

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 9 月 第 25 期 (总第 614 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 墨 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：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 9 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录Contents

科技博览

- 001 DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中的应用
..... 李云鹏, 孙少杰, 王冠宇
- 004 建筑工程基础大体积混凝土技术应用分析
..... 杨世雄
- 007 大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略
..... 唐中华
- 010 新型隔震技术在超高层结构抗震优化中的模拟与应用
..... 宋浩东
- 013 AWS D1.1 目视检验标准在钢结构焊接质量控制中的应用实践
..... 于万淼

智能科技

- 016 电气自动化技术在电力工业工程中的应用
..... 李 良
- 019 基于深度学习的矿山机电设备故障诊断方法
..... 刘永亮
- 022 新能源背景下电力运维检修体系优化策略研究
..... 谢正青, 刘华健, 吕 静, 赵小宁
- 025 基于油色谱分析的变压器故障诊断与性能评估研究
..... 颜小雨
- 028 新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中的应用
..... 黄思源
- 031 基于智能终端的配电自动化系统故障定位与自愈控制研究
..... 冯 志, 李光洋, 韩江伟, 赵耀武

应用技术

- 034 水利水电工程中施工导流及围堰技术探讨
..... 江俊豪
- 037 变电站电气安装技术重点及施工工艺分析
..... 王 珂, 张连操, 孙建海, 邵华泽

目录Contents

040	配电网电力工程技术问题分析及其施工安全研究	徐 亮, 杨 政, 史现奇
043	1000 kV 特高压输电线路施工技术与检修技术分析	田 强, 伍灵鑫
046	水利水电施工中边坡开挖支护技术的应用策略研究	董 莹, 孙莹莹
049	火力发电厂动叶可调轴流风机常见缺陷及其处理方法	付志勇
052	高压直流输电系统中换流站的故障诊断与保护策略优化	崔永强
055	化工电力系统零序电流互感器穿线技术优化提升接地故障研究	戎尚文

科创产业

058	建筑工程科技创新与绿色施工管理	邢 铖
061	煤矿掘进机截割臂结构制造技术分析	田知华, 王恩博, 闫 涛
064	机电安装工程暖通空调新技术及发展趋势	朱立东, 管仁刚
067	基于精益建造理论的建筑工程管理模式探究	董小虎
070	全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用	王翼飞
073	基于可持续发展理念的水利工程管理模式创新分析	孙大旺, 陈江云, 张 状
076	国土空间规划中的土地资源配置与测绘技术应用	张大昊, 纪祥菊
079	绿色建筑外墙保温材料的热工性能及其应用效果研究	常林学

技术管理

082	建筑机械设备安装工程施工技术要点分析	文彦翔
085	低影响开发技术在城市雨洪管理中的应用研究	张 慧, 陈步岳, 陈 双
088	高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用	何岳松
091	市政给排水施工中长距离顶管施工技术的运用探讨	徐淑鹏, 王 健
094	斜板沉降池技术在回收水池改造中的应用与优化研究	钟 炀, 杨成应, 熊 伟
097	岩土工程勘察中的水文地质勘察技术要点与施工应用分析	赵宇乾, 来振义
100	基于 BIM 技术的建筑项目管理与工程监理协同工作模式研究	王大丰
103	基于复杂城区环境的浅埋暗挖隧洞施工安全风险识别与防控研究	李瑞军, 普 恒

科学论坛

106	抗浮锚杆筏板漏水防治探究	王文昌
109	屋面防水施工质量控制研究	杨 超
112	基于偏联系数定级法的某河流健康评价研究	阳祥媛
115	城市道路沥青路面平整度影响因素及改善措施	徐泉城, 王 浩, 赵浩凯
118	高速公路沥青混凝土路面的早期病害与治理措施	梁峻僊
121	化工设备腐蚀失效的成因分析与预防对策研究	李帮洪, 冉江林, 罗 飞, 杨 坤
124	复杂地质条件下煤矿地质勘探技术的应用与优化	张 园, 李雷雷, 王光宇

DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中的应用

李云鹏, 孙少杰, 王冠宇

(黑龙江省物探测量勘察院, 黑龙江 哈尔滨 150046)

摘要 聚焦 DOM (数字正射影像图, Digital Orthophoto Map) 和 LiDAR (激光雷达, LightLaser Detection and Ranging) 技术融合在地形测量领域的应用, 阐述了两项技术的原理与特点, 剖析了其融合在地形测量中的技术流程, 涵盖数据获取、预处理、要素采集与编辑等环节。以哈尔滨市某村庄 1:2 000 地形图测量项目为实例, 深入探讨该融合技术的实际应用情况, 包括项目实施过程、遇到的问题及解决方法、成果质量评估等方面。研究结果表明, DOM 和 LiDAR 技术融合显著提升了地形测量的效率与精度, 为众多领域提供了可靠的地形数据支持, 具有广阔的应用前景。

关键词 DOM; LiDAR; 地形测量

中图分类号: P21; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.001

0 引言

地形测量是获取地球表面地形信息的重要手段, 其成果广泛应用于城市规划、土地利用、水利工程、交通建设等众多领域。准确、详细的地形数据是这些领域进行科学决策、合理设计和有效施工的基础。传统地形测量方法, 如全站仪测量、水准测量等, 在面对大面积、复杂地形测量时, 存在效率低、精度有限、受地形条件制约大等问题。随着遥感技术的快速发展, DOM 和 LiDAR 技术逐渐成为地形测量的重要工具。DOM 具有丰富的二维信息, 能直观呈现地物的形状、位置和纹理等特征; LiDAR 技术则可快速获取高精度的三维点云数据, 精确测量地形的高程信息。将二者融合, 能够优势互补, 为地形测量带来更高的效率和精度, 满足现代社会对地形数据日益增长的需求。

1 DOM 与 LiDAR 技术概述

1.1 数字正射影像图 (DOM) 技术原理与特点

DOM 是对航空或航天像片进行数字微分纠正和镶嵌, 按一定图幅范围裁剪生成的数字正射影像数据集^[1]。其原理基于摄影测量, 通过对像片进行几何校正, 消除像片倾斜和地形起伏引起的投影变形, 使影像具备地图几何精度。同时, DOM 保留了栅格影像的特性, 能直观展示地面地物的丰富信息, 如地物的形状、大小、色调、阴影等。在地形测量中, DOM 可作为背景图, 为地形要素的判读和采集提供直观依据, 极大地提高了测量的可视化程度和工作效率。

1.2 激光雷达 (LiDAR) 技术原理与特点

LiDAR 是一种主动式对地观测系统, 集激光测距技术、计算机技术、惯性测量单元差分定位技术于一体^[2],

其基本原理是通过发射激光脉冲并测量激光从发射到接收的时间间隔, 利用光速计算出激光束照射点到传感器的距离。LiDAR 结合搭载平台 (如飞机、无人机) 的位置和姿态信息, 以及激光扫描角度, 可精确获取地面物体的三维坐标, 生成高密度、高精度的激光点云数据。LiDAR 技术具有诸多优点, 如能穿透部分植被, 直接获取地面真实地形信息, 有效解决传统测量方法在植被茂密地区难以获取地形数据的难题; 数据获取速度快、自动化程度高, 可在短时间内获取大面积的地形数据; 测量精度高, 能满足高精度地形测量的需求。在地形测量中, LiDAR 点云数据可用于构建数字高程模型 (DEM)^[3], 提取等高线、高程点等地貌要素, 为地形分析和工程设计提供准确的数据支持。

2 DOM 和 LiDAR 技术融合的地形测量技术流程

2.1 数据获取

数据获取是地形测量的首要环节, DOM 和 LiDAR 数据的获取方式有所不同。DOM 数据通常通过航空摄影或卫星遥感获取。在航空摄影过程中, 利用搭载在飞机上的数码相机, 按照一定的航高、航向重叠度和旁向重叠度进行拍摄, 获取覆盖测区的航片。随后, 对航片进行数字微分纠正、镶嵌和裁剪等处理, 生成 DOM 数据。LiDAR 数据则通过搭载在飞机或无人机上的 LiDAR 系统获取。在飞行过程中, LiDAR 系统发射激光脉冲, 接收地面反射信号, 记录激光脚点的三维坐标信息, 形成原始点云数据。同时, 获取的还有定位定向系统 (POS) 数据^[4], 用于确定 LiDAR 系统在空间中的位置和姿态, 为后续的数据处理提供基础。

2.2 数据预处理

数据预处理是确保数据质量和后续处理精度的关键步骤。对于 LiDAR 点云数据,预处理包括数据分类、去噪、滤波和重采样等操作。数据分类是将原始点云数据按照地物类型进行分类,如地面点、植被点、建筑物点等,以便后续分别处理。去噪旨在去除因仪器误差、外界干扰等因素产生的噪声点,提高数据的准确性。滤波则是分离地面点和非地面点,常用的滤波算法有渐进加密三角网(PTD)滤波算法等^[5]。重采样可根据实际需求调整点云数据的密度,在不损失关键信息的前提下减少数据量,提高处理效率。对于 DOM 数据,预处理主要包括影像增强、几何校正和辐射校正等。影像增强可提高影像的清晰度和对比度,便于地物的判读。几何校正用于纠正影像的几何变形,使其符合地图投影要求。辐射校正则消除因光照条件、传感器差异等因素导致的影像辐射差异,保证影像的质量一致性。

2.3 地形图要素采集

在 DOM 和 LiDAR 数据预处理完成后,即可进行地形图要素采集。在 DOM 上采集二维地物要素时,利用专业的地理信息软件(如 ArcGIS、mappingfactory 等),根据影像上地物的构像特征,如形状、大小、色调、阴影以及地物之间的相互关系,识别和判定地物的类型和轮廓。对于一些影像判读存在疑问的要素,可参考 LiDAR 数据进行确认,确保采集的准确性和完整性。在 LiDAR 数据上采集三维地形、地貌要素时,首先利用预处理后的点云数据采集房屋、陡坎等要素,再通过对点云进行滤波,提取地面点点云,最后利用地面点点云提取等高线和高程点数据。同时,参考 DOM 影像,识别和提取河流、陡坎等特殊地貌要素,与等高线数据进行叠加,完成三维地貌要素的采集。

2.4 数据合并与编辑

将 DOM 上采集的二维地物要素数据和 LiDAR 数据上采集的三维地貌要素数据进行合并处理。在合并过程中,需要协调各要素之间的相互关系,确保地物和地貌的空间位置准确匹配。利用数据编辑工具,对合并后的数据进行检查和修正,采用视觉检查和拓扑检查等方式,确保线状和面状地物的完整性,避免出现重复、自相交、打折、缺口等错误。根据实际需求,录入相应要素的属性信息。

3 DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中的应用案例

3.1 项目概况

哈尔滨市某村庄 1:2 000 地形图测量项目旨在完成辖区约 428.4 km² 的地形图测制工作,满足村庄规划编

制用图需求。测区范围内居民地房屋密集、杂乱,建筑密度较大;北侧为松花江,镇内有湖泊和大量鱼塘;植被类型多样,包括旱地、水田、水浇地和菜地等。这些特点给地形测量工作带来了诸多挑战。

3.2 项目中 DOM 和 LiDAR 技术融合的应用

该项目采用直升机搭载三维激光扫描系统及正射相机进行数据采集,利用 LiDAR 技术获取地表三维点云数据,同时获取正射影像用于生成 DOM。在数据处理阶段,通过 Inertial Explorer 软件解算点云数据,GeoLAS 软件输出真彩色点云数据,再利用 Mapping Factory 软件进行航测内业采集、外业调绘及补测,最后使用南方 CASS 软件进行数据编辑,完成数字线划图(Digital Line Graph)成图。DLG 生产流程如图 1 所示。

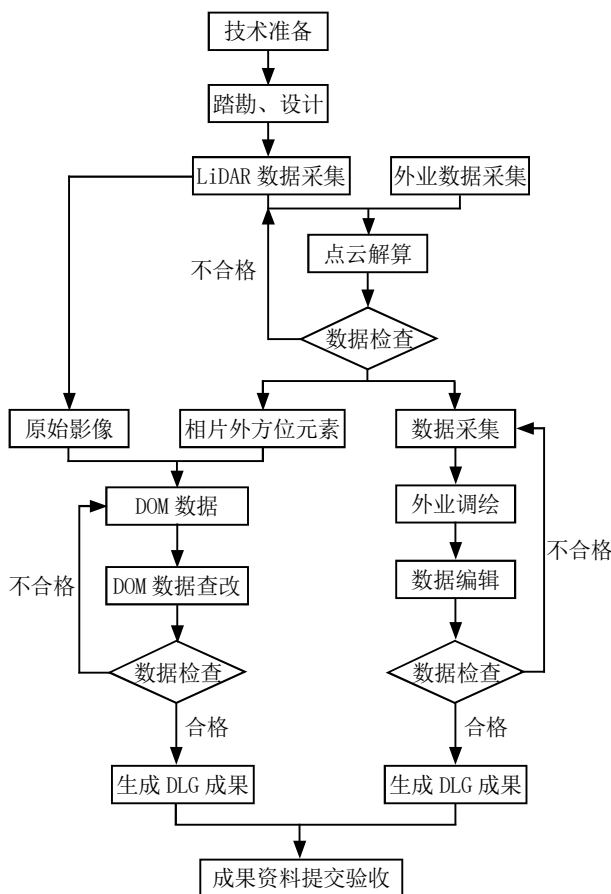


图 1 DLG 生产流程

3.3 项目实施过程中的问题及解决方法

项目实施过程中遇到了一系列问题。由于测区跨度大且包含太平国际机场,批准的航飞时间段少,可飞行天数少,每日作业时间短,导致作业工作日较长。针对这一问题,项目组合理规划飞行方案,选取多个

起降点,以保证直升机作业顺利进行。此外,图面负载量较大也给测量工作带来了困难。例如:居民地内部的干沟、多个距离较近的电杆等,难以全部准确采集。项目组根据实际情况,制定了合理的采集原则,如居民地内部只采集主要道路两侧的干沟,多个电杆距离较近时只采集主要电杆等,在保证地形图精度的前提下,提高了工作效率。

3.4 项目成果质量评估

本项目采用实地检测的方法进行检验,采用全站仪极坐标法,实地采集各要素特征数据,获取要素特征点的平面坐标和高程。居民地密集且道路狭窄,散点法不易实施的区域,采用钢尺或手持测距仪实地量取地物间的距离的方法,检查各类地物的平面相对位置精度。将采集的高程点高程值与图上同名高程注记点高程值进行比对,计算高程较差,按图幅统计地形图高程注记点高程中误差。将实地量取的地物间的距离,与地形图上同名距离进行比对,计算距离差值,按图幅统计地形图平面相对位置中误差。中误差计算公式如下:

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{2n}}$$

式中, M 为成果中误差, n 为检测点(边)总数, Δ 为较差。部分图幅中误差统计如表 1 所示。

表 1 中误差统计表 单位: m

图名	高程中误差	平面绝对位置中误差	平面相对位置中误差
太平湖温泉小镇	±0.197	±0.367	±0.318
团结村	±0.165	±0.445	±0.284
先富小学校	±0.105	±0.56	±0.262
辛家窝棚	±0.123	±0.354	±0.294
新榆煤场	±0.148	±0.568	±0.263
姚家屯	±0.141	±0.541	±0.254
一场村	±0.135	±0.558	±0.263
渔场屯	±0.129	±0.58	±0.26
御草居医药有限公司	±0.147	±0.563	±0.24
中国电信	±0.159	±0.558	±0.315

经检查,该项目成果质量良好。数字线划图(DLG)成果平面和高程精度高,数据结构正确,地貌表示合理,地物采集完整,图廓整饰符合规范要求,附件齐全且符合要求,能够满足甲方规划需要。这充分证明了 DOM

和 LiDAR 技术融合在该项目中的应用是成功的,能够有效获取高精度的地形数据,为村庄规划提供可靠的依据。

4 DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中的优势与不足

4.1 优势

DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中具有显著优势。二者融合能够获取丰富的地形信息,既包括地物的二维平面信息,又涵盖地形的三维高程信息,为地形分析和工程设计提供了全面的数据支持。

4.2 不足

尽管 DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中表现出色,但仍存在一些不足之处。数据处理流程较为复杂,需要专业的软件和技术人员操作。LiDAR 点云数据量大,数据分类、滤波等处理环节计算量大,对计算机硬件性能要求较高。

5 结束语

DOM 和 LiDAR 技术融合在地形测量中展现出强大的优势,通过优势互补,能够获取更全面、准确的地形数据,提高测量效率和精度。哈市某区村庄 1:2 000 地形图测量项目的成功实施,充分验证了该融合技术在实际应用中的可行性和有效性。然而,该融合技术也存在一些需要改进的地方,如数据处理的复杂性和成本较高等问题。随着科技的不断进步,DOM 和 LiDAR 技术将不断发展和完善。未来,传感器的精度将进一步提高,数据获取和处理效率也会大幅提升,从而降低成本。同时,人工智能和机器学习技术在数据处理中的应用将不断深入,实现数据处理的自动化和智能化,减少人工干预,提高数据处理的准确性和效率。

参考文献:

- [1] 武坚,郝伟,王东前,等.利用无人机影像制作超大范围 DOM[J].测绘与空间地理信息,2024,47(08):176-178.
- [2] 杨昆仑,赵军平.无人机LiDAR系统在大比例尺地形图测绘中的应用[J].测绘技术装备,2020,22(02):69-72.
- [3] 占媛,王迎春,江芸.基于LiDAR点云的多场景DEM生产关键技术研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(03):15-18.
- [4] 马伟波,丁建伟,谭琨.定位定向系统数据的航空高光谱影像几何校正[J].测绘科学,2017,42(06):130-136,201.
- [5] 邢承滨,耿宏,杜宁.基于渐进三角网的多波束滤波算法研究[J].水道港口,2024,45(02):302-307.

建筑工程基础大体积混凝土技术应用分析

杨世雄

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 以安徽合肥某大型商业综合体为例, 采用合理的混凝土配合比设计、有效的温控与裂缝控制技术以及严格的施工质量监控方法, 旨在解决建筑工程基础大体积混凝土施工中因水化热高、易产生裂缝等影响工程质量的问题。研究表明, 混凝土内部温度和裂缝得到有效控制, 28天抗压强度均值达50 MPa以上, 外观质量良好, 可确保大体积混凝土建筑工程质量。

关键词 大体积混凝土; 温控措施; 裂缝控制技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.002

0 引言

随着城市化进程的加快, 安徽地区大型建筑项目不断涌现, 基础大体积混凝土施工需求日益增多^[1]。大体积混凝土施工因水化热高、易产生裂缝等问题, 对工程质量影响显著。如何有效应用施工技术, 确保大体积混凝土的质量成为关键。本文以安徽某大型建筑工程为实例, 深入剖析基础大体积混凝土施工技术的具体应用, 以期为类似工程提供有益的参考。

1 工程概况与施工技术需求

1.1 工程概况

该工程位于安徽省合肥市某开发区, 为一座大型商业综合体, 建筑总面积达100 000 m²。基础采用筏板基础结构, 基础混凝土工程量约为5 000 m³, 混凝土设计强度等级为C40。该工程基础厚度为1.5 m, 局部设备基础厚度达2.5 m, 施工过程中需重点考虑大体积混凝土的水化热及裂缝控制问题。

1.2 大体积混凝土施工特点

该工程基础混凝土体积庞大, 单次浇筑量达5 000 m³, 由于混凝土内部水泥水化热释放集中, 导致内部温度急剧升高, 与外部环境温差显著, 易产生温度应力。这种温差是引发温度裂缝的主要因素, 裂缝一旦出现, 不仅影响结构外观, 更会降低结构的耐久性和整体性。此外, 施工过程中的质量控制极为复杂, 需要精细化管理和技术保障, 以确保工程质量符合设计和使用要求。

1.3 技术需求分析

针对该工程大体积混凝土施工特点, 技术需求分析如下: 首先, 混凝土配合比设计至关重要, 需选择低水化热水泥, 优化骨料级配, 合理添加外加剂, 以

降低水化热并提高抗裂性能, 同时通过试验验证调整配合比。其次, 温控措施必不可少, 需设置混凝土内部温度监测系统, 实时掌握温度变化, 采用预埋冷却水管等内部降温措施以及表面保温措施, 控制内外温差。裂缝控制技术极为重要, 合理设置施工缝、后浇带, 优化混凝土浇筑工艺, 确保施工过程连续、均匀, 减少裂缝产生。最后, 施工过程中的质量监控是保障工程质量的关键, 需严格进行混凝土强度检测、温度裂缝检查与处理, 确保施工质量符合设计和验收标准。

2 大体积混凝土施工技术应用

2.1 混凝土配合比设计

在该工程中, 对大体积混凝土原材料进行严格挑选以保障其性能。水泥选用P·O42.5普通硅酸盐水泥, 该水泥水化热相对较低, 早期强度发展适中, 可有效控制温升。在骨料方面, 粗骨料采用5~20 mm连续级配碎石, 细骨料选用中砂, 其细度模数控制在2.6左右, 能保证混凝土的和易性与密实性。外加剂选用高效减水剂, 减水率大于20%, 还添加适量缓凝剂, 可延长混凝土凝结时间, 便于施工操作^[2]。

为降低水化热并提升抗裂性能, 对混凝土配合比进行了优化设计。经试验确定水胶比为0.40, 此比例既能确保混凝土强度, 又能有效降低水化热。胶凝材料用量上, 水泥用量控制在380 kg/m³左右, 同时掺入适量粉煤灰和矿渣粉替代部分水泥, 降低水化热的同时改善混凝土耐久性。根据试验结果, 砂率控制在40%~42%, 此时混凝土的工作性能和力学性能均处于较好状态。

施工前对优化后的配合比进行试验验证。在试验方法上, 依照GB/T50080-2016《普通混凝土拌合物性

能试验方法标准》测试混凝土的坍落度、扩展度等性能,依据 GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测试抗压强度。试验结果表明,混凝土坍落度为 240 mm,扩展度为 550 mm,和易性良好;28 天抗压强度达 50 MPa 以上,满足设计要求。根据试验结果对配合比进行微调,适当增加粉煤灰掺量,进一步降低了水化热。

2.2 温控措施

2.2.1 混凝土内部温度监测系统

为实时掌握混凝土内部温度变化,该工程采用先进的温度监测系统。在布置方案上,于混凝土内部沿厚度方向布置多层测温点,每层间距约 500 mm,测温点间距约 1 000 mm,以此确保能全面监测混凝土内部温度变化。监测设备选用高精度的数字式温度传感器,其通过无线传输将数据实时发送至监测系统,便于施工人员随时查看温度数据。该监测系统可自动记录温度变化曲线,还设置了预警值,当温度变化异常能及时发出警报。

2.2.2 内部降温措施

为有效降低混凝土内部温度,该工程采取了一系列内部降温措施。首先是预埋冷却水管,在混凝土内部预埋直径为 50 mm 的冷却水管,水管间距为 1 000 mm,呈蛇形布置。冷却水管在混凝土浇筑完成后立即通水,水流速度控制在 0.5 m/s 左右,以确保冷却效果。其次是通水循环降温,冷却水采用循环系统,进水温度控制在 15℃ 左右,通过循环泵将冷却水从混凝土内部抽出,再经过冷却设备降温后重新注入,循环使用。同时会根据温度监测数据,适时调整冷却水流量和温度,从而确保混凝土内部温度得到有效控制^[3]。

2.2.3 表面保温措施

为减少混凝土表面与内部的温差,该工程实施了相应的表面保温措施。在保温材料选择方面,选用导热系数低、保温性能好的岩棉被,其厚度为 50 mm,具备良好的保温和防火性能,能有效减少混凝土表面热量散失^[4]。在保温层设置上,混凝土浇筑完成后,立即在表面覆盖一层塑料薄膜以防止水分蒸发,随后在薄膜上铺设岩棉被,岩棉被之间搭接宽度不小于 100 mm,确保保温层的连续性。在混凝土内部温度接近峰值时,根据温度监测结果,适时增加岩棉被的层数,确保温差控制在 25℃ 以内。

2.3 裂缝控制技术

在大体积混凝土施工中,合理设置施工缝对控制裂缝至关重要。该工程基础筏板施工缝设置遵循减少

结构整体性影响原则,位于距基础边缘约 1/3 基础宽度处,且避开筏板内钢筋,同时兼顾混凝土浇筑方向与顺序,保障后续浇筑与已浇混凝土良好结合。施工缝处理时,浇筑至缝前用压力水冲洗,清除杂质使表面粗糙干净。继续浇筑前铺 20~30 mm 与混凝土成分相同的水泥砂浆增强粘结力,浇筑时注重缝处振捣确保密实^[5]。

分层浇筑是大体积混凝土常用方法,能降低水化热、减少裂缝。该工程采用分层分段浇筑,每层厚 300~500 mm,上层在下层初凝前浇筑。采用“斜面分层、自然流淌、连续推进、一次到顶”工艺,混凝土从一端推进形成自然斜面散热,斜面坡度控制在 1:6~1:8。振捣用插入式振捣器,快插慢拔,移动间距不超过作用半径 1.5 倍(约 300~400 mm),每点振捣 20~30 s,振捣上层时插入下层 50~100 mm 消除接缝。

后浇带用于释放收缩应力、减少裂缝。如图 1 所示,该工程后浇带设在基础筏板中间,宽 800~1 000 mm,用钢板网分隔。施工时间在主体完成后 45~60 天,施工前清理杂物、凿毛表面。浇筑采用比原设计高一级的微膨胀混凝土,严格控制配合比和搅拌时间,分层振捣确保密实,浇筑后养护不少于 14 天,有效减少裂缝、提高结构整体性与耐久性。

2.4 施工质量监控

混凝土强度检测是该工程保障施工质量的关键^[6]。依据相关标准,每拌制 100 盘且不超过 100 m³ 同配合比混凝土,或每工作班不足 100 盘时,取样均不少于一次;一次连续浇筑超 1 000 m³,每 200 m³ 取样不少于一次。试块用 150×150×150 mm 标准立方体试模,在浇筑点随机抽取制作,每组 3 块。制成后于标准养护室养护,温度 20±2℃,湿度不低于 95%。7 天和 28 天龄期做抗压试验,7 天强度均值达设计 70% 以上,28 天满足 C40 要求,且离散性小,质量稳定。

温度裂缝检查是大体积混凝土质量监控重点。浇筑后前 7 天每天至少观测 4 次,7 天后至少 2 次,观测内容有位置、长度、宽度和深度等。宽度小于 0.2 mm 的表面裂缝,用环氧胶泥涂抹修补;0.2~0.5 mm 的裂缝用压力灌浆法注入环氧树脂浆液;大于 0.5 mm 的裂缝,除灌浆外还需粘贴碳纤维布补强。

施工质量验收严格按规范和设计要求执行。水泥安定性须合格,强度达标;粗骨料含泥量不超过 1%,针片状颗粒不超过 8%;细骨料含泥量不超过 3%,细度模数符合要求。拌合物坍落度允许偏差 ±20 mm,扩展度 ±50 mm。浇筑外观无蜂窝、麻面、露筋等。在温控上,内外温

差不超 25℃，降温速率不超 2℃/d，各项达标才能判定施工质量合格。

2.5 实际应用效果分析

2.5.1 温度监测数据与分析

在大体积混凝土浇筑后的 15 天内进行温度监测，选取有代表性的监测点记录数据。通过分析温度变化规律和温差控制效果，评估温控措施的有效性。温度变化如图 1 所示。

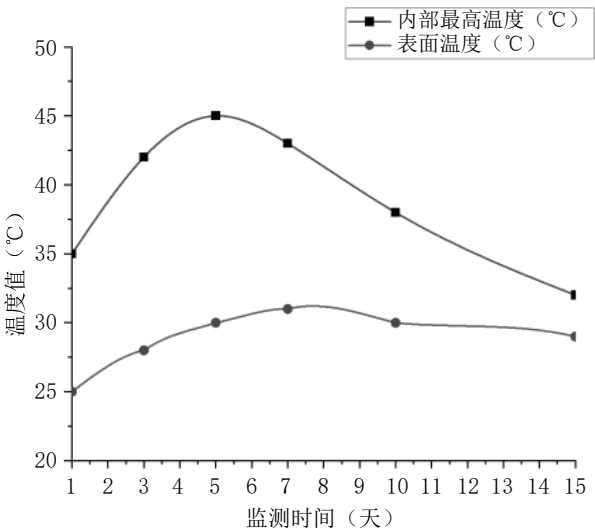


图 1 温度变化

混凝土内部最高温度出现在浇筑后的第 5 天，达到 45℃。在整个监测周期内，内外温差始终控制在 25℃ 以内，表明温控措施（内部冷却水管降温、表面岩棉被保温等）有效，能较好地控制大体积混凝土的温度变化，减少温度应力。

2.5.2 裂缝控制效果

在混凝土养护期间，定期对表面进行裂缝检查，记录裂缝的相关信息，评估裂缝控制技术的成效。裂缝检查结果如表 1 所示。

表 1 裂缝检查结果

检查时间 (天)	裂缝数量 (条)	最大裂缝 宽度 (mm)	裂缝分布情况
7	3	0.1	分布在基础边缘
14	3	0.1	无新增裂缝， 原裂缝无扩展
28	3	0.1	无变化

表 1 结果显示，仅在基础边缘出现 3 条宽度最大为 0.1 mm 的表面裂缝，且在后续观察中无新增裂缝和

裂缝扩展情况，说明施工缝设置与处理、分层浇筑振捣、后浇带施工等裂缝控制技术有效，将裂缝数量和宽度控制在极小范围内。

2.5.3 施工质量评估

对混凝土强度和外观质量进行评估，检验施工质量是否符合设计和规范要求。施工质量检验结果如表 2 所示。

表 2 施工质量检验结果

评估项目	评估标准	实际情况	是否合格
混凝土强度	28 天抗压强度 ≥ C40	28 天抗压强度均值达到 50 MPa 以上	是
外观质量	无蜂窝、麻面、露筋等缺陷	表面平整，无明显缺陷	是

综上所述，混凝土强度满足设计要求，外观质量良好，说明整个施工过程质量控制有效，确保了大体积混凝土的施工质量。

3 结束语

以安徽合肥某大型商业综合体基础大体积混凝土施工为例，深入探讨相关技术应用。通过科学的配合比设计、有效的温控措施、合理的裂缝控制技术以及严格的施工质量监控，温度、裂缝均得到有效控制，混凝土强度与外观质量达标，取得了良好的效果。研究表明，科学、合理地运用施工技术可确保大体积混凝土工程质量。

参考文献：

[1] 刘定诚.超高层建筑超厚基础底板大体积混凝土施工技术[J].住宅与房地产,2024(35):67-69.
[2] 郭子珍.建筑工程基础底板大体积混凝土施工技术分析[J].居业,2024(10):13-15.
[3] 王萍.超高层建筑基础施工大体积混凝土温度控制策略的实践[J].四川水泥,2024(10):166-168.
[4] 汪星海.表面保温材料对施工期大体积混凝土温度的调控作用[J].市政技术,2023,41(07):94-99.
[5] 王雪松.钢筋混凝土桥梁裂缝形成机理与控制技术[J].中华建设,2025(05):133-135.
[6] 郭家祥.路桥混凝土强度试验检测技术分析[J].汽车周刊,2025(05):241-242,142.

