参数组合，减少人工干预，提升参数调整的效率与精度；针对拉曼泵浦功率与DSP算法迭代步长，采用动态寻优算法，实时调整参数，确保补偿效果处于最优状态。在算法优化方面，持续优化改进型DSP算法的神经网络模型，增加训练样本量，提升模型对不同非线性效应的拟合精度，进一步降低算法复杂度与时延；引入LDPC级联交织编码技术，提升纠错能力，抵消补偿过程中引入的微小噪声。在系统协同优化方面，整合监控单元与协同控制模块，实现链路参数实时监测、补偿参数动态调整与补偿效果实时反馈的闭环控制。

4 结束语

超长距离OTN波分系统中的非线性效应是限制其传输性能的核心瓶颈，各类非线性效应随传输距离、信号功率的增加不断累积，严重影响信号质量与传输距离。现有线性补偿技术仅能处理线性损伤，无法有效补偿非线性效应，单一非线性补偿技术存在补偿精度、系统复杂度与成本的平衡难题，多技术协同补偿缺乏有效联动，难以适配高速率、长距离的传输需求。新型非线性效应补偿技术通过改进DSP算法与构建光域—电域协同补偿架构，有效解决了现有技术的不足，改进DSP算法降低了计算复杂度与时延，提升了补偿精度与自适应能力；光域—电域协同补偿技术实现了两类补偿技术的优势互补，全方位抵消多种非线性效应。通过参数、算法与系统协同优化，新型补偿技术进一步提升了实用性与适配性，可有效提升系统非线性抑制增益，延长传输距离，适配单波400 G及以上速率的传输需求。

参考文献：

- [1] 沈洪.面向政企客户的OTN低时延保障技术研究[J].通讯世界,2026,33(01):36-38.
- [2] 左剑.基于FEC技术的OTN光传送网波分系统误码性能提升研究[J].现代传输,2026(01):68-72.
- [3] 范晔,葛样.基于OTN的城域传输网方案设计研究[J].广播电视网络,2022,29(12):54-56.
- [4] 张志,李永嫒.OTN技术在电信二级干线传输系统中的应用研究[J].现代传输,2025(06):31-35.
- [5] 关鹏.基于OTN技术下电力通信传输网络优化措施的研究[J].科技资讯,2024,22(16):98-100.
- [6] 睢洲,王晨,王凯辉,等.32.768 Tbit/s净速率1000 km长少模光纤波分复用系统[J].光学学报,2023,43(10):38-45.

新能源并网下电力设备谐波治理与运行稳定性研究

于成飞¹, 齐绍森²

(1. 中建材新能源工程有限公司, 上海 200042;

2. 济南锅炉集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要 高比例新能源接入电力系统后,以逆变器为核心的并网设备与电网之间产生复杂的宽频域谐波交互作用,严重威胁系统运行稳定性。本文针对新能源并网引发的谐波问题与稳定性挑战,系统分析了光伏、风电并网系统中谐波产生机理,揭示了弱电网条件下锁相环与多控制环路耦合导致的负阻尼特性及谐波放大机制。基于阻抗建模与稳定性分析理论,提出“源-网-储”协同的谐波治理与稳定性提升技术框架。研究表明,构网型储能与宽频域有源滤波装置的协同应用,可从阻抗重塑与主动阻尼两个维度有效提升新能源并网系统的全局同步稳定性。

关键词 新能源并网; 谐波治理; 运行稳定性; 构网型储能; 有源滤波

中图分类号: TM712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.005

0 引言

我国新能源发电总装机容量已于 2024 年底历史性超越火电,成为我国电力系统装机规模第一大电源。与此同时,风电、光伏发电量在全社会用电量中的占比持续稳步提升,已成为支撑全社会用电增量的核心绿电来源。“双碳”进程深入推进,以电力电子变流器为接口的新能源发电设备在电力系统中的比例不断提高,改变了以往以同步发电机为主导的机电暂态特性。新能源并网设备基本采用跟网型控制方案,是电流源型并网,在锁相环与多级控制环路之间存在非线性耦合,且电网阻抗的宽范围变化,很容易导致宽频域谐波振荡问题。谐波治理与运行稳定性是新能源大规模高效并网的核心技术难题。一方面,新能源场站中几十台甚至上百台逆变器并联运行,各个逆变器开关频率及其边频带产生的间谐波、超谐波在电网阻抗的交互作用下被放大,导致电压畸变率过大;另一方面,当电网为弱电网时,跟网型逆变器的锁相环动态和电流环动态产生负阻尼效应,导致次同步振荡甚至失稳。传统的无源滤波器难以适应电网的宽范围变化,单一的有源滤波器也难以解决系统级的稳定问题。

1 新能源并网谐波产生机理与系统失稳机制

1.1 跟网型逆变器的非线性耦合与谐波产生机理

新能源并网逆变器主要采用跟网型控制结构,即通过锁相环同步电网相位来控制电网中的电流,该控

制范式在强电网条件下较为理想,但随着新能源渗透率及电网阻抗的提高,其自身的非线性耦合问题逐渐凸显。跟网型逆变器产生谐波的原因有三种:一种是锁相环作为非线性部件在电网电压不平衡或畸变时产生相位扰动,此扰动被调制到电流指令中形成一定频率的间谐波分量。有研究表明,当电网电压为 5 次谐波时,通过锁相环可以产生 6 倍频的相位波动,并且对 7 次谐波产生放大。另一种是电流环的比例积分控制器对谐波指令的跟踪由带宽所限,高频谐波分量不但难以被抑制,反而会因为控制器相位的滞后导致谐波畸变。还有一种是直流母线电压控制环与电流环的动态耦合,直流侧电压波动通过调制环节传递到交流侧产生边带谐波。光伏并网三相不平衡故障还会出现一种特殊的间谐波现象,当电网产生不对称故障时,直流母线电压就会产生二倍频波动,该波动被调制到逆变器输出电流中,这种波动的频率与基波的频率之差等于二倍频分量,间谐波可导致保护装置误动。

1.2 弱电网下负阻尼特性与谐波放大机制

新能源并网系统的稳定性与电网强度紧密相关,短路比一般用 3 衡量,当短路比小于 3 时,系统为弱电网,电网阻抗不可忽略,而逆变器和电网之间的交互作用增强。弱电网条件下谐波放大的主要原因是阻抗交互,当逆变器的输出阻抗和电网阻抗在某频率的幅值相等时,相位差达到 180° 时,系统将在该频率出

作者简介: 于成飞 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力设备工程。

现并联谐振回路,小的谐波扰动会放大成为大的电压/电流振荡。传统分析通常忽略线路的频变特性,但长距离输电场景下电缆分布电容效应使得电网阻抗呈现宽频谐振峰,谐波不稳定的风险较高。跟网型逆变器从阻抗特性上看,在中低频段表现出负阻尼特性,这主要由锁相环主导,锁相环是一个相位跟踪环路,由于其动态特性使得逆变器在特定频段表现出负电阻特性,即有功功率随着电压幅值的增加而减小,不同于同步发电机的正阻尼特性。

1.3 宽频域谐波传播特性与谐振风险辨识

新能源并网系统的谐波问题从传统的整数次谐波发展为间谐波、超谐波等宽频域。不同频段的谐波在电网中的传播特性不尽相同,辨识谐振风险频段是有效治理的前提。风电变流器的 $6k \pm 1$ 次特征谐波、光伏逆变器的开关频率边带谐波均属此类。间谐波(非整数倍基频)则与控制系统动态密切相关,其频率随运行工况变化,难以通过固定频率的滤波器滤除。超谐波($2\text{ kHz} \sim 150\text{ kHz}$)是近年来关注的热点频段。随着电力电子设备开关频率向高频发展,超谐波污染日益严重。长距离输电电缆对超谐波具有特殊的传输特性——由于电缆分布电容在高频下的分流效应,超谐波电流沿电缆传播时呈指数衰减,但其引发的电压畸变可能在电缆末端显著放大。海上风电经长距离海底电缆送出时,这一现象尤为突出。谐振风险的准确辨识依赖于精确的阻抗建模。传统的 dq 域序阻抗模型无法表征频率耦合效应,为此研究者发展了多谐波线性化建模方法,建立了考虑正负序频率耦合的整体序阻抗模型。

2 谐波治理与稳定性提升协同技术

2.1 多模态有源滤波与谐波抑制技术

宽频域有源滤波器的关键部分是谐波指令的检测与跟踪。采用同步旋转坐标变换的次谐波分量,并运用准比例谐振控制器进行特定次谐波的无静差跟踪,利用数字信号处理器的高效运算进行高频谐波的补偿。为了抑制间谐波和超谐波,需要在控制结构中增加自适应陷波器,实时跟踪扰动频率并产生补偿指令。静止无功发生器除补偿无功外还可兼作有源滤波的功能。改进型三电平静止无功发生器使用中点钳位拓扑,开关频率达到 6 kHz 以上,具备25次以内的主动抑制能力。通过在电压外环中嵌入谐波抑制模块,在保证直流母线电压稳定的同时,对特定次谐波电压进行补偿。有源滤波装置的协同运行是多机并联需要解决的问题。

以浙江舟山 220 kV 海上风电场群示范工程为例,华能岱山风电场与中广核岱山风电场分别给各自配置一套高压有源谐振抑制装置,两套装置电气层面的距离较近,有交互耦合的状况发生。采用双机协同治理模式,按照各并网点谐波限值为约束条件进行解耦控制,每台装置利用独立阻抗重塑方法对谐波电压和电流进行控制,有效避免双机并联运行的控制冲突。长庆油田清洁电力开发项目部在中二供光伏电站中应用的有源电力滤波技术,在2次 ~ 50 次谐波上实现有效补偿。该技术通过实时检测电网中的谐波电流,经电力电子变换输出与谐波大小相等、方向相反的补偿电流,在高效滤除谐波的同时改善三相电流不平衡,提高线路功率因数^[1]。

2.2 构网型储能变流器与阻抗重塑方法

储能系统在新能源场站中配置的比例不断提升,为谐波治理和稳定性提升提供技术解决方案。与跟网型变流器不同,构网型储能变流器采用功率同步控制模拟同步发电机机电特性,从根本上改变并网设备的控制范式。构网型储能变流器的阻抗特性与跟网型变流器不同,构网控制主要采用功率外环和虚拟阻抗内环,输出阻抗幅值相对跟网控制更小,中低频段为正阻尼特性。其对新能源场站整体阻抗特性有很好的改善。对比表明,新能源场站接入构网型储能后,在阻抗交截频率处,其相位裕度由 3.39° 提升到 38.35% ,系统阻尼能力大幅增强。构网型储能的阻抗调控能力主要体现在对新能源场站阻抗特性起主导作用^[2]。

2.3 “源-网-储”协同治理框架与多机协调控制

单一技术手段难以应对新能源并网系统复杂多变的谐波与稳定问题,亟需构建“源-网-储”协同的综合治理框架。该框架涵盖新能源场站侧、电网侧和储能侧三类设备,通过分层控制架构实现协同优化。场站侧治理聚焦新能源机组本身的谐波抑制。通过优化逆变器调制策略、改进锁相环参数设计、嵌入有源阻尼控制,从源头上降低谐波发射水平。网侧治理则以有源滤波装置和无功补偿设备为核心,在公共耦合点进行谐波补偿和电压支撑^[3]。储侧治理发挥储能系统的灵活调节能力,通过构网型控制为系统提供主动阻尼。多机协同控制是“源-网-储”框架落地的关键技术难题。海上风电场群示范工程采用的双机协同模式提供了有益经验:每套高压有源谐振抑制装置以各自并网点谐波限值为约束条件进行独立控制,但同时通过通信系统共享谐波测量信息,实现全局优化。在60余种组合运行工况下的验证结果表明,协同模式

可有效避免装置间的交互耦合，区域电能质量治理效果显著提升。

3 工程应用与实证分析

3.1 基于实测数据的谐波治理效果评估

华能岱山风电场与中广核岱山风电场位于舟山海域，装机容量分别为 100 MW 和 150 MW，通过 220 kV 海底电缆接入陆上电网。两座风电场电气距离较近，存在交互耦合作用，运行初期多次发生因谐波谐振引发的保护动作事件。浙江电力科学研究院牵头设计的高压有源谐振抑制装置双机协同治理模式投入运行后，谐波治理效果显著（见表 1）。实测数据显示：在华能

表 1 双机协同治理模式下谐波治理效果实测数据

治理对象	5 次谐波电流下降比例	5 次谐波电压下降比例
华能岱山风电场	46%	28%
中广核岱山风电场	53%	35%
区域内 220 kV 变电站	—	26%

储能接入前后的系统稳定性进行比较。测试系统为典型的新能源场站模型，包含 6 台 2 MW 跟网型风电机组、1 台 5 MW 构网型储能变流器，通过 35 kV 集电线路接入 110 kV 电网，电网短路比为 3.83，为弱电网工况。采用阻抗分析法进行系统稳定性分析。在系统处于临界稳态状况下，会引发振荡风险，新能源场站的中低频区阻抗特性呈现出负阻尼的情况发生在构网型储能尚未接入时，此时相位裕度仅为 3.39° ，阻抗交截频率达到了 171 Hz；在接入构网型储能之后，由于构网控制所表现出的电压源特性和正阻尼特性，使得场站整体的阻抗特性得到提升。进一步探讨构网型储能对不同电网强度的适应性。在短路比降至 1.86 的极弱电网工况，仅依靠构网型储能基础控制已不可能保持稳定，系统产生次同步振荡，开启自主阻抗适配控制，系统在适配系数的自适应调节下由不稳定过渡到稳定状态，电压电流波形发散振荡收敛为正弦波，验证构网型储能与自适应阻抗控制协同作用在极端工况下的有效性^[5]。

4 结论

新能源并网引发的谐波问题与运行稳定性挑战是新型电力系统建设过程中必须突破的核心技术瓶颈。本文从谐波产生机理、系统失稳机制、协同治理技术到工程应用验证，系统研究了新能源并网下电力设备谐波治理与运行稳定性问题，得出以下主要结论：第一，跟网型逆变器在弱电网条件下的失稳本质是多环路非

岱山风电场，28% 的降幅于 5 次谐波电压处被发现，46% 的下降幅度在 5 次谐波电流上被观测到，在中广核岱山风电场，5 次谐波电流所呈现出的下降幅度达到 53% 被观察到，5 次谐波电压产生的 35% 降低情况也被发现，在该区域中，5 次谐波电压于 220 kV 变电站内平均降低的幅度，被检测出达到了 26%。谐振抑制装置的协同运行不仅降低了各自风电场的谐波水平，还改善了整个区域电网的电能质量^[4]。

3.2 构网型储能接入前后的稳定性对比分析

为进一步验证构网型储能提高了新能源场站稳定性，基于数字储能网公开的仿真测试结果，对构网型

线性耦合导致的负阻尼效应。锁相环与电流环、电压环的交互作用使逆变器在中低频段呈现负电阻特性，与感性电网阻抗共同作用引发次同步振荡。准确认识这一机理是开展有效治理的理论前提。第二，多模态有源滤波与构网型储能协同应用构成谐波治理与稳定性提升的有效技术框架。有源滤波器实现对宽频域谐波的精准补偿，构网型储能通过阻抗重塑提供主动阻尼支撑。两者协同工作，从“滤波”与“阻尼”两个维度提升系统性能。未来，随着构网型控制技术向更高电压等级、更大容量装备拓展，以及人工智能技术在谐波检测与控制参数优化中的应用，“源-网-储”协同治理框架将向智能化、自适应方向发展。

参考文献：

- [1] 孙杨. 高渗透率新能源并网下的电网谐波治理与电能质量优化路径研究[J]. 产业科技创新, 2024, 06(06): 97-101.
- [2] 郭家池, 孙晓宁, 王丽媛. 新能源并网对农村电网稳定性的影响及对策[J]. 模型世界, 2025(14): 243-245.
- [3] 张成, 赵涛, 朱爱华, 等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 江苏电机工程, 2022(03): 41.
- [4] 李林. 西部高海拔地区新能源项目电气设备谐波治理研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(24): 9-12.
- [5] 张后谊, 古庭赞, 高吉普, 等. 高比例新能源电网下的光伏电站谐波分析与治理[J]. 电力大数据, 2022, 25(08): 20-28.

分布式光伏并网后台区线损异常反转现象剖析与应对

高 源

(国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆 401320)

摘 要 分布式光伏大规模接入改变了配电台区单向潮流格局, 导致传统线损理论面临挑战, 台区线损率突变及负值等“异常反转”现象频发。异常反转本质上是物理损耗特性与统计计算模型不匹配的体现, 其成因不仅包含电流互感器轻载误差、双向表计接线错误等计量配置问题, 更涉及光伏大发引发的潮流逆向分布、单相接入加剧的三相不平衡与无功倒送等物理层面因素, 同时叠加了光伏表计归属错位与户变关系不一致等档案错配引发的统计性负损。基于此, 本文提出通过强化计量精益化改造与拓扑精准识别夯实数据基础, 依托智能融合终端优化就地无功补偿, 并构建多维关联分析模型提升数字化预警研判能力的应对策略, 以期对提升有源配电网线损治理水平有所裨益。

关键词 分布式光伏; 配电台区; 线损异常反转; 潮流反向; 有源配电网

中图分类号: TM727

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.006

0 引言

在新型电力系统建设背景下, 分布式光伏接入配电网的规模与比例不断攀升。传统的台区线损管理理论及计算模型均基于单向受电架构设计, 随着光伏并网引发潮流双向频繁交替, 基层线损管理人员在营销系统与配电自动化系统中遭遇了大量线损率突变、负值等异常数据。这类被称为“线损异常反转”的现象, 在实际业务中往往并非单纯的物理网络损耗异常, 而更多指向光伏发电表配置错误、计量参数设置不规范等导致的统计性电量计算偏差, 同时也交织着有源网络下损耗分布规律的改变。深入剖析此类异常反转现象的构成要素与诱发机理, 进而制定针对性的管控策略, 已成为基层供电企业提升台区线损精益化管理水平的紧迫任务。

1 分布式光伏并网后台区线损异常反转的现象特征

1.1 传统台区线损与光伏台区线损的表征差异

无光伏接入的传统台区, 电能由变压器高压侧单向流向低压用户。其线损特征相对平稳, 线损率主要随负荷峰谷变化呈现规律性波动, 且理论线损与统计线损方向一致, 始终为正值。台区线损率主要受导线截面、供电半径、负荷分布及变压器负载率决定。引入分布式光伏后, 台区内部同时存在电源与负荷, 电

能流动路径不再单一。此时, 统计线损不仅包含实际物理网络中的电阻发热损耗, 更严重受到关口表计与用户表计之间计量同步性、误差方向的综合影响。表征上的最大差异在于, 光伏台区的统计线损率打破了“恒正”的规律, 表现出强烈的非线性与不确定性^[1]。

1.2 线损异常反转的典型数据特征

线损率由正向突变为负向的“极性反转”是此类异常最直观的表现。在光伏发电高峰时段, 台区总表记录的供电量可能小于该时段内所有用户表计抄见电量之和, 导致“供电量—售电量”出现负值, 线损率在系统中显示为负数。这种现象在物理层面是不可能发生的, 纯属统计计算层面的异常映射。昼夜交替时段线损率的“剧烈波动”同样显著。晴天正午光伏出力达到峰值, 潮流反向最为严重, 线损率可能瞬间跌入谷底甚至转为负值; 傍晚光伏出力骤降, 台区重新回到单向供电状态, 线损率又会快速拉升。

不同光伏渗透率下的线损离散性表现也十分突出。在低渗透率台区, 光伏仅作为局部补充, 线损率偏离正常值幅度较小; 当光伏装机容量超过台区变压器额定容量的某一临界点后, 线损率数据的离散度急剧增加, 相邻两日间若光照条件不同, 线损率差异可能达到数个百分点, 完全失去统计规律性^[2]。

作者简介: 高源 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 线损、计量、用检。

1.3 异常反转现象的季节周期与气象高敏感性

有别于常规台区线损主要受工业与居民生活作息规律主导, 光伏台区的异常反转现象展现出极强的气象依赖与季节周期属性。在连续晴朗的高辐照季节, 光伏大发导致潮流双向交替频繁, 线损异常反转现象发生的频次与负值深度达到顶峰; 而在阴雨天气或冬季低温低辐照时段, 光伏出力受限, 台区退化为传统受电模式, 线损率随之回归正向平稳区间。这种气象敏感性极易引发线损管理的“阶跃式异动”。特别是在季节交替或遭遇连续阴雨转晴的气象突变节点, 台区线损率往往缺乏过渡, 直接从正常值跳变至异常反转状态。气象条件的不确定性使得光伏台区的线损曲线在时间序列上被高频切割, 传统基于月度或年度时间尺度的线损趋势分析完全失效, 凸显出高比例新能源接入下台区线损边界条件的高度脆弱性与波动性^[3]。

2 台区线损异常反转现象的成因

2.1 计量装置配置与误差因素

电流互感器 (CT) 变比选择不当与轻载误差是导致反转的常见硬件原因。部分台区在初始建设时, 按照常规负荷选取了较大变比的 CT。光伏接入后, 在电网向负荷供电的低谷时段或光伏大发时段, 一次侧实际电流远低于 CT 额定电流的 10%, 甚至接近空载。此时 CT 的激磁电流占比增大, 比差向负方向急剧偏移, 导致关口表计量的输入电量大幅虚低。当这种虚低程度超过低压用户侧表计的综合误差时, 统计线损即呈现负值。

双向计量表计的接入误差与极性反接同样会引发数据扭曲。光伏并网要求采用具备正反向有功计量功能的全电子式表计。若在施工或改造过程中, 出现电压相序错接、电流进出线接反等隐蔽性接线错误, 表计内部会将实际发出的有功电量错误计为消耗电量, 或将反向有功计入错误象限。

2.2 物理拓扑变化与潮流反向

光伏大发时段引发的潮流逆向分布是改变物理损耗格局的根本动因。传统辐射状配电网的损耗计算基于递增的负荷电流。当光伏出力大于本台区负荷时, 多余电能通过低压线路逆向流过配电变压器, 再升压至中压网络。此时, 线路中的电流分布发生根本性改变。

“源-网-荷”距离不匹配导致的损耗转移进一步加剧了账面异常。若大容量光伏集中接于低压线路末端, 而本地负荷主要集中在变压器附近, 光伏电能需经过全线路长距离倒送。由于低压线路阻抗中电阻占比较大, 长距离反向输送会大幅增加线路物理损耗。但在统计层面, 这部分增加的物理损耗往往被计量误

差或不同步所掩盖, 表现为当物理损耗升高时, 由于关口计量点特性的改变, 统计线损率反而呈现下降或反转的假象^[4]。

2.3 三相不平衡与无功功率倒送

单相光伏接入加剧的三相不平衡损耗是低压台区的特有问题。受限于屋顶面积和安装条件, 大量单相光伏随机接入 A、B、C 三相。由于光伏出力的随机性, 原本就存在的三相不平衡被严重放大。不平衡电流会在中性线上产生零序电流, 导致中性线损耗急剧增加。逆变器无功调节能力不足引发的功率因数恶化同样不可忽视。多数早期并网的逆变器采用单位功率因数控制策略, 不参与无功电压调节。当光伏大发、有功功率大量倒送时, 台区线路呈现容性特征, 系统吸收的无功功率发生变化。若台区原有的无功补偿装置未能及时退出或调整, 极易出现无功功率在光伏与电容器之间往复流动的现象。无功潮流的紊乱不仅拉低了台区整体功率因数, 更增加了视在功率, 导致有功损耗和无功损耗同步攀升, 使得线损账面数据更加紊乱。

2.4 同期系统中光伏计量配置错位引发的统计性反转

基层台区线损异常反转数据的直观呈现, 主要依托于同期线损管理系统。该系统的底层计算逻辑基于严密的“总表电量减去分表电量”模型。当光伏接入后, 同期系统最多只能通过采集关口总表的反向电流来识别台区存在向外倒送电的现象, 但系统本身无法自动解析这些倒送电量的复杂结算属性。

在具体业务中, 光伏并网通常涉及自发自用电量与上网电量的区分, 部分台区配置了发电表与上网表两套计量节点。若在系统建档时, 错误地将光伏“发电量表”的电量属性标识为正常的“售电量”, 或者将上网表的计量方向配置为正向受电, 同期系统在进行台区电量决算时, 就会把光伏自身产生的电量错误地当成电网下发的售电量进行叠加。当这种由于配置错误虚增的“售电量”超过台区总表的实际供电量时, 同期系统便会直接计算出负线损^[5]。

3 分布式光伏台区线损异常反转的应对策略

3.1 强化计量精益化管理与技术改造

优化高光伏渗透率台区的 CT 配置标准是消除计量误差的基础。针对光伏接入比例超过 50% 的台区, 应开展专项排查, 全面评估现有 CT 的运行工况。对于常年处于轻载状态的互感器, 应更换为高精度、宽量程的 S 级电流互感器, 或者采用 0.2S 级计量电流互感器以缩小低负荷区的误差带。条件允许的台区, 可逐步推进

高供低计台区取消CT的改造方案,采用全直接接入式智能电表,从物理根源上消除CT比差带来的负面影响。

规范光伏并网双向计量装置的安装与验收需建立刚性约束。在光伏并网验收环节,必须引入相量图分析作业标准,严格核对光伏上网计量点与用户用电计量点的接线极性、相序。建立光伏表计接线专项复核机制,杜绝凭借经验肉眼判断的做法。同时,在营销系统中完善光伏表计的运行状态监测,对出现反向有功电量与正向有功电量逻辑冲突的表计,系统应能自动冻结数据并触发现场稽查流程。

3.2 推进台区拓扑精准识别与档案治理

建立光伏接入动态台账更新机制是遏制统计性负损的管理核心。营销与配电业务部门必须打破数据壁垒,实现光伏业务流程的闭环联动。任何新增、扩容或变更的光伏项目,在并网环节必须同步完成营销系统档案的挂接与拓扑更新。实行“无档案不并网、档案错不结算”的管理原则,确保台区总表与下级所有光伏表计、用户表计在同一个空间和时间维度内严格对应。

应用拓扑识别技术解决“户变关系”错位是提升治理效率的技术利器。单纯依靠人工拉网式排查户变关系耗时费力。应充分利用台区智能融合终端采集的电压、电流高频数据,通过大数据算法比对各用户节点与不同台区总表之间的电压波形相似度与暂态波动相关性。当某光伏用户电压波动曲线与相邻台区总表高度耦合时,系统自动识别并生成疑似错接工单,依此进行精准的物理档案纠偏,确保线损计算模型的基础架构绝对正确。

3.3 优化台区运行控制与无功补偿

合理规划光伏接入容量与相序是从源头降低附加损耗的规划手段。在光伏接入方案审查阶段,应依据台区三相负荷历史数据进行测算,尽量将单相光伏均匀分散接入A、B、C三相。对于装机容量较大的单相光伏,强制要求采用三相逆变器或通过相序转换设备均衡接入。同时,设定台区光伏准入红线,当台区光伏总容量与变压器额定容量比值超过临界值时,需同步开展台区承载力评估,必要时实施台区增容或分裂改造,避免潮流严重越界。

依托台区智能融合终端实现就地无功补偿是改善运行工况的关键。将传统静态无功补偿装置升级为具备动态连续调节能力的智能设备。利用台区智能融合终端的边缘计算功能,实时采集光伏出力与负荷功率,计算出线路中的无功缺口。通过高速通信接口,向下发指令调节智能电容器的投切,或向具备Q(V)下垂控制功能的逆变器下发无功出力目标值,实现“源网荷”

两端的无功就地平衡,消除无功倒送引起的功率因数恶化及附加线损。

3.4 提升线损异常研判的数字化能力

构建“光伏出力—线损率”多维关联分析模型能够实现从被动应对向主动预警的转变。传统的日统计线损已无法满足光伏台区的管理需求。应打通气象数据、光伏逆变器运行数据与台区线损计算的底层链路。将光照辐照度、环境温度作为变量引入分析模型,测算在不同气象条件下光伏台区理论线损的合理浮动区间。当系统采集的实际统计线损偏离该动态区间时,即可判定为异常。

建立台区线损异常反转的自动预警与派单机制是形成管理闭环的保障。在用电信息采集系统中开发专项诊断模块,针对“极性反转”和“剧烈波动”设定特征阈值。一旦触发预警,系统不应简单下发“高损/负损”提示,而应结合前述成因分析逻辑进行初步故障定位。若判断为三相不平衡导致,自动派发“三相不平衡调整”工单至配电运维班;若判断为计量异常,则派发“现场装表接电核查”工单至计量班组。通过数字化的精准分拣,大幅缩短异常排查周期,提升台区经济运行水平。

4 结束语

分布式光伏并网后台台区线损异常反转现象,是传统配电网向新型有源配电网演进过程中的必然产物。该现象并非单纯的物理损耗异常,而是计量误差、潮流反向、三相失衡以及档案错配等多重因素在统计层面的叠加反映。应对这一问题,无法依靠单一的技术改造或管理手段,必须摒弃传统的单向思维,将计量精细化、拓扑数字化、运行柔性化与研判智能化深度融合。只有通过“技术+管理”的双轮驱动,厘清有源台区线损的真实物理逻辑与统计逻辑,才能有效根治线损异常反转顽疾,从而为高比例新能源接入下的配电网经济运行与精益化管理提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 陈明,何雪梅,赵顺麟,等.非参数核密度估计下台区线损异常数据辨识[J].电子设计工程,2025,33(03):74-77,82.
- [2] 谢鑫.配电网台区线损异常原因与应对措施[J].中国高新技术,2025(03):63-65.
- [3] 闫好霖,肖旭文,王婷婷,等.供电企业中台区线损异常原因研究[J].电力设备管理,2024(14):17-19.
- [4] 李倩.农村低压台区线损异常综合治理技术探析[J].电力设备管理,2025(12):38-40.
- [5] 陈天德,刘登瑞,岑荣佳.台区线损异常原因及管理方法[J].农村电气化,2024(11):110-112.

长尾分布下图像分类方法综述

杨春晖

(安庆职业技术学院信息技术学院, 安徽 安庆 246003)

摘要 长尾分布下的图像数据会显著降低分类模型性能, 如何缓解该问题是图像分类研究中的关键课题。本文从类别重平衡、信息增强与模块改进三大技术路径展开研究, 系统梳理了近年来长尾图像分类方法的研究进展, 并进一步将结合大模型的方法作为第四大类进行归纳分析, 对 Logit 调整、集成学习等各类代表性方法进行清晰解读, 剖析其核心思想。最后探讨当前领域面临的主要挑战, 并对大模型融合方法探索、具体应用领域适配等未来研究方向进行合理展望, 以期相关人员提供参考。

关键词 长尾分布; 图像分类; 类别不平衡; 大模型

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.007

0 引言

图像分类任务是计算机视觉领域的关键任务, 在工业质量检测、医学影像分析、野生动物识别等诸多现实领域中发挥着重要作用。然而长久以来, 在实际应用中却始终面临数据不平衡这一基本问题, 尤其是真实世界的图像数据分布往往呈现出明显的长尾分布特征。这种极度不平衡的分布会导致模型训练过程被头部类别主导, 决策边界向头部偏移, 最终使得整体分类准确率尤其是对尾部类别识别的准确率显著下降。因此, 长尾分布下图像分类方法的研究成为计算机视觉领域的重要课题, 受到人们的广泛关注。本文聚焦长尾分布下图像分类问题, 围绕类别重平衡、信息增强、模块改进与结合大模型四个大类进行研究, 系统综述各类方法与典型方法, 并对未来发展趋势进行合理展望。

1 长尾分布问题概述

1.1 长尾分布定义

长尾分布即指在数据集中, 少数类别拥有大量图像样本, 而大多数类别则只有极少量样本的一种极端类别不平衡现象^[1]。用幂律分布描述, 设训练集包含 c 个类别, 各类别样本数量记为 $\{n_1, n_2, \dots, n_c\}$, 按降序排列 $n_1 \geq n_2 \geq \dots \geq n_c$ 。则有 $n_c \propto c^{-\alpha}$, $\alpha > 0$, 其中 α 控制分布的倾斜程度, α 值越大, 尾部越“长”。不平衡因子 $\rho = n_1/n_c$ 用来衡量数据平衡程度, $\rho=1$ 代表完全平衡, 通常 $\rho \geq 100$ 时表示当前数据分布重度不平衡。

1.2 基准数据集与评价指标

主流的长尾分类基准数据集包括 CIFAR-100-LT、ImageNet-LT、iNaturalist 2018 及 Places-LT 等。其中既包含人造数据也包含真实数据, 能够满足细粒度与粗粒度多种长尾分布场景。为了反映评估结果, 在评价指标方面, 目前通常采用分层评估: 即对头部类、中部类、尾部类各自的准确率进行综合评估, 以及宏观平均 F1 分数等指标也被广泛使用。

2 四类技术范式的梳理与研究

2.1 基于类别重平衡的方法

类别重平衡的主要思路是, 通过在不同层面施加直接或间接的人为干预, 对模型训练过程中各类别的影响力进行重新平衡。即拉近头部类和尾部类对训练的影响力差异, 缓解头部类别主导训练这一问题。依据具体实现方式, 该大类可划分为重采样、类敏感学习和 Logit 调整三个细类。

重采样方法是最简单直观类别重平衡: 包括过采样、欠采样和类平衡采样, 在训练中直接对数据入手, 分别通过复制尾部类、丢弃头部类以及平衡采样概率的方式, 使各类别在训练过程中获得的采样机会或出现频次趋于均衡^[2]。类敏感学习方法主要包括重加权和边际损失, 两类方法均以损失函数作为切入点。重加权的核心思想是根据各类别的样本数量来分配损失权重, 使尾部类别获得更大的梯度。典型重加权包括按类别样本数倒数直接加权, 以及基于有效样本数

作者简介: 杨春晖 (1998-), 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 人工智能和计算机视觉。

等更精细的理论进行权重设计等。边际损失方法通过引入类别相关的边际来增大尾部类别的决策边界,将类别边际与样本数量关联,使样本数量越少的图像类别获得越大的边际,从而在特征空间中为尾部类别赋予更大的分类边际。

Logit 调整方法则是从贝叶斯决策理论出发推导,在交叉熵损失中引入基于类先验相关的校正项,从统计层面缓解了头部类对决策边界的挤压,以此提升尾部类别识别能力。该方法具备较高的灵活性,既可用于训练阶段,也可在推理时后处理Logit 输出。例如:赵亮^[3]等在延续了Logit 层面进行校正的基础上,借鉴批归一化的思想,进一步提出Logit 归一化(LogN)方法。该方法通过对各类别输出Logit 进行标准化校准来消除长尾偏差,同时针对目标检测任务中前景与背景样本严重不平衡的特有问题,引入了背景校准机制以恢复背景判别力。LogN 方法具备无需额外训练、不改动模型结构且即插即用的特点,在ImageNet-LT 等长尾图像分类数据集上展现出优异性能。

2.2 基于信息增强的方法

长尾分布下图像分类问题的根源在于数据本身分布的严重不平衡,因此信息增强类别的方法直接干预数据本身,为尾部类别补充信息量。该类别包括数据增强与迁移学习两类方法。

数据增强通过对原始图像施加各类变换产生新样本,以此扩充尾部类别的数据规模,增加特征多样性。常见的变换方式包括几何变换、颜色变换、图像混合等。例如:以Mixup 为基础衍生出诸多改进方法,通过赋予尾部类别图像更高的混合权重,使尾部样本在以头部样本为主导的混合过程中获得更多曝光机会,从而强化其在训练中的影响力。此外,基于生成对抗网络和扩散模型的生成式数据增强方法近些年也逐渐受到关注,进一步突破了传统变换的局限。

迁移学习认为尽管不同类别在视觉外观上差异显著,但在深度特征空间中,许多基础且通用的视觉模式(边缘、形状、纹理等)具有跨类别共享的特性。因此其核心思想是借用现有的从样本充足的源域中已学到的稳定特征表示,迁移到信息稀缺的尾部类别上。根据知识来源的不同,迁移学习可细分为:从外部数据集迁移的模型预训练、从教师模型向轻量学生模型迁移的模型蒸馏,以及从头部类别向尾部类别迁移特征表示的头尾知识迁移等。三种迁移策略知识来源各不相同,但核心思想一致:通过知识复用来弥补尾部类别的信息缺口,为模型提供更丰富的特征表示基础。

2.3 基于模块改进的方法

模块改进类方法的思路与前两种不同,既不尝试平衡不同类别的影响力,也不从数据层面补充尾部类别的信息量,而是改造模型内部组件或训练流程,让模型本身就具备对抗长尾分布不平衡的能力。这类思路可分为解耦训练、表征学习、分类器设计和集成学习四种方法。

解耦训练^[4]的提出是因为在研究中发现:即使在长尾分布下,特征提取器可以学到高质量的视觉表示,但分类器会受到头部类别的严重干扰,最终导致决策边界偏移。因此解耦训练将二者分离:第一阶段在原始长尾数据上端到端训练,获得泛化能力良好的特征提取器;第二阶段冻结特征提取器参数,采用类别均衡采样策略,重新训练分类器。在具体应用领域中,尹乾等将解耦训练策略引入脉冲星识别任务。该方法经过在HTRU_bands 和 HTRU_ints 数据集测试,召回率相较基准方法得到显著提升,验证了解耦训练策略在跨领域长尾分类任务中的通用性与可移植性。

表征学习聚焦改进特征提取器,旨在获得更均衡的特征表示。其中,对比学习通过拉近同类样本、推远异类样本的方式增强特征空间的类别区分性;原型学习则为每个类别在特征空间里学出一个或几个能代表该类别语义中心的特征向量作为原型,强制样本向其所归属类别的原型靠拢,防止尾部类特征被头部类淹没。分类器设计则是旨在通过权重归一化、原型分类器等方式,消除分类器层在长尾训练中产生的结构性偏见。例如:权重归一化通过将所有类别的分类器权重模长强制约束至同一水平,使决策不再受权重模长差异的影响,而仅依赖于特征与权重向量之间的方向相似度,从而有效纠正了分类器层的结构性偏见。

集成学习的研究思路是构建多个差异化学习模块,先分而治之再综合集成以此获得比单一模型更稳健的结果。这类方法最具代表性的就是多专家模型:通过构建多分支网络,在一个完整网络内部构造多个专家,通过共享底层特征和专业化学习缓解长尾分布带来的决策偏向。例如:崔国恒等近期提出的多专家动态协作模型^[5],包含多专家网络和动态学习策略两部分。在多专家网络中设计了一个传统分支和两个再平衡分支,通过多专家协作实现头部尾部平衡兼顾的效果。动态学习策略在训练过程中动态调整两个再平衡分支对模型的影响力,防止因过度关注尾部类而损害模型对头部类的判别能力。经过实验测试,该模型在多个长尾声呐图像数据集上表现出非常优秀的整体准确率。

2.4 基于多模态大模型的新方法

随着近几年视觉—语言模型（VLM）与大语言模型（LLM）等大规模预训练模型的蓬勃发展，越来越多的研究者开始尝试结合大模型，利用大模型蕴含的跨模态知识来弥补尾部视觉样本不足这一基本矛盾。这一类研究思路中，根据大模型结合的层面不同，大体可划分为检索与生成式数据增强、语义表征引导和跨模态知识迁移的三类方法。

检索与生成式数据增强的思路是将跨模态知识转化为补充的训练样本，直接在输入端补充数据以缓解尾部类数据匮乏的根本矛盾。这一方法充分发挥了大模型优势，从语义层面创造或检索出新的样本，打破了传统数据增强仅能进行像素级变换的局限，将跨模态知识系统性地引入信息增强范式。

语义表征引导的思路是利用 LLM 生成高质量的文本描述，再由 VLM 的文本编码器编码为文本特征原型，以此作为训练时额外的监督信号，在特征或损失层面引导视觉模型学习更均衡的类别表示，从而强化对尾部类的监督。例如：李象贤等针对长尾分类中尾部类表征学习不足的问题，提出了一种基于跨模态特权信息增强的图像分类框架^[6]。该方法将图文描述词作为跨模态特权信息，仅在训练阶段引入，通过类感知信息选择（CIS）筛选高质量文本描述词，再由部分异构对齐（PHA）机制将筛选后的文本特征映射至视觉特征空间，引导图像特征从视觉空间向语义空间靠拢。该方法在 NUS-WIDE 和 VireoFood-172 等长尾跨模态数据集上的实验结果均证明了该框架的有效性。

与语义表征引导不同，跨模态知识迁移则通常采用跨模态知识蒸馏范式，以 VLM 为教师模型，引导下游的视觉学生模型学习跨模态对齐能力，将 VLM 已掌握的图文对齐能力直接迁移至视觉模型。该类方法建立在 CLIP 等预训练模型的基础之上——CLIP 首次证明了在海量图文匹配学习的基础上，模型可以获得对开放概念的跨模态理解能力。例如：史江明等提出的 CLIP2FL 方法^[7]，在联邦学习框架下构建了完整的跨模态知识迁移方案。该方法通过知识蒸馏将 CLIP 的跨模态知识迁移至各客户端模型，以提升其在异构长尾数据上特征表示的质量。同时以 CLIP 文本编码器生成的类别语义原型为监督信号，引入原型对比学习机制，生成类别均衡的联邦特征并重训分类器。这种将大规模预训练的跨模态先验注入联邦学习流程的方法，有效缓解了长尾分布导致的决策偏见。

3 结束语

本文从类别重平衡、信息增强与模块改进经典三范式出发，系统梳理长尾分布下图像分类的各种经典方法及其核心思想。在此基础上结合先进技术发展，引入结合大模型方法作为第四范式，梳理现有相关方法，进一步归纳了检索与生成式数据增强、跨模态知识迁移和语义表征引导的三个主要分支。类别重平衡着力于平衡训练过程中各类别明显的影响力差异，纠正头部类的主导地位；信息增强聚焦数据本身，通过补足尾部样本信息量缓解数据分布不均；模块改进致力于优化模型结构或训练流程，使模型对不平衡数据具备更强的适应性。结合大模型的第四范式则突破传统视觉数据局限，引入丰富的跨模态语义知识，为尾部类别提供了更强大的先验信息或监督支撑，在尾部样本极度稀缺甚至部分零样本场景下展现出显著优势。当前长尾分布下的图像分类研究在各类方法层面均已取得丰富成果，但在实践中仍面临诸多挑战：现有研究大多假设训练集与测试集具备相似的静态分布，但对真实场景中开放、动态的长尾分布图像的适应能力仍显不足；诸多先进方法的计算开销与资源受限场景的部署需求之间存在显著差距；大模型结合等新路径的发展也带来基准污染与数据泄露、现有评估体系不完备不统一等新的挑战。未来，多类方法的有机融合与协同互补，尤其是结合多模态大模型的研究方兴未艾，相关研究仍有巨大深挖潜力。结合大模型范式下的长尾图像分类新方法研究，以及对医学影像、遥感监测、工业质检等具体细分领域的适配性研究和对应落地方案的探索实验，具有广阔的发展前景。

参考文献：

- [1] 韩佳艺, 刘建伟, 陈德华, 等. 深度长尾学习研究综述 [J]. 自动化学报, 2025, 51(05): 985-1020.
- [2] 魏秀参. 长尾分布图像识别: 途径与进展 [J]. 中国基础科学, 2023, 25(05): 48-55.
- [3] 赵亮, 滕宇, 王亮. 长尾目标检测中的 Logit 归一化 [J]. 国际计算机视觉杂志, 2024, 132(06): 2114-2134.
- [4] 尹乾, 车润琪, 杨如意, 等. 基于解耦训练的脉冲星识别算法 [J]. 光学技术, 2023, 49(06): 680-684, 698.
- [5] 崔国恒, 周浩, 王超, 等. 基于多专家动态协作学习的长尾声呐图像识别 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 2026, 49(20): 232-243.
- [6] 李象贤, 郑裕泽, 马浩凯, 等. 基于跨模态特权信息增强的图像分类方法 [J]. 软件学报, 2024, 35(12): 5636-5652.
- [7] 史江明, 郑珊珊, 尹星博, 等. 异构及长尾数据下的 CLIP 引导联邦学习 [C]// 第 38 届 AAAI 人工智能会议论文集. 2024.

智能化背景下电气安装施工技术应用与实践

邵士振¹, 王梅²

(1. 山东金宇信息科技有限公司, 山东 济南 250101;

2. 众汇中宏建工集团有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要 随着智能化技术不断发展, 电气安装施工也发生着深刻的变革。传统施工模式效率低、精度差、安全控制不到位等问题越来越突出, 以 BIM 技术、自动化设备、物联网传感系统为代表的智能化技术给电气安装施工提供了一条新路径。本文从电气安装施工技术的智能化发展现状入手, 对 BIM 集成应用、自动化施工设备实践、智能传感监控等关键技术的应用方式进行梳理, 再从数字化管理体系创建、技术标准规范制定、人才培养体系完善三个方面提出智能化电气安装施工技术的改进途径和保证措施, 以期给电气安装施工质量提升和行业智能化转型提供参考。

关键词 智能化; 电气安装施工; BIM 技术; 物联网; 数字化管理

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.008

0 引言

电气安装施工是建筑工程的重要组成, 其施工质量直接关系到建筑整体安全运行和使用功能。长期以来, 电气安装施工一直依靠人工操作, 管线布置繁杂、施工环境多变、质量控制困难等问题阻碍着行业的进步。进入智能化时代之后, 信息技术、自动化控制技术、传感技术迅速发展, 为解决上述问题提供强大的支持。国家层面也不断出台相关政策, 促使建筑业向着数字化、智能化的方向发展, 电气安装施工领域智能化改造也成了行业发展的必然趋势。在此背景下, 对智能化技术在电气安装施工中的应用模式及实践路径进行系统的研究, 总结目前的技术应用问题, 并提出相应的优化保障措施, 具有重大的现实意义和应用价值。本文以工程实践为基础, 从理论和实践两个方面对相关问题进行研究, 以期为相关人员提供参考。

1 智能化背景下电气安装施工技术的发展现状

1.1 智能化技术在电气施工领域的渗透与应用

近年来, 智能化技术渗入电气安装施工当中, 包含信息建模、自动控制、远程监测等诸多方面。BIM 技术被广泛使用之后, 管线综合设计从二维图纸变成了三维可视化模型, 施工前的碰撞冲突大大降低; 物联网传感器的安装实现了施工现场的实时数据采集与远程监控, 有效提升了现场管理水平。智能化技术的引入,

正在对电气安装施工的作业方式和组织架构进行全方位的改变^[1]。

1.2 电气安装施工技术的发展与转型特征

电气安装施工技术的发展过程, 先是完全依靠手工操作, 后来引进机械辅助, 现在是以数字化、智能化为主导的三个阶段。当前阶段的特点是施工信息越来越数字化, 施工过程的可追溯性也越来越强, 设备和系统之间协同联动的能力也越来越强。该转变不单表现在施工工具和工艺的更新上, 而且表现在施工组织思想、质量控制思路以及全过程管理方式等方面的根本改变上^[2]。

1.3 当前电气安装施工面临的技术挑战

虽然智能化转型不断推进, 但是电气安装施工还存在一些现实的困难。一方面, 施工企业技术积累不足, 智能化设备操作水平和软件应用水平普遍较低; 另一方面, 行业内缺少统一的智能化施工技术标准 and 规范体系, 造成各个企业、各个项目的实施效果千差万别。另外, 智能化设备前期投入大, 中小型施工企业转型的内在动力小, 推进速度慢^[3]。

2 智能化电气安装施工核心技术的应用实践

2.1 BIM 技术在电气管线综合布置中的集成应用

BIM 技术在电气管线综合布置中的应用, 从根本上解决了传统设计和施工相脱离的问题。施工前期建模

作者简介: 邵士振 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气安装智能化工程施工。

人员根据设计图纸在 BIM 平台上建立电气管线三维精细模型,用碰撞检测功能对电气管线与结构构件、暖通管道、给排水管道之间空间冲突进行系统识别。经由实际工程数据证实,在引入 BIM 碰撞检测之后,施工之前发现的管线冲突问题大致能缩减一半以上,从而有效地防止由于设计上的疏忽所引发的现场返工现象发生。施工阶段 BIM 模型可以直接给出管线定位坐标及施工排布图,给工人提供可视化的作业指导,降低施工经验依赖程度。BIM 平台也可以实现各个专业施工方之间的协同工作,电气、暖通、结构等各个专业施工进度及变更信息可以在同一个平台上同步到各个施工方,使各方的信息一致。部分项目在引入 BIM 协同管理之后,由于信息不对称所导致的各专业之间协调性返工次数明显减少,施工效率也得到了一定的提高^[4]。另外,BIM 模型在工程结束之后也可以转化成竣工档案以及运维数据库,一直服务于建筑后期的运营管理,拓宽了技术应用的价值链条。

2.2 自动化施工设备与机器人技术的现场实践

自动化施工设备和机器人技术在电气安装现场使用,可以较好地克服传统的人工作业精度低、劳动强度大、危险作业环境适应性差等缺点。以管线穿线为例,自动化穿线设备用气动或者机械牵引的方式,在复杂的管路中可以完成电缆的自动穿引,比人工穿线效率高很多,而且大大减少了由于操作不当造成的电缆绝缘层损伤概率。高空或者密闭空间内使用辅助机器人设备可以改善施工的安全条件。从相关实践数据可知,用辅助机器人进行高空桥架安装的工程项目,施工人员处在高风险作业环境的时间比以前少四分之一左右,安全事故发生率明显降低。与此同时,自动化放线设备依靠内置的测量、定位系统,可以按照事先设定好的路径准确地把导线展放到指定的位置并加以固定,从而避免由于人工操作出现的线缆排布不规则情况^[5]。自动化设备的推广使用对操作人员的技术水平有更高的要求,施工企业要同步建立与之相适应的人员培训和设备保养体系,发挥出自动化技术的优势。

2.3 智能传感与物联网技术在施工质量监控中的应用

智能传感与物联网技术相结合之后,把电气安装施工质量控制从事后检验转变为过程实时监测,实现了质的飞跃。施工现场温湿度传感器、电流检测仪、绝缘电阻检测终端等智能传感设备布置在关键节点上,对施工环境和电气参数进行不间断的采集并传送到管理平台,管理人员可以随时对各项指标的变化情况

进行查看。以配电系统安装过程为例,在接线端子处安装微型温度传感器可以对由于接线质量引起的局部温升进行实时监测。如果某个接线节点因为连接不牢固造成接触电阻偏高,那么在异常初期就会发出预警信号,管理人员可以在问题扩大之前就采取措施进行处理,从而避免由于接线缺陷而造成的电气故障。经过统计可知,采用实时传感监控的项目,在竣工验收阶段发现的隐性接线质量问题数量比传统的手工巡检模式要少得多,验收一次通过率也有所提高。另外,物联网平台所汇集的施工过程数据可以形成结构化的质量档案,给以后类似项目的施工质量控制提供可以参照的经验基准,从而不断改善企业的施工质量控制水平。

3 智能化电气安装施工技术的优化路径与保障措施

3.1 施工全流程数字化管理体系的构建

创建施工全过程的数字化管理架构,是推进电气安装施工智能化改造的前提工作。全流程数字化就是指把项目从方案设计、施工准备、现场作业到竣工验收的各个环节都纳入数字化管理平台之中,使信息可以全程留痕、实时共享、动态追溯。体系构建可以从以下几个方面着手推进:从信息集成角度来说,把 BIM 模型当作信息载体,把设计数据、施工图纸、材料清单、变更记录等结构化的信息全部录入平台上,从而创建起包含项目整个生命周期的数字化档案。从过程控制的角度出发,利用物联网传感器的数据以及移动端施工日志,对重要的工序进行数字化签认,并且保证质量状态能够及时更新,从而达成管理指令和现场执行之间快速的闭环。就协同联动而言,打破业主、设计、施工、监理等各个参与方之间存在的信息壁垒,利用统一平台进行跨主体的即时沟通和动态协作。经过对多个采用数字化管理体系的电气安装工程项目进行跟踪观察,可以发现由于图纸版本不同引起的返工现象,在创建统一的数字化档案之后基本上消失,返工次数下降明显;各个参与方之间由于信息传递不及时造成的停工等待时间平均每周减少约 1.5 个工作日。项目竣工之后可以形成完整的数字化施工档案,经过统计可知,这类档案在以后的运维过程中被调取使用次数远多于传统的纸质档案,说明数字化成果有持续应用的价值。数字化管理体系的形成不是技术层面的问题,而是组织管理模式的全方位更新,企业如果想要取得实质性成效的话,就得从制度安排、流程重组、人员配备等各个层面着手。

3.2 智能化施工技术标准与规范的制定与执行

技术标准和规范体系的完备状况,直接影响智能化施工技术能不能在行业范围内展开规范化推行并且得以持续运用。目前电气安装施工领域智能化技术的应用正处于快速发展的时期,相关标准的制定工作比较滞后,造成企业推进智能化转型时缺少明确的参照标准,技术路径的选择随意性较大,应用效果良莠不齐。从标准制定内容上看,应该重点包括以下几个方面:一是智能化施工设备技术性能及安全准入标准,对设备进入市场要有一定的门槛要求;二是BIM建模精度等级和成果交付标准,根据不同场景的需要确定建模的深度要求;三是物联网传感数据采集频率、传输协议和存储格式规范,保证各个系统之间数据的互通互联;四是智能化施工过程质量验收标准,把传统验收指标和数字化管控指标有机地结合起来,形成适合于智能化施工特点的新型验收体系。从对部分施工企业执行情况的观察中可以发现,执行内部统一技术规范的项目与未执行规范的同类项目相比,在施工过程中由于操作不规范所导致的质量问题占总问题数的15%以下,而未执行规范的项目这一比例大多大于40%,存在较大差异。另外,根据对施工现场质检人员的访谈得知,有明确的操作标准可以依照的工序,工人在遇到异常情况时判断的准确性比没有操作标准的工序要高,处置失误率也低。具体的推进可以采取分级的方式,新建的大型公共建筑和工业项目强制达到相应的智能化施工标准,中小项目采用引导鼓励、政策扶持的方式逐步提高标准的覆盖率。

3.3 电气安装施工技术人才培养与能力提升机制

智能化技术不断深入应用,给电气安装施工领域从业人员的知识结构和能力提出全方位的要求。传统的施工工人现场操作、经验积累能力较强,但是缺少了数字化工具的操作能力、系统化的智能化思维;具有信息技术背景的人才对施工现场工艺流程、安全规范认识不深。结构性的人才缺口成了智能化电气安装施工技术落实推广的又一重要障碍。创建系统化的人才培育和能力提升体系,要依靠院校教育和企业培训两方面共同努力。在院校教育方面,职业院校和高等院校要加快电气工程相关专业课程体系的更新速度,把BIM操作、物联网应用、自动化设备维护等智能化核心内容作为必修课,并且通过校企合作的形式,给学生提供真实的智能化施工场景的实训机会。企业在培训方面要创建起涵盖各个岗位层次的分层培训体系,对于一线操作工人来说,主要培训他们的智能化设备

规范操作及基本维护水平。对于施工管理人员来说,主要提高他们的数字化平台综合应用和数据分析水平。对于技术骨干来说,主要加强他们的BIM深化设计、系统集成以及方案优化等进阶技术能力。经过对已经开展系统化智能化技术培训的施工企业进行观察发现,受训工人独立完成智能设备操作任务的合格率比未受训工人高25%左右;管理人员经过数字化平台专项培训后,在日常工作中主动调取平台数据辅助决策的频率是培训前的3倍左右。另外,经过对多位一线工人进行访谈得知,约七成的受访者认为参加培训之前对于BIM模型“一无所知”,但是培训之后可以基本读取模型中的定位信息来指导现场施工。因此可以认为,定向培训对于弥合从业人员能力短板有着直接的、可感知的效果。企业内部还可以创建技术能力认定和激励机制,把智能化技术应用能力纳入职业晋升和薪酬评定之中,从而产生正向的激励导向,从制度角度促使从业人员自觉提高自身的能力。

4 结束语

智能化技术的广泛应用正在深刻改变着电气安装施工的面貌,从BIM管线综合布置、自动化施工设备实践、物联网传感监控全面铺开等各方面来看,智能化技术在提高施工精度、保证施工质量、改善安全条件等方面具有明显的优势。而且,电气安装行业存在着技术标准滞后、人才结构失衡、管理模式转型难等各类问题。推进电气安装施工智能化转型,必须依靠技术和标准、人才这三方面来协调推进,才能建立起互相支持的保障系统。随着人工智能、大数据等新技术同电气施工不断深入融合,行业的智能化水平必将达到一个新的高度,给建筑工程的高质量发展提供更加有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张宁,余扬昊,章家维,等.面向电气工程学科的“大数据技术与应用”课程构建与教学实践[J].中国电机工程学报,2023,43(19):7749-7758.
- [2] 李鹏,王力.大型水电站地下工程施工安全与质量实时监控与预警关键技术研究与应用[J].企业管理,2021(S2):172-173.
- [3] 张玉勇,李帮坤,杨勇.电力工程现场施工管理中的电气及机电安装技术应用分析[J].中国建筑,2025,08(13):40-42.
- [4] 彭波,杜佳乐,白凯,等.轨梁厂冷区集控智能化关键技术应用与实践[J].包钢科技,2026,52(01):87-90.
- [5] 萧若霓.地铁车站机电项目施工管理的BIM技术应用实践[J].中国住宅设施,2021(08):25-26.

基于工业互联网的机械设计协同创新策略研究

宋晨华¹, 张鹏飞², 陈林林³, 崔健⁴, 肖亮⁵

(1. 潍坊奥司特工贸有限公司, 山东 潍坊 261021;

2. 烟台富耐克换热器有限公司, 山东 烟台 265215;

3. 青岛海尔智能技术研发有限公司, 山东 青岛 266101;

4. 青岛前湾联合集装箱码头有限公司, 山东 青岛 266000;

5. 山东润龙机床有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 机械设计协同创新由技术平台、数据资源、设计流程及组织管理等多因素共同驱动, 当前其推进存在协同链路贯通不足、创新资源整合度低、设计方案与制造场景适配性不足、全生命周期管控机制不完善等问题。基于此, 本文提出构建多维度创新资源整合体系、分级搭建全流程设计协同体系、优选适配制造场景的协同设计技术、搭建智能化设计动态管控平台等创新策略, 以期为进一步提升机械设计协同效率与创新精准度、提高机械装备研发设计质量提供参考。

关键词 工业互联网; 机械设计; 协同创新

中图分类号: TH122

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.009

0 引言

机械设计阶段是装备创新的核心环节, 协同创新作为设计过程中跨主体、跨环节、跨领域的关键模式, 具有集成性、动态性与高效性等特征, 不仅能提升装备设计迭代速度, 还能降低研发成本、增强产品市场竞争力, 减少设计返工损耗^[1]。当前, 机械设计协同创新存在资源整合不深入、协同措施缺乏针对性、管控流程不闭环等问题, 严重制约装备创新升级与行业高质量发展。本文围绕工业互联网特性及机械设计协同现状展开分析, 探究科学有效的实施策略, 为机械装备研发设计管控提供技术与管理支撑。

1 工业互联网特性

1.1 全域数据互联支撑协同设计高效运转

工业互联网依托泛在感知网络与分布式数据架构, 实现机械设计全链条要素的互联互通, 打破设计主体、制造环节与应用场景间的信息壁垒。其以数据要素为核心纽带, 推动设计资源、制造数据、工况信息与仿真结果的一体化汇聚与共享, 为跨组织、跨地域、跨领域协同创新提供底层支撑^[2]。该特性可显著提升设计信息传输效率, 保障协同过程中数据一致性与时效性, 推动机械设计从离散化作业向一体化协同模式转型, 为全生命周期设计管控奠定数据基础, 强化创新决策的科学性与精准性。

1.2 智能动态适配赋能设计流程柔性优化

工业互联网融合智能算法与实时调控技术, 具备对机械设计流程的动态感知与柔性适配能力。依托云端协同、数字孪生与智能监测等技术支撑, 系统可实时捕捉设计状态、协同进度与参数变化, 依据设计需求与制造场景特征自主调整协同逻辑与管控规则。这一特性能够适配复杂装备研发的多样化需求, 推动机械设计协同从固定流程向动态迭代转变, 提升协同体系对外部环境与内部任务的响应速度, 增强创新过程的稳定性与可控性, 助力设计效率与创新质量同步提升。

2 机械设计协同现状分析

2.1 协同体系层级缺失, 关键设计环节效能薄弱

当前, 机械设计协同创新缺乏科学的分级协同设计, 协同体系的层级构建存在明显缺失, 关键设计环节与核心部件作为创新管控的核心区域, 其协同设计的针对性与系统性不足。协同层级的划分缺乏明确标准, 创新措施与设计特征的适配性较差, 设计流程未能根据协同层级进行差异化调整, 且创新管控责任未实现全流程、各岗位细化落实^[3]。多数企业仍沿用传统线性设计模式, 未按装备复杂度、部件重要性与创新风险等级实施分层管控, 导致核心环节资源投入不足、一般环节冗余消耗。跨部门、跨企业协同边界模糊, 信息传递滞后与口径不一问题突出, 设计、仿真、制造环节

作者简介: 宋晨华 (1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机械设计。

衔接不畅,严重降低整体协同效率与设计成果可靠性。

2.2 创新措施适配性不足,制造场景贴合度低

面对不同装备类型、不同设计工艺、不同生产环境的复杂制造场景,现有机械设计协同创新措施与行业实际需求的适配性存在显著差距,创新技术的针对性、数据资源的适配性、设计流程的科学性均未达到精细化管控标准。创新措施的制定仍依赖经验判断,未与协同创新需求溯源结果、装备制造场景参数进行深度绑定,专项协同技术的应用缺乏针对性,技术与数据配套的协同性不足。传统创新措施的“一刀切”实施模式,导致其在复杂制造场景下易出现创新效果不佳、方案反复迭代的问题,创新的长效性与稳定性无法得到有效保障。

2.3 管控机制不完善,设计创新优化滞后

机械设计协同创新的全过程动态管控机制尚未构建完善,设计监测技术的应用覆盖不全面,设计数据采集的频次与精度未能满足管控需求,各类平台、数据、设计、仿真数据的整合共享程度偏低。创新管控参数的设定缺乏实时监测数据的支撑,参数调整为事后处置,针对设计过程中出现的参数偏差、流程异常等问题,未能实现快速溯源与精准调控。智能化设计管控平台的搭建进度缓慢,创新风险预警机制缺失,导致协同流程与设计参数的优化处于滞后状态,难以动态适配机械设计协同创新的实际需求^[4]。

3 基于工业互联网的机械设计协同创新实施路径

3.1 分级构建全流程协同体系,强化关键设计环节效果

作为机械装备研发设计管控的核心环节,关键设计环节与核心部件的协同效果直接决定创新成效与装备整体性能,肩负着创新风险提前预防与设计质量稳定保障的双重职责。而分级构建科学完善的全流程设计协同体系,可将精准协同技术全面融入创新需求识别、协同方案设计、云端设计、效果校验全流程,实现协同层级的精准定位与创新强度的梯度提升。

设计单位可搭建“设计分级一措施适配一流程迭代”的全流程协同实施框架,以分级协同理念贯穿创新需求排查、协同方案设计、云端设计、效果验收等各个环节,实现设计分级与协同流程的精准适配。设计单位需建立分级协同与需求溯源的联动机制,将全流程协同目标拆解为环节划分、措施制定、参数控制等具体任务,由技术攻坚小组牵头核心环节突破。例如:在机械装备主体结构设计中,设立“分级协同示范工区”,由技术骨干主导关键设计环节划分、协同措施设计、设计流程优化等核心工作。将创新管控责任细

化到数据进场校验、设计环节执行、环节交接验收、成果保护等全流程。其中核心部件三维建模、关键结构仿真分析、标准件参数设计等核心环节设置一级协同,通用部件设计、图纸绘制、工艺对接等重要环节设置二级协同,文档整理、模型渲染等一般环节设置三级协同,分层落实协同要求^[5]。

同时,设计单位应推动分级协同标准与机械设计管理体系深度融合,将全流程协同设计流程、参数控制要求纳入企业设计质量管理体系。在协同方案优化过程中,由技术专家组联合一线设计人员,结合3组以上同类装备协同创新案例经验,梳理不同协同层级的设计难点与风险点,制定针对性分级协同方案,形成“需求精准溯源+分级梯度协同”的协同推进机制。且在设计阶段,采用“分层设计、逐道校验”模式,一级协同环节采用高精度仿真与标准化设计流程,设计过程中实时监测质量参数,环节验收实行100%全检;二级、三级协同环节依次降低检测频次与设计精度要求,实行抽样验收,同步实时监测设计数据,根据监测数据动态调整设计参数,推动关键设计环节与核心部件的创新效果持续强化。通过将分级全流程协同从被动整改转化为主动预防的创新保障动能,可实现分级协同体系与机械设计管控全流程的深度融合,切实保障装备设计质量的稳定性、可靠性与长效性。

3.2 适配制造场景与创新特征,优选专项协同技术体系

机械设计协同创新的效果,核心取决于专项协同技术体系与制造场景、创新特征的适配性与应用科学性,直接关系到装备设计质量与市场效益。在机械设计精细化创新导向下,需以专项协同技术体系优选为核心突破口,将协同技术、数据性能、设计流程等关键要素转化为机械设计创新的实际成效。这既是破解复杂制造场景下设计协同难、效果差、易反复等行业痛点的关键举措,也是筑牢装备研发设计防线、提升创新管控水平的核心支撑。

针对不同装备类型、不同制造场景、不同特征的创新需求,可构建“技术优选、数据适配、流程配套”的三维专项协同技术应用体系,以“适配性优先、创新性达标、长效性可控”为核心原则。该体系摒弃传统机械设计创新“一刀切”的技术选型模式,将协同创新需求溯源结果、制造场景参数与协同技术指标深度绑定,通过高效专项协同技术(云端三维协同设计技术、数字孪生仿真技术、跨端参数同步技术)、适配性创新数据(高精度工况数据、标准化零部件库、实时制造数据)、精准设计流程(并行设计、跨域协同、精准参数匹配)的三方协同,形成“技术保协同、

数据提效果、流程强长效”的闭环管控模式。其关键在于将协同技术与数据选型从“经验判断”转向“精准适配”，从“单一应用”升级为“体系化配套”，使专项协同技术体系成为提升机械设计创新质量的核心支撑。

推行该体系时，需制定“机械设计协同创新专项技术与数据适配责任清单”，将协同技术参数、数据性能指标、设计操作标准量化挂钩，以标准规范选型、以参数控制质量、以流程保障成效，推动协同技术与数据应用全流程标准化落地。例如：溯源出装备结构仿真偏差为创新核心问题后，优先选用精度 $\geq 0.01\text{ mm}$ 、同步延迟 $\leq 100\text{ ms}$ 的高性能数字孪生仿真技术，搭配云端并行设计流程。为保证创新效果长效性，可采用结构仿真+参数优化的复合创新流程，添加3%~5%的工况修正数据提升设计精度，搭配数据加密协议增强设计成果与制造端的对接稳定性。且在设计中采用“精准定位、分段协同”流程，每段设计长度控制在2个~5个模块，仿真压力控制在0.3倍~0.5倍额定载荷，同步结合创新需求数据调整数据用量与设计参数，确保创新数据与装备结构紧密贴合，以提升复杂制造场景下机械设计协同创新的有效性与长效性^[6]。

3.3 动态监测设计全流程，优化协同流程与管控参数

动态监测机械设计全流程、优化协同创新流程与管控参数，是破解设计阶段创新溯源难、协同效果不佳的核心路径，更是保障装备设计质量、防范创新风险反复出现的关键举措。

设计单位应建立“三维协同”溯源与创新机制，以机械设计质量验收规范为准则，明确协同创新溯源边界与创新技术标准，以全过程监测数据为支撑优化管控参数，以专项技术革新提升创新效能，实现协同创新溯源、设计执行、效果核验的全流程可控。在技术架构层面，组建由平台、设计、仿真、制造等领域专家牵头，创新管控、现场设计、设备运维等班组深度参与的专项工作组，打破技术壁垒，建立数据实时共享与协同处置机制。例如：以高端液压装备协同设计为例，专项工作组统筹工业互联网平台部署、三维模型构建、多工况仿真分析与制造工艺规划，实时对接现场设计数据与设备运维反馈，依托统一数据接口实现设计参数、仿真结果、制造工艺与运维信息的互通共享，快速响应协同偏差并闭环处置。

针对不同装备结构、制造场景及协同创新类型，将溯源精度、创新数据性能、设计质量验收标准等核心要求，转化为可量化的技术指标，嵌入协同创新全流程。例如：在协同创新溯源阶段，采用高精度设计

检测设备（测量精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ ）与设计追溯系统联合应用，每道设计环节采集1组质量数据，重点捕捉创新问题的位置、参数、形成原因等关键指标。而在创新设计阶段，优化核心协同流程参数。例如：对装备模型冲突进行治理时，将模型处理精度控制在Ra3.2以上，协同节点间距设置为300 ms~500 ms，设计数据传输比控制在0.4~0.5，同时每5分钟记录1次设计参数，动态适配协同创新需求。

为提升创新管控决策的精准度，需搭建智能化设计动态管控平台，整合平台架构数据、设计检测数据、仿真监测数据、创新验收记录等资源，实现多维度数据比对与创新风险预警。针对创新过程中出现的设计偏差、协同效果未达预期等问题，推行“溯源排查—参数调整”处置模式。通过复盘溯源数据、核查设计操作流程，精准定位协同流程不当或参数不匹配等问题，及时调整设计方法、数据配比等参数。例如：当装备结构设计后仿真强度偏差超10%、尺寸误差仍大于0.2 mm时，立即暂停设计，核查协同平台运行状态，调取近30分钟检测数据，将仿真压力从0.4倍调整为0.5倍额定载荷，更换精度更优的仿真数据，优化协同流程参数。

4 结束语

针对当前机械设计协同创新中资源整合、协同体系、措施适配、管控机制等环节的现存问题，通过构建多维度创新资源整合体系、分级搭建全流程设计协同体系、优选适配制造场景的专项协同技术体系、搭建智能化设计动态管控平台等实施路径，可有效提升机械设计协同效率与创新精准度，从源头驱动和保障机械设计协同创新，提升机械装备整体研发设计质量。

参考文献：

- [1] 董素秀.工业互联网平台生态价值共创演化路径[J].时代经贸,2026,23(03):161-164.
- [2] 吴青,卓帅,孙莉.基于工业互联网与深度迁移学习的电动汽车电机故障诊断技术研究[J].机电工程技术,2026,55(06):137-142.
- [3] 平卫英,石华安,潘芳侠.工业互联网嵌入、企业柔性重塑与生产率提升[J].南方经济,2026,44(03):131-154.
- [4] 焦泽钰,刘越,李平.工业互联网平台赋能智能制造企业数字韧性的形成机制:基于数字技术可供性视角[J].经济问题,2026(03):99-109.
- [5] 朱维亚,杨宇浩.轻量化机械结构在汽车车身抗撞性设计中的协同优化[J].汽车电器,2026(02):113-115.
- [6] 谈志豪.基于工业机械臂与移动底盘协同作业的自动装车系统的设计与应用[J].自动化应用,2026,67(01):269-272.

