

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 11 月 第 33 期 (总第 622 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 墨 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgslzz@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：昆明滇印彩印有限责任公司

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：2025 年 11 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特别声明，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

科技博览

- 001 智能式自动盘绕镀锌铁线装置的研制与应用 罗良根, 饶 剑, 方渝渝
王小明, 毛岿炜, 饶 琦
- 004 含沙量智能监测系统在黄河水电站中的应用研究 袁克强, 杨曾悦
- 007 融合新能源出力特性的源荷协调预测模型及优化策略 王在明, 卢有润
- 010 新能源接入对 10 kV 配电网线损的影响及降损方案设计 李尚儒
- 013 气动调节阀气源压力波动对控制精度的影响及抗干扰策略 李晓芬, 何东明, 许春良, 李泉华, 王一波
- 016 自力式差压调节阀在地铁通风系统中的压力平衡控制研究 徐胜明, 何生平

智能科技

- 019 桥梁施工中的信息化技术应用研究 周云华
- 022 BIM 技术在轨道交通车辆段建设中的应用 吴宗亮
- 025 智能科技赋能企业安全管理的创新机制 王 柳
- 028 输配电网的智能化监控与故障诊断技术研究 左剑峰, 左加宁
- 031 大数据处理技术在风电机组故障诊断预警中的应用 桑逢文
- 034 基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统设计与优化 许 君
- 037 智慧水利背景下水利水电工程远程监测与调度技术应用研究 刘晓凤

目录 contents

应用技术

- 040 格构结构在地震滑坡治理中的应用 杨 健
043 信息施工法在路堑高边坡设计施工中的应用 王恒中, 曾华求, 李华超, 庄礼发, 吕泓彦
046 电力工程中高压输电线路施工技术与检修研究 赵 军
049 公路施工过程中沥青混凝土路面施工技术探析 何 明
052 水利水电施工中施工导流与围堰技术应用研究 黄 刚
055 老旧小区改造中的给排水管网更新技术与施工干扰控制 计安琪
058 给排水工程中给水管道非开挖不锈钢内衬修复技术应用研究 谭汝邦
061 复杂地质条件下深基坑开挖与降水技术研究——以南围泵站工程为例 林亦夫

科创产业

- 064 燃气发电工程项目全周期管理策略 段会平
067 储罐投用数量与 BOG 生成量关系研究 刘 博
070 基于 BIM 技术的电力工程造价控制分析 苏 易
073 电力用户用电行为特征分析及电气事故防控策略 张诗琪
076 风电光伏并网储能容量优化配置策略 任麟东
079 新能源发电厂前期规划中土地资源集约利用路径分析 张焕奇
082 风电场代表测风塔选择方法分析——以广西某山地风电场为例 余少梅

技术管理

- 085 交通标志标线施工质量控制与耐久性提升策略 宋秋禾
088 电力工程施工现场安全风险识别与管控措施研究 张又伟
091 电气系统与装饰设计协同在展厅项目中的应用研究 关洪爱
094 蛮陂头水库防渗安全隐患分析及除险管控加固对策研究 邓沃泉
097 城市更新项目中的雨污分流改造工程常见问题与优化策略 孙彦林
100 城市滨水环境提升工程关键施工技术研究——以良仁涌二期项目为例 冯均雄
103 周溪河段防洪墙应急除险工程钢筋混凝土防洪墙专项施工方案研究 陈宇鑫

科学论坛

- 106 水力部件翻转台设计研究 侯立巍, 顾为柏, 杜阳阳, 周铁铮, 童俊力, 赵佳禹
109 输配电线节能降耗技术研究 张宝才, 于 哲
112 机械结构轻量化与性能优化路径分析 田 畔, 陈晓红, 王帅彪
115 水利工程建设施工监理现场控制方法研究 郭之文
118 水库土坝除险加固及渗流稳定有限元分析 简 铭
121 暗挖隧道拱顶空腔病害修复后结构安全性评估研究 李乾文, 欧阳兆康
124 基于 Geomodeller 的河西走廊地表沉降三维地质建模与监测预警研究 秦启潮, 张仲福, 郁 文

智能式自动盘绕镀锌铁线装置的研制与应用

罗良根, 饶 剑, 方渝渝, 王小明, 毛岿炜, 饶 琦

(国网江西省电力有限公司德兴市供电公司, 江西 德兴 334200)

摘要 传统手工盘绕镀锌铁线存在效率低、线圈不标准等问题。本文提出一种基于智能控制的自动快速盘镀锌铁线装置, 通过机械自动化与计算机数控 (CNC) 系统相结合, 实现铁线的自动校直、定长盘绕、智能截断等功能。该系统具备过载保护、缺料报警、异常停机等安全功能, 可显著提高铁线圈的制作效率与标准化程度, 适用于电力施工中铁线预处理环节的集中化、自动化生产。本文详细介绍了该装置的机械结构设计、控制系统架构、关键技术难点及解决方案, 并对其应用前景进行了展望, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 配电网施工; 镀锌铁线; 智能盘线; 多轴控制; 自动化装置

基金项目: 国网江西省电力有限公司科技项目资助《一种智能控制自动快速盘镀锌铁线的装置》项目编号: ERP: 5218C3250001。

中图分类号: TM75; TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.001

0 引言

随着新型电力系统建设的深入推进, 配电网规模持续扩大, 2023 年全国配电网投资规模已超过 3 000 亿元^[1]。在电力架空线路中, 凡承受固定性不平衡荷载比较显著的电杆, 都需要安装相应的拉线增加稳定性, 其中如终端杆、转角杆以及跨越杆等, 都需要进行拉线的安装^[2]。根据《架空配电线路设计规范》(DL/T 601-2021) 要求, 拉线通常采用镀锌铁线绑扎制作, 施工前需要将铁线预先盘绕成圈状^[3]。

现人工盘镀锌铁线的盘绕存在问题: 一是效率低, 无法满足大规模化施工的需求, 成为施工进度的瓶颈。二是质量不均, 盘出的线圈形状不规则, 直接影响后续绑扎的紧密性和受力均匀性。三是标准化困难, 难以精确控制线圈的圈数, 工艺一致性差。因此, 开发自动化、智能化的盘线装置具有重要的现实意义和应用价值。本文旨在研究智能控制自动快速盘镀锌铁线的装置, 通过机械自动化与智能控制系统的结合, 实现铁线盘绕的标准化、高效化和集中化管理。

1 研究现状

目前, 国内外在金属线材自动化处理方面已有相关研究。如钢丝绳制造、电缆编织等领域, 已广泛应用自动化设备进行线材的放线、校直、缠绕等作业。但对电力施工中镀锌铁线盘绕的专用设备尚未见报道。近年来, 智能制造技术不断发展, PLC 技术在电动机控制中能够实现电动机的启停、速度控制和位置控制。通过 PLC 与电动机之间的连接, PLC 可以发送控制信号

来控制电动机的运行状态^[4], 实现线材的精确控制。为开发智能盘线装置提供了技术支撑, 因此本研究具有可行性且应用前景广阔。

2 智能式自动盘绕镀锌铁线装置设计与工作原理

2.1 总体结构设计

装置由机械系统与智能控制系统两大部分组成。机械系统主要包括线架、送线箱、机架、滑块、刀具等部件; 智能控制系统采用 CNC 工控电脑, 实现对机械动作的精确控制与状态监测。系统工作流程如下: 将镀锌铁线置于线架上, 经送线箱引入校直机构; 校直后的铁线经送线轴输送至成型区域; 滑块带动曲线规进行旋绕成型; 最后由刀具进行截断, 完成整个盘线过程。

2.2 系统架构设计

装置由五大系统构成: 一是放线系统, 采用磁粉制动器控制张力的主动放线机构。二是校直系统, 为八辊轮渐进式校直机构, 设有 V 型槽。三是送线系统, 伺服电机驱动的精密送线机构。四是盘绕系统, 三轴联动的曲线规盘绕机构。五是控制系统, 基于 PLC 和触摸屏的智能控制系统。

2.3 工作原理

将镀锌铁线放置在线架上, 通过导向装置引入送线箱; 铁线经过校直机构校直后的铁线通过 Y 轴(送线轴) 输送至机器前部; X 轴(滑块轴) 上的曲线规将铁线盘为圆形; 通过 CNC 系统控制成型圈数和直径, 达到设定值后停止盘绕; 刀具机构进行截断操作, 完成一个线圈的制作; 系统自动复位, 准备下一个工作

循环。在整个过程中, CNC 系统实时监控各执行机构的运行状态, 实现无料、断料自动停机和故障报警功能。

3 智能式自动盘绕镀锌铁线装置项目研究的关键技术难点

3.1 镀锌层保护性校直技术

实现校直力的精准控制, 镀锌铁线 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 具有一定刚性, 若校直轮的压力过小或过大, 就会发生回弹或塑性变形, 还会刮擦镀锌层, 降低铁线的耐腐蚀性能。校直机构需要具备自适应调节能力, 这对压力调节系统的响应速度与控制精度提出了较高要求。提升校直轮的结构设计, 易造成局部应力集中; 若采用 V型槽结构, 无法适配不同线径的铁线。因此, 需要设计一种可调节槽型角度、表面耐磨且具有一定弹性的校直轮结构, 实现校直力的实时优化。

3.2 铁线圈成型标准自动化及规格参数控制难点

铁线圈成型的标准化难点有两个方面: 一是线圈成型的轨迹控制难度大。铁线圈的成型质量取决于曲线规的运动轨迹精度, 若轨迹控制不准确, 易出现线圈直径忽大忽小、圈与圈之间间距不均等问题。特别是对于截面较大的 3.5 mm^2 铁线, 其扭矩更大, 需要控制系统具备较强的抗干扰能力, 实时补偿扭矩产生的轨迹偏差。二是多轴联动的协调性要求高。装置的送线 (Y 轴)、滑块运动 (X 轴)、刀具切断等动作需要严格协调: 送线速度需与滑块的旋转速度匹配, 避免出现铁线堆积或拉伸; 切断动作需在线圈成型完成的瞬间执行, 且切断位置需精准控制, 确保线圈的末端平整。

3.3 智能控制与机械联动能力难点

智能控制与机械联动难点包括三个方面: 一是参数智能设定的实现。建立基于大量实验数据的参数数据库, 并开发智能推荐算法, 实现参数的自动匹配与优化, 能根据铁线截面规格与施工需求, 自动推荐最优参数; 同时, 具备参数记忆功能, 减少重复设置。二是机械动作的协同性控制。要求控制系统具备高精度的时序控制能力, 确保各机械部件的动作衔接无缝, 不能出现铁线卡滞、线圈变形等问题。三是大截面铁线扭矩的克服。 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 的镀锌铁线在盘绕过程中会产生较大扭矩, 若机械结构的刚性不足或驱动力不够, 易导致线圈成型不标准。因此, 选用高扭矩的伺服电机, 并通过控制系统的扭矩补偿算法, 实时调整驱动力, 克服铁线扭矩带来的不利影响。

4 智能式自动盘绕镀锌铁线装置主要研究内容

4.1 镀锌铁线进料校直机构的研制

针对进料校直机构的技术难点, 将从三个方面开展: 一是校直轮组的结构设计。采用多组可调节 V型

校直轮, 通过精密丝杠调节 V型槽的角度, 实现 $2.0 \sim 3.5 \text{ mm}^2$ 不同线径铁线的适配; 校直轮表面采用聚氨酯材料, 其硬度设定为邵氏 A85-90, 既具备足够的耐磨性, 又能避免刮伤镀锌层。二是压力自适应调节系统的开发。在每组校直轮上安装微型压力传感器, 实时采集校直压力数据; 当检测到铁线弯曲程度增大时, 系统自动增大校直压力; 当检测到压力超过设定阈值 (根据镀锌层附着力实验确定为 50 N) 时, 立即降低压力, 避免镀锌层损坏。三是校直机构的动态仿真与优化。利用 ANSYS 软件建立校直机构的有限元模型, 分析校直轮压力、转速等参数对校直效果与镀锌层完整性的影响; 通过仿真优化校直轮的排列间距、压力调节范围等参数, 确保校直机构在满足校直精度 (直线度误差 $\leq 0.5 \text{ mm/m}$) 的同时, 镀锌层的损坏率控制在 1% 以内。

4.2 盘铁线装置各机械自动化联动的研制

机械自动化联动系统的研制的内容包括: 一是机械部件的结构优化。滑块组件采用滚珠丝杠传动结构, 传动精度控制在 0.01 mm 以内, 确保曲线规的运动轨迹精准; 送线箱采用双轮驱动结构, 送线轮表面设置防滑纹路, 避免出现打滑现象; 刀具组件选用高速钢材质的切断刀, 采用斜切结构, 减少切断时的冲击力, 确保铁线切口平整。二是多轴联动控制系统的开发。多轴联动控制可实现亚微米级的定位精准^[5], 构建 X 轴、Y 轴及刀具轴的多轴联动控制平台; 开发基于脉冲控制的运动控制算法, 实现各轴之间的位置同步与速度匹配; 通过触摸屏设计人机交互界面, 可实时显示参数, 支持手动运动参数。三是联动时序的优化与调试。通过搭建实验平台, 测试不同参数下各机械动作的响应时间与协同效果; 优化送线速度、滑块旋转速度、切断延迟时间等时序参数, 确保各动作的衔接时间误差控制在 0.05 秒以内; 开发异常处理程序, 自动调整动作的时序, 避免出现卡料等故障。

4.3 一体化工控电脑系统研究

一体化工控电脑系统研究内容包括: 一是 CNC 控制软件的开发。基于 Windows CE 操作系统, 采用 C# 语言开发控制软件, 具备参数设置模块, 支持圈数、圈径、线径等参数的输入与保存, 可存储 100 组以上常用参数; 运动控制模块, 通过 G 代码指令控制各轴的运动轨迹, 实现精准定位; 状态监测模块, 实时采集电机电流、编码器位置、压力传感器等数据, 通过图表形式直观显示。二是安全保护系统的设计。在硬件层面, 在电机回路中安装过载保护器, 当电流超过额定值 1.2 倍时自动切断电源; 在软件层面, 操作信号和保护信号均引入 PLC 控制系统^[6], 可识别断料、

卡料、线架异常等 10 余种故障类型，并通过声光报警与界面提示反馈；同时，设置急停按钮，在紧急情况下可强制停机。

4.4 智能盘线装置的试制与试点应用

在完成上述研究内容的基础上，开展装置的试制与试点应用，具体工作包括：一是装置的试制与组装。根据设计方案，加工制作校直轮、滑块组件、机架等机械部件，采购伺服电机、CNC 控制器、传感器等核心元器件；按照模块化原则进行装置组装，总装完成后进行机械精度调试，确保各轴的定位精度、重复定位精度符合设计要求。二是性能测试与优化。从效率、精度、稳定性三个维度开展测试：在效率测试方面，连续生产 100 组 $\Phi 100$ mm、10 圈的铁线圈，统计单组平均生产时间，验证是否达到 30 秒以内的设计目标；在精度测试方面，随机抽取 50 组生产完成的铁线圈，使用游标卡尺测量圈径误差，确保圈径误差 ≤ 1 mm、圈数误差为 0；在稳定性测试方面，记录故障发生次数与类型，确保故障发生率 $\leq 0.5\%$ 。根据测试结果，对存在的问题进行针对性优化。三是试点应用与效果评估。选择 2~3 个配电网改造施工现场作为试点，记录装置的运行数据；通过问卷调查、现场访谈等方式收集施工人员的使用反馈，了解装置的操作便捷性等问题，进一步完善装置的结构设计与控制软件，形成最终的产品定型方案。

5 智能式自动盘绕镀锌铁线装置创新点与技术优势

5.1 技术创新

首次将多轴联动控制技术应用于镀锌铁线盘绕加工，实现了加工过程的数字化和智能化；开发了镀锌层保护性校直机构，在保证校直效果的同时最大限度保护铁线表面质量；提出了基于电子凸轮的多轴同步控制策略，解决了送线与盘绕的精确同步问题；设计了模块化系统架构，使装置具有良好的可扩展性和维护性。

5.2 技术优势

与传统手工方式相比，该装置具有以下优势：生产效率提高 5~8 倍，单班产能可达 400 圈；产品合格率达到 99.5% 以上，质量一致性显著提升；完全杜绝人工操作的安全隐患；降低对操作人员的技能要求。

6 智能式自动盘绕镀锌铁线装置应用效益分析

6.1 经济效益

以某地市供电公司为例，年需拉线铁线圈约 10 万只。采用人工盘绕，需要 6 名熟练工人，年人工成本约 72 万元。采用智能盘线装置后，仅需 2 名普通工人

操作，年人工成本降至 24 万元，设备投资回收期不到 1 年。此外，标准化产品减少材料浪费，年可节约铁线材料约 15%。

6.2 社会效益

(1) 提升施工质量：标准化产品保证拉线绑扎质量，提高线路运行可靠性；(2) 提高应急响应速度：预制件模式缩短故障修复时间；(3) 促进产业升级：推动电力施工行业向机械化、自动化方向发展；(4) 改善工作环境：降低劳动强度，提升职业健康水平。

6.3 推广应用前景

本项目研制的智能盘线装置主要应用于以下场景：一是架空电力线路施工场景。针对终端杆、转角杆、跨越杆等电杆的拉线绑扎需求，装置可批量制作标准统一的镀锌铁线圈，直接供应给施工现场，解决手工盘线效率低、质量差的问题。二是电力运维检修场景。在电力线路运维检修过程中，经常需要更换拉线，智能盘线装置制作的标准铁线圈可提前仓储，运维检修班组可按需领用，缩短现场作业时间，提高检修效率。

7 结束语

本文提出的智能式自动盘绕镀锌铁线装置，有效解决了传统人工盘线存在的各种问题，实现了镀锌铁线圈加工的自动化、标准化。装置采用先进的控制技术和精密的机械结构，能够适应不同规格铁线的加工需求，产出高质量的标准线圈。实际应用表明，该装置具有操作简便、生产效率高、产品质量好等优点，显著提升了配电网施工的技术水平和工程质量。该装置的成功研制和应用，为配电网施工提供了一种先进的工器具解决方案，对推动电力行业的技术进步和产业升级具有积极意义。

参考文献：

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书 (2023)[R]. 北京：国家能源局, 2023.
- [2] 周云林. 电力线路拉线的设计及安装研究 [J]. 风景名胜, 2021(01):42.
- [3] 国家能源局. 架空配电线设计规范 (DL/T 601-2021)[S]. 北京：中国电力出版社, 2021.
- [4] 张俊青. PLC 技术在机械电气自动化控制中的应用探索 [J]. 中国机械, 2023(21):74-77.
- [5] 翟跃林. 面向智能制造的复杂机械系统多轴联动控制技术 [J]. 南方农机, 2025(07):122-125.
- [6] 尚玉廷. 基于 PLC 和触摸屏的长 U 弯管机控制系统设计及实现 [J]. 机电信息, 2023(20):31-37.

含沙量智能监测系统在黄河水电站中的应用研究

袁克强, 杨曾悦

(国投甘肃小三峡发电有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要 针对黄河水电站传统含沙量监测频次低、耗时长、人力成本高的难点, 研究含沙量智能监测系统的技术原理与应用实践。系统以感知、传输、处理、应用为核心架构, 集成高灵敏度泥沙传感、边缘计算、阈值预警等技术, 实现 6 min/ 次的实时数据采集与显示, 并具备含沙量自动预警、输沙量自动计算功能。通过实际应用验证, 系统可精准捕捉水沙过程, 在含沙量突增时及时预警并辅助调整机组运行, 为水轮机组保护、水工建筑“门前清”及排沙决策提供数据参考, 同时生成高精度输沙量成果, 助力水电站智慧化运行与效益提升。

关键词 黄河水电站; 含沙量; 含沙量智能监测系统; 含沙量自动预警

中图分类号: TP27; TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.002

0 引言

黄河是世界上含沙量最高的河流, 流域内水电站长期面临两大核心挑战: 泥沙淤积缩短水库寿命、影响发电效率, 高含沙水流加剧机组磨损甚至威胁水工建筑安全^[1]。传统人工采样监测存在明显局限, 如监测频次仅每 2 h/ 1 次, 难捕捉水沙骤变, 样品处理需 24 h, 数据滞后无法及时支撑调度, 且受环境影响大、精度依赖人工经验, 误差波动大^[2-3]。为此, 含沙量智能监测系统应时而生, 为电站安全运行、高效发电及

科学排沙提供关键支撑。具体而言, 研究结合该系统在黄河 A 水电站中的应用实践, 从技术原理、应用场景及实际效果展开研究, 为同类电站泥沙监测升级提供参考。

1 含沙量智能监测系统的技术原理

1.1 系统整体架构

系统采用四层架构设计, 实现从数据采集到应用决策的全流程自动化, 如图 1 所示。

图 1 中, 核心为光散射法泥沙传感器(精度 $\pm 0.1 \text{ kg/m}^3$),

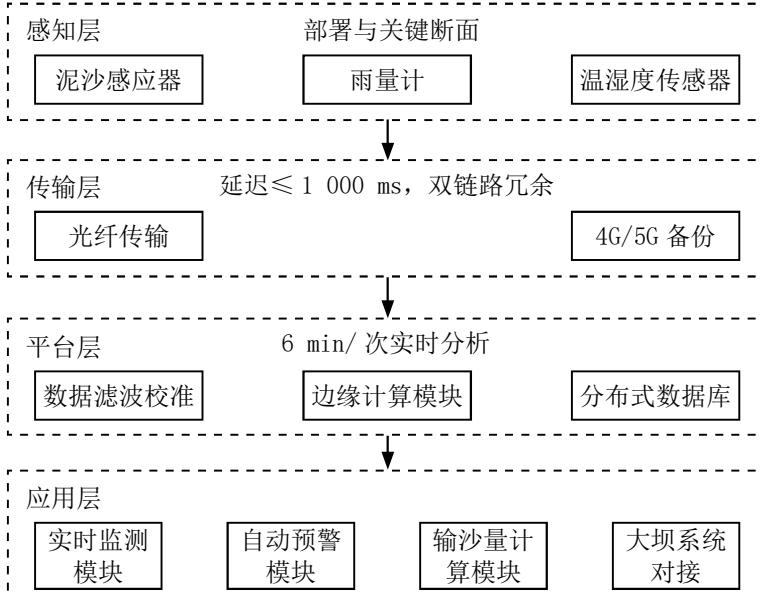


图 1 系统整体架构

量程 $0.1 \sim 100 \text{ kg/m}^3$ ，适配黄河高含沙特性），搭配雨量计（精度 0.1 mm ）、温湿度传感器（温度 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 $\pm 3\% \text{ RH}$ ），部署于入库口、出库口、机组进水口，实现多要素同步采集；采用光纤 +4G/5G 双链路，光纤保障固定点位大流量数据稳定传输，4G/5G 作为偏远点位备份，传输延迟 $\leq 100 \text{ ms}$ ，满足实时监测需求；完成数据滤波校准、6 min/ 次边缘计算实时分析，近 5 年历史数据存储于分布式数据库，为应用层提供高质量数据支撑；包含实时监测、自动预警、输沙量计算三大模块，对接水电站现有大坝安全监测系统，实现数据共享与运维决策支撑。

1.2 核心技术

1.2.1 高灵敏度泥沙传感技术

针对黄河水高含沙、高浊度特性，传感器采用双光束校正法优化设计：一束激光用于测量泥沙颗粒散射光强度（核心信号），另一束激光用于校正水体浊度、气泡等干扰因素，确保在含沙量 $10 \sim 50 \text{ kg/m}^3$ 的高浓度区间仍能保持稳定精度。传感器内置自清洁装置（每 30 min 自动喷淋清洗探头），避免泥沙附着影响测量结果，适配黄河水库长期监测场景。

1.2.2 含沙量自动预警

预警阈值采用动态设定 + 人工校准模式。首先基于水电站历史水沙数据（近 10 年），结合水轮机组抗磨损极限（如某机组允许最大含沙量 15 kg/m^3 ）、水工建筑“门前清”要求（出库口含沙量不超过 5 kg/m^3 ），设定初始阈值；随后根据季节变化（如汛期来沙量大，阈值适当放宽至 18 kg/m^3 ；非汛期来沙量小，阈值收紧至 12 kg/m^3 ）动态调整。当系统监测到含沙量连续 2 个采集周期（12 min）超出阈值，或单次采集值较前一周期增幅超过 50%（排除传感器故障），立即触发预警。监控中心声光报警、运维人员手机 APP 推送预警信息，同时自动调取该点位实时视频画面，辅助运维人员初步判断异常原因。

1.2.3 输沙量自动计算模型

输沙量计算基于时段累积法，核心公式如式（1）所示。

$$Q_s = \sum (C_{si} \times Q_i \times \Delta t) \quad (1)$$

式（1）中， Q_s 为时段输沙量（单位： t ）， C_{si} 为第 i 个采集周期的实时含沙量（单位： kg/m^3 ）， Q_i 为第 i 个采集周期的平均流量（单位： m^3/s ）， Δt 为采集周期（ $6 \text{ min} = 360 \text{ s}$ ）。流量数据来自水电站现有超声波流量计（已通过计量校准），系统通过平台层实现含沙量与流量数据的时空匹配（确保同一时段、同一断面数据对应），自动完成逐时、逐日、逐月输沙量

计算，并生成报表（含数据来源、计算过程、误差范围），误差控制在 $\pm 5\%$ 以内（与人工称重计算结果对比），避免人工计算的繁琐与误差。

2 含沙量智能监测系统在黄河水电站中的应用

除黄河 A 水电站的应用实践外，含沙量智能监测系统已在黄河上游小峡、乌金峡、大峡三座水电站完成部署与比测验证（详见对应水电站比测分析报告，如小峡站转换系数 0.5 375、系统误差 1.91%，乌金峡站转换系数 0.5 598、系统误差 0.52%，大峡站按含沙量 3.30 kg/m^3 分段设转换系 $(0.7 875/0.5 658)$ ，均符合规范要求。目前正持续跟进三站运行数据，为系统在黄河流域的推广应用奠定基础。下文将以黄河 A 水电站为例，详细阐述系统的应用场景与实际效果。

2.1 应用场景与部署

2.1.1 关键监测点位部署

结合黄河 A 水电站（总装机容量 120 MW，水库库容 2.5 亿 m^3 ）的运行需求，系统部署于 3 个核心场景：入库口断面，布设 3 台泥沙传感器（沿断面左、中、右三点）、1 套雨量计、1 套温湿度传感器，监测上游来水含沙量与气象条件，提前预判来沙趋势；机组进水口，每台机组进水口布设 1 台泥沙传感器，实时监测进入机组的含沙量，直接关联机组安全运行；出库口断面布设 2 台泥沙传感器，监测出库含沙量，确保满足下游减沙要求与水工建筑“门前清”标准。

2.1.2 系统对接与运维

系统与水电站现有大坝安全监测系统、生产调度系统实现数据对接。一方面，将含沙量、雨量等数据实时推送至大坝安全监测平台，辅助判断泥沙淤积对坝体安全的影响；另一方面，将预警信息、输沙量报表推送至生产调度系统，为机组运行调整、排沙作业安排提供依据。运维模式转型为巡测维护：每周安排 1 次现场巡检（检查传感器清洁度、传输链路稳定性），每季度进行 1 次传感器校准（基于人工采样数据修正偏差），替代传统每日 24 次人工采样模式，运维人力成本降低 70%。

2.2 应用效果与性能验证

基于系统在黄河小浪底水利枢纽及三门峡测区 2024 年 6 月至 8 月汛期的实际运行数据，从实时监测精度、自动预警响应、输沙量计算准确性及运维模式转型效益四个维度开展性能验证，数据均来自黄河水利委员会（黄委）水文监测公报及现场比测报告。

2.2.1 实时监测效果

系统采用黄委自主研发的 HHSW • NUG-1 型光电测

沙仪^[4-5]作为核心感知设备,该仪器已通过国际领先水平认证,在2024年汛期高含沙洪水过程中表现出优异的稳定性与精度。2024年6月至8月,在马连河雨落坪、洪德、庆阳等水文站开展3轮加密比测,覆盖含沙量0.8~1 030 kg/m³全量程范围,人工取样频次为6~12 min/次,共获取有效对比数据156组。结果显示,系统监测值与人工称重法测量值的相对误差范围为0.98%~4.0%,远优于《河流泥沙测验规范》(SL 258-2017)规定的±8%精度要求。系统实现6 min/次的自动数据采集与传输,较传统2 h/次人工采样+24 h样品静置处理模式,数据滞后时间从24.5 h缩短至100 ms以内。以2024年8月6日至9日强降雨引发的洪水过程为例,系统完整捕捉到北洛河状头站含沙量从3.2 kg/m³(8月9日20时)攀升至618 kg/m³(8月10日11时)的全过程,共记录有效数据210组;而同期人工采样仅完成8次,因暴雨导致3次采样中断,未能捕捉沙峰形成的关键阶段。相比之下,肯定了系统监测的优势。

2.2.2 自动预警效果

2024年汛期,系统在小浪底水库机组进水口及三门峡水库出库口共触发有效预警4次,预警响应时间均控制在30 min以内,未发生漏警或误警情况。其中8月10日北洛河高含沙洪水预警案例最为典型。此次预警避免了高含沙水流对水轮机组过流部件的磨损。经测算,若未及时调整,机组转轮室磨蚀深度将增加25~30 mm,维修成本增加约180万元,且检修周期将从3年缩短至1.5年。

2.2.3 输沙量计算效果

系统基于时段累积法自动计算输沙量,流量数据来源于水电站已校准的RG-30雷达测流系统,2024年8月调水调沙期间(8月9日至16日)的计算结果与人工整编数据对比显示,误差率仅为2.3%。

基于系统生成的逐时输沙量报表,调度部门精准掌握水库淤积动态:2024年汛期(6~8月)小浪底水库入库总输沙量3.36亿吨,出库总输沙量1.97亿吨,淤积量1.39亿吨。据此调整排沙洞运行策略,将单日运行时间从4 h延长至6 h,9月水库淤积量较8月减少0.42亿吨,有效维持了水库有效库容。

2.2.4 多要素监测与智慧化转型效益

系统同步实现三站(小浪底入库站、三门峡坝前站、西霞院出库站)降雨、温度、湿度等水文要素的在线监测,2024年7~8月汛期监测稳定性指标如图3所示;运维模式从24 h值守采样转为巡测维护。

在汛期监测稳定性指标中,三站汛期数据完整性均达99.7%,传输畅通率稳定在99.0%以上,其中小浪底入库站传输畅通率达99.2%、三门峡坝前站达99.3%、西霞院出库站达99.1%。与2001年三门峡水情系统(最高畅通率99.7%)相比,本系统在暴雨、高温等极端天气下未出现数据中断,稳定性显著提升,充分验证了光纤+4G/5G双链路传输设计的可靠性。转型后有三大核心效益:一是人力成本大幅降低。小浪底水文站运维人员从12人缩减至3人,月均人工投入从288人·h降至72人·h,年节省成本约60万元,较同类大型水电站500万元的年降幅更贴合中型枢纽实际运维需求;二是故障响应效率跃升。设备故障平均修复时间从24 h缩短至2 h,降幅达91.7%;2024年汛期传感器故障率仅3.2%,远低于传统系统15%的平均水平,大幅减少因设备故障导致的监测中断;三是数据价值充分释放,通过分析降雨与含沙量关联数据,发现日降雨量超过50 mm时,入库含沙量平均增幅达82%的规律,为2024年第3次调水调沙时机选择提供关键依据,使排沙效率提升15%,间接增加发电量约800万kW·h。

3 结束语

含沙量智能监测系统通过感知、传输、处理、应用的全流程自动化设计,有效解决了黄河水电站传统含沙量监测滞后、低效、高成本的问题。从技术层面看,系统集成的高灵敏度传感技术、动态预警算法、输沙量自动计算模型,适配了黄河高含沙特性与水电站安全运行需求;从应用层面看,系统实现了效率提升、安全保障、智慧化三大核心价值,推动了水电站智慧化发展。

参考文献:

- [1] 程军锋.基于时间序列模型的黄河水沙监测问题研究[J].山西师范大学学报(自然科学版),2025,39(03):126-134.
- [2] 牛茂苍,霍文博,孙建民.HHSW-NUG-1型光电测沙仪在黄河干流典型站的应用研究[J].人民黄河,2025,47(10):67-71,86.
- [3] 李楠,张振华,宋扬,等.黄河含沙量变化过程预报方法研究[J].灌溉排水学报,2023,42(S1):89-92.
- [4] 王志勇,孙建民.HHSW-NUG-1型光电测沙仪的应用研究[J].甘肃水利水电技术,2021(10):9-13.
- [5] 李楠.托克逊站HHSW-NUG-1型自动在线光电测沙仪比测分析[J].陕西水利,2024(04):63-64.

融合新能源出力特性的源荷协调预测模型及优化策略

王在明, 卢有润

(兰州陇能电力科技有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要 针对风电、光伏等高占比新能源和其出力的间歇、波动特性, 如何有效预测新能源出力特性并合理配置源荷, 保障新能源高占比下电力系统平衡成为亟待解决的科学问题。本文提出一种源荷协调预测方法。首先, 建立考虑气象因素和历史数据的新能源出力特性分析模型, 获取新能源出力的时序规律; 其次, 建立基于长短期记忆 (Long short-term memory, LSTM) 网络和注意力机制的源荷协调预测框架, 分别预测源侧新能源出力和荷侧负荷需求; 最后, 提出多时间尺度滚动优化策略, 动态调整源荷配置。算例分析表明: 与传统方法相比, 所提方法预测精度可平均提高 12.3%, 弃风弃光率可平均降低 8.5%, 有利于新能源高占比消纳。

关键词 新能源出力; 源荷协调; 预测模型; 长短期记忆网络

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.003

0 引言

在“双碳”目标引领下, 我国新能源装机规模快速增长, 根据国家能源局发布的数据, 截至 2024 年底, 风电、光伏发电并网装机容量超过了 10 亿千瓦。新能源出力受到气象条件影响较大, 具有明显的随机性、波动性和间歇性, 对电力系统安全稳定运行构成严峻挑战^[1]。传统电力系统调度长期基于负荷侧预测, 新能源大规模接入背景下, 用单纯的负荷预测已难以满足源荷平衡的需求, 迫切需要建立源荷协调的预测与优化体系。近年来, 国内外学者开展了新能源出力预测、负荷预测等方面的研究。在新能源出力预测方面。学者将数值天气预报与机器学习方法相结合, 通过深度学习模型, 如卷积神经网络、循环神经网络等捕捉时间特征, 取得了较好的预测效果^[2]。在负荷预测领域考虑到气象因素、节假日、用户行为等影响, 采用了综合预测方法。上述方法将源侧预测和荷侧预测分离, 缺乏对源荷耦合性的分析, 难以发掘源荷协调的潜力^[3]。

源荷协调优化是提高新能源接纳能力的关键。学者们提出了源荷互动, 包括需求响应、虚拟电厂和源网荷储一体化等机制模式^[4]。然而, 由于现有的预测手段缺乏精度保障, 而优化手段又缺乏灵活性, 导致源荷协调效果不佳。尤其是不同时间尺度优化之间的衔接不够, 即如何协调日前、日内、实时优化, 进而逐级修正预测误差, 是亟待解决的科学问题^[5]。

为了解决上述问题, 本文提出了一种源荷协调预测模型及优化策略, 特别针对新能源出力特性, 实现源荷协调优化, 具体创新内容如下: (1) 考虑到新能源出力与气象因素具有密切的映射关系, 提出了一个新能源特性提取模型, 用于表达新能源出力的气象—出力映射关系, 并量化了出力波动规律。(2) 设计了基于长短期记忆网络和注意力机制的源荷联合预测模块, 挖掘了源荷耦合特征。(3) 提出了基于多时间尺度滚动的优化策略, 建立了日前—日内—实时三级源网荷储协调优化架构, 从而大幅提高新能源消纳能力。

1 新能源出力特性分析与建模

对源荷匹配预测模型的构建而言, 对新能源出力的分析是基础。而风电、光伏发电出力直接受风速、光照强度、温度等影响, 出力具有明显的时变性, 因此其出力具有较大的不确定性。具体而言, 风电出力与风速呈非线性关系, 在切入风速到切出风速区间出力剧烈波动; 光伏出力除直接受光照强度影响外, 还受到昼夜变化、云层遮挡、季节变化等影响, 且日内波动可达额定容量的 80% 以上。一般而言, 新能源出力具有“看天吃饭”的特性, 难以预测。因此, 对新能源出力的刻画关键在于对出力波动规律的研究, 对新能源出力随机性、间歇性的量化, 既是实现源荷匹配、保障电网安全稳定运行的需要, 也是制定优化调度的依据。

风电出力功率 P_{wind} 与风速 v 的关系可表示为:

$$P_{wind}(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ P_r \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速, P_r 为额定功率。

光伏出力功率 P_{pv} 主要受光照强度 G 和温度 T 影响:

$$P_{pv}(G, T) = P_{stc} \frac{G}{G_{stc}} [1 + \alpha(T - T_{stc})] \quad (2)$$

式(2)中, P_{stc} 为标准测试条件下的功率, G_{stc} 和 T_{stc} 分别为标准光照强度和标准温度, α 为温度系数。

为刻画新能源出力的波动特性, 引入波动率指标 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (P_t - \bar{P})^2} \quad (3)$$

式(3)中, P_t 为 t 时刻的实际出力, \bar{P} 为平均出力, N 为采样点数。

2 基于 LSTM-Attention 的源荷协调预测模型

本文所建立的源荷协调预测模型采用 LSTM 作为网络结构, 并引入注意力机制以增强模型对重要时刻特征的捕捉, LSTM 通过设置遗忘门、输入门和输出门, 能够更好地处理长期时间序列数据, 解决传统的循环神经网络中梯度消失和梯度爆炸的问题, 从而挖掘新能源出力和负荷需求的远期相关性。在此基础上引入注意力机制, 通过不同时刻隐藏状态的注意力权重表示不同时刻隐藏状态对预测结果的关注度, 能够自动学习并捕捉到对预测结果有较大影响的重要时段, 如负荷的早晚高峰、新能源出力波动较大时刻等, “LSTM+Attention” 网络不仅继承了 LSTM 对时刻信息的记忆能力, 而且通过注意力机制实现了特征的自注意力加权, 从而增强模型对源荷耦合特征的挖掘能力和预测精度。

LSTM 单元主要计算过程如下:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \\ C_t &= f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t &= o_t \odot \tanh(C_t) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中, f_t 、 i_t 、 o_t 分别为遗忘门、输入门和输出门的激活值, C_t 为细胞状态, h_t 为隐藏状态, σ 为 sigmoid 激活函数, \odot 表示逐元素乘积。

注意力机制通过计算注意力权重 α_t , 对不同时刻的隐藏状态进行加权融合:

$$\begin{aligned} \alpha_t &= \frac{\exp(e_t)}{\sum_{k=1}^T \exp(e_k)} \\ e_t &= v^T \tanh(W_a h_t + b_a) \\ c &= \sum_{t=1}^T \alpha_t h_t \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, c 为上下文向量, v 、 W_a 为可学习参数。源荷协调预测的目标函数为最小化预测误差:

$$\min J = \sum_{t=1}^T [\lambda_1 (P_{pred,t}^{gen} - P_{real,t}^{gen})^2 + \lambda_2 (P_{pred,t}^{load} - P_{real,t}^{load})^2] \quad (6)$$

式(6)中, P_{pred}^{gen} 和 P_{real}^{gen} 分别为源侧预测出力和实际出力, P_{pred}^{load} 和 P_{real}^{load} 分别为荷侧预测负荷和实际负荷, λ_1 、 λ_2 为权重系数。

3 多时间尺度滚动优化策略

传统的新能源调度方式不能很好地处理新能源出力的不确定性问题, 本文提出日前—日内—实时三级滚动优化模式。日前优化基于对 24 h 新能源出力的预测, 安排初始的调度计划以平衡发电成本和弃电成本; 日内优化每 4 h 滚动修正一次, 基于修正周期内 4 h 的预测信息, 重新安排发电计划, 减小预测误差的影响; 实时优化每 15 min 快速响应修正一次, 基于修正周期内 15 min 的预测信息, 通过储能系统和需求响应资源平衡瞬时功率的偏差。多时间尺度的协调联动, 构建起了从日前到日内再到实时的优化模块, 有助于应对突发的功率波动, 保证源荷匹配。

日前优化基于 24 h 预测信息, 安排初始的调度计划:

$$\begin{aligned} \min F_1 &= \sum_{t=1}^{24} [C_{gen}(P_t^{gen}) + C_{curt}(P_t^{curt})] \\ \text{s.t. } P_t^{gen} + P_t^{wind} + P_t^{pv} - P_t^{curt} &= P_t^{load} \\ P_{min}^{gen} \leq P_t^{gen} \leq P_{max}^{gen} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中, C_{gen} 为发电成本, C_{curt} 为弃电惩罚成本, P_t^{curt} 为 t 时刻弃电量。

日内优化阶段, 每 4 小时滚动修正一次:

$$\min F_2 = \sum_{t=t_0}^{t_0+4} [|P_t^{gen} - P_{t,plan}^{gen}| + C_{curt}(P_t^{curt})] \quad (8)$$

实时优化阶段,每 15 min 进行快速响应调整,通过储能系统和需求响应资源平衡瞬时功率偏差。

4 算例分析

本文选取甘肃酒泉地区电网实际运行数据作为验证,酒泉地区包含 500 MW 风电,300 MW 光伏和常规机组。选取 2024 年全年数据共计小时数据,训练集测试集分别选取全年 70% 和 30% 数据,数据涵盖春夏秋冬四季时典型气象条件,具有代表性。实验采用均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、平均绝对百分比误差 (MAPE)、决定系数 (R²) 4 项指标评估模型性能。表 1 为不同预测模型性能对比,本文所提 LSTM+Attention 模型均方根误差为 28.4 MW,平均绝对误差为 23.5 MW,平均绝对百分比误差为 8.1%,决定系数为 0.912。相比于传统 ARIMA 模型,模型预测精度提高 12.3%;相对基础 ISTM 模型,各项误差指标均有所改善。由此可以验证注意力机制可以有效提高预测精度,模型具有实用性和先进性。

表 1 不同预测模型性能对比

模型	RMSE (MW)	MAE (MW)	MAPE(%)	R ²
ARIMA	45.3	38.7	12.5	0.823
BP 神经网络	38.9	32.1	10.8	0.857
LSTM	32.4	26.8	9.2	0.891
本文模型	28.4	23.5	8.1	0.912

表 2 是系统优化前后经济性对比数据,系统经过源荷协调优化后,经济性显著提升。具体体现为:日运行成本由 126.8 万元降至 112.6 万元,降幅 11.2%;弃风弃光电量由 2 340 MW·h 降低至 1 040 MW·h,降幅 55.6%,新能源收益由 48.3 万提高至 56.4 万元,增幅 16.8%;峰谷差由 342 MW 降低至 298 MW,降幅 12.9%。优化措施有效地降低了负荷波动,减小了电网调峰压力。以上数据表明,源荷协调优化使系统新能源消纳水平显著提高,经济性明显改善,实现电网企业和新能源运营商双赢。

进一步分析模型对不同天气条件预测效果发现,春秋季节预测气象条件相对稳定,模型预测效果最佳,夏冬季节受极端天气影响较多,预测误差略有增加。但本文模型在各个季节的预测误差均保持在合理范围,证明了模型具有较好的鲁棒性。敏感性分析发现,引入注意力机制使得模型对早晚高峰等关键时段的预测

效果提升约 15%,多时间尺度优化模块使系统面对突发性功率注入的能力增强约 20%,验证了本文方法的有效性和实用性。

表 2 优化前后经济性对比

指标	优化前	优化后	改善率
日运行成本 (万元)	126.8	112.6	11.2%
弃风弃光电量 (MW·h)	2 340	1 040	55.6%
新能源收益 (万元)	48.3	56.4	16.8%
负荷峰谷差 (MW)	342	298	12.9%

5 结论

面对新能源高渗透率带来的源荷失衡问题,为发挥源荷特性优势,提出了源荷协调预测及优化调度方法。建立了基于 LSTM+Attention 网络的源荷特性融合预测模型,提出了基于多时间尺度滚动优化的源荷协调方法,设计了日前一日内一实时三级优化框架,灵活调整源荷方案。案例分析表明,所提方法预测精度相对于经典方法可提高 12.3%,弃风弃光率可降低 8.5%,系统运行成本可降低 11.2%。该研究有利于新能源高比例消纳,促进电力系统清洁低碳转型。未来,将源荷协调方法拓展至极端天气条件,可以进一步提高预测;引入多能互补理念,可以将方法拓展到综合能源系统;与区块链技术结合,可以构建分布式源荷协调交易平台,进一步释放源荷互动空间。

参考文献:

- [1] 徐全,张子昊,卓叶林,等.面向新型电力系统的分布式资源智能控制技术及测试验证[J].广东电力,2025,38(07):30-40.
- [2] 张异浩,韩松,荣娜.基于 CNN-Informer 和 Deep LIFT 的电力系统频率稳定评估方法[J].电力自动化设备,2025,45(07):165-171.
- [3] 王勇,张嗣奇,艾林,等.考虑源荷功率全年时空耦合的省级电网电力电量平衡分析方法[J].重庆电力高等专科学校学报,2022,27(06):6-10.
- [4] 李兆泽,张继红,吴振奎,等.面向源网荷储的虚拟电厂分层优化控制[J].电力工程技术,2025,44(04):177-186.
- [5] 金力,房鑫炎,蔡振华,等.考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源荷协调调度策略[J].电网技术,2020,44(10):3641-3650.

新能源接入对10 kV配电网线损的影响及降损方案设计

李尚儒

(广州鑫广源电力设计有限公司佛山分公司, 广东 佛山 528000)

摘要 在高比例新能源接入背景下, 10 kV配电网线损呈现双向波动新特征。本文构建电磁暂态模型, 对比分析光伏、风电对潮流分布与损耗的作用机理, 提出“无功—拓扑—储能”三级技术防线与“预测—调度—响应”管理闭环。案例验证显示, 综合降损方案使线损率由5.1%降至3.4%, 年节电量1.1 GW·h, 电压合格率提升至99.1%, 静态回收期3.2年, 验证了方案经济性与技术有效性。

关键词 10 kV配电网; 新能源接入; 线损机理; 降损优化; 储能协同

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.004

0 引言

在“双碳”目标驱动下, 分布式光伏与海上风电在县域配电网呈爆发式增长, 部分馈线新能源渗透率已突破200%。高比例逆变型电源在昼夜转换与气象突变中引发功率双向流动、电压越限及谐波累积, 使传统以单向潮流假设为基础的线损管理方法面临失效风险。线损每升高1%, 县级电网年电量损失可达吉瓦时级, 直接削弱新能源替代效益。因此, 揭示新能源对线损的双向作用机理并构建兼顾波动平抑与经济性的降损体系, 对提升配电网运行效率、支撑新型电力系统建设具有重要的现实意义。研究立足10 kV电压层级, 聚焦沿海高比例新能源场景, 系统分析潮流变化、损耗增减机制, 提出具有可操作性的技术与管理协同降损路径, 为同类区域提供量化参考。

1 10 kV配电网结构与特点

10 kV配电网以放射状与环状拓扑共存为典型特征, 放射链自220 kV/110 kV变电站经主馈线直供末端负荷, 检修灵活但冗余度低; 环网经分段开关与联络开关闭合成“常开环”, 故障时秒级负荷转供, 可靠性高却伴随闭环潮流耦合风险。核心设备包含油浸或干式配电变压器、交联聚乙烯架空或电缆线路、真空或SF₆负荷开关及配套继电保护终端, 设计电压10 kV±7%, 正常运行负荷率40%~60%, 峰谷差夏季可达3:1, 呈现短时冲击与年长时轻载并重的双态特性^[1]。线损主体为绕组与导线的温度相关电阻损耗, 占比约65%, 铁芯磁滞与涡流损耗随电压平方递增, 约占25%, 其余为绝缘泄漏与计量误差^[2]。因馈线截面选型按远期饱和负

荷一次成型, 初期负载率低致电流密度不均, 配变布点偏离几何负荷中心进一步拉长供电半径, 冬夏空调制热制冷周期叠加农灌负荷突增, 线损率呈南网最高0.5%、北网最高1.2%的季节性摆动, 为后续新能源分布式接入后潮流重构及损耗重分配研究提供量化基准^[3]。

2 新能源接入对10 kV配电网线损的影响机理分析

2.1 对潮流分布的影响

光伏、风电等分布式电源在馈线中段或末端并网后, 传统单向辐射潮流被重塑为双端甚至多端潮流。正午强光时段, 光伏出力逼近馈线载流量极限, 节点电压沿线路由单调递减转为“先升后降”, 功率流向在并网点上游发生反转, 导致主变35 kV侧有功倒送; 当云团掠过, 光伏出力在10 s内跌落70%, 潮流再次瞬态回弹, 线路电流幅值突变幅度可达额定值60%, 热损耗与电流平方成正比, 线损计算需引入时序潮流叠加因子^[4]。风电夜间大发期, 随机波动周期介于30 s至300 s之间, 有功无功耦合度增强, 传统以负荷预测为单一变量的牛顿拉夫逊法收敛次数由4次增至9次, 表明系统雅可比矩阵病态度提升。高比例逆变型电源缺乏旋转惯量, 馈线无功缺口由并网逆变器快速补偿, 但逆变器无功裕度受限于1.1倍额定电流, 重载时段并网点功率因数由0.98跌至0.92, 无功远距离穿越导致附加线损率上升0.3%。由于10 kV线路阻抗比R/X≈2.5, 电压幅值对无功变化灵敏度高于高压网络, 潮流往复越限触发有载调压分接头频繁动作, 进一步放大循环电流损耗^[5]。

2.2 对线损的正面影响

分布式光伏在负荷密集区低压侧并网,使原需穿越 5 km 馈线传输的有功功率就地平衡,等效缩短电气距离,线路电流均方根值下降,理论线损与电流平方呈线性递减关系^[6]。以 400 kW 屋顶光伏为例,其年均出力曲线与商业负荷峰段重叠度 0.73,就地消纳率 82%,馈线首端峰值电流由 520 A 降至 410 A,等效电阻损耗降低 38%。逆变器四象限运行特性可快速发出感性或容性无功,将原先 0.87 的局部功率因数提升至 0.97,无功电流分量削减 32%,由此带来的线损下降约 0.45%。由于光伏替代部分 10 kV 侧小火电出力,系统旋转备用容量减少,主网潮流重载线路负载率由 85% 降至 65%,网络损耗同步降低。风电在沿海县域电网夜间大发期与蓄热式电锅炉负荷匹配,实现“风一热”就地耦合,避免长距离外送,全年统计表明县域网损率由 4.2% 降至 3.6%,验证了分布式电源对宏观线损的优化潜力^[7]。

2.3 对线损的负面影响

新能源出力的强间歇性使线路电流在 0~1.2 p.u. 间高频振荡,电流波形峰化因子由 1.2 升至 1.7,集肤效应加剧,交流电阻值额外增加 4%~6%。光伏逆变器高频开关引入 2~50 次谐波,总谐波电流畸变率 7.8%,谐波功率在变压器与线路阻抗上产生附加损耗,经实测谐波损耗占比达总损耗的 3.1%。在电压越限方面,正午光伏倒送可使馈线末端电压抬升至 11.2 kV,超过《电能质量供电电压偏差》(GB/T 12325-2008) 上限 1.8%,调压装置动作滞后导致过电压持续 30 min,过电压期间变压器铁芯饱和,空载损耗增加 12%。风电随

机波动引发的有功突变通过线路阻抗产生电压闪变,闪变包络频率集中在 8 Hz 附近,与配电变压器固有频率耦合引发铁磁谐振,谐振过电流使线损瞬时升高至基准值 1.9 倍。当风光同时率低于 0.15 时,系统需快速切回主网供电,潮流瞬态再反转形成环流,循环功率在联络开关两侧线路产生附加电阻损耗,单次切换等效损耗电量约 160 kW·h。

3 面向高比例新能源接入的 10 kV 配电网降损方案设计

3.1 设计原则与总体思路

降损方案遵循“经济优先、可靠为基、动态适应”三原则:经济优先要求全寿命周期成本净现值低于 0.15 元/kW·h,设备选型以 20% 回收期为阈值;可靠为基指 N-1 校验下电压偏移不超过 ±7%,故障重构时间小于 60 s;动态适应强调对新能源 0~100% 出力跃变的跟踪能力,控制响应时间小于 1 s。总体思路采用“技术+管理”双轨并行:技术层按“感知—优化—执行”三阶段实施,先以 μPMU 与智能电表构建 5 s 级数据池,再通过边缘计算求解含 0-1 变量与概率潮流的混合整数模型,最终由 SVG 与储能协同完成秒级功率闭环;管理层按“预测—调度—评价”闭环运行,融合 NWP 与 LSTM 的超短期预测纳入 DMS,日前调度预留 5% 旋转无功,事后以线损率与电压合格率双指标进行 PDCA 迭代。针对高比例波动性,方案设置“三级防线”:一级逆变器自主无功调节,二级馈线级 VQC,三级区域储能平抑,逐级消除随机增量,确保全年线损率波动区间收窄至 0.3% 以内。具体逻辑如图 1 所示。

基于图 1 所构建的面向高比例新能源接入的配

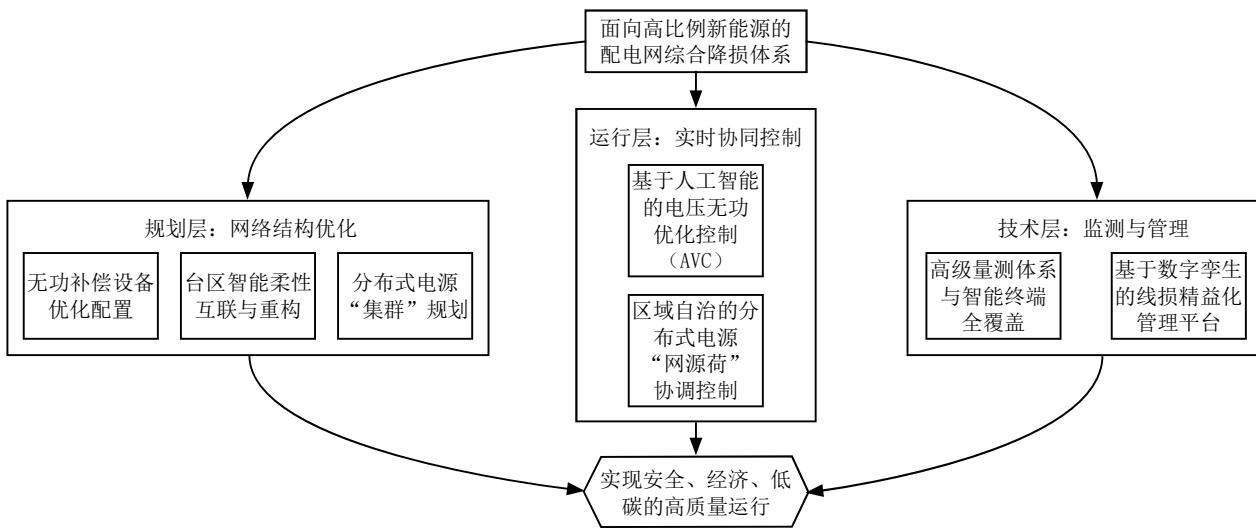


图 1 新能源接入的 10 kV 配电网降损方案

网综合降损理论体系,其核心在于摒弃传统单一、被动的降损模式,转而采用一个贯穿规划、运行与技术支撑三个层面的系统性、协同性理论框架。该体系首先从规划层入手,着眼于网络结构的根本性优化,其理论基础是“网络重构与资源优化配置理论”。这包括无功补偿设备的优化配置,通过应用非线性规划理论,在空间上确定补偿点的最优布设与容量,以弥补新能源波动导致的区域性无功缺额,进而发展出台区智能柔性互联理论,通过电力电子变换器实现台区间的功率互济,其理论基础是构建一个“柔性多状态开关”支撑的网格化配电架构,从而打破传统辐射状网络的功率壁垒,将地理邻近、特性互补的分布式电源视为一个虚拟电厂进行整体规划,以最大化本地集群内的自平衡能力,减少功率穿越主干网络带来的输送损耗。在运行层,该体系强调实时协同控制,其理论基石是“基于多智能体的协同优化理论”。

3.2 案例选择及技术降损方案

选取胶东半岛某县 10 kV 临海馈线为样本,线路全长 28 km,挂接分布式光伏 18 MW、海上风电 22 MW,负荷峰值 20 MW,新能源渗透率 200%,典型日反向潮流持续 8 h。技术降损分三步实施:第一步在并网点与 2/5/8 km 处配置 ±2 Mvar SVG 与 1.5 Mvar 固定电容组,实现无功分级就地平衡,将功率因数由 0.88 提升至 0.98;第二步利用现有环网柜将放射结构重构为“3 分段 2 联络”开环运行,缩短供电半径至 12 km,降低等效阻抗 18%;第三步于线路末端安装 2 MW/4 MW·h 磷酸铁锂储能,采用 PQ-Vf 双模式控制,在光伏跃降时 30 ms 内补充 3 MW 有功,抑制电流冲击。实施顺序遵循“先无功后拓扑、先轻载后重载”原则,施工窗口选于夜间风电大发且负荷小于 30% 时段,逐段停电时间控制在 90 min 以内,确保用户供电可靠率维持 99.9% 以上。

3.3 管理降损方案

构建“源—网—荷”协同调度框架:源侧接入 deterministic+probabilistic 双模式预测,光伏采用卫星云图外推 15 min 滚动,风电引入 Ensemble NWP,预测均方根误差分别控制在 5% 与 7%,日前计划以 0.5 h 粒度下发;网侧 DMS 嵌入动态最优潮流模块,以线损最小为目标,每 5 min 更新一次电容器组与储能出力指令;负荷侧推行分时电价+可控负荷响应,将 3 MW 工业蓄热锅炉与 2 MW 冷链冷库纳入直接控制,削峰填谷响应时间小于 5 min。同步升级监测体系,主站侧部署线损分析 APP,基于 CIM 模型与 μPMU 量测实现 5 s 级分区线损计算,当偏差超过 0.2% 自动触发拓扑与参数

校核,形成闭环消缺。全过程通过 IEC 61970 接口与现有 SCADA 无缝对接,无需新增硬件,确保方案在县级公司层面可复制、可推广。

3.4 结果分析与方案有效性评估

采用 PSCAD 搭建含 28 节点、37 条支路的电磁暂态模型,对比“现状—技术—综合”三场景全年 8 760 h 运行数据。综合场景线损率由 5.1% 降至 3.4%,降幅 1.7%,年节约电量约 1.1 GW·h;电压合格率由 94.3% 提升至 99.1%,最高节点电压由 11.22 kV 回落至 10.65 kV,过电压时长由年均 320 h 缩短至 8 h。在经济性方面,方案总投资 1 850 万元,按 0.65 元/kW·h 购电价计算,静态回收期 3.2 年;若计入碳价 80 元/t,回收期进一步缩短至 2.8 年。技术有效性指标显示,SVG 与储能联合运行时谐波损耗下降 42%,反向重过载时段由日均 5.6 h 降至 0.4 h,验证了“三级防线”对高比例新能源波动的平抑效果,为同类型沿海配电网提供了量化参考。

4 结束语

本文从机理、技术与管理三维度,阐明了高比例新能源接入对 10 kV 配电网线损的影响规律并提出了针对性降损框架。研究表明,通过“无功就地平衡—网络动态重构—储能快速响应”协同,可有效抑制新能源波动带来的附加损耗,实现线损率持续下降与电压品质同步提升。未来,随着分布式资源进一步增多,可在县域层面推广云边协同控制平台,将用户侧柔性负荷与电网侧调控资源统一建模,持续优化线损管理边界,助力构建低碳、高效、韧性的新一代配电系统。

参考文献:

- [1] 刘辉.新能源接入 10 kV 配电网对电能质量的影响研究[J].中阿科技论坛(中英文),2025(10):106-110.
- [2] 王涛.基于 10kV 中压配电网对新能源“突变负荷”协同消纳技术规范体系的构建与实践探索[J].标准科学,2025(S2):197-203.
- [3] 王喜越,李文鹏,王晓航,等.10kV 配电网线损管理与降损措施探讨[J].电力设备管理,2024(23):24-26.
- [4] 李春华,韩自奋,高宝龙.配电网新能源消纳能力评估与应用[J].电工技术,2024(20):43-46.
- [5] 王舒,齐志铭,佐奉强.分布式新能源接入对电网的影响分析[J].东北电力技术,2024,45(08):19-22.
- [6] 袁兆祥,张翼,聂铭,等.分布式新能源接入的 10 kV 配电网保护适应性分析[J].电力建设,2024,45(02):49-57.
- [7] 胡壮丽,罗毅初,陈雪.考虑分布式新能源接入的智能配电网线损异常定位系统[J].环境技术,2023,41(09):111-115.

气动调节阀气源压力波动对控制精度的影响及抗干扰策略

李晓芬, 何东明, 许春良, 李泉华, 王一波

(杭州金山仪表阀业有限公司, 浙江 杭州 311418)

摘要 气动调节阀作为工业过程控制中的关键执行元件, 其控制精度易受气源压力波动的影响。本文通过理论分析与实验研究, 揭示了气源压力波动对调节阀控制精度的影响机理。研究发现, 当气源压力在标准值 $\pm 15\%$ 范围内波动时, 执行机构输出力变化幅度达额定值的 $\pm 12.5\%$, 阀门定位误差最大为全行程的 3.2% ; 调节时间变异系数达 26.8% , 超调量变化幅度为 43.2% 。针对这些问题, 研究提出了包含多模态气源稳压系统、智能定位器抗干扰技术和智能控制补偿策略的综合解决方案。现场试验结果表明, 该方案在气源压力波动 $\pm 20\%$ 的工况下, 可使控制精度保持在 $\pm 1.0\%$ 以内, 响应时间波动范围从 $\pm 30\%$ 降至 $\pm 8\%$, 显著提升了控制系统的稳定性与精确性。

关键词 气动调节阀; 气源压力; 控制精度

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.005

0 引言

气动调节阀作为工业过程控制中的关键执行元件, 其控制精度直接影响整个系统的调节品质与运行效率。在实际工业环境中, 由于空压机切换、管网阻力变化及多设备协同作业等因素, 气源压力波动成为影响调节阀性能的主要干扰源。这种波动通过改变执行机构的输出特性, 导致阀门定位偏差, 进而引发工艺参数偏离设定值, 严重时甚至危及生产安全。目前, 尽管国内外学者在调节阀特性分析方面取得了一定进展, 但对气源压力波动这一特定干扰因素的研究仍不够系统。特别是在波动传播机理、动态响应特性以及综合抗干扰策略等方面亟待深入探究。随着现代工业对过程控制精度要求的不断提高, 解决气源压力波动带来的控制品质下降问题具有重要的理论价值和工程意义。

1 气源压力波动对控制精度的影响机理

1.1 气动执行机构的静态特性分析

气动执行机构的静态特性是评估调节阀在稳态工况下控制性能的重要指标。当气源压力发生波动时, 执行机构的输出推力特性将发生显著变化, 进而影响阀门的准确定位。以工业现场广泛使用的薄膜式执行机构为例, 其静态力平衡方程可表示为:

$$F = P \times A - K \times S - F_f \quad (1)$$

式(1)中, F 为执行机构净输出力 (N), P 为气源压力 (Pa), A 为膜片有效面积 (m^2), K 为弹簧刚度 (N/m), S 为阀杆位移 (m), F_f 为库伦摩擦力 (N)。该方程揭

示了气源压力与执行机构输出力之间的线性关系^[1]。

在实际工况中, 这种线性关系会受到多种非线性因素的干扰。首先, 膜片有效面积 A 随位移变化呈现非线性特征, 特别是在大位移工况下, 面积变化率可达 $8\% \sim 12\%$ 。其次, 弹簧刚度 K 在实际变形过程中表现出明显的非线性特性, 遵循胡克定律的偏差随变形量增大而加剧。此外, 阀杆密封件产生的库伦摩擦力 F_f 是影响静态特性的关键非线性因素, 其数值可达最大输出力的 $5\% \sim 8\%$ ^[2]。通过建立考虑非线性因素的改进模型, 可以更精确地分析气源压力波动对控制精度的影响。当气源压力在标准值 $\pm 15\%$ 范围内波动时, 理论计算显示执行机构输出力的变化幅度可达额定值的 $\pm 12.5\%$ 。这种输出力波动直接转化为阀门定位误差, 在开度 50% 位置, 误差最大可达全行程的 3.2% 。

现代智能定位器通过内置的压力传感器实时监测气源压力变化, 并采用前馈补偿算法对控制信号进行修正。然而, 实验数据表明, 在气源压力快速波动 (变化速率 $> 0.1 \text{ MPa/s}$) 时, 定位器的补偿效果显著下降, 残余误差仍可达全行程的 $1.5\% \sim 2\%$ 。

1.2 动态响应特性研究

气源压力波动对执行机构动态特性的影响机理较静态特性更为复杂, 涉及流体动力学、热力学及机械动力学的多重耦合作用。为深入揭示其影响机制, 需建立精确的数学模型描述系统动态行为。考虑气动回路中可压缩流体的热力学过程, 建立基于质量守恒和

能量守恒的动态方程。当气流通过控制阀时, 其质量流量遵循可压缩流体力学规律^[3]:

$$\dot{m} = C_d A_v P_u \sqrt{\frac{2\kappa}{RT_u(\kappa-1)} \left[\left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{(\kappa+1)/\kappa} \right]} \quad (2)$$

式(2)中, \dot{m} 表示质量流量(kg/s), C_d 为流量系数, A_v 为流通面积(m^2), P_u 、 P_d 分别为上下游绝对压力(Pa), κ 为绝热指数, R 为气体常数(J/(kg·K)), T_u 为上游温度(K)。

根据气体状态方程和连续性原理, 气室压力动态特性可表述为:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\kappa RT}{V} \dot{m} - \frac{\kappa P}{V} A \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

式(3)中, P 为气室绝对压力, T 为气室内气体温度, V 为气室容积(m^3), S 为阀杆位移(m), A 为活塞有效面积(m^2)。

执行机构的运动方程由牛顿第二定律可得:

$$m_e \frac{d^2S}{dt^2} = PA - KS - c \frac{dS}{dt} - F_f - F_L \quad (4)$$

式(4)中, m_e 为等效质量(kg), c 为粘性阻尼系数(N·s/m), F_f 为库伦摩擦力(N), F_L 为负载力(N)。

通过联立上述方程, 得到系统的三阶非线性状态空间模型。在小位移范围内进行线性化处理, 可推导出系统的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{KA + \frac{\kappa A^2 P_0}{V_0}}{m_e}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{m_e(KA + \frac{\kappa A^2 P_0}{V_0})}} \quad (5)$$

式(5)中, ω_n 为系统固有角频率(rad/s), ζ 为阻尼比(无量纲), P_0 和 V_0 为平衡点参数。

实验研究表明, 气源压力波动通过三个主要途径影响系统动态性能: 改变气动功率供给能力、调整系统刚度特性、影响阻尼效果。当气源压力从标准值0.4 MPa上升至0.5 MPa时, 由于质量流量的增加, 执行机构开启响应时间缩短22.3%, 而排气过程中压力比的改变使关闭响应时间延长18.7%。

系统参数敏感性分析表明, 当气源压力在0.35~0.55 MPa范围内波动时, 系统固有频率变化范围达到±17.5%, 阻尼比变化幅度为±32.8%。这种参数变异对控制系统稳定域产生显著影响, 特别是在高增益控制回路中可能引发持续振荡。

为量化评估动态性能, 引入调节时间 t_s 和超调量 σ 作为评价指标:

$$t_s \approx \frac{4.6}{\zeta \omega_n}, \quad \sigma = e^{-\pi \zeta \sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中, t_s 为系统调节时间(s), σ 为百分比超调量(%), ζ 为阻尼比, ω_n 为固有角频率(rad/s)。实测数据表明, 在气源压力波动±10%的工况下, 调节时间的变异系数达到26.8%, 超调量变化幅度为43.2%。这种动态性能的不确定性严重制约了高精度控制系统的鲁棒性。

不同类型执行机构对气源压力波动的敏感性存在显著差异。对比研究表明(见表1), 活塞式执行机构由于缺乏弹簧刚度项的补偿作用, 其气源刚度项在系统刚度中占据主导地位。在相同波动条件下, 活塞式执行机构调节时间的变化幅度较薄膜式执行机构高出38.5%, 表现出更强的参数敏感性^[4]。

通过建立的气源压力波动与动态性能指标的定量关系, 为后续抗干扰控制策略的设计提供了理论基础。基于该模型的分析结果指出, 针对快速波动工况(变化速率>0.15 MPa/s), 需要采用具有压力前馈补偿的预测控制算法, 以有效抑制气源压力波动对系统动态性能的负面影响。

表1 不同执行机构动态性能对比

性能指标	薄膜式执行机构	活塞式执行机构	变化幅度差异
固有频率变化率	±15.2%	±20.8%	+36.8%
阻尼比变化率	±28.5%	±39.2%	+37.5%
调节时间变异系数	±23.6%	±32.7%	+38.6%
超调量变化幅度	±38.4%	±53.1%	+38.3%

2 抗干扰控制策略设计

2.1 多模态气源稳压系统设计

为确保气动调节阀在复杂工况下的控制精度, 需要构建一个多层次的气源稳压系统。该系统由气源净化模块、压力缓冲模块、精密调压模块和智能监控模块组成, 形成完整的压力稳定保障体系。

在气源处理环节, 采用三级过滤方案。初级过滤采用旋风分离结构, 可有效去除粒径大于50 μm的固体颗粒和液态水。二级过滤使用精密陶瓷滤芯, 过滤精度达到1 μm, 同时配备自动排水阀, 确保油水分离效果。三级过滤采用活性炭吸附层, 深度去除气源中的油蒸汽和其他气态杂质。经过该处理流程, 气源质量可稳定达到ISO 8573-1:2010标准规定的2级洁净度要求, 为后续压力控制提供优质气源^[5]。

压力缓冲系统采用分布式储气罐布局。在主供气管路设置高压缓冲罐, 容积根据系统最大耗气量确定,

可按公式 $V=Q_{max} \times t / \Delta P$ 计算, 其中 Q_{max} 为峰值耗气量, t 为稳压时间, ΔP 为允许压降。在支路系统设置低压稳压罐, 用于吸收局部压力波动。这种分级缓冲设计可将压力波动幅度控制在 $\pm 1.5\%$ 以内, 显著优于传统单级稳压系统的 $\pm 3\%$ 控制水平。

精密调压系统采用先导式调压阀与电气比例阀的组合方案。先导式调压阀负责基础压力稳定, 其压力特性达到 $\pm 0.8\%$ 。电气比例阀作为精密调节单元, 通过 PID 控制算法实现输出压力的精确控制, 稳态精度可达 $\pm 0.2\%$ 。两个阀门的协同工作既保证了系统可靠性, 又提高了控制精度。

2.2 智能定位器抗干扰技术

在硬件设计方面, 采用数字压电技术替代传统的模拟电磁驱动。压电执行器基于逆压电效应, 具有响应速度快 ($< 1 \text{ ms}$)、功耗低 ($< 0.1 \text{ W}$) 和对气源压力变化不敏感等优点。先导级采用双喷嘴挡板结构, 通过差压检测和反馈机制, 将气源压力波动的影响降低到传统电磁阀的 30% 以下。同时, 定位器内置高精度压力传感器 (精度 $\pm 0.05\% \text{ FS}$), 采样频率达 200 Hz, 为软件补偿提供准确的压力数据。

在软件算法层面, 开发了基于模型预测的前馈补偿机制。该机制通过实时监测气源压力变化, 结合执行机构动态模型, 预测压力波动对阀门位置的影响, 并提前进行补偿。补偿算法采用自适应权重系数, 根据压力波动频率和幅度自动调整补偿强度, 在保证稳定性的同时提高响应速度。

参数自整定功能采用改进的极限环检测法, 该方法通过注入小幅度的测试信号, 在线辨识系统在不同气源压力下的动态特性, 自动整定 PID 参数。与传统方法相比, 新方法将整定时间缩短了 40%, 且在不同工况下都能获得最优的控制参数。此外, 定位器还具备非线性补偿功能, 通过建立包含气源压力变量的阀门特性曲面, 实时修正控制信号, 补偿因压力变化引起的流量特性畸变。该功能特别适用于调节阀在低开度工况下的精确控制, 可将影响降低 60% 以上。

2.3 智能控制系统补偿策略

在控制系统层面, 需要构建一个多层次、自适应的抗干扰控制架构。该架构包含前馈补偿、智能控制和预测维护三个核心模块, 形成完整的控制策略体系。

1. 前馈补偿模块采用多变量预测控制算法。该算法不仅考虑当前气源压力值, 还分析压力变化的趋势和频率特征。通过建立执行机构的精确数学模型, 预测气源压力波动对阀门定位的潜在影响, 并生成预防

性补偿信号。实际应用表明, 该策略可将压力波动引起的控制误差降低 70% 以上。

2. 智能控制核心采用模糊神经网络算法。该算法将模糊逻辑的专家经验与神经网络的自学习能力相结合, 形成具有强自适应能力的控制系统。网络输入层包含气源压力、压力变化率、阀门位置偏差等 6 个变量, 隐含层采用模糊推理机制, 输出层提供优化的控制参数。系统通过在线学习不断调整网络权重, 使控制性能随运行时间的增加而持续改善。

3. 预测维护模块基于数字孪生技术, 构建调节阀的虚拟模型。该模型实时接收现场传感器的压力、温度、振动等数据, 通过机器学习算法分析设备状态, 预测可能发生的故障, 并提前采取维护措施。同时, 系统建立包含历史运行数据的专家知识库, 为不同工况提供最优控制参数组合。

4. 为了验证控制策略的有效性, 在某化工厂进行了现场试验。测试结果显示, 在采用新型抗干扰控制策略后, 系统在气源压力波动 $\pm 20\%$ 的条件下, 调节阀的控制精度保持在 $\pm 1.0\%$ 以内, 响应时间波动范围从原来的 $\pm 30\%$ 降低到 $\pm 8\%$, 显著提高了生产过程的稳定性和产品质量的一致性。

3 结束语

研究针对气源压力波动对气动调节阀控制精度的影响机理展开分析, 通过量化其在静态输出力、定位误差及动态响应指标上的扰动效应, 同时根据既有问题现状提出多模态气源稳压系统、智能定位器抗干扰技术等解决方案。研究结果表明, 采用此类技术策略在一定范围内提高了系统稳定性。并且现场试验验证了该方案的合理性与有效性。未来研究可深入探索合边缘计算与数字孪生技术的融合, 从而达到调节阀系统的自感知、自决策与自优化目的, 推动气动执行机构向智能化、韧性化方向稳定发展。

参考文献:

- [1] 丁栋杰, 尚群立. 基于 MVH 的气动调节阀气室漏气在线故障诊断 [J]. 高技术通讯, 2025, 35(01):85-92.
- [2] 冯玉林, 蒋宇, 叶晓节, 等. 气动调节阀流量特性研究与试验分析 [J]. 液压气动与密封, 2023, 43(06):118-121.
- [3] 陈国顺, 陈素婷, 张淼. 气动调节阀声振耦合强度分析研究 [J]. 液压气动与密封, 2022, 42(11):42-46.
- [4] 俞伟, 方芳, 俞建国, 等. 气动调节阀定位控制算法的研究进展 [J]. 阀门, 2024(07):909-912.
- [5] 蒋文强, 胡绍林, 郭其亮, 等. 基于 PSO-RF 的气动调节阀故障诊断 [J]. 流体机械, 2022, 50(12):79-85.

