

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 3 月 第 7 期 (总第 632 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 3 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 基于精密磁性部件的自动充退磁系统研究
..... 肖伟东, 于亚云, 冀 雨, 张宇菲
- 004 燃气发电厂 DCS 系统编程优化与维护策略研究
..... 冯河东
- 007 高速弱光探测条件下光电探测器噪声特性分析
..... 曾维强
- 010 桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术对比研究
..... 章博辉, 蔡庆森
- 013 火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常与抑制策略研究
..... 张晋豪
- 016 城市地下勘探作业中既有管线损毁风险预警与防护技术研究
..... 刘自强

智能科技

- 019 人工智能在城市交通控制中的应用
..... 高夕砚
- 022 BIM 技术驱动下的建筑工程管理创新路径
..... 张 欢
- 025 智能巡检机器人在变电运维中的应用及成效
..... 刘海韬
- 028 人工智能技术在软件自动化测试中的应用分析
..... 吴鸿璋, 高 凯, 张建恒
- 031 电气自动化技术在智能建筑电气工程中的应用探究
..... 张玲芝, 李小慧, 马联蒙, 薛玉洁, 桑广坤
- 034 空调通风系统节能优化设计与运行能效提升路径研究
..... 赵欣欣
- 037 建筑电气安装工程中物联网技术的智能监测与质量管控实践
..... 胡 斌, 王寿龙, 宋 静

应用技术

- 040 水利施工中水坝堤防堵口施工技术应用
..... 蔡卫露

目录 Contents

043	水利河道治理施工技术与管理措施研究	陈振斌
046	水利河道防洪治理施工技术的应用研究	王飞翔
049	软土地基深基坑开挖施工技术 & 支护分析	吴琼
052	黄河干流堤防加固关键技术与施工方法研究	马红旭, 陈思豫
055	水利工程质量检测中的探地雷达技术应用分析	杨畅, 郑成
058	水利工程深基坑支护与降排水施工技术及变形控制研究	张正

科创产业

061	全过程工程造价管理模式的应用与优化	朱琳
064	大数据赋能智能建造工程造价成本控制研究	周燕
067	基于大数据的智能建造工程造价成本控制策略	谢慧慧
070	新能源电力工程全流程优化与成本控制研究	王茂利, 王士元, 房启庆
073	基于 BIM 技术的土木工程建设项目管理创新实践研究	李春甫, 孙世存, 姜晓阳
076	机械装备智能化升级对化工企业本质安全水平提升的路径研究	邹军
079	CCUS 节能环保技术在综合智慧能源产业应用场景下的市场开拓	顾瑞恺

技术管理

082	风电塔筒制作过程中的质量检验与控制	杨龙
085	工程机械电气故障诊断技术及维修策略研究	王坤, 刘旭鹏, 王嘉瑞
088	10 kV 变配电室电气设备安装质量控制策略研究	王学刚
091	建筑工程质量控制管理水平提升要点探讨	杨博婷
094	住宅建筑土建工程中混凝土施工技术要点分析	轩冬冬
097	建筑工程电气设备安装精细化施工技术应用分析	陈天婵, 张锴
100	建筑工程施工技术优化对工程质量提升的影响分析	宋彬, 魏栋
103	住宅供配电工程施工质量与安全协同管理机制探析	钮斌

科学论坛

106	高负荷条件下电气安装可靠性评估方法	张文斌, 李安强, 赵娟
109	绿色公路建设理念在公路设计中的应用探讨	欧玉才
112	市政道路施工中沥青路面平整度控制技术研究	郭士清, 董忠杰, 杨龙飞
115	高层建筑铝模外墙全现浇施工技术研究与应用	张道亮
118	跨境公路改扩建项目沥青混凝土路面精细化施工技术应用	田玉柱
121	国土空间规划编制中现状底图整合技术与数据质量控制方法	徐芸, 金铭
124	高盐环境下微生物群落结构调控及其对有机物降解效能的影响研究	邢胜利, 邢进, 冯振平

基于精密磁性部件的自动充退磁系统研究

肖伟东, 于亚云, 冀雨, 张宇菲

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要 精密磁性部件作为航空航天、高端装备制造等领域的核心部件, 其磁性能直接决定了高精尖产品的精度和可靠性。然而, 传统人工充退磁的方式存在精度低、一致性差、生产效率低下和对工人依赖性高等问题。本文基于脉冲充磁原理、分段式退磁技术与全流程自动化控制理念, 研发了一套集自动上料、精准充退磁、360° 全周磁性能检测于一体的集成系统。该系统采用强-弱双退磁线圈设计, 适配矫顽力不同的磁性能材料, 结合 6 轴协作机械臂与视频识别技术, 实现了取料、充退磁、磁场检测的全流程自动化操作, 满足精密磁性部件的高精度处理需求, 旨在为提升生产效率与产品一致性提供借鉴, 进而为高端磁性部件制造提供技术参考。

关键词 精密磁性部件; 自动充退磁; 360° 全周磁性能检测; 强-弱双退磁线圈

中图分类号: TH16; V24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.001

0 引言

在现代制造业向高精度、智能化转型的背景下, 精密磁性部件^[1]的应用场景日益广泛, 从航空航天领域的姿态控制系统到高端医疗设备的驱动机构, 从精密仪器的传感组件到新能源汽车的核心电机, 其磁性能直接影响整个系统的运行精度、稳定性与使用寿命。精密磁性部件需具备精确可控的磁场强度、均匀的磁场分布及稳定的磁导率特性, 而充退磁工艺是决定这些性能指标的关键环节。传统充退磁^[2]过程多依赖人工操作, 通过手动调节磁场参数导致来完成部件的充退磁过程, 由于精密磁性部件的矫顽力存在差异, 且人工手动调节磁场参数误差较大, 导致批量产品的磁性能离散度较高, 产品合格率低; 充磁、退磁和检测分散在多套独立设备中, 工序衔接效率低, 单工件处理周期时间长, 生产效率低下; 磁场检测多为单点抽样, 无法全面反映 360° 环形磁场分布, 易遗漏局部磁性能缺陷。针对以上问题, 传统充退磁工艺已无法满足现代生产需求。因此, 设计研发一套集高精度和自动化于一体的自动充退磁系统, 实现充退磁参数的精准匹配、过程的全面实时监测与自动调节, 对于提升精密磁性部件的制造质量和降低生产成本有重要意义。

1 自动充退磁系统总体设计

1.1 系统功能需求与技术指标

针对传统设备的手动调控、功能单一、精度不足、兼容性差等问题, 自动充退磁系统可自动识别工件序

列号, 实现工件的自动上料、充退磁、360° 全周磁场检测和下料等, 全程无需人工干预, 可实时动态检测磁场强度等参数, 记录与分析处理数据, 支持数据导出与追溯, 具备过流、过温、过压保护等功能, 满足不同类型、不同规格精密磁性部件的自动充退磁工艺需求。其技术指标包括: (1) 充磁场强: 4 T; (2) 退磁精度: $\pm 1\%$; (3) 测量精度: $\pm 0.5\%$; (4) 重复测量精度: $\pm 0.8\%$ 。

1.2 系统总体设计

整个系统分为 7 个功能区域(如图 1 所示), 包括: A 区(6 轴协作机械臂)、B 区(充磁区域)、C 区(强退磁区域)、D 区(弱退磁区域)、E 区(视频识别区域)、F 区(360° 全周磁场检测区域)和 H 区(临时周转区域)。核心组成主要包括机械执行系统、磁场发生系统、检测系统和控制系统, 各系统间通过工业总线实现数据交互与协同工作。

1.3 工作流程

该系统工作流程分为 6 个核心工序, 各工序间互不影响, 可独立设定参数并完成单步工序, 适配不同规格型号和不同应用的产品:

1. 初始化: 系统启动后, 进行硬件自检和参数的初始化, 确保各功能区域正常工作。

2. 自动上料与识别: 6 轴机械臂从送料盘抓取部件, 移送至 E 区, 通过视频识别装置完成工件有无判断、序列号识别与参数检测, 确保工件装配精度。

作者简介: 肖伟东(1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 惯性器件研发。

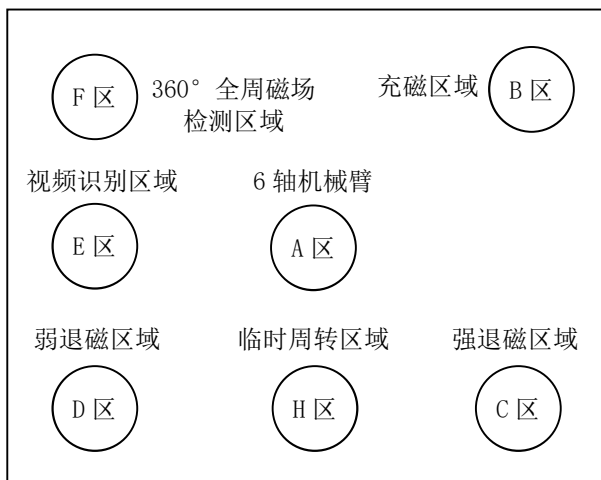


图1 系统工作示意图

3. 饱和和充磁：机械臂将工件移送至B区的充磁线圈，通过丝杠模组下压定位，确保工件位置不变，按照设定参数进行高压放电饱和和充磁，同时检测系统实时监测磁感应强度，确保达到饱和和充磁状态，充磁的磁场强度可达4.0 T。

4. 分级退磁：根据材料类型自动切换退磁模式，矫顽力较高的磁性材料（钕钴永磁体^[3]）移送至C区的强退磁线圈，采用阶梯式逼近放电退磁（退磁率和退磁范围可自主设定调节）；矫顽力较低的磁性材料（铝镍钴永磁体^[4]）移送至D区弱退磁线圈，采用线性精准退磁，动态调节磁场参数，同时检测系统实时监测磁感应强度，确保退磁后磁场强度满足使用要求。

5. 360°全周磁场检测：机械臂将工件移送至F区，定位卡盘带动工件旋转360°，霍尔探头沿Z轴精准定位，采集工件磁气隙360°全周的磁场强度数据，生成直角坐标与极坐标曲线。

6. 下料与分选：机械臂将符合要求的部件送至合格品区，不合格品送至返修区，同时记录检测数据，自动生成生产报表，支持数据的溯源。

1.4 核心模块设计

1.4.1 机械执行系统

机械执行系统以6轴协作机械臂为核心，搭配多工位定位工装与丝杠驱动机构，可实现工件的精准抓取、移送与定位。6轴协作机械臂选用负载5 kg、重复定位精度±0.02 mm的工业机械臂，末端配备弹性夹爪与真空吸附复合装置，适配不同尺寸的工件，可实现多工位间的快速切换与精准对接；各系统的定位工装根据工件的尺寸和需求特殊定制，检测工位配备X/Y/Z三维微调平台，调节精度0.001 mm，确保探头与工件气隙的精准对齐；充退磁与检测工位均采用高

精密滚珠丝杠，行程500 mm，运动速度0~5 mm/s可调，重复定位精度0.01 mm，满足工件压紧与探头定位的高精度要求。

1.4.2 磁场发生系统

磁场发生系统是产生充退磁磁场的核心模块，包括充磁系统、退磁系统和冷却系统。当输入电压220 V时，通过可调直流高压电源将电容组充电至1 500 V，放电开关导通后产生瞬时大电流，此电流脉冲在线圈内产生一个强大的磁场，该磁场使置于线圈中的磁性材料永久磁化。冷却系统主要采用水冷+风冷复合冷却方式，充退磁线圈内置水冷通道来控制线圈温度，设备内部配备轴流风机，实现空气循环散热，避免环境温度升高影响检测精度和工作效率。

在充磁过程中，线圈内径40 mm，磁场强度可达4.0 T，充磁磁场深度≥50 mm；储能电容容量6 000 μF，耐压2 000 V，充电时长3~6 s，满足饱和充磁的能量需求；在强退磁过程中，由于磁性材料矫顽力较高，电压调节范围在150~1 500 V，磁场强度可达2.5 T，采用阶梯式间歇逼近退磁算法，通过5次左右试探放电，逐步逼近目标退磁率；在弱退磁过程中，由于磁性材料矫顽力较低，电压调节范围30~500 V，磁场强度为1 000 Gs，采用线性退磁算法，退磁精度约为±1%；在整个退磁过程中，双阵列霍尔探头会实时采集工件的磁场数据，并与初始磁场参数对比计算退磁率和退磁范围，形成闭环控制，避免过度退磁或退磁不足等问题。

1.4.3 检测系统

检测系统包括视频识别系统和360°全周磁场检测^[5]系统，视频识别装置采用高清工业相机与高精度OCR识别算法相结合分方式，来实现工件序列号的识别和有无的判断，识别准确率达99.9%，同时配备多个接触式传感器，测量精度为1 μm，可测量工件的平面度，避免装配干涉；360°全周磁场检测系统采用微型霍尔探头，检测量程0~1.0 T，测量精度0.001 mT，测量过程中旋转电机伺服系统带动工件360°旋转一周，采样点数为3 600个，确保磁场数据的全面采集；控制系统实时绘制磁场强度的直角坐标曲线（随旋转角度的变化趋势）与极坐标曲线（环形分布），自动计算最大值、最小值和平均值等磁场参数，检测结果自动保存并关联工件的序列号。

1.4.4 控制系统

控制系统^[6]以MCU为核心，搭配触摸屏与人机交互界面，实现了全流程自动化控制与数据管理，自动控制系统包含有序控制程序、电容分级充电子程序、

磁性检测子程序、RS485/CAN 接口程序和过压过流保护等。软件功能包括工艺管理、运动控制、数据处理等核心模块，工艺管理模块支持用户自定义设定退磁率、充磁电压等参数；运动控制模块可实现机械臂、丝杠、旋转电机的协同动作；数据处理模块存储充磁电压和磁场强度等重要参数，支持按序列号查询历史记录；控制算法采用电压—磁场反馈的双闭环控制算法，充磁阶段通过电压反馈调节储能电容电压，确保饱和充磁，退磁阶段通过磁场反馈动态调整放电参数，提升退磁精度和退磁效率。

2 自动充退磁系统关键技术点与创新

2.1 分级退磁技术

针对不同矫顽力的磁性材料，采用强—弱双退磁线圈和差异化算法相结合的分级退磁技术，对于矫顽力较高的钕钴材料永磁体，退磁过程是非线性的，采用强退磁线圈与阶梯式间歇逼近的算法，通过多次小幅度放电逐步调整磁场强度，避免一次性的强磁场导致过度退磁或退磁不足等问题；对于矫顽力较低的铝镍钴材料永磁体，退磁过程是线性的，采用弱退磁线圈与线性退磁算法，精准控制退磁的磁场强度和衰减速率，该技术解决了传统退磁模式单一、适配性差等问题，实现了不同磁性材料的高精度退磁。

2.2 360° 全周磁场检测

传统气隙的检测多为单点或多点抽样测量，难以反映气隙磁场的分布均匀性。本系统采用旋转采样与高密度数据采集技术相结合的方式，实现了 360° 全周磁场检测。旋转电机伺服系统带动工件匀速旋转，旋转角度的精度为 0.1° ，确保采样点均匀分布，霍尔探头^[7]沿 Z 轴精准定位，采样步距 0.1° ，单工件采样点数 3 600 个，全面覆盖环形气隙，为参数的处理计算提供更加全面的数据。

2.3 全流程自动化

通过 6 轴机械臂与多工位协同控制，实现从上料、充磁、退磁、测量和下料的全流程无人化操作，减少人工干预导致的误差，单工件全流程处理周期不超过 3 分钟，实现了各工序间的高效衔接，有效提高了工作效率。

3 自动充退磁系统性能测试

本文对自动充退磁系统进行了设计和构建，如图 2 所示。自动充退磁系统满足指标要求，分别取 20 个钕钴和铝镍钴磁性材料的精密部件进行充退磁和检测等全流程操作，部件合格率 100%，单件整体流程时间平

均约 2.5 min，降低了生产成本，实现了全流程自动化操作，大大提高了生产效率。

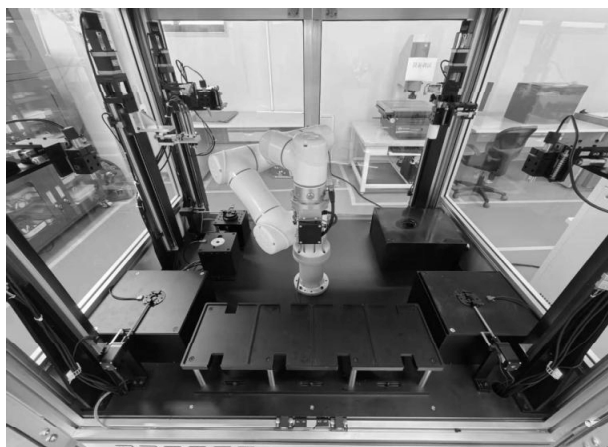


图 2 自动充退磁系统图

4 结束语

本文研发的精密磁性部件自动充退磁系统，采用充磁线圈与双退磁线圈的差异化设计，结合闭环控制算法，实现了不同磁性材料的精准充退磁；360° 全周磁场检测技术实现了环形磁场的全面采集，为磁性能的一致性提供可靠保障；6 轴机械臂与多工位协同控制实现了全流程自动化，单工件处理周期约 2.5 min，大大提高了生产效率。未来可进一步优化控制算法，实现工艺参数的智能优化与预测，提升磁性能的调控精度，同时针对异形复杂的精密部件引入机器视觉定位技术，以提升异形工件的定位精度与检测覆盖率。

参考文献：

- [1] 白冰,李村,史阳,等.小量程高标度因数石英谐振加速度计研究[J].导航与控制,2025,24(Z1):65-72.
- [2] 魏彬,丁文晖,陈定定,等.基于 CMC 芯片的充退磁控制器设计[J].仪器仪表标准化与计量,2024(05):21-23,45.
- [3] 董创辉,刘雷,王思迪,等.烧结 2:17 型钕钴永磁材料力学性能研究进展[J].稀土,2025,46(03):39-50.
- [4] 刘悦卿,赵江涛,王凤青,等.铝镍钴永磁材料的研究进展[J].材料导报,2024,38(23):116-125.
- [5] 彭程远.磁性材料磁场检测成像系统关键技术研究[D].深圳:深圳大学,2023.
- [6] 卢浩.磁场调制型双馈无刷混合励磁电机控制系统研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [7] 周萍.特斯拉计探头自动精准定位和校准系统[J].上海计量测试,2020,47(01):37-38.

燃气发电厂 DCS 系统编程优化与维护策略研究

冯河东

(广西钢铁集团有限公司能源总厂, 广西 防城港 535500)

摘要 钢铁生产耦合工况中, 燃气发电厂 DCS 系统面临负荷波动适配困难、故障频繁出现等诸多挑战。为确保系统安全稳定运转并提高效能, 本文着重于编程优化与全生命周期维护工作, 对燃烧控制逻辑开展模块化重构, 优化数据采集传输流程, 设计三重容错联锁保护程序, 同时与运行数据驱动的预防性维护、智能故障诊断、规范版本管理以及技能应急体系构建相结合, 旨在为同类型电厂 DCS 系统优化提供可参考的解决办法。经过试点应用检验, 系统月均故障率大幅降低, 维护成本减少, 设备可用率持续提升。

关键词 燃气发电厂; DCS 系统; 编程优化; 控制程序版本; 效能评估指标体系

中图分类号: TM62; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.002

0 引言

燃气发电厂在整个能源供应体系中占据重要地位, 在钢铁生产耦合工况中, 面临煤气管网压力波动、燃料热值不稳定这类复杂难题, 其关键的控制中枢、DCS 系统、运行状况直接关系到机组安全和能源利用效率。传统 DCS 系统暴露出诸多问题, 如控制逻辑适配性差、数据采集效率不高、联锁保护容错能力不足等, 再加上传统维护模式存在局限, 使得系统故障频繁出现、控制精度降低。基于此, 开展 DCS 系统编程优化与维护策略研究, 重构控制逻辑、优化数据处理流程、构建全生命周期维护体系, 以解决工况适配和稳定运行的难题, 为同类工业控制系统的优化提供技术借鉴。

1 燃气发电厂 DCS 系统运行现状与编程优化需求分析

1.1 煤气锅炉—蒸汽汽轮机联动系统架构及控制

煤气锅炉与蒸汽汽轮机联动系统的 DCS 控制运用分层分布式架构, 涵盖现场控制层、过程监控层以及管理决策层, 各层级经由高速工业以太网实现数据交互和指令传递。

过程监控层采用双环网冗余设计, 通信网络配置优先级策略以确保关键信号能实时传输, 信号分辨率可满足高保真采集要求。核心控制着重于机炉协调, 借助现场总线互联设备开展实时数据采集并执行基础控制指令, 构建从设备感知直至控制执行的闭环运行状态, 以此维系联动系统的稳定运行。

1.2 钢铁生产耦合工况下 DCS 系统编程运行现存问题

在钢铁生产耦合工况下, 煤气管网压力和燃料热值频繁波动, 使得 DCS 系统持续承受负荷冲击, 当前编程逻辑响应迟缓, 难以迅速适应工况变化, 控制逻辑适应性欠佳致使控制精度降低, 自动化控制误差偏大。编程还缺少针对波动工况的动态适配机制, 联锁保护逻辑冗余设计不够完善, 容易出现误触发或者漏触发问题。传统维护模式的缺陷更让系统不稳定性加剧, 难以达到联动系统对实时性和准确性的核心控制要求^[1]。

1.3 基于安全与效能目标的 DCS 系统编程优化需求

为兼顾系统安全保障和效能提升这两个目标, DCS 系统编程优化要明确三个核心方向。在控制逻辑上强化其对工况的适配性, 以解决负荷波动时控制精度方面的问题, 数据采集环节要对监测点布局和采样策略加以优化, 从而提升数据传输效率, 保证存储的规范性, 在联锁保护方面增强容错能力以及故障预判功能, 减少突发故障带来的影响。多维度开展编程优化工作, 可使控制响应速度加快、故障发生率降低, 还能提高能源利用效率。

2 燃气发电厂 DCS 系统编程优化技术路径

2.1 煤气锅炉燃烧控制逻辑的模块化编程优化

煤气锅炉燃烧控制逻辑实施模块化优化, 以功能解耦为关键, 把复杂的控制流程拆成燃烧初始化、燃料调节、空气配比、负荷适配四大独立功能模块, 各

作者简介: 冯河东 (1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 自动化控制、仪器仪表。

模块经标准化接口开展数据交互,方便独立调试以及迭代升级。依据工况动态变化特性对功能块逻辑进行重构,着重强化适配燃料热值与管网压力波动的模块,嵌入参数自适应调整算法,凭借实时计算测量值变化速率来判断设备运行状况,动态修正 PID 控制参数^[2]。面对长期运行引发的参数偏差,运用比例增益修正公式来优化控制逻辑,同步对控制回路死区和采样周期作出调整,防止误差被放大。于模块间设定联动校验机制,保证燃料供给和空气量时刻匹配,在钢铁生产耦合工况下使燃烧效率达到最大。

2.2 煤气—蒸汽联动系统数据采集与效率提升策略

提升数据采集效率可从优化监测点、提高传输速率以及构建预处理模型三个方向着手。于锅炉出口、汽轮机轴承、主蒸汽管道等关键位置加密布置监测点,并安置高精度传感器来获取温度、压力、流量等核心数据,以保证所采集数据既全面又准确。选用不低于 10 kHz 的采样频率和 1 秒刷新周期,借助现场总线与高速工业以太网搭建双传输通道,同时配置传输优先级策略来保证关键数据能实时传输且抖动处于合理区间。优化双传输通道的协同工作模式,提高数据传输的稳定性和抗干扰能力,持续优化动态采样频率调整机制,使其能更敏锐地感知参数变化,进一步提升数据采集的有效性和精准度。构建数据预处理模型,根据设备的故障模式和设备状态变化特征之间的关系,构建故障模式的特征矩阵,将不同故障模式的特征信号与实际设备的状态进行匹配,识别设备故障的类型和位置。矩阵中的每一行代表一个故障模式,每一列代表设备的不同运行特征,矩阵元素则表示某个故障模式与特征信号的关联度^[3]。进行特征提取和冗余数据过滤,算出采集数据和历史健康指标的相似度,筛选出有效信息存入数据库,给煤气—蒸汽联动系统精准控制提供高保真的数据源支撑。

2.3 连锁保护程序的容错性编程优化设计

连锁保护程序容错性优化围绕“预测—冗余—分级”三重设计逻辑展开,开展设计工作,构建故障模式特征矩阵,整合历史故障数据和实时运行参数,提取各类故障典型特征指标,剖析故障模式与特征信号内在联系,提前预判潜在故障隐患,从根源减少突发故障引发非必要连锁动作的风险。冗余设计增强备份机制,控制核心采用双 CPU 热备冗余配置,通信链路采用双光纤通道冗余架构,连锁逻辑设置独立备份模块,实现主备模块实时数据同步,确保单一组件故障时系统维持基础连锁保护功能。分级设计构建故障分级响应模式,按严重程度划分为预警、降负荷、紧急

停机三级,每级配备专属连锁动作逻辑,触发告警提示、参数调节、安全截断流程,防止过度保护造成非计划停机,融入故障自诊断算法设计,结合时序数据趋势特征迅速识别故障类型,完善连锁动作延时校验机制,合理设定阈值过滤瞬时干扰信号,降低误触发概率,保障系统稳定运行。

3 燃气发电厂 DCS 系统全生命周期维护策略构建

3.1 基于运行数据的预防性维护方案制定

借助 DCS 系统海量运行数据构建多维度的设备健康状态评估模型,以温度、压力、流量这些实时参数为依据,把过去 1 年的运行数据和故障记录整合起来,确定平均无故障时间、故障率、性能下降率等核心的设备健康评估指标。运用时序数据处理算法探寻参数的变化规律,计算当下设备状态与历史健康状态的相似程度,进而精准预估关键组件剩余的使用时长。依据评估结果对设备的健康等级予以划分,针对不同的健康等级拟定差异化的维护周期与具体内容,对健康等级良好的设备适当延长维护间隔时间,着重对参数变化趋势进行监测,对等级中等的设备增加对关键部件的检查频率^[4]。对等级较低的设备开启预防性维修工作,及时更换老化的组件,构建维护数据闭环更新体系,把维护的实际效果反馈到评估模型之中,不断提升维护方案的针对性和有效性。

3.2 DCS 系统软硬件故障的快速诊断与处置策略

建立完备的 DCS 系统软硬件故障特征库,对控制器、传感器、通信模块等硬件故障,以及程序逻辑、数据传输等软件故障的典型特征信号分类梳理。构建双层诊断流程,也就是“特征匹配+智能算法”模式,先借助故障模式特征矩阵做初步匹配,接着运用深度学习算法提取信号深层特征,以此实现对故障类型与位置的快速定位,使诊断准确率处于较高水准。制定分级处置策略,对于硬件故障采用冗余组件快速切换,并且同步安排故障部件更换,面对软件故障则启动程序版本回滚或者逻辑块修复,防止故障扩散。明确系统恢复步骤,先让核心控制功能恢复,然后逐步完善辅助功能,记录故障处置的整个过程,更新故障特征库,优化诊断算法,把平均维护响应时间控制在合理区间。

3.3 控制程序版本管理与升级维护规范

制定控制程序版本分类存储的标准规范,依据功能模块、更新时间以及适用工况展开分类编码工作,运用双备份存储这一可靠机制,保障历史版本具备可追溯性,存储期限不少于 3 年。构建严格版本变更审批流程,变更申请要清晰阐明修改缘由、范围以及预

期成效,经过技术审核与风险评估之后方可实施。在升级维护前搭建模拟测试环境以还原实际运行工况,验证新版本程序兼容性、稳定性与控制精度,防止升级对机组运行产生不良影响,升级过程采取分阶段实施策略,先于非关键控制回路进行测试,之后逐步推广到全系统,同时设置升级断点和回滚机制,一旦出现异常能够迅速恢复到原版本。完善版本维护档案,详细记载每次升级的时间、具体内容、测试结果以及运行反馈情况^[5]。

3.4 维护人员技能体系与应急响应机制建设

搭建多层次维护人员技能培训架构,包含DCS系统编程逻辑、硬件构造、故障诊断算法以及智能维护工具的实际操作运用。借助典型故障实例开展沉浸式培训活动,定时开展技能考核与技术研讨,设立跨部门协作应急响应制度,清晰界定维护、运行、技术等部门的职责划分。拟定分级应急响应程序,常规故障由现场维护人员自行处理,重大故障则启动应急指挥中心;统一调配资源迅速应对,编写具有针对性的应急方案,定期开展实战性质的应急演练,增强团队协同处理能力。经技能提升与制度健全,实现维护成本降低、设备平均可用率提升,维持系统持续稳定运转。

4 燃气发电厂DCS系统编程优化与维护策略的实践效能评估

4.1 效能评估指标体系设计

构建包含安全性、稳定性、经济性、响应速度这四个维度的评估指标体系,确定各维度量化准则。安全性指标涉及联锁保护有效率、故障误触发率,规定有效率不少于99%、误触发率小于1%,稳定性指标选择月均故障率、平均停机时间、设备可用率,经济性指标着重单位能耗、月均维护成本、控制精度,控制误差要低于1%,响应速度指标包含采样响应时间、故障诊断耗时,将单次诊断时间把控在合理区间,对各指标依权重加权算出综合效能值,以此构建科学统一的评估标准。

4.2 优化维护策略的试点应用与数据监测

以某燃气发电厂3台机组当作试点,部署经优化的DCS编程逻辑以及全生命周期维护策略,明确需监测的核心参数涵盖煤气锅炉燃烧效率、主蒸汽压力温度、汽轮机转速还有系统故障信号等。采用每秒刷新一次的周期采集实时数据,历史数据存储周期设为1年。通过DCS系统自带采集模块和智能诊断平台开展联动监测,设置5个关键测试点位,定时记录指标数据,同时同步跟踪维护执行状况与策略适配成效,以此保证监测数据能全方位反映系统运行状态。

4.3 优化前后系统运行参数对比与成效分析

对比试点机组优化前后的运行数据能发现明显成效,月均故障率自优化前的0.5~0.8次降低到0.05~0.3次,平均停机时间也缩短至0.8~1.8小时,单位能耗降至3200~3600kW·h,维护成本月均下降15.4%,自动化控制误差被控制在0.5%~1.0%,响应速度提高30%以上,设备平均可用率提升0.6%,联锁保护有效率达到99.5%。这些数据说明编程优化和维护策略成功化解了工况适配不佳、故障频繁出现等状况,实现系统安全与效能的双重提高。

4.4 策略的适应性调整与推广应用建议

依据试点结果来拟定适应性调整策略,小型燃气发电厂可精简部分智能算法,着重对核心控制逻辑加以优化。中型电厂全面运用现有的策略,按照实际需求来调整监测点的密度。大型电厂增添控制核心的冗余配置,增强跨机组数据的协同性。在推广过程中要同步开展维护人员的技能培训工作,提供标准化的实施手册并给予技术支持。提议分阶段推进此项工作,先于同类型钢铁耦合工况电厂进行推广,之后再慢慢覆盖不同能源结构的燃气发电厂,实现燃气发电厂的稳定高效运行。

5 结束语

本文针对燃气发电厂DCS系统于钢铁生产耦合工况运行时存在的难点,构建一套涵盖“编程优化—维护保障—效能验证”的完备技术体系。从试点验证情况来看,系统故障率、维护成本、控制误差等关键指标均有明显改善,这充分证实了该技术路径与维护策略具备实际应用价值。未来可进一步深入推进人工智能与大数据的融合应用,从而不断拓展系统的适用范围并提升其运行效能。

参考文献:

- [1] 景青,许德杰,白刚.基于小型DCS的化工自动化生产线维护与故障诊断[J].设备管理与维修,2025(22):125-127.
- [2] 刘晨.DCS控制系统在电厂热控设备维护中的优化应用[J].自动化应用,2025,66(21):21-23.
- [3] 柴虎,金青峰,王建,等.分布式控制系统DCS报警管理策略优化研究[J].自动化博览,2025,42(10):34-37.
- [4] 张辰武.基于DCS控制系统的温度传感器精度提升研究[J].装备维修技术,2025(01):56-59.
- [5] 章海峰,高瞳.基于深度学习的工业自动化控制DCS系统维护方法[J].自动化应用,2025,66(06):12-14.

高速弱光探测条件下光电探测器噪声特性分析

曾维强

(桂林光翼智能科技有限公司, 广西 桂林 541000)

摘要 高速弱光探测场景中光电探测器的噪声表现会对系统灵敏度与信噪比产生影响。针对 1 550 nm 波段微弱光信号的探测需求, 通过开展理论分析构建散粒噪声与电路噪声数学模型, 研究跨阻放大器里寄生电容、反馈元件对噪声频谱的影响规律, 借助 PSpice 仿真工具, 对电路参数进行优化设计, 构建平衡零拍探测测试系统, 对不同光功率条件下的频域噪声特性展开测量操作。实验结果表明, 优化后的探测器在 15 MHz ~ 1 GHz 频段内信噪比能够维持在 10 dB 以上, 共模抑制能力达到 60 dB, 该方案已成功应用于宽带压缩光场测量实验当中, 证实了弱光工况下噪声特性与电路参数之间的定量关联。

关键词 光电探测器; 弱光探测; 噪声特性; 跨阻放大; 信噪比

中图分类号: TN2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.003

0 引言

量子通信、光纤传感、激光雷达等应用对高速弱光探测性能提出极高的标准, 探测器的噪声特性直接决定系统的整体水平。在弱光环境中, 散粒噪声源于光电流的量子涨落, 电子学噪声包含跨阻放大器电压波动、电流干扰以及热效应, 共模噪声体现探测器两臂的匹配程度好坏。目前的研究多集中在常规光功率场景, 对弱光条件下噪声机制、频率响应特性及电路参数间作用规律缺乏深入研究。通过精确测量弱光探测中各类噪声的频谱分布状况, 明确噪声功率与光照强度、电路设计参数之间的数学关联, 为提升探测器性能、增强弱光探测能力提供重要理论支持。

1 光电探测噪声理论

1.1 弱光探测噪声机理

光电探测器在低照度环境中的噪声表现由散粒噪声、电子学噪声及共模噪声三类噪声源决定。散粒噪声是因光子撞击光电二极管的随机性与光电转换时载流子生成的量子起伏, 其噪声强度与入射光强度呈现正比关系, 在弱光场景下成为制约探测能力的关键因素, 电子学噪声是源于跨阻放大器中运放的电压噪声、电流噪声及反馈电阻的热噪声^[1]。共模噪声由探测器双路光电二极管输出信号的幅度差与相位差所致, 散粒噪声在理想状态下呈现出白噪声的特征, 电子学噪声在低频段会受到 1/f 噪声的影响而在高频段则显现为白噪声平台。

1.2 噪声特性数学模型

跨阻放大电路的信号增益特性决定噪声功率谱的频率响应, 考虑光电二极管结电容、运算放大器输入电容及电路板寄生电容的综合影响, 信号增益可表示为:

$$G(f) \approx \frac{R_F}{1 + if \left(2\pi R_F C_F + \frac{1}{A_0 f_0} \right) - \frac{2\pi f^2}{A_0 f_0} R_F (2C_{PD} + C_{IN} + C_P + C_F)} \quad (1)$$

式(1)中, R_F 为反馈电阻, C_F 为反馈电容, C_{PD} 为光电二极管结电容, C_{IN} 为运算放大器输入电容, C_P 为寄生电容, A_0 为运算放大器开环增益, f_0 为单位增益带宽。探测器总噪声功率由各噪声源贡献叠加, 散粒噪声功率谱表示为:

$$U_{shot} = -\sqrt{4qP\rho\Delta f} |G(f)| \quad (2)$$

式(2)中, q 为电子电荷量, P 为入射光功率, ρ 为光电二极管响应度, Δf 为分析带宽, 电子学噪声功率谱需综合考虑运算放大器电压噪声 e_n 、电流噪声 i_n 以及反馈电阻热噪声的频域特性, 建立完整的噪声数学模型, 为后续电路设计优化提供理论基础。

2 探测器系统设计

2.1 光电转换电路设计

光电转换电路选择双光电二极管反接构成差分探测方案, 以 InGaAs PIN 型光电二极管当作核心光电转换元件, 此元件在 1 550 nm 波长处量子效率能达到 95%、结电容为 1.1 pF、暗电流仅 0.5 nA。把两光电二

作者简介: 曾维强 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 微弱光探测和分布式光纤传感技术。

极管 PD1 与 PD2 进行反向串联后, 利用 L-C 耦合网络分离光电流的交直流分量, 其中交流信号经过隔直电容输送到跨阻放大电路, 直流信号则通过电感接入监测电路, 实现光功率平衡监控与相位锁定^[2]。反馈网络由电阻 R_f 与电容 C_f 并联构成, 探测器带宽满足关系式:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

式(3)中, C 为光电二极管结电容、分布电容及寄生电容之和, R 为终端电阻。

2.2 噪声抑制技术方案

要抑制电子学噪声需要从电路结构与元件选用两个维度开展, 直流放大级选用低噪声运放 LMH6624, 其输入电压噪声指标是 $0.92 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、输入电流噪声为 $2.3 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。针对寄生电容问题通过优化 PCB 布线方案解决, 采用双面板设计把两只光电二极管分设于正反两面, 确保双路信号传输路径长度达到完全一致。共模噪声的抑制依赖于双臂光电二极管参数的高度匹配, 实验中严格筛选量子效率、暗电流、等效电容及等效电阻等参数一致的器件对, 借助对称布局来减小输出信号的幅度差与相位差^[3]。共模抑制比定义为:

$$CMRR = \left| \frac{P_{\text{Unbalanced}}}{P_{\text{Balanced}}} \right|$$

表征探测器抑制共模信号的能力水平。

2.3 电路参数仿真优化

电路仿真基于 PSpice 软件构建完整的噪声等效模型, 运算放大器输入噪声用电压、电流噪声源表征, 光电二极管光电流噪声与反馈电阻热噪声分别等效为电流源, 仿真中改变反馈电阻从 $2.2 \sim 8.2 \text{ k}\Omega$ 、反馈电容从 $2 \sim 3.9 \text{ pF}$, 获得不同参数组合下的噪声功率谱曲线。图 1 展示四种反馈参数设置下的模拟曲线, 当反馈电阻从 $2.2 \text{ k}\Omega$ 增至 $8.2 \text{ k}\Omega$ 时, 散粒噪声功率谱整体上移表明增益提升, 但高频截止频率降低, 而在反馈电阻 $6.8 \text{ k}\Omega$ 、反馈电容 2.0 pF 配置下, 2 MHz 频点处散粒噪声与电子学噪声相差 22 dB , 对应最佳信噪比, 3 dB 带宽约 480 MHz , 满足高速探测要求^[4]。

2.4 实验测试平台搭建

实验测试平台由光源调制系统、探测器本体及信号分析系统三部分组合, 1550 nm 光纤激光器所输出的光要经过模式清洁器进行滤波, 通过半波片与偏振分束器调整光功率。电光振幅调制器 (EOAM) 的作用是生成调制信号用于测试探测器的频率响应特性, 调制后的光束经过 $50:50$ 分束器被均匀分成两路并分别注入探测器的双臂, 两个焦距为 30 mm 的透镜可确保光束完全耦合到光电二极管的探测区域^[5]。探测器的交流输出接入频谱分析仪来采集噪声功率谱且分辨率带宽 (RBW) 设置为 100 kHz 、视频带宽 (VBW) 设置为 300 Hz , 直流输出连接示波器以监控光功率平衡状态。

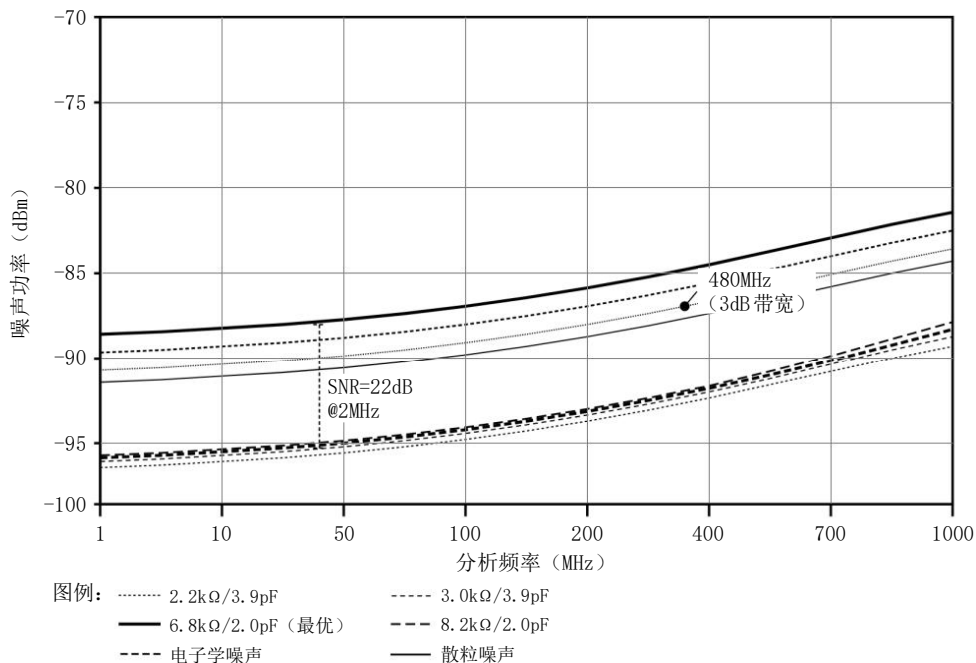


图 1 不同反馈参数配置下噪声功率谱仿真曲线

3 噪声特性实验验证

3.1 频域噪声功率谱测试

频域噪声功率谱测试借助频谱分析仪在 15 MHz ~ 1 GHz 频段逐点扫描展开, 通过对比遮光时的电子学噪声与不同光功率注入下的散粒噪声功率谱曲线, 检验探测器噪声特性与理论模型的符合状况, 测试过程中入射光功率从 0.6 mW 逐步提升到 9.6 mW, 每个功率点都会采集完整的频域噪声功率谱数据。

表 1 数据表明, 反馈电阻 6.8 kΩ 搭配反馈电容 2.0 pF 的参数组合在 2 MHz 分析频率处获得最高信噪比 22 dB。通过对比理论计算值、仿真结果以及实验数据, 反推出电路板寄生电容集中在 65 ~ 68 pF 的范围之内, 该值明显高于光电二极管结电容与运算放大器输入电容之和, 证实了 PCB 布局优化对减少寄生电容的重要意义。

表 1 不同反馈参数配置下探测器噪声特性对比

反馈电阻 RF (kΩ)	反馈电容 CF (pF)	3dB 带宽 (MHz)	信噪比 @2MHz (dB)	电子学噪声 (dBm)	寄生电容 Cp (pF)
2.2	3.9	850	18.5	-92.3	65
3.0	3.9	720	19.8	-93.1	67
6.8	2.0	480	22.0	-95.6	67
8.2	2.0	380	21.2	-94.8	68

3.2 信噪比特性评估

通过测量不同光功率之下散粒噪声功率与电子学噪声功率比例, 能够评估信噪比特性并定量描述探测器弱光环境性能表现。实验选用反馈电阻为 6.8 kΩ 以及反馈电容为 2 pF 的最优参数, 在 200 MHz、400 MHz、600 MHz、800 MHz 及 900 MHz 五个典型频率点采集噪声功率数据, 当入射光功率从 1 mW 增加至 8 mW 时, 五个频率点的散粒噪声功率都随光功率严格线性增加, 线性拟合相关系数均高于 0.99。信噪比在 550 MHz 处达到最大值 12 dB, 降低到 1 GHz 时为 10.73 dB。

3.3 弱光压缩态探测验证

弱光压缩态探测实验依靠光学参量放大器 OPA 产生 1 550 nm 正交振幅压缩态光场, 探测器直流输出信号用来锁定本振光与压缩光的相对相位到零相位, 确保测量压缩态光场的正交振幅分量噪声特性, 交流输出信号连接频谱分析仪记录压缩态噪声功率谱。

表 2 数据表明, 探测器在 3.5 ~ 71.5 MHz 宽带范围内所测得的压缩态噪声功率都低于散粒噪声基准, 在 21.5 MHz 分析频率处观测到最高达到 -2.5 dB 的压缩度, 压缩带宽受限于 OPA 腔的谐振特性而非探测器带宽, 证明 1 GHz 带宽的探测器能够支撑更宽频段的非经典光场探测需求。

表 2 宽带压缩态探测性能参数

测试项目	测量结果
压缩带宽范围 (MHz)	3.5 ~ 71.5
最高压缩度 (dB)	-2.5 @ 21.5 MHz
本振光功率 (mW)	8.0
共模抑制比 (dB)	60.65 @ 20 MHz
直线性度偏差 (%)	0.7
腔锁定频率 (MHz)	56.35

4 结束语

基于跨阻放大电路的高速弱光探测器设计表明, 寄生电容、反馈网络参数及 PCB 布局对噪声特性影响相当显著。实验数据与理论计算、电路仿真结果达成高度吻合, 验证了噪声模型准确性。该探测器在 15 MHz ~ 1 GHz 频段内实现 10 dB 以上的信噪比, 在 20 MHz 处共模抑制比能达 60.65 dB, 已成功用于 3.5 ~ 1.5 MHz 宽带压缩态光场测量。研究表明, 在弱光条件下, 散粒噪声占主导且电子学噪声需严格控制, 明确寄生电容约 67 pF, 对高频响应存在限制作用, 以及运算放大器实际噪声参数高于标称值的现象, 并通过优化电路拓扑、选用低噪声器件、改进 PCB 对称布局, 能进一步提升探测器在弱光条件下的性能。

参考文献:

- [1] 尚鑫, 李番, 马正磊, 等. 0.1mHz—1Hz 频段超低噪声光电探测器实验研究 [J]. 物理学报, 2025, 74(05): 279-286.
- [2] 段放世, 李超, 索普一, 等. 高性能 GHz 带宽平衡零拍探测器的研制 [J]. 量子光学学报, 2025, 31(01): 27-34.
- [3] 伍凯凯, 谢博娅, 陈琳, 等. 基于光学偏振控制的散粒噪声极限微振动光学测量方法 [J]. 红外与激光工程, 2023, 52(07): 241-250.
- [4] 滕鑫, 余慧敏, 梁焰. 高速平衡零拍探测器的设计与实现 [J]. 光学仪器, 2022, 44(04): 32-38.
- [5] 潘国鑫, 刘惠, 翟泽辉, 等. 平衡零拍探测器的噪声特性分析与实验研究 [J]. 量子光学学报, 2021, 27(02): 109-116.

桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术对比研究

章博辉, 蔡庆森*

(温州市交通工程试验检测有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要 预应力混凝土桥梁广泛应用于交通基建, 预应力孔道注浆密实度直接关系到预应力筋防腐、结构整体性及耐久性, 注浆缺陷易引发桥梁安全隐患。无损检测技术凭借非破坏性、高效性等优势, 成为注浆密实度评估的核心手段。本文梳理超声法、雷达法等五种主流无损检测技术的原理、特点及适用范围, 从检测精度、操作难度等多维度对比分析, 探讨技术局限性与优化方向, 以期检测技术选型、质量控制及行业标准完善提供理论参考。

关键词 桥梁工程; 预应力孔道; 注浆密实度; 无损检测

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.004

0 引言

随着我国交通基建快速推进, 预应力混凝土桥梁建设规模扩大, 其结构安全性与耐久性备受关注。预应力孔道注浆的核心作用是包裹预应力筋、隔绝水汽防腐, 同时传递张力保障结构受力稳定。受施工多种因素影响, 注浆易出现空洞、裂隙等缺陷, 超过 30% 的预应力桥梁病害与此相关, 精准检测管控至关重要。传统钻芯取样法存在破坏性、效率低等弊端, 无损检测技术以无损伤、高效全面的优势, 弥补其不足并成为研究与应用主流。本文对比主流无损检测技术的优劣及适用条件, 为技术选型、精度提升提供依据。

1 桥梁预应力孔道注浆密实度无损检测技术原理及特点

1.1 超声法检测技术

1. 检测原理。超声法基于弹性波传播理论, 借助超声波在不同介质中传播参数(速度、振幅、频率等)的差异, 评估孔道注浆密实度。注浆密实区域介质均匀, 超声波传播速度快、振幅衰减小、波形稳定; 若存在空洞、裂隙等缺陷, 声波会发生反射、折射, 导致参数异常。通过在孔道两侧或同侧布置换能器, 发射并分析超声信号, 可判定注浆密实度及缺陷情况。按检测方式可分为穿透法与反射法, 前者需双侧布置换能器, 适用于孔道明确、双侧可达场景; 后者单侧布置即可, 适配复杂工况。

2. 技术特点。超声法的优势在于检测精度高, 能

够准确识别毫米级缺陷, 对空洞、裂隙等缺陷的敏感性高; 检测设备轻便、操作简单, 可实现现场快速检测, 检测成本较低; 适用于各类混凝土强度等级及注浆材料, 不受浆体类型限制。同时, 超声法也存在一定局限性: 受结构尺寸、钢筋分布影响较大, 密集钢筋会对超声波信号产生干扰, 导致检测结果偏差; 对检测人员专业技能要求较高, 信号参数分析需结合经验判断; 难以检测大跨度、复杂布置的孔道, 检测范围有限^[1]。

1.2 雷达法检测技术

1. 检测原理。雷达法(地质雷达法)基于电磁波传播理论, 发射 100 MHz ~ 2 GHz 高频电磁波穿透混凝土结构, 其不同介质界面会发生反射、折射, 反射波参数与介质介电常数等密切相关。注浆密实区域浆体与混凝土介电常数差异小, 反射波微弱; 存在空洞时, 空气与浆体介电常数差异大, 产生强反射波。通过接收分析反射波信号, 可反演注浆分布及缺陷情况。检测时移动雷达天线连续收发电磁波, 形成剖面图, 解译后实现注浆密实度连续评估。

2. 技术特点。雷达法具有十分明显的核心优势, 检测速度较快, 能开展大面积连续扫描, 检测效率比超声法更高。使用该方法无需耦合剂, 对桥梁结构表面的损伤较小, 适应性也较强, 还能清晰展示孔道的走向以及缺陷的三维形态, 可视化效果良好, 适用于复杂孔道布置和大跨度桥梁的检测工作。不过它也存在突出局限性: 检测精度会受电磁波频率影响, 难以同时兼顾穿透深度与分辨率; 容易受到环境电磁干扰,

作者简介: 章博辉(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 交通检测。

*通信作者: 蔡庆森(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 交通检测。E-mail: tsyww0001@163.com

对浆体离析等缺陷的敏感性较差；设备成本较高，且对操作人员的信号解译能力有严格要求^[2]。

1.3 冲击回波法检测技术

1. 检测原理。冲击回波法的检测原理以应力波反射理论为基础，借助锤击或电磁冲击装置，向结构表面施加瞬时冲击，从而激发 10 ~ 100 kHz 的低频应力波，让其在结构内部传播。应力波在不同介质的界面会产生反射，当遇到孔道缺陷时，反射波的传播时间和振幅会出现变化。该方法的核心是利用应力波在不同密度介质中传播特性的差异，密实区域中应力波传播稳定，缺陷区域则因介质不连续，导致波能衰减、波形畸变。通过传感器接收相关信号，提取特征参数并结合结构参数，就能计算出缺陷的位置和尺寸，进而评估注浆密实度。

2. 技术特点。冲击回波法有着显著优势，只需单侧接触结构表面就能操作，十分便捷，适合单侧可达而另一侧无法接触的工况。它的设备体积小、重量轻，方便在现场移动检测，且对结构表面平整度要求不高，无需复杂预处理，不会受钢筋分布干扰，检测深层缺陷的效果比超声法更好。不过它也有明显局限：检测精度不如超声法和雷达法，难以识别小尺寸缺陷；检测速度较慢，不适合大面积快速检测，对冲击能量控制要求严格，还容易受环境振动干扰^[3]。

1.4 声发射法检测技术

1. 检测原理。声发射法以材料损伤发声为基础，当注浆体及混凝土结构内部的空洞、裂隙等缺陷受到力发生变形或者扩展时，会释放出弹性波，就是声发射信号。在结构表面布置传感器能够捕捉信号，分析振幅、频率等参数，判断缺陷是否存在、位置及发展趋势，对注浆密实度进行评估。它与其他技术不同，属于动态检测，需施加荷载让缺陷释放信号，适宜于结构服役时的实时监测及损伤评估。

2. 技术特点。声发射法具有突出优势，能实现动态监测，实时捕捉缺陷发展过程，为结构安全评估提供动态数据；检测范围广，对隐蔽性缺陷识别能力强，还能区分缺陷类型及发展阶段，为修复工作提供精准依据。其局限性也很明显：属于被动检测，需施加荷载激发信号，不适用于静态工况；易受环境噪声干扰，设备复杂且成本高，无法检测静止的微小缺陷。

1.5 红外热成像法检测技术

1. 检测原理。红外热成像法以热传导理论为基础，借助注浆体与混凝土之间的热传导系数差异，对结构表面温度场分布情况的分析来对注浆密实度开展评估工作。注浆密实的区域温度场分布比较均匀，而空洞的地方因为空气形成热屏障，会出现温差异常。此方

法分为主动式和被动式，分别依靠外部热源和自然温差，适宜在环境温度变化比较明显的场景中应用。

2. 技术特点。红外热成像法优势明显，检测速度快，能实现大面积非接触式检测，可视化效果好，可快速地定位缺陷区域。其设备操作简便，无需接触结构表面，适配高空、狭小空间等复杂工况，对大面积空洞缺陷识别力强。但它受环境因素影响大，对小尺寸及深层缺陷敏感差，主动式设备携带不便、成本较高。

2 各类无损检测技术对比分析

2.1 检测精度对比

检测精度是评估注浆密实度的核心指标，直接决定缺陷识别准确性。超声法对弹性波参数捕捉精准，识别精度最高，可检出直径 ≥ 5 mm 的小尺寸缺陷，能区分空洞、裂隙及浆体离析等类型。雷达法精度受电磁波频率影响，高频 (≥ 1 GHz) 对小缺陷识别精度次之，低频适用于深层检测但精度偏低。冲击回波法对小缺陷识别能力弱，仅能精准识别直径 ≥ 20 mm 的空洞。红外热成像法对小尺寸及深层缺陷精度最低，易漏判微小缺陷。声发射法精度与荷载施加相关，适配荷载下对活动缺陷精度较高，对静态微小缺陷敏感性差。

2.2 操作难度对比

操作难度直接影响检测效率与现场适用性。冲击回波法与红外热成像法（被动式）难度最低，只需单侧接触结构表面，设备调试简单，无需复杂预处理。雷达法难度中等，设备移动便捷，但反射波信号解译需专业经验，对操作人员技能要求较高。超声法难度较高，穿透法需精准布置双侧换能器，信号分析需结合结构参数调整，对操作规范性要求严格。声发射法难度最高，需设计荷载方案，信号降噪及缺陷定位分析复杂，对专业知识与经验要求极高^[4]。

2.3 检测速度对比

检测速度直接决定技术在大面积场景的适用性。雷达法速度最快，可连续扫描，每小时检测 100 ~ 200 m²，适配大跨度桥梁快速检测。红外热成像法（主动式）次之，每小时 80 ~ 150 m²，被动式受环境温度影响，速度波动较大。超声法速度较慢，需逐点检测，每小时仅 20 ~ 50 m²，不适用于大面积检测。冲击回波法速度较慢，单点耗时久，每小时 15 ~ 40 m²。声发射法速度最慢，需施加荷载并持续监测，单次检测数小时至数天，仅适用于小范围动态监测。

2.4 环境适应性对比

环境适应性是评估技术现场应用能力的关键。超声法适应性较强，不受温湿度影响，但易受电磁及钢筋分布干扰。雷达法适应性较弱，受电磁干扰、结构

表面平整度及植被覆盖影响,高温高湿环境下信号稳定性下降。冲击回波法适应性较强,不受电磁、温湿度影响,对结构表面条件要求低。声发射法适应性最差,易受环境噪声、振动干扰,对检测环境密封性和稳定性要求严格。红外热成像法适应性较弱,受温湿度、风速、光照影响极大,仅晴朗无风环境效果佳。

2.5 检测成本对比

检测成本涵盖设备购置、运营及人力成本。超声法与冲击回波法成本最低,设备购置费用5~15万元,操作简便、人力成本低,适合大规模推广。红外热成像法成本中等,设备购置15~30万元,主动式需额外投入热源设备,运营成本略高。雷达法成本较高,设备购置30~80万元,信号解译需专业人员,人力成本偏高。声发射法成本最高,设备购置超100万元,荷载设备复杂,运营及人力成本极高,仅适用于高精度专项检测。

2.6 适用范围及缺陷识别能力对比

超声法适用于深度 ≤ 50 cm的中浅层孔道,擅长识别中小尺寸空洞、裂隙及浆体离析,适配各类混凝土桥梁注浆检测。雷达法适用于 ≤ 100 cm中深层孔道及大面积检测,对空洞识别力强但对离析敏感差,适配大跨度及复杂孔道。冲击回波法适用于 ≤ 80 cm深层孔道、单侧可达工况,抗钢筋干扰,专攻深层空洞检测。声发射法适用于动态监测,可评估活动缺陷发展,适配长期健康监测。红外热成像法适用于 ≤ 5 cm浅层孔道,快速筛查浅层空洞^[6]。

3 无损检测技术的优化方向

3.1 多技术融合检测

多技术融合检测需要整合各类技术的优点,构建协同检测体系,凭借优势互补提高检测的精度和可靠性。例如:超声法和雷达法结合,运用超声法的高精度去识别小尺寸缺陷,搭配雷达法的快速扫描实现大面积的检测;冲击回波法和声发射法联用,依靠冲击回波法定位静态缺陷,借助声发射法监测缺陷的动态变化;红外热成像法与超声法融合,对浅层和中深层缺陷进行全面检测,有效弥补单一技术的不足,使缺陷识别的准确性和全面性得到进一步的提升。

3.2 智能化信号解译技术

智能化信号解译技术需引入人工智能、机器学习及大数据等技术,开发相应的智能解译系统,减少人为因素所造成的影响。通过构建海量检测信号数据库,对机器学习模型进行训练,使信号参数自动提取、缺陷类型智能识别及检测结果精准判定得以实现。例如:借助深度学习算法自动解译雷达剖面图与超声信号波

形,能够快速对缺陷进行定位与量化;借助大数据分析整合多工况数据,对判定标准进行优化,提升检测结果的一致性与客观性^[6]。

3.3 检测设备轻量化与集成化

针对检测设备的轻量化及集成化,需要对其结构设计进行优化,以此使设备变得更轻便、小巧,且实现功能的集成,提升现场操作的便捷性。例如:开发便携式多通道超声检测仪,及将雷达和红外热成像一体化的设备,同时开展无线传感技术的研发工作,使其能够适配复杂的工况,增强设备的抗干扰能力,对信号模块进行优化,减少环境带来的干扰^[7]。

3.4 完善检测标准与规范

无损检测技术规范化的关键是要不断完善检测标准以及相关的规范。需要制定统一的标准以及判定缺陷的规范,明确各种技术的检测参数、操作流程以及评价方法;建立健全人员资质认证体系,借助专业培训对操作和解译的精准度进行提高;建立检测结果溯源机制,对数据流程进行规范,推动技术实现标准化的推广。

4 结束语

预应力孔道注浆密实度无损检测技术是保障桥梁质量与寿命的关键。本文对比五种主流技术特性得出:超声法高精度低成本,适用于中浅层小缺陷;雷达法高效可视化,适配大面积复杂孔道;冲击回波法抗钢筋干扰,擅长深层缺陷检测;声发射法可动态监测缺陷发展;红外热成像法非接触,适用于浅层快速筛查。现有技术各有局限,单一技术难以适应复杂工况,未来需聚焦多技术融合、智能解译等方向的优化,实践中按需选型,推动技术创新应用,为交通基建安全提供支撑。

参考文献:

- [1] 庄肃言.智能检测技术在预应力箱梁质量评估中的应用[J].绿色建造与智能建筑,2025(08):117-119.
- [2] 刘勇,任东华.无损检测技术在桥梁养护管理中的应用[J].运输经理世界,2025(19):133-135.
- [3] 单志龙,侯福金,梅波,等.混凝土桥梁预应力钢筋锈蚀的研究进展[J].材料导报,2025,39(20):199-209.
- [4] 董洪伟.预应力混凝土桥梁锚杆无损检测技术应用[J].运输经理世界,2024(32):107-109.
- [5] 许恒.超声波无损检测技术在桥梁工程中的应用分析[J].运输经理世界,2024(07):71-73.
- [6] 朱妍,张小琼,张林文,等.预应力索孔道注浆密实度检测技术及其应用[J].无损检测,2023,45(08):14-18.
- [7] 刘安桥,熊超,贾万权.冲击回波法检测预应力孔道注浆密实度实践研究[J].低碳世界,2021,11(02):165-166.

火电厂集控运行中蒸汽轮机 振动异常与抑制策略研究

张晋豪

(国家能源集团重庆电力有限公司重庆发电厂, 重庆 400800)

摘要 蒸汽轮机是火电厂集控运行系统的核心设备, 蒸汽轮机的振动稳定性直接影响电厂的安全性和经济性。蒸汽轮机振动异常轻则会造成设备磨损加重, 重则会导致机组停机、设备损坏, 造成重大的经济损失。本文根据集控运行架构和蒸汽轮机振动理论, 从设备本身、运行操作、外部环境三个方面分析振动异常的原因, 提出设备优化、应急处置等各方面的抑制措施, 以期为火电厂解决蒸汽轮机振动问题、提高集控运行可靠性提供参考, 进而保证机组长期平稳高效运行。

关键词 火电厂集控运行; 蒸汽轮机; 振动异常

中图分类号: TM62; TK26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.005

0 引言

随着火电厂集控运行技术的持续发展, 机组正朝着高参数、大容量方向升级迭代。作为能量转换的核心枢纽, 蒸汽轮机的运行状态对机组整体性能的影响愈发关键。振动异常是蒸汽轮机运行中经常出现的故障之一, 轻微的振动会加快设备的磨损, 严重的会造成机组停机、设备损坏, 造成巨大的经济损失。因此, 对蒸汽轮机振动异常的原因进行深层次的探究, 寻找出一套行之有效的抑制方法, 对火电厂集控系统安全稳定运行、减少故障的发生率具有重大的现实意义和应用价值。

1 火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常理论

1.1 火电厂集控运行系统概述

火电厂集控运行系统是把锅炉、蒸汽轮机、发电机等主要发电设备集成在一起, 实现集中监测、操作、控制的一体化管控系统。核心架构由中央控制室、现场检测单元、执行机构、高速通信网络组成, 通过统一控制平台来协调各个设备之间的联动关系, 有效地提高发电效率、降低运行损耗、保证机组安全稳定运行, 实现设备运行状态的实时可视化与远程操控, 减少人工巡检频次, 提升机组运行的智能化水平。蒸汽轮机是集控系统的主要动力设备, 主要功能是把蒸汽的热能转化为机械能, 驱动发电机产生电能, 它的运行稳定性直接影响整个集控系统的供电可靠性及运行经济性, 是锅炉蒸汽系统和发电机电力输出之间联系的关键节

点, 在火电厂集控运行体系中占据着不可替代的核心地位, 对机组的连续高效运行起着决定性的支撑作用。

1.2 蒸汽轮机振动相关理论

蒸汽轮机振动是蒸汽轮机运行过程中不可避免的物理现象, 可分为强迫振动和自激振动两种。强迫振动主要是由于转子不平衡、部件不对称等原因引起的, 自激振动多与润滑不良、气流扰动有关。振动异常判断的核心指标为振动幅值、频率、相位, 必须严格按照火电厂设备运行行业标准来确定合格范围, 结合设备本身参数来判断, 通过频谱分析、趋势分析等专业手段精准识别振动类型, 为后续故障诊断与消缺处理提供可靠数据支撑。集控运行环境下的振动监测采用高精度传感器技术, 蒸汽轮机转子、轴承、气缸等关键部位安装振动传感器并实时采集振动信号, 通过调节电路、传输模块传送到集控中心, 然后对振动参数进行分析处理, 判断是否超出了正常值, 发现异常源马上停止振动扩散。

2 火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常的成因分析

2.1 设备本身因素

设备自身的质量缺陷、安装偏差、长期运行损耗等都是造成蒸汽轮机振动异常的主要内在原因, 隐具有隐蔽性强、影响持久的特点。转子是蒸汽轮机的主要转动部件, 在制造过程中由于材料不一致、加工精度达不到要求、长期使用磨损腐蚀疲劳产生裂纹或者结垢, 都会造成转子不平衡、产生离心力引起持续振动^[1]。轴承是支撑转子的重要部件, 安装时同轴度、

作者简介: 张晋豪 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 火电集控运行。

间隙调整不当或者运行中润滑失效、磨损、剥落等，都会造成转子支撑不稳定，产生振动。另外，蒸汽轮机气缸、隔板等部件变形、密封件损坏造成的蒸汽泄漏、转子和静止部件碰磨等都会影响设备的正常运转，进而加重振动异常，这些问题的产生大多和设备全生命周期管理不到位有关。

2.2 集控运行操作因素

集控运行操作规范性直接影响蒸汽轮机的运行状态，不规范的操作是引起振动异常的主要人为因素，大部分可以通过科学控制来避免。机组启停时，若操作人员未按操作规程执行，升温、降温速度过快，升速、降速节奏不合理，就会使蒸汽轮机各个部件受热、冷却不均，产生较大的热应力和热变形，破坏各个部件的配合精度，引起振动。当机组负荷波动较大，变化频繁时，会使得蒸汽压力、温度、流量等主要参数发生突然变化，蒸汽对转子的作用力不均，造成转子振动异常。集控系统操作参数设置不合理、操作人员误操作、设备运行状态监测不到位，不能及时发现轻微振动隐患并进行处理，会造成振动隐患逐渐扩大，引起严重的振动异常，影响机组正常运行，与操作人员专业素质及管控机制有关。

2.3 外部环境及辅助系统因素

外部环境干扰、辅助系统运行异常，都是造成蒸汽轮机振动异常的主要外在因素，各个因素之间互相影响，很容易形成连锁反应^[2]。在外部环境方面，火电厂厂房内温度、湿度超标或者存在大量粉尘、腐蚀性气体，会加快设备部件的老化、腐蚀，间接降低设备运行稳定性，引起振动异常；厂房基础沉降、周边设备运行产生的振动干扰，会传递到蒸汽轮机上，破坏其运行平衡，严重时还会引起共振。在辅助系统方面，蒸汽系统参数不稳定、蒸汽带水造成蒸汽冲击转子力不均；润滑油系统油质变差、供油不足或油路堵塞使轴承磨损加大，影响转子支撑稳定性；冷却系统运行异常使设备降温不及时而引起部件热变形；励磁系统故障会影响发电机运行状态从而干扰蒸汽轮机的稳定运行，各类辅助系统异常都会通过不同途径诱发或者加剧蒸汽轮机振动异常。

2.4 多因素耦合作用分析

火电厂集控运行时，蒸汽轮机振动异常一般不是单一因素单独造成的，而是设备自身、运行操作、外部环境、辅助系统等多因素耦合的结果，且耦合后的振动异常更复杂、危害更大，排查和处理难度大大增加，容易造成严重的设备故障，造成重大的经济损失。例如：设备本身存在转子质量不平衡隐患，集控运行时

操作人员调节负荷过于频繁，会使转子振动增大，此时若润滑油系统出现供油不足、油质变差的情况，会使轴承润滑变差，振动幅值急剧增大，产生“设备隐患+操作不当+辅助系统异常”的恶性耦合效应，短时间内就可能造成轴承损坏。另外，厂房基础沉降造成设备安装精度不准确，加上蒸汽系统蒸汽参数波动，会造成蒸汽轮机各部件受力不均，如果操作人员不能及时发现振动异常、不能调节运行参数，就会使振动异常扩大，进而造成转子碰磨、轴承损坏、气缸变形等严重的设备故障。多因素耦合时，各因素的影响叠加、放大部分，会增大振动异常的排查难度，缩短设备使用寿命，严重影响机组连续稳定运行，给火电厂造成安全隐患和经济上的损失。

3 火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常的抑制策略

3.1 设备层面的抑制措施

对于设备自身原因造成的振动异常要构建设备制造、安装、维护全流程控制体系，从源头上消除振动隐患。在设备制造阶段严格控制材质质量、加工精度，加强转子、轴承、气缸等主要部件的质量检测，采用先进的加工工艺，杜绝不合格的部件投入使用；在安装阶段严格按照安装规范进行安装，控制好安装偏差，保证各部件的配合精度和同轴度，做好设备的密封处理，减少蒸汽泄漏隐患。建立设备日常维护检修制度，定时对蒸汽轮机核心部件巡检、无损检测，及时发现并处理磨损、腐蚀、裂纹等隐患，定时对转子做平衡校正，加强润滑系统、密封系统的维护；定时更换润滑油、密封件，保证设备润滑、密封良好；定时做设备全面检修，及时调整部件间隙、修复变形部件，提高设备运行稳定性，从源头上抑制振动异常发生^[3]。

3.2 集控运行操作层面的优化策略

优化集控运行操作流程：其一，加强操作人员管控是控制振动异常的有效措施，可以降低人为因素造成的隐患。制定完善的标准化操作规程，明确机组启停、负荷调整的具体要求，严格控制升温、降温、升速、降速速度，避免参数急剧变化，减少热应力和部件变形，保证机组平稳启停、负荷平稳调整。其二，加强操作人员专业培训，按期开展设备运行特性、操作规程、应急处置等内容的培训和考核，提高操作人员的专业素养与操作技能，培养其责任意识，避免误操作。其三，根据蒸汽轮机运行状况动态调整相关参数，使设备协同高效运行，建立操作全过程管控机制，对操作流程实施实时监测、追溯，及时发现并纠正不规范操作，防止操作因素引起的振动异常。其四，创建集控运行操作经验分享平台，整理出振动异常典型状况、规范操作案

例并进行剖析,提高风险预判能力。完善应急操作预案,根据不同原因引起的振动问题制定专门的处置流程,保证突发情况下可以快速反应、精准处理,从操作全过程筑牢振动防控防线,保证机组长期稳定安全运行。

3.3 监测与预警系统的完善

健全振动监测预警系统,达到振动异常的早发现、精预警和及时处置的目的,可以有效防止振动隐患扩大。首先,改善振动监测点位的布置,增加到蒸汽轮机转子、轴承、气缸等重要部位的高精度振动传感器,扩大监测范围,全面、实时地采集振动信号,使用先进的信号处理技术提高振动数据分析的精度,正确识别振动类型,判定振动等级,防止出现误判、漏判^[4]。其次,搭建智能化预警平台,根据行业标准和设备运行参数阈值来设置分级预警指标,当振动参数接近或者超过预警阈值的时候,会发出声光预警信号,并推送预警信息给相关操作人员,提醒他们及时排查处理。再者,建立振动数据台账,对振动数据实施长久存储并加以剖析,总结振动变化的规律,预先判定振动异常的隐患,从而实现从被动处置到主动防控的转变。最后,完善预警联动处置机制,把预警信号同设备启停、旁路切换等应急操作联动,缩短故障响应时间。对预警系统定期进行校验、维护,更新传感器、算法模型等,保证预警系统长期稳定运行,不断提高设备振动风险防控的智能化、可靠性水平。

3.4 辅助系统的优化改进

辅助系统稳定运行是蒸汽轮机正常运转的保证,优化改进辅助系统可以有效减少振动异常的原因,提高设备运行稳定性。对蒸汽系统加强锅炉运行调控,保证蒸汽压力、温度、流量稳定,改善蒸汽净化工艺,削减蒸汽带水状况,防止蒸汽对转子产生不平衡冲击;定时对蒸汽管道、阀门等部件展开检查,及时修补出现的泄漏隐患,保证蒸汽系统密封良好、运行稳定。定期对润滑油系统油质进行检测,及时更换已劣化的润滑油,改善供油系统设计,保证供油充足、稳定,加强油路清洗,防止油路堵塞,从而提高轴承润滑的效果,减少轴承磨损的概率。对冷却系统、励磁系统等其他辅助系统进行定期的巡检和维护,发现运行中的异常现象及时加以处理,改善控制逻辑以使系统更加稳定、可靠地运行,保证各个辅助系统与蒸汽轮机、集控系统一起协同高效运行,降低外界因素的影响。

3.5 应急处置策略

建立科学完善的应急处置体系,提高振动异常应急处置能力,可以在蒸汽轮机出现振动异常的时候迅速做出反应并妥善处理,最大限度地减少损失,防止

振动异常扩大导致设备故障或者机组停机,保障电厂安全生产。首先,根据振动幅值大小、影响范围、危害程度将振动异常分为一般、较大、重大三级,制定出相应的应急处置预案。确定不同的分级对应的处理流程、责任分配、应急手段、时间限制。在应急处理时依据不同的等级采取相应的措施来解决振动异常问题,及时地修改与调整应急方案,结合实际工作中遇到的经验来完善应急处理方案,使应急处理方案更具有实用性、可行性。其次,配置足够的应急处理设备和材料,如振动检测设备、维修用具、备件等,加强应急队伍的建设,选择有经验的、有能力的人员组成应急小组,定期进行应急演练,模拟各种等级的振动异常情景,提高操作人员的应急处理能力和团队协作能力^[5]。当发生轻微振动异常的时候,及时调整运行参数,消除隐患,防止隐患的扩大;当出现严重振动异常的时候,立即执行应急停机程序,停止设备运转,组织专业人员对隐患进行全方位的排查,制定出有针对性的处置方案,在隐患彻底消除并通过验收之后,再启动机组;应急处置结束以后,认真总结经验教训,不断改进应急处置预案和防控手段,持续提高振动异常的应急处置能力。

4 结束语

火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常是由设备、操作、环境等诸多因素引起的,且多因素耦合作用会加大故障风险,直接危及机组的安全和电厂的效益。本文提出多种抑制策略,可以对由各种原因引起的振动现象采取相应的措施,在设备改进、规范操作之后,可以减少振动异常的发生概率。而后可以结合实际机组运行数据来优化策略参数,提高适用性。做好蒸汽轮机振动控制,对促进火电厂集控运行高质量发展、实现节能降耗具有重大意义。

参考文献:

- [1] 江宗浩.火电厂集控运行中蒸汽轮机振动异常智能诊断与抑制策略研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(S2):569-571.
- [2] 张晓东,唐经天,杜玉生,等.300MW 汽轮机振动治理分析[J].中国设备工程,2025(24):81-83.
- [3] 王新,李凌坤,朱亚鹏,等.某汽轮机振动突增故障的诊断和处理[J].热力透平,2025,54(04):313-317.
- [4] 陈建军.裂解气机组汽轮机振动大的原因分析及对策[J].石化技术,2025,32(12):266-268.
- [5] 张冲.汽轮机振动故障诊断技术分析[J].今日制造与升级,2025(07):201-203.