信息化技术在水工金属结构设计中的应用研究

史天聪

(安徽芜源工程技术有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 信息技术发展日新月异,在水工金属结构设计领域的应用愈发广泛。本文聚焦信息化技术在水工金属结构设计各环节的应用实践展开探究:计算机辅助设计软件大幅提升了设计效率与精度,有限元分析技术可对结构性能进行精准优化,信息化管理系统则能保障设计流程高效顺畅推进。同时,针对信息化技术应用过程中面临的挑战及应对策略进行深入分析,旨在为推动水工金属结构设计的信息化进程、提升设计质量与效率提供理论参考。

关键词 信息化技术;水工金属结构设计;计算机辅助设计;有限元分析

中图分类号:TV698.2;TP391.72

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.010

0 引言

水工金属结构是水利工程的关键构成部分,其设计质量直接关乎水利工程的安全性、可靠性与经济性。在传统水工金属结构设计长期受困于效率低、精度差、协同难等问题,难以满足现代水利工程对高质量、高标准的建设需求。随着信息化技术的持续迭代,将其引入水工金属结构设计领域,可有效弥补传统模式的不足,推动设计过程向智能化、精准化、高效化转型^[1]。因此,对信息化技术在水工金属结构设计中的应用展开研究具有重要的现实意义。

1 信息化技术在水工金属结构设计中的具体应用

1.1 计算机辅助设计(CAD)技术

1.1.1 二维绘图与三维建模

CAD技术在水工金属结构设计的起始绘图阶段有着重要作用^[2]。借助二维绘图软件,设计师能精准绘制结构的平面布置图、剖面图等,清楚地展现出各部件的位置和尺寸关系。三维建模软件则让设计的直观性与可视化水平得到了增强。设计师可以搭建水工金属结构的三维模型,从各个角度观察结构的形状、空间布局、各部件之间的装配关系。以压力钢管设计来讲,利用三维建模能够直观呈现钢管的走向、弯头部位的空间形态,及时察觉设计中可能存在的干涉问题,防止施工过程中出现返工情况。

案例1:某大型水利枢纽工程船闸闸门设计项目。设计团队采用CAD技术进行二维绘图、三维建模工作。项目初期,设计团队先借助二维绘图软件,精心绘制船闸闸门的平面布置图、纵剖面图及各零部件的详细

图纸,精准标注尺寸、公差、材料规格等关键技术信息。完成二维图纸后,再通过三维建模软件搭建船闸闸门的三维模型。在这个模型中,闸门的整体结构得以直观呈现,门叶、支臂、止水装置、启闭机连接部件等组件的空间位置与装配关系一目了然。设计人员从多视角对三维模型进行观察与分析,很快发现原设计方案中支臂与止水装置存在潜在空间干涉问题。针对这一隐患,团队迅速调整设计方案,通过优化支臂角度、微调止水装置安装位置,提前规避了可能出现的施工冲突,确保了闸门结构的合理性与运行可靠性。

1.1.2 参数化设计与图纸修改

参数化设计是CAD技术的一项重要优势。水工金属结构设计中,不少部件有着相似的结构形式,只是尺寸或者某些参数有所不同。借助参数化设计,设计师只要修改关键参数,就能自动生成对应的结构模型、图纸。若设计方案出现变更,CAD软件可以便捷地修改图纸。软件会自动更新相关的视图、尺寸标注,保证图纸的一致性和准确性,降低因人工修改产生的错误。

案例2:某水电站压力钢管群设计项目。压力钢管的管径、壁厚、长度等参数,会因为所处布置位置不一样、水力要求存在差异而产生变化。设计团队利用CAD的参数化设计功能,建立起压力钢管的参数化模型。只要设置好管径、壁厚、长度、弯头角度等关键参数,输入不同的参数值,就能快速生成各个压力钢管的三维模型、相应的二维施工图纸。在设计过程中,由于水电站运行工况发生变化,部分压力钢管的管径和壁厚需要调整。借助CAD软件的参数化设计特性,设计人员只需修改相应参数,软件就会自动更新所有相关

作者简介:史天聪(1992-),男,硕士研究生,研究方向:水工金属结构、水利工程。

模型和图纸,包括各个视图、尺寸标注、材料清单等,保证了设计变更的高效与准确,避免了传统手工修改图纸时可能出现的遗漏和错误。

1.2 有限元分析 (FEA) 技术

1.2.1 结构力学性能分析

有限元分析技术可针对水工金属结构进行详细的力学性能分析工作^[3]。把金属结构划分成数量有限的单元,借助建立结构的有限元模型,以此模拟该结构在实际工况下所受力的情况。例如:弧形闸门的门叶结构,在承受水压力、自重等荷载作用的时候,运用有限元分析能够计算出结构的应力分布、变形状况,进而评估该结构是否符合强度、刚度方面的要求。依据分析得出的结果,设计师能够对结构的厚度分布、加强筋布置等进行优化,以此提高结构的力学性能^[4]。

1.2.2 优化设计方案

根据有限元分析所得出的结果可以对水工金属结构的设计方案进行优化。通过调整结构的几何形状、材料属性等参数再次进行有限元分析,对比不同方案的力学性能指标,从中找出最优设计方案。例如:在设计大型水利枢纽的金属结构时,利用有限元分析不同截面形状和尺寸的钢梁在相同荷载作用下的应力应变情况,选出最合理的钢梁设计方案,在保证结构安全的前提下实现材料的优化利用,降低工程成本。

案例 3:某大型水利水电工程在进行工作闸门设计时运用的是传统经验设计方式,导致门叶结构设计冗余、自重偏大。设计团队利用有限元分析技术创建了闸门精细有限元模型,该模型纳入了水压力分布、门体自重、支承条件等诸多因素。通过应力分析能够发现,原设计方案在部分位置应力水平较低,材料利用率不够理想,而且支臂与主梁连接的部位存在应力集中的状况。依据分析结果,设计团队对结构采取了优化措施,把部分区域的板厚减小,增加过渡圆角以减轻应力集中,还对加强筋布置方式进行了调整。优化后的方案经过有限元分析验证,结果表明结构应力分布更加趋于均匀,最大应力下降了 12%,结构重量减轻了 18%,节省了大概 200 吨钢材,同时提高结构安全裕度。

1.3 建筑信息模型 (BIM) 技术

1.3.1 三维信息集成与协同设计

BIM 技术是信息化技术在工程建设领域的重要创新成果,其重点在于搭建涵盖几何信息、材料信息、施工信息、运维信息的三维数字化模型^[5]。在水工金属结构设计中,BIM 技术能够达成结构设计与水工、

机械、电气等专业的协同设计,防止专业之间出现冲突和矛盾^[6]。

BIM 模型不仅包含三维几何信息,还整合了材料属性、制造工艺、安装流程、维护要求等全生命周期数据。设计人员可依托统一的 BIM 平台协同作业,实时查看各专业设计进展,及时发现并解决设计冲突。例如:在船闸金属结构设计工作中,闸门、阀门、启闭机、电气控制等系统能够在 BIM 模型中做整体布置、协调,保证各系统之间空间位置合理,接口也匹配^[7]。

1.3.2 施工模拟与进度管理

BIM 技术能够通过施工过程三维模拟,以此对施工方案、安装顺序进行优化。对于船闸人字闸门、大型平面闸门这类大型水工金属结构而言,其安装涉及多工序交叉作业,协同难度大。而 BIM 的 4D 模拟技术,将三维模型与时间维度深度结合,可动态呈现结构运输、吊装、就位、焊接等全流程细节,帮助施工方提前发现潜在的工序冲突、空间干涉等问题,进而针对性优化施工组织设计,保障施工效率与质量。

BIM 模型能够和项目管理系统结合在一起,从而达到施工进度可视化、动态控制的目的。管理人员借助 BIM 平台能够实时掌握工程进展情况,进而进行进度预警、资源调配工作,以此提高项目管理水平。

1.3.3 运维管理与全生命周期服务

凭借对多维度信息的整合能力,BIM 技术为水工金属结构的全生命周期管理筑牢了数据根基。在运维阶段,BIM 模型通过整理监测数据、检修记录、维护计划等信息,实现对结构健康状态的实时监控、预测性维护。运维人员可以借助 BIM 平台迅速查询结构的设计参数、材料信息、维护历史等情况,以此为维护决策提供支持。

依托 BIM 技术推进数字化交付,成功构建起从设计源头到施工执行、再到运维管理的信息传递链路,确保各阶段数据连贯互通。这种方式避免了传统模式中会出现的信息丢失、信息断层的情况,为水利工程能够长期安全运行、实现智慧化管理奠定了基础。

1.4 信息化管理系统

1.4.1 设计流程管理

信息化管理系统能够对水工金属结构设计的整个流程进行有效的管理。从项目立项开始到方案设计、详细设计直至施工图纸交付,该系统可以清晰地明确各个阶段的任务内容、责任人、时间节点,达成设计流程的规范化与标准化目标。例如:在项目立项阶段,系统会录入项目的基本信息、设计要求等,而在方案设计阶段,设计师上传设计方案,经过审核之后进入

详细设计阶段。借助系统所具备的流程跟踪、提醒功能,能够保证设计项目依照计划稳步推进,防止出现延误情况。

1.4.2 数据资源管理

水工金属结构设计涉及诸多数据,如材料性能参数、设计规范、计算书、图纸等内容。信息化管理系统能够把这些数据集中存储并加以管理,从而方便设计人员查询、调用、共享。而且系统还可以对数据进行版本控制,记录数据的修改历史,以此保证数据的准确性、可追溯性。例如:设计人员在进行结构计算的时候,能够迅速从系统里获取所需的材料力学性能参数,当出现设计变更之时,也能够清楚知晓变更的原因与过程。

2 信息化技术应用面临的挑战及应对策略

2.1 技术更新换代快

信息化技术呈现出快速发展的趋势,各种新的软件、算法持续不断地涌现出来。从事水工金属结构设计的人员必须持续学习并熟练掌握新的技术,以此来顺应行业发展提出的新要求。然而,设计人员日常所承担的工作任务繁重,很难进行系统学习,进而使得对新技术的应用出现滞后的情况。

设计单位需定时组织内部培训,邀请行业专家或者软件供应商的技术人员来讲解新技术。同时还应鼓励设计人员参与外部学术交流活动、技术研讨会等,以此拓宽技术视野。另外,要建立技术学习激励机制,对于积极学习新技术并将其应用到实际项目中的人员给予奖励,进而提高设计人员学习新技术的积极性。

2.2 数据安全问题

信息化管理系统存有大量水工金属结构设计数据,此数据关乎工程核心技术和商业机密。如果数据出现泄露情况或者遭受网络攻击,极有可能给设计单位、工程造成严重损失。此外,数据在传输进程中也存在被篡改的风险。

设计单位需要强化数据安全防护举措。运用先进加密技术对存储、传输的数据予以加密操作,以此防止数据遭窃取或者被篡改。建立严格的用户权限管理制度,依据不同岗位的要求,分配相应的数据访问权限,从而确保数据访问具备合法性。并且要定期针对系统展开安全检测、漏洞修复工作,安装防火墙、入侵检测系统等网络安全设备,以此保障数据安全。

2.3 软件兼容性问题

在水工金属结构设计过程中,会运用到种类多样的信息化软件,如CAD软件、有限元分析软件、信息

化管理系统等。然而,这些软件相互之间存在兼容性方面的问题,进而使得数据没办法顺利进行传输、共享,最终对设计效率造成了影响。

选取具备良好兼容性的软件产品,同时留意软件供应商的技术支持、更新状况。在软件选型阶段,要进行充分的测试与评估工作,以此保证所选软件能够实现数据的无缝对接。还可以借助中间数据格式或者数据转换工具,来解决不同软件之间的数据兼容性问题。例如:将CAD模型转换为通用的STEP格式后,就能在有限元分析软件中进行导入和分析。

3 结束语

信息化技术在水工金属结构设计中的推广应用,已成为驱动该领域技术革新与产业升级的核心力量,带来了前所未有的重大变革。运用计算机辅助设计技术可提高设计效率、精度,借助有限元分析技术能优化结构性能,依靠建筑信息模型技术可实现全生命周期管理,凭借信息化管理系统可保障设计流程顺利、数据资源管理有序,切实提高水工金属结构设计的质量与水平。虽然在应用期间面临技术更新换代迅速、数据安全、软件兼容性、人才队伍建设等挑战,但通过采取科学合理的应对策略,就能有效克服这些问题,推动信息化技术在水工金属结构设计中的广泛应用。未来,随着人工智能、数字孪生、云计算等一系列新技术持续不断地发展,信息化技术于水工金属结构设计当中的应用会越来越广泛,为水利工程建设提供更为强大的技术支撑,进而推动水利行业朝着数字化与智能化的方向转型升级,为保障国家水安全、促进经济社会可持续发展贡献更大力量。

参考文献:

- [1] 刘鸿文.材料力学 I (第6版)[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [2] Autodesk 公司.AutoCAD 2022 从入门到精通[M].北京:人民邮电出版社,2022.
- [3] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [4] 张雪才,陈丽晔,姚宏超,等.弧形闸门支臂结构空间有限元分析原则研究[J].水力发电,2021,47(07):73-82.
- [5] 赵春龙,王正中,李岗,等.水工金属结构 BIM 技术研究与应用[J].人民黄河,2022,44(09):155-160.
- [6] 杨健.水利水电工程中金属结构 BIM 技术研究与应用[J].水电水利,2024,08(02):65-67.
- [7] 刘天祥,黄海杨,张晴.SolidWorks 在水工金属结构 BIM 设计中的应用[J].浙江水利科技,2022,50(04):79-83.

井工煤矿智能化综采工作面无人化控制技术应用

宋海波, 张 海, 杜琛豪

(山西岚县昌恒煤焦有限公司, 山西 吕梁 035200)

摘 要 为解决井工煤矿综采工作面人员密集、安全风险高、生产效率低等问题, 本文构建了“地面决策—井下执行—面内无人”的三级智能化控制体系, 采用多传感数据融合、边缘计算、设备协同联动等技术, 设计无人化控制系统硬件架构与软件模块, 优化采煤机自适应截割、液压支架电液控、多设备协同等关键技术流程。经实验室测试与现场应用, 系统实现工作面设备自主联动、环境实时监测、故障智能预警, 自动化作业率达 92.3%, 设备响应时延 < 150 ms。结果表明, 该技术能够有效提升综采工作面安全管控与生产效能, 为井工煤矿无人化开采提供技术参考。

关键词 井工煤矿; 智能化综采; 无人化控制; 协同联动; 自适应截割

中图分类号: TD672; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.011

0 引言

煤炭作为我国主体能源, 综采工作面智能化是煤矿安全高效生产的核心方向。当前多数矿井仍以“人工干预+远程监控”为主, 存在煤岩识别精度不足、设备协同滞后、复杂地质适应性差等问题。传统控制模式难以实现全流程无人化作业, 制约煤矿智能化升级。本文针对上述问题, 设计一体化无人化控制系统, 突破多设备精准协同、复杂环境自适应控制等关键技术, 通过工程验证优化技术路径, 为井工煤矿综采工作面无人化开采提供技术方案与实践参考。

1 井工煤矿智能化综采工作面无人化控制系统设计

1.1 系统总体设计方案

系统采用“感知—传输—决策—执行—监管”五层架构(见图 1), 构建地面控制中心、井下顺槽集控站、工作面设备终端三级控制体系^[1]。地面端负责全局决策与远程监控, 井下集控站承担本地边缘计算与指令转发, 设备终端实现自主执行与状态反馈。通过 5G+ 万兆工业环网融合传输, 保障数据实时交互, 形成“井上智能决策、井下自动执行、面内无人作业”的闭环控制模式。

1.2 硬件系统选型与布局设计

硬件采用“核心控制+感知采集+执行终端”分层布局(见图 2), 核心选用矿用本安型边缘控制器与冗

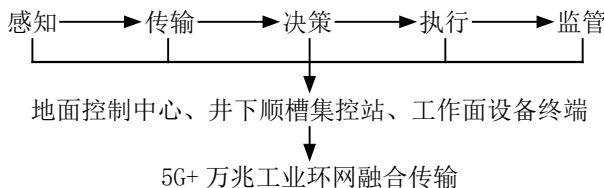


图 1 系统总体设计方案图

余工业交换机; 感知层部署激光雷达、惯性导航、振动传感器等监测设备, 定位精度 ± 5 cm; 执行层集成智能采煤机、电液控液压支架、变频刮板输送机装备。设备沿工作面呈线性分布式布局, 顺槽设集控中心与供电泵站, 实现硬件资源优化配置^[2]。

1.3 软件系统架构与模块设计

软件采用微服务架构, 分为数据采集、智能决策、协同控制、安全预警、可视化监控五大模块^[3]。数据采集模块实现多源信息标准化接入; 智能决策模块基于地质模型与设备状态生成控制指令; 协同控制模块完成多设备时序联动; 安全预警模块实现异常识别与分级报警。模块间通过消息队列交互, 支持动态扩展与远程升级。

1.4 系统抗干扰设计与可靠性优化

针对井下电磁干扰、粉尘、潮湿等恶劣环境, 从硬件、软件、传输三方面优化^[4]。硬件采用屏蔽线缆与隔离供电, 软件设数据滤波与容错机制, 传输采用

作者简介: 宋海波(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 煤矿采矿工程。

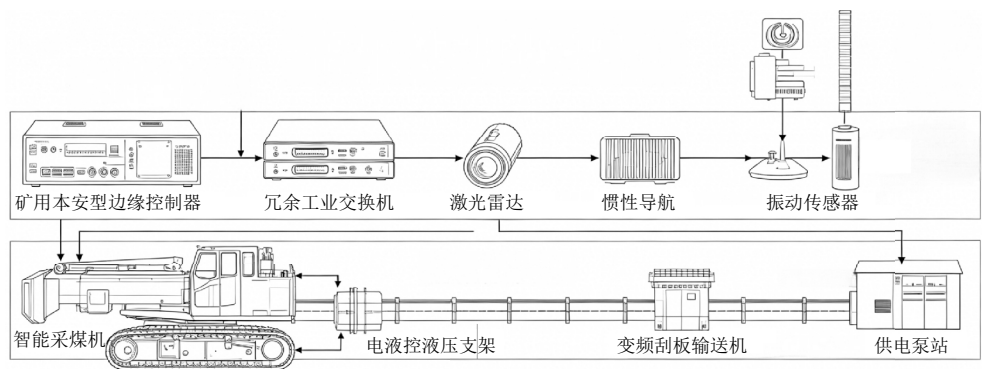


图 2 硬件系统选型与布局设计图

环网冗余与数据校验。通过可靠性设计，提升系统平均无故障工作时间，提高数据传输准确率（见表 1）。

表 1 系统抗干扰与可靠性优化指标

优化维度	技术措施	性能指标
电磁抗干扰	屏蔽接地、滤波电路	干扰抑制比 > 60 dB
数据传输	环网冗余、CRC 校验	丢包率 < 0.03%
设备容错	冗余备份、故障切换	切换时间 < 50 ms
环境适应	三防处理、温控设计	工作温度 -20 ℃ ~ 60 ℃

2 无人化控制关键技术研究是实现

2.1 采煤机无人化控制技术

采煤机无人化控制技术是实现综采工作面无人作业的核心技术之一，以记忆截割技术为基础，融合激光雷达、振动传感器、电流传感器等多源传感数据，通过算法实现煤岩界面精准识别^[5]。工作人员需手动规划标准截割轨迹，记录滚筒高度、牵引速度、截割功率等参数；运行中通过截齿应力、振动、电流多传感融合识别煤岩界面，实时调整滚筒高度与牵引速度。

2.2 液压支架自适应控制技术

通过动态调节支架立柱压力、移架速度及护帮板角度，实现支架跟机移架的精准联动，自动适配采煤机作业节奏与煤层地质变化，确保支架对顶板的有效支护，提升支护可靠性与作业效率。以采煤机位置为核心，构建支架跟机移架自适应控制模型^[6]。基于电液控系统，建立姿态—阻力耦合控制方程：

$$\Delta P=K_p \cdot \Delta L+K_d \cdot \frac{d(\Delta L)}{dt}+K_i \cdot f \Delta L dt \quad (1)$$

式（1）中： ΔP 为支架立柱压力调节量； ΔL 为支架与采煤机相对位移偏差； K_p 、 K_d 、 K_i 分别为比例、微分、积分系数。通过实时修正移架速度与护帮板角度，跟机移架精度达 ± 10 cm，响应时间 < 0.3 s。

2.3 刮板输送机协同控制技术

刮板输送机协同控制技术以采运协同为核心目标，通过称重传感器、功率传感器实时采集煤流负荷数据，结合采煤机截割节奏，构建煤流负荷预测与调速模型^[7]。通过称重传感器与功率监测实时获取煤流量，采用时间序列预测未来 5 s 负荷变化，动态调整输送机频率。

2.4 工作面环境智能监测与预警技术

工作面环境智能监测与预警技术集成瓦斯、一氧化碳、粉尘、温度、矿压等多类型矿用本安型传感器，通过工业环网实现环境参数实时采集与传输^[8]。实时采集环境参数，经边缘计算本地分析，识别异常趋势并分级预警。

2.5 多设备协同联动控制技术

多设备协同联动控制技术构建统一的时空同步基准，统筹采煤机、液压支架、刮板输送机等工作面核心设备的动作时序^[9]。建立统一时钟基准，同步误差 < 10 ms；以采煤机为核心，规划支架移架、推溜、护帮时序，控制输送机速度匹配。

3 系统测试与工程应用验证

3.1 实验室模拟测试与参数校准

搭建 1:1 物理模拟平台，开展功能、性能、可靠性测试。测试采煤机截割精度、支架跟机响应、多设备协同等指标，校准控制参数与传感系数（见表 2）。

表 2 实验室模拟测试结果

测试项目	设计指标	实测值	达标情况
采煤机截割误差	≤ 3 cm	2.4 cm	达标
支架跟机响应时间	≤ 0.3 s	0.22 s	达标
设备同步误差	≤ 10 ms	7 ms	达标
数据传输时延	≤ 150 ms	110 ms	达标

实测数据显示，采煤机截割误差 2.4 cm、支架跟机响应时间 0.22 s、设备同步误差 7 ms、数据传输时

延 110 ms, 均优于对应设计指标, 四项测试均达标, 验证了系统核心功能与性能符合设计要求, 控制参数校准精准, 为现场工程应用提供了可靠的实验支撑。

3.2 现场工程应用方案与实施

选取某矿 300 m 综采工作面实施, 按“设备改造—系统部署—调试优化—试运行”流程推进。改造原有设备, 安装感知与控制模块; 铺设 5G 与万兆环网, 部署地面与井下控制系统; 分阶段单机调试、联动调试、空载与带载试运行, 逐步实现无人化作业。

3.3 应用效果数据监测与分析

应用效果如表 3 所示。

表 3 现场应用效果监测数据

指标类别	改造前	改造后	变化率
单班作业人数	11 人	3 人	-72.7%
日推进度	8 刀	9.6 刀	+20%
设备故障率	15%	6.2%	-58.7%
自动化作业率	65%	92.3%	+42%

改造后单班作业人数从 11 人降至 3 人, 日推进度从 8 刀提升至 9.6 刀, 设备故障率从 15% 降至 6.2%, 自动化作业率从 65% 提升至 92.3%。数据表明, 系统有效减少作业人员、提升生产效率、降低设备故障, 无人化控制应用成效显著, 达到预期技术目标。

3.4 技术经济性与安全性评估

经济与安全效益如表 4 所示。

表 4 技术经济性与安全性评估

评估维度	具体指标	评估结果
初期投资	系统建设总费用	850 万元
年收益	成本节约总额	420 万元
投资回收期	静态回收周期	2.02 年
安全提升	事故风险降低率	90%

数据显示, 系统初期建设总费用 850 万元, 年成本节约总额 420 万元, 静态投资回收期 2.02 年, 事故风险降低率达 90%。评估结果表明, 该系统不仅具备良好的技术经济性, 短期内可回收投资成本, 同时能大幅提升工作面安全管控水平, 实现安全与效益双重提升。

4 技术难点与优化改进措施

4.1 复杂地质条件下控制难点分析

复杂地质条件下存在三大控制难点: 断层、夹矸等导致煤层识别模糊, 传统传感准确率降至 80% 以下; 大倾角煤层(倾角 $> 15^\circ$)设备滑移, 支架姿态与推溜精度下降, 移架误差超 20 cm; 地质突变引发设备载荷骤变, 协同控制失步, 动作冲突率上升 3 倍。上述

问题导致无人化系统稳定性下降, 人工干预频次增加。

4.2 系统运行中的问题

系统运行暴露四方面问题: 井下多源干扰致数据丢包率升至 0.5%, 控制指令延迟超 200 ms; 长期高负荷下传感器漂移, 监测误差超 5%, 决策失准; 边缘计算算力不足, 复杂工况分析延迟超 500 ms, 实时性下降; 设备兼容性差, 不同厂家控制器协议不统一, 联动故障率达 8%。

4.3 针对性优化改进方案

针对上述难点与问题, 实施三维优化: 感知层融合探地雷达与机器视觉, 构建 D-S 证据理论识别模型, 煤层识别准确率至 95%; 加装倾角补偿与防滑控制, 大倾角下移架误差 < 8 cm。传输与计算层采用 5G+ 光纤冗余备份, 丢包率降至 0.03%; 升级边缘控制器, 算力提升 2 倍, 分析时延 < 100 ms; 部署统一协议转换网关, 解决设备兼容问题。控制算法引入自适应 PID 与强化学习, 动态修正控制参数, 复杂工况下协同稳定性提升 40%, 人工干预频次减少 70%。

5 结束语

本文构建井工煤矿智能化综采工作面无人化控制系统, 突破多设备协同、复杂环境自适应等关键技术, 形成“地面决策—井下执行—一面内无人”的完整技术体系。经实验室与现场验证, 系统自动化作业率达 92.3%, 单班人员减少 72.7%, 生产效率提升 16.7%, 有效解决了传统开采痛点。

参考文献:

- [1] 陈晓晶. 井工煤矿运输系统智能化技术现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(06): 6-14, 35.
- [2] 刘青红, 史发慧. 煤矿井下绿色智能辅助运输调度系统的研究[J]. 矿山机械, 2024, 52(07): 16-21.
- [3] 赵康康, 刘波. 煤矿井下水处理装置智能控制系统设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 151-157.
- [4] 谢军峰, 张阳. 基于数字孪生的智能控制技术在煤矿提升系统的设计及应用[J]. 煤矿机械, 2024, 45(10): 212-215.
- [5] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(01): 34-53.
- [6] 张锐, 彭俊, 白屹彬, 等. 煤矿井下排水系统智能监控关键技术研究[J]. 矿山机械, 2024, 52(08): 54-59.
- [7] 张旭辉, 万继成, 杨文娟, 等. 煤矿巷道智能掘进技术进展、挑战与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2026, 54(01): 388-410.
- [8] 田锦钊, 吴玉杰, 冉令才, 等. 车路协同下的煤矿井下辅助运输系统设计与智能调度方法[J]. 能源与环保, 2024, 46(11): 235-241.
- [9] 王国法, 孟庆勇, 侯林, 等. 5G+ 工业互联网智能化矿井及智能放煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2026, 51(01): 112-142.

电气自动化控制系统在工业现场的可靠性优化策略

神兴民, 宋建

(杭州和利时自动化有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要 随着工业 4.0 和智能制造的深入发展, 电气自动化控制系统作为工业现场的核心神经中枢, 其可靠性直接关系到生产安全、效率与经济效益。传统基于定期维护和被动响应的可靠性保障模式已难以应对现代工业系统高度复杂化、强耦合性与动态不确定性的挑战。本文针对工业现场电气自动化控制系统可靠性瓶颈, 提出一种融合数据驱动的预测性维护与边缘计算的新型优化策略。该策略通过在工业现场部署边缘计算节点, 对关键设备(PLC、变频器、伺服驱动器)的运行数据进行实时采集、特征提取与本地化分析, 结合基于长短期记忆网络(LSTM)的故障预测模型, 实现从“事后维修”到“视情维修”的范式转变。本文以某汽车制造厂焊装车间控制系统为应用实例, 通过对比优化前后六个月的运行数据, 论证了该策略在降低非计划停机时间、提高平均无故障时间(MTBF)以及减少维护成本方面的显著效果。研究结果表明, 该融合策略能有效提升工业现场电气自动化控制系统的动态可靠性与运维智能化水平, 为构建高韧性工业控制系统提供了新的技术路径。

关键词 电气自动化控制系统; 可靠性优化; 预测性维护; 边缘计算

中图分类号: TP273; TP393.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.012

0 引言

电气自动化控制系统是现代工业生产的核心组成部分, 其可靠性直接决定了生产线的连续性与产品质量的稳定性。随着工业系统向大规模、复杂化、集成化方向发展, 传统的电气控制系统(基于 PLC、DCS 的控制系统)面临着前所未有的挑战, 设备老化、环境干扰、多源耦合故障等导致系统失效模式日趋复杂。传统的可靠性保障方法主要依赖定期检修和故障后修复, 这种“定时维修”策略存在明显的过度维修或维修不足的问题, 不仅维护成本高昂, 且难以有效预防随机性故障, 导致非计划停机事件频发, 给企业带来巨大的经济损失。近年来, 随着工业物联网、大数据分析和人工智能技术的兴起, 为工业控制系统的可靠性优化提供了新的思路。其中, 预测性维护(Predictive Maintenance, PdM)被视为提升设备可靠性的关键技术, 它通过实时监测设备状态, 预测故障发生的时间点, 从而实现按需维护。然而, 将预测性维护应用于工业现场的电气控制系统时, 面临两大核心挑战: 一是工业现场海量数据实时传输至云端进行分析存在延迟和带宽瓶颈; 二是控制系统的实时性和确定性要求极高, 任何分析决策的延迟都可能影响系统稳定性。

1 工业现场电气自动化控制系统可靠性现状与挑战

1.1 系统复杂性与故障模式多元化

现代工业现场的电气自动化控制系统通常由传感器、PLC、PAC 等设备、执行器、通信网络、人机界面组成, 属于复杂的异构系统。根据某汽车制造企业近 3 年的故障统计数据(数据来源: 企业内部设备管理系统)可以看出, 该焊装车间的自动化控制系统的故障模式呈现多元化特点, 其中与控制器硬件相关的故障 19.5%, 与执行器相关的故障 34.2%, 与通信网络相关的故障 26.1%, 与传感器及其外围设备相关的故障 20.2%; 其中复合型故障由 2020 年的 8.7% 上升到 2022 年的 15.3%, 系统的耦合度越高, 系统传播和扩散的风险越大。因此, 多元化的故障模式导致传统的基于单一阈值或简单逻辑的故障诊断方法无法快速发现故障的前期信息^[1]。

1.2 传统可靠性保障方法的局限性

目前工业现场主流可靠性保障方法仍是“定期维护”和“事后维修”。定期维护是根据设备制造商的建议或经验来制定维护周期, 存在三方面的局限性: 第一, 对于工况良好、状态健康的设备, 过度维护造成备件和人力资源的浪费; 第二, 对于因环境或负载波动而

作者简介: 神兴民(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气自动化。

老化的设备, 定期维护的保障措施缺陷较为明显; 第三, 对于因为外界环境(高温、粉尘)或负载较大导致设备老化过快的设备, 已有的维护周期不足以提前对其进行识别从而引发突发性故障。例如: 某化工厂 DCS 控制系统, 其 I/O 模块的 MTBF 值为 50 000 小时, 但是在实际运行过程中, 由于存在现场腐蚀性气体, 导致某些模块实际 mtBF 仅为 30 000 小时左右, 远小于理论值^[2]。

1.3 数据孤岛与实时性瓶颈

目前控制系统均具有数据采集功能, 但是有很多数据只能被就地显示或存档, 是“数据孤岛”。它们中蕴含的关于设备老化、工况变化、干扰模式等信息没有得到充分利用。此外, 若将所有原始数据上传到云端分析, 既占用网络带宽, 又会产生不可控延迟。对于电气控制系统而言, 许多故障演化速度相当迅速, 从已有的征兆到功能失效只持续几秒至数十秒的时间, 云端分析模式所产生的延迟无法满足实时响应需求, 因此基于云的分析仅能应用于离线趋势分析, 无法直接应用于实时控制与保护的实践。

2 基于数据驱动的预测性维护与边缘计算融合优化策略

2.1 边缘计算赋能的现场级实时数据处理架构

为了克服传统架构中数据传输时延过长和实时性低的不足, 首先是建立“云-边-端”的协同架构。其中, “端”是指现场的各个设备, 用于数据收集和基础控制; “边”是工业现场的机柜或产线旁设置的边缘计算网关或边缘服务器, 用于算力、存储和网络的处理。边缘节点随时浏览端设备的运行数据, 包括 PLC 的 CPU 负载率、变频器的输出电流谐波含量、伺服电机的温升速率、通信网络的数据包重传率等, 同时在本地完成数据清洗、时间戳对齐和特征工程等工作。云端对于数据的处理延迟从秒级下降到毫秒级。实测数据显示, 边缘处理一个完整数据包的平均延迟为 15 ms, 而云端往返延迟平均为 280 ms。并且边缘只需把提取到的特征和异常事件上传至云端即可, 数据量压缩比可达 100:1, 缓解了网络带宽的压力^[3]。

2.2 基于 LSTM 的故障预测模型构建与轻量化部署

在数据处理的基础上, 其核心在于建立精确的故障预测模型。基于工业现场运行数据的典型时间序列特征, 以 LSTM 为预测模型, LSTM 具有特殊的门控结构, 能够有效捕捉时间序列中的长期依赖关系, 克服

传统 RNN 的梯度消失问题。模型构建过程分为两步:

(1) 云端模型训练: 利用历史运行数据和故障记录, 在云端构建 LSTM 预测模型。输入特征包括从边缘节点上传的关键状态变量, 输出为设备健康指数(Health Indicator, HI)或剩余使用寿命(Remaining Useful Life, RUL)。训练目标是最小化预测 HI 与实际状态之间的均方误差; (2) 边缘模型轻量化部署: 为适应边缘节点有限的计算资源, 对训练好的 LSTM 模型进行剪枝和量化处理。剪枝操作移除冗余的神经元连接, 量化则将浮点参数转换为 8 位整数, 从而将模型大小压缩 60% 以上, 推理速度提升 3 倍~5 倍, 同时预测精度损失控制在 2% 以内^[4]。轻量化后的模型部署于边缘节点, 实现对关键设备的实时健康状态评估。

2.3 基于健康状态的动态维护决策机制

获取设备的健康状态后, 需要采用联动的动态维护决策来替代固定周期的维护, 该维护策略基于风险矩阵模型, 将设备的健康状态按照 HI 和 HI 的退化速度(HI 的一阶导数)进行划分。设备的健康状态分为一般状态, 即健康、亚健康、预警、失效临界。设备进入一般状态时, 设备工作正常, 按日常巡检即可; 设备进入亚健康状态时, HI 开始慢慢下降但仍然在可接受范围内, 此时边缘节点发出“关注”警报, 云端系统自动调整监测频率, 安排一次离线精密点检以收集更多数据以研判趋势; 设备进入预警状态时, HI 迅速降低或者已经低于预设阈值($HI < 0.8$), 退化速度加快, 系统自动生成维护工单, 确定故障部件、预计失效时间窗口(“预计 7 天~14 天后将达到失效阈值”)及建议维护窗口, 联系生产调度系统, 将维护计划与生产空隙(换班, 型号切换)匹配, 实现“视情维修”。

3 应用案例与效果分析

3.1 应用场景与实施

为验证上述优化策略的实际效果, 以某汽车制造厂焊装车间为例。该厂共有 8 条自动化焊接生产线, 设备 200 余台机器人, 300 多套伺服驱动器、50 余套 PLC 控制系统和 Profinet 网络, 改造前该车间由月定期维护, 平均每月停机 4.2 次, 每次停机时间 65 分钟, 严重影响生产进度。在该车间逐步使用本文提出的融合优化策略, 步骤如下: 在每条生产线的控制柜部署一台边缘计算网关, 并接入 PLC、驱动器、机器人控制器和网络交换机诊断数据。在工厂数据中心部署云端管理平台, 用于模型训练、数据聚合和可视化展示。

对伺服驱动器（故障高发设备）构建 LSTM 预测模型，输入特征为输出电流谐波畸变率，IGBT 模块温度，母线电压波动幅度和风扇转速，输出为健康指数。建立动态维护决策机制，并集成到现有制造执行系统 Mes 中，实现维护工单的自动派发^[5]。

3.2 数据对比与分析

经过 6 个月的运行，对 2023 年 1 月—6 月与 2022 年同期（优化前）的数据进行对比分析（见表 1）。数

表 1 优化前后关键指标对比

指标	优化前（2022 年 1 月—6 月）	优化后（2023 年 1 月—6 月）	变化率
非计划停机次数	25 次	12 次	-52.0%
平均单次停机时间	65 分钟	48 分钟	-26.2%
总非计划停机时间	1 625 分钟	576 分钟	-64.6%
平均无故障时间（MTBF）	172.8 小时	232.8 小时	+34.7%
维护相关成本（万元）	98.2 万元	70.1 万元	-28.6%
关键设备（伺服驱动器）	4 次	1 次	-75.0%

172.8 小时提升至 232.8 小时，提升了 34.7%，表明系统整体可靠性得到显著增强。维护成本下降 28.6%，主要源于备件更换从“定期”转为“按需”，减少了不必要的备件消耗和过度维修的人力成本^[6]。

3.3 策略优势与创新性总结

该案例数据表明融合优化策略的有效性，优势及创新点主要在于实现了由被动响应到主动预测的可靠性保障范式，数据驱动预测将故障模式从事后发现向事前预知转变。构建“云—边—端”协同架构，有效解决工业现场数据实时处理与决策响应的问题，边缘计算保障了毫秒级故障预警能力，实现了控制系统高实时性；决策机制基于健康指数的动态维护决策模型投放优质维护资源，改变了定期维护的盲目性，提升了维护效率与经济性，形成了数据采集到边缘分析到云端建模再回传策略优化的数据闭环，可靠性优化策略能够不断迭代、不断提升，为工业现场电气自动化控制系统的智能运维提供了可复制、可拓展的技术路径。

4 结束语

本文针对工业现场电气自动化控制系统可靠性难题，设计并验证了融合数据驱动的预测性维护与边缘计算的优化策略。通过构建“云—边—端”协同架构，部署轻量化 LSTM 故障预测模型，并建立基于健康状态

数据来源为工厂 MES 系统、维护管理系统（CMMS）以及新增的边缘计算平台日志。关键指标对比如表 1 所示。

分析表 1 可知，优化后非计划停机总时间下降了 64.6%，其中因伺服驱动器和通信网络问题导致的停机大幅减少。通过边缘计算平台的预警记录发现，有 8 次潜在的伺服驱动器故障在演变为实际停机前被成功预警，维护人员得以在工间休息或换班时间完成预防性更换或维修，将损失降到了最低。MTBF 从优化前的

的动态维护决策机制，实现被动式、固定周期维护向主动式、视情维护的转变。在某汽车焊装车间的实际应用中，该策略显著降低了非计划停机时间，提升了 MTBF，并有效控制了维护成本。研究结果表明，该融合策略为提升工业现场电气自动化控制系统的动态可靠性与智能化运维水平提供了切实可行的技术路径。

参考文献：

- [1] 王斌. 工业电气自动化控制系统的优化设计与实现策略 [J]. 数字化用户, 2025(48):82-84.
- [2] 冯晓东. 煤矿电气自动化控制系统的优化设计研究 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(24):7-9.
- [3] 聂海勇. 电气自动化控制系统的设计与优化研究 [J]. 漫科学 (科技应用), 2025(03):34-36.
- [4] 袁金城. 电气自动化控制系统的可靠性分析与优化 [J]. 建筑设计与研究, 2024, 05(10):40-42.
- [5] 林树镇. 基于 PLC 技术的电气自动化控制优化系统设计 [J]. 数码设计 (电子版), 2024(02):7-9.
- [6] 莫佳俊. 电气自动化控制系统在工业生产管理中的优化应用分析 [J]. 中国设备工程, 2026(01):45-47.

道路桥梁施工中的旋挖桩施工技术

潘 矩

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 本文重点关注道路桥梁施工中的旋挖桩施工技术, 以 S18 宁合高速公路合肥段路基 01 标项目作为实际案例开展研究。阐述旋挖桩施工技术以及其在道路桥梁工程当中的应用优势, 分析该工程中旋挖桩的施工条件。详细介绍旋挖桩施工技术在该工程实例中的具体应用情况, 涵盖施工准备、具体施工细节、后期运维管理以及应用效果等方面。同时提出提升旋挖桩施工质量的技术措施, 如依据现场条件合理选用施工技术、重视现场勘探以准确掌握施工条件等。本文旨在为促进道路桥梁施工中旋挖桩技术的应用提供参考, 进而提高施工质量和工程稳定性。

关键词 道路桥梁施工; 旋挖桩施工技术; 地质勘查; 定位测量; 钻孔施工

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.013

0 引言

道路桥梁建设属于交通基础设施的重要组成部分, 其质量直接和交通的安全与顺畅相关联。在道路桥梁施工过程中, 桩基础施工属于关键环节, 对工程的整体稳定性以及承载能力起到决定性作用。旋挖桩施工技术作为一种较为先进的桩基础施工方法, 具备施工效率高、成孔质量好、适应性强等诸多优点, 在道路桥梁工程当中获得了广泛应用。S18 宁合高速公路合肥段路基 01 标项目作为安徽省重要的交通建设项目, 其建设对加强区域互联互通、构建交通一体化格局有着重要意义。在该项目中合理运用旋挖桩施工技术, 对保障工程质量、提高施工效率具有关键作用。

1 旋挖桩施工技术及其应用优势

1.1 旋挖桩施工技术的概述

旋挖桩施工技术是借助旋挖钻机开展桩基础施工的一种方式。旋挖钻机依靠动力头驱动钻杆与钻头进行旋转, 促使钻头切入土层或者岩层, 与此同时利用卷扬机提升钻杆和钻头, 将钻渣排出孔外, 如此不断反复循环, 直至达到设计规定的孔深。此技术能够依据不同的地质条件来挑选不同类型的钻头, 如螺旋钻头、筒式钻头等, 从而适应不同的施工要求^[1]。在施工进程中, 旋挖钻机具备自动化程度高、移动灵活等特性, 能够迅速完成桩孔的施工。

1.2 旋挖桩施工技术的应用优势

旋挖桩施工技术具备多方面的应用优势。在施工效率层面, 旋挖钻机成孔速度较快, 与传统的冲击钻

等施工方法相比, 能够大幅缩短施工工期。在成孔质量方面, 旋挖桩孔壁较为光滑, 垂直度较高, 可有效减少桩身混凝土的充盈系数, 进而提高桩的承载能力。此技术适应性较强, 能够在多种地质条件下开展施工, 其中包括黏土、砂土、卵石层等。旋挖桩施工过程中产生的噪声和振动较小, 对周边环境的影响也较小, 符合绿色施工的相关要求。

2 道路桥梁工程中旋挖桩施工条件

在道路桥梁工程中运用旋挖桩施工技术, 需要满足特定的施工条件。地质条件属于关键因素之一, 不同的地质状况对旋挖桩的施工工艺以及设备选择存在不同要求。例如: 在软土地基当中, 需要考虑桩的沉降与稳定性问题, 采取加固措施; 在岩石地层中, 需要选择适宜的钻头和钻进参数。施工现场的环境条件同样会对施工产生影响, 如场地平整度、地下水位高低等。施工设备的性能和质量、施工人员的技能水平等, 也是保障旋挖桩施工能够顺利开展的重要条件^[2]。

3 旋挖桩施工技术在工程实例中的应用

3.1 工程概况

S18 宁合高速公路合肥段路基 01 标项目的起点桩号 K55+202.229 处在合肥市巢湖市烔炀镇西南侧, 在此处与 S90 肥东支线、S09 明合高速交叉, 项目终点止在 K65+772.5 并连接跨淮南铁路大桥。该项目全长为 10.57 km, 涵盖了路基和桥梁工程, 其中桥梁工程所占比例达 66.77%, 重难点工程包含烔炀枢纽跨线桥、烔炀河特大桥等。此项目采用双向六车道的高速公路

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

设计标准,设计时速为120 km/h,对桩基础的承载能力和稳定性有着较高要求。

3.2 施工准备

1. 地质勘查。在工程施工开始前,针对项目所在区域开展全面且详细的地质勘查工作十分必要。借助钻探、物探等专业方法,深入了解地层结构、岩土性质以及地下水位等具体情况。在S18宁合高速公路合肥段路基01标项目当中,地质勘察结果显示部分区域存在软土层和卵石层,这为后续旋挖桩施工工艺的合理选择以及设备的科学配置提供了关键依据。

2. 技术准备。组织施工人员开展旋挖桩施工相关技术规范与操作规程的学习活动,使其熟悉施工图纸以及设计要求。依据地质勘察结果和工程特点,制定详尽的施工方案和质量控制措施。对施工人员进行技术交底工作,以确保每一位施工人员都明确自身职责和施工要求。

3. 施工工序的优化。结合工程实际状况,对旋挖桩施工工序予以优化,合理规划施工顺序,避免不同工序间产生相互干扰。例如:在桥梁桩基施工时,可优先施工靠近既有道路或建筑物的桩基,以此减少施工对周边环境所造成的影响,优化钻进参数,提升施工效率与成孔质量。

4. 定位测量。依据设计图纸以及现场控制点,运用全站仪等测量仪器开展桩位的定位测量工作。在测量过程中,需严格监控测量精度,以此确保桩位的准确性。测量结束后,设置清晰明显的桩位标志,并进行复核操作,从而防止桩位出现偏差^[3]。

3.3 旋挖桩施工技术的具体细节

1. 测量与定位。测量与定位作为旋挖桩施工的首要步骤,其精准程度直接影响后续施工进度与桩体质量。在施工现场构建精确的测量控制网是开展工作的基础,需依据现场实际状况,合理选取极坐标法或直角坐标法来进行桩位放样。在放样过程中,施工误差和测量仪器精度是需要重点考量的因素,必须进行严格监控,从而确保桩位偏差处在规范允许的范围内,否则将会导致桩位出现偏移,进而影响桩的承载力以及整体结构的稳定性。定位工作完成后,对桩位采取有效的保护措施极为重要,如设置明显的标识、进行围护等,以此防止在后续施工环节,诸如场地平整、材料堆放、机械行走等过程中桩位遭到破坏。一旦桩位被破坏,重新进行定位不仅会耗费时间和人力,还可能因二次定位不准确而引发一系列质量问题,所以做好桩位保护是保障施工质量的重要前提。

2. 护筒的埋设。护筒在旋挖桩施工当中起着重要作用,具备固定桩位、保护孔口以及防止塌孔等多项功能。根据桩径大小与地质条件,需精心挑选适配规格的护筒,通常采用钢板制作,其强度与耐用性可满足施工要求。在埋设护筒时,需先在桩位处挖掘直径比护筒稍大的坑,从而为护筒放置提供空间。将护筒垂直放入坑中是极为关键的操作,若护筒出现倾斜状况,将会导致桩位产生偏差,进而影响桩的垂直度。通过用黏土进行分层回填并夯实,能够确保护筒的稳定性与垂直度,防止在后续钻孔过程中护筒出现移位或倾斜现象。护筒顶面高出地面一定高度,可有效阻挡地面水流入孔内,避免孔内泥浆性能发生改变,进而引发塌孔等问题,为钻孔施工营造良好条件^[4]。

3. 钻孔施工。钻孔施工作为旋挖桩施工的核心环节,其质量会直接对桩的成孔质量产生决定性影响。依据不同的地质条件来挑选适宜的钻头以及钻进参数是十分关键的。在软土地层当中,螺旋钻头相对比较适合,采用较低的转速与较大的扭矩进行钻进,能够避免因转速过快而致使土体扰动过大,进而引发孔壁坍塌的情况。而在岩石地层中,筒式钻头能够更好地破碎岩石,有助于提高钻进的速度和效率。在钻进过程中,密切观察钻机的运行状态以及钻渣情况是不可或缺的,通过钻渣能够判断地层的变化,从而及时对钻进参数作出调整。要严格控制钻进速度,若钻进速度过快,孔壁土体来不及形成有效的护壁,容易导致孔壁不稳定,出现缩径、塌孔等问题,对桩的质量以及施工进度造成影响。

4. 清孔。清孔作为旋挖桩施工中确保桩底质量的关键工序,其主要目的在于清除孔底的钻渣与泥浆,从而保证桩底沉渣厚度能够符合设计要求。倘若桩底沉渣过厚,便会降低桩端承载力,进而影响桩的整体稳定性。采用换浆法与掏渣法相结合的方式可以取得较好的清孔效果。当钻进至设计孔深后,需将钻头提出孔外,并向孔内注入清水或者泥浆,通过循环换浆的操作,利用泥浆的流动将孔底钻渣带出孔外。仅仅依靠换浆法或许无法彻底清除孔底沉渣,在这种情况下使用掏渣筒等工具进行进一步清理,能够有效确保孔底清洁。清孔工作完成以后,需要及时检测沉渣厚度,若检测结果不符合要求,则需再次进行清孔,直至满足设计标准,进而为后续混凝土灌注创造良好条件。

5. 钢筋笼吊装与声测管的安装。钢筋笼作为桩身的关键组成部分,其制作与吊装质量对桩的承载能力起到决定性作用。钢筋笼在加工场进行统一制作,在

制作过程中,需严格依照设计要求监控钢筋的间距、直径以及焊接质量。若钢筋间距不均匀,将会影响钢筋笼的整体受力性能,若直径偏差过大且焊接质量不佳,则会降低钢筋笼的强度。在吊装时,需采用起重机配合专业吊具,以此确保钢筋笼能够垂直下放,避免碰撞孔壁。碰撞孔壁可能会致使孔壁土体脱落,进而影响桩的成孔质量,还可能使钢筋笼变形,从而影响桩的承载能力。声测管通常随钢筋笼一同安装,其作用是检测桩身混凝土的完整性。安装时要确保其垂直度和密封性,防止在混凝土浇筑时声测管变形或漏浆,以免影响后续检测结果的准确性。

6. 灌注桩混凝土施工。灌注桩混凝土施工作为旋挖桩施工的最后一道关键工序,其质量会直接对桩的强度与耐久性产生影响。在进行混凝土浇筑前,需仔细检查孔底沉渣厚度是否符合设计要求,若沉渣过厚,则需再次开展清孔工作,要检查钢筋笼和声测管的安装位置是否正确,防止因位置偏差对桩的受力性能和检测结果造成影响。采用导管法灌注混凝土时,导管应具备良好的密封性和足够的强度,以防止在混凝土灌注过程中出现漏浆现象,进而导致桩身混凝土不密实。在灌注过程中,要控制好混凝土的灌注速度和高度,确保实现连续灌注,避免出现断桩等严重质量问题。

3.4 后期的运维管理

旋挖桩施工结束后,后期的运维管理对保障桩的使用寿命以及工程质量极为关键。需定期针对桩开展检测工作,其中涵盖桩身完整性检测与承载能力检测等项目。借助无损检测方法,如低应变动力试桩法、声波透射法等,检测桩身是否存在缺陷状况。针对承载能力检测,可运用静载试验等方式,以此确保桩的承载能力能够满足设计要求。要强化对桩周边环境的监测,防止因周边环境出现变化而致使桩受到损坏。

4 提高旋挖桩施工质量的技术措施

4.1 立足现场条件,合理选用施工技术

旋挖桩施工质量受现场条件的影响十分显著,合理选用施工技术是确保施工质量的关键所在。不同的地质条件与场地环境,对施工技术的要求存在较大差异。在软土地基进行施工时,由于软土具有强度低、压缩性高的特点,直接成桩容易导致桩体下沉以及承载力不足的问题^[5]。此时可以采用预钻孔的方法,先钻出合适的孔径与深度,然后再灌注混凝土成桩,以此增强桩与土体间的摩擦力,也可以采用注浆加固的方式,向土体注入水泥浆等固化剂,提高土体的强度与稳定性,进而提升桩的承载能力。在岩石地层施工时,

由于岩石硬度较大,普通钻头容易损坏,需要选用耐磨、抗冲击的合金钻头,并且要根据岩石硬度调整钻进速度,对在硬岩要缓慢钻进,对在软岩则可以适当加快钻进速度,避免钻头过度磨损,从而保障施工效率与质量。

4.2 注重现场勘探,准确掌握施工条件

现场勘探作为旋挖桩施工前期不可或缺的重要环节,对保障施工质量具有重大意义。进行详细的地质勘查能够明确施工现场的土层分布状况、岩石具体性质以及地质构造等相关情况,开展环境调查则可以了解地下水位高低、周边建筑物分布情形以及基础形式等方面的信息。依据所获取的这些信息来制定施工方案,能够切实增强方案的针对性。例如:在地下水位较高的区域开展施工时,倘若不采取相应措施,成孔过程中孔内水压力与外部土压力就会失衡,极易引发孔壁塌方现象,进而影响桩身质量以及施工安全。通过勘探提前了解到该情况后,可采取诸如设置井点降水等降水措施,以此降低地下水位,确保孔壁保持稳定状态。

5 结束语

旋挖桩施工技术在道路桥梁工程中具有重要的应用价值。通过对 S18 宁合高速公路合肥段路基 01 标项目开展研究能够了解到,合理运用旋挖桩施工技术,并且结合科学的施工准备工作、精细的施工过程管控以及有效的后期运维管理,能够提升施工效率、确保成孔质量、增强桩的承载能力。采取立足于现场实际条件合理选用施工技术、注重现场勘探作业以准确掌握施工条件等措施,可进一步提高旋挖桩施工的质量。在道路桥梁建设工作中,应当充分重视旋挖桩施工技术的应用,持续总结相关经验,提升施工水平,从而为保障工程质量奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 李春林.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术[J].四川建材,2023,49(07):172-174.
- [2] 董海峰,沈艳玲.试论干成孔旋挖桩施工技术在市政道路桥梁工程中的应用[J].低碳世界,2016(01):140-141.
- [3] 李高举.干成孔旋挖桩施工技术在桥梁工程中的应用[J].四川建材,2020,46(09):128-129.
- [4] 顾正平,徐波,岳大昌,等.卵石地层旋挖钻孔先注浆扩底灌注桩施工技术[J].四川水泥,2026(04):113-115.
- [5] 张徐.旋挖钻孔灌注桩施工工艺研究[J].城市建设理论(电子版),2026(06):139-141.

山区高陡边坡缆索吊装施工技术研究

虞 朗

(四川路桥华东建设有限责任公司, 四川 成都 610200)

摘 要 随着我国交通基础设施建设的重心向西部山区转移, 高速公路、铁路、水利水电等工程不可避免地需要穿越地形复杂、地势险峻的高陡边坡区域。在此类环境下, 传统的大型起重设备因受地形限制难以进场作业, 而修筑临时施工便道不仅成本高昂, 且对原始山体破坏严重, 极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害。缆索吊装技术作为一种成熟的空中运输与吊装手段, 凭借其跨越能力强、地形适应性强、对地表扰动小等独特优势, 成为解决山区高陡边坡施工难题的关键技术。本文针对山区高陡边坡缆索吊装的难点以及山区高陡边坡缆索吊装施工技术的应用价值进行了分析, 探究了山区高陡边坡缆索吊装施工技术应用策略, 以期为相关人员提供参考。

关键词 山区高陡边坡; 缆索吊装; 地形约束; 动态稳定性; 智能化控制

中图分类号: U445.46

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.014

0 引言

我国山区面积广阔, 随着交通、水利等基础设施建设向西部纵深推进, 工程活动不可避免地遭遇高陡边坡这一复杂地形。高陡边坡通常具有地形陡峭、临空面高、场地狭小、地质条件复杂等特征, 传统施工模式依赖修筑便道、开辟平台供大型起重设备作业, 不仅成本高昂、周期漫长, 更因大挖大填而极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害, 对生态环境造成严重破坏。而缆索吊装技术利用架设于空中的承载索构建“点对点”的运输通道, 可实现重物跨越深谷、陡崖的水平和垂直运输, 对地形适应性强、对地表扰动小, 是解决山区高陡边坡施工难题的有效手段。然而, 在该极端环境下应用缆索吊装技术, 面临着索塔与锚碇布设困难、动态荷载下边坡稳定性控制复杂等严峻挑战。为了最大限度发挥出山区高陡边坡缆索吊装施工技术的优点, 需要针对该技术的具体应用进行深入研究分析。

1 山区高陡边坡缆索吊装的难点

1.1 地形地质与设备布设的冲突

山区高陡边坡最明显、最本质的特征是其极端的地形条件, 一般由地壳抬升与河流强烈下切共同作用形成, 其典型地貌表现为“V”形深切河谷、悬崖峭壁、基岩大面积裸露, 可供建设使用的场地极其稀缺。因此, 山区高陡边坡与缆索吊装系统对场地的基本要求存在

直接而尖锐的冲突: 索塔基座的选址极其困难。理想的索塔位置应选在地质条件良好、地形相对平缓的台地上, 但山区高陡边坡恰恰缺乏这类天然条件^[1]。故而实践中索塔常被迫直接立于陡峭的坡面或悬崖边缘。

在此条件下进行基础开挖, 本身就是高风险作业, 由于开挖作业在近于垂直的坡面上进行, 施工人员高空作业时的安全防护极其困难, 机械设备的悬空作业也极难控制。同时, 大规模开挖必然打破原有山体的应力平衡, 尤其在岩体节理裂隙发育、风化程度极高的地段, 开挖扰动极有可能诱发坡面局部崩塌乃至整体滑坡。更严重的是, 索塔基础的承载力、抗倾覆能力、抗滑移能力都处在极大的考验之下, 设计中稍有不慎, 塔架在使用过程中就可能发生沉降、倾斜, 甚至彻底倒塌。

1.2 高动态荷载下的结构稳定性控制

吊装作业过程中产生的动态荷载与边坡及缆索系统的相互作用, 构成了一个复杂的动态难题。山区高陡边坡的缆索吊装, 其荷载工况远比平原地区复杂, 对结构稳定性的控制提出了更高要求^[2]。

1.2.1 缆索系统的受力状态极为复杂

在陡峭地形中, 两岸索塔通常存在巨大的高差, 这直接导致承载索的垂度呈现非线性变化。当跑车从高岸向低岸移动时, 承载索的受力状态和空间位置时刻都在变化, 由此产生的水平分力、垂直分力以及侧

作者简介: 虞朗 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路与桥梁隧道施工。

向分力相互耦合,使得整个索系处于一种动态的平衡之中。与此同时,山区峡谷往往是风能集中的区域,瞬时风速高、风向紊乱,缆索系统作为典型的风敏感结构,在风荷载作用下极易产生振动。起吊瞬间的冲击荷载以及吊装过程中因加速度变化产生的惯性力,都会进一步加剧缆索系统的受力波动。这种复杂的动态受力状态,对缆索系统的设计裕度、钢丝绳的疲劳寿命、卷扬机的同步性以及各连接节点的可靠性都提出了极高的要求。

1.2.2 吊装就位的精准度控制难度极大

高陡边坡环境下的吊装作业,其目标构件往往需要安装在边坡本体之上或紧邻边坡的结构物上。由于缆索吊装属于高空无依托作业,且受高差大、跨度大、风荷载复杂等因素的影响,被吊重物在起升、横移、下放过程中极易产生大幅度的摆动。这种“摆幅”现象是缆索吊装中的固有难题,在山区峡谷大风环境中尤为剧烈。重物的摆动不仅会影响就位效率,更严重的是,稍有不慎,摆动中的重物就会与陡峭的山体岩面或已经安装好的结构发生剧烈碰撞,造成构件损坏、山体落石甚至安全事故。在狭窄的作业空间内,如何实现重物的“毫米级”精准对位,是对操控技术、设备性能和人员素质的综合考验。

2 山区高陡边坡缆索吊装施工技术的应用价值

2.1 突破地理屏障,实现“跨越式”运输

山区高陡边坡环境中缆索吊装技术最突出、最重要的应用价值是它提供了真正能突破地理屏障限制的“跨越式”运输方案,因此其价值绝不只是技术可行性的证明,更是对整个工程建设模式的根本性革新。在缆索吊装技术出现以前,山区深谷、陡崖上的结构物施工都采用“迂回抵达”的传统思路,往往是先修建足够长的临时施工便道,以“之”字形或螺旋形从山脚蜿蜒向上到达施工高程,再在结构物附近开辟足够面积的平台,让汽车吊、履带吊等常规起重设备进场作业。然而,此种模式有十分明确而重大的局限性,在高陡边坡上修筑施工便道本身就是极其困难、风险极大的工程,必然要进行大量土石方开挖,修建高填方路基,实施复杂的边坡防护工程,故其工程造价常远超主体结构本身,工期也极长。更重要的是,受地形条件严格限制,即使耗费巨资修建便道,也很难将大型起重设备运达所有需要作业的点位,尤其是悬崖绝壁之处,传统起重设备根本无处安放^[3]。

2.2 保护生态环境,减少工程创面

工程建设与环境保护协调统一已经明确成为不可逾越的红线,而生态环境本就极其脆弱的山区,要在完成建设任务的同时最大限度地保护原始地貌、自然生态,这也成为评价一项技术先进性最直接、最有力的标尺。缆索吊装技术在保护生态环境方面有传统施工方法不可替代的生态价值。传统的“开山辟路、填筑平台”施工模式实质上是对山体进行大规模人为改造:修建施工便道必然要进行大量挖方、填方作业,因此既会彻底破坏地表植被,又会改变山坡原始地形,形成大面积的人工创面。暴雨来临时,该创面极易发生水土流失,进而诱发滑坡、泥石流等次生灾害,对下游河流生态、农田村庄都构成直接而重大的威胁。更严重的是,大型设备在坡面反复碾压作业,会对地表植被、土壤结构造成不可逆的伤害。传统模式可被概括为“先破坏、后治理”,而此种模式往往需要耗费巨量资金进行生态修复,且实际修复效果又极难达到预期。

缆索吊装技术在环境保护方面的优势不仅体现在减少开挖量上,更重要的是它从根本上改变了施工对山体的作用方式。索塔及锚固点的布设只需要在少数几个关键位置进行局部基础施工,施工扰动范围被严格限制在塔基周围很小的区域内,山坡上的绝大部分区域都不会受到施工活动的直接影响。缆索横跨峡谷时,吊装路径完全悬空,构件在空中移动不会与地面接触,自然也就不会对地表植被造成任何破坏。施工结束后,仅需对索塔基础及锚固点进行简单的场地恢复,就能让山体基本回归原始状态,山坡的自然植被可以在短时间内自行恢复生长,水土保持功能很快就能重建。

3 山区高陡边坡缆索吊装施工技术应用策略

3.1 基于BIM+GIS的“天地一体化”前期规划与锚固优化

山区高陡边坡缆索吊装的复杂性,决定了其成败在很大程度上取决于前期规划的质量。传统基于二维图纸和现场踏勘的规划方式,难以准确捕捉地形的三维空间特征和地质的隐蔽信息,极易导致决策失误。因此,必须引入先进的信息技术手段,构建“天地一体化”的规划与设计体系。

该策略结合地理信息系统与建筑信息模型技术:先用无人机倾斜摄影、三维激光扫描等测绘手段对施

工现场进行高精度地形数据采集,建立施工区域地形、地貌、植被、既有建构筑物等要素的三维实景模型;继而采用地理信息系统技术对区域内地质构造、岩层产状、节理裂隙发育程度、历史滑坡点等地质信息进行系统整合,形成完整的地质信息数据库^[4]。将相关数据导入建模平台,建立缆索吊装系统及施工环境的数字孪生体,开展索塔位置、锚碇选点的反复模拟优化。通过模拟承载索的空间线形、计算索塔受力及变形、分析不同选址方案对山体稳定性的影响,确定最优布设方案。优化原则为“避让优先”,即利用三维可视化手段对索塔基础、主锚碇等关键受力结构进行地质避让分析,主动避开地质勘察中所揭露的滑坡体、断层破碎带、软弱夹层等不良地质区域,优选基岩完整、承载力高的稳定地段。

3.2 实施“小分段、多索道、智能化”的吊装控制

高陡边坡环境下有限的作业场地,对吊装作业的组织方式提出了严峻挑战。传统采用单一大型缆索吊机、整体吊装大型构件的模式,往往需要宽阔的拼装和堆放场地,这在山区陡坡上是难以满足的。应当转变思路,采用“小分段、多索道、智能化”的综合控制策略。

“小分段”策略是将大型构件合理拆分成若干尺寸较小、重量较轻的“小分段”单元,在设计时就充分考虑山区运输及吊装的限制,将整体结构划分为可在工厂或山下平坦区域预制、又可由常规运输车辆直接运至缆索吊装起吊点的各单元。通过“化整为零”,既大大降低了对拼装场地的需求,也使单次吊装的起重吨位减小,缆索系统的荷载峰值相应降低,整个吊装系统的安全裕度得以提高。

“多索道”策略是根据工程规模及施工组织需要合理布置多条并行或交叉的工作索道,当单条索道不能满足工期要求,或者不同作业面彼此干扰时,布置多索道可以组织多工点、多构件的平行作业。同时,多索道协同作业能合理分散吊装任务,实现资源最优配置,施工效率显著提高。此外,多索道布置也增大了系统的冗余度,在某条索道发生故障时其他索道可承担应急任务^[5]。

“智能化”策略是提高吊装精准性、安全性的有效手段,传统缆索吊装主要依靠地面指挥人员的目测及手势来控制,受视线被遮挡、距离较远、天气不利等因素影响,其操控精度及反应速度都难以保证。智能化改造的思路是在缆索系统中嵌入各种智能感知设备:

在关键受力点布置高精度索力传感器,对承载索、牵引索、起重索的受力状况进行实时监测,跑车上安装全球定位系统(GPS)或北斗定位模块,精确确定其空间位置,吊钩及作业面附近布置高清摄像头,实现作业区域无死角视频监控,塔架及边坡重要部位布设风速仪、倾角仪、加速度计等环境及结构监测设备,所有监测数据都通过无线网络实时传送到中央集控室。集控室以可编程逻辑控制器(PLC)为自动控制系统的核心,操作人员无需亲赴现场嘈杂、危险的作业区域,可在安全舒适的室内,借助多屏联动的实时数据及视频画面远程操控卷扬机的启停及速度。而且,控制系统本身具有智能决策能力,出现索力异常、风速超限、重物摆幅过大等危险信号时,系统会自动报警,必要时自动执行紧急停机等安全保护动作,真正把事故隐患消灭于萌芽状态。与此同时,操作人员可从实时监测数据中调整吊装参数,优化起吊速度、横移轨迹、下放节奏,实现对吊装过程的精准控制,使构件安全、准确就位安装。

4 结束语

山区高陡边坡缆索吊装施工是一项集地形适应、结构控制与风险管控于一体的系统工程。研究表明,其核心难点在于地形地质条件与设备布设的天然冲突,以及高动态荷载下缆索系统与边坡稳定性之间的复杂耦合效应。该技术具有突破地理屏障与保护生态环境的双重应用价值,既实现了对深谷、陡崖的跨越式运输,又最大限度减少了对山体的扰动破坏。未来,随着智能传感与自动控制技术的发展,山区高陡边坡缆索吊装将向更加智能化、数字化的方向发展,为我国复杂山区重大工程建设提供更为坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张华贵.水利水电工程缆索吊装系统设计研究[J].科技视界,2025(33):80-83.
- [2] 凌鹏飞.缆索吊装大悬臂悬拼施工技术研究[J].大众科技,2025(04):47-50.
- [3] 翁浩,岳秀斌,陈小佳,李志峰,董必昌.缆索吊装施工新型组合锚碇在陡峭山区的应用[J].西部交通科技,2024(12):200-203.
- [4] 欧昌伟.缆索吊装悬拼安装在山区大跨钢箱梁桥梁中的应用[J].江西建材,2023(08):330-333.
- [5] 周咏凯.山区超大跨径拱桥缆索吊装系统设计研究[J].城市道桥与防洪,2023(08):228-231,22.

