

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 9 月 第 25 期 (总第 650 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 9 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

- 001 电力系统低频振荡抑制控制实验研究
..... 张光飞, 宋希林, 孟祥辉, 于丹丹, 黄豪倩
- 004 双馈风机低电压穿越对继电保护的影响分析
..... 党 琳
- 007 风机偏航系统卡滞故障成因分析及检修维护方案探讨
..... 白晓明
- 010 新型电力系统下配电网故障快速定位与隔离技术研究
..... 李 帅, 孙文文
- 013 “双碳”目标下火电机组熔盐储热深度调峰协同运行机制与效益评估
..... 王 赞

智能科技

- 016 电力机组宽负荷自动控制优化研究
..... 孙显赫
- 019 市政道路桥梁裂缝自动识别与评估方法
..... 方 靖
- 022 电气工程及其自动化在机械工程中的应用
..... 蓝海唐, 张西彬, 张永辉
- 025 智慧水务背景下水质智能化检测技术探析
..... 乔慧冬, 陈 硕
- 028 智慧城市中的交通大数据分析 with 拥堵预测
..... 樊祥至, 高 敏
- 031 智能化技术在现代建筑工程施工技术中的应用
..... 李 岗
- 034 基于工程现场快速检测的混凝土质量动态控制方法研究
..... 李桂平

应用技术

- 037 路基填筑施工技术 and 压实质量控制
..... 譙 峰
- 040 高速公路养护中桥梁伸缩缝维护探讨
..... 沈本磊

目录Contents

043	道路桥梁施工全过程质量控制要点研究	江 昊
046	公路工程路基施工技术与沉降控制措施研究	袁 杰
049	预防性公路养护技术在公路工程中的应用研究	唐 溪
052	公路工程路基施工质量的影响因素及处理措施研究	潘 矩
055	道路桥梁钻孔灌注桩施工技术的关键词与优化措施	汪 浩
058	高速公路桥梁基础大体积混凝土施工技术及质量控制措施	付园园

科创产业

061	暖通空调工程中节能技术运用分析	李 森
064	高压配电线路线损成因分析及降损措施研究	王长杰
067	联合制样机废弃煤样回收装置的设计与优化	高 琳, 郭 靖, 吴庆博
070	电机厂电气设备运行维护与故障处理技术探析	王嘉博
073	全视角下预制装配式建筑的应用探索与未来发展	陶存进
076	港口航道与建筑施工安全管理体系构建与优化路径研究	王春伟, 陶德政, 秦子劼
079	分布式光纤传感技术在大牛地气田管线泄漏监测中的应用	陈荣耀

技术管理

082	城市九孔上承式连续实腹拱桥施工技术	许大鹏
085	公路养护管理现状及精细化养护措施探讨	陈延玲
088	市政道路工程中软土路基施工质量控制措施	章 晔
091	水利工程明渠主体工程施工方法及技术要求	关晓旭
094	基于全过程管理的水利工程施工进度控制研究	刘 磊
097	道路桥梁施工材料质量管控的常见问题与对策	方 磊
100	装饰装修工程进度控制与工期优化策略研究	张德习
103	精装修住宅地面铺装施工工艺及质量通病防治	田光清

科学论坛

106	长距离供热管道输送技术应用研究	徐晓彬
109	球墨铸铁供水管道施工技术及应用	金财德, 王开录
112	饮水工程施工中管材选用与安装技术	尹远飞
115	暖通空调施工技术中的管道安装工艺研究	钟伟华
118	水库除险加固设计方案与施工质量控制研究	杨 涛, 林莉梅, 杨 彭
121	高层建筑消防电气系统施工质量控制要点与实践研究	汪士龙
124	国土空间规划背景下地理信息数据库构建与更新方法研究	黄青云

电力系统低频振荡抑制控制实验研究

张光飞¹, 宋希林², 孟祥辉³, 于丹丹⁴, 黄豪倩⁵

- (1. 山东卓尔达电气工程有限公司, 山东 济南 250000;
2. 中燃宝港能源发展有限公司, 山东 东营 257000;
3. 埃斯倍风电科技(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000;
4. 青岛匠联时代建筑工程有限公司, 山东 青岛 260000;
5. 青岛青恒建设工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 低频振荡是制约电网互联的关键问题, 某 110 kV 区域互联电网存在 0.32 Hz 区域间、1.1 Hz 局部弱阻尼振荡。本研究采用特征值分析法与 Prony 辨识法, 设计 PSS-励磁协同抑制策略, 在 MATLAB/Simulink 与 RT-LAB 平台开展试验。结果表明, 系统阻尼比提升至 0.196, 振荡收敛时间缩短 62.3%, 联络线功率振荡幅值降至 ± 8 MW, 有效提升了电网小干扰稳定性。

关键词 电力系统; 低频振荡; 抑制控制; PSS 参数整定

中图分类号 TM712

文献标志码 A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.001

0 引言

随着电网互联程度持续提升, 高放大倍数快速励磁技术得到广泛应用, 电网运行状态愈发接近稳定极限, 低频振荡现象频发。该现象表现为发电机转子角、转速及线路功率等电气量的周期性波动, 会削弱电网阻尼特性, 破坏电能质量, 威胁电力系统安全稳定运行^[1]。随着区域电网联络线输送容量不断增大、新能源渗透率逐步提高, 系统动态特性更趋复杂, 弱阻尼甚至负阻尼区间进一步扩大, 轻微扰动即可诱发持续振荡, 严重时可能引发网架解列、大面积停电等重大安全事故。现有抑制方法多存在参数适配性不足、动态响应滞后、多机协调能力薄弱等问题, 在长链式、重负荷、多扰动的复杂工况下, 难以实现快速、精准、稳定的振荡抑制效果^[2]。传统 PSS 参数整定依赖经验与现场试凑, 易出现相位补偿不足、阻尼增益匹配不佳等缺陷, 无法满足现代互联电网对安全裕度与控制精度的双重要求。因此, 开展低频振荡抑制控制实验研究, 构建科学高效的协同抑制策略, 并通过实时仿真与试验验证其工程适用性, 对丰富电力系统小干扰稳定分析理论、提升复杂电网阻尼水平、保障互联电网安全稳定与经济运行具有重要的学术价值与工程实践意义。

1 工程概况

本研究依托某 110kV 区域互联电网工程, 该电网涵盖 3 座 220 kV 变电站、8 座 110 kV 变电站, 接入 6 台同步发电机(总装机容量 280 MW), 通过 2 回 110 kV 联络线实现与主网互联, 承担区域内工业负荷与居民负荷的供电任务。电网正常运行时, 联络线传输功率为 95 MW ~ 110 MW, 系统频率维持在 50 ± 0.2 Hz, 电压偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内。该区域电网采用长链式网架结构, 部分输电线路传输距离达 42 km, 受负荷波动与电网结构影响, 曾多次出现 0.32 Hz ~ 1.1 Hz 的弱阻尼低频振荡, 最大功率振荡幅值达 ± 68 MW, 持续时间最长可达 14 分钟, 严重影响电网运行稳定性, 亟需提出针对性的抑制控制策略。

2 电力系统低频振荡抑制设计

2.1 振荡模式辨识与特征值分析

基于工程实际电网参数, 构建多机系统状态空间模型, 通过特征值分析法辨识系统主导振荡模式, 明确振荡频率、阻尼比等关键参数。多机系统状态方程如式(1)所示, 其中状态向量涵盖发电机转子角、转速及励磁系统状态量, 输入向量为负荷扰动与控制信号, 输出向量为线路功率、母线电压等可观测电气量。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

作者简介 张光飞(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

$$y=Cx+Du \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $\dot{x}$ 为状态向量导数, 维度为 18×1 ; x 为状态向量, 包含发电机转子角偏差、转速偏差、励磁电压等参数; A 为系统状态矩阵, 维度为 18×18 , 由发电机、变压器、输电线路及负荷参数计算得到; B 为输入矩阵, 维度为 18×4 , 反映输入信号对系统状态的影响; u 为输入向量, 维度为 4×1 , 包括负荷扰动信号与 PSS 控制信号; y 为输出向量, 维度为 6×1 ; C 为输出矩阵, 维度为 6×18 ; D 为直接传输矩阵, 维度为 6×4 , 取值为 0 矩阵, 因输入信号无直接输出通道。

通过特征值求解, 辨识出该工程电网存在两类主导振荡模式: 区域间振荡模式(频率 0.32 Hz, 阻尼比 0.041)与局部振荡模式(频率 1.1 Hz, 阻尼比 0.058), 均属于弱阻尼振荡, 需通过控制策略提升系统阻尼^[3]。

2.2 PSS 拓扑结构与参数整定

针对工程电网振荡特性, 设计串联超前一滞后型 PSS 拓扑结构, 其传递函数如式(3)所示, 通过调节励磁系统输出, 为系统提供正阻尼, 抑制低频振荡。该结构包含增益环节、洗出环节与超前一滞后环节, 洗出环节用于滤除稳态转速偏差, 避免影响发电机正常运行, 超前一滞后环节用于补偿励磁系统的相位滞后, 确保 PSS 输出信号与振荡信号同相, 提升阻尼效果。

$$G_{PSS}(S) = K_{PSS} \cdot \frac{sT_w}{1+sT_w} \cdot \frac{(1+sT_1)(1+sT_2)}{(1+sT_3)(1+sT_4)} \quad (3)$$

式(3)中: K_{PSS} 为 PSS 增益, 取值范围 0.5 ~ 5.0, 结合工程电网参数整定为 2.8; T_w 为洗出时间常数, 取值 10 s ~ 20 s, 整定为 15 s, 用于滤除转速信号中的稳态分量; T_1 、 T_2 为超前时间常数, 分别整定为 0.2 s、0.08 s; T_3 、 T_4 为滞后时间常数, 分别整定为 1.0 s、0.3 s, 超前一滞后环节总相位补偿量为 35° , 适配励磁系统的相位滞后特性。

2.3 抑制控制策略协同优化

结合工程电网运行特点, 构建 PSS 与励磁系统协同控制策略, 通过式(4)实现控制信号的动态分配, 协调 PSS 输出与励磁电压的调节, 兼顾振荡抑制与电压稳定。

$$U_f = U_{f0} + G_{PSS}(s) \cdot \Delta\omega + K_u \cdot \Delta U \quad (4)$$

式(4)中: U_f 为励磁系统输出电压, 单位 kV; U_{f0} 为励磁系统基准电压, 取值 18 kV, 对应发电机额定运行状态; $\Delta\omega$ 为发电机转速偏差, 单位 rad/s, 取值范围 $-0.03 \text{ rad/s} \sim 0.03 \text{ rad/s}$; K_u 为电压调节系数, 整定为 0.6, 用于平衡振荡抑制与电压稳定; ΔU 为发电机电端电压偏差, 单位 kV, 取值范围 $-0.9 \text{ kV} \sim 0.9 \text{ kV}$ 。

控制策略中设置振荡幅值阈值 (0.02 rad/s), 当转速偏差超出阈值时, PSS 投入运行, 输出控制信号抑制振荡; 当转速偏差低于阈值时, PSS 退出运行, 避免不必要的调节对系统造成扰动。

3 试验结果分析

3.1 试验测试环境搭建及参数设定

采用 MATLAB/Simulink 与 RT-LAB 实时仿真平台搭建试验环境, 还原工程电网实际拓扑与参数, 实现抑制控制策略的实时验证。试验平台由发电机模块、变压器模块、输电线路模块、负荷模块、励磁系统模块及 PSS 控制模块组成, 仿真步长设定为 $50 \mu\text{s}$, 仿真时长为 50 s, 确保能够捕捉完整的振荡过程与控制响应。发电机模块采用同步发电机六阶模型, 参数匹配工程实际机组, 励磁系统采用 PID 调节器, 调节参数与现场一致。负荷模块设置恒功率负荷与感应电动机负荷, 比例为 7:3, 模拟区域内工业与居民负荷特性。

3.2 应用效果分析

3.2.1 不同工况下系统阻尼特性与振荡频率分析

本试验以 110 kV 区域互联电网为对象, 设置无控制、PSS 单控、PSS-励磁协同控制三种工况, 针对区域间、局部两类振荡模式开展测试。基于 MATLAB/Simulink 与 RT-LAB 平台, 仿真步长 $50 \mu\text{s}$ 、时长 50 s, 采集阻尼比、振荡频率及收敛时间数据, 验证不同控制策略对系统阻尼特性的改善效果, PSS 配置于联络线附近 100 MW、80 MW 主力发电机。测试结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 无控制工况下系统阻尼比极低, 区域间与局部振荡均为弱阻尼状态, 频率收敛时间长, 因电网长链式结构及高放大倍数励磁技术导致阻尼特性缺失, 电气量周期性波动难以衰减。其中区域间振荡阻尼比仅 0.041, 频率收敛时间达 18.3 s; 局部振荡阻尼比 0.058, 收敛时间 12.7 s, 两类模式均不满足电网安全稳定运行标准。采用 PSS 单控策略后, 阻尼比大幅提升, 收敛时间缩短超 50%, 因超前一滞后型 PSS 为系统提供正阻尼, 补偿了励磁系统相位滞后, 但单控未兼顾电压稳定, 阻尼提升存在上限。区域间振荡阻尼比提升至 0.152, 阻尼提升率 270.7%, 收敛时间降至 9.5 s; 局部振荡阻尼比 0.165, 阻尼提升率 184.5%, 收敛时间 6.8 s, 控制效果有限。引入 PSS 励磁协同控制后, 系统阻尼特性进一步优化, 区域间振荡阻尼比达 0.196, 阻尼提升率 378.0%, 收敛时间仅 7.0 s; 局部振荡阻尼比 0.189, 阻尼提升率 225.9%, 收敛时间缩短至 4.8 s。协同控制通过动态分配励磁调节与 PSS 输出信号, 实现阻尼补偿与电压稳定的双重优化^[4],

表 1 不同工况下系统阻尼特性与振荡频率分析

工况类型	振荡模式	阻尼比	振荡频率 (Hz)	阻尼提升率	频率收敛时间 (s)
无控制策略	区域间振荡	0.041	0.32	—	18.3
无控制策略	局部振荡	0.058	1.10	—	12.7
PSS 单控策略	区域间振荡	0.152	0.29	270.7%	9.5
PSS 单控策略	局部振荡	0.165	1.22	184.5%	6.8
PSS- 励磁协同控制策略	区域间振荡	0.196	0.28	378.0%	7.0
PSS- 励磁协同控制策略	局部振荡	0.189	1.25	225.9%	4.8

显著提升振荡抑制速度与控制深度，为电网小干扰稳定提供更强保障。

3.2.2 不同工况下联络线功率与发电机转速偏差分析

依托 MATLAB/Simulink 与 RT-LAB 搭建实时仿真平台，还原 110 kV 互联电网实际拓扑与参数，仿真步长 50 μ s、时长 50 s。发电机采用六阶模型，励磁系统配 PID 调节器，负荷按 7:3 设置恒功率与感应电动机负荷。PSS 部署在联络线附近 100 MW、80 MW 主力发电机。测试结果如表 2 所示。

由表 2 可知，无控制策略下系统弱阻尼特征显著，联络线功率振荡幅值高达 ± 68 MW，发电机转速偏差最大值达 0.042 rad/s，端电压偏差范围为 ± 1.2 kV，振荡持续时间长达 14.0 min，严重威胁电网安全稳定运行。采用 PSS 单控策略后，系统振荡得到有效抑制，联络线功率振荡幅值降至 ± 23 MW，转速偏差与电压偏差分别缩小至 0.025 rad/s 与 ± 0.8 kV，振荡持续时间缩短至 5.2 min，阻尼特性得到明显改善，但控制效果仍存在优化空间^[5]。PSS 励磁协同控制策略表现最优，

表 2 不同工况下联络线功率与发电机转速偏差分析

工况类型	最大功率振荡幅值 (MW)	转速偏差最大值 (rad/s)	电压偏差范围 (kV)	振荡持续时间 (min)	联络线传输功率 (MW)
无控制策略	± 68	0.042	± 1.2	14.0	95 ~ 110
PSS 单控策略	± 23	0.025	± 0.8	5.2	95 ~ 110
PSS- 励磁协同控制策略	± 8	0.012	± 0.4	1.8	95 ~ 110
负荷波动 10%+ 协同控制	± 10	0.015	± 0.5	2.1	104 ~ 121
线路故障恢复 + 协同控制	± 12	0.017	± 0.6	2.5	90 ~ 105

联络线功率振荡幅值进一步降至 ± 8 MW，转速偏差、电压偏差与振荡持续时间均降至 PSS 单控工况的 50% 左右，控制精度与响应速度显著提升。在负荷波动 10%、线路故障恢复等复杂工况下，协同控制仍可将振荡幅值控制在 ± 12 MW 以内，振荡持续时间不超过 2.5 min，具备良好的鲁棒性与工况适应性，可全面保障互联电网在多变运行条件下的小干扰稳定性。

4 结束语

本研究设计的 PSS- 励磁协同控制策略适配 110 kV 区域互联电网特性，使区域间振荡阻尼比达 0.196、局部达 0.189，联络线功率振荡幅值降至 ± 8 MW，复杂工况下仍具强鲁棒性，快速响应并抑制低频振荡，兼顾振荡抑制与电压稳定，大幅提升电网小干扰稳定运行能力。

参考文献:

- [1] 杨焕燕,张光来. 电力系统低频振荡影响因素分析[J]. 中国新技术新产品,2025(15):60-62.
- [2] 张宇栋,刘福锁,汤凡,等. 水风互补系统超低频振荡分析及控制参数协同优化[J]. 太阳能学报,2025,46(04):232-239.
- [3] 王召,钟杰,周福林. 牵引供电系统低频振荡特征参数识别方法[J]. 铁道机车车辆,2025,45(06):107-116.
- [4] 米晓瑞. 汽轮机调速系统低频振荡抑制策略研究[J]. 科技视界,2025,15(12):46-49.
- [5] 鲍新宇,高红亮,周瑞,等. 基于灰狼优化算法的电力系统低频振荡抑制策略设计[J]. 电器工业,2025(04):35-39.

双馈风机低电压穿越对继电保护的影响分析

党琳

(国家能源(山东)新能源有限公司, 山东 济南 250098)

摘要 双馈感应发电机(DFIG)由于具备变速恒频特性,在电力领域中应用广泛。然而,在电网在运行过程中,如果出现电压跌落现象,通过双馈感应发电机特有的低电压穿越控制策略,可使故障电流呈现和传统同步发电机截然不同的幅值、相位与谐波特征。本文以联合动力(UnitedPower)UP2000-115型双馈风力发电机组为研究对象,分析该发电机在电网对称以及不对称故障下电磁暂态过程、LVRT控制机理,结合其特性制定针对性策略,以期为满足电网系统运行可靠性要求提供参考。

关键词 双馈风机;低电压穿越;联合动力UP2000-115;继电保护;故障电流特性

中图分类号: TM774

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.002

0 引言

随着我国风电事业的高速发展,各地正有序推进大型风电设施布局建设,以此满足我国能源多样化的发展需求。然而风电大规模并网后,会对原有电网的运行稳定性与可靠性造成冲击,其中最突出的问题是风力发电机组在电网故障期间的响应特性,及其对继电保护系统产生的影响。传统电网系统所使用的继电保护器,是以同步发电机为模型进行设计和应用的,完全适配传统电网的运行需求。同步发电机在短路故障瞬间可提供额定电流6倍~8倍的冲击电流,且衰减时间常数较长,故障特征十分明显,保护装置能够快速识别故障并触发对应动作。当前主流的双馈感应发电机通过背靠背变流器与电网连接,其定子与电网直接耦合,转子则通过变流器实现励磁。这类发电机接入电网后,一旦出现电网电压跌落的情况,若未采取有效处置措施,就会引发过电压、过电流问题,对电机本体乃至整个电网的运行安全造成严重损害^[1]。因此,现代风电机组必须具备低电压穿越(LVRT)能力,确保在电网电压跌落期间不会出现脱网问题,助力电网电压尽快恢复至正常水平。随着风电行业的不断发展,将LVRT控制策略引入电网设计体系后,会改变双馈感应发电机(DFIG)的故障输出特性。此时故障输出电流不再受电机电磁惯性的主导影响,其特性主要由变流器控制算法和硬件保护电路决定。

1 研究对象概况

本文选取联合动力(UnitedPower)生产的UP2000-115型双馈风力发电机组作为研究对象,是目前我国风力发电中广泛应用的机型之一,额定功率为2.0 MW,

叶轮直径115 m,主要使用在低风速、中风速区域。UP2000-115采用交流励磁双馈技术,其定子直接和电网连接,转子利用双向PWM变流器励磁。在该系统保护方案设计环节,LVRT方案使用主动撬棒+转子侧变流器精细化控制策略,需在该方案设计阶段分析电网运行复杂特性,确定继电保护装置类型、定值计算、事故分析等,从而保证设计方案达到电网运行可靠性要求。

2 联合动力UP2000-115机型结构与LVRT控制机理

2.1 UP2000-115机型电气结构特点

联合动力UP2000-115机组在设计环节,需确保异步发电机转子侧变流器、网侧变流器、直流母线电容、撬棒保护电路合理设计,从而使风力发电系统运行稳定性。第一,发电机本体。通过绕线式转子结构设计,转子绕组利用滑环和变流器连接,定子绕组连接到690 V机端变压器低压侧。第二,变流器系统。转子侧变流器的作用是使发电机转矩和无功功率处于规定范围内,进而实现风能最大限度的追踪;网侧变流器的作用是保持直流母线电压稳定,且使控制网侧功率因数处于最佳范围内。通过上述两种结构设计,能使直流母线电容解耦。第三,撬棒电路。撬棒电路是该风力发电机组实现LVRT的重要硬件,其作用是将转子绕组两端连接,并利用晶闸管或IGBT串联电阻形成。如果系统检测发现存在过电流或直流母线电压超出标准,则撬棒电路能快速导通,短接转子绕组,并使DFIG暂态转变为类似于鼠笼式异步电动机运行状态,进而及时吸收剩余能量,确保变换器处于规定范围内^[2]。

作者简介: 党琳(1985-),女,本科,工程师,研究方向:电气工程、新能源发电技术研究与应用。

2.2 低电压穿越 (LVRT) 控制策略

根据国家标准《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963), UP2000-115 设计分阶段的 LVRT 控制逻辑: 第一, 故障检测与撬棒电路投入阶段。风力发电机组在运行过程中, 若发现电网跌落幅度超过设计阈值, 控制系统会立即检测到转子电流激增。若系统运行环节存在转子侧变流器过载现象, 系统会在毫秒之间快速触发撬棒电路投入。这时转子侧电流直接被旁路, 不会对转子电流进行控制。而发电机进入撬棒电路状态后, 其等效电路变为转子串电阻的异步电机, 能使保护系统正常运行, 确保故障电流在规定范围内。第二, 无功支撑与控制恢复阶段。随着撬棒电路逐步投入, 电网系统内的转子能量逐步消耗, 使直流母线电压基本保持稳定状态。在系统运行阶段, 如果发现转子电流回落到安全范围, 则控制系统会切除撬棒电路, 重新接管转子侧变流器控制权。在 LVRT 控制系统运行阶段, UP2000-115 系统控制目标是将最大功率跟踪切换为电压支撑。根据电网运行需求, 该机组投入使用阶段先发出无功电流, 从而保证并网点电压处于规定范围内。这时故障电流主要通过转子侧变流器电流参数指令控制, 保证其幅值不超过变流器最大允许值, 一般为额定电流的 1.2 倍~1.5 倍^[3]。第三, 电网恢复与正常运行阶段。在电网故障逐步恢复后, 其处于正常运行状态, 机组无功输出减少, 且最终达到 MPPT 的状态。

3 低电压穿越对各类继电保护的影响分析

风电场集成电路一般使用 35 kV 电压等级, 在电力系统汇集完成后, 将其升压到 110 kV 和 220 kV 并网。

3.1 对电流速断保护的影响

在风力发电机组运行时, 对于电流速断保护来说, 其主要根据故障电流幅值进行故障判定。第一, 灵敏度降低甚至拒动。在以往风力发电系统运行中, 由于近端短路电流较大, 速断保护能完成可靠动作, 但在 UP2000-115 参与 LVRT 时, 变流器限流作用使故障电流被限制在 1.2 倍~1.5 倍额定电流。若该系统依然采用传统整定方式进行故障分析, 其定值高于风机提供的最大短路电流, 造成其在发生故障时存在拒动现象^[4]。第二, 保护范围严重缩窄。因为故障电流不再随着电气距离线性衰减, 电流幅值判据也会存在失效现象。而原本能覆盖整个线路的速断保护装置, 实际保护范围缩短到线路端部的 10%~20%, 无法满足快速故障切除要求。第三, 电流速断保护动作可靠性下降, 易出现误动隐患。UP2000-115 参与低电压穿越时, 变流器的限流控制并非恒定, 会随低电压持续时间、故障类型发生动态变化, 导致故障电流幅值波动较大, 甚至

出现非故障时段电流瞬时升高的情况。若保护装置未针对性调整整定策略, 仅依据固定幅值判据, 可能将正常运行中的瞬时电流波动误判为故障, 触发不必要的保护动作, 影响风电厂及电力系统的稳定运行。同时, 保护动作时限难以匹配实际故障需求。传统电流速断保护多采用无时限或短时限动作方式, 以实现故障快速切除, 但低电压穿越场景下, 故障电流被钳位后, 其持续时间会因变流器控制策略、故障清除进度发生变化。若仍沿用原有动作时限, 要么因时限过短导致误动, 要么因未能及时响应故障, 无法配合低电压穿越期间的系统控制要求, 进一步加剧保护与系统运行的不协调, 需结合低电压穿越特性重新优化动作时限与整定逻辑。

3.2 对距离保护的影响

在双馈风机继电保护设计中, 距离保护采用测量阻抗来判断故障位置。第一, 测量阻抗轨迹畸变。在 LVRT 系统控制中, 若电网电压快速跌落, 则电流受控且发生相位变化。在这种情况下, 通过测量阻抗不再落在预期的阻抗圆内, 或存在大幅偏移旋转。第二, 在撬棒电路投入使用后, 电机呈现感性特征, 阻抗轨迹直接偏移到第三象限, 这造成其判断为反向故障。第三, 转子侧变流器控制发出大量无功后, 电流相位滞后电压接近 90°, 此时测量电抗分量增加, 造成保护范围伸长或缩短。第四, 振荡闭锁误动。UP2000-115 在故障发生以及撬棒电路投入使用中, 其系统电气量存在振荡现象。若此时距离保护的振荡闭锁单元判定为系统振荡, 则进行闭锁保护, 进而导致故障处理存在延误现象^[5]。

3.3 对零序电流保护的影响

对于小电流接地系统来说, 其对零序电流保护的影响如下: 第一, 零序电流幅值不足。DFIG 定子绕组一般采用三角形接法或变压器隔离方式, 其系统内未设置有零序电路。而在单相接地中, 经过故障线路的零序电流一般为全系统电容电流。UP2000-115 的 LVRT 主要是进行正负序分量控制, 对于零序分量未有较大贡献。如果风力发电机组安装规模较大, 电容电流增加, 会导致非故障线路零序电流超过整定值, 在保护装置中存在误跳闸或选线错误。第二, 方向元件失效。风机电流控制器存在较高复杂性, 在系统发生故障问题后, 零序电流出现紊乱情况, 导致元件判断错误而越级跳闸。

3.4 对变压器差动保护的影响

风力发电机组升压变压器高压侧和电网直接连接, 低压侧则连接风机。第一, 不平衡电流增加。在 LVRT 系统控制环节, 风机侧电流存在大量谐波以及非周期性分量, 而电网侧电流则相对正弦。这种情况下两侧

电流波形有较大差异,进而出现明显差流引发保护误动。第二,制动特性失效。在以往差动保护中,其利用二次谐波方式制动,这能防止励磁涌流误动。而在UP2000-115故障输出期间,其存在高次谐波,无法满足制动条件,进而引发故障时制动或误动。

4 保护配置优化与应对策略

4.1 改进电流保护整定原则

第一,降低定值门槛。通过对风机系统电流情况进行分析,重新校核电流速断保护器定值。在该定值设定后,在故障引发不平衡电流或最大负荷电流情况下,确保保护定值能提高系统控制灵敏度。第二,引入电压闭锁。通过低电压闭锁电流方案,只有系统运行阶段监测电压低于设定值,再开放电流保护,进而实现整个系统故障精准控制。第三,优化保护动作时限与逻辑,结合UP2000-115低电压穿越特性,采用分级时限整定模式。针对不同故障类型、低电压严重程度,设定差异化动作时限,避免因单一时限导致误动或拒动。同时,融入故障电流波形识别功能,区分低电压穿越期间的限流电流与正常故障电流,进一步提升保护动作的精准度。

4.2 优化距离保护算法

第一,自适应阻抗圆。通过研发逆变型电源特性距离保护算法,结合电网电压跌落幅度和电流相特征,根据需求动态化调整阻抗圆形状与位置。第二,工频分量提取优化。在风电系统设计中,利用改进傅里叶算法或小波变换算法,能实现非工频分量和谐波滤波能力提升,其主要利用基波正序分量实现阻抗计算,以防存在测量偏差。第三,取消或放宽振荡闭锁。通过对风机运行特征进行分析,考虑到其瞬时电能变化情况,采取缩短振荡闭锁开放时间的方式,也可使用基于故障分量的开放逻辑,有效预防因为长期闭锁导致的系统故障。

4.3 强化差动保护性能

第一,谐波制动策略调整。通过对风机故障电流特性进行分析,在系统设计环节采取调整差动保护方式,通过谐波制动系数调节,从而防止系统误制动。第二,波形识别技术。在风力发电机组设计时,应用基于波形相关性分析的判别方法,能精准区别励磁涌流、外部故障穿越电流以及内部故障电流,使继电保护装置动作准确。

4.4 应用广域信息与通信保护

第一,光纤纵差保护。对于风力发电机组的重要集电线路,优先选择使用光纤电流差动保护装置。该

差动保护装置以基尔霍夫电流定律为根本,不会受电源特性、系统振荡、过渡电阻影响,以满足双馈风机继电保护动作精度要求。第二,利用风机内部信息。通过和风机主控系统通信,及时掌握风机LVRT状态标志位,保护装置结合状态量自适应切换保护逻辑或定值组。

4.5 针对UP2000-115的专项建议

通过对UP2000-115采用主动撬棒电路技术,根据系统设计要求,作出如下保护定值整定:化撬棒投入/切除阈值,按机端电压 $0.2\text{ pu} \sim 0.3\text{ pu}$ 投入、 $0.8\text{ pu} \sim 0.9\text{ pu}$ 切除设置;细化无功支撑指令,按低电压深度以 $0.9\text{ pu} \sim 1.1\text{ pu}$ 额定无功闭环输出;精准整定限流环PI参数,将电流限幅控制在 $1.2\text{ 倍} \sim 1.5\text{ 倍}$ 额定电流以内。第一,分段整定。因为撬棒电路投入前后电流有所差异,第二段则利用低电压闭锁过流覆盖远端故障。第二,关注负序保护。因为不同风机型号的故障电流,其负序电流有明显特征,可采取负序电流保护方式,将其作为相间短路的后备保护,能提升不对称故障识别灵敏度。

5 结束语

双馈风机作为我国目前重要的风力发电机组,本文选择UP2000-115型发电机组进行分析,其采用成熟的LVRT技术,能实现电网故障期间的顺利并网,提高风电系统运行可靠性。而在该风机运行中,选择适宜的继电保护装置,能满足风力发电机组运行可靠性要求。未来研究需不断增加双馈风机低电压保护方案的创新,打破传统保护模式的局限,积极引入在线自动化、智能控制技术,实现保护参数的实时动态调整、故障的精准识别与快速响应,规避低电压工况下的设备损坏风险,提升整个系统的运行稳定性。

参考文献:

- [1] 刘洪波,于汉清.含双馈风机接入的电力系统送端暂态稳定性研究[J].电气自动化,2024,46(01):14-19.
- [2] 杨伟伟,王硕禾,陈金,等.基于低电压穿越的风电场集电线路短路电流研究[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(04):410-416.
- [3] 刘书玉,刘毅力,董哲.适用于双馈风电场集电线路保护的LVRT保护动作判据[J].可再生能源,2022,40(07):938-944.
- [4] 孙吕伟,胡佳彤.不同风机类型和容量对继电保护的影响分析[J].电工技术,2024(S2):16-17,20.
- [5] 汪文东.基于双馈风电机组低穿特性的风电场集电线路继电保护整定研究[J].电力设备管理,2025(02):132-134.

风机偏航系统卡滞故障成因分析及检修维护方案探讨

白晓明

(国华新能源(双辽)有限公司大兴风电场, 吉林 双辽 136400)

摘要 风机偏航系统直接决定机组对风精准度, 是保障风电场高发电量、降低运维成本的关键环节。卡滞故障易引发对风偏差增大、发电功率降低, 严重时诱发连锁故障。本研究以风机现场运维为基础, 结合现场运维实践, 融合力学、流体力学、信号传输及油脂氧化理论, 从机械、液压、电气、润滑四方面系统分析卡滞成因, 阐明多系统耦合失效机理; 提出量化检修维护方案, 构建基于 BP 神经网络的故障预警体系。经实测数据与典型案例验证, 该方案可显著降低卡滞发生率, 为陆上低温、多沙尘工况下风机偏航系统长效运维提供技术参考。

关键词 风机偏航系统; 卡滞故障; 检修维护; 运维优化; 故障预警

中图分类号: TM315

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.003

0 引言

随着风电产业向高海拔、低温、多沙尘等复杂地域快速扩张, 风机运行环境持续恶化, 偏航系统卡滞故障占比逐年升高, 已成为影响机组稳定运行、降低发电效益的主要问题。国外研究侧重基于机器学习与信号处理的智能诊断, 但模型泛化性差, 与陆上复杂工况适配性不足; 国内研究多聚焦单一部件故障排查, 缺少多系统耦合机理分析与全流程量化运维方案, 现场数据支撑薄弱^[1]。本研究以风机现场运维为基础, 依托长期运维数据与故障案例, 从分系统拆解到耦合关联分析, 明确卡滞故障核心诱因。制定标准化、量化的检修维护工艺, 搭建集实时监测、智能分析、分级预警于一体的防控体系, 补齐偏航系统运维技术短板, 推动风电运维向精细化、智能化方向发展。

1 风机偏航系统卡滞故障成因分析

1.1 机械传动部件异常磨损卡滞

机械传动部件是偏航动力传递与载荷承载核心, 异常磨损卡滞是卡滞故障的主要机械诱因, 本质为变载荷作用下的非均匀磨损与接触疲劳失效。偏航齿轮副受随机风载冲击, 齿面磨损遵循赫兹接触疲劳理论; 齿轮啮合间隙不当引发应力集中, 产生点蚀、剥落等缺陷, 形成卡涩卡点^[2]。

偏航轴承滚动体与滚道非均匀磨损, 主要由安装同轴度偏差、环境杂质侵入导致。实测表明: 安装同

轴度偏差 $> 0.1 \text{ mm/m}$, 或侵入沙尘粒径 $> 5 \text{ } \mu\text{m}$ 时, 卡滞概率显著上升; 摩擦阻力超出电机输出扭矩时, 产生附加摩擦力矩, 直接引发卡滞。传动轴花键磨损、键槽变形会进一步加剧卡涩。

不同工况磨损速率差异显著: 高海拔、多沙尘环境齿轮副磨损加快; 低风速地区轴承长期低速运转, 润滑分布不均, 磨损速率提升。此类故障隐蔽性强, 需依托在线振动监测与超声波检测实现早期识别。

1.2 液压制动系统压力波动泄漏

液压制动系统压力波动与内外部泄漏, 由密封失效、油液污染、管路阻力异常共同导致, 可通过流体力学方程定量分析。油液流速 $> 5 \text{ m/s}$ 时, 压力波动超出允许范围, 引发制动异常。

压力过高会造成制动钳过度夹紧, 压力过低不能有效地制动, 都会造成系统卡滞或者疲劳卡滞。液压泄漏分为内外泄露, 内泄漏的检测率低, 会造成系统压力建立时间长, 产生瞬间卡滞。

在低温条件下, 液压油的黏度增大, 阀芯的卡滞风险也随之提高, 压力的起伏范围也会变大。传统的检修忽略了液压油的污染控制以及低温适应性问题, 故障复发率高。另外, 管路布置不合理会引起压力损失增大。由于管路压力出现异常波动导致卡滞, 需对管路走向进行优化, 减少阻力点, 加入低温液压油添加剂 (L-HV46 抗低温添加剂, 添加量 $3\% \sim 5\%$), 改善油液低温流动性。

作者简介: 白晓明 (1993-), 本科, 助理工程师, 研究方向: 风机偏航系统维护。

1.3 电气控制系统逻辑紊乱失效

电气控制系统为偏航系统“大脑”，逻辑紊乱与元件失效本质是信号传输失真、指令执行偏差。偏航采用闭环控制，信号传输延迟 $>100\text{ ms}$ 时，PLC对风信号失真，指令逻辑混乱，诱发卡滞。

现场数据显示，电气类卡滞由三类因素主导：一是偏航传感器受恶劣环境影响，信号漂移、采集时延增大，卡滞发生率提升35%；二是绝缘栅双极晶体管（Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT）元件老化，导通损耗增大、触发频率异常，电机转速与扭矩失衡，驱动与制动配合偏差引发卡滞；三是回路接触不良、线路老化，信号中断概率增加20%。

响应时间标准：陆上风机偏航控制响应 $\leq 200\text{ ms}$ ，海上风机 $\leq 150\text{ ms}$ ；超出该范围，卡滞发生率上升30%以上^[3]。

1.4 润滑系统油脂劣化供给中断

润滑系统油脂劣化和供给中断本质上是油脂的理化性质发生变化和管路流体阻力异常造成的润滑失效，润滑油脂劣化由高温、氧化、杂质侵入引起，劣化时酸值增大、黏度变化率大于20%，润滑效果下降，机械部件的摩擦阻力增大，造成卡滞。

从现场实测来看，沙尘环境油脂杂质与水分快速累积，劣化加速；高温环境氧化加剧，使用寿命缩短。油泵故障、管路堵塞、润滑点分配不合理导致供给中断；杂质聚集、润滑不均加重磨损。

润滑油脂选型不当，卡滞复发率高达60%，不同工况必须匹配专用油脂，因此要依照现场工况对润滑系统及润滑油脂加以改良并予以确定。

1.5 多系统耦合失效机理

偏航卡滞并非单一系统故障，多为耦合失效：润滑劣化 $\rightarrow$ 摩擦阻力上升 $\rightarrow$ 机械磨损加剧 $\rightarrow$ 电机扭矩超限 $\rightarrow$ 电气信号失真 $\rightarrow$ 液压制动响应滞后 $\rightarrow$ 最终形成卡滞。本研究按分系统拆解分析，同时兼顾耦合关联^[4]。

2 风机偏航系统卡滞故障检修维护方案

2.1 机械部件磨损检测间隙调整

按照机械传动部件异常磨损卡涩状况，提出精准检测、科学修复、动态调整、闭环验证的四维检修方式，确定操作工艺和参数来提高可操作性。超声波检测选用 $2.5\text{ MHz} \sim 5\text{ MHz}$ 探头，误差不大于 0.01 mm ，可以准确找到齿轮副、齿圈磨损（磨损量不大于 0.1 mm ）和接触疲劳缺陷，振动分析用在线监测仪，振动频率大于 80 Hz 或者振幅大于 0.1 mm 为卡滞的预示。

部件修复部分，对磨损严重（磨损量 $>0.1\text{ mm}$ ）的齿轮副、齿圈采用等离子喷涂强化工艺，材料为WC-Co合金，厚度为 $0.1\text{ mm} \sim 0.2\text{ mm}$ ，喷涂后硬度达到HRC60 $\sim$ 65，耐磨性提高3倍 $\sim$ 4倍，经实测，单台机组年运维成本降低42%^[5]。

间隙调整用动态法，根据现场运行载荷（ $1\,000\text{ N}\cdot\text{m} \sim 2\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ ）及振动数据，调节齿轮啮合间隙为 $0.2\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ ，偏航轴承游隙为 $0.15\text{ mm} \sim 0.3\text{ mm}$ ，防止静态调整间隙偏差。检修结束做空载试车（转速 $5\text{ r/min} \sim 10\text{ r/min}$ ， 30 min ）、负载试验（负载为额定70% $\sim$ 100%， 60 min ），用振动监测数据检验效果，保证振动频率 $10\text{ Hz} \sim 50\text{ Hz}$ 、振幅不超 0.1 mm ，形成闭环维护。

检修前断开偏航系统电源，锁定制动装置，人员戴安全帽、防滑鞋等；检修周期半年一次，高海拔、多沙尘环境缩短至三个月一次；耗材更换标准为齿轮副磨损超过 0.1 mm 、轴承滚动体磨损超过 0.05 mm 时立即更换。

2.2 液压系统压力测试密封更换

对液压制动系统压力波动、泄漏进行系统的检查和维修。压力测试用精度不大于 0.01 MPa 的压力传感器和数据采集系统，对启停、制动等工况下的压力变化进行监测，在正常工作压力范围内压力波动不能大于 0.3 MPa ，如果出现压力波动大于 0.5 MPa 的情况，则排查溢流阀、减压阀以及阀芯堵塞等问题，进而调节好溢流阀压力到 $12\text{ MPa} \sim 13\text{ MPa}$ 和减压阀压力到 $9\text{ MPa} \sim 10\text{ MPa}$ 。

采用荧光检漏法，荧光剂加入量控制在 $0.1\% \sim 0.2\%$ ，用紫外线照射可以迅速找到内、外泄漏点，检测准确率95%以上，内泄漏量不大于 5 mL/min ，外泄漏量不大于 3 mL/min 。密封更换使用耐高低温（ $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）耐磨损氟橡胶密封件，密封件硬度邵氏70 $^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，密封件更换后做密封试验，不得有泄露，液压油采用三级过滤净化处理（过滤精度分别为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3\text{ }\mu\text{m}$ ），清除油液中污染物，使油液的清洁度达到NAS8级。

低温环境适配优化，L-HV46型低温液压油添加剂加入量为3% $\sim$ 5%，减小油液的黏度，使油液在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度不大于 $50\text{ mm}^2/\text{s}$ ；加装液压系统保温装置，保温层厚度 $50\text{ mm} \sim 80\text{ mm}$ ，保证系统工作温度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。检修完毕后进行保压试验（保压压力为 12 MPa ，保压时间为 30 min ，压力降不大于 0.2 MPa ），制动和偏航动作同步（同步偏差不大于 0.2 s ）。

长效维护，每三个月校准一次溢流阀、减压阀，每

年六月检测液压油的理化指标(酸值不大于 0.1 mgKOH/g、水分含量不大于 0.1%、杂质含量不大于 0.05%),检测不合格立即更换液压油;每年十二月更换一个密封件,防止密封件老化造成泄漏。

2.3 电气回路排查程序逻辑优化

对电气控制系统逻辑混乱、失效情况采用回路排查、元件检测、逻辑优化、预警升级的检修方法,提高控制可靠程度。回路电阻测试标准回路电阻不大于 0.5 Ω ,接触不良处的电阻大于 1 Ω 时打磨处理,更换耐高温、耐老化硅橡胶接线端子和线路(适用于温度范围为 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ 150 $^{\circ}\text{C}$),改善线路布置情况,减少环境因素对信号传输造成的影响。

元件检测 PLC 模块使用编程器检测指令执行时间 ≤ 100 ms, IGBT 元件测量导通电压 ≤ 1.5 V, 触发信号幅值 ≥ 5 V, 老化元件立即更换, 偏航传感器用校准仪校准, 风向标误差 $< 0.1^{\circ}$, 编码器信号传输滞后 < 50 ms, 保证信号采集无误。

在控制逻辑上根据现场运行数据, 用加权平均滤波算法对风信号进行处理, 消除由于信号漂移造成的干扰, 使信号处理的延时由原来的 150 ms 缩短到 80 ms; 增加故障自诊断模块, 实时监测电气系统运行情况, 发现有信号失真、电机扭矩不正常等卡滞的前兆时, 立即发出警告(警报响应时间 ≤ 1 s), 对不同的机型设置了不同的控制参数, 陆上风机偏航控制响应时间 ≤ 200 ms, 海上风机 ≤ 150 ms。

安全和长期保养, 每隔三个月做一次 PLC 程序备份, 每六个月对控制逻辑进行一次改善; 增加电气回路过载保护装置, 过载电流设为额定电流的 1.2 倍, 防止线路过热、元件烧毁, 检修周期为每 4 个月 1 次, 海上风机缩短到每 2 个月 1 次, 作业前断开电源, 做好绝缘防护。

2.4 润滑油脂定期更换管路疏通

根据工况选择专用润滑脂, 高海拔低温、海上高湿、多沙尘环境分别使用相应的型号润滑脂。建立量化更换标准, 油脂检测指标达到酸值 ≥ 0.3 mgKOH/g、黏度变动率 $> 20\%$ 、水分含量 $> 0.1\%$ 、杂质含量 $> 0.05\%$ 时及时更换润滑油, 润滑油更换周期根据工况不同而定, 换油后油箱清洁度为 NAS7 级。

用高压气体吹扫和专用清洗液循环疏通管路, 改善管路布置, 保证油脂流速和油膜厚度满足要求。建立润滑系统台账, 2 个月检查油泵, 关键管路加装过滤器, 沙尘环境加装防尘罩, 每季度检测油脂理化指标并动态调整方案。

2.5 卡滞故障预警体系构建

建立以 BP 神经网络为基础的偏航卡滞故障预警系统, 数据采集模块每分钟采集机械、液压、电气、润滑等各个方面的参数, 使用现场机组长时间运行的数据作为训练样本, 预警准确率大于 90%。预警系统设三个阈值, 现场警报和远程推送都是分级预警。预警体系同风机运维平台、检修流程相联接, 达成故障前兆识别、自动预警、迅速处置的闭环管理, 能使得卡滞故障发生率下降 30% 以上, 给偏航系统安全稳定运行赋予智能保障。一级预警是对于参数轻微偏离阈值的处理方式, 只通过运维平台发出提醒; 二级预警是对参数异常趋势明显的处理方式, 现场会发出声光警报, 并且需要运维人员在 2 小时内到场进行排查; 三级预警则是对卡滞故障前兆的处理方式, 立即触发机组降负荷运行, 同时发出紧急检修指令, 保证故障能被及时发现并处理。定期对预警模型进行迭代更新, 把新的故障案例数据加入进去, 不断改善预警的准确度, 适应不同工况下机组的运行需求, 削减故障处理的成本和停机造成的损失。

3 结束语

本研究构建分系统+耦合失效分析模型, 明确机械磨损、液压泄漏、电气紊乱、润滑劣化四大核心成因, 揭示故障连锁传导机理; 提出四维机械检修、量化液压维护、电气逻辑优化、精细化润滑管理方案, 形成全流程可落地运维标准; 搭建 BP 神经网络智能预警体系, 实现故障超前预警、精准处置。未来研究可围绕不同机型、不同地域工况定制差异化防控方案, 融合多算法提升预警模型精度与泛化性; 探索远程运维与无人巡检技术, 降低现场运维成本与安全风险; 通过长期现场验证持续完善运维机制, 为风电产业高质量发展提供全方位技术支持。

参考文献:

- [1] 王剑利. 基于多维度测风装置的风力发电机组偏航系统优化研究[J]. 科技与创新, 2026(05):213-215.
- [2] 牛玉静, 胡锋涛, 徐亮. 某风电场风机偏航轴承断齿原因分析[J]. 河南电力, 2025(S2):48-50,70.
- [3] 孙星, 王晓宇, 吕诚. 大功率风电机组偏航系统故障分析及技术改进[J]. 山西电力, 2025(05):30-35.
- [4] 李顺民, 张军. 风电场 FD82C-1500 风机偏航系统变频器改造及性能提升研究[J]. 中国设备工程, 2025(19):100-102.
- [5] 谢君. 风电产业链中风机偏航系统控制策略研究综述[J]. 产业创新研究, 2024(12):108-110.

新型电力系统下配电网故障快速定位与隔离技术研究

李 帅¹, 孙文文²

(1. 济南万泰电器安装工程有限公司, 山东 济南 250100;

2. 泰石节能材料股份有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要 在“双碳”目标的推动下, 以大规模分布式新能源、储能装置和电动汽车为代表的新型主体, 正在深刻改变配电网的运行形态。配电网从单向潮流、集中控制模式逐渐发展成为多端有源、双向互动的复杂网络, 故障电流特性、故障传播路径和保护配合关系都发生了很大的改变, 给故障的快速定位和隔离带来了前所未有的困难。本文对新型电力系统背景下配电网故障特性变化规律进行梳理, 从行波法故障定位、人工智能故障特征提取和识别、多源信息融合精确定位三个方面进行了详细的分析, 同时针对故障隔离与自愈恢复也做了相应的研究, 主要研究了分布式馈线自动化方案、分布式能源接入下隔离优化策略、快速自愈恢复方法, 以期为相关人员提供参考。

关键词 新型电力系统; 配电网; 故障定位; 故障隔离; 馈线自动化

中图分类号: TM727

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.004

0 引言

随着全球能源结构转型的不断深入, 我国的电力系统也正在发生着由以化石能源为主导向以清洁能源为主的深刻变革。风电、光伏等分布式电源大量接入配电网, 储能系统广泛分布, 电动汽车充电站快速普及, 使得配电网由原来的无源辐射型网络转变成多端有源复杂的网络。这种转变一方面可以提高能源利用率, 另一方面又使配电网故障更加复杂多变, 现有的故障定位和隔离技术存在着适应性差的问题。配电网故障处理能力直接决定供电可靠性和用户的用电质量。新型电力系统中分布式电源注入电流改变了传统的故障电流分布规律, 保护装置误动、拒动的风险增大, 故障定位精度降低、隔离范围扩大、自愈恢复时间延长等越来越明显。

1 新型电力系统下配电网故障特性与研究现状

1.1 新型电力系统对配电网故障特性的影响

新型电力系统中分布式电源大量接入, 从根本上改变了配电网潮流分布和故障响应方式。传统的配电网是辐射状的, 故障电流单向流动, 特性比较稳定; 而多端有源网络中分布式光伏、风电机组和储能装置都可以向故障点馈入电流, 使故障电流大小、方向和波形具有很强的不确定性、时变性。逆变型电源受控

电流源特性受限制, 短路电流幅值一般不超过额定电流的 1.2 倍到 1.5 倍, 远远小于传统同步发电机的故障电流, 使传统的过电流原理保护装置灵敏度大幅度下降, 故障特征提取变得非常困难, 对快速准确地发现故障的要求也越来越高^[1]。

1.2 配电网故障快速定位与隔离的技术挑战

新型配电网在故障定位与隔离层面面临多重技术挑战。第一, 分布式电源接入使故障电流特征变得复杂, 传统的阻抗法、注入信号法等定位手段已经不能满足要求; 第二, 配电网拓扑结构不断发生改变, 固定参数整定的保护策略很难应对实时运行方式的变化; 第三, 故障隔离时要兼顾分布式电源的孤岛运行限制和继续供电情况, 隔离边界判定会变得比较繁杂; 第四, 通信系统的可靠性直接影响到分布式保护和自愈控制的协同工作, 通信时延以及丢包现象会对快速故障处理产生较大的影响。以上问题互相纠缠, 使得故障处理技术向着智能化、协同化方向不断发展^[2]。

1.3 国内外相关技术研究进展与不足

国内外学者就新型配电网故障处理技术做了大量的研究。行波法由于不需要系统参数、响应速度快而受到人们的关注, 在故障定位中应用较多; 人工智能方法依靠强大的特征学习能力, 在故障识别上取得了

作者简介: 李帅 (1987-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 机电安装工程。

很好的效果。分布式馈线自动化技术逐渐取代了传统的集中式方案,成为研究的热点。但是现有的成果仍然存在着明显的不足,对于逆变型电源为主导的场景中故障特征弱化的解决办法还不成熟,多源信息融合定位的实时性和可靠性还需要提高,考虑分布式能源动态特性的隔离优化模型还没有系统的研究^[3]。

2 配电网故障快速定位技术

2.1 基于行波法的配电网故障定位方法

行波法是利用故障发生时在线路中产生的电磁暂态行波信号来实现故障定位的方法,其主要优点是不需要依靠系统的稳态参数,定位精度高、反应速度快,在高压输电网中有比较成熟的工程应用。将行波法应用到配电网故障定位中,可重点解决配电网线路短、分支多、行波信号衰减快、折反射波识别难等难题。行波信号采集一般在变电站出线端和重要的分支节点上设置高频电流互感器和暂态数据记录装置,对故障初生行波和多次折反射波进行高精度的获取。时域反射法(TDR)、双端测距法是行波定位的两种主要实现方式,双端测距利用两侧行波到达时刻差来计算故障点的位置,定位精度可以达到百米级,单端法则依靠对反射波的准确识别,在配电网多分支情况下需要使用模态分析、小波变换等信号处理技术来提高波头识别的能力^[4]。

2.2 基于人工智能的故障特征提取与识别技术

人工智能技术对于故障特征提取以及识别来说,有着很强的适应性,特别适合处理新型配电网故障信号非线性、非平稳的复杂特点。目前,深度学习、机器学习和信号处理相结合的混合智能方法成了配电网故障识别的主要研究方向。经验模态分解(EMD)、变分模态分解(VMD)以及短时傅里叶变换等方法被用来从故障电流、电压信号中分离出和故障类型有关的时频特征分量。相比传统的傅里叶变换来说,该方法可以更好地反映故障信号的非平稳性,得到更加具有判别力的特征向量。在此基础上,卷积神经网络(CNN)由于具有自动特征学习的能力,可以直接从原始波形或者时频图像中提取出深层次的故障特征,而不会出现人工特征工程所造成的主观性误差^[5]。从故障类型识别角度来讲,长短期记忆网络(LSTM)更适合于处理有时序依赖的故障发展过程,可以很好地将单相接地、相间短路、断线等不同的故障类型区分开来。

2.3 多源信息融合的故障精确定位策略

单一的信息源在配电网故障定位上存在着覆盖范围小、抗干扰能力差等问题,而多源信息融合定位策

略则利用了量测终端、保护装置、智能传感器和通信系统等各种异构的数据,从而大幅度提高了故障定位的准确性以及鲁棒性。多源信息融合定位的数据来源主要有配电自动化系统(DA)上报的开关动作序列和故障指示器告警信息、配电变压器台区智能终端(TTU)采集的电流突变量、分布式故障检测单元(FTU)记录的暂态信号、用电信息采集系统反映的用户停电投诉信息。以上信息具有时间上的异步性、空间上的分散分布特征,需要统一的数据融合框架来整合。D-S证据理论、贝叶斯网络都是多源信息融合定位中使用较多的数学工具。D-S理论用建立的故障区段信度函数,把不同的信源故障证据进行合成推理,可以给出在部分信息缺失情况下合理的定位置信区间。

3 配电网故障快速隔离与自愈恢复技术

3.1 基于分布式馈线自动化的故障快速隔离方案

馈线自动化(FA)是实现配电网故障快速隔离的主要技术手段,其主要发展过程是从集中式到分布式。传统的集中式馈线自动化依靠主站系统的远程遥控,故障处理全程高度依赖通信链路的完好性,在通信中断或者主站故障的时候很容易造成隔离失败,整体故障处理时间一般会超过3分钟,在城市核心区域供电可靠性保障上存在着明显的不足。分布式馈线自动化技术将馈线终端单元(FTU)的本地故障判断与执行功能下沉至终端,使故障隔离决策从依赖主站实时通信的模式转变为直接就地自治操作的模式。其基本工作原理就是相邻的FTU之间采用对等通信协议互相传递电流方向、开关状态等保护信息,根据事先设定的本地逻辑自行判定故障区域并实施分闸动作,不需要主站参与。分布式馈线自动化的故障隔离速度在工程实际中得到了很大的提高。采用典型的10 kV手拉手环网接线模式,对分布式FA系统和传统集中式方案做故障隔离时间的对比测试分析,得到故障隔离平均时间为35秒以内,较传统的集中式方案平均缩短了约80%,通信链路部分断时仍可在45秒内完成各个分段开关就地隔离。另外,以分布式FA为基础的故障隔离方案具有较好的模块化扩展性,可以依据配电网拓扑的变化来灵活地改变保护区域的划分,满足新型电力系统中配电网频繁重构的需求。

3.2 考虑分布式能源接入的故障隔离优化策略

分布式电源(DG)大规模接入之后,改变了配电网故障电流的特性,也给故障隔离策略的改进提供了新视角。合理利用分布式电源的可控特性,在故障隔离过程中可以有效地缩小停电范围、提高供电连续性,

但前提是要解决孤岛运行的安全判别和控制协调问题。从故障隔离策略的设计角度出发,把分布式电源的运行状态当作重要约束条件加入优化模型当中。故障发生时,首先要迅速判断各个分布式电源节点是否具备形成计划性孤岛的技术条件,即本地负荷和DG出力的功率平衡裕度、逆变器的频率或电压调节能力、保护装置的孤岛检测速度。研究显示,在光伏出力充足的时候,带有储能协调的微网单元在故障隔离之后可以做到5秒钟内实现孤岛模式转换,保证区域内60%到75%的重要负荷可以持续供电,比全停电处理模式要好得多。隔离边界优化上建立以停电用户数最少、分布式电源弃电量最少为目标的优化模型,用启发式算法求解开关动作序列。经过对含20%光伏渗透率典型配电网的仿真分析,得到的优化后故障隔离方案可以使平均停电用户数下降约28%,光伏弃电率控制在8%以内,隔离时系统频率偏差不大于0.3 Hz,满足电能质量基本要求。另外,在故障隔离过程中,由于分布式电源控制模式的切换而引起的暂态冲击问题,可以在隔离动作序列中加入预同步控制环节,使孤岛和主网之间的电压相位平滑过渡,防止重合闸时出现大的冲击电流。为更直观地呈现不同故障隔离策略的性能差异,结合含20%光伏渗透率的典型配电网仿真数据,构建数据表(见表1),对比传统隔离策略与优化后隔离策略的核心性能指标。

表1 传统隔离策略与优化后隔离策略的核心性能指标

隔离策略类型	平均停电用户数 下降比例	光伏弃电率
传统隔离策略	0% (基准值)	15% ~ 20%
优化后隔离策略 (含DG协调)	约28%	≤8%

3.3 故障隔离后的配电网快速自愈与供电恢复方法

配电网自愈恢复是故障处理流程的最后一个环节,其目的是当故障被隔离之后,利用最优的网络重构和电源调度策略,在最短的时间内使非故障区域恢复供电,最大限度地减少停电造成的损失。自愈恢复速度和质量可以反映配电网运行韧性水平。自愈恢复决策框架一般采取分层协调的控制架构,就地层按照预先设定的恢复逻辑自动执行联络开关合闸动作,使健全区段尽快转供;主站层在就地恢复之后启动全局优化,考虑线路载流量限制、电压质量要求和分布式电源出力预测,得出最佳的网络重构方案。两层互相协调配合,一方面保证恢复的速度,另一方面又保证恢复方案的全局最优性。基于预案库的快速恢复方法,在故障发

生之前就离线地对各种典型故障场景下的恢复预案进行枚举,并存入主站数据库中,在故障发生之后,根据场景匹配的方式,迅速调取相应的预案执行,可以将恢复决策的时间缩短到10秒之内。经过对多个典型配电网结构进行测试分析之后,使用预案驱动的自愈恢复方式,非故障区域平均停电时间控制在90秒以内,比传统的手动遥控恢复模式缩短了约70%。就恢复方案质量而言,把分布式电源出力调度纳入恢复优化模型当中,可以较好地提高恢复方案的可行度。研究表明,在配有储能的配电网中,先用储能装置的放电能力来参与故障后功率的重新分配,可以使重要负荷恢复比例提高约15%,当配电网转供能力不足的时候,利用分布式电源以孤岛的方式保持局部区域供电,可以使实际停电用户比例降到全网用户12%以下。自愈恢复的可靠性保证要重点考虑重合闸操作给孤岛内分布式电源带来的冲击作用,还要注意多次重合闸操作所造成的系统振荡危险。

4 结束语

本文主要研究新型电力系统下配电网故障快速定位与隔离问题,从故障特性变化、定位技术方法、隔离自愈策略三个方面展开研究。研究发现,大规模接入分布式新能源改变了配电网故障响应特性,传统的单一技术已经不能满足现在形势下对快速、准确、可靠处置故障的要求;以行波法为代表的技术、以深度学习为代表的智能识别技术、多源信息融合定位技术的协同使用,可以提高故障定位的准确性、适应性;分布式馈线自动化方案对于故障快速隔离有明显的优势,结合分布式能源灵活调节和优化自愈恢复策略,在保证供电连续性的基础上大幅缩短了故障处理时间。

参考文献:

- [1] 毕忠勤,余晓婉,王宝楠,等.基于量子蚁群算法的配电网故障区段快速定位技术[J].上海交通大学学报,2024,58(05):693-708.
- [2] 汪泽.配电网故障定位与修复的自动化技术研究[J].电子元件与信息技术,2025,09(10):121-123.
- [3] 刘涛.10kV配电网深度限流高压电阻特性优化研究[J].电工技术,2026(02):137-139.
- [4] 张纯强.基于深度强化学习的配电网故障快速定位与恢复优化算法[J].电脑编程技巧与维护,2024(12):135-137.
- [5] 秋安旺,拓浪.数字化运维模式在配电网线路设备管理中的应用[J].张江科技评论,2025(08):119-121.

“双碳”目标下火电机组熔盐储热深度调峰协同运行机制与效益评估

王 赞

(大唐保定热电厂, 河北 保定 071051)

摘 要 在以“双碳”为目标的新型电力系统建设过程中, 火电机组具备良好深度调峰性能, 是保障大量新能源接入的必要条件。熔盐储热凭借大容量、长时储热、高效率的显著优势, 可以弥补传统火电机组的短板, 在破解热电联产机组“以热定电”的难题、提升整个电力系统灵活性方面发挥积极作用。本文聚焦火电机组与熔盐储热协同开展深度调峰的配合模式, 详细介绍了二者结合后整体结构及工作原理, 针对不同电网需求提出多模式融合的实施路径, 并明确了两者间的协同配合关系。在此基础上, 从提高调峰能力、低碳减排以及经济效益三个方面进行总体评价, 对耦合系统的调峰空间扩大、碳排放降低、投资回报等主要优点进行定量分析。结果表明, 熔盐储热与火电站联用能有效降低机组最小调峰负荷至 20% ~ 30%, 大幅增强系统的灵活性, 同时具有良好的低碳和经济效益, 对火电灵活性改造及新型电力系统的建立起到积极的作用。

关键词 “双碳”目标; 火电机组; 熔盐储热; 深度调峰; 协同运行

中图分类号: TM621

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.005

0 引言

“双碳”目标促进我国能源结构快速向清洁低碳发展, 风电、光伏等新能源装机量不断增加, 新型电力系统电源构成以及运行方式发生改变。随着大量新能源接入电网, 其出力的不确定性和随机性特征凸显, 对电网的调峰调频性能提出了更高要求。传统的火电机组运行方式由基荷电源转变为灵活调节电源, 而其中深度调峰是主要任务。但是热电联产机组由于长期以来采用“以热定电”的方式, 在供热无法进行大规模的发电量削减, 导致其不能满足大量新能源接入后对于电网调峰调频的需求。熔盐储热技术是较为成熟的大型长时储热技术, 利用熔融态硝酸盐混合物作为储热工质, 具有温区宽广、储热量大、运行可靠、经济性高等特点, 可以用来储存热能并在需要时释放出来。将熔盐储热系统与火电机组联结起来后, 可以通过热能的时间转移而解除两者之间的联系, 即实现热电解耦, 从而提高机组灵活性, 同时具有良好的经济效益。

1 火电机组熔盐储热耦合系统协同运行机制

1.1 耦合系统的架构与能量流特性

火电机组与熔盐储热耦合系统是基于传统的火电机组热力系统上增加熔盐储热子系统, 利用蒸汽抽汽、

热量传递等手段使二者之间形成能源联系并共同工作的一种方式。一般而言, 耦合结构为多源抽汽储热以及梯级释放热量的形式, 有主蒸汽、再热蒸汽、汽轮机四抽蒸汽三条抽汽支路为熔盐储热系统供能以满足各种工况下对热量的需求。

熔盐储热子系统采用双罐结构, 主要包含高、低温熔盐罐、熔盐泵及两类换热设备。系统选用 $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$ 三元熔盐作为储热工质, 熔点约 157 °C, 250 °C ~ 550 °C 区间热稳定性好, 适配火电机组换热工况。储热时低温熔盐经泵送入蒸汽—熔盐换热器吸收抽汽热量升温后存入高温罐; 放热时高温熔盐通过换热器释放热量, 降温后的熔盐回流至低温罐完成循环。

从能量流动分析, 耦合系统实现了能量的空间位移以及调配。传统的燃煤发电厂的能量流动是“锅炉燃烧→产生蒸汽→驱动汽轮机做功发电/供热”, 能量生产和消耗需要同步进行, 这就使得热电联产。但是加入熔盐储热之后, 则多了一个“锅炉产汽→储热→放热”的能量调节路径, 在时间上实现能量的解耦, 在电力系统用电量少、新能源大发的情况下, 可以将剩余热量存入熔盐中以减少机组发电功率; 而在电力系统用电量、新能源出力不够时, 就可以从熔盐中

作者简介: 王赞 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电厂电力。

取出这部分热量来增加系统的发电或者供热的能力。这种能量流动方式改变,从本质了解除了传统热电联产机组“以热定电”限制条件,使系统具备一定的灵活性^[1]。

1.2 深度调峰场景下的多模式协同运行策略

根据不同的电网运行工况以及负荷需求,耦合系统可以切换到不同的工作状态,使火电机组与熔盐储热系统相互协作,提高整个系统的灵活性以及经济性。

1. 低谷深度调峰模式。在夜晚电网负荷较低以及新能源大发的情况下,电网需让火电机组减小其发电量以接纳更多的新能源,但又要保障居民供暖正常进行。在这种情况下,火电机组锅炉仍保持一定燃烧量,产生一定蒸汽量来保证基本供暖要求;然后从汽轮机中抽一部分蒸汽进入熔盐储热装置加热水,储存多余能量。汽轮机进气量减少导致其发电量下降,可以使机组最低发电能力由原来的45%~50%降低到20%~30%,即实现深度调峰。在此过程中,锅炉产汽一部分供给供暖,另一部分用于蓄热,所以供暖参数及流量不受发电负荷变化影响,达到热电解耦的效果,保证供暖稳定。

2. 高峰顶峰模式。在白天电网负荷高峰期以及新能源发电量较低的情况下,电网需增加火电机组发电量,保障供电的同时还要应对不断增加的供热需求。在这种情况下,火电机组主机组处于最大出力状态;而熔盐储热系统进行放热操作,放出之前储存高温热量,对给水或者产汽起到全部或者一部分供热作用。这样可以使主机组不必为供热保留蒸汽而处于低负荷状态,可以做到满发,又可以通过储热系统提供热量,解决供热问题,提高了系统的顶峰能力。此外,释热产生的蒸汽也可以引入增设的小型汽轮机进行发电,从而增加整个系统的发电能力,以满足电网的高峰负荷^[2]。

3. 调频辅助模式。在调峰的基础上,耦合系统还可以向电网提供调频辅助服务,熔盐储热系统具有非常短的响应时间,其储热量可以在1秒之内发生改变,可以充当快速可控制载荷以帮助火电机组进行一次调频以及AGC控制,当电网频率下降,需增加发电量的情况下,熔盐储热系统可以迅速减少自身的储热量,甚至转入放热状态,放出热量提高发电量;而当电网频率上升,需要减小发电量的情况下,熔盐储热系统可以迅速增大自身的储热量,吸收多余的电能,快速响应电网的需求,这样快速的变化可以大大提高火电机组调频的效果,获得相应的补偿费用。

1.3 协同运行的协调控制逻辑

为使耦合系统正常可靠工作并使二者良好配合,必须有合理的协调控制策略来对负荷指令进行合理分配及对运行参数进行反馈控制。

协调控制的目标在于依据电网所给定的发电负荷指令、供热负荷以及熔盐储热系统的工作状况进行火电机组及熔盐储热系统的功率分配,使整个系统达到最佳工作状态。系统输入为电网下达的发电负荷指令、热网供热负荷指令、高温熔盐罐温度、低温熔盐罐温度、低熔盐罐液位、火电机组当前工况等,控制器通过对以上信息分析得出当前的工作情况,选择熔盐系统的工作方式(储存热量、释放热量或者停机备用)并得出相应的储存或释放功率,然后改变火电机组的锅炉负荷、汽轮机进汽量、抽汽量等参数,使得全厂的有效功率和无功功率符合外界的要求。

在深度调峰储热状态下,控制系统先判断低温熔盐罐剩余可储热量是否足够,在有足够空间的情况下,调节抽汽阀开度,使相应功率蒸汽进入熔盐换热器,同时调节汽轮机阀门,减小汽轮机进汽量,降低机组发电量,但不影响锅炉燃烧良好,不会造成锅炉燃烧不良现象。在顶峰释热工况下,控制系统先判断高温熔盐罐中有多少可以放出的能量,如果能量足够多,则改变熔盐泵流量,控制释热功率,同时也改变给水或者蒸汽量,使供热或者发电的蒸汽参数维持在一个恒定值上。

此外,控制系统配置保护逻辑,设置机组最小稳燃负荷约束,避免锅炉熄火。系统引入模型预测控制,基于电网负荷、新能源出力、供热需求开展24小时滚动优化,确定熔盐充放热功率,实现系统安全经济运行。

2 耦合系统的综合效益评估

2.1 调峰能力提升效益

熔盐储热与火电机组耦合可改变机组原有热力特性,有效拓宽机组负荷调节区间,提升调峰潜力^[3]。传统的热电联产机组受“以热定电”的限制,其最小出力一般在额定出力的45%~50%之间,调峰幅度较小,不能很好地适应长时间大范围的调峰。而熔盐储热系统的引入使得热电解耦,在此情况下,最小出力可以降低到额定出力的20%~30%,提高了30%~40%,可以较好地解决电网大范围调峰的问题。

耦合系统变负荷响应速度显著提升,机组变负荷速率由常规1%~2%Pe/min提升至约3%Pe/min,可快速平抑新能源出力波动;依靠熔盐储热缓冲,机组深度

调峰持续时长可延长至 5 小时以上, 适配夜间新能源大发下的长时间调峰工况。

熔盐储热与火电机组耦合协同有利于提高系统的调峰能力, 从而更好地接纳新能源。当新能源大发时, 火电机组进行大幅度调峰降低出力, 给新能源腾出上网的空间, 减少弃风弃光现象发生。一般情况下, 该类联合系统的年均增加新能源消耗电量约在 1 000 万千瓦时以上, 提高新能源利用率, 促进以新能源为主体的新型电力系统的发展^[4]。

2.2 低碳减排效益

在“双碳”背景下, 耦合系统低碳减排效益具有重要价值, 主要是指新能源消纳所带来的碳排放降低以及能源利用率提高导致的排放降低。

耦合系统提高新能源消纳水平, 降低化石能源发电比例和碳排放。在一般情况下, 由于火电机组调峰能力有限, 在新能源大发时会出现弃风弃光的现象, 导致化石能源发电比例上升以及碳排放增多。但是耦合系统可以进行深度调峰, 从而多消纳新能源, 每消耗 1 千瓦时新能源电量就可以少用 1 千瓦时煤电, 大约可减少 0.8 千克二氧化碳排放量。耦合系统通过能量梯级利用提高能源利用率, 节约能源以及降低污染排放。传统的火电机组进行大范围深度调峰需要投油稳燃, 造成额外的成本支出以及污染物排放。而耦合系统可以利用储热进行大范围深度调峰, 不需要投油稳燃, 在锅炉处于高效率的工作状态下运行, 避免了低负荷情况下锅炉效率下降的问题。熔盐储热系统的储放热效率达到 83.4%, 能够很好地回收利用热量, 降低能量损耗^[5]。

2.3 经济性效益评估

在最初投入方面, 熔盐储热系统的投资相对较小。模块化的熔盐储热系统成本约为 1 350 元 / 千瓦, 而传统的双罐系统为 1 600 元 / 千瓦, 大规模的应用项目的单位能量存储成本在 340 元 / 千瓦时以下, 远远低于电化学储能。此外, 熔盐储热系统的使用寿命长达 30 年并且没有次数要求, 在其整个寿命周期内都能正常工作, 因此降低了整个寿命周期内的总投资。

在运营费用上, 熔盐储热系统结构简单、自动化水平较高, 可以实现无人值守, 只需要定期巡检维护, 成本很低。而电化学储能需要定期更换电池, 运维成本很高。熔盐储热系统一年的运行维护费用只占其最初投资的 1% ~ 2%, 远远小于电化学储能的 3% ~ 5%。

从收益来看, 耦合系统可以获取多种收益来源。

第一种为深度调峰辅助服务所带来的收益, 深度调峰会给予一定的补贴, 补偿价格约为 0.3 元 / 千瓦时 ~ 0.5 元 / 千瓦时, 每年都有较大数额的补贴收入; 第二种为电力现货市场峰谷价差收益, 在低谷期蓄热并在高期内释放进行发电所获得的差额收益, 是主要收益之一; 第三种为供热收益, 提高供热能力的同时也增加了供热及工业供汽量。另外, 还可参与调频辅助服务获取相应的调频收益等^[6]。

3 结束语

火电机组与熔盐储热联合运行是实现“双碳”背景下火电机组灵活性提升的一种可行方法。通过建立二者之间的耦合运行方式, 实现热电负荷分离, 增大机组可调范围, 在不同工况下采取不同的运行模式以及协调控制策略, 使整个耦合系统安全可靠运行。从整体上分析, 该耦合方式可以使机组最小可调负荷降低到 20% ~ 30%, 大幅提高其灵活性的同时也带来显著的低碳环保效果及经济效益, 有利于大规模新能源接入和新型电力系统的发展。

参考文献:

- [1] 洪烽, 李鹏飞, 梁璐, 等. 强安全约束下的火电-熔盐耦合系统灵活运行控制策略 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13[2026-03-16][2026-04-20].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5qKCSu-RHigiqjTThviNv1nzHBBdjTTIoaM77BDLEWYzr6sEcG-LgGaVuKIk-o-pAhxFlUOL_PLSdxEhqbJQbhU3wqkUQIWaE8Wjx83Df56iiH7YTsrUyq4hvy-2giEua-c11PuNVnp7PdbVlh7grG_Gevw1yGeRliHz9BW833lfmN2_6PdNA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 陈珍, 李超, 杨壮, 等. 电力现货市场下火电机组耦合熔盐储热系统技术经济性对比 [J]. 油气与新能源, 2026, 38(01): 149-158.
- [3] 祁艳超, 洪文鹏. 集成熔盐储能的亚临界火电机组热力性能及经济性研究 [J]. 工程热物理学报, 2026, 47(02): 412-425.
- [4] 黄张驰, 周月桂, 王玉亭. 熔盐储热系统集成方式对燃煤火电机组深度调峰和灵活性运行的影响研究 [J]. 动力工程学报, 2026, 46(01): 112-120.
- [5] 魏乐, 周家俊, 张怡, 等. 耦合熔盐储热火电机组技术经济分析与运行优化 [J]. 工程热物理学报, 2026, 47(01): 46-58.
- [6] 张文彬, 赵瑜滢, 李骏, 等. 火电机组耦合熔盐储热集成系统调峰特性研究 [J]. 仪器仪表用户, 2026, 33(01): 90-93, 97.