城市地下勘探作业中既有管线损毁风险预警与防护技术研究

刘自强

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要 城市地下勘探作业中既有管线损毁风险严重威胁城市运行安全。本文系统剖析勘探扰动机理与多维风险源, 开发高精度探测定位与信息融合技术, 构建基于多源实时监测的智能预警模型及分级响应机制, 并创新融合主动防护(地层改良、隔离屏障、施工调控)与被动防护(结构增强、缓冲耗能、应急阻断)协同体系, 以期为提升勘探作业安全性与城市基础设施韧性提供借鉴, 进而为地下空间开发提供关键技术支撑。

关键词 城市地下勘探; 既有管线; 损毁风险; 风险预警; 防护技术

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.006

0 引言

随着城市化进程加速, 地下空间开发规模持续扩大, 勘探作业中既有管线损毁风险日益凸显。供水、燃气、电力等管线作为城市运行的“生命线”, 其安全直接关乎民生保障与城市韧性^[1]。城市(特别是老城区)地下既有管线往往比较复杂, 通过前期管线调查、联系产权单位确认后仍难以完全准确掌握其类型、埋深、走向。复杂地质条件、密集管线交叉及动态扰动等因素易引发勘探过程中的管线破裂、渗漏甚至爆炸等事故, 造成人员伤亡、重大经济损失与社会影响。若是作业过程中损坏国防光缆, 还可能触犯《刑法》。因此, 构建精准高效的风险预警与防护技术体系, 实现损毁风险超前辨识、实时监测与主动防控, 是提升地下作业安全性与城市基础设施韧性的核心需求。

1 勘探作业对既有管线的扰动机理与风险源识别

在勘探作业中, 钻探设备直接击中既有管线是造成管线损坏的常见且严重情形。在作业过程中, 由于地下情况复杂, 管线埋设位置可能存在偏差记录或标识不清等问题, 使得钻探设备在未准确探明管线位置时便贸然施工。当钻探设备的钻头、钻杆等部件直接撞击到管线时, 强大的冲击力会瞬间破坏管线的结构完整性^[2]。对于金属管线, 可能出现破裂、穿孔; 对于塑料等材质管线, 则可能被打断或严重变形。这种直接打击不仅会中断管线的正常使用, 还可能引发介质泄漏, 对周边环境、人员安全以及生产生活造成极大危害, 因此勘探前精准探测管线位置至关重要^[3]。

风险源识别需立足多维度交叉分析。地质风险源涵盖复杂地层条件(高压压缩性淤泥、富水砂层、破碎岩体等)及隐伏灾害体(空洞、断层等), 其空间不确定性大幅增加勘探误伤管线概率; 作业风险源集中于工艺选择失当(顶管轴线与管线交叉角 $< 30^\circ$ 时剪切风险倍增)、参数控制偏差(掘进顶力超限或注浆压力不足)及监测盲区(关键节点未布设变形传感器); 管线本体风险源则涉及材质属性(铸铁管抗弯能力仅为钢管的 $1/3$)、服役状态(腐蚀减薄或接口松动)及空间分布(多类型管线 $< 1\text{ m}$ 密集并行时扰动叠加效应显著)。需要特别关注的是高压燃气管、超高压电缆等特殊管线, 其受损可能触发链式灾害, 风险等级需提升至最高阈值^[4]。

2 既有管线高精度探测、定位与信息融合技术

2.1 多源管线探测技术原理与适用性

多源管线探测技术通过集成物探、测绘及人工智能算法实现地下管线的精准识别与空间定位^[5]。电磁感应法基于金属管线导电特性, 发射交变电磁场激发管线二次场, 适用于埋深 $\leq 5\text{ m}$ 的金属管道定位, 对燃气、供水等铁磁性管线探测精度达 $\pm 10\text{ cm}$; 地质雷达法利用高频电磁波反射原理, 通过介电常数差异识别非金属管线轮廓, 在混凝土排水管、电缆通道探测中优势显著, 但其分辨率随埋深增加而衰减($> 8\text{ m}$ 时误差增至 $\pm 30\text{ cm}$)。高密度电阻率法通过布设电极阵列分析土层电性结构, 可辨识塑料管等绝缘体在富水地层中的异常区, 尤其适用于岩溶区管线空洞隐患

作者简介: 刘自强(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设工程安全生产管理。

探测。惯性定位与陀螺仪导向技术结合顶管机内置传感器实时记录管线三维轨迹,对深埋(>15 m)管线动态施工定位误差 $\leq 0.1\%$ 里程^[6]。多源技术需依据管线材质、埋深、地质噪声等约束条件优化组合。例如:在电磁干扰城区宜采用地震波束成型技术抑制背景噪声,而在密集交叉管段则依赖探地雷达层析成像实现毫米级分辨。

2.2 探测精度提升与误差控制

探测精度提升需突破复杂环境下的信号干扰与定位漂移瓶颈。硬件抗干扰优化通过多频段自适应传感器阵列抑制电磁噪声,增强非金属管线识别能力;高精度惯性导航系统结合温漂补偿技术,显著提升深埋管线动态轨迹定位稳定性。多源数据协同融合构建空地一体化观测网络:地表高程畸变采用激光扫描校正,浅层电性结构通过钻孔电阻率反演约束,融合电磁与地震波数据的概率加权模型有效解决交叉管线空间分辨难题。全流程误差抑制实施系统性控制:施工前设备标定消除系统偏差,探测中同步定位与振动补偿技术避免时移误差,后处理阶段引入深度学习算法智能识别地质杂波与虚影干扰。针对岩溶区等特殊环境,极化敏感的全波形反演技术可精准区分管线目标与地质异常,大幅提升复杂场景探测可靠性。

2.3 多源数据融合与三维建模

多源数据融合通过集成地质勘探、管线探测及施工动态监测数据,构建全域地下空间数字孪生体。融合架构采用时空基准统一技术,将电磁定位点云、钻孔岩芯参数、InSAR 地表形变监测流与顶管机实时姿态数据协同校正,消除坐标系差异与时间异步误差;智能关联引擎基于图神经网络解译管线-岩土相互作用关系,自动匹配物探异常区与地质构造特征,识别隐伏管线交叉冲突区。三维动态建模依托 BIM+GIS 双平台耦合,融合地层界面概率分布模型生成参数化地质体,管线实体通过非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面精确表达材质接口与服役状态,实现支护结构应力场、地下水流场与管线变形的多物理场耦合仿真。模型动态更新机制通过施工监测数据流驱动实时修正地层参数,预演不同勘探工艺下的管线位移风险云图,为防护决策提供沉浸式空间推演平台。

3 基于多源监测的管线损毁风险预警体系构建

3.1 风险预警指标体系

风险预警指标体系涵盖地质环境、管线状态及作业扰动三大类核心参数。地质环境指标包括地层位移速率、土压力失衡度与地下水渗透压变幅,实时捕捉土体失稳前兆;管线本体状态指标聚焦接口错位角、

管材应变梯度及腐蚀电位漂移,精准量化结构损伤程度;作业扰动指标纳入掘进顶力偏差率、振动加速度谱强度及注浆压力波动系数,动态评估施工机械的扰动强度。指标融合采用层次化赋权模型,依据管线类型(高压燃气、供水等)与地质敏感性(岩溶、软土等)动态调整阈值权重。通过物联网传感器群实时采集多维数据,结合长短期记忆网络(LSTM)预测指标演化趋势,实现“稳态监测—异常诊断—临界预警”三级响应,形成覆盖勘探全周期的风险态势感知网络。

3.2 多维度监测技术选型与布设

多维度监测技术需依据风险特征适配布设策略。地质环境监测采用分布式光纤传感网络实时捕捉地层位移与孔隙水压变化,辅以微震传感器阵列识别岩体破裂信号;浅层异常区嵌入阵列式倾角计,动态反馈土体失稳趋势。管线本体监测重点部署管壁应变片组与管节接口位移计,燃气管线增设气体微泄漏激光光谱探头;深埋管线融合陀螺仪轨迹追踪与声波导波技术,全周期量化管体形变与腐蚀损伤。作业扰动监测在施工机械关键节点安装振动加速度计与液压压力传感器,同步采集顶进力、注浆压力等动态参数。布设方案遵循“隐蔽性—鲁棒性—经济性”原则:狭窄空间采用无线自组网传输,减少布线干扰;高电磁干扰区采用屏蔽铠装传感器;深埋区构建光纤—无线混合中继网络,确保数据连续回传。

3.3 监测数据采集、传输与处理

监测数据采集采用分布式架构实现多源异构数据高效整合。智能感知层通过嵌入式传感器(光纤应变计、微震探头、气压变送器等)实时采集地层位移、管体形变及机械振动等参数,狭窄区域采用无线自组网节点实现无盲区覆盖。可靠传输层构建光纤-5G 混合网络:浅层监测点通过 LPWAN 低功耗回传;深埋区采用铠装光缆抗电磁干扰;高实时性数据(顶管机液压参数)经 5G 切片专网直传。边缘智能处理层部署网关级计算单元,运行轻量化 LSTM 模型实现数据降噪与特征提取,通过时间序列异常检测算法实时过滤环境干扰,生成结构化风险特征流。中心平台采用流式计算引擎动态融合多维度特征,结合管线材质、埋深及地质敏感性标签,输出风险等级图谱,支撑预警决策闭环。

3.4 风险预警模型与阈值设定

风险预警模型采用动态贝叶斯网络融合多源异构数据,构建“地质—管线—作业”耦合风险演化链。阈值自适应机制依据管线属性分级设定核心指标临界值:刚性管道以接口错位容限与混凝土裂缝宽度为失控阈值,柔性管线侧重环向应变梯度及曲率突变判据;

高压燃气管线增设微泄漏气体扩散浓度与土壤气压骤变双因子联动阈值。风险演化建模通过隐马尔可夫链刻画异常状态迁移规律,结合地层参数实时反演结果动态修正失稳概率权重。分级响应机制设计三级预警:初级预警触发施工参数微调(注浆压力补偿);中级预警启动支护强化与机械限速;高级预警执行停工避险及应急注浆隔离。

4 既有管线主动与被动防护技术体系

4.1 主动防护技术

主动防护技术通过超前干预降低管线损毁风险,核心涵盖地层改良、隔离屏障及施工调控三大方向。地层改良技术采用MJS工法桩实施全方位高压注浆加固,通过40 MPa水泥浆液渗透填充岩土裂隙(水泥掺量 $\geq 40\%$),提升管线周边土体强度与均质性;针对岩溶区实施速凝浆液空洞充填,同步植入钢管桩增强抗变形能力。隔离屏障技术在管线与施工区之间构建刚性防护体系:微型顶管幕(直径0.8~1.5 m)形成超前支护网络;高压燃气管线采用钢套管复合结构(外套D2400 mm钢管内衬玻璃夹砂管),双面焊接确保密封性,管间灌注低收缩水泥砂浆缓冲外部荷载。施工动态调控技术基于实时监测数据优化作业参数:通过顶力闭环控制系统限制顶进偏差率 $\leq 15\%$;在软土区实施分级降水与同步回灌(回灌率 $\geq 80\%$),采用防渗膜阻断水土流失;振动敏感区启用低转速掘进模式,结合智能注浆系统动态补偿地层损失量,实现扰动源头精准抑制。

4.2 被动防护技术

被动防护技术通过缓冲耗能机制降低管线受扰后的损毁程度,涵盖结构抗损设计、变形缓冲层及灾变应急控制三大领域。结构抗损设计针对高风险区管线采用增强型复合管材:高压燃气管线植入碳纤维增强聚合物(CFRP)内衬层,抗弯刚度提升40%;混凝土管道环向配置预应力钢绞线网,抑制裂缝扩展。变形缓冲体系在管线周边构建能量耗散层:采用高密度泡沫混凝土回填层(密度 $\leq 0.8 \text{ g/cm}^3$)吸收地层形变能;管土界面敷设楔形橡胶垫层(压缩模量 $\geq 8 \text{ MPa}$),通过弹性变形消解不均匀沉降冲击;岩土交界面设置立体土工格栅加筋带,分散剪切应力。灾变应急控制部署智能阻断系统:管道关键节点安装记忆合金自锁装置(触发应变 $\geq 5\%$),在超限变形时自动闭阀;漏水点配置膨胀止水环(遇水膨胀率300%),实现渗漏自主封堵;结构体预埋微型爆破索,受塌方冲击时定向释放支撑腔室缓冲压应力。被动防护体系与主动技术协同,形成“预防—消解—应急”全链条防护网。

4.3 防护效果评估与验证

防护效果评估采用多尺度实测验证方法,贯穿材料性能、结构响应及系统防灾安全链条。材料级验证对钢套管双面焊接接头实施气压试验(30 min压降 $\leq 1\%$),内衬玻璃夹砂管开展三点弯曲试验(极限曲率 $\geq 0.05 \text{ m}^{-1}$);缓冲层泡沫混凝土经落锤冲击测试(能量吸收率 $\geq 80\%$),楔形橡胶垫层通过百万次疲劳加载保持压缩回弹率 $> 90\%$ 。结构级验证构建缩尺试验场:MJS工法桩加固区加载模拟顶进扰动(顶力 \leq 设计值120%),实测管线位移量控制在管径的0.5%以内;钢管混凝土复合管段在3倍设计水土压力下,接口错台量稳定在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 阈值区间。系统防灾验证搭建全尺寸灾变模拟平台:触发5%拉伸应变激活记忆合金自锁装置(响应时间 $< 15 \text{ s}$);向膨胀止水环注水加压至0.3 MPa,验证300%体积膨胀率下的渗漏封堵时效性;通过爆破索定向释放模拟塌方冲击,结构残余承载力仍高于设计荷载70%。所有验证数据经数字孪生平台比对理论模型误差率 $< 8\%$,实现防护效能可量化、可追溯、可迭代。

5 结束语

城市地下勘探作业中的管线安全是保障城市运行的关键。本文系统剖析了勘探扰动致损机理与风险源,构建融合多源高精度探测、定位与信息融合技术的风险识别体系。在此基础上,建立基于多维实时监测数据的智能预警模型与分级响应机制,并提出主动干预(地层改良、隔离屏障、施工调控)与被动防护(结构增强、缓冲耗能、应急阻断)协同的技术体系。研究成果为超前辨识风险、精准预警与高效防护提供了系统性解决方案,可提升勘探作业安全性与城市基础设施韧性,对推动城市地下空间安全开发具有重要的实践价值。

参考文献:

- [1] 沈旭甜,张娟.复杂环境下地下综合管线探测技术研究[J].建设科技,2025(15):41-43,47.
- [2] 张莉.市政工程建设中地下管线探测技术的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(05):208-210.
- [3] 樊涛,刘洋.测绘工程中的地下管线与地质勘探技术研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第二届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.咸阳地稷信息技术有限公司,陕西御龙科技有限公司,2024.
- [4] 曹佃龙.地下管线探测方法及测量质量控制研究[J].科学技术创新,2024(09):123-126.
- [5] 李骄阳.地下管线物探原理及探测方法分析[J].江西建材,2022(11):43-44,48.
- [6] 郑细华.城市地下管线物探中的干扰因素及排除方法[J].大众标准化,2025(19):134-136.

人工智能在城市交通控制中的应用

高夕砚

(南京创志无限信息技术咨询有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要 响应数字化转型与智能化升级的时代要求, 城市交通控制体系正遭遇系统性变革, 深度融合人工智能技术, 为破除交通拥堵、提升管控效率打造全新途径。本文依托协同数字设计管理平台、数字建设管理平台和数字运营养护管理平台的协同逻辑, 全面整理城市交通控制核心内涵和适配的人工智能技术体系, 探究人工智能在路口信号调控、交通流感知预判等核心应用场景, 深挖技术、应用管理及政策标准方面的现存问题, 并提出针对性改进策略, 以期为促进人工智能和城市交通控制深度融合、构建智能化交通管控体系提供理论参考。

关键词 人工智能; 城市交通控制; 数字化转型; 协同管理平台; 智能调控

中图分类号: TP18; U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.007

0 引言

城市化进程不断加快, 机动车保有量持续攀升, 城市交通拥堵、通行效率偏低、安全隐患增多等问题愈发明显, 传统交通控制模式难契合现代化城市发展需求, 数字化转型与智能化升级成了城市交通高质量发展的核心方向。人工智能技术依托数据处理、智能决策、自适应调控等优势, 成为拉动城市交通控制变革的核心动力。构建数字设计管理平台、数字建设管理平台和数字运营养护管理平台, 为人工智能技术在城市交通控制中的应用提供全生命周期的支撑载体。人工智能在交通信号调控、交通流感知等场景已实现初步落地, 但仍要面对技术瓶颈、管理滞后、标准缺失等多项挑战。基于此, 本文系统梳理人工智能在城市交通控制中的应用逻辑、现存问题与优化路径, 旨在为强化城市交通管控智能化水平、推进新型智慧城市建设提供参考。

1 城市交通控制核心理论基础

1.1 城市交通控制核心内涵与目标

城市交通控制是指通过各类技术手段与管理措施, 对城市道路中的人、车、路等交通要素进行统筹协调, 以实现交通流有序运行的管理活动。其核心内涵在于基于实时交通状态感知, 动态优化资源配置, 平衡交通效率、安全与环境效益。在数字化转型背景下, 城市交通控制的核心目标已从传统的“疏堵保畅”升级为构建“智能协同、高效安全、绿色低碳”的一体化交通管控体系, 通过协同数字设计、建设与运营养护

全流程, 实现交通控制的全生命周期智能化管理^[1]。

1.2 适配城市交通控制的人工智能技术体系

适配城市交通控制的人工智能技术体系由数据核心驱动, 覆盖感知、决策、执行三大环节, 涉及机器学习、深度学习、计算机视觉、自然语言处理及强化学习等关键技术, 该技术体系和三大数字平台紧密协作: 数字设计管理平台依托人工智能技术实现交通控制方案的模拟优化和预演; 数字建设管理平台借助智能监测技术保障交通设施建设质量和进度; 数字运营养护管理平台依靠人工智能, 完成交通状态实时感知、故障预警及动态调控, 表 1 为核心人工智能技术与协同数字平台及应用环节的对应关系。

2 人工智能在城市交通控制中的核心应用场景

2.1 路口交通信号智能调控

智能调控路口交通信号是城市交通控制的核心环节。人工智能技术实现信号配时从“固定方案”转变为“动态自适应”, 依托数字运营养护管理平台。人工智能系统依托视频监控、地磁感应器等多元设备, 即时采集路口车流量、人流量、车辆排队长度等精细化数据, 通过强化学习算法构建动态决策模型, 精准调整信号定时方案。例如: 早高峰及晚高峰时段, 系统能按照不同方向车辆的实时排队状态, 按需分配绿灯时长, 优先保障主干道及拥堵方向通行效率; 平峰时段自动缩减空放时长, 减少车辆无效滞停。数字设计管理平台能借助人工智能技术, 提前构建城市交通数字孪生模型, 模拟不同交通流量、天气条件下的信

作者简介: 高夕砚 (1984-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 信息及交通控制。

表1 核心人工智能技术与协同数字平台及应用环节的对应关系

核心人工智能技术	协同数字平台	主要应用环节	核心作用
机器学习	数字设计管理平台、数字运营养护管理平台	方案优化、交通流预判	提升方案适配性与预判精准度
计算机视觉	数字建设管理平台、数字运营养护管理平台	设施监测、交通流感知	实现可视化精准监测与感知
强化学习	数字运营养护管理平台	信号动态调控、协同管控	提升自适应调控与协同效率
深度学习	三大数字平台协同	全流程模拟、故障诊断	支撑全生命周期智能化管理

号运行状态, 预演优化信号方案, 为实际调控提供科学依据, 维持信号调控的前瞻性与精准性。部分先进城市已实现区域信号协同调控, 依托人工智能系统联动多个相邻路口的信号设备, 构建“绿波带”通行模式, 显著提升区域整体通行效率^[2]。

2.2 交通流状态感知与预判调控

人工智能技术和数字运营养护管理平台深度结合, 建成全维度的交通流状态感知体系, 借助摄像头、雷达、物联网传感器等设备采集实时交通数据, 依靠计算机视觉和深度学习算法完成交通流参数提取、拥堵状态识别。基于这一前提, 用机器学习模型预判未来15~30分钟的交通流状态, 临界拥堵出现前启动调控措施, 如引导车辆分流、调整区域信号时序等。数字建设管理平台可支撑感知设备安装调试阶段的智能监测, 保障感知体系稳定运转, 感知网络正朝“全域覆盖、全时响应”方向逐步升级, 依托路侧单元与移动终端的互联互通, 实时记录非机动车逆行、行人闯红灯等违规行为, 为交通流调控提供更完备的决策凭据, 深化交通管控精细度。

2.3 特殊场景交通智能调度

面对大型活动、恶劣天气、交通事故等特殊场景, 人工智能技术可实现交通精准智能调度, 依托数字运营养护管理平台归集实时路况、事件信息等多源数据, 人工智能系统提出最优调度方案, 如临时调整信号配时、划定临时绕行路线、调度应急车辆优先通行等。通过数字设计管理平台提前预演特殊场景的交通运行状态, 预备多套调度预案, 保证应急响应既及时又高效, 全力减少特殊场景对交通运行的影响^[3], 以突发交通事故为例, 系统可对接事故严重程度、现场清理预估时间, 智能算定影响范围, 通过导航APP为周边车辆推送分级绕行指引, 联动周边路口信号设备同步调整放行策略, 杜绝二次拥堵, 压缩交通复原时长。

2.4 多交通主体协同管控

随着共享单车、网约车等新型交通方式的普及, 多交通主体协同管控成为城市交通控制的新需求。人

工智能技术依托三大数字平台的协同支撑, 实现了机动车、非机动车、行人及新型交通主体的全要素管控。通过数字运营养护管理平台实时监测各类交通主体的运行状态, 利用深度学习算法优化通行权分配; 数字设计管理平台则在交通设施规划阶段, 结合人工智能模拟多交通主体协同运行场景, 优化设施布局, 提升协同通行效率, 构建多元化的交通协同管控体系。针对共享单车乱停乱放影响交通通行的问题, 人工智能系统可通过图像识别技术定位违规停放区域, 联动企业后台发送调度指令, 引导运维人员及时规整车辆, 同时在规划阶段预留专属停放空间, 从源头优化多主体通行秩序。

3 人工智能在城市交通控制中应用的现存问题

3.1 技术层面存在的不足

技术层面主要存在三大短板: (1) 数据质量与共享不足, 不同交通部门(交管、市政、公交等)的数据标准不统一, 数据格式、采集频率存在差异, 且受部门利益壁垒影响, 存在严重的“数据孤岛”现象, 导致人工智能模型训练数据不全面、时效性差, 直接影响决策精度; (2) 模型泛化能力较弱, 现有人工智能模型多针对特定区域、特定时段的交通场景训练, 模型参数适配性有限, 面对极端天气(暴雨、暴雪、强浓雾等)、突发事件、大型活动等非常规交通场景时, 容易出现决策偏差, 适应性不足; (3) 技术融合深度不够, 人工智能技术与三大数字平台的协同衔接存在壁垒, 数字设计管理平台的优化方案难以直接为数字建设管理平台提供精准指导, 数字运营养护管理平台的实时数据也无法反向优化设计阶段的模型参数, 未能充分发挥全生命周期管理优势, 导致技术应用呈现碎片化状态, 难以形成管控合力^[4]。

3.2 应用与管理层面问题

应用与管理层面的问题集中体现为: (1) 管理机制滞后, 传统交通管理模式难以适配人工智能技术驱动的智能化管理需求, 跨部门协同管理机制不健全,

导致技术应用效率低下；（2）运维保障能力不足，人工智能交通管控系统的运维需要专业技术团队，但目前多数城市缺乏此类人才，导致系统故障难以快速修复；（3）平台协同不足，数字设计、建设与运营养护管理平台各自为政，数据流转与功能衔接不畅，影响全流程智能化管理效果^[5]。

3.3 政策与标准层面短板

政策与标准层面存在明显短板：（1）缺乏统一的技术标准，人工智能在交通控制中的应用场景、数据采集、模型构建等方面尚未形成统一标准，导致不同系统难以兼容互通；（2）数据安全与隐私保护政策不完善，交通数据包含大量个人隐私与公共安全信息，现有政策对数据安全管控的力度不足，存在数据泄露风险；（3）激励与保障政策缺失，针对企业参与人工智能交通控制技术研发与应用的激励政策不足，影响技术创新与落地推广。

4 人工智能在城市交通控制中应用的优化策略

4.1 技术优化策略

技术优化需聚焦三大方向：（1）搭建统一的数据共享平台，牵头制定交通数据采集、存储、传输标准规范的主体为政府，明确各部门数据共享的责任和边界，破除“数据孤岛”，同时添加数据清洗和质量校验机制，对多部门、多维度交通数据做标准化处理，为人工智能模型提供优质、高时效的数据支撑；（2）增强模型泛化和自适应能力，采用迁移学习、强化学习等前沿算法，依托城市交通数字孪生技术打造多元训练数据集，强化模型应对复杂交通场景的适配性，同步强化极端天气、突发事件等特殊场景的模型训练和验证，维持模型决策的靠谱性；（3）强化技术与平台融合，促成人工智能技术和三大数字平台的深度配合，连通数据接口和功能链路，构建全流程智能技术体系，增强技术应用的系统协同与整体联动。

4.2 应用与管理体系完善策略

应用和管理体系完善需聚焦三个层面：（1）革新管理架构，搭建跨部门协同管理平台，厘清交通、公安、市政等部门的职责边界和协同流程，设立常态化沟通和联动处置机制，满足人工智能驱动的智能化管理要求；（2）加强人才队伍建设，依托校企合作共建实训基地、开展专项技能培训等途径，培养既具备交通管理专业知识又拥有人工智能技术能力的复合型人才，一并优化人才激励机制，招揽专业技术人才参与交通智能化建设，强化运维保障实力；（3）加强平台协同联动，理顺数字设计、建设和运营养护管理平台的功

能关联，构建全流程数据流转和反馈机制，让设计方案、建设进度、运维数据实时同步，保障全生命周期智能化管理闭环稳定运行^[6]。

4.3 政策与标准保障策略

构建全覆盖的政策和标准保障体系：（1）构建统一的技术标准体系，行业主管部门牵头，联合科研机构、企业制定人工智能在交通控制领域的应用规范、数据采集与交互标准、模型性能评估指标等，推动不同系统兼容互联及规模化落地；（2）优化数据安全和隐私保护政策，建立交通数据分级分类管控机制，明确数据采集、使用、共享的安全界限，加大数据加密、脱敏等安全技术研发和应用力度，从重打击数据泄露和滥用行为，筑牢数据安全防线；（3）推出激励和保障政策，增加人工智能交通控制技术研发的财政资金投入，设立专项创新扶持基金，给技术领先企业减免税收、优先立项项目等奖励，为技术创新和落地应用提供政策支持。

5 结束语

在城市交通控制中应用人工智能技术，是数字化转型和智能化升级的必经之路。为解决城市交通难题，提出全新方案，依靠协同数字设计管理平台、数字建设管理平台、数字运营养护管理平台联动支撑。人工智能在路口信号调控、交通流感知预判等场景已体现出明显的应用效果，但当前应用还面临技术、管理、政策等多方面挑战，需从技术优化、管理体系完善、政策标准保障多个层面推进，促进人工智能和城市交通控制深度联动，深化三大数字平台协同配合，构建贯穿全周期的智能交通管控体系，不仅可提高城市交通运转效率和安全标准，还能为新型智慧城市建设提供更足的助力，进而实现城市高质量发展。

参考文献：

- [1] 周锐鑫. 人工智能技术在城市智慧交通管理中的应用展望[J]. 信息记录材料, 2020, 21(05): 1-3.
- [2] 王志国. 智能交通控制系统在交通工程领域中的应用[J]. 交通世界, 2019(19): 16-17.
- [3] 王增鑫. 基于人工智能技术的城市公共交通智能驾驶舱设计与开发研究[J]. 人民公交, 2023(07): 82-86.
- [4] 焦宏斌. AI人工智能技术在智能交通领域中的研究与应用[J]. 中国新通信, 2023, 25(12): 74-76.
- [5] 焦宏斌. AI人工智能技术在智能交通领域中的研究与应用[J]. 中国新通信, 2023, 25(12): 74-76.
- [6] 牟凯, 张舒, 曹洪斌. 人工智能技术在智慧交通领域的应用研究[J]. 物流科技, 2022, 45(20): 98-100.

BIM 技术驱动下的建筑工程管理创新路径

张 欢

(平湖市建发投资(集团)有限公司, 浙江 平湖 314200)

摘 要 建筑信息模型(BIM)技术属于工程项目建设领域的高科技工具,在推动建设项目的全过程管理方面发挥着不可替代的作用。本文首先对传统管理模式在信息割裂、协同低效、控制粗放等各方面的突出问题进行系统的分析,接着阐述了BIM技术推动管理创新的必要性,即顺应行业数字化转型、推进精益建造和可持续发展、解决复杂工程系统问题这三大动因。在此基础上,重点从全生命周期信息集成管理、基于BIM的协同决策机制、精益化的施工过程控制和智慧运维及资产管理系统四个方面进行BIM技术推动的管理创新实践,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 建筑信息模型; 建筑工程管理; 数字化创新

中图分类号: TU71; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.008

0 引言

建筑工程行业作为国民经济的支柱产业,传统管理模式存在明显短板,已难以适配现代工程的复杂需求。在此背景下,建筑信息模型(BIM)技术应运而生并快速发展——它突破了传统计算机辅助设计工具的局限,以三维数字模型为核心载体,实现了对工程项目的数字化表达,是贯穿项目全生命周期的信息集成与管理方法。BIM技术被深入地应用到建筑工程系统性创新中,用创建利用项目信息的方法来带动管理活动由经验转向数据驱动、由分段转向全生命周期一体化、由孤立作业转向多方协同,在各个方面释放出巨大的价值。因此,探究BIM技术驱动下建筑工程管理创新途径,对行业转型升级、高质量发展具有重大理论与实践意义。

1 传统建筑工程管理难点解析

传统的建筑工程管理模式经过长期实践形成一套相对固定的方式,它的主要特点一般表现为以二维图纸为信息传递载体、以纸质文档为主要数据载体、按照专业或者阶段进行条块分割式的管理。该模式对于标准化程度高、技术更新缓慢的项目可适用,但是当遇到大型复杂的工程时,它的内在缺陷就会暴露出来^[1]。

其一,存在严重的信息孤岛问题,各个阶段所产生的数据互相割裂,图纸和文档版本混乱,信息传递依靠人工解读和二次转换来完成,造成信息在传递的过程中被损耗、失真或者出现错误,从而成为项目延期、

成本超支、质量隐患的源头。其二,管理协同效率低,各个参与方如业主、设计、施工、监理、供应商等常常以各自的利益为出发点进行工作,缺乏有效的沟通协调,造成设计冲突、施工碰撞问题在施工现场才会出现,导致大量的返工和浪费。其三,过程控制粗放,进度管理大多依靠横道图等静态工具,不能动态地模拟和优化施工流程;成本管理采用的是量价分离的预算模式,对于设计变更所引起的成本变化反应较慢;质量、安全管理工作主要依靠事后检查和人工经验,缺少对过程数据的精确追溯和风险预警。这些难点互相交织在一起,使传统的管理模式在透明度、预见性、精细程度上都存在着明显的不足,不能满足现代工程建设对于高效、优质、低成本的需求,成为行业追求技术与变革的主要原因。

2 BIM 技术驱动下的建筑工程管理创新必要性

2.1 适配行业数字化转型的必然要求

当前数字化转型已成为建筑行业高质量发展的必然选择,国家也陆续出台相关政策推进建筑信息模型技术的应用和发展,明确把以数字化、智能化为发展方向推进建筑业提质增效作为重点任务。传统的建筑工程管理模式数字化程度很低,不能适应行业转型发展的需要,BIM技术是建筑行业数字化转型的重要支撑技术,可以实现工程全过程的数据化集成和可视化管理,打破传统管理模式信息壁垒。借助BIM技术创建数字化工程管理平台,可以达到设计、施工、运维全

作者简介: 张欢(1990-),女,本科,助理工程师,研究方向:土木工程。

阶段信息无缝连接和高效流转的目的,促使管理模式由经验驱动转变为数据驱动,由分段控制变为全生命周期协同控制,这是顺应行业数字化转型政策导向的必要条件,也是建筑企业提高自身竞争力的重要途径^[2]。

2.2 破解复杂工程管理难题的现实需要

随着城市综合体、超高层建筑、大型市政工程等复杂工程的出现,工程建设技术难度、管理复杂度也不断提高,传统的管理模式已经不能满足复杂工程多专业协调、多目标兼顾、多风险控制的要求。BIM 技术依靠三维可视化、多专业协同建模、模拟分析等功能,可以有效地解决复杂的工程管理问题。建立三维数字化模型可以清楚地展示出整个工程的结构以及各个专业的细节,并且可以提早发现并处理好多专业之间交叉冲突的问题;利用模拟分析工具可以对施工进度、施工工艺、资源配备等进行仿真优化,为复杂的工程施工组织和管理决策提供科学依据;依靠全周期数据集成,可以完成复杂工程各个阶段、各个主体之间的协调高效控制,保证质量、进度、成本、安全等各方面目标的均衡达成,这是破解复杂工程管理难题的现实要求。

2.3 提升工程管理综合效益的核心支撑

建筑工程管理的核心目的是保证工程质量及安全的同时,实现进度的优化和成本的节约,提高工程的整体效益。传统的管理模式存在着协同低效、管控滞后、资源浪费等弊端,造成工程的综合效益低下。BIM 技术依靠数据集成和智能分析可以达到工程管理精细化、精准化的控制目的,从而提高工程的整体效益。在成本控制方面,采用 BIM 模型可以达到工程量准确计算和成本动态监控的目的,避免资源浪费和成本超支。在进度控制方面,利用 4D 进度模拟来优化施工计划,提前发现并预防可能出现的进度问题,保证工期目标的实现。在质量安全控制方面,利用可视化的技术交底以及风险模拟分析,可以提高施工质量,降低安全风险。BIM 技术可以有效地弥补传统管理模式的缺陷,为提高工程管理综合效益提供重要的核心技术支持。

3 BIM 技术驱动下的建筑工程管理创新有效路径

3.1 构建以 BIM 模型为核心的全生命周期信息集成管理路径

创新的核心在于打破信息壁垒,创建覆盖规划、设计、施工、运维直到拆除整个工程全生命周期的数字主线。BIM 技术引发的管理创新首先是信息管理范式

的根本改变,即由原来的分散的、文档驱动变为现在的集中式的、模型驱动。BIM 模型是信息的唯一可信来源,它把几何信息、物理属性、功能性能、建造和维护过程等所有的数据都包含在内。管理活动的中心由原来管图纸文档转变为管模型以及有关的数据资源。这就需要建立统一的数据标准以及交付标准,规范各个阶段、各种专业的模型深度和信息粒度,保证信息在传递和交付的过程中是一致的、完整的并且可以继承。另外,要创建一个多参与方协同工作的数据管理系统,该系统可以管理模型中的数据,并实现集中存储备份、版本控制和权限设置以及实时共享等功能。通过此途径,将项目的各项信息不断地累积起来、不断地更新并且重复使用,为后续阶段的决策提供可靠的依据,从而达到资产价值最大的目的^[3]。

在大型医疗综合体建设管理过程中,从方案设计阶段开始,就以 BIM 模型作为载体,将建筑、结构、机电、医疗专项等各个专业设计信息集成起来。施工阶段承包商利用该模型来划分施工,在施工、进度、成本、物料等各方面形成联系。竣工时交付的不单单是某一栋实体建筑,而是包含所有的设备参数、管线走向、维护要求的数字化运维模型。医院运营方利用该模型可以有效地对空间进行管理、对设备进行巡检、开展应急演练并作出未来改造规划,从而改变以往依靠大量的纸质竣工图以及信息不全面处于被动运维状态的局面,使建筑资产由“建造”转变为“智维”。

3.2 建立基于 BIM 的协同工作与集成化决策机制

BIM 技术不单提供了一个共享信息的载体,而且造就了新的协作工作方式和决定方式。传统的线性、串行的“设计—招标—建造”流程正在逐步被以 BIM 为基础并行、集成的协同流程所取代,集成项目交付模式等则是典型的代表。在这种机制之下,业主、设计方、施工方、主要供应商等重要的参与方,在项目初期就组成一个协同的工作团队,用同一个 BIM 平台来开展工作。各方面的人员可以实时查看、评论并修改模型,在设计阶段就把施工可行性、造价、采购和运维等各方面的问題一起考虑进去^[4]。

BIM 模型能够与多种分析软件(结构分析、能耗分析、日照分析等)完成无缝对接,达成按照性能来开展设计的目的。管理决策由依靠个人经验、孤立的数据转变为依靠集成模型数据的可视化分析和模拟仿真。在复杂的市政综合管廊工程中,项目团队使用 BIM 协同平台把土建、给排水、电力、通信、燃气等各个专

业设计和施工计划放在同一个四维模型中进行模拟。借助可视化协同与模拟,不但提前解决了上百处管线碰撞问题,更重要的是优化了各个专业的施工时序及空间穿插顺序,模拟出各种施工方案对交通导改、周围环境影响的情况,最后选择出对城市运行干扰最小、总体工期最短的施工组织方案。依靠BIM模型开展的协同决策大大提高了各方沟通的效率以及决策的科学性。

3.3 实现施工过程的数字化与精益化管控

施工阶段是资源投入最集中的、不确定性最大的一个环节,BIM技术在这一阶段的应用创新,旨在实现由粗放式施工向精益式的建造转变。具体而言,在三维几何模型的基础上,把时间进度信息联结起来形成4D施工模拟,用来优化施工计划、进行可视化技术交底、对模拟的关键施工工艺进行可视化;再联系到成本信息来创建5D模型,从而达到动态工程量计算、成本估算和资源计划的目的。施工现场用物联网、移动终端、无人机、智能穿戴设备等手段,实时采集进度、人员、机械、材料、质量安全等数据,与BIM模型进行对比分析,达到施工过程的数字化监控和精确调度的目的。

以建投集团承建的明湖科创产城之窗项目为例,在项目初始阶段,施工总包单位使用BIM-5D管理平台把建筑结构、钢结构、幕墙等几千个构件的三维模型和详细的施工进度计划准确地整合起来,实现了虚拟建造的完整工程。在施工前阶段,依托BIM详细模型就能够发现设计中的问题和冲突,并及时进行调整和优化。同时,与原设计、幕墙模型进行合模,确保了结构的准确性和建筑效果的完美呈现。而在施工过程中,利用BIM技术进行施工模拟和进度管理,本项目大大提高了施工效率和工程质量。工作人员每天使用无人机航拍加上现场工程师的移动端应用来自动或者半自动采集构件安装进度图像,经过图像识别技术及模型计划进度比较后生成进度偏差报告。物料管理模块按照模型实时计算出未来一周所需要构件的准确数量,自动生成采购订单及配送计划,保证零库存或者准时供货,大大减少现场物料堆放、二次搬运。在质量控制上,关键部位的施工工艺采用BIM模型进行三维可视化交底,施工结果用移动端拍照和模型标准对比验收的方式进行验收,保证施工质量一次合格。

3.4 延伸至智慧运维与数字化资产管理

BIM技术价值在运维阶段的释放,是管理创新的最终表现与长效表现。创新的路径在于,将设计、施工阶段形成的、包含着大量信息的竣工BIM模型变成智

慧运维管理的重要数字资产。运维人员可以对三维模型进行操作,直观地找到设施设备的位置,并且可以通过点击来查询到该设备的生产厂家、规格参数、安装日期、保修期、维修记录等全部生命周期档案。更重要的是,BIM运维平台可以和楼宇自控系统、能源管理系统、安防系统等物联网系统集成,实时接收设备运行数据(温度、压力、能耗、故障报警等)并显示在三维模型中。这就实现了由被动式、响应式的维修,转向了预防性、预测性的维护^[5]。

以一栋大型商业办公楼的智慧运维为例,运维团队利用竣工BIM模型创建的运维平台,汇集了楼宇中成千上万个空调机组、风机盘管、照明回路、电梯等设备的实时运行数据。当某一楼层的空调区域连续出现温度过高的情况时,运维人员不需要查阅大量的图纸,在平台上直接对三维模型中定位出该区域的服务空调机组、风管阀门和传感器进行高亮显示即可。平台根据历史运行数据智能诊断出某个地方风阀执行器故障造成送风量不足,自动生成包含备件信息和维修指引的工作单,推送给最近的维修人员。平台对整个建筑能耗数据进行分析之后,可以自动调节空调系统分时分区运行策略,在保证舒适度的基础上达到节能的目的。以BIM为基础形成的智慧运维大大提高了设施的可靠度,提升运行效率和服务质量,降低长期运营成本。

4 结束语

BIM技术给建筑工程管理带来的驱动创新是深刻的范式变革,而不是传统管理流程电子化或者三维可视化。它以全生命周期信息集成为基础,以协同工作和数据驱动决策为特点,重新塑造起设计、施工到运维的各个环节。未来,建筑工程管理会随着BIM与云计算、物联网等新技术的结合而进入更优化、自适应、可持续发展的新时代。

参考文献:

- [1] 吴筱夏. 建筑工程管理创新模式的应用和发展研究[J]. 张江科技评论, 2024(05):107-109.
- [2] 钱俊杰. BIM技术在建筑工程管理中的应用研究[J]. 四川建材, 2024,50(02):211-213.
- [3] 杨王芳. 建筑工程管理创新及绿色施工管理探讨[J]. 居舍, 2023(25):158-161.
- [4] 王东艳. 探究BIM技术在建筑工程管理中的应用[J]. 居舍, 2021(07):137-138,142.
- [5] 邹维国. 建筑工程管理中创新模式的应用及发展分析[J]. 中国住宅设施, 2021(01):125-126.

智能巡检机器人在变电运维中的应用及成效

刘海韬

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司变电运检分公司, 湖北 黄冈 438000)

摘要 运用智能巡检机器人完成变电运维工作, 能够提升运维效率、保障人员安全, 对于电力企业而言具有积极的作用。本文针对智能巡检机器人的核心技术要点进行分析, 探讨其在变电运维中的技术应用要点, 进一步指出应用智能巡检机器人进行变电运维所取得的效果, 以期为提高变电运维工作水平提供有益参考。

关键词 变电运维; 智能巡检机器人; 设备检测; 区域巡检

中图分类号: TP24; TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.009

0 引言

电力负荷持续上升和电网规模不断扩大, 传统运维模式已无法满足新型电力系统对运维精度和效率的高要求。智能巡检机器人是推进电力数字化转型的关键设备, 融合机器人运动控制、多源感知、智能算法与网络通信等多项技术, 能在变电场景实现自主路径规划、全维度设备监测、缺陷智能识别和数据实时传输。深挖核心技术应用逻辑和运维效能提升机制, 对优化变电运维模式、巩固电网安全保障能力具有关键理论和实践意义。

1 智能巡检机器人的核心技术架构

1.1 自主导航与运动控制技术

自主导航技术支撑智能巡检机器人完成自主作业, 关键是精准定位和路径优化, 目前主流技术方案采用激光雷达与视觉融合导航架构, 用激光雷达采集环境三维点云数据, 依托视觉传感器采集的图像信息, 完成多源数据交叉校验。依托融合 SLAM (同步定位与地图构建) 算法, 机器人能实时生成变电站室内外环境地图, 实现自主定位和障碍物识别, 定位精度可达毫米级, 保证在设备密集、通道狭窄的变电场景中灵活避开障碍, 精准到达巡检点位。运动控制模块按照导航指令完成机器人的稳定移动, 给不同变电场景做差异化设计: 室内变电站大多选用全向移动底盘, 依靠 4 轮独立驱动完成任意方向平移和旋转, 适配室内狭小空间作业; 室外变电站采用轮式或履带式底盘装置, 履带式结构可强化雨雪、泥泞等复杂地形的通行能力, 轮式结构聚焦平坦区域的高效移动, 运动控制模块额外集成姿态感知和防抖技术, 保证移动期间传感器数据

采集的稳定性, 为后续数据处理输送高品质原始数据。

1.2 多传感器融合感知技术

多传感器融合是智能巡检机器人实现设备全状态监测的核心技术, 整合不同类型传感器的感知优势, 构建全维度设备状态感知网络, 核心传感器涵盖可见光高清摄像头、红外热成像仪、超声波传感器、特高频 (UHF) 传感器及环境传感器等, 各传感器功能互补形成协同监测合力。可见光高清摄像头整合高精度光学镜头和图像稳定模块, 能高清采集设备外观细节, 依托 OCR 文字识别算法完成仪表读数、设备标识等信息的自动提取, 读数误差率能控制在 0.5% 以内; 红外热成像仪靠红外辐射探测原理工作, 可实时捕捉设备温度分布特征, 通过温度场分析甄别接头过热、绝缘老化等热缺陷, 温度检测误差控制在 ± 0.1 °C 内; 超声波和特高频传感器的核心用途是局部放电检测, 抓取设备绝缘缺陷产生的超声波信号与特高频电磁信号, 对绝缘状态做早期预警; 环境传感器实时采集温湿度、风速、雨雪等环境参数, 为精准分析巡检数据提供环境校正依据^[1]。

1.3 AI 智能分析与决策技术

AI 智能分析是智能巡检机器人实现“自主识别、自主判断”的核心支撑, 借助深度学习算法智能处理多传感器采集的数据, 完成缺陷识别、状态评估和预警决策, 核心算法体系涉及目标检测算法、图像分割算法、模式识别算法和趋势预测算法等, 构建从数据处理到决策输出的完整技术通路。进行缺陷识别环节, 依托卷积神经网络 (CNN) 的目标检测算法可自动识别设备外观缺陷, 涉及绝缘子破损、设备锈蚀、渗漏油、

作者简介: 刘海韬 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 变电运维。

刀闸分合状态异常等，识别正确率达98%以上；构建设备正常状态的图像和数据模板库，采取图像比对与数据偏差分析算法，可快速排查异常状态并标记缺陷等级。从状态评估角度，合并设备实时监测数据与历史运维数据，采用机器学习算法构建设备健康状态评估模型，准确预判设备劣化走向。决策输出阶段，依托专家知识库搭建告警机制，按照缺陷等级自动生成多级告警信号，同步给出专属处置方案，为运维决策构建智能支持框架^[2]。

1.4 数据传输与协同管控技术

依托数据传输与协同管控技术，智能巡检机器人和运维管控平台实现实时联动。搭建“机器人端—边缘端—云端”三级数据处理与传输架构，机器人依靠边缘计算模块完成数据预处理，清理冗余数据、抓取关键特征，减少数据传输压力；依靠5G和工业以太网双模通信技术实现数据实时传输，5G技术依托高带宽、低延迟特性，保障高清图像、红外视频等大容量数据高速传输，毫秒级延迟可实现控制；工业以太网可保障室内封闭环境等5G信号弱的区域通信稳定。云端管控平台承担机器人远程调度、数据存储和集中分析任务，兼容多机器人协同作业调度，采用路径优化算法规避作业冲突；建立标准化数据存储和管理体系，实现巡检数据的追溯、分析功能；依托数字孪生技术构建设备3D模型，精准关联巡检数据和数字模型，实现设备状态可视化监控与异常根源追溯，构建“数据采集—传输—分析—决策—调度”闭环管控路径。

2 智能巡检机器人在变电运维中的技术应用

2.1 设备状态全维度监测场景

在设备状态监测场景下，智能巡检机器人借助多传感器融合技术，实现变电核心设备全维度、常态化监测，覆盖变压器、GIS设备、开关柜、绝缘子、互感器等核心设备，结合不同设备的结构特性和监测需求，机器人可自动调节巡检姿态与传感器参数，完成精准监测。变压器监测的核心对象是油温、油位、绕组温度及运行声纹，通过红外热成像仪监控温度分布，可见光摄像头判别油位刻度，超声波传感器采集设备运行声纹，依托AI算法分析变压器运行状态；针对GIS设备的监测侧重局部放电和气体泄漏，依靠特高频传感器和气体传感器捕捉异常信号，配合红外测温管控接头温度；开关柜监测整合外观检查、表计读数、局部放电检测等功能，依托舱体内部图像采集与数据分析，完成封闭环境设备状态的精准评估。与传统人工

监测比，机器人可7×24小时不间断监测，大幅强化监测的连续性和全面性。

2.2 高压高危区域巡检场景

高压高危区域是传统运维中的高风险场景，涉及高压设备区、高空设备区、电缆沟道等区域，人工巡检面临触电、高空坠落等安全风险。智能巡检机器人借技术适配实现这类场景的无人化巡检，从根源消除作业风险。在高压设备区，机器人搭载高压感应传感器和防碰撞预警模块，可在安全距离完成设备监测，用长焦镜头采集远距离高清图像，避免近距离接触高压设备；在高空设备区，能配合无人机巡检机器人开展高空设备监测，地面机器人与无人机依托数据协作达成无死角巡检；在电缆沟道等封闭狭窄空间，采用微型履带式机器人，装设红外热成像仪与气体传感器，完成沟道内电缆温度监测及有害气体检测，解决人工巡检触及不到的场景问题^[3]。

2.3 极端环境运维场景

极端天气环境（高温、严寒、雨雪、大风等）会大幅降低人工巡检的可行性和安全性，智能巡检机器人凭借环境适配设计和技术优化，可在极端环境稳定工作。在低温环境当中，机器人搭载低温启动模块和保温防护结构，保障电池性能与核心部件稳定运行；在高温环境中，运用散热优化设计及耐高温材料，防止部件过热出现损坏；遇雨雪天气时，凭借防水防尘设计（防护等级可达IP67以上）和防滑底盘，保障移动稳定性和传感器正常运转。在极端环境中，机器人能借助远程操控完成巡检任务，运维人员无需赴现场作业，既筑牢人员安全防线，又保证极端天气下电网运维工作不停摆，杜绝环境限制引发的巡检中断^[4]。

2.4 缺陷排查与应急处置场景

在缺陷排查和应急处置场景中，智能巡检机器人借助快速响应和精准定位能力，提速缺陷处理效率与应急响应节奏，运维平台收到告警信号或电网出现异常，能远程调派机器人到目标区域做精准复核，统筹多传感器采集数据，快速判定缺陷位置和严重程度。开展应急处置工作时，机器人可实时传输现场图像与监测数据，给运维人员远程研判送第一手资料；针对紧急缺陷，可对接现场应急设备实施初步处置，如紧急隔离故障区域、切断危险电源等；机器人能对缺陷处置后的设备状态做跟踪监测，保障处置成效，打造“缺陷发现—应急响应—处置跟踪”的闭环管控，大幅压缩应急处置时长。

3 智能巡检机器人在变电运维中的技术应用效果

智能巡检机器人凭借核心技术深挖运维场景价值,从安全保障、效率提升、质量优化、成本控制等方向,全面强化变电运维效能,促使运维模式从“经验驱动”切换为“技术驱动”。

3.1 提升运维安全防护水平

智能巡检机器人采用无人作业模式,从本质上降低运维人员在高压、高空、极端环境里的作业风险,防止触电、坠落、冻伤、中暑等安全事故出现。机器人能替代人工完成 90% 以上的高危场景巡检工作,大幅降低人员和高压设备的直接接触频次;通过 AI 智能识别技术提前排查设备缺陷,阻拦缺陷演变为安全事故,提升电网运行安全水平。通过机器人远程操作和协同管理模式,实现运维人员无需外出即可完成巡检作业,构建“人机分离”安全运维模式,大幅提高变电运维的安全防护等级。

3.2 提高运维作业效率

与传统人工巡检相比,智能巡检机器人作业效率实现了质的飞跃。在巡检速度方面,机器人移动速度恒定且可不间断作业,完成等同范围的巡检任务,所需时间仅为人工巡检的 1/3 左右。在巡检频率方面,能做到 7×24 小时不间断巡检,按设备健康状况调整巡检频次,高风险设备可开展高频次精准巡检,人工巡检受生理极限束缚,无法实现长期不间断作业。在数据处理效率方面,机器人借助 AI 算法完成巡检数据实时分析和缺陷自动识别,不用人工逐一核查数据,大幅缩减数据处理时长;依托数据自动上传和报告生成功能,实时输出巡检报告,省去人工记录和整理的繁杂流程,使运维作业的整体效率再上台阶^[5]。

3.3 优化运维数据质量与精准度

智能巡检机器人依托技术支持,攻克传统人工巡检数据分散、精度不够、主观偏差大等难题。多传感器融合技术保障数据采集的全面性,各传感器的高精度性能提升数据采集精度;AI 智能分析算法通过标准化流程实现缺陷识别,摆脱人工识别对经验的依赖,缩小漏检、误检占比;依托数据自动校准和环境校正技术,进一步强化数据的可靠性与可比性,标准化、高精度的巡检数据,为设备状态评估和趋势预测夯实可靠数据支撑,把运维决策从“经验判断”转变成“数据驱动”,提高变电运维精准度,巡检数据的数字存储与可追溯属性,为设备全生命周期管理构建完整的数据链路^[6]。

3.4 降低运维综合成本

长期采用智能巡检机器人进行巡检,能大幅削减变电运维的综合成本。在人力成本方面,机器人能替代大量人工巡检任务,减少运维人员的配置工作量,减少人员薪酬、培训等人力成本;在设备维护成本方面,依托早期缺陷预警和精准维护,省去设备缺陷升级带来的大修或更换成本,延长设备服役时长;在应急成本方面,应急快速响应和缺陷快速处置能力,可降低设备故障造成的停电损失,减少应急处置的人力与物资成本,机器人模块式设计和扩展潜力,使其可满足不同规模的变电站运维需求,杜绝重复投入,优化运维成本组成结构。

4 结束语

智能巡检机器人通过自主导航、多传感器融合、AI 智能分析等核心技术协同助力,为变电运维场景构建涵盖全面、精度达标、效率领先的智能管控体系,大幅提高运维安全标准、作业效率和数据质量,减少运维综合成本,为新型电力系统建设提供可靠的技术支撑。该应用助推变电运维模式完成数字化转型,还重塑了运维管理的核心逻辑,实现从“被动抢修”到“主动预警”、从“人工驱动”到“技术驱动”的本质性转变。技术持续更新迭代,应用场景逐步拓展,智能巡检机器人将在变电运维中承担更核心的角色。依托技术创新与模式优化,进一步提升机器人的自适应能力、协同能力和一体化运维能力,助力变电运维向全流程无人化、智能化发展,为电网安全、稳定、高效运行筑牢更可靠的防线,助推新型电力系统实现高质量发展。

参考文献:

- [1] 李建华,丁伟,张博.智能巡检机器人在变电站运维管理中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(09):153-154.
- [2] 黄涛.智能巡检机器人在变电站运维工作中的应用[J].光源与照明,2021(04):80-81.
- [3] 周启平,贾蕾,何伟,等.变电站智能巡检机器人导航算法改进[J].农村电气化,2021(04):5-8.
- [4] 杨清民,陈炜智,韦明.对于变电站智能巡检机器人的几点思考[J].电力设备管理,2021(03):37-39.
- [5] 陈晨,黄铮.智能巡检机器人在变电站日常运维及缺陷跟踪方面的应用[J].科技风,2018(18):3.
- [6] 赵宪中,颜恒生,侯梓浪,等.现代移动巡检系统的应用及分析[J].电工技术,2020(02):98-99.

人工智能技术在软件自动化测试中的应用分析

吴鸿璋¹, 高凯², 张建恒²

(1. 安擎(天津)信息技术有限公司, 天津 301701;

2. 卓芯(天津)信息科技有限公司, 天津 301700)

摘要 人工智能技术正快速推进软件测试方式深层转变, 机器学习、自然语言处理与深度学习等方法深度嵌入实践, 大幅提升了软件自动化测试效率与准确性。本文聚焦人工智能在软件自动化测试中的具体应用进行深层剖析, 探讨测试用例生成、缺陷预测、测试覆盖率提升的维度优势, 分析当前应用存在的实际挑战, 以期为促进智能测试系统长期发展提供参考。

关键词 人工智能; 软件测试; 自动化测试; 测试用例生成; 缺陷预测

中图分类号: TP2; TP311.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.010

0 引言

人工智能技术融入软件测试流程, 正推动其向智能自动化转型, 在压缩测试周期、扩大覆盖范围、控制投入成本等关键环节展现出显著价值。本文结合人工智能与软件测试融合发展的实际现状, 分析技术落地应用途径及现存实际困境, 旨在为“智能测试”技术的长期发展提供更多深度思考与实践探索方向。

1 人工智能技术赋能软件自动化测试的背景与动因

人工智能技术快速迭代, 不断重构传统软件测试运行模式, 在自动化测试环节凸显应用潜力。在软件开发节奏变快、系统复杂度提高、交付周期缩短的现实环境中, 传统测试方法已无法达到高效高质量交付的严格要求, 软件自动化测试成为保障产品稳定性与功能完整性的核心支撑环节。引入人工智能, 目的是突破现有自动化测试在脚本迭代维护、测试用例智能生成、测试资源动态优化等方面的现实瓶颈。深度学习、机器学习和自然语言处理等关键技术赋能 AI 技术, 可实现软件全流程行为模式的深度学习与精准预测, 减少人工介入, 增强测试系统自适应能力, 为软件全生命周期各阶段测试环节注入变革动力。

人工智能持续渗入测试设计与执行的诸多关键模块, 以机器学习构建的缺陷预测模型, 调用长期积累的历史缺陷数据和全流程留存的代码变更记录, 精准排查出高风险模块, 为科学分配测试资源筑牢可靠数

据根基。自带自然语言处理能力的 AI 可辅助分析复杂需求文档或零散用户故事, 自动生成匹配测试用例, 扩大测试覆盖维度 减少隐性漏测概率^[1]。图像识别和行为建模技术推动多类型复杂界面及多样化用户交互行为测试工作实现深度智能化转变, 二者结合可加速测试整体推进, 还能降低测试人员重复操作机械任务的压力, 推动他们把精力放到策略性测试规划和全流程质量核心管控上。

企业推进数字化转型向纵深发展、DevOps 理念全面扬场、持续集成/持续交付(CI/CD)体系全面铺开等宏观趋势, 共同推进人工智能与自动化测试融合。软件测试绝非独立运行, 而是纳入全开发流程的连贯模块, 对智能化、实时性和敏捷性的需求不断攀升。用 AI 技术构建动态测试模型与自我学习机制, 能带动测试方案不断动态调整优化, 增强测试环境适配程度和运转效率。该智能测试架构为质量保障体系补充全新评估指标与自动决策机制, 实现测试全流程闭环管理和质量可视化, 自动化测试系统核心的智能引擎模块, 人工智能引领软件测试往更智能、更高效的方向发展, 进一步增强软件测试在全流程软件开发中的效能和价值。

2 人工智能在自动化测试用例生成中的关键应用

在开展自动化测试的流程中, 用例生成质量和覆盖范围直接关联测试效果及产品最终品质。人工智能技术介入运作, 为自动化测试用例生成找到全新破局

作者简介: 吴鸿璋(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 人工智能。

方向。传统测试用例依赖人工编写，还会受测试人员经验储备和理解偏差干扰，引入自然语言处理（NLP）和机器学习算法，使人工智能从需求规格说明、用户故事、历史用例及代码语义等多源数据里提取测试意图，自动生成兼具逻辑合理性和业务关联性的测试用例，明显提升测试效率和结果精准性。该方式契合敏捷开发环境下需求频繁变更的实际场景，可切实压缩测试准备时长，减少人工操作引发的执行不一致问题。

借助深度学习模型生成测试用例的应用日渐成熟，行为建模和场景预测，足以体现它的核心价值。完成循环神经网络（RNN）或者 Transformer 结构模型的训练，能凭借已有用户交互数据生成符合真实操作路径的测试脚本，服务回归测试与异常检测专用。依托代码覆盖信息与路径分析技术，AI 可实现更大价值，可自动生成边界场景测试、负面逻辑测试用例，保障测试完整性^[2]。通过强化学习技术拟定最优测试策略，引导 AI 测试代理结合测试执行结果动态调整用例生成方向，完成测试资源最优配置，多类技术配合，打破测试用例生成环节依赖静态规则的传统模式，切换到数据驱动和模型自学习同步推进的智能发展路径。

在实际应用场景中，大量企业正陆续将 AI 测试用例生成工具整合进 CI/CD 流水线，建立持续迭代的智能测试机制。部分领先平台能借助语义解析自动识别 Web 页面核心交互元素，精准生成匹配的交互测试脚本，或依照产品更新日志定向生成匹配新功能的覆盖用例。这种靠 AI 支撑的测试用例生成方式，能快速对接需求变动，依靠历史缺陷学习机制针对性优化易出错模块的测试重点配置，增强整体测试的风险管控实力。

3 缺陷预测与智能分析在测试流程优化中的作用

缺陷预测属于人工智能自动化测试的核心应用，也是优化测试流程的核心手段。机器学习模型分析历史缺陷数据、代码变更记录、模块复杂度及开发人员行为等多维特征，能识别潜在高风险代码区域，预判缺陷分布态势。该流程降低盲目测试引发的资源消耗，指导测试人员按风险权重动态调整测试策略，将有限测试资源集中到问题高发区。强化测试覆盖效率，决策树、随机森林、支持向量机及神经网络这类预测算法，普遍应用到缺陷预测、模块风险评估与测试优先级排序场景，实际工业项目中，可实现稳定适配、高效适配。

智能分析是与缺陷预测相互支撑的核心技术环节，承担两大核心任务：深挖全流程生成的测试数据、提供决策支撑，自动化测试执行阶段不断产生海量数据，

涉及测试通过率、缺陷密度、执行时长、环境依赖等关键维度，方法局限限制传统分析手段发挥，无法从里面提取有指导作用的实用信息^[3]。人工智能搭载的数据分析和可视化技术实力，能辅助构建多维度动态质量评估模型，实时呈现测试质量的动态变化状态，把聚类分析与异常检测技术深度嵌入系统后，可使系统精准识别测试结果里的潜在异常模式，协助排查测试脚本隐藏漏洞或环境参数配置疏漏，因果推断与相关性分析的实际运用，能帮测试团队找出部分缺陷反复产生的关键诱因，针对性优化开发或测试流程，构建高效闭环优化模式。

应用持续集成和持续交付的运行体系，对智能优化测试流程的需求愈发明显，把缺陷预测和智能分析机制嵌入 CI/CD 流水线，支撑系统每次构建后高效完成质量评测和缺陷风险预警，给版本发布拿出量化决策支撑。部分企业构建嵌入深度学习的缺陷热力图生成系统，同步显示各模块缺陷风险等级，和产品负责人确定测试回归及上线计划。依托历史数据训练的 AI 模型能预估测试执行时长和潜在瓶颈，落实测试计划动态排程，完成资源精准配置。依托多种智能技术，引导测试流程逐步摒弃静态执行模式，转为“数据驱动 + 预测导向”的全新模式，全面强化整体测试效率与软件质量保障力度。

4 人工智能提升测试效率与覆盖率的实践探索

全面应用人工智能技术，深度重构软件测试的效率机制和覆盖能力，构建自动化测试体系时优势明显，实际应用效果好。在实际项目中，AI 能智能调度测试资源、优化用例执行路径、实时甄别路径模块，大幅减少冗余测试的无效执行时间。测试流程里的任务分配、回归测试集选取和测试环境筹备等环节，以往完全依靠人工经验判断，如今借 AI 模型稳步实现决策自动化。采用遗传算法或强化学习构建的调度优化模型，可对测试任务执行顺序做动态规划，防止系统负载过高和资源冲突问题，提高测试整体运行效率。这类优化策略在大型复杂系统测试场景中表现出色，大幅缩减测试周期，精准契合敏捷开发节奏的高频迭代需求。

落实测试覆盖率升级工作，人工智能输出强劲可靠的技术支持。传统测试覆盖率一般依靠代码覆盖工具执行静态分析，存在识别覆盖范围不大、各类边界场景易被漏掉等问题，借 AI 路径探索算法构建模型驱动测试技术，测试系统可在构建阶段深度剖析代码调用关系、状态转移模型及各种异常路径，自动生成高

覆盖测试实例,全方位排查各类隐藏缺陷^[4]。结合模糊测试与强化学习技术,辅助系统全面筛查输入空间的极端条件,生成定向反常测试数据,补全人工测试的空白。这套智能补全机制极大地延展了测试的深度和广度,能在安全性验证、性能边界测试等核心场景持续凸显关键价值。

实践落地场景,诸多企业已在实际测试全流程布设AI辅助工具,让测试效率和覆盖范围双双提升,部分AI测试平台能深度剖析版本迭代核心内容、用户真实行为数据及历史缺陷发生模式,自动判定回归测试集优先级,防止低价值用例重复执行,融合运用AI视觉识别技术,可开展多终端、多分辨率界面一致性验证,大幅拓展界面测试的覆盖维度。实施移动应用测试过程,AI机器人模仿真实用户操作习惯自动走完全流程操作,覆盖大量边缘场景,优化测试质量,削减人工测试成本。人工智能为自动化测试升级动态适应能力,让测试工作从仅聚焦执行转向全面评估、风险预测和流程优化,成了构建建智能质量保障体系的核心驱动力。

5 人工智能测试系统的局限性与技术挑战分析

人工智能展现出自动化测试环节的明显优势,当前AI测试系统还存在很多局限,关键难题是高度依赖高质量训练数据。AI模型的预测与智能决策能力都依托历史数据学习,输入数据存在残缺、偏差或代表性不足,易引发测试判断失误,生成的测试用例会脱离实际业务需求。部分系统缺失足量标注缺陷数据,早期训练阶段难以构建有效模型,直接降低测试效率,减小覆盖范围。AI系统遇到全新模块或无历史数据支撑的业务场景,泛化能力存在显著短板,无法替代人工测试的灵活判断和应变能力,关键测试环节仍需人工介入补位^[5]。

技术端核心挑战集中在模型透明性、可解释性与安全性三大关键维度。现阶段大量应用的主流深度学习模型,虽在模式识别和路径优化任务中成绩突出,但内部决策逻辑如同黑箱,测试人员无法明确追踪每项生成结果的核心推导依据。金融、医疗这类高风险行业,已设定明确硬性要求,测试结论要可审计,AI系统缺少可解释性这一属性,直接阻滞AI测试工具的落地应用。AI测试系统本身存有各类潜在缺陷,如训练数据偏差、模型过拟合、训练样本分布不均这类潜在问题,都可能造成测试精准度不足。更难处理的是,AI模型遭遇恶意数据篡改或预设逻辑陷阱诱导,进入全流程测试阶段后误差范围逐步扩大,造成上下游整

条链路相继发生故障。建立具备完整可追溯性、强鲁棒性和高可靠性的AI测试系统,成为学术界和工业界携手攻关、聚力破解的核心技术难题^[6]。

开展工程实践工作时,要正视并攻克AI测试系统集成与维护成本的难题。与传统脚本驱动的测试体系比,引入AI系统对基础设施有更严格的标准,也要求团队拥有扎实的工程能力、数据处理经验及算法认知水平,大幅拉高技术学习和实际落地的门槛。系统迭代升级过程中,AI模型需持续更新及补充训练数据,维持适配业务变化和测试场景的能力,模型训练、调优与验证环节往往要耗费大量计算资源和人力投入,各类测试平台、框架与工具间,接口、数据格式及运行机制的兼容问题还没彻底解决,拖慢AI测试系统的快速部署与大范围普及。未来推动人工智能赋能自动化测试的深度拓展,必须从数据、算法、平台架构与治理机制等多个层面打通技术堵点,建成更稳健、高效且可控的智能测试生态体系。

6 结束语

本文聚焦人工智能技术在软件自动化测试中的实际应用,完成全维度分析梳理,厘清其在测试用例生成、缺陷预测、流程效率提升等核心环节的实际作用,同步排查当前技术落地存在的核心挑战和现实局限。在AI算法迭代优化提速和应用场景不断拓宽的大环境里,智能化测试将逐渐成为软件质量保障体系的核心支撑手段,后续着力构建高效、可信且可长期迭代的AI测试体系,是推动软件工程高质量发展的核心方向。

参考文献:

- [1] 陈志坚,陈星.人工智能在自动化软件测试技术中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(S2):152-154.
- [2] 管玲玲,李长英.AI技术在自动化软件测试中的应用分析[J].软件,2025,46(09):74-77.
- [3] 张咪咪,吴建军.论自动化仪表与信息化技术的深度融合[J].电子元器件与信息技术,2025,09(09):170-172,175.
- [4] 吴梦瑶.机器学习技术在软件测试领域的应用[J].信息与电脑,2025,37(15):28-30.
- [5] 马静芳,郑宇.浅谈AI技术在软件测试中的应用[C]//天津市电子工业协会.天津市电子工业协会2025年年会论文集.逸兴泰辰技术有限公司,星际空间(天津)科技发展有限公司,2025.
- [6] 唐欢.人工智能技术在软件自动化测试中的应用[J].智慧中国,2025(11):106-107.