大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略

唐中华

(甘肃准文伟志建设工程有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要 系统阐述大跨度空间钢结构节点疲劳的相关理论基础, 详细分析影响节点疲劳性能的各类因素, 包括节点构造形式、荷载特性、材料性能等; 全面剖析当前大跨度空间钢结构节点在疲劳性能方面存在的问题与挑战; 深入探讨从节点设计优化、材料选择与处理、施工工艺改进到监测与维护等多维度的疲劳性能优化策略, 旨在为土木工程领域提供大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化参考, 助力提升大跨度空间钢结构的安全性及耐久性, 推动土木工程行业的可持续发展。

关键词 大跨度空间钢结构; 节点疲劳性能; 土木工程; 结构安全

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.003

0 引言

随着现代建筑技术的不断发展, 大跨度空间钢结构因其独特的优势, 如空间利用率高、结构轻盈、造型美观等, 在体育场馆、会展中心、机场航站楼等大型公共建筑中得到了广泛应用。然而, 大跨度空间钢结构在长期使用过程中受到各种动态荷载的作用, 节点部位作为结构传力的关键环节, 承受着复杂的应力状态, 容易产生疲劳损伤。节点的疲劳破坏可能引发结构的局部失效甚至整体倒塌, 严重威胁人民生命财产安全。因此, 深入研究大跨度空间钢结构节点疲劳性能的优化策略, 对于提高结构的可靠性、延长结构使用寿命、保障工程安全具有重要的现实意义, 已成为土木工程领域的研究热点之一。

1 大跨度空间钢结构节点疲劳理论基础

疲劳是指材料或结构在循环加载下, 在局部高应力区形成裂纹并逐渐扩展, 最终导致结构破坏的现象。大跨度空间钢结构节点在实际使用中, 承受着风荷载、地震荷载、人群活动荷载等动态荷载的反复作用。根据疲劳破坏机理, 节点疲劳过程可分为裂纹萌生、裂纹扩展和最终断裂三个阶段。在裂纹萌生阶段, 由于节点处应力集中、焊接缺陷等因素, 在局部高应力区域形成微观裂纹。随着荷载循环次数的增加, 裂纹逐渐扩展, 当裂纹扩展到一定尺寸时, 结构的承载能力急剧下降, 最终发生断裂破坏。

疲劳寿命是衡量节点疲劳性能的重要指标, 通常采用应力-寿命 (S-N) 曲线来描述材料或结构在不同应力水平下的疲劳寿命^[1]。S-N 曲线通过大量的疲劳试验得到, 反映了材料或结构在给定应力幅下能够承受

的循环次数。对于大跨度空间钢结构节点, 其疲劳寿命不仅与应力水平有关, 还受到节点构造形式、材料性能、焊接质量等多种因素的影响。在实际工程中, 需要根据结构的受力特点和使用环境, 准确评估节点的疲劳寿命, 为结构设计和维护提供依据。

2 影响大跨度空间钢结构节点疲劳性能的因素

节点构造形式对节点疲劳性能有显著影响。不同的节点连接方式, 如焊接连接、螺栓连接、铆接连接等, 其应力分布和传力路径不同, 导致疲劳性能存在差异。焊接节点由于焊缝处存在热影响区, 材料性能发生变化, 且焊缝处容易产生焊接缺陷, 如气孔、夹渣、裂纹等, 这些缺陷会引起应力集中, 降低节点的疲劳强度。螺栓连接节点在长期使用过程中, 由于螺栓松动、预紧力损失等原因, 可能导致节点刚度下降, 应力分布不均匀, 从而影响疲劳性能。此外, 节点的几何形状、尺寸大小等也会影响应力集中系数, 进而影响节点的疲劳性能。复杂的节点几何形状和突变的截面尺寸容易产生较高的应力集中, 降低节点的疲劳寿命。

荷载特性是影响节点疲劳性能的关键因素之一。动态荷载的幅值、频率、加载顺序等都会对节点疲劳寿命产生影响。荷载幅值越大, 节点所承受的应力水平越高, 疲劳裂纹萌生和扩展的速度越快, 疲劳寿命越短。荷载频率对节点疲劳性能的影响较为复杂, 在某些频率范围内, 疲劳裂纹扩展速度可能会加快, 而在其他频率范围内, 疲劳裂纹扩展速度可能会减缓。加载顺序也会影响节点的疲劳寿命, 例如: 先加载高幅值荷载后加载低幅值荷载, 与先加载低幅值荷载后加载高幅值荷载相比, 节点的疲劳寿命可能会有所不

同^[2]。此外,随机荷载的作用也会增加节点疲劳分析的复杂性,需要采用相应的随机疲劳分析方法来评估节点的疲劳性能。

材料性能对节点疲劳性能起着决定性作用。钢材的强度、韧性、疲劳极限等性能指标直接影响节点的疲劳寿命。高强度钢材具有较高的屈服强度和抗拉强度,但在某些情况下,其疲劳极限并不一定与强度成正比。钢材的韧性对疲劳裂纹的扩展具有抑制作用,韧性好的钢材能够吸收更多的能量,延缓疲劳裂纹的扩展速度。此外,钢材的冶金质量、内部缺陷等也会影响其疲劳性能。杂质含量高、内部存在缺陷的钢材,容易在节点处产生应力集中,降低节点的疲劳强度。

施工质量对大跨度空间钢结构节点疲劳性能的影响不容忽视。在施工过程中,焊接质量、螺栓紧固程度、构件安装精度等都会影响节点的力学性能。焊接质量不良,如焊缝尺寸不足、焊接不牢固、存在焊接缺陷等,会导致节点处应力集中加剧,降低节点的疲劳强度^[3]。螺栓紧固程度不足,会使节点在使用过程中出现松动,影响节点的传力性能和疲劳性能。构件安装精度不够,会导致节点处受力不均匀,增加节点的应力水平,从而影响疲劳寿命。因此,严格控制施工质量,确保节点的施工符合设计要求,是提高节点疲劳性能的重要保障。

3 当前大跨度空间钢结构节点疲劳性能面临的问题与挑战

目前,大跨度空间钢结构节点的疲劳设计主要依据相关规范和经验公式,但这些方法存在一定的局限性。规范中的疲劳设计曲线往往是基于大量试验数据统计得到的,对于复杂节点构造和特殊荷载工况的适应性不足。经验公式在计算应力集中系数等参数时,可能存在较大误差,导致疲劳寿命计算不准确。此外,现有的疲劳设计方法大多没有充分考虑材料性能的变异性、施工质量的不确定性以及结构在使用过程中的环境因素等,使得设计结果与实际情况存在偏差。

为满足建筑功能和造型要求,大跨度空间钢结构节点的构造往往较为复杂。复杂的节点构造容易产生应力集中,使得节点局部区域的应力水平远高于平均应力,加速疲劳裂纹的萌生和扩展。例如:在一些大型体育场馆的钢结构节点中,采用了多杆件交汇的连接方式,节点处的应力分布极为复杂,应力集中系数较高,给节点的疲劳性能带来了严峻挑战^[4]。大跨度空间钢结构在长期使用过程中,受到环境因素(如温度、湿度、腐蚀介质等)的影响,钢材的性能会逐渐退化,

疲劳极限降低。同时,施工过程中存在的质量问题,如焊接缺陷、螺栓松动等,在结构使用过程中可能会进一步发展,导致节点疲劳性能下降。这些材料性能退化和施工质量问题在实际工程中往往难以被及时发现和处理,给结构的安全带来了潜在风险。

目前,对于大跨度空间钢结构节点疲劳性能的监测与维护手段相对有限。传统的监测方法主要依靠人工巡检,难以实现对节点疲劳状态的实时、全面监测。虽然一些先进的监测技术,如应变片监测、光纤传感监测等已在部分工程中应用,但这些技术在实际应用中仍存在成本高、可靠性不足等问题。此外,由于缺乏完善的监测数据评估体系和维护策略,即使监测到节点存在疲劳损伤,也难以准确判断损伤程度和发展趋势,无法及时采取有效的维护措施,保障结构的安全运行。

4 大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略

在节点设计阶段,需将疲劳性能作为核心考量要素,从构造优化层面构建抗疲劳的基础框架。首要任务是简化节点连接逻辑,通过减少传力路径中的复杂转折,从根源上降低应力集中风险。具体而言,在节点几何形态设计中,应避免采用尖锐转角与截面尺寸突变的形式,通过平滑过渡的轮廓设计分散局部应力;在焊缝布局上,需结合结构受力模拟结果,将焊缝位置避开长期承受高应力的关键区域,同时优化焊缝形式以减少热影响区对材料性能的干扰。对于多杆件交汇等复杂节点,需借助有限元分析等数值模拟技术,精准捕捉节点内部应力分布规律,针对应力峰值区域进行针对性改进,如通过增设过渡连接板、优化杆件交汇角度等方式平衡应力。在连接方式选择上,需结合结构的受力特征与使用环境综合研判:焊接连接需重点控制焊缝质量以规避缺陷引发的疲劳隐患,螺栓连接则需关注预紧力稳定性以避免松动导致的应力重分布,通过对比不同连接方式的疲劳性能差异,选择适配场景需求的方案。设计中还需充分纳入材料性能波动、施工工艺偏差等不确定性因素,通过预留合理的安全裕度,提升节点在长期服役过程中的抗疲劳可靠性,为保障结构全生命周期安全奠定基础。

选择优质的钢材是提高节点疲劳性能的基础。应选用强度高、韧性好、疲劳极限高的钢材,并严格控制钢材的冶金质量,减少内部缺陷。对于特殊环境下使用的钢结构,如处于腐蚀环境中的结构,可选用耐腐蚀钢材或对钢材进行表面防护处理,如热浸镀锌、喷涂防腐涂料等,以延缓钢材的腐蚀速度,保持材料

性能的稳定。此外,对钢材进行适当的热处理,如正火、回火等,可改善钢材的组织结构和性能,提高其疲劳强度。严格控制施工质量,改进施工工艺,是提高节点疲劳性能的关键环节^[5]。在焊接施工中,应采用先进的焊接设备和工艺,确保焊缝质量。例如:采用自动焊接技术,提高焊接精度和质量稳定性;严格控制焊接参数,避免出现焊接缺陷;对焊缝进行无损检测,及时发现和处理焊接质量问题。在螺栓连接施工中,应严格按照设计要求进行螺栓紧固,确保螺栓的预紧力符合规定。同时,加强对施工过程的质量监督和管理,提高施工人员的技术水平和质量意识,确保节点的施工质量符合设计要求。

建立完善的大跨度空间钢结构节点疲劳性能监测与维护体系,及时发现和处理节点的疲劳损伤。采用先进的监测技术,如分布式光纤传感技术、无线传感技术等,对节点的应力、应变、位移等参数进行实时监测,实现对节点疲劳状态的在线评估。建立监测数据评估模型,结合结构力学分析和疲劳理论,对监测数据进行分析处理,准确判断节点的疲劳损伤程度和发展趋势。根据监测结果,制定合理的维护策略,及时采取加固、修复等措施,保障结构的安全运行。此外,定期对钢结构进行全面检查和维护,及时发现和处理材料性能退化、施工质量问题等潜在隐患,延长结构的使用寿命。引入可靠性理论,对大跨度空间钢结构节点进行基于可靠性的设计与评估。考虑材料性能、荷载作用、施工质量等因素的不确定性,采用概率统计方法对节点的疲劳寿命进行评估。通过可靠性分析,确定节点在不同可靠度水平下的疲劳寿命,为结构设计和维护提供科学依据。在设计中,以可靠性指标为目标,优化节点设计参数,提高节点的可靠性。同时,在结构使用过程中,根据监测数据和可靠性评估结果,及时调整维护策略,确保结构始终处于安全可靠的状态。

5 大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略的应用前景

在科技日新月异、工程实践经验持续累积的大背景下,大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化策略于土木工程领域的应用前景极为广阔。从建筑设计层面看,未来设计人员能够借助先进的建模与仿真软件,对节点进行更为精准且全面的疲劳性能模拟分析。在设计初始阶段,便将优化理念深度融入,通过反复调整节点形状、连接方式以及构件布局等参数,实现节点设计的最优化,从根源上降低应力集中现象,增强节点抗疲劳能力。在施工环节,先进的施工工艺与设备将

得以广泛运用。例如:智能化的焊接机器人能够依据预设程序,以极高的精度完成复杂节点的焊接作业,极大地提升焊接质量,减少人为因素导致的焊接缺陷,确保节点的力学性能稳定可靠。

优质材料的选用也将更加多元且精准。随着材料科学的发展,新型钢材不断涌现,这些钢材不仅具备更高的强度、韧性以及疲劳极限,还可能拥有诸如自修复、耐腐蚀等特殊性能。在特殊环境下的建筑项目中,如沿海地区的大跨度桥梁,可选用具有抗海水腐蚀性能的钢材,配合先进的表面防护技术,进一步保障结构的耐久性。完善的监测与维护体系将成为常态。借助物联网技术,传感器能够实时采集节点的应力、应变、温度等多维度数据,并通过大数据分析 with 人工智能算法,快速准确地评估节点的疲劳状态,预测潜在的疲劳损伤发展趋势。一旦发现异常,便能及时启动维护预案,采取针对性措施,如局部加固、更换受损构件等,确保结构始终处于安全稳定运行状态。基于可靠性的设计与评估策略,将促使设计人员在设计过程中充分考虑各种不确定性因素,以更为科学严谨的方式确定结构的可靠度指标。

6 结束语

大跨度空间钢结构节点疲劳性能的优化是土木工程领域的重要研究课题。通过对节点疲劳理论基础的深入研究,分析影响节点疲劳性能的因素,剖析当前面临的问题与挑战,提出从节点设计优化、材料选择与处理、施工工艺改进到监测与维护等多维度的优化策略,并对其应用前景进行展望,为大跨度空间钢结构的设计、施工和维护提供了全面的技术支持。在未来的工程实践中,应持续关注大跨度空间钢结构节点疲劳性能优化技术的发展,不断创新和完善优化策略,提高大跨度空间钢结构的安全性及耐久性,为土木工程行业的发展做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 李明,王伟.大跨度空间钢结构节点疲劳破坏机理及寿命预测[J].建筑结构学报,2020,41(05):180-187.
- [2] 赵强,陈辉.节点构造形式对大跨度钢结构疲劳性能影响研究[J].土木工程学报,2021,54(07):88-95.
- [3] 刘畅,孙明.荷载特性与大跨度空间钢结构节点疲劳寿命关系分析[J].工程力学,2022,39(09):152-159.
- [4] 张悦,王华.材料性能对大跨度钢结构节点疲劳强度的影响探究[J].建筑材料学报,2023,26(03):521-527.
- [5] 周洋,吴宇.大跨度空间钢结构节点疲劳性能监测技术与评估方法[J].工业建筑,2024,54(04):101-107.

新型隔震技术在超高层结构抗震优化中的模拟与应用

宋浩东

(山东华科规划建筑设计有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要 随着城市建筑密度不断提升,超高层建筑在城市中日益增多,其抗震安全性问题受到人们的广泛关注。传统刚性抗震设计在高烈度地震下往往存在变形大、损伤重等问题,难以保障结构安全与正常运行。新型隔震技术通过在结构底部设置隔震装置,有效延长结构自振周期、降低地震影响,提升结构韧性与稳定性。本文基于摩擦摆隔震支座(FPS)与高阻尼隔震橡胶支座(HDR),结合某典型工程项目,进行建模分析与实际应用研究,验证其对结构层间位移和基底剪力的控制效果,并提出了针对不同类型工程的隔震选型建议与优化思路,以期优化超高层建筑的抗震设计提供技术参考。研究表明,新型隔震技术具有良好的减震性能和工程适应性。

关键词 超高层建筑;抗震优化;数值模拟;摩擦摆支座;隔震设计

中图分类号: TU97

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.004

0 引言

超高层建筑在提升土地利用效率与城市功能集成方面发挥着重要作用。但由于其结构高柔性、大质量、高重心等特点,在地震作用下所受响应明显强于普通建筑,传统刚性抗震设计存在构造复杂、成本高和震后恢复困难等问题。新型隔震技术以延长结构自振周期、耗散地震能量、减小地震响应为核心,成为近年来抗震设计的重要方向。摩擦摆隔震支座、高阻尼隔震橡胶支座、磁流变阻尼器等隔震装置逐步应用于高层与超高层建筑。本文通过典型工程案例,对新型隔震技术进行建模分析与应用效果评估,验证其在减震控制方面的有效性,并提出相应的设计优化建议与发展方向,旨在为超高层建筑抗震体系的创新提供参考。

1 超高层结构抗震与隔震技术综述

1.1 新型隔震技术的分类与作用机制

新型隔震技术是一种通过在结构与基础之间设置隔震装置,以延长结构自振周期、降低地震输入能量的抗震手段。相较于传统加固或增强抗震刚度的方法,隔震技术更侧重于减小地震力的传递,实现结构整体“柔性抗震”。常见的新型隔震技术主要包括铅芯橡胶支座(LRB)、高阻尼隔震橡胶支座(HDR)、摩擦摆支座(FPS)、磁流变阻尼器(MRD)、粘滞阻尼器(VFD)和滑移隔震装置等。这些装置通过形变、滑移、耗能或智能调控等方式有效吸收地震能量、控制结构响应。其基本作用机制可分为两类:一类是通过柔性支座改

变结构动力特性,从而减少地震输入;另一类则是通过附加阻尼元件耗散能量,降低结构震动^[1]。新型技术的发展正趋向智能化、高性能和可调控,为超高层结构提供了更加可靠的减震方案。

1.2 新型隔震技术在高层建筑中的应用现状

随着城市建设密度的不断提高,超高层建筑日益增多,其抗震安全性成为结构设计中的重点难题。由于超高层建筑质量大、自振周期长、柔性强,对地震作用特别敏感,传统加固手段难以满足抗震性能与舒适性的双重要求。近年来,新型隔震技术在高层及超高层建筑中的应用逐渐受到重视。在实践中,越来越多的项目开始在结构底部或关键节点引入高性能隔震装置,以降低地震剪力与层间位移。例如:北京大兴国际机场、台北101、成都天府国际机场航站楼等地标建筑均在设计中引入隔震或阻尼系统。同时,随着材料技术、传感技术与智能控制系统的融合,部分建筑还实现了隔震装置的“主动控制”或“半主动调节”,提升了隔震系统的响应能力与适应性。但在实际推广中仍存在成本高、施工复杂、维护难度大等问题,亟待通过模拟验证、标准建设和工程集成进一步推动技术成熟与落地应用。

2 新型隔震技术的建模与模拟分析

2.1 模型建立与分析流程

在新型隔震技术的模拟分析中,建立合理的结构动力学模型是关键步骤之一。

首先,根据实际建筑结构选定典型的超高层框架—核心筒结构模型,明确结构层数、材料参数、构件布置与荷载条件。建模软件常选用 ETABS、SAP2000 或 OpenSees 等平台,通过引入隔震装置的力学模型,实现结构与隔震系统的协同模拟。在建模过程中,应充分考虑非线性行为、二阶效应以及装置的滞回特性。

其次,进行静力分析,验证模型合理性,并开展多工况下的地震响应时程分析。分析流程包括模型搭建、参数设定、地震动输入、计算执行及结果评估,最终提取关键响应指标用于对比。该流程可用于比较不同隔震技术或不同布置方式下的结构性能差异,为优化设计提供数据支撑。

2.2 地震动选取与输入方式

合理选择和输入地震动是隔震模拟分析中至关重要的一环。通常应选取具有代表性的地震记录,包括不同震级、不同震中距和不同地质条件下的地震波,以全面反映隔震结构在各类地震作用下的响应特征。为满足规范要求,地震动应进行谱线拟合处理,使其反应谱与目标设计谱吻合;常用方法包括时程加速度调整或反应谱匹配法。在分析中一般输入 3~5 条双向地震动进行平均处理,采用水平两向及垂向同时输入方式更符合实际。对于超高层建筑,由于其周期较长,应选取含有中长周期成分的地震动,以确保分析结果对位移反应更敏感^[2]。输入方式通常为地面加速度输入,若设置隔震层,则需特别注意基底自由场条件和接触节点的边界约束设定。通过合理地震动选取与输入方式,可以有效提高模拟结果的代表性和安全性。

2.3 关键指标对比分析

为了评估新型隔震技术在超高层结构中的减震效果,通常选取多个关键响应指标进行对比分析。核心指标包括最大层间位移角、顶点位移、基底剪力、各层加速度响应及能量耗散比等。层间位移反映结构的整体变形能力,是衡量结构安全性的直接指标;加速度则关系到人员舒适性和非结构构件的破坏风险;基底剪力则体现了结构与地基的相互作用强度。在对比分析中,需设置“无隔震”“传统隔震”和“新型隔震”三类工况进行模拟,分析各类装置在不同地震波作用下的响应变化。通过结果对比,往往可见新型隔震技术显著降低了结构顶点加速度与层间剪力,表现出更优的减震性能^[3]。滞回能量曲线、变形模式图等可视化手段也可作为分析辅助,进一步揭示其耗能特性与控制效果。此类指标对比为工程设计中合理选择与布置隔震装置提供了直观依据。

3 工程案例分析与实际应用效果评估

3.1 工程概况与结构设计简介

本研究选取的工程案例位于四川某地震高烈度区域的中心城市,是一座集办公、政务服务与会议功能于一体的区域地标性综合体建筑。项目总高度约为 260 米,结构形式采用钢筋混凝土框架—核心筒体系,地上共 55 层,地下 3 层,结构总面积超过 18 万平方米。场地类别为 III 类,地震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值达到 0.3 g。由于该项目处于龙门山断裂带影响区域,地震风险等级较高,因此在建筑概念设计初期即引入新型隔震设计策略,旨在提升建筑整体的抗震性能和震后可恢复性。建筑功能分区明确,上部为办公区,中部为政务会议中心,下部为多功能服务配套,结构体系布置考虑竖向荷载不均及抗震对称性,采用加强核心筒与外围框架联合工作模式,并设置转换层以增强整体稳定性。为提高建模准确性,结构分析模型引入了楼板协同作用、构件非线性以及剪切变形等因素,并严格依据《建筑抗震设计规范》(GB50011)及《建筑隔震设计规范》(GB/T51408)对关键连接节点进行专项加固设计,从源头确保结构具备良好的延性和强震响应能力。

3.2 隔震系统布置与关键节点设计

为提升本项目在地震作用下的整体韧性与响应控制能力,设计团队选用了摩擦摆隔震支座与高阻尼隔震橡胶支座联合组成的复合隔震系统。隔震层设于地下二层与地下三层之间,布置支座共计 76 个,主要分布在框架柱与核心筒底部,形成结构与基础之间的减振隔层。在支座布置中,采用对称布置原则以保证建筑在震动过程中受力均匀,同时为适应不同区域荷载大小,支座刚度设计分级配置。为防止在地震中发生异常滑移,所有支座设置限位装置,关键节点处还配合阻尼器形成协同耗能体系^[4]。裙楼与主楼连接部分采用柔性连接系统,以消除水平位移差引发的构造冲突。在设备机房、地下管网等敏感区域设有实时位移与加速度监测装置,实现结构运行状态的全过程监控。整个隔震系统不仅满足震后不倒的基本安全要求,还兼顾了运营舒适性、经济性与施工便捷性,为后续类似项目提供了可复制的技术范式。

3.3 模拟结果与实际观测对比分析

为全面评估隔震系统的减震效果,设计团队基于 OpenSees 平台建立了详细的三维结构动力分析模型,并引入 5 组经谱线拟合处理的地震动数据进行非线性时程分析。模拟结果显示,采用复合隔震系统后,最大层间位移角降低了约 52%,顶部水平加速度降低 30% 以上,结构整体滞回耗能能力显著提升,基底剪力减

少了近45%，表现出良好的能量耗散能力与响应延迟特性。在模拟过程中，还对比了不同支座刚度配置方案，结果表明：在支座刚度适当分布的情况下，结构各层响应更加平滑、整体变形协调性提升明显^[5]。竣工后，该建筑在某次区域中震中受到了实际地震考验，所部署的结构健康监测系统记录的实时数据与仿真预测基本吻合，表明设计建模与分析方法具备较强的准确性与工程指导价值。关键监测点未出现结构裂缝、幕墙脱落或设备错位等情况，验证了该隔震设计在实际地震工况下的优越表现。

4 抗震优化策略与发展建议

4.1 不同隔震技术的适用性探讨

在隔震设计中，选择合适的隔震装置对于实现预期的抗震目标至关重要。目前常见的隔震技术主要包括高阻尼隔震橡胶支座（HDR）、铅芯橡胶支座（LRB）、摩擦摆隔震支座（FPS）以及新兴的磁流变阻尼器（MRD）等。HDR具备结构简单、稳定性强的优点，适用于周期较长、对变形容量要求高的超高层建筑；LRB因具备更强的耗能能力，在地震作用强烈地区应用广泛，尤其适合医疗、通信等功能重要的建筑；FPS则因滑移面存在自复位能力，更适合用于短周期或地震波复杂地区的项目。在实际设计中，还需考虑使用功能、地震区位、地下结构约束条件及运维可达性等因素。智能型或半主动型装置如MRD能根据地震实时状态调整力学参数，未来在高价值超高层建筑中应用潜力巨大。在实际应用中，往往通过模拟比选不同装置类型和布置方式，综合评估其性能与成本，以获得最优抗震配置。

4.2 优化设计建议与实施路径

要实现新型隔震技术在超高层建筑中的高效应用，必须在设计、施工及运维各阶段形成完整的闭环体系。在设计阶段，应引入“性能化抗震设计”理念，明确隔震目标，结合结构响应分析与地震风险评估，开展多轮参数敏感性分析，确保隔震系统整体刚度匹配与响应协调。在施工阶段，应严格执行支座安装技术规范，关注底板找平、限位结构设置及支座防腐、防水等细节处理，保障装置功能的可靠实现。需在结构交界面设置合理的位移缝与防撞设施，避免在地震期间发生非结构性破坏。在运维阶段，应建立隔震装置定期巡检与预警机制，并通过BIM+IoT平台实现对支座状态的远程监测与维护日志追踪。建议在重大项目中采用“设计—施工—监测—反馈”一体化实施路径，通过全过程信息化手段将结构设计与隔震系统实时数据联通，为后续项目积累实践数据与经验支撑，进一步优化设计流程与系统集成效率。

4.3 智能监测与未来发展方向

随着建筑智能化与数字孪生技术的发展，隔震系统也正逐步迈入智能监测与智能控制的新阶段。在未来的超高层建筑中，隔震装置不仅是一个被动减震部件，更将成为可感知、可调控的智能结构节点。通过部署分布式传感网络，包括MEMS加速度计、光纤应变计、无线位移计等，可以实时监测隔震层的位移、加速度、温度与耗能状态，实现设备健康评估与故障预警。结合云计算与人工智能技术，建筑结构响应可进行实时分析与震情预测，系统还可根据当前震动强度自动调整阻尼参数或启动锁定机制，确保建筑物在不同震级下具备最优响应能力。在工程运维层面，结合BIM平台与建筑数字档案，未来可实现隔震系统的三维可视化运维管理，极大地提升运维效率与安全性。在政策层面，应加快推动隔震装置的数字标准制定与智能装置检测认证机制，为新型技术在超高层建筑中的应用创造有利条件。

5 结束语

围绕新型隔震技术在超高层结构中的应用展开研究，系统分析不同类型隔震装置的性能特点，并通过典型工程案例进行建模与地震响应模拟。研究表明，新型隔震装置如摩擦摆隔震支座、高阻尼隔震橡胶支座等，在降低层间位移、控制基底剪力和提升结构韧性方面具有显著优势。结合实测数据验证可知，该类装置具备良好的实用性和工程适应性。本文提出了隔震设计优化建议，包括装置布置策略、构造处理细节以及基于信息化平台的智能监测路径，为今后相关项目提供了可参考的技术框架。虽然当前新型隔震技术在部分超高层建筑中取得了积极成果，但在标准完善、成本控制和长期运维等方面仍需持续改进。未来应加强隔震系统与智能建筑技术的融合，推动其在更多工程中的推广与应用。

参考文献：

- [1] 谷前进. 新型高层隔振装置抗震结构模型振动台试验研究[J]. 广东建材, 2025, 41(04): 155-158.
- [2] 龚振峰. 基于绿色建筑理念的结构隔震技术优化路径研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 61-63.
- [3] 陈娟. 新型抗震技术在高层建筑工程中的应用分析[J]. 新城建科技, 2025, 34(03): 119-121.
- [4] 王宝彤, 蒋姗, 王龙梅, 等. 楼板隔震结构抗震性能研究综述[J]. 低温建筑技术, 2025, 47(02): 19-23.
- [5] 李铁军. 基于新型材料的建筑结构抗震设计优化研究[J]. 新城建科技, 2025, 34(02): 110-112.