电力机组宽负荷自动控制优化研究

孙显赫

(内蒙古国华准格尔发电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要 为了适应新能源发电大规模并网带来的电网调节压力,提升电力机组在宽负荷区间的运行稳定性、经济性和智能化水平,本文开展30%~100%负荷段全自动控制优化研究。以某电厂一、三号机组为研究对象,结合机组设备参数与运行现状,分析宽负荷控制存在的问题,制定针对性的优化方案并对优化效果进行量化分析。结果表明,优化后的控制系统可实现机组30%~100%负荷段的全自动稳定运行,大幅提升负荷响应速度,提高机组运行经济性,为同类机组宽负荷自动控制优化提供实践参考。

关键词 电力机组;宽负荷控制;自动控制;磨煤机;给水泵

中图分类号:TM621;TM761

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.006

0 引言

当前,大部分的燃煤机组在额定负荷附近的自动控制性能较为稳定,但在30%~70%的低负荷至中负荷区间,由于工况复杂、参数波动较大,自动控制效果不佳,常需依赖人工操作调整,不仅增加了运行人员的劳动强度,还降低了机组运行的经济性。基于此,开展机组宽负荷自动控制优化研究,通过梳理控制逻辑、优化控制策略、完善调试方案,实现30%~100%负荷段的全自动控制,对于提升机组运行水平、适应电网调节需求具有迫切意义。

1 机组概况与运行现状分析

1.1 机组设备参数

本次研究对象为某电厂一、三号机组,两台机组设备配置一致,具体参数如下:锅炉为北京巴布科克威尔科克斯有限公司生产的亚临界、一次中间再热、自然循环单炉膛汽包锅炉,燃烧方式为前后墙对冲,可满足各种负荷下的燃烧需求;汽轮机为北京重型电机厂生产的N33017.75/540/540型单轴、三缸、双排汽中间再热凝汽轮机,额定功率330 MW,拥有宽负荷调节能力;发电机为北京重型电机厂生产的TA25546型水氢冷却发电机,发电效率高、运行稳定。

机组控制系统(DCS)采用西门子控制系统,有着健全的控制功能以及数据采集能力,可以对机组不同系统展开持续性监测与控制工作。机组辅机配置包括两台送风机(工频运行)、两台引风机(工频运行)、两台一次风机(变频运行)、三台电动给水泵(两台变频、一台工

频,互为备用)、五台中速磨煤机(四用一备),采用对冲燃烧方式,为机组宽负荷运行带来了设备基础^[1]。

1.2 机组运行现状及存在问题

一是磨煤机控制自动化程度低。磨煤机的启停通常依赖人工操作,缺少健全的自动暖磨控制以及启停顺控逻辑,磨组启停期间冷、热风门调节不及时,使磨煤机出口风粉混合物温度、风速波动较大,既制约着制粉系统运行效率,还会造成炉膛燃烧不稳定甚至带来安全隐患。而且,磨煤机启停中产生的瞬时燃料量扰动,得不到有效抑制,影响机组负荷响应速度以及协调参数控制品质^[2]。

二是给水泵运行控制不合理。给水泵的运行方式和控制手段没有与机组负荷实时匹配,宽负荷区间内给水泵出力调整缺少自适应能力,低负荷时多台给水泵同时运行,造成能源浪费且再循环阀芯冲刷严重;高负荷时给水泵投运不及时,影响机组给水稳定性。

2 电力机组宽负荷自动控制优化必要性

2.1 满足电网运行与新能源发展需求

在新能源发电的蓬勃发展下,风电、光伏等可再生能源的间歇性给电网运行带来了一定调节压力,电网对燃煤发电机组的负荷调节能力提出了更严格的要求。机组实现30%~100%负荷段全自动控制,可以第一时间响应电网负荷指令变化并调整机组出力,以弥补新能源发电的不足,减轻电网调节压力,保障电网频率和电压稳定^[3]。此外,宽负荷全自动控制可使机组在低负荷段稳定运行,防止由于负荷过低造成机组

作者简介:孙显赫(1999-),男,本科,助理工程师,研究方向:火电厂热工自动化。

解列, 增强电网供电可靠性, 为新能源发电大规模并网提供支持。

2.2 增加机组运行经济性

宽负荷全自动控制优化, 能够按照机组运行状态和负荷需求来调整燃烧、蒸汽和给水等系统参数, 使机组在各负荷段都可以运行在最优工况, 减少煤耗和厂用电率。例如: 磨煤机自动控制优化能够对煤粉细度、出口温度进行精细化控制, 减少燃料浪费; 给水泵自适应控制可围绕负荷变化调整运行台数和出力, 增加给水泵运行效率的同时减小再循环阀芯冲刷, 节省设备损耗。

2.3 保障机组安全生产

在电力机组运行期间, 安全是重中之重。人工操作在复杂的负荷调节中易发生失误, 特别是在宽负荷区间工况多变、参数波动大的前提下, 人工调整无法精准响应负荷变化, 易使主汽压力、汽包水位等参数超标并带来安全事故。全自动控制系统可以全面基于预设的程序和算法操作, 防止人为因素造成的操作失误, 保障机组实现安全运行^[4]。

3 电力机组宽负荷自动控制优化方案设计

3.1 磨煤机自动控制优化

1. 暖磨控制与启停顺控逻辑优化。优化 A、B 磨煤机自动暖磨控制策略, 按照磨煤机入口、出口温度的变化情况调整冷、热风门开度, 实现暖磨过程的自动化控制, 防止暖磨不足或过度暖磨造成设备损坏以及能源浪费。梳理并优化磨组自动启停过程中的冷、热风门超驰控制逻辑, 明确启停各阶段的控制参数以及时间节点, 实现磨煤机自动启停, 减少人工干预。

2. 运行参数精细化控制。在磨组正常运行期间, 按照磨组实际出力变化采用自适应预测控制、模糊控制和随动控制相结合的方式, 实现制粉系统出口温度、出口风速以及煤粉细度的控制。持续性采集磨煤机运行参数并建立控制模型, 调整冷风门、热风门开度和给煤量, 使制粉系统运行参数稳定在最优区间, 减少燃料量扰动对机组负荷的影响。其中, 自适应模糊控制技术的应用能够使调节速度提升 20%, 控制精度提高 36%, 最大限度抑制参数波动。

3.2 给水泵自动控制优化

1. 运行方式智能选择。基于机组负荷运行状况建立给水泵运行方式智能选择模型, 实现宽负荷区间给水泵出力自适应选择调整。在预控模式下, 当负荷较低 (低于 50% 额定负荷) 时自动无扰退出一台给水泵备用运行, 仅保留两台给水泵运行, 提高给水泵运行

效率, 减少能源消耗; 当负荷升高 (高于 50% 额定负荷) 时自动无扰并入备用给水泵运行, 保证给水流量满足机组需求^[5]。

2. 并 / 退泵控制策略优化。采用并 / 退泵速率自适应闭环控制、给水流量指令平衡、给水泵再循环阀动态自适应比例控制等技术, 减少并 / 退泵过程中给水流量和汽包水位的扰动。并 / 退泵过程中监测给水流量、汽包水位等参数, 灵活调整并 / 退泵速率和再循环阀开度, 确保参数平稳过渡, 防止发生水位明显波动或水泵过载等情况。

3.3 风烟系统控制优化

1. 一次风压设定曲线优化。为提高变负荷过程主汽压力的响应速度, 将一次风压设定曲线由当前负荷指令改为燃料主控的输出指令生成, 使一次风压与燃料量实时匹配。同时, 在变负荷时, 增加一次风压设定的修正系数, 根据负荷变化速率和主汽压力偏差, 动态修正一次风压设定值, 强化磨煤机的风粉比变化, 提高一次风刚度, 加快主汽压力响应速度, 减少参数波动。

2. 送风—氧量控制闭锁逻辑设计。设计送风—氧量控制增加闭锁逻辑, 在机组快速升负荷过程中, 当快速加风时闭锁氧量调节回路, 防止因氧量快速变化造成炉膛负压大幅波动; 优化送风调节回路的 PID 参数, 按照负荷变化速率调整调节增益, 确保送风流量与燃料量之间实现精准匹配, 确保炉膛燃烧稳定, 减少炉膛负压波动幅度 (控制在 ± 50 Pa 以内)。

4 优化方案实施与调试

4.1 实施前期准备

1. 组织架构搭建。建立现场组织机构, 配备数量足够、专业齐全的管理及技术人员, 任命具有丰富机组控制经验的项目经理负责项目管理工作, 项目经理常驻项目现场, 未经招标人同意不得离开, 确保项目良好实施。此外, 明确岗位职责, 采取相关项目管理制度以及安全操作规程, 保障实施过程安全进行。

2. 技术交底与人员培训。调试工作开始前对电厂技术人员和运行人员进行技术交底, 阐述磨煤机自动启动、给水泵并泵的工作模式以及投 / 切操作方法等, 保证人员熟悉优化方案和控制逻辑。进行针对性培训工作, 增强运行人员对优化后控制系统的操作能力及其故障处理水平, 为后续阶段的调试和运行工作夯实基础。

4.2 项目实施工期安排

合同签订后 20 天内, 项目团队进驻现场, 开始完成三号机组 30% ~ 100% 负荷段全自动控制系统逻辑修

改、静态调试等工作,预计耗时120天;一号机组在机组检修期间完成逻辑修改、静态调试等工作,预计耗时100天;两台机组热态调试及验收工作预计耗时80天;剩余30天作为预留时间,用于处理实施过程中出现的突发问题,确保项目在330天内完成。具体工作进度及时间安排将根据现场设备情况及甲方计划进行适当调整,届时由招标方提前通知投标方。

4.3 控制系统调试

1. 静态调试。静态调试阶段主要完成控制逻辑的检查、配置和优化,包括检查磨煤机、给水泵和风机系统等控制逻辑的正确性,保证逻辑满足优化方案要求;配置控制策略的参数(PID参数、折线点参数、闭锁条件等),进行模拟仿真测试,验证控制逻辑的可行性;调整各控制回路的联动关系,确保系统协调运行;对DCS系统的信号采集和输出进行校准,确保信号传输准确、可靠^[6]。

2. 热态调试。热态调试阶段主要在机组正常运行状态下,对优化后的控制系统进行实际运行测试和参数优化,具体包括:对每个控制回路进行定值扰动试验、外扰试验、变负荷试验,测试控制回路的响应速度和调节品质;综合考虑控制系统在稳定工况、吹灰或启停制粉系统等大幅扰动工况下的运行性能,不断优化控制系统的参数,以获得满意的性能品质;验证磨煤机自动启停、给水泵自动并退等功能的可靠性和稳定性,确保在不同负荷段能够正常运行;测试密封水差压、汽包水位、主汽压力等关键参数的控制精度,确保参数波动在规定范围之内。

5 优化效果分析与效益评估

5.1 优化效果量化分析

优化前,机组30%~100%负荷段升降负荷速率为1.5%额定负荷/分钟,优化后提升至2.5%额定负荷/分钟,负荷响应速度提升66.7%,可以在第一时间响应电网负荷指令变化,满足电网深度调峰需求。磨煤机启停及给水泵投退时间最大限度缩短,优化前磨煤机启停时间约为15分钟/台,优化后缩短至5分钟/台,给水泵并退时间由10分钟缩短至3分钟,有效增强了机组负荷响应能力。

5.2 经济效益评估

1. 节能效益。优化后,机组平均煤耗降低2 g/kWh,两台机组额定功率330 MW,年运行时间按6 000 h计算,每年可节约标准煤792吨($330\text{ MW}\times 2\text{ 台}\times 6\text{ 000 h}\times 2\text{ g/kWh}\div 1\text{ 000 000}=792\text{ 吨}$),按标准煤单价1 200元/吨计算,每年可节约燃料成本95.04万元。

2. 设备维护成本节约。优化后,给水泵再循环阀芯冲刷减少30%,磨煤机设备磨损减轻,每年可减少设备维护费用约15万元;运行人员操作量减少,人工成本每年可节约约10万元,合计每年可节约维护和人工成本25万元。

5.3 安全与社会效益

一方面,围绕安全效益来看,优化后的全自动控制系统不再被人为操作所影响,机组运行风险明显减少,机组和人员愈发安全;控制系统拥有故障预警以及联锁保护作用,可以在第一时间觉察到设备异常情况,防止事故严重发展,从根本上确保机组安全运行。据统计,优化后机组非计划停机次数降低80%,安全事故出现率为0。

另一方面,围绕社会效益来看,增强机组宽负荷自动控制水平可以快速适应新能源发电并网需求,为社会带来极为可靠的电力供应。此外,机组煤耗减少也会使二氧化硫、氮氧化物等污染物排放量越来越少,每年能够减少二氧化硫排放量约200吨、氮氧化物排放量约150吨,环保、社会效益明显。

6 结束语

随着电力系统智能化、低碳化转型的深入,需积极深化宽负荷控制技术研究,融合现代化智能算法以及全系统协同控制理念,建立健全的控制策略,促使机组运行水平向更高质量、更高效益、更安全可靠的方向发展,为我国电力能源安全和“双碳”目标实现注入持续动力。

参考文献:

- [1] 宋嘉雯,王琦,王亚伦,等.计及负荷等效惯量的新型电力系统机组组合安全优化方法[J].电力建设,2025,46(09):111-119.
- [2] 秦空,张德龙,董彬.基于双馈风电机组的电力运维系统负荷预测模型设计研究[J].自动化与仪器仪表,2024(10):65-68,74.
- [3] 林岫菁,蔡丽敏,林汉填,等.考虑短期负荷的新能源电力系统AGC机组动态优化调度[J].电气开关,2024,62(05):95-97.
- [4] 周心慧.含压缩空气储能机组的交互式多模型电力负荷建模研究[D].济南:山东大学,2024.
- [5] 张康,王超.集中式电力现货市场下厂级煤电机组负荷优化分配研究[J].能源科技,2024,22(02):8-11.
- [6] 徐荣田.全负荷脱硝技术在电力机组的设计应用进展[J].电站系统工程,2023,39(06):64-68.

市政道路桥梁裂缝自动识别与评估方法

方 靖

(安徽省建设工程测试研究院有限责任公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 本研究以某市政斜拉桥工程为例, 通过无人机近距离拍摄来获取桥梁结构高清图像, 构建基于掩膜区域卷积神经网络的裂缝自动识别模型, 运用图像二值化、骨架化及法线投影等后处理技术实现裂缝宽度定量提取。实验结果显示, 裂缝识别的准确率与召回率均达到 92.5%, 大部分样本宽度测量的绝对误差小于 0.10 mm, 最大绝对误差为 0.132 mm 且相对误差在 9.8% 以内, 检测精度符合工程要求, 评估结论可为桥梁养护决策提供参考。

关键词 市政桥梁; 裂缝自动识别; 无人机检测; 深度学习; 安全评估

中图分类号: U445.7; TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.007

0 引言

城市道路桥梁是城市交通体系的关键组成部分, 随着运营服役年限持续增长, 混凝土裂缝病害愈发凸显, 直接削弱结构耐久性与承载能力。传统人工检测手段普遍存在结果主观性强、信息处理效率低、高空作业安全风险高等问题, 无法满足城市桥梁批量、高频次的日常维护工作要求。目前, 卷积神经网络在路桥裂缝识别应用方面已取得多项研究成果, 深度学习技术在病害判别准确度与处理速度上表现突出^[1-2]。基于此, 采用无人机拍摄图像并融合掩膜区域卷积神经网络, 构建市政桥梁裂缝的智能识别与评估系统, 对于提高检测效率、降低成本及确保桥梁安全运行具有重大意义。

1 工程概况

某市政斜拉桥为无背索斜塔结构, 主跨 206.0 m, 桥面总宽 33.2 m, 桥塔垂直高度 136.8 m, 加钢壳基座后整体高度超过 150.0 m。桥塔混凝土表面受温度变化、荷载循环及材料老化等多重因素影响, 裂缝病害显著, 涵盖横向、竖向、斜向及网状等多种类型。传统人工检测存在高空作业风险高、覆盖率低及结果主观性强等问题, 难以满足全面准确的病害普查需求, 采用无人机进行影像拍摄来获取数据, 运用深度学习算法开展智能识别与分析, 目的是自动检测并评估桥梁裂缝的状况, 对于准确掌握结构实际损伤程度、科学制定后续养护策略具有重大的工程应用价值。

2 桥梁裂缝自动识别技术的应用

2.1 无人机图像采集与控制

为解决市政斜拉桥桥塔高度大、人工难以检测的问题, 采用多旋翼无人机配备高清相机云台进行近距

离航拍, 维持无人机与桥塔立面间距大概 10.0 m, 确保图像清晰度与检测精度符合裂缝识别标准。在飞行过程中, 无人机实时采集并记录悬停点的三维空间坐标, 通过覆盖桥塔全部立面并保持 50% 的拍摄重叠率, 共采集高清影像 637 张。所采用的相机传感器分辨率为 2000 万像素, 镜头焦距为 35 mm, 拍摄过程中快门速度要保持在 1/500 s, 以有效抵消无人机悬停时产生的细微振动对画面造成的影响。基于相机针孔模型完成像素标定, 以确定每像素对应实际尺寸约 0.494 mm, 采用熵值与锐度双指标开展图像质量评估, 有效过滤模糊影像, 确保数据质量满足模型处理需求。

2.2 裂缝识别模型构建与训练

裂缝识别模型以掩膜区域卷积神经网络为核心算法框架, 该网络在区域生成网络基础上增添了掩膜分支, 能同时达成裂缝目标的定位、分类以及实例分割, 与传统图像处理技术相比具备更出色的特征提取能力与抗干扰性能^[3]。训练样本经过人工标注后, 借助旋转、翻转、亮度调节及噪声添加等数据增强技术扩展到 1 133 张以上, 模型训练运用迁移学习方法, 以预训练残差网络作为骨干网络的初始权重, 迭代次数设定成 40 000 次。网络总损失 L 定义为:

$$L=L_c+L_l+L_m \quad (1)$$

式(1)中, L_c 为分类损失; L_l 为边框回归损失; L_m 为掩膜损失, 损失曲线在迭代 20 000 次后收敛并稳定至 0.15 附近, 模型未出现过拟合, 参数设置合理有效。为全面评估模型的稳定性, 训练完成之后用 127 张独立测试图像进行推理验证, 测试结果与训练集精度数据高度一致, 表明模型具备出色的跨场景泛化能力。

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

2.3 裂缝宽度提取与量化

完成裂缝识别与定位后,对掩膜区域内裂缝图像依次执行图像二值化、连通域去噪、骨架化提取及宽度计算等后处理流程。二值化采用最大类间方差法突出裂缝轮廓,连通域去噪剔除孤立噪点并连接断裂区域,骨架化通过形态学腐蚀提取裂缝中心轴线^[4]。裂缝宽度基于法线投影原理计算,在骨架切线方向作法线,寻找法线与裂缝边缘两个交点后结合像素标定结果换算为实际宽度,计算公式为:

$$W_c = P_{cw} \cdot L_{pp} = \frac{10 P_{cw} L_d}{L_f P_C} \quad (2)$$

式(2)中, W_c 为裂缝实际宽度; P_{cw} 为裂缝宽度方向的像素数量; L_d 为无人机至桥塔表面的拍摄距离; L_f 为相机焦距; P_C 为感光元件每厘米对应的像素数量,针对裂缝走向和图像坐标轴不平行的情况,实际计算时以骨架点处的切线向量为参考来自适应调整法线方向,提高了斜向及网状裂缝的检测精度,该方法能够实现裂缝宽度的非接触式精确测量,全过程自动完成可显著降低人工测量带来的主观误差影响。

2.4 识别结果输出与校验

裂缝识别完成后,对12处典型裂缝的无人机自动测量结果与裂缝宽度测试仪人工测量数据进行逐项对比,校验过程中,客观评估无人机自动检测方法的工程应用精度,具体的对比情况如表1所示。

表1 无人机识别与人工测量裂缝宽度对比表

编号	像素数	无人机测量宽度/mm	人工测量宽度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
C1	3.000	1.482	1.500	0.018	1.2
C2	3.000	1.482	1.350	0.132	9.8
C3	1.000	0.494	0.500	0.006	1.2
C4	1.414	0.699	0.750	0.051	6.8
C5	2.828	1.397	1.300	0.097	7.5
C6	1.414	0.699	0.650	0.049	7.5
C7	1.414	0.699	0.750	0.051	6.8
C8	1.000	0.494	0.450	0.044	8.9
C9	1.414	0.699	0.700	0.001	2.0
C10	2.000	0.988	0.950	0.033	3.5
C11	2.236	1.105	1.150	0.045	4.1
C12	2.000	0.988	0.900	0.088	9.8

(注:每像素对应物理尺寸标定值为0.494 mm。)

由表1可知,12条裂缝的无人机测量宽度与人工测量的结果基本保持一致,多数样本的绝对误差小于0.10 mm,最大绝对误差为0.132 mm(C2号裂缝),所有样本的相对误差都没有超过9.8%,表明该方法在裂缝宽度测量方面精度较高且工程适用性较强,其测得的数据能够作为后续病害等级划分与安全评价的有效依据。C2号裂缝误差较为显著,主要原因在于该区域混凝土局部出现剥落情况,致使图像纹理紊乱,造成二值化阈值分割过程中裂缝边界定位产生偏差,后续可通过采用自适应局部阈值分割算法进行优化处理。

3 桥梁裂缝检测评估分析

3.1 裂缝识别精度验证

以交并比作为判定依据,当模型预测掩膜与实际裂缝区域交并比超过0.5时判定为真阳性,分别对横向、竖向、斜向以及网状四类裂缝的识别准确率与召回率进行了计算,其中竖向裂缝的准确率与召回率分别达到91.5%与97.7%,斜向裂缝准确率是94.3%,网状裂缝准确率为94.1%,横向裂缝因受施工缝干扰,其准确率相对较低,为86.4%,所有裂缝类型的整体准确率与召回率均达到92.5%,各类裂缝的识别性能对比可查看图1。针对横向裂缝识别准确率不足的问题,建议在后续数据扩充环节着重增加施工缝与横向裂缝共存场景的标注样本,并且在损失函数中对该类别赋予更高权重,从而提升模型对横向裂缝的判别能力。

3.2 裂缝分布规律与病害分级

根据精度校验后的裂缝识别成果,对桥塔整体立面裂缝的空间分布规律与宽度规模做全面统计,竖向裂隙占比最高且密集分布在桥塔中上部区域,斜向裂隙多在截面变化位置出现,网状裂隙主要集中于长期受风雨侵蚀的迎风一侧,横向裂隙数量较少且多与施工缝位置重合,其分布特性与结构受力模式及环境劣化机理高度一致^[5]。在病害等级划分方面,参照现行公路桥梁技术状况评价规范,依据裂缝宽度实测值将损伤程度划分为三个等级,宽度小于0.2 mm定为轻微病害,宽度介于0.2 mm~0.5 mm之间定为中度病害,宽度超过0.5 mm定为严重病害。据此构建覆盖全塔面的裂缝病害分布图,为后续结构安全状况综合评估提供分区化的量化参考依据。

3.3 结构安全状态综合评估

依据裂缝分布统计数据并参照现行桥梁技术状况评价规范,对桥塔各部位裂缝按宽度分级做了病害程度划分,评估过程中同步记录各级裂缝空间坐标,方便与桥塔结构分区图叠加对比,直观显示病害集中区

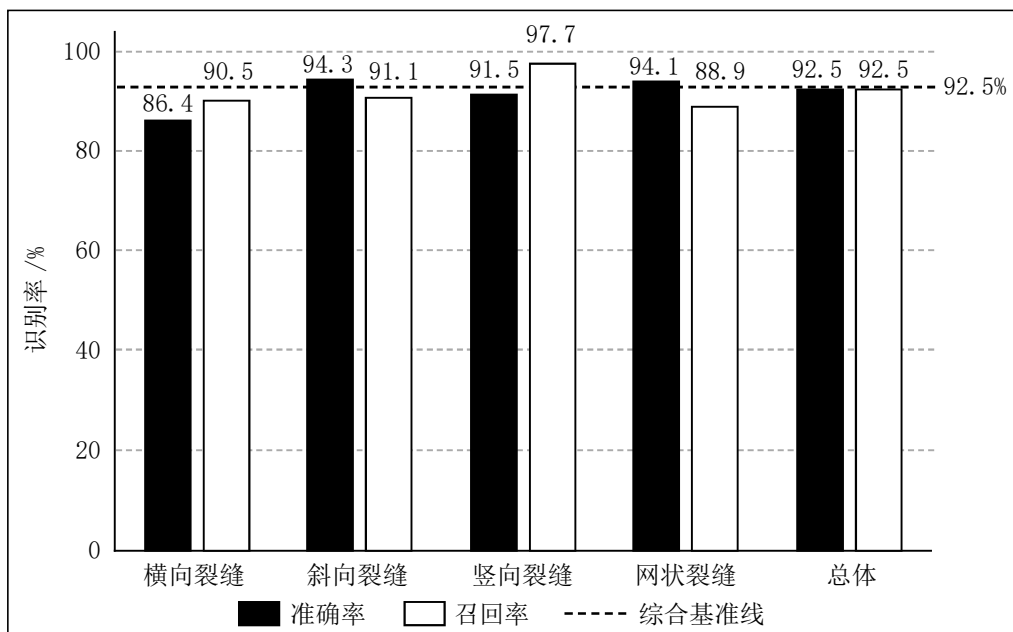


图 1 四类裂缝识别准确率与召回率对比

域,为制定针对性养护方案提供精确位置参考,汇总结果见表 2。

由表 2 可知,桥塔裂缝共 173 条,轻微病害占比 56.6%,中度病害占比 32.9%,严重病害占比 10.4%,中度以上病害合计超过 43%,大多集中在桥塔中上部的

迎风面。综合评估表明,该桥塔结构整体处于可控服役状态,尚未发现会影响结构整体承载能力的贯穿性裂缝,但建议优先对严重病害区域开展裂缝封闭修补,对中度损伤区域制定周期性复查方案,确保市政桥梁长期使用安全。

表 2 裂缝病害等级划分与分布统计

病害等级	裂缝宽度范围/mm	病害描述	裂缝数量/条	占比/%
轻微病害	< 0.2	表面微裂,不影响结构承载	98	56.6
中度病害	0.2 ~ 0.5	裂缝明显,耐久性存在隐患	57	32.9
严重病害	> 0.5	裂缝宽张,承载能力受损风险较高	18	10.4
合计	—	—	173	100.0

4 结束语

本研究以某市政斜拉桥工程为例,将无人机图像采集、掩膜区域卷积神经网络与数字图像后处理技术有机融合,形成覆盖采集、识别、量化、评估全流程的技术体系,极大地弥补了人工检测存在的固有缺陷,同时具备显著的应用价值与创新特点。四种裂缝类型的识别准确率与召回率都达到了 92.5%,宽度测量偏差符合工程规范的相关要求,裂缝分布特征与病害等级划分能够为结构安全状况的客观评价提供量化支撑。未来可进一步研究三维点云模型与裂缝信息的空间关联方法,推动市政桥梁检测朝着智能化、可视化的方向不断迈进。

参考文献:

- [1] 张徐杏.基于卷积神经网络的路桥设施缺陷检测研究[J].科技创新与应用,2022,12(17):76-79.
- [2] 洪卫星,吴美,陈贵海,等.基于机器视觉的路桥裂缝病害自动检测技术[J].交通运输研究,2021,07(04):114-122.
- [3] 李文举,何茂贤,张耀星,等.基于卷积神经网络和投票机制的轨道板裂缝检测[J].应用科学学报,2021,39(04):627-640.
- [4] 应俊杰,夏峰,卢国庆,等.基于深度学习的桥梁裂缝识别方法研究[J].水利规划与设计,2021(01):75-80.
- [5] 王超,贾贺,张社荣,等.基于图像的混凝土表面裂缝量化高效识别方法[J].水力发电学报,2021,40(03):134-144.

电气工程及其自动化在机械工程中的应用

蓝海唐¹，张西彬¹，张永辉²

(1. 中特科技(青岛)股份有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 友创智融数字科技(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 在现代工业体系向智能化、自动化、高效化转型的背景下, 电气工程及其自动化与机械工程的深度融合已成为装备制造业发展的核心趋势。机械工程作为工业生产的基础载体, 其运行效率、控制精度、运行稳定性与智能化水平, 高度依赖电气控制、自动检测、动力驱动与信息化系统的支撑。本文围绕电气工程及其自动化在机械工程领域的应用价值, 系统阐述应用原理与技术特征, 分析二者融合的重要作用, 并展望未来融合发展方向, 旨在为推动机械工程领域技术升级、提升工业装备现代化水平提供理论参考。

关键词 电气工程; 自动化技术; 机械工程; 机电融合

中图分类号: TH-39

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.008

0 引言

机械工程是支撑工业生产、装备制造与工程建设的基础性学科, 主要涉及机械结构设计、制造工艺、动力传动、设备运行等内容, 是实现物质生产与装备运行的物理载体。电气工程及其自动化则以电能控制、电气驱动、自动检测、智能调控为核心, 通过电气系统与控制逻辑实现对机械装备的精准驱动、动态监测与智能管理。二者的有机融合, 构成了现代机电一体化技术体系, 使机械装备向高精度、高速度、高可靠性、低能耗、智能化方向快速发展。

1 电气工程及其自动化与机械工程的内在关联性

机械工程与电气工程及其自动化具有高度互补、相互依存的内在联系, 是现代装备不可或缺的两大组成部分。机械系统为装备提供结构支撑、传动路径与执行机构, 决定装备的机械性能与物理形态; 电气系统为机械装备提供动力来源、控制指令与监测手段, 决定装备的运行效率、控制精度与智能化水平。

在传统机械系统中, 动力传递与动作执行主要依靠机械结构完成, 控制方式单一、调节能力有限、运行灵活性不足。引入电气工程及其自动化技术后, 机械装备可通过电机驱动、电气调速、信号反馈与程序控制实现动态调节, 使机械运动更加精准、平稳、高效。二者的融合, 使机械装备从“纯机械结构”转变为“机电耦合系统”, 从被动运行转变为主动调控, 从固定模式运行转变为柔性化、可编程运行。这种内在关联性,

决定了电气工程及其自动化在机械工程中具备广泛且不可替代的应用空间^[1]。

2 电气工程及其自动化在机械工程中的核心应用领域

2.1 电气驱动技术在机械动力系统中的应用

动力驱动是机械装备运行的基础, 电气驱动技术凭借调速范围宽、控制精度高、响应速度快、能耗可控等优势, 全面替代传统机械驱动方式, 成为机械工程动力系统的核心支撑。电气驱动以电动机为核心执行部件, 通过变频器、软启动器、伺服控制器等电气装置, 实现对机械转速、转矩、转向与启停状态的精准调控, 可满足低速大扭矩、高速高精度、频繁启停等复杂工况需求。

在机械传动系统中, 电气驱动可与齿轮、丝杠、带传动等机械结构协同工作, 实现动力平稳传递与运动精准控制。与传统动力方式相比, 电气驱动具备能耗低、噪声小、维护简便、易于自动化控制等特点, 能够根据机械负载变化自动调节输出功率, 实现节能运行。同时, 电气驱动系统可通过电气保护装置实现过流、过载、过压、欠压等故障保护, 有效提升机械动力系统运行安全性与使用寿命。

2.2 自动控制技术在机械运行调控中的应用

自动控制技术是电气工程及其自动化的核心内容, 在机械工程中主要用于实现机械运动、生产流程与工艺参数的自动调控, 使机械装备摆脱人工干预, 实现

作者简介: 蓝海唐(1989-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向 电气工程及其自动化。

连续化、标准化、稳定化运行。基于 PLC、工控机、嵌入式系统等控制平台,自动控制系统可按照预设逻辑对机械动作进行程序化控制,包括位置控制、速度控制、压力控制、温度控制、力矩控制等多种形式。

在机械装备运行过程中,自动控制系统通过接收指令信号、处理反馈信息、输出控制命令,形成闭环控制机制,使机械运动精度与稳定性大幅提升。对于复杂机械系统,可通过分布式控制、集散式控制实现多轴联动、多设备协同,满足高精度加工、连续化生产等高端需求。自动控制技术还可实现机械装备的远程操控、集中管理与模式切换,增强机械系统的柔性生产能力与环境适应性。

2.3 传感检测技术在机械状态监测中的应用

传感检测技术是机械装备实现自动化运行的基础前提,通过各类传感器对机械运行参数进行实时采集,为电气控制系统提供数据支撑。在机械工程中,传感检测系统可对位移、速度、加速度、压力、温度、振动、电流、电压等物理量进行连续监测,全面反映机械结构、传动系统、动力部件与执行机构的运行状态。

通过信号转换、数据传输与处理,传感系统可将机械状态转化为电信号或数字信号,为故障诊断、精度补偿与安全预警提供依据。在闭环控制系统中,检测信号作为反馈环节,可实时修正机械运行偏差,保证机械动作精准可靠。传感检测技术的应用,使机械装备从“事后维修”转变为“在线监测”,从“经验判断”转变为“数据判断”,显著提升机械系统运行可靠性与维护效率。

2.4 电气保护与安全控制系统在机械安全保障中的应用

机械装备在高速、重载、连续运行过程中,面临过载、碰撞、失稳、漏电、短路等多重安全风险,电气保护与安全控制技术可从电气层面实现对机械系统的全方位安全防护。通过设置过载保护、短路保护、漏电保护、限位保护、急停控制、安全连锁等功能,电气系统可在机械装备出现异常状态时快速切断动力、强制停机或自动调整运行状态,避免设备损坏与安全事故。

安全控制系统可结合机械结构特点,构建多级防护机制,对危险运动、高压部件、高温区域、旋转部件进行安全隔离与状态监控。在自动化生产线中,安全控制系统可实现多设备联动保护、区域防护与故障定位,提升整体生产系统的安全性 with 稳定性。电气安全技术的应用,使机械装备在提升效率的同时,运行安全性得到系统性保障^[2]。

2.5 信息化与智能化技术在机械装备升级中的应用

随着工业信息化与智能化技术快速发展,电气工程及其自动化与信息技术深度融合,推动机械工程向智能机械、数字装备方向升级。基于总线通信、工业以太网、物联网等技术,机械装备可实现数据互联互通、远程监控与集中调度,形成网络化、数字化管控体系。

智能化技术通过算法模型、逻辑判断与自主学习,使机械装备具备自动识别、自动调节、故障自诊断与自适应运行能力。在高端机械装备中,智能化控制系统可根据工况变化自动优化运行参数、补偿运动偏差、预测潜在故障,实现无人干预下的稳定高效运行。信息化与智能化的融入,使传统机械工程突破结构与传动限制,迈向高精度、高效率、高自主化的全新发展阶段。

3 电气工程及其自动化对机械工程发展的推动作用

3.1 提升机械装备运行精度与稳定性

电气控制与反馈系统可对机械运动进行实时校正,消除机械间隙、负载变化与环境因素带来的运行偏差,显著提升加工精度、定位精度与动作重复性。闭环控制与高精度传感技术的应用,使机械装备运行更加平稳,振动与冲击大幅降低,为高质量生产提供可靠保障。

3.2 提高机械系统运行效率与生产能力

电气驱动与自动控制技术可实现机械装备高速化、连续化运行,减少启停时间与人工干预,提升生产效率与设备利用率。自动化控制系统可优化机械运行节拍,实现多机构协同动作,降低能耗与物料损耗,使机械系统在同等条件下实现更高的产能与效益^[3]。

3.3 推动机械装备向柔性化与多功能化发展

通过可编程控制与模式切换,电气自动化系统使机械装备能够快速适应不同工艺需求与生产任务,实现一机多用、柔性生产。机械结构无需大幅改动,仅通过调整控制程序即可完成不同动作与工艺流程,增强装备适应性与扩展能力,降低设备投入与改造成本。

3.4 实现机械系统节能降耗与绿色运行

电气驱动与智能调控技术可根据机械负载需求动态调节功率输出,避免空转、轻载与过载造成的能源浪费。变频调速、智能软启动、能耗监测等功能,可有效降低电力消耗与机械磨损,实现节能、降噪、减排的绿色运行目标,契合现代工业可持续发展要求。

4 电气工程及其自动化在机械工程中的应用发展趋势

4.1 高度集成化与一体化

未来机械装备将进一步实现机械结构、电气驱动、控制系统、传感检测的高度集成,结构更加紧凑、体

积更小、效率更高,机电接口更加简化,系统耦合更加紧密,整体性能持续提升。这种集成化并非简单的部件拼接,而是通过模块化设计与系统集成技术,将电气驱动模块、控制模块、传感模块与机械执行机构深度融合,实现硬件共用、数据共享、功能协同,大幅减少设备占用空间与制造成本。同时,集成化发展将推动机电系统的标准化与通用化,不同厂家的电气部件与机械结构可实现无缝对接,降低装备研发、生产与维护的难度。

此外,高度集成化还能减少系统冗余,降低故障发生概率,提升装备运行的稳定性与可靠性,适配小型化、轻量化的现代机械装备发展需求,尤其在精密仪器、便携式机械装备领域具有显著优势。

4.2 智能化与自主化水平不断提升

以人工智能、数字孪生、机器学习为代表的智能技术将深度融入机械控制系统,使装备具备自主感知、自主决策、自主修复与自主优化能力,向无人操控、自主运行方向发展。人工智能算法将实现对机械运行数据的深度挖掘与分析,能精准识别工况变化、预测潜在故障,自动调整运行参数,优化运行模式,摆脱对人工经验的依赖。数字孪生技术将构建机械装备的虚拟镜像,实现虚拟仿真与实物运行的实时联动,可在虚拟环境中完成装备调试、故障模拟与工艺优化,大幅降低实体试验成本与风险。机器学习技术将使机械装备具备自主学习能力,能够根据长期运行数据积累经验,持续优化控制策略,提升适应复杂工况的能力。未来,智能化与自主化技术将推动机械装备从“自动化运行”向“智能化决策”转型,实现无人车间、智能生产线的全面普及,大幅提升生产效率与产品质量^[4]。

4.3 网络化与远程化管控普及

基于工业互联网与云平台的远程监控、远程调试、远程运维将成为主流模式,机械装备可实现跨区域、跨设备协同运行,数据共享与智能调度能力显著增强,运维成本持续降低。随着5G技术的普及与工业以太网的升级,机械装备将实现高速、稳定的数据传输,打破时空限制,实现多地点、多设备的集中管控。云平台将整合所有机械装备的运行数据,构建大数据管控中心,管理人员可通过电脑、手机等终端实时查看装备运行状态、参数数据,远程下达控制指令,完成装备调试与参数调整。远程运维技术将实现故障的远程诊断与远程修复,技术人员无需到达现场,即可通过远程连接排查故障、更新程序、指导维护,大幅缩短故障处理时间,降低运维人力成本与差旅成本。此外,网络化管控还能实现多装备协同联动,优化生产资源

配置,提升整个生产系统的运行效率与协同能力,推动机械工程向网络化、集约化方向发展。

4.4 高精度与高可靠性持续突破

随着高精度传感器、高性能伺服驱动与先进控制算法的发展,机械装备运动精度、响应速度与稳定性将达到更高水平,可靠性与使用寿命进一步提升,满足高端制造与精密工程需求。高精度传感器的精度将持续提升,能够实现纳米级的位移、速度、压力等参数检测,为精准控制提供更可靠的数据支撑;高性能伺服驱动系统将具备更快的响应速度与更高的控制精度,可实现对机械运动的毫秒级调控,消除运动偏差,提升装备的加工精度与动作重复性。先进控制算法的优化将进一步提升系统的抗干扰能力,有效抑制环境温度、负载变化、机械磨损等因素对运行精度的影响,确保装备在复杂工况下稳定运行。同时,材料技术与制造工艺的升级将提升电气部件与机械结构的耐用性,减少磨损与故障发生,延长装备使用寿命,降低维护成本,适配航空航天、精密加工、高端装备制造等对精度与可靠性要求极高的领域^[5]。

5 结束语

电气工程及其自动化技术在机械工程中的广泛应用,是现代工业技术发展的必然结果,也是机械装备实现现代化、智能化、高效化的核心支撑。二者的深度融合,不仅显著提升了机械装备的精度、效率、稳定性与安全性,更推动机械工程从传统结构驱动向智能控制驱动转型,为工业生产高质量发展提供了强大技术动力。随着技术不断创新,电气工程及其自动化与机械工程的融合将更加紧密,装备智能化水平将持续提升,在智能制造、高端装备、绿色工业等领域发挥更加重要的作用,为现代工业体系升级与技术进步奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 粟保锐.浅谈电气工程及其自动化在电气工程中的应用[C]//中国电力设备管理协会.全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(六).国网湖南省电力有限公司常德市鼎城区供电分公司,2024.
- [2] 刘少航.电气工程及其自动化技术在机械工程中的应用[N].企业家日报,2025-04-27(003).
- [3] 伊大宝.电气工程及其自动化在机械工程中的应用分析[J].化纤与纺织技术,2023,52(03):119-121.
- [4] 孙英赫.电气工程及其自动化在电气工程中的应用[J].科学咨询(科技·管理),2021(14):65-66.
- [5] 董晓澄.电气工程及其自动化在电气工程中的应用[J].大众标准化,2021(04):32-34.

智慧水务背景下水质智能化检测技术探析

乔慧冬, 陈 硕

(升禾(山东)检测科技有限公司, 山东 日照 276800)

摘 要 随着智慧水务理念的持续深化与广泛普及, 水质智能检测技术已成为维护水资源安全、推动水资源高效合理利用的核心支撑。本文聚焦智慧水务背景下的水质智能检测技术, 系统梳理其发展历程、技术原理及特点, 探讨了当前该项技术存在的问题及未来发展趋势, 以期对水质智能检测技术的进一步发展提供理论参考, 助力智慧水务体系统的完善, 最终实现水资源的精准管控与可持续利用。

关键词 智慧水务; 水质智能化检测技术; 传感器技术; 数据分析

中图分类号: TU991.21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.009

0 引言

当前, 水资源的合理利用与保护是全球广受关注的热点议题。智慧水务是利用现代信息技术实现水资源智能管理与科学决策的创新模式, 水质监测作为智慧水务的核心组成部分, 其智能化水平直接决定水资源质量安全保障能力。传统水质检测方法存在检测周期长、数据时效性差等短板, 无法满足智慧水务对水质信息快速、精准获取的要求。因此, 开展智慧水务场景下的水质智能化检测技术研究具有重要的现实意义, 可有效提升水质检测的速度与准确度, 为智慧水务的发展提供有力支撑。

1 水质智能化检测技术概述

1.1 水质智能化检测技术的定义

水质智能检测技术是运用高科技传感器技术、信息采集技术及数据分析方法等进行对水质各项指标进行自动化、连续性、精确性的检测和分析的技术。该技术将传感器安置在水体内部实时收集水样数据, 并把数据输送到处理中心进行处理和分析, 进而及时准确地了解水质状况。水质智能化检测技术不仅可以监测常见的水质参数如 pH 值、溶解氧、化学需氧量等, 还可以监测一些不易被发现的污染物及有毒有害物质, 为水质管理和决策提供有力支持。

1.2 水质智能化检测技术的发展历程

水质智能监测技术的发展经历了不同的时期, 最早的水质检测是人工取样后送到实验室进行分析的方式, 这种方法耗时长, 无法及时反映水质变化情况。随着传感器的出现, 能够连续监测水质指标的电极传

感器、光学传感器等被研制出来, 使水质检测更加及时有效^[1]。近年来, 由于信息技术、数据分析技术的发展, 水质智能化检测技术又上了一个新的台阶, 实现了对水质变化的数据收集、传输以及处理等功能, 使水质检测更加智能化。目前融合物联网、边缘计算以及 AI 算法的智能化监控系统能够做到及时报警、溯源及预测未来变化情况, 大大提高了应对速度和决策准确性, 加快水环境保护工作向主动预防、精准治理转变的步伐。

1.3 水质智能化检测技术对智慧水务的重要性

在智慧水务领域, 水质智能化监测技术非常重要, 它可以及时、准确地得到水质状况的有关数据, 对水资源的管理以及决策起到指导作用; 根据水质的数据分析和处理, 可以尽早发现水质异常现象, 对其进行处理, 保证水资源的安全和质量; 水质智能化监测技术还可以节省水质监测的时间及费用, 减少由于人工检测带来的偏差以及繁杂的工作, 而且可以做到对水质的远距离监控及管理, 使管理人员随时随地可以了解到水质的情况, 提高管理水平。

2 水质智能化检测技术的原理与方法

2.1 传感器技术原理

传感器是水质智能监测技术的重要组成部分, 它基于物理、化学或生物效应将水质参数转换为电信号或其他可测量的信号。常见的水质传感器有电极式传感器、光学传感器、生物传感器等。电极式传感器是根据电极与水之间的电位差来测定水质参数如酸碱度、溶解氧等, 光学传感器是基于光与水之间的相互作用

作者简介: 乔慧冬 (1984-), 女, 专科, 研究方向: 环保工程。

而设计出来的水质传感器用于检测浊度、颜色等，而生物传感器是由生物分子和水体中物质之间的特异性反应构成的水质传感器用于检测微生物、重金属等。

2.2 数据采集与传输方法

水质智能化检测系统在通过传感器对水质进行检测之后，要将检测到的数据送到计算机上进行分析和处理。数据采集与传输方式包括有线传输以及无线传输两种方式。有线传输是指用电缆或者光纤把传感器采集到的数据传到计算机进行存储，这样的传输方式稳定、可靠，但是布线成本高。无线传输就是利用无线网络将传感器采集到的数据传输到计算机进行保存，其优点就是安装方便、成本低，但是传输的稳定性较差，目前主要有 ZigBee、GPRS、3G/4G 等技术手段。

2.3 数据分析与处理技术

水质智能监测系统在获取大量水质数据之后，需要对这些数据进行分析 and 利用，从中获取有用的信息。数据处理技术主要有数据挖掘、机器学习、深度学习等，数据挖掘是指从大量的资料中提取有意义的信息和知识，通常使用的方法有联系规则挖掘、聚类分析、分类算法等^[2]。机器学习是指让电脑从资料中学习从而获得提升自身性能的技术，一般使用的模型有决策树、支持向量机、神经网络等。深度学习是指使用深层的神经网络对数据进行整理分析的技术，具有强大的特征提取能力和分类能力。

3 水质智能化检测技术的优势与应用

3.1 水质智能化检测技术的优势

水质智能化监测技术拥有诸多优点，利用传感器网络及物联网平台，可以做到对水质的全天候实时连续监测，及时地发现水质的变化情况，对发生的污染事件及异常变化作出迅速的反应，为水源保护、供水调度以及应急指挥提供准确有效的信息支持；采用高灵敏的传感器结合智能的算法，该技术在 pH 值、溶解氧、浊度、氨氮、重金属等重要指标的监测中有着很好的精度和长久的稳定性，消除了人为的操作误差及采样的延迟时间；系统集成了自动校正、远程维护及数据可视化等功能，减少了对专业人员的依赖，操作简单方便，提高了检测的频率及覆盖面，使水质监测由被动应对转为主动预防。

3.2 水质智能化检测技术应用于饮用水安全保障

在饮用水安全保障上，水质智能监测系统起到了非常重要的作用，在水源地、取水口、水厂净化各工艺段、清水池以及输水管网关键点布置多参数水质监

测仪，实时监测水中浑浊度、余氯含量、pH 值、氨氮含量、有机物、微生物及重金属等参数，利用边缘计算及人工智能技术，能自动判断异常值、提示潜在隐患并关联调度反馈机制^[3]，有助于快速追溯源头和准确应对。该技术大大提高了水质监管的前瞻性、协同性以及反应速度，使饮用水安全由事后补救变为事前防范，为饮用水安全从始至终、从源头到龙头的全过程、全链条饮用水质量的保障奠定了坚实的技术基础。

3.3 水质智能化检测技术在污水处理中的应用

在污水处理行业中，水质在线监测技术以传感器网络、边缘计算以及智能算法为基础，对污水中化学需氧量、氨氮、总磷、pH 值、溶解氧、浊度等重要指标进行连续实时监测，系统能及时反映水质变化情况，控制加药量、曝气强度、水力停留时间等工艺参数自动调整，极大地提高了处理效率和资源利用率。此外，还涉及进水、过程段、出水全流程的监测以及对出水水质的闭环监测，快速发现不正常的变化趋势，保证出水水质达标排放，从源头增强对水污染的防范能力，推动绿色低碳水务管理。

4 水质智能化检测技术面临的挑战

4.1 传感器性能与可靠性问题

传感器是水质智能化监测的基础，它的质量直接影响到水质监测的准确性和可靠性。而部分电化学传感器容易受到水体浑浊度、温度变化、共存离子等因素影响而造成延迟响应和数据波动；光学传感器则会受到微生物附着、光路污染等问题影响导致长期使用灵敏度降低。大部分传感器材质不够稳定，膜易老化或溶解，影响使用寿命。标定过程需在标准液下逐点校准，维护过程需要拆卸清理及设定参数，麻烦且不容易控制。基层站点常因缺少专业人员而耽误标定，造成数据误差或者系统停止运行，阻碍了水质监测网络的广覆盖和高速度发展。

4.2 数据安全与隐私保护问题

水质智能监测系统获取的大量水质信息不仅包含物理化学性质，还有可能涉及使用者的位置、用水习惯以及设备信息等，具有很强的隐私性，在数据传输过程中需要使用端到端加密，双向身份认证的方式，在存储过程中要做到分级加密和动态调整访问权限，所有的数据操作都要留下痕迹可查询，防止出现未经授权或者越权调用的情况发生^[4]，数据共享需要得到用户授权的基础上，只能是环境监测、公共卫生等正当的用途，不能用于商业推销或者第三方转卖，严格

按照个人信息保护法以及数据安全法的规定来执行,遵循最少必要原则和目的限定原则,确保公众的知情权、决定权、删除权。

4.3 技术标准与规范不完善问题

目前,水质智能检测技术的相关标准及规范还不完善,包括传感器校准方法、数据传输方式、设备的环境适应性及长期可靠性评估等重要方面都没有统一的标准,不同厂家生产的传感器在响应灵敏度、抗干扰能力、寿命衰减情况等方面存在较大差异,使得同一水体的检测结果产生较大误差。应用上也缺乏相关的布置规定、维护指南以及质量控制制度等,造成整个系统集成难度大、数据不可靠、不同区域的监测结果无法互通,影响了智能检测技术应用于流域监控、应急预案及智慧水务等方面的推广应用和整合使用。

5 水质智能化检测技术的发展趋势

5.1 传感器技术的发展趋势

未来传感器的发展方向包括更高精度、更高灵敏度、更多功能、更小体积以及智能化等方向发展,新的传感器层出不穷,纳米传感器、生物传感器、柔性传感器、光纤传感器等,在环保检测、医疗检测、工业控制、可穿戴设备等方面都有大量的应用,它们拥有更高效的识别特异性和更低的检测极限,可以对痕量的气体、病原体、代谢标记物、微应力变化等做出快速准确的反应^[5]。结合边缘计算以及轻量级的 AI 模型,传感器可以独立完成信号分析处理、异常判断以及即时响应等功能,在恶劣工况下长时间的稳定工作。材料的进步和先进的制造工艺使传感器的功耗更低、寿命更长、系统兼容性更好,在实现万物互联、智能感知等方面起到重要的基础作用。

5.2 数据分析与处理技术的发展趋势

数据分析与处理技术将更加智能化、自动化、直观化。人工智能算法可以更好地发现水质变化规律,机器学习可以自动调整污染变化趋势,而深度学习则可以发现其中大量的复杂关系。系统可以对溶氧下降、氨氮过高或者重金属超标等情况及时发出报警提示,实时分级报警并给出解决方案。智能仪表与边缘计算设备合作完成,实现数据收集、清理、建模、反馈的全流程闭环。可视化界面可以对多个方面进行下钻查询,结合地理信息地图、趋势热力图、对比雷达图、交互式仪表盘等,使水质状况一目了然,大大增强了监控响应速度和治理准确性。

5.3 水质智能化检测技术与其他技术的结合发展趋势

水质智能化监测技术正不断融入物联网、云计算、大数据等新一代信息技术的发展进程之中,建立从水源地到水厂、管网以及用户端的全流程监测系统。基于高分辨率的多参数传感器网络,实时获取水体 pH 值、溶解氧、浊度、氨氮、重金属等参数的连续测量及相应的响应时间小于 1 000 ms。物联网支持广泛分布的在线监测设备间互联互通。边缘协同、云计算可以提供无限计算能力及跨区域数据交互能力。大数据技术可以推动趋势预测、异常溯源、风险预警及智能诊断。系统拥有自主学习及自我完善的能力,极大地提高水质管理的精确性、即时性和前瞻性,为持续合理地用水、精细地管理用水提供了坚实的技术支持。

6 结束语

在智慧水务背景下的水质智能检测技术是保障水资源安全以及合理利用的重要手段。本文对水质智能检测技术的定义、发展历史、原理与方法、优势与应用、面临的困难以及发展趋势等进行了详细介绍。水质智能检测技术具有及时、准确、高效等优点,在饮用水安全保障、污水处理等方面起到很大的作用,但是也存在着传感器的性能和稳定性不足、数据的安全性和隐私性保障不力、技术标准和规范不健全等缺点。未来,水质智能检测技术将会向传感器的高精度化、数据分析与处理智能化、与其他技术的融合方向发展。为了促进水质智能检测技术的发展,需要加强传感器技术的研究和创新,提高传感器的质量和可靠性;加强对数据安全及隐私的保护,制定相应的法律法规及技术标准;推动水质智能检测技术与其他技术的融合,做到水资源的科学管理和合理开发。只有这样,才能够更好地应对智慧水务的发展要求,给水资源的安全和质量提供有力的支撑。

参考文献:

- [1] 牛影.基于智能化的水质理化检测装置研究与设计[D].合肥:合肥大学,2024.
- [2] 魏冶.智能化水质监测系统在环保治理中的应用[J].计算机产品与流通,2026(01):112-114.
- [3] 林必忠,江升.在线多参数水质智能化检测装置的设计[J].福建农机,2021(03):37-41.
- [4] 谭志军.循环水水质检测技术的革新:自动智能化[J].读报参考,2025(20):52-53.
- [5] 蔡立弘,孙杰,万梓薇.数字水哨兵:智能水质检测实验室[J].中学科技,2025(12):2-9.

智慧城市中的交通大数据分析 with 拥堵预测

樊祥至, 高 敏

(齐齐哈尔工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161003)

摘 要 随着城市交通越来越拥挤, 对交通大数据进行实时采集、分析以及预测已经成为缓解交通堵塞的重要措施之一。通过对车辆 GPS、路侧传感器、移动设备轨迹等多源数据进行融合, 建立交通流时空特征模型, 运用机器学习与深度学习算法来进行短期、中期交通拥堵预警, 从而对交通流态进行实时掌控。根据预测结果对信号灯配时、出行路线选择以及交通疏导进行调整, 可以大大提升道路通行能力, 减少等待时间, 节约能源以及排放量, 为智慧城市的交通管理提供智能决策参考。

关键词 智慧城市; 交通大数据; 拥堵预测; 时空特征; 模型优化

中图分类号: U495; TP391

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.010

0 引言

随着工业化进程不断加快, 城市机动车数量持续增长, 交通堵塞已经成为制约城市发展的瓶颈性问题, 多源交通信息的实时获取以及智能化分析为我们探索交通流量变化规律带来机遇。应用机器学习、深度学习等技术对交通流量构建模型以及进行预测, 从而做到实时观察路况以及发出警报, 在合理使用预测结果的基础上可以调控红绿灯时序、路径计算以及调度方案, 进而提升道路利用率, 节约能源消耗, 降低环境污染, 对智慧城市的交通治理提供基于大数据的智能化决策建议。

1 智慧城市交通大数据概述

1.1 交通大数据的来源

城市智慧交通大数据来源是各类异构型的数据源, 主要有车辆 GPS 和 V2X 数据、路侧设备如摄像头、雷达、地磁线圈等、手机信令、公交地铁刷卡以及公众出行等信息。车辆的 GPS 及 V2X 设备可以得到非常精确的车辆的位置坐标、速度与行驶路径等信息, 可以作为城市道路中车流密度研究的基础数据。路侧设备则有摄像机、雷达以及地磁线圈等可以获取车辆的数量、速度、通行方式等信息, 用于城市道路中行车流量监测与突发事件发现^[1]。

此外, 移动端轨迹数据(手机位置记录、共享单车骑行轨迹)以及公众出行数据(公交刷卡、滴滴出行等打车应用)都可体现行人的行为特征以及出行需求的变化情况。对上述多种来源的数据加以整合就可以构建起全时空覆盖面广、角度多样性的交通大数据集, 对交通分析、拥堵预报、出行优化等问题都有参考作用。

1.2 数据特征与处理挑战

交通大数据具备海量性、时空性和多源异构性的特点, 数量庞大并持续增加, 符合“大数据量、高速产生、实时更新”的特点; 而交通数据除了包含空间位置与时间外, 还有包含速度、加速度、路段特征等多种属性, 解析和处理起来较为繁杂。因此, 为了适应实时交通预测以及动态调度的需求, 对数据处理的要求是需要做到高并发、低延迟、高可靠性的状态。

针对上述难点, 要对采集到的数据先经过预处理, 包括清洗、去噪、融合以及归一化等一系列的操作来去除传感器偏差所带来的误差以及过多的数据。另外, 使用高性能的流式大数据处理引擎(Spark Streaming、Apache Flink 等)来实现实时处理大规模的数据, 并进行分析与计算, 可以给之后的道路车流预测、拥堵判断提供精确的、实时的信息来源^[2]。

1.3 交通大数据分析技术

交通大数据研究借助新型的算法、计算平台深入理解复杂的交通体系。采用时空数据分析技术对道路交通网上的车辆时空分布特征进行研究, 可以找出交通瓶颈点、热点路段以及危险路段, 从而作为交通拥堵预报的一种特征输入项; 模式识别及聚类分析的方法可以从以往交通数据内获取典型的车流量变化状况, 用作模型构建与预测的参考数据。

实时流处理是一种对动态更新的交通数据持续不断地进行监测与分析的技术手段, 在事件触发或者流处理的过程中能够迅速地检测出诸如交通堵塞以及交通事故等突发性情况变化, 再配合时间和空间维度上

作者简介: 樊祥至(2003-), 男, 本科, 研究方向: 大数据分析。

的分析,从而使得交通大数据分析可以实现对当前的详细描绘,同时也给交通管理部门做出合理安排提供了有效的参考依据,使道路交通资源分配更合理并且实现智慧管理。

2 交通拥堵预测模型与算法

2.1 传统统计预测方法

传统的统计预测方法是最早的针对交通拥堵预测的方式,主要是借助经典的统计学方法的时间序列、回归方程以及马尔科夫链等方法。其中,时间序列法就是通过以往交通流的数据的历史进行时序上的相关性和线性的探索来建立预测模型。例如:自回归整合移动平均模型 (ARIMA) 及扩展的形式就可以在较短时间内很好地预测交通流量的变化情况;而基于马尔科夫模型的交通拥堵预测则是运用其状态转换的概率阵型表示交通状态从一个状态到另一个状态变化的过程,在较小的范围中进行预测^[3]。

虽然上述统计方法适用于线性的变化及有显著规律性的交通流量信息,在处理复杂的行车行为、多重模式的车流量以及非线性的特点时就显得力不从心了。为了提高模型的灵活性,本文采用了高阶多元马尔科夫模型并用增加调控变量、多种来源变量集成等手段增强模型对于动态变化交通的反应程度,从而大大提高了模型预测精准度以及稳定性,但是依然基于线性的前提条件。

2.2 机器学习预测模型

大数据体量以及计算性能的增强使得机器学习成为交通拥堵预报的一类主要手段。机器学习的模型可以自动从海量的历史交通信息中挖掘出输入特征到输出流量之间的复杂非线性联系,在多个输入参数的情况下提升了预报准确性。而支持向量机可以构造一个非常高维度的特征空间,并且通过最大间隔分类器来实现对非线性样本的区分,适合用于短期或者中期的流量预测工作。

随机森林是一种集成决策树的方法,在多颗决策树的投票中来减小过拟合问题,增强模型的泛化能力;而梯度提升树 (GBDT) 则是通过对误差的修正来进行预测优化的一种方式,可以提取到各个变量之间的复杂的相互关系。该类机器学习模型适用于高维、多源输入的数据,具有较好的预测效果,但是需要较多的特征工程以及参数调整工作,因此需要借助一定的专业知识来进行特征选择与设计。

2.3 深度学习模型

深度学习方法是目前交通流预测的研究前沿热点,可以实现对时空序列数据进行端到端的特征抽取。长

短时记忆网络 (LSTM) 采用门控策略来克服传统的递归神经网络存在的梯度爆炸或梯度消失现象,可以较好地学习交通量的时间变化过程中所蕴含的长程依赖特性;而图卷积网络 (GCN) 则适用于对交通网络的空间结构进行建模,在表示交通网络中的道路连接以及其拓扑信息上具有较好的效果,可以通过将道路节点及其相互连接的关系映射成一种图结构特征的方式,从而方便后续的学习任务。

除此之外,利用注意力机制的 Transformer 模型可以实现并行运算并且可以对全序进行建模,因此能够用于交通流的预测任务当中,进而提高了对于复杂的时空关系的学习能力。深度学习算法适用于异构的大规模数据集,但是训练过程占用大量的处理器资源并且对于标记的数据量有较高的需求以防止模型过拟合等。

2.4 综合模型与混合集成算法

集成模型、混合集成算法在整合不同的预测技术的同时,也提高了对交通拥堵情况的预测效果。集成学习方法如袋装法 (Bagging)、提升法 (Boosting)、堆叠法 (Stacking) 等,可以将一系列独立的基模型的结果进行整合以得到一个更准确可靠的预测结果,降低某一个模型的误差,从而提高了集成的学习效果,比如把时间序列模型的短期趋势捕捉能力以及深度学习模型的非线性表示能力结合起来,既可以包含局部的变化,又可以包含全局的变化^[4]。

混合模型也能够结合使用统计方法以及机器学习或者神经网络模型来建立一个多层次的预测机制,利用不同的时间段,运用最适宜的方法来进行单独的预测之后加以整合。

3 交通拥堵预测系统架构设计

3.1 系统总体架构

交通拥堵预测系统通常由数据层、计算层、模型层和应用层构成,形成完整的智能预测体系。数据层负责多源交通数据的采集与存储,包括车辆 GPS、路侧传感器、手机定位以及出行记录等信息。通过分布式文件系统与消息队列技术 (如 HDFS、Kafka), 实现数据的高效传输与存储,并支持历史数据与实时数据的统一管理。

计算层承担数据预处理与计算任务,对采集数据进行清洗、格式转换及特征提取。采用批处理与流处理结合方式,在 Spark、Flink 等框架下完成数据过滤、缺失值补齐和时间对齐等操作,同时提取关键时空特征,为模型提供高质量输入数据。

模型层集中部署各类预测算法,包括统计模型、机器学习模型及深度学习模型。通过容器化与微服务

架构实现模型的灵活部署与扩展,并结合模型管理机制进行版本控制与自动更新,提升预测性能与稳定性。

应用层用来将预测结果进行可视化展示以及业务规则的应用,将模型输出转换成可以使用的交通管控措施,提供给交管部门仪表盘、报表生成功能模块等,可以跨设备使用。

3.2 实时数据处理与流分析

交通拥堵预报系统依靠实时数据流处理技术,能够实现快速交通监测预警。在实时数据流水线中,基础数据由各种各样的传感器以及车联网装置不断向系统中输送,运算环节运用流式计算框架对数据流实时进行运算。例如:以事件时间窗口来处理某段时间内车辆数量信息等,从而快速了解交通流量变动情况以及突发性交通堵塞警报等。

实时数据分析不仅涉及基本的统计汇总,还有复杂的事件处理(CEP)、模式匹配,可以找到数据流中的特定的事件串。基于实时计算系统,在短短数秒,甚至毫秒以内就可以做出拥堵趋势的预测,进而推送到模型层或者应用层,作出交通管控灯光调控与拥堵告警信息提醒,使整个系统更加灵敏、快速响应^[6]。

3.3 可视化与决策支持

交通拥堵预报系统最核心的目的就是给交通管理部门以及各级领导层提供一目了然的信息支撑依据。可视化层借助于开发交互式的图形界面以及动态地图将交通流、拥堵等级与未来发展的走势以热力图、时间线图表、流量图表等方式呈现出来,使调度人员能迅速了解掌握整个城市的路网运行状况及其发展趋势。

同时,可视化系统还具有对多维度查询、回溯比较、虚拟仿真的功能,方便交管部门根据分析结果实施方案论证、红绿灯调控、路径指引发布等工作内容,通过可视化加决策支持模块智能推荐的方式,在出现潜在拥堵预警情况后可以即时发送报警提示以及调度建议预案,提高城市智能化交通管控水平。

4 智慧城市交通拥堵预测面临的挑战、应用与未来发展

4.1 当前面临的挑战

智慧城市的道路交通拥堵预测实践中有诸多困难:其一,交通数据质量参差不齐以及存在隐私泄露的威胁,来源多样化的数据产生各种各样的误差问题,如传感器误差、空缺值、格式不一等,还存在有关车辆路线以及人员出行的信息需要在开放共享的同时考虑到个人隐私保护的问题;其二,模型的泛化性较差,不同的城市之间存在着巨大的区别,即道路格局的区别、交通流量的区别以及人们的出行习惯的区别等,

所以直接采用单个城市训练好的模型是不太现实的,应该进行调节优化并且调整特征以适应新的城市环境。

4.2 智慧城市交通拥堵预测的典型应用

交通拥堵预测技术的应用前景广阔,在智慧城市的建设中有着广泛的应用场景。智慧信号机控制根据预测结果适时调节绿灯时间及交叉口配时方案来解决局部路段拥堵问题;出行导航及路线规划依据最新的预测流量情况给司机以及公共交通系统提供最佳行驶方案,从而增大道路承载力,减少排队时间及空气污染等负面因素的影响。高峰预警及分流措施可以在突发性大流量之前及时发出警报并且指导车辆进行分流,以避免出现大规模堵塞的现象。

4.3 未来发展趋势

交通拥堵预测将向融合化与智能化方向发展。边缘计算与5G技术的结合提升了数据传输与处理效率,可在低时延条件下实现实时流量预测,并增强模型的可解释性,便于决策应用。多出行方式融合预测逐渐成为重点,在统一框架下综合公交、共享出行及步行等数据并进行分析。随着算法优化、算力提升及通信技术进步,交通预测模型精度与响应能力将持续提高,推动智能交通系统向更高水平发展。

5 结束语

智慧城市交通大数据挖掘与拥堵预报依托多源信息融合、算法建模及系统架构设计,实现道路交通流的实时监测与预测。通过融合统计学、机器学习与深度学习方法,并结合实时数据分析与智能决策平台,可有效支持交通疏导与路径优化,提升道路利用效率。当前仍存在数据质量、模型适应性及计算时效等方面的挑战。随着边缘计算、5G通信及多交通方式协同预测技术的发展,交通预报系统将持续向智能化、高效化发展,更好地服务城市治理与智慧城市建设。

参考文献:

- [1] 崔瑶.基于5G通信技术的城市智慧交通堵塞状况预测的方法[J].长江信息通信,2023,36(12):213-215,220.
- [2] 鹿皓元.基于深度学习的交通流补齐以及预测算法的研究[D].北京:北京邮电大学,2024.
- [3] 熊佳慧.基于深度学习的交通拥堵预测研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2025.
- [4] 杨瑞雪.“智慧城市”背景下衡城市数字交通的研究[D].保定:河北大学,2024.
- [5] 古明生.多模式大数据融合及大模型驱动智能体系统的智慧城市建设应用分析[J].长江信息通信,2025,38(08):231-233.