电气自动化技术在智能建筑 电气工程中的应用探究

张玲芝¹，李小慧²，马联蒙³，薛玉洁⁴，桑广坤⁵

- (1. 中创蓝谷建设有限公司，山东 青岛 266200；
2. 山西晋防人防工程咨询检测有限公司，山西 太原 030032；
3. 中暖新能源（青岛）有限公司，山东 青岛 266599；
4. 青岛市园林环境规划设计院有限公司，山东 青岛 266000；
5. 山西晋防人防工程咨询检测有限公司，山西 太原 030032）

摘要 电气自动控制技术是提高电气工程项目建设运行效率的关键途径之一。本文对电气自动控制技术在智能化建筑电气工程中的应用进行了分析，介绍了电气自动控制技术在供配电系统、照明与通风系统、消防系统以及安防系统中的应用情况，对电气自动控制技术应用中出现的协调性、统一性和建设维护等问题的表现形式进行了分析，并展望发展前景，以期对完善智能化建筑电气工程自动化应用有所裨益，进而提高建筑电气系统的安全性和高效化以及智能化程度。

关键词 电气自动化技术；智能建筑；电气工程；系统优化

中图分类号: TU17; TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.011

0 引言

随着新型城镇化的推进及信息化的发展，智能建筑已经成为建筑业发展的一大趋势，并确保建筑物安全、快捷、智能运行为主要需求。电气工程是整个智能建筑系统的“大脑”，其工作效果直接影响着建筑物的智能化程度，而电气自动化的应用则以其精确控制、监控、联动等功能，在智能建筑电气工程中起到了重要的推动作用^[1]。但是目前来看，在实际使用过程中还存在着一定的不匹配、分散化以及后期维护不够及时等问题，影响着该技术的有效应用。因此，针对智能建筑电气工程中电气自动化技术的应用现状及存在的问题进行了分析，并提出相应的改进对策，以期为促进智能建筑中电气工程的良好建设与发展提供参考。

1 电气自动化技术在智能建筑电气工程中的具体应用实践

1.1 在供配电系统中的应用

电气自动化技术在供配电系统中的应用主要采用智能化的配电自动化设备、远程监控以及故障诊断系统以及负荷的实时调节技术，能够针对整个供配电过

程进行实时监控，并且可以准确地获取到电压或者电流的相关信息，进而平衡整个负载情况，防止出现某一个地方负载较大的现象^[2]。另外，还能够第一时间找到故障的位置并且将故障点进行自动切除，降低故障危害程度，切实提高供电可靠性和电能品质，为楼宇各用电装置安全高效运行提供可靠的能源保障。

1.2 在照明与空调通风系统中的应用

采用智能化照明及暖通自动控制策略。照明方面利用照度检测、红外传感器进行控制，暖通方面利用温度、湿度检测以及变频控制，做到灯具能开能关、随动调节，暖通设备能够按照环境变化及时调整自身工作模式，不仅能有效降低能耗水平，而且能够满足人们的活动需求，提高房屋使用的舒适性。

1.3 在消防电气系统中的应用

消防电气主要包括火灾自动报警、消防联动控制以及消防电源监控等相关自动化技术的应用。其中，火灾自动报警系统的应用能够对存在的隐患进行提前预报，在发现报警信号之后，消防联动控制系统会自动将喷淋装置、排烟装置、应急照明等启动，消防电源监控系统则可以确保消防设施在电力方面的稳定性。

作者简介: 张玲芝 (1987-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程。

以上几项技术能够促使消防工作得以及时处理，提高系统的联动效率，尽可能地压缩事故处理的时间，为人们的生命财产保驾护航。

1.4 在安防监控系统中的应用

安防监控结合了视频监控自动、入侵探测报警以及出入口控制等多种技术的应用，实现了视频监控功能，能够对整个区域进行实时监控，并且在入侵发生之后可以发出警报，而出入口则可以通过门禁或者道闸的方式进行管理，多种技术组合在一起，提高了整体的安全防护能力，加快了安防反应效率，提升了安防处理的准确性^[3]。做好安全工作，避免安全事故的发生，可确保人身财产安全以及建筑物的安全。

2 电气自动化技术在智能建筑电气工程中应用存在的问题

2.1 技术适配性不足

一些自动化的技术和智能化楼宇中的电力系统的实际需求不相匹配，要么是过于繁杂而显得多余，要么是没有关键性的技术而难以达到使用的要求。例如：一些普通的自动化控制装置没有根据楼宇的大小以及用电量等特点进行定制化设计，从而不能够发挥出其应有的作用，导致电路工作受到影响。

2.2 系统集成度不高

各个电控系统相对比较独立地进行自动控制，没有形成一个集中管理的整体。各个电控系统之间如供电、消防、安全监控信息不能共享，相互之间存在一定的隔离，很难做到有效的联合使用，在发生紧急事故的时候，这些系统也无法及时进行协调处理工作，不利于智能化楼宇的有效管理。

2.3 施工与运维水平滞后

在建设过程中，由于自动化技术和常规电气施工的结合不够紧密，导致自动化系统的线路布置混乱、设备安装误差大等情况出现。而在后期的维护管理中，技术人员业务水平较低，对于自动化系统的构造、使用以及维修不太熟悉，在出现问题后不能快速找到问题所在，并进行处理，从而造成自动化系统经常发生故障停机的现象。

2.4 成本控制难度大

先进自动控制系统、关键元器件和软件价格昂贵，在一定程度上提高了项目的投资水平；个别工程一味地追求高精尖的技术装备，对昂贵的先进设备进行大量投资，并没有从性价比的角度来衡量其可行性，造成较高的成本投入与较低的投资回报率之间的矛盾；

而后续系统的运维、更换费用也给项目带来了一定的成本压力^[4]。

3 电气自动化技术在智能建筑电气工程中应用问题的解决策略

3.1 优化技术选型，提升适配精准度

3.1.1 开展个性化需求研判，避免功能冗余

针对不同建筑的规模、功能定位、用电负荷等个性化特征，建立技术选型前期调研机制。组织专业团队深入分析建筑电气系统的实际运行需求，明确核心功能诉求与非必要功能边界。例如：小型住宅项目聚焦基础的供配电监测、照明与空调简易调控功能，避免套用大型商业建筑的复杂负荷调控模块；精密仪器实验室则重点强化供电稳定性控制、环境参数精准监测等核心技术配置，确保技术方案与实际需求高度契合，减少资源与资金浪费。

3.1.2 补齐核心功能短板，强化需求匹配

围绕智能建筑电气系统安全运行、高效节能等核心诉求，针对性完善自动化技术方案。对于绿色建筑项目，嵌入光伏储能、余热回收等新能源利用适配模块，构建能源优化调度系统；针对医疗建筑等对供电可靠性要求极高的场景，升级故障快速隔离与备用电源自动切换功能，保障关键区域持续供电。通过精准补齐核心功能短板，确保自动化技术充分发挥管控价值，契合智能建筑建设目标^[5]。

3.2 搭建统一集成平台，提升系统协同性

3.2.1 打破子系统壁垒，实现集中管控

搭建统一的电气自动化集成管控平台，整合供电、消防、安防、照明等各子系统的控制功能。建立跨系统协同调度机制，实现各子系统的联动运行。例如：照明系统可联动空调系统的温度参数，根据环境温度湿度与人员活动情况协同调控亮度与空调运行状态；安防系统发现入侵隐患时，自动触发照明系统增强重点区域照明，同时联动消防系统做好应急准备，提升智能建筑整体管控效能。

3.2.2 统一接口标准，消除数据孤岛

制定统一的自动化系统数据接口规范与传输协议，要求各子系统供应商遵循标准化接口设计。推动供电系统的电力参数、消防系统的火灾监测数据、安防系统的视频监控信息等多源数据高效共享，实现数据集中整合分析。例如：运维人员通过集成平台即可获取完整的电气运行数据，无需分别登录多个系统，提升数据获取效率与故障处置响应速度，为建筑电气系统整体优化决策提供数据支撑。

3.3 规范施工流程,提升运维专业水平

3.3.1 强化施工衔接,消除运行隐患

为解决施工衔接不畅引发的运行隐患,需建立标准化、精细化施工管理体系。制定自动化技术与传统电气施工的衔接规范,明确施工前、中、后全流程要求:施工前组织技术、施工、监理三方开展交底会议,详解设备安装、布线规范及抗干扰措施;施工中安排自动化技术人员驻场指导,重点监督传感器安装、控制柜布线等关键环节,避免布线混乱、接线错误等问题;施工后组建联合调试小组,全面检测设备运行、数据传输及联动功能,建立问题台账限期整改并二次调试。

3.3.2 加强运维团队建设,保障系统稳定运行

为破解运维能力不足导致的保障效能缺失问题,需从人员、制度、技术三方面构建完善运维管理体系^[6]。在人员培养上,组建专业运维团队,招聘电气自动化、物联网等相关专业且经验丰富的技术人员;建立常态化培训机制,邀请专家开展系统原理、故障排查等培训,组织行业交流与技能竞赛,通过师徒结对加速人才成长。

3.4 科学管控成本,实现效益平衡

3.4.1 合理规划前期投入,降低造价压力

为缓解前期投入偏高的造价压力,需建立科学的成本评估与管控机制。先开展项目全生命周期成本测算,统筹设备采购、施工安装等直接成本与后期维护、更新升级等间接成本,全面评估总投入^[7];再构成本与效益联动分析模型,结合建筑使用年限、节能目标等,量化自动化技术的节能、运维节约等经济效益,据此确定合理预算。设备选型坚持“适配优先、性价比导向”,普通项目优先选用国产成熟设备,大型复杂项目采用“核心进口+辅助国产”混合配置。同时规范招标采购流程,通过公开招标、集中采购压低成本,明确合同条款避免后期额外费用,实现前期投入精准管控。

3.4.2 优化后期运维投入,提升效益产出

为解决后期运维持续投入引发的效益失衡问题,需构建全生命周期成本管控体系。在成本管控方面,结合设备运行年限、维护周期及市场价格波动,编制年度运维预算;与供应商签订长期维保协议,通过批量采购降低备件与维修费用;强化日常巡检与预防性维护,定期清洁设备、校准传感器、检查线路,及时排除隐患以延长设备寿命,减少非必要更新投入。在效益提升方面,定期对比系统运行前后能耗、运维成本、安全事故发生率等指标,量化实际效益;对过度配置、

无实用价值的功能模块优化或拆除;挖掘增值潜力,如通过分析供配电负荷数据优化用电时段,借助照明与空调精准调控提升建筑舒适度,间接增加商业收益,通过“控成本+提效益”双措并举,实现成本与效益平衡。

3.5 完善安全防控机制,降低安全风险

为破解网络防护薄弱引发的信息安全隐患,需构建多层次网络安全防护体系。在硬件部署上,于自动化系统网络入口安装下一代防火墙,精准拦截恶意流量与黑客攻击;配置入侵检测与防御系统(IDS/IPS),实时监测并阻断网络异常行为;部署数据加密网关,对设备运行参数、监控视频等敏感数据全程加密传输,严防泄露。在访问管控上,遵循“最小权限原则”划分用户权限,明确不同角色操作边界;引入密码、指纹结合的多因素身份认证,定期更新权限与密码,及时注销离职人员账号。

4 结束语

电气自动化技术在智能建筑供配电、照明空调等核心系统中的应用成效显著,通过精准控制、实时监测等优势,大幅提升了电气系统运行效率、舒适度与安全性,是智能建筑发展的关键支撑。但电气自动化技术的应用仍面临技术适配偏差、系统集成不足、施工运维不规范、成本效益失衡、安全防控短板等问题,制约了其价值释放。未来,需通过优化技术选型、搭建集成平台、规范施工运维、科学管控成本、完善安全防控等策略精准施策,推动技术深度融合,并结合物联网、大数据等新兴技术探索新模式,助力智能建筑向数字化、低碳化转型。

参考文献:

- [1] 贺彦峰.智能建筑中电气工程及其自动化技术的探索[J].建筑·建材·装饰,2025(06):88-90.
- [2] 荣俊香.智能建筑中的电气自动化系统设计[J].电子技术,2025(02):419-421.
- [3] 钟鑫林.智能建筑电气综合自动化系统节能控制技术研究[J].科技资讯,2025,23(20):197-199.
- [4] 张拓.智能建筑中的电气工程设计策略分析[J].电子技术,2023,52(10):252-253.
- [5] 王维佳.电气工程及其自动化智能化技术在建筑电气中的应用[J].中国房地产业,2025(27):22-25.
- [6] 同[5].
- [7] 王伟.智能建筑与电气自动化技术的融合发展趋势[J].新潮电子,2025(11):121-123.

空调通风系统节能优化设计与运行能效提升路径研究

赵欣欣

(信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266109)

摘要 在“双碳”目标的指引下, 建筑能耗管控成为节能工作的重要方面。空调通风系统是建筑能耗的主要载体, 在节能优化设计和提高运行能效方面具有十分重要的现实意义。本文以系统架构优化、智能控制集成设计为主要方面来构建空调通风系统节能优化设计框架, 重点论述设计策略; 根据运行阶段的能效难点, 提出运行能效提升策略, 论述了动态负荷匹配、智能联动控制等技术, 并结合实践案例进行分析, 以期为促进空调通风系统节能升级提供技术参考。

关键词 空调通风系统; 节能优化设计; 运行能效; 智能控制; 动态调节

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.012

0 引言

随着建筑智能化水平的不断提升, 空调通风系统的功能范畴持续拓展, 它的能耗约占建筑总能耗的30%~50%, 是影响建筑节能水平提高的主要因素。传统的空调通风系统存在设计冗余、运行参数固定、系统协同性差等缺点, 造成能效低、能源浪费严重。当前物联网、人工智能、变频控制等技术的发展给空调通风系统的节能升级提供技术支持, 促使系统由“被动适应”转变为“主动调节”。

1 空调通风系统节能优化设计框架

1.1 系统架构优化

系统架构优化是空调通风系统节能设计的基础, 即根据实际情况把系统划分为不同的分区, 对管网进行合理的布置, 并选择合适的设备容量来达到能量传输和转化效率的最大化^[1]。根据负荷特性不同的分区设计是架构优化的重要部分, 对于负荷变化较大的外围区域和负荷比较稳定的中心区域, 应该用独立送风系统, 防止由于整体调节而造成能量的浪费, 在管网布置时要经过水力计算和气动性能分析, 改进管路弯头曲率半径, 减小局部阻力, 选用优质的保温材料来减小输送过程中冷热交换损耗。设备容量的匹配要抛弃传统的“大马拉小车”冗余的设计思想, 根据动态负荷预测的结果来选择高效的设备, 使设备处于额定负荷区间内稳定运行, 提高整个系统的能效水平。

1.2 智能控制集成设计

智能控制集成设计是完成空调通风系统精细化节能的关键技术支撑, 利用融合感知层、控制层和执行层的优势, 创建一个以数据为驱动的动态调控系统。感知层使用的是分布式物联网传感器网络, 实时采集室内室外温湿度、CO₂浓度、人数密度等各方面的参数, 为调控决策提供数据支持; 控制层利用人工智能算法和模型预测控制技术, 根据得到的信息创建负荷预测模型, 事先估计出负荷变化趋势, 得出最优的调控方案; 执行层依靠变频驱动器、电动风阀等智能执行装置, 精确响应控制命令, 使送风量、供水温度等各项参数动态调节。另外, 控制系统需要有多个设备联动的功能, 保证风机、水泵、冷水机组等主要设备可以互相配合来运作, 改善系统调节整体性和效率。

2 空调通风系统节能优化设计策略

2.1 高效热回收系统集成

高效热回收系统集成可以有效地降低新风处理的能耗, 它的主要原理是利用热交换设备回收排风的冷热量, 对预处理的新风进行预处理来减轻空调主机的负担。根据空气处理流程的不同, 可以采用全热回收器或者显热回收器, 全热回收器可以同时回收显热和潜热, 适合于温湿度变化大的场合, 它的热回收率可以达到60%~80%, 可以大大降低新风处理的能耗要求。热回收系统集成要兼顾气流组织的合理性和设备运行

作者简介: 赵欣欣(1992-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑环境与设备工程。

的稳定性,通过优化进排风路径的设计,防止交叉污染,再设置智能旁通阀,在室内外空气参数接近时切换到旁通模式,从而提高节能效果^[2]。

以大型公共建筑的新风系统为例,该系统内装有转轮式全热回收器,与送风管道、排风管道精准对接,达到新风和排风高效热交换的目的。夏季工况下,排风把冷量传给新风,减小新风预处理的冷却负荷;冬季工况下,排风把热传递给新风,减少新风加热能耗。从实际运行的数据可以看出,该热回收系统采用后冷却式新风处理能耗降低 40% 以上、系统综合能效比提高 0.8 ~ 1.2 的效果,证明热回收系统集成策略有节能的效果。

2.2 变风量系统 (VAV) 优化设计

变风量系统优化设计的核心在于根据实时负荷情况来动态调整送风量,从而达到节能的目的。系统设计要重点考虑末端装置选型、风机变频控制逻辑和最小风量保证这三个主要方面。末端装置应选择响应快、调节精度高的变风量箱,保证各个区域的温度准确控制;风机使用变频控制技术,按照系统总的风量需求来改变转速,使风机功率随着风量而变化,从而达到风机能耗明显下降的目的;最小风量要符合室内空气质量标准,一般不应少于最大风量的 30%,还需保证气流布置合理,不能出现局部过热或者温差过大等问题。

以商业建筑空调系统为例,本系统使用 BIM 技术进行变风量系统优化设计,用三维建模的方法准确地计算出管网阻力,并对支管布置、风阀的位置做相应的调整,使整个系统的风阻降低 18%。另外,还配套使用矢量控制型变频器,可以对风机转速进行平滑调节,在 50% 风量工况下,风机能耗比定风量系统降低 50% 以上。此外,系统利用室内 CO₂ 浓度传感器联动调节送风量,在 CO₂ 浓度小于 800 ppm 时自动减小送风量,从而提高节能效果,整个系统的年能耗比传统的定风量系统降低 35%。

2.3 动态负荷匹配的设备选型

动态负荷匹配的设备选型策略的核心是根据建筑全生命周期的负荷特性来选择具有宽负荷高效运行能力的设备,保证设备在各种不同的负荷工况下都能达到较高的能效水平。冷水机组作为空调系统的能耗中心,选择变频离心式或者螺杆式机组,用变频技术控制压缩机的转速,在部分负荷工况下仍然可以保持较高的性能系数 (COP);风机和水泵的选择要选用高效节能型产品,配套变频驱动装置,实现流量、压力的动态匹配。设备选型要通过负荷计算软件来模拟出一年之中负荷的变化曲线,使设备额定容量与负荷峰值相适应,防止设备长时间处于低负荷下导致效率降低^[3]。例如:在某办公建筑空调系统的选型过程中,用 EnergyPlus 软件对全年的负荷进行模拟,选择变频离心式冷水机

组,其 COP 在 100% 负荷时可达 6.1,在 50% 负荷时仍然能达到 5.2。配合使用高效、低噪声的风机,风机电力比值 (FPR) $\leq 1.1 \text{ hp}/1\ 000 \text{ cfm}$,使用变频驱动器来实现实时调速。系统运行数据表明,采用动态负荷匹配的方式选择空调主机、风机水泵等设备后,空调主机能耗降低 25%,风机水泵能耗降低 30%,整个系统的能效提高很多。

2.4 自然通风与机械通风协同设计

自然通风和机械通风协同设计主要是利用自然通风的免费冷源,在过渡季节或者室外参数适合时,切换为自然通风模式或者混合通风模式,减少机械通风的能耗。设计过程中需要通过计算流体力学 (CFD) 模拟来优化建筑开口布局,保证自然通风路径畅通,达到室内和室外空气高效交换的目的,并且设置智能通风控制模块,在室内外温湿度、污染物浓度等参数的基础上自动调节通风模式,实现自然通风与机械通风的无缝切换。协同设计既要考虑通风的效率也要注意室内舒适度,不能造成由于自然通风导致的温度波动过大或气流组织混乱。

对大型公共建筑采用可开启式外窗加机械通风系统的综合设计方案,利用 CFD 模拟来改善外窗开启角、位置,创建合理的自然通风路径。智能通风控制模块实时比较室内外的温湿度和污染物浓度,当室外温度在 18 ~ 26 °C、PM2.5 浓度小于 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,自动开启外窗切换到自然通风模式,室外参数超出合适范围的时,自动关闭外窗切换到机械通风模式。经过实际运行表明,在过渡季节自然通风的时间大约占到总时长的 40% 以上,机械通风能耗比降低 38%,室内空气质量和舒适度达到设计标准。

3 空调通风系统运行能效提升路径

3.1 基于 AI 的动态负荷预测与参数优化

基于 AI 的动态负荷预测和参数优化是提高运行效率的主要途径,核心在于采用人工智能算法挖掘出历史运行数据与负荷影响因素之间的联系规律,创建准确的负荷预测模型,完成运行参数的前瞻式调整。所用到的 AI 算法有遗传算法、神经网络、模糊逻辑等,其中神经网络模型具有很强的非线性拟合能力,可以准确地反映温湿度、人员密度等各方面的因素对负荷的影响,预测精度能达到 85% 以上。根据预测的结果,系统可以提前对冷水机组的供水温度、风机送风量等主要参数进行调节,使设备的运行状态与未来负荷的需求保持一致,防止由于滞后调节而造成能量的浪费^[4]。

空调通风系统运行时,使用带有 BP 神经网络的负荷预测模型,在训练历史运行数据的基础上(包含室

内外温湿度、人员流量、照明能耗等),建立负荷预测模型。模型提前15分钟给出负荷预测结果,控制系统根据此结果对冷水机组的蒸发温度和冷凝温度进行调节,并调节变频风机的转速。实际运行验证表明,该种优化方法可以使冷水机的COP增加0.6~0.9,风机能耗降低15%~20%,整个系统运行能效提升22%,室内温度波动不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证舒适度。

3.2 多设备协同联动运行优化

多设备协同联动运行优化的核心是打破单设备独立调控的局限,用全局优化的目标函数来实现风机、水泵、冷水机组等核心设备的协调运行。协同联动要通过建立设备间运行关联模型,确定各个设备运行参数之间的耦合关系,水泵流量和冷水机组制冷量的匹配关系、风机送风量与空调末端负荷的适应关系等。根据关联模型,用多目标优化算法,在保证室内舒适度的基础上,最小化系统的总能耗。另外,协同运行要具有故障自诊断和冗余备份的功能,在某个设备出现异常时,自动调整其他设备的运行参数,保证系统的正常运转。

具体而言,采用中央空调通风系统多风机联动控制技术,使用Q-learning算法建立协同决策模型,实时得到各个区域的温湿度、风量数据,并依据实际情况动态调节各风机的运行功率及风阀的开度。当某一区域的人员密度增大而造成负荷增大时,系统会提高该区域风机转速,同时对其他区域的风机参数进行微调来保持系统的压力平衡,在非高峰时段负荷降低时,系统就切换到低能耗联动模式,同步降低风机和水泵的转速。运行数据表明,采用该协同优化路径后系统综合节能率可达30%以上,温度调节响应时间缩短到2分钟以内,设备故障引起的停机时间减少60%。

3.3 设备运行状态监测与能效诊断优化

设备运行状态监测及能效诊断优化是保证系统长久稳定运行的重要途径,依靠实时监控设备核心的运行参数,找出设备性能降低和运行异样的地方,适时采取维修保养以及调控的办法。监测参数有冷水机组的COP、风机的单位风量能耗、水泵的水力效率等主要能效指标,还有设备的振动、噪声、轴承温度等状态参数,来预测出设备存在的故障隐患。根据监测数据建立能效诊断模型,比较标准运行参数和实际运行参数之间的差别,找到能效降低的原因,如叶轮积尘造成风机效率下降、制冷剂泄漏造成机组COP降低等,从而得出相应的改进措施^[5]。

3.4 可再生能源与空调系统耦合运行

可再生能源和空调系统耦合运行是实现能源替代和节能增效的重要途径,将太阳能、地热能等可再生

能源与传统的能源消耗相结合,减少系统对电网电力的依赖,达到节约能源的目的。太阳能和空调系统耦合可以利用太阳能集热器预热新风或者加热生活热水,从而减小空调主机以及辅助加热设备的负荷;地热能耦合使用地源热泵系统,依靠地下土壤温度稳定的特点来提高热泵机组的COP,COP一般在3.5~4.5之间,远远大于传统的空气源热泵。耦合系统需要设置智能切换装置,在可再生能源供应量和负荷需求之间,自动调节能源供应的比例,保证系统的稳定、高效。

以地源热泵和空调通风系统耦合为例,系统利用地埋管换热器从地下土壤中获取热量,在冬季为空调系统提供预热热源,在夏季作为冷却热源。在耦合系统中添加智能能源管理系统模块,对地下土壤温度、热泵机组的COP和空调负荷进行实时监控,自动调整地源热泵和传统冷水机组的运行负荷比例。当可再生能源供应充足时,地源热泵承担70%以上负荷,当供应不足时,自动增加传统机组的负荷。实际上的运行结果显示,该耦合途径可使系统每年的耗电量降低25%至30%,二氧化碳排放量减少约205吨,大大提高系统的节能和环保水平。

4 结束语

在建筑能耗管控和“双碳”目标推进的双重作用之下,空调通风系统节能优化、提高能效成为建筑领域实现绿色转型的重要突破口。通过系统架构优化和智能控制集成设计的协同创新,利用动态负荷匹配、多设备协同联动、设备状态监测以及可再生能源耦合等先进的技术途径,不但能提高系统的运行能效和稳定性,而且能促使建筑能源管理向精细化、智能化的方向不断深入。采用这些技术策略进行实践,给建筑领域的节能降碳提供一个可以复制、可以推广的技术范式,有利于行业的高质量可持续发展。

参考文献:

- [1] 洪青春.城市综合体空调通风设计体会[J].洁净与空调技术,2025(02):69-72.
- [2] 孔敏,侯凯娟.基于变频技术的地铁车站空调通风系统自适应控制方法[J].设备管理与维修,2024(21):45-48.
- [3] 王美菊.洁净区域净化空调通风系统的构建与维护措施[J].建设科技,2024(14):96-98.
- [4] 刘欢.变频控制技术在地铁站空调通风系统中的节能应用研究[J].工程机械与维修,2023(06):61-63.
- [5] 张建炜.某RO-PAX船空调通风系统的应用研究[J].机电技术,2023(03):78-81,116.

建筑电气安装工程中物联网技术的智能监测与质量管控实践

胡 斌¹, 王寿龙², 宋 静³

- (1. 化生医疗科技有限公司, 山东 威海 264200;
2. 山东迈拓凯尔新材料科技有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 元昇消防科技(山东)有限公司, 山东 烟台 264000)

摘 要 建筑电气安装工程作为建筑功能实现的核心环节,其施工质量与运行安全性直接影响建筑整体使用效能。传统电气安装质量控制依赖人工巡检与经验判断,存在数据采集滞后、故障预警不及时、管控精度不足等问题。本文立足于工程实践,阐述物联网技术在建筑电气安装工程中的应用逻辑,深入分析传感器部署、数据传输优化、云平台构建、智能诊断等关键技术路径,探讨物联网在施工过程质量管控、设备运维优化、安全风险防控等场景的实践应用。研究表明,物联网技术可实现电气安装工程全流程的实时化、智能化管控,有效提升工程质量稳定性、降低运维成本、增强系统运行安全性,为建筑电气行业智能化转型提供技术支撑。

关键词 建筑电气安装;物联网技术;智能监测;质量管控

中图分类号: TU85; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.013

0 引言

随着建筑行业向智能化、可持续化方向快速发展,建筑电气系统的技术复杂度与功能要求也随之不断提升。其涉及供电照明、安防监控以及智能操控等多个子系统,这就对安装施工的精确度、安全性和稳定性提出了更高标准。传统电气安装工程的品质管理主要依赖事后检测和周期性巡查,通过人工采集设备运行数据、排查故障隐患。这种方式不仅效率不高,而且难以全面覆盖复杂电气系统的所有关键环节,容易忽略潜在的质量问题,进而引发设备故障、能源浪费乃至安全事故。物联网技术作为现代信息技术的关键组成部分,借助传感监测、无线通信、云计算以及大数据分析等技术,能够实现设备、数据与人员的智能互联,构建覆盖全流程、全方位的动态监控与管理系统。在建筑电气安装工程中,物联网技术突破了传统管理模式的时空限制,可实时感知施工过程、设备运行状态和环境参数,并通过数据分析为品质控制提供可靠决策依据。本文立足于建筑电气安装工程的施工特性与品质管控需求,深入探讨物联网技术的创新应用方案,并结合实践案例验证其实际效果,以期为行业的高质量发展提供借鉴。

1 建筑电气安装工程施工特点与传统管控局限

1.1 工程施工核心特点

建筑电气安装工程包含供配电装置、电气线路、控制单元以及智能终端等众多组件,各子系统之间联系紧密且接口交错复杂。例如:供配电系统需要和照明、空调、安防系统相互配合协作,智能控制单元需与各类终端设备进行精准连接对接,任何安装失误都有可能损害整体系统的运行效果,同时电气设备布局比较分散,分布在地下室配电间、楼层管井、吊顶夹层等不同位置,施工条件复杂加大了质量控制的难度。电气安装施工的精确性会直接影响系统运行的可靠性,如线路铺设的绝缘性能、设备接线的稳固程度、接地系统的有效性等,都必须要达到国家标准和设计标准要求,一旦超出误差范围就可能引发接触不良、漏电、短路等故障情况。此外,不同电气设备的安装方法互不相同,对施工人员的技术水平和操作规范要求严格。

建筑电气设备拥有比较长的服役期限,运行维护阶段的管理效能对整个建筑运作成效有关键影响,在长期使用过程中受到老化、损耗以及外界环境等因素作用,电气设备性能会渐渐地降低且故障发生概率随之增加,所以要对设备状况展开不间断的跟踪与评估,并且适时执行必要维护措施来保障系统长期可靠运行能力^[1]。

作者简介: 胡斌(1981-),男,本科,工程师,研究方向:电气安装。

1.2 传统质量管控模式的局限性

传统电力系统运维主要靠人工定期开展检查工作,借助便携设备测量各项参数并进行人工记录,这使得数据采集效率十分低下且时效性明显不足,很难实时捕捉瞬时的电压波动或者线路过载等突发状况。通常是在故障发生之后才能够被发现,从而延误了最佳的故障处理时机,因为设备数量非常庞大并且分布极为广泛,人工巡检很难覆盖到所有的关键部位,尤其是高空、狭小空间等区域容易形成管理上的盲点,排查过程高度依赖人员自身经验,很难精准识别如线路绝缘老化、设备内部零件磨损等潜在缺陷,导致安全隐患长期存在。分散的人工记录数据缺乏统一的管理方式,缺少系统化的分析能力,无法有效挖掘数据之间的关联性 with 变化趋势。电气安装工程涉及多个不同的参与方,传统模式下信息传递主要依靠纸质文件和口头交流,容易造成信息不对称以及传递滞后的情况,一旦出现质量方面的问题,很难快速定位责任方和问题产生的根源,进而影响问题整改的实际效率^[2]。

2 物联网技术在建筑电气安装工程中的应用架构与关键技术

2.1 物联网智能监测与管控系统架构

感知层作为物联网体系基础架构,通过安装多样传感装置与数据采集终端,全面掌握电气工程施工及设备运行状况,依据监测目标配置对应传感器,包含电流、电压、温度、湿度等参数,全面覆盖设备运行环境施工质量等要素。部署时要平衡测量精度和成本效益,在配电室配电箱等关键区域增加监测密度,确保数据采集完整且准确。网络层负责数据传输功能,把感知层采集信息输送到云端处理中心,需结合现场环境和传输要求选通信方式,室内环境用Wi-Fi蓝牙等近距离通信技术实现高速数据传输,远距离低能耗场合选LoRa、NB-IoT等物联网通信协议保障稳定低功耗,同时建立多重数据传输通道形成冗余备份机制,避免单一路径故障导致数据中断,确保传输可靠。平台层是整个系统的核心枢纽,整合云存储大数据分析人工智能算法等功能模块,实现数据集中管理和智能化处理,基于云存储技术构建分布式数据存储体系安全存储海量数据支持检索溯源,用大数据分析技术对多源异构数据清洗整合挖掘发现内在关联,引入机器学习深度学习等算法开发故障诊断和风险预测模型精准识别预警设备异常。

应用层会针对各类用户量身定制专属管理方案,并且通过Web界面与移动客户端来展示数据图表、异常提示以及运维方案等内容。针对施工主管可让其实时跟进项目进度、细致检查质量指标以及及时接收违规提醒;针对运维团队能够支持设备状态诊断、准确

进行故障溯源以及合理分派保养任务;针对决策层会提供运行数据汇总、开展费用效益分析以及配备辅助决策工具,以此实现全过程智能管理。

2.2 关键技术路径优化

对于电气安装工程的监测要求要选高灵敏度低功耗且抗干扰性强的传感器。具体来讲,在配电室等高温场所需部署耐高温的温度传感器,高压线路监测时应选用绝缘性能良好的电流传感器,潮湿环境则要采用防水型的湿度传感器,同时结合电气系统网络架构实施分层部署策略,在关键设备、核心线路及隐蔽工程等区域增加传感器部署密度,在次要区域适当减少部署量以此达到监测效果与经济性的优化平衡。电气系统监测包含设备运行参数、环境指标、施工过程等多类型数据,各类数据在格式和维度方面存在差异,采用数据融合技术对多源信息进行标准化处理能有效消除数据冗余与误差并建立统一的数据分析模型,借助边缘计算能力在数据上传至云端前进行预处理,通过筛选关键信息、压缩数据体积,既能减轻网络传输压力,又能降低云平台处理负担,从而整体提升数据处理效能^[3]。

通过机器学习方法来建立设备故障识别模型,借助历史数据学习各类故障的表现特征,如过载时会出现电流异常的情况、绝缘老化会有电阻下降的问题等。把实时采集到的数据与模型进行比对,能够准确判断故障类型和严重程度,并参考设备过往运行情况来预判故障发展态势从而及时预警。在面对复杂故障的时候,利用深度学习技术分析多源数据间的内在关联,以此有效提升故障识别的精度。

3 物联网技术在建筑电气安装工程中的实践应用

3.1 施工过程质量实时管控

在电气安装施工过程中,通过物联网手段对施工品质开展实时跟踪并即时调整,在进行管线铺设工作的时候,借助位移及倾角感应器检测管路铺设的水平度与垂直度,以此保证其符合设计规范要求。在开展设备安装作业的过程中,运用力矩感应器核查螺栓的锁紧力度,利用电压感应器确认接线的准确性,避免因装配失误而引发接触失效问题。针对隐蔽工程这一部分内容,采用高清摄像装置与环境感应器留存施工过程和环境数据,构建电子化档案来为后续验收提供参考依据。若监测数值超出了标准范围,系统会自动触发警示,提示作业人员迅速进行修正,进而实现质量隐患的及时发现与处理。

3.2 设备运行状态智能监测与运维优化

建筑电气设备启用之后采用物联网技术持续跟踪其电流、电压、温度及振动等运行参数,动态评估设备运行状况,借助大数据分析可深入挖掘设备运行特

性, 预判其老化进程并据此生成定制化预防性维护方案, 有效规避维护过度或维护不足的问题。例如: 当变压器温度出现异常攀升时, 系统会依据历史记录及环境因素分析成因, 若诊断为散热系统故障, 将立即推送清洁维护指令, 若判断为内部零件磨损则提前安排部件更换, 防止设备突发故障导致停机。此外, 借助远程监控功能, 运维人员能够通过移动终端实时掌握设备状态并远程处理轻微故障, 显著提升运维效率, 降低运营成本。

3.3 安全风险精准防控

物联网技术给电气系统安全风险带来智能化新途径。借助漏电流感应装置系统能不间断监视线路漏电流状况, 一旦检测到漏电流强度超出安全标准就自动执行断电操作并启动警报, 以此有效规避人员触电风险^[4], 同时烟雾与温度感应装置可感知配电室机房等重要场所环境变化, 能迅速辨识出潜在的火灾威胁。结合视频监控与人员追踪功能可规范现场作业人员行为准则, 杜绝因不当操作引发的各类安全问题, 而且该系统还能对已发生安全事件数据进行归纳分析, 找出安全管理存在的薄弱环节并为制定和改进安全措施提供数据支持, 进而全面增强电气系统安全管理效能。

3.4 能耗优化与绿色运行

通过物联网技术对建筑的电力消耗进行精准控制, 利用智能电表以及能耗监测设备实时获取各分区和装置的用电信息, 分析能耗的分布规律以及资源浪费点所在, 联动建筑的使用状态和外部环境数据, 通过智能调控单元优化照明、暖通等系统的运转方式以实现按需供给。例如: 根据室内人数自动调控光照强度, 根据环境温度动态调整空调运行参数, 以此显著减少电力浪费并促进建筑用电系统绿色低碳发展。

4 案例分析

4.1 案例概况

某商业综合体建筑面积约 15 万平方米, 其内部划分出商业办公酒店等多样功能分区, 该项目电气体系涵盖供电配电照明安防及智能控制等多个子系统, 全项目设备总数超过了 5 000 台(套)。这为安装施工带来了比较高的技术难度, 也对质量管理构成十分严峻的挑战。为有效提升项目工程品质与后期运维效率, 项目团队引入物联网智能监测及质量管控系统, 以此打造覆盖项目全流程的智能化管理体系。

4.2 物联网系统部署方案

项目在感知层部署超 1 200 台各类传感器, 涵盖电流、电压等多种类型, 用于监控配电室等重要设施。网络层采用 Wi-Fi 与 NB-IoT 结合通信方式保障数据传输稳定性与全面覆盖, 平台层构建专用云平台集成数据存储分析诊断等核心功能并开发移动端 APP 和 Web

管理端^[5]。应用层设置施工质量管理等功能模块适应不同用户实际需求。

4.3 应用效果

项目依托物联网技术实现电气安装工程全流程智能化管理, 施工环节质量缺陷整改率提高到 98% 且隐蔽工程验收通过率达 100%, 返工率相比常规项目减少 60%, 设备运行阶段故障预报准确度达到 92%, 预防性维护覆盖面增至 85%, 设备平均无故障运行时间延长 30%, 运维开支减少 40%, 安全风险管控上未出现漏电火灾等安全事故, 安全事故发生率为零, 能耗管理方面通过精细调控使建筑电气系统能耗比同类项目降低 15%, 实现质量安全和效益共同提高。

5 结束语

本文通过分析建筑电气安装工程施工特性及传统管理方式不足, 研究物联网技术应用框架、核心环节和实际落地场景, 并以实例证明其成效。结果表明, 物联网依靠感知、网络、平台、应用四层架构联动, 实现施工、设备运行及运维管理全程实时智能控制, 显著改善传统模式数据延迟、覆盖有限和决策支持薄弱等缺陷, 增强工程质量稳定性、运维效率和系统安全性且降低成本, 为行业智能化升级奠定基础。未来, 随着物联网和人工智能、大数据、边缘计算等技术深度融合, 其应用会更广。在技术层面, 要着力提升传感器性能, 保障数据采集精确性与可靠性, 强化智能诊断算法研究, 提升故障识别与预测精准度, 推动云平台 and 边缘计算协同作业, 提高数据处理速度; 在应用层面, 应拓展其在绿色建筑、智能建筑等领域的应用场景, 实现能耗优化与智慧管控一体化, 构建行业统一技术标准与数据规范, 促进系统互联互通。加强专业人才培养, 提升从业人员技术应用水平, 加速技术在中小型项目推广普及。通过持续技术革新与实践应用, 物联网技术将为推动行业迈向高质量、智能化、绿色化新阶段提供强大助力。

参考文献:

- [1] 王军, 李娟. 物联网技术在建筑电气安装质量管控中的应用研究 [J]. 电气技术, 2024, 25(07): 132-135.
- [2] 张伟强, 陈丽. 基于物联网的建筑电气设备智能监测与运维系统设计 [J]. 建筑电气, 2023, 42(09): 58-63.
- [3] 刘敏, 赵刚. 物联网在电气安装工程安全风险防控中的实践应用 [J]. 安全与环境工程, 2023, 30(05): 198-203.
- [4] 陈晓峰, 周宇. 建筑电气系统能耗优化中物联网技术的应用 [J]. 节能技术, 2023, 41(03): 289-293.
- [5] 赵文博, 吴婷. 基于物联网的电气安装隐蔽工程质量追溯系统研究 [J]. 工程质量, 2023, 41(04): 89-93.

水利施工中水坝堤防堵口施工技术应用

蔡卫露

(安徽圣合建设工程有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 水利工程关乎民生福祉及国家建设。水坝作为防洪挡水的核心构筑物,其堤防的决口质量直接影响水利工程质量,且与工程安全及周边群众的生命财产安全有紧密关联。因此,施工人员需要采取合适的堵口施工技术,有效保证堤防修复质量及效率。基于此,本文按照基础处理、堵口实施、加固养护的逻辑,梳理水坝堤防堵口施工技术的操作流程,并结合具体案例,深入探究透水拦截结构构建、分级消能作业、闭气防渗加固等关键措施的应用要点。工程实践结果表明,该技术方案可有效降低决口流速,使堤防水位恢复至正常蓄水位,降低堤坝沉降问题的产生概率,切实维护周边群众的生产生活安全,提高工程防洪效益与经济效益。在水利施工中,精准把控水坝堤防堵口施工技术应用要点极为必要,是提高水利工程质量、维护工程效益的关键措施。

关键词 水利工程施工;水坝堤防堵口;复堤加固

中图分类号:TV64

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.014

0 引言

水坝堤防作为水利工程中的挡水建筑物,是防洪体系的重要组成部分。在水利工程施工阶段,一旦发生水坝或堤防决口,将严重威胁工程安全及周边群众的生命财产安全。对此,应采用合理的施工技术,提高水坝堤防堵口施工效果,维护工程后续的施工安全。水坝堤防堵口施工中包括水文观测、裹头处理等操作,应明确施工流程,结合工程实际选取合适的施工技术,将决口高效修复。本文对实际工程案例展开分析,对水坝堤防堵口施工技术进行全面分析,提出可行的施工技术运用方案,以期为促进水利工程的稳定发展提供参考。

1 水利施工中水坝堤防堵口施工技术的工艺流程

1.1 基础施工处理

基础处理为水利工程堤坝堵口施工中的关键内容,决定各道施工工序能否高效完成,施工要点包括现场勘测、施工材料与设备准备。现场勘察阶段,对口门水深、水位、水量等基础信息收集记录,对周围水下地形予以测量,经地质勘察工作,了解水势变化,精准评测口门水量和水流是否发生改变。施工材料与施工设备环节,结合工程量明确堵口物料具体使用量。针对入场的施工人员,也需合理分工,高效组织设备与人员进场^[1]。

1.2 堵口施工

施工人员需明确堵口施工技术要点,了解施工顺序,物料准备齐全,且机械设备、施工材料、施工人

员准备就绪后,展开堵口施工。当遇到恶劣环境无法正常施工时则暂停,在水位降低后进行施工。处理河堤决口时,需了解口门复堵原则,施工时遵循下游一上游一小口一大口原则。

1.3 加固维修养护

结束堵口施工后,进行工程加固维修养护处理。堵口期间,堤身土体较容易出现松散、防渗性能下降的问题。采取合适的养护加固技术,可规避管涌、渗漏等次生灾害的产生,切实提高防洪安全效益。在此阶段,施工人员需着重开展护坡防冲、复堤施工等操作,以系统化的措施及方案,提高堤防防洪能力。复堤施工过程中,需严格以设计规范为参考进行质量管理。首先,将低顶恢复至预先设计要求。施工期间,可采取分层压实技术,对堤身土体进行处理,以提高其压实度。同时,需对堤顶路面、排水沟等附属设施进行修复,确保堤防具有防洪功能与通行功能。为消除堵口风险,断面设施恢复处理时,逐步将其恢复到原本的尺寸。针对护坡防冲施工,则是展开新的堤防施工。考虑到经过一段时间的洪水冲刷,堵口段及周边堤段较容易出现土体裸露、抗冲能力下滑的问题,在护坡防冲施工中,需要选用适配的防护材料,如混凝土预制块、浆砌石。同时,需对防护结构加以改造优化,建立完序且连整的护坡体系,有效抵御水流冲刷,预防堤坡坍塌、水土流失等问题,筑牢堤防防洪防线。图1为水利工程中水坝堤防堵口施工技术的工艺流程。

作者简介:蔡卫露(1992-),男,本科,工程师,研究方向:水利工程。

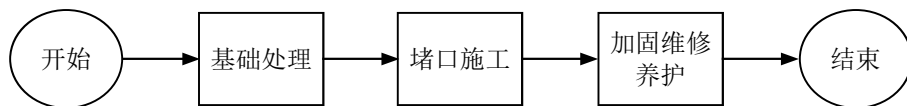


图 1 水坝堤防堵口施工技术的工艺流程

2 水利施工中水坝堤防堵口施工技术的应用实践

2.1 工程概况

本文案例水利工程建设用途为农业用水灌溉以及防洪。工程堤防因多元环境改变，工程在持续强降雨条件下，水坝堤防形成决口，决口最大宽度为 35 m，其流速可达 4.5 m/s。工程出现决口过后，影响周围地区群众的人身安全、财产安全。由于工程所处地区交通环境有限，施工抢险材料和机械设备运输难度提升。在河床底质，主要土质为粉砂土，其整体的抗冲刷能力弱。对此，要选用合适的技术，快速进行抢险施工，达到高效封堵目标。

2.2 明确堵口施工目标

分析案例受损情况，在水坝堤防堵口施工期间，遵循施工原则，即高效拦截、分层消能，具体的施工要点如下：

1. 构建透水拦截结构。结合模块化树枝形组合体的持续抛投操作，构建立体网状拦截系统，减少水流所带来的持续冲击。结合工程实例，对水利工程堵口施工位置的水流状况予以分析，通常组合体的透水率应大于等于 60%，每日抛投长度应大于等于 50 m，明确抛投体已经沉没到河底后，钢叉插进河床，其深度应大于等于 0.8 m^[2]。

2. 分级消能入场施工作业。首先，抢修工程裹头，对于决口两侧的堤头，将钢丝石笼抛投其中，建立起裹头结构，此结构的坡比数据为 1:1.5，而顶宽数据为 3 m，需在 24 小时以内进行抗冲刷防护处理。其次，展开阻拦架抛投操作，沿着决口的双侧，不同时间推进施工进度，单侧的进占速度一般大于等于 5 m/h。此外，龙门口合龙施工操作，当剩余口门的宽度已经小于 5 m 时，这时消能处理会运用到固定桩以及横向阻拦架结合的方式，而此时合笼抛投强度设定为 $\geq 20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。闭气前封堵操作应当在 24 小时内完成。

3. 闭气和防渗加固施工。堵口坝体闭气处理后，查看渗流量是否满足施工建设要求。接下来，通过分层碾压碎石操作，让碎石和黏土料混合，成为全新的防渗体，其后续压实度测定要超过 95%。

4. 做好风险防范处理。施工作业模式为人工辅助以及机械抛投结合，让树枝型组合体的拼装处理效能提高，快速完成应急抢险处理。

2.3 选择堵口材料

本项目工程中，结合决口流速和深度，选取坚硬的花岗岩岩石，其粒径要处在 30 ~ 50 cm，其抗压强度较高，即便处在水流之下，仍然可以维持稳定性。抛石操作时，经理论和流速测定，可明确抛石数量。例如：流速如果为 4 m/s，每个小时的抛投块石一般为 800 m³。针对抛石稳定性不高和水流复杂的区域，可以笼装石封堵，在决口容易被冲刷的位置，多投放笼体，提高局部防护水准。

2.4 明确堵口方法

1. 平堵：适用于决口水流较为平缓的位置，从上到下铺设堵口材料，借助土袋和抛石材料，维持基础结构的稳定性^[3]。

2. 混合堵：此种方式适用于水流变化多端以及地形环境复杂的情况，混合堵运用下铺设厚度为 1.5 m 的基础层，会让基层稳定性提高，确保堵口施工安全。

3. 立堵：适用于宽度大的决口、水流速较快的决口，会运用到大型的自卸卡车，通过块石运输以及抛投操作，确保施工效果。

2.5 设计堵口系统

2.5.1 建立施工平台和抢修裹头

本文的工程案例中，在施工平台抢修裹头操作，属于堵口施工的关键内容，此环节施工技术的选择和施工质量关系到工程后续的使用安全。施工关键步骤为以下几步：

1. 决口双侧堤顶削低处理，并把原堤顶的高程降低到 1.5 ~ 2 m 之间，同时加宽施工作业面，为装载机以及挖掘机等设备的施工作业构建平台。针对决口双侧的机械设备操作空间不足以及堤顶狭窄等问题，可以通过分级压实的施工流程解决问题^[4]。实际施工阶段，先运用挖掘机设备，以阶梯式挖掘的方式，开挖原堤顶，严格把控削坡高度，约为 1.5 ~ 2 m。完成削坡后，原堤顶宽度加宽处理，使两台挖掘机能够在平台上施工作业。削坡土方要放在背水坡位置，在进行分层填筑施工时，运用压路机设备，碾压 6 遍左右，此时压实度要大于等于 93%。修整坡面过后，需进行碎石垫层铺设，其厚度为 0.2 m，采用的碎石材料粒径要求在 30 ~ 50 mm 之间，通过平板夯实操作，把控坡度比，这样可避免机械设备操作时出现倾覆风险。针对

平台边缘设计,其顶宽以及高度分别为0.8 m、0.5 m,使其成为暂时运用的挡水堰,防止雨水对坡面造成持续冲刷。

2. 裹头抢救施工时,所用双层结构为“外护内稳”,抛投顺序应合理,并观察施工细节。面向基础层施工,决口堤口临水一侧抛投首层石笼,然后堆高施工,需小于等于1 m,石笼通过螺纹钢横向连接,让其变成抗冲骨料结构。接下来,积极开展错缝加高施工处理,通常情况下第二层的石笼,要根据堤轴线朝内缩进0.3 m,使其和底层的石笼成为错缝咬合关系。

3. 坡面修整处理。当两层的抛投施工完成后,将长臂挖掘机设备引入施工现场,裹头背水坡修整处理,此时坡度比把控为1:1.5。土工布要覆盖在坡面,然后把钢管打入,让其成为暂时使用的支护。4层抛投施工完成后,裹头的顶端宽度约为3 m。使用装载机轮胎,把控充气压力,进行三次碾压处理,让石笼的密实度高于90%。

4. 过渡层施工作业的主要内容为基面整平,可通过裹头顶端铺设随时过渡层的方式,便于接下来的拦阻架抛投操作^[5]。

2.5.2 建立树枝形组合体拦阻结构

1. 水坝堤防堵口施工期间,运用树枝形组合体阻拦结构。此结果可有效控制水流,解决以往堵口所用材料抓地稳定性较差的问题。结构形式为标准化构件,经组装后高效施工,处于堵口位置变成多层级的抗冲体系,解决高流速之下堵口稳定性差的问题。拦阻结构要注重创新设计,通过模块化分型处理,明确组件构成情况。核心骨架为外径为160 mm以及主管,主权钢管的直径为22 mm,其属于分支支撑结构。主干所用的钢管结构,预制处理,通过螺纹连接钢管延长,整体的拼装时间不大于3分钟。单个标准段,要沿着轴向每间隔1 m布设主权钢管组,单组包括四根展现出放射状布局的钢管,其长度为1.5~2 m,并让邻近的钢管间距控制在5 m,变成空间桁架体系。针对导向钢管,要运用螺栓使其和钢管主干的迎水面固定,以抵御外部的高流速冲击,让组件进入水流中后,能够稳定地下沉。文中所用的复合防护体系为四阶段递进式。

2. 决口侧翼防护:施工人员需在决口两侧持续抛投标准构件,通过分形特性使其成为透水率大于68%的滤网。组件进入水中以后,根据顺流自主调整,让钢管能够以适合角度插入河床,提高抓地深度和效果,此种方法和传统钢丝笼施工方式比较,锚固力显著提升。

3. 龙门口预处理:施工期间运用立体编织工艺,让纵向组件可以和横向的工字钢桩体形成空间网格体

系。单层抛投后,运用振动压路机多次碾压操作,提升组件的嵌入深度,解决高流速堵口体失稳问题。

2.6 复堤加固施工技术

主体合龙过后,为使堵口防渗性能进一步提升,在工程上游复堤加固处理,搭建多重防渗屏障。第一层屏障为混合反滤层,使用碎石、粗砂以及低塑性黏土。第二层屏障为防渗墙,施工作业时运用硅酸盐水泥拌合成浆液,注浆处理,让桩体可以直接进入堵口下方。第三层则是复合土工膜防渗层。经三层防护,可提升堵口结构的使用性能与抗渗性能。

3 水坝堤防堵口施工成果分析

从工程指标层面分析,经堵口施工技术运用后,决口流速直接降低,从4.5 m/s降低为1.2 m/s,也从危险水位降低至正常蓄水位,有效解决了堤坝沉降问题。可见,此次施工操作促进了堤坝恢复稳定和运行安全。

从效益层面评估,堵口施工技术的运用,提高了工程防洪效益,并减少了周围群众的经济损失。本次的堵口施工将潜藏的经济损失风险消除,且工程修复过后,水坝堤防的防洪功能恢复,周围农田设施和居民安全得到保障,获取的直接和间接性经济效益较大。

4 结束语

在水利工程施工中,水坝堤防堵口施工技术是关键内容,合理选用技术类型,把控施工工艺流程和要点,可维持水利工程稳定性,解决工程风险以及隐患。通过文献研究并联合工程实践,明确水坝堤防施工方案,细化各个环节的施工要点,在施工材料、施工人员和施工设备的高效配合下,提高水坝堤防堵口施工有效性、安全性,为水利工程建设与使用安全保驾护航。

参考文献:

- [1] 褚延虎,吕伟氏.关于水利施工中水坝堤防堵口施工技术探讨[J].城市建设,2025(13):60-62.
- [2] 施志明.水坝堤防决口原因分析及堵口施工技术[J].新农村,2024(02):49-51.
- [3] 陈辽.水坝堤防堵口施工技术在水利工程中的应用[J].建筑技术开发,2022,49(24):92-94.
- [4] 刘磊.水利施工中水坝堤防堵口施工技术的应用对策分析[J].中国设备工程,2021(14):189-190.
- [5] 谷剑鸣,王善聚,张保民.水利工程施工中的水坝堤防堵口施工技术分析[J].农业开发与装备,2020(07):79-80.

水利河道治理施工技术与管理措施研究

陈振斌

(山东硕庆工程项目管理有限公司, 山东 济南 250014)

摘要 本文结合目前河道治理工程实际, 从河道治理的背景和发展现状入手, 对河道清淤、护坡加固、整治导流、生态修复等主要施工技术进行研究, 探究各种技术的应用要点和创新方向。从工程规划、质量控制、进度管理、安全管理四个方面出发, 提出有针对性、可操作的施工管理措施, 以期为提高河道治理工程质量、加强施工管控效能、实现生态效益和工程效益的统一提供理论参考。

关键词 水利河道治理; 河道清淤技术; 河床生态修复技术; 生态修复

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.015

0 引言

当前我国河道普遍存在淤积严重、护坡老化、生态功能退化等突出问题, 不仅影响水利工程的正常运行, 更破坏了流域生态平衡。因此, 优化河道治理施工技术、完善施工管理体系就成为水利工程领域的一项重要研究课题。本文主要从核心技术、关键管理环节入手, 结合实际工程经验展开论述, 以期能为河道治理工程提质增效、可持续发展提供借鉴。

1 水利河道治理的背景与发展现状

在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 河道生态系统以及水利功能面临着严峻的考验, 河道治理成了保证流域水安全、改善生态环境的重要措施。过去我国河道治理大多以单一防洪、排涝为目标, 采用硬化护坡、直线开挖等工程化手段, 虽然短期见效快, 但是忽略了生态系统的完整性, 造成河道自净能力下降、生物多样性减少。近些年, 由于“绿水青山就是金山银山”理念深入人心, 河道治理也转变为“生态优先、综合治理、长效运维”, 将水利功能与生态修复相结合的治理方式成为主流^[1]。目前治理技术不断更新换代, 智能设备以及生态材料也被越来越多的地方所使用, 但是也有地区存在技术不匹配、管理体系不健全等问题, 需要改善技术方案和管理体系。

2 水利河道治理具体施工技术

2.1 河道清淤技术: 机械清淤、人工清淤与疏浚设备应用

河道淤积是影响河道水利功能发挥的主要问题, 清淤技术是否科学决定着治理的效果和生态的影响。

机械清淤以效率高、适用范围广的优势成为规模化清淤工程的主要方式。常用的设备有挖泥船、绞吸式清淤机等, 其中绞吸式清淤机可以实现挖掘、输送、脱水一体化作业, 有效减少淤泥二次污染, 适用于泥沙含量高、水深大的河道。人工清淤适用于机械无法到达的狭窄河道、岸边死角、生态敏感区, 作业时要配合淤泥固化处理技术, 防止淤泥散落对周边植被、水体造成破坏。近几年来, 疏浚设备朝着智能化、环保化方向发展, 无人清淤船、水下清淤机器人等设备逐渐投入使用, 可以实现精准定位、高效清淤, 并且能够实时监测淤泥成分, 为淤泥资源化利用提供数据支持, 使清淤工程由“治标”向“治本”转变。

2.2 河道护坡与加固技术: 砌石护坡、混凝土护坡及生态护坡

砌石护坡属于传统护坡技术, 因为取材方便、耐久性好, 在中小河道治理中仍然被广泛使用。施工的主要内容是石块的挑选以及砌筑工艺, 需要选用质地坚硬、抗风化的石头, 利用错缝砌筑的方法来保障护坡结构的安全, 同时预留排水孔隙, 减小水体对坡体的冲刷。水流冲击较大的河段, 可以在砌石底层铺设土工格栅来提高坡体的抗剪强度, 提高护坡整体的承载能力。砌石护坡施工要严格控制灰缝厚度和密实度, 防止施工缺陷造成坡体渗漏、坍塌, 还要考虑与周边环境的协调性, 不能过度工程化改造。混凝土护坡分为现浇混凝土护坡和预制混凝土块护坡, 强度高、抗冲刷能力强, 适用于河道岸坡较陡、水流速度较快的河段。现浇混凝土护坡施工时需要先平整压实坡体, 再铺钢筋网增加结构整体性, 然后浇筑混凝土并及时

作者简介: 陈振斌 (1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程施工与管理。

养护,防止出现裂缝而影响防护效果^[2]。预制混凝土块护坡施工方便、工期短,块体可提前在工厂预制,现场拼接安装,且可在块体上预留种植孔,为后续生态修复创造条件。

2.3 河道整治与导流技术:弯道改直、分流导流及水力调控

河道整治的主要目的是改善河道的形态,提高水流的宣泄能力,减少水流对河岸的冲刷侵蚀。弯道改直技术被用于弯道过多、水流不畅的河道,用裁弯取直的方式缩短河道流程,加快水流速度,减少淤积,但是施工前要进行详细的水文地质勘察,评估改直对周边流域生态、水利设施的影响,不能破坏原有的水系平衡。分流导流技术用于河道拓宽、疏浚等工程,修建导流堤、导流槽等设施,把水流引向临时通道,为施工创造无水作业环境,施工时要准确计算导流流量,保证导流设施承载能力满足水流要求,做好导流通道的防护加固,防止水流冲刷造成安全事故。水力调控技术依靠修建闸坝、溢流堰等水利设施来调节河道水流速度、水位,改善河道水力条件,既可以给生态修复提供适宜的水流环境,又可以提高河道防洪、灌溉能力,达到水利功能与生态功能的协同优化。

2.4 河床生态修复技术:植被恢复、湿地建设与生态护岸

植被恢复是河床生态修复的主要手段,在河床、河岸种植适宜的水生、湿生植被,构建完整的河道生态系统,提高水体自净能力,改善流域生态环境。植被选择要遵循适地适种原则,优先选用本土物种芦苇、香蒲、菖蒲等水生植物,这些植物根系发达,可以固持底泥、吸收水体污染物,同时为鱼类、鸟类提供栖息和觅食场所。植被恢复施工应根据河道水文条件采用扦插、播种等方式,合理搭配挺水、浮水、沉水植物,形成多层次植被群落。建立长效养护机制,定期除杂草,观测植被生长情况,保证修复效果的稳定持久。湿地建设属于河道生态修复的关键载体,在河道周边创建人工湿地、恢复天然湿地,发挥湿地的净化、调蓄、生态涵养作用,达到水资源循环利用、生态平衡的目的。人工湿地建设要结合河道地形地貌,设计合理的水流路径和净化单元,通过基质、植被、微生物的协同作用去除水体中氮、磷等污染物,提高水质^[3]。天然湿地恢复要减少人为干预,拆除不合理围堤、养殖设施,恢复湿地原有的水文连通性,逐步修复湿地生态系统。生态护岸是植被恢复和湿地建设的衔接技术,利用生

态材料和植被种植相结合的方式,达到岸坡加固和生态修复的双重目的。相比于传统的硬化护岸,生态护岸具有增强岸坡透水性、保持河道与地下水连通等优点,有利于生态系统的稳定。

3 水利河道治理施工管理措施

3.1 工程规划与组织管理:施工方案制定、工序安排与资源调配

施工方案的制定要以工程实际为依据,结合水文地质条件、生态保护要求和工程目标进行多方案比选,优化技术路线和施工工艺,同时要充分考虑施工过程中可能出现的突发情况,制定出相应的应对措施。方案编制要注重科学性、可操作性,确定各分项工程的施工标准、技术要点、质量要求,防止因方案不合理造成返工、延误工期。工序安排按照统筹兼顾、循序渐进的原则,根据各分项工程之间的逻辑关系及施工难易程度合理划定施工段,确定各个工序的起止时间、衔接节点以及责任人,使工序之间衔接顺畅,不会产生交叉作业的干扰。资源调配要实现人、财、物的合理配置,根据施工进度计划合理调配施工人员、机械设备、材料,建立资源动态管理机制,实时监控资源使用情况,及时补充短缺资源,防止因资源供应不足影响施工进度,严格控制资源浪费,提高工程经济效益。

3.2 施工质量控制措施:材料质量检测、施工工艺监控与验收标准

材料质量是工程质量的重要保证,河道治理工程所用的砂石、水泥、混凝土、生态材料等都要严格实行质量检测制度,保证材料达到设计标准和相关规范的要求。施工前需要对供应商进行资质审核,优先选用信誉好、质量稳定的供应商,对进场材料进行抽样检测,主要检测材料的强度、耐久性、环保性等指标,不合格材料不得使用。对生态袋、格宾网等特殊生态材料还要检测抗老化、抗腐蚀性能,保证满足河道生态修复的长期需求。材料存储时,应根据不同材料的特点采取相应的保护措施,防止材料受潮变质,影响使用效果,并建立材料台账,全程跟踪材料进场、使用、剩余情况,实现材料质量可追溯。施工工艺监控是质量控制的重要环节,要创建全流程的监控体系,就各个分项工程的关键工艺而言,设定质量控制点,派遣专门的技术人员到现场监督,对施工期间的技术参数以及操作规范的执行状况实施实时监测,及时察觉并纠正施工偏差。对清淤、护坡、生态修复等重要

工序要使用无人机巡检、超声波检测等智能化监测设备,提高监控精度和效率,保证施工工艺符合方案要求^[4]。验收标准要结合工程设计目标和相关规范,制定出明确、细化的验收指标,分阶段进行分项工程验收、隐蔽工程验收和竣工验收。分项工程验收合格后才能进入下一道工序,隐蔽工程验收要重点检查施工质量及安全隐患,验收合格并签字后才能进行覆盖施工。竣工验收要全面检查工程质量、生态效果和水利功能,邀请专业机构、监理单位、建设单位共同参加,保证工程符合验收标准,同时整理好验收资料,建立工程质量档案,为以后的运维管理提供依据。

3.3 施工进度管理: 工期计划制定、施工节点控制与动态调整

施工进度管理的重点是科学地制定工期计划、控制关键节点、建立动态调整机制。工期计划要根据工程规模、施工难度、资源条件、合同要求来确定总工期、各分项工程及关键节点工期。计划编制应使用网络计划技术,梳理工序的逻辑关系,找出关键线路和工序,保证计划可行,有指导性。同时将工期目标分解给各施工班组,明确任务和时间要求,建立责任制,实现责任到人。施工节点控制要以关键节点为控制重点,定期检查进度,分析实际与计划的偏差,采取相应的措施。对滞后的工序,可以优化施工方案、增加资源投入,加快施工进度,同时加强班组之间的沟通协调,防止由于工序衔接不畅造成延误,并建立节点考核机制,对按时完成的班组给予奖励,对延误的班组进行问责。动态调整机制是应对施工突发情况的保障。河道治理工程受水文、气象等因素影响较大,应建立实时监测体系,掌握施工进度和环境变化。暴雨、洪水、地质、材料供应出现异常时要快速做出反应,调整计划和工序,优化资源配置,降低延误的风险。同时定期召开进度协调会,汇总进度情况、分析问题、协商对策。使用信息化管理平台,实现施工进度的实时监控、数据共享,提高管理的智能化水平,保证工程按期竣工交付。

3.4 施工安全管理: 安全风险评估、安全培训与应急预案

施工安全管理以风险评估为依据,依靠培训、应急预案来保证施工安全。施工前要查清边坡坍塌、溺水、机械伤害、触电等隐患,按隐患发生概率和危害程度进行分级控制。对于高风险的深基坑、水上作业、高空作业等要进行专项评价,确定责任人和防控措施,

加强现场监督。施工过程中要定时复评,根据进度及现场情况的变化对风险清单进行更新,保证防控无死角,创建风险预警机制,用监测设备及时捕捉到风险信号,为应急处置争取时间。安全培训是提高施工人员安全意识和安全技能的重要部分,应该根据岗位职责实行分层分类培训,包括安全法规、施工技术和应急处置。新进场人员必须经过岗前培训,考核合格后才能上岗,特种作业人员实行持证上岗制度,定期进行技能考核。日常用班前交底、安全警示、巡查等方式强化意识,纠正不安全操作,营造安全氛围。应急预案应包含各种风险的应对措施,确定组织机构、职责、响应程序和物资保障等各方面内容,并针对边坡坍塌、溺水、火灾等制订专项方案^[5]。定期开展演练,检验可行性并优化预案,储备救生设备、急救药品、机械设备,保证完好可用,将安全事故损失降到最低,保证施工全过程安全。

4 结束语

水利河道治理是项系统工程,涉及技术应用、施工管理、生态保护等诸多方面,其质量好坏关乎流域水安全及生态可持续发展。本文通过对河道治理关键施工技术及核心管理措施的研究,确定了各个技术的应用要点及创新方向,提出了具有针对性、可操作性的管理方案,给河道治理工程实践提供参考。随着水利工程技术的不断发展和生态保护要求越来越高,河道治理也要继续推进技术创新、管理优化,加大智能化、生态化技术应用力度,健全全过程管理体系,实现水利功能、生态效益和经济效益的协调统一。

参考文献:

- [1] 张恒. 水利工程河道治理护岸护坡关键施工技术[J]. 工程建设与设计, 2024(24):118-120.
- [2] 齐文超. 水利工程中的河道生态护坡施工关键技术[J]. 科学技术创新, 2024(23):126-129.
- [3] 韩鹏程, 万里飞. 农田水利河道治理护岸防护施工技术思考探讨[J]. 中华建设, 2024(04):172-174.
- [4] 程维辉. 河道治理工程生态护坡施工措施[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(08):56-57.
- [5] 黎晗. 河道治理工程中疏浚与护坡工程施工关键技术研究[J]. 中国水运, 2024(13):93-95.