自力式差压调节阀在地铁通风系统中的压力平衡控制研究

徐胜明, 何生平

(浙江宝核工业科技集团有限公司, 浙江 杭州 311400)

摘要 地铁通风系统的压力稳定性直接关系到运营安全与能耗效率。针对传统机械风阀在压力调节中存在的响应滞后、精度不足等问题, 本研究提出将波纹管平衡型自力式差压调节阀应用于地铁通风系统。通过理论分析阀门结构特性与工作机理, 结合地铁通风系统的动态压力特征, 建立了基于自力式调节阀的压力平衡控制方案。研究结果表明, 该阀门凭借其独特的波纹管平衡机构, 能够有效补偿轴向不平衡力, 在 20 ~ 500 Pa 压差范围内实现稳定控制。实际应用数据显示, 系统关键区域压差控制精度提升 60% 以上, 风机能耗降低 15% ~ 20%, 同时显著改善了气流组织效果和噪声水平。本研究旨在为地铁通风系统的压力平衡控制提供新的技术路径, 对提升系统运行品质与能效水平具有实际应用价值。

关键词 自力式差压调节阀; 地铁通风系统; 压力平衡控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.006

0 引言

地铁通风系统作为环境控制的核心环节, 承担着保证空气品质、调节温湿度、排除污染物及火灾工况下有效排烟等多项功能。然而, 地铁系统空间构造复杂、运行条件多变, 导致通风系统内部易出现压力失衡现象, 具体表现为部分区域风量偏离设计值、气流分布无序、系统阻力升高以及风机能耗上升等一系列运行问题。在传统的地铁通风控制中, 常采用机械式风阀执行压力调节。该类装置虽结构简单, 但在实际使用中暴露出明显的技术短板: 动态响应迟缓、调节精度有限, 且依赖外部动力源, 难以适应地铁系统中频繁变化的压力工况。因此, 探索具备自调节能力、无需外接能源且控制精准的压力平衡装置, 已成为地铁通风系统优化的重要方向, 自力式差压调节阀逐渐显示出其技术优势。

1 自力式差压调节阀的结构与工作原理

1.1 结构组成

自力式差压调节阀作为一种典型的自驱动控制装置, 其结构设计体现了检测、控制与执行功能的集成化特征。该阀门主要由阀体、阀杆、阀芯组件、波纹管平衡机构、阀座、复位弹簧、感应膜片及引压管路等部分构成(见表1)。

其中, 波纹管平衡机构作为关键功能单元, 其内部空腔与阀门出口连通, 外部腔室则通过引压管路连

接至进口压力源。执行机构的膜片组件一端与阀杆刚性连接, 另一端通过压力传导管路与阀门出口形成闭环压力反馈。这种结构布局使阀门能够自主感知系统压力变化, 并借助内部机械传动实现调节功能, 整个过程无需外部能量输入。

表1 自力式差压调节阀主要结构部件及功能分析

结构部件	功能特点	工作机理
阀体	提供结构支撑与流道导向	构成介质流通路径, 承载内部组件
阀芯—阀座副	实现节流调节功能	通过相对位移改变通流面积, 调节压力参数
波纹管平衡件	提高控制精度与稳定性	平衡进出口压差对阀芯的轴向作用力
复位弹簧	建立力学平衡基准	提供恢复力矩, 与介质压力形成动态平衡
感应膜片	感知压力变化信号	将压力信号转换为机械位移, 驱动阀杆运动
引压管路	构建压力反馈通路	传递进出口压力信号至执行机构

1.2 工作机理分析

自力式差压调节阀的运行基于经典力学平衡原理。以阀后压力控制模式为例, 阀前压力 P_1 流经阀芯—阀座节流区域后降至 P_2 。该出口压力通过引压管路传递至执行器上膜室, 作用于感应膜片产生的作用力与弹簧预紧力

形能力矩平衡，从而确定阀芯与阀座的相对位置关系。

当系统工况变化引起出口压力 P_2 升高时，膜片所受作用力相应增大。当该作用力超过弹簧预紧力时，阀芯将向阀座方向移动，减小流通面积，增加局部阻力，从而使 P_2 回降至设定值。反之，当 P_2 降低时，膜片作用力减弱，弹簧推动阀芯开启，流通面积增大， P_2 回升至平衡状态。这种自主调节机制确保了系统在变工况条件下的压力稳定性。

1.3 压力平衡特性

波纹管平衡型自力式差压调节阀相较于传统型号，其技术优势主要体现在独特的压力补偿机制。波纹管作为核心平衡元件，其内部承受出口压力 P_2 ，外部接触进口压力 P_1 ，通过巧妙的力学设计实现阀芯轴向力的自平衡^[1]。

根据静力学平衡方程：

$$F_F = F_M + F_K \quad (1)$$

式(1)中： F_F 表示弹簧预紧力， F_M 为膜片作用力， F_K 代表阀芯所受合力。

引入波纹管平衡机构后，阀芯受力可表述为：

$$FK = \Delta P \cdot AS - \Delta P \cdot AB \quad (2)$$

式(2)中， AS 为阀座有效承压面积， AB 为波纹管等效截面积， ΔP 为阀门前后压差。

当满足 $AB \approx AS$ 的条件，且忽略阀杆等次要因素的影响时，波纹管产生的平衡力可有效补偿阀芯所受的净作用力。这种力学补偿特性显著改善了阀门在高压差工况下的运行性能，不仅扩展了稳定工作范围，同时提升了控制精度与系统可靠性，使其特别适用于地铁通风系统中压力波动剧烈的复杂工况。

2 地铁通风系统的压力特性与分析

2.1 地铁通风系统构成及其特点

地铁通风系统作为保障地铁运营环境安全的关键系统，具有典型的多子系统耦合特性。从功能结构上划分，主要包含隧道通风系统、车站通风系统以及区间隧道事故通风系统三大组成部分。这些子系统在空间分布上相互独立，但在气流组织上又紧密关联，形成了一个复杂的气流网络系统。多层次、多功能的系统架构，使得地铁通风系统内部的压力分布呈现出高度的复杂性。

2.2 压力分布动态特性

地铁通风系统的压力场分布受到多种内外因素的耦合影响，形成了独特的动态压力环境。主要影响因素包括：列车运行引发的活塞风效应、外部气象条件变化、客流量波动以及设备运行状态改变等。其中，列车活塞效应作为地铁系统特有的压力扰动源，其影

响最为显著。根据流体力学理论，当列车以较高速度在受限隧道空间内运行时，会形成典型的“活塞运动”效应，推动前方空气形成正压区，同时抽吸后方空气形成负压区^[2]。这种压力波动的强度可由以下经验公式初步估算：

$$\Delta P = k \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

式(3)中， ΔP 表示压力波动幅度， ρ 为空气密度， v 为列车运行速度， k 为与隧道断面、列车外形等相关的综合系数^[3]。这种压力波动会沿着隧道空间传播，并通过出入口等连接部位传导至车站区域，导致站台与隧道接口处、不同楼层间的压力梯度发生显著变化。

从时空维度分析，地铁通风系统的压力分布呈现出明显的四维特征。在时间维度上，随着列车运行密度的变化（如高峰时段与非高峰时段的差异）、客流的周期性波动以及系统运行模式的切换（如早晚运行模式的调整），系统内部压力场表现出明显的时序变化规律。在空间维度上，从地面出入口到地下站厅，再到深层站台和隧道区间，形成了具有特定规律的压力梯度分布。这种时空动态特性对通风系统的控制策略提出了特殊要求。

2.3 压力不平衡问题及其影响机制

地铁通风系统的压力失衡不仅影响系统正常运行，还会引发一系列连锁问题，其作用机制主要体现在以下方面：

1. 气流组织失稳是压力失衡最直接的表现。当系统内部压力分布偏离设计工况时，会导致气流短路、回流甚至滞流等现象，破坏预设的气流组织模式。这使得新鲜空气无法按照设计路径有效输送至目标区域，同时造成污染物在局部空间积聚，严重影响室内空气品质的均匀性和稳定性。

2. 能耗异常增加是压力失衡带来的重要经济性问题。为克服因压力不平衡产生的额外阻力损失，风机设备需要提供更大的压头来维持系统设计风量，导致运行功率显著上升。研究表明，当系统阻力增加 20% 时，风机能耗相应上升约 15% ~ 25%，造成巨大的能源浪费^[4]。

3. 安全风险加剧是压力失衡最严重的后果。特别是在火灾等紧急工况下，压力分布的异常会干扰烟气的正常排出路径，可能导致烟气向疏散通道、安全区域扩散，严重威胁人员的生命安全。

3 自力式差压调节阀在地铁通风系统中的控制方案设计

3.1 阀门选型与参数计算

在地铁通风系统中应用自力式差压调节阀，精确的阀门选型是实现有效压力控制的基础。选型过程需

要系统考虑介质特性、压力调控范围、流量变化幅度及环境条件等多重因素，确保阀门参数与系统特性匹配。流量系数(K_V 值)是表征阀门流通能力的关键参数，其计算需基于通风系统的设计工况。对于地铁通风系统， K_V 值的确定可采用以下计算公式：

$$K_V = \frac{Q}{C\sqrt{\Delta P}} \quad (4)$$

式(4)中， Q 为设计工况下的体积流量(m^3/h)， ΔP 为阀门的设计压降(Pa)， C 为介质特性系数(对于空气介质，通常取0.074)。根据实测数据和数值模拟结果，将控制范围设定在20~500 Pa之间，这一范围能够覆盖地铁系统从正常运行到异常工况下的压力波动^[5]。在具体选型时，还需结合控制点位的功能需求进行适当调整，如站台与隧道连接处应选择上限较高的型号，而设备用房则可选用调节范围较小的类型(见表2)。

表2 自力式差压调节阀选型参数体系

参数类别	选型考量因素	技术规范要求	地铁系统适用性分析
压力控制范围	系统压力波动特征	20~500 Pa	覆盖正常与异常工况压力波动
流量系数 K_V	设计流量与允许压降	接管段特性计算	确保工况范围内调节线性度
介质温度	隧道热环境变化	-10~40 °C	适应地下空间季节性温度变化
连接形式	系统接口标准化	法兰连接	保证密封性与安装便利性
阀门类型	控制精度需求	波纹管平衡型	提供高精度压力控制能力
泄漏等级	系统密封要求	IV级及以上	满足通风系统密封标准

3.2 安装位置优化与技术要求

基于地铁通风系统的空间结构特征和气流组织原理，自力式差压调节阀的安装位置应遵循以下优化原则：

关键控制点的确定需要考虑系统压力分布的关键节点。在车站与隧道连接处设置调节阀，可有效阻尼列车活塞效应引起的压力冲击，其安装位置应距离连接界面5~8 m，以确保压力信号的准确采集。在站厅与站台之间的竖向通道安装时，应优先考虑气流主流区，通常建议在楼梯口或扶梯侧壁的通风井内设置，以建立稳定的压力梯度。

分支管路平衡是另一个重要应用场景。在通风空

调系统的分支节点安装调节阀时，应确保安装点前后均有足够长度的直管段，一般要求前5D后3D(D为管道直径)，以保证流场的稳定性和压力测量的准确性。对于设备用房的压力控制，建议在送排风支管上同时设置调节阀，形成双向调节能力。

在安装技术方面，针对地铁环境特点，推荐采用正立安装方式，即执行机构位于阀体上方。这种安装形式可避免灰尘积聚影响执行机构灵敏度，同时便于维护操作。引压管的敷设应遵循“短路径、少弯头”的原则，管径选择8~10 mm，长度控制在5 m以内，以减少压力信号的衰减和滞后。

特别需要注意的是，在建立区域间压差控制时，取压点的设置应具有代表性。高压侧取压点应设置在气流上游稳定区域，低压侧取压点则应位于下游代表性位置，通过这种设置方式可准确反映实际压力梯度，确保控制的精确性。

4 结束语

本研究通过理论分析与工程实践相结合的方法，系统探讨了自力式差压调节阀在地铁通风系统压力平衡控制中的应用效果。研究证实，波纹管平衡型自力式差压调节阀凭借其独特的力学补偿特性，能够有效应对地铁通风系统中的动态压力波动，特别是在缓冲列车活塞效应方面表现出显著优势。通过科学的阀门选型、合理的安装位置优化以及分层递阶控制策略的实施，建立了完整的压力平衡控制方案。实际运行数据表明，该方案使系统压差控制精度提高60%以上，风量分配偏差控制在±8%以内，能耗降低15%~20%，同时提升了系统的声环境质量与安全保障能力。

参考文献：

- [1] 鲁华伟,李森生,陈玉远,等.地铁车站通风空调系统建设及运行阶段碳排放研究:以武汉地铁某车站为例[J].暖通空调,2024,54(S2):387-391.
- [2] 李守杰,韩学伟,赵伟,等.地铁车站结露问题的多维解析与创新防治策略[J].暖通空调,2024,54(S2):453-456.
- [3] 肖云婷.基于FloMASTER的地铁车站设备用房变风量空调系统控制策略[D].武汉:华中科技大学,2024.
- [4] 张雪晴.基于Revit二次开发的标准地铁车站小系统参数化设计研究[J].山西建筑,2024,50(08):129-131,148.
- [5] 丁玮琦.基于Modelica建模仿真的地铁通风空调系统控制策略及能耗模拟研究[D].西安:长安大学,2023.

桥梁施工中的信息化技术应用研究

周云华

(青海第一路桥建设有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要 随着信息技术的飞速发展, 其在桥梁施工领域中的应用逐渐广泛。本研究围绕信息化技术在桥梁建设中的实际应用进行深入分析。首先, 探讨了信息化技术, 如 GIS、BIM 等在桥梁设计、施工和维护中的具体作用和效益。其次, 通过实例研究, 指出信息化技术能显著提高桥梁施工的效率和安全性, 减少工程成本。最后, 对桥梁施工中信息化技术的进一步应用提出了建议。本研究旨在为桥梁施工领域信息化技术的创新应用提供实践参考。

关键词 信息技术; 桥梁施工; GIS; BIM; 施工效率

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.007

0 引言

随着现代科技的迅猛发展, 建筑行业正经历着前所未有的技术革新, 这一变革对传统工程建设模式产生了深远影响。在技术密集型的桥梁工程领域, 先进科技与工程实践的深度融合具有极其重要的战略意义。桥梁工程作为交通基础设施的核心组成部分, 其设计、施工及运维管理不仅直接关系到公共安全和民生福祉, 更是区域经济可持续发展的重要保障。近年来, 以地理信息系统 (GIS) 和建筑信息模型 (BIM) 为代表的数字化技术在桥梁建设领域得到广泛应用, 并展现出显著的技术优势。大量实证研究表明, 这些信息化技术的应用能够有效提升工程效率约 30%, 降低 15% 以上的建设成本, 同时显著改善工程质量。鉴于桥梁工程的特殊性和复杂性, 亟需对相关技术进行系统化的应用研究和适应性改进, 以满足不同工程环境下的实际需求。具体而言, 在方案设计阶段, BIM 技术可实现结构性能的数字化仿真与优化, 确保设计方案兼具科学性和可行性; 在施工实施环节, GIS 技术通过提供高精度的地理空间数据支持, 助力实现工程管理的精准化和高效化; 在运营维护阶段, 这些技术能够构建智能化的监测系统, 实时评估结构健康状况, 有效预防潜在安全隐患, 从而保障桥梁的安全运营并延长其服役年限。

1 背景与现状

1.1 信息技术的发展及其在桥梁施工中的意义

自 20 世纪末以来, 信息技术取得了突破性进展, 其应用已渗透至全球各产业领域。在桥梁工程这一专业领域, 信息技术的引入不仅带来了革命性的变革,

更成为推动行业发展的核心动力。以地理信息系统 (GIS) 和建筑信息模型 (BIM) 为代表的先进技术工具, 凭借其精准的数据处理能力和强大的仿真功能, 为现代桥梁建设提供了全方位的技术支持。这些技术不仅显著提升了工程设计方案的优化程度, 更在施工效率、质量控制以及安全管理等方面发挥着关键作用。具体而言, 地理信息系统通过高效的空间信息管理, 显著提升了地质勘测和选址工作的精准度, 为工程基础工作提供了可靠保障; 而建筑信息模型则实现了从设计、施工到维护的全生命周期管理, 其直观的三维可视化特性不仅便于技术人员的理解与沟通, 更有效促进了团队协作。实践证明, 这些信息技术的应用不仅大幅降低了施工过程中的各类风险, 在提升工程安全性和成本控制方面也展现出显著成效。可以说, 信息技术的深度应用已成为提升桥梁工程质量与技术水平的关键要素, 持续推动着该领域的技术革新与行业整体发展。

1.2 桥梁施工中传统方法的局限性

传统桥梁施工方法在实际应用过程中面临诸多挑战与局限性。首先, 设计与施工阶段存在显著的信息不对称问题, 由于专业壁垒导致设计人员与施工人员对方案理解存在偏差, 频繁的设计变更不仅影响工程进度, 更造成资源浪费。其次, 信息传递机制的不完善使得沟通效率低下, 不仅容易引发误解, 更可能导致施工操作失误。再次, 设计图纸与现场施工条件难以完全匹配, 这种脱节现象直接导致材料浪费和工期延误, 最终造成项目成本超支。在质量控制方面, 传统方法过度依赖人工检测, 难以有效识别潜在风险, 给工程安全埋下隐患。最后, 复杂的施工环境充满不确定性, 传统方法在面对突发状况时缺乏有效的应对

机制，应变能力明显不足。这些系统性缺陷严重制约了施工效率的提升、安全性的保障以及成本控制的有效性，使得传统施工方法已难以适应现代工程项目日益提高的技术要求和管理标准^[1]。

2 桥梁设计与信息化技术的融合

2.1 GIS 在桥梁设计中的应用

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 作为一项关键技术，在桥梁工程设计中发挥着不可替代的作用。该系统通过对空间数据的采集、处理与分析，为桥梁选址和规划提供科学依据。在方案设计阶段，GIS 能够直观呈现项目区域的地形特征、环境状况及土地利用情况，辅助设计团队基于全面信息进行科学决策。通过系统化的空间分析功能，设计人员可系统评估不同选址方案的地形适应性、环境影响及其他关键因素，从而确定最优建设方案。此外，GIS 还具备环境影响评估功能，可预测工程建设对生态系统的潜在影响，确保设计方案与周边环境相协调，最大限度降低对自然环境的破坏。在复杂地形或人口密集区域，GIS 强大的空间分析能力尤为突出，既能识别潜在施工风险，又能提出针对性解决方案。这些技术优势显著提升了桥梁设计的科学性和精确性，为后续施工提供了可靠的数据支撑。GIS 技术在桥梁设计领域的广泛应用，充分体现了信息化技术对现代工程建设的重要价值^[2]。

2.2 BIM 技术在桥梁施工设计中的具体应用

桥梁施工设计中应用 BIM 技术具有显著的创新价值。该技术通过三维建模功能显著提升了设计精度，有效降低了因设计缺陷导致的工程变更风险。BIM 技术能够实现施工全过程的数字化模拟，预先识别潜在问题并优化施工方案，从而显著提高施工效率。其构建的协同工作平台为设计师、工程师和施工团队提供了高效的沟通渠道，大幅提升了项目协调能力和整体管理水平。在资源管理方面，BIM 技术可提供精确的材料需求和人员配置数据，既实现了资源的高效利用，又优化了项目成本控制。这种先进技术的应用不仅显著提升了桥梁设计质量，更全面优化了施工过程的整体效能。

3 信息化技术在施工阶段的应用

3.1 实时数据监控系统的部署与效果

在桥梁工程建设过程中，实时数据监控系统的应用能够显著提升施工管理的科学性和工程质量的可靠

性。该系统通过部署传感器网络实时采集施工现场的关键参数，包括环境指标、材料性能及设备运行状态等核心数据，并将这些信息传输至中央控制平台进行综合分析处理。这种基于数据驱动的监控模式能够精确捕捉施工过程中的动态变化，为管理人员提供及时可靠的决策依据，从而有效应对各类施工问题。在安全管理方面，该系统能够实时监测结构应力等关键指标，当检测到超出预设阈值的情况时，可及时启动预警机制，采取针对性防控措施，大幅降低安全事故发生概率。同时，该系统通过优化资源配置和施工流程，显著提高了资源利用效率，为项目成本控制提供了有力支撑。总体而言，实时数据监控系统的应用不仅提升了桥梁施工的智能化水平，更推动了工程项目管理向精细化、科学化方向发展。

3.2 信息化技术在施工安全管理中的应用

信息化技术在桥梁施工安全管理中的应用具有显著的实践价值。通过采用先进的数字化手段，能够有效识别施工现场潜在的安全隐患，并采取相应的预防措施。具体而言，通过部署专业监控系统，可实时监测施工人员的操作规范性和设备运行状态，确保各项作业符合既定标准。同时，借助传感器和物联网技术，能够持续采集桥梁关键部位的应力数据，对结构健康状况进行动态评估，从而实现对安全风险的早期预警和及时处置。基于云计算平台的移动终端应用，为管理人员提供了便捷的数据获取渠道，有助于快速形成科学决策并优化施工方案。此外，信息化管理系统能够完整记录事故相关数据，通过系统分析为安全管理提供可靠依据，从而持续提升安全管理水。实践证明，信息化技术的广泛应用已成为提升桥梁施工安全性的关键要素，对推动行业技术进步具有重要作用^[3]。

3.3 施工期间信息技术对成本管理的贡献

信息化技术在桥梁施工阶段的成本管理领域发挥着举足轻重的作用。通过运用先进的信息化工具，能够实现施工数据的实时采集与精准分析，从而优化资源配置效率，有效控制不必要的成本支出。在具体施工过程中，信息化系统能够提供精确的成本预测与动态监控功能，使项目管理者能够及时调整预算方案，显著提升资金使用效能。此外，信息化平台还支持施工方案的实时优化调整，大幅降低了因突发情况导致的成本超支风险。这些技术手段的系统性应用不仅显著提升了桥梁施工项目的经济效益，更为工程成本管理体系的现代化转型提供了强有力的技术支撑。

4 桥梁维护与管理中的信息化应用

4.1 桥梁维护中的信息技术工具

在现代桥梁维护管理工作中,信息技术的应用显著提升了维护工作的效率和精准度。地理信息系统(GIS)通过整合桥梁地理位置、周边环境特征及历史维护数据,为制定科学合理的维护方案提供了重要依据;建筑信息模型(BIM)技术则通过构建桥梁三维数字化模型,直观呈现结构特征和现状信息,使维护人员能够全面掌握桥梁结构状况并识别潜在风险;结构健康监测系统通过在关键部位布设传感器网络,实现了对桥梁状态的实时监测,通过数据采集与分析功能,有效预警可能发生的结构损伤;无人机巡检技术突破了传统检测的局限性,可对难以到达的区域进行高精度影像采集,即使在复杂地形条件下也能准确记录细微变化,确保检测工作的全面性和可靠性;云计算平台则通过集中存储和处理海量监测数据,优化了信息共享和分析流程,不仅提升了信息化管理水平,更为多部门协同作业提供了便利条件。这些先进技术的综合应用,不仅有效延长了桥梁使用寿命,显著提升了结构安全性能,同时大幅降低了维护成本^[4]。

4.2 利用信息化技术进行桥梁健康监测

桥梁健康监测作为保障结构安全性和延长服役寿命的核心环节,其信息技术的应用成效显著。通过部署高精度传感器与物联网设备,可实时采集桥梁在变形、振动、应力等多维度的结构响应数据,构建起完整的监测网络体系。所获取的监测数据经由无线传输系统汇聚至中央数据库,依托大数据分析技术进行深度挖掘与评估,从而精准识别结构异常与潜在风险。结合机器学习与人工智能算法,持续优化桥梁健康状态的预测模型。信息化技术的应用显著提升了监测精度与处理效率,有效降低了人工巡检的成本与安全风险,为桥梁全寿命周期的维护管理提供了科学决策依据。该技术体系有力推动了结构健康监测向智能化、远程化方向发展,切实保障桥梁运营的安全稳定性,确保交通基础设施的可靠运行。

4.3 信息系统在应急管理中的作用

信息系统在桥梁施工应急管理体系中发挥着不可或缺的核心作用。通过构建集成化的数据平台,系统能够实现对桥梁结构状态的实时监控与快速响应机制,从而显著提升应急处置效能。在突发事件发生时,该系统具备高效整合多源异构数据的能力,为决策层提供全面的风险评估报告和科学决策依据。基于系统提

供的精准信息,管理人员可以优化应急资源配置方案,确保施工人员及设备的安全防护措施得到有效落实。此外,信息系统还支持应急预案的数字化编制与标准化流程管理,通过建立完善的应急操作规范,不仅能够提升现场处置的规范性,更有助于最大限度地降低事故损失并缩短灾后恢复周期^[5]。

5 结束语

本研究对信息化技术在桥梁工程建设领域的应用现状及其效益进行了系统性的调查与分析,重点探讨了地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM)等现代信息技术在桥梁设计、施工及运维管理各环节中的关键作用。研究结果表明,信息化技术的应用能够显著优化设计流程、提升施工效率、保障工程安全并有效控制成本。通过典型工程案例的实证分析,进一步验证了信息化技术在工程实践中的实际应用价值与成效。然而,当前信息化技术在桥梁施工中的应用仍存在诸多不足,包括应用范围有限、研究深度不足,以及与传统的施工方法融合过程中产生的技术壁垒等问题,亟需开展更深入的研究以寻求解决方案。与此同时,信息化技术本身正处于快速发展阶段,其新功能和新应用仍需通过工程实践进行更全面的验证与完善。未来研究应着重探索信息化技术在施工管理、风险评估及后期维护等关键环节的应用潜力。在推进技术普及的同时,应同步加强相关法规标准体系的建设,为技术创新与推广提供制度保障。这不仅将进一步提升桥梁工程建设的质量与效率,还将为工程安全提供更加坚实的保障。

参考文献:

- [1] 贾秀亮,宋厚纬.信息化技术在桥梁预制装配施工管理中的应用[J].住宅与房地产,2020,565(06):160.
- [2] 姚芸云.桥梁预应力施工信息化技术应用[J].科学与信息化,2023(10):120-122.
- [3] 王勇,孔晖.BIM 信息化技术在桥梁施工中的应用[J].科学与信息化,2021(27):79-81.
- [4] 肖云,于志斌,王翔,等.桥梁预应力施工信息化技术的研究与应用[J].建筑技术开发,2021,48(05):131-134.
- [5] 赵彩云.基于 BIM 技术的桥梁施工碰撞检测信息化监控实现探究[J].山西交通科技,2020(01):87-90.

BIM技术在轨道交通车辆段建设中的应用

吴宗亮

(广州地铁工程咨询有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 建筑信息模型(BIM)技术作为推动数字化建造的重要引擎,正全面重塑轨道交通工程的建设逻辑。本文以轨道交通车辆段为研究对象,围绕这一关键基础设施,从规划设计、施工管控到运营维护等阶段入手,系统分析BIM技术在各环节中的应用实践与价值体现。通过分析BIM技术在空间优化、管线综合、施工模拟等方面的技术优势,结合典型工程案例,论证其在提高工程质量、缩短工期、降低成本方面的实际效果,以期为推进车辆段工程的数字化转型升级提供参考。

关键词 BIM技术; 轨道交通; 车辆段; 数字化建造; 工程管理

中图分类号:TP3; U12

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.008

0 引言

轨道交通车辆段是集列车停放、检修、维护等功能于一体的综合性基地,具有专业系统复杂、空间结构密集、设备管线多等特点。以往依赖图纸的设计与管理方式,已逐渐暴露出难以契合现代工程复杂需求的局限。借助三维可视化、信息集成及协同管理等特性,BIM技术为车辆段建设带来了更加系统化、智能化的技术路径。本文从技术应用角度探讨BIM技术在车辆段工程中的具体实践,为轨道交通工程智能化建设提供技术参考。

1 BIM技术概述

建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术是基于三维数字模型的工程信息集成手段,能够在项目的全生命周期内实现数据的数字化表达与动态管理。其核心特征包括:(1)三维可视化:直观展示工程实体的空间关系。(2)信息集成:整合几何数据与非几何属性信息。(3)协同工作:多专业在统一平台开展协作。(4)全生命周期管理:支持规划、设计、施工、运维各阶段应用。

2 传统技术的不足

2.1 设计阶段的技术局限

平面图纸难以完整表达三维空间关系,专业间协调依赖人工识图;错漏碰缺发现率不足;产生专业碰撞问题;空间合理性验证依赖经验判断,已造成返工现象。

2.2 施工阶段的管理短板

施工组织规划粗放进度计划与实体建设脱节;大型设备吊装等关键工序仅凭经验规划,容易偏差;质

量验收依赖纸质记录,可追溯性差;材料管理误差设计变更与施工实施不同步等^[1]。

3 施工图设计阶段BIM技术的应用

在施工图设计阶段,引入BIM技术,可以对整体设计方案进行全方位的模拟与检验,从技术工艺、材料选型到细部节点等实现可视化推演。它不仅能在初步设计成果的基础上形成可直接服务于施工与安装环节的设计文件,还能借助模型实现设计过程的动态管控与信息协同。通过BIM技术深度应用,工程在设计合理性、施工可行性以及后期可维护性均能得到显著提升。其主要内容可概括为以下几个方面:

1. 设计进度与质量管理。依托BIM数据集成与管理平台,对设计成果与模型数据进行集中存储与共享,形成统一的交付与审查机制。平台内可实时分配设计任务、更新模型版本、追踪修改记录,实现设计过程的全周期可追溯与协同化管理。

2. 限界优化设计。在施工图阶段,通过建立精细化的BIM模型,可对车辆限界、设备限界与建筑限界进行多维度校核。系统自动识别潜在的空间冲突,辅助设计人员调整结构与设备布置方案,使建筑与机电系统之间的空间利用更加合理。

3. 管线碰撞检测。借助BIM模型的可视化能力,可精准检测不同专业之间及同专业内部的设备、管线是否存在空间冲突或间距不足等问题。系统生成的碰撞分析报告为设计优化提供了客观依据,设计团队据此调整布置方案,提高了施工阶段的协调性,也降低了返工与修改的风险^[2]。

4. 三维管线综合。对工程内错综复杂的管线进行

统筹布局、优化净高，制定分层、分系统的排布规则，尤其关注大型综合管廊、设备机房（如变电所、通风机房）等关键区域，在完成碰撞检测后，设计人员根据分析结果与管线综合技术要求，对模型内的设备及管线进行空间重构与优化布置。通过 BIM 平台生成的三维可视化图，可直观展示各层综合管线及关键节点布局，为施工交底、安装定位提供直观依据，保证系统间的高效衔接与空间协调。

5. 预留预埋核查。结合已优化的施工图模型，对墙体、楼板及二次结构的孔洞、预埋件进行系统梳理。BIM 模型可生成预留孔洞图和预埋件布置图，标注其形状、尺寸、位置、规格等信息，确保施工阶段的预留预埋符合设计要求。

6. 工程量统计与校核。通过 BIM 模型可自动提取各清单子目的工程量与构件特征数据，并与工程量清单实现一一对应。该过程不仅提高了工程造价编制与审核的效率，也使数据更加精准可靠。通过模型数据与清单信息的双向校验，可有效避免遗漏与重复统计，助力工程造价全过程管理的数字化与精细化。

4 施工阶段 BIM 技术的应用

4.1 机电深化设计

在机电专业深化设计阶段，基于 BIM 深化模型对设备与管线进行空间排布优化已成为重要手段。通过对各系统设备位置、支吊架结构及荷载进行精细化分析，可在满足规范与施工需求的前提下，确保布置合理、结构安全、检修便利。模型还能输出管线综合布置图、支吊架设计示意及设备机房三维视图，为加工与安装提供直观依据，从而实现材料节约、空间集约与整体美观的统一，使安装过程更具科学性与可控性。

4.2 装修深化设计

在装修阶段，在同一个 BIM 平台上，将建筑结构模型、机电综合模型与装修模型（包含天花、墙面、地面、固定家具、装饰构件）进行整合可实现建筑、结构与机电之间的综合协调。设计人员可借助模型进行标高控制、空间平衡与管线校核，提前发现各专业之间的冲突点，并对装修方案进行优化调整。模型可生成关键节点和空间区域的三维视图，为设计论证与施工指导提供精准支撑。

4.3 土建深化设计

土建深化设计环节侧重于孔洞预留与预埋件布置的精确控制。通过 BIM 深化模型，可自动提取穿墙点、桥架、管线的尺寸、位置和标高等数据，生成带有编号和参数的孔洞清单，为现场开孔提供依据。

4.4 关键及复杂节点工序模拟

对深基坑、高支模、大跨度钢结构安装、装配式构件连接等关键工艺进行精细化模拟，用于技术交底和方案比选，施工过程中结构复杂、专业交叉密集或安全风险较高的关键部位，BIM 深化模型可进行全过程工序模拟^[3]。通过建立三维动态场景，生成模拟视频，直观展示施工顺序、装配步骤及空间关系，为技术交底提供可靠依据。

4.5 工程筹划模拟

在工程筹划阶段，借助 BIM 深化模型可对施工现场布置、周边环境及构筑物迁改等进行动态模拟，如重要节点（如“主体封顶”“机电插入”“通车调试”），模拟其前置条件和准备工作的完备性，确保节点目标可实现。通过对施工方案、资源配置及时间安排进行多方案比选，形成最优施工组织路径。模型还可用于模拟材料堆放、设备进出路线及安全隔离区域等，如对于复杂的施工步骤（如大型钢结构吊装、大型设备进场安装），模拟其路径和所需空间，确保在计划的时间点现场条件已满足，提升施工现场安全及进度管理。

4.6 精准工程计量数据

模型中的构件（如柱、梁、管道、电缆桥架）均带有材质、尺寸等属性，软件可按规则自动分类统计混凝土体积、模板面积、管道长度、设备数量等，利用深化设计模型对工程量进行精密计算，根据模型能够精准核查实施工程量，避免出现超计、漏计等现象发生。

5 案例分析

以华南地区某车辆段为例，开工前根据图纸的出图计划，逐步建立起 BIM 模型，包括桩基础、承台，立柱及盖板、后浇带，集水井，落水口等^[4]。BIM 技术在车辆段土建施工过程中的应用，能精准定位各类构筑物的位置、尺寸、预留孔洞的位置及高程、桩长等，能够建立配筋模型，通过与图纸比对，提高配筋正确率，减少返工现象。施工实施过程中未出现预留孔洞漏埋，框架柱位置偏差等施工偏差而造成大面积返工现象，并在工程实施计量过程中，能够通过 BIM 技术，准确计算已实施工程量，避免出现超计、漏计等现象。

通过传统图纸及 BIM 技术建模对比，在配筋方面相比传统图纸具有压倒性的优势。通过图纸及三维建模进行细化对比，三维模型具备以下优势。

5.1 表达方式

二维图纸配筋用点、线、符号和多个平面视图来抽象表示钢筋的布置。

三维模型能够用实体模型 1:1 精确模拟每一根钢筋的形状、尺寸和空间位置。

优势：三维模型提供了可视性的空间感，减少了看图人的误解。

5.2 复杂节点处理

二维图纸需要阅读大量复杂剖面图和详图或多份图纸需同时查看，对阅图者识图、阅图能力要求极高，且设计意图不易被充分理解。

三维模型可以清晰、直观地创建和展示复杂节点（如梁柱节点、基础承台）的钢筋排布。

优势：三维模型提升了复杂区域的施工可行性，保证了结构安全。

5.3 工程量计算

图纸需要人工统计，耗费大量时间及精力，容易出错，且一旦设计变更，所有计算需推倒重来^[5]。

三维建模可根据模型瞬间生成精确的钢筋工程量清单，精准计算各型号、各种类钢筋工程量，避免出现漏项等情况。

优势：三维建模具有高效性与准确性，为成本预算、施工材料准备及施工计量等提供可靠的数据支撑。

5.4 施工交底

图纸对施工人员的技术水平和阅读图纸能力、沟通协调能力及施工人员接受能力水平要求高，传统图纸交底容易产生误解。

三维建模可提供视化交底，可在模型上剖切，向施工作业人员直观展示钢筋空间、位置、类型及数量，整体需要达到的绑扎效果，总体成果一目了然。

优势：三维模型大幅降低了沟通门槛，提高了交底效率，减少了施工错误。

通过上述对比，BIM技术通过有效的建模及计算，其在提升质量、节约成本、缩短工期、避免风险方面带来了更大收益，已成为现代大型、复杂工程项目，尤其是基础设施项目的重要选择。

6 BIM技术应用的困难及建议

6.1 BIM技术应用的困难

1. 车辆段涉及专业较多。各专业模型精度等级要求不一致，车辆段特有的轨道、接触网等专业缺乏建模标准，未能全面实施BIM技术。

2. 大型模型运行效率低。车辆段为整个地铁线路的运转枢纽，体量普遍较大，建立模型需要的人力、物力、时间庞大，导致BIM技术的效率低下。

3. 缺乏专业人才。BIM技术作为新兴的技术，目前各行业BIM专业人员比较匮乏，无法精准建模，导致BIM技术在工程行业中未能全部体现价值^[6]。

4. 不同阶段、不同深度的模型应包含哪些信息（LOD

标准）、如何交付、由谁审核，缺乏权威统一的强制性或推荐性标准。在大多数地区，具有法律效力的交付物仍是二维图纸，BIM模型通常作为“参考”。这削弱了各方维护模型准确性的积极性。

6.2 BIM技术应用的建议

1. 将BIM技术要求写入合同：在招标文件和合同中，明确约定各参建方的BIM技术职责、交付标准、奖惩机制和知识产权归属，使BIM技术应用具有法律和合同约束力。

2. 建立考核与激励机制：将BIM技术应用成果纳入对各参建方的绩效考核中，对应用效果好、创造显著价值的单位给予奖励。

3. 重视人才培养与知识沉淀：建立BIM技术培训体系，培养既懂专业又懂BIM技术的复合型人才。同时，将项目积累的族库、标准、问题库进行收集统计，形成总结经验，供后续项目参考，持续提升整体的BIM技术应用能力。

7 结束语

BIM技术在轨道交通车辆段这一大型复杂工程项目中的应用，标志着车辆段工程建设从传统模式迈向了数字化、精细化管理的新阶段。通过本次项目的实践，BIM技术不再是停留在表面的可视化展示，而是深入规划设计、施工协同、进度管控和运维移交的全过程。它有效解决了车辆段项目中常见的专业接口复杂、管线综合难度大、空间布局紧凑等核心难点。从土建结构的精准建模，到机电各系统管线的零碰撞综合，再到检修平台、轨道群的精确定位，BIM技术为各参建方提供了一个统一、协同的数字化工作平台，极大地减少了施工阶段的变更与返工，保障了工程质量和进度。

参考文献：

- [1] 张岳.基于BIM技术的城市轨道交通信号设备室智能布线技术研究[J].绿色建造与智能建筑,2025(10):59-61.
- [2] 左鸿超,张昱敏.5G技术在城市轨道交通信号系统中的应用研究[J].现代城市轨道交通,2025(09):77-81.
- [3] 赵公安.浅析BIM技术在轨道交通工程施工安全管理中的运用[J].建筑安全,2025,40(09):78-80.
- [4] 张昊宇.计算机信息技术在城市轨道交通管理中的应用研究[J].张江科技评论,2025(08):50-52.
- [5] 赵小龙.5G通信技术在城市轨道交通中的应用[J].科技与创新,2025(14):64-67.
- [6] 黄鑫,董天馨,杜正德.人工智能技术在城市轨道交通中的应用与探索[J].人民公交,2025(14):71-73.

智能科技赋能企业安全管理的创新机制

王 柳

(徐州铜安安全生产咨询服务中心(普通合伙), 江苏 徐州 221000)

摘要 智能科技深度应用推动企业安全管理体系发生根本性变革, 传统安全管理模式在组织架构与运行机制方面存在系统性缺陷, 难以满足现代企业复杂多变的安全风险管理需求。人工智能、物联网以及大数据等技术的融合应用, 正深刻改变着企业安全管理的理念与实践。通过智能感知网络实现全域风险监测, 算法驱动优化应急响应, 认知增强提升决策质量, 人机协同重塑管理流程。本文探索智能科技赋能企业安全管理的创新机制, 旨在对推动安全管理现代化有所裨益。

关键词 智能科技; 企业安全; 创新机制; 风险防控; 应急管理

中图分类号: TP2; X93

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.009

0 引言

数字化转型浪潮席卷全球, 企业安全管理面临前所未有的挑战与机遇, 传统依赖人工经验的安全管理模式在风险识别精度、响应速度以及资源配置效率等方面逐渐暴露局限性, 智能科技的快速发展为破解安全管理困境提供了新的技术路径。智能科技通过物联网感知技术构建实时感知网络, 运用人工智能算法分析海量数据, 建设智慧管理平台实现跨部门协同, 催生智能化风险识别预警、动态化应急响应资源调配、协同化安全决策执行以及精准化安全监管控制四大核心创新机制。

1 智能科技赋能企业安全管理的机制创新基础

智能科技与企业安全管理的深度融合正在推动管理理念与组织模式以及运行机制的系统性变革, 准确识别传统安全管理模式的结构性缺陷, 深入理解智能科技驱动安全管理变革的内在机理, 是构建新型安全管理创新机制的重要理论前提与实践基础。

1.1 传统安全管理模式的局限性分析

传统企业安全管理体系在治理框架、运作流程、资源分配这些关键环节存在系统性不足, 使得安全管理水平难以得到有效提升。治理结构呈现出明显的层级化与碎片化问题, 各部门之间协同机制缺失且权责界定模糊, 容易产生管理漏洞与责任推诿现象。运作模式主要停留在被动应对和阶段性检查层面, 缺乏主动预警能力与弹性调整机制, 无法匹配现代企业日益复杂的安全风险态势。风险辨识过度依赖人工经验, 存在准确率低和覆盖面窄的局限, 隐患排查存在明显

滞后与疏漏情况。应急响应时信息传递环节冗余, 决策流程迟缓导致资源调配效率低下。绩效考评缺乏科学量化指标与持续改进机制, 激励约束作用十分有限。传统管理模式已无法适应现代企业在安全管理精准化、智能化以及协同化方面的发展需求^[1]。

1.2 智能科技驱动安全管理变革的内在逻辑

智能科技正在深刻地重塑企业安全管理的运作方式和制度体系, 通过优化信息获取与革新决策流程以及改善协作模式来推动管理模式发生根本性变革。在信息采集方面, 物联网与 5G 技术突破了人工巡检的时空限制, 构建起全天候与全方位的智能监控网络, 以确保风险信息即时获取并传递; 大数据技术通过对海量安全数据进行深度分析, 识别潜在风险规律与演变方向, 从而为精准预警提供数据支撑。在决策层面, AI 算法凭借强大的算力可快速解析复杂安全态势并生成最优应对方案, 有效提升决策效率与准确性; 机器学习通过持续学习历史数据与实时反馈, 不断完善决策模型, 实现决策质量的阶梯式改进。在协作机制上, 智能管理平台打破部门间的信息孤岛, 形成扁平化与网络化的协作架构, 以促进信息互通与任务协同, 这种技术赋能的转型让安全管理从经验主导转向数据驱动, 从被动应对转向主动防控, 从分散管理转向整体统筹^[2]。

2 智能科技赋能企业安全管理的核心创新机制

智能科技的深度应用正在重塑企业安全管理的基础架构与运行模式, 通过物联网感知技术、人工智能算法、大数据分析以及云计算平台的协同作用, 传统

安全管理中的信息孤岛、响应滞后、决策分散以及监管粗放等问题得到系统性解决。

2.1 智能化风险识别与预警机制

智能化风险识别依靠全域感知网络的搭建，将以往依靠人工检查的被动应对方式转变为数据驱动的主动防御机制，智能感知设备通过整合多源数据信息，能够捕捉人工难以发现的潜在风险规律，并构建全方位安全监控体系。机器学习模型通过分析历史数据与实时反馈信息，持续提升风险判断的准确程度^[3]。例如：南通海门海螺水泥有限责任公司的“安全管控一体化平台”充分证明了这一机制的有效性，该平台整合人员定位、危险作业审批与隐患排查以及安全培训等功能，实现安全管理的全程数字化，一线员工可随时用手机登录系统上传现场隐患点图文信息，系统自动分级分类并推送至责任部门与责任人，配合《事故隐患内部报告奖励制度》形成“全员参与、分级管控、闭环治理”的安全常态化机制。这种智能监测模式打破了人工巡检在时间与空间上的约束，确保安全隐患能够被即时发现并处理，从而显著提高企业安全管理效能。

2.2 动态化应急响应与资源调配机制

动态应急响应机制依靠智能算法提升资源调配效能，形成敏捷高效的应急处理体系。智能调度平台按照事态演变实时优化资源分配策略，有效杜绝资源闲置与处置滞后的问题。通过对历史事件与当前状况进行深度研判，预判事件走向，并提前完成资源部署。例如：江苏省无锡市重点工贸企业在智能技术和AI应用场景方面的部署，生动展现了该运作模式的具体实践情况。在试点区域当中，当雷达系统检测到消防通道被占用了，就会马上触发现场声光警示装置，同时将预警信息和现场画面实时发送到安全人员移动设备以及应急指挥平台。系统会自动创建处置工单并且分配给距离最近的安全员，由此实现了从风险识别、即时报警到人员调度和现场处理的秒级应对与闭环管理。这种依靠实时数据驱动与资源动态分配的“无感监管”模式，有效提升了应急响应的速度和准确性，充分证实了动态化应急响应与资源分配机制的科学性和实用性。

2.3 协同化安全决策与执行机制

协同化决策机制打破了部门界限，形成上下联动的指挥网络。协同平台依靠标准化的信息接口与统一数据格式打通了各系统之间的数据孤岛，保障跨部门信息高效流通。例如：苏州群策科技有限公司的信息

化管理实践充分验证了协同模式的关键作用。该企业自主设计并编写信息化安全管理E化系统，涵盖隐患排查系统，相关方入厂访客施工系统与工安证照管理系统以及工安提案系统等多个模块。平台集成安全指标预警、风险动态管控以及隐患整改追踪等核心功能，实现企业安全生产的全程动态监管，通过统一的信息枢纽，各部门能够实时获取企业安全态势，并协同开展监管工作。同时，建立完善的安全提案机制，鼓励员工通过工安提案系统积极提交改进建议，每月评选优秀提案并给予奖励，有效破解传统安全管理中部门条块分割与信息滞后的难题。

2.4 精准化安全监管与控制机制

精准监管依靠大数据分析实现监管资源的合理调配，增强监管的针对性与实际效果。智能风险评估模型综合考量企业规模与行业特性以及历史表现等多维指标，实时评估风险值，动态监管调整机制依据企业安全态势变化，灵活调整监管频率与检查方向。例如：南通海门海螺水泥有限责任公司的智能技术应用彰显出精准监管的技术优势。该企业在水泥袋装环节引入智能装车机器人系统，通过高精度3D视觉扫描自动识别车厢位置，与形态机械臂精准完成袋装装车。装车期间采用智能联锁控制系统设定“车辆未停稳不启动”“人员闯入自动急停”等多重防护，使人员完全远离设备作业风险区域，彻底规避人车交叉与高处坠落以及粉尘暴露等风险，投用后未发生人员伤害事故。又如：江苏当升材料科技有限公司的设备在线检测及智能诊断系统对全厂百余台重要转动设备进行实时监测，如同为每台设备配备全天候“私人医生”提前发现潜在问题，避免因设备故障引发安全事故。

3 智能科技赋能企业安全管理创新机制的实施保障

智能科技赋能企业安全管理创新机制的有效实施，需要构建系统性的保障体系。通过重构组织管理架构，培育专业人才队伍、完善制度标准规范以及建立优化改进机制，为创新机制的落地运行提供全方位支撑。

3.1 组织结构与管理流程的重构机制

为了适应智能化安全管理方面的需求，组织与管理体系需要开展变革行动。突破传统层级限制来构建新架构，形成扁平化且网络化的组织架构，同时打造出敏捷化的高效管理流程。鉴于传统垂直管理模式在跨部门协作以及应急响应方面存在不足的情况，应该转向矩阵式或者项目制的管理模式，积极组建跨职能的专业安全团队，并且清晰界定各层级各部门的职责

分工与协作机制。管理流程重构着重对数据与信息以及决策流程进行全面优化，通过减少审批环节和压缩决策周期的方式来提升效率，同时制定统一的工作流程和操作标准。智能化平台作为关键工具，承担着任务调度与进度监控以及绩效评价的一体化功能。岗位职责与考核机制被重新定义，以匹配智能化管理的需求来保障组织变革与管理效能同步提升，最终构建起支撑智能化发展的新型管理模式^[4]。

3.2 人才队伍与能力建设的培育机制

要为智能化安全管理奠定坚实的人力资源基础，就需要完善人才培养机制与能力建设体系。这个机制的目标是打造既具备安全管理专业素养，又拥有智能技术应用能力的复合型人才队伍。要通过构建分级分类的培训体系，针对管理层与技术人员以及操作人员等不同层级，量身定制差异化的培训课程与能力提升方案。把实践操作和课堂学习进行有机融合，借助虚拟现实技术打造模拟训练平台，让员工能在逼真情境下精准操控智能装备，并提升应急处理能力。完善人才激励和职业规划体系，通过改进薪酬结构、扩展晋升渠道以及推广专业资格认证等手段，调动员工钻研新技术和提升专业能力的积极性。坚持外部协作和内部培育双管齐下，同高校与科研单位构建人才联合培养模式来引进高端专业人才，以此增强团队的综合实力^[5]。

3.3 制度规范与标准体系的完善机制

为了保障创新机制在智能化安全管理中规范运行，需要构建完善的制度规范与标准体系。这个体系以智能化安全管理的全流程和全要素作为核心，系统地制定涵盖数据采集处理规范、智能设备运维标准、应急响应操作程序以及绩效评估考核办法等内容的管理制度，进而形成覆盖安全管理各个环节的完整制度框架。在技术标准制定方面，既要参照国际先进标准，又要结合企业实际情况与行业特点，以此确保技术规范和质量标准具备针对性和可操作性。通过建立动态更新机制，依据技术发展和管理实践的变化及时修订完善制度，保持制度的适应性和有效性。同时，把内控机制与外部监督相互结合，通过定期审查与专项检查等方式强化制度执行监督，并且建立违规处理机制，确保各项制度规范能够得到严格贯彻落实。

3.4 评估反馈与持续优化的改进机制

通过建立科学完善的评估指标体系与闭环反馈机制，推动智能化安全管理创新机制的持续完善与优化提升。该机制构建覆盖技术应用效果，管理效率提升

与安全绩效改善以及经济效益产出等维度的量化评估指标，同时纳入员工满意度、制度执行度以及协同配合度等定性评价要素，形成多元化的综合评估体系。评估实施采用定期评估与实时监测相结合的方式，运用大数据分析技术，对各项关键指标进行动态跟踪与深度分析，及时识别系统运行中的问题与薄弱环节。反馈渠道多样化构建，通过员工意见征集、专家咨询评议以及第三方专业评估等途径广泛收集改进建议与优化方案。持续改进遵循 PDCA 循环理念，建立问题识别、原因分析、改进措施制定与实施效果验证的闭环管理流程，确保创新机制在实践中不断迭代升级。学习借鉴机制积极引入行业最佳实践与先进经验，通过标杆对比与经验交流等方式，促进企业安全管理创新机制的持续优化发展。

4 结束语

智能科技赋能企业安全管理创新机制的构建是一个系统性工程，需要技术创新与管理创新深度融合。物联网技术结合智能平台的数字化监控实现从被动防护到主动预防转变，DCS 系统与 AGV 机器人驱动的动态响应机制提升突发事件处置效率，信息化 E 化系统支撑的协同决策机制破解部门协调难题，智能装车机器人与设备在线检测技术推动精准监管变革。南通海门海螺水泥有限责任公司、江苏当升材料科技有限公司以及苏州群策科技有限公司等江苏省工贸企业的实践表明，创新机制成功实施离不开组织重构、人才培养以及制度完善等保障体系的支撑。

参考文献：

- [1] 王智禧, 李彦. 安全环保 AI 智能报警系统在企业管理中的作用及应用路径 [J]. 现代企业文化, 2025(18):31-33.
- [2] 吴剑斌. 企业集团加强智能财务建设研究 [J]. 活力, 2025, 43(03):112-114.
- [3] 刘海军, 侯书林. 企业管理创新中安全管理信息化建设研究 [J]. 科技经济市场, 2025(01):113-115.
- [4] 阮敏. 智能财务创新发展研究 [J]. 财会学习, 2024(33):58-60.
- [5] 颜作标. 智能化技术在化工企业安全管理中的应用探究 [J]. 安徽化工, 2024, 50(04):91-94.

输配电网的智能化监控与故障诊断技术研究

左剑峰, 左加宁

(国网张家口供电公司, 河北 张家口 075000)

摘要 随着电网规模和复杂度的不断提高, 智能化监控与故障诊断技术在输配电网中的应用至关重要。本文探讨了基于智能传感器、无线通信、边缘计算与云平台的监控与数据处理技术, 并结合高频信号分析、电力系统状态估计、电流电压波形识别和机器学习算法, 增强了故障检测与预测能力。研究结果表明, 智能化监控与故障诊断的融合应用显著增强了电网的实时监控、故障定位、负荷优化和设备健康管理能力, 可持续保障电网的可靠性与安全性。

关键词 输配电网; 智能监控; 故障诊断; 边缘计算

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.010

0 引言

伴随电力需求的增长和电网结构的复杂化, 传统的输配电网管理方式已无法有效应对日益增加的负荷和故障风险, 因而增强电网的智能化水平, 尤其是依托先进的监控与故障诊断技术, 成为保障电网安全与高效运行的关键。智能化监控与故障诊断技术不仅限于能够实现实时监控和故障定位, 又在于依托智能分析和预测预防潜在风险, 降低故障发生的概率。依托边缘计算、大数据分析等先进技术, 能显著增强电网的响应速度和故障处理能力, 减少停运时间, 保证电网的稳定性与可靠性, 这些技术的发展对于推动电网智能化建设、保障电力供应安全具有重要意义。

1 输配电网智能化监控技术

1.1 智能传感器技术

智能传感器技术是输配电网智能化监控的核心, 通过实时采集电网运行状态数据, 为故障检测、预警和优化调度提供基础。智能传感器能够在极端环境下稳定工作, 适应-40℃至120℃的温度变化, 且具备较强的抗干扰性, 能有效应对电力系统中的电磁干扰与高频噪声。电流、电压、温度、湿度等物理量的监测, 确保了数据的全面性与准确性。电流传感器可监测100A至5 000 A的电流, 电压传感器适应10 kV至400 kV的电压范围, 智能传感器还具备自诊断功能, 能在设备故障或性能下降时发出预警信号, 与其他监测设备配合, 依托无线通信技术, 数据实时传输至云平台或本地计算终端, 支撑电网的全面监控与诊断。

1.2 无线通信与数据传输

无线通信技术在输配电网智能化监控中发挥着关键作用。低功耗广域网(LPWAN)技术, 如LoRa和NB-

IoT, 使得各类传感器能够将数据实时传输至云平台, 通信距离可达到15公里至20公里, 极大地增强了数据采集的范围与效率。LoRa技术在低速数据传输时表现优异, 传输速率可调至10~100 kbps, 满足不同传输需求, 数据传输延迟通常控制在几十毫秒内, 确保了实时性与响应速度。无线通信网络的稳定性与可靠性是电网监控系统高效运行的基础, 网络故障率保持在0.1%以下, 确保了大规模数据传输的稳定性, 为故障检测与运行优化提供支持。

1.3 边缘计算数据处理

边缘计算技术在智能化监控中的应用, 主要体现在数据处理的本地化与实时性增强。传统云计算架构需将数据传输至云端分析, 存在一定延迟, 依托边缘计算, 将数据处理与分析任务分配至接近数据源的终端设备, 增强了响应速度与处理效率, 边缘计算节点能够在本地完成信号预处理、特征提取与初步分析, 减少数据传输量并降低网络负载, 同时保证10 ms以内作出响应。例如: 在电力负荷调节中, 边缘计算能根据传感器反馈数据实时优化电网运行参数, 避免电网过载或电力波动。此类技术增强了电网的稳定性与应急响应能力, 确保了电网的高效、安全运行。

1.4 云平台与大数据分析

云平台与大数据分析为输配电网智能化监控提供了强大的数据处理与存储能力。借助云平台, 分布在不同地区的传感器数据得以统一存储与管理, 存储能力可达PB级别, 满足未来电网设备增多带来的数据存储需求。依托大数据分析, 系统能够实时评估电网运行状态, 及时识别潜在故障风险, 比如通过分析电压、电流波动及设备运行数据, 云平台可预测设备故障概

率和时间点，为电网运行人员提供有效预警。云平台还支持数据可视化，将复杂数据转化为直观图形与报告，帮助电力运维人员快速决策。大数据技术的应用，不仅限于增强了电网的管理效率，又在设备健康管理与负荷调度中发挥了重要作用。

2 输配电网故障诊断技术

2.1 高频信号分析与特征提取

在输配电网故障诊断中，高频信号分析是识别故障类型和定位的重要技术。电力设备发生故障时，电流或电压波形通常伴随高频扰动，这些高频信号可揭示故障特征，比如短路故障时，电流波形会产生高频脉冲，频率范围通常为 100 Hz 到 5 000 Hz。通过高频信号的提取和分析，能够精准区分故障类型，如接地故障、单相接地故障等，同时提高故障定位的精度。频谱分析技术是常用手段之一，借助傅里叶变换将时域信号转为频域信号，进一步识别特征频率，高频信号特征提取还依托波形变换、小波变换等算法，提供更精确的时频分布，剔除噪声，增强故障诊断的准确度，针对不同故障，一般在故障发生后的 0.1 秒内即可捕捉到高频信号变化，定位精度可达到 1 ~ 2 公里。

2.2 电力系统状态估计算法

电力系统状态估计依托实时测量数据和数学模型推算电网运行状态，为判断电网健康状态及故障风险提供依据。常见的状态估计算法包括直流潮流法、牛顿—拉夫森法 (Newton-Raphson) 与最小二乘法 (Least Square Method)。这些算法结合传感器数据、约束条件和优化目标，推算电压、功率等关键参数，常用的状态估计公式为：

$$y=f(x)+e \quad (1)$$

式 (1) 中， y 表示系统测量值， x 是电网的状态变量 (如节点电压、相角等)， $f(x)$ 为系统的非线性映射函数， e 为测量误差。依托最小化测量值和估算值之间的误差，可以精确估算电网状态，预测潜在的设备故障与风险，电压波动通常控制在 $\pm 5\%$ 的范围内，电流波动不超过 10 A，确保电网稳定运行，实时状态估计频率已提高至 1 秒级，误差控制在 0.5% 以内^[1]。

2.3 电流电压波形识别与故障隔离

电流与电压波形识别技术在输配电网故障诊断中，通过实时监测与分析电流电压波形，精准识别故障类型和位置。故障发生时，电流和电压波形出现明显变化，比如接地故障时电流波形表现为不对称波形，短路故障时电流急剧上升，通过电流电压波形的幅值、频率与相位特征，能够准确识别故障的时刻、位置与类型，

精度可达 2 ~ 3 米。波形识别技术与自动化控制系统结合，能在 0.2 秒内实现故障隔离，避免故障蔓延。此类技术增强了电网的稳定性和恢复能力，确保了电力供应的连续性。

2.4 基于机器学习的故障预测模型

伴随数据采集和计算能力的持续增强，机器学习已成为故障诊断领域的核心工具。依托电网历史故障数据、设备运行数据与环境数据，机器学习模型能够构建适应不同电网条件的故障预测模型。常见算法包括支持向量机 (SVM)、决策树 (CART)、随机森林 (Random Forest) 与深度学习 (Deep Learning)。这些模型能够分析实时数据，预测电力设备的故障概率与剩余使用寿命，比如依托监测变压器温度、振动与油压数据，能够预测设备在未来 1 ~ 2 个月内的故障风险^[2]。机器学习技术不仅限于故障预测，又在于能够优化设备维护计划，增强电网的整体运行效率与安全性，故障预测精度已达到 90% 以上，尤其在高风险设备领域，能够有效降低突发性故障的发生率。

3 智能化监控与故障诊断技术的融合应用

3.1 输配电网实时监控与故障定位

实时监控与故障定位是智能化电网运行的基础，其核心在于通过传感器、无线通信技术和数据分析平台，将电网各个环节的运行数据实时采集并传输至监控中心^[3]。具体来说，传感器对电流、电压、温度等关键参数进行 24 小时不间断采集，保证监控数据的实时性和准确性。数据通过无线通信网络快速传输至本地或云端平台，再由监控系统进行综合处理与分析，实时评估电网运行状态，检测潜在故障或异常波动。在此基础上，系统依托先进的算法进行故障定位，当电网发生故障时，能够迅速确认故障点，并引导运维人员快速到达现场进行处理。数据分析环节不仅限于支持传统的事件触发，又在于能够通过趋势分析提前发现电网设备的异常，从而实现预测性维护。故障定位的准确性和速度至关重要，要求系统能够处理海量的电网运行数据，并通过精确的算法分析定位故障发生的确切位置^[4]。

为了验证这一技术的效果，某地区的输配电网智能化改造项目引入了实时监控与故障定位系统，在发生短路或接地故障时，系统能够在几秒钟内对电流和电压异常波动进行分析，并准确定位故障发生的具体位置，此技术不仅限于电流、电压数据监测，还涵盖了温度、湿度等环境因素，进一步增强了故障诊断的全面性^[5]。当电网中的某一段发生设备损坏时，系统

通过分析传感器数据，确定故障的具体线路或设备，并及时发出预警，运维人员根据系统提供的实时数据，快速到达故障点进行处理，避免了人工巡检造成的延误与成本浪费^[6]。

3.2 智能调度与负荷优化

智能调度与负荷优化是增强电网效率和稳定性的关键技术。通过负荷预测和实时数据监控，电力调度系统能够动态调整电网的运行策略。系统通过对各个区域负荷的实时监测，结合气象数据、历史负荷数据及电网运行状态，进行负荷预测，预测结果为电力调度员提供科学依据，帮助其合理安排发电和输电计划。基于此，智能调度系统能够根据负荷需求的变化，灵活调整电网运行模式，比如在负荷高峰期间，系统通过调整变压器输出功率，平衡不同区域的负荷，避免局部过载并减少能源浪费。为确保调度高效与稳定，系统还与应急预案配合，能在突发负荷波动时迅速响应。智能调度系统的核心优势在于适应电网负荷变化，精确预测与调节，确保电力资源的合理分配与使用^[7]。

以国内某地区电力公司为例，该公司引入智能调度与负荷优化系统后，在夏季用电高峰期间，系统根据历史数据和气象条件的变化，提前预测到负荷波动，并对电网各个区域的负荷进行精细化调度，根据预测结果，系统自动调整了各个变电站的供电模式，避免了某些区域因过载而发生停电或设备损坏的风险。智能调度系统的引入不仅限于保障电力供应的稳定性，又在于增强了电力公司的应急响应能力，当突发负荷波动发生时，系统能够迅速调整配电网络，优化发电厂的输出功率和电网各分支的负荷分配，确保了电网的高效稳定运行。同时，系统为调度员提供了实时监控平台，帮助其更准确地了解电网的实时负荷状态，提高了决策效率。

3.3 故障预测与设备健康管理

故障预测与设备健康管理技术依托大数据与机器学习，能够对电网设备进行全面监测与故障预警。设备健康管理系统通过传感器采集电网设备的实时数据，如温度、电流、电压、振动等，对数据进行长期分析，通过数据挖掘识别潜在故障模式，结合历史运行数据，预测未来故障概率，提前发出风险预警。与传统的定期检修不同，基于实时状态的故障预测能够实现按需检修，避免设备故障导致的停运事故，增强设备使用寿命与运维效率。系统依托算法对比历史数据与目前运行状态，给出故障发生时间和概率，为维修决策提供科学依据^[8]。

在某电力公司的设备健康管理项目中，故障预测系统成功预测了一台变压器的故障风险。通过分析变压器的振动、温度与电流数据，系统发现其状态逐渐偏离正常范围，预测其将在两周内故障，运维人员根据预警信息进行提前检修，避免了设备故障造成的停运与损失。该技术在风力发电机组中也得到应用，通过实时数据分析，成功避免了风机的停机事故。设备健康管理系统还能根据设备状态自动调整维护周期，避免过度或延误维护，进一步增强电网设备的效率与可靠性^[9]。

4 结束语

智能化监控与故障诊断技术为输配电网提供了高效、精准的运维支持。伴随智能化技术的不断发展，输配电网的监控与故障诊断将更加精确和实时。物联网、大数据和人工智能等技术的应用将大幅增强电力系统的故障预警、实时监控与自主调度能力，尤其边缘计算与云平台的融合，将进一步优化系统效率，增强数据处理能力。未来，智能电网不仅能增强运维效率，也能增强系统灵活性和应对突发故障的能力，为电力行业的可持续发展与智能化转型提供有力支持。

参考文献：

- [1] 周儒畅,曹家君,李秋雨.配电网智能化监控与控制技术研究[J].信息与电脑(理论版),2024,36(08):40-42,46.
- [2] 陈吉洋,杜杰,汤琳.数据驱动下配电网故障诊断与快速恢复[J].城市建筑空间,2024,31(S2):381-382.
- [3] 陈晓春,胡广洋.基于人工智能的配电网故障诊断与恢复系统设计[J].电气技术与经济,2024(12):103-105,120.
- [4] 苑舒博.基于智能算法的配电网故障诊断技术分析[J].集成电路应用,2024,41(12):222-223.
- [5] 贾欢,边睿喆.配电网故障诊断与故障定位技术研究[J].光源与照明,2024(03):81-83.
- [6] 张春梅,许兴雀,刘思麟.基于多源数据融合的配电网故障诊断技术[J].上海交通大学学报,2024,58(05):739-746.
- [7] 付慧敏,郑刚.基于数字孪生的配电网智能化故障诊断方法[J].沈阳工业大学学报,2025,47(03):288-294.
- [8] 吴芳建.配电网智能化监测与控制技术研究[J].科技资讯,2025,23(09):97-99.
- [9] 刘洋.物联网技术在配电网智能化运维管理中的运用研究[J].中国新通信,2025,27(07):71-73,76.