智能化技术在现代建筑工程 施工技术中的应用

李 岗

(腾越建筑科技集团有限公司安徽分公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 传统建筑工程施工存在环节脱节、管控粗放、作业误差大、协同不畅等问题, 制约施工质量与效率提升。本文以 BIM 技术、物联网、大数据等智能化技术为核心, 结合建筑施工全流程实践, 对智能化技术在施工管控、关键环节作业、协同管理中的应用展开研究, 分析技术适配、实操落地、协同管理层面的应用难点, 提出优化技术融合路径、强化人员培育与设备保障、完善协同管理体系等针对性解决对策, 以期为推动智能化技术与建筑施工深度融合, 实现施工管理精细化、作业精准化、协同高效化提供参考。

关键词 智能化技术; 建筑工程; 全流程管控; 协同管理

中图分类号: TU74; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.011

0 引言

我国建筑行业正朝着绿色化、工业化、智能化方向加速转型, 传统施工模式在质量管控、进度协同、成本控制、安全管理等方面的短板日益凸显, 已难以适配现代工程建设的高标准要求。以 BIM、物联网、大数据、人工智能为代表的智能化技术, 为建筑施工全过程升级提供了关键支撑, 成为推动行业提质增效的核心动力。本文立足于建筑工程施工实际场景, 围绕智能化技术在施工管控、现场作业、多方协同等环节的应用路径展开分析, 梳理技术融合、实操落地、体系构建中的突出问题, 并提出针对性优化策略, 旨在为建筑施工企业推进数字化转型、提升核心竞争力提供参考, 助力建筑行业实现高质量、可持续发展。

1 智能化技术在建筑工程施工中的核心应用技术

1.1 施工全流程智能化管控技术

施工全流程智能化管控技术以综合性智能化技术覆盖施工全环节, 实现施工过程的系统化管控, 打破传统施工中各环节脱节、管控滞后的局限, 推动施工管理从粗放式向精细化转型。BIM 技术作为核心支撑, 通过构建三维数字化模型, 将施工设计、进度规划、资源配置等全流程信息整合其中, 实现施工全流程可视化呈现, 设计中的碰撞问题可提前排查, 施工方案可基于模型进行动态优化, 避免后期返工整改。物联网技术通过在施工设备、物料、作业区域部署智能传

感器, 实现施工过程实时监测, 温度、湿度、施工荷载等关键参数可实时采集并传输至管理平台, 异常情况第一时间反馈, 保障施工过程合规可控^[1]。大数据技术依托施工全流程产生的海量数据, 通过算法分析挖掘数据背后的规律, 为施工进度调整、资源调配、风险预判提供精准支撑, 让施工决策摆脱经验依赖, 实现科学高效, 推动施工全流程形成闭环管控, 提升整体施工质量与效率。

1.2 施工关键环节智能化作业技术

施工关键环节的智能化作业技术, 主要围绕施工的主要环节展开, 利用针对性的智能化技术提高作业的精准度和效率, 解决传统关键工序作业误差大、效率低、质量难以保障的问题。智能浇筑、砌筑技术依靠自动化设备加精准控制算法, 代替传统人工操作: 浇筑过程中可以精准把控浇筑速度、厚度和平整度, 砌筑作业也能让砖块定位、灰缝控制实现标准化, 能有效减少人工操作的误差, 提高施工工艺水平, 还能降低工人的劳动强度, 缩短作业所需时间。智能检测技术针对混凝土强度、钢筋间距、墙体垂直度这类关键工序的质量指标, 使用高精度检测设备搭配 AI 识别技术, 做到质量缺陷的精准识别和量化分析, 与传统人工检测相比, 不仅检测效率更高, 还能避开人为判断的误差, 及时发现潜在的质量隐患并完成整改。智能吊装、运输技术借助自动化调度和精准定位系统,

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

让吊装设备实现精准操作、物料实现高效运输,优化了施工工序之间的衔接,减少了工序等待时间,避免物料堆积和运输损耗,保证关键施工环节有序推进,为整体施工进度提供支撑。

1.3 施工协同智能化技术

施工协同智能化技术依靠智能协同技术,打破施工各主体、各环节之间的壁垒,提高协同效率,解决传统施工中多方沟通不畅、信息滞后、协同脱节的问题,智能协同平台整合建设单位、施工单位、监理单位、设计单位等多方的需求与信息,达成各方高效联动,施工方案变更、进度反馈、质量意见等信息都能实时同步,避免信息传递时出现遗漏和偏差,减少沟通成本,提高协同决策效率^[2]。移动智能终端把管理平台延伸到施工一线,现场作业人员可以借助终端实时上报施工进度、质量情况以及现场问题,后台管理人员能及时接收并反馈处理意见,保证现场和后台信息实时同步,让施工管理做到即时便捷。智能化文档管理技术对施工图纸、技术交底、验收资料等各类施工资料做数字化存储和智能化管理,资料的查阅、修改、归档都可以在线完成,做到施工资料协同共享,避免资料丢失、损毁和重复编制,同时方便各方随时调取需要的资料,为施工协同提供高效的信息支撑,促进施工各环节高效衔接、协同推进。

2 智能化技术在建筑工程施工中的应用难点

2.1 施工技术层面的应用难点

智能化技术与施工技术适配性不足,技术落地存在实操障碍,成为制约智能化技术在建筑施工中推广应用的核心难点之一。

传统建筑施工工艺经过长期发展已形成固定模式,多数施工流程依赖人工操作与经验判断,而智能化技术具有技术密集、操作规范的特点,二者在融合过程中存在明显脱节,部分智能化技术无法贴合传统施工工艺的实际需求,难以直接应用于施工实践,需进行针对性改造,增加技术应用成本与难度。在复杂施工场景下,建筑结构的复杂性、施工环境的不确定性,会影响智能化技术的应用稳定性,高温、暴雨、高空等恶劣环境易导致智能设备故障、信号中断,降低技术应用效果,甚至影响施工进度。目前,智能化施工技术缺乏统一的行业标准与规范,不同企业研发的智能化设备、技术系统在接口、参数、操作流程上存在差异,无法实现互联互通,形成技术壁垒,不仅增加施工企业的设备投入与学习成本,也制约智能化技术的规模化应用,导致技术应用效果大打折扣。

2.2 实施操作层面的应用难点

人员、设备等实操条件不完善,限制了智能化技术的有效应用,让这类技术难以真正落地、发挥实际作用。目前,建筑行业的施工从业者整体素质高低不一,多数一线施工人员一直做传统施工工作,不会操作智能化设备和技术系统,对智能化技术的了解也不够,无法熟练掌握设备的操作步骤和维护方法,甚至对这类技术有抵触情绪,最终导致智能化设备无法充分发挥作用,不少先进设备只能当成“摆设”。智能化施工设备的研发和生产投入多,购买设备的成本也高,对中小施工企业来说,无法承担大额的设备投入,也打击了企业引入智能化设备的积极性^[3]。同时,智能化设备维护难度大,需要专业运维人员定期做检修、调试和故障处理,可目前拥有相关专业能力的运维人员数量不够,运维服务体系也不完善,设备出故障后没法及时处理,不仅影响施工进度,也让企业更不敢轻易应用这类技术。另外,部分智能化设备的设计和实际施工场景匹配度不高,无法灵活适配不同建筑类型、不同施工环境的需求,需进行个性化改造,进一步提高了应用的难度和成本。

2.3 协同管理层面的应用难点

协同管理体系不健全,难以支撑智能化技术高效应用,智能化技术的应用效果无法完全发挥出来。建筑施工需要多方主体共同参与,不同主体的利益诉求和管理方式都有差异,部分施工主体对智能化协同的认识不够,协同意识薄弱,更看重自身利益和工作进度,不愿意主动配合协同,导致智能化协同技术无法有效推广。现有的协同管理机制不完善,没有明确的协同职责和流程规范,各方在信息传递、决策沟通、问题处理等环节衔接不畅,信息传递不顺畅也不及时,还存在信息孤岛问题,智能化协同平台的作用无法充分发挥。另外,智能化管理和现场施工实操存在脱节,部分企业引入智能化管理系统后,没有结合实际施工需求做优化调整,管理流程和实操流程不匹配,导致智能化管理系统无法有效指导现场施工,反而增加了管理人员的工作负担。同时,现场施工人员的实际操作情况也无法及时反馈回管理系统,形成管理和实操“两张皮”的问题,限制了智能化技术的应用效果,无法达成协同管理的预期目标。

3 智能化技术在建筑工程施工中应用难点的解决对策

3.1 针对施工技术层面难点的对策

优化技术融合路径,完善技术支撑,破解技术层面应用障碍,推动智能化技术与建筑施工技术深度融合

合、高效落地。立足于传统施工工艺的实际需求,推动智能化技术进行针对性优化改造,结合不同施工环节的工艺特点,研发适配性强的智能化技术与设备,减少技术融合难度,让智能化技术能够快速融入施工全流程,发挥实际效用。聚焦复杂施工场景的技术需求,加大技术研发投入,研发具备抗干扰、自适应能力的智能化技术,提升技术在恶劣环境、复杂结构施工中的应用稳定性,通过技术升级解决信号中断、设备故障等问题,保障技术应用的连续性与可靠性^[4]。建立统一的智能化施工技术标准体系,由行业主管部门牵头,联合企业、科研机构制定统一的技术规范、设备参数与接口标准,打破技术壁垒,实现不同企业、不同设备之间的互联互通,降低企业技术应用成本,推动智能化技术规模化、标准化应用,为技术落地提供坚实的标准支撑。

3.2 针对实施操作层面难点的对策

强化人员培育与设备保障,提高实操能力,促进智能化技术真正落地,充分发挥技术优势。构建专业化智能化施工人才培养体系,结合施工岗位需求,进行针对性的技能培训,重点培养一线施工人员操作、维护智能化设备的能力,同时提高管理人员的智能化管理水平。可以邀请行业专家、技术骨干进行授课指导,用理论讲解搭配实操演练的方式,提高从业人员的专业素养,消除人员对智能化技术的抵触心理。加大对智能化设备投入的扶持力度,行业主管部门可以出台相关扶持政策,对引入智能化设备的企业给予资金补贴、税收减免,降低企业设备投入成本,激发企业引入智能化设备的积极性^[5]。优化智能化设备运维服务体系,培育专业的运维团队,建立设备故障快速响应机制,确保设备出现故障后能够及时检修、调试,同时促进设备研发企业给出完善的售后运维服务,降低企业运维难度与成本。另外,还要研发适配不同施工场景的智能化设备,结合不同建筑类型、施工环境的需求,推出个性化、模块化的智能化设备,提高设备与施工场景的适配性,减少设备改造成本,促进技术高效应用。

3.3 针对协同管理层面难点的对策

完善协同管理体系,强化协同意识,提高智能化协同效能,促进智能化技术和协同管理深度融合,解决协同管理层面的应用难点。强化各施工主体的智能化协同意识培育,利用宣传引导、培训教育等方式,让各主体充分了解智能化协同的重要意义,树立“协同共赢”的理念,提高主动协同的意愿,促进各方主

体主动参与智能化协同管理,建立健全智能化协同管理机制,明确各施工主体的协同职责、沟通流程与决策机制,规范信息传递的内容、方式与时限,打破信息孤岛,保证各方信息可以实时同步、高效传递。优化智能化协同管理平台,结合施工实操需求与各方主体的管理需求,完善平台功能,做到施工进度、质量、安全、资源等信息的一体化管理,促进智能化管理和施工实操深度衔接,让管理系统可以精准指导现场施工,现场实操情况也能及时反馈至管理平台,做到管理与实操的同频同步。另外,建立协同考核评价机制,将协同工作成效纳入各主体的考核范围,倒逼各方主体履行协同职责,提高协同管理效率,充分释放智能化技术的应用效能。

4 结束语

智能化技术为现代建筑工程施工转型升级提供了重要支撑,其在施工全流程管控、关键环节作业、协同管理中的应用,有效弥补了传统施工模式的短板,推动施工领域向精细化、高效化、安全化发展。当前,智能化技术在建筑施工中的应用仍面临技术适配不足、实操条件欠缺、协同体系不健全等现实挑战,这些问题并非单一因素导致,需立足于施工实际,多维度发力破解。随着技术研发的不断深入、人才队伍的持续建设以及协同体系的逐步完善,智能化技术与建筑施工的融合将更加深入,其应用场景将进一步拓展,应用效能将得到充分释放。未来,建筑施工企业需主动顺应智能化发展趋势,积极引入适配的智能化技术与设备,不断优化应用模式,推动建筑工程施工质量、效率与安全水平全面提升,助力建筑行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 刘正佳.BIM技术在建筑工程施工危险源辨识中的应用[J].建材发展导向,2025,23(23):70-72.
- [2] 邱寿煌.建筑通风与空调工程施工管理问题及措施探析[J].建材发展导向,2025,23(23):103-105.
- [3] 彭臻.建筑工程施工中混凝土浇筑施工技术应用研究[J].中国房地产业,2025(34):206-209.
- [4] 魏昊诚.建筑电气照明安装工程施工技术与质量控制措施[J].光源与照明,2025(11):29-31.
- [5] 王昌贵.建筑砌体工程ALC板施工关键技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):73-75.

基于工程现场快速检测的混凝土质量动态控制方法研究

李桂平

(南陵县建诚建筑工程检测咨询有限公司, 安徽 芜湖 241300)

摘要 本研究提出基于工程现场快速检测的混凝土质量动态控制方法。首先, 构建了涵盖工作性、力学性能、耐久性 & 内部缺陷的多维度快速检测技术体系, 并阐述了检测数据的标准化与融合方法。其次, 融合物理机理与数据驱动技术, 建立了能够反映混凝土质量时变特性的动态演变模型, 实现了对关键性能指标的实时预测。在此基础上, 构建了以“检测—预测—决策—反馈”为闭环的动态控制理论框架, 设计了相应的控制决策模型与实时反馈系统。结果表明, 该方法能够显著提升混凝土质量控制的时效性、精准性与预见性, 为工程质量管理智能化转型提供了一种新范式。

关键词 混凝土质量; 快速检测; 动态控制; 数据融合

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.012

0 引言

混凝土作为建筑工程中应用最广泛、最基础的核心材料, 其综合性能与最终质量直接决定了整体工程结构的安全性、可靠性与长期耐久性, 进而影响整个建筑物的服役年限和使用寿命^[1]。长期以来, 行业内普遍采用的传统混凝土质量控制与评价模式, 主要依赖于在施工现场取样、在实验室内进行标准条件养护的混凝土试块, 并以28天龄期的抗压强度作为核心验收指标, 同时辅以现场回弹法测定、钻芯取样检测等局部抽查手段作为补充。然而, 这种模式存在明显的滞后性与局限性, 难以全面、及时地反映混凝土在实际结构中的真实状态与发展过程。随着物联网技术的普及、智能传感器的发展、无损检测方法的进步以及大数据分析能力的提升, 在工程施工与运维阶段实时、连续、多维度地获取混凝土的温度、湿度、应变、强度发展等关键状态信息已逐渐成为可能^[2]。因此, 当前迫切需要深入研究如何有效集成与协同运用多种快速、无损、原位检测技术, 构建实时感知混凝土质量性状的监测体系, 并基于不断积累的实时监测数据, 利用数据分析与机器学习等方法对混凝土性能发展趋势进行动态预测与评估, 进而实现施工工艺的主动调整与优化。这标志着混凝土质量控制范式正从传统的“事后检验”转向“全过程控制”, 从“静态、离散的抽查”迈向“动态、连续的管理”, 对于推动土木

工程材料与施工技术的智能化发展具有显著的理论创新价值和重大的工程实践意义^[3]。本研究旨在提出一套完整的基于现场快速检测的混凝土质量动态控制方法体系。

1 混凝土质量快速检测技术体系构建

1.1 现场快速检测需求分析与指标体系

混凝土质量是一个多属性综合体。基于施工过程动态控制的需求, 需建立一套能够快速响应、全面表征的现场检测指标体系。混凝土质量现场快速检测指标体系从工作性、力学性能发展、耐久性、内部缺陷与均匀性四个关键维度构建(见表1), 实现对混凝土质量的全面动态监控。在工作性方面, 通过快速坍落度仪测定坍落度/扩展度以直观反映混凝土流动性, 便携式流变仪量化黏度以评估其抗离析能力, 插入式温度传感器监测温度以掌握混凝土的初始状态及后续水化热发展趋势, 三者共同作用确保混凝土具备良好的可施工性, 为浇筑与振捣作业提供直接指导^[4]。力学性能发展监测中, 贯入阻力仪可快速获取早期强度数据, 成熟度法则通过温度历程推算强度发展, 超声脉冲速度法不仅能反映强度增长, 还能间接体现弹性模量的变化, 这些方法协同追踪混凝土强度增长过程, 为确定脱模、张拉等关键施工节点提供科学依据^[5]。耐久性检测聚焦结构抵抗环境侵蚀的潜在能力, Autoclam

作者简介: 李桂平(1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

表 1 混凝土质量现场快速检测指标体系

类别	核心指标	快速检测方法 / 设备	控制目的
工作性	坍落度 / 扩展度、黏度、温度	快速坍落度仪、便携式流变仪、插入式温度传感器	评估可施工性, 指导浇筑与振捣
力学性能发展	早期强度、弹性模量	贯入阻力仪、成熟度法、超声脉冲速度法	追踪强度增长, 确定脱模、张拉等关键节点
耐久性	表层渗透性、氯离子扩散系数	Autoclam 渗水 / 吸气仪、RCM 法简化现场装置	评估结构抵抗环境侵蚀的潜在能力
内部缺陷与均匀性	内部孔洞、离析、均匀性	冲击回波法、超声断层扫描、电阻率成像法	监测浇筑密实度与材料均质性

渗水 / 吸气仪可便捷评估表层渗透性, RCM 法简化现场装置能测定氯离子扩散系数, 二者从不同角度为判断混凝土的长期耐久性提供重要参考。内部缺陷与均匀性监测借助冲击回波法检测内部孔洞, 超声断层扫描技术可清晰地呈现内部结构, 电阻率成像法则能有效反映材料的均匀性, 通过这些手段可全面监测混凝土浇筑的密实度与材料分布的均质性, 及时发现并处理潜在缺陷。整个体系通过明确的核心指标、对应的快速检测方法 / 设备及清晰的控制目的, 形成了一个逻辑严密、响应迅速的混凝土质量现场检测框架, 满足施工过程动态控制的需求。

1.2 多模式快速检测技术集成

为实现上述指标的全覆盖, 构建“传感网络 + 便携设备”的集成化快速检测系统。(1) 嵌入式传感器网络: 在浇筑前预埋无线温度、湿度传感器, 实时、连续监测混凝土内部温湿度场, 为成熟度计算和温度应力预警提供数据。(2) 便携式无损检测设备集群: 配备表 1 所列的各类便携设备, 由质检人员在关键点位、关键时段进行移动式、定点检测。(3) 移动终端 (APP) 集成: 所有检测数据通过蓝牙、移动网络即时上传至云端数据库, 并与构件位置、检测时间、施工班组等信息自动绑定, 确保数据可追溯。这种多模式集成方案融合了嵌入式监测的连续性与便携检测的灵活性, 既能够对混凝土内部核心参数进行长周期不间断跟踪, 又可以按需对关键部位开展针对性检测, 同时依托移动互联技术实现检测数据的实时归集与管理, 彻底解决了传统单点检测数据零散、时效性不足、追溯性差的问题, 能够为后续混凝土质量评价与动态控制提供完整、准确、及时的数据支撑。

1.3 检测数据标准化与融合方法

多源异构数据的有效利用。需建立: (1) 数据标准化协议: 统一时间戳、空间坐标、单位、数据格式, 建立检测数据与 BIM 模型构件单元的映射关系。(2)

数据清洗与校准规则: 对异常值、缺失值进行处理, 并建立现场快速检测结果与实验室标准方法结果之间的相关关系模型, 进行数据校准。例如: 建立贯入阻力与标准抗压强度之间的回归方程: $f_{cu}=a \cdot R+b$ 。(3) 多源数据融合模型: 采用基于权重分配或机器学习的方法, 融合多源信息。例如: 采用加权平均法融合多个位置的温度数据, 估算截面平均温度 $T_{avg}=\sum_{i=1}^n(w_i \cdot T_i)$ 其中 w_i 为根据传感器位置重要性确定的权重。

2 混凝土质量动态演变模型

2.1 质量演变影响因素分析

混凝土性能演变受内部因素 (水化反应、配合比等) 外部因素 (环境温湿度等) 养护及施工扰动 (浇筑、振捣等) 的共同驱动。动态模型需综合考虑这些输入变量。

2.2 基于物理机理的演变模型

成熟度模型: 基于 Arrhenius 方程, 利用实时温度数据预测强度发展。成熟度至 $M(t)$ 和预测强度 $f(t)$ 可表示为:

$$M(t)=\int_0^te^{\frac{E}{K}\left(\frac{1}{T(\tau)}-\frac{1}{T_0}\right)}d\tau \quad (1)$$

$$f(t)=f_{\infty} \cdot \frac{k \cdot (M(t)-M_0)}{1+k \cdot (M(t)-M_0)}$$

式 (1) 中, E 为活化能, $T(\tau)$ 为实时绝对温度, T_0 为参考温度, f_{∞} 为极限强度, k 、 M_0 为材料常数。

水化热—温度应力耦合模型: 基于热传导方程预测温度场 $T(x, y, z, t)$:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}=\nabla \cdot(\lambda \nabla T)+Q(t) \quad (2)$$

式 (2) 中, ρ 为密度, c 为比热, λ 为导热系数, $Q(t)$ 为单位体积水化放热率。基于热弹性理论计算温度应力。

2.3 基于数据驱动的实时预测模型

物理模型在复杂边界条件下可能受限。引入数据驱动模型作为补充和增强。模型输入与结构以实时采

集的温度、湿度、快速强度、声速等时间序列数据作为特征,构建LSTM等循环神经网络模型进行训练。预测输出模型输出未来一段时间(12小时、24小时)的核心指标预测值(强度、温差)。采用在线学习策略,利用新数据滚动更新模型参数。

3 动态控制方法与反馈系统设计

3.1 动态控制理论框架

建立以“感知—分析—决策—执行”为闭环的反馈控制系统框架(见图1)。系统输入为实时检测数据与计划目标,通过动态模型进行状态预测和偏差分析,由控制决策模型生成调控指令,通过执行机构或人工干预作用于施工过程,最终使混凝土质量状态向目标轨迹收敛。

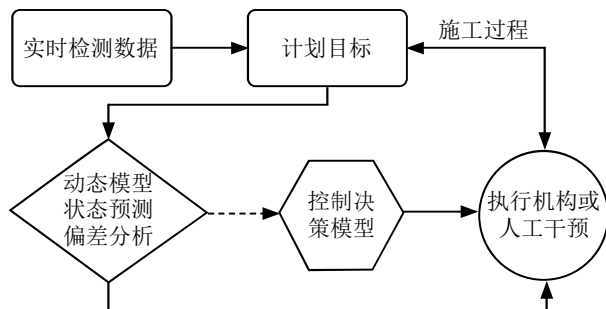


图1 混凝土质量动态控制闭环系统框架

3.2 控制决策模型

决策模型的核心是将预测的偏差转化为具体的控制动作。(1)规则库决策:基于专家知识,建立“IF-THEN”规则。例如:“IF 预测核心温度 $>70^{\circ}\text{C}$ THEN 启动循环水冷却系统”;“IF 预测24小时强度增长 $<$ 计划值的80% THEN 延长养护覆盖时间并预警”。(2)优化决策:将控制问题转化为多目标优化问题。以成本、工期、质量风险最小化为目标,以养护资源、降温措施为决策变量,在动态模型约束下,利用模型预测控制(MPC)等方法求解最优控制序列。

3.3 实时反馈控制系统

本研究设计一个软硬件深度融合的智能化管理系统,具体包括以下三个核心组成部分:

1. 软件平台架构:构建一个高度集成的中央控制平台,该平台具备四大功能模块——实时数据可视化看板,用于动态展示各类监测数据与运行状态;精准的预测分析模型,能够基于历史数据和实时输入进行趋势预测与模拟分析;多级预警提示模块,可根据预设阈值自动触发不同级别的报警机制;面向管理者的交互式决策支持界面,提供清晰的操作建议和可视化管控工具^[6]。

2. 多模态反馈控制链路:系统支持对自动喷淋设备、智能养护棚等硬件装置的闭环控制,能够依据环境参数与模型输出结果实现自动调节和响应;建立有效的人工反馈机制,在必要时通过消息推送、短信或邮件等方式,及时向相关责任人发送预警信息和详细的操作指导,确保关键情况得到迅速处理^[7]。

3. 持续优化的自适应学习机制:系统将全面记录每次控制动作及其实际执行效果,积累运行数据并形成决策日志,利用机器学习方法不断迭代和优化控制策略与决策规则,同时更新预测模型,使其具备随时间推移不断适应新条件、提升准确性的能力^[8]。

4 结束语

本研究构建了集成多模式快速检测技术的现场质量信息感知体系,通过数据标准化与融合方法,实现了对混凝土多维度质量状态的实时、全面感知,解决了信息碎片化与滞后性问题。本研究提出的“物理机理+数据驱动”混合动态演变模型,能够充分利用实时数据,实现对关键性能指标的准确预测,为前瞻性质量控制提供科学依据;“检测—预测—决策—反馈”动态控制闭环系统,将质量控制从被动检验转变为主动调控,通过规则与优化相结合的决策模型,能够生成及时、精准的控制指令,提升了施工过程的智能化水平。未来研究可进一步探索基于数字孪生的全生命周期质量控制,并推动快速检测设备的小型化、智能化与低成本化,以促进该方法的更广泛应用。

参考文献:

- [1] 刘俊. 建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术分析[J]. 中华建设, 2024(05):118-120.
- [2] 雷海涛. 住宅建筑工程质量检测技术与监管探讨[J]. 居舍, 2025(06):159-162.
- [3] 孙跃维. 宁波市建筑工程质量检测市场监管机制改善研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2010.
- [4] 岳庆霞, 王伟娜, 张鑫. 既有建筑物混凝土强度时变规律研究[J]. 山东建筑大学学报, 2023, 38(02):9-14.
- [5] 杨帅, 应宗权, 李嘉民, 等. 基于现场检测数据的海工混凝土强度经时变化规律研究[J]. 水运工程, 2023(04):39-42, 115.
- [6] 牛付虎. 住宅建筑工程主体结构质量检测技术实践探索[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(10):19-21.
- [7] 徐超杰, 苏晓辉. 基于超声波无损检测的混凝土抗压强度试验研究[J]. 建筑机械化, 2023, 44(11):26-29.
- [8] 孙源. 混凝土结构内部缺陷的超声成像检测方法研究[J]. 砖瓦, 2025(06):124-127.

路基填筑施工技术及压实质量控制

焦 峰

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 路基是公路工程的基础承载结构,填筑施工工艺与压实质量直接决定公路整体运营稳定性与使用寿命。路基填筑压实不达标,易引发工后不均匀沉降、路面开裂、边坡失稳等系列病害,严重影响公路行车安全。本文结合现行公路工程施工规范要求,系统梳理路基填筑施工的关键技术要点,分析路基压实质量的主要影响因素,提出全流程、标准化的压实质量管控措施,以期为公路路基工程标准化施工提供参考。

关键词 路基填筑;压实质量;基底预处理;路基填筑

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.013

0 引言

随着我国公路交通网络的持续完善,公路建设范围不断向山区、丘陵地带延伸,沿线地形地质条件日趋复杂,对路基填筑施工质量与压实管控水平提出了更高要求。路基作为公路路面结构的基础支撑,其填筑压实质量直接关系到公路结构的长期稳定性与运营安全^[1]。当前部分公路路基施工中仍存在填料选型不当、填筑工艺不规范、压实管控不到位等问题,导致路基工后沉降超标、结构病害频发,大幅缩短公路使用寿命^[2]。基于此,本文系统梳理路基填筑施工的关键技术要点,提出全流程的质量控制措施,对保障公路路基施工质量、降低全生命周期养护成本具有重要的工程实践意义。

1 路基压实质量的主要影响因素

路基压实质量受多重因素共同影响,需精准识别各影响要素,为施工管控提供靶向依据。(1)填料物理性质,填料的颗粒级配、塑性指数、最大干密度、最佳含水率等指标,直接决定压实作业的效果,级配良好的碎石类土压实性能远优于细粒土,塑性指数过高的黏土压实难度大,易出现反弹现象。(2)填料含水率,土体压实效果与含水率直接相关,只有当填料含水率处于最佳含水率 $\pm 2\%$ 范围内时,才能达到最大干密度,含水率过高易出现弹簧土,含水率过低则土体颗粒间摩阻力大,难以压实^[3]。(3)施工工艺参数,分层松铺厚度、压实机械选型、压实遍数、碾压速度与方式,均会直接影响压实效果,松铺厚度过大会导致路基上下压实度不均,压实机械吨位不足则无法满

足深层土体的压实要求。(4)现场施工管控,施工过程中未严格执行分层填筑工艺、碾压作业不规范、压实度检测流于形式等管控缺口问题,是导致压实质量不达标的直接诱因。(5)自然环境条件,沿线地下水位、降雨、气温等环境因素,会直接影响填料含水率与压实作业效果,雨季施工易导致填料含水率超标,低温环境会影响土体的压实成型效果。

2 路基填筑施工关键技术要点

2.1 路基基底预处理技术

基底预处理是保障路基填筑稳定性的前置环节,需根据基底地形、地质条件,采用适配的处理技术,为路基填筑提供坚实的承载基础。(1)表层清理与处理,填筑前对路基基底范围内的腐殖土、杂草、树根、淤泥等进行彻底清理,清理深度不小于 30 cm,清理完成后对基底原状土进行碾压,压实度需满足规范要求,对坑穴、古井、沟槽等缺陷,采用级配碎石回填压实,消除基底不均匀沉降隐患。(2)软弱基底专项处理,对于基底存在软土、淤泥质土等软弱土层的路段,根据软弱层厚度采用对应的处置技术,厚度 ≤ 3 m 的浅层软弱层采用清淤换填法,挖除软弱土层后换填级配碎石、砂砾等水稳性好的材料,分层填筑压实;厚度 > 3 m 的深层软弱层采用水泥搅拌桩、CFG 桩复合地基等技术,提升基底整体承载力^[4]。(3)斜坡地段基底处理,对于地面横坡陡于 1:5 的路段,需在基底开挖宽度不小于 2 m 的反向台阶,台阶设置向内 4% 的排水坡度,增强路基与基底的抗滑移能力,避免路基整体滑移引发的沉降变形。

作者简介: 焦峰(1990-),男,本科,工程师,研究方向:项目管理。

2.2 路基填筑施工关键工艺

路基填筑需严格执行标准化施工流程，严控各环节工艺参数，保障填筑作业的规范性与均匀性。（1）填料选型与管控，根据路基填筑部位、公路等级，选用适配的填料，路床部位优先选用 CBR 值高、水稳性好的粗粒土填料，不同性质的填料严禁混填，每一水平层需采用同一种填料，具体填料选型及技术要求详见表 1。（2）分层填筑标准化作业，严格遵循“水平分层、分段填筑、分层压实”的原则，根据压实机械性能，严控每层松铺厚度，常规路段松铺厚度不超过 30 cm，高填方路段采用冲击碾压补强时，松铺厚度可

适当调整但不超过 50 cm；填筑宽度需超出路基设计宽度每侧不小于 50 cm，保障路基边缘压实度达标，后期再进行刷坡修整。（3）摊铺作业精细化管控，填料运至现场后，采用平地机进行均匀摊铺，保障摊铺面平整，横坡控制在 2%～4%，便于雨天排水；摊铺过程中同步检测填料含水率，超出最佳含水率范围时，采用晾晒或洒水的方式进行调整，确保含水率达标后再开展压实作业。（4）填筑段衔接处理，相邻作业段交接处，若不在同一时间填筑，先填筑路段按 1:1 坡度分层预留台阶；若同时填筑，需分层相互交叠衔接，搭接长度不小于 2 m，避免交接部位出现压实度不足的问题。

表 1 路基填料选型及技术要求表

填料类型	适用填筑部位	关键技术指标要求
级配碎石、砾石土	路床、路堤全范围	CBR 值≥ 3%，最大粒径≤ 15cm，含泥量≤ 5%
砂类土、粉质土	路堤下部、路床辅助填筑	CBR 值≥ 2%，塑性指数≤ 26，有机质含量≤ 5%
红黏土、膨胀土	路堤下部非浸水路段	改性后 CBR 值≥ 2%，胀缩总率≤ 0.7%
冻土、淤泥、腐殖土	严禁用于路基填筑	有机质含量> 10%，压缩性高，水稳性差

2.3 路基压实作业关键技术

压实作业是保障路基填筑质量的关键环节，需根据填料类型、填筑厚度，适配压实机械与作业参数，实现路基压实度达标。（1）压实机械选型，根据填料类型与填筑部位选配压实设备，粗粒土填料优先选用 20 t 以上的振动压路机，细粒土填料选用静作用光轮压路机配合轮胎压路机，边角部位、台背回填等大型机械无法作业的区域，采用小型振动夯进行补压。（2）压实作业标准化流程，碾压作业遵循“先轻后重、先静后振、先慢后快、先边后中”的基本原则，直线段由路基两侧向中间碾压，曲线段由内侧向外侧碾压，碾压轮迹重叠宽度不小于 1/3 轮宽，杜绝漏压、欠压问题^[5]。（3）压实参数精细化管控，根据填料类型与松铺厚度，确定压实遍数与碾压速度，常规路段静压 1 遍～2 遍后，振动碾压 4 遍～6 遍，最后静压 1 遍收面，碾压速度控制在 2 km/h～4 km/h；每碾压完成一遍，采用灌砂法快速检测压实度，直至压实度满足规范要求，严禁擅自减少压实遍数。（4）高填方路基补强压实，对于填方高度大于 8 m 的高填方路段，每填筑 2 m 开展一次冲击碾压补强作业，采用 25 kJ 以上的冲击式压路机，全断面碾压 15 遍～20 遍，消除路基土体的残余沉降，提升路基整体压实度与均匀性。

2.4 特殊路段路基填筑适配技术

针对特殊地形、地质路段的路基填筑，需采用适配的专项施工技术，规避路基不均匀沉降、压实度不

足等问题。（1）半填半挖路段填筑技术，半填半挖路段必须严格执行台阶开挖工艺，对挖方段路床范围进行超挖回填处理，超挖深度不小于 80 cm，采用与填方段同类型填料回填压实，同步铺设双向土工格栅进行加筋处理，土工格栅抗拉强度不小于 80 kN/m，铺设范围跨越填挖交界线不小于 5 m，避免新旧路基不均匀沉降。（2）软土路段填筑技术，软土地基路段填筑需遵循“分级加载、匀速填筑、动态监测”的原则，采用薄层轮加法分层填筑，每层填筑厚度不超过 20 cm，严控填筑速率，路基中心线日沉降量不大于 10 mm，坡脚水平位移日增量不大于 5 mm，填筑过程中同步布设沉降观测点，动态监测路基沉降与位移情况，避免填筑过快引发路基滑移。

3 路基填筑压实质量全流程管控措施

3.1 填筑原材料进场质量管控

原材料质量是路基压实质量的基础，需建立“先检后用、闭环管控”的原材料管控体系，杜绝不合格填料流入施工现场。（1）填料进场检验，路基填筑用填料进场前，需开展土工试验，检测填料的颗粒级配、塑性指数、CBR 值、最大干密度、最佳含水率等关键指标，每 5 000 m³ 同类型填料开展一次全指标检测，填料性质发生变化时，需重新开展检测，检测不合格的填料严禁进场使用。（2）填料现场管控，填料运至施工现场后，需按类型、规格分区堆放，严禁不同类型

填料混杂堆放；雨季施工时，填料堆放区需设置防雨棚与排水设施，避免雨水浸泡导致填料含水率超标；对于塑性指数偏高的填料，需提前开展改性处理，经检测达标后方可用于路基填筑。（3）辅助材料管控，土工格栅、土工布等加筋材料进场时，需检测抗拉强度、延伸率、耐腐蚀性等指标，每 5 000 m² 为一个检验批次，检测不合格的材料严禁使用，保障加筋补强效果。

3.2 施工过程工序质量管控

路基填筑压实需严格执行工序报验制度，上一道工序验收合格后，方可进入下一道工序施工，实现全流程闭环管控。（1）隐蔽工程验收管控，基底预处理、软弱地基处理、台阶开挖等隐蔽工程，施工完成后由施工单位自检，自检合格后报监理单位联合验收，验收合格并留存影像资料后，方可开展路基填筑作业。

（2）分层填筑工序管控，建立路基填筑施工台账，详细记录每一层填筑的填料类型、松铺厚度、含水率、压实遍数、压实度检测结果等参数，确保施工参数与设计、规范要求一致，严禁擅自调整松铺厚度、混填不同类型填料。（3）现场旁站管控，对路基基底处理、首件工程填筑、高填方路段填筑等关键工序，实行监理全程旁站制度，全程记录施工过程，及时纠正不规范施工行为，确保工艺执行到位。（4）首件工程认可制，路基填筑施工前，需选取长度不小于 200 m 的路段开展首件工程施工，确定最优的松铺厚度、压实遍数、含水率控制范围等工艺参数，经监理单位验收认可后，作为全线标准化施工的依据，杜绝盲目施工。

3.3 压实质量检测与评定管控

压实质量检测是验证路基填筑效果的关键环节，需严格遵循规范要求，选用适配的检测方法，确保检测结果真实、准确，全面反映路基压实质量。（1）检测方法选型，根据路基填筑部位、填料类型，选用规范认可的检测方法。（2）压实度检测频次管控，路基填筑压实度检测需每 200 m 每压实层检测不少于 4 个点位，不足 200 m 的路段按 200 m 计，高填方路段、特殊路段需加密检测点位；检测点位需随机布设，覆盖路基全断面，重点检测路基边缘、填挖交界、台背回填等薄弱部位，严禁人为挑选检测点位。（3）检测结果评定，路基压实度评定采用数理统计方法，单个检测点位的压实度不得低于规范极值，合格率不低于 95%，评定不合格的路段，需重新碾压处理，直至检测达标；除压实度外，还需同步检测路基弯沉值、平整度、纵断高程等指标，全面验证路基施工质量。

3.4 全周期动态管控与验收管控

建立路基填筑压实全周期动态管控体系，实现从施工准备到竣工验收的全流程质量管控。（1）施工过程动态监测，高填方路段、软土地基路段，填筑过程中同步布设沉降观测点与水平位移观测点，每填筑一层开展一次观测，根据观测数据动态调整填筑速率与施工工艺，及时处置沉降异常问题，避免路基失稳。（2）雨季、冬季专项管控，雨季施工时，每日关注气象预报，提前做好防雨措施，雨后复工前需全面检查路基排水情况，检测填料含水率，严禁在路基积水、填料含水率超标的情况下施工；冬季施工时，做好路基防冻措施，严禁使用冻土、冰雪填筑，已填筑路段受冻后，复工前需进行翻挖重新压实。（3）竣工验收管控，路基填筑完成后，需对全线路基的压实度、弯沉值、平整度、边坡坡度、排水设施等指标开展全面检测，所有指标均满足设计与规范要求后，方可开展竣工验收；对检测不合格的路段，制定专项整改方案，整改完成后重新检测，确保路基施工质量全面达标。

4 结束语

本文结合现行公路工程施工规范要求，系统梳理了路基填筑施工从基底预处理、分层填筑到压实作业的全流程关键技术要点，提出了从原材料管控、工序管控、检测评定到动态监测的全流程质量管控体系。路基填筑压实质量管控，需遵循源头防控、过程管控、全程闭环的原则，严格执行标准化施工工艺，精准把控各环节技术参数。未来可进一步结合智能化施工设备、数字化监测技术，构建路基填筑压实全过程智能管控体系，实现施工参数的实时调整与质量隐患的提前预判，推动公路路基施工向标准化、智能化、精细化方向发展。

参考文献：

- [1] 吴煜场.公路路基填筑施工的技术要点与质量控制措施[J].汽车画刊,2026(01):173-175.
- [2] 张皓.公路路基填筑施工技术要点与质量控制研究[J].汽车周刊,2026(02):75-76.
- [3] 褚天牛.高速公路路基填筑施工技术研究[J].汽车周刊,2026(02):120-122.
- [4] 陈谦.强降雨地区铁路路基施工质量控制要点探析[J].路基工程,2025(06):179-184.
- [5] 张少龙.公路工程膨胀土路基填筑施工技术[J].交通世界,2025(35):121-123.

高速公路养护中桥梁伸缩缝维护探讨

沈本磊

(四川蜀道养护集团有限公司, 四川 成都 610011)

摘要 为提升高速公路桥梁伸缩缝养护质量,保障桥梁结构的稳定性,本文围绕伸缩缝渗水、异型钢破坏等常见病害,分析其引发原因,并结合相关技术要求梳理对应养护处置策略,以期在高速公路桥梁伸缩缝养护施工提供参考。结果表明,施工人员实施“严控防渗施工”“强化型钢加固”“精准调平校正”“加固锚固基座”“定时清杂疏通”等针对性措施,可解决伸缩缝各类病害,恢复其正常功能。

关键词 高速公路;桥梁伸缩缝;伸缩缝渗水;异型钢破坏;锚固区病害

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.014

0 引言

随着我国高速公路路网持续完善,交通流量与重载车辆通行频次同步增长,对高速公路养护工作提出了更高要求。桥梁作为高速公路的重要构筑物,其伸缩缝是衔接桥面并适应结构变形的部件,能够影响桥梁结构稳定性。桥梁伸缩缝长期暴露在自然环境中,易受荷载冲击、雨水侵蚀等因素影响出现各类病害,若养护不及时,会加剧结构损伤,缩短桥梁寿命。因此,相关养护人员需重视伸缩缝维护工作,精准排查病害、落实科学养护策略,为高速公路安全稳定运营提供保障。

1 桥梁伸缩缝病害及其引发原因

1.1 伸缩缝渗水

伸缩缝渗水是桥梁伸缩缝较为常见的病害类型,主要表现为缝口橡胶密封条出现开裂或脱落现象,致使雨水沿破损部位下渗并进入桥梁内部结构。这种渗水问题易引发一系列次生病害,导致桥面混凝土出现麻面缺陷,桥梁内部钢筋发生锈蚀,同时还会加速支座橡胶的老化进程,影响桥梁整体结构稳定性。该病害的引发主要有两个方面的原因:(1)橡胶密封条所采用的橡胶材料自身抗老化性能不足,在长期使用过程中受到环境温度变化及雨水侵蚀的影响,慢慢出现性能衰减现象。(2)伸缩缝锚固区的混凝土出现破损问题,使橡胶密封条失去可靠的固定支撑,进而呈现松动、脱落现象,最终导致雨水渗入^[1]。

1.2 异型钢破坏

异型钢破坏是桥梁伸缩缝的主要病害类型,其病害表现多样,体现为异型钢发生断裂、松动现象,部

分构件甚至会弹出桥面。此类病害会削弱桥梁通行平顺性,车辆驶经受损部位时易产生跳车和异响现象,影响行车舒适度的同时加大对车辆及桥梁结构的冲击。产生异型钢破坏与两个方面的因素有关:首先,重载车辆频繁通行会持续对异型钢产生作用力,长期累积后易引发结构损伤。其次,异型钢自身刚度不足,难以承受桥梁运营过程中产生的多向变形,进而出现断裂或松动现象。

1.3 伸缩缝变形

伸缩缝变形具体表现为伸缩缝整体出现错位、偏移,或产生不规则的弯曲、隆起,部分伸缩装置还会出现伸缩量不足的问题。而引发伸缩缝变形的因素较为复杂,主要集中在“温度变化反复作用”“车辆荷载持续影响”“伸缩缝施工安装不规范”三个方面:桥梁结构会随温度升降产生热胀冷缩,若伸缩缝无法灵活适应这种变形,长期受力后便会出现形态异常;重载车辆反复碾压也会给伸缩缝带来较大作用力,导致其发生变形;锚固不牢固易使其在运营过程中出现变形问题^[2]。

1.4 锚固区病害

锚固区作为桥梁伸缩缝的支撑部位,其病害会影响伸缩装置的稳定性,威胁桥梁整体结构安全。锚固区病害主要表现为锚固混凝土出现开裂及局部破损现象,部分位置伴有钢筋外露,严重时还会造成伸缩缝同桥梁主体结构连接松弛,致使伸缩装置难以保持稳定固定。引发锚固区病害是施工、荷载、环境三大因素共同影响的结果,各因素相互作用,加速病害的形成及发展。施工层面:锚固区混凝土浇筑质量不足或钢筋布置偏离规范要求,均会使锚固区在形成阶段就

作者简介: 沈本磊(1988-),男,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁。

存在结构薄弱环节,从而为后续病害发展留下隐患。
荷载影响:车辆行驶产生的反复冲击,会持续对锚固区施加作用力,长期累积的应力易诱发混凝土破损。
环境因素:雨水渗入、温度交替变化会加快锚固区混凝土的老化速度,导致内部钢筋发生锈蚀,加剧锚固区的破损程度。

1.5 杂物堆积

杂物堆积会严重阻碍桥梁伸缩缝发挥正常功能,进而诱发一系列连带病害,影响桥梁运营的安全。日常运营中,泥沙、落叶等杂物易在伸缩缝缝隙内堆积,慢慢填满缝隙空间,导致伸缩缝无法正常伸缩,失去其缓冲的作用。这些堆积的杂物还会遮挡伸缩缝,阻碍雨水顺利排出,长期滞留会加速伸缩缝构件老化,同时增加车辆通行时的颠簸感,间接加剧其他病害的发生。杂物堆积的形成主要和环境及通行因素相关,自然环境中的风力作用会把路面落叶、尘土等杂物吹至伸缩缝内,雨水冲刷也会携带泥沙类杂物沉积其中。若日常养护不到位,未及时清理伸缩缝内杂物,会导致杂物持续堆积^[3]。

2 高速公路养护中桥梁伸缩缝维护的策略

2.1 严控防渗施工,封堵伸缩缝渗水通道

施工人员进入作业区域后,应沿桥梁伸缩缝全线排查渗水状况,结合缝口湿痕分布范围及梁端滴水位置,标记密封失效区和排水受阻区。为便于同步核验病损边界,单次排查长度应控制在 20 m 以内并设置不小于 50 m 的渐变警示区,对于老化开裂或整体脱槽的橡胶密封条,施工人员应沿缝口缓慢剥离失效材料,切除范围需超出破损边缘的 100 mm 以上,防止残存的脆化胶体影响新密封材料的贴合效果。拆除旧胶后,要重点检查异型钢边缘平顺度及锚固区混凝土完整性,若出现空鼓类问题,需凿除至坚实基层,凿除深度可控制在 20 mm ~ 50 mm;当裂缝宽度超过 0.2 mm 时,应沿裂缝方向开设修补槽口,为后续封堵层提供稳定基面。

基层修整完毕后,施工人员需用工业丙酮擦洗缝壁及钢构件接触面,再利用热风设备将槽内含水率降至 8% 以下,雨后展开养护作业时,要保证基面能够连续干燥 4 h 以上。锚固区破损部位宜采用快凝高强聚合物修补料实施修复,修补厚度不足 20 mm 时可采用薄层压抹方式压实收面;厚度超过 20 mm 时采用分层填筑的方式,每层厚度需在 15 mm 以内,层间间隔 20 min ~ 30 min。材料终凝后复测表面平整度,误差 < 2 mm,保证嵌入密封条后伸缩缝受力均匀,缝口两侧钢边梁若有锈蚀,应打磨至金属本色再均匀涂刷防锈底层材

料,涂层厚度约 80 μm ,待表干后开展下道封缝工序。安装新密封材料时要优先选用耐臭氧、耐疲劳、耐温差的三元乙丙橡胶密封条,入槽前按缝宽实测值复核规格,保证压缩变形率在 20% ~ 35% 之间,避免过松失稳或过紧鼓胀。嵌装时自一端连续推进,用专用压辊将密封条压入槽内,接头避开轮迹带,拼接处预留 50 mm,采用专用结构胶热粘封合。密封条嵌装完成后,要沿其两侧补打弹性密封胶,胶缝宽度 8 mm ~ 12 mm、厚度约 6 mm,表面修整为微弧形排水面,同时修整桥面局部排水坡度,避免雨水在伸缩缝附近聚集。封堵后需控制养护时间,快凝修补层养护不少于 6 h,完全固化需 24 h 以上。

2.2 强化型钢加固,修复异型钢破损部位

依据《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021)中关于桥梁构造安全、构件完好及病害精准处治的相关要求,施工人员进入桥梁伸缩缝维修作业面后,应首先排查异型钢受损情况,沿伸缩缝全线重点核查型钢边缘平顺状态和局部挠曲程度,准确锁定轮迹带范围内的断裂、松动等部位^[4]。

针对未完全断开的裂纹异型钢,可先沿裂纹两端钻设 8 mm ~ 10 mm 的止裂孔以阻止裂纹扩展,再根据裂纹位置开设 V 形坡口,坡口深度达型钢厚度的 2/3 即可,修整槽口边缘并清除氧化层,保证焊缝熔合效果。整体切除局部断裂或刚度不足的区段,切除长度需超出病害区各 100 mm,新配型钢进场后复核截面尺寸,确保截面高度误差 ≤ 2 mm、直线度偏差 ≤ 3 mm,屈服强度符合设计要求,预调至顺桥方向平顺线形后,用卡具临时锁定对接,确保型钢顶面同桥面铺装高差在 0 ~ 2 mm 内。

焊接前施工人员需对连接段预热至 80 $^{\circ}\text{C}$ ~ 120 $^{\circ}\text{C}$,采用分段退焊法,每段焊长 60 mm ~ 80 mm,层间温度 > 70 $^{\circ}\text{C}$,焊缝厚度同设计值对应,角焊缝焊脚尺寸 ≥ 8 mm,焊后打磨清渣顺利衔接焊缝和钢体。重载区段应在异型钢腹板外侧增设厚度 10 mm ~ 12 mm、长度 300 mm ~ 500 mm 的加劲钢板,采用双侧角焊方式固定,完成后复测挠度变化,确保结构状态保持稳定。同步处治锚固松散部位,凿除型钢根部 25 mm ~ 40 mm 厚疏松混凝土,清理锚筋并除锈防腐,锈蚀严重时补设锚筋。

2.3 精准调平校正,整治伸缩缝形变问题

在养护过程中,施工人员应细查伸缩缝两侧桥面铺装及锚固区外露状态,明确局部错位的诱发原因。对于顶面弯曲的异型钢边梁,沿变形中心区两侧布设控制点,借助千斤顶或专用顶推架分级调校,顶升前测定原始高程,每次顶调 1 mm ~ 2 mm 后立即展开复测,

避免钢件二次损伤。待顶面高差收敛至2 mm以内,再校正横向偏移,使边梁中线同原桥轴线能够顺利衔接,中心偏差 ≤ 3 mm,调校期间需持续观察钢件状态,发现异常立即停止作业并整修。针对伸缩量不足的区段,施工人员可结合环境温度复核设计缝宽,逐段调整使缝宽变化均匀,局部缝宽差 ≤ 2 mm。若定位构件松动应先拆除失效件,布设临时限位夹具,防止缝体回弹;局部弯曲但可保留的边梁,校正后机械压紧、补强;失稳严重的短段构件,切除变形部位后换装同规格短节段,换装前反复校核标高及缝宽,保障车辆通行安全。

形位恢复后,施工人员要立即整修锚固区,采用早强高韧修补材料分层填补,单层厚度约15 mm,压实后精细抹平,保证同边梁外缘能够平顺衔接。收面时使用靠尺复测,3 m范围内平整度偏差 < 3 mm,边梁外缘高差 ≤ 2 mm。待修补层稳定,校核缝腔启闭状态,确认无卡阻后拆除临时限位装置。

2.4 加固锚固基座,处置锚固区病害隐患

锚固区病害处置应紧扣基座加固、边界稳固两项要求,围绕病损混凝土清除、锚筋补强和修补材料填筑及后续养护展开,保证伸缩缝锚固基座具备稳定承载能力^[5]。具体如下:

1. 补强锚固结构。锚固基座恢复阶段宜采用早强高韧聚合物修补料或快硬型高强微膨胀材料,材料强度等级不低于原设计要求,拌合完成后立即入槽压填,单层摊铺厚度宜控制在15 mm左右,厚层区采取逐层压实的方式以防止内部出现夹气问题。填筑至距顶面10 mm左右时,施工人员要利用抹刀反复压实收面,再沿顺桥方向找平,使锚固区顶面同桥面铺装、型钢边缘衔接自然,3 m范围内平整度偏差宜控制在3 mm以内,型钢边缘高差宜压缩至2 mm以内。局部承压较大区段可在异型钢腹板外侧增设短节限位加劲件,单块长度宜控制在300 mm~400 mm,厚度可采用8 mm~10 mm,再同原连接件焊牢,增强锚固区边缘抗冲击能力。

2. 巩固修复成效。完成锚固基座加固后不得立即开放通车,应保持静置养护状态,使修补材料充分硬化。常温条件下,初期封闭时间不宜 < 8 h,达到稳定承载前的总养护时间宜控制在24 h以上;气温低于10℃时适当延长至36 h,避免出现早期开裂现象。表面终凝前需覆盖塑膜保湿,炎热时段加设遮阳层以防止基座表层失水收缩;昼夜温差较大路段宜在夜间增加巡查频次,观察修补面边缘是否存在细裂或翘边的现象。开放交通前,应沿修复段复核锚固带平整度、边缘密实度,采用小锤轻击检查是否仍有空响区,连续空响长度超过100 mm处需立即返修,再沿伸缩缝顶面开展低

速压车检验,确认车辆碾压后无跳车感方可恢复通行。

2.5 定时清杂疏通,清理伸缩缝堆积杂物

定时清杂疏通需围绕“清缝腔”“通排水”“稳构件”“防回积”四项要求,结合杂物清除、排水恢复及后续巡养等环节,保证伸缩缝始终保持可伸可缩的状态。

开展养护作业时,施工人员应先按伸缩缝全线长度划分清理单元,单次作业段控制在20 m左右,在缝口两侧设置警示标志和导流设施,预留不少于50 m的安全过渡区。随后逐段清扫桥面,重点清除轮迹带附近的碎石类杂物,再用细小钩铲工具缓慢挑出缝腔表层板结杂物,清理至可见底部,避免损伤密封胶构件。缝腔清理应自一端向另一端连续展开,重点清除槽口边缘类易积杂部位,针对压实沉积物可先采用高压风机吹散再吸除,确保缝内不存在连续板结堆积。同步疏通排水导流槽,用细长疏通杆清理至堵塞端,注入清水复核排泄效果直至水流顺畅无滞留。杂物清除后,需对缝口两侧500 mm范围展开精细清扫,修整不顺泄水坡向,易积杂区域可扩大清理范围至1 m。喷吹压缩空气清除细小颗粒,复核缝宽及启闭状态,确定无卡滞现象。后续建立周期性清杂机制,常规路段每半月1次,特殊时段加密频次,同步完善养护记录,持续防范杂物堆积风险,保障伸缩缝功能完整。

3 结束语

桥梁伸缩缝是保障高速公路安全运营的基础,其病害防控和科学养护关系到桥梁结构的耐久性能。施工人员梳理常见病害类型及诱发原因,落实针对性养护策略,可解决各类病害隐患并恢复伸缩缝正常功能,延长桥梁使用寿命,降低养护成本。未来,施工人员应结合高速公路运营实际,不断优化养护流程,推动养护工作向规范化的方向发展,为高速公路路网长期稳定、高效运营提供支撑。

参考文献:

- [1] 杜凯.桥梁伸缩缝快速更换技术在高速公路养护中的应用[J].工程建设与设计,2026(05):206-209.
- [2] 王玉晶.高速公路养护管理中的桥梁伸缩缝维护分析[J].工程建设与设计,2026(04):254-256.
- [3] 邹建喜.高速公路桥梁伸缩缝病害成因及维修处理分析[J].工程建设与设计,2026(02):104-106.
- [4] 谭宝麟.高速公路桥梁伸缩缝维护保养技术[J].交通世界,2025(32):153-155,159.
- [5] 朱小颖.高速公路桥梁伸缩缝病害成因及修复策略研究[J].运输经理世界,2025(32):123-125.

道路桥梁施工全过程质量控制要点研究

江 昊

(黄山新洲建设集团有限公司, 安徽 黄山 245000)

摘 要 道路桥梁工程是国家交通基础设施的重要组成部分, 其施工质量直接关系到结构安全、运营效益及公众生命财产安全。本文聚焦施工全过程, 系统分析了当前道路桥梁施工中存在的质量问题, 涵盖施工准备不足、材料管理混乱、关键工序失控及质量通病频发等。在此基础上, 从施工准备、材料管控、关键工序精细化施工、质量通病防治及信息化监测等方面提出了全过程质量控制的具体措施。结果表明, 构建覆盖“事前预防、事中控制、事后追溯”的全过程质量管理体系, 是提升道路桥梁工程实体质量、实现耐久性目标的有效路径。

关键词 道路桥梁; 全过程质量控制; 精细化施工; 质量通病防治长效机制; 信息化质量监控体系

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.015

0 引言

随着我国城镇化进程的深入推进和交通强国战略的全面实施, 道路桥梁工程建设规模持续扩大, 结构形式日益复杂, 施工技术难度不断提升^[1]。根据交通运输部《2025 年交通运输行业发展统计公报》显示, 截至 2025 年底, 全国公路总里程达 557.89 万公里, 其中高速公路里程 19.94 万公里, 全国公路桥梁总量达 114.41 万座。这些基础设施在支撑区域经济发展、保障民生出行等方面发挥着不可替代的作用。然而, 近年来桥梁垮塌、路面早期破损等质量事故时有发生, 这些问题暴露出部分项目在施工质量控制环节存在系统性漏洞, 不仅影响工程使用寿命, 更对公共安全构成严重威胁^[2]。本文结合黄山地区典型道路桥梁工程实践, 通过分析施工各阶段质量控制的薄弱环节, 提出针对性改进措施, 旨在为同类工程提供参考, 推动道路桥梁施工质量管控水平的系统性提升。

1 道路桥梁施工全过程质量问题分析

道路桥梁工程施工周期长、工序复杂、影响因素众多, 任何环节的疏漏都可能导致质量缺陷。通过对大量工程实例的调研与分析, 当前道路桥梁施工过程中的质量问题主要集中体现在以下四个方面。

1.1 施工准备阶段的技术与管理缺失

施工准备阶段是质量控制的起点, 但实际工程中往往存在重视程度不足的问题。一是图纸会审流于形式, 设计图纸中的错、漏、碰、缺未能及时发现, 导致施工过程中频繁变更, 甚至造成结构性隐患。二是

施工组织设计缺乏针对性, 部分项目照搬照抄同类工程方案, 未能结合项目实际地质条件、气候特点及周边环境进行专项设计。三是技术交底不到位, 一线作业人员对质量标准、工艺要求理解不清, 凭经验施工现象普遍存在^[3]。四是测量控制网的建立过程不够严谨规范, 未能严格遵循高精度测量标准, 导致控制点的布设和精度存在一定偏差。同时, 高程及平面控制点的定期复测工作频率明显不足, 未能按照施工进度和规范要求及时进行校验与修正。这种管理上的疏漏, 使得测量误差在施工过程中逐渐累积, 无法得到有效控制和消除, 从而为后续工程的线形精确控制埋下了潜在的风险隐患, 可能影响整体工程的质量与精度。

1.2 原材料与构配件质量管控薄弱

材料是工程质量的物质基础, 当前材料管理环节存在的问题较为突出。一是材料进场验收把关不严, 部分项目为赶工期, 对进场钢筋、水泥、外加剂等关键材料未严格执行“先检后用”原则, 甚至存在合格证与实物不符的情况^[4]。二是材料存储条件不达标, 如水泥库房防潮措施缺失导致结块失效, 钢筋露天堆放造成锈蚀严重, 直接影响结构性能。三是材料使用追溯机制不健全, 同一批次材料用于多个部位时, 难以实现精准追溯, 一旦出现质量问题, 责任界定困难。四是商品混凝土供应质量控制难度大, 部分拌合站对集料级配、含泥量及含水率控制不严, 导致混凝土工作性能波动较大。

1.3 关键工序施工过程控制失范

关键工序是质量控制的重点环节, 但在实际施工中, 过程控制失范现象时有发生。路基与软基处理方面,

作者简介: 江昊 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁施工管理。

软基处理深度、桩位偏差、灌入量控制不严,堆载预压期不足即卸载,导致工后沉降超标;在路基填筑中,分层厚度控制不严,压实度检测频率不足,甚至存在虚填、漏压现象,为后期路面不均匀沉降和桥头跳车埋下隐患。桥梁基础与下部结构方面,钻孔灌注桩施工中,泥浆比重控制不当、清孔不彻底、沉渣厚度超标等问题直接影响桩基承载力;大体积混凝土承台施工中,水化热控制措施不到位,冷却水管布设不规范,导致温度裂缝频发;在墩柱施工中,钢筋保护层厚度偏差大,模板拼缝不严导致漏浆烂根^[5]。预应力结构施工方面,波纹管定位偏差超标,浇筑过程中发生位移或漏浆堵塞;张拉时混凝土强度及弹性模量未达设计要求即进行张拉,或张拉顺序错误;压浆不密实,管道内存在空隙,导致预应力筋锈蚀,严重影响结构耐久性。路面结构层施工方面,水稳基层养生不到位,早期强度不足即开放交通;在沥青面层施工中,油石比控制波动大,摊铺温度不达标,碾压遍数不足,导致压实度与平整度不满足规范要求。

1.4 质量通病反复出现且防治不力

道路桥梁工程中的质量通病具有普遍性和顽固性特征。桥头跳车问题长期未能根治,主要原因是台背回填压实度不足、填料选择不当、沉降差控制不严。沥青路面早期水损坏现象频发,根源在于集料与沥青粘附性差、压实度不足导致空隙率过大、路面排水系统不畅。混凝土结构裂缝问题普遍存在,既有干缩裂缝,也有温差裂缝和沉降裂缝,反映了养护管理、配合比优化及地基处理等方面的不足。预应力孔道压浆不密实问题在部分工程中依然存在,传统压浆工艺难以保证密实度,直接影响预应力体系的耐久性。

2 施工全过程质量控制措施分析

针对上述质量问题,构建覆盖施工全过程的系统化质量控制体系。以下从施工准备、材料管控、关键工序精细化施工、质量通病防治及信息化监测五个维度提出具体控制措施。

2.1 强化施工准备阶段的技术预控

施工准备阶段的核心在于“预防为主、策划先行”。一是深化图纸会审与设计交底,由施工单位、监理单位联合开展图纸会审,重点核查结构几何尺寸、高程控制点、预应力管道布置、软基处理范围等关键参数,形成会审纪要并闭合处理^[6]。设计交底必须覆盖所有管理层级和作业班组,确保一线人员准确理解设计意图及质量控制重点。二是优化施工组织设计与专项方

案,针对深基坑、高支模、大体积混凝土、预应力张拉等危险性较大或技术复杂的分部分项工程,编制专项施工方案并组织专家论证,明确质量控制点(停止点/见证点)的设置位置及验收要求。三是建立高精度测量控制网,采用GPS静态测量与全站仪导线测量相结合的方式,确保平面及高程控制网精度满足规范要求,对跨江、跨海特大桥,需建立独立的精密控制网并定期复测。

2.2 实施原材料全链条闭环管控

材料质量控制应从采购、进场、存储到使用进行全链条闭环管理。一是建立合格供应商名录,优先选用通过ISO质量体系认证的大型企业产品,从源头保障材料质量。二是严格执行进场验收制度,所有进场材料必须核验出厂合格证及检验报告,执行“先检后用”原则,对钢筋、水泥、预应力锚具、支座、伸缩缝等关键材料,在监理见证下进行第三方独立检测。三是推行标准化仓储管理,建设标准化的材料储存库房,落实防潮、防雨、防晒措施,杜绝材料在存储环节发生质量劣化^[7]。四是建立材料可追溯机制,推广使用“二维码”或“RFID”电子标签管理,记录材料进场时间、批次、检测结果及使用部位,实现全生命周期可追溯。对于混凝土拌合站,应严格控制集料级配、含泥量及含水率,动态调整施工配合比,确保混凝土质量稳定。

2.3 推进关键工序精细化施工

关键工序的精细化施工是保障工程实体质量的核心。(1)路基与软基处理。软基处理应根据地质条件选择合理工法,严格控制桩位、垂直度、桩长及灌入量,堆载预压段必须依据沉降观测数据确定卸载时间,严禁未达沉降稳定标准即进行路面施工。路基填筑实行“划格法”控制卸土厚度,严格遵循填筑工艺,压实度检测采用灌砂法或核子密度仪法,高填方路基进行分层检测,确保每层压实度满足规范要求。(2)桥梁基础与下部结构。钻孔灌注桩施工中,严格控制泥浆比重、清孔沉渣厚度通常不大于5厘米,采用超声波成孔检测仪对成孔质量进行检测,混凝土灌注过程中导管理深控制在2米~6米,确保不出现断桩。在大体积混凝土承台施工中,优化配合比掺入粉煤灰及高效减水剂,布设冷却水管进行通水循环降温,实施温度监控,控制内外温差不超过25℃。在墩柱与盖梁施工中,重点控制钢筋保护层厚度,推广使用高强砂浆垫块或塑料垫块,确保垫块数量不少于4个/平方米,模板拼缝严密防止漏浆^[8]。(3)预应力结构施工。波纹管安装坐标误差控制在规范允许范围内纵向不大

于 ± 10 毫米, 横向不大于 ± 5 毫米, 在混凝土浇筑过程中加强保护防止位移。采用智能张拉系统替代传统人工张拉, 实现“应力、伸长量”双控, 待混凝土强度及弹性模量达到设计要求后方可进行张拉。推广使用大循环智能压浆系统, 确保管道内浆液饱满、密实, 排除气泡, 防止预应力筋锈蚀。(4) 路面结构层施工。水稳基层严格控制含水量及压实度, 碾压完成后及时覆盖土工布进行保湿养生, 养生期内严禁车辆通行。沥青面层重点控制级配、油石比、温度三大指标, 采用智能拌合站实时监控油石比波动, 摊铺过程保持匀速、连续, 碾压遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”原则, 确保压实度及平整度满足规范要求。

2.4 建立质量通病防治长效机制

针对桥头跳车、路面早期水损坏、混凝土裂缝、预应力孔道压浆不密实等典型质量通病, 应建立专项防治机制。桥头跳车防治方面, 采用透水性材料如砂砾、碎石分层对称填筑台背回填, 压路机无法触及的边角采用小型夯实机具夯实, 设置桥头搭板并预压处理。路面水损坏防治方面, 采用抗剥落剂增强集料与沥青粘附性, 严格控制压实度与空隙率控制在 $3\% \sim 6\%$, 优化路面横坡确保排水畅通。混凝土裂缝防治方面, 加强早期保湿养护覆盖薄膜加土工布, 优化配合比减少水泥用量, 合理设置后浇带或诱导缝。预应力孔道压浆防治方面, 强制使用智能大循环压浆系统, 压浆前进行管道清洗及吹干, 采用专用压浆剂控制流动度在 10 秒 ~ 17 秒之间。

2.5 构建信息化质量监控体系

随着智慧工地建设的推进, 利用信息化手段实现全过程质量数据的实时采集、分析与预警, 成为提升质量控制水平的重要途径。一是建立质量数据实时采集平台, 通过传感器实时监测混凝土拌合站每盘配合比、拌合时间、材料用量, 超限数据自动报警并锁定不合格生产记录; 智能张拉与压浆系统自动生成张拉力、伸长量及压浆压力曲线, 数据直接上传云端, 杜绝数据造假。二是应用 BIM 技术进行三维可视化交底, 重点解决复杂节点(如钢筋密集区、预应力管道交叉部位)的碰撞检查, 将质量验收资料、隐蔽工程影像与 BIM 模型关联, 形成数字孪生体。三是推行隐蔽工程影像化管理, 针对钢筋绑扎、桩基灌注、台背回填等隐蔽工程, 建立“一工序一影像”制度, 利用执法记录仪或高清摄像头留存影像资料, 并附有监理签字的验收记录, 实现隐蔽工程全过程可追溯。

3 结论

道路桥梁施工全过程质量控制是一项系统工程, 涵盖从设计源头到实体成型的每一个环节。通过对施工全过程质量问题的系统分析及控制措施的深入研究, 得出以下结论: 第一, 施工准备阶段的技术预控是质量管理的起点。深化图纸会审、优化施工组织设计、建立高精度测量控制网, 能够有效消除质量隐患, 为后续施工奠定坚实的基础。第二, 材料全链条闭环管控是工程质量的物质保障。从供应商选择、进场验收、标准化仓储到可追溯管理, 构建严密的材料质量控制体系, 杜绝不合格材料流入施工现场。第三, 关键工序精细化施工是质量管理的核心。路基与软基处理、桥梁基础与下部结构、预应力结构、路面结构层等关键工序, 必须严格执行工艺标准, 落实过程控制, 确保每一道工序质量受控。第四, 质量通病防治需建立长效机制。针对桥头跳车、路面早期水损坏、混凝土裂缝等典型问题, 采取专项防治措施, 从工艺优化、材料选用、养护管理等方面综合施策, 实现质量通病的系统治理。第五, 信息化监控体系为质量管理提供技术支撑。利用物联网、BIM、智能张拉压浆等数字化手段, 实现质量数据的实时采集、分析预警与可追溯管理, 推动质量管理由经验型向数据驱动型转变。综上构建“预防为主、过程严控、数据驱动”的全过程质量管理体系, 强化各阶段、各工序的质量控制要点, 是提升道路桥梁工程实体质量、保障结构耐久性、实现交通基础设施建设高质量发展的必由之路。

参考文献:

- [1] 赵亚超. 道路桥梁施工中的质量控制与安全管理[J]. 汽车周刊, 2025(03):134-136.
- [2] 刘萌萌. 道路桥梁工程路基路面的施工质量控制[J]. 汽车画刊, 2024(09):227-229.
- [3] 彭益彬. 市政工程道路与桥梁施工质量管理探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(27):181-183.
- [4] 王继虎. 市政道路桥梁工程的施工管理及施工控制措施[J]. 散装水泥, 2024(03):196-198.
- [5] 房晨光. 道路与桥梁施工技术管理及其质量控制措施[J]. 新城建科技, 2023(23):169-171.
- [6] 姬俊慧, 张晓燕. 道路桥梁施工中桩基施工技术与质量控制[J]. 汽车周刊, 2024(12):123-125.
- [7] 杨丽雯. 市政道路桥梁施工技术及其质量控制[J]. 居业, 2022(05):56-58.
- [8] 雷靖锋. 道路桥梁施工技术与施工管理[J]. 运输经理世界, 2021(35):140-142.