水利河道防洪治理施工技术的应用研究

王飞翔

(新泰市河道管理保护中心, 山东 新泰 271200)

摘要 本文根据当前河道防洪治理的发展现状, 对施工技术的应用价值、创新策略进行深入的研究, 从效率质量提升、防洪风险控制、生态协调发展、工程长效运行四个方面展开论述。通过优化施工方案、使用智能设备、推行绿色施工、推进信息化监测等方式, 使技术的应用与实际的需求相匹配。研究表明, 科学采用防洪治理施工技术, 既能保证工程的功能性, 又能达到生态可持续发展的目的, 给水利工程的高质量发展提供了技术支撑, 对加强区域防洪减灾能力、推进水利行业绿色转型具有重要的现实意义。

关键词 水利河道; 防洪治理; 信息化技术

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.016

0 引言

目前我国河道防洪治理正由单一防洪向综合整治转变, 但是部分区域施工效率低、技术与地形匹配度不高、生态协同性差。因此, 对水利河道防洪治理施工技术的应用进行深入研究, 通过创新策略来解决工程中的难点问题, 达到施工质量、防洪效能、生态效益、长效运行的有机统一, 是水利工程领域的重要研究课题, 对于完善防洪治理体系、保障社会经济的稳定发展具有十分重要的意义。

1 水利河道防洪治理的背景与发展现状

全球气候变暖引发的极端降雨事件频发, 使河道洪涝灾害风险加大, 给沿岸居民的生命财产安全以及区域生态环境带来严重的威胁。我国河道水系复杂, 部分河段由于年久失修、淤积严重, 加上传统治理技术的局限性, 防洪标准低、生态功能退化等问题越来越突出。近些年, 随着水利强国战略的推进, 河道防洪治理进入转型升级期, 治理理念从“被动防御”到“主动管控和生态协同”, 施工技术逐渐向着智能化、绿色化、精准化的方向发展^[1]。但是目前还存在区域发展不平衡、技术匹配度不高、生态保护与工程建设衔接不紧密等问题, 急需依靠改善施工技术的应用来提高防洪治理的综合效能和可持续性。

2 水利河道防洪治理施工技术的应用价值

2.1 提升防洪工程施工效率与施工质量

防洪工程施工效率和质量直接决定着河道防洪治理成败, 先进施工技术应用的核心价值在于突破传统

施工的瓶颈, 达到效率与质量双重提高的目的。传统的河道清淤、堤坝修筑大多依靠人工和常规设备, 施工周期长、劳动强度大, 而且受人为操作误差的影响, 工程质量很难准确控制。液压抓斗清淤技术、模块化堤坝浇筑技术等新型工艺的使用, 大大缩短了施工工期, 模块化构件可以提前预制, 现场快速拼装, 比传统现浇工艺效率提高40%以上。同时, 精准化施工技术的应用可以控制施工误差, 激光找平技术在堤坝基础施工中的应用, 把基础平整度误差控制在毫米级, 提高了堤坝结构稳定性。另外, 技术升级促使施工程序更加标准化, 在各个工序的技术参数和质量控制点上都做出明确的规定, 从而减少施工过程中存在的质量隐患, 保证防洪工程达到设计防洪标准, 为之后的工程运行安全打下基础。

2.2 增强河道防洪能力与灾害风险控制水平

增强河道防洪能力、降低灾害风险是防洪治理施工技术的核心目标, 技术的科学应用可以从河道行洪能力、灾害应对韧性等多方面提升风险管控水平。河道行洪能力不足、堤坝防洪标准偏低是洪涝灾害频发的主要原因, 通过生态护岸技术、河道拓宽清淤技术等的应用, 可以改善河道断面形态, 清除行洪障碍物, 提高河道行洪流量。生态格网护岸技术相比于传统的浆砌石护岸, 在保证岸坡稳定的同时, 不会占用过多的河道行洪断面, 而且有良好的透水性和抗冲性, 能够抵御瞬时暴雨造成的高水位冲击。同时, 施工技术的升级可以提高灾害风险的预测和应对能力, 在堤坝施工中采用防渗加固技术, 用高压喷射注浆形成连续

作者简介: 王飞翔(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

防渗墙,有效阻断堤坝渗漏通道,降低管涌、溃坝等风险^[2]。结合施工过程中地质勘察技术,可以准确识别出河道周边地质隐患点,提前做好加固处理工作,形成主动防御和应急应对相结合的双重风险控制体系,最大程度地减少洪涝灾害造成的损失。

2.3 改善河道环境与生态保护的协调性

新时期河道防洪治理不再局限于单一的防洪功能,而是追求工程建设和生态保护的协同发展,施工技术的创新应用为生态环境的改善提供重要的支撑。传统的防洪施工大多采用硬质护岸、大范围土方开挖等方法,破坏了河道原生生态系统,造成水体自净能力下降、生物多样性减少。绿色施工技术的应用很好地解决了这一矛盾,使防洪治理和生态保护良性互动。生态袋护岸技术用可降解材料填充土壤和植被种子,既能满足岸坡加固的需要,又能促进植被的生长,形成自然生态岸线,为水生、陆生生物提供栖息环境。同时,施工过程中清淤淤泥无害化处理技术,可以将清淤产生的淤泥经脱水、固化处理后变成绿化用土,减少淤泥堆放对周围环境的污染,实现资源循环利用。施工技术的改进可以减小对河道水体的扰动,采用分段施工、围堰防护等方法,减少施工期间泥沙进入河道的数量,保证河道水质的稳定,促进河道生态系统修复和可持续发展。

2.4 支持水利工程可持续发展与长期运行安全

传统的施工技术由于材料耐久性差、结构设计不合理等原因,使得工程运行一段时间后容易出现堤坝开裂、岸坡冲刷、防渗性能下降等病害,不但会增加后期维修的成本,还会降低防洪的效能。先进施工技术与新型材料的结合,可以大大提高工程耐久性、抗老化能力,高性能混凝土在堤坝浇筑中的应用,抗渗性、抗冻性比普通混凝土提高 30% 以上,可延长工程使用寿命。施工期间对工程结构的优化设计,采用复合式堤坝结构,防洪、防渗、生态等多功能兼顾,提高工程运行稳定性、适应性^[3]。另外,施工技术与后期运维的衔接,在施工中预留监测点位、植入智能化监测设备,给后期工程运维提供精准的数据支撑,及时发现并处理运行隐患,保证水利工程长期稳定运行,实现水利工程的可持续发展。

3 水利河道防洪治理施工技术的应用策略

3.1 优化施工方案设计,实现技术与地形条件匹配

施工方案设计是防洪治理工程前期的关键部分,其科学与否直接影响技术应用成效及工程总体质量,

要依照地形状况精确改良,实现技术与实际场景的高效匹配。不同河道地形差异较大,山区河道坡陡流急、岸坡不稳定,平原河道地势平缓、易淤积,如果使用统一的施工方案,容易造成技术应用不匹配、工程效果不好。因此,在方案设计阶段要根据高精度地形勘察数据来建立三维地形模型,准确分析河道断面形态、岸坡坡度、地质构造等主要参数,有针对性地选择施工技术与工艺^[4]。山区河道以柔性护岸技术、边坡锚固技术为主,兼顾抗冲性、岸坡稳定性,防止由于地形陡峭造成的岸坡坍塌;平原河道以清淤技术、堤坝修筑方案优化为主,采用水力冲挖清淤技术提高清淤效率,根据地形特点设计梯形堤坝结构,提高防洪能力。方案设计还要统筹施工工序衔接,合理规划施工分区和进度,避免地形限制造成的施工冲突,保证技术应用有条不紊地进行,最大程度地发挥技术优势,提高工程的适用性、实用性。

3.2 引入新型施工设备与智能化施工管理技术

新型施工设备及智能化管理技术的引入,是防洪治理施工转型升级、提升工程管控水平的重要途径,可以有效地克服传统施工效率低、精度不高、管控滞后等缺点,使工程施工高效、精准、标准化。施工设备方面要逐步淘汰传统人工辅助机械,针对核心工序的特点,引入大型智能化清淤船、液压模块化拼装设备、高压喷射注浆机、无人化巡检设备等,大幅度提高核心工序的作业效率和精度。智能化清淤船装有水下声学探测、GPS 定位、自动作业系统,可以准确地识别出河道各个区域淤泥的厚度、成分分布,从而实现定点、定量清淤作业,比传统的绞吸式清淤设备效率提高 50% 以上,并且可以精准控制作业范围和深度,减少对河道底栖生物栖息地的扰动,兼顾施工效率和生态保护。在智能化管理方面,创建覆盖施工全过程的智能化管理平台,把 BIM 技术、物联网技术和大数据分析技术深度融合;创建“数据采集—模拟分析—精准管控”的闭环体系,从而实现施工流程的可视化、数字化管控。利用 BIM 技术创建工程全专业三维模型,准确模拟施工工序衔接、设备调度、场地布置,提前预判交叉施工冲突、结构受力隐患等问题,优化施工方案和资源配置;采用物联网传感器对施工设备运行参数、混凝土浇筑强度、堤坝沉降等重要数据实施实时采集,通过大数据平台加以分析处理之后,实现异常情况的即时预警,进而及时对施工策略作出调整。另外,采用智能化人员管理系统,按照工序要求合理安排施工

人员,明确各个岗位的责任、技术标准、考核要求,消除了信息传递的障碍,提高了施工团队的协作效率,从而形成设备智能化、管理数字化的施工模式,使防洪治理工程实现智能化、精细化的发展。

3.3 结合河道生态与环境要求实施绿色施工

践行绿色施工理念,兼顾河道生态保护和环境管控要求,是新时期防洪治理施工摒弃传统粗放模式、实现生态与工程协同发展的主要方向,需要把生态保护理念贯穿施工前期勘察、中期作业、后期修复全过程,构建施工不破坏、完工快修复的生态友好型施工体系。

施工前期专项开展河道生态环境勘察评估,利用遥感技术和实地调研相结合的方式,准确确定河道周边的敏感生态区、珍稀水生生物栖息地、原生植被分布区等保护重点,根据勘察结果优化施工路线、分区及时序,优先避开生态敏感时段和区域,采用分段施工、错峰作业的方式,最大限度减少施工对生态环境的占用和破坏。

施工期间严格执行污染防控措施,全面使用低噪音、低排放、节能型施工设备,配备隔音围挡、废气净化装置等辅助设施,降低施工噪声和废气对周边环境的影响;施工废水和生活污水配套建设一体化污水处理设施,经过沉淀、过滤、消毒处理达标后再排放,严禁未经处理的污水直接排入河道,保证水体质量稳定。同时,大力推广生态友好型施工技术,替代传统硬质护岸、露天开挖等高污染工艺,采用植草混凝土护岸、生态袋堆叠、生态浮岛搭建等技术,在保证岸坡稳定性和防洪功能的同时,给水生、陆生物提供栖息空间,促进河道生态系统修复;施工产生的建筑垃圾和清淤淤泥进行分类存放、专项处理和资源化利用,建筑垃圾经破碎筛分后用作路基回填、垫层铺设,淤泥经脱水、固化、无害化处理后用作生态绿化用土,既减少了资源浪费,又降低了固废堆放对环境的压力^[5]。

在施工后期开展生态修复工程,以本土植被品种为主,在堤坝周边、河道岸线构建复合型植被群落,修复河道原生生态系统,提升水体自净能力、生态承载力,实现防洪达标、生态优良、环境协调三重目标。

3.4 推进信息化技术在施工监测与管理中的应用

信息化技术在施工监测和管理中广泛应用,是提高防洪治理工程管控精度、保证施工安全的重要手段,可以实现施工全过程实时监测、精准控制、高效调度。

施工监测中创建多维信息化监测系统,把传感器技术、GPS定位技术、远程传输技术结合在一起,对堤坝沉降、岸坡位移、防渗性能、河道水位等关键指标实行实时监测。在堤坝、岸坡等重要部位布置高精度传感器,实时采集监测数据,经由远程传输系统上传到监测平台,用大数据技术分析处理数据,精确识别施工隐患,如堤坝沉降异常、岸坡位移超标等,及时发出预警信号,给施工调整提供数据支撑。施工管理依靠信息化平台开展施工进度、质量、成本一体化的控制,及时更新施工进度数据,比较计划进度和实际进度,适时调整施工安排,借助信息化手段展开质量追溯,记录各个工序施工数据和质量检测结果,保证工程质量可追溯、可控制,还要利用信息化平台进行施工资源的动态调配,合理调配施工设备、材料、人员,提高资源利用效率,降低施工成本。信息化监测数据可以给后期工程运维提供基础数据,实现施工与运维的信息化衔接,保证工程长期运行的安全。

4 结束语

水利河道防洪施工技术创新和优化应用,是提高防洪工程综合效益、推进水利行业绿色可持续发展的主要支撑。本文从应用价值和策略两个方面对施工技术在效率质量提升、风险控制、生态保护、长效运行等方面所起的积极作用做了详细的论述,并提出了适配地形、智能赋能、绿色施工、信息化管控等优化途径。经过实践检验,只有将先进的施工技术与工程实际、生态要求、管理要求相结合,才能达到防洪治理工程安全、高效、生态、长效的目的。

参考文献:

- [1] 鹿晓艺.水利工程河道防洪现状及治理措施[J].新农村,2024(21):49-51.
- [2] 马金焕.农村水利工程河道防洪现状及治理措施探究[J].农业开发与装备,2024(06):107-109.
- [3] 许琳林.北票市东官营子河道治理探究[J].水与水技术,2024(00):136-141.
- [4] 王金松,程源.浅谈清流河防洪治理规划总体布局[J].治淮,2023(12):67-68.
- [5] 吴生荣.浅谈水利工程河道防洪现状及治理措施[J].水上安全,2023(07):107-109.

软土地基深基坑开挖施工技术及支护分析

吴 琼

(江苏省地质局第一地质大队, 江苏 南京 210041)

摘 要 软土地基因具有高含水量、高压缩性、低承载力及强触变性等工程特性, 给深基坑支护与开挖施工带来诸多技术难题, 易引发基坑失稳、周边建筑物沉降开裂、地下管线破坏等安全事故。本文以软土地基深基坑工程为研究对象, 阐述了软土地基深基坑支护及开挖施工技术研究的工程意义, 分析当前施工过程中存在的问题, 并提出软土地基深基坑支护及开挖施工技术优化措施, 旨在为相关工作人员提供参考。

关键词 软土地基; 深基坑; 支护技术; 开挖施工

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.017

0 引言

软土地基在我国沿海、沿江等地区分布广泛, 此类地基土的工程性质复杂, 承载能力弱且变形量大, 在深基坑支护与开挖过程中, 若施工技术不当或控制措施不力, 极易导致基坑支护结构变形过大、坑底隆起、周边土体不均匀沉降等问题, 进而威胁临近建(构)筑物、地下管线及道路的安全稳定。因此, 系统开展软土地基深基坑支护及开挖施工技术研究, 解决当前施工中存在的技术瓶颈, 优化施工工艺与控制措施, 对于保障深基坑工程施工安全、提高工程质量、降低工程风险具有重要的现实意义和工程应用价值。

1 软土地基深基坑开挖施工技术及支护工程意义

1.1 筑牢工程施工安全防线

软土地基具有高含水量、低抗剪强度的显著特性, 深基坑开挖时极易引发土体滑移、坑底隆起、支护结构失稳等安全风险^[1]。科学规范的支护与开挖施工技术能够有效平衡基坑周边土体应力, 抑制坑周土体过量位移, 避免支护结构因受力失衡发生倾覆或破坏。通过精准控制施工流程与技术参数, 可从源头降低基坑坍塌等安全事故发生概率, 为施工人员、设备及工程整体施工过程提供坚实的安全保障, 是深基坑工程顺利推进的核心前提。

1.2 守护周边环境稳定安全

城市深基坑工程多紧邻既有建筑物、地下管线、城市道路等重要设施, 软土地基的不均匀沉降对周边环境敏感度极高。合理的支护与开挖技术能有效控制土体变形速率与沉降量, 避免因基坑施工导致周边建筑物开

裂倾斜、地下管线断裂、道路塌陷等问题。通过减少施工对周边岩土体的扰动, 维持区域地层力学平衡, 保障城市基础设施正常运行, 减少施工对居民生活与城市交通的不利影响, 实现工程建设与周边环境的和谐共存。

1.3 夯实工程建设质量根基

深基坑施工质量直接决定后续主体结构的稳定性与耐久性, 软土地基的复杂性对施工精度与工艺要求更为严格。规范的支护施工可确保支护结构承载能力与变形控制符合设计标准, 精细化的开挖工艺能避免坑底土体结构破坏, 保障地基承载力满足工程要求。通过严格控制支护结构施工精度、基坑开挖平整度及降水效果, 为后续主体结构施工创造良好条件, 有效提升工程整体建设质量, 延长建筑物使用寿命, 降低后期维修养护成本。

2 软土地基深基坑开挖施工技术及支护存在的问题

2.1 支护结构选型缺乏针对性

当前部分软土地基深基坑工程在支护结构选型时, 未能充分考虑软土地层的具体特性、基坑开挖深度、周边环境条件等因素, 存在盲目选型的问题^[2]。例如: 在含水量高、抗剪强度低的淤泥质软土地层中, 单纯采用土钉墙支护, 由于土钉与土体的粘结力不足, 难以有效控制基坑变形; 而对于开挖深度较大、周边建筑物密集的基坑工程, 若选用支护刚度不足的钢板桩, 易导致支护结构变形过大, 威胁周边环境安全。

2.2 开挖施工工艺不够优化

软土地基深基坑开挖施工工艺的合理性直接影响基坑的稳定性。目前, 部分工程在开挖过程中存在开

作者简介: 吴琼(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水工环地质勘察。

挖顺序不合理、开挖速度过快、超挖现象严重等问题。在开挖顺序方面,未严格遵循“分层开挖、分层支护”的原则,一次性开挖深度过大,导致基坑周边土体应力集中,加剧了土体变形;在开挖速度方面,盲目追求施工进度,开挖速度超过土体的应力调整速度,使得支护结构未能及时发挥作用,增加了基坑失稳的风险;超挖现象的存在,破坏了坑底土体的原始结构,导致坑底隆起量增大,同时也增加了支护结构的受力负担。

2.3 变形控制与监测体系不完善

在软土地基深基坑施工过程中,基坑变形和周边土体沉降是必然现象,有效的变形控制和监测是保障工程安全的重要手段。当前部分工程在变形控制方面缺乏有效的技术措施,未能根据基坑变形的实际情况及时调整施工参数和支护措施,导致变形量超过允许值。在监测体系方面,存在监测点布置不合理、监测频率不足、监测数据处理不及时等问题。监测点布置过于稀疏,难以全面反映基坑变形和支护结构受力的真实情况;监测频率不符合规范要求,无法及时捕捉基坑变形的动态变化;监测数据处理不及时,不能为施工决策提供及时有效的参考,导致无法及时发现工程隐患,错过最佳的处理时机。

3 软土地基深基坑开挖施工技术及支护优化措施

3.1 支护结构精准选型与参数优化

支护结构的合理性直接决定软土地基深基坑的稳定性,需基于地质勘察数据、基坑深度及周边环境进行精准选型^[3]。对于浅层软土分布区域、开挖深度小于6 m且周边无重要构筑物的基坑,可选用土钉墙与喷锚联合支护形式,通过增强土体粘结力控制浅层变形;开挖深度6~12 m的基坑,宜采用水泥土搅拌桩挡墙,利用其整体性强、防渗效果好的优势适配软土高含水量特性;深度超过12 m或临近建筑物、隧道的基坑,应优先选用地下连续墙或SMW工法桩结合内支撑体系,提升支护刚度以限制大变形。同时,需严格把控关键参数:基坑与临近建筑物桩基间距 L/B' 应大

于1.4,避免整体失稳和倾覆破坏;支挡结构嵌固深度 D/B' 需根据失稳类型调整,整体失稳控制在0.8以上,倾覆失稳不小于0.7,坑底隆起失稳则需维持在0.4以上,通过参数优化实现支护结构与软土地基特性的精准匹配。

3.2 分层分段开挖与动态降水协同技术

软土地基开挖需严格遵循“分层开挖、先撑后挖、限时闭环”原则,避免土体应力集中引发失稳^[4]。开挖分层厚度应控制在2 m以内,分段长度不超过15 m,优先开挖基坑周边土体再推进至中心区域,每层开挖完成后48小时内必须完成对应层支护施工,减少土体暴露时间。针对软土高含水量特点,采用动态降水技术,通过管井或轻型井点降水系统,将地下水位控制在基坑底以下0.5~1.0 m,降水过程中实时监测水位变化速率,避免单口水位降幅超过0.5 m导致周边土体不均匀沉降。结合江北新区地层特性,对于淤泥质粉质黏土与粉土互层区域,可采用“分层降水+水平止水帷幕”组合方案,在基坑周边设置水泥土搅拌桩止水帷幕,渗透系数控制在 10^{-6} cm/s以下,有效阻断地下水渗透路径,配合分层开挖形成协同防护体系,降低坑底隆起和土体滑移风险。

3.3 变形监测与安全预警智能化升级

构建全维度智能化监测体系是软土地基基坑施工的关键保障,需覆盖基坑变形、支护结构受力及周边环境三大核心监测对象^[5]。监测点布置应遵循“重点区域加密、全域覆盖”原则,在基坑转角处、临近建筑物侧等关键部位,沉降监测点间距加密至5 m,支护结构水平位移监测点每10 m设置一处,同时在周边建筑物基础及地下管线上布设监测点,实现数据全面采集。监测频率根据施工阶段动态调整,开挖期间每日监测1~2次,支护完成后每3日监测1次,数据异常时加密至每2小时1次。通过物联网技术将监测数据实时传输至智能分析平台,结合预设预警阈值实现分级预警,具体预警标准如表1所示。

通过智能化监测与分级预警,实现风险的早发现、早处置,避免变形累积引发安全事故。

表1 预警标准

监测项目	预警阈值	报警阈值	应急处置措施
支护结构水平位移	≥ 10 mm	≥ 15 mm	暂停开挖,加密支撑或注浆加固
周边地面沉降	≥ 8 mm	≥ 12 mm	调整降水参数,增设沉降隔离桩
桩侧土压力	达到设计值的80%	达到设计值的90%	检查支护结构完整性,必要时增加内支撑
坑底隆起量	≥ 5 mm	≥ 8 mm	采用沙袋堆载反压,加固坑底土体

3.4 坑底加固与周边环境防护补强措施

针对软土地基承载力低、坑底隆起风险高的问题,采用坑底加固技术提升地基稳定性。对于开挖深度超过 10 m 的基坑,坑底采用高压旋喷桩加固,加固深度为基坑开挖深度的 0.5~0.8 倍,桩径 600 mm,桩间距 1.2 m,加固后土体承载力特征值提升至 120 kPa 以上,有效抑制坑底隆起。临近既有建筑物或隧道的基坑,在基坑与构筑物之间设置隔离防护带,采用水泥土搅拌桩形成隔离桩墙,桩长超出基坑底 3 m,阻断土体变形传递路径。对于既有隧道周边基坑,根据基坑等级控制安全保护距离,一级、二级基坑保护距离不小于基坑开挖深度 H,三级基坑不小于 0.5 H,基坑深度超过 20 m 时调整为 0.8 H,同时对隧道侧壁采用注浆加固,增强隧道抗变形能力。通过坑底加固与周边防护的双向补强,形成立体防护体系,保障基坑与周边环境的双重安全。

4 典型案例分析

4.1 基本概况

本案例选取南京江北新区某滨江地下综合体项目的深基坑工程,该项目地处江北新区核心区域,是区域地下空间开发“一心、三轴、多点”布局中的重要节点工程,主要承担地下交通换乘、商业配套及市政管廊等功能。工程基坑开挖深度 18 m,占地面积约 12 000 m²,属于一级基坑工程。场地工程地质条件复杂,分布的土层自上而下依次为 1 层填土(厚度 1.5~3.0 m)、②1b2-3 粉质黏土(厚度 2.0~4.5 m)、②2b4 淤泥质粉质黏土(厚度 3.5~6.0 m,天然含水量 41%,压缩系数 1.05 MPa⁻¹,抗剪强度 11 kPa)、②2bd 粉质黏土与粉土互层(厚度 4.0~5.5 m)、②2d3 粉细砂(厚度 3.0~4.2 m),下部为②3d1-2 粉细砂及②4e 卵砾石层。场地地下水位埋深 1.2~1.8 m,水量丰富,地层透水性强,浅部软土具有高含水量、高压缩性、低承载力的典型特征。基坑周边环境敏感,北侧 5~8 m 处为既有桩基础建筑物(6 层框架结构),东侧 12 m 处分布有地下综合管廊,西侧紧邻城市主干道,南侧距离既有地铁隧道约 15 m(基坑深度 H=18 m,安全保护距离按 H 控制),周边构筑物对土体变形敏感度高,需严格控制基坑施工引发的沉降与位移。

4.2 工程实施效果

该工程通过科学适配的支护体系、精细化施工工艺及全维度监测预警机制,实现了基坑本体与周边环境的双重安全管控,整体实施效果显著。施工全过程基坑

未出现整体失稳、倾覆破坏等风险,坑底最大隆起量仅 7 mm,远低于设计控制值,支护结构最大水平位移为 11 mm,符合安全预警标准,且变形规律与软土地基深基坑变形特征一致,验证了支护方案的合理性。周边环境变形得到有效控制,既有建筑物最大沉降量 16 mm,地下综合管廊最大沉降 8 mm,地铁隧道最大变形 5 mm,均未超出规范允许限值,未引发建筑物开裂、管廊渗漏等问题,邻近建筑物桩基水平位移最大 6 mm,桩侧土压力处于设计安全范围内,成功规避了基坑施工对周边构筑物的不利影响。同时,地下水控制成效突出,通过“管井降水+水平止水帷幕”协同方案,地下水位平稳降至基坑底以下 1.0 m,未出现管涌、流砂等不良地质现象,基坑内干燥无积水,为开挖施工创造了良好条件,实现了基坑稳定性、周边环境安全性与施工效率的协同达标。

5 结束语

软土地基深基坑支护与开挖施工的核心在于破解软土高含水量、高压缩性、低承载力带来的技术难题,实现工程安全与周边环境稳定的双重保障。本文通过分析软土地基深基坑施工的工程意义与现存问题,从支护结构选型、开挖降水工艺、变形监测预警及防护补强四个维度提出优化措施,构建了针对性强、可操作性高的技术体系。南京江北新区工程案例的实践成效表明,科学适配的支护方案、精细化的施工管控与智能化的监测预警,能够有效控制基坑变形、规避失稳风险,实现工程建设与周边环境的和谐共存。未来,需进一步结合地质勘察精度提升与数字化施工技术创新,持续优化软土地基深基坑施工技术体系,为类似工程提供更具针对性的技术参考,推动深基坑工程向安全、高效、绿色的方向高质量发展。

参考文献:

- [1] 汪炳仙.软土地基深基坑支护设计的相关探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024(33):26-28.
- [2] 杨伟.深基坑支护施工技术在建筑工程中的实践探究[J].居业,2024(10):40-42.
- [3] 周孙桐.软土地基深基坑支护及开挖施工技术分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(08):75-77.
- [4] 郑剑杰.软土地基地下调蓄池深基坑设计研究[J].城市道桥与防洪,2024(07):294-298,31.
- [5] 张开勇.建筑工程深基坑支护施工的关键技术探究[J].建材发展导向,2024,22(13):95-97.

黄河干流堤防加固关键技术与施工方法研究

马红旭, 陈思豫

(济南黄河河务局长清黄河河务局, 山东 济南 250300)

摘 要 黄河干流堤防需承担起防御高水位长期浸泡和强河势摆动的双重压力, 因此堤防加固的系统研究具有重大的现实意义。本文围绕渗控、安全稳定、河势适应三个主要要求, 建立防渗屏障、堤身固结、坡脚支挡、水沙调控等关键技术体系, 提出与之相适应的联动防渗、分层压实、阶式支护、水沙管控施工方法。通过技术链和施工链的协同组织, 可以明显提高堤防抗渗能力、整体强度以及复杂河势条件下适应性, 以期为黄河干流堤防的长效稳定运行提供技术参考。

关键词 黄河干流; 堤防加固; 防渗技术; 堤身结构; 水沙调控

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.018

0 引言

黄河干流堤防在高含沙水流、大流量调度、复杂河势的共同作用下, 长期处于渗流发育、堤身强度不足、岸坡失稳等风险之中, 加固任务具有连续性、复杂性。为了形成结构稳固、功能完备、运行安全的堤防工程体系, 就要从风险控制、结构提高、河道适应三个方面来综合研究关键技术与施工方法^[1]。以本研究的逻辑框架为依据, 提出成体系的技术构建与实施路径, 为黄河防洪工程的高质量提升提供依据。

1 黄河干流堤防加固要点

1.1 控制渗流通道风险

黄河干流水沙含量高、堤基多呈粉质黏土与砂层夹杂结构, 渗流通道形成具有隐蔽性和突发性, 在高水位持续顶托的情况下更易产生管涌、流砂等险情。因此堤防加固要将识别和控制渗透路径作为基本要点, 掌握堤基层间的差异和透水性的变化规律, 明确潜在渗透压力集中区和薄弱带的分布特征^[2]。只有整体认识渗透机制以及黄河独特的水沙动力背景, 才能保证堤防在长时间高水位作用下保持稳定。

1.2 提升堤身整体强度

黄河干流堤身大多为历史年代填筑, 成分差别较大, 结构缺陷和局部松散普遍存在, 高流量调度时承载需求大幅提高。堤身整体强度的提高是堤防安全的关键, 应考虑土体天然抗剪能力、密实度以及层间结合情况等内在力学性质。多年水流冲刷、干湿循环影响下堤身强度衰减具有累积性, 加强对材料均质性、

结构完整性认识, 是保证堤体抵御洪水压力的基础。

1.3 完善险段稳定构造

黄河干流河势变化无常, 局部岸坡容易受到冲刷、淘刷、浸润线抬升的影响, 造成堤脚区稳定性降低, 险段分布具有集中性、持续性。加固要点就是掌握堤坡力学平衡关系和失稳模式特征, 主要是滑移面发展趋向、坡脚应力分布以及洪水期地下水位变化带来的潜在影响。准确找出影响稳定性的主要结构因素, 堤防在复杂的水动力条件下就不会出现整体形态被破坏的情况^[3]。

1.4 强化河势演变适应

黄河有“水沙共律”的特点, 河槽摆动频繁, 滩区形态变化大, 堤防要具备适应河势演变的能力。加固要点是注意主槽摆动趋势、过流分配变化、床面冲淤调整对堤线安全空间的影响。河势转折、过水断面变化、高含沙洪水过程都会造成局部冲刷集中或者滩地抬升, 给堤防安全造成长期压力。加强堤防同河道演变关系的系统认识, 是保证加固工程具有前瞻性、长期稳定性的基础。

2 黄河干流堤防加固关键技术

2.1 深层防渗屏障构建

深层防渗屏障技术针对黄河干流堤基渗透性大、层间结构差异大的实际情况, 其关键之处在于创建一条贯穿渗流通道、具备足够延性和整体性的截水体系^[4]。黄河堤基常由粉土、粉砂和细砂等颗粒级配差别很大的组合构成, 垂向和水平方向渗透系数相差可

作者简介: 马红旭 (1996-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 黄河防汛、水利工程建设与运行管理。

达 1 到 3 个数量级, 使洪水期渗流线在堤基内部容易发生偏折和集中。防渗屏障的形成要依照“非均质渗流场”的特性, 以地下连续墙、塑性混凝土墙或者深层搅拌墙作为主要结构, 经由连续成槽或者原位搅拌来形成完整的隔断体。

技术要点: 包括屏障厚度、深度、贯通性要与渗流主通道位置相匹配, 使屏障延伸到相对低渗透层; 屏障材料的渗透系数一般控制在 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/s 之间, 满足高水头条件下的安全要求; 材料的变形模量不能过大, 以适应黄河河床沉降和堤基湿陷后的变形。施工上成槽质量连续性、垂直度和接头密实性决定屏障能否形成封闭结构。在监测上, 布设渗压监测点、分析洪水期渗透压力变化可以判断是否形成有效的水力阻隔面。深层防渗屏障技术的本质就是改变堤基水力梯度分布, 使渗流通道被迫延长、压降重新分配, 从而降低管涌和渗透破坏发生的可能性, 给堤防提供长期、稳定的渗控基础。

2.2 堤身结构固结增强

堤身结构固结增强技术的提出, 是考虑到黄河干流堤身材料复杂、密实度不同、长期受干湿循环影响导致强度衰减的特点。堤身提升的关键技术逻辑就是改善颗粒接触状态、加大有效应力、提高抗剪强度, 使堤体整体形成均质、连续、抗变形能力强的结构体系^[5]。黄河堤身常有粉质黏土和砂性土的不均质填筑层, 其天然抗剪强度小于水位长期上涨后的要求, 所以固结技术要包含力学性能恢复、结构性强化和压实度控制这三个方面。

固结增强体系一般以土体改良和结构重构为依托。水泥土固化、堤身补强填料、分层压实等常用方法的技术机理都是提高土体颗粒间的胶结度, 使抗压强度呈稳定增长。典型的固化体系无侧限抗压强度一般在 0.8 MPa 到 1.5 MPa 之间, 这是工程规范里常用参考值。同时, 堤身加固要达到压实系数要求, 使填土层之间没有结构性弱带; 控制含水率使固结后的土体在洪水浸泡期不发生软化, 是固结技术成败的关键条件之一。

从堤体工作机理上来说, 固结增强技术可以使浸润线抬升之后堤体有效应力下降幅度被抑制, 滑动面形成的可能性大大降低; 同时由于堤身内部结构均匀化, 侧向变形和沉降趋于一致, 有利于保持堤防整体线形的稳定。该技术重视材料力学性质、压实工艺、结构连续性的统筹, 使堤身在高水位、强河势的条件下保持稳定的承载能力。

2.3 坡脚稳定支挡体系

坡脚稳定支挡体系源于黄河干流岸坡受淘刷、渗流逸出和浸润线波动三者共同作用, 使坡脚区域最容

易形成剪切弱面和位移集中区, 因此堤防稳定的关键在于建立可以阻止滑动、分散侧向力并保持渗流平衡的支挡结构体系。支挡体系的设计逻辑要兼顾抗滑、抗冲、渗控这三个功能, 使堤坡在洪水的长期作用下保持整体稳定。

支挡体系一般包括反滤层、防冲构造和支挡结构三类。反滤层依靠合理的骨料级配, 使渗透梯度在坡脚处平缓过渡, 防止细颗粒被渗流带走, 这是黄河堤防最基本的渗控条件。防冲构造可以采用护砌、块体或者连续性材料, 其作用是抵御高含沙水流局部集中冲刷, 保持坡脚原有地形不被削弱; 冲刷深度的预测可以用水力学模型进行分析, 使防护范围覆盖最大潜在冲刷线以下一定深度。支挡结构如抗滑构造、支护墙或者加固体, 其力学作用是提供附加抗滑力, 使潜在滑面的安全系数满足设计要求。

2.4 河道水沙协同调控

河道水沙协同调控技术是黄河干流堤防加固体系当中具有河道整体性意义的重要技术之一。黄河有“水沙共律”特征, 水沙组合关系决定过水断面形态, 断面变化直接决定堤线安全空间和堤身受力条件。堤防的安全不单依靠堤体结构本身, 也依赖河槽形态是否能保持相对稳定。因此, 水沙协同调控的技术重点就是协调来水过程、来沙过程和河床冲淤反应, 使河道形态保持在可控范围内。

水沙协同调控的技术机制为调节水量、含沙量的组合来影响主槽流速、紊动特性, 控制河段内水力条件, 使冲刷能力不出现局部异常集中, 根据河床演变规律分析冲淤趋势对堤线安全的影响。河床冲刷深度分析、水流挟沙力计算、过水断面调整规律等可以通过水力模拟和物理模型试验来获得, 可以用来判断堤防所面临的风险。

3 黄河干流堤防加固施工方法

3.1 多工法联动防渗施工

多工法联动防渗施工是在一个防渗目标下综合使用成槽、搅拌、灌注等工法, 使地下防渗体系形成完整、连续、适应性强的结构。施工组织一般按照堤基地层结构的不同来设置工法分区, 使深层连续墙、旋喷桩墙或者固化搅拌墙根据水力条件和土体类别合理组合。在粉土和粉砂层混杂段, 成槽机先形成主槽体, 再采用渗透系数一般达到 10^{-7} cm/s 级别的低渗透材料均匀浇筑, 保证截水墙连续; 局部透水性较强的细砂段, 用高压旋喷形成三重管搅拌体, 水泥浆液在孔隙中均匀扩散并与土体充分混合, 弥补槽段接缝处可能出现的薄弱带。

施工期间联动控制为关键。不同的设备要保持施工节奏一致,使截水体在空间上没有断点、无缝隙;槽段闭合时,接头位置用专用止浆结构保证密实。完工后,用超声检测或者取芯试验来检验墙体的均质性;渗压监测点用来分析成墙前后水力梯度的变化,检验施工质量。多工法联动的本质就是适应复杂堤基结构,利用工法互补来提高整体防渗能力,在水位较高的情况下保持截水体系结构的完整性。

3.2 分层填筑压实成型法

分层填筑压实成型法适合堤身结构加固期,核心施工逻辑就是通过严格控制材料含水率、分层厚度和压实能量,使堤身形成均质化结构。施工开始阶段先对堤身填料进行筛分、含水率检测,使材料性能符合压实要求。填筑厚度一般控制在20~30 cm,推土平整后进入压实阶段。压实设备根据堤身材料选择,黏性土一般采用羊脚碾,砂性土一般采用振动碾,使压实能量充分作用于土体内部。

压实过程中要实时检测压实系数,使其达到工程规范要求的取值范围(0.93~0.95区间为常见指标范围),并用环刀试样或者轻便触探进行密实度复核。层间结合是保证整体性的重要环节,施工中要避免形成光滑层或隔离层,因此必须控制含水率使其接近最佳含水率附近,使压实后的土体抗剪能力不致减弱。

成型后的堤身要进行形态复核,即堤顶标高、坡比、横断面线形等是否符合设计要求。分层填筑压实成型法施工效果体现在堤身强度提高、变形协调性增强、浸润线抬升时稳定性改善,是堤身固结增强技术的直接落地方式。

3.3 阶式排力支护施工法

阶式排力支护施工法主要用来改善堤坡受力结构,提高堤坡的稳定性。施工方法的核心就是将堤坡分为若干阶梯形台阶,用支护结构把堤坡的侧向推力逐级传递和分散,减小潜在滑动面的剪应力集中。施工布置一般包括台阶开挖、反滤层铺设、支护体施工、坡面整形四个过程。

台阶宽度和高度根据堤坡坡比、土体强度、稳定计算结果确定,使开挖后的坡体有足够的系数。在台阶底部铺设反滤层,来控制由于坡脚渗流逸出而造成的颗粒流失风险。支护结构可以采用浆砌体、混凝土构造或者加筋土结构,施工时需要保证界面粘结牢固,不能产生结构性弱面。

排力过程的实现依靠阶式结构的逐级分担作用,各个台阶的支护体凭借自身的刚度来抵抗坡体的水平应力,从而使得潜在的滑移面应力重新分布。施工中

需要用测斜仪和表面位移监测手段跟踪边坡变形,来判断支护效果。阶式排力支护施工法的意义在于用几何分割和结构支撑共同作用,使堤坡在高水位、快速退水、渗流耦合作用下仍然保持足够的稳定。

3.4 联动调度水沙管控法

联动调度水沙管控法属于堤防加固后河道协同施工方法,其实质就是对水量、水位、含沙量、流速等参数进行综合调度,使堤防所处河段的冲淤平衡保持在可控区间。施工组织要按照水动力模拟结果来调节调度策略,使得不同来水来沙组合情况下流场结构稳定,不会出现局部强冲刷作用集中到堤脚区域的情况。

调度方法一般包含三类联动作业:控制水量变化梯度防止水位快速上升造成渗流压力突然增大;调节含沙量结构改变输移沉积模式,使主槽不发生异常摆动;结合河道断面特征通过调控流量分配保持过水断面稳定。施工期和运行期要通过断面测深、流速剖面测量、含沙量取样等方式不断监测河槽状态。

水沙管控施工的关键是使河道动力过程和堤防结构相匹配,使堤线附近的水力条件稳定、冲刷深度没有大的变化。联动调度水沙管控法不是依靠单一的调度措施,而是依靠水位、水沙、断面控制三者联动,使堤防加固工程具有长期适应河势变化的外部条件。

4 结束语

黄河干流堤防加固要同时考虑渗流控制、结构加固、险段稳定、河势适应四项主要要求,采用深层防渗、堤身固结、坡脚支护、水沙调控等技术进行系统组合来达到工程功能整体提高的目的。相关施工方法的精细化组织使关键技术得以稳定落地,形成风险识别、结构构建、运行调控的闭合体系。研究成果为后续堤防加固方案优化、建设实施、长期运行管理提供可持续的技术支持。同时,通过持续监测与动态评估,可进一步验证技术体系在不同水文情势下的适应能力,为未来黄河防洪安全的长期保障奠定更加坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 薛泽雨.黄河干流上游径流特性及成因识别分析[J].水利水电快报,2025,46(07):17-23.
- [2] 黄敏昊.西江干流堤防护岸加固防渗技术应用[J].河南水利与南水北调,2024,53(02):34-36.
- [3] 马慧英.黄河内蒙古段堤防工程建设成效分析[J].内蒙古水利,2023(04):46-47.
- [4] 詹发竹.淮河干流一般堤防加固工程质量监督工作的思考[J].河南水利与南水北调,2023,52(01):81-82.
- [5] 刘玉瑞.黄河干流刘-盐段综合治理工程设计方案比选[J].陕西水利,2020(12):59-61.

水利工程质量检测中的探地雷达技术应用分析

杨 畅, 郑 成*

(四川南充水利电力建筑勘察设计院, 四川 南充 637000)

摘 要 探地雷达技术通过发射和接收电磁波, 生成地下结构的可视化图像, 适合对坝体、闸基等关键部位开展无损检测工作。本研究主要围绕填筑密实度评估、变形趋势监测及加固效果验证等核心方向展开, 着重探讨了探地雷达技术在水利工程质量检测中的具体应用方法, 并结合典型工程案例分析, 以期为进一步提高水利工程隐蔽结构的检测精度提供借鉴。研究表明, 探地雷达具备检测快速、结果直观的特点, 可提升结构隐患的识别效率, 为水利工程的安全稳定运行提供技术保障。

关键词 探地雷达; 水利工程; 质量检测

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.019

0 引言

目前, 水利工程正进入集中养护期。部分设施服役年限较长, 在环境变化与长期运行负荷的双重作用下, 内部结构逐渐暴露出各类安全隐患。传统检测方法在检测效率方面已无法满足当下的实际工作需求。为进一步提升检测质量, 工作人员需选择适配典型水利场景的技术, 精准识别常见病害的同时连续监测结构运行过程, 以此增强隐蔽部位检测的科学性, 为水利工程安全运行筑牢技术根基。

1 探地雷达工作原理

探地雷达是靠电磁波来摸清地下结构的情况, 在工作的时候, 设备上的发射天线会向地下发送高频电磁脉冲, 这些脉冲在地下传播时, 只要碰到不同材料的交界处, 就会产生反射, 而接收天线会把这些反射信号收集起来, 再经过数据处理, 就能形成对应的探测图像。不同材料对电磁波的反应不一样, 如土壤、水、混凝土和空洞, 各自的电磁特性都有差别, 电磁波在其中传播, 速度和信号的强弱都会发生变化。进一步分析这些变化, 就能确定地下物体的位置和形状。这种技术不用开挖, 很适合给坝体、隧洞、渠道类结构做质量检查, 能快速找出裂缝、空洞之类的问题。

2 水利工程质量检测中应用探地雷达技术的作用

2.1 评估工程填筑质量

探地雷达是非开挖检测技术, 在土石坝、堤防类结构的质量检查中, 能发挥很好的作用。实际使用时,

探地雷达会发射高频电磁波, 之后接收反射回来的信号, 凭借这些信号, 不同填筑材料之间的界限能清晰地呈现出来^[1]。检测人员对这些信号做进一步分析, 就能判断材料层次是不是分明, 以及不同区域的结构有没有差异。除此之外, 此技术还能反映填筑区域的密实情况, 找出松散或未压实的区域。

2.2 查找隐蔽工程缺陷

在水利工程质量检测工作中, 探地雷达技术能发现不少传统检测手段难以察觉的问题, 通过发射并接收电磁波信号, 准确呈现地下不同材料间的界面变化, 据此就能找出异常区域。在实际检测时, 探地雷达可以有效识别地下管道的位置偏移、局部破损引发的漏水情况, 还有渗流可能形成的通道。另外, 填筑过程中若不小心混入异物, 或出现材料分布不均匀等问题, 也能借助雷达图像里的异常反射特征来判断。这种不用开挖、能直观呈现检测结果的方式, 有助于检测人员全面掌握地下结构状况, 为后续维护或安全评估提供科学依据。

3 探地雷达技术在水利工程质量检测中的应用策略

3.1 精准探测坝体结构, 识别内部空洞隐患

在水利工程中, 坝体结构的安全状况直接关系到整个工程的运行安全, 检测人员使用探地雷达技术能够捕捉地下不同材料间的界面信息, 进而判断结构内部是否存在空洞或分层等异常。

探地雷达技术能生成高精度的地下图像, 把隐蔽

作者简介: 杨畅(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程检测。

*通信作者: 郑成(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程检测。E-mail: 1138806062@qq.com

缺陷的位置和形态清晰地呈现出来,方便检测人员判断坝体是否存在潜在安全隐患。与传统检测方法相比,其效率高、覆盖范围广、成像清晰,很适合大体积坝体的整体排查和重点区域的细致检测^[2]。检测人员在应用时要结合坝体结构特征和建设材料,合理设置探测参数,让采集的信号准确反映实际情况。同时,检测人员还要考虑坝体地质条件和周边水文环境对电磁波传播的影响,保证反射信号清晰。发现异常区域后,要结合历史施工记录和监测数据,区分是质量缺陷还是后期损伤,并分析发展趋势,经过多次检测对比,能提高识别精度,为后续处理工作指明方向。例如:某大型水工隧洞已运行多年,为全面掌握衬砌结构的稳定状况,检测人员应组织一次结构质量检测,排查衬砌内部是否存在脱空、分层等安全隐患。该隧洞围岩为软质黏性岩土,长期受地下水渗流和隧洞内水力冲刷交互作用影响,结构稳定性相对复杂。为保证检测工作覆盖到隧洞部位,检测人员要把探测路径设置在拱顶中线、底板边缘等典型结构区段,同时把断层构造带纳入重点检测范围。考虑到隧洞结构材质密实度高且反射界面又较为复杂,应选用低频地质雷达设备来增加探测穿透深度,把天线间距设定为0.5米,沿着预设路径连续采集纵向剖面数据,在图像分辨率和深度信息之间做好平衡。检测作业需统一在温湿度相对恒定的条件下开展,减少环境波动干扰。图像数据处理完毕后结果会显示隧洞左侧拱肩附近有一段明显的反射异常区域,宽度大约10米深度集中在衬砌2米至4米处,雷达图像表现出持续低反射的特征。对比历年结构巡检记录和渗流监测数据发现,该段隧洞在汛期多次出现衬砌湿斑现象,结合设计图纸和施工资料综合研判,初步认为该区域存在混凝土衬砌压实不足或衬砌背后填充不密实的问题。检测人员可在该区域两侧加密布设雷达扫描路径,同时适当调整天线频率,补充采集多角度高分辨率图像数据。经过多组图像比对分析,最终确认该段隧洞结构存在不均匀性及局部空洞问题,建议后续结合钻探验证工作开展针对性治理。

3.2 立体监测闸基变形,掌握埋设构件状况

探地雷达技术可扫描地下结构的空間并捕捉不同深度的图像信息,检测人员借助这些信息能判断闸基是否存在沉降类变形问题^[3]。除此之外,该技术还能排查闸基内部埋设构件的运行状态如钢筋、锚固件等,

明确其安装位置是否精准、连接部位是否牢固。生成的图像清晰度高、信号反应灵敏,能让检测人员在变形现象显现之前就发现潜在隐患,为提前开展评估处置、保障工程长期安全运行提供有力支撑。检测过程中,工作人员需结合闸基的结构特性科学设定雷达参数,保证信号可覆盖所有区域,同时结合当地地质条件和荷载传递规律,综合解读图像信号,精准锁定问题所在区域。例如:以某水工隧洞运行安全评估工作为例,检测人员需运用探地雷达技术检测隧洞衬砌结构及基础连接部位,判断是否存在沉降及其他各类结构异常情况。

该隧洞基础采用钢筋混凝土结构长期承受地下水压力、地质应力的共同作用,结构稳定性面临一定隐患。为保障检测精度,工作人员需围绕隧洞底板、两侧墙脚等关键受力部位,划分多个纵横剖面并布设密集检测网格,保证结构内外边界过渡带及连接节点区域都能被检测图像完整覆盖。本次检测要把探测深度控制在6米以内,同步采集多方向、不同深度层次的图像数据,以此提升对微小结构异常的识别精准度。检测时可选用多频率组合雷达设备,依据隧洞结构均匀设置采集点,同时实时记录洞内湿度、衬砌表面状况等环境参数,为后续数据反演和异常识别提供参考。图像分析阶段工作人员需重点关注反射波的强度分布和能量衰减特征,结果显示隧洞中部底板出现反射异常图像,信号呈低强度且连续性差。结合图像特征研判该区域存在密实度不足、局部钢筋排列不均问题,推测伴随底板轻微沉降或钢筋锚固松动等结构隐患。为进一步核实状态,需在异常区域周边加密布设雷达测线,调整频率并采集多角度剖面图像,解析异常信号,明确结构变化趋势及受力路径干扰范围,为隧洞后续加固设计提供可靠技术支撑。

3.3 快速扫描渠道衬砌,评估衬层结合状态

探地雷达可以清晰地呈现材料层之间的界面情况,检测人员能够从图像中看出结合是否紧密、结构是否连续完整。与传统检测手段相比,探地雷达不用破坏结构表面,就能完成大范围且高效率的检测,对于长度较长、结构复杂的渠道工程格外适用,能及时发现潜在风险,对保障水利设施安全运行很关键。在实际应用时,检测人员要结合渠道的结构类型和所在区域的地质条件,合理规划检测路线,确保重点部位和薄弱区域都能被有效覆盖。在此过程中,检测人员还需

结合衬砌材料特性以及已有运行信息,综合分析雷达数据反映的界面变化,判断是否存在异常趋势。把检测结果同以往资料对比,能进一步明确当前衬砌性能状态,为后续养护提供有力依据,使质量检测更全面^[4]。例如:以某混凝土衬砌水工隧洞的日常检测工作为例,该隧洞线路跨度大沿线地质条件复杂,部分段落此前还出现过衬砌裂缝问题。为保证检测结果的准确性,探测路径必须覆盖隧洞底板及两侧边墙,检测点按固定间距均匀布置,同时对以往出现过异常的段落适当加密测点,精准把控结构的变化规律。结合隧洞浅层结构的实际特性,本次检测选用适配高分辨率浅层成像的高频探地雷达设备,把探测深度控制在 1.5 米以内,重点捕捉混凝土衬砌层和基层接触界面的反射图像信息。为确保图像数据一致性,检测工作应选在天气干燥的时段开展,同时实时记录隧洞内电磁环境变化及结构表面状况,为后续图像数据的解析提供有效依据。图像分析结果显示,隧洞中段有一段长约 20 米的区间,底板区域反射信号存在不连续情况,图像层间边界模糊,反射强度明显低于周边区域以形成鲜明对比。结合原始设计图纸和运行维护记录分析得知,该段隧洞所在位置地基土层偏软且排水效果欠佳,长期运行易引发结构基础局部沉降,进而导致衬砌和基础层结合松弛甚至出现局部脱空。为进一步核实异常情况,检测团队应在该区域两侧增设检测剖面,开展多角度补测。基于此次检测结果,工作人员可编制详细技术报告,明确标注结构异常的位置与范围,结合受力分析提出针对性修复建议,为后续养护决策提供支撑。

3.4 反演分析雷达数据,辅助评估加固成效

探地雷达技术可采集加固区域内部的结构信息,检测人员经过分析雷达图像中反射信号的变化,就能判断加固处理是否达到预期效果。此项技术能清晰地呈现结构内部加固前后的差异,如材料分布是否变得均匀、结合是否紧密、原有缺陷有没有修复。对于衬砌层、基础、边坡这些重点结构部位,探地雷达生成的图像信息能提供具体的变化依据,为后续技术判断提供支持^[5]。在开展检测时,检测人员要结合加固区域的结构特点,合理确定探测范围。检测中需考虑现场材料的电磁特性及环境干扰,确保获取的数据清晰稳定,还要对比施工前后的雷达图像,分析结构连续性和密实程度等内容,增强判断的科学性,让检测结果更具实用价值。例如:隧洞原本为浆砌石结构,因

地基承载力不足且已服役多年,部分段落出现结构裂缝等典型病害。本次加固采用混凝土衬砌搭配注浆加固的复合技术对结构薄弱区开展修复,以此提升衬砌整体稳定性和抗渗能力。为保证检测覆盖无死角,探测范围要涵盖隧洞底板和拱肩区域,同时结合原始设计图纸,把整个加固区段划分成若干检测单元,针对性对各关键结构节点采集数据。考虑到加固材料需一定时间才能进入性能稳定期,本次检测安排在加固施工结束一个月后。检测设备选用适配隧洞结构检测的双频探地雷达系统,设定的探测深度需覆盖加固层及下方的地基土体,保证采集到的图像清晰且各层分明。采集数据时检测人员要同步记录隧洞内湿度、电磁背景等可能干扰雷达信号的因素,为后续图像解析提供必要参考。图像分析阶段需重点选取加固前后对应位置的剖面图像做对比,聚焦反射波形强度类指标。分析结果显示加固注浆区域的雷达反射信号有所增强,原本模糊的结构界面变得规整清晰,说明内部空隙已被有效填充。

4 结束语

探地雷达技术是一种高效直观的非开挖检测技术,已在水利工程各类结构质量评估工作中推广应用。此项技术能精准识别地下结构异常情况,清晰反映关键构件运行状态并准确评估衬层结合质量,为加固处理效果的判断提供辅助作用。当前工程规模不断扩大,运维标准也在持续提高,检测人员合理运用探地雷达技术可为工程精细化管理提供技术支撑。未来,工作人员还需进一步优化图像识别方法,强化和结构安全评估的深度融合,构建覆盖设计、施工及运维全周期的监测体系。

参考文献:

- [1] 刘拓,云天禹.探地雷达检测方法在抽水蓄能电站工程中的应用研究[J].东北水利水电,2024,42(08):46-48.
- [2] 陈攻明.韩江鹿湖隧洞引水工程二衬回填灌浆质量检测分析[J].河南水利与南水北调,2024,53(02):57-58.
- [3] 闫永峰.探地雷达在水利工程隧道衬砌脱空质量检测中的应用[J].广东水利水电,2023(02):15-19.
- [4] 赵辰乔.探地雷达法在水电工程输水隧洞衬砌混凝土检测中的应用分析[J].黑龙江水利科技,2022,50(09):151-153.
- [5] 唐嘉洪.探地雷达在引水工程隧洞二衬回填灌浆质量检测中的应用[J].河南水利与南水北调,2022,51(04):88-90.

水利工程深基坑支护与降排水 施工技术及变形控制研究

张 正

(中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030032)

摘 要 深基坑支护与降排水施工技术对水利工程意义重大, 尤其面对复杂地质和高地下水位环境, 工程规模扩张, 施工难度加大, 传统支护与降排水方法已无法满足现代施工要求。基于此, 本文探究不同支护形式和降排水技术的适用条件, 研究支护和降排水系统的协同运行机制, 通过技术创新和优化, 提出基坑变形精准控制方案, 包括智能化监测系统和动态调节手段, 并结合真实工程实例, 剖析技术实施的风险和挑战, 提出相应的策略, 以期深基坑施工提供创新解决方案, 进而筑牢施工安全与稳定防线。

关键词 水利工程; 深基坑; 支护技术; 降排水; 变形控制

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.020

0 引言

深基坑施工作为水利工程建设的重要支撑环节, 在复杂地质条件和高地下水位环境下, 其施工安全保障与变形控制已成为工程实践中的关键难题。随着基坑深度不断增加和施工技术持续革新, 传统支护与降排水技术已难以完全满足现代深基坑工程需求。为此, 开展新型支护与降排水技术研究, 并制定精准的变形控制方案, 对确保深基坑施工安全、提高施工效率具有决定性意义。本文重点探讨深基坑支护与降排水施工的技术难点, 研究变形控制优化方案, 通过实际工程案例验证现代技术的应用效果, 以期水利工程深基坑施工提供技术参考, 进而为相关技术创新与实践奠定坚实的理论基础。

1 水利工程深基坑支护技术的研究与应用

1.1 深基坑支护系统的分类与选择

根据支护结构类型的不同, 深基坑支护体系主要分为土钉墙支护、地下连续墙支护、喷锚支护及悬臂式支护等多种形式。各类支护结构具有特定的适用范围: 土钉墙支护适用于岩土条件良好的场地, 具有施工便捷的特点; 地下连续墙支护凭借其出色的止水性能和结构稳定性, 通常应用于地下水位较高的深基坑工程; 喷锚支护则更适用于浅基坑施工, 展现出较强的环境适应性。在支护体系选型过程中, 需综合考虑基坑深度、地质条件、水文特征、周边环境以及工

期要求等关键因素。随着基坑深度的增加, 对支护体系稳定性的要求也随之提高, 这使得地下连续墙支护逐渐成为深基坑工程中的首选支护方案。

1.2 支护技术的创新发展与实际应用

随着基坑工程深度不断增加, 施工技术持续创新, 支护技术也取得了显著进步。传统的土钉墙和喷锚支护已难以满足日益复杂的地质条件和深基坑工程需求。在此背景下, 深孔注浆技术、钢支撑系统以及智能化支护系统等新型支护技术应运而生, 这些技术不仅显著提升了支护结构的稳定性, 同时有效缩短了施工周期并降低了工程成本。以钢支撑系统为例, 其具有优异的承载能力和抗变形性能, 在深基坑工程中已得到广泛应用, 特别是在软弱地层或复杂岩土条件下, 能够有效控制基坑侧壁变形, 显著提升施工安全性^[1]。

1.3 支护结构的施工安全与风险控制

深基坑支护结构的施工安全至关重要, 尤其在基坑深度较大、土质条件较差、周边环境复杂的工况下, 支护系统的安全性直接关系到施工人员的安全及邻近建筑物的稳定性。根据《建筑基坑支护技术规范》(GB 50330-2013)和《深基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)等现行规范要求, 在施工过程中必须严格控制土体扰动与变形, 采用科学合理的支护方案并实施全过程监测。为确保施工安全, 需重点加强监测力度、完善防护措施、严格管控施工进度。其中, 基坑变形

作者简介: 张正(1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 土木工程。

监测精度应达到毫米级,实时反馈监测数据并动态调整施工方案。工程实践表明,采用钢支撑与混凝土墙体的组合支护体系,可将基坑侧壁变形速率有效控制在 0.5 mm/d 以内,满足高精度变形控制要求,从而有效避免基坑过度变形或土体滑移等安全隐患的发生。

2 水利工程降排水技术的发展现状

2.1 常见降排水方法及其适用性分析

水利工程深基坑施工阶段,降排水技术至关重要,它的核心作用是降低基坑内水位,保障施工环境干燥基坑稳固。常用降排水手段有井点降水、深井降水、管井降水、截水沟,井点降水法一般用在地质条件简单的浅层基坑,它的运作逻辑是用一系列小孔(井点)抽取地下水至地面,普遍用于城市基础设施建设。大深度基坑适用于深井降水,尤其聚焦高地下水位区域,深井依靠深层泵站和加压设备实现功能,实现大流量抽排水作业,管井降水法有结构简单、施工便捷的特点,多孔性土层基坑的水位控制方案,截水沟核心功能是阻挡基坑周边的渗水流进,不同降水方法的选定,依据基坑深度、土层类型、地下水位及周边环境等因素,实际施工阶段,井点降水单小时最大抽水量可达 500 m³/h,深井降水系统单小时流量普遍能到数千 m³/h,满足大规模基坑排水要求^[2]。

2.2 深基坑降排水技术的创新实践

深基坑施工复杂程度逐步上升,传统降排水技术存在一定局限,尤其是遇到深基坑、高地下水位及复杂地质条件,高效、安全实施降水是当前关键,为应对这一挑战,诸多创新类降排水技术应运而生,如智能降水系统、低能耗降水系统。智能降水系统通过自动化管控,实时监测基坑水位、地下水流量,采用动态调控技术,按实际降水需求调整泵站作业状态,降低能耗,提升排水速率。部分大型深基坑项目采用复合式降排水技术,如井点降水和深井降水组合运用,实现多层面、多维度排水效果,维持施工期基坑安全与稳定。排水设备和技术更新换代,降排水效率明显提高。特定高水位基坑中,智能降水系统的排水流量精准调控区间为 300 m³/h 至 1 500 m³/h,精度误差上限为 5%,实现水位精准控制,筑牢施工安全防线。

2.3 降排水施工中的风险与挑战

实施降排水施工期间,较为普遍的风险因素包含:水位调控不当引发的基坑坍塌、地下水回流问题以及施工阶段的设备故障等,参照《建筑基坑降水设计规范》,施工前要对降排水系统开展细致的水文地质勘察,保障降水方案合理。实际施工阶段,基坑周边地

下水回流、渗水及系统设备故障,都可能削弱排水效果,引发水位控制未达标,提升基坑变形概率。为降低这些风险,施工全程需定期检查和维护降水设备,维持设备正常运行,降水施工要严控降水流量,防范水位过低引发周边土体松动,造成不必要的变形。参照工程积累经验,要把降水流量控制精度稳定在±10%区间,把水位误差控制在±2 cm 以内,维护施工安全和基坑稳定^[3]。

3 深基坑施工中的变形控制与监测技术

3.1 变形监测技术的现状与发展趋势

随着深基坑工程规模的扩大和地质条件的日益复杂,变形监测技术在基坑施工中的重要性显著提升。目前常用的变形监测技术包括地表沉降监测、深层位移监测、土压力监测和倾斜角度监测等。地表沉降监测主要采用沉降仪、全站仪和 GPS 监测系统等设备,其监测精度可达毫米级,适用于大范围基坑沉降监测;深层位移监测则通过深层位移计实现,特别适用于大深度基坑的地基变形监测。随着传感器技术的进步和数据采集系统的完善,变形监测正逐步向自动化、智能化方向发展。现代变形监测系统通常将数据采集间隔设置为 15~30 分钟,以确保及时捕捉基坑变形趋势。在复杂地质条件下,系统可实现 1 mm 的监测精度和 50 cm 的空间分辨率,从而大幅提升基坑施工的安全性和精确性。

3.2 基坑变形控制的优化措施与方法

在深基坑施工过程中,变形控制是确保基坑结构稳定及周边环境安全的关键环节。控制早期变形的核心在于提升支护结构的刚度和强度,以避免因受力不均导致过大变形。随着工程技术的发展,当前变形控制策略更注重从源头上降低变形发生的可能性,主要措施包括:加固基坑周边土体、优化支护结构设计以及科学调控地下水位等。在支护结构设计方面,通过合理配置支撑系统,采用钢支撑与混凝土支护相结合的方案,能够显著提升支护体系的整体稳定性和抗变形能力;地下水位控制则依托精准的降水系统和实时监测技术,避免水位波动对周边土体结构造成不利影响。通过实施上述综合控制措施并配合高精度监测系统,可将深基坑变形控制精度提升至 1 mm/d,从而确保施工全过程的安全性和可靠性。

3.3 变形控制在深基坑施工中的实践案例

在深基坑施工过程中,变形控制技术已在实际工程项目中得到广泛应用,并取得了显著成效。以某大型水利工程深基坑项目为例,该工程基坑开挖深度达

30 m,且周边地下水位长期处于高位,施工难度极大。项目团队创新性地采用了地表沉降监测与深层位移监测相结合的综合监测技术,同时配合智能化降水系统与高精度变形监测系统的协同运行,实现了对基坑变形状态的实时精准控制。监测结果表明,基坑最终沉降量控制在3 mm以内,最大水平位移不超过2 mm,各项指标均远低于现行技术规范规定的限值要求。这一工程实践充分验证了该技术方案的科学性与实用性(如表1所示)^[4]。

表1 基坑施工期间不同监测点的变形数据(单位:mm)

时间	监测点 A (地表沉降)	监测点 B (水平位移)	监测点 C (深层位移)
施工初期	1.2	0.8	0.5
施工中期	2.1	1.5	1.0
施工末期	2.9	2.0	1.8
施工完工	3.0	2.2	2.0

4 深基坑支护与降排水施工中的技术难点与解决方案

4.1 支护与降排水的协同工作机制

深基坑支护与降排水系统施工时需协同作业,维持基坑稳定和施工安全。支护系统的核心作用是固定基坑周边土体,防范基坑侧壁坍塌或变形;降排水系统借助降低地下水位达成效果,削减基坑内外水压力,避免基坑周边土体上浮流失。实际施工期间,支护和降排水协同运作十分关键。支护结构设计必须考虑地下水位变化影响,要让降排水系统的布置和支护结构相互适配,实现水位控制和基坑稳定两项目标。开展基坑施工,支护结构和降排水系统合理配合,可最大程度缩减基坑沉降与侧壁位移。依照《建筑基坑工程施工规范》,优化支护和降排水系统的协同运作,通过联合设计与动态调整,保障施工全程水位控制精度控制在 ± 2 cm以内,基坑变形控制精度实现1 mm/d。

4.2 施工技术难点的解决策略

深基坑施工过程中遇到的主要技术难点包含支护结构与施工的复杂性、地下水位控制、基坑变形的精准监测与调节。为解决这类问题,要全面勘察基坑的土壤和水文地质条件,选定合适的支护结构样式,合理布设降排水系统,进行支护系统设计,采用地下连续墙、钢支撑这类高强度支护结构,切实提升支护稳定性,防控基坑变形风险。聚焦地下水位控制,采用智能型降排水技术,实时监控基坑水位变化,通过动态调整降水流量,实现地下水位精准控制^[5]。

4.3 基坑变形控制的综合优化方案

控制基坑变形需综合实施多项优化方案,包括支护设计优化、降水系统优化、土体加固等措施,开展支护设计,可合理选用支护结构形式,采取钢支撑、地下连续墙加土钉墙结合的方式提升基坑稳定性。降水数据采取分阶段降水、智能管控降水流量等技术,把基坑周边水位控制到最优区间。控制基坑变形阶段,采用高精度变形监测系统,实时抓取基坑沉降、水平位移等数据,及时调整施工方案,通过综合优化支护设计与降排水技术,基坑沉降量控制上限为5 mm,水平位移不超3 mm,较行业标准要求的10 mm低不少(如表2所示)。

表2 基坑施工期间基坑变形控制数据

时间	沉降量(mm)	水平位移(mm)	基坑水位(m)
施工初期	0.5	0.3	6.5
施工中期	1.5	1.0	5.0
施工末期	2.5	1.8	4.0
施工完工	5.0	3.0	3.0

5 结束语

本文针对深基坑支护、降排水与变形控制技术展开研究,提出优化技术方案及解决办法。合规的支护结构与降排水系统协同运作,从源头消除基坑侧壁坍塌、基底涌水等隐患,精准把控基坑沉降和位移,守住施工安全底线。运用现代技术,如智能监控和动态调节,可实时采集基坑变形数据并快速反馈修正,大幅提升施工效率与变形控制精度。以真实案例验证,综合优化方案可切实降低施工风险,为水利工程深基坑施工提供技术参考和经验支撑,促进相关技术发展和应用。

参考文献:

- [1] 刁华辉,陈子其.水利工程深基坑施工安全事故原因分析与预控对策[J].水上安全,2025(22):34-36.
- [2] 魏久坤.水利工程深基坑支护技术在复杂地质条件下的应用研究[J].水上安全,2025(22):193-195.
- [3] 刘金豹.复杂地质条件下水利工程深基坑开挖与支护技术创新[J].水利技术监督,2025(12):325-327,340.
- [4] 贺佳岩,赵玮,孙忠园.水利工程泵站深基坑承压水降水研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(10):100-103.
- [5] 孟博霞.复杂地质条件下水利工程深基坑复合支护施工技术[J].河南水利与南水北调,2025,54(09):40-41.

全过程工程造价管理模式的应用与优化

朱琳

(辽宁省建筑设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要 全过程工程造价管理是贯穿于工程项目全生命周期的一种造价管理方式, 它以项目决策、设计、施工、竣工结算等各个阶段造价的控制来达到资源合理配置、成本精确控制和项目综合效益最大化的最终目的。本文根据全过程工程造价管理的内涵展开论述, 从定义、特征、实施价值三个方面对全过程工程造价管理进行阐述, 并分析全过程工程造价管理在各个阶段的应用情况及存在的问题, 结合行业发展需要提出完善管理体系、加强协同管控、推进信息化升级的优化途径, 以期为促进建筑行业提高造价管理水平、适应高质量发展需求提供借鉴。

关键词 全过程工程造价管理; 协同管控; 信息化升级; 成本控制

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.021

0 引言

随着我国建筑业转型升级的加快, 工程项目的规模越来越大、技术越来越复杂。传统的分段式造价管理模式由于存在管控脱节、信息壁垒、预判不足等问题, 已不能满足项目全周期成本控制和效益提高的要求。全过程工程造价管理以全周期、全要素、全方位为理念, 打破传统造价管理只在施工或者结算阶段采取碎片化的做法, 将管控触角伸展到项目的决策、设计、施工、竣工等各个阶段, 依靠各阶段之间的互相配合和动态调节, 达到造价管理精确化、系统化、高效化的目的。目前, 如何有效运用全过程工程造价管理方法解决实践中存在的问题和困难, 进而改善控制途径, 成为建筑行业从业人员以及研究者所关注的课题。本文从过程工程造价管理应用和优化入手, 旨在为行业实践提供参考。

1 全过程工程造价管理模式的核心内涵

1.1 全过程工程造价管理的界定

全过程工程造价管理是以工程项目全生命周期为管控范围, 以造价控制为核心目标, 融合经济、技术、管理等多学科知识, 采用科学方法, 对项目从前期决策、设计、招投标、施工到竣工结算的全过程进行造价预测、计划、控制、核算、分析和评价的系统性管理活动。不同于传统的分段式造价管理的主要特点是“全过程覆盖”, 不是各个阶段造价工作简单的叠加, 而是在各环节之间进行有机衔接和联动, 在提前预测风险、动态调整方案的基础上达到项目造价由被动核算转为

主动控制的目的, 最终实现质量、进度、成本三者兼顾的目标, 为项目决策提供可靠的造价依据, 保证项目在合理成本内完成预期的功能和效益。

1.2 全过程工程造价管理的主要特征

全过程工程造价管理有三个主要特征: (1) 全周期性。造价管控范围覆盖项目的整个投资决策到竣工验收的全部过程, 在各个阶段都会设立相应的造价管控节点, 从而达到事前预判、事中控制、事后复盘的闭环管理目的; (2) 系统性。需要综合考虑建设单位、设计单位、施工单位、监理单位、造价咨询单位等各方的主体, 把技术、经济、管理等多个方面因素结合起来, 消除主体之间信息壁垒和管理脱节的问题, 形成协同管控体系; (3) 动态性。工程项目在实施过程中会受到政策变动、市场价格波动、设计变更、施工条件改变等众多因素的影响, 全过程造价管理要时刻关注这些变量的变化, 并对造价方案做出及时的调整和优化。

1.3 全过程工程造价管理的实施价值

全过程工程造价管理的推行对于工程项目和建筑行业有重要意义。从项目角度来说, 它可以通过前期准确的投资估算和方案比选为项目决策提供科学依据, 防止盲目投资、浪费资源; 通过设计阶段造价优化和施工阶段动态控制来有效地控制工程变更、现场签证所造成的成本增加, 减少造价失控的风险, 保证工程质量、施工进度, 并使项目综合效益达到最大。从行业角度来说, 全过程造价管理促使建筑行业由粗放式管理转变为精细化、规范化管理, 使企业提高造价管

作者简介: 朱琳 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程概预算。

理的专业能力以及协作运作水平，从而减小行业内恶性竞争和资源内耗。

2 全过程工程造价管理模式的应用现状

2.1 前期决策阶段造价管理应用

前期决策阶段是工程造价控制的起点，也是决定项目总体造价的重要时期，在此期间的造价管理主要是对投资估算和可行性研究这两个关键环节。在投资估算环节，大多数项目会根据项目规模、功能定位、工艺要求、市场价格水平等因素，采用指标估算法、系数估算法等方式来编制投资估算，给项目的立项和资金筹措提供依据，但实践中还存在估算精度不够的情况，部分项目为了加快立项进度，在考虑市场波动、隐性成本时并不充分，造成投资估算与实际造价相差较大，为后面造价控制埋下隐患^[1]；在可行性研究环节，造价管理同技术方案、市场分析、政策合规性分析一起进行，经过多方案比较选出造价合理、效益最好的实施方案，但是有的项目可行性研究流于形式，方案比选缺少量化分析，不能发挥好决策阶段造价控制的前置作用。

2.2 设计施工阶段造价管理应用

设计阶段为造价控制的关键时期，目前全过程造价管理在这一阶段主要采取限额设计、价值工程等方法来达到造价优化的目的，即按照投资估算来确定设计限额，在保证工程功能的基础上，控制设计方案的造价水平。通过价值工程分析对设计方案进行技术经济评价，优化设计细节，减少不必要的成本支出，但是部分设计单位存在着重技术、轻经济的倾向，设计方案没有把造价放在统筹考虑之中，造成设计方案中存在大量的设计变更，从而使造价增加。

施工阶段是造价动态控制的重点场所，目前主要是用工程量清单计价、现场签证管理、工程进度款支付控制、变更价款审核等方式来进行控制，造价咨询机构和监理单位共同参与到现场造价监管当中，对工程量的完成情况进行监控，并对变更签证的合理性和必要性做出评判，防止施工单位虚报工程量、乱签证的现象发生。但是从实践来看，还存在协同不够、管控滞后的情况，现场签证审批流程过于复杂、变更价款审核不及时，对于施工过程中产生的成本偏差缺少快速纠偏的手段，导致造价控制效率不高。

2.3 竣工结算阶段造价管理应用

竣工结算阶段为全过程造价管理的收尾阶段，其主要目的是通过准确计算来确定最终工程价款，保证

甲乙双方的合法权益。目前该阶段造价管理的主要工作就是对结算资料进行审核、工程量复核、费用核算、争议协调等。造价咨询机构要对施工单位提交的竣工图纸、工程量清单、签证单、验收报告、发票等资料进行全面核查，保证资料齐全、真实、合法^[2]。在工程量复核和费用核算方面，根据施工合同、计价规范、市场价格等依据，对已经完成的工程量进行准确复核，对各项费用逐一计算，剔除虚报、错报的部分。在争议协调上，对于结算中双方存在计价争议、签证争议等问题，采用协商、调解的方式寻找解决办法。但是，目前竣工结算阶段还存在许多问题，施工单位提交的结算资料不齐全、虚报工程量和费用的现象屡见不鲜，结算审核周期过长，部分争议问题不能迅速达成一致意见，造成结算工作效率低，影响项目的资金回收以及竣工交付。

3 全过程工程造价管理模式的优化路径

3.1 完善造价管理体系建设

完善的工程造价管理体系是全过程工程造价管理有效实施的前提，要从制度、人员、标准三个方面来推进体系的优化。建设单位要牵头制订全过程造价管理制度，规定各个阶段造价控制的目标、责任划分、工作程序、考核尺度，把造价控制的责任分配给所有的参加者以及具体的岗位，构成全员参与、全程控制的职责系统^[3]。另外，要创立造价风险预警机制，对于市场价格变动、政策改动、设计变更等可能发生的风险，制订出相应的解决办法，经常开展风险评价和演习，提前对风险的影响进行预测，并采取防范措施。

在人员建设上，加强造价管理专业人才的培养，创建“理论加实践”的双轨制培养模式，提高从业人员多学科综合能力，不仅要精通造价计价、核算等专业知识，还要了解工程技术、法律、法规、市场等各方面的知识，并经常参加培训、进行行业交流、开展实操训练、实行师徒结对等形式来更新从业人员的知识结构，着重培养具有较强技术素养和造价能力的复合型人才，满足全过程造价管理多样化的需求。

在标准建设上，根据行业的发展和项目的特点，完善全过程造价计价标准和规范，统一各个阶段造价编制、审核、核算的方法和口径，确定签证、变更、结算等环节操作的标准，采用第三方审核校验的方式，设立标准动态更新的机制，根据建材价格波动、施工工艺改变等的变化而适时地调整，以防止由于标准不同而导致的管理混乱以及争议。

3.2 强化各阶段协同管控力度

打破主体壁垒、提高各个阶段协同控制的力度,是提高全过程工程造价管理效率的重要途径。一方面,创建多方面协同治理机制,以建设单位为中心,整合设计、施工、监理、造价咨询等各方面的资源,搭建线上线下相结合的常态化的沟通协商平台,开设实时的信息交流通道和问题反馈渠道,不定期召开造价控制推进会议,同步项目进度、共享造价信息、集中处理管控难题,防止由于各方各自为政、信息不对称造成的管控脱节,明确各方在造价控制中所负的责任范围及合作程序。确立与造价控制效果有关联的奖励惩罚制度,把成本控制指标纳入各方的绩效考核中,促使各方主动配合、高效协作,形成一个协同联动、权责对等的管控格局^[4]。另一方面,加强各个阶段造价控制之间的有机联系,形成前一阶段为后一阶段赋能、后一阶段对前一阶段校验的闭环机制,把决策阶段造价数据准确地传递给设计阶段,作为限额设计的主要依据,设计阶段造价方案细化之后落实到施工阶段,施工阶段造价动态数据实时汇总到竣工结算阶段,使各个阶段造价控制无缝衔接,在各个阶段交接处设立专门的审核小组,对前一阶段造价控制成果进行全面的核查校验,重点核查数据的准确性、流程的规范性,及时纠正偏差补救漏洞,保证造价数据的准确性以及管控的连续性,从源头上防止造价偏差和争议的发生。

3.3 推进造价管理信息化升级

利用信息技术的赋能,可实现全过程工程造价管理更精确化、更高效^[5]。首先,创建一体化造价管理信息平台,将项目各个阶段造价数据、合同信息、签证资料、设计图纸、施工进度等所有的信息都集成到一起,并设立数据权限分级管理功能和操作留痕机制,配备数据加密、定期备份等安全保障措施,保证数据的安全性、统一性、完整性以及可追溯性,从而消除信息壁垒,使各个参与方可以迅速地得到所需要的信息,缩短信息传递的时间,提高决策与管控的效率。其次,深度地引入建筑信息模型(BIM)、大数据、人工智能等先进的技术,提升各个阶段造价管理的质量和效率,在设计阶段采用BIM技术来完成三维建模、碰撞检测、造价模拟,精确计算工程量并优化设计方案,防止出现后期返工造成的损失。在施工阶段利用BIM技术同进度管理系统联动,实时观测工程量的进展以及造价的差异,自动产生造价分析报告并发送预警提示。在竣工结算时采用BIM技术与大数据技术相结

合的方式,迅速复核出工程量、对比造价数据及市场价,准确找到虚报费用的地方,大幅度提高结算审核的准确性与效率。最后,要强化造价数据治理和深度应用,创建起标准化的造价数据库,对各种类型的、不同的规模项目各个阶段的造价数据实行分类搜集、整理、规范化处理,并运用大数据剖析发现数据背后的成本演化规律以及控制存在的问题,经过大数据剖析发掘出数据所蕴含的有关成本方面的规律以及控制中存在的问题,给之后项目的投资估算、方案比较、造价优化提供精确的数据支持,也促进数据跨项目重复使用,使造价管理工作由经验主导转向数据主导、智能主导的方向发展。

4 结束语

全过程工程造价管理是建筑行业精细化管理的一种方式,其运用的效果好坏会影响到工程项目综合效益以及行业发展。虽然目前我国全过程工程造价管理已经取得一定的成绩,但在实践上还存在体系不健全、协同性差、信息化水平低等缺陷,影响了管控效能的充分发挥。未来,需要以完善管理体系为前提,加强各个主体、各个阶段之间的协同控制,依靠信息技术推进造价管理数字化、智能化发展,不断改进全过程造价管理途径,使造价控制由碎片化走向系统化,由被动核算走向主动控制,由经验驱动走向数据驱动。另外,行业各方面的协作也要加强,不断积累实践经验,完善造价管理的标准和技术方法,推进全过程工程造价管理方式在建筑行业中的深入应用和普及,为建筑业高质量发展赋予强大动力。随着行业的发展,全过程工程造价管理的应用领域将更加广泛,成为提高工程项目管理水平、实现资源的合理调配与效益最大化的有利保证。

参考文献:

- [1] 张奕然.全过程造价管理在住宅建筑项目中的应用与实践[J].居舍,2026(01):158-161.
- [2] 王森,杨晓琳.全过程工程造价在现代住宅建筑控制中的重要作用[J].居舍,2026(01):165-168.
- [3] 卓金花.建筑工程造价全过程动态管理模式分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):163-165.
- [4] 肖肖.全过程工程造价管理与控制方法探析[J].城市开发,2025(20):67-69.
- [5] 潘彩燕.住宅建筑工程全过程造价咨询管理[J].居舍,2025(26):145-148.