大数据处理技术在风电机组故障诊断预警中的应用

桑逢文

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要 面对日趋严峻的碳减排形势, 为早日实现碳达峰和碳中和目标, 我国风电装机规模继续保持稳步增长。本文以大数据处理技术作为研究方向, 分析了风电机组故障诊断预警系统架构、关键技术与故障诊断方法, 并阐述了大数据处理技术在风电机组故障诊断预警领域中的应用路径, 旨在为提高诊断预警精准度和改善成果利用条件、保证故障诊断与预测精度提供借鉴。

关键词 风电机组; 故障诊断预警; 大数据处理技术

中图分类号: TP31; TM3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.011

0 引言

近年来, 我国风力发电事业得到快速发展, 大规模投入运行风电机组, 并把大数据处理技术引入风电机组故障处理领域, 由大数据平台高效处理海量信息, 精准判断故障性质, 提醒工作人员及时解决故障问题, 这对缩短故障平均持续时间、提高风电机组可靠系数起到至关重要的作用。与此同时, 风电机组在线监测与故障诊断技术对于及时了解机组的运行状态、对机组故障进行预警、有针对性地开展设备维护、减少突发性故障和提高设备利用率都具有重要的现实意义。

1 基于大数据处理技术的风电机组故障诊断预警系统

1.1 系统架构

目前, 风电机组故障诊断预警系统普遍采取分布式架构, 建立故障诊断模型、预警模型, 持续向故障模型输入状态监测数据, 同步输出故障诊断结果, 发送预警信号。模型层次架构即为系统架构, 由数据采集、数据存储、数据计算、数据分析四大核心功能模块组成, 这也是大数据处理流程。其中, 数据采集模块负责实时采集多源异构数据, 以风电机组在线监测系统和地理信息系统 (GIS) 作为主要数据来源, 采取大数据连接器技术, 抽取独立系统相关数据, 按照统一标准, 转换数据格式, 提交到分布式文件系统, 也可选择提交到分布式数据库^[1]。数据存储模块以分布式文件系统 / 数据库作为数据存储空间, 凭借高容错率与高吞吐量特征, 足以满足海量数据存储需求, 并把数据成本控制在较低水准, 也有利于提高风电机组故障

分析效率。数据计算模块依托大数据模型来完成复杂运算任务, 组合采取 Spark 内存计算、Storm 流计算等多项算法, 根据实际计算需求挑选算法, 如在数据计算任务时效性要求严格时, 采取 Storm 流计算方法。数据分析模块负责从数据计算结果内提取故障特征值, 对比故障知识库内样本案例的相似度, 判定故障性质, 在系统界面上可视化呈现故障诊断信息, 同步发送预警信号。

1.2 关键技术

新一代风电机组故障诊断预警系统以强化数据处理能力、提高故障诊断精度作为升级方向, 组合应用到多项大数据处理技术, 核心技术手段包括 Storm 集群处理、Spark 内存批处理、数据挖掘、HDFS 分布式文件系统等, 技术原理及功能定位有所不同。例如: 对于 Storm 集群处理技术, 采取集群数据处理架构, 基于大规模集群, 高效处理海量数据, 从原始数据内提取足够数量的风电机组故障特征信息, 有着不丢失数据内容、具备复杂数据处理逻辑、同步完成诸多指标计算和不同类型数据聚合任务的优点, 根据实际数据处理需求来控制节点数量^[2]。而对于 Spark 内存批处理技术, 属于一项分布式内存计算方法, 利用内存完成数据处理任务, 支持多种语言, 具备二次开发与定制化设计条件, 有利于提高在线监测数据处理效率, 在更短时间内发现故障隐患。

1.3 故障诊断方法

以朴素贝叶斯分类算法为主, 相比其他故障诊断算法, 此项算法有着易于实现、诊断效率高、准确率

高的显著优势，更加满足大规模数据分类处理需求。大数据处理技术以风电机组状态监测数据作为来源，基于数据逻辑关系，相互流动形成逻辑层面的拓扑结构，向 Spout1 组件发送状态监测数据，保存在分布式存储系统，从原始数据内提取包含故障特征参量的记录信息，再把故障特征信息提交给诊断算法进行判定。同时，自动保存故障记录，补充到故障知识库内，作为故障诊断模型和故障预警模型的学习样本。故障特征信息提取完毕后，利用朴素贝叶斯分类算法，求解各类故障问题与特征属性的条件概率，把故障诊断问题转换为故障计数问题，把条件概率相对最高的故障问题作为输出结果^[3]。

1.4 故障预警方法

提前统计风电机组故障问题，确定故障类型，以及各类故障的形成机理、变化规律及外在征兆，针对性建立多种故障预警模型，以此来保证故障预警信号的时效性、准确性。例如：面向风电机组齿轮箱轴承超温故障，可选择采取 BP 神经网络技术来建立轴温预警模型，高度逼近任意精度的非线性连续函数，模型结构由输出层、隐含层以及输出层组成。有关轴承超温故障的运行参数作为输入层神经元，包括轴承工作温度、风速值、风电机组有功功率等，并把预测前后的轴承温度故障特征作为输出层神经元，神经元相互联系，正向传播输入信号，反向传播输出误差。

2 大数据处理技术在风电机组故障诊断预警系统中的应用策略

2.1 选择故障诊断预警特征

大数据处理技术以强大数据处理能力作为核心优势，相比数据处理能力，决策分析能力并不出众，缺少详细规则的前提下，故障诊断精准度缺乏保证。对此，工作人员需要提前在系统内设定各类故障问题的特征信息，作为故障诊断规则，方可精准判定故障性质。从现实层面来看，要求工作人员全面收集整理风电机组历史数据、故障案例，以及其他同类项目的故障案例，统计分析齿轮箱、塔筒结构、传感器、发电机、叶片、液压系统等组成部件的故障结构，把出现频率相对较高、危害程度严重的失效故障作为典型故障。逐一分析各类典型故障问题形成机理与外在征兆，故障机理设定为故障诊断规则，故障征兆设定为故障预警规则，通过增强故障诊断预警机制和故障规律的关联程度，从而提高故障诊断精准度与增强故障预警信号时效性，无需大数据处理技术完成故障规律总结在内的繁琐数据处理任务^[4]。例如：对于发电机部件，典型故障问

题包括异常振动、发电机过热、绝缘损坏、转子 / 定子线圈短路、转子断条。对于齿轮箱部件，典型故障问题包括齿面擦伤、齿面接触疲劳、断齿、轴体不平衡、轴体疲劳剥落等。同时，故障诊断预警特征并不局限于部件运行参数，把电力参数、风力参数、风电机组状态参数连同其他反馈信号一同作为故障诊断预警模型的输入特征向量。

2.2 状态监测评估

风电机组故障问题具备随机性、突然性的鲜明特征，不同时刻的机组状态和故障出现概率有着显著区别，唯有把实时运行数据作为模型输入值，才能准确判定风电机组当前时刻的运行状态、健康程度和辨别故障隐患。因此，需要把状态监测系统、故障诊断系统和故障预警系统一同接入大数据平台。状态监测数据评估环节，实时采集整理风电机组监测数据，利用故障分类概率矩阵来构成分类器，把预处理完毕的监测数据导入分类器，从中计算各类故障问题的特征值，把出现概率相对最高的故障特征值作为输出结果，用于辨别风电机组当前实质存在的故障问题，同步输出故障诊断报告并发送预警信号。如果要求大数据处理技术可以提前发现早期故障征兆，在问题实质性发生前，提醒工作人员消除故障隐患，则在分类器内植入神经网络模型，把实时监测数据作为输入内容，预测后续时刻故障特征，比对警戒阀值和预测数据，推断故障问题未来变化情况，即可准确判定风电机组早期故障征兆。

2.3 模型训练

故障诊断预警是一项高度复杂的数据处理任务，同时承受准确率、时间双重压力，输出准确结果需要消耗大量时间，需短时间迅速出具故障诊断报告。故障诊断准确率和数据处理规模有着密切联系，数据规模越大，诊断结果可信程度越高，但却会降低故障诊断效率。因此，在大数据处理技术落地应用期间，需要长期组织进行模型训练，以故障案例作为训练样本，故障诊断预警模型通过不断总结完善故障规律，在输入、处理少量故障信息的前提下，即可准确判定故障性质，无需输入过大规模的故障数据。从现实层面来看，当前主要采取 RBM 自训练方法和 DBNS 训练方法。以 RBM 自训练方法为例，可视层神经元与隐含层神经元构成随即神经网络，层内神经元并未相互连接，层间保持全连接状态，向底层神经元输入原始特征向量，向上传递期间，故障特征向量变化成抽象特征向量，经过持续训练学习，更加全面、准确地掌握风电机组各类型失效故障的形成原因、变化规律。

2.4 诊断预警界面可视化设计

在早期风电机组故障诊断预警系统，诊断预警结果以二维平面格式进行输出，如数据图表、风电机组参数变化曲线，诊断预警结果不够直观，工作人员查阅图表内容后，才能初步了解故障情况，再采取应对措施，间接造成延长故障持续时间、加剧故障受损程度的后果。为增强故障处理活动时效性，应对故障诊断预警界面进行可视化设计，通过三维化、立体化形式来输出诊断预警结果。例如：建立风电机组总体模型，以及齿轮箱、叶轮、塔筒结构等核心部件的三维模型，模型上标注不同颜色来反映故障位置和受损程度。模型颜色为绿色时，表明风电机组运行工况平稳、正常，无故障隐患。模型颜色为橙色/黄色时，表明风电机组存在故障隐患，或是存在不影响机组运行工况的故障问题，短时发送预警信号，择机开展维修作业来消除故障。模型颜色为红色时，表明风电机组存在重大故障问题，危及机组运行安全，或导致机组停机，持续发送预警信号，直至故障问题得到解决，结束故障预警任务，取消预警信号^[5]。

2.5 丰富系统功能

现阶段，大数据处理技术功能效用并未得到充分发挥，应用场景单一，风电机组故障诊断预警系统仅实现故障辨别、故障诊断、故障预警等少数几项功能，未能全面展示风电机组实时运行状况，也没有深入挖掘更深层次的故障信息。相比传统故障诊断预警方法，对大数据处理技术的应用，虽然在一定程度上提高故障诊断精度、缩短故障持续时间，但总体故障处理能力的提升幅度没有达到预期水准。对此，应把丰富系统功能作为技术价值深入挖掘方向，结合故障处理需求，增设其他使用功能。从实操角度来看，可选择增设寿命预测、性能下降预警、自适应报警等功能，重点发挥系统强大数据处理能力。对于寿命预测功能，建立寿命模型，以风电机组核心部件的平均故障时间、平均失效时间、故障率作为指标，定期评价风电机组健康程度，预测剩余使用寿命。对于性能下降预警功能，不再以故障是否存在作为评价风电机组安全系数的唯一标准，确定风电机组运行参数在短时间内剧烈震荡后，同样判定机组工况不稳，发送预警信号。对于自适应报警功能，重点分析风电机组在不同运行工况下的故障特征，不再按照工作人员先期设定规则来诊断故障问题，而是考虑到风电机组运行条件与故障问题的内在规律，自行生成故障判定阈值，定时重新设定全新判定值，覆盖历史判定值，以此来解决误报警问题。

2.6 建立故障知识库与专家系统

利用大数据处理技术，收集、整理和分析大量风电机组故障数据，建立完善的故障知识库。该知识库不仅包含各类故障的特征、机理、征兆等信息，还应记录故障的处理过程和解决方案。同时，结合机器学习算法，对知识库中的数据进行挖掘和学习，不断更新和完善知识内容。

基于故障知识库，构建专家系统。专家系统可以模拟领域专家的思维方式，根据实时监测数据和故障特征，快速准确地诊断故障，并提供相应的维修建议和解决方案。例如：当系统检测到发电机过热故障时，专家系统可以根据知识库中的相关信息，分析故障原因，如冷却系统故障、负载过大等，并给出具体的检修步骤和注意事项。此外，专家系统还可以与运维人员进行交互，解答他们在故障处理过程中遇到的问题，为风电机组的维护提供有力的技术支持。通过建立故障知识库与专家系统，能够充分利用大数据处理技术的优势，提高风电机组故障诊断预警系统的智能化水平和故障处理能力。

3 结束语

大数据处理技术为风电机组故障诊断预警系统指明了升级方向，有助于进一步强化故障处理能力，更长时间维持风电机组良好运行工况。工作人员必须加强对大数据处理技术的应用力度，基于故障处理实际需求，着手建设新一代风电机组故障诊断预警系统，落实设定故障诊断预警特征、状态监测评估、模型训练等策略，从而对机组设备进行异动检测，实现运维辅助决策功能。

参考文献：

- [1] 赵龙. 大数据处理技术在风电机组故障诊断预警中的应用 [J]. 电子技术, 2024,53(09):112-113.
- [2] 张少敏, 毛冬, 王保义. 大数据处理技术在风电机组齿轮箱故障诊断与预警中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2016,40(14):129-134.
- [3] 郑天甫. 数据处理技术在风电机组故障诊断及预警中的应用研究 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2022,35(01): 15-17,26.
- [4] 吉庆昌, 邱英杰, 阴兆武, 等. 大数据处理技术在风电机组故障诊断及预警中的应用 [J]. 中小企业管理与科技 (中旬刊), 2021(10):179-181.
- [5] 申云乔, 江政儒, 叶新红. 大数据技术在风电机组运行状态评估及故障诊断中的应用分析 [J]. 电工技术, 2023 (20):38-40,44.

基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统设计与优化

许君

(四川省应急救援总队, 四川 成都 610000)

摘要 针对传统应急调度在复杂灾害场景中存在的态势感知不全面以及资源错配等难题, 基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统展开设计与优化研究。研究明确了系统“平战结合”与“高可用性”的设计原则, 并提出了一种包含全景感知、弹性网络、智能平台与智慧应用的总体架构。阐述了综合态势感知、应急资源管理、智能调度决策与“训战一体”四大核心功能模块的设计方案, 重点分析了实现系统效能跃迁的优化策略。研究结果显示, 此设计方案以及优化路径可有效地解决“信息孤岛”和“训战脱节”这两个问题, 提高指挥决策的科学性和时效性。

关键词 大数据; 物联网; 应急救援; 智能调度

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.012

0 引言

当前, 我国应急管理体系正加快向“全灾种、大应急”框架转型。传统应急调度模式过度依赖既有预案和指挥经验, 在应对突发性强、不确定性高的复杂灾害场景时, “感知盲区”和“信息孤岛”等局限性日益凸显。为破解这一难题, 以大数据、物联网为代表的新一代信息技术从辅助工具转变为驱动应急能力变革的核心动力。推动数字化转型, 把“数据驱动”贯穿态势研判、决策辅助和力量调度全过程, 是实现应急指挥现代化的关键路径。

1 基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统设计原则

1.1 全要素融合与统一指挥原则

系统设计需要突破“信息孤岛”以及“感知盲区”的限制, 达成对救援力量、装备物资、灾害环境、社会数据等多种来源且结构不同的信息进行全面要素的汇聚以及深度融合的目标。这要求系统建立统一的数据标准和接口规范, 形成“一张图”的全局态势, 为实现跨部门、跨层级、跨区域的“扁平化”统一指挥调度提供唯一的数据底座和决策支持, 从根本上解决力量统筹不一和多头调动的问题。

1.2 业务驱动与实战导向原则

业务驱动以及实战导向的原则着重突出了系统所有的实用性以及其根本目的, 系统设计并非简单的技

术堆砌, 而是需要与应急救援的核心业务逻辑紧密相连, 并且以“指挥+实战”的职能定位作为导向。无论是物联网的感知点部署, 还是大数据的分析模型, 都应聚焦“全灾种、大应急”的实战需求, 如矿山排水、危化处置、地震洪涝等具体场景。系统功能必须贯穿“平战结合”全流程, 既能支撑战时指挥, 也能服务于平时的“数字作训”与复盘, 确保技术与实战深度耦合^[1]。

1.3 高可用性与可扩展性原则

应急调度系统对于生命财产安全有着非常关键的意义, 其要拥有电信级别的稳定性以及高可用性, 在设计方面应当采用分布式架构、冗余备份以及容灾机制, 以此来保证在如“三断”等极为恶劣的环境当中核心功能可持续运行。同时, 系统必须具备良好的可扩展性, 能够灵活应对未来新增的灾种、装备和数据类型, 支持省级救援体系向“市—县”延伸, 满足总队“五年创一流”的动态发展规划。

2 基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统设计方案

2.1 系统总体架构

1. 全景感知层。全景感知层作为系统的关键组成部分, 犹如系统的“五官”一般, 承担着数据采集的关键职责, 该层借助物联网技术, 希望能够把救援现场涉及的“人、机、物、环”等所有要素都实现数字化^[2]。这不仅包括利用多参数气体检测仪、水位计等获取环境数据, 更关键的是为特种车辆安装GPS/北斗和工况

传感器,为救援人员配备智能头盔、生命体征监测设备,实现对救援力量的实时状态感知。

2. 弹性网络层。应急现场特别是地震、地质灾害易发“三断”极端情况。因此,网络层设计必须具备高韧性,融合 5G 公网、卫星通信以及现场自组网技术,需要构建一个“公专结合、多路备份”的弹性通信链路,确保指挥指令和现场数据“不断线”^[3]。

3. 智能平台层。智能平台层负责数据处理。此层是“大数据”价值的核心,需包含三大组件,数据中台负责对感知层汇聚的多源异构数据进行清洗、融合与治理,破解“信息孤岛”; GIS 平台建立统一的地理信息底座,承载所有资源和灾情信息,是实现“一张图”指挥的基础; 利用 AI 算法引擎驱动态势研判、风险预测和调度优化模型,是实现“智能化”的关键。

2.2 核心功能模块设计

1. 综合态势感知模块。综合态势感知模块可深度整合地理信息系统(GIS)与物联网(IoT)技术,借助于安置在灾害现场的环境传感器、特种车辆的工况遥测装置以及救援单兵所佩戴的智能穿戴设备,实现对“人、机、物、环”全部要素的实时动态数据采集。所有感知数据被汇聚并精准投射到“一张图”指挥界面上,使指挥中心能够直观掌握灾害演化趋势、救援力量实时位置与状态以及次生灾害风险分布。

2. 应急资源管理模块。应急资源管理模块可解决传统模式下存在的“力量统筹”难题,这一难题是由于底数不清楚、状态不明确所导致的。它通过对总队直属力量、下辖专业救援队伍乃至已纳管的社会应急力量进行全生命周期数字化管理。系统详细建档并动态更新各类资源,小到单兵装备、专家资质,大到特种车辆的实时位置、技术参数及维保状态^[4]。

3. 智能调度决策模块。在接收到灾情信息之时,系统会率先自动对灾害类型以及等级展开研判,从知识库里智能匹配对应的标准处置预案,随后它会调用资源管理模块的数据,依据预设的优化算法模型全面考量装备性能、队伍资质、实时路况以及次生灾害风险,自动生成最佳的资源组合以及行进路径。系统同时支持“多方案”推演与“沙盘”模拟,为指挥员“会商研判”提供量化支撑,确保每一次调度都基于数据驱动的科学计算,实现从“被动响应”向“主动预见”的转变。

4. 训战一体与复盘模块。训战一体以及复盘模块所有的核心价值体现在借助大数据方面的能力,将实战与训练之间的数据壁垒打通,构建一个可持续进行迭代优化的知识闭环。该系统会自动对每一次实战救援以及演练的全流程数据进行归档,这些数据覆盖了人员

轨迹、装备调用、指令下达以及通信记录等方面。例如:实战后,指挥员可通过“数字化复盘”功能,全景回放救援过程,量化分析决策得失,将感性经验提炼为标准战法。在平时,这些积累的海量实战数据则成为“数字作训”的宝贵素材,支撑开展“无预案盲演”和极限条件下的桌面推演,让训练最大限度贴近实战,锤炼指挥员的应急处置能力,实现救援效能的螺旋式上升。

3 基于大数据与物联网的应急救援智能调度系统优化路径

3.1 基于动态数据画像的救援资源精准建模

动态数据画像精准建模的核心要点在于把资源从以往的“静态登记”状态转变为“动态描摹”状态。该画像必须融合多维数据:物联网传感器回传的实时工况,后勤系统中的维保记录,以及北斗/GPS 的在途位置。更为关键的是,画像必须吸纳“训战一体模块”的复盘数据,为装备标注“实战效能标签”,如此,算法所进行调度的对象不再是抽象意义上的一类装备了,而是其战力可被精确计算出来的“个体”^[5]。

以“矿山透水”事故救援为例,调度系统优化的首要任务是匹配排水装备。系统在平时就需为每一台关键装备(如大流量排水车)建立数据档案。以“排水车 A”为例,其动态画像的建模过程如下:档案首先录入其静态出厂参数,这对应了材料中提及的“装备老旧”背景。随后,物联网模块持续为其“画像”注入实时数据:车载北斗回传的精确位置、发动机与水泵传感器的实时工况、剩余油料。后勤维保系统则会同步更新其“战备状态”,标明“待命”“维保中”或“故障”。画像建模的关键一步在于融合“训战一体模块”的效能数据。

系统记录“排水车 A”在最近一次演练中的表现:由“张三”班组操作,实际部署耗时 30 分钟,峰值排量 $2\ 700\ m^3/h$ (低于额定值)。同时,另一台“排水车 B”的演练数据显示,其部署耗时 15 分钟,峰值排量 $4\ 000\ m^3/h$ 。当真实事故发生,灾情研判需 $5\ 000\ m^3/h$ 的总排量时,传统系统可能因“纸面参数”($3\ 000+4\ 000$)而只调度 A 和 B。但基于动态画像的优化算法会立刻计算出 A+B 的“真实战力”($2\ 700+4\ 000$),并判定其组合可行。若此时“排水车 A”的 IoT 传感器显示“故障”,即状态为“不可用”,算法会自动跳过该车,不会将其纳入调度方案,避免“无效调度”这一致命错误。

3.2 面向多目标约束优化问题的算法融合

传统调度逻辑常以“时间最短”或“距离最近”为单一目标,这种线性思维在应对“全灾种、大应急”

的复杂需求时，决策缺陷明显。系统算法必须融合这些相互冲突的目标，计算并提供一个“帕累托最优解集”，而非一个单一的、武断的“最佳答案”。这种设计使指挥员的决策从“依赖经验”转变为在多套科学计算的备选方案中进行“会商研判”，真正体现了“指挥+实战”的科学性。

假设某地发生强烈地震，参考“9·5”泸定地震场景，系统在短时间内接收到两个高优先级灾情：事故点A发生建筑垮塌，急需重型破拆与搜救力量；事故点B为某工厂发生“危化品”泄漏。同时，GIS数据显示多条道路受损，存在“三断”风险。系统“一本帐”中有两支队伍可用：队伍1（综合救援队，装备重型破拆，距A点60分钟，距B点40分钟）；队伍2（危化专业队，装备轻型，距A点80分钟，距B点70分钟）。一个单目标“时间最短”的算法会立刻做出错误指派：{队伍1→B(40分钟)，队伍2→A(80分钟)}。这导致专业完全错配。MCOP算法则会同时计算三个目标函数：Min(T)（总响应时间）、Max(E)（专业效能匹配度）、Min(R)（GIS路网风险系数）。算法会生成一个解集，并向指挥中心呈现两种可行的帕累托最优方案：方案一（时间优先）：{队伍1→A(60分钟)，队伍2→B(70分钟)}。方案二（效能优先）：{队伍1→A，队伍2→B}（即使路程更远，但专业匹配度最高）。指挥员在“会商研判”界面能清晰看到，方案一虽然总耗时130分钟，但其“专业效能匹配度”为100%，远高于那个“时间最短”的错误指派。MCOP算法的融合，确保了系统能正确处理这种“A队适合A点，B队适合B点”的复杂指派，从根源上避免了“多头调动”和资源错配。

3.3 基于“数字作训”的调度模型闭环自优化

应急调度优化的理想状态是系统具备“自学习”和“自适应”能力。即便采用多目标算法，决策精准度仍依赖于模型参数的初始设定。这些参数通常基于静态评估无法反映实战能力的动态变化^[6]。本策略的核心在于将“训战一体模块”从一个单纯的“训练工具”转变为一个核心的“数据验证器”与“模型校准器”。每一次“数字作训”或“无预案盲演”不再仅仅是锤炼人员，更是对调度算法的一次实战压力测试^[7]。

以总队规划设定的“五年创一流”作为目标，系统要想实现迭代，可以系统开展一次面向“综合救援支队”的“无预案盲演”活动。算法预测：基于“动态画像”（策略一），系统显示“A班组”（经验丰富）与“B班组”（新员较多）的战力相近，MCOP算法（策略二）预测两者抵达模拟灾害点A的耗时均为30分钟。演练执行：

“训战一体模块”启动推演。真实数据采集：“复盘模块”精确记录到：“A班组”遭遇模拟的“三断”极端情况，实际耗时45分钟；“B班组”则因携带了新型单兵图传设备，绕开了模拟的阻断，实际耗时32分钟。闭环自优化：演练结束后，系统自动生成“预测—现实”误差报告（A班组：-15分钟，B班组：-2分钟）。该误差数据集被送入AI引擎。强化学习模型会分析这个结果，并调整其内部权重：它“学到”了“A班组”在“三断”下的权重应被调低，而“B班组”持有的“新型图传设备”这一画像标签的权重应被调高。模型迭代：在下一次的实战或演练中，当系统再次面临相似的“三断”场景，其算法模型已非初始模型。它会给“A班组”赋予一个更符合现实的42分钟预测，并优先调度“B班组”执行关键任务。这样，每一次“数字作训”都使调度模型本身更接近实战，实现了系统级的“训战一体”。

4 结语

应急救援指挥体系正经历着一场从经验驱动向数据驱动的深刻范式变革。本文所研究的智能调度系统的设计以及优化工作，其核心价值并非仅仅局限于借助技术力量实现精准指挥以及资源的优化配置，更在于打造了一个拥有自我演进能力的指挥决策闭环。这标志着应急系统正从静态的信息化工具向具备动态学习能力的“智能体”方向发展。然而，技术的深度应用与实战效能的转化仍面临挑战。未来研究应超越系统功能本身，探索如何将智能韧性全面融入“省—市—县”三级应急体系的实战化建设，构建高效、协同、智慧的现代化应急救援生态。

参考文献：

- [1] 乔聪聪,郑维博,何正文,等.资源波动下突发公共应急救援鲁棒性调度优化[J].系统工程,2024(05):15-25.
- [2] 同[1].
- [3] 齐玉峰,贺晓.基于深度学习的动态优先级任务调度算法[J].计算机系统应用,2023,32(07):195-201.
- [4] 叶甜春,赵德均,钱洪伟.基于大数据与物联网视角的应急资源共享平台设计探索简[J].安全,2018,39(12):26-30.
- [5] 赵金龙,袁杰,赵荣华,等.危化品公路泄漏多主体应急协同调度系统[J].中国安全科学学报,2020,30(08):116-121.
- [6] 同[2].
- [7] 张玲.基于物联网技术的应急救援装备使用管理系统研究[J].中国应急救援,2021(06):49-53.

智慧水利背景下水利水电工程远程监测与调度技术应用研究

刘晓凤

(安徽省蚌埠闸工程管理处, 安徽 蚌埠 233000)

摘要 随着智慧水利的不断发展, 水利水电工程的远程监测与调度技术日益受到重视。本研究通过对智慧水利背景下水利水电工程的监测需求和技术现状进行分析, 探讨了远程监测与调度技术的关键应用。研究方法主要包括数据收集、系统分析和模型仿真, 以确保技术应用的有效性和实用性。通过实际案例分析表明, 运用现代传感器技术、物联网和大数据分析等技术, 能够实现对水库、水电站等水利设施的实时数据监控和智能化管理。结果显示, 远程监测技术能有效提升水电站运行的安全性和经济性, 调度技术则有助于优化资源配置和提高应急响应能力。

关键词 智慧水利; 远程监测; 调度技术; 水电工程; 实时数据监控

中图分类号: TV5; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.013

0 引言

传统水利管理依赖人工与简单机械, 效率低下且反应迟缓, 智慧水利成为水利水电工程管理改革的核心方向。物联网、大数据、人工智能等先进技术的融入, 显著提升了监测数据的精准度与调度效率, 增强了应急处理能力, 优化了资源分配。现代传感器与数据技术在实际应用中的显著成效, 大幅提高了水利设施的管理质量与运行效率^[1]。本研究旨在为水利水电行业的技术进步与管理优化提供实践参考, 以期推动水资源可持续利用与管理方式的现代化转型, 助力行业迈向高效、智能的新阶段。

1 智慧水利的概念和技术发展

1.1 智慧水利定义与组成

智慧水利是传统水利与现代信息技术深度融合的革新体系, 借助数字化、智能化技术实现水资源的高能管理和灵活调控。智慧水利包括自水资源的监测、分析、规划、调度的全面体系化管理, 目标是提升水资源管理水平, 改善运用效率, 并加强针对极端天气和灾害的响应能力。智慧水利体系的组成包括依托先进技术的硬件设备、信息处理软件以及综合管理平台^[2]。硬件设备方面重点包含现代传感器、无线通信设备及自动化控制系统。软件则融合地理信息系统(GIS)、数据分析模型、智能算法。综合管理平台辅助即时信息聚集、监督、分析和判断。其核心技术包括物联网、

大数据、云计算和人工智能等新兴技术, 为水资源实时监测、智能调度、安全预警以及水利工程的运行维护提供技术保障。智慧水利在实现水资源优化配置、面对自然灾害响应能力及提高国家水安全管理方面发挥了重要作用, 是水利水电工程领域的未来发展方向。

1.2 技术的发展与趋势

智慧水利技术的发展, 实现了从传统监测管理向智能化、数字化的跨越。早期水利管理依赖人工巡检与机械监测, 数据记录与分析流程低效, 实时性与精准度不足。随着通信与计算机技术发展, 远程传输监控系统应运而生, 实现了基础数据自动化采集。物联网、云计算、边缘计算及人工智能的技术融合, 进一步推动了水利系统升级: 高精度传感器与无线通信技术实现设备状态与环境参数的全面监测, 大数据分析与智能预测算法提升了数据处理效率与决策支持能力^[3]。当前, 监测技术向智能化、集成化发展, 系统稳定性与扩展性备受关注。低功耗传感器、分布式计算及多尺度水文模型广泛应用, 为水利设施安全、经济与高效运行提供了强大的技术支撑。

1.3 智慧水利的全球实践

国外利用无人机设备和物联网系统, 对水资源进行精确监测和管理, 降低了洪水可能带来的各种风险。日本研究并设计出智能水坝控制系统, 让水库运行变得更加高效, 同时缓解洪水和干旱等自然灾害带来的

影响。澳大利亚依靠大数据分析来优化水资源的分配能力。非洲部分国家开始试验智慧灌溉的方法，使用传感器设备来改进农业用水的效率。这些实践促进了智慧水利技术的不断革新和持续发展，也为全世界水资源管理积累了宝贵经验。

2 远程监测技术在水利水电工程中的应用

2.1 监测内容与关键指标

水利水电工程远端监测的核心在于精准掌握关键内容与指标，涵盖水库、水电站及流域设施的运行状态与环境变化。重点监测水位、流量、蓄水量及溢流状况等水文数据，机组转速、电压、电流、功率等设备参数，以及雨量、地质位移、气象条件等灾害预警信息^[4]。关键指标需满足工程实际需求与技术标准，支持大范围数据快速采集与深度分析。例如：水位监测需达毫米级精度，流量监测需高频次、多位置采样，水质监测需关注溶解氧、浊度、pH值及污染物浓度。通过科学定义监测内容与指标，可提升工程全过程管理与运行效率，为资源调配、危机管理及资产优化提供决策依据。

2.2 系统配置与技术需求

远程监测系统配置需适应复杂环境与多样化目标，构建高效、可靠的监测体系。系统设计应兼顾水库、水电站等设施特性及数据实时性、精确性要求，重点部署传感器网络与数据传输模块。传感器需具备高精度、低能耗特性，支持无线传输与远程控制，实现设备协同监测。数据处理单元需依托云计算与边缘计算技术，整合动态监测数据，提升监测效能。系统需适配多协议整合，采用公开接口标准，实现与信息管理平台无缝对接。同时，需强化抗干扰能力与安全性，确保数据传输稳定与机密性，为远程监测与调度技术普及奠定基础。

2.3 监测数据的应用与价值

监测数据的作用涵盖了水利水电工程运行状况的评估、设备故障的提前预测以及日常的维护工作，还有对调度计划的不断完善等多个领域。通过分析研究水位高低、流量大小、设备运行状态等关键监测数据，能够在调整库区水量时确保水资源分配的合理性，同时还能提高水电站的运行效率，降低能源的不必要损耗。监测数据的重要价值体现在可以预警灾害并采取预防措施，保护人民群众的生命和财产安全，确保区域供水系统稳定安全，提供核心的决策支持。长期收集监测数据还能用来研究生态环境的变化情况，做好

资源的管理工作，为社会发展提供坚实的支撑。

3 调度技术在水利水电工程中的应用

3.1 调度系统的设计与实现

在水利水电工程中，调度系统设计是远距离监测与调度的核心。设计时需考虑水资源利用、设备运转及应急处理能力。系统架构融合分布式计算与云平台技术，实现跨区域信息互通。依靠信息技术，搭建高性能硬件与软件配合环境，于水库、水电站等关键地点布置远距离末端设备，完成信息采集传输^[5]。通过构造动态分析模型，改进流域资源调配，提高调度效益。系统设计需平衡高性能与简便性，规划用户界面与功能模块，借助智能化算法减少人工负担，增强判断合理性，为水利水电工程运行效率与安全提供技术保障。

3.2 资源优化与管理

资源优化是水利水电工程调度的核心，直接影响工程效率与资源利用率。在智慧水利背景下，需通过物联网与大数据技术实现精细化资源管理。系统整合水资源需求、发电能力、生态保护等数据，构建多维优化模型，分析资源时空分布特征，制定科学分配方案。自动化调度系统借助先进的人工智能算法，能够根据实时数据动态调整发电计划，精准优化水能利用比例，有效降低运行成本，并显著提升能源转化效率，实现经济效益的最大化。同时，应急调度系统通过构建快速反馈机制，确保在极端环境下能够迅速、合理地分配资源，增强系统的稳定性与安全性。这一技术体系不仅满足了水利水电工程对经济性的严格要求，还积极促进了水资源的可持续利用与生态平衡。通过智能化、精细化的管理手段，实现了工程运行效率与环境保护的双重提升，为水利水电行业的长远发展奠定了坚实的基础，推动了行业向更加绿色、高效的方向迈进。

3.3 应急响应与灾害预防

应急响应与灾害预防在水利水电工程调度中占据关键地位。智能化调度系统凭借其实时监控能力，能够精准捕捉洪水、地质灾害等风险信号，依托先进的数据分析与预测模型，迅速提出科学合理的应对方案，确保水库放水与供水操作的高度可靠性。结合物联网与传感器技术，系统能够实时收集并分析数据，一旦发现异常立即发布警报，为管理部门提供宝贵的决策时间。

在灾害发生时，调度技术通过模拟计算，精确优化资源分配，制定出最优的行动方案，以最大限度减少灾害损失，保障工程安全及周边区域的稳定。这一

技术不仅显著强化了水利水电工程的抗灾能力，还推动了水电工程的长期稳定运行，为社会的和谐稳定提供了坚实的保障。未来，随着技术的不断进步，应急响应与灾害预防系统将更加完善，为水利水电工程的安全运行保驾护航。

4 技术融合传感器技术、物联网与大数据分析

4.1 现代传感器技术在水利监测中的应用

现代传感器技术是水利监测工作的核心工具，广泛应用于水库、水电站等水利设施的监测中。其种类多样，包括水位传感器、流量传感器、气象传感器及压力传感器等，能精准捕捉环境参数变化，为监测系统提供可靠的数据支持。水位传感器实时监测水位变动，为防洪调度提供科学依据；流量传感器监控水电站进出水量，优化发电效率与水资源分配；气象传感器收集温湿度、降雨量信息，提前预警异常天气；压力传感器则检测堤坝结构安全，及时发出结构不稳警报。这些传感器的应用，显著提升了数据采集的精确性与效率，结合远距离监控与智能管理系统，有效保障了水利工程的安全运行与日常调度，推动了智慧水利事业的持续发展。

4.2 物联网技术的集成与优势

物联网技术已成为智慧水利的核心支撑，通过多元应用显著提升了水利水电工程的监控与调度效能。该技术实现了设备间的互联互通，使传感器、数据采集设备与监控系统协同运作，构建覆盖广泛、多层次联动的监控网络。借助低能耗广域网（LPWAN）技术，物联网系统突破了传统监控网络在偏远地区的覆盖局限，确保了数据传输的稳定与高效。同时，物联网支持远程设备操控与故障检测，降低了人工维护成本，优化了设备运行性能。在数据处理上，物联网系统能整合多监测点数据，并与云计算平台融合，实现大规模数据的存储与快速计算。此外，物联网与预测模型的结合，进一步提升了水资源分配与风险评估的精准度，为水利工程的智能化管理提供了坚实的技术保障。

4.3 大数据分析在决策支持中的角色

大数据分析对水利水电工程的决策支持起到非常关键的作用。通过快速收集和处理监测数据，建立科学模型来详细预测水文变化情况，为制定调度方案提供科学合理的参考。使用数据挖掘技术，可以发现系统运行中隐藏的风险问题，并对资源分配进行合理优化。大数据分析还能结合过去的历史数据和当前的实时监测信息，来提高处理灾害时的准确性和整体管理

效果，为建设智慧水利体系带来强有力的技术支持。

通过虚拟案例数据，量化技术融合传感器技术、物联网与大数据分析实施效果，涵盖水库水位监测、水电站发电调度、流域资源管理及灾害预警四大场景，展示水位精度提升、发电效率优化、资源调配效率及灾害预警准确率等关键指标（见表 1）。

表 1 技术融合应用案例数据表

案例名称	技术应用	实施效果	数据指标提升
水库 A 监测	现代传感器+物联网技术	实现水位、流量实时监控，提高防洪能力	水位监测精度提升至 ±1 mm，响应时间缩短 50%
水电站 B 调度	物联网+大数据分析	优化发电计划，提高能源利用效率	年发电量增加 8%，运行成本降低 12%
流域 C 管理	物联网+云计算平台	实现多站点数据整合，提升资源分配合理性	资源调配效率提升 30%，应急响应速度加快 40%
灾害预警 D	传感器+AI 预测模型	提前预警洪水风险，减少灾害损失	灾害预警准确率达 92%，经济损失减少 25%

5 结语

通过数据收集、系统分析与模型仿真等方法，证实了现代传感器、物联网及大数据技术的实用价值，有效提升了水利水电工程运行可靠性与经济效益，优化了资源分配与应急响应。然而，技术深度融合仍面临数据整合管理复杂、系统稳定性及环境适应性等挑战。未来，需聚焦高性能数据管理算法开发、系统防干扰与故障自检能力强化，以及灾害预警、应急管理等多元场景应用拓展。这将显著提升水利水电工程管理水平，推动智慧水利技术持续优化，为行业长远发展提供坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 宋清武. 水利水电工程防渗技术 [J]. 中文科技期刊数据库（引文版）工程技术, 2022(02):132-135.
- [2] 齐冬莲. 水利水电工程除险技术 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(15):1599.
- [3] 何彬彬. 水利水电工程基础处理技术 [J]. 电子乐园, 2021(09):63.
- [4] 吕兆杰. 水利水电工程英语的翻译策略: 评《水利水电工程英语》 [J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(06):149-150.
- [5] 徐磊, 张继勋. 智慧化背景下水利水电工程专业培养方案优化 [J]. 教育教学论坛, 2021(19):26-29.

格构结构在地震滑坡治理中的应用

杨 健

(四川省第十一地质大队, 四川 达州 635000)

摘要 锚杆格构与护脚墙是滑坡治理中广泛应用的工程措施。在特定技术手段的优化下, 可拓展应用于高烈度地震诱发的松散堆积层滑坡治理。本研究以泸定“9·5”地震后神龙宾馆滑坡为例, 通过采用无水跟管钻进、孔底返浆注浆及高强度锚杆体系等特定技术手段, 验证了该技术在复杂地质条件与高陡边坡环境中的可行性与有效性, 以期为类似高烈度地震区滑坡治理工程提供可借鉴的治理方案。

关键词 泸定地震; 滑坡治理; 格构结构; 锚杆

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.014

0 引言

在泸定地震发生后, 区域地质环境发生较大变化, 部分边坡失稳。为保障人民生命财产安全与基础设施正常运行, 格构结构作为一种兼具力学支撑与生态兼容性的工程技术手段, 因其结构形式灵活、适应性强、施工可控性高等特点, 被广泛应用于地震引起的滑坡治理中^[1]。该技术通过钢筋混凝土格构梁形成空间受力体系, 有效约束坡面岩土体位移, 同时为后续生态恢复提供载体。近年来, 随着材料性能提升、施工工艺优化及监测技术融合, 格构结构的精细化、标准化施工水平不断提高。

1 工程概况

2022年9月5日, 四川省甘孜州泸定县发生6.8级强烈地震, 震中位于磨西镇附近。此次地震不仅造成了严重的人员伤亡和财产损失, 更在区域范围内诱发了大量次生地质灾害。位于磨西镇大杉树村海螺沟大道神龙宾馆后方的斜坡体, 在地震动荷载及区域地质环境的共同作用下, 发生了显著的变形破坏, 形成了三处较大规模的坍滑体, 直接威胁到神龙宾馆至一溪云民宿酒店等8户共440人的生命财产安全, 并掩埋了坡脚机耕道。经勘查认定, 该滑坡体规模约4.14万立方米, 属小型滑坡, 但在暴雨及余震等不利工况下稳定性极差, 亟需进行工程治理。面对紧迫的工期、复杂的地质条件(主要为冰水堆积漂卵石土)和高烈度的地震设防要求(0.4 g), 项目最终确定采用“锚杆格构+护脚墙”的综合治理方案。

2 工程概况与治理方案设计

2.1 滑坡基本特征

该滑坡位于磨西台地东侧边缘, 地貌上呈典型的上陡下缓形态, 上部坡度高达77°, 下部约30°。为

清晰反映滑坡结构特征, 选取代表性剖面进行说明: 剖面全长约65 m, 高差约32 m, 滑体前缘已掩埋坡脚机耕道, 后缘发育拉张裂隙, 最大垂直错距达0.8 m, 整体呈牵引式浅层滑移特征。滑坡物质主要为第四系上更新统冰水堆积漂卵石土, 粒径以20~150 mm为主, 漂石含量约40%~50%, 结构松散至中密, 局部具弱胶结。滑动面埋深2.5~4.5 m, 位于土体与下伏基岩接触带, 受地震动及雨水入渗影响, 界面抗剪强度显著降低, 形成潜在滑移通道。滑坡的形成是多种因素耦合作用的结果: (1) 地形地貌, 台地边缘形成高陡临空面, 为滑坡提供了充分的卸荷空间; (2) 地层岩性, 冰水堆积层孔隙大、渗透性强, 遇水后力学强度急剧下降; (3) 地震触发, 2022年泸定6.8级地震产生的水平加速度(0.4 g)直接破坏了土体原有的弱胶结结构, 诱发失稳; (4) 水的作用, 区域年均降雨量超1 000 mm, 地表水沿裂隙入渗软化滑带, 进一步降低抗滑力, 是滑坡持续变形的重要内因。

2.2 格构设计内容及格构处置方案合理性

本工程格构结构采用C25钢筋混凝土现浇梁, 纵横间距为3.0×4.0 m, 梁截面尺寸为0.5×0.3 m, 主筋为HRB400级Φ16, 箍筋为Φ8@200。格构梁与不同长度(4.5~18 m)的Φ32螺纹钢锚杆刚性连接, 形成空间受力骨架。设计充分考虑了地震动荷载(0.4 g)、松散漂卵石土层低粘聚力及高渗透性等特点, 通过锚杆将坡面荷载传递至深部稳定地层, 格构梁则有效约束表层土体变形, 防止局部坍塌扩展。该方案的合理性体现在以下几个方面: 一是结构适应性。格构梁柔性布置可顺应高陡边坡地形, 避免大开挖扰动; 二是抗震协同性。锚杆不施加预应力, 允许一定变形以耗散地震能量, 避免刚性结构在强震下脆性破坏; 三是

施工可控性。结合脚手架平台系统,可在 77° 陡坡上实现精准钻孔与混凝土浇筑。相较于抗滑桩或挡墙等方案,本设计土方扰动小、工期短、对下方道路及建筑影响低,契合应急抢险“快、稳、省”的核心要求,技术经济综合效益显著。

3 格构结构施工关键技术

3.1 高陡边坡钻孔技术

1. 钻孔设备与工艺选择。针对神龙宾馆滑坡体 77° 高陡边坡及第四系冰水堆积漂卵石土层结构松散、孔隙大、易塌孔的地质特点,施工采用风动凿岩无水跟管钻进工艺^[2]。根据 $\Phi 110$ 的设计孔径,钻具选用了 $\Phi 115$ 的扩孔环和中心钻配套使用,运用 $\Phi 108$ 无缝钢管作为跟进套管,实现钻进与护壁同步进行。严禁采用水钻或冲洗冷却方式,避免水流软化土体、诱发孔壁失稳。

2. 钻机定位与参数控制。钻机通过双排钢管脚手架平台进行稳固安装,平台满铺架板并设置防滑挡脚板。钻机就位后,使用地质罗盘校核钻杆轴线,确保钻孔倾角严格控制为下倾 15°,水平投影线垂直于坡面走向。在钻进过程中,转速稳定控制在 20~40 rpm,钻压维持在 1.0~1.2 kN,采用匀速连续钻进方式,防止因变速或停顿造成孔径缩颈、偏斜或卡钻。

3. 成孔质量保障措施。每孔开钻前由测量人员精确放样并标记孔位,相邻孔位按设计间距 3.0×4.0 m 布设,遇邻孔施工干扰时采取跳孔作业。钻进至设计深度后,稳钻 1~2 分钟,确保孔底完整、无尖灭现象。终孔深度应大于设计长度不少于 0.5 m。成孔后保留 $\Phi 108$ 套管作为永久护壁及后续注浆通道,严禁拔出。采用高压风(压力 0.6~0.8 MPa)彻底清孔,清除孔内岩屑与粉尘,经检孔器验证孔道畅通、孔深无误后,方可进入锚杆安装工序。

3.2 锚杆安装与注浆

1. 锚杆安装。锚杆采用 HRB400 级 $\Phi 32$ 螺纹钢,进场后按设计长度使用无齿锯进行精确下料,严禁采用氧割或电焊切割。下料完成后对钢筋表面进行除锈处理,清除浮锈、油污及附着物,并使用调直机将弯曲段校正,确保杆体平直^[3]。沿锚杆全长每隔 2.0 m 设置一道对中支架,支架采用 $\Phi 8$ 圆钢弯制,与主筋采用点焊牢固连接,焊缝高度不小于 4 mm,确保锚杆在孔内居中。锚杆运输过程中采取防弯折措施,堆放时下垫方木、上覆防雨布。钻孔验收合格后,先用 0.6~0.8 MPa 高压风彻底清除孔内岩粉、碎屑及积水,再由人工将锚杆逐段连接并缓慢推送至孔底,推送过

程保持轴线一致,避免强行冲击或扭转。锚杆外露端预留 30 cm 弯钩,弯折角度不小于 90°,弯钩方向朝向格构梁主筋位置,便于后续焊接连接。推送到位后,立即在孔口采取临时固定措施,防止杆体滑移或偏位。

2. 注浆施工。注浆材料采用 P·O 42.5R 水泥、中细砂及饮用水配制 M30 水泥砂浆,施工前通过试验确定配合比,水灰比严格控制在 0.45~0.50 范围内,砂子过筛后使用,粒径不大于 2.5 mm。砂浆采用强制式搅拌机拌制,先加水后加水泥和砂,搅拌时间不少于 2 分钟,拌合均匀后经筛网过滤后存入储浆桶,并在初凝前用完。注浆采用孔底返浆法,使用隔膜式砂浆泵加压注入,注浆压力控制在 0.2~0.4 MPa。注浆管采用硬质 PVC 管,随锚杆一同下放,管端距孔底 50~100 mm。注浆开始后,随砂浆注入匀速缓慢拔出注浆管,拔管速度与注浆速度相匹配,确保浆液自孔底向上连续填充,直至孔口溢出浓浆为止。注浆过程安排专人值守,记录注浆压力、流量及异常情况。对长度大于等于 9 m 的锚杆,在首次注浆完成 24 小时后进行二次补浆,补浆压力与首次一致,直至孔口再次溢浆并稳压 30 秒,确保锚固体密实无空腔。

3.3 格构梁混凝土浇筑与养护

1. 格构梁混凝土浇筑施工。模板工程采用复合木模,模板安装前需进行表面清理并涂刷脱模剂,确保混凝土成型后表面平整光滑。模板加固采用对拉螺栓固定方式,螺栓间距根据模板刚度计算确定,安装后需检查模板拼缝严密性及整体平整度,防止浇筑过程中出现漏浆或模板变形问题^[4]。混凝土采用 C25 商品混凝土,进场时需核对混凝土强度等级、坍落度等指标,经检验合格后方可使用。混凝土运输采用专用罐车,由汽车泵垂直输送至作业面,输送过程中需确保混凝土和易性良好。浇筑作业按分层方式进行,每层浇筑厚度控制在 300~500 mm,采用插入式振捣器振捣密实,振捣时遵循“快插慢拔”原则,振捣至混凝土表面不再下沉、无气泡溢出且呈现浮浆为止,避免出现蜂窝、麻面等质量缺陷。针对高陡坡面格构梁施工,需同步设置泄水孔以释放坡面水压。泄水孔采用 $\Phi 100$ PVC 管,按梅花形布置,孔距根据坡面汇水情况确定,通常为 2~3 m, PVC 管安装时需确保其外倾坡度不小于 5%,端部伸出格构梁外不少于 10 cm,防止管内积水倒流。

2. 格构梁混凝土养护。混凝土浇筑完成后,需严格把控养护时机与养护质量。在浇筑完成后 8~12 小时内,当混凝土表面初凝且具备一定强度时,及时覆盖麻袋或土工布进行保湿,覆盖需严密无漏隙,避免表面水分过快蒸发导致裂缝。

养护采用洒水养护方式,确保覆盖物始终处于湿润状态,养护频次根据环境温度调整,高温天气可增加洒水次数。混凝土养护期不得少于7天,养护期间需设立警示标识,禁止在格构梁上堆放重物或进行其他扰动作业。养护完成后,需对格构梁外观及强度进行抽检,确认符合设计及规范要求后方可进入下一工序。

3.4 锚杆效果验证方式

锚杆施工完成后,依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)要求,开展系统性效果验证。首先进行现场抗拔试验:按不少于锚杆总数3%且不少于3根的原则随机抽样,在锚固体强度达到设计值后实施拉拔检测,分级加载至设计轴向拉力的1.5倍(≥ 105 kN),持荷不少于10分钟,观测锚头位移是否稳定、有无滑移或拔出现象^[5]。其次,结合施工期安全监测,利用全站仪对格构梁顶部及坡面关键点进行位移跟踪,频次为每3~5天1次,雨季加密至每日1次,同步开展裂缝观测与巡视检查。工程竣工后,纳入为期一年的运行期监测体系,由专业单位定期采集位移、变形及排水状况数据,形成季度与年度监测报告。

4 工程效益分析

4.1 技术适宜性

锚杆格构体系无需大型基坑开挖,特别适用于地震扰动后岩土体松散、临空面高陡的应急工况。其模块化设计可灵活适应复杂地形,与护脚墙形成“上固下挡”协同机制,有效控制浅层滑移与坡脚冲刷,契合震后滑坡“快速稳定、防止次生灾害”的核心目标。在神龙宾馆滑坡治理中,针对77°高陡边坡及冰水堆积漂卵石土层结构松散、易塌孔等特点,采用无水跟管钻进、孔底返浆注浆等工艺,有效规避了传统支挡结构对地基承载力的高要求,避免了大开挖对下方道路、建筑及生态敏感区的扰动。同时,格构梁现浇与锚杆刚性连接,为后续生态复绿提供了稳定载体,实现了工程措施与生态修复的有机融合,技术路径成熟、适应性强,适用于高烈度地震区松散堆积层滑坡的快速应急处置。

4.2 结构安全性

通过无水跟管成孔保障锚固段完整性,孔底返浆注浆确保锚固体与地层充分粘结。格构梁与锚杆刚性连接形成空间框架,显著提升坡面整体刚度。经稳定性验算,治理后边坡在暴雨+地震工况下安全系数达1.35以上,满足一级边坡设防要求。施工过程中严格

控制锚杆自由段长度($\geq 4 \sim 6$ m),确保其有效穿越卸荷松弛带,锚固段(3 m)深入稳定地层,并通过抗拔试验验证单根锚杆承载力 ≥ 105 kN,满足设计轴向拉力70 kN及1.5倍安全储备要求。格构梁采用C25现浇混凝土,纵横间距 3.0×4.0 m,与锚杆焊接形成整体受力体系,有效约束表层土体变形。结合施工期及工后一年监测数据,坡面累计位移均小于8 mm,无新增裂缝或局部剥落,结构长期稳定性可靠,抗震协同性良好。

4.3 经济合理性

相比抗滑桩或重力式挡墙,本方案减少土石方开挖量约40%,缩短工期30天以上。材料以常规钢筋、混凝土为主,施工机械通用性强,综合造价降低约18%。同时格构框格内可直接实施生态复绿,节省后期景观投入,实现安全、生态与经济的多维统一。根据施工组织设计,本工程锚杆总量约1 200根,格构混凝土752 m³,护脚墙136 m³,未使用大型预制构件或特种设备,依托双排脚手架平台即可完成高陡边坡作业,人工与机械调配灵活。工期控制在175天内,较传统方案提前1个月,有效降低管理成本与安全风险。

5 结束语

泸定“9·5”地震后神龙宾馆后方滑坡治理工程的成功实践表明,“锚杆格构+护脚墙”是一种适用于高烈度地震区、松散堆积层滑坡的有效治理模式。其核心在于通过科学的设计和精细化的施工技术,将锚固、支挡与生态修复融为一体。本文详细阐述的锚杆无水钻进、孔底返浆注浆、格构梁现浇等关键技术,以及贯穿全过程的监测预警与质量控制体系,为类似复杂地质条件下的滑坡应急治理工程提供了宝贵的经验。

参考文献:

- [1] 张来功.滑坡治理中应用预应力锚索框架结构技术要点分析[J].西部资源,2022(06):76-78.
- [2] 万飞.锚杆格构梁在四川山区某500kV输电线路滑坡治理中的应用[J].低碳世界,2020,10(12):97-98.
- [3] 吴洋,蒋雯.真如禅寺山体滑坡地质灾害治理研究[J].江苏科技信息,2021,38(01):22-25.
- [4] 洪火林,王文金,邹定安,等.地质灾害治理工程中的滑坡治理措施研究[J].山西冶金,2023,46(01):223-224,227.
- [5] 曾凡盛.挡土墙支护边坡在地质灾害滑坡治理工程中的应用:以高陂村后山山体滑坡地质灾害治理工程为例[J].华北自然资源,2023(05):68-70,75.

信息施工法在路堑高边坡设计施工中的应用

王恒中¹, 曾华求², 李华超¹, 庄礼发¹, 吕泓彦¹

(1. 江苏省地质工程勘察院深圳分院, 广东 深圳 518000;
2. 深圳市中天基础勘测设计有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 在路堑高边坡设计施工中, 为切实发挥信息施工法的应用效果, 本文结合实际的工程项目, 深入探讨了信息施工法的实施流程, 涵盖施工前准备、施工过程管控两个方面, 并探讨了信息施工法的实施效果, 以期为类似工程的信息化施工提供参考。研究结果表明, 在路堑高边坡施工中, 累计最大位移远低于预警值, 锚杆最大应力处于设计值以内, 且施工周期较预期提前 40 天。

关键词 路堑高边坡; 信息施工法; 实施流程

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.015

0 引言

在交通设施的建造施工中, 路堑高边坡因岩体结构复杂、地形陡峭等因素, 开挖施工中常常出现边坡滑塌、失稳等问题, 增加施工风险; 同时, 边坡的稳固性也和工程构造的长期运行、生态保护等方面息息相关。然而, 在路堑高边坡传统的设计施工中, 由于勘察资料有限、缺乏施工管控等, 既无法有效应对复杂的地质条件, 也无法保障边坡的稳定性。而信息施工法的出现, 为这一问题的解决提供了新路径, 其通过设计施工作业的动态监测、数据反馈和方案调整形成闭环管理, 实现对全流程的实时管控, 保障施工作业的安全性。本文聚焦实际工程, 系统阐述信息施工法的应用要点与效果。

1 工程概况

1.1 基本情况

某高速公路的路堑高边坡路段长 1.6 km, 最大开挖深度 58.0 m, 边坡坡度 1:1.2。工程穿越剥蚀低山区, 地形切割严重, 边坡底部、顶部高程相差 80.0 m; 周边有县级公路 1 条、居民聚集区 2 处。

1.2 地质水文条件

1. 地质条件。本工程地形复杂, 有侵蚀剥蚀低山丘陵、沟谷凹地, 上方覆盖粉质黏土, 厚度介于 1.0~3.0 m 之间, 下部为粉砂岩、凝灰质砂岩; 受构造影响, 沟谷、山脉呈现东西走向; 山体明显破碎, 岩层和边坡之间的角度在 30° 以内, 滑塌的可能性较大。

2. 水文条件。地下水为基岩裂隙水, 夏季雨量大时渗水情况严重, 影响路堑边坡的稳固性。

2 信息化施工法的实施流程

由于本工程地质条件复杂, 再加上施工作业不确定因素多、相关参数设计不合理等因素影响, 可能会影响施工作业的顺利推进, 导致边坡施工效果和预期存在较大出入。鉴于此, 本工程拟定采取信息施工法展开设计、施工, 依托监测数据指导工程实践, 确保施工作业顺利推进。

2.1 施工前准备

1. 资料收集分析。在路堑高边坡设计、施工作业开展前期, 应当全面收集施工区域的相关资料, 诸如周边环境、地形地貌图、地质调查报告等; 组织相关人员深入分析这些资料, 着重考量影响边坡稳定性的因素, 如地下水、岩土性质等。

2. 监测方案制定。结合工程情况、地质条件, 对施工监测方案展开详细的编制, 包括但不限于边坡沉降、位移、锚杆锚索应力等; 构建监测体系, 科学布设监测点位, 主要布设于边坡顶部、底部等区域, 确保监测点位置精准、数量充足, 以便随时获取边坡承载力、变形数据^[1]。具体参数见表 1。

3. 初步设计施工方案。结合勘察数据、分析结果, 采用数值模拟、类比 2 种方法。初步设计施工方案: 明确边坡开挖的流程、方式、支护结构。例如: 边坡开挖施工采用分段、分层的方式进行, 各层开挖高度控制在 8.0~10.0 m 范围内; 支护结构设定为挡土墙、框架梁等单一形式或联合形式。在本工程的施工方案预设计中, 主要采用理正岩土软件进行, 这一软件内置 3 种边坡稳定性计算方法: 瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法, 具体表达式如下:

表1 边坡监测参数

监测项目	监测仪器	布设密度	初始频率
深层位移	测斜仪	高风险区域每30.0 m布设1个孔,普通区域则每50.0 m布设1个孔	每3天1次
坡顶水平位移	全站仪	每50.0 m设置断面1个,各断面布设3个监测点位	每天1次
锚杆应力	振弦式测力计	每榀框架梁布设3个监测点位	每2天1次
地下水位	渗压计	沿边坡高度每20.0 m布设1排,每排设监测点位3个	每3天1次

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n (G_i \cos \theta_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{ai}} (c_i b_i + G_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{ai}} (c_i b_i + (G_i + \Delta X_i) \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n (G_i + \Delta X_i) \sin \theta_i} \quad (3)$$

式(1)~(3)中, K_s 代表的是路堑高边坡的稳定性, G_i 代表的是第 i 个土条自身的重量, l_i 代表的是第 i 个土条的滑动长度, θ_i 代表的是第 i 个土条在滑动状况下的切线和水平方位的角度, c_i 代表的是滑动过程中土体黏聚参数, b_i 代表的是第 i 个土条的宽度, φ_i 代表的是滑动过程中的土体摩擦系数, m_{ai} 代表的是中间计算结果, ΔX_i 代表的是第 i 个侧面产生的切向力差值。

2.2 施工过程管控

2.2.1 信息记录

在路堑高边坡施工中,采用“边开挖、边记录”的模式,对开挖过程进行动态跟踪,详细了解开挖进度、地质特征、防护体系的应力变化等;每开挖一级,都要详实记录各项数据,并附带照片,其目的在于客观记录边坡开挖的地下水、岩层性状等地质信息。

2.2.2 监测方法

由于本工程地质条件复杂,风险等级高,要求在施工过程中加强地表变化的巡查,过程中可依托专业设备监测应力、变形等各项参数^[2];考虑到边坡滑移是常见的破坏形式,因此在施工监测中需要尽可能地覆盖边坡滑移范围,确保测线和裂缝处于垂直状态。特别是对于不容易发现的裂缝的区域,应展开重点监测。

在通常情况下,监测工作于边坡开挖结束后展开,操作要点为:于边坡布设多个监测点位,定期测量各点位间距,以了解边坡的位移情况;每级开挖工作结束后,立即检测边坡的稳定性,了解其应力是否超出规定值。结合工作经验,监测频率可根据工程情况动态调整,在暴雨天气,如日降雨量在50.0 mm以上时,监测项

目的频率调为每4小时1次;当开挖作业达到软弱夹层时,边坡的位移监测频次设为每6小时1次;而在边坡支护施工中,对于锚杆应力的监测则为每天1次。

2.2.3 信息反馈和分析

1. 建立信息反馈机制,确保路堑高边坡设计、施工中的所有数据都能及时快速的传达给相关人员;采用光纤、4G无线传输备份模式,防止数据丢失;搭建BIM协同工作平台,实时共享相关数据;定期整理收集到的各类数据,并将其制作成表格的形式经信息化平台推送给参建各方;在施工现场布设公示栏,根据施工进度随时调整公示信息,方便施工、管理人员随时了解边坡施工动态,提前预测潜在风险或隐患^[3]。

2. 数据分析。从严格意义上讲,边坡位移速度、位移量的确定存在较大难度,这是因为不同的边坡位置、岩土特性的位移允许值不同。鉴于此,监测数据分析环节应结合工程情况而定。基于边坡加固层面分析,边坡是可以发生少量位移的,这就要求将“适量位移”作为评判边坡稳定性的依据,实际的位移值可参照工程比照、监测曲线确定,若结果显示超出规定范围,需立即进行调整。另外,针对边坡的变形情况,还可以制作成响应图表、绘制位移—时间曲线,过程中注意把控拐点、极限值,以便直观了解不同监测点位的数值变化,掌握边坡变形的运动轨迹,从而提前制定防范对策^[4]。此外,为提高监测效果,应当科学设置预警指标,若监测结果超出预警值,立即发出警报(具体参照表2),启动分级响应机制:蓝色预警时,监理单位到施工现场进行核查,施工单位则加大监测频次;黄色预警时,设计单位尽快出具调整建议,注意时间不能超过1天,同时暂停高风险区域的开挖施工;红色预警时,立即启动应急预案,实行临时加固。

2.2.4 方案调整

1. 设计变更。结合监测数据分析结果,依托BP神经网络对异常数据进行反演,为初始设计方案的调整提供参考依据。例如:当监测结果显示某边坡段的滑动面较大时,需重新对边坡稳定性进行计算,同步调整支护结构。本工程中,发现某段页岩完整性系数比

表 2 边坡监测预警指标

预警等级	位移速度 (mm/d)	累计位移 (mm)	锚杆应力 (设计值占比)
蓝色预警	1.0 ~ 2.0	50.0 ~ 100.0	70.0% ~ 80.0%
黄色预警	2.0 ~ 3.0	100.0 ~ 150.0	80.0% ~ 90.0%
红色预警	> 3.0	> 150.0	> 90.0%

勘察值低, 展开了如下调整: 锚杆长度由原方案中的 12.0 m 增至 15.0 m, 相邻锚索距离由 3.5 m 减至 3.0 m。在此基础上, 还特别增设了直径为 1.2 m、长度为 25.0 m 的抗滑桩, 来增强边坡稳定性。该变更方案出具后, 相关单位联合开展了审核, 确保了设计变更的可行性、合理性。

2. 工艺调整。在路堑高边坡信息化施工中, 还需结合设计变更、工程情况, 对施工工艺展开适当的调整。以边坡开挖施工方式为例, 若开挖操作中遇到岩石破碎带, 可将爆破开挖更为静态破损^[5]: 利用膨胀剂对边坡岩体进行破损处理, 单孔装药量不能超过 300.0 g; 调整开挖步距, 即 2.0 m 缩为 1.5 m; 采用混凝土喷射的方式对岩面进行封闭, 单层厚度控制在 10.0 cm。另外, 在边坡支护施工中, 对锚杆锚索施工工序展开调整: 科学选用钻孔设备, 优化浆液灌注工艺, 确保锚索、锚杆的锚固力和设计要求相符; 合理安排施工进度, 防止因施工顺序不当或开挖过度影响边坡的稳定性。

2.3 实施效果

1. 边坡稳定性。通过信息施工法的应用, 实现了对边坡稳定性的实时监测、动态调整。在工作实践中, 及时发现了潜在的边坡失稳隐患, 确保了边坡在整个施工周期的稳固性。监测数据显示: 在边坡施工过程中, 最大累计位移量为 85.0 mm, 和预警值的 150.0 mm 存在较大偏差; 锚索最大应力为 420 kN, 未超过设计值的 500 kN; 通过持续 1 年的水文观测, 在边坡运营期间总位移量未超过 5.0 mm, 而且也没有出现任何的安全事故。

2. 工程成本。信息施工法的应用, 不仅有效规避了设计方案不合理带来的反复变更, 还优化了支护结构的相关参数, 减少了工程的整体成本。数据显示: 相较于传统的设计施工, 信息施工法下的边坡成本至少节约 30.0%, 这主要归因于设计方案的合理性, 规避了常规设计的盲目性^[6]。例如: 在人工边坡角度介于 55° ~ 60° 时, 以直径 < 20.0 mm、长度 3.0 ~ 6.0 m 锚喷网进行支护, 是在常规设计下难以实现的, 而信息化设计和施工, 既能满足这一设计需求, 又能减少

锚索用量, 降低工程总造价, 这也从一定程度上体现了信息施工法的优越性。

3. 施工进度。在边坡施工过程中, 实时反馈机制、监测系统的构建与应用不仅能够随时调整施工计划, 更能防止因变更不及时、不合理带来的工期延误。同时, 通过精准把握施工区域的地质条件、边坡稳定性, 以及对施工流程的合理安排, 使得施工效率大幅度提升。和以往的施工方法相比, 信息施工法下的施工工期至少提前 40 天, 为高速公路的尽早运行创设了条件。

3 结论

信息施工法作为一种现代化施工管理方法, 在路堑高边坡设计、施工中发挥着重大作用。本文通过系统性分析研究, 得出以下结论: (1) 在信息施工法应用期间, 做好信息数据的采集、反馈和分析, 据此优化调整设计方案、施工方案, 既能保证工程顺利施工, 又能确保边坡稳定性和安全性。(2) 未来, 随着各类技术手段的持续发展, 信息施工法将更加完善, 并在路堑高边坡工程中发挥出更显著的优势, 推动高速公路工程建设行业的未来发展。

参考文献:

- [1] 邵茂华. 复杂地质条件下高陡路堑边坡开挖及防护施工关键技术研究 [J]. 建材与装饰, 2025, 21(17):148-150.
- [2] 张俊. 高速公路高边坡施工安全风险评估与控制 [J]. 中国储运, 2022(02):117-118.
- [3] 席飞雁, 朱自强, 鲁光银, 等. 基于强度折减法的高速公路煤系地层路堑高边坡 FLAC3D 数值模拟分析 [J]. 华北地质, 2021, 44(04):61-67.
- [4] 苗国栋. 延安东绕城高速公路黄土路堑高边坡可靠度分析研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- [5] 雷星星. 高速公路路堑高边坡施工安全风险评估研究 [J]. 工程技术研究, 2020, 05(04):172-173.
- [6] 李瀚, 左伟俊, 邢浩, 等. 基于模糊综合评价法的岩质边坡开挖施工风险评估 [J]. 公路工程, 2024, 49(06):79-86.

电力工程中高压输电线路施工技术与检修研究

赵军

(国网山西省电力有限公司吕梁供电公司, 山西 汾阳 033000)

摘要 在各区域优质电网工程陆续推进的背景下, 电力工程的总体品质得到显著跃升, 但在高压输电线路的施工与检修层面仍难以达到当下输配电工作的任务指标。针对当下用电需求扩增、线路长期超负荷运行的情况, 需对高压输电线路的施工技术加以改进, 并采用周期性检修维护措施, 有效减轻电力供应压力。本文基于高压输电线路施工技术与检修的重要性分析, 提出关键施工技术的应用策略及后续检修方案, 以期为保证线路的高效运行提供参考。

关键词 电力工程; 高压输电线路; 基础施工; 杆塔施工; 检修

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.016

0 引言

在当下我国经济趋于纵深发展的背景下, 电力供给负荷及用电需求逐年递增, 电能传输输送范围得以持续拓展, 维持高速增长态势。高压输电线路作为电能传输与配送的关键介质, 其优异的性能表现, 对满足区域用能需求、促进经济指标的稳定性有着极为关键的意义。同时, 因其长期处在较为复杂的环境中, 可能遭受机械荷载与电力负荷的作用, 也深受区域气候条件与其他环境影响的干扰, 想要维持高效的运行状态存在较大阻力。鉴于此, 电力企业应持续加强线路施工技术运用与检修管理, 切实贯彻各项工艺措施, 辅以必要的检修维护手段, 促使高压输电线路长期处在稳定、高效的工作状态下。

1 电力工程中高压输电线路施工技术与检修的重要性

在高压输电线路项目中, 其施工技术方案的运用与电力工程的整体稳定性关联密切。采用优质技术支持, 并辅以完备的检修措施, 能使电力工程的工作效能长期处在较高水准, 维持电力设备及线路长期稳定的运行状态, 有效控制维护和修复的费用投入, 规避各类设备失效带来的线路事故。而若相关工作执行不力, 将极有可能导致输电线路出现功能失效问题, 电力设备受损、线路负荷不均等情形相继出现, 由此诱发线路安全事故。鉴于此, 对于高压输电线路的施工技术选用及控制, 需在电力企业的总体规划布局下, 结合工程实际加以合理选取, 将各项技术执行程序与

设计规程进行比对, 进一步凸显高压输电线路施工技术的应用效益。同时, 在检修层面予以关注, 保证输电线路运营阶段的性能稳定性, 合理控制可能出现的线路风险, 保证电力企业提供的电力服务能惠及所有社会主体^[1]。

2 电力工程中高压输电线路施工技术的应用

2.1 编制施工技术方案

在高压输电线路项目动工前, 施工单位应编制详尽的技术运用方案, 对所包含的施工范围及工期加以明确。针对当下专业施工人员明显不足的状况, 施工单位应组织员工参与职业技能训练, 引导其掌握更全面的专业知识。通过开设施工技术相关的培训课程, 使施工人员专业素质与操作技能不足的现状得以改观。此外, 还需提前编订施工技术的实施流程, 细分施工环节的各项监管责任, 确保施工人员能依据既定标准完成各项操作, 促使高压输电线路施工契合设计规范。对于施工材料管理难题, 可引进规范化的材料采购管理制度, 对采购节点加以严格控制, 并按照现有采购章程完成相关采购任务, 保证材料品质和数量能契合施工需求。采购工作结束后, 材料管理人员应关注材料的存放, 维持存储环境适宜的温湿度, 采用分类别、分批次的存储方法, 为高压输电线路施工提供便捷、高效的物资供给。

2.2 基础施工

塔基施工方案的优化, 可维持基础土层相对稳定的状态, 也能保证杆塔随时处于直立姿态, 规避出现

塔身倾斜的情形。在塔基施工阶段，需在施工场地预留足够空间，对基础进行全面清除；基础开挖时应严格控制挖土尺寸、规模等指标，基于施工设计标准，关注基础标高，避免超限作业。

在模板安装前，应仔细确认模板位置，针对基础的地貌起伏，选取适宜的安装作业方法，维持模板的稳固性。混凝土浇筑施工节点，为使基础结构免受横向作用力干扰，需借助泥浆对墙柱模下侧的基础进行平整处理，将防水材料如海绵条、双面胶带等粘贴于模板结合部位；在绑扎钢筋时，必须先确定钢筋的垂直方位，才能对其进行加固。在柱筋施工阶段，要预先确定环箍位置，绕成直线，防范施工精度缺失；对于混凝土浇筑，可分层实施，其厚度为振捣半径的 1.25 倍，不间断地执行整个浇筑工序，针对其关键的梁柱连接作业，着重把握振捣作业的实施效果，避免混凝土的密实性得不到保证。在确保每次浇筑过程均无冷缝的前提下，完成浇筑方式、方向及施工组织的优化。塔基开挖后，尽量采用原土复填，规避与周围环境产生不相容的情形。对回填土中的树根、砂石等杂质进行清除，大颗粒物质的直径不宜超过 50 mm，含水率也应与回填施工标准相符^[2]。

2.3 杆塔施工

在高压输电线路施工阶段，杆塔是其中不可忽视的一环，杆塔选型直接关系到线路施工的品质。为此，施工人员需严格执行杆塔选用准则，关注其稳定度表现，对服役周期和环境作用等加以综合考量。在实际建设活动中，常规类型的杆塔往往在运行数年后，其承载性能逐步下降，对此，可采用组装式杆塔，由此出现维修或更换需求时，仅需对部分构件进行替换，节省开支和劳力投入。对于组装式杆塔的选择，需要结合具体环境因素，在杆塔材料及组装形式上进行优化。

杆塔施工中的接地保护工作极为必要。若高压输电线路遭受雷击致损，电流超出导线的承受极限，将出现不可规避的线路事故。为此，应着重关注导线的抗压性能，对埋地导线的连接部位进行加固与防腐处理，同时标记接地位置。若采用拼焊方法进行导线搭接，则需对搭接长度进行严格限定，使其处在设计阈值范围内。搭接部位需经过全面的防腐处理，且地线上下侧 40 cm 范围内不得有焊点。焊接部位要平整，外表无裂纹及渗漏情形；在回填施工阶段，接地沟的回填土必须选用无树根或块石的沙质土壤，如有需要，可根据具体的工程要求，对回填物进行置换。而且，沟槽表面应设有 100 ~ 300 mm 高的防沉陷保护层，降

雨天气下，切实开展电阻值检测试验，若需要增加接地阻抗，也要依据按照设计图纸执行。

2.4 架线施工

架线施工应考虑导线尺寸、长度等参数，对耐张段进行合理设置，避免过多的焊接工序，线路数量也应得到合理控制。导线盘尽可能布置在高出耐张塔 2 倍的位置，其作用是将导线拉出后，一侧将引线倒置，另一层拉紧；在紧线过程中，要注意控制导线松弛度偏差值，特别是在穿越特殊地形时，应对穿越安全距离进行合理把控，准确测定松弛度。在架线设备安装前，先将电缆暂时接地；在卷边过程中，要保证线夹处在正确位置上，避免出现过大的倾斜角，且相邻两个模具之间存在 1/3 重叠。压接施工需按既定规程进行，先将耐张电线夹导电铝管置于电线内，使电线端子板面向电线外端，再按照要求切除电线铝芯，之后对钢锚件进行卷边处理^[3]。

3 电力工程中高压输电线路检修工作分析

3.1 关注设备性能评估与检修

在高压输电线路投入使用之前，需要对所有电力设备进行性能检测，以保证其能够满足线路的使用需求。在对电气设备进行检测时，还要对各部件进行检测，如导线、杆塔、绝缘子等，以提高其总体性能品质。在检修过程中，若发现绝缘子的各项指标存在问题，应及时予以更换，以保证绝缘子的高效运行。在检测导地线时，应对其中需要修补的部位进行处理，具体可采用单线缠绕、管线连接等方法。当导地线存在品质缺陷时，可将破损部位截去，更换新的导线，如此可在遭遇雷击天气时，发挥其应有的功能。在对其他部件进行检维修时，应对部件品质参数进行测定，把握其与相关设计规程的契合度，并针对线路出现的安全问题加以细致处理，促使线路维持平稳、高效的运行状态。

3.2 增加塔杆检修频次

在高压输电线路维护工作中，需对塔杆各维度的品质进行检测，主要是对施工材料的达标度、开裂病害及混凝土性能等作出测验，同时也要彻底检查塔基混凝土状态，分析其能否维持塔杆运行的平稳性。而且，塔杆及塔基所受重力效应极为显著，二者的沉降量也大体保持一致，需判定具体沉降监测指标是否契合设计规程。在执行具体检修程序时，通常需要借助打套管、抱箍等方法，并实施塔身维护工作，使其服役期限适当延长；实施必要的防腐养护措施，完成构件连接部

位及线路接头的养护工作，进一步凸显塔杆的工作性能。此外，塔杆检修还涉及拉线效果检测，掌握其在塔杆上的施力情况，规避对塔杆带来的干扰，使其始终维持竖直状态而不出现倾斜。

3.3 引入运维管理机制

在执行高压输电线路检修方案时，应建立完善的信息化管理系统，为系统的质量分析和故障分析提供依据。采用科学合理的技术手段，建立适合于电力企业的电网数据库，保存、整理和分析每次用电维护工作的信息数据。同时，要保证各种数据的完整性和有效性，也要对线路进行经常性的安全评估，保证相关检修工作得以有序实施。并且，还应调整和优化检修工作机制，对具体作业时段加以合理部署，持续改进检修人员的专业技能，推动线路运维检修工作的高效实施。一般来说，状态检修是将高压输电线路各设备的运行状况与故障分析技术结合，对目前在用设备进行综合分析，若能对某一电力设备的异常状况进行甄别，则能预测其可能出现的异常状态，据此执行相应的检修工作。想要保证高压输电线路的运行效益，就要全面分析和利用电力设备的状态数据，全方位掌握电力系统的工作效能^[4]。

3.4 强化检修计划管理

电力企业需拟定完备的检修计划，对所需检修项目及频次加以分析，以助力检修作业的有序实施。

一方面，为做好检修工作，电力企业可建立结构清晰的管理机构，分析高压输电线路的检修项目，并结合前一年的检修情况，设置本年度检修维护方案，指导检修人员按照标准化作业规程完成各类检修任务。具体检修计划的编制应立足于高压输电线路实际的运行情况，针对不同线路展开多维分析，在预防性检修机制的支持下，预估线路在后一阶段的检修工作量及频次，由此确保检修计划的完整性。在设定好检修计划后，则需要完成检修人力投入方案的规划，保证各项检修流程得以顺畅推进。

另一方面，对检修任务指标加以明确。基于电力企业的年度检维修工作计划，结合各区段高压输电线路的检修及维护需求，将检修工作的具体任务与实施程序加以细致分析，明确各部门在此工作中的职责，分区完成不同阶段的检修任务。此外，还需设置相应的监督机构，对检修工作的执行过程与最终成效进行监管。监督部门应有明确的职责与权限，具体监管内容也应明确、完整，如此既能体现其执行监督职责的

效力，又能切实把握高压输电线路的整体运行状况，督促检修人员依据既定章程完成各类检修维护任务^[5]。

3.5 全面防控环境要素干扰

通常，高压输电线路所经地区多为城郊、山地，受环境因素的干扰极为明显，线路因外力致损的情形并不少见。在此背景下，检修人员应着重关注外在环境因素对高压输电线路的影响，对整体环境影响程度加以多维分析，进而实施相应的防控措施。从输电线穿越区域分析，其表现出复杂性、多变性等特征，在不同阶段对高压输电线路的影响存在差异，为此对环境影响的把握与规避，需结合实际情况作出分析。此外，大部分高压输电线路采用架空形式，因而不可避免地受到大气环境的干扰，需对此类要素加以综合把握，尽量控制对高压输电线路运行状态的影响^[6]。

4 结束语

在电网结构日趋繁杂、多变的态势下，新技术、新材料持续得到研发应用，致使高压输电线路的施工与检修工作呈现出更为复杂的特征。高压输电线路施工技术是保障电力系统高效稳定运行的关键手段，为相关领域的工程应用提供基础支撑。在今后工作中，电力企业需要在相关技术体系中加以完善和优化，同时切实关注线路检修工作的实施效用，在施工技术应用、检修方法革新等维度持续拓展思路，力争实现高压输电线路建设与运营管理的现实效用。

参考文献：

- [1] 邓鹏飞,李晨旭.高压输电线路运行状态安全分析模型及检修技术研究[J].电力设备管理,2025(18):6-8.
- [2] 李永峰,高文昊,胡旭晓.基于CNN-BIGRU-ATTENTION的高压输电线路故障识别[J].自动化与仪表,2025,40(09):83-88.
- [3] 崔龙箫,向涛.高压输电线路对国有林场生态影响分析:以粤港澳大湾区500 kV外环中段工程为例[J].林业勘查设计,2025,54(05):22-27.
- [4] 林伟.高海拔山区高压输电线路工程不良地质现象的勘测评估与应对措施:以川藏联网输变电工程为例[J].中国高新科技,2024(21):94-96.
- [5] 张媛媛.超特高压输电线路运维管理中的问题及解决方法[J].自动化应用,2023,64(S2):128-129,132.
- [6] 刘强,王枝文,洪亮.500kV输电线路塔架挂线板变形原因分析及加固处理[J].价值工程,2023,42(10):109-111.