预应力混凝土连续梁桥施工技术要点分析

杨 烜

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘 要 预应力混凝土连续梁桥在施工过程中需经历多次体系转换, 成桥质量的稳定性直接取决于各阶段施工要点的精准把控。本文从支架预压与预拱度设置、预应力管道定位等关键环节入手, 系统梳理了预应力混凝土连续梁桥的核心施工技术要点, 旨在为帮助施工人员明确各环节的控制重心、强化施工过程的规范性与精准度提供参考, 进而提升预应力混凝土连续梁桥的结构耐久性与服役寿命。

关键词 预应力混凝土; 连续梁桥; 预应力管道; 混凝土浇筑; 预应力张拉

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.015

0 引言

预应力混凝土连续梁桥具有结构刚度大、行车平顺舒适等优点, 在桥梁建设中应用广泛。当前, 《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020) 明确提出了预应力混凝土连续梁桥施工质量的管控要求, 进一步规范了各环节施工的技术标准。本文结合桥梁工程实践梳理预应力混凝土连续梁关键施工技术要点, 以期为保证桥梁施工质量、延长桥梁使用寿命提供有益参考。

1 预应力混凝土连续梁桥的结构特点

预应力混凝土连续梁桥以超静定受力体系为基础, 利用预应力技术抵消混凝土拉应力, 具有刚度大、伸缩缝少等优点, 其施工质量直接关系到桥梁的承载安全, 而明确结构特点是掌握施工技术、把控施工关键环节的前提^[1]。其结构特点为: (1) 受力性能更优, 作为超静定结构, 荷载作用下支点产生负弯矩, 能够有效降低跨中正弯矩峰值, 使梁体截面受力更均匀; (2) 整体刚度大, 变形小, 行车平顺性好, 相较于多跨简支梁, 仅在两端设置伸缩缝, 大幅减少了伸缩装置的养护工作量, 降低了行车过程中的跳车问题; (3) 结构整体性好, 对地基不均匀沉降的适应能力更强, 使用寿命更长。

2 预应力混凝土连续梁桥施工技术要点

2.1 支架与模板系统

1. 地基处理与承载力要求。依据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020), 地基承载力特征值不宜低于 150 kPa。当天然地基承载力不足时, 可采用换

填、碾压等措施进行加固。换填材料需选用级配良好的砂砾, 换填厚度应依据地质条件确定, 一般为 50 cm ~ 80 cm, 压实度不应小于 95%。

2. 支架预压。支架搭设完毕后需进行预压, 预压荷载取梁体自重的 1.1 倍 ~ 1.2 倍, 采用分级加载方式。其中, 首次加载为预压荷载的 60%, 第二次为 80%, 第三次为 100%, 后续可按 10% 梯度进行补载, 直至达到设计要求预压荷载。每级加载完成后, 要按规范要求间隔时间监测支架沉降量, 待沉降稳定后方可进行下一级加载。

2.2 预应力管道安装

预应力管道的位置准确性直接决定预应力束能否按设计线形建立有效应力^[2]。管道偏位会改变预应力合力作用点, 引起附加弯矩, 严重时会在张拉阶段梁体开裂。因此, 需严格把控管道安装的定位精度。

1. 管道选型与定位。当前, 工程中预应力管道多采用波纹管, 依据预应力束的规格, 选择对应内径的管道, 保证预应力筋能够顺利穿入。管道安装时需借助定位钢筋固定, 定位钢筋需沿纵桥向, 按设计间距布设, 直线段间距 50 cm ~ 80 cm, 曲线段间距 30 cm ~ 40 cm, 以保证管道位置偏差符合标准要求, 防止管道出现凹折破损。其中, 管道坐标允许偏差执行《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020), 见表 1。

2. 接头密封。管道接长时要采用大一号的同类型管道作为接头套管, 套管长度为管道直径的 5 倍 ~ 7 倍, 且不小于 20 cm。接头两端必须用密封胶带包裹严密, 缠绕层数不少于 3 层, 防止水泥浆渗入管道造成堵塞。安装过程中还要做好管道防护, 避免电焊作业灼伤管

作者简介: 杨烜 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路建设施工管理。

道、外物戳破管壁，若发现管道存在破损需及时更换。同时，接头位置需避开锚垫板和梁体预留孔位^[3]。

表 1 预应力管道安装允许偏差

检查项目	允许偏差 (mm)
梁长方向坐标	±30
梁高方向坐标	±10
梁宽方向坐标	±10
同层管道间距	±10
上下层管道间距	±10

2.3 混凝土浇筑

混凝土浇筑质量直接影响梁体密实度和预应力管道的完整性。浇筑过程中需重点控制分层厚度、浇筑顺序和振捣工艺，避免冷缝、管道移位。

1. 分段分层浇筑。梁体混凝土要按底板、腹板、顶板顺序分层浇筑。每层浇筑厚度控制在 30 cm~50 cm。上层混凝土需在下层混凝土初凝前覆盖，相邻两层浇筑间隔时间不宜超过混凝土初凝时间。普通硅酸盐水泥混凝土的初凝时间一般为 2 小时~4 小时。超出初凝时间未覆盖，会形成冷缝，降低结构整体性。

2. 浇筑顺序。连续梁桥混凝土浇筑需左右对称进行。单幅梁体浇筑时，要从跨中向支点方向推进。悬臂施工时，各梁段应左右对称浇筑，两端混凝土重量差不超过该梁段自重的 30%。这是因为不对称浇筑会让 T 构两侧受力不均，产生附加弯矩。对于腹板与顶板的交接区域，需在腹板混凝土浇筑完成并初步沉实后，再开展顶板混凝土浇筑作业，避免腹板顶部因混凝土收缩出现开裂问题^[4]。浇筑过程中需安排专人同步检查支架沉降、模板位移情况，若发现异常变形需立即暂停浇筑，及时调整加固后方可恢复施工。

2.4 预应力张拉

预应力张拉是建立梁体预压应力的关键工序。张拉控制是否准确，直接影响结构受力状态。施工中需采用张拉力与伸长值双控措施，严格执行对称张拉顺序。

1. 标定张拉设备。标定周期不超过 6 个月，或单台设备张拉次数超过 200 次时重新标定。压力表精度不低于 1.0 级，表盘直径不小于 150 mm。标定后绘制压力表读数与张拉力关系曲线，现场按曲线查表确定油压值。

2. 张拉控制方式。采用双控法，以张拉力为主控指标，伸长值为校核指标。设计张拉力 (σ_{con}) 按图纸取值。实测伸长值与理论伸长值的偏差应控制在 ±6% 以内。超出该范围时，应停止张拉，查明原因并处理

后方可继续。其中，理论伸长值 ΔL 按下列公式计算：

$$\Delta L = \frac{P_p L}{A_p E_s} \quad (1)$$

式 (1) 中， ΔL 为理论伸长值 (mm)； P_p 是预应力筋平均张拉力 (N)； L 是预应力筋长度 (mm)； A_p 为预应力筋截面面积 (mm²)； E_s 即预应力筋弹性模量 (MPa，一般取 1.95×10^5 MPa)。

3. 张拉顺序与同步。张拉顺序需遵循先长束后短束的原则。同一梁段内的预应力束要保持左右对称。对于箱梁，要交替进行腹板束和顶板束。在张拉过程中，两端伸长值差值不应超过 10%。当差值超限时，要调整油泵供油速度，保持两端同步。

4. 超张拉工艺。为减少锚具变形和孔道摩阻引起的预应力损失，需采用超张拉工艺。超张拉应力取 $1.05 \sigma_{con}$ ，持荷时间不少于 5 分钟，然后回油至 $0.9 \sigma_{con}$ ，释放前期非弹性残余变形，再重新张拉至设计 σ_{con} 锚固。超张拉要在梁体混凝土强度达到设计值的 90% 以上后进行。每束预应力张拉完成后，要记录张拉日期、梁段编号等数据，以便于后续质量追溯核验。

2.5 孔道压浆

孔道压浆要在预应力张拉完成后 48 小时内完成，需采用真空辅助压浆工艺。压浆前，孔道内需清除积水及杂物。关闭所有排气阀，开启真空泵，抽出孔道内空气^[5]。当孔道真空度达到 -0.06 MPa ~ -0.08 MPa 时，保持真空稳定。接着进行压浆，其间要保持真空泵持续工作，直至浆体从另一端排气阀流出。当排气阀流出的浆体与注入端浆体稠度一致时，关闭排气阀。继续加压至 0.5 MPa ~ 0.7 MPa，稳压时间不少于 3 分钟。稳压结束后关闭注浆阀，拆除压浆管 (如图 1 所示)。

压浆完成后，需封锚，锚具外部多余的预应力筋需切割预留不小于 30 mm 的长度，然后浇筑封端混凝土。其中，封端混凝土强度需符合设计要求，表面需做好抹面养护，防止开裂。

2.6 悬臂浇筑

悬臂浇筑是大跨度预应力混凝土连续梁桥常用的施工方法。梁体从墩顶开始，向两侧逐段对称浇筑成型。

1. 挂篮设计与预压。挂篮是悬臂浇筑的主要施工设备，承担梁段混凝土自重、模板重量。挂篮重量与最重梁段重量的比值不宜大于 0.45。挂篮加工完成后，要进行预压试验。预压荷载取最大梁段自重的 1.2 倍，分级加载。分级荷载分别为最大荷载的 60%、80%、100%、120%，每级持荷时间不少于 30 分钟。预压的目的是消除挂篮的非弹性变形，并测定弹性变形量。

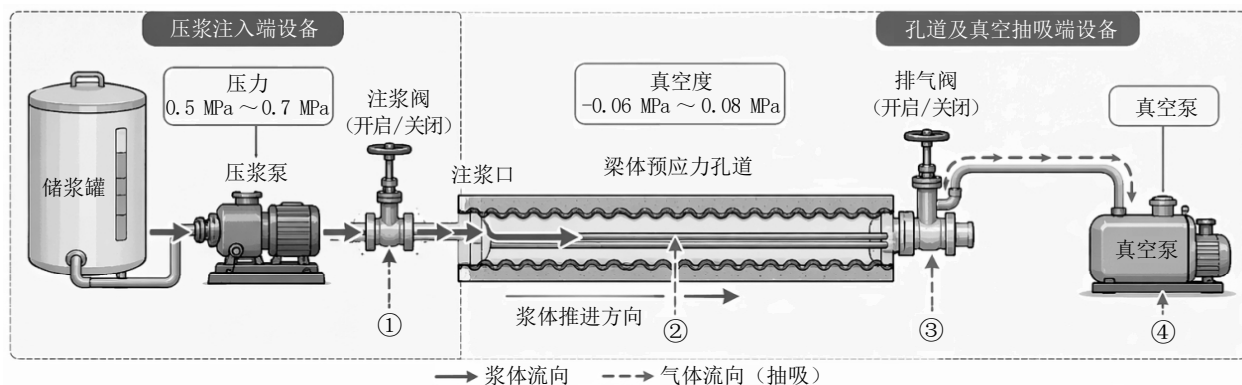


图 1 真空辅助压浆工艺流程示意图

2. 对称平衡浇筑。梁段浇筑要左右对称进行。两端悬臂同时浇筑混凝土，两端浇筑重量差不应超过该梁段自重的 30%。当两端重量差超限时，较重一侧会产生附加弯矩，轻侧可能出现上翘变形，影响结构稳定。浇筑顺序要底板、腹板、顶板分层进行，每层厚度 30 cm ~ 50 cm。若因混凝土供应等原因导致两端速度不同，要在轻侧加配重以保持平衡。

3. 线形监控。每节段浇筑后，需测量梁顶面高程和中线位置。测点布置在梁段前端和根部，每断面不少于 3 个点。测量时间选在温度稳定的时段，避开日照和温差影响。其在，立模标高按下式计算：

$$H_{\text{模}} = H_{\text{设计}} + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (2)$$

式 (2) 中： $H_{\text{模}}$ 是立模标高 (m)； $H_{\text{设计}}$ 为该截面设计成桥标高 (m)； f_1 是挂篮弹性变形量 (mm)，由预压试验测得； f_2 是梁段自重作用下挠度 (mm)，按设计或有限元计算； f_3 即预应力张拉引起的反拱 (mm)； f_4 是下一节段施工引起的本段挠度变化 (mm)。

每浇筑 3 个 ~ 5 个节段后，要对全线形进行复核。实测标高与理论标高偏差超过 ± 15 mm 时，需在后续节段调整。

2.7 合龙与体系转换

合龙段施工是悬臂浇筑连续梁桥的关键工序。合龙完成后，结构要转换为超静定的连续梁，内力发生重分布。

1. 合龙顺序。合龙顺序要按设计图纸执行，一般为先边跨、后中跨。其中，边跨合龙时，边跨现浇段与悬臂端连接，形成单侧连续。中跨合龙时，两侧悬臂端连接，全桥形成连续梁。

2. 临时锁定。合龙口两侧梁体在温度变化时会产生伸缩变形。若不锁定，合龙段混凝土在硬化过程中可能被拉裂。临时锁定的作用是连接两侧梁体刚性，抵抗温度变形。锁定装置由刚性支撑和临时预应力束

组成。其中，刚性支撑采用钢管，沿合龙口上下缘布置，每处支撑与两侧梁体预埋钢板焊接牢固。临时预应力束对称布置在箱梁腹板和顶底板位置。张拉临时束的应力一般为 $0.3\sigma_{\text{con}} \sim 0.5\sigma_{\text{con}}$ ，不注浆。

3. 合龙温度。合龙温度选择会直接影响合龙段混凝土的受力状态。合龙温度宜选择当天最低温度进行合龙，在设计合龙温度 ± 5 °C 范围内。温度确定后，要在该温度下完成临时锁定和混凝土浇筑。若施工期间气温持续高于设计合龙温度上限，应调整合龙时间，不得在高温时段强行合龙。

3 结束语

预应力混凝土连续梁桥施工涉及支架预压、管道定位等多个技术环节，每个环节的质量控制均直接影响成桥结构的受力状态。未来，预应力混凝土连续梁桥施工需进一步聚焦关键工序，通过细化管理标准、强化过程监督、严格参数核验等方式，筑牢核心环节质量防线。同时，要推动施工技术迭代升级，引入智能监测、数字化管控等手段，提高预应力混凝土连续梁桥的施工质量，为交通基础设施的安全稳定运行筑牢坚实的基础。

参考文献：

- [1] 李国俊. 预应力混凝土连续梁桥挂篮施工技术优化分析 [J]. 建筑机械化, 2026, 47(03): 46-49.
- [2] 姚明, 罗朋, 王建龙, 等. 预应力混凝土连续梁桥挂篮智能反力架预压施工技术优化 [J]. 粘接, 2026, 53(02): 435-438.
- [3] 农定立. 预应力混凝土连续梁桥施工技术及其变形监测研究 [J]. 石材, 2026(01): 82-84.
- [4] 来泉泉. 预应力混凝土连续梁桥悬浇施工及线形控制要点 [J]. 交通世界, 2025(22): 122-124, 127.
- [5] 孙雪宏, 杨帆. 跨铁路预应力混凝土连续梁桥顶推施工监测技术分析 [J]. 工程质量, 2025, 43(06): 93-96.

桥梁建设工程中的高墩施工技术要点

江 渝

(四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司, 四川 成都 610031)

摘 要 在我国交通基础设施快速建设的背景下, 桥梁高墩施工已成为山区及跨水域桥梁建设的重要环节。本文分析了桥梁高墩施工高度突出及结构体量大等特点, 阐述了爬模、滑模及液压翻模等常用施工类型, 探究测量控制、模板施工、钢筋绑扎及混凝土浇筑等技术要点, 旨在加强高墩施工技术及实施路径总结, 为同类桥梁高墩工程施工提供技术参考。

关键词 桥梁工程; 高墩施工; 爬模施工; 滑模施工; 液压翻模施工

中图分类号: U445.559

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.016

0 引言

随着我国交通强国战略的深入推进, 桥梁工程建设规模不断扩大, 高墩施工技术面临着更高要求。《国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知》明确提出, 提高复杂地质条件下桥梁建设能力。高墩作为桥梁基础承载结构, 其施工质量影响着工程安全及耐久性, 探究高墩施工技术要点, 对于完善技术内容, 指导现场作业具有重要的工程实践价值。

1 桥梁建设工程中的高墩施工特点

1.1 施工高度突出, 安全管控严格

在桥梁体系中, 高墩结构显现出竖向尺度特征, 墩身高度变化范围较大, 施工空间随着高度增加逐步收窄, 重力作用下结构受力状态变得敏感。高空作业环境, 使施工组织呈现连续上升式空间分布特点, 作业平台随高度推进发生调整, 空间转换节奏对施工协调提出更高要求。在高墩施工过程中, 结构刚度有明显波动, 外界环境因素对其产生不利影响, 温度变化及风荷载作用持续制约施工稳定状态。墩体线形控制需要保持较高精度, 对空间定位的一致性形成约束。整体施工呈现长周期连续推进特点, 使时间维度叠加空间维度。高空环境条件随高度增加不断演变, 施工过程需要具备较强的环境适应能力, 整体结构在施工过程中的受力状态随施工阶段持续变化, 并不断积累^[1]。

1.2 结构体量较大, 工序衔接紧密

桥梁高墩在结构构成上呈现明显的体量特征, 墩身沿竖向方向表现出一定的空间延展特性, 混凝土用量及钢筋配置规模同样处于较高水平。沿竖向持续推

进施工过程, 作业阶段随高度增加形成分段结构, 各分段之间在时间排序上保持先后关系。工序内容按阶段分布, 不同专业作业在空间位置及时间安排上交替展开, 作业内容之间存在先后约束。资源配置随施工进度动态调整, 材料运输、设备使用及人员组织在不同高度条件下具有阶段差异。随墩身增加高度, 结构受力状态发生变化, 不同竖向位置的截面受压分布不一致。施工空间受高度条件影响表现收缩趋势, 同步减小操作区域尺度。整体作业周期保持持续状态, 各阶段持续时间存在一定差别。环境作用因素在不同高度区间有着不同表现形式。结构沿竖向发展时, 几何形态随施工阶段发生变化, 不同阶段对应的空间状态不同。时间推进过程中各阶段持续节奏存在不一致的情况, 整体施工过程呈现分层分段交错特征^[2]。

1.3 工艺要求复杂, 技术标准严格

高速公路桥梁高墩施工属于高空作业, 因此采用的施工方法和工艺十分复杂, 也要考虑自然环境、施工工艺、突发问题等对工程进度带来的影响。高墩施工工艺涵盖多道工序共同推进, 测量放样、模板安装、钢筋工程及混凝土施工等, 在空间及时间上连续展开, 各环节之间有着明确的先后关系。施工过程对尺寸控制及线形控制具有精度约束, 竖向轴线偏差控制、截面尺寸稳定及标高一致贯穿整个过程。模板体系在受力转换及重复周转中约束结构的稳定性, 拼装精度及接缝处理关系到成型质量。钢筋布设在空间分布上较为密集, 节点连接方式及位置控制影响到整体受力状态。混凝土施工涉及配合比稳定性及浇筑连续性等内容, 材料状态对应施工节奏。养护阶段对环境温湿条件具有响

作者简介: 江渝(1996-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

应特征,时间变化及表面状态变化形成联动关系。施工数据记录纳入各道工序,各类检测指标形成连续记录内容。整体施工在多环节交替作用下,有着较强的程序属性,工序之间关系清晰,技术参数控制覆盖全过程。

2 桥梁建设工程中的高墩施工类型

2.1 爬模施工

爬模施工借助模板系统,随墩身竖向延伸分段上升,附着支撑结构承担定位及承载作用。模板单元在连接体系约束下完成调整,同步结构施工过程。模板体系、支撑构件及导向装置构成空间稳定单元,各单元之间形成衔接关系。竖向传力路径清晰,荷载利用模板体系逐级传递至已完成结构。施工界面沿高度方向分层展开,作业面保持独立状态并维持节奏。模板周转过程涵盖拆卸及复位等环节,空间占用随施工进度发生调整。同步进行结构成型过程及模板移动过程。施工组织围绕垂直方向展开,作业节奏依墩身高度变化慢慢推进。附着式支撑作为基础构造,提供稳定上升路径。模板与已完成结构之间形成互助关系,移动路径沿既定轨道运行。竖向空间状态持续发生变化,施工单元形成顺序衔接状态^[3]。

2.2 滑模施工

滑模施工以滑动式模板为主要构造,凭借连续作业完成高墩成型。模板沿墩身竖向不断滑动,不用分段拆卸,适配高墩竖向延伸的结构特征。借助支撑装置固定,形成稳定作业载体,适配高空施工环境条件。滑模施工过程连续进行,减少施工阶段之间的间隔,符合施工进度需求。模板滑动同步混凝土浇筑,保障墩身结构连续性。结构设计匹配截面规整的高墩,可按墩身设计参数调整滑动速度,保障成型质量。滑模体系机械化程度较高,减少人工干预,契合规模化施工需求,是高墩施工中兼具效率及适用性的类型。

2.3 液压翻模施工

以液压系统作为动力来源的翻模施工体系,利用定型模板组构成整体作业结构,适配桥梁高墩竖向施工需求。其构成涵盖液压提升装置、模板模块及承重支架等,各部分形成协同作业单元。液压系统提供稳定且可控的动力,使模板沿墩身竖向同步上移,保障过程平稳一致。模板模块采用标准化设计,可按高墩截面尺寸灵活适配,满足不同结构施工需求。承重支架及操作平台依附已完成墩身结构固定,为作业人员提供操作空间,并承担模板及施工荷载。该施工类型依据液压驱动完成模板周转及顶升,不用频繁拆卸重装,对应高墩连续施工节奏,兼具施工效率及结构成

型精度,是桥梁高墩施工中适配性较强的类型之一^[4]。

3 桥梁建设工程中的高墩施工技术要点探究

3.1 测量控制技术

高墩施工测量控制是保障墩身线形及结构精度的重要技术,覆盖高墩施工全过程。其借助定位及持续监测,控制墩身竖向轴线偏差及截面尺寸精度,使结构符合设计标准。测量控制依据常规测量原理,结合高墩施工高度较大的特点,形成适应高空作业条件的测量方式,为后续各道工序施工提供基础基准^[5]。

应用测量控制技术,需布设施工控制网,结合桥梁工程整体测量基准,建立专属高墩测量控制网,保证控制网精度满足高墩施工要求,平面控制网闭合差需控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 范围内。布置完成后进行反复校验,保障控制网稳定性,避免后续测量出现偏差。墩身轴线测量采用精准测量设备,从墩身底部至顶部进行全程定位,每完成一段施工,立即开展轴线复核,单节墩身轴线偏差不能超过 3 mm ,及时调整偏差。标高控制按施工分段逐步进行,准确测量各分段标高,每节墩身标高控制偏差不大于 $\pm 2\text{ mm}$,结合墩身竖向延伸节奏,实时校准施工标高,使墩身整体标高一致。测量过程中同步记录测量数据,整理分析数据,发现测量过程中的异常情况并处理。针对高空环境对测量的影响,选择合适的测量时段,规避风力大于6级的时段作业,减少不利环境因素干扰,保障测量数据准确性。同时,定期校验维护测量设备,校验周期不超过15天,保证设备性能稳定,为测量控制提供可靠保障,提高高墩施工质量。

3.2 模板施工技术

在桥梁高墩施工过程中,模板施工属于基础环节,影响着墩身成型质量及结构精度。其主要选用合适模板类型,规范安装过程,保持模板体系稳定及良好密封,为混凝土浇筑提供成型条件。该环节结合高墩施工高度突出及结构体量较大的特点,考虑模板周转情况及作业安全,符合桥梁工程高墩施工的实际要求。

因此,应用模板施工技术,需结合高墩结构设计参数,选用高强度定型钢模板,模板厚度控制在 12 mm 至 15 mm 之间,使模板承载力满足施工需求。模板进场后要校验精度,表面平整度偏差控制在 2 mm 以内,严禁使用不合格模板。模板安装需利用承重支架固定,支架立杆间距控制在 1.2 m ,横杆步距不超过 1.5 m ,保障支架整体稳定性。安装过程中控制模板垂直度,每安装一节模板即复核垂直度,偏差控制在 3 mm 以内。模板接缝处采用密封材料处理,密封材料厚度控制在 3 mm

至5 mm,保证接缝严密不渗漏。安装时需保证模板及钢筋体系预留间隙合理,间隙控制在30 mm至50 mm,防止后续浇筑出现钢筋外露问题。模板安装完成后,进行全面检查,确认无误后方可进入下一道工序,施工完成后按规范流程拆卸模板,避免损伤墩身结构,延长模板周转使用周期。拆卸后及时清理模板表面杂物并涂抹防护涂层,保障后续周转使用性能。

3.3 钢筋绑扎技术

在高墩施工中,钢筋绑扎作为主要工序,关系到墩身结构承载能力及稳定性。其凭借规范布置钢筋,准确完成绑扎固定,使钢筋体系符合设计标准,并与混凝土形成共同受力状态。该技术需适配高墩施工的结构特性,针对性解决钢筋密集带来的施工难点,在保障绑扎质量达标基础上,提高作业效率,帮助桥梁高墩施工质量管控落地。

在钢筋绑扎技术的实际应用中,需严格检验进场钢筋质量,屈服强度不低于400 MPa,抗拉强度符合设计标准,未达标的钢筋不能纳入作业环节。加工环节需把控尺寸精度,切割弯折误差控制在4 mm以内,使钢筋规格契合安装要求。钢筋绑扎前要彻底清除表面锈蚀及杂物,为钢筋及混凝土的良好黏结奠定基础。绑扎作业中重点把控间距精度,竖向钢筋间距偏差不超过5 mm,水平钢筋间距偏差控制在6 mm以内。钢筋搭接需严格遵循规范,搭接长度不小于35 d,搭接处绑扎点间距控制在200 mm,保障搭接稳固。竖向钢筋采用机械连接时,接头错开距离不能小于500 mm,接头质量核验合格后,才能进行后续绑扎。作业全程需做好钢筋防护,以防碰撞变形,发现问题及时校正,绑扎完成后全面核查位置及牢固度,同步完善施工记录,留存验收资料,从细节上保障高墩结构受力性能稳定。

3.4 混凝土浇筑技术

高墩墩身混凝土浇筑负责衔接钢筋及模板工序,其施工质量决定着高墩结构整体性及长期服役性能。该技术借助科学管控混凝土浇筑全流程,使混凝土有效黏结钢筋,保障墩身结构密实无缺陷,适配高墩高空作业及体量较大的施工场景,保证施工质量及安全性。

混凝土浇筑需优先把控原材料质量,选用符合设计标准的高强度混凝土,立方体抗压强度不低于C40,坍落度控制在120 mm至140 mm之间,保证浇筑流动性达标。浇筑前检查模板及钢筋体系,确认无偏差后,启动浇筑作业。浇筑采用分层推进方式,每层浇筑厚度控制在500 mm,分层浇筑间隔不超过2小时,避免出现施工冷缝。浇筑过程中控制浇筑速度,每小时浇筑量不超过8 m³,防止混凝土离析。浇筑时分层振捣,

振捣时间控制在20秒至30秒,以混凝土表面不再冒气泡且不再泛浆为准。浇筑全程做好高空防离析措施,浇筑完成后及时进行表面整平,监测混凝土浇筑状态,发现异常立即处理,浇筑完毕后做好前期防护,为后续养护工作奠定基础,保障高墩结构耐久性。

3.5 养护监控技术

高墩混凝土浇筑后,水化热作用明显且高空环境温湿度波动较大,结构表层及内部容易出现不均匀收缩。养护监控技术凭借控制温湿度,跟踪力学变化,减少温度裂缝及干缩裂缝的产生,保障墩身密实性。该技术衔接浇筑工序,以覆盖保湿及持续观测为手段,保证高墩在强度增长阶段保持稳定状态。

混凝土浇筑完成后,及时启动养护监控,浇筑完毕后4小时内覆盖保湿材料,让混凝土表面湿度保持在90%以上,避免表面水分快速蒸发产生收缩裂缝。养护期间需控制环境温度,混凝土内部及表面温差控制在25℃以内,环境温度骤降时及时采取保温措施,减缓温度变化速率。定期检测混凝土强度,养护3天强度需达到设计强度的40%,7天强度不低于设计强度的50%,28天强度满足设计标准后,才能停止养护。同时,监测墩身结构变形,每天定时记录变形数据,发现异常及时调整养护方案。养护过程中做好全程记录,详细留存温湿度数据及变形监测报告,使养护流程可追溯,为高墩结构质量验收提供可靠依据。

4 结束语

探究桥梁建设工程中高墩施工技术要点,能够保障桥梁工程质量及结构安全,为同类施工提供可靠技术指引,提高桥梁工程建设整体水平。未来,随着智能化监测技术深度融合自动化施工装备,高墩施工将向更高效的方向发展,为交通基础设施建设提供有力技术支撑。同时,借助数字化技术,优化施工管控流程,促使交通强国建设落地见效。

参考文献:

- [1] 聂昕.公路桥梁施工中高墩施工技术要点研究[J].运输经理世界,2025(25):100-102.
- [2] 邓清元.铁路桥梁工程建设中的高墩施工技术要点探析[J].工程机械与维修,2023(02):93-95.
- [3] 邱振华.高速公路桥梁建设工程中的高墩施工技术要点[J].四川建材,2023,49(01):110-112.
- [4] 孙素坡.高速公路桥梁建设工程中的高墩施工技术要点[J].中国高新科技,2022(19):108-109.
- [5] 陈玉.高速公路桥梁工程中的高墩施工技术要点[J].黑龙江交通科技,2021,44(09):90,92.

高墩施工技术在公路桥梁施工中的应用研究

兰永安

(四川三江交通建设工程有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘 要 在我国公路桥梁施工过程中, 高墩施工技术目前较为常见, 能够有效提高整体工程质量及安全性, 适用于山区、跨河谷等复杂路段, 可有效突破地形限制, 保证施工稳定性。基于此, 本文从高墩施工技术入手, 分析了其在公路桥梁施工中的应用策略, 包括施工前: 精准勘测和统筹施工资源; 施工中: 混凝土浇筑和高墩模板支撑; 施工后: 高墩结构检测和防护养护, 旨在为同类工程提供参考。

关键词 高墩施工技术; 公路桥梁; 滑模施工技术; 翻模施工技术; 爬模施工技术

中图分类号: U445.559

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.017

0 引言

近些年, 我国公路客运量以及货物运输量逐年增长, 为了保障交通建设更加科学完善, 公路桥梁建设逐渐转为高墩以及大跨的施工方式, 而由于桥梁高墩施工需要在高空进行, 墩体较高、横截面较小, 整体施工难度相对较大。高墩施工作为高速公路桥梁施工过程中必不可少的核心环节之一, 影响项目整体建设的质量、稳定性及安全性, 并且关乎人们的出行安全。因此, 研究高墩施工技术, 能够为公路桥梁建设提供高标准的技术支撑。

1 高墩施工技术分类

1.1 滑模施工技术

滑模施工技术以滑升模板为主要载体, 利用液压系统控制模板与钢筋、埋件、预埋管道等施工环节, 形成不间断的施工流程, 帮助墩身结构在浇筑过程中保持稳定的线形滑, 适用于高墩、高层及浇筑周期较长的工程项目, 特别是在连续浇筑、形状规则且具有较大规模的结构中, 滑模施工能够提高效率^[1]。滑模体系主要由滑模模板、支撑架、导向架、提升设备及操作平台等组成。其中, 模板多采用高强度钢板或铝合金材料, 以保证表面平整度。支撑架将导向杆与液压千斤顶相连, 保证模板精确升降。液压系统的控制精度直接影响结构的垂直度, 其压力分配与同步装置需保持高度协调, 以防止模板倾斜或局部应力集中。同时, 滑模施工的测控系统承担着关键的几何监测任务。全站仪与激光测距仪结合使用, 动态监控墩身轴线及倾斜度, 微调液压油箱或模板滑移速度以修正姿态。施工平台通常设置在模板上部, 集中布置混凝土浇筑、振捣等作

业空间, 让施工活动在有限范围内形成封闭循环, 以保证高空安全作业。此外, 滑模施工在结构成型过程中对混凝土性能要求较高, 需保证早期强度增长速率, 其中施工参数包括滑升速度、混凝土温度控制等。

1.2 翻模施工技术

翻模施工技术以标准化模板、可调节支架及精准测控系统为主要组成部分, 在分层施工中实现模板的重复定位, 让每一施工节段都能保持几何一致性, 其适用于中高墩桥梁, 尤其是在地形复杂或有特殊要求的区域, 适合具有一定高度的墩柱结构, 并且当施工需要分段开展时, 翻模施工能够提供较高的效率^[2]。翻模施工以模板的机械翻转是关键动作, 利用吊装或液压装置将下段施工完成后的模板整体上移, 并与上段钢筋笼、预埋件及施工缝精准对接, 保证墩身垂直度与截面尺寸保持统一。模板体系多采用钢模板结构, 内表面平整光洁, 外设加劲肋以增强刚度。模板外部设置环形脚手架及安全平台, 为混凝土浇筑、振捣、养护与测量提供作业空间。翻模施工强调模板稳定性, 如模板翻转后需进行严格校核, 以保证其与已成型段之间的施工缝紧密贴合。总的来说, 翻模施工在高墩桥梁建设中兼具灵活性与经济性, 适用于中高墩及复杂地形条件下的施工。该工艺能够利用分段控制有效降低一次性模板投入, 实现施工质量与进度的双重平衡。

1.3 爬模施工技术

爬模施工技术以爬升架、模板系统、液压顶升装置和导向轨为主要组成部分, 依托结构自身的承载能力或预埋锚固件形成垂直爬升路径, 帮助施工活动在高空环境中具备稳定的支撑, 适用高墩、高层及高空

作者简介: 兰永安 (2000-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程管理。

环境中施工的桥梁项目,尤其对施工空间有较高要求且需频繁调整高度的工程。爬模体系在结构上具有高刚度,能够在复杂风压条件下保持模板形态稳定性^[3]。爬模施工以分层浇筑为基本节奏,混凝土浇筑高度通常按照结构承载能力确定,如模板体系一般采用组合钢模板结构,内部设置加劲肋和导向套筒,外部连接平台、防护栏及操作支架,形成一个封闭的施工空间,这样可以满足浇筑等作业需求,又能保证高处作业的安全性。除此之外,混凝土性能在爬模施工中起着关键作用,需具备适宜的流动性及凝结时间,以保证分层浇筑后的整体粘接强度。整体来看,该技术利用模块化设计,集约施工空间、合理布置设备,减少了频繁拆装。爬模系统能够按照施工进度灵活调整爬升节奏,并结合数字化监控精细管理全过程。模板提升与结构成型同步进行,缩短了施工周期,且可控工程质量。爬模施工技术以高精度为特征,成为现代公路桥梁高墩结构施工的重要技术体系。

2 高墩施工技术在公路桥梁施工中的应用策略

2.1 施工前

1. 精准勘测。精准勘测是高墩施工前阶段的首要环节,也是保证桥梁结构安全的基础工程^[4]。高墩结构普遍分布于地形起伏较大的区域,勘测工作的精确程度直接决定后续设计参数的科学性。勘测过程以地质探测为核心内容,利用多维度技术手段构建三维地质模型,为高墩施工提供可量化的数据信息。测量体系需采用高精度全站仪,形成静态与动态数据的同步采集机制,从而综合评估地表形态、地下结构及环境要素。在地质勘探阶段,应重点关注岩层分布、地下水位变化及土体结构稳定性。由于高墩基础受力集中,地基承载力要求较高,地层信息的不确定性极易引发沉降或偏位。利用钻探取样,可判断不同深度土层的密实度,为基础设计提供科学依据。边坡监测能揭示潜在滑坡带的分布规律,便于制定防护措施。水文条件的勘测同样重要,需掌握降雨汇流规律等情况,保证排水系统设计具备可操作性。在空间测绘阶段,控制点选址需具备长期稳定性,利用三维坐标系统一全桥测量基准。同时,墩位放样过程应结合地形起伏和施工通道布置,采用多角度测距技术,保障墩身中心线精确重合桥轴线。

2. 统筹施工资源。统筹施工资源是高墩桥梁工程开工前的重要环节,是保障施工各阶段进度协同的系统性过程。在设备资源方面,应依据高墩高度等条件,确定模板系统及安全防护装置的类型。施工机械需经过性能评估,以保证在复杂环境中保持稳定运转。施

工场地应合理规划材料堆放区等区域,形成交通顺畅的空间布局。设备进出场时间需与工序进度保持一致,避免资源闲置,并借助机械群组化管理提高设备利用率。在人力资源配置方面,项目管理层需建立多层次施工组织结构,明确各人员的职责边界。高墩施工属高风险作业,对操作技能要求极高,人员培训应重视设备操作规范,并利用岗位责任制强化执行力,形成专业分工的高效团队。需要注意的是,安排劳动力需结合施工节奏,采取动态排班方式,保障关键工序连续作业,避免资源浪费。在材料与供应链管理方面,应构建全过程追踪机制,对原材料采购等环节进行数字化管理。供应关键材料的计划需要和施工节点精准对接,采用批次化调度模式,保障供料稳定。物料堆放应结合施工流线设计,保持清晰的进出路径。此外,仓储区需设立防潮装置,以维持材料性能稳定。

2.2 施工中

1. 混凝土浇筑。混凝土浇筑是高墩施工的核心工序,直接决定结构的强度,其施工过程需材料性能、设备运行与工艺控制三者高度协同,缺一不可^[5]。由于高墩结构受力复杂,加上截面高耸,这就要求浇筑作业需依据设计标高划分,采用连续浇筑与分层振捣相结合的方式,保证混凝土密实成型,且界面黏结均匀。为形成整体结构,应严格控制浇筑高度与时间间隔,帮助新浇筑层与前一层在初凝前充分结合。鉴于混凝土在输送过程中需保持均匀流速,拌合站的选址应考虑避开不良地质灾害区域,并远离居民区的下风向,以减少环境影响。而且,拌合站的混凝土输送系统,应采用泵送管道为主,并配备自动压力监测装置,以保证混凝土均匀流速。为防止混凝土离析,输送过程中需控制泵送压力,平稳混凝土流动过程。同时,温控系统应实时监测混凝土出机和入模的温差,必要时借助冷却水循环或保温覆盖调节温度梯度,防止热裂纹产生。在浇筑操作环节,导管布设应依据墩身截面形态及钢筋分布,保证混凝土下落路径顺畅,分布均匀。浇筑速率需与振捣频率匹配,应分层插入插入式振动器,每次插入下层混凝土的深度应为50 mm~100 mm,以有效消除气泡及空隙,从而形成致密的整体结构。模板内侧应开展脱模剂处理,降低界面摩擦阻力,防止混凝土表面拉裂。模板支撑体系需实时监控该过程,防止模板在浇筑荷载作用下产生变形或位移,而且要在墩身顶部设置临时溢浆口,保证混凝土填充饱满并形成自然上拱,并保持表面平整。

2. 高墩模板支撑。在高墩施工中,模板支撑直接决定混凝土结构的成型质量,同时作为承上启下的关

键节点,是维系施工体系稳定的核心控制点。高墩结构多处于高空环境,受风荷载、浇筑荷载及振动荷载共同作用,支撑体系需具备高强度能力。这就要求模板支撑应依据结构高度及施工工艺综合确定设计方案,采用空间桁架或钢管扣件组合结构,以保障整体刚度。模板拼装需按照设计分块定位,连接缝隙控制在允许范围内,以连续传递受力。要利用高强度螺栓或插销节点紧固支撑系统的立杆、横杆与斜撑,让整体形成一个空间受力单元。连接节点是模板支撑稳定的关键位置,需具备足够的抗剪能力。支架布设高度较大时,应设置中间水平平台或爬升支架作为施工操作面,以保证作业安全。同时,要精确计算立杆间距与横向刚度的匹配关系,以避免因局部偏差引起整体变形。支架基础沉降观测点要布设在受力集中区,并定期测量分析支架承载稳定性,以便适时调整。此外,要注意模板安装前需对所有构件完成编号检验,保证结构件无裂纹。模板与钢筋间应保持合理间距,以防止浇筑过程中钢筋位移。支架顶端应设置可调节顶托,便于模板高程微调与轴线修正。且模板拆除顺序需结合混凝土强度增长规律,分层卸载,均衡释放,防止墩身出现应力集中或表面裂纹。

2.3 施工后

1. 高墩结构检测。高墩结构检测是公路桥梁施工后期的关键环节,其检测结果更是科学评估高墩结构安全性能,判定其耐久水平的核心依据。检测工作以数据化为核心原则,对墩身、基础及连接部位的力学特性、几何精度、材料状态开展综合检测,最终保证结构满足设计标准,更具备长期安全性。公路桥梁施工后,采用激光铅垂仪来控制,利用高精度全站仪复测墩身垂直度、轴线偏差以及断面尺寸,并监控平面位置及垂直度,保证结构的精度。检测数据经误差平差处理,生成墩身空间坐标曲线,以评估结构线形和设计值的一致性。表面平整度检测采用激光扫描或摄影测量技术,利用点云数据分析局部凹凸及表面偏差,以满足外观质量的规范要求。沉降监测点应布设于墩基与墩身交界处,要利用光学水准仪或 GNSS 监测系统连续观测地基变形,从而判断结构稳定性。此外,还需检测混凝土质量,利用回弹仪获取混凝土表层特征,并借助温度与湿度传感器长期记录内部环境变化,为耐久性评估提供基础数据。还可凭借电磁感应法或雷达波检测钢筋保护层厚度,保证钢筋处于合理保护范围内,以防腐风险增加。在结构裂缝检测中采用高清成像技术,深度分析判断潜在应力集中区域,必要时结合声发射监测动态跟踪情况。

2. 防护与养护。高墩结构施工完成后,随即进入

防护与养护阶段,该阶段工作的科学性直接决定结构的使用寿命。防护与养护工作以结构应力调节为核心,利用系统化管理维持墩身及附属构件的长期安全状态。可在混凝土表面设置防护,涂覆防护层,在结构外部形成致密屏障,以减少雨水的侵入。防护涂层材料多采用硅烷、聚氨酯或环氧体系,其分子结构具备高附着力,能够有效阻断水汽渗透并提高表层抗污染能力。对于长期暴露于风雨的高墩外表面,应现场检测确认防护层的耐老化性能,以保持防护体系的完整性。接缝与构造节点部位是最易产生渗水与腐蚀的薄弱环节,应采用弹性密封材料填充,保证结构伸缩与防水性能兼容。除此之外,由于高墩受风面广,加上蒸发速率显著高于常规结构,这就要覆盖保湿以维持表面湿度。鉴于混凝土早期内部温度梯度较大,若外表面降温过快易引发热裂缝,可采用温控传感系统实时监测内部温差,可调节养护水温以维持温度平衡,并增加自动喷淋养护系统,控制湿度,进一步防止表面温度过快下降,以减小热裂缝发生的风险。养护周期内,要按照混凝土强度确定增长曲线,以充分稳定水化过程。养护期间还应检查外观及微裂缝,发现异常应及时修复,防止裂缝扩展影响结构整体性。

3 结束语

高墩施工技术整合模板体系优化、混凝土工艺创新与智能化测控手段,形成了技术融合优势,最终高精度控制结构线形,保持结构力学性能的动态平衡。当前山区公路桥梁建设环境复杂多变,高墩施工受地形等多重因素制约,施工难度较高。施工单位完善全过程质量管控体系,同时优化施工组织方案,能够有效规避各类施工风险,提高工程整体稳定性。基于此,以精细化管理为路径,可形成高墩桥梁建设现代技术体系,赋予施工高精度特征,推动交通基础设施建设迈向高质量阶段。

参考文献:

- [1] 王应.高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].交通科技与管理,2025,06(16):119-121.
- [2] 林君武.高速公路桥梁施工中的高墩施工技术要点分析[J].江西建材,2025(05):248-249,259.
- [3] 刘家兴.高速公路桥梁施工中高墩施工技术的应用研究[J].交通科技与管理,2024,05(15):59-61.
- [4] 常晓花.公路桥梁施工中高墩施工技术的实践探讨[J].石材,2024(06):69-71.
- [5] 卫彩红.高墩施工技术在公路桥梁工程施工中的运用[J].运输经理世界,2023(20):84-86.

道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术分析

田磊

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘要 伴随道路桥梁工程逐步向大型化、复杂化方向发展, 干成孔旋挖桩施工技术以旋挖钻机为核心装备完成取土成孔, 能够有效保证成孔稳定性, 降低塌孔风险, 还能减少地下水等水体对施工过程的干扰, 进一步提高施工精度与作业效率。基于此, 本文深入分析了道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工条件及施工技术, 并从施工各环节针对性提出具体应用措施, 旨在为同类工程施工提供技术参考。

关键词 道路桥梁; 干成孔旋挖桩; 钢护筒埋设; 钻进成孔; 清孔作业

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.018

0 引言

施工单位需严格甄选并规范桩基施工方法, 从源头保障桩基工程的施工质量与结构安全。干成孔旋挖桩施工技术凭借机械化成孔的核心优势, 通过分层切削土体的作业方式, 能有效降低施工过程对周边环境的扰动, 同时因其工序流程清晰可控, 大幅提升了现场管理的便捷性与规范性。因此, 施工单位需要细化控制施工参数, 强化监测成孔过程, 保证各环节衔接顺畅且参数执行稳定, 不断提高成孔精度。

1 道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工条件

干成孔旋挖桩施工需要具备较为稳定的地质条件, 要求场地土层具有一定的自立能力, 且粉质黏土或中密砂层更适合保持孔壁形态, 若松散砂层或高含水软土则容易出现塌孔情况, 此时需要配合全套管护壁来控制^[1]。而且, 地下水条件影响施工较为明显, 水位较低且补给速度较慢时, 更有利于维持孔内干作业环境, 若地下水活动较强, 则应提前布设降水系统, 持续抽排来降低水位, 以减轻孔壁受水压力影响, 稳定运行成孔过程。与此同时, 由于旋挖钻机自重较大, 需要严格要求地基稳定性, 通过地基加固或铺设钢板形成稳定平台, 以保证设备运行平稳。为应对土层变化带来的阻力差异, 施工设备应满足不同地层条件下的作业需求, 保证旋挖钻机具备足够的扭矩能力, 同时配置合适的钻头, 以提高取土效率。另外, 施工过程需连续钻进, 防止停顿影响孔壁稳定, 并使用监测系统记录钻进深度、转速及扭矩等参数, 以便及时调整施工状态。

2 道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术

2.1 纯干作业干成孔旋挖桩技术

纯干作业干成孔旋挖桩技术多应用地下水位较低且土体具备一定自稳能力的道路桥梁工程区域, 施工现场多处在城市道路改扩建或高架桥基础施工环境, 场地空间受限且周边结构密集, 严格要求施工扰动控制情况^[2]。旋挖钻机进场后, 需基于已压实的作业平台来定位, 其中平台承载力需满足设备自重要求, 避免钻进过程产生沉陷影响孔位精度。钻进过程中, 钻头下放到孔底后开始旋转切削, 随即提高至地面卸土, 需保持稳定的循环节奏, 以减少孔壁长时间暴露带来的松动风险。粉质黏土层中, 应控制钻进速度在较低范围, 让孔壁形成较为紧实的结构面, 进入砂层时, 需要缩短单次进尺长度, 防止局部松散致使孔壁掉块。钻进深度逐步增加时, 要利用钻机自带的垂直度监测系统读取偏差数据, 配合操作来调整钻杆姿态, 保持孔轴线偏移在可控范围内。为避免孔口塌陷向下传递, 孔口位置可设置短套管, 以稳定上部土层, 并设置套管埋设深度覆盖松散填土层范围, 待成孔完成后, 立即清底处理, 采用专用清底钻具反复作业, 直至孔底沉渣厚度满足施工设计要求。钢筋笼完成整体绑扎后, 要用履带吊沿导向装置缓慢下放, 此期间控制下放速度, 保证钢筋笼中心与孔中心基本重合^[3]。

2.2 护筒辅助干成孔旋挖桩技术

护筒辅助干成孔旋挖桩技术适用上部填土层较厚且结构松散的道路桥梁施工区域, 对孔口稳定性有更高要求。施工现场测量放样后, 用钢制护筒定位, 利用振动锤将护筒压入地层, 控制埋设深度覆盖杂填土

作者简介: 田磊(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

层及松散砂层范围,让护筒底部进入较为密实土层,以此形成稳定约束界面,而且需要同步校核垂直度,使用水平仪调整护筒姿态,保持轴线与设计桩轴相一致,从源头减少成孔偏差^[4]。为防止孔壁长时间暴露产生松动,准备旋挖钻机于加固后的作业平台,沿护筒中心下放钻杆,进入护筒内开始切削土体,取土提升后直接卸到弃土区。其中,护筒内壁在钻进初期可以支撑孔口区域,能够有效阻止上部土体掉块,需要注意的是,要结合地层变化调整进尺深度,缩短单次切削长度,避免扰动范围扩大,进入相对稳定土层后方可逐步恢复正常钻进节奏。若护筒外侧土体出现松动迹象,施工单位应及时回填压实或补充夯实处理,以保持护筒与土体之间紧密接触,伴随钻进深度不断增加,需使用设备监测系统读取垂直度数据,结合操作调整钻杆姿态,控制孔轴线在设计允许范围内。

3 道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术应用措施

3.1 施工准备阶段

施工准备阶段,施工单位需要依据设计文件,细化分解桩径尺寸、桩长范围及持力层控制标高,以执行各项技术指标,并比对现场观测与历史资料,确认地下水位情况,按照水位埋深制定降水控制方案,布设井点系统或排水设施,维持孔内环境干作业条件^[5]。而且,施工单位还要压实处理施工场地,在作业区域铺设级配碎石或钢板形成稳定平台,保持旋挖钻机平衡运行状态并减少沉降影响,并同步建立场地排水体系,设置排水沟,及时排出地表水,避免雨水积聚干扰设备运行。同时,依据工程条件调试施工设备,保证旋挖钻机具备足够扭矩能力,以适应不同土层切削需求,让钻斗与齿具形式与施工土层相匹配,从而提高取土效率,并提前组装履带吊与清底装置,促使后续工序衔接顺畅。除此之外,在加工场地按设计尺寸绑扎钢筋笼,控制尺寸偏差在规定范围内,保持顺畅的下放过程,依据施工要求调整混凝土配合比,控制坍落度,以满足导管灌注工艺需求。

3.2 钢护筒埋设

钢护筒埋设环节,施工单位控制护筒直径在设计桩径基础上增加 80 mm 至 120 mm 范围,保证钻具顺利进出,维持导向精度,多取护筒壁厚 8 mm 至 12 mm,以满足强度要求。为形成稳定支撑界面,施工单位需结合地表松散层厚度确定护筒长度,控制常规埋设深度在 2.0 m 至 4.0 m 之间,让护筒底端进入相对密实土层,并使用全站仪复核桩位坐标,控制偏差在 20 mm 以内。护筒压入过程,应采用振动锤垂直压入,按照

土层条件匹配振动频率及激振力,保持平稳连续的压入过程,并实时检测垂直度,控制偏差在 1% 以内,用经纬仪校正护筒轴线,与设计轴线保持一致。压入深度逐步增加时,应保持护筒周边土体密实状态,若出现空隙,立即开展回填夯实处理,以保证护筒紧密贴合土体,避免施工过程发生位移,其中护筒顶端标高可以高出地面 300 mm 至 500 mm,以防地表水倒灌进入孔内,影响干作业条件。护筒安装完成后,施工单位要复测中心位置偏差及垂直度数据,保持平整的护筒内壁,保证钻杆下放顺畅并维持导向精度。另外,需要在护筒周边区域设置排水沟,引流地表水到集水点,防止水分渗入造成土体软化,同时控制孔口稳定范围在设计之内,为后续成孔质量提供可靠保障。

3.3 钻进成孔

旋挖钻机就位后,施工单位要用导向架锁定钻杆初始姿态,开钻阶段采用低转速与小进尺方式,让钻斗逐步切入土体并形成稳定孔口,依据土层性质调节转速,在粉质黏土层控制转速在 10 r/min 至 20 r/min 范围,平稳运行切削过程,进入砂层时则降低单次进尺深度,控制在 0.5 m 至 1.0 m 之间,以缩小孔壁扰动范围。同时,钻斗装满后,及时提升至地面卸土,保持孔内清洁,避免残留松散土体堆积增加孔壁压力,待钻进深度逐步增加,使用设备自带监测系统实时记录孔深数据,结合操作调整钻进节奏,保持稳定的钻进过程。为保持孔轴线直线状态,施工单位应使用倾角传感器动态监测钻杆垂直度,控制偏差在 1% 以内,调整钻机姿态来修正参数。除此之外,施工单位要稳定控制孔壁,贯穿整个钻进过程,避免长时间停钻引起孔壁松动,保证连续作业节奏,维持孔壁结构完整。进入设计深度前,应减缓进尺速度,采用多次轻切削方式接近持力层标高,保持平整的孔底形态。

3.4 清孔作业

钻孔结束后,可进行清孔作业,目的是修复被破坏的土层,并重新利用。因此,要按照设计方案进行,以免破坏成孔。同时,要根据实际情况选择合适的清孔器类型,并判断清筛机的过滤面积和所需数量是否合适,搭配使用透气性良好的滤布,保证清孔完成后,孔内沉渣量在允许范围内。旋挖钻机达到设计孔深后,施工单位应该更换专用清底钻具,沿孔轴缓慢下放清底桶或平底清孔器至孔底,采取低速旋转方式收集沉积土体,让孔底表层松散物逐步进入清底装置内部,而且需保持平稳的提升过程,避免扰动孔壁结构,以维持孔内整体稳定状态。清孔过程中,施工单位应需反复开展多次提取作业,每次清底深度控制在较小范

围,以保证沉渣逐层剥离并清理至地面,逐步减小孔内残余物厚度,并可以借助测绳配合重锤复核孔底标高,保持孔深数据与设计要求相一致,同时利用沉渣测定装置控制孔底沉积厚度在 50 mm 以内,以促使桩端与持力层形成良好接触界面。为避免空气暴露影响孔底土体性质,施工单位要维持干净的孔内环境,待清孔完成后,立即开展后续工序,并在钢筋笼下放前再次检查孔底情况,确认无明显沉积物堆积,方可让钢筋笼顺利到达设计标高。

3.5 钢筋笼安装

清孔完成后,立即展开钢筋笼安装环节,以保证孔内环境稳定,在加工场地按设计尺寸整体绑扎钢筋笼,保证主筋间距与箍筋间距严格符合设计要求,控制主筋直径偏差在允许范围内,采用双面焊或套筒连接形式焊接接头,让连接强度满足规范标准。而且,施工单位需要利用履带吊实施吊装作业,依据钢筋笼长度与重量布置吊点位置,均匀分布受力,避免起吊过程产生变形。为保持钢筋笼轴线与孔轴线相一致,钢筋笼起吊后沿导向架缓慢移动至桩位中心,基于垂直状态对准孔口,随后匀速下放,让其顺利进入孔内,需要持续控制速度,促使钢筋笼与孔壁具有适当间距,防止发生刮擦引起孔壁局部松动。钢筋笼下放至设计标高后,施工单位应该复核标高,借助测量装置确认顶部标高与设计值相符,必要时人工微调以保证位置准确。为保证混凝土包裹效果良好,可依靠设置定位垫块控制保护层,均匀分布垫块间距,让钢筋笼在孔内居中,控制保护层厚度在 50 mm 至 70 mm 范围,且钢筋笼固定完成后应保持稳定状态,为混凝土灌注提供可靠基础,促进桩身结构形成连续均匀的受力体系。

3.6 混凝土灌注

为保持孔内条件稳定,施工单位应安装钢筋笼后,迅速展开混凝土灌注环节,提前拼接导管系统,控制导管内径在 200 mm 至 300 mm 范围,采用法兰连接接口并加设密封圈,促使导管整体具备良好密闭性能。需要注意的是,导管下放至孔底位置后需预留一定高度,控制在距孔底 200 mm 至 300 mm 范围,如此混凝土能顺利铺展并形成初始填充层。与此同时,混凝土配合比需要满足灌注工艺要求,这就要求施工单位控制坍落度在 180 mm 至 220 mm 范围,让混凝土具备良好流动性,其中首批混凝土利用导管注入孔底后迅速形成垫层,随后持续供料保持导管内混凝土柱稳定上升,逐步充实桩身内部。为了防止空气进入形成离析界面,施工单位需维持导管埋深在 1.0 m 至 3.0 m 范围,控制提升节奏,促使导管始终埋入已灌混凝土中。

另外,施工单位应保持连续的灌注过程,尽量缩短供料间隔时间,让混凝土在孔内形成均匀上升的整体结构,并用测绳检测灌注高度,及时调整导管提升速度,保证混凝土面始终高于导管底口位置。而且,施工单位应持续观察孔口区域混凝土返浆情况,借助返浆状态判断灌注密实程度,直至混凝土面达到设计标高以上一定高度,超灌 300 mm 至 500 mm,以满足施工要求。

3.7 质量检测

成孔完成后,施工单位应复核孔径尺寸及孔深数据,使用孔径检测器获取实际数值,控制孔深偏差在设计允许范围内,常见控制标准为不超过 ± 50 mm,控制孔径偏差在设计桩径的 ± 50 mm 以内,并利用钻机自带倾角监测系统检测孔壁垂直度,控制偏差在 1% 以内,以保持稳定的孔轴线状态。同时,施工单位需要通过沉渣厚度检测评估孔底质量,采用测锤或专用检测装置获取沉渣数据,控制沉渣厚度在 50 mm 以内,以保证桩端与持力层形成有效接触界面,并核查位置及保护层厚度,控制保护层厚度在 50 mm 至 70 mm 范围,使用定位垫块确认分布情况,保持钢筋笼居中状态。混凝土灌注完成后,为判断是否存在缩颈或夹泥等缺陷,施工单位应用水准仪测量桩顶标高,使其满足设计控制要求,并采用低应变反射波法检测桩身完整性,利用检测设备采集桩体反射信号,分析桩身连续性。质量检测结果需形成完整记录,对比分析检测数据与施工参数,以及时识别施工过程的偏差。

4 结束语

干成孔旋挖桩施工技术以机械化作业为核心依托,兼具高效施工与强环境适应能力两大显著优势,能够在各类复杂地质条件下稳定保持较高的成孔精度与质量。未来,施工单位需要采用数字化管理手段,实时反馈施工数据,提高桩基施工的可控程度,为道路桥梁基础工程筑牢长期稳定的性能根基,推动行业施工技术向智能化、高效化方向持续迈进。

参考文献:

- [1] 杨忠全.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术分析[J].中国房地产业,2025(34):218-221.
- [2] 李明洋.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术分析[J].交通科技与管理,2025,06(14):58-60.
- [3] 武俊.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术[J].运输经理世界,2025(01):111-113.
- [4] 袁岑晚.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术[J].汽车周刊,2024(10):115-117.
- [5] 许伟.道路桥梁施工中的干成孔旋挖桩施工技术[J].散装水泥,2024(01):48-50.