大数据赋能智能建造工程造价成本控制研究

周 燕

(安徽安天利信工程咨询有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 为解决智能建造工程造价管控中数据碎片化、协同不足、风险预警不完善等问题, 本文围绕大数据赋能路径展开研究, 结合智能建造全生命周期造价管控需求, 剖析数据采集整合、技术支撑等应用基础, 针对现存核心问题, 构建前期精准预判机制、强化施工阶段动态管控、构建供应链协同体系、打造智能风险预警系统。依托大数据技术打通数据壁垒, 实现造价管控从事后核算向事前预判、实时调控转变, 提升成本管控精准度与效率。本文立足于实际工程场景, 整合多维度数据与技术手段, 以期智能建造领域造价成本管控优化提供实操参考, 助力行业实现精细化成本管理目标。

关键词 智能建造; 大数据; 工程造价; 成本控制; 协同管控

中图分类号: TU723; TP31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.022

0 引言

建筑业正加速向智能化、绿色化转型, 广州建筑机器人计价新规落地、青海数智造价体系建设推进等政策, 推动行业迈入数智化计价新阶段。智能建造场景下, BIM、建筑机器人等技术普及虽提升效率, 却也让造价数据呈现多源异构特征, 数据碎片化、管控协同不足、风险预警滞后等问题愈发突出, 制约成本精细化管控落地。传统经验驱动的造价模式难以适配动态变化的行业需求, 亟需依托技术突破瓶颈。本文立足于全生命周期造价管控需求, 探索大数据赋能路径, 通过构建精准预判、动态管控、协同联动及风险预警体系, 破解行业难点, 为智能建造造价成本优化提供实践参考, 助力行业实现提质增效降本目标。

1 大数据在智能建造造价控制中的应用基础

1.1 智能建造场景下造价数据的采集与整合

全流程多维度数据采集与标准化整合是大数据赋能智能建造造价管控的核心前提, 其核心价值在于打破数据壁垒、构建完整成本数据链路。智能建造的造价管控需覆盖设计、施工、竣工全生命周期, 各阶段数据源特性存在差异却相互关联, 设计阶段需采集图纸参数、工艺选型、地质勘察等基础数据, 施工阶段聚焦材料消耗、机械运维、人工排班等动态数据, 竣工阶段则侧重结算审核、变更签证、运维预估等收尾数据。这些数据往往分散于不同部门、不同系统, 形成孤立数据节点, 唯有实现跨环节采集才能消除信息孤

岛, 为后续成本分析提供全面支撑。数据整合的关键在于建立统一标准体系, 明确各类造价数据的格式规范、口径定义与分类准则, 实现BIM模型数据、进度管理数据、供应链数据等异构数据的格式兼容与语义统一^[1]。此外, 需同步整合供应链上下游价格、人员机械台班单价、政策调整细则等关联数据, 填补单一环节数据的局限性, 构建覆盖“基础数据—动态数据—关联数据”的完整造价数据体系, 为大数据技术的深度应用筑牢数据根基。

1.2 大数据在造价控制中的核心应用支撑

大数据处理和挖掘手段为智能建造造价精准管控奠定了坚实的技术基础。借助技术赋能让数据价值从“资源”转向“工具”, 数据质量直接影响到造价管控的精度水平, 数据清洗手段能够去掉采集过程中出现的异常数值、缺失数据和重复内容, 同时配合数据脱敏方法隐藏商业机密以及敏感信息, 确保数据在合规条件下具备真实、完整和可用的特性。造价数据里面隐藏了材料价格波动规律、工序成本关联特征、风险因素影响权重这些关键内容。聚类算法可以对海量造价数据做分类归并, 挖掘不同工程类型、施工工艺下的成本共性特点。预测算法则能依据历史数据和动态变量, 预判后续造价变化趋势, 为决策提供前瞻性支持。智能建造场景下造价数据呈现指数级增长, 传统存储和处理模式难以适应需求, 云计算技术借助分布式存储架构, 能够实现海量造价数据的安全存储和

作者简介: 周燕(1986-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 工程造价。

弹性扩展,同时借助高速运算能力缩短数据处理周期,确保造价数据的实时调用和高效分析,这三者形成“数据质量保障—数据价值挖掘—数据高效处理”的技术闭环,使大数据真正成为造价管控的核心推动力量。

2 智能建造工程造价成本控制现存核心问题

2.1 造价数据应用的碎片化与低效化

数据分散且利用率低,难以支撑精准造价管控,这一问题贯穿智能建造全流程,成为制约成本管控升级的首要瓶颈。当前多数项目各环节造价数据独立存储于设计、施工、造价管理等不同系统,缺乏跨阶段数据联动机制,设计阶段数据未有效传递至施工环节,施工过程中的成本动态变化也无法反向反馈至结算环节,导致数据链路断裂,无法形成全周期成本分析视角。传统造价管控模式仍以经验决策为主,数据驱动决策占比不足,造价人员过度依赖过往项目经验开展估算、结算工作,忽视了对海量历史数据、实时动态数据的深度挖掘,使得造价结果缺乏精准数据支撑,易出现偏差^[2]。数据处理滞后性进一步加剧管控低效,多数项目数据处理停留在事后整理层面,无法实时捕捉施工过程中材料消耗、工艺调整等带来的成本变化,难以适配智能建造动态管控需求,导致造价管控始终处于“被动应对”状态,无法提前规避成本风险、优化成本配置,最终影响造价管控的整体效果。

2.2 造价管控与智能建造流程的协同不足

造价控制与施工以及技术这些环节分开,协同管理能力不够强,导致成本管控和项目推进节奏不匹配,造成各种成本上的问题。设计阶段作为成本管控的起点,一些设计人员更看重技术可行和外观好看,对造价的预先判断不够,没有充分思考材料选择和工艺复杂程度对成本带来的作用,造成设计方案本身就有成本上的不足,后期施工中需要通过变更来做调整优化,直接导致成本偏差和工期拖延,施工过程中造价管控跟进度管控、质量管控缺少有效配合,造价人员和施工管理人员的工作对接不顺畅,造价调整没有结合施工进度节点做出合理规划,进度推进过程中也没有充分考虑到成本限制,容易出现为了赶进度胡乱增加资源投入,或者为了控制成本放弃施工质量的极端局面。供应链作为造价管控的关键环节,它的价格变动、供货及时性和现场施工适配性管理存在明显不足,供应链数据与造价数据、施工数据没有实现联动,不能依据施工进度灵活调整采购安排,既可能因为材料积压增加仓储成本,也可能因为供货短缺影响施工进度,使成本间接上升。

2.3 动态造价风险预警机制不完善

缺少大规模数据作为基础的动态预警,让成本控制变得被动,难以处理智能建造环境中复杂多变的成本影响因素。材料价格受到市场供需关系、国际形势、运输开支等多方面因素作用,政策调整涉及税收、环保、行业规范等多个层面,这些都成为造价波动的关键风险来源。目前大多数项目没有建立系统性的风险预判体系,仅仅依赖人工定期检查,不能全面覆盖所有风险因素,更难提前判断风险出现的概率及其影响程度,常常在风险实际发生后才被动应对,加大了成本上的损失。施工过程中对造价偏差的实时捕捉能力不够,无法借助数据即时监测工序开支、资源消耗与预算之间的差距,等到偏差明显时已经造成实际损失,错过了最佳调整时机^[3]。风险应对办法缺少数据支持,针对性和可行性都不足,多数项目沿用通用的应对方式,没有结合项目本身的造价特点、风险类别以及过往数据来优化方案,面对具体风险时难以快速形成有效处理手段,进一步放大了风险对造价的不利影响。

3 大数据赋能造价成本控制的关键策略

3.1 基于大数据的前期造价精准预判

依靠大数据改进前期决定,从起点把握造价,重点在于借助数据汇总与建模解析,提升设计环节造价估算的准确程度与方案的经济效益。汇总相似工程以往造价资料,涵盖材料价格、人力开支、设备支出、变更支出这些关键指标,联系当前项目设计参数、工艺条件,建立设计环节造价推测模型,借助模型运算预判不同设计思路的成本区间,提早避开高成本设计风险,将地质勘探资料、地区政策细则、环保规定这些变量引入模型,改进造价估算精度。地质状况直接干扰施工工艺挑选同基坑支护开支,政策变动则涉及税收、材料限制这些成本变化因素,多角度数据结合能够降低单一数据角度带来的估算误差。依靠大数据实施设计思路对比解析,从造价角度挑选最佳方案,借助数据量化不同思路的成本差别,同时考虑技术可行性同工程质量条件,防止仅仅追求低成本引发设计不足。这种以数据为重点的前期预判方式,突破了传统经验估算的限制性,将造价管理前置到设计起点,借助准确预判与方案改进,从本质上把握工程成本,为后续造价管理打下扎实的基础。

3.2 施工阶段造价动态管控与优化

大数据引入施工流程造价即时改动,降低偏差程度,重点在于借助即时数据获取、解析同反馈,完成

造价把握与施工进度同步联动。使用智能感应设备、BIM协作平台这些方法,即时获取施工进度、材料消耗、设备台班、人力投入这类动态资料,同时上传到造价控制系统,动态计算实际开支同预算的差异,确保造价资料与施工进度一起变动,消除数据滞后带来的把握盲区^[4]。对照预算与实际资料,智能找出造价偏差并深入挖掘原因,分辨材料价格波动、工艺调整、人员效率不足这些不同类别偏差,准确找到责任环节干扰要素,为成本调整提供明确依据。依靠数据改进资源调度方案,联系施工进度需要与成本限制,合理调配人力、材料、设备这些资源,降低没有效果资源投入与闲置浪费,如借助数据解析改进材料进场计划,防止积压占用资金;调整设备排班提高台班效率,压低单位工程设备成本。这种动态把握方式,使造价把握从“事后核算”转向“即时改动”,借助准确找出偏差、改进资源配置,持续缩小成本偏差空间,确保施工环节造价处在可以把握的范围。

3.3 供应链造价协同管控体系构建

大数据将供应链与造价环节打通,带动协同降本,关键在于建立数据共享机制,促进供应链各节点和工程造价环节彼此联动、准确适配。构建供应链数据共享平台,汇集供应商基本信息、材料价格变动、交货时间、质量检验记录等重要数据,实时追踪材料价格变化,捕捉市场价格转折点,为采购选择给出数据依据。在价格较低时确定采购成本,避开价格上涨带来的隐患。借助数据模型改进采购计划,联系施工进度需要、材料库存状况与价格走向,准确计算采购数量和采购时点,防止过多采购导致库存费用上升,也能避免采购不够耽误施工进度^[5]。结合供应商数据和现场施工数据,实现材料供应与施工需要的精确配合,依据施工进度灵活调整供货安排,同时共享施工期间材料使用情况、质量回馈等信息,协助供应商改善供货步调与产品品质,降低因材料质量问题造成的返工开支,这有助于借助数据对供应商开展动态评价,挑出性价比高、交货可靠的重点供应商,形成长期协作关系,进一步压低采购开支与交流费用,构建“数据带动—协同配合—成本改善”的供应链造价管理闭环。

3.4 大数据驱动的造价风险智能预警与应对

打造全流程风险预警模型,加强风险防控水平,关键在于借助大数据完成风险的事先判断、即时监控与合理应对。汇集材料价格、政策法规、施工工艺、地质条件等多方面数据,设立造价风险预警指标系统,

明确每个指标的预警界限与重要程度,覆盖价格变动风险、政策变化风险、工序差异风险等主要类别,做到风险范围的全方位包含。借助算法对风险要素加以即时监控,假如指标碰到预警界限,系统马上发出预警提示,同时传递风险具体情况与影响预估,给管理人员留出处理时间,转变以往风险防控的被动状态。依据以往风险数据与处理实例,改进风险应对办法,面对不同类别、不同级别的风险,制定有针对性的处理对策,如遇到材料价格猛涨风险,自动对应历史类似实例的处理方法,结合当前项目实际情况调整改进,构成“预警—分析—处理”的完整链条风险管控体系。这类大数据带动的风险管控方式,既加强了风险辨别的准确性与及时性,又提高了应对办法的合理性与可操作性,整体提升了工程造价比风险防控水平,确保成本管控目标达成。

4 结束语

大数据为智能建造工程造价成本控制提供了全新赋能方向,破解了传统管控模式的诸多瓶颈。本研究从大数据应用基础、现存问题到关键策略层层递进,构建覆盖全生命周期的大数据造价管控体系,既夯实数据与技术支撑根基,又针对性解决数据低效、协同薄弱、风险被动应对等难点。各项策略相互衔接、形成闭环,可有效激活造价数据价值,推动管控模式向数据驱动转型,兼顾成本优化、进度适配与风险防控。未来,还需进一步完善数据安全与标准化建设,深化大数据与BIM、云计算等技术的融合应用,助力该行业高质量、低成本发展。

参考文献:

- [1] 刘羽田.智能建筑技术在施工阶段的应用与挑战[J].新城建科技,2024,33(12):31-33.
- [2] 朱志坤,汪红亮,沈小星,等.大数据视角下的建筑智能化应用分析[J].绿色建筑与智能建筑,2023(12):94-97.
- [3] 孙力.大数据在智能建筑中的应用[J].互联网周刊,2023(05):38-40.
- [4] 张少军,虞健.新信息技术对智能建筑及延伸拓展领域发展的影响分析[J].绿色建筑与智能建筑,2023(02):61-64,84.
- [5] 林子新.物联网技术在智能建筑系统集成中的使用[J].长江信息通信,2022,35(10):109-111.

基于大数据的智能建造 工程造价成本控制策略

谢慧慧

(安徽安天利信工程咨询有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 为解决智能建造工程造价成本管控精准度不足、全流程协同性薄弱等问题, 本文围绕大数据赋能该领域成本控制展开研究。构建造价成本控制数据资源、技术支撑及标准规范三大基础体系, 结合投资决策、设计、招投标、施工、竣工结算各阶段特点, 提出针对性成本管控策略。通过整合多维度数据、运用数据分析算法及可视化技术, 实现成本预判、优化、动态管控与精准审核, 平衡成本、质量与效益。本文立足于智能建造全生命周期, 形成数据驱动的成本管控闭环, 以期为行业相关从业者优化造价管理模式、提升成本管控效能提供参考。

关键词 大数据; 智能建造; 工程造价; 成本控制; 全生命周期管理

中图分类号: TU723; TP31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.023

0 引言

当前, 建筑行业数字化转型迈入深水区, 材料费占施工成本 60% ~ 70% 且波动剧烈, 传统造价管控依赖经验、事后核算的模式难以应对风险。智能建造与大数据技术的深度融合, 为成本管控从被动应对转向主动预判提供了可能。行业对数据驱动的全流程协同管控需求迫切, 却受限于数据壁垒、标准不一等问题。本文立足于项目全生命周期, 探索大数据赋能造价管控的基础体系与阶段策略, 为行业破解成本难题、提升利润空间提供实践路径, 适配数字化转型的最新发展要求。

1 大数据在智能建造工程造价成本控制中的应用基础

1.1 造价成本控制数据资源体系构建

构建全生命周期数据资源体系是大数据赋能的核心前提。智能建造项目参建各方需同步推进全流程造价数据的采集与归集工作, 覆盖从前期设计的工程量清单、中期施工的耗材台账到后期结算的费用凭证等核心环节, 确保数据采集无死角、无遗漏, 为后续成本分析提供完整数据源。数据分类分级机制的建立是实现规范化管理的关键, 需按造价构成要素、项目实施阶段、数据敏感程度划分层级, 明确不同类型数据的管理主体与使用权限, 让零散数据转化为可高效调用的结构化资源。成本数据蕴含项目核心商业信息,

强化数据安全防护不可或缺。需构建全流程安全管控体系, 落实数据加密存储、访问权限校验、操作日志追溯等措施, 在保障数据合规使用的同时, 防范数据泄露、篡改等风险, 为大数据赋能造价控制筑牢安全防线^[1]。此外, 数据归集需兼顾实时性与完整性, 依托智能传感、物联网等技术实现施工过程数据动态采集, 同步整合历史项目、行业基准等静态数据, 形成动静结合的数据资源池, 为成本精准管控提供数据支撑。

1.2 大数据支撑体系构建

多种技术融合构建大数据驱动的技术基础。大数据分析算法成为挖掘造价数据价值的关键工具, 需要结合智能建造造价控制的具体要求, 选择使用回归分析、聚类分析这类算法模型, 对大量造价数据做深入拆解, 准确找到数据背后藏着的成本波动规律和相互联系, 显著提高成本预测的准确程度, 改变以往造价管理依赖经验判断的局限^[2]。数据可视化技术给造价动态监控带来直观的表现形式, 通过建立可视化管理平台, 把成本测算结果、偏差预警消息、数据关联图谱等用图形化方式展示出来, 简化决策的步骤, 让管理人员能够快速掌握成本管控的核心要点。高效的数据存储和传输架构是保证数据流转效率的根基, 需要采用分布式存储技术来应对大量造价数据的存储需要, 配合 5G、边缘计算技术实现数据实时传输和本地处理, 减少数据延迟, 确保施工一线的成本数据与管控平台

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

保持同步更新。技术体系构建还要注意兼容性，实现与BIM、智能造价软件等已有系统的顺畅对接，打破技术之间的障碍，让不同系统的数据可以自由流动，形成协同支持的技术局面，为造价控制全过程提供稳定的技术支撑。

1.3 造价成本控制数据标准规范制定

统一标准规范是打破数据孤岛、实现协同管控的关键点。造价数据格式与接口标准的制定要立足于行业共性需求，明确工程量、单价、费用构成等核心数据的录入格式、编码规则与交换接口，保证业主、设计、施工、监理等不同参建主体的数据能够跨平台共享，避免因数据格式不统一带来的重复录入、信息失真问题。数据质量直接决定大数据赋能效果，需要明确量化的质量评价指标，覆盖数据完整性、准确性、时效性三大核心维度，建立数据质量校验机制，对采集到的造价数据进行自动筛查与人工复核，及时修正缺失、错误数据，确保用于成本分析的数据真实可靠。数据应用流程规范的建立要覆盖数据采集、存储、分析、调用全环节，明确各环节操作流程、责任主体与时间节点，规范数据使用权限与审批流程，避免数据滥用、误用。

2 大数据赋能智能建造各环节造价成本控制策略

2.1 投资决策阶段造价成本预判策略

大数据驱动决策阶段成本精准预判，降低投资风险。历史项目数据是成本测算的重要依据，需整合同类项目的造价数据、实施效果、风险记录等信息，构建标准化成本测算模型，结合当前项目的建设规模、功能定位、区位条件等核心要素，精准测算项目投资额度，大幅提升投资估算准确性，规避传统测算方法偏差过大导致的投资失控风险。政策与市场数据的多维整合的关键，需实时捕捉土地政策、税收优惠、建材价格指数、人工成本波动等信息，量化分析各类因素对项目成本的影响程度，明确成本敏感点，为决策制定提供数据支撑^[3]。多方案数据对比是优化成本合理性的有效路径，针对不同建设方案，依托大数据技术测算各方案的前期投资、运营成本、收益回报等核心指标，全面对比各方案的成本效益比，筛选出成本最优、效益最高的实施方案。同时，需结合宏观经济走势与行业发展趋势，通过大数据模型预判项目全生命周期成本变化规律，提前预留成本波动缓冲空间，确保投资决策既符合当前成本管控需求，又能应对长期市场变化，实现投资效益最大化与风险最小化的平衡。

2.2 设计阶段造价成本优化策略

大数据引入设计方案迭代，做到成本前置控制，参数化设计与大数据的深度融合，能够有效优化构件选型环节的成本管控。通过整合不同构件的价格、性能、使用寿命、施工难度等数据，建立构件选型数据库，参数化设计过程中自动匹配成本最优的构件组合，在满足设计功能要求这一前提下，最大限度降低构件采购与施工成本。历史设计变更数据的溯源分析，可以精准预判设计风险，需要梳理同类项目的设计变更原因、变更范围及对应的成本增减额度，挖掘设计环节容易出现的漏洞与不足，在当前项目设计中提前规避此类问题，减少因设计变更导致的成本追加与工期延误^[4]。限额设计是成本前置控制的核心手段，大数据技术能够为限额设计提供动态支撑，将造价限额指标拆解至各设计分项，实时对比设计方案与限额指标的偏差，动态调整设计参数与方案细节，确保设计成果始终符合成本管控要求，还需借助大数据分析设计方案的经济性与可行性，平衡功能设计与成本控制的关系，避免过度设计带来的成本浪费，做到设计阶段成本与质量的协同优化。

2.3 招投标阶段造价成本管控策略

大数据的应用使招投标流程变得更规范，成本和质量管控得到平衡。投标报价数据的分布特点分析，能有效找出异常报价行为，需要把历年同类项目的投标报价数据整合起来，建立报价区间模型，明确合理报价范围与波动门槛，对本次投标报价超出合理区间、报价逻辑有问题的投标单位做重点检查，防止围标、串标等违规行为，维护招投标市场秩序。评标数据模型的建立能够实现报价合理性和技术适配性的综合评估，打破传统评标过多依赖主观判断的限制，把报价构成、工期承诺、技术方案、企业资质等多方面指标作为评标参数。借助大数据算法算出综合得分，挑出报价合理、技术扎实的中标单位，实现成本管控和工程质量的双重保证。市场价格波动的实时监测是投标报价的重要支撑，需要搭建人工、材料、设备价格动态监测平台，实时收集市场价格数据，结合供应链供需关系、宏观经济政策等因素，预测价格变化走向，给投标单位准确制定报价策略提供参考，同时帮助业主合理设定招标控制价，避免因价格信息不及时带来的成本偏差。

2.4 施工阶段造价成本动态管控策略

大数据的应用可实现施工成本实时监控与动态调整，最大限度减少资源浪费。施工进度和成本数据的

深度融合是管控核心切入点。需建立进度—成本协同管控模型，将施工进度计划拆解至每日、每周的具体作业节点，同时关联对应节点的成本预算额度、资源配置计划及实际支出数据，通过物联网设备实时采集施工进度完成情况与成本消耗数据，运用对比分析算法实时比较进度与成本的匹配程度，一旦出现成本超支或进度滞后的偏差，系统自动发出预警，并通过数据溯源定位偏差原因，如工程量变更、耗材浪费、人工效率不足、设备故障等，为管理人员快速制定调整管控措施提供数据依据。材料设备成本在施工总成本中占比极高，其动态跟踪管理至关重要^[5]。借助大数据技术搭建材料设备全流程管控平台，实时监测材料设备市场价格变动趋势，结合施工进度计划优化采购时机与采购批量，在价格低谷期锁定采购资源，降低采购成本；同时对施工过程中的耗材消耗进行实时统计，通过智能传感设备记录材料领用、使用、剩余情况，对比计划消耗与实际消耗的差异，运用异常检测算法分析消耗超标原因，如施工工艺不当、材料存储损耗等，制定针对性的管控办法，减少材料浪费和库存积压。现场传感数据的实时采集能够提升变更签证成本核算效率，依靠物联网技术对施工工序、现场地质条件变化、设计变更执行等情况进行动态记录，自动生成变更签证相关的工程量、工时、材料消耗等数据，快速核算变更成本，确保变更签证数据的真实性与及时性，避免因变更签证滞后、数据不准确带来的成本争议和核算偏差。此外，还可通过大数据分析施工人员效率、设备运行效率等数据，优化人力与设备配置，减少窝工、设备闲置等问题，进一步降低施工成本。

2.5 竣工结算阶段造价成本审核策略

大数据赋能结算审核工作提质增效，实现成本核算精准合规。结算数据与合同、图纸之间的一致性核验是审核的核心环节。传统人工核验不仅效率低下，且易受人为因素影响出现差错。大数据技术能够构建多源数据比对模型，自动提取结算文件中的工程量、单价、费用构成等核心信息，与合同约定条款、施工图纸设计要求、变更签证记录、材料设备采购凭证等资料进行逐项智能匹配，通过关键词检索、数据校验算法迅速识别工程量多算、单价偏高、费用重复计算、未按合同约定计价等问题，大幅降低人工差错率，显著提升审核效率。结算争议数据溯源库的建立有助于快速化解审核中的分歧，需系统梳理历年项目结算过程中常见的争议点，如工程量计算规则理解差异、费

用计取标准争议、变更签证有效性认定等，整合相关的政策法规、行业标准、合同条款及典型案例数据，建成结构化的争议数据溯源库，针对当前结算审核中的争议问题，通过大数据检索快速调取相关依据数据，明确争议解决方向，缩短结算争议处理时间，加快结算进程。结算数据复盘对提升后续项目成本管控水平具有重要意义，借助大数据技术对本次结算数据进行全面深度分析，归纳成本管控中的成功经验与短板不足，运用关联分析算法挖掘影响成本的关键因素，如材料价格波动、设计变更频率、施工管理水平等，将复盘结果转化为可复用的成本管控指标体系与优化方案，应用于后续项目的投资决策、设计、施工等环节，形成成本管控的闭环优化机制。此外，大数据还能实现结算审核全流程数字化记录，自动保存审核依据、审核流程节点、审核意见、修改痕迹等内容，构建可追溯、可核查的审核档案体系，确保结算审核工作的透明度与合规性，有效维护参建各方的合法权益。

3 结束语

大数据为智能建造工程造价成本控制注入核心动能，打破传统管理模式的经验依赖与信息壁垒。三大基础体系的构建筑牢数据应用根基，各阶段管控策略的落地实现成本全流程前置与动态优化，有效规避投资风险、减少资源浪费，推动造价管理向精准化、协同化、数字化转型。大数据与BIM、参数化设计等技术的深度融合，实现了成本与工程质量、工期的协同提升。未来，还需持续完善数据标准与安全体系，深化算法模型在复杂项目中的适配性，推动技术与管理模式迭代升级，助力智能建造行业实现成本效益最大化，赋能行业高质量可持续发展。

参考文献：

- [1] 张楠,王艳丽,姚军.智能建造背景下工程造价与预算课程教学路径优化研究[J].现代商贸工业,2024,45(21):255-257.
- [2] 蒋胡双.智能建造协同下的路桥工程造价优化研究[J].运输经理世界,2024(09):76-78.
- [3] 杨丹.智能建造背景下BIM技术在工程造价行业的应用[J].绿色建造与智能建筑,2024(02):63-66.
- [4] 黄剑,赵士德.智能建造背景下工程造价专业数智化课程建设探索[J].建筑经济,2023,44(S1):432-437.
- [5] 刘泳奇,吴环宇,陈珂.智能建造技术在工程造价管理中的应用研究综述[J].建筑经济,2022,43(S1):245-252.

新能源电力工程全流程优化与成本控制研究

王茂利, 王士元, 房启庆

(山东泛在新能源集团股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 新能源电力工程造价是制约行业规模化发展的核心因素, 其构成与影响机制具有复杂性和系统性。本文梳理新能源电力工程核心造价构成要素, 明确固定成本与变动成本的核心范畴及占比特征, 重点分析自然条件、技术选型与工艺水平、政策调控与市场波动对工程造价的作用机制。通过剖析各影响因素的关联逻辑与作用路径, 厘清不同要素对造价的差异化影响规律, 旨在为促进新能源行业高质量发展提供有益参考。

关键词 新能源; 电力工程; 全流程优化; 成本控制

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.024

0 引言

随着能源结构转型速度加快, 新能源电力工程掀起规模化建设热潮, 工程造价管控直接关系到项目投资回报以及行业的可持续发展。新能源电力工程受诸多因素综合作用影响, 造价出现升跌波动的风险高, 且各个影响因素的作用机制差异显著, 亟需进行系统梳理与深度剖析。本文聚焦新能源电力工程造价构成体系, 剖析各类影响因素的作用逻辑机制, 为有效解决造价管控难题、提升工程投资效益提供有益的实践参考。

1 新能源电力工程造价构成与影响因素分析

1.1 新能源电力工程核心造价构成要素

新能源电力工程核心造价构成要素可分为固定成本与变动成本两大类, 两类成本在项目全周期中占比不同, 且受实施阶段影响存在差异。固定成本是项目前期与建设阶段形成的刚性支出, 核心包括设备购置费用、土建工程费用与前期准备费用。设备购置费用在总造价中占比最高, 涵盖光伏组件、风电整机、储能设备、变压器及输电线路核心设备等, 设备型号、功率等级与技术先进性直接决定该部分成本高低。土建工程费用主要涉及场地平整、基础浇筑、厂房搭建、支架安装等, 其金额与工程规模、施工难度及材料标准密切相关。前期准备费用包含项目可行性研究、勘察设计、审批备案、环评安评等环节支出, 虽占比相对较低, 但直接影响项目合规性与后续施工效率。变动成本主要包括施工安装费用、材料损耗费用、运维预备费用与资金成本。

1.2 自然条件对工程造价的影响机制

自然条件通过改变施工难度、设备选型标准与工程建设周期, 对新能源电力工程造价形成系统性影响, 且影响具有不可逆性与关联性。气候条件是核心影响因素之一, 高温、严寒、暴雨、台风等极端天气会增加施工风险与成本。高温环境需采取设备降温、人员防暑措施, 延长施工周期; 严寒天气会导致混凝土凝固缓慢、施工机械启动困难, 需额外投入保温材料与设备维护费用; 强降雨与台风则可能破坏施工场地、损毁临时设施, 引发工期延误与返工成本。地质条件直接决定土建工程费用高低, 土壤承载力不足时需进行地基加固处理, 增加基础浇筑材料用量与施工工序; 地质结构复杂区域勘察难度提升, 不仅增加前期勘察费用, 还可能因突发地质问题调整施工方案, 产生额外支出^[1]。

1.3 技术选型与工艺水平的造价关联

技术选型与工艺水平通过影响设备效率、施工效率与运维成本, 与新能源电力工程造价形成强关联, 合理的技术与工艺组合可实现造价与效益的平衡。设备技术选型直接决定初始投资规模, 高效能设备虽购置成本较高, 但可减少设备数量与占地面积, 降低土建与安装配套成本, 同时提升项目投产后发电效率, 摊薄单位造价。反之, 低效能设备虽初期投入较低, 但需更大规模配置, 且后期运维成本偏高, 长期来看总造价反而上升。施工工艺水平影响施工周期与资源消耗, 先进施工工艺可提升施工精度、缩短工期, 减少人工与机械使用成本, 降低材料损耗率。例如: 模

作者简介: 王茂利(1970-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

块化施工工艺可实现部件工厂预制、现场组装，大幅减少现场施工工序与时间，降低人工成本与天气影响带来的额外支出；精细化安装工艺可提升设备稳定性，减少后期调试与维修费用^[2]。

1.4 政策调控与市场波动的造价影响

政策调控与市场波动通过改变成本构成要素价格与项目收益预期，对新能源电力工程造价产生动态影响，二者叠加效应明显。政策调控主要通过补贴政策、税收政策、行业标准三大途径影响造价。补贴政策直接影响项目收益，进而影响企业对造价的承受能力，补贴退坡会促使企业压缩各项成本，优化造价结构；税收优惠政策可降低设备购置、施工安装等环节的税负，直接减少项目总造价；行业标准提升会倒逼企业选用更先进的设备与工艺，可能增加短期造价，但可降低长期运维成本与合规风险。市场波动对造价的影响集中在原材料价格、设备价格、人工成本与融资成本四个方面。原材料价格波动直接影响土建工程与设备生产环节，钢材、水泥、有色金属等价格上涨会同步推高土建费用与设备购置成本；设备市场供需变化影响价格，产能过剩时设备价格可能下降。

2 不同场景下新能源项目的成本差异化控制策略

2.1 集中式新能源电站成本精准管控策略

集中式新能源电站成本精准管控需贯穿项目整个周期，重点聚焦前期规划、建设开展、设备管理与成本核算四大核心方面，依靠各环节协同作用达成总成本最优。前期规划阶段须强化全维度精准核算，结合资源的禀赋情况和电网接入条件，合理确定电站规模，防止盲目扩大规模引发设备闲置、土建浪费以及后期弃电风险；实施精细化场地勘探，完全掌握地质、水文、气候情形；调整优化总平面布局，恰当规划发电区、储能区与配套设施的位置，让场内输电线路长度减小，缩减电缆、杆塔等设备的用量及铺设方面成本。严格编制可行性研究报告跟设计方案，精准计算设备所需、施工工序及周期，提早预判可能出现的设计变更隐患，从根本源头规避返工成本和工期延误的各类损失。建设实施阶段实行标准化施工及全过程管控举措，构建统一的施工技术标准、质量规范及流程体系，减少因工艺差别引发的质量问题，减小返工频次与开销，优化现有的施工组织方案，依照施工进度对机械、人员及材料做合理调配，提升施工机械利用率水平，防止人力及设备陷入闲置现象，把建设周期缩短，以此减少资金占用成本。推行集中采购与战略合作模式，依

靠大规模采购优势降低原材料以及核心设备采购价格，构建“材料入库—领用—核销”全流程的台账表，严格掌握材料损耗率，杜绝物料浪费^[3]。设备管理阶段坚持把性价比放在优先位置，选用稳定性卓越、运维成本低、适配项目实际需求的设备，摒弃单纯以低价为目标的选型逻辑，降低后续故障维修及替换的花费。构建设备全生命周期的管理体系，施工阶段把安装调试记录补充完整，投运前制订有针对性的运维方案，提前把常用备件储备好，按固定周期开展预防性检修项目。

2.2 分布式新能源项目低成本落地策略

分布式新能源项目若要低成本落地，需基于其布局分散、规模较小、贴近负荷中心、能适配多元应用场景的核心特质，按照设计优化、施工管控、运维集约、资源整合四个维度建立全流程低成本体系。设计阶段奉行简约适配原则，按照现有建筑结构与场地条件开展方案设计，最大程度压低场地改造、结构加固等土建工程的投入规模，防止产生额外的施工开销，优先去采用标准化、模块化设计方案，做到设备规格与安装接口的统一，减少设计难度跟成本，同时增强后期施工的效率与设备的通用水平。按照终端负荷需求精准契合设备容量，防止因设备冗余让投资亏损，针对各类应用场景选取高效适配的核心设备，促进发电效率和设备利用水平，减少单位发电成本。在施工阶段实行轻量化、集约化施工模式，选用小型、安装简单、搬运容易的设备及施工机械，缩减临时设施搭建、大型机械租赁开支及场地占用成本，降低施工对周边环境所产生的干扰。实现施工流程的优化，精简现场作业时长，优先选用工厂预制、现场拼接的施工样式，减少人工投入与材料耗费，让施工的精准度有所提高^[4]。充分借助现有的基础设施，采用已有建筑屋顶、场地通道、配电设施来布置发电设备及输电线路，降低新增土建工程与配套管线的投入，减少并网的线路距离。运维阶段创建区域集中化管理模式，归整周边分布式项目的资源，组成专业的运维团队，实现设备巡检、维修、保养的大规模操作，减少单项目的运维成本值。实施智能化运维技术推广，搭建远程监控、故障预警体系，实时掌控设备运行情形，提早预判故障并精准应对，降低非预期停机时间与维修花销。

2.3 高海拔 / 荒漠等特殊场景成本优化策略

高海拔、荒漠等特殊场景中新能源项目的成本优化工作，应针对极端环境带来的施工困难大、设备损

耗快、配套成本高、运输压力大等核心难点，采取具有针对性的管控举措，实现环境适配与成本管控的双重目的。设备选型阶段着重留意环境适应性与长久稳定性，优先选用能抗住风沙、低温、缺氧及腐蚀的专用设备，对设备的密封、散热、保温结构设计进行优化，依靠严格的环境适应性检验，保障设备于极端工况中长时间稳定运行，降低故障修理、替换成本和停机形成的损耗。考虑到设备运维过程的便利性，把结构设计简化，便于后期检修和部件替换，降低运维的难度和经费支出。施工阶段改良方案以契合极端环境，结合气候状况恰当规划施工季节，避开暴雨、暴雪、高温、强风沙等极端天气出现的时段，把施工周期缩短，降低因天气条件引起的工期延误及返工费用。就高海拔的缺氧环境而言，配备必需的人员防护装置与应急保障物资，优化施工人员的排班模式，增强工作效率，同时采用小型、高效益、低能耗的施工机械，减少设备运维及能耗的成本。面对荒漠场景，需同时开展场地防护与施工活动，采用防风固沙、场地硬化这类防护办法，减少风沙对施工场地、设备形成的破坏，缩减后期修复开支，配套设施建设采用集约化模式，集中规划供水、供电、通信、仓储等配套项目，做到资源共享，缩减重复投入和闲置带来的浪费^[5]。就物资运输的难题而言，对运输方案做优化处理，选用契合复杂路况的运输器械，恰当规划运输路线，采用集中运输、提前储备的做法，缩减运输次数及运输损耗，压减运输花销。

2.4 并网型新能源项目全周期成本控制策略

就并网型新能源项目全周期成本控制来说，需覆盖规划设计、建设施工、并网运营、退役处置四大阶段，把焦点放在并网环节核心成本节点，设立各阶段联动、全流程闭合的管控体系。在规划设计阶段强化并网可行性的前期分析，结合电网承载能力、接入点分布和输电通道的容量大小优化项目布局与发电容量配置，防止因并网条件不达标引发后期改造升级费用。做好输电线路设计的优化，采用高效的输电设备与技术，缩短实现并网的距离，减小线路损耗及建设成本，同时恰当规划线路的走向，削减征地、拆迁及生态修复的成本支出，事先与电网部门做好对接，弄清楚并网技术标准、验收流程及安全要求，把并网需求纳入设计方案，降低后期并网调试整改的成本以及时间耗费。建设施工阶段，严格按照并网标准去推进工程建设，切实强化施工质量管控，着重把控发电设备、输电线路、

测控系统与电网设备之间的兼容性，预防质量问题拖累并网进度，降低工期延误引起的资金占用费用，优化施工进度计划，做到各工序的合理衔接，加快项目施工的节奏，减少并网前资金的占用时长，降低融资花销^[6]。并网运营阶段把重点放在发电效率与调度优化上，着重设备运维管理事宜，依照周期实施检修保养，保障设备平稳运转，加大发电负荷占比，降低弃电现象频次，降低发电的单位成本水平。提升并网调度策略的合理性，主动契合电网调度要求，合理安排发电的时段，降减电网辅助服务成本与并网考核的费用支出。筹建能耗管控架构，削减发电进程里的能源消耗，进一步削减经营支出，退役处置阶段提前谋划科学的处置方案，选用既环保又高效的设备拆解回收技术，减少处置成本以及环境治理的花销。

3 结束语

新能源电力工程造价的形成与管控受多重要素的协同作用与综合影响，实现固定成本与变动成本的科学配比、对各类影响因素的精准识别与精细化把控，是推进造价优化、提升项目成本效益的关键。自然条件的地域特征与技术方案的选型决策，共同构筑了工程造价的基础框架，决定了成本的核心区间；产业政策的导向调整与市场供需的价格波动，则会对造价形成动态影响，引发成本的阶段性变化。自然条件、技术选型、政策与市场三者相互关联、相互作用，构成完整的造价影响体系。

参考文献：

- [1] 王晔,杜皓. 电力工程输电线路施工技术分析[J]. 通讯世界,2026,33(01):131-133.
- [2] 周舒阳. 电力工程中的电力检修及电力施工技术研究[J]. 办公自动化,2026,31(02):120-122.
- [3] 宋秉虎,杨明祥,李祥,等. 基于云区块的电力工程供应链数据共享技术研究[J]. 电子设计工程,2026,34(01):106-110.
- [4] 孙世雄. 机电安装技术在电力工程现场施工中的应用[J]. 光源与照明,2025(12):211-214.
- [5] 程潭送. 电力检修与施工技术在电力工程中的应用[J]. 光源与照明,2025(12):215-217.
- [6] 甘国民. 电力工程中电力设备检修及施工技术刍议[J]. 通讯世界,2024,31(02):151-153.

基于 BIM 技术的土木工程建设 项目管理创新实践研究

李春甫¹, 孙世存², 姜晓阳²

(1. 青岛程坤朋建筑装饰有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 山东阳正项目管理有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 针对土木工程建设项目规模大、专业交叉多、全周期管控难度高的行业难点, 传统项目管理模式在信息协同、风险预判、资源优化等方面的局限性日益凸显。本文立足于 BIM 技术三维可视化、全周期数据集成、多主体协同的核心特性, 系统分析其在土木工程设计、施工、运维全阶段的应用路径与创新价值。通过实际项目案例验证, BIM 技术可有效破解设计冲突、进度滞后、成本超支等传统管理难题, 实现项目管理的精细化与信息化升级。同时, 针对当前技术应用中存在的 talent 缺口、标准不一、数据壁垒等问题, 提出针对性优化策略, 以期为土木工程行业相关研究提供实践参考, 助力行业高质量发展。

关键词 BIM 技术; 土木工程; 项目管理; 全周期管控; 协同优化

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.025

0 引言

土木工程作为基础设施建设的核心构成要素, 其项目管理水平对工程安全性、进度控制效率及全生命周期经济效益具有决定性影响。目前国内土木工程建设项目呈现出规模扩大、结构复杂且智能化的趋势, 传统以二维图纸为基础、沟通方式松散还依赖经验管理的模式, 已经无法满足项目全周期多专业协作与动态调整的要求, 普遍存在设计施工分离、信息传递偏差以及资源分配不合理等现象, 进而引发返工增加、工期拖延和成本超支等方面的隐患。建筑信息模型 (BIM) 技术是数字化转型的关键工具, 它通过建立涵盖项目全生命周期信息的三维数字平台, 有效打通了各参与方之间的数据障碍, 保障了设计、施工、运维等阶段的连贯协作。虽然近年来 BIM 技术在土木工程领域的应用日益广泛, 但在实际项目管理实践中依然存在应用深度不足、实施效果不一等问题。基于此, 本文聚焦 BIM 技术在土木工程项目管理中的创新实践, 剖析现存问题并且制定相应的改进策略, 以期为行业技术普及与管理模式革新提供参考。

1 土木工程建设项目的核心特征与现实挑战

1.1 核心管理特征

土木工程建设项目呈现出系统化和多层次特征, 贯穿建筑、结构、机电、市政等多个专业方向, 并且

关联到设计、施工、监理、建设、运维等多个参与方, 各环节之间耦合度非常高且逻辑衔接十分严密, 要求实行全过程一体化管控措施, 项目开发周期普遍较长, 容易受到地质状况、气候条件、政策变动等外部环境干扰, 进度安排与资源分配必须灵活调整来适应变化, 此外项目涉及工程量计算、材料采购、工艺技术等重大数据集, 这些数据的精确度、更新速度与流通效率对管理决策质量起决定性作用。

1.2 主要现实挑战

在传统项目管理方法里设计环节主要靠二维图纸表达, 这让不同专业领域的设计矛盾难以提前发现, 相关问题通常到施工阶段才会显现出来, 进而引发返工、调整以及工期延长等问题。各相关方采用各自独立工作系统和数据标准, 信息传递多依靠纸质材料或者口头交流, 容易造成信息传递延迟以及内容失真等现象, 形成“信息壁垒”从而降低了协作效率。由于缺少精确模拟分析工具进度安排制定, 往往是基于过往经验难以提前预判施工潜在瓶颈, 导致资源分配不合理, 引发成本超支或者工期延误。安全与质量控制大多属于事后处理的方式, 对施工过程中可能出现风险缺少提前识别预防措施, 增加了项目的安全与质量风险。

作者简介: 李春甫 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

2 BIM技术在土木工程项目管理中的创新应用路径

2.1 设计阶段：数字化协同与前置优化

BIM技术通过建立三维参数化模型，可以实现建筑、结构、机电等多个专业在同一平台协同工作，设计人员可实时掌握各专业构件的空间位置关系并对设计方案进行动态优化，利用BIM的可视化特性能够直观展现项目整体布局和具体构造，协助设计团队高效改进空间布局、结构方案与材料选择来提高设计方案的科学性和可行性；BIM技术还能进行能耗模拟和结构力学分析等操作，为绿色设计和安全设计提供可靠依据，有助于达成项目节能减排目标^[1]。借助BIM的碰撞检测功能可把不同专业设计信息整合到统一模型中，利用自动化工具自动识别管线交叉、构件重叠、空间冲突等潜在问题并输出详细碰撞报告，设计人员可根据报告提前进行方案修改以避免施工过程中重复调整，显著减少设计偏差和成本浪费，在某高层建筑项目中应用BIM碰撞检测提前处理30多处管线与梁、墙冲突问题，使设计阶段错误排查效率提升40%，为后续施工顺利开展创造有利条件。

2.2 施工阶段：精细化管控与动态适配

把BIM技术融入时间维度来形成4D施工模型，可以将施工进度规划和三维模型有机结合起来，清晰呈现各个施工阶段具体任务、时间节点以及资源分配情况。管理人员依靠这个模型对项目进展进行动态监控，实时比照计划进度与实际进度，精准定位出现延误的环节并迅速调整施工策略与资源调配方案。基于BIM模型能够精确统计工程量数据，为物资采购、设备调度提供可靠参考依据，有效减少材料损耗以及资源闲置现象，达到进度和成本双重管控的目标。

在施工前运用BIM模型开展方案推演工作，重点优化高危工序以及复杂节点的施工流程，明确质量管控要点和安全防控要点。在施工期间通过模型与现场情况进行实时比对，可以快速检验构件安装精度、施工工艺规范性，及时发现问题并且进行整改处理。针对深基坑开挖、高空作业等高风险作业场景，借助BIM技术开展虚拟仿真工作，提前预判潜在安全隐患并制定针对性防控措施，从而有效降低施工安全风险。

2.3 运维阶段：全生命周期信息支撑

BIM模型把项目从建设到拆除全过程各类信息汇聚起来，涵盖构件具体参数、施工过程记录、材料详细规格以及设备运行实时数据等内容，为后续运营维护管理工作奠定坚实的数据基础。运维团队可依托模型迅速定位设备具体位置，还能调取其过往维护历史记录，进而制定出更为科学合理的维护策略，有效推动设备管理向预防性维护模式转变。利用BIM具备的可视化呈现

与深度数据分析能力，能实时追踪建筑能耗情况及设备运行状态，对可能发生的设备故障进行预判并提前安排检修保养，从而有效控制运维阶段的资金投入。BIM模型能为项目改造或扩建工程提供精确初始资料，保障改造方案在技术层面合理性与实践上的可操作性^[2]。

2.4 协同管理：多方联动与信息共享

BIM技术依靠一体化数字协作平台全面消除建筑工程各参与方信息隔绝，该系统汇集设计方建立的三维模型、施工方制定的进度安排、监理方记录的质量检测数据以及业主提出的各类需求调整等全过程资料，确保项目各方可随时掌握包含详细设计方案、动态更新施工进度、分项工程质量检验记录以及各类工程变更通知的全面项目信息。依托这一协作平台设计方可在线提交设计优化方案、施工方可实时反馈现场实际状况、监理方可直接上传工程验收报告，业主能随时跟踪项目进展并提出调整建议，各方通过线上即时沟通、意见提交和电子化审批流程大幅缩短传统沟通模式信息传递周期，显著提高跨部门协作响应效率与执行效果保障项目各环节顺利衔接。

系统实现了项目资料的统一归档与全程追溯功能，所有信息支持动态更新并且可随时进行查阅，从而保障了管理决策的公开性与合理性，降低了因信息差异引发的矛盾与隐患^[3]。

3 实践案例分析：BIM技术在典型项目中的应用效果

3.1 高层建筑项目：多专业协同与工期成本优化

某高层建筑项目整体建筑面积达到15万平方米，涵盖地下室、主体结构、屋面以及外墙装饰等多个施工环节，涉及建筑、结构、机电、消防等多个专业领域，所以施工的难度比较大。项目采用BIM技术来进行全过程管控，在设计阶段通过协同设计和碰撞检测工作，提前解决了专业之间的32处冲突问题，让设计变更率降低了50%，施工阶段运用4D模型去制定详细的进度计划，并且实时优化资源的调配工作，把主体结构的施工周期缩短了18天，借助BIM模型精确计算出材料的需求量，让材料损耗率从传统的12%降低到了4%，总共节省成本230万元，运维阶段依托BIM模型构建设备的维护档案，使设备故障响应时间减少了60%，让运维效率得到了显著提高。

3.2 桥梁工程项目：复杂工序管控与风险防控

某跨河桥梁工程全长达到1200米，其中涵盖桩基施工、支架布设以及钢结构拼装等多个技术难点，并且现场地质情况复杂多变，这让施工面临着较大安全挑战。项目团队采用BIM技术构建三维可视化模型，

把地质探测资料、设计方案还有施工计划等信息整合在模型当中,给现场作业人员提供了清晰的技术参照依据。基于 BIM 施工过程进行仿真分析,对支架搭设与钢构吊装方案进行优化,有效降低了高空作业的风险系数,通过协同管理平台达成设计修改、进度变更等信息的即时共享^[4],使决策效率提升了 50%,避免了因信息传递不畅而引发的工序冲突问题,该工程最终比计划提前 22 天完成施工,质量评定达到标准要求,成功实现零安全事故的目标。

3.3 隧道工程项目:地质适配与全周期管控

某山区隧道工程全长达到 3.5 公里,其所处区域地质状况复杂多变,围岩结构稳定性明显不足,这对施工精度与安全管理提出严峻挑战,项目全面引入 BIM 技术实施全过程管控,前期阶段整合 BIM 模型与地质勘探资料,对隧道走向及支护方案进行优化改进,增强设计方案与实际地质条件匹配度,施工期间借助 BIM 三维可视化特性指导作业^[5],有效规避超挖或欠挖现象,使施工精度提高了 30%,建立协同工作平台实现各相关单位即时信息互通,快速响应围岩变形等异常情况,运维阶段依托 BIM 构建隧道健康监测体系,可实时掌握围岩稳定性及设备运行状态,大幅提升运维安全水平和作业效率。

4 BIM 技术应用现存问题与优化策略

4.1 主要现存问题

在土木工程实践过程当中,BIM 技术的推广应用依旧面临显著局限。部分项目对于 BIM 数据的采集与管理重视程度不够,这就导致数据质量参差不齐,进而影响模型对实际工程的真实反映,最终降低管理效能。当前多数项目仍然沿用人工数据录入模式,造成信息采集不完整且更新滞后,在复杂工程结构当中更容易遗漏关键参数,直接影响模型的准确性,不同 BIM 软件之间的数据格式存在壁垒且互操作性较差,导致各参与方难以实现高效的信息交互与协同作业。如设计单位大多采用 Revit 进行建模,施工单位倾向于使用 Tekla 进行深化设计,而造价工作常常依赖广联达等专业平台,跨系统数据转换时经常发生信息丢失情况,严重阻碍多方协作效率,制约了 BIM 技术在工程全生命周期管理中的实际应用价值。同时,行业里既懂土木工程专业知识又精通 BIM 软件操作及数字化管理的复合型人才较为稀缺,制约了技术应用的深度与广度。此外,由于缺乏统一的 BIM 技术应用标准与规范^[6],导致项目实施流程、模型构建标准及数据管理要求等方面存在差异,影响了技术应用的整体规范性与实际效果。

4.2 针对性优化策略

为了推动 BIM 技术在土木工程项目管理中全面渗透,需要围绕数据、技术、人才、标准这四个层面构

建完善方案。(1)制定统一的数据采集与管理规范,明确项目全周期数据的采集范围、格式规范以及存储形式,以此保障数据资源具备高质量与高可靠性;(2)强化 BIM 软件的自主研发以及协同应用,提升不同平台之间的数据互操作性,建立通用的数据交互规范,进而实现信息流的高效流转;(3)搭建高校、企业、行业协会协同育人机制。高校增设 BIM 相关专业课程,企业实施持续性培训计划,增强从业人员的专业技能与实践应用水平;(4)行业管理机构需加速出台 BIM 技术实施标准与操作指南,细化模型创建、协同作业、数据管控等环节的技术要求,标准化项目执行流程,为技术普及推广提供制度支撑。

5 结束语

BIM 技术是土木工程建设项目管理数字化转型的关键手段,凭借三维可视化展示、全流程数据整合和多方协同作业等优势,克服传统管理模式信息割裂、协作不畅和管控滞后等弊端。在规划设计环节应用 BIM 技术,可促进多专业协作设计与早期问题修正;在施工实施阶段应用 BIM 技术,可实现进度、品质与成本的精准把控;在运营维护阶段应用 BIM 技术,可提供贯穿全生命周期的数据保障,大幅增强项目管理规范性与执行效率。尽管 BIM 技术的应用受专业人才匮乏、标准体系缺失和数据共享障碍等问题限制,但随着技术持续迭代、人才培养机制健全和行业规范完善,其在土木工程项目管理领域的渗透度与影响力会不断提升。未来需强化技术革新与实践验证,促进 BIM 技术与大数据、人工智能等先进技术有机融合,推动项目管理向智能化方向发展,为土木工程行业可持续发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 张建平,李丁,王要武.BIM 技术在大型土木工程全生命周期管理中的创新应用[J].土木工程学报,2022,55(08):120-128.
- [2] 刘贵应,陈晨,周建新.基于 BIM 的多专业协同设计冲突检测与优化研究[J].建筑结构学报,2021,42(11):185-193.
- [3] 王强,李娜,赵雪峰.BIM 与大数据融合的土木工程项目施工动态管控方法[J].工程管理学报,2023,37(02):56-61.
- [4] 陈明,张丽,吴波.运维阶段 BIM 模型的信息集成与应用优化研究[J].建筑科学,2022,38(07):98-105.
- [5] 黄强,董帅,孙成双.土木工程项目中 BIM 软件数据兼容问题及解决方案[J].施工技术,2021,50(15):76-80.
- [6] 李建峰,王敏,张宇.基于 BIM 的隧道工程地质适配与施工风险防控研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(03):620-628.

机械装备智能化升级对化工企业本质安全水平提升的路径研究

邹 军

(苏州汇川技术有限公司, 江苏 苏州 215104)

摘 要 本质安全是化工企业安全生产的核心内容,需着重从源头对安全风险进行规避,实现安全生产的长效化效果。机械装备作为化工生产全流程的核心载体,其技术水平直接决定了本质安全的下限与上限。在新型工业化、智能制造技术迭代的背景下,装备智能化升级成为化工企业突破安全管理瓶颈的关键。本文以本质安全理论及其实际应用为基础,结合实际案例重点探究其赋能本质安全提升的创新路径,以装备本体、控制体系、运维体系、协同体系这四个维度为基础构建升级框架,对各路径的科学性及实用性加以验证,以期为化工企业提质增效提供理论与实践方面的借鉴,进而推动该行业高质量发展。

关键词 安全生产; 机械装备; 智能化升级; 化工企业; 本质安全

中图分类号: F407; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.026

0 引言

化工行业作为国民经济的支柱产业,涉及多个领域,其生产流程对安全的要求极高。本质安全理念体现出对传统理念的突破,它采取主动防护的模式,以源头防控作为核心要点,依靠技术与装备的升级实现安全的自主化,这是化工企业迈向可持续发展的必经途径。随着工业互联网等新技术的不断发展,机械装备的智能化升级成为趋势,同时也是实现本质安全的关键。传统装备存在局限性,无法满足安全管控的实际要求。本文结合实际案例,聚焦装备智能化升级赋予本质安全的关键路径,建立升级体系并制定实施方案,以填补研究的空白,助力行业实现安全高质量的转变。

1 本质安全理论

本质安全理念由英国化工安全专家特雷弗·克莱兹于1978年首次系统提出,主张通过消除危险取代附加防护装置,核心是“从源头消除或控制安全风险”。该理论体系有四个关键维度:设备本质安全通过技术与结构优化消除设备隐患;工艺本质安全对生产流程进行系统优化以降低风险;管理本质安全构建规范、制度、智能的管控机制;人员本质安全依靠自动化装备减少人工涉险操作,提升人员能力与素养^[1]。在化工企业,本质安全建设目标是实现生产全流程“可监

测、可预警、可控制、可追溯”,用先进技术替代传统人工模式,降低事故概率。机械装备作为化工生产基础与执行载体,其智能化升级是贯彻本质安全理念、实现全方位本质安全的关键路径和重要手段。

1.1 机械装备智能化升级内涵

机械装备智能化升级表示运用工业互联网、人工智能、物联网等新一代信息技术,对传统机械设备实施深度改造并拓宽其功能,让其拥有像环境感知、智能决策这样能力的过程,这一过程涉及硬件结构的优化以及传感器的集成内容,还有软件系统算法实现赋能与数据的驱动。考虑化工行业的生产特性,机械装备智能化核心内涵有三个方面要点:一是装备本体的智能化,主要围绕拉高机械结构可靠性等方面予以开展;二是实现控制体系的智能化,要构建具有响应快速等特点的智能控制体系^[2];三是运维体系走向智能化,得借助工业互联网平台达成设备状态的实时监测等目标,依靠这些智能化功能,装备可冲破传统人工操作的限制,为化工本质安全供给技术支撑与实现基础。

1.2 本质安全理论与机械装备智能化升级内在关联

本质安全理论与机械装备智能化升级联系紧密、协同效应显著:本质安全给装备智能化升级赋予目标方向和价值引领,阐释其核心是服务安全风险防控相关需求;智能化装备是实现本质安全理念的重要载体,

作者简介: 邹军(1983-),男,本科,中级注册安全工程师,研究方向:安全工程。

利用其感知、决策和控制的能力推进安全策略实施。智能化装备可以借助嵌入传感器采集参数，依靠大数据分析对风险进行预警，依靠自动控制降低人为过失，借助远程运维降低人员的暴露频次，凭借智能协同提高生产的稳定性与可靠性，机械装备智能化从多个层面开展，是增强化工企业本质安全水平的核心推力。

2 机械装备智能化升级赋能化工企业本质安全提升的创新路径

结合本质安全理论与装备智能化内涵，立足化工生产实践及苏州汇川技术案例经验，本文构建“四位一体”创新升级路径，即装备本体、控制体系、运维体系、协同体系智能化升级路径，四者协同发力提升企业本质安全水平，案例有机融入且占比严控在 15% 以内。

2.1 装备本体智能化升级路径：筑牢本质安全硬件基础

装备本体作为化工生产的核心载体，其智能化升级是达成本质安全的基础支撑，核心要点是借助技术改造，强化装备的安全与可靠水平，去除自身存在的隐患，以此达成本质意义上的安全，核心的方向聚焦于“安全化、精密化、集成化”，关键举措有优化装备结构、采用新型材料，实现智能传感功能与防爆防护功能的集成，推动装备功能走向集成，从而减少衔接环节的安全威胁。汇川技术帮助立邦涂料实现升级，设置防爆伺服等专用器械，把砂磨机、灌装线结构优化后集成智能功能，实现精细化工防爆防泄漏的需求，为装备本体的升级给出了样板，装备本体实现智能化可达成“主动安全”局面，减少对人工防护的倚赖，打牢硬件基础，为后续体系升级奠定数据收集与传递的基础。

2.2 控制体系智能化升级路径：强化本质安全过程管控

本质安全过程管控核心内容就是控制体系智能化，其核心为构建起协同智能控制系统，完成全流程精准控制与异常状况的联动应对，以此减少人为操作所造成的潜在隐患。核心举措包含打造智能控制的核心要点、达到各环节控制系统的联动状态、完善安全联锁保护功能，以此保证工艺平稳以及异常状况的迅速处置。例如：汇川技术给立邦涂料部署 PLC 控制器，实现了精准操纵与协同配合；为大型石化企业的压缩机升级采用高压变频器双机并联系列方案，均强化了过程安全方面的管控，说明了该路径的实用价值特性，这条路径可实现生产的自主掌控，引领本质安全从“事后处置”向“过程防控”过渡，提高管控的精确程度和效率。

2.3 运维体系智能化升级路径：巩固本质安全长效保障

运维体系智能化是达成本质安全长效保障的核心要点，其核心为凭借工业互联网搭建智能化运维体系，从而提高装备的稳定性，减少故障安全相关风险以及人员暴露风险。关键举措囊括搭建运维平台、构造故障预测预警模型、推行远程运维与智能检修，以此增强运维的精准程度与安全水平。例如：汇川技术凭借其自身的工业互联网平台，向化工企业提供设备检测、预报预警以及远程运维服务，增进装备的稳定性，增进安全长效保障水平，该路径可助力运维模式实现转型，减少故障出现风险与人员暴露现象，引导本质安全管控向长效、日常稳定化方向发展。

2.4 协同体系智能化升级路径：构建本质安全协同生态

协同体系实现智能升级是构建本质安全协同生态的关键，其关键在于实现装备之间以及装备与工艺、管理的智能协同，进而提升管控在系统性和全面性方面的水平，关键举措囊括装备协同、装备与工艺的协同、装备与管理的协同，以此冲破信息壁垒，实现全流程各要素间的协同^[3]。例如：汇川技术同立邦涂料达成战略合作伙伴关系，促进装备与工艺、管理达成深度协同，形成本质安全的协同生态局面，为系统升级给出样本，其安全系统为协同升级做技术支撑，此途径推动本质安全从“单点强化”向“系统提升”过渡，强化安全成效，助力企业促成安全生产常态化局面。

3 机械装备智能化升级赋能化工企业本质安全提升的实施策略

基于上述“四位一体”的创新升级路径，结合化工企业生产实践与苏州汇川技术的案例经验，为推动机械装备智能化升级高效落地，进一步提升化工企业本质安全水平，提出以下针对性的策略，确保升级工作兼具创新性、科学性与可操作性。

3.1 立足企业实际，制定差异化升级方案

类型和规模各不一样的化工企业，其生产工艺、装备的实际水平与安全需求差异显著，机械装备智能化升级不能盲目跟风赶潮流，得依据自身实际境况制定不一样的方案，精细化工企业能把重点聚焦在装备本体的防爆化、精密化以及控制体系的精准化升级，以此来满足小批量、多品种生产的安全诉求；大型石化企业不妨把重点放在控制体系的协同化、运维体系的远程化以及协同体系的全面升级上，进而实现大规模、连续性生产的安全需求。企业在构建方案的阶段，

应当全面开展对自身生产现状及安全需求的调研,结合行业前沿实践与技术发展趋向,确定目标、任务与步骤,优先对核心关键、高危环节的装备实施升级,逐步推进全流程装备实施智能化升级,确保方案与实际相契合、切实可操作。

3.2 强化技术创新,提升升级核心能力

技术创新是引领机械装备智能化升级的核心驱动力,也是促进化工企业本质安全水平增强的关键依托,化工企业应强化与苏州汇川技术等专业智能化装备企业、科研院所的合作关系,着重就化工行业装备智能化升级的核心技术瓶颈展开联合攻关,重点攻占智能传感、防爆控制等核心技术高地,增强装备智能及安全相关性能。企业需提升技术研发的投入水平,培养承担装备升级实施、运维与优化任务的复合型人才队伍,增强自身技术应用与创新本领,保证智能化装备能稳定运转、有效发挥功效,为本质安全的提升提供技术后盾,可以借助智能化工大模型这类先进技术,加速装备升级和工艺优化深度聚合,拉高本质安全管控的智能化层级。

3.3 注重数据融合,强化数据支撑作用

数据是机械装备智能升级和本质安全管控的关键因素,智能化装备的自主识别、判定和告警,依赖对海量运行数据开展采集、分析与处理,化工企业实施装备智能化升级举措时,应聚焦数据融合,搭建整合型的数据采集与管理平台,整合装备的运行状况、工艺参数数值、故障现象、检修操作等方面的数据,以此实现数据的集中管理、共享及运用^[4]。要强化对数据质量的管控,保证数据真实无误、准确无差、完整无缺,依靠大数据分析跟人工智能算法,发掘数据背后存在的安全风险及优化空间,为装备运维、工艺优化、安全管理给予精准的数据后盾,达成安全风险精准鉴别、预先预报与高效化解,推动本质安全管控往“数据驱动”形式转变^[5]。

3.4 加强人才培养,夯实升级实施基础

专业人才的支撑是实现机械装备智能化升级落地的保障,复合型人才的稀缺限制着化工企业装备智能化升级及本质安全的推进,化工企业要积极推进相关人才的培养与引进:要针对现有的员工进行一套系统的培训,使他们掌握智能化装备的操作、日常检修与故障处理技能,提升他们运用智能化技术的能力,让他们可以操作装备、利用系统实施安全管控;需引进拥有化工专业知识、智能化技术能力以及安全管理经验的复合型人才,增大人才规模,让他们去做装备升级方案的拟定、实施、健全以及智能化系统的运行维

护事务,企业应构建成熟的人才激励机制,激励员工参与技术创新与装备升级,调动员工的积极性与主动性,为装备智能化升级和本质安全提升夯实人才根基。

3.5 坚持循序渐进,推动升级长效落地

机械装备的智能化升级归属系统工程,涉及装备改造、技术升级等多个范畴,无法于短期内完成,需要按顺序、逐个阶段开展,化工企业需依据自身的资金、技术以及安全要求,分阶段实施装备智能化升级,优先把核心关键以及高危环节的装备进行升级,积累经验完后再扩大相关范围,实现整个流程智能化的升级。企业需建立升级效果评估体系,按一定周期对实施效果进行评估,总结过往经验,查找存在问题,赶紧优化方案与策略,保证升级工作连贯开展、收获实际效果,助力本质安全水平增长,实现安全生产的长期有效状态^[6]。

4 结束语

在新型工业化和智能制造技术迭代的背景下,要实现本质安全与高质量发展,化工企业必须对机械装备进行智能化升级。本文以本质安全理论及装备智能化内涵为参照,结合苏州汇川技术支持企业升级的相关实例,提出了“四位一体”的创新升级方法,厘清了核心要点和实施办法,验证装备智能化升级对化工企业本质安全的提升作用。该办法突破了单点升级的局限,构建起一套系统的升级路径体系,实现了理论与案例的紧密融合。随着新技术的持续发展,装备智能化的升级路线也将一直完善,化工企业要借助“四位一体”的渠道与策略,促进装备智能化与本质安全的融合,加强企业间的合作,助力行业安全及智能化的高质量发展。

参考文献:

- [1] 李俊杰. 化工安全素养与职业能力的耦合探索 [J]. 大学教育, 2026(01):158-162.
- [2] 李风华. 防范化工行业安全视频智能识别报警系统的构建与发展分析 [J]. 中国安防, 2025(12):134-136.
- [3] 王小峰, 李祥太. 破解化工园区安全治理难题一体化管理路径赋能行业安全发展 [J]. 中国石油和化工, 2025(09): 61-63.
- [4] 蒋松. 化工行业安全量化表达研究 [J]. 现代职业安全, 2025(09):69-72.
- [5] 方好. “智”造筑起化工行业安全防线 [N]. 工商导报, 2025-07-08(013).
- [6] 陈德祥. 化工行业安全评价中关键风险因素的识别与控制方法 [J]. 应用能源技术, 2025(07):103-105.