公路工程路基施工技术与沉降控制措施研究

袁 杰

(陕西星光工程设计有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要 公路工程路基是道路结构的主要承重部分,其施工质量直接影响到公路的运营安全和耐久性,沉降问题是路基施工中需要重点控制的严重隐患。本文主要针对公路工程路基施工技术及沉降控制进行研究,根据路基施工全过程的特点,分析施工技术应用和沉降控制过程中存在的主要难点,探究有针对性的施工技术优化途径和沉降控制措施,通过规范施工工艺、加强过程控制、优化技术应用等手段,提高路基施工质量,减少沉降现象的发生,以期公路工程路基施工和沉降控制提供实践参考,保证公路工程长期稳定运行。

关键词 公路工程;路基施工;沉降控制;特殊地质;路基后期养护

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.016

0 引言

公路属于交通运输体系的重要组成,公路建设的质量同国民经济发展、群众出行安全存在紧密联系。路基是公路的“承重基础”,承受路面传递过来的车辆荷载和自身的重量,施工质量的好坏直接影响到公路整体稳定性及使用寿命。公路工程建设中路基沉降属于常见质量隐患,沉降控制不达标容易造成路面开裂、桥头跳车等病害,不但会加大后期养护费用,还会危及行车安全。在山区、软土地区等复杂的地质施工环境下,由于土体压缩、地基固结、荷载累加致不均匀沉降病害的发生,从而造成路面开裂、颠簸、塌陷等质量隐患。目前,部分施工队伍重前期填筑、轻过程控制和后期养护,标准化施工落实不到位,沉降控制存在较多漏洞。因此,对公路工程路基施工技术及沉降控制措施进行深入的研究,解决施工中遇到的难点,改进技术应用过程,对提高公路工程建设质量、保证道路长久稳定运行有着十分重要的现实意义。

1 公路工程路基施工技术与沉降控制难点

1.1 路基施工技术应用的协同性难点

加强对公路工程中石灰土路基施工技术的应用和质量控制,一方面可以提高道路基础设施的建设效果,改善当地的交通状况;另一方面可以促进公路工程的高质量发展,加强施工质量^[1]。公路工程路基施工包含填料处理、压实作业、边坡修整等各个环节,各个施工环节之间的技术协同应用是保证路基质量、控制

沉降的基础,但是这种协同性把控是施工过程中的一大难点。不同的施工环节技术要求不同,填料选择及处理技术影响路基密实度、承载力,压实技术影响路基整体稳定性,边坡修整技术影响路基抗滑移能力,任何一个环节技术应用不到位或者各环节技术衔接不顺畅都会造成路基结构存在薄弱环节,从而引起沉降问题。同时,路基施工要根据工程所在区域的地质、水文条件来调整技术参数,不同的地质条件下施工技术的适配性要求较高,如何根据现场实际情况优化技术方案,实现各个环节技术的高效协同,是路基施工技术应用和沉降控制的首要难题。在实际施工中,各个施工环节分别由不同的施工队伍或者作业班组来完成,不同队伍之间技术水平、施工经验等各方面的差异比较大,对于技术协同的认识及执行的程度也不一样。部分队伍过分重视自身施工环节质量,忽略与其它环节的衔接配合。这种各自为政的施工方式,使技术协同无法真正落实,容易造成施工界面处理不到位、技术参数不匹配等状况,从而加大路基沉降风险。

1.2 特殊地质条件下的沉降控制难点

石灰土路基属于公路工程的重要基础设施,对提高道路稳定性、延长使用寿命起着关键作用^[2]。公路工程建设会穿过各种不同的地质区,软土、膨胀土等特殊地质条件下路基的施工及沉降控制变得比较困难。特殊地质土体本身具有的物理力学性质,容易受到外界条件的影响而产生变形,给路基沉降控制造成很大困难。施工期间,如何依照特殊地质土体的特性

作者简介:袁杰(1990-),男,本科,工程师,研究方向:公路工程。

来挑选契合的施工技术,改良路基处理办法,削减土体变形给路基沉降带来的影响,就成了沉降控制的关键难题。另外,特殊地质区水文条件复杂,地下水渗透会改变土体含水量,降低土体黏结力和承载力,加大路基沉降风险,如何才能在保证施工技术可行性和沉降控制有效性的同时,规避水文因素影响,成为特殊地质条件下路基施工与沉降控制的重要难题。软土地区土体含水量高、压缩性大,沉降过程长期、不确定,传统的施工方法容易造成路基不均匀沉降,需要采用排水固结、复合地基等技术改善土体性质;膨胀土地区土体吸水膨胀、失水收缩,易引起路基开裂,需用石灰改良、湿度控制等措施抑制体积变化,但技术实施时要平衡处理深度和成本控制之间的矛盾。特殊地质条件下的施工机械选型及作业参数设置要兼顾土体扰动控制和压实效果,在软土地基中使用轻型振动压路机可以减少对土体的破坏,但是会降低压实度达到要求;而在膨胀土地基中进行强夯施工虽然可以提高密实度,但是会增大土体开裂的风险。特殊地质区沉降监测要依靠高精度的仪器以及多参数综合分析,传统的沉降板监测受环境影响较大,而自动化监测系统可以提高数据的准确性,但是设备稳定性和后期维护成本也成了限制技术推广的瓶颈。

1.3 施工过程管控与沉降预判难点

在公路工程建设迅速发展的大环境下,高填方路基施工技术相关研究虽然取得了部分成果,但是仍然存在着一些问题和挑战。路基施工过程中现场控制及沉降预估,属于及时发现隐患、削减沉降风险的关键手段,更是施工技术与沉降控制的关键难点之一。路基施工流程繁杂,现场作业环境复杂,施工人员操作规范性、设备运行稳定性都会影响施工质量,进而影响路基沉降情况,如何建立完善的现场管控体系,实现施工全流程的精准管控,规范施工操作行为,保证施工技术有效落地,难度较大。路基沉降具有隐蔽性、滞后性的特点,在施工过程中很难发现沉降隐患,如何用科学的预判方法,结合施工过程中的各项指标,准确预判沉降风险,提前采取防控措施,防止沉降问题扩大,也是路基施工和沉降控制过程中需要解决的难点。路基施工受到地质条件变化、施工材料性能波动、环境温度湿度变化等因素的影响,使施工过程变得不确定,沉降预判的难度也越来越大。目前,沉降预判方法大多依靠经验公式或者有限的数据分析,对于复杂的多变施工环境适应性较差,预判结果的准确性、

可靠性有待提高。另外,施工过程中各个环节的数据采集和整合也存在问题,数据质量良莠不齐,如何才能有效地利用这些数据来建立沉降预判模型,对沉降风险进行动态监测和预警,这也是施工过程管控与沉降预判需要解决的问题。

2 公路工程路基施工技术与沉降控制措施

2.1 优化路基施工技术,强化施工环节协同

城市化加速推动我国公路工程建设发展,公路工程是道路交通运输事业的重要组成部分,公路工程施工质量影响人们的出行质量、出行安全和社会发展水平。对于路基施工技术协同性差的难题,要从施工全过程入手,改进各个施工环节的技术,加强技术衔接,提高路基施工质量,为沉降控制打下基础。根据工程地质条件选择合适的填料,晾晒、粉碎、掺拌等方法改变填料含水量及颗粒级配,提高填料密实度和承载力,从源头上减少沉降隐患。根据填料特性及路基设计要求,选用合适的压实设备和压实工艺,确定压实顺序、压实遍数、压实厚度,保证路基压实均匀,防止压实不足或压实过量,提高路基整体稳定性。边坡修整环节按照路基坡度设计要求,采用精准的修整技术,保证边坡坡度符合规范,铺设防护层、种植防护植被等方式提高边坡抗滑移能力,减少边坡变形引起的路基沉降,使各个施工环节的技术共同发挥作用。施工技术要动态调整、优化。由于公路工程路基施工受地质、水文等环境因素的影响较大,施工时要根据现场实际情况,及时对技术参数和施工方案进行调整。当地下水位高或者土质变化大时,需要增设排水措施来降低地下水位,调整填料处理及压实工艺,保证路基施工质量。依靠创建动态的技术调整体系,实现施工技术与现场环境的匹配,改善各个环节的技术协作水平,有效地控制路基沉降。

2.2 针对性处理特殊地质,降低沉降风险

随着我国公路交通网络的不断延伸,公路工程在建设过程中经常遇到软土路基的环境,给工程建设带来了很大的困难^[3]。面对特殊地质条件下沉降控制的难题,根据不同的地质类型,采取相应的施工技术及沉降控制措施来提高路基的抗沉降能力。对于软土地质地区,可以采用换填法、灌浆法、布设土工格栅等技术手段,将不良土体或改善土体密实度,提高地基承载力,减少土体压缩变形引起的沉降问题;设置完善的排水系统,及时排除地下水,降低水分对土体性质的影响,防止土体软化引起沉降^[4]。对膨胀土区重

点做好土体改良工作,采用掺加改良剂等方法,调整土体的膨胀性,减少土体遇水膨胀、失水收缩现象,加强路基防水防护,防止雨水渗透造成土体变形,从根本上控制沉降风险。根据特殊的地质条件,有针对性地采取地质处理技术来满足施工要求,从而达到沉降风险控制的目的。对湿陷性黄土区应采用强夯法、灰土挤密桩等加固技术,利用外力消除黄土的湿陷性,提高土体密实度,减小因湿陷造成的沉降;做好地表排水和防水工作,防止雨水下渗使黄土强度降低^[5]。对于冻土区段,要充分考虑到冻融循环给路基带来的影响,用保温隔热材料铺设路基来减小外界温度变化对土体的影响,同时改善路基填筑材料,选用抗冻性好的材料来加强路基的抗冻胀能力,防止冻胀融沉造成路基沉降。

2.3 完善现场管控体系,强化沉降预判防控

加强路基施工过程的控制和沉降预估,是提高沉降控制效果的重要途径,要创建完善的现场管控体系,改良沉降预估和防控机制。在施工现场控制方面,确定各个岗位人员的职责,加强施工人员的技术培训,规范施工操作程序,保证施工技术按照设计要求执行;加强对施工设备的维护与控制,保证施工设备正常运转,提高施工效率和施工质量。根据路基施工进度设置沉降观测点,采用科学的观测方法对路基沉降数据进行实时监测,通过对观测数据的分析来准确预测路基沉降趋势,及时发现沉降隐患。根据预测的沉降风险,采取相应的控制措施,调整施工工艺、增加压实遍数、加强排水防护等,提早抑制沉降问题的发展,保证路基施工过程沉降处在可控制范围内。建立动态化管控机制,依照施工过程中的具体情况以及监测数据,及时做出调整,保证现场管控与沉降预判防控的持续有效。同时,加强与设计单位、监理单位的联系和协调工作,形成多方合力来保证路基施工质量及沉降控制的效果。

2.4 优化路基后期养护,巩固沉降控制效果

路基施工完成后,后期养护是巩固沉降控制效果、保证路基长期稳定的环节,要根据路基的运营特点来改进后期养护技术及措施。定期对路基开展巡查工作,尽早察觉路面出现的开裂状况、路基下沉等问题,并实施相应的修复手段,防止问题发展成更大范围的问题;重视路基排水系统的保养工作,及时清除排水系统内积累的杂质,保证排水通畅,防止雨水渗入路基内,造成土体软化和承载能力减弱,从而引发二次沉降。

同时对路基边坡、桥台背等容易发生沉降的薄弱处所加强养护,定期检查防护设施是否完整,及时修补破损的防护结构,提高路基抗沉降能力。通过科学的后期养护来巩固前期施工和沉降控制的效果,延长公路路基使用寿命,保证公路长期稳定运营。养护时还要重视养护技术的革新与应用,依靠现代科技手段来提高养护效率和质量。以无人机巡查的方式对路基进行巡查,对路基沉降观测数据进行大数据分析,可以更好地预测路基沉降的趋势,给养护工作提供准确的数据。另外,加强养护人员培训与管理,提高养护人员的专业技能和责任心,保证养护工作的落实,从而巩固路基沉降控制的效果。路基施工完毕并不意味着质量控制的结束,科学的后期养护才是保证土体结构稳定、防止后期沉降的有效手段。根据天气湿度、温度的变化来调节洒水养护的次数,保证路基土体含水率的均匀性,防止土体干湿交替造成收缩沉降,长效巩固路基施工质量以及沉降控制的效果。

3 结束语

公路工程路基施工技术及沉降控制效果直接影响到公路工程的质量和安 全。本文以公路工程路基施工技术及沉降控制为研究对象,对施工技术协同、特殊地质处理、现场管控及沉降预判这四个主要问题进行了梳理,并从优化施工技术协同、针对性处理特殊地质、完善现场管控和沉降预判、强化后期养护四个方面提出相应的控制措施。根据工程现场地质、水文条件的不同,在实际工程施工过程中,应结合工程实际情况,对施工技术方案进行灵活调整,严格执行各项沉降控制措施,加强施工全过程管控,不断提高路基施工质量及沉降控制水平。

参考文献:

- [1] 杨雪婷. 公路工程中石灰土路基施工技术应用及质量控制措施[J]. 汽车周刊, 2025(05):116-118.
- [2] 吴祥凤. 公路工程中石灰土路基施工技术应用及质量控制措施[J]. 产品可靠性报告, 2024(07):124-125.
- [3] 党繁荣. 软土路基施工技术在公路工程中的应用[J]. 汽车画刊, 2025(12):107-109.
- [4] 王伟. 公路工程高填方路基施工技术要点及质量控制措施分析[J]. 运输经理世界, 2024(14):5-7.
- [5] 赖冠斌. 市政公路路基路面施工技术与质量控制措施[J]. 工程与建设, 2023, 37(02):689-691.

预防性公路养护技术 在公路工程中的应用研究

唐 溪

(四川成渝高速公路集团股份有限公司公路运营管理二分公司, 四川 成都 610041)

摘 要 在公路工程全生命周期管理工作中, 预防性公路养护技术已摆脱传统意义上的“辅助养护手段”定位, 成为支撑公路长效运营的核心战略举措。该养护模式以“早发现、早干预、早处置”为核心原则, 要求养护工作人员结合公路实际运营工况, 常态化开展路面及结构关键部位的养护作业, 统筹兼顾公路设施的日常运维管理与长期安全保障。本文全面梳理了预防性养护技术在公路工程中的多元应用价值, 深入拆解了各类技术的具体实施流程与关键要点, 目的在于有效延长公路设施使用寿命, 提升公路通行质量, 旨在为公路工程实现长期稳定运营提供参考。

关键词 预防性公路养护技术; 公路工程; 路面裂缝密封技术; 微表处养护技术; 稀浆封层技术

中图分类号: U418.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.017

0 引言

公路作为区域交通网络的核心组成部分, 其运营质量与使用年限直接关系到区域经济发展活力与群众出行的安全便捷性。近年来, 我国交通基础设施建设不断推进, 公路通车总里程持续增长, 随之而来的是交通流量的大幅攀升, 重载车辆通行频次不断增加, 导致公路设施长期处于高负荷运行状态。在长期使用过程中, 路面破损、结构老化等各类病害逐步显现, 不仅影响公路通行品质, 还增加了后期养护成本。在此背景下, 深入研究并推广应用预防性公路养护技术, 对于提升公路运维水平、降低养护成本具有重要的现实意义。

1 预防性公路养护技术在公路工程中的应用价值

养护人员利用专业的检测仪器, 在公路病害刚出现的时候, 就可以准确地发现隐患信号, 并且可以了解到病害的初期情况以及发展趋向, 这个时候再开展养护作业就不需要对公路主体结构进行大规模的拆解, 操作流程更简单, 耗材和人力投入量也比后期大修工程要少得多, 可以有效地降低养护成本。采用科学合理的预防性养护技术, 可以大大降低公路设施全生命周期的养护费用, 提高养护资金的使用效率, 避免养护资金的浪费, 给公路工程长期稳定运行提供强有力的经济保障, 减少养护作业对公路通行的影响, 保证

交通通行的连续性。从通行安全的角度来说, 公路设施性能逐渐衰退, 会带来各种各样的安全隐患, 直接危及过往车辆和行人的出行安全。路面细微裂缝如果不及处理, 雨水浸泡后会慢慢向深处发展, 最终形成坑槽、沉陷等严重病害, 使车辆行驶时容易产生颠簸、打滑、失控等问题; 路面抗滑性能下降之后, 雨雪天气中车辆制动距离明显变短, 交通事故的发生率也会大大提高; 公路结构内部的隐蔽病害, 如果长时间不被发现, 就会引起路面塌陷等重大安全事故, 造成严重的人员伤亡和财产损失。养护人员利用预防性养护技术有目的地对路面进行修复、改善性能和隐患排查, 及时消除各种安全风险, 保证公路设施良好的通行性能和结构稳定性^[1]。

2 预防性公路养护技术在公路工程中的应用策略

2.1 应用路面裂缝密封技术, 遏制病害进一步扩散

养护人员在裂缝密封作业之前要对路面进行全面检查, 采用人工排查和专业检测设备相结合的方法, 逐一查清路面裂缝的种类、长度、宽度、深度和分布情况, 做好详细的记录, 为以后的密封作业提供准确的数据支持。在排查过程中, 养护人员要重点对车辆行驶频繁的地方等容易出现裂缝的部位进行检查, 不能有丝毫的疏忽^[2]。宽度小于 5 mm 的细微裂缝不需要开槽处理, 可以直接使用专用裂缝密封胶灌注; 宽

作者简介: 唐溪 (1977-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

度大于5 mm的中大型裂缝需要先用专业开槽机对裂缝两侧进行规范开槽,开槽的宽度和深度要根据裂缝实际情况来控制,保证能充分暴露裂缝内部结构,为后续清理和密封作业创造良好的条件。开槽后用高压吹风机、毛刷等工具清除裂缝内杂物、积水、灰尘和老化密封材料,保证裂缝内干燥、干净,给密封胶良好黏结创造条件。施工期间养护人员要精确控制密封胶的灌注量和施工温度,根据裂缝宽度和深度准确调节密封胶灌注速度和用量,保证密封胶能完全填充裂缝内部空间,达到有效密封、阻止病害扩散的效果。密封胶选择要结合公路运营环境等各方面因素,使用黏结性强、弹性好、耐老化、抗高低温的专用密封胶,保证密封效果的持久性。密封胶灌注完毕后,养护人员应及时用刮板等工具将裂缝表面多余的密封胶刮平,使密封胶与路面表面齐平,保证路面平整度,防止影响车辆行驶。

2.2 采用微表处养护技术,修复路面轻微破损隐患

微表处养护技术是以聚合物改性乳化沥青为结合料,配合级配碎石、矿粉、水和专用添加剂,采用专业机械拌和后均匀摊铺在路面表层的薄层养护工艺,施工方便、效率高,养护成本比传统工艺低30%~40%,修复后路面使用寿命可延长3年~5年。养护人员在采用微表处技术之前,需要对路面状况做详细的勘察和评价,确定路面破损的种类、程度和结构情况,保证路面只有轻微的车辙、松散、细小的裂缝或者磨损,路面结构整体完好,没有严重的结构性病害,从而保证微表处技术的适用性。路面严重沉陷、坑槽、结构损坏时,先做路面结构性修复,后做微表处养护。勘察结束后,养护人员要制订详细的施工方案,施工前,养护人员可以对路面进行彻底清理,去除路面表面杂物,必要时采用高压水枪冲洗路面,确保路面表面干净干燥平整,无任何影响微表处材料黏结的杂质。清理完成后,养护人员需对路面进行预处理,路面细微裂缝可采用密封胶简单密封处理,防止摊铺后雨水渗入裂缝内部;路面局部不平整部位需进行找平处理,为微表处材料摊铺提供良好基础条件。材料拌和环节,养护人员要严格按照设计配比,精准控制各材料用量,其中聚合物改性乳化沥青用量控制在混合料总质量的6%~8%,级配碎石用量占比70%~80%,矿粉用量占比5%~8%,水及添加剂用量根据施工环境微调。同时控制好拌和时间与速度,采用专用拌和设备充分拌和,保证各材料均匀混合,避免出现拌和不均、材料离析或结块等问题。拌和完成后,养护人员需对拌和料稠度、

均匀度进行检查,确认符合要求后,方可进行摊铺作业。

2.3 推行稀浆封层技术,增强路面抗滑耐磨性能

稀浆封层技术操作简单、施工速度快,单车道每天施工里程可达8 km~12 km,养护成本只有传统大修工艺的20%~30%,不仅可以修补路面表面的细微缺陷、修复轻微破损,提高路面抗滑耐磨性能、改善路面外观质量和使用品质,还可以隔绝雨水、灰尘等外界杂质和路面结构的接触,减少病害的发生,是公路预防性养护工作中不可缺少的重要技术手段^[3]。施工前,养护人员要对路面进行彻底清理,清理完毕后再进行路面裂缝等小病害的处理,宽度较小的裂缝直接使用稀浆灌注,宽度较大的裂缝先用水泥密封胶封闭。同时,还要检查路面的平整度,对局部不平整处进行找平,为稀浆封层摊铺做好铺垫。养护人员在材料配制时要严格按照设计配比执行,准确掌握各种材料的用量以及加水比例,乳化沥青用量占混合料总质量的5%~7%,细集料用量占75%~85%,矿粉用量占4%~6%,同时还要根据施工环境的温度、湿度变化来调节稀浆稠度,保证稀浆具有较好的流动性、稳定性,能均匀地摊铺在路面上并与路面黏结牢固。拌和时应使用专用稀浆拌和设备,控制拌和时间在30 s~60 s,使各种材料充分混合成均匀的稳定稀浆混合物,防止拌和不均、材料离析或沉淀等现象发生。拌和完毕后,养护人员要对稀浆性能进行检测,检测结果符合施工要求后,才能开始摊铺工作。摊铺时可以使用专用稀浆封层摊铺机,将稀浆均匀摊铺在路面上,摊铺速度控制在1 km/h~3 km/h,防止因摊铺过快或者过慢造成稀浆分布不均、漏铺等问题。摊铺完成后要及时对稀浆封层进行养护,设置醒目标识牌禁止车辆、行人通行,防止封层被破坏而不能固化。固化时间要按照施工环境的温度、湿度来定,常温下固化时间不少于24 h,低温潮湿环境下需要延长到48 h。固化后养护人员要对封层进行全面检测,检查封层平整度、黏结性、抗滑性能和防水性能是否满足要求。对检测出的起皮、脱落、裂缝等缺陷要及时修补,保证稀浆封层养护效果。

2.4 运用无损检测技术,精准排查公路隐蔽病害

养护人员在使用无损检测技术的时候,要联系公路实际运营状况、检测需求以及病害种类,挑选恰当的检测设备和办法,保证检测结果准确可靠。目前公路养护中常用到的无损检测技术有地质雷达检测、红外热成像检测、声呐检测、超声波检测等,不同的检测技术适应的场景和检测优势也有所不同,养护人员需要根据实际情况选择合适的检测方法。地质雷达检

测技术是目前公路隐蔽病害排查中应用最广的技术,它的工作原理就是向公路结构内部发射高频电磁波,电磁波在传播过程中遇到不同介质界面时会发生反射,养护人员通过接收反射信号,分析信号的传播时间、振幅、频率等参数,就可以判断公路结构内部是否存在空洞、脱空、松散、积水等病害,并且可以准确地定位病害的位置、类型、规模和深度。该技术检测精度高、检测速度快,检测速度为 5 km/h ~ 10 km/h,能对大面积的公路隐蔽病害进行连续检测,适合公路隐蔽病害的检测,尤其是对路面基层、底基层、路基的隐蔽病害的检测。养护人员使用地质雷达检测时,必须严格按照设备操作规范进行工作,合理调节检测参数,保证检测数据准确无误,并做好检测数据的记录和整理工作。红外热成像检测技术是利用公路结构内部病害区和正常区温度的不同,用红外热像仪对路面温度分布图像进行捕捉,从而找出病害的位置和范围。当公路结构内部出现空洞、脱空等病害的时候,病害区域的热传导性能和正常区域存在着明显的差别,在外界温度发生改变的时候,就会产生明显的温度异常区域,红外热像仪可以清楚地发现这些温度上的差别,并生成热成像图,养护人员通过对热成像图的分析,就可以准确地找到隐蔽的病害位置^[4]。该技术检测效率高、操作简便、不接触路面,可以对整个路段进行检测,适用于大面积公路快速筛查,特别适合检测路面表层下的积水、松散等病害。声呐检测技术主要是向公路结构内发出声波,声波在传播过程中遇到病害界面会形成反射和折射,养护人员通过接收声波反射信号来分析声波传播特性、传播时间等参数,从而判断公路结构是否完整以及存在哪些病害。该技术对公路基层、路基松散、空洞等病害的检测具有独特的优势,检测深度可达 1 m ~ 5 m,检测精度高,可以有效地发现深埋在公路结构内部的病害。

2.5 采用同步碎石封层技术,提升路面防水抗裂能力

同步碎石封层技术的主要目的是将沥青的黏结性和碎石的耐磨性结合起来,在路面表面形成一层坚固致密的防水防护层,提高路面的抗滑性和耐磨性。养护人员应根据公路运行环境及施工要求选择合适的沥青结合料和碎石骨料。沥青结合料应选择具有较好的黏结性、抗老化性、抗高温性及防水性好的改性沥青,软化点不小于 60 ℃,针入度控制在 30 ~ 50 (单位为 0.1 mm),保证能与碎石骨料充分黏结,形成良好的封层结构;碎石骨料应为质地坚硬、耐磨性好、级配合理

的碎石,压碎值不大于 26%,粒径应根据施工要求准确控制在 5 mm ~ 10 mm 之间,保证能均匀分布到沥青膜上,提高封层的抗滑和耐磨性能。材料准备完毕后,养护人员应检测材料性能是否满足施工要求,符合施工要求后方可使用。施工时需要操作同步碎石封层车,同步完成沥青结合料喷洒和碎石骨料摊铺工作。喷洒时要准确控制沥青结合料的喷洒量和喷洒速度,喷洒量控制在 1.2 kg/m² ~ 1.8 kg/m²,喷洒速度控制在 3 km/h ~ 5 km/h,保证沥青能均匀地覆盖路面表面,形成连续均匀的沥青膜,防止出现喷洒不均、漏喷等现象。碎石骨料摊铺与沥青喷洒同时进行,控制碎石摊铺量为 8 kg/m² ~ 12 kg/m²,使碎石均匀分布在沥青膜上,覆盖面积达到 80% 以上,保证碎石与沥青充分结合,防止出现碎石堆积、分布不均等问题^[5]。碎石摊铺完毕后,养护人员要及时用重型压路机对封层进行碾压,碾压速度控制在 2 km/h ~ 4 km/h,碾压遍数根据封层密实度要求确定,一般为 2 遍 ~ 3 遍,使碎石与沥青紧密黏结,封层表面平整密实,无松散、脱落等现象。碾压时养护人员要全程跟上,及时调节压路机的碾压路线和速度,保证碾压质量达到相应标准。

3 结束语

公路工程运维领域核心的技术体系就是预防性公路养护技术,在公路工程中的应用价值和实践意义越来越明显。养护工作人员要不断加强各种预防性养护技术的学习和研究,掌握各项技术的实施要点,不断改进施工工艺,提高技术应用的准确性、有效性。随着养护人员对于预防性养护技术的不断探索,该项技术在公路工程中的应用将会越来越广泛,给我国交通事业的高质量发展提供强有力的科技支撑。

参考文献:

- [1] 吴睿婧. 国省道公路沥青路面预防性养护技术研究[J]. 汽车周刊, 2026(04):9-10.
- [2] 张柏. 预防性公路养护技术在现代公路养护中的应用[J]. 工程建设与设计, 2026(04):157-159.
- [3] 闫俊杰. 高速公路桥梁隧道预防性养护技术运用探讨[J]. 价值工程, 2026,45(07):34-37.
- [4] 孙建, 史焕钰. 沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用研究[J]. 汽车周刊, 2026(03):22-23,69.
- [5] 陈国利. 公路工程沥青路面病害成因及预防性养护技术研究[J]. 时代汽车, 2026(04):157-159.

公路工程路基施工质量的 影响因素及处理措施研究

潘 矩

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 本文将天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目作为研究对象, 深入剖析公路工程路基施工质量的各类影响因素, 其中涵盖施工材料质量、施工管理水平以及施工人员专业能力等方面。针对这些影响因素, 提出注重地质环境勘察分析、强化土石方质量管理、优化路基压实处理、加强路基防护质量管理、严格排水施工质量控制等处理措施。通过对该项目实际施工情况展开探讨, 旨在为公路工程路基施工质量管理提供理论依据与实践参考, 进而提升公路工程路基施工质量, 保障公路工程的安全性及耐久性。

关键词 公路工程; 路基施工; 施工质量; 地质环境; 土石方施工

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.018

0 引言

公路工程属于国家基础设施建设的重要构成部分, 其质量直接关联交通运输的安全与效率。路基作为公路的基础结构, 其施工质量是公路整体质量的关键要素。天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目, 路线全长达到 10.946 千米, 涉及桥梁、路基等多项工程, 施工环境较为复杂, 对路基施工质量有着极高要求。深入探究该项目路基施工质量的影响因素以及处理措施, 不仅有利于保障该项目的顺利实施, 还能够为类似公路工程提供经验参考。

1 公路工程路基施工与质量管理分析

1.1 公路工程路基施工的特点

天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目的施工具备显著特征。该项目施工面积较大, 其路线跨越沿江平原, 涉及灰河乡、陈瑶湖镇等多个区域, 施工范围较为广泛。此项目施工内容丰富, 涵盖 3 座桥梁以及 3 306 米的路基工程, 不同工程类型的施工工艺与要求各不相同。该项目施工环境复杂, 受到基本农田、横埠河、枫沙湖、陈瑶湖等因素的控制, 地质条件呈现多样性, 给施工带来诸多挑战。该项目施工周期较长, 需要投入大量的人力、物力以及财力, 对施工组织与管理的要求相对较高^[1]。

1.2 公路工程路基施工的难点

该项目路基施工面临着诸多难点。地质条件极为复杂, 处于沿江平原地带, 地基承载力存在较大差异,

部分区域存在软土地基情况, 若处理不当极易引发路基沉降问题。软土地基因具备含水量高、压缩性大以及抗剪强度低等特性, 一旦处理不当, 就会导致路基整体沉降、边坡滑移, 甚至出现路面开裂现象。施工环境多变, 受天气、水文等因素影响显著, 如降雨可能致使施工现场积水, 进而对施工进度与质量产生影响。施工工序繁多, 涵盖从清表、填筑到压实、防护等多个环节, 每个环节都需要进行严格控制, 否则容易出现质量问题。例如: 填筑材料选择不当或者压实度不足, 会导致路基不均匀沉降, 从而影响路面平整度。

2 公路工程路基施工质量的影响因素

2.1 施工材料的质量

施工材料作为路基施工的物质基础, 其质量状况会直接对路基质量产生影响。在天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目当中, 填筑材料的合理选择至关重要。倘若选用级配不良的填料, 如含泥量过高的碎石土, 就会造成填料颗粒间空隙较大的情况, 压实后难以达到规定的密实度, 进而容易引发路基沉降问题。水泥、石灰等稳定材料的质量也会对路基的强度与稳定性造成影响。若水泥强度等级不足或者石灰消解不完全, 就会降低混合料的强度, 从而影响路基的承载能力^[2]。

2.2 施工管理的水平

施工管理水平在路基施工质量方面起到关键作用, 施工组织设计的合理性会对施工进度与质量产生影响。

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

若施工组织设计存在不完善的情况,就可能致使施工顺序出现混乱,各工序间的衔接也会不够顺畅,进而影响到施工效率与质量。施工过程中质量控制措施是否落实到位同样至关重要,如对填筑厚度、压实度等关键指标的检测频率与方法若存在不当处,就可能无法及时察觉质量问题,从而导致质量隐患的出现。施工安全管理也会对施工质量造成影响,安全事故一旦发生,就会使施工中断,进而影响施工进度与质量。

2.3 施工人员的专业能力

施工人员的专业能力是保障路基施工质量的关键要素。在天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目中,施工人员的操作技能和质量意识会直接对施工质量产生影响。倘若施工人员对施工工艺不够熟悉,如在填筑时没有依照规定的分层厚度和碾压顺序进行操作,就会造成填筑不均匀以及压实度不足的情况。施工人员质量意识淡薄,对质量标准不够重视,有可能在施工过程中偷工减料,进而影响路基质量^[3]。

3 公路工程路基施工质量的处理措施

3.1 注重地质环境的勘察分析

在天天高速公路无为至安庆段路基工程 TTWA-LJ04 标项目施工前,开展全面且详细的地质勘察工作。通过采用物探与钻探相结合的科学方式,精准地探明地下水位、土层分布以及不良地质体的分布范围和具体特征。针对软土地基情况,依据软土厚度、路堤高度等多方面因素,慎重选择合适的处理方法。对于浅层软土,采用换填法进行处理,利用强度较高的土或碎石等材料对软土进行置换,以此提高地基的承载力。对于深厚软土,则采用复合地基技术,如 CFG 桩与塑料排水板联合处理的方式,CFG 桩凭借水泥胶结作用提高地基承载力,塑料排水板加速土层排水固结,从而有效控制工后沉降^[4]。

3.2 强化土石方质量管理

1. 填料质量严格监控。在土石方施工过程中,填料质量属于影响路基质量的基础要素。应优先挑选级配状况良好的碎石土、砂砾石等粗粒土用作填料,这类填料颗粒间的空隙较小,压实后能够形成稳定的结构。对于打算采用的填料,必须开展取样试验工作,精准测定其最大干密度、最佳含水量等关键参数,从而为后续的施工提供准确依据。要严格禁止使用淤泥、沼泽土等不合格的填料,原因在于淤泥含水量较高、承载力较低,而沼泽土具有高压缩性,使用它们会造成路基沉降、变形等问题,严重影响公路的使用安全与耐久性。因此,从源头上保障填料质量是土石方施工质量控制的重要环节。

2. 填筑过程精细管理。填筑过程应当遵循“分层填筑、分层碾压、分层检测”的原则,每层填筑厚度需依据填料类型和压实机械性能进行科学确定,一般情况下填筑厚度不超过 30 cm,压实厚度不超过 20 cm。若填筑厚度过大,压实机械难以对填料进行充分压实,容易留下质量方面的隐患,若填筑厚度过小,则会增加施工工序,降低施工效率。填筑时采用水平分层填筑法,从最低处开始,由两边向中间进行填筑,如此能够保证填筑的均匀性和稳定性,避免出现因局部高差过大而导致的不均匀沉降。通过对填筑过程实施精细管理,确保每一层填筑都符合质量要求,为整体路基质量奠定坚实的基础。

3. 碾压操作规范执行。碾压作为土石方施工的关键环节,其操作是否规范直接影响到路基压实度。进行碾压时需要遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中、轮迹重叠”的原则。“先轻后重”指的是先用轻型压路机对填料进行初步压实,再用重型压路机进一步压实,以使填料逐步达到密实状态,“先慢后快”能够保证压实效果,避免因碾压速度过快而导致压实不均匀的情况发生,“先边后中”可以防止边坡土体在碾压过程中被挤出,从而保证边坡的稳定性,“轮迹重叠”能够确保压实区域没有遗漏处,进而保证压实的均匀性。严格按照规范要求执行碾压操作,能够有效提高路基的压实度,增强路基的承载能力和稳定性,最终保障公路工程的整体质量^[5]。

3.3 优化路基压实处理

1. 精准匹配压实机具与土质。不同类型的土质具备独特的物理特性,这就要求在路基压实处理过程中精准地匹配压实机具。对于砂性土而言,其颗粒间的摩擦力较小且透水性较强,采用振动压路机进行碾压是较为理想的选择。振动压路机所产生的高频振动能够使砂性土颗粒重新排列,进而减少颗粒间的空隙,以此提高压实效果并增强路基的稳定性。而对于黏性土来说,其颗粒细小且黏聚力较大,若使用振动压路机,振动可能会导致土体结构遭到破坏,出现弹簧土等不良现象。采用光轮压路机进行碾压更为适宜,光轮压路机的静压力能够缓慢且均匀地压实黏性土,从而保证土体结构的完整性。根据土质科学地选配压实机具,是确保路基压实质量的首要步骤。

2. 合理确定碾压参数。在路基压实作业过程中,不同压实机具所适宜的碾压土层松铺厚度以及碾压遍数属于关键参数。以光轮压路机对黏性土进行碾压操作为例,其松铺厚度不宜超过 25 厘米。若松铺厚度过大,压路机所施加的压力将无法有效传递至深层土体,进而导致压实效果不均匀,深层土体难以达到规定的

压实度标准,若松铺厚度过薄,则会使施工成本增加且延长施工工期。碾压遍数应不少于6遍,足够的碾压遍数能够促使土体颗粒充分嵌挤,从而达到紧密排列的状态。对于其他土质与压实机具的组合情况,同样需要通过试验来确定合理的松铺厚度和碾压遍数,以此为路基压实工作提供准确的施工指导,确保压实质量符合相关标准要求。

3. 严格监控含水量与压实度。含水量与压实度属于影响路基压实质量的两个重要因素,在碾压过程当中必须严格监控,要时常检查土体的含水量以及压实度,让其符合规定的密实度要求,当含水量过高的时候,土体里的水分会占据空隙,对土颗粒间的紧密接触造成阻碍,致使压实效果不理想,此时可以采用晾晒等方式降低含水量,让土体达到适宜的压实含水量范围,若含水量过低,土体过于干燥,颗粒间摩擦力增大,难以进行压实,可以采用洒水等方法增加含水量,提升土体的可塑性,通过对含水量进行实时监测与调整,并结合压实度检测,确保路基压实质量达到设计标准,保障公路能够长期稳定使用。

3.4 加强路基防护质量管理

1. 科学选择路基防护形式。不同地质条件与边坡高度对路基防护要求存在较大差异,所以需科学地选择适宜的防护形式。对于高填方边坡而言,因其填方高度较大,坡面土体稳定性相对欠佳,采用“土工格室+植草”防护可有效增强坡面抗滑能力,土工格室高度设定为15厘米且内填种植土,格室能够限制土体侧向位移并增加坡面整体性。而对于受水流冲刷严重的路段,水流对路基的侵蚀作用较为强烈,浆砌片石护坡是更为优质的选择,它能够直接阻挡水流对路基的冲刷,从而保护路基结构。依据具体工程条件精准选择防护形式,可充分发挥防护结构的作用,提升路基的稳定性与安全性,降低后期维护成本。

2. 严控土工格室防护施工质量。在“土工格室+植草”防护施工过程中,土工格室的铺设质量具有关键意义。需确保格室连接稳固,运用专用的连接件或者焊接工艺,促使格室构成一个整体,防止在受力时产生脱节状况。填土时,要保障填土密实,采用分层填筑与夯实的方式,让种植土和格室充分融合,为草种生长营造良好的土壤环境。要留意格室的平整度,避免出现凹凸不平的情形,以免影响坡面美观和防护效果。严格监控土工格室防护施工的各个环节,能够保证防护结构发挥预期的抗滑作用,切实维护高填方边坡的稳定^[6]。

3. 确保浆砌片石护坡质量可靠。针对采用浆砌片

石护坡的路段而言,石料质量以及砌筑工艺属于影响护坡质量的关键要素。在进行石料选择时,需挑选质地坚硬且无裂缝、无风化的石料,以此保障石料的强度与耐久性。在砌筑过程当中,要严格依照砌筑工艺要求开展施工,运用坐浆法进行砌筑,从而确保石块间的砂浆饱满,增强护坡的整体性和稳定性。要留意控制护坡的坡度和表面平整度,让护坡既具备防护功能,又拥有一定的美观性。

3.5 严格排水施工质量控制

完善路基排水系统,设置边沟、截水沟以及排水沟等排水设施,以此排除地表水与地下水,在施工过程当中,要严格控制排水设施的施工质量。边沟、截水沟等沟槽进行开挖时,需采用全站仪进行定位,严格监控槽底高程与平整度,超挖部分严禁使用虚土回填,必须采用级配砂石进行分层压实。管道安装时,承插式管道要检查橡胶圈的密封性,对口时需避免出现扭曲情况,平口管采用钢丝网水泥砂浆抹带,以确保接口强度。检查井施工时,井壁砌筑使用MU10砖、M7.5砂浆,灰缝饱满度需大于或等于80%,井座与管道连接时,采用柔性接口,避免因不均匀沉降而导致渗漏。

4 结束语

公路工程路基施工质量会受到多种因素的影响,涵盖施工材料质量、施工管理水平以及施工人员专业能力等方面。通过对天天高速公路无为至安庆段路基工程TTWA-LJ04标项目开展研究,采取注重地质环境勘察分析、强化土石方质量管理、优化路基压实处理、加强路基防护质量管理以及严格排水施工质量控制等措施,能够有效提高路基施工质量。这些措施的实施,有助于保障公路工程的安全性及耐久性,为公路工程的顺利实施和长期使用奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 钱夏夏.公路工程路基施工质量管理研究[J].运输经理世界,2021(35):61-63.
- [2] 张晓虎.简谈公路工程路基施工质量控制策略[J].大众标准化,2022(05):19-21.
- [3] 王飞.公路工程路基施工质量控制技术研究[J].交通建设与管理,2024(02):65-67.
- [4] 李洁.公路工程路基施工质量控制技术研究[J].汽车周刊,2025(05):226-228.
- [5] 齐福沛.公路工程路基路面压实施工的质量控制[J].居舍,2021(28):146-147.
- [6] 刘杰.公路工程中路基施工质量与安全管理分析[J].交通世界,2021(15):144-145.

道路桥梁钻孔灌注桩施工技术的 关键问题与优化措施

汪 浩

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 在道路桥梁建设过程中, 钻孔灌注桩作为深基础构件, 其施工质量会直接对工程结构的安全性与耐久性产生影响。本文将天天高速 04 标段作为研究对象, 系统地分析钻孔灌注桩施工中孔壁稳定性、泥浆参数控制、钻孔偏斜与孔底沉渣、钢筋笼安装以及混凝土灌注等关键问题。通过引入先进的泥浆护壁技术、泥浆参数智能监测系统、高精度测斜装置、钢筋笼分段吊装工艺以及智能混凝土灌注设备, 提出具有针对性的优化措施。结果表明, 优化后的施工技术能够有效降低孔壁坍塌率、控制沉渣厚度、提升桩身垂直度以及混凝土密实性, 可为同类工程提供技术参考。

关键词 钻孔灌注桩; 孔壁稳定; 泥浆参数; 钻孔偏斜; 混凝土灌注

中图分类号: U445.55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.019

0 引言

钻孔灌注桩凭借地质适应性强、单桩承载力高、工艺成熟便捷等突出优势, 已成为道路桥梁工程中应用最广泛的桩基形式之一。由于地质条件具有复杂性、施工工艺的规范性存在不足以及现场管理的精细化程度受到限制, 钻孔灌注桩在施工过程中常常面临诸如孔壁失稳、沉渣超标、桩身偏斜等一系列质量问题, 这些问题会直接影响到工程结构的安全性与耐久性。本文结合具体的工程实践情况, 系统地分析施工过程中的关键问题并提出相应的优化措施, 以期能够为同类工程提供技术借鉴。

1 钻孔灌注桩施工技术概述

1.1 钻孔灌注桩的基本概念与分类

钻孔灌注桩是借助机械或者人工的方式于地基当中进行钻孔, 之后灌注混凝土所形成的深基础构件。依据成孔工艺的不同, 能够将其划分为泥浆护壁成孔、全套管成孔以及干作业成孔这三类。泥浆护壁成孔灌注桩由于适用的地层范围较为广泛、施工效率较高, 从而成为道路桥梁工程中的主流选择。其核心功能是通过桩身和周围土体的摩擦阻力以及桩端阻力来传递上部荷载, 同时通过配筋设计增强抗弯、抗剪性能, 以此满足地震、风荷载等水平力作用下的结构稳定性要求^[1]。

1.2 施工工艺流程

钻孔灌注桩施工应遵循一套严谨且有序的工艺流程, 以此保障桩基质量。施工开始时, 需做好场地准备工作, 对施工区域进行平整与夯实, 清除杂物和软弱土层, 为后续施工搭建稳固平台。紧接着进行测量定位, 依据设计图纸, 运用精密测量仪器精确定位桩位, 并设置牢固标记, 确保位置准确无误。随后进行护筒埋设, 护筒可起到固定桩位、防止孔口塌陷以及隔离地表水的作用。钻机就位时, 要确保钻机平稳且垂直, 使钻头对准桩位中心。成孔环节十分关键, 需根据地层特性合理选择钻进参数, 同时严格控制泥浆性能, 维持孔壁稳定。成孔后进行清孔, 清除孔底沉渣, 保证沉渣厚度符合规范要求。钢筋笼安装时要确保垂直下放且位置精准。最后进行混凝土灌注, 严格控制灌注速度, 保证导管埋深合适, 避免出现夹泥、断桩等质量问题。成桩后还需进行成桩检测, 全面评估桩身完整性, 为工程质量提供可靠保障。

2 案例项目概述

天天高速 04 标段项目位于安徽省长江北岸, 路线穿越冲积平原、丘陵及复杂地质区域, 包含特大桥、长隧道及高陡边坡等关键工程。项目采用双向四车道设计, 设计时速 120 千米/小时, 桥隧占比达 41.6%, 施工难度大、技术要求高。钻孔灌注桩作为基础工程

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

核心,需应对软土、砂层等不良地质条件,通过优化护筒埋设、泥浆配比、钻进工艺及混凝土灌注参数,结合智能化监控系统,确保桩基承载力与成桩质量,为上部结构施工及全线年底通车目标提供坚实的保障。

3 钻孔灌注桩施工的关键问题

3.1 孔壁稳定性问题

孔壁稳定性属于钻孔灌注桩施工当中的核心问题之一。在软土、砂层这类松散地层中,孔壁土体容易因为泥浆护壁失效、地下水位出现变化或者钻进产生振动等因素而发生坍塌,进而致使孔径缩小、钢筋笼下放遭遇困难以及混凝土灌注出现中断。在天天高速 04 标段的桥梁桩基施工时,由于砂层厚度达到 12 米,泥浆比重控制存在不当情况,使得成孔之后 3 小时内孔壁发生坍塌,孔深减少 2.3 米,需要重新进行清孔并且加固护筒,最终延误工期 5 天^[2]。

3.2 泥浆参数控制问题

泥浆性能对孔壁稳定性以及成孔质量有着直接的影响。泥浆的比重、黏度和含砂率属于关键控制指标,若比重过低,容易致使孔壁失稳,而比重过高则有可能引发泥浆泵堵塞,要是黏度不足,便无法有效地悬浮钻渣,而黏度过高又会降低钻进效率,一旦含砂率超标,会加剧泥浆泵的磨损,同时还会影响混凝土与孔壁的黏结强度。在天天高速 04 标段施工期间,由于泥浆配比不恰当,造成 3 处桩基沉渣厚度超出标准(最大达到 15 厘米),需要进行二次清孔并且增加混凝土超灌量,使得成本增加约 12%。

3.3 钻孔偏斜与孔底沉渣问题

钻孔偏斜现象主要是由钻机安装不稳定、地层软硬程度不均匀或者钻进参数控制不恰当所引发。若偏斜程度超出标准,将会造成钢筋笼下放困难、桩身受力不均衡以及承载力降低等问题。孔底沉渣属于影响桩端阻力的关键要素,沉渣过厚会使单桩承载力降低 10%~30%。在天天高速 04 标段施工过程中,由于钻机底座未进行夯实处理,致使 2 处桩基垂直度偏差达到 1.5% (规范要求垂直度偏差应小于等于 1%),这种情况需要进行回填并重新钻孔,因为清孔工作不彻底,导致 5 处桩基沉渣厚度超出标准(最大沉渣厚度达到 12 厘米),此时需采用后压浆技术进行补强,这会使成本增加约 8%^[3]。

3.4 钢筋笼安装问题

钢筋笼的安装质量会直接对桩身的受力性能产生影响,常见问题包含钢筋笼变形、保护层厚度不足以及下放困难等情况,钢筋笼变形主要是由于吊装方式

不恰当或者钢筋笼刚度不够所引起;保护层厚度不足会使桩身的耐久性降低,下放困难大多是因为孔壁缩径、孔底沉渣或者钢筋笼尺寸存在偏差所导致。在天天高速 04 标段施工期间,由于钢筋笼分段焊接质量欠佳,造成 2 处桩基钢筋笼在灌注过程中出现上浮现象,需要重新进行焊接并加以固定,从而延误工期 3 天。

3.5 混凝土灌注质量问题

混凝土灌注作为桩基施工的最后环节,其质量状况直接影响桩身的完整性。施工过程中常见的问题包含导管堵塞、断桩以及混凝土离析等情况。导管堵塞大多是由于混凝土和易性较差或者灌注速度过快所导致,断桩则是由灌注中断或者导管拔出混凝土面等原因引起,混凝土离析会降低桩身强度,同时增加不均匀沉降的风险。在天天高速 04 标段的施工当中,因为混凝土初凝时间不足,使得 1 处桩基在灌注至桩顶 5 米时发生堵管问题,需要采用冲击钻进行疏通并补灌,这使得成本增加了约 5%^[4]。

4 钻孔灌注桩施工技术的优化措施

4.1 先进泥浆护壁技术

在软土、砂层这类松散地层当中,传统泥浆护壁技术容易因为黏度不足或者比重失衡,进而导致孔壁出现坍塌情况。鉴于此,采用膨润土基高性能泥浆,通过添加聚丙烯酰胺(PAM)等增黏剂的方式,将泥浆黏度提升至 25 秒~30 秒,同时严格把比重控制在 1.15~1.25 之间,并且使含砂率小于等于 4%。膨润土的层状结构能够形成致密泥皮,可有效阻隔地下水渗透,PAM 的增粘作用则可以增强泥浆对孔壁土体的悬浮支撑能力。在天天高速 04 标段施工过程中,该技术使得孔壁坍塌率从传统工艺的 3% 降低至 0.5% 以下,成孔效率提升了 15%。引入泥浆分离系统,通过振动筛去除大颗粒钻渣,利用旋流器分离细颗粒悬浮物,从而实现泥浆循环利用率达到 80%,废弃泥浆排放量减少 40%,显著降低了环保成本。该系统通过多级过滤与离心分离,确保泥浆性能保持稳定,避免因钻渣积累导致泥浆性能出现劣化,为连续成孔提供了保障^[5]。

4.2 泥浆参数优化与智能监测

泥浆性能的动态调控对于确保成孔质量而言是极为关键的。针对不同地层所具有的特性,需建立分级配比机制,当在砂层中进行钻进作业时,要将膨润土的用量增加至 8%~10%,并且添加 0.2%~0.3% 的 PAM,以此来提升泥浆的黏度与悬浮能力,当在岩层中进行钻进作业时,要把泥浆比重降低至 1.05~1.10,从而减少泥浆泵的负荷,同时避免因比重过高而导致钻头

磨损加剧的情况发生。为了实现对参数的精准控制,需要引入智能泥浆监测系统,通过在泥浆池中部署高精度传感器,实时采集泥浆的比重、黏度以及含砂率数据,并借助无线传输模块将这些数据上传至云端平台。当参数超出限定范围时,系统会自动触发报警并推送调整建议至现场终端,以指导施工人员及时补充膨润土或者清水。在天天高速 04 标段的施工过程中,该系统使得泥浆参数的合格率从 85% 提升至 98%,沉渣厚度的控制精度提高了 30%,有效避免了因参数失控而导致的二次清孔或者桩基缺陷问题。

4.3 高精度测斜与钻机精度提升

钻孔的垂直度会直接对桩基的承载力以及结构的安全性产生影响,传统的测斜方法主要依赖人工进行抽检,难以实现对全过程的有效监控。鉴于此,采用电子垂直度监测系统,通过在钻杆上安装双轴倾角传感器的方式,实时采集钻孔的偏斜数据,并通过无线传输将数据传送至驾驶室的显示屏。当偏差超过 0.5% 时,系统会自动触发声光报警,并联动钻机的液压系统对钻进方向进行调整,从而实现闭环控制。对钻机的安装工艺进行优化,在钻机底座与地面之间铺设 20 毫米厚的钢板,并通过地锚进行固定,以此减少钻进过程中因地面沉降或振动所导致的位移。在天天高速 04 标段的施工过程中,该技术使得桩基垂直度的偏差能够控制在 0.3%~0.8% 之间,合格率达到 100%,相较于传统工艺提升了 20%。通过在钻杆上设置刻度标记,并配合电子测斜仪,能够实现每 5 米进行一次偏斜复核,进一步确保钻孔的精度。

4.4 钢筋笼刚度增强与分段吊装

钢筋笼出现变形或下放困难的情况,是影响桩基质量较为常见的问题。传统焊接工艺容易因为局部应力集中,进而导致刚度不足,而整体吊装会受到起重设备能力的限制。鉴于此,对钢筋笼设计进行优化,将加强箍筋数量增加至每 2 米设置一道,并把主筋与加强箍筋的焊接方式改为机械连接(套筒挤压连接),借助冷加工强化来提升整体刚度。采用分段吊装工艺,把每段长度控制在 12 米以内,运用双吊点法垂直下放,以此避免因单点受力不均而造成的弯曲变形。在孔口对接时,采用二氧化碳气体保护焊,这种焊接方式焊接速度快、熔深大,能够确保接头强度不低于母材。在天天高速 04 标段施工过程中,该工艺使钢筋笼变形率从传统工艺的 2% 降低至 0.2% 以下,下放效率提升了 25%。通过在钢筋笼上设置保护层垫块,可以确保混凝土保护层厚度均匀,从而提升桩身耐久性^[6]。

4.5 智能混凝土灌注与导管优化

混凝土灌注作为桩基施工的最后环节,其质量状况会直接对桩身完整性产生影响。传统的灌注工艺主要依靠人工经验来控制导管埋深,这种方式容易因为导管埋深过浅而导致断桩问题,或者因埋深过深而引发堵管现象。鉴于此,引入智能混凝土灌注系统,该系统通过在导管内安装压力传感器与流量计的方式,对混凝土灌注速度以及导管埋深进行实时监测。当导管埋深超过 6 米时,系统会自动降低灌注速度,以此避免压力过大的情况发生,当导管埋深低于 2 米时,系统则会加速灌注,从而防止混凝土与泥浆混合。对导管设计进行优化,采用内径为 300 毫米、壁厚为 10 毫米的加厚导管,并在接头处设置双密封圈,以此减少漏浆风险。在天天高速 04 标段的施工过程中,该系统使得导管堵塞率从传统工艺的 1% 降低至 0.1% 以下,桩身完整性检测合格率达到 99%,相较于传统工艺提升了 15%。通过在混凝土中添加缓凝剂的手段,可将混凝土的初凝时间延长至 8 小时以上,为复杂地质条件下的连续灌注提供有力保障。

5 结束语

钻孔灌注桩施工技术的优化对于提升道路桥梁工程质量起着关键作用。本文结合天天高速 04 标段的实际情况,系统地对孔壁稳定性、泥浆参数控制、钻孔偏斜与孔底沉渣、钢筋笼安装以及混凝土灌注等关键问题展开分析,并提出具有针对性的优化措施。工程应用结果显示,优化后的施工技术能够显著降低孔壁坍塌率、有效控制沉渣厚度、大幅提升桩身垂直度以及增强混凝土密实性,可为同类工程提供技术方面的参考。

参考文献:

- [1] 王海军.道路桥梁钻孔灌注桩施工技术的關鍵问题与优化措施[J].大众标准化,2025(12):39-41.
- [2] 李雄.道路桥梁钻孔灌注桩施工技术的關鍵问题与优化措施[J].城市建设理论研究(电子版),2026(08):133-135.
- [3] 陈育斌.市政道路桥梁工程钻孔灌注桩施工技术的探讨[J].四川水泥,2024(12):233-235.
- [4] 胡力鹏,陈真银,易磊,等.基于旋挖钻机的桥梁灌注桩施工关键技术[J].工程建设与设计,2024(22):121-123.
- [5] 胡平健,吴金芳.公路桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用研究[J].运输经理世界,2023(30):77-79.
- [6] 段博员.道路桥梁施工中钻孔灌注桩施工技术的应用[J].大众科技,2023,25(10):42-44,53.

高速公路桥梁基础大体积混凝土 施工技术及质量控制措施

付园园

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 233000)

摘 要 桥梁基础是高速公路桥梁工程中承接全桥荷载、保障结构整体稳定的核心承重结构, 其施工质量直接决定桥梁整体安全性、稳定性与使用寿命。随着高速公路工程建设规模化发展, 大体积混凝土凭借整体性强、承载力高、耐久性好等优势, 被广泛应用于桥梁基础工程。但大体积混凝土结构断面尺寸大、水泥水化热释放集中, 施工过程中易产生温度应力裂缝, 严重危害桥梁结构质量。基于此, 本文结合具体高速公路工程案例, 系统梳理桥梁基础大体积混凝土施工前期准备工作, 详细阐述基坑开挖、模板安装、混凝土浇筑振捣、温度调控等核心施工技术, 针对性制定全流程质量控制措施, 以期提升高速公路桥梁基础施工质量提供技术参考。

关键词 高速公路; 桥梁基础; 大体积混凝土; 基坑开挖; 模版安装

中图分类号: U445.57

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.020

0 引言

在高速公路桥梁工程建设中, 桥梁承台、墩柱等基础结构对工程整体质量起决定性作用。大体积混凝土凭借高强度、高整体性、优异的抗变形能力与耐久性, 成为桥梁基础施工的核心材料。但相较于普通混凝土, 大体积混凝土水化热反应剧烈, 内外温差控制不当极易引发温度应力裂缝, 降低结构承载力与耐久性, 增加工程安全隐患。为有效解决上述施工难题, 本文依托实际高速公路工程项目, 系统化、规范化分析大体积混凝土施工关键技术, 从施工准备、现场施工、后期养护全环节制定质量管控体系。同时强调施工人员专业能力提升、质量管理制度落地的重要性, 通过落实工程质量终身责任制、完善质量保障体系, 全面提升桥梁基础施工标准化水平, 助力高速公路桥梁工程高质量建设发展。

1 工程概况

本文依托某高速公路工程合同段开展研究, 该合同段起点桩号 K17+900, 终点桩号 K31+191.241, 主线总长度 13.3 km。本标段施工内容涵盖路基、路面、桥梁、隧道、交通安全设施、绿化环保及配套附属工程。标段内核心构筑物工程量如下: 桥梁 10 座, 总长度 4 612.8 m; 隧道 6 座, 总长度 7 265.2 m; 路基施工段长度 1 413.2 m。

本标段桥梁基础多采用大体积混凝土结构, 施工区域局部存在软弱土层、地下水富集等问题, 极易引

发基坑坍塌、基底扰动、混凝土温度裂缝等质量隐患, 对施工技术及质量控制标准要求极高, 具备典型的大体积混凝土桥梁基础施工研究价值。

2 施工前期准备工作

2.1 现场施工准备

2.1.1 专项施工方案编制与交底

施工前需组建专项技术小组, 结合工程地质条件、设计图纸及施工规范, 编制大体积混凝土专项施工方案。方案需明确施工程序、施工工艺、现场平面布置、设备机具配置、材料供应、能源保障等核心内容, 确保方案具备科学性、针对性与可操作性。方案完成后需组织专家审核论证, 审核通过后方可落地实施。

2.1.2 全员岗前专业培训

针对所有现场作业人员开展系统化岗前技术与安全培训, 重点讲解大体积混凝土施工工艺、温控标准、裂缝防控要点及安全作业规范, 确保作业人员熟练掌握岗位操作技能, 考核合格后方可上岗作业。同时, 安排专职技术人员, 负责全程监测混凝土结构内外水化热温差、环境大气温度等关键参数, 实时记录监测数据, 为施工温控及质量调整提供数据支撑^[1]。

2.2 施工技术准备

2.2.1 技术复核与分级交底

施工前全面复核施工图纸、地质勘察报告等设计

作者简介: 付园园 (1987-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 道路桥梁。

资料,结合现场实地勘查、测量核验结果,核对设计参数与现场实际工况的匹配性,对存在偏差的内容及时与设计单位沟通优化。待施工条件完全满足规范要求后,组织施工设备、人员进场。严格落实二级、三级技术交底制度:由项目部总工对部门负责人、施工班组长、技术员开展二级安全技术交底;由现场技术员、班组长对一线劳务作业人员开展三级技术交底,所有交底资料需完整签字、归档留存,保障施工技术落地标准化。

2.2.2 施工测量控制

完成与设计单位的测量控制桩点交接工作后,测量班组需对桩点坐标、高程进行全面复核校验。结合工程施工需求,优化布设施工现场平面控制网,制定控制网布设细则与测量作业方案,精准确定控制点位置及高程参数,形成完整的控制测量成果文件。成果经监理工程师审核批复后,方可开展后续施工放样、测量交底工作,全程保障测量数据精准、施工定位准确^[2]。

2.2.3 施工现场勘查清理

依据设计资料及勘察数据,对施工区域开展全方位实地勘查,精准标注施工构筑物、管线、周边建筑的位置及数量。全面排查并清除施工现场影响施工的障碍物,详细记录施工区域周边交通、环境、建筑物分布情况。对破损道路、通行不便区域及时修复整改,优化现场施工条件,保障后续施工工序有序推进。

2.2.4 施工试验准备

工地试验室所有检测仪器、设备均需经资质单位检定,取得合格证书后方可投入使用。试验室建设完成后,需上报监理及主管单位验收备案,验收合格方可开展试验工作。所有进场原材料必须先取样检测,各项指标符合规范标准后方可进场使用。

3 核心施工技术要点

3.1 基坑开挖与支护施工

结合工程地质勘察报告及设计规范要求,编制专项基坑开挖施工方案,明确开挖顺序、分层厚度、边坡坡度及支护形式。本标段施工区域多为软弱土层且地下水丰富,为防范基坑坍塌、涌砂、基底扰动等病害,采用锁扣钢管桩围堰、钢板桩围堰等支护结构,全方位保障基坑施工稳定性^[3]。

在基坑开挖过程中,严格控制开挖深度与边坡坡度,杜绝超挖、欠挖及基底原状土扰动。同步开展基坑周边沉降、位移监测,实时掌握基坑稳定性,发现异常立即停工处置,采取加固、排水等应急措施。开挖作业完成后,及时清理、整平基底,检测基底承载力,核验其是否满足设计标准。

3.2 模板安装与加固施工

模板是保障大体积混凝土结构几何尺寸、外观质量的核心构件,需具备足够的强度、刚度与稳定性,可有效承受混凝土浇筑侧压力及施工荷载^[4]。本工程桥梁基础统一采用钢模板,要求模板表面平整光滑、无变形破损,拼缝严密无缝隙,从源头杜绝漏浆、错台等质量问题。

模板安装前,完成表面清理、除锈作业,均匀涂刷合规脱模剂,便于后期拆模作业。在安装过程中,严格按照设计尺寸精准放样,严控模板垂直度与平整度,确保安装精度符合规范要求。为提升模板整体稳定性,采用双 8 号槽钢作为背楞、钢管作为支撑体系,支撑间距经受力计算确定,严格控制在 1 m 以内。同时,在模板内部布设对拉螺栓,螺栓直径、间距经荷载计算优化,有效抵御混凝土浇筑侧压力,防止模板变形、位移。模板安装完成后,开展全面自检与专项验收,验收合格后方可进入下道工序。

3.3 混凝土浇筑与振捣施工

3.3.1 分层浇筑方式

结合桥梁基础结构尺寸、施工场地条件,合理选用大体积混凝土浇筑方式,主流浇筑工艺分为三类:一是全面分层浇筑,适用于平面尺寸较小的结构,将结构整体分层,逐层连续浇筑;二是分段分层浇筑,适用于平面尺寸较大的结构,分区域、分段落逐层浇筑;三是斜面分层浇筑,适用于长度较大的条形基础结构,从一端向另一端形成斜面连续浇筑^[5]。施工中需保证浇筑连续不间断,严控浇筑速度,避免混凝土堆积、离析。

3.3.2 精细化振捣工艺

振捣是保障混凝土密实度、提升结构质量的关键工序。施工现场采用插入式振捣棒作业,严格遵循“快插慢拔”原则,插点均匀排布、逐点有序移动,杜绝漏振、过振。单点位振捣时间控制在 20 s ~ 30 s,以混凝土表面泛浆、无下沉、无气泡溢出为合格标准。振捣作业时,避免振捣棒碰撞钢筋、模板及预埋件,防止构件移位、混凝土局部松散。

3.3.3 二次振捣与表面抹压

在混凝土初凝前开展二次振捣作业,可有效消除一次振捣产生的分层、气泡、空隙等缺陷,显著提升混凝土密实度与抗渗性能。二次振捣时间控制在初次振捣后 1 h ~ 2 h,结合现场混凝土凝结状态灵活调整。振捣完成后,在混凝土初凝、失塑前后开展至少两次表面抹压作业,反复压实抹平,有效消除混凝土表面塑性收缩裂缝,优化结构外观质量。

3.4 混凝土温度控制技术

3.4.1 内部降温处理

为降低混凝土内部水化热峰值、缩小内外温差,在大体积混凝土结构内部布设冷却水管,采用循环冷水降温工艺^[6]。优先选用导热性能优良的钢管或塑料管作为冷却管材,结合结构尺寸、形态科学规划水管布设间距与路径,保障降温均匀无死角。当混凝土内部温度升至35℃时,立即启动冷水循环系统,持续带走内部热量,有效控制温度应力,从源头抑制温度裂缝产生。

3.4.2 外部保温防护

混凝土浇筑完成后,及时开展外部保温覆盖作业,减少表面热量散失,平衡结构内外温差。施工现场常用保温材料为塑料薄膜、保温棉被,结合当地气候条件、混凝土内部温度数据,合理确定保温层厚度,避免因温差过大引发结构性裂缝,保障混凝土强度稳步增长。

4 全流程质量控制措施

4.1 施工过程质量控制

4.1.1 原材料质量管控

建立严格的原材料进场检验制度,构建“进场核查、抽样检测、合格使用”的管控体系。所有水泥、骨料、外加剂、掺合料等原材料进场时,必须核查质量合格证明、检测报告等资料,并按规范要求抽样复检,各项性能指标达标后方可进场使用。严禁不合格原材料投入施工,从源头把控混凝土基础质量。

4.1.2 搅拌过程质量管控

强化混凝土搅拌全过程监督,重点保障原材料计量精准度^[7]。定期校准搅拌设备计量系统,严格控制计量误差:水泥、外加剂计量偏差 $\leq \pm 1\%$,骨料、拌合水计量偏差 $\leq \pm 2\%$ 。搅拌作业人员严格按照批复配合比施工,严禁随意更改原材料用量。搅拌过程中实时观察混凝土拌合物和易性、均匀性,发现离析、干稀异常等问题立即停机排查,及时调整施工参数,保障拌合质量稳定。

4.1.3 浇筑过程质量管控

混凝土浇筑前,全面检查模板垂直度、平整度、密封性,核查钢筋规格、间距、保护层厚度及预埋件安装位置,确认全部符合设计及规范要求后方可开工。浇筑作业安排专人统一指挥,合理控制浇筑速度与分层厚度,避免混凝土集中堆积、初凝搭接不良等问题,保障浇筑施工连续、规范。

4.2 养护阶段质量控制

养护是大体积混凝土施工的核心收尾工序,直接影响混凝土强度增长速率、结构密实度与长期耐久性。

混凝土终凝后需立即启动养护作业,养护周期根据水泥品种、外加剂类型、施工环境确定。其中,硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥拌制的混凝土,养护周期不少于7d;掺加缓凝型外加剂、有抗渗等级要求的混凝土,养护周期不少于14d。

养护期间持续保持混凝土表面湿润,高温季节增加洒水频次,每日洒水不少于2次,避免表面水分快速蒸发产生干缩裂缝;低温季节增设保温防护层,防范混凝土受冻损伤。严格把控拆模时间,需结合混凝土实测强度、环境温度综合确定,严禁过早拆模导致表面破损、结构受力变形。拆模后持续开展养护作业,可涂刷专用养护剂,长效保持表面湿度,保障混凝土结构成型质量。

5 结束语

高速公路桥梁基础大体积混凝土施工工序繁杂、技术要求高、质量管控难度大,温度裂缝、结构变形是主要施工病害。本文结合实际工程案例,系统完善了施工准备、基坑支护、模板安装、浇筑振捣、温度调控等核心施工工艺,构建了原材料、施工过程、后期养护全链条质量控制体系。工程实践表明,通过标准化落实施工技术、精细化管控施工全流程,可有效规避大体积混凝土施工质量隐患,保障桥梁基础结构的稳定性与耐久性。在施工过程中严格遵循设计规范与专项施工方案、强化全过程监督管控,能够显著提升桥梁基础施工质量,为高速公路桥梁工程安全、长效运营提供坚实的保障,也可同类市政、交通桥梁大体积混凝土施工提供参考。

参考文献:

- [1] 罗璨.桥梁承台大体积混凝土温度控制研究[J].江西建材,2025(08):304-306,314.
- [2] 邱虎.水化热对大体积混凝土结构的影响[J].交通世界,2025(21):161-163.
- [3] 方亮,陈建群.公路桥梁施工中的大体积混凝土温度控制与裂缝防治技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(20):134-136.
- [4] 王茜,黄荣宾,李晶晶.公路桥梁大体积混凝土承台一次性浇筑施工技术探析[J].江西建材,2025(05):285-287.
- [5] 施跃毅,左勤.公路桥梁承台大体积混凝土施工温度控制[J].江西建材,2025(04):123-125.
- [6] 张志涛.公路桥梁承台大体积混凝土施工关键技术[J].石河子科技,2025(01):44-45.
- [7] 余若松.公路桥梁大体积混凝土浇筑施工技术研究[J].运输经理世界,2025(01):99-101.

暖通空调工程中节能技术运用分析

李 森

(津秦铁路客运专线有限公司, 天津 300041)

摘 要 暖通空调工程是建筑工程中的重要组成部分, 承担着调节建筑内室温度、湿度及空气质量的主要任务, 其能耗在整个建筑总耗能中占比很高, 是建筑节能领域的重点管控环节。本文结合暖通空调工程实践, 系统阐述暖通节能技术的核心内涵、运用意义, 分析当前暖通空调工程中暖通节能技术运用存在的主要问题, 重点探讨暖通空调系统设计、设备选型、运行管理及系统改造等环节的节能技术运用要点, 提出针对性的优化措施, 以期暖通空调工程从业人员提供理论参考, 进而推动暖通节能技术规范化、规模化运用, 助力建筑行业绿色低碳高质量发展。

关键词 暖通空调工程; 暖通节能技术; 节能设计; 设备选型; 运行管理

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.021

0 引言

随着我国建筑业的不断发展, 各种类型的民用建筑、工业建筑不断增多, 而暖通空调系统作为建筑物内环境调节的重要设备之一, 其耗能也越来越大。据统计, 暖通空调系统的能耗约占整个建筑物能耗的 40% ~ 60%, 成为建筑能耗的主要组成部分, 其高运行能耗推高建筑领域碳排放, 传统供暖模式与部分制冷剂使用也会带来额外环境负荷, 不符合我国绿色低碳发展的理念。暖通节能技术以“节能降耗、绿色环保、高效舒适”为核心, 通过科学的设计、合理的设备选型、精细化的运行管理, 在保障室内舒适环境的前提下, 最大限度降低暖通空调系统能耗。

1 暖通空调工程中暖通节能技术的核心内涵、运用意义

1.1 核心内涵

暖通节能技术是指在暖通空调系统的整个生命周期内, 在设计阶段、施工阶段以及使用过程中、改造过程中所采取的一切节约能源、提高能源利用率、减轻环境污染的技术及措施的总称。其主要目标就是在保证室内的温度、湿度、空气品质等舒适性的条件下, 采取优化系统方案、采用节能设备及材料、加强运行调节控制、充分利用可再生能源等措施, 在保证满足使用功能的前提下, 尽可能地降低对电力、燃气等常规能源的需求, 达到“节能、环保、高效、舒适”的效果。暖通节能技术涵盖多个领域, 包括系统节能设计技术、节能设备应用技术、运行优化管理技术、可再生能源利用技术等, 是一门融合建筑、暖通、能源、

自动化等多学科的综合性的技术, 其运用需结合工程实际场景, 实现技术与工程的精准适配^[1]。

1.2 运用意义

(1) 节约能源费用, 降低建筑运行成本。暖通空调系统是建筑耗能最大的部分, 在暖通空调中应用节能技术可以有效降低系统的能耗 30% ~ 50%, 大大节省了建筑在运行过程中所耗费的能源费用, 提高了建筑的经济效益。(2) 减轻污染环境程度, 促进绿色可持续发展。传统的暖通空调使用了大量的化石燃料, 会产生大量的二氧化碳、二氧化硫等污染性气体, 应用节能技术可以节约能源使用量, 减小污染产生, 有助于“双碳”目标的达成, 促进生态环保建设; 营造舒适的室内外环境, 在保证节能降耗的同时, 暖通节能技术还可以对暖通空调系统进行更好的控制, 从而达到室内温湿度的精确控制, 降低温差变化、噪声等影响因素, 提高人体舒适性, 保证居住人员及使用人员的身体健康^[2]。(3) 促进建筑业转型升级。暖通节能的应用可推进建筑业由高耗能、高污染向绿色化、低碳化的转变, 提高建筑工程质量和竞争力, 促进建筑业高质量发展。

2 暖通空调工程中暖通节能技术运用存在的主要问题

2.1 系统设计不合理, 节能潜力未充分发挥

当前部分暖通空调工程在设计阶段缺乏节能理念引领, 系统构建存在科学性、合理性不足的问题, 导致暖通节能技术难以发挥应有的价值, 其节能潜力未能得到充分挖掘。相关设计人员未能根据工程的实际环境以及当地的气候特点来进行针对性设计, 一味地

作者简介: 李森 (1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 暖通工程。

套用以前的设计方案,并未对系统的构建、风管的设计、水力的平衡等方面进行改进,导致系统运行过程中能耗过大。例如:部分工程风管设计不合理,风管阻力过大,增加空调机组的运行负荷;水力平衡设计不到位,使得各个区域供冷、供热不均匀,既影响舒适感,也造成了能源的浪费。设计过程没有考虑节能技术的集成运用,只单一选用某一种节能技术,未能将多种节能技术有效结合使用,无法取得较好的节能成效^[3]。

2.2 节能设备选型不当,运行效率偏低

部分建设单位、施工单位为降低初期投资,选用低成本、低能效的设备替代节能型设备,导致设备运行效率低、能耗高,无法实现节能目标。选用能效等级低的空调机组、水泵、风机等设备,虽然初期投资较低,但长期运行过程中能耗巨大,反而增加了运营成本。系统设计与设备选型不匹配,在设备选型上没有根据系统的相关设计参数及设备实际运行的需求选择合适的节能设备,导致设备在运行的过程中其负荷不合理,出现“大马拉小车”或者“小马拉大车”,这不仅会影响设备本身的使用寿命,还会造成能源的浪费。节能设备的质量良莠不齐,一些节能设备本身存在着质量问题,运行不稳定,不能长时间处于高能效工况下,从而降低节能量。

2.3 运行管理粗放,节能技术运用不规范

缺少专业运行管理人员,部分管理人员没有经过系统的专业培训,对暖通节能技术、节能设备操作、维护知识不熟练,不能进行系统的精细化运行管理;运行参数设置不合理,未能按照室内外温度、湿度的变化、使用场景的需求,及时调整系统的运行参数,造成系统长时间满负荷运转,浪费能源^[4]。设备维护保养不到位,没有建立健全的设备维护保养机制,节能设备长期得不到维护、检修,致使设备运行效率降低,耗能增大,甚至发生设备故障,影响系统的正常运行。

2.4 节能技术适配性不足,推广应用受阻

部分先进的暖通节能技术,如地源热泵、空气源热泵等,对工程场景、地域气候条件、初期投资等要求较高,适用于特定类型、特定地域的暖通空调工程,而部分工程盲目引进此类技术,未结合自身实际情况进行适配性分析,导致技术运用效果不佳,甚至无法正常运行。部分节能技术的初期投资较高,部分建设单位、施工单位受资金限制,不愿投入过多资金用于节能技术的引进与应用,导致节能技术难以广泛推广。

3 暖通空调工程中暖通节能技术的运用要点

3.1 暖通空调系统设计环节的节能技术运用

优化系统布局设计,结合建筑结构、使用功能,合理规划暖通空调系统的布局,缩短风管、水管的输

送距离,减少管道阻力,降低能源损耗;合理划分空调区域,根据不同区域的使用需求、人员密度,设计独立的供冷、供热系统,实现按需供能,避免能源浪费。加强风管及水力设计,选用低阻力、高强度的风管材料,优化风管截面尺寸与走向,减少风管弯头、变径等局部阻力;做好水力平衡设计,设置平衡阀、调节阀等,保证各区域供冷、供热均匀,提高系统的运行效率。采用节能型设计方案,推广变风量系统、变水量系统,按照室内负荷的变化,自动调节风量、水量,实现系统负荷与能源消耗的精确匹配;考虑地域气候情况,进行被动式节能设计,如利用建筑遮阳、自然通风等方式,降低暖通空调系统运行负荷及能耗。

3.2 暖通空调设备选型环节的节能技术运用

采用高效能级的主要设备,空调机组、水泵、风机等主要设备,优先选用一级能效的产品,保证设备运行效率高、能耗低,如选用变频空调机组、变频水泵、变频风机可根据负荷的变化自动调节运行频率,降低能耗。合理匹配设备参数,结合系统设计的冷负荷、热负荷,采用合适的设备参数,不造成设备选型偏大或者偏小的情况发生,让设备在最好的负荷下工作,提高工作效率,增加设备寿命。推广新型节能设备,如地源热泵、空气源热泵、太阳能空调等,结合工程地域条件、能源状况,合理选用可再生能源设备,替代传统化石能源设备,实现能源的清洁高效利用^[5]。

3.3 暖通空调系统运行管理环节的节能技术运用

加强运行参数调控,安排专业管理人员,根据室内外温度、湿度变化、人员密度、使用场景等因素,及时调整系统运行参数,优化供冷、供热温度,避免温度设置过高或过低,实现按需供能。强化设备维护保养,建立常态化的设备维护保养机制,定期对空调机组、水泵、风机、管道等设备进行清洁、检修、校准,及时发现并排除设备故障,确保设备始终处于高效运行状态;定期清洗空调滤网、换热器,减少设备阻力,提升换热效率,降低能耗。推广智能化运行管理,搭建智能化监控平台,实现对暖通空调系统运行状态、能耗数据的实时监测与分析,自动调整系统运行参数,实现系统的智能化、精细化运行,提升节能效果。

3.4 暖通空调系统改造环节的节能技术运用

对老设备进行节能改造或更换,对运行效率低、能耗大、老化严重的空调机组、水泵、风机等设备,进行节能改造或更换为高效节能设备,提高设备运行效率。优化系统管道改造,对管道保温性能差、阻力大的管道,进行保温层改造,选用高效保温材料,降低管道热损失;简化管道布置,减小管道弯头及变径数量,降低管道阻力,提高系统的使用效率;采用可再

生能源利用技术,在既有工程中增加太阳能集热系统、地源热泵系统等取代部分常规能源,实现能源的多样化应用,减少化石类能源的消耗量。

4 暖通空调工程中暖通节能技术运用的优化措施

4.1 强化节能设计理念,优化设计方案

加强设计人员的节能观念,提高设计能力,优化暖通空调系统的方案设计。加强对设计人员的培训力度,定期对设计人员进行有关建筑节能规范以及暖通节能知识的学习,提高设计人员的节能意识及专业知识,保证设计方案满足节能要求,并将节能技术充分应用在设计中;建立设计审查制度,加强暖通空调系统设计方案审查力度,着重审查系统布置、设备选用、节能措施等方面内容,对于达不到节能要求的设计方案,责令进行整改,保证设计方案的合理性和科学性。结合工程实际、地域气候条件,开展个性化设计,充分考虑被动式节能技术与主动式节能技术的协同运用,挖掘节能潜力,确保设计方案适配工程实际,发挥最佳节能效果^[6]。

4.2 规范设备选型,提升设备运行效率

严格暖通空调设备选型程序,选用合适的节能设备,提高设备使用率。制定设备选型标准,明确设备能效等级、参数要求,不得选用低能效、低品质的设备,优先选用一级能效、口碑较好的节能设备;根据系统的设计参数、使用情况,选取合理的设备参数,保证设备选型的合理性。加强对设备采购、验收的管控,严格审核设备供应商的资质,确保设备质量符合要求;设备安装完成后,进行严格的验收,检测设备运行效率、能耗指标等,确保设备能够正常发挥节能作用。加大对新型节能设备的推广力度,鼓励建设单位、施工单位引进地源热泵、空气源热泵等可再生能源设备,给予一定的政策支持与资金补贴,降低初期投资压力。

4.3 完善运行管理体系,强化精细化管理

完善暖通空调系统运行管理体系,提升运行管理水平,强化精细化管理。加强专业管理人员培养,建立多层次的培训体系,定期组织管理人员开展暖通节能技术、设备操作、维护保养等方面的培训,提升管理人员的专业技能与综合素养;建立管理人员考核机制,定期对管理人员的工作进行考核,确保管理人员规范操作、履职尽责。建立智能化运行管理平台,实现对系统运行状况、能耗数据的实时监测、分析及控制,自动调节运行参数,实现系统精细化、智能化运行;建立能耗统计分析机制,定期分析能耗数据,查找能源浪费环节,优化运行方案。完善设备维护保养机制,明确维护保养周期、内容以及责任分工,安排专人进

行设备日常维修保养工作,对出现的问题及时处理,保证设备完好率,使其能够始终保持在良好的工作状态下运行。

4.4 提升节能技术适配性,加大推广力度

加强暖通节能技术的适配性研究,提高暖通节能技术推广力度,促进节能技术广泛普及。结合不同种类、不同地区的暖通空调工程进行节能技术适配性分析,并根据不同的暖通空调工程情况提出适用性的节能技术和节能方案,避免盲从引入,影响技术应用效果。增加政策支持力度,制定相应的鼓励政策,对于使用暖通节能技术的项目予以一定的资金补助、税费减免等,减轻建设单位、施工企业的前期投入负担,增强企业推广节能技术的动力^[7]。强化技术指导及交流,组织行业专家、技术人员进行技术指导,为工程项目中节能技术的应用提供技术支持;组织行业交流活动,分享节能技术应用经验,促进暖通节能技术创新和发展,提高行业节能环保水平。

5 结束语

暖通空调工程应用暖通节能技术可有效减少建筑物能源消耗量,提高其绿色化程度,从而达成“双碳”的目标,对于确保系统的高效运转、改善室内的使用体验以及节约资金支出等方面具有重要作用。但在实际工程项目中有较多设计不科学合理、选用的装置不合适、缺少规范化的维护控制及技术水平不能满足工程需求的问题,限制了节能的应用。通过优化节能的设计方案、严格选用节能设备、加强精细管理、提高节能技术水平等方面的改进措施,能够有效地解决上述问题,实现节能技术的大规模应用。

参考文献:

- [1] 宋东方.暖通空调工程中暖通节能技术运用分析[J].价值工程,2026,45(08):97-100.
- [2] 石新新,何延隆.建筑工程中的暖通空调节能技术应用[J].建设科技,2025(24):81-83.
- [3] 刘峰.暖通空调工程中暖通节能技术运用分析[J].科学技术创新,2025(24):144-147.
- [4] 郭瑞,中铁军.暖通空调节能技术在建筑工程中的应用分析[J].建材发展导向,2025,23(09):115-117.
- [5] 王永宝,钱文涛,尹春晓.暖通空调节能技术在建筑工程中的应用分析[J].中国战略新兴产业,2024(15):132-134.
- [6] 刘倩.建筑工程中暖通空调节能技术的应用分析[J].智能建筑与智慧城市,2024(03):119-122.
- [7] 胡跃涛.暖通空调工程管理与暖通节能技术分析[J].科技创新与应用,2022,12(23):175-178.