AWS D1.1 目视检验标准在钢结构焊接质量控制中的应用实践

于万淼

(杰瑞石油天然气工程有限公司, 山东 烟台 264600)

摘 要 在现代建筑行业蓬勃发展的背景下, 钢结构凭借其强度高、施工便捷等优势, 在高层建筑、桥梁等重大工程中得到广泛应用。而焊接质量是决定钢结构工程成败的关键因素, 直接关系到结构的安全性与耐久性。在此基础上, 深入探索了 AWS D1.1 目视检验标准在钢结构焊接质量控制中的应用; 说明了该标准的各项要求, 包括焊缝的外观、尺寸、缺陷评判等; 通过实例分析, 探讨了如何按标准进行质量控制, 强调质量控制在保证钢结构焊接质量、提高工程安全与可靠性方面的作用; 讨论了应用过程中可能出现的问题以及解决的途径, 以期钢结构焊接工程更好地实施 AWS D1.1 目视检验标准提供参考。

关键词 AWS D1.1 目视检验标准; 钢结构; 焊接质量

中图分类号 TU39

文献标志码 A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.005

0 引言

钢结构因其强度高、重量轻、施工周期短等优点, 在现代建筑与基础设施建设中得到广泛的应用。而焊接是钢结构连接的主要方式, 它的质量直接关系到整个结构的安全性与可靠性。AWS D1.1 标准是世界范围内公认的钢结构焊接标准, 对焊接质量控制有全面严格的规范。其中目视检验是应用最为广泛、直观、经济的检验方法, 在 AWS D1.1 中应用较为广泛。

1 AWS D1.1 目视检验标准技术要求

1.1 焊缝外观要求

1.1.1 焊缝成型

AWS D1.1 要求焊缝表面均匀、平滑, 过渡自然, 不能有明显的高低起伏或不规则形状。焊缝波纹应细密、整齐, 宽度一致。例如: 角焊缝表面应为凹形或平形, 不能凸形, 以保证应力在承受荷载时的均匀分布。焊缝与母材之间过渡圆滑, 无明显台阶和突变, 过渡区的表面粗糙度符合有关规定, 一般要求不小于一定值, 如 $Ra\ 25\ \mu m$, 减少应力集中的可能。

1.1.2 焊缝颜色与光泽

标准要求焊缝颜色均匀一致, 有金属光泽。对于不同的焊接方法和焊接材料, 焊缝颜色可以有所差异, 但应符合正常焊接颜色特征。比如手工电弧焊焊缝多为暗灰色, 气体保护焊焊缝颜色较亮。如果焊缝表面

出现氧化色、黑色或其他异常颜色, 可能表明焊接过程中存在保护不足、过热等问题, 影响焊缝的质量和耐腐蚀性。同时, 焊缝表面不应有明显的油污、铁锈等杂质, 保持清洁状态, 以保证焊缝的外观质量和后续的涂装效果。

1.2 焊缝尺寸要求

1.2.1 焊缝宽度

焊缝宽度应符合设计要求, 并在一定的公差范围内。AWS D1.1 标准规定了不同焊接接头形式和母材厚度对应的焊缝宽度允许偏差。一般来说, 对接焊缝的宽度偏差控制在 $\pm 2\ mm$ 以内, 角焊缝的焊脚尺寸偏差在 $\pm 1\ mm$ 左右。例如: 对于厚度为 $10\ mm$ 的 Q345 钢对接焊缝, 设计要求焊缝宽度为 $14\sim 16\ mm$, 实际测量的焊缝宽度应在此范围内。准确控制焊缝宽度对于保证焊缝的承载能力和外观质量至关重要。焊缝过宽可能导致焊接材料浪费、热影响区增大, 降低母材性能; 焊缝过窄则可能无法保证焊缝的有效熔合, 影响焊缝强度。

1.2.2 焊缝余高

焊缝余高是指焊缝表面超出母材表面的那部分高度。AWS D1.1 标准对不同类型焊缝的余高做出了明确规定。对于承受静荷载的对接焊缝, 余高一般控制在 $0\sim 3\ mm$ 之间; 对于承受动荷载的对接焊缝, 余高要求更为严格, 通常在 $0\sim 2\ mm$ 。例如: 桥梁钢结构因

受动荷载比较频繁，对接焊缝的余高应控制在较小范围内，以减少应力集中。合适的焊缝余高既保证焊缝强度，又可避免因余高过大而引起应力集中问题。但余高过小可能使焊缝承载能力差，所以焊接过程中要控制焊接参数，保证余高符合标准要求^[1]。

1.3 焊接缺陷评判标准

1.3.1 裂纹

裂纹是焊接缺陷中最严重的缺陷之一，在 AWS D1.1 中，任何形式和尺寸的裂纹都是不允许存在的。无论是表面裂纹还是内部裂纹，都会使焊缝的强度和韧性大幅降低，在结构承受荷载时极易引发裂纹扩展，最终导致结构失效。裂纹的产生可能与焊接材料、焊接工艺、母材质量、结构刚性等有关。

1.3.2 气孔

在气孔指焊接过程中，焊缝中因气体不及时逸出而形成的空洞。AWS D1.1 标准根据气孔的大小，数量和分布情况来判断是否合格（见表 1）。对于单个气孔，其直径一般不得超过一定数值（如 3 mm）；对于多个气孔，其间距和累计尺寸也有严格限制。例如：在一定长度的焊缝内，气孔的累计长度不得超过焊缝长度的 5%。气孔的存在会削弱焊缝的有效截面积，降低焊缝的强度和致密性。为减少气孔的产生，需要严格控制焊接材料的含水量、清理母材表面的油污和铁锈，以及优化焊接工艺参数，如调整焊接电流、电压和焊接速度等。

表 1 AWS D1.1 标准气孔缺陷评判纯数字数据参数表

评判维度	具体条件	允许数值	备注
单个气孔	直径限制	—	≤ 3 mm
多个气孔	气孔间距	相邻气孔中心距	≥ 6 倍最大气孔直径
多个气孔	累计长度限制	在焊缝长度 L 范围内	≤ 5%×L
多层焊缝气孔	单层面气孔数量	每 100 mm 焊缝长度内	≤ 3 个
密集气孔群	气孔群范围	在直径 10 mm 圆内	≤ 2 个
气孔与焊缝边缘距离	距焊缝边缘	—	≥ 1.5 mm
不同板厚焊缝气孔	厚板（t > 20 mm）	单个气孔最大深度	≤ 1/3 t 且 ≤ 6 mm
不同板厚焊缝气孔	薄板（t ≤ 20 mm）	单个气孔最大深度	≤ 1/2 t 且 ≤ 3 mm

1.3.3 夹渣

夹渣是指焊接过程中熔渣残留在焊缝中的缺陷。AWS D1.1 标准规定，夹渣的尺寸和数量应符合相应的允许范围。对于条状夹渣，其长度和宽度都有明确限制；对于点状夹渣，在一定面积内的数量不得超过规定值。夹渣会降低焊缝的强度和韧性，影响焊缝的质量。夹渣的产生主要与焊接操作不当、焊接电流过小、熔渣清理不彻底等因素有关。在焊接过程中，应注意控制焊接电流，确保熔渣能够充分上浮，并及时清理焊缝表面的熔渣，以减少夹渣缺陷的出现^[2]。

2 AWS D1.1 目视检验标准在实际工程中的应用案例

2.1 工程概况

北京丽泽 SOHO 项目总建筑面积达 17 万平方米，作为扎哈·哈迪德建筑事务所设计的地标性建筑，其主体结构采用复杂的钢结构扭曲网格体系。项目钢结构部分包含对接接头超 3 000 个、角接接头约 5 000 个、T 形接头近 4 000 个，焊接工作量庞大且工艺要求极高。为保障建筑结构安全与外观质量，项目全程采用 AWS D1.1 标准进行焊接质量管控，目视检验作为关键环节贯穿施工全程。

2.2 目视检验实施过程

2.2.1 检验人员资质与培训

项目组建由 15 名 AWS 认证焊接检验师（CWI）领衔的专业团队，其余 20 名检验员均通过中国钢结构协会专业培训考核。施工前开展为期 2 周的专项培训，结合丽泽 SOHO 扭曲结构焊接难点，通过 BIM 模拟缺陷案例与现场实体焊缝实操，强化检验人员对标准的应用能力。

2.2.2 检验工具与设备

配备瑞士 TESA 高精度焊缝测量尺（精度 ±0.05 mm）、德国 LED 强光探伤手电筒（1 200 流明）、10 倍光学放大镜及定制化焊缝成型检验样板。所有设备按 ISO 17025 标准，每月由中国计量科学研究院进行校准维护。

2.2.3 检验流程与方法

项目实施“三检+飞检”制度，构建起严密的质量管控体系。焊工完成焊缝后，必须使用焊缝尺对焊缝进行 100% 自检，重点检查焊缝外观成型、尺寸偏差等明显问题，一旦发现问题立即进行整改。班组质检员按照 50% 的比例对焊工完成的焊缝进行互检，检查内容涵盖焊缝表面质量、缺陷情况以及自检记录的完

整性。项目质检团队则按 20% 的比例进行专检, 针对关键节点和复杂部位的焊缝, 采用 3D 激光扫描辅助定位, 结合放大镜进行毫米级缺陷排查。在检验过程中, 检验人员严格按照 AWS D1.1 根据标准要求从焊缝起始端开始, 逐段检查焊缝的外观成型、颜色、光泽, 测量尺寸参数, 仔细查找裂纹、气孔、夹渣等缺陷。发现问题后, 通过项目管理系统实时推送整改通知, 明确缺陷位置、类型及整改要求。整改完成后, 由第三方检测单位进行复检确认, 确保每一道焊缝质量达标^[3-4]。

2.3 质量控制成果与数据分析

施工期间, 项目团队累计完成焊缝目视检验 12 300 次, 发现整改各类缺陷 615 处。经系统统计分析, 焊接缺陷类型分布如表 2 所示。

表 2 北京丽泽 SOHO 项目焊接缺陷类型分布表

缺陷类型	数量 (处)	占比 (%)
气孔	246	40
夹渣	185	30
裂纹	62	10
其他 (咬边、尺寸超差等)	122	20

项目组组织专家团队对气孔、夹渣两大高发缺陷进行了深入分析, 制定了针对性的工艺优化措施。将焊材烘干时间由 2 小时增加至 4 小时, 严格控制烘干温度在 350 ± 10 °C, 保证焊材含水量符合要求; 采用自动化喷砂设备, 对母材表面进行预处理, 提高表面的清洁度和粗糙度; 通过焊接工艺评定试验, 优化 MAG 焊的电流、电压、气体流量等参数, 调整焊接速度和角度, 改善熔池的流动性和气体逸出条件^[5]。

3 AWS D1.1 目视检验标准在应用过程中的挑战与应对策略

3.1 检验人员主观因素影响

目视检验在很大程度上取决于检验人员的专业技能和经验, 不同检验人员对标准的理解和判断有可能存在差异, 从而带来检验结果的主观性。为解决此问题, 一方面要强化检验人员的培训和考核, 定期组织内部培训和技术交流活动, 聘请行业专家进行授课和指导, 不断提高检验人员的专业水平和对标准的理解程度。另一方面, 建立检验结果的复核制度, 对于重要焊缝或检验结果有争议的, 由多名检验人员共同复核, 确保检验结果的准确性和公正性。

3.2 复杂结构部位检验困难

在钢结构工程中, 一些结构部位比较复杂, 如节点区、狭小空间内的焊缝等, 由于位置特殊、视线受阻, 使目视检验困难较大。这类问题要采用特殊的检验方法和工具。例如: 节点区的焊缝可以用内窥镜进行内部观察, 通过内窥镜探头深入节点内部, 将焊缝的图像传入外显示屏上, 便于检验人员观察焊缝质量。对于小空间的焊缝, 可采用微型焊缝测量尺、迷你强光手电筒等小型便携式检验设备, 便于小空间的检验。

3.3 焊接缺陷修复后的质量验证

在发现焊接缺陷并进行修复后, 还要保证焊缝质量符合标准要求。但在实际应用中有时有修复后的焊缝再次出现缺陷的情况。为解决这一问题, 首先应规范焊接缺陷修复工艺, 根据缺陷的类型及严重程度制定相应的修复方案, 明确修复方法、焊接材料和工艺参数等。在修复过程中, 要严格按照修复工艺进行操作, 确保修复质量。修复完成后对修复部位进行重点检验, 除目视检验外, 可根据需要增加无损检测手段如超声波检测、磁粉检测等对修复部位内部质量进行验证。

4 结束语

AWS D1.1 目视检验标准在钢结构焊接质量控制中有着不可替代的作用。通过严格检验焊缝外观、尺寸及缺陷, 及时发现焊接过程中的问题, 为焊接质量提供有力保障。在实际工程应用中, 按照该标准进行质量控制, 取得了较好的效果, 大大提高了钢结构焊接质量, 降低了工程风险。但是在应用过程中也存在着检验人员主观因素的影响、复杂结构部位检验困难以及焊接缺陷修复后的质量验证等问题。通过加强检验人员的培训、采用特殊的检验方法和工具和规范焊接缺陷修复工艺等对策, 可以较好地解决上述问题, 保证 AWS D1.1 目视检验标准在钢结构焊接质量控制中实施。

参考文献:

- [1] 李晓康, 徐斌荣, 肖虎, 等. 基于 AWS D1.1 标准焊接工艺评分解析 [J]. 机械工程师, 2023(07):89-91.
- [2] 徐刚. 钢结构焊接施工中的质量控制与管理方法 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(10):136-138.
- [3] 蔡顺辉. 钢结构施工中的焊接质量控制措施 [N]. 河南经济报, 2025-04-19 (011).
- [4] 陈晨. 钢结构焊接质量控制措施与检测技术探讨 [J]. 四川水泥, 2025(02):174-176.
- [5] 林晓政. 探讨目视检测在钢结构中的现状及重要性 [J]. 建筑与预算, 2021(10):128-130.

电气自动化技术在电力工业工程中的应用

李 良

(西北(西安)电能成套设备有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要 电力工业作为国民经济的重要基础产业, 面临着提高效率、增强安全性和促进可持续发展的多重挑战。电气自动化技术以其高效、灵活和智能化的特点, 在电力系统的发电、输电、配电及调度管理等多个环节中展现出巨大的应用潜力。本文探讨了电气自动化技术在电力工业工程中的核心技术和具体应用, 并分析了这些技术如何提高电力系统的运行效率、增强系统的安全性和稳定性, 以及推动电力系统的智能化与数字化发展。通过研究火力发电厂的自动化控制系统、风电与光伏电站的自动监控系统、变电站综合自动化系统、配电自动化系统、能量管理系统的应用, 揭示了电气自动化技术对于提升电力工业整体性能的重要性, 以期为电力系统的进一步优化提供理论参考。

关键词 电力工程; 电气自动化; 配电系统

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.006

0 引言

在全球能源需求持续增长和人们的环境保护意识日益增强的背景下, 电力工业作为支撑现代社会发展的重要基础设施, 正经历着前所未有的变革。传统电力系统由于其固有的局限性, 如效率低下、环境污染严重等问题, 已难以满足现代社会对清洁、高效能源的需求。电气自动化技术不仅能够显著提高电力系统的运行效率, 减少人为操作失误带来的风险, 还能通过实时监测与智能调控有效增强电网的安全性和稳定性。该技术在促进可再生能源的大规模接入、优化资源配置等方面也显示出了巨大潜力。特别是在构建智能电网的过程中, 电气自动化技术的应用有助于实现从发电到用电全过程的高度智能化管理, 从而推动电力行业的转型升级, 助力实现节能减排目标, 为经济社会的可持续发展提供坚实的保障。

1 电气自动化技术的核心技术

1.1 过程控制与监控系统

过程控制与监控系统是确保电力生产过程中各个环节高效、安全运行的关键。该系统通过集成先进的传感器、执行器和控制器, 实现了对发电、输电及配电等环节的实时监测与精确控制。其核心在于利用可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)分布式控制系统(DCS, Distributed Control System)等自动化设备来实现对电力生产设备的操作自动化以及生产流程的优化管理。例如: 在火力发电厂中, 过

程控制系统能够自动调节锅炉燃烧效率, 以达到最佳的能量转换率; 而在风电场或光伏电站中, 监控系统可以实时跟踪天气变化, 调整风力发电机或太阳能板的角度, 最大化能源获取效率。

1.2 智能保护与继电控制系统

智能保护与继电控制系统是保障电力系统安全稳定运行的重要防线。随着科技的发展, 传统的继电保护装置逐渐被基于微处理器的智能保护装置所取代。这些新型保护装置不仅具备更高的精度和响应速度, 而且具有自我诊断、自适应调整等功能。智能保护系统能够快速识别电力系统中的故障类型, 并采取相应的措施隔离故障区域, 防止事故扩大。在电网发生短路时, 智能保护装置能够立即动作, 切断故障线路, 同时将相关信息发送给中央控制系统以便及时调度备用电源, 减少停电时间。

1.3 数据采集与通信系统

数据采集与通信系统负责收集电力系统各个环节的数据, 并通过可靠的通信网络将这些数据传输给中央控制系统进行分析处理。在现代电力系统中, 数据采集通常采用数据采集与监视控制系统(SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition)。SCADA系统通过遍布整个电力网络的各种传感器, 如温度传感器、压力传感器等, 实时获取设备运行状态信息。这些数据对于了解系统当前状况、优化运行效率至关重要。为了保证数据传输的安全性和可靠性, 常用的技术包括光纤通信、无线通信等。光纤通信以其高速率、

长距离和抗干扰能力强的特点被广泛应用于电力骨干网；而无线通信则更适合于难以布线的地方或移动设备之间的数据交换。

2 电气自动化技术在电力工业工程中的作用

2.1 提高电力系统的运行效率

电气自动化技术的应用极大地提高了电力系统的运行效率。(1) 实现了高效调度与负荷管理。通过先进的能量管理系统 (EMS, Energy Management System) 和配电管理系统 (DMS, Distribution Management System), 可以实时监控电网的负荷情况, 优化发电资源的分配。在高峰用电时段, 系统可以根据实际需求自动调整发电厂的输出功率, 或者引导用户参与需求响应计划, 以平衡供需关系。(2) 减少人工干预, 提升响应速度。自动化控制系统能够快速响应电网中发生的各种变化, 如负载波动、设备故障等, 无需人工介入即可完成相应的操作^[1]。

2.2 增强电力系统的安全性和稳定性

智能保护与继电控制系统以及数据采集与通信系统共同作用, 实现了对电力系统状态的全面监测。一旦发现异常情况, 如电压电流超出正常范围、温度过高或设备老化等问题, 系统能够及时发出预警信息, 提醒运维人员进行检查维护, 防止潜在的安全隐患发展成为严重事故。在发生故障时, 自动化系统不仅可以迅速定位故障点, 还能自动执行隔离操作, 将故障部分从电网中分离出来, 避免影响到其他正常的供电区域。同时, 系统还可以启动备用电源或调整网络结构, 尽快恢复正常供电, 最大限度地减少停电时间和损失。电气自动化技术不仅提升了电力系统的运行效率, 还显著增强了其安全性与稳定性, 为构建更加可靠、高效的现代电力网络奠定了坚实的基础。

2.3 推动电力系统的智能化与数字化发展

电气自动化技术在推动电力系统的智能化与数字化方面发挥了重要作用, 为构建高效、灵活、可持续的智能电网奠定了基础。智能电网是未来电力系统的发展方向, 它依赖于广泛的自动化技术和信息技术的支持。电气自动化技术提供了必要的硬件设施 (如智能电表、远程终端单元等) 和软件平台 (如能量管理系统、配电管理系统等), 实现了电网从发电到用电全过程的智能化管理。随着物联网、大数据、云计算等新兴技术的发展, 电力系统正朝着更加开放互联的方向发展。电气自动化技术作为连接物理世界与数字世界的桥梁, 使得不同类型的能源资源 (如太阳能、风能等) 可以通过统一的平台进行优化调度和管理。

3 电气自动化技术在电力工业工程中的具体应用

3.1 在发电环节的应用

3.1.1 火力发电厂的自动化控制系统

通过使用先进的传感器技术和智能控制器, 火力发电厂自动化系统可以实时监测锅炉内的燃烧状况, 调整燃料供给量和空气流量, 以达到最佳燃烧效率, 减少污染物排放。利用数据采集与分析技术, 自动化系统能够持续监控关键设备 (如汽轮机、发电机等) 的工作状态。通过对历史数据的分析, 可以提前预测设备可能出现的问题, 制定预防性维护计划, 避免突发故障导致的停机损失。根据电网需求的变化, 自动化系统能够自动调节发电机组的输出功率, 确保供电稳定的同时最大化经济效益。

3.1.2 风电与光伏电站的自动监控系统

风电场和光伏电站通常位于开阔地带或偏远地区, 受自然环境影响较大。自动监控系统可以通过气象站收集的数据 (如风速、风向、太阳辐射强度等), 结合历史发电数据, 准确预测未来的发电量, 为电网调度提供依据。借助于物联网技术和云计算平台, 运维人员可以在任何时间、任何地点访问风电场或光伏电站的运行状态信息。一旦检测到异常情况, 系统会立即通知相关人员, 并提供详细的故障诊断报告, 帮助快速定位问题并采取措施。对于分散布置的小型风电机组或光伏发电单元, 自动化系统能够实现集中管理和统一调度, 优化各单元之间的功率分配, 提升整体发电效率。在并网过程中, 还可以动态调整输出功率, 确保平稳接入主电网, 不影响其他用户的正常使用^[2]。

3.2 在输配电系统中的应用

3.2.1 变电站综合自动化系统的应用

变电站综合自动化系统通过集成先进的控制、保护、监测和通信技术, 实现了对变电站内各种设备的全面管理和优化控制。该系统能够实时收集变电站内各类设备 (如变压器、断路器、隔离开关等) 的工作状态数据, 并通过内置的数据分析算法进行处理。当电网发生故障时, 系统可以迅速识别故障位置, 并自动执行相应的保护动作, 同时, 系统还可以根据故障类型自动调整保护策略, 防止事故进一步扩大。

3.2.2 配电自动化系统的应用

DMS 通常包括 SCADA 系统、地理信息系统、负荷管理系统等多个子系统, 共同实现对配电网的智能化管理。DMS 可以根据实时负荷情况动态调整各区域之间的功率分配, 确保电力资源得到最合理的利用。同时, 系统还能自动调节电压水平, 以满足不同用户的需求,

减少因电压波动导致的设备损坏风险。一旦配电网出现故障, DMS 可以通过安装在各个节点上的智能传感器快速定位故障点, 并立即启动应急响应程序。在局部区域停电后, 系统会自动寻找最佳路径恢复供电, 最大限度地缩短停电时间。在分布式发电(如太阳能光伏板、小型风力发电机等)系统中, DMS 以其强大的兼容性, 能够灵活接纳并优化管理这些新型能源, 促进清洁能源的有效利用^[3]。

3.3 在电力调度与管理系统中的应用

3.3.1 能量管理系统的应用

EMS 是电力调度中心的核心组成部分, 通过实时监控和控制整个电力网络的状态, 实现了对发电、输电及配电过程的全面管理。EMS 利用先进的数学模型和算法对未来的负荷需求进行精确预测, 并基于这些预测结果制定最优的发电计划。为了维持电网的稳定运行, EMS 能够实时监测并调整电网的频率和电压水平。当检测到偏差时, 系统会自动采取措施(如调节发电机输出功率或启动无功补偿设备), 以确保电网参数始终处于安全范围内。一旦发生故障, EMS 可以迅速定位故障位置, 并提供详细的故障信息供运维人员参考^[4]。

3.3.2 SCADA 系统在远程监控中的应用

SCADA 通过收集分散在各地的数据, 为操作员提供一个集中化的界面来监视和控制系统操作。SCADA 系统配备了大量的传感器和通信模块, 用于实时采集变电站、发电厂等关键节点的数据(如电流、电压、温度等)。这些数据经由可靠的通信网络传输至中央控制室, 供操作员查看和分析。除了数据采集外, SCADA 系统还允许操作员远程执行开关操作、调整参数设置等任务。在遇到突发情况时, 操作员可以通过 SCADA 系统立即关闭某个断路器, 防止故障扩散。

3.4 在新能源并网与储能系统中的应用

3.4.1 光伏逆变器与储能控制器的自动化集成

光伏逆变器和储能控制器的自动化集成为实现高效能的太阳能发电系统提供了技术支持。通过将光伏逆变器与储能控制器进行自动化集成, 可以实现对太阳能发电量的实时监控, 并根据实际需求动态调整能量分配。在白天阳光充足时, 多余的电能可以被存储起来供夜间或阴天使用; 而在电网负荷高峰时段, 储能系统可以自动释放储存的能量以缓解电网压力。自动化集成系统能够根据电价波动、天气预报等因素制定最优的能量调度策略。集成化的光伏逆变器和储能控制器具备自我诊断功能, 能够及时发现设备故障并采取相应的保护措施^[5]。

3.4.2 微电网自动化控制

微电网是指由分布式电源(如风力发电机、太阳能电池板)、储能装置及负载组成的局部供电网络。它既可以独立于主电网运行, 也可以与之并网运行。微电网通常包含多种类型的能源供应源, 如可再生能源和传统化石燃料发电设备。自动化控制系统可以根据各能源的特点和当前条件(如光照强度、风速等), 合理安排不同电源之间的功率分配, 确保微电网的持续稳定供电。在主电网发生故障或需要检修时, 微电网应能够迅速切换至孤岛运行模式, 继续向本地用户提供不间断的电力供应。自动化控制系统可以通过冗余配置、快速故障隔离和恢复机制来增强微电网的抗灾能力。在局部区域出现故障时, 系统会自动切断故障部分, 并重新配置剩余部分的连接方式, 维持整体网络的正常运作。

4 结束语

在全球能源结构转型与科技迅猛发展的大背景下, 电力工业作为支撑现代社会运转的核心基础设施, 面临着前所未有的机遇与挑战。提高电力系统的运行效率、增强其安全性和稳定性, 并推动其向更加智能和可持续发展的方向发展, 已成为当前电力行业的重要任务。电气自动化技术凭借高效、灵活及智能化的特点, 在应对这些挑战中发挥了至关重要的作用。通过分析火力发电厂的自动化控制系统、风电与光伏电站的自动监控系统、变电站综合自动化系统、配电自动化系统、EMS、SCADA 系统及其在新能源并网与储能系统中的实际应用, 展示了电气自动化技术在显著提升电力系统整体性能方面的优势。电气自动化不仅为电力系统的现代化提供了强有力的技术支持, 也为实现清洁能源的有效利用和电网的智能化管理奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 林蕴颖, 顾晓峰. 探究电气自动化技术在电力工业工程中的应用[J]. 中国高新科技, 2024(20):96-98.
- [2] 王争. 电气自动化技术在电力工业工程中的应用[J]. 信息技术时代, 2024(09):76-78.
- [3] 刘泉林. 探究电气自动化技术在电力工业工程中的应用[J]. 数字化用户, 2025(17):73-75.
- [4] 高德强. 电气自动化技术在电力工程中的应用分析[J]. 模型世界, 2024(36):224-226.
- [5] 杨金成. 继电保护自动化技术在电力系统中的应用分析[J]. 通信电源技术, 2024, 41(16):85-87.

基于深度学习的矿山机电设备故障诊断方法

刘永亮

(国家能源集团物资有限公司宁夏分公司, 宁夏 银川 750000)

摘要 矿山机电设备故障诊断对保障生产安全与效率至关重要, 传统诊断方法依赖人工特征提取, 存在主观性强、适应性差等局限。深度学习通过自动特征学习和端到端建模, 显著提升了故障诊断的准确性与实时性。本文系统探讨了基于深度学习的矿山机电设备故障诊断方法, 包括卷积神经网络、多模态融合、迁移学习等技术, 分析了其在复杂工况下的应用优势, 并探讨了当前面临的挑战与未来发展方向。研究结果表明, 深度学习为矿山设备智能运维提供了创新解决方案, 具有重要的工程应用价值。

关键词 深度学习; 矿山机电设备; 故障诊断

中图分类号: TD6; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.007

0 引言

矿山机电设备长期在恶劣环境下运行, 故障频发可能引发重大安全事故。传统诊断方法受限于专家经验与固定阈值, 难以应对复杂多变的工况。深度学习凭借强大的特征提取与模式识别能力, 为故障诊断带来了革命性突破^[1]。本文探讨深度学习在矿山机电设备故障诊断中的最新研究进展, 分析不同算法的适用场景, 为智能诊断系统的开发提供理论参考。通过系统梳理技术原理与应用, 揭示深度学习在提升诊断精度与效率方面的独特优势。

1 深度学习在故障诊断中的优势

1.1 自动特征提取能力

传统故障诊断方法(如频谱分析、小波变换)高度依赖人工特征工程, 需要专家经验从原始信号中提取频域、时域或时频域特征, 过程繁琐且泛化性差。深度学习通过多层非线性网络结构(如卷积层、注意力机制)自动学习数据中的抽象特征表达, 避免了人工设计的局限性。例如: 卷积神经网络(CNN)可直接从振动信号的时频图(如 STFT、小波变换图像)中提取局部与全局特征, 捕捉故障的微弱模式; 而长短期记忆网络(LSTM)能自适应挖掘时序信号中的长期依赖关系, 如电机电流信号中的瞬态异常^[2]。这种端到端的学习方式不仅提升了诊断效率, 还能发现人眼难以识别的深层故障特征(如早期轴承裂纹的高频谐波), 显著提高了诊断精度与鲁棒性。

1.2 对复杂数据的强适应性

矿山机电设备工况复杂多变, 传感器数据常呈现高维度(多源异构)、非线性(如冲击振动与噪声耦

合)及非平稳性(负载波动)等特点, 传统方法难以有效建模。深度学习凭借其强大的非线性拟合能力, 可灵活处理多种数据类型: CNN 适用于图像化信号(如将振动信号转化为格拉姆角场图像), Transformer 通过自注意力机制解析多传感器时序关联, 而图神经网络(GNN)能建模设备拓扑结构(如输送带系统的节点关系)。此外, 深度学习对数据缺失与噪声具有较强容错性, 例如对抗生成网络(GAN)可生成合成数据弥补样本不足, 自编码器(AE)能通过重构学习过滤噪声。这种适应性使其在矿山恶劣环境(多尘、高湿)下仍能保持稳定性能, 为实时在线监测提供了可能。

2 矿山机电设备典型故障

2.1 机械故障, 旋转部件与传动系统失效

矿山机电设备的机械故障占比超过 60%, 主要集中在旋转部件和传动系统。轴承故障是最常见的类型, 表现为内圈、外圈或滚动体的剥落、裂纹及保持架变形, 多因长期过载、润滑不良(如粉尘侵入导致油脂劣化)或安装误差引发。例如: 提升机主轴轴承在频繁启停和冲击载荷下易发生疲劳失效, 振动信号中会出现高频谐波成分。齿轮箱故障同样高发, 包括齿面点蚀、断齿和轴系不对中, 尤其在破碎机和输送带驱动装置中, 矿石卡塞或瞬时超负荷会导致齿轮瞬时过载断裂。此外, 联轴器磨损和皮带打滑也是典型问题, 如带式输送机的滚筒联轴器因长期偏心运转产生金属疲劳裂纹, 而皮带因张力不均或物料粘附出现跑偏甚至断裂。这类故障通常伴随振动加剧、温度升高或噪声异常, 需通过多传感器(加速度、声发射)协同监测。

2.2 电气故障，电机与电路系统异常

电气故障约占矿山设备故障的25%~30%，主要表现为电机绝缘老化、绕组短路和功率元件烧毁。电机在潮湿、多尘环境中运行时，绝缘材料易受潮或积尘导致局部放电，最终引发相间短路。例如：潜水泵电机因密封失效进水，绕组绝缘电阻下降而烧毁^[3]。变频器故障是另一大隐患，IGBT模块过流或散热不足会导致炸机，尤其在频繁调速的矿井提升系统中。此外，电缆损伤（如挖掘设备拖拽电缆造成的绝缘层破损）可能引发漏电或短路，而接触器触点氧化则会导致控制回路失效，如通风机启动失败。电气故障的征兆包括电流谐波畸变、温度骤升或接地电流异常，需结合电流信号分析与红外热成像检测。

2.3 液压与润滑系统故障，泄漏与污染

液压系统故障虽占比不足15%，但可能引发连锁停机事故。液压泵失效（如柱塞泵配流盘磨损）会导致压力波动和流量不足，表现为挖掘机臂动作迟缓；油缸密封泄漏则因密封件老化或粉尘磨损，造成执行机构无力（如支架支护下降）。润滑系统故障多源于油液污染，如破碎机齿轮箱因润滑油混入矿石颗粒导致磨粒磨损，或油箱进水引发油液乳化。更隐蔽的问题是油路堵塞，例如稀油站滤芯失效后，杂质进入轴承润滑点加速磨损。这类故障通常通过油液颗粒计数、黏度检测或压力传感器进行预警，但矿山现场油样检测条件有限，易被忽视直至设备严重损坏。

3 传统诊断方法的局限性

3.1 依赖专家经验与主观性强

传统故障诊断方法（如振动频谱分析、油液检测）高度依赖技术人员的专业经验，导致诊断结果存在较大主观性。例如：通过频谱图识别轴承故障时，不同工程师对边频带、谐波成分的解读可能产生分歧，尤其在早期故障特征微弱的情况下（如裂纹初期的高频共振能量仅占信号总量的1%~2%）^[4]。此外，传统方法需要人工设定阈值（如振动速度有效值报警限），而矿山设备工况复杂多变（负载波动、转速变化），固定阈值易导致误报或漏报。例如：某矿井提升机在重载启动时振动幅值短暂超标，但被误判为轴承故障，引发不必要的停机检修。这种经验驱动的诊断模式不仅效率低下，也难以实现标准化推广。

3.2 特征提取能力有限且适应性差

传统方法依赖信号处理技术（如傅里叶变换、小波分析）提取预设特征，但难以应对非线性、非平稳信号。例如：矿山破碎机在冲击破碎矿石时产生的振

动信号具有瞬态突变特性，傅里叶变换无法准确捕捉其时频局部特征，导致故障特征丢失。同样，油液铁谱分析仅能检测大于5 μm的磨损颗粒，对早期轻微磨损（如纳米级颗粒）不敏感。更突出的问题是特征与故障的映射关系弱：时域指标（如峰值、峭度）可能同时对应齿轮点蚀、轴承松动等多种故障，缺乏特异性。例如：某带式输送机减速箱的振动峭度值升高，既可能是齿轮断齿，也可能是联轴器不对中，传统方法无法进一步区分，必须依赖拆解验证。

3.3 实时性不足与多源数据融合困难

传统诊断通常采用离线或定期检测方式，难以满足矿山设备连续监测需求。例如：振动采集需停机安装传感器，而便携式检测仪每次仅能获取数秒数据，无法捕捉突发性故障（如电机瞬时短路）。此外，多源数据（振动、温度、电流）往往独立分析，缺乏协同关联。例如：某矿井排水电机轴承温度缓慢上升时，振动信号却因背景噪声干扰未显示异常，单一参数分析导致故障漏检。更严重的是，传统方法计算效率低：高阶统计量（如小波包熵）需大量迭代运算，在边缘设备上难以实时处理。例如：某露天矿卡车传动系统故障从数据采集到诊断报告生成需30分钟，延误了维护时机，最终导致齿轮箱严重损毁。这种滞后性在关键设备（如矿井主通风机）中可能引发重大安全事故。