CCUS 节能环保技术在综合智慧能源产业应用场景下的市场开拓

顾瑞恺

(华电科工股份有限公司, 北京 100071)

摘要 在“双碳”目标与能源安全双重要求下, 综合智慧能源被广泛用于承接高碳行业减排需求, 二氧化碳捕集、利用与封存技术 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 正从单一减排工具逐步转向系统治理选项。本文基于综合智慧能源的发展脉络, 梳理 CCUS 技术在产业层面的应用现状, 分析其在源网荷储协同中的价值机理, 构建“政策引导—场景嵌入—商业模式—生态共建”相衔接的市场开拓框架, 以为类似工程实践和制度设计提供有益参考。

关键词 CCUS; 环保技术; 综合智慧能源; 市场开拓

中图分类号: F407; X38

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.027

0 引言

综合智慧能源项目在多能互补、数字调度与区域一体化方面持续扩展, 高碳资产在新的系统架构下面临更严密的排放约束与转型压力。CCUS 被纳入国家和行业中长期规划, 角色由末端减排手段延伸到支撑深度减排的关键技术。现有研究多聚焦技术路线和单体工程, 针对综合智慧能源场景的系统嵌入、商业可行性和市场扩展机制关注不足, 有必要在统一框架下展开综合分析策略研究。

1 综合智慧能源产业发展与 CCUS 技术应用现状

在“双碳”目标与能源安全双重要求的格局下, 综合智慧能源产业被视为重塑能源供给与消费结构的重要载体。通过源网荷储协同、多能互补和数字化调控, 系统可以在同一平台上统筹电、热、气等多种形态, 为清洁能源消纳和终端减排提供条件, 并为高排放环节预留引入 CCUS 的技术接口^[1]。

从发展态势看, 综合智慧能源项目规模扩大, 参与主体多元, 目标由节能降耗延伸到经济性、灵活性与环境绩效的综合优化。相关规划和技术路线已将 CCUS 纳入深度减排工具组合, 将其视为约束存量高碳设施的关键手段。然而, 在成本水平、价格信号和制度支撑尚未充分到位的情况下, CCUS 在综合智慧能源场景中的应用力度仍然有限。碳排放约束趋严、绿色

金融扩展和环境监管强化, 为两者协同发展提供了基本框架, 相关主体可以在项目论证阶段同步考虑供能安全、资源配置与碳约束, 在统一决策体系下规划能源结构与排放管理。

2 CCUS 节能环保技术在综合智慧能源场景中的价值机理

在综合智慧能源系统中, CCUS 的作用体现在对系统约束条件与优化空间的再配置。综合智慧能源强调多能协同与柔性调节, 需要在供需平衡、成本控制与排放强度之间寻找相对稳定的运行区间。CCUS 可以作用于高排放源头, 通过集中管理和深度处理碳流, 释放部分碳约束空间, 使系统在维持供能安全的前提下提高减排水平。

从系统优化视角看, 综合智慧能源项目在配置减排技术时, 需要在多种方案之间进行组合选择。CCUS 可以与可再生能源开发、储能配置和需求侧响应构成技术组合, 使决策在总成本、减排潜力和实施周期等维度上进行权衡。项目评估可以将 CCUS 投入与节约的碳成本、减少的合规风险及可能获得的环境权益综合计量, 形成相对明确的边际贡献。通过规范监测、核算与报告, 减排量可以进入碳交易和其他环境权益交易安排, 为项目带来附加现金流, 并为金融机构识别项目绿色属性提供依据。

作者简介: 顾瑞恺 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 清洁能源。

3 面向综合智慧能源场景的CCUS市场开拓策略设计

3.1 聚焦政策导向，夯实示范基础

要推动CCUS技术在综合智慧能源中的市场开拓，必须先从政策层面入手，提供清晰的政策框架和支持。国家层面的政策可以在实现“双碳”目标的过程中发挥关键作用，尤其是在能源安全、减排责任与成本控制之间找到平衡。通过政策引导，鼓励企业在能源转型过程中逐步加大对CCUS技术的投入。为了进一步促进行业发展，应将CCUS列入长期能源规划和减排目标，确保政策支持的稳定性和连续性，消除企业在技术应用与投资决策中的不确定性^[2]。

为实现这一目标，政府可以通过设定明确的技术路径和实施标准，帮助企业厘清技术应用的边界及具体操作细则。这不仅有助于明确产业链条的各个环节，还能为后续项目的推广提供可复制的成功案例。同时，政策的明确性和导向性将有助于引导资本和技术资源的有效配置，避免在技术研发和产业化过程中遭遇瓶颈。此外，在具体的政策工具方面，政府还可以通过财政补贴、税收减免、绿色债券等方式减轻企业负担，尤其是在项目初期的高成本阶段。例如：在项目启动阶段，政府可以对那些在综合智慧能源系统中应用CCUS的项目提供资金支持，尤其是在具有重要示范意义的区域或重点行业，通过补贴、奖励等形式激励更多企业参与到这一领域中来。政策的持续性和对市场的长期预期将大大提升企业的投资信心，促进CCUS技术的广泛应用。

政策层面的稳定支持，也需要与地方政府的协同作用相结合。各地区可以根据本地能源结构和产业特点，制定差异化的实施方案，并以地方政府为纽带，推动当地企业和科研机构共同参与到技术研发和商业化应用的过程中。通过地方政府的政策推动，不仅可以为企业提供更多定制化的支持，还能在区域层面形成示范效应，进一步促进技术的快速普及与应用。

3.2 嵌入多元场景，拓展协同空间

在综合智慧能源体系中，CCUS应用可以作为贯穿源、网、荷、储各环节的关键纽带，通过多场景嵌入与协同运行，构建兼顾减排绩效、系统效率与经济性的整体方案。多元场景的有机布局，可以打通能源流与碳流，形成长期稳定的市场空间^[3]。

在场景识别层面，规划部门需要结合区域能源禀赋、产业结构和负荷特征，对适宜纳入CCUS的环节进行系统梳理。综合能源服务主体可以从电力、热力、

制氢、工业用汽等不同需求出发，构建若干具有内在关联的应用子场景，将分散的排放源与潜在利用或封存单元进行成组匹配。通过这样的梳理过程，可以明确各类场景的减排潜力、边际成本和技术条件，为后续项目组合和路径选择提供依据。在系统集成层面，工程技术团队需要从整体架构出发设计耦合方案，将CCUS环节与综合智慧能源系统中的调度、储能与需求响应有机结合。运营主体可以利用数字孪生、实时监测和预测模型，对不同场景下的负荷波动和碳流动进行动态分析，合理安排捕集装置启停和运行负荷，减少对基准能源系统的扰动。通过将碳捕集、输送、利用与封存嵌入统一的调控平台，可以在保障供能安全的前提下提高减排强度。

在多能协同层面，综合能源项目可以围绕园区、城市群或产业带构建跨行业协作网络，引导电力、热力、化工、建材等主体共享基础设施和减排成果。通过共用管道、压缩、监测等设施，可以摊薄单个项目的固定成本，提升利用率。区域内不同企业之间可以通过协议安排和市场机制，对碳源与碳汇进行统筹配置，实现减排责任和经济收益的合理分担，增强各方参与意愿。在模式创新层面，相关主体需要把多元场景视作测试和迭代应用路径的重要载体，主动探索“综合能源服务+CCUS技术服务”的复合供给形态。项目开发单位可以通过分阶段实施、分场景落地的方式，逐步扩展技术边界，积累运行数据和工程经验，为后续标准制定、成本测算和风险评估提供支撑。

3.3 优化商业模式，健全投融资链

在综合智慧能源框架下拓展CCUS市场，需要通过商业模式重构，将减排效益、系统灵活性和环境价值转化为可计量、可交易的收益项。项目方可以在成本、价格和风险三者之间重塑关系，使技术价值通过稳定现金流得以体现，由此为资本投入提供清晰的回报预期，为长期运营提供相对可靠的制度基础^[4]。

在收益结构设计上，项目开发运营主体可以将CCUS嵌入综合能源服务体系之中，将传统能源产品销售与减排服务、环境权益打包配置。企业可以通过“能源供应+碳减排承诺+环境绩效”一揽子方案，将碳捕集量、减排贡献度与服务价格相联系，形成多元收入来源。综合能源运营平台需要在合同条款中明确信息披露和绩效考核方式，使收益分配与减排结果、系统调节作用相匹配，增强商业模式的解释性与可复制性。在风险分担机制方面，项目方需要对建设期、技术、市场与政策等不同类型风险加以拆分，通过多方参与的项目结构实现分级承担。政府部门可以通过长期稳

定的政策信号、适度的财政与税收工具，承担一部分制度不确定性带来的风险；能源企业可以承担工程建设和运营管理方面的责任；金融机构可以在可控范围内承接收益波动带来的金融风险。通过长期购售电（热）协议、服务期内保底条款等安排，项目可以获得相对可预见的现金流曲线，降低外部资本进入门槛。

在投融资工具配置方面，项目筹划阶段需要与绿色金融体系进行深入对接，形成覆盖研发、中试、示范和商业化各阶段的资金供给链条。金融机构可以依据项目的减排效益和环境绩效，设计与之匹配的绿色信贷、绿色债券以及中长期专项贷款工具；产业基金和引导基金可以在早期阶段提供股权或准股权支持，缓解前期投入集中、回收周期长的问题。项目运营一段时间后，还可以在符合条件的前提下，探索以资产证券化、基础设施类公募产品等方式进行再融资，使沉淀资产重新转化为可投入的新资本。在价格机制与市场平台衔接方面，项目方需要构建规范的监测、报告与核查体系，为减排量进入碳市场和相关环境权益交易提供基础数据。综合能源服务企业可以将通过交易获得的碳收益，与终端用户的绿色采购需求相结合，设计多层次的低碳服务产品，强化 CCUS 在综合智慧能源场景中的“增值服务”属性。监管与行业组织可以在实践基础上不断完善计量标准和交易规则，使商业模式与投融资链条在制度层面实现良性互动，从而为 CCUS 节能环保技术在综合智慧能源产业中的持续扩展提供较为稳固的金融支撑结构。

3.4 强化生态共建，提升品牌价值

在综合智慧能源产业中推进 CCUS 应用，生态共建理念可以作为支点，通过重塑合作关系和认知结构，将技术优势与长期品牌建设联系起来。围绕“协同、透明、责任”构建运行框架，行业主体可以在减排绩效、市场声誉与社会认同之间形成联动，使节能环保技术由单一工程项目转化为较为稳定的价值符号^[5]。

在生态架构层面，综合能源企业需要从孤立项目思维转向网络化协同视角，将设备供应商、园区运营方、高排放用户、科研机构等纳入开放合作网络。企业可以搭建常态化沟通机制和共享数据平台，对减排目标、技术路线与运维标准进行协同研判，引导各方在统一规则下分工合作。随着参与主体的增多，资源配置弹性和风险缓冲能力会提升，CCUS 相关项目的议价能力与抗波动能力也会同步增强。在协同治理层面，行业骨干企业和专业机构可以联合推动联盟化运作，对综合智慧能源场景下 CCUS 应用的边界、责任与权利进行制度化表达，并通过技术规范、信息披露准则和环境

绩效评价办法形成具有约束力的行业共识。政府部门可以在政策设计中预留空间，把符合联盟标准的项目纳入重点支持范围，以认证和评价结果引导资源流向治理能力较强、合作基础较稳的主体。

在品牌塑造层面，综合能源服务商需要把 CCUS 实践嵌入整体品牌叙事，将节能减排成果、供应链管理和客户服务方案一体呈现。企业可以建立环境信息披露机制，用连续数据和可核查指标展现减排路径和管理改进，把“低碳可信度”转化为面向政府、资本市场和客户的共同信号。随着披露质量的提升，企业在参与公共项目遴选、资本合作和重点客户开发时，可以获得更高的信任溢价。在社会互动层面，项目实施主体需要加强与地方政府、社区与社会组织的沟通，将 CCUS 在综合智慧能源体系中的作用解释清晰，把安全管理、环境监测等关切点前置回应。通过听取反馈、优化方案和适度开放现场，项目可以缓解信息不对称引发的阻力，降低由认知偏差带来的社会风险。从长期看，强化生态共建可以为 CCUS 节能环保技术形成较为稳固的品牌支撑结构。行业主体在技术创新、治理能力、信息透明度和社会责任等维度持续积累，有条件把单个示范项目升格为区域或行业层面的“低碳名片”，在综合智慧能源产业的竞合格局中获得更优发展位置。

4 结束语

综合智慧能源为 CCUS 提供了集中排放管理和协同调度平台，CCUS 为高碳资产保留一定运行弹性的同时也增强了减排强度，二者在系统层面具有较强的互补性。本文围绕产业基础、价值机理与市场路径，对 CCUS 在综合智慧能源场景中的功能定位与扩展方向进行了梳理，提出以政策导向、多元场景嵌入、商业模式优化和生态共建为重点的开拓策略，为后续分阶段推进与区域化布局提供可借鉴的分析框架。

参考文献：

- [1] 李永辉. 工业节能环保技术在环境能源领域的应用研究[J]. 石化技术, 2024,31(10):151-153.
- [2] 程飞, 景晓栋, 田泽. 节能环保产业政策对企业技术创新的影响研究[J]. 科研管理, 2024,45(10):102-111.
- [3] 安栋. 节能环保技术在供暖通风系统中的应用研究[J]. 黑龙江环境通报, 2024,37(08):136-138.
- [4] 谭红妍, 田鸿业. 环保节能技术在给排水系统中的应用[J]. 清洗世界, 2024,40(08):45-47.
- [5] 李晓艳. 浅析燃煤锅炉的节能环保改造技术[J]. 能源与节能, 2024(04):79-82.

风电塔筒制作过程中的质量检验与控制

杨 龙

(中国水利水电夹江水工机械有限公司, 四川 乐山 614100)

摘 要 陆上风电塔筒的制作质量直接关系到风电整机长期运行安全, 是塔架设备制造公司的管控核心。本文以陆上风电塔筒制作全流程为研究对象, 深入分析风电塔筒制作质量控制要点, 聚焦原材料、设备、人员三大核心影响因素, 并系统阐述下料成型、焊接、防腐工序的精准检验技术, 在此基础上提出设备精度闭环管控、工艺参数数字化管控、全流程质量追溯管控三类实操方法, 旨在为塔架制造公司优化质量管控体系、提升产品稳定性、降低生产损耗提供技术参考, 筑牢陆上风电设备运行的结构基础。

关键词 风电塔筒制作; 质量检验与控制; 无损检测; 工艺数字化

中图分类号: TK8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.028

0 引言

在陆上风电产业稳步发展进程中, 塔筒作为核心承重部件, 其结构强度和制作精度对整机服役寿命及运行稳定性起着决定作用。为破解塔筒制作各环节的质量难点, 明确质量控制的核心逻辑, 本研究聚焦原材料、设备、人员等影响因素, 对各工序检验技术与管控措施进行细化, 从而构建全流程技术管控体系, 旨在对塔架制造公司提升批量生产质量的一致性、降低返工成本有所裨益, 为陆上风电设备制造的质量升级提供实操路径。

1 风电塔筒制作过程中的质量控制要点

风电塔筒属于典型的大型钢结构部件, 其制作质量的关键之处在于在全工序中贯穿设计精度和结构稳定性, 质量控制要点的实质是对各环节技术风险做出前置预判以及进行精准把控。从结构承载的核心需求角度出发, 质量控制需要围绕工序之间的关联性构建系统性逻辑, 既不将单一工序质量孤立起来看待, 也不忽略细节偏差给整体性能带来的连锁影响。质量控制要点表现为全流程的连贯性管控, 下料、成型、焊接、防腐各环节并非独立存在, 前道工序的质量状况直接对后道工序的实施基础和最终效果起到决定性作用, 需要将尺寸精度和结构完整性作为核心主线, 使各环节质量标准实现统一衔接。

2 影响风电塔筒制作质量的核心因素

2.1 原材料品质与适配性

原材料作为风电塔筒制作的物质基础, 其品质是结构强度的核心保障, 而适配性则决定加工环节的技

术兼容性, 二者共同构成质量管控的前置性要素。从材质本质来看, 品质直接关联塔筒承载能力的底线, 适配性则影响技术参数的落地效果, 缺一不可。

品质的核心内涵体现为材质的均匀性与力学性能的稳定性, 材质纯度不足或力学指标波动, 会直接导致塔筒结构存在潜在开裂、变形风险, 无法承受长期复合载荷作用。适配性并非单纯的规格匹配, 更强调原材料特性与加工工艺的内在契合度, 不同材质的物理化学属性, 对后续加工环节的技术适配边界形成天然约束, 而原材料自身的状态一致性则会通过加工环节的传导效应放大对最终质量的影响, 而适配性不足则会打破加工流程的技术平衡, 引发连锁性质量偏差。二者并非孤立存在, 品质为适配性提供基础支撑, 而适配性则让品质优势充分转化为产品质量, 共同构成塔筒制作质量的源头性影响因子。

2.2 设备精度与运维对塔架制作的影响

相较于原材料的基础作用, 设备精度是塔架制造公司将设计参数转化为实体塔架产品的核心依托, 而设备运维工作的核心价值在于保障设备精度的稳定输出, 避免因设备状态异常影响塔架制作质量, 二者共同构成塔架加工环节的硬件核心影响因素。

对塔架制作而言, 设备运维的核心目标是维持加工精度稳定性, 而非单纯的设备日常保养, 重点在于防控设备长期运行中出现的磨损、老化及参数漂移问题。设备精度的实现依赖各部件的协同运作, 任一环节的精度缺失都会形成短板效应, 而针对性的运维工作则是通过对核心加工设备全生命周期的动态管控,

作者简介: 杨龙(1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 新能源风电塔筒制作。

有效延缓精度衰减速度, 维持塔架加工质量的一致性, 二者形成互补支撑关系, 共同保障塔架制作的硬件基础可靠性。

2.3 人员技能与操作规范性

在硬件因素之外, 人员技能与操作规范性是衔接设备、工艺与原材料的核心人文因素, 直接影响技术落地的精准度, 人员技能决定对加工技术的掌控能力, 操作规范性则规避人为失误对质量的破坏。

人员技能体现为对设备操作、工艺原理及质量风险的认知与掌控能力, 其水平差异会导致相同设备、工艺条件下的质量输出差异, 这是加工质量波动的重要人为诱因。操作规范性则聚焦流程执行的一致性, 核心在于遵循技术逻辑, 规避主观随意性, 违规操作往往会直接引发显性或隐性质量缺陷, 且这类缺陷具有较强的随机性与隐蔽性。技能是规范性操作的基础, 只有具备扎实技能才能精准把握操作边界, 规范性则是技能价值最大化的保障, 避免技能优势因操作失范而抵消。二者相辅相成共同构成人为因素对塔筒制作质量的核心影响, 其管控效果直接决定硬件优势与工艺设计能否转化为合格产品。

3 风电塔筒制作过程中的质量检验技术

3.1 下料与成型工序精准检测技术

下料与成型工序的质量精度直接决定塔筒后续工序的适配性, 其精准检测技术的核心是通过量化验证设计参数落地效果, 从源头阻断尺寸与形状偏差的传导, 为焊接工序筑牢基础, 这类检测需兼顾宏观尺寸与微观形态, 依托成熟检测手段实现全维度管控^[1]。

下料工序检测以尺寸精准度与切口质量为核心, 核心依托激光测距仪与高精度游标卡尺构建双重检测体系。激光测距仪凭借 ± 0.05 mm 的测量精度, 对板材长度、宽度等宏观尺寸进行全点位核验, 确保偏差控制在设计阈值 ± 0.5 mm 内, 这一精度标准经行业长期实证, 可有效避免后续成型对接间隙超标, 而成型工序检测则在于聚焦筒节形状精度与曲率一致性。圆度仪作为核心设备, 通过环绕筒节至少 8 个截面的多点测量生成圆度偏差数据, 确保偏差 \leq 直径的 0.2%, 这一指标能避免塔筒运行中出现局部应力集中。对接精度检测采用塞尺与经纬仪协同作业, 塞尺精准测量对接间隙, 控制在 2 ~ 4 mm 的合理范围, 经纬仪则校准筒节直线度, 确保每米偏差 ≤ 1 mm, 防止对接错边量超过板厚的 10%。除此之外, 曲率样板的贴合检测在于验证卷制弧度, 确保与设计曲线的贴合度 $\geq 98\%$, 避免因曲率波动导致焊接间隙不均。整套检测技术形成“尺寸—形状—适配性”的全维度覆盖, 通过可量化

的实证数据, 精准把控下料与成型工序的质量底线, 为后续工序顺畅推进提供保障。

3.2 焊接工序无损检测技术

焊接焊缝是塔筒结构强度的核心承载区, 其内部与表面缺陷的隐蔽性决定了无损检测技术的不可或缺性, 这项技术以非破坏性为核心优势, 通过多手段协同实现缺陷的精准识别与量化, 保障焊缝符合长期承载需求, 检测逻辑需覆盖不同类型缺陷并弥补单一的技术盲区。

超声波探伤仪是焊缝内部缺陷检测的主力设备, 采用 2 ~ 5 MHz 频段探头, 检测灵敏度 $\geq 90\%$, 可精准识别气孔、夹渣等体积型缺陷及未焊透、裂纹等线性缺陷, 对面积 ≥ 5 mm² 的缺陷实现精准定位与量化, 作为补充手段, 射线检测技术针对性解决超声波检测盲区问题, 依托 X 射线穿透性成像, 检测灵敏度可达 0.1 mm, 对焊缝根部未焊透、微小裂纹等缺陷的识别准确率显著优于单一超声波检测, 尤其适用于塔筒环缝、纵缝等关键焊缝的二次核验, 与此同时磁粉检测技术聚焦焊缝表面及近表面缺陷, 可识别宽度 ≥ 0.2 mm、深度 ≥ 0.1 mm 的表面裂纹, 通过磁痕聚集效应实现可视化识别, 检测覆盖率达 95% 以上, 能有效排查焊接接头等应力集中区域的隐性表面缺陷。三类技术协同形成“内部 + 表面、主力 + 补充”的检测体系, 既遵循焊缝缺陷的分布规律, 又通过经实证的精度数据, 确保焊缝无致命缺陷, 保障塔筒结构承载的稳定性, 最终避免因焊缝失效引发的安全风险。

3.3 防腐工序全流程检测技术

防腐工序的防护效果直接决定塔筒陆地服役寿命, 全流程检测技术的核心是覆盖表面处理至涂层固化的全链条, 通过量化指标验证防护性能, 抵御潮湿、风沙等环境侵蚀^[2]。检测需聚焦各环节关键指标, 确保防护层与钢材的稳固结合。

防腐工序全流程检测技术的核心在于表面处理环节的检测, 该环节直接决定涂层附着牢度, 采用对比样板法与粗糙度仪协同进行检测, 通过对比 Sa2.5 级标准样板确保钢材表面油污、氧化皮等杂质清除率 $\geq 95\%$, 仅残留附着牢固的极少量锈迹, 这一除锈等级经长期实证, 可使涂层附着力提升 40% 以上。表面粗糙度通过粗糙度仪量化, 控制 Ra 值在 40 ~ 80 μ m, 该区间既能为涂层提供充足附着点, 又可避免粗糙度超标导致涂层局部厚度不均。进一步来看涂层施工环节的过程检测则是聚焦于厚度的均匀性, 湿膜测厚仪实时采集数据, 根据设计厚度 80 ~ 120 μ m/道调整喷涂参数, 确保湿膜厚度偏差 $\leq \pm 10$ μ m, 避免局部过厚引发固

化不充分或过薄导致防护不足。涂层固化后干膜测厚仪采用网格布点法检测,每平方米布点不少于5个,确保平均厚度符合设计要求,单点偏差 $\leq \pm 5 \mu\text{m}$,合格率需达到100%,同时附着力与针孔缺陷检测是最终验证手段,划格法检测中,涂层经划格、胶带撕扯后无整片脱落,边角翘起 ≤ 1 级,符合行业附着标准,而电火花检测仪采用的是5~15 kV电压检测,可识别直径 $\geq 0.05 \text{ mm}$ 的针孔缺陷,这类缺陷若漏检会加速局部腐蚀。全流程检测通过量化实证数据构建防护性能的闭环验证,确保塔筒在陆地复杂环境下的服役寿命 ≥ 20 年。

4 风电塔筒制作质量的控制措施

4.1 设备精度闭环管控措施

对塔架设备制造公司而言,设备精度闭环管控是锁定加工质量底线的核心手段,其核心逻辑并非单一校准行为,而是构建“预判—管控—反馈—优化”的全周期体系,以设备精度稳定性支撑塔筒制作各工序的质量输出^[3]。塔架制造公司需按设备重要性实施分级管控,将数控下料机、卷板机等核心加工设备与辅助设备区分管控,核心设备直接决定塔筒尺寸精度与成型质量,需建立动态校准机制,实时跟踪精度衰减曲线,而非依赖固定周期校准,精准匹配设备运行损耗规律。塔架公司需配备专业校准团队,结合生产间隙开展精度检测,在设备精度接近临界值前提前安排校准,避免生产中断与质量返工,同时塔架制造公司还需强化精度数据与生产批次的关联管理,将每次校准结果、运行偏差数据同步至生产系统,与对应批次塔筒加工质量绑定,通过数据复盘优化校准周期与参数设置。

4.2 工艺参数数字化管控措施

塔架制造公司规模化生产场景下,工艺参数数字化管控的核心价值在于消解人为干预的不确定性,通过数据驱动实现工艺执行的标准化,以参数精准度保障批量塔筒产品的质量一致性。塔架制造公司需搭建专属工艺参数数字化平台,将下料、焊接、防腐等各工序设备与平台联网,实现切割速度、焊接电流、喷涂流量等关键参数的实时采集与集中管控,打破工序间参数信息壁垒,确保参数调整的联动性^[4]。塔架公司可基于过往生产数据构建分类参数数据库,按塔筒规格、原材料特性存储最优参数组合,在新批次生产时直接调用并微调,缩短工艺调试周期,减少试错损耗。平台需设置动态预警阈值,当参数超出合理范围时自动联动设备停机并报警,规避人为监控滞后导致的质量缺陷,同时塔架公司还可依托数据追溯功能,复盘参数波动与质量问题的关联关系,针对不同加工

场景优化参数配比让工艺参数随生产经验积累持续迭代。这种数字化管控既契合塔架公司规模化生产需求,又通过参数精准把控提升产品质量稳定性并降低因参数偏差引发的返工成本,从而实现质量与效率的平衡。

4.3 全流程质量追溯管控措施

全流程质量追溯并非单纯的责任界定工具,其核心是通过全链条数据关联,实现质量问题的精准溯源与管控优化,为持续提升产品质量提供数据支撑,贴合塔架公司全周期质量管控需求^[5]。塔架制造公司需为每批次塔筒分配唯一追溯编码,作为质量数据关联的核心载体,实现原材料信息、加工设备参数、各工序检测结果、操作人员信息的精准绑定,确保全流程数据可查可追。在生产过程中,操作人员需实时录入关键质量数据,杜绝数据断层或造假,保障追溯信息的完整性与真实性。当出现质量问题时塔架公司则需通过追溯编码快速定位问题发生工序、对应设备及责任人,精准分析成因,避免盲目排查全流程,提升问题解决效率,同时塔架公司还需将追溯数据与质量改进体系联动,汇总高频质量问题的共性规律,针对性优化管控措施并形成“追溯—分析—改进—优化”的良性循环。这一措施既满足塔架公司对产品质量的全周期把控需求,又通过数据支撑实现质量持续提升,增强产品市场竞争力与品牌公信力,契合了塔架制造公司的长期发展诉求。

5 结束语

陆上风电塔筒制作质量管控需贯穿全工序,核心在于平衡各影响因素、优化检验技术与落实管控措施。本研究明确了原材料、设备、人员的核心影响作用,并细化了各工序检验标准。在未来的风电塔筒制作中,塔架制造公司还需深耕技术创新并推进检测设备智能化、工艺管控数字化升级,最终实现质量与效率的协同提升。

参考文献:

- [1] 胡赢,陈旺明,李怿炳,等.风电塔筒高强钢焊接过程与质量控制[J].工程设计与设计,2025(24):240-242.
- [2] 石登钊.陆上钢制风电塔筒制作工艺及质量控制研究[J].装备制造技术,2025(11):167-170.
- [3] 胡学锋.风电塔筒制作中的关键质量控制点探究[J].中国战略性新兴产业,2025(26):85-87.
- [4] 香东远.风电塔筒制作过程中的质量检验与控制研究[J].机械管理开发,2023,38(03):65-67.
- [5] 陆伟大.风电塔筒制造技术及质量控制探讨[J].中国设备工程,2021(04):189-191.

工程机械电气故障诊断技术及维修策略研究

王 珅, 刘旭鹏, 王嘉瑞

(烟台港股份有限公司联通国际件杂货码头分公司, 山东 烟台 264000)

摘 要 工程机械电气控制系统是工程机械的核心组成部分, 其故障表现多样、结构复杂, 给工程机械电气故障诊断与维修带来巨大挑战。本文主要从工程机械电气故障维修实践出发, 分析电气系统中电源、控制、执行三大子系统的典型构成以及常见故障特征, 并重点剖析电气控制系统中启动异常、动作失灵、信号紊乱等故障问题。以此为基础, 深入分析经验判断、仪器检测、智能辅助的电气故障诊断方法适用场景以及操作要点, 旨在解决工程机械电气故障诊断与维修难题, 明确具体的诊断与维修工作策略, 为提高工程机械电气故障解决效率以提升运行效率和质量提供参考。

关键词 工程机械; 电气故障; 故障诊断; 故障分级

中图分类号: TH17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.029

0 引言

目前, 工程机械电气系统已经融入动力控制、作业逻辑、安全连锁、信息交互等多项核心功能, 这使得工程机械设备整机的运行水平全面提升。工程机械电气系统主要由电源、控制器、传感器、执行器、线束网络等部分组成, 其在运行中存在电压等级多、信号类型杂、工作环境干扰强等特点。如果工程机械电气系统存在故障, 轻则造成设备停机, 重则引发严重安全事故。而工程机械电气系统维修人员在实际工作中面临故障定位难、修复周期长、同类问题反复发生等挑战, 需要结合具体故障问题选择科学合理的故障诊断方法以及维修策略。

1 工程机械电气系统结构特点

1.1 电源系统特点

工程机械电源系统以柴油发电机为主电源, 辅助使用蓄电池组保证其正常运行。电源系统的工作电压为 12 V 或 24 V 直流低压系统, 其作用是工程机械的控制、照明以及启动; 有些大型工程设备还配置 380 V/220 V 交流系统, 能够满足空调、电焊等辅助设备使用需求。工程机械的电源输出经过配电箱分配到各用电单元, 在系统内设置熔断器、继电器以及电源管理模块保证正常运行。同时, 工程机械的电源系统需要在发动机启停、负载突变等工况条件下保持电压稳定, 并且具备过压、欠压以及短路保护等多样化功能^[1]。

1.2 控制系统特点

工程机械电气控制系统以可编程控制器或专用电子控制单元作为核心, 其需要接收来自操作手柄、传感器、开关等输入信号, 并且经过逻辑运算后输出指令驱动执行元件。控制系统信号主要为数字量、模拟量以及 CAN 总线通讯数据, 其控制逻辑嵌入到程序内实现动作互锁、顺序控制、故障报警等多样化功能。工程机械电气控制系统一般采用分布式架构设计方式, 其主控单元和远程 I/O 模块利用现场总线连接, 能够有效减少设备中线束数量。此外, 工程机械的控制柜安装在驾驶室或设备本体内, 其需要满足防尘、防震、宽温工作要求以降低故障率。

1.3 执行元件与线束网络特点

工程机械中电气系统执行元件包含电磁阀、比例阀、接触器、电机以及液压控制器, 其能够直接完成动作输出。电气系统执行元件工作状态受控于控制元件发出的电信号, 其运行时功率较大, 一般需要在中间继电器或功率放大模块中进行驱动。电气系统线束网络连接所有电气部件, 其采用多芯屏蔽电缆按功能分区布线, 并将线路布置在线槽或护套内。而电气系统中接插件需具备防水、防尘的特性, 尤其在长期运行过程中不会发生松动、氧化等缺陷。此外, 电气系统线束走向需避开高温、运动部件以及尖锐边缘, 但长期运行存在磨损、挤压、老化等问题。

作者简介: 王珅 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术。

2 工程机械常见电气故障类型

2.1 电源系统故障

工程机械电气故障中电源系统故障发生率较高,其主要表现形式为整机无电、启动困难或电压异常波动。电源故障发生原因如下:蓄电池亏电、极柱腐蚀、电极液干涸;发动机皮带断裂、调节器失效造成充电不足;配电箱内熔断器熔断、继电器触点烧蚀;电源线束磨损、搭铁或短路。工程机械电气系统处于低温条件下,蓄电池极易引发启动失败,而电压不稳定则会造成控制器复位或传感器误报^[2]。

2.2 控制系统故障

控制系统故障多表现为动作失灵、逻辑混乱或显示屏报错。硬件方面包括控制器内部芯片损坏、I/O模块故障、CAN通信中断;软件方面涉及程序丢失、参数错乱或版本不匹配。传感器信号异常(如压力、角度、位置传感器漂移或断线)会向控制器输入错误信息,导致误动作。操作手柄电位器磨损造成信号跳变,引发执行机构抖动。线束破损导致信号串扰或短路,也会扰乱控制逻辑。此类故障往往伴随故障代码,但代码仅指示现象,需结合原理图深入分析根本原因。

2.3 执行元件故障

工程机械电气系统执行元件故障造成动作无法完成或性能下降,其表现形式如下:电磁阀线圈烧毁、阀芯卡滞造成液压回路不通;比例阀反馈信号丢失导致流量失控;接触器触点粘连或烧蚀引发电机无法正常启动;电机绕组短路或轴承损坏引发过热停转。工程机械电气系统执行元件运行环境恶劣,其在投入使用中受到高电压、大电流、机械冲击影响引发绝缘老化与连接松动。同时,有些电气故障存在渐进性,如磨损初期只表现为响应迟缓,后期则完全失效^[3]。

3 电气故障诊断技术方法

3.1 传统诊断法

在工程机械电气故障诊断领域,传统诊断方法高度依赖维修人员经验积累与基础检测工具。在电机故障诊断过程中,维修人员与操作人员沟通了解故障现象、发生时机以及伴随声响气味,进而初步确定故障发生范围。而后维修人员目视查看线束是否破损、接插件是否松脱、元器件是否有烧焦痕迹,并且辅助使用万用表检测各关键点电压、电阻以及通电。此时检测通电状态下电源电压是否正常,信号线是否有预期电平;断电后检测线路通电以及对地绝缘状态。而在电气故障诊断中采用分段隔离法逐个断开负载或模块,以缩小故障检测区间。针对工程机械电气系统的动作

类故障,其采用手动触发继电器或短接控制信号方式检测执行元件是否存在故障。该检测方法具备适用广、成本低等特性,尤其针对复杂、间歇性故障诊断效率较低,对于维修人员的专业技能要求极高^[4]。

3.2 仪器辅助诊断

工程机械电气故障诊断使用仪器辅助检测方式,其能够提高电气故障检测的精度以及效率。在电气故障检测中,使用示波器观测传感器或控制信号波形,能够精准识别噪声干扰、信号畸变或频率异常,其一般应用在模拟量与PWM信号分析时。CAN分析仪接入电气系统的总线读取通信报文,能够检查电气系统节点是否在线、数据是否更新、是否存在错误帧,进而快速确定网络层故障。绝缘电阻仪检测电气系统中高压线路或电机绕组绝缘,能够有效防止发生漏电风险。钳形电流表非接触测量电流大小,能够判定其负载是否过载或开路。故障诊断仪利用OBD接口读取控制器存储的故障码以及实时数据流(油门开度、液压压力、电机转速等),以辅助判断传感器或执行器的工作状态。使用前需熟悉仪器操作规范,选择合适量程与探头。测试时注意安全,避免短路或反接。仪器数据需结合系统原理解读,单一参数异常未必是故障根源。例如:某传感器信号漂移,可能是其自身损坏,也可能是供电不稳或参考地不良所致。仪器诊断应作为传统方法的补充,而非替代^[5]。

3.3 智能诊断技术

工程机械电气故障采用智能诊断技术具备较高先进性,其利用数据驱动与算法模型进行电气系统故障的预测与识别。在工程机械电气系统中安装数据采集终端,能够及时获取设备运行中电压、电流、温度、振动、控制信号等多维参数以形成运行数据库。而在数据获取之后,利用机器学习算法对历史故障样本进行训练,从而构建故障分类模型。如果设备运行中新数据输入,则利用模型自动输出故障类型以及置信度。有些智能诊断技术采用深度学习处理时序信号,能够精准识别早期微弱异常。智能诊断技术应用中构建远程监控平台,其能够实现多台设备故障数据聚类分析以发现共性缺陷,并且结合数字孪生技术在虚拟模型内复现故障,以帮助维修人员制定适宜维修策略。该技术需大量高质量数据支撑,初期投入较高。模型需定期用新故障案例更新,避免过时。目前多用于高端或大型设备,对中小机型仍以规则库为主。实际应用中,智能系统通常给出预警与建议,最终判断仍需人工确认。其价值在于将被动维修转为主动干预,减少突发停机。

4 维修策略制定与实施

4.1 故障分级

工程机械电气故障诊断过程中,需结合电气故障对安全生产、成本影响程度划分为三级:一级故障指危及人身或设备安全的隐患,其主要为主电源短路、制动控制失效、高压漏电等类型,需要及时停机处理。二级故障造成工程机械功能丧失或效率严重下降(行走无动作、挖掘无力、关键传感器失效等),需要在当日或次日组织维修以防影响工期。三级故障指的是不影响工程机械作业的轻微异常(照明不亮、空调失灵、非关键报警等),将这些故障作为非计划性维护内容在定期保养时一并处理。工程机械电气故障分级标准需结合不同机型以及工况确定,并明确各类故障响应时限以及处置权限。

4.2 预防性维护措施

工程机械的预防性维护措施制定能够提前发现隐患,防止工程机械发生突发性故障。针对预防性维护策略制定定期检修计划,具体为下述内容:清洁控制柜内灰尘、紧固接线端子,并且检查电气系统线束固定是否牢固;检测工程机械蓄电池电压与内阻,清理极柱氧化物;校验传感器零点与量程保证信号传输准确;检查继电器、接触器触点磨损情况,如有必要进行设备更换;更换控制器软件至最新稳定版本。在工程机械维护过程中,针对季节转换或高负荷作业前组织专项维护,如雨季前检查全车绝缘、冬季前检查加热元件等。针对工程机械管理需建设设备健康档案,记录每次维护数据以及更换部件,并且分析工程机械电气系统的劣化趋势。

4.3 快速修复与备件管理策略

工程机械电气故障的快速修复需根据标准化流程进行,并且准备充足备件以提高检修效率。对于工程机械电气系统常见故障需要编制《电气故障应急处置卡》,其明确诊断步骤、所需工具以及替换件号,并且张贴在驾驶室或维修间。同时,针对工程机械电气故障维修,采用模块化更换方式将易损单元设计为快插式以便缩短拆装时间。建立两级备件库存:现场维修车携带高频消耗件(保险丝、继电器、传感器);项目部仓库储备核心组件(控制器、电机、阀组)。备件管理采用 ABC 分类法,A 类高价值关键件少量储备,B 类常用件适量储备,C 类低值易耗件批量采购。引入条码或 RFID 技术跟踪备件出入库与安装位置,实现全生命周期追溯。与供应商签订快速响应协议,对缺货件承诺 24~48 小时到货。修复后需进行功能测试与

参数校准,确保系统恢复正常。记录每次修复时间与成本,用于优化备件清单与维修方案。

4.4 安全操作规范与防二次损伤要点

工程机械电气维修需严格遵循安全规程,以免在维修过程中引发人员伤害及设备二次损坏。在工程机械电气系统检修前切断整机电源,拔下启动钥匙、断开蓄电池负极,并悬挂“禁止合闸”警示牌。而设备中高压系统需验电确认无电后再进行操作,并且维修过程使用绝缘工具、穿戴防护手套与眼镜。在机械检修时禁止带电插拔控制模块或传感器接插件,防止静电或浪涌击穿芯片。在工程机械电气系统测量时选择合适量程的测量工具,禁止电流档测电压。而在工程机械电气系统元件更换前,重点核对型号参数以及接线顺序,防止错装而引发严重故障。工程机械电气系统线束拆装前标记对应关系,防止恢复时存在接错现象。对于 CAN 总线等通信线路禁止随意剪切,必须使用专用接线端子压接。在工程机械电气系统维修结束后,检查是否遗留工具、短接线路或松动接头,并且每项操作有两人协同,一人操作、一人监护以达到安全性要求。

5 结束语

工程机械电气故障的特点是隐蔽性与多样性,采用单一诊断方法无法覆盖所有的故障情况。维修人员需采用经验判断、仪器检测、智能分析等手段形成互补诊断方式,并对工程机械电气故障进行合理分级,统筹安排预防性检查、快速修复以及安全操作方式,确保工程机械电气系统正常运行。此外,在信息时代背景下,想要更进一步提升工程机械电气故障的诊断效率,确保电气故障维修更加稳定,就要积极引入数字化、智能化等诊断技术,确保工程机械电气故障得到及时排除,以保证工程机械电气设备安全稳定地运行。

参考文献:

- [1] 毕延军.智能化技术在电气控制设置及电气故障诊断中的应用探讨[J].世界有色金属,2024(10):29-31.
- [2] 韩意.电力设备故障诊断与预测技术研究[J].家电维修,2024(08):98-100.
- [3] 陈刚.电气自动化设备故障诊断与预测维护技术发展探究[J].仪器仪表用户,2024,31(11):93-95.
- [4] 袁瑞.智能化技术在电气工程故障中的诊断研究[J].塑料包装,2025,35(06):124-126.
- [5] 付天昊.电气工程中现代制造设备的维护与故障诊断[J].电气技术与经济,2025(08):140-144.

10 kV 变配电室电气设备安装 质量控制策略研究

王学刚

(山东能源集团发展服务集团有限公司鲁西分公司, 山东 菏泽 274700)

摘要 10 kV 变配电室是电力系统配电环节的核心部分, 设备安装质量直接关系到电力供应的稳定状态、安全水平与持续能力, 对工业生产正常推进、居民日常用电保障及各类场景用电需求的满足影响深远。结合现场施工积累的实践经验与行业现行规范要求, 围绕 10 kV 变配电室电气设备安装全流程, 梳理变压器、高压开关、配电柜等核心设备安装的关键要点, 分析安装过程中常见质量隐患及深层诱因, 提出优化安装流程、强化过程管控、完善验收标准等策略, 以期有效规避安装偏差、接触不良等问题, 以期提升设备安装整体质量与运行可靠性提供参考。

关键词 电力系统; 10 kV 变配电室; 电压转换; 电气设备; 安装质量

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.030

0 引言

社会经济持续发展推动各行业用电需求不断增长, 对电力系统供电可靠性、稳定性的要求也逐步提升。10 kV 变配电室承担着电力输送、电压转换、负荷分配的重要职能, 是衔接高压电网与低压用电终端的关键部分, 其运行状态直接影响电力系统整体供电质量。电气设备安装工序繁杂且技术要求严格, 任一环节出现质量疏漏, 不仅可能引发设备故障、供电中断, 还可能造成安全事故与经济损失, 做好安装质量管控工作尤为关键。

1 10 kV 变配电室电气设备安装的特点

10 kV 变配电室涉及的电气设备品类不少, 变压器、高压断路器、隔离开关、配电柜、互感器和避雷器都在其中。每种设备的结构原理、安装工艺以及技术标准都不一样, 不能套用统一方案, 需要结合设备自身特性制定适配的安装方案。施工环境的限制也很明显, 变配电室多数布置在室内, 少数布置在地下或半地下区域, 施工可用的空间不算宽裕。而且环境的湿度、温度还有洁净度都有具体要求, 防护手段必须到位, 不然环境因素容易影响安装质量。安全风险也不能忽视, 10 kV 设备本身带有高压电, 安装全过程都可能出现触电、设备损坏等问题, 安全管控与操作规范要落实到位, 同时得兼顾施工质量和作业安全, 两者不能偏废。

2 10 kV 变配电室电气设备安装质量控制的重要性

严格的质量控制能减少设备绝缘失效、接线错误、部件松动等问题, 相应也能降低短路、漏电这类安全事故的发生概率, 为施工人员和后期运维人员的人身安全筑牢基础。从设备运行来看, 只有安装质量符合标准, 设备运行参数才能贴合设计需求, 不会因安装偏差出现发热、异响、能耗增加等情况, 变配电室供电的稳定性也能提升, 供电中断的频次和时长都会减少。质量控制还能降低后期设备维修、改造的相关成本, 避免因质量问题造成停产损失和故障抢修支出, 延长设备的使用年限与变配电室的运维周期, 更好实现电力工程建设经济效益。规范的安装质量控制能带动电力施工行业朝着标准化方向推进, 提升行业整体的施工技术水平和工程质量。

3 10 kV 变配电室电气设备安装前期准备阶段质量控制

3.1 技术准备与方案优化

施工单位技术人员前期准备工作要提前落地, 核心是将设计图纸、现行施工规范、设备原厂说明书等资料充分研判。变配电室建设规模大小、各台设备型号参数、具体安装技术要求以及明确下来的质量标准, 都得做到精准掌握、熟记于心, 无任何模糊偏差。设计图纸很难做到完全合理, 设备布局相互冲突、接线

作者简介: 王学刚 (1987-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 配电室电气设备。

路径标注不清、基础预留尺寸存在偏差等问题,都必须在施工正式开始前排查完毕。施工单位要主动联动设计单位、建设单位,组织三方开展图纸会审,形成正式会审纪要,将各方提出的修改意见逐一落实,从源头杜绝图纸问题可能给后续施工埋下的质量隐患。结合工程实际制定的施工组织设计方案,各环节施工进度、核心技术要点、合理施工进度以及质量控制责任分工都要明确,不留任何模糊空间。变压器吊装、高压设备接线、绝缘性能测试等关键工序,还需单独编制专项施工方案,把每一步操作步骤和安全防护相关要求细化到具体动作^[1]。方案编制要充分结合现场施工条件,施工空间宽窄、吊装设备选型适配度、环境保护具体需求等因素都要考虑在内,保证方案既有针对性又能落地执行。施工图纸与技术文件的审核是确保施工质量的前提,任何偏差都可能导致工程返工或质量缺陷。施工前的准备工作应包括对图纸的详细审查与现场条件的评估,保证所有施工活动都在控制之中。

3.2 人员配置与能力管控

10 kV 电气设备安装对操作人员专业能力的要求较高,施工单位必须组建专门施工团队,配备数量充足且持有有效证件的上岗人员,电气工程师、专业安装技工、质量检测人员等核心岗位一个都不能缺。操作人员的资质证书要逐一严格审核,确认其具备对应岗位所需操作能力,无证上岗、跨岗位操作这类违规行为要坚决杜绝。安装工作正式启动前,施工单位要组织全员开展岗前培训,培训内容涵盖施工方案细节、技术规范要求、安全操作流程、质量控制核心要点以及应急处理相关措施。考虑到 10 kV 高压设备安装的特殊属性,高压接线技巧、绝缘测试方法、设备调试流程这些关键技能要作为培训重点,通过真实案例拆解、现场实操演练等方式,提升操作人员识别质量隐患的能力和应对突发情况的应急处置水平^[2]。同时要搭建完善的人员绩效考核机制,把安装质量情况和个人绩效直接挂钩,强化操作人员的责任意识,减少因操作疏忽、违规施工引发的质量问题。

4 10 kV 变配电室核心电气设备安装质量控制要点

4.1 变压器安装质量控制

变压器作为变配电室的核心设备,承担着电压转换的关键功能,安装质量优劣直接关系变配电室整体供电稳定性。吊装、就位、接线、注油及绝缘测试等关键环节,每一处的质量都要重点把控。吊装时要选用载荷匹配设备的吊装工具,搭配经验丰富的专业吊装人员,吊装绳索只能固定在设备指定吊点,严禁直接接触设备本体,防止造成设备损坏。吊装过程中要平稳控制速度,始终保持设备平衡,避免出现倾斜、

碰撞等情况,确保设备安全准确就位。设备就位后,需及时调整水平度与垂直度,水平偏差控制在 0.5% 以内,垂直度偏差也要严格契合设计文件要求。就位完成后紧固设备底座螺栓,要保证各螺栓受力均匀,避免螺栓松动导致设备运行时产生振动,影响整体运行稳定性。接线前先核对高低压侧接线端子与电缆规格是否匹配,再彻底清理端子表面氧化层和油污,确保接线接触良好。接线操作严格按照接线图进行,杜绝接线错误、漏接、错接等问题,接线完成后再次紧固接线螺栓,做好清晰易懂的接线标识,为后续运维工作提供便利。油浸式变压器注油时,合理控制注油速度和油量,注油前仔细检查油箱密封性,防止出现漏油现象。注油后让设备静置足够时间,再检测油位、油质,确保油位符合设备标准,油质无杂质、无水分^[3]。

4.2 高压开关安装质量控制

高压开关包含断路器、隔离开关等品类,核心功能是控制电路通断、保护设备运行安全,其安装质量直接影响整个电力系统的运行安全。基础验收、设备就位、机构调试、接线及密封性检测等环节,都要做好质量把控,不能有任何遗漏。设备就位前,再次核查基础尺寸、预留螺栓位置是否准确,将基础表面杂物彻底清理干净,为设备平稳就位创造良好条件。断路器安装时,重点调整分合闸机构,确保分合闸动作灵活、精准,分合闸间隙符合技术规范。安装真空断路器,要仔细检查真空灭弧室密封性,防止真空度不足影响灭弧性能;安装 SF₆ 断路器,严格控制 SF₆ 气体充装量与纯度,充装后必须开展气密性检测,确认无漏气才能进入下一步施工。隔离开关安装需精准调整触头接触间隙,保证接触紧密,避免运行时因接触不良产生发热现象,同时调整好操作机构,确保分合闸到位、锁定可靠,防止意外脱扣^[4]。接线环节选用符合高压运行要求的电缆与接线端子,接线螺栓紧固时保证受力均匀,降低接触电阻过大带来的安全隐患。

5 10 kV 变配电室电气设备安装过程质量监督与管控

5.1 建立分层质量监督体系

施工单位要建立“班组自检、技术复检、专项巡检”的分层质量监督体系,明确各层级监督责任和具体工作内容,形成完整监督闭环,确保质量管控覆盖所有环节。班组自检由施工班组负责人组织,每道工序完成后都要开展全面细致的自检,核查施工质量是否符合操作要求和质量标准,自检合格后填写详细自检记录,经确认无误方可进入下道工序,自检不合格则立即组织整改,直至符合要求。技术复检由专业技术人员负责,针对班组自检合格的工序进行抽样复检,关

键工序、隐蔽工程列为复检重点，复检不合格下达书面整改通知，明确整改要求和期限，督促班组按时整改，整改后经复检合格才能继续施工。专项巡检由质量检测部门牵头，定期对施工现场开展全面巡检，重点排查施工流程执行情况、设备安装质量达标情况、安全防护措施落实情况等，巡检发现的质量隐患，要明确整改责任人、具体措施和期限，安排专人跟踪整改进度，确保隐患彻底消除。

5.2 关键工序与隐蔽工程重点管控

变压器接线、高压电缆敷设、接地系统施工等关键工序与隐蔽工程，因施工难度大、后期整改成本高且不便，必须强化重点管控，实施全过程旁站监督。隐蔽工程施工前，监督人员先检查施工准备情况、技术交底落实情况，确认所有条件满足后再允许施工。施工过程中监督人员全程在岗跟踪，检查施工工艺是否规范、材料质量是否达标、操作规范是否严格执行，发现施工单位违规操作及时制止并督促纠正。隐蔽工程完成后，组织建设单位、设计单位、监理单位共同验收，验收合格并签署相关记录后，才能进行覆盖施工，坚决杜绝隐蔽工程遗留质量隐患。关键工序施工时，监督人员重点核查技术参数、操作流程是否符合要求，变压器注油速度、高压开关分合闸间隙、配电柜接地电阻等核心参数逐一核对，发现施工偏差及时督促整改。

6 10 kV 变配电室电气设备安装验收阶段质量控制

6.1 分阶段验收实施

验收工作需结合施工进度分阶段开展，不能等到全部施工完成后一次性验收，否则容易遗漏问题且整改难度加大。验收主要分为基础工程验收、设备安装中间验收、试运行验收及竣工综合验收四个阶段。基础工程验收重点核查基础尺寸、混凝土强度、预留螺栓位置是否符合设计要求，基础表面平整度、牢固性也纳入验收范围，基础质量不达标，会直接影响后续设备安装质量和运行稳定性。设备安装中间验收在变压器、高压开关、配电柜等核心设备安装完成后开展，重点检查设备安装位置准确性、接线质量合格情况、固定牢固程度，及时发现并整改设备安装过程中出现的问题，避免问题累积到后期难以整改。试运行验收需在设备安装与调试全部完成后进行，模拟正常运行状态，检查设备运行参数稳定性、动作可靠性、安全保护性能达标情况，试运行时间要满足规范要求，不能为赶进度随意缩短。竣工综合验收由建设单位牵头，联合设计单位、施工单位、监理单位共同参与，对整个变配电室安装工程质量进行全面评估，各单位达成一致意见后，才能确认验收合格并出具验收报告。

6.2 验收项目与标准把控

验收项目要全面覆盖电气设备安装全流程，不能存在任何遗漏，核心涵盖设备外观质量、安装位置准确性、接线规范性、接地可靠性、绝缘性能、运行参数等内容。设备外观质量验收需检查设备无变形、无破损、无锈蚀，各部件齐全且安装牢固，标识清晰准确，能清晰区分设备型号和用途。安装位置验收要核对设备实际位置与设计图纸一致性，水平度、垂直度偏差控制在规范允许范围内，设备间距须符合设计要求，为后期运维预留足够空间。接线验收重点检查接线整齐规范程度，无错接、漏接情况，接线接触良好、无松动，接线标识清晰易懂，方便后期运维人员开展工作。接地验收需确认接地系统完整无破损，接地电阻符合相关标准，接地螺栓紧固可靠、无松动，确保接地功能正常发挥。电气性能验收依次开展绝缘电阻测试、耐压试验、直流电阻测试、变比测试等多项试验，试验数据符合《电气装置安装工程电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范》《电气装置安装工程高压电器施工及验收规范》等相关标准。试运行验收保证设备连续运行24小时以上，运行过程中无异常声响、发热、振动等情况，各项运行参数稳定在允许范围内，安全保护装置动作可靠，满足实际运行需求^[5]。

7 结束语

10 kV 变配电室电气设备安装的质量控制是一项系统性工作，覆盖前期准备、设备安装、过程监督直至验收投运的各个环节。施工单位要结合设备自身的特性、具体的施工工艺和对应的技术规范，制定出针对性的质量控制策略，切实强化各环节管控的实际效果。施工期间，要充分考量现场的实际条件和各类不确定因素，灵活调整质量控制的相关措施，不可机械套用规范标准。既要守住施工质量的核心底线，也要兼顾施工效率提升，调整后的措施不能影响质量，避免出现顾此失彼的情况。

参考文献：

- [1] 刘德宏.10kV 变配电室的电气安装及质量控制分析[J].科技资讯,2022(21):59-62.
- [2] 龚自军.刍议变配电室电气设备安装质量与造价控制[J].江西建材,2020(06):135,137.
- [3] 李志华.10kV 配电室电气设备年检安全措施探讨[J].设备管理与维修,2019(20):23-24.
- [4] 常雪梅.10kV 变配电室电气设备安装施工技术注意事项[J].农村电气化,2018(09):11-12.
- [5] 张化利.10kV 变配电室的电气安装及质量控制[J].建筑·建材·装饰,2022(05):105-107.

建筑工程质量控制管理水平提升要点探讨

杨博婷

(中交一公局西北工程有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要 建筑工程质量控制管理面临规模扩大、技术复杂、管理精细化的复合挑战。本文在整理质量目标、责任体系、数字化机制、全过程协同、数据体系建设五个要点的基础上, 提出智能监测、标准化流程、绩效评估三类措施, 旨在创建数据驱动、机制健全、链条耦合的质量管理体系。结果表明, 通过实时监测、统一标准、动态评价, 可以明显改善质量状态识别能力以及风险预控水平, 使质量管理由经验式转向科学化、可视化、可追溯, 为建筑工程高质量发展提供技术支撑和管理途径。

关键词 建筑工程; 全过程管理; 数字化监管; 质量数据体系

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.031

0 引言

随着建设规模的不断扩大以及施工技术的迅速发展, 传统的依靠人工检查、经验判断的质量控制模式已经不能满足现代工程对精细化、实时性的要求。全过程目标导向、明确责任结构、数字化监测手段、协同机制的加强, 成为质量管理体系升级的主要方向^[1]。行业迫切需要依靠信息化工具来提高风险识别的能力, 依靠标准化的流程来提高过程执行力, 依靠数据体系来支撑趋势研判, 使工程质量在全周期内保持稳定、可控、可验证。基于此, 本文对质量管理的关键要点和实施措施进行了系统的论述, 以期为相关人员提供参考。

1 建筑工程质量控制管理水平提升要点

1.1 明确质量目标导向强化全过程控制核心

建筑工程质量控制核心是建立科学的、可量化和可跟踪的质量目标取向, 把质量管理真正变成一个全过程、全要素系统控制过程。质量目标既是施工验收标准, 又贯穿于设计、采购、施工、验收和运维等各个环节, 构成了质量逻辑的统一链条。明确目标导向, 有利于项目立项之初制定明确的控制基准并保证参建各方以统一的标准协同运行^[2]。全过程控制核心表现在由源头预防, 过程监控至结果评估等系统闭环上, 注重基于数据和标准的质量偏差滞后发现和事后纠正, 确保项目实物质量和和管理质量高度统一。

1.2 健全管理责任体系夯实多层级监管基础

质量控制的有效性取决于责任体系是否科学合理、分权明责和层级衔接。完善的管理责任体系要求建设

单位、监理单位、施工单位和分包单位之间权责分明、互相监督、层次分明。通过厘清各层管理职责、构建可追溯质量责任链可以避免责任空转、监管失效等, 责任体系不是简单的制度性条款, 而是管理运行中不可或缺的支撑。质量目标和岗位职责的匹配使得各级管理主体有相应的技术判断力和管理执行力, 从而形成“决策—实施—督导—反馈”四位一体的监管框架, 为全过程质量管理的实施提供组织保障和制度支撑。

1.3 推进数字化转型构建实时动态管控机制

数字化转型已经成为推动管理水平提升的重要途径, 数字化管控机制更重视利用信息模型、传感器数据以及云端协同的方式进行实时监测和动态反馈, 从而达成工程质量状态从静态记录转变为实时可视化管理的目的。数字化在改变数据采集和传递方式的同时也改变了质量决策逻辑, 使管理者可以利用动态数据来预测趋势, 发现风险。实时管控机制的核心就是搭建数据驱动质量感知系统, 把检测信息、施工日志和材料追溯整合到一起, 对整个工程实行透明、精细化管理, 为建筑质量管理向智能化转型提供基础。

1.4 强化全过程协同机制提升管理链条耦合度

提高建筑工程质量控制水平, 就要建立贯穿设计、采购、施工、监测、验收、运维全过程的协同运行机制, 使质量管理链条由单点控制变为全链条耦合。协同机制的价值就在于它把统一的信息表达体系、明确的交互接口以及一致的质量判定框架作为基础, 使得不同的主体可以在一个逻辑体系下完成质量行为的传递和

作者简介: 杨博婷 (1995-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术管理。

确认。当管理链条形成稳定的协同结构之后,设计变更、材料偏差、施工扰动等因素的影响可以在早期被识别出来,在链条内进行快速闭合处理,使质量风险不会向后累积。协同机制所强调的并不是另外一层级,而是在现有的管理结构中提高跨部门、跨专业、跨流程的质量一致性,实现环节之间可以对话、信息之间可以贯通、结果之间可以校核的系统运行状态。当全过程协同成为工程管理的基本逻辑以后,质量控制就会从碎片化的管理转变为整体性的治理,使质量目标在项目的全周期内保持可控、透明、可验证的状态,给更高标准的工程质量提供结构性支持。

1.5 完善质量数据体系夯实科学决策基础

质量数据体系是现代建筑工程管理由经验模式走向科学化、预测化的重要基础,它反映施工过程中的真实状况,也决定着质量判断、趋势分析和风险识别的有效性。完善的数据体系要求在工程全生命周期中形成统一的数据来源、标准化的数据格式和结构化的数据存储关系,使质量信息不再只是文本记录,而是成为可以分析、可以比对、可以推演的核心资源。数据从分散采集变为系统聚合以后,质量状态改变就会在多维度指标交叉验证下得出逻辑一致的判断,给管理者提供更好的质量洞察力。数据体系的完善就意味着质量指标之间的关联关系可以被算法识别,从而给结构安全趋势、材料性能衰减或者施工偏差演化提供预判依据,使质量控制具有前瞻性^[3]。当工程逐渐沉淀出跨项目、跨年度的数据资产时,行业可以依靠统计模型和经验曲线建立质量标杆体系来提高决策质量,加快管理模式向科学化、可度量的方向演进。

2 建筑工程质量控制管理水平提升措施

2.1 建立智能监测平台实现数据驱动质量预警

搭建智能监测平台是从经验判断到数据驱动的建筑工程质量控制关键途径,核心是基于传感监测,数据融合与智能分析,构建“实时采集—智能分析—动态预警—反馈纠偏”的闭环体系。将物联网传感器及数据采集终端布设于施工关键节点,可实现结构安全,材料性能,施工环境及设备运行多维指标同步监测。该平台在“BIM+IoT+AI”技术体系支持下,通过算法对现场结构应力、混凝土温度、钢筋应变、湿度、噪声和振动数据进行实时上传到云端数据库中,并通过算法进行自动分析,生成可视化趋势曲线。与传统人工抽检模式相比较,该智能监测平台在数据采集精度,监测频率和反馈速度等方面都能有一个质的跨越,实现了质量管理从静态记录向动态感知转变^[4]。具体实

践时,可以将嵌入式传感模块布设于施工模板,混凝土构件和关键节点上,利用LoRa低功耗通信技术进行长距离的信号传输;监测数据经过边缘计算节点的初始处理并上传到云端分析系统中,利用机器学习算法实时匹配设计参数,一经检测应力超限、当温差异常或者沉降速率出现偏差等变化趋势时系统会自动启动多级预警机制。管理端能够立即接收告警信息并将风险位置通过BIM模型界面标记到三维视图上,从而达到精准定位和责任追溯的目的。此举有效解决了传统质量检查滞后、问题发现周期长的弊端,实现了“早期发现,早期防治,早期处理”的主动防控格局。

2.2 完善标准化流程体系提升施工过程执行力

为了提高施工过程的执行力,需要建立设计、材料采购、施工安装、检测验收等全流程的标准化作业体系。一是制定工序分解为基础的作业标准,细化每道工序的技术要点、检验频率、记录格式和验收节点等内容,形成数字化标准库,使各环节有依据。第二要在项目管理信息系统里植入标准流程,用统一模板、编码规则来完成过程数据的自动采集与对比,避免执行环节随意性、累积偏差。在模板支设、混凝土浇筑等部分,可以建立过程节点的质量控制标准,明确钢筋保护层厚度容许偏差、模板拼缝严密度、坍塌度控制值的定量标准。施工现场可以使用移动终端录入数据,系统会自行判断录入数据是否达到标准范围,异常信息会及时反馈给监理端。同时标准化体系应同动态监测平台同步运作,利用把控过程控制的数据与智能预警的结论进行比对的方式,创建起一条“数据—规范—执行—反馈”的完整链条。通过构建制度化、信息化和可视化的标准体系,可以减少人为操作造成误差,提高过程质量的可控性以及一致性,实现施工执行力的真正落地和持续改进。

2.3 构建质量绩效评估机制强化持续改进动力

质量绩效评估机制对工程质量管理从静态达标到动态优化的环节来说,有着至关重要的意义。为了使质量管理不断提升,应该建立一个基于数据指标和过程表现的科学评价体系。首先要建立多维度的质量绩效评价模型,在综合评价矩阵中加入结构安全、工艺精度、材料合格率、返工率和监测响应时间等量化指标。其次需要将质量绩效结果和项目双方经济激励、信用评级以及合同履行评价等联系起来,把质量优先作为制度化的约束力量。具体的实施过程中可以依靠前端智能监测以及标准化流程系统来形成质量绩效的自动化分析模型。系统可以基于多源数据(传感监测值,

检测记录以及整改日志)计算出质量得分,生成周期性的评估报告。施工单位可结合“关键工序合格率”、过程预警响应时间、整改完成时限等指标来判定其质量等级;监理单位可以以隐患发现率、隐患上报闭环率为指标来体现其监督效果。评估结果既可以用于阶段性奖惩也可以用于系统性问题原因分析,促进了工艺改进和技术创新。同时要将绩效机制嵌入到不断完善的过程中。依靠年度质量评估会议和数字化复盘平台,把收集到的经验数据反馈给设计标准、工艺参数库,形成一个由评价、优化、再评价组成的质量提升流程。

2.4 完善全过程协同支撑体系提升质量链条运行效能

在全过程协同机制已经确定质量链条耦合逻辑的基础上,需要通过可操作的协同支撑体系把这一逻辑落到实处,使各个环节不再孤立运行,而是在共享信息、统一接口、过程可验证的框架下持续运行。协同体系的构建可以从三个方面入手,一是设置跨专业协同节点,把设计、造价、材料、施工、监测等关键流程的质量信息嵌入到统一的接口模型当中,使每一次的设计调整、材料参数的变化、施工状态的更新都能同步到管理链路当中;二是建立质量语义一致的资料标准,把工序记录、检测数据、审批结论、模型参数等在一个结构下表达,使各个环节的判断依据一致,避免因认知差异造成的执行偏差;三是在项目管理平台中植入协同校核链,在任务流转过程中设置自动化校核程序,对设计文件、施工记录、监测数据进行逐节点比对和异常标记,使质量风险在链条内部被及时截获。实践中项目团队可以将 BIM 模型作为协同底座,把材料追溯码、工序记录、监测曲线绑定到构件节点上,实现以构件为最小颗粒度的质量协同。在工序流转阶段,平台根据前置环节的数据状态自动判定是否满足进入下一作业阶段的质量条件,监理端也可通过协同界面查看完整链路,从而保证质量信息在链条中连续、透明并可追踪。协同支撑体系的建立,使质量管理由分散控制转变为链条控制,在复杂工况下工程依然可以保持质量的一致性,给大规模工程组织化质量管理提供长期稳定的能力基础。

2.5 建立质量数据治理体系支撑精准研判与闭环提升

在质量数据体系成为管理决策基础之后,其应用价值只有通过完善的数据治理体系才能真正释放出来,使工程质量从“数据可采”走向“数据可用、可析、可控”。数据治理措施的核心就是形成采集、校验、清洗、分

析、应用的闭环链条,使质量数据具有一致性、可信度以及分析价值^[6]。从实施上看,可以建立质量场景下的数据采集规范,对结构监测、材料试验、工序记录、环境参数等设置统一的数据采集精度、频率、格式、命名规则,使数据在进入系统之初就具备计算性;之后引入数据清洗与质量校验模块,通过算法剔除噪声点、错误值、异常跳变,并对关键指标进行可追溯性验证,使数据资产具有完整性和可信性。数据建模上可以利用质量主题库建立工艺偏差模型、结构状态模型、过程合格率模型,使数据不再孤立,可以形成跨指标、多维度的关联分析。数据治理体系还要注重应用端的可操作性,即把数据分析的结果自动投射到质量看板上,用曲线趋势、指数字段、风险图谱的形式呈现出来,使施工、监理、业主可以有针对性地查阅质量状态。质量决策阶段系统用历史项目数据、监测规律、构件特性生成趋势预测模型来辅助判断工序稳定性、结构响应特征、潜在偏差的演变方向。将数据治理融入绩效考核、工艺优化、设计复盘等流程中,工程质量管理就可以形成以数据驱动的持续改进机制,使质量控制逻辑由经验判断上升为科学推演,并不断增强管理体系的韧性以及前瞻性。

3 结束语

提高建筑工程质量控制管理水平要从系统化、数字化持续改进入手,只有明确了质量控制目标、落实了质量控制责任、加强了技术支撑,才能真正实现全过程的可控、可追溯。通过搭建智能监测平台、完善标准流程、健全绩效评价体系等手段来使建筑工程质量管理由经验型向数据驱动型转变,为产业的更高质量发展打下基础,同时,也为未来项目工程的安全生产、经济高效和绿色发展提供可参考的管理范式。

参考文献:

- [1] 江宏玲. 建筑工程质量管理与控制 [J]. 工程质量, 2025, 43(12):12-15.
- [2] 林晓平. 建筑施工阶段工程质量管理与控制方法研究 [J]. 中国招标, 2025(12):176-178.
- [3] 朱世华. 建筑工程质量控制管理水平提升要点探讨 [J]. 建设监理, 2025(05): 97-100.
- [4] 周强民. 提高建筑工程管理水平的有效途径研究 [J]. 陶瓷, 2025(03):212-214.
- [5] 冯萧. 提高建筑工程管理及施工质量控制的策略研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(08):237-239.