高压配电线路线损成因分析及降损措施研究

王长杰

(国网陕西省电力有限公司西咸新区泾河新城供电分公司, 陕西 咸阳 713702)

摘 要 高压配电线路作为电力系统电能传输与分配的关键环节,其线损水平不仅能够直接反映电网规划设计、设备运行及运维管护的综合质量,也是电力企业控制运营成本、提升电能利用效率的核心指标。基于此,本文首先分析了高压配电线路线损的具体成因,然后着重探讨了高压配电线路降损的有效举措,以期为广大电力工作人员提供参考。

关键词 高压配电线路; 电网规划设计; 设备升级改造; 无功补偿配制; 三相负荷

中图分类号: TM726

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.022

0 引言

随着我国经济的快速发展,全社会电力需求持续攀升,在此情况下高压配电线路覆盖范围不断扩大,线路长度、设备容量持续增加,但与此同时,线损问题也日益严重。线损具体是指电能 in 高压配电线路传输、变压、分配过程中,因线路电阻、设备损耗、管理疏漏、外部干扰等因素产生的电能损耗与电量损失。线损不仅会造成大量电力资源浪费,还会增大电网负荷压力,严重时甚至会影响电网运行的安全性及稳定性。因此,为了减少电力资源浪费,确保电网得以安全稳定运行,在此背景下就高压配电线路线损的具体成因和降损措施展开探讨是非常必要的。

1 高压配电线路线损的具体成因

1.1 技术层面的原因

1. 电网规划设计不合理。电网规划设计是影响线损的基础性因素,如果电网规划设计不合理会从源头加剧线路损耗,具体可概括为以下情形:一是供电半径过长。部分地区受地理条件、资金投入等因素限制,导致高压配电线路供电半径远超标准范围,即 35 kV 的高压配电线路供电半径远超 30 km,15 kV 的高压配电线路供电半径远超 15 km。由于供电半径过长,所以线路电阻会相对较大,进而会在一定程度增大电阻损耗;二是线路布局迂回交叉。部分线路未结合负荷分布科学规划,经常出现迂回供电、交叉跨越现象,会在一定程度上增大线路能耗^[1];三是导线截面选型不当。早期建设的高压配电线路未能准确预测用电负荷增长趋势,致使所选的导线截面过小。而随着用电负

荷的不断增加,导线极易出现电流过载现象,进而增加线路电阻损耗。

2. 电气设备老化陈旧。高压配电线路及配套设备长期在户外运行,受环境侵蚀、运行年限影响,老化问题突出,进而极易引发大量的附加损耗,具体可概括为以下几种情形:一是线路导线老化。部分运行超过 20 年的老旧线路,其导线氧化、腐蚀现象严重,表面电阻较大,进而增加电能输送损耗;二是变压器性能衰退。高耗能的老旧变压器其容量通常很难与当前用电负荷匹配,进而极易出现“大马拉小车”或“小马拉大车”现象。而“大马拉小车”会引发高压配电线路空载损耗,“小马拉大车”又会增加高压配电线路铜损^[2];三是配件老化。缘子、开关、互感器等配件老化极易引发电流泄露、接触不良等问题,进而也会产生额外的电能损耗。

3. 无功补偿配置不足或不合理。在高压配电线路中,变压器、电动机等感性设备运行需要消耗大量无功功率,在此期间,如果无功补偿不足或不到位,会导致线路功率因数降低,线损大幅增加,具体可概括为以下几种情形:一是无功补偿装置容量不足。部分线路仅在变电站侧配置集中补偿装置,却未在线路分支、负荷端配制分散补偿装置,致使无功功率需从变电站远距离传输,增大了线路的无功电流和有电损耗;二是无功补偿方式不合理。缺乏动态无功补偿装置,无法根据负荷变化实时调整补偿容量,致使负荷高峰期补偿不足、负荷低谷期过补偿,而不论是上述哪种情况均会降低线路功率因数,增加线路损耗;三是无功补偿装置老化故障。电容器、电抗器等设备一旦运

作者简介: 王长杰(1997-),男,本科,助理工程师,研究方向:高压营配。

行异常,会导致高压配电线路功率因数降低,进而增大高压配电线路损耗^[3]。

4. 三相负荷不平衡。高压配电线路多采用三相四线制运行模式,而三相负荷平衡是降低线损的一个重要方法。但是,在实际运行中受单相负荷接入不均、用户用电随机性强等因素影响,极易出现三相负荷不平衡现象。而当三相负荷不平衡时,零线会产生电流,进而增加线路额外损耗。

1.2 管理因素

1. 计量装置管理不规范。电能计量装置是核算供电量与售电量的核心设备,而一旦电能计量装置出现计量偏差,就会直接导致线损统计偏差和实际电量损耗,具体主要可以概括为以下几种情形:一是计量装置选型不合理。部分线路仍使用机械式电能表、低精度互感器等计量装置,这些计量装置无法精准计量电量,计量误差远超电子式智能电表;二是计量装置老化失准。未定期对计量装置进行校验、轮换,致使互感器变比误差、电能表走字偏差等问题频发,而这也是导致电量数据计量失真的一个重要原因;三是计量装置安装不规范。计量装置一旦出现接线错误、接触不良等问题,会导致电量计量出现漏记或少记现象,而这均会增大高压配电线路管理线损。

2. 抄表核算及线损管理粗放。传统人工抄表模式经常出现漏抄、错抄、估抄等问题,导致售电量统计缺乏准确,线损数据失真。除此之外,电量核算流程也缺乏严谨,经常出现核算错误、电量分摊不合理等问题,从而会进一步放大高压配电线路管理线损。另外,电力企业对于线损管理体系缺乏完善,如对线损的责任划分不明确,并且缺少常态化线损监测、分析及考核机制,进而导致高压配电线路线损管控流于形式。

3. 窃电行为管控不力。部分用户为了减少电费支出,会通过私拉乱接、改动计量装置、绕过电表接线等方式进行窃电。而高压配电线路覆盖范围广,农村、偏远地区线路巡检难度大,加之反窃电技术手段落后、执法力度不足,导致窃电现象屡禁不止,进而造成了极大的电量流失。

1.3 自然环境因素

1. 自然环境侵蚀。高压配电线路长期暴露在户外,受雷击、大风、雨雪、冰冻、高温等恶劣天气影响,致使线路设备受损严重。其中,雷击会导致线路绝缘子击穿、设备短路,进而极易引发突发性损耗;大风、冰冻会导致导线摆动、覆冰,进而会增大线路电阻和

运行负荷;高温、潮湿环境会加速导线及设备绝缘老化,进而会增大线路漏电损耗;树木、植被触碰线路,会导致线路放电、漏电,不仅会增大电能损耗,而且极易引发安全事故^[4]。

2. 外力破坏与干扰。工程施工、车辆碰撞、人为破坏等外力因素,会导致线路杆塔倾斜、导线断裂、设备损坏,极易引发线路故障与电量损耗。除此之外,部分地区电磁干扰、谐波污染严重,用户侧非线性设备产生的谐波电流能够注入高压配电线路,致使线路电流畸变,进而增加线路附加损耗。

2 高压配电线路降损措施

2.1 技术层面的降损措施

1. 优化电网规划设计。一是科学规划线路布局。要根据辖区负荷分布、地理条件等合理确定变电站、配电所布点,以此来缩小供电半径,确保 10 kV 高压配电线路供电半径控制在 15 km 以内,35 kV 高压配电线路供电半径控制在 30 km 以内。除此之外,还要加快推进环网供电改造,以此来实现线路负荷灵活转移,进而有效提升电网运行的灵活性;二是合理确定导线截面选型。要依据线路负荷现状以及未来增长趋势精准测算导线载流量,及时淘汰小截面老旧导线,更换导电性能优、耐腐蚀的新型导线,确保导线容量与负荷匹配,以防出现过载损耗与轻载浪费现象;三是优化负荷分布。要将集中负荷布置在线路中段,避免线路末端负荷过载,同时还要均衡线路各段电流密度,以此来尽可能降低电量传输损耗。

2. 推进设备升级改造。一是更换老旧导线。要对氧化、断股、腐蚀严重的线路加以全面改造,采用 LGJ 型钢芯铝绞线、铝合金导线等节能导线代替传统导线,降低线路电阻;二是淘汰高耗能变压器。要将高耗能变压器更换成 S11、S13 及以上型号的节能变压器,并依据线路负荷特性合理配制变压器容量,确保变压器负载量始终控制在 30%~70% 这一经济运行区间,以免出现轻载或过载损耗;三是更换老旧配件。要将老旧配件及时更换为低泄露、高绝缘性配件,减少接触电阻和泄漏电流,进而降低设备附加损耗。

3. 完善无功补偿配制。一是要在变电站侧配置大容量动态无功补偿装置,以此来维持全网无功功率平衡;二是要在线路分支、负荷集中区域安装分散式电容器组,通过就近补偿无功功率的方式,减少无功功率远距离传输损耗;三是要安装无功自动补偿装置,无功自动补偿装置能够根据线路负荷、电压变化实时

调整补偿容量,确保线路功率因数始终维持在 0.95 以上,以此来最大限度降低线路无功损耗。

4. 均衡三相负荷。一是要建立三相负荷常态化检测机制,定期对线路三相的电流、电压加以检测,以便及时发现线路三相负荷不平衡问题;二是要通过调整单相用户接入相位、优化负荷接线方式等举措,将线路三相的负荷不平衡度控制在 15% 以内,变压器出口端的不平衡控制在 10% 以内;三是对于负荷波动较大的线路可以安装三相负荷自动平衡装置,以此来实时调整负荷分布,消除零线电流,进而减少三相不平衡引发的额外损耗。

5. 治理谐波污染。一是要在高压配电线路谐波源接入部位安装滤波器、无功补偿兼谐波治理装置,以此来抑制谐波电流传输,进而减少因谐波引发的线路附加损耗;二是要加强用户侧非线性设备管控,要求新增的非线性设备必须配置谐波治理装置,从源头控制谐波污染。

2.2 管理层面的降损措施

1. 规范计量装置管理。一是要全面淘汰机械式电能表,更换为 0.5S 级以上的电子式智能电表,同时要配套高精度电流、电压互感器,减少电量计量误差;二是要建立计量装置全生命周期管理体系,定期对计量装置进行校验、轮换及维护,确保计量装置始终维持在正常运行状态;三是要规范计量装置安装流程,严禁出现接线错误、接触不良等问题,保证电量计量的精准性。

2. 优化抄表核算流程。一是要运用远程自动抄表系统代替传统人工抄表,提高抄表的效率和精准性,以防出现漏抄、错抄、估抄等问题;二是优化电量核算流程,采用智能化核算系统自动进行电量统计、电费核算、线损计算,减少人工核算误差,从而进一步提升线损数据准确性。

3. 强化线损精细化管理。一是要明确各部门、各岗位线损管理责任,将线损指标细化到每条线路、每个台区,纳入辖区电力工作人员绩效考核体系范畴,以此来激发辖区电力工作人员参与线损管控的积极性;二是要积极借助用电信息采集系统、电网运维管理系统等对线损加以实时监测分析,以便及时找出高损耗线路,快速定位线路损耗根源,并提出针对性整改措施,形成线路损耗常态化管控机制,降低高压配电线路线损率。

4. 加大反窃电力度。一是要借助无人机、无网监

控等装置对高压配电线路加以实时巡逻,以便及时发现窃电行为;二是要建立反窃电联合执法机制,联合公安、市场监管部门等相关部门加大窃电查处与处罚力度,提高窃电违法成本;三是要推广应用防窃电电表、智能封印、用电异常报警器等新型装置,整体提升防窃电技术水平,进而有效减少窃电事件发生概率^[6]。

2.3 外部环境层面的降损措施

一是要对线路杆塔、导线、设备等进行防风、防雷、防冰冻改造,并安装防雷装置、防覆冰装置等,提高高压配电线路抗自然灾害能力;二是要定期清理线路内的树木、植被,确保树木、植被与高压配电线路保持一定距离,以防树木、植被触碰导致线路出现漏电、放电损耗;三是要加大线路保护宣传力度,提升公众电力设施保护意识,同时要对施工区域内的线路加强防护,以免外力对高压配电线路造成破坏;四是要建立恶劣天气应急处置机制,提前做好防灾准备,快速处理线路故障,减少突发性电量损耗。

3 结束语

高压配电线路线损一般由技术因素、管理因素、外部环境因素等多种因素所引发,不仅会造成大量电力资源浪费,还会增大电网负荷压力,严重时甚至会影响电网运行的安全性及稳定性。因此,电力企业在实际运行期间必须依据高压配电线路实际特点,切实做好电网规划设计、设备改造升级、无功补偿装置配制、三相负荷平衡、计量装置规范、窃电行为管控、外部环境防控等相关工作。只有这样,才能最大限度降低高压配电线路线损,进而更好地维持高压配电线路安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 南天宇,赵圭鑫,张君,等.基于大数据的电力线路线损故障分析与预测研究[J].电工材料,2026(01):117-120.
- [2] 樊星.分析电力线损产生的原因及处理的有效措施[J].电气技术与经济,2024(06):297-298,302.
- [3] 周韶波,曾俊,李明远.基于大数据技术的电力线路线损故障诊断系统设计[J].电气技术与经济,2025(01):323-325.
- [4] 张鹏飞.基于光伏发电的电力线路线损优化管理研究[J].科技与创新,2024(23):114-116.
- [5] 管海滨.基于线路参数计算的电力线路线损优化策略研究[J].科技创新与生产力,2024,45(11):77-79,83.

联合制样机废弃煤样回收装置的设计与优化

高 琳, 郭 靖, 吴庆博

(华润电力登封有限公司, 河南 郑州 452470)

摘 要 煤炭联合制样设备已经在煤炭、燃煤火电等领域广泛应用, 其性能偏差可能会导致煤炭贸易纠纷, 影响锅炉燃烧安全经济性。本文围绕联合制样机运行末端废弃煤样回收不畅、撒漏偏多与堵塞易发等问题, 结合制样系统空间受限、节拍连续与环保约束并存的工况特点, 提出密闭提升回送装置的设计思路。依托弃样接收、封闭输送、提升倒料、溜管回送与联锁控制等环节, 构建兼顾结构布置、流动组织与运行响应的整体方案。进一步从关键部件协同、回收效率计算及控制保护逻辑等方面展开校核, 并对防堵、防尘、节拍匹配与维护便利性进行优化。联机验证表明, 该装置在回收稳定、环境约束适配与联机运行协调方面表现较好。

关键词 联合制样机; 废弃煤样回收; 密闭输送; 提升倒料; 联锁控制

中图分类号: TD462

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.023

0 引言

煤样制备自动化与连续化已成为行业技术升级的核心方向, 末端弃样处理已不再只是辅助工序, 而是牵动整机稳定运行的重要节点。传统落地收集与人工清运方式在转接衔接、环境控制和运行节拍方面存在短板, 稍有滞后便可能导致撒漏、积料与二次扬尘。尤其在制样间空间有限、设备接口紧凑、除尘系统并行运行的条件下, 回收路径布置与结构组织难度进一步加深。如何把弃样从主机尾端顺畅抽离并安全回送, 已经成为联合制样装备优化中的重要课题。

1 联合制样机废弃煤样回收装置的工况需求与技术约束

无人值守煤炭联合制样系统, 避免了人工劳力, 提高了工作效率且保证精确检测结果, 使得煤炭制样工作无人化、标准化、智能化、无尘化以及制样全过程数据可追溯。联合制样机在送料、6 mm 一级破碎、3 mm 二级破碎、缩分切割与样品分装后会持续析出弃样流, 此类物料并非无效废弃物, 而是需回送煤场或集中回收点的剩余煤样, 回收端因而承担着连续接收、密闭转运、稳定卸料与污染压制的复合任务。现有系统单批处理范围为 15 kg ~ 150 kg, 前级大质量单元还覆盖 150 kg ~ 800 kg 来样, 同时日制样量达到 40 个 ~ 60 个批次, 回收路径又嵌置于既有制样间、煤场接口与除尘主管之间, 空间转接、节拍衔接和防堵抑尘便成为设计边界。回收装置的性能目标也由此收束

为三点: 一是弃样不落地、输送不停滞; 二是与弃样口、皮带机、提升倒料机构及煤场落点顺畅对接; 三是在 AC380V 供电体系下兼顾 3 kW 提升驱动、 ≥ 5 t/h 回送能力与后期检修便利性。

2 联合制样机废弃煤样回收装置的总体方案设计

2.1 总体结构方案与工艺路线设计

废弃煤样回收装置宜采用“弃样接收—密闭输送—提升倒料—回收溜管—终端卸料”五段式组织方式, 把联合制样机尾端析出的弃样流从主机内部平稳抽离, 再沿封闭路径回送至煤场 (见图 1)。弃样出口与接收斗直接衔接后, 煤样可借助短距皮带或导流段进入提升倒料机, 再由顶部倒料溜斗定点卸入回收通道, 这一路线把水平过渡与垂直提升压缩在同一流程内, 更适合制样间与煤场接口之间存在高差和空间分隔的场景^[1]。提升倒料机构采用竖向框架布置, 上部布置倒料溜斗组件, 下部预留接料接口, 中部为提升腔体与料斗运行通道; 现有参数表明, 其驱动条件为 AC380V、3 kW, 设计出力可达 5 t/h, 可作为废弃煤样回送段的核心执行单元。

2.2 核心组成单元设计

总体方案落地时, 弃样接收单元负责缓冲、稳流与导向, 较多采用带观察口的密闭接料斗, 以减轻批次排样对后端的冲击; 密闭输送单元则顺接原有弃样输送逻辑, 压住煤流离析与接口撒漏。提升倒料单元是整套回收系统的动力核心, 借助链条与料斗完成整

作者简介: 高琳 (1989-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 火电技术管理。

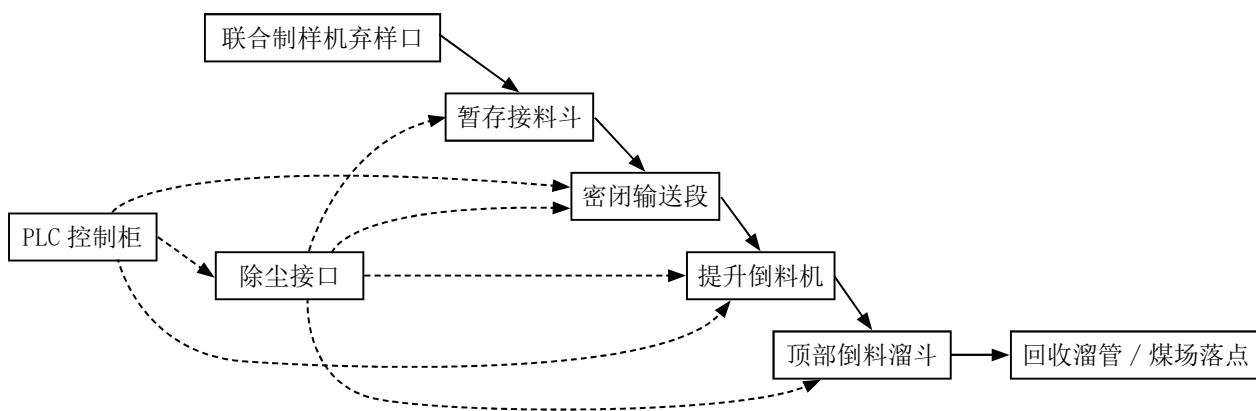


图 1 联合制样机废弃煤样回收装置总体结构与工艺流程图

向回送，现有设备资料给出的边界为 AC380V、3 kW、出力 ≥ 5 t/h，这一配置已具备较强工程适配性。顶部倒料溜斗单元关系卸料轨迹与落点精度，倾角、截面尺寸及耐磨衬板形式都需同步校核；除尘与吹扫单元还要和现有除尘主管连通，在转接节点布置负压吸尘口与压缩空气清扫口^[2]。PLC 联锁控制单元则把弃样口状态、提升机运行、堵塞报警与故障停机编入同一逻辑链，由此形成机械回收与电控响应协同运行的结构体系。

3 废弃煤样回收装置的关键部件设计与核心计算

3.1 提升倒料机构与流动协同设计

提升倒料机构依托立式框架承载，自重、满载煤样重力及启停冲击在同一受力体系内闭合，刚度储备不足之际易诱发偏摆与料斗跑偏。回收连续性由料斗容积、链条节距、导轨间隙与翻斗角度协同牵动，顶部翻转区与导轨过渡段最为敏感，配合偏差会带出回卸不净与挂壁返料^[3]。结构形态沿高位倒料、立式提升与顶部溜斗外伸展开，适配狭长空间内的垂直回送与定向卸料，运行边界按 AC380V、3 kW、出力 ≥ 5 t/h 校核。溜管与落料节点顺着煤流下滑路径布置，倾角在防滞留与控冲击之间取值，截面过渡避开突缩与锐角折转，内壁采用耐磨低附着衬层并辅以柔性密封。针对细粒或高水分弃样，在易积料区配置振打或气动清扫，并联负压除尘与吹扫接口，以压住挂壁、堵塞与粉尘外逸。

3.2 输送能力与回收效率的核心计算

废弃煤样回收装置的计算重点，不宜停留在单一电机功率选配，而要把回收流量与制样节拍扣紧，判断回收端能否跟上弃样批次排放频率。为此，可将回收效率设为核心评价量：

$$\eta_r = (M_r) / (M_w) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中， η_r 为废弃煤样回收效率，单位为 %； M_r 为实际回收到的煤场或指定位置的煤样质量，单位为 kg； M_w 为联合制样机排出的废弃煤样总质量，单位为 kg。该指标越接近 100%，说明撒漏、滞留与返料越少，可直接用于优化前后方案比对；结合现有提升段 3 kW 驱动、出力 ≥ 5 t/h，以及系统日制样 40 个~60 个批次的运行边界，回收链条的连续性与匹配度便有了量化参照。

3.3 控制逻辑与联锁保护设计

废弃煤样回收装置的控制逻辑宜采用“来料识别—顺序启动—状态反馈—异常闭锁”的链式组织方式，当前端弃样口检测到来料信号后，接收单元、输送单元与提升单元再依次投入，以削弱瞬时堆料对末端回收的冲击。若提升机未到位、顶部卸料区尚未排空，或回收通道已出现堵塞迹象，前端弃样输入通常要进入延时等待或禁止状态，避免煤样在转接段集中堆积。过载、堵塞、跑偏、料满、门开及检修切换等工况，均宜并入报警与停机逻辑，同时保留必要的手动/自动切换接口^[4]。制样系统采用 PLC 控制、具备开放接口，并上传批次号、制样时间、重量及故障日志等信息，回收装置据此可与联合制样机总控系统共享运行状态、故障记录和弃样重量，进而增强末端回收链条的可追溯性。

4 联合制样机废弃煤样回收装置的优化策略

4.1 面向防堵与防黏附的结构优化

废弃煤样回收装置在连续运行之际，真正拉开稳定性差距的往往不是主传动，而是料斗底部、转接法兰、提升机底部回煤区等易滞料节点的结构细化。优化时宜把料斗锥角、出料口宽度与落料通道截面联动校核，

尽量压缩滞料区和死角区；对细粒煤样、高水分弃样及局部黏附偏强工况，接触面更适合采用 SUS304 不锈钢或低附着衬层，以减轻挂壁和结拱。高风险节点还可前置振打、气吹或独立清扫机构，借此把积料在早期阶段就导出；提升机底部回煤区则宜同步设置集中清扫口和废煤回收接口，避免残留煤样在下一个运行周期再次卷入，致使堵塞与交叉污染叠加。

4.2 面向密封与抑尘的环保优化

密封与抑尘优化的关键，在于把“煤样不落地”从单一输送要求延伸到转接、检修和清扫全过程。落料点、法兰转接点及检修门周边宜采用双层密封构型，内层负责拦截细粒煤粉，外层负责削弱负压波动对外泄的牵引；顶部倒料区、弃样接收区和密闭输送段则宜与现有除尘主管联动，并在关键位置增设负压接口^[5]。制样过程与传输过程不得出现煤样、煤粉漏出，同时设置多处除尘点、外部主管道及压缩空气吹扫管路，这为回收装置的环保优化提供了直接边界。进一步看，压缩空气吹扫不宜泛化配置，而更适合布置在死角积粉区、回煤盲区及检修后复位节点，以便在不扩大风量波动的前提下清理残粉。

4.3 节拍匹配与维护协同优化

运行优化围绕回收周期与弃样批次的动态扣合展开，日制样 40 个~60 个批次条件下，若维持固定运行节律，空转与瞬时堆料易交替出现，因而提升倒料机的启动间隔、运行时长与停机延时需随来料波动整定。前端设置适度缓冲容积以吸纳排样峰值，后端对提升速度与卸料节奏进行联动校核，用于压低峰值电流与冲击负荷，在 3 kW 驱动、 ≥ 5 t/h 出力边界内划定经济运行区间。工程维护侧同步嵌入结构设计，检修门、观察窗与清堵口前移至转接段、提升底部及顶部翻转区，缩短故障定位路径。传动部件采用外置或半外置布置，配合清扫通道与状态标识，削弱煤粉侵入并压缩停机判断时间。料斗、溜管及密封组件按模块化单元组织，局部替换即可完成维护切换，长期运行稳定性随之提升。

5 废弃煤样回收装置的方案对比与联机验证

验证环节以“传统落地清运”与“密闭提升回送”两类路径并行对照展开，评价范围除回收效率外，还纳入堵塞频次、人工干预次数及清扫工作量等变量。试验过程嵌入联合制样机整机调试链条，在空载、自动及负载连续工况下同步采集数据，负载连续运行时间不低于 2 h，由此锁定回收端与制样节拍、除尘系统

及 PLC 连锁之间的耦合状态。结果判读依托表 1，对比优化前后回收效率、撒漏量、单位能耗与连续运行时长等指标变化，若效率提升且堵塞与干预回落，说明回送路径更贴合末端工况。结合日处理 40 个~60 个批次与 3 kW、 ≥ 5 t/h 运行边界，即可作为方案优选与工程适配判断依据。

表 1 联合制样机废弃煤样回收装置优化前后关键指标对比表

指标名称	单位	优化前	优化后	变化方向
回收效率	%	92.4	98.1	提高
堵塞频次	次·d ⁻¹	5.0	1.0	降低
撒漏量	kg·d ⁻¹	8.6	1.7	降低
单位回收能耗	kWh·t ⁻¹	0.96	0.72	降低
人工干预次数	次/班	6	2	降低
连续运行稳定时长	h	2.5	6.0	延长
检修耗时	min/次	42	18	缩短
扬尘控制效果	定性等级	中	优	改善

6 结束语

联合制样机废弃煤样回收装置设计的关键不在单一提升单元选配，而在结构布置、物料流动、控制响应与维护组织之间形成稳定配合。依托密闭输送、立式提升、溜管顺流与 PLC 连锁协同展开，装置较好地解决了末端回收中的撒漏、堵塞与滞料问题。围绕防堵防粘、密封抑尘和节拍整定展开的优化，又进一步改善了运行平稳性与检修便利度。联机验证结果表明，该方案与联合制样系统末端工况具有较强的适配性，工程应用价值明确。

参考文献：

- [1] 马旭,王文龙,刘峰.营盘壕选煤厂智能采制化的设计与实践[J].洁净煤技术,2025,31(S1):797-802.
- [2] 刘奇,梁宇,张洪,等.选煤生产过程控制机器人煤质化验系统的研制和应用[J].煤炭科学技术,2025,53(S1):308-316.
- [3] 付令怡,杨长友,朱超,等.商品煤采制化系统改造实践[J].选煤技术,2023,51(03):77-81.
- [4] 王红燕,陈敬胜,李俊,等.智能采制化系统在潘集选煤厂的应用[J].煤炭加工与综合利用,2024(02):85-89.
- [5] 王家栋.煤炭全自动制样系统精密度和偏倚试验实施方法[J].煤质技术,2025,40(05):89-96.

电机厂电气设备运行维护与故障处理技术探析

王嘉博

(哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要 在现代装备制造行业中, 电机厂电气设备的运行状态直接影响生产线稳定性、产品质量与企业安全生产水平。本文结合电机厂现场实际运行情况, 对变压器、高低压电动机、配电装置及 PLC 控制系统等关键电气设备的运行特点、常见隐患与故障规律进行分析, 引入行业实测数据与工程经验, 从日常巡检、定期检修、状态监测、故障判断及应急处理等方面提出针对性维护措施, 以期为同类制造企业电气设备运维工作提供参考。实践表明, 建立以预防性维护为主、状态监测为支撑的综合管理方式, 可有效降低设备突发故障概率, 减少非计划停机时间, 提升电机厂整体供电与控制系统的可靠性。

关键词 电机厂; 电气设备; 运行维护; 故障处理; 状态监测

中图分类号: TM07

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.024

0 引言

电机作为工业生产的主要动力设备, 广泛应用于机械、冶金、化工、建材等多个领域, 而电机制造厂自身的电气系统则是保障生产连续运行的基础。近年来, 随着电机厂生产规模不断扩大, 自动化生产线逐步普及, 电气设备数量增多、结构更加复杂, 传统以事后维修为主的管理模式已难以满足高效生产需求。相关行业数据显示, 机械制造类企业中, 电气设备故障造成的停机占生产中断总量的 50% 以上, 不仅直接影响产能, 还可能引发短路、发热甚至电气火灾等安全问题^[1]。因此, 对电机厂电气设备开展系统性运行维护研究, 总结典型故障成因, 优化维护流程, 提高故障处置效率, 具有较强的现实意义。本文从电机厂常用电气设备结构出发, 结合现场运维经验, 梳理设备日常管理要点、典型故障现象及处理方法, 力求为一线电气维护人员提供实用、可操作的技术思路。

电机厂生产现场多台大功率电机、试验机组、绕线设备、数控加工设备同时运行, 负荷波动大、电磁环境复杂, 加之车间内粉尘、油污、湿度变化等因素, 进一步加剧电气设备老化与故障风险。从哈尔滨电机厂近年来运维统计数据看, 电气故障导致的非计划停机占总停机时长的 58%, 其中电动机故障约占 42%、配电系统故障约占 28%、控制系统故障约占 19%、变压器及高压设备故障约占 11%。传统“坏了再修”模式不仅维修成本高、恢复时间长, 还会影响生产节拍与交付

周期, 甚至威胁试验设备与人员安全。因此, 构建以预防性维护为核心、状态监测为支撑、标准化故障处置为保障的综合运维体系, 对提升电机厂电气系统可靠性、降低运维成本、保障连续生产具有重要工程价值。

1 电机厂主要电气设备组成

电机厂电气系统覆盖从高压进线到低压控制的完整环节, 设备种类多、分布广, 按照电压等级与功能大致可分为高压设备、低压配电设备、控制保护设备及辅助电气设备。

高压电气设备以 10 kV 系统为主, 包括配电变压器、高压开关柜、高压电动机及高压电缆等。变压器承担全厂电压转换与电能分配任务, 是供电系统的核心; 高压电机多用于大型机床、试验设备、风机水泵等大功率负载; 高压开关柜则负责电路控制、保护与故障隔离, 是高压系统安全运行的关键装置。

低压电气设备数量最多、应用最广, 主要包括低压配电柜、低压电动机、断路器、接触器、热继电器及各类控制电缆。这类设备直接服务于机加工、绕线、装配、测试等工位, 启停频繁、负荷波动较大, 也是日常维护中最需要关注的部分。

控制与保护类设备主要包括 PLC 控制器、变频器、软启动器、继电保护装置及各类传感器。PLC 负责生产流程逻辑控制, 变频器与软启动器用于改善电机启动性能并实现节能运行, 继电保护与监测仪表则在设备异常时及时发出信号或切断电源, 避免故障扩大。此外,

作者简介: 王嘉博 (1987-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电气工程。

厂区还包括照明、消防电气、应急电源、通风等辅助电气设施。虽然它们不直接参与产品加工,但对维持生产环境、保障人员安全和应急处置至关重要,同样需要纳入统一管理范围。

在实际生产中,上述设备并非独立运行,而是通过供电网络、控制信号、保护逻辑形成有机整体。高压系统负责大功率试验机组、大型加工设备的动力供给,低压系统覆盖全流程辅助设备与工位供电,PLC 与变频器构成自动化生产线的控制核心,继电保护与监测仪表则为整个电气系统提供安全屏障。任何一个环节出现异常,都可能引发连锁反应,导致局部甚至全线停产。这就要求运维人员不仅要熟悉单台设备结构原理,更要掌握系统联动特性,从整体角度开展维护与故障处置工作^[2]。

2 电机厂电气设备运行维护要点

电机厂电气设备维护总体遵循“预防为主、防治结合”的原则,通过日常巡检、定期检修和状态监测相结合的方式,及时发现并消除隐患。

日常巡检是最基础、最有效的手段之一,主要依靠观察、听音、测温、测振等方式判断设备状态。对变压器,重点查看油位是否正常、有无渗漏油、运行声音是否均匀、套管有无放电或脏污痕迹;对高低压电动机,重点关注外壳温度、轴承部位温升、运行振动及有无异常噪声;对配电柜与控制柜,主要检查有无异味、发热、指示灯异常及接线松动现象。巡检过程中发现的接线发烫、轻微异响、局部积尘等问题,往往是后续严重故障的前兆,及时处理可大幅降低维修成本。

定期检修是在设备运行一定周期后开展的系统性保养工作^[3]。根据设备重要程度,主变压器、关键高压电机一般每年进行一次小修,重点完成清扫、紧固、润滑、绝缘测试等内容;间隔 3 年~5 年进行一次大修,对内部绕组、铁芯、触头、轴承等关键部件进行检查或更换。低压配电柜、普通电机可适当延长检修周期,但仍需保证每年至少一次全面检查,重点处理触点烧蚀、接线氧化、散热不畅等问题。

状态监测与预防性试验是提升设备可靠性的重要手段。在不停机状态下,可利用红外测温仪对开关柜触头、母线、电机接线盒等部位进行温度检测,对旋转设备进行简易振动测量,判断是否存在过热、不平衡、轴承磨损等隐患。在停电检修时,通过绝缘电阻测试、直流电阻测试等常规试验,能够更准确地判断绕组、电缆等绝缘状况,为设备能否继续安全运行提供依据。

在具体执行中,应结合《电力设备维护保养手册》(GB/T 38532-2020)与厂内实际工况,细化巡检项目与判定标准。例如:变压器运行声音应均匀无杂音,本体及套管清洁无渗漏;电动机轴承温度一般不超过 80℃,振动速度有效值控制在合理范围;配电柜内母线、触头温度不超过 70℃,接线端子无变色、无发热痕迹。同时,将巡检数据、检修记录、试验结果统一录入设备台账,形成可追溯的全生命周期管理档案,为后续状态评估、备件计划、检修决策提供数据支撑,避免凭经验盲目维修^[4]。

结合电机厂多工况、多设备协同运行的特点,巡检工作还需注重差异化覆盖。针对试验车间高负荷运行的电机,增加巡检频次,重点监测温升与电流波动;针对机加工车间长期连续运行的设备,强化振动与噪声的日常对比记录,建立设备状态基准值;对室外露天布置的电气设备,额外关注防雨、防雷、防凝露措施,避免环境因素加速设备老化。此外,巡检过程中应同步更新设备台账,对设备运行时长、故障次数、维护记录等信息实时更新,确保台账数据与设备实际状态一致,为后续维护策略调整提供精准依据。

3 电气设备常见故障及处理方法

结合电机厂实际运行情况,电气设备故障相对集中,主要出现在变压器、电动机、低压配电装置及控制系统中。

变压器常见故障以渗漏油、绝缘下降、局部过热为主。渗漏油多发生在密封垫老化、法兰连接处或焊接部位,发现后应及时查找渗漏点,更换密封件或补焊处理,并保持油位正常。绝缘下降通常与长期过载、散热不良、油质受潮有关,表现为绝缘电阻偏低、运行温度偏高,轻微受潮可通过干燥、滤油改善,严重时需停机检修。局部过热与铁芯多点接地、内部接触不良有关,油温异常升高、气体继电器动作时应立即停运检查。

电动机故障在电机厂占比最高,尤以绕组故障和轴承故障最为常见。定子绕组绝缘受潮、老化或受损,会导致电流增大、温升偏高,严重时跳闸冒烟,可通过绝缘测试快速判断,轻度受潮烘干处理,严重损坏则重新绕组。轴承故障表现为振动加大、异响、温升上升,多由润滑不良、磨损超标、安装对中偏差引起,处理以换轴承、补润滑脂、校正同轴度为主。此外,转子笼条断裂、不平衡会引发振动与电流波动,需检修或动平衡校正。

低压配电系统故障多集中在断路器、接触器与线

路接点。断路器拒动、误动与机构卡涩、脱扣器异常、触头烧蚀有关,需定期检查动作特性,打磨或换触头。接触器易出现触点熔焊、线圈烧毁、吸合噪声大,多由频繁启停、电压波动、接触不良导致,按损坏程度维修或更换。线路故障以接头松动、绝缘破损、过载发热为主,易引发短路接地,需精准定位故障点,修复绝缘并重新压接^[5]。

PLC、变频器等控制设备故障多表现为信号异常、通信中断、报警停机。常见诱因是电源不稳、接线松动、粉尘潮湿、电磁干扰。处理时先查供电与接线,再核对模块状态,必要时重设参数、恢复程序。变频器过流、过热、过压报警,多与负载突变、散热不良、参数不当有关,需结合报警代码排查,改善散热并优化参数。

现场处置时遵循“先断电、再排查、后修复”安全流程,采用“外观判断—仪器检测—分步隔离—验证恢复”标准化步骤。对绕组故障,用500 V~2 500 V兆欧表测绝缘,低压电机对地绝缘不低于0.5 MΩ,高压电机不低于1 MΩ/kV,三相直流电阻偏差 $\leq \pm 2\%$,快速判断短路、断路、接地。对控制回路故障,重点排查电压波动、接线虚接、触点烧蚀、电磁干扰,可分段断电、换模块快速定位。实践表明,标准化流程可将平均故障修复时间缩短30%以上,降低误操作与二次损坏风险。

针对电机厂复杂工况下的复合故障,需建立联合排查机制。例如:电机振动超标伴随电流波动,需同步排查绕组绝缘、轴承磨损、转子平衡及负载对中情况;控制系统报警伴随设备停机,需先区分是控制程序参数错误、硬件模块故障,还是外部电气干扰导致,避免单一排查遗漏根源问题。同时,故障处理后需进行不少于2小时的试运行监测,记录运行参数,确认故障彻底消除后再恢复正常生产,防止故障复发。

4 设备维护管理体系建设

想要长期保持电气设备稳定运行,除技术措施外,还需建立完善的管理体系,实现维护制度化、常态化。健全设备管理制度,明确巡检、检修、试验、故障上报流程,做到有记录、责任到人、闭环管理。建立设备台账,记录型号、投运时间、检修历史、试验数据,为状态评估提供依据。加强运维人员技能培训,熟悉设备结构、故障判断方法与安全规范,关键岗位持证上岗,提升现场处置能力。合理储备备品备件,对接触器、轴承、开关、端子等易损件保持库存,故障时快速更换,缩短停机时间。备件存放需防潮防尘,避免长期失效。建立应急预案,针对变压器跳闸、母线

失压、电机烧毁、电气火灾等突发事件,明确处置步骤与安全措施,定期开展应急演练,提升快速响应能力,降低事故影响。为进一步提升运维效能,可引入简易在线监测与智能诊断工具,对关键电机、主变压器、重要配电回路加装温度、振动、电流监测模块,实现异常预警。结合生产计划制定差异化运维策略:A类关键设备缩短巡检周期、增加试验频次;B类普通设备按标准执行;C类辅助设备简化流程,提升管理效率。通过制度、人员、备件、应急、技术协同,推动设备管理从被动抢修向主动预防、精准维护、智能管控转型。

结合电机厂数字化转型需求,可逐步搭建设备运维管理平台,整合巡检数据、检修记录、故障信息、备件库存等内容,实现数据可视化与智能分析。利用平台建立设备故障知识库,将常见故障的现象、成因、处理方法进行归类存储,为运维人员提供快速查询参考;同时通过数据分析设备运行趋势,提前预判潜在故障,实现从“事后处理”到“事前预警”的转变。此外,平台可对接生产计划,自动生成检修计划与备件采购需求,避免人工规划的疏漏,提升运维管理的精细化水平。

5 结束语

电机厂电气设备种类多、工况复杂,故障形式多样,做好运行维护的核心是早发现、早处理,将被动抢修转为主动预防。通过规范日常巡检、落实定期检修、辅以状态监测,再建立完善的管理体系,可减少设备故障,延长使用寿命,提升生产连续性与安全性。随着工业自动化与智能化发展,电气设备维护向在线监测、智能预警迈进。企业需持续优化维护策略,提升管理水平,适应现代生产要求,为稳定高效运行提供可靠的电力保障。

参考文献:

- [1] 韩译文.电动机常见故障分析与维修[J].科技资讯,2022,16(16):67-69.
- [2] 刘一帆.高压电机常见故障与检修技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(11):65-68.
- [3] 张栋.高压电机常见故障与检修技术分析[J].科海故事博览,2025(32):88-91.
- [4] 姜家伟.防爆电机运行维护与故障处理要点[J].防爆电机,2025(02):83-85.
- [5] 龚长安,王孝建,杨运成.电机厂电气设备运维管理与故障处置实践[J].电气防爆,2025(05):44-46.

全视角下预制装配式建筑的应用探索与未来发展

陶存进

(东台市泓泰建设工程有限公司, 江苏 盐城 224200)

摘 要 在社会经济发展与可持续发展理念深度践行的背景下, 传统建筑建造模式已难以适配行业发展需求, 预制装配式建筑凭借质量可控、节能减排的核心优势, 逐步成为建筑行业改革转型升级的重要发展方向。本文系统阐述预制装配式建筑的核心特征与关键施工技术, 从技术、产业、政策等多维度剖析其发展现存问题, 同时结合技术、经济与环境层面分析该建筑形式的可持续发展优势, 并据此预判其未来发展趋势, 以期为预制装配式建筑的高质量发展提供理论参考。

关键词 预制装配式建筑; 预制内剪力墙施工; 预制叠合板安装; 预制窗体施工; BIM 技术

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.025

0 引言

预制装配式建筑是将建筑全部或部分构件在专业预制工厂标准化生产, 经检测合格后运至施工现场, 依托专用机械与标准化工艺完成现场组装, 最终形成具备使用功能的建筑工程施工模式^[1-2]。与传统建筑相比, 预制装配式建筑实现了建筑构件的工厂化生产与现场装配化施工, 大幅转变了传统建筑的建造方式。按材料划分, 可分为预制装配式钢筋混凝土建筑与预制装配式钢结构建筑; 按使用功能划分, 可分为预制装配式民用建筑和预制装配式工业建筑, 其中民用建筑又细分为住宅与公共建筑^[3-4]。预制装配式建筑能够有效提升施工效率、保障建筑工程质量、缩短工程周期、控制施工成本、降低能耗等, 契合建筑行业绿色化、工业化的发展需求。因此, 深入研究并推广该技术, 对推动建筑行业高质量发展具有重要的现实意义与产业价值。

1 预制装配式建筑的特征

预制装配式建筑与传统建造模式的核心差异在于生产作业方式的转变, 即把大量现场施工作业转移至预制工厂完成, 由此形成了“五化一体”的核心特征, 充分体现了建筑工业化的理念。

1.1 设计标准化

设计标准化是预制装配式建筑工业化发展的基础, 具备设计灵活、低碳环保、工期节约、成本可控等优

势, 能够有效解决装配式建筑装配率偏低、建造成本偏高的行业痛点。高集成化水平能够推动设计、生产、施工的一体化进程, 加速装配式建筑产业链的完善与升级。

1.2 生产工厂化

生产工厂化的核心是将传统施工中的大部分湿作业转移至预制工厂, 转化为流水线标准化操作^[5]。其优势明显: 一是流水线生产能严格保障预制构件的质量稳定性, 大幅缩短构件生产周期; 二是减少现场湿作业量, 降低废水、废气排放, 践行绿色施工; 三是改善作业环境, 精简施工人员数量并提升专业素质, 提高文明施工水平; 四是工厂生产受自然环境等外部因素影响较小, 保障工期稳定, 可有效延长寒冷地区施工周期。

1.3 施工装配化

装配化施工是把在工厂生产合格的构配件运至施工现场后, 通过机械吊装完成拼接组装, 大幅简化了作业流程, 提升效率并缩短工期。经过专业培训少量施工人员即可开展交叉作业, 实现预制构件的快速、精准装配, 且施工各环节均可实施标准化质量检验, 从工序层面保障建筑工程的整体质量。

1.4 装修一体化

装修一体化要求在设计前期, 统筹考虑后期施工与装修的协同性: 在构件生产阶段, 根据装修施工需

作者简介: 陶存进 (1971-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

求预先预留钻洞、打孔等工艺孔洞；在预制构件吊装施工过程中，同步开展下一楼层的装修与水电工程施工，实现预制构件生产与集成装修的同步推进，从设计与施工层面实现建筑主体与装修工程的一体化衔接。

1.5 管理信息化

预制装配式建筑的发展与信息技术的融合应用深度绑定，BIM 技术是装配式建筑信息化管理的核心手段。在设计阶段，可通过 BIM 技术构建 3D 设计模型与施工模拟模型，有效规避构件遗漏、管线碰撞等问题。同时，BIM 技术也渗透在建筑的全寿命周期中，实现设计、生产、施工、运维等各参与方的信息共享与协同作业，保障建筑工程各环节的高效衔接。

2 预制装配式建筑的关键技术和创新

2.1 关键施工技术

1. 预制内剪力墙施工。预制内剪力墙施工质量直接影响建筑的抗震性能与结构稳定性，构件衔接是该技术的核心控制点。在住宅施工中，需要做好预留，注重构件的准确连接，减少误差；预制构件安装阶段，通过灌浆工艺向螺栓孔灌注水泥，配合螺栓固定实现构件连接，使各预制构件形成整体结构，为后续施工奠定基础。

2. 预制叠合板安装。预制叠合板安装是预制装配式建筑的常用核心技术。施工过程中需严格控制叠合板与作业层的间距，根据施工图纸与工程实际需求确定叠合板安装方向，确保安装位置与方向的准确性。针对双层结构的预制叠合板，需提前布置双层支撑支架，上层叠合板安装完成后进行混凝土浇筑，并做好混凝土养护工作，确保混凝土强度达到施工要求^[6]。支架拆除时，混凝土强度需满足 75% 的设计标准，拆除过程中需实时监测叠合板状态，保障安装质量^[7]。

3. 预制窗体施工。预制窗体施工是保障建筑采光、通风功能的关键环节，需兼顾窗体安装的安全、稳定与美观。预制窗体与墙体的连接普遍采用螺栓固定方式，该技术不仅能保障窗体安装质量，还具备施工成本低、效率高、操作难度低的优势，大幅提升窗体施工的标准化水平。

2.2 技术创新方向

1. 采用高精度垂直传感技术。高精度垂直传感技术极大地提高了垂直测量在施工过程中的精准度与工作效率。该项技术解决了施工时实际过程跟踪监控以及实时数据分析的问题，凭借远程监控管理系统实现了预制构件装配的精准评价和估量，从而从技术层面为建筑结构垂直度的标准化控制提供了支持。

2. 预制墙板支撑体系。预制墙板支撑体系通过对支撑体系的优化设计，能够增强预制装配式建筑结构的安全性及稳定性，同时精简了施工工艺，大大降低了施工成本。

3. 脚手架多功能防护体系。构建无脚手架多功能防护体系，研发新型多功能施工操作围栏，该防护体系采用轻质材料制作，具备可重复利用的特点，不仅能使材料多次重复使用、降低了施工成本，还能让现场施工操作环境更优化，施工效率更高。

3 预制装配式建筑的不足

我国预制装配式建筑行业目前处于发展初级阶段，受技术、产业、政策等多方面原因的影响，在发展过程中仍然存在很多需要解决的问题。

3.1 建造成本偏高

行业尚未形成规模化生产，无法发挥规模效益；构件工厂化生产需缴纳增值税，成本增加；现有建设管理体制与预制装配式建筑的工业化生产模式不匹配，进一步推高了项目建设成本。

3.2 建筑设计与深化设计脱节

现阶段，多数设计院仍采用传统设计思路开展装配式建筑的设计，未充分考虑装配式施工的工艺要求；承建商需开展二次深化设计，且需与原设计单位沟通调整设计方案，这样既影响了施工周期，又不能使方案一次性做到最佳。

3.3 未形成规模效益

建筑结构体系种类繁多，不同体系之间的构配件难以通用，小体量项目无法实现构配件的标准化、规模化生产，难以发挥社会化大生产的成本优势。

3.4 施工成熟度不高

预制装配式混凝土建筑工艺在我国住宅项目使用中所占比例偏低，市场需求率造成施工队伍的专业性难以提高，从而使预制装配式建筑在项目应用中的施工质量与施工效率提升缓慢。

3.5 认证不到位

由于我国预制装配式建筑混凝土结构体系种类繁多，在行业不断发展、不断创新的同时，缺乏对新技术、新体系关键技术的严格认证与把关，导致部分技术体系的安全性及适用性难以保障。

3.6 过度追求装配率

建筑装配率的确定应结合项目综合成本科学考量，部分地区在政策执行过程中过度强调装配中采用预制部品部件的综合比例，甚至采取“一刀切”的管理办法，从而扼制了行业的良性发展。

4 预制装配式建筑可持续性

预制装配式建筑以低污染、低能耗、高质量为核心特征,契合绿色建筑施工理念,通过工厂预制、现场装配模式施工,替代传统现场浇筑、现场制作的施工方式,既能缩短工期,又能提升施工效率与工程质量,为建筑行业绿色可持续发展走出了一条新的道路。

构件在工厂标准化生产,通过工厂精准的材料配比,减少材料浪费。与传统现场施工相比,预制装配式建筑可节约 55% 的混凝土、70% 的木材模板与 40% 的钢筋,不但降低施工成本,而且还实现了能源与资源的高效利用。

预制装配式建筑大幅缩短了现场施工工期,构件吊装施工仅需少量专业人员协同作业,单个构件的组装效率大幅提升。工期的缩短不仅减少了成本支出,还降低了项目整体建设造价;同时,有效减少了建筑施工的噪声污染、建筑垃圾,降低了施工扬尘。

预制装配式建筑从全过程实现了污染控制。在构件运输方面,不仅降低了运输成本,还减少了运输过程中的扬尘、噪声污染及道路破坏。预制装配式建筑在全过程、全方位对废弃物的控制,契合绿色低碳的发展理念。

5 预制装配式建筑的发展趋势

结合行业发展的现状及发展需求,我国预制装配式建筑将朝着一体化、标准化、多元化、信息化的方向发展,核心趋势如下。

5.1 确立工程总承包施工的发展模式

预制装配式建筑全过程对从事该行业的相关人员都具有较高的专业技术要求,才能使其每个环节高度协同,确立工程总承包施工模式最大限度发挥企业的资源优化配置能力,实现项目整体效益的最大化,是适配预制装配式建筑工业化发展的核心模式。

5.2 形成良性的技术体系

预制装配剪力墙结构体系的关键技术、高强混凝土技术与预应力技术、预制/预应力框架结构体系、预制/预应力框架剪力墙结构体系等在未来的行业发展中都有待持续完善,形成良性的技术体系,提供更好的技术支持,确保预制装配式建筑向更高质量发展。

5.3 形成通用体系

从设计角度出发,统一模数,保证预制构件厂生产的标准化,从而提高生产工艺的机械化、自动化程度,是建筑工业化的高级发展形式,也是预制装配式建筑发展的趋势。

5.4 拓展公共建筑、工业建筑领域

随着高强度混凝土、预应力等核心技术的不断发展,预制装配式建筑的结构性能持续提升,能够满足大跨度、重载建筑的设计与施工需求,未来将逐步从住宅建筑向公共建筑、工业建筑领域拓展,充分发挥其结构经济效益与施工优势。

5.5 BIM 技术的全面应用

BIM 技术将贯穿预制装配式建筑全过程、全方位及全寿命周期,以快捷的供应链、精准的建造,构建以 BIM 模型为核心的建筑供应链管理体系,实现各环节的信息共享、协同作业与精准管控,推动预制装配式建筑行业的数字化、智能化发展。

6 结束语

预制装配式建筑作为建筑行业技术创新与模式转型的核心方向,其科学应用推动了绿色建筑的长效发展,为建筑行业的健康良性发展提供了新思路,推动建筑市场向工业化、绿色化、智能化转型升级。与传统现浇建造模式相比,预制装配式建筑在提升施工质量、缩短施工工期、降低建筑全寿命周期能耗等方面优势十分明显,是公认的可持续发展技术。目前,在政策支持下,我国预制装配式建筑的研发与推广工作正在快速推进,但行业的高质量发展仍面临技术、产业、政策等多方面的挑战。未来,需要工程领域与学术领域加强协同创新,不断完善技术标准体系、优化生产施工工艺、健全政策激励机制,推动预制装配式建筑实现规模化、高质量发展,助力建筑行业完成转型升级,为我国可持续发展战略的实施提供坚实的产业支撑。

参考文献:

- [1] 曹伟.装配式混凝土结构应用现状研究[J].科技风,2020(24):178,180.
- [2] 徐通.装配式建筑施工安全管理关键措施探析[J].江西建材,2021(01):181-182.
- [3] 肖帅,郝生跃,任旭.我国农村装配式建筑发展对策研究[J].工程管理学报,2018,32(01):7-11.
- [4] 刘美霞.国外发展装配式建筑的实践与经验借鉴[J].住宅产业,2016(10):16-20.
- [5] 王洁.基于 BIM 的预制装配式建筑绿色施工应用研究[J].建筑节能,2020,48(10):138-141.
- [6] 王成.预制装配式住宅建筑建设管理问题分析及防治措施[J].现代建筑,2020,11(03):184-185.
- [7] 赵轩,曲宏迪.预应力混凝土叠合板研究[J].砖瓦,2023(12):93-95.

港口航道与建筑施工安全管理体系构建与优化路径研究

王春伟¹, 陶德政², 秦子劼³

(1. 青岛盛仕建筑工程有限公司, 山东 青岛 266400;

2. 平度市发展和改革委员会, 山东 青岛 266799;

3. 枣庄中成建设发展有限公司, 山东 枣庄 277100)

摘要 针对港口航道与建筑施工水陆作业交叉多、水文环境复杂、安全管控难度高的行业特征, 以及当前安全管理体系碎片化、水陆管控脱节、动态风险预判不足、应急机制不完善等核心痛点, 本文系统梳理了港口航道与建筑施工安全风险的核心特征与关键影响因素, 构建了全流程、全要素、多主体的水陆一体化安全管理闭环体系, 明确了体系总体架构、核心模块与实施要点, 分析了体系运行的现存短板, 提出了系统性优化路径, 旨在为港口航道与建筑施工安全管理的标准化建设提供理论参考, 进而有效降低施工安全事故发生率, 提升工程建设安全管控水平。

关键词 港口航道工程; 建筑施工; 安全管理体系; 风险管控; 水陆协同

中图分类号: U655.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.026

0 引言

港口航道与建筑施工是水运基础设施建设的核心环节, 其安全管理水平直接决定工程建设的质量、进度与作业人员的生命财产安全。本文围绕港口航道与建筑施工安全管理核心问题, 系统界定施工安全风险的核心特征与影响因素, 构建水陆一体化全流程安全管理体系, 明确体系核心构成与实施要点, 梳理体系运行的现存痛点, 提出系统性优化路径, 形成港口航道与建筑施工安全管理的标准化技术框架, 为水运工程建设安全管控提供技术参考。

1 港口航道与建筑施工安全风险核心特征与影响因素

1.1 安全风险核心特征

港口航道与建筑施工兼具水运工程与陆域建筑施工双重属性, 涵盖航道疏浚、码头建设、陆域配套施工等多类型作业, 其安全风险呈现五大核心特征。一是高风险性, 施工涉及水上水下作业、高空作业、深基坑施工、大型起重吊装等高风险环节, 淹溺、船舶碰撞、结构坍塌等事故风险显著高于常规建筑工程。二是强环境依赖性, 施工安全受潮汐、风浪、地质条件、极端天气等自然因素影响显著, 通航水域施工还受航

道通航条件制约, 风险诱因具有强动态性。三是交叉耦合性, 水上作业与陆域施工同步推进, 船舶、机械、人员多环节交叉, 多专业协同要求高, 各类风险相互交织, 单一风险易引发连锁反应。四是动态不确定性, 施工区域水文气象条件实时变化, 作业场景随施工进度动态调整, 风险发生的时间、位置、影响程度随机性强, 难以静态精准预判。五是事故处置高难度性, 水上水下作业事故的应急救援受水域环境、通航条件限制, 响应时间长、处置难度大, 易造成损失扩大, 对事前预防与应急准备的要求远高于陆域工程^[1]。

1.2 安全风险核心影响因素

港口航道与建筑施工安全风险的产生, 受多维度因素影响, 核心可划分为四大类。一是人员因素。施工与管理人员的专业能力、安全意识是风险产生的核心主观因素, 特种作业人员无证上岗、违规操作, 管理人员管控缺位、技术交底不充分, 是引发安全事故的主要诱因。二是设备与设施因素。施工船舶、大型机械、水下作业设备的性能状态与维护情况, 安全防护、应急救援设施的设置情况, 直接决定作业过程的本质安全水平。三是环境因素。水文气象、地质条件、航道通航环境、施工场地水陆布局等, 是影响施工安全的重要客观因素, 极端天气、复杂地质易直接引发

作者简介: 王春伟 (1987), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 港口与航道。

安全事故,同时放大其他风险的影响。四是管理因素。安全管理制度不完善、责任体系不健全、水陆协同管控机制缺位、应急预案针对性不足、安全教育培训不到位,是导致风险识别不全、防控措施不落地的根本原因,管理体系缺陷会形成系统性安全隐患。

2 港口航道与建筑施工安全管理体系总体架构与核心原则

2.1 体系总体架构

结合港口航道与建筑施工的行业特征与管控需求,构建“目标层—管控层—执行层—保障层—监督层”五层水陆一体化安全管理体系,各层级上下联动、协同运行,形成“事前预控—事中管控—事后处置—反馈优化”的全流程闭环管理机制,实现施工安全全要素、全周期、多主体一体化管控。目标层为体系顶层设计,以“零死亡、零重伤、零重大安全事故”为核心目标,明确安全管理总体要求、管控标准与考核指标。管控层是体系核心中枢,涵盖风险分级管控、全员责任管理、现场作业管控、应急处置管理、安全教育培训五大核心模块,制定安全管控具体流程与实施要求,统筹各参建方、各环节安全管理工作。执行层是体系落地端口,由施工项目部、作业班组、一线作业人员构成,负责安全管理制度与防控措施的现场执行^[2]。保障层为体系运行提供人员、制度、技术、资源、应急五大维度支撑。监督层是体系闭环保障,由建设、监理、行业监管部门构成,负责对体系运行开展全过程监督、考核与整改督促,推动体系持续优化。

2.2 体系核心管控原则

本质安全原则:以源头管控为核心,优先选用安全达标的施工船舶、机械设备与防护设施,优化施工工艺与作业方案,从设计与准备阶段消除先天安全隐患。水陆协同原则:打破水上与陆域施工的管控壁垒,建立统一的安全管控标准、协同作业流程与信息共享机制,实现水陆施工安全一体化管控。全流程闭环原则:将安全管理贯穿施工全周期,覆盖所有作业环节与风险点位,形成风险识别、评估、防控、处置、复盘、优化的闭环管理。合规性原则:以国家现行水运工程、建筑施工、安全生产相关法律法规与强制性条文为底线,所有安全管理行为严格符合合规性要求^[3]。分级管控原则:根据风险等级实行分级分类管控,明确差异化管控要求,聚焦重大风险重点防控,实现管控资源精准配置。全员参与原则:建立全员安全生产责任制,将安全管控责任落实到每个岗位与作业人员,形成全员安全管理格局。

3 安全管理体系核心模块与实施要点

3.1 全流程风险分级管控模块

风险分级管控是安全管理体系的核心基础,需建立覆盖施工全周期的风险分级管控流程。施工准备阶段,重点开展施工组织设计、专项方案的安全合规性审查,针对危大工程开展专项风险评估,编制专项管控方案。施工实施阶段,采用“全面排查法+专业分析法”开展常态化风险排查,梳理动态风险清单,采用层次分析法与风险矩阵法开展分级评估,明确风险等级、管控责任与防控措施;竣工验收阶段,重点管控收尾作业、设备拆除环节的安全风险,开展全过程安全管理复盘。针对重大风险,实行“一风险一专项方案”,落实全过程旁站监理与动态监测,确保风险全程可控^[4]。

3.2 全员安全责任管理模块

建立“横向到边、纵向到底”的全员安全生产责任体系,明确建设单位首要责任、施工单位主体责任、监理单位监督责任、设计单位技术支撑责任、船舶运营方作业责任,细化各单位、各部门、各岗位的安全管理职责,签订安全生产责任书,将责任落实到具体个人。建立安全管理考核评价机制,将安全生产责任落实情况与绩效考核、奖惩机制直接挂钩,对管控到位的予以奖励,对责任落实不到位的严肃追责,形成“有责必履、失责必究”的责任闭环。

3.3 现场作业安全管控模块

现场作业管控是安全管理体系的核心执行环节,需针对高风险作业建立标准化管控流程。严格执行作业审批制度,水上水下作业、动火作业、有限空间作业等危险作业,必须办理专项审批手续,明确作业范围、防控措施与现场监护人,审批通过后方可作业;强化水陆协同作业管控,划定水上施工作业警戒区,设置通航警示标识,建立船舶与陆域施工的沟通联络机制,杜绝交叉作业引发的碰撞、淹溺事故;严抓危大工程施工管控,严格执行专项施工方案,落实技术交底与全过程旁站监理,严禁无方案施工、擅自变更方案;规范现场安全防护管理,临水临边、高空作业区域按规定设置防护设施与警示标识,作业人员必须按规定佩戴防护用品,杜绝无防护作业;同步强化施工现场临时用电、消防安全、机械作业常态化管控,对隐患实行“清单化、闭环式”整改,确保隐患动态清零。

3.4 应急处置与事故管理模块

构建水陆一体化应急管理体系,针对船舶碰撞、淹溺、坍塌、极端天气等典型事故,编制专项应急预案,明确应急组织机构、响应流程与处置措施。建立专业化应急救援队伍,配备适配水上水下作业的应急救援设备、物资与船舶,定期开展水陆协同应急演练。建

立与海事、应急、消防部门的应急联动机制，畅通应急信息沟通渠道，确保事故发生后快速响应、高效处置。建立事故调查与复盘机制，对安全事故开展全面调查，查明原因、厘清责任，总结教训并优化管控措施与应急预案，实现“一事故一整改、一案例一提升”。

3.5 安全教育培训模块

建立分层级、全覆盖的安全教育培训体系，针对管理人员、作业人员、特种作业人员制定差异化培训计划。对管理人员重点开展安全管理体系、法律法规、风险管控培训，提升安全管理能力；对作业人员重点开展安全操作规程、风险防控、应急处置培训，严格执行岗前培训、三级安全教育制度，考核合格后方可上岗；对特种作业人员严格执行持证上岗制度，定期开展专项培训与技能考核，杜绝无证上岗。定期开展安全技术交底，将各工序施工风险、安全要求、应急措施，逐级交底至作业班组与一线人员，确保交底内容全员知晓、全面落实。

4 安全管理体系运行现存核心痛点

当前港口航道与建筑施工安全管理体系运行仍存在诸多突出短板，制约了安全管控效能。一是体系碎片化问题突出，多数项目未建立水陆一体化安全管理体系，水上与陆域施工分块管控，标准不统一、协同机制不健全，多参建方责任边界模糊，形成管控盲区。二是风险管控精准度不足，对水文气象、通航环境等动态风险的实时监测与预判能力不足，风险识别评估仍以静态排查为主，难以适配施工场景动态变化，风险预警存在滞后性。三是现场作业管控不严，作业审批制度执行不力，无审批作业、违规作业、监护缺位等问题频发，安全防护不到位等隐患长期存在，管控要求难以落地到作业层。四是应急管理体系不完善，应急预案针对性不足、与现场实际脱节，水陆应急联动机制不健全，应急物资与队伍配置不足，应急演练流于形式，事故处置能力不足。五是安全管理数字化水平偏低，仍以人工排查、现场巡检的传统模式为主，北斗定位、物联网等智能化技术应用不足，难以实现风险动态监测与智能预警，管控效率与精准度不足。

5 安全管理体系系统性优化路径

针对体系运行中的核心痛点，结合港口航道工程建设发展趋势，提出六大系统性优化路径，推动安全管理体系完善升级。一是构建水陆一体化闭环管控体系，打破水上与陆域施工管控壁垒，制定统一的安全管控标准与协同作业流程，明确各参建方责任边界，建立多主体协同管控机制，消除管控盲区，形成全流程、全要素闭环管理。二是强化动态风险分级管控能力，完善风险识别与评估体系，针对水文气象、通航环境等动态风险，建立实时监测与动态评估机制，结合施

工进度动态更新风险清单与管控措施，实现风险精准识别、动态评估、提前预警、靶向防控。三是推进现场作业精细化管控，严格执行危险作业审批与旁站监护制度，规范水上水下作业、船舶协同作业标准化流程，强化安全防护设施常态化检查，加大违规作业、隐患整改不到位行为的追责力度，推动管控要求全面落地到作业一线。四是完善水陆一体化应急管理体系，结合工程实际优化专项应急预案，提升预案针对性与可操作性；建立多部门应急联动机制，畅通应急信息渠道；配齐配强应急救援队伍、物资与设备，定期开展水陆协同实战化演练，全面提升事故应急处置能力^[5]。五是推动安全管理数字化智能化升级，引入北斗高精度定位、物联网、视频智能识别、BIM等技术，搭建港口航道施工智慧安全管控平台，实现施工船舶、设备、人员、风险点位的实时监测与智能预警，推动安全管理从“人工管控”向“智能管控”转型。六是完善全员安全培训与责任考核机制，优化分层级安全教育培训体系，强化特种作业、水上作业人员的专项技能与应急能力培训，提升全员安全意识；完善安全生产责任考核与奖惩机制，将安全责任落实情况与岗位绩效直接挂钩，推动全员安全生产责任制全面落地。

6 结束语

港口航道与建筑施工安全管理是水运基础设施建设的核心保障。本文构建的水陆一体化全流程安全管理体系，明确了体系总体架构、核心模块与实施要点，针对体系运行短板提出了系统性优化路径，可有效解决当前安全管理中体系碎片化、管控脱节、精准度不足等核心问题，全面提升港口航道与建筑施工安全管控水平。随着水运工程建设智能化发展，需持续完善水陆一体化协同管控机制，推动安全管理从事后处置向事前预防、从静态管控向动态预警全面转型，为水运基础设施高质量建设提供坚实的安全保障。

参考文献：

- [1] 杨舒涵. 水运码头桩基施工质量控制要点及安全保障措施[J]. 安家, 2026(02):169-171.
- [2] 韦鑫. 港口航道工程中生态护岸技术的创新与工程实践[J]. 时代漫游, 2022(01):237-239.
- [3] 卢自来, 刘超群, 朱运权. “水陆空”一体化测量在航道测量中的应用[J]. 中国水运, 2023(06):59-62.
- [4] 郑健良, 宋敏, 石常峰. 粤港澳大湾区航运网络韧性及驱动机制研究[J/OL]. 水利水电工程学报, 1-19[2026-04-17]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1613.TV.20251009.1854.002>.
- [5] 王春梅, 宋亚军. IPD模式下基于BIM的水运工程项目风险协同管理[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(11):71-74.