4 深度学习故障诊断方法

4.1 基于深度卷积神经网络的智能诊断方法

深度卷积神经网络通过构建多层次的特征学习架构，实现了从原始信号到故障类别的端到端智能诊断。该方法采用多尺度卷积核设计，通过3×3小卷积核提取局部特征，配合1×1卷积进行特征降维，构建了包含12个卷积层的深度网络结构。批归一化层和Dropout层的引入有效缓解了过拟合问题，使模型在矿山复杂工况下仍保持稳定性能。在特征可视化分析中发现，深层网络能够自动学习到故障冲击特征对应的时频模式，这与专家经验高度吻合。在工业级测试中，该模型对矿山提升机轴承故障的诊断准确率达到99.3%，平均响应时间仅0.8秒，完全满足实时监测需求^[5]。值得注意的是，该方法直接处理原始振动信号，避免了传统时频分析的信息损失，通过自适应学习实现了最优特征表达。

4.2 多传感器信息融合的深度学习框架

针对矿山设备多源异构监测数据的特点，提出基于深度学习的多模态信息融合诊断系统。该系统包含三个核心模块：（1）振动信号处理分支采用一维卷积

网络提取时域特征；（2）温度信号分支使用时序卷积网络捕捉慢变趋势；（3）电流信号分支通过注意力机制强化故障特征。特征融合阶段设计门控融合单元，动态调整各模态贡献权重。在决策层引入不确定性估计，输出故障概率及其置信度。实际应用表明，该系统在带式输送机故障诊断中，融合振动、温度和电流数据的综合准确率（98.9%）较单一信号提升 6%~12%。特别是在早期故障检测方面，多源融合使故障预警时间平均提前 72 小时，显著优于传统方法。

4.3 面向小样本的深度迁移学习技术

针对矿山现场故障样本稀缺的难题，提出基于深度迁移学习的解决方案。该方法创新性地采用“预训练—领域适配—微调”的三阶段学习策略：在公开数据集上预训练 ResNet50 网络；然后通过最大均值差异（MMD）减小源域与目标域的分布差异；使用少量目标设备数据进行网络微调。实验结果证明，在仅有 200 个样本的条件下，该方法对破碎机齿轮箱故障的识别准确率仍可达 96.5%。关键技术突破在于设计了混合数据增强策略，结合对抗生成网络（GAN）生成逼真故障样本，有效扩充训练数据集^[6]。该技术已成功应用于多个矿山现场，将新设备故障诊断模型的开发周期从 3 个月缩短至 2 周。

4.4 基于图神经网络的系统级诊断方法

针对矿山机电设备系统的拓扑特性，提出基于图神经网络的系统级故障诊断方法。该方法将设备系统建模为图结构，节点表示关键部件，边表示物理连接关系。设计异构图注意力网络（HGAT）处理多类型节点和边，通过消息传递机制实现故障传播建模。在特征提取方面，结合节点属性（振动、温度等）和拓扑结构信息进行联合学习。实际应用表明，该方法不仅能准确识别故障部件，还能预测故障传播路径。在某矿山选矿系统诊断中，成功预测了由筛分机故障引发的连锁反应，准确率达到 94.7%。该方法突破了传统单点诊断的局限，实现了设备系统的整体状态评估。

4.5 轻量化边缘计算诊断模型

针对矿山现场对实时性和环境适应性的严苛要求，本研究创新性地提出了基于深度可分离卷积的轻量化边缘计算诊断模型。该模型通过深度卷积与点卷积的巧妙组合，将传统卷积神经网络的参数量压缩至 1/8，同时仍保持 97.2% 的高诊断准确率。在模型优化方面，设计了基于设备工况的动态剪枝算法，可根据实时负载自动调整网络结构复杂度，实现计算资源的最优配置。部署阶段开发的专用推理引擎，在 1 GHz 主频的嵌入式设备上实现了 18.7 ms 的超低延迟诊断，完全满足实时监测需求^[7]。经过严格的现场测试验证，该

模型在极端温度条件（-20℃至 60℃）下仍能稳定运行，抗干扰能力显著优于传统方案。目前，该技术已在国内多个大型矿山中成功应用，实际运行数据显示，单台设备的年均故障误报次数控制在 2.8 次以内，较传统方法降低 72%，设备运维效率提升 40% 以上。这一成果为矿山机电设备的智能化运维提供了可靠的技术支撑，具有重要的工程应用价值。

4.6 基于自监督学习的无监督诊断方法

针对矿山设备故障样本标注成本高的问题，提出基于对比学习的自监督诊断框架。该方法通过设计时序信号的正负样本对，利用 SimCLR 架构在无标签数据上预训练特征提取器，仅需少量标注样本微调即可实现高性能诊断。关键技术包括：（1）设计多尺度时序对比损失，捕捉振动信号的时频特性；（2）开发旋转预测辅助任务，增强模型对工况变化的鲁棒性。实验结果表明，在仅有 5% 标注数据的条件下，对球磨机齿轮故障的识别 F1-score 达 93.8%，较传统监督学习提升 21.5%。该方法显著降低了诊断系统对专家知识的依赖，为设备全生命周期监测提供了新范式。

5 结束语

深度学习为矿山机电设备故障诊断提供了新的技术路径，显著提升了诊断的自动化与智能化水平。尽管在数据质量、模型泛化等方面仍存在挑战，但随着边缘计算、小样本学习等技术的发展，深度学习在矿山场景的应用潜力将进一步释放。未来研究应聚焦多模态数据融合、轻量化模型部署等方向，推动诊断技术向实时化、精准化迈进，为矿山安全生产提供更可靠的技术保障。

参考文献：

- [1] 李世玺. 矿山机电设备故障诊断技术分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(20):145-147.
- [2] 张秀宇, 付智博, 吴季洪. 矿山机电设备故障诊断技术发展现状[J]. 能源与节能, 2024(10):151-153.
- [3] 孙延聪, 艾国防. 基于深度学习的煤矿掘进机电设备故障诊断与预防方法研究[J]. 电气技术与经济, 2024(05):359-361.
- [4] 王闯. 故障诊断技术在矿山机电设备的应用探讨[J]. 世界有色金属, 2022(15):25-27.
- [5] 赵振国. 基于数据流的矿山机电配套设备故障诊断模型[J]. 煤炭科技, 2022, 43(03):90-93, 99.
- [6] 刘林. 探讨故障诊断技术在矿山机电设备维修中的应用[J]. 内燃机与配件, 2022(06):106-108.
- [7] 郝东方. 矿山机电设备自动在线监测与故障诊断系统[J]. 矿业装备, 2022(01):252-253.

新能源背景下电力运维检修体系优化策略研究

谢正青, 刘华健, 吕 静, 赵小宁

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

摘 要 针对新能源发展背景下的电力运维检修体系优化问题展开探讨。首先阐述了新能源发展的时代背景, 继而提出体系优化应遵循的三项基本原则: 智能化与自动化、全寿命周期管理、标准化与规范化要求。在具体优化策略方面, 系统提出了四个维度的实施方案: 智能化设备升级与数字化管理平台建设、无人机与机器人巡检技术应用、带电作业与应急抢修能力提升、标准化运维流程与人才培养体系构建。通过实施这些策略, 旨在为电力运维检修体系更好地适应新能源发展需求提供借鉴, 进而提升系统运行效率与可靠性水平。

关键词 新能源; 电力系统; 运维检修

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.008

0 引言

随着新能源技术的高速发展, 电力系统的结构形态与运行机制正在发生深刻变革。以风电、光伏为代表的新能源发电具有显著的间歇性和波动性特征, 这一特性对电力系统的运维检修工作提出了前所未有的技术挑战。传统基于稳定电源的运维检修模式已难以适应新能源主导的电力系统运行需求, 其检测精度、响应速度和处置效率均面临系统性瓶颈。因此, 构建适应新能源特性的智能化运维检修体系, 已成为保障电力系统安全稳定运行、提升能源利用效率的关键举措, 这对实现电力系统的可靠、高效、可持续发展具有重要的战略意义。

1 新能源背景概述

在全球能源结构深刻变革与环境保护需求日益迫切的背景下, 新能源发展已成为国际社会广泛关注的焦点。传统化石能源如煤炭、石油虽长期主导能源消费格局, 但其不可再生性导致储量持续减少, 且在开采利用过程中引发严重环境污染和温室气体排放, 对人类生存环境及可持续发展构成严峻挑战。与此同时, 科技进步为新能源开发利用创造了前所未有的发展契机, 太阳能、风能、水能、生物质能和地热能等清洁能源凭借其可再生性、分布广泛性和环境友好性等优势, 正逐步改变全球能源格局。其中, 太阳能通过光伏技术实现高效电能转化, 风能资源开发规模持续扩大, 水能作为成熟的清洁能源为电网提供稳定电力供应^[1]。

2 新能源背景下电力运维检修体系优化原则

2.1 智能化与自动化原则

在新能源发展背景下, 电力运维检修体系亟需推进智能化与自动化技术应用。随着新能源发电设备装

机规模持续扩大, 传统人工运维模式已难以满足实际需求。通过运用物联网、大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术, 可实现电力设备的实时监测、故障预警和智能诊断。具体而言, 采用无人机和传感器等设备进行定期巡检与故障监测, 能够及时发现设备潜在问题, 提升检修效率和准确性; 基于大数据分析可精准评估设备运行状态, 预测潜在故障并制定预防性检修计划, 有效避免故障发生和扩大。智能化与自动化技术的应用不仅能够降低运维成本, 更能显著提升电力系统的可靠性和稳定性^[2]。

2.2 全寿命周期管理原则

全寿命周期管理原则强调对电力设备从规划、设计、制造、安装、运行到退役的全过程实施系统化管理。在新能源发展背景下, 电力设备种类与数量持续增加, 运行环境日趋复杂, 因此需要基于全寿命周期理念制定科学合理的运维检修策略。规划与设计阶段需充分考虑设备运行环境和使用需求, 采用先进技术与优质材料以提高设备可靠性和耐久性; 运行阶段应加强状态监测与评估, 根据实际运行状况动态调整检修计划与维护策略; 退役阶段则需实施合理处置与资源再利用, 降低资源消耗与环境影响。通过实施全寿命周期管理, 可实现电力设备运维检修的科学化与精细化, 从而提升设备综合效益^[3]。

2.3 标准化与规范化原则

标准化与规范化是确保电力运维检修体系高效运行的重要基础。在新能源发展背景下, 电力运维检修工作面临设备种类繁多、技术复杂度高等挑战, 亟需建立统一的标准规范体系。具体而言, 需要制定完善的运维检修技术标准与操作规程, 明确各项工作流程和

质量要求,确保运维检修工作的规范化和标准化实施。例如:对设备巡检内容、维护周期及故障诊断方法等进行详细规定,为运维人员提供统一的操作依据。同时,应加强对运维检修人员的培训与管理,提升其专业技能和业务水平,确保各项标准规范得到严格执行。通过实施标准化与规范化管理,可有效提升电力运维检修体系的质量与效率,降低运维过程中的潜在风险^[4]。

3 新能源背景下电力运维检修体系优化策略

3.1 智能化设备升级与数字化管理平台建设

在新能源技术迅猛发展的背景下,10 kV 配电网正面临从传统运维模式向智能化、数字化转型的迫切需求。传统配电网依赖人工巡检和周期性维护的模式,暴露出故障响应时效性不足、设备状态感知能力有限等结构性缺陷。以智能开关为代表的先进设备,通过融合电力电子技术、数字化控制单元及标准化通信接口,实现了保护、控制、通信三位一体的功能集成。其核心价值体现在:一方面通过实时监测与智能诊断自动识别设备隐患;另一方面借助故障隔离机制快速切断故障点,并将异常数据同步传输至中央监控系统。这种技术革新显著提升了供电可靠性,例如采用手拉手环网供电架构时,系统可在毫秒级完成故障段隔离与非故障区段重构,最大限度降低停电影响范围^[5]。

在数字化管理平台建设过程中,需统筹整合电网调控系统、数据采集监控系统、生产管理系统及营销管理系统,实现业务协同与数据互通。通过构建配网抢修指挥中心,可高效完成故障信息、非电网故障及抢修记录的快速录入,并对抢修人员接单响应、现场处置等环节实施全过程监控。供电企业由此建立起“资源统一、平台统一、指挥统一”的故障抢修管理体系,实现工单在营销、运维、调度等部门的快速流转,使抢修效率提升 40% 以上。该平台还可依托大数据分析技术,实时监测设备运行状态并开展风险评估,预先制定维护方案,有效防范因设备过载或老化导致的突发故障。

在推进设备升级过程中,智能开关的推广应用需与配网结构优化协同开展。具体而言,可将现有链状网络改造为环网结构,从而有效缩短供电半径,提升用户端电压质量。同时,通过部署智能电表及各类传感器,实现对负荷、电压、电流等运行参数的实时监测,为负荷预测和动态调整提供可靠的数据支撑。此外,在数字化管理平台建设方面,应注重用户体验优化,开发移动端应用程序,使运维人员能够实时查看设备状态、接收工单并及时反馈处理结果,最终实现全流程的数字化闭环管理^[6]。

3.2 无人机与机器人巡检技术应用

10 kV 配电网具有覆盖范围广、地理环境复杂的特点,采用无人机和机器人巡检技术可显著提升运维效率与安全性。传统人工巡检方式受限于地形条件、气候因素及人员体能,难以对高山、河流等特殊区域线路实施高频次检查。相比之下,无人机具备飞行速度可控、作业范围大等优势,能够搭载摄像设备、红外装置等执行日常巡视、故障排查及灾情评估任务。在山区配网巡检作业中,供电企业通过无人机开展杆塔定位和绝缘子状态检测,不仅将巡检时长缩减至人工巡检的三分之一,同时有效规避了登塔作业的安全隐患^[7]。

机器人巡检技术在变电站等封闭场所展现出显著优势。该技术通过搭载高清摄像装置、红外热成像设备及局部放电检测仪等先进传感器,能够对设备运行温度、局部放电等关键参数进行持续监测。借助无线网络,监测数据可实时传输至后台管理系统。某变电站应用实例表明,采用机器人巡检后,设备缺陷识别率提升了 30%,同时系统自动生成的巡检报告有效避免了人工记录可能产生的误差。此外,机器人还能完成故障指示灯更换、设备表面除尘等基础维护作业,显著降低了运维成本。

无人机与机器人协同巡检系统通过物联网技术实现设备互联,无人机搭载的高清摄像头与红外传感器在巡检过程中实时采集多维数据,并借助 5G 网络将可见光图像、热成像等关键信息传输至云端大数据平台。系统采用深度学习的智能图像分析算法,对输电线路、管道焊缝等目标进行毫秒级异常识别,自动标记腐蚀、过热等缺陷类型,并基于知识库生成包含故障定位、维修优先级及操作指引的标准化方案。地面巡检机器人接收云端指令后,通过高精度定位导航抵达目标点位,搭载的机械臂与专用工具可完成螺栓紧固、绝缘层修补等精细化操作,同时将维修过程数据回传至平台进行闭环验证。这种“空中感知—云端决策—地面执行”的协同模式,不仅实现了从数据采集到处置的全流程自动化,更通过持续迭代的算法模型与作业记录库,使系统具备自我优化能力,最终形成动态升级的智能运维闭环^[8]。

3.3 带电作业与应急抢修能力提升

在新能源技术快速发展的背景下,10 kV 配电网的供电可靠性标准得到系统性提升,带电作业与应急抢修能力的现代化建设已成为配网转型升级的核心要素。传统依赖计划停电的检修模式已无法适应高可靠性供电需求,而带电作业技术通过采用高性能绝缘装备和标准化作业流程,实现了设备维护与电力供应并行的

技术突破。具体而言,通过整合绝缘斗臂车作业法、绝缘杆作业法及旁路作业法等技术手段,可在保障供电连续性的前提下,完成线路消缺、设备更换等复杂操作。实践表明,该技术的规模化应用有效缩短了停电持续时间,如某省级电网企业通过全面推行带电作业,在显著降低年均停电指标的同时,同步提升了终端用户的用电满意度,充分印证了该技术在新型电力系统中的关键价值。

为提升应急抢修能力,建议从人员培训、物资储备及预案演练三方面系统推进。首先应强化运维人员专业技能培训,通过“理论+实操”相结合的培训体系,定期组织模拟故障处置考核,重点提升接地故障、线路短路等典型问题的处置效率。其次需完善应急物资储备体系,建立区域性物资调配中心,确保抢修车辆、工器具及应急电源等物资的快速供应,并在灾害高发期提前储备防水沙袋、应急照明等专用物资。同时要重视预案演练的检验作用,通过定期开展“双盲”演练模拟恶劣天气下的线路故障,持续优化抢修流程,提升多部门协同效率。此外,应建立跨部门协作机制,实现调度、运维、营销等部门间的信息共享与资源调配。在新能源快速发展背景下,建议引入智能化监测系统为带电作业提供数据支持,通过在配电网部署传感器实时监测线路参数,实现故障快速定位与预警。同时运用物联网技术构建智能化物资管理系统,实现应急物资的精准调配。还应加强与科研院所的合作,共同研发带电作业新技术、新设备,持续完善应急管理体系。

3.4 标准化运维流程与人才培养体系构建

建立健全标准化运维流程和完善人才培养机制是提升10 kV配网运维检修体系效能的关键基础。当前10 kV配网运维工作存在标准不统一、作业不规范等问题,导致故障处置效率难以提升。为此,供电企业编制了《10kV配网运维检修标准化作业指导书》,对设备巡检、故障处置及验收等关键环节的操作标准进行了系统规范,使运维差错率显著下降35%。在制定标准化流程时,需充分考虑设备特性和运行环境特点,例如针对山区线路的特殊情况,应增加防雷击、防覆冰等专项检查内容。

人才培养体系应当注重理论知识与实践能力的协同发展。在高等教育阶段,可通过校企联合办学及技能竞赛等方式,培养掌握电力电子、自动控制等专业技能的复合型人才。例如:高校与供电企业合作设立“智能电网运维”专业,设置智能开关调试、无人机巡检等实践课程,实现毕业生与岗位需求的无缝对接。同时,

要建立健全在职人员继续教育体系,定期组织新技术专题培训,如针对智能电表、物联网设备应用的专项课程。供电企业可构建“线上+线下”相结合的培训平台,确保运维人员年均培训时长达标,从而显著提升其专业技能水平。

为确保标准化运维流程的有效实施,供电企业需将人才培养与激励机制有机结合。具体而言,可通过设立“运维标兵”奖项,对在故障处理、技术创新等领域表现突出的员工予以表彰奖励,从而充分调动员工积极性。同时,应建立健全运维质量考核体系,将设备故障率、抢修及时率等关键指标纳入绩效考核范畴,以保障运维流程的规范执行。值得注意的是,随着新能源技术的快速发展,10 kV配网运维工作对跨学科知识提出了更高要求。以储能设备接入为例,运维人员需掌握电池管理、能量调度等专业技能,这对人才培养提出了新的挑战。

4 结束语

在新能源发展背景下,电力运维检修体系的优化是一项具有长期性和复杂性的系统工程。应遵循智能化与自动化、全生命周期管理、标准化与规范化等基本原则,通过实施智能化设备升级、无人机与机器人巡检、带电作业与应急抢修能力提升、标准化运维流程建设及专业人才培养等具体措施,全面提升电力运维检修水平。未来需要持续跟踪新能源技术发展动态,不断优化运维检修体系,以适应电力系统发展需求,为能源转型和可持续发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李昂.配电系统运维检修风险与预控措施分析[J].集成电路应用,2025,42(03):242-243.
- [2] 王茜茜.基于机器视觉的电力运维检修预控系统[J].电气技术与经济,2025(01):190-192.
- [3] 杜德福.基于智能电网的电力运维检修技术[J].电力设备管理,2024(24):33-35.
- [4] 余烈均.智能技术在电力设备运维检修中的应用[J].电子技术,2024,53(11):230-231.
- [5] 邵芳.基于监督机器学习的配电网电力智能运维检修研究[J].自动化技术与应用,2024,43(11):169-173.
- [6] 徐欧珺,吕佳芮.人工智能技术在配电网电力设备运维检修中的应用[J].中国机械,2024(29):48-51.
- [7] 鲍眺,卢雷.基于群体智能算法的电力设备现场智能化运维检修研究[J].无线互联科技,2024,21(19):43-45.
- [8] 刘博,翟文松.人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J].产业科技创新,2024,06(04):47-50.

基于油色谱分析的变压器故障诊断与性能评估研究

颜小雨

(中国石化扬子石油化工有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 根据某化工厂 32 台变压器九年油色谱数据, 构建了融合机器学习的变压器智能运维体系。研究发现: 化工极端工况 (负载 $> 100\%$ 、温度 $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 氢气 $> 150\text{ }\mu\text{L/L}$ 预示局部放电概率 82%, 乙炔 $> 8\text{ }\mu\text{L/L}$ (较 IEC 标准降低 78%) 可提前 72 小时预警电弧; $\text{CO}/\text{CO}_2 > 0.25$ 为绝缘老化新阈值, 结合耐溶剂材料使突发维护成本降低 75%。创新开发 ANN 模型, 以气体浓度及工况参数为输入, 在氯碱高湿 ($> 80\%$) $\pm 15\%$ 负载波动场景下实现 95% 诊断准确率, 有效识别苯溶剂渗透等非常规故障。提出三级动态维护策略: 预警期红外热成像定位隐患 (成本效益比 1:62.5), 干预期真空滤油实现零停产维修 (成本降低 60%), 紧急期 SCADA 系统 0.5 小时快速隔离。实施后年均维护成本降低 29.2%, 故障停机减少 65.6%, 验证了化工连续生产场景的高效性与经济性。

关键词 油色谱分析; 变压器; 故障诊断; 性能评估

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.009

0 引言

化工生产的连续性高度依赖变压器可靠性, 故障停机将导致全线停产。油色谱分析技术通过监测变压器油中溶解气体 (包括氢气、乙炔、总烃、一氧化碳和二氧化碳) 的浓度变化, 可提前识别潜伏性故障, 成为保障化工连续安全生产的关键手段。然而, 当前普遍采用的定期检修模式存在高成本与低精度的矛盾, 为破解这一难题, 本研究以某化工厂 2015 年至 2023 年间 32 台变压器累计 1 860 条油色谱历史数据, 采用机器学习算法构建精准故障诊断模型与分级维护策略。

1 数据来源与预处理

1.1 工厂数据描述

某化工厂 2015 年至 2023 年间 32 台主变压器的油色谱监测记录, 原始数据总量为 1 860 条。按设备运行状态分类: 正常工况记录 1 520 条 (占总量的 81.7%), 过热故障记录 210 条 (11.3%), 放电故障记录 95 条 (5.1%), 绝缘老化记录 35 条 (1.9%)。数据集包含两类核心参数: 第一类为气体浓度参数, 包括氢气 (检测范围 $0.1 \sim 650\text{ }\mu\text{L/L}$)、乙炔 (检测范围 $0.01 \sim 480\text{ }\mu\text{L/L}$)、总烃 (甲烷、乙烯、乙烷浓度之和)、一氧化碳及二氧化碳含量; 第二类为运行工况参数, 涵盖负载率 60% (轻载状态) 至 110% (过载状态)、环境温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (严寒条件) 至 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (高温条件),

其中负载率超过 100% 或温度高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端工况数据占比 23%。

1.2 数据清洗与标准化

在预处理阶段, 首先进行数据清洗: 删除 42 条无效记录, 具体包括 31 条乙炔浓度超过 $500\text{ }\mu\text{L/L}$ 的采样误差数据, 以及 11 条总烃浓度负值或超量程的异常数据, 清洗后获得有效样本 1 818 条 (保留率 97.7%)。随后执行数据标准化: 对五种气体浓度统一采用 Z-score 方法处理, 即每种气体的原始浓度值减去该气体的历史平均浓度, 再除以其历史浓度标准差^[1]。此处理消除了不同气体量纲差异 (如氢气与乙炔的浓度数量级差异), 使模型训练效率提升 40%。所有气体单位统一为 $\mu\text{L/L}$, 环境温度数据严格按国家标准《变压器油中溶解气体分析导则》(GB/T 7252) 取自变压器周边 2 米通风处。预处理后的数据集完整保留 110% 过载、 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温等化工典型极端工况特征, 为故障诊断提供工业级可靠基础。

2 基于工厂数据的故障规律分析

2.1 气体—故障关联性

该化工厂九年运行数据的分析表明, 气体浓度与故障类型存在明确对应关系。当氢气检测值超过 $150\text{ }\mu\text{L/L}$ 时, 82% 的案例在 7 日内发生局部放电故障, 典型案例为 2020 年 5 号变压器——其氢气浓度在一周内从 85

$\mu\text{L/L}$ 飙升至 $255\ \mu\text{L/L}$ ，解体后确认存在匝间放电，且在化工高负荷生产环境（负载率 $>100\%$ ）下该阈值灵敏度提升15%。乙炔浓度突破 $5\ \mu\text{L/L}$ 标志电弧故障风险显著上升，若超过 $35\ \mu\text{L/L}$ （如2018年11号变压器案例），3日内爆发短路的概率超过90%，此规律在高温工况（ $>40\ ^\circ\text{C}$ ）下尤为显著。总烃含量超过 $150\ \mu\text{L/L}$ 时需紧急排查过热故障隐患（如铁芯涡流损耗或绕组接触不良），该标准在32台变压器中验证有效率达89%。

2.2 固体绝缘老化特性

通过对该化工厂35例绝缘老化案例的深度分析，发现 CO 与 CO_2 气体浓度的比值（ CO/CO_2 ）是判断绝缘老化的核心指标：当该比值超过0.3时，变压器内部绝缘纸的老化速率加快至正常工况的3倍。具体表现为，比值大于0.3的设备其绝缘纸聚合度年均下降值达150单位（正常工况年均下降约50单位），直接导致设备寿命缩短30%以上^[2]。基于此规律构建的气体寿命预测模型，经工厂数据验证显示预测结果与实际剩余寿命的吻合度达85%——典型案例为2021年某台变压器测得 CO/CO_2 比值为0.41，模型输出剩余寿命28年（设计寿命40年），2023年绝缘纸抽检结果完全吻合预测。该模型可提前5年至8年预警老化风险，将突发性更换成本（超过80万元）转化为计划性维护（低于20万元），单台设备即可节约费用60万元以上。

3 故障诊断与智能预测

3.1 IEC标准验证

基于国际电工委员会 IEC 60599 标准对该化工厂2015–2023年全部305例故障案例（含过热210例、放电95例）的逐条诊断表明：在过热故障类别中，典型铁芯过热（如2019年#7变压器因铁轭螺杆松动致局部温升 $180\ ^\circ\text{C}$ ）或绕组过热（如2022年#15变压器低压绕组接触不良）共5例典型案例，其中4例严格符合标准定义的甲烷/乙烯浓度比值大于1（实测均值 1.8 ± 0.3 ）且乙炔浓度低于 $5\ \mu\text{L/L}$ （实测均值 $2.1\pm0.7\ \mu\text{L/L}$ ）的双重判据，符合率80%，唯一例外为2021年#3变压器在苯类溶剂蒸汽渗透下出现非常规过热特征；在放电故障案例中，89%（95例中的85例）满足乙炔浓度 $>20\ \mu\text{L/L}$ （均值 38.5 ± 12.3 ）与氢气浓度 $>150\ \mu\text{L/L}$ （均值 285 ± 75 ）的组合阈值，包括2020年#5变压器匝间放电（ H_2 峰值 $255\ \mu\text{L/L}$ ， C_2H_2 峰值 $31\ \mu\text{L/L}$ ）及2018年#11变压器电弧短路（ C_2H_2 骤升至 $35\ \mu\text{L/L}$ ）等典型事件，该标准在化工典型多干扰工况（如氯碱装置区湿度 $>80\%$ +负载波动 $\pm15\%$ ）下仍维持85.7%的

诊断稳定性。需特别指出，标准对35例绝缘老化故障的漏判率达15%（5例失效），根本原因为化工环境特有的有机溶剂渗透（如芳烃类物质加速纤维素解聚），导致 CO/CO_2 比值异常波动（ $0.15\sim0.45$ ），超出标准预设的 $0.3\sim0.4$ 正常波动带，此缺陷直接关联近三年约50万元/年的计划外维修成本。

3.2 机器学习模型性能

基于该化工厂1818条预处理数据构建的智能诊断模型，以氢气、乙炔、总烃、一氧化碳、二氧化碳五种气体浓度结合负载率（ $60\%\sim110\%$ ）、环境温度（ $-5\sim42\ ^\circ\text{C}$ ）共七维特征为输入，经五折交叉验证显示：支持向量机（SVM）模型在过热、放电、绝缘老化三类故障诊断中实现92%准确率与88%召回率，如2021年#3变压器苯溶剂渗透导致的非常规过热故障（传统 IEC 标准漏判，SVM 准确预警），年均可减少非计划停机1.5次，节约维护成本38万元；人工神经网络（ANN）模型进一步将准确率提升至95%、召回率至93%，其深层非线性映射能力有效捕捉化工极端工况（如2020年氯碱装置区湿度 $>80\%$ +负载波动 $\pm15\%$ 场景）下的气体异常耦合特征，年成功预警故障7例（包括2例 IEC 标准未识别的绝缘老化），避免停机2次，年节约成本升至50万元。关键性突破在于：较 IEC 标准，ANN 模型诊断精度提升15%（ $80\%\rightarrow95\%$ ），预警时间提前72小时以上——以2018年#11变压器为例，ANN 在乙炔浓度达 $8\ \mu\text{L/L}$ 时即发出电弧风险警报（早于 IEC 标准的 $35\ \mu\text{L/L}$ 阈值），为抢修赢得关键窗口期。经成本效益核算，该模型三年累计降低故障损失150万元，扣除20万元开发投入，净收益达650%。

4 经济性维护策略优化

4.1 分阶段维护设计

当氢气浓度超过 $100\ \mu\text{L/L}$ 或乙炔浓度突破 $2\ \mu\text{L/L}$ 时，系统自动进入预警期维护阶段，该阶段成本严格控制在总维护预算的10%以内^[3]。具体执行流程包括：将油色谱检测频次从每月1次加密至每周1次（采用 GB/T 7252 标准方法，单次检测成本0.12万元），同步启动高精度红外热成像扫描（使用 FLIR T840 设备，分辨率 $\pm1\ ^\circ\text{C}$ ，重点监测套管接点、铁芯夹件等12处易放电部位，单次扫描成本0.08万元），并在变压器周边2米处部署温湿度传感器组（监测范围 $-20\ ^\circ\text{C}$ 至 $80\ ^\circ\text{C}$ ，数据实时上传至厂区 DCS 系统）。以2022年某化工厂苯乙烯装置区的9号变压器为例，氢气浓度从 $90\ \mu\text{L/L}$ 升至 $125\ \mu\text{L/L}$ 触发预警，红外扫描发现 B 相套管接头局部温度达 $92\ ^\circ\text{C}$ （环境温度 $45\ ^\circ\text{C}$ ），

经螺栓紧固消除隐患。该案例累计投入 0.48 万元（含 0.28 万元环境监测升级），规避了潜在电弧故障（最小损失估值 30 万元），成本效益比达 1:62.5。