荷载试验在城市桥梁检测及加固决策中的应用研究

张旭景

(国检测试控股集团安徽元正检测有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘 要 为解决城市桥梁常规检测精准度不足、加固决策缺乏科学数据支撑, 导致过度加固或加固不到位的问题, 本文结合城市桥梁运营现状与核心痛点, 对荷载试验在桥梁检测及加固决策中的应用展开研究。明确荷载试验的检测指标、方案设计要点及应用场景, 通过精准解读试验数据, 为桥梁结构性能评估提供依据; 基于试验数据判断加固需求、优化加固方案、验证加固效果, 实现检测与加固决策的精准衔接。结果表明, 荷载试验可有效弥补常规检测局限, 提升桥梁检测的精准度与加固决策的科学性, 为城市桥梁安全运营、资源合理配置提供可靠支撑, 适配城市交通发展对桥梁安全的需求。

关键词 城市桥梁; 荷载试验; 结构检测; 加固决策; 安全运营

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.019

0 引言

城市桥梁长期承担密集交通荷载, 服役环境复杂多变, 结构老化与性能退化问题持续显现。常规检测手段难以全面反映桥梁真实受力状况, 易造成结构隐患识别不充分、加固措施制定缺乏依据等问题, 直接影响桥梁运行安全与使用寿命。荷载试验能够真实还原桥梁受力状态, 量化评估结构承载能力与工作性能, 为病害诊断与加固方案提供可靠数据支撑。在城市基础设施精细化运维的新形势下, 依托荷载试验实现检测与决策一体化, 可有效提升桥梁管养科学性, 保障交通系统稳定运行, 推动城市桥梁安全运维水平持续提升。

1 城市桥梁检测与加固决策的核心需求

1.1 城市桥梁运营现状及核心痛点

城市桥梁作为城市交通网络的核心枢纽, 其运营状态直接关系到城市交通的顺畅与公众出行的安全。随着服役年限逐年增长, 多数既有桥梁出现不同程度的结构性能衰减, 混凝土碳化、钢筋锈蚀等老化现象普遍存在, 直接导致桥梁承载能力下降, 安全隐患日益凸显。城市进程的加快使得交通量呈现爆发式增长, 重型货运车辆的频繁通行, 往往超出部分老旧桥梁的原始设计荷载标准, 进一步加剧桥梁结构损耗, 缩短服役寿命^[1]。当前常规检测手段多以外外观观测、材料

性能抽检为主, 难以精准捕捉桥梁在实际受力状态下的结构响应, 无法全面反映桥梁真实承载能力。这种检测层面的局限直接传导至加固决策环节, 导致部分加固工作缺乏科学数据支撑, 要么出现过度加固造成资源浪费, 要么加固不到位无法彻底消除安全隐患, 形成“检测不精准、决策不科学”的恶性循环, 无法满足城市桥梁安全运营的实际需求。

1.2 荷载试验在检测与加固决策中的核心价值

荷载试验通过模拟桥梁实际受力场景, 精准获取结构在不同荷载作用下的力学响应数据, 为城市桥梁检测与加固决策提供不可替代的核心数据支撑, 显著提升决策的科学性与合理性。常规检测手段难以突破对桥梁实际受力状态的判断局限, 而荷载试验可直接还原桥梁在设计荷载、极限荷载下的挠度、应变等关键力学参数, 清晰呈现结构实际工作状态, 弥补常规检测的不足。基于试验获取的量化数据, 能够精准评估桥梁结构性能, 明确病害产生的根源的核心影响因素, 避免仅凭外观判断导致的病害误判。在加固决策环节, 荷载试验数据可指导加固方案的精准设计, 结合结构薄弱环节针对性选择加固措施, 从根本上避免盲目加固带来的资源浪费与加固不足引发的安全风险。加固施工完成后, 荷载试验可再次对桥梁结构性能进行检测, 验证加固措施的实际效果, 确保桥梁加固后

作者简介: 张旭景 (1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 市政道桥。

达到设计承载要求,为加固决策的有效性提供直接佐证,保障桥梁长期安全运营。

2 荷载试验在城市桥梁检测中的策略应用

2.1 荷载试验的检测指标与方案设计

科学设定检测指标、优化试验方案,是荷载试验检测有效的核心,需结合桥梁类型与运营现状精准设计,杜绝试验流程形式化、数据失准。荷载试验核心检测指标需贴合桥梁结构受力特点,涵盖挠度、应变、裂缝宽度等关键参数。挠度反映荷载作用下桥梁整体变形能力,直接关联结构刚度;应变体现构件内部受力状态,可判断其是否处于正常受力范围;裂缝宽度直观呈现结构损伤程度,为评估耐久性提供依据,三者相互补充,构成核心指标体系。方案设计需立足桥梁实际,结合结构形式(梁桥、拱桥、斜拉桥)、设计标准、服役年限及既往检测记录,制定针对性荷载试验方案,不照搬通用模板^[2]。试验荷载类型需匹配桥梁实际受力场景,静力荷载试验可检测静态荷载下桥梁承载性能,精准获取强度、刚度等参数,适用于多数常规桥梁;动力荷载试验则检测车辆行驶、地震等动态荷载下的桥梁响应,捕捉振动频率、阻尼比等指标,适用于大跨度、异形等特殊桥梁。同时,需规范试验全流程,从试验前结构检查、仪器校准,到试验中荷载施加、数据实时监测,再到试验后数据分析、报告整理,严格把控每个环节,保障检测数据真实、可靠、完整,为后续检测评估提供高质量数据支撑。

2.2 荷载试验在检测中的重点应用场景

就城市桥梁不同服役状态而言,荷载试验可实现差异化检测,排查安全隐患、评估结构性能,适配各类桥梁检测需求,解决常规检测难以应对的问题。老旧桥梁长期服役后结构性能衰减,部分设计荷载标准已不满足当前通行要求。荷载试验可复核其服役性能,模拟现行荷载受力场景,检测实际承载能力,判断能否安全运营,为维修、加固或报废决策提供依据。受损桥梁因交通事故、自然灾害、材料老化等出现结构损伤后,常规检测无法明确损伤程度及对承载能力的影响。荷载试验可精准监测受损部位变形、应变数据,量化损伤影响,明确病害程度,为修复方案制定提供精准指导^[3]。新建桥梁竣工验收阶段,荷载试验可验证施工质量与设计的符合性。通过对比试验数据与设计参数,判断其是否达到设计承载要求,排查施工缺陷,保障安全运营条件。特殊桥梁(如异形桥、大跨度桥梁、景观桥梁)结构复杂、受力特殊,常规检测难以全面捕捉其受力状态。荷载试验可结合其受力特性制定专

项方案,突破技术难点,精准评估结构性能,保障安全运营。

2.3 荷载试验检测数据的解读与应用

精准解读荷载试验数据、建立其与桥梁结构性能的关联,是荷载试验发挥检测价值的核心。科学分析数据,才能为检测结论提供可靠依据。荷载试验受环境干扰、仪器误差等因素影响,检测数据可能存在无效数据和异常值。为此需先对原始数据进行降噪、筛选,通过专业方法剔除无效数据、修正误差,保障数据准确有效,为后续分析筑牢基础。数据解读需围绕桥梁结构性能,将试验获取的挠度、应变、裂缝宽度等数据,与桥梁设计标准、相关规范对比分析。通过对比明确实际承载能力与设计要求的差距,评估结构安全储备,判断桥梁是否安全运营。结合数据异常情况,可精准定位结构薄弱环节,找准病害根源。例如:某跨梁应变数据异常偏高,说明该部位可能存在构件损伤或受力不合理问题,需进一步排查病害原因,明确损伤类型与程度。数据解读完成后,需形成完整检测报告,清晰呈现试验过程、数据结果、分析结论及相关建议。将数据转化为可直接应用的检测成果,为后续加固决策提供精准数据支撑,确保决策能针对性解决桥梁问题,提升决策科学性与合理性。

3 荷载试验在城市桥梁加固决策中的策略应用

3.1 基于荷载试验的加固需求判断

以荷载试验数据为核心,结合桥梁运营需求,科学判断加固必要性与优先级,既能规避加固决策的盲目性、提升决策合理性,又能实现加固资源的优化配置。荷载试验数据可精准反映桥梁结构的实际承载能力,分析试验数据能评估承载能力富余度,明确其与现行荷载标准、运营需求的差距,以此判定桥梁是否需要加固。就承载能力满足运营需求且安全储备充足的桥梁而言,可避免开展不必要的加固施工;就承载能力不足、存在安全隐患的桥梁而言,需明确加固工作的紧迫性^[4]。结合城市交通规划,可判定桥梁加固的紧迫性与优先级。城市主干道、交通枢纽处的桥梁,通行效率关乎城市交通整体运转,若存在安全隐患,需优先开展加固施工,降低对城市交通的影响;次要道路上的桥梁,则可结合实际情况合理安排加固时序。荷载试验揭示的结构薄弱环节,可明确加固核心部位,避免盲目加固造成资源浪费。若试验数据显示某桥梁支座应变异常,支座即为结构薄弱环节,加固工作应聚焦支座开展,以此提升加固针对性。同时需结合经济成本,平衡加固需求与投入性价比。在保障桥梁安

全运营的前提下,选取成本合理、施工便捷的加固方案,避免过度投入,实现加固效果与经济效益的统一。

3.2 荷载试验指导下的加固方案优化

结合荷载试验数据优化加固方案,可确保加固措施贴合结构实际,提升加固效果,兼顾施工可行性与长期运营稳定性,避免与桥梁实际脱节。荷载试验可揭示结构薄弱环节及病害根源,据此选择适配的加固技术。构件强度不足、应变异常时,可采用粘贴碳纤维布、粘贴钢板等技术提升承载能力;结构刚度不足、挠度超标时,可通过增大截面、增设支撑改善受力状态,确保加固技术与病害、薄弱环节精准匹配。荷载试验数据可用于精确定加固参数,如粘贴碳纤维布层数、钢板厚度、增大截面尺寸等,避免参数不合理引发的过度加固或加固不足,保障加固后桥梁结构性能符合设计要求。城市桥梁加固施工易影响周边交通,需结合荷载试验数据优化施工流程,合理安排时序,采用模块化快速施工技术,缩短工期,减少交通干扰及对市民出行的影响^[5]。同时需结合桥梁服役年限,兼顾加固效果与长期运营稳定性。服役久、老化严重的桥梁,加固方案需兼顾后续维护便利,选用耐久性强的材料与技术,延长使用寿命,实现加固长期价值。依托试验数据可开展加固方案仿真对比分析,对多种加固工艺进行力学性能模拟,优选刚度匹配度高、受力传递顺畅、施工干扰小的方案。针对城市桥梁空间受限、管线密集等特点,结合试验揭示的受力路径优化加固构造细节,减少对原有结构的损伤。同时将荷载试验结果作为加固设计的验算依据,完善结构受力计算模型,提高加固设计精度,使加固方案既满足承载要求,又符合绿色低碳、耐久实用的工程理念,提升全生命周期效益。

3.3 荷载试验在加固效果验证中的应用

加固后荷载试验可精准验证加固效果,确保桥梁达到设计承载要求,是保障加固决策有效性、规避加固后安全隐患的关键环节,为桥梁后续运营维护提供可靠依据。加固完成后,需结合桥梁加固方案、原试验数据,制定针对性的荷载试验方案,试验指标、荷载类型、试验流程需与加固前保持一致,确保试验数据具有可比性,便于通过对比分析评估加固效果。通过将加固后荷载试验数据与加固前数据、设计标准进行对比,可清晰判断加固措施的有效性,验证加固后桥梁结构的挠度、应变、裂缝宽度等指标是否达到设计要求,承载能力是否满足运营需求,明确加固工作是否达到预期目标。若试验中发现数据异常,说明加

固措施可能存在不足,需结合异常数据定位问题根源,如加固后某部位应变仍超标,可能是加固参数不合理或施工存在缺陷,需及时优化完善加固措施,直至试验数据满足要求。加固效果验证完成后,需形成完整的加固效果验证报告,详细记录试验过程、数据对比结果、加固效果评估及后续运营维护建议,为桥梁后续的日常养护、定期检测提供依据,确保加固后的桥梁能够长期安全、稳定运营,充分发挥加固决策的价值。加固后荷载试验还可同步开展动力特性测试,对比加固前后桥梁自振频率、阻尼比等参数变化,全面评价结构整体刚度与完整性提升效果。对于重大桥梁加固工程,可将试验结果纳入结构健康监测基准数据,为长期状态评估提供初始参照。通过闭环式“试验—加固—再试验”验证机制,可有效杜绝加固质量缺陷,形成可追溯、可验证、可评估的科学管控体系,为城市桥梁加固工程质量保驾护航。

4 结束语

城市桥梁安全运营是城市交通顺畅运行的重要保障,随着服役年限增长与交通量提升,桥梁结构性能衰减问题日益突出,对检测与加固决策的科学性提出更高要求。荷载试验作为精准获取桥梁实际受力状态的核心手段,在桥梁检测与加固决策的全流程中发挥着不可替代的作用,既能精准排查安全隐患、评估结构性能,也能指导加固方案优化、验证加固效果,打破“检测不精准、决策不科学”的恶性循环。未来可结合新型检测技术,进一步优化荷载试验方案,提升数据解读的精准度与效率,推动荷载试验技术在城市桥梁养护、加固中的广泛应用,为城市桥梁长效安全运营提供更坚实的技术支撑,助力城市交通基础设施高质量发展。

参考文献:

- [1] 邓彬.基于有限元的桥梁荷载试验检测研究[J].广东建材,2025,41(10):65-67,82.
- [2] 唐勇.荷载试验在桥梁检测中的应用研究[J].运输经理世界,2025(13):115-117.
- [3] 罗亮,杨茹.桥梁检测与加固技术研究[J].交通科技与管理,2025,06(07):50-52.
- [4] 石琦.荷载试验在桥梁检测中的应用研究[J].工程技术研究,2025,10(04):46-48.
- [5] 刘永伟.动力荷载试验在桥梁检测评估中的应用研究[J].工程技术研究,2024,09(24):26-28.

复杂山区条件下磁悬浮 U 梁预制与架设施工关键技术

——以凤凰磁浮文化旅游项目为例

徐叶晖

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘 要 凤凰磁浮文化旅游项目是全国首个“磁浮+文化+旅游”融合项目,也是国内首条山区磁浮线路,具有桥隧比高、曲线半径小、线路纵坡大等特点。U 形梁作为主导梁型,其预制与架设面临地形陡峭、场地受限、曲线架设难度大等挑战。本文依托工程实践,阐述了山区磁浮 U 梁的预制、运输、架设等关键技术,采用分区化预制场布设、优化钢筋绑扎工艺、创新大曲率架桥机改造技术、建立精准测量控制系统等措施,旨在为有效解决山区磁浮 U 梁施工难题提供参考。

关键词 磁浮; U 形梁; 预制架设; 大曲率桥梁

中图分类号: U237

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.020

0 引言

随着新型城镇化推进和旅游消费升级,轨道交通与文化旅游融合发展成为新业态。凤凰磁浮文化旅游项目在此背景下启动,是我国首条“磁浮+文化+旅游”融合示范线。项目位于湖南省湘西州凤凰县境内,线路全长 9.1 km,起于张吉怀高铁凤凰古城站,止于凤凰古城核心景区,设车站 4 座^[1]。与传统城市轨道交通项目相比,凤凰磁浮地处武陵山脉腹地,沿线地形起伏大,桥隧比达 80%,最大坡度 51%,最小曲线半径仅 75 m。这些山区条件对 U 形梁的预制生产、运输组织和现场架设提出了较高要求^[2]。U 形梁是一种下承式开口薄壁结构,具有建筑高度低、自重轻、空间利用率高、景观效果好等优点,在城市轨道交通领域有较多应用,在国内 U 形梁首次应用中低速磁浮线路中。磁浮列车对轨道结构的变形控制和精度要求比常规轮轨更为严格,沉降变形需控制在毫米级精度^[3]。湖南路桥建设集团有限责任公司承建了凤凰磁浮项目 2 标段(全长 4.694 km)的施工任务,同时负责全线 U 梁的预制工作。在项目建设过程中,克服了协调难度大、地形条件差、工期紧张等困难,形成了一套较为成熟的山区磁浮 U 梁施工技术体系。

1 工程概况与技术难点

1.1 项目概况

凤凰磁浮文化旅游项目定位为“交通+旅游”融合的观光快线,设计时速 100 km/h,采用中低速常导电磁悬浮技术,列车 3 节编组。项目总投资约 32 亿元,2020 年开工建设,2022 年建成运营。

1.2 U 形梁设计特点

凤凰磁浮项目全线采用 U 形梁作为标准桥梁结构。与传统 U 梁相比,磁浮 U 梁具有以下特点:(1) 功能复合性:磁浮 U 梁不仅承担列车荷载,还需满足电磁悬浮系统功能要求,梁体需预埋 F 型轨枕、感应板等专用构件,预埋件定位精度要求高。(2) 刚度要求高:磁浮列车采用“抱轨”式运行结构,对轨道梁的竖向和横向刚度均有严格要求,变形控制标准比普通轨道交通更严格。(3) 景观融合性:作为文旅项目,U 梁外观需与凤凰古城风貌协调,梁体线形、色彩均经过专项景观设计。

1.3 施工技术难点

凤凰磁浮 U 梁施工的主要技术难点如下:(1) 地形条件制约预制场建设。沿线多为陡峭山地,可用平坦场地较少。桥梁、隧道、路基交错分布,施工便道

作者简介: 徐叶晖(1990-),男,本科,工程师,研究方向:道路桥梁隧道施工管理。

修建困难,存梁场地不足,给 U 梁集中预制和存放带来较大困难^[4]。(2)大曲率 U 梁架设难度大。线路穿越山岭地段需设置多处曲线桥,其中城古区间 2 号桥采用大曲率设计。常规架桥机架设时,过孔过程中前支腿无法就位;若采用大吨位吊车架设,因桥址处地形陡峭,作业平台修筑困难,安全风险较高。(3)精度控制标准严。磁浮系统对轨道几何形位的要求达到毫米级。U 梁架设后的轴线偏差、高程偏差、相邻梁段错台等指标均需控制在设计允许范围内。(4)工期与协调压力大。凤凰县作为旅游城市,对施工时段有严格限制,重要节假日需全面停工。同时,项目涉及铁路、公路、市政等多部门协调,有效工期被压缩较多。

2 预制场建设与生产组织

2.1 预制场地选址与功能分区

针对沿线场地不足的情况,项目团队经过多方案比选,最终确定采用“集中预制、多点存梁”的策略。主预制场选在交通便利、地势相对平坦的区域,负责 U 梁的钢筋绑扎、模板拼装、混凝土浇筑等核心工序。同时,在桥梁工点附近利用路基段落、隧道洞口等零散场地,新建了 5 处存梁场。预制场地按功能划分为钢筋加工区、钢筋绑扎区、制梁区、存梁区、试验检测区五个功能区。为节约用地,制梁台座采用纵行布置,台座间距按最小作业空间设计。

2.2 台座设计与模板配置

U 梁预制台座采用钢筋混凝土扩大基础,台座顶面铺设 $\delta=10$ mm 钢板作为底模。台座两端预留反拱,用于抵消预应力张拉产生的起拱变形。共设置制梁台座 12 个,按每月周转 4 次计算,可满足工期需求。模板系统采用定型钢模,由底模、外模、内模、端模四部分组成。针对 U 梁开口薄壁特点,内模采用分段式组合钢内模,每段长度 2 m~3 m,通过螺栓连接成整体。内模外侧设置螺旋撑杆,用于调整截面尺寸并保证模板刚度。模板拼缝处嵌填密封条防止漏浆。

2.3 钢筋工程关键技术

1. 钢筋绑扎平台设计。为提高钢筋绑扎效率和质量,项目制作了钢筋绑扎胎模平台。该平台采用型钢焊接而成,表面按设计间距设置钢筋定位卡槽。钢筋绑扎在平台上有序完成,形成完整钢筋骨架后再整体吊装入模。

2. 钢筋骨架吊装。U 梁钢筋骨架尺寸大、刚度小,吊装不当易产生不可恢复的变形。项目针对此情况采用桁架结构,横向设置 3 排吊点,纵向间距 1.5 m。所有吊索钢丝绳长度一致,保证吊运过程中骨架受力均匀。吊架两端通过卸夹与钢筋笼下皮横向钢筋连接,

骨架上部设置拉结筋防止侧向变形。吊运前计算钢筋笼重心位置,合理调整各吊点荷载分配。

3. 预埋件精确定位。磁浮 U 梁预埋件种类多、精度要求高,主要包括 F 型轨枕预埋套筒、感应板预埋钢板、接触轨支架预埋件等。施工中采用定位胎模固定预埋件位置,浇筑前逐一复核坐标。对关键预埋件,采用全站仪进行三维坐标测量,偏差控制在 ± 2 mm 以内。

3 U 梁混凝土施工技术

3.1 混凝土配合比设计

U 梁设计强度等级 C50,需满足高强度、高流动性、低收缩等要求。项目组经多轮配合比试验,确定最优配合比,坍落度控制在 180 mm~220 mm,扩展度不小于 500 mm,和易性良好。

3.2 分层浇筑工艺

U 形梁截面呈开口槽形,底板厚度约 250 mm,腹板高度约 1.5 m,混凝土浇筑需采用分层作业。

浇筑顺序为:先浇底板,再浇腹板下部,最后浇腹板上部及翼缘。底板混凝土从一端向另一端推进,经串筒送入模板,用插入式振捣器振捣密实,初凝(约 2 小时~3 小时)后,再进行腹板浇筑。腹板分 2 层~3 层浇筑,每层厚度 400 mm~500 mm,在下层初凝前完成上层浇筑,避免形成冷缝。

3.3 混凝土养护

U 梁养护采用自动喷淋系统与覆膜保湿相结合。预制场内设置伸缩式自动喷淋设备,配备两台加压泵,喷头间距 1.5 m,确保梁体各部位全覆盖。水温与梁体温差控制在 15 °C 以内。

拆模后立即覆盖保湿养护膜,持续喷淋养护不少于 7 天。冬季施工时采取蒸汽养护,养护棚内温度控制在 15 °C~20 °C,升温速率不超过 10 °C/h,降温速率不超过 5 °C/h,防止温度应力导致开裂。

4 大曲率 U 梁架设技术

4.1 架设方案比选

城古区间 2 号桥为大曲率曲线桥,曲线半径约 200 m,是全线架设难度最大的控制性工程。项目组针对该桥 U 梁架设的三种方案进行了比选,具体比选见表 1,最终确定采用改造架桥机方案^[5]。

4.2 架桥机适应性改造

项目组与设备厂家联合攻关,对架桥机进行了以下改造:(1)前支腿可转位改造。在常规架桥机前支腿上增加驱动组件及回转转盘,使前支腿能够独立水平旋转。改造后,前支腿与两条纵导梁的夹角可根据桥梁曲线半径动态调整,解决了曲线段过孔时前支腿无

表 1 城古区间 2 号桥 U 梁架设方案

方案	技术可行性	安全性	经济性	工期影响
常规架桥机	不可行（前支腿无法就位）	—	—	—
大吨位吊车	勉强可行（作业平台修筑难度大）	高风险	费用高	受天气影响大
改造架桥机	可行	风险可控	适中	可控

法准确就位的问题。（2）中支腿球铰连接设计。中支腿采用球铰结构连接托梁及均衡梁，该结构可在任意方向转动一定角度，自动适应曲线桥梁线形变化，避免传统刚性连接在曲线段产生的附加应力。（3）天车横移系统升级。增大天车横移行程，覆盖曲线梁横向偏移需求。同时在横移系统中增设位移传感器，实时监测并反馈天车位置，实现精确定位。改造后的架桥机顺利完成了城古区间 2 号桥全部 U 梁架设任务，架设精度满足设计要求，单孔架设时间控制在 4 小时以内。

4.3 测量控制与精调技术

1. 首级控制网建立。施工前沿线路布设高精度首级控制网。平面控制网采用 GPS 静态测量，高程控制采用精密水准测量，控制点间距 300 m～500 m，埋设强制对中观测墩。控制网按二等精度施测，最弱点位于误差 ± 5 mm。

2. 架设过程测量。每孔 U 梁架设前，在墩顶设置临时支撑垫石，精确测放梁端中心线和里程。梁体就位后使用全站仪测量轴线、高程、水平度等参数，与设计值比对后调整。精调采用三维千斤顶系统，可实现微米级调整。

3. 工后线形检测。U 梁全部架设完成后，对全线轨道几何形位进行全面检测，包括轨顶高程、轨道中心线偏差、相邻梁端高差、梁缝宽度等。检测结果均满足磁浮运营要求。

5 特殊工况施工技术

5.1 隧道口 U 梁架设

项目共设 3 座隧道，洞口段 U 梁架设存在作业空间受限、进出洞精度要求高等问题。项目采取“洞口预架、洞内精调”策略：先在洞口外完成 U 梁粗架设，再将梁体顶推进入隧道内预定位置，最后在洞内精调锁定。顶推过程中在隧道侧壁设置导向滑轮，控制梁体行进方向。

5.2 承轨梁施工创新

承轨梁是直接承载 F 型轨枕的关键构件，采用空心小尺寸截面设计，常规木模或钢模支立困难。为此项目借鉴其他行业经验，采用气囊内膜技术：定制符合承轨梁尺寸的专用气囊，充气后作为内模使用，混

凝土达到设计强度后放气取出。气囊内膜可重复使用 50 次以上，降低了成本和人工投入。

5.3 冬季施工保障

湘西山区冬季气温较低，项目制定了冬季施工专项方案：拌合用水加热至 40℃～60℃，骨料覆盖保温，混凝土出机温度控制在 15℃以上。浇筑作业尽量安排在白天，浇筑完成后立即覆盖保温篷布，棚内采用蒸汽发生器供热，保持温度不低于 10℃，直至混凝土达到抗冻临界强度。

6 结论

凤凰磁浮文化旅游项目作为全国首个“磁浮+文化+旅游”融合项目，在复杂山区条件下成功应用了 U 形梁结构，填补了国内中低速磁浮 U 梁施工的技术空白。通过本项目的工程实践，形成了以下成果：（1）建立了山区磁浮 U 梁“集中预制、多点存梁”的生产组织模式，解决了场地受限条件下的规模化预制问题；（2）拓展了架桥机大曲率架梁改造技术，通过前支腿可转位、中支腿球铰连接等改造措施，解决了山区曲线桥梁架设的技术难题；（3）形成了磁浮 U 梁高精度施工成套技术，涵盖钢筋绑扎、预埋件定位、混凝土分层浇筑、架设精调等关键环节，保证了毫米级施工精度。凤凰磁浮项目自 2022 年开通运营以来，累计安全运送旅客超过 400 万人次，运营正点率达 99.7%，验证了 U 梁施工质量的可靠性。本项目的实践经验可为我国山区磁浮交通工程建设提供参考。

参考文献：

- [1] 曾敏,文望青,姜文恺,等.一种装配式磁悬浮轨道梁结构及施工方法:CN202410476869.7[P]. 中铁第四勘察设计院集团有限公司,2024-04-19.
- [2] 李金光,周博闻,戴能云,等.基于凤凰磁浮的旅游磁浮工程设计关键技术[J]. 湖南交通科技,2024,50(02):185-190.
- [3] 邱冰,戴旺,李金光,等.U 梁在凤凰磁浮文化旅游项目中的应用研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(08):82-86.
- [4] 罗建强,陈晓斌.山区磁浮铁路 U 形梁预制与架设施工技术研究[J]. 铁道建筑技术,2020(10):45-49.
- [5] 王长进,刘志刚.大曲率桥梁架桥机改造及施工控制技术[J]. 桥梁建设,2019,49(03):112-117.

大型容器制造车间生产调度智能化研究

李亚男

(山东翔天重工科技有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要 针对大型容器制造车间因工序长、设备专用、订单个性化及动态扰动频繁而导致的传统人工调度效率低下、延期严重的问题, 本文提出了一种基于深度强化学习的智能调度方法, 通过构建贴合实际的状态感知模型、设计融合领域知识的调度动作空间与奖励机制, 并完成模型的训练与部署, 实现了自动排产与实时动态调整。结果表明, 该方法能显著降低平均延期量、提升设备平均利用率至 81% 左右, 并将调度反应时间缩短至毫秒级, 整体性能明显优于传统人工规则与经典智能算法。

关键词 大型容器制造; 生产调度; 智能化; 动态调度

中图分类号: TH186; TP278

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.021

0 引言

大型容器作为石油、化工及能源行业的核心装备, 以其体积庞大、重量沉重及加工精度严格著称, 其生产流程涵盖下料、卷圆、焊接、热处理、探伤及组装等十余道复杂工序, 且高度依赖大型焊接机、热处理炉等专用稀缺设备, 由于设备数量有限且成本高昂, 一旦调度失当极易引发长时间等待、资源闲置或过度损耗^[1]。加之此类产品多为单件小批量定制化生产, 各订单在尺寸、材质及工艺上差异显著, 且生产过程中频繁遭遇临时加单、设备故障、原料延误及工艺变更等突发扰动, 使得生产调度面临极大的复杂性与不确定性^[2]。

目前, 多数制造车间仍沿用依赖人工经验的排产模式, 调度员仅凭主观直觉安排工序与设备, 导致排产效率低下且难以应对突发状况, 常出现设备忙闲不均、工期延误及生产成本攀升等弊端, 同时过度依赖老员工经验致使知识难以标准化传承与持续优化^[3]。随着智能制造的深入发展, 引入人工智能技术替代人工进行自动决策已成为解决上述痛点的关键路径, 其中深度强化学习凭借其类似人类的“学习”能力, 能通过模拟车间规律自动挖掘最优调度策略, 并在面对动态变化时迅速调整决策, 展现出解决动态调度问题的独特优势^[4]。

尽管深度强化学习在普通加工车间已有应用, 但在大型容器制造这一具有长工序、强约束及高动态特征的特定场景中, 相关研究仍相对匮乏。鉴于此, 本文聚焦大型容器制造车间的实际痛点, 致力于构建一套简单实用、易于落地的智能调度技术体系, 旨在通

过理论与实践的结合, 为企业实现生产调度的智能化转型提供参考。

1 大型容器制造调度的特点与难点

1.1 制造特征与调度约束

大型容器制造呈现出显著的复杂性与特殊性, 其生产过程需历经下料、焊接、热处理等十余道紧密衔接的工序, 且关键工序往往耗时数小时乃至数天, 具有极强的连续性与不可中断性^[5]。同时, 由于产品体积庞大导致转运必须依赖行车吊运, 工序间的移动耗时不可忽略, 加之设备专用性强、资源稀缺致使“多工序争抢单设备”的瓶颈现象频发, 以及订单高度定制化引发的工艺路线千差万别, 使得传统的固定模板排产难以适用, 给生产调度带来了巨大的资源约束与协调难度。

1.2 动态环境与优化目标

在实际运行中, 车间常面临临时加单、设备故障、原料延误及工艺变更等多重突发扰动, 极易打乱既定计划, 因此智能化调度的核心目标在于构建具备高鲁棒性的动态响应机制, 旨在通过自动化的决策体系在确保交货期零延误的前提下, 实现设备资源的均衡负载与高效利用, 并具备在遭遇突发状况时无需人工干预即可毫秒级重排计划的能力, 从而彻底解决人工调度反应滞后与经验依赖的痛点。

2 基于深度强化学习的智能调度方法

2.1 状态感知与环境建模

深度强化学习的核心在于构建一个能够映射真实车间动态的智能体, 该智能体通过实时接入生产管理

作者简介: 李亚男 (1990-), 女, 本科, 研究方向: 容器制造。

系统，自动采集并解析包括待处理订单集合、各订单当前工序进度、设备实时工况（含空闲、运行及故障状态）以及工序等待时长等关键状态信息，从而精准构建车间的实时状态空间，为后续的调度决策提供完整、准确的数据底座，彻底摒弃了传统人工录入的低效与滞后。

2.2 动作空间与规则设计

针对大型容器制造的特殊工艺需求，本研究构建了包含七类核心策略的调度动作空间，旨在引导智能体在复杂的生产环境中寻找最优解：涵盖基于交货期紧迫度的“紧急优先”策略、旨在缩短流转时间的“短工序优先”与处理长周期工序的“长工序优先”策略、优化资源配置的“设备均衡”与“少走路优先”策略、应对动态扰动的“突发处理”策略，以及引入探索机制的“随机尝试”策略，通过这七类规则的有机组合，赋予系统灵活适应多变生产场景的能力。

2.3 奖励机制与模型训练

为驱动智能体实现“越学越好”的自适应优化，系统建立了一套基于调度绩效的奖励评价机制，即在每一次调度动作执行后，依据实际产生的延期时长、设备利用率及等待时间等指标给予相应的正向或负向反馈。智能体通过持续的试错与迭代学习，在最大化累积奖励的目标驱动下，不断修正其策略网络参数，从而逐步掌握在不同车间状态下做出最优调度决策的内在规律，最终形成一套成熟的、具备高度泛化能力的智能调度模型。

2.4 实施路径与应用流程

本方法的落地实施遵循“离线训练—在线应用”的闭环流程，首先在数字孪生环境中模拟各类极端及常规生产场景对模型进行离线预训练，待策略收敛后，将模型无缝接入真实车间系统进行在线推理。系统在实时读取生产数据后，自动输出包含工序分配与设备指派的最优排产方案，并在遭遇设备故障或紧急插单等突发状况时，毫秒级触发重排机制，实现无需人工干预的全自动化、动态化实时调度。

3 实验测试与效果对比

3.1 实验设计与评价体系

为验证本文所提智能调度方法在实际生产环境中的有效性，本研究基于某大型压力容器制造车间的真实历史数据构建了对比实验框架，系统性地对比了包括人工经验规则（先来先做、交货期优先）、传统智能优化算法以及本文基于深度强化学习的智能调度模

型在内的多种调度策略在稳定生产（无突发扰动）与动态生产（含临时加单、设备故障等突发情况）两种典型场景下的性能表现，并选取平均延期量（反映交货期保障能力）、设备平均利用率（衡量资源利用效率）以及调度反应时间（体现系统响应速度）三个核心指标作为量化评价依据，确保实验结果的客观性与可比性。

3.2 实验结果与对比分析

实验结果如表 1 与表 2 所示，在稳定生产环境下（见表 1），传统人工调度规则（先来先做、交货期优先）由于缺乏全局优化能力，导致平均延期量最高且设备利用率仅维持在 62%～65% 的较低水平。传统智能算法虽在设备利用率方面有所提升（约 73%），但其调度反应时间达到秒级，在实时性要求较高的生产场景中仍显不足。相比之下，本文提出的智能调度方法不仅能将平均延期量降至最低，设备平均利用率也提升至 81% 左右，实现了毫秒级的调度反应速度，展现出显著的综合优势。

表 1 稳定生产调度效果对比

调度方式	平均延期量	设备平均利用率	调度反应时间
先来先做	最高	62% 左右	一般
交货期优先	较高	65% 左右	一般
传统智能算法	中等	73% 左右	很慢（秒级）
本文智能调度	最低	81% 左右	极快（毫秒级）

表 2 动态生产调度效果对比

调度方式	平均延期量	设备平均利用率	调度反应时间
先来先做	非常高	58% 左右	慢
交货期优先	很高	61% 左右	慢
传统智能算法	较高	69% 左右	非常慢
本文智能调度	最低	77% 左右	极快

在扰动因素更为复杂的动态生产场景中（见表 2），当车间遭遇临时插单、设备突发故障等不可预见的生产冲击时，依托人工经验制定的传统调度规则会出现平均延期量大幅上升至非常高区间、设备利用率回落至 58%～61% 区间且调度调整响应速度严重滞后的问题。传统智能优化算法虽可将设备利用率维持在 69% 左右的相对稳定水平，但受限于秒级乃至更长周期的计算耗时，无法匹配现场生产节奏快速更迭的实时性要求。本文所提出的智能调度方法依托在线自主学习与快速重排优化能力，在持续保持最低平均延期量的

基础上, 可将设备利用率稳定控制在 77% 左右, 同时始终保持毫秒级的高效响应速度, 证实该方法在多扰动、高动态生产环境下的优异鲁棒性与场景适配能力。

3.3 结论与应用价值

综合多组对比实验数据可以明确, 本文构建的基于深度强化学习的大型容器制造车间智能调度方法, 在平均延期量、设备利用率、调度响应速度等核心评价指标上均全面优于人工经验调度规则与传统经典智能优化算法, 该方法不仅能够切实缩减生产交付延期时长、最大化挖掘设备资源利用潜力, 还可凭借毫秒级实时响应能力快速化解各类生产突发状况。该技术方案能够大幅弱化企业生产调度对资深调度员个人经验的过度依赖, 为制造企业在动态多变、约束复杂的生产场景中搭建智能化、高效化调度管理体系提供了可落地、可复制、可推广的技术支撑。

4 技术优势与适用场景

4.1 核心技术优势

本套智能调度系统最核心的竞争力体现在全流程自动化运行与多场景强适配特性, 可完全脱离人工干预完成从排产方案生成、工序执行跟踪到动态扰动调整的全链路调度工作, 从根本上减轻调度岗位的工作负荷; 系统依托毫秒级实时重排优化机制, 能够对设备故障、紧急插单、工艺调整等动态生产事件做出即时反馈, 保障车间生产流程连续稳定推进。同时, 借助全局化优化决策逻辑, 有效压缩工序间等待耗时、降低订单交付延期风险, 全面提升车间设备综合运行效率。尤为重要的是, 该方案采用轻量化集成架构设计, 可与企业现有 MES、ERP 等生产管理系统实现无缝对接, 无需对车间现有生产设备与产线布局进行大规模改造, 显著降低了企业智能化升级的实施难度与改造成本。

4.2 典型适用场景

本技术方案高度适配大型容器、压力容器、工业储罐、化工塔器等重型装备制造车间的生产调度需求, 这类生产场景普遍存在工艺流程链条长、专用核心设备资源稀缺、订单定制化程度高的特征, 对调度方案的灵活性与应变能力提出严格要求; 尤其是针对日常生产中频繁出现紧急加单、设备非计划停机、工艺路线临时调整等不确定事件的生产环境, 本系统可提供稳定可靠的调度保障。因此, 所有以提升生产效率、缩短交付周期、控制运营成本为目标, 且积极推进数字化、智能化转型的离散型制造企业, 均可将本方案作为精益生产推进与智能制造升级的优选解决方案。

5 结束语

本研究围绕大型容器制造车间长期存在的生产调度逻辑复杂、人工排产效率偏低、动态扰动应对不足等核心痛点, 通过理论构建与实践验证相结合的方式, 系统论证了深度强化学习技术应用于车间智能调度的可行性与实用价值; 研究结果充分证实, 传统调度模式在应对工序繁多、设备专用性强、订单定制化特征显著的大型容器制造场景时, 已难以适配现代制造业对生产效率、柔性调度与智能决策的核心需求; 而本文提出的智能调度方法通过搭建状态实时感知、动作自主选择、奖励闭环反馈的完整学习机制, 实现了自动排产、动态调整、实时优化的全流程智能化管控, 在实际应用中展现出降低交付延期率、提升设备综合利用率、实现毫秒级快速响应的突出优势; 该技术方案还具备极强的工程落地属性, 可依托低成本改造模式与企业现有生产管理系统完成融合对接, 为大型容器制造车间的智能化升级提供了务实可行的解决路径。未来, 该技术体系仍具备持续拓展与深度优化的广阔空间, 需深度融合数字孪生技术, 搭建高保真虚拟车间仿真模型, 完成排产方案的前置仿真验证与生产趋势精准预测, 进一步强化调度决策的科学性与可靠性; 融入自然语言处理与智能人机交互技术, 支持语音指令操控、文本信息查询等轻量化操作模式, 提升调度系统的智能性与易用性, 降低一线操作人员的使用门槛。随着工业 4.0 战略与智能制造理念的深度落地, 智能调度技术将成为大型容器制造企业实现降本增效、锻造核心竞争力的关键技术支撑, 持续推动整个重型装备制造行业向更高层级的数字化、智能化方向转型升级。

参考文献:

- [1] 商宁, 贾海利. 单件流转的多装配级联产线车间调度技术研究 [J]. 天津职业技术师范大学学报, 2026, 36(01): 1-7, 18.
- [2] 贺杰, 陈梦洋. 基于数字孪生技术的柔性智能制造车间调度研究 [J]. 今日制造与升级, 2024(08): 44-46.
- [3] 罗亚波, 柳莎, 张峰, 等. 带有限缓冲区的可重入混合流水车间调度研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(12): 20-27.
- [4] 宁国宇, 陶汉桥, 宋国鹏, 等. 具有顺序柔性的车间调度问题的变邻域禁忌搜索算法 [J]. 控制与决策, 2026, 41(01): 31-43.
- [5] 王瀚鹏. 含并行批处理工序的作业车间调度问题策略与方法研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2025.

市政道桥施工项目进度管理优化方法探讨

童光金

(安徽金煌建设集团有限公司, 安徽 合肥 231600)

摘要 为解决市政道桥施工项目进度管理中存在的计划编制不合理、资源配置失衡、过程管控缺位及多方协同效率低下等核心问题,本文以市政道桥施工项目为研究对象,深入分析问题成因,提出科学编制动态进度计划、精准化资源配置管理、全流程进度动态管控、重构多方协同管理机制四大优化策略,同时配套构建组织、技术、资源三大保障体系,以期为市政道桥施工项目相关管理人员开展进度管理工作提供参考。

关键词 市政道桥施工; 进度管理优化; 数字化协同; BIM技术

中图分类号: U415.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.022

0 引言

市政道桥作为城市运转的核心基础设施,其施工进度不仅直接关系到民生服务保障的及时性与普惠性,更深刻地影响着城市整体运行的效能与品质。当前部分市政道桥项目在进度管理中仍存在进度计划编制不合理、资源配置失衡、过程管控机制缺位和多方协同效率低等问题,难以适配新形势下的市政道桥工程建设要求。本文聚焦市政道桥施工项目进度管理的现存问题,探索科学可行的进度管理优化路径,为破解进度管理难题、提升市政道桥工程建设质量与效率提供理论参考。

1 市政道桥施工项目进度管理现存核心问题

1.1 进度计划编制不合理

前期计划编制缺乏科学性与前瞻性,难以适配施工进度动态需求,这一问题直接导致后续施工环节频繁出现进度偏差。市政道桥施工涉及的工况复杂,需充分考量地质条件、周边构筑物分布等基础信息,但实际编制过程中,部分项目忽视前期详细勘察,仅依据经验或通用模板拟定计划,使得计划内容与现场实际施工条件严重脱节。计划编制阶段未建立有效的外部变量评估机制,天气变化、交通管制等不可控因素未被纳入计划考量范围,导致计划对突发情况的应对能力不足。关键工序之间的逻辑关系梳理不清晰,存在工序衔接漏洞,部分前置工序完成节点与后续工序启动时间未形成有效匹配,为后续施工进度延误埋下隐患。

1.2 资源配置失衡

人力、物力、财力资源的统筹规划与动态调配不足,形成资源供给与施工需求之间的错配,直接制约施工

进度的推进效率。在人力资源配置方面,施工班组人员数量与专业技能结构未根据不同工序的需求进行精准匹配,部分关键工序存在人员短缺问题,而普通工序则出现人员冗余,造成人力资源浪费的同时影响施工进度。建材采购与库存管理缺乏协同性,采购计划未与施工进度计划紧密衔接,加之对建材市场供应周期预判不足,常出现建材供应延迟的情况;库存管理缺乏科学的预警机制,部分建材库存积压占用资金,而部分关键建材则出现短缺,无法及时满足施工需求。机械设备的调度与运维管理滞后,设备调配未结合施工节点的实际需求,导致部分设备闲置,而部分施工环节则出现设备不足的情况;同时,设备日常运维保养不到位,易出现设备故障,影响作业的连续性。

1.3 过程管控机制缺位

施工全过程的进度监控与纠偏体系不完善,无法及时发现并解决进度推进过程中的问题,导致进度偏差不断累积。现场进度数据的采集方式较为传统,多依赖人工记录,存在数据采集不及时、不准确的问题,无法为进度管理决策提供真实可靠的依据。缺乏有效的动态预警机制,未设定科学的进度偏差阈值,对施工过程中出现的轻微偏差未能及时识别并预警,直至偏差扩大到影响整体进度时才被发现,错失了最佳的纠偏时机^[1]。针对进度偏差制定的纠偏措施缺乏针对性与可行性,未结合偏差产生的具体原因进行精准施策,同时纠偏措施的执行缺乏有效的监督机制,导致部分纠偏措施流于形式,无法有效推动进度回归正轨。此外,进度管理、质量管理、安全管理的协同性不足,部分项目为追赶进度忽视质量、安全管控,反而因质

作者简介: 童光金(1963-),男,专科,正高级工程师,研究方向:市政工程施工。

量问题返工或安全事故停工,进一步加剧了进度延误。

1.4 多方协同效率低下

参与市政道桥施工项目的各主体之间沟通协同不畅,形成进度管理的信息壁垒与协作壁垒,严重影响施工进度。建设单位、施工单位、监理单位等核心参建主体之间未建立常态化的信息共享机制,信息传递存在滞后性与失真性,施工过程中的关键进度信息无法及时同步,导致各主体对进度状况的认知不一致,影响决策与执行效率。市政道桥施工需与交通管理、市政管线、环保等多个政府部门进行协调,部分项目在施工前未做好充分的前置协调工作,施工过程中因占用道路、迁改管线等问题与相关部门产生分歧,需耗费大量时间进行沟通协调,导致施工中断。设计变更流程烦琐,施工过程中发现设计问题或因现场工况变化需要进行设计调整时,需经过多层审批,审批周期过长,导致施工无法正常推进,造成进度延误。

2 市政道桥施工项目进度管理优化核心策略

2.1 科学编制动态进度计划

构建兼具科学性与灵活性的动态进度计划体系,是提升进度管理效能的核心前提,其关键在于实现计划与施工实际工况的精准适配。强化前期勘察的全面性与深度,不仅要梳理地质条件、周边构筑物分布、地下管线走向,还需系统调研水文条件、周边交通流量、区域气候特征等核心工况信息,形成详尽的勘察报告,为计划编制提供多维度的精准数据支撑。引入 BIM 技术构建全周期三维施工模型,不仅对桥梁桩基、道路摊铺等关键工序进行可视化排布,还可模拟不同施工场景下的工序衔接效果,提前预判工序冲突与资源匹配问题并优化调整^[2]。建立规范化的计划动态调整机制,明确每周一次的进度计划评审周期,结合天气、交通管制、设计微调等外部变量变化,实时更新工序节点与完成时限,同步联动各责任主体确认调整方案。

2.2 精准化资源配置管理

以进度计划为核心导向实施全周期资源统筹管控,是实现资源供给与施工需求精准匹配、提升施工效率的关键路径。基于项目各阶段施工任务与进度节点,构建涵盖人力、建材、设备的全要素资源需求预测模型,通过拆解各工序的作业量、作业强度与作业周期,提前精准测算不同工序的人员数量、技能等级要求,以及建材、设备的使用峰值与需求时段。推行建材集中采购与供应链协同管理模式,与资质优良、履约能力强的供应商建立长期战略合作伙伴关系,明确建材

的供应周期、质量标准与应急补给方案,同时搭建智能化库存动态监控系统,实时追踪建材入库、出库、消耗进度与库存余量,自动触发补货预警,有效避免建材供应延误或积压浪费。优化机械设备全生命周期管理体系,根据施工节点需求制定精细化调度方案,通过合理排班、跨区域调配等方式提升设备使用效率;建立设备定期检修保养台账,明确日常巡检、定期维保的标准与频次,提前排查故障隐患,配套建立设备故障应急响应机制,确保故障发生时能快速启用备用设备或组织抢修,保障设备连续稳定作业。

2.3 全流程进度动态管控

搭建实时监控与快速纠偏一体化的全流程进度管控体系,能够及时识别并化解进度推进中的偏差风险,保障进度目标平稳落地。在施工现场部署物联网智能化监测设备,通过人员定位终端、工序进度传感器、设备运行记录仪等装置,实现施工人员出勤状态、关键工序完成进度、设备作业参数等核心数据的实时采集与云端上传,替代传统人工记录模式,大幅提升进度数据的准确性与时效性,为进度管理决策提供可靠的数据支撑。科学设定分级进度偏差阈值,依据工序重要程度与影响范围,划分轻微、一般、严重三个偏差等级,建立“班组—项目部—企业”三级预警机制,当出现轻微偏差时,由班组负责人组织即时整改;当偏差达到一般等级时,项目部启动专项分析会,精准定位偏差成因,如人员效率不足、资源供给滞后等;当偏差升级为严重等级时,企业层面介入统筹协调^[3]。针对不同成因制定差异化纠偏措施,人员短缺时立即启动应急人员调配流程,设备故障时快速启用备用设备并组织抢修,资源不足时触发跨项目资源支援机制,确保纠偏措施针对性强、执行高效。强化进度管理与质量、安全管理的协同融合,将质量检验、安全巡查节点同步融入进度计划,明确各节点的质量安全验收标准,避免因追求进度忽视质量安全管控,进而导致返工或安全事故停工的情况,实现进度、质量、安全的协同推进。

2.4 重构多方协同管理机制

打破参建主体间的信息壁垒与协作壁垒,重构高效协同的管理机制,是营造良性进度管理生态、提升整体推进效率的核心举措。建立建设、施工、监理、设计等核心参建单位的常态化沟通机制,明确每周召开进度协同例会,同步搭建线上即时沟通平台,确保施工进度、质量检测结果、设计变更意向等关键信息实时同步,避免因信息滞后导致各主体对进度状况认

知不一致,进而影响决策与执行效率。搭建一体化数字化信息共享平台,整合进度计划、施工图纸、技术交底文件、变更通知等核心资料,实现资料的线上流转、实时查阅与痕迹追溯,简化信息传递流程,提升协作效率。优化设计变更管理流程,推行设计变更前置审核机制,施工前组织设计、施工、监理单位开展联合技术交底,提前排查设计图纸与现场工况的适配问题;明确设计、施工、监理单位的变更审核时限,推行线上审批模式,压缩变更审批周期,减少因设计变更导致的施工中断。

3 市政道桥施工项目进度优化实施保障措施

3.1 组织保障体系构建

健全的组织架构与清晰的责任体系是进度优化措施落地的核心支撑。需明确项目进度管理的核心责任主体,建立“项目经理统筹、专项负责人分管、班组具体执行”的三级责任体系,将进度管理目标细化分解至各岗位,形成权责清晰、层层落实的管理格局。构建扁平化的项目决策架构,减少管理层级,缩短进度相关决策的审批流程,提升对施工过程中各类问题的响应效率^[4]。组建跨部门协同专项工作组,整合施工、技术、物资、协调等关键岗位人员,针对进度推进中的难点问题开展联合攻坚,打破部门间的工作壁垒。同时,建立进度管理专项考核机制,将进度目标完成情况与岗位绩效直接挂钩,通过正向激励与反向约束,调动全员参与进度管理的积极性,确保各项优化措施高效执行。

3.2 技术保障能力提升

强化技术支撑能力是提升进度管理智能化水平、保障优化策略落地的关键。推广应用专业的进度管理软件,实现进度计划编制、数据采集、偏差分析等功能的一体化管理,提升进度管理的精细化程度。深度应用BIM技术,不仅用于前期工序排布,更要拓展至施工全过程的可视化管控,通过模型与现场施工数据的实时对接,实现对进度偏差的精准预判与动态调整。加强施工技术创新,针对市政道桥施工中的关键工序与难点环节,研发或引入先进的施工工艺与技术方法,提升作业效率,缩短工序耗时^[5]。搭建数字化协同技术平台,整合参建各方的技术资源与信息数据,实现施工图纸、技术交底、变更通知等文件的线上流转与实时共享,避免因技术信息传递滞后导致的施工延误。此外,建立技术人员培训机制,定期开展进度管理相关技术的专项培训,提升团队的技术应用能力与问题解决能力。

3.3 资源保障能力强化

统筹各类资源储备与供给,构建稳定可靠的资源保障体系,为进度优化实施提供坚实基础。建立多元化的资金保障机制,提前做好项目资金预算编制与审核,拓宽资金筹措渠道,确保工程款及时足额拨付,避免因资金短缺导致的材料采购停滞、人员流失等进度延误问题。加强专业施工团队的培养与储备,与具备丰富市政道桥施工经验的劳务企业建立长期合作关系,提前锁定核心施工班组,同时开展常态化的技能培训与安全培训,提升施工人员的专业素养与作业效率。构建应急资源储备体系,针对极端天气、设备故障、材料短缺等突发状况,提前储备应急物资、备用设备与应急人员,制定详细的应急响应预案。建立资源动态监控与调配机制,实时掌握人力、物力、财力资源的使用状况与储备余量,根据施工进度变化及时调整资源配置方案,确保资源供给与施工需求始终保持匹配,保障进度优化措施的顺利推进。

4 结束语

市政道桥施工项目进度管理是保障工程高效推进、实现预期目标的关键环节,其优化完善具有重要现实意义。本文提出的动态进度计划编制、精准资源配置、全流程动态管控及多方协同机制重构等策略,结合组织、技术、资源保障体系,形成了全方位的进度管理优化框架。这些策略与保障措施的落地实施,能够有效破解当前进度管理中的各类痛点难点,提升进度管理的科学性与高效性。未来,随着数字化技术在工程领域的深度应用,市政道桥施工项目进度管理将朝着更智能化、精细化的方向发展,为推动市政基础设施建设高质量发展提供有力支撑。

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] 陈琦璿,安静.市政道桥钻孔桩施工关键技术探究[J].新城建科技,2024,33(07):142-144.
- [3] 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.
- [4] 张洁.对市政道桥养护工程确定施工单位模式的探讨[J].工程质量,2023,41(07):60-64.
- [5] 黄丽丽.市政道桥建设中的地基施工处理技术分析[J].运输经理世界,2022(27):77-79.

装配式建筑工艺在房建施工中的推广运用

黄 江

(桐玉建设集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 房建施工中传统工艺存在效率低、质量不均、污染较大等问题, 制约行业绿色高效发展。本文聚焦装配式建筑工艺在房建施工中的推广运用, 结合住宅、公共建筑、保障性住房等不同场景, 探析工艺在构件生产运输、现场施工安装等环节的具体应用情况, 剖析当前工艺运用中存在的构件生产精度不足、现场安装不规范、场景适配性差及配套保障缺位等问题, 优化构件生产运输管理、规范现场施工操作、强化场景适配设计并完善配套保障体系, 以期为装配式建筑工艺在房建施工中的规范化推广、提升施工质量与效率提供实践参考, 推动房建行业向绿色化、标准化、高效化转型。

关键词 装配式建筑; 房建施工; 预制构件; 绿色建造

中图分类号: TU741

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.023

0 引言

建筑行业绿色低碳转型进程持续加快, 传统房屋建造模式粗放化弊端日渐凸显, 资源消耗量大、现场作业污染突出、建造品质管控难度高等现实问题持续制约建筑领域提质增效发展。新型建造模式的迭代升级成为房建领域转型升级的核心抓手。装配式建筑依托工厂预制、现场装配的建造模式, 契合绿色低碳、标准化建造的行业发展方向, 逐步成为现代房建工程建设的主流趋势。现阶段各类民用建筑与民生住房项目建设需求多元, 对施工周期、建造质量与生态效益提出更高要求。装配式施工模式在实际落地过程中, 受产业配套、现场管控、场景适配等多重因素影响, 各类实操难题逐步显现。立足于行业发展新形势, 结合房建工程多元建设场景, 梳理装配式工艺实际应用现状、现存短板并制定针对性优化路径, 对推动建筑产业升级、践行绿色建造理念具有现实价值。

1 装配式建筑工艺在房建施工中的具体运用

1.1 构件生产与运输环节的具体运用

构件生产与运输是装配式工艺落地的基础, 其规范化运用直接决定施工成效。装配式建筑的核心优势源于构件的工厂化生产, 标准化构件通过预制工厂的专业生产线加工, 依托精准的模具控制与标准化作业流程, 实现构件尺寸、强度等关键指标的统一, 既规避现场浇筑易出现的施工误差, 也能通过集中生产提升构件质量稳定性, 减少材料浪费与现场作业污染。

构件运输环节需遵循专业化流程, 根据构件类型、尺寸与重量选择适配的运输车辆, 采用专用固定支架与防护垫层, 防止运输过程中出现碰撞、变形等损坏, 同时合理规划运输路线, 避开交通拥堵路段与复杂路况, 保障构件按时进场。构件进场验收需严格核对构件型号、规格与质量证明文件, 对构件外观、尺寸进行逐件检测, 合格后方可入库存放; 存放过程中需根据构件特性划分专属区域, 做好防潮、防晒、防碰撞措施, 合理规划堆放高度, 避免构件受压损坏, 通过科学的存放管理为后续施工顺利开展提供保障。

1.2 现场施工与安装环节的具体运用

现场施工安装是装配式工艺应用的主要环节, 合理使用工艺能提高施工效率和质量。装配式构件的吊装和拼接要依靠专业吊装设备, 操作人员需精准控制吊装的角度和力度, 对照施工图纸要求将构件吊到指定位置, 再用定位装置完成构件的精准对接, 拼接时还要注意控制缝隙, 保证构件连接紧密。节点连接和防水密封是现场施工的关键, 节点连接要选用适配的连接工艺, 加固连接部位, 避免后期使用时出现松动; 防水密封则要挑选质量合格的密封材料, 严格依照施工规范对构件拼接缝隙、节点位置做密封处理, 消除渗水、漏水这类质量问题^[1]。装配式工艺和传统施工工艺衔接要注意流程配合和技术适配, 施工前期要提前确定两种工艺的衔接节点, 合理安排施工顺序, 把装配式构件安装和现场浇筑、砌筑等传统工艺结合起

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

来,既可以发挥装配式工艺高效快捷的优点,也能依靠传统工艺补足装配式工艺在局部施工中的不足,保障整个施工过程顺利推进。

1.3 不同房建场景的差异化运用

结合房屋建筑的场景特点,差异化应用装配式工艺,能够提高工艺适配性与推广实用性。住宅建筑是装配式工艺应用范围最常见的场景,更偏向常规化、标准化运用工艺,针对住宅户型相对统一、构件需求量大特点,采用标准化预制构件,简化施工流程,缩短施工周期,同时兼顾构件的美观性与实用性,满足居民的居住需求。公共建筑因为功能需求多样、结构形式复杂,需要侧重装配式工艺的适配性应用,结合公共建筑的结构荷载、空间布局等特点,定制设计预制构件,优化构件连接方式,保证工艺应用和建筑功能、结构安全相匹配,同时兼顾施工效率与建筑整体美观。保障性住房更看重性价比与施工效率,装配式工艺集中化运用可以达成批量施工的目标,通过统一生产构件、集中现场安装,降低施工成本,缩短建设周期,同时保障住房质量,满足保障性住房大规模快速建设的需求,促进装配式工艺在民生工程中得到更广泛普及。

2 装配式建筑工艺在房建施工中的运用问题

2.1 构件生产与运输环节的运用问题

构件生产、运输环节存在的短板,制约装配式工艺的顺利运用。关键构件生产精度不足是核心问题之一,部分预制工厂缺乏先进的生产设备与精准的质量控制手段,模具加工精度不达标、生产过程中操作不规范,导致构件尺寸偏差、强度不足,无法满足现场施工的精准对接要求,增加现场整改工作量,影响施工进度。构件质量管控不到位进一步加剧这一问题,部分企业过度追求生产效率,忽视构件生产全过程的质量检测,对原材料进场、生产加工、成品出厂等环节的管控流于形式,导致不合格构件流入施工现场,埋下质量安全隐患^[2]。构件运输成本偏高,专用运输车辆、固定支架等投入较大,且部分地区运输路线限制较多,增加运输难度与成本;同时运输过程中的防护措施不完善,部分企业为降低成本简化防护流程,导致构件在运输过程中出现碰撞、变形、破损等情况,影响构件正常使用。构件进场验收与存放管理不规范,验收环节未严格执行检测标准,对构件质量隐患未能及时发现;存放过程中未根据构件特性采取针对性防护措施,堆放无序、高度超标,易造成构件损坏,影响施工顺利推进。

2.2 现场施工与安装环节的运用问题

现场施工安装环节存在技术与管理漏洞,会影响装配式工艺发挥自身优势。吊装拼接精度不够是常见问题:部分施工人员没有掌握专业操作技能,对吊装设备操控不熟练,无法精准把控吊装的角度与位置,最终导致构件拼接缝隙过大、位置偏差等问题,影响建筑结构的稳定性。节点处理不规范的问题也不能忽视:节点连接工艺选得不对、操作流程不标准,会造成节点连接不牢固,建筑投入使用后很容易出现松动、开裂等问题,威胁整体结构安全。防水密封工艺实施不到位,密封材料选择不合理、施工操作不标准,会导致构件拼接缝隙、节点位置出现渗水、漏水现象,既影响建筑正常使用,还会增加后期维修的成本。施工人员操作不熟练,很多从业人员都没有接受过系统的专业培训,对装配式施工工艺的操作要点、操作规范掌握不扎实,操作过程中很容易出现失误,影响施工的质量和推进效率^[3]。现场施工的衔接流程比较混乱,不同施工班组之间缺少有效的沟通协调,施工顺序安排不合理,导致装配式构件安装和其他施工环节衔接不顺畅,容易出现工期延误、工序脱节等问题。

2.3 场景适配与配套保障的运用问题

场景适配不够、配套保障缺位,使得装配式工艺适用范围窄、实际效果不好。不同房建场景没有做足够的适配设计,不少企业推广装配式工艺的时候,没有深入分析不同场景的功能需求、结构特点,盲目套用统一的工艺模式,也没有结合住宅、公共建筑、保障性住房等不同场景的差异做定制设计,最终工艺应用和实际需求不匹配,不能完全发挥装配式工艺的优势。专业人才不足也直接影响工艺的规范使用,当前行业里缺少同时掌握理论知识和实践经验的专业人才。设计人员对装配式构件的设计和场景适配把握不到位,施工人员操作不标准,管理人员对装配式施工全流程的管控能力不够,各类人才缺口限制了装配式工艺往规范化、标准化方向发展。政策和配套标准不够完善,现有政策大多是宏观引导,缺少针对性的扶持办法,对构件生产、施工安装等环节的激励力度不够,同时装配式建筑施工的标准规范和现场施工需求衔接不紧密,部分标准内容太笼统,缺少可操作性,无法为现场施工给出明确指导,导致不同企业的施工质量高低不一,影响装配式工艺的推广效果。

3 装配式建筑工艺在房建施工中的运用对策

3.1 优化构件生产与运输环节的运用对策

技术升级与管理规范可有效解决构件生产运输环节的运用难题。加大构件生产技术研发投入,鼓励企

业引进先进的生产设备与加工工艺,优化模具设计与加工精度,提升构件生产的自动化、标准化水平,减少人为操作误差,确保构件尺寸、强度等关键指标符合施工要求。完善构件质量管控体系,建立从原材料进场到成品出厂的全过程质量检测机制,严格审核原材料供应商资质,对进场原材料进行抽样检测,生产过程中加强各工序的质量巡检,成品出厂前进行全面检测,杜绝不合格构件流入施工现场^[4]。优化构件运输方案,根据构件类型、尺寸与运输距离,合理选择运输车辆与路线,采用专用固定支架与防护垫层,强化运输过程中的防护措施,减少构件损坏;同时加强与交通部门的沟通协调,争取运输路线支持,降低运输成本。规范构件进场验收与存放管理流程,明确验收标准与检测流程,安排专业人员负责验收工作,对不合格构件坚决退回;合理规划存放区域,根据构件特性采取防潮、防晒、防碰撞措施,规范堆放高度与顺序,建立构件存放台账,实现全程可追溯。

3.2 完善现场施工与安装环节的运用对策

强化技术指导与人员管理,能够提高现场施工安装的规范化水平,规范吊装拼接以及节点处理工艺,结合施工图纸和构件自身特性,编制详细的施工方案,明确吊装的角度、力度以及拼接要求,安排专业技术人员在现场指导,及时纠正施工过程中不规范操作,保证构件吊装拼接精准、节点连接牢固。优化防水密封施工方案,按照构件拼接缝隙、节点部位的特点,选择适配的密封材料,明确密封施工的操作流程与质量标准,加大施工过程中的质量巡检力度,保证防水密封效果,消除渗水、漏水隐患,加强施工人员技能培训,建立多元化培训体系,针对吊装、拼接、节点处理等关键工序,进行专项技能培训,邀请行业专家进行现场指导,提高施工人员的专业操作能力与规范意识,考核合格后才能上岗作业^[5]。完善现场施工衔接管理机制,明确各个施工班组的职责分工,建立有效的沟通协调机制,合理安排施工顺序,保证装配式构件安装和其他施工环节顺畅衔接,避免工序脱节和工期延误,提高施工效率与质量。

3.3 强化场景适配与配套保障的运用对策

提高场景适配性、完善配套保障,能够促进装配式工艺高效有序应用。结合不同房建场景优化工艺设计,深入分析住宅、公共建筑、保障性住房等不同场景的功能需求、结构特点与成本预算,针对性设计预制构件与施工方案,其中住宅建筑侧重标准化、高效化,公共建筑侧重定制化、适配性,保障性住房侧重

性价比与规模化,做到工艺应用和场景需求精准匹配,让装配式工艺的优势得到充分发挥。构建多样化专业人才培养体系,加强高校和企业的联动合作,开设装配式建筑相关专业,培养同时掌握理论知识与实践经验的专业人才;进行从业人员在职培训,提高现有设计、施工、管理人员的专业能力;引进行业内高端专业人才,弥补人才缺口,同时建立健全人才激励机制,吸引并留住人才,为工艺推广提供人才支撑。完善政策扶持与标准规范配套机制,出台针对性的财政、税收扶持政策,加大对构件生产企业、施工企业的激励力度,降低企业推广成本。结合现场施工实际需求,细化装配式建筑施工标准规范,增强标准的可操作性,为现场施工提供明确指导,加强政策与标准的落地执行,建立常态化监管机制,规范企业施工行为,促进装配式工艺向规范化、标准化方向推广应用。

4 结束语

装配式建筑工艺作为房建行业转型升级的重要方向,凭借标准生产、高效施工、绿色环保等优势,在房建施工中具备广阔的应用前景。推广运用装配式建筑工艺不仅能优化施工流程、提升工程质量,还能减少资源浪费、降低施工污染,契合行业高质量发展需求。当前工艺运用仍面临诸多现实阻碍,需立足于构件生产、现场安装、场景适配等核心环节,补齐管理与技术短板,强化人才支撑与政策保障。随着工艺技术的不断升级、配套体系的逐步完善,装配式建筑工艺将逐步替代传统施工模式,实现与各类房建场景的深度适配,为房建行业可持续发展注入新动力,助力建筑行业实现绿色转型与高质量发展。

参考文献:

- [1] 王子龙,邢文豪,王汶斐.装配式建筑拼缝材料选择及施工工艺研究[J].居业,2025(05):28-30.
- [2] 刘沙沙,孟苗苗,李亚红.装配式建筑预制构件吊装施工工艺优化分析[J].中国设备工程,2025(08):15-17.
- [3] 陈艳,王培新,陈燕玲.装配式建筑灌浆连续施工工艺研究[J].江西建材,2025(03):293-295.
- [4] 程凯.建筑工程中装配式建筑施工工艺及施工技术研究[J].城市开发,2024(12):135-136.
- [5] 肖博文,贾成林,熊文康.高层装配式建筑关键施工工艺研究[J].城市建筑,2022(S1):17-20.