分布式光纤传感技术在大牛地气田 管线泄漏监测中的应用

陈荣耀

(中石化华北油气分公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要 大牛地气田前期管道监测采用“音波管道泄漏检测仪”进行振动报警, 误报率较高, 目前现场主要采取人工巡检方式, 未建立完善、可靠的泄漏定位系统。随着气田开发的深入, 下古气藏已逐步成为产能接替的主要阵地, 建设适用于大牛地气田的管道泄漏监测系统, 实现管道异常状态实时检测, 快速确定泄漏位置, 具有重要的意义。通过利用分布式光纤传感技术对重点采气、外输管线进行温感和振感监测, 在 2、3 号脱硫站组建“大牛地重点集输管线泄漏监测系统”, 实际投用效果良好, 系统的建立和投运为降低下古气藏开发风险提供了技术支撑。

关键词 泄漏检测; 分布式光纤传感技术; 光纤拉曼 (Raman) 散射; Φ -OTDR 相敏光时域反射仪

中图分类号: TE973.92; TN247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.027

0 引言

大牛地气田地面集输采用“气井中低压集气, 集气站一次增压, 处理站集中脱水二次增压”为主体的集输工艺。管辖集输管道 6 条总长 230.2 千米, 采气管线约 1 600 条总长 4 100 千米, 前期利用“音波管道泄漏检测仪”进行振动报警, 误报率较高, 效果不佳。气田油气管道所处区域大, 局部地形复杂, 人工巡检难度大, 传统的巡检方式效率低下且无法进行 24 小时监控。随着管道使用时间增长, 特别是下古含硫化氢气藏开发, 管道事故发生概率大幅增加, 危害当地居民的人身财产安全。利用与管道同沟敷设的振动光纤、感温光纤以及音波泄漏监控等手段, 实现管线运行状态实时监控, 及时发现管线泄漏、管线破坏等异常信息, 并及时发现位置信息, 提高管线管理效率, 保障管线安全运行, 具有重要的现实意义。

1 天然气管道泄漏监测定位技术

光纤管道泄漏监测定位法是一种应用光缆对长输天然气管道泄漏进行监测定位的方法, 利用光缆对管道中的温度、压力等传输的变化进行测试。光纤工作频带宽, 动态范围大, 适合于大范围远距离组网和遥测遥控, 是一种优良的低损耗传输线; 在一定条件下, 光纤特别容易接受被测量或场地加载, 是一种优良的敏感元件; 光纤本身电绝缘、体积小、易弯曲、抗电

磁干扰、抗辐射、耐压、耐腐蚀, 特别适合于易燃、易爆、空间狭窄及强电磁干扰等恶劣环境^[1]。

光纤管道安全预警技术使用通信光缆作为检测介质, 与管道同沟敷设, 实现连续, 实时油气管道监测。当发生异常作业、施工、自然事故导致的异常振动、温度变化等时, 实时预警并定位^[2]。分布式光纤温度应力变化监测系统是利用光纤作为传感器, 实时测量被测媒介温度应力变化并提供报警信息以及数据存储的综合监控系统^[3]。分布式光纤预警系统选取井口到脱硫站必要管线及脱硫站外输管线, 进行分布式光纤振动预警与感温泄漏监测系统及 AI 识别^[4]。

光纤传感管道泄漏监测技术具备以下技术特点: 光波不易受到外界电磁信号的干扰, 也不会形成电磁干扰, 能够被各类光探测器件高效感应, 可便捷实现光电与电光之间的相互转换, 便于与成熟配套的电子设备、计算系统适配和对接。大牛地气田采气管线同沟铺设光纤具备光纤传感监测的基础条件, 结合光纤管道泄漏监测技术特点, 采用该技术开展管线泄漏监测试验。

2 泄漏监测系统建设部署

2.1 应用原理

与监测管输管线同沟敷设的光缆, 是泄漏监测系统的监测介质, 光缆中的一芯光纤用于振动传感, 另

作者简介: 陈荣耀 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 油气开发。

一芯光纤用于感温传感。当外界有挖掘或发生管道介质泄漏时,光缆会随之振动或降温,通过光纤捕获振动信号,系统通过算法对采集的光缆振动信号解析,智能识别施工、泄漏事故、泄漏点位。

2.2 系统部署

在脱硫站机房系统,针对性开发并部署光纤振动监测与光纤感温监测系统。系统实时显示各条天然气管线各处、各区域振动情况和温度值,通过显示颜色进行区分,并将每隔固定时间采集的相关信息记录振动情况和温度的变化。第一时间感知外部入侵造成的异常扰动,并通过大数据和人工智能技术进行准确识别和定位,第一时间进行告警和信息上报。服务器统一部署在厂区生产指挥中心,利用内网传输,便于厂、区、站各层级用户及时监控查询报警信息,便于采取相应措施。

2.2.1 数据采集层

分布式光纤预警主机安装在站内,采用模块化设计,沿线振动信号转换成传感信号并处理,实现事件的分析、识别和定位,并上传到分布式光纤预警主机。

2.2.2 数据汇聚层

光纤预警主机负责实时接收光缆在线监测过程中产生的各类运行状态数据及预警相关信息,通过内置算法对数据进行解析、判别与综合分析处理,及时在界面上直观展示各类告警信息,同时将处理后的有效数据统一上传至平台,实现数据的集中管理与远程监控。

2.2.3 数据平台层

可视化综合管理平台集成分布式光纤预警系统、分布式光纤传感 AI 工具箱、图表管理、GIS 定位和运行监控管理等功能。

2.2.4 终端展示层

在厂级生产指挥中心部署监控系统展示界面。在采气管理区和站场中控机房部署管线泄漏监测系统终端,在现场发生风险事件或者泄漏事件的时候,在系统界面电子地图中快速定位报警事件发生的地点,并且发出系统报警。

2.2.5 软件开发测试

软件开发测试根据项目需求定制开发,按项目计划、需求评审、设计评审、代码规范检查开展。按照系统成果提交计划编写系统相关文档、用户手册,在项目试用上线形成测试项目管理方式,由项目组和软件质量保证小组审核文档的完整性,确保系统交付质量。在系统试运行过程中,开展平台日常巡检,上线试运行的过程中涉及功能性的修改、新增功能、更新

相关接口等情况时,管控组评估工作量以及对试运行系统的影响,制定工作方案。

2.3 系统架构

2.3.1 光纤路由普查标定地图建模

按照数据采集模板,根据数据收集需求,由属地提供路由数据,将采集的数据导入系统中,及时采购项目所需检测主机和服务器等硬件设备,为软硬件部署提供保障。

2.3.2 振动传感器配置

以光纤作为传感器,采用光纤瑞利散射原理,通过承载物传至光缆振动,引起干涉光相位的线性变化(Φ -OTDR),主机采集该位置不同时刻的干涉信号,经数据降噪处理后,提取时频特征,并实时更新完善系统样本数据库,从而识别事件状况,判断外部干扰类型、干扰等级和震源距离。

2.3.3 温度传感器配置

以光纤作为传感器,采用光纤拉曼(Raman)散射效应对温度敏感的特性,当管线泄漏出现温度变化时,通过平台算法分析,识别泄漏未知和信息^[5]。

2.3.4 系统架构配置

系统架构配置包括系统感知层、传输接入层、系统数据层、平台服务层和展示层配置。(1)系统感知层:通过分布式光纤振动、感温监控主机实时监控管线温度、振动、声纹等信号,对不同的行为提取多个维度的特征参量,报警阈值可根据环境配置,监测的物理量参数阈值可以分区域灵活设置。(2)传输接入层:利用通信光缆本体做通信数据回传载体,实现通信本体化,保证数据传输稳定性。(3)系统数据层:采用自组织神经网络技术,针对光纤监测预警系统应用需求,建立数据库进行特征提取,实现对外界入侵的有效识别,如设防区域的施工、挖掘,大型机械以及可能威胁光纤承载物的破坏行为等。(4)平台服务层:通过基础应用服务支撑应用系统,接口服务实现接口对接,机器学习算法保证系统的报警准确率。(5)平台展示层:系统应用层通过算法分析对现场信号收集,实现报警推送展示包括报警状态、报警地理位置、事件类型、报警时间等。报警数据在终端服务器上永久保存。

2.4 监测主机部署

天然气管道泄漏监测系统跟光纤振动监测主机和光纤测温监测主机对接,放在统一机房。总体设计四层架构,数据采集层由光纤振动监测与温度监测设备组成,数据汇聚层由交换机组成,数据解析层(应用服务)放置一台服务器。

2.4.1 测温主机对接

测温主机作为测温系统核心设备,是实现光电信号转换与信息综合处理的核心单元,负责全系统信号采集、数据处理、分析研判、超温告警以及网络数据传输等关键任务。设备主要由光频发生器、开关电源等模块组成。温度异常变化可通过分布式光纤测温技术精准捕捉,系统需要在温度分辨率、定位精度及响应速度上均具备良好性能。

2.4.2 振动主机对接

振动主机是测振系统核心设备,基于分布式光纤振动传感技术,对管道外力破坏与介质泄漏情况进行实时监测。通过持续采集光缆沿线环境的振动信号,精准判定异常事件发生位置,对外力破坏风险进行分级评估,为管道安全防护提供可靠依据。

3 泄漏监测系统算法提升

产生告警所依赖的振动事件的累加逻辑调整:事件叠加机制由 5 分钟加长到 15 分钟,解决振动事件不叠加导致无法出报警的问题。

3.1 阈值设置和报警机制优化

(1)事件判断频率调整 2 分钟调整为 30 秒一次。(2)事件产生配置调整:振动阈值从 15 db 调整为 8 db。

(3)产生告警所依赖的振动事件的累加逻辑调整:事件叠加机制由 5 分钟加长到 15 分钟,解决振动事件不叠加导致无法出报警的问题。

3.2 调整阈值设置和报警机制算法训练优化

(1)数据模型采集:在试运行期间对数据进行分析,采集现场确认后施工类型,车辆路过(误告)还是植树等,进行数据标注。(2)数据标注更新:将标注后的数据导入数据中心进行更新。(3)算法优化训练:通过对数据中心的数据定期训练后,将施工事件与误告干扰事件区分度提高,同时对现场的环境干扰特征进行识别,最终分析的结果与事件吻合度更高。

(4)训练结果验证:通过重复上述告警确认,数据导入和数据训练,可持续提高识别的准确率,降低误告率、漏告率。

3.3 光缆防区设置

根据采集的光缆路由,每两个设施点间建立一个防区;根据每个防区的不同环境特征,从振动幅度、振动发生概率、振动频次等方面过滤振动波形,设定预警门限,实现光缆的分布式预警,排除相关干扰因素。(1)安静区:环境安静,发生外破风险的振动较为明显,门限设置为低级。(2)路口和桥梁:车辆产生的振动

较多,设置门限为中级。(3)工地:高频高幅度的振动较多,门限需设置为高级。

4 泄漏监测系统应用效果

4.1 人工测试情况

组织技术人员在现场进行了人工振动测试、温度测试、系统学习能力测试,测试情况如下:(1)人工振动测试:西干线 5 200 m 处,模拟机械进行人工敲击,敲击持续 90 s,平台发出告警,说明连续规律振动会引起系统出现机械告警。(2)人工温度测试:站内使用光缆盘测试,通过水浴方式加热光缆盘,系统发出温升告警,告警距离与温度正确,说明温度变化或温度突变会引起系统出现测温告警。(3)借助现场施工学习能力测试:现场进行抽氮气作业,出现告警后采集该告警模型。系统对采集的告警模型进行学习,确认此类振动为误告警。

4.2 实际案例

泄漏监测系统试运行期间,系统产生振动异常告警,经巡视发现为养牛场地施工导致报警,证实了系统的可用性。

5 结束语

利用分布式光纤传感技术对重点管线进行温感和振感监测,在大牛地气田中的应用效果良好。泄漏监测系统实现了特殊情况下异常位置的实时监测和实时告警,有效降低了气田下古气藏开发风险,目前报警准确率为 63.79%。对于管线自动泄漏监测不足的部分,通过培训监管、人工干预、数据分析优化等方面加强人工巡检,实现人机互补,保证准确率。对历史数据进行分析,提取有关管道泄漏的特征,以优化监测算法和预警模型,提高监测准确性和效率。

参考文献:

- [1] 李建伟.分布式光纤传感技术在长输管道中的应用.中国仪器仪表,2025(12):53-56.
- [2] 党争光.长输天然气管道泄漏监测定位方法应用[J].技术研究,2022,29(07):61-63.
- [3] 邱志刚.分布式光纤传感技术在温度测量中的应用与进展[J].激光杂志,2025,46(12):12-20.
- [4] 魏辉龙.分布式光纤传感检测技术在锦州某油田的应用[J].电子制作,2025,33(24):108-110.
- [5] 张雨佳.基于时分复用的多路任意时间整形前端系统[J].中国激光,2024,51(23):31-41.

城市九孔上承式连续实腹拱桥施工技术

许大鹏

(安徽建工建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 城市多孔连续实腹拱桥造型优美、景观效果突出, 在城市河道及景观廊道工程中应用广泛。九孔上承式连续实腹拱桥因跨数多、连拱效应明显、自重较大, 对施工对称性、结构线形、支架体系及受力控制要求极高。本文以城市九孔上承式连续实腹拱桥为研究对象, 结合现行规范与工程实践, 系统阐述施工总体流程、下部结构施工、满堂支架搭设与预压、主拱圈现浇、拱上结构施工、桥面系施工及支架卸除等关键技术, 明确施工控制要点、质量标准与安全环保措施, 以期为同类型城市连续拱桥施工提供技术参考。

关键词 城市桥梁; 九孔连续拱桥; 上承式实腹拱; 满堂支架法; 对称浇筑

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.028

0 引言

随着我国城镇化进程不断加快, 城市市政桥梁不再仅满足通行功能, 更加注重结构安全、景观效果、文化特色与生态保护的综合统一。上承式连续混凝土拱桥因受力合理、刚度较大、造型舒展美观、耐久性好, 在城市景观河道、生态廊道、新城核心区等工程中应用日益广泛。安徽省庐江县合庐产业新城作为合肥南部重要的产城融合发展片区, 区域内水系发达、生态敏感节点多。本文结合该项目实际施工条件, 从施工部署、关键技术、过程控制、安全环保等方面总结形成一套适用于城市多跨连续混凝土拱桥的施工技术体系, 旨在为同类工程提供实践参考。

1 工程概况与技术特点

1.1 工程概况

龙桥路(牛金路—星夜大道)段建设工程西起牛金路, 东至星夜大道, 位于合庐产业新城核心区, 长度3 028.058 m。红线宽45 m, 南侧绿线15 m, 道路等级: 城市主干道, 跨河桥桥梁中心桩号为K2+483.903, 全长118.7 m, 采用9孔上承式连续实腹拱桥, 桥梁结构分两幅设计, 中间留一道2 cm变形缝。全桥位于直线段, 拱桥中间大两边小对称布置, 跨径分别为7.5 m, 8.5 m, 9.5 m, 10.5 m, 11.5 m, 10.5 m, 9.5 m, 8.5 m, 7.5 m。第一个和最后一个拱圈满足游步道净空不少于2.5 m, 高程为4.5 m。

1.2 技术特点

首先, 连拱受力特征显著: 九孔连续结构使各孔拱圈与墩台形成整体受力体系, 施工过程中必须严格执行全桥对称、逐孔均衡、同步加载的原则, 避免因受力不均导致墩顶偏移、拱圈开裂及内力重分布异常。其次, 结构自重较大, 支架要求高: 实腹拱圈混凝土方量大、自重集中, 现浇施工对支架刚度、稳定性及地基承载力要求极高, 支架设计与预压为施工控制核心环节。最后, 线形控制精度要求高: 拱轴线形直接决定桥梁景观效果, 施工中需严格控制拱轴线偏差、高程偏差及结构尺寸偏差, 保证全桥线形流畅、对称美观。

2 城市九孔上承式连续实腹拱桥总体施工流程

城市九孔上承式连续实腹拱桥遵循先地下、后地上; 先下部、后上部; 先主拱、后拱上; 对称施工、均衡受力的总体原则。

3 城市九孔上承式连续实腹拱桥关键施工技术

3.1 施工测量与全过程监控

测量控制是保证拱桥线形与位置准确的基础。正式施工前, 需建立全桥统一平面及高程控制系统。对拱脚、墩台中心、拱轴线、支架基础位置进行精准放样。施工过程中布设支架沉降测点、墩顶位移测点、拱圈应力与线形测点, 实施动态监测, 及时反馈数据并调整施工参数, 确保结构受力与线形始终处于可控状态。

作者简介: 许大鹏(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政道桥工程。

3.2 下部结构施工

下部结构是上部拱圈的受力依托,施工质量直接影响全桥稳定性。基础施工采用钻孔灌注桩基础,严格控制成孔、清孔、钢筋笼安装及混凝土灌注质量,确保桩基完整性与承载力。基坑开挖按土质放坡,设置排水系统,基底夯实平整并浇筑混凝土垫层。墩台采用定型钢模板,分层对称浇筑混凝土,保证外观平整、垂直度满足规范要求。拱脚位置预埋钢筋与预埋件必须定位准确、固定牢固,为后续主拱圈施工提供可靠连接。九孔墩台宜同步推进施工,保证全桥受力均衡。

3.3 现浇拱圈施工

1. 满堂支架设计与预压:满堂支架现浇是城市实腹拱桥最常用、最成熟的施工方法,支架体系安全是工程成败的关键。第一步,支架搭设:常用盘扣式钢管支架,立杆纵距 0.8 m,横距 0.8 mm,步距 1.2 m。支架底部设置垫板或可调底座,增强局部稳定性;纵横向设置扫地杆、水平横杆及竖向剪刀撑,形成空间整体稳定结构。顶托上方铺设方木与模板系统,底模严格按照设计拱轴线与计算预拱度进行放样安装,确保成桥线形符合设计要求^[1]。第二步,支架预压:支架搭设完成后进行支架预压,可有效消除支架体系的非弹性变形,保障施工精度。检验支架整体安全性并获取弹性变形值,为高程调整提供依据。预压荷载取拱圈自重的 1.1 倍~1.2 倍,采用砂袋、水箱或混凝土块分级加载,依次为 0→60%→100%→120%。每级加载完成后进行沉降观测,持荷至连续 24 h 沉降量不大于 2 mm 方可进行下一级加载。预压完成后分级对称卸载,分别计算弹性与非弹性变形,据此调整底模标高。

2. 模板安装:拱板底部模板采用 15 mm 厚竹胶板,标准尺寸 1 220 mm×2 440 mm;底模模板长边顺桥梁走向布置,外模使用木工板。底模布设遵循以下原则:以各跨拱座中心线为基准,整幅模板由基准位置向两侧排布^[2]。在底模板安装好后,经过监理单位一起通过验收后,才能进入下一道工序施工。在下道工序施工前确保模板标高及平面位置进行复核测量,确保其平整度、接缝质量均符合设计及规范规定。

3. 钢筋制作与安装:本桥梁主筋选用 HRB400E 抗震螺纹钢,所有钢筋半成品统一于钢筋加工厂预制加工。按部位、型号、规格分别堆放,钢筋直径<22 mm 的采用绑扎搭接或者单面搭接焊连接,钢筋直径≥22 mm 的采用机械连接(即直螺纹套筒连接)。模板平面位置及标高复核合格后,方可开展钢筋安装作业。在底板、

侧板上弹出钢筋间距控制线,按标识依次布设主筋与箍筋,同步穿插底板横向分布钢筋;底板上层纵向钢筋需从箍筋内侧穿入。底板上层钢筋设置定位支撑筋,避免施工踩踏引发钢筋变形。底板与侧墙钢筋选取关键节点点焊加固,保证钢筋网格整体稳定。纵向普通钢筋采用搭接焊连接,双面焊缝长度不应小于 5 d,单面焊缝长度不应小于 10 d。同一连接区段内钢筋接头数量占比不得大于 50%,接头错开间距不小于 35 d,且最小间距不小于 500 mm。当钢筋位置发生冲突时,本着适当调整次要受力钢筋的原则处理,并经监理工程师的认可。钢筋保护层的设置:钢筋保护层垫块采用同强度标号的水泥垫块,其厚度满足设计要求,垫块呈梅花形布置,并确保每平方米内垫块数量不少于 4 个。

4. 混凝土浇筑:主拱圈是桥梁主要受力结构,施工需严格控制对称、密实、温控与线形。混凝土由商品混凝土站集中拌制,通过运输罐车运至施工现场,运至现场后应现场检测坍落度及和易性,坍落度满足 150±30 cm 要求方可使用,并做好试样留存工作^[3]。本工程混凝土采用汽车泵泵送入模。混凝土浇筑施工前,须对支架、模板、钢筋及各类预埋件进行全面检查验收,确认各构件完好无损,安装位置正确、几何尺寸均符合设计及规范要求,方可开展浇筑作业。拱顶混凝土浇筑时先从拱脚下料,利用输送泵直接浇筑。具体浇筑步骤如下:首先自拱脚下料保证两侧拱脚对称浇筑,从拱脚向拱顶全宽浇筑,拱圈混凝土整体浇筑工作,要赶在拱脚混凝土初凝前收尾。浇筑过程中检测拱顶高程及位移变化,提前在拱顶位置加压配重,防止拱架拱顶上翘。必须等拱圈强度完全达到设计要求,再进行后续拱上结构施工。由于九拱桥超静定次数大,受温差影响大,拱圈浇筑温度应选择在 10℃~20℃ 时进行。混凝土采用 C40 泵送混凝土,入模温度控制在 5℃~30℃。单孔拱圈采取对称分段浇筑,一般分为 3 段~4 段,从拱脚向 L/4 位置、再向拱顶推进,保证连接可靠。浇筑顺序遵循底板→腹板→顶板,腹板分层斜向推进,分层厚度不大于 30 cm。选用插入式振捣器振捣混凝土作业时均匀振捣,保证快插、慢拔的操作手法。避免漏振、过振及蜂窝麻面。在施工过程中,务必把控好混凝土内外温度差值不大于 25℃,内部最高温度不大于 70℃,防止温度裂缝产生^[4]。

5. 混凝土养护:浇筑完成后及时对混凝土表面进行覆盖保温保湿,可选用塑料薄膜结合保温棉被或土工布分层覆盖。养护阶段始终维持表面湿润状态,严

禁表面失水、干裂。连续养护时间不得低于14 d;大体积混凝土同步监测内部、表面温度,动态调整养护方式,合理控制降温速率。

3.4 拱上结构施工

待主拱圈混凝土强度达到设计强度100%,再开展拱上结构施工作业。拱上横墙、腹拱采用对称浇筑,避免单侧偏载。拱上填料采用泡沫轻质土填料施工,施工应按配料→制泡→混合→浇筑→养护工序实施。原材料(水泥、发泡剂、水等)需符合设计与规范要求,配合比经试配后报监理工程师确定,湿重度、流动度及抗压强度满足设计指标。浇筑前基底平整、无积水并做好排水;模板支撑牢固、拼缝密封防漏浆。采用分层浇筑,单层厚度宜控制在0.3 m~0.5 m,浇筑从一端向另一端推进,同一区段上下层浇筑间隔:气温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 时。浇筑完成后及时覆盖塑料薄膜或土工布保湿养护,养护时间不少于7 d;顶层强度达1.5 MPa后方可进行后续施工。拱脚处设置排水层与泄水管,防止雨水积存侵蚀结构^[5]。

3.5 桥面系及附属工程

桥面铺装分幅施工,基层混凝土拉毛处理,保证与上层铺装黏结可靠。伸缩缝、人行道、栏杆、照明、排水等附属工程精准定位安装,确保线形顺直、外观统一。景观栏杆、亮化工程与桥梁整体风格协调,提升城市景观效果。

3.6 支架与模板卸除

卸架是拱桥施工的关键工序,必须在主拱圈强度达到100%且监控数据合格后进行。卸架遵循从拱顶向拱脚、全桥对称、分级缓慢、同步卸除的原则,先松动顶托,再拆除杆件,严禁集中、快速、单侧卸载,避免拱圈产生额外内力导致开裂。卸架过程持续监测拱顶高程与墩顶位移,确保结构安全稳定。

4 城市九孔上承式连续实腹拱桥施工质量控制与质量标准

第一,支架体系:预压沉降稳定,整体刚度与强度满足设计要求,变形可量化、可调整。第二,主拱圈:拱轴线偏差 $\leq \pm 5\text{ mm}$,高程偏差 $\leq \pm 10\text{ mm}$,截面厚度偏差 $\leq \pm 5\text{ mm}$,混凝土密实、无裂缝、无露筋。第三,连拱控制:全桥对称施工偏差 $\leq 5\text{ mm}$,墩顶水平位移 $\leq 3\text{ mm}$ 。第四,卸架控制:分级、匀速、同步,卸架过程无异常变形、无裂缝产生。第五,拱圈混凝土温度监测监控:建立水化热监测管控系统,测温点

位严格按照规范及施工计算布设,覆盖混凝土结构内部、表层及施工环境,保障监测数据全面、精准、有效。全程规范记录各项温度数据,保证监测记录连续、完整、真实,无漏测、断测情况。施工全过程严控混凝土内外温差标准,以 25°C 为临界管控值,根据测温数据动态调整养护方案,规避温湿度骤变引发的有害裂缝。依托信息化监测系统实时掌握混凝土温度变化情况,结合环境温度、昼夜温差及结构温度状态,及时调整保温、保湿养护措施,保证混凝土结构温湿度平稳变化,从源头预防水化热过高、温差过大引发的结构性裂缝。

5 城市九孔上承式连续实腹拱桥施工管理措施

首先,安全管理:支架搭设、高空作业、起重吊装均执行专项方案,支架方案需经专家论证;现场设置临边防护、安全网、警示标识,特种作业人员持证上岗。其次,环保措施:城区施工采取降噪、降尘措施,建筑垃圾与施工污水集中处理,保护河道水环境,做到文明施工、绿色施工。最后,应急管理:编制暴雨、大风、支架沉降超限、混凝土浇筑中断等应急预案,配备应急物资,确保突发情况快速处置。

6 结束语

城市九孔上承式连续实腹拱桥施工技术复杂、控制要点多,其核心在于对称均衡施工、支架安全可靠、拱圈线形精准、受力体系平稳转换。通过严格执行满堂支架预压、主拱圈对称浇筑、全过程监测及分级卸架等关键技术,可有效保证结构安全、线形美观与质量达标。该施工体系适应性强、成熟可靠,在城市景观拱桥建设中具有较高的推广与应用价值。

参考文献:

- [1] 白泓伟.山区下承式钢管混凝土拱桥关键施工技术[J].交通世界,2026(11):119-121.
- [2] 杨先权,王亮,王亚龙,等.多跨双曲拱桥无支架法拆除施工方案研究[J].世界桥梁,2026,54(03):40-46.
- [3] 徐建,王修山.人行系杆拱桥吊杆更换施工控制与力学性能试验研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(S1):202-205.
- [4] 周水兴,刘小波,张敏.混凝土拱桥悬臂浇筑施工成拱线形简化计算方法研究[J].世界桥梁,2026,54(02):97-102.
- [5] 李广华.开口薄壁截面拱桥转体施工监测要点[J].交通世界,2025(32):141-143.

公路养护管理现状及精细化养护措施探讨

陈延玲

(陕西交控宜富分公司, 陕西 延安 716000)

摘要 公路是推动社会经济发展的重要基础设施, 伴随我国公路路网不断扩大, 传统的粗放式养护方式已经不能满足行业发展的需求。本文对公路养护管理的主要内容进行了总结, 分析了目前我国公路养护管理中存在的主要问题, 基于精细化养护的要求, 提出了相应的解决措施, 以期为提高公路养护的质量和效率提供参考, 进而促进公路养护事业高质量发展。

关键词 公路养护管理; 精细化养护; 养护质量

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.029

0 引言

公路是综合交通运输体系的基础性组成部分, 其运营状态直接关系道路通行安全, 也与国民经济发展水平紧密关联。随着我国公路网络建设持续完善, 通车里程稳步增长, 公路养护管理工作的重要性越来越受到业界重视。传统的粗放式养护方式已经不能适应当前公路运营的需要, 精细化养护是公路养护行业发展的必由之路。本文主要探讨公路养护管理现状及精细化养护措施, 以期为行业发展提供参考。

1 公路养护管理内容

1.1 公路养护管理的核心作业内容

公路养护管理是贯穿公路全生命周期的过程, 主要目的是保证公路结构完好, 运行正常, 行车安全舒适, 为社会公众提供优质的通行服务。其基本工作内容包括了公路的全方位日常巡视检查和路面保洁, 路基路面的常规养护和车辙、裂缝、坑槽等各种病害的标准处理, 桥梁、涵洞、隧道及沿线附属构造物的定期检查和病害修复, 交通标志、标线、护栏等安全设施的经常性检查和及时更新。同时也包括了恶劣天气、交通事故、地质灾害等突发情况下的应急救援和道路保通工作, 以及养护工作全过程中的安全生产问题, 规范现场的交通组织及安全防护, 减少养护工作对道路交通的干扰, 防止安全事故发生, 保证公路基本的运行安全^[1]。

1.2 公路养护管理的统筹管控内容

公路养护管理贯穿整个公路性能监测、路网运行要求、养护资源投入、短期病害治理与长期性能提升

等方面的管理工作, 是保障养护作业规范有效落实、养护效能最大化的基础支撑体系。它的主要内容有: 养护计划的合理编制与统筹安排, 根据公路检测结果及路网状况需要, 合理配置养护力量, 兼顾短期病害处理及长期性能保证之间的关系; 养护资金及成本控制, 规范资金使用流程, 严格控制养护成本, 提高资金的使用效率; 养护项目的质量监督及验收评审, 从施工到效果形成闭环管理; 新技术、绿色环保新材料的研究开发与应用; 养护管理人员的技能培养及队伍建设; 养护管理机制和规定的完善更新; 同时也要考虑到养护作业的生态环境因素, 协调养护投入、通行效果与生态保护之间的关系, 保障公路基础设施的长期稳定运营, 促进国民经济持续发展提供有力的道路保障服务^[2]。

2 公路养护管理现状

2.1 养护管理体系建设仍有短板

当前国内公路养护管理体系仍存在诸多不完善之处, 多数地区仍沿用传统的分段分级管理模式, 不同层级、不同区域的养护管理部门权责划分不够清晰, 跨区域、跨部门的协同联动机制不健全, 尤其是国省干线与农村公路的养护管理标准不统一, 部分偏远路段存在管理盲区, 难以实现路网养护的统筹规划与统一管控。同时, 养护管理的制度规范与作业标准更新滞后, 难以适配当前公路路网规模扩大、交通流量激增、重载车辆占比持续提升带来的新挑战, 养护作业的全流程监管机制不完善, 从养护计划制定、作业实施到质量验收、效果评估的闭环管理存在明显漏洞, 部分

作者简介: 陈延玲 (1987-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程养护。

环节的管理流于形式,难以保障养护工作的规范性与实效性,导致养护管理的整体效率偏低,无法实现公路全生命周期的系统化管控。

2.2 预防性养护理念落实不到位

当前多数公路养护单位仍沿用传统被动式的养护模式,核心工作集中在病害出现后的修复处置,缺乏全生命周期养护的理念,预防性养护的落实严重不足。多数地区尚未建立完善的公路性能常态化监测与评估体系,无法精准掌握路面结构、桥涵构造物的性能状态与衰减规律,养护计划的制定多依赖管理人员的经验判断,缺乏科学的监测数据支撑,导致预防性养护的投入占比长期偏低,往往在病害发展到较为严重的阶段才开展集中养护处置。这种模式不仅大幅提升了养护作业的成本投入,也加剧了公路结构的不可逆损坏,大幅缩短了公路的使用寿命,同时集中养护作业需要占用更多的通行资源,极易引发长时间的交通拥堵,增加了道路通行的安全风险,无法实现养护效益的最大化^[3]。

2.3 养护技术与装备水平有待提升

当前国内公路养护的技术与装备水平仍存在明显的区域差异,多数地区尤其是县域及以下的公路养护,仍以传统的人工养护模式为主,机械化、智能化的养护装备普及率偏低,农村公路的养护大多依赖小型工具与人工操作,作业效率低,质量稳定性差,难以满足精细化养护的作业要求。同时,新型养护技术与环保材料的研发与转化应用不足,绿色高效的养护技术、路面无损检测技术、智能化监测系统的应用范围十分有限,部分地区的养护检测仍以人工目测为主,无法精准识别路面内部的隐性病害,导致养护作业缺乏针对性,极易出现病害反复处置的情况。此外,养护作业的信息化管理水平不高,多数地区尚未建立统一的养护管理数据平台,不同路段、不同部门的养护数据无法互通共享,难以实现养护工作的数字化管控与精准决策。

2.4 养护资金保障与成本管控能力不足

当前国内公路养护的资金来源渠道较为单一,主要依赖各级财政拨款,随着公路路网规模的持续扩大,公路养护的需求逐年增长,养护资金的缺口不断扩大,尤其是农村公路的养护资金保障能力较弱,难以满足日常养护与病害处置的基本需求,部分偏远路段甚至出现失养的情况。同时,养护资金的使用管理不够规范,全流程的成本管控体系不完善,养护计划的制定缺乏精准的成本测算,养护作业的资源配置不合理,存在重复投入、资源浪费的问题,部分养护项目的招

投标管理不规范,存在低价中标后偷工减料的情况,不仅严重影响了养护工程的质量,也大幅降低了资金的使用效率。此外,养护资金使用的监管机制不完善,无法实现对资金使用全流程的有效管控,难以实现有限养护资金的效益最大化,严重制约了养护管理工作的高质量开展^[4]。

2.5 养护队伍专业素养与管理能力参差不齐

当前国内公路养护行业的从业人员结构不合理,整体专业素养偏低,一线养护人员多为临时聘用人员,文化水平不高,缺乏系统的专业培训,对新型养护技术、智能化养护装备的操作能力不足,难以适应精细化养护的工作要求,同时一线养护人员的薪酬待遇偏低,人员流动性大,队伍稳定性不足。养护管理岗位的专业人才流失较为严重,具备公路全生命周期养护管理经验、熟悉智能化养护技术、精通成本管控与项目管理的复合型人才严重短缺,部分养护单位的管理理念落后,仍采用传统粗放式的管理模式,对养护人员的考核激励机制不完善,无法充分调动从业人员的工作积极性与主动性,导致养护作业的标准化程度偏低,养护质量难以得到稳定保障,严重制约了精细化养护模式的推广与落地。

3 公路养护管理精细化养护措施

3.1 健全精细化养护管理体系,完善全流程闭环管控

要构建权责清晰、协同高效的精细化养护管理体系,明确各级养护管理部门的职责边界,理顺国省干线与农村公路的养护管理权责,建立跨区域、跨部门的协同联动机制,实现全域路网养护的统一规划、统一标准、统一管控,消除养护管理盲区。同时,结合行业发展趋势与公路运营实际,更新完善养护管理的制度规范与作业标准,制定覆盖养护计划制定、作业实施、质量验收、效果评估全流程的标准化管理体系,建立严格的闭环管控机制,强化对每个环节的监督管理,杜绝管理漏洞与形式化问题。此外,全面推行网格化养护管理模式,将养护责任精准落实到具体路段、具体岗位、具体人员,实现养护管理的全覆盖、无死角,全面提升养护管理的整体效率与规范化水平,为精细化养护的落地提供坚实的制度保障^[5]。

3.2 树立全生命周期养护理念,强化预防性养护落实

要全面树立公路全生命周期养护的核心理念,彻底转变传统被动处置的养护模式,将预防性养护贯穿于公路运营的全过程,建立完善的公路性能常态化监

测与评估体系,定期对路基路面、桥涵隧道、交通安全设施等开展全面系统的检测,精准掌握公路结构的性能状态与衰减规律。依托常态化监测数据构建科学的养护决策模型,完全替代传统的经验判断模式,精准制定养护计划,合理确定预防性养护的时机与作业方案,稳步提升预防性养护在总养护投入中的占比,在病害萌芽阶段及时开展精准处置,延缓公路结构的性能衰减,避免病害进一步发展造成的不可逆损坏,有效延长公路的使用寿命。同时,优化养护作业的交通组织方案,最大限度减少养护作业对公路通行的影响,降低通行安全风险,真正实现养护效益的最大化。

3.3 推动养护技术与装备升级,提升数字化智能化养护水平

加快推进公路养护的机械化、智能化升级,逐步淘汰传统落后的人工养护模式,根据不同路段的养护需求,配置标准化、智能化的养护装备,全面提升养护作业的效率与质量稳定性,尤其要加大对农村公路养护机械化装备的投入力度,补齐农村公路养护的装备短板,实现全域养护作业的机械化覆盖。同时,加大新型养护技术与绿色环保材料的研发与转化应用力度,全面推广应用路面无损检测技术、微表处、超薄磨耗层等绿色高效的养护技术,精准识别路面内部的隐性病害,实现病害的针对性处置,彻底解决病害反复处置的问题。此外,搭建全域统一的数字化养护管理平台,整合不同路段、不同部门的养护数据,实现养护数据的互通共享,构建集监测、分析、决策、管控、评估于一体的数字化养护管理体系,依托大数据、人工智能等技术实现养护决策的精准化与管理的智能化,为精细化养护提供坚实的技术支撑^[6]。

3.4 拓宽资金保障渠道,构建精细化成本管控体系

要进一步拓宽公路养护资金的来源渠道,在保障各级财政拨款稳定增长的基础上,积极探索引入社会资本参与公路养护运营,推广政府与社会资本合作的市场化养护模式,有效缓解养护资金的缺口压力,同时加大对农村公路养护的资金倾斜力度,建立稳定的农村公路养护资金保障机制,满足农村公路的日常养护与病害处置需求,杜绝失养情况的发生。同时,构建覆盖养护全流程的精细化成本管控体系,在养护计划制定阶段开展精准的成本测算,结合养护需求与资金规模优化养护方案,合理配置养护资源,杜绝重复投入与资源浪费的问题。规范养护项目的招投标管理,强化对投标单位资质与履约能力的审核,杜绝低价中标、偷工减料的情况,同时建立养护资金使用的全过程监管机制,定期对资金使用情况开展专项审计,确

保资金专款专用,全面提升资金使用效率,实现有限养护资金的效益最大化,为精细化养护的全面落地提供稳定的资金保障。

3.5 加强养护队伍建设,完善人才培养与激励机制

要全面加强公路养护队伍的专业化建设,构建完善的分层分类人才培养体系,针对一线养护人员开展常态化的系统培训,培训内容涵盖养护作业标准、新型养护技术、智能化装备操作规范、安全生产要求等多个方面,全面提升一线养护人员的专业素养与操作能力,使其能够完全适应精细化养护的工作要求,同时合理提升一线养护人员的薪酬待遇,降低人员流动性,保障养护队伍的稳定性。同时,加大复合型养护管理人才的引进与培养力度,重点培养具备公路全生命周期养护管理经验、熟悉智能化养护技术、精通成本管控与项目管理的专业人才,优化养护从业人员的整体结构。此外,更新养护管理理念,摒弃传统粗放式的管理模式,建立完善的考核激励机制,将养护质量、作业效率、责任落实情况等核心指标纳入考核体系,将考核结果与薪酬待遇、岗位晋升直接挂钩,充分调动从业人员的工作积极性与主动性,全面提升养护作业的标准化程度,为精细化养护的全面推广提供坚实的人才支撑。

4 结束语

公路养护管理是保障公路基础设施长效稳定运营的核心工作,面对当前行业发展的新挑战与新要求,推动养护管理向精细化转型是公路行业高质量发展的必然趋势。本文系统梳理了当前公路养护管理中存在的体系、理念、技术、资金、人才等方面的突出问题,提出了针对性的精细化养护措施,通过各项措施的落地实施,旨在有效提升公路养护的质量与效率,延长公路使用寿命,为促进社会经济发展提供更坚实的交通保障。

参考文献:

- [1] 安秀丽.公路工程养护施工精细化管理与养护措施优化研究[J].运输经理世界,2025(32):117-119.
- [2] 刘霞.公路日常巡查与精细化养护管理模式的优化研究[J].时代汽车,2025(14):172-174.
- [3] 汪马良.公路养护作业精细化管理安全保障机制构建与实践[J].运输经理世界,2025(08):115-117.
- [4] 余巧玲.精细化养护管理在公路项目中的运用分析[J].交通科技与管理,2023,04(04):171-173.
- [5] 张志.公路养护管理中精细化管理的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2020(02):33.
- [6] 谢学文.公路精细化养护管理途径探讨[J].经营管理者,2019(12):94-95.

市政道路工程中软土路基施工质量控制措施

章 晔

(黄山市建设监理有限公司, 安徽 黄山 245000)

摘 要 本文结合具体市政道路工程施工实践, 针对软土路基处理问题展开探讨。首先, 从软土路基施工要点切入, 围绕软土特性识别、处理方案选择以及关键施工工艺流程等方面进行了深入探究。其次, 从施工前准备控制、施工过程质量控制以及作业完成后质量检测与监测三个维度对软土地基处理的质量控制方案进行了分析, 提出了全过程、多视角的软土地基处理施工质量控制举措, 以期为企业在市政道路工程软土路基处理方面的工作提供参考。

关键词 市政道路; 软土路基; 软土特性识别; 施工质量控制; 地基处理

中图分类号: TU99; TU472

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.030

0 引言

为了更好地满足城市人口日益增长的出行需求, 加强城市交通基础设施建设已成为推动国民经济发展的重要任务。市政道路作为重要的交通基础设施建设项目, 其施工技术与质量管理水平对城市建设质量和经济的发展具有重要影响^[1]。然而, 市政道路工程施工过程中常面临软土地基难题。软土含水量高、承载力不稳定且具较强压缩性, 若处理不当, 轻则延误工期, 重则埋下质量与安全隐患, 给工程安全带来不可估量的负面影响^[2]。本文结合安徽省某市政道路建设项目实例, 针对上述问题展开深入研究, 重点探讨软土路基处理技术与质量控制策略。

1 工程概况

本文以安徽省某片区路网工程项目为典型案例进行分析。该项目由11条市政道路组成, 设计总里程为4 348.633 m, 道路红线宽度分别为20 m、22 m、25 m和30 m。项目场区位于典型的冲积平原地貌, 地质条件复杂。通过勘察可以发现, 目标区域内土壤成分在浅层部分主要包含的是杂填土(Qm1)与淤泥质黏性土(Q1), 中层是软弱黏性土层(Q4a1)及上更新统冲洪积成因(Q3al+pl)黏性土与碎石层, 下层伏基岩地质构成主要为白垩-第三系泥质粉砂岩。这里面对施工作业影响突出的主要是①-3层淤泥质黏土, 其表现出较高的流动性, 土壤中含有水分高、具有孔隙分布率高、低渗透性、容易被压缩、抗剪强度差等不利于施工的诸多特点。该层软土分布广泛, 厚度不均,

天然含水率可达38%~52%, 孔隙比1.2~1.8, 地基承载力特征值仅为60 kPa~85 kPa。若不进行有效处理, 在道路荷载作用下将产生巨大且长期的沉降, 无法满足设计及使用要求。该案例集中体现了安徽沿江、沿海地区市政道路建设中面临的典型软土问题。

2 软土路基施工要点

2.1 软土特性识别与处理方案选择

工程施工前期需基于详细勘察资料精确识别软土。根据相关规范, 天然含水率不低于液限、天然孔隙比不小于1.0的黏质土、有机质土可认定为软土。处理方案的选择应遵循“技术可行、经济合理、环境友好”的原则。浅层处理深度 ≤ 3 m适用于软土埋藏较浅的路段, 一般的处理方案是使用换填法进行应对, 也就是把软土全部挖出, 然后填入质地较为坚实稳定的砂砾、碎石, 构建稳定垫层, 并且在填料中加入石灰、水泥用以固定^[3]。深层采用该方法的处理时向下挖出软土层深度要超过3 m, 因此可以用在深厚软土问题的处理上。采用排水固结法也可以处理软土问题, 一般是在软土区域向下竖向插入排水管, 然后上方使用袋装砂井、排水板等施加预压, 让下方孔隙水在受压作用下通过排水管向外排出, 通过减少下方土壤中的水分含量, 实现土体性质改良。复合地基法也是处理软土问题的方法之一, 主要为是在软土区域通过测量, 以均匀分布方式在软土中打入竖向增强桩, 让桩体插入软土中起到增强承载的作用, 从而防止软土地基带来的稳定性问题。该技术在打桩方式上常用的有粒料

作者简介: 章晔(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政道桥。

桩砂桩、碎石桩、CFG 桩等。强夯法与强夯置换法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土地基。

2.2 关键施工技术流程

以本工程所采用的双向粉喷桩复合地基及排水固结法为例,阐述施工要点。双向粉喷桩施工运用专用深层搅拌机械,将水泥等固化剂以粉体形式喷入软土之中,借助钻头叶片的双向旋转搅拌,使固化剂与土体充分混合,从而形成水泥土桩体。施工流程主要涵盖:场地平整→测量放样→桩机就位→预搅下沉→喷粉提升搅拌→重复搅拌→成桩移位。质量控制的关键在于对水泥掺入比、钻进/提升速度、喷粉压力进行精确控制,以及确保桩长、桩径和垂直度符合要求^[4]。

排水固结法施工的核心是设置排水系统。以塑料排水板为例,施工流程为:整平原地面→摊铺下层砂垫层→机具就位→塑料排水板穿靴→插入套管→拔出套管→割断塑料排水板→机具移位→摊铺上层砂垫层。作业过程中需关注的问题主要包括排水板间距的控制、深度的合理把握;在拔出套管操作时避免带出土壤;做好砂垫层处理,防止出现渗透性问题;对预压荷载实施有效测试。

在实际工程中,除上述两种较为普遍的作业方法外,针对软土区域厚度较薄、深度不均的情况,还可采用换填垫层法。采用该方法时,在作业流程上需注意以下几点:首先,按照设计标准确定换填区域的面积与深度,然后使用挖掘设备对指定地点的软土进行全面挖除,作业过程中应尽量控制挖掘深度,避免超挖对下方正常土层造成损伤。初挖完成后,对作业区域分层填筑级配砂石、灰土和素土,单层铺设厚度以 25 cm 左右为宜,可根据现场实际情况进行适当调整。铺设完成后,使用振动压路机进行压实作业,直至压实度达到规定要求。

3 市政道路工程中软土路基施工质量控制措施

为确保软土路基处理效果,必须实施贯穿于施工全过程的质量控制。

3.1 施工前准备控制

1. 地质的复核工作以及试验段的施工工作:施工前需要对地质勘察的资料开展现场的复核工作,必要的情况下进行补充的勘探工作。针对选用桩体处理的路段,必须开展成桩工艺性的试验工作,确定水泥掺量、水灰比、搅拌速度、电流值等各项施工的参数,并且需要经监理确认后,才可以开展大面积的施工工作。

2. 材料的质量的管控工作:所有进入施工现场的

材料都必须经过严格的检验工作,确保其质量完全契合相关的标准以及规范的要求后才可以使用。对于砂、石垫层的材料,其含泥量必须严格控制,不得超过 5%,同时最大的粒径建议保持在 50 mm 以下,保证垫层的均匀性以及稳定性。水泥、石灰等固化剂的材料需要提供完整的出厂合格证明,并且附有相应的复试检测报告,以验证其性能指标满足工程的需要。此外,土工合成材料的各项关键参数,如纵向以及横向的抗拉强度、延伸率等,均须严格契合设计的图纸以及技术文件当中的具体规定,确保其在工程当中发挥应有的作用。

3. 测量放样精度的管控工作:运用全站仪、RTK 等高精度的测量设备对施工区域进行详细的放样作业工作,对处理范围的边界线以及桩位的中心点进行精确的测定以及反复的校核工作,确保所有桩位的实际偏差严格控制在相关的规范允许范围内,如偏差值不超过 ± 150 mm。

4. 施工组织设计的审查工作:施工单位需要编制详尽的软土路基处理专项施工组织的设计工作,明确施工的流程、人员的配置、设备的选型、进度的计划以及质量的保证措施。技术负责人需要对施工组织的设计工作进行内部审核工作,重点审查关键工序的技术参数、质量控制标准以及应急预案,经监理工程师审批后,才可以实施。同时,还需组织施工人员进行技术交底工作以及岗前培训工作,确保施工人员熟悉设计图纸、施工规范以及质量控制的要点,掌握各工序的操作要领以及质量检验标准。

3.2 施工过程质量控制

1. 工艺参数的实时监测工作:针对粉喷桩/浆喷桩,需要配备喷粉也就是浆量自动记录的装置,并且要定期进行标定的工作,来确保每延米固化剂的喷入量契合设计的要求。记录施工过程当中钻进深度、提升速率、旋转速度、喷粉压力等关键参数。

2. 工序的检查以及验收工作:严格落实“三检制”。例如:排水板的施工工作需要检查板间距、板长、垂直度以及外露的长度;换填的施工工作需要分层检验压实度;垫层的施工工作需要检查厚度、平整度以及宽度。

3. 特殊的过程以及季节施工的管控工作:雨季的施工工作应设置临时的排水系统,防止积水浸泡基底;冬季的施工工作需要采取对混凝土、砂浆采取防冻保温的措施。对于抛石挤淤,应遵循正确的抛填顺序,横坡

缓于 1:10 时从中线向两侧对称抛填,陡于 1:10 时自高侧向低侧抛填。

4. 质量通病的防治工作:在软土路基的施工过程当中,常会出现一些典型的质量问题,如缩颈、断桩以及夹层等,这些缺陷若处理不当,将严重影响路基的最终承载能力以及长期稳定性。针对这些常见的隐患,施工前需要精心制定并且还严格执行专项防治技术方案以及应急预案。以粉喷桩施工作业为例,正式开钻前,需要详细检查钻头的磨损状况,确保它的尺寸以及形状契合规范要求,来保障水泥土能够充分、均匀地搅拌混合。在注浆加固过程当中,操作人员需要密切监测注浆的压力以及地表的出浆情况,一旦发现压力值突然异常降低或地表现象不符合常规冒浆的规律,需要立即暂停钻进作业,迅速组织技术分析工作以查明根本缘由,并且要及时采取针对性的补救措施,如在相应桩段补喷水泥浆或实施重复的搅拌等,确保成桩的质量契合设计标准^[5]。对于路基的施工当中可能出现的沉降量超出允许限值的问题,填筑阶段需要实施严格的过程控制工作,关键在于严格控制每层填料的摊铺厚度,通常建议单层压实的厚度不超过 30 cm,还应根据填料的性质以及现场条件,合理选用匹配的压路机类型以及吨位,如振动压路机或冲击碾压设备等,借助科学的碾压工艺组合,确保每层填筑层充分地压实,其压实度的检测结果须全部达到设计的文件规定指标要求。

3.3 施工后检测与监测

1. 实体的质量检测工作:成桩之后,需要依照规范开展质量检测工作。对于 CFG 桩、搅拌桩等,可以运用低应变法来检测桩身的完整性,选用静载试验来检测单桩以及复合地基的承载力。砂桩、碎石桩的密实度可以借助动力触探来进行检测工作。

2. 沉降以及稳定的监测工作:此乃软基处理工作成功与否的关键。需要在路堤中心、坡脚等关键部位埋设沉降板、位移边桩、孔隙水压力计等监测元件。施工期间,必须严格遵循控制标准:路堤中心地面沉降的速率每昼夜不超过 10 mm~15 mm,坡脚水平位移的速率每昼夜不超过 5 mm。借助对监测数据的动态分析来指导填筑的速率,实现信息化施工。

3. 工后沉降的评估工作:预压期结束后,如果测量五天后,该区域的沉降幅度都始终没有超过 0.5 mm/d,同时地基的固结度达标,就可以卸载装置继续进行后续路面的施工。

4. 监测数据的处理以及反馈工作:监测数据需要及时进行处理以及分析,绘制沉降—时间曲线、水平位移—时间曲线以及孔隙水压力消散曲线,借助曲线的形态来判断地基沉降的发展趋势以及稳定性。若发现沉降或位移的速率超过预警值,应立即暂停施工,核查地质条件、施工参数以及监测元件的状态,必要时采取放缓填筑速度、增设临时排水措施或调整地基处理方案等应急措施,待数据恢复正常后可以继续施工。

4 结论

市政道路软土路基施工属于技术复杂且质量要求较高的系统工程。安徽省亳州市路网工程实践显示:其一,精准勘察是前提条件。需全面掌握软土层的空间分布、物理力学指标以及工程特性,为方案设计提供可靠支撑。其二,方案优选是基础。应依据软土厚度、道路等级、工期造价以及环境条件,综合比选垫层置换、排水固结、复合地基等处理方案,必要时可采用组合工法。其三,过程控制是关键。从材料、测量、工艺参数到工序验收,必须构建严格的全过程质量控制体系,尤其要对成桩质量、排水系统有效性、填筑速率等关键环节实施重点监控。其四,动态监测是重要保障。依托沉降、位移等现场监测数据开展信息化施工,动态调整施工参数与加载计划,是确保路基稳定、控制工后沉降的有效举措。未来,伴随智能化、自动化施工装备的发展,以及 BIM、物联网技术在施工质量管理中的深度融合,市政道路软土路基施工的质量控制将朝着更加精细化、智能化的方向发展,进而为构建安全、耐久、高品质的城市交通基础设施提供更有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 王红军.深厚淤泥质软土地层盾构隧道选线及加固技术研究[J].铁道标准设计,2025,69(04):139-147,156.
- [2] 李国维,赵星宇,张黎明,等.支盘桩加固既有填砂路基深层软土的模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(08):1768-1775.
- [3] 张先伟,刘新宇,王港,等.赛车道软土路基 PHC 桩负摩阻力中性点的时间效应[J].工程地质学报,2024,32(05):1838-1849.
- [4] 李自福,苏峰.建筑软土深基坑放坡桩锚联合支护施工技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(06):49-51.
- [5] 郑轩.基于市政路基填筑施工质量的控制与管理方法[J].中国建筑金属结构,2025,24(03):34-36.

水利工程明渠主体工程施工方法及技术要求

关晓旭

(四川省交通建设集团有限公司, 四川 成都 610036)

摘要 在我国水利基础设施建设稳步推进的背景下, 明渠主体工程作为水利输水体系的基础组成部分, 其施工质量直接影响着工程运行安全及输水效益。本文阐述了水利工程明渠主体工程施工的主要特点, 分析了渠道开挖、渠体衬砌及渠床防护等施工技术, 提出分层开挖、精准衬砌以及排水疏导等施工方法, 梳理施工要点及管控措施, 旨在为同类水利明渠工程施工提供实践参考。

关键词 明渠主体工程; 渠道开挖; 渠体衬砌; 渠床防护; 衬砌施工

中图分类号: TV551.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.031

0 引言

随着我国不断深入开展水资源优化配置工作, 明渠主体工程在输水灌溉及防洪排涝体系中发挥着重要作用。依据《水利工程质量事故处理规定》(2024 年) 相关建设要求, 明渠施工需严格遵循技术标准, 并实现全过程管控。科学合理的施工工艺以及严格的技术要求, 是保障明渠结构稳定、防渗可靠及长期安全运行的前提, 对完善水利工程建设、提高水资源利用效率具有现实意义。

1 水利工程明渠主体工程施工的主要特征

1.1 施工环境的复杂性

水利工程明渠主体工程施工环境复杂, 是其区别于不同工程施工的明显特征, 关系着明渠施工推进效率及技术实施效果。明渠主体工程多位于野外区域, 常受自然环境影响, 气候变化会对施工进度产生一定的影响, 不同季节的温湿度差异会改变施工条件。地形地貌多样也增加了施工环境复杂性, 明渠线路常需穿越不同地形区域, 地形起伏及地质条件差异, 使施工环境具有不确定性。同时, 水文条件波动同样加大环境复杂程度, 施工区域地下水位变化、地表径流状态都会制约施工基础条件。另外, 施工区域周边生态环境状况也是重要组成部分, 施工过程中需要考虑生态保护要求, 进一步体现明渠主体工程施工环境的复杂特征^[1]。

1.2 施工工艺的专业性

明渠主体施工工艺对技术要求较高, 是保障工程结构成型质量及运行稳定的条件之一。此类工程的各

工序之间有着明确的先后顺序, 需要依据设计参数及技术标准来组织实施。同时, 施工过程对操作规范的依赖程度较高, 施工人员要按照既定工艺要求执行各项作业, 保证各项技术指标满足工程设计目标。另外, 施工工艺要适配现场条件, 结合地质、水文以及结构特点进行技术调整, 让施工过程保持稳定。各施工环节之间相互关联, 工艺控制要贯穿全过程, 借助连续化作业, 达成整体结构质量的协调统一, 从而保障明渠主体工程施工质量符合水利工程建设要求。

1.3 质量控制的严格性

明渠主体工程施工质量控制, 在水利工程建设中要求很严格, 是保障工程整体性能及运行安全的基础条件。质量控制要贯穿施工全过程, 明确要求各环节的技术指标, 按照设计标准及规范文件进行统一管理。质量管理内容涵盖结构成型及材料应用等方面, 对各环节的执行一致性要求较高。施工过程中的质量检测要同步技术标准, 对关键节点进行过程性约束, 让施工行为始终处于规范范围之内。同时, 质量控制强调全过程记录及技术追溯, 使各阶段的施工状态有可验证性。利用多环节协同控制, 稳定达到质量要求, 保证明渠主体工程整体质量适配水利工程建设标准^[2]。

2 水利工程明渠主体工程施工技术分析

2.1 渠道开挖施工技术

渠道开挖施工技术是明渠主体工程施工的技术内容之一, 关系到渠体成型质量及后续施工基础。该技术将明渠设计参数作为依据, 结合地质勘察数据, 确定开挖技术参数, 保证开挖断面符合设计标准, 其中

作者简介: 关晓旭 (1993-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

渠道边坡坡度一般控制在 $1:1.5 \sim 1:2.5$, 开挖深度误差不能超过 $\pm 5\text{ cm}$, 断面尺寸偏差控制在 $\pm 10\text{ cm}$ 以内。其重点在于控制开挖坡度、深度以及断面尺寸, 保证渠体结构稳定, 为后续衬砌及防护施工提供条件。技术实施要结合地质条件, 选择合适的开挖方式, 并考虑开挖过程中的边坡稳定, 借助规范操作, 减少对周边土体的扰动, 避免土体失稳, 影响工程安全。同时, 该技术要衔接后续施工环节, 控制开挖面平整度误差不大于 3 cm , 保持开挖面洁净, 没有浮土杂物。

2.2 渠体衬砌施工技术

在明渠主体工程施工中, 渠体衬砌属于重要技术环节, 主要作用是提高渠体防渗性能及结构整体性, 适应明渠主体工程运行及输水需要。该技术结合渠体地质及水文条件, 以明渠设计标准为依据, 确定衬砌技术参数, 使衬砌结构贴合渠体。衬砌材料性能参数会影响技术实施效果, 常用衬砌材料厚度控制在 $8\text{ cm} \sim 12\text{ cm}$, 抗压强度不低于 20 MPa , 抗渗等级不低于 P6, 衬砌表面平整度误差不能超过 2 mm/m 。其控制衬砌层厚度、强度及平整度, 形成比较致密的防渗结构, 提高渠体抗冲刷及抗冻融能力, 保持结构稳定。另外, 该技术需连接渠道开挖施工成果, 使衬砌层结合开挖面, 利用技术管控, 保持衬砌结构的均匀性及密实性, 满足防渗性能及结构强度规定^[3]。

2.3 渠床防护施工技术

为维持明渠主体工程运行稳定, 渠床防护作为必要技术部分, 多是针对渠床受水流冲刷、冻融循环及渗透破坏等作用, 采取相应防护措施。该技术依据明渠设计流量、流速及地质条件, 确定防护结构形式及参数, 使渠床具备抵抗水力冲击以及环境影响的能力。防护层厚度为主要控制指标, 一般控制在 $15\text{ cm} \sim 25\text{ cm}$, 要结合渠底流速及地基条件, 确定具体取值, 流速大于 3 m/s 的渠段取上限值。防护材料抗压强度不低于 25 MPa , 抗冻等级不小于 F150, 以适配寒区明渠的使用需要。渠床防护层及渠体衬砌结构之间存在衔接界面, 其搭接宽度不小于 20 cm , 采用止水材料填充接缝部位, 防止水流沿缝隙下渗引发渠床掏空。防护层底面需设置反滤层, 反滤料粒径控制在 $5\text{ mm} \sim 20\text{ mm}$, 厚度 $10\text{ cm} \sim 15\text{ cm}$, 起到排水保土作用。对于高地下水位渠段, 防护层下部应该增设排水设施, 排水孔间距 $2\text{ m} \sim 3\text{ m}$, 孔径 $5\text{ cm} \sim 8\text{ cm}$, 使渗透水稳定排出, 减小扬压力对防护层的顶托作用。渠床防护施工完成后, 防护层平整度误差不超过 5 mm/m , 表面不能出现裂缝, 保证过流顺畅^[4]。

3 水利工程明渠主体工程施工方法探究

3.1 分层开挖作业, 保障施工安全

分层开挖作业在明渠主体工程中应用较为普遍, 围绕施工安全管控及施工质量展开, 符合明渠主体工程施工技术要求。施工组织以开挖技术要求为依据, 基于渠体地质条件、开挖深度及边坡稳定性情况, 把整体开挖任务划分成若干分层段落, 按照顺序推进。分层控制开挖高度、坡度及进度, 可降低土体失稳风险, 便于调控开挖参数, 适应后续衬砌及防护施工需要^[5]。例如: 水利明渠主体工程, 渠道总长 8.6 km , 设计开挖深度 $3.5\text{ m} \sim 6.2\text{ m}$, 边坡坡度 $1:1.8$, 地质以粉质壤土为主, 地下水位埋深 2.3 m , 结合工程技术要求, 采用分层开挖作业保障施工安全。该工程基于开挖深度及地质条件, 把开挖作业划分为 3 个分层, 第一层开挖高度 1.5 m , 第二层开挖高度 1.8 m , 第三层开挖高度结合剩余深度灵活调整, 每层开挖完成后, 及时进行边坡修整, 使边坡坡度符合设计标准。开挖过程中, 严格控制每层开挖进度, 每天开挖长度不超过 50 m , 避免一次性开挖过深致使土体应力集中。针对粉质壤土遇水易软化的特性, 每层开挖后, 立刻清理开挖面浮土, 铺设临时排水设施, 控制地下水位不高于开挖面以下 0.5 m , 防止土体软化失稳。同时, 用专业设备检测边坡平整度及坡度, 保证误差控制在技术要求范围内, 检测合格后, 方可进入下一层开挖作业。开挖过程中安排专人全程值守, 监测边坡位移及土体沉降情况, 实时记录施工数据。借助分层开挖作业, 该工程控制边坡坍塌风险, 避免开挖过程中安全事故的发生, 为后续渠体衬砌及渠床防护施工奠定良好基础, 体现分层开挖作业在明渠主体工程中保障施工安全、契合技术要求的价值。

3.2 精准衬砌施工, 提高防渗性能

在明渠主体工程施工方法中, 精准衬砌以防渗性能及结构成型为主要控制目标。该方法以衬砌层厚度、施工精度及结构贴合情况为主要控制内容, 按照设计标准, 确定施工参数, 使衬砌层符合使用条件。衬砌作业需保持连续性, 避免接缝处产生不均匀变形。同时, 让衬砌表面保持平整状态, 改善过水条件, 为渠体结构提供基础条件。

依据明渠主体工程衬砌技术标准, 工程渠道总长 9.2 km , 设计输水流量 $18\text{ m}^3/\text{s}$, 渠体衬砌采用 C25 混凝土材料, 结合工程技术要求, 采用精准衬砌施工提高防渗性能。工程以渠体衬砌技术参数为依据, 控制衬砌材料质量, 使混凝土抗压强度达到 25 MPa , 抗渗

等级符合 P6 标准,衬砌厚度统一控制在 10 cm,偏差不超过 ± 2 mm。施工前,清理开挖面,让表面洁净平整,平整度误差控制在 3 cm 以内,适配衬砌施工要求。衬砌施工过程中,采用专业设备进行浇筑作业,控制浇筑速度及振捣频率,保证衬砌层密实无孔隙,以防出现麻面等质量问题。浇筑完成后,及时进行养护,养护时间不少于 14 天,养护期间控制环境温度在 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$,防止衬砌层出现裂缝。同时,精准处理衬砌接缝,用专用止水材料填充,使接缝严密,搭接宽度控制在 20 cm,不让水流沿接缝渗漏。施工全过程同步进行质量检测,实时监测衬砌厚度、强度及平整度。凭借精准衬砌施工,该工程降低输水渗漏损耗,渗漏量控制在设计标准以内,衬砌结构整体平整密实,抗冲刷及抗冻融能力达标,既能保障明渠输水效能,又能延长工程使用年限,体现精准衬砌施工在明渠主体工程中提高防渗性能的价值。

3.3 合理排水疏导,避免渠体冲刷

在明渠主体工程运行过程中,渠体冲刷问题多与积水及渗透水排出不畅有关。因此,在施工阶段,需提前设计并布置排水系统。合理排水疏导的实施重点放在排水路径设置及排水能力匹配上,结合水文条件及输水流量,分区安排不同渠段的排水方式,使积水及渗透水,能够按既定路径排离渠体区域。例如:水利明渠主体工程,渠道总长 10.5 km,设计输水流量 $22 \text{ m}^3/\text{s}$,渠底坡度 $1/2500$,地质以砂壤土为主,渠段沿线地下水位较高且汛期降雨集中,采用合理排水疏导施工避免渠体冲刷。明渠排水系统的设计要结合水文地质、渠道结构及周边环境。在进行地表排水系统设计时,要依据集水面积计算排水沟断面尺寸与纵坡。采用梯形或矩形断面,边坡坡度 $1:1 \sim 1:1.5$,沟底宽不小于 30 cm,保障排水能力符合暴雨强度要求。高填方渠段在填方体内部设纵向排水盲沟,用粒径 20 mm ~ 40 mm 的碎石或卵石作反滤层,厚度不少于 30 cm,与横向排水管连通,构成立体排水网络。同时,在渠体两侧布设排水边沟,沟底宽度控制在 80 cm,深度 60 cm,与渠体轴线平行布设,使排水顺畅。在渠床底部每隔 2.5 m 布设排水盲管,管径 10 cm,外包土工布,防止泥沙堵塞。汛期前,检查并调试排水系统,使其具备排出地表汇水及地下渗透水的能力。输水期间,实时监测排水流量及渠体周边水位,基于变化调整排水速率,将地下水位控制在渠底以下 1.2 m。凭借合理排水疏导施工,该工程控制水流对渠体的冲刷作用,渠体边坡及渠底未出现破损,过流状态平稳,符合明渠主体工程施工技术要求,保障工程输水效能。

3.4 全程监测管控,筑牢工程质量

全程监测管控,把质量检验由结果验收前移到施工各环节。其依据设计文件及技术规范,确定监测点位及检测频率,让开挖断面、衬砌成型及防护层铺设等工序处于受控状态。检测数据及时反馈至作业面,为调整施工参数提供依据。监测结果要对照技术要求,偏差超出允许范围时及时修正,按照规定交接各工序,稳定达成明渠主体工程质量目标。例如:在该水利明渠主体工程施工过程中,渠道总长 7.8 km,设计输水流量 $16 \text{ m}^3/\text{s}$,基于工程技术要求,用全程监测管控方式强化工程质量。该工程结合明渠主体工程施工各环节特点,在开挖、衬砌、防护及排水施工阶段均布设监测点位,明确监测指标及控制标准,边坡位移监测频率为每 2 小时 1 次,衬砌强度监测每 50 m 布设 1 个检测点,渠床平整度允许误差不超过 5 mm/m。监测内容涵盖边坡位移、衬砌强度及排水流量等,使用专业监测设备,实时采集数据,安排专人整理分析数据,每天生成监测报告,上报施工管理部门。在监测过程中,仔细对照施工技术要求,发现参数偏差,立即暂停作业,调整施工工艺直至达标,同步更新监测数据,施工全过程记录监测数据及调整情况。借助全程监测管控,该工程各施工环节参数都符合设计标准,没有质量隐患,防渗及抗冲刷性能达标,表明此方法能够稳定控制工程质量,使工程运行状态保持可靠。

4 结束语

规范明渠主体工程施工方法,并落实技术要求,是保障水利工程输水效能、延长工程使用年限的前提,对推动水利基础设施发展具有重要价值。未来,需结合水利建设新需求,继续优化施工工艺,强化技术应用,使施工方法适配技术管控,促进水利工程更好地发挥水资源调配及保障作用,为水利事业长远发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 高利宁,王强.水利工程施工中导流施工技术的应用研究[J].产品可靠性报告,2025(12):139-140.
- [2] 马超.明渠施工技术在农田水利工程建设中的应用[J].村委主任,2025(13):266-268.
- [3] 谢军.探析水利工程项目梯形明渠施工技术[J].产品可靠性报告,2025(06):133-134.
- [4] 李心雨.水利工程施工中导流施工技术的应用[J].科技与创新,2024(14):106-108.
- [5] 牟畅,何楚,福亚旭,等.导流明渠在水利工程中的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(03):149-151.