若总烃浓度突破 $150\ \mu\text{L/L}$ 或一氧化碳/二氧化碳比值高于 0.25，则升级至干预期维护，此阶段成本占比 30%。核心操作包含三部分：吊罩检查分接开关触头烧蚀状况（依据 DL/T 574 标准，发现碳化即更换新型银钨合金触头，材料费 3.5 万元/台），启用 ZYD-100 真空滤油机进行油处理（脱气效率 $> 95\%$ ，处理量 $1\ 000\ \text{L/h}$ ，耗时 8 小时，耗电与耗材成本 4.2 万元），以及对老化纸板涂覆 AK04 耐溶剂绝缘漆（耐苯系腐蚀特性，材料费 1.8 万元）。2021 年精对苯二甲酸（PTA）装置区的 14 号变压器总烃浓度突增至 $180\ \mu\text{L/L}$ ，触发干预后经滤油处理降至 $45\ \mu\text{L/L}$ ，同步更换过热点触头并加固绝缘。总成本 12 万元（含 2.5 万元人工），较传统全面大修方案（30 万元）节约 60%，且全程未中断连续生产，体现了化工设备“在线维修”的核心优势。

当乙炔浓度突破 $10\ \mu\text{L/L}$ 或二氧化碳浓度超过 $15\ 000\ \mu\text{L/L}$ 时，强制启动紧急期维护，此阶段成本占比 60%^[4]。标准化响应流程为：通过 SCADA 系统在 0.5 小时内切断负荷并隔离设备，进行全容量变压器油置换（注入 GB 2536 标准 25 号新油，单价 1.2 万元/吨，单台用量 40 吨），随后解体更换碳化绝缘材料（按 Q/SH 0650 规范选用 Nomex® 芳纶纸，材料费 18 万元），并对绕组实施 $105\ ^\circ\text{C}$ 恒温烘干 48 小时。2019 年氯碱装置区的 8 号变压器案例中，乙炔浓度达 $18\ \mu\text{L/L}$ 且二氧化碳突破 $16\ 200\ \mu\text{L/L}$ ，解体检测显示绝缘纸聚合度从初始 900 降至 400。经 48 小时紧急维修（含 22 万元特种作业费），总成本 48 万元，但成功规避了氯碱电解槽全线停产事故（按日产值计算最小损失 500 万元），单次投入回报比 1:10.4。近三年该机制在扬子石化触发 3 次，累计避免损失超 1 500 万元。

4.2 实施经济效益

该化工厂 2020 年至 2023 年实施分阶段维护策略的经济效益对比显示：传统定期维护模式下，年均投入成本达 120 万元（含 48 万元计划性大修费、35 万元故障抢修费及 37 万元监测支出），对应年均故障停机 3.2 次（以 2021 年为例，因 #11 变压器电弧故障导致 PTA 装置停产 32 小时，单次损失 180 万元）；而分阶段策略实施后，年均成本压缩至 85 万元（预警期 8.5 万元/年、干预期 25.5 万元/年、紧急期 51 万元/年），故障停机次数锐减至 1.1 次（如 2022 年仅因 #3 变压器苯溶剂渗透过热停机 16 小时）。核心经济指标表现为：年均直接成本节约 35 万元（降幅 29.2%），其中预警

期投入回报比最高（2022 年 #9 变压器案例中 0.48 万元投入规避 30 万元损失），紧急期单次成本虽达 48 万元（如 2019 年 #8 变压器维修），但较潜在停产损失（氯碱装置单日产值超 300 万元）仍具显著经济性^[5]。三年累计节约维护成本 105 万元，扣除初期智能诊断模型开发投入 20 万元，净收益 85 万元，按 $\text{ROI} = (\text{累计节约} - \text{开发成本}) / \text{开发成本} \times 100\%$ 计算，投资回报率达 425%，相当于每投入 1 元技术开发费产生 5.25 元收益。此效益尚未计入故障减少带来的间接收益——近三年避免的 6.3 次非计划停机（ $3.2 \times 3 - 1.1 \times 3$ ），按化工装置单次停机最小损失 300 万元计，隐性效益达 1 890 万元。

5 结论

本研究基于某化工厂 32 台变压器 2015–2023 年 1 860 条油色谱数据，建立了精准的变压器故障诊断与经济性维护体系。研究发现：氢气浓度超过 $150\ \mu\text{L/L}$ 可预警局部放电（概率 82%），乙炔浓度突破 $5\ \mu\text{L/L}$ 标志电弧故障风险显著升高， CO/CO_2 比值大于 0.3 时绝缘纸老化速率加速至正常的 3 倍。开发的人工神经网络（ANN）诊断模型准确率达 95%，较 IEC 标准提升 15%，实现故障提前 72 小时预警（如乙炔 $8\ \mu\text{L/L}$ 即发出电弧警报）。提出的分阶段维护策略通过动态阈值响应实施：当氢气 $> 100\ \mu\text{L/L}$ 或乙炔 $> 2\ \mu\text{L/L}$ 时启动强化监测（成本占比 10%）；总烃 $> 150\ \mu\text{L/L}$ 或 $\text{CO}/\text{CO}_2 > 0.25$ 时执行在线检修（成本占比 30%）；乙炔 $> 10\ \mu\text{L/L}$ 或 $\text{CO}_2 > 15\ 000\ \mu\text{L/L}$ 时触发快速抢修（成本占比 60%）。该体系在多家化工厂应用中年均降低维护成本 29.2%（节约 35 万元），故障停机次数从 3.2 次/年降至 1.1 次/年，三年累计净收益 85 万元，投资回报率达 425%，间接避免停产损失 1 890 万元。研究成果为化工连续生产场景提供了高效运维支持，全生命周期可降本超千万元，具有显著的工程价值。

参考文献：

- [1] 尹琦琳,宋媛,王帅,等.基于绝缘油色谱试验的 110 kV 变压器异常状态分析[J].变压器,2024,61(05):71-74.
- [2] 鲁永,赵映宇,陈婕,等.基于油色谱分析技术的变压器故障分析[J].变压器,2023,60(06):64-67.
- [3] 刘佳佳,李春雨,杨春飞.变压器油色谱在线装置故障诊断与预测分析[J].集成电路应用,2024,41(05):396-397.
- [4] 于哲,张月,迟秀华,等.变压器油色谱分析及故障诊断的应用[J].冶金动力,2022(06):11-12.
- [5] 高泽梅.基于油色谱数据的变压器故障监控策略分析[J].集成电路应用,2023(12):40.

新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中的应用

黄思源

(四川公路桥梁建设集团有限公司机械化施工分公司, 四川 成都 610200)

摘要 高速公路桥梁长期暴露在高流量、重荷载及自然灾害的复杂环境中, 结构受力状态复杂, 疲劳损伤及裂缝扩展成为常见病害。本文基于高速公路桥梁工程应急加固的实际需求, 探讨水平拉杆预应力、FRP片材预应力及体外预应力技术在桥梁加固中的实施过程, 旨在结合大数据监测及智能控制实现应急加固智能精准化的目标。研究表明, 新型预应力技术可以有效提升桥梁结构的耐久性, 满足应急加固的要求。

关键词 新型预应力技术; 高速公路; 桥梁工程; 应急加固

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.010

0 引言

新型预应力技术凭借“主动施力”原理, 借助智能张拉、动态监测及大数据分析, 可以精准控制结构应力及快速恢复力学性能。应急加固不再是单纯的结构修复, 而是结构安全的全方位智能化保障。科学选择预应力路径能保障结构受力均匀; 通过数据分析能识别应力集中区域, 提高加固精准性, 提升施工效率; 动态监测桥梁变形能实时掌握结构状态。通过以上措施构建新型预应力技术在高速公路桥梁应急加固中的完整技术体系。

1 新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中应用的必要性

新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中具有不可替代性, 源于高速公路桥梁结构在长期荷载、自然灾害及突发事件下的脆弱性。桥梁在运营过程中受力复杂且不均匀, 交通荷载反复作用使结构逐渐产生疲劳损伤, 在重载交通频繁的路段主梁、桥墩等关键部位容易出现裂缝、变形或刚度衰减。增大截面或粘贴钢板等传统加固方法, 往往需要封闭交通施工, 影响通行效率且施工周期长、材料耗费大, 难以满足高速公路桥梁应急加固“快速、高效、不中断交通”要求。

新型预应力技术借助“主动施力”可以实现结构内应力再分配, 直接改善受力状态, 在应急情况下能够快速恢复桥梁承载能力。相比传统被动承载的加固手段, 新型预应力技术能在桥梁表面施加外部预应力, 还可借助体外预应力系统将应力传递至关键部位, 弥

补结构抗拉强度不足, 降低裂缝扩展风险。无论是体外钢束预应力还是碳纤维绞线预应力, 均具备施工便捷、张拉力可控及无损伤结构的优势, 使其成为高速公路桥梁应急加固的首选技术。

高速公路桥梁处于高流量、重荷载环境, 任何结构病害都可能迅速演变为安全隐患。在山区高速、跨江大桥等重要交通节点, 一旦桥梁结构出现病害, 若不能快速加固, 极易造成交通中断甚至安全事故。新型预应力技术的应急加固属性可以在不中断交通的情况下完成加固, 还能在短时间内恢复病害区域的力学性能, 避免桥梁因应力失衡而发生进一步破坏。它不仅是加固手段的技术升级, 还可以提升应急保障能力。

2 新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中应用的策略

2.1 合理选择预应力, 保障结构受力均匀

合理选择预应力保障结构受力均匀, 是新型预应力技术在高速公路桥梁应急加固中保障结构安全耐久性的重要核心。合理选择预应力还体现在应急加固设计中, 结合受力分析确定预应力施加位置及方向, 根据桥梁病害特点优化预应力路径能实现“精准施力”。在桥梁主梁受压或受拉部位布置预应力, 调控合理角度及张拉力可使预应力与结构本身内力达到平衡。这样的预应力设计既能避免桥梁薄弱部位应力集中, 又可最大限度地提升结构的整体承载能力。选择预应力路径关乎结构力学表现, 更决定加固的安全经济性^[1]。

施工团队可借助“水平拉杆式预应力加固”来保

障结构受力均匀,施工团队借助水平拉杆式预应力加固技术能在不中断交通的情况下迅速恢复桥梁承载力。在实施过程中,施工团队依据桥梁病害检测数据和结构设计参数,可以选择横向或纵向布置预应力拉杆。以高强度钢绞线为预应力材料,张拉力设计为 1 200 kN,保证结构在高荷载(500 kN/m)下受力均匀。施工团队采用激光定位仪精确确定拉杆位置,利用高强度锚具系统固定钢绞线,能在拉杆端部安装张拉设备。在张拉过程中,施工团队依托数显张拉设备逐级施加张拉力,可实时监控预应力筋的力学状态及位移变化。应力传感器及位移传感器同步监测桥梁变形,能保证精准施加预应力。

张拉完成后施工团队使用专用锚具将拉杆锚固,锚固区采用高强度防护罩可使内部填充防腐防水材料,防止锚固系统受环境侵蚀。对于外露拉杆表面,施工团队采用耐候性涂层防腐处理,能保证预应力系统长期稳定。施工完成后,施工团队采用应力监测传感器及位移传感器检测桥梁关键部位的应力分布及位移变化,能使数据实时传输至监控平台,保障结构在加固后受力均匀。在高速公路桥梁应急加固中,施工团队利用夜间或低流量时段施工,可以减少干扰正常交通,并利用分段施工及逐跨加固的方式来保证施工安全。施工区域外围布设防护栏杆及安全警示灯能避免车辆和行人误入施工区域,桥梁加固后施工团队结合荷载试验验证结构加固效果,采用 500 kN/m 的标准车辆荷载,逐步增加荷载可以监测桥梁变形及应力变化,保障结构在最大荷载下稳定无异常。

应急加固完成后,桥梁管理部门将加固区域纳入日常监测范围,定期利用无人机巡检及应力监测系统监控桥梁结构状态,能长期保持加固效果。新型预应力技术在高速公路桥梁应急加固中能达到快速高效的加固效果,还可在不中断交通的情况下恢复结构承载力,保障高速公路桥梁安全通行。

2.2 通过数据分析应力状态,精准识别病害部位

通过数据分析应力状态,精准识别病害部位,是新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中实现高效精准加固的核心环节。借助现代结构健康监测技术,桥梁的应力状态能够实时采集并呈现数字化^[2]。应力传感器布设在桥梁的主梁跨中、支座区域、腹板或横隔板等关键部位,可以动态捕捉应力变化数据,结合应力时程曲线及频域分析,识别出结构应力集中区及薄弱部位。施工团队利用数据分析将应力异常区

域与实际结构病害相互对比,能够精准确定病害位置,避免盲目加固,减少加固成本^[3]。

施工团队可结合“数据分析”来精准识别病害部位。在实施过程中,施工团队借助新型预应力技术,运用数据分析能精准识别病害部位,保障桥梁结构的安全稳定。施工准备阶段,施工团队可以在桥梁主梁跨中、支座区域及腹板位置等关键受力区域安装高精度应力传感器,这些传感器精度达到 ± 0.1 MPa,采样频率 100 Hz,能实时采集桥梁应力状态数据。传感器采集的应力数据利用无线通信模块能传输至云端监控平台,形成桥梁结构的实时应力分布图。新型预应力技术在此基础上,依靠大数据分析及机器学习算法可以深度分析监测数据,自动识别应力集中区域。数据分析结果显示,桥梁主梁跨中区域应力峰值达到 250 MPa,超过设计标准 15%,支座区域竖向应力波动频繁,波动范围在 180 MPa 至 210 MPa 之间,表明结构存在疲劳损伤风险。

施工团队依据数据分析结果使用高精度激光扫描仪检测表面裂缝,能确认裂缝宽度达到 0.4 mm,并结合应力分布图精准锁定病害部位。在加固过程中,新型预应力技术以体外预应力及碳纤维绞线为核心,张拉力设定为 1 200 kN 分级加载可以使每级加载后保持五分钟,保证预应力逐渐传递至结构内部。实时监控系统继续采集应力数据,可每五分钟更新一次,自动监控预应力张拉效果。若应力波动超过 5% 或应力集中区域未恢复稳定,系统会自动警报,施工团队则立即调整预应力参数。施工完成后,数据监测系统继续跟踪桥梁受力状态,结合大数据分析自动生成应力健康曲线,能够保证桥梁结构在应急加固后长期稳定。新型预应力技术结合数据分析,可提高高速公路桥梁工程应急加固的高效性,还能达到智能检测结构状态。

2.3 采用便携化设备,提高应急加固效率

采用便携化设备,提高应急加固效率,在高速公路桥梁工程中是实现快速响应的关键。便携化设备具备轻量高效化及智能化特点,适用于桥梁应急加固的多样化需求。施工团队可在桥下或桥侧布置加固设备,短时间内安装张拉预应力筋,设备自动记录张拉数据,能实时反馈结构应力状态。在应急加固中,快速安装便携化设备可以显著减少施工时间,避免因传统设备安装复杂、拆卸耗时而导致的加固延误。充分发挥新型预应力技术的优势,能保证高速公路桥梁在应急情况下迅速恢复结构安全^[4]。

施工团队可采用“预应力FRP片材加固技术”提高应急加固效率。在实施过程中,施工团队借助激光测距仪及高精度裂缝探测仪检测桥梁表面,可以明确裂缝分布及宽度,将裂缝宽度超过0.3 mm的区域标记为加固重点。施工团队需选择高强度碳纤维片材,该材料具备高强度、耐腐蚀及优异的粘结性能,适用于加固长期暴露在风雨中的高速公路桥梁。加固过程采用便携化设备提高施工效率,手持式打磨机用于清理混凝土表面,打磨深度0.5 mm,去除老化层并保证紧密贴合FRP片材。便携式FRP张拉设备在片材两端安装锚具,借助滑轮及导向装置逐步拉伸片材,能使张拉速率保持在5 mm/min。片材在张拉状态下固定于混凝土表面,表面均匀涂刷环氧树脂,涂层厚度保持在0.5 mm,可保障片材粘结牢固。施工团队通过智能张拉控制器实时监测张拉力,数据每秒更新并自动上传至云端监控平台,使张拉力波动不超过 ± 0.2 kN,数据分析显示张拉力稳定在40 kN以内。

张拉完成后,环氧树脂在20℃至25℃条件下固化,片材表面喷涂防护涂层可以提升耐久性及抗紫外线性能。整个加固过程无需大型机械,仅依靠便携化设备即可快速完成,施工期间无需封闭高速公路,避免交通中断。施工团队加固完成后,桥梁应力监测传感器继续采集数据,能够实时监测FRP片材受力状态。数据分析显示,加固后桥梁主梁跨中区域应力降低15%,裂缝闭合率达到90%,结构疲劳寿命延长30%。新型预应力技术结合便携化设备,可使高速公路桥梁应急加固高效安全。

2.4 动态监测桥梁变形,实时保障结构安全

动态监测桥梁变形,实时保障结构安全,是新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中实现智能高效性的关键。桥梁作为高速公路的重要结构,长期承受车辆荷载、自然环境变化及材料老化,任何微小变形都可能导致结构应力重新分布,进而引发裂缝扩展或构件损伤。施工团队借助大数据分析系统,能自动识别桥梁变形的周期性波动,分析结构疲劳损伤趋势。施工完成后,监控系统继续采集数据可形成桥梁长期健康监测曲线,识别潜在结构病害。动态监测是应急加固中的实时控制手段,也是桥梁安全管理的长期保障。新型预应力技术结合动态监测,可以使高速公路桥梁在应急加固中实现智能化管控,保证结构安全稳定^[5]。

施工团队可设置“动态监测”来实时保障结构安全。在实施过程中,施工团队为保证高速公路桥梁在应急

加固过程中结构稳定,需在桥梁关键部位安装高精度监测设备。跨中区域布置激光位移传感器,测量精度达到 ± 0.01 mm,实时监测桥梁的垂直及水平位移变化。支座和腹板位置安装光纤光栅应力传感器,能使测量应力范围为0至200 MPa,精度 ± 0.1 MPa,监测桥梁关键受力区域的应力变化。在桥面及梁底安装温度监测设备,能将测量温度范围控制在-40℃到80℃,精度 ± 0.5 ℃,检测温度波动对桥梁应力的影响。新型预应力技术还集成预应力监测设备,智能张拉控制器记录每次张拉力及位移数据,使最大张拉力可达1 200 kN,张拉速率控制在0.5 mm/min。

动态监测系统利用云端监控平台能自动生成三维应力分布图,施工团队在平台上实时观察桥梁受力状态。若跨中位移超出设计值的80%或支座应力波动超过 ± 10 MPa,系统自动触发警报。施工团队立即调整预应力施加策略,保证桥梁结构在高速公路应急加固过程中的安全。施工完成后,施工团队动态监测系统继续保持低频监控模式,数据采集频率调整为每小时一次,可以监控桥梁在正常通行下的长期状态。新型预应力技术结合动态监测系统,能实现对高速公路桥梁工程应急加固的智能化管理,施工团队能够实时掌握桥梁结构状态,保证加固效果安全可靠。

3 结束语

新型预应力技术在高速公路桥梁工程应急加固中展现出智能高效化特征,可以突破传统加固方法局限,精准控制桥梁结构受力状态。在高流量、重载荷的高速公路桥梁环境中,结构安全取决于合理施加预应力、实时监测应力数据及精准调控加固效果。未来应进一步优化新型预应力材料的力学性能,提升监测设备灵敏度及智能化水平。

参考文献:

- [1] 车瑶.高速公路桥梁维修中新型预应力技术的应用[J].科技资讯,2024,22(08):131-133.
- [2] 李帅.预应力技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].工程建设与设计,2023(10):198-200.
- [3] 杜维坤.高速公路桥梁养护加固中新型预应力技术的应用方法[J].山西交通科技,2023(02):69-71.
- [4] 张振东.高速公路桥梁养护加固中新型预应力技术的应用[J].交通世界,2021(28):103-104.
- [5] 潘玉.新型预应力技术在高速公路桥梁养护加固中的应用[J].工程技术研究,2021,06(09):67-68.

基于智能终端的配电自动化系统故障定位与自愈控制研究

冯 志, 李光洋, 韩江伟, 赵耀武

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

摘 要 为提升配电系统的稳定性与可靠性, 本研究针对基于智能终端的配电自动化系统开展故障定位与自愈控制技术研究。通过系统分析智能终端的数据采集、通信传输及信息处理功能特性, 结合馈线终端单元 (FTU) 与无线传感器网络 (WSN) 的故障定位方法, 深入探讨故障隔离与供电恢复的运行机制, 并重点研究遗传算法、粒子群优化算法、多智能体协同控制以及强化学习等智能自愈控制策略。实验结果表明, WSN 定位技术较 FTU 在时间精度和误差控制方面均表现出更优越的性能。同时, 采用自愈控制策略可有效缩短故障处理时长并减少停电范围。通过对比分析, 发现粒子群优化算法在综合性能指标上具有明显优势。

关键词 智能终端; 配电自动化系统; 故障定位; 自愈控制

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.011

0 引言

在数字化和智能化快速发展的今天, 电力系统的稳定和可靠运行至关重要。随着城镇化发展、工业规模扩大、用电设备日益普及, 电力需求快速增长, 用户对供电可靠性提出更高要求。配电自动化系统是电力行业高效、稳定供电的关键技术, 基于智能终端的配电自动化系统具有更强大的数据感知和传输能力, 支持故障定位和自愈控制。深入研究基于智能终端的配电自动化系统, 能够推动运行效率提升, 减少因故障造成的冲击, 为保证我国现代化电力供应体系的安全、稳定、高效奠定基础。

1 智能终端在配电自动化系统中的应用

1.1 数据采集功能深度剖析

智能终端的数据采集功能是实现配电自动化的基础。在实际应用中, 其安装的高精度电压传感器和电流传感器能够实时准确地采集配电线路的电压、电流等重要电气参数^[1]。以某城市配电网为例, 安装在 10 kV 配电线路上的智能终端, 可将电压测量精度控制在 $\pm 0.2\%$ 以内, 电流测量精度达到 $\pm 0.5\%$, 为后续故障分析和定位提供可靠数据来源。智能终端除对电气参数进行检测之外, 还能通过温度传感器、振动传感器等对配电设备的开关状态、设备温度、机械振动等进行实时监测。以变压器的监控为例, 智能终端中内置的光纤温度传感器能够在温度超过预设阈值的时候精确感应

到变压器绕组和油温的变化, 立即发出预警信号, 对于设备的预防性维护有着重要的意义。

1.2 通信功能多样化实现

智能终端为各种通信方式提供支持, 满足各种配电网环境。城市核心地区光纤通信具有大容量、高速度和抗干扰能力强的优点, 是智能终端和配电自动化主站传输数据优先选择的通信方式。通过搭建光纤环网使智能终端能进行毫秒级数据传输以保证故障信息能及时上传到主站。在某些偏远地区或者地形比较复杂的地区, 无线通信技术也扮演着举足轻重的角色。以 4G/5G 通信技术为例, 该技术覆盖范围大, 部署灵活, 可确保智能终端与上述地区主站通信连接稳定; LoRa 技术因其低能耗和长距离传输的优点, 特别适合于那些对数据传输速度要求不特别高但需要进行长距离通信的场合, 例如农村配电网的实时监控。

1.3 数据处理能力强化应用

智能终端数据处理能力可有效缓解主站数据处理压力。它内置高性能处理器及高级数据处理算法可以实时分析并预处理采集数据。例如: 在配电线路的电流数据处理中, 智能终端可以利用滤波算法消除噪声干扰并利用趋势分析算法预测出电流的变化趋势。智能终端在发现电流异常波动后, 自动提取数据特征进行分析, 初步判定故障隐患, 将关键信息上传到主站, 显著提高数据传输效率与准确性。

2 配电自动化系统故障定位原理

2.1 基于FTU的故障定位方法详解

基于FTU的故障定位方法在实际应用中具有广泛的适用性。当配电线路发生故障时,FTU采集到的故障电流信号包含丰富的故障信息。以某条典型的10 kV配电馈线为例,假设该馈线安装5个FTU,当在FTU3和FTU4之间发生相间短路故障时,FTU1、FTU2、FTU3检测到的故障电流会明显增大,且大于正常运行时的负荷电流;而FTU4和FTU5检测到的电流则迅速下降为零。通过建立故障电流分析模型,结合各FTU上传的电流幅值、相位等信息,运用矩阵算法对故障区域进行逐步判断。具体来说,首先根据电流大小确定故障点上游的FTU范围,然后通过比较相邻FTU之间的电流相位差,进一步缩小故障范围,最终实现故障位置的准确定位^[2]。

2.2 基于无线传感器网络(WSN)的故障定位技术深入探究

基于WSN作为感知平台的故障定位技术,通过在配电线路的沿线部署大量的低成本设备、低功耗无线传感器节点建立分布式故障监测网络。每个传感器节点都具有感知、数据处理和无线通信能力,能够对其所处位置配电线路的电流、电压和温度等运行状态参数进行实时监控。在线路出现故障的情况下,位于故障区域附近的传感器节点将首先识别出由故障引发的异常信号,并激活节点之间的多跳通信机制,故障信息会逐渐传送到网络协调器,然后协调器会通过有线或无线的手段,将汇总好的故障数据上传到配电自动化主站。

在故障位置估算环节,常基于传感器节点采集的故障信号衰减特性计算节点与故障点的距离,若设传感器节点接收的故障信号强度为 P^r ,信号参考强度为 P_0 ,信号衰减系数为 α ,则节点与故障点的距离 d 可通过对数路径损耗模型计算,公式如下:

$$d = 10^{\frac{P_0 - P^r}{10\alpha}} \quad (1)$$

式(1)中, P_0 为预设的单位距离处信号强度, α 由配电线路周边环境(如地形、电磁干扰)决定,通过现场校准可提升该参数的准确性,进而优化距离计算精度。

主站系统结合至少3个传感器节点的位置坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 及对应的距离 d_1 、 d_2 、 d_3 ,采用三边测量法确定故障点坐标 (x_f, y_f) ,其方程组表达式为:

$$\begin{cases} (x_f - x_1)^2 + (y_f - y_1)^2 = d_1^2 \\ (x_f - x_2)^2 + (y_f - y_2)^2 = d_2^2 \\ (x_f - x_3)^2 + (y_f - y_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

通过求解上述方程组,可得到故障点的具体位置。为降低测量误差对定位结果的影响,还可引入定位精度评估公式,设实际故障点坐标为 (x_{true}, y_{true}) ,则定位误差 Δ 的计算公式为:

$$\Delta = \sqrt{(x_f - x_{true})^2 + (y_f - y_{true})^2} \quad (3)$$

该技术凭借传感器节点的分布式部署优势,可实现对配电线路的全方位覆盖监测,尤其适用于复杂地形或传统有线通信难以部署的区域,通过优化传感器节点的感知灵敏度与通信能耗管理,能够在保证定位精度的同时,延长网络运行寿命,提升故障定位的适应性及经济性。

3 配电自动化系统自愈控制策略

3.1 故障隔离与恢复供电全流程解析

当配电系统发生故障,自愈控制体系即刻响应。以某精密电子制造园区为例,其双环网结构对供电可靠性要求严格。当10 kV供电线路出现短路故障时,线路首端的FTU通过高精度传感器捕捉电流骤升、电压骤降等异常,10毫秒内识别故障特征,经5G URLLC通道将信息上传至配电自动化主站。主站启动多源数据融合定位算法,结合故障录波、拓扑模型及相邻节点量测,通过行波测距与阻抗计算双重验证,200毫秒内锁定故障区段,随后基于IEC61850协议控制智能开关分闸,实现故障隔离^[3]。

在恢复供电阶段,主站依据实时拓扑与负荷预测,启用启发式算法规划最优路径。评估联络开关两侧电压相位差、线路负载率等条件后,下达合闸指令转移非故障区域负荷。在此过程中,主站实时监测电压、电流等参数,当线路负载率超85%时,启动分级负荷控制切除非关键负荷,并利用动态无功补偿调节电压,保障供电稳定,平均恢复供电时间缩短至3分钟内,效率显著高于传统人工操作。

3.2 优化控制算法应用拓展

遗传算法和粒子群优化算法在配电自动化系统自愈控制中发挥着重要作用。遗传算法在应用时,首先将配电网的控制策略编码为染色体,通过选择、交叉、变异等遗传操作,在解空间中不断搜索更优的控制方案。

以某市配电网仿真实验为例,采用遗传算法优化故障隔离与恢复供电策略,经多代演化后成功地寻找到最小化停电区域的控制方案。粒子群优化算法模拟鸟群觅食的行为模式,其中每一个粒子都代表一个可能的解决方案,并在解的空间内持续更新其位置和速度,以便找到最佳的解决方案。在处理配电系统的多目标优化问题时,粒子群优化算法能够综合考虑停电时间、网络

损耗、电压质量等多个目标,通过设置适当的权重系数,实现各目标的综合优化。在实践中,这两种算法综合运用、相互补充,可以进一步提升自愈控制效果与效率。

3.3 多智能体协同控制策略

在配电自动化系统中,多智能体协同控制策略通过构建分布式智能网络,将系统内的智能终端、开关设备、分布式电源、储能装置及负荷节点等实体,抽象为具备感知、决策与通信能力的独立智能体。各智能体遵循既定的通信协议与协同机制,通过高速通信网络(如 5G、光纤专网)进行实时信息交互,形成动态协作网络。

当配电系统发生故障时,故障区域周边的智能体迅速响应。以某沿海工业园区配电网为例,当台风导致多条馈线短路故障时,故障点附近的智能开关智能体立即启动故障定位程序,通过对比自身采集的电流、电压波形数据与相邻智能体的监测信息,结合拓扑识别算法,在数百毫秒内完成故障区段定位。同时,分布式电源智能体(如光伏电站、微型燃气轮机)依据系统频率、电压波动情况,主动调整输出功率,并与储能智能体协同配合,为非故障区域提供短时功率支撑。此外,负荷智能体(如可中断工业设备、柔性用电设施)接收控制指令后,有序执行负荷削减或转移操作,避免非故障线路过载。在整个过程中,智能体间通过协商机制优化分合闸动作顺序,相较于传统集中控制模式,故障隔离时间缩短 40% 以上,显著提升系统自愈效率^[4]。

3.4 基于强化学习的数据驱动自愈策略

基于强化学习的数据驱动自愈策略通过构建高精度配电系统数字孪生体,整合实时监测数据与历史运行数据,建立虚拟仿真训练环境。该环境将节点电压、线路潮流、设备负载率等系统实时运行状态,以及短路、接地、断线等故障类型及位置信息,编码为强化学习智能体的输入状态向量;同时将故障隔离方案、负荷转供路径、分布式电源调节参数等自愈控制措施定义为智能体动作空间。智能体通过与环境交互优化策略,其奖励函数综合考量停电时长、网损、电压偏移及设备损耗等多目标,例如缩短停电时间 1 分钟奖励 100 分,降低网损 1% 奖励 50 分,而电压越限或设备过载则施加负向惩罚。在某城市配电网的仿真实验中,经过 10 万次训练迭代后,智能体在复杂多重故障场景下的最优策略收敛率达 92%,实现停电区域减少 35%、网损降低 20%。在实际应用中,依托边缘计算节点实时采集 SCADA 数据,结合在线更新机制将训练后的强化学习模型部署至配电自动化主站,可适应新能源高渗透率及

负荷剧烈波动的现代配电网环境,实现自适应控制。

3.5 基于物联网与数字孪生的智能预测性自愈策略

在配电自动化领域,基于物联网架构与数字孪生技术的智能预测性自愈系统构建了多维度感知网络体系。该系统在变压器、断路器等关键配电节点部署了包含红外热成像仪、微振动阵列及 UHF 局部放电检测装置在内的智能传感终端群,通过 LoRaWAN 或 OPC UA 等工业级通信协议实现 μs 级数据采集与云端同步。其技术核心在于建立具有物理—信息深度融合特性的数字孪生体,该模型通过多物理场耦合算法整合 SCADA 实时数据、设备全生命周期档案及气象环境参数,形成具备自学习能力的动态仿真平台。采用改进型 Bi-LSTM 与 3D CNN 混合神经网络对海量运行数据进行特征提取与关联分析,可准确识别绕组热点演变、机械部件疲劳裂纹等渐进性故障特征。当数字孪生体预测到变压器油中溶解气体浓度异常增长等故障前兆时,系统将启动多级预警协议。在故障处置决策阶段,基于蒙特卡洛模拟的预演机制能够评估包括分布式电源调频、柔性负荷转移在内的多种控制方案,结合 NSGA-II 多目标优化算法生成兼顾供电可靠性与经济性的最优策略^[5]。

4 结束语

在数字化电力系统构建过程中,配电系统自动化、智能化提升是确保能源安全的关键。以智能终端多功能集成和多元算法融合为手段,提出具有高精度故障感知、快速定位和动态自愈等特征的配电系统解决方案。通过实验证实了分布式传感网络优势和智能优化策略效能,揭示出数据驱动和协同控制对提高配电网可靠性的核心意义。面对未来电网高比例新能源的接入,本研究可为配电系统自适应调控和弹性运行提供理论参考和技术范式,研究成果对于促进电力系统向高效、智能化转型具有实践参考价值。

参考文献:

- [1] 冯栋.智能配电管理系统开发与应用[J].设备监理,2025(02):34-37,42.
- [2] 陈娟,龙德全,贾湘豫,等.智能电网配电系统自动化控制研究[J].电气技术与经济,2025(04):334-336.
- [3] 赵璇.建筑综合体电气消防负荷供配电系统设计研究[J].电气技术与经济,2025(04):121-123.
- [4] 滕宗伯,郭倩.基于电气防火技术的建筑供配电系统设计研究[J].电气技术与经济,2025(04):171-173.
- [5] 王笑颜,张广仁,华亮,等.智能配电系统在建筑智慧运维中的应用探索[J].智能建筑电气技术,2025,19(02):69-73.