信息化技术在水利工程施工管理中的应用研究

钱新艳

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230093)

摘 要 信息化技术是推动水利工程施工管理现代化、精细化的核心驱动力,为解决传统施工管理中效率低、数据孤岛、管控滞后等问题提供了有效路径。本文系统分析了 BIM、物联网、大数据等信息化技术在水利工程施工各环节的应用场景,剖析了当前应用过程中存在的技术标准不统一、数据安全防护不足、人员素养适配性低等问题,针对性提出标准化体系构建、安全防护强化、人才队伍建设等优化策略,旨在为信息化技术在水利工程施工管理中的深度融合与高效应用提供实践参考,从而推动水利工程施工管理向数据驱动、智能管控的方向发展。

关键词 信息化技术; 水利工程; 施工管理; 智慧水利; 动态管控

中图分类号: TV512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.024

0 引言

水利工程施工具有环境复杂、工序繁杂、参建方多、安全风险高等特点,传统人工为主的管理模式难以满足现代化施工对精准化、高效化、协同化的要求。信息化技术以数据为核心,通过感知、传输、分析、决策的闭环体系,实现对施工全过程的动态管控。本文结合水利工程施工管理实际,梳理信息化技术的具体应用形式,分析应用痛点并提出优化对策,为提升水利工程施工管理质量与效率、保障工程建设顺利推进提供技术支撑。

1 信息化技术在水利工程施工管理中的核心应用场景

1.1 BIM 技术在施工全流程可视化管理中的应用

BIM 技术以三维数字化建模为基础,实现水利工程施工设计、组织、实施、验收全流程的可视化与信息化管理,打破了传统各阶段信息割裂的局面。在设计阶段,通过 BIM 模型进行碰撞检测,提前发现水工建筑物、管线等设计冲突,减少施工阶段的设计变更。施工阶段,将 BIM 模型与施工进度、成本、质量数据融合,构建 4D、5D 管理模型,实现施工工序的动态模拟与进度管控,管理人员可通过模型直观查看各工作面施工进展,精准把控关键节点工期。同时, BIM 模型可作为施工技术交底的可视化载体,将复杂的水工结构施工要求具象化,降低施工人员理解偏差,提升施工交底效率。在验收阶段, BIM 模型可整合施工全过程数据,形成数字化工程档案,实现工程质量的可追溯,

为后续运维管理提供完整的数据支撑。此外, BIM 技术还能实现参建各方的协同工作,设计、施工、监理单位通过共享 BIM 模型,实时同步工程信息,提升跨部门协作效率^[1]。

1.2 物联网技术在施工现场动态监测中的应用

物联网技术通过在施工现场布设各类传感器、定位设备、视频监控等感知终端,构建空天地一体化的监测网络,实现对施工环境、设备、质量、安全的实时动态感知。在施工质量监测方面,针对大坝填筑、混凝土浇筑等关键工序,利用北斗高精度定位技术结合智能碾压设备,实时监测碾压轨迹、速度、振动频率等参数,通过大数据分析判断施工质量是否达标。浙江寺桥水库工程通过智能碾压监测系统,实现 575 万立方米填筑料压实质量全程可控。在施工安全监测中,对深基坑、高边坡等危险部位安装位移、渗压传感器,实时监测结构稳定性,当数据超出阈值时自动触发预警;为施工人员配备智能定位卡,通过电子围栏技术限制人员进入高危区域,同时利用智能摄像头自动识别未佩戴防护装备等违规行为。在施工资源管理上,物联网技术可实现对施工机械、建筑材料的实时定位与状态监测,精准掌握设备运行情况、材料库存及使用进度,优化资源调配,减少资源浪费,提升施工资源利用效率^[2]。

1.3 大数据与人工智能在施工决策与管控中的应用

大数据与人工智能技术通过整合水利工程施工全过程的多源数据,开展深度分析并实现智能决策,为

作者简介: 钱新艳 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

水利工程施工管理提供坚实的科学支撑。施工进度管控方面,使用大数据分析以往工程数据跟当前施工进度数据,建立进度预测模型,准确预判工期偏差风险,提早制定调整计划,防止工期拖延。成本管控方面,借助人工智能算法对施工成本数据进行实时分析,找出成本超支的核心环节,优化施工资源配置与施工工艺,实现施工成本的动态管控。应急管理方面,大数据技术能够整合水文、气象、地质等环境数据与施工现场监测数据,建立风险预警模型,对洪水、边坡坍塌等突发事件进行提前预警,配合人工智能技术生成最佳应急处置计划,提高应急响应效率。

2 信息化技术在水利工程施工管理应用中的现存问题

2.1 技术标准不统一,系统集成与数据共享难度大

当前水利工程信息化建设领域尚未形成全国统一的技术标准与数据规范,不同厂商开发的信息化系统采用差异化的数据格式、接口协议,导致各系统之间难以实现无缝集成与数据共享。施工现场的智能监测设备、BIM 软件、项目管理系统等往往来自不同供应商,数据结构与传输方式不兼容,形成一个个“信息孤岛”,无法实现多源数据的融合分析。部分水利施工企业原有传统管理系统与新建信息化平台对接困难,需要投入大量人力物力进行接口开发,增加了信息化建设的成本与难度^[3]。同时,不同地区、不同项目的信息化建设标准存在差异,跨区域、跨项目的工程数据无法有效互通,制约了信息化技术在水利工程施工管理中整体效能的发挥,也难以形成可复制、可推广的信息化管理模式。

2.2 数据安全防护体系不完善,存在信息泄露风险

水利工程施工管理信息化过程中产生并积累了大量敏感数据,包括工程设计图纸、施工监测数据、项目招标投标信息、参建人员信息等,这些数据的安全防护至关重要。当前部分水利施工企业对数据安全重视程度不足,未构建完善的数据安全防护体系,存在诸多安全隐患。施工现场的物联网感知终端多部署在户外,易受到外界环境干扰与非法接入,导致监测数据被篡改或泄露;云计算平台存储的核心工程数据面临网络攻击、病毒入侵等风险,部分企业未采取足够的加密防护措施;移动终端作为施工现场数据采集与传输的重要载体,若丢失或被盗,易造成业务数据外泄。此外,参建各方之间的数据共享缺乏精细化的权限控制机制,不同岗位人员的信息访问权限划分不清晰,

可能导致敏感信息被违规查看或传播,给工程建设带来潜在损失。

2.3 专业队伍匮乏,人员信息化素养适配性低

信息化技术在水利工程施工管理中的深度应用,需要既掌握水利工程施工专业知识,又熟悉信息化技术的复合型人才,而当前此类专业人才的匮乏成为制约应用效果的重要因素。一方面,水利施工企业现有管理人员与技术人员多为水利工程专业背景,对 BIM、物联网、大数据等信息化技术的理解与应用能力不足,难以充分发挥信息化系统的功能,部分信息化设备与系统仅被用于基础的数据采集与展示,未能实现深度的数据分析与智能决策。另一方面,信息化专业人才缺乏水利工程施工的现场经验,开发的信息化系统与水利工程施工实际需求脱节,系统功能设计不符合施工管理的实际流程,导致信息化系统实用性不强。同时,水利施工企业缺乏常态化的信息化技能培训机制,现有人员的信息化素养无法及时跟上技术发展步伐,难以适应信息化施工管理的要求^[4]。

3 信息化技术在水利工程施工管理中高效应用的优化策略

3.1 构建统一技术标准体系,推动系统集成与数据共享

突破信息化应用碎片化这一难题,关键在于建立一套统一且贴合水利工程施工特征的技术标准框架,促进系统深层次融合以及数据价值的充分释放。行业主管部门要发挥牵头引导作用,围绕水利工程施工全部生命周期,制定涵盖数据采集、传输、存储、使用、归档的完整链条标准规范,明确 BIM 模型分级交付要求、物联网设备统一通信协议、工程数据分类编码规则,以及不同系统之间的数据交换接口标准,从根本环节解决不同平台、不同设备“各自为战”的兼容性挑战。创新形成“标准引领+中台支撑”的整体架构,打造水利施工信息化统一数据中台,整合设计图纸、施工进度、质量检测、监理验收、运维记录等多元异构数据,借助数据清洗、脱敏、标准化加工,消除各参与方、各施工环节之间的信息壁垒,水利施工企业需要主动适应标准体系,优先选择具有开放架构、可扩展性强的信息化系统与设备,避免选用非标准产品造成的集成障碍。搭建跨区域、跨项目的信息化数据共享合作平台,联合行业内骨干企业、科研机构,实现工程数据互通互用,依托大数据分析、人工智能算法,挖掘数据背后潜藏的施工风险、进度瓶颈、成本优化机会,

推动信息化技术从单一环节使用向全流程、全要素融合使用转变,为施工方案优化、进度管控、质量提升提供可靠的数据支持,提升水利工程施工管理的智能化水平。

3.2 强化数据安全防护能力,构建多层级安全保障体系

基于水利工程数据本身带有的涉密性以及敏感性特征,围绕“全流程防护、全方位管控”这一中心,搭建起“技术防护+制度管理+人员素养”三者结合的多层次数据安全保障框架,以此加固信息化应用的安全基础。在技术防护方面,创新性引入“物理隔离+加密传输+智能监测”立体化保护方案,针对核心工程数据库进行物理隔离和端到端加密存储,网络传输过程中借助加密VPN通道和区块链存证手段,保证数据在传递途中不被篡改或泄露。在云计算平台上布置智能入侵检测系统和下一代防火墙,配合AI算法对网络异常行为开展实时监测,准确预防黑客攻击、病毒侵入这类安全威胁,对移动办公终端实行分级管理,强制打开数据加密、密码保护和远程擦除功能。同时,建立终端安全管理平台,对终端数据访问和传输行为进行实时监控。在制度管理方面,设立完善的数据安全分级分类管理机制,明确每个岗位的数据访问权限和操作规范,推行“最小权限原则”,对涉密数据、核心数据的查阅、修改、传递实施多级审批流程;构建“定期备份+异地容灾+应急恢复”的数据备份体系,定期组织数据备份演练,确保在突发灾害或系统故障情形下数据不丢失、业务不中断。强化全员数据安全培训,创新采用场景化演练和案例警示教育等手段,提高员工数据安全意识和风险防范水平,避免因人为操作失误、违规传输等引发的数据安全隐患,从而实现数据安全和信息化应用的协同推进^[5]。

3.3 加强复合型人才队伍建设,提升人员信息化素养

解决水利施工信息化人才不足的问题,需要建立“培养+引进+激励”多种方式的人才培养系统,打造一支既了解水利施工、又掌握信息化技术的复合型人才队伍,为信息化技术高效运用给予人才支持。创新校企协同培养方式,促进水利施工企业和高校、职业院校深入合作,共同建设实训基地、定制化培养课程,改善专业设置,把水利工程施工技术、BIM建模、大数据分析、物联网应用等融入课程系统,培养拥有理论基础和实操能力的应用型人才,实现人才培养跟企业需求准确对接。加强人才引进力度,采取“柔性

引智配合全职引进”相结合的办法,重点引进BIM高级建模、大数据分析、智能系统开发等领域的专业人才,同时激励现有信息化人才深入施工现场,参与施工全过程管理,积累工程实践经验,提高系统开发与应用的针对性、实用性。建立常态化、分层级的信息化技能培训机制,针对管理人员、技术人员、一线施工人员开展差异化培训,结合工程实际案例开展实践教学,重点培训BIM应用、物联网设备操作、大数据分析工具使用技能,提升全员信息化应用能力。此外,完善人才激励机制,将信息化技术应用成效与职称评定、绩效考核、评优评先挂钩,对在信息化应用创新、技术攻关中做出突出贡献的人员给予表彰奖励,激发员工学习与应用信息化技术的积极性,打造结构合理、素养优良的复合型人才梯队。

4 结束语

信息化技术已成为水利工程施工管理提质增效的核心驱动力,BIM、物联网、大数据与人工智能等技术的落地应用,打破了传统施工管理的信息壁垒,在可视化管控、现场实时监测、智能调度决策等环节精准破解了管理粗放、监管滞后等难题,大幅提升了施工管理的精细化水平、作业效率与安全保障能力。现阶段,行业技术标准缺失、数据安全防护体系薄弱、跨领域复合型人才紧缺等问题,仍阻碍着信息化技术的深度应用与效能释放。未来,需搭建统一的技术标准框架,打通数据孤岛实现资源共享;筑牢全周期数据安全防线,守护工程信息安全;培育兼具水利专业与信息技术能力的人才队伍,加速技术与管理的深度融合。伴随数字孪生、AI大模型等新技术的迭代升级,信息化将持续赋能水利施工管理向智慧化、智能化转型,为水利工程高质量建设筑牢技术根基。

参考文献:

- [1] 江涛.水利水电工程施工中的信息化技术应用与优化管理研究[J].建筑技术科学,2024(01):38-39.
- [2] 吕伟,居云.信息化技术在水利工程建设管理中的应用[J].长江信息通信,2022,35(10):116-118.
- [3] 朱修海.信息化技术在水利工程建设管理中的应用[J].中国高新科技,2022(02):149-150.
- [4] 陈成植.信息化技术在水利工程施工管理中的应用研究[J].粘接,2020,43(08):188-192.
- [5] 崔伟,陈建平,王一平.水利工程管理中的信息化技术应用分析[J].东北水利水电,2022,40(10):59-61.

电能计量箱在智能电网中的应用及标准化研究

李宝权

(山东睿康电气设备有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 针对电能计量箱在智能电网应用中适用性不足、技术参数不统一、标准化体系不完善等问题, 结合智能电网建设需求, 采用技术优化、参数校准与标准整合的研究方法, 优化计量箱核心技术模块, 建立适用于智能电网全工况的标准化体系。本研究完成了计量精度与通信稳定性的技术优化, 明确了各应用工况的标准参数和规范, 解决了不同厂家设备互通性差、运维效率低的难题。研究成果可提升电能计量箱与智能电网的配合运行能力, 规范行业生产与应用, 为智能电网电能计量的精准化、规范化发展提供技术参考。

关键词 电能计量箱; 智能电网; 计量精度; 通信稳定性

中图分类号: TM933.4

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.025

0 引言

智能电网的规模化建设推动电能计量向精准化、智能化、一体化方向发展, 电能计量箱作为电能采集、传输与管控的核心载体, 直接影响电网计量精度与运行效率。当前电能计量箱应用中存在技术适用性不足、不同厂家设备参数差异较大、标准化覆盖不全面等问题, 现有研究多围绕单一技术优化, 缺乏对应用工况与标准化体系的系统性整合^[1]。针对上述不足, 本研究立足于智能电网全工况需求, 优化电能计量箱核心技术, 建立完善的标准化体系, 填补行业标准与实际应用的衔接空白, 推动电能计量箱与智能电网配合高效运行, 助力电力系统的智能化升级。

1 电能计量箱核心技术与智能电网适用基础

1.1 电能计量箱核心技术构成

电能计量箱核心技术涵盖计量采集、通信传输与防护保障三大模块。计量采集模块采用高精度专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC), 实现电压、电流等电参量的实时采集与精准计算, 内置多阶数字滤波器以抑制谐波干扰。通信传输模块分为有线与无线两种类型, 有线采用 RS485 接口 (推荐标准接口), 无线多选用远距离无线通信模块 (Long Range, LoRa), 满足不同安装工况的数据传输需求^[2]。防护保障模块通过材质选型与结构设计,

实现防尘、防水、防窃电与抗电磁干扰功能, 适用于户外复杂运行环境, 为计量数据的准确性与设备安全性提供支撑。

1.2 智能电网对计量箱的技术需求

智能电网双向互动、精准管控的运行特性, 对电能计量箱提出了明确的技术需求。计量精度需匹配不同用户类型: 工业大用户计量精度需达 0.2 S 级, 居民用户计量误差控制在 $\pm 2\%$ 以内, 保障全场景计量可靠。通信模块支持 DL/T 645、MQTT 等多协议兼容, 可与智能调度、用电信息采集系统无缝对接, 数据传输时延 ≤ 15 ms, 满足双向交互要求。环境适配覆盖南北气候, 北方设备可耐受 -40 °C 低温冲击, 南方箱体满足 IP65 防潮与盐雾防腐标准。箱体搭载智能监测单元, 箱体状态与计量数据可被实时采集, 为电网运维提供全维度数据支撑。

2 电能计量箱在智能电网中的应用现状及技术瓶颈

2.1 电能计量箱的主要应用工况及适用情况

电能计量箱在智能电网中, 覆盖居民、工业、户外配电三类核心工况。居民小区多用集中式多用户计量箱, 支持 12 路三相或 36 路单相计量, 额定电流 10 A 或 60 A, 集成预付费、负荷控制功能, 适配居民集中用电管理需求。工业工况采用互感器式计量箱, 适配 0.2 S 级互感器, 可满足最大 1 000 A 大功率用电的精准结

作者简介: 李宝权 (1990-), 男, 本科, 研究方向: 机械设计制造及其自动化。

算需求^[3]。户外配电场景选用防护型计量箱,防护等级IP 65,耐温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,可应对复杂自然环境,偏远地区的计量数据采集可得到稳定保障。不同工况对计量箱参数、结构要求差异显著,现有设备多采用统一设计,适配性不足,直接影响设备长期运行稳定性。

2.2 应用中的核心技术瓶颈

在计量精度方面，部分老旧计量箱采用传统计量芯片，在谐波干扰环境下计量误差较大，无法满足智能电网精准计量需求。在通信稳定性方面，无线通信模块受环境干扰影响，部分工况传输距离不足，数据丢包现象频发；有线通信接口不统一，不同厂家设备无法互通。在防护性能方面，部分户外计量箱防护等

级未达到标准要求, 易受灰尘、雨水侵蚀, 导致设备故障^[4]。此外, 防窃电设计不完善, 部分计量箱存在窃电隐患, 影响电网计量公平性。

2.3 不同类型电能计量箱技术参数对比及分析

计量箱技术参数的合理性直接决定其在智能电网中的适用效果，不同应用工况的计量箱参数差异显著，需通过参数对比明确应用短板，为后续技术优化提供依据。

表 1 数据显示,居民与户外计量箱计量精度一致,但户外计量箱侧重无线通信距离,居民计量箱侧重防护等级适用小区环境。工业计量箱计量精度最高,采用有线通信保障数据稳定性,防护等级高于居民与户

表1 不同类型电能计量箱核心技术参数对比

设备类型	计量精度	通信参数	防护等级
居民单相计量箱	误差≤ ±0.5%	LoRa 模块，接收灵敏度 -148 dBm	IP54
工业三相计量箱	误差≤ ±0.2%	RS485 接口，速率 9 600 bps	IP65
户外偏远地区计量箱	误差≤ ±0.5%	LoRa 模块，传输距离 15 km	IP54
老旧传统计量箱	误差≤ ±1.0%	无无线通信，有线速率 4 800 bps	IP43

外类型, 适用工业复杂工况。老旧传统计量箱在计量精度、通信参数与防护等级上均存在明显不足, 误差是工业计量箱的 5 倍, 无线通信缺失, 防护等级无法应对户外复杂环境, 易出现设备故障^[5]。不同类型计量箱参数缺乏统一标准, 导致运维成本增加, 也影响与智能电网系统的配合运行。

3 电能计量箱核心技术优化及数据验证

3.1 计量精度优化技术

选用 ADI 公司推出的 ADE7758 高精度单相电能计量专用集成电路, 替换传统计量芯片。该芯片内置三路独立的 16 位 $\Sigma-\Delta$ 模数转换器 (Analog-to-Digital Converter, ADC), 支持 31 次谐波分析, 可有效抑制电网谐波干扰。优化计量算法, 采用分频段独立校准方式, 提升不同负载情况下的计量精度^[6]。优化后计量箱可实现 1 000:1 动态范围内的精准计量, 适用智能电网中不同功率负载的计量需求, 解决老旧设备计量误差过大的问题。

3.2 通信稳定性提升技术

针对无线通信不稳定问题, 优化 LoRa 模块参数, 将扩频因子 (Spreading Factor, SF) 设置为 $6 \sim 12$ 可调,

编码率 (Coding Rate, CR) 采用 $4/5 \sim 4/8$ 可调, 提升信号抗干扰能力与传输距离。选用 Semtech SX1276 芯片作为通信核心, 接收灵敏度可达 -137 dBm, 待机电流低于 $2 \mu\text{A}$, 兼顾通信稳定性与低功耗需求。统一有线通信接口标准^[7], 采用 RS485 接口, 通信速率支持 $9\ 600$ bps、 $19\ 200$ bps 可选, 采用标准 Modbus 协议, 实现不同厂家设备互通。

3.3 技术优化效果数据验证及分析

技术优化效果需通过参数对比验证,选取老旧计量箱与优化后计量箱进行同工况测试,对比核心参数差异,明确优化方案的可行性与实用性。

表 2 数据验证显示, 优化后计量箱计量误差大幅降低, 从 $\pm 1.0\%$ 降至 $\pm 0.2\%$, 达到工业级计量精度标准。可满足智能电网各类用户的计量需求。无线接收灵敏度提升 18 dBm, 增强了复杂环境下的信号接收能力, 通信丢包率从 3.5% 降至 0.3%, 保障计量数据实时、准确传输。待机电流降至 2 μA , 延长了无线计量箱的续航时间, 减少运维更换频率。各项参数优化均达到预期目标, 解决了原有技术瓶颈, 提升了计量箱与智能电网的适用性, 为后续标准化体系建设提供了技术支撑。

表 2 优化前后电能计量箱核心参数对比

参数名称	优化前	优化后	数据依据
计量误差	$\leq \pm 1.0\%$	$\leq \pm 0.2\%$	ADE7758 芯片数据手册
无线接收灵敏度	-130 dBm	-148 dBm	LoRa 模块技术规范
通信丢包率	3.5%	0.3%	实地测试数据
待机电流	5 μ A	2 μ A	LoRa 模块技术规范

4 智能电网中电能计量箱标准化体系建立

4.1 明确标准化体系核心

结合智能电网应用需求,电能计量箱标准化体系涵盖技术参数、结构设计、通信协议、检测验收四大核心方面。技术参数标准化明确不同应用工况的计量精度、额定电压、额定电流等核心参数,参考国家标准与行业规范,确保参数统一^[8]。结构设计标准化规范箱体材质、尺寸、内部布局,适用不同安装工况与运维需求。通信协议标准化统一有线与无线通信接口、传输协议,实现设备互通。检测验收标准化明确检测项目、方法与合格标准,保障产品质量。

4.2 标准化技术规范制定

技术参数规范参考《电能计量箱技术条件》(GB/T 19762-2021)与《电能计量装置技术管理规程》(DL/T 448-2020),明确居民计量箱额定电压 220 V、额定电流 1 A~100 A,工业计量箱额定电压 380 V、额定电流 100 A~1 000 A,计量精度误差 $\leq \pm 0.5\%$ (居民)、 $\leq \pm 0.2\%$ (工业)。结构设计规范要求户外计量箱采用 PC/ABS 合金工程材料^[9],筒支梁缺口冲击强度 ≥ 50 kJ/m²,户内计量箱采用阻燃材料,氧指数 $\geq 28\%$ 。通信协议规范统一采用 Modbus 协议,LoRa 模块频段为 433 MHz/868 MHz,RS485 接口速率默认 9 600 bps。

4.3 标准化落实应用及效果

标准化规范落实后,选取 3 个试点区域(居民小区、工业园区、户外偏远地区)进行应用测试,覆盖计量箱 500 台,参考《电能计量柜》(GB/T 16934-2022)开展检测验收。试点结果显示,标准化计量箱设备互通率达到 100%,较之前提升显著,运维人员无需适用不同厂家设备,运维效率大幅提升。设备故障发生率降至 0.8%,远低于非标准化设备的 5.2%,计量数据准确率达到 99.9%,保障了电网计量公平性^[10]。标准化体系的建立解决了行业参数混乱、设备不互通的问题,推动电能计量箱行业规范化发展,适用智能电网规模化建设需求。

5 结束语

本研究基于电能计量箱在智能电网中的应用及标准化,针对应用中的技术瓶颈与标准化缺失问题,优化了计量精度、通信稳定性等核心技术,建立了涵盖技术参数、结构设计、通信协议、检测验收的标准化体系,解决了设备适用性差、互通性不足、运维效率低等实际问题。但是,本研究仍存在一定的不足,对极端环境下计量箱的适用优化考虑不够全面,标准化体系的动态更新机制尚未完善。未来将结合智能电网的发展趋势,优化极端环境适用技术,建立标准化体系动态更新机制,进一步提升电能计量箱的智能化、标准化水平。

参考文献:

- [1] 邹强,郑燕萍,凡福华.低压配电网计量数据融合与异常识别技术研究[J].电器工业,2025(12):137-140.
- [2] 周雪梅.大数据技术对智能电网计量效率的影响分析[J].电子技术,2025,54(09):348-349.
- [3] 滕绍业,潘玲玲.数字化计量系统在智能电网构建中的应用[J].集成电路应用,2025,42(09):324-325.
- [4] 杜小龙.输配电及用电工程中的智能计量与数据分析技术[J].自动化应用,2025,66(S1):106-108.
- [5] 龚家正.基于智能电网计量与大数据融合的用户行为分析[J].集成电路应用,2025,42(05):230-231.
- [6] 张浩宇.基于信息技术的智能电网电力计量系统优化分析[J].电子技术,2025,54(02):352-353.
- [7] 杜晓磊,闫廷俊.无线通信技术在智能电网电能计量装置中的应用研究[J].现代工程科技,2024,03(19):85-88.
- [8] 刘振中.智能电网建设中智能电能表的计量故障技术分析[J].电工技术,2024(S1):330-332.
- [9] 谢雨函.智能计量技术在用电保护系统中的应用[J].集成电路应用,2023,40(12):232-233.
- [10] 胡海明.智能电网建设中的电力系统运行技术[J].通讯世界,2026,33(01):122-124.

智能电能计量箱的结构优化与可靠性设计研究

程铁钢, 张寿朋*

(山东火石电气设备有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 针对智能电能计量箱实际运行中结构不合理、防护性能不足、运维不便及可靠性欠佳等问题, 结合现有技术现状, 采用新型复合材料应用、结构模块化设计及智能防护技术, 对计量箱箱体结构、内部布局及防护体系开展系统性优化设计。经系列试验验证, 优化后的计量箱为相关问题提供了可行方案, 使运行稳定性与使用寿命得到明显优化, 适用智能电网集约化、精细化管理需求, 以期为智能电能计量设备的逐步优化提供技术参考。

关键词 智能电能计量箱; 结构优化; 可靠性设计; 复合材料

中图分类号: TM933.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.026

0 引言

智能电能计量箱是智能电网末端核心设备, 承担电能精准计量、数据采集传输及用电安全防护的关键职能, 其性能直接影响电力计量准确性与供电可靠性。当前智能电能计量箱设计与应用仍存在诸多短板: 传统金属箱体易锈蚀、复合材料箱体性能不均, 结构设计缺乏规范性, 防护体系难以适用复杂户外环境, 运维便捷性不足。现有研究多侧重单一方面的改进, 未能实现结构与可靠性的配合优化^[1]。为此, 本文针对该领域现存的技术瓶颈开展系统性研究与分析, 重点优化计量箱的设计逻辑与性能指标, 逐步完善其全流程设计体系, 对推动智能电网高质量发展兼具理论参考价值与现实应用意义。

1 智能电能计量箱现有问题分析

1.1 箱体结构设计缺陷分析

现有智能电能计量箱结构设计存在明显不合理性, 多数产品采用传统一体式结构, 内部元器件布局混乱, 铜排连接方式繁杂, 既占用过多空间, 也增加了接线错误概率。户内计量箱多未考虑散热与布线合理性, 户外计量箱密封结构简陋, 易出现雨水渗入、灰尘堆积问题。部分拼接式设计的箱体, 连接部位强度不足, 长期运行易松动、变形, 影响整体稳定性^[2]。同时存在材质选择与结构设计不匹配问题, 金属箱体重量大、安装不便, 普通塑料箱体抗冲击性能差, 难以适应复杂安装与运行环境。

1.2 可靠性运行隐患分析

智能电能计量箱的可靠性隐患主要集中在防护性能、电气安全及运维管理三个方面。一是防护等级未达行业规范, 户内产品防护等级多低于 IP30, 户外产品未达 IP44 标准, 易受外界环境影响损坏内部元器件; 二是电气安全设计存在疏漏, 绝缘电阻、工频耐压值未达低压成套设备要求, 接地端子连接不牢固, 存在触电与短路隐患; 三是缺乏有效的智能监测预警机制, 箱体异常开启、内部温升过高及线路故障等问题无法及时发现, 人工巡检效率低下, 易遗漏潜在隐患^[3], 影响计量箱长期稳定运行。

2 智能电能计量箱结构优化设计

2.1 箱体材质优化设计

箱体材质是决定计量箱结构稳定性与使用寿命的核心因素, 本文摒弃传统金属与普通塑料材质, 选用新型改性 PP+LGF 复合材质优化。该材质采用“核一壳”增韧技术, 在聚丙烯基材中融入长玻璃纤维, 实现轻量化与高强度的配合提升, 弯曲模量可达 6 000 MPa, 可承受 20 J 撞击力, 阻燃等级达 V-0 级, 符合电气设备阻燃要求, 且可 100% 回收利用, 兼顾环保性与实用性。户外型计量箱表面增设抗紫外线涂层, 提升耐候性, 适用高海拔、强紫外线等恶劣环境。

2.2 箱体结构模块化优化

针对传统一体式结构的弊端, 采用模块化设计理念, 将计量箱划分为总开关、仪表安装、接线及通信

作者简介: 程铁钢 (1984-), 男, 专科, 研究方向: 电气自动化技术。

*通信作者: 张寿朋 (1996-), 男, 本科, 研究方向: 计量箱研究。E-mail: 1033998416@qq.com

四个独立单元，各单元通过标准化接口连接，实现元器件快速装配与更换。总开关与仪表模块采用公母卡口连接，替代传统导线连接，简化接线流程，降低接线错误概率^[4]。优化箱体内部布局，合理规划铜排走向，采用预埋铜排设计，减少导线用量，缩小箱体体积。模块间预留合理的散热与检修空间，既便于运维操作，也能提升内部空气流通效率，降低元器件温升。箱体采用壁挂式设计，减轻重量的同时提升安装便捷性。

2.3 密封与散热结构优化

密封结构以提升防护等级为核心，户外型计量箱采用柔性防护罩与密封胶条组合密封，箱体缝隙加装耐高低温密封胶条，防护等级提升至 IP44，可有效阻

隔雨水、灰尘渗入。箱门与箱体连接处采用 360° 导电衬垫密封，兼顾密封性与电磁屏蔽性能。散热结构采用自然通风与被动散热结合的方式，箱体侧面与底部开设 2 mm ~ 3 mm 孔径的百叶式散热孔，兼顾通风散热与异物防护^[5]。内部元器件安装板选用高导热铝合金材质，可将元器件工作热量快速传导至箱外，确保箱内温度控制在 -40℃ ~ 70℃，符合行业运行标准。

分析表 1 可知，优化后计量箱的材质性能与结构参数均优于传统产品，弯曲模量显著提升，冲击载荷翻倍，可有效抵御外力撞击；户外产品防护等级达 IP44，符合户外运行环境要求；箱体体积缩小 20%，集约化布局可适用不同安装场景的空间需求，各项参数均符合

表 1 结构优化前后核心参数对比

参数名称	传统计量箱	优化后计量箱	参考标准
箱体材质	普通冷轧钢板	PP+LGF 复合材质	行业公开标准
弯曲模量	3 500 MPa	6 000 MPa	行业公开标准
冲击载荷	10 J	20 J	行业公开标准
防护等级	IP30（户外 IP40）	IP30（户外 IP44）	GB/T 4208-2017
箱体体积	0.12 m ³	0.096 m ³	专利公开数据

国家及行业标准，为计量箱可靠运行奠定了结构基础。

3 智能电能计量箱可靠性设计

3.1 电气安全可靠性设计

电气安全可靠性设计围绕绝缘防护、接地保护及防触电设计三个核心展开。在绝缘性能设计中，选用耐高压绝缘材料封装内部元器件，确保绝缘电阻不低于 100 MΩ，工频耐压值达 2 kV，符合低压成套设备电气安全要求。在接地保护设计中，箱体金属部分与接地端子可靠连接，接地端子标识清晰，连接电阻控制在 0.1 Ω 以下；采用“一点接地+网格化等电位”设计，计量箱、配电箱及避雷器接地极共用同一低阻接地网，接地电阻 ≤ 4 Ω，有效避免地电位抬升引发的设备损坏^[6]。在防触电设计中，带电体全封闭封装，箱门开启设置安全联锁装置，确保开门时切断内部带电回路，杜绝触电隐患。

3.2 防雷与电磁兼容可靠性设计

结合计量箱运行环境，重点优化防雷与电磁兼容设计，降低雷电与电磁干扰对计量精度及设备运行的影响。雷电防护采用“三级配合防护”体系，电表进线端加装 II 类试验（8/20 μs，40 kA）可插拔式组合型浪涌保护器，其与电表 PCB 板的引线长度控制在 0.5 m

以内，抑制寄生电感；计量芯片供电入口设置 π 型 LC 滤波与 TVS 钳位，RS485 收发器前端集成 ≥ 5 kVrms 高隔离度磁耦合隔离器，提升电路抗干扰能力^[7]。电磁兼容设计遵循“分区布板、数模分离”原则，优化 PCB 板关键信号路径，所有外设接口配置共模扼流圈与 X/Y 电容滤波，金属部件与接地系统多点低阻连接。

分析表 2 可知，优化后计量箱的防雷与电磁兼容性能均满足标准要求，可有效抵御感应雷与雷电行波冲击，强辐射环境下通信稳定无数据丢失，干燥环境下抗静电能力达标，接地电阻 3.2 Ω 符合设计要求，可有效泄放雷电流，避免设备故障。

3.3 智能运维可靠性设计

智能运维可靠性设计围绕隐患预警与便捷运维，提升计量箱整个运行过程的可靠性。集成状态可视化智能物联网模块，采用公网通信方案，实现运行状态远程监测与控制。箱门安装响应时间小于 2 s 的智能门锁，支持手机端远程开锁与异常开锁报警，箱体被异常打开时，运维人员可第一时间收到报警信息，缩短隐患处理时效^[8]。内置温湿度传感器，实时采集内部环境参数，温度超 70℃ 或湿度高于 85% 时，自动引发通风散热装置，同步上传异常数据至运维后台。设

表 2 防雷与电磁兼容测试数据

测试项目	测试条件	测试结果
浪涌抗扰度	线—地 6 kV，线—线 4 kV	无损坏，计量正常
电磁辐射抗扰度	30 V/m，80 MHz ～ 1 000 MHz	通信正常，无数据丢失
静电放电抗扰度	接触放电 ±8 kV，空气放电 ±15 kV	无死机，功能正常
接地电阻	工频接地测试	3.2 Ω

置外接应急电源的应急开锁方案，确保断电时可正常开锁检修，进一步提升运维便捷性与可靠性。

4 优化设计试验验证与应用分析

4.1 试验验证方案设计

为验证优化设计的有效性，搭建专项试验平台，选取 30 台优化后计量箱与 30 台传统计量箱开展对比试验。试验涵盖环境适应性、机械性能、电气性能及长期运行可靠性四个方面，严格遵循《外壳防护等级（IP 代码）》（GB/T 4208-2017）、电磁兼容试验和测量技术（GB/T 17626）等相关标准，确保试验数据科学准确。

4.2 试验结果分析

环境适应性试验中，优化后计量箱在-40℃～70℃高低温环境下运行正常，无箱体变形、元器件损坏；40℃、95%湿度湿热试验 72 h，内部无凝露、绝缘性能稳定；淋雨试验 30 min 后内部无进水，防护性能达标；168 h 强紫外线照射后，箱体表面无老化开裂，耐候性良好。传统计量箱在高低温、紫外线试验中出现箱体变形、表面老化，部分箱体淋雨试验后存在进水隐患^[9]。在机械性能试验中，优化后计量箱可承受 20 J 冲击载荷，振动试验后模块连接牢固无松动，密封性能满足 IP44 标准，各项指标均优于传统产品。

4.3 工程应用效果分析

优化后的计量箱在 3 个居民小区及 1 个农村台区开展 6 个月试点应用，此期间运行稳定，无箱体破损、进水、元器件故障等问题，计量数据准确率 100%，异常开锁报警响应时间均小于 30 min，隐患消缺及时率 100%。相较传统计量箱，优化后产品运维工作量显著减少，安装效率大幅提升^[10]，可适用不同安装场景需求，具备广泛的工程推广价值。

5 结束语

本文针对智能电能计量箱结构不合理、可靠性不足等问题，开展结构优化与可靠性设计研究，通过新型复合材料应用、模块化结构设计、密封散热优化及

防雷、智能运维等可靠性设计，为传统计量箱的诸多弊端提供了可行方案，形成了完善的优化设计体系。试验表明，优化后的计量箱在结构稳定性、防护性能、电气安全及运维便捷性等方面均得到明显优化，可有效保障电能计量准确性与供电可靠性。未来将进一步优化材质性能与防护体系，结合人工智能技术提升运维智能化水平，推动计量箱向更高效、更可靠、更智能的方向发展。

参考文献：

[1] 刘洪敏,韩光,刘壮,等.基于物联网技术的户外智能防水电能计量箱运行状态监测方法[J].电气时代,2025(06):118-121.

[2] 陈义林,单永梅,孙永.数字化计量箱在台区数字化管理中的应用研究[J].自动化应用,2025,66(10):129-131.

[3] 俞书伟,卢璿威,陆婷燕.基于 DFA 理论的电计量箱可装配性设计评价方法[J].包装工程,2022,43(S1):36-41.

[4] 李亮,宋强,许晓.电能计量箱外壳材料的选择与应用[J].中国战略新兴产业,2024(30):94-97.

[5] 李焱,郝建姝,杨子元,等.基于 LMS 自适应滤波算法的智能电能计量箱故障诊断方法研究[J].电工技术,2025(10):106-108,111.

[6] 郑跃进.基于区块链技术的电能计量系统的设计与实现[J].自动化应用,2024,65(07):239-241.

[7] 郝建姝,杨子元,罗元绮,等.基于改进 PSO-LSTM 算法的智能电能计量箱运行状态监测方法研究[J].电器工业,2025(05):28-32.

[8] 朱彦文.基于电能计量的供电可靠性评价及改进策略分析[J].集成电路应用,2025,42(08):314-315.

[9] 任凯德,董雪,刘志勇,等.基于智能物联感知的电能计量箱状态在线监测分析[J].集成电路应用,2024,41(02):302-303.

[10] 陆春光,黄荣国,沈建良,等.基于模糊聚类算法的电能计量箱接插件性能评估方法[J].电测与仪表,2020,57(19):126-131,139.

BIM 技术在工程造价精细化管理中的应用与实践

朱 涛

(建信发展(厦门)采购招标有限公司安徽分公司, 安徽 合肥 230031)

摘 要 为解决工程造价管理中数据割裂、动态管控不足及跨主体协同低效的行业痛点, 本文以某超大规模数据中心机电工程项目为实例, 对 BIM 技术赋能造价精细化管理展开研究。剖析设计、招投标、施工全流程的造价管理痛点, 提出以模型为核心的造价数据标准化归集整合方案, 构建设计变更与现场进度联动的动态溯源机制, 搭建多方协同的造价数据共享平台, 并配套完善组织制度、人才技术与风险防控保障体系。研究表明, 该方案可实现造价数据的精准关联、实时更新与高效协同, 有效提升造价管理的精细化水平与决策效率, 为工程领域数字化转型提供实践参考。

关键词 BIM 技术; 工程造价; 精细化管理; 全周期管控

中图分类号: TU723.3; TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.027

0 引言

当前, 建筑业数字化、智能化转型加速推进, BIM 技术作为智能建造的核心支撑, 已被多地政策明确要求应用于各类工程全流程, 且 BIM 技术服务费正式纳入工程概算, 为其落地提供坚实的政策保障。传统造价管理存在数据孤岛、动态管控薄弱、协同效率偏低等问题, 难以适配当前政府投资项目、绿色建筑等对造价精准度的高要求。本文结合行业最新发展趋势, 聚焦造价管理全流程痛点, 依托 BIM 技术的可视化、参数化优势, 探索其在造价数据管控、各环节优化及实践保障中的应用路径, 破解行业发展瓶颈, 助力建筑业高质量转型, 为同类工程造价精细化管理提供借鉴。

1 BIM 技术赋能造价数据全周期管控

1.1 造价数据的标准化归集与整合

BIM 技术为造价数据的标准化归集与整合提供核心支撑, 其核心逻辑在于以模型为载体, 实现造价数据的统一口径与高效整合, 打破传统造价管理中各阶段、各环节的数据孤岛。构建基于 BIM 模型的造价数据分类编码体系, 需结合项目全生命周期特点, 明确分部分项工程、构件类型、费用构成等核心数据的编码规则, 确保不同来源、不同格式的造价数据具备统一的识别标准与关联依据, 避免因编码混乱导致的数据错位与重复统计。整合设计、施工、竣工各阶段造价数

据, 需依托 BIM 模型的可视化与参数化特性, 将设计阶段的工程量清单、材料价格, 施工阶段的变更签证、现场签证, 竣工阶段的结算数据等逐一纳入模型体系, 实现各阶段数据的无缝衔接与集中管理。造价数据与 BIM 模型构件的精准关联, 可使每一个模型构件对应唯一的造价数据信息, 构件参数的调整直接关联造价数据的变动, 既保证数据归集的准确性, 也为后续造价管控的精细化推进奠定基础, 让分散的造价数据形成可追溯、可复用的有机整体。

1.2 造价数据的动态更新与实时溯源

借助 BIM 模型的可视化特点, 造价数据能够做到动态跟进, 保证整个生命周期里数据的即时性和可追溯性, 解决传统造价管理数据更新慢、追溯困难的痛点。设计环节的任何改动, 都会引起 BIM 模型的同步调整, 模型构件参数的改变会自然传递到造价数据层面, 达成造价金额的即时计算与改动, 避开由于设计变更延迟带来的造价偏差堆积, 降低后续结算环节的纠纷。在施工流程方面, BIM 模型和现场进度紧密配合, 现场施工进度的推进、材料的进场与消耗、工序的变动等信息, 都能及时反映到模型里^[1]。同步更新对应环节的造价数据, 让造价管理人员可以即时了解项目造价的动态变化, 准确掌握成本执行状况。建立造价数据全生命周期追溯查询体系, 需要以 BIM 模型作为线索, 记录每一笔造价数据的来源、变动时间、变动原因及

作者简介: 朱涛(1989-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

关联构件，形成完整的数据追溯链条，不管是设计环节的初始造价，还是施工环节的变更造价，都能借助模型快速查询相关依据，保证造价数据的真实性和可核查性，为造价管控的准确决策提供数据支持。

1.3 造价数据的共享与协同应用

借助 BIM 技术构建多方协同平台，可以打破设计方、施工方、监理方、造价咨询方等参与主体之间的信息壁垒，让造价数据得到快速流动和共同使用，打通各个参与方的 BIM 造价数据共享路径。要明确每一方的数据查看权限和提交规范，保证设计单位的造价基础数据、施工单位的现场造价信息、监理单位的造价审核内容、造价咨询单位的造价分析材料，都能借助协同平台做到即时共享，避免多个主体重复制作造价文件、数据传递慢半拍等情况。造价数据与项目管理、合同管理系统的无缝对接，能够实现数据的跨系统联动，把造价数据与项目进度安排、合同条件、付款时间点等消息联系起来，使造价控制与项目整体管理深度结合，提升项目管理的整体感和高效性。这种协同方式能够支持跨部门、跨主体的造价数据协同分析和决定，各个参与方可基于统一化的造价数据展开工作，及时交流解决造价控制里的不同意见，优化造价决定方案，提升造价管理的协同效率和决定科学性，推动造价管理从分散控制向协同控制转变。

2 BIM 技术驱动造价精细化管理环节优化

2.1 设计阶段造价精准控制

BIM 技术在设计阶段的深度应用，能够实现多方案造价比选与成本前置控制，从源头提升造价管控的精准度，破解传统设计阶段造价控制滞后、方案优化不足的问题。基于 BIM 模型可快速开展不同设计方案的造价测算与对比，设计师在完成方案设计后，通过模型可直接提取工程量数据，结合实时材料价格、定额标准等信息，快速核算各方案的造价金额，清晰呈现不同方案的成本差异，为设计方案的优化选择提供量化依据，避免因方案选择不合理导致的后期成本超支^[2]。BIM 碰撞检测技术可提前识别设计中的专业冲突、构件碰撞等问题，如结构构件与机电管线的碰撞、管线之间的交叉干扰等，在设计阶段及时优化调整，减少施工阶段因设计变更产生的造价增量，降低设计变更带来的成本风险与工期延误。优化设计构件参数可实现材料用量的精准估算与成本优化，通过 BIM 模型的参数化特性，调整构件的尺寸、材质等参数，可实时查看材料用量与造价的变化，在满足设计规范与使用功能的前提下，选择性价比最优的构件参数，实现设计阶段的成本优化，推动设计方案向经济合理、成本可控的方向完善。

2.2 招投标阶段造价高效管控

BIM 技术在实际使用中能够明显提高招投标阶段造价编制的效率与精准度，规范招投标整个流程，降低招投标过程出现的造价争议，保障招投标工作公平、公正、高效地推进。借助 BIM 模型可以自动获取工程量数据，取代传统人工计算的方式，有效避免人工计算过程中出现的遗漏计算、错误计算问题，缩短招控制价的编制周期，为招投标工作的顺利推进节约时间成本。投标方能够依托 BIM 模型展开工程量复核与报价对比，通过招标方给出的 BIM 模型，快速核对工程量清单的准确性，结合自身施工技术、成本控制能力等因素，精准编制投标报价^[3]。同时能够借助模型对比不同报价方案的合理性，优化报价策略，提升投标竞争力。依托 BIM 技术可以规范招投标阶段造价文件的编制标准，明确工程量清单、招标控制价、投标报价等文件的编制规范与数据格式，确保各方造价文件的统一性与规范性，降低因文件编制不规范引发的误解与争议，提高招投标阶段造价管控的标准化水平，保障招投标工作的有序开展。

2.3 施工阶段造价动态精细化管理

BIM 技术为施工阶段造价的动态精细化管理提供有力支撑，借助模型同现场进度的深入结合，达成造价的实时监控与偏差纠正，保证施工阶段成本在可控制范围内。将 BIM 模型与施工进度计划结合，可以动态分析造价执行情况，把施工进度节点与造价支付节点联系起来，实时比较实际造价与计划造价的区别，准确找出造价偏差的具体环节和原因，比如材料价格变动、工程量更改、施工工艺改动等，为造价偏差的及时纠正给出依据。设立基于 BIM 的施工过程造价偏差识别和预警机制，通过设定合理的造价偏差界限，当实际造价与计划造价的偏差达到界限时，系统自动发出预警，提醒造价管理人员及时介入处理，防止偏差继续扩大，确保施工阶段造价控制的主动性和预见性。使用 BIM 技术优化施工方案，可以借助模型模拟不同施工工艺、施工流程的造价差别，选择成本最合适的施工方案，同时能够提前预测施工过程中的成本风险点，如材料浪费、工序不合理等，有针对性地制定预防措施，减少施工阶段的造价风险，实现施工阶段造价的精细化、动态化管控。

3 BIM 技术在造价精细化管理中的实践保障体系

3.1 BIM 技术应用的组织与制度保障

完善的组织架构与制度体系，是 BIM 技术落地造价精细化管理的重要支撑，能够明确各方职责、规范

应用流程,确保 BIM 技术的应用有序推进、落地见效。组建跨专业 BIM 造价应用团队,需整合造价、设计、施工、技术等多领域专业人才,明确团队成员的职责分工,明确造价管理人员负责数据核算与管控、设计人员负责模型搭建与优化、施工人员负责现场数据反馈等,形成分工明确、协同高效的工作机制,避免因职责不清导致的工作推诿、效率低下等问题^[4]。制定 BIM 技术在造价管理中的应用标准与操作规范,明确 BIM 模型的搭建标准、造价数据的录入规范、数据更新流程、协同工作要求等,确保 BIM 技术的应用有章可循、标准化推进,避免因应用不规范导致的数据偏差、模型失效等问题。建立 BIM 造价应用的考核与激励机制,将 BIM 技术应用成效纳入相关岗位的考核范围,明确考核指标,如模型准确率、数据更新及时性、造价管控效果等,对表现优秀的团队与个人给予激励,对未达到要求的进行督促整改,充分调动相关人员应用 BIM 技术的积极性与主动性,保障 BIM 技术在造价精细化管理中的有效应用。

3.2 BIM 技术应用的人才与技术保障

打造专业的人才队伍、适配合适的技术工具,是夯实 BIM 造价应用基础的核心关键。这两者能够有效破解 BIM 技术与造价管理融合过程中存在的人才供给不足、技术适配性不强等痛点问题,进而推动 BIM 造价应用在深度与广度上实现双重拓展。组织 BIM 技术与造价管理融合应用的专门培训,针对造价管理人员、设计人员、施工人员等不同人群,设计个性化的培训材料,重点讲解 BIM 软件使用、模型建立、造价数据关联、协同使用等核心内容,提高相关人员的专业水平,让他们能够熟练掌握 BIM 技术在造价管理里的应用方式,达成技术与业务的深入结合。适结合项目特点和造价管理需要,挑选功能齐全、操作简单、数据兼容性好的 BIM 软件,同时配套造价核算、数据统计、协同管理等辅助工具,提高造价数据处理、模型优化、协同工作的效能,防止因软件匹配性不够带来的应用障碍^[5]。建立 BIM 技术与造价管理系统的技术对接平台,达成 BIM 模型数据与造价管理系统的无缝连接,保证造价数据的实时同步和高效流转,打破技术障碍,提高造价管理的数字化、智能化程度,为 BIM 技术的深度使用提供技术支撑。

3.3 BIM 技术应用的风险防控保障

形成一套完整的 BIM 造价使用风险防范体系,能够更好地发现和解决使用过程中出现的各种风险,保证 BIM 技术在造价精细化管理中的稳定应用,防止因为

风险防范漏洞造成造价不准、信息泄密等问题。需精准识别 BIM 模型应用于造价管理过程中的两类隐性风险:一是模型信息错误风险,具体表现为构件参数录入偏差、工程量抓取失准、信息关联逻辑错误等,此类问题直接导致造价计算结果失真;二是信息保密风险,涵盖信息泄露、丢失及非法篡改等情形,不仅会干扰造价管理工作的正常推进,更可能威胁项目整体信息安全。针对上述风险,需建立全流程风险防控机制:一方面,设立专人负责动态风险监测体系,定期核查 BIM 模型信息的准确性与完整性,持续开展信息保密状态监测;另一方面,制定靶向性风险处置方案,对发现的信息错误立即启动修正流程,对信息保密风险则通过数据加密、分级权限管理等技术手段进行前置防范,确保风险隐患得到及时处置。同时,需强化 BIM 造价成果的多维度审查确认机制,构建多层级、全链条的审查流程,对 BIM 模型、造价数据及分析报告等成果进行逐层校验,重点核查信息真实性、流程规范性及结果合理性,尽早发现并改正使用过程中出现的问题,减少使用风险,确保 BIM 技术在造价精细化管理中的使用效果。

4 结束语

本文围绕 BIM 技术在工程造价精细化管理中的应用落地,完成从全周期数据管控到协同机制优化的系统探索。以模型驱动的造价管理体系,可有效破解传统模式下数据滞后、协同断层的瓶颈,实现造价管控从静态核算向动态精准、分散管理向协同共治的跨越。未来,可进一步聚焦 BIM 技术与大数据、人工智能的深度融合,探索智能预警与自动优化算法的应用,推动造价管理向更高阶的智慧化阶段迈进,为行业在“双碳”目标下的高质量发展提供更强大的技术支撑与实践范式。

参考文献:

- [1] 陈凤,张云翔.基于 BIM 技术的建筑工程造价精细化管理策略[J].智慧中国,2025(09):54-55.
- [2] 郭娜.基于 BIM 技术的工程造价精细化管理研究[J].经济师,2025(03):290-291.
- [3] 王娟.基于 BIM 技术的建筑工程造价精细化管理研究[J].房地产世界,2024(20):83-85.
- [4] 贺昱.基于 BIM 技术的建筑工程造价精细化管理控制策略[J].价值工程,2024,43(12):15-17.
- [5] 逯云芳,张琼.BIM 技术视角下精细化工程造价管理研究[J].广西开放大学学报,2024,35(02):87-91.

混凝土结构强度检测技术要点分析

王玉钺, 张昌军*

(四川智通路桥工程技术有限公司, 四川 成都 610200)

摘要 为应对混凝土结构服役期内性能退化的问题, 本文重点分析了常规检测条件下回弹法、钻芯法、超声回弹综合法等混凝土结构强度主要检测方法及技术要点, 并结合高水位潮湿环境、盐渍土侵蚀环境等特殊地质条件, 分析了潮湿面回弹修正、侵蚀损伤层测定等技术的应用, 以期为混凝土结构安全评定提供技术参考。

关键词 混凝土结构强度; 配合比设计; 钻芯法; 回弹法; 超声回弹综合法

中图分类号: TU528.07

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.028

0 引言

混凝土结构作为工程建设中的主要承重体系, 其强度水平直接关系到工程整体质量与使用安全。科学开展混凝土结构强度检测, 能够及时掌握结构性能状态, 为工程质量评估、加固处理及后续维护提供可靠依据。因此, 围绕混凝土结构强度检测方法及技术要点展开系统分析, 对提升检测结果的准确性具有重要的现实意义。

1 影响混凝土实测强度的主要因素

1.1 原材料的质量

水泥作为胶凝材料, 其强度等级、安定性以及凝结时间均对混凝土强度形成产生直接影响。若水泥强度等级偏低或储存时间过长, 水化活性下降, 将导致混凝土早期强度发展缓慢, 后期强度增长受限。同时, 水泥细度变化会影响水化反应速率, 细度偏粗易造成浆体包裹能力不足, 从而降低骨料之间的黏结强度。在水泥性能之外, 骨料质量同样对混凝土强度形成具有重要作用。压碎指标较大时, 骨料自身承载能力不足, 在荷载作用下容易发生破碎, 导致结构强度降低。颗粒级配不合理会增加孔隙率, 影响混凝土密实度, 从而削弱整体抗压性能。细骨料含泥量过高时, 泥质颗粒附着在骨料表面, 阻碍水泥浆体与骨料之间形成有效黏结界面, 降低混凝土整体强度水平。与此同时, 水中若含有较多有机物或杂质, 可能干扰水泥水化反应过程, 改变凝结硬化规律, 进而影响混凝土强度发展。此外, 水胶比控制不当会改变混凝土内部孔隙结构, 水胶比偏大将导致毛细孔增多, 降低结构密实度, 从而造成实测强度偏低。进一步而言, 减水剂掺量控制

不合理可能引起离析或泌水现象, 影响混凝土均匀性。粉煤灰或矿渣粉活性不足时, 会削弱胶凝体系反应能力, 影响强度增长过程。

1.2 配合比设计

水胶比是混凝土配合比设计的核心控制参数。水泥水化所需的理论用水量仅为水泥质量的 20% ~ 25%, 但为满足施工和易性要求, 实际用水量往往远超理论值。如果未能严格控制水胶比, 多余水分蒸发后将在硬化水泥石中留下相互连通的毛细孔隙, 降低混凝土的密实度与抗渗性能, 诱发强度倒缩、碳化加速等问题, 影响结构耐久性。同时, 过高水胶比会延长凝结时间, 在浇筑后形成表面浮浆层, 并削弱骨料与水泥浆体间的界面黏结力, 提高界面过渡区的破坏风险, 影响实测强度的真实表征。在此基础上, 矿物掺合料的使用将进一步影响混凝土性能。粉煤灰、矿渣粉等掺合料的火山灰活性在后期逐步发挥, 其反应速率显著滞后于水泥水化进程。如果未合理控制掺量, 早期强度发展将明显延缓。同时, 大掺量矿物掺合料会降低混凝土碱度储备, 在碳化作用下加速钢筋钝化膜破坏进程, 增加结构安全隐患。另外, 掺合料品质波动会改变浆体流变特性, 提高拌合物离析泌水倾向, 影响浇筑成型后的强度分布规律。

1.3 施工工艺

振捣是混凝土浇筑成型的核心工艺环节。混凝土拌合物在入模后仍含有大量浇筑裹入气泡, 其内部空隙率与密实度直接取决于振捣的充分程度。如果未能给予足够振捣, 气泡就难以有效排出, 直接在硬化混凝土中形成蜂窝、麻面甚至孔洞缺陷, 削弱截面有效

作者简介: 王玉钺 (1988-), 男, 本科, 研究方向: 试验检测。

*通信作者: 张昌军 (1989-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。E-mail: 704745505@qq.com

承载面积,进而诱发局部破坏。此外,漏振区域的水泥浆体无法均匀包裹骨料,在受力时大幅提高界面微裂缝贯通的风险。而过振会造成粗骨料下沉、砂浆上浮,形成表层浮浆薄弱层,影响现场检测数据的准确性。在振捣保证混凝土内部结构均匀的前提下,养护环节进一步保障强度。水泥水化反应需要持续的水分供给与适宜的温度环境。如果未能及时进行保湿养护,表层水分迅速蒸发导致水化反应中止,直接形成疏松多孔的失水缺陷层,降低表面硬度,进而诱发起砂、龟裂。同时,早期失水会增大塑性收缩与干燥收缩叠加效应,在约束条件下大幅提高开裂风险。另外,冬期施工未采取保温措施时,混凝土受冻将造成冰晶膨胀破坏水泥石微观结构,增加不可逆强度损失,即使后期恢复正温养护亦无法恢复至设计等级。

2 混凝土结构强度主要检测方法及技术要点

2.1 钻芯法

钻芯法通过精密的钻取、加工和试验过程,能够准确评估混凝土的力学性能。检测实施前,要细致勘察结构特征,选择对整体受力影响最小的部位进行取芯^[1]。钻芯位置应避开主筋、预应力筋、预埋管线及节点核心区,采用钢筋扫描仪精确定位,保证取样具有代表性且不损伤结构。取样过程中必须采用高精度金刚石薄壁钻头,内径宜为 100 mm 或 75 mm,钻机转速宜控制在 800 r/min~1 000 r/min,保持冷却水充分供给,以保证芯样表面光滑、无扭断损伤。芯样直径不应小于粗骨料最大粒径的 3 倍,高径比宜控制在 0.95~1.05 范围内。完成现场取样后,芯样需转入实验室进行精细化检测。先应根据试验要求调节状态,干燥状态试验前需在室内自然放置不少于 3 天,并对端面进行切割磨平或采用硫磺胶泥补平处理,补平层厚度不得大于 1.5 mm,端面不平整度应控制在每 100 mm 长度内不超过 0.1 mm。使用游标卡尺在芯样中部两个垂直方向测量直径取平均值,精确至 0.1 mm。若芯样存在可见裂缝、分层或尺寸偏差超过规范限值,则应重新取样。

2.2 回弹法

回弹法借助测定混凝土表面硬度与抗压强度间的相关关系,能够在不破坏结构的前提下快速推定混凝土强度等级。检测实施前,应依据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)规定细致勘察构件外观,选择表面平整、干燥且无蜂窝麻面的区域布置测区。测区应避开预埋件、钢筋密集区及受力最大部位,每个测区面积不宜大于 0.04 m²,相邻测点净距不宜小于 20 mm,确保取样具有代表性。检测过程

中必须采用标准能量 2.207 J 的中型回弹仪,使用前在洛氏硬度 HRC60±2 的钢砧上进行率定,率定值应在 80±2 范围内方可使用。仪器弹击杆应垂直于测区表面,缓慢施压至弹击完成,每测区读取 16 个数据点,剔除 3 个最大值和 3 个最小值,取余下 10 个有效测点的平均值作为测区回弹代表值^[2]。在完成数据点测定后,需同步开展碳化深度测量作为关键辅助环节。回弹值反映的是表层硬度,而碳化作用会使表面硬度升高,导致强度推算值偏高。具体操作时,应在代表性位置钻孔取粉,孔深应大于碳化深度预估值,清除孔内粉末后滴加浓度 1% 的酚酞酒精溶液,用游标卡尺测量未变色边界至表面的垂直距离,精确至 0.25 mm。依据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T 23-2011)第 7.0.1 条规定,碳化深度不大于 0.5 mm 时可按无碳化处理,碳化深度大于 0.5 mm 时必须按规范测强曲线进行碳化修正。

2.3 超声回弹综合法

超声回弹综合法利用联合测定混凝土声速与表面回弹值,建立两者与抗压强度间的多元回归关系,能够弥补单一回弹法仅反映表层硬度、单一超声法离散性大的不足,显著提高无损检测精度。检测实施前,应依据《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》(CECS 02:2005)规定勘察构件状态,测区应避开钢筋密集区、预埋件及裂缝缺陷部位,测区数量不少于 10 个且均匀分布。超声测点与回弹测点应一一对应布置在同一测区内,确保两参数反映同一混凝土体积范围。检测过程中,回弹仪须采用标准能量 2.207 J 的中型仪器,测试前在钢砧上率定至 80±2。超声仪应选用频率 50 kHz~100 kHz 的平面换能器,零声时标定采用标准棒校准,声时测量精度不低于 0.1 μs。每测区测值取 16 点,舍去 3 个最大值和 3 个最小值取平均值,声速值取 3 次均值且单次偏差超 ±15% 时重测^[3]。在综合测试过程中,声速测量方式的准确选择对保证检测精度尤为关键。对测法适用于两面临空构件,换能器中心轴线重合时可获得最稳定的声通路;角测法适用于转角部位,需保证换能器与构件表面紧密贴合;平测法仅适用于单一测试面临空条件,其声速值须经回归换算方可参与强度计算。耦合剂应选用黄油、凡士林或化学浆糊,涂抹厚度均匀且不宜过厚,以排除空气间隙、保证声能有效传递为原则。测距测量应采用钢卷尺或激光测距仪,两测点间距精确至 1 mm。

2.4 后装拔出法

后装拔出法借助测定混凝土表层抗拔力与抗压强度的相关关系,以微破损方式推定实体强度。检测前按

《拔出法检测混凝土强度技术规程》(CECS 69:2011)规定勘察构件表面,测点应选在平整、无裂缝且避开钢筋及预埋件处,间距不小于200 mm,距边缘不小于100 mm,测点处厚度不小于80 mm。钻孔采用专用金刚石薄壁钻头,孔径与深度依锚固件规格确定,钻孔后吹尘器清孔确保贴合紧密。安装胀簧锚固件时使其在孔底张开与混凝土咬合,锚固深度偏差控制在 ± 0.8 mm以内。拉拔试验采用经计量检定、示值误差不超过 $\pm 2\%$ F.S.且具峰值保持功能的专用拔出仪,反力支撑需平稳均匀。拉拔杆与锚固件连接后检查同轴度以防偏心受拉,加载速率控制在 $0.5\text{ kN/s} \sim 1.0\text{ kN/s}$,连续均匀施力至破坏,记录极限值精确至0.1 kN。破坏形态是结果有效性的关键:有效破坏应为混凝土呈倒锥体拔出,若出现锚固件拉断、滑脱或仅局部破损等异常,则该测点作废并在附近补测。

3 特殊地质条件下混凝土结构强度检测技术要点

3.1 高水位与潮湿环境检测技术要点

潮湿环境显著影响回弹法检测精度。检测前应勘察构件表面湿度及水源状况,区分长期浸水区、干湿交替区及结露区,并优先选择相对干燥部位布置测区。无法避开的潮湿测区需采取修正措施或强制干燥处理,可采用热风枪或红外线灯进行烘烤,确认表层自然干燥后方可按统一测强曲线进行测试。该法测试操作应与常规检测一致。仪器在钢砧上率定至 80 ± 2 ,每测区读取16个数据点,3个最大值和3个最小值不计,取剩余数据平均值,精确至0.1。碳化深度测量在干燥处理后进行,钻孔取粉滴加1%酚酞酒精溶液,测量未变色边界深度,精确至0.25 mm。湿度修正是保证检测可靠性的关键,可通过同条件对比试验建立专用测强曲线或确定修正系数:在典型潮湿部位选取不少于6个对比测区,先测湿态数据点,再测干燥状态数据点,以干燥状态强度换算值为基准,计算比值作为湿度修正系数,并据此查统一曲线获取强度值,实现潮湿环境下混凝土强度的准确评定^[4]。

3.2 盐渍土与侵蚀环境检测技术要点

3.2.1 侵蚀损伤层测定技术

侵蚀损伤层测定技术可判定混凝土受化学侵蚀后的表层劣化深度,从而确定有效强度检测基准面,避免损伤层对实测强度的干扰。检测前应依据《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344-2019)勘察构件表面特征,观察起皮、剥落、结晶析出及颜色异常,初步判定损伤范围,并选择典型且便于操作的测区,避开裂缝、钢筋锈胀区及修补痕迹^[5]。超声平测法适用于

大面积普查损伤层厚度。在代表性位置钻孔取粉,深度大于预估损伤层,将粉末置于白色瓷板上滴加1%酚酞酒精溶液,不显红色为完全侵蚀层,显红色为未侵蚀层,两区交界至表面的垂直距离即为损伤层厚度,精确至0.5 mm。大面积普查可采用超声平测法,发射换能器固定表面,接收换能器沿测线移动记录声时值,绘制时-距曲线,曲线斜率突变处对应损伤层厚度。

3.2.2 损伤层剔除后强度检测

损伤层剔除后强度检测借助清除侵蚀层测定完好截面混凝土力学性能,可真实反映结构有效承载能力,避免低强度数据干扰评定结果。检测前依据已测损伤层厚度确定剔除范围,凿除深度以暴露未侵蚀坚实混凝土面为准,宜采用角磨机分层打磨或轻型电锤逐层凿除,控制力度避免扰动微裂缝。清理后可采用回弹法评定:测区不少于10个,打磨平整、表面干燥无松动颗粒,回弹仪率定值 80 ± 2 ,每测区读取16个回弹值,舍去3个最大值和3个最小值后取平均,精确至0.1。同时测量碳化深度,钻孔取粉滴加1%酚酞酒精溶液,测量未变色边界深度精确至0.25 mm,据实测碳化深度查统一测强曲线换算强度。对于损伤深度较大或回弹数据离散性显著的构件,可采用钻芯法,芯样直径70 mm~100 mm,高径比 $0.95 \sim 1.05$,取出后检查是否存在残留损伤层或界面裂缝,异常则重新取样。

4 结束语

在工程建设中,科学选用检测方法以及严格控制操作要点,能够解决混凝土结构强度检测中碳化干扰、潮湿偏差及侵蚀损伤误判等行业问题。未来,将进一步研发智能回弹采集与云端数据处理系统,提高检测数据的实时分析能力,同时开展不同地域测强曲线的适配研究,推动综合检测技术在既有建筑评定领域的规模化应用,为跨行业混凝土结构安全评估提供技术参考。

参考文献:

- [1] 聂金富. 建筑工程混凝土结构强度检测技术运用分析[J]. 新发现, 2025(16):79-81.
- [2] 王安江. 建筑工程主体结构混凝土强度检测要点分析[J]. 建材发展导向, 2025,23(08):4-6.
- [3] 孟祥俊. 建筑工程混凝土结构损伤检测技术要点分析[J]. 建材发展导向, 2025,23(04):16-18.
- [4] 赵彬. 建筑工程混凝土结构强度检测技术分析[J]. 砖瓦, 2024(10):89-92.
- [5] 李晓芹. 常见混凝土强度检测技术原理及操作要点分析[J]. 工程技术研究, 2023,08(09):141-143.