基于全过程管理的水利工程施工进度控制研究

刘磊

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230093)

摘要 水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,兼具民生保障、生态治理与区域经济发展多重价值,其施工进度控制直接关系到工程能否按期交付、成本管控与质量达标。传统水利工程施工进度管控多聚焦施工中期,忽视前期策划与后期收尾环节,易出现进度滞后、资源浪费、工序衔接不畅等问题。本文基于全过程管理理念,将水利工程施工进度控制划分为前期准备、施工实施、竣工收尾三个核心阶段,分析各阶段进度管控的核心要点与现存问题,针对性提出全过程进度控制优化策略,旨在构建全周期、闭环式进度管理体系,为提升水利工程施工进度管控效率提供参考,保障工程顺利推进,实现质量、进度、成本的协同优化。

关键词 全过程管理; 水利工程; 施工进度控制; 施工管理; 数字孪生技术

中图分类号: TV512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.032

0 引言

水利工程施工具有周期长、规模大、涉及专业多、受自然环境与地质条件影响显著等特点,进度管控难度远高于普通建筑工程。当前,部分水利工程仍采用分段式、碎片化的进度管理模式,前期规划不充分、中期管控不及时、后期收尾衔接混乱,导致工程延期现象频发,增加建设成本的同时也影响工程效益。全过程管理贯穿工程建设全周期,能够实现各阶段进度管控的无缝衔接,有效规避阶段性管理漏洞。本文立足于水利工程施工实际,结合全过程管理核心内涵,探究全周期进度控制的有效路径,为水利工程施工进度管理提供实践参考。

1 水利工程施工进度控制与全过程管理的核心内涵

1.1 水利工程施工进度控制的核心目标与特点

水利工程施工进度控制是通过科学规划、动态管控、协调统筹,确保工程各工序按计划推进,如期完成竣工验收并投入使用的管理过程。其核心目标不仅是保障工期达标,更要平衡进度、质量与成本三者关系,避免盲目赶工引发质量问题或过度管控导致效率低下。水利工程进度控制具备鲜明特点:一是受自然因素影响极大,汛期、降雨、地质条件等都会直接干扰施工节奏;二是涉及施工、监理、设计、勘察等多方主体,协同配合要求高;三是工序繁杂且专业性强,土方开挖、

混凝土浇筑、设备安装等工序衔接紧密,单一环节滞后易引发连锁反应。相较于其他工程,水利工程进度管控更具复杂性与不确定性,需建立全面、系统的管控机制。

1.2 全过程管理在水利工程施工进度控制中的应用价值

全过程管理打破传统分段管理的局限,将管理理念贯穿工程前期准备、施工建设、竣工收尾全周期,实现进度管控的全覆盖、无死角。在水利工程施工进度控制中应用全过程管理,首先能够强化前期规划的科学性,提前预判施工中的各类风险,优化施工方案与进度计划,从源头规避进度滞后风险;其次可实现施工过程的动态监控,及时发现进度偏差并快速调整,保障施工工序有序推进;最后能完善竣工收尾管理,加快验收流程,避免后期拖沓影响工程交付。同时,全过程管理可统筹各方资源与主体,打破信息壁垒,提升协同作业效率,让进度管控更具针对性与实效性,是解决水利工程施工进度管控难题的有效手段。

1.3 水利工程施工进度全过程管理的现存问题

当前,我国水利工程施工进度全过程管理仍存在诸多短板,制约了管控效能的充分发挥,这些问题贯穿工程全生命周期且呈现出差异化特征。在前期准备阶段,部分项目存在“重审批、轻筹备”的现象,忽视现场精准勘察与施工方案的充分论证,进度计划制

作者简介: 刘磊(1992-),男,本科,工程师,研究方向: 水利水电工程。

定过于粗放,未结合区域水文、地质、气候等实际条件进行动态优化,仅照搬同类工程模板,导致计划与实际施工严重脱节,后期频繁调整计划,直接延误施工进度^[1]。在施工实施阶段,动态管控机制不完善,多数项目仍采用传统人工采集进度数据的方式,数据采集不及时、不准确,难以实现对进度偏差的实时预警;同时,偏差分析流于形式,纠偏措施缺乏针对性与可操作性,且多方主体沟通协调机制不健全,出现问题时相互推诿扯皮,无法快速形成解决合力,进一步加剧进度滞后问题。在竣工收尾阶段,验收资料整理不规范、不完整,工序交接记录不清晰,收尾工作与前期施工、设计要求衔接不畅,加之部分管理人员存在“重主体、轻收尾”的认知偏差,对收尾工作投入不足,导致竣工验收周期大幅延长。此外,全过程管理体系不健全,缺乏标准化的管控流程与专业的管控团队,管理人员专业能力不足,对新型管控技术的应用不够熟练,进一步制约了进度管控效果的提升。

2 基于全过程管理的水利工程施工进度控制各阶段要点

2.1 前期准备阶段进度控制要点

前期准备是水利工程施工进度控制的基础,直接决定后续施工能否顺利开展,核心是做好科学规划与风险预判。首先,要全面开展现场勘察工作,详细调研工程所在地的地质条件、气候特征、水文环境,收集完整的基础数据,为施工方案制定提供依据;同时组织设计、施工、监理等多方开展图纸会审与技术交底,优化施工设计方案,及时解决设计漏洞与技术难题,避免施工中因设计变更延误进度。其次,要制定科学完善的进度计划,采用关键路径法、网络计划技术等方法,将总工期目标分解为分项工程、分部工程的阶段性目标,明确各工序的开工、完工时间与衔接节点,制定里程碑计划,同时预留合理的工期弹性空间,应对自然环境等不可控因素。最后,要完成资源配置规划,提前落实施工设备、材料、人员的调配与进场计划,确保资源供应与施工进度匹配,做好招投标与合同签订工作,明确各方进度责任与违约条款,为进度管控提供合同保障。

2.2 施工实施阶段进度控制要点

施工实施阶段是进度控制的核心环节,需以动态监控、及时纠偏、协同管控为核心,保障施工按计划推进。首先,建立实时进度监控机制,采用现场巡查、信息化监测等方式,全面采集各工序施工进度数据,将实际进度与计划进度对比分析,精准识别进度偏差,

分析偏差产生的原因,判断其对总工期的影响程度。针对进度滞后问题,及时制定纠偏措施,通过优化施工工艺、增加施工人员与设备、调整作业时间等方式追赶进度,同时避免赶工影响施工质量。其次,要强化现场协同管理,建立多方沟通协调机制,定期召开进度推进会,通报施工进度、解决现场问题,明确各方职责分工,杜绝责任推诿;加强工序交接管理,严格执行交接验收流程,确保上一道工序合格后再进入下一道工序,减少返工现象。最后,要做好风险应急管控,针对汛期、地质灾害等突发情况,启动应急预案,及时调整施工计划,最大限度降低风险对进度的影响,保障施工连续推进^[2]。

2.3 竣工收尾阶段进度控制要点

竣工收尾阶段是全过程进度控制的最后一环,重点是加快收尾施工与验收流程,确保工程按期交付。首先,要梳理剩余施工任务,制定收尾施工进度计划,集中力量完成附属工程、设备调试、场地清理等收尾工作,避免遗留零星工程拖延工期;安排专人负责施工资料的整理与归档,按照验收标准规范整理施工记录、检测报告、变更签证等资料,确保资料完整、准确,满足竣工验收要求。其次,要组织多方开展预验收工作,提前排查工程质量问题与施工漏洞,及时整改完善,避免正式验收时因问题整改延误进度;加强与建设单位、验收部门的沟通对接,提前熟悉验收流程与标准,配合完成各项验收工作,提高验收效率。最后,要做好工程移交准备工作,明确移交流程与责任,确保验收合格后快速完成移交,让工程尽早投入使用,实现经济效益与社会效益^[3]。

3 水利工程施工全过程进度控制优化策略

3.1 构建适配水利工程特性的全过程进度管理体系

水利工程兼具公益性、专业性与季节性特征,其进度管控需突破传统“四方协作”的单一框架,构建全周期、多维度的标准化管理体系。首先,搭建“多层级、跨主体”的进度管控组织架构:在建设、施工、监理、设计单位基础上,纳入地方水利主管部门、第三方水文地质监测机构,形成“核心管控+外部监督”的组织体系;成立专职进度管理中心,下设计划编制、动态监控、协调纠偏三个专项小组,明确各小组职责与岗位权限,推行“项目经理总负责、岗位责任到人”的分级管理机制,确保进度管控指令层层落地。其次,制定“全流程、风险前置”的管控制度与流程:在前期规划阶段,融入水文、地质等自然因素的进度风险研判环节,结合历史水文数据制定弹性进度计划;施

工阶段细化进度数据采集、偏差分析、纠偏措施的标准化流程,明确偏差等级判定标准与处置时限;竣工收尾阶段增设进度复盘与资料归档规范,实现管控闭环。最后,创新“三位一体”的进度考核机制:将进度完成度与工程质量、安全生产指标绑定,建立“按期奖励、滞后问责、协同加分”的考核体系,对跨单位协作高效、进度与质量双达标的团队给予专项激励,对因人为因素导致进度严重滞后的责任主体实施精准问责,从制度层面激发各参与方的管控积极性,保障水利工程进度管控贴合工程实际、落地见效^[4]。

3.2 依托数字孪生技术打造智能化进度管控体系

信息化技术是破解水利工程进度管控“信息孤岛、动态滞后”难题的核心抓手,需以数字孪生为核心,构建全维度、智能化的管控体系。首先,融合BIM、GIS与水文气象大数据,搭建全过程进度管理数字孪生平台:依托BIM技术构建三维水工模型,结合GIS地理信息系统还原工程现场地形、水文特征,叠加历史水文气象数据,实现施工全过程的虚拟映射与动态模拟;通过物联网传感器在施工现场布置智能监测终端,实时采集混凝土浇筑、土方开挖、水工构件安装等工序进度数据,以及水位、降雨量等环境参数,借助大数据分析技术构建进度偏差智能预警模型,当进度偏差超过预设阈值时自动触发多级预警。其次,升级信息化协同与决策工具:引入AI进度预测算法,基于实时数据与历史工程案例,精准预测后续工序进度风险,为施工计划调整提供数据支撑;开发移动端进度管控APP,实现现场施工人员进度实时上报、设计单位图纸线上交底、监理单位远程进度审核,打破地域与部门壁垒;推广智能巡检机器人应用,对偏远水利施工现场的进度与设备状态进行自动化巡检,提升管控覆盖面。通过数字孪生技术的深度应用,推动水利工程进度管控从“人工统计、事后纠偏”向“智能感知、事前预警、精准调控”转型,大幅提升管控的精准性与效率^[5]。

3.3 聚焦人员能力与资源适配性的全周期管控

人员素养与资源配置是水利工程进度管控的核心支撑,需结合水利工程“施工环境复杂、人员结构多元、资源需求特殊”的特点,实现人员能力与资源配置的精细化、动态化管理。一方面,构建“本土化+专业化”的人员培养体系:针对水利工程基层施工人员多为本地务工群体的特征,编制本土化实操培训教材,结合本地水利工程案例开展进度管控、信息化操作、应急处置等实操培训;引入VR沉浸式培训模式,模拟

水文突变、设备故障等场景下的进度应急处置流程,提升人员应急能力;推行进度管控持证上岗制度,将信息化操作、进度计划编制等能力纳入考核,考核合格后方可上岗,从源头减少人为因素导致的进度滞后。另一方面,实施“全周期、智能化”的资源统筹管理:结合水利工程季节性施工特点,建立区域化资源储备库,提前储备砂石料、水工预制构件、防汛物资等关键资源;引入动态资源调度算法,基于进度计划与实时资源消耗数据,自动优化设备、材料、资金的投入比例,重点保障关键水工工序的资源供应;与供应商、设备租赁方签订“弹性供应协议”,建立应急资源调配机制,应对突发资源短缺问题;同时,建立资源使用绩效评价体系,对资源消耗效率、供应响应速度进行量化考核,推动资源配置与进度管控深度融合,为水利工程施工全过程进度目标的实现提供坚实的保障。

4 结束语

水利工程施工进度控制是一项系统性、全周期的工作,全过程管理能够有效弥补传统分段管控的不足,实现前期、中期、后期进度管控的无缝衔接。本文通过分析水利工程施工进度控制的特点与全过程管理的应用价值,梳理现阶段进度管理存在的问题,明确了前期准备、施工实施、竣工收尾三阶段的进度控制要点,并从构建管理体系、引入信息化技术、强化人员与资源管理三个方面提出优化策略。实践表明,基于全过程管理的进度控制模式,能够有效预判风险、动态纠偏、统筹资源,减少工程延期现象,保障水利工程按期、保质完成。未来,在水利工程建设中,需进一步深化全过程管理理念,结合信息化技术与工程实际,持续优化进度管控策略,不断提升施工管理水平,推动水利工程行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 彭涛,宋培.大型水利工程项目档案全过程管理模式探讨[J].四川水利,2024,45(06):126-127,134.
- [2] 李欢.水利工程造价全过程控制与管理分析[J].大众标准化,2022(11):75-77.
- [3] 孙庆艳.水利工程危险源管理问题及全过程安全管理措施[J].黑龙江水利科技,2020,48(12):149-151.
- [4] 刘辉.水利工程合同全过程管理探讨[J].造纸装备及材料,2020,49(04):89-90.
- [5] 郑晓丹.水利工程合同标准化管理的全过程管理分析[J].大众标准化,2023(07):63-65.

道路桥梁施工材料质量管控的常见问题与对策

方 磊

(黄山新洲建设集团有限公司, 安徽 黄山 245000)

摘 要 随着我国基础设施建设的快速发展,道路桥梁工程的质量安全愈发受到社会关注。施工材料作为工程实体的物质基础,其质量直接决定了道路桥梁的安全性、耐久性与使用寿命。然而,在实际施工过程中,材料质量管控仍面临诸多挑战,如源头控制不严、检测环节流于形式、存储管理不规范、监管体系不完善等。本文系统分析了道路桥梁施工材料质量管控的常见问题,并从健全管理体系、强化源头控制、规范检测流程、提升信息化监管水平及加强人员培训等方面提出针对性对策,旨在为提升工程质量、推动行业高质量发展提供参考。

关键词 道路桥梁; 施工材料; 材料检测; 全链条材料质量管理体系; 信息化管理

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.033

0 引言

道路桥梁工程是国家重要的基础设施,其建设质量直接关系到国民经济发展和社会公共安全。在工程建设领域,材料费用通常占工程总造价的 60%~70%,更重要的是,材料的性能与质量是决定工程结构安全、耐久性和使用功能的根本性因素^[1]。近年来,尽管我国在工程建设质量管理方面取得了显著成效,但由于施工周期紧、成本压力大、市场环境复杂等因素,因材料质量问题引发的结构裂缝、不均匀沉降、耐久性不足甚至桥梁垮塌等事故仍时有发生^[2]。因此,深入剖析道路桥梁施工材料质量管控中存在的常见问题,并探索科学有效的管控对策,对于提升工程质量水平、延长工程使用寿命、保障人民群众生命财产安全具有重要的现实意义和长远战略价值。本文基于当前道路桥梁工程材料质量管控的实际需求,结合行业发展现状,从问题分析与对策研究两个维度展开探讨,以期完善材料质量管控体系、推动道路桥梁工程建设高质量发展提供系统性的解决方案。

1 道路桥梁施工材料质量管控的常见问题

1.1 材料采购源头控制不严

在材料采购环节,部分施工单位为追求利润最大化,往往将价格作为选择供应商的首要甚至唯一标准,忽视了供应商的生产能力、资质信誉及质量保证体系

的考察。一些不具备生产资质的小厂、家庭作坊通过低价竞标进入供应链,其提供的钢筋、水泥、沥青、外加剂等关键材料质量波动大,甚至存在以次充好、偷工减料的现象。此外,采购合同中对材料技术指标、验收标准、违约责任等关键条款约定不明,导致后续质量纠纷时缺乏有效的合约约束力。部分采购人员专业素养不足,对材料的性能参数、行业标准及市场行情了解不深入,难以准确识别供应商提供的材料质量证明文件的真伪和有效性,甚至在供应商的不当引导下采购了不符合工程设计要求的材料^[3]。同时,对供应商的实地考察流于表面,未能深入生产线、实验室了解其质量控制流程和技术实力,使得一些管理混乱、质量控制能力薄弱的供应商得以蒙混过关,为后续材料质量问题埋下隐患。

1.2 材料进场验收流于形式

材料进场验收作为工程项目质量管控体系中的首要防线,在实际操作过程中却屡屡出现漏洞,未能有效发挥其应有的把关作用。究其原因,主要在于验收执行环节存在双重疏失。首先,从现场验收人员角度来看,部分人员缺乏足够的责任意识与专业素养,他们在验收时往往只进行表面化的检查,如简单地清点材料数量、核对规格型号以及观察外观是否完好,而对于至关重要的质量证明文件(产品合格证、出厂检验报告、材质单等)却审查不严,流于形式。更有甚者,

作者简介: 方磊(1990-),男,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁工程施工管理。

出于赶工期或图方便,默许甚至纵容“先投入使用,后补办检验手续”这种明显违反规定的操作,使得不合格材料得以蒙混过关,直接进入施工环节^[4]。其次,在材料检测这一后续关键环节中,同样暴露出诸多混乱与不规范的现象。在取样阶段,问题尤为突出:取样缺乏代表性,负责取样的人员未能严格按照技术规范的要求进行随机、多点取样,导致样本无法真实反映整批材料的质量状况。

1.3 材料存储与保管不当

道路桥梁施工涉及大量不同类型的材料,其对存储环境、堆放方式、防护措施均有严格要求。然而,施工现场材料存储管理往往较为粗放。例如:钢筋露天堆放且未采取有效的防潮、防锈措施,导致锈蚀严重,影响握裹力和力学性能;水泥仓库防雨、防潮设施不足,导致水泥受潮结块,活性下降;外加剂未按品种分类存放,且未注意保质期管理,造成混淆或失效;沥青及防水材料存储温度控制不当,导致材料老化或性能改变。这些因存储不当造成的材料性能劣化,若在施工中未被发现,将直接带入工程实体。此外,部分施工现场材料堆放缺乏科学规划,不同类型、规格的材料随意混杂堆放,不仅难以准确清点数量,还可能因相互污染影响材料质量。

1.4 材料使用过程管控缺失

在材料使用环节,现场管理粗放的问题同样突出。一是材料领用制度不健全,未严格执行“先进先出”原则,导致部分材料超期使用。二是不同批次、不同来源的材料混用现象时有发生,特别是混凝土拌合中,若水泥、外加剂等批次差异未得到有效识别和控制,极易造成混凝土性能波动。三是材料使用台账管理混乱,材料的进场、检验、入库、出库、使用部位等信息记录不全或不准确,一旦发生质量问题,无法进行有效追溯,难以查明原因和界定责任。四是施工过程中材料计量精度不足,如砂石骨料的称量偏差超出规范允许范围,或外加剂掺量控制不准确,直接影响混凝土、砂浆等混合料的配合比稳定性,导致强度、耐久性等关键性能指标不达标。五是对材料使用过程中的质量检查不到位,如钢筋绑扎时未及时发现局部钢筋间距过大、保护层厚度不足等问题,或沥青混合料摊铺时未严格控制温度和压实度,使得材料性能在施工环节未能得到有效发挥,进而埋下工程质量隐患。

1.5 监管体系不完善

从宏观管理层面看,材料质量监管存在多头管理、权责不清的现象。建设单位往往更关注工期和投资控

制,对材料质量管控的投入和监督不足;监理单位因受制于业主或人员配置不足,对材料质量的旁站、巡视和平行检验未能完全到位;施工单位质量保证体系运行不畅,内部自控形同虚设。此外,市场监管力度不够,对违规使用不合格材料的行为惩处偏软,违法成本较低,未能形成有效的威慑力。从技术层面分析,现有监管手段相对滞后,过度依赖人工抽检和经验判断,缺乏智能化、信息化的监管工具。例如:对材料进场后的动态追踪、使用过程中的实时监测等环节缺乏有效技术支撑,导致质量问题难以及时发现。同时,行业内尚未形成统一的材料质量监管数据平台,各参与方之间信息壁垒严重,质量数据无法共享互通,使得监管部门难以全面掌握材料质量的整体状况,监管效率低下。部分地区还存在地方保护主义,对本地材料生产企业的质量问题处理不够严格,甚至存在“睁一只眼闭一只眼”的情况,进一步削弱了监管的公正性和权威性。

2 道路桥梁施工材料质量控制对策

2.1 建立健全全链条材料质量管理体系

构建覆盖材料“采购、运输、验收、检测、存储、使用、追溯”全生命周期的质量管理体系是根本之策。首先,应明确建设单位、施工单位、监理单位及检测机构等各方主体在材料质量管控中的具体职责,形成权责清晰、协同联动的工作机制。建设单位应将材料质量管控要求明确写入合同文件,并定期组织专项检查;施工单位应建立并有效运行内部材料质量保证体系,落实项目经理负责制;监理单位应严格履行独立第三方监督职责,对关键材料实行全过程旁站监理^[5]。同时,应推行质量责任终身制,将材料质量责任落实到具体岗位和人员,增强全员质量意识。

2.2 严格供应商准入与动态管理

从源头上杜绝不合格材料流入工地,关键在于建立严格的供应商准入与评价机制。施工单位应组建由技术、物资、质检等部门组成的评审小组,对供应商的企业资质、生产能力、工艺水平、质量体系、信誉状况进行全方位考察,择优纳入合格供应商名录。对于钢筋、水泥、支座、锚具等关键材料,应优先选择行业内信誉良好、质量稳定的知名品牌。同时,实施动态管理,定期对供应商供货质量、售后服务等进行评价,对出现质量问题的供应商及时淘汰。采购合同中必须明确材料质量标准、验收程序、不合格品的处理方式以及相应的经济赔偿责任,以合同手段强化源头约束。

2.3 规范材料进场验收与检测

必须严格执行材料进场验收程序,把好入口关。所有进场材料均需查验质量证明文件(包括出厂合格证、质量检验报告等),并进行外观质量检查,核对规格型号、数量。在此基础上,必须严格按照国家现行标准及设计要求进行抽样送检。重点做好以下几方面:一是确保取样的代表性,由监理工程师见证,按照规范规定的批量和取样方法在现场随机抽取,并实施盲样管理。二是选择具有相应资质且信誉良好的第三方检测机构,杜绝检测机构与施工单位之间的利益关联。三是推行检测数据实时上传制度,利用信息化手段防止数据篡改。对于检测不合格的材料,必须立即清退出场,并建立不合格材料处理台账,留存影像资料,确保处理过程可追溯。

2.4 实施标准化存储管理

施工现场应按照材料类别和性能要求,规划和建设标准化的材料存储场地及设施。具体而言:钢筋存放应设置高于地面的枕木或混凝土墩台,并覆盖防水布,防止受潮锈蚀;水泥必须存入专用库房,做到防潮、防雨、通风,并严格遵循“先进先出”原则,控制存储时间;外加剂应按品种、标号分区存放,设置明显标识,并注意有效期管理;沥青、防水卷材等应按照产品说明书要求,严格控制存储温度和环境^[6]。同时,建立材料存储巡查制度,定期检查存储条件是否达标、材料状态是否正常,发现问题及时处理。通过规范化的存储管理,最大限度地减少因环境因素导致的材料性能衰减。

2.5 提升信息化管理水平

运用现代信息技术提升材料质量管控的精细化水平是行业发展的必然趋势。应大力推广和应用建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)、射频识别(RFID)、二维码等技术,建立覆盖材料全生命周期的数字化管理平台。为每一批次的进场材料赋予唯一身份标识,通过扫码或射频识别,实时记录并关联其供应商信息、合格证、检测报告、入库时间、存储位置、出库流向、使用部位等全流程信息。通过该平台,管理者可以随时掌握材料的质量状态和动态流向,实现从源头到终端的全程可追溯。一旦发生质量波动或事故,能够快速定位问题材料的批次、范围和影响部位,为应急处置和责任认定提供精准支撑。同时,监管部门也可通过平台进行远程监督,提高监管效能。

2.6 加强人员培训与责任落实

材料质量管控工作的有效落实,其根基最终在于人的严格执行与责任到位。施工企业必须将对材料管

理人员、专职质检人员、仓库保管员以及一线施工作业人员的系统性专业技能培训 and 职业道德素养教育置于至关重要的位置。培训内容应当全面覆盖国家及行业相关的材料技术标准、详细的验收规程与规范、科学的检测方法与操作流程、各类材料的储存条件与保管要求,以及《建筑法》《建设工程质量管理条例》等相关的法律法规知识,确保相关人员不仅知其然,更知其所以然,从而真正具备胜任各自岗位所必需的专业技术能力和职业判断力。与此同时,企业必须将材料质量管理的链条延伸至合作的各分包单位和劳务作业队伍,通过合同约束、技术交底、过程监督等多种方式,将企业对材料质量的控制标准与管理要求清晰、准确、无衰减地层层传递和落实到位。

3 结束语

道路桥梁施工材料质量管控是一项系统性、长期性的工作,贯穿于工程建设的全过程。当前,材料质量管控面临的采购源头失控、验收检测不严、存储保管不当、使用管理粗放、监管体系不完善等问题,是制约工程质量提升的主要瓶颈。为解决这些问题,需要从制度建设、流程规范、技术应用、人员管理等多维度综合施策。具体而言,应通过建立健全全链条管理体系、严格供应商准入、规范进场检测程序、实施标准化存储、构建信息化追溯平台以及强化责任落实等措施,构建起一道严密、高效的材料质量管控防线。唯有将材料质量管控真正落到实处,才能为打造优质耐久、安全可靠的道路桥梁工程奠定坚实的物质基础,推动交通基础设施建设从“规模扩张”向“质量效益”的根本性转变,实现行业的高质量可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘志伟.交通工程材料质量检测重要性及要点分析[J].建材与装饰,2023,19(15):36-38.
- [2] 张强.道路桥梁工程材料质量检测重要性及要点分析[J].安徽建筑,2024,31(03):183-184.
- [3] 陈泽磊.道路桥梁工程材料质量检测重要性及检测要点分析[J].模型世界,2022(12):151-153.
- [4] 张弘.道路桥梁工程材料质量检测的重要性及要点分析[J].汽车博览,2023(07):122-124.
- [5] 王亚玲.道路桥梁工程材料质量检测重要性及检测要点[J].人民交通,2021(22):40-41.
- [6] 马也.道路桥梁工程材料质量检测的重要性及检测要点[J].汽车博览,2021(25):326-327.

装饰装修工程进度控制与工期优化策略研究

张德习

(安徽省安泰建筑装饰工程有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 装饰装修工程工期易受多方因素干扰, 工期延误问题频发, 严重影响工程效益与交付质量。本文结合装饰装修工程施工实际, 系统分析施工人员管理、材料设备、设计沟通及外部环境四大类工期影响因素, 明确各因素的具体影响路径与表现形式。针对各类问题, 从进度计划编制、施工过程管控、资源配置优化、沟通机制完善四个维度制定进度控制策略, 同时从工序优化、技术创新、风险应急三个方面提出工期优化路径, 以期装饰装修工程高效推进、缩短工期、提升管控水平提供参考, 助力解决工程工期管控中的各类难题。

关键词 装饰装修工程; 进度控制; 工期优化; 施工管理; 装配式施工

中图分类号: TU722

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.034

0 引言

当前, 建筑装饰行业朝着精细化、绿色化与智能化方向发展, 项目对施工周期、交付品质与综合效益的要求持续提升。装饰装修工程工序繁杂、参与主体多元, 易受材料供应、设计变更、现场条件等多重因素影响, 工期管控难度不断加大。合理开展进度控制与工期优化, 既是保障项目按期交付的关键, 也是提升企业市场竞争力的重要举措。立足于行业新形势, 深入剖析工期延误成因, 构建科学可行的进度管控体系与工期优化路径, 对保障施工连续高效推进、减少资源浪费、实现项目提质增效具有现实意义, 也为装饰装修工程规范化、高效化实施提供实践支撑。

1 装饰装修工程工期影响因素分析

1.1 施工人员管理因素

施工方的人员管理能力是影响工期的核心内生因素, 直接决定施工效率, 也是工期管控中最具可控性却最易出现疏漏的环节。施工人员的专业素养直接关联施工工序的推进效率, 部分装修施工人员缺乏系统技能培训, 对新型装修工艺、材料特性掌握不足, 易出现操作失误, 不仅影响施工质量, 更需返工整改而延误工期; 同时行业内施工人员流动性大, 人员频繁更替会导致工序衔接出现断层, 新进场人员需重新熟悉施工要求与现场环境, 进一步影响施工进度。

1.2 材料与设备因素

材料和设备的供应速度、质量、是否适配设计, 都会直接影响施工能不能连续进行, 是导致工期延误

最主要的外部原因, 这类影响会贯穿整个施工过程, 却往往容易被忽略, 装修材料的采购环节直接决定施工能不能按时开始, 不少施工方没有制定完善的采购计划, 对建材市场的供货周期、运输时长判断不准, 结果造成材料采购推迟, 没办法按时运到工地, 直接让施工停了下来; 还有部分材料运到现场后, 检验发现质量不达标, 不符合装修设计标准和施工要求, 需要重新采购或是退换, 不仅增加了时间消耗, 还会打断原本的施工节奏, 引发后续工序接连延误。装修材料和设计要求能不能匹配同样重要, 一些施工方采购前没有仔细核对材料规格、型号、花色和设计方案是不是一致, 导致到场的材料无法直接使用, 重新采购或是调整设计都会影响施工进度。施工设备作为施工过程的核心支撑, 配置不足会导致关键工序无法同步推进, 部分施工方为控制成本未及时更新老化设备, 设备维护保养不到位易引发故障停机, 直接造成施工中断, 且故障排查与维修过程会占用大量有效施工时间。

1.3 设计与沟通因素

频繁的设计变更、沟通不顺畅会打乱原有施工安排, 抬高工期成本, 是项目进度管控的一大难点, 也是造成工期延误的常见因素。不少设计方案在前期调研不够充分, 没有结合装修现场的实际条件、施工工艺的可操作性以及业主的核心需求做完善调整, 使得施工过程中不断出现设计变更^[1]。每一次变更都要让已经完成的工序重新施工、还没开始的工序调整安排, 既浪费了人力和材料, 还会完全打乱原本的施工计划, 最终造成工期延误。另外, 设计方、施工方和业主三方

作者简介: 张德习 (1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 装饰装修施工。

的沟通效率直接影响施工进度,沟通不及时就会产生信息传递误差:设计方没有及时向施工方说明设计细节和主要要求,施工方没有及时反馈现场施工和设计不符的问题,业主也没有及时明确自己的需求,这些问题都会造成施工出错,需要返工整改,进一步耽误工期。

1.4 外部环境因素

政策、施工环境、现场实际条件等外部因素都无法人为控制,容易导致工期延长。这类情况通常都是突然发生,很难提前预测并有效规避其对工期的影响。施工现场的基础条件直接关系到施工的顺利开展,部分工地存在水电供应不稳定、场地不平整、临时设施配备不全等问题,施工单位必须先投入时间和精力整改完善基础条件,方可正式动工,这就间接导致整体工期被拉长。环保、安全等方面的政策要求越来越严格,装修施工如果产生的噪声、粉尘等污染物超出环保标准,就会被要求停工,只有整改达标才能恢复施工;安全检查发现施工流程不满足安全规范,也会被要求停工整改,这类停工都会直接占用施工时间,最终造成工期延误。极端天气、周边居民投诉这类突发状况,同样会打乱施工节奏:暴雨、台风、严寒这类极端天气无法进行户外装修作业,还会影响材料运输和现场施工安全,施工产生的噪声、粉尘会影响周边居民日常生活,引发投诉后也可能导致施工暂停,这些突发情况都会导致工期延长,给工期管控增加更多不确定性。

2 装饰装修工程进度控制核心策略

2.1 科学编制进度计划

以实际施工条件为基础,编制科学、可行的进度计划,为进度控制提供明确依据,是避免工期混乱、保障施工有序推进的前提。进度计划的编制需立足于工程实际,结合工程规模、装修工艺要求、施工资源储备等核心条件,合理划分施工工序与关键节点,明确各工序的施工内容、施工标准与施工时长,确保工序划分贴合施工实际,无冗余或遗漏环节。明确各工序的起止时间与衔接关系,梳理工序之间的逻辑关联,避免出现工序脱节、交叉冲突等问题,确保前一道工序完成后,后一道工序能够及时衔接,提升施工连续性。预留合理的弹性工期,充分考虑施工过程中可能出现的突发情况,如材料延迟、设备故障、极端天气等,弹性工期的设置需科学合理,既不能因过长而导致资源浪费,也不能因过短而无法应对突发情况。

2.2 强化施工过程管控

对施工现场全流程加强管控,规范施工操作,保障进度计划按要求落地,是进度控制的主要内容,直

接影响进度计划能不能有效推进。要建立良好的现场进度巡查制度,安排专业管理人员定期对施工现场做全面检查,重点核查各工序的施工进度、施工质量和施工安全情况,及时发现施工过程中出现的进度滞后、操作不规范等问题,第一时间协调处理,防止小问题累积变成大隐患,保证各工序能按照进度计划推进^[2]。规范工序验收流程,明确每道工序的验收标准、验收流程和验收责任人,任何一道工序完工后,都要经过严格检查,确认合格才能进入下一道工序,既可以避免质量不合格造成返工耽误工期,也能减少后续工序因为前期质量问题埋下的工期隐患。

2.3 优化资源配置管理

合理调配人力、材料、设备等各类资源,提高资源利用效率,保证施工能够连续推进,是进度控制工作顺利进行的重要基础。人力资源配置要贴合项目实际施工需求,组建专业施工队伍,筛选出装修经验丰富、专业技能过硬的施工人员,还要加强人员培训和日常管理,定期组织工艺技能、安全规范等内容的培训,提高施工人员的专业素养和操作性,同时建立合理的人员管理制度,稳定施工队伍,降低人员流动性,避免人员更替造成工期延误。材料资源管理要提前做好规划,建立完备的材料采购和库存管理制度,结合施工进度计划确定材料采购的时间、数量、规格以及质量要求,提前对接可靠的供应商,保证材料能够及时供应,同时加强库存管理,合理控制材料库存量,避免出现材料积压浪费或者供应短缺的情况,还要做好材料进场后的检验工作,确保材料质量符合标准要求,为连续施工提供支撑^[3]。设备资源配置要做到科学合理,根据施工工序的实际需求调配施工设备,保证设备配置数量充足、型号匹配;建立设备维护检修制度,定期对设备做保养维护,及时排查设备故障,保证设备能够正常运行,避免设备故障造成施工中断。

2.4 完善沟通协调机制

要保障进度控制顺利推进,同时解决多方参与施工产生的矛盾,需要搭建多方协同沟通机制,减少信息传递偏差,化解施工过程中的冲突。建立固定的多方协调会议制度,敲定会议时间、参会人员与讨论内容,组织设计方、施工方、业主等所有参与方定期开协调会,同步当前施工进度、整理施工中已经出现的问题,协商解决分歧,保证所有参与方对施工进度、施工要求形成统一认知,避免信息不对称造成施工失误,耽误工期。要建立规范的设计变更审批流程,把设计变更的申请、审核、批准等各个环节划分清楚,所有设

计变更都必须经过严格审批,充分评估变更会给工期、成本带来哪些影响,制定对应的调整方案,避免无序变更打乱原有施工计划,减少设计变更引发的工期延误。明确每个参与方的责任划分,梳理清楚施工过程中各参与方的职责与义务,避免出现责任交叉或是责任空白的情况,杜绝互相推诿的问题,保证施工过程中出现问题能快速找到责任主体并解决问题,确保施工有序推进。

3 装饰装修工程工期优化路径

3.1 工序优化与流程再造

通过优化施工工序、再造施工流程,缩短关键工序工期,提升整体施工效率,是工期优化的核心路径,能够在不增加额外资源投入的前提下,实现工期缩短。关键工序直接决定整体工期长度,需精准识别工程关键工序,明确关键工序的施工时长与资源需求,优先保障关键工序的人力、材料、设备等资源供应。优化关键工序的施工工艺,减少不必要的操作环节,提升关键工序施工效率,进而缩短关键工序工期,带动整体工期优化^[4]。非关键工序的优化同样重要,结合施工流程逻辑,优化非关键工序的施工顺序,合理调整非关键工序的施工时长,实现工序平行作业、交叉作业的合理衔接,避免非关键工序占用关键工序的施工时间,充分利用施工间隙,提升整体施工效率。简化冗余施工流程,梳理施工过程中不必要的审批、操作环节,删除冗余流程,优化流程衔接,减少流程消耗的时间,让施工流程更加简洁高效,进一步提升施工效率,实现工期优化目标。

3.2 技术优化与创新应用

引入先进施工技术和信息化手段,打破传统施工的限制,优化工期安排,是提高装修工程施工效率、压缩工期的重要保障,也是行业发展的必然方向。传统现场装修模式工序复杂、花费时间多,采用模块化、装配式装修技术,能将装修构件提前在工厂预制完成,施工现场只需完成组装作业,大幅减少现场施工时长,降低现场作业难度,还能提高施工质量,避免现场操作失误带来的返工延误,有效缩短总工期。引入BIM技术后,可利用它的可视化、可模拟特点,提前对完整施工流程进行模拟,精准排查施工中可能出现的工序冲突、空间布局不合理等问题,提前调整施工方案,避开施工冲突,减少施工过程中的调整和返工,节省施工时间^[5]。使用信息化工具,搭建进度管控的信息化平台,做到对施工进度的实时监控和动态调整,管理人员能随时掌握各道工序的施工进度,及时发现

进度滞后的问题并快速调整,还能做到各参与方之间的信息同步共享,减少信息传递的误差,提高沟通效率,间接缩短工期。

3.3 应急处置与风险预判

搭建风险预判与应急处置体系,主动避开工期风险,降低突发状况对施工进度的干扰,是保障工期稳定、做到工期优化的重要条件,可以有效减少不确定因素给工期带来的负面影响。提前整理装修工程施工阶段可能出现的各类影响工期的因素,覆盖人员、材料、设备、外部环境等多个方面,明确各类风险的表现形式、影响范围与发生可能性,健全风险预判机制,定期排查、评估各类风险,提前制定对应解决方案,主动避开风险,减少风险对工期的干扰,面对材料短缺、人员流失、设备故障这类突发状况,需要搭建快速响应机制,明确应急处理流程、责任人和应对办法,当突发情况出现后,可以快速启动应急方案,及时调整施工安排、调配可用资源,最大程度降低突发状况对工期的影响,防止工期出现大幅延误。

4 结束语

装饰装修工程进度控制与工期优化是一项系统性、综合性工作,需统筹兼顾施工全流程、各参与方及各类影响因素,无法通过单一措施实现管控目标。本文通过梳理工程工期的核心影响因素,结合实际施工需求构建的进度控制策略与工期优化路径,贴合行业施工现状,具有较强的实操性,能够有效规避工期延误风险,提升施工效率。工期管控工作需动态调整、持续完善,结合工程具体规模、工艺要求灵活适配相关策略,同时重视技术创新与风险预判的作用。未来可进一步结合具体工程案例深化研究,不断优化管控方法,推动装饰装修行业实现高效、有序、高质量发展。

参考文献:

- [1] 石磊.建筑装修装饰工程施工质量控制路径探究[J].中国建筑装饰装修,2025(13):145-147.
- [2] 秦家军.建筑工程装饰装修质量通病分析及预防[J].散装水泥,2025(03):145-147,150.
- [3] 张栋,刘融融.装饰装修工程中绿色节能技术的集成应用[J].中华民居,2025,18(06):96-98.
- [4] 刘少将.房屋建筑装饰装修工程施工质量控制与管理[J].中国品牌与防伪,2025(06):102-104.
- [5] 贾先萌.建筑装饰装修施工工艺及质量控制研究[J].工程技术研究,2025,10(09):159-161.

精装修住宅地面铺装施工工艺及质量通病防治

田光清

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 231200)

摘要 随着房地产行业的高质量发展, 精装修住宅逐渐成为市场主流, 地面铺装作为精装修工程的核心分项, 其施工质量直接影响住宅的使用功能、美观度及耐久性。本文结合当前精装修住宅地面铺装的施工现状, 系统阐述了不同类型地面铺装的施工工艺要点, 深入分析了铺装过程中常见的质量通病及成因, 并提出针对性的防治措施, 结合工程实践优化施工流程, 旨在为精装修住宅地面铺装施工质量控制提供参考, 助力提升精装修住宅整体施工水平, 满足居民对居住品质的更高需求。

关键词 精装修住宅; 地面铺装; 地面空鼓; 地面开裂; 地面平整度

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.035

0 引言

近年来, 我国精装修住宅行业快速发展, 消费者对居住环境的品质要求不断提升, 地面铺装作为住宅空间的“脸面”, 不仅承担着承载荷载、划分空间的基础功能, 更直接影响居住的舒适度与美观性。当前, 精装修住宅地面铺装类型日益丰富, 但施工过程中受材料、工艺、人员等多方面因素影响, 易出现空鼓、开裂、平整度不达标等质量通病, 严重影响住宅的使用体验与使用寿命。因此, 深入研究精装修住宅地面铺装施工工艺, 精准识别质量通病并采取有效防治措施, 对规范施工流程、提升施工质量、推动精装修住宅行业良性发展具有重要意义。

1 精装修住宅地面铺装施工前期准备

1.1 施工技术准备

施工技术准备是确保地面铺装施工顺利开展、保障施工质量的前提, 需贯穿施工全过程。首先, 施工单位应组织技术人员深入熟悉施工图纸、设计规范及相关标准, 明确地面铺装的材料类型、规格型号、铺装厚度及工艺要求, 重点核查图纸中地面标高、坡度、节点处理等细节, 结合住宅不同空间(客厅、卧室、卫生间等)的使用需求, 优化铺装方案, 避免后期出现设计与施工脱节的问题。其次, 开展技术交底工作, 由技术负责人向施工班组、作业人员详细讲解施工流程、工艺要点、质量标准及安全注意事项, 结合样板间施工案例, 明确各环节的操作规范, 确保每位作业人员都能熟练掌握施工技术。

1.2 材料准备与管控

材料质量是地面铺装质量的关键基础, 必须完全依照设计需要和规范条文来执行材料采购、检验以及存放, 选择供应商时应当找那些资质完整、口碑不错的单位, 优先采用达到国家环保要求、质量过关的材料, 明确材料规格、型号、性能以及验收标准, 签订采购合同, 把双方责任划分清楚, 禁止使用不达标材料。材料运到现场以后, 需要开展严格检验工作, 邀请监理单位、建设单位一起参加, 对材料外观、规格、性能等做抽样检测, 核对产品合格证、出厂检测报告等相关文件, 比如瓷砖要检测吸水率、耐磨性, 木地板要检测含水率、甲醛释放量, 水泥砂浆要检测强度等级等, 检测通过以后才能投入应用, 禁止不合格材料进入现场, 做好材料存放管理事务, 按照材料特性分开存放, 瓷砖、石材等容易碎裂的材料需要侧立摆放, 底部垫上木方, 采取防碰撞、防破损手段^[1]。

1.3 施工现场准备

施工现场的准备工作要围绕施工的便捷程度、安全状况以及质量的可控性来开展, 给地面铺装施工创造出比较好的基础, 清理施工现场, 把地面上的杂物、浮尘、油污以及松散的基层都清除掉, 对地面上凸起的地方加以打磨, 凹陷的地方进行填补, 让基层表面达到平整、结实、洁净的状态, 没有积水也没有裂缝, 对于那些有防水需求的空间(卫生间、厨房、阳台等), 需要先做完防水施工以及闭水试验, 闭水试验通过之后, 才能继续后面的铺装施工, 这样能够防止后期发

作者简介: 田光清(1989-), 男, 专科, 副高级工程师, 研究方向: 装饰装修工程施工。

生渗漏的情况。搭建临时施工设施,合理地划分出材料堆放区域、加工区域以及作业区域,设置醒目的分区标识,这样有助于施工现场保持整齐有序;铺设临时施工道路,保证材料运输过程顺畅,减少对施工现场造成的破坏,配备齐全施工所需要的机械设备以及工具,如切割机、打磨机、水平仪、橡皮锤等,对机械设备做调试和检修,确保它们能够正常运转,从而提高施工的效率^[2]。

2 精装修住宅地面铺装核心施工工艺

2.1 瓷砖地面铺装施工工艺

瓷砖地面因具有耐磨、易清洁、美观大方等特点,广泛应用于精装修住宅的客厅、卫生间、厨房等空间,其施工工艺需严格遵循规范要求,确保铺装质量。施工前,先对瓷砖进行预处理,将瓷砖放入清水中浸泡2小时~3小时,取出后晾干表面水分,避免瓷砖铺贴时因吸水过快导致水泥砂浆失水,影响黏结强度。同时,根据施工现场放线情况,进行瓷砖预排版,调整瓷砖的排列顺序,避免出现窄条瓷砖位于显眼位置,确保铺装美观,预排版完成后做好标记,便于后续铺贴。铺贴时,先在基层表面均匀涂刷一层素水泥浆,增强基层与水泥砂浆的黏结力,然后铺设1:3干硬性水泥砂浆找平层,厚度控制在30 mm~40 mm,用刮杠刮平、木抹子拍实,确保找平层平整、坚实。

2.2 木地板地面铺装施工工艺

木地板地面具备脚感舒适、温馨自然等特点,是精装修住宅卧室、书房这类空间的常见铺装类型,其施工工艺对平整度、含水率控制提出较高要求,施工开始前,要对基层做再次清理与找平,保证基层表面平整、坚实、没有杂物,含水率控制在10%以内,如果基层含水率过高,需要进行干燥处理,防止后期木地板受潮变形,这有助于在基层表面铺设防潮层,采用防水卷材或防潮垫,防潮层搭接宽度不小于100 mm,搭接处用胶带做密封,保证防潮效果,避免地面潮气渗透到木地板里,造成木地板变形、发霉^[3]。针对实木地板,在基层上铺设木龙骨,木龙骨选择干燥、无腐朽、无虫蛀的木材,规格符合设计要求,木龙骨间距控制在300 mm~400 mm,铺设时用膨胀螺栓固定在基层上,确保木龙骨平整、牢固,相邻木龙骨的高度差不超过2 mm,木龙骨铺设完成后,在木龙骨表面铺设一层毛地板,毛地板与木龙骨固定牢固,缝隙控制在3 mm~5 mm,用来分散荷载、保护木地板。接下来,进行木地板铺贴,铺贴时按照木地板的纹理方向,从房间一端向另一端铺设,木地板之间采用企口拼接,

拼接紧密,缝隙控制在0.5 mm~1 mm,避免出现松动、起翘等情况。

2.3 石材地面铺装施工工艺

石材铺就的地面带着质感细腻、美观大气、耐久性强等特点,经常被用在精装修住宅的客厅、玄关这类高端空间里,它的施工流程复杂,对施工精度也有着较高要求,施工开始之前,对石材做一番挑选和预处理,把表面有裂纹、缺棱掉角、色差太大的石材剔除出去,对石材表面加以打磨、抛光处理,让石材的美观度得到提升;还应该对石材做六面防护处理,涂上石材专用防护剂,避免石材吸水、泛碱、被污染,防护剂要涂得均匀,等到防护剂完全干透之后再开始铺贴,基层处理搞完以后,进行放线定位,弹出石材铺装的基准线、分仓线,依照石材规格做预排版,调整石材的排列位置,保证石材铺装整齐、美观,预排版结束之后做好标记。铺贴的时候,采用干挂法或者湿贴法施工,针对大面积石材铺装,优先选择干挂法,确保石材铺贴牢固,防止出现空鼓、脱落等问题,针对小面积石材铺装,可以选用湿贴法,先在基层表面涂上素水泥浆,铺设1:3干硬性水泥砂浆找平层,厚度控制在30 mm~50 mm,刮平、拍实之后,在找平层表面涂上一层石材专用黏结剂,把石材按照预排版标记铺到找平层上,用橡皮锤轻轻敲打石材表面,调整石材的位置,保证石材表面平整、缝隙均匀,缝隙宽度控制在1 mm~2 mm。

3 精装修住宅地面铺装质量通病及防治措施

3.1 地面空鼓质量通病及防治措施

地面空鼓是精装修住宅地面铺装最常见的质量通病之一,主要表现为用小锤敲击地面时,发出空响,空鼓面积过大时,会影响地面的承载能力,后期易出现开裂、脱落等问题。其成因主要包括:基层处理不彻底,表面存在浮尘、油污、松散基层,导致基层与找平层、铺装层黏结不牢固;水泥砂浆配合比不合理,干硬性水泥砂浆含水率过高或过低,黏结强度不足;铺装材料预处理不到位,瓷砖、石材等材料表面未清理干净或未进行湿润处理,影响黏结效果;在施工过程中,铺装层未压实,存在空隙,后期水分蒸发后形成空鼓^[4];养护不及时、不到位,导致铺装层与基层黏结不牢固。针对以上成因,采取以下防治措施:施工前,彻底清理基层,清除浮尘、油污、松散基层,对基层进行打磨、修补,确保基层平整、坚实、干净;严格控制水泥砂浆配合比,按照设计要求配制干硬性水泥砂浆,确保其含水率适中、黏结强度达标;对铺

装材料进行预处理, 瓷砖浸泡至无气泡后晾干, 石材清理干净后进行防护处理, 确保材料表面干净、无杂质; 在施工过程中, 加强铺装层的压实工作, 用橡皮锤轻敲铺装材料, 确保铺装层与基层、找平层紧密结合, 无空隙; 铺贴完成后, 及时进行养护, 养护时间符合规范要求, 养护期间禁止踩踏、堆放重物, 避免铺装层松动。

3.2 地面开裂质量通病及防治措施

地面出现开裂情况是精装修住宅地面铺装过程中常有的质量通病, 主要表现是地面产生纵向、横向或是不规则的裂缝, 不仅影响到地面整体美观, 还会让地面耐久性有所下降, 严重时候还可能干扰到住宅的正常使用功能。导致这个问题的原因主要有: 基层发生沉降或是开裂, 使得铺装层随之出现开裂; 水泥砂浆找平层在施工时质量把控不够好, 厚度不够均匀、压实做得不充分, 后期收缩带来裂缝, 铺装材料质量存在缺陷, 比如瓷砖、石材存在内部暗裂, 木地板含水率超出标准范围, 后期收缩、变形造成裂缝^[5]。在施工过程中, 铺装层与基层之间、铺装材料之间伸缩缝设置得不够合理, 温度出现变化时, 材料收缩、膨胀产生内部应力, 最后导致地面开裂, 养护工作没有及时跟上, 铺装层水分蒸发速度太快, 产生收缩裂缝。针对以上问题, 可以采取以下防治措施: 在施工开始之前, 对基层做一次全面检查, 如果基层存在沉降、开裂等情况, 需要先做修补、加固处理, 保证基层稳定可靠, 严格把控水泥砂浆找平层施工质量, 确保找平层厚度均匀、压实充分, 施工结束之后及时做好养护, 减少收缩裂缝的出现, 选择质量过关的铺装材料, 严格把好材料进场检验关, 避免使用质量有问题的材料, 合理布置伸缩缝, 根据铺装面积大小、材料类型以及环境温度情况, 在地面四周、墙角位置、不同材料交接处设置伸缩缝, 伸缩缝宽度控制在 5 mm~10 mm 之间, 填入弹性填缝材料, 缓解温度变化带来的应力影响, 加强施工过程中的养护工作, 控制铺装层水分蒸发速度, 避免阳光直接照射、高温烘烤, 确保铺装层均匀收缩, 减少开裂发生。

3.3 地面平整度不达标质量通病及防治措施

地面平整度未能达到标准是精装修住宅地面铺装中影响使用感受的一项常见质量问题, 具体表现为地面高度不平整, 用 2 m 靠尺进行检查的时候, 偏差超出了规范允许的范围, 这不仅会影响到地面的美观程度, 还会让家具摆放变得不稳当, 人行走时产生颠簸的感觉, 其原因主要包含: 基层处理不够平整, 存在

凸起、凹陷等状况, 没有进行彻底修补; 放线定位不够准确, 基准线、标高控制线设置偏差过大, 造成铺装层高低不平, 水泥砂浆找平层施工过程中, 没有进行精细找平, 刮杠刮平不彻底, 存在局部凸起、凹陷, 铺装材料本身厚度不一致, 规格偏差过大, 造成铺装后地面平整度不达标; 在施工过程中, 作业人员操作不规范, 铺装材料铺贴时没有进行精细调整, 造成表面平整度偏差过大。针对以上原因, 采取以下预防和处理方法: 施工之前, 对基层进行彻底处理, 对凸起部位进行打磨, 凹陷部位进行修补, 保证基层表面平整度符合规范要求, 借助精密仪器进行放线定位, 弹出准确的基准线、标高控制线, 放线完成后进行多次复核, 保证放线误差控制在规范允许范围内, 严格控制水泥砂浆找平层施工质量, 施工时用刮杠反复刮平, 木抹子拍实, 保证找平层表面平整、坚实, 平整度偏差控制在 2 mm 以内, 严格把控铺装材料的进场检验环节, 剔除厚度不均匀、规格偏差过大的材料, 保证材料质量符合要求, 加强施工过程中的质量控制, 作业人员铺贴时, 用水平仪实时检查铺装材料的平整度, 及时调整材料位置, 保证铺装后地面平整度达标。

4 结束语

精装修住宅地面铺装质量直接决定住宅使用功能、美观度及耐久性。施工前期准备是质量基础, 需做好技术、材料、现场三项准备; 瓷砖、木地板、石材铺装工艺各有侧重, 需严格把控规范; 空鼓、开裂、平整度不达标是主要通病, 需结合成因采取针对性防治措施。未来需优化施工工艺、引入新材料新技术, 加强人员培训, 推动铺装施工向规范化、精细化发展, 提升住宅品质。

参考文献:

- [1] 林添福. 住宅小区园林地面铺装的维护与管理策略[J]. 中国住宅设施, 2024(10):67-69.
- [2] 李炳琦, 龙海军, 王茜. 装配式住宅地面架空体系与墙面硅瓷一体板技术创新与应用研究[J]. 工程建设与设计, 2025(17):3-5.
- [3] 高志成. 现浇水磨石住宅地面施工工艺优化与质量控制[J]. 住宅与房地产, 2025(05):114-116.
- [4] 陈年鸿, 谢超, 陈艳猛, 等. 住宅精装修工程地面起砂及空鼓原因和处理工艺研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(06):169-171.
- [5] 景晓柯. 住宅工程中水泥基自流平地面施工技术研究[J]. 住宅与房地产, 2023(08):178-180.

长距离供热管道输送技术应用研究

徐晓彬

(国能哈尔滨热电有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要 在城镇化进程加快与“双碳”目标推进的背景下,长距离供热管道输送技术作为集中供热系统的支撑,对优化能源配置、降低能源浪费、推动供热行业低碳转型具有重要意义。本文围绕长距离供热管道输送技术的应用展开研究,分析技术应用中的要点;针对当前技术应用中存在的问题提出针对性的优化策略,以期为该技术的规范化应用、完善升级及集中供热行业高质量发展提供理论参考。

关键词 长距离供热管道;输送技术;管道设计;保温技术;水力调控技术

中图分类号: TU995.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.036

0 引言

在“双碳”目标背景下,城市供热系统向低碳化转型已成为当务之急。而长距离供热作为城市集中供热系统的重要组成部分,其技术水平影响供热系统的效率以及环保目标的实现。长距离供热管道输送技术的应用可以加快大型热源的集约化利用,将热量从能源富集区输送至热负荷集中区,破解区域热源分布不均与热负荷需求不平衡的矛盾。此外,该技术的完善和创新也能降低供热能耗以及污染物排放,助力实现供热行业可持续发展。研究长距离供热管道输送技术的应用要点、现存问题及优化路径,对于推动该技术的规范化应用、提升集中供热系统的整体效能、实现供热行业的高质量发展具有重要的理论价值和实践意义。

1 长距离供热管道输送技术应用关键点

1.1 管道设计要点

管道路由设计是设计工作的重中之重,应选择地形平坦、地质条件良好以及交通足够方便的区域,规避地质灾害高发区、地下管线密集区和文物保护区等,最大限度降低对城镇交通、居民生活造成的干扰。路由设计应尽可能缩短管线长度,减少转弯和交叉;考虑近远期结合,为后续管网改扩建预留一定的空间。对于穿越河流、铁路和公路等障碍物的路段来说要用正确的穿越手段,如顶管、定向钻、架空跨越等,保证管道安全和施工方便^[1]。

管道管径和壁厚设计要借助水力计算和强度计算确定。水力计算的重点是按照供热负荷、输送距离等

计算管道内的流量、流速及压力损失,保证介质在管道内的流动状态合理,水力损失控制在允许范围内。强度计算则围绕管道内的设计压力、介质温度,结合管道材质的力学性能来确定管道壁厚,保证管道可以承受相应压力和热应力,防止管道破裂。此外,管道设计还应注重热胀冷缩变形,设置补偿器,保证管道在温度变化中自由伸缩,降低热应力对管道造成的影响。

管道敷设方式通常分为直埋敷设、管沟敷设和架空敷设三种,要按照地质条件、环境要求和施工难度等因素进行选择。其中,直埋敷设是现阶段长距离供热管道最常用的敷设方法,占地少、施工快,适合地形平坦、地下水位较低的区域;管沟敷设分为通行管沟、半通行管沟和不通行管沟,方便进行管道检修工作,适合管线密集、地下水位较高区域;架空敷设适用于山区、地下管线复杂的区域,施工维护比较方便,但保温要求严格且会影响附近景观。

1.2 保温技术应用要点

保温材料要选择导热系数低、保温效果优秀以及耐腐蚀、环保无污染的材料。现阶段,长距离供热管道应用较多的保温材料有聚氨酯泡沫、岩棉等,在选择保温材料时要按照介质温度、管道敷设方式以及使用环境,确定材料规格和具体厚度,保证整体的保温效果符合设计要求。

保温结构的施工质量决定了保温效果,施工中必须按照设计要求实施操作,以保证各层结构紧密贴合。防腐层施工应保证管道表面清洁、干燥且涂层均匀,避免管道腐蚀;保温层施工要保证厚度均匀,拼接紧密,

作者简介: 徐晓彬(1973-),男,本科,工程师,研究方向:供热研究。

防止出现缝隙而造成热量散失；防潮层施工要保证密封性好，避免外界水分进入保温层；保护层施工需确保牢固，避免存在机械损伤^[2]。此外，在管道接头、阀门和补偿器等位置还要用专用的保温方法，确保薄弱环节的保温效果，防止热损失过大。

1.3 水力调控技术应用要点

在管道设计阶段，要借助详细的水力计算确定管道内的流量、压力损失和流速等参数，科学配置循环水泵以及中继泵站，保证介质可以顺利输送至不同用户端。在系统运行中要按照热负荷的变化，灵活调整循环水泵的转速及阀门开度，优化介质流量分配，达到水力平衡。输送距离过长的管道系统要设置中继泵站，通过加压增强介质压力，弥补水力损失，保证远端用户的供热质量。

水力平衡调控分为静态平衡和动态平衡两种方式。其中，静态平衡调控是在系统调试阶段展开，依托平衡阀、流量调节阀等设备调整各支路流量，保证用户端流量达到设计要求，以实现系统的静态水力平衡；动态平衡调控则在系统运行期间进行，监测介质的流量、压力和温度等参数，按照热负荷的变化调整调控设备的运行状态，保证系统在不同工况下都可以保持水力平衡。现阶段，智能化技术逐渐普及，动态平衡调控技术已得到大范围应用，借助智能调控系统可以对管道系统进行精准调控，提高供热质量和运行效率。

1.4 安全监测与防护技术应用要点

安全监测系统主要采集管道系统的运行参数，涉及介质温度、压力和流量，管道的振动、位移及设备运行状态等。监测设备包括温度传感器、压力传感器以及腐蚀传感器等，它们安装在管道的关键位置，如管道接头、中继泵站和换热器等，将监测数据传输到调度中心，为安全预警和故障处理带来数据支撑。此外，可采用光纤传感技术等监测技术对管道全程展开持续性监测，增强监测的准确性。

泄漏监测是安全监测的重点，长距离供热管道一旦泄漏，不仅会导致热量损失和能源浪费，还可能引发地面沉降、环境污染等次生灾害。泄漏监测技术分为直接监测和间接监测两种，直接监测通过泄漏检测传感器直接检测管道内介质的泄漏情况；间接监测通过监测管道附近的温湿度、压力等参数的变化，判断管道是否出现泄漏。当监测到泄漏信号时系统第一时间发出预警并定位泄漏位置，方便工作人员处理，最大限度降低损失^[3]。

2 长距离供热管道输送技术应用现存问题

2.1 管道热损失控制效果较差

虽然保温技术越来越健全，但在长距离供热管道输送中，热损失问题依旧突出，有些管道的热损失率超出设计要求，使能源浪费和运行成本上升。造成热损失控制效果低下的原因有三方面：一是保温材料的质量高低不一，一些保温材料的导热系数达不到设计要求，保温效果不合格；二是保温结构施工质量不当，存在保温层厚度不均、拼接缝隙等问题，加快热量从缝隙处散失；三是管道运行期间，保温层和保护层受到机械损伤、土壤沉降等因素的影响而破损、脱落，没有在第一时间修复，导致热损失增加。

2.2 水力失调问题突出

水力失调具体表现为管道内介质流量分配不均，一些用户端流量过大、温度过高，部分用户端流量过小、温度过低，影响供热质量。造成水力失调的原因主要包括：一是管道设计不合理，管径选择不当，导致管道阻力分布不均；二是调控设备配置不完善，平衡阀、流量调节阀等设备的精度不足，无法达到精准调控；三是热负荷变化频繁，而水力调控系统的响应速度较慢，无法第一时间调整介质流量分配，导致水力平衡被打破。

2.3 管道腐蚀与老化问题严重

管道内腐蚀是由供热介质的水质不佳引起，如果介质中含有大量氧气、二氧化碳和氯离子等有害物质，那么会导致管道内壁腐蚀、结垢，管道的强度和密封性下降并造成管道泄漏；管道外腐蚀是由土壤、空气等环境介质引起，土壤里面的水分、盐分和微生物等会直接损坏管道外壁的防腐层，导致管道外壁腐蚀，长期腐蚀会使管道壁厚减薄，管道破裂概率上升^[4]。

2.4 安全监测与应急处置能力不足

现阶段，一些长距离供热管道输送系统的安全监测体系并不健全，监测设备的覆盖率较低且监测精度较低，无法对管道展开全程实时监测。部分监测设备老化、故障，未能更换和维修，导致监测数据不准确，不能发现管道泄漏、腐蚀等隐患。此外，监测系统与调度系统的联动性不足，监测数据无法有效传输和分析，难以实现安全预警和快速处置。

3 长距离供热管道输送技术应用优化策略

3.1 完善保温技术，减少热损失

一是科学选择保温材料，选用导热系数低、保温效果好以及耐腐蚀的高质量保温材料，使其质量达到

设计要求,并围绕介质温度、敷设方式等因素确定保温材料的规格和厚度;二是规范保温结构施工,对施工过程做好质量管控,确保防腐层、保温层和保护层的施工质量,防止缝隙、破损,高度重视管道接头、阀门和补偿器等薄弱环节的保温处理,确保保温严密^[5];三是加强保温系统的日常维护,检查保温层和保护层的完整性,破损、脱落等问题第一时间修复,并对保温材料展开检测,对于老化、变质的保温材料快速更换,保证保温效果长期稳定。除此之外,还可推广应用新型保温技术和材料,如真空保温技术、复合保温材料等,最大限度增强保温功能,减少热损失;优化管道设计,缩短管道长度,降低热损失和水力损失。

3.2 完善水力调控体系,解决水力失调问题

一是优化管道设计,借助详细的水力计算来确定管道管径和路由,保证管道阻力分布均匀,减少水力失调的隐患;二是完善调控设备配置,选用精度高、响应速度快的平衡阀、流量调节阀等设备,加强调控的精准度,并且在各支路和用户端安装流量监测设备,持续性监测流量变化;三是建立智能化水力调控系统,整合监测数据和热负荷信息,应用智能算法实现对循环水泵转速、阀门开度的自动调节,响应热负荷变化,达到动态水力平衡。与此同时,还应对用户做好管理,严禁用户私自改装供热设施,对于违规改装的用户第一时间进行整改,维护系统的水力平衡。

3.3 加强腐蚀防护,延缓管道老化

一是控制供热介质水质,按照规定要求对介质进行处理,减少介质中的氧气、二氧化碳等有害物质含量,避免管道内腐蚀;二是加强管道防腐处理,采用优质的防腐涂层和阴极保护技术,完善管道外防腐层和保护层,提高管道的抗腐蚀能力,对于老旧管道,及时进行防腐修复和改造,提升防腐水平;三是建立定期检测制度,采用现代化检测技术,如超声波检测、腐蚀检测等对管道腐蚀情况及老化程度展开检测,第一时间发现腐蚀隐患并采取修复方法,防止腐蚀加剧。除此之外,科学控制管道运行参数,防止介质温度和压力过高,减少对管道材质的损伤,延缓管道老化。

3.4 健全安全监测与应急处置体系

一是健全安全监测系统,扩大监测设备的覆盖范围,选用精度高、稳定性好的监测设备,对管道介质参数、管道状态及其设备运行状态进行全面监测,采用光纤传感等技术提高监测的准确性;二是加强监测系统与调度系统的联动,建立数据共享平台,实现监

测数据的实时传输和分析,发出安全预警,故障解决提供支撑;三是制定健全的应急预案,明确应急处置流程、责任分工和处置手段,配备足够的应急设备和物资,加强应急救援队伍建设,按时进行应急演练以进一步增强应急处置水平^[6]。

3.5 提升施工技术与管理水平

一是推广先进的施工技术和工艺,引进先进的施工设备,如定向钻、顶管设备等,提高管道敷设、接口焊接、保温施工等环节的施工质量和效率,针对复杂工况,制定专项施工方案,确保施工安全和质量;二是完善施工管理制度,建立健全施工质量管控体系,加强对施工过程的全程监管,严格执行施工规范和标准,对施工质量进行严格验收,确保施工质量符合要求;三是加强施工人员培训,提高施工人员的专业素质和操作技能,规范施工操作,加强施工安全管理,落实安全责任制,避免施工安全事故的发生。

4 结束语

长距离供热管道输送技术作为集中供热系统的核心支撑,在优化能源配置、减少能源浪费以及推动低碳城市建设等方面发挥着重要作用。未来,长距离供热管道输送技术将朝着智能化、节能化方向发展,随着智能化技术、节能技术和可再生能源融合技术的不断创新,该技术将快速完善和升级,为集中供热行业的高质量发展带来强大的支撑,并助力实现“双碳”目标和能源高效利用。

参考文献:

- [1] 张军.原油长输管道电伴热系统的安装与质量控制措施[J].石油和化工设备,2025,28(05):119-121.
- [2] 闫勇琦.大管径长输供热管道穿跨越河流方案设计[J].煤气与热力,2024,44(11):7-10.
- [3] 赵晓飞.长输供热管道施工关键工序控制及监督要点研究[J].工程建设与设计,2024(21):59-61.
- [4] 赵江栋,臧洪泉,李亚男,等.长输供热管道经济比摩阻的影响因素分析[J].区域供热,2024(02):103-110.
- [5] 冯涛,单强.长距离输送供热工程设计中锚固段应力及应力验算[C]//中国市政工程华北设计研究总院有限公司,《煤气与热力》杂志社有限公司.2024供热工程建设与高效运行研讨会论文集(下).济南城投设计有限公司,2024.
- [6] 党卫东,张庆伟,李磊祚,等.供热蒸汽管道长距离顶管的穿管技术[J].煤气与热力,2021,41(05):16-19,42-43.

球墨铸铁供水管道施工技术的应用

金财德¹, 王开录^{2*}

(1. 甘肃省武威市西营河专用输水渠管理站, 甘肃 武威 733000;

2. 武威华禹江河项目管理有限公司, 甘肃 武威 733000)

摘要 球墨铸铁管因具有施工方便、密闭性好、使用寿命长等特点, 在兰州新区的供水引水工程中得到了广泛应用。为保障管网全生命周期运行安全, 施工安装环节必须对技术方案进行专项优化。为进一步探讨如何应用好球墨铸铁管施工安装技术, 本文结合兰州新区段家川种养循环园区供水工程等项目, 从管槽开挖、基础处理、管道安装等方面对球墨铸铁管安装施工技术方案进行总结论述, 并提出球墨铸铁管施工安装过程中的注意事项, 以期为同类工程施工技术应用提供参考。

关键词 球墨铸铁管; 供水工程; 管槽开挖; 基底处理; 管道安装

中图分类号: TU991.36

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.037

0 引言

球墨铸铁管凭借安装便捷、管件配套齐全、密闭性优异、使用寿命长等技术优势, 成为引水、供水等工程领域的优质输水管材, 被广泛应用于多地相关工程建设中, 该管材能够适应复杂地质条件, 满足长期运行需求^[1]。近年来, 兰州新区大力推进生态绿化、现代农业、城乡供水一体化建设, 如兰州新区生态绿化供水管道、石门沟水库供水工程、南部生态绿化管道连通工程、段家川种养循环园区供水工程等重点项目均大量采用球墨铸铁管, 有效提升了供水系统稳定性与可靠性。

兰州新区地处西北黄土高原与戈壁过渡地带, 地质条件以砂壤土、砂砾石、马兰黄土为主, 部分区域存在湿陷性黄土、粉质壤土压缩变形等工程地质问题, 对管道基础处理、安装精度、抗变形能力提出更高要求^[2]。本文结合兰州新区多个供水工程实践, 系统总结球墨铸铁管全流程施工技术, 优化关键工序控制要点, 解决地质适应性、接口密封、沉降控制、防腐保护等核心问题, 保障管道工程安全建设与稳定运行。

1 球墨铸铁供水管道施工技术方案

1.1 施工工艺流程

施工准备→测量放样→管槽开挖→原土夯实→10%水泥土垫层→混凝土管座→管道敷设→镇墩施工→阀门井施工→管道试验→管槽初次回填→管槽二次回填压实→竣工验收。

1.2 施工工艺

1.2.1 管槽开挖

管槽开挖采用分段纵挖法, 沿管线施工方向纵向开挖, 减少横向扰动与边坡失稳风险。开工前对开挖边线外侧 3 m 范围内进行场地清理, 清理树根、杂草、建筑垃圾及表层 30 cm 有机腐殖土, 保留耕作层土壤用于后期耕地恢复, 保护区域生态与农业生产条件。

管槽开挖过程中严格控制槽底高程、宽度与边坡坡度, 如遇粉质壤土层、基岩、砂碎石层与设计条件不符时, 及时组织监理、业主、设计、勘察单位现场确认, 及时调整施工方案。管槽内严禁积水, 配备水泵与排水系统, 持续排除地下水与雨水, 防止槽底软化、扰动与沉降, 确保基底承载力符合设计要求。

管槽土方开挖施工工艺流程是测量放线, 场地清理及平整, 分层分段开挖, 弃土规范装运, 槽底修整, 验收合格后进入下道工序。弃土堆放于槽边安全距离以外, 避免堆载导致边坡坍塌, 开挖完成后及时验收, 防止长期暴露引发风化、浸水破坏。

1.2.2 基底处理

基底处理是控制管道沉降、保证运行稳定的核心环节, 针对兰州新区湿陷性黄土、粉质壤土、砂砾石等不同地质条件, 采用原土夯实+水泥土垫层+混凝土管座复合基础体系, 提升整体强度与抗变形能力^[3]。

原土基面夯实采用 5 t 振动碾进行碾压, 粉质壤土层压实系数不小于 0.95, 砂砾石层相对密度不小于

作者简介: 金财德 (1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程建设与管理。

*通信作者: 王开录 (1955-), 男, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 水利工程建设管理。E-mail: 571212890@qq.com

0.65。施工前检测土体含水率,控制在最优含水率 $\pm 3\%$ 范围内;含水率不足时,翻松土层洒水焖料,半小时内复测含水率合格后立即碾压,陡坡、边角等机械难以作业区域,采用蛙式跳夯人工补夯,确保全断面压实均匀、无死角。

有10%的水泥土垫层采用厂拌法拌和,自卸汽车运至现场,按设计配合比严格控制水泥掺量不低于10%,依据土体最大干容重精准计量,保证水泥强度均匀性。拌和过程根据气候条件与土料湿度适当洒水,拌和物色泽一致,手紧握成团、轻捏即碎为最佳含水率状态。

摊铺采用分层整平,虚铺厚度根据试验确定,确保压实后厚度与高程达标。摊铺完成后先用压路机初步稳压,随即进行测量高程,局部低洼处翻松表层10 cm以上,用新拌的混合料补填压实,严禁薄层贴补。碾压遵循试验确定的遍数与速度,压实度合格后进行高程复测,每10 m打桩挂线,人工精平确保基面平整顺直。垫层成形后洒水养护不少于7天,养护期禁止车辆通行,防止早期强度破坏与表面裂缝。

C25W6F150混凝土管座浇筑,水泥土养护达标后进行混凝土管座施工,管座采用抗渗、抗冻混凝土,适应西北低温、干湿循环环境。支模前精确放线,模板牢固顺直,模板架设完成后挂线控制混凝土浇筑高程。混凝土从一端开始连续浇筑,插入式振捣器在1小时内完成振捣,确保密实无蜂窝麻面。浇筑完成后刮平、木抹子搓平压光,及时覆盖塑料薄膜养护,塑料薄膜搭接宽度不小于5 cm。混凝土管座每20 m设置一道伸缩缝,缝宽2 cm,采用聚氯乙烯闭孔泡沫板填充,适应温度变形与不均匀沉降。施工缝位置凿毛清理,保证新旧混凝土结合紧密,形成整体结构。

1.2.3 管道安装

球墨铸铁管安装以承插式橡胶圈接口为主,安装质量直接影响密封性能与通水安全,全流程执行标准化操作^[4]。

施工中对承口、插口与橡胶圈表面彻底清理,无泥沙、油污、杂物;橡胶圈顺直无扭曲,仅在规定部位涂抹润滑剂,严禁涂入承口内部,避免接口失效;转角处安装时,转角段先直线安装,再调整至设计角度,安装后检查插口标识线,确保橡胶圈到位;切管加工处理时,采用等离子切割,最小长度不小于1 m,端部加工合理锥度,保证接口配合精度;接口检查时,用专用工具检查橡胶圈位置,插口标识线外露均匀,每个接口编号记录,实现全程追溯;橡胶圈应单独存放,避光、隔热、密封存放,用帆布苫盖,防止太阳暴晒,

远离油污与热源,防止老化变质;施工中注意临时封堵,未连通端口采用盲板法兰封堵,外加麻油布缠绕5道后填埋,防止杂物进入与污染。

安装过程采用柔性吊带吊装,严禁吊钩直接勾挂管口,保护管口与内防腐层;人工配合调整位置,保持管道顺直、高程准确,避免强行撬动、顶推造成接口损伤。

1.3 镇墩施工

镇墩用于固定管道转弯、变径、落差等关键部位,防止管道位移、接口拉脱,采用现浇C25混凝土浇筑。

镇墩施工需管道安装完成且管道在镇墩上下游伸出一一定长度后,方可浇筑镇墩混凝土;按设计断面与现场地形选型,确保抗滑、抗倾覆、抗拔承载力满足要求;镇墩包裹段管道接口处包玻璃布、外缠草绳,缓冲混凝土收缩与温度应力;模板支撑牢固,验收合格后浇筑;管道周边加强振捣,保证混凝土填充密实,无空洞;混凝土强度达标后拆模,避免损伤棱角;表面涂刷冷底子油与热沥青,提升防腐能力。

1.4 阀门施工

阀门包括控制阀井、分水阀井、排气阀井、排水阀井、调流调压阀井等,是管道系统调控、检修、保护的重要构筑物,执行与管道基础协同的处理工艺。

阀门基础采用100 cm原土翻夯、50 cm水泥土垫层,施工方法同管道基底处理。垫层采用C15混凝土,井室及井筒采用C25W6F150抗渗抗冻混凝土,钢筋按设计图纸加工、现场绑扎安装。

模板采用组合木模或定型模板,安装前清理垫层杂物基面、涂刷脱模剂,拼接严密、支撑稳固,防止漏浆与变形。混凝土由罐车运输,卸料前高速搅拌,卸料时自由倾落高度不超过2 m,超高时采用溜槽,溜槽出口距浇筑面不大于1 m。振捣采用插入式振捣棒,快插慢拔,不触碰模板与钢筋。

管道穿井壁处设置刚性防水套管,施工缝设于底板以上500 mm及变截面处,加设300 mm $\times$ 4 mm镀锌钢板止水带。井壁地下部分及外侧涂刷冷底子油、热沥青各两道,提升防腐防渗性能。混凝土浇筑后洒水养护,强度达标后文明拆模,模板及时清理回收。

1.5 管道初次回填

水压试验前进行初次回填,回填高度至管顶以上50 cm。接口位置暂不回填,便于试验检查与缺陷处理。回填土选用合格原土,禁止使用渣土、冻土、淤泥、腐殖土;分层摊铺、分层夯实,每层厚度不大于0.2 m,管道与基础三角区重点夯实,压实度不小于0.95。从管道两侧同步进行,防止单侧推力导致管道偏移;采

用蛙式打夯机配合人工夯实,夯夯相连,分段衔接呈阶梯形,不得漏夯。

1.6 管道二次回填压实

试验合格后进行二次回填,回填范围为管顶 0.5 m 至地面,及接口位置。采用原土分层回填压实,压实度不小于 0.95。机械与人工配合,两侧同步作业,避免管道移位、损伤;分层碾压采用 5t 振动碾,逐层检测压实度,达标后方可进行上层回填,最终恢复地面高程与原有地貌。

2 球墨铸铁供水管道施工中应注意的问题

2.1 管道安装控制要点

管道安装控制一是要沿管线设置贯通施工通道,宽度满足运输车辆、吊装设备、混凝土罐车通行要求,保障物料供应与机械作业;二是管道要沿管线均匀卸放,装卸过程轻装轻放,严禁碰撞、抛摔,防止外防腐层破损、管口变形;三是使用柔性吊带吊装,严禁吊钩直接伸入管口,保护内防腐层与端口的完整。

2.2 管道转弯处的处理

平面转弯与上坡下坡处的折角在规范允许范围内时平顺安装,当超出允许角度时,要依据弯道角度安装专用弯头,保证转折滑顺、受力均匀,严禁强行接口形成撬角,防止接口拉脱、漏水^[5]。

2.3 管口保护与安装

管道安装中要注意管口保护,下管时要用随车吊,保持管道平衡,人工配合就位,用木楔调整支撑,保证管道顺直平整。就位后两侧设置导链,管口部位加柔性垫衬保护,均匀牵引到位,实时检查标识线;严禁用挖掘机直接顶推管道,避免管口开裂、胶圈移位。

3 球墨铸铁供水管道施工质量控制及施工环境保护

3.1 质量控制措施

建立以项目部经理为第一责任人,技术负责人具体负责质量管理体系,业主、监理、施工单位三级专职质检人员全程管控,班组设兼职质检员,全员落实质量责任。

严格控制原材料进场检验,水泥、砂石、钢筋、管材、橡胶圈等逐批抽检,不合格材料严禁使用。管道安装全过程控制轴线、高程、坡度、顺直度,接口密封、基础压实、混凝土强度等关键指标全数检测,执行“自检、互检、专检”三检制度,确保施工质量全程受控^[6]。

3.2 安全生产与文明施工控制措施

健全安全管理制度体系,落实安全责任、教育培训、检查考核、危险作业审批、防火防爆等制度,实现安全管理标准化。

管道连中的钢短管焊接、螺栓连接头需全面检查,合格后方可隐蔽;配电装置、电缆线路、照明设备按规范设置,保护装置齐全有效,定期检修维护;管沟、基坑支护与围挡验收合格后方可作业,专职安全员旁站监督,防范坍塌、坠落事故发生。

3.3 环境保护及水土保持控制措施

施工生活区供水与水源隔离,禁止排放未达标污水、堆放垃圾,设置渗水坑与排污管线,保障供水安全;完工后全面清理残渣、污物、建筑垃圾,恢复施工场地原貌;修整永久道路、建筑物周边排水沟与防护设施,保持排水畅通、边坡稳定,减少水土流失。

4 结束语

兰州新区供水工程地质以砂壤土、砂砾石、马兰黄土为主,粉质壤土与黄土存在湿陷、压缩变形问题,砂砾石地基条件良好。针对不同地质,施工中采用差异化基础处理方案,砂砾石地基仅压实整平;粉质壤土、马兰黄土等地基经原土夯实、水泥土夯填、混凝土管座加固后安装管道,有效解决沉降变形问题。球墨铸铁管施工全过程严格控制管槽开挖、基础处理、管道安装、镇墩阀井、回填压实等关键工序,强化管材保护、接口密封、防腐抗冻、质量检测与安全环保措施,工程建成后运行稳定、外观优良、效益显著。本文探讨的施工技术体系与管控要点,适合兰州新区及西北同类地区地质与气候条件,旨在为球墨铸铁供水管道工程设计、施工、监理、运行提供参考,推动区域供水工程高质量建设与可持续发展。

参考文献:

- [1] 徐文慧.球墨铸铁管在供水管网建设中的安装应用探讨[J].中华建设,2024(06):120-122.
- [2] 白杨,赵佳蕾,郎映辉.大口径球墨铸铁管长距离输水工程施工关键技术研究:以遵义夹岩项目为例[J].水利水电技术,2025,56(12):121-124.
- [3] 郑国强.城市给水主干管改造中大口径球墨铸铁管带压开孔施工技术与安全保障体系[J].现代工业工程,2026(03):142-144.
- [4] 陈磊.大口径球墨铸铁管承插接口快速组装工艺优化研究[J].水电水利,2025,09(08):133-137.
- [5] 崔昱,李丽轩,赵国志,等.《排水球墨铸铁管道工程技术规程》关键技术解读[J].中国给水排水,2025,41(04):1-6.
- [6] 时宏远.市政给水球墨铸铁管道施工技术[J].建筑与装饰,2025(18):109-111.