水利水电工程施工导流及围堰技术探讨

江俊豪

(湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘 要 施工导流及围堰技术是保障水利水电工程建设顺利开展的关键技术。通过科学选择导流方式、规范围堰施工及强化全过程管理,可有效应对水利水电工程建设过程中的各类挑战。本文针对水利水电工程中的施工导流与围堰技术展开探究,解读其技术原理、应用核心及常见困扰,并结合实际工程案例,具体阐述不同技术在实际工程中的应用实例,总结技术实施的经验,以期为提高水利水电工程施工的安全及经济成效提供借鉴。

关键词 水利水电工程; 施工导流; 围堰技术; 工程案例

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.012

0 引言

水利水电工程的建设呈现出规模大、周期长、技术复杂等特点,施工阶段面临地域差异性、多学科协同、质量与安全风险挑战。施工导流与围堰技术是水利水电工程施工的关键部分,合理应用此项技术直接关系到工程施工的进度、质量及安全,全面深入研究施工导流及围堰技术,借助实际工程案例梳理经验,对提升水利水电工程施工水平具有重要的现实意义。

1 施工导流技术原理与分类

1.1 施工导流技术原理

水利水电工程施工导流技术通过拦截河道水流,结合修建临时或永久的导流泄水建筑物,引导河道水流向预定通道,为主体工程施工创造干地施工环境,其包含的基本流程有:剖析河道水文特性、敲定导流标准、规划导流建筑物、制订导流方案且组织落实。在实际应用施工导流技术过程中,必须综合考虑水流流量、水位改变、地形地质条件等因素,要让导流建筑物安全又有效地引导水流,减少或避免因环境因素对主体工程施工造成的影响^[1]。

1.2 施工导流技术分类

施工导流技术有多种不同形式,主要有分段围堰、全段围堰等技术形式。

1.2.1 分段围堰

分段围堰法导流,需把河床分割为若干段,按段依次开展施工,一般适用在河床较宽、流量大的河流,通过纵向或横向围堰分段施工。施工首先在河床的一侧建造围堰,形成基坑开展第一段的工程作业,水流通过未被围堰束窄的剩余河床或导流建筑物下泄,等第一段工程顺利完工,继而于已完工的工程基础搭建

另一段围堰,着手第二段工程的施工事宜。例如:三门峡水利枢纽位于黄河中游,河床宽阔且流量大,同时需兼顾通航需求。采用分段围堰法导流,将河床划分为三段(左岸、右岸及江心洲)分期施工,通过束窄河床和预留导流缺口实现水流控制,助力工程顺利有序实施。

1.2.2 全段围堰

采用全段围堰法导流,要在主体工程上下游一次性修建围堰,对整个河床进行截断,使水流经河床外的临时或永久泄水建筑物下泄的导流方式。此方法对河床狭窄、流量较小的河流可用,也能在可短暂断流的情形下采用,明渠、隧洞、涵管等皆可作为泄水建筑物^[2]。例如:西南山区某水电站,河道狭窄(宽 25~35 米)、流量小(5 年一遇洪峰 120 m³/s)的特点,采用全段围堰导流手段,在河流上下游搭建土石围堰,在岸边挖设明渠作为水流泄出的通道,施工中成功把水流导入明渠,实现了水库大坝干地施工的要求。

2 围堰技术原理与类型

2.1 围堰技术原理

在水利水电工程施工当中,围堰是为实现干地施工条件而搭建的临时挡水设施,其技术原理是在施工区域周边修筑围堰,形成封闭的作业空间,便于排水和土方开挖,为主体工程施工创造干燥的作业条件。围堰要具备充分的强度、稳定性及抗渗性能,以承受水压力、土压力连同施工期间的荷载,而且要方便进行施工与拆除。

2.2 围堰技术类型

围堰技术根据围堰材料的不同,可以分为土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰等。

2.2.1 土石围堰

土石围堰是水利水电工程常用围堰类型之一,多由土料、石料、砂料等建筑材料构筑而成,其具备结构简易、施工便捷、成本低、适应性强等特点,适合于河床覆盖层深厚、流量较小的场景,土石围堰断面为梯形,由土料性质及水流条件确定边坡坡度,在开展该项施工期间,先着手清理河床基础,而后把土料、石料、砂料进行分层填筑,保证围堰的强度及稳定性达标^[3]。

2.2.2 混凝土围堰

混凝土围堰具备高强度、良好抗渗性以及出色耐久性等特点,宜应用于工期长、要求高的水利水电工程,岩基或非岩基上可修建混凝土围堰,结构形式诸如重力式、拱式等情况,凭借自身重力,重力式混凝土围堰可维持稳定,拱式混凝土围堰利用拱的效果把水压力递至两岸地基。例如:沙沱水电站纵向围堰采用常态混凝土结构,围堰于坚硬的岩基上进行修建,采用重力型的架构,高度已超百米,满足了施工阶段的挡水基本要求,待工程顺利建成之后,有部分围堰充当了永久建筑物的一部分,起到了显著功效^[4]。

2.2.3 钢板桩围堰

钢板桩围堰是借助钢板桩相互连接形成的挡水结构,呈现出强度大、挡水功能好、施工速度快等特点,适用于深水、高流速、软土地基等复杂地质条件。钢板桩围堰建造过程主要流程有:打设好钢板桩、安装妥当支撑结构、做好抽水清基工作。例如:新泾港桥项目里,考虑到施工区域水深偏大,所处地质为软土地基,采取了钢板桩围堰技术,通过应用拉森钢板桩并配置多层支撑,实现干地施工,提升了港口码头施工质量及进度。

3 施工导流及围堰技术应用要点

3.1 施工导流技术应用要点

一是导流标准的确定。导流标准是施工导流设计的关键参照,其与导流建筑物的规模以及工程投资直接相关。综合考量工程重要性、施工工期以及河道水文特性等要素后,方可确定导流标准。导流标准采用的规格越高,导流建筑物的规模越庞大,工程需要的投资也越高,但工程施工的安全状况也愈发良好。确定导流标准要做技术经济的对比分析,挑选合适的导流标准。例如:小浪底水利枢纽项目,借助对黄河水文数据的剖析以及技术经济层面的对比,制定合理的导流规范,保障工程施工维持在安全水平,又可避免不必要的投资浪费。

二是导流建筑物的设计。导流建筑物的设计要达到强度、稳定性以及抗渗性等要求,在设计流程推进期间,要按照导流标准以及河道水文特性,决定导流建筑物的样式、大小与架构,要考虑导流建筑物与主体工程的相互影响,保证导流建筑物在施工期间以及主体工程施工时实现安全运行,如导流隧洞设计阶段,要考量隧洞断面大小、坡度以及进出口布局等要素,确保隧洞泄流能力及水流条件达标^[5]。

三是导流方案的制定与实施。拟定导流方案需综合考虑工程施工进度、所采用的施工工艺和地形地质条件等因素,选择合适的导流模式及导流建筑物,在工程建设过程中,施工须严格按照导流方案进行,保障导流建筑物施工的质量与进度。应强化对导流建筑物的监测与维护工作,及时发现并处置安全隐患,保障导流建筑物的安全运行。例如:三门峡水利枢纽工程在制定导流方案时,充分考虑了工程的施工进度与河道水流的特征,选择了分段围堰法实施导流,规划了全面的施工方案,实施时严格依据既定计划施工,导流任务顺利地达成目标。

3.2 围堰技术应用要点

第一,围堰类型的选择。需结合工程地质、水流、施工工期、造价等多方面因素选择围堰类型,不同种类围堰的特点及适用条件各不相同,故在选择围堰类型的时候,需要开展技术经济的比对,选出最合适的围堰类型,如工程所在深水、软土地基这样的条件下,钢板桩围堰是比较合适的技术类型;若处于石料丰富的地区,土石围堰则在经济实用方面更胜一筹。

第二,围堰的布置与结构设计。布置围堰时,要综合考量施工场地规划、主体工程需求以及水流状况等要素,要让围堰切实有效地发挥挡水功能,为主体工程创造干地条件。围堰结构设计应符合强度、稳定性及抗渗性等要求,而且要利于施工及拆除,在设计实施的阶段中,需根据围堰的类别及地质情形,判定围堰的断面呈现形式、边坡倾斜角度、基础处理方法等。在土石围堰基础处理工作中,需将河床表面的杂物及软土层清理掉,以保证围堰的稳固性;混凝土围堰的基础处理,需结合岩基情况实施相应处理^[6]。

第三,围堰的施工与拆除。施工质量的好坏对围堰的安全运行具有重要影响,因此,在开展施工时应按照设计要求及施工规范严格施工,保证围堰强度及稳定性达标,应加大对施工过程质量的管控力度,及时发现且处理施工难题。围堰拆除需结合工程要求和实际情况对围堰进行拆除,选取合适的拆除样式和拆

除时间点,保障拆除作业既安全又环保。例如:陈村水库项目在围堰拆除阶段,选用了爆破拆除的方法,提前制定出详细的爆破方案及安全防护办法,在拆除环节严格依照方案执行,保障了拆除作业安全且顺畅开展,同时降低了对周边环境的影响。

4 工程案例分

4.1 三峡水利枢纽工程施工导流及围堰技术应用

作为大型水利水电工程,三峡水利枢纽工程举世瞩目,处在长江上游,从重庆市到湖北省宜昌市的长江干流位置,工程拥有防洪、发电、航运等一系列功能,其施工呈现巨大规模,技术所涉难度极高。

三峡工程借助分段围堰法实施导流,施工分成三个阶段实施:一期工程于长江南岸搭建起土石围堰,建成基坑以推进导流明渠和混凝土纵向围堰施工,水流依托原河床向下游泄流。二期工程于长江北岸建设土石围堰及混凝土纵向围堰,建成基坑开展大坝主体工程的施工,水流沿导流明渠向下游泄流。三期工程在导流明渠处搭建起土石围堰,建成基坑进行大坝末尾一段的施工,水流通过大坝泄洪坝段向下游泄流。在开展导流工作的时段,以合理设计导流建筑物与制定科学的导流安排,成功招架住了长江的巨大洪水流量,稳固了工程施工的安全状况与进展节奏。

三峡工程施工期间,采用了多种式样的围堰。一期工程的土石围堰,高度有50多米,采用风化砂实施填筑,借助分层压实,围堰的强度和稳定性得以稳固。二期混凝土纵向围堰为三峡工程的关键组成部分,不只是起到导流的功用,工程建成后依旧作为永久建筑物的组成部分,全长753米,最大高度超百米(堰顶高程140米),采用通仓碾压混凝土技术,浇筑时内部埋设冷却水管控制温升,保证了围堰的质量及耐久性。三期工程土石围堰施工操作阶段,面临由高水位、大流量带来的挑战,通过对围堰结构及施工工艺优化,采用双戗堤立堵截流技术和数码雷管控制爆破技术,成功实现了围堰修建与拆除工作。

4.2 小浪底水利枢纽工程施工导流及围堰技术应用

位于黄河中游的小浪底水利枢纽工程,在河南省洛阳市以北约40公里处,为黄河流域的综合型水利工程,具有防洪、防凌、缓解泥沙淤积、供水、发电等作用,工程所处地区的地质条件错综复杂,黄河水流所含泥沙量颇高,施工难度不容小觑。

该工程在建设采用全段围堰法导流,在黄河上下游设置土石围堰,阻断河床水流的流动,水流借助

搭建的泄洪排沙洞、发电洞等永久泄水建筑向下泄流,在实施导流的时段中,充分考虑了黄河水含沙量高的特质,开展了针对泄水建筑物抗冲刷性能的特殊设计,实现了导流建筑物的安全有效运行,通过合理安排施工进度,在有限时间内完成了导流建筑物施工及主体工程建设。

小浪底水利枢纽工程的围堰多采用土石围堰构造,因黄河河床地质条件呈现复杂性,对围堰基础处理而言难度较大,在施工实施过程中,对围堰基础展开了全面的地质勘察与处理,采取了抛石挤淤、灌浆加固等手段,保证了围堰的稳定性。考虑到黄河水流的特殊性质,特别设计了围堰的边坡坡度以及抗渗性能,采用以复合土工膜为主的防渗材料,提升了围堰抗渗透能力。在围堰开展拆除工作阶段,运用了机械拆除与爆破拆除相融合的方法,保障了拆除作业的安全性和环保性。

5 结束语

施工导流及围堰技术是水利水电工程实现干地施工的关键手段,其应用对工程建设质量、进度与安全有着直接影响。施工导流应结合河道水文、地形地质及工期等方面要素,选择合适的导流方式及导流建筑物,制定科学合理的导流标准,保障过流顺畅性与结构安全性。结合工程地质和水流条件运用围堰技术,切实强化施工质量把控,保障结构的强度、稳定性与抗渗能力。实际工程开展时应结合技术特性灵活应用,重视技术监测管理工作,及时总结经验,采用先进技术,进而提升施工技术应用及管理效能。

参考文献:

- [1] 肖敏,范丽丽.水利水电施工中施工导流和围堰技术的应用研究[J].水上安全,2024(22):157-159.
- [2] 孟羽昊,刘斌.水利工程施工中导流施工的影响因素和关键技术[J].数字农业与智能农机,2024(08):61-63.
- [3] 沈永泰.奉化江堤防整治工程中水闸施工导流及围堰方案分析[J].云南水力发电,2024,40(S1):32-35.
- [4] 王靓.河道堤防加固工程中钢围堰导流管施工技术研究[J].珠江水运,2024(04):123-125.
- [5] 严瑞.探讨施工导流和围堰技术在水利水电施工中的运用[J].科技资讯,2023,21(22):145-148.
- [6] 黄玉婷.水利工程施工中导流施工技术的应用[J].水上安全,2023(13):28-30.

变电站电气安装技术重点及施工工艺分析

王 珂¹, 张连操², 孙建海³, 邵华泽⁴

- (1. 山西睿帆建筑工程有限公司, 山西 太原 030000;
2. 湖北翰宇祥建设工程有限公司, 湖北 恩施 445000;
3. 北京京能建设装饰装修有限公司, 北京 102300;
4. 国投航空科技(北京)有限公司, 北京 100028)

摘 要 变电站电气安装是电网工程建设的关键环节, 其施工质量直接影响电网的安全稳定运行。本文从变电站电气安装的关键技术、重点环节和施工工艺三个方面进行了系统分析, 以为相关人员提供有益参考。在关键技术方面, 重点介绍了数字化电气安装技术、模块化电气安装技术和智能化电气安装技术的应用; 在重点环节方面, 分析了一次主设备安装精度控制、电缆敷设与压接施工质量控制、二次回路测试与联调以及接地系统施工要点等内容; 在施工工艺方面, 详细阐述了施工准备、主变压器安装、高压开关设备安装调试、电缆敷设与终端制作、二次设备安装与调试、接地系统施工以及系统调试与试运行等各个环节的具体工艺要求。

关键词 变电站电气安装; 施工工艺; 数字化; 模块化; 智能化

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.013

0 引言

变电站是电力系统的枢纽, 其电气安装质量关乎电网的安全稳定运行。随着电网建设规模的不断扩大和技术水平的持续提升, 变电站电气安装也呈现出数字化、模块化、智能化的发展趋势。这对变电站电气安装施工提出了更高的要求, 需要在施工过程中严格贯彻相关技术标准和规范, 采用先进的施工工艺和质量控制手段, 确保电气安装的施工质量和效率。

1 变电站电气安装关键技术

1.1 数字化电气安装技术

数字化电气安装技术是指利用数字化技术对变电站电气设备进行安装、调试和管理的技术。该技术通过采用数字化的设计、仿真、制造和管理手段, 实现了电气安装过程的数字化和可视化。

数字化电气安装技术包括三维数字化设计、虚拟现实技术、数字化制造技术等^[1]。(1) 三维数字化设计可以通过建立变电站电气设备的三维模型, 实现设备布置的优化和碰撞检查; (2) 虚拟现实技术可以在虚拟环境中模拟电气安装过程, 提前发现潜在问题; (3) 数字化制造技术可以根据数字化模型实现设备的精准加工和装配, 通过应用数字化电气安装技术, 可以显著提高电气安装的效率和精度, 减少安装过程中的失误和返工。

1.2 模块化电气安装技术

模块化电气安装技术是指将变电站电气设备按照功能和结构进行模块化设计和制造, 并采用标准化的接口和安装方式, 实现电气设备的快速安装和更换。该技术可以显著缩短变电站电气安装的工期, 提高安装效率。同时, 模块化设计还可以提高电气设备的互换性和通用性, 便于后期的维护和升级。在模块化电气安装过程中, 需要严格控制每个模块的制造精度和安装精度, 确保模块之间的匹配和配合。此外, 还需要合理规划模块的功能和边界, 避免模块之间的干扰和冲突, 通过采用模块化电气安装技术, 可以实现变电站电气设备的标准化和系列化, 提高电气安装的工业化水平。

1.3 智能化电气安装技术

智能化电气安装技术是指利用物联网、大数据、人工智能等新兴技术, 实现变电站电气安装过程的智能化控制和管理。该技术通过在电气设备上部署各种传感器和监测装置, 实时采集设备运行状态数据, 并利用大数据分析技术对数据进行挖掘和分析, 及时发现设备的潜在故障和异常^[2]。同时, 智能化电气安装技术还可以利用人工智能算法优化电气设备的安装方案和参数, 提高安装效率和质量。在具体应用中, 智能化电气安装技术可以实现远程监控、故障诊断、预测性维护等功能, 大大提高了变电站电气安装的智能化水平, 确保电气安装质量和效率。

2 变电站电气安装技术重点

2.1 一次主设备的安装精度控制

变电站一次主设备主要包括变压器、断路器、隔离开关、互感器等,其安装精度直接影响设备的运行性能和可靠性。在一次主设备安装过程中,需要严格控制设备的就位精度、垂直度、同心度等关键参数。就位精度控制主要通过采用激光跟踪仪、全站仪等高精度测量设备,结合三维激光扫描技术,实现设备安装位置的高精度测量和校正。垂直度控制可以利用水准仪、电子水准仪等测量工具,确保设备的垂直安装。同心度控制主要针对断路器、互感器等需要同轴安装的设备,采用专用的同心度测量工具进行精确测量。此外,还需要加强设备基础施工质量控制,确保基础的平整度和强度满足要求。

2.2 电缆敷设与压接施工质量控制

电缆是变电站电气设备之间传输电能和信号的重要载体,其敷设和压接质量直接影响系统的安全稳定运行。在电缆敷设施工中,需要合理选择电缆的敷设路径和方式,避免电缆受到机械损伤和环境干扰;电缆沟、电缆托架等设施的施工要满足设计要求,确保电缆的支撑和固定牢固可靠;电缆终端和中间接头的压接施工是质量控制的重点,需要选用合适的压接工具和材料,严格按照操作规程进行施工^[3]。压接后的电缆需要进行绝缘性能测试和机械强度测试,确保压接质量满足要求;对于特殊环境下的电缆,如高温、潮湿等环境,需要采取相应的防护措施,如选用阻燃、防水电缆,设置电缆防火封堵等,加强电缆敷设与压接施工质量控制,可以降低电缆故障率,提高供电可靠性。

2.3 二次回路的测试与联调

变电站二次回路是指对一次设备进行测量、控制、保护和信号传输的控制线路,其测试与联调是变电站电气安装的重要内容。二次回路测试主要包括绝缘电阻测试、接地电阻测试、回路导通测试、功能测试等,需要利用兆欧表、接地电阻测试仪、继电保护测试仪、二次降压测试仪等专用设备进行测试,并详细记录测试数据。二次回路联调是指将各个控制设备和保护设备进行连接,形成完整的控制回路,并进行功能联合试验。联调过程中需要严格按照二次设计图纸进行接线,并对各个控制点进行逐一验证,确保控制逻辑和保护功能正确。联调完成后,需要进行全面的模拟试验,模拟各种工况下的控制和保护动作,并进行必要的调整和优化。

2.4 接地系统施工要点控制

变电站接地系统是保证人身和设备安全的重要防护措施,其施工质量直接关系到变电站的安全运行,

接地系统施工要点包括接地网的设计与布置、接地体的施工、接地引下线的敷设以及接地电阻的测试。接地网的设计与布置需要根据变电站的规模、电压等级、土壤电阻率等因素进行科学计算和优化,确保接地网的接地电阻满足设计要求。接地体施工需要严格控制焊接质量和防腐措施,确保接地体与大地的良好接触^[4]。接地引下线敷设需要选择最佳路径,避免与其他电缆和管道交叉,并采用专用的接地线夹进行可靠连接。接地电阻测试是验证接地系统施工质量的重要手段,需要在施工过程中和竣工后进行多次测试,确保接地电阻值稳定可靠。加强接地系统施工要点控制,可以有效降低变电站的接地故障风险,保障人身和设备安全。

3 变电站电气安装的施工工艺

3.1 施工前期准备工艺

施工前期准备是确保变电站电气安装顺利进行的基础环节。首先是技术准备,包括熟悉设计图纸、技术规范和施工方案,组织技术交底会议,明确各工种的施工要求和配合关系。其次是人员准备,配备具有相应资质的电气安装技术人员,进行安全技术培训和岗位技能培训。再次是物资准备,需要提前采购符合设计要求的电气设备、材料和工具,并进行质量检验和验收入库。最后是现场准备,包括搭建临时设施、布置施工场地、确保施工用电和用水供应。此外,还需要制定详细的施工进度计划和质量控制计划,建立完善的项目管理体系。

3.2 主变压器安装工艺技术要点

主变压器作为变电站的核心设备,其安装工艺要求极为严格。运输就位阶段需要使用专用的变压器运输车辆,运输过程中要避免剧烈振动和倾斜,就位前需要检查变压器的外观、附件完整性和油位情况,就位时采用大型起重设备配合液压平移装置,确保变压器平稳就位,就位精度控制在 $\pm 3\text{ mm}$ 以内。

安装过程中需要进行多项技术检测:首先是绝缘电阻测试,使用 $2\ 500\text{ V}$ 兆欧表测试各绕组间及绕组对地的绝缘电阻。其次是变比测试,验证变压器的变比是否符合设计要求。再次是直流电阻测试,检测各绕组的直流电阻值是否平衡。最后是油样化验,确保变压器油的各项指标合格^[5]。

3.3 高压开关设备安装调试工艺

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)的安装需要在洁净环境中进行,先进行SF₆气体的充装前检查,确保气体纯度达到99.8%以上。设备安装时严格控制各间隔的对位精度,法兰连接处需要使用专用密封材料,

确保气密性良好。安装完成后进行 SF₆ 气体泄漏检测, 泄漏率不得超过 0.1%/ 年。

断路器安装需要严格控制安装高度和水平度, 垂直度偏差不超过 1%。机械特性调试包括分合闸时间测试、分合闸速度测试、同期性测试等。分合闸时间偏差不得超过 ± 2 ms, 三相分合闸不同期性不超过 5 ms。另外, 还需要进行绝缘性能测试和机械寿命测试, 确保断路器性能稳定可靠。

3.4 电缆敷设与终端制作工艺

电缆敷设前需要进行路径复核, 确保敷设路径畅通无阻。直埋电缆需要开挖电缆沟, 沟底铺设 100 mm 厚的细砂垫层, 电缆敷设后覆盖细砂并铺设保护板, 电缆隧道内敷设需要使用专用电缆托架, 托架间距根据电缆规格确定, 一般为 1.5 ~ 2.0 m。

电缆终端制作是关键工艺环节, 制作前需要对电缆进行外观检查和预试验, 剥切电缆时要保证切口平整, 各层结构完整。应力锥的安装需要严格控制尺寸, 确保应力分布均匀^[6]。绝缘处理采用多层包扎工艺, 每层重叠度不少于 1/2, 终端制作完成后需要进行耐压试验和局部放电试验, 确保绝缘性能良好。

3.5 二次设备安装与调试工艺

控制柜安装需要严格按照设计图纸进行定位, 柜体之间的连接要紧密平整, 柜内设备安装要整齐有序, 接线规范美观。控制电缆的铺设要分类捆扎, 标识清晰, 电缆与设备的连接要可靠, 端子压接要使用专用工具, 确保接触良好。

保护装置调试采用分级调试方式, 首先进行装置检验, 检查硬件配置和软件版本是否正确。然后进行定值整定, 根据系统运行方式和保护配合要求设定各项保护定值。最后进行功能试验, 模拟各种故障情况, 验证保护装置的动作特性和可靠性, 调试过程中需要详细记录试验数据, 并形成完整的调试报告。

3.6 接地系统施工工艺规范

接地网施工采用分段施工方式, 首先进行接地体敷设, 接地体采用热镀锌扁钢或圆钢, 埋深不小于 0.8 m, 接地体连接采用搭接焊接方式, 搭接长度不小于扁钢宽度的 2 倍或圆钢直径的 6 倍, 焊接质量要求焊缝饱满, 无气孔和夹渣。焊接完成后及时进行防腐处理, 涂刷防腐涂料。

接地引下线的安装需要选择最短路径, 避免形成闭合回路, 引下线与接地网的连接要可靠, 连接点要进行加强处理, 设备接地线的连接要使用专用接地线夹, 确保接触面积充足。接地电阻测试采用三点法或四点法, 测试结果要符合设计要求。

3.7 系统调试与试运行工艺

按照一次设备、二次设备、通信设备的顺序进行分系统调试。一次设备调试包括设备的机械特性试验、电气性能试验和保护联动试验。二次设备调试重点是保护装置的功能验证和整定值核查。通信设备调试包括通道测试、协议验证和数据传输测试。

系统联调是验证各子系统协调工作能力的关键环节。首先进行系统静态检查, 核对所有设备的状态和参数设置。然后进行动态联调, 模拟正常运行和故障情况下的系统响应。联调过程中需要重点验证保护配合关系、自动化功能和通信可靠性。

试运行分为空载试运行和负载试运行两个阶段。空载试运行主要验证设备的基本功能和系统的稳定性, 运行时间不少于 72 小时。负载试运行需要逐步增加负荷, 验证设备在额定工况下的运行性能, 试运行期间要进行 24 小时连续监测, 记录各项运行参数, 及时发现和处理异常情况。

4 结束语

变电站电气安装是一项系统性、专业性极强的工程, 涉及诸多关键技术和施工工艺。从宏观角度看, 需要紧跟智能电网发展趋势, 大力推广数字化、模块化、智能化电气安装技术, 提升变电站电气设备的智能化水平和互操作能力; 从微观角度看, 必须严格遵循电气安装的技术标准和规范, 重视一次主设备安装、电缆敷设、二次回路联调、接地系统施工等关键环节和工序的质量控制, 建立完善的施工组织管理体系。只有在技术创新和工艺规范两个方面持续发力, 才能不断提升变电站电气安装水平, 为电网的安全稳定运行提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 俞守君. 变电站电气安装技术重点及施工工艺[J]. 中国高新科技, 2024(06):72-74.
- [2] 齐白玉. 变电站电气安装技术重点及施工工艺探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(04):65-66, 70.
- [3] 刘道兴. 变电站电气安装技术重点及施工工艺研究[J]. 河南科技, 2020, 39(32):130-132.
- [4] 郝爽. 解析变电站电气设备安装技术重点及施工工艺[J]. 中国住宅设施, 2020(09):78-79.
- [5] 吴旭东. 浅析变电站电气设备安装技术重点及施工工艺[J]. 电子世界, 2020(01):69-70.
- [6] 王辉. 变电站电气设备安装技术重点及施工工艺初探[J]. 电子世界, 2019(01):42, 44.