水利工程施工中围堰施工技术研究

余娟

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要 本文以杨湖水厂施工组织设计项目为实证对象, 深入剖析围堰施工技术在实际应用中的具体细节。研究重点聚焦围堰类型的科学比选、结构参数的精准设计、施工过程的量化管理以及拆除之后的环境恢复策略。通过引入具体的工程数据, 如土埂围堰长度达到 300 米、填筑量为 900 立方米、拉森钢板桩围堰长度为 70 米等, 详细阐述从进占法填筑到分层碾压的工艺控制要点。针对基坑降水、防渗墙施工以及废弃材料处理, 提出基于数据的解决方案。实践表明, 依据水文数据 (10 年一遇洪水位为 26.14 米) 制定的施工方案, 能够有效保障基坑干地作业环境, 显著降低施工风险, 为同类水利工程提供具备数据支撑的参考模式。

关键词 水利工程施工; 围堰施工; 参数设计; 导流标准

中图分类号: TV551.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.029

0 引言

水利工程施工常常会受到复杂水文地质条件的制约, 围堰作为保障主体工程能够顺利进行作业的关键临时设施, 其技术方案的科学性与可靠性直接关系到工程的整体安全以及建设周期。在江河湖泊区域开展取水头部、泵站或者大坝基础施工时, 往往会面临水位波动剧烈、河床渗透性强以及汛期洪水威胁等多重挑战。传统单一形式的围堰结构在面对深基坑开挖或者高流速冲刷环境时, 常常会显现出防渗性能不足或者抗滑稳定性欠缺等局限。随着水利建设标准的持续提升, 如何依据精确的水文数据与地质参数, 合理选择围堰型式并且优化结构设计, 已经成为施工技术领域亟待解决的核心问题。

1 工程概况

杨湖水厂建设项目地处淮北大堤堤内, 其主体工程建筑物级别被确定为 1 级, 导流建筑物级别设定为 4 级, 施工导流标准选取 10 年一遇洪水。该工程地理位置具有特殊性, 取水头部施工会直接受到淮河河水的影响, 因此需要布置围堰来封闭基坑, 而加压站身利用预留土埂挡水即可。依据水文资料分析, 淮河全年 10 年一遇设计洪水位处于 26.3 米至 25.44 米之间, 正阳关节点 10 年一遇洪水位为 26.14 米, 5 年一遇洪水位为 25.19 米。施工期跨越 2023 年和 2024 年两个汛期, 其中 2023 年汛期主要利用原淮河河堤进行挡水, 仅开展顶管沉井预制及三轴搅拌桩基础处理工作, 大规模

土方开挖与回填安排在 2023 年 10 月至 2024 年 4 月的枯水期。水厂主体现状地面高程约为 20.5 米, 底板底高程为 11.0 米, 取水头部建基面高程为 11.6 米。工程地质条件表明, 建基面坐落于 Q4a1 层重粉质壤土, 其渗透系数为 1.0×10^{-5} 厘米/秒, 属于弱透水层, 下层为中粉质壤土, 渗透系数为 2.0×10^{-4} 厘米/秒, 属于中等透水层。基于此情况, 工程采用了三轴搅拌桩进行围封, 桩径为 850 毫米, 成墙厚度为 600 毫米, 平均桩深约 20 米, 截渗墙底部深入砂层底部相对不透水层 1.0 米, 以此切断砂层渗流路径, 确保基坑处于干燥状态。

2 工程围堰施工技术应用实践

2.1 围堰形式的科学选定

围堰形式的确定需严格按照水文计算与现场地形条件来执行。针对杨湖水厂不同施工区域, 采取了具有差异化的选型策略。鉴于水厂主体区域位于淮北大堤堤内, 且其主要功能为拦截地表水以及排涝沟汇水, 所以选用了土石围堰形式。该区域借助现有地形, 设置了高度为 1.0 米、顶宽 1 米、底宽 5 米的土埂, 边坡坡比设定为 1:2, 总长度约 300 米, 填筑土方量控制在 900 立方米。此种形式充分利用了建筑物基坑开挖出的合格土方, 实现了资源的内部循环。由于取水头部区域直接面临淮河水流冲击, 且河滩地面高程约为 22.0 米, 建基面低至 11.6 米, 水深较大, 因此选用了拉森钢板桩围堰。该形式由两道拉森钢板桩组成, 宽度为

作者简介: 余娟 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利施工。

5米,长度约70米,中间填筑黏土以进行防渗,钢围堰高程设定为19.0米,并在堰顶增设了1米高、顶宽0.5米的土袋围堰用于防浪。这种组合形式既利用了钢板桩高强度抗冲刷的特性,又通过黏土心墙解决了防渗问题,能够抵御施工期内5年一遇至10年一遇的洪水冲击,确保了取水头部基坑的封闭性与安全性^[1]。

2.2 围堰结构的合理设计

围堰结构设计严格依照《水利水电工程围堰设计规范》开展,各项参数均经过精准细致的计算,土埂围堰断面设计成梯形,其底宽设定为5米、顶宽为1米、高为1米且边坡为1:2,该坡比经过稳定性验算,能够契合土料自然休止角要求,可有效防止滑坡情况发生,填筑材料限定为黏土或者粉质黏土,严禁使用沙质土等抗渗性较差的土料,土料含水量需控制在最优含水量范围之内,以此保证压实效果。拉森钢板桩围堰设计时,两道钢板桩间距为5米,从而形成重力式结构,其内部填筑黏土防渗体,能够有效阻断淮河侧向渗流,钢围堰高程设计值为19.0米,此值高于施工期11月至次年4月时段5年一遇洪水位(正阳关节点为20.61米,但考虑到大堤防护以及局部地形因素,19.0米能够满足内部基坑防护需求,且顶部设有土袋用于加高)。基坑降水设计采用深井降水与明沟排水相结合的方式,围封墙中心距结构物外边线为6米,截渗墙底部高程为0米,可确保截断下部中等透水层,排水系统所配置水泵的排水能力大于预测涌水量的一倍,并且设有1:1比例的备用水泵以及备用电源,可防止因设备故障导致基坑被淹没。所有结构设计参数均考虑到安全储备,能够确保在施工期内结构保持稳定,不存在渗漏隐患^[2]。

2.3 施工过程的精细管理

2.3.1 施工工艺流程的持续优化

施工工艺流程按照标准化作业要求实施,土埂围堰采用进占法进行填筑。首先运用1.0立方米挖掘机挖装基坑开挖所产生合格土方,再借助8吨自卸汽车将其运输至作业面,之后由120型推土机对土方进行推平与碾压作业。在填筑过程中,须严格执行分层上土制度,将每层厚度控制在30厘米以内,同时要求土料粒径不大于5厘米。每层土料摊铺平整之后,要立即开展碾压工作,在压实度检测合格后才可铺筑上层土料,直至达到设计高程1.0米。在拉森钢板桩围堰施工时,先施打两道钢板桩以形成框架,随后在中间区域填筑黏土,且填筑过程同样需分层进行,以此确保防渗体达到密实状态。堰顶土袋围堰在钢板桩施

工完成后要迅速进行堆筑,土袋需码放整齐且咬合紧密。施工期间,要实时监测淮河水位变化情况,若遇到水位上涨接近警戒线情况,需立即启动应急预案,对土袋围堰进行加高处理。整个施工流程紧凑有序,自2023年10月开工至2024年4月完工,各工序之间衔接紧密,未出现停工待料现象。通过对机械配置进行优化,使得挖掘机、自卸车与推土机之间配合默契,日均填筑效率得到显著提升,从而确保在枯水期内完成全部围堰建设任务^[3]。

2.3.2 质量控制与安全管理同步强化

在质量控制环节,需对全过程进行数据监控。进场的土料必须经由试验室进行检测,要将含水率偏差控制在最优含水率的 $\pm 2\%$ 范围之内,对于不合格的土料要坚决予以退回。在碾压作业时,要详细记录碾压遍数以及行走速度,采用环刀法对每层压实度进行检测,以此确保达到设计要求。钢板桩施打时,要将垂直度偏差控制在1%以内,保证锁口连接严密,防止出现漏水情况^[4]。在安全管理方面,鉴于基坑深度大(最大开挖深度约9.5米)这一特点,要在基坑周边设置高度不低于1.2米的防护栏杆,并悬挂警示标志。高处作业平台需铺设固定脚手板,安全网距工作面的最大高度不能超过3.0米,水平投影宽度不小于2.0米。施工现场临时用电要执行“一机一闸一漏一箱”制度,配电箱与开关箱的距离不超过30米。机械作业区要安排专人进行指挥,非作业人员严禁进入挖掘机回转半径内。在防汛期间,要安排专人进行24小时值班,观测大堤及围堰的变形情况,一旦发现裂缝或渗水异常,要立即上报并进行处理。

2.4 围堰拆除与环境恢复

2.4.1 拆除工作的有序安排

围堰拆除工作安排在主体土方工程结束之后开展,遵循“轻挖、少装量、一次挖装到位”的原则,目的是减少对水源的污染。土埂围堰拆除使用1.0立方米挖掘机从一端向另一端逐步挖掘,渣料直接装入8吨自卸汽车并运至指定弃土场,拆除过程需严格控制边坡稳定,防止坍塌造成人员伤害。拉森钢板桩围堰拆除时,先借助振动锤将钢板桩逐根拔出,清洗干净后进行分类堆放,以便后续周转使用。桩间黏土由挖掘机清理装车并运至指定地点。拆除作业开始前,需对设备进行全面保养,确保液压系统处于正常状态。现场要设立警戒线,禁止无关人员进入。拆除进度需与下游河道疏浚相协调,确保拆除产生的泥沙不会堵塞河道。对于残留的防渗材料,要彻底清理至河床以下,保证水流畅通无阻。整个拆除过程历时约15天,未发

生任何安全事故,且未对淮河水水质造成明显影响,实现了平稳过渡。拆除后的场地要及时进行平整,恢复原地貌,以满足竣工验收要求。

2.4.2 废弃材料的分类处理

废弃材料处理需严格执行分类回收制度。拆除作业所产生的土石方,经检验合格之后,部分用于厂区道路的路基填筑,其余则运至指定的弃土场进行堆放,且堆放高度不得超过 2 米,并进行覆盖以防止扬尘。拉森钢板桩拔出之后,需去除其表面的锈蚀与附着物,同时检查桩身的完整性,完好的钢板桩应入库保存,以备后续项目使用,损坏严重的则送至回收站进行熔炼再生。施工过程中产生的废旧木材、模板等,剔除铁钉之后,将完好的进行整理以备使用,废料则作为生物质燃料进行处理。混凝土块破碎之后作为路基填料,从而实现循环利用^[5]。所有废弃物运输车辆必须覆盖篷布,以此防止沿途出现遗撒情况,车轮冲洗干净之后方可出场。处理过程需建立详细的台账,记录废弃物的种类、数量、去向以及责任人,确保处理情况可追溯^[6]。通过分类处理,本项目废弃材料回收利用率达到 85% 以上,大幅减少了固体废弃物的排放,降低了对土地资源的占用。

3 应用效果与经验总结

3.1 围堰施工的实际应用成效

杨湖水厂围堰施工项目于实际应用当中取得了十分显著的成效。土埂围堰成功地对地表水以及排涝沟汇水进行拦截,累计排水量达到了数万立方米,切实维护了水厂主体基坑在 2023 年 10 月至 2024 年 4 月期间处于干地作业环境。拉森钢板桩围堰成功经受住了施工期洪水的严峻考验,在淮河水位出现波动的情况下,未发生渗漏或者垮塌等事故,有效保障了取水头部深基坑(开挖深度约 10 米)的施工安全。质量检测数据表明,土埂填筑压实度合格率达到 100%,钢板桩垂直度偏差均小于 1%,防渗效果达到了设计标准要求。在施工进度方面,围堰工程按照计划节点顺利完成施工任务,未因围堰问题而导致主体工期出现延误,为后续三轴搅拌桩、顶管工程以及主体结构施工争取了宝贵时间。在安全方面,施工期间未发生重大安全事故,人员伤亡率为零。在环保方面,废弃材料实现高比例回收利用,既降低了工程造价,又减少了对环境的污染。该项目的成功实施,验证了基于具体水文数据(10 年一遇洪水位)和地质参数(渗透系数)所制定的施工方案具有科学性,为同类水利工程提供了可复制推广的范例。

3.2 围堰施工的经验深度分析

本项目在实施过程中积累了十分宝贵的经验。精准开展水文地质勘察是项目成功的重要前提,准确获取正阳关节点洪水位数据以及土层渗透系数,为围堰型式的选择和参数设计提供了坚实可靠的依据。采取差异化的选型策略至关重要,针对不同区域的特点分别选用土埂和钢板桩围堰,既能够满足工程的安全需求,又可以有效控制项目成本。在施工过程中坚持实施动态管理,依据实时水位情况及时调整施工计划,主动避开强降雨时段,从而确保了工程的顺利进度。严格进行材料管控,从源头上杜绝了质量方面的隐患,尤其是对土料含水率和钢板桩质量进行了严格把控。团队协作机制高效运行,土方、基础、金结等班组之间紧密配合,成功解决了诸多突发出现的问题。同时也清醒地认识到,在复杂地质条件下的深基坑降水工作仍需要进一步优化完善,以此降低能耗。提高机械化程度是缩短工期的关键所在,未来应当加大对先进设备的投入力度。

4 结束语

水利工程施工期间,围堰技术的合理运用是确保工程顺利开展的关键。通过对杨湖水厂项目开展实践分析,充分证实了依据 10 年一遇洪水位 26.14 米等具体数据来实施科学选型、开展精心设计、进行严格管理以及执行环保拆除工作的重要意义。土埂围堰和拉森钢板桩围堰进行组合运用,在特定施工条件下呈现出良好的适应性与经济性,对其施工工艺加以优化后显著提升了施工效率与工程质量。在整个施工过程中实施质量控制与安全管理能够有效规避各类风险,切实保障人员生命安全和财产安全。对废弃材料开展分类处理工作实现了资源的循环利用,契合可持续发展的先进理念。

参考文献:

- [1] 赵焱. 围堰施工技术在农田水利工程中的应用实证研究[J]. 数字农业与智能农机, 2024(10):79-82.
- [2] 周广忠. 水利工程围堰施工技术研究[J]. 河南科技, 2025,52(03):55-58.
- [3] 王朝晖. 水利工程施工中国堰施工技术及其质量控制研究[J]. 现代工程科技, 2025,04(13):73-76.
- [4] 李强. 钢板桩围堰施工技术在防洪工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2026,44(02):19-22,46.
- [5] 李黎临,唐新平. 水利工程常见围堰类型及施工质量管控要点研究[J]. 工程建设与设计, 2026(03):186-188.
- [6] 胡杰. 深水嵌岩基础施工围堰平台一体化设计与施工技术[J/OI]. 世界桥梁, 1-7[2026-04-17]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1681.U.20260205.1040.016>.

水利工程钻孔灌注桩施工技术分析

王 程

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230093)

摘 要 钻孔灌注桩凭借承载力强、适应性广、施工扰动小等优势, 成为水利工程基础施工中的核心技术, 广泛应用于大坝、水闸、泵站等水利构筑物的地基处理中。本文结合水利工程施工特点, 阐述钻孔灌注桩施工的前期准备与核心流程, 分析施工过程中常见的质量问题及成因, 提出针对性的解决对策, 总结施工技术应用要点与发展趋势, 以期对水利工程钻孔灌注桩施工质量提升提供理论参考与实践借鉴, 进而保障水利工程基础结构的稳定性和耐久性。

关键词 水利工程; 钻孔灌注桩; 钻孔作业; 钢筋笼制作; 塌孔

中图分类号: TV553

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.030

0 引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施, 承担着防洪、灌溉、供水等重要民生职能, 其基础工程质量直接决定整个工程的安全运行与使用寿命。钻孔灌注桩因能适应水利工程复杂的地质条件, 可有效穿越软土、砂卵石等不良地层, 且具备良好的抗渗、抗倾覆性能, 在水利基础施工中应用广泛。但在实际施工中, 受地质条件、施工工艺、操作水平等因素影响, 易出现塌孔、钻孔偏斜、断桩等问题, 影响工程质量。因此, 深入分析钻孔灌注桩施工技术要点, 排查施工隐患, 优化施工工艺, 对提升水利工程施工质量、保障工程长期稳定运行具有重要意义。

1 水利工程钻孔灌注桩施工前期准备与核心流程

1.1 施工前期准备

水利工程钻孔灌注桩施工前期筹备, 是筑牢施工根基、规避质量隐患、适配水利工况特点的核心前提, 需从技术、场地、设备、材料四大维度系统推进。技术方面, 技术人员通过深度研读图纸与地质勘察报告, 精准把控桩位、桩径等参数, 结合水下施工、地质复杂的特性编制专项方案, 明确工艺标准与应急措施, 完成全员技术交底。场地面层, 清理平整作业区, 硬化软土路基、搭建施工平台并完善排水系统, 合理规划运输与堆放区域, 避免扰动周边水利设施。设备进场前全面检修调试, 确保钻机、输送设备等性能达标。原材料严格筛选检测, 钢筋、抗渗混凝土、护壁膨润土等均检验合格后投入使用, 为施工夯实基础^[1]。

1.2 钻孔作业施工

钻孔作业是钻孔灌注桩施工的核心环节, 施工质量直接影响桩体成型效果, 需严格控制钻孔精度、泥浆护壁质量及钻进速度。钻孔前, 采用全站仪精准定位桩位, 设置定位桩和护桩, 确保桩位偏差控制在规范允许范围; 埋设钢护筒, 采用钢板制作, 直径比桩径大 10 cm ~ 20 cm, 埋深根据地质条件确定, 一般不小于 1.5 m, 护筒周边用黏土分层夯实, 防止泥浆渗漏和护筒移位。泥浆护壁是关键, 需结合地质配置泥浆, 砂层采用“膨润土 + 纯碱 + 纤维素”混合泥浆, 黏度控制在 22 s ~ 25 s、比重 1.2 ~ 1.3, 形成致密泥皮保护孔壁; 淤泥层适当提高泥浆比重至 1.3 ~ 1.4, 防范孔壁坍塌。钻进中, 根据地层特性调整参数, 黏性土层可适当提速, 砂卵石层遵循“慢进尺、勤排渣”原则, 降低钻进速度; 实时监测孔内水位, 保持高于地下水位 1.5 m ~ 2.0 m, 定期检测泥浆性能并调整配比。钻孔至设计深度后, 用超声波检测仪检测孔径与垂直度, 确保孔径偏差 $\leq \pm 50$ mm、垂直度偏差 $\leq 1\%$, 合格后方可进入下一工序。

1.3 钢筋笼制作与安装

钢筋笼制作与安装直接影响桩体抗拉强度和整体稳定性, 需严格遵循设计要求和施工规范。钢筋笼采用工厂化加工, 选用 HRB400 级钢筋, 主筋直径、箍筋间距、加强箍设置符合设计标准, 主筋直径 ≥ 22 mm, 箍筋间距 ≤ 200 mm, 每隔 2 m 设置一道加强箍; 结合水利工程桩体抗裂、抗腐蚀需求, 增设纵向止水钢筋并与主筋焊接牢固, 加工完成后采用环氧树脂涂层进行

作者简介: 王程 (1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

防锈处理,防止桩体长期浸泡锈蚀。钢筋笼制作完成后,重点检验钢筋规格、焊接质量及尺寸,确保符合规范^[2]。安装采用吊车分段吊装,段间焊接长度 $\geq 10d$ (d 为主筋直径),焊接质量需进行无损检测;安装时保持钢筋笼居中,设置厚度 ≥ 70 mm 的混凝土保护层垫块,避免保护层不足影响抗渗性能。吊装过程中缓慢下放,防止碰撞孔壁破坏泥皮,下放至设计标高后固定牢固,防范混凝土灌注时发生上浮,保障钢筋笼安装质量。

2 水利工程钻孔灌注桩施工常见问题分析

2.1 塌孔问题

塌孔是水利工程钻孔灌注桩施工中最常见的质量问题,多发生于砂层、粉土层、淤泥层等不稳定地层,严重影响施工进度与工程质量。其成因主要有三个方面:一是地质因素:地下水位骤升(尤其雨季或承压水层施工)会破坏孔壁土压力平衡,砂层、粉土层透水性强易导致泥浆渗漏,淤泥层土质松软、孔隙比大,孔壁稳定性差,均易引发塌孔。二是施工工艺缺陷:泥浆黏度、比重不达标,无法有效包裹钻渣、形成致密泥皮;钻进速度过快扰动孔壁土体,破坏原状土结构;护筒埋设不规范,埋深不足、周边回填不密实,导致泥浆渗漏、护筒移位;钻孔停钻时间过长,泥浆沉淀使孔壁失去保护。三是设备与操作因素:钻机底座不平整、固定不牢,钻进时倾斜扰动孔壁;钻杆弯曲、接头不直,产生不均匀挤压力;操作人员未及时监测泥浆液面和性能,隐患未及时处理。塌孔若处理不及时或不当,可能导致钻孔报废,增加施工成本、延误工期^[3]。

2.2 钻孔偏斜问题

钻孔偏斜会影响桩体受力性能,若偏斜超标,会导致桩体受力不均、承载力下降,甚至影响水利构筑物整体稳定性。其成因主要包括四个方面:一是设备因素:桩架不稳、钻杆导架不垂直,钻机部件松动,或钻杆弯曲、接头不直,使钻具无法保持垂直;钻机底座未垫实平整,施工中因土层沉降导致钻机倾斜。二是地质因素:钻进时遇较大孤石、探头石,或在粒径悬殊的砂卵石层中钻进,钻头阻力不均导致偏移;软硬地层交替时,钻进速度控制不当,软地层过快、硬地层过慢,造成孔壁受力不均引发偏斜。三是操作因素:操作人员未严格按规范定位校正钻机,未用经纬仪或全站仪在互成 90° 方向校正桩架垂直度,或校正后未复核;钻进中未实时监测垂直度,发现偏斜未及时纠正。四是环境因素:水利施工区域多临近水源,场地积水、泥泞导致钻机移位倾斜;风力过大使钻机晃动,均会影响钻孔垂直度。钻孔偏斜还会影响钢筋笼安装和混凝土灌注,严重时需返工,增加施工成本。

2.3 混凝土灌注相关问题

混凝土灌注是决定桩体完整性和密实度的关键工序,水利工程水下灌注中,易出现封底失败、卡管、断桩、夹泥层等问题,严重影响桩体质量。封底失败主要因首批混凝土数量不足、孔底沉渣过厚,导致无法实现水下封底,泥浆与混凝土混合影响质量。卡管则源于混凝土和易性差、坍落度不达标,含大块骨料或受潮凝固水泥块,灌注冲击力不足,或导管内壁结垢堵塞,导致灌注中断。断桩是最严重的问题,成因包括导管埋深不足(泥浆倒灌污染混凝土)或过深(导管无法提拔),混凝土供应中断导致已浇筑混凝土初凝,新旧混凝土无法结合,以及钢筋笼上浮与混凝土黏结不紧密形成缝隙。夹泥层主要因清孔不彻底、孔底沉渣过多,导管提升过快导致泥浆进入,或混凝土灌注过快使泥浆无法及时排出,混入混凝土中。这些问题会导致桩体强度不足、完整性差,无法满足水利工程基础承载和抗渗要求。

3 水利工程钻孔灌注桩施工问题解决对策

3.1 塌孔防控对策

针对塌孔问题,需坚持“预防为主、防治结合”的原则,结合地质条件和施工实际,采取针对性的防控措施。一是优化泥浆护壁质量,根据地质勘探报告调整泥浆配比,黏性土地层适当降低泥浆黏度和比重,增强携渣能力;砂层、粉土层中适当增加膨润土掺量至 $8\% \sim 12\%$,并添加 CMC(羧甲基纤维素)改善泥浆的悬浮性和稳定性,确保泥浆黏度维持在 $18\text{ s} \sim 22\text{ s}$,比重控制在 $1.1\text{ g/cm}^3 \sim 1.3\text{ g/cm}^3$;定期检测泥浆性能,及时补充新泥浆,确保泥浆始终处于良好的护壁状态。二是规范护筒埋设与钻进操作,护筒埋设前精准定位,确保中心与桩位中心重合,埋深符合设计要求,周边用优质黏土分层回填夯实,夯实时不得撞击护筒;钻进过程中严格控制钻进速度,软淤泥、流沙层中遵循“低转速、慢进尺”的原则,让泥浆有足够的时间形成护壁,避免钻进过快扰动孔壁;避免长时间停钻,若确需停钻,需定期循环泥浆,防止泥浆沉淀。三是加强现场监测与应急处置,安排专人每小时监测一次泥浆液面高度,并记录,发现液面下降较快,立即查找原因并迅速补充泥浆;轻度塌孔时,立即停止钻进,将钻具提至安全高度,补充优质泥浆,提高泥浆比重至 1.3 以上,提高孔内水头,循环观察 $1\text{ h} \sim 2\text{ h}$,确认无异后再恢复钻进;严重塌孔时,立即回填掺有 5% 水泥的黏土混合物或低标号砂浆至塌孔位置以上 $1\text{ m} \sim 2\text{ m}$,待其凝固 $3\text{ d} \sim 7\text{ d}$ 后,在原位置重新钻进。四是规范设备操作,钻机就位后确保底座平整、固定牢固,钻进

前检查钻杆的完好性,避免使用弯曲、损坏的钻杆^[4]。

3.2 钻孔偏斜纠正对策

针对钻孔偏斜问题,需从设备校准、操作规范、地质适配等方面采取措施,确保钻孔垂直度符合要求。一是加强设备检查与校准,钻机就位后,采用两台经纬仪或全站仪在互成90°的方向上校正桩架(或钻杆)的垂直度,不仅要检查静态垂直度,还应在钻机空转运行时观察其是否有明显晃动;每班开始工作前,机长必须检查钻杆连接销、螺栓是否松动,钻杆是否有肉眼可见的弯曲,及时更换损坏的钻杆和部件;钻机底座需垫实钢板,防止施工中因土层沉降导致钻机倾斜,临平台需增设揽风绳固定。二是优化钻进工艺,采用“减压钻进”法,尤其在开孔和进入软硬交替地层时,通过吊钩系统使钻杆始终处于受拉状态,仅提供部分钻压,避免钻杆因受压而弯曲导致偏斜;遇到孤石、探头石时,暂停钻进,先回填黏土和片石,用锥形钻头将探头石挤压在孔壁内,或用冲击钻冲击击碎,再继续钻进;在软硬交替地层中,降低钻进速度,逐步过渡,维持孔壁稳定^[5]。三是及时纠正偏斜,发现孔斜后,不要盲目强行钻进,应提起钻头,分析偏斜的位置和原因;对于上部20 m以内的偏斜,回填高强度等级的片石(粒径10 cm~20 cm)和黏土的混合物至偏斜位置以上至少2 m,然后用冲击钻采用“低冲程、高频率”的方式反复冲砸、修孔;对于下部较深的偏斜,采用“扫孔法”,在偏斜段,使钻头反复上下提拉,并不旋转或慢速旋转,利用钻头侧刃逐步切削突出的孔壁。四是优化施工环境,及时清理施工场地积水,对泥泞场地进行硬化处理,避免钻机移位、倾斜;风力较大时,暂停钻孔作业,防止钻机晃动引发偏斜。

3.3 混凝土灌注问题解决对策

针对混凝土灌注过程中的各类问题,需从混凝土质量、导管操作、灌注流程等方面严格把控,确保灌注质量。一是严控混凝土质量,根据水利工程抗渗、抗冻要求优化混凝土配合比,采用商品混凝土,坍落度控制在180 mm~220 mm,初凝时间 ≥ 6 h,掺入粉煤灰与聚羧酸减水剂,提升混凝土和易性与抗渗性;严格控制粗骨料粒径,最大粒径不大于导管内径的1/8和钢筋净距的1/4,避免混入大块骨料和杂物;混凝土运输过程中需持续搅拌,防止离析,进场后进行坍落度检测,不合格的混凝土严禁使用。二是规范导管操作,导管使用前进行试拼、水密性试验,确保导管无渗漏、无变形;导管安装时保持垂直,避免弯曲、倾斜,导管底部距孔底300 mm~500 mm;灌注过程中严格控制导管埋深,保持在2 m~6 m之间,埋深过浅时及

时补充混凝土,埋深过深时缓慢提拔导管,避免导管拔出混凝土面;定期清理导管内壁,防止结垢、堵塞。三是优化灌注流程,灌注前严格清孔,采用换浆法或抽浆法进行二次清孔,确保孔底沉渣厚度符合规范要求,沉渣厚度不大于50 mm;计算准确的首批混凝土方量,确保首批混凝土灌注后导管埋深 ≥ 1.0 m,实现有效封底;安排专人实时监测混凝土灌注进度和孔内混凝土面高度,及时调整灌注速度,当混凝土面在钢筋笼底口以下时,可适当加快灌注;当混凝土面升至钢筋笼内时,应适当放慢灌注速度,减少混凝土向上的顶托力。四是加强应急处置,封底失败时,立即暂停灌注,用带底盖的捞渣筒或反循环钻机将已灌注的混凝土和沉渣一并吸出,清理干净后重新灌注;卡管时,在保证最小安全埋深的前提下,小幅提升导管然后快速下落,或用附着式振动器振动导管,无效时可加大一次性拆管长度,若仍无法疏通,需拔除导管,清理孔内混凝土后重新灌注;发生断桩时,根据断桩位置和程度,采用接桩或补桩的方式处理,确保桩体完整性。

4 结束语

孔钻孔灌注桩作为水利工程基础结构的核心施工技术,其成桩质量直接关乎水利工程整体结构安全与长效运行能力。本文围绕水利工程场景下该技术的施工要点展开研究,明确前期准备、钻孔施工、钢筋笼加工安装及混凝土灌注等质量管控的核心环节,各工序均需严格遵循设计标准与施工规范执行。针对施工中易出现的塌孔、孔身偏斜、混凝土灌注缺陷等问题,其诱因多与地质条件、工艺操作、设备管控相关,需秉持预防为主、精准处置的原则,针对性防控各类隐患。随着水利工程建设趋于大型化、智能化,需持续优化灌注桩施工工艺,融入数字化、智能化监测管控手段,提升施工质量与效率,为水利工程基础安全提供更坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 梁文杰.不良地质中粗砂层钻孔灌注桩施工质量的控制研究[J].工程建设与设计,2024(06):191-193.
- [2] 张雪林,宋晓冬,吴政.用于长螺旋钻孔灌注桩施工工艺的混凝土配合比试验研究[J].水电站设计,2024,40(01):8-14.
- [3] 孔凡磊.水利施工中钻孔灌注桩技术的应用分析[J].水上安全,2024(05):148-150.
- [4] 徐光.水下钻孔灌注桩施工常见问题及对策研究[J].工程技术研究,2024,09(21):103-106.
- [5] 邵晓平.桥梁钻孔灌注桩施工中的泥浆护壁技术改进研究[J].工程技术研究,2025,10(11):74-76.

隧道病害的主要类型和防治措施研究

肖朝升

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 隧道作为交通基础设施的重要组成部分, 广泛应用于公路、铁路等工程建设中, 其服役安全性直接关系到交通通行安全和工程使用寿命。受地质条件复杂、施工工艺不当、运营维护不足、设计适配性欠缺等多重因素影响, 隧道在建设和运营过程中易产生各类病害, 不仅影响隧道结构稳定性, 还可能引发交通安全事故、大幅增加全生命周期维护成本。本文结合隧道工程建设与运营实际, 系统梳理隧道病害的核心类型, 深入分析各类病害的产生机理与关键诱因, 针对性提出全周期、可落地的防治措施, 以期隧道病害的前期预防、精准治理及长效管控提供参考。

关键词 隧道病害; 衬砌结构病害; 渗漏水病害; 围岩及掌子面病害; 地质条件

中图分类号: U457.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.031

0 引言

随着我国交通基础设施建设向山区、复杂地质区域延伸, 隧道工程凭借缩短线路距离、克服地形障碍、保护生态环境等优势, 已成为公路、铁路网络建设的关键组成部分。隧道工程多穿越山岭、河谷等区域, 面临断层破碎带、岩溶发育、高承压水、软弱围岩等复杂地质条件, 建设与运营过程中病害频发^[1]。隧道病害不仅会降低结构使用寿命, 还会直接威胁行车安全, 严重时甚至引发塌方、涌水等重大安全事故。基于此, 本文系统梳理隧道病害的主要类型, 深入剖析病害成因, 构建“前期预防、过程管控、后期治理”的全周期防治体系, 对提升隧道工程建设质量、保障运营安全具有重要的工程实践意义。

1 隧道病害的主要类型

1.1 衬砌结构病害

一是衬砌裂缝。根据裂缝走向可分为纵向裂缝、环向裂缝与斜向裂缝。纵向裂缝多由围岩偏压、结构受力不均引发, 通常沿隧道轴线方向发展; 环向裂缝多与混凝土收缩、不均匀沉降相关, 常出现在洞口段或地质变化处; 斜向裂缝则多由剪切作用引起。裂缝宽度超过 0.2 mm 的规范限值后, 会直接削弱衬砌结构的承载能力, 并为渗漏水提供通道。现场检测数据显示, 裂缝宽度大于 0.5 mm 时, 衬砌受力性能下降约 15%~20%, 宽度超过 1.0 mm 的裂缝需采取结构性补强措施。

二是衬砌背后空洞与混凝土缺陷。受浇筑振捣不密实、超挖回填不到位等因素影响, 衬砌拱顶、边墙

易出现脱空、蜂窝麻面等问题。地质雷达检测数据显示, 约 35% 的运营隧道存在不同程度的拱顶脱空现象, 脱空高度通常在 5 cm~30 cm 之间, 脱空范围超过 2 m² 时, 该区域衬砌受力集中系数可达 2.5~3.0, 极易引发局部破损、掉块。蜂窝麻面深度超过 2 cm、面积大于 0.5 m² 时, 需进行补强处理。

三是衬砌腐蚀与劣化。地下水中含有的硫酸根离子(SO₄²⁻)、氯离子(Cl⁻)等侵蚀性离子, 会逐步腐蚀混凝土与内部钢筋。当 SO₄²⁻ 浓度超过 250 mg/L 时, 混凝土会产生钙矾石膨胀破坏, 腐蚀速率可达 0.1 mm/年~0.3 mm/年; Cl⁻ 浓度超过 500 mg/L 时, 钢筋脱钝锈蚀的临界浓度被突破, 锈蚀膨胀产生的径向压力可达 5 MPa~10 MPa, 导致混凝土保护层开裂、剥落, 严重时保护层脱落厚度可达 5cm 以上。

四是衬砌变形侵限。在高地应力(最大主应力>20 MPa)、软弱围岩大变形(变形速率>10 mm/d)等工况下, 衬砌结构出现收敛变形。当拱顶沉降超过 50 mm 或周边收敛超过 100 mm 时, 变形可能侵入隧道建筑限界(设计限界富余量通常为 15 cm~20 cm), 直接影响行车安全; 变形量超过 200 mm 时, 衬砌结构承载能力下降 40%~60%, 严重时会引起结构整体失稳^[2]。

1.2 渗漏水病害

渗漏水是隧道工程最普遍的病害, 根据渗漏形式可分为点漏、线漏、面漏与集中涌水四类: 点漏多为衬砌施工缝、变形缝处的滴水、漏水, 单处渗漏速率多在 0.05 L/min~0.5 L/min; 线漏多沿衬砌裂缝形成线状流水, 渗漏速率 0.5 L/min~5 L/min; 面漏表

作者简介: 肖朝升(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程。

现为衬砌边墙、拱顶大面积渗水,渗水面积占比可达衬砌断面的15%以上;集中涌水多发生在岩溶、断层破碎带等富水地层,单处涌水量可达 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 以上、水压超 0.5 MPa ,易引发突水突泥事故。渗漏水病害的危害具有连锁性,一方面,隧道内渗水会导致路面动摩擦系数降至 0.3 以下,冬季结冰后摩擦系数进一步衰减,直接降低行车安全性;另一方面,渗漏水携带的侵蚀性离子会加速衬砌结构腐蚀劣化,寒区隧道中,渗漏水引发的冻融循环会导致衬砌混凝土冻胀开裂、排水系统冻堵,进一步加剧病害发展。

1.3 围岩及掌子面病害

围岩及掌子面病害主要发生在隧道施工阶段,部分失稳隐患会延续至运营阶段,是隧道建设过程中安全风险防控的核心重点。一是掌子面失稳与塌方,在软弱围岩、破碎带地层中,开挖工法不当、支护不及时,易导致掌子面滑塌,不仅会造成工期延误、财产损失,还可能引发人员伤亡事故;二是围岩大变形与基底病害,高地应力软岩地层中,围岩流变特性会导致持续大变形,挤压初期支护与衬砌结构,运营阶段则易出现基底隆起、路面下沉变形,影响线路平顺性;三是涌泥涌水灾害,在岩溶、富水断层破碎带施工中,掌子面揭穿承压水层、岩溶管道时,易发生突发性涌泥涌水,是隧道施工中群死群伤事故的主要诱因之一;四是附属设施病害,围岩变形与渗漏水耦合作用下,易引发接触网基础偏移、消防管道破损、监控线路脱落等问题,直接影响隧道附属功能正常发挥,衍生次生行车安全风险。

2 隧道病害的原因分析

2.1 地质条件因素

地质条件是隧道病害产生的先天基础,属于不可控的客观诱因。隧道穿越地层的复杂性与不确定性,直接决定病害发生概率。线路穿越断层破碎带、岩溶发育区、软弱围岩、膨胀土等不良地质段时,围岩自稳能力差,易诱发塌方、大变形、涌水等病害;高承压水层、富水岩溶管道等水文地质条件,是渗漏水、突水突泥病害的主要来源,地下水中的侵蚀性离子,还会持续造成衬砌结构腐蚀劣化^[3]。

2.2 施工工艺因素

施工工艺不规范、质量管控缺位,是隧道病害产生的最主要人为因素,超六成运营期隧道病害均源于施工阶段的质量缺陷。软弱围岩段盲目选用全断面开挖、开挖进尺过大,会过度扰动围岩,引发塌方、大变形;初期支护施作不及时、锚杆与喷射混凝土参数不达标,无法有效约束围岩变形;衬砌混凝土振捣不密实、拱顶浇筑不饱满,易产生蜂窝、空洞、背后脱空等缺陷,

直接削弱结构承载力;防水板破损、焊缝不牢、止水带安装偏差等问题,会造成防水体系失效,是渗漏水病害的核心诱因。

2.3 运营维护因素

运营期维护管理缺位,是隧道病害持续发展、逐步恶化的关键原因。日常巡检流于形式,对初期微小裂缝、局部渗漏水等病害发现不及时,小隐患易发展为结构性病害;已发现病害处置不及时、治理工艺不当,会导致病害反复复发。同时,部分隧道存在“重建轻养”问题,养护资金投入不足、养护队伍专业能力欠缺,无法满足精细化养护需求。此外,重载、超限车辆长期反复碾压,易造成基底结构疲劳破损,隧道内汽车尾气、潮湿环境,也会加速衬砌结构与附属设施的腐蚀劣化。

2.4 设计因素

前期设计适配性不足,是隧道病害产生的源头性因素。前期地质勘察深度不足,对线路沿线不良地质体的分布、规模预判不准,会导致设计方案与现场地质条件严重不符;围岩等级判定偏低、支护参数安全余量不足,特殊地质段未设置专项超前支护设计,无法有效控制围岩变形;防排水体系设计未遵循“防、排、堵、截相结合”原则,未考虑排水系统长期堵塞风险,富水段防水设计冗余不足;同时,对运营期交通量增长、荷载变化预估不足,结构设计未预留安全余量,长期运营下易出现结构疲劳损伤。

3 隧道病害的优化防治措施

3.1 优化设计方案,筑牢病害防控基础

首先,强化前期综合地质勘察,针对线路沿线的不良地质段,采用钻探、地质雷达、地震波反射法等综合勘察手段,精准查明断层破碎带、岩溶、富水层的分布特征与水文地质条件,避免因地质资料失真导致的设计缺陷;其次,针对性优化结构与支护设计,根据围岩分级结果采用差异化支护参数,软弱围岩、高地应力段采用超前小导管、管棚等超前支护设计,配合强初期支护方案,严控围岩变形,结合工程地质条件优化衬砌结构形式,预留合理的安全余量^[4];再次,完善防排水体系专项设计,严格遵循“防、排、堵、截相结合,因地制宜,综合治理”的原则,优化防水板、止水带的选型与布设,针对富水段、寒区隧道设计抗堵塞、防冻胀的排水系统,确保防排水体系长期有效;最后,针对岩溶、断层破碎带等特殊地质段,编制专项设计与处置方案,从源头降低病害发生概率。

3.2 规范施工工艺,提升施工质量管控水平

施工阶段是防控隧道病害的关键环节,必须以规范施工为核心,实现施工全过程质量闭环管控。一是

严格执行设计与规范要求,根据现场围岩条件动态优化开挖工法,软弱围岩段采用台阶法、CRD 法等分部开挖工法,严控开挖进尺,减少对围岩的扰动,严禁超挖、欠挖;二是严控初期支护施工质量,严格按设计参数控制锚杆的长度、间距与注浆饱满度,确保喷射混凝土的厚度、强度与平整度达标,开挖后及时封闭围岩,杜绝初期支护滞后的违规操作;三是强化衬砌混凝土与防水工程施工管控,严格控制混凝土配合比与浇筑振捣工艺,采用带模注浆工艺解决拱顶脱空问题,衬砌完成后采用地质雷达进行全断面检测,对脱空区域及时注浆回填;防水板铺设前清理基面尖锐物,采用双焊缝焊接工艺,完成后通过充气试验检测焊接质量,施工缝、变形缝处精准固定止水带,确保防水体系闭合无缺陷;四是建立全过程质量管控体系,落实“三控制”,每道工序验收合格后方可进入下一道工序,严禁盲目赶工期省略关键工序,从施工源头消除质量隐患。

3.3 强化运营维护,建立长效管控机制

运营阶段的长效管控,是遏制病害发展、保障隧道长期服役安全的核心保障。

(1) 建立常态化巡检检测体系,采用“日常巡检+定期检测+专项检测”相结合的模式,日常巡检重点排查渗漏水、衬砌掉块、路面破损等显性病害,定期采用地质雷达、超声波检测、自动化监测等技术,开展结构内部缺陷、变形等专项检测,全面掌握隧道技术状况;(2) 落实病害分级处置机制,根据病害类型、严重程度进行分级分类,建立病害动态管理台账,对轻微裂缝、局部渗水等早期病害及时处置,防止病害持续扩大,对结构性重大病害,组织专家论证专项治理方案,确保治理效果;(3) 完善养护管理制度与保障体系,摒弃“重建轻养”的理念,保障隧道养护资金投入,组建专业养护队伍,定期开展养护人员技能培训,提升病害处置的专业性;(4) 强化运营环境管控,联合交通执法部门严控超限超载车辆,减少结构疲劳损伤,建立隧道健康自动化监测系统,对特殊地质、高风险段布设监测设备,实时监测结构变形、渗流等数据,实现病害风险提前预警、及时处置;(5) 创新技术应用,提升防治智能化水平。积极推动隧道养护数字化、智能化升级,搭建隧道全生命周期数字孪生管控平台,融合物联网感知、AI 图像识别、大数据分析技术,实现病害数据自动采集、智能识别与发展趋势精准研判。

3.4 完善病害治理技术,提升应急处置能力

针对渗漏水病害,按渗漏形态分级施策:点状渗漏采用针孔注浆堵漏,选用单组分聚氨酯注浆浆液,注浆压力控制在 0.5 MPa ~ 1.0 MPa;线状渗漏沿裂缝

开凿宽 10 cm ~ 15 cm、深 5 cm ~ 10 cm 的梯形凹槽,完成引排水、埋管注浆后,用防水砂浆分层封闭找平;大面积面漏或集中涌水段,先重做结构防水层、增设环向排水盲管疏导水流,富水断层、岩溶地层同步实施帷幕注浆完成源头堵水。

针对其余病害同步匹配精准处置工艺:衬砌背后脱空采用水泥-水玻璃双液浆注浆回填,注浆压力控制在 0.8 MPa ~ 1.2 MPa,通过雷达检测验证回填密实度;围岩失稳段采用超前管棚注浆+型钢支架支护,强化围岩自稳能力;路面破损病害精准切割破损区域,清理松散基层后采用快硬混凝土回填修复,缩短交通管制时间。同时,完善重大病害应急处置预案,配套专项应急物资与专业处置队伍,提升突发病害的快速响应与处置能力。

针对隧道塌方、突水突泥等重大突发事件,编制专项应急预案,配备专业应急抢险队伍与物资设备,定期开展应急演练,提升突发事件的快速响应与处置能力^[5]。建立病害治理后效果评估机制,对完成治理的病害段开展持续跟踪监测,验证治理效果,总结治理经验,形成病害治理技术案例库,持续优化隧道病害防治技术体系。

4 结束语

隧道病害的产生是地质、设计、施工、运营等多因素共同作用的结果,具有类型多样、成因复杂、危害连锁性强的特点,其防治工作必须坚持“预防为主、防治结合、全周期管控”的核心原则,打破传统“重治理、轻预防”的固有模式。在隧道工程建设与运营实践中,需持续深化对病害产生机理的研究,不断推广智能化勘察、数字化施工、自动化监测等新技术的应用,构建全生命周期的隧道病害防控体系,从根本上减少病害发生,保障隧道的结构安全与长期稳定服役,为我国交通基础设施高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 杨华清,高刚刚,朱小明,等.公路隧道渗漏水病害处治对策研究[J].山西建筑,2025,51(22):148-151.
- [2] 覃志涛.公路隧道渗漏水病害检测及评价研究[J].现代工程科技,2025,04(19):89-92.
- [3] 李剑雄,李海.隧道衬砌带模注浆工艺的创新与实践[J].工程机械,2025,56(10):82-85,132.
- [4] 刘瀚璠,余昌,李彬,等.隧道基底病害对货运列车振动响应影响的测试分析[J].铁道标准设计,2025,69(10):347-356.
- [5] 李宇星,胡籍,何国旗,等.高速公路隧道裂缝渗漏水病害处治措施研究[J].现代工程科技,2025,04(17):69-72.

土木工程建筑结构设计问题及优化措施

汶永涛, 李文军

(陕西金晟弘建设工程有限公司, 陕西 宝鸡 722300)

摘要 随着我国城镇化建设步伐持续加快, 土木工程建筑行业也迎来了飞速发展, 各类建筑工程数量和规模不断扩张。在行业快速发展的背景下, 土木工程建筑结构设计诸多设计问题突出, 不仅影响建筑工程的施工进度, 还大幅降低了建筑整体的安全性。本文从土木工程建筑行业的发展现状出发, 深入剖析了结构设计中的普遍问题, 并结合行业规范, 提出针对性的解决措施, 以期为行业内结构设计工作的改进和完善提供参考。

关键词 土木工程建筑结构设计; 结构材料选取; 楼层平面刚度; 传递性设计

中图分类号: TU318

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.032

0 引言

土木工程建筑结构设计是现代建筑工程领域不可或缺的重要组成部分, 更是保障建筑物综合性能的关键环节, 在整个建筑行业高质量发展进程中占据着举足轻重的地位。在建筑物整体规划、方案设计以及现场施工建造的全流程中, 建筑结构设计的作用不可替代, 其直接影响了建筑物的长期使用过程中的整体安全性能以及项目运营的经济合理性。目前社会经济稳步发展, 人们对于建筑空间的需求越来越多样化, 因此, 设计人员需要立足于工程实际条件和项目建设需求, 全面统筹兼顾选材、受力分析、合理选型等多个维度, 合理控制工程建设成本的同时全面提升建筑的安全防护水平。因此, 现阶段需要结合当下结构设计工作的短板, 主动探究有效的优化路径, 持续完善设计体系, 全面助力建筑行业的持续健康发展^[1]。

1 土木工程建筑结构设计的主要内容

在开展土木工程建筑结构设计工作中, 需要重点考虑两大关键内容开展系统化的设计工作。首先是需要重视各类专项设计项目中的规划落实工作, 建筑工程本身是一项综合性的建设工程, 结构主体设计、给排水系统设计等多个内容紧密关联, 直接关系建筑后期使用体验和运行效果, 在开展各个模块的设计工作时, 必须将建筑整体的安全可靠性和功能稳定性作为出发点, 合理优化设计方案, 切实提升建筑整体经济效益。其次, 需要遵循行业结构设计规范和硬性的设计要求等, 建筑物由多种结构构件共同组成, 每个构件都需要具备承载能力, 能够稳定承受自重荷载和外

力荷载等, 充分发挥自身优势, 保障建筑日常使用过程中的稳定性, 因此在设计阶段需要进行强度测算工作, 结合建筑物的使用年限、环境因素等综合分析, 从构件设计层面规避安全风险^[2]。除此之外, 设计人员还需要分析不同结构之间的衔接关系和受力传递逻辑等, 科学选择结构组合方式, 实现各部分结构的协同受力, 全方位保障建筑物整体结构安全, 有效提升建筑质量。

2 土木工程建筑结构设计的主要问题

2.1 缺乏较强的整体性

在开展土木工程建筑结构设计的过程中, 行业内普遍存在的问题就是整体设计思维较为薄弱, 严重缺乏全局统筹意识和系统规划理念, 很多设计人员往往局限于内部设计的内容, 无法站在建筑的整体布局开展深层次的综合分析, 这种局部设计的思想会导致结构设计工作呈现碎片化的状态, 各区域之间互不衔接, 缺少统一的规划导向和协同配合逻辑, 不能形成相互支撑的完整结构体系, 在后续使用的过程中, 建筑各项功能缺陷和结构短板也会逐渐暴露。另外, 结构设计整体性不足的问题还体现在建筑物无法与周围的自然环境等相融合, 与周围环境格格不入。这些不协调的设计难以对周围的生态、市政等各类资源进行高效利用, 造成资源浪费, 违背了现代建筑绿色化的发展理念。

2.2 结构材料选取问题

在当前土木工程建筑结构设计工作中, 结构科学选材往往容易出现疏漏, 材料选用的合理性需要从材

作者简介: 汶永涛 (1996-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 土木工程。

料强度、耐久性、经济成本以及绿色可持续发展等多个维度综合考虑。在实际选材过程中,强度与刚度的匹配不达标是比较常见的问题,建筑不同位置的结构构件所处的受力环境不同,需要承载的荷载类型和强度也有差异,如果没有在设计阶段进行精确受力分析和匹配建材,盲目选用材料,就会出现材料与实际需求不匹配,整体结构受力失衡。除此之外,结构材料的耐久性能和使用寿命是选材阶段的关键要点,建材自身的抗老化、抗风化等能力,直接决定了建筑物整体的使用周期。建筑在长期使用过程中,会持续受到温度、湿度变化、雨雪侵蚀、风霜冻融等因素的持续影响,如果选用的材料性能较差,环境适应能力不足,便会缩减建筑整体结构的服役年限,严重威胁建筑使用安全。因此,在设计阶段需要综合研判各类建材的环境适应能力,从源头提升建筑结构的性能,同时兼顾材料采购的经济合理性,实现安全性能和经济效益的协调统一。

2.3 细节处理缺乏严谨性

在土木工程建筑结构设计工作中,各类关键细节问题都应该被充分重视,但目前我国很多土木工程建筑结构设计方面的不足都来源于一些看似不起眼的小细节,这些细节问题虽然表面微小并且不易被察觉,却会对建筑整体质量产生十分显著的影响,比如在预埋件设计时,如果不能对兼容问题进行细致处理,就可能会导致施工效果不合理,与其他结构部件的施工还可能会发生冲突,进而严重影响建筑整体功能^[3]。

2.4 楼层平面刚度问题

在建筑结构设计过程中,一些设计人员的设计能力可能相对不足,对结构力学的原理和核心设计理念掌握得不够扎实,理论储备不足,在开展设计工作时,结构布局规划和力学模型的搭建脱离了现场实际情况,对受力分析不够精准细致,计算方式不严谨,得出的各项技术参数与现行的行业设计规范和标准不符合,这不仅大幅削弱了数据的参考价值,还会直接影响建筑结构的稳定性,对后续施工造成极大的安全隐患。

2.5 土木工程结构设计方案中的问题

土木工程结构设计需要紧密结合施工现场实际情况,以设计方案为施工核心依据,根据方案的指导性作用,保障建筑设计达到预期的需求标准^[4]。现阶段的很多结构设计方案存在诸多细节缺陷,图纸标注、构件表示和参数标注等缺乏统一的规范,内容表述模糊甚至是符号使用混乱,给施工人员的使用造成困难,这类不规范设计的问题很容易引发操作问题,方案不

能正常落地执行,破坏结构设计的合理性,进而影响工程建设质量。

2.6 套用标准图危害设计安全性或经济性

土木工程结构前期计算涉及多门专业学科知识,技术门槛比较高,部分设计企业缺乏专业人才,在设计过程中会简化计算流程,对于建筑结构简单分类后便直接套用标准图纸开展设计施工,盲目地套用标准图纸的行为无法平衡建筑安全与施工经济,如果忽视场地环境、地基条件差异等而一味照搬图纸,容易导致建筑安全标准和实际场地不匹配,遗留结构安全隐患。后期如果想弥补缺陷,又需要增加额外的施工投入,提升建筑成本,因此,套用标准图的设计模式弊端问题突出,质量水平和效率均严重不足。

3 基于土木工程建筑结构设计现存问题的优化措施

3.1 优化整体土木工程建筑结构设计

在土木工程建筑结构设计的前期方案设计阶段,可以依托建筑本身的结构体系、使用功能和荷载受力等多方面基础条件,结合专业判断能力,为设计人员的设计提供可靠的参考,更好地进行功能设计和外观造型设计^[5]。在整体结构设计过程中,需要保障理想的结构形态具备协调性,能与后续各类建筑构造有效适配,规避建筑内部各结构之间出现矛盾和不兼容问题,尤其是后期涉及暖通、给排水等配套系统的安装,都需要在结构设计阶段进行综合考量,从而让建筑结构设计完全契合预期设计目标。

3.2 材料选取方面优化措施

在材料的选择方面,要考虑建筑结构的整体性能、安全水平和经济成本等,如大跨度的钢结构桥梁设计,可通过合理选材落实设计优化工作。首先要全面分析各类建材的综合性能,包括金属、混凝土和各种复合材料等,充分了解不同材料的力学性能,综合对比各类材料的适用条件和优劣势。针对大跨度桥梁工程,需要重点研究各类钢材的受力性能,研判其在大跨度施工场景中的适配性,结合工程实际来筛选最优的钢材。除此之外,还要根据桥梁的抗震等级等,选用强度和延展性能较好的钢材,对不同的地域环境,如滨海高腐蚀等特殊情况,搭配耐腐蚀的钢材或防护层,进一步提升结构的环境适应能力。

3.3 注重土木工程建筑结构设计核心细节

想要高效推进土木工程建筑结构设计工作,提升建筑投入使用后的整体运行质量,就需要高度重视结构设计中的细节内容,精准把控并妥善处理好每一处

关键细节设计,保障各结构之间精准契合,协调统一,从源头上避免各类结构质量缺陷。在针对性优化结构关键细节的过程中,设计人员需要把控关键节点设计,既要保证整体结构布局的科学性,也要保障建筑结构设计的标准化和运行可靠性。设计人员需要全面熟悉并深入研究国家现行的设计规范与行业标准,将各项硬性要求融入设计和现场施工的全过程中,严格按照规范来开展各项工作,以规避各设计细节之间出现矛盾冲突,全面提升建筑的整体稳定性。由于建筑结构核心细节的处理标准严格且实施难度较大,这对设计人员的综合能力形成了挑战,相关人员需要持续学习专业知识,从而更加专业地完成土木工程结构细节设计与优化工作。

3.4 传递性设计优化

当前建筑工程设计行业普遍使用了建筑信息模型技术,该技术能出色地整合信息与协同协作,可以显著增加建筑方案编制的效率,能更好地进行辅助优化细节、调整图纸及参数等关键工作,有效提升设计工作的效率和准确性。设计人员需要对建筑局部的构件规格、某个设备运行参数进行调整时,模型内所有的关联数据和配套的构件信息能够根据设定的逻辑进行联动更新,快速生成一个全新的三维设计模型,有效缩短方案设计的时间,简化了不必要的重复工作,又可以有效规避传统二维图纸设计的设计数据疏漏等问题,全面保障建筑设计方案的科学完善性和数据精准性,为后续现场施工与建筑后期运营提供了可靠的设计支撑。

3.5 优化土木工程建筑结构设计方案

土木工程建筑结构设计方案的优化核心在于方案本身的设计完善。在方案的编制阶段,需要综合考虑各类内外部影响因素,深入剖析原有设计内容存在的潜在问题,结合工程实际情况制定针对性的改进措施,进而打造出内容更加完善、符合现行建设标准的全新设计方案。同时,还要对设计内容进行对比和筛选,逐步完成方案的持续升级优化。在开展设计优化工作的过程中,设计人员要明确建筑核心的使用功能需求,在满足功能设计的基础上,从成本、外形设计等方面进行综合调整和优化,全面平衡各项设计要素,保障最终设计方案达到实际建设要求。

3.6 做好建筑结构设计工程数据计算工作

土木工程建筑结构图纸的编制应该充分结合项目施工现场的实际条件来进行设计,要杜绝照搬其他同

类建筑的标准化图纸,这就要求设计人员重视各项工程数据的测算,根据真实可靠的计算数据来编制专属结构施工图。设计人员在开展工程计算工作时,要严格遵守国家标准和行业规范,主动对接主管部门,在完成基础计算后,要结合场地的自然条件、地域环境特征等特殊设计要求,开展结构受力的验证,统筹兼顾建筑结构安全性能和工程经济效益,实现结构安全。根据科学严谨的工程计算结果,结构设计人员能够对施工图纸进行个性化调整和优化改良,让最终的设计图纸充分适配项目所在地的条件,更好地满足施工和长期安全使用的需求。

4 结束语

土木工程建筑结构设计是贯穿建筑工程项目全周期的核心环节,也是保障工程整体质量和长期安全运行的关键前提,科学合理的结构设计方案不仅能为现场施工提供清晰的指导依据和技术支撑,还能有效避免施工阶段各类操作的矛盾冲突,最大限度减少建筑完工交付后的细节问题。为全面提升建筑结构设计的精准性,优化设计中存在的问题,行业内应积极引入建筑信息模型技术,依托数字化手段开展建筑结构模型的搭建,凭借信息化的优势精准排查设计方案的细节漏洞。随着现代化技术的深度融合,结构设计方案的内容更加精细化和标准化,便于一线施工人员全面准确理解设计意图,严格落实各项技术标准与施工要求,有序推进各环节的稳步实施,持续提升现场施工的效率和建设管控水平,从而助力整个土木工程建筑项目的高效推进。

参考文献:

- [1] 杜文东.土木工程建筑结构设计中的问题分析[J].中国住宅设施,2023,08(06):125-127.
- [2] 李丽娜.土木工程中建筑框架结构设计现存问题及解决对策:以某综合楼工程为例[J].房地产世界,2023,11(20):42-44.
- [3] 胡庆涛.超高层建筑设计问题及对策研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023,15(13):143-145.
- [4] 李云杰.房屋建筑设计中的问题与对策分析[J].科技与创新,2022,25(12):161-163,170.
- [5] 吴树明.土木工程建筑结构设计问题及优化措施[J].中国高新科技,2021,06(06):33-34.

港口与航道工程大体积混凝土裂缝控制

尹 镖

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 大体积混凝土是港口与航道工程中码头承台、沉箱、防波堤、船坞坞室等结构的主要用材, 其裂缝问题是影响结构长期服役安全与耐久性的关键病害。本文结合港航工程海洋侵蚀环境与结构约束特点, 系统梳理了大体积混凝土裂缝的分级标准与形成机理, 从原材料管控、温度应力调控、施工工艺优化、养护防护四个维度构建了全流程裂缝控制体系, 归纳了针对性的防控技术要点, 以为同类港航工程施工提供参考。

关键词 港口与航道工程; 大体积混凝土; 裂缝控制; 温度应力

中图分类号: U655.54

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.033

0 引言

随着我国水运事业的高质量发展, 沿海大型港口、深水航道、跨海枢纽、船坞船闸等港航工程的建设规模持续扩大, 大体积混凝土结构凭借承载能力强、整体性好、抗渗性能优的特点, 广泛应用于码头承台、重力式沉箱、直立防波堤、船坞坞室等关键部位。港航工程大体积混凝土多处于海洋浪溅区、水位变动区等恶劣服役环境, 长期面临干湿交替、氯离子渗透、潮汐冲刷、温度骤变等耦合作用, 同时结构断面尺寸大、与下部基础刚性连接, 浇筑后极易因水化热集中释放、收缩变形受约束等因素产生裂缝^[1]。裂缝不仅会影响结构外观质量, 还会为侵蚀介质提供渗透通道, 加速内部钢筋锈蚀与混凝土劣化, 严重时削弱结构承载能力, 大幅缩短工程服役寿命。当前, 港航工程大体积混凝土裂缝防控仍存在措施针对性不足、全流程管控体系不完善等问题。基于此, 本文系统分析裂缝的形成机理, 构建标准化的全流程控制技术体系, 为同类工程施工提供系统性参考。

1 港航工程大体积混凝土的特性与裂缝分级

1.1 港航工程大体积混凝土的结构与服役特性

港航工程大体积混凝土区别于普通工民建工程, 具有显著的结构与环境特殊性。在结构层面, 港工大体积混凝土多为长条形、大断面复合结构, 如码头胸墙、防波堤堤身等, 单段浇筑长度大, 与桩基、沉箱、方块等下部基础刚性连接, 混凝土温降收缩、干燥变形受强约束作用, 易产生拉应力开裂; 同时结构配筋密集、

预埋件多, 临水作业空间受限, 对浇筑振捣工艺要求更高。在服役环境层面, 港工大体积混凝土绝大多数处于海洋环境, 其中浪溅区、水位变动区受干湿交替、氯离子侵蚀、潮汐冲刷、海风温湿度骤变的耦合作用, 是裂缝高发且危害最严重的区域, 对混凝土的抗裂、抗渗、抗侵蚀性能要求远高于普通工程^[2]。

1.2 裂缝的分级判定标准

结合《水运工程混凝土结构设计规范》与港航工程海洋服役环境要求^[3], 根据裂缝宽度、深度、所处环境分区与危害程度, 将大体积混凝土裂缝划分为 4 个等级, 具体判定标准如表 1 所示。

2 港航工程大体积混凝土裂缝的形成机理

2.1 水化热释放与温度应力作用

水化热引发的温度应力是港航工程大体积混凝土开裂的最主要诱因。大体积混凝土浇筑后, 水泥水化反应会释放大量的水化热, 由于结构断面尺寸大, 热量不易散发, 会在混凝土内部形成温度峰值, 而表层热量散发较快, 形成显著的内外温差。根据热胀冷缩原理, 内部混凝土受热膨胀, 表层混凝土温降收缩, 两者变形不协调会在表层产生拉应力, 当拉应力超过混凝土早期极限抗拉强度时, 便会产生表面温度裂缝。后期混凝土整体温降过程中, 体积收缩受到下部基础的刚性约束, 会在结构内部产生较大的整体拉应力, 当拉应力超过混凝土抗拉强度时, 便会形成深层甚至贯穿性温度裂缝。港航工程临水露天作业的特点, 易因海风、昼夜温差加剧混凝土内外温差, 进一步提升开裂风险。

作者简介: 尹镖 (1987-), 男, 本科, 研究方向: 港口与航道工程。

表 1 港航工程大体积混凝土裂缝分级判定标准

裂缝等级	裂缝宽度限值	裂缝深度特征	适用环境分区	危害程度
轻微	$\leq 0.15\text{ mm}$	表面裂缝, 深度 $< 50\text{ mm}$	大气区、水下区	仅影响外观, 无显著耐久性危害
中等	$0.15\text{ mm} \sim 0.30\text{ mm}$	深层裂缝, 深度 $50\text{ mm} \sim 200\text{ mm}$	大气区、水下区	削弱局部断面, 存在氯离子渗透风险
严重	$0.30\text{ mm} \sim 0.50\text{ mm}$	深层裂缝, 深度 $> 200\text{ mm}$	浪溅区、水位变动区	显著降低结构耐久性, 加速钢筋锈蚀与混凝土劣化
极严重	$> 0.50\text{ mm}$	贯穿裂缝, 穿透结构断面	全环境分区	破坏结构整体性, 危及结构承载安全与使用功能

2.2 收缩变形与约束作用耦合

收缩变形与约束作用的耦合, 是港航工程大体积混凝土开裂的重要诱因。混凝土浇筑后会产生塑性收缩、干燥收缩、自生收缩等多种收缩变形, 其中塑性收缩发生在混凝土初凝前, 海风作用下表面水分快速蒸发, 易产生塑性收缩裂缝; 干燥收缩发生在混凝土硬化过程中, 内部多余水分持续蒸发, 引发体积收缩。港航工程大体积混凝土多与桩基、沉箱等已成型的下部基础刚性连接, 混凝土的收缩变形受到强约束作用, 无法自由释放, 会在结构内部产生持续的拉应力, 当拉应力超过混凝土的极限抗拉强度时, 便会产生约束裂缝。同时, 港航工程长条型大体积结构单段浇筑长度过长, 会导致收缩应力叠加, 进一步加剧开裂风险^[4]。

2.3 原材料与配合比设计影响

原材料性能与配合比设计是混凝土开裂的内在基础因素。在原材料方面, 若选用水化热较高的普通硅酸盐水泥, 会加剧水化热集中释放, 提升温度裂缝风险; 骨料级配不良、含泥量超标, 会增大混凝土的收缩变形, 降低抗拉性能; 掺合料掺量不合理, 无法有效降低水化热、改善混凝土抗裂性能; 外加剂与水泥适应性差, 易引发混凝土泌水、离析, 导致表层砂浆富集, 干缩变形增大。在配合比设计方面, 水胶比过大是导致混凝土干缩开裂的关键因素, 过量水分蒸发后会形成大量毛细孔隙, 增大收缩值; 胶凝材料总量过高, 会加剧水化热释放; 砂率不合理、未掺加抗裂组分, 会导致混凝土极限拉伸性能不足, 无法抵抗应力作用引发开裂。

2.4 施工工艺与环境因素影响

施工工艺管控不到位与海洋环境的耦合作用, 是裂缝产生的直接触发因素。在施工层面, 浇筑方案不合理, 分层厚度过大、浇筑速度过快, 会导致水化热

集中释放, 内部温度峰值过高; 振捣作业不规范, 漏振、欠振会导致混凝土密实度不足, 过振会引发离析, 均会形成局部缺陷诱发裂缝; 拆模时间过早, 混凝土强度未达到设计要求, 无法抵抗温度变化与约束应力; 施工缝处理不规范, 新旧混凝土收缩差会诱发沿施工缝的裂缝。在环境层面, 港航工程临水露天作业, 海风风速大、昼夜温差大, 会加速表面水分蒸发, 加剧内外温差; 潮汐水位变化会导致早期混凝土受潮水冲刷, 表层结构受损; 夏季高温、冬季低温等极端天气, 会分别引发温降收缩开裂与冻胀开裂。

3 港航工程大体积混凝土裂缝全流程控制技术

3.1 原材料优选与配合比抗裂优化

原材料优选需以降低水化热、提升混凝土抗裂性能为目标, 开展全流程管控。水泥优先选用中低热硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥, 降低水化热释放速率与峰值; 粗骨料选用质地坚硬、级配良好的连续级配碎石, 严控含泥量与针片状颗粒含量, 细骨料选用级配良好的中粗砂, 严禁使用未淡化海砂, 严控氯离子含量; 合理复配 I 级粉煤灰、S95 级矿粉等活性掺合料, 替代部分水泥, 降低水化热的同时, 改善混凝土和易性与密实度; 选用与水泥适应性良好的聚羧酸系高效减水剂, 搭配适量引气剂、聚丙烯抗裂纤维, 提升混凝土的极限拉伸性能与抗渗能力。

配合比优化需遵循“低水化热、低收缩、高抗拉、高密实”的原则, 在满足强度、工作性与耐久性要求的前提下, 严格控制水胶比, 最大限度降低用水量; 合理控制胶凝材料总量, 通过试配确定最优的掺合料复配比例, 减少水泥用量; 优化砂率参数, 保证混凝土的和易性与可泵性, 避免离析、泌水; 针对浪溅区、水位变动区的结构, 优化抗裂组分掺量, 兼顾混凝土的抗裂与抗侵蚀性能。

3.2 温度应力与约束释放调控

温度应力与约束释放调控是防控大体积混凝土裂缝的关键环节。在温度应力管控方面,采用“内降外保”的温控模式,通过优化浇筑方案,采用分层分段连续浇筑,分层厚度控制在 300 mm ~ 500 mm,合理控制浇筑速度,避免水化热集中释放;在混凝土内部预埋冷却水管,采用冷却水循环降温,降低内部温度峰值;混凝土表层采用土工布、保温棉等材料覆盖保温,缩小混凝土内外温差,严格控制内外温差不超过 25 °C,表层与环境温差不超过 20 °C;合理选择浇筑时间,优先选择夜间、低温时段浇筑,严控混凝土入模温度,夏季入模温度不超过 30 °C,冬季不低于 5 °C。在约束释放方面,合理优化分段分缝设计,根据结构断面尺寸与环境条件,控制单段浇筑长度,合理设置变形缝、诱导缝,有效释放混凝土的温度应力与收缩应力;优化结构与下部基础的连接设计,在旧混凝土结合面设置滑动缓冲层,减弱刚性约束作用;优化结构断面设计,避免断面突变,在转角处设置圆弧过渡,减少应力集中;在易开裂区域加密配置防裂钢筋网片,提升混凝土的极限拉伸能力,约束裂缝的产生与扩展^[5]。

3.3 施工全过程标准化管控

施工全过程标准化管控是防控裂缝的重要保障。浇筑作业需严格执行经审批的专项方案,采用分层分段连续浇筑工艺,避免出现冷缝;采用二次振捣、二次抹面工艺,在混凝土初凝前完成二次振捣,提升密实度,在初凝后、终凝前完成二次抹面,消除表层塑性收缩裂缝;规范振捣作业,严格执行“快插慢拔”的操作要求,控制振捣间距与时间,对钢筋密集区、预埋件周边采用小型振捣器加强振捣,避免漏振、欠振、过振。

在模板与拆模管控方面,选用刚度、强度满足要求的模板,做好拼缝密封处理,避免漏浆;严格控制拆模时间,待混凝土强度达到设计要求、内外温差符合规范限值后再拆模,拆模后及时做好保温保湿养护,避免混凝土表面温度骤降引发裂缝;规范施工缝处理,彻底凿除表面浮浆与松散混凝土,涂刷界面剂后再进行后续浇筑,保证新旧混凝土结合良好。

3.4 海洋环境适配的养护与防护技术

养护管控需结合港航工程海洋环境特点,构建全周期养护体系。混凝土浇筑完成后,在初凝前及时覆盖土工布、保湿棉等保湿材料,避免海风导致表面水

分快速蒸发;严格控制养护时间,普通硅酸盐水泥配制的混凝土养护不少于 14 d,掺加活性掺合料的混凝土养护不少于 21 d,确保护养期内混凝土表面始终处于湿润状态;针对临水作业区域,设置防风围挡,降低作业区域风速,减少表面水分蒸发;潮汐区施工,精准把握低潮位施工窗口期,养护期内做好临时防护,避免混凝土受潮水冲刷、浸泡。

针对海洋侵蚀环境,在混凝土养护完成后,可在浪溅区、水位变动区结构表面涂刷防腐涂层,隔绝氯离子、水分等侵蚀介质,降低裂缝引发的耐久性风险;针对已产生的裂缝,根据裂缝等级采取差异化处置措施,轻微表面裂缝采用环氧树脂封闭处理,深层裂缝采用低压灌缝处理,贯穿裂缝需采用灌浆加固与结构补强联合处置,确保结构安全。

4 结束语

本文结合港口与航道工程大体积混凝土的结构特点与海洋服役环境要求,系统梳理了裂缝的分级判定标准,从水化热温度应力、收缩约束耦合、原材料配合比、施工环境影响四个维度,全面解析了裂缝的形成机理,构建了从原材料优选到养护防护的全流程裂缝控制技术体系。当前,我国港航工程正向深水化、大型化方向发展,对大体积混凝土结构的抗裂性能与长期耐久性提出了更高要求,现有管控体系在智能化、精细化方面仍有优化空间。未来研究可聚焦绿色低碳抗裂混凝土研发、智能化温控监测技术、结构全生命周期裂缝预警等方向,完善抗裂管控标准,提升港航工程大体积混凝土结构的建设质量与长期服役能力。

参考文献:

- [1] 张焱.探究港口与航道工程大体积混凝土施工中的裂缝问题及控制[J].珠江水运,2020(01):101-102.
- [2] 王崇宇.港口与航道工程中大体积混凝土的施工裂缝控制[J].珠江水运,2024(06):111-113.
- [3] 花长春.港口与航道工程大体积混凝土施工裂缝控制[J].价值工程,2026,45(02):10-12.
- [4] 李厚平.分析港口与航道工程大体积混凝土施工裂缝控制[J].珠江水运,2024(12):43-45.
- [5] 刘中兴.港口航道工程大体积混凝土裂缝的施工工艺探讨[J].珠江水运,2021(03):58-59.