住宅建筑土建工程中混凝土施工技术要点分析

轩冬冬

(安徽丰临观泰建设工程有限公司, 安徽 合肥 231100)

摘要 混凝土是住宅建筑土建工程的主要材料, 混凝土施工品质的优劣对住宅的结构稳固性、功能性实现以及长期耐用性起着决定性作用。本文聚焦住宅建筑混凝土施工的全周期管理, 深入探讨了从前期筹备至原材料品质把控、混凝土拌制与输送, 直至浇筑与振实的关键技术细节。特别着重于剖析并提出预防裂缝、蜂窝现象及钢筋外露等常见质量问题的有效对策, 确保每个工程阶段均遵循严格的技术规范与质量管控准则, 旨在为施工人员提供实际的操作指导, 为提高住宅建筑混凝土施工质量提供借鉴, 进而保证住宅工程整体质量, 满足居民对居住安全、舒适的要求。

关键词 住宅建筑土建工程; 混凝土施工; 混凝土搅拌技术; 混凝土运输技术; 通用浇筑技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.032

0 引言

随着城市化进程的加速推进, 住宅建设项目的规模与数量呈现持续增长态势, 居民对建筑结构安全性、使用功能完善性以及居住舒适性的要求也日益提高。混凝土结构凭借抗压强度高、整体性能好、使用寿命长等优势, 在住宅建设中广泛应用。混凝土施工中若前期规划不充分, 材料检验不到位, 或操作流程未按标准执行, 可能导致结构强度不足、裂缝扩展等缺陷, 这些不仅会降低建筑耐久性, 还可能引发局部坍塌等安全风险。针对住宅建筑中混凝土施工的关键环节开展系统性分析, 有助于提升工程质量控制水平, 对推动建筑行业实现可持续发展具有实际参考价值。

1 住宅建筑混凝土施工前期准备与原材料控制要点

1.1 施工前期准备要点

施工前期准备是保证混凝土施工顺利进行的前提, 要从技术、场地、设备、人员等各方面统筹安排。施工前需组织技术人员系统梳理设计图纸、施工规范及相关技术文件, 明确混凝土结构的强度等级、耐久性指标及构件尺寸等关键参数, 并针对复杂构造部位制定具体的施工措施方案^[1]。施工前必须完成技术交底, 将具体工艺流程、质量控制指标及安全操作要点明确告知作业班组, 确保现场人员掌握相关要求。施工前需根据实际需求划分功能区域, 包括材料存放区、混凝土搅拌作业区及运输路径, 同时确保地面平整并具备有效排水措施。原材料堆放区要设防雨、原材料按

规格和品种分开存放, 堆放区域配备防潮与防晒措施, 明确标识以避免混淆。施工所需设备应依据工程体量与工艺标准配置, 包括混凝土搅拌机、运输车辆、振捣器具以及各类检测仪器, 确保各环节作业顺利进行。

1.2 原材料控制核心要点

原材料的质量是决定混凝土性能好坏的关键因素, 必须严格落实各项控制措施, 保证原材料满足设计及规范的要求。水泥作为混凝土的核心组成部分, 其品质直接决定了混凝土的力学性能及耐候特性, 故而确保水泥质量对于提升整个结构的可靠性和持久性至关重要。在采购水泥时, 优先考虑声誉卓越且产品质量稳定的供应商。务必审核出厂合格证书、检测报告等文件, 并遵循标准程序抽取样品送至实验室进行检验, 检验内容涵盖强度、稳定性及凝固时间等关键指标, 确保仅采用质量达标的产品。在建筑材料中, 骨料主要分为细骨料(砂)与粗骨料(石子等), 在选择应用时, 需严格把控其颗粒级配、含泥比例以及泥块杂质含量等关键参数。优选中砂作为细骨料, 应确保其级配良好, 含泥量控制在3%以内, 泥块含量则需限制在1%以下; 粗骨料推荐采用连续级配的碎石或卵石, 其粒径需适应构筑物尺寸及施工方法的需求, 选择外加剂需综合考量混凝土的性能指标及施工条件, 确保既能满足工程需求又适应现场环境, 缓凝剂、减水剂、防冻剂等应首选环保型、性能稳定的外加剂^[2]。为清晰呈现原材料质量控制标准, 制定表1。

作者简介: 轩冬冬(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

表 1 原材料种类

原材料种类	核心控制指标	标准要求	检测频率
水泥	强度、安定性、凝结时间	符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007) 要求	同一厂家、同一品种、同一强度等级, 每 200 t 为一批, 不足 200 t 按一批计
细骨料(砂)	含泥量、泥块含量、级配	含泥量 ≤ 3%, 泥块含量 ≤ 1%, 级配良好	同一产地、同一规格, 每 400 m ³ 或 600 t 为一批, 不足按一批计
粗骨料(石子)	含泥量、泥块含量、粒径、级配	含泥量 ≤ 1%, 泥块含量 ≤ 0.5%, 粒径符合设计要求, 连续级配	同一产地、同一规格, 每 400 m ³ 或 600 t 为一批, 不足按一批计
外加剂	减水率、凝结时间差、抗压强度比	符合《混凝土外加剂》(GB 8076-2008) 要求	同一厂家、同一品种, 每 50 t 为一批, 不足 50 t 按一批计
拌合水	pH 值、硫酸盐含量、杂质含量	pH 值 ≥ 4, 硫酸盐含量 ≤ 270 mg/L, 无有害杂质	首次使用或水质变化时检测

2 住宅建筑混凝土搅拌与运输技术要点

2.1 混凝土搅拌技术要点

混凝土搅拌是将原材料均匀混合形成符合性能要求的混凝土拌合物的关键环节, 需严格控制搅拌参数和搅拌工艺。搅拌前要根据混凝土配合比通知单准确计量各原材料的用量, 计量精度要符合规范要求, 水泥、外加剂、水等计量允许偏差为 ±2%, 骨料等计量允许偏差为 ±5%。应该采用电子计量设备, 定期校准, 保证计量的准确性。搅拌顺序的合理确定可以提高搅拌的均匀性, 一般遵循“先倒骨料、再倒水泥、最后加水 and 外加剂”的原则, 即先将砂、石骨料投入搅拌筒内搅拌均匀, 再加入水泥继续搅拌, 在充分混合后, 将水与外加剂一同加入, 并确保其混合至完全均匀的状态。采用粉末状添加剂时, 应确保其与水泥充分混合再投入搅拌容器中; 而液态添加剂则需先行稀释, 确保均匀分散于水中。确保混凝土拌合物均匀性及高效能的搅拌时间控制至关重要。若搅拌不足, 可能导致混凝土强度受损; 反之, 过度搅拌则会提升能源消耗, 并引发混凝土离析现象, 影响其性能稳定性。强制式搅拌机与自落式搅拌机的搅拌时间分别规定为至少 90 秒和 120 秒, 这一要求需依据搅拌机种类及混凝土的坍落度等关键指标灵活调整。在混凝土拌制时, 需持续监控其流动性, 确保施工效果与质量标准相契合, 包括流动性、黏聚性、保水性等, 如出现离析、泌水等现象, 应及时调整配合比或者搅拌工艺^[3]。

2.2 混凝土运输技术要点

混凝土运输的核心要求是保证混凝土拌合物在运输过程中均匀, 不离析、不泌水、坍落度损失不大, 及时供应, 满足浇筑进度要求。运输设备的选择要依据施工场地条件、运输距离等因素来定, 常用的运输设备有混凝土搅拌运输车、手推车、泵车等。对于运输

距离大于 1 km 或者施工场地狭窄的项目, 宜用混凝土搅拌运输车; 在运输过程中应保持低速搅拌, 防止混凝土离析。运输中要控制运输速度, 不能急刹车、急转弯等剧烈运动, 防止混凝土拌合物因惯性发生离析。

3 住宅建筑混凝土浇筑与振捣技术要点

3.1 通用浇筑技术要点

混凝土浇筑前做好准备工作, 首先对模板、钢筋、预埋件等进行全面检查, 保证模板安装牢固、尺寸准确、表面平整光滑, 钢筋规格、数量、间距、保护层厚度等符合设计要求, 预埋件位置准确、固定牢固。清理模板内的杂物、积水, 模板缝隙严密, 防止漏浆^[4]。施工缝应按规范要求处理, 旧混凝土表面应凿毛, 清除浮浆、松动石子, 浇水湿润后铺一层与混凝土同配合比的水泥砂浆, 保证新旧混凝土结合紧密。混凝土浇筑应遵循分层浇筑、循序渐进的原则, 分层厚度根据振捣方式和混凝土坍落度确定, 采用插入式振捣器时, 分层厚度不超过振捣器作用部分长度的 1.25 倍, 一般为 500 mm 左右; 采用表面振动器时, 分层厚度不超过 200 mm。浇筑顺序要合理安排, 对于条形基础、梁、板等构件可以采用从一端到另一端的方式; 对于大体积混凝土或复杂构件要采用分段分层浇筑的方法, 防止冷缝的产生。浇筑时, 混凝土拌合物应均匀布料, 不能集中堆放, 以免模板受力过大。浇筑高度大于 2 m 时, 应采用串筒、溜槽等辅助工具, 防止混凝土自由下落时产生离析。浇筑时应安排专人观察模板、钢筋、预埋件情况, 若出现模板变形、移位、钢筋松动等问题, 应立即停止浇筑, 采取相应措施整改后再继续施工。

3.2 不同构件专项振捣技术要点

混凝土振捣旨在有效驱除混合物内的气体, 确保混凝土均匀压实, 此举对于增强混凝土的紧密度与持久性能至关重要。住宅建筑中, 由于构件种类繁多且

尺寸各异,因此选用适宜的振捣技术至关重要,这直接影响到施工质量和工程安全。在梁构件浇筑过程中,应选用插入式振捣器进行密实作业。振捣点需均衡分布,确保混凝土充分密实,相应的,振捣器作用范围内的间距不宜超过其有效作用半径的1.5倍,一般为300~400mm。振捣时要将振捣器插入梁底和梁侧,

保证振捣到位,不漏振。梁和柱、梁和板交接处,应重点振捣,保证混凝土密实。板构件振捣可使用插入式振捣器或者表面振动器,使用插入式振捣器时,振捣点间距不应大于400mm,振捣深度要贯穿板厚,不能振捣过深触及模板;使用表面振动器时,应匀速移动,覆盖整个板面,保证振捣均匀(如表2所示)。

表2 构件类型

构件类型	振捣设备	振捣点间距	分层厚度	专项要求
梁	插入式振捣器	300~400mm	≤500mm	重点振捣梁与柱、板交接处,避免漏振
板	插入式振捣器/ 表面振动器	≤400mm(插入式); 匀速覆盖全表面(表面式)	≤200mm(表面式); 贯穿板厚(插入式)	振捣后及时刮平、搓平,防止表面裂缝
柱	插入式振捣器	≤300mm	≤500mm	振捣器插入下层混凝土50~100mm,避免碰撞钢筋和预埋件
墙	插入式振捣器	300~400mm	≤500mm	门窗洞口两侧对称振捣,确保两侧混凝土密实

4 住宅建筑混凝土施工质量通病防治要点

4.1 裂缝防治要点

裂缝是住宅建筑混凝土施工中出现频率最高的一种质量通病,根据裂缝出现的时间节点,可分为施工阶段产生的裂缝与结构投入使用后出现的裂缝;依据形成原因,可归类为因材料收缩引发的干缩裂缝、由温差变化引起的温度裂缝以及地基不均沉降导致的沉降裂缝。混凝土干缩裂缝多源于养护不充分或表面水分蒸发过快,控制此类问题需重点加强养护管理,浇筑成型后在初凝阶段即应覆盖土工布、塑料薄膜等保湿材料,终凝后立即开始浇水养护,持续时间不少于14天,尤其在高温干燥环境下应适当增加洒水频次,确保混凝土表面始终维持湿润状态。温度裂缝常见于大体积混凝土结构或高温环境下浇筑的构件,主要因水泥水化反应产生热量集中,导致内部温度上升过快,与表面温差超出材料承受范围所致。防治措施有选用低热水泥、优化混凝土配合比、减少水泥用量,在混凝土内部设置冷却水管,通入循环水降低内部温度、合理安排浇筑时间,避开高温时段、浇筑后及时覆盖保温材料,控制内外温差不得超过25℃^[5]。

4.2 蜂窝麻面防治要点

蜂窝是混凝土表面出现酥松、砂浆少、石子多的孔洞,麻面是混凝土表面出现凹凸不平、局部缺浆的现象,两者都会影响混凝土外观质量,严重时降低混凝土强度。蜂窝麻面的产生主要是由于模板没有清理干净、模板表面不平整、混凝土拌合物和易性差、振捣不规范等原因造成的。防治措施首先要加强模板管理,模板使用前要彻底清理表面的杂物、油污,用

清水冲洗干净,晾干后涂刷均匀的隔离剂,隔离剂应选用质量合格、不影响混凝土粘结性能的产品;原材料计量要准确,保证砂浆量足。振捣环节要严格按照规定操作,保证振捣到位,不能漏振或过振,漏振会造成混凝土不密实形成蜂窝;过振会造成砂浆流失、石子堆积也会造成蜂窝。

5 结束语

住宅建筑混凝土施工技术涉及工程建设的各个环节,施工质量水平直接影响住宅的结构安全和使用品质。本文从施工前期准备及原材料控制、搅拌与运输、浇筑与振捣等环节出发,针对各个施工环节的核心技术细节进行深入探讨,同时对裂缝、蜂窝麻面、露筋等普遍存在的质量问题提出针对性的预防策略。施工方应强化质量管理理念,在执行每项工程时严谨遵循技术规范与管控策略,确保各工序均经过严格的质量检验和竣工验收,对施工过程中的任何瑕疵做到即时识别与有效处理。

参考文献:

- [1] 王之岗. 多层住宅建筑供暖通风节能设计研究[J]. 江西建材, 2024(12):210-212.
- [2] 罗辉. 住宅建筑中绿色建筑技术应用研究[J]. 新城建科技, 2024,33(12):55-57.
- [3] 黄斐然,张尧帮,郭栋梁,等. 浅析住宅建筑保温楼面系统施工技术[J]. 四川建筑, 2024,44(06):205-207.
- [4] 张登峰. 基于区域供电侧和需求侧管理的住宅能耗预测[J]. 自动化应用, 2024,65(24):107-109.
- [5] 朱晓琳,孙东明,郭富强,等. 住宅建筑工程中混凝土结构防渗漏施工技术的探究[J]. 居舍, 2025(08):80-83.

建筑工程电气设备安装精细化施工技术应用分析

陈天婵¹, 张 错²

(1. 山东岳建建设集团有限公司, 山东 菏泽 274000;

2. 鸿都集团有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要 本文围绕建筑工程电气设备安装精细化施工技术的应用展开研究, 以精细化施工的核心逻辑与技术特征为切入点, 结合工程实践案例, 分析精细化技术在电气设备安装流程、工艺优化、质量控制中的具体应用路径, 探究其对电气系统运行稳定性、安全性及使用效能的提升作用。通过文献研究法、案例分析法与实证对比法, 系统梳理精细化施工技术的核心内涵、应用原则与实践要点, 验证其在解决电气安装质量通病、降低运维成本中的实际效能。研究结果表明, 精细化施工技术通过对安装流程的标准化、操作工艺的精准化、质量管控的全流程化, 能够从根源上提升电气设备安装质量, 保障电气系统长期稳定运行。

关键词 建筑工程; 电气设备安装; 精细化施工技术

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.033

0 引言

在我国建筑行业向智能化、绿色化、高端化转型的背景下, 建筑电气系统的功能持续扩展, 已涵盖供配电、照明、消防、安防及智能化控制等多个子系统。建筑工程电气设备安装质量不仅直接影响建筑的运行效率, 更关系到整体安全水平。然而, 当前建筑电气设备安装环节仍存在诸多突出问题, 常规施工方法易导致管线布局混乱、设备定位偏差及线路连接不规范等现象, 进而诱发电路短路、漏电及设备损坏等风险。此类问题不仅会削弱建筑的使用性能, 还可能引发严重的经济损失与安全事故。行业调研数据显示, 约 30% 的建筑电气故障源于施工安装环节的操作不当, 而传统施工管理模式已难以满足现代建筑对电气系统高精度、高可靠性的需求。本文对建筑工程电气设备安装精细化施工技术应用进行研究, 旨在为提升工程整体品质提供理论参考。

1 建筑工程电气设备安装精细化施工技术的理论基础

1.1 精细化施工技术的核心内涵与应用原则

建筑工程电气设备安装的精细化施工技术是以提高安装质量与运行为目标, 借助精准设计、规范操作和全程管理理念对施工各环节做系统优化的方法, 其

要点包含流程标准化、工艺精准化和管控全程化, 流程标准化是把安装分成准备、布线、设备安装、接线调试和验收五个阶段, 明确步骤、责任和时间来防止施工无序; 工艺精准化是对关键环节制定如管线弯曲弧度、设备安装垂直度和接线力矩等具体指标来确保操作精确; 管控全程化是构建“事前防范—事中监管—事后追责”质量体系^[1], 借助数字工具实时监控并记录数据以保障问题可查可改。

电气设备安装里的精细施工实践要遵循四项核心准则: 第一项是精确性准则, 电气系统运行的安全与稳定特别依赖安装精度, 得通过精确测量、定位以及调试来保证设备安装位置、管线布置和连接方式完全符合设计规范, 各项偏差要在标准允许范围之内。第二项是标准性准则, 一定要严格执行国家技术规范和行业准则, 制定标准化的施工指南, 明确各个工序的技术参数和验收标准, 避免施工操作出现随意性。第三项是协同性准则, 电气设备安装常常要和建筑、给排水、暖通等专业进行交叉作业, 精细施工需要建立多专业协作机制, 提前统筹好施工进度, 防止专业交叉产生冲突, 确保施工过程衔接顺畅。第四项是全周期性准则, 精细施工不但要重视安装过程的质量管控, 还要兼顾后期运维需求, 通过优化设备布局、完善管线标识、预留检修空间等措施, 提高运维便利性, 降低长期维护成本。

作者简介: 陈天婵 (1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

1.2 电气设备安装质量的核心影响因素与评价标准

电气设备的安装品质是由多种条件共同作用形成的,依据工程经验能够总结出四个关键方面:一是人为操作条件,作业者的技术水平高低、责任心强弱以及操作流程是否规范,都直接关系到电气设备的安装效果;二是设备材料条件,电气设备像配电盘、变压器以及材料如电线、连接端子等的品质,是保证电气设备安装质量的前提;三是工艺技术条件,传统粗放式工艺例如管线随意弯折、接线不加力矩控制等,是造成电气设备安装质量问题的根源,而精细工艺的不足会导致安装精度低、系统协调性差等问题;四是环境条件,潮湿、高温、粉尘等不利环境会干扰电气设备的功能以及施工进度^[2]。

电气设备安装质量评判准则要依据国家规范和实际应用需求来建立综合性评价框架,核心评价维度主要有安全性指标,涉及绝缘电阻、接地电阻、漏电保护等参数,如低压配电系统绝缘电阻应不小于 $0.5\text{ M}\Omega$ 且接地电阻须满足设计规定,安装精度指标包含设备定位偏差、管线敷设平整度、接线端子紧固度等要求,例如:开关插座安装高度偏差控制在5毫米以内且管线固定间距需符合标准,运行效能指标涵盖电气系统稳定性、能耗表现、设备服役时长等特征。

2 精细化施工技术在电气设备安装中的实践应用与效果分析

2.1 典型工程电气设备安装精细化施工案例分析

某市中心区域大型商业综合体工程,总建筑面积达到了35万平方米,融合商业、办公、酒店三大功能模块,其电气系统涵盖高压配电智能照明等子系统,具备施工难度大标准严苛的显著特点,施工方引入精细化管理手段克服常规质量通病,大幅提升安装精度和作业效率。在前期规划环节项目组借助BIM技术建立电气专业三维可视化模型,达成多专业管线综合布局的有效优化,为解决传统施工电气管线与水暖系统交叉冲突难题,通过BIM模型开展碰撞检测提前排查调整32处冲突点,优化15处管线路径保障系统布局科学性和维护空间充足性,同时基于BIM模型编制专项施工方案界定各专业作业流程和时间节点,制定《电气安装作业指导书》对关键环节设定具体参数,比如电缆敷设采用机械辅助方式将牵引速度控制在5米/分钟以内预防线缆损伤风险^[3]。

在主体施工阶段要实施工艺精细化控制,管线铺设时借助激光测距仪与自动化放线装置精确定位,保证管路铺设误差不超过3毫米且支架间距严格遵循标

准,桥架安装水平误差控制在2毫米/米以内,设备安装阶段利用水平仪与扭矩控制扳手,确保配电柜垂直度误差不大于1.2%且接线端子扭矩维持在 $12\sim 15\text{ N}\cdot\text{m}$ 范围,防止因连接松动引发接触故障,接线调试环节采用红外热成像仪与电阻测试仪进行即时监测,对每个接线端子进行温度及电阻检测,杜绝虚接和过热情况,同时建立多工种协作机制配备专职协调人员,定期召开协调会议解决施工交叉作业中的衔接问题,例如:建筑工程预留孔洞与电气管路走向的精准配合避免返工施工。在质量监督阶段建立“三检三查”全过程管理机制,施工队伍自查、技术人员检查、监理单位专检相结合,每道工序完成后需经三方签字确认方可进入下一工序,应用数字化质量监管系统实时上传施工检测数据、影像资料,建立电子档案实现质量问题的全程追溯。

2.2 精细化施工对电气安装质量的提升效果验证

通过典型案例实证研究和常规施工项目数据对比发现,精细化施工技术在电气设备安装质量上有显著提升,具体体现为以下三个方面:在安全保障层面,精细化施工技术能有效消除传统施工模式里的潜在风险,监测结果表明该项目电气系统绝缘电阻均值达 $2.8\text{ M}\Omega$,大幅超出规范规定的 $0.5\text{ M}\Omega$ 标准,且接地电阻全部满足设计标准,未出现漏电保护异常情况,和传统项目8.5%的安全隐患发生率相比,该项目降至1.2%,其中接线松动、管线损坏等主要问题发生率下降超90%,设备投运后连续18个月保持无电气故障运行状态,充分证明其对安全可靠性的强化作用;在安装精度及运行可靠性方面,精细化施工实现了对安装质量的精确把控,该项目设备定位误差控制在平均4毫米以内,开关插座安装高度偏差不超3毫米,均优于规范标准,电气系统持续运行1000小时无故障记录,设备噪声控制在45 dB以下,低于行业常规水平,和传统项目12毫米的设备定位误差及5.3%的故障率相比,该项目故障率降至0.8%,设备使用寿命预计延长5~8年,同时通过优化管线布局和设备选型,该项目电气系统能效较传统工艺提升12%,年均可节约电费约80万元,实现了经济效益与环保效益的双重优化^[4]。

在施工效率和成本控制这个领域之中,精细化管理借助流程再造和风险前置手段,有效减少了施工返工以及运维方面支出。此工程的电气安装工期比原定计划提前15天完成,返工率成功控制在0.3%,明显优于行业常规的5%这一水平,材料综合利用率相比之前提高了18%,线缆损耗量相较于以往下降了22%,直

接实现材料费用节约大约 120 万元,进入运维阶段之后,得益于施工质量提升和技术档案完备情况,设备检修周期缩短了 40%,运维开支降低了 30%,充分展现了精细化管理所带来的持续性效益。

3 电气设备安装精细化施工技术的推广保障与优化建议

3.1 精细化施工技术推广的保障机制构建

为了推动精细化施工技术能够广泛应用和顺利实施,得建立一套全面的支撑体系,从组织架构、规章制度、专业人才以及技术创新这四个方面来提供坚实保障。在组织架构方面,施工企业要构建一套分层级的精细化管理组织体系,企业层面需专门设立技术研发部门来负责精细化施工技术的研发与推广工作,项目层面应成立精细化管理小组并由项目经理领导,同时配置专业技术负责人和质量管理人员且明确划分各岗位职能,构建起“企业统一规划、项目具体执行、班组层层落实”的三级管理模式。要积极强化与设计单位、监理方及设备供应商的协作以形成联动机制,保障精细化施工方案能获得各方的支持与配合^[5]。

在人力资源建设方面要着力打造高素质专业团队,定期组织专项培训邀请业内资深专家和技术人员开展施工技艺指导,培训内容聚焦建筑信息模型(BIM)运用、精密操作工艺、质量检验规范等领域且确保年度培训频次不低于 4 次,搭建人才互动平台促进各项目间的技术研讨与经验互通加速人才成长进程,在技术支撑层面要加速数字技术与精密施工的有机融合,增加对建筑信息模型(BIM)、物联网、大数据等数字化工具的投入力度开发电气安装施工智能化管理系统实现对施工流程的可视化与智能化监控^[6]。

3.2 基于质量提升的精细化施工优化建议

为充分发挥精细施工技术对电气安装品质改进效果,结合行业动态和实际应用存在的不足,现提出以下优化策略:一是要健全精细施工标准框架,提高标准通用性与专项要求适配性,当前精细施工规范主要针对大型项目,要针对中小型工程、民用住宅以及工业厂房等不同应用场景,制定适用性强的标准,着重把控关键质量控制节点,以此增强标准实际应用价值,同时要顺应建筑智能化与绿色化发展趋势,补充智能电气系统安装、节能设备调试等精细化规范内容,填补行业规范空白。二是要促进精细施工和智能技术进行深度融合,加快 BIM、物联网、人工智能等技术协同应用进程,构建一个覆盖电气安装全生命周期的精细化管理平台。三是要强化跨专业协作方面的精准管控

工作,为应对电气安装和其他工种交叉作业的诸多难点,构建起全流程协同管控体系,在设计环节实施跨专业协同设计,提前对管线排布进行合理规划,在施工环节借助协同管理平台,实时共享各工种进度与质量相关数据,快速化解交叉作业产生的冲突,建立联合验收制度来保障各工种衔接部位质量达标,防止因专业分歧埋下质量方面的隐患。四是要兼顾精细化施工的成本效益情况,部分施工单位因顾虑精细化施工会增加成本而推行工作不力,需要优化技术路径以实现质量与成本的最优配比。

4 结束语

建筑工程电气设备安装精细化施工技术的核心内容在于流程标准化、工艺精准化以及管控全过程化,其贯彻精准性、规范性、协同性和全生命周期原则,能够有效应对电气设备安装过程中的质量难题。电气设备安装质量和人员素质、材料设备、施工工艺、现场环境以及管理水平等多方面因素相关,其评价标准包含安全性、安装精度和运行效率等多个维度,而精细化施工技术通过系统控制,能够整体提高电气设备的安装质量。实际工程案例证实,精细化施工技术借助 BIM 技术应用、工艺精准控制以及全过程质量管理等具体措施,可明显增强电气系统的安全性、安装精度和运行稳定性,减少安全隐患并且降低运维方面的费用,实现质量与效益的协同发展。为推广建筑工程电气设备安装精细化施工技术,需要建立组织、制度、人才和技术四位一体的保障体系,同时通过健全标准体系、促进智能化应用、加强跨专业协作以及兼顾经济性等优化途径,持续提升该技术的应用效能。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑电气工程施工质量验收规范(GB 50303-2015)[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [2] 王建国,张莉.BIM技术在建筑电气管线综合排布优化中的应用[J].建筑电气,2020,39(05):45-50.
- [3] 李晓明,刘峰.建筑电气设备安装精细化施工工艺改进与实践[J].施工技术,2019,48(12):89-93.
- [4] 陈志强.建筑工程电气安装精细化管理与质量控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [5] 赵伟,孙艳.全流程管控模式下电气安装精细化施工技术应用研究[J].建筑科学,2021,37(08):102-107.
- [6] 周婷,吴刚.多专业协同视角下建筑电气精细化施工技术创新[J].工程管理学报,2020,34(03):78-83.

建筑工程施工技术优化对工程质量提升的影响分析

宋彬¹, 魏栋²

(1. 济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250102;

2. 菏泽市定陶区房产服务中心, 山东 菏泽 274000)

摘要 本文围绕建筑工程施工技术优化与工程质量提升的内在关联展开研究,以施工技术优化的核心逻辑为切入点,结合工程实践案例,分析技术优化在施工流程、工艺应用中的具体实施路径,探究其对工程结构稳定性、使用安全性、功能完善性等质量维度的提升作用。通过文献研究法、案例分析法与数据对比法,系统梳理施工技术优化的核心内涵、基本原则与实践要点,验证技术优化在解决工程质量难点、提升工程整体品质中的实际效用与价值。研究表明,施工技术优化通过对传统工艺的革新、施工流程的重构以及技术资源的整合,能够从根源上降低质量隐患发生率,提高工程质量的稳定性与可靠性。

关键词 建筑工程; 施工技术优化; 工程质量

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.034

0 引言

随着我国城市化进程的持续推进,建筑业正面临历史性的发展机遇,工程建设规模持续扩张,建设标准亦不断升级,对工程品质的要求日益严格。工程品质不仅关系到建筑的使用效能与耐久年限,更直接涉及公众生命财产安全及社会整体利益。然而,当前我国建筑业仍存在部分工程质量波动及安全隐患频发的问题,如结构开裂、渗漏、不均匀沉降等常见病害尚未得到有效根治。传统施工技术的固有缺陷日益凸显,成为制约工程质量提升的关键瓶颈。在追求高质量发展的新时期,建筑业必须通过技术突破来打破品质提升的桎梏。施工技术优化作为技术革新的关键要点,通过对施工工艺、作业流程、操作方法以及机具设备等进行全面革新与升级,能够有效解决传统施工模式中存在的效率不足、品质波动等问题。

1 建筑工程施工技术优化与工程质量的内在关联

1.1 施工技术优化的核心内涵与基本原则

施工技术优化指的是在工程建设阶段结合项目具体条件与质量要求,采用前沿技术思想、方式以及工具对既有施工技术、工艺流程、作业方法及相关设施等进行全面革新与升级,从而达到加快工程进度、确保工程质量、降低建设成本、强化安全环保等多重效

益的目的,它本质是借助技术创新与合理调配有效克服施工环节中的技术瓶颈与品质风险,促进施工技术朝着高效、精准、绿色及智能化的方向演进,施工技术优化范畴不局限于单一工艺的改良^[1],还涵盖施工工序的再造、技术要素的统筹以及管理模式的创新等多个维度,是一项复杂的系统性工作。

施工技术优化要遵循以下准则:(1)强调施工技术优化方案的实际应用价值,要紧密贴合项目具体情况、施工环境以及质量标准,保证所采用的方法切实可行且能解决实际问题;(2)优化过程需要兼顾成本效益,在满足质量与安全要求的前提条件下,选择经济合理的方案,防止因过度投入而导致成本失控;(3)鼓励进行技术创新,通过突破传统思路、引入新技术和新工艺,推动施工技术不断向前进步;(4)优化方案要体现环保与节约的理念,最大限度降低施工对环境造成的负面影响,促进建筑行业实现可持续发展。

1.2 工程质量提升的关键影响因素与评价标准

工程质量优化属于综合性管理工作,需要全面考量各类要素相互作用,从施工实践层面来看,核心影响因素能归纳成以下五个方面:(1)施工工艺水平。工艺方法的先进性、适配性和标准化程度是保障质量基础,陈旧落后工艺往往难达高标准要求并埋下质量

作者简介:宋彬(1986-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程。

风险；（2）作业人员素质。施工队伍专业能力、职业素养和操作规范程度对工程质量起决定性作用，技术过硬团队能严格执行标准并减少人为操作缺陷；（3）建材与机械配置。工程材料品质直接关系到建筑根本性能；（4）现场管控机制。健全施工管理体系是确保工程质量的关键保障，涵盖质量监督、进度把控、成本控制和安全防护等环节，管理缺失易造成施工无序并诱发质量事故；（5）外部环境条件。自然气候、地质特征和场地周边环境等客观因素会对工程质量造成干扰，需要制定专项应对策略。

工程质量评定准则是衡量工程品质的重要参照，必须同时具备科学性、适用性与执行可行性。从实际施工品质和过程档案这两大维度来开展评定，实际施工品质包含地基基础、主体结构、建筑装饰、屋面工程、给排水采暖、电气安装等多个分项工程的品质状况，其评定要素涉及结构稳固度、使用安全性、功能完备度以及表观质量等方面；过程档案涵盖设计图纸、技术交底文件、材料检测报告、隐蔽工程验收记录、分项工程检验批验收文件等材料，以此保障施工环节能够全程追溯^[2]。

2 建筑工程施工技术优化的实践路径与质量提升效果分析

2.1 典型工程施工技术优化的实践案例分析

某城市综合开发项目，工程建筑面积大约 20 万平方米，涵盖了商业、住宅、办公等多种功能业态，其结构体系很复杂，施工过程中面临着诸多挑战，并且对工程质量标准要求十分严格。在工程建设的期间，项目组针对传统施工技术存在的不足之处，实施了全面的技术改进措施，取得了比较理想的实践成效。针对主体结构施工环节，常规钢筋混凝土施工工艺存在钢筋安装效率低、混凝土浇筑易出现裂缝等问题，为了攻克这些难题，项目组引入 BIM 技术进行钢筋精细化设计与施工仿真，通过 BIM 模型对钢筋排布、用量以及间距进行精确调整，有效避免了钢筋冲突和材料损耗。采用创新钢筋连接工艺和高性能混凝土材料，提高了钢筋连接的稳固性以及混凝土的强度和耐久性能，在施工程序方面，优化了钢筋安装、模板支撑、混凝土浇筑各环节的衔接关系，实现了工序连续作业，大幅提升了施工效率和质量保障水平^[3]。

项目部分住宅楼选用预制化结构体系，为解决传统装配施工中存在节点连接稳定性差等难题，项目组对施工工艺进行全面升级以应对施工中的问题。一方面通过革新构件制造工艺显著提升构件生产精度与品质，另一方面完善现场装配作业流程引入定制化起重

机械等技术，保障构件安装过程中的精确度与稳固性不出差错。在绿色施工技术应用层面项目方着重推行环保理念，对施工工艺和管理体系进行合理的优化配置工作，选用低能耗施工机械有效控制施工过程能源消耗，实施建筑垃圾分类处理与循环利用的相关机制，最大限度减少施工过程中固体废弃物的产生数量，采用喷雾抑尘和隔声降噪等一系列环保措施，减轻施工作业对周边环境产生的干扰影响，通过系列绿色施工技术综合应用降低环境负面影响，还实现施工成本节约达成经济与环保效益双赢局面。

2.2 技术优化对工程质量的多维度提升效果验证

通过对典型案例进行综合研究以及对实证数据开展对比分析，充分证实了施工技术优化对工程质量全面提升发挥的作用。在结构稳固性方面，引入 BIM 技术来优化钢筋配置并且结合高性能混凝土应用之后，主体结构的强度与刚度实现了显著增强，检测数据表明混凝土构件抗压强度达标率为 100%，结构裂缝发生率相比传统工艺下降超过 80%，全面保障了建筑结构的稳固性与安全性。在使用功能优化方面，装配式施工技术的革新提升了构件安装精准度，墙面平整度及地面垂直度等参数都超越了规范标准，大幅减少了后期装修修补的工作量^[4]，显著提升了建筑实用性与居住舒适度，绿色施工技术的推广不仅改善了现场作业环境，还优化了建筑内部空间品质，契合当代建筑环保化发展需求。在质量可控性维度，技术优化通过推行标准化施工流程与规范操作，最大限度降低了人为因素对质量波动产生的干扰，该项目各分项工程验收合格率达到 100%，分部工程优良率超过 90%，较传统施工模式质量稳定性实现质的飞跃，同时施工技术革新显著提升了工程效率，有效压缩了建设周期，避免了因工期压力引发的质量隐患，实现了质量管控与施工进度的协同发展。

从经济层面来进行分析，施工技术优化前期虽需更多资金投入，但依靠施工效率的提升、材料损耗的减少以及质量问题处理费用的降低，最终达成了整体开支的削减。在这个项目当中，技术改进让材料使用效率提升幅度超过 15%，质量问题修复支出减少比例超过 70%，总成本与常规工程相比降低了大约 10%，实现了质量与经济效益同步提升的良好效果。

3 施工技术优化提升工程质量的保障机制与优化建议

3.1 技术优化落地的保障机制构建

施工技术优化要成功推行得有健全支持体系，需从组织架构、规章制度、人力资源和资金投入等多个

维度提供坚实支撑,以此保障优化举措能落实并达到预期成效。在组织方面建筑企业要构建系统化技术优化管理架构,清晰界定各部门和岗位的权责,建立自上而下的技术优化推进脉络。要设立专项技术优化领导小组全面统筹规划优化工作,明确优化目标与执行路径,同时成立技术研发机构专注新技术、新工艺的研发与转化应用,并且强化项目部与企业总部、设计方、监理方等各方的联动协作,构建协同推进的工作格局确保优化方案在施工现场精准执行。在制度方面需要构建完整的技术优化管理规范体系。要制定技术优化评审机制对优化方案可行性、技术先进性和经济合理性严格评估,确保方案契合工程实际需求,建立技术交底机制将优化方案具体要求和操作细节精准传递给施工人员,确保施工过程严格遵循优化标准,完善质量管理体系加强对施工环节质量监控与检测,及时识别并处理优化实施中的质量问题,同时设立激励机制对在技术优化中表现优异个人和团队给予表彰与奖励,激发全员参与技术优化的热情与创造力。

要给施工技术人才队伍的建设提供切实保障,就得注重提升施工人员专业技能与综合素养。首先要通过定期开展培训课程,来帮助现有施工人员掌握新技术、新工艺以及行业规范^[5],以此增强他们的技术实操能力,其次需要吸纳高素质的技术与管理人才,充实团队力量从而为技术升级提供专业支撑。此外还应完善人才培养与激励体系,鼓励员工积极开展技术创新方面的尝试,构建出有利于人才成长的良好发展氛围。针对资金保障方面的问题,建筑施工企业要加大对技术优化的资金支持力度,确保新技术研发、引进以及应用能获得充足的经费支持。

3.2 基于质量提升的施工技术优化改进建议

为了能更好通过施工技术改进保障工程质量,针对建筑行业当下发展状况和实际挑战,提出以下这些优化措施:首先,施工企业要积极推动新技术与新工艺研究应用^[6],加大研发投入力度,根据具体工程要求,专注开发有实用价值新技术新工艺,同时要深化和科研机构、行业组织等的合作,吸收转化国内外前沿技术再二次创新,加速技术成果产业化和市场普及,政府也要强化政策扶持与引导激励企业创新,搭建行业技术交流机制促进经验技术共享;其次,提升施工技术优化全面性与统筹性,技术优化工作不能只关注局部工序环节提升,要立足工程项目整体视角实施全局系统优化策略。项目启动初期要依据工程特性和质量标准,制定周密技术优化计划考量全流程技术要求,

施工执行阶段要强化各专业工种工序间协作配合,确保技术优化措施真正落地取得实际成效,还要注重施工技术和管理方法有机结合,依靠科学管理体系巩固技术优化工作成效,最终实现技术与管理相互促进达成效益倍增。再次,要健全工程质量评估体系。主动顺应施工技术创新的整体趋势,不断持续改进工程质量评估的具体准则,把新技术和新工艺应用带来的质量改进效果纳入考量范围,从而更加系统且精准地去评估工程质量。最后,要强化工程质量管控工作,积极革新监管模式。运用数字化和智能化的管理工具,针对施工环节实施实时性的监督,快速识别并且处置出现的质量问题,同时要压实市场主体相关责任,引导施工企业扛起质量方面的担当,强化企业的自我约束,提升企业全员的质量意识。

4 结束语

施工技术优化是建筑行业技术进步的关键组成部分,它具备整体性和协调性等显著特征,其发展要遵循实用为本、质量至上等基本原则。通过革新施工方法、工序安排、材料选用及设备配置等途径,能有效克服传统施工方式当中存在的质量缺陷。工程品质提升是多因素共同作用的复杂过程,涉及施工技术人员素质、材料品质等多个方面。科学的技术优化措施可从不同层面改善工程质量状况,还能兼顾经济效益与环境效益实现双赢。为确保施工技术优化能够得到有效执行,需建立涵盖组织架构、制度规范等方面的支撑体系,保障技术方案顺利推进并达成预期目标。为进一步增强施工技术优化对工程质量的积极影响,需持续加强新技术研发应用与推广普及工作、注重技术优化整体性规划、健全质量评估与监督管理机制、强调技术优化方案针对性设计以适应不同项目需求。

参考文献:

- [1] 李健明. 建筑工程施工技术优化的核心路径与质量提升机制研究[J]. 施工技术, 2023, 52(12): 89-93.
- [2] 王浩. BIM技术在钢筋精细化施工与质量管控中的实践应用[J]. 建筑科学, 2024, 40(05): 112-116.
- [3] 张莉. 装配式建筑施工工艺革新与工程质量稳定性分析[J]. 住宅科技, 2022, 42(08): 45-49.
- [4] 陈明. 钢筋机械连接与套筒灌浆连接工艺对结构强度的影响研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(07): 98-102.
- [5] 赵伟. 高性能混凝土与自密实混凝土在工程质量提升中的应用实践[J]. 混凝土, 2024(03): 76-80.
- [6] 刘芳. 建筑工程质量核心影响因素识别与施工技术适配性研究[J]. 工程质量, 2023, 41(10): 56-60.

住宅供配电工程施工质量与安全协同管理机制探析

钮 斌

(江苏天云电力建设有限公司, 江苏 苏州 215300)

摘 要 住宅供配电工程是保证居民生活质量、生命财产安全的基础设施, 施工质量、安全生产与民生福祉、社会稳定息息相关。目前行业内存在质量与安全相互脱离、缺少协调的情况, 进而导致工程隐患多发、运维成本高。本文以协同管理理论、PDCA 循环理论、全生命周期管理理论为基础, 结合住宅供配电工程施工特点, 对质量、安全管理工作现状及主要矛盾进行分析, 建立“目标、过程、责任、保障”四位一体的协同管理机制, 旨在为住宅供配电工程施工质量与安全协同管理机制提供实践参考。

关键词 住宅供配电工程; 施工质量; 安全生产; 协同管理

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.035

0 引言

随着城镇化进程的加快以及居民生活水平的提高, 住宅供配电工程的重要性也越来越突显。供配电工程是住宅建筑的生命线, 除了要满足居民的日常用电需求外, 还要有很高的安全可靠度。但是目前住宅供配电工程施工领域仍然存在问题, 部分项目重进度轻质量安全, 造成材料验收走过场、安全防护措施不到位, 质量与安全管理体系相互独立, 缺乏有效的协同衔接, 各方责任划分不清, 出现问题后互相推卸责任, 过程管控缺乏系统性, 不能实现全流程闭环管理^[1]。这些问题既影响住宅供配电工程施工质量与运行安全, 诱发电气火灾等隐患、威胁居民生命财产安全, 也制约行业规范化发展, 不符合城镇化高质量推进及居民高品质居住要求。据此, 深入研究工程施工质量安全管控问题, 探索体系协同、责任明晰、流程闭环的管控路径, 对完善管理机制、强化管控效能、提升工程质量安全水平意义重大, 还能为行业监管和企业管理提供参考, 助力构建安全可靠高效的供配电体系, 为城镇化建设与居民美好生活筑牢保障。

1 安全协同管理相关理论基础

1.1 协同管理理论

协同管理理论来源于系统科学中的协同论, 主要观点是系统内部各个要素之间相互配合、相互协作, 使整体功能大于各部分功能之和。住宅供配电工程施

工质量与安全属于两个主要因素, 二者经过目标协同、过程协同、责任协同和保障协同而构成一个有机整体, 可以有效地规避单一管理模式的不足, 提高管理效能和管理效果。协同管理主张打破部门壁垒、流程割裂, 实现资源共享、信息互通、行动一致, 为质量与安全协同管理机制的创建提供了关键理论支撑^[2]。

1.2 PDCA 循环理论

PDCA 循环理论就是计划 (Plan)、执行 (Do)、检查 (Check)、处理 (Act) 的闭环管理模式, 在工程管理中广泛使用。将 PDCA 循环理论用于质量与安全协同管理, 可以实现管理过程的持续改进, 即在计划阶段确定质量与安全一体化目标及实施方案; 在执行阶段严格按照管理措施进行; 在检查阶段同时开展质量检测和安全巡查; 在处理阶段总结经验教训, 改进管理流程。依靠循环往复的闭环管理来提高质量与安全协同管理水平。

1.3 全生命周期管理理论

全生命周期管理理论认为要对工程从规划设计、施工建设、竣工验收到运维保障的全过程进行系统的管理。住宅供配电工程施工质量及安全管理涉及全生命周期的各个阶段, 各个阶段之间相互影响、相互制约。施工阶段质量安全问题会影响到工程运维阶段的可靠性、安全性, 需要从全生命周期的角度出发, 建立施工全过程的协同管理机制, 使各个环节无缝衔接、协

作者简介: 钮斌 (1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力施工。

同管控。城市住宅10 kV供配电工程施工过程中,要根据实际情况区域和设计方案的差异来制定管理对策,指导和规范施工过程。

2 住宅供配电工程施工质量与安全管理现状及问题分析

2.1 管理目标割裂,协同性不足

目前,在部分住宅供配电工程施工中,质量目标和安全目标是分开设定的,没有有机融合。建设单位注重工程进度和成本控制而忽视质量、安全,施工单位为赶进度会采取牺牲质量、安全等短视行为来完成任务,简化安全防护措施、使用不合格材料等。质量目标重在工程实体质量达标,安全目标重在事故防控,二者缺乏统一的协同目标体系,管理方向不一致,不能形成管理合力。

2.2 责任划分模糊,追溯机制不完善

住宅供配电工程涉及建设方、施工方、监理方、设计单位等众多主体,但是在一些项目的合同中并没有对各方质量安全责任进行清晰的规定,尤其是在交叉作业环节容易出现责任真空。部分合同只对质量验收标准、安全事故责任作出规定,没有对质量与安全协同管理的具体责任作出规定,出现质量问题后互相推卸责任。责任追溯机制不健全,缺少对施工全过程质量安全行为的记录和追溯,不能准确地找到责任主体,从而影响管理的严肃性和有效性^[3]。

2.3 过程管控脱节,衔接流程不顺畅

施工过程中质量控制和安全控制由不同的部门或者人员进行管理,缺乏有效配合。材料进场验收阶段,有些项目只核对质量合格证明,不进行材料的安全性能检测;施工工序交接时,只检查质量是否达标,不关注安全防护措施是否到位;竣工验收阶段,只注重工程实体质量的验收,对施工过程中的安全管理情况复盘不够。过程管控的脱节造成质量安全隐患不能及时发现和整改,形成管理漏洞。

3 住宅供配电工程施工质量与安全协同管理机制构建

根据以上问题分析,结合有关理论基础,建立以目标、过程、责任、保障四个方面为主要内容的协同管理机制,把质量与安全有机地结合起来,对整个工程实行全流程管理。

3.1 目标协同:构建一体化目标体系

目标协同是协同管理的前提和基础,核心就是质量目标和安全目标的统一设定、同步推进、协同考核。

1. 目标一体化设定:根据住宅供配电工程的特点,把质量标准、安全要求融入统一的项目目标体系当中。质量目标要明确工程实体质量、材料设备质量、验收合格率等指标,安全目标要明确安全事故发生率、安全隐患整改率、安全文明施工达标率等指标,使两者相兼容、相支撑。

2. 目标层层分解:把一体化的目标分解到各个参建方、各个部门以及各个施工班组,明确各层级的质量安全协同目标。建设单位负责总体目标的制定,施工单位负责具体目标的落实,监理单位负责目标执行的监督,形成“总目标、分目标、子目标”的层级体系,保证目标明确、责任到人。

3. 目标动态调整:按照施工进度、现场情况、行业政策变动等,随时对质量安全协同目标作出调整。在目标调整时充分听取各方面的意见,使调整后的目标既能符合工程实际又能保证质量、安全地协调。施工方案发生变更的时候,同步调整对应的质量控制要点和安全防护要求。

3.2 过程协同:建立全流程协同管控体系

过程协同为协同管理的中心环节,要达成施工全过程质量与安全管理无缝连接并同步控制的效果,分为材料进场、施工过程、竣工验收三大部分。

1. 材料采购阶段协同:实行材料设备质量、安全双验收制度。施工单位采购材料设备时,应同时核对质量合格证明和安全性能检测报告,保证材料设备既符合质量标准,又满足安全要求;监理单位同步进行材料进场验收,对质量不合格或者安全性能不符合要求的材料设备坚决退场。电缆、配电箱等主要设备,除了要对电气性能指标进行核查之外,还要对阻燃、绝缘等安全性能进行检验。

2. 施工实施阶段协同:推行质量巡检与安全检查同时进行的工作模式。施工单位成立协同管理小组,由质量管理人员和安全管理人员组成,对施工工序实行联合检查。监理单位定时进行联合巡查,主要对协同管理落实情况进行巡查,对关键工序进行旁站监理,保证质量控制、安全防护措施同时到位。在电缆沟砌筑施工中联合检查沟体砌筑质量、临边安全防护措施,防止出现质量问题及安全隐患。

3. 竣工验收阶段协同:创建质量验收和安全评估并行的验收体系。竣工验收时,除了对工程实体质量是否符合设计要求、验收标准进行核查外,还要对施工过程中的安全管理情况进行评价,即安全制度的执行情况、安全措施落实情况、安全事故的处理情况等。质量验

收不合格或安全评估不达标的工程不能进行竣工验收。

3.3 责任协同：构建清晰化责任追溯体系

责任协同的核心就是明确各方面的质量安全双重责任，建立“责任法定、分工明确、追溯可查”的责任体系，保证出现问题后可以准确找到责任主体。

1. 确定责任：完善合同条款，确定建设、施工、监理、设计等各方质量安全协同责任。建设单位负责提供满足施工要求的施工条件，协调各方共同进行管理；施工单位是质量安全协同管理的主要责任方，要落实好各项协同管理措施；监理单位对协同管理执行情况进行监督，及时发现并督促整改问题；设计单位提供满足质量安全要求的设计方案，并参与协同管理过程中的技术指导。

2. 建立责任清单：制定各方主体的质量安全协同责任清单，明确各个阶段、各个工序的具体责任内容。施工单位项目经理责任清单包含质量安全目标落实、协同管理小组运作、隐患整改监督等；作业班组责任清单包含严格按照质量标准和安全规范施工、及时报告质量安全问题等。责任清单要公开透明，便于各方对照执行和监督。

3. 健全责任追溯机制：用数字化手段对施工全过程的质量安全协同管理进行档案记录，包括材料验收、工序检查、隐患整改、验收结果等全部数据，实现责任追溯的全过程。档案有文字记录、视频影像等，保证追溯信息的真实性、准确性、完整性。一旦出现质量安全问题，就可以查阅协同管理档案，精准找到责任主体，依法依规追究责任^[4]。

4 住宅供配电工程施工质量与安全协同管理实践路径

4.1 完善协同管理制度体系

1. 制定专项管理办法：根据行业规范、工程实际，制定《住宅供配电工程施工质量与安全协同管理办法》，规定协同管理的组织架构、职责分工、管理流程、考核标准。办法要突出可操作性，对材料验收、工序管控、验收结算等关键环节的协同要求作出具体规定。

2. 细化合同条款：在工程施工合同中明确质量安全协同管理的内容，即协同目标、责任划分、费用支付、违约责任等。明确施工单位没有执行好协同管理措施而发生质量安全问题的，应承担相应的赔偿责任；监理单位没有履行好协同监督工作的，应扣除监理费用^[5]。

4.2 强化全流程协同管控

1. 前期准备阶段协同：施工图纸设计阶段，设计单位应考虑质量控制、安全防护要求，施工单位、监

理单位参加图纸会审，提出优化建议；施工组织设计编制阶段，施工单位制定质量安全协同管理方案，明确质量安全协同管理流程、措施、责任分工，报建设单位、监理单位审批。

2. 施工实施阶段协同：推行“三检三查”制度，即作业班组自检、技术人员巡检、监理单位专检；对关键工序和危险作业实行“双监护”制度，即质量管理人员和安全管理人員同时在场监护；建立协同沟通机制，定期召开质量安全协同管理会议，通报管理情况，解决存在的问题。

3. 竣工验收阶段协同：制定协同验收方案，明确验收内容、标准、流程，验收过程中建设、施工、监理、设计等各方共同参与，同步开展质量检测、安全评估，验收合格后共同签署验收报告，明确质量保修责任、安全运维要求，验收不合格的制定整改方案，限期整改后重新组织验收。

5 结束语

住宅供配电工程施工质量与安全协同管理对于提高工程管理水平、保证居民的生命财产安全具有非常重要的作用。本文从分析行业内质量与安全管理存在的问题出发，结合协同管理理论、PDCA 循环理论和全生命周期管理理论来创建“目标—过程—责任—保障”这四个互相配合的管理机制，并提出相应的改善措施，如健全制度体系、搭建数字化平台、强化全过程管理、培养人员素养、制定考核机制。该协同管理机制的主要价值就是打破质量、安全两方面管理的割裂状况，实现两者的有机融合以及全过程控制，可以提高管理效率和效果，降低工程隐患及安全风险。

参考文献：

- [1] 丘飞龙. 新建住宅小区供配电设施工程中的施工探析[J]. 电气技术与经济, 2023(10):159-161.
- [2] 徐锦文. 住宅建筑中配电系统的质量管理优化措施[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(10):169-171.
- [3] 陈培斌. 中小型住宅小区供配电设计和系统优化策略[J]. 光源与照明, 2023(10):42-44.
- [4] 何彦. 住宅小区供配电方案的问题探讨[J]. 新型工业化, 2021, 11(06):198-199.
- [5] 余林君. 关于新建住宅小区供配电工程电气施工安装中的安全隐患及技术对策分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(10):103-106, 126.

高负荷条件下电气安装可靠性评估方法

张文斌, 李安强, 赵娟

(山东百聚建筑工程有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要 基于高负荷条件下电气安装结构在热、电、力多应力叠加作用下呈现的快速退化特性, 构建由多维指标解析、概率统计建模与负荷驱动耦合计算组成的可靠性评估方法。通过分析温升、接触电阻与电动力等参数的动态演化, 建立失效概率推断模型, 并以典型配电场景开展时序仿真验证, 旨在为高负荷工况下电气安装结构的状态评估、寿命预测与运维策略制定提供技术参考。结果显示, 热应力贡献在高负载区间显著提升, 整体失效概率呈非线性跃迁特征。

关键词 高负荷条件; 电气安装; 可靠性评估; 应力耦合

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.036

0 引言

高负荷运行使电气装置长期处于高电流密度与快速升温状态, 热、电、力多应力叠加导致退化速率明显加快^[1]。定值化方法难以反映负荷波动引起的应力动态变化, 需以多维指标解析、概率量化与负荷驱动耦合计算构成统一评估体系。本研究围绕三类应力的联合表征与失效概率推断展开, 并结合典型场景验证其适用于高负荷工况的连续可靠性刻画能力, 为后续状态评估与运维策略设定提供依据。

1 高负荷条件下电气安装可靠性问题分析

高负荷运行使电气安装长期处于高电流密度状态, 导体温升按 I^2R 关系呈非线性增长, 接触界面微观凸点软化后导致接触电阻进一步攀升, 形成“温升—电阻”正反馈链条, 电缆接头温度在高载率条件下常超过 95 °C, 绝缘耐压裕度显著压缩。大电流冲击产生的电动力与 I^2 成正比, 使母排产生瞬态位移并削弱紧固件预紧力, 若叠加负荷频繁波动形成循环应力, 则螺栓松动与金具疲劳成为主要隐患。绝缘系统方面, 热老化遵循 Arrhenius 规律, 温度每提升 10 °C 会使寿命衰减约 50%, 高温引起的电场畸变又会推动局部放电幅值提升, 进一步加剧介质损伤^[2]。在此作用下, 常见失效包括接触点烧蚀、绝缘碳化、电缆护套龟裂、母排连接点松弛及断路器触头磨损, 其触发概率受温升速率、负荷波动幅度和界面初始状态共同影响, 需在可靠性评估中进行量化建模。

2 可靠性评估方法

2.1 多维解析指标构建

在界定高负荷条件下的主导应力后, 将热、电、机械三类量化参数组构为可计算的状态向量, 通过统一归一化规则形成可输入模型的特征集。温升 ΔT 取自接头与母排布点温度传感器, 按 1 s 周期采集并以滑动窗口计算梯度 dT/dt ; 电气侧采用在线接触电阻 R_c 与局部放电幅值 q , 分别通过四线法与超声传感器获取; 机械侧以螺栓预紧力损失率 η 和母排位移 δ 为核心指标, 利用应变计与位移编码器同步测量。各指标经量纲压缩后形成综合状态量 H , 计算式为:

$$H = w_1 \Delta T + w_2 R_c + w_3 q + w_4 \eta + w_5 \delta \quad (1)$$

式(1)中, $w_1 \sim w_5$ 为基于历史工况分布的权重系数, 通过区间约束优化确定^[3]。

2.2 概率统计模型

基于综合状态量 H , 采用随机过程描述高负荷引起的参数波动特性, 将其转化为可计算的失效概率。首先以 1 min 分辨率构建 H 的时间序列, 对 ΔT 、 R_c 、 q 、 η 、 δ 等子量提取极值、均值与涨落特征, 采用偏最小二乘法消除多重共线性后输入寿命分布拟合器。各应力通道的退化速率以 Weibull 分布表征, 形状参数 k 由最大似然法求取, 尺度参数 λ 依据区间工况重采样得到。多应力间的相关性通过构建 Clayton-Copula 函数完成, 耦合系数 θ 取自 H 向量的 Spearman 秩相关系数回归结果^[4]。失效概率 P_f 由以下关系给出:

作者简介: 张文斌 (1974-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气安装。

$$P_f = 1 - C[F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)] \quad (2)$$

式 (2) 中, $C[\cdot]$ 为 Copula 联合分布函数, $F_n(t)$ 为第 n 类应力的边缘分布。该公式用于在指定运行时间窗口内计算高负荷应力叠加下的总体失效概率, 通过对 $F_n(t)$ 的参数更新可在不同负荷水平下生成对应的可靠性曲线^[5]。

2.3 负荷—应力耦合评估

在获得各应力通道的边缘分布后, 以实际负荷序列 $P(t)$ 作为驱动变量构建耦合求解流程^[6]。首先对 $P(t)$ 按 10 s 步长离散并输入导体电流模型得到瞬态电流 $I(t)$, 随后更新温升 $\Delta T(t) = k_1 I^2(t) R_c(t)$ 。接触电阻 $R_c(t)$ 依据界面退化速率与瞬态温度按指数递推式计算, 时间步间保持与 $\Delta T(t)$ 同步更新。电动力 $F(t) = k_2 I^2(t)$ 用于求解母排位移 $\delta(t)$, 并将 $\delta(t)$ 作为接触压力修正量作用于 $R_c(t)$, 形成电、热、力三通道的联动演化^[7]。局部放电幅值 $q(t)$ 按 $\Delta T(t)$ 及电场畸变量即时求取。上述量形成耦合应力向量 $S(t)$, 输入疲劳损伤模块并以 Miner 准则递推等效损伤 $D(t)$, 其表达式为:

$$D(t) = \sum_{i=1}^m \frac{n_i(t)}{N_i(S(t))} \quad (3)$$

式 (3) 中, $n_i(t)$ 为第 i 类应力在时刻 t 的循环数, $N_i(S(t))$ 为该应力幅对应的疲劳寿命。该结构支持在全时域内生成负荷扰动下的连续损伤序列。

2.4 不确定性处理策略

将负荷预测偏差、温度测量噪声及接触界面初始状态差异视为独立不确定源并进行参数区间化处理^[8]。负荷侧以历史 30 d 负荷序列构建置信区间, 上下边界按 95% 分位设定, 并在耦合模型中对 $P(t)$ 实施随机扰动注入; 温度测量侧采用零均值高斯噪声模拟传感器误差, 并以实时残差决定噪声方差更新, 保持与现场工况一致的统计结构; 接触界面状态以三类初始粗糙度等级离散

建模, 通过随机抽样生成 $R_c(t)$ 的初值集合。各不确定源在统一调度器内按时间步独立采样并驱动耦合链路迭代, 通过 1×10^4 次蒙特卡洛运行生成损伤分布区间。最终以分布的上置信边界作为输入, 构建不同载荷水平下的可靠性曲线, 为工程验证提供稳健的参数集合。

3 工程应用与验证

3.1 典型场景模拟

选取数据中心 10 kV 配电柜作为验证对象, 负载率在 0.65 ~ 1.00 区间接 5min 记录并输入求解链路, 导体电流 $I(t)$ 据此换算并驱动温升、接触电阻及局部放电的联合演化。如图 1 所示, 负荷在 0 ~ 24 h 呈峰谷分布, 09:00-12:00 与 20:00-23:00 负载率超过 0.92, 温升随之快速上升, 接头温度在负载率大于 0.95 时突破 96 °C。温升变化速率 dT/dt 在峰段分别达到 1.8 °C/min 与 1.5 °C/min, 对 $R_c(t)$ 的指数递推产生显著放大, 使末期值较初始增加约 38%。母排位移 $\delta(t)$ 在大电流冲击下出现三次突升, 最大 0.42 mm, 接触压力下降进一步提升 $R_c(t)$ 迭代结果, 强化热—力耦合特性。局部放电 $q(t)$ 在温升超过 90 °C 后产生阶梯式跃迁, 峰值提升约 22%。上述时序结果构成连续损伤轨迹集, 为后续失效概率计算提供完整输入。

3.2 性能指标分析

在获得全时域的损伤序列后, 将等效损伤 $D(t)$ 分解至热、电气、机械三类应力通道, 分别计算其对应的边缘失效概率并构建联合分布。如图 2 所示, 在负载率从 0.75 上升至 1.00 的过程中热应力主导性最为明显, 其失效概率贡献从 45% 提升至 63%, 对应 $\Delta T(t)$ 与 $R_c(t)$ 的同步加速特征; 电气应力贡献主要由局部放电跃迁驱动, 在负载率高于 0.9 后由 14% 上升至 22%, 与电场畸变与温升组合效应一致; 机械应力贡献受 I^2 驱动的电动力变化影响, 贡献率从 18% 升至 27%, 并在

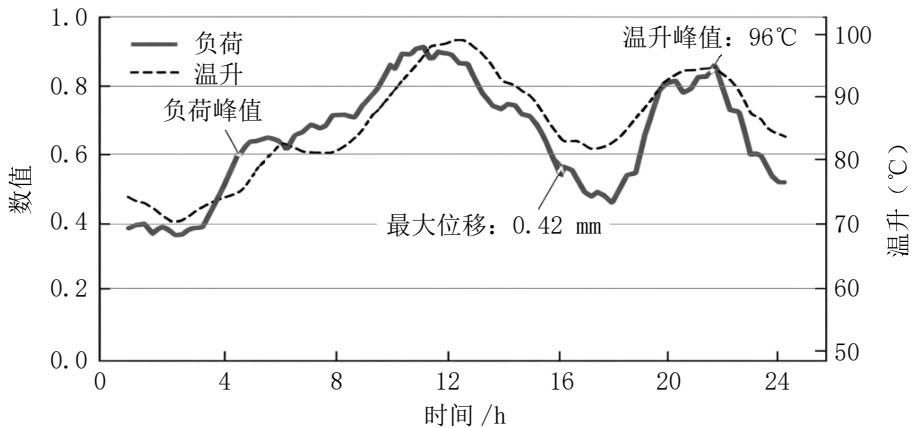


图 1 负荷—温升时序曲线图

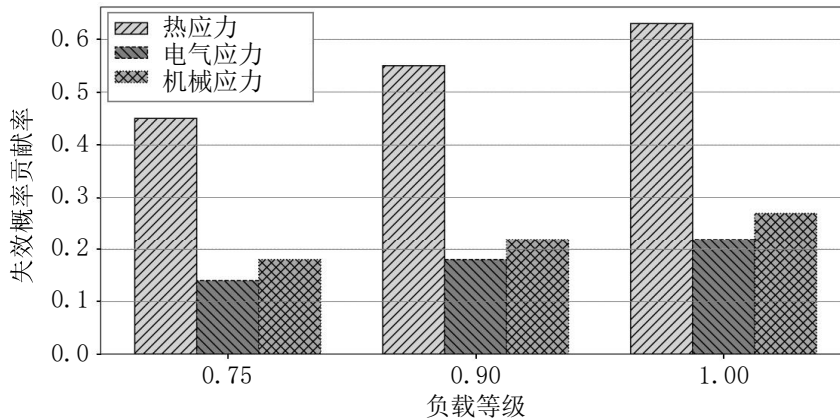


图2 多应力失效概率对比条形图

三次电流冲击段出现峰值。联合失效概率 P_f 由 Copula 结构输出, 在最高负载区间达到 1.8×10^2 , 较中负载区间提升约 2.6 倍。该结果体现出负荷驱动应力分布的非线性增强特征, 高负载区间的概率跃迁主要由热应力与机械应力共同作用所触发。

3.3 经济性评估

在失效概率与损伤序列获得后, 以对比表形式建立不同策略下的寿命与成本数据, 如表 1 所示, 通过将等效寿命、年均故障率及全寿命周期成本在传统安装策略与可靠性评估驱动策略之间进行差异化, 得到

表1 不同策略下的寿命与成本对比

指标	传统安装策略	可靠性评估驱动策略	差异
接头等效寿命 (年)	1.8	3.2	↑ 77.8%
年均故障率 (%)	4.5	1.6	↓ 64.4%
年均停运时长 (h)	12.4	4.1	↓ 66.9%
年均维护成本 (万元/年)	28	17	↓ 39.3%
全寿命周期成本 LCC (万元/10年)	260	190	↓ 26.9%
高负荷区段失效概率	1.8×10^2	6.9×10^2	↓ 61.7%

其在寿命延展、停运时长减少与维护成本削减方面的量化结果, 并可据此反推高负荷运行下的运维策略边界。

4 结束语

高负荷条件下电气安装体系的可靠性演化规律可通过多维指标解析、概率统计建模与负荷驱动的应力耦合机制实现定量刻画, 相关方法经典型场景验证后形成可用于工程决策的参数体系。后续工作将围绕复杂负荷波动下的多物理场联动特征、在线监测数据的动态校准策略及面向长周期退化过程的模型更新机制展开, 以进一步提升高负荷条件下电气装备的全寿命安全保障能力。

参考文献:

[1] 杜尊峰, 刘治余, 杨源, 等. 基于 CREAM 方法的海上风机安装人因可靠性评估 [J]. 中国海洋平台, 2024, 39(03): 27-34.

[2] 张华龙, 郑正国, 李忠为. 基于 ISO13849 的核电数控桥式起重机电气控制回路的可靠性分析 [J]. 装备制造技术, 2022(09):128-132.

[3] 金国喜, 韩丽冰, 孙辉. 船舶电力系统调试负荷测试评估研究 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(03):46-48.

[4] 郑锋. 基于 S-LPIM 的复杂机械设备可靠性评估方法 [J]. 设备管理与维修, 2024(09):21-26.

[5] 郑兰疆, 王广金, 周天. 核电站电气贯穿件导体组件老化寿命评估研究 [J]. 中国测试, 2021, 47(06):156-160.

[6] 廖恺, 孟旭, 丛楨, 等. FMEA 在风电安装船绕桩起重机电控系统的应用 [J]. 船舶工程, 2024, 46(S01):531-535, 542.

[7] 严彭, 许悦, 季定胜. 发动机附件可靠性试验谱设计方法研究 [J]. 环境技术, 2024, 42(11):44-48, 54.

[8] 刘盼. 机电设备电气安装常见故障及应对措施 [J]. 中国厨卫, 2022(01):148-150.

绿色公路建设理念在公路设计中的应用探讨

欧玉才

(皓筠工程设计有限公司兰州设计分公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要 为推动公路建设向绿色低碳、生态环保方向转型, 破解传统公路设计资源消耗大、生态破坏严重等困境, 本研究明确绿色公路建设理念在公路设计中的应用价值, 探究绿色公路建设理念在公路路线、路基路面、排水系统及配套设施等关键设计环节的应用路径, 提出生态优先的路线选线策略、低碳节能的路基路面方案、雨洪利用的排水模式及绿色配套设施配置建议, 以期为促进我国公路建设高质量发展提供参考。实践验证表明, 相关设计方法可降低公路建设资源消耗, 减少生态破坏面积, 提升运营阶段能源利用效率, 有效协调公路建设与生态环境、资源利用的关系, 显著提升工程生态、经济与社会效益。

关键词 绿色公路建设理念; 公路设计; 生态保护; 低碳节能

中图分类号: U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.037

0 引言

在我国交通运输行业高速发展的进程中, 公路网络的不断完善为区域经济联通、社会资源流动提供了核心支撑, 但传统公路建设模式也逐渐暴露出深层次问题。以通行功能为单一导向的设计思路, 导致公路建设过程中普遍存在耕地占用量大、自然植被破坏严重、建筑废弃物排放超标等现象, 运营阶段更是面临能源消耗过高、污染物排放失控等生态压力, 与我国“双碳”目标及生态文明建设要求存在显著差距^[1]。在此背景下, 绿色公路建设理念应运而生, 其以全生命周期绿色化为核心, 强调生态保护、资源循环与低碳高效的协同发展, 为破解传统公路建设困境提供了全新路径。公路设计作为工程建设的前置核心环节, 直接决定了公路的建设形态、资源消耗强度及生态影响范围, 是绿色理念落地的关键载体^[2]。将绿色公路建设理念系统融入设计全过程, 重构设计逻辑与技术路径, 不仅能从源头降低工程对生态环境的扰动, 更能提升公路全生命周期的综合效益。

1 绿色公路建设理念在公路设计中的应用的價值

1.1 筑牢生态保护第一道防线

传统公路设计往往忽视生态系统的整体性, 易对沿线自然保护区、湿地、珍稀动植物栖息地等敏感区域造成不可逆破坏。绿色公路建设理念通过前置生态调研、优化路线布局等设计手段, 能有效避让生态敏

感区, 减少对原生植被的砍伐和土壤的扰动。同时, 通过生态防护技术、植被恢复方案的融入可实现公路建设与自然生态的和谐共生, 降低水土流失、生物多样性减少等生态风险, 筑牢公路建设的生态保护第一道防线。例如: 在生态脆弱区域的公路设计中通过采用桥隧替代高填深挖、设置生态廊道等措施可显著降低对生态系统的割裂影响。

1.2 实现全生命周期成本优化

绿色公路设计虽可能在前期设计阶段增加部分技术研发与方案优化成本, 但从全生命周期视角来看其经济效益显著。通过资源循环利用技术(如废旧路面材料再生、工业废料资源化利用)可大幅减少原生资源开采量, 降低建设材料采购成本, 低碳节能设计(节能照明、透水路面、优化路线坡度等)能降低公路运营阶段的能源消耗和养护成本。同时, 绿色公路设计带来的生态环境损害减少, 可规避生态修复、污染治理等后续额外支出, 实现工程建设与运营的全生命周期成本优化^[3]。

1.3 助力高质量发展与民生改善

绿色公路建设理念的应用, 能推动公路建设从“粗放型”向“集约型”转型, 契合我国高质量发展的核心要求。优质的绿色公路不仅能提升通行安全性与舒适性, 还能通过景观融合设计、配套服务优化, 打造“路景相融”的交通环境, 助力沿线旅游产业发展。同时,

作者简介: 欧玉才(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路与桥梁工程。

绿色公路建设过程中推广的低碳技术、生态理念，能引导社会公众树立绿色出行意识，推动交通运输行业绿色转型，进而提升社会整体生态文明水平。此外，绿色公路设计注重对沿线居民生产生活的影响规避，通过合理设置隔音设施、排水系统减少公路建设与运营对周边居民的干扰，改善民生福祉。

2 绿色公路建设理念在公路设计中的关键应用环节

2.1 路线设计生态优先，实现避让与协同

路线设计是公路设计的基础，直接决定工程的生态影响与资源消耗强度，绿色理念在此环节的核心应用原则为“生态优先、避让协同”。前置生态调研与评估，采用遥感监测、实地勘察、无人机测绘等多元手段全面梳理路线沿线的生态敏感区域、地质条件、水资源分布、耕地与林地分布等情况，建立详细的生态环境数据库，明确路线选线的生态约束条件。基于调研结果优先选择荒地、劣地等土地资源质量较差的区域布设路线，坚决避让自然保护区、核心湿地、珍稀动植物栖息地等生态敏感区^[4]。同时，优化路线平面与纵断面设计，平面设计中尽量采用直线与大半径曲线组合，减少路线转折次数，降低对地形地貌的切割破坏；纵断面设计中结合地形条件优化坡度与坡长，避免高填深挖，减少土石方工程量，降低水土流失风险。对于必须穿越复杂地形的路段优先采用桥隧构造物替代，减少对山体植被的破坏。例如，在山区公路设计中采用隧道穿越山体替代大面积开挖，既能保护山体地质稳定性，又能减少植被砍伐。此外，注重路线与周边景观的协同融合，采用本土植物品种进行沿线绿化设计，通过植草护坡、生态挡土墙等景观化防护措施实现“路在景中、景在路上”的效果。

2.2 路基路面设计低碳循环，提升节能与耐久性

路基路面是公路的核心结构，绿色理念在此环节的应用重点为“低碳节能、资源循环、提升耐久”。在路基设计方面推广生态型路基结构与材料，对于软弱地基路段采用真空预压、水泥粉煤灰碎石桩等复合地基处理技术，减少土石方用量，提升路基稳定性；积极利用粉煤灰、矿渣、建筑垃圾等工业废料替代传统路基填料，实现废料资源化利用，降低环境压力。同时，路基防护摒弃传统浆砌片石等硬质防护，采用植草、植灌相结合的生态防护模式，提升水土保持能力。在路面设计方面核心是推广低碳环保材料与结构，采用再生路面材料，将废旧沥青路面、水泥混凝土路面

破碎再生后，用于新建路面的基层或底基层，减少原生沥青、水泥等资源消耗；推广温拌沥青、高性能沥青等低碳材料，降低沥青混合料生产过程中的能耗与碳排放；优化路面结构设计，根据公路等级与交通流量，设计合理的路面厚度与层间结构，提升路面抗疲劳、抗车辙性能，减少养护频次；在人行道、非机动车道、服务区停车场等区域推广透水路面技术，实现雨水渗透涵养，补充地下水，减少城市内涝风险。

2.3 排水系统设计生态排水，实现雨洪资源利用

传统公路排水设计多采用“快排快泄”模式，易导致雨水资源浪费、周边水体污染等问题，绿色理念在此环节的应用核心为“生态排水、雨洪利用”。优化排水系统布局，摒弃传统混凝土硬式边沟，采用植草沟、生态边沟、雨水花园等生态排水设施，利用土壤过滤、植被吸附作用对雨水进行净化，减少径流污染物含量。同时，设置雨水集蓄与利用系统，在公路服务区、收费站、互通立交等区域布设蓄水池、集雨池，收集路面与沿线区域的雨水，经沉淀、过滤等简易处理后用于公路绿化灌溉、路面冲洗、卫生间用水等，实现雨水资源循环利用，降低自来水消耗^[5]。此外，注重排水系统与周边水文环境的协同，公路跨越河流、湿地时，采用桥梁跨越替代涵洞穿越，减少对水体的阻隔与扰动；排水出口设置水质净化设施，确保排放雨水水质达标，避免污染周边水体。对于山区公路合理设置截水沟、急流槽，结合山体植被分布优化排水路径，减少水土流失。

2.4 配套设施设计智能节能，打造绿色服务体系

公路配套设施（服务区、收费站、照明系统、监控系统等）是运营保障的核心，绿色理念在此环节的应用重点为“智能节能、绿色环保”。在服务区设计中推行绿色建筑标准，采用节能门窗、保温隔热材料，提升建筑节能性能；配套建设太阳能光伏发电系统、地热能供暖制冷系统，满足服务区电力、供暖、制冷需求，减少传统能源消耗；设置垃圾分类收集与处理设施，推行厨余垃圾资源化、可回收物回收利用，减少垃圾污染；建设污水处理设施，对生活污水进行处理，达标后用于绿化灌溉或排放。同时，在照明系统设计中全面推广LED节能灯具，替代传统高压钠灯，降低能耗50%以上；采用智能照明控制系统，结合光照强度、交通流量数据，自动调节照明亮度，实现“白天关灯、夜间按需调光”，避免无效能耗；在公路沿线合理布设

太阳能路灯,利用可再生能源供电,进一步提升节能效果。此外,监控系统采用低功耗设备,结合物联网技术实现设备智能启停与状态监测,降低运营能耗^[6]。

3 案例分析

3.1 案例概况

选取某省级绿色公路示范项目(以下简称“示范项目”)作为研究案例,该项目为双向四车道高速公路,全长 68 公里,途经平原、丘陵与生态保护区边缘,其中穿越生态敏感区域路段约 12 公里。项目设计阶段全面融入绿色公路建设理念,重点围绕路线优化、资源循环、生态防护、智能节能等方面开展设计,是区域内绿色公路建设的典型代表。

3.2 绿色设计应用措施

在路线设计环节项目前期通过无人机测绘与实地勘察,全面梳理沿线生态敏感点,将原需穿越生态保护区核心区的路线方案优化调整,采用 1.2 公里隧道+0.8 公里桥梁的组合方式,避让核心敏感区,减少植被砍伐面积约 8 公顷;同时,优化纵断面坡度,将平均坡度从原设计的 3.2% 降至 2.0%,减少土石方开挖量约 25 万立方米。在路基路面设计环节项目利用沿线废弃水泥厂的矿渣作为路基填料,替代传统碎石填料,用量达 15 万立方米,减少了矿渣堆放污染与原生碎石开采;路面施工采用废旧沥青路面再生技术,将项目周边旧路改造产生的 8 万立方米废旧沥青混合料再生后,用于新建路面基层,再生利用率达 90%;在服务区停车场与互通立交匝道区域,铺设透水沥青路面,面积约 2 万平方米,配套建设 3 座容量为 500 立方米的雨水集蓄池。在排水与配套设施设计环节项目全线采用植草沟生态排水系统,替代传统混凝土边沟,长度达 45 公里;服务区建设 1 000 平方米太阳能光伏板,配套地热能供暖系统,实现服务区 80% 的电力需求与 100% 的供暖需求自给;全线照明采用 LED 智能灯具,结合交通流量监测实现亮度自动调节,配套太阳能路灯 320 盏。

3.3 应用效果

案例项目通过绿色公路设计理念的系统应用,取得了显著的生态、经济与社会效益。生态方面,项目避让了生态敏感核心区,减少植被破坏 8 公顷,通过生态防护与植被恢复,沿线水土流失量较传统设计减少 60%,区域生物多样性得到有效保护;雨水集蓄与透水路面系统年收集利用雨水约 1.2 万立方米,补充地下水约 0.8 万立方米。经济方面废旧材料再生与工业废料

利用减少建设成本约 1 200 万元,太阳能与地热能利用年节约电费与取暖费约 80 万元,智能照明系统年节能耗约 50 万千瓦时,全生命周期成本预计降低 25%。社会方面项目“路景相融”的设计提升了通行舒适性,沿线旅游产业因交通改善得到带动,年新增旅游收入约 500 万元;绿色理念的推广提升了周边居民生态保护意识,获得了广泛的社会认可。

4 结束语

绿色公路建设理念在公路设计中的应用是破解传统公路建设生态破坏、资源浪费困境的必然选择,更是推动交通运输行业高质量发展的核心路径。从应用价值来看,其不仅能筑牢生态保护防线,更能实现全生命周期成本优化与民生福祉提升,兼具生态、经济与社会多重效益。从应用实践来看,绿色理念需贯穿路线、路基路面、排水系统、配套设施等关键设计环节,通过生态优先的路线优化、低碳循环的材料应用、雨洪利用的排水设计、智能节能的配套建设,构建全链条绿色设计体系。案例实践表明,系统应用绿色公路设计理念,能有效降低工程对生态环境的影响,提升资源利用效率,实现综合效益最大化。未来,随着大数据、物联网、BIM 等智能技术的发展,绿色公路设计应进一步向精准化、智能化方向升级,通过技术融合提升设计科学性与可行性。同时,需完善绿色公路设计标准体系,加强技术研发与推广,强化设计全过程管理与多方协同,推动绿色理念在公路设计中全面落地,为我国“双碳”目标实现与生态文明建设提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 周炜.绿色公路理念下的高速公路景观设计与思考[J].运输经理世界,2023(17):160-162.
- [2] 李忠.绿色公路设计理念在高速公路改扩建工程中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2024(11):126-128.
- [3] 姚捷,高小虎,齐韵涛.基于绿色公路建设理念的高速公路路线设计方案评价体系研究[J].交通世界,2021(12):102-103,120.
- [4] 吴敏.基于绿色公路建设理念的高速公路路线设计方案评价体系[J].工程与建设,2022(04):957-958,1011.
- [5] 苏瀚生,王海梁.基于生态环保理念的绿色公路路线设计思路[J].运输经理世界,2025(24):163-165.
- [6] 鲍志远,周晓玺,白超.高速公路城市延伸段绿色低碳优化方案研究[J].交通节能与环保,2025(03):38-42.