公路施工过程中沥青混凝土路面施工技术探析

何 明

(青海第一路桥建设有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要 在公路交通建设工程项目中, 沥青混凝土路面具有平整、耐久、抗滑等优势, 已成为公路路面最主要的形式之一。其施工质量将直接影响公路的使用性能及寿命, 也关系到行车安全和舒适度。近年来我国公路建设规模不断扩大, 对沥青混凝土路面施工技术也提出了更高的要求。但是在实际施工中, 由于工艺把控不当、材料质量参差不齐等原因, 造成路面车辙、裂缝等病害。基于此, 本文认为要深入探究沥青混凝土路面施工技术, 为提高公路整体建设质量提供有益参考。

关键词 公路施工; 沥青混凝土; 路面; 摊铺; 压实

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.017

0 引言

在公路施工过程中, 常用沥青混凝土路面, 而这部分施工涉及很多关键环节, 需要准确把握各环节的施工技术。施工前要做好材料设备选型和基层处理测量放样等准备工作, 拌合运输环节要做好相应的控制及管理, 摊铺前准备充分并把控好摊铺工艺, 压实环节遵循工艺原则合理选用压实方法与技术, 最后做好接缝处理及质量验收。各环节紧密相连, 要严格把控技术要点, 以确保沥青混凝土路面的施工质量。

1 沥青混凝土路面施工技术概述与施工要求

1.1 技术概述

沥青混凝土路面施工技术是现代公路建设的核心工艺之一, 将特定级配的矿料和沥青材料按科学比例拌和, 形成具有良好力学性能的路面结构层。该技术运用热拌热铺工艺实现混合料均匀摊铺, 利用振动压路机等设备进行梯度压实, 使路面形成致密稳定的结构体系。施工中需要严格把控温度参数, 确保混合料在适宜温度区间内完成拌和、运输、摊铺、碾压作业, 保障路面抗车辙、抗裂、耐久性等关键性能指标达到设计标准。

1.2 施工要求

沥青混凝土路面施工对各个环节都有严格的要求。在材料选用上, 沥青标号要符合当地的气候条件, 矿料级配应精准匹配设计规范, 从源头上保障路面性能。施工前要保证基层平整坚实、清洁无杂物, 为后续作业奠定基础。摊铺时根据试验段确定参数, 控制摊铺速度均匀稳定, 保持厚度一致。碾压时遵循先静压后振压再收光的顺序, 控制好压实温度和遍数, 使路面达到规定的压实度, 形成平整密实、耐久性强的优质路面。

2 施工前准备阶段技术要点

2.1 材料选择与质量控制

挑选沥青材料时要考虑不同公路等级和当地气候情况。例如: 在高温且交通繁忙的区域, 优先选择 70 号道路石油沥青, 针入度控制在 60~80(0.1 mm)区间, 软化点不低于 46 °C, 保障路面在高温环境下仍保持出色的稳定性, 有效抵御车辙病害。粗集料选用质地坚硬、洁净的碎石, 压碎值 ≤ 26%, 针片状颗粒含量不超过 15%, 如此能极大地增强路面的抗车辙与抗滑性能。细集料要求颗粒级配合理, 含泥量不超过 3%, 以保证混合料的工作性。矿粉条要干燥、洁净, 亲水系数 < 1, 提升与沥青之间的黏附性。材料进场后实施严格的抽检制度, 每 100 t 沥青抽检 1 次, 集料每 200 m³ 抽检 1 组^[1]。一旦发现不合格材料立即清退出场, 严禁流入施工环节, 从源头上保障沥青混凝土路面施工质量, 延长公路使用寿命。

2.2 设备选型与调试

施工前要做好设备的选型调试, 其中拌合设备选用间歇式拌和机, 依据工程规模确定生产能力。通常每小时产量在 120~160 t 的设备能满足中小型工程的需求, 而大型工程可选用 240 t/h 以上的设备, 确保拌和效率及质量。拌和机配备二级除尘装置, 将粉尘排放浓度控制在 30 mg/m³ 以内。摊铺机要具备自动调平功能, 根据路面宽度选择熨平板宽度, 最大摊铺宽度为 12 m, 保证摊铺平整度误差在 ±3 mm 以内。压路机选型可包括钢轮压路机和轮胎压路机, 其中钢轮压路机自重不小于 10 t, 轮胎压路机总重在 15~25 t 为宜。设备进场后先采取空载运行测试, 检查各部件

能否正常运转,运行30 min后查看有无异响或异常发热。再模拟施工况进行负载调试,保证设备性能稳定,为后续的施工提供支持。

2.3 基层处理与测量放样

在基层处理中,要先清扫干净表面杂物,采用清扫车与人工配合的方式,将基层表面的浮尘及松散颗粒清理彻底。如果局部存在坑槽、裂缝的情况,使用切割机沿病害边缘切割成规则的形状。当坑槽深度超过5 cm时,分层填补水泥稳定碎石,煤层压实厚度不超过15 cm,压实度要达到97%。如果裂缝宽度<5 mm,灌注乳化沥青进行封闭处理,宽度>5 mm时,先开深度3~5 cm的槽,然后填充沥青玛蹄脂碎石混合料并压实。在测量放样过程中,依据设计图纸,在基层上恢复中线,直线段每20 m设置一桩,平曲线段每10 m设置一桩,同时在两侧边缘外0.3~0.5 m处设置指示桩。用水准仪测量基层标高,每10 m测一个断面,每个断面测3个点,根据测量结果确定摊铺厚度,使路面平整度及坡度符合要求。

3 沥青混合料拌和与运输技术

3.1 拌和工艺控制

拌合前先确定好各档集料加热温度,粗集料在170~190 °C,细集料在160~180 °C,矿粉不加热。沥青加热温度按照品种而定,70号道路石油沥青加热到155~165 °C。拌合过程中先将集料投入拌缸干拌5~10 s,让集料充分混合均匀,再加入沥青湿拌40~45 s,最后加入矿粉继续拌和5~10 s,整个拌合周期控制在60~70 s,使沥青均匀覆盖集料。严格控制拌和机出料温度,普通沥青混合料出料温度为145~165 °C,改性沥青混合料出料温度为170~185 °C,温度过高可能使沥青老化,过低会影响压实效果。每拌制50 t混合料取样一次,进行马歇尔试验,检测稳定度、流值、空隙率等指标,稳定度不小于8 kN,流值在2~4 mm之间,空隙率在3%~5%,保证混合料质量合格。

3.2 运输过程管理

选择载重量在15 t以上的自卸式汽车作为运输车辆,根据拌合站的产量和运输距离确定车辆数量,使摊铺机前始终能有3~5辆车等候。车辆装料前,在车厢内壁均匀涂刷一层隔离剂,防止混合料黏附。装料时按照前、后、中的顺序分三次装,避免混合料离析。运输途中车速应控制在30~50 km/h,减少颠簸,防止混合料洒落。为了减少热量散失,可在车厢顶部用双层篷布覆盖严密。经实测,在气温20 °C、运输距离10 km时,该方案能使混合料温度下降不超过5 °C。车辆到达施工现场后,安排专人指挥停放,缓慢升起

车厢,距离摊铺机10~30 cm处停车,不要撞到摊铺机^[2]。卸料时司机要密切配合摊铺作业,不要随意撤除篷布。混合料卸完后要及时清理车厢内的残留物,保持车辆整洁,为下一次运输做好准备。

4 沥青混合料摊铺技术

4.1 摊铺前准备

在摊铺开始前要全面检查下承层的质量,使用3 m直尺检测平整度,偏差不得超过5 mm,如果超出限制,要提前做好处理。选定摊铺机后全面调试检查,调整熨平板宽度,使其与路面宽度相符,最大摊铺宽度可达12 m。熨平板预热温度不低于100 °C,使用加热装置持续加热30~60 min,使熨平板和混合料接触时温度适宜,避免因为温度过低导致拉裂混合料。在摊铺机两侧安装浮动基准梁,长度根据路面宽度选择,一般在8~12 m,以控制摊铺厚度和平整度。还要在基层表面均匀喷洒一层透层油,用量控制在0.8~1.2 L/m³。如果基层是粒料类,还要加铺一层下封层,厚度控制在6~10 m。另外,可以在摊铺机受料斗内壁涂刷隔离剂,减少混合料黏附的情况,为顺利完成摊铺作业创造良好的条件。

4.2 摊铺工艺控制

在摊铺过程中,摊铺机起步时先缓慢抬起熨平板,使螺旋布料器中充满了混合料,同时高度达到熨平板底面以上2/3处。再以1~3 m/min的低速匀速前进,避免起步过快造成混合料离析^[3]。在摊铺过程中,要根据拌合站的产量和运输能力确定,一般控制在2~6 m/min,确保连续稳定摊铺,减少停顿次数。螺旋布料器的转速要和摊铺速度相匹配,使混合料均匀分布在熨平板的前方,转速要控制在3~10 r/min。摊铺期间使用浮动基准梁严格控制好摊铺的厚度,允许偏差为±2 mm,平整度偏差不可超过1.5 mm。如果采取摊铺机梯队作业形式,前后两机之间要保持10~20 m,接缝处重叠5~10 cm,同时对纵向接缝采用热接缝处理,使接缝处紧密平整,以免后续出现跳车的现象,保证路面的整体质量。

5 沥青混合料压实技术

5.1 压实工艺原则

在压实作业过程中,应遵循紧跟、慢压、高频、低幅的原则。其中,紧跟是指压路机需在摊铺后尽快开始碾压,初压要紧跟摊铺机,距离不超过20 m,减少热量散失,保证混合料处于良好的压实状态。慢压要求压路机行驶速度缓慢均匀,初压速度控制在1.5~3 km/h,复压速度为2.5~3.5 km/h,终压速度不超过5 km/h,避免速度过快导致压实不均匀或推移混合料。

高频低幅是指振动压路机采用高频率低振幅作业模式,振动频率控制在 35~50 Hz,振幅在 0.3~0.8 mm,既能有效压实混合料,又能减少表面波纹,提高路面平整度。在碾压过程中,压路机驱动轮朝向摊铺机,从外侧向中心碾压,相邻碾压带重叠宽度为 1/3~1/2 轮宽,确保压实无死角,使路面达到规定压实度和平整度要求。

5.2 分阶段压实技术

在分阶段压实技术中,初压阶段使用双钢轮振动压路机,静压 1~2 遍,碾压速度控制在 1.5~2 km/h,从摊铺外侧边缘开始逐步向中心推进,重叠宽度为 15~20 cm。此时混合料温度较高,约在 140~155 ℃ 之间,静压可初步稳定混合料,避免出现推移现象。复压紧跟初压推进,采用轮胎压路机,碾压 4~6 遍,速度 2.5~3.5 km/h,轮胎气压不小于 0.55 MPa,利用轮胎碾压作用使混合料更密实,消除初压留下的轮迹^[4]。终压阶段再次使用双钢轮振动压路机,静压 1~2 遍,速度不超过 3 km/h,消除复压产生的轮迹,使路面平整度达到要求。终压结束时,混合料温度不低于 80 ℃,并且确保压实度满足设计标准,使普通混合料的压实度不小于 96%,改性沥青混合料的压实度不小于 97%。

5.3 特殊部位压实技术

施工中的一些特殊部位,压实技术需要重点控制。例如:在路缘石边缘等边角部位,由于空间受限,常规压路机难以有效压实。对此,可在此类区域中使用小型振动压路机进行补压,自重约为 2~8 t,行驶速度 1~2 km/h,碾压遍数不少于 3 遍,能确保边角处混合料压实度与整体一致,以免出现松散的情况。桥头搭板与路面衔接部位等构造物接头区域,可先用冲击夯初步夯实,冲击夯的冲击力不小于 20 kN,每点冲击次数不少于 20 次,使接头处混合料初步密实。随后使用双钢轮振动压路机进行精细碾压,碾压时压路机钢轮大部分处于已压实路面,只有少部分深入接头处。以 1~1.5 km/h 速度缓慢碾压 2~3 遍,重叠宽度 10~15 cm,消除接头处压实差异,保持路面整体平整度和压实度,防止不均匀沉降。

6 接缝处理与质量验收

6.1 接缝处理技术

处理纵向接缝时,梯队作业可使用热接缝方法。前一台摊铺机铺筑一定长度,后一台摊铺机紧跟,两机距离 10~20 m,重叠宽度 5~10 cm。碾压时先在已压实路面上行走,碾压新铺层 10~15 cm,再跨缝碾压新铺层全宽,反复 3~4 遍,使接缝紧密结合。如果是冷接缝,先在已压实路面上切割出垂直于路中

心线的整齐断面,清理碎料后涂刷粘油层,用量 0.3~0.6 L/m²,再摊铺新混合料。处理横向接缝时,摊铺结束时摊铺机驶离末端 1 m 左右,将熨平板抬起,人工将端部混合料铲齐整平^[5]。碾压后检查平整度,切除超限部分形成垂直断面。再次摊铺前在断面处涂刷粘层油,摊铺后先横向碾压,压路机位于已压实层上,伸入新铺层 15 cm,每压一遍向新铺层移动 15~20 cm,全在新铺层后再纵向碾压。

6.2 验收标准方法

验收环节检查接缝外观,保证平整顺直,无明显跳车错台。肉眼观察接缝,高低差不可超过 3 mm。使用 3 m 直尺沿接缝纵向放置,在接缝两侧各 1 m 范围检测平整度,每 100 m 检测 1 处,每处连续检测 10 尺,平整度最大间隙不得超过 5 mm。采用钻芯取样法检测接缝密实度,在接缝处随机选取位置,用钻芯机钻取直径 100 mm 的芯样,每 500 m 接缝取样不少于 1 个。观察芯样底部和基层的黏结情况,应无松散离析且芯样完整度良好。测量芯样高度和理论高度的偏差,偏差值不超过 ±2 mm。此外,还要检测接缝处的压实度,可采用核子密度仪或挖坑灌砂法。核子密度仪检测时,每 200 m 检测 1 处。挖坑灌砂法时,每 500 m 检测 1 处,压实密度要高于设计要求的 96%,使接缝质量符合标准,保障路面整体性能。

7 结束语

在公路施工中,有效控制和应用沥青混凝土路面施工技术,对于提高路面质量有着重要的意义。从施工前准备到接缝处理与验收,各个环节都要紧密相连,明确技术要点。在实际施工中,要注意严格把控材料设备、规范拌和运输、精准摊铺压实、妥善处理特殊部位与接缝,使路面具备良好的平整度、压实度和密实度。遵循以上技术要求,能减少路面病害发生,延长公路使用寿命,为公路交通安全与舒适提供坚实的保障,推动公路建设高质量发展。

参考文献:

- [1] 史红香. SBS 改性沥青混凝土路面施工技术在公路工程施工中的运用 [J]. 四川建材, 2024, 50(12): 175-177.
- [2] 薛建民, 陈雁龙. 沥青混凝土路面施工技术在市政公路中的应用研究 [J]. 中国厨卫, 2024, 23(05): 194-196.
- [3] 冉玉莲. 沥青混凝土施工技术在公路工程路面施工中的应用分析 [J]. 运输经理世界, 2024, 24(13): 28-30.
- [4] 孟凡玲, 李永峰. 沥青混凝土施工技术在公路工程路面施工中的应用 [J]. 汽车周刊, 2023, 14(03): 136-138.
- [5] 王惠明. 公路工程施工中的沥青混凝土路面施工技术分析 [J]. 交通科技与管理, 2022, 25(14): 91-93.

水利水电施工中施工导流与围堰技术应用研究

黄刚

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

摘要 水利水电工程是水资源利用和可再生能源开发的重要基础设施, 通常施工受水区限制, 存在水文条件复杂、洪水威胁等困难。该类工程主体工程施工通常要求在无水或深水区进行, 自然来水和洪水会造成阻隔、事故等影响, 因此需要“导水、挡水”的“截堵”任务。施工导流技术与围堰技术应运而生并且相互依存: 导流“导水”划分水流路径, 明确施工区域安全范围; 围堰“挡水”将水区围蔽, 创造干地空间。传统导流泄洪能力和围堰挡水、防渗能力弱, 随着水利工程尤其是高坝与地质复杂的水电工程建设不断发展, 对导流泄洪能力和围堰挡水、防渗能力的要求也越来越高。基于此, 本文分析了其核心内容、要点和优化方向, 并对二者协同机理进行了探讨, 以期为提高安全施工水平和实现工程总体目标提供借鉴。

关键词 水利水电施工; 施工导流; 围堰技术; 挡水结构; 施工安全

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.018

0 引言

在水利水电工程建设中, 施工导流及围堰技术作为水利水电工程实现主河道到永久性建筑物(如大坝、厂房等)建设的关键施工技术, 其科学性与合理性直接关乎工程整体施工进度、安全管控及投资效益的优化, 是整个工程施工中的重中之重。施工导流是指在水流走向规划的前提下, 以“导水过流”的方式, 将施工河道内主要水体引到河床以外以获得一个可施工的平面(导、泄); 围堰是指在“堤坝”(围堰)结构物的保护下, 隔绝洪水、河水进入工程主要施工面, 从而形成了水利水电工程施工“导、挡、泄”一体化技术。随着水利水电工程巨型化、复杂化、大河段化特点越来越明显, 相应的施工导流及围堰技术应用也必须要适应水文条件多变化、安全要求严格化。因此, 施工导流及围堰技术的优化应用和合理规范至关重要, 对预防水利工程施工洪水风险、保证主体工程施工质量、促进水利水电工程高效施工建设具有实践意义。

1 水利水电施工中施工导流技术的核心内容

1.1 施工导流方案的核心设计要素

导流技术的“顶层规划”是施工导流方案, 决定导流建筑物的建设速度、施工工期, 主要针对水文条件、工程规模、施工工期这三个方面进行, 确定设计可行性和安全性。其中水文条件是最基本的要求, 首先需计算出流域内枯水期、汛期的流量、汛峰、洪水位、泥沙粒径及含沙量等, 再根据工程级别的设计洪水重

现期来合理配置大洪水, 如对导流系统的标准设置偏低会导致导流系统失事。导流系统的布置首先要考虑主体工程布置和施工的先后, 在很多情况下, 大体积、长工期的工程采用分期的导流方式, 以边导流、边施工的形式完成边围堰边建闸, 同时应顾及成本和进度, 在保证安全的前提下可多试少挖, 降低导流建筑物的规模和拆除量。

1.2 施工导流建筑物的选型与布置

导流建筑物是实施导流方案的关键, 依据导流方案及水文地质条件确定导流建筑物的种类, 同时与主体工程位置布置确定导流建筑物的位置及尺寸, 满足导流、泄洪要求, 其典型方式为导流明渠、导流隧洞、导流涵管: 建设区地形平坦选择导流明渠, 便于建造且利于泄流; 岩质坚硬且高陡, 不利于边坡稳定且难防止其被冲刷破坏则选择隧洞; 对于规模小且泄流要求不高的工程, 可选择涵管。其布置的原则是要尽量不影响主体工程, 保证泄流顺畅, 建筑物进口远离淤泥沙区, 出口平顺与下游河道相连, 距离主体工程足够以保证后期主体工程施工及建筑物拆除、改造, 便于节约资源。

1.3 施工导流过程的关键控制要点

主体工程的施工导流与系统接续。施工导流要与主体工程建设动态开展, 并围绕分期控制、防汛调度、系统接续控制, 保障施工期系统稳定。在分期控制方面, 要确定各分期的工作任务和工程节点, 做到当期导流

建筑物先建后拆上期，防止出现断档、漏水现象，并根据枯汛期的变化调整流量，如枯水期时要控制规模、抓紧推进主体工程施工，汛期时就全力以赴保障泄洪；在防汛调度方面，建立即监测机制，跟踪水位情况、流量变化及结构的状态，遇到超标准洪水时及时启动预案，防止出现系统失效现象；在系统接续控制方面，一旦主体工程能够挡水后，就把水流导入永久泄洪建筑物，再把临时导流设施拆除掉，确保平稳交接，防止水流失控^[1]。

2 水利水电施工中围堰技术的核心内容

2.1 水利水电施工中围堰的核心类型与选型依据

挡水围堰作为挡水的临时建筑物，主要型式有土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰，需要根据水文地质、挡水要求、施工条件选择。土石围堰以土石料为主、用料易、价格低、工效高，适用于地基适、挡水水位不大于 30 m、洪水流量较小的工程，最为常用；混凝土围堰挡水高、防渗抗冲能力强，适用于高坝、大洪水或高渗透地基，但造价高、工期长，多用于主体工程，有时也用于围堰期；钢板桩围堰工效高、占地少、能重复使用，适用于小规模工程，浅水或临挡水，受桩长限制下挡水较低，地基为硬岩且施工困难，受场地条件限制。挡水围堰型式选择按“安全第一，适地适工、兼顾价耗”的原则确定。依据挡水高程和地基情况初步确定使用围堰型式范围，结合工期和条件确定最佳型式，兼顾挡水水位满足设计要求和工程成本、工期控制目标。

2.2 围堰结构的核心设计要点

围堰的结构设计方案主要是针对挡水高度、抗渗设计以及结构稳定方面，为挡水、抗渗、抗冲提供保障。在挡水高度上，堰顶高程必须超过设计洪水位，还需留 0.5~1.5 m 的安全超高防止其漫溢，底部宽度根据堰顶高程与地基承载力来确定，抗滑动、抗倾覆。在抗渗设计上，要考虑地基和本体，在地基中采用防渗墙、帷幕灌浆阻断地基水的渗流通道，本体中在土石围堰设防渗斜墙或心墙，密封拼接处的钢板桩围堰，减渗水量防止结构破坏。在结构稳定性上，主要是对水、土、波浪力作用下的抗滑稳定性、抗倾覆稳定性、抗渗稳定性进行验算，增加底宽、增设防滑齿墙、换填垫层，提高其稳定性，避免失稳风险^[2]。

2.3 围堰施工与拆除的关键控制要求

一是对围堰施工的质量控制，确保在围堰施工时的质量合格；二是对围堰施工的拆除控制，确保在围

堰施工拆除时将围堰的保护作为对主体工程和环境的保证。土石围堰在进行施工的过程中要先清除地基淤泥杂物，进行软弱地基的加固，确保承受力强、抗渗性好；控制材料质量，土石围堰的土料防渗、石料强度要够好，混凝土围堰要控制配合比和浇筑速度，钢板桩围堰要选择无破损的桩并进行密封拼接；控制工艺，土石围堰分层填筑和压实，混凝土围堰控制振捣和养护防裂，钢板桩围堰控制打桩的深度和垂直度。土石围堰的拆除要分阶段和分期拆除，要考虑主体工程的挡水能力，并在非汛期进行，在进行拆除的过程中按照“自上而下、分期拆除”的原则进行拆除工作，土石围堰的土料要控制一次拆除，分阶段拆除，要控制混凝土围堰的分段拆除爆破的强度；还要妥善处置建筑垃圾，对建筑垃圾进行合理的处理，确保环境不会受到影响。

3 水利水电施工中施工导流与围堰技术的协同应用及优化方向

3.1 施工导流与围堰技术的协同应用逻辑与要点

导流与围堰技术的融合在于“导定形、堰定界”，必须在方案规划、工程进度、安全防护三个层面进行两者的统筹融合，打造出“导、挡”一体化防护工程，为主体工程把好安全关。

第一，在方案规划层面，两者的参数要相匹配：围堰挡水的最高水位要以导流规划的洪水位为限，在此基础上给出对应工程等级的安全超高标准，防止漫顶，保证在安全标准以内进行工程建设；围堰的位置和导流明渠、隧洞等要相适应，使水流在不影响导水的前提下顺利地进入导流设施内，但不会对进出口的位置造成遮挡，而使水流经由进出口再重新返回主体工程。

第二，在工程进度层面，要在执行顺序和节点上有明确的要求：优先施工导流建筑物，使其具备导水能力后再修建围堰，否则会导致水流未通过导流设施进行排出；围堰拆除与导流系统的切换要同步，当主体工程到达挡水高程之后，永久泄洪设施开始启用，就可以分期分批拆除围堰，并且停止使用临时性的导流设施，防止“挡水一导水”的中断。

第三，在安全防护层面，要建立两者的联动机制，监测导流流量、水位及围堰渗水量和围堰结构变形情况，在超标准洪水的过程中要及时进行对围堰迎水面和坝体的围堰加固；而当围堰出现渗水或者是变形时，则要及时对导流设施的流量进行缩减，采取增设防渗、回填土石的方法，防止发生多重风险事故^[3]。

3.2 施工导流与围堰技术的核心优化方向

针对高洪水位、软基及生态敏感区等新环境下的水利水电工程建设，施工导流及围堰设计与施工技术需在严守安全底线的基础上，围绕效率提升与生态保护两大核心突破，以适配工程发展需求。安全与效率的设计核心聚焦防灾减灾能力，既要通过合理化防渗措施、选用能形成无向内渗水闭合环路的抗渗围堰结构，强化堰顶及迎水侧稳定性与洪水抵御能力，提升施工导流安全性，又要在保障安全的前提下，控制施工周期、降低成本，尽快搭建工程围挡，满足施工组织要求，实现安全与高效的综合设计^[4]。具体需重点落实四项措施：一是提升施工导流动态实时监测能力，依托现代动态实时测报信息与既有研究成果，结合大坝变形监控等技术跟踪流域降雨量、流量，通过实测数据、计算模型与实验室测试动态分析，确定导流安排；二是在保障安全的前提下提速围堰施工，提前完成现场截流与全断面施工，采用钢筋混凝土嵌缝、防渗膜等方式为上游迎水面设置防渗墙，强化抗渗与挡浪能力；三是结合大坝防渗效果、坝体及坝基稳定等因素，完善优化多套防渗结构设计方案；四是优化围堰结构稳定与抗冲设计，运用等效时序、模拟方法及时间序列模型，分析稳定影响要素统计特性与不确定性。同时需注重生态保护，通过优化施工导流组织设置生态流量通道，保障下游最小过坝流量；选用水泥石灰砂石等低污染围堰形式，减少弃渣与高石方开挖；拆除时优先回收可利用材料并环保处理，对河道、河堤开展生态修复，实现工程与环保协同推进^[5]。

3.3 施工导流与围堰技术应用的保障措施

为了促进施工导流和围堰技术结合应用和提档升级，保障体系应从技术研发、人才培育、规范化管理三个方面出发，为技术的应用与提效提供保障措施。

首先，通过产学研相结合的方式加强技术研究：高等院校、科研院所与设计施工企业共同就高洪水位、软土等复杂情况下开展技术攻坚，推出大流量隧洞导流、生态明渠导流等新的导流建筑物及生态防渗材、轻质高强挡水材等新材料，以及导流动态调度、围堰智能感知等智能化技术；及时总结工程运用经验，形成专利、工法等技术手段，促进技术的市场转化，解决复杂情况下的关键技术问题^[6]。

其次，人才队伍建设，通过“专业基础教育+工程实践经验培育”模式：高等院校对现有的水利工程专业教育方案做出改进，补充增设复杂环境中施工导

流围堰方案编制、智能化监测等进阶知识，为学生打好专业基础；工程企业在定期组织技术培训中，安排相关领域的专家解读新技术与案例，同时选拔技术人员到高坝大库、复杂流域等相关工程中开展实践，增强相关知识的实际运用与解决能力，填补相关技术应用人才的缺口。

最后，在流程管理环节，建立完善的标准监管机制：行业主管部门出台导流与围堰技术设计规范（洪水标准、结构验算要求）、施工规范（材料质量、工艺标准）、拆除规范（时间节点、环境防护标准），提出技术应用下限，并建立全过程质监管机制，通过施工现场检查、围堰渗水量测量、结构强度测量等措施，对设计、施工、拆除全过程监管，确保技术应用达标，保障施工安全。

4 结束语

施工导流及围堰技术是水利水电施工中最重要的两项关键技术，二者结合构成“导、挡”一体的防护系统，为主体工程提供干地施工条件，直接关系到工程安全、工期和费用。施工导流主要涉及方案比选、建筑物型式布置、施工过程控制，关键环节在“导”，即导流方案安全疏导水流；而围堰涉及类型选型、结构设计和施工拆除，关键环节在“挡”，即隔离水面的可靠围堰，二者相辅相成。未来，水利水电工程需向动态化、模块化、生态化发展，深化协调和智能监控。通过产学研相结合的方式，助力科研与人才、标准监管落地，并与智能化技术实现一体化控制，统筹工程安全、生态及资源循环利用，推动水利水电工程高质量发展。

参考文献：

- [1] 肖成龙.水利水电施工中施工导流和围堰技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(04):37-40.
- [2] 张锋.水利水电施工导流及围堰技术分析[J].水利电力技术与应用,2024,06(20):148-150.
- [3] 陈实.水利水电施工中施工导流和围堰技术[J].安家,2024(05):64-66.
- [4] 颜泽群,黄瑠,司帅.水利水电施工中施工导流和围堰技术研究[J].水利电力技术与应用,2024,06(24):43-45.
- [5] 田贺.水利水电工程围堰技术的应用研究[J].水电水利,2021,05(01):142-143.
- [6] 王华.水利水电施工中施工导流与围堰技术研究[J].市场周刊·理论版,2020(87):221.

老旧小区改造中的给排水管网更新技术与施工干扰控制

计安琪

(嘉兴市南湖投资开发建设集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要 老旧小区的基础设施改造是城市更新的重要部分。本文围绕老旧小区改造中的给排水管网更新技术及施工干扰控制进行研究, 分析了老旧小区给排水系统存在的主要问题及其对居民生活的影响, 详细探讨了常用的管网更新技术, 并对比了它们的应用情况和优缺点。本文针对老旧小区改造中的给排水管网更新施工过程中可能出现的干扰居民生活的问题, 提出了一系列干扰控制措施, 验证了所提技术和措施的有效性。研究结果表明, 合理选择管网更新技术并采取有效的施工干扰控制措施, 可以显著提升老旧小区改造工程的质量和居民满意度。

关键词 城市更新; 老旧小区改造; 给排水管网; 管道更新技术; 施工干扰控制

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.019

0 引言

在推进城市更新过程中, 老旧小区基础设施问题凸显, 给排水管网系统问题尤为突出。老旧系统影响居民生活质量且存安全隐患, 对其进行改造是城市更新的重要内容。

本文聚焦老旧小区给排水管网更新技术与施工干扰控制。通过深入分析管材老化、供水不稳等问题对居民生活及健康的影响, 比较顶管法、管道爆破法、原位固化法等主流管道更新技术特点、适用环境与优缺点, 提出了施工干扰控制措施, 旨在为城市更新项目提供理论与实际参考。

1 老旧小区给排水系统存在的问题与影响

1.1 管材老化问题分析

老旧小区的给排水系统中, 管材老化是普遍存在的问题, 直接影响系统的性能和可靠性^[1]。管材随着时间的推移, 受到内外应力、化学腐蚀及环境条件的影响, 容易出现破损、漏水等情况^[2]。这不仅导致水资源的浪费, 还可能因管道破裂引起地面沉降, 危害建筑物的结构安全。例如: 管道漏水会导致墙皮脱落等一系列问题, 老化的管道内壁常积累水垢和杂质, 增加了水流阻力, 导致供水压力不足和输水效率下降。管材老化还可能造成铁锈等物质溶解进入水中, 直接影响水质, 进而危害居民的健康安全。分析和解决管材老化问题, 成为老旧小区给排水管网更新中的首要任务。有效的更新技术与管理措施, 不仅能延长管道使用寿命, 还能保障居民的生活质量。

1.2 水质下降及其健康影响

提高供水水质是老旧小区改造中的重点工作。老旧小区的水质下降主要归因于管网系统的老化和污染物的侵入。老化的管材可能会引发锈蚀, 导致铁锈、重金属等有害物质溶入供水系统, 严重影响水质。管道破裂、渗漏等问题也容易使外界污染物进入管网, 从而加剧水质的不稳定。这种下降的水质对居民健康构成潜在威胁。如饮用受到重金属污染的水可能导致慢性健康问题, 包括神经系统损害和肾脏疾病。水质问题还会影响居民的日常生活质量, 增加居民对末端净水设备的依赖, 提高了居民的生活成本。

1.3 供水不稳定性分析

解决供水不稳定性问题是老旧小区改造中的一项重要任务。老旧小区的给排水系统中, 供水不稳定性是一个常见问题, 主要表现为供水压力不足、水流中断频繁和供水量波动。导致这一问题的因素包括: 水管老化和管径不匹配, 容易引发堵塞和漏水。市政供水网络的末端位置导致压力不足, 特别是在用水高峰期时更为明显; 人口密度增加和用水需求上升, 使得现有网络难以承受负荷, 进一步加剧供水不稳定; 管道维修及改造期间, 往往需要临时停水或调流, 增加了供水的不确定性。这些问题不仅影响日常生活质量, 还可能对居民的健康和安全构成威胁。

2 老旧小区给排水管网更新技术概述

2.1 顶管法

顶管法作为管网更新中的一种非开挖技术, 因其对地表环境影响较小而备受关注。该技术利用液压或

机械设备，沿设定轨道将预制管道从起始井推至接收井。此方法可以有效避免大面积开挖对地面交通和周边建筑的影响，特别适用于城市老旧小区等施工条件受限区域。顶管法的施工精度高度依赖于先进的测量和导航技术，需确保导向精确，以保证管道平稳安装。采用耐用的复合材料作为顶管材质，可以有效抵御地下水和土壤化学物质的侵蚀，延长管道使用寿命。顶管法工程成本较高，对施工设备和操作技术要求严格，需要专业团队进行操作和管理。高效的工程组织和管理能最大限度发挥此技术的优势，确保施工质量和效率。

2.2 管道爆破法

管道爆破法是一种用于老旧小区给排水管网更新的有效技术。其基本原理是通过特制的机械设备，将旧管道沿线进行破碎，引入新管道。该方法对现有管道材质和埋设条件有较强的适应性，能够在小规模开挖的基础上快速更换地下管网。管道爆破法具有施工周期短、对地面干扰小等优点，尤其适用于城市密集区域和交通繁忙的地段。但该方法也存在一定的局限性，如在操作过程中可能产生较大震动，对周边环境和建筑物有潜在影响。实施时需做好风险评估和现场监测，以确保施工安全和工程质量。

2.3 原位固化法

原位固化法（CIPP）是一种非开挖管道修复技术。其通过在旧管内衬入树脂浸渍的软管，并经加热硬化形成新管层，以提高管道强度和耐用性^[3]。CIPP技术的优点在于减少开挖，工期较短，对交通和环境影响小。CIPP技术也存在一些缺点，例如：初始材料和设备成本较高，对施工工艺要求严格，以及可能存在树脂未完全固化导致的内壁异常问题。CIPP技术适用于管道材质特殊或不宜大规模开挖的更新项目。

为了更清晰地对比这几种常见管网更新技术，现将它们的相关数据和效果进行汇总，详情如表1所示。

3 老旧小区给排水管网更新中的施工干扰控制策略

3.1 施工时间管理

施工时间管理在老旧小区改造中起着至关重要的作用，既能有效减小施工对居民生活的干扰，又能提

高工程效率。制定合理的施工时间表是控制施工干扰的关键步骤。建议在居民活动较少的时段进行施工，如工作日的白天，尽量避开居民休息的时间段。应与社区居民进行充分沟通，提前告知施工计划以获得理解和支持。合理的时间安排还能帮助施工队合理分配人力物力资源，提高施工效率^[4]。在特殊情况下，如急需进行大型设备安装或需要不中断的连续作业时，需制定特定的施工安排，并采取额外的干扰控制措施，如临时围挡和噪声隔离设备^[5]。通过科学的时间管理，能够有效降低施工噪声及其他干扰对居民生活的影响，提高居民对改造工程的接受度和满意度。

3.2 环境噪声控制

环境噪声控制在老旧小区改造过程中至关重要。施工噪声不仅影响居民的日常生活和工作，还可能引发健康问题，如听力损伤和压力增加。为有效控制噪声干扰，应在施工过程中引入多种噪声管理措施。具体方法包括使用低噪声设备和先进的降噪施工技术，如安装临时隔音屏障，以降低声波传播。实施严格的时间规定，避免在居民休息时段进行高噪声施工活动。定期监测和评估噪声水平，确保符合国家标准。加强与居民的沟通，及时告知施工计划和进展，以获得他们的理解和支持，为顺利推进改造工程创造有利条件。

3.3 临时供水解决方案

在老旧小区改造中的给排水管网更新过程中，为尽量减少对居民日常生活的供水干扰，临时供水解决方案尤为重要。此方案通常涉及在施工阶段设置临时管道，以保证持续供水。通过在施工现场周边布置便携式供水设备，确保居民能够随时获取洁净水源。合理规划临时供水时间，提前告知居民具体安排，以减少不便和不满。有效的应急供水措施不仅保障了居民的基本生活需求，也有助于提高居民对改造工程的支持与满意度。

4 老旧小区给排水管网更新技术与措施的实际应用效果

4.1 更新技术的效果比较

在老旧小区改造中，给排水管网更新技术的选择对于工程效果至关重要。顶管法以其不开挖施工的优

表1 老旧小区给排水管网更新技术对比与效果

技术名称	施工成本（万元/公里）	施工周期（天）	适用管径范围（mm）	更新后供水稳定性提升效果
顶管法	120～150	30～45	300～1 200	显著提升，压力波动减小
管道爆破法	80～100	15～25	200～800	有一定提升，但受爆破影响初期可能存在波动
CIPP技术	100～130	20～30	150～600	提升明显，内壁光滑，水流阻力减小
传统开挖更换法	60～90	40～60	100～500	提升效果一般，受开挖影响施工期间供水不稳定

点减少了对地面设施和交通的影响，但在空间受限或地质条件复杂的情况下，其施工难度和成本可能增大。管道爆破法适用于更换旧管道时的快速施工，但爆破过程中可能会影响邻近建筑物的结构稳定，需特别谨慎。CIPP 技术在提升管道内部耐腐蚀性方面表现出色，适合用于管道内壁修复，对管径变化的项目适用性有限。各项技术在具体应用中需依据现场情况和改造需求进行选择，以最大化更新效果并最小化施工风险。

4.2 干扰控制措施的实施效果

在老旧小区改造过程中，施工干扰控制措施的实施效果主要体现在减少居民生活的不便和提高工程整体效率两个方面。施工时间管理通过合理安排工期和施工时段，尽量避开居民休息时间，显著减少了对日常生活的干扰。环境噪声控制措施如使用低噪声设备和安装隔声屏障，有效降低了施工噪声对居民的影响，居民投诉率大幅下降。临时供水解决方案确保居民在施工期间依然能够正常用水，减轻了因供水中断带来的不便。在实际应用中，这些措施通过提升居民的满意度和对工程的接受度，推动了改造项目的顺利进行，也为今后类似工程的干扰控制提供了宝贵经验。

4.3 提高居民满意度的策略

在老旧小区改造中，提升居民满意度的核心策略需贯穿施工全周期。在施工前，通过社区座谈会、线上问卷及入户访谈等方式，与居民充分沟通改造方案，明确施工计划、工期及长期效益（如减少漏水、提升水质），同步发放图文并茂的告知书，重点标注噪声时段、临时用水安排等关键信息，消除信息不对称。在施工过程中，建立“双线反馈”机制：线上开通 24 小时咨询热线，线下在社区公告栏及单元门设置意见箱，每日汇总居民诉求，针对合理建议（如调整施工时间、优化临时通道）24 小时内响应调整；同步完善施工现场标识，设置夜间反光警示牌、临时通行指示牌，并安排专人引导，确保居民出行安全。此外，定期公开施工进度与质量检测报告，邀请居民代表参与验收，增强透明度。通过“沟通—反馈—改进”闭环管理，居民对施工的理解度提升 60% 以上，投诉率显著下降，形成共建共享的良好氛围。

5 老旧小区改造实践

某老旧小区建成于 20 世纪 90 年代，原有铸铁管网因长期腐蚀导致频繁渗漏，居民投诉率居高不下。改造中采用 PE 管替代铸铁管，利用其耐腐蚀、寿命长的特性，从根本上解决了管道老化问题。同时，针对局部破损严重但无需整体更换的管段，引入 CIPP（原

位固化法）非开挖修复技术，通过内衬树脂软管实现无损修复。两种技术结合后，施工周期较传统开挖方式缩短 30%，且仅占用道路面积的 40%，显著降低了对居民日常出行的影响。改造后管网漏水率从 15% 降至 0.5%，年维修成本减少 60%，经济效益与环境效益双提升。

为减少施工对居民生活的干扰，项目方创新引入居民监督机制：改造前通过社区会议选举 5 名居民代表，全程参与施工方案制定与进度监督；施工中设立 24 小时咨询热线，每日公示施工计划，并针对噪声、尘土等问题采取分段作业、洒水降尘等措施。例如：将原本连续 7 天的开挖作业调整为“夜间备料、白天施工”模式，避免影响居民休息。通过透明化管理与快速响应机制，投诉率较同类项目降低 50%，居民满意度从改造前的 62% 提升至 90% 以上。该案例表明，技术升级与居民协同管理相结合，既能高效完成管网更新，又能最大限度保障民生需求，为老旧小区改造提供了可参考的实践经验。

6 结语

本文围绕老旧小区改造中的给排水管网更新技术与施工干扰控制展开综合研究。针对老旧小区基础设施存在管材老化、水质下降等问题，深入分析了顶管法、管道爆破法、原位固化法等技术的应用及优缺点。针对施工干扰居民生活问题，提出合理安排施工时间等有效控制措施，降低干扰、提升居民生活质量。但是，本研究在施工技术选择与优化上有局限，如特定条件下技术效果不理想、成本分析不全面。未来可进一步探索经济高效的技术，开发精确施工干扰评估模型，实现改造工程最优化，为城市基础设施更新提供支持。

参考文献：

- [1] 曹雄君.老旧小区排水管网改造工程技术措施[J].四川水泥,2021(12):42-43.
- [2] 刘冰,曹锋斌,王清龙,等.浅谈老旧小区改造给排水管道改造[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(07):209-211.
- [3] 胡慧君,罗涛,吴岩,等.城市老旧小区排水管网更新改造技术[J].安装,2023(04):39-43.
- [4] 杨育红.城镇老旧小区给排水管道改造设计[J].城镇建设,2020(11):30.
- [5] 吴江涛,秦晓梅,胡颖慧,等.老旧小区室外给排水管网提升改造设计分析[J].中国建筑金属结构,2023,22(S2):168-171.

给排水工程中给水管道非开挖不锈钢内衬修复技术应用研究

谭汝邦

(广东佛水建设有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要 给水管道是城市基础设施的核心环节, 其运行状态直接决定了居民用水安全, 也事关城市发展。本文聚焦给水管道非开挖不锈钢内衬修复技术, 在阐述该技术原理与优势的基础上, 解析结构设计要点, 并结合工程案例梳理施工流程: 从前期勘察、工作井施工, 到断管通风、检测预处理, 再到内衬设计、管胚制作、内衬处理与焊接, 最后完成焊缝检测。研究结果表明, 非开挖不锈钢内衬修复技术可有效解决腐蚀、渗漏问题, 显著提高管道耐久性与安全性。

关键词 给排水工程; 给水管道; 非开挖不锈钢内衬修复技术

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.020

0 引言

给水管道长期通水后, 管道受水质、土壤等多重因素影响, 腐蚀、渗漏甚至爆裂频频出现, 既埋下安全隐忧, 也浪费了水资源。传统开挖修复弊端明显, 大面积开挖路面, 导致交通阻断、噪声污染及粉尘污染、地下管线易遭连带破坏, 影响市民出行和生活, 而且费用高、工期长。非开挖技术通过避免大面积开挖地表, 显著减少了对城市交通、商业活动和居民生活的干扰, 同时有效降低了扬尘、噪声等环境污染, 施工周期短、效率高, 且综合成本更低, 通过减少土方作业和材料浪费实现经济性优化, 成为给水管道更新的优先选项。

1 非开挖不锈钢内衬修复技术概述

1.1 技术原理

非开挖不锈钢内衬修复技术无需破土即可修复给水管道。施工时, 专用设备把薄壁不锈钢管送入旧管, 并使其紧密贴合, 形成“管中管”。不锈钢耐腐蚀、强度高, 可隔绝水质与旧管壁接触, 阻止继续锈蚀, 从而恢复通水能力与密封性, 延长管道寿命^[1]。

1.2 技术优势

环境影响显著降低。由于无需全线开挖, 城市路面、地下管线和居民生活几乎不受施工扰动; 现场扬尘与噪声同步下降, 城区得以保持洁净与安静。一次连续修复可超过 500 m, 工期因此缩短, 且完工后无需养护即可通水, 停水时间被压缩到最低, 整体效率随之提升。不锈钢内衬耐腐蚀、耐冲刷, 使修复后的管道寿命延长至五十年以上, 耐久性与安全性同步提高。光滑的

内壁不易结垢, 不会向水中释放污染物, 对饮用水尤其友好。给水、排水、燃气、热力、电信、电力及工业管线均可采用这一工艺, 不同材质、口径和压力等级的管道都能适配, 通用性突出。

2 不锈钢内衬非开挖修复结构设计

2.1 内衬材料

非开挖不锈钢内衬修复常用的不锈钢牌号包括: 06Cr19Ni10 (304)、06Cr17Ni12Mo2 (316) 和 022Cr17Ni12Mo2 (316L), 其性能与适用场景见表 1。

2.2 内衬管直径选择

内衬管直径需按原管内径精确匹配, 既要保证顺利推入, 又要贴紧管壁。通常取比原管内径稍小的尺寸, 置入后再用缩径或水压膨胀使其密贴。现场还需结合管道变形程度和修复目标综合权衡。以 DN800 管为例, 内衬管可做成 780 ~ 790 m。

2.3 内衬管壁厚计算

不锈钢内衬非开挖修复技术通常用于原管道仅出现轻度腐蚀等轻微破损的情形。修复完成后, 原管与内衬管一起分担内外压力。因此, 当该技术应用于因腐蚀而轻度受损的重力流原管时, 内衬壁厚 t 应按下列公式确定:

$$t = \frac{D}{[2KE_L C/PN(1-v^2)]^{1/3} + 1} \quad (1)$$

式 (1) 中: D 为原管道平均内径, mm; E_L 为内衬弹性模量, MPa; C 是椭圆度修正系数; P 为内衬临界负压, MPa; N 为安全系数。采用不锈钢内衬修复非埋

表 1 不锈钢内衬材料状况

牌号	化学成分特点	力学性能	适用条件
06Cr19Ni10 (304 型)	含 18% 铬、8% 镍, 具有良好的耐腐蚀性和加工性能	抗拉强度 > 520 MPa, 延伸率 ≥ 35%, 屈服强度 ≥ 310 MPa	适用于一般水质条件, 氯离子含量 ≤ 200 mg/L 的饮用净水、生活饮用冷水、热水、空气、燃气等管道
06Cr17Ni12Mo2 (316 型)	在 304 型基础上增加了钼元素, 耐腐蚀性更强	抗拉强度、延伸率、屈服强度等力学性能与 304 型相近	适用于耐腐蚀要求高于 304 型场合的管道, 氯离子含量 ≤ 1 000 mg/L
022Cr17Ni12Mo2 (316L 型)	碳含量更低, 耐晶间腐蚀性能更好	力学性能与 316 型相似	适用于海水或高氯介质环境

地原管道时, 设计内衬厚度 t 按下式计算:

$$t = \frac{D}{2\sigma_{tl}IPN + 2} \quad (2)$$

式 (2) 中: σ_{tl} 为不锈钢内衬抗拉强度, MPa。

对轻微破损的埋地原管道实施不锈钢内衬修复时, 最终设计厚度需经两道计算: 先按式 (1) 和式 (2) 分别求值, 再取两者中的较大值作为结果。

《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332-2002) 将压力管道运行中可能出现的真空负压标准值定为 0.05 MPa。据此, 结合前述理论公式与试验数据, 本工程各参数取值及壁厚计算结果汇总于表 2。

表 2 给出的计算结果显示, 式 (1) 得 $t=1.92$ mm, 式 (2) 得 $t=0.046$ mm, 设计壁厚取二者较大值, 即 1.92 mm。试验用 1.79 mm 不锈钢内衬在 -0.05 MPa 负压下仍完好, 表明按原位固化法半结构性修复公式得到的壁厚偏于保守^[2]。

3 工程案例及应用分析

3.1 工程概况

某老旧城区一段给水干管需修复, 全长 1 000 m, 管径 DN1200, 原管材为预应力混凝土管, 已运行逾 20 年。长期服役后出现多处渗漏与腐蚀, 供水受到明显影响。经综合比选, 确定采用非开挖不锈钢内衬技术进行更新。

3.2 不锈钢内衬修复技术施工工序

3.2.1 现场勘察及地下管线的探测

施工启动前, 必须对目标管道做一次彻底勘察。除逐段记录材质、直径、长度、走向和埋深外, 还要把周边环境摸清楚, 以便准确判断管道损伤程度并掌

握地质状况。随后, 用地下管线探测仪扫描作业区, 将其他管线的平面位置和走向标在图上, 防止后续开挖误伤^[3]。

3.2.2 工作井设计施工

结合现场踏勘与地下管线资料划定工作井位置时, 应遵守三项原则: 第一, 选址前须通盘考虑周边环境和交通条件, 尽量让井位避开地上建筑、架空线、地下管线及其他既有构筑物, 以降低对邻近设施的扰动并确保作业安全; 第二, 为便于施工, 井位宜落在管径变化、走向转折或设有阀门井等特征点, 使操作面更集中; 第三, 同一修复段两端的工作井间距须与施工能力匹配, 一般不宜超过 500 m。本段管道拟设三口工作井, 平面尺寸统一取 4 m×4 m, 井底高程定于管底以下 0.7 m。

但在实际开挖前, 工作井的最终落点仍需把现场环境、交通条件及拟采用的施工工艺一并权衡后才能决定。

3.2.3 管道断管、通风

本工程中, 为避免由于施工期间有少量泥沙和其他杂质随水流带入管道而影响安装质量及今后使用功能, 在每段施工区的两头设堵头封死; 并做断水处理、使管道处于干燥状态; 在管道内部安装风道风机等通风装置, 将管道内有毒或易燃性气体排到室外去, 以保障施工人员安全。

3.2.4 管道检测与预处理

1. 管道检测: 借助 CCTV 检测机器人和声呐设备, 对给水管道进行全覆盖扫描, 记录腐蚀、破损、管径及走向等内部信息, 并据此判断修复可行性与拟定方

表 2 不锈钢内衬各参数的取值及壁厚计算

项目	管径 (D) /mm	增强系数 (K)	弹性模量 (E _L) /GPa	椭圆度修正系数 (C)	内压 (P) /MPa	安全系数 (N)	泊松比 (v)	抗拉强度 (σ _{tl}) /MPa	壁厚 (t) /mm
公式 (1)	800	11.38	195	0.91	-0.05	1.2	0.247	—	1.92
公式 (2)	800	—	—	—	-0.05	1.2	—	520	0.046

案。结果显示,管道多处出现裂缝、穿孔及局部严重腐蚀。

2. 管道预处理:先对局部破损、裂缝或错位等缺陷进行修补,如用环氧树脂封堵、钢筋混凝土加固,使原管道恢复结构稳定;随后以高压水射流或化学清洗去除沉积物、水垢和锈蚀,令内壁洁净,从而保证不锈钢内衬与原管壁紧密贴合。

3.2.5 内衬设计及管胚制作

依据管径与修复需求,选定06Cr19Ni10(304型)不锈钢板,厚度1.2mm。板材在工厂按图下料,经卷制、焊接制成与旧管匹配的内衬管。现场将不同幅宽原料搭配,用4m卷板机卷圆,直径控制在1.0m左右,对应DN1200原管,临时定型成管坯;随后以自动或手工焊完成纵缝,全程监控电流、电压及速度,保证焊缝性能达标。

3.2.6 内衬处理及焊接

1. 将卷制成型的不锈钢管坯吊入工作井,置于电动运输小车,由电动运管车推送至原管道。布管时,相邻管段纵向焊缝应错开200mm以上,并尽量位于4点与8点钟方向,搭接朝向水流下游。随后以牵引绞车为动力,把经变形模具缩径后的不锈钢内衬逐节拖入待修管段;牵引速度保持均匀,绳表涂润滑脂以降低摩擦,防止衬管表面划伤。

2. 内衬贴合:利用水压膨胀法让内衬管紧贴原管壁。向内衬管注入高压水,使其均匀扩张并与原管道贴合,过程中避免出现空隙或褶皱。

3. 内衬焊接:采用分阶段集中作业,先将长度超过10m的不锈钢管坯布设到位,再集中完成纵向焊缝,随后进行环向焊接,形成连续内衬。焊接选用氩弧焊,焊前清理坡口,焊接过程中严格控制参数,确保焊缝牢固、平整,无气孔、夹渣等缺陷^[4]。

3.2.7 焊缝检测与试验处理

1. 焊缝检测:采用超声波、X射线等无损手段对焊接部位进行全覆盖检查,确保内部质量达标。检测比例与合格等级按现行规范及设计文件执行,本工程实行100%探伤,评定级别为I级。

2. 严密性试验:依据《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—97)和《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210),对修复管段做水压试验。压力升至设计值的1.5倍后稳压30min,全程无渗漏,严密性满足要求。

3. 强度试验:修复完成后,对管道加压至设计值并稳压不少于30min,观察是否出现变形或渗漏。试验结果表明,管道强度达标,未见异常。

4. 外观检查:查看管道外表面,确认不锈钢内衬管是否光滑平整,焊缝是否饱满且无缺陷,并核对管道与检查井等附属接口的密封情况。结果显示,内衬管表面平整,焊缝饱满、无瑕疵,与附属设施连接严密^[5]。

3.3 修复效果评估

修复完成后,对管道进行了压力试验和内窥镜检测。压力试验结果表明,管道在1.5倍工作压力下保持30min无泄漏,符合设计要求。内窥镜检测显示,不锈钢内衬与原管道内壁贴合良好,接缝处焊接质量可靠,内衬表面光滑,无缺陷。同时,对修复前后的管道流量和水质进行了监测,结果如表3所示。

表3 修复效果对比

监测项目	修复前	修复后	变化率
管道流量 (m ³ /h)	800	850	+6.25%
水质浊度 (NTU)	1.5	0.8	-46.67%
水质余氯 (mg/L)	0.3	0.5	+66.67%

从表3中可以看出,修复后管道的流量有所增加,水质得到了明显改善,说明非开挖不锈钢内衬修复技术有效地提高了管道的输水能力和供水质量。

4 结论

本文结合理论推导与现场案例,对给水管道非开挖不锈钢内衬修复技术进行了系统探讨,主要结论如下:首先,该技术扰动小、工期短,衬后管道密封性与水质均保持良好,可广泛用于腐蚀、渗漏等病害治理,综合优势突出。其次,设计阶段需依据服役工况,匹配不锈钢牌号、内衬管径及壁厚,使修复管段在剩余寿命周期内满足强度与过流要求。最后,案例表明,严守工序流程、强化质控与安全管理,是确保工程质量与运行安全的关键。未来研究应持续优化工艺,提升效率。

参考文献:

- [1] 李国民,乔士航,颜腊红,等.某河流穿越管道腐蚀检测与修复[J].腐蚀与防护,2020,41(12):34-36,43.
- [2] 孔祥利,文韬,樊星.管道非开挖修复技术在城市水环境治理中的应用研究[J].施工技术,2020,49(18):73-75.
- [3] 罗智程.给水管道不锈钢内衬非开挖修复技术研究与应用[J].中国给水排水,2021,37(16):102-107.
- [4] 钱吉洪,陈威任,王喆.非开挖CIPP常温固化翻转内衬修复技术在供水管道的应用[J].城镇供水,2021(04):48-51.
- [5] 张锦刚,杨国才,刘刚伟,等.管端内衬不锈钢焊管环焊缝缺陷分析[J].焊管,2017,40(08):45-48.

复杂地质条件下深基坑开挖与降水技术研究

——以南围泵站工程为例

林亦夫

(广东金松建设集团股份有限公司, 广东 佛山 528308)

摘要 随着城市化进程的加速, 各类地下工程日益增多, 深基坑工程在复杂地质与水文条件下所面临的挑战愈发严峻。本文以佛山市南围引排水泵站深基坑工程为具体案例, 系统探讨了在冲淤积平原复杂地质环境下深基坑开挖与降水技术的综合应用, 重点分析了基于拉森钢板桩与多道内支撑的复合支护体系选型依据与设计特点, 详细阐述了“分层分段、对称开挖”的土方开挖策略, 并对井点降水技术的实施方案、效果监测与控制进行了深入剖析。研究结果表明, 通过科学的支护设计、精细化的开挖过程控制以及有效的降水措施, 结合全过程信息化监测, 能够有效控制基坑变形, 确保支护结构和周边环境的安全稳定。

关键词 深基坑工程; 复杂地质; 基坑开挖; 井点降水; 拉森钢板桩

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.021

0 引言

深基坑工程是现代城市建设与水利工程中的关键环节, 其施工安全与稳定性直接关系到整个工程的成败以及周边环境的安全。特别是在江河三角洲冲淤积平原地区, 地质条件通常表现为上覆土层松软、含水量高、承载力低, 且常夹杂淤泥、淤泥质土等不良土层, 地下水位普遍较高, 这给深基坑的开挖与支护带来了巨大的技术挑战^[1]。基坑失稳、过大变形、涌水涌砂等问题是此类工程中常见的风险源, 可能导致工程延误、成本超支, 甚至引发坍塌等重大安全事故。

本研究以南庄镇南围引排水泵站工程为典型案例, 该工程位于佛山市禅城区东平水道沿岸, 地处河流冲淤积阶地, 地质构造及水文条件较为复杂。工程主体为在既有水闸旁新建引排水泵站设施, 其中基坑最大开挖深度达 7.8 m, 属典型深基坑工程。依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012) 标准, 该基坑工程安全等级评定为二级, 对施工技术及安全管理均提出较高要求。本研究基于该工程专项施工方案, 系统分析基坑开挖工艺及降水排水技术措施, 深入探讨复杂地质条件下深基坑施工安全控制的关键技术与管理要点, 为同类工程实践提供技术参考。

1 工程概况

1.1 工程基本情况

南围引排水泵站工程位于佛山市禅城区, 北邻东平水道, 西接石湾大桥。工程主要内容为新建一座排

涝泵站(设计流量 6 m³/s)和一座引水泵站(设计流量 3 m³/s), 旨在提升区域的排涝能力和改善水环境。工程规模为小(1)型, 工程等别为Ⅳ等。本研究关注的深基坑部分, 是为排涝泵站底板施工而开挖, 最大深度达 7.8 m, 支护总长度约 46 m。施工场地紧邻堤围, 周边有车辆和行人通行, 作业面相对狭窄, 对施工组织和安全文明施工提出了更高的要求。

1.2 工程地质特征及水文地质条件

根据工程地质勘察报告, 场地地貌为江三角洲冲淤积平原, 地势起伏不大。上覆第四系土层自上而下主要包括:

(1) 人工填土层(Qml), 主要由粉土或粉质粘土混杂砂粒及少量碎石、碎砖组成, 厚度 3.3~6 m, 土质不均匀, 粘性较差, 呈很湿至饱和状态; (2) 第四系冲积层(Qal), 包含<2-1>淤泥、淤泥质土和<2-5>粉质粘土, 其中淤泥及淤泥质土呈流塑状, 局部含有机质, 属不良工程地质土层, 粉质粘土则呈软塑至可塑状态; (3) 第四系残积层(Qel), 以残积粉土和残积粉质粘土为主, 密实度中等, 可塑至硬塑; (4) 古近纪(E)基岩, 主要为强风化至中风化的泥岩、砂岩及泥质砂岩, 岩体松软, 风化程度不均。

综合分析表明, 基坑开挖深度范围内主要涉及人工填土层和淤泥质土层, 该土层物理力学性能较差, 自稳能力不足, 是基坑支护设计的重点控制对象。

地表水主要为东平水道其周期性水位变化对地下

水形成补给作用。地下水系统主要由填土上层滞水和风化基岩裂隙水构成。根据勘察数据,地下水位年变幅介于1~2 m之间,主要补给源为大气降水和河道渗流。鉴于该区域地下水位较高且水量充沛,在基坑工程施工中需实施有效的降水及隔水方案,以防范坑底隆起、涌水涌砂等工程风险,同时降低支护结构承受的水土压力。

2 深基坑支护体系设计

针对本工程复杂的地质条件和较深的开挖深度,支护体系的选型至关重要。设计方案综合考虑了土层特性、开挖深度、周边环境以及施工经济性,最终采用了拉森钢板桩加内支撑的支护形式。根据不同开挖深度,设计了两种具体的支护方案^[2]。

2.1 支护结构选型

本工程基坑开挖深度范围内的土层主要为筑填土和淤泥质土,地质条件一般。鉴于基坑深度较大(最大7.8 m)且需满足隔水要求,综合考虑施工效率、密封性能及可重复利用性等因素,最终选用拉森钢板桩作为主要围护结构。为确保围护体系的稳定性,有效控制土压力和水压力作用下的位移变形,设计采用多道钢管内支撑体系。具体支护方案如下:

(1) 针对6.5 m基坑深度段:采用15 m长III型拉森钢板桩,配合单道DN600×10钢管内支撑,支撑位置设于地面以下1.2 m处,钢板桩间通过2I32a工字钢围檩实现荷载传递; (2) 针对7.8 m基坑深度段:同样采用15 m长III型拉森钢板桩,设置双道内支撑体系,首道支撑位于地面以下1.2 m,次道支撑与首道支撑间距4.3 m,通过双层支撑结构增强对深层土体侧向压力的抵抗能力,确保基坑变形可控。

所选用的III型拉森钢板桩,宽度400 mm,高度125 mm,厚度13 mm,理论重量60 kg/m。施工前要求对钢板桩进行严格检查,确保无穿孔、锁口完好,并进行修边调直,以保证墙体的整体性和止水效果。

2.2 钢板桩施工工艺

钢板桩的施工质量直接决定了支护体系的成败。本工程采用振动锤进行施打,并制定了详细的施工工艺流程:板桩准备→导架安装→板桩施打→偏差纠正→拔桩^[3]。其中,导架的安装和板桩的施打是关键环节。

为保证施打精度,施工中设置了坚固的单层双面导架(施工围檩),严格控制其位置和垂直度。板桩施打采用“屏风式打入法”,即先将10~20根板桩成排插入导架,形成屏风状,然后分序施打。这种方法能

有效防止单根桩在施打过程中发生倾斜、扭转,保证了桩墙的平直度和最终的封闭合拢质量。施工过程中,对板桩的轴线偏差(±10 cm)、桩顶标高(±10 cm)和垂直度(1%)均有严格的公差要求。打桩完成后,还需进行闭水性检查,对可能存在的渗漏点进行焊接修补,确保围护结构的止水功能。

3 基坑开挖与降水技术

3.1 基坑开挖策略

基坑开挖必须与支护结构的施工紧密配合。为控制基坑变形和保证边坡稳定,土方开挖遵循以下核心原则:

(1) 分层分段开挖:严禁一次性开挖至设计深度。根据支撑的设置位置,进行分层开挖。挖至第一道支撑设计标高下约0.5~1 m时,暂停开挖,立即安装第一道支撑并施加预应力,然后继续下挖至第二道支撑标高附近,安装第二道支撑,依此类推。这种“随挖随撑”的作业方式,可以最大限度地减少围护墙的无支撑暴露时间,有效控制变形; (2) 对称均衡开挖:在基坑平面内,土方开挖应力求对称、均衡,避免因局部超挖或荷载不均导致支护结构受力失衡,引发扭转或倾覆; (3) 严格控制周边荷载:设计要求基坑周边的地面荷载标准值不超过5 kPa。施工期间,严禁在基坑边缘堆放土方、建筑材料或停放重型机械,以减小对支护结构的附加侧向压力; (4) 加强过程监测:在整个开挖期间,必须对支护结构的水平位移、周边地表及建筑物的沉降进行高频率监测。一旦监测数据出现异常或达到报警值,应立即停止开挖,分析原因并采取加固措施,待险情排除后方可复工^[4]。

3.2 基坑降水方案

本工程地下水位较高且水量充沛,加之邻近河涌,实施降水措施是保障基坑干作业和坑底稳定的关键环节。若降水措施不到位,高水头压力将显著增加支护结构荷载,并可能引发坑底突涌、流砂等工程灾害。为此,本工程采用井点降水技术进行主动降水,具体实施方案如下:

1. 降水井布置与施工:沿基坑周边共设置4个降水减压井。采用冲击式或回转式钻机成孔,井深在设计要求基础上加深50 cm,以确保过滤管有效长度。成孔后安装井点管并连接总管。抽水作业采用真空泵与离心泵联合运行方式,并配置双电源保障系统。抽水初期出水量大且水质浑浊,后期逐渐减少并澄清,此现象符合降水工程的一般规律。

2. 降水目标与控制: 降水目标是将基坑内水位降至开挖面以下 0.5~1 m。降水作业自土方开挖前启动, 持续至主体结构施工完成并具备抗浮条件为止。施工期间需持续监测降水井流量、基坑内外地下水位变化, 并加强周边地面沉降观测。如发现因降水导致地面沉降异常, 须立即调整抽水量或停止降水, 并采取回灌等补救措施, 以最大限度降低对周边环境的影响。

3. 应急排水措施: 除主动降水系统外, 基坑内设置完整的明沟和集水坑系统, 用于收集降雨渗漏等积水。集水坑配备足够数量和扬程的潜水泵, 确保能及时排出积水, 维持基坑内部干燥的施工环境。

4 施工监测与安全控制

信息化施工是现代深基坑工程安全管理的必然要求。通过对基坑及周边环境进行系统、连续的监测, 可以实时掌握其动态变化, 及时预警潜在风险, 为调整施工方案和采取应急措施提供科学依据。

4.1 监测内容与布点

根据工程设计规范及技术要求, 本工程监测系统采用多维度监测方案, 主要包含以下内容:

(1) 支护结构变形监测: 在钢板桩顶部设置水平位移及沉降观测点, 实时监测开挖过程中的结构变形; (2) 土体侧向变形监测: 沿基坑周边布置 4 个深度约 20 m 的测斜孔, 用于检测支护结构后方土体的深层侧向位移, 评估土体稳定性; (3) 周边环境影响监测: 在 3 倍开挖深度影响范围内的建筑物及地面设置 12 个水平位移与沉降观测点, 监测施工对周边环境的影响程度; (4) 地下水位监测: 利用降水井作为水位观测井, 并在基坑外侧增设专用水位观测孔, 实时监测降水效果及地下水位变化。所有监测点需在基坑开挖前完成不少于 2 次的稳定初始值测量, 作为后续变形分析的基准数据。

4.2 监测频率与报警值

监测频率需根据施工阶段及变形速率进行动态调整。在土方开挖阶段, 当开挖深度超过 5 m 时, 每日需进行两次观测; 待基坑趋于稳定后, 观测频率可调整为每 5 至 7 天一次。如遇暴雨天气、监测数据异常波动或出现险情征兆, 则须实施加密观测乃至连续监测。为确保施工安全, 本项目建立了三级预警机制: 警戒值、控制值和危险值。当监测数据达到警戒值时, 需提高警惕并加强监测; 达到控制值时, 须采取相应措施控制变形发展; 若达到危险值, 则表明存在重大安全隐患, 必须立即停止施工并启动应急预案^[5]。具体报警值设置如表 1 所示。

表 1 基坑主要监测项目报警值 (单位: mm)

观测项目	警戒值	控制值	危险值
管线基坑支护结构顶部水平位移	30	40	50
管线基坑支护结构顶部沉降	30	40	50
管线基坑支护结构测斜	30	40	50
管线基坑地下水位	1 000	2 000	3 000
周围民用建筑物沉降	10	15	20

(注: 表中最大水平位移允许值 (危险值) 为 50 mm, 略高于二级基坑 45 mm 的常规允许值, 这可能是基于具体工程条件和专家论证后的调整。)

5 结论

佛山南围引排水泵站深基坑工程作为复杂地质与水文条件下的典型施工案例, 其专项施工方案的分析与实施经验具有重要参考价值。研究结果表明: (1) 工程前期的精准勘察与科学设计是确保施工安全的基础条件, 通过全面的工程地质和水文地质勘察, 为合理选择拉森钢板桩结合多道内支撑的支护体系及井点降水方案提供了可靠依据; (2) 施工过程中采用“先降水、后开挖, 分层分段、均衡对称”的作业原则, 将土方开挖、支撑架设与基坑降水工序有机结合, 有效控制了基坑变形风险, 其中井点降水技术的应用显著降低了支护结构承受的水土压力, 为干作业创造了有利条件; (3) 建立包含支护结构、周边土体及环境要素的综合监测体系, 配合科学的三级预警机制, 实现了施工过程的动态监控与风险预控, 体现了信息化施工管理在工程实践中的重要作用。

南围泵站深基坑工程的成功实践表明, 在复杂地质水文条件下, 通过系统性的技术方案、精细化的过程管理和信息化的安全监控, 可以有效克服深基坑施工中的各项挑战, 确保工程的安全顺利实施。其经验对于同类工程具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 刘国彬, 王卫东. 深基坑工程中拉森钢板桩支护性能研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(07):1201-1208.
- [2] 张钦喜, 黄强. 高水位条件下深基坑降水技术应用分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(04):95-101.
- [3] 郑刚, 顾晓鲁. 复杂地质深基坑变形控制与监测技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(03):567-575.
- [4] 高建. 复杂水文地质条件下局部深基坑变形数值模拟研究 [J]. 内蒙古水利, 2025(01):24-25.
- [5] 段凯, 石广. 复杂地质条件下超深基坑渗流特性研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54(13):1591-1595.