水利工程施工过程中的安全隐患排查与治理

龙 凤

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230093)

摘 要 水利工程作为国家关键基础设施, 直接关乎国计民生福祉、生态环境安全, 是保障人民群众生命财产安全的重要屏障。受施工周期长、露天作业多、工况复杂、多工种交叉作业等特性影响, 水利工程施工环节隐患排查与治理缺位极易引发安全事故, 造成严重损失。本文结合水利工程施工实际, 剖析常见安全隐患类型及成因, 明确排查原则、内容与方法, 提出针对性治理举措, 构建长效安全防控机制, 以期为施工安全管理提供理论与实践参考。

关键词 水利工程; 施工安全; 隐患排查; 隐患治理; 长效管理

中图分类号: TV513

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.034

0 引言

水利工程承担着洪涝灾害防控、水资源优化配置、农田灌溉保障及生态环境修复的核心功能, 施工环节的安全管控是项目建设不可突破的基础准则。现阶段国内水利项目建设体量持续提高, 施工工艺迭代速度不断加快, 可工程实施阶段受地质气象等自然条件、作业人员安全素养、机械设备运维状况、内部管理规范落地效果等多维度要素制约, 安全风险点依然广泛分布, 各类安全事件仍有出现, 对项目建设效率与成品质量造成明显阻碍。

1 水利工程施工过程中常见安全隐患及形成原因

1.1 常见安全隐患类型

水利工程施工环节繁杂, 涉及土方开挖、模板支护、混凝土浇筑、起重吊装、临水作业、高空作业、机电设备安装等多个工序, 不同工序存在的安全隐患各有侧重。土方开挖与模板支护隐患主要包括开挖坡度不合理、支护结构强度不足、边坡滑移等, 易导致基坑坍塌, 造成人员伤亡和设备损坏; 混凝土浇筑主要隐患是模板支撑系统由于设计不合理、立柱间距过大、底部无垫板或未按方案搭设, 可能导致支撑失稳, 引发坍塌。模板强度不足、接缝不严、浇筑速度过快或布料不均, 可能造成模板胀裂或爆模; 起重吊装环节安全隐患主要表现为吊物脱落、起重机械装置失效、超载或作业条件不符导致倾覆; 临水作业隐患多集中在围堰施工、基坑降水、河道疏浚等环节, 存在围堰溃决、基坑涌水、人员溺水等风险, 尤其在汛期施工时,

风险系数显著提升; 高空作业隐患主要表现为脚手架搭设不规范、安全防护设施缺失、作业人员未按规定佩戴安全防护用品, 极易引发高空坠落事故; 机电设备安装隐患表现为现场临时用电线路敷设不规范、私拉乱接、配电箱防护不到位、接地接零保护系统不完善, 易引发触电事故^[1]。

1.2 安全隐患形成的主要原因

水利工程施工过程中安全隐患的产生, 是人员素养、设备状态、作业环境、管控体系等多维度条件耦合作用的产物。人员维度是隐患产生的首要诱因: 部分一线施工人员职业技能水平不足、安全防范意识淡薄, 既未熟练掌握施工安全规范与标准操作流程, 又普遍存在麻痹侥幸心态, 违章操作、冒险施工等问题长期难以杜绝; 特种作业岗位存在人员未按法定要求持证上岗的情况, 从业者缺少必要的专业操作资质, 极易因操作不当触发安全风险; 针对从业人员的安全培训体系存在明显漏洞, 未按规定周期组织安全理论知识与实操技能的系统性培训, 直接导致施工群体整体安全素养达不到岗位要求。设备维度的风险主要源于成本管控下的不规范运维: 不少施工企业为压缩项目投入, 违规采购或投入使用老化失修、存在破损缺陷、不符合安全强制标准的施工机具, 同时设备日常维护保养机制严重缺位, 缺少固定周期的性能检测与故障排查, 使得设备在高负荷运行过程中极易突发故障, 进而酿成安全事故。环境维度的风险具有典型的不可预判性: 水利工程项目大多采取露天作业模式, 作业过程受气象、地质、水文等自然要素的干扰程度较高,

作者简介: 龙凤(1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

暴雨、台风、极端高温、低温冻害等恶劣天气,以及滑坡、泥石流等复杂地质灾害风险,都可能直接诱发施工安全隐患。

1.3 安全隐患排查治理的重要性

加强水利工程施工安全隐患排查与治理,是防范安全事故、保障施工人员生命财产安全的根本举措。水利工程施工安全事故多由未及时排查的隐患引发,通过全面、系统的隐患排查,能够精准识别施工过程中存在的各类安全隐患,掌握隐患的分布、类型和严重程度,为后续治理工作提供明确方向,从源头上防范安全事故的发生^[2]。同时,隐患排查与治理能够规范施工行为,推动施工企业完善安全管理制度,提升安全管理水平,确保施工过程符合安全规范要求。此外,做好隐患排查与治理工作,能够减少安全事故造成的人员伤亡和财产损失,避免工程停工、返工,保障水利工程施工进度和质量,降低施工成本。

2 水利工程施工安全隐患排查原则、内容与方法

2.1 水利工程施工安全隐患排查原则

水利工程施工安全隐患排查需严格遵循科学、全面、及时、精准、闭环管理的核心原则,保障排查工作落地见效。全面性原则要求排查覆盖施工全流程,涵盖准备、实施、竣工验收各阶段,聚焦高空作业、临水作业、基坑施工、临时用电等高危环节,覆盖所有岗位、人员及设备,做到无死角、无遗漏。及时性原则需建立常态化排查机制,定期开展排查,同时针对暴雨、台风等极端天气及工序转换、设备检修等关键节点,开展专项排查,实现隐患早发现、早处置。精准性原则要求排查人员具备专业素养,精准识别隐患类型、成因及严重程度,区分一般与重大隐患,为分类治理提供依据。闭环管理原则需形成“排查—登记—分析—整改—复查—销号”完整流程,确保隐患整改到位、复查合格后销号。

2.2 水利工程施工安全隐患排查内容

水利工程施工安全隐患排查围绕施工全流程,重点聚焦人员、设备、环境、管理四大核心维度。人员排查重点核查特种作业人员(起重工、电工、焊工等)持证上岗情况,检查施工人员安全意识、操作技能及安全培训记录,杜绝违规操作、冒险作业行为。设备排查针对起重机械、挖掘机、混凝土搅拌机等各类施工设备,检查其是否符合安全标准、定期检测维护情况、运行状态及安全防护装置完整性,完善设备台账,杜绝使用不合格、老化设备。环境排查关注施工场地排水系统、基坑边坡稳定性,临水、高空作业防护设

施,以及暴雨、高温等极端天气引发的次生隐患。管理排查核查安全管理制度健全性、安全责任落实情况、管理机构及人员配备、隐患排查治理机制、应急预案可行性,确保施工方案中安全措施落地,实现安全管理规范化^[3]。

2.3 水利工程施工安全隐患排查方法

结合水利工程施工特点,安全隐患排查采用日常排查、专项排查、综合排查、技术检测等多种方法,确保排查全面深入。日常排查由施工班组、安全员负责,每日对施工环节、设备运行、人员操作开展全面检查,重点排查高危岗位和环节,及时处置一般隐患并做好记录。专项排查针对特定工序、设备或时段,组建专业小组,通过现场检查、资料查阅、现场询问等方式,制定专项方案,聚焦高空作业、临时用电、汛期施工等领域,提升排查针对性。综合排查由施工企业牵头,联合监理、建设单位,每月或每季度全面排查施工场地,梳理隐患、分析成因、评估严重程度,形成报告为管理决策提供依据。技术检测借助专业设备,排查基坑支护强度、起重机械性能等隐蔽性隐患,提供科学治理依据。

3 水利工程施工安全隐患的治理措施与长效管理

3.1 安全隐患的分类治理措施

针对水利工程施工过程中排查出的不同类型、不同严重程度的安全隐患,应采取分类治理、精准施策的措施,确保隐患彻底整改到位。对于一般隐患,即危害程度较低、整改难度较小、能够立即整改的隐患,如施工人员未佩戴安全防护用品、临时用电线路敷设不规范等,由施工班组负责立即整改,安全员现场监督,整改完成后及时复查,合格后销号,确保隐患不遗留、不反弹^[4]。对于重大隐患,即危害程度高、整改难度大、可能引发重大安全事故的隐患,如基坑坍塌隐患、围堰溃决隐患、起重机械故障隐患等,应立即停止相关作业,设置警示标志,划定危险区域,禁止无关人员进入。组织专业技术人员制定专项整改方案,明确整改措施、整改时限、整改责任人,配备必要的整改设备和物资,确保整改工作有序推进。在整改过程中,安排专人现场监护,及时解决整改过程中出现的问题,整改完成后,由施工企业、监理单位、建设单位联合验收,验收合格后方可恢复作业,确保重大隐患彻底消除。针对不同类型的隐患,采取针对性的治理措施,如高空作业隐患,应规范脚手架搭设,完善安全防护设施,强制施工人员佩戴安全防护用品,加强现场监护;临水作业隐患,应加固围堰,完善排水系统,配备救

生设备,加强汛期巡查;临时用电隐患,应规范线路敷设,完善接地接零保护系统,定期检测线路绝缘性能,严禁私拉乱接。

3.2 强化隐患治理的保障措施

为确保安全隐患治理工作落到实处,必须强化各项保障措施,为隐患治理提供有力支撑。首先,强化组织保障,施工企业应建立健全安全管理机构,配备足够的专业安全管理人员,明确各岗位人员的安全责任,将隐患排查治理责任落实到每个班组、每个岗位、每个人,形成“人人有责、层层落实”的责任体系;成立隐患治理专项工作小组,统筹推进隐患治理工作,及时协调解决隐患治理过程中出现的问题。其次,强化资金保障,施工企业应合理安排安全投入资金,确保隐患排查、整改、检测、培训等工作有足够的资金支持,不得因资金不足而拖延隐患整改,严禁挪用安全投入资金,确保资金专款专用。再次,强化技术保障,加强与科研机构、高校的合作,引进先进的隐患排查和治理技术,推广应用信息化、智能化手段,如利用BIM技术模拟施工场景,排查隐蔽性隐患;利用物联网技术对施工设备、作业环境进行实时监测,及时发现隐患并预警,提升隐患治理的科学性和高效性;组织专业技术人员对隐患治理方案进行论证,确保整改措施科学、可行、有效。最后,强化监督保障,监理单位应履行监理职责,加强对隐患排查治理工作的监督检查,督促施工企业及时排查和整改隐患,对隐患整改不到位、拒不整改的,及时上报建设单位和相关监管部门^[5]。

3.3 建立隐患排查治理长效机制

安全隐患排查治理绝非阶段性突击任务,而是需要长期推进、动态迭代的系统性工作,唯有构建完善的常态化管控体系,才能从根源上消解安全风险,为施工全过程筑牢安全防线。施工企业可先行搭建常态化排查工作框架,结合项目实际编制隐患排查专项工作方案,清晰划定排查频次、覆盖范围、执行主体与判定准则,按计划有序进行日常巡检、重点领域专项排查与全维度综合排查,逐步形成覆盖全项目的常规排查工作方式,保障隐患排查工作不间断落地。在此基础上推行隐患台账精细化管理制度,对排查发现的所有风险点逐一登记注册,形成标准化隐患管理台账,详细记录隐患所属类别、分布位置、诱发原因、风险等级、整改方案、完成期限、直接责任人等核心信息,落实“单个隐患独立建档”要求,对台账内容实行动态更新,全程跟进整改进展,确保所有风险点始终处

于可控范围之内。同步搭建常态化安全培训教育体系,定期面向一线施工人员进行安全常识、岗位操作技能与相关法规政策培训,尤其要强化特种作业人员的资质核验与技能考核,从意识层面与操作层面双重提高从业人员安全素养,推动施工人员主动践行安全操作要求,自发参与到隐患排查治理的各个环节;定期进行多场景安全应急演练,锤炼从业人员的应急响应与现场处置能力,保障突发安全事件时可第一时间进行应对,最大限度降低人员伤亡与财产损失。最终要配套建立考核问责联动机制,将隐患排查治理的工作成效纳入施工企业各层级、各岗位人员的绩效考核指标,对隐患排查治理工作推进成效突出的主体与个人予以表彰奖励;对存在排查覆盖不全、整改进度滞后、整改质量不达标等问题的,严格追究对应人员的管理责任;若因隐患排查治理工作失职引发安全事故,则依照相关法规追究涉事单位与人员的法律责任,通过权责清晰、奖惩明确的约束机制,引导隐患排查治理工作逐步走向常态化、规范化、制度化运行轨道。

4 结束语

水利工程施工安全隐患排查与治理,是守护施工人员安全、保障工程建设质效的核心抓手,直接决定项目建设的安全底线与可持续性。高空作业、临水施工、基坑开挖、临时用电等关键环节隐患频发,人员素养、设备状态、现场环境及管理体系的多重短板,共同构成安全风险诱因。实践中需秉持闭环管控、精准排查的思路,融合日常巡检、专项排查与技术检测手段识别隐患,通过分类整治、多维保障推动隐患清零,并搭建常态化排查、台账化管理、制度化考核的长效机制。未来,伴随水利工程建设升级,需持续深化智能化、信息化技术应用,迭代安全管理体系,以技术创新与制度完善双轮驱动,筑牢施工安全防线,助力水利建设行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 康健,刘玉成,黄少争.解析水利水电工程施工中的安全控制措施[J].水上安全,2024(08):155-157.
- [2] 海秀成.水利工程施工现场的质量控制研究[J].大众科学,2025,46(24):163-165.
- [3] 胡水波.水利水电工程施工安全控制探究[J].科技资讯,2022,20(19):121-124.
- [4] 李永昌.水利工程施工中的安全风险评估与控制措施研究[J].水上安全,2025(09):107-109.
- [5] 张研宇.水利工程施工安全管理及控制对策探析[J].地下水,2021,43(01):230-231.

小型基建维修工程建设管理中存在的问题与策略

王雨楠, 梁富林, 房 菁

(中国人民解放军陆军特种作战学院, 广东 广州 510000)

摘 要 针对小型基建维修工程建设管理乱象, 本文结合工程管理实际场景, 从项目前期管理、施工过程管理、后期管理及保障体系等环节切入, 系统剖析各环节存在的突出问题, 深入挖掘问题产生的核心根源。在此基础上, 从规范管理流程、强化全流程管控、健全保障机制三个维度提出针对性优化策略, 旨在全面提升工程质量、施工进度与资金使用效能, 为小型基建维修工程规范化管理提供实践指引, 客观呈现本研究的核心价值与应用导向。

关键词 小型基建维修工程; 工程建设管理; 施工管控

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.035

0 引言

小型基建维修工程与民生保障、公共服务运转密切相关, 涵盖各类设施修缮、维护等相关工作, 具有规模小、分布散、工期短、涉及环节多等特点。此类工程建设管理中普遍存在前期调研不充分、施工管控不严格、后期保障不到位等问题, 不仅影响工程质量与使用年限, 还造成资金浪费, 制约工程管理效能的提升。基于此, 本文立足于工程管理实际, 梳理现存问题、剖析根源、探索管理优化路径。

1 小型基建维修工程建设管理存在的问题

1.1 项目前期管理不够规范

立项阶段未开展全面调研, 未结合设施运维情况、实际使用需求和周边环境进行细致核查, 仅按单一诉求仓促立项, 部分维修项目与实际不符, 出现维修过度或关键部位修缮不到位的问题。设计多由非专业人员凭经验制定简易方案, 未考虑现场地质、设施兼容及后期运维, 存在材料、工艺、安全方面的疏漏。同时前期审批简化, 无多层设计审核, 方案核查流于形式。

1.2 施工过程管理存在短板

施工队伍选用未建立严格的准入与考核机制, 部分中选队伍资质不全、小型维修施工经验匮乏, 缺乏精细化施工能力。施工人员多为临时聘用, 未接受系统的岗前培训, 对施工规范、质量标准及安全要求掌握不熟练, 导致施工工序衔接不畅、工艺落实不到位, 易出现墙面开裂、地面起砂、管线接口渗漏等质量通病。

质量管控缺乏常态化巡检机制, 对隐蔽工程、细节工序管控缺位, 且未建立质量问题闭环整改机制^[1]。

1.3 后期管理与保障体系不完善

部分不合格的工程, 只通过简单整改就应付验收, 没有形成“验收不合格—整改完善—复核通过”的完整流程, 整改效果无法得到保障。工程交付后, 没有建立完善的运维记录台账, 也没有明确运维主体、运维标准、巡检时间, 日常巡检流于形式。设施运行中出现的轻微损坏由于没有及时处理, 导致损坏越来越严重, 缩短了设施的使用年限。资金使用管理比较松散, 缺乏资金使用实时监管机制, 无法及时发现并纠正超支问题, 资金使用效率不高^[2]。

2 小型基建维修工程建设管理优化策略

2.1 规范项目前期管理流程

2.1.1 强化立项调研与论证

立项前要做好扎实的调研工作, 建立长期稳定的调研模式, 不能只围绕单一需求推进, 要全面了解有设施的运行状况、实际使用需求、对周边环境的影响, 以及后期维护的可行性。组建由工程管理、设施运维、造价咨询等专业人员构成的论证小组, 不仅要查阅资料, 还要到现场实地核查, 与使用方沟通了解真实需求, 同时开展技术评估, 全面分析调研数据。重点核查设施老化程度、损坏原因以及维修的紧急程度, 剔除不合理的维修诉求, 优化维修内容。调研过程中要形成详细报告, 明确维修的必要性、范围和预期目标,

作者简介: 王雨楠 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程建设与管理。

论证小组结合报告开展多轮论证，重点看维修方案是否可行、资金投入是否合理、能否与现有设施兼容，确保立项贴合实际需求，从源头避免维修过度或关键部位漏修的问题，具体流程如图1所示。

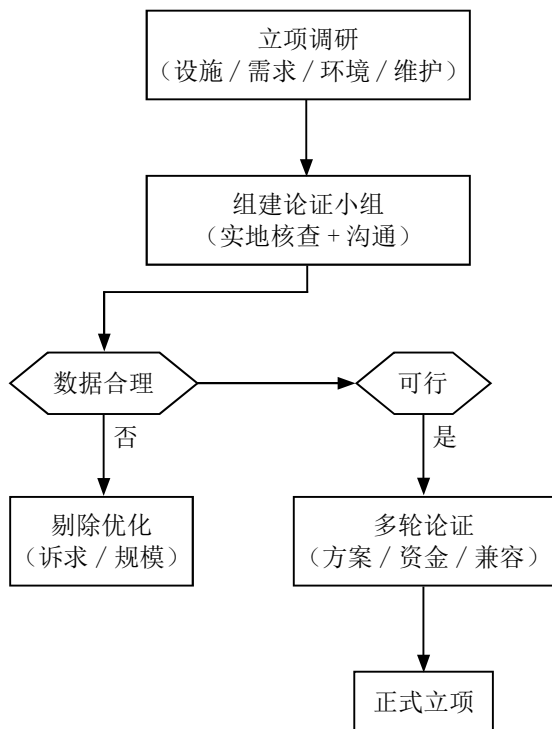


图1 强化立项调研与论证流程图

2.1.2 优化设计方案并严格审核

首先，在选择设计单位时，不能只看资质达标，更要优先挑选有小型基建维修设计经验的单位，这样才能更好地适配维修工程“规模小、细节多、贴合现场”的特点。确定设计单位后，要求设计人员必须深入维修现场，进行全面细致的勘查，不能仅凭图纸或经验设计，要掌握现场的地质情况、现有设施的结构状况、各类管线的具体走向，以及周边环境的限制条件，再结合实际维修需求，制定出精细化的设计方案^[3]。

在设计方案中，必须明确标注清楚材料的具体规格、施工的先后工序、质量验收的标准、施工过程中的安全防护措施，还要预留出后期运维的空间，避免因设计粗放、考虑不周，出现材料浪费、施工工序冲突、后期无法运维等问题。同时，要建立一套多层次的设计审核流程，从源头规避隐患：第一步由设计单位内部先做自我审核，重点检查方案的技术是否可行、成本是否合理，及时修正设计中出现的疏漏；审核通过后，再提交给工程管理部门，由部门组织专业人员进行二次复核，重点关注材料选型是否贴合维修

需求、施工工艺是否容易落地、安全措施是否到位、造价控制是否合理。

对于复核中发现的问题，要出具详细的整改意见，明确整改方向和期限，要求设计单位逐一修改完善。整改完成后，需要重新组织审核，直到方案完全符合相关规范和现场实际需求，才能进入后续的施工阶段，杜绝因设计问题导致的施工质量不达标、成本超支等情况（见图2）。

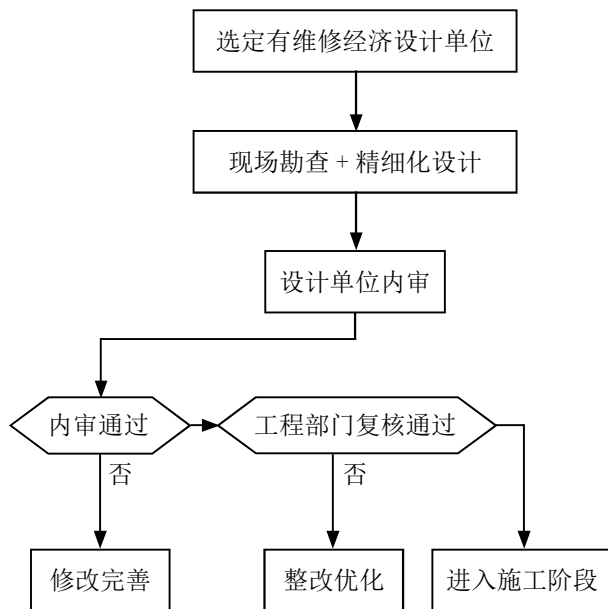


图2 优化设计方案并严格审核流程图

2.2 强化施工过程全流程管控

2.2.1 严格筛选施工队伍并管控

建立施工队伍准入与动态考核机制，明确准入资质标准，要求施工队伍具备相应的施工资质、完善的施工设备及专业的施工团队，同时提交过往小型基建维修工程业绩证明、质量验收报告及安全施工记录。通过资质审核、业绩核查、实地考察等方式，筛选出资质齐全、经验丰富、信誉良好的施工队伍，建立合格施工队伍名录，实行择优选用与动态更新管理。加强施工人员管理，对所有进场施工人员进行岗前培训，内容涵盖施工规范、质量标准、安全操作流程及应急处置方法，培训后进行理论与实操考核，考核合格后方可上岗作业。

2.2.2 完善质量与安全管控体系

建立常态化质量巡检机制，安排具备专业资质的质量管理人员驻场，对施工全过程进行实时巡检，重点关注隐蔽工程、关键工序及细节部位，采用现场检测、抽样检查、工艺核查等方式，核实施工工艺落实情况、

材料质量达标情况及工序衔接合理性。对发现的质量问题,立即下达整改通知,明确整改要求、整改期限及责任人,整改完成后进行复检验收。加强施工人员安全意识教育,定期开展安全隐患排查,重点核查安全防护设施配备与使用情况、施工人员违规操作行为,对排查出的安全隐患及时整改,对违规操作行为严肃查处,杜绝安全事故发生。同时,明确质量与安全管理责任分工,将责任落实到具体岗位、具体人员,形成全员参与、全程管控的质量安全管理格局^[4]。

2.2.3 制定科学进度计划并管控

结合工程规模、施工工艺、材料供应及人员配置等实际情况,制定详细的施工进度计划,细化各施工阶段的起止时间、施工任务、人员安排及材料供应计划,明确每日施工进度与工序衔接要求,确保进度计划具有可操作性与针对性。建立进度动态管控机制,安排专人每日核查施工进度情况,对比实际进度与计划进度的偏差,深入分析偏差产生的原因,针对人员调配不足、材料供应延迟、施工工艺衔接不畅、恶劣天气影响等问题,及时调整施工计划,优化人员配置。定期召开进度协调会,梳理施工过程中存在的进度阻碍,协调解决跨部门、跨环节的衔接问题,保证施工进度按计划有序推进、工程按期完工^[5]。

2.3 健全后期管理与保障机制

2.3.1 严格规范工程验收流程

结合小型基建维修工程规模小、类型杂的特点,制定明确、统一的验收标准,明确验收内容、验收方法、质量判定依据及验收流程,涵盖工程质量、施工工艺、材料规格、使用功能及安全性能等关键环节,确保验收工作有章可循、有据可依。组织工程管理、设计、施工、监理及设施运维等领域专业人员组成验收小组,验收前要求施工单位提交完整的施工资料,包括施工记录、材料检测报告、质量整改记录、安全施工记录等现场验收采用现场核查、技术检测、功能测试等方式,对验收内容逐一核查,对不合格项目,明确整改要求、整改期限及责任人。

2.3.2 建立长效运维管理机制

工程交付后,立即建立完善的运维记录台账,详细记录设施名称、维修内容、施工时间、材料规格、验收情况、运维责任人及联系方式等信息,实现运维工作可追溯、可核查。明确运维责任主体与责任分工,指定专人负责设施日常运维工作,结合设施使用频率、老化规律,制定常态化巡检计划,明确巡检频率、巡检内容及巡检标准,巡检过程中详细记录设施运行状

态,对发现的轻微损坏、异常情况,及时组织专业人员进行维修,避免损坏扩大,延长设施使用年限。建立运维人员培训机制,定期开展运维技能培训,重点提升运维人员对设施故障排查、日常养护、应急处置的能力,确保运维工作规范、高效开展。

2.3.3 强化资金使用全流程管控

科学编制资金预算,结合工程实际情况,细化预算条目,明确各项费用的使用标准与范围,涵盖材料采购、人工费用、设备租赁、安全防护、质量检测及后期运维等方面,避免预算编制粗放导致的资金浪费与超支问题。在预算编制过程中,结合市场价格波动情况,预留合理的预算浮动空间,确保预算编制科学合理、精准可控。建立资金使用监管机制,实行资金专款专用,明确资金支付流程,每笔资金支付需提供完整的凭证,包括采购合同、发票、施工进度证明、质量检测报告等,经工程管理、财务等多部门审核确认后方可支付,杜绝资金挪用、截留现象。安排专人实时监管资金使用情况,定期核对资金使用与预算的偏差,深入分析偏差产生的原因,针对耗材浪费、超支等问题,及时采取整改措施,优化资金使用配置。

3 结束语

小型基建维修工程建设管理的规范化,需立足于各环节现存问题,从前期调研论证、施工全流程管控到后期验收运维形成闭环管理。梳理并明确了前期立项设计、施工队伍与工序、后期验收与资金等方面的核心问题,提出的优化策略贴合工程管理实际,突破传统粗放式管理模式,聚焦全流程精细化管控与长效机制建设。但是受限于研究范围,本文未结合具体行业场景细化管控细则,未来研究中可以结合不同类型小型基建维修工程的特点,进一步优化管控措施。

参考文献:

- [1] 李志荣.小型基建维修工程管理中存在的问题与对策[J].现代工程科技,2023,02(05):125-128.
- [2] 牛德亮.关于小型基建维修工程建设管理中的问题与措施[J].魅力中国,2020(47):59.
- [3] 杨吉祥.小型基建维修工程建设管理中的问题及其措施[J].全面腐蚀控制,2023,37(04):93-95.
- [4] 李华伟.小型基建维修工程建设管理中存在的问题与对策[J].砖瓦,2021(08):158-159.
- [5] 张巧燕.试论小型基建维修工程建设管理中存在的问题与对策[J].建筑·建材·装饰,2020(16):25-26.

新形势下城市市政基础设施建设路径分析

刘林杰

(张掖市骏泽建筑安装工程有限公司, 甘肃 张掖 734000)

摘要 城镇化提质转型、双碳政策落地及极端天气频发重塑城市发展底层逻辑,城市市政基础设施承载城市运转、民生保障、生态调控多重职能,行业发展迎来全新发展准则与建设标准。本文立足于韧性安全、绿色低碳、智慧赋能三大核心发展要求,结合基建现存发展瓶颈,从管网运维、能源改造、数字搭建、水循环利用、路桥养护五大维度优化建设实施路径,全方位补齐城市基建短板,筑牢城市安全防线,以期为促进城市实现低碳、智能、长效高质量发展提供参考。

关键词 新形势;市政基础设施;城市韧性;绿色低碳;数字孪生

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.036

0 引言

国内城市发展模式从规模扩张转向内涵提质,气候环境复杂化、城市治理精细化、生态管控严格化多重外部环境,倒逼市政基建行业打破传统粗放建设模式。市政基础设施作为城市生存发展的实体载体,直接关联城市防灾避险能力、居民生活品质与区域生态发展水平。各地市政基建长期沿用传统建设运维模式,建设标准、配套体系难以适配当下城市治理新需求,各类基建隐患逐步凸显。行业亟需贴合时代发展要求重构建设逻辑,适配城市多元发展诉求,夯实城市现代化建设硬件根基。

1 新形势对市政基础设施的核心要求

1.1 韧性安全基底重构

全球极端气象灾害频发、城市人口圈层持续集聚、城市地下空间开发规模持续扩容,多重外部风险叠加城市内部运行负荷上涨的发展态势,让市政基础设施不再仅承担基础通行、给排水、输送配套功能,城市全域风险抵御能力成为基建建设首要评判维度。城市系统具备联动传导特性,单一市政设施破损会引发交通停滞、供水中断、积水内涝等连锁城市危机,新形势要求市政基建跳出常规防灾建设标准,依托城市水文地质、空间布局、灾害历史数据优化本体建设标准,强化地下管网、排水系统、路桥构筑物、应急配套设施的抗冲击、抗损毁、可快速复原属性,兼顾常态运行稳定性与灾时应急适配性,补齐老旧片区防灾短板,

适配复合型城市灾害冲击,进而筑牢城市全域基础安全底盘^[1]。

1.2 绿色低碳效能跃升

市政工程造价生产、现场施工、长期运维、报废拆解全流程都会产生资源损耗与温室气体排放,新形势赋予市政基建生态赋能属性,行业建设需要贴合区域碳减排指标,依托低碳建材应用、节能工艺落地、生态空间融合优化基建能耗结构,依托水资源循环、余热资源化、清洁能源适配优化基建排放结构,让市政设施适配城市生态涵养规划,贴合属地生态管控细则,平衡基建建设效益与区域生态承载上限,实现基建功能价值与生态价值双向统一。

1.3 智慧感知体系全域覆盖

数字城市建设全域推进、城市精细化治理模式全面落地、市政设施运维管理从被动处置转向前置管控,城乡治理数字化考评体系逐步完善,数字化感知能力成为衡量现代化市政基建品质的核心维度^[2]。新形势要求全城市政配套搭载适配工况环境的低功耗物联网感知元器件,按地下管网、地面场站、路桥构筑物三大空间层级布设感知点位,打通路桥、管网、泵站、环卫、供水各类设施的数据采集通道,依托市域住建部门统一制定的数据编码口径归集设施运行动态数据,搭建联动市级城市治理中台的全域感知网络,实现市政设施运行状态可视化、隐患苗头可预判、运行负荷可调控,全方位适配现代化城市闭环治理管控逻辑。

作者简介: 刘林杰(1988-),男,本科,工程师,研究方向:市政公用工程。

2 当前市政基础设施建设面临的突出瓶颈

2.1 管网老化与内涝防治标准错配

国内多数建成区给排水管网依托早年城建规划分期施工落地,建设年代跨度较大、设计参考气象水文数据相对滞后,城建扩容改造工作多聚焦地上建筑提质,地下管网存量改造进度长期滞后于城市开发节奏。早年铺设的混凝土、铸铁材质管网历经常年水土侵蚀、车辆荷载碾压、地下地质沉降,管壁锈蚀、接口渗漏、管径淤积等结构性病害大范围滋生,老旧管网排水通量持续衰减。多地新版城市内涝治理导则上调短时强降雨设防等级,存量管网设计峰值排水能力无法匹配现行防涝管控指标,新旧设施衔接口径不统一,片区排水层级划分混乱,极端降水天气下积水消散效率大幅降低,城市腹地涝水积存隐患长期无法消解。

2.2 能源供给与碳排约束矛盾加剧

市政路桥照明、排水泵站加压、水厂全域运维等公共设施具备全天候不间断运行属性,城市建成面积逐年扩容会持续抬高市政板块基础能源消耗体量,传统市政运维能源高度依托火电类常规电力供给^[3]。现阶段属地碳排管控指标逐层分解至城建行业板块,市政领域能耗碳排放纳入全域生态考核台账,传统供能模式产生的碳排放体量触碰区域减排红线。存量市政配套节能改造基底薄弱,传统供能线路布局固化难以适配光伏、地热等清洁能源接入布局,属地财政专项低碳改造资金拨付额度有限,市政运维刚需用能规模无法缩减,行业能源供给模式转型进度难以适配日趋收紧的碳排放管控要求。

2.3 数据孤岛与协同调度能力割裂

城市市政设施分属水务、城管、交通多职能部门分管运维,各部门依据自身管控需求搭建专属信息化管理系统,系统研发标准、数据储存格式、后台运算维度未形成市域统一规范。不同业态市政设施感知设备布设时序不同,老旧设施未搭载数字化采集模块,新增智能设施数据端口互不兼容,跨业态设施运行数据无法完成互通流转。部门管控权责边界划分固化,跨板块数据共享审批流程繁杂,市域市政全域运行数据无法整合归集,城市治理后台只能实现单一场景设施管控,城市基建精细化统筹管控效能受到硬性制约。

3 新形势下城市市政基础设施建设路径

3.1 实施管网病害非开挖修复与排涝泵站智能联调

结合城市老旧地下管网分布密度、地下管线交叉排布工况以及城区建筑密集无法大面积破土施工的场

地条件,市政运维单位依托内窥检测、地质雷达扫描技术完成全域雨污管网结构性、功能性病害分级摸排,对标新版城市内涝设防标准分区制定差异化管网提质施工方案。施工团队针对管径 800 mm 以下淤积渗漏支管选用紫外光固化 CIPP 内衬修复工艺,打磨清理管网内壁附着物后浸润树脂固化软管,依托紫外灯匀速光照固化形成高强度内衬管壁,原位修复破损管段无需开挖路面;针对主干大管径沉降错位管网采用螺旋缠绕制管加固工艺,适配地下水丰富片区施工工况加固管网整体承载力^[4]。运维部门联动水务中控中心改造全域排涝泵站电控模组,植入雨量、积水深度、管网流量一体化传感终端,划定老城低洼片区、河道交汇片区、下穿立交片区三级积水管控单元,依托片区水文阈值设定泵站分级启停参数,联动闸阀开度自适应调节输水流量,匹配管网输水承载力动态分流涝水,同步建立管网季度内窥复检机制,长效管控管网淤积破损问题,闭环提升城市雨洪消纳能力。

3.2 布设源网荷储一体化微电网与余热回收装置

依托市政场站闲置屋面、河道沿岸护坡、路桥中央隔离带可利用空间,结合市政泵站、净水厂、垃圾转运站日均 1 200 kWh~1 800 kWh 常态化能耗负荷特征,城建部门联动电力运维机构布局属地适配型源网荷储一体化市政专属微电网体系^[5]。施工人员分片铺设单块功率 580 W 高效光伏组件搭配单机额定功率 8 kW 小型垂直轴风电储能机组,对接 0.4 kV 市政专用低压配电组网,划分场站自用、市政照明、应急保电三类用电负荷分区,搭载闭环式智能负荷调控模组平衡清洁能源发电量与设施用电量,富余电能存入额定容量 400 kWh 磷酸铁锂储能模组,极端天气市电断供后 1.2 s 内自动切换储能电源,保障排水泵站、中控机房等核心市政设施 72 小时稳定运转。施工团队针对污水处理生化池、泵站机组机房、路面沥青拌合站点加装分级式板式余热换热装置,吸附 42℃~65℃ 中水余热、机组机械散热余热,密闭导热管网归集余热热量供给场站冬季采暖、地下管网前置防冻保温、市政绿植养护加温使用,将市政原有 50 Hz 工频耗电设备全域更换为 35 Hz 变频节能机型,优化市政配电线路损结构,联动属地能耗监管平台录入微电网发电、耗电、余热回用台账,依托清洁能源自发自用、余热就地复用模式压降市政运维全流程化石能源用电量,贴合属地城建板块年度分项碳排放压降管控指标。

3.3 搭建物联感知神经网络与数字孪生决策平台

立足于市域市政水务、交通、环卫、防汛多板块设施分散布局、分管运维的现有格局,市域住建统筹

部门统一制定市政设施感知设备通信协议、数据编码、点位布设三类建设标准,破除原有部门信息化系统端口壁垒。技术团队分批更换老旧无源市政设施配件,在管网关键节点、路桥支座、河道闸口、场站机房布设低功耗物联网感知芯片、边缘计算网关、高清测距传感设备,搭建全域分层布设的市政物联感知神经网络,边缘网关就地筛选有效运行数据过滤冗余干扰信息,加密传输标准化数据至市级政务算力中心。平台研发人员依托城市实景三维底图复刻市政设施1:1数字孪生仿真模型,耦合气象数据、人流车流、水文变化外部动态数据,嵌入设施病害推演、负荷预警、联动调度算法模块,赋予模型风险模拟、工况预判、方案推演功能,平台后台按权责分级开放部门操作权限,水务、交通部门可独立调取分管设施仿真数据,市域总控端口可统筹全域设施联动调度,实现市政隐患前置研判、资源统筹调配、运维流程线上闭环管控。

3.4 推行污水厂网河一体化运维与再生水分质利用

结合城市流域水系连通形态、污水管网接驳走向、污水处理场站单日设计处置能级,属地水务集团整合污水厂运维、管网管护、河道管护三方作业队伍,破除部门分片管护权责壁垒,重组闭环式一体化专项运维班组,依据流域汇水范围划定上下游联动管护片区,厘清片区污水收集、输送、处置、生态补水全链条管护权责,制定统一管护作业标准与巡检时效规范。运维班组按月开展全域干支管网混接错接、破损渗漏点位摸排整改,全域溯源封堵沿岸零散生活污水直排河道排污口,优化污水进厂分水调配工艺,依据进水COD $180\text{ mg/L} \sim 320\text{ mg/L}$ 、氨氮 $25\text{ mg/L} \sim 40\text{ mg/L}$ 实测水质指标灵活切换厌氧、缺氧、好氧生化处理工艺档位,分级稳定提升尾水出水品质,稳定契合属地河道生态补水国标水质要求。场站技术人员升级污水深度处理工艺流程,分级增设超滤膜过滤、柱状活性炭吸附精细化处理单元,依托管网水压高程分区改造防腐耐压再生水专用输送廊道,搭建工业回用、市政杂用、生态补水三级分质供水支路,达标一类再生水输送至城市景观河道补给水系基流,二类再生水供给道路洒水、绿化浇灌、工地降尘市政场景,三类再生水对接周边工业园区闭式冷却用水点位,配套智能电磁分质用水量装置核算全域水资源复用体量,联动流域断面水质监测点位动态调控水处理工况,盘活城市污水资源化利用价值,稳步缩减市政自来水刚需取用体量。

3.5 建立道路桥梁结构健康监测与预防性养护体系

结合市域主次干道、跨河桥梁、高架互通、人行天桥建成年限、荷载等级、通行工况,市政养护机构

分类布设应变传感、沉降监测、裂缝观测、车辆动态称重一体化监测终端,重点在桥梁箱梁支座、桥台衔接处、道路路基软弱土层加密监测点位,全天候采集结构形变、行车荷载、温湿度腐蚀核心数据。后台监测系统划定结构安全三级预警阈值,数值临近预警区间后自动推送研判信息至养护管控终端,养护技术人员结合数据研判结果开展靶向预防性作业,对道路微裂缝病害采用高粘改性乳化沥青封层处置,对路基松散点位采用无机注浆加固工艺提升土体密实度,对桥梁支座锈蚀点位做惰性防腐涂层喷涂处理。养护管理部门编制年度分级养护作业清单,区分通勤主干道、货运通行道路、景观便民桥梁养护频次,建立一桥一档、一路一档电子养护档案,归档监测数据、养护工艺、耗材参数、作业工期全维度资料,摒弃破损后大修的传统运维模式,以轻量化前置养护延缓路桥结构老化速度,延长市政道路桥梁整体服役周期,降低后期结构性大修资金投入。

4 结束语

市政基础设施迭代升级是适配城市现代化治理、响应国家生态安全战略的长期性工程,各类适配新形势的建设举措能够精准破解当下基建运维、建设、管控全流程痛点。城市管理部门需立足于城市本土发展禀赋,循序渐进落地韧性改造、低碳提质、智慧赋能各类基建项目,统筹基建安全、生态、效益多维价值。未来,城市市政基建会深度融合新能源、物联网、人工智能先进技术,基建体系会实现全域可控、低碳闭环、自主运维发展,全域提升城市抗风险能力,助力宜居智慧城市长效建设。

参考文献:

- [1] 本刊编辑部.持续推进城市更新行动加强城市基础设施建设改造[J].建设科技,2026(05):1.
- [2] 廉敏.住宅小区与市政基础设施同步建设,促进城市新区发展[J].楼市,2026(04):123-125.
- [3] 强文君.城市市政基础设施智能化建设与管理探究[J].低碳世界,2026,16(01):88-90.
- [4] 王太虎.智慧城市背景下市政基础设施智能化建设[J].新型城镇化,2025(12):39-40.
- [5] 裴磊.智慧城市背景下的市政基础设施建设[J].城市建设理论研究(电子版),2025(17):201-203.

超宽路面排水施工技术优化与排水效能研究

崔秀鑫

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 针对山区超宽路面汇水面积大、排水路径长及暴雨引发的积水、冲刷等病害, 本文依托四川某公路改扩建工程, 探讨优化纵向排水沟、路肩排水构造及路面协同施工技术, 配套改进粘层油封水与精准开槽工艺, 以期同类工程的排水系统设计与施工提供实践参考。结果表明, 优化后的排水体系可有效缩短积水滞留时长, 增加排水性能, 适配山区复杂降雨条件与超宽路面结构特性。

关键词 超宽路面; 排水施工; 内侧排水系统; 路肩沟排水系统; 路面结构

中图分类号: U417.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.037

0 引言

山区公路改扩建进程中, 双向多车道超宽路面应用场景持续增多, 这类路面采用双幅左右同步拓宽形式时, 单幅横向跨度大幅增加, 汇水范围较常规路面显著扩大。西南山区降雨集中且短时暴雨强度大, 平缓纵坡与宽幅路面组合下, 雨水难以及时排离路面, 易形成持续积水, 不仅会造成路面水毁、基层冲刷, 还会引发路肩软化、路基边坡滑塌等问题, 既影响高速行驶安全, 也会大幅缩短道路服役寿命^[1]。现有排水技术多适配常规宽度路面与单幅拓宽场景, 针对双幅左右同步拓宽超宽路面的特殊排水需求, 存在结构适配性不足、施工工艺针对性不强的问题。因此, 聚焦双幅超宽路面排水核心痛点, 结合工程实际优化排水系统构造与施工技术, 成为保障山区公路改扩建后通行安全与结构耐久性的关键议题。

1 工程概况

四川地区降雨量大且时空分布不均, 夏季短时暴雨频发, 山区公路双幅拓宽超宽路面因单幅汇水面积大、横向排水路径长, 易出现路面积水、路基冲刷等病害。本文依托四川某山区公路改扩建工程, 该路段全长 2.3 km, 既有路面为双向 4 车道, 原左右单幅路面宽度均为 11.75 m, 本次采用双幅左右同步拓宽方案, 左右两幅分别向外侧对称加宽, 拓宽后单幅路面宽度达 19.25 m, 全线形成双向 8 车道超宽路面结构。路中设置中央分隔带, 曲线段已在中央分隔带内布设纵向排水沟, 属于典型双幅拓宽超宽路面工程。

2 超宽路面排水施工技术优化方案

2.1 内侧排水系统优化

针对左右两幅路面横坡“0”断面(路面最低处)与中央分隔带衔接处的排水需求, 采用双幅对称开槽引流方案。沿左右两幅路面内侧边缘(横坡分水线), 分别向中央分隔带既有纵向排水沟端头进行纵向开槽, 排水沟端头沟壁同步开槽, 开槽尺寸与纵向开槽保持一致, 以此将两幅路面内侧断面的水流拦截并引流至中央分隔带原纵向排水沟, 防止纵向汇水在路面内侧聚集造成路面积水^[2]。

沟槽断面采用 10 cm×10 cm 矩形形制, 左右两幅开槽同步施工, 开槽完成后, 采用高压风枪清理槽壁及底部浮渣, 待基面洁净干燥后, 以喷涂法均匀涂布改性乳化沥青粘层油, 涂布量控制在 0.3 kg/m² 左右。粘层油涂布后静置 2 h, 待破乳完成再进行后续回填工序, 确保回填材料与槽壁紧密贴合, 无空隙残留。铣刨开槽过程中, 设备保持匀速行走, 确保槽壁垂直、底部平整, 无松散土体或台阶状缺陷, 开槽产生的碎屑实时清理, 避免堵塞排水通道。

针对中央分隔带混凝土护栏阻断横向水流的问题, 沿左右两幅护栏底座边缘分别开槽, 开槽宽度与深度均按 10 cm×10 cm 控制, 并与中央分隔带原纵向排水沟连通, 将拦截的水流有序导入既有排水系统, 后续封水与回填工艺与上述要求保持一致。

2.2 路肩沟排水系统优化

针对左右两幅路面外侧边缘, 重构对称布设的“路肩沟”排水构造, 为每幅路面分别构建“路肩沟+横

作者简介: 崔秀鑫(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

向导水槽+路侧边沟”的独立完备排水体系，左右两幅同步施工、同步成型，确保排水路径无断口、无阻滞。

1. 纵向路肩沟布设：沿左右两幅超宽路面外侧边缘，分别布设纵向排水沟槽（简称“路肩沟”）。鉴于改造范围包含既有路面病害铣刨重铺段与路面加宽段，为避免排水沟槽纵向上形成断口、阻碍水流衔接，待左右两幅加宽路面铺筑完毕后，采用铣刨设备沿两幅加宽路面外侧纵向延伸同步开槽，形成通畅的纵向排水廊道^[3]。

2. 横向导水通道施工：对左右两幅路面外侧的土路肩，同步开展横向开槽作业，形成分别连接对应路肩沟与路侧边沟的导水通道。开槽深度与对应路侧纵向排水沟槽深度严格一致，确保水流顺畅导入，无高差阻隔。开槽完成后即刻实施硬化平整处理，硬化材料与槽壁充分黏结，无空鼓现象。

3. 路侧边沟设置：沿左右两幅路面外侧边缘，分别布设路侧纵向排水边沟，沟槽净宽40 cm，最小深度40 cm并根据路面纵向坡度动态调整，沟壁同步开设10 cm×10 cm矩形断面槽口，并与横向导水通道顺接。

4. 接口处理：左右两幅路肩沟与各横向导水槽的接口处，槽壁均做轻微倒角处理（倒角半径不大于2 cm），槽口边缘打磨光滑，避免水流冲击产生涡流。开槽作业时由人工配合小型设备修整，确保所有槽壁垂直、槽底水平，无局部塌陷或凸起。

左右两幅路面均保留3%单向横坡，坡面平整无注点，确保水流沿坡面自然流向外侧路肩沟。硬化土路肩表面做拉毛处理，增加表面粗糙度，与路面衔接处无明显高差。

2.3 路面结构协同优化

对左右两幅路面病害路段全断面同步实施铣刨作业，铣刨深度统一控制在5 cm左右，铣刨完成后同步重铺PA-13沥青面层。路面摊铺前，优先完成左右两幅内侧纵向排水沟槽与外侧路肩沟的施工，确保排水系统成型后再开展路面摊铺作业，避免路面施工对排水构造造成破坏。

3 排水施工关键施工技术要点

3.1 改性乳化沥青粘层油封水施工

左右两幅路面所有排水槽体成型后，即刻同步启动基面处理工序，采用高压风枪持续吹扫槽壁与槽底，风压调节至适宜区间，将浮尘碎渣彻底清除，确保基面呈现洁净干燥状态。随后采用低压喷涂设备，沿槽体匀速移动施涂改性乳化沥青粘层油，喷枪枪口距槽壁保持30 cm间距，施涂量稳定在 $0.3 \text{ kg/m}^2 \sim 0.5 \text{ kg/m}^2$ ，

确保油膜均匀包覆槽壁与槽底，无流淌、无露底、无气泡。

在喷涂过程中，操作人员沿槽体往返检查，用吸水试纸轻触油膜，试纸吸附均匀即符合要求，若出现露底区域，即时补涂。油膜施涂完毕，静置等待破乳，周期控制在2 h~4 h，此期间槽体上方覆盖土工布，边缘用石块压实，防止外界粉尘、杂物污染油膜，槽口周边5 m范围内设置警示围挡，禁止人员车辆靠近。破乳状态通过视觉观察与轻触判断，油膜表面失去黏性、呈现暗褐色时，即可开展沟槽回填或硬化工序，作业时采用小型工具轻放材料，避免直接撞击槽壁油膜^[4]。

3.2 精准开槽工艺

左右两幅路面排水沟槽开槽作业同步推进，采用小型履带式铣刨机沿设计路线匀速推进，人工手持平头钢钎跟进修整，槽体宽度与深度均锁定10 cm，铣刨机行走速度控制在1.2 m/min，避免过快导致槽壁出现锯齿状痕迹。人工用2 m长铝合金靠尺紧贴槽壁检查垂直度，若缝隙超1 mm，立即用钢钎凿除突出部分，确保槽壁与水平面呈垂直状态，槽底用水平尺找平，无高低起伏的台阶状缺陷。

槽内碎屑随开随清，每开槽3 m即停止铣刨，人工用铁铲将碎屑装入密封袋，转运至场外指定堆放点，防止碎屑残留堵塞排水通道。左右两幅路肩沟开槽完毕后，紧随其后进行土路肩硬化处理，做到开槽一段、硬化一段，硬化材料与槽壁充分黏结，无空鼓现象。开槽完成后若暂不进行下道工序，槽口须覆盖厚质塑料薄膜，边缘用土压实，阻挡雨水灌入。铣刨机刀片刃口磨损超2 mm时，及时停机更换，保证开槽切面平整；槽体转角处，先铣刨出大致轮廓，再用角磨机精细打磨^[5]。

3.3 路面与排水协同施工

排水相关工序全程前置，左右两幅内侧纵向排水沟槽与外侧路肩沟的槽体成型、粘层油施涂全部完成后，方可开展路面摊铺作业。沟槽内铺设透水混凝土作为排水基层。

透水混凝土采用分层浇筑并振捣密实，每层厚度控制在5 cm，用小型电动夯实机沿槽壁两侧对称压实，确保回填层密实度达标，与槽壁无松动空隙。左右两幅沟槽回填完结后，同步启动排水工序验收，纵向排水沟沿槽体轴线方向每隔5 m设置一个注水点，水位稳定在5 cm处，观察10分钟无明显渗漏、无积水滞留；横向导水槽逐槽注水检验，以同样水位标准观察，确保水流能顺畅导入纵向沟，同时检查所有槽口边缘无破损、无松动，即为合格。

摊铺机进场前完成调试,熨平板温度预热至 160℃,振动频率调节至 50 Hz 以适配 PA-13 混合料特性,行走速度设定为 2 m/min ~ 3 m/min,确保左右两幅路面摊铺连续性。检测人员手持水准尺与楔形塞尺,随摊铺机同步移动,每 5 m 设置一个检测点,精准把控单幅 3% 横坡坡度,确保坡面与槽口衔接无错台、无高差。

坡面与槽口衔接处,先用热喷枪加热至 60℃,再用热沥青混合料填补,竹制刮板刮平至与路面齐平。混合料运输车与摊铺机保持 1 m 间距缓慢卸料,专人指挥均匀布料。路面碾压环节,压路机采用先轻后重的碾压顺序,初始碾压速度控制在 2.5 km/h,避开槽口位置先碾压路面主体,再沿槽口边缘进行侧向轻压,防止压实过程中破坏排水构造。碾压后再次核查左右两幅路面坡面与槽口衔接处,若出现细微沉降,及时用热混合料补平,确保整个路面坡面顺畅,水流能沿设计路径快速汇入排水沟槽,无局部阻滞情况。

4 排水效能监测与分析

4.1 监测方案

为全面评估双幅拓宽后排水系统的实际运行效能,本次监测采用定点自动监测与人工巡查相结合的方式,构建左右双幅对称、多维度全覆盖的监测体系,具体方案如下:

1. 监测断面与设备布设。选取纵坡 0.3%、横坡 3% 的超宽路段作为核心监测断面,该路段单幅汇水路径长、纵坡平缓,是全线排水条件最不利的典型段落。在左右两幅路面按 20 m 间距交错布设积水深度传感器与流量监测装置,传感器探头嵌入路面表层下 2 cm 处,顶部与路面齐平,周边采用环氧砂浆黏结固定;流量监测装置分别安装于左右两幅路肩沟出口端部与中央分隔带纵向排水沟出口,实时采集水流速度与断面面积数据。同时,在三处典型路段设置辅助监测断面,对比不同纵坡、不同加宽宽度下左右两幅路面的排水效能差异。

2. 监测周期与数据采集。监测时段集中在 6 月—8 月夏季主汛期,当气象站实测降雨强度达到 50 mm/h 及以上时,系统自动启动监测。每次监测从降雨前 10 分钟开始设备预热,降雨过程中持续记录,直至雨停后 30 分钟结束,重点采集左右两幅路面的积水深度、排水流量及积水停留时长等关键指标。

3. 常态化人工巡查。每周开展两次全线徒步排查,巡查路线覆盖 2.3 km 试验路段左右两幅路面,每 500 m 设置一个排查节点。采用精度 0.1 cm 的标尺测量边坡

冲刷沟尺寸,对基层渗水点位进行定位标记并拍摄影像资料。

4. 设备校准与质量控制。每半月对监测设备进行一次全面调校,积水深度传感器通过标准水位容器比对校准,流量监测装置与便携式流量计同步测试,确保监测数据的准确性与可靠性。

4.2 效能验证

经主汛期连续三个月现场监测,优化后的双幅对称排水系统各项运行指标均满足设计要求,左右两幅路面排水效能均衡,无明显差异。暴雨工况下,左右两幅路面积水峰值最大为 4.2 mm,低于 5 mm 安全阈值,积水自形成至完全消退仅用时 12 min,较优化前消退速率提升 38%,大部分路面区域无明显积水滞留。改性乳化沥青封水效果显著,左右两幅路面基层土样含水率平均下降 32%,基层渗水点位减少 90%。左右两幅路肩沟峰值流量均达 1.2 m³/min,汇水效率较优化前提升 45%,沟内无泥沙淤积、无堵塞情况,完全达到设计预期目标。

5 结束语

本研究依托四川山区公路双幅左右同步拓宽工程实例,针对超宽路面排水核心难题,构建了双幅对称布设的立体排水体系,优化了粘层油封水、精准开槽、路面协同施工等关键施工技术,有效解决了双幅超宽路面积水滞留、路基冲刷等核心问题,形成了可复制、可落地的标准化施工技术方案。未来可结合智能监测技术实现排水系统动态调控与病害预警,持续提升超宽路面排水体系的耐久性与施工便捷性,为公路工程排水技术升级提供更丰富的实践路径。

参考文献:

- [1] 吕勇.高速公路大空隙排水沥青路面施工技术研究[J].四川建材,2023,49(01):83-84.
- [2] 魏昨.公路工程排水沥青路面施工技术分析[J].科学技术创新,2024(18):165-168.
- [3] 罗东鑫.高速公路路基路面排水施工设计[J].国际建筑学,2024,06(04):37-39.
- [4] 王斐.探究高速公路路基路面排水施工技术[J].四川建材,2023,49(06):102-104.
- [5] 朱勇强,李连生,陈嘉成,等.排水沥青路面超渗流行为时空分布规律的试验研究[J].公路交通科技,2024,41(03):9-18.