饮水工程施工中管材选用与安装技术

尹远飞

(衡宇建设集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 231200)

摘要 饮水工程是保障群众饮水安全的民生工程, 受地形复杂、地质多样、经济条件有限等因素影响, 管材选用与安装质量直接决定工程长效运行效果。本文结合工程实际, 聚焦管材选用与安装核心环节, 梳理管材选用的核心原则, 分析PE管、PVC管、钢管等常用管材的适配场景, 明确采购、检验、存放全流程质量管控要点; 针对山区不同施工场景, 优化安装前期筹备、分场景安装实施及接口密封处理技术, 完善技术人员、质量检测、后期运维等保障措施, 实现管材选用与安装技术与山区实际的精准适配, 保障工程供水安全、稳定、高效, 以期为饮水工程高质量建设提供实践参考, 助力民生保障提质增效。

关键词 饮水工程; 管材选用; 安装技术; 质量保障

中图分类号: TU991.36

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.038

0 引言

饮水安全是民生保障的重要基石, 饮水工程的建设质量直接关系到群众切身利益。山区地形复杂、地质多样且经济条件有限, 管材选用与安装环节的合理性直接决定工程运行稳定性与使用寿命。科学选用适配管材、规范安装施工, 是解决山区供水中断、水质污染等问题的关键。本文结合山区工程实际, 探讨管材选用核心要点与安装关键技术, 完善保障措施, 为饮水工程高质量建设提供实践参考。

1 饮水工程管材选用核心要点

1.1 管材选用的核心原则

饮水工程的管材选用, 核心是贴合实际工程特点, 实现实用性、经济性与适配性的有机统一, 最终保障饮水安全与工程长效运行。山区地形复杂、地质条件多样, 多陡坡、多岩土结构, 管材需具备较强的抗冲击能力以应对施工与使用中的外力影响, 同时要抵御山区地下水水质、土壤环境可能带来的腐蚀作用, 避免管材过早破损导致供水中断。农村地区经济发展水平有限, 管材选用需兼顾采购成本与后期维护成本, 避免选用价格过高、维护难度大的管材, 确保工程建设与后续运维在当地经济承载范围内。饮水工程的核心功能是保障群众饮水安全, 管材需严格匹配工程设计标准, 无论是输水压力、流量参数, 还是材质的卫生安全性, 都要达到饮用水输送要求, 既保证供水稳定性, 杜绝因管材适配性不足出现的漏水、断水问题, 也确

保水质不受管材本身污染, 让群众用上安全、放心的饮用水。

1.2 常用管材的适配性选用

实际饮水工程施工场景丰富多样, 不同路段的地形、地质和输水需求各有区别, 要结合具体场景挑出合适的常用管材, 厘清每种管材的适用范围和选用优先级, 保证管材性能和施工需求准确匹配。PE管具有抗冻、抗裂、重量轻、施工方便的优点, 是山区长距离输水和复杂地形路段的优先选择, 选管材的时候优先挑食品级材质, 防止材质里的有害物质渗进水里, 同时要结合输水压力挑选对应规格, 兼顾实用性与安全性。PVC管性价比高、安装简单, 适合用在地势平缓、输水压力不高的路段, 挑选这类管材时要重点留意管材的压力等级和抗老化性能, 避免山区昼夜温差大、紫外线照射强使管材老化开裂, 影响工程的使用时长^[1]。钢管的抗冲击、抗压能力很强, 适合用在陡坡、高压输水的路段, 这类路段受力情况复杂, 遇到外力冲击的风险更高, 钢管需要提前做好防腐处理, 可以用镀锌或者涂抹防腐涂层等方式, 避免山区潮湿土壤和地下水锈蚀管材, 延长管材使用寿命。

1.3 管材全流程质量管控

管材质量直接影响饮水工程的整体品质, 需要严格把控采购、检验、存放各个环节, 禁止不合格管材进入施工现场, 为工程施工打好质量基础。采购环节要先筛选出有对应资质、信誉可靠的管材生产厂家,

作者简介: 尹远飞 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

核对厂家的生产许可证、产品合格证以及第三方检测报告,确认管材的材质、规格、性能等参数,保证管材满足工程设计和饮用水输送的相关标准,防止买到劣质、不合格的产品。管材进场之前,要安排专业人员抽样检测,重点检查管材外观有没有破损、裂纹、变形等问题,测量管材的尺寸、壁厚是否符合标准,利用压力试验测试管材的耐压能力,所有检测项目都达标后,才能准许管材进场使用,禁止让不合格管材进入施工环节。管材存放环节也很重要,需要按照管材类型搭建专门的存放场地,不要让管材直接接触地面泥土,避免受潮、被污染或是出现破损;PE管、PVC管要避开阳光直射,防止提前老化变质。钢管、铸铁管要做好防潮、防腐处理,分类存放、标识清楚,建立完整的存放管理制度,安排专人负责管理,定期检查管材状态,及时处理存放时出现的问题,保证管材在使用前始终保持良好状态,从源头保障工程质量。

2 饮水工程管材安装关键技术

2.1 安装前期筹备技术

饮水工程管材安装前的筹备工作核心是适配山区施工条件,提前排查各类隐患,确保安装工作有序、高效推进,为后续安装质量提供保障。前期需结合山区地形地貌、地质条件,开展详细的现场勘察,精准完成管线放线和高程测量,根据测量结果优化管线走向,尽量避开滑坡、泥石流等地质灾害隐患点,减少施工过程中的地质风险^[2]。同时缩短管线长度,降低施工成本与后期运维难度。管线放线确定后,按照设计要求开挖施工沟槽,开挖过程中需根据土壤性质采取针对性的支护措施,山区土壤多为岩土、砂土,稳定性较差,易发生沟槽坍塌,需采用钢板桩、木支撑等支护方式,控制沟槽开挖深度与坡度,避免坍塌事故发生,保障施工人员安全。沟槽清理完成后,需对进场管材进行再次检查,核对管材的型号、规格是否与设计要求一致,检查管材外观与接口质量,排查破损、裂纹等问题,提前做好接口清洁、打磨等处理准备,确保接口连接的密封性与牢固性。

2.2 分场景安装实施技术

山区地形复杂多样,不同路段的施工条件差异较大,需要针对陡坡、地下水位高、穿越河道道路、入户等不同场景,选用对应的安装技术,同时兼顾安装质量与施工效率,保证管材安装符合工程要求。陡坡路段地势陡峭,管材安装完成后容易出现滑动位移,因此可采用分段安装的方式,每装好一段就立刻做固定加固处理,选用专用固定件将管材和沟槽壁连接牢

固,还要严格控制管材的铺设坡度,保证输水过程顺畅,同时要做好接口的密封处理,避免管材滑动带动接口松动,最终引发漏水问题。地下水位偏高的路段,沟槽很容易积留地下水,管材长期浸泡在水中容易发生损坏、腐蚀,这类场景需要提前做好沟槽排水作业,用抽水设备降低地下水位,等沟槽完全干燥后再开始安装管材,安装过程中要使用防腐蚀、防渗漏的接口处理技术,选用适配的密封材料,避免地下水渗入管材内部或是从接口位置渗漏,影响供水质量,也缩短管材的使用寿命^[3]。需要穿越河道、道路的路段,施工时要尽量降低对周边环境与已有设施的破坏,可采用顶管、套管等工艺,让管材从河道底部、道路下方穿过,不用直接开挖河道、破坏现有路面,安装过程中也要做好管材的固定与密封,避免河道水、路面污水渗入管材内部,保障输水过程安全,入户管线安装需要贴合农户的实际居住布局,优化管线铺设的路径,尽量缩短管线总长度,减少弯头与接口的数量,保证每个接口都能密封严密,还要考虑农户后续使用的便利性,把管线安装在不易被碰撞、方便日常维护的位置,满足农户的日常用水需求。

2.3 接口密封处理技术

管材接口密封是保障饮水工程供水密封性的主要环节,要规范接口处理流程,按照不同管材的特性选择合适的密封方式,杜绝接口渗漏,保证供水系统完整稳定,PE管是山区饮水工程常用的管材,它的接口处理主要用热熔对接和电熔连接两种方法,操作时要严格把控焊接温度与时间,结合管材规格调整参数,保证接口融合紧密;焊接结束后要冷却到常温才能继续后续施工,避免冷却不充分引发接口开裂渗漏。PVC管接口大多采用胶粘处理,操作时要先把接口表面清理干净,去掉油污、灰尘和水分,保证接口干燥,之后均匀涂抹专用胶粘剂,对准接口后用力按压,留出足够黏结时间保证胶粘强度,防止接口松动漏水,还要注意胶粘剂要符合环保要求,避免污染饮用水。钢管和铸铁管多用于高压路段、陡坡等地段,接口用法兰连接或焊接:法兰连接要保证法兰面平整、密封垫完好,拧螺栓时力度均匀,防止受力不均引发接口渗漏,焊接接口要保证焊接质量,做到焊缝饱满、没有夹渣、没有裂纹,焊接完成后还要做好防腐处理,使用防腐涂层或者镀锌工艺,避免接口锈蚀,同时兼顾密封性和抗腐蚀性,不同管材的接口处理技术各有侧重,核心要贴合管材特性,规范操作流程,保证接口密封严密、牢固耐用,从根源上消除渗漏隐患。

3 饮水工程管材选用与安装保障措施

3.1 技术与人员保障

饮水工程管材选用与安装的规范落地,离不开强有力的技术支撑与高素质的施工人员队伍,需强化技术与人员保障,确保各项技术要求落实到位。施工前需组织专业技术人员,结合山区工程实际,制定科学合理的管材选用方案与安装技术规范,明确管材选用标准、安装流程与质量要求,为施工提供技术指导。针对施工人员开展专项技术培训,重点讲解管材的特性、选用原则、安装操作要点与质量控制要求,让施工人员熟练掌握各类管材的安装技术,明确施工过程中的注意事项,提升专业操作能力^[4]。配备专业技术人员现场指导施工,全程跟踪管材选用与安装的各个环节,及时发现施工过程中出现的技术难题,结合山区施工特点提出针对性的解决措施,避免因技术操作不当导致施工质量问题。建立完善的施工人员岗位职责体系,明确每个施工人员的工作任务与质量责任,强化施工人员的质量意识,引导施工人员严格按照技术规范操作,杜绝违规施工,确保管材选用与安装工作规范、有序推进,保障工程质量。

3.2 质量与检测保障

构建全流程质量管控体系,利用科学检测手段排查施工隐患,严格规范验收流程,确保饮水工程的管材选用和安装质量符合工程标准,保障工程能安全稳定运行。在施工进行中,安排专门人员负责质量管控,重点控制管线铺设、接口处理、管材固定等关键环节,对照施工技术规范,随时检查施工操作是否符合要求,及时修正施工偏差,避免施工失误留下质量隐患。管材安装完成后,进行全面检测工作,结合不同管材的特性与工程要求,安排水压试验、管线排查等检测项目:水压试验要按照设计压力标准进行,持续一段时间后观察接口是否渗漏、管材是否变形^[5];管线排查要全面检查管线的铺设、固定状态,找出破损、松动等问题,确保接口密封性能与管材耐压性能符合要求,规范工程验收流程后,要成立专业验收小组,对照工程设计要求 and 施工标准,对管材选用、安装质量、检测结果等进行全面核查,仔细核对相关工程资料,对验收过程中发现的不合格部位,明确整改要求和整改期限,安排专人跟进整改进度,确保问题整改到位,只有验收合格后工程才能投入使用,从全流程保障工程质量。

3.3 运维与效益保障

饮水工程想要长期稳定运行,不能缺少完善的后期运维机制,还需要平衡工程成本与使用效益,达成工程可持续发展的目标,给群众提供长期稳定的饮水

保障。建立长效运维机制后,要制定管材定期巡检与维护制度,明确巡检的周期、内容和负责人员,定期对管线、管材、接口等位置做全面检查,及时找出破损、渗漏、锈蚀等问题,发现问题后立刻维修、更换,避免小隐患发展成故障。还要建立完整的管材维护档案,详细记录管材型号、规格、安装位置、安装时间、维护情况等信息,给后续的巡检、维护工作提供参考,方便精准推进运维,进行农户用水指导,给农户普及管材与管线的保护知识,引导农户规范用水,避免人为碰撞、损坏管线和管材,减少人为因素引发的工程故障,结合当地经济条件,优化管材选用与安装方案,在保证工程质量和饮水安全的前提下,选择性价比更高的管材,简化安装流程,减少施工耗材和人力投入,控制工程建设成本;借助规范的运维工作,降低后期维修费用,提高工程的使用效益,让饮水工程真正惠及山区群众,发挥长久的民生价值。

4 结束语

饮水工程的高质量建设,核心在于管材选用的合理性与安装技术的规范性,二者直接关系到工程的供水安全、运行稳定性与使用寿命,更是保障山区群众饮水权益的关键。结合山区地形复杂、地质多样、经济条件有限的实际,通过科学界定管材选用原则、精准匹配常用管材与施工场景、强化管材全流程质量管控,可有效解决管材适配性不足、质量不达标等问题;优化安装前期筹备、分场景安装实施及接口密封处理技术,完善技术人员、质量检测、后期运维等保障措施,能够破解山区施工难题,提升安装质量,防范渗漏、破损等隐患。饮水工程建设需立足于民生需求,兼顾实用性与经济性,将管材选用与安装技术融入工程全流程,持续优化方案、规范操作,推动工程长效稳定运行,切实发挥饮水工程的民生价值,为饮水安全保障提供坚实支撑,助力乡村振兴背景下山区基础设施建设提质增效。

参考文献:

- [1] 田晓丽.农村饮水安全工程施工技术与管理方式分析[J].新农民,2025(17):4-6.
- [2] 张浩.农村饮水安全工程施工技术及工程管理策略研究[J].农业开发与装备,2025(05):190-192.
- [3] 令婷娟.农村饮水工程施工建设方法研究[J].水上安全,2025(05):118-120.
- [4] 王江伟.农村饮水安全工程施工技术及工程管理探讨[J].农村实用技术,2024(07):120-122.
- [5] 孟繁吉.农村饮水安全工程施工技术与管理方式的分析[J].农村实用技术,2024(07):123-124.

暖通空调施工技术中的管道安装工艺研究

钟伟华

(广东潭洲会展服务有限公司, 广东 佛山 528300)

摘 要 暖通空调系统是建筑工程中保证室内热环境和空气质量的主要部分, 其施工质量关系到同管道安装工艺的规范性、合理性, 管道安装的科学性又是暖通空调系统运行效率、稳定性以及使用寿命的重要环节。本文对暖通空调施工技术中管道安装工艺进行系统的探究, 论述管道安装工艺的核心含义和重要意义, 剖析管道安装的全过程工艺要点, 包含前期准备、管材处理、管道敷设、连接密封、后期调试等各个环节, 探究工艺执行时的关键原则和改良途径, 结合实际施工环境整理工艺应用的重点和细节, 以期改善暖通空调管道安装施工品质、推进管道安装工艺标准化发展提供理论参考, 助力暖通空调系统充分展现其使用效能, 满足建筑使用舒适化的需求。

关键词 暖通空调; 管道安装; 管材预处理; 管道敷设; 管道连接

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.039

0 引言

随着建筑行业的发展, 人们对建筑室内居住、使用的舒适度要求越来越高, 暖通空调系统应用范围越来越大, 施工质量也越来越受行业内的关注。在暖通空调施工过程中, 管道安装属于核心施工环节, 贯穿施工全过程, 工艺水平直接影响到暖通空调系统整体施工进度, 以及系统运行的安全性、节能性、稳定性。管道安装工艺改善可以减少系统运行过程中出现的泄漏、堵塞等现象, 进而降低后期维护费用, 延长系统使用寿命^[1]。目前暖通空调管道安装工艺正向标准化、精细化发展, 根据暖通空调系统运行特点, 对管道安装工艺核心要点及实施方法进行研究, 明确各个环节施工规范和技术要求, 对暖通空调施工技术进步、建筑工程整体质量提高具有重大意义。

1 暖通空调管道安装工艺的内涵

1.1 暖通空调管道安装工艺的定义

暖通空调施工技术中管道安装工艺, 即暖通空调系统全面施工过程中, 严格按照设计图纸技术要求和现行施工规范标准, 对管道进行材料选择、预处理加工、敷设布置、连接组装、密封处理、支撑固定、后期系统调试等一系列系统的施工操作和工程技术管理的综合技术体系。

1.2 管道安装工艺的核心目的与根本宗旨

该工艺体系的核心目的和根本宗旨就是保证所建立的管道系统可以准确、高效地满足暖通空调系统中

冷热水、制冷剂、空气等各种介质可靠的输送要求, 从根本上保证整个暖通空调系统长期运行的稳定性、能效表现和安全性。

1.3 管道安装工艺的全过程环节及内在关联

管道安装工艺贯穿于施工全过程, 包括前期准备、安装过程、验收等各个紧密衔接的技术环节, 各个技术环节之间不是孤立存在的, 而是存在着深刻相互联系、相互影响的关系, 任何一个技术环节的工艺执行如果达不到标准要求或者出现疏漏, 都会导致管道系统局部或者整体性的故障, 如泄漏、阻力大、振动噪声等问题, 直接影响到暖通空调系统正常、高效运转, 影响其使用功能和寿命。

1.4 暖通空调管道安装工艺的特殊性与复杂性

与常规的建筑给排水或者一般工业管道安装工艺相比, 暖通空调领域的管道安装工艺具有很强的针对性以及更高的技术复杂性。它必须与暖通空调系统特有的运行工况相结合, 即系统内部工作压力波动范围、输送介质的物理化学性质(温度、腐蚀性)、建筑内部和外部各种使用环境条件(温湿度、洁净度要求、空间限制)等, 做详细的分析和计算, 然后制定出科学、合理、具有可操作性的施工方案和工艺措施。

1.5 管道安装工艺的实施要求与全生命周期效益目标

该目标是保证管道安装的实体质量和功能性能全部满足设计文件中技术标准及国家、行业颁布的相关规范条文的要求, 在施工过程中有效地协调质量控制、施

作者简介: 钟伟华(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 暖通空调施工。

工进度和成本控制三者之间的关系^[2],充分考虑到竣工后系统日常运行维护、检修甚至将来可能的改造扩容的方便性和经济性,实现全生命周期内最佳的综合效益。

2 暖通空调管道安装工艺的重要价值

暖通空调管道安装工艺是暖通空调系统工程的重要组成部分,作为项目施工全流程的基础性支撑环节,其重要性不容忽视,具体价值可以从三个方面进行阐述。

2.1 严格遵循行业技术标准的管道安装工艺是保证整个暖通空调系统正常、高效运行的基础

严格遵循行业技术标准的管道安装工艺保证了制冷剂、冷冻水、热水等冷热介质在管道网络中可以自由地、无障碍地循环和输送,使空调系统可以迅速、准确地按照控制指令作出反应,达到设定的温度、湿度控制目标,真正达到现代建筑对室内环境舒适度和健康性的高标准要求。

2.2 严格按照规范、设计要求进行管道安装工艺

严格按照规范、设计要求进行管道安装工艺对实现系统节能降耗运行有明显的促进作用。经过细致的安装工作,能够最大程度上减少由于管道连接处密封不良而造成的介质泄漏、由于管道内部清洁度不够或者设计不合理而引起的局部阻力增大甚至堵塞等状况,进而防止由此产生的非必要能源浪费,这与目前全球提倡的绿色建筑理念以及我国持续推行的节能减排施工政策相契合。

2.3 使用科学、先进的管道安装工艺和材料提高管道系统结构稳定性

管道安装工艺不但可以减少建筑物后期使用过程中因为管道老化、破损而需要维修、更换部件的次数,给施工单位和业主双方节省了大量的长期维护和更新费用,而且从根本上防止了由于管道突然破裂、泄漏等故障造成的漏水、电气短路以及更大的安全事故的发生,有效地保证了建筑内部设施和人员的安全,进而保证了建筑的正常运行^[3]。另外,推进管道安装工艺在全行业范围内的标准化、规范化应用,会对暖通空调施工领域起到引领作用,有利于统一技术标准、优化施工流程、培养专业人才,从而整体提高行业的技术水平和工程质量管理能力,促进整个行业的健康和可持续发展。

3 暖通空调施工技术中的管道安装工艺

3.1 管道安装前期准备工艺

暖通空调管道安装前期准备工艺是保障后续施工顺利进行的基础,更是确保管道安装质量的前提。其

核心是做好施工前的全面规划和准备工作。在前期准备阶段,首先要根据暖通空调系统整体设计方案确定管道安装具体要求,即管道走向、敷设方式、连接方式等,整理出施工流程,编制施工方案,确定各个施工环节的技术要点和责任分工。其次要做好管材和施工机具的准备,按照设计要求选用符合标准的管材,对管材进行检查,保证管材无破损、无缺陷,准备好管道连接、固定、密封所需的机具和材料,保证机具性能好、材料质量合格。另外,还要做好施工人员的技术交底工作,明确施工规范和技术要求,保证施工人员能熟练掌握管道安装工艺的核心要点,规范地进行施工操作,防止由于操作不当而影响施工质量。施工区域应清理、规划,为管道安装创造良好的施工条件,防止施工中受到外界因素的影响。

3.2 管材预处理工艺

管材预处理工艺属于暖通空调管道安装过程中的一项重要内容,其主要作用是去除管材表面的杂质、氧化层以及油污等物质,从而保证管材连接处的密封性和牢固性,防止因为管材预处理不到位而造成连接部位出现泄漏等状况。在管材预处理阶段,首先要对管材进行切割处理,按照施工设计要求的长度,使用合适的切割工具对管材进行精确切割,切割时保证切口平整、光滑,无毛刺、无变形^[4],防止切口不平整影响后续连接质量。切割完毕后需要对切口进行打磨,去掉切口处的毛刺和氧化层,保证切口表面光滑。对需要弯曲的管材,用专用弯曲工具按设计要求的弯曲角度,准确弯成所需形状,弯曲时注意控制弯曲力度,防止断裂、变形等。另外,还需要对管材进行除锈、脱脂处理,金属管材可以采用喷砂、酸洗等方式去除表面锈迹,塑料管材需要去除表面的油污和杂质,保证管材表面干净、干燥,为后续的连接和密封提供良好的基础。

3.3 管道敷设工艺

管道敷设工艺属于暖通空调管道安装的关键部分,管道敷设质量关系到管道系统运行的稳定性和使用寿命,必须依照设计要求和施工规范实施敷设操作。管道敷设要根据建筑结构及施工环境来确定敷设方式,常见的敷设方式有明敷和暗敷两种,不同的敷设方式有不同的工艺要求。明敷时要合理安排管道走向,保证管道敷设平整、美观,管道间距满足设计要求,做好管道固定工作,用支架、吊架等固定构件将管道牢固固定,防止管道运行时发生晃动、移位等现象,固定构件安装间距和安装方式应符合规范要求,保证固

定牢固、可靠。暗敷前应提前预留管道敷设孔洞和沟槽,孔洞、沟槽尺寸、位置应与管道尺寸、走向一致,敷设时管道位置准确,防止管道与建筑结构冲突,做好管道保护工作,防止管道在敷设过程中受损。明敷或暗敷敷设时,管道坡度应符合设计要求,保证介质能顺利流过,不得有介质积存堵塞现象。

3.4 管道连接与密封工艺

管道连接和密封工艺是保证暖通空调管道系统密封性的重要环节,工艺水平直接影响到管道系统是否存在介质泄漏等隐患,应根据管材种类及施工要求来选用合适的连接和密封方式。不同种类的管材有不同的连接方式,常用的管道连接方式有螺纹连接、焊接连接、法兰连接、承插连接等,在进行连接时必须按照连接工艺的要求进行操作,保证连接部位牢固、紧密。螺纹连接要对螺纹进行精确加工,保证螺纹光滑、无破损,连接时涂上密封材料,提高连接部位的密封性;焊接连接要控制好焊接温度和焊接速度,保证焊缝饱满、平整,无夹渣、气孔等缺陷,焊接完成后检查焊缝并处理;法兰连接要保证法兰面平整、干净,密封垫片选择及安装符合要求,连接螺栓均匀拧紧,保证法兰连接紧密。根据连接部位的不同,在密封处理时应选用相应的密封材料,使密封材料与管材及介质相适应,密封时应保证密封均匀、严密,防止密封不严造成介质泄漏。

3.5 管道固定与防护工艺

管道固定和防护工艺属于暖通空调管道安装的必要部分,它的主要作用是保证管道系统在运行时保持稳定,防止受到外界因素的影响而受损,从而延长管道系统的使用寿命。管道固定应根据管道规格、重量和敷设方式选择合适的固定构件,支架、吊架、托架等,固定构件材质、规格符合设计要求,安装位置准确,安装间距合理,保证管道受力均匀,不发生晃动、移位、变形等现象^[5]。对垂直敷设的管道要设置防滑支架,防止管道下滑;对水平敷设的管道要根据管道重量和长度合理设置支架间距,保证管道敷设平整、稳定。管道防护工艺主要分为防腐和保温防护两种,防腐处理要根据管材种类和使用环境选择合适的防腐材料,对管道表面进行均匀涂抹或者喷涂,保证管道表面形成完整的防腐层,防止管道受到腐蚀;保温防护要选用符合节能要求的保温材料,对管道进行全面包裹,保证保温层平整、严密,无破损、无缝隙,减少管道内介质的热量损失,防止管道表面结露,影响建筑结构和环境。

3.6 管道安装后期调试工艺

管道安装后期调试工艺是检验管道安装质量、保证管道系统正常运行的重要环节。在管道安装完成后,按照施工规范 and 设计要求进行全方位的调试工作。调试工作包含管道水压试验、气密性试验和系统试运行等,在调试前要对管道系统进行全方位的检查,保证管道连接牢固、密封严密、固定可靠、保温层完好无损。水压试验要按照设计要求的试验压力,对管道系统进行充水加压,保持规定的压力时间,观察管道有无泄漏、压力下降等现象,若有问题,应及时查找原因并处理,直到试验合格为止。气密性试验主要是对输送气体的管道系统进行试验,向管道内充入气体,保持一定的压力^[6]。

4 结束语

暖通空调施工技术中的管道安装工艺是暖通空调施工全过程中的一个综合性、系统性技术体系,它贯穿于暖通空调施工的全过程,工艺水平直接影响到暖通空调系统的运行稳定性、安全性和节能性,也是保证建筑室内舒适性的重要因素。本文明确了管道安装工艺的核心内涵和重要价值,对管道安装前期准备、管材预处理、管道敷设、连接密封、固定防护、后期调试等各个环节的工艺要点进行了详细的阐述,并整理出各个环节的施工规范和技术要求,形成了一套比较完整的管道安装工艺体系,以期为暖通空调管道安装施工提供科学的理论依据和实践借鉴,有利于施工单位规范施工操作,提高管道安装质量,减少施工过程中出现的问题和隐患。

参考文献:

- [1] 巩烁烁.建筑暖通空调安装施工技术问题探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛:绿色智造·采购革新专题(第三册).天津市三品机电工程有限公司,2025.
- [2] 谭敬波.建筑暖通空调安装施工关键技术研究[J].城市开发,2025(24):154-156.
- [3] 李运波,刘云宽.暖通空调工程安装施工技术探讨[J].工程建设与设计,2025(23):225-227.
- [4] 张舒伟.绿色节能视角下游泳馆暖通空调系统施工技术[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):22-24.
- [5] 种纪森,徐扬,刘泓邑,等.BIM技术在暖通空调系统安装施工中的运用研究[J].居业,2025(11):106-108.
- [6] 王尉.建筑暖通空调工程节能设计与施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(05):154-156.

水库除险加固设计方案与施工质量控制研究

杨 涛, 林莉梅, 杨 彭

(沧源佤族自治县水库管理局, 云南 临沧 677499)

摘 要 水库运行一定周期以后, 容易出现坝体渗漏、溢洪道损毁及输水设施老化等现象。因此, 为提升水库整体结构的稳定性, 增加水库基础设施的运行功能, 本文以某水库除险加固工程项目为例, 通过分析该水库现存的安全隐患, 提出采用高压旋喷灌浆防渗、溢洪道底板重建及启闭机系统更新等针对性设计方案, 并分析了水库除险加固施工准备、关键工序管控、全过程监测及后期验收等质量控制要点, 以期为增加水库除险加固设计方案的合理性、提升水库除险加固工程的施工质量提供参考, 从而消除工程隐患, 提升水库防洪调蓄能力与结构安全, 保障下游人民的生命财产安全。

关键词 水库除险; 加固设计; 施工质量; 隐患治理

中图分类号: TV697.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.040

0 引言

水库作为现代社会重要基础设施, 尤其是河流域防洪体系的关键, 对水资源调度和利用具有重要意义。水库安全运行, 对社会稳定以及经济发展存在直接影响。然而, 水库在长期运行之下, 因为地质条件变化、材料自然老化、早期建设标准局限等因素影响, 造成结构性病害以及功能性缺陷。在水库运行过程中, 可通过除险加固措施使其恢复设计功能、延长使用寿命, 并具备较高的防灾韧性。基于此, 应针对水库除险加固确定适宜设计方案, 落实施工质量控制措施, 采取精细化控制方案保证水库除险加固效果合格, 构建完善水库管理体系, 为社会对资源合理调配利用奠定基础。

1 水库除险加固工程概况与现存隐患

1.1 工程基本概况

某中型水库位于长江支流上游丘陵地带, 始建于1975年, 是一座以农业灌溉为主, 兼顾城乡供水、防洪及水产养殖的综合利用水利工程。大坝为均质土坝, 最大坝高28.5 m, 坝顶轴线长320 m, 顶宽6 m, 防浪墙高1.2 m。水库正常蓄水位158.0 m, 相应库容1 200万 m^3 , 设计洪水标准为50年一遇, 校核洪水标准为100年一遇。溢洪道布置于大坝右岸坝口, 为开敞式宽顶堰结构, 净宽15 m, 设有3孔弧形闸门。输水涵管位于左岸坝体内, 为钢筋混凝土箱涵结构, 进口设检修闸与工作闸, 设计流量3.5 m^3/s 。经过近五十年的运行, 该水库在

历次汛期发挥了重要调蓄作用, 但随着时间推移, 工程设施逐渐老化, 部分技术指标已低于现行规范要求, 亟须进行全面除险加固。

1.2 水库现存主要安全隐患

在本水库除险加固开始前, 由专业机构进行安全鉴定以及现场勘查, 确定水库存在严重安全隐患, 评定为三类坝。首先, 水库坝体防渗体系几近失效, 背水坡脚位置出现常年散浸现象, 雨季形成明显沼泽化现象, 浸润线抬高, 渗透破坏风险加剧; 水库坝顶路面坑洼不平, 防浪墙多处存在开裂、倾斜现象。其次, 水库溢洪道混凝土内钢筋露筋明显, 侧墙裂缝发育且存在渗水现象, 消力池冲刷坑深度超标, 尾坎损毁, 已经无法满足水库运行稳定性、可靠性。再次, 输水涵管进出连接段不均匀、错位现象明显, 管身有纵向裂缝, 在长期运行下出现严重渗漏问题; 原有铸铁闸门锈蚀卡阻无法正常开启, 传动部件损坏严重。最后, 防汛道路狭窄、泥泞。由于水库运维单位未采取雨水情自动测报系统以及视频监控系统, 管道维护相对落后, 造成设备运行过程中无法满足功能性需求, 对下游三个行政村以及万亩良田安全产生危害^[1]。

2 除险加固的必要性与目标

水库除险加固的主要目的是消除安全隐患, 确保水库运行过程中达到安全性、可靠性要求。由于本水库所在地区下游分布大量村庄, 人口密集度较高, 是当地极为重要的水资源调配设施, 若该水库坝体出现

作者简介: 杨涛(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

渗透破坏或溢洪道失事造成溃坝,其产生的灾难性后果极为严重。目前,该水库存在渗漏、结构裂缝、设备失灵等问题,已经存在严重安全隐患,需及时进行加固维修处理才能保证人员与农田安全性。同时,水库除险加固是促进区域可持续发展、实现工程综合效益提升的关键。水库除险加固能提高供水效率,确保防洪调蓄精度达到要求,为农业增产、农民增收奠定基础。此外,水库除险加固需建设完善监控系统,构建水库现代化管理体系实现水资源高效利用,为区域经济社会发展做出贡献。本次水库除险加固设计目标如下:一是达标性,确保水库大坝抗震、防洪标准满足规范性要求;二是安全性,消除水库运行中渗漏、滑坡、结构性破坏隐患等,使水库长期运行达到稳定性要求;三是功能性,水库除险加固后恢复泄洪输水功能,确保机电设备具备可靠性与自动化水平;四是耐久性,通过除险加固提高水库耐久性,发挥新材料、新工艺特性延长水库使用寿命,构建完善水库运维管理体系^[2]。

3 水库除险加固设计方案

3.1 坝体除险加固设计

针对坝体渗漏及稳定性不足问题,采用“上截下排、加强护坡”的综合治理方案。在坝体上游面铺设复合土工膜防渗层,下设砂砾石垫层,顶部锚固于新建防浪墙底部,底部嵌入坝基截水槽,形成连续封闭防渗屏障。对于坝基深层渗漏,采用高压旋喷灌浆技术构建垂直防渗帷幕,钻孔深入基岩 0.5 m,桩径 80 cm,搭接长度 20 cm,确保截水效果。背水坡设置贴坡排水体,由碎石、粗砂及土工布反滤层组成,降低浸润线,防止渗透变形。坝顶加宽至 8 m,采用沥青混凝土路面,重建钢筋混凝土防浪墙。上下游坝坡分别采用预制混凝土六角块护坡与生态草皮护坡,增强抗冲刷能力与景观效果,确保坝体整体稳定与防渗安全。

3.2 溢洪道优化设计

本水库溢洪道进行全线重建与水力优化,能保证其运行过程中达到安全性。在该理念下需将水库原破损的底板、侧墙拆除掉,再浇筑 C30 钢筋混凝土,保证底板厚度达到 40 cm。而侧墙则增加锚杆加固系统,确保其具备较高的抗滑稳定性与刚度。水库进口段改为圆弧形翼墙,在设计过程中翼墙圆弧半径须 ≥ 3 m,翼墙倾斜角度控制在 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 左右,并且翼墙厚度 ≥ 50 cm,水流阻力系数 ≤ 0.025 ,使水流状态得以改变,减少进水损失与涡流振动。控制段堰型优化为实用堰,使水库泄流系数得以提高,能满足 100 年一遇洪水安全下泄要

求。水库出口消力池加深加长,消力池加深深度 ≥ 0.8 m,消力池加长长度 ≥ 5 m,辅助消能墩间距 1.5 m $\sim$ 2 m,尾坎高度 ≥ 0.5 m,消能效率 $\geq 85\%$,增加辅助消能墩与尾坎消除剩余能量,以防对水库产生过大冲击。同时,水库溢洪道两侧建设检修通道与安全护栏,检修通道宽度 ≥ 1.2 m,安全护栏高度: ≥ 1.2 m,排水系统坡度: $\geq 2\%$,护栏间距 ≤ 15 cm,通过设置完善排水系统,以提高后续运维管理的操作性与安全性。

3.3 输水建筑物除险设计

由于本水库输水涵管存在渗漏、设备老化等问题,在除险加固中采取内衬修复与设备更新组合的方式。原涵管使用高压水枪清理打磨后植入钢筋网,再喷射高强聚合物砂浆内衬加固,以增强结构完整性与止水性。水库进口连接段拆除重建,选择使用柔性橡胶止水带进行沉降缝处理,橡胶止水带宽度 ≥ 300 mm,厚度 ≥ 10 mm;沉降缝间距: ≤ 6 m;止水带搭接长度 ≥ 100 mm;混凝土强度 $\geq C30$,进而避免发生不均匀沉降问题。铸铁闸门存在锈蚀、强度下降的情况,将其整体更换为平面钢闸门,钢闸门厚度设计为 ≥ 12 mm;同时采取热喷锌加环氧涂料防护处理,热喷锌厚度设计为 ≥ 80 μ m,环氧涂料厚度设计为 ≥ 150 μ m,闸门承载力设计值不低于设计荷载的 1.2 倍。水库闸门启闭系统升级为螺杆式电动启闭机,配合使用备用电源与手动装置,确保在断电情况下依然能够紧急关闭。此外,该水库增加电磁流量计与高清视频监控系统,将现场运行数据及时传输到后台管理系统,确保水库运维管理达到高可靠性^[3]。

3.4 配套设施设计

该水库除险加固建设完善配套管理措施,促进水库管理现代化水平的提升。本次除险加固建设防汛管理用房 200 m²,包含值班室、会议室、设备间,以满足日常办公与应急指挥需求。水库内部防汛道路进行硬化处理,将宽度增加到 6 m,浇筑混凝土路面满足车辆通行需求。而在现场运行中建设自动化监测系统,包含坝体表面位移、内部变形、渗流压力、雨量、水位监测等点位,设计过程中坝体表面位移监测精度为 ± 1 mm,内部变形监测频率:每 30 分钟 1 次,渗流压力监测范围:0 MPa $\sim$ 1.6 MPa,精度 $\pm 0.5\%$,雨量监测精度 ± 0.1 mm,水位监测精度 ± 2 mm,数据传输延迟设计在 ≤ 1 s 之内,并且将所有监测数据传输到水利管理平台,能时刻掌握大坝溢洪道主要出入口的运行状态并设置预警功能。

4 水库除险加固施工质量控制要点

4.1 施工准备阶段质量控制

水库除险加固开始前需做好施工准备工作,这关系到各项加固措施是否有效落实。首先,对除险加固单位以及人员资质进行审查,确保关键岗位人员持证上岗。同时,组织多方人员进行技术交底,使现场人员了解设计方案和施工质量标准。其次,严格落实材料质量管理。水库除险加固中水泥、钢筋、土工膜、止水带为关键材料,按照规定比例抽样检测,各项指标合格再开展现场加固施工。在现场施工环节,根据设计方案布置测量控制网,确保大坝轴线高程、断面尺寸精度合格。再次,检查设备性能。针对水库除险加固中大型设备,如起重机械、灌浆设备、混凝土搅拌站,保证其性能处于最佳状态。最后,建设完善质量管理体系,明确各岗位人员质量责任并制定奖惩措施,为后续施工奠定基础^[4]。

4.2 关键工序施工质量控制

水库除险加固关键工序是核心,其对除险加固效果有直接影响,需落实旁站监理与全程精细化控制措施。水库除险加固中,高压旋喷灌浆保证垂直度、喷浆压力、提升速度、水泥浆液比重合格,且确保现场灌浆作业达到连续性、均匀性。而在灌浆完成后,需使用取芯检测、压水试验检测防渗效果,使其合格率达到100%。土工膜铺设保证基层表面平整性,焊接部位使用双焊缝工艺,且焊缝宽度超过10 cm,再使用充气检测以防存在焊接缺陷。混凝土浇筑保证混凝土配合比符合要求,各项参数合格,分层振捣施工以提高混凝土结构密实度。预应力锚索保证钻孔角度、深度合格,张拉环节采取应力与伸长值双控方式^[5]。此外,灌浆作业全程固定设备运行参数,施工时保持匀速作业,施工过程中不能随意调整设备参数。土工膜铺设搭接区域严格清理干净,彻底清除区域内杂物、积水与尖锐颗粒,规避焊接空鼓、开裂问题。混凝土振捣严格遵循快插慢拔施工规范,合理控制振捣间距与振捣时长,减少漏振、过振、蜂窝麻面等施工情况出现。锚索张拉采取分级匀速施压作业模式,每一级张拉完成后保持稳压静置,严格核对孔位、张力及伸长值各项施工参数,全程标准化合规作业。

4.3 施工过程质量监测与管控

水库除险加固建设动态化质量监测措施,对施工现场进行全面施工监督管控。在本项目水库除险加固中,需对坝基沉降、位移、渗流定期监测,及时掌握数据变化趋势,一旦发生质量缺陷则及时停止施工作业。溢洪道高边坡支护进行深层位移监测,避免发生

滑坡风险。而在现场施工环节落实隐蔽工程检查验收工作,基础清理、钢筋绑扎、止水安装等关键环节留存影像,确保施工质量具备可追溯性。同时,水库除险加固引入第三方机构对水库实体质量进行抽样检测。在水库除险加固中建设信息化管理平台,及时掌握现场施工质量信息,针对潜在质量隐患采取应对方案^[6]。

4.4 施工后期养护与质量验收控制

水库除险加固后需进行养护,这是保证除险加固质量的核心环节。混凝土浇筑后及时进行养护处理,保证养护时间在14天以上,采取夏季遮阳降温、冬季保温防冻的措施,避免发生混凝土结构裂缝。水库中金属部件安装后,采取全程调试与防腐涂层修补措施,使其开启灵活且防腐性能达到要求。水库除险加固后组织专业技术团队进行质量验收,主要从实体质量检测、外观评定、资料核查、功能测试等方面展开质量检查。上述工作结束后收集项目施工以及质检资料,确保资料真实、准确^[7]。

5 结束语

水库除险加固属于复杂系统性工程,其关系到水库运行功能以及社会稳定。本文以某水库为例,深入探讨坝体渗漏、溢洪道损毁、输水设施老化的具体加固措施,在水库除险加固中进行质量监督管控,以保证水库除险加固效果合格。在水库除险加固中,通过高压旋喷灌浆、复合土工膜防渗、智能化监测等技术,能及时消除安全隐患,确保水库运行达到安全性、可靠性。同时,水库除险加固需落实各方责任,将新材料、新工艺、数字化技术应用到实践中,构建全生命周期管理模式,确保水库运行状态合格,符合当前水利事业发展需求。

参考文献:

- [1] 王雪婷,贾云龙,张甲栋.浅析李家川水库除险加固设计洪水复核计算[J].地下水,2023,45(06):213-215.
- [2] 夏初阳,于海洋,张晓青.通辽市库伦旗养畜牧东水库坝体除险加固设计方案浅析[J].内蒙古水利,2023(09):18-19.
- [3] 简从义.某水库枢纽大坝工程除险加固设计要点[J].河南水利与南水北调,2023,52(10):77-78.
- [4] 李东文.阳春市北河水库除险加固工程中输水涵加固设计研究[J].陕西水利,2023(11):162-163,166.
- [5] 胡衍,邱云强,张松.水利工程中小型水库除险加固设计探讨[J].中国设备工程,2024(17):239-241.
- [6] 鞠晓东.小型水库除险加固设计方案分析[J].陕西水利,2025(03):163-165,168.
- [7] 张骞文,李青.水利工程中小型水库除险加固设计研究[J].水上安全,2025(13):13-15.

高层建筑消防电气系统施工质量 控制要点与实践研究

汪士龙

(安徽省首通消防工程有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘要 高层建筑结构复杂、功能多样, 消防电气系统作为消防安全核心保障, 其施工质量直接关系到建筑整体安全与人员生命财产安全。针对当前高层建筑消防电气施工中存在的质量隐患问题, 结合施工全流程实际, 对其施工质量控制要点展开研究, 梳理施工前期、施工中及施工后各环节的核心控制内容, 明确施工准备、人员管理、技术把控、系统调试、验收维护等关键环节的具体要求, 形成全流程、精细化的质量控制体系, 以期高层建筑消防电气系统施工质量提升提供实践参考, 进而保障系统稳定可靠运行。

关键词 高层建筑; 消防电气系统; 施工质量控制; 全流程管控

中图分类号: TU976

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.041

0 引言

城市建设向高层化、智能化快速推进, 建筑体量与功能复杂度持续提升, 消防电气系统作为火灾预警、应急联动的核心载体, 施工质量直接决定建筑消防安全底线。近年来, 消防规范全面升级, 智慧消防技术深度应用, 监管标准向全流程追溯、智能化核验转变。当前高层建筑消防电气系统施工仍存在管线敷设不规范、设备接线不实、联动调试不到位等隐患, 加之新材料、新设备应用带来技术适配难题, 质量管控压力显著加大。基于行业新形势与工程实践, 本文围绕高层建筑消防电气系统施工前期、过程、后期全链条, 细化人员、技术、工艺、验收、维护等关键环节控制要点, 构建精细化质量管控体系, 为提升高层建筑消防电气施工质量、保障系统长效稳定运行提供实践参考。

1 高层建筑消防电气系统施工前期质量控制

1.1 施工前期准备质量控制

全面做好施工前期准备, 核心是通过多环节严格把控, 从源头规避消防电气施工中的质量隐患, 为后续施工筑牢基础。施工图纸审核并非简单核对条款, 而是要结合高层建筑的结构特点、功能分区, 深入核查电气线路走向与建筑主体结构的适配性, 重点确认消防专用回路的独立性、负荷分配的合理性, 以及设备选型与现行消防规范、建筑使用需求的符合性, 及时发现并修正图纸中存在的线路冲突、设备型号不符

等问题, 避免后期施工返工。施工方案的编制与评审需兼顾合规性与实操性, 明确各施工工序的质量验收标准、施工流程、技术要点, 细化隐蔽工程的施工工艺与检测要求, 同时结合施工场地、人员配置等实际情况, 优化施工流程, 确保方案能够有效指导现场施工。

1.2 施工人员质量控制

规范管理施工人员, 组建专业能力强的施工队伍, 成为确保消防电气施工质量的关键基础。施工人员的专业素养直接关系到施工过程的规范程度和系统运转的稳定程度, 对施工人员资质的审查必须从严控制, 着重检查从业人员有没有取得消防电气专业施工资格, 是否持有对应的实际操作技能证明, 并且结合过往工作经历, 挑选出熟悉高层建筑消防电气施工特性、掌握突发事件应对技能的人员, 避免没有资质、缺乏经验的人员介入重要工序施工^[1]。上岗前的训练应当跳出一般化套路, 围绕高层建筑消防电气系统的复杂性和独特之处, 组织专门训练, 内容包含当前消防规范讲解、新式设备使用步骤、质量隐患防范重点, 同时加入代表性质量问题实例剖析, 使施工人员深刻认识到不规范作业带来的严重后果, 增强按章办事的观念和安全防范意识。

1.3 施工技术前期控制

提前做好技术方面的储备和预判, 把技术应用整个过程都加以明确规范, 是为消防电气施工质量控制

作者简介: 汪士龙 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑电气。

筑牢技术基础的关键点，可以有效避开施工环节的技术风险。技术交底要打破形式化的传递方式，由技术负责人带头，向施工人员逐一讲解每个工序的技术参数、操作重点、质量验收规范，配合施工图纸标出关键节点的技术要求。针对高空线路敷设、复杂管线交汇等难点地方，进行现场演示讲解，保证每一位施工人员准确掌握技术标准，避免因技术理解出现偏差造成施工质量达不到要求。技术难点预判需要从施工实际情况出发，结合高层建筑的结构特征、施工环境，提前整理施工环节中可能出现的技术难题，如设备安装空间受到限制、线路敷设与其他机电系统产生冲突等，有针对性地制定施工工艺优化方案和应急处置办法，保证施工过程中遇到问题能够快速有效地处理。

2 高层建筑消防电气系统施工过程质量控制

2.1 核心电气系统施工质量控制

聚焦配电与火灾报警核心系统，严格把控施工工艺的每一个细节，是保障消防电气系统运行可靠性的核心，直接关系到火灾发生时系统能否正常发挥作用。配电系统作为消防电气系统的动力核心，其施工质量直接决定各消防设备的供电稳定性与连续性。电源安装需严格遵循规范要求，确保消防专用电源的独立性，避免与非消防电源混用，规范电源接线的工艺标准，做好接线处的绝缘处理，杜绝虚接、错接、漏接等问题，确保电源切换灵活、可靠^[2]。线路敷设需结合建筑结构特点，合理规划线路走向，优先选择阻燃、耐火等级符合要求的线缆，严格控制线缆弯曲半径与敷设间距，避免线缆受到挤压、损伤，同时做好线路的固定与防护，防止后期使用过程中出现线路老化、短路等隐患。配电箱接线需规范端子处理与布线方式，确保接线牢固、排列整齐、标识清晰，便于后期检修与维护，同时严格核查配电箱的防护等级，确保符合高层建筑的使用环境要求，通过精细化把控核心系统施工工艺，筑牢消防电气系统的运行基础。

2.2 辅助保障系统施工质量控制

做好应急和防雷辅助系统施工工作，持续改进消防电气保障体系，是施工质量控制的关键措施，有助于从各个角度增强消防电气系统的安全水平和稳定程度。应急照明和疏散指示系统在火灾出现时承担着保证人员安全撤离的核心任务，其施工品质紧密关联疏散速度和人员的生命安全。高层建筑消防电气系统施工要保证设备安装位置科学合理，严格遵循建筑疏散路线设计需要，在疏散通道、安全出口等重点部位按规定安装应急照明灯具和疏散指示标志，确保标记清

楚、指向正确、安装稳固。规范线路连接和调试步骤，做好线路的绝缘处理，保证应急情况下设备可以迅速启动、平稳运转，照明亮度和维持时间达到规定标准，消除由于设备问题、线路问题引发的疏散指引失灵^[3]。接地和防雷系统构成消防电气系统安全运转的重要屏障，直接影响到系统的抗干扰性能和设备使用年限，接地系统施工必须严格把握接地电阻，规范接地体的埋设深度、间隔和连接方式，确保接地装置的导电性能和可靠程度，防止由于接地不良造成设备破坏、信号扰乱等状况。防雷系统施工需要按照规范要求装设接闪器、引下线等组件，加强防雷部件的连接质量和防护成效，确保能够有效应对雷击危险。通过健全辅助保障体系，为关键消防电气系统提供全面支撑。

2.3 施工全流程现场质量管控

加强施工全流程的现场管理，及时发现各类质量隐患，是保证施工质量达到规定标准的重要步骤，能够使施工质量在整个过程中都能被有效管控。施工现场的工序非常复杂，人员也很多，质量风险点分布广泛，需要建立起常态化且细致化的现场管理方式。工序巡检应当安排专业能力强的质量管理人员全程跟随施工工序，重点查看操作是否规范、工艺是否合格、材料使用是否满足要求等情况，对于发现的质量隐患要迅速发出整改通知，清晰说明整改内容、采取的办法以及完成时间，指派专人负责跟进监督，确保问题得到及时解决，不留下质量隐患。工序交接检验需要严格执行“上一道工序不合格就不进入下一道工序”这一原则，每一道工序结束之后，由施工班组和质量管理人员一起进行交接验收，逐一检查上一道工序的施工质量、资料的完整性，确认合格并且签署验收记录后，才允许进入下一道工序施工，避免因上一道工序的质量问题而对后续施工质量造成影响。施工过程记录要做到真实、完整、规范，详细记载施工工序、施工人员、材料规格、质量检测结果等关键信息，建立完整的施工质量档案，这不仅为后期质量验收提供了可靠的依据，也为后续质量追溯、系统维护打下了基础，通过全流程的现场管理，全面确保施工质量。

3 高层建筑消防电气系统施工后期质量控制

3.1 系统调试与检测质量控制

全面开展系统调试与检测，精准检验施工质量，是确保消防电气系统功能达标的关键步骤，能够全面验证系统的运行可靠性与合规性。系统调试需分层次、分系统有序推进，先完成各子系统的独立调试，逐一核查配电系统、火灾自动报警系统、应急照明系统等

各子系统的运行参数、功能有效性与稳定性,重点确认设备的启停状态、信号传输质量、参数匹配度等关键指标,及时排查子系统运行过程中的故障与问题,对调试中发现的参数偏差、运行异常等情况,及时调整优化,确保各子系统能够独立稳定运行^[4]。在此基础上开展系统联动调试,模拟火灾场景下各消防电气系统的协同响应流程,验证各系统之间的联动逻辑、响应速度与配合效果,重点检查火灾探测器报警后,应急照明启动、电源切换、联动设备动作等环节的协调性与准确性,确保系统联动准确、动作协调,满足火灾应急处置需求。第三方检测需委托具备相应资质的专业机构,严格按照现行消防规范与行业标准开展全面检测,检测过程全程规范、公开,确保检测结果真实、客观、准确,通过多维度调试与检测,全面验证施工质量,为系统安全投用奠定坚实的基础。

3.2 施工验收质量控制

规范验收流程和严格验收标准,是确保施工质量达到要求、保障系统安全投入使用的最后一道防线,可以全面核查施工成果的合规性与可靠性。验收资料整理审核是验收工作的重要前提,需要全面梳理施工全过程的各类资料,涵盖施工图纸、设计变更文件、材料合格证明、施工记录、调试报告、检测报告等,逐一核查资料的完整性、规范性与真实性,确保资料能够完整反映施工全过程,与施工实际情况高度一致,杜绝资料缺失、造假、与实际施工不符等问题,为现场验收核查提供可靠依据。现场验收核查要采取“资料核对+现场查验”相结合的方式,验收人员对照施工图纸与规范标准,逐一查验施工现场的施工工艺、设备安装质量、系统运行状态等实际情况,重点排查隐蔽工程、关键工序等易出现质量隐患的环节,对发现的质量问题详细记录,明确问题性质与整改要求^[5]。验收问题整改要建立闭环管理机制,对验收中发现的问题,明确整改责任主体、整改措施与整改时限,整改完成后组织专业人员进行复查,确认问题彻底整改合格,确保验收通过后,消防电气系统能够安全、稳定地投入使用。

3.3 竣工后质量维护与追溯控制

竣工之后的质量维护和追溯工作,是保证消防电气系统可以长时间稳定运转、巩固施工质量成果的一项重要举措,能够延长系统使用寿命,保证系统持续发挥消防保障作用。竣工之后需要建立起一套完整的质量维护管理制度,明确系统维护的责任主体、维护周期、维护内容和维护标准。结合高层建筑消防电气

系统的特点,制定出详细的维护计划,明确日常巡检、定期检修、故障处理等具体内容,保证维护工作可以有序、规范地开展。系统巡检维护需要按照维护计划定期开展,安排专业维护人员对系统设备、线路、接地装置等进行全面检查,重点关注设备运行状态、线路连接情况、系统参数稳定性等,及时排查质量隐患,对发现的设备老化、线路破损、参数异常等问题,及时采取维修、更换等措施,避免小隐患变成大故障,保证系统长时间稳定运转。质量追溯体系的构建需要整合施工全过程信息,将施工材料采购、施工工序开展、人员履职情况、检测验收结果等信息统一归档,实现全流程可追溯,一旦出现质量问题,可以快速追溯问题根源,明确责任主体,及时落实整改措施,通过完善维护与追溯机制,持续巩固施工质量成果,为高层建筑消防安全提供长期保障。

4 结束语

高层建筑消防电气系统施工质量管控是一项系统性工作,贯穿施工前期准备、过程实施到后期调试验收与维护的各个环节,任一环节出现疏漏,都可能埋下消防安全隐患,影响系统正常运转。本文结合施工实践,梳理各阶段质量控制核心要点,明确人员、技术、设备、现场管理等方面的管控要求,构建全流程精细化质量控制体系,为实际施工提供可落地的实践指引。消防电气系统作为高层建筑消防安全的“生命线”,其质量管控需兼顾合规性与实操性,既要严格遵循现行消防规范,也要结合建筑结构特点优化施工工艺。未来仍需结合新型建筑技术与消防设备的发展,持续优化质量控制方法,强化全流程管控力度,巩固施工质量成果,为高层建筑提供长期、稳定、可靠的消防安全保障,守护人员生命财产安全。

参考文献:

- [1] 刘建伟.高层建筑消防电气设计研究[J].产品可靠性报告,2023(06):152-154.
- [2] 张华屏.高层建筑消防电气设计隐患及火灾报警系统思考[J].城市建筑空间,2022,29(S1):87-88.
- [3] 林伟伟.高层建筑消防电气设计隐患及火灾报警系统优化策略探析[J].中国住宅设施,2021(12):7-8.
- [4] 常堃.高层综合体建筑消防电气及其配电设计分析[J].科技资讯,2025,23(13):93-95.
- [5] 金辉.超高层公共建筑消防电气设计技术问题及对策研究[J].现代工程科技,2024,03(22):40-43.

国土空间规划背景下地理信息数据库构建与更新方法研究

黄青云

(山东恒工测绘有限责任公司, 山东 菏泽 274100)

摘要 国土空间规划体系全面重组落地施行之后, 全域空间治理精细化推进对地理信息数据支撑水平提出了全新的需求。地理信息数据库是国土空间资源管控和规划落地的承载者, 数据完整性标准化、动态时效性直接关系到规划编制实施监督全流程质量。本文根据国土空间规划全域统筹发展的特点, 梳理数据库建设的核心价值, 深入剖析当前数据架构管理机制、技术迭代应用等方面存在的短板。紧扣数字化技术发展趋势, 提出适配国土空间治理实际需求的数据建设路径与常态化动态更新方案, 进一步强化地理信息数据与国土空间规划业务的深度融合, 以期自然资源统一管控、空间资源高效利用提供參考。

关键词 国土空间规划; 地理信息数据库; 数据构建; 动态更新

中图分类号: P208

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.042

0 引言

国土空间规划是协调区域发展、资源利用、生态保护的核心治理手段, 实现了对传统分散化空间治理模式的系统性重构。全域全要素的空间管控模式要依靠准确全面连续的地理信息做支撑。地理信息数据库整合了土地利用、地形地貌、生态环境、城乡建设等诸多空间数据, 是国土空间规划编制、审批、实施监管的基础性地理信息数据。传统的地理信息数据建设模式存在着体系分散、标准不统一、更新缓慢等缺点, 不能适应新时代国土空间规划一体化发展的需要。立足于国土空间规划整体发展格局, 研究地理信息数据库科学构建模式和长效更新机制, 可以完善自然资源数字化治理体系, 促进国土空间治理现代化转型发展。

1 地理信息数据库在国土空间规划中的应用价值

1.1 夯实国土空间一体化规划实施的数据基础

国土空间规划重视全域各类自然要素的统筹治理, 各个规划工作开展必须依靠统一的地理空间基底。地理信息数据库把各种各样的空间要素进行整合, 使用相同的坐标系、分类方式和存储格式。一体化数据资源能冲破各种空间规划之间数据隔绝状况^[1]。规划编制工作可以依靠标准化的地理信息资源开展许多主要的工作。完善规范的数据库体系, 保证各级规划内容

能够有效衔接协调, 给国土空间规划落地实施提供稳定扎实的数据基础。

1.2 提升自然资源精细化管理的治理效能

自然资源管理体制不断完善, 各项核心业务开展对地理信息精细度有更高的要求。地理信息数据库汇集了各种类型的、各方面的空间数据, 从而对全域资源进行要素的系统性整合和归集。管理部门依靠数据库系统来执行各种各样的常态化工作。精准地理信息可以使得管理部门准确地找到各种资源治理的问题。依靠完备的数据体系实行精细化管理方式, 削减基础工作的人力资源消耗, 加强自然资源治理工作专业的水准和精确的程度。

1.3 推动国土空间治理数字化转型发展进程

数字化建设是国土空间治理现代化的主要发展方向, 地理信息数据库搭建是治理数字化提升的重要基础。数据库把多项现代信息技术整合起来, 创建起数字化治理服务平台。海量的空间数据进行集中化管理以及智能分析, 达到对国土空间发展状况全面掌控的目的。数字化体系搭建起上到下部门之间信息传递的渠道^[2]。全域共享数据内容给各有关部门协同开展管理提供了基础, 使原来的管理方式发生改变, 国土空间治理的数字化建设进入新阶段。

作者简介: 黄青云 (1986-), 女, 专科, 助理工程师, 研究方向: 自然资源一测绘工程 (地理信息系统工程)。

2 国土空间规划背景下地理信息数据库建设与更新现存问题

2.1 数据标准体系缺乏统一规范

各个部门都单独进行地理信息数据的整理工作,行业间的数据采集和划分标准也大相径庭。国土空间规划所涵盖的要素范围较广,没有形成统一的编制要求和入库标准。差异化数据格式不能达到顺畅衔接的效果,数据整合阶段容易出现各种内容问题。混乱的数据标准降低数据库整体建设质量,削弱多源数据融合应用成效,不能满足国土空间规划全域统筹的总体发展需要。

2.2 数据库整体架构设计适配性不足

多地地理信息数据库沿用传统的建设方式,整体架构侧重于静态数据的存储,不能适应国土空间规划动态化发展的要求。数据库功能比较单一,只对基础数据进行保存,缺少很多业务相关的功能。内部数据划分结构有问题,对主要影响因素界定不清。老旧运行架构不能满足大范围数据运算的要求,不能适应国土空间规划各种分析以及实际应用。

2.3 现代化技术融合应用程度不足

各类先进地理信息技术已经走向成熟发展,基层数据库建设运维环节的技术落地力度较小。数据采集工作仍然使用传统的手工方式,整体效率低,还会导致人为主观因素引起的误差。数据整合处理过程缺少智能技术的支撑,大量的异构数据处理工作进程缓慢。智能动态监测技术的普及程度较低,国土空间各种要素的变化情况不能及时把控^[3]。技术应用不足降低数据库的综合服务效能,造成地理信息数据不能充分发挥价值。

2.4 动态更新机制建设不够完善

地理信息数据具有很强的时效性,国土空间不断变化发展的要求使得数据必须是实时更新的。大多数地区的数据库实行阶段性更新的方式,常态化长效更新的制度还没有完全形成。部门协同共享体系存在漏洞,各类新的规划建设信息不能及时被数据库所包含。数据更新权责划分不明,整个工作流程缺乏制度约束,很容易出现各种数据更新问题。滞后的数据内容会对国土空间规划的监管以及科学决策造成影响。

3 国土空间规划背景下地理信息数据库构建与更新优化策略

3.1 统一数据规范,筑牢全域管控根基

严格按照国土空间规划有关制度要求来制定全域通用的地理信息数据管理统一标准。统一全域数据核

心规则内容,协调整改各个领域原有差异化管理条例。根据规划管控实际需要,对不同国土、资源、基建要素制定分类管理细则^[4]。构建常态化数据审核校验体系,严格把控入库数据的完整性与规范性。依托统一化标准体系整合多元数据源,破除各领域数据对接壁垒,保障全域地理信息数据库内容统一、口径一致。例如:全域基建统筹规划实施中以统一数据规范为工作导向,依据国土空间管控、基建建设、资源调配等顶层制度要求,创建全域工程基建要素统一管理体系。整合市政工程、交通基建、园林工程、岩土工程等各方面的建设领域原有的分散统计规则,细化工程用地、建设规模、设备配置、施工参数、运维指标等主要要素的分类标准,并形成常态化的数据核验和质量校验流程。全面整理全域工程建设领域数据统计漏洞和规范差别,剔除老旧落后统计指标,增添契合现代基建发展的量化考核要素,统一数据填报格式、计量标准、统计周期等基本规范。就基层工程建设单位数据管理能力不同制定标准化填报规程和审核细则,减少由于人工操作而产生的数据误差。依托统一规范整合全域基建多元数据,打通工程规划、施工管控、运维管理各个环节的数据链路,消除行业板块数据衔接的障碍,实现全域工程地理信息数据标准化整合,为国土空间规划落地、基建项目统筹、工程质量管控提供可靠的支撑,全面提升全域工程建设精细化管控水平。

3.2 优化库体架构,适配规划应用需求

按照国土空间全域治理、动态管控的需求,重新搭建起分层模块化的数据库整体运行结构。科学划分空间数据存储区域,明确各类空间数据的应用范围与管理边界。拓展数据库功能模块,强化与国土空间各类工程业务的适配衔接。依托云端技术搭建分布式存储架构,提升海量空间数据的存储承载与运算处理能力。优化数据库架构弹性,紧跟行业发展动态迭代升级,保障系统长期稳定运行。例如:在全域国土工程信息数据库升级改造工作中,根据国土规划、基建管控、资源勘测、工程运维等主要业务需求创建分层模块化的工程信息管理结构。将地形地貌数据、工程用地信息、基建规划资料、资源勘测数据、运维监测信息分成独立的存储单元,确定各个模块的管理权限和应用范围,创建工程动态监测、规划方案比对、资源数据分析、项目运维管控等专业功能。依靠云端分布式存储技术来承载大量的工程空间数据以及动态监测信息,从而提高数据库的大容量存储、快速调取、批量运算等方面的能力。根据国土规划政策的调整和新型基础设

施建设的需求动态调整系统的架构,以保证全域工程的可持续发展。传统的工程数据管理系统大多使用集中式的单体架构,各个功能模块之间互相重叠,地形数据、工程资料、勘测信息一起被存放在同一个系统中,数据调取效率低,系统扩容升级困难,无法满足越来越大的全域工程数据需求。分层模块化优化后各个功能模块独立工作,又相互联系,符合国土规划管理、工程建设实施、跨领域协同管控等多种需要,可以依据工程建设的发展动态来增加新的功能模块,全面提高国土工程数据库的实用性和扩展性,深度满足全域国土空间治理和工程建设管理的实际需要。

3.3 融合先进技术,升级智能建设能级

推进新型测绘遥感和大数据技术与数据库建设全流程深度融合,依托智能采集设备替代传统人工勘测模式,提升空间数据采集的精准度与作业效率。运用智能算法处理异构空间数据,依托数字化技术完成数据校对、整合与优化处理^[5]。借助云计算搭建专业化数据处理平台,实现海量地理信息数据的批量快速处理。结合智能感知技术构建全域动态监测体系,实时捕捉国土空间要素变化,以技术赋能全面提升数据库综合服务效能。例如:在全域工程数字化建设推进的过程中,以先进技术融合为发展途径,把测绘遥感、大数据、云计算、智能感知等技术应用到工程地理信息数据管理的各个环节当中。利用无人机测绘、智能勘测终端、遥感影像采集等智能设备取代传统的手工勘测收集方式,提高全域工程地形测绘、用地勘测、基建数据采集的精度和效率。依靠智能算法自动辨别异构数据,改正异常参数,把工程勘测数据,建设参数,空间信息融合起来。采用云端数据处理平台对全域国土勘测、工程规划、资源勘测等大量数据进行处理,缩减数据处理时间。智能技术全面落地应用之后,可以对工程建设动态、地质环境变化、基建运维状况、国土要素变动等信息实行自动采集和即时汇总,依靠智能算法来发出异常数据警报并加以修正,从而明显削减人工勘测和数据整理的成本,促使全域工程数据治理朝着智能化、精细化方向转变。

3.4 健全更新机制,保障数据时效质量

构建一体化长效数据更新管理体系,革新传统阶段性、周期性的数据更新模式。搭建跨领域、跨部门协同联动机制,打通国土、基建、勘测、运维等行业信息互通渠道,保障各类规划建设信息高效流转。明确数据更新各环节责任主体与操作规范,建立标准化运维管理体系。结合国土要素变动规律划分差异化更新模式,按需开展数据维护工作。落实数据更新后质

量复核流程,确保数据库内容完整准确,持续维系地理信息数据的时效性与实用性。例如:以全域国土工程动态管控工作为背景,按照长效运维机制的建设要求,创建一体化工程地理信息动态更新体系,冲破固定周期集中更新的老路子。创建国土规划、工程建设、地质勘查、基建维护等诸多方面协同互动的机制,健全跨行业信息共享途径,保证工程规划调整、用地改造、基建施工、地质环境变动这些关键信息及时互通。确定工程数据采集、更新、审核、归档各个环节的职责以及操作规范,创建起闭环式的工程数据运维管理流程。根据国土要素和工程建设变动的规律来制定不同的更新方式,工程建设动态、地质环境变化等频繁发生的变动数据每月更新一次,地形地貌、用地规划等静态的基础数据每季度或者每年进行一次更新,常态化的开展数据梳理和维护工作。同步执行数据更新之后的复核校验程序,立即对出现偏差的数据予以修正,保证全域工程地理信息数据的准确性及完备性。长效更新机制一旦落实,工程数据就会同全域国土建设实际状况相契合,从而给国土空间规划改善、工程建设协调以及地质防护把控提供及时、准确的数据支持。

4 结束语

国土空间规划体系全面实施之后,地理信息数据库就成为空间治理、资源控制的基本数据资源。地理信息数据库创建可以为一体化规划执行精细化的资源管理数字化治理转型提供关键支撑。目前,地理信息数据的数据库建设存在着标准不统一、结构不合理、技术运用不足、更新速度慢等诸多现实问题,从而限制了其利用价值。未来需持续深化地理信息数据库同国土空间规划业务的融合,不断巩固自然资源数字化管理的基础,给国土空间高质量发展、全域空间治理现代化提供持久的数据支撑。

参考文献:

- [1] 彭超,张芮,康喆文.国土空间规划背景下村级公益性公墓规划路径探索:以洛南县村级公益性公墓规划为例[J].青海师范大学学报(自然科学版),2025,41(02):20-28.
- [2] 谭泉.国土空间规划背景下旧城改造规划设计策略分析[J].新型城镇化,2025(06):48-51.
- [3] 周传芳,闫兴辉,张芹.国土空间规划背景下全域土地综合整治研究[J].住宅与房地产,2025(15):68-70.
- [4] 白雪,星悦,唐文慧,等.国土空间规划背景下的兰州科学城生态保护修复[J].资源节约与环保,2025(05):105-108.
- [5] 张建中.基于国土空间规划背景下农业土地规划研究[J].河北农业,2025(05):26-27.