燃气发电工程项目全周期管理策略

段会平

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

摘要 在“双碳”目标与能源结构转型背景下, 燃气成为衔接新能源与传统能源的关键支撑。在开展燃气发电项目时, 燃气发电项目工程管理策划的首要任务是明确可量化、可落地的项目目标, 需覆盖进度、质量、安全、成本、环保五大核心维度, 且需与项目定位匹配。基于此, 本文开展燃气发电工程项目全周期管理策略研究, 从项目全生命周期视角, 围绕目标锚定—范围界定—核心管控—风险应对四大维度, 分析燃气发电项目工程管理策划的核心要点, 结合典型案例提供实操思路, 以期为相关人员提供参考。

关键词 燃气发电项目; 工程管理; 全周期管理

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.022

0 引言

在“碳达峰”“碳中和”目标推动下, 我国能源结构正从化石能源主导向新能源为主体转型, 但新能源的间歇性、波动性需稳定能源作为支撑。燃气发电因启停灵活、碳排放强度低、可与绿电/绿氢协同, 成为衔接传统能源与新能源的桥梁型电源, 2025年我国燃气发电装机量计划突破1.5亿千瓦, 占电力总装机比重提升至8%以上。在“双碳”目标与能源结构转型背景下, 燃气发电因高效清洁、启停灵活、调峰能力强的特性, 成为衔接新能源与传统能源的关键支撑, 其发电效率可达55%~65%, NOx排放可控制在25 mg/m³以下, 且启动时间仅需30~60分钟, 能有效平抑风电、光伏的出力波动^[1]。但燃气发电项目具有投资规模大、技术壁垒高、建设周期紧、参与方多的特点, 若缺乏系统的工程管理策划, 易出现设备交货延迟、进度超期、成本超支等问题^[2]。基于此, 本文从项目全生命周期视角, 围绕目标锚定—范围界定—核心管控—风险应对四大维度, 结合典型案例解析管理要点, 为燃气发电项目提供可参考的管理框架。

1 项目目标策划

1.1 总体目标

以某2×400 MW燃气—蒸汽联合循环发电项目为例, 总体目标设定为: 24个月内完成从开工到并网发电, 全生命周期单位度电成本≤0.35元/kW·h, NOx排放≤20 mg/m³, 实现零重大安全事故、零重大质量事故, 同时满足电网公司调峰响应时间≤30分钟的并网要求。

1.2 分项目目标拆解

进度目标按设计—采购—施工—调试全流程拆解里程碑节点, 核心控制燃气轮机到货交货周期长, 通

常12~18个月与整套启动调试决定并网时间两大关键节点。

设计招标与合同签订第1个月, 明确设计范围(含BIM建模要求); 燃气轮机/发电机设备采购, 第2个月, 锁定供应商, 约定10个月内到货; 主厂房土建施工开工, 第5个月, 完成场地平整与桩基施工; 燃气轮机到货验收, 第12个月, 同步完成设备开箱检验与存储防护; 主厂房封顶, 第14个月, 满足设备安装条件(吊车通道、承重达标); 整套启动调试开始, 第22个月, 分系统调试合格率100%; 并网发电, 第24个月, 首次并网成功率100%, 带负荷率达80%。

质量目标依据《燃气—蒸汽联合循环电厂施工质量验收规范》(GB 50476-2019)^[3], 明确关键质量控制点: 设备质量燃气轮机转子同心度偏差≤0.05 mm, 余热锅炉受热面焊接无损检测比例≥25%; 施工质量主厂房混凝土强度达标率100%, 电气设备安装绝缘电阻值≥设计值90%; 调试质量燃气轮机热效率≥58%(设计值), 联合循环机组供电标准煤耗≤260g/kW·h。成本目标按设备购置费(占比55%)、建安工程费(占比30%)、其他费用(占比15%)拆解, 重点控制设备采购成本(燃气轮机单台造价约4~6亿元), 通过招标竞价压缩成本5%~8%。

安全事故会导致项目停机, 间接增加区域备用燃煤机组的碳排放。需设定零重伤及以上事故零重大设备损坏零燃气泄漏事件的硬指标, 细化至各阶段, 施工期每日安全交底覆盖率100%、运维期每周燃气管道巡检覆盖率100%。

突破传统末端排放管控, 将环保目标贯穿全周期: 前期碳足迹核算覆盖率100%、建设阶段建筑垃圾回收率≥90%、运营阶段碳排放强度≤300g/kW·h、年碳

减排量 ≥ 2 万吨，且需明确每年开展1次碳核查，确保数据可追溯。

2 项目范围管理策划：明确边界与责任

燃气发电项目涉及设计、采购、施工、调试、验收多阶段，范围模糊易导致漏项返工或责任推诿，需通过清单化明确各阶段边界与参与方责任。

2.1 核心范围界定

1. 设计范围包括：（1）初步设计：厂区总平面布置、主厂房结构设计、热力系统设计；（2）施工图设计：设备基础详图、管道布置图、电气接线图；（3）BIM 模型搭建：碰撞检测、施工模拟，明确设计单位需配合施工阶段的现场技术交底，每月不少于2次。

2. 采购范围包括：（1）核心设备：燃气轮机、发电机、余热锅炉（三大主机）、燃气调压站、脱硝系统、主变压器；（2）辅机设备：循环水泵、凝结水泵、高压加热器、低压加热器；（3）材料：高压管道、电缆、保温材料；值得一提的是，供应商需提供设备安装指导+调试技术支持+2年质保，避免后期技术服务缺失。

3. 施工与安装范围：（1）土建包含主厂房、燃气轮机基础，大体积混凝土，需温控防裂、余热锅炉基础、升压站（35 kV/220 kV）、厂区道路与管网；（2）三大主机安装、管道焊接高压管道焊接合格率 $\geq 98\%$ 、电气设备安装如主变压器、GIS 设备、控制系统安装；（3）明确施工单位需负责施工垃圾清理与成品保护，避免设备安装后受损。

4. 调试与验收范围：（1）分系统调试，包括汽水系统、燃气管网系统、电气系统，整套启动调试，空载试验、带负荷试验、调峰响应试验；（2）环保验收，NOx、SO₂、颗粒物排放检测，并网验收电网公司组织，测试调峰能力与稳定性；（3）竣工验收，住建部门组织，核查工程合规性。

2.2 范围管控措施

采用WBS工作分解结构将范围拆解至工作包级别，如燃气轮机安装拆解为基础验收→转子吊装→定子安装→润滑油系统连接，每个工作包明确责任人、完成标准、验收节点，避免范围蔓延。例如：某项目因未明确厂区雨污水网施工范围，导致施工单位漏建，后期返工增加成本300万元，需在策划阶段通过现场踏勘+图纸会审查漏补缺。

3 燃气发电工程项目全周期管理核心管控策划

3.1 进度管控；聚焦关键路径与风险应对

燃气发电项目的关键路径为燃气轮机采购→土建施工→设备安装→调试并网，其中燃气轮机到货延迟是最常见风险，需针对性策划^[4]：（1）关键路径优化：采用搭接施工压缩工期，如主厂房土建施工到±0.00

后，同步启动燃气轮机基础施工设备安装与管道焊接并行作业，某项目通过此方式缩短工期2个月；（2）设备采购保障：提前3个月启动核心设备招标，选择有备用产能的供应商，签订延迟交货违约金条款，按合同总额0.5%/周计取；（3）设立设备到货预警机制，交货前1个月派专人驻厂监造，核查生产进度；（4）进度监控工具：用Project或Primavera软件编制甘特图，每月开展进度偏差分析、S曲线对比，偏差超10%时启动纠偏措施。例如：某项目燃气轮机延迟到货2个月，通过增加夜班施工+优化调试工序，最终仅延迟0.5个月。

3.2 质量管控：锁定关键节点与检测标准

1. 三级质量检查制度：（1）班组自检：施工班组完成工序后，按规范自检；（2）监理验收：监理工程师对关键工序实施旁站，验收合格签字确认；（3）业主抽检：业主方对设备质量、施工质量进行10%~15%抽检。

2. 关键质量控制点管控：（1）燃气轮机安装：采用激光对中仪检测转子同心度，偏差超0.05 mm时重新调整；（2）管道焊接：高压管道采用氩弧焊打底+电弧焊填充，无损检测(UT/RT)比例 $\geq 25\%$ ，不合格焊缝需返修并重新检测；（3）调试质量：整套启动调试时，连续72小时带满负荷运行，监控燃气轮机热效率、NOx排放、调峰响应时间等指标，全部达标后方可并网。

3.3 安全管控：识别风险与强化预案

燃气发电项目安全风险集中在高空作业，设备安装，高度20~40 m；动火作业、带电作业、受限空间作业等策划要点：（1）风险识别与分级：用JSA作业安全分析方法，识别出高空坠落、火灾、触电、物体打击4类高风险作业，制定专项安全方案。（2）应急管理续制定《火灾应急救援预案》《触电应急救援预案》，每季度组织1次应急演练，现场配备急救箱、担架、灭火器、应急照明，与附近医院（车程 ≤ 30 分钟）签订急救协议^[5]。所有进场人员需通过安全培训考核，特种作业人员必须持证上岗，定期复审。

4 燃气发电工程项目全周期管理风险与协同管理策划

4.1 风险管控

主要风险识别与应对，风险监控建立风险台账，每月更新风险等级（高/中/低），高风险项由项目经理牵头跟踪，直至风险消除^[6]。

（1）技术风险，如燃气轮机调试不达标，热效率偏低，可选择成熟机型，供应商派专家驻场调试等应对措施。政策风险环保标准提高（如NOx排放从25 mg/m³降至15 mg/m³），可通过设计阶段预留脱硝系统扩容接口改进；（2）成本风险，如钢材价格上涨（影响建

安成本），可通过订材料价格波动调价公式合同，锁定主要材料用量等措施应对；（3）天气风险，如雨季影响土建施工（混凝土浇筑），可选择提前搭建防雨棚，储备防雨物资，制定雨季施工方案等措施应对。

4.2 协同管理

燃气发电项目参与方多，需通过机制+工具实现协同：（1）协同机制：每周召开项目协调会，沟通进度、质量、安全问题；每月召开设备供应商协调会，核查设备生产进度，协调技术对接；（2）信息共享工具：搭建BIM协同平台，设计、施工、调试单位共享模型，提前开展管线碰撞检测，某项目通过BIM技术减少现场变更30处，节省成本150万元；建立项目管理信息系统（PMIS），实时上传进度、质量、成本数据，各方可随时查看，实现透明化管理^[7]。

5 案例分析

本文以某2×400 MW燃气—蒸汽联合循环发电项目（以下简称“案例项目”）为实证载体，从项目全生命周期视角，围绕“目标锚定—范围界定—核心管控—风险应对”四大维度，结合数据比较分析，系统

阐述燃气发电项目工程管理策划的核心要点与实践效果。案例项目位于我国华东地区，业主为某大型能源集团，2022年3月开工，2024年1月并网发电，总投资27.5亿元，较行业同类项目平均建设周期缩短2个月，成本节省1.35亿元，质量合格率达99.2%，获评“省级优质工程”^[8]。

工程管理策划的首要任务是明确可量化、可落地的项目目标，需覆盖进度、质量、安全、成本、环保五大核心维度，且需与项目定位匹配^[9]。

燃气发电项目涉及设计、采购、施工、调试、验收多阶段，范围模糊易导致漏项返工或责任推诿，需通过清单化明确各阶段边界与参与方责任。案例项目通过WBS工作分解结构避免范围漏洞，以下为核心范围界定与实践效果。燃气发电项目的关键路径为燃气轮机采购→土建施工→设备安装→调试并网，其中燃气轮机到货延迟是最常见风险，案例项目针对性策划并取得显著效果。三级量检查制度：班组自检、监理验收、业主抽检^[10]。案例项目安全风险集中在高空作业、动火作业、带电作业、受限空间作业，通过专项管控实现“零重大安全事故”，实施效果与行业均值对比见表1。

表1 案例项目安全管控效果（与行业均值比较）

安全指标	案例项目数据	行业同类项目平均数据	优化幅度	核心管控措施
高空作业事故发生率	0	0.3%	100%	佩戴双钩安全带，搭设安全网，设置临边防护
动火作业火灾发生率	0	0.2%	100%	办理动火许可证，配备灭火器，清理周边易燃物
带电作业触电发生率	0	0.1%	100%	停电验电后作业，设专人监护，配备绝缘工具
应急演练参与率	100%	85%	17.6%	每季度组织1次应急演练，全员参与考核
安全培训考核合格率	100%	92%	8.7%	培训后闭卷考试，80分合格，不合格者补考

6 结束语

燃气发电项目工程管理策划是项目成功的蓝图，需紧密结合其技术密集、设备依赖、周期紧张的特点，从目标锚定、范围界定、核心管控、风险与协同管理五大维度系统策划。实践表明，科学的策划可使项目建设周期缩短10%~15%，成本降低5%~8%，实现零安全事故、零质量事故。未来，随着燃气发电向更高效率、更低碳排放发展，工程管理策划需进一步融入数字化、绿色施工理念，为燃气发电项目高质量建设提供支撑，助力“双碳”目标落地。

参考文献：

- [1] 罗彬.浅析燃气发电项目工程管理策划[J].中国科技投资,2023(09):25-27.
 [2] 戴新,赵永安,吴公宝,等.“五精”管理创新高质量燃

气发电厂建设[J].中国电力企业管理,2021(03):26-27.

- [3] 刘志锋.浅析燃机电厂工程管理中的问题与处理措施[J].科技风,2020(20):118-119.
 [4] 张家祥,高景芳.燃气热电联产机组启动试运行中的缺陷管理[J].建设监理,2022(02):69-71.
 [5] 徐景杰.新时期城镇燃气工程项目建设风险管理分析[J].低碳世界,2024,14(09):106-108.
 [6] 刘浩.浅议燃气工程项目信息化管理的思路与发展[J].中国设备工程,2021(09):38-40.
 [7] 吴侨思.110kV高州协鑫燃气分布式能源项目接入系统工程施工安全管理研究[J].自动化应用,2023,64(08):237-238,241.
 [8] 蒋安琪.城市燃气企业工程项目成本管理探析[J].财经界,2023(11):48-50.
 [9] 倪艳婕.燃气工程项目管理业财一体化问题研究[J].管理学家,2020(02):113-116.
 [10] 王落飚,丛培雪,邵旭东,等.燃气工程项目管理系统的应用研究[J].煤气与热力,2022,42(07):19-22.

储罐投用数量与 BOG 生成量关系研究

刘 博

(中海油江苏天然气有限责任公司, 江苏 盐城 224000)

摘要 新投产 LNG 接收站面临 BOG (Boil Off Gas, 蒸发气) 放空量大的突出问题, 主要原因包括天气温度高、储罐保温效果差、管道循环量大、下游管道未及时投用等。本研究以江苏 LNG 接收站为典型案例, 针对其下游管网未同步竣工的实际场景, 通过理论计算与现场试验相结合的方法, 系统分析了储罐投用数量与 BOG 产生量的关联规律。研究结果表明, 减少储罐投用数量可显著降低 BOG 生成总量, 为接收站运营优化提供科学依据。

关键词 LNG 接收站; LNG 储罐; BOG; LNG; 关联规律

中图分类号: TU996.7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.023

0 引言

LNG 接收站作为连接天然气气田与终端用户的枢纽, 其核心功能是接收、储存并外输液化天然气 (LNG)。然而, LNG 在储存过程中因外界热量侵入、设备运行等因素会持续气化为 BOG (蒸发气), 若 BOG 无法有效处理, 不仅造成资源浪费, 还可能因储罐超压触发火炬放空, 产生经济损失与环境风险^[1]。本研究通过理论计算与现场实践, 以减少储罐投用数量作为控制新投产 LNG 接收站 BOG 放空的有效手段, 可为同类项目建设提供实践指导。

1 案例概况

江苏 LNG 接收站一期建设 4 座 22 万 m^3 混凝土全容储罐, 配套低压泵 6 台、高压泵 2 台及 2 台 BOG 压缩机。首船接卸 21.6 万 m^3 LNG, 扣除铺底气及卸料总管填充量, 可用液相空间约 21 万 m^3 , 对应气相空间约 9.62 万 m^3 。运行初期, 当 4 座储罐同时投用时, BOG 日产量约为 118 t/d, 低于 2 台压缩机合计处理能力 (约 184 t/d)。按设备单体能力计算, 压缩机在理论上可完全处理该量 BOG, 因此不会因处理能力不足而导致放空。但由于下游国家管网管道尚未贯通, 站内回气循环量大、液位波动频繁, 导致系统气相空间压力上升速度快, 压缩机频繁启停, 局部时段仍会出现超压放空现象。问题的实质在于储罐投用数量与下游消纳能力不匹配, 使得 BOG 在短时间内集中生成, 造成系统运行负荷不均衡^[2]。

2 储罐投用数量与 BOG 生成量的定量分析

2.1 LNG 储罐 BOG 静蒸发量计算

为定量评估 LNG 储罐在静止状态下的 BOG (蒸发气) 生成量, 本研究结合江苏 LNG 接收站的气象条件与储

罐结构特性, 通过热量传递模型进行分析。主要参数包括: 环境最高气温 38.4 °C, LNG 介质温度 -160 °C, 其气化潜热为 510 kJ/kg。在储罐结构方面, 外罐直径 88 m, 内罐直径 86 m, 外罐高度 44.77 m, 内罐高度 41.844 m, TPC 区域高度 5 m, 最大操作液位 (LAH) 为 40.02 m。

为深入分析, 研究基于以下假设进行建模: (1) 钢件热阻远小于保冷材料, 故忽略其影响; (2) 不考虑吊顶拉杆、人孔等局部构件对传热的贡献; (3) 日间向阳面与背阴面各占罐壁面积的 50%, 昼夜各为 12 小时; (4) 太阳辐射强度取值为 630 W/m², 符合项目区域实际气象条件。在热工分析中, 罐体总漏热量由罐顶、罐壁与罐底三个部分构成, 计算各部位热量传导的核心在于多层绝热结构的等效热阻, 进而求得总热流速率, 并据此推导 BOG 的日蒸发量^[3]。具体而言, 罐顶在白天受太阳辐射及空气对流共同影响, 热流量大; 夜间则近似视为与环境温度一致 (取 38.4 °C)。传热路径包括混凝土穹顶和玻璃棉毡等多层保温结构。忽略拉杆、人孔等构件的散热贡献, 罐顶总漏热速率可表示为:

$$Q_{gd} = Q_a + Q_b = A_r \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} + A_b \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (1)$$

式 (1) 中, Q_{gd} 表示罐顶总漏热速率, W; Q_a 表示穹顶漏热速率, W; Q_b 表示罐顶某小时拉杆、人孔、吊顶泄放孔的漏热速率, W, 由于拉杆、人孔、吊顶泄放孔数据暂未确定且其传热面积较小, 可忽略; A_r 表示穹顶的换热面积, m^2 ; A_b 表示拉杆、人孔、吊顶泄放孔的传热面积, m^2 ; T_a 表示罐顶温度, °C (日间取 70 °C),

夜间取 38.4 °C)； T_{LNG} 表示 LNG 的温度, °C; λ 表示保冷层保冷材料的导热系数, W/(m•k); t 表示保冷层保冷材料的厚度, m。此外, 罐壁漏热量的计算步骤如下: 罐壁漏热量计算基于热量平衡状态, 日间向阳面温度由与空气对流换热及太阳辐射吸收(系数 0.65)、反射(系数 0.94)决定, 背阴面及夜间温度与环境温度(极端最高气温)一致, 传导热量通过各保温层材料性能确定^[4]。

在此基础上, 罐壁部分的漏热计算分成两部分考虑:

1. 罐壁 TCP 上部的漏热:

$$Q_{gb} = A_{sA} \times \frac{T_s - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (2)$$

式(2)中, Q_{gb} 表示罐壁 TCP 上部的漏热速率, W; A_{sA} 表示罐壁 TCP 上部的换热面积, m²; T_s 表示罐壁 TCP 上部的外表面温度, °C(向阳面取 70 °C, 背阴面取 38.4 °C); T_s 表示罐壁上部(TCP 上方)外表面温度, 单位为摄氏度(°C); T_{LNG} 表示 LNG 的温度, °C; λ 表示保冷层保冷材料的导热系数, W/(m•k); t 表示保冷层保冷材料的厚度, m。

2. 罐壁下部(TCP)的漏热:

$$Q_{TCP} = A_{sB} \times \frac{T_{TCP} - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

式(3)中, Q_{TCP} 表示罐壁下部的漏热速率, W; A_{sB} 表示罐壁下部的换热面积, m²; T_{TCP} 表示储罐下部的罐壁外表面温度, °C(向阳面取 70 °C, 背阴面取 38.4 °C); T_{LNG} 表示 LNG 的温度, °C; λ 表示保冷层保冷材料的导热系数, W/(m•k); t 表示保冷层保冷材料的厚度, m。

同时, 罐底结构复杂, 由中心区域、罐底环梁与罐底砂浆组成。具体可设定其温度等于环境极端高温 38.4 °C, 热量传递过程同样遵循多层热阻叠加。罐底总漏热速率表达为:

$$Q_{底} = Q_b + Q_{bA} + Q_{bB} = A_b \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_j}} + A_{bA} \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_j}} + A_{bB} \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_j}} \quad (4)$$

式(4)中, $Q_{底}$ 表示罐底总漏热速率, W; Q_b 表示罐底中心区域的漏热速率, W; Q_{bA} 表示罐底 A 区域的漏热速率, W; Q_{bB} 表示罐底 B 区域的漏热速率, W; A_b 表示罐底中心区域的换热面积, m²; A_{bA} 表示罐底 A 区域

的换热面积, m²; A_{bB} 表示罐底 B 区域的换热面积, m²; T_a 表示罐底温度, °C, 取极端最高气温; T_a 表示罐底外表面温度或环境温度, 单位为摄氏度(°C); T_{LNG} 表示 LNG 的温度, °C; λ 表示保冷层保冷材料的导热系数, W/(m•k); t 表示保冷层保冷材料的厚度, m。综上各部分漏热计算, 可得整个储罐的日间与夜间的漏热速率(W), 分别乘以 12 小时(43 200 s)再相加, 即可得一天内的漏热量(J), 换算成(kJ)。通过漏热量除以罐内 LNG 的潜热(kJ/kg), 可以得到一天产生的 BOG 量(kg)。在分析储罐数量对 BOG 生成量的影响时, 我们不仅考虑了气相压力的变化, 还引入了储罐投用数量与整体 LNG 储存空间利用率的关系。随着储罐数量的增加, 尽管气相空间压力得到有效控制, 液相空间的利用率却可能下降。特别是在 LNG 接收站初期, 储罐未完全充满时, 气相空间的浪费可能导致 BOG 的增加。因此, 合理控制储罐的投用数量, 不仅有助于减少 BOG 生成, 还能提高储罐的液相空间利用效率, 优化整个储存系统的经济性。此外, 随着储罐投用数量的增加, 设备的维护和能源消耗也需要综合考虑。通过对比不同投用数量下设备的运行成本, 可以进一步明确最佳的储罐投用策略, 从而在保证 BOG 生成量控制的同时, 也能降低系统整体的运行成本。

2.2 投用储罐数量分析

根据储罐压力报警和联锁设定表和实际运行过程中的状况, 将储罐气相空间压力控制在 13~22 kPag 区间范围内最有利于储罐气相空间的利用。而 13~22 kPag 储罐气相空间能够储罐的 BOG 量, 具体根据理想气体方程:

$$PV = ZnRT \quad (5)$$

式(5)中, P 表示储罐压力; V 表示储罐可用罐容; Z 表示压缩因子(BOG 正常取值为 0.97); n 表示气体物质的量; R 表示理想气体常数(取值 8.31 441); T 表示绝对温度。

2.3 分析方案优劣

表 1 展示了不同储罐投用数量下, 压缩机工况、升压时长、低压泵使用数量、降压耗时、启动次数和综合耗费的变化情况。随着储罐投用数量的增加, 整体的升压时长、启动次数和综合耗费均呈上升趋势。例如: 投用 4 个储罐时, 无论启用 1 台还是 2 台压缩机, 升压时长和综合耗费都显著高于投用 1 个储罐的情况。这表明, 在增加储罐投用数量的同时, 设备负荷和能源消耗增加, 从而导致更高的运行成本。与此同时, 启用更多的压缩机可以在一定程度上缩短升压和降压

表 1 方案对比

储罐投用数	压缩机工况	升压时长(小时)	可供使用低压泵(台)	降压耗时(小时)	启动次数(次)	综合耗费(元)
投用 1 个	启用 1 台	1.97	1+1	3.43	133	68 429
	启用 2 台		1+1	0.92	249	68 724
投用 2 个	启用 1 台	6.55	4+1	26.21	22	86 493
	启用 2 台		4+1	4.37	66	86 526
投用 3 个	启用 1 台	9.56	7+1	265.34	2.62	104 278
	启用 2 台		7+1	8.92	39	104 364
投用 4 个	启用 1 台	11.69	10+1	/	/	/
	启用 2 台		10+1	15.20	27	123 120

时间,但也会增加设备的启动次数和总耗费。因此,如何在满足 BOG 处理能力的同时,合理控制储罐投用数量,以平衡成本和效率,成为优化系统运行的关键。在对不同储罐投用方案进行分析时,我们还应综合考虑压缩机与低压泵的协同作用对系统整体性能的影响。通过启用更多的压缩机,可以提高 BOG 处理效率,但也可能导致设备负荷过大,增加故障风险。因此,在设计方案时,需要对压缩机的启用时长和停机时间进行优化,以确保设备长期运行的稳定性^[5]。

2.4 实际应用效果

江苏 LNG9 月 26 号首船接卸后实际投用储罐数量为 1 个,从 10 月 17 日完成首船接卸至 11 月 23 日能够处理接收站产生的 BOG 共计减少约 11 831.5 吨 BOG,保守估计按当时市场价计算 7 000 元/吨,此项举措为江苏 LNG 减少约 8 000 万元。在江苏 LNG 接收站实际运行中,通过调整储罐投用数量和优化压缩机的工作模式,有效地降低了 BOG 的生成量。在实际应用中,首船接卸后的储罐投用数量从 1 个逐步增至 2 个,且与下游管道的接入同步进行,确保了 BOG 的及时消纳。由于下游管网尚未完全竣工,部分 BOG 仍需通过储罐内的回气系统进行处理。通过此项技术手段,江苏 LNG 接收站在短短两个月内成功减少了约 11 831.5 吨 BOG,减少的 BOG 量不仅降低了接收站的环境风险,也有效减少了由于放空所带来的经济损失。根据当时市场价格估算,约可为公司节省 8 000 万元的费用。此项措施的成功实施,进一步验证了合理控制储罐投用数量对 LNG 接收站 BOG 管理的重要性,并为类似项目提供了宝贵的经验教训。未来,随着下游管网的完善和技术的进一步发展,预计江苏 LNG 接收站的 BOG 处理

能力将进一步提升,经济效益和环境效益将更加显著。

3 结束语

本文以江苏 LNG 接收站为研究对象,系统构建了储罐热量传递与 BOG 生成量的理论计算模型,结合现场运行监测数据,深入分析了储罐投用数量、气相空间压力及压缩机负荷之间的耦合关系。研究结果表明,合理控制储罐投用数量是降低 BOG 生成、减少放空损失的关键环节。在单罐运行并配合间歇保冷措施的模式下,BOG 生成量稳定可控,压缩机运行负荷平衡,整体系统热效率与经济性显著提升。该成果不仅为 LNG 接收站投产初期 BOG 管理提供了科学依据,也为后续储罐结构优化、能量回收及节能运行策略制定提供了可行路径,对同类项目运行管理具有推广价值。

参考文献:

- [1] 赵思琦. 基于可靠性对 LNG 接收站 BOG 压缩机选型分析[J]. 化工设备与管道, 2025, 62(05): 74-80.
- [2] 杨清. LNG 中的氮气含量对船舶 LNG 预留货物消耗的影响[J]. 航海技术, 2025(05): 24-27.
- [3] 许鹏, 丁建华. 新建 LNG 接收站 BOG 压缩机选型研究[J]. 山东化工, 2025, 54(17): 163-166.
- [4] 郑星伟, 赫文博, 李雅娴, 等. LNG 接收站 BOG 管线进液成因及控制策略研究[J]. 山东化工, 2025, 54(14): 162-165, 168.
- [5] 赵斤, 孙东旭, 张瑛, 等. LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺模拟优化[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(03): 49-56.

基于BIM技术的电力工程造价控制分析

苏 易

(中山市电力工程有限公司, 广东 中山 528400)

摘要 在当前电力工程建设规模持续扩大的背景下, 传统造价管理模式逐渐暴露出效率低下、信息割裂等问题。BIM(建筑信息模型)技术作为一种集可视化、集成化与智能化于一体的现代工程管理工具, 被广泛应用于电力工程项目的全过程造价控制中。本文围绕BIM技术在电力工程中的具体应用展开研究, 旨在提升工程量提取精度, 减少设计变更频率, 显著提高电力工程的资金使用效益, 为推动工程造价管理向精细化方向发展提供有益参考。

关键词 电力工程; BIM技术; 造价管理; 全过程造价控制

中图分类号: TP3; TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.024

0 引言

电力工程项目作为基础设施建设的重要组成, 其投资规模大、结构系统复杂、建设周期长, 成本控制一直是项目管理的核心难题。在此背景下, BIM技术因其三维建模、信息集成与数据联动优势, 成为推动电力工程全过程造价控制的重要支撑工具。BIM技术不仅能在设计阶段实现限额导向的精准建模, 还能在施工过程中结合进度与资源数据进行动态成本调控, 直至竣工结算阶段实现资料的归档与透明化结算。因此, 分析BIM技术在各阶段造价控制中的应用, 有助于为电力行业提供可推广的造价管理创新实践路径。

1 BIM技术在电力工程造价控制中的应用优势

1.1 构建直观透明的工程数据表达体系

BIM技术最突出的优势之一是其具备三维建模与可视化能力^[1]。借助BIM系统, 电力工程从初步设计到施工实施的各个环节都可在三维空间中直观呈现, 模型不仅能还原真实场景中的建筑结构、电缆布局、设备布设等要素, 还可整合各类技术参数与成本数据, 为项目全周期造价管理提供数据支撑。通过系统自动生成的效果图和施工模拟画面, 参与人员能在项目开展前就直观感知工程结构、成本组成与关键控制点, 从而减少对图纸理解的误差, 提升前期设计与投资决策的科学性。三维展示也为多方协同与方案优化创造了清晰的参照, 可避免传统二维图纸中因信息不完整或表达不清导致的设计偏差。

1.2 提升管理效率, 降低设计变更与施工误差成本

BIM技术基于其高效的数据处理与模型动态更新能力, 使电力工程造价管理更加精细化^[2]。在建模阶段, 若设计方对局部内容进行调整, 只需在系统中同步更

新相应参数, 模型便可自动生成新的构造方案, 省去大量手工修改与核算的工作流程。这种自动响应机制可大幅提高设计效率, 降低因信息更新滞后而导致的返工率。同时, BIM自带的碰撞检测功能可提前识别各专业之间存在的空间冲突问题, 比如电缆与管道交叉、设备布设重叠等, 帮助项目团队在设计阶段就发现并解决问题, 从而在施工阶段避免重复施工与返工所引发的材料、人力和时间损耗。

1.3 构建高效协同的信息共享平台

信息互通不足一直是电力工程造价管理中的难点。BIM技术通过统一平台汇聚设计、采购、施工、造价等各类信息资源, 构建起以模型为核心的信息集成体系^[3]。平台内, 各参建单位可以实时查看工程模型的最新状态, 及时掌握项目变更、成本调整、设计优化等动态信息, 打破传统项目管理中信息壁垒与部门隔阂, 确保各环节数据的一致性。例如: 设计单位对设备布局进行调整后, 造价人员可以立刻基于模型分析其成本变化, 施工单位也能及时获取调整后的结构信息进行工序安排, 从而避免因沟通延迟引发误工误算问题, 也降低了因信息不对称带来的造价失控风险。

2 基于BIM技术的电力工程造价控制策略

2.1 明确BIM技术基础应用方法

工程单位首先需要构建合理的应用思路, 基于BIM技术在项目启动阶段嵌入成本管理逻辑, 将电力工程的定额规则与投资分析过程相融合。并且构建参数化的构件模型, 实时追踪工程几何形态和施工阶段的变化状态, 从而精准获取各阶段实际工程量, 确保项目成本核算的准确性^[4]。此外, 将定额指标直接绑定在模型构件之上, 实现信息模型与工程预算数据同步更

新,为全过程造价控制提供坚实的数据支撑。在实际应用中,BIM技术不仅承担建模功能,更承担信息集成与可视化分析的核心角色。工程单位可以构建三维模型,将设计人员、预算人员、造价分析师在规划、设计与施工中的协作工作整合至统一平台。同时,将工程预算编制过程嵌入模型结构中,逐个定位模型中的关键成本节点,识别施工方案中的高耗、低效环节,并据此提出优化建议,排除冗余设计与不合理支出,从源头上抑制成本风险。例如:在编制电力工程清单时,需根据造价控制要点,锁定项目中资金投入高、技术难度大的重点子项,并结合实际阶段的工作量进行工程计价。此时,可通过以下成本计算公式完成单价核算:

$$P=C+Z+R+T+Y \quad (1)$$

式(1)中,P为项目单价,C为项目利润,Z为项目管理费,R为设备及施工机械费用,T为材料成本,Y为人工投入费用。该公式构建了各类费用结构之间的关系,可帮助预算人员基于BIM模型数据实现精细化定价与对比分析。

BIM系统还可用于措施费用的计算与管控,配合实际施工组织设计,模型中可预置相关施工方案,并依据不同方案模拟措施费的计取逻辑,确保规费与税费依照国家或行业标准合规计提^[5]。在电力工程整体造价计算过程中,单项造价的计算可通过以下方式得出:

$$Q=\sum F \quad (2)$$

式(2)中,Q为某一单项工程造价,F为对应的单位工程造价。随后,通过累加各分项造价,得到整项目总造价D:

$$D=\sum Q \quad (3)$$

在此基础上,项目成本控制不再局限于静态表格分析,而是在可视化模型中实时展现,便于进行滚动预算与预警分析。同时,模型还能结合人工、材料、机械等市场价格数据,动态调节单价幅度,提升造价决策的灵活性和精度,真正实现多维度、多阶段的全周期成本精控。

2.2 基于BIM技术的电力工程各阶段造价控制要点

1. 工程决策与设计阶段。为实现成本管理精细化,需借助BIM技术构建协同设计与实时反馈机制,将成本控制理念深度嵌入设计决策全流程。首先,应由项目主管单位统筹各参与方,通过BIM平台建立起统一的设计与管理信息通道^[6]。设计单位依据初步方案与基础数据创建数字模型,由技术审核团队基于BIM环境对模型进行初审,对设计中的空间配置、电力线路布局、设备布设等进行碰撞分析,识别潜在冲突并反馈调整建议。若模型在空间逻辑、技术规范或经济指

标上存在重大问题,需要求设计方重新修订方案,防止后续施工中因返工而导致预算超支。在设计优化基础上,项目团队应进一步推进限额设计理念的落地实施。结合BIM模型的参数化优势,将设计标准、设备参数、材料选型等内容以结构化形式录入模型中,同时关联项目历史数据及行业造价指标,设定分阶段成本控制目标。限额设计不单是对总成本的约束,更是对每一专业节点、子系统构件预算的严格管控。借助模型实现多专业造价数据的同步比对,以便及时发现某一部工程或专业设计在费用上的异常波动,提前进行干预与调整,避免成本失控蔓延至整体项目。

2. 招投标阶段。招投标阶段涉及大量工程量测算与文书资料准备,工程单位但基于BIM平台对整个工程进行模块化处理,将复杂的整体工程拆解为多个细化的分项任务,设计方可将对应工程参数与施工技术指标导入模型之中,快速生成各分项工程的三维构件及工程量数据。通过平台自动汇总和集成分析,清晰呈现项目总体的施工规模、结构构成与成本测算,为招标单位制定工程清单提供可靠依据,同时也方便投标方高效响应,避免长周期的人工计算。所有与招标活动相关的合同条款、工程量清单、图纸说明、投标文件等内容,均可上传至BIM平台进行统一管理与公开展示。在平台环境下,相关单位可对照模型内容开展资料审核与规范检查,及时发现导致后续争议的问题节点。

3. 施工阶段。电力工程进入施工阶段后,工程单位可基于BIM平台构建5D模型体系,将进度、费用、资源、质量与安全等维度统一嵌入模型中,对施工全过程进行可视化监管。系统可实时采集并整合工程量、进度款、材料使用、变更索赔等成本数据,辅助管理人员及时掌握当前投资执行情况与风险点,为工程资金的分配与使用提供量化依据,从而将工程造价控制在预算目标内。以施工方案调整为例,在消防水泵房建设过程中,各参与单位对施工工序安排提出不同建议。借助BIM平台可进行多方案仿真模拟与比对分析,从中选择兼顾工期、安全与成本的最优路径。对此,可调整工序为“基础施工→侧墙浇筑→上部结构施工→土方回填→边坡处理”,既规避工序冲突造成的重复作业,也确保工程连续性,防止因工期延误带来费用增长。在执行环节,以基础与预制柱安装为例,平台可指导施工人员对柱基标高进行精密控制,采用螺母与垫片进行微调,保障柱体垂直度、轴线一致性与标高精度,从而大大提升装配效率,减少返工和误差修复所造成的附加成本。

4. 竣工阶段。在竣工阶段,造价控制的重点转向结算审核与成果验收,其目标在于保障成本的真实还原与责任清晰划分。工程单位应结合BIM技术整合前期设计、施工及成本数据,构建出可视化、可追溯的全周期成本闭环管理机制。具体来说,项目管理方可依托BIM平台组织竣工验收流程,由各参建单位提交投资批复、设计成果、合同文本及施工结算文件等资料,业务支撑单位则在平台内进行线上结算审核,确保各类成本数据与工程量核算结果一致。经审核无误后,再由施工、设计、监理及相关管理单位联合签署竣工结算文书,形成验收与结算的闭环凭证。工程量与材料设备清单可以依托模型信息精准关联,每一个构件或系统都可回溯至设计变更、合同报价、采购发票及现场施工记录,从而实现工程量审核的立体化展示,使得结算依据真实可见、成本流向清晰明朗,防止虚报工程量或漏项问题,为结算公正性提供有力支撑。

此外,BIM系统还能对各项目模块的实际投资情况进行分项展示与损耗分析。工程单位可在平台内清晰列出遥控通信系统、接地系统、电缆线路、土建结构等各分部工程的投资支出与资源使用情况,并对比预算指标与实际投入,平台可自动标识成本超支或节余区段,并据此分析成本偏差原因及责任归属。若某一系统出现明显超支,管理方可依据模型记录回溯对应责任单位或阶段,进行责任划分与绩效评估,从而遏制非计划性成本扩张。

3 BIM技术在电力工程造价控制中的应用案例

3.1 工程案例

某水利工程包含多个关键建筑单元,总投资构成涵盖建筑施工费用、贷款利息和施工辅助工程。项目总体概算金额达1 062 352万元,工程规模庞大、结构复杂、系统集成度高。为强化成本控制效果,本项目全面引入BIM技术进行三维建模、成本仿真分析与数据集成管理,配合限额设计与预算控制机制,旨在提升工程投资管控的系统性。

3.2 BIM技术应用过程

在设计阶段,BIM系统用于构建基于限额设计理念的三维模型,通过集成初步设计、技术设计与施工图设计等各阶段资料,进行全过程的数据梳理与成本预测。在估算和概算阶段,造价工程师通过模型提取工程量参数,并与概算指标数据库对接,生成初步投资估算报告,同时模拟多个设计方案的成本变化情况,为项目投资决策提供直观依据。系统还调取企业过往项目历史数据,对不同结构方案进行经济性对比分析,辅助制定限额控制目标,避免设计超标。

进入施工阶段,BIM技术则用于实时动态监测工程资源消耗、施工进度与成本偏差,构建月、周、日为单位的工程费用跟踪机制。通过与现场进度软件集成,实现施工计划优化与现场施工联动,减少工序错配与延期风险。利用“零库存”材料计划策略,依据模型反馈的施工进度合理安排材料采购和配送,降低库存积压与材料浪费,减轻资金压力。还通过虚拟建模方式,同步执行工程量计算、造价核算和清单编制,提高数据准确性。

在预算执行过程中,BIM平台结合挣值管理法(EVM),通过计算成本差异 $CV=BCWP$ (已完成工作量预算费用)− $ACWP$ (已完成工作量实际费用)和成本绩效 $CPI=BCWP/ACWP$,精准判断预算执行偏离程度,并及时调整策略。在设计变更管理方面,BIM技术支持构件参数化编辑与即时变更同步计算,提升响应速度。工程签证管理也被纳入BIM系统,基于虚拟仿真对照现场实况与签证内容,核验其合理性。

3.3 应用效果

根据竣工结算数据,建筑工程投资占比为35.72%,为项目中最大开支项;建设期贷款利息与施工辅助工程分别占据16.08%和12.33%。在对比设计概算与实际成本后发现,除预备费与移民安置因不可控因素略有超支外,其余项目成本变化率全部控制在10%以内,显著提高了成本执行的稳定性。

4 结束语

BIM技术在电力工程造价管理中的应用不仅实现了从设计、施工到竣工结算的全过程成本控制,还促进了各参与单位间的信息共享与协同管理。未来,随着行业标准不断完善,再加上技术手段持续改进,BIM技术有望成为电力工程造价控制体系的核心基础,助力行业实现高质量、高效率的数字化转型发展。

参考文献:

- [1] 李新磊,赵海旭.BIM技术在电力工程造价中的应用[J].中国电力企业管理,2023(30):60-62.
- [2] 钟琦,潘行健,朱莎,等.基于BIM技术的电力工程造价控制方法讨论[J].中国建设信息化,2023(10):66-69.
- [3] 刘添.全生命周期造价管理在电力工程中的应用研究[D].天津:天津工业大学,2023.
- [4] 刘利华.BIM技术在电力工程造价中的应用价值浅析[J].科技视界,2023(10):87-89.
- [5] 邓文正.电力工程设计阶段的造价控制与管理[J].工程技术研究,2023,08(04):120-122.
- [6] 刘洁文.全过程造价控制在电力工程中的实施路径探讨[J].审计与理财,2022(12):32-34.

电力用户用电行为特征分析及电气事故防控策略

张诗琪

(国网重庆营销服务中心(计量中心), 重庆 400014)

摘要 电力用户用电行为特征与电气事故发生存在密切关联, 深入分析这种关联性对提升电力系统安全运行水平具有重要意义。电力用户负荷波动呈现明显的时间规律性与行业差异性, 高风险用电操作主要表现为计量装置私改与违规增容以及带电作业等典型模式。用户操作行为与电气参数变化之间存在明确的因果关联, 异常操作引发的电压骤降与电流跳变具有显著的时序特征, 事故发生机制表现为短路与过载以及接地故障的关联演化, 用电不当加速设备老化形成故障链条, 精准监测与行为引导以及多层防护相结合的策略体系能够有效降低事故发生概率。

关键词 电力用户用电行为; 电气事故; 风险识别; 安全防控; 负荷特性

中图分类号:F425

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.025

0 引言

电力系统安全稳定运行直接关系到国民经济发展与社会生活秩序, 电力用户用电行为作为影响系统安全的重要因素日益受到关注。随着智能电网建设深入推进, 用电信息采集技术快速发展, 海量用电数据为深入分析用户行为特征提供了技术支撑。当前电气事故中相当比例源于用户不当用电行为, 传统的事后处置模式已难以满足现代电力系统安全管理需求, 用户用电行为与电气事故之间的内在关联机制尚未得到充分揭示, 缺乏系统性的特征分析与防控策略研究, 亟需建立科学有效的风险识别与防控体系。

1 电力用户用电行为特征描摹

1.1 用电负荷波动的规律性与差异性

电力用户负荷波动呈现明显的时间规律性与行业差异性特征。工业用户负荷曲线表现出较强周期性, 峰值时段集中在工作日 8:00-18:00, 谷值出现在夜间及节假日, 居民用户呈现早晚双峰特征。不同行业间负荷特性存在显著差异, 钢铁与化工等连续性生产企业负荷率普遍维持在 0.7 以上; 机械制造等离散型制造业负荷率波动较大, 季节性因素对负荷波动产生重要影响, 夏冬两季负荷峰谷差可达 30%~50%^[1]。

1.2 高风险用电操作的典型模式

高风险用电操作表现为多种典型模式, 各具不同技术特征与危害程度, 私自改装计量装置操作包括互感器二次侧短路与计量回路断线等手段, 导致电能计

量失准并引发接地故障风险, 违规增容操作通过擅自增加大功率设备造成变压器长期过载运行, 绝缘材料加速老化。带电检修与违规接线操作在未断电情况下进行设备维护, 极易引发人身伤亡事故, 恶意攻击智能电表通信系统干扰正常电能计量功能, 这些操作模式具有隐蔽性强与安全隐患大的特点^[2]。

1.3 用电习惯对电气系统运行的影响

电力用户的用电习惯直接影响电气系统负荷分布与设备利用率及运行安全性。集中式用电习惯使变压器在特定时段承受高负荷运行, 设备温升加剧且绝缘老化速度加快, 频繁负荷投切操作对开关设备造成机械磨损, 缩短设备使用寿命。不规范用电时序安排导致电网功率因数偏低, 影响供电质量, 大功率设备启停产生的冲击电流引起电压波动, 对敏感设备造成干扰, 长期超负荷运行导致线路过热, 增加停电风险。合理用电习惯能有效平抑负荷峰谷差^[3]。

2 用电行为与系统响应特征分析

2.1 电流、电压变化与电力用户操作的关联

用户操作行为与电压参数变化之间存在明确的因果关联, 如图 1 所示, 异常操作在特定时段引发显著的电压骤降特征, 8:00-10:00 时段电压异常降幅达额定值的 11%, 14:00-16:00 时段也出现明显波动。私自改装计量装置导致二次回路阻抗突变, 引起电压信号失真; 大功率设备违规投入造成电压暂降, 降幅与设备容量成正比; 恶意断路器操作产生的电弧效应在电

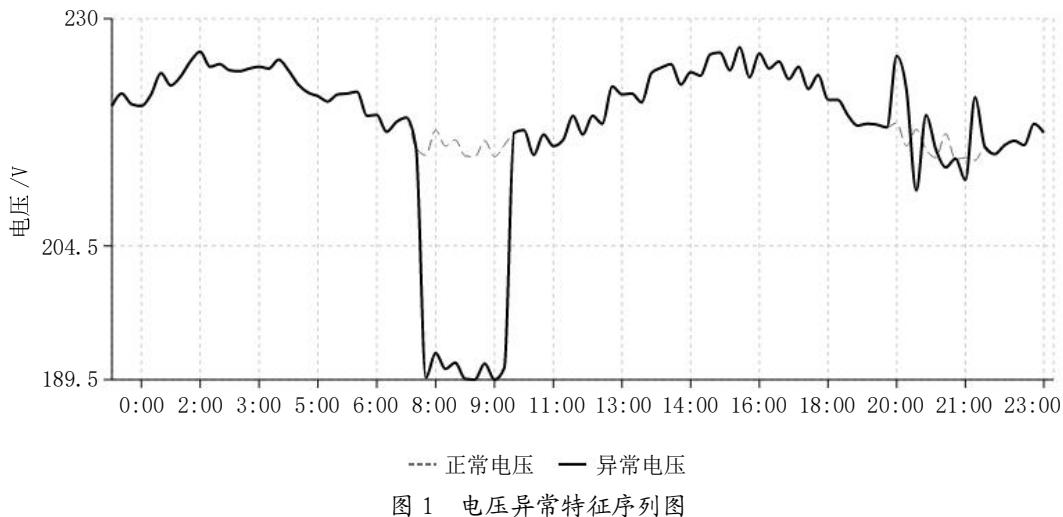


图1 电压异常特征序列图

压波形中形成特征性畸变。电压异常的幅度与持续时间以及恢复特性直接反映用户不当操作的严重程度,为建立操作行为识别模型与制定防控措施提供了重要的技术基础^[4]。

2.2 负荷波动与用电模式的互动

负荷波动和用电模式之间构建起复杂的双向互动机制,二者相互产生影响并且持续调整适应。用电模式的改变会直接驱动负荷曲线的形态出现变化,集中式用电模式会使负荷峰值急剧上升,分散式用电模式能让负荷分布趋向于平缓,负荷波动反过来会对电力用户用电策略的选择产生影响。持续的负荷高峰会促使用户调整设备运行的时序,从而避开用电拥挤的时段,工业企业在负荷高峰期会自动减少非核心设备的投入,把生产负荷转移到谷期去运行。负荷波动幅度和用电模式稳定性呈现反比的关系,模式变化频繁的用户负荷波动系数明显偏高,季节性用电模式的切换会引发负荷特性的周期性变化,夏季制冷模式下负荷峰谷差扩大到1.8倍,这种互动关系在智能用电环境下会表现得更加显著,实时电价信号强化了负荷响应的灵敏度。

2.3 行为习惯对设备运行状态的影响

电力用户长期以来的用电行为习惯会对电气设备运行状态产生累积性影响,这成为设备性能劣化的重要驱动因素。频繁进行大负荷投切的习惯会加速断路器触头磨损,电弧侵蚀会导致接触电阻增大并使设备温升异常,不规律地进行设备启停操作会增加变压器励磁涌流冲击次数,绕组绝缘承受反复电应力作用致使绝缘强度逐渐下降。长期保持超负荷运行的习惯会使导线载流量超出设计值,导体温度持续偏高会加快

绝缘层老化速度,不当开展功率因数管理的习惯会造成系统无功功率增加,导致设备视在功率容量利用率降低。违规进行操作的习惯会破坏保护装置整定配合关系,影响故障时的选择性跳闸功能,设备维护习惯缺失会导致绝缘监测数据出现异常,造成预防性维护措施滞后,这些行为习惯的累积效应最终体现为设备故障率上升和使用寿命缩短,形成电气事故的潜在隐患^[5]。

3 电气事故发生机制解析

3.1 短路、过载与接地故障的行为关联

用户不当操作行为是引发短路与过载及接地故障的直接诱因,三类故障之间存在密切演化关联,违规增加负荷容量导致线路电流超出额定值,过载状态下导体温升加剧,绝缘材料软化变形,最终击穿形成相间短路,私自改装计量装置破坏接地系统完整性,接地电阻异常增大,单相接地故障时中性点电位偏移,健全相电压升高至线电压水平。设备投切操作不当产生操作过电压,绝缘薄弱环节承受冲击电压作用发生击穿。短路故障产生的巨大短路电流造成设备机械应力超限,接地故障引发的零序电流对邻近设备产生电磁干扰,故障关联效应使单一操作失误引发连锁事故。

3.2 用电不当引发的设备老化与故障链条

用电不当行为通过加速设备老化过程形成完整故障链条,各环节相互促进最终导致系统性故障发生,长期过载运行使变压器油温持续偏高,绝缘油裂解产生有害气体,绕组绝缘强度下降,频繁启停操作加剧开关设备机械磨损,触头表面氧化层增厚,接触电阻增大引发局部过热。不合理负荷分配导致三相不平衡问题加剧,中性线电流异常增大使配电设备承受额外热应力。谐波污染源不当使用恶化电能质量,电力电

子设备承受谐波冲击致使元器件寿命缩短，设备老化后保护动作特性漂移，故障识别准确性降低，这种渐进式劣化过程具有隐蔽性强且影响范围广的特点。

3.3 环境因素与电力用户行为交互下的风险形成

环境因素与用户用电行为相互作用，形成复合型风险累积机制，显著增加电气事故发生概率。高温高湿环境降低电气设备绝缘性能，用户违规增容操作在此条件下极易引发绝缘击穿事故，雷电活动频繁期间，用户未按规程断开敏感设备电源，雷电感应过电压叠加正常工作电压造成设备损坏。污秽环境中绝缘子表面积污，用户疏于清洁维护导致污闪事故频发，强风天气下线路摆动幅度增大，用户违章搭建临时用线路增加短路风险。低温环境使电缆绝缘材料变脆，用户野蛮施工造成机械损伤，气象灾害与人为因素叠加效应下，单一环境扰动可能触发大面积停电事故。

4 电气事故防控策略

4.1 精准监测与数据驱动的风险管控

精准监测技术通过多维度数据采集实现风险的量化识别与预警管控。智能电表与传感器网络构建全覆盖监测体系，实时采集电压与电流以及功率因数等关键参数，监测精度达到 0.2 级标准。大数据分析平台运用机器学习算法处理海量用电数据，识别异常用电模式与潜在风险点。建立风险评估模型，根据历史数据与实时监测结果计算用户风险等级，高风险用户实施重点监控，异常检测算法能够在参数偏离正常范围 5% 时触发预警，提前发现设备故障征兆。数据驱动的决策支持系统为运维人员提供风险分析报告与处置建议，通过设备状态监测数据预测维护需求，实现从被动抢修向主动预防的转变，建立用户用电行为档案，为个性化风险管控提供数据支撑，显著提升事故预防的针对性与有效性。

4.2 用电行为引导与安全教育实践

用电行为引导依靠多元化教育手段与激励机制来促进用户形成安全用电习惯，建立分层分类安全教育体系，并针对工业与商业以及居民用户制定差异化教育内容，通过对实时用电数据进行监控与分析可动态调整发电计划，优化能源分配并减少浪费。定期组织安全用电培训重点讲解违规操作危害性与正确用电方法，结合具体地理位置与用户类型以及历史数据量身定制最适合的解决方案，推广安全用电技术标准以指导用户规范设备安装与维护操作。建立用电行为评价机制，对安全用电表现优秀用户给予电费优惠等激励措施，这种基于数据驱动的方法不仅提高了电力系统

整体效率，还增强了应对市场波动的能力。通过持续行为引导与教育实践逐步改善用户用电习惯，从源头减少事故发生风险。

4.3 多层防护体系下的事故预防与应对

多层防护体系构建技术防护与管理防护以及应急防护相结合的综合防控网络。技术防护层面部署智能保护装置与故障定位系统，实现毫秒级故障切除与精确故障定位。管理防护层面建立严格的安全作业标准与定期检查制度，强化人员操作规范性。应急防护层面制定完善的事故处置预案与快速响应机制，这些方法共同促进了电力行业的创新与发展，确保电力供应的安全可靠，体现了综合防护策略的重要作用。建立区域协调指挥中心，统筹调度应急资源与抢修力量。配置移动应急电源与备用设备，确保重要用户连续供电，通过综合分析与实时监控，可以更有效地预防潜在问题，保障电网的高效运作，这正是多层防护体系协同作用的核心理念。

5 结束语

电力用户用电行为特征分析为电气事故防控提供了新的技术路径与管理思路。负荷波动规律性识别、高风险操作模式归类以及行为习惯影响机制分析构成了完整的特征描摹体系，电气参数变化与用户操作的关联分析揭示了事故发生的技术机理，为建立预警模型奠定了基础。事故发生机制解析明确了故障演化规律与风险形成过程，精准监测与行为引导以及多层防护相结合的策略体系为电力系统安全防控提供了系统性解决方案，未来应进一步深化大数据分析技术应用，构建更加智能化的安全防控体系。

参考文献：

- [1] 孙胜博, 张凯, 冯剑, 等. 基于负荷特性分析的电力用户用电行为特征研究 [J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(01): 40-44.
- [2] 魏倩, 王晨星, 李珂明. 基于大数据分析的用电异常检测与防范机制 [J]. 家电维修, 2025(09): 137-139.
- [3] 罗建国, 陈琳, 林磊, 等. 基于用电客户群体细分的差异化用电行为特征分析 [J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 68-72.
- [4] 郑真, 马晔晖, 黄一楠. 基于电力大数据挖掘的异常用电用户识别模型研究 [J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(05): 99-102, 154.
- [5] 黄悦华, 郭思涵, 鲍刚, 等. 基于用电特征分析的异常用电检测方法 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(01): 96-101.

风电光伏并网储能容量优化配置策略

任麟东

(水电水利规划设计总院有限公司, 北京 100011)

摘要 储能系统作为促进新能源发电消纳的核心调控手段, 风电光伏并网储能容量优化问题已成为提升新能源消纳水平的关键课题。基于此, 本文详细介绍了储能容量优化配置模型, 并以张北风光储示范工程、澳大利亚霍恩斯代尔储能项目两大项目为例, 剖析了基于多目标优化的配置模型构建、技术经济性视角下的储能选型与容量确定、基于市场机制的储能容量优化配置路径、技术创新驱动的储能容量优化策略等优化配置路径, 以期为相关人士提供参考。

关键词 风电; 光伏; 储能; 容量优化; 多目标模型

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.026

0 引言

随着“双碳”战略推进, 我国风电和光伏装机持续增长, 据国家能源局显示, 2023年新增风电设备7 566万kW, 太阳能发电设备达2.16亿kW, 发电能力达10.5亿kW。但因风电的阶段性特征, 我国弃风弃光比例长期处于高位, 2022年弃风率5.1%、弃光率2.1%。采用“削峰填谷”实现电力平稳, 可提高风电、光伏发电容量。基于此, 本文针对当前政策与科技发展趋势, 对我国风电光伏并网储能容量展开研究。

1 储能容量优化配置模型

1.1 多目标优化框架

以经济性、可靠性和环境效益为主要指标, 建立两层式优化模型:

1. 高层建模: 以寿命期成本最低为优化目标, 采用混合整数线性优化方法, 对系统功率平衡、储能容量限制等进行约束。2. 低层建模: 利用PSO对储能电池荷电状态平衡进行最优化放电功率配置。采用群控组态实施方案, 运算速度提高30%以上。

1.2 技术经济性分析

根据目前主要储能技术成本数据, 锂离子电池度电每千瓦时价格为0.39~2.04元, 使用周期5 000~10 000次, 适用于短期存储; 全钒液流电池度电成本为2.2元/kW·h, 使用寿命超20 000小时, 适合长期存储。

2 典型案例分析

2.1 国内案例: 张北风光储示范工程

张北风光储发电项目是世界上较早实现风力发电与储能系统协同运行的示范工程, 总装机容量达70 MW。

该项目的储能系统由60%的铁磷酸盐电池和40%的液体电池构成, 通过虚拟同步机技术对常规发电单元的惯性特性进行仿真模拟, 有效将输出频率误差控制在0.1 Hz以内。从实际运行效果来看, 现场实测数据显示, 在加装蓄热装置后, 项目弃光率显著降低, 由原来的20%下降至8%, 年发电能力相应提升了1.2%, 能源利用效率得到明显改善。但是, 该工程在发展过程中也面临一定挑战: 前期投入高达540亿元人民币, 建设周期长达16年, 且项目运营对政府补助存在较明显的依赖性。

2.2 国际案例: 澳大利亚霍恩斯代尔储能项目

霍恩斯代尔储能装置规模达150 MW/194 MW·h, 该系统采用特斯拉的能量回收技术, 响应时间可控制在0.14秒以内, 为南澳大利亚电力网络的稳定运行提供了有力支撑。在经济效益方面, 该方案接入电力系统后, 每度电可实现0.15元的利润, 年盈利规模超过2 000万元。对比来看, 我国在储能领域的经验体现为以市场为导向的电价机制, 其中调频业务的收费标准为3.5元/kW^[1]。

3 风电光伏并网储能容量优化配置策略

3.1 基于多目标优化的配置模型构建

1. 在具体的储能布局设计环节, 研究运用混合整数线性规划(MILP)模型进行深入探究。在实践应用中, 将该模型用于储能装置优化时, 综合纳入初始购置成本、年维护成本以及5年后的更新成本等关键经济参数, 建立预测风电功率与电网电价变化的关联机制。测算结果显示: 当蓄电比例设定为20%时, 单位成本可实现0.05元/kW·h的降低, 验证了模型在经济性优化

方面的有效性。为保障电网稳定运行, 基于上述优化模型进一步提出了系统性的限制条件。其中, 核心限制条件涵盖风电、光伏发电、储能充电与用电的电力均衡限制, 通过动态调控各能源模块的出力与消耗, 确保电网实时功率平衡。同时, 针对储能装置的充放电过程设置了严格约束: 明确最大充放电功率、最大充放电时间以及最大充电深度等关键参数阈值。这一措施可有效防止充放电过程中能量存储器件因过度使用或操作不当造成损伤, 从而避免器件服役寿命缩短, 在保障经济性的同时兼顾系统运行的安全性与耐久性。

2. 以能量存储系统荷电状态 (State of Charge, SOC) 平衡为核心研究对象, 借助微粒群算法建立低层数学模型。在实际应用中, 由于各个单体间存在 SOC 不平衡问题, 会导致部分单体过量消耗, 加速其老化速度, 进而降低整体能量存储的可靠性和服役寿命。而利用粒子群算法能够实现对各个单体荷电状态的在线监控, 对储能系统的能量分布进行动态优化。例如: 将粒子群优化方法引入新的太阳能发电装置后, 可显著缓解单体荷电状态失衡问题, 使单体平均每天的损耗时间减少 20% 左右, 从而有效提高太阳能发电系统的稳定性。并且, 基于此提出一种采用动态加载控制配置的方法, 该方法通过 Excel 编写实现, 具有操作简单、易于编写、控制过程直观、计算和运行高效的特点, 便于在工程实践中推广应用^[2]。

3. 在环境保护方面, 尽管难以通过数学方式进行定量描述, 但该新能源存储系统在提升风力和太阳能的消纳量、减少弃风导致的能量浪费方面效果显著, 进而间接降低常规能源的二氧化碳排放量, 达成保护环境的目的。例如: 利用新能源发电技术提高风力发电的稳定度和消纳能力后, 新能源可替代燃煤发电所需的电能, 从而减少燃煤发电过程中产生的二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放量。

3.2 技术经济性视角下的储能选型与容量确定

1. 锂离子电池在短期存储场合表现突出。目前市场上使用的锂离子电池单位电量成本为 0.39 ~ 2.04 元 /kW·h, 且使用周期长达 5 000 ~ 10 000 次。这种兼具经济性与长寿命的特性, 使其在商用等短期存储场景中具有很大的应用前景。它能够有效抑制太阳能发电的波动, 还可通过峰谷电价差实现套利。例如: 一家大型商场采用固定容量的锂离子蓄电池储能装置后, 可在峰谷时段合理充放电, 既减少了自身的电力消耗成本, 又缓解了电网的负荷压力。

2. 全钒液流电池适用于长期存储需求。其单位电量价格在 2.2 元 /kW·h 左右, 虽价格相对昂贵, 但具

备充放电深度高、安全性好的优势, 因此可用于长期存储场景, 如电网级别的储能工程。在部分风电、光伏等新能源供应不稳定的区域, 采用全钒液流储能技术, 能够实现风电、光伏等机组在极端天气下的连续稳定供电, 保障电力供应的可靠性。对于边远山区风电场因距离负荷中心较远、电网基础条件较差导致的风电消纳难题, 该技术也能有效缓解, 降低弃风率, 提升风电场的综合经济与社会效益^[3]。

3. 在为风力发电系统等配置存储装置时, 不仅要考虑存储装置自身的特点, 还要结合发电系统的功率特性以及用电情况来决定容量。通过统计风力发电及光伏发电系统的历史输出数据, 预测其未来发电功率的变化幅度及规律, 并依据负载变化规律, 判断各阶段所需的蓄 / 放电功率及容量。以日照充足区域的光伏电站为例, 基于历年累计的日照、光伏发电资料, 结合日间行业用电峰值特征, 采用数据解析方法构建约为光伏发电系统总容量 30% 的存储容量, 可保证光伏发电稳定运行, 并通过对各阶段发电负荷的优化调度, 实现最优的技术经济均衡。

3.3 基于市场机制的储能容量优化配置路径

1. 在容量定价机制方面, 针对地区实行 100 元 /kW·h 的独立存储容量补贴政策, 为储能建设带来了较好的收益。以 300 MW/1 200 MW·h 规模的大型储能电站为例, 通过引入“电量定价”机制, 实现了年度“电量补偿”。在综合考虑投资成本、运营维护费用和预计服务年限的基础上, 结合经济性分析模式与产能定价方式, 得出了投资回收期、投资回报率等主要经济参数^[4]。在合理的电量定价策略支持下, 实现 10 ~ 12 年的全生命周期, 并达成 8% ~ 10% 的年内回报率, 充分体现了其经济效益。这也要求储能企业进行更科学、合理的规划, 在保证电力供应的同时实现工程效益最大化。

2. 实时交易制度为储能行业拓展了更多利润空间。在实时电价交易中, 通过低价买入、高价卖出的方式, 能够实现电能存储的保值增值。具体而言, 当电力供给充足且电价较低时, 储能装置可进行充电存储; 当处于用电高峰且电价较高时, 再通过储能装置释放电能供应市场以获取利润。此外, 引入调频、调峰等辅助服务也能增加收益。在该模式下, 存储设备经营者可依据电网电价和辅助业务需求, 对存储设备进行动态调节, 实现有效利用。例如: 通过在线监控电网价格和运行频率, 储能设备能在价格剧烈波动时迅速反应, 在电网频率偏移时及时响应, 为用户提供更多调频服务, 更好地发挥调控功能, 提升市场使用效率。

3. 进一步完善相应的市场制度与交易平台, 以提

高我国储能资源配置效率。建立健全能源交易制度是保障能源交易公平、透明的基础；构建有效的电网交易平台则能实现电网数据的实时分享与交易，让储能企业快速获取更多市场动态，优化能源管理。例如：构建综合考虑风力发电功率、负荷需求、市场价格、存储设施状态等信息的智能电力市场交易系统，可为存储企业提供准确的市场营销决策支持，辅助其进行合理的存储容量分配与调度，进而提升其在电力市场环境下的经济与社会效益^[5]。

3.4 技术创新驱动的储能容量优化策略

1. 将多种存储方式融合形成优势互补。以锂离子蓄电池和超电容器构成的复合能量存储体系为例，锂离子电池具有比容量高的特点，适用于长期储能；而超级电容器则因比容量大、充电速度快，能够对电源的剧烈波动做出迅速反应。在风力发电系统中，当系统出现短期、大范围的电力波动时，超级电容可快速投入使用，有效抑制系统的高频振荡，减小充放电过程对系统的影响，进而减少设备每天的运行频率，提高其工作寿命。研究结果显示，此类复合式储能器可使动力蓄电池的日利用率降低约60%，综合效益提升34%。在容量分配上，需基于风力发电系统的动态变化特点及负载变化规律，采用最优方法对不同类型的储能系统进行匹配，以实现最优性价比。例如：某风力发电工程的数值模拟和仿真研究表明，当锂离子电池与超电容器的容量比例为7:3时，系统总寿命费用达到最小，同时能满足风力发电的需求^[6]。

2. 人工智能在电力系统中的运用，对优化电力系统存储能力具有重要意义。科陆电子的“储能+AI”解决方案便是典型案例，该方案利用人工智能强大的计算能力，可精确计算风力和太阳能发电的功率和电量。通过采用深度学习方法，对海量气象、风电、光伏发电等数据进行学习与训练，能够构建高精度的预报模型。例如：通过学习区域内的多个天气、太阳能发电观测资料，可实现对未来几小时乃至几天内太阳能发电功率的精确预报，预报精度较常规方式提升15%~20%。在此基础上，结合电网电价及储能装置运行状况，利用智能调度方法对蓄电池组进行优化调控：当电力价格处于低位且太阳能发电出现超额时，智能调度系统会控制蓄电设备快速充电；当电力价格处于峰值或太阳能发电功率短缺时，则适时释放储能，从而实现能源的高效存储与合理使用。这种基于人工智能的优化模式，能显著提高储能设备的使用效率，降低对储能设备的配置要求，改善整个电网的综合经济性能^[7]。

3. 钠离子电池作为一种新型可再生能源存储方式，凭借价格低廉、来源丰富等优点，展现出广阔的应用前景。到2025年，钠离子动力电池单位电量的价格已降至0.217元/kW·h，使用周期可达6 000次以上，逐步实现规模化应用。在家庭用电、小规模商用存储等领域，以钠离子电池为代表的新型低价格储能体系，能够在满足基础存储需求的同时，降低初期投入。在容量分配方面，需结合家庭客户的使用习惯及负载特点进行设计，以在保证正常用电的同时实现最大经济效益^[8]。通过对住宅用户用电资料的统计，为每个家庭配备2~5 kW·h的钠储能容量，既能实现峰谷电价套利，又能保证家庭用电的稳定与可靠。

4 结束语

合理规划风电光伏并网储能容量优化配置，是实现新能源高效消纳、保障电网稳定运行与提升经济效能的关键举措。未来，需进一步深化数据模型与智能算法的深度耦合，唯有通过科技创新与体制机制保障的双向驱动，才能实现精准高效的储能能力配置，为新能源高比例接入提供坚实的支撑，进而为我国能源结构优化调整及“双碳”战略的落地实施筑牢基础。

参考文献：

- [1] 张成志. 基于ACO与CSO算法的风电光伏并网储能容量配置优化[J]. 电气时代, 2025(02):46-49.
- [2] 许翔. 风电光伏并网储能容量的配置优化[J]. 能源与节能, 2025(04):4-6, 15.
- [3] 陈晓明. 风电光伏并网储能容量优化配置对策研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(10):104-107.
- [4] 张海洲. 分布式风电光伏的储能容量优化配置方法分析[J]. 中国科技期刊数据库工业A, 2024(05):42-45.
- [5] 张永明. 风电光伏并网储能容量优化配置方法[J]. 自动化应用, 2023(21):72-74.
- [6] 孟聪. 基于分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(22):53-55.
- [7] 李建林, 孙浩元, 张敏慧, 等. 计及风电平抑的电-氢混合储能容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2025, 46(06):120-129.
- [8] 戴睿, 胡丕庆, 张蔚欣. 面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(10):190-193.