市政道路施工中沥青路面平整度控制技术研究

郭士清, 董忠杰, 杨龙飞

(山东诚通市政工程有限公司, 山东 菏泽 274000)

摘要 市政道路沥青路面平整度直接决定了通行安全性、舒适性及路面耐久性。施工工序衔接不畅、参数管控粗放、智能化应用不足等问题导致平整度达标率偏低。本文聚焦施工全流程核心影响环节, 重点分析摊铺—压实关键工序的控制技术, 明确路基—基层基础质量、摊铺压实参数协同、接缝处理工艺等核心影响因素, 提出“智能参数调控+工艺优化+数字化管控”三维控制技术体系, 构建摊铺速度自动补偿、压实参数动态适配、全过程数字化监控等关键技术方案, 以期为市政道路沥青路面平整度控制提供有益参考。

关键词 市政道路; 沥青路面; 平整度; 摊铺压实

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.038

0 引言

市政道路是城市交通体系的关键组成部分, 其施工品质对交通通行效率和市民出行体验起着决定性作用。沥青路面因为具备行驶平稳、噪声较小以及施工简便等特点, 已经成为市政道路工程的首选材料。路面平整度是衡量沥青路面品质的核心要素, 会显著影响车辆行驶的平稳程度和路面的使用年限。鉴于市政工程常面临施工空间有限、交通干扰频繁以及工序交叉复杂等特殊情况, 当前平整度控制存在工序衔接不畅、参数变化剧烈和智能化管理不足等问题, 容易导致路面出现波浪状、接缝处台阶差和局部沉降等缺陷, 亟需采取针对性改进措施。目前针对市政施工特点的“多要素协同与智能化管理”模式还未成型, 立足于摊铺与压实这两大核心环节, 融合数字化手段提出专属解决方案具有创新意义。

1 沥青路面平整度相关理论概述

路面平整度指的是路面表面和理想平面之间存在的偏差情况, 这是评价工程品质以及服务效能的重要参数。其主要评估方法有两种, 首先是国际平整度指数也就是 IRI^[1], 该数值是基于车辆行驶时的垂直振动来表征路面整体平整状况, 单位为米/千米, 数值越低就代表路面越平整; 其次是 3 米直尺最大间隙, 此方法用于检测路面局部的平整度, 单位是毫米, 能直观反映路面的凸起或凹陷情况。考虑到市政工程的具

体特点, 实际检测采用“车载激光连续检测与 3 米直尺定点核查相结合”作业方式, 目的是确保检测过程既快速又准确。

从平整度作用的基本原理来进行分析, 首要因素是施工误差出现逐步累积情况, 在道路建设这个环节当中, 各工序的参数变化会产生叠加效应, 像路基压实形成的误差、基层平整度欠佳等前期缺陷, 会在后续摊铺与压实阶段被进一步放大, 进而对路面整体平整性产生不利影响。其次是材料与工艺的协同作用原理^[2], 混合料的级配组成、沥青含量等特性指标, 需要和摊铺速率、压实温度等操作参数实现高度协调, 若配合不当易造成路面压实度不均、材料离析等问题, 最终导致路面平整度出现下降状况。最后是市政工程所具有的独有特性, 城区施工场地普遍存在受限情况, 交通繁忙且多工种交叉作业较为频繁, 这些条件制约了施工设备的作业范围, 导致摊铺压实作业难以连续开展, 这要求采用的控制技术须具备良好环境适应性与精确控制能力。

2 市政道路沥青路面平整度核心影响因素聚焦分析

2.1 前期准备阶段关键影响因素

路基和基层作为道路的承重结构部分, 它们的施工质量直接关联着路面的平整持久性, 要是路基压实度不均匀且低于 95% 的标准要求, 在行车作用之下就容易引发不均匀沉降现象, 基层横坡误差要是超过 $\pm 0.3\%$,

作者简介: 郭士清 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政道路施工。

会造成排水不顺畅进而加速局部区域的侵蚀下沉情况。当基层平整度误差大于 3 毫米的时候, 沥青面层将很难进行有效修正最终影响整体路面平整度。工程实测数据表明, 路基压实度每下降 1%, 路面后续沉降量会增大 0.8 ~ 1.2 毫米, 基层平整度每增加 1 毫米误差, 沥青面层的整平难度会相应提高 30%。当混合料级配偏离设计规范要求时, 拌合过程当中容易产生材料分离的现象, 粗集料富集区域经过碾压之后会形成凸起, 细集料集中区则会出现凹陷。沥青用量如果超过 5.5% 会导致高温条件下材料出现流动变形, 而低于 4.5% 则会削弱黏结力造成路面松散, 改性剂选择不恰当。

2.2 核心施工阶段关键影响因素

摊铺作业对保障路面平整度起着关键作用, 其工艺参数的稳定性直接决定表面最终品质, 摊铺机运行速度要超出 ± 0.5 千米/小时的稳定范围, 会让铺层厚度产生 3 毫米至 5 毫米误差进而形成明显波纹。当熨平板工作温度低于 100 摄氏度时, 会因混合料与平板黏附造成表面拉毛, 若温度高于 150 摄氏度, 混合料会因过热而流动变形。振捣频率若低于 500 次/分钟, 会导致材料压实度不达标, 超过 800 次/分钟又会引起骨料分离最终造成密实度分布不均。接缝处理工艺粗糙现象较为严重, 横向接缝若采用直接平铺且未预先切割, 会形成高达 3 毫米至 5 毫米的高差, 纵向接缝采用冷接方式时, 若压实不充分, 极易出现宽度普遍在 8 厘米至 15 厘米之间的疏松凹陷区域。碾压工艺的质量是决定路面密实度和平整度的根本所在, 若压实设备组合不当, 单独使用钢轮压路机会造成表层光滑但内部压实不足, 仅采用胶轮压路机则易留下深度为 2 毫米至 3 毫米的轮痕。

2.3 辅助影响因素

当运输里程超过 5 千米或者耗时超过 2 小时的时候, 混合料降温速率将会超过 5 摄氏度/小时且工作性能明显下降, 要是没有采用篷布覆盖来进行保温, 表层热量散失速度会加快一倍进而导致材料板结。当卸料高度超过 1.2 米的情况下, 混合料在下落过程中会出现粗细骨料分离现象且离析程度增加 40%, 摊铺后局部平整度偏差扩大 1 ~ 2 毫米^[3]。若养护时间不足 48 小时就开放交通, 此时材料强度还未达到设计要求(通常要求不低于设计强度的 80%), 在车辆碾压下容易出现车辙凹陷且凹陷深度可达 2 ~ 4 毫米, 超载车辆(轴重超过 10 吨)通行或者频繁急刹变道, 会加剧局部应力集中并使平整度劣化速度加快 2 ~ 3。

2.4 影响因素耦合作用分析

多个影响因素不是单独发挥作用, 而是相互交织产生协同效应。例如: 当路基压实度没有达到标准, 同时摊铺速率存在波动且压实温度较低时, 路面不平整的概率会上升 60%, 如果混合料发生离析现象并且伴随碾压速度过快, 那么平整度超标的概率将提高 50%。基于耦合矩阵的分析表明, 路基与基层质量和摊铺参数的协同效应对平整度影响最为显著, 其权重占比达到 45%, 其次是混合料特性与压实参数的耦合作用占比 30%。

3 市政道路沥青路面平整度关键控制技术优化

3.1 摊铺施工精细化控制技术

本系统将 GPS 定位和速度传感技术融合在一起, 通过借助 PID 控制算法来实时校准摊铺机运行速度, 以此确保其速度波动幅度不会超过 ± 0.3 千米/小时, 进而让摊铺厚度误差能够维持在 ± 2 毫米以内。速度传感器会持续不断地监测行驶数据并与既定目标值进行比对, 一旦监测数据超出容差范围, 控制器就会立即触发指令去调节液压系统, 从而控制行走马达的转速。熨平板部分采用了分区域电加热的方案, 设置有边缘、中部以及另一中部温控区, 各区域温度能够独立设定并精确维持在 120 摄氏度至 150 摄氏度之间, 而且预热阶段时长不少于 30 分钟, 这样就能杜绝局部温度不均的问题^[4]。系统会根据所用混合料的具体类型自动优化振捣参数, 如在处理 AC-13 型混合料的时候, 会将频率设定为 650 次/分钟至 700 次/分钟, 把振幅控制在 0.7 毫米至 1.0 毫米, 而对于 AC-20 型混合料, 则采用 600 次/分钟至 650 次/分钟的频率以及 0.5 毫米至 0.8 毫米的振幅, 以此保障摊铺密实度的均匀性, 使其变异系数低于 3%。

横向接缝处理工艺涵盖斜向切割、热熔连接以及分层碾压这些方式, 首先要借助路面切割设备把接缝加工成 45 度斜口, 清理完碎屑后均匀喷洒 SBS 改性黏结油, 摊铺机熨平板需要覆盖接缝 50 厘米的范围, 启用高密实度作业模式也就是将振捣频率提升 10%, 碾压环节先用 12 吨双钢轮压路机沿斜向碾压 3 遍且时速控制在 2 千米至 2.5 千米, 再横向碾压 2 遍, 最后进行纵向整修, 使接缝平整度误差不超过 2 毫米。纵向接缝采用热接缝同步施工法, 要求相邻摊铺间隔不超过 30 分钟以确保料温不低于 130 摄氏度, 搭接宽度根据实际摊铺宽度在 10 厘米至 15 厘米间动态调整, 碾压遵循“由内向外”原则, 钢轮碾压时需重叠三分之一轮宽防止产生冷接台阶现象。

3.2 压实施工协同控制技术

根据混合料种类和铺层厚度来设计差异化方案,对于AC-13细粒式混合料且铺层厚度在4厘米到6厘米的情况,采用“12到15吨双钢轮初压加上20吨到25吨胶轮复压再加上12吨双钢轮终压”的工艺,其中双钢轮承担初步整平与最终收面工作,胶轮通过揉搓作用增强密实度,对于AC-20中粒式混合料且铺层厚度在6厘米到8厘米的情况,采用“12吨双钢轮初压加上22吨胶轮复压1加上15吨双钢轮复压2加上12吨双钢轮终压”的组合,重点提升中层压实质量,压实流程严格遵循“由轻到重、由慢到快、先边后中”的准则,边部需先用小型设备预压防止混合料推移,中部采用大型设备强化压实效果^[5]。

配备集成压实度传感器的智能压路机结合GPS定位与数据传输功能,能通过振动响应分析采集压实数据且检测误差在±1%以内,还以5 Hz频率进行采样,该系统实现压实度的动态反馈调节,当测量值低于96%的设计标准时会自动增加1~2遍碾压次数并降低碾压速度0.5千米/小时,若压实度超过98%则自动减少1遍碾压以防止过度碾压导致材料离析,GPS定位模块以±0.5米精度记录碾压路径经后台软件处理后生成压实轨迹图可有效覆盖作业区域从而实现压实质量的可视化监控。

3.3 全过程质量管控体系

开发一套能数字化监测摊铺与压实参数的系统,将行驶速度、熨平板温度等关键指标汇集起来,依托5G网络达成毫秒级数据传输(响应时间低于100毫秒),系统配备动态阈值报警相关功能,要是摊铺速度超出设定区间±0.3千米/小时、熨平板温度偏差超过±5摄氏度或者压实温度偏离最佳范围±10摄氏度,就会自动触发声光警示并同步推送优化方案,系统具备历史参数查询与趋势分析功能,可以生成工程质量评估报告,给施工过程管理提供数据方面的依据。构建核心参数的全程追踪记录的机制,对摊铺速度、温度控制、压实次数以及检测数据等进行完整留存,数据保存期限不少于5年,创新采用“段落编码+二维码”的双标识方式,按照50米施工单元生成专属二维码,集成段落编号、施工时段、作业人员、设备型号以及关键参数等信息,通过扫码就能调取该段落的完整施工记录,当路面出现平整度缺陷的时候,可借助该追溯系统快速定位问题环节和参数异常情况,为质量整改提供精准的参照^[6]。

对保温运输罐的构造进行优化,它的内胆采用双相不锈钢还搭配聚氨酯保温材料,保温层的厚度达到

了50毫米,能确保温度每小时下降幅度不超过5摄氏度,罐体装配有温度监测装置,可持续记录混合料的温度状况并把信息传送到监控系统,一旦温度低于预设标准也就是初压温度减20摄氏度就会触发警报机制。对卸料口的设计加以改进,应用可调节式卸料板,将卸料高度维持在0.8米至1.2米的区间,控制卸料速率在每分钟0.5立方米至0.8立方米,以此防止混合料因自由坠落而产生分离现象,对卸下的混合料实施二次搅拌,能够切实消除运输期间出现的物料分层问题,经实际检测表明可减少超过60%的离析率。

4 结束语

市政道路沥青路面平整度受到多种因素共同作用影响,所以要重点优化摊铺与压实参数之间的协调性,并且加强接缝处理方面的工艺。同时,要保障路基与基层的基础质量以及混合料设计的合理性,再辅以运输和后期管理上的有效控制,以此来系统性应对各项因素间的复杂影响。本文构建的“智能参数调控+工艺优化+数字化管控”三维控制技术体系具有明确的针对性,其核心的摊铺速度自动调节、接缝斜接切割与热黏结工艺、压实参数动态匹配及智能压实监测等技术,能够有效解决施工过程当中的关键难题。未来可从三个方向进一步完善:一是融合BIM与物联网技术,建立覆盖全流程的参数闭环控制体系,形成施工设备自动协同、参数实时优化的智能化作业模式,提高控制精度与管理效率;二是针对再生沥青混合料、纳米改性沥青等新型材料,开展施工参数适应性研究,优化控制技术方案,以满足绿色施工的发展要求;三是深入研究高温、低温、雨季及狭小场地等特殊环境下的平整度控制技术,完善不同工况下的参数调整标准,增强技术的适应性,扩大其应用范围。

参考文献:

- [1] 李海滨.市政道路沥青路面平整度影响因素及控制措施[J].施工技术,2021,50(S1):1567-1569.
- [2] 黄晓明,朱湘.沥青路面施工技术[M].北京:人民交通出版社,2021.
- [3] 王建国.沥青混合料离析控制技术在市政道路施工中的应用[J].公路交通科技,2021,38(05):34-40.
- [4] 张磊.智能化压实技术在沥青路面施工中的应用研究[J].市政技术,2022,40(03):156-159.
- [5] 张永梦.市政道路沥青混凝土路面施工技术及其质量控制探究[J].大众科学,2025,46(18):161-163.
- [6] 陈军.路基沉降对沥青路面平整度的影响及控制措施[J].路基工程,2021(04):189-193.

高层建筑铝模外墙全现浇施工技术研究与应

张道亮

(安徽丰临观泰建设工程有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要 在高层建筑工程项目中, 铝模外墙全现浇施工技术的应用具有重要作用, 不仅可以提高施工效率, 缩短工程工期, 还能提高整体浇筑施工质量, 确保建筑工程的安全性。基于此, 本文以铝模系统的结构为切入点, 简要论述铝模外墙全现浇施工技术的优点, 并对铝模外墙全现浇施工技术在高层建筑中的应用加以分析, 主要包括工程概况、施工准备、结构拉缝、铝模拼装、模板矫正、混凝土浇筑及铝模拆除等关键技术, 旨在为高层建筑铝模外墙全现浇施工提供参考。

关键词 高层建筑; 铝模外墙; 全现浇施工技术; 结构拉缝; 铝模拼装

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.039

0 引言

在城市化建设规模不断扩大的趋势下, 高层建筑已成为建筑工程中的常见形式, 在追求建筑高度与功能多样性的同时, 对建筑外墙施工技术的要求也日益提高。传统外墙施工技术在高层建筑外墙施工中具有一定的局限性, 如施工效率低、质量风险高、资源消耗大、无法满足精度要求等问题。因此, 应做好铝模全现浇外墙施工技术的研究工作, 有效发挥现代材料与先进施工理念的优势, 以提高高层建筑的施工质量与效率。

1 铝模系统的结构

铝模系统主要包括模板、支撑、加固以及配件四大组成部分, 进而确保施工效果。其中, 模板系统是整个铝模外墙的核心部分, 能够打造混凝土浇筑封闭面, 确保混凝土结构的良好成型。支撑系统可以为其提供支撑, 确保混凝土结构的稳定。加固系统主要包括背楞、对拉螺杆等构件, 可避免出现模板变形或爆模问题。配件系统主要为销钉、螺栓等关键连接件, 能够将单一模板进行连接, 进而形成统一的铝模系统^[1]。

2 铝模外墙全现浇施工技术的优点

2.1 结构性能强

在高层建筑中, 铝模外墙全现浇施工技术具有结构性能强的优点。运用铝模外墙全现浇施工技术能够减

少外墙的接缝, 有效提高其外墙的整体性, 可有效降低开裂与渗漏风险。与此同时, 通过铝模外墙全现浇施工技术的应用不仅能够提高外墙结构的稳定性, 还能够在地震发生时具备更高的抗震能力, 确保高层建筑外墙结构安全。

2.2 施工速度快

铝模外墙全现浇施工技术具有施工速度快的特点, 施工人员可运用铝模技术确保一次性浇筑成功, 不仅可以节省施工时间, 还能节省人力投入, 与传统浇筑技术相比, 铝模外墙全现浇施工技术是其施工速度的 2~3 倍, 有效节约时间成本, 为施工单位获取更多经济利润空间。

2.3 施工质量高

在高层建筑中使用铝模外墙全现浇施工技术具有重要优势, 可提高整体施工质量。运用铝模进行外墙浇筑施工可以保证墙面具有良好的平整度, 有效减少空鼓、开裂、渗漏等问题, 从而延长高层建筑外墙结构的使用寿命, 为居民的日常居住提供安全保障。

2.4 环保性良好

在高层建筑工程中, 铝模外墙全现浇施工技术具有环保性良好的优点。铝模外墙全现浇施工中可保证现场整洁, 且无有害物质的产生, 施工后产生的废料较少, 对环境并未造成污染。铝模系统具有较高的回收价值, 其周转次数高达 300 次, 其回收率能够达到

作者简介: 张道亮 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

30%~40%，材料可再生，满足绿色施工理念^[2]。

3 高层建筑铝模外墙全现浇施工技术的应用

3.1 工程概况

A 建筑工程为某市的高层建筑项目，该工程的整体建筑面积为 15.64 万 m²，其中，住宅部分为建筑项目的主体，占地 10.02 万 m²，服务设施占地 1 073 m²，运动场地占地 902 m²，其余为配套商业空间。该建筑工程主要为现代高层板式布局，建筑为一字型 and L 型，在标准层施工过程中，融入能够快速安装和拆除的铝模系统，以便为高层建筑施工提供技术支撑。

3.2 施工准备

在铝模外墙全现浇施工前，应做好相关准备工作。施工人员需要对主轴线和墙线进行测量，确保数据的精准度，全面掌握钢筋位置是否存在偏差问题。施工人员可在施工现场打造 0.3 m 控制线，为后续墙体垂直度检测工作提供基准点。施工人员可运用定型模具切割机工具做好钢筋定位筋的加工作业，并对定位筋和阴角之间的距离加以控制，一般设定为 200 mm，定位筋之间的距离应保持在 500~800 mm 之内。在高层建筑外墙施工过程中，施工人员应将内侧基准线作为依据进行定位筋的安装，确保其外端未超出混凝土结构表面。同时，施工人员还可通过十字型对定位筋进行焊接，确保其稳定。在开展基础放线工作中，施工人员需要对模板底部进行找平处理，其找平材料可选择水泥砂浆，能够为后续模板的安装作业提供良好条件，避免出现混凝土材料渗漏问题。此外，施工人员还应为其设置钢筋支撑结构，确保其间隔距离 1.2 m，并通过梯形支撑件将墙体和竖向钢筋之间进行连接，还应使用井字型钢筋套箍将立柱进行固定。在铝模材料进场过程中，施工人员需要对其质量加以检测，主要观察铝模表面是否存在划痕、磕碰、变形等问题，并对其尺寸和连接部件数量进行检查，一切准备就绪后，才能为后续施工奠定基础。

3.3 结构拉缝

在 A 工程中，7~9 号楼的 2 层以上设置了 22 个纵向隔离缝。在进行横向构造缝的设置时，需要根据高层建筑的墙体布局情况加以设置，并在构造柱的位置上进行断开处理。对横向隔离板而言，施工人员可对其进行混凝土灌注开口的提前设置，并距离梁底和板底 100 mm 处进行钢筋贯穿孔的预留，为后续施工提供方便。同时，施工人员可利用斜向连接工艺进行转角处水平构件接缝处理，并在接口位置预留 100 mm 的间隙，可以避免阳台位置的墙体发生破损。施工人员

还需要沿着外墙垂直方向进行纵向构建接缝的设置，其接缝板不必预留浇筑开口，可为其设定贯穿孔，方便钢筋进行穿入，要求贯穿孔的直径为 12 mm^[3]。为了提高纵向接缝结构的稳定性，施工人员需要在标准楼层中安装 4 根 U 形箍筋，要求箍筋直径为 10 mm，箍筋材料为钢材，通过对穿的方法加以安装。结构拉缝操作前，需要做好拉缝板的预先制作工作，对钻孔位置和配筋数量加以确定，做好相应准备工作。在对水平构件进行拉缝操作时，施工人员需要确保板底平整，并做好拉缝检测工作，确保其无扭曲、断裂、偏移等问题。在进行转角位置的拉缝操作时，应保证其缺口朝外，并运用斜向拼接的方式进行施工。在竖向结构拉缝施工过程中，施工人员需要使用铁丝对外墙钢筋进行加固，并使用 U 型箍筋与钢筋笼加以连接。在窗下结构拉缝施工中，施工人员可将竖向钢筋和斜向加强筋进行交叉固定，要求斜向加强筋数量不低于 3 根。因铝模系统具有封闭性的特点，所以施工人员需要在板面预留开孔，要求其孔径不低于 20 mm。在浇筑施工中，施工人员需要对混凝土的运输时间加以控制，以便确保工程质量，具体要求如表 1 所示。

表 1 混凝土运输时间

混凝土温度(℃)	运输时间(min)	运输延续时间(min)
≤ 30	90	75
> 30	60	45

3.4 铝模拼装

在铝模拼装施工中，施工人员可需要利用定型构件进行模板预制，并在墙体内侧和底端设置 L 形铝材，要求其规格为 60 mm×40 mm，在外墙外侧顶端安装专用的 K 型板。施工人员可使用螺栓将 L 形铝材和模板之间加以固定，并通过销钉进行相邻模板的连接，销钉的设置间距为 300 mm。与此同时，施工人员可在外墙内侧和外侧分别设置 4 道和 5 道背楞，首道背楞距离地面 250 mm，还应对相邻背楞垂直距离加以控制，要求其控制在 700 mm 以内。在构建下飘窗板时，施工人员可通过全密封的方式将背楞、模板、L 形角铝构件进行组装，并在顶端提前设定能够拆卸的振捣通道。在混凝土浇筑施工中，暂时不安装振捣区域的板件，当完成振捣操作后再使用背楞进行加固。在构件连接施工中，施工人员可使用销钉进行连接，并通过竖向杆件进行支撑结构的构建，要求竖向杆件间距不超过 1.2 m。对铝板系统而言，可通过 C 型槽将其与周边剪力墙模板加以连接，进而打造较为完整的支模体系。在楼梯模板安装时，施工人员可利用密封式工艺将底

模、踢面板、侧壁板、支撑构件等进行安装,其安装工艺需要与相邻墙体模板进行同步实施,并使用 C 型槽加以连接固定,并在踏步板上设置振动孔洞。各个构件之间使用销钉连接,同时设置支撑背楞进行加固。在楼板铝模安装时,施工人员应先安装 C 型槽,并对梁体间距进行仔细检查,要求其误差不超过 3 mm^[4]。施工人员需要对铝模角部首块板材进行固定,并与龙骨进行配合安装第二块板材,并依次进行循环操作,直至完成全部工作。施工人员还应按照设计图纸要求合理设置斜向支撑构件,完成铝模拼装任务。

3.5 模板矫正

铝模拼装结束后,施工人员需要使用撬棍工具进行校正,要求模板平面和地面墙线对齐,并对其标高加以调整,通过激光测量仪对垫片加以调整,确保其偏差不超过 ± 3 mm。为提高校正精准性,具体操作前,施工人员需对铝模拼接缝进行清理,确保其中不包括木屑、混凝土残渣等杂物,防止其出现卡阻问题,影响拼接精度。并且,在使用激光测量仪前,也需要对其进行校准处理,以提高标高数据的精准性。调节铝模的水平度和垂直度阶段,施工人员可在基部插入木质楔块,方便将其偏差控制在 5 mm 以内。施工人员可使用木锤工具,以均匀力度进行敲击,避免砌块出现断裂问题,或引发模板局部变形风险。为保持受力均衡,还需要合理布设砌块,确保其对称均匀。在对剪力墙的背楞进行加固操作时,施工人员需要根据模板编号进行依次布设,避免调换模板位置,并使用 C 型钢槽进行加固。施工人员可提前预埋对拉螺栓,并与垫片配合实现加固目标,要求螺栓外露 100 mm。施工人员需要对横向对拉螺栓的间距进行检查,要求其不超过 800 mm,不低于 300 mm。在该环节,施工人员需要调整对拉螺栓的预埋位置,确保其能够与模板保持垂直关系,且螺栓孔位精准对应,以避免在后续操作中出現强行穿入的行为,致使模板孔口破损。背楞加固操作技术后,施工人员应做好墙柱模板的垂直度、平整度的检测工作,并通过顶部斜撑装置对水平度和垂直度加以调整^[5]。除此之外,还需逐一检查螺栓紧固扭矩,避免存在松动隐患。针对施工过程中记录的所有检测数据都需要详细记录归档,以支持后续验收工作的顺利推进。

3.6 混凝土浇筑及铝模拆除

在铝模安装矫正施工结束后,应正式开展混凝土浇筑作业。施工人员需要对外墙结构的基本要求加以了解,进而合理设置混凝土配合比。在浇筑施工前,

施工人员应再次进行铝模系统检查,确保其密封性良好,避免出现漏浆问题,还应检查螺栓是否拧紧,支撑是否牢固,进而确保安装稳定。浇筑作业开始之前,施工人员还需要对近几天的天气情况形成充分了解,尽量避免在高温暴晒时段或低温冻害时段进行施工,以维持混凝土初凝环境的稳定性。在此基础上,施工人员可通过分层浇筑的方式进行施工,从高层建筑外墙的一端开始浇筑,要求起浇筑厚度不超过振捣棒作用部分长度的 1.5 倍,一般情况下为 30 ~ 50 cm。在浇筑的同时进行振捣处理,要求振捣棒插入深度不低于 50 mm,避免出现过振或漏振问题。在振捣作业期间,施工人员需遵循快插慢拔的原则操作振捣棒,尽量将其移动间距控制在 300 ~ 400 mm,以避免出现麻面或蜂窝缺陷。当混凝土结构的强度达到相应要求后,应进行铝模的拆除。施工人员可先对外墙侧向支撑进行拆除,然后拆卸穿墙对拉螺栓,并按照由上至下的原则依次拆除铝模。施工人员需要使用专业撬棍进行拆除,避免对混凝土结构造成破坏。此外,施工人员需要做好铝模的清理工作,分类进行堆放,为后续的使用奠定基础。

4 结束语

在高层建筑施工过程中,铝模外墙全现浇施工技术具有结构性能强、施工速度快、施工质量高、环保性良好等优点,可应用于高层建筑施工中,有效提高整体浇筑施工质效。在实际施工过程中,施工人员应对工程概况进行基本了解,并做好相关准备工作,然后按照结构拉缝、铝模拼装、模板矫正、混凝土浇筑及铝模拆除等程序进行施工,有效提高高层建筑铝模外墙全现浇施工效果。

参考文献:

- [1] 高晋飞. 铝模全现浇外墙施工技术在高层建筑工程中的应用研究[J]. 中国厨卫, 2025, 24(05): 130-132.
- [2] 崔朋. 高层建筑施工中的铝模全现浇外墙施工技术探讨[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(05): 9-11.
- [3] 韦奇. 铝模全现浇外墙施工技术在高层建筑施工中的应用[J]. 设备管理与维修, 2024(10): 168-170.
- [4] 魏成惠. 高层建筑工程铝模及爬架全现浇外墙快速穿插施工技术[J]. 建材发展导向, 2024, 22(24): 76-78.
- [5] 吴萍. 高层建筑工程铝模全现浇外墙施工技术研究[J]. 江西建材, 2023(11): 300-301, 304.

跨境公路改扩建项目沥青混凝土路面精细化施工技术应用

田玉柱

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘要 本文以尼泊尔 Mugling-Pokhara (马格林-博克拉) 公路升级改造项目为研究对象, 重点关注跨境公路改扩建工程中沥青混凝土路面精细化施工技术的应用。首先系统地阐述了在该项目实施的过程中, 通过引入国内先进的摊铺与压实设备、优化混合料配合比、实施全过程精细化施工控制以及部署智能化监控手段等措施, 有效提升了路面施工的质量。其次针对沥青混合料供应不稳定、温度控制困难、机械故障频发以及质量监控薄弱等实际存在的问题, 提出了针对性的技术应对策略, 并结合具体工程数据说明了其应用成效。结果表明, 在跨境基础设施项目中, 精细化施工技术的本地化适配与系统性执行, 是保障高等级沥青路面工程质量的关键路径。

关键词 跨境公路; 改扩建项目; 沥青混凝土路面; 精细化施工

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.040

0 引言

在跨境公路改扩建工程的开展过程中, 沥青混凝土路面施工会受到复杂地形、资源匮乏以及管理差异等诸多因素的制约, 这对施工技术与管理水平提出了更高的要求。尼泊尔 Mugling-Pokhara 公路升级改造项目所处的位置是南亚山区, 该项目面临着气候多变、材料供应不稳定以及设备故障频发等方面的挑战。本文以该项目作为案例, 对跨境工程中精细化施工技术的适配路径进行系统分析, 通过设备升级、工艺优化以及智能监控等相关措施来突破资源瓶颈, 形成适用于复杂环境的高等级路面施工解决方案, 为国际承包商提供可参考的技术管理范式。

1 项目概述

尼泊尔 Mugling-Pokhara 公路升级改造项目二标段起讫桩号是 K49+700 至 K88+583, 线路全长达到 38.883 公里, 中标金额为 7 404 680 796.32 尼泊尔卢比约合 4.5 亿元人民币。项目资金的来源是亚洲开发银行贷款, 业主单位为尼泊尔政府基础设施和交通运输部公路局项目指挥部。工程计划开工时间是 2020 年 10 月, 因受全球疫情影响实际开工日期推迟至 2021 年 8 月 29 日。项目总工期设定为 9 年包含 3 年建设期、1 年缺陷通知期及 5 年基于性能的维护期。路线穿越海拔 500 米至 800 米之间的陡峭山川、河谷平原及市镇农村区域, 沿

线跨越 28 条河流地理环境复杂多变。道路等级属于国家级干线公路, 采用四车道断面设计非街镇段路基宽度为 24 米, 街镇段红线宽度达到 50 米采用主辅分离的四块板形式, 设置 3 米宽中央绿化带及混凝土护栏进行隔离。路面结构自上而下依次是 4 厘米厚沥青混凝土上面层、6 厘米厚沥青混凝土下面层及碎石基层。建设期内完成的沥青混凝土工程量总共为 100 405 立方米, 其中 AC-F 型混合料用量分别为 53 789 立方米与 46 618 立方米。项目共布设太阳能路灯 336 套, 安装 W 型波形钢护栏的长度为 76 813 米, 铺设 M20 级混凝土路缘石的长度达到 116 293 米, 并完成透封层 1 131 516 升与粘层 564 071 升的喷洒作业。上述工程参数构成了沥青路面精细化施工的技术基础与实施边界。

2 跨境公路改扩建工程特性分析

2.1 地形与气候条件高度复杂

项目所经过的区域地貌类型呈现出多样化特点, 包含深切河谷、陡峭山坡、冲积平原以及密集居民区, 区域内高差变化十分显著, 局部路段最大纵坡能够达到 7%。施工区域里面分布着 28 条大小不同的河流, 在雨季期间容易发生滑坡、泥石流等地质灾害, 这对临时道路通行以及材料运输造成持续干扰。年降雨量主要集中在 6 月至 9 月这个时间段, 高温高湿的环境对沥青混合料的拌合、运输以及摊铺温度控制提出严格

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

要求。部分路段与既有通车道路紧紧相邻，施工空间受到一定限制，大型设备进场和作业面展开面临物理方面的约束^[1]。

2.2 本地施工资源严重不足

尼泊尔国内在现代化筑路设备制造与维护方面能力不足，大型摊铺机、压路机及沥青拌和站都得从其他国家进口。项目所使用的履带式摊铺机与 25 吨以上振动压路机全部是从我国调运过来的，运输周期超过 90 天。沥青材料需要依赖从印度进口，受边境通关效率以及燃油价格波动影响，供应稳定性比较差。资源短缺情况不仅推高了项目施工成本，同时也对施工连续性造成了威胁，要求项目团队必须建立冗余供应链与应急响应机制，以此来支撑精细化施工的持续运行^[2]。

3 沥青混凝土路面精细化施工技术体系

3.1 引进高性能摊铺与压实装备

项目没有采用当地普遍在用的 6 米宽小型轮胎式摊铺机，而是选用了中国产徐工 RP953 和福格勒 1880L 型履带式摊铺机，该摊铺机最大摊铺宽度能够达到 10.5 米，并且具备自动找平与高程控制系统，可将摊铺平整度标准差控制在 1.2 毫米以内。同时配套使用 2 台 26 吨双钢轮振动压路机和 2 台 30 吨胶轮压路机，形成了“初压—复压—终压”的三级压实流程。压路机配备了 GPS 轨迹记录仪和红外温度监测模块，能够实时反馈碾压遍数、速度以及混合料表面温度。在 K67+700 至 K68+200 示范段施工过程中，摊铺速度稳定保持在 2.5 米/分钟，初压温度不低于 155 °C，复压结束温度不低于 120 °C，终压完成前温度高于 90 °C，完全可以满足规范要求。

3.2 优化沥青混合料配合比设计

考虑到当地规范设计要求细集料占比偏大及骨料棱角性差的情况，项目对 AC-13F 型上面层和 AC-20F 型下面层混合料进行重新设计。上面层采用压碎值为 15.8% 的石灰岩碎石、针入度 52 且软化点 55 °C 的 VG-30 沥青，受尼泊尔区域限制，本地没有石灰岩矿粉加工设备，故用 1% 回收粉代替矿粉，油石比确定为 5.5%，较当地规范值提高 0.5% 用于中和因无石灰岩矿粉可能造成的沥青混合料质量问题。下面层同样使用压碎值 15.8% 的石灰岩碎石与 VG-30 沥青，油石比设定为 5.0%。通过马歇尔试验来确定最佳沥青用量以及毛体积密度，并通过马歇尔稳定度仪测定稳定度及流值并计算空隙率、矿料间隙率及沥青填充率，同时对沥青上面层测

定残留强度比为 89.2%，均符合招标文件技术指标。混合料在拌和站出料温度控制在 170±5 °C，以此确保施工和易性^[3]。

3.3 实施全过程精细化工工艺控制

施工之前要对下承层进行彻底清扫并做高程复测，对于局部高差超过 5 毫米的区域要采用铣刨处理。透层油选用稀释沥青 MC-30 进行撒布，撒布量设定为 0.9 升每平方米且间隔时间不少于 24 小时。粘层采用稀释沥青 MC-70 进行撒布，撒布量为 0.3 升每平方米以确保层间能够有效黏结。摊铺作业运用两台摊铺机进行梯队作业，间距需控制在 8 米以内且搭接宽度为 15 厘米以避免出现冷接缝，夏季高温天气可适当延长间距。每车混合料到场之后都要检测温度，温度低于 145 °C 的混合料要予以废弃处理。碾压工作要遵循“高频低幅、紧跟慢压”的原则，初压要在紧跟摊铺机后 3 米内开始，复压遍数不能少于 6 遍。终压遍数不能少于 2 遍直至消除轮迹印。施工缝处理采用垂直切割的方式进行，新旧混合料搭接处要涂刷热沥青以确保接缝密实^[4]。

3.4 部署智能化施工监控平台

项目搭建起基于物联网的路面施工监控系统，该系统集成温度传感器、GPS 定位模块、视频监控及数据采集终端。沥青运输车上安装温度记录仪，可实时将车厢内部温度上传至云端平台，异常数据能自动发出预警。摊铺机配备激光找平系统，当高程偏差超过 ±3 毫米时会自动进行报警。压路机运行轨迹与碾压参数同步上传至 BIM 管理平台，进而生成压实热力图以识别欠压或过压区域。质量管理人员能够通过移动端查看各工序实时数据，对偏离控制限值的作业面可立即叫停并整改。系统累计采集施工数据已超过 12 万条，实现从原材料进场到成品验收的全链条数字化管控，为精细化施工提供有力的数据支撑。

4 精细化施工实施中的主要制约因素

4.1 沥青混合料供应存在中断风险

项目所需要的沥青全部从印度古瓦哈提港进行进口，受到尼印边境口岸通关效率的影响，单次清关周期波动处于 7 天至 21 天的范围之间。2024 年雨季这段时间，因为边境罢工从而导致连续 15 天没有沥青到货，这迫使项目不得不暂停路面施工相关工作。骨料供应同样也是不稳定的状态，主要供应商由于 ADB 环保检查而停产了两周时间，造成级配碎石库存下降到安全线以下水平。

4.2 施工机械设备故障率偏高

进口设备在高原高湿环境运行时稳定性会下降,履带式摊铺机液压系统曾因密封件老化三次出现漏油故障,每次维修所耗费的时间在2至3天。压路机发动机在连续高强度作业状态下出现过热保护停机现象。由于尼泊尔当地没有专业维修点,关键配件需要从我国进行空运,平均等待的时间达到5天。设备停机不但会延误工期,还会导致已摊铺混合料冷却,无法实现连续碾压操作,影响整体密实度的均匀性。机械可靠性不足削弱了先进装备自身具备的技术优势^[5]。

5 精细化施工技术的具体应用实践

5.1 构建多源混合料供应保障机制

为了应对单一供应渠道可能存在的风险,项目专门建立“主供+备用+应急”三级沥青采购体系,主供应商确定为印度 IOCL 公司,备用供应商选定迪拜进口沥青,应急储备通过预存 1 000 吨桶装沥青在加德满都仓库来实现。在骨料方面,除主采石场之外,还新增两处经过认证的备用料源,并且提前储备 15 天用量的成品料,运输环节采用“定点装车、专线运输、优先通关”策略,与边境代理签订时效协议,以此确保平均通关时间能够压缩至 5 天以内,在 2024 年第三季度,通过该机制成功规避了两次潜在断供风险,保障连续 28 天不间断路面施工,累计完成沥青摊铺达到 14.6 公里,混合料供应准时率达到 98.7%。

5.2 采用全流程温度闭环控制措施

在拌合站出口、运输车中部和摊铺机料斗这三处设置红外测温点,让数据能够实时上传至监控平台。运输车辆加装双层保温棉罩并且接缝处用铝箔胶带密封,以此减少热量的散失。现场配置移动式红外加热板用于对温度偏低的混合料表面局部升温,确保摊铺起始温度不低于 155 ℃。制定《沥青温度管理规程》来明确各环节允许温度范围和处置措施。2024 年 2 月至 2024 年 6 月施工数据显示到场混合料平均温度为 158.3 ℃,标准差为 4.1 ℃,温度合格率从初期的 82% 提升至 96.5%,有效保障了压实质量^[6]。

5.3 实施预防性机械维护制度

建立设备健康档案来记录每台机械运行小时、故障类型及维修记录,制定月度保养计划涵盖液压油更换、滤芯清洗、传动系统润滑等 12 项强制维护项目,与国内厂家签订远程技术支持协议并通过视频连线指导复杂故障排除,在工地设立小型备件库储备价值 80 万元的常用易损件,2024 年推行该制度后摊铺机与压

路机平均无故障运行时间由 120 小时提升至 210 小时,设备可用率从 85% 提高到 94% 保障了精细化施工的连续作业能力。

5.4 强化全过程质量监控执行力

把智能监控系统的数据和人工检测结果进行交叉验证,每日生成一份《路面施工质量日报》,由中方技术主管与尼方监理联合签认,将钻芯取样频率增加到每周 2 次,确保覆盖不同施工班组与路段,针对压实度低于 92% 或者平整度超限的段落,强制进行返工并追溯责任班组,开展本地技术人员培训工作,累计举办 12 期操作培训班,覆盖人员达到 67 人次,让他们能够独立使用监控平台,2024 年下半年,路面工程一次验收合格率从 89% 提升至 97%,厚度偏差控制在 ±3 毫米以内,完全符合招标文件技术标准。

6 结束语

尼泊尔 Mugling-Pokhara 公路升级改造项目二标段的沥青混凝土路面施工实践显示,在跨境改扩建工程中推行精细化施工技术,需要立足于当地资源条件和管理环境,借助设备引进、配合比优化、工艺标准化以及智能监控等多维度协同,构建出适应性强的技术实施体系。该项目通过建立稳定供应链、实施温度闭环控制、推行预防性维护以及强化质量监控等举措,有效克服了材料供应、温控困难、机械故障和监管薄弱等现实制约因素,实现了高等级沥青路面的高质量成型。该案例验证了精细化施工技术在南亚山区公路工程中的可行性和有效性,为国际承包商在类似环境中开展路面施工提供了系统性技术路径和管理范式。

参考文献:

- [1] 王金华.公路沥青路面质量控制及施工精细化研究[J].运输经理世界,2023(32):37-39.
- [2] 龙海波,王大智.路基路面施工精细化控制要点分析[J].四川水泥,2020(01):41.
- [3] 樊卫东.路基路面施工精细化控制浅析[J].山西建筑,2019,45(09):146-147.
- [4] 林霖.公路沥青路面质量控制及施工精细化研究[J].运输经理世界,2022(09):31-33.
- [5] 雷潇,韩雪刚,王勇超.二级公路改扩建工程路面结构优化及性能评估研究[J].建筑机械化,2025,46(12):163-167.
- [6] 付毅恒,张旭波.路网交通态势感知平台在高速公路改扩建场景中的应用探析[J].中国交通信息化,2025(S2):206-208.

国土空间规划编制中现状底图整合技术与数据质量控制方法

徐芸¹, 金铭²

(1. 日照东方太阳城文化旅游研究院有限公司, 山东 日照 276800;

2. 山东荣创筑研装饰设计有限公司, 山东 日照 276800)

摘要 本文聚焦国土空间规划编制中现状底图整合的核心技术方向与数据质量控制方法,旨在构建精准、可靠、动态的国土空间“一张图”。系统阐述了多源异构数据融合的技术路径与具体实施步骤,探讨了以地理实体和三维空间模型为核心的现状表达范式升级。同时,构建了一套贯穿数据全生命周期的质量控制体系,详细解析了从自动化质量探查到强规则监控的闭环管理流程。结合成都市“一张图”实施监督信息系统、蚌埠市及广西壮族自治区的实践数据,论证了技术集成应用在提升规划科学性与治理现代化水平方面的关键价值,旨在为规划编制从“经验判断”向“数据赋能”转型提供可操作的实施方案参考。

关键词 国土空间规划; 现状底图整合; 多源数据融合; 地理实体建模; 数据质量控制

中图分类号: TU98

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.041

0 引言

国土空间规划是国家空间治理的“地基”,现状底图的精准度直接关系到国土空间规划的科学性。数据来源太单一、不同地方的数据标准不一样、数据更新慢等问题使传统底图很难满足现在全域全要素、全生命周期精细化管理的需求。遥感影像、物联网感知、社会大数据等新型数据源已经和人工智能、三维重建、流式计算等先进技术深度融合在一起,给底图整合带来了全新的可能。本文重点探讨了具体技术的实施方案及质量控制措施,通过整合最新的实践案例和真实数据,构建了国土空间数字底板。

1 多源异构数据融合的技术路径与实施步骤

1.1 标准化数据接入与自动化采集流程

多源数据融合的底层逻辑是建立一套高效、自动化的数据管道。根据企业级数据集成的最佳实践,一个完整的接入流程可拆解为五个关键环节,其技术难点与主流解决方案如表 1 所示。

这一自动化流程的核心价值在于将技术人员从繁琐的手工 ETL 工作中解放出来,通过配置化、可视化的方式,保障数据能够持续、稳定、低延迟地汇入国土空间基础信息平台。

1.2 基于语义关联与空间配准的深度融合技术

数据接入之后,要想整合成一张能直接拿来用的“底图”,深度融合这一步是关键。需要做好高精度的空间配准。就拿生产高可信度的地理空间产品来说,专业软件操作时,第一步通常是创建个“捕获会话”,把带着方位信息的影像精准地导进来,还需要给这些影像确定一个统一的空间参考标准。接下来是“新建对齐”环节,要利用好多连接点,对影像的精确方位和姿态进行优化调整。这一步非常重要,是消除不同数据源之间几何位置偏差的关键,只有把位置偏差消除了,数据才能准确地对在一起。关于解决语义鸿沟的问题^[1]。例如:国土调查数据里的“物流仓储用地”,工商登记数据里的“物流公司”,还有从手机信令数据里识别出来的“职住活跃区”,它们之间其实是有内在联系的。要实现深度融合,就得用知识图谱技术,构建一个国土空间要素语义模型。在该模型中,需明确定义实体的基本概念、属性特征,并理清它们的相互关系。

2 从二维平面到三维实体的底图表达升级

2.1 地理实体建模与结构化组织

实体化提取是从多源空间数据里对独立地理实体进行识别与分离的过程,应结合深度学习、计算机视

作者简介:徐芸(1987-),女,硕士研究生,工程师,研究方向:国土空间规划。

表1 国土空间底图整合各流程环节方案

流程环节	主要任务与技术难点	推荐工具/技术	在国土空间底图整合中的具体应用
数据源注册与连接	适配各类数据库、API、文件系统的异构接口，统一认证	低代码数据集成平台（如 FineDataLink）、自定义连接器	统一注册“三调”数据库、历年遥感影像库、规划审批数据库、物联网传感器 API 等，实现“一键连接”
数据采集与抽取	平衡实时流数据（如传感器）与离线批量数据（如历史地形图）的采集策略，保障高并发与容错性	Kafka 等消息中间件用于实时流；调度任务用于批量同步	通过 Kafka 实时接入重点区域监控视频流；定时调度任务增量同步每日变化的用地审批数据
数据转换与治理	格式转换、坐标系统一、字段语义映射、缺失值处理与重复记录去重	低代码 ETL 工具、Python 清洗脚本	将不同坐标系的历史专题图统一转换至 2000 国家大地坐标系；将各部门对“绿地”的不同定义进行语义标准化
数据同步与入仓	协调全量同步与增量同步，确保数据高效、稳定进入统一数仓	数据集成平台的全量/增量同步功能	首次整合时进行全量同步建立底图基线；之后每日定时对变化图斑进行增量同步，更新底图
权限与安全管控	实现表、字段、行级别的细粒度访问控制，满足数据安全与合规要求	平台内置的统一权限管理体系	—

等技术实现自动式处理，针对建筑物对象，可以借助基于卷积神经网络（CNN）的语义分割模型，自动从高分辨率遥感影像与激光雷达点云中识别建筑物轮廓，随后利用矢量化处理生成多边形几何模型。于 2025 年蚌埠市开展城市监测之际，借助改进的 U-Net++ 模型对 0.2 米分辨率的遥感影像做建筑物提取，模型针对测试集的 F1 分数达到 0.92，成功达成超 7.7 万栋单体化建筑的采集工作，还把单体化建筑的占地面积、高度、层数等基础属性记录了。针对道路这一实体，可借助基于图神经网络（GNN）的中心线提取途径，从道路矢量数据里找出道路中线，结合高程数据生成出三维道路模型，水系实体提取应结合水体指数（NDWI）以及形态学分析，从遥感影像中判别河流、湖泊等水体的边界，搭建三维水系网络。几何重建可看作是实体化提取的延伸，应利用倾斜摄影建模、激光雷达点云分类等技术构建具有真实纹理的三维实体模型，倾斜摄影建模凭借多视角影像匹配造就密集点云，依靠 Mesh 重建算法生成具有真实纹理的建筑物白模，精度符合 1:500 比例尺要求。激光雷达点云分类得结合随机森林、支持向量机等机器学习算法，对点云实施地面、建筑物、植被等分类操作，提取建筑物立面的点云然后生成三维模型。2024 年深圳市进行城市更新规划期间，采用倾斜摄影和激光雷达融合在一块的建模技术，产出覆盖全市的三维建筑物模型，模型平均所得平面精度为

0.1 米，垂直方向高程精度 0.05 米，为城市更新项目开展空间分析提供精准根基^[2]。结构化组织就是把提取出来的地理实体按空间关系和语义逻辑进行组织的步骤，需构建实体彼此的拓扑关系与语义联系，建筑物实体要跟周边道路、绿地、管线等实体搭建连接关系，造就完整的城市空间网络。

2.2 三维空间建模与动态场景构建

地形实体建模是开展三维空间建模的基础，应创建数字高程模型（DEM）用以表达地形起伏，生成 DEM 有两种途径：一是导入勘测数据以达成生成，就像借助无人机激光雷达扫描得到高精度地面点云，生成分辨率超出 1 米精度的 DEM；二是在专业设计软件里手动缔造，如通过界定边界、绘制并修正高程点与等高线来生成 DEM。2024 年成都开展天府新区规划工作当中，凭借无人机激光雷达扫描技术制作出分辨率 0.5 米的 DEM，精确呈现出新区里丘陵、沟谷等地形模样，为规划方案的对比挑选提供了地形分析的根基。实体集成是把地理实体模型和地形模型整合到一起的过程，得解决实体与地形的空间匹配方面的问题，针对建筑物实体，需依据其基底坐标和高程数据，把它放置到 DEM 的相应位置，并对其高度进行调整以匹配地形；针对道路对应的实体，应按照其中心线与横断面设计，弄出三维道路模型，保证其与地形能实现平滑连接。实体集成可借助三维 GIS 软件（CityEngine、SketchUp）

进行自动化处理,就像利用 CityEngine 的规则建模本领,可凭借道路中心线和建筑物轮廓自动生成三维模型,并与地形模型融合在一起,构建出初步的城市三维场景。语义化建模是把实体编码和属性信息赋予三维模型的过程,应借助语义标注技术达成模型的可查询效果,语义标注应构建实体与属性的映射关系,就像为每一个建筑物模型标注其 GUID、用途、层数等属性,为每条道路模型标注诸如等级、宽度、交通流量之类的属性。语义化建模得借助 BIM 和 GIS 融合技术达成,产出语义化三维模型;还可开展自定义插件的开发工作,在三维建模软件中直接对实体的属性加以标注。2025 年上海市开展城市数字孪生建设当中,借助 BIM+GIS 融合技术生成语义化三维模型,支持用户点击模型后查询实体详细属性,为城市规划及管理提供了交互式工具。动态场景构建乃语义化建模的延伸,应引入实时数据流达成场景的动态更新,实时数据流有交通流量、环境监测数据、城市事件等方面,得利用物联网传感器、视频监控、社交媒体等渠道去采集,接着依靠数据中台开展数据的清洗、融合与分发^[3]。

3 贯穿全流程的数据质量控制与持续治理体系

3.1 基于规则引擎的自动化质量监控闭环

现代化数据质量控制主要靠可配置的规则引擎来实现自动化操作。这里面最核心的就是“三大支柱”,分别是监控对象、质量规则以及规则强度。具体实施的话,分下面三步走。第一步是数据探查。系统会自动生成一些报告,像字段空值率是多少、值域是怎么分布的、主键是不是唯一的等,通过这些报告就能评估出数据源一开始的健康程度如何。第二步是配置并执行质量监控规则。这些规则得把完整性、准确性、唯一性、一致性和及时性这五大方面都覆盖到。而这里规则强度特别重要,它就像一个关键开关。“强规则”要是没通过,就会直接阻断后面的任务,避免脏数据继续传播;“弱规则”没通过的话,就只是发出告警,主要是用来观察数据变化的趋势。第三步是订阅告警和处置问题。需要保证数据一出现问题,马上就能通知到相关责任人,然后一直追踪,直到问题解决,这样就形成了一个完整的管理闭环^[4]。

3.2 多源一致性校验与时空拓扑检查

在复杂的数据融合场景里,保证数据一致性的校验工作特别关键。多源交叉验证是大家经常用的一种办法。例如:通过遥感解译得到的耕地范围,和农业部门统计的种植业数据进行空间叠加,再对比一下面

积。要是两者差异超过了合理的范围即启动核查任务,查找问题。同样,用移动信令数据估算出来的人口热力分布情况,要和社区统计的人口数据在宏观趋势上做校验,看是不是大致相符^[5]。还有一种保障数据逻辑正确性的重要手段,就是时空拓扑规则检查,这可以说是最后一道防线。这里面包括空间拓扑检查和时间序列拓扑检查。空间拓扑检查,如行政区划这种面状要素,需要保证它们拼接起来没有缝隙,也不能有重叠的地方;河道这种线状要素,如果是连续的,不能有断开的情况。这些检查内容都可以写成自动化的规则,然后融入日常的数据更新流程当中,这样就能及时发现问题,保证数据质量。

4 结束语

国土空间规划现状底图的整合与质量控制,是一项融合了技术创新与体系化管理的复杂工程。在技术层面,它遵循从自动化多源接入、语义深度融合,到地理实体与三维建模的递进路径,其目标是构建一个结构化的、可计算的,而非仅可视图的数字空间基底。在管理层面,它依赖于一个贯穿“探查—监控—比对—处置”全流程的、基于规则引擎的数据治理体系,通过定义清晰的规则与强度,实现数据质量的常态化、自动化守护。当前的成功实践,如成都市“一张图”系统,已证明这种“技术—管理”双轮驱动模式的有效性,其不仅支撑了规划编制审查从“经验判断”向“数据赋能”的转变,更通过监测评估预警功能,筑牢了动态监管的防线。广西、蚌埠等地的“城市体检”工作,则凸显了精细化现状数据在精准识别公共服务短板、支撑城市品质提升中的决策价值。

参考文献:

- [1] 段松江,吴开杰,倪千尧,等.渝北区国土空间规划现状底图构建方法研究[J].智能城市,2024,10(09):69-71.
- [2] 张楠,周艳,林富明,等.国土空间规划视角下的生态保护红线划定底图编制研究[J].测绘与空间地理信息,2020,43(S01):1-5,12.
- [3] 刘军华.国土空间规划体系下专项规划编制研究:以福州市环境卫生专项规划为例[J].未来城市设计与运营,2024(08):42-46.
- [4] 程斌.国土空间详细规划现状底图底数转换管控及编制方法研究[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2020(11):1805-1806.
- [5] 江雨瑶.国土空间总体规划编制中底图底数的研究[J].中国房地产业,2023(20):50-53.

高盐环境下微生物群落结构调控及其对有机物降解效能的影响研究

邢胜利, 邢进, 冯振平

(江苏合拓环境技术有限公司, 江苏 宜兴 214200)

摘要 本研究聚焦高盐环境下微生物群落结构调控及其对有机物降解效能的影响, 系统分析了影响盐浓度、有机物种类等微生物群落结构的因素, 重点探讨了耐盐菌的驯化、添加特定微生物等调控微生物群落结构的策略; 通过实验研究和案例分析, 揭示了微生物群落结构与有机物降解效能之间的关系, 旨在为高盐废水处理等领域提供有益参考。

关键词 高盐环境; 微生物群落结构; 有机物降解效能

中图分类号: X172

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.042

0 引言

工业扩张加剧高盐废水排放, 治理迫在眉睫。化工、制药、食品、油气等工业过程是高盐废水的主要来源^[1]。此类废水具有显著的高盐特性(盐分浓度 $> 5\%$), 同时含有多种难降解有机污染物, 包括苯系物、多环芳烃及卤代烃等。此外, 废水中还含有悬浮物、重金属离子、有毒化学物质以及营养盐等多种污染成分。高盐废水肆意排放, 严重威胁生态安全与环境健康, 导致土壤盐渍化、破坏水体生态平衡。因此, 有效的处理高盐废水, 去除其中的有机污染物, 对于生态环境的可持续发展至关重要。

微生物处理技术虽具备高效、环保和经济等优势, 但在高盐环境下仍面临显著挑战。当 Cl^- 或 SO_4^{2-} 浓度超过2%临界值时, 渗透压变化会破坏细胞膜脂质双分子层的稳定性, 同时导致胞内酶活性明显降低, 进而引发活性污泥絮体结构破坏、沉降性能下降, 系统脱氮除碳功能急剧衰退。

此外, 苯系物、多环芳烃等难降解有机物因其致密结构和较高电子云密度, 难以通过常规生物氧化途径分解。溶解性有机物(DOM)与高浓度盐离子在膜表面的协同吸附作用, 会加速凝胶层和污染层的形成, 使膜通量衰减率提高3~5倍, 显著缩短生物反应器的运行周期。这些多重抑制因素的叠加效应, 导致传统生化工艺在高盐环境中的处理效能和运行稳定性均受到严重影响。

1 影响高盐环境下微生物群落结构的因素

1.1 盐浓度

盐度是塑造微生物群落格局的“筛选筛”。低盐环境($< 0.5\%$)中, 普通异养菌如假单胞菌属、芽孢杆菌属占优; 而当盐度升至3%~8%, 嗜盐古菌(盐杆菌属)及耐盐细菌(海杆菌属、盐单胞菌属)逐步成为功能主导, 其胞内积累 K^+ 、相容性溶质(甜菜碱、ectoine)以平衡渗透压, 并重构膜脂组成增强稳定性。盐度每升高1%, 非耐盐类群丰度平均下降12~18%, 群落 α 多样性呈显著负相关。

1.2 有机物种类和浓度

有机物特性直接决定“谁能在高盐中活下来、干得好”。葡萄糖、乙酸等小分子底物可被广谱菌快速同化, 支撑基础代谢; 而萘、氯苯等顽固组分则高度依赖特定降解菌群(红球菌属降解多环芳烃、脱卤拟球菌属介导还原脱氯)。底物浓度过高($\text{COD} > 1\ 500\ \text{mg/L}$)易引发酸积累与氧耗激增, 造成局部厌氧胁迫; 过低($\text{COD} < 200\ \text{mg/L}$)则导致维持能不足, 优势功能菌丰度下滑, 群落功能冗余减弱。

1.3 温度和pH值

温度与pH并非孤立变量, 而是与盐度产生强耦合效应。35~40℃虽利于多数降解酶活, 但会加剧 Na^+ 跨膜渗漏速率, 放大盐胁迫; $\text{pH} < 6.5$ 或 > 8.5 时, 不仅削弱胞外聚合物(EPS)的电荷屏蔽能力, 更使关键脱氢酶(GDH、MDH)构象畸变, 导致电子传递链效

作者简介: 邢胜利(1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污水处理。

率下降 40% 以上。实证表明：在 5% 盐度下，将温度由 30 °C 调至 37 °C、pH 由 7.2 稳控至 7.0，可使苯酚降解速率提升 2.3 倍，印证了精准调控的不可替代性^[2]。

1.4 其他因素

除了上述因素外，高盐环境下的溶解氧、氧化还原电位、重金属离子等因素也会对微生物群落结构产生影响^[3]。溶解氧的含量会影响微生物的呼吸方式和代谢途径，高溶解氧环境利于好氧微生物的生长与代谢，而低溶解氧环境则利于厌氧微生物的生存。氧化还原电位反映出环境的氧化还原状态，不同的微生物对氧化还原电位有着不同的要求。重金属离子具有毒性，会对微生物的生长和代谢产生抑制作用，甚至导致微生物死亡。所以，在高盐废水处理过程中，需要综合考虑这些因素的影响，优化处理工艺条件，以维持微生物群落的稳定与高效运行。

2 高盐环境下微生物群落结构调控策略

2.1 耐盐菌的驯化

在高盐废水处理中，可以将活性污泥置于含有一定盐浓度的培养基中进行培养，随着培养时间的延长，逐渐增加盐浓度，直到达到目标盐浓度。经过驯化后的耐盐活性污泥系统具有更强的抗盐能力和有机物降解能力。耐盐菌的驯化是一种常用的微生物群落结构调控策略。通过逐步提高盐浓度（0.5% ~ 5%/周），可以筛选出适应高盐环境的嗜盐菌和耐盐菌，构建耐盐活性污泥系统。在驯化过程中，微生物会逐渐适应高盐环境，调整自身的生理特性和代谢途径，提高对盐的耐受性^[4]。

2.2 添加特定微生物

中科院深圳先进院戴俊彪团队与上海交大唐鸿志团队联合构建出一株能同步代谢五类芳香烃污染物的多功能工程菌“微生物特种兵”VCOD-15。该菌株可实现联苯、苯酚、萘、二苯并呋喃和甲苯等五种典型芳香类有机污染物的同时降解，涵盖了从单环到多环化合物的广泛底物范围。在高盐废水处理中，添加这种工程菌株可以显著提高有机物的降解效率。添加特定微生物是另一种有效的微生物群落结构调控方法。可以选择具有特定功能的微生物（高效降解菌、耐盐菌等）添加到高盐环境中，以改善微生物群落结构，提高有机物降解效能。

2.3 优化环境条件

在高盐废水处理过程中，可以将温度控制在微生物的最适生长温度范围内，调节 pH 值至中性或微碱性，

保证充足的溶解氧供应等。还可以通过添加营养物质、调节氧化还原电位等方式来优化环境条件，提高微生物的活性与代谢能力。优化环境条件也是调控高盐环境下微生物群落结构的重要手段。通过控制温度、pH 值、溶解氧等环境因素，可以为微生物创造适宜的生长和代谢条件，促进微生物的生长和繁殖，提高微生物群落的稳定性和功能。

2.4 生物强化技术

生物强化是提升高盐废水处理效能的关键策略之一。其核心在于定向引入经人工选育的功能微生物或其活性代谢产物，如高效降解菌剂与微生物酶制剂。前者通过现代发酵与筛选技术，富集并扩增具备耐盐性及广谱降解能力的工程菌株；后者则以高度特异、高效的天然酶蛋白为载体，在不依赖活体微生物的前提下催化有机物、氮磷等污染物的快速转化。二者协同应用，可突破高盐环境对土著微生物的抑制瓶颈，精准补强系统功能短板。尤其在盐度波动大、毒性负荷高的工况下，生物强化不仅能加速群落功能重构，更能推动微生物由“被动适应”转向“主动响应”，显著提升系统稳定性与抗冲击能力。

3 微生物群落结构与有机物降解效能的关系

3.1 微生物群落结构对有机物降解效能的影响

微生物群落结构直接决定有机物转化效率。在高盐体系中，厌氧菌群承担着大分子有机物水解酸化与 pH 缓冲的关键作用，有效缓解盐胁迫；而好氧菌群则主导后续的深度氧化与矿化过程，实现难降解物质的彻底去除。群落中优势类群的功能属性尤为关键。当耐盐产酸菌、嗜盐脱氢酶菌或广谱芳香烃降解菌成为主导时，整体降解速率与去除率同步跃升^[5]。功能多样性远比物种数量更影响处理效能：不同菌属通过代谢互补、电子传递耦合与微生态位分异，形成多路径协同降解网络，大幅提升碳源利用效率与污染物覆盖广度。因此，优化群落并非追求“越多越好”，而是构建“能力匹配、分工明确、动态稳定”的功能性组合。

3.2 有机物降解过程中微生物群落结构的变化

在有机物降解过程中，微生物群落结构会发生动态变化。随着有机物的降解，微生物的营养物质供应发生变化，微生物群落会根据营养物质的变化进行调整。在有机物降解的初期，一些能够快速利用易降解有机物的微生物会大量繁殖，成为优势菌群；随着易降解有机物的减少，一些能够利用难降解有机物的微生物会逐渐生长和繁殖，微生物群落的结构也会相应

发生改变。环境条件的变化也会影响微生物群落结构的变化。例如：在高盐废水处理过程中，随着盐分的去除和有机物浓度的降低，微生物群落可能会从以耐盐微生物为主逐渐转变为以普通微生物为主。

3.3 提高有机物降解效能的微生物群落结构优化策略

提升有机物降解效率，关键在于主动塑造高效、稳定的微生物功能群落。这并非依赖单一手段，而需多维度协同干预：一方面，精准调控温度、pH、溶解氧及碳氮比等理化参数，为土著降解菌创造最适代谢窗口，抑制低效或竞争性菌群，从而自然筛选并富集功能优势种；另一方面，可定向引入经实验室验证的高效功能菌株（如耐盐型假单胞菌、嗜碱芽孢杆菌）或复合酶制剂，弥补原生群落的功能短板，实现“缺什么补什么”的靶向强化。尤其在高盐胁迫下，生物强化不应仅停留于添加，更需结合梯度盐度驯化策略，通过逐级提升盐浓度，驱动群落发生适应性演替，促使耐盐基因表达上调、胞内相容性溶质合成增强，最终构建出兼具耐受性与降解力的稳定菌群结构。

4 实验研究与案例分析

4.1 实验设计与方法

本研究围绕高盐废水处理场景，构建了三类对照实验体系：盐度梯度驯化组、功能菌投加组及环境参数优化组（控温 32 ± 1 °C、pH 7.2~7.8、DO 维持 4~6 mg/L）。所有组别均设三重平行，并以未干预组为基准。全程动态监测进/出水 COD、TOC、 Cl^- 及 Na^+ 浓度，同步采集活性污泥样本，采用 16S rRNA 基因 Illumina MiSeq 高通量测序解析群落组成与多样性变化。

4.2 实验结果与分析

结果证实：驯化组在 21 天后 COD 去除率由初始 58% 跃升至 89%，其群落中海杆菌属（*Marinobacter*）、盐单胞菌属（*Halomonas*）相对丰度合计提升至 41.3%，显著高于对照组（12.7%）；功能菌投加组在第 7 天即达峰值降解速率（ $0.86 \text{ g COD} \cdot \text{g}^{-1} \text{ VSS} \cdot \text{d}^{-1}$ ），且外源菌株在系统中成功定殖并持续贡献 > 30% 的降解活性；参数优化组虽未引入外来菌剂，但 Shannon 指数提高 0.9，硝化螺菌属（*Nitrospira*）与动胶菌属（*Zoogloea*）协同增强，使难降解大分子有机物转化效率提升 37%。三组均展现出优于传统工艺的抗冲击负荷能力，证明了微生物群落并非静态资源，而是可通过科学干预持续进化的“活体催化剂”。其结构优化本质是功能导向的生态重构，唯有让对的微生物，在对的时间、以

对的方式发挥作用，有机物降解效能的跃升才具备可持续根基。

4.3 实际案例分析

化工厂产生的高盐高 COD 废水，采用“化学沉淀→耐盐生物处理（MBR）→高级氧化（UV-AOP）→蒸发结晶”的工艺进行处理。通过化学沉淀降低硫酸盐负荷，缓解生物系统抑制；利用耐盐生物处理（MBR）构建耐盐活性污泥系统，强化有机物的降解；采用高级氧化（UV-AOP）进一步矿化难降解有机物；最后通过蒸发结晶实现盐分回收与零排放。处理后，盐分去除率高于 95%、COD 去除率高于 90%，出水水质满足回用或排放标准^[6]。

5 结束语

高盐环境对微生物的生存和代谢活动提出了严峻挑战，但通过合理的微生物群落结构调控可以提高微生物对高盐环境的适应能力和有机物的降解效能。耐盐菌株的筛选与应用、环境因素的调节、微生物群落的构建与优化等方法可以有效地调控微生物群落结构。微生物群落结构与有机物降解效能密切相关，不同的群落结构对有机物的降解能力不同，稳定的群落结构有利于提高有机物的降解效能。通过采用合适的研究方法和实验设计，可以深入研究微生物群落结构与有机物降解效能的关系。目前的研究成果在化工、海水淡化、电镀等行业的高盐废水处理中已经得到了应用，但仍面临一些挑战。未来需要进一步深入研究微生物群落的功能和代谢机制，开发新型的调控技术，拓展应用领域，为高盐废水处理及相关生态修复提供更有效的技术支持和理论依据。

参考文献：

- [1] 中国科学院城市环境研究所. 城市环境所在处理高盐废水研究中取得进展 [J]. 高科技与产业化, 2022, 28(07): 83.
- [2] 李萌, 刘如玲, 陈进进, 等. 高盐条件下 pH 对同步短程硝化反硝化脱氮性能及微生物群落的影响 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2023, 53(04): 67-76.
- [3] 王绪民, 王铖, 崔芮. 微生物在不同营养盐环境下矿化产物研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 208-212.
- [4] 王茹. 耐盐微生物在不同盐度条件下的驯化及其性能研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [5] 张圣海, 喻婵, 韩一凡, 等. 微生物处理高盐工业有机废水工艺研究进展 [J]. 微生物学通报, 2023, 50(04): 1720-1733.
- [6] 孟凡旭. 高盐环境微生物的分离、鉴定及其在含盐废水处理中的应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009.