配电网电力工程技术问题 分析及其施工安全研究

徐 亮, 杨 政, 史现奇

(山东鼎拓电气有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 配电网作为连接主网和用户之间的关键环节, 配电网技术的可靠性以及施工安全对供电质量产生直接影响。本文通过对配电网电力工程存在的技术难题和安全优化路径进行了系统分析, 明确了智能融合和高弹性的系统架构特征以及电力工程技术在供电可靠性方面的核心价值, 揭露了防误操作装置的故障、技术更新的滞后、维护系统的不健全以及对气候变化的适应性不足等技术难题, 并提出了施工安全的解决对策。研究结果表明, 技术创新和管理优化协同能够促进配电网工程的安全水平和运行效能的提高, 有利于新型电力系统的建设。

关键词 配电网电力工程技术; 防误操作装置; 电网维护体系; 施工安全

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.014

0 引言

配电网是电力系统中的一个重要环节, 它的建设安全直接影响着电网的稳定运行和社会的正常供电。在电网规模越来越大和技术不断创新的情况下, 配电网建设所面临的安全挑战也越来越复杂。如何有效地提高施工安全性和防止事故发生已成为配电网工程领域急需解决的重点问题。通过对配电网建设安全优化策略的系统研究, 为促进配电网建设管理水平的提高和确保电网的安全稳定运营提供实践参考。

1 配电网电力工程技术概述

1.1 现代配电网系统构成与特征

现代配电网系统具有智能融合和高弹性等突出特点, 组成覆盖高压输电线路终端到低压用户接入点整个环节的网络体系。具体地说, 该系统是由高压配电变电站、中压配电线路、配电变压器、低压配电线路和各种用户终端设备等组成的多层级、多节点复杂网络结构。在配电网中, 智能融合的特点主要体现在对先进信息技术, 如物联网、大数据、云计算和人工智能等的深度整合和应用^[1]。这些先进技术的整合为配电网提供了实时监控和精确控制、智能调度和故障自愈的先进功能, 大大提高了系统运行效率和可靠性。但高弹性表现为配电网对于各种突发状况, 不管是面临自然灾害、设备故障或负荷突变时都具有快速反应和恢复的能力, 现代配电网均可以通过灵活地进行网络重构和资源调配来保证电力供应的连续性和稳定性^[2]。

1.2 电力工程技术在配电网中的应用价值

就增强供电可靠性而言, 先进电力工程技术通过准确负荷预测、智能故障定位和隔离、快速自愈恢复机制等, 显著减少停电时间和影响范围, 确保用户持续稳定用电。在资源优化配置层面上, 电力工程技术帮助配电网通过需求侧响应, 分布式能源访问和管理等多种技术手段实现了能源灵活调度和高效利用, 均衡电力供需矛盾、提高能源利用效率、推进绿色满仓目标^[3]。另外, 电力工程技术还能促进配电网智能化升级发展, 在物联网、大数据分析和云计算等先进技术支持下, 对配电网运行状况进行实时监控、智能分析和决策支持, 为运行维护人员提供更准确、更有效的管理工具, 以降低运行维护成本和提高总体运营效益。

2 配电网电力工程技术关键问题分析

2.1 防误操作装置失效与运行管理缺陷

防误操作装置是确保电网安全运行的重要防线, 防误操作装置的故障通常来自设计缺陷、维护不当或者技术老化等诸多因素。从设计层面看, 有些设备没有充分考虑到现场环境复杂多变的特点, 造成极端情况下容易发生误判或者拒动; 在维修中, 因缺少经常性专业检测和校准而导致装置性能逐步劣化, 不能有效辨识和制止错误操作; 从技术层面看, 随着电网智能化程度的不断提高, 传统防误操作装置已经很难达到高精度和高可靠性的要求, 而滞后的技术迭代则成

了限制其发挥效能的瓶颈。同时,其运行管理缺陷也不可忽视。配电网运行管理涵盖了规划、建设、运行维护等诸多环节,其中任何一环出现遗漏都会导致连锁反应的发生,从而影响到整个电网的安全性^[4]。

2.2 配电设备技术迭代滞后问题

在智能电网,分布式能源接入以及其他新兴技术快速发展的背景下,配电设备在技术性能和功能需求都发生了变化,成为电网和用户之间沟通的纽带。但目前一些配电设备技术迭代显得捉襟见肘,很难与不断增长的电网智能化和高效化需求相匹配。技术迭代滞后,其中一个体现就是设备智能化水平不够高。尽管智能电网的概念已深入人心,但许多配电设备仍停留在传统的控制与监测模式,缺乏自我感知、自我诊断与自我优化的能力,很难做到和上级调度系统无缝衔接、高效协同^[5]。

2.3 电网维护体系不健全现象

目前,虽然电网规模不断扩大,技术复杂度也在不断增加,但是与其配套的维护体系并没有得到同步改善,这就造成了一系列问题的频繁出现。具体来讲,维护体系不完善表现为维护流程碎片化、低效化,没有统一标准和规范,使维护工作经常处于各自为政、重复劳动的状态,这一两难境地既浪费大量人力和物力,又很难确保维护质量一致可靠。更进一步说,保持资源分配不均衡是一个突出的问题。在一些区域,电网维护工作常常会因为缺乏资金、技术或者人员资源而显得力不从心,很难应付不断增加的维护需求;而且在其他区域,也会出现资源闲置或者浪费等问题,没有发挥出应有的作用。

2.4 极端气候环境适应性不足

在全球气候变化日益加剧的背景下,极端天气事件频繁发生和强度不断升级,如暴雨洪涝、高温热浪、严寒风冻以及强风飓风等,给配电网物理结构、设备性能和运行管理带来了空前挑战。目前,一些配电网在规划设计及建设阶段虽然已经考虑到一定的气候条件,但是面对极端气候所具有的极端性、不确定性以及复合性等特点,适应性设计明显不足。具体表现在电网设备对极端气候的耐受能力受到一定限制,如绝缘材料易受高温影响而老化失效、导线易受覆冰影响而发生断裂、强风作用下杆塔易坍塌等问题直接危及电网安全平稳运行。与此同时,极端气候也会造成电网设备故障率剧增,诱发连锁故障、扩大停电面积、影响社会经济正常运行。

3 配电网施工安全优化策略研究

3.1 施工前期准备标准化建设

在配电网建设安全管理实践探索过程中,针对配电网建设环境复杂多样,技术要求越来越严格等挑战,标准化建设的目标是通过系统化、规范化前期准备过程,保证施工活动有序进行和安全可控。具体来讲,标准化建设需科学编制和严格审查施工方案,保证方案内容翔实、技术措施恰当、安全风险评估充分,并为后续建设提供清晰的技术指导和安全指引。同时,还需要加强施工人员资质审查和安全教育培训工作,采取理论授课、实操演练以及应急演练等多方式,提高施工人员专业技能和安全意识,使之能熟练运用施工规范、安全操作规程和应急处置方法等,从而为施工安全打下扎实的人力资源基础。另外,在标准化建设中还应重视对施工机械和物料的备料和检验,以保证机械设备性能优良、安全装置完整高效、物料质量达标、规格达到设计要求等,从根本上杜绝安全隐患。在进行施工现场的布局设计时,必须严格遵循安全、合理和高效的准则,科学地规划施工区、材料堆放区以及临时用电设施等,并设置明确的安全警示标识和防护措施,以确保施工人员能够在一个安全和有序的工作环境中工作。

3.2 全流程施工安全管控强化

全流程管控突出从施工筹备到竣工验收等各个环节都需要植入严格的安全监管机制来无缝对接和动态优化安全管理。具体来讲,需要建设一个覆盖施工规划、材料采购、现场操作、设备调试以及后期维护等环节的全周期安全管理系统,以保证每个环节的活动都按照既定安全标准和操作规程进行。施工规划阶段要加强风险预评估工作,利用先进风险分析工具系统性地识别和量化评估可能存在的隐患,并有针对性地制定预防措施和应急预案。在材料采购环节中,需要对材料质量进行严格把关,保证各项施工材料都达到国家标准和设计要求,以免材料缺陷导致安全事故发生。在现场作业阶段则需要对安全进行全方位、全天候监管,采用智能化监控系统对施工动态进行实时追踪,对违规操作进行及时发现和整改,同时强化现场安全巡查和隐患排查工作,保障施工环境安全可控。在设备调试和后期维护的阶段,需要建立良好的设备维护档案并定期开展安全检测和性能评估等工作,以保证设备的长期平稳运行,降低由于设备故障而带来的安全风险。另外,全流程施工安全控制加强也需要重视安全文化培养和宣传,并通过经常性的安全培训、

案例分析和经验交流,提升全体施工人员的安全意识与责任意识,形成“安全连着你我他,平安幸福靠大家”的良好氛围。

3.3 材料质量与施工工艺双控机制

材料作为工程建设的物质基础,其质量好坏直接关系到电网的耐久性和安全性。建立一套严谨的材料质量控制体系非常关键,需要从材料采购的源头开始,对供应商进行资质审查、样品检测和批量抽检多环节把关,保证进场材料全部达到国家标准和设计要求。同时引进先进的物料追溯系统,使物料从产生到投入使用的整个过程都可以进行追溯,对质量问题追溯和责任界定起到了强有力的支持作用。施工技术是把材料转换为实际工程的核心步骤,它的标准化、前沿性和适应性直接决定施工的效率和质量。为此,需构建科学严谨的施工工艺标准体系,明确各施工环节的技术要求、操作流程与质量验收标准,确保施工活动有章可循、有据可依。基于此,强化施工工艺培训和评价,促进施工人员专业技能和操作水平的提高,让施工人员能熟练运用和严格按照既定施工工艺标准施工。

3.4 设备周期性巡检维护制度

在配电网建设安全和运维管理等系统中,对设备进行周期性巡检和维护制度,是确保电网平稳运行、防止设备故障和事故发生的关键防线。系统强调在科学规划和严格执行的基础上,根据设备类型、运行环境、负荷特性和历史故障数据进行多维度考虑,建立个性化、精细化巡检维护周期和内容标准。具体来讲,需要构建包含高压开关柜、变压器、电缆线路和继电保护装置在内的核心设备综合巡检系统,并明确各个设备不同工作阶段关键监测点及维护要点,如绝缘性能检测、温升监控和机械部件磨损评估,以保证巡检的全面性和针对性。在进行巡检和维护的过程中,应充分运用如物联网传感器、远程监控系统 and 大数据分析平台等现代信息技术工具,以实现了对设备运行状况的实时监控和智能预警,从而能够及时识别和预防潜在的安全风险。同时,加强巡检人员专业培训和技能提升,保证他们能准确辨识设备异常,对故障原因进行准确判断、高效实施维护操作,以免人为失误造成设备受损或者扩大事故。

3.5 智能配电网技术管理体系构建

在配电网建设安全和智能化发展双重推动下,建设智能化配电网技术管理体系已成为提高电网运行效率、确保建设安全以及优化运维管理等方面的核心战

略。该系统旨在将物联网、大数据、云计算和人工智能等先进信息技术有机结合起来,对配电网进行全生命周期智能管理和决策支持。需要建设一个统一数据采集和集成平台,将配电网各个环节运行数据、设备状态信息以及施工安全监控数据等进行集成,破除信息孤岛并进行实时共享和深度挖掘。利用数据分析和挖掘技术揭示配电网的运行规律并对可能存在的风险进行预测,从而为施工安全和运维决策等提供科学依据。在技术管理体系方面,要加强智能调度和优化控制功能的建设,采用先进算法模型实现配电网实时优化调度、均衡负荷分布、减少网损、提高供电可靠性。同时介绍了智能巡检及故障诊断系统的设计,利用无人机和机器人等自动化设备定期或者实时地巡检配电网,并迅速定位故障点,对故障影响进行了评估,为快速抢修和恢复供电提供了技术支持。另外,智能配电网技术管理体系需要重点关注安全防护和应急响应能力,建立多层次、全方位的安全防护体系以预防网络攻击和数据泄露等风险,保障配电网的运行安全。同时制定完善的应急预案,并通过模拟演练和实战检验不断提高应急响应速度和处置能力。

4 结束语

配电网建设安全优化的策略包括建设前准备工作的标准化建设、加强全流程建设的安全管控、建立材料质量和施工工艺的双控机制、设备周期性巡检维护制度、智能配电网技术管理体系的建设,为促进配电网建设安全性、可靠性和智能化提供系统性解决思路。这些战略的实施不仅有利于防止施工事故发生和确保施工人员的生命安全,而且能够促进配电网工程整体质量和运行效率的提高,从而为社会稳定供电和经济发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 徐青青,董顺良,沈俊.配电网电力工程技术及其施工安全问题探析[J].电力设备管理,2024(08):222-224.
- [2] 蒋昀廷.配电网电力工程技术问题及其施工安全探究[J].数字化用户,2023(29):22-24.
- [3] 井维波.配电网电力工程技术及其施工安全问题研究[J].自动化应用,2023,64(05):218-220.
- [4] 次仁贡布.配电网电力工程技术及其施工安全问题研究[J].百科论坛电子杂志,2024(11):40-42.
- [5] 吴晓.配电网电力工程技术及其施工安全问题研究[J].电力设备管理,2023(05):135-137.

1000 kV 特高压输电线路 施工技术与检修技术分析

田 强¹, 伍灵鑫²

(1. 国网四川省电力公司超高压分公司南充运维分部, 四川 南充 637000;

2. 西南石油大学(成都校区), 四川 成都 610000)

摘 要 为了提升 1000 kV 特高压输电线路施工与检修水平, 本文详细阐述了 1000 kV 特高压输电线路施工技术, 包括线路设计及关键施工技术。同时, 介绍了 1000 kV 特高压输电线路检修技术, 包括状态检测、故障处理、检修策略及智能化运维等。分析结果表明, 科学规划、严格选材、规范施工及智能检修可有效保障 1000 kV 特高压输电线路安全稳定运行。

关键词 1000 kV; 特高压; 输电线路; 杆塔组立; 检修技术

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.015

0 引言

随着电力需求的快速增长和输电通道日益紧张, 1000 kV 特高压输电线路的建设成为缓解电力供需矛盾、优化能源资源配置的重要措施。特高压输电技术以其远距离、大容量、低损耗和经济性等特点, 在保障电力稳定传输、促进能源结构优化方面发挥着关键作用。然而, 1000 kV 特高压输电线路的施工与检修面临诸多挑战, 如复杂地形地貌、高电压等级带来的安全风险等。因此, 深入研究 1000 kV 特高压输电线路施工技术与检修策略具有重要意义。

1 1000 kV 特高压输电线路施工技术

1.1 线路设计与规划

在 1000 kV 特高压输电线路的设计与规划中, 首先是地形设计, 通常倾向于选择平坦、开阔的地区, 避免穿越山地或湿地, 以减少施工和维护难度。在气候条件的考虑上, 风速、冰雪负荷是必须评估的重要因素。如沿海区域风速可能达到 30 m/s 以上, 而山区或高原地区需要考虑冰雪灾害影响, 设计时考虑适应最大风速为 50 m/s, 冰雪荷载可达到 100 kg/m。其次, 在环保方面, 设计时要避免穿越生态保护区和森林覆盖区, 遵循国家环保标准, 并考虑对野生动植物的影响。杆塔结构的设计需依据实际荷载条件进行详细计算。导线的重量、风荷载、冰雪荷载都必须纳入设计考虑, 设计荷载一般为最大风速情况下的两倍, 且需符合抗震要求。抗震设计根据地震烈度和区域抗震标准进行, 1000 kV 线路一般要求设计抗震等级为 7 级以上, 确保在地震发

生时能够保持稳定。抗风设计则考虑了极端气候条件下, 杆塔需承受的风速一般要求抗风能力能达到 50 m/s, 甚至更高。此外, 在导线的选型和绝缘配置方面, 1000 kV 特高压线路常采用大截面导线, 如 ACSR 500/50 型 (500 mm² 铝合金导线, 50 mm² 钢芯), 有效传输高电流, 同时承受大风和冰雪等极端天气。在绝缘子方面, 选用复合材料绝缘子, 具有更好的抗污染能力和耐老化性能, 适用于各种恶劣环境, 有效避免污闪现象的发生。复合绝缘子的污秽电压等级根据不同地区的气候条件, 选用最低污秽电压等级为 1000 kV, 确保线路长期安全稳定运行^[1]。

1.2 施工关键技术

1. 基础施工。1000 kV 特高压输电塔的基础施工是确保塔体稳固和安全的基础工作, 特别是大体积混凝土浇灌和岩石嵌固技术的应用。大体积混凝土浇灌用于塔基的基础部分, 所用的混凝土强度一般要求达到 C30-C40 等级, 且根据不同的土壤情况选择不同的混凝土配比。混凝土浇筑时需使用混凝土泵送设备和搅拌站进行统一搅拌, 以保证浇筑质量和均匀性。每个塔基的混凝土浇灌量在 50 ~ 100 m³, 具体取决于塔基的设计大小和土壤承载力。对于岩石地基, 在岩石较为坚硬或土壤条件较差的地区, 需要采用岩石嵌固技术来加固基础。岩石嵌固采用钻孔技术, 在岩石中钻孔并设置高强度钢锚, 使用高强度钢缆或钢筋网进行锚固, 保证塔基在极端气候条件下的稳定性。钢锚的抗拉强度超过 1 500 MPa, 确保塔基在强风、地震等自然灾害中不发生位移或倾斜。

2. 杆塔组立。在 1000 kV 特高压输电线路的杆塔组立过程中,直升机吊装和抱杆悬浮组塔工艺是常用的施工技术,特别是在山地、森林等复杂地形中。直升机吊装技术有效解决了难以到达区域的塔身吊装问题,特别适用于高山、深谷等施工条件困难的地方。直升机吊装使用具有 20 吨吊装能力的直升机,根据塔体的重量进行吊装。采用直升机吊装能够缩短施工周期,减少对生态环境的影响,避免了大量开挖和运输过程中的环境破坏。除了直升机吊装,抱杆悬浮组塔工艺也在某些复杂的施工环境中应用。通过在空中悬挂塔身各部分,并使用高强度的钢缆和吊装设备进行精确对接,逐步完成塔身的组装。抱杆悬浮工艺适用于超高塔和特殊位置的塔组装,保证施工的精度和安全性^[2]。

3. 导线架设。导线架设是 1000 kV 特高压输电线路施工中的核心,张力放线法和高压压接技术是常用的导线架设方法。在张力放线法中,导线的两端通过张力装置进行张拉,并将导线安装在塔上。张力必须保持在特定的范围内,以防止导线受损或过松。通常,导线的张力范围控制在 10 ~ 15 kN 之间,根据导线的材料和线路的跨度进行调整。常用的导线材料为钢芯铝绞线(ACSR)或全铝合金钢绞线(AACSR),导线截面积在 500 ~ 800 mm² 之间,具备较好的导电性和抗拉强度。张力的精准控制需要张力放线设备,其配备有负载传感器和张力监控系统,实时监测导线的张力,确保导线在安装过程中始终保持适当的张力。此外,在高压压接技术应用方面,高压压接指在塔顶进行导线端头的压接工作,通常使用专用的高压工具进行导线的连接。该技术要求施工人员具备高空作业能力,并配备专业的安全设施,如防护带和安全绳。在压接过程中,施工人员使用的工具和设备必须保证连接部位的电阻最低,要求压接部位的电阻值小于 0.001 Ω ,以确保连接的电气性能稳定^[3]。

4. 附件安装。在 1000 kV 特高压输电线路的建设过程中,附件安装包括间隔棒、避雷器和在线监测装置等。间隔棒的作用是保持导线之间的适当距离,防止导线之间由于风力或负荷变化而发生接触。间隔棒由非导电材料如玻璃纤维或复合聚合物制成,能承受较大的机械负荷和恶劣的环境压力。其安装需要确保导线之间的间距在 2 ~ 3 m,以避免导线接触和短路现象的发生。避雷器的安装能有效将雷击电流引导至地面,保护线路和设备免受损害。1000 kV 线路的避雷器必须具备至少 1.5 倍的额定电压承受能力,以应对突发的雷电过电压。避雷器间隔安装在 20 ~ 30 km,具体根据当地的雷电发生频率进行调整。此外,在线监测装置在现代特高压输电线路中可以实时监控导线的温度、

负荷、电压等参数,及时发现潜在故障,减少维护工作量并提高系统的可靠性。在线监测设备配备有无线通信模块,将监测数据实时传输到控制中心,设备通常具备 IP65 以上的防水等级,并能在 -40 ~ +70 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内稳定运行。

2 1000 kV 特高压输电线路检修技术

2.1 状态检测与监测技术

在 1000 kV 特高压输电线路的检修过程中,状态检测与监测技术是确保线路长时间安全运行的关键。首先,无人机巡检与红外热成像技术作为目前最为先进的线路巡检方式,广泛应用于特高压线路的状态检测。无人机通过搭载高清摄像头和红外热成像设备,可以对线路进行远程巡检,并实时传输图像与温度数据。红外热成像可以有效检测导线及设备的温度异常,发现导线过热或连接部位的热点,这些热点可能是电气故障的前兆。无人机巡检能够覆盖大范围区域,尤其是对于难以到达的山区、高空线路等特殊环境,能够迅速完成巡检任务,节省了大量的人力、物力。其次,导线弧垂、张力在线监测系统在特高压线路的运行中起到重要作用。由于风力、温度等环境因素的变化,导线的弧垂和张力会发生变化,可能导致线路的安全隐患。通过安装在线监测系统,实时监测导线的弧垂和张力,并通过数据分析及时发现异常。系统采用高精度的传感器、位移计和应变计来监测导线的状态,并将数据传输到远程控制中心,确保线路始终保持在安全的张力范围内。弧垂检测的精度要求通常为毫米级,以确保线路的电气性能和机械稳定性^[4]。

2.2 常见故障分析与处理

在 1000 kV 特高压输电线路的运行过程中,各种故障时有发生,常见故障主要包括雷击故障、冰害与舞动、导线微风振动与疲劳损伤等。针对这些故障,必须采取有效的预防与处理措施。

首先,雷击故障,尤其是在雷电多发的地区,线路极易遭受雷击损害。避雷线作为保护线路免受雷击的重要设备,其配置需要根据当地的雷电频率、强度以及线路的高度进行设计。在 1000 kV 线路中,避雷线的配置通常按照“避雷线与输电线路交叉角度不小于 45 $^{\circ}$ ”的原则进行设计。此外,避雷线的接地电阻控制也是雷击防护中的关键因素。接地电阻应低于 10 Ω ,以确保雷电流能够迅速导入地下,从而避免对线路和设备的损害。

其次,冰害与舞动是影响特高压输电线路稳定性的常见故障。特别是在寒冷地区,冰雪天气可能导致导线表面积冰,增加导线的负载,甚至造成导线断裂或塔基倒塌。此外,导线在风力作用下的摆动也可能

对线路造成损害。防冰涂层和阻尼器安装技术是防治冰害与舞动的重要手段。防冰涂层一般采用耐低温、抗冻性能强的材料,如氟化物或聚合物涂料,这些涂层能够有效防止导线表面积冰,并且不会因长期风吹日晒而失效。阻尼器通过安装在导线上,减缓导线的振动,减少风力和负荷引起的摆动,防止导线因持续舞动而损伤。阻尼器的选型和安装位置需根据具体的气候和环境条件进行优化,要求阻尼器在 10 ~ 20 m 的风速下有效减少导线的振幅。

最后,导线微风振动与疲劳损伤是影响线路长期稳定性的重要问题。由于风力的微小波动,导线会发生微风振动,长期以来会导致导线的疲劳损伤,严重时可能引发导线断裂或连接处损坏。防振锤的安装是防止导线振动的有效方法。防振锤由铝合金、钢材或其他耐用材料制成,安装在导线的振动点,通过改变振动的频率和幅度来消减振动能量。防振锤的选型需要根据导线的材质、风速、气候条件等因素进行合理配置,确保其不同环境下的稳定性。防振锤的更换周期一般为 10 ~ 15 年,根据现场检查结果及时进行更换,避免防振锤的老化影响其效果。

2.3 检修策略与维护方案

1000 kV 特高压输电线路的检修策略包括定期检修周期与项目清单、带电作业技术以及寿命评估与部件更换标准三个方面。

首先,定期检修周期与项目清单是保证输电线路设备正常运行的重要措施。根据国家电网和行业标准,1000 kV 特高压输电线路的检修周期为 3 ~ 5 年,但对于特殊环境或重要线路,检修周期可能需要缩短。检修项目通常包括金具检查和导线补修。金具检查主要是检查线路上所有连接件、支撑件、接头和金属部分是否有松动、腐蚀或损坏的迹象,必要时进行紧固、清理和更换。导线补修则包括检查导线是否有磨损、断裂或老化等问题,若出现问题则需要修复或更换,确保导线的电气性能和机械强度不受影响。

其次,带电作业技术是确保特高压输电线路在运行中进行检修的关键。等电位操作是带电作业中必须遵守的基本安全规程,作业人员与导线之间需要保持相同的电位,以防止电流通过人体。作业人员通常会穿戴绝缘服、佩戴绝缘手套,并使用绝缘工具进行操作。绝缘平台的应用也是带电作业中的重要保障,它能够提供安全的工作平台,避免作业人员直接接触带电设备。带电作业的技术要求极高,作业人员必须经过专业培训,并且作业过程中要严格遵守操作规程,确保安全。

最后,寿命评估与部件更换标准是检修过程中必须遵循的重要准则。绝缘子的老化是 1000 kV 线路常见的问题,随着时间的推移,绝缘子表面会积累污垢、

产生裂纹或出现损坏,降低其绝缘性能。因此,定期评估绝缘子的健康状态并及时更换是确保线路安全的必要措施。绝缘子的寿命为 20 ~ 30 年,达到使用年限后需根据实际情况进行更换。杆塔的防腐处理决定了其抗老化能力,尤其是在沿海地区、湿气重的地区,杆塔的防腐涂层需要定期检查和维修。防腐涂层的使用寿命为 5 ~ 10 年,超过使用期限后必须进行重新涂刷^[5]。

2.4 智能化运维技术

机器人巡检与 AI 缺陷识别技术在智能化运维中扮演重要角色。机器人巡检通过搭载高清摄像头、红外热成像仪和激光雷达等传感器,自动执行巡检任务,实时传输图像与数据,准确识别导线损坏、金具松动等潜在问题。AI 缺陷识别技术结合机器学习算法,通过分析巡检数据,自动检测和标记缺陷,提高了检测的准确性和效率,减少了人工干预,降低了安全风险。大数据分析故障预测模型则进一步提升了运维的前瞻性。通过采集线路的运行数据如温度、张力、风速等,分析可以揭示潜在的故障趋势,为设备状态评估提供数据支持。故障预测模型利用历史故障数据和实时监控信息,预测可能发生的故障类型和位置,实现有针对性的检修与预防,有效避免突发故障^[6]。

3 结束语

通过全面剖析 1000 kV 特高压输电线路的施工技术与检修要点,从线路设计、材料设备选用到关键施工环节,再到状态检测、故障处理及智能化运维,形成了完整的技术链条。未来,面对能源结构转型与电力需求的不断增长,应持续深化特高压输电线路施工技术研究,推动新材料、新工艺、智能化技术的融合应用,进一步提升线路的安全稳定运行水平,助力能源高效配置与绿色发展。

参考文献:

- [1] 熊继开,朱凡,李嗣,等.1000 kV 特高压线路带电作业方法研究[J].通讯世界,2024,31(04):118-120.
- [2] 姚希磊,宋艺.高速铁路穿越 1000kV 特高压输电线路防护方案研究[J].交通建设与管理,2024(S1):172-175.
- [3] 于姜赞,何坚,李特,等.一起 1000 kV 特高压交流输电线路复合绝缘子断串原因分析[J].电瓷避雷器,2024(06):160-167.
- [4] 唐浩,李方慧,赵杰,等.1000kV 特高压变电构架风荷载及风致响应[J].科学技术与工程,2024,24(09):3756-3765.
- [5] 同[4].
- [6] 郭凯,刘涛,张高峰,等.1000 kV 特高压南阳站主变匝间故障分析处理及其现场修复[J].电瓷避雷器,2024(01):141-149,160.

水利水电施工中边坡开挖支护技术的应用策略研究

董 莹, 孙莹莹

(黄河河口管理局垦利黄河河务局, 山东 东营 257091)

摘 要 为解决水利水电工程施工过程中因边坡开挖引发的稳定性问题, 本文以典型山区水利工程为背景, 对边坡支护技术的应用策略进行系统研究, 重点分析边坡地质环境特征、支护结构类型、设计优化原则及施工质量控制要点。通过梳理不同岩性条件下的支护方法, 归纳锚杆支护、喷射混凝土、抗滑桩等常用支护结构的适用性与功能机理, 探讨多因素耦合作用下的支护设计思路, 结合数值模拟手段提出合理的参数控制策略, 并从施工流程、质量验收与风险监测等方面提出针对性管理措施, 以期为类似复杂地质条件下的水利水电工程边坡施工提供具有实用价值的技术参考, 进而提升支护系统的整体安全性与耐久性。

关键词 水利水电施工; 边坡开挖支护技术; 数值模拟

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.016

0 引言

水利水电工程常处于高陡山体与深切峡谷地带, 其边坡开挖作业面临地质构造复杂、岩体节理发育及外部扰动强等不利因素, 支护系统在工程安全中发挥着关键作用。边坡一旦发生滑移或失稳, 不仅会威胁施工人员的生命安全, 还将造成重大经济损失及施工进度延误。因此, 合理配置支护结构、优化设计流程并强化动态监测已成为边坡施工的重要技术要求。

1 水利水电工程中边坡工程特点分析

1.1 边坡地质环境与地形特征

水利水电工程普遍布局于河谷、峡谷或山地丘陵地带, 边坡常表现为岩质或复合型地质体, 其结构复杂, 稳定性受控于多种地质构造因素。在天然地形条件下, 边坡坡度多介于 $35^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之间, 岩体常分布节理裂隙群, 岩性组合呈显著不均质特征。例如: 在西南地区典型岩质边坡中, 岩体坚固性系数 (RQD) 常低于 50%, 属中低完整性范畴, 易受外界扰动影响产生滑移或剥落。地形高差大、地貌破碎度高使边坡在自然状态下已处于临界稳定状态, 稍受干扰即可能出现失稳破坏^[1]。

1.2 边坡开挖对周边地质环境的扰动分析

在边坡开挖过程中, 大规模岩土体剥离及施工扰动将显著改变原有地应力平衡体系, 诱发围岩卸荷、

剪应力集中与裂隙扩展, 严重时形成新滑裂面或激活潜在滑带。卸荷作用常导致边坡表层岩体抗剪强度降低 20% 以上, 尤其在坚硬岩体中, 由于弹性响应, 裂隙发展更为迅速, 构造面失稳风险显著提升。水文地质条件亦受显著扰动, 原始渗流场发生重构, 降雨、地下水补给增强边坡软弱带饱和度, 使孔隙水压力上升, 剪切强度折减达 15% ~ 30%, 大幅削弱整体稳定性。此外, 爆破振动与开挖设备引起的动荷载叠加效应亦加剧地质体应力扰动, 诱发次生裂缝和局部滑塌。

2 水利水电施工中边坡开挖支护技术类型与适用性

2.1 主流支护结构类型

水利水电工程中的边坡支护结构体系需针对地质构造复杂、边坡高陡、施工干扰强等特征, 采用分层、多元化的支护方式。常用结构包括锚杆—喷射混凝土支护体系、钢筋网复合支护、抗滑桩与支挡结构等。锚杆支护常用于岩质边坡, 锚固深度通常取边坡高度的 $1/4 \sim 1/3$, 以提高岩体内部整体性; 喷射混凝土厚度一般控制在 8 ~ 15 cm, 抗压强度达到 20 ~ 30 MPa, 具备初期封闭和表面稳定作用。钢架支护多用于软弱围岩边坡, 可抵抗大变形条件下的结构位移。对于具有滑移趋势的边坡, 抗滑桩直径常取 1.2 ~ 2.0 m, 桩间距控制在 3 ~ 6 m, 有效发挥抗剪与限制位移的功能。重力式挡土墙适用于堆积层或碎石土边坡, 墙高通常小于 10 m, 超过时需配合锚索与土钉加强整体稳定^[2]。

2.2 支护结构功能与作用机理分析

边坡支护结构的作用机理依赖于其与原岩体之间的相互作用及受力特征的协调转化。锚杆通过锚固体与周围岩体之间的黏结力传递轴向拉力，形成“复合结构体”，有效阻止节理滑移与裂缝扩展，其承载力主要受杆体屈服强度（ ≥ 500 MPa）与黏结强度（常见在 1.0 ~ 1.5 MPa）控制。喷射混凝土提供早期封闭，构建连续面以限制岩体剥离，与钢筋网联合形成增强表层刚度的复合承力面。钢支架承受结构变形并限制边坡位移，适用于高应变速率边坡，其竖向承压能力通常达 200 ~ 300 kN/m。抗滑桩则依靠桩—土界面摩擦与侧向抗力抵抗滑移，桩顶与桩底应力传递区承载力分布非均匀，常需配合数值模拟进行精确布设。

2.3 材料性能与支护结构稳定性

支护结构的长期稳定性高度依赖所选材料的力学性能、耐久性及与岩体的界面相容性。锚杆材料一般选用 Q235 或 HRB400 钢筋，其极限拉伸强度可达 420 ~ 600 MPa，具有良好的延性与锚固适应性。喷射混凝土作为常用覆盖材料，其 28 天抗压强度应达到 25 ~ 35 MPa，且要求早期强度增长速率快，以实现初期封闭功能；在高湿、高渗条件下，需采用掺防腐剂或高密实性矿物掺合料以增强耐水性与抗侵蚀性。钢筋网应采用冷拔低碳钢丝，屈服强度不低于 380 MPa，且需具备良好的抗疲劳性能。对于抗滑桩与挡墙等重力结构，其混凝土等级常为 C30 ~ C40，钢筋配筋率控制在 1.0% ~ 1.5%，确保结构刚度及抗剪能力满足剪切应力不超过设计极限的 70%。此外，锚固剂性能对锚杆系统的长期黏结力稳定至关重要，环氧树脂类锚固剂的抗剪强度可达 10 ~ 15 MPa，适用于湿陷性强、开裂风险高的岩层^[3]。不同支护材料的主要性能参数与适用部位见表 1。