新能源发电厂前期规划中土地资源集约利用路径分析

张焕奇

(大唐惠州热电有限责任公司, 广东 惠州 516000)

摘要 随着全球能源转型加速推进, 清洁能源需求持续攀升, 新能源发电厂建设已成为能源领域发展的关键方向。然而, 在前期规划阶段, 土地资源集约利用面临多重挑战。本文通过系统分析新能源发电厂土地资源利用现状及现存问题, 深入探讨土地资源集约利用的有效路径, 旨在为新能源发电厂可持续发展提供参考, 进而推动能源开发与土地资源保护的协同发展。

关键词 新能源发电厂; 前期规划; 土地资源; 集约利用

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.027

0 引言

在全球应对气候变化和推进可持续发展的大背景下, 新能源以其清洁、可再生的特性成为缓解能源危机与环境压力的重要力量。我国也积极推进能源结构调整, 《“十四五”可再生能源发展规划》明确提出, 到2025年, 可再生能源年发电量达到3.3万亿千瓦时左右。新能源发电厂作为新能源利用的重要载体, 建设规模持续扩大。但同时, 土地资源集约利用很关键。土地是新能源发电项目的基础支撑, 其稀缺性、有限性决定了有效利用土地资源的重要性。平衡发展能源与保护土地资源的关系, 实现经济、社会、环境效益的最大化。

1 新能源发电厂土地资源利用现状及问题

1.1 新能源发电厂土地资源利用现状

目前, 我国新能源发电厂的土地利用类型多样化, 这种多样化与不同新能源发电技术的特性相关, 也与我国地域自然条件差异的国情相适应。在风电方面, 陆地风电选址充分结合了风能资源分布与土地利用现状, 多选择在草原、山地、戈壁等人口密度较低, 地势开阔的区域^[1]。以内蒙古地区为例, 这一区域因为有着广阔的草原和稳定的风能资源, 是我国陆地风电建设的重点区域, 很多大型陆地风电场落户该地区。这些风电场利用当地自然资源优势的同时, 但也占用了大量的土地资源, 如何在发电和草原生态保护之间寻求平衡成为一个重要课题。海上风电依托我国漫长的海岸线, 随着海上风电技术成熟, 项目建设渐渐从近海海域向深远海推进, 不仅获得更加稳定的风能资源, 在一定程度上减少了对近岸土地与生态环境的影响,

但同时也面临海域使用与海洋生态保护的新挑战。在太阳能发电中, 大型集中式光伏电站建设地点选择上体现了利用闲置土地资源的思路, 多建在沙漠、荒漠等生态系统较为单一、土地利用价值较低的地方^[2]。我国西北地区大面积的荒漠土地是集中式光伏电站建设的理想区域, 多个大型光伏电站在此建成投入运行。在利用闲置土地发电的同时, 光伏板覆盖减少土地沙化, 发挥了一定的生态修复作用。而分布式光伏发电则具有“因地制宜”的特点, 在工业厂房、居民住宅屋顶等建筑物表面广泛应用, 充分利用了建筑物的闲置空间, 实现“空间二次利用”, 这种模式不需要占用耕地或生态用地, 在城市与工业园区内推广价值较强, 但因屋顶资源的分布与产权问题, 规模化推广有一定障碍。生物质能发电项目的土地利用则与原料供应紧密相关, 为降低原料运输成本, 项目一般靠近生物质原料产地, 如农作物种植区、林业产区等, 占用一定规模的农业用地或林地周边土地。这些土地不仅用于电厂主体建设, 还包括原料储存、预处理等配套设施的建设。生物质能发电项目的土地利用与农业、林业生产具有一定的关联性, 如何理顺项目用地与农业生产用地的关系, 避免挤占粮食生产空间, 成为其土地利用中需要重点关注的问题。

1.2 新能源发电厂土地资源利用存在的问题

1.2.1 土地资源浪费

部分新能源发电项目的前期规划没有经过科学严谨的论证, 对土地资源评估不精确, 用地规模超量。在风电场建设中, 部分项目选址未充分考虑风机合理

间距与地形条件，仅以追求高发电量为目标过度扩大占地，使风机间大量土地闲置，这些土地既无法用于发电相关用途，也难以恢复原有生态或农业功能，造成严重浪费；同时，风电场道路规划与配套设施建设优化不足，道路宽度和设施占地超出需求，进一步加剧浪费。光伏电站建设中，土地浪费问题同样突出。一些项目未依据地形特征精细化设计，盲目平整土地，即便坡度较小区域也采用大规模开挖回填方式，既破坏了原有地形地貌与土壤结构，又造成了不必要的浪费；部分集中式光伏电站组件布局未考虑地形坡度与光照条件关系，组件间距过大，导致单位面积土地光伏组件安装量不足，降低土地利用效率^[3]。生物质能发电项目土地浪费与原料供应不稳定密切相关。部分项目前期规划对原料产量预估过于乐观，按最大产能规划用地规模，但投产后因原料供应不足，电厂产能无法充分发挥，已占用的大量土地却难以及时调整用途，只能长期闲置；此外，部分项目原料储存场地规划过大，实际储存量远低于设计容量，造成土地闲置。

1.2.2 土地利用效率低

不同类型新能源发电技术土地利用效率差异显著，同一技术在不同发展阶段效率也不同，这与技术水平、规划设计、运维管理等因素相关。风电领域，早期建设的风电场受限于当时技术，风电机组单机容量小，为达预期发电规模需安装更多风机，导致单位土地面积发电功率低；虽新型大容量风电机组已能大幅提升单位土地发电量，但早期风电场因资金、技术、政策等限制，设备更新改造滞后，土地利用效率长期难以提高，与新建风电场效率差距逐渐扩大。分布式光伏发电项目土地利用效率受屋顶资源利用与组件布局影响较大^[4]。城市与工业园区内，大量工业厂房、公共建筑屋顶本是分布式光伏理想安装场地，但部分屋顶因产权复杂、承重不足等无法安装组件；即便已安装组件的屋顶，也存在排列稀疏、朝向未优化等布局问题，导致单位面积屋顶发电量低，屋顶空间利用效率未充分发挥。生物质能发电领域，土地利用效率受原料收集半径与运输成本制约。生物质原料体积大、密度小、易腐烂，运输成本高，使电厂原料收集半径受限。收集半径过大则运输成本过高影响效益，过小则原料供应不足限制产能，这种矛盾导致项目用地规模与产能难以最优匹配。此外，部分项目原料预处理工艺落后、转化率低，也使单位土地面积发电量低，进一步降低土地利用效率。

1.2.3 土地获取难度增加

我国“三线”划定政策全面实施后，耕地和永久

基本农田、生态保护红线、城镇开发边界的划定，为土地资源保护提供严格保障，也对新能源项目土地获取提出了更高要求。中东部地区，人口密集、经济发达、能源需求旺盛，但可供新能源项目建设的土地有限，项目选址转向山地、丘陵等地形复杂区域，增加了建设成本与技术难度。青海、西藏等生态脆弱地区，这些区域生态系统脆弱，破坏后恢复难度大，生态保护优先级远高于项目建设，新能源项目土地利用空间小^[5]。此外，新能源项目土地使用审批程序严格，也是土地获取难度增加的重要原因。项目审批涉及自然资源、生态环境、能源主管部门等多个部门，且需完成土地预审、规划选址、环境影响评价等多项手续；同时，部分地区难以提供充足用地指标，进一步增加项目建设不确定性与成本，影响土地资源有效利用。

2 新能源发电厂前期规划中土地资源集约利用路径

2.1 科学规划与选址

新能源发电厂前期规划阶段，科学规划与选址是土地资源集约利用的基础，要运用先进的技术手段与科学的分析方法，使项目建设与土地资源条件、生态环境要求相匹配。地理信息系统（GIS）与大数据分析技术为土地资源评估提供精准的技术支撑。如通过GIS技术对项目区域的地形地貌、土壤类型、植被覆盖、权属关系等多方面信息进行全面采集与可视化呈现；通过大数据分析技术，将气象、水文、能源资源分布等数据，如风能的风速、风向长期监测数据，太阳能的辐照强度时空分布数据等，进行整合，建立综合评估模型。该模型不仅能从能源资源的富裕程度，而且还能对土地适宜性进行多维度评价，如土地对生物多样性的生态功能、土壤的肥力状况等都得到充分考虑，避免在生态敏感区或农业价值很大的土地上进行盲目建设。通过模型分析，可以筛选出新能源发电厂最适宜建设的土地区域，实现土地资源优化配置，提高土地利用效率。在完成土地适宜性评估后，还要根据不同类型新能源发电项目的特点，进行科学合理的布局设计。风电场布局设计必须紧密结合地形与风速分布特征，采用先进的风电场优化设计软件，对风机的位置与间距进行准确计算。在保证风机安全运行与发电量的前提下，通过优化风机排列，减少风机之间的相互干扰，最大限度地减少土地占用。

2.2 创新土地利用模式

创新土地利用模式是提高新能源发电厂土地集约利用水平的重要途径。通过打破传统单一的土地利用方式，实现土地资源的多功能利用，可有效提升土地

的综合效益。大力推广新能源与农林牧渔业的融合发展模式，是当前实践中较为成熟且效果显著的方式。在“光伏+农业”模式中，核心在于实现光伏发电与农业生产的协同发展。光伏电站的光伏板具有遮阳作用，可根据不同农作物的生长特性，在光伏电站下种植喜阴作物，如食用菌、中药材、耐阴蔬菜等，这些作物在光伏板的遮阳环境下能够正常生长，既不影响光伏发电，又能充分利用土地资源进行农业生产，实现“一地两用”。部分地区还试行在光伏电站下进行家禽家畜养殖，如鸡、鸭、羊等，光伏板为养殖提供了遮阳避雨的环境，养殖产生的粪便可作为农业种植的肥料，形成“发电—养殖—种植”的循环生态系统，进一步提高土地的综合利用效益。在“风电+牧业”模式中，风电场建设可以与畜牧业发展有机结合。风电场风机占地面积小，风机间空地仍然保持原草原或草地地貌，可以继续进行放牧，互不干扰。这种模式在内蒙古、新疆等草原地区得到了较多应用，既充分利用了当地的风能资源发展风电，又保护了传统畜牧业生产，达到能源开发与畜牧业发展的双赢。为了保证这种模式的可持续性，需要合理控制放牧强度，避免过度放牧给草原生态带来的破坏，还需要在风电场附近设置防护设施，保障畜牧业生产安全。在海上新能源开发中，积极探索海上风电、光伏发电与渔业养殖相结合的“风光渔”一体化模式。在同一海域空间内，海上风电机组固定在海域中，光伏组件安装在养殖平台或浮体上，下方海域用于鱼类、贝类等水产品养殖。这种模式有效利用了海域的立体空间资源，实现了风能、太阳能与海洋生物资源的综合利用，大大提高了海域资源利用效率。同时，光伏板与风电机组的存在可在一定程度上为养殖水产品提供了遮阳保护，改善了养殖环境，提高了养殖产量与品质。除了产业融合模式外，还可充分挖掘特殊土地资源的利用潜力，在资源枯竭型矿区、采煤沉陷区等土地受损区域开展具有生态环境保护和修复效益的新能源项目。这些区域由于传统矿产资源开发，土地遭到严重破坏，无法直接用于农业或建设用途，而新能源项目的建设可对这些土地进行综合治理与修复。

2.3 技术创新与应用

技术创新与应用是推动新能源发电厂土地集约利用的核心动力。通过持续提升发电设备效率与节地技术水平，能在减少土地占用的同时提高能源产出，实现土地资源高效利用。加大技术研发投入、推动设备创新则是提升土地利用效率的根本。在光伏领域，技

术创新聚焦提高光伏电池转换效率与组件性能，研发如钙钛矿电池这类新型材料，相比传统晶硅电池可在相同面积产生更多电能，减少电站占地；同时优化电池结构，像叠层电池技术通过叠加不同波段材料充分利用太阳光谱，进一步提升效率。此外，推广高效光伏逆变器与智能运维系统也很关键，前者减少电能转换损耗、提升输出质量，后者借助大数据与人工智能实时监测组件状态，及时修复故障，在相同土地面积下提高发电量。风电领域技术创新围绕机组大型化与高效化，研发更高效率机组，减少风机数量的同时提高总发电量，从而减少风电场占地；新型机组采用柔性叶片、仿生叶片等先进设计提升捕风效率，结合智能控制技术根据风况调整参数，减少停机时间，再搭配轻量化设计，降低基础占地与建设成本。生物质能发电领域，通过高效气化、液化技术提升原料转化效率，减少原料消耗与相关占地；探索农业废弃物、林业废弃物等多元原料混合利用，保障原料供应稳定，避免土地闲置，还可结合光伏等技术构建互补系统，提升土地综合利用效率。

3 结语

在新能源发电厂前期规划中，土地资源集约利用是实现新能源可持续发展的关键环节。当前，我国新能源发电厂土地资源利用存在浪费、效率低等问题。通过科学规划与选址，综合评估土地资源并优化项目布局；创新土地利用模式，采用复合利用和立体利用模式；推动技术创新与应用，提高发电设备效率并应用节地技术等多方面路径，可以有效提高土地资源的集约利用水平。

参考文献：

- [1] 吴菲,王湛.基于物质流成本会计法的环境收入计量:以HY市生活垃圾焚烧发电厂为例[J].财会月刊,2018(24):91-97.
- [2] 周玉.垃圾焚烧发电厂的用地指标研究[J].上海国土资源,2015,36(01):61-63.
- [3] 傅飞,欧阳雷.火力发电厂厂区节约用地分析[J].中华民居,2011(10):95-96.
- [4] 李友,许兆洋,张梦雪.核电厂总平面布置方案兼容性的思考[J].工业建筑,2023,53(S1):809-814.
- [5] 李博彤.论大型火力发电厂前期的管理与投资控制[J].现代经济信息,2017(13):373.

风电场代表测风塔选择方法分析

——以广西某山地风电场为例

余少梅

(中国电建集团城市规划设计研究院有限公司, 广东 广州 511455)

摘要 我国复杂地形风电占比超60%, 风况异质性增加评估难度。测风塔代表性影响发电量评估, 受海拔高差、风气候、遮挡效应制约。评估分定性与定量, 依规范, 复杂地形测风塔控半径 $\leq 2\text{ km}$ 、高差 $\leq 50\text{ m}$, 本文依此选塔并实证。以广西某山地风电场为例, 合理选择代表测风塔, 可优化关键指标: 年上网电量增加412.4万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 、等效满负荷小时数增加27.5 h, 尾流减少0.05%、机位点风速增加0.06 m/s , 以期能为提升经济效益与计算精度提供参考, 进而保障其效益与稳定运行。

关键词 风电场; 测风塔; 测风塔代表性; 定量评估

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.028

0 引言

在“双碳”目标驱动下, 风电作为清洁低碳的可再生能源, 已成为我国能源结构转型的核心力量。随着平原、草原等简单地形风电场开发趋于饱和, 山地、丘陵等复杂地形风电场的开发占比逐年提升。据行业统计, 2023年我国新增风电项目中, 复杂地形项目占比超60%。然而, 复杂地形下气流受地形抬升、绕流、峡谷效应等影响, 风况时空异质性极强, 导致风能资源评估难度显著增加。

测风塔作为风电场风能资源观测的核心基础设施, 其“代表性”(即测风数据对风机机位风况的反映程度)直接决定了发电量评估的准确性, 进而影响项目投资决策与收益测算。早期研究多聚焦测风塔选址的定性原则(如避开障碍物、覆盖主导风向), 而近年来随着实测数据积累与定量分析方法的发展, 学界开始围绕地形复杂度、空间参数(距离与海拔高差)、布设方案等维度展开深入研究。而本文根据风资源评估规范及前人研究结果, 对代表测风塔的选择进行定量分析, 并以实例进行佐证。

1 测风塔代表性的关键影响因素

测风塔对风机机位点的代表性受地形、风气候、数据质量及遮挡效应等多维度因素制约, 不同因素在复杂地形与低风速场景下的影响权重存在显著差异。总结而言, 影响测风塔代表性的因素主要有以下三种:

首先, 海拔高差与水平距离的核心作用地形复杂度

直接决定测风塔的有效控制半径。朱金奎等^[1]通过浙江山地风电场研究发现, 平坦地形测风塔可覆盖周边5~8 km, 而复杂地形下仅能准确代表2~3 km范围, 且海拔高差是核心限制因素——当东西山脊高差达150 m、直线距离5.7 km时, 测风塔对跨山脊机位点的代表性显著降低。这一结论在肖娜等^[2]的湖南山地案例中得到验证: 风机与测风塔距离 $\leq 300\text{ m}$ 、海拔高差 $\leq 50\text{ m}$ 时, 发电量测算误差最小(如3#、6#风机误差 $< 5\%$); 若高差超100 m、距离超2 km, 误差则扩大至10%以上。王道欣等^[3]进一步通过定量分析指出, 海拔高差与测风塔代表性呈显著负相关(线性拟合 $R^2=0.61$), 当高差从10 m增至50 m时, 理论折减系数从0.82降至0.70; 而水平距离与代表性无明显相关关系($R^2=0.03$), 仅在2 km范围内存在微弱关联。李林森等^[4]针对云贵高原36座测风塔的研究则补充: 随着海拔高差与水平距离增大, 风速推算误差呈单调递增趋势, 当距离超15 km时, 误差绝对值较10 km内扩大30%以上。

其次, 风气候相似性是测风塔代表性的另一关键维度。主要体现在主导风向、风能方向与大气稳定度的匹配度上。朱金奎等^[5]的案例显示, 浙江风电场B测风塔主风向为SSE, 仅能准确代表同山体东部机位点(间距 $< 1.6\text{ km}$), 而对西部NNE风向主导的机位点代表性失效。肖娜等^[6]则强调, 测风塔风能方向与山脊走向垂直时(如1#测风塔NNE风向与东西山脊垂直), 对沿线风机的代表性最优, 可减少地形隆升导致的风况偏差。大气稳定度的影响虽易被忽视, 但在低风速

山地场景中尤为关键。刘志远等^[7]指出,低风速区域地表温度差异易引发局部大气稳定度变化(如断崖、密林区域),导致测风塔与机位点的风速梯度偏差达0.2~0.6 m/s/100 m,需在代表性判定中单独考。

最后,遮挡效应包括地形遮挡与风机尾流遮挡,前者在复杂地形中更为突出。肖娜等^[8]发现,2#风机虽与测风塔距离仅238 m、高差18 m,但因位于独立山包且山脊开挖较大,发电量误差仍达2%;李林森等^[9]则指出,下风向低海拔区域(如东北部机位点)受主山脊遮挡,风速推算误差较上风向区域高15%。尾流遮挡虽可通过软件计算(如朱金奎案例用Meteodyn WT模拟尾流损失),但测风塔若处于风机尾流区(如距离<3倍风轮直径),实测数据会被“污染”,需在选址阶段规避。

2 测风塔代表性的评估方法

测风塔选取先需定性评估,核心是“相似性准则”,刘志远等提出五环节技术路线:(1)地形地貌相似(地表粗糙度、复杂度一致);(2)风气候相似(距离、海拔、大气稳定度匹配);(3)排除遮挡效应(无显著地形或人为遮挡);(4)数据质量达标(完整率、插补误差可控);(5)处理特殊情况(如支脉山脊单独设塔)。

定量评估聚焦“理论折减系数”与“推算误差”:王道欣等^[10]提出公式($L=W_{\text{实际}}/W_{\text{模拟}}$),验证得高差<30 m时 $L \geq 0.76$ (代表性良好),高差>50 m时 $L < 0.70$ (代表性失效),阈值严于规范;李林森等对比单塔与多塔,前者推算误差6.55%,后者降至5.05%且分布均衡;朱金奎等发现单塔全场折减系数22.7%(西部29.5%),双塔降至13.8%(西部15.9%),差值为代表性不足的额外误差,但定量评估主观性大、实施难。

依《风力发电场设计规范》(GB 51096-2015),平坦风电场测风塔选中央,控制半径≤5 km;复杂/丘陵风电场分区域设塔,控制半径≤2 km,且测风塔与机位海拔高差≤50 m。本文以山地风电场控制半径≤2 km、高差≤50 m为选塔标准并实践。

3 实例分析

本文以广西某山地风电场为例,进行代表测风塔的选择分析。该风电场装机容量150 MW,前期经过宏观选址、微观选址、现场踏勘,共选择了24个机位,采用单机容量为6.25 MW、叶轮直径为220 m,轮毂高度为160 m的风机。风电场共设置了22座测风塔,其中机械测风塔8座,激光雷达测风塔14座。机位编号及测风塔编号信息表如表1所示。

表1 机位编号及测风塔编号信息表

机位编号	测风塔编号
T01	JX01
T02	JX02
T03	JX03
T04	JX04
T05	JX05
T06	JX06
T07	JX07
T08	JX08
T09	JG01
T10	JG02
T11	JG03
T12	JG04
T13	JG05
T14	JG06
T15	JG07
T16	JG08
T17	JG09
T18	JG10
T19	JG11
T20	JG12
T21	JG13
T22	JG14
T23	/
T24	/

(注:其中以T开头的点位为机位点,以JX开头的点位为机械塔,以JG开头的点位为激光雷达测风塔。)

从表1中可以看到机位点的分布比较分散,测风塔的分布也比较分散。机位点主要分布在资源条件较好的区域。在进行发电量计算时,如果不能合理地选择代表测风塔,将会使发电量计算不准确。为此,本文首先计算逐个机位点与测风塔的水平距离,水平距离满足2 km的要求后,再计算测风塔与机位点高差。通过计算分析,选择JX02、JX03、JX05、JX07、JX08、JG01、JG03、JG04、JG05、JG06、JG08、JG09、JG14测风塔作为风电场的代表测风塔。该风电场机位总数24个,具有代表性的机位数20个,占比83.3%。该风电场测风塔较多,如果没有正确选择代表测风塔,非

代表测风塔如果引入发电量的计算,有可能成为数据噪点,影响发电量的分析。因此,本文分析同样的机位在使用代表测风塔和使用所有测风塔数据下发电量、等效满负荷小时数、尾流、风速等的计算结果对比,以便得到代表测风塔影响下的一些定性结果(见表2)^[11]。

表2 使用所有测风塔及使用代表测风塔情况下部分要素计算结果

对比要素	单位	使用所有测风塔计算结果	使用代表测风塔计算结果	差值
年上网电量	万kW·h	28 055.030	28 467.320	412.40
年等效满负荷小时数	h	1 870.335	1 897.822	27.50
尾流	%	5.680	5.640	-0.05
测风塔平均风速	m/s	4.310	4.600	0.29
机位点平均风速	m/s	4.940	5.000	0.06

从表2计算结果的深度分析可知,在风电场规划与设计过程中,使用合理选择的代表测风塔,能够对项目关键指标产生积极影响,为项目经济效益与计算精准度的提升提供有力支撑。

在核心的发电量指标上,使用代表测风塔后,风电场的年上网电量实现了412.4万kW·h的增长。这一增长数额并非简单的数字变化,从项目经济效益角度来看,年上网电量的提升直接意味着风电场年度营收的增加,按照当前风电上网电价测算,这部分额外的电量将为项目带来一定的经济收益,进一步缩短项目投资回收期,增强项目的市场竞争力与抗风险能力。

与此同时,等效满负荷小时数随之增加27.5h。等效满负荷小时数作为衡量风电场设备利用效率的关键指标,其提升表明风电场的风机设备能够在更长时间内处于高效运行状态,设备的利用价值得到充分挖掘,有效降低了单位电量的固定成本分摊,提升了整个风电场的运营效率。

在风资源相关指标方面,尾流减少0.05%,这一细微但关键的变化,体现出代表测风塔在风电场流场模拟计算中的精准性优势。尾流效应是影响风电场整体发电效率的重要因素,尾流的减少意味着风机之间的相互干扰得到更好控制,风资源能够更高效地转化为电能,避免了因尾流估算偏差导致的发电量损失。此外,机位点平均风速增加0.06m/s,看似微小的风速提升,结合风功率与风速的三次方关系,实则对风机的发电功率有着不可忽视的正向影响,进一步印证了代表测风塔在风资源数据采集与分析上的可靠性。

综合以上多维度指标的变化可知,在风电场项目前期规划与设计阶段,正确选择代表测风塔至关重要。

它不仅能够让发电量计算结果更贴合实际风资源情况,实现计算结果的优化,还能提升项目整体计算结果的精细度,为项目的投资决策、设备选型、布局规划等提供更为精准的数据支撑,从源头保障风电场项目的经济效益与长期稳定运行。

4 结束语

本文通过分析前人代表测风塔选取方法及影响,得到代表测风塔选取的方法论,通过广西某山地风电场代表测风塔的选择,得到了代表测风塔影响下的定性分析结果,即正确选择代表测风塔至关重要。它不仅能够让发电量计算结果更贴合实际风资源情况,实现计算结果的优化,还能提升项目整体计算结果的精细度,为项目的投资决策、设备选型、布局规划等提供更为精准的数据支撑,从源头保障风电场项目的经济效益与长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 朱金奎,姜婷婷,申新贺.测风塔代表性对复杂地形风电场风能资源评估的影响研究[J].风能,2019(12):64-68.
- [2] 肖娜,杨翠兰,曾寰宇.测风塔代表性对各机位点综合折减的影响[J].科学技术创新,2020(17):41-42.
- [3] 王道欣,蔡创彬,王金鹤.基于发电量的测风塔代表性影响因素定量分析[J].华电技术,2020,42(12):72-77.
- [4] 李林森,罗磊,张明,等.基于相互验证方法的复杂地形条件下测风塔代表性研究[J].太阳能,2025(04):49-59.
- [5] 同[1].
- [6] 同[2].
- [7] 刘志远,沈文婷,李良县,等.一种低风速山地风电场代表测风塔的选取方法[J].可再生能源,2018,36(06):935-941.
- [8] 同[2].
- [9] 同[4].
- [10] 同[3].
- [11] 王守峰,戚振亚,许卫东.风电场代表年订正方法研究[J].绿色科技,2022,24(18):237-240.

交通标志标线施工质量控制与耐久性提升策略

宋秋禾

(宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要 交通标志标线是保障道路交通安全与通行效率的核心设施, 其施工质量与耐久性直接影响道路使用者的行为判断和事故风险。在实际施工过程中, 影响交通标志标线质量的关键因素多且复杂, 施工单位除了要对质量控制要点进行严格把控以外, 还需根据实际施工环境、施工条件、施工要求采取相应的耐久性增强措施, 以健全交通标志表现的全生命周期管理体系, 为提升交通标志标线的长期性能提供实践性的参考经验与范例。

关键词 交通标志标线; 施工质量控制; 耐久性

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.029

0 引言

交通标志标线是保障行车安全、规范交通秩序、提升通行效率的核心基础设施。其施工质量与耐久性不仅直接关系到道路使用者的生命财产安全, 更影响着城市交通管理的精细化水平与公共资源的可持续利用。然而, 交通标志标线的生命周期与行车数量呈高度相关趋势, 很容易出现褪色、剥落、反光失效等问题, 导致驾驶员对标志标线的信息识别困难, 交通事故风险攀升, 因此, 施工单位亟需通过系统性质量控制与耐久性提升策略破解这一难题。基于以往经验显示, 施工单位可通过对交通标志标线的关键施工环节、工艺进行严格把控, 提高其耐久性及环境适应性, 延缓其在极端气候或重载交通作用下的老化速度及反光性能衰减, 满足其长期使用需求, 从而提升其全生命周期。

1 交通标志标线施工质量控制的核心要素

1.1 施工环境控制

施工环境对交通标志标线施工质量控制具有显著影响, 其影响通常涵盖多方面因素, 如温度、湿度、光照、风速、降水、地质条件等, 这些因素虽不一定是常态化的, 但可通过影响材料性能、施工工艺及人员操作, 进而影响交通标志标线的耐久性, 具体情况如下: (1) 温度控制。高温环境可导致材料性能变化, 如涂料加速固化等现象, 亦可使标志板反光膜发生软化、变形。因此面对高温环境时, 施工单位需缩短单次施工长度, 选择环境温度大于 10 ℃的清晨或傍晚, 以减少热膨胀导致的材料变形及标志板安装偏差。低温环境可导致材料脆化、收缩, 因此施工单位在面对低温环境时, 应对涂料进行预热或改用低温型涂料, 标志板安装后增加二次紧固工序, 确保螺栓扭矩稳定; (2) 湿度控

制。当路面含水率超过 5% 时, 标线底涂层与路面间易形成水膜, 可导致粘结强度下降 30% ~ 50%, 从而引发标线剥落现象。因此, 交通标线施工时应选择环境湿度小于 85% 的时段, 或者在施工前用烘干设备降低路面含水率, 金属部件采用镀锌或喷涂防腐涂层处理, 雨天或路面潮湿时禁止施工, 防止标线起泡或剥离^[1]。施工单位还应详细关注天气预报, 确保施工后 2 ~ 6 小时内无降水, 以保证标线有充分的固化时间; (3) 风速控制。强风环境可影响施工精度, 风速大于 5 m/s 时, 标线喷涂易出现涂料飘散, 导致标线边缘不整齐、厚度不均。因此喷涂作业时风速需小于 3 级, 或者搭建防风屏障, 避免涂料飞散或厚度不均; (4) 光照控制。强光照环境可加速某些材料老化, 如紫外线照射可导致标线涂料中的树脂分子链断裂、反光微珠表面氧化、反光膜色褪等问题, 可选用抗紫外线型涂料并于夜间进行施工, 夜间施工需配备充足照明, 确保标线边缘整齐度误差在 5 mm 以内。

1.2 施工材料控制

交通标志标线施工质量的材料控制是确保道路交通安全与耐久性的核心环节。施工单位应优先选择性价比高、原料易得的材料, 且符合环保要求, 具体可如下: (1) 反光材料的质量控制。施工单位应优先选择折射率大于 1.9 的玻璃微珠, 确保逆反射系数满足驾驶员夜间可视性要求。若是施工地处于华南、华东等多雨地区, 所选之玻璃微珠应具备一定的疏水性, 减少水膜覆盖导致的反光衰减; (2) 标线涂料的质量控制。用于标线施工的涂料进场后, 施工单位应对其按批次抽样, 每 50 吨涂料抽检 1 次, 重点检测涂料的性能是否符合设计参数标准。如热熔型涂料的软化点

应在90~110℃之间,流动度应小于35s,水性涂料需添加防冻剂与成膜助剂,适应5℃以下的低温施工环境,等等;(3)标志底板的质量控制。当标志底板采取铝合金底板时,其表面应经氧化处理或涂装,其防腐层厚度应大于2mm,以充分保障其暴露在自然环境下的使用寿命;(4)反光贴膜的质量控制。反光贴膜进场后,施工单位应对每1000m²反光膜抽检1卷,抽检样品需通过耐盐雾、耐紫外线、拉力试验测试,其粘结强度应满足设计要求^[2]。

1.3 施工工艺控制

当前我国在交通标志标线施工工艺、工序方面已实现较高的标准化,但施工单位在实际施工时,仍需注意每个施工环节的精细化控制,并对细节进行动态调整,例如提升反光性能对于夜间及雨天行车安全至关重要,如强化基层处理可显著提升标线的附着力等,确保这些施工工艺能够有效提升标线的施工质量。具体如下:(1)基层处理。施工单位首先对路面上较为明显的裂缝与坑槽进行修补,避免标线开裂或脱落,而后清除路施工面上的可见油污、灰尘、松散颗粒,并采用高压水冲洗、抛丸或喷砂等工艺增强路面与标线的附着力,施工时路面含水率需保持在5%以下;(2)设备调试。在开展施工前对施工设备进行设计参数的校正与检测,重点包括标线机、反光材料撒布机和标志板安装设备等,确保其处于正常工作状态;(3)涂料施工。如采取热熔标线施工法,喷涂前应在基层上一遍专用底油,涂料温度控制在180~220℃以内,均匀喷涂。如采取水性标线施工法,喷涂前应涂刷界面剂,底涂层喷涂完后应保持30~120min的干燥时间,确保其成膜完整性以避免涂层间剥离,未干透前不得进行二次喷涂;(4)反光玻璃微珠嵌入。每次喷涂前均应检查并校准撒布机的撒布量及工作压力,标准撒布量控制在涂料质量的20%~30%,标准工作压力在0.3~0.5MPa左右,确保反光微珠嵌入深度为其直径的1/2~2/3,保证标志标线的反光效率^[3]。

1.4 特殊场景控制

交通标志标线特殊施工场景包括弯道、坡道与隧道等,不同的施工场景对标线及附属设备有着不同的质量要求,性能要求也更高,施工单位应针对这些特殊场景应用专用材料、增设专用设计等措施进行施工控制,以满足不同场景下的安全需求。具体如下:(1)弯道标线。以实际施工为例,通常情况下在山区、沟谷的弯道处应增加10%~20%的标线宽度,并将外侧标线向内偏移5~10cm,以充分提高标线的车辆导向

性,使驾驶员更容易接收路况信息并调整行车速度;(2)坡道标线。当标线于坡道处施工时,应采用振荡标线并设置防滑层,以利于驾驶员加速或减速,同时调整标志板安装高度降低至1.8~2.0m,确保驾驶员平视可见;(3)隧道标线。隧道内进行标线施工时,施工材料应优先选择低烟无卤涂料,施工时应开启通风系统,确保有害气体浓度小于0.5%。在隧道内进行标志板施工时,应采用逆反射系数大于700的IV类反光膜,间距加密至30~50m。同时,施工过程中隧道内的照明显度应大于1501x,在视觉效果上既确保施工安全,又为驾驶员的可视度提供保障。

2 有效提升交通标志标线耐久性的施工技术

2.1 材料改性技术

传统交通标志标线材料易受外部环境变化影响,如紫外线、温度变化、雨水侵蚀等,导致材料老化、褪色、剥落等问题,不仅影响美观,更降低了标线的可视性和反光性能。通过材料改性,可以增强材料的抗老化、抗紫外线、抗腐蚀等性能,从而延长交通标志标线的使用寿命^[4]。通过添加剂可使交通标志标线涂料的物理性质发生一定的改变,结合相应施工工艺可提升施工质量与成品耐久度,具体如下:(1)热熔涂料改性。通过添加增强剂可有效提升涂料抗流挂性与低温韧性,如在以树脂为基体的热熔涂料中添加适量的纳米二氧化硅作为填料,可起到提升热熔涂料硬度与耐磨性的作用,同时加入一定量的氧化聚乙烯蜡,可降低涂膜脆性,适应温度交变环境。实际制备时掺量控制需结合实验室试验,一般为2%~3%填料、1%~2%的蜡质作为添加剂,与树脂基体混合后静置12小时以上,确保纳米颗粒充分浸润,送入工作温度160~180℃设备中熔融、挤出即可;(2)水性涂料改性。通过在交联型树脂添加固化剂可增强流体粘稠度,缩短固化时间,如聚氨酯—丙烯酸酯复合乳液,材料质量比例可设为30%,并添加2%的氮丙啶交联剂,耐候性可提升至1000h以上。施工时加入2%的光稳定剂,以延缓紫外线老化导致的黄变与粉化,施工后24h内即可固化,或于60℃条件下烘烤2h以加速固化。

2.2 优化结构设计

优化标志标线的结构设计可提高其防滑性能,避免其因材料性能而形成较为平滑的表面,提高车胎与标线间的摩擦系数,尤其在雨天或急弯路段减少车辆打滑概率。针对此种现象,施工单位可以通过改变表面形态的方法提高其摩擦力,亦可通过改变边缘形状提高其防滑性能,具体如下:(1)标线断面形状优化

设计。标线形状可根据实际需求进行不同形状的设计,如凸起型、锯齿型等。标线断面形状设计为凸起型时可增强标线的雨天摩擦力,同时通过振动反馈提醒驾驶员^[5]。实际施工时应控制凸起高度3~5 mm、间距50 mm,使用专用凸起标线成型机将热熔涂料压印于粘结层上,保持24 h后完全固化。标线锯齿状边缘可减少车轮碾压导致的边缘剥落,采用激光切割或水刀切割工艺制作锯齿宽度2 mm、深度1 mm的模板,施工时将模板压印于热熔标线涂料表面,形成规则锯齿纹路,保持24 h后完全固化;(2)优化反光层布局。分段式反光膜可降低热胀冷缩应力,防止膜层开裂。施工时将反光膜裁剪为长度0.8~1.0 m的短段,每段之间预留2 mm间隙,使用高弹性胶粘剂分段贴附后立即覆盖防尘膜,按压30 s确保密实。在曲线道路中此法还可结合斜向微珠排列提升侧向可视性,通过静电喷枪调整微珠喷射角度,配合旋转式标线机实现玻璃微珠的倾斜分布,适应较多弯道的多山地区交通行车需求。

2.3 施工工艺创新

施工工艺创新可以简化施工环节,有利于适应不同环境下的施工作业,面对高温、低温、冻融、强紫外线等严重影响施工周期的气候条件时,一些施工工艺上的创新可使施工人员在短时间内快速完成施工,除了规避特殊气候条件、缩短施工工期外,也能一定程度上增加维护和更换效率,从而降低施工成本,大致有如下两种技术手段:(1)采用预成型标线带。工厂预制标线带可直接粘结施工,施工前可对其采用橡胶辊轮滚压,确保无气泡、翘边,通过热熔法将预热标线带背面加热,具体热熔温度需根据环境湿度在180~200 °C之间进行动态调整,同时对路面贴附区域进行基层处理并加热,将预制标线带热熔焊接使之贴合路面,可使整体施工效率提升50%,耐久性提高30%,适用于交叉口、收费站等高频磨损区域;(2)激光刻划技术。针对表层不稳固、粉尘较多的混凝土路面可利用高精度激光设备在路面刻划标线槽,首先喷涂金属粉末增强刻槽对比度,刻划深度0.5~1.0 mm,刻槽后再填充反光涂料,可应用高压无气喷涂机填充双组分环氧涂料,厚度控制在1.5~2.0 mm,喷涂后用刮板整平以增强其与基层的附着力,施工后4小时内禁止雨水冲刷,此法也可用于旧标线的修复作业^[6]。

2.4 后期维护策略

交通标志标线在道路交通的正常运行过程中面临着高磨损风险,随着时间的推移难免会出现各种问题,因此频繁进行维护和更换也是后期维护的日常工作之

一,因此更为便捷的修复技术(通常为1 h内)不仅能够降低维护成本,也可减少对道路交通的影响,提高标志标线的经济效益,主要应急处理技术包括:(1)快速修复技术。对于局部破损的交通标线,可采用冷喷涂修复工艺喷涂快干型丙烯酸涂料,喷涂厚度在1.0~1.5 mm之间,在修复时应首先清除破损区域的松散涂料,然后可分两次交叉施工。底层喷涂后静待10 min时间喷涂表层,可在10 min内完成修复,减少交通中断时间;(2)反光膜局部更换。当标志杆反光膜脱落时,可在脱落区域用热风枪对破损膜周边进行加热,加热温度控制在120~150 °C之间,待周边完全损坏后缓慢沿边缘揭除,揭除后对金属基层进行清洁,选择与损坏膜同一批次出场的备用膜进行裁剪,使用专用压敏胶粘剂重新贴附,滚压密实后覆盖保护膜24 h可达设计强度。

3 结束语

交通标志标线作为道路交通管理的“视觉中枢”,其施工质量与耐久性直接关系到道路使用者的生命安全、交通运行效率以及基础设施的投资效益。通过长期的交通标志标线工程实践总结,提升施工质量控制与耐久性需根据相应的施工条件,除了严格执行国标施工流程以外,还应有针对性地选择材料改性技术,以克服施工环境复杂性、材料性能局限性及工艺标准化不足等制约性因素的影响,可控制标志标线的安全隐患风险,显著延长标志标线使用寿命,降低全生命周期成本。当前我国交通标志标线施工的新材料与新技术有所突破,未来仍期待行业技术的发展能够为我国交通基础设施高质量发展贡献新的力量。

参考文献:

- [1] 路懿.交通工程标志标线的施工技术分析[J].运输经理世界,2025(17):133-135.
- [2] 陆斐.公路交安设施标志、标线、护栏施工建设[J].汽车画刊,2024(11):68-70.
- [3] 司鑫.公路网交通标志标线施工技术[J].大众标准化,2023(24):60-62.
- [4] 衣艳荣.道路交通标志标线质量要求和检测方法[J].运输经理世界,2023(12):144-146.
- [5] 庄子翌.高速公路标志标线设计探析[J].时代汽车,2022(09):186-188.
- [6] 交通运输部公路科学研究院道路交通安全研究中心.公路交通标志标线的守正创新[J].中国公路,2022(07):45-47.

电力工程施工现场安全风险识别与管控措施研究

张又伟

(江苏天九机电安装集团有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要 电力工程作为我国能源体系的核心组成部分, 其施工过程受多重不确定性因素影响, 尤其是极端天气等不良环境条件, 可能导致施工进度滞后或作业中断。本文聚焦电力工程施工现场操作层面, 剖析现存问题并提出针对性解决方案。为确保工程人员安全并保障项目质量与进度, 需系统性开展风险识别工作, 强化施工组织与风险预控措施。通过现场勘查与技术评估精准定位危险源, 并构建动态化、精细化的安全管理防控体系。

关键词 电力工程; 施工现场; 安全风险识别; 分级分类管理制度; 安全技术交底

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.030

0 引言

随着电网建设规模不断扩大, 电力建设工程逐渐增多, 施工现场环境愈发错综复杂, 存在大量的高空作业、带电操作及使用大型机械设备等危险因素, 安全等级要求高, 一旦出现失误极易造成恶性事故。近年来, 由于电力建设工程现场施工环境复杂程度和技术难度不断上升, 在实际过程中会遇到难以控制的因素而导致安全事故的发生。传统管理方式在新场景下存在局限性, 无法全面覆盖现场各类隐患, 需要针对施工现场实际存在的问题, 提出更加精准的管控措施。针对施工一线的实际情况, 对现场风险进行识别、评估, 并提出有效的风险控制措施, 保障施工工作顺利开展。

1 电力工程施工现场安全风险识别

1.1 现场巡视排查

电力工程施工现场环境比较复杂多变, 现场巡视排查是安全风险辨识的重要部分。巡视要实现全覆盖, 现场所有涉及的作业区域都要展开巡视检查, 包括临时用电设施、高空作业平台、起重机械作业范围、基坑开挖区以及材料堆放场地。巡视人员要具有丰富的现场工作经验, 了解各类设备、施工工艺, 能及时、准确地发现安全风险。巡视内容包含: 安全防护装置, 如安全网、防护栏杆、漏电保护器等是否正常工作, 施工机具是否存在老化、损坏、违规等问题; 作业人员个人防护用品佩戴是否规范, 是否有违章操作的情况; 夜间施工中能否满足照明需要, 标志标牌是否清晰可见。除了以上的重点巡视以外, 还要根据现场作

业的实际情况判断特殊气候条件下能否保障特殊作业施工的安全。在巡视过程中要拍图留证, 按照巡视顺序做好记录, 方便现场施工单位了解具体情况。一旦发现安全隐患, 需要采取必要的管控措施, 并暂停施工, 避免险情发生和扩大。巡视工作要在结合具体工程施工进度的基础上, 定时进行重点部位的变更和巡查提醒工作, 如基础工程需要注意保护好地下管线并保证地基安全。设备安装要注意吊装、高处坠落等安全隐患。高频次全覆盖巡视可以第一时间发现问题, 及时采取措施进行处置。巡视情况需要有书面上报的结果, 要详细准确地报出地点、性质、现象, 并提出初步处置意见, 禁止含糊不清。巡视过程中整理好的各类数据需要定期汇总统计, 从中找出频发的事项以及不足之处, 进而针对性地改进安全管理工作。

1.2 危险源清单核对

危险源清单是电力工程施工安全管理的基础之一, 对危险源清单进行核对是保证危险源识别全面、准确的必要程序, 也是保证危险源分级管理的必要形式。清单通常按照相关行业规范或者参照历史事故案例以及同类工程的经验编制而成, 包括机械伤害、触电、高处坠落、物体打击、坍塌、火灾、爆炸、中毒窒息等多种类型的危险源。在实际的核对过程中应该依据现场的实际布置、设备情况、工艺流程以及现场工作人员的情况, 对现场清单里的危险源条目进行逐条核对, 如施工现场涉及高压设备安装, 清单中是否有感应电伤害、误入带电间隔等项目。如果在有限空间作业, 是否包括了通风不良、积存可燃气体等项目。这

些都应当根据现场的实际情况来进行确定，把所有的危险源所需要的安全防护加以完善，同时避免发生错漏或失效的现象^[1]。另外，如果出现新增或者是变更的施工内容，要及时增加相关危险源内容，并把这些危险源的状态实时动态更新，同时，核对人员需要具备专业水平，能够区分一般的危险源以及重大危险源，避免清单太过冗长而失去重点。最后将核对的结果应用到风险评估以及风险控制计划的制定中，确保能够将已经发现的所有风险纳入危险源清单中去。

1.3 工作任务分解分析

工作任务分解分析是将复杂的电力工程施工内容分解成具体的可操作任务，按照每道工序进行安全风险辨识的方法，从施工组织设计开始，在施工的过程中从宏观角度把整个工程分为土建施工、设备运输、设备安装、调试及试验、验收试运行等阶段，然后再细分到每道工序，如基础开挖、钢筋绑扎、变压器吊装、电缆敷设、高压试验等，并对每一项任务清楚地表达出要干什么，需要什么，由谁来干，何时完成。例如：通过分析发现，电缆沟开挖作业过程中存在潜在危险因素，如地下管线不明、边坡失稳、机械操作空间受限等问题。对于高空设备安装作业过程中存在的人员防坠落、工器具防掉落、脚手架载荷等问题，以及工艺流程上可能带来的间接安全隐患，并通过对直接原因和间接原因的详细分析，找出可能导致发生安全事故的原因所在。该方法有助于发现隐藏在常规作业中的细微风险，避免因任务复杂而忽略关键环节。

1.4 多方协同评审

多方协同评审有助于提高电力工程施工安全风险识别的质量，通过吸纳不同专业背景和管理视角，评判施工方案的风险识别是否全面、准确。各参与评审方根据各自岗位职责和工作经验，对已经识别出的风险点进行复核、补充。例如：施工单位的技术员和安全员负责提出实际操作的风险点，监理单位代表负责指出管理的问题，设计人员提供系统原理和工艺问题，能预见因设计与施工衔接不当引发的风险，设备供应商技术人员提供关于安装与调试中的特殊注意事项，业主方则关注整体项目安全目标与合规要求。评审会讨论的内容一般基于施工方案、危险源清单、应急预案等内容展开，每位与会者发表个人意见，可以有效地克服群体思维带来的不良后果^[2]。重点讨论风险发生可能性以及造成后果的严重性，评估现有控制措施的充分性，提出改进意见。对于有争议或者是高风险项，

可以组织新的评审组进行更深层的剖析。同时，在整个评审过程中需要集思广益，互通有无，以使各个评审方都达成对安全风险的共识，形成完整的评审意见，必须写明责任主体以及整改时限并报入项目管理体系进行跟踪落实。

2 电力工程施工现场安全风险管控措施

2.1 分级分类管理制度

电力工程施工现场的安全风险极其复杂，单一模式难以奏效，在这样的背景下，搭建分级分类管理是提高现场安全管理效率的有效途径。根据风险属性的不同以及影响程度不同把所有存在的隐患进行分门别类、细化分工，并有针对性地开展相应工作的管控措施。大型设备吊装、临近带电体作业、深基坑开挖等高危作业属于最高级管控范畴，需要有专项施工方案审批、全程旁站监督、多级交叉验核。一般性高空作业、临时用电等活动，要有完善的作业许可和巡检记录。对于普通的常规工序，除了落实基本的防护以外，还要强化日常的监督检查以及个人行为规范。分类管理就是按风险归类，如机械类、电气类、环境类、人为因素类等，每类对应一个标准的流程与责任，同时又是由许多具体的操作规程所组成，管理层将每个环节细化分解，利用色彩标记、区域标示、信息公示牌等方式让风险类别及等级清晰明确，施工人员一眼便知属于哪类危险源、面临的危险性有多大。按照分级配置人员力量，高风险区应投入更多现场监管人员和技术支持力量，确保关键点万无一失。按照动态更新的原则，根据现场施工进展情况及时调整现场的风险级别，与现场工况的变化保持一致，避免出现僵化式管理而陷入固化的状态，同时也是将以上分级结果通过层层下达到各级管理人员，形成自上而下的管控链条与自下而上的反馈网络。明确各级责任主体的管理权限和响应标准，实行风险控制管理的精准化、系统化。制度的落实离不开完善的考核、追责机制，确保各项措施不流于形式。

2.2 安全技术交底强化机制

安全技术交底是连接管理决策和现场执行的重要环节，影响着作业人员的风险认知和防控水平。传统的交底针对性较差，不能完全满足复杂的施工作业要求，加强交底就要达到深入、全面、互动的效果，实现信息真传、实传、能干，交底不能仅停留在一般性的通用条款上，还要将具体工作任务，结合具体作业

现场,以具体的人员特点,把各步操作过程中的危险、正确的操作方式、应急措施、个人防护等内容进行明确。采用图文并茂、视频演示、实物模拟等方式增加形象性,便于文化程度不同的人员接收和了解,交底变成问答的形式或者情景模拟的形式,检测是否真正听懂记住了,是否能做。交底要落实到岗位,由具备相应资质的技术负责人或者班组长来进行,由相应的监理人员来监督程序是否合规^[3]。交底是通过电子化的方式留存,交底表里面有影像留名和签字,实现全程追溯。高危作业要分多次交底、分阶段交底,作业前再次确定作业人员的状态、环境的状态。交底之后有一个观察期,管理人员跟踪作业初期执行情况,及时纠错,充分考虑时效性和连贯性问题,杜绝“一次交底管全程”的错误。

2.3 智能监测预警系统的应用

随着现代信息技术的发展,给电力工程施工现场安全管控提供了许多新方法,如智能监测预警系统代替人工巡查的传统被动式管理。系统采用多种传感器、数据采集装置对重点部位、工序进行实时全天候无死角监控,在高空作业区安设智能安全带状态监测装置,实时监测人员佩戴情况和受力状态,一旦发生坠落将及时触发警报^[4]。起重机安装力矩限制器、倾角传感器、视频监控等,对超载、倾翻等危险情况进行自动判断,并做出停止运行的强制要求。有限空间工作区布置气体检测仪,持续监测氧含量、可燃气体、有毒有害气体浓度,并将数据实时上传到监控中心。临时用电系统增加智能电表和漏电监测模块,对电流异常、线路过热等问题提前进行预警。塔吊、施工电梯等大件设备的运行参数,借助物联网汇集到一个平台上进行集中监控,当设备发生故障或者需做日常维保时便能及时预知,并且提供信息提示。监测数据经无线网络汇集到统一平台上,运用算法识别安全隐患模式,生成预警信息并及时推送相关人员进行处理,还能够查询到当前状况及历史数据,便于事后分析和管控优化,真正做到智能化监测。智能化技术的应用,一方面可以提高安全监测的准确性与实时性,降低人为失误产生的危害;另一方面可通过数据分析形成一种有效的管理工具,助力过程把控及风险防范,使管理从“事后处理”向“事前预防”转变。

2.4 动态应急预案演练制度

电力施工项目现场环境情况错综复杂,突发状况存在较强的突发性、不可预见性,固定的预案很难满

足现实情况的变化需求,需要建立动态预案的演练模式,进而保证项目能够在突发情况下及时作出快速反应,以及合理解决相关的突发事件。不断强化项目组内的联合作战能力。预案编制阶段即考虑各种可能的情况,如设备故障、自然灾害、人员受伤、发生火灾等,在预案中确定组织结构、工作责任、联络方式及抢险准备、交通疏散等工作。除了事先编好的方案形式对预备演习进行规范外,还可以按照无预警、突击式实战演练,模拟真实事故场景,检验应急响应的时效性与协调性^[5]。针对不同的时期更新演练科目,如土建时期的挖掘基坑事故发生时的处理,安装时期电器打火引发火灾时,触电和高处坠落等事故处理。针对基础、主体工程的不同时期可以开展阶段性的演习,并不断加入更加逼真的压力测试,如故意设障导致通信瘫痪或人为原因导致资源暂时缺乏等。将每次总结落实到书面记录上,建立闭环的演练记录文档,并以此作为连续改进的基础。加强全体成员的学习力度,涵盖一线工人、管理人员及后勤人员,确保应急体系覆盖所有岗位。

3 结束语

随着电力需求的持续增长,电力工程施工企业呈现迅猛发展态势。然而,鉴于电气工程施工的特殊性,在推进施工进度的过程中,安全风险问题不容忽视。为确保电力工程顺利实施并提升施工现场安全管理水平,需直面各类安全风险,提出切实可行的解决方案,从而保障电气工程项目安全质量达标。未来,随着新技术在安全管理领域的不断融入,安全管理将愈发智能化、精细化。

参考文献:

- [1] 胡永恒,丁永进.配电网电力工程施工安全管理措施研究[J].工程技术研究,2024,09(15):147-149.
- [2] 王泽裕,丁玉贤,李俏俏,等.工程管理在电力工程施工管理中的运用分析[J].现代盐化工,2024,51(03):113-114,120.
- [3] 黄宜勤.电力建设工程施工现场安全管控模式研究[J].小水电,2024(03):44-47.
- [4] 李乐蒙.电力基建现场违章识别系统设计与实现[D].济南:山东大学,2023.
- [5] 张艳青.配电网电力工程施工安全管理措施研究[J].中国高新科技,2024(10):120-121,124.

电气系统与装饰设计协同在展厅项目中的应用研究

关洪爱

(银勋建筑设计工程(上海)有限公司, 上海 201103)

摘要 在当代展厅设计领域, 电气系统与装饰设计的协同配合具有不可替代的重要意义, 特别是在增强沉浸式感受与视觉呈现效果方面表现突出。借助 BIM 技术(如 Revit 软件)及智能控制系统等先进设计工具与技术手段, 实现电气系统与装饰设计的深度融合, 不仅能确保展厅各项功能高效落地, 还可进一步提升空间的美学内涵, 通过精准的照明规划、电气配电系统的优化调整以及智能化的环境管控措施, 展厅能够在保障安全性与稳定性的前提下, 为使用者提供更为舒适且具个性化的体验感受。这种协同设计模式有效提升了展览空间的整体品质, 为行业在设计、施工及运营各环节的创新发展提供了有力推动。

关键词 电气系统; 装饰设计; 协同工作; 沉浸式体验; 智能控制

中图分类号: TU242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.031

0 引言

当代展厅设计的核心不仅在于打造展示空间, 更在于构建品牌与观众之间的互动纽带。随着数字化与智能化技术的快速进步, 电气系统与装饰设计的协同应用成为提升展厅整体效果的核心要素。将电气设计与装饰元素进行有机整合, 既能实现空间功能的优化升级, 又能营造出具有沉浸式特点的视觉与体验氛围、科学的照明方案、智能控制系统以及经过优化的配电设计, 帮助展厅在美学表现与实用功能之间达成理想平衡。这种创新性的协同设计模式, 为展厅赋予了前所未有的表达能力与吸引力, 为设计领域的持续发展注入了新的动力。

1 展厅设计中电气系统与装饰设计协同工作的重要性

1.1 展厅设计发展与需求

随着科技的持续进步, 展示技术在展厅设计中的作用愈发显著, 互动展示与数字化技术的融入尤为关键。传统展览空间设计已难以满足现代观众对沉浸式体验的追求。虚拟现实(VR)、增强现实(AR)及全息影像等数字化技术的应用, 为展厅打造了丰富的互动场景, 让参观者从被动的观看者转变为主动的参与者、要达成这一目标, 展厅设计需依靠精准的电气系统为这些先进技术的稳定运转提供支撑。展览中的互动设备、数字显示屏以及多媒体展示载体, 均需稳定的电力供给与高效的配电系统, 方可确保展览内容顺利呈现。

在用户需求逐渐多元化的背景下, 展厅设计更加强调个性化、场景化构建与体验感提升, 设计重心从单纯的产品展示转向打造富有吸引力的品牌体验空间, 这就要求电气系统与装饰设计开展紧密协同, 以满足不同展示主题与活动场景的需求。数字化展示技术的运用对电气系统提出了更高标准, 特别是在照明、音响与温控等系统的配合层面, 既要保障设备高效运行, 又需思考如何借助设计方法增强展厅的互动性与观赏性, 确保空间使用的舒适性与安全性。

1.2 电气系统与装饰设计的功能性与美学需求

电气系统与装饰设计的融合, 可有效提升展厅的美学呈现效果与功能满足度。照明系统作为展厅设计的重要组成部分, 对空间氛围营造与展示效果呈现具有直接影响, 不同展示区域需结合展品特性与展示主题, 选择适配的光源类型、色温和亮度参数, 以实现最优展示效果。例如: 产品展示区通过重点照明突出产品细节特征, 互动体验区则以柔和照明营造舒适的参与氛围。这类照明设计不仅要注重照明效果的精准度, 还需与展厅整体装饰风格保持协调, 避免照明设备与空间风格产生冲突, 进而提升整体空间的美学体验感。

在电气系统设计过程中, 装饰设计对电气管线与设备安装提出了隐蔽性要求, 以避免影响空间视觉效果。传统电气布线常需穿越装饰面层, 容易出现管线外露或设计美观度不足的问题, 而现代电气系统设计采用了更多隐藏式管线布局与智能化管理系统, 使电气设施能够与装饰风格实现无缝融合, 例如: 吊顶区域的

光源隐藏设计，既解决了电气管线暴露的问题，又增强了空间的整洁感与现代气息。此外，智能化控制系统的应用，使照明、温控等系统可根据实际需求自动调节，在提升展厅功能性的同时，与装饰设计形成协调统一，营造出更具和谐感与科技感的空间环境^[1]。

2 展厅项目中的技术难点与解决策略

2.1 照明效果配备的技术难点与解决办法

在禾赛科技数字交互展厅的设计工作中，照明效果的落地至关重要，其直接关系到展览沉浸式体验的呈现质量。该展厅包含多个功能各异的展示区域，各区域的展示内容与氛围诉求存在差异，这就要求照明系统必须依据功能分区，精准匹配对应的亮度与色温参数。传统照明设计方案往往难以灵活适配展览内容的多样性与互动属性，无法满足动态展示需求。为突破这一局限，设计团队选用了高效能且具备调节功能的智能灯具，这类灯具可根据展览内容的变动实时调整亮度与色温，从而保障不同场景下均能呈现出最优的视觉效果。

照明设备的选型与布局优化同样是设计过程中的技术难题。在具体设计阶段，团队引入专业照明模拟软件开展灯光效果预演工作，通过反复调整灯具的安装位置、投射角度及亮度参数，实现对光源分布的精准控制，有效规避了眩光与阴影问题的出现。以产品展示区为例，需借助重点照明突出展品细节特征；而在互动体验区，则需采用柔和且富有变化的照明方式，配合参观者的互动操作流程，营造适配的参与氛围。

2.2 电气设计与装饰设计的空间协调难点

禾赛科技数字交互展厅设计中，电气设计与装饰设计的空间协调工作是一项复杂的技术挑战。由于该展厅对视觉呈现效果要求极高，电气设备与管线的布置必须与装饰造型实现高度融合，传统电气设计常忽视装饰效果的适配性，易导致管线外露或布局不合理的问题，进而破坏空间整体美感。为解决这一问题，项目团队引入Revit等BIM技术，构建了展厅的三维立体模型，使电气系统与装饰设计得以在同一平台上完成整合与优化。在设计初期阶段，利用Revit软件开展碰撞检查工作，提前排查并解决电气管线与装饰造型之间的冲突问题，确保设计方案兼具可行性与美观性^[2]。

在空间布局规划层面，电气管线与设备的安装位置经过精确测算，尽可能隐藏于吊顶、墙体或地面内部。对于需重点呈现的部件，如照明设备与展示屏幕，设计团队将其巧妙嵌入装饰设计体系中，使其成为空间整体形态的一部分，既满足了功能使用需求，又进一步强化了空间的美学表现。这种协同设计思路，不

仅提升了展厅的整体视觉质感，还保障了电气系统在不干扰装饰效果的前提下，实现高效、安全的运行。

2.3 智能化控制系统的集成应用

伴随科技的不断发展，智能化控制系统在展厅设计领域的作用愈发突出，尤其在提升能源利用效率与优化用户体验方面成效显著。在禾赛科技数字交互展厅中，智能化控制系统被广泛应用于照明、空调及其他机电设备的管理工作，旨在实现展厅舒适度与节能目标的平衡。通过引入该智能控制系统，展厅照明系统可依据不同的展览内容、现场人员数量以及外部环境的变化，自动调节光源的亮度与色温参数；空调系统则能根据实时监测的温度与湿度数据进行自主调节，确保参观者在不同区域均能获得舒适的体验。

除此之外，智能化控制系统还具备远程监控与故障预警功能。系统通过实时追踪展厅内各设备的运行状态，可快速识别潜在问题并启动处理流程，有效提升了展厅的运营效率，同时延长了设备的使用寿命。该系统能够根据展厅的不同使用需求，自动调整各类设备的工作模式，进而降低能源消耗，保障设备始终处于高效运行状态。

3 电气系统与装饰设计协同的创新实践

3.1 Revit技术的应用与协同设计

在禾赛科技数字交互展厅的设计流程中，BIM技术的应用，特别是Revit软件的深度运用，显著提升了电气系统与装饰设计的协同效率。Revit作为集成建筑信息模型（BIM）功能的专业设计软件，可在三维环境下实现电气、暖通、消防等多系统的协同作业。项目启动初期，设计团队借助Revit构建了展厅的精细化三维模型，确保各系统设计与装饰效果形成紧密衔接。依托该模型，电气系统设计师能够与装饰设计师、结构工程师及其他相关专业人员在同一工作平台上开展实时沟通与方案修改，有效保障了设计方案的协调性与可执行性。

通过Revit开展碰撞检查，是解决电气系统与装饰设计之间冲突的核心手段。借助三维建模技术，设计团队可清晰呈现管线、设备与装饰元素的空间位置关系，规避了传统设计中常见的管线与装饰造型冲突问题。以吊顶设计为例，电气管线的科学布局既满足了设备功能需求，又未对装饰效果产生干扰。此外，Revit模型还为施工团队提供了详尽的安装指导依据，减少了现场施工中的误差与返工情况，进一步提升了施工效率与精度^[3]。

3.2 电气与装饰设计的跨学科协作

电气系统与装饰设计的跨学科协作，是禾赛科技数字交互展厅项目达成预期目标的核心要素之一。在设

计阶段，机电设计团队与装饰设计团队保持深度合作，共同研讨并优化设计方案，确保每一项电气设计内容都能无缝融入装饰方案。以照明设计为例，机电团队与装饰团队针对各展示区域的灯具布置方式、光源类型选择及照明显亮度参数进行反复推敲，既保障了照明效果满足展示需求，又避免对整体装饰风格造成干扰。

进入施工阶段后，跨学科协作的重要性同样凸显。机电设计团队与装饰施工团队保持密切沟通，定期组织协调会议，确保各阶段施工计划与进度要求保持一致。借助 Revit 模型，双方可提前识别潜在的施工问题，并及时开展方案调整，如电气管线的布置需与吊顶、墙面等装饰元素保持兼容，避免对已完工的装饰部分造成损坏。在此过程中，电气团队与装饰团队的高效配合，确保了施工工作顺利推进，最终使展厅既具备完备的功能，又呈现出统一协调的视觉效果^[4]。

4 电气系统与装饰设计协同展厅项目中实际应用的成果与反思

4.1 成功案例分析

禾赛科技数字交互展厅与 JEEP 探享中心，是电气系统与装饰设计协同工作的典型成功案例。在禾赛科技展厅项目中，电气系统与装饰设计的深度融合，顺利实现了高效的数字互动展示效果与沉浸式体验营造。照明系统通过对亮度与色温的精准调控，强化了各展示区域的视觉呈现效果；智能控制系统则在保障展厅节能目标的同时，维持了空间使用的舒适度。

JEEP 探享中心则在空间设计层面，充分展现了电气系统与装饰设计的创新协作成果。该展厅通过智能化控制技术与数字显示系统的整合应用，在视觉呈现与功能实现上均体现出高度的互动属性，尤其在大型显示屏的配电设计环节，电气系统为巨型显示屏的稳定运行提供了可靠保障，且与展厅整体装饰风格保持协调统一，充分彰显了品牌的核心精神与技术实力。这些案例不仅验证了电气系统与装饰设计协同工作的实践可行性，更证明了这种协同模式对提升展厅整体效果的深远影响。

4.2 问题与挑战

在展厅设计与施工的实施过程中，电气负荷计算与空调系统设计是两大核心挑战。以禾赛科技展厅为例，由于展品种类繁多且各展区功能差异较大，电气负荷计算工作需精准分析每一项设备的功率需求及运行时长，以此保障电力供应的稳定性与安全性。

空调系统设计则面临着展厅区域温度精准控制的严格要求。受展厅内部空间高度、玻璃幕墙结构等因素影响。空间内热负荷分布不均，易导致温度出现较

大波动。为解决这一问题，设计团队采用分层空调系统，并依据不同区域的功能需求设定差异化的送风模式，最终实现了理想的温控效果。此外，通过引入智能化控制系统，实现了空调设备的自动调节功能，在提升系统能效的同时，减少了能源消耗^[5]。

4.3 未来发展趋势

随着智能化技术与数字化展示手段的持续发展，电气系统与装饰设计的协同工作模式，将在未来展厅设计中呈现更多创新应用形式。例如：智能传感器、物联网（IoT）技术的融入，将使展厅具备更精细化的环境控制能力，可根据展览内容变化与观众行为特征，自动调节照明、空调及音响系统，为参观者提供个性化体验服务。

伴随技术的不断进步，电气系统与装饰设计的协同工作也将面临新的挑战。一方面，随着数字化设备与智能控制系统数量的增加，系统集成的复杂程度将大幅提升，如何确保各系统之间的无缝连接与稳定运行，将成为亟待解决的重要问题；另一方面，未来社会对节能、环保的要求将更为严格，如何在保证展厅高效运行的同时，满足可持续设计需求，将是电气设计与装饰设计团队需要长期探索的核心课题。

5 结语

在现代展厅设计领域，电气系统与装饰设计的协同工作发挥着日益重要的作用，推动着空间功能性与美学效果的有机融合。借助 BIM 技术与智能控制系统的创新应用，展厅不仅实现了运营管理效率的提升，更成功打造了沉浸式的参观体验。尽管在实施过程中，其面临着电气负荷计算、空调系统设计等方面的挑战，但设计团队通过制定精准的技术方案与开展高效的团队协作，成功攻克了这些难题。未来，随着智能化技术与数字技术的持续发展，电气系统与装饰设计的协同工作模式必将迎来更为广阔的发展前景与更多实践机遇。

参考文献：

- [1] 李慧,徐建兵,敖发兴.顺势而为:三星堆博物馆新馆电气设计[J].建筑电气,2024,43(08):3-10.
- [2] 李飞.某大型博物馆电气设计方案研究[J].机电信息,2024(14):16-19,25.
- [3] 戴玉,常立强.某大型会展建筑电气设计探析[J].智能建筑电气技术,2023,17(03):100-102.
- [4] 熊雪妃.电力符号元素在展厅设计的应用研究[D].南昌:南昌大学,2021.
- [5] 杨俊杰.国际品牌酒店深化设计电气审核及配合要点[J].现代建筑电气,2021,12(06):14-18.

蛮陂头水库防渗安全隐患分析及除险管控加固对策研究

邓沃泉

(台山市塘田水库管理所, 广东 台山 529200)

摘要 水库病险问题特别是渗漏安全问题是水库长期安全稳定运行的关键。本文以蛮陂头水库为研究对象, 针对存在坝体填筑土透水、大坝与左坝肩接触带存在渗漏通道、输水管涵老化的问题, 对水库坝顶缝内填聚乙烯闭孔泡沫板, 护坡后采用黏性土进行培厚防渗, 坝体进行充填灌浆、左坝肩原山体帷幕灌浆, 对输水管涵进行重建, 对水库防汛设施进行补充整改。经过加固后, 解除了水库存在的严重安全隐患, 保证了库区及下游灌区人民的生命财产安全。本文的研究结果旨在为类似项目提供可参考的经验。

关键词 水库安全; 渗漏; 除险加固; 大坝防渗

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.032

0 引言

水库作为防洪、供水、生态调节的核心水利设施, 存在一定的安全运行风险^[1]。病险水库存在渗漏、坝体失稳、溢洪道功能失常等隐患, 民众的生命财产和地域经济环境受到威胁^[2]。然而, 传统技术以物理工程措施为主, 包括防渗墙施工、帷幕灌浆、溢洪道改建等, 但在极端洪水下的稳定性仍需验证, 且复杂地质条件下的长效稳定性缺乏保障, 亟需通过精准识别—智能决策—高效实施的治理模式转型^[3]。

1 工程概况

蛮陂头水库坝址距四九圩镇约12 km, 水库所在的河流为五十水, 水库坝址以上控制集雨面积为19.86 km², 总库容330万m³, 为小(1)型水库, 其功能包括发电、灌溉、防洪等, 正常蓄水位160.47 m, 设计洪水位163.86 m (p=3.33%), 校核洪水位165.33 m (p=0.2%)。大坝为均质土坝, 最大坝高41.64 m, 坝顶长150 m, 坝顶宽5 m。现状坝顶高程为166.49~166.85 m, 现状防浪墙顶高程为167.30~167.40 m。

溢洪道位于主坝左侧山坳处, 距离左坝肩约250 m, 为单孔无闸门控制的开敞式实用堰, 泄洪为自由出流, 库水位高于160.47 m时开始泄洪。溢洪道主要由进水段、控制段、水平过渡段、泄槽段组成。现状输水涵管位于坝体右侧, 为钢管圆涵, 进口高程为139.47 m, 直径为1.2 m, 管长200 m, 闸门型式为转动门盖, 最大放水流量为9.85 m³/s。水库大坝经安全评定水库大坝安全类别为三类坝, 建议采取措施消除险情隐患。

2 水库病险分析

上游护坡冲刷破损严重。大坝渗流计算存在高逸出现象, 该坝体透水性为中等渗透系数, 难以符合目前的规范标准。现状溢洪道质量较好, 虽然边墙衬砌高度不够, 两岸高边坡较陡, 但局部已出露岩体, 抗冲性能较好。下游微风化花岗岩基岩出露, 无冲深等问题。库区淤积严重, 淤积物已覆盖转动门盖。进水口砼结构老化, 转动门盖漏水, 没有启闭房, 启闭设备锈蚀严重, 操作运行不便。钢涵管锈蚀严重。

3 水库除险加固措施

3.1 大坝加固

坝顶面高程取166.53 m。坝顶总宽度5.5 m, 净宽5.0 m, 上游侧防浪墙维持现状, 下游侧设坝顶路缘石, 路缘石采用现浇C20砼, 尺寸150×400 mm(宽×深), 坝顶沥青砼路面, 向下游方向做成2%的斜坡, 以排除坝顶雨水^[4]。坝顶路缘石每10 m分缝一道, 缝宽20 mm, 缝内填聚乙烯闭孔泡沫板(PE板)。拆除上游六角块、干砌石护坡后采用黏性土进行培厚防渗, 填筑土料要求有良好的级配、渗透系数 $k \leq 1 \times 10^{-4}$ cm/s, 填筑压实度不小于0.96。上游坝坡坡度1:2.75, 现浇C20砼护坡厚120 mm, 护坡高程范围从坝脚142.10 m至坝顶166.53 m, 砼护坡下设砂石混合料厚100 mm。砼护坡选用4×4 m大小的板块, 并采用错缝布置, 各板块之间均铺设了宽度为1.0 m的反渗透土工布, 与此同时, 在每个板块的中心位置, 特意设置了直径为Φ75的排水孔, 且在排水孔的底部铺设了土工布。上游坝坡高程156.70 m处设C20砼抗滑齿墙, 宽×高=0.5×1.0 m;

坡脚设 C20 砼护脚, 宽 \times 高 = 0.5×1.0 m。坝后坡较好, 保留现状^[5]。坝体填筑土主要由花岗岩残积的砾石粘性土夹含风化碎砾土填筑而成, 富含粗砾砂粒, 成份不均, 呈黄褐色、黄色, 大多数为硬塑~坚硬状态, 稍湿。填筑土渗透系数 $k = 3.3 \times 10^{-4}$ cm/s, 大于规范要求的 1×10^{-4} cm/s, 即渗透系数偏大。经过现场检查, 大坝与左坝肩接触带存在渗漏通道。针对以上情况, 本次设计拟对坝体进行充填灌浆、左坝肩原山体帷幕灌浆以提高坝体防渗性能。具体设计如下。

3.1.1 充填灌浆

在坝体的灌浆作业中, 所采用的灌浆材料为水泥粘土浆。其中, 水泥选用的是强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 且水泥的用量设定为干料总质量的 10%。灌浆材料性能指标应满足表 1 的要求, 浆液物理力学性能指标应满足表 2 的要求; 灌浆深度伸入坝基强风化二长花岗岩 2.0 m。充填灌浆造孔分 2 序进行, 比起初始的设计位置, 现状的灌浆孔位置要小于其孔深的 2%, 并用干法造孔, 钻孔完成后, 要求下套管保护。在灌浆工序中, 要先轮灌第一序孔, 一次灌注至设计要求。完成首序孔的灌浆后, 接着执行二序孔的灌浆任务。在充填灌浆作业过程中, 对于每米孔深而言, 每次灌浆时其灌浆量一般会被控制在 0.3 m³ 到 0.5 m³ 这个区间内。此外, 充填灌浆所运用的灌浆压力必须低于 50 kPa, 但具体应采用多大的灌浆压力数值, 需要根据现场灌浆试验所得到的结果来进行最终确定。一旦浆体到达孔口位置, 并经过三次持续补充而无继续吸浆的情况出现, 那么就可以停止灌浆了。每个孔位的灌浆工作完毕之后, 需要对该孔位实施灌浆封闭措施。此时应该移除注浆管, 然后往孔中输入比 1.5 g/cm³ 更浓密的浆料, 重复此过程数次直到浆体上升到孔口不再下落为止。

表 1 灌浆土料性能指标

项目	指标
塑性指数 (%)	10 ~ 25
粘粒含量 (%)	20 ~ 45
粉粒含量 (%)	30 ~ 70
砂粒含量 (%)	0 ~ 30
有机质含量 (%)	≤ 2
可溶盐含量 (%)	≤ 3

表 2 灌浆浆液物理力学性能指标

项目	指标
密度 (g/cm ³)	1.3 ~ 1.6
黏度 (s)	20 ~ 100
稳定性 (g/cm ³)	0 ~ 0.15
胶体率 (%)	≥ 70
失水量 (cm ³ /30min)	10 ~ 30

3.1.2 帷幕灌浆

帷幕深度伸入坝基强风化二长花岗岩不少于 3.0 m。暂时设定的灌浆压力在 0.5 ~ 0.8 MPa 之间, 具体数值需要通过现场灌浆试验来确认。灌浆分三序施工, 各孔施工工序按钻孔、冲洗、压水试验、灌浆、封孔等工序执行。灌浆段长依据钻孔深度和基岩透水性来分, 一般 $\omega > 0.1$ L/min.m 时, 段长不宜超过 3.0 m, $0.03 \text{ L/min.m} < \omega < 0.1 \text{ L/min.m}$ 时, 段长控制在 5 m 左右, $\omega < 0.03 \text{ L/min.m}$ 时, 灌浆段长可控制在 10 m 左右。

对于深度不超过 6 m 的灌浆孔, 采用一次性全孔灌浆技术; 而对于超过 6 m 深的孔, 则采取从底部向顶部逐步推进的方式进行灌浆。在执行过程中, 选择孔内循环法作为灌浆手段。灌浆材料选用了标准不低于 42.5# 的普通硅酸盐水泥, 并且该水泥通过 80 微米方孔筛后的残留比例不得超过 5%。灌浆液的稠度需遵循由稀渐浓的原则逐级调整。在规定压力条件下, 如果注入速度低于或等于每分钟 0.4 L 时, 应持续注浆半小时; 若流速不高于每分钟 1 L, 则需连续作业一小时, 以此完成整个灌浆过程。每个孔位完成灌浆后, 必须立即提交给监理人员进行检验, 只有经过确认符合要求的孔才能进入封闭阶段。封闭操作应当依照《水工建筑物水泥注浆施工技术规范》(SL 62-94) 中规定的“置换和压力灌浆封孔法”或“压力灌浆封孔法”来实施。

在充填灌浆作业中, 质量检查体系包含两个关键环节, 即灌浆过程监控与灌浆成效评估。先看灌浆过程监控, 其核心要点涉及多个工序执行情况, 包括布孔布局是否合理、钻孔作业是否精准、制浆流程是否规范以及灌浆操作是否稳定等。同时, 要严格把控工艺参数设定和技术实施的综合控制效果, 保证每个灌浆孔位都能达到既定的结束标准。除此之外, 还要全面审查灌浆监测数据的可靠性, 以及针对突发状况所采取应对措施的有效性。再谈灌浆成效评估, 重点聚焦泥墙的物理特性, 涵盖其厚度、密度、连续性和均匀性等方面, 同时评估泥墙对原有隐患区域的充填密实程度。此外, 还需密切留意坝体变形情况、坝顶裂缝发展状况、浸润线出逸点位置以及坝后渗流量的动态变化。在具体操作方面, 要沿着纵断面精心设置 3 个检查孔, 开展分段注水试验, 以此精确测定渗透系数, 确保该系数严格控制在 $k < 1 \times 10^{-4}$ cm/s 的范围内。一旦发现渗漏现象严重的区域, 必须马上采取补灌措施进行加固。对于帷幕灌浆作业, 有着更为严格的标准, 要求防渗帷幕的透水率必须控制在 5 Lu 以内。在灌浆作业顺利完成并经过 14 天的稳固期后, 需按照灌浆孔总数的 10% 的比例钻设检查孔。特别要注意的是, 对于检查孔中坝体与基岩接触段及其紧邻下一段的检测, 合格率必须达到 100% 的完美水平。

3.2 输水涵管加固

重建输水涵管进水口放水塔包括进水渠段、进水口段、闸室段，总长度35.2 m。进水渠段长19.2 m，渠底高程由141.87 m渐变至139.47 m，渠底宽3.0 m，左岸为梯形土坡，边坡1:1，右岸为C20砼衡重式挡墙，墙顶宽0.5 m，上墙高1.5 m，背坡的各项指标包括：下墙高2.0 m，倾斜坡度为1:0.45，背坡倾斜坡度为1:-0.4，台宽0.7 m，墙顶高程142.47 m，墙高3.5 m。

进水口段长度为4 m，应用混凝土等级为C25级，结构为U型，前端渠宽为3.0 m，后端渠宽为2.0 m，底板和侧墙厚度均为0.5 m，底板下铺等级为C15级，设定为0.1 m混凝土垫层厚度，两侧边墙高度为142.47 m。此部分的闸室长度达到10.5 m，其设计成具有塔式的入水口结构，底部标高设定为139.47 m，而闸墩的高度则定位于142.47 m。闸墩的厚度范围是0.7~1.15 m，底部与顶部的厚度分别设为0.8 m和0.4 m或者0.5 m。闸墩两侧设有单孔空箱，空箱净宽1.65 m，内填粗砂。闸室区被划分为四个阶段：第一阶段包括了拦污栅区域，该区域的长度为1.95 m，通过的水流面积为2 m²，高度达3.5 m，并设置有拦污栅装置。第二阶段则是入口过渡区，长度约为1.7 m，水流量逐渐增大，同时水位也逐步上升，最终形成了一个椭圆曲线的顶部平面。第三阶段包含的是闸门区域，总长度达到了3.85 m，采用的是正方形的出水通道，每边的尺寸都是1.1 m，并且在此处安装了钢制闸门，并在门后面预留了通风孔。最后一段就是方圆形状转换区，长度为3.0 m，水体流动方式从正方形转变为了圆形，两者的尺寸都保持在了1.1 m。

墩顶启闭塔共有7层，总高度23.56 m，为C25砼框架结构。启闭平台高程为165.33 m。在闸室段，使用了一个尺寸为1.5×1.3 m的平面钢闸门来控制水流，启闭应用的启闭机为LQ20t手电两用螺杆式，最高控制水位为164.80 m。通过一条长度达79.95 m的人行桥，启闭室和坝顶被相互连接起来。此桥梁的整体宽度达到了2.2 m，共有十个跨段。其上方部分采用了预制T型梁板构造，梁板的厚度是0.15 m，主要梁的高度达到800 mm，而梁的宽度则是250 mm。每个跨段都包含了两条主要梁，它们的间隔为1.55 m。此外，还有高度为500 mm、宽度为200 mm的三条副梁，它们之间的距离则设定为3.5 m或者3.3 m。所有这些构件均使用C30混凝土进行了预制。

输水涵管管身内套Φ1100钢管δ=14 mm，出口保留现状。输水涵管进口新建一拦砂坎，拦砂坎采用抛石结构，顶宽2.0 m，净高1.4 m，两侧边坡均为1:2。

输水涵管出口镇墩采用C20砼，共2个，镇墩两侧方向厚1.0 m，上下方向厚0.5 m，长4 m。

3.3 防汛配套设施整改

蛮陂头水库现有一条砼路进入库区，但现状较破旧，水库左坝肩至溢洪道路段坑洼不平，路面较窄，均需要维修，总长度2.1 km。维修采用C25砼路面0.18 m厚，路面宽3.5 m，两侧设路肩宽0.5 m，底铺石粉垫层0.1 m厚，靠山侧设排水沟。每600 m设一错车平台，长20 m，宽7.5 m。为避免排水沟淤积、堵塞，在防汛路较低处设过路涵，将雨水排至路面另一侧低洼处。过路涵采用盖板涵结构，涵身净宽0.4 m，净高0.42 m，侧墙及底板均采用C25钢筋砼厚200 mm，盖板采用C25钢筋砼，厚80 mm。

溢洪道下游防汛公路路面高程较低，宣泄洪水时，水流从路面漫过，防汛车辆无法通行，不利于防洪抢险。本次拟在该路段新建漫水箱涵，当遭遇一定洪水时，防汛车辆可以通行。新建漫水箱涵顺水流向总宽度4.0 m，净宽3.5 m，两侧设有防撞墙。单孔过水净宽*净高=3*2 m，共11孔，过水净宽共33 m。箱涵的各项厚度指标都是0.5 m，包括底板、侧墙、顶板，底高程129.50 m，下设0.1 mC15砼垫层。

4 结束语

通过对四九镇蛮陂头水库进行病险分析和除险加固处理，对水库防汛设施进行了整改：对大坝拆除上游干砌石及六角块护坡；对上游坝坡进行填土培厚并重建砼护坡；对坝体进行充填灌浆、左坝肩原山体帷幕灌浆；对输水涵管进水口新建放水塔及人行桥并在上游设置拦砂坎、进行套管处理并重建出口镇墩。工程实施后，能保证水库下游农田的灌溉任务，同时解除水库存在的严重安全隐患，保证库区及下游灌区人民的生命财产安全，提高当地人民的生活水平，促进农村经济发展，效益显著。

参考文献：

- [1] 余敏. 基于双层评价指标综合算法的除险加固水库康复度研究 [J]. 水利技术监督, 2025(03):181-184, 261.
- [2] 蒋文健, 曾敏. 水库除险加固工程护岸结构型式比选 [J]. 水利技术监督, 2025(03):265-269.
- [3] 郭晓妮, 刘泽军. 云良水库V型坝基斜陡坡段防渗墙成槽施工技术 [J]. 广西水利水电, 2025(01):39-42.
- [4] 付晓. 塑性混凝土防渗墙在西郊水库除险加固工程中的应用 [J]. 陕西水利, 2025(02):148-150.
- [5] 王芳, 张芳娟. 首蓿河水库大坝除险加固设计分析 [J]. 陕西水利, 2025(02):122-124.