建筑给排水工程中防渗漏施工技术应用研究

谢敬茹

(安徽省宜安消防工程有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要 建筑给排水工程渗漏问题频发, 不仅影响建筑使用稳定性, 还会降低居住体验, 甚至缩短工程使用寿命。本文结合建筑给排水施工实际, 针对工程中存在的渗漏隐患, 从施工材料、施工工艺、设计与环境三个层面深入分析渗漏问题的诱发因素。在此基础上, 重点探讨管道安装、节点部位、防水辅助等核心防渗漏施工技术的具体应用要点, 同时从质量管控、人员能力、后期维护三个维度提出针对性的保障策略, 以期建筑给排水工程防渗漏施工提供实践参考, 助力提升工程防水性能, 减少渗漏隐患, 保障工程长期稳定运行。

关键词 建筑给排水; 防渗漏施工; 管道节点; 防水技术; 工程质量

中图分类号: TU82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.038

0 引言

当前建筑工程向着高品质、长寿命、精细化方向发展, 给排水系统作为建筑使用功能的重要组成部分, 其防渗漏质量直接关系到居住安全与建筑耐久性。在住宅品质提升、工程建设标准日趋严格的行业背景下, 渗漏问题仍是给排水工程中常见的质量通病, 不仅影响建筑正常使用, 也易造成资源浪费与后期运维压力。面对复杂建筑结构与多样化施工环境, 传统施工方式已难以满足现代工程防渗需求。本文立足于工程实际, 从渗漏成因、关键技术、管理保障等方面展开研究, 探索科学可行的防渗施工路径, 为提升建筑给排水工程质量、推动建筑行业高质量发展提供实践支撑。

1 建筑给排水工程防渗漏施工核心问题分析

1.1 施工材料层面的渗漏诱因

材料质量不达标、选型不合理是引发给排水渗漏的基础诱因, 直接决定工程防水体系的筑牢程度, 也是后续渗漏隐患萌发的核心前提。给排水管材作为渗漏防控的第一道防线, 部分劣质管材未达到行业标准, 抗腐蚀性薄弱, 长期接触水中酸碱物质易发生管壁破损、穿孔, 抗老化能力不足则会导致管材在长期使用中出现脆化、开裂, 进而引发渗水。密封材料的选型与适配直接影响接口防水效果, 部分施工中选用的密封材料与管材材质不匹配, 黏结性差, 且抗老化、抗温变能力不足, 使用一段时间后易出现收缩、开裂, 导致接口密封失效, 形成渗漏通道^[1]。防水卷材、涂料等辅助材料的质量同样关键, 劣质防水卷材厚度不

足、耐穿刺性差, 涂料则存在附着力弱、抗渗性不足等问题, 铺设和涂刷后无法形成完整、严密的防水屏障, 难以有效阻挡水分渗透, 为后续渗漏问题埋下隐患, 严重影响建筑给排水工程的使用稳定性。

1.2 施工工艺层面的渗漏隐患

施工工艺不达标、操作不规范, 是造成渗漏最主要的人为原因, 即使选择质量好的防水材料, 不标准的施工操作也会破坏防水系统的完整性, 最终引发渗漏问题。管道连接的工艺是否规范, 直接影响接口的密封效果, 部分施工人员操作不够熟练, 选用的连接方式和管材类型不匹配, 连接时也没有严格控制接口的清洁度和衔接精度, 使得接口缝隙过大, 密封处理没有做到位, 投入使用后很容易出现渗水问题。管道预埋和预留孔洞的施工缺少精准管控, 预埋管道时定位偏差比较大, 预留孔洞的尺寸和管道直径不匹配, 后续封堵时也没有采用分层封堵、分层压实的方法, 封堵材料填充不够密实, 留下了缝隙和空洞, 这些就成为水分渗入建筑的主要通道。防水施工的必要流程有所缺失, 涂刷防水涂料前没有清理掉基层的杂物、油污, 导致防水涂料和基层黏结不牢固, 容易出现起鼓、脱落的问题; 铺设防水卷材时, 搭接宽度不够、搭接位置密封不严, 也没有按照规范要求做收口处理, 这些问题进一步加重了渗漏隐患, 降低了工程整体的防水效果。

1.3 设计与环境层面的渗漏影响因素

设计不合理加上环境因素的干扰, 会加大给排水工程出现渗漏的风险, 这两个问题互相影响, 还会进一步降低防水体系的稳定性, 让渗漏隐患变得更严重,

作者简介: 谢敬茹 (1985-), 女, 专科, 工程师, 研究方向: 给排水工程项目管理。

给排水系统设计有疏漏会直接影响工程整体防水效果,部分设计没有结合建筑的结构特点和使用需求规划,管道走向安排不合理,有过多弯头和接口,渗漏发生的概率会因此增加,同时管道坡度设置不符合规范要求,会造成管内积水没办法及时排出去,长期积水又会加快管道腐蚀,还会让接口的密封效果失效^[2]。建筑沉降是引发渗漏的重要环境因素,建筑投入使用后产生的不均匀沉降,会让管道受力变形,接口位置出现松动、开裂,直接破坏密封结构。温度变化会让管道发生热胀冷缩,反复形变会缩短管道和密封材料的使用寿命,最终引发接口位置渗漏。地下水、雨水这类自然环境带来的侵蚀也不能大意,地下水的渗透压力会破坏管道和防水结构,雨水则会顺着预留孔洞、接口缝隙等位置渗入建筑内部,长期侵蚀会进一步加快防水结构损坏,导致渗漏问题反复出现,影响建筑的实际使用体验。

2 建筑给排水工程防渗漏施工核心技术应用

2.1 管道安装防渗漏施工技术

规范管道安装工艺,强化接口密封,能从源头减少渗漏隐患,为建筑给排水工程防水性能奠定坚实的基础,核心在于通过标准化操作把控安装全过程的关键环节,将渗漏防控理念融入每一道安装工序,实现从材料进场到管道固定的全流程管控^[3]。管道连接技术需结合管材类型精准选用,不同材质的管材物理性能、化学特性存在差异,对应的连接工艺也需区别对待,塑料管材优先采用热熔连接工艺,确保接口熔接紧密、无缝隙,熔接温度和时间需严格按照管材规格控制,避免因熔接不充分或过度熔接导致接口损坏,金属管材则采用螺纹连接或焊接工艺,螺纹连接需做好螺纹密封处理,焊接则需保证焊缝饱满、无夹渣、无气孔,连接后及时进行密封处理,选用与管材材质适配的密封材料,提升接口密封可靠性,杜绝接口渗漏。管道预埋、预留孔洞施工需严格控制精度,预埋前精准定位管道位置和标高,结合建筑结构图纸标注的尺寸进行放线,确保预埋管道平整、牢固,避免出现偏移、倾斜,预留孔洞尺寸需与管道直径匹配,预留后做好临时封堵,避免杂物进入管道或孔洞,管道安装完成后,采用分层封堵方式,选用高强度、抗渗性强的封堵材料,逐层填充、压实,确保封堵密实、无空洞,防止水分从孔洞缝隙渗透。

2.2 节点部位防渗漏施工技术

针对渗漏容易出现的位置重点加强处理,可以大幅提高节点防水的可靠程度,节点是管道连接、穿设

结构的关键区域,也是渗漏隐患最容易出现的地方,这类位置结构复杂、施工难度大,还容易受外部因素影响,必须重点强化防护,搭建适配节点特点的防水体系。管道穿墙、穿楼板的节点是渗漏防控的核心,这类节点是建筑结构和管道的衔接位置,存在缝隙无法避免,施工时要在管道穿越的位置加装防水套管,套管的材质需要和管道材质适配,套管和管道之间的缝隙要用柔性密封材料填实,填充时要逐层压实,防止留下空隙;穿越楼板的节点还需要在楼板上下两面增设防水附加层,附加层的延伸范围要符合规范要求,通常不小于 200 mm,以此形成双重防护,有效阻挡水分渗入,地漏、马桶、洗手池这类卫生器具和管道的接口,是日常使用中渗漏的高频位置,这类接口使用频率高,容易受水流冲击和杂物堵塞影响,要选用专用密封件,安装时要保证接口对齐、密封严实。卫生器具安装完成后,需要在接口周边涂刷防水涂层,涂层要覆盖接口周边 100 mm 以上范围,以此强化密封效果,避免使用过程中污水从接口渗漏,同时要做好卫生器具周边的找坡处理,保证积水可以快速排出。

2.3 防水辅助施工技术应用

合理使用各类防水辅助技术,健全防水体系,可以提高整体防渗漏效果,弥补核心施工技术存在的不足,搭建全方位、多层次的防水防护网络,只有辅助技术和核心技术相互配合,才能达成给排水工程长期防水的目标。防水卷材、防水涂料的规范铺设与涂刷是最基础的辅助手段,它们的质量会直接影响防水体系的完整程度:铺设防水卷材前要彻底清理基层,把基层上的杂物、油污和积水全部清除,保证基层平整干燥;卷材的搭接宽度和搭接顺序要严格遵守规范要求,搭接宽度不能小于 100 mm,搭接位置要用专用密封材料做密封处理,避免留下搭接缝隙,涂刷防水涂料时要保证涂刷均匀、厚度符合要求,需要分多遍涂刷,每遍涂刷的厚度控制在 0.5 mm ~ 0.8 mm 之间,保证涂层没有气泡、没有破损、没有漏刷,形成完整连续的防水涂层,提高基层的防水能力。防腐、防老化处理技术可以延长管道和防水结构的使用寿命,要针对不同材质的管道使用对应的防腐处理方式:金属管道需要先做除锈处理,清理掉管道表面的铁锈和氧化皮,再涂刷防腐漆,保证涂刷均匀、没有漏刷,塑料管道则要选用抗老化性能更好的材质,同时添加抗老化剂,延缓管道老化的速度,还要对防水结构的表面做防护处理,涂抹防护涂层,减少紫外线、雨水等环境因素对防水结构的侵蚀,延长防水结构的使用寿命。

3 建筑给排水工程防渗漏施工保障策略

3.1 施工质量管控体系构建

建立全流程质量管控机制,能确保防渗漏施工各项要求落地,从源头把控施工质量,减少渗漏隐患,为工程防渗漏性能提供制度保障。材料进场检验是质量管控的第一道关口,建立严格的材料进场检验制度,对给排水管材、密封材料、防水卷材等所有进场材料进行抽样检测,核查材料规格、型号、质量证明文件,杜绝不合格材料投入使用,从材料层面保障防渗漏施工质量^[4]。规范施工工序验收,明确各施工工序的验收标准,重点核查管道连接、节点防水、封堵处理等防渗漏关键环节,验收合格后方可进入下一工序,对验收中发现的问题及时整改,避免隐患遗留。建立质量追溯体系,对施工全过程进行记录,明确各工序的施工人员、施工时间和施工参数,一旦出现渗漏问题,能快速追溯问题根源,及时采取针对性整改措施,同时定期开展质量巡查,强化施工全过程管控,确保防渗漏施工各项要求落实到位。

3.2 施工人员专业能力提升

强化施工人员的专业培训,提高防渗漏施工的操作水平,施工人员的专业能力直接决定施工工艺是否规范,也是保障防渗漏施工质量的核心。组织防渗漏施工技术的专项培训,结合工程实际需求,重点讲解管道安装、节点防水、材料使用等核心技术的操作规范和需要注意的问题,针对常见渗漏隐患的防控方法做详细指导,帮助施工人员熟练掌握标准操作流程,提高自身技术水平,同时加强施工人员责任意识教育,明确每个岗位的职责,强调防渗漏施工的重要性,引导施工人员树立“质量第一”的工作理念,杜绝违规操作、敷衍施工等问题,确保施工过程严格按照规范要求推进^[5]。建立健全考核机制,定期对施工人员的专业能力和操作规范性进行考核,考核不合格的人员需要暂停上岗,只有重新培训考核合格后才能继续参与施工,另外将考核结果和绩效薪酬挂钩,充分调动施工人员工作的积极性和主动性,保证所有进场施工人员都具备对应的专业能力,保障整体施工质量。

3.3 后期维护与渗漏治理策略

完善后期维护机制,及时处理渗漏问题,可以保障工程长期防水效果,延长工程的使用时间,避免渗漏反复出现影响建筑正常使用。要建立定期巡检制度,明确巡检的周期和内容,安排专业人员对给排水管道、

节点部位、防水结构等做全面排查,重点检查管道有没有破损、接口是否松动、防水结构是否完好,及时发现并处理潜在的渗漏隐患,把隐患消除在发生之前。要制定科学的渗漏治理方案,针对不同渗漏类型用对应的处理方法:管道破损渗漏要及时更换损坏的管材、重新密封接口,节点渗漏需要重新做防水加强处理,防水结构破损要修复或者重新铺设防水层,以此保证治理效果,避免渗漏再次出现。另外,要加强后期使用指导,给用户普及给排水系统的正确使用方法,提醒用户不要违规操作,比如不要让重物撞击管道、不要随意改动管道走向等,减少人为因素引发的渗漏。此外,还要建立渗漏反馈渠道,及时响应用户反映的渗漏问题,快速进行维修,保障工程长期拥有良好的防水性能。

4 结束语

建筑给排水工程防渗漏施工是保障建筑质量与使用功能的关键环节,渗漏隐患的防控需贯穿施工全流程,兼顾技术应用、质量管控与后期维护的协同发力。本文围绕渗漏诱因、核心技术及保障策略展开系统研究,明确施工材料质量、工艺规范、设计合理性及环境因素对防渗漏效果的重要影响,梳理出适配不同场景的防渗漏技术路径与保障方法。防渗漏施工质量的提升,既需要规范技术操作,也需要健全管控体系、强化人员素养、完善后期运维。未来可结合新型材料与施工技术的发展,进一步优化防渗漏方案,破解复杂工况下的渗漏难题,推动建筑给排水工程向更高效、更耐用、更环保的方向发展,切实提升建筑工程整体品质。

参考文献:

- [1] 王言凯.建筑给排水管道防渗漏施工方法与管理策略研究[J].中国科技纵横,2025(17):106-108.
- [2] 刘晓琼.房屋建筑给排水管道防渗漏施工技术的要点[J].居业,2025(08):25-27.
- [3] 张锦.高层住宅建筑给排水工程施工技术要点分析[J].中华民居,2025,18(04):162-164.
- [4] 马兴华.建筑给排水管道施工中防渗漏施工技术分析[J].建材发展导向,2025,23(06):25-27.
- [5] 刘家明.建筑给排水管道工程施工渗漏问题与防渗漏措施[J].中国建筑装饰装修,2024(22):186-188.

建筑消防联动控制系统施工调试技术要点研究

汪士龙

(安徽省首通消防工程有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘要 建筑消防联动控制系统的施工调试质量直接关系到建筑消防安全, 为破解当前施工中设计与现场适配不足、设备安装不规范、线路干扰等问题, 以及调试阶段故障排查低效、联动逻辑偏差等痛点, 本文结合建筑消防施工实际, 对系统施工与调试核心技术要点展开深入研究。明确施工前期准备、设备安装、线路敷设的关键要求, 梳理单机调试、系统联动调试及故障排查的核心流程, 提出施工调试质量控制、技术优化及后期运维保障策略, 完善施工调试全流程技术体系, 保障系统稳定高效运行, 以期建筑消防联动控制系统施工调试工作提供实践参考, 进而提升建筑消防安全防护水平。

关键词 建筑消防; 联动控制系统; 系统设备安装; 系统线路敷设; 单机设备调试

中图分类号: TU998.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.039

0 引言

建筑消防联动控制系统是现代建筑安全防控体系的关键载体, 直接关系到火灾应急响应效率与人员的财产安全。随着超高层建筑、大型商业综合体、智慧化建筑快速发展, 消防系统集成度持续提升, 施工环境更趋复杂, 传统施工调试模式已难以适配现场需求。设计与现场衔接不足、设备安装精度不够、线路电磁干扰、联动逻辑匹配度不高等问题, 成为影响系统可靠运行的突出短板。在消防安全监管日趋严格、智慧消防全面推广的新形势下, 规范施工流程、优化调试技术、强化全过程质量管控尤为重要。本文结合工程实践对施工与调试技术要点开展系统性研究, 完善技术体系与管控策略, 旨在有效提升系统运行稳定性, 为建筑消防安全提供技术参考, 助力城乡建设安全高质量发展。

1 建筑消防联动控制系统施工核心技术要点

1.1 施工前期准备技术要点

科学完善的前期准备是保障施工质量与效率的基础, 为后续施工调试奠定坚实的基础。施工前期需聚焦设计与现场的适配性核查, 对比消防联动系统设计图纸与建筑实际工况, 逐一排查管线走向、设备安装空间等维度的设计偏差, 避免因设计与现场实际情况不符导致施工返工。设备与材料的筛选需严格对标国家消防规范及设计标准, 从供应商资质审核、产品合

格证明核验到进场抽样检验形成完整管控链条。同时, 根据设备特性做好存放防护, 如精密控制模块的防潮、防火设备的防锈处理, 从源头把控材料质量。施工流程的梳理需结合项目特点拆解各工序环节, 明确各环节的技术标准、质量要求与人员职责分工, 通过专项技术交底会将设计意图、施工要点及风险防控要点传递至每一位施工人员, 确保施工团队对施工方案形成统一认识, 为后续施工推进筑牢基础。

1.2 系统设备安装技术要点

设备安装的规范性构成了系统正常运转的核心环节, 必须严格依照安装标准来把握关键细节。火灾探测器以及手动报警按钮的安装需要做到位置上的精确, 结合建筑物的功能分区和火灾风险特征来明确安装点位, 严格把控设备之间的间隔距离, 采用专门固定配件来保证安装牢固, 同时避开遮挡物对设备感应范围造成干扰。联动控制器、模块这类核心设备的安装要兼顾操作的便利性和散热方面的需要, 设备固定应当符合承重方面的标准。接线操作要遵循规范的工艺要求, 做到接线牢靠、标识清楚, 接地处理必须满足电气安全方面的规定, 避免由于接触不良或者接地不到位而引发设备问题^[1]。消防水泵、风机、阀门等联动执行设备的安装需要与消防管网、通风系统等配套设施精确配合, 借助调试来确认设备动作方向、运行参数和系统整体需求相互匹配, 确保火灾发生时各个执行设备能够协调响应, 消防联动功能得到有效落实。

作者简介: 汪士龙 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑电气。

1.3 系统线路敷设技术要点

合理的线路敷设方式能够避免信号受到干扰,保证整个系统信号在传送上的稳定程度与安全水平。线路敷设需要预先规划好路径,绕开强电线路、电机设备等电磁干扰源头。强弱电线路采取分层、分槽敷设并且完成物理上的分隔,防止强电信号对弱电信号传送带来干扰。线缆挑选要严格符合设计规格,敷设流程里控制线缆弯曲的半径、敷设时候的张力,避免线缆出现损伤。接头处理应当采用标准工艺做好密封、绝缘方面的操作,全部敷设结束之后执行绝缘测试,保证线路绝缘性能达到安全规定。线路标识应当覆盖整个过程,采用一致的标识规范对线路编号、标注设备连接端口,清楚展示线路走向与连接关系,这样有助于后续调试过程中线路的查找,也能为后期系统维护、故障点确认提供准确参考,减少运维流程中的操作复杂性与风险程度。

2 建筑消防联动控制系统调试核心技术要点

2.1 单机设备调试技术要点

单机调试是联动调试的基础,需确保各独立设备性能达标、运行正常。火灾探测设备调试需覆盖全品类探测器,通过模拟火灾场景测试设备的探测灵敏度,验证不同火灾类型下设备的报警准确性与响应速度,排查设备感应盲区与灵敏度偏差问题。联动控制器调试需全面检测设备核心功能,包括电源供应稳定性、显示界面数据准确性、操作指令响应及时性,同时模拟故障场景测试设备的故障报警与自诊断能力,确保控制器能够及时捕捉设备异常并发出预警信号。执行设备调试聚焦消防水泵、风机等关键装置,测试设备启停操作的流畅性、运行参数的稳定性,验证设备在额定工况下的运行效果,确保各单机设备均能达到设计运行标准,为后续联动调试提供可靠的单体设备支撑。

2.2 系统联动调试技术要点

联动调试作为检验系统协同工作能力的关键环节,需要保证各个设备联动的逻辑正确,动作相互配合。火灾报警联动逻辑的调试工作要模拟建筑里不同区域、不同类别的火灾报警信号,然后沿着信号传输的路径去跟踪,查看报警信号产生之后,相关设备的联动动作顺序、动作时间点是不是与设计文件保持一致,要确保报警信息能够准确无误地驱动对应的设备运行。分区联动调试要以建筑的防火分区作为基本单元,针对每个分区消防设备的配置特点,进行专门的测试,验证分区内部火灾探测、报警、执行等设备之间的联动配合情况,找出分区边界可能存在的联动盲区和逻辑

上的矛盾问题。应急联动调试则需要模拟真实火灾场景下的紧急状态,测试火灾报警系统与应急广播、应急照明、疏散指示标志等系统之间的联动配合效果,要保证火灾发生时,应急系统能够快速做出反应,为人员疏散提供有效帮助,从而全面地检验整个系统在面对紧急情况时的处置能力。

2.3 调试故障排查与处理技术要点

高效率的故障排查与处理能够保障调试工作顺利推进,提升系统运转可靠性。调试过程中需要建立系统化的故障排查思路,针对报警异常、联动失灵、信号中断等典型情况,从设备本身、线路连接、逻辑设置三个角度逐一进行溯源,借助分段检测、替换测试等方法精准找到故障根源^[2]。故障处理应当遵循规范流程,针对设备故障及时更换或维修受损部件,针对线路故障修复破损线路、重新规范接线,针对逻辑设置偏差调整联动程序参数,处理过程里需要做好操作记录,留存故障处理过程与整改措施。故障处理结束之后需要开展二次调试,全面验证故障整改效果,确保设备运转、信号传输、联动逻辑都恢复正常,防止故障反复出现,保障系统调试质量与运转稳定性。

3 建筑消防联动控制系统施工调试质量控制策略

3.1 施工阶段质量控制要点

全过程质量管控可有效规避施工隐患,保障施工质量符合规范要求。施工阶段需建立常态化质量巡检机制,安排专业技术人员对设备安装、线路敷设等关键施工环节进行实时巡查,重点核查设备安装精度、线路敷设规范度等核心指标,及时发现并纠正违规施工操作。严格执行施工验收标准,针对隐蔽工程、关键工序制定专项验收流程,在管线预埋、设备基础浇筑等隐蔽工程完成后开展专项验收,确认施工质量符合设计要求后再进行后续工序,从流程上阻断质量隐患传递路径。加强施工人员专业培训,定期组织消防施工规范、操作技能培训,考核合格后方可上岗,规范施工操作流程,明确各工序的质量管控要点,杜绝违规施工行为,从人员与操作层面保障施工质量。

3.2 调试阶段质量控制要点

标准化的调试质量控制能够保证系统表现达到标准,符合消防联动方面的需要。调试开始之前需要准备完备的调试计划,明确各个调试环节的流程步骤、质量水平与验收条件,结合项目具体情况整理调试关键点与潜在问题,确保调试工作有序开展。调试期间要做好全过程记录,保存设备调试信息、故障应对记录、联动测试结果等资料,形成完整的调试文件,为后面

系统验收、追溯检查提供参考依据^[3]。调试结束之后进行全方位验收,对照设计材料与消防规定,逐项验证系统各项表现指标,包含设备运转稳定性、信号传送准确性、联动逻辑精确程度等,保证系统整体表现符合设计与规定要求,借助全过程质量管控确保系统调试质量合格。

3.3 施工调试全过程安全管理要点

加强安全管理能够防范施工调试过程中出现的安全风险,确保人员和设备安全。施工阶段要落实全面安全防护手段,规范施工现场用电、动火等高危作业流程,配备符合要求的安全防护设备,设置安全警示标志,明确作业人员的安全操作要求。强化施工调试人员安全培训,借助专题培训、案例教学等方式提升人员的安全意识和应急处置能力,保证人员掌握火灾、触电、设备故障等突发情况的处理方法。建立动态安全隐患排查机制,定期对施工调试现场开展安全巡检,重点排查用电安全、设备操作安全、消防安全等方面的隐患,及时发现并处理安全问题,从制度和执行层面防范施工调试过程中的安全风险,确保项目安全推进。

4 建筑消防联动控制系统施工调试优化策略

4.1 施工技术优化策略

优化施工技术可提升施工效率与质量,降低施工成本与隐患。施工过程中积极引入新型施工工艺与专业工具,如采用模块化安装工艺提升设备安装效率,借助精准测量工具提高线路敷设、设备定位的精准度,减少施工误差与返工率。针对复杂建筑场景,如超高层、大型综合体建筑,结合建筑结构特点优化施工方案,合理规划施工顺序,规避管线与结构的冲突问题,提升施工的顺畅度^[4]。聚焦传统施工中的痛点问题开展技术创新,针对狭小空间设备安装难、管线敷设难等问题探索适配的施工方法,通过技术创新突破施工瓶颈,提升施工整体效率与质量,同时降低施工成本与安全隐患。

4.2 调试技术优化策略

优化调试技术能够提高调试效率,保证系统联动可靠性和稳定性。科学应用智能化调试设备,如智能故障诊断仪、信号检测设备等,替换传统人工调试方法,提升调试数据的准确性和调试效率,降低人工操作错误。结合建筑实际场景优化联动逻辑设置,按照建筑功能分区、人员密度、火灾风险特点来调整联动参数,提高系统对不同场景的适应能力,避免逻辑多余或逻辑缺少问题^[5]。建立系统化的调试复盘机制,在每一轮

调试结束之后组织技术人员归纳调试经验,整理调试中遇到的问题和改进方向,形成调试经验库,用来指导后续或是同类调试工作,不断优化调试流程和方法。

4.3 后期运维保障优化策略

完整的后期运维保障能够有效延长系统使用寿命,让系统长期保持平稳运转。设立常态化的运维管理机制,明确规定运维周期、运维事项和运维准则,按时对系统设备做巡视检查、保养和校准,及时发现并解决设备隐藏的故障,防止故障扩大干扰系统运转。健全运维档案管理体系,完整保存施工调试记录、设备保养记录、故障解决记录等内容,建立系统全流程数据档案,这样可以为系统运维、升级改造提供数据支持。强化运维人员专业能力的培养,定期安排运维人员参与消防技术、设备维护等训练考核,增强运维人员的专业水平和问题应对能力,确保运维人员可以迅速响应系统运转过程中的各种状况,保证系统长期平稳运行。

5 结束语

建筑消防联动控制系统是建筑消防安全体系的核心组成,其施工调试质量直接决定火灾发生时系统的应急处置能力,关乎人员生命与财产安全。本文围绕系统施工与调试全流程,梳理各环节核心技术要点,明确质量控制与优化路径,破解施工调试中的各类技术难题与管理痛点。施工调试工作需兼顾规范性与创新性,既要严格遵循国家消防规范与设计要求,把控好设备安装、线路敷设、联动测试等关键环节,也要积极引入新型技术与工具,完善运维保障体系。未来,需结合建筑行业发展趋势,针对新型建筑场景的消防需求,持续优化施工调试技术与管理模式,推动系统运行更加稳定、高效,为建筑消防安全筑牢技术防线,助力建筑行业安全、高质量发展。

参考文献:

- [1] 孟星一.建筑消防工程防排烟设计与施工探究[J].今日消防,2025,10(04):116-118.
- [2] 苏周燕.建筑电气消防设计与施工方案探究[J].中国建筑金属结构,2024,23(12):116-118.
- [3] 熊飞,曹绍江.建筑消防系统施工监理实践[J].工程技术研究,2020,05(14):150-151,161.
- [4] 林航.探讨消防联动控制系统中的自动探测设置研究[J].建筑与预算,2024(04):37-39.
- [5] 张照阳.浅谈消防物联网对建筑消防系统的提升[J].现代建筑电,2023,14(05):33-38.

平原地区泵站工程的总图布置与土地利用研究

陈 童

(安徽水利水电勘测设计研究院股份有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 平原地区泵站工程总图布置与土地利用优化是本文核心研究内容。当前我国水利工程建设快速推进, 泵站在防洪排涝、灌溉供水等领域作用关键, 但平原地区土地资源供需矛盾突出, 通过科学总图布置提升泵站土地利用效率, 已成为行业亟待解决的现实问题。本研究选取江苏、河南、安徽等地典型泵站为案例, 结合文献梳理与实地调研, 系统归纳平原泵站总图布置的主要影响因素与典型模式, 重点探讨紧凑型、分散型、立体型三类布置方式的适用条件与综合评价体系。研究表明, 模块化、标准化设计可有效节约工程占地, 其中垂直立体布置对土地利用效率提升效果显著, 在用地紧张区域优势突出。推动泵站与周边生态环境、农业生产有机融合, 可实现土地资源复合多功能利用。基于此, 本文提出分类指导管控、工程功能整合、空间立体开发、生态优先布局等优化策略, 构建适配泵站工程的总图布置与土地利用效率综合评价体系。该成果旨在为平原地区泵站工程规划设计提供理论参考, 对推动水利工程与土地资源协调可持续发展具有积极现实意义。

关键词 泵站工程; 总图布置; 土地利用; 平原地区

中图分类号: TV675

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.040

0 引言

随着我国水利工程的不断发展, 泵站工程于防洪排涝灌溉供水等范畴的重要性愈发显著, 尤其在平原地区, 这些工程不但肩负着确保农业生产的关键使命, 而且对区域生态平衡以及经济发展发挥了关键的支撑作用。然而, 平原地区的土地资源相对有限且分布较为均匀, 如何在满足泵站功能需求的同时实现土地资源的高效利用, 已成为当前水利工程领域亟待解决的问题之一。据《全国土地利用总体规划纲要(2006-2020年)》数据显示, 全国范围内每年新增泵站工程用地约30万亩, 平原地区占比超60%, 而土地利用效率却普遍低于50%。这一现状表明传统泵站工程总图布置方式已难以适应现代水利发展的要求, 亟须通过科学规划与技术创新提升土地利用效率。

通过江苏、河南、安徽等典型平原地区的泵站工程案例, 并且结合文献研究和实地调查后, 可知, 地形地貌、功能需求、施工条件、生态环境等诸多方面都对泵站工程总图布置有影响。基于此, 研究进一步探讨了紧凑型、分散型、立体型等不同布置模式的适用性和效果评价, 比如在用地紧张的地方, 垂直立

体布置能让土地利用效率大大提高, 而且模块化、标准化设计有助于节省建设成本、缩短工期。另外, 把泵站工程与周边生态环境和农业生产有机结合起来, 不但能实现土地资源多功能利用, 还可有效减少对自然环境的干扰。本研究根据上述研究背景, 系统总结平原地区泵站工程总图布置的影响因素和优化策略, 以便给以后泵站工程规划设计提供理论依据和实践引导, 促使水利工程和土地资源协调发展。

1 平原地区泵站工程总图布置的理论与方法

1.1 平原地区泵站工程总图布置的基本原则与要素

平原地区泵站工程总图布置需遵循科学、经济、生态等基本原则, 关键在于实现土地资源高效利用与工程功能优化配置的一致。随着我国水利工程的规模持续扩张, 平原区域的防洪排涝以及灌溉供水的需求逐步增多, 然而有限的土地资源成了限制泵站工程建设的关键瓶颈。据水利部门数据表明, 在2018年至2023年这段时间内, 我国平原地区新增泵站工程用地面积的年均增长率仅为1.5%, 远远低于实际需求的增长速度。因此, 泵站工程总图布置应优先考虑紧凑

作者简介: 陈童(1994-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 水利总图设计。

型布局模式, 以通过模块化设计和标准化施工减少占地规模。同时, 地形地貌水文条件以及周边生态环境也是影响总图布置的关键要素。例如: 江苏河南等地区的典型泵站案例显示, 借助自然地形高差能够大幅削减土方工程量并且为后续运行维护提供便利。另外, 泵站工程总图布置要全面考量交通组织、管线敷设以及设备安装等实际需求, 以保障各个功能区之间的和谐衔接, 进而提高整体运行效率^[1]。

1.2 泵站工程总图布置的影响因素分析

自然环境、社会经济和技术条件等多种因素综合影响着泵站工程总图布置。在自然环境方面, 平原地区地势平坦且土壤承载力低这一特点使泵站基础设计要求提高, 并且降水分布不均匀和地下水位变动又进一步使工程选址和布置更为复杂, 以安徽某个泵站为例, 周围区域季节性洪涝经常发生, 所以其总图布置采用分散型模式, 将主要设施放在不同的标高区域, 从而有效降低洪水风险。从社会经济角度看, 土地资源稀缺以及农业生产有空间需求是重要的考虑因素, 技术条件也不可小觑, 并且近年来智能化设备应用促使泵站布置方式创新, 如垂直立体布置既能节省平面用地, 又方便设备集中管理, 不过这种方式对结构安全和施工精度要求更高。总之, 泵站工程总图布置要在多个目标限制下找出最好的解决办法, 既要满足功能方面的需要, 还要考虑到经济性和可持续性。

1.3 泵站工程与土地资源优化配置的关系

泵站工程是重要的水利基础设施, 其总图布置与土地资源优化配置紧密相连且这两者共同影响着工程的综合效益^[2]。近些年, 我国平原地区的泵站工程逐渐从传统的粗放式布局朝着集约化、多功能化的方向转变, 这一变化体现出土地资源利用理念的进步。例如: 江苏某大型泵站采用模块化设计和立体开发策略后, 占地面积比传统方案少了将近 30%, 并且防洪排涝和生态景观功能也有机的融合在一起了。泵站工程和周边农业生产的联系也不容忽视, 研究显示, 2020 年到 2023 年全国泵站覆盖区域的粮食单产平均提高 5% 到 8%, 这是由于科学合理的总图布置让农田灌溉有了稳定保障, 不过土地资源优化配置不是一味地追求占地最少, 而是在满足工程功能的前提下重视与生态环境的协同发展, 如有些泵站设置了生态缓冲带和雨水收集系统, 不仅改善了当地的微气候, 还提高了土地的综合利用价值。可见, 泵站工程总图布置不只是工程技术方面的问题, 更是土地资源管理的重要内容, 所以优化策略要充分考虑区域的特点和发展需求。

1.4 国内外泵站工程总图布置的先进经验与模式

国内外泵站工程总图布置的经验显示, 关键在于技术创新以及因地制宜以达成高效土地利用。发达国家泵站建设大都运用模块化设计和智能化管理, 如荷兰阿姆斯特丹某泵站引进自动化控制系统后, 将操作间和设备间放在同一个建筑里, 从而大大减少占地面积。而日本注重泵站和城市景观相融, 其东京湾泵站项目用地下立体布置, 不但解决了用地紧张的问题, 还给地面空间腾出更多公共用途。我国近些年也一直在积极探寻适合平原地区的先进做法, 如江苏某个泵站采用“分类指导+功能整合”的策略, 按不同功能需求划分独立区域并通过连廊连起来实现一体化管理, 这样既能提高土地利用效率, 又能增强抗灾能力, 而且安徽、河南等地的实践表明, 在泵站总图布置中秉持生态优先的理念意义重大, 因为构建人工湿地和植被隔离带之后, 这些泵站在实现工程功能的同时也保护好生态环境, 达成了双赢局面。总的来说, 不论是国际上的经验还是国内的探索都在朝着精细化、绿色化的方向发展, 这对未来平原地区泵站建设有着宝贵的借鉴意义。

2 平原地区泵站工程土地利用效率提升策略

2.1 基于 GIS 的泵站选址与土地适宜性评价

近些年, 我国水利工程建设规模持续扩大, 使得泵站在防洪排涝以及农业灌溉中的作用越来越明显, 不过平原地区平平展展且人多、地少, 所以科学选址对提高土地利用效率很关键。而地理信息系统 (GIS) 技术用于泵站选址的方法能综合地形地貌、水文条件、交通网络以及周边土地利用情况等因素给出泵站工程精确的空间布局方案。研究显示, 在江苏、河南、安徽等典型的平原地区泵站选址时, 运用 GIS 技术会让选址更科学合理。统计近五年相关区域的数据可知, 用 GIS 技术选址的泵站项目土地利用效率平均提升了 15% 以上。另外, 将土地适宜性评价模型加进来还能进一步让泵站工程功能分区设计得到优化, 从而防止因为选址不好造成土地资源浪费或者生态破坏。例如: 江苏某泵站项目, 用 GIS 分析之后发现原定选址跟基本农田有冲突, 调整之后不但耕地占用少了而且建设成本也降低了, 这种方法对平原地区泵站工程高效利用土地很重要, 并且可供类似项目的规划决策作参考^[3]。

2.2 泵站工程土地集化利用技术

平原地区用地紧张, 而泵站工程的土地集化利用技术对于解决这一问题十分重要。经模块化、标准化

设计后,泵站工程能在有限空间高度集成功能从而有效节省土地。例如:把泵房、配电室、控制室等功能单元集中放置且采用预制装配式结构,既能缩短施工周期,又能减少占地面积。数据表明,江苏、河南等地近五年来,泵站项目采用模块化设计,土地利用率比传统设计提升约20%,而且土地集化利用技术中还有垂直立体布置这种创新方式,在平原地区用地紧张时,靠多层结构设计把设备安装和操作空间往垂直方向扩展能大大减少平面占地。例如:安徽某泵站项目引入立体布置方案后,原本需2 000平方米的用地被压缩到1 200平方米且工程运行需求也得到了满足。该技术的应用既减轻了土地资源压力,又给泵站工程可持续发展提供了新思路,不过推广土地集化利用技术要结合具体工程条件并充分考虑经济性与可行性才能保证实际应用效果^[4]。

2.3 泵站工程布置的生态补偿机制

平原地区泵站工程的总图布置要重视土地利用效率且不能忽视生态保护与修复以建立合理的生态补偿机制,由于生态文明建设不断深入,近些年泵站工程和周边生态环境如何协同发展成了热门研究内容。例如:江苏某泵站项目采取生态补偿举措,将一部分工程用地改成湿地公园,这样不但达成了土地资源多功能运用的目的,而且改善了区域生态环境。有数据表明,近五年平原地区推广这类案例后,区域内生物多样性指数平均提高了10%以上,并且生态补偿机制也包含农业生产影响评估与补偿措施。例如:河南某泵站工程合理调整工程布局,减少对周边农田干扰,并用资金补贴、技术支持帮农民恢复生产,这样既能缓和工程建设和农业生产的矛盾,又能提高当地居民对项目的接受程度。总的来说,建立完善生态补偿机制能让泵站工程和生态环境良性互动,从而给平原地区水利工程建设可持续发展提供保障^[5]。

2.4 泵站工程土地多功能复合利用模式

平原地区泵站工程土地多功能复合利用模式是提高土地利用效率的重要途径,将泵站工程与周边环境、农业生产等功能有机融合,能让土地资源得到最大程度的利用。例如:安徽某泵站项目,泵站工程与光伏发电系统相结合,不仅自身用电有了着落,还给周边村庄提供了清洁能源,每年平均发电50万千瓦时,泵站工程用地与农业种植相结合的模式效果也很显著。例如:江苏某项目在泵站周边空地种耐水作物,既能提高土地利用率,又能增加农民收入。数据表明,近五年来,采用多功能复合利用模式的泵站项目经济

效益平均提升25%以上,这一模式对推动区域经济与生态保护协同发展也有帮助。例如:河南某泵站项目引进观光农业和生态旅游功能后吸引了很多游客,带动当地服务业发展。这些实践显示,多功能复合利用模式能有效缓解平原地区土地资源紧张问题并给泵站工程可持续发展注入新活力。

3 结束语

水利工程建设存在土地资源有限而功能需求多样的矛盾,亟待解决,所以随着我国水利工程规模越来越大,平原地区的泵站工程在防洪排涝、灌溉供水等方面越来越重要,但是由于土地资源很稀缺,对泵站工程的规划设计就有了更高的要求。研究显示,用模块化、标准化设计能大幅减少土地占用且提升整体工程效率,垂直立体布置新模式在用地紧张的地方优势明显,既能提高土地利用率,又给多功能开发创造了条件。另外,泵站工程与周边生态环境和农业生产结合起来,能使土地资源的功能价值进一步拓展,从而实现经济效益和生态效益双赢。通过对江苏、河南、安徽等平原地区的典型案例进行分析,再结合实地调查和文献研究,本研究总结出影响泵站工程总图布置的关键因素,并提出分类指导、功能整合、立体开发和生态优先的优化策略,给平原地区泵站工程的科学规划提供理论依据且建立土地利用效率评价体系,使实际操作有了量化工具。近五年数据显示,水利工程行业在平原地区的投资年均增长率达8%,但是土地资源利用率的提升速度比较慢,必须靠技术创新和模式优化来改变。总之,研究成果对提高平原地区泵站工程的土地利用效率有帮助且给出水利工程与土地资源协调发展的实践路径,行业推广价值和应用前景很重要。

参考文献:

- [1] 卢云. 水利水电工程中绿色施工技术的应用研究:评《高山峡谷地区大型水电工程绿色施工总布置创新与实践》[J]. 人民黄河, 2024(04):170.
- [2] 于芝琳. 基于PLUS-InVEST模型的土地利用变化模拟及其对碳储量的影响[D]. 淮南:安徽理工大学, 2024.
- [3] 王鹏. 水利工程建设下土地利用时空演变及驱动因素分析[D]. 昆明:云南农业大学, 2024.
- [4] 刘仪. 绿汁江流域土地利用景观格局演变与模拟预测研究[D]. 昆明:云南财经大学, 2023.
- [5] 黄梓诚. 水利水电工程建筑中的节能与环保技术分析[J]. 产品可靠性报告, 2025(10):114-116.

常见薄膜沉积工艺中影响薄膜质量的主要因素探究

樊中军

(中国建材国际工程集团有限公司, 上海 200383)

摘要 薄膜沉积工艺是现代材料科学领域极具代表性的工业应用技术, 凭借其精准可控的材料制备能力, 在电子信息、光学器件、高端制造、新能源开发等众多产业领域发挥着不可替代的核心作用。本文以磁控溅射、离子蒸发、近空间升华三种主流薄膜沉积工艺为研究对象, 采用理论分析与实践经验相结合的方式, 着重探究影响薄膜质量的主要因素, 以期在不同应用场景下的薄膜制备工艺优化提供有益参考。

关键词 磁控溅射; 离子蒸发; 近空间升华; 升华源

中图分类号: TN304.055

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.041

0 引言

当前工业中常见的薄膜沉积方式主要分为物理气相沉积 (PVD) 与化学气相沉积 (CVD), 其中, 磁控溅射、离子蒸发与近空间升华这三种方式的应用场景最为普遍。磁控溅射技术具有沉积速率稳定, 薄膜均匀性与致密等优点, 在微电子、光学薄膜沉积工艺中应用较为广泛; 离子蒸发技术对于要求膜层附着力强、沉积面不规则且对挠度较为敏感的场景较为适合; 近空间升华法则具有膜层致密性好, 且镀膜工艺控制简单的特点, 在新能源等领域应用较为广泛。目前, 国内外的学者针对某一种薄膜沉积工艺的特点与控制做了大量的研究, 但对于不同方式之间的系统性对比与多参数协调控制机制的研究与分析较少。因此, 本文通过对磁控溅射、离子蒸发与近空间升华这三种常用薄膜沉积方式下的工艺参数对薄膜质量的影响规律进行探究, 旨在为用户提供一套清晰的技术路径选择依据, 并为各种复杂与交互薄膜沉积工艺下的情况提供优化方案与缺陷改进措施。

1 磁控溅射

1. 溅射功率。溅射功率的大小除了可以影响薄膜的厚度之外, 还能使得薄膜更加致密, 也就是说, 在基板与阴极之间间距不变, 且离子气体浓度不变的情况下, 提升沉积功率就意味着提高沉积速率, 在微观上可以使得带电粒子的能量更高, 宏观上可以使得薄膜更加致密。但是, 过于高的功率也可能增大膜的内应力, 使得薄膜在冷热交替或高温高湿的环境下出现裂纹或脱落。

2. 工作气压。当前主流的溅射用工作气体为氩气, 这主要得益于氩气具有良好的化学惰性与容易电离的特性。一般来说, 随着氩气的供应流量的增加, 当其他条件不变化时, 流量越大, 离子浓度越高, 薄膜沉积速度也越高。单流量的增加并不意味着供气压力较大。

3. 靶基距 (靶到基底距离)。所谓靶基距, 顾名思义, 就是靶材表面与镀膜基板之间的距离。因为带电子受磁场的作用, 使得其密度分布在空间内并不呈均匀分布, 距离靶材越近, 离子浓度越高, 薄膜沉积速率越高, 但这一距离并非越近越好, 因为距离越近, 虽然沉积速率得到了提高, 但也可能引起薄膜的均匀性变差, 而且靶基距越小, 则基板表面的热量分布越不均匀, 这种不均匀会使得薄膜内部产生大小不一的内应力, 降低薄膜的可靠性^[1]。

4. 基底温度。在有些溅射工艺中, 为了提高薄膜的附着力, 需要在沉积前提高基板表面的温度, 根据材料不同, 工艺需求不同, 对基板表面温度的要求也不同。基板表面温度提高, 沉积原子的迁移率也会提高, 这会使得薄膜更加致密, 微观结晶更加均匀, 膜层附着力有效提高。

5. 基板偏压。在恒电压溅射模式下, 基板偏压越大, 则离子轰击能量越大, 使得薄膜更加致密, 表面粗糙度更加良好, 微观空洞越少。但过大的偏压反而会导致薄膜内部应力急剧增大, 附着力下降, 甚至使得薄膜受到损伤, 出现破裂甚至色变等不良现象。

6. 靶材品质。溅射靶材的品质也是影响最终薄膜

作者简介: 樊中军 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 微电子薄膜沉积工艺。

品质的原因之一。其中主要指的是靶材的纯度，纯度不够的情况下，靶材中的杂质会进入薄膜中，从而影响薄膜的导电性、绝缘性与耐腐蚀性。有些杂质会使得靶材异常放气、起弧，从而影响膜层的均匀性。当然，片面追求越高纯度是没有实际意义的，因为纯度越高，往往也意味着靶材的成本越高。

7. 基底与预处理（决定附着力）。基底的洁净状况会直接影响到薄膜的最终品质。但这种影响又分为消极与积极两种情况。基地表面的粉尘、油污、指印、刮痕、毛屑、水雾等都是薄膜质量的消极因素，这些基板的表面缺陷在薄膜沉积后，可能会更加明显，尤其是要求薄膜具有透光性的情况下。在实际生产中，建议采用化学清洗，离子清洗/刻蚀，加热等手段做基板的预处理^[2]。

8. 设备与腔体条件。在磁控溅射工艺中，为确保薄膜品质，沉积腔的底真空都要求越低越好，因为残留气体中的 H_2O 、 O_2 、 N_2 等会污染膜层，使得膜层变色、附着力差，特别是在CVD模式下，还可能使得膜层变异。

9. 其他因素。工装 & 夹具的形制，以及基板与工装 & 夹具的装配方式也会影响薄膜的品质，尤其是在立式镀膜环境下，夹具的挡边位置、尺寸需要与基板的旋转方向相互适配，否则可能会因为局部遮挡而造成薄膜分布不均，在基板表面留下条纹状的情况。

2 离子蒸发

1. 蒸发源与蒸发工艺（决定膜层基础）。从原理上来讲，当镀料原子被等离子体激发后变成高能带电离子后，会在强电场作用下向基板移动并最终成膜。所以，外加电场的强弱将直接影响成膜的速度。弱电场环境下，薄膜内应力释放均匀，膜层的致密性较好，但同时生产效率也低，而且一旦沉积速率低于溅射玻璃速率，膜层将停止生长，镀膜工艺无法持续。适当地提高电场强度并提升镀率可以有效防止这种情况的发生^[3]。

2. 坩埚舟材质与状态。相比磁控溅射的靶材，离子蒸发所用的镀料载体——坩埚舟的体积要小很多，但是，因为工艺的不同，坩埚舟的材质要求除了具有熔点高、低蒸汽压、化学惰性好、耐高温等一般特性外，还不能与膜料发生反应。目前，主流材质主要包括陶瓷与难熔金属。材质不匹配，就会产生合金反应，最终使得膜层遭到污染。

3. 基底温度。在生产中，为了提高薄膜的附着力，往往需要在生产前对蒸发伞具与基板进行预热。提高预热温度，有利于增强原子的迁移能力，使得膜层更加的致密，附着力更好。但无限制地提高预热温度则

没必要，过高的预热温度除了增加生产的能耗之外，还有可能使得膜的内应力增大，膜层老化变色，甚至有可能使得伞具机体变形。

4. 离子束浓度。从原理上来讲，可以通过提高离子源的工作电压来提高离子束的浓度，而离子束的浓度越高，则离子轰击的强度就会提高，这种变化可以提高薄膜的致密性，使得膜层表面更加光滑，也能提高膜层的附着力，在一些对薄膜镜面质量要求较高的工艺环境下，这种方式使用比较广泛。

5. 辅助气体纯度。这类气体主要指的是气相电离所用的主气体（Ar等），以及反应型离子蒸发工艺中所用的其他气体（ O_2 、 N_2 等）。纯度不高的气体会造成膜面发黄、发黑、发雾、附着力变差等质量问题^[4]。

6. 真空系统。与磁控溅射工艺类似，离子蒸发镀膜工艺对真空系统的要求也比较严格，沉积腔内的底真空越高，薄膜蒸发所受的影响就会越小，薄膜质量也会更加稳定。在众多的残余杂质气体中，残余水、氧气以及碳氢化合物是导致薄膜发雾、氧化变色以及薄膜附着力变差的主要原因之一。

7. 基底与预处理。基底的表面质量状况也是影响薄膜质量的主要因素之一，这种表面质量主要体现在油污、手印、粉尘、刮伤、水痕、毛屑、表面粗糙度等方面。一般来说，在镀膜前都需要对基底表面做前置的清洗或预处理，其目的便是尽可能消除上述的不良现象，否则薄膜就会出现起泡、针孔、附着力变差甚至脱模的现象。但是需要说明的是，清洗无法消除刮伤等深度缺陷，对于这类缺陷，如果使用场景不能接受，就应该果断剔除，因为在蒸发镀膜的高温下，某类基体（玻璃或硅片）有可能会发生破裂甚至破碎，从而影响设备的安全。

8. 其他因素。工装 & 伞具的转动速度也会影响薄膜的沉积质量。从原理上来说，工装 & 伞具的转速影响的是膜厚的均匀性，这就要求在镀膜过程中这一速度需要尽可能地保持不变，或快或慢的速度变化都会影响薄膜的沉积厚度，而要保持这个速度恒定，除了采用抗干扰性能良好的伺服系统外，基板在工装 & 伞具上的安装状况（遮挡、角度、距离等因素）也会影响薄膜的表面质量，比如薄膜的均匀性、色差、边缘发雾等不良现象。

3 近空间升华

1. 升华源温度。通常情况下，当升华源温度提高后，升华速率也将提高，沉积速率也将明显提高。但需要注意的是，随着沉积时间的发展，升华源内原料会逐渐减小，这种减小会逐步地影响升华的速率，因为蒸

汽到基板表面的距离有了改变,所以在近空间升华工艺中,需要对薄膜的厚度做定期的测量或检查,一旦发现薄膜厚度开始逐渐减小,则需要适时地调整升华源的温度参数,给予必要的补偿。而这种调整切记不可大开大合,除了担心基体碎裂外,更重要的原因是温度的提升对膜厚的增加并非一直处于直线变化状态,也就是说,虽然源温度对薄膜厚度控制很重要,但并非唯一决定因素。事实上,过高的温度会使得薄膜的晶粒变得粗大,增加后续的工艺处理难度,也会加速腔体的污染,缩短设备保养时间^[5]。

2. 基底温度。在近空间升华工艺中,基底温度是另外一个影响薄膜品质的因素之一。基于基板的耐受温度之下,提高基板温度可以使得薄膜中的分子晶粒长得更大,同时也能提高膜层的附着力。一方面,过高的基体温度有可能会造成基体变形较大,膜应力增大,甚至薄膜的翘曲与开裂;另一方面,当基板的温度比周围腔室的温度高的情况下,蒸汽分子可能更容易在腔体而不是在基板上沉积。然而,过低的基板温度会使得薄膜内部的微小空洞较多,分子晶体生长不够而显得较小,附着力也会变差。如果镀的是导电薄膜,那薄膜的电学性能也会变差。

3. 源-基间距。源-基间距就是升华源与基板之间的间距。升华蒸汽由升华源漂移到基板并形成薄膜,这一气相传输路径越大,蒸汽能量散射越多,所沉积的薄膜内部结构往往比较疏松,均匀性也不好,相反,间距越小,则能量散射越少,沉积速率越高,所沉积的薄膜也更加致密。但过于小的间距,也可能导致局部污染物刮伤薄膜,特别是当基底温度很高,基板变形较大的情况下,基板可能会直接与污染物或升华源部件接触造成刮伤甚至破碎。

4. 腔体气氛与压力。几乎所有真空镀膜工艺都会要求设备的基底真空尽可能的低,近空间升华工艺也不例外,虽然它不像磁控溅射一样需要达到高真空环境,但一般的低真空环境也是需要保证的,应尽可能地减少残余气体中的水蒸气、氧气等杂质气体的含量,降低薄膜污染,保证薄膜导电特性,减少气泡,提高薄膜的附着力。

5. 基板移动速度。基板移动速度越快,则薄膜沉积时间越短,膜厚越薄;反之,则沉积时间越长,膜厚越厚。除考虑薄膜厚度这一基本指标之外,还要注意的是:时间短,薄膜薄,虽然内应力可能小,但微观针孔可能会增加;时间长,薄膜厚,虽然晶粒生长可能较好,但薄膜内应力也可能增大,导致薄膜开裂,甚至脱落。

6. 基板品质。近升华镀膜工艺要求基板本身具有稳定的尺寸保持性,也就是说,无论是高温还是常温环境下,它的热膨胀系数要尽可能的小,比如玻璃。前置处理的状况如清洁度、表面平整度都会影响薄膜的质量。因为油污、粉尘、指印等表面状况会导致薄膜出现针孔、脱膜、晶界缺陷等质量问题。如果是在已有薄膜的基板上沉积,如 ITO,那么原有薄膜的品质状况也直接决定新沉积的薄膜附着力,这与新的界面是否完整无关,而是指当新的薄膜界面形成后,原有薄膜是否有足够的附着力,这一点是决定新形成的复合膜层对于基板是否足够牢固的重要因素。

4 结束语

本文以磁控溅射、离子蒸发与近空间升华三种主流沉积工艺为核心,结合实践经验,探究了影响薄膜品质的各种工艺条件,明确了不同工艺参数是如何影响薄膜品质,并对如何调试给出了建议性的方向,完成了预设的研究目标。其主要研究结论如下:(1)通过原理分析与实践经验,指出真空度、沉积温度、功率大小以及基板与靶材/蒸发源之间的间距等参数,对薄膜的致密性、附着力等有着重要的影响,为不同场景下如何调节这些参数提供了方向上的引导;(2)无论是磁控溅射、离子蒸发,还是近空间升华,基板前置处理是否彻底,特别是表面质量是否足够好,粉尘、指印、油污等缺陷都会对最终的薄膜品质,特别是针孔、附着力等有着决定性的影响;(3)在生产效率许可的范围内,提高沉积区域的底真空程度对薄膜质量是有益的。薄膜沉积工艺的优化需要持续迭代,不同的镀膜材质以及工艺要求,会有不一样的参数设置范围。此外,具体数值范围也涉及知识产权的问题,所以本文无法提供一种普遍适用的具体参数,但希望本研究成果能够为实际生产过程提供有益参考。

参考文献:

- [1] 宋佳赞,马解放,张亚飞,等.宽幅镀铝聚酯薄膜的物理性能研究[J].包装工程,2025,46(17):335-341.
- [2] 李鑫浦,李永伟,李志强,等.基于PECVD的SiC薄膜制备工艺研究[J].压电与声光,2025,47(03):525-531.
- [3] 李子曦,黄景林,谢春平,等.基于单一气源的PECVD方法制备SiC薄膜及其微观结构研究[J].原子能科学技术,2022,56(07):1473-1482.
- [4] 黄宇鹏.低气压CVD法大面积镀膜均匀性控制的数值研究[D].南昌:南昌大学,2025.
- [5] 上海晶普材料科技有限公司.一种卷绕式真空镀膜机蒸发源保护装置:CN202520202328.5[P].2026-02-24.

工程测量在建筑物变形监测中的误差来源及改进措施

周 卷

(安徽省城建设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 为解决工程测量在建筑物变形监测中的误差问题, 本文以高层建筑、基坑、桥梁等不同场景为例, 对误差来源展开分析, 明确测量仪器性能、环境干扰、人员操作、方法选择及基准点稳定性是主要影响因素。针对这些问题, 提出仪器全生命周期管控、环境多维度防护、人员三维度培养、方法三阶优化及基准点全周期保障等改进措施, 涵盖从选型到维护、从预防到补偿的全流程方案, 以期为工程测量人员及相关建设项目提供实践参考。

关键词 工程测量; 变形监测; 误差控制; 智能监测; 安全评估

中图分类号: TU196.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.042

0 引言

在城市化进程中, 超高层建筑与重大工程数量持续增长, 建筑物变形监测成为保障结构安全的核心环节。精准的监测数据是评估建筑稳定性的前提, 即使是毫米级误差都可能隐藏安全隐患。当前智能监测技术普及背景下, 仪器性能、环境干扰、人员操作等因素仍制约着数据可靠性。本文聚焦工程测量中的误差问题, 梳理主要影响因素, 构建全流程改进方案, 为提升监测精度提供实践路径, 助力工程安全防控体系完善。

1 工程测量在建筑物变形监测中的误差来源

1.1 测量仪器相关误差

测量仪器的性能和状态直接影响变形监测数据的可靠性。不同监测场景对仪器精度存在差异化要求, 如高层建筑倾斜监测需毫米级精度的全站仪, 而基坑沉降观测则依赖精度达 0.1 mm 的水准仪。若选用精度不足的设备, 初始数据采集阶段就会引入系统性偏差, 导致后续变形分析出现误判。仪器校准是控制误差的关键环节, 光学仪器的视准轴偏差、电子设备的传感器漂移, 都会随使用时间累积误差。未按规程每月校准的全站仪, 其角度测量误差可能从 $\pm 2''$ 增至 $\pm 5''$ 以上, 直接放大建筑物变形量的计算误差。长期野外作业会加速仪器老化, 金属部件锈蚀导致轴系间隙增大, 光学镜片霉变影响成像质量, 这些物理损耗使测量重复性下降, 同一监测点的多次读数偏差可能超过规范允许值的 3 倍。

1.2 测量环境影响误差

环境因素通过干扰仪器工作状态和被测物体物理特性引入误差。温度剧烈变化时, 全站仪的金属支架会因热胀冷缩产生毫米级形变, 导致竖轴倾斜误差; 混凝土建筑的墙体在日照下的温差可达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 这种非均匀温度场会引发瞬时形变, 若此时进行测量, 会误将温度应力导致的变形计入结构沉降数据。风力对高精度测量的影响尤为显著, 三级以上风力会使测斜仪探头产生共振, 造成深基坑侧壁位移监测数据波动幅度超过 2 mm; 用于高耸建筑监测的 GPS 接收机, 强风导致的天线抖动会使定位误差增加 $5\text{ mm} \sim 8\text{ mm}^{[1]}$ 。电磁干扰在城市环境中普遍存在, 高压输电线路产生的电磁场会干扰电子水准仪的信号传输, 地铁运行时的电磁脉冲可能导致雷达干涉测量出现相位跳变, 这些干扰直接降低数据的稳定性。

1.3 测量人员操作误差

测量人员的操作规范性与专业判断能力直接影响数据质量。仪器安置阶段, 若对中误差超过 3 mm, 水平角测量误差会呈几何倍数增长; 整平不到位导致的 i 角偏差, 会使水准测量每 100 m 距离产生 0.5 mm 的高程误差。读数环节的人为偏差具有累积性, 光学经纬仪的估读误差通常在 $6'' \sim 10''$, 采用人工记录时还可能因视觉疲劳出现读数错记, 如将 2.345 m 误读为 2.435 m。经验差异导致的判断误差在复杂场景中更为突出, 面对建筑物表面的遮挡物, 新手可能选择不合理的棱镜架设位置; 在处理突发数据跳变时, 缺乏经

作者简介: 周卷 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程测量。

验者易误判为结构突变，而忽略环境干扰的可能性。操作流程的执行偏差同样不容忽视，如在 GPS 测量中未按要求进行静态观测，提前移动仪器会导致基线解算精度下降 40% 以上。

1.4 测量方法选择误差

测量方法的适用性与设计合理性决定误差控制效果。方法与监测对象不匹配时，误差会系统性放大，如采用传统水准测量监测超高层建筑沉降，因测站数过多导致累积误差超过 5 mm，远不及 GPS 静态测量的精度表现；用接触式测斜仪监测软土地区基坑变形，探头与孔壁的摩擦会使数据偏小 20% ~ 30%。每种测量方法都存在固有局限，全站仪极坐标法在超过 300 m 距离后，大气折光影响会使平面位置误差增至 15 mm；InSAR 技术受植被覆盖影响，在绿化密集区域的监测精度会下降 60%。测量步骤设计缺陷会引入额外误差，如数据采集间隔设置过长，可能错过建筑物在暴雨期间的短期变形峰值；观测路线规划不合理导致的往返测不符值，会使闭合差超限，迫使部分数据作废重测^[2]。

1.5 基准点稳定性误差

基准点作为测量基准，其稳定性直接决定整体监测精度。基准点自身沉降多源于地基处理不当，设置在回填土区域的基准点，半年内可能产生 5 mm ~ 8 mm 的下沉，导致所有监测点高程数据出现同向偏差。周边环境扰动对基准点的影响具有突发性，邻近工地的重型机械振动会使基准点产生瞬时位移，某次打桩作业可能导致 30 m 外的基准点偏移 2 mm ~ 3 mm；地下水抽取引发的地面沉降会使基准点随土层整体下沉，在岩溶地区，这种影响可能呈现非线性特征。基准点设置不合理放大误差传递效应，数量不足时难以通过平差消除偶然误差，布设间距超过 500 m 会使联测精度下降；位置选择不当更具隐蔽性，将基准点设置在活跃断层带上，其年位移量可能超过监测对象的变形量，导致误判建筑稳定性。

2 工程测量在建筑物变形监测中的误差改进措施

2.1 测量仪器的优化管理

测量仪器的优化管理需构建全生命周期的精细化管理体系，从选型适配到退役淘汰形成闭环。选型阶段应建立多维度评估矩阵，将监测对象的结构特性、变形速率、精度要求转化为可量化的设备参数指标。例如：在大型桥梁挠度监测中，需选用采样频率不低于 10 Hz 的动态全站仪，配合 0.1 mm 级分辨率的位移传感器，确保捕捉瞬时振动变形；而古建筑沉降监测则需优先考虑轻量化设备，如便携式电子水准仪，其 3 kg 的机身重量可减少了对文物结构的扰动。校准体系实施“双轨制”

运行，日常校准采用自动检校系统，通过激光干涉仪对全站仪的角度、距离测量精度进行实时修正，确保每小时自动校准一次，将短期漂移误差控制在 $\pm 0.5''$ 以内；季度深度校准联合国家计量院，采用绝对法校准技术，利用氦氖激光波长作为基准，将长度测量误差溯源至国际基本单位，使系统误差压缩至 0.3 mm/km 以下。设备维护推行“预测性保养”模式，通过内置传感器采集仪器的振动频率、温度响应等数据，建立故障预警模型，当轴系磨损导致振动幅值超过 0.02 mm 时自动触发维护指令。对使用超过 5 年的仪器，采用“性能衰减曲线”评估法，若精度衰减率超过 15% 则强制更新，替换为搭载 AI 算法的智能测量机器人，其自动目标识别与跟踪功能可减少 80% 的人工操作误差，数据采集效率提升 3 倍以上。

2.2 有效控制测量环境

环境干扰的控制需打造主动干预与智能补偿的协同机制，实现对多因素影响的精准管控。温度调控构建“时空双维”防护网，空间上采用梯度布点的传感器阵列，在监测区域按 5 m 间距布设 10 组温湿度传感器，实时绘制三维温度场分布图，当局部温差超过 5 °C 时自动推送预警信息；时间上建立 72 小时预报模型，结合历史数据预测温度变化趋势，优先选择每日 6 小时 ~ 8 小时进行测量，此时段混凝土建筑的温度梯度最小，变形量仅为正午的 1/5。风力防护实施分级响应策略，当风速处于 3 级 ~ 5 级时，启用三脚架的磁流变阻尼器，通过改变磁场强度调节阻尼系数，使设备振动振幅从 1.2 mm 降至 0.3 mm；风速超过 5 级时，切换至室内远程操控模式，利用无人机搭载测量模块，配合地面基站实现厘米级定位，避免人员现场作业的安全风险^[3]。电磁干扰防护构建多层隔离屏障，在变电站周边 200 m 范围内，测量设备外壳采用纳米晶合金材料，其磁导率可达 80 000，对 50 Hz 工频磁场的屏蔽效能超过 60 dB；数据传输采用跳频扩频技术，在 2.4 GHz 频段内每秒切换 100 次频率，避开电磁干扰峰值区间，使数据丢包率从 15% 降至 0.5% 以下。

2.3 提升测量人员的专业能力

人员能力建设需构建“三维度”培养体系，实现操作技能、误差判断与应急处置的全面提升。操作培训采用“虚实结合”模式，在 VR 仿真系统中还原 12 种典型监测场景，包括暴雨天气、建筑遮挡、电磁干扰等，训练人员在虚拟环境中完成全站仪对中整平的标准动作，要求连续 10 次操作的对中误差均小于 0.8 mm，i 角校准偏差控制在 $\pm 8''$ 以内。引入“数据溯源”制度，每个监测数据需标注操作人员、设备编号、环境参数

等元数据,通过区块链技术形成不可篡改的记录链,当发现数据异常时可逆向追溯至操作环节。经验传承建立“案例—实操”转化机制,精选300个典型误差案例,按仪器误差、环境误差、操作误差等类别建立检索系统,每个案例配套三维动画演示误差产生过程,新手需完成50个案例的模拟处置才能参与现场作业^[4]。应急训练设置“突发场景库”,包括仪器突然断电、数据传输中断、极端天气来临等15种情况,训练人员在3分钟内启动备用方案,如采用备用电池组维持设备运行,通过北斗短报文传输关键数据。

2.4 科学选择与优化测量方法

测量方法的优化需建立“场景适配—缺陷弥补—流程再造”的三阶体系,实现误差源头控制。方法选择构建“多目标决策模型”,将监测精度、成本投入、时间效率等6项指标量化为权重值,通过层次分析法计算综合得分。例如:在软土地区深基坑监测中,分布式光纤传感技术得分85分,显著高于传统测斜仪的62分,因其能实现每米一个监测点的高密度布设,捕捉微小变形的空间分布特征;而在开阔区域的高层建筑监测中,GPS静态测量法得分90分,其平面精度可达1 mm+1 ppm,比全站仪极坐标法节省40%的作业时间。针对方法固有缺陷实施技术融合,全站仪长距离测量时,同步采集大气压力、湿度数据,代入修正公式 $\Delta D=D \times (0.268 \times 10^{-3} \times (t-20)-0.0026 \times \cos 2 \phi-0.00028)$ 实时补偿,使300 m距离的测量误差从 ± 5 mm降至 ± 1.5 mm;InSAR技术应用时,结合地面水准测量数据进行几何校正,对植被覆盖区采用“去相干点过滤算法”,剔除相干系数低于0.3的监测点,使数据有效性提升50%。流程优化引入“自适应闭环”机制,数据采集阶段设置三级阈值,当变形速率超过1 mm/天,自动将观测频率从1次/天提升至3次/天;当变形量达到预警值的80%时,启动24小时连续监测模式。路线规划采用“蚁群算法”,通过模拟蚂蚁觅食路径优化观测顺序,使测站迁移时间减少25%,同时确保每个监测点的观测时段分布均匀,避免系统误差累积^[5]。建立“交叉比对”制度,对关键监测点采用两种以上方法测量,如GPS与全站仪数据的偏差需控制在 ± 2 mm以内,否则启动复核程序,确保方法选择的科学性。

2.5 基准点合理设置与维护

基准点的管控需构建“选址—建设—监测—更新”的全周期保障体系,确保测量基准的长期稳定。选址实施“三维地质评估”,通过地质雷达探测地下20 m范围内的断层分布、岩溶发育情况,采用标准贯入试验测定土层承载力,要求基准点所在位置的地基承载力特

征值 ≥ 300 kPa,压缩模量 ≥ 20 MPa,且距离活跃断层不少于50 m。在软土地区,需选择在地质钻探揭示的硬土层顶面布设,该层土的黏聚力应大于50 kPa,内摩擦角不小于 25° ,避免后期沉降。建设执行“超标准设计”,基准点主体采用 $\Phi 300$ mm的316L不锈钢桩,桩身埋深不小于8 m,底部嵌入中风化岩层不少于2 m,桩周采用M30水泥砂浆注浆加固,形成直径1.5 m的扩大头,单桩竖向承载力特征值 ≥ 1000 kN。顶部设置强制对中装置,其对中误差 ≤ 0.1 mm,配备不锈钢防护罩,防护等级达到IP68,可抵御暴雨、沙尘暴等恶劣天气。日常维护实施“立体化监测”,每周用水准仪按二等水准测量精度观测高程变化,往返测较差不超过 $0.5 \sqrt{L}$ mm;每月用全站仪按一级导线精度测量平面位移,测角中误差 $\leq 5''$,边长相对中误差 $\leq 1/30000$;每季度进行一次地质雷达扫描,监测基准点周边5 m范围内的土层密度变化。建立“健康度指数”评估模型,综合沉降速率、平面位移、周边地质条件等参数,当指数低于80分时启动备用基准点,采用加权平均法对历史数据进行修正,权重按基准点稳定性系数分配,确保衔接误差 ≤ 1 mm。备用基准点按主基准点标准建设,数量不少于3个,形成三角形分布的监测网,提高整体系统的冗余度。

3 结束语

建筑物变形监测的误差控制是保障工程安全的关键环节。本文梳理的误差来源与改进措施,形成了从问题识别到解决方案的完整逻辑链。仪器管理的精细化、环境控制的协同化、人员能力的体系化、方法选择的科学化及基准点维护的常态化,共同构成了误差防控的立体网络。这些措施在实际应用中可有效提升监测数据的可靠性,为建筑结构安全评估提供精准依据。未来需结合技术发展持续优化方案,推动变形监测精度向更高维度突破,为工程建设的安全与稳定筑牢防线。

参考文献:

- [1] 姜铭煊,李冉,刘宁.基于移动RTK的建筑工程测量技术研究[J].自动化应用,2025,66(05):230-232.
- [2] 曲强.数字测量技术在建筑工程测量中的应用[J].住宅与房地产,2023(32):98-100.
- [3] 王勤明.试论现代测绘技术在工程测量中的应用[J].世界有色金属,2023(12):132-134.
- [4] 王丹.智能化时代的工程测量服务框架[J].工程勘察,2023,51(01):1-6.
- [5] 张吉.GPS测量技术在工程测绘中的应用及特点[J].房地产世界,2022(06):91-93.