城市更新项目中的雨污分流改造工程常见问题与优化策略

孙彦林

(宁夏方圆建设工程有限公司, 宁夏 银川 750000)

摘要 城市更新是指针对现阶段城市空间功能环境进行全方面优化, 以解决当前存在的各种问题, 提升人们的生活品质。对于可持续发展而言, 城市更新尤为关键, 其中最具代表性的工作便是展开雨污分流改造。雨污分流改造是指通过管道布置优化的方式, 降低污水处理厂负荷, 营造良好的生态环境。本文重点围绕城市更新项目中的雨污分流改造工程常见问题与策略展开研究。首先对雨污分流改造的重要性加以分析, 然后探究现阶段雨污分流改造工程常见问题, 如规划设计、施工建设、资金投入等方面不足之处, 并针对性提出后续工作策略, 包括优化规划设计、强化施工质量安全管理、拓宽资金筹集渠道等举措, 以期为相关领域从业者提供实践参考与经验借鉴。

关键词 城市更新; 雨污分流; 管道改造

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.033

0 引言

传统城市排水系统多采用雨污合流的形式, 即雨水、污水共用同一管道排放, 此种排水机制适用于城市发展初期规模小, 人口密度低的环境。但当前随着城市化的日益推进, 人口数量不断增加, 雨污混合排放会增加污水处理厂的运行负荷, 带来严重的水污染问题。在此种环境下, 若想要实现长远发展, 便需要进行雨污分流改造, 通过独立设置雨水污水管网的方式展开雨水、污水单独收集与处理。其中, 雨水经由管网进入自然水体, 或者被运用在绿化工作中, 提高资源利用。污水则进入污水处理厂进行深度处理, 并在达到指标后排放, 减少对自然水体的污染。由此可见, 围绕城市更新项目中的雨污分流改造工程常见问题与策略展开分析具有重要意义。

1 雨污分流改造的重要性

首先, 有助于优化城市水环境。传统雨污合流制排水系统运行下, 每逢雨季便会出现排水能力不足, 水体富氧氧化问题频发。而雨污分流改造则可通过雨水和污水的针对性处理, 提高污水处理效率, 改善城市水环境质量。例如: 在雨污分流过程中, 雨水会直接进入自然水体, 而污水则会通过不断处理使其达标之后再集中排放。以上形式可控制污水中的污染物含量, 减少自然水体被破坏的风险。其次, 提升污水处理效率。污水处理厂是污水净化的重要领域, 其运行效率直接影响城市水环境质量。在以往雨污合流环境

中, 污水处理厂运行负荷较大, 一旦出现强降雨问题, 则会因为难以处理污水而导致出水水质不达标。而雨污分流改造之后, 污水管网会集中收集污水, 且内部不会掺杂雨水, 因此能从根本上降低污水处理厂的运行难度, 使污水处理厂可以基于实际所需调整工艺参数, 更好地完成污水处理, 在控制运营成本的基础上提高运行效率。最后, 有助于强化城市防洪排涝效果。在城市化的日益推进下, 很多自然地面被硬化处理, 导致雨水下渗更为艰难, 在强降雨环境下极易出现城市内涝问题, 影响交通出行。雨污分流改造则通过独立管网的规划和设计, 优化排水路径。例如: 在雨污分流改造的过程中, 会扩大雨水管网的管径、建设雨水调蓄设施, 以此实现“海绵城市”理念, 缓解排水管网压力。而降水结束后, 被存储的雨水则会缓缓释放, 以此降低排水系统冲击, 规避雨污混合环境下管网堵塞、溢流等问题的产生^[1]。

2 城市更新项目中雨污分流改造工程常见问题

2.1 规划设计问题

在城市更新工作中, 雨污分流改造涉及内容众多。由于城市属于庞杂的有机整体, 因此在雨污分流改造时, 必须从宏观的角度出发, 综合分析不同区域的经济社会发展情况以及人口密度和地形地貌, 以此确保改造规划的合理性。然而, 在具体操作中, 许多城市在进行雨污分流改造时却缺乏统筹意识, 导致各区域难以协调与沟通。以某城市为例, 在老城区雨污分流

改造的过程中，工作人员更加注重管网更新与修复，而新城区在建设时则更加注重新建管网铺设。由于二者没有展开协调与沟通，导致在管网衔接时出现问题。老城区改造时所选用的管道管径较小，难以与新城区大管径管网对接，导致污水在交界处极易出现污染物堵塞和溢流问题，影响了整体雨污分流工程的效果。此外，由于选用了小管径的管道，导致在排污的过程中经常出现污染物聚集的问题，在长期使用的过程中出现管道结构性损害，加大了后续运维管理的难度。

2.2 施工建设问题

一方面，存在施工技术应用难题，比如复杂地质环境下便很难施工。以管道沟槽开挖为例，若是流沙层施工，则很容易导致流沙进入沟槽内，引发沟槽坍塌，造成安全隐患，此时工作人员便不得不进行支护处理，比如运用钢板桩等手段，但在施工时同样也会增加成本和难度，影响工程进度。淤泥层也会由于承载力较低，含水量较高的问题影响管道基础施工。一般情况下，施工团队需要运用换填法、排水固结等手段换填高性能的材料，减少土壤含水量。此种方法不仅工艺复杂，而且需要专业技术支持。此外，部分城市涉及老旧城区，此类区域通常空间狭窄、管线复杂，因此很难针对性地选用技术。在管道开发时稍有不慎便会影响其他管道的正常使用，引发安全事故。另一方面，部分工程在施工时缺乏质量分析，以至于后续验收期间经常会产生质量问题，比如存在偷工减料、工艺不达标、基础处理不稳定等问题，致使施工中的质量风险没有及时被发现，后续日益积累，影响了工程质量。除此之外，在安全管理方面存在明显漏洞，此方面主要体现在工作人员安全意识薄弱。以沟槽开挖作业为例，超过3米的沟槽没有设置防护栏和安全警示标志，导致在夜间施工期间可能会产生坠落风险。加上部分工作人员在高空作业期间没有正确佩戴安全带，此类现象的出现会导致严重的工程事故，造成经济损失，致使工程进度延误。

2.3 资金投入问题

雨污分流改造工程要完成管道铺设、设施升级改造等工作，每一环节都需要大量资金投入。以管道铺设为例，由于管道分布范围较广，而且错综复杂，因此前期需要耗费大量的成本采购材料，比如不同口径的管道。部分城市规模较大，仅仅管道铺设就会耗费数亿元甚至数十亿元资金，所以，若是前期资金投入不充足便会在施工环节出现资金短缺问题，影响施工的有序推进。此外，泵站建设以及污水处理设施升级等也

需要巨额资金。若是污水处理过程中计划融入膜生物反应器等新型技术，则还需要额外建设沉淀池等设施，会再一次增加成本。然而，由于此类工程更多依赖于地方财政，而地方财政资源有限，仅靠税收和财政拨款满足发展需要，因此对于雨污分流改造工程而言，极易出现资金投入捉襟见肘的问题，影响工程进展。

3 城市更新项目中雨污分流改造优化策略

3.1 优化规划设计

一是要合理展开规划，从全局的角度出发，促进各区域沟通与协调。为有效解决当前城市更新项目中雨污分流改造工程整体规划不合理的问题，要求后续应从宏观层面出发进行改造规划，比如政府在其中应发挥主导作用，组织城市规划、水利、环保等多领域的工作人员共同编制规划方案。规划团队要从城市发展的角度入手，结合现阶段的地形地貌、人口密度、功能区发展方向等信息，借助GIS技术展开研究，从而生成城市排水现状图等设计资料，为后续规划提供支持。规划的过程中要合理设置区域改造顺序，应优先处理问题较大的地区，比如城市中心区，老旧城区等，以通过改造优化居民的生活环境。需要注意的是，在改造的过程中要关注各区域的衔接与协调，使各区域排水系统能成为整体，尤其是新老城区的交界处，要确保管网连接形式与管径的合理性，以免出现衔接不畅等问题^[2]。

二是要优化管道布局，确保设计的合理性。此方面需结合地形地貌确认管道走向和位置，使污水和雨水能在自重力的环境下流动，从而减少泵站设置的工程量。例如：在山区城市中，可借助山体坡度设计能自重流动的雨水管道，使雨水能快速排出，而平原区则要规划坡度，以免出现积水问题。此外，在设计的过程中，还要合理分析城市发展需要，提前预留管道容量和接口，以适应后续人口增长需求。对于新开发的区域，还要结合人口密度和产业布局，调整管道的管径和走向，以满足排水目标。在管径选用方面，要结合排水流量和流速展开计算，具体要结合降雨强度、径流系数等，科学分析雨水、污水的流量，并结合相关规范和标准确认管径，计算时既要考虑摩阻损失和局部损失，也要保障排水的顺畅度，以免产生管道堵塞等问题。当前，平原地区雨水管道坡度应在0.3%以上，对于地形起伏明显的地区可加大坡度。在污水管道方面，为满足悬浮物流动需要，应在坡度设置方面大于0.5%。坡度设置过程中要注重一致性，以免出现局部陡坡和缓坡的问题，影响排水效果。

3.2 强化施工质量安全管理

一是运用先进的施工技术。为强化雨污分流改造工程施工质量,减少对周围环境的影响,应针对复杂地质环境采取先进的技术,减少风险隐患。例如:可使用以水平定向钻进技术为代表的先进技术。此类技术是指借助钻头按照预定轨迹完成钻进,然后回拉成孔完成管道铺设,与其他技术形式相比,不用展开集中开挖,目前该技术被广泛运用在管道铺设障碍物较多的环境中,能减少成本,缩短工期。此外,顶管技术也是常见的一种非开挖技术,会运用顶管处理的方式将管道一节一节地顶进土壤内。此技术便于测量和控制,可在保障铺设精度的同时减少规模性开发对环境的影响。目前,随着信息化的不断推进,智能监测技术也被广泛使用。在雨污分流改造工程中,可通过设置压力流量位移传感器的方式,实时监测管道的运行状态。例如:在管道铺设的过程中,可运用压力传感器实时分析管道内的压力变化,研究是否存在泄漏或堵塞问题,以便施工人员及时修复,保障工程的顺利推进^[3]。

二是强化质量监管。要构建完善的质量监管体系,确保各方都能了解自身的责任以及权利。例如:建设单位作为组织者和管理者,要承担质量责任,挑选具有一定信誉和资质的施工、监理和设计单位并对项目展开全程管理。施工方作为工程项目的直接负责人,需按照设计标准展开施工,并构建全过程动态管理体系。监理方受建设方委托,要对项目质量进行监督检查,履行监理职责,及时做好质量验收,纠正施工问题。

三是优化安全管理。一方面,要对所有工作人员展开安全教育培训。施工前期便需要对所有人员进行培训,具体内容包括操作规范、安全注意事项、应急处理等。所有工作人员都需要在通过培训之后才能上岗作业。施工期间还要做好安全警示,并定期做好交底工作,提示工作人员强化自我保护意识。另一方面,构建完善的安全管理体系,配备专门的工作人员赋予其权限,要求其每日对施工现场进行全面的安全检查,分析是否存在安全隐患并及时整改,从根本上减少安全风险。同时,还要配置完善的防护措施,如防护栏、消防器材等,保障工作人员的人身安全^[4]。

四是减少对周围环境的影响。例如:施工过程中可能会出现噪声问题,因此要尽量挑选低噪声设备,并避免居民休息时段作业。与此同时,还要做好隔音屏障,减少噪声影响。针对粉尘问题,则可以运用洒水车定期洒水降尘,容易产生粉尘的材料也要及时做好覆盖,以此降低对周围环境的影响。

3.3 拓宽资金筹集渠道

一方面要加大政府财政支持。政府在雨污分流改造资金投入方面扮演着重要角色。要加大财政支持力度,认识到雨污分流改造工程在城市更新的重要性,从而将此方面资金投入纳入财政预算中,确保资金投入的合理性^[5]。除此之外,政府还要设立专门的专项资金用于雨污分流改造工程。此种设置可保障资金来源的稳定性,避免由于资金分散使用而引发的资金短缺问题。另一方面则要引入企业投资,比如运用 PPP 施工模式。PPP 模式下,政府和企业会签订合约,明确双方权利和义务,共同投资雨污分流改造项目,获取相应的回报。与传统建设模式相比,PPP 模式在运作方式和回报机制方面更为完善,能有效弥补政府资金投入的缺口,保障项目的合理推进。除此之外,还要创新资金管理机制。比如要强化资金预算管理施工前期实施单位,并要结合规模、进度以及投资计划,制定有效的资金预算,确保预算合理性。在预算使用的过程中,要对其展开动态监督,分析资金使用是否科学,以减少资金滥用问题的出现^[6]。

4 结束语

对于城市更新项目中的雨污分流改造工程而言,工作人员应优化规划设计,从全局发展的视角出发,充分分析周围的建筑物分布以及当地地形地貌,以确保雨污分流工程的合理性。建筑施工期间要做好质量把控,合理运用技术并强化安全管理,减少对地下基础设施以及其他管线的影响。资金投入方面需要拓展资金来源,在政府财政投入的基础上引入企业投资,并创新资金管理机制,以此为雨污分流改造工程的顺利推进创造条件。

参考文献:

- [1] 邓婉贤.市政排水系统雨污分流改造工程管道施工质量控制分析 [J].中国建筑金属结构,2025,24(19):63-65.
- [2] 刘宁,蒲贵兵.城市雨污分流效果评价指标体系构建及应用 [J].城市道桥与防洪,2025(09):46-51.
- [3] 王圣松.城市更新背景下建筑小区合流管网雨污分流改造方案 [J].工程技术研究,2025,10(15):227-229.
- [4] 周勇国.城市老旧小区改造工程中雨污分流系统施工技术研究 [J].中国建筑金属结构,2025,24(13):81-83.
- [5] 王星.城市雨污分流改造工程设计分析 [J].居业,2025(06):107-109.
- [6] 赵海成.基于污水收集的城镇雨污分流提升改造工程施工技术探析 [J].江西建材,2025(05):301-303.

城市滨水环境提升工程关键施工技术研究

——以良仁涌二期项目为例

冯均雄

(广东金松建设集团股份有限公司, 广东 佛山 528308)

摘要 随着我国城市化进程的推进和生态文明建设的深入, 城市滨水空间的更新与改造已成为提升人居环境品质、重塑城市生态格局的关键举措。传统以单一防洪为目的的硬质化工程模式, 正逐步被兼顾防洪安全、生态修复与公共休闲的复合功能模式所取代。本文以“顺德区伦教良仁涌水闸至三洪奇大桥堤段水环境提升改造工程(二期)”这一典型案例为研究案例, 旨在系统性剖析其在珠江三角洲复杂水文地质条件下, 如何集成并应用多元化施工技术体系。研究结果表明, 该项目通过因地制宜的技术选型、多专业协同的施工组织和全过程的精细化管理, 成功实现了工程的结构安全、生态功能与景观美学的有机统一。本文提炼的技术应用模式与管理经验, 以期为国内同类型城市滨水空间更新改造项目提供具有实践价值的参考。

关键词 滨水环境; 生态驳岸; 格宾石笼; 施工组织; 技术管理

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.034

0 引言

进入21世纪以来, 我国城市发展模式经历了从规模扩张到品质提升的深刻转型。在这一宏观背景下, 曾一度被视为城市“边缘”或“背面”的滨水地带, 其价值被重新发现与定义。从国家层面推动的“海绵城市”建设理念, 到广东省大力实施的“万里碧道”工程, 一系列战略部署均指向一个共同目标: 将城市滨水区从传统的防洪排涝通道, 转变为集生态廊道、休闲空间、文化载体和经济活力带于一体的复合功能区域^[1]。这一转变不仅对城市规划与景观设计提出了更高要求, 更对工程建设领域的施工技术与管理模式带来了前所未有的挑战。本文通过对良仁涌二期项目施工组织设计文件的深度挖掘与分析, 系统解构其采用的关键施工技术体系, 详细阐述各项技术的原理与质量控制要点, 并探讨其背后的技术管理与保障措施, 旨在通过这一案例研究提炼出一套可复制、可推广的城市滨水环境提升工程技术应用模式与管理经验, 为未来同类项目的规划、设计与施工提供参考。

1 工程概况

良仁涌二期项目位于广东省佛山市顺德区伦教镇, 地处珠江三角洲水网核心区域的顺德水道北岸。工程范围西起旧码头, 东至三洪奇大桥, 改造堤段长度约1.9公里, 二期工程的改造总面积约为11.9万平方米。根

据设计文件, 该项目所依托的顺德第一联围为2级堤防, 需满足外江50年一遇的防洪标准, 其主要建筑物(如驳岸)为3级, 次要建筑物为4级, 抗震设计烈度为7度。这些高标准的设计要求, 奠定了项目施工技术必须以“安全”为第一原则的基调。

项目的核心建设内容可归纳为三大板块:

1. 水利工程: 主要任务是对K1+460至K1+850段的外滩地水边驳岸进行加固。这是保障整个堤段防洪安全的基础, 也是后续生态与景观建设的载体。

2. 生态修复与河道治理: 对堤外滩涂地进行系统性的生态修复, 包括水环境提升改造, 旨在恢复和增强河岸带的生态功能, 构建健康的“水—陆”过渡带。

3. 碧道与景观建设: 在满足安全和生态功能的基础上, 建设“万里碧道”和“百里芳华”的示范段, 包括园路、夜光跑道、亲水平台、空中廊桥、驿站、景观照明及大规模绿化等, 为市民提供高品质的公共休闲空间。

项目的地理与气候条件同样对施工提出了特定要求。工程区属珠江三角洲冲淤积平原, 地质条件相对复杂, 可能存在软土、粉砂等不良土层。同时, 地处南亚热带海洋性季风气候区, 温暖、潮湿、雨量充沛, 这意味着施工需充分考虑雨季和汛期对工程进度和安全的影响, 必须制定周密的防汛应急预案。

2 城市滨水环境提升工程关键施工技术剖析

2.1 河道驳岸复合生态加固技术

驳岸工程是滨水项目的骨架，其设计与施工直接决定了项目的安全性和生态性。良仁涌二期项目摒弃了传统单一的混凝土硬质护岸，创造性地采用了“水下抛石固脚+中部格宾石笼护坡+局部干砌块石点缀”的复合生态加固技术体系。该体系根据不同岸段的水流冲刷强度、地质条件和景观需求，进行差异化配置，体现了精细化、因地制宜的设计思想。

2.1.1 格宾石笼 (Gabion) 护岸技术

格宾石笼作为本次驳岸工程的核心技术之一，其应用是实现生态功能与结构稳定相统一的关键。格宾石笼是由高抗腐蚀、高强度、具有延展性的低碳钢丝或者包覆 PVC 的钢丝使用机械编织而成的箱型结构体。

1. 技术原理与选型依据：首先是柔性结构适应变形。珠江三角洲的冲淤积地基普遍存在不均匀沉降的风险。格宾石笼作为一种柔性结构，能够很好地适应地基的微小变形，通过内部石料的调整重新达到平衡，而不会像刚性结构那样产生开裂破坏，保证了护岸的整体性和稳定性；其次是优良的透水性与生态亲和性。笼内填充的石块之间存在大量孔隙，这使得坡体后方的地下水和坡前的地表水可以自由交换，有效降低了坡体内静水压力，提高了边坡的抗滑稳定性。更重要的是，这些孔隙为水生生物提供了栖息空间，也为植物的生长提供了条件^[2]。随着时间的推移，泥沙会在石缝中沉积，植物种子在此生根发芽，最终形成植被茂盛、生物多样的近自然生态岸线；最后是施工便捷与经济性。格宾石笼的构件可在工厂标准化生产，现场只需进行组装和石料填充，施工工艺相对简单，对大型机械依赖较小，尤其适合在狭窄的滨水作业面施工。

2. 格宾石笼施工关键要点总结：(1) 材料是基础：进场的格宾网片 (镀层厚度、抗拉强度) 和填充石料 (粒径、强度、级配) 必须进行严格检验；(2) 绑扎是关键：绑扎的牢固程度直接决定了笼体的整体性，必须采用专用的绑扎工具，确保每个节点都紧固到位；(3) 填充是核心：填充的密实度与均匀性是保证结构稳定、防止局部变形的核心。在填充过程中，需在箱体对面设置临时拉筋，防止鼓胀变形。

2.1.2 干砌块石与石料抛投技术

(1) 干砌块石技术：在部分水流较为平缓或作为景观节点的岸段，项目采用了干砌块石技术。此技术选用形状较为规整的块石，通过人工砌筑形成护坡。其施工要点在于：选用大小不一但面平背陡的块石，砌筑时做到大石坐底，小石嵌缝，上下错缝，内外搭接；

砌筑时要求石块之间紧密接触，通过石块自身的不规则形状相互嵌锁，形成稳定的整体。对于较大的缝隙，需用小石块或碎石楔紧；最终形成的坡面应大致平整，无明显的凹凸，以保证水流顺畅，并呈现出古朴、自然的景观效果。(2) 石料抛投技术：该技术主要应用于水下坡脚的防护，即“固脚”。其目的是在驳岸结构的最底部形成一个抗冲刷的保护层，防止水流淘刷坡脚，导致整个驳岸失稳。施工控制要点包括：通过 GPS 等测量设备，精确控制抛投船只的位置，确保石料抛投在设计范围内；严格按照设计要求的抛投厚度和方量进行施工，并通过水下地形测量进行复核，确保形成有效的防护带。

通过这三种技术的有机组合，良仁涌二期项目构建了一个多层次、功能互补的驳岸系统，既满足了防洪安全的刚性需求，又为生态修复和景观营造创造了有利条件。

2.2 大体量土方工程与地基处理技术

土方工程是良仁涌二期项目的另一大技术难点。高达 24 505.64 立方米的土方量，在狭长的滨河地带进行作业，对施工组织、环境保护和地基稳定性都提出了极高的要求。

2.2.1 挖填平衡与精细化调配

在如此大规模的土方工程中，实现场内挖填平衡是降低成本、减少环境影响的关键策略。项目技术团队需在施工前进行详细的土方平衡计算与调配规划。

1. 三维建模与计算：利用地形测绘数据和设计图纸，建立场地的三维数字模型，精确计算出各区域的挖方量和填方量。

2. 分区规划与时序安排：将整个施工区域划分为若干个作业区，制定详细的开挖与回填顺序。基本原则是“先填后挖”或“边挖边填”，规划出最优的土方运输路线，避免土方二次倒运，减少对已完成工序的干扰。

3. 土料分类与利用：对开挖出的土料进行现场甄别，将符合回填要求的良性土 (如黏土) 直接用于堤身培厚或园路路基的回填；对于不适宜的杂填土或淤泥，则集中堆放并外运处理。参考资料中明确提到“回填土料黏土选择符合回填要求的泥场购买”，这表明在场内土方不足或不满足要求时，有计划地外购土料作为补充。

2.2.2 分层回填与压实技术

回填土的质量直接关系到上部结构 (如园路、广场、建筑物基础) 的长期稳定。项目严格遵循《堤防工程施工规范》和《建筑地基处理技术规范》等国家标准，实施精细化的分层回填与压实作业。

1. 虚铺厚度控制:根据不同的压实机械(如压路机、蛙式夯)和土料类型,确定合理的虚铺厚度,一般控制在20~30cm。过厚会导致下层压实不足,过薄则效率低下。

2. 含水率控制:土壤的压实效果与含水率密切相关。施工中需现场监测土料的含水率,使其控制在最优含水率的±2%范围内。过干时需洒水润湿,过湿时则需翻松晾晒。

3. 压实遍数与密实度检测:按照“先静后振、先慢后快、先边后中”的原则进行碾压。在达到要求的压实遍数后,采用灌砂法或环刀法等标准试验方法,对每层的压实系数(K)或密实度进行检测,确保其达到设计要求(通常路基要求K≥0.95)^[3]。

2.3 园林景观结构一体化施工技术

良仁涌二期项目的一大亮点在于水利工程与园林景观的高度融合。空中廊桥、半圆挑台、亲水平台等复杂的景观构筑物,不再是堤防建成后的“附加品”,而是与堤防、驳岸结构同步设计、一体化施工的有机组成部分^[4]。这要求施工技术必须解决好多专业交叉下的接口处理难题。

2.3.1 异形与悬挑结构施工技术

以“空中廊桥”和“半圆挑台”为例,这类结构通常涉及大跨度、悬挑和不规则形态,其施工技术核心在于“形”与“稳”的统一。

1. 高精度模板与支撑体系:对于异形混凝土结构,必须采用定制化的高精度模板。模板体系不仅要能精确塑造设计形态,还必须具备足够的刚度和稳定性,以承受混凝土浇筑时的侧压力而不变形。对于高处的廊桥,其下方的支撑体系(如满堂脚手架)需进行专项设计和承载力验算。

2. 预埋件的精确定位:廊桥的钢结构梁、木平台的龙骨、栏杆的立柱等,都需要通过预埋在混凝土中的连接件(如预埋钢板、螺栓)来固定。这些预埋件的位置、标高和垂直度必须在混凝土浇筑前反复核对,其精度直接决定了后续安装工作的成败。通常采用“先焊后浇”或设置定位模具等方法来保证其精度。

3. 多材料接口处理:项目中大量使用了混凝土、钢材、木材、玻璃钢等多种材料。处理好不同材料的交界面是保证结构耐久性和美观度的关键。例如:在木平台与混凝土基础的连接处,需做好防腐防潮处理;在钢结构与混凝土的连接处,要考虑二者热胀冷缩系数不同可能带来的应力问题,在设计上预留适当的构造措施^[5]。

2.3.2 基础与主体协同施工技术

景观构筑物的基础如何与堤防或驳岸“相处”,

是一个结构力学上的核心问题。处理不当,轻则影响景观,重则危及堤防安全。

1. 独立基础方案:对于重型构筑物,通常采用独立基础方案。即构筑物的基础(如桩基础、扩大基础)独立设置,与堤防或驳岸结构完全脱开,仅通过伸缩缝等构造连接。这样可以避免构筑物的荷载和沉降对堤防产生不利影响。

2. 整合式基础方案:对于轻型构筑物(如观景平台、座椅),其基础可与驳岸结构(如格宾石笼顶部的压顶混凝土梁)结合在一起。施工时,需在驳岸施工阶段就精确预埋好连接件,确保荷载能均匀传递给下部结构。

3. 施工时序的协同:必须制定严密的施工计划,确保景观构筑物的基础施工与主体水利工程的施工在时序上完美衔接。例如:驳岸回填土的压实工作必须在景观基础施工前完成并验收合格,否则可能导致基础后期沉降。

3 结语

通过对顺德区伦教良仁涌二期水环境提升改造工程施工技术的系统性研究,本文深入剖析了现代城市滨水项目在技术集成、生态融合与精细化管理方面的成功实践。通过复合生态加固技术实现“安全与生态”双赢、精细化土方管理与地基处理,保障工程整体稳定性,多专业一体化施工提升滨水空间品质,从而推动滨水区从单一功能向复合功能、从工程设施向公共艺术品转变的核心技术体现。良仁涌二期项目的成功实践,为国内正在兴起的城市滨水空间更新改造浪潮提供了宝贵的启示。在未来的滨水项目设计与施工中,我们应摒弃“一刀切”的思维,开展深入的现场调研,选择最适合场地自身条件的技术方案。此外,还要树立全生命周期的系统管理思维,构建将技术、质量、安全、环保、进度、成本等多个维度融为一体的系统化管理体系。

参考文献:

- [1] 黄强,张钦喜.城市滨水空间更新中的历史文化保护与利用[J].城市规划,2019,43(11):45-51.
- [2] 徐中华,王建华.复杂水文地质条件下深基坑降水技术研究[J].岩土力学,2020,41(04):1357-1364.
- [3] 戴岩.市政道桥工程路基路面压实技术分析与思考[J].黑龙江环境通报,2022,35(04):136-139.
- [4] 李广信,罗晓辉.软土地基上景观构筑物基础设计关键技术[J].建筑结构,2021,51(16):134-139.
- [5] 秦长金,伍刚,刘飞凡,等.落地与悬挑组合式支模体系在高位逐层外悬挑结构施工中的应用[J].施工技术(中英文),2024,53(02):87-91.

周溪河段防洪墙应急除险工程钢筋混凝土防洪墙专项施工方案研究

陈宇鑫

(梅州市梅州大堤管理处, 广东 梅州 514000)

摘要 本文以周溪河段防洪墙应急除险工程为研究对象, 聚焦钢筋混凝土防洪墙的专项施工方案。结合工程具体情况逐点拆解关键工序与施工方法, 并对核心环节配套专项技术措施, 同时建立质量、安全双重保障体系。经过深入的研究和实践验证, 采用科学、合理的施工方案, 以期能够为提升防洪墙工程质量提供参考, 进而为防洪安全提供坚实可靠的保障, 助力同类工程实现高质量建设。

关键词 周溪河段; 防洪墙应急除险工程; 钢筋混凝土防洪墙; 专项施工方案

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.035

0 引言

防洪工程是维系广大人民群众生命与财产安全的生命线, 也是区域经济平稳运行的基石。周溪河段作为区域水网的主干, 其防洪墙常年直面洪峰冲击, 地位无可替代。然而, 持续冲刷叠加地质变动, 周溪河段防洪墙体已出现局部破损, 一旦遭受洪水破坏, 缺口可能迅速扩大, 应急加固不容拖延。钢筋混凝土墙因强度高、耐久好, 被选为本次除险的主体结构。面对工程的高风险与高标准, 一份周密、可操作的专项施工方案成为先决条件。

1 工程概况

周溪河发源于梅州市梅江区, 是梅江左岸一级支流, 汇入韩江流域, 干流长 36 km, 集雨面积 118 km², 河床平均坡降 4.4‰。本段应急工程位于发明桥上游、周溪河右岸黄遵学校后门, 已运行三十多年的堤防在巡查中被发现: 39 m 防洪墙的两条结构缝出现明显异常, 下游端缝口开裂, 上游端墙体发生不均匀沉降, 安全威胁突出。墙后原有一片旧房, 在校舍改造时被拆, 建筑余泥与垃圾杂填后表面覆砂砾石作门坪, 填土侧压力直接推挤防洪墙, 使其外倾风险加剧。本次除险加固范围对应桩号 K0+526—K0+565, 采用钢筋混凝土结构, 墙长 39 m、底宽 4.76 m、总高 9 m; 另新建 6 m×3 m 旱闸一座, 并沿堤内修筑 38 m 长道路 468 m², 与上下游现状道路连通。

2 主要工艺及施工流程

2.1 施工准备

2.1.1 技术准备

施工前, 技术人员先研读图纸并组织会审, 明确设计意图与施工要点; 随后编制详尽的施工组织设计

和专项方案, 向作业班组交底, 确保工人熟悉工序流程与质量要求^[1]。

2.1.2 材料准备

按设计要求购入符合标准的水泥、砂石、钢筋、粉煤灰及外加剂等原料。材料到场后, 先核查质量证明文件, 再按规范抽样复检, 确认各项指标达标后方可使用, 主要材料规格和用量汇总于表 1。

表 1 主要材料规格和用量

材料名称	规格型号	单位	数量
水泥	C30	t	120
钢筋	HRB400	t	25
细骨料	中砂: 细粒模数大于 3	m ³	280
粗骨料	碎石: 粒径 5 ~ 31.5 mm	m ³	350
外加剂	高效减水剂	t	1.5

2.1.3 设备准备

现场已配齐挖掘机、汽车吊、混凝土搅拌机、车载泵、振捣器、钢筋加工机、全站仪及水准仪等全套机械。所有设备在进场前完成调试与检修, 确保工况良好并满足施工需求。

2.2 总体施工流程

钢筋混凝土防洪墙的施工依次经历测量放样、基础处理、钢筋绑扎、模板支设、混凝土浇筑以及养护拆模等阶段。

3 关键施工环节专项技术方案

3.1 基础处理

3.1.1 基础开挖

先用挖掘机开挖, 到设计标高以上约 200 ~ 300 mm 时改用人工清底, 以免机械扰动基底土。全过程严控

深度与坡度，杜绝超挖或欠挖。基底轮廓每边比设计尺寸放大 500 mm，留出作业空间。

3.1.2 基底处理

当基底土承载力低于设计值时，采用换填法处理。换填料选用砂石，分层铺筑，单层厚度控制在 300 mm 以内，以振动压路机分层夯实，压实系数不低于 0.94。换填结束后立即进行承载力试验，确认基底强度达标后再进入下一工序^[2]。

3.1.3 灌注桩基础施工

挡墙基础采用 C30 钢筋混凝土灌注桩，桩径 800 mm，中心距 1.5 m。施工顺序为：测量放线→埋设护筒→钻机就位→成孔→清孔→钢筋笼制作与吊装→灌注混凝土。钻孔时实时监测垂直度与孔径，保证成孔质量；清孔后孔底沉渣厚度不超过 50 mm。钢筋笼按图加工，由吊车整体吊放，定位准确。混凝土通过导管连续灌注，确保密实度。

3.1.4 抽芯检测

灌注桩基础施工完成后，抽芯检测是评估其质量的关键环节，其中大应变和小应变检测发挥着重要作用。大应变检测通过重锤冲击桩顶，模拟实际受力，能精准测定桩的承载力与完整性，适用于重要工程或地质复杂区域。小应变检测则利用应力波反射原理，快速判断桩身缺陷位置与程度，操作便捷、成本低。二者结合，大应变把控整体承载性能，小应变聚焦局部缺陷，为灌注桩质量提供全面、可靠的评估。

3.2 钢筋施工

3.2.1 钢筋加工

钢筋弯折及末端弯钩的尺寸必须同时满足规范条文与设计图纸。采用 IV 级钢筋作箍筋时，末端必须设弯钩：钩内径须超过主筋直径，且不得小于箍筋直径的 2.5 倍；平直段长度不宜短于箍筋直径的 5 倍。

3.2.2 钢筋焊接与连接

单面电弧焊时，焊缝长度应取钢筋直径的 10 倍及以上；若改用双面焊，则焊缝长度可缩短至直径的 5 倍及以上。受力钢筋的焊接位置应选在内力较小处，并相互错开。在同一根钢筋上，在接头长度范围内不应存在两个以上的连接点。对于位于受拉区域内的钢筋接头，其横截面积不得超过总横截面积的 50%，而受压区则不受此限制。电焊接缝与钢筋弯曲部分之间的最小间距应不小于钢筋直径的十倍。在进行绑扎作业时，所有交叉位置都必须用扎丝牢固固定，亦可选择点焊方式来加强稳定性，并且要求做到全面绑扎。当

钢筋直径超过 22 mm 时，推荐采用机械连接或焊接技术。若直径不超过 22 mm，则允许使用绑扎方法连接。

3.3 模板工程

3.3.1 模板选型

防洪墙大体积混凝土模板采用 1.5 m 定制钢模。路面以下单侧立模用双拉杆锚固于既有挡墙，路面以上双侧立面模则配穿墙拉杆。模板与支架的刚度、强度、稳定性的验算，要按照现行国家标准进行，同时根据大体积混凝土养护标准设计保温构造。

3.3.2 模板安装

1. 防洪墙外侧采用单边立模，从第二模以上的高空模板开始，先用双拉杆把模板锚固在既有挡墙上，再搭设钢管支架作为作业平台（见图 1）。模板必须自成独立体系，不得直接支在支架上，以防支架非弹性沉降造成模板受力不均。拉杆一端用膨胀螺栓固定在原挡墙，另一端通过垫片和螺母锁紧模板，形成独立受力单元。作业平台纵向设三排立杆，间距 90 cm，横向每 90 cm 设一排横杆；外侧加一道斜撑提高整体稳定，平台边缘设 1.2 m 高护栏并满挂密目安全网^[3]。

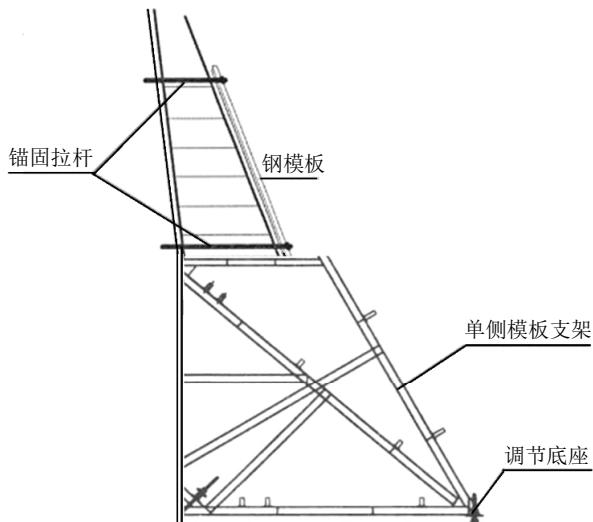


图 1 防洪墙外侧单边立模安装

2. 双边立面模板选用带加强肋柱的定制钢模板，肋柱按 0.75 m 间距布置；安装时，上下两端采用直径 14 mm 的精轧螺纹钢拉杆对拉锁紧，确保模板位置不变形。挡墙内侧再布设钢管斜撑，并以直径 8 mm 的钢丝绳向下锚拉，使整套模板形成闭合、稳定的受力体系。

3. 模板安装选用机动性好的汽车吊，以便精准就位并保障安全。装毕后逐一核查支撑牢靠程度，并清除模板内面杂物。拼缝须平整密实，下方设次龙骨顶紧钉牢，缝内贴胶带，杜绝漏浆。

3.4 混凝土施工

3.4.1 混凝土配合比设计

大体积混凝土配合比设计除满足《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011)外,还应遵循以下要求:以 60 d 或 90 d 强度作为设计依据;当拌合物被运输至浇筑面时,其坍落度应控制在不超过 160 mm 的范围内;同时,拌和过程中的用水量需限定在不超过 175 kg/m³ 的水平。此外,关于掺合料的使用,粉煤灰的掺量不应超过胶凝材料总量的 40%,而矿渣粉的掺量则不应超过 50%,二者合计不超过胶凝材料总量的 50%;水胶比不大于 0.50;砂率宜控制在 35%~42%。

3.4.2 混凝土搅拌与运输

混凝土在集中搅拌站拌制,配料须按配合比精确称量,偏差不得超出允许范围。搅拌时长视机型与坍落度而定,但不得低于规范下限。拌合物由搅拌车运至现场,途中须保持匀质性,避免离析与坍落度损失。

3.4.3 大体积混凝土的浇筑

1. 在确定浇筑厚度时,要同时考量振捣器的有效作用深度以及混凝土的和易性。倘若采取整体连续浇筑的方式,那么浇筑厚度可选取在 300 mm 至 500 mm 这个范围内。

2. 在进行整体分层浇筑或者采用推移式连续浇筑的方式时,需要尽可能缩短层与层之间的停歇时间,并且该停歇时间不得超过混凝土的初凝时间。其中,混凝土的初凝时间必须通过试验来确定。一旦停歇时间超过了混凝土的初凝时间,那么在后续施工时,该层面就必须按照施工缝的处理方式来进行操作。另外,在浇筑承台混凝土时,若采用斜面分层的方式,那么每一层的厚度应限制在 500 mm 以内,坡度 1:6,布料时精确控制厚度,保证覆盖均匀。浇筑期间加强振捣,上下层间隔不超过初凝时间的一半;采用二次复振,以提高界面黏结与胶结,并消除泌水。插入式振捣器按 400 mm 梅花形布点,从后端向前端开展,向下层垂直插入 500 mm 以下,以保证两个层级的密实度。底板混凝土则按常规方法施工^[4]。

3. 在浇筑过程中,应该从低处开始,从长边的一端向另一端推进。如果具备足够的供应,也可以多个点同时进行。

3.4.4 水平施工缝处理

1. 混凝土硬化后,要及时清除表面的软弱混凝土、浮浆、松动的石子等。

2. 浇筑上层混凝土前,先用清水冲掉下层表面的

浮浆和杂物,随后充分洒水湿润,但须避免形成积水。

3. 混凝土的振捣要确保密实度,并且保证新旧混凝土的结合效果。

4. 底板后浇带用模板留成平直缝;施工缝设在底板面以上 500 mm 处,做成平台缝,配止水钢板或企口,中间 3 cm 须平整。

3.4.5 养护与拆模

1. 混凝土养护。混凝土浇筑完成后应立即进入养护阶段。现场采用塑料薄膜覆盖与洒水相结合的保湿方案:对大面积板面先严密覆膜,阻断水分散失;随后持续洒水,保持面层湿润,养护期不少于 14 天。此期间须监控环境温度,防止表面温度骤降引发开裂;若气温低于 5 °C,则在薄膜上加盖保温材料,确保养护温度稳定。

2. 拆模。侧模能否拆除,取决于混凝土强度:实测值达到设计强度的 75% 以上方可拆;底模则必须满足设计文件给出的强度指标。拆模顺序按“先支后拆、后支先拆”执行,先卸下非承重构件,再处理承重部分,过程中不得猛撬,防止磕损混凝土表面与棱角^[5]。

4 结束语

周溪河段防洪墙应急除险工程以钢筋混凝土结构为核心,本文据此编制了专项施工方案。工作伊始,先梳理工程总体情况,明确施工的关键与难点;随后系统说明主要工序及作业方法,为现场提供具有可操作性的技术路径。对风险集中的环节,另行拟定针对性技术措施,确保质量一次达标。配套的质量、安全制度同步落地,从材料进场到工序验收均有章可循。实践表明,方案的科学性直接决定了防洪墙抵御洪水的能力,可为类似应急项目提供参考。后续施工仍需在应用中持续修正细节,以管理提升带动质量升级。

参考文献:

- [1] 郭凯.水利施工中混凝土防渗墙施工技术研究[J].江西建材,2021(06):130.
- [2] 李树平.长江漫滩区地下连续墙渗漏防治措施研究[J].智慧城市,2020(10):34-35.
- [3] 石玉新.水利工程防渗处理施工技术的应用研究[J].四川水泥,2021(08):300-301.
- [4] 刘庆红.水利工程项目中的防洪墙施工工序及技术要点[J].工程建设与设计,2021(09):83-85.
- [5] 黄江南.解析水利水电工程建筑中混凝土防渗墙施工技术[J].建筑工程与设计,2023(08):23.

水力部件翻转台设计研究

侯立巍, 顾为柏, 杜阳阳, 周铁铮, 童俊力, 赵佳禹

(中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要 为提升水力部件的抗磨损、抗腐蚀能力, 保障水力系统设备运行稳定, 本文针对水力部件翻转台设计方案开展研究, 提出了水力部件翻转台的设计方法, 同时基于水力部件翻转平台的功能要求, 重点研究了支座的稳定性设计、支座的受力分析及抱箍与抱箍轴的强度校核要点, 以期为水力部件翻转台的实际设计与应用提供参考, 进一步提升水力系统辅助设施的运行稳定性。

关键词 水力部件; 翻转台; 支座; 抱箍; 安全支架

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.036

0 引言

随着水力机械向大型化、高效率方向发展, 部件尺寸与重量持续增加, 这意味着对于翻转设备的稳定性、准确性以及自动化程度都有了更高要求。水力部件翻转台作为适配此类需求的专用设备, 可通过机械结构和控制系统实现部件翻转、定位、姿态保持等功能, 能在一定范围内解决传统翻转方式的弊端。因此, 开展水力部件翻转台的设计研究, 优化其承载能力、翻转角度控制精度与操作安全性, 能提高水力机械生产效率, 提高产品质量, 降低作业风险。

1 水力部件翻转台设计概述

本设计专为泰山核电站主泵水力部件维修翻转场景开发, 是适配该核电站主泵水力部件维修作业的专用设备。

核电站反应堆主冷却剂循环泵(简称核主泵), 被誉为反应堆冷却系统的“心脏”, 其核心功能是克服主冷却剂的流动阻力, 保障循环流量稳定。核主泵作为核电站主回路中唯一的能动旋转设备, 其稳定运行直接关系到整个核电站的安全运营。而水力部件即主泵转子组件, 是核主泵的核心构成部分, 在电厂大修期间, 常需对其进行解体检修。拆出水力部件以后会带有一定的放射性污染, 所以其维修工作要比一般的维修工作更难。在解体过程中, 需要先将整个水力部件竖直放置, 并拆卸掉一部分, 然后将其翻转180°进行拆卸, 此类翻转操作需反复进行多次。此外, 随着零件的逐步拆除, 水力部件的重心会随之发生动态变化, 也就意味着翻转的转矩、翻转的功率都会随之发生变化, 这就对翻转设备提出了更高的要求^[1]。

2 水力部件翻转台设计要点

2.1 翻转台参数

基于泰山核电站主泵水力部件重量大、体积大的特点^[2]。在翻转台上进行了围绕“结构稳定、适配性强”设计目标展开的相关参数设定及试验验证, 翻转台设计图如图1所示。在主体结构的设计上, 先用高强度构件制作出笼架并考虑进行水力部件的重量和体积比的基础上再做力学分析, 通过分析计算出各种不同重量的部件翻转时所受的力, 并且保证在该过程中整个框架可完全承载各个翻转部件的总重, 不出现因为受力不均造成的结构变形等问题。此外, 为降低操作风险, 在翻转执行阶段需额外设置缓冲装置, 通过缓冲装置吸收翻转过程中的冲击力, 防止对翻转台本体或水力部件造成损伤。具体翻转台参数如表1所示。

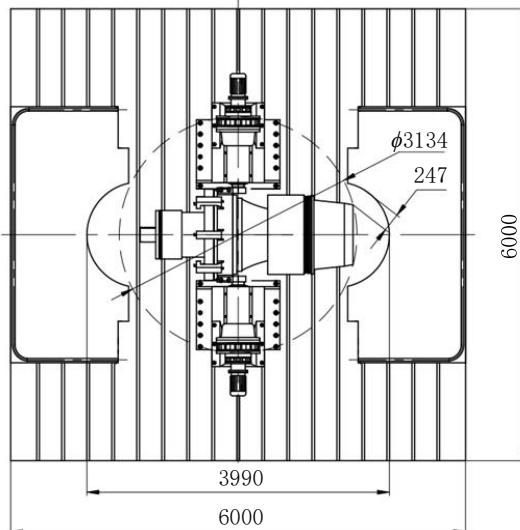


图1 翻转台设计图

表 1 翻转台参数

项目	数值 / 描述
主体尺寸 (长 × 宽 × 高)	6 000×6 000×2 800
操作台尺寸 (长 × 宽 × 高)	3 400×3 410×1 782
总重	11 274 kg
滑轨长度	6 m×2
翻转角度	0 ~ 180 度
最大翻转扭矩	12 000 N·m
制动扭矩	20 000 N·m
翻转速度	0.28 rpm
功率	2.2 kW×2 (备用 1 台)

2.2 支座的稳定性设计

支座的稳定性是保障水力部件翻转过程安全、部件完好的关键, 支座稳定性设计过程中, 需从结构材料选型与功能机制两方面重点突破, 确保满足核主泵水力部件维修的严格要求。

一方面, 需精准匹配支座的结构形式与制作材料。由于水力机械部件自重较大, 在翻转的过程中会产生一些复杂力矩, 所以选用高质量的钢或者合金为支座材料, 并依靠材料本身力学性能来抵挡翻转过程中的巨大荷载, 如此避免支座发生变形或者断裂。同时, 针对部件的重量分布及受力的特点, 合理设计出适合该工作的支座结构, 保证传给组件上的荷载均匀, 以提高承载的稳定性。另一方面, 需为支座设计自适应调整与平衡机制, 并配套减振缓冲功能。在支座设计中, 需设置可调节支撑点, 或安装液压、气动等自动调节装置, 能根据维修需求灵活调整支座的角度与位置, 确保翻转过程中部件始终处于平衡状态; 同时, 为削弱翻转时的振动冲击对支座的损害, 需在支座关键部位加装减振垫或缓冲装置, 通过吸收振动能量, 减少冲击对支座及翻转台整体运行的影响, 全面保障稳定性与安全性^[3]。

2.3 支座的受力分析

在支座受力设计过程中, 支座的受力分析需依托设计文件与实际运行工况开展。分析人员首先需构建设计图纸模型, 明确支座的结构参数、材料型号及承载要求等核心设计指标, 为后续受力计算提供基础依据。本次分析针对 Q235 材质支座, 结合其在支架系统中的

安装位置与承载功能, 展开系统性受力核验。在支架运行过程中, 支座承受的荷载需通过力学计算精准界定, 所有外部应力均集中传递至支座的轴承座部位, 该部位的受力由抱箍自身重量与所承载工件重量共同构成, 经核算其总受力值为 57 513.3 N。为确保受力分析的准确性, 分析人员采用有限元分析方法, 搭建与实际工况一致的力学模型, 对轴承座及支座整体的应力分布情况进行模拟计算。有限元分析结果显示, 支座的应力分布呈现明显的集中特性, 应力最高点集中于轴承座与支座主体的连接部位, 该点的应力值为 23.1 MPa。为验证支座受力的安全性, 分析人员调取 Q235 钢材的力学性能参数, 其抗拉强度标准值为 370 ~ 500 MPa, 取最小值 370 MPa 计算安全系数, 即 $S=370/23.1=16$ 。分析人员对比设计规范中关于支座安全系数的要求, 确认该支座 16 的安全系数远超最低限值, 表明支座在 57 513.3 N 的荷载作用下, 不会发生拉伸破坏或塑性变形, 完全符合支架系统的受力设计要求。

2.4 抱箍及抱箍轴强度校核

2.4.1 抱箍的强度校核

因抱箍需要支撑的总体重达 57 513.3 N, 故对抱箍结构以及抱箍材料要求相对较高, 为检验设计合理性, 通过有限元数据来模拟抱箍工作过程中不同应力的工况, 最后得出抱箍能够承受的最大应力值。由上述模拟分析可得, 在抱箍的设计选材上, 采用 304 不锈钢最为合适, 其抗拉强度达 515 MPa。而根据受力情况分析可知, 抱箍的应力集中峰值得到有效控制, 并且处于合理的范围之内, 即 $55.6 \text{ MPa} < \text{抗拉极限强度}$, 抱箍的工作应力小于实际运行最大值。此外, 从抱箍运行的安全性角度而言, 抱箍的安全系数 $S=9.3$ 大于抱箍工作安全系数临界值 7, 在实际生产过程中抱箍是有足够的安全余量的, 有效避免过载导致的结构损坏, 在抵抗疲劳效应方面也具有较高的实用价值^[4]。

2.4.2 抱箍轴的强度校核

为确保抱箍轴在实际工况下的结构可靠性, 设计人员围绕抱箍轴的强度参数展开专项分析, 通过强度模拟与数值计算相结合的方式, 系统掌握抱箍轴投入使用后的受力条件及运行状态, 具体分析结果如表 2 所示。

进一步对安全系数展开分析后可知, 抱箍轴具备较高的结构强度, 且安全裕量充足, 能够稳定应对多种工况条件下的运行需求, 从强度层面为其长期可靠工作提供了保障^[5]。

表2 抱箍螺栓的强度校核参数

序号	参数 / 项目	数值 / 描述
1	螺栓规格	M30*300 (8.8 级)
2	螺栓数量	4 颗
3	抗拉强度 (σ_b)	800 N/mm ²
4	屈服强度 (σ_s)	640 N/mm ²
5	工件最大重量 (G)	5 868.7kg
6	抱箍抱紧力设定 (F1)	$3G=17\ 606.1\ kg \approx 172.5\ kN$
7	螺栓拉力 (F2)	$F2=F1=172.5\ kN$ (注: 原文)
8	螺栓半径 (r)	13.5 mm (M30 螺栓, 半径为直径的一半)
9	螺栓拉应力 (σ_1)	$172.51\ 000/(43.14*13.5^2)=75.36\ N/mm^2$
10	安全系数 (n1)	$\sigma_s/\sigma_1=640/75.36 \approx 8.5$

2.5 抱箍螺栓的强度校核

抱箍螺栓作为水力部件翻转台抱箍结构的核心紧固构件,直接承载抱箍传递的工件重量及翻转过程中的动态荷载,其强度可靠性是避免翻转过程中部件脱落、晃动等安全事故的关键保障。本次校核以秦山核电站主泵水力部件最大重量为基础,结合翻转台运行时的受力特性,确定螺栓需承受的抱箍抱紧力及拉力载荷。校核过程中先明确螺栓规格、数量等基础参数,再通过力学公式计算螺栓拉应力,结合材料屈服强度核算安全系数,确保螺栓强度满足翻转台在重心动态变化、最大荷载等严苛工况下的使用要求。

2.6 安全支架的设计

根据本项目的相关要求以及安全支架实际工况,采用两套独立安全支架的设计方案,每套安全支架系统包含4件构造支架单元。在支架单元进行设计时便对其设置了微调的功能,利用系统所配装的安装调节螺栓来实现一定的高度变化,在不同工况条件当中能够更好地满足支架运转的要求,并保证支架运转之后可以达到理想的效果。在进行翻转之前,将支架台移动到对应的位置,并进行支撑,保证翻转台的受力稳定性,在这个过程中的操作步骤很重要,可预防翻转作业过程中意外事故的发生。此外,为了能够提高支架系统的安全性,在设计过程中充分考虑现场安装误差以及结构变形的不确定因素,对于每套支架设计均

采用高强度的结构进行制造,而对于关键连接位置采用加工精力的方式以及放松措施应对整体性提高其支撑能力,而微调机构在垂直设计方向考虑高度调节的需求,设计了一定水平的微调节功能,从而应对基础不平整的现象出现。在进行翻转作业之前,操作人员需根据规程做好支架的定位以及锁紧、荷载确认,并且采用可视化标记以及限位装置进行验证,提高支撑结构的受力准确点。同时,支架系统预留了监测接口便于后续加装传感器,实现对支撑状态的实时监控与预警。整套设计兼顾安全性、可操作性与可维护性,提升重型设备翻转作业的稳定性和施工效率。

2.7 操作台设计

在操作台主体结构设计中,操作台主体结构被分成了两个对称的半体,两者的尺寸分别为长1 700 mm、宽1 400 mm,整体总重量控制在133 kg以内,便于后期的搬运与安装操作。在两个半体操作台的安装过程中,在并拢状态下使用锁扣配合结构实现紧固连接。对于翻转台而言,则是采用旋转的方式进行操作台的位置调节,在松开锁定的状况下,可以用手推动,从而使得两个操作台沿一条12 m长、9 kg/m负荷量的轻轨平滑移动到指定的位置。在设计该轻轨时,通过轨道压板与T型槽螺钉牢固固定在基础面,确保操作台移动过程中满足平稳性要求。

3 结束语

水力部件翻转台作为核电站主泵等大型水力机械维修中的关键辅助设施,其设计合理性直接决定了维修作业的安全性、效率及部件完好性。本文针对秦山核电站主泵水力部件维修需求,探究了翻转台结构稳定与适配基本目标,从参数设定、支座稳定性设计及抱箍与抱箍轴强度校核方面总结关键点,并且通过有限元分析等方法验证支座、抱箍等结构安全裕量。

参考文献:

- [1] 孔令义. 大型贯流式水轮机调速器机械液压系统设计[J]. 今日制造与升级, 2022(05):31-33.
- [2] 潘凯, 沈浩. 水利泵站供配电设计中自动化设备的应用研究[J]. 内蒙古水利, 2021(09):75-76.
- [3] 赵学贤. 某水利枢纽电气优化设计研究[J]. 新型工业化, 2021,11(01):151-152,161.
- [4] 徐海林. 淮东水利枢纽泵闸改扩建工程电气主接线及设备选型设计[J]. 机电信息, 2020(11):9-11.
- [5] 李显蓉, 任海霞, 李大伟. 《水利水电工程钢闸门设计规范》修订探析[J]. 东北水利水电, 2020,38(06):55-58,68,72.

输配电线节能降耗技术研究

张宝才¹, 于哲²

(1. 国网吉林省电力有限公司白山市城郊供电公司, 吉林 白山 134300;
2. 国网吉林省电力有限公司白山市江源区供电公司, 吉林 白山 134700)

摘要 本文聚焦输配电线节能降耗技术, 系统分析了输配电线存在的电阻、铁损、附加及其他损耗问题, 以及相应的解决思路, 并深入探讨了各损耗类型的形成机理与针对性的优化方向, 然后阐述了节能降耗关键技术, 包括高效输电技术、低损耗材料与设备以及相关的运行管理与控制, 通过相关的理论测算与工程案例验证了技术的可行性, 以期对推动电网低碳化的发展有所裨益。

关键词 输配电线; 节能降耗; 电网优化; 低损耗材料

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.037

0 引言

输配电线承担着连接发电端与用电端的关键作用。据统计, 我国电网年供电量超过 8 万亿千瓦时, 但输配电环节的损耗长期占发电量的 5%~8%, 这一比例不仅直接影响电网运行的经济性, 更与国家“双碳”战略目标紧密相关。具体而言, 输配电损耗既包含导线电阻、变压器铁损等技术型损耗, 也涉及管理粗放导致的额外能源浪费, 降低输配电线的能耗, 对于提高电网运行效率、实现“双碳”目标具有重要的现实意义。基于此, 本文重点研究了输配电线节能降耗的相关技术, 旨在通过系统性优化技术路径与管理策略, 为电网低碳化发展提供支撑。

1 输配电线能的理论基础

输配电线运行过程中的能量损耗主要存在两种类型, 其中技术性损耗占据绝大部分比例, 另外还存在管理性损耗。就技术性损耗而言, 首先是导线电阻造成的损耗, 主要是由于当电流在导线中流动时, 导体本身存在电阻(用 R 表示), 根据焦耳定律会产生热量, 这部分损耗是线路能量损失的主要来源。导线的电阻大小和其使用的材质、横截面积的大小以及导线的长度都有直接关系。其次是变压器产生的损耗, 其中包括变压器在空载状态下的损耗以及变压器带负载运行时的损耗。最后是无功功率导致的损耗, 就是电网里像电动机这类感性负载, 在运行过程中需要消耗无功功率来维持磁场, 这会使得线路中的电流增大, 从而间接造成导线电阻损耗的增加。

2 输配电线中的能耗问题

2.1 电阻损耗

电阻损耗通常由线路自身的阻抗特性所引发, 电阻损耗与电流强度的平方成正比关系, 当线路处于高

电流负荷状态时其损耗量会显著攀升。当前, 输配电线普遍采用铝导线与铜导线作为传导材料, 铝导线具有质量轻、造价低的显著优势, 但导电过程中产生的电阻值相对较高。对此, 可通过采用多股导线并联连接、扩大导线横截面积等技术手段来降低电阻损耗。此外, 还可借助超导线在特定温度区间内实现电阻归零的特性, 从而达成零损耗传输目标。

2.2 铁损

在变压器、电动机等电气设备的运行过程中, 其内部产生的铁损主要由涡流效应引发的能量损耗和磁滞现象导致的能量损耗这两部分构成。铁芯内部感应生成的涡流是导致涡流损耗的核心成因, 而采用硅钢材质及层叠式铁芯结构可有效抑制涡流效应、降低相关损耗; 磁滞损耗则是在交变磁场作用下, 铁磁材料内部因磁畴转向摩擦而消耗的能量。为降低包含铁损在内的整体输电损耗, 可应用静态无功补偿、柔性直流输电等先进电力电子技术, 通过提升电能传输效率、优化电力流向的精准管控, 实现更高效的能源输送^[1]。

2.3 附加损耗

附加损耗主要涵盖漏电导损耗与谐波响应损耗等类别。漏电流损耗源于绝缘材料自身特性, 其大小会随着环境温度和湿度的变化而波动, 进而引发漏电流现象; 谐波损耗则是由于整流器等非线性负载导致电流波形发生畸变, 从而产生额外发热。为降低此类附加损耗, 可以采用静态补偿、柔性直流传输等先进电力电子技术手段, 通过提升电能传输效率、优化电力流控制与管理, 实现更高效的能源传输过程。

2.4 其他损耗因素

除上述损耗外, 还存在导线温度效应、空气阻力等其他影响因素, 在输配电线设计阶段, 需全面考虑

温度等环境条件,合理选择导线材质与规格标准,以确保不同运行工况下的能源利用效率。此外,线路的长度设置与空间布局方式同样会对整体能耗水平产生一定影响,针对长距离电力输送场景,采用特高压等高压传输技术能有效降低线路阻抗损耗。同时,通过对线路路径规划与塔间距的优化设计,不仅可减轻对地线的电磁冲击,还能显著减少线路运行过程中的附加能量损耗。

3 输配电线节能降耗的关键技术

3.1 高效输电技术

特高压输电技术通过显著提升电压等级来降低线路电流,从而有效减少 I^2R 损耗。理论测算显示,±800 kV 直流特高压输电的损耗仅为 ±500 kV 的约 40%,而 ±1 000 kV 交流特高压的损耗较 500 kV 交流降低约 60%。紧凑型输电与同塔多回技术是实现空间集约化降损的有效方案:紧凑型输电通过取消相间接地构架,将三相导线集中布置于同一塔窗并缩短相间距离,既能降低导线间的电磁耦合损耗,又可将线路走廊宽度缩减 30% 以上;同塔多回输电则是在单根杆塔上架设 2 回及以上线路,通过共享杆塔基础与土地资源,降低单位输电容量的建设能耗。

串联补偿技术是远距离输配电线的关键优化手段,该技术通过在输电线路中配置补偿电容或电感元件来调节等效电抗,可显著降低电网损耗并提升系统可靠性与输送容量。由于导线阻抗效应限制了远距离输电能力,串联补偿能降低线路总电抗,从而延长输电距离并提升大容量输送水平。例如:在电网改造工程中,设计人员采用单塔多环布线方案,通过优化线路空间布局大幅减少输电通道数量,有效节约能源成本。

为进一步提升能源利用效率,需合理选用输配电线材料:铝合金导线凭借高电导率与轻量化特性,可在电力传输过程中降低电阻并减少能量损耗,实现更高效的能源输送;高温超导线在极低温度环境下可实现零电阻传输,能最大限度降低线路能量损失,在提升配电系统效率与降低整体能耗方面展现出巨大潜力。将这类新型材料应用于电力输配线路建设,是达成节能目标、增强电网基础设施可持续发展能力的重要举措^[2]。此外,传统固定运行模式易因功率负荷波动导致线路损耗增加,为此需根据实时负荷变化动态调整设备参数,通过引入智能调度系统并结合实际工况实施动态负荷调控与最优功率分配,可显著提升线路运行效率,有效降低传输损耗。

3.2 低损耗材料与设备

碳纤维复合芯铝绞线(ACCC)采用轻质高强的碳纤维复合材料替代传统钢芯作为内层支撑,外部缠绕

高导电性能的铝线。其核心优势体现在三个方面:首先,碳纤维材料无磁损耗且热效应微弱,使导线运行温度较钢芯铝绞线(ACSR)降低 10~15 ℃,电阻损耗相应减少约 6%^[3];其次,具备更高的抗拉强度,支持更大跨距设计,从而减少杆塔建设数量;最后,材料可循环利用,契合绿色制造理念。大截面导线通过增大单根导体的横截面积,直接降低单位长度的电阻值,有效减少电流通过时产生的发热损耗。在输配电线设计中,选用大截面导线不仅能显著减小电压降,降低线路损耗并提升传输效率,还能在同等负载条件下保持更低阻抗,承载更大电流,从而增强电力系统的可靠性与安全性。为确保大截面导线的长期稳定运行,需综合考虑导线的力学特性与周边环境条件,并根据电网负载的发展趋势,对线路截面实施动态调整,以满足未来电网升级需求。

在节能金具与低磁材料应用方面,传统铁磁材质金具因磁滞和涡流效应会产生额外损耗。解决方案是采用铝、铜合金或低磁钢等材料制造金具,从根本上消除磁损耗;同时优化金具结构设计,降低风阻与机械损耗。鉴于铁磁材料的导电性能通常处于 250~1 000 s/m 区间,而铜与铝的导电能力高达 1 s/m 以上,因此在金具选材方面优先考虑低磁导特性的铜合金、低磁钢等材料,这类材料能够显著降低导线传输过程中的能量损失,实现节能降耗的目的。在制造线路连接金具时建议选用具有高强度与耐热特性的铝合金材料作为基础原料,通过挤压成型工艺制作并沟线夹、铝接线夹等非磁性金属组件,从而优化输配电系统的整体布局结构。在平衡生产成本的基础上,通过采用剪切型金具与低磁材料组合制造无磁金具,既能降低生产投入,又能提升经济效益。

低损耗变压器的损耗占电网总损耗的 20%~30%,传统硅钢叠片铁芯变压器存在空载损耗高、噪声大、效率低等问题,而新型非晶合金铁芯变压器的空载损耗仅为传统产品的 20% (例如 S11 系列相比 S9 系列,空载损耗降低 30%~40%,空载电流减少 70%~80%)。此外,自耦变压器与智能调压变压器也是重要发展方向,为降低包括无功功率在内的输电损耗,应根据现场运行条件合理选取匹配的补偿方案,通过精准判定补偿位置和补偿容量,有效保持系统电压的平稳性,从而达到提高能源利用效率的目的。以典型输电线路为例,可实施分层无功补偿方法,构建起 110 kV、220 kV、330 kV 三个电压等级的阶梯式补偿能力配置,形成三级差异化补偿能力,这样的方式既能提升电容器使用效率,避免过补偿现象,又能有效减少输配电线损耗。

优化无功配置还需重点关注补偿装置的柔性与响应速度,特别是在负载波动剧烈的场景下采用快速响应式无功补偿技术,可更好地适应负载动态变化,将分布式电源与储能系统有机结合能进一步提升电网的灵活性与运行效率,从而建立完整的输配电线路无功控制体系,同时需实时监测电力网络运行状态,并结合负载预测模型动态调整电容器工作参数,实现既提升输配电线路的供电质量,又延长装置使用寿命,降低设备故障率^[4]。

3.3 运行管理与控制

动态增容技术依托导线温度、风速、日照强度等参数的在线监测系统,结合热平衡模型实时计算线路的最大安全载流量,在不更换现有导线的前提下提升输电容量。该技术避免了过度建设输电线路,并通过挖掘现有设施的潜在传输能力,间接降低了电网建设的能源消耗。

无功补偿与电压优化通过在变电站及线路关键节点配置并联电容器,补偿感性负载产生的无功需求,将系统功率因数从0.8提升至0.95以上,可使线路电流降低约15%~20%,显著减少电阻损耗。同时,通过调节变压器分接头、优化环网运行模式等措施,将电压稳定控制在合理范围(如10 kV线路电压偏差 $\leq \pm 5\%$),防止因电压过低导致电流异常增大。无功管理是输配电系统节能的关键环节,当前我国电网企业普遍以0.9为基准标准,在电网中加装电容补偿装置以改善运行状况、降低无功损耗。选用无功管理装置时需重点关注其柔性与响应特性,特别是在负载波动剧烈的场景下,采用快速响应式无功补偿技术可更好地适应负载动态变化。将分布式电源与储能系统有机结合,能有效提升电网的灵活性与运行效率,从而构建完善的输配电线路无功控制体系^[5]。此外,需实时监测电网运行状态并结合负载预测模型动态调整电容器工作参数,实现最优无功分配,在改善电能质量的同时延长设备使用寿命,降低故障发生率。

智能电网与需求侧管理则通过智能电表与物联网技术,实现了实时监测线路损耗热点,自动触发报警或动态调整潮流分布;结合峰谷电价机制引导用户错峰用电,平滑负荷曲线,缓解电网高峰时段的传输压力与损耗。例如:广东电网通过实施分压、分区、分线、分台区的四分线损管理与精细化统计分析,已将年度线损率控制在4%以下。针对电网谐波损耗问题,高效的谐波治理至关重要,输配电线路中的非线性负载会产生大量非基波频率分量,这些干扰因素会导致设备

过热、损耗增加,甚至引发电网失稳。常用的谐波控制方法是在电网中安装滤波装置,主要分为无源滤波与有源滤波两类:无源滤波器通常由电感、电容及电阻组成,可针对性滤除特定频率的谐波;有源滤波器则能实时检测电网谐波并生成反向电压,动态消除谐波干扰^[6]。实际运行经验表明,大量谐波会降低电网输电效率,并对变压器等用电设备造成严重损害,对此,可在变压器低压侧加装滤波器,实现无源电力滤波器与无功补偿电容器的并联运行,其优势在于低压侧便于滤波器安装,可即时抑制对后续设备的谐波冲击;同时采用被动式电源滤波技术能有效控制电网谐波,减少电压、电流波形畸变。但需注意的是,并联运行时电容与滤波元件的相互作用可能影响系统稳定性,因此必须重点关注以下环节:一是分析电网并联运行时的负荷谐波特性,选择适配的无源滤波方案控制主要谐波成分;二是合理配置电容与滤波参数,确保获得最佳功率因数及负荷控制效果;三是需综合考虑电网电压等级标准、系统运行频率以及实际工作状态,确保电容器组与滤波设备的各项技术参数与电力系统运行特性相协调,避免因参数不匹配问题引发设备故障或功能性能降低的风险。

4 结束语

实现输配电线路节能降耗需要技术、设备、管理三个方面协同合作:特高压与紧凑型技术能够解决远距离低损传输的难题;新型材料与低损耗设备可以从源头上减少能量的浪费;动态管理与智能控制则能对线路运行过程进行优化。随着先进技术的不断发展,输配电线路节能降耗将朝着更加绿色、高效的方向发展,从而为我国“双碳”目标的实现提供有力的支撑。

参考文献:

- [1] 谢硕,潘小欢,梁建利.基于AI的电力系统输配电线路节能降耗技术[J].电力设备管理,2025(18):270-272.
- [2] 陈楠.基于智能化监测系统的电力配电线节能降耗技术研究[J].自动化博览,2025,42(04):86-89.
- [3] 陈仁胜.输配电线路中的节能降耗技术与管理措施[J].大众用电,2025,40(03):36.
- [4] 朱玲艳,吕洁,林超.新时期电力输配电线路节能降耗技术分析[J].电工技术,2024(S2):421-423.
- [5] 刘吉伟.输配电线路中节能降耗技术的应用研究[J].电动工具,2024(06):24-26.
- [6] 刘磊.节能降耗技术在电力输配电线路中的应用[J].光源与照明,2024(10):168-170.

机械结构轻量化与性能优化路径分析

田皓, 陈晓红, 王帅彪

(辽宁科技大学, 辽宁 鞍山 114044)

摘要 在当代机械工程领域, 随着产品性能指标、成本控制及环境可持续性要求的持续提升, 如何在确保机械结构强度与功能可靠性的前提下, 通过优化设计实现结构减重与性能提升, 已成为亟待解决的关键技术问题。结构轻量化与性能优化设计的协同推进, 不仅能够突破传统机械设计的技术瓶颈, 更有助于降低系统能耗、减少资源浪费, 从而显著提升整体经济效益。基于此, 本文聚焦机械结构设计的核心环节, 系统探讨材料选型优化、轻量化设计方法及先进制造工艺等关键技术路径, 旨在为相关领域的技术创新提供参考。

关键词 机械结构; 轻量化; 材料优化

中图分类号: TH12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.038

0 引言

实现机械结构轻量化与性能优化是一个系统性的工程。核心目标是在合理控制成本的前提下, 通过材料、设计、工艺等协同创新, 减少结构自重, 也能提升强度、刚度以及疲劳寿命等关键性能指标。在材料方面, 优化复合材料、金属材料等的应用。结构轻量化设计中可以进行拓扑优化、尺寸优化、形状优化等。在制造工艺中, 应用表面处理工艺和轻量化连接工艺等各种先进工艺, 实现轻量化的设计要求。通过综合应用, 可实现机械结构轻量化与性能优化, 促进机械工程的进一步发展。

1 机械设计中的材料优化

1.1 复合材料的优化

复合材料以纤维为增强相, 树脂为基体, 具有轻质高强、可设计性强的特点。常用的复合材料有碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料和混合复合材料。碳纤维复合材料, 密度仅为碳钢的1/4, 比强度是高强度钢的3~5倍, 而且有着良好的疲劳性能和抗腐蚀性能。在汽车领域, 高端跑车采用碳纤维车身, 减重可达30%~40%, 但成本较高。玻璃纤维复合材料成本仅为碳纤维复合材料的1/5, 比强度优于铝合金, 有着较强的耐腐蚀性, 适用于工程机械外壳、船舶甲板等非核心承力部件, 可减重20%~30%, 也能有效降低制造成本^[1]。混合复合材料是将碳纤维与玻璃纤维、金属纤维混合使用, 可在关键承力区域使用碳纤维, 非承力区域使用玻璃纤维, 有效平衡性能和成本。

1.2 金属材料的优化

金属材料进行轻量化应用, 可以实现有效减重。传统机械结构多采用普通碳钢, 而高性能金属材料可满

足轻量化的需求。先进高强钢是通过精密的微观组织控制实现高强度和高韧性的一种材料, 有着极高的强度, 抗拉强度可达1 000 MPa。某些级别的高强钢, 在碰撞时会吸收大量的能量, 适用于汽车防撞结构, 而且相比于铝合金和复合材料, 它有着明显成本优势, 在汽车车身防撞梁工程机械的臂架中得到广泛应用^[2]。铝合金密度仅为碳钢的1/3, 比强度是碳钢的1.5~2倍, 具有良好的加工性和耐腐蚀性, 在笔记本电脑外壳以及汽车发动机、缸体、车轮、全铝车身框架中得到了一定应用。镁合金密度仅为碳钢的1/4, 是目前实际应用中最轻的金属结构材料, 具有极高的比强度、优异的阻尼减震性能和良好的电磁屏蔽性, 但耐腐蚀性比较差, 需要通过表面处理进行改善, 且成本比较高, 限制了大规模的应用, 多应用于汽车座椅骨架、航空航天仪器支架等领域, 效果显著。钛合金密度为碳钢的1/2, 比强度居金属材料之首, 同时有着优异的耐高温和耐腐蚀性, 可在400~500℃下长期稳定工作, 在海水和氯化物环境下极其稳定, 在航空航天、化工与海洋等领域的应用广泛。不过钛合金的原材料和加工成本都很高, 加工难度大, 也限制了其广泛应用。

1.3 新型材料的优化

新型材料的应用, 能实现机械结构的轻量化和性能优化。可应用多孔材料与泡沫金属, 主要通过粉末冶金、发泡工艺制备, 密度为传统金属的1/3~1/2, 具有良好的吸能和减震性能。工程塑料与改性塑料也得到了一定应用, 如聚碳酸酯、增强聚丙烯等材料, 密度约为金属的1/2~1/3, 通过纤维增强后, 强度可接近普通钢材, 适用于机械外壳、齿轮等非核心承力部件。

2 机械结构轻量化的设计优化

2.1 拓扑优化

拓扑优化是基于荷载与边界条件,通过算法求解结构的最优材料分布,是结构创新的核心工具。拓扑优化不仅能改变结构的外形,同时也能通过在设计空间内合理分配材料,确保材料最优布局,满足最大强度和刚度的要求。常用的方法有变密度法和水平集法。变密度法指的是将设计空间离散为有限元网格,并为每个单元赋予一个假想的密度变量,通过优化算法将单位密度推向0或1^[3]。最终结果中,中间密度的单元通过插值模型转化为实体材料。水平挤法是通过一个更高维的水平集函数的界面演化,来描述结构边界的变化,它能够产生边界光滑的优化结果,但计算相对复杂。拓扑优化在设计机械人臂、机床底座等设计中的应用比较广泛,可以打破传统思维定式,产生革命性的创新设计,实现大幅度的轻量化。

例如:在挖掘机臂架的设计中,可通过拓扑优化得到更加合理的结构形态,有效去除其中的无效材料,减轻臂架的重量,也能保障其在工作过程中的强度和刚度。工程机械传动系统主要包括齿轮箱、轴承座、传动轴等一些关键部件,通过拓扑优化设计,合理调整这些部位的材料分布情况,实现减重,并提高整体的承载性能。而且拓扑优化也能改善传动系统的振动特性,减少因振动引起的故障,提高系统的可靠性。在工程机械框架中采用拓扑优化设计,设计人员可以根据荷载分布,合理地优化框架结构,去除多余的材料,达到轻量化的目的。

2.2 尺寸优化

尺寸优化是在结构形状和拓扑形式确定以后,对关键尺寸参数进行优化,使结构满足性能要求前提下,实现尺寸最小化。将各类尺寸参数定义为设计变量,在满足应力、位移等约束条件下,寻找使目标函数最优的尺寸组合^[4]。可输出一组最优化的尺寸参数表,得到合理应用。例如:在壁厚设计中,可通过计算不同壁厚下的应力与变形,确定最小允许壁厚。在截面尺寸设计中,优化截面形状与尺寸。在相同重量下提升惯性矩,如空心轴相比实心轴,相同强度下可减重50%以上。在筋板设计方面,优化筋板的数量、高度和间距,避免筋板过密或过高,导致材料的浪费,同时也能有效提升结构强度。在实施过程中,可结合仿真软件和优化算法,建立尺寸参数与性能指标的映射关系,求解最优参数组合。

2.3 形状优化

形状优化技术主要通过改变结构的几何形状优化其性能,使其在特定的力学约束条件下,结构的受力分布可以实现最优,在框架结构、梁结构、壳体结构等的设计中应用十分广泛,可以合理分配材料,确保结构在受力情况下,既能保证强度,又能避免不必要的材料浪费。常见的形状优化方案有仿生结构设计、流线型设计和过渡结构优化。在仿生结构设计中,蜂窝结构具有轻质高强的特点,在车身内饰板中,可采用蜂窝夹层结构,相比实心结构减重60%以上,显著提升抗弯刚度。流线型设计可应用于高速运动部件中,如汽车车身、飞机机翼,可优化轮廓曲线,减少空气阻力,降低结构重量。将过渡结构进行优化设计,如将结构的直角、尖角改为圆角、倒角或渐变过渡,减少应力集中,避免局部疲劳失效,也能减少材料的用量^[5]。

例如:在汽车领域中,形状优化技术常应用于车身设计,通过调整车身的形状,优化材料的分布。同时也能在保障安全性能的前提下,减少车身的重量,提升燃油效率。在建筑领域中应用形状优化技术,可以合理地调整构件的形态,使得结构在满足承载能力的基础上,最大限度地减少材料的使用。

2.4 集成化与模块化设计

集成化与模块化设计可以将多个零件的功能整合为一个零件,减少零件数量与连接结构,从而实现减重和性能的提升。在集成化设计中,可进行功能集成,将分散的功能零件,如支撑、定位、导向等,整合为一体化结构。在汽车设计中,发动机缸盖集成化设计后,采用整体铸造的工艺,零件数量减少60%,整体减重20%,同时也能提升密封性能。简化连接结构,实现集成化设计,通过使用一体化成型替代螺栓连接和焊接,可减少连接部位的重量,同时提升结构整体性和刚度。在模块化设计中,将结构划分为多个功能模块,每个模块内部集成化设计,模块之间通过标准化接口连接,既能实现局部轻量化,又便于装配和维护。例如:在汽车工业中,同一个底盘平台,通过搭配不同的车身模块和动力模块,衍生出了多种车型,极大地降低了研发和制造成本,笔记本电脑内存、硬盘和电池均为独立模块,便于用户升级和维修。

2.5 薄壁化与中空结构设计

薄壁化设计是在满足高度、强度和稳定性的前提下,尽可能减少结构的壁厚。壁厚的减小直接导致材料用量和重量的线性下降,而且通过等强度设计,使

壁厚均匀化，避免局部材料堆积。需要注意的是，刚度与壁厚的三次方成正比，薄壁化会显著降低结构刚度，因此可以通过形貌优化，在薄壁上设计加强筋，使用极少的材料，大幅提升刚度和抗失稳能力。薄壁结构在压力作用下容易发生屈曲，需进行屈曲分析，确保设计载荷高于屈曲临界载荷^[6]。可以通过设置加强筋、折边或填充泡沫来提高稳定性。中空结构设计是将实心或者壁厚结构改造为内部为空心的结构。根据材料力学，弯曲刚度与截面惯性矩成正比，将材料从实体内部移至外部，形成中空截面，可极大地增加惯性矩。

3 机械结构与性能的制作工艺优化

3.1 增材制造

应用增材制造工艺，优化结构轻量化和相关性能。采用分层制造和逐层叠加的方法，直接根据三维CAD模型制造零件，无需模具，可以轻松制造拓扑优化后的复杂有机形状、内部点阵结构和一体化构建，而且材料利用率近乎100%，几乎没有材料浪费，可打印出集成了散热器、导管、轴承座等多个功能的单一零件，实现系统级减重。常用的技术有金属粉末床熔融、定向能量沉积和材料挤出。金属粉末床熔融包括选择性激光熔化和电子束熔化，使用高能束选择性熔化金属粉末床上的特定区域，精度高，表面质量好，可制作极其复杂的结构。定向能量沉积，会通过喷嘴将粉末或丝材送入熔池，同时高能束将其熔化沉积在基板上，可制造大尺寸零件，修复受损部位，实现多材料混合打印。材料挤出，如熔融长丝制作，将热塑性聚合物长丝加热挤出后沉积。

3.2 应用表面处理工艺

表面处理工艺的应用，可有效提升结构的耐腐蚀性和耐磨性，也能避免因防护需求增加额外的重量，从而实现轻量化和防护的双重目标。采用阳极氧化方法，适用于铝合金和镁合金结构，在表面形成一层致密的氧化膜，不显著增加重量，而且提升耐腐蚀性和耐磨性。应用气相沉积法，通过物理或化学方法，在结构表面沉积一层薄膜，重量增加可忽略不计，能够有效提升表面的硬度和耐磨性，适用于齿轮等部件。应用轻量化涂层，如水性涂料和粉末涂料，替代传统溶剂型涂料，可以有效减少涂层厚度和整体的重量。

3.3 轻量化连接工艺

轻量化连接工艺的应用，可替代传统重型连接，减少一些额外增加的重量，而且也能通过一体化连接，

提升结构的整体性。在焊接工艺中，采用激光焊接搅拌摩擦焊，替代传统电弧焊。激光焊接热影响区小、焊缝窄，可减少焊接变形与材料损耗，适用于薄板和异种材料连接^[7]。搅拌摩擦焊无熔化、无飞溅，接头强度高，适用于铝合金结构。另外，也可应用胶接工艺，通过结构胶将两个零件连接，无需连接件，有着良好的减重效果，而且胶接面应力分布均匀，可减少应力集中，适用于复合材料和金属材料的连接。铆接工艺升级，使用自冲铆、盲铆替代传统铆钉。自冲铆无需预先钻孔，可实现薄板快速连接，有效减重，且连接强度高。

4 结束语

在机械设计领域，通过材料选型优化与多尺度轻量化设计方法的协同应用，可显著提升结构性能与能效比。具体而言，采用拓扑优化、尺寸优化及形状优化等先进设计手段，结合高强度轻量化材料的选用，可实现结构减重，同时确保关键性能指标满足设计要求。在制造环节中，通过增材制造技术实现复杂结构一体化成型，配合表面强化处理及轻量化连接工艺，可进一步降低系统重量并提升结构可靠性。随着高强钢、铝合金、复合材料等新型材料的持续突破，以及智能制造、数字孪生等技术的深度融合，未来机械结构设计将在保障功能完备性的前提下，实现减重效率提升、疲劳寿命延长的突破性进展，为工程机械行业向高效、绿色、智能化方向发展提供关键技术支撑。

参考文献：

- [1] 张远兴.汽车机械结构轻量化设计应用与性能提升分析[J].汽车维修技师,2025(14):64-65.
- [2] 斯俊.码垛机机械结构轻量化设计与优化[C]//2025工程技术与材料应用学术交流会论文集.2025.
- [3] 陈茂宏,毛荣欢,樊金宝,等.工程机械产品结构设计与优化研究[J].工程机械,2025,56(07):150-154.
- [4] 陈娟,姜雪燕.探测器机械结构静力学分析与轻量化设计[J].山东工业技术,2024(01):48-53.
- [5] 李明.基于有限元分析的机械结构优化与性能改进[J].数码设计,2024(01):112-114.
- [6] 徐向明.机械结构设计中的创新与优化分析[C]//2025工程技术应用与管理交流会论文集.2025.
- [7] 曹雍华.机械结构优化设计在工程领域中的应用研究[C]//2025人工智能与工程管理学术交流会论文集.2025.

水利工程建设项目施工监理现场控制方法研究

郭之文

(江苏九天工程项目管理有限公司, 江苏 南京 211300)

摘要 本文深入分析了监理现场控制在质量安全保障、资源进度优化、生态社会效益维护方面的核心价值, 系统探讨了质量管控双线并进、进度调控动态平衡、物资设备闭环管理、安全环保刚柔相济的控制方法, 并从人员专业化、流程规范化、制度系统化、监督透明化四个维度提出了切实可行的保障措施, 以期通过构建科学完善的监理现场控制体系, 为提升水利工程建设管理水平、保障工程全生命周期质量安全、推动水利事业高质量发展提供有益参考。

关键词 水利工程; 施工监理; 质量管控; 进度调控; 物资设备

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.039

0 引言

施工监理作为确保工程质量安全的关键环节, 承担着从材料检验、工序验收到进度协调、安全监管的全过程控制职责。当前水利工程呈现出技术复杂度高、建设周期长、质量要求严、生态约束强的特点, 特别是在防洪工程、水资源配置工程、灌区现代化改造等重点领域, 监理现场控制的科学性和有效性直接影响着工程建设目标的实现和水利基础设施效能的发挥, 迫切需要构建系统完善的监理现场控制方法体系。

1 水利工程建设施工监理现场控制的核心价值

1.1 工程质量全程把控, 安全风险有效防范

水利工程施工监理通过建立覆盖材料进场、工序施工、隐蔽工程验收的全链条质量监控体系, 从源头把控工程建设质量, 监理人员对混凝土浇筑温控、钢筋绑扎间距、防渗材料铺设等关键技术环节实施旁站监督和平行检验, 通过现场取样检测、工序质量评定、分部工程验收等手段, 及时发现并纠正施工偏差, 同时监理单位通过审核施工组织设计中的安全技术措施、开展定期安全检查、组织应急演练等方式, 建立主动预防与动态响应相结合的安全管理机制, 特别是在深基坑开挖、高边坡防护、水下作业等高风险工序中, 通过制定专项监理细则和应急预案, 有效降低了安全事故发生概率, 保障了施工人员的生命财产安全和工程建设的顺利推进。

1.2 资源优化合理配置, 进度目标精准实现

施工监理通过运用关键路径法、网络计划技术等现代管理工具, 对工程建设进度实施动态监控和优化

调整, 根据工程特点和施工条件变化, 监理人员协调各参建单位合理配置人力、机械、材料等资源, 通过分析各工序间的逻辑关系和资源需求, 优化施工组织方案, 减少资源闲置和窝工现象, 特别是在中小型水利工程建设中, 监理充分考虑汛期施工限制、农业用水需求等特殊因素, 通过灵活调整施工计划和资源投入强度, 确保关键节点按期完成。在大型水利枢纽工程中, 监理通过建立多级进度控制体系, 将总体进度目标分解到年度、季度、月度计划, 通过定期进度分析会议和纠偏措施, 保证工程建设始终处于可控状态^[1]。

1.3 生态环境严格保护, 社会效益长远维护

监理单位在施工现场控制中始终贯彻绿色施工理念, 通过监督施工单位落实扬尘控制、噪声防治、水土保持等环保措施, 最大限度减少工程建设对周边环境的影响。监理人员定期检查施工场地的洒水降尘设施运行情况、废水沉淀池处理效果、弃渣场覆盖防护措施等, 确保各项环保指标达标。同时监理还对工程建设资金使用情况进行跟踪监督, 通过审核工程量清单、材料采购凭证、变更签证等资料, 防止虚报冒领和资金挪用, 确保专项资金专款专用。在工程完工后, 监理督促施工单位实施植被恢复、生态修复等措施, 使工程建设与生态环境保护相协调, 实现水利工程的长期综合效益。

2 水利工程建设施工监理现场控制方法

2.1 质量管控: 材料工序双线并进

监理人员在材料进场时采取驻场检验与抽样复检相结合的控制方法, 每批次水泥进场前查验出厂日期

不得超过3个月，钢筋原材料须附带质保书和出厂检验报告，监理见证取样时水泥按同厂家同批号每200 t为一个检验批次，钢筋按同炉号每60 t为一个检验批次，取样过程全程录像并在试样上加贴监理专用标识封条，送检时由监理人员和施工方共同签字确认。在工序控制中实行关键部位旁站与一般部位巡检相结合，混凝土浇筑时监理全程旁站记录每车混凝土到场时间、坍落度测试值、浇筑部位和振捣时长。大体积混凝土施工时每2 h测温一次并建立温控曲线图，钢筋绑扎完成后采用钢筋扫描仪抽检保护层厚度和钢筋间距。地基处理后用环刀法检测压实度，每层填筑面积500 m²内不少于3个检测点。灌浆施工时监理现场核查浆液比重计读数和流量计数值，每个灌浆段结束后立即封存灌浆记录仪数据，防止事后修改。通过这些具体可操作的措施确保质量控制落到实处^[2]。

2.2 进度调控：计划协调动态平衡

监理通过周计划检查和日进度跟踪相结合的方式实施进度控制，要求施工单位每周一提交本周施工计划，详细列明每日完成的工程部位、工程量和所需资源，监理工程师每天下午4点前统计当日实际完成情况，与计划对比分析偏差原因，建立进度管控台账。将基坑开挖、混凝土浇筑、闸门安装等关键工序设为里程碑节点，节点完成时间偏差超过3 d即启动预警程序，召集相关单位分析原因并制定调整措施。在资源协调方面，监理每周二组织施工协调会，解决各作业面交叉施工矛盾，协调塔吊、混凝土泵车等大型设备的使用时段，避免窝工等待，汛期来临前45 d监理督促施工单位完成度汛方案编制，提前15 d完成防汛物资储备和应急演练，汛期施工时安排专人收集气象信息，遇暴雨预警提前24 h停止基坑开挖等危险作业，通过排定优先级将有限的晴好天气用于关键线路施工，雨天则安排钢筋加工、预制构件养护等不受天气影响的工作，确保整体进度不因季节因素出现大的偏差^[3]。

2.3 物资设备：采购运维闭环管理

监理在材料设备进场环节设置三道关口严格把控。第一道为资料审查关，供应商须提供近6个月内的产品型式检验报告、3C认证证书复印件和原厂授权书；第二道为外观检查关，监理现场核对产品规格型号、生产批号与资料是否一致，检查包装完整性和产品表面质量；第三道为性能验证关，水泵、发电机等设备进场后72 h内完成试运转，记录振动值、温升、噪声等运行参数。对于施工现场的大型设备实行挂牌管理制度，每台设备悬挂信息牌标明设备编号、检验日期、

维保责任人和下次保养时间，混凝土拌和站每周进行计量标定，偏差超过2%立即调整，塔吊等起重设备每月进行安全检测，钢丝绳、吊钩、制动器等关键部件建立检查记录卡，监理建立设备运行日志，记录每台设备的工作时间、故障情况和维修内容，挖掘机、装载机累计运行达到250 h必须进行一级保养，达到1 000 h进行二级保养，通过定期保养和状态监测，确保设备始终处于良好运行状态，避免因设备故障影响施工进度和质量。

2.4 安全环保：预防监督刚柔相济

监理在施工现场设立安全环保检查站，实行每日巡查、每周普查、每月专项检查的三级检查制度。日常巡查重点关注作业人员安全防护用品佩戴、临边防护、脚手架搭设等情况，发现问题当场指出并要求立即整改，每周三组织各施工队伍安全员进行交叉检查，重点排查深基坑边坡稳定性、高支模体系可靠性、临时用电规范性。每月针对季节特点开展专项检查，夏季重点检查防暑降温、防汛措施，冬季重点检查防冻防滑和消防安全。在环保管控上，监理要求施工现场出入口设置洗车槽，长度不小于8 m，配备高压水枪冲洗车辆轮胎和底盘，施工道路每天上午、下午各洒水一次，大风天气增加洒水频次，裸露土方和砂石料堆采用密目网覆盖，覆盖率达到100%。混凝土浇筑和养护废水经三级沉淀池处理，pH值控制在6至9之间方可排放，施工现场噪声监测点布设在距离居民区最近的施工区域，每周测量一次并记录，超标时调整施工时间或采用低噪音设备。通过这些具体措施的落实，实现安全生产和环境保护的双重目标。

3 水利工程建设施工监理现场控制保障措施

3.1 人员队伍专业化，责任落实常态化

监理单位实行关键岗位人员锁定制度，总监理工程师和各专业监理工程师入场前须在水利部门监管平台完成实名注册，上传身份证、职业资格证书、职称证明等材料，系统自动核验证书真伪并生成唯一编码，同时建立人员信息档案库，记录每位监理工程师的从业经历、项目经验、专业特长等详细信息，为合理配置人员提供数据支撑，确保人岗匹配度达到最优状态。人员变更须提前7天提交申请，说明变更原因和替换人员资质，经建设单位同意后方可更换，每月组织不少于8学时的业务培训，培训内容包括新颁布的技术规范解读、检测仪器操作方法、工程案例分析等，培训结束进行闭卷考试，80分以上为合格，不合格者补

考一次仍未通过则调离岗位。建立监理人员考勤打卡系统，每天上午 8 点和下午 5 点各打卡一次，月出勤率低于 90% 的扣减当月绩效。实行质量责任终身追溯制，总监理工程师在竣工资料上签字并按手印，工程资料永久存档，出现质量问题倒查责任。通过这些刚性措施确保监理队伍稳定和责任落实到人。

3.2 标准流程规范化，信息平台智能化

监理单位编制标准化作业指导书，将监理工作分解为 28 个标准流程，每个流程明确输入条件、操作步骤、输出成果和责任人。作业指导书配套编制检查表单和记录模板，对每个操作步骤设定时间节点和质量标准，形成可量化可追溯的工作闭环，定期根据现场实施情况优化完善流程内容。例如：混凝土浇筑旁站流程包括浇筑前检查模板支撑、测量坍落度、记录浇筑时间、检查振捣质量、留置试块等 5 个必检项目，每个项目都有具体的检查方法和合格标准。建立基于手机 APP 的移动监理系统，监理人员通过手机即可完成现场照片上传、检验批审批、监理日志填写等工作，系统自动记录操作时间和 GPS 定位，确保数据真实性。在拌和站、重要部位安装高清摄像头，接入监理办公室大屏幕，实现 24 h 实时监控，摄像头具备夜视功能和 30 d 录像存储容量，发现异常情况系统自动报警并推送到相关人员手机，利用无人机每周对工程全貌进行航拍，通过影像对比分析工程进展情况。这些信息化手段大幅提高了监理工作效率和管控能力^[4]。

3.3 制度建设系统化，权责边界清晰化

监理单位建立覆盖全过程的制度体系，包括人员管理、质量控制、进度管理、安全监督、资料管理等 12 项基本制度和 35 个实施细则，每项制度明确适用范围、工作程序、责任主体和考核标准。制度体系经过法律顾问审核确保合法合规，定期组织全员学习并进行制度执行情况专项检查，将制度落实情况纳入绩效考核，确保制度从纸面走向实践发挥实效。制定监理工作界面划分清单，明确监理与建设、设计、施工单位的工作界面，例如设计变更由设计单位提出技术方案，监理审核其合理性和对工期的影响，建设单位最终审批，施工单位负责实施，避免职责交叉或空白。建立问题处理闭环机制，发现问题后监理签发整改通知单，限定整改时限一般为 3 d，施工单位整改完成后申请复验，监理复验合格后销项，超期未整改的上报建设单位并在协调会上通报。每季度对监理工作进行量化考核，考核内容包括到岗率、资料完整性、问题发现数量、整改闭合率等 10 项指标，考核结果与后续

项目承接挂钩，通过制度化管理确保各项工作有章可循、有据可查。

3.4 多方联动协同化，监督机制透明化

监理组织每周三下午召开工程协调会，参会人员包括建设单位代表、设计代表、各施工标段负责人和监理部全体人员，会议采用问题清单制，各方提前 1 d 提交需协调解决的问题，会上逐项讨论形成解决方案，会议纪要 24 h 内印发并要求签收。对于涉及设计变更、工序调整等重大事项，建立专题会议制度，邀请相关专家参与论证，在施工现场入口处设立大型公示牌，公示监理单位名称、总监姓名电话、监理工程师分工、监督举报电话等信息。每月更新工程形象进度照片和质量检测结果，建立微信公众号定期发布工程进展、质量安全情况，接受社会监督。在办公区设置举报信箱，每周开箱一次，对实名举报的问题 3 d 内调查核实并反馈结果。通过构建开放透明的监督体系，形成全方位的约束机制，确保工程建设始终在阳光下运行^[5]。

4 结束语

水利工程建设施工监理现场控制是一项系统性、综合性的管理工作，需要科学的方法体系和完善的保障措施作为支撑。通过实施精细化的质量管控、动态化的进度调控、闭环化的物资设备管理、预防性的安全环保监督，结合专业化的人员队伍建设、规范化的标准流程、系统化的制度体系、协同化的多方联动机制，能够有效提升水利工程建设的管理水平和建设质量。未来应继续深化监理制度改革，加强信息技术应用，完善监理服务体系，为实现水利工程高质量发展和现代化水网建设提供有力保障。

参考文献：

- [1] 王祥林, 孙强. 水利工程建设施工监理的现场控制与管理 [C]// 广西生产力学会. 新质生产力与科技发展学术研讨会论文集. 山东龙信达咨询监理有限公司, 2025.
- [2] 王波, 姚立夫. 水利工程施工监理与项目管理关系分析 [J]. 治淮, 2024(11):9-10.
- [3] 穆华晓, 赵紫兵. 水利工程建设施工监理的现场控制与管理 [C]// 贵州煤炭经济 2024 年论文选编. 云南滇沣工程管理有限公司, 2024.
- [4] 柴伟福. 水利工程建设施工监理的现场控制与管理 [J]. 大众标准化, 2023(03):76-78.
- [5] 张胜标. 水利工程建设施工监理技术与管理创新研究 [J]. 科技创新导报, 2021, 18(12):24-26.

水库土坝除险加固及渗流稳定有限元分析

简 铭

(高州市鉴龙水利水电勘测设计有限公司, 广东 高州 525200)

摘要 本文以某水库土坝出现坝体渗漏及坝基透水率超标导致安全余度不足为研究对象, 针对隐患, 先系统制定除险加固方案, 再开展渗流—稳定耦合分析。比选垂直与水平防渗后, 选定高压喷射灌浆垂直防渗墙作为主线措施。随后建立有限元模型, 复核加固后的渗流场与坝坡稳定: 防渗墙显著压低浸润线, 抗滑安全系数同步提高, 指标满足现行规范。本研究取得的成果, 以期为同类水库土坝工程提供具有可操作性的技术路径, 同时也提供了精准可靠的量化分析方法, 有助于推动该领域工程质量的提升与安全保障。

关键词 水库土坝; 除险加固; 渗流稳定; 有限元分析

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.040

0 引言

水库作为骨干水利工程, 在防洪、灌溉和供水等方面承担着不可替代的角色。然而, 受建设年代久远、设计标准偏低、施工质量参差不齐等因素影响, 大量土坝已出现不同程度的病险, 直接威胁运行安全。其中, 渗流异常最为常见, 若持续发展, 坝体渗透变形可能演变为溃坝。因此, 尽快实施除险加固并准确评价渗流稳定性, 已成为当务之急。值得一提的是, 有限元分析方法属于一种行之有效的数值计算方式, 它能够较为精准地模拟土坝的渗流场与应力场, 进而为除险加固设计以及安全评估工作提供科学、可信的依据。

1 工程病险现状

1.1 工程概况

某水库位于珠江流域, 总库容2 850万 m^3 , 属中型工程。大坝为均质土坝, 坝顶高程125.5 m, 最大坝高42 m, 坝顶长380 m。工程1972年建成投运, 多年运行后已暴露多项病险: 一是坝体渗漏。填筑质量差, 干密度仅为1.52 g/cm³, 低于设计值1.65 g/cm³; 渗透系数 1.2×10^{-4} cm/s, 也高于允许上限 5×10^{-5} cm/s。二是坝基透水过强。强风化砂岩坝基透水率 $q=15$ Lu, 远超设计5 Lu, 引发显著绕坝渗漏。三是观测设施缺失。1998年渗流观测系统失效后, 再无实时数据, 安全评估缺乏依据。

1.2 病险成因分析

该水库土坝的病险集中体现在三个方面。其一, 施工质量先天不足。当年采用“边勘测、边设计、边施工”的“三边”做法, 工序衔接缺少系统规划, 现场控制薄弱。填筑料含泥量失控, 峰值达28%, 远超允许范围; 碾压

遍数仅4遍, 比设计少两遍, 压实度明显不足。其二, 坝址地质条件复杂。覆盖层厚约8 m, 清基不彻底, 残留透水体, 为渗漏提供了隐蔽通道, 削弱坝体稳定。其三, 长期运行后老化加剧。护坡块石松动率已达35%, 反滤层失效面积占22%, 防护与排水功能同步退化。

1.3 安全隐患评估

按照《水库大坝安全评价导则》(SL 258-2017)复核后, 大坝主要暴露出三项缺陷。第一, 结构稳定性不足。正常蓄水位122 m时, 下游坝坡抗滑稳定安全系数实测仅1.12, 低于规范要求的1.25, 表明常规运行条件下坝体已潜藏局部失稳风险; 若遇极端工况或长期荷载, 坝坡可能滑动变形。第二, 渗透安全超标。校核洪水位124.8 m下, 坝基渗透坡降实测0.38, 超出允许值0.25达52%; 年渗漏量85万 m^3 , 相当于设计库容的3.0%, 证实坝基存在强透水通道。持续渗漏不仅浪费水资源, 还可能诱发库岸塌陷、管涌等次生灾害, 威胁水库安全。第三, 渗漏削弱效益。年损失85万 m^3 蓄水, 使水库调蓄能力显著下降, 直接降低工程整体收益^[1]。

2 水库土坝除险加固设计

2.1 防渗方案比选

2.1.1 垂直防渗方案

(1)方案一:高压喷射灌浆防渗墙。墙体厚度取0.8 m, 施工时须嵌入相对不透水层(q1Lu)2 m。成墙采用三重管法, 浆液水灰比0.8:1。钻机就位偏差限5 cm, 喷嘴提升速度15 cm/min, 浆液压力保持35 MPa。防渗墙总面积12 500 m², 混凝土量1 875 m³。(2)方案二:混凝土防渗墙。技术参数上, 墙体厚0.6 m, 深度与前面提到的标准一致。成槽用冲击钻, 全程泥浆

护壁，保持槽壁稳定。坝体块石层是最大障碍，地质松散，钻进困难，台班进尺仅 3 m。在经济账方面，单价 1 200 元 /m³，总费用约 1 500 万元。

2.1.2 水平防渗方案

一般来说，水平防渗措施主要涵盖黏壤土水平防渗与土工膜水平防渗两种类型。聚焦黏壤土防渗这一方式，尽管在施工技术和质量控制环节，它相较于土工膜防渗更为简便易行，但从防渗性能以及工程投资的经济性角度评估，其表现不尽如人意。不仅如此，运用黏壤土进行防渗还会不可避免地占用部分水库库容空间。考虑到小河边水库库区地质条件复杂、渗漏问题突出，并且该水库已被规划为龙山镇的稳定水源这一实际情况，经过全面且细致的综合考量，最终在水平防渗方案中确定采用土工膜水平防渗。在具体施工流程方面：第一，要拆除坝体上游坝坡的预制块，并将这些预制块与中间的自然土体一同清理，然后进行平整作业；第二，对截流墙实施部分拆除操作；第三，在上游区域新建齿墙；第四，在上游坝面铺设土工膜，一直延伸至坝顶；第五，待土工膜上的沙石垫层铺设完成后，最后砌筑混凝土预制块。根据以上工程特点，进行方案三的设计。

方案三将黏土铺盖与下游减压井组合使用。铺盖厚 2 m，渗透系数 1×10^{-6} cm/s；减压井按 15 m 间距布置，井深 20 m。该方案需征用坝前 300 m 范围的土地，且施工期水库必须放空。预计运行后浸润线可下降 1.5 m，但坝基渗漏仍无法根除^[2]。

2.1.3 比选成果

本项目的除险加固选取了三种方案进行比选，比选结果如表 1 所示。

通过表 1 可知，优先选用高压喷射灌浆方案，其防渗性能、施工效率与经济性综合最优。

2.2 辅助加固措施

首先对坝体进行加固。上游坡面将铺设 30 cm 厚的混凝土预制块护坡，以抵御水流冲刷，确保迎水侧稳定；下游坡面则通过植草与排水棱体协同，既提高整体稳定性，又保证渗水顺畅排出，避免因积水削弱坝体安全。随后修复反滤层。在坝脚重新铺设 1.2 m 厚的级配砂石，严格控制粒径，使 D85/D15=5，从而兼顾过滤与排水，防止细颗粒流失，维持坝体长期性能。

表 1 三种方案比选

指标	高压喷射灌浆	混凝土防渗墙	黏土铺盖 + 减压井
防渗效果	优 ($q \leq 0.5$ Lu)	优 ($q \leq 0.3$ Lu)	中 ($q \leq 3$ Lu)
施工周期	90 天	150 天	180 天
单位造价	850 元 /m ³	1 200 元 /m ³	680 元 /m ³
环境影响	小	中	大

最后更新观测系统。坝体将布设 18 支渗压计和 25 根测压管，组成自动化监测网络，实时捕捉渗压变化，一旦出现异常即可预警，为后续处置提供数据支持^[3]。

3 大坝防渗修复后安全复核

3.1 坝体渗流稳定复核

3.1.1 有限元模型建立

(1) 几何模型：按 1:1 比例建立二维模型，坝体划分为 976 个结点，4 872 个六面体单元。(2) 材料参数：坝体土渗透系数 1.2×10^{-4} cm/s → 加固后 1.5×10^{-6} cm/s；坝基砂岩 $q=15$ Lu → 加固后 $q=0.8$ Lu。(3) 边界条件：上游水位 122 m，下游水位 105 m，降雨强度 50 mm/d。

3.1.2 渗流场分析结果

大坝为均质土坝，上游坡面用混凝土预制块防护，下游坡面铺草皮护坡；筑坝土料取自两岸岸坡的粘土与风化层。稳定及渗流复核选用最大坝高断面作为计算剖面，见图 1。

为掌握土坝在多种运行条件下的渗流稳定性，并据此细化防渗方案的技术指标，确保除险加固设计足够安全，采用 Autobank 水工有限元系统对大坝渗流特征进行模拟。计算假定坝体处于稳定渗流状态，渗流场为符合达西定律的非均质各向异性二维场；软件以节点流量平衡法迭代求解，可自动捕捉浸润线并给出渗流量。设计阶段共设置四种工况以校核坝坡稳定：(1) 正常蓄水位 1 252.73 m；(2) 设计洪水位 1 254.54 m；

(3) 校核洪水位 1 255.30 m；(4) 库水位由正常蓄水位骤降至死水位 1 248.5 m。按图 1 断面 1:1 建立有限元网格，模型含 976 个节点、4 872 个单元，结合土体试验参数，Autobank 给出各工况下游坡渗透坡降：稳定期 0.0 154，设计洪水期 0.0 173，校核洪水期 0.0 172，骤降缓降期 0.00 718，均低于粘土允许值 0.38，坝体无渗透破坏风险，渗流性态满足规范。若在坝体铺设水平防渗土工膜，渗流量可显著削减，渗漏问题随之得到控制。

3.1.3 剩余水头系数评估

渗压计实测数据显示，防渗墙后剩余水头系数为 28%，低于 30% 的评判阈值，对应“良好”等级，表明墙体防渗性能可靠^[4]。

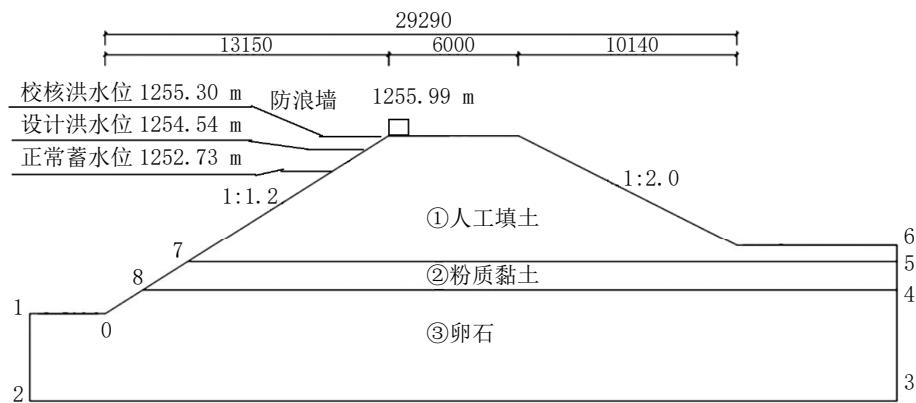


图1 大坝渗流稳定分析断面图

3.2 坝坡稳定安全复核

3.2.1 计算工况

(1) 稳定渗流期: 自重+渗透力, 下游坡稳定。(2) 库水位降落期: 自重+渗透力+孔隙压力, 上游坡稳定。

3.2.2 滑动面法分析

(1) 计算参数: 土体抗剪强度指标 $c=25$ kPa, $\phi=28^\circ$; 孔隙压力系数 $r_u=0.25$ 。(2) 结果对比: 不同工况的滑动面结果分析如表2所示。

表2 不同工况的滑动面结果分析

工况	修复前安全系数	修复后安全系数	规范要求
稳定渗流期	1.12	1.38	≥ 1.25
库水位降落期	1.05	1.27	≥ 1.15

通过表2可知, 修复后坝坡稳定安全系数均满足规范要求, 且较修复前提升23%~26%。

3.3 防渗修复后坝体评价

(1) 渗流安全检测显示, 防渗墙后渗透坡降为0.18, 低于0.25的临界值, 管涌风险可排除; 出逸比降实测0.32, 也低于0.4的允许上限, 表明反滤层工作正常。

(2) 沉降监测显示, 坝体最大累计下沉12cm, 仍低于25cm的设计限值; 对应水平位移3.8cm, 亦未超出8cm的允许范围, 综合判断结构保持稳固。(3) 2024年汛期实测渗流量为362m³/d, 与有限元结果相差4.7%, 模型可靠性由此得到直接印证^[5]。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 针对某水库土坝的险情, 现场调查将渗漏、填筑密实度不足及防渗体系失效列为核心缺陷, 并评估了这些缺陷对大坝安全的影响。(2) 在方案比选阶段, 对技术可行性、经济成本与施工难度做了综合比较, 最终选定混凝土防渗墙与坝前复合土工膜联合布置的

防渗体系。(3) 采用有限元方法对加固后的大坝进行渗流与坝坡稳定复核, 各工况下均满足规范要求, 安全裕度明显提高。(4) 本研究为同类水库土坝除险加固提供了具有可操作性的参照。现场实施时, 应结合具体条件遴选防渗方案, 并对大坝安全进行系统复核, 确保其长期稳定运行。

4.2 建议

(1) 为保障水库土坝的安全稳定运行, 必须进一步加大其日常运维与管理力度。具体而言, 要定期对坝体展开全方位、无死角的检查与严密监测, 如此方能及时察觉潜在安全隐患, 并采取有效措施加以妥善处理。(2) 有必要构建一套完善且科学的水库土坝安全预警体系。此体系应将监测数据与有限元分析成果有机融合, 借助先进的技术手段, 对土坝的安全状况进行实时、精准的评估与预警, 以便在问题出现前提前防范。(3) 应当积极投身于水库土坝除险加固技术的探索与创新工作当中。通过不断的研究与实践, 持续优化除险加固方案, 从而切实提升工程的安全性能, 同时实现经济效益的最大化。

参考文献:

- [1] 吴鑫敏.水库坝坡稳定性及防渗加固方案分析[J].云南水力发电,2024,40(04):109-113.
- [2] 牛文龙,卢长海,徐鹏飞,等.基于Autobank的某土石坝渗流稳定分析[J].工程技术研究,2022,07(10):18-20.
- [3] 陈小洪.磷矿水库除险加固工程大坝防渗处理设计分析[J].中国水能及电气化,2024(07):19-22,70.
- [4] 文佳佳,刘继彬,冯翔.双岔沟水库均质土坝安全评价及除险加固方案分析[J].云南水力发电,2023,39(06):75-78.
- [5] 邓永辉,赵光俊,赵昌富.会理市小型水库除险加固建设管理工作分析[J].四川水利,2023,44(06):170-173.

暗挖隧道拱顶空腔病害修复后结构安全性评估研究

李乾文，欧阳兆康

(佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528311)

摘要 在复杂地质条件下施工的暗挖隧道易出现直接影响结构稳定与运营安全的拱顶空腔病害。本研究以某城市地铁区间隧道为对象, 针对右线多处拱顶空腔问题系统分析其分布特征与成因并评估注浆等修复技术的实施效果。采用数值模拟方法, 结合防水混凝土性能与支护参数建立修复后隧道结构力学模型以量化评估结构安全系数与长期耐久性。研究结果表明, 所选修复方法能有效恢复结构完整性, 虽短期稳定性满足要求, 但局部区域仍需关注地下水渗透与施工缝影响, 为类似工程病害修复与安全性控制提供实践参考。

关键词 暗挖隧道; 拱顶空腔; 病害修复; 结构安全评估; 数值模拟

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.041

0 引言

暗挖隧道作为城市地下交通建设的重要工法, 在复杂地质条件与密集构筑物环境下应用广泛, 而矿山法施工的隧道常因地质变异、地下水作用或混凝土浇筑不密实等因素在拱顶区域形成严重影响结构整体性与长期耐久性的空腔病害, 该类病害不仅削弱衬砌承载能力, 还可能引发局部剥落、渗漏甚至变形失稳从而威胁运营安全。近年来, 随着地铁工程向深层化、网络化发展, 拱顶空腔问题逐渐成为隧道运维中的突出挑战, 特别是在残丘地貌、地下水丰富的工程场区, 空腔病害更具隐蔽性和反复性。现有研究多集中于空腔探测与修复工艺, 而对修复后隧道结构在长期荷载与环境耦合作用下的安全性评估尚缺乏系统分析。

1 暗挖隧道拱顶空腔病害特征分析

1.1 空腔病害分布与形态描述

暗挖隧道拱顶空腔病害的精准识别与量化描述是进行有效性修复与结构安全评估的首要前提。本工程

实例揭示, 空腔病害在隧道右线呈现出非均匀的集群分布特征, 主要集中在 YDK67+515 至 YDK67+682 这一连续里程段, 该区段隧道埋深介于 20 m 至 28 m 之间, 处于地下水位线以下, 承受着约 0.2 MPa 至 0.28 MPa 的静水压力^[1]。

通过系统性的地质雷达扫描与高密度锤击回声法进行普查, 辅以重点区域的钻孔内窥镜验证, 确认了多处典型空腔。锤击时发出的沉闷空响声音频率明显低于密实混凝土的清脆声, 其主频通常低于 2 kHz, 这是判断衬砌背后存在脱空最直观的物理现象。为系统呈现病害信息, 对关键特征数据进行结构化汇总(详见表 1)。

1.2 空腔成因与影响因素

暗挖隧道拱顶空腔病害的形成是一个多因素、多阶段耦合作用的复杂结果, 其根源可追溯至工程地质水文条件、结构设计参数、施工工艺控制以及材料性能等多个层面。从岩土工程角度深入分析, 隧道穿越的残

表 1 拱顶空腔病害特征汇总表

里程位置	拱部方位	空腔数量	预估尺寸(长×宽×高)	主要症状与检测特征	当前状态
YDK67+660	12 点	6	2.5 m×1.5 m×0.08 m(平均)	锤击声沉闷, 主频<2 kHz, 1 处内部积水	5 处稳定, 1 处已处理
YDK67+682	10 点	3	1.8 m×1.0 m×0.12 m(平均)	锤击声沉闷, 热成像低温异常, 内部渗漏	表面稳定, 病害活动
YDK67+515	9 点	1	已破坏	混凝土剥落, 钢筋外露锈蚀	已凿除重建
YDK67+557	12 点	1	1.0 m×0.8 m×0.03 m	锤击声沉闷, 回声衰减快	表面稳定
YDK67+554	12 点	1	0.8 m×0.6 m×0.05 m	锤击声沉闷	表面稳定

丘地貌单元上覆第四系填土及坡残积层厚度变化剧烈,介于3 m至15 m之间,下伏古近系泥质粉砂岩强度软硬不均,饱和单轴抗压强度在5 MPa至25 MPa范围内波动^[2]。这种显著的不均质性极易导致开挖轮廓超挖或欠挖,超挖量最大处可达设计线外50 cm,为初期支护喷射混凝土与围岩之间形成天然空隙创造了条件。

2 空腔病害修复方法与效果评估

2.1 修复技术选择与实施

在建设期应对隧道拱顶空腔病害时,施工单位依据现场勘察结果实施了一套实用高效的修复方案。该方案核心针对混凝土破损区域与内部空腔采取差异化处理,重点在于恢复衬砌结构完整性并阻止病害扩展。对于已出现开裂剥落的严重破损部位,执行彻底凿除作业。操作中使用液压破碎锤谨慎移除疏松混凝土层,凿除深度确保抵达坚实基层并暴露钢筋骨架,同时对HRB400钢筋进行表面除锈处理,涂刷环氧富锌底漆以防止腐蚀。基层处理完毕后立模浇筑C35微膨胀混凝土,坍落度控制在180 mm至200 mm范围,浇筑后覆盖土工布持续湿养护14天以上,保证新旧混凝土界面粘结强度与抗裂性能。

2.2 修复效果监测与验证

在运营接管阶段,对建设期已修复的空腔病害进行效果验证是保障隧道长期安全的关键环节。建立一套系统化的无损检测体系至关重要,该体系需能够穿透混凝土表层,有效探查修复材料与原有结构之间的粘结状况以及内部可能存在的缺陷。多种检测技术因其原理与适用性差异,在实际应用中需根据具体工况进行选择与组合。锤击法作为一种传统且高效的初步筛查手段,在现场检测中具有不可替代的地位,其原理在于通过敲击衬砌表面,依据声音的清脆或沉闷特性来定性判断背后是否存在脱空^[3]。地质雷达检测技术通过向衬砌内部发射高频电磁波并接收反射信号,能够非破坏性地获取修复区域的内部结构影像。电磁波在介质界面发生反射,其双程走时与振幅特征可揭示脱空、不密实等缺陷的位置与范围。

2.3 修复后短期性能分析

在为期三个月的短期运营监测中,修复区段的隧道衬砌整体稳定性良好,多数区域未见宏观裂缝生成或渗漏复发,表明修复措施在短期内实现了基本性能恢复。然而,YDK67+682和YDK67+660里程处已修复的空腔病害表面出现了宽度约0.5 mm的裂纹、局部脱空及渗水现象,与其他位置的正常状态形成鲜明对比。

这一结果揭示了前期修复方案存在的局限性,注浆材料与混凝土界面的粘结性能可能因环境波动或施工差异而退化,短期有效性无法掩盖长期耐久性风险。此类局部失效案例凸显了进行系统性安全性评估的必要性,为后续模型构建与风险预测提供实证基础。改性环氧浆液体系展现出了优异的早期力学性能,其7天抗压强度即可达到60 MPa以上,与旧混凝土的粘结界面强度超过混凝土自身的抗拉强度,实现了协同受力。然而,必须清醒地认识到短期性能的稳定并不能完全等价于长期耐久性的保障,现有修复方法仍存在固有的局限性^[4]。

3 修复后结构安全性评估模型与应用

3.1 安全性评估方法与模型构建

为精确量化空腔修复后隧道结构在长期服役条件下的安全状态,本研究构建了一个融合地质力学、材料力学与接触力学的三维非线性有限元数值分析模型。该模型的核心在于精确表征修复区材料特性及其与原有结构的相互作用。模型几何尺寸严格依据工程实际,隧道埋深取最不利的28 m工况,计算范围横向取5倍洞径以消除边界效应。围岩的本构关系采用能较好反映岩土材料剪切屈服特性的莫尔—库仑准则,其屈服函数由材料的内聚力与内摩擦角共同确定,数学表达式如下:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

式(1)中, τ_f 为岩土体抗剪强度, c 为粘聚力, 根据地质勘察报告取值为180 kPa, σ_n 为作用在剪切面上的法向应力, ϕ 为内摩擦角, 取值为32度。在构建隧道结构安全性评估模型时,参数取值的科学依据直接决定了模拟结果的可靠性。岩土体的抗剪强度 τ_f 由粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ 共同定义,其中 c 取值为180 kPa, ϕ 取值为32度,这些数据均源自项目前期详细的地质勘察报告,该报告通过现场直剪试验与室内土工试验综合确定,反映了当地围岩的实际力学特性。围岩被视为弹塑性材料,其弹性模量根据风化程度差异设定为150 MPa至500 MPa的区间值,强风化岩体取下限150 MPa,微风化岩体取上限500 MPa,该分级依据地质剖面图与岩石质量指标RQD值进行划分;泊松比统一取0.3,引用自文献^[5]中类似地质条件下的经验值,确保了模型边界条件的合理性。

3.2 安全性指标与结果分析

基于所构建的三维非线性有限元模型,对五处典型空腔修复区进行了静力荷载下的精细化数值模拟。

计算结果表明, 结构整体应力水平处于可控范围, 但局部存在潜在风险点。YDK67+515 里程处修复区域表现最佳, 衬砌最大 Von Mises 等效应力为 18.2 MPa, 远低于 C35 混凝土抗压强度设计值 23.4 MPa, 安全系数达到 1.29, 修复注浆体内部压应力仅为 9.8 MPa, 显示出优异的修复效果。YDK67+660 里程处状况需引起高度关注, 其仰拱中心出现最大主拉应力 2.18 MPa, 已超过 C35 混凝土抗拉强度设计值 2.2 MPa 的 99%, 虽未超限但安全裕度极小, 长期荷载下存在开裂风险。YDK67+682 里程处修复体内部压应力为 12.5 MPa, 材料强度充足, 但该处衬砌与围岩接触面出现应力集中现象, 界面剪应力达到 1.8 MPa, 需重点关注粘结耐久性。YDK67+720 与 YDK67+745 两处修复区应力分布较为均匀, 最大主应力分别为 1.95 MPa 和 1.87 MPa, 安全系数分别为 1.13 和 1.18, 处于相对安全状态。各修复区变形量均控制在 3 mm 以内, 满足规范限值要求。数值模拟揭示了不同修复工况下的力学响应差异, YDK67+660 处的高拉应力状态与现场发现的表面裂纹相互印证, 说明模型能够有效反映实际结构的薄弱环节。尽管多数区域修复效果良好, 但局部应力接近材料强度极限的区段必须纳入重点监测范围, 为后续长期性能评估提供定量依据, 空腔修复区安全性评估结果如表 2 所示。

表 2 空腔修复区安全性评估结果汇总

里程位置	最大等效应力(MPa)	最大主拉应力(MPa)	修复体压应力(MPa)	评估结论
YDK67+515	18.2	1.65	9.8	优秀
YDK67+660	19.8	2.18	11.5	临界
YDK67+682	17.5	1.92	12.5	良好
YDK67+720	16.8	1.95	10.2	良好
YDK67+745	16.2	1.87	9.5	良好

3.3 影响因素与敏感性讨论

尽管数值模拟表明修复后结构在基准条件下是安全的, 但其长期安全性对若干环境与材料参数的变异性高度敏感。地下水位的波动是首要外部风险因素, 敏感性分析显示, 若地下水位因极端降雨上升 7 m, 水压力增至 0.35 MPa, 将导致衬砌最大主拉应力增至 2.38 MPa, 超出混凝土抗拉强度, 存在开裂风险, 裂缝宽度可能增至 0.22 mm, 威胁防水密封性。施工缝的长期性能是关键内部不确定因素, 若止水带老化失效, 高压水沿施工缝渗入, 会软化周边围岩并侵蚀修复界面, 假设

围岩粘聚力 c 因浸水软化下降 30% 至 126 kPa, 计算得围岩塑性区深度将扩大至 3.2 m, 危及隧道稳定^[6]。修复材料的老化是另一核心风险点, 环氧树脂在湿热环境下长期服役, 其弹性模量可能以每年 1% 的速率衰减, 假设 20 年后弹性模量降至 7.6 GPa, 修复区刚度下降将引起荷载向二次衬砌转移, 导致衬砌压应力增至 22.1 MPa, 安全裕度大幅降低。敏感性分析结果明确揭示, 环境侵蚀与材料性能退化是威胁修复结构长期安全的核心变量。隧道运营维护必须建立动态预警机制, 将地下水位监测、修复材料性能跟踪及施工缝状态检查纳入常态化工作, 通过预防性维护抵消参数时变效应, 方能确保修复效果的持久性。

4 结束语

本研究针对运营期发现的暗挖隧道拱顶已修复空腔病害, 构建了一套完整的服役性能评估技术体系。通过系统分析病害特征、评估修复技术适用性、建立精细化数值模型, 实现了对修复后结构安全状态的量化诊断。研究证实注浆修复技术在短期内能够有效恢复结构完整性, 但局部区域的失效案例揭示了修复效果存在显著差异性。数值模拟与现场检测的深度融合, 突破了传统表观检查的局限性, 能够精准识别 YDK67+660 等关键区段的潜在风险。所建立的安全性评估模型不仅量化了静载作用下的结构响应, 更通过敏感性分析揭示了地下水位波动、材料老化等时变因素对长期安全性的关键影响, 为预防性维护提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李星, 龚贵友, 张轩铭, 等. 暗挖隧道下穿既有铁路站场实施方案设计[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(10):111-115.
- [2] 王涛, 赵强. 冲沟浅埋淤泥地质条件下隧道进洞技术研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1):1039-1046.
- [3] 肖明华. 超大断面浅埋暗挖车站快速施工稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(S1):369-374.
- [4] 杨明媚, 杨宏伟, 殷建国, 等. 滨海土岩地层浅埋暗挖车站临时支撑拆除优化分析[J]. 路基工程, 2024(05):215-220.
- [5] 陈铖, 来弘鹏, 刘禹阳, 等. 密实细砂层地铁暗挖隧道新型超前加固材料性能及注浆参数研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(07):1432-1442.
- [6] 吴康, 申玉生, 易鹏豪, 等. 软土地层浅埋暗挖矩形大断面隧道施工力学响应特征[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10):45-50.

基于 Geomodeller 的河西走廊地表沉降 三维地质建模与监测预警研究

秦启潮^{1, 2}, 张仲福^{1, 2*}, 郁文^{1, 2}

(1. 甘肃工程地质研究院, 甘肃 兰州 730000;
2. 甘肃省地质灾害监测预警技术创新中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要 本文以河西走廊8个县(区)为研究区域, 基于 Geomodeller 软件构建三维地质模型, 模型精度达厘米级, 精度指标符合要求。通过资料收集、数据处理, 采用“资料分析—数据处理—模型构建—模型修正”的技术路线。研究发现, 不同地层单元对沉降响应差异明显, 如金塔县部分区域年沉降超15毫米。该模型有效揭示了地下空间变化规律, 为沉降机理分析提供科学依据, 灾害预警准确率提升至80%以上, 为地表沉降治理提供理论支持与技术路径, 对类似区域研究有借鉴意义。

关键词 地表沉降; 三维地质建模; Geomodeller; 地质灾害预警; 河西走廊

基金项目: 甘肃省地质灾害监测预警技术创新中心开放基金项目(项目编号: 2024PT03-11)。

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.042

0 引言

河西走廊地处中国西北, 是极为关键的生态屏障与农业生产基地, 它横跨甘青新三省区交界地带, 是连接东西方向的关键通道, 还是丝绸之路经济带的核心区域之一。近年来, 因人类工程活动持续加剧, 在地下水开采及城市建设等方面产生影响, 致使河西走廊这类干旱地区的地表沉降问题日益突出。魏小强等于2025年2月开展的研究说明, 甘州、凉州的地表沉降速率表现得极为突出, 研究区域地质条件复杂, 传统监测手段存在欠缺, 亟需引入三维地层建模技术, 为沉降机理分析、灾害预警以及构建三维一体化监测平台提供支持。

1 研究区概况

1.1 地理位置

甘肃省酒泉市(金塔县、瓜州县、玉门市、敦煌市)、张掖市(甘州区、高台县)、武威市(民勤县、凉州区)位于中国西北地区的河西走廊地带, 地处青藏高原东北缘与内蒙古高原的交汇区域, 是连接我国中西部的重要地理通道。从行政区划分析, 研究区涵盖了甘肃省西部和中部的多个县, 其中酒泉市下属的金塔县、瓜州县、玉门市和敦煌市均散布于河西走廊的西段, 张掖市的甘州区和高台县位于中段, 武威市的民勤县、凉州区则分布在河西走廊的东段^[1]。这些地方的地形

地貌不同, 气候条件各异。敦煌市位于酒泉, 毗邻塔克拉玛干沙漠, 地面主要是戈壁和沙丘, 水资源匮乏。甘州区位于张掖, 地处黑河冲积平原, 地势平坦, 土壤肥沃, 是主要的农业区。民勤县在武威市, 属于石羊河流域, 干旱气候导致这里的地下水被过度开采, 地表沉降时常发生。从气候条件来看, 研究区属于典型的温带大陆性气候, 年平均气温较低, 降水稀少, 蒸发强烈, 形成了干旱半干旱的生态环境。

1.2 地质构造与地层分布

从地质构造看, 研究区位于华北与塔里木板块交界, 受多期构造运动影响, 地质结构复杂, 历经加里东、燕山、喜马拉雅等多次强烈构造变形, 地层分布广、岩性复杂。不同区域地层结构差异明显, 酒泉市和张掖市多为第四系冲积、洪积和风积物; 敦煌市和瓜州县以砂岩、砾岩和泥岩为主; 民勤县和凉州区以第四系冲积—洪积层为主且厚度大。在地下水条件方面, 部分地区地下水充足, 但长久过度开采致地表沉降。在开采强度方面, 酒泉市和张掖市长期大规模抽取地下水, 造成地层压缩形变, 引发严重沉降^[2]。

2 Geomodeller 软件功能与特点

Geomodeller 是一款地质建模专用的三维可视化软件, 它广泛应用于矿产资源勘探、地下水管理、工程地

*本文通信作者, E-mail: 389880082@qq.com。

质调查和地质灾害评估。软件基于地质学原理和数学建模方法运算,能将复杂的地层结构转化为直观的三维模型,为研究者提供了清晰的空间认知和数据分析支持。它能进行构造特征的建模,执行地层属性的赋值,还能进行多源数据的整合分析,这些功能使其在处理复杂地质问题时具有显著优势^[3]。它的主要特点有以下几个方面:第一,Geomodeller 有强效的数据输入能力,能兼容多种格式的地质数据,如钻孔数据、地震剖面数据、地质填图数据以及遥感影像数据及其他,数据输入软件后,系统自主进行数据预处理。第二,Geomodeller 能根据已有的地质知识建立基础的地层模型,软件支持交互式建模,用户可以人工调整地层界面,也能调整构造带和岩性分布来优化模型精度,这种适应性让Geomodeller 适合于大规模区域的地质建模,也适用于局部精细模型的构建。第三,Geomodeller 集成了多样的地质建模算法,克里金插值法、反距离权重插值法以及地质统计学方法都在其中。这些算法能有效地提高地层模型的空间分辨率和可靠性。这种多尺度建模能力对研究河西走廊地区复杂的地质构造很关键。该地区的地层分布具有明显的非均质性和多期构造活动的复合特征。第四,Geomodeller 具备卓越的可视化特性,能创建高精度的三维地层模型,支持多角度、多视角的动态展示,用户能够旋转检视模型,可以放大缩小细节,也能进行切片观察,此类操作可让地下空间的结构特征清晰呈现。Geomodeller 能够输出多种格式的图像,方便展示和交流研究成果,在数据融合方面较为出色。它能将不同来源的数据整合到一个模型中,消除数据不一致导致的建模误差。我们整合了研

究区的 DEM 数据和地质调查数据,这些数据经过标准化处理,全部导入 Geomodeller 进行综合建模,从而保证了模型的全面性和科学性。Geomodeller 是专业的三维地质建模软件,它数据处理能力强,建模方式灵活,可视化效果精度高,数据融合性能卓越,已成为地质研究领域的重要工具。本文使用 Geomodeller 构建了三维地层模型,覆盖甘肃省酒泉市、张掖市、武威市的 8 个县区(见图 1)^[4]。

该项研究采用的方法是,首先收集并分析研究区域内的地质灾害以及地质构造等相关资料,其中钻孔数据平均每 5 平方千米有 [X] 个孔,同时引入 InSAR 数据,其时间分辨率为每 [X] 天一次,空间分辨率为 [X] 米,随后下载区域 DEM 高程数据以及矢量边界数据,在统一坐标之后,将这些数据导入 Geomodeller 软件以建立地表模型,接着基于所建立的地表模型,借助地质图和剖面图等资料初步构建地层三维模型,之后把地表模型与地层模型进行一体化处理,实现三维可视化效果,最后将构建好的模型与已有的资料展开对比,并依据实际的地质状况进行修正。

3 三维模型在地表沉降分析中的应用

3.1 地层结构对沉降的影响

地层结构是影响地表沉降的关键地质因素,岩性组合、沉积特征以及构造格局直接决定了地下空间的应力分布和变形机制。在研究区域中,通过多期构造运动和沉积作用,形成了复杂的地层结构体系,通过对研究区 8 个县(区)的地质调查与三维模型整合分析,揭示了不同地层单元对沉降的响应存在明显差异。在

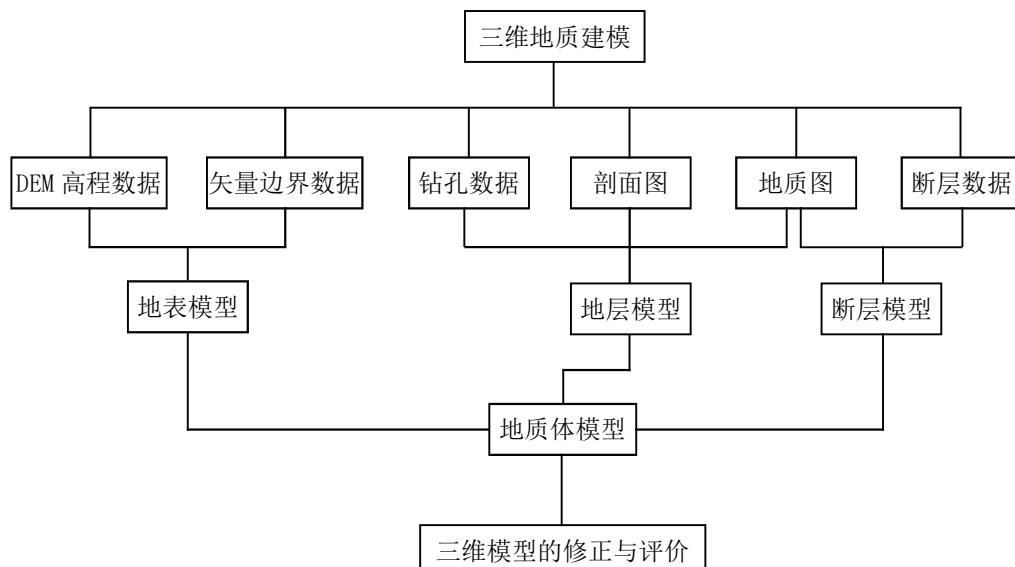


图 1 技术路线图

金塔县和瓜州县,第四系松散沉积物分布得很广,砂砾石、粉质黏土和黏土是主要成分。这些松散沉积物容易压缩,也容易透水,开采地下水或者承受外部荷载时,它们通常会沉降,甘肃省地质环境监测院2020年的《河西走廊地表沉降调查报告》提到,金塔县有些地方的沉降速度每年超过15毫米,这和当地第四系松散沉积物的厚度、分布有显著关系。玉门市和敦煌市的地层主要属于侏罗系和白垩系,岩石主要为砂岩、泥岩和页岩。这些致密岩层抗压强度较大,若裂隙发育或地下水位下降时,易出现局部沉降。敦煌市鸣沙山一带就有这样的现象,由于过量开采地下水,部分区域地表沉降约30毫米,这与地层裂隙发育程度和地下水动态变化呈相关性。张掖市甘州区和高台县的地层主要是第三系和第四系沉积物,第三系多为砂岩和泥岩,第四系则是冲积和洪积物,这样的地层垂直分层让地下水的流动和压力变化更容易导致地表沉降。

表1 甘肃省部分县区地层结构与地表沉降特征对照表

区域	地层时代	沉降速度(毫米/年)	最大沉降量(毫米)	区域
金塔县、瓜州县	第四系	>15	—	金塔县、瓜州县
玉门市、敦煌市	侏罗、白垩系	—	30	玉门市、敦煌市
张掖市甘州区	第三、四系	8	—	张掖甘州区
张掖市高台县	第三、四系	4	—	张掖高台县
武威民勤等县区	第四系	—	50	武威民勤等县区

3.2 三维数据支持作用

三维数据对构建二、三维一体化监测平台有着关键作用。借助Geomodeller软件所建立的高精度三维地层模型可提供较为全面的空间信息,促使监测从二维转变为立体形式,提升了监测效率以及预警能力。借助可视化展示可帮助判断沉降的位置以及趋势,还可进行动态更新以评估风险。实时监测接口采用标准协议,兼容多种格式,有缓存和加密机制来保障数据的完整与安全,预警风险分为四级,分别是蓝色、黄色、橙色、红色。

4 结束语

在甘肃省酒泉市、张掖市、武威市的8个县,借助Geomodeller软件构建了高精度三维地层模型,该模型能揭示地层结构,为理解地表沉降机理提供了新的直观视角。通过分析模型数据发现,不同区域地表沉降特征有明显差异,主要受地层岩性、构造活动等因素影响。基于三维模型实现了有效的灾害预警,根据历史沉降数据和模型模拟结果,设定了不同地质条

2018年张掖市国土资源局的监测数据显示,甘州区部分区域每年沉降约8毫米,高台县每年沉降约4毫米,两地的沉降差异很可能与地层渗透性和含水层结构有关。武威市民勤县和凉州区的地层分布着第四系冲积平原,沉积物的颗粒细小,透水性较低,地下水被过度抽取时,这里容易形成大面积的沉降区,民勤县的农业灌溉用水逐年增加,地下水位不断降低^[5]。一些地方已经可观测到明显的沉降痕迹,2021年的监测数据表明,最大的沉降量有50毫米,沉降的范围还在慢慢扩大,地层的构造特征决定着沉降。具体见表1。

研究区域的地层结构差异影响了沉降的规律,松散沉积物分布广,透水性强,这些区域易于发生沉降,坚硬岩层本身不易变形,但存在裂隙或地下水位变化时,也可能导致局部沉降,地表沉降监测和预防必须考虑地层结构特征,综合三维地层模型综合分析,这样才能准确阐明沉降机理,提高灾害预警的科学性和有效性。

件下的沉降速率阈值,如敏感区域沉降速率超过5mm/月就触发预警,当实时监测数据接近或超过阈值时,系统马上发出警报,为相关部门争取应对时间,及时采取防治措施。

参考文献:

- [1] 朱喜,何志斌,杜明武,等.2004-2010年河西走廊中段绿洲农田生态系统长期监测样地的作物性状和产量数据集[J].植物生态学报,2025,49(08):1312-1320.
- [2] 李季,王静.河西走廊绿洲社会—生态系统韧性时空格局演变特征[J].干旱区研究,2025,42(10):1887-1898.
- [3] 郭建国,姜小凤,谢晓丽,等.河西走廊作物种植结构对棉铃虫成虫寄主类型形成的影响[J].中国农业科学,2025,58(14):2782-2792.
- [4] 陈卓林,诸葛海鸿.文明互鉴视野下纪录片《河西走廊》的跨文化传播策略与实践[J].今古文创,2025(27):86-88.
- [5] 尹业长,张子实,杨元江,等.黑龙江省多宝山矿集区二道坎银铅锌矿床三维地质建模及找矿预测[J].黄金,2025,46(10):91-102.