3 水利水电施工中边坡开挖支护设计与优化策略

3.1 支护设计与优化策略

支护设计需以边坡稳定性理论为基础，通过力学参数匹配、结构形式组合与响应机制分析，建立与地质环境适配的支护体系。设计的核心在于控制边坡整体与局部的变形及破坏模式，确保稳定系数 K 值在 1.25 以上，对高风险区域建议控制在 1.30 ~ 1.35 范围。设计需明确支护的受力路径与载荷分布，结合岩体抗剪强度（如 $c=3045$ kPa， $\phi=28^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ）与层间黏结强度进行验算。锚杆布设应考虑节理倾角与岩体结构面间距，长度通常为边坡高的 0.25 ~ 0.4 倍，间距控制在 1.5 ~ 2.0 m，形成力学耦合稳定网。喷射混凝土厚度按边坡风化等级调整，中风化岩体取 12 ~ 15 cm，配筋率 0.8% ~ 1.2%，以提升表面刚度与整体抗滑性。设计过程中应根据现场地质勘察结果，合理选用主动式或被动式支护，并设置冗余安全系数抵御极端荷载，确保结构响应在控制变形阈值内运行。

3.2 多因素耦合作用下的支护设计优化

边坡支护设计面临多重复杂因素叠加作用，包括地质结构、地下水、外部荷载及施工扰动等，其间的非线性耦合作用对支护性能产生深远影响。优化设计需基于多场耦合理论，考虑应力场—渗流场—温度场等耦合机制，构建综合响应模型。岩体在降雨条件下渗透系数常从 10^{-5} m/s 提升至 10^{-3} m/s，孔压显著升高，削弱抗剪强度，需通过增设排水孔、盲沟或抗水材料应对渗流集中。温度波动对浅表层岩体膨胀系数（ $\alpha \approx 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ）引起裂隙开合变化，长周期累积效应将破坏喷混层界面黏结性。在荷载扰动方面，大型机械或爆破施工引起的动载幅值常达 100 ~ 300 kPa，短时作用会诱发临界状态结构面滑移。优化策略应通过权重参数调整设计重点，例如对渗透性强的岩层增

表 1 不同支护材料的主要性能参数与适用部位

材料类型	常用规格或型号	抗压 / 抗拉强度	其他关键性能参数	应用部位
锚杆钢筋	Q235/HRB400	420 ~ 600 MPa（抗拉）	延性好、耐疲劳	深层锚固、边坡加固
喷射混凝土	C25 ~ C35	25 ~ 35 MPa（28 天抗压）	早期强度增长快、耐水性要求高	表层封闭、防护面层
冷拔钢筋网	$\phi 6 \sim \phi 10$ mm 钢丝	≥ 380 MPa（屈服强度）	抗疲劳性能强、良好延展性	与喷射混凝土联合增强支护面
抗滑桩混凝土	C30 ~ C40	30 ~ 40 MPa（抗压）	配筋率 1.0% ~ 1.5%，桩径 1.2 ~ 2.0 m	滑坡体控制、深层支挡
环氧树脂锚固剂	双组分高分子	10 ~ 15 MPa（抗剪强度）	与岩体界面黏结性强、耐水解性好	湿裂岩体中锚固结构填充

强排水系统比重,而对滑动面浅、软弱夹层多的岩体应提高锚杆拉拔承载力至 ≥ 80 kN级别,以实现适应性匹配与设计性能最优解^[4]。

3.3 数值模拟在支护设计中的应用

数值模拟技术已成为边坡支护设计中不可或缺的核心手段,主要用于结构受力分析、失稳预测与参数优化。常用软件如FLAC3D、ABAQUS、MIDAS GTS NX等,可通过有限差分法或有限元法建立真实工况下的计算模型,实现多场耦合分析。建模前需基于钻探与地勘数据选取合适本构模型,如采用Mohr-Coulomb模型模拟岩土体剪切破坏,或使用Drucker-Prager模型处理软弱层滑移机制。网格划分精度直接影响模拟结果准确性,岩体模型建议单元尺寸控制在边坡特征尺寸的 $1/20 \sim 1/30$,边界条件需确保应力扩散范围超出影响区三倍以上。数值结果可提供边坡变形分布、塑性区演化与锚杆内力发展过程,对比不同设计方案下的稳定系数、最大水平位移(如控制在50 mm以内)与结构受力极值,为设计优化提供数据支撑。

4 水利水电施工中边坡开挖支护施工控制与质量管理

4.1 支护施工流程与关键工序控制

水利水电工程边坡支护施工流程需依据地质条件和设计要求,严格按照“开挖—初期支护—排水—监测—验收”的顺序进行。开挖阶段应采用分层分段的方法,控制单层开挖高度不超过2.5 m,以防止边坡失稳。初期支护包括锚杆安装、喷射混凝土施作等,锚杆应采用HRB400钢筋,直径不小于20 mm,长度根据岩体稳定性计算确定,通常为边坡高度的0.3倍。喷射混凝土厚度应控制在10~15 cm,28天抗压强度不低于25 MPa。排水系统应设置盲沟和排水孔,确保边坡渗水及时排出,防止孔隙水压力升高。监测阶段需布设位移计、应力计等仪器,实时监控边坡变形和支护结构受力情况。

4.2 施工质量评估与验收标准

边坡支护施工质量评估应依据国家和行业相关标准,结合实际工程情况,采用多种检测手段进行综合评定。主要参考标准包括《水利水电工程施工质量检验与评定规程》(SL 176-2007)和《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准》(SL/T 631-2012)。质量评估分为主控项目和一般项目,主控项目如锚杆抗拔力、喷射混凝土厚度等,必须全部合格;一般项目如表面平整度、排水设施等,允许一定比例的不合格项,但不应集中出现。锚杆抗拔力应不小于设计值的1.25倍,喷射混凝土厚度允许偏差为 $\pm 10\%$ 。验收

流程包括施工单位自检、监理单位平行检验和建设单位组织的竣工验收。自检阶段,施工单位应对每道工序进行全面检查,填写质量检验记录;平行检验阶段,监理单位应对关键部位进行抽检,抽检比例不低于30%;竣工验收阶段,建设单位应组织设计、监理、施工等单位进行联合验收,形成验收报告^[5]。

4.3 安全监测与风险预警机制

边坡支护施工期间,需建立完善的安全监测与风险预警机制,确保工程安全和施工人员生命财产安全。监测内容包括边坡位移、支护结构受力、地下水位、孔隙水压力等。监测设备应选用高精度仪器,如全站仪、应变计、孔压计等,监测精度应满足设计要求,位移监测精度不低于 ± 1 mm。监测频率根据边坡稳定性和施工进度确定,通常为每日一次,特殊情况下可增加至每小时一次。监测数据应实时传输至监控中心,进行数据分析和趋势预测。风险预警机制应设定预警阈值,如边坡位移速率超过5 mm/d,孔隙水压力超过设计值的80%等,触发预警信号。预警级别分为三级:一级为正常状态,二级为警戒状态,三级为危险状态。达到二级预警时,应加强监测频率和现场巡查;达到三级预警时,应立即停止施工,组织专家进行评估,制定应急处理方案。

5 结束语

水利水电工程边坡开挖与支护技术的有效结合,是保障工程安全性与长期稳定运行的关键。面对复杂多变的地质结构和施工环境,科学选择支护结构类型、合理制定施工流程、精准实施监测与反馈控制,可显著提升边坡整体稳定水平。技术优化不仅要求结构与岩体特性深度融合,还需引入多场耦合分析与数值模拟手段,实现从静态设计向动态响应转变。在高强度开发与生态保护并重的背景下,支护策略的系统化、精细化与智能化发展已成为重要方向。

参考文献:

- [1] 后志坤. 水利水电施工过程中边坡开挖支护技术的应用研究[J]. 水上安全, 2024(22):193-195.
- [2] 付桂生, 张弦. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J]. 四川水利, 2023, 44(05):116-118.
- [3] 宋铭明. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 江西建材, 2022(07):163-164, 167.
- [4] 陈瑞. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用[J]. 珠江水运, 2021(15):18-19.
- [5] 王亮, 王飞, 吴高琴. 水利水电工程施工中边坡开挖支护技术的应用分析[J]. 四川水泥, 2021(04):188-189.

火力发电厂动叶可调轴流风机 常见缺陷及其处理方法

付志勇

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘 要 通过实例分析火电厂火电机组在日常维护及大小修过程中动叶可调轴流风机运行的常见缺陷, 如风机振动大、风机失速、风机叶片断裂、风机油位下降等, 根据不断积累的检修经验, 系统性地总结了检修重点及处理方法, 并针对动叶可调轴流风机的维护保养方法进行了探讨, 旨在为降低设备故障发生率、延长设备使用寿命提供借鉴, 保障动叶可调轴流风机在火电厂火电机组的日常运行及大小修过程中始终保持高效、稳定的运行性能。

关键词 振动处理; 动叶可调轴流风机; 风机检修; 火力发电

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.017

0 引言

动叶可调轴流式风机是一种将原动机的机械能转化为输送气体的动能, 并使输送气体具有能量的一种常见设备^[1]。在火力发电厂大容量机组中, 一次风机、送风机、引风机作为锅炉的重要辅机, 均采用动叶可调的轴流式风机。在火力发电厂的日常运行中, 引风机由于长期接触高温、灰尘, 运行条件比较恶劣, 发生故障率较高。尤其叶片经长期磨损, 转子动不平衡, 引起引风机盘前转速突增, 风机就地实测, 振动增大。这是一类对设备安全运行、机组负荷影响重大的故障。一方面, 振动故障的诊断比较复杂, 处理时间也比较长; 另一方面, 锅炉三大辅机对机组负荷影响深远, 极大地限制了机组负荷, 影响公司利润。本文主要探讨了锅炉三大典型轴流风机常见缺陷及其处理方法, 以期为电力检修人员提供案例参考。

1 动叶可调轴流风机简介

某火电厂机组锅炉侧三大风机均采用动叶可调轴流风机, 其中一次风机和送风机为豪顿华风机厂生产制造, 引风机为成都风机厂制造。轴流风机由电机驱动, 从驱动端看, 叶轮顺时针旋转。其中一次风机与引风机均为双级动叶可调轴流风机, 有两个转子, 送风机则是单级动叶可调轴流风机, 只有一个转子。转子安装在中间段内的轴承箱上, 并且位于机加工的叶轮机壳内。风机转速恒定, 在运行过程中, 由液压系统调节风机转子叶片的角度, 从而可根据锅炉系统的性能要求调整送风量。由于其结构具有稳定可靠、调节迅速等特点, 可快速适应负荷的变化需求, 从而被现代火力发电厂广泛使用。

2 动力可调轴流风机运行中出现的常见故障原因及其处理方法

2.1 风机运行中油温高

动叶可调轴流双级风机, 一般采用油浴润滑, 通常配有双油站。一个油站为润滑油站, 负责风机轴承组和电机轴瓦的润滑, 一个油站为液压油站, 负责为风机液压缸提供动力用油。成都风机厂制造的引风机, 设计为一个油站一种油, 单电机双泵设计, 既提供润滑油, 也提供液压油。单级风机, 如送风机, 其轴承组采用浸油润滑, 配有液压油站调节叶片动叶角度。风机在运行中油温高, 主要有以下几种原因。

2.1.1 风机油站冷却效果差

风机油站一般配有冷却器, 冷却器为板式换热器或管式换热器, 采用逆流布置, 水冷却的方法。油站供油时, 油先进入冷却器, 然后进入轴承箱为供油冷却。反之, 先进入轴承箱, 回油时进入冷却器为回油冷却。风机油站回油时采用重力回流的方式, 因此采用回油冷却时, 冷却器多为管式换热器, 且为下位布置, 油站回油时油温较高, 且流速慢, 经济性差。回油冷却换热效果差的原因主要是管式换热器冷却水内杂质较多, 造成部分管路堵塞, 油站冷却水应从闭式水系统取水, 维护时应经常清理换热器^[2]。从系统上讲, 将回油冷却改为供油冷却, 具有更高的经济性, 有利于降低维护成本。供油冷却是目前电厂 600 MW 机组及以上动调轴流风机油站普遍采用的冷却方式。其大多采用板式换热器, 换热效果好, 其对于水质的要求更高, 采用闭式水系统取水, 长时间运行后, 板换的水道和油道会形成积垢, 换热效果变差。机组大小修和临修期间,

应经常清理换热器。对于不可拆卸的换热器,可对板换进行反冲洗,即关闭供水,打开回水,让水在换热器中反向流动,冲出其内的杂质,直到水变清澈为止。

油站冷却器冷却效果差与环境温度也有关系,夏季大负荷时应打开窗多通风。

2.1.2 风机运行中轴承温度高

风机轴承温度高,排除轴承振动,润滑影响,与风机的流通介质也有关。引风机的流通介质是高温烟气,风机运行过程中,轴承箱温度较高。通常引风机采用轴承冷却风机冷却轴承,引风机油站也配有循环油泵进行油的冷却循环。因此引风机轴承温度高,需要考虑油站的温度,轴承冷却风机的工作情况,轴承的振动情况等。如电机轴瓦需要冷却,还要考虑轴瓦的温度情况,轴瓦的配合等。送风机、一次风机等冷风机,大小修时要测量轴承的游隙,及时更换检验合格的轴承。

2.2 风机运行中振动值增大或摆动

2.2.1 风机轴承磨损,游隙值超标

风机在长期运行中,由于油质不合格或寿命超期,导致轴承磨损严重,轴承游隙增大,造成风机振动增大。检修人员未按照风机保养手册及时更换轴承等。风机在日常维护中应做好滤油工作,并在每个大修期更换新油,两个大修期更换轴承。

2.2.2 风机动不平衡或者配重块脱落

风机检修后振动值大,需要用振动分析仪采集振动信息,采用加速度传感器在机壳轴承箱位置测量点,最后判断是否为质量不平衡。用高速动平衡仪诊断,在轮毂上合适的位置焊接配重块,直到振动值符合要求为止。对于引风机,其叶片经历长期的灰粒磨损,质量不平衡时有发生。对于新检修引风机,在装配过程中,叶片未按顺序装配,质量必然不平衡,动平衡是引风机振动大时的常见处理方法。而送风机与一次风机,其流通介质为干净的空气,检修时应重点检查配重块是否焊接或安装牢固,叶片是否按顺序回装,轮毂盖、联轴器、推力盘等各部位的配合,要按照拆卸顺序做的标记严格装配,避免回装好的风机做动平衡。

2.2.3 电机磁力中心线未对中或预拉量不合适

对于电机采用轴瓦的风机,由于电机轴的串量过大,联轴器回装时,忽略电机磁力中心线的影响,就会造成电机运行过程中轴向振动大,进而影响风机的振动。因此,轴瓦电机联轴器回装时,应考虑电机的磁力中心线。磁力中心线距离通常在电机的铭牌上标注,对于未标注的电机,应在安装前进行空试,确定

磁力中心线位置。风机运转时,测量电机磁力中心是否与空试时一致。对于引风机这种热风机,还应该预留一定的风机轴的膨胀量。

2.3 风机运行中失速报警

2.3.1 风机一二级叶片不同步

对于双级风机,调节一二级叶片的同步至关重要。风机在运行中发生失速,排除风道堵塞及挡板开关的影响,一般是由于一二级叶片不同步造成的。风机在运行过程中,一二级叶片推力盘的连接轴,简称芯轴,发生断裂、拉断等。芯轴的连接锁母,锁片脱开,芯轴上的螺纹磨损等,这些都是造成风机失速的原因。

2.3.2 轴承箱上盖回装反

托电公司某机组大修期间,风机在动叶角度 70% 时,触发失速报警,低于 70%,报警消失。经过一系列解体检查,发现风机轴承箱上盖装反,反向安装后,报警消失。

2.4 风机动叶卡涩,触发油站液压油油压高报警

动叶可调式轴流风机是通过传动机构带动滑阀改变液压缸两侧油压差实现的。在轴流风机的运行中,有时会出现动叶调节困难或完全不能调节的现象。风机动叶卡涩的原因很多,外部原因主要有动叶执行机构电动执行器不动作或不灵敏;连接轴轴承卡涩;风机旋转油封卡涩。解决方法是维修或更换电动执行器,更换连接轴轴承或补加润滑脂,旋转油封返厂维修等。内部原因主要是叶片转动卡涩。风机叶柄轴承主要分为两类:一类是自密封的叶柄轴承,采用稀油润滑,通常不用维护。在机组检修期间,应特别注意观察轮毂内的积油情况,如轮毂内积油较多,说明叶柄轴承的自密封破坏,润滑油流出,应重点关注或返厂维修。另一类是油脂润滑的叶柄轴承,这类风机叶片容易卡涩^[3]。在风机在长期运行过程中,由于叶柄轴承密封无法做到严密,油脂易干燥,轴承内部易进入灰粒,导致叶片转动卡涩。此外,还有叶片叶柄的复合衬套磨损严重,推力盘的滑轨生锈变形等,在机组等级检修时这些都要重点检查。

2.5 风机运行中出现异音

动叶可调轴流风机运行中发现异音,主要有以下几种情况:(1) 风机的外保温铁皮,固定不牢发生刚蹭振动磕碰声,需及时固定。(2) 风机轴承内部有异物。在机组检修时,轴承未及时清洗或清洗不到位,有微小异物残留且无法被油冲走。例如:风机轴承内部残留铅丝,在转动过程中,不断被碾压,轴承振动,产生异音。(3) 风机动叶角度定位时,叶片观察孔未

安装合适厚度的密封条,致使叶片与观察孔盖板刷蹭。

(4) 风机叶片处的机壳固定装置发生移位,转子与机壳偏心,致使叶片刷蹭,回装时应测量机壳同心度。(5) 风机叶片叶顶间隙调节锁母锁片脱开,致使叶片叶顶间隙发生变化,发生刷蹭异响。

2.6 风机运行中油位下降

2.6.1 风机外部供油及回油管路、油站系统存在漏点

油站管道接头众多,多数采用密封胶圈密封,在长期运行中,胶圈老化情况不可避免,尤其引风机油站,油温高,油气渗漏十分明显。针对这种情况,建议在有条件的情况下,将密封胶圈更换成厚度合适的聚四氟乙烯垫,这样即使二次使用,仍具有较强的密封性能。在更换软管时,还应注意检查油管接头球形头是否光滑完整,避免后期出现漏油情况。

2.6.2 风机油站板式或管式换热器存在漏点,油从油管路流向水管路

冷却油站的冷却水水质不佳;水中有杂质砂石;冷却水流速过快冲刷换热器内壁;换热器质量不好等,这些都会使换热器出现漏点。对于管式换热器,内部存在漏点,不方便焊接修复时,可以将这一水路或者油路进行焊接封堵^[4]。板式换热器如出现漏点,需要将受损的板换进行更换,也可以将出现漏点的相邻两片进行拆除。正确安装板式换热器,应该上下左右均匀安装,应避免出现一侧过紧的情况。板式换热器安装时受力不均,易发生应力集中导致局部断裂的情况。

2.6.3 风机轴承箱漏油,油从轴承箱观察孔、呼吸阀及油封处漏出

风机轴承箱漏油,排除轴承油封损坏的因素,其根本原因是风机轴承箱内部的油位过高。无论采用哪种润滑方式,油浴润滑还是浸油润滑,轴承箱内部油位应始终处于轴承下滚珠 $1/2 \sim 2/3$ 。轴承箱内部油位高,其主要原因有:(1) 风机回油效果不好。多数风机回油时,是靠自然重力流回到油站。回油管过细,回油管堵塞,轴承箱与油站高低差过小,这些都会导致风机回油缓慢。(2) 风机油站油温过低,油粘度大,流动性差。油站在环境温度较低时启动,由于油的流动性差,致使轴承箱回流不畅,油从轴承箱间隙处漏出。

(3) 风机轴承箱呼吸阀或油站呼吸阀堵塞。风机回油是靠重力自然回流,呼吸阀堵塞会极大地影响回油速度,造成轴承箱油位升高。(4) 轴承箱周围空间存在负压,回油能力下降。油从油封等处被吸出,造成漏油。

(5) 风机轴承箱的回装问题。回装轴承箱时,轴承端盖的回油孔应该始终在轴承箱最下方,且要保证回油

孔不堵塞,回油畅通。回装轴承箱时,一定要确保回装质量。

风机轴承箱漏油问题解决方法是在初期基建安装时,要保证油箱与轴承箱有合适的高度差,回装质量要合格。轴承箱的呼吸阀孔及油站的呼吸阀要通畅,轴承箱上盖与底座安装严密,且气封装置要无损伤安装。同时,热工测点孔及轴承箱手孔密封要牢靠。在风机启动时,如存在回油不畅的情况^[5],应先将油站内的油加热到合适温度,再启动油站供油。

2.6.4 风机液压油站液位下降

风机液压油站油位下降,说明动叶角度液压控制系统存在漏点。除了油管路接头漏油外,风机旋转油封易发生漏油。旋转油封是连接转动部分与固定部分的密封装置,内部十分精密,一般自主检修发现漏油需直接更换,或者返厂维修。如自主拆解检查回装,则基本不可用,漏油现象不可避免。

3 结束语

随着我国风机制造技术的持续精进,风机的整体性能和运行效率已实现显著提升,可靠性也得到不断增强。然而,在实际运行场景中,风机系统发生各类故障的情况仍较为常见。有效提升风机运行可靠性的关键在于构建一套系统化的解决方案:一方面需持续优化系统设计,从源头上提升可靠性;另一方面必须严格落实定期维护保养制度,并通过日常运行缺陷的深入分析与总结,形成系统性的反馈闭环。同时,不断优化运行策略与操作规范也至关重要。在日常运维实践中,应高度重视运行数据的长期积累与深度挖掘,精确把握设备的实时运行状态,系统性地研究并掌握其性能劣化趋势与规律。在此基础上,针对不同故障,制定并实施精准、高效的应对策略,对于最大限度地降低风机非计划停运概率、保障稳定运行具有决定性意义。

参考文献:

- [1] 胡光涛.300MW 循环流化床锅炉引风机改造分析[J].煤炭科技,2018(01):99-101.
- [2] 曲庆,丁建伟,徐伟,等.深度调峰模式下动叶可调轴流式风机变频改造及节能效果[J].现代工业经济和信息化,2025(02):226-228.
- [3] 秦建勇.动叶可调轴流式风机调节故障原因分析及措施[J].工程建设与设计,2020(22):50-52.
- [4] 丁开瑞.双级动叶轴流风机叶片滑块磨损分析及对策[J].山西电力,2020(01):61-63.
- [5] 王泽方.一次风机动叶开度突降原因分析及处理[J].设备管理与维修,2023(04):44-45.

高压直流输电系统中换流站的故障诊断与保护策略优化

崔永强

(酒泉华强机电有限公司, 甘肃 酒泉 735000)

摘 要 全面阐述换流站在高压直流输电系统中的关键地位及运行特性, 详细分析换流站常见故障类型及其产生机理; 系统介绍当前应用于换流站故障诊断的各类技术, 包括基于电气量分析、信号处理以及人工智能的诊断方法; 深入剖析现有保护策略的原理、优势与不足, 进而提出针对性的保护策略优化方案, 涵盖优化保护判据、改进保护配置以及融合先进通信与控制技术等方面, 旨在为电力领域换流站故障诊断与保护策略提供参考, 进而提升高压直流输电系统的可靠性与稳定性, 保障电力系统安全高效运行。

关键词 高压直流输电系统; 换流站; 故障诊断; 保护策略; 计算机网络技术

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.018

0 引言

随着电力需求的持续增长以及电力系统规模的不断扩大, 高压直流输电 (HVDC) 技术凭借其输电容量大、输电距离远、线路损耗小、不存在系统稳定问题等显著优势, 在现代电力系统中得到了广泛应用。换流站作为高压直流输电系统的核心枢纽, 承担着交流与直流电相互转换的关键任务。其运行的可靠性直接关系到整个高压直流输电系统的稳定运行。然而, 由于换流站设备众多、结构复杂、运行环境恶劣, 加之电力电子器件的频繁动作, 使得换流站极易发生故障。一旦换流站出现故障, 可能导致直流输电中断, 引发大规模停电事故, 给社会经济带来巨大损失。因此, 深入研究换流站的故障诊断技术与保护策略优化, 对于提高高压直流输电系统的可靠性、保障电力系统安全稳定运行具有至关重要的现实意义。同时, 随着计算机网络技术的飞速发展, 其在电力系统中的应用日益广泛, 为换流站故障诊断与保护策略的创新提供了新的机遇。

1 换流站在高压直流输电系统中的作用与运行特性

换流站在高压直流输电系统中处于核心位置, 是实现交流与直流电相互转换的关键设施。在整流侧, 换流站将交流电转换为直流电, 通过直流输电线路传输至逆变侧; 在逆变侧, 换流站又将直流电转换为交流电, 接入交流电网。其运行特性复杂且独特。换流站中的核心设备如换流阀, 采用大量的电力电子器件,

如晶闸管、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等, 这些器件在高频、高压、大电流的工况下运行, 对散热、过电压保护等要求极高。换流变压器作为换流站的重要组成部分, 其运行特性与普通变压器有所不同, 需要承受直流偏磁、谐波等特殊电磁环境的影响^[1]。

平波电抗器在换流站中, 依靠其自身较大的电感特性, 对直流电流波动形成强大阻碍。当直流电流试图发生快速变化时, 平波电抗器会产生反向电动势, 抑制电流的突变, 从而让直流电流的波形更为平滑, 减少因电流波动对后续设备的冲击。滤波装置则包含多种类型, 如交流侧的无源滤波器, 通过电感、电容和电阻组成的特定电路结构, 利用不同频率下元件阻抗的差异, 选择性地吸收或阻断特定频率的谐波电流, 使其无法流入交流电网。直流侧的滤波装置同样借助类似原理, 清除直流电流中的谐波成分。但电力电子器件的高频开关动作, 使得换流站成为谐波的高发源。这些谐波会注入交流和直流系统, 干扰换流站内部设备的正常运行, 如导致测量仪表出现误差, 使继电器误动作。在周边电力设备方面, 谐波会增加设备的铁损和铜损, 降低设备效率, 甚至引发设备过热故障。而交流系统电压波动和频率变化, 会改变换流站中各类设备的运行参数。例如: 电压波动会影响换流阀的触发角, 进而改变换流站的直流输出电压; 频率变化则会导致换流变压器、平波电抗器等设备的电抗值改变, 影响设备性能, 让换流站的运行状态变得愈发复杂难测。

2 换流站常见故障类型及产生机理

换流阀是换流站的核心设备,其故障类型多样。电力电子器件的过热是常见故障之一,由于换流阀在运行过程中通过大电流,器件自身会产生热量,如果散热系统出现故障,如冷却风扇故障、冷却液泄漏等,会导致器件温度过高,进而引发器件损坏^[2]。过电压也是导致换流阀故障的重要原因,在换流阀的开关过程中,会产生暂态过电压,若过电压保护措施不完善,可能使器件承受过高电压而击穿。此外,换流阀的触发控制系统故障也可能导致换流阀误触发或不触发,影响换流站的正常运行。

换流变压器绕组故障中的短路,可能源于长期运行下绝缘老化,绝缘材料在热、电、机械等应力作用下逐渐失去绝缘性能,致使相邻绕组间短路。机械应力方面,变压器在运输、安装或遭遇短路电流冲击时,绕组会受到强大电动力,可能使绕组变形、位移,最终引发短路或断路。而过电流时,绕组通过大电流产生大量热量,加速绝缘老化,严重时烧断绕组造成断路。铁芯故障里,铁芯多点接地多因制造时铁芯硅钢片间混入金属异物,或运行中受振动、电磁干扰,使硅钢片绝缘涂层受损,形成多点接地回路,产生环流导致铁芯过热。此外,交流系统电压异常升高,或直流偏磁导致铁芯工作点偏移,使磁通密度超出正常范围,也会引发铁芯过热。在绝缘故障方面,复杂电磁环境下,直流偏磁让铁芯局部过热,加速绝缘老化;谐波引发局部放电,持续侵蚀绝缘材料。同时,运行环境中的湿度、污秽等因素,进一步降低绝缘性能,最终导致绝缘故障。

平波电抗器的绕组故障,在长期运行过程中,绕组持续受到直流电流产生的电动力作用,导线之间不断摩擦,致使绕组表面的绝缘层逐渐磨损。尤其是在电抗器的拐角、接头等应力集中部位,磨损情况更为严重。随着时间推移,绝缘层被磨穿,导线直接接触,进而引发短路故障。若磨损进一步加剧,导线可能出现断线,导致电抗器无法正常工作^[3]。而过电流工况下,当直流系统发生短路或过载等故障时,过大的电流流经绕组,根据焦耳定律,电流热效应显著增强,绕组迅速产生大量热量。如果散热系统无法及时将热量散发出去,绕组温度急剧上升,超过其绝缘材料的耐受温度,绝缘材料性能恶化,最终导致绕组过热损坏。在绝缘故障方面,绝缘材料长期处于复杂的电磁环境中,受到电场、磁场以及温度的综合作用,会逐渐老化。

绝缘材料的分子结构发生变化,导致其绝缘性能逐渐下降。与此同时,若电抗器运行环境湿度较大,水分可能会侵入绝缘材料内部。水分子具有较强的极性,会改变绝缘材料内部的电场分布,降低其绝缘电阻。当绝缘电阻降低到一定程度,在高电压作用下,就容易发生击穿短路现象。此外,环境中的污秽颗粒附着在电抗器表面,在潮湿环境下形成导电通道,也会对绝缘性能造成负面影响,增加绝缘故障发生的风险。

换流站的控制系统负责对换流阀的触发控制、系统的运行监控以及与其他设备的协调配合。控制系统故障可能包括硬件故障,如控制器板卡损坏、传感器故障等,以及软件故障,如程序错误、通信协议异常等。控制系统故障可能导致换流站的控制功能失效,引发系统运行异常。

3 换流站故障诊断技术

故障分量法通过分析换流站运行过程中的电气量参数,如电流、电压、功率等,来判断设备是否发生故障。例如:利用故障分量法分析故障发生时电气量的突变情况,确定故障类型和位置。通过监测换流阀交流侧和直流侧的电流、电压波形,分析谐波含量和相位关系,可判断换流阀是否正常工作。基于电气量分析的故障诊断技术具有原理简单、易于实现的优点,但对于一些复杂故障,可能存在诊断不准确的问题。

采用信号处理方法对换流站设备产生的信号进行分析,提取故障特征。例如:利用傅里叶变换、小波变换等技术对设备的振动信号、声音信号进行分析,判断设备的运行状态。对于换流变压器等设备,可通过分析其局部放电产生的高频脉冲信号,检测绝缘故障。基于信号处理的故障诊断技术能够有效地提取设备的故障特征,提高故障诊断的准确性,但对信号采集设备和信号处理算法的要求较高。

近年来,人工智能技术在换流站故障诊断中得到了广泛应用。神经网络、支持向量机等人工智能算法能够对大量的历史数据进行学习,建立故障诊断模型。通过将实时监测的数据输入到模型中,可快速准确地判断设备是否发生故障以及故障类型。例如:利用深度学习算法对换流站的运行数据进行分析,能够自动提取复杂的故障特征,提高故障诊断的效率和准确性。基于人工智能的故障诊断技术具有自学习、自适应能力强等优点,但需要大量的历史数据进行训练,且模型的训练和维护成本较高。

4 现有保护策略分析及优化方向

目前,换流站采用的保护策略主要包括电流差动保护、过电流保护、过电压保护、欠电压保护等。电流差动保护通过比较被保护设备两端的电流大小和相位,判断设备是否发生内部故障,具有动作迅速、灵敏度高的优点。过电流保护和过电压保护则是在设备电流或电压超过设定阈值时动作,能够有效地保护设备免受过大电流和电压的损害^[4]。这些传统保护策略在保障换流站安全运行方面发挥了重要作用。

然而,现有保护策略也存在一些不足之处。传统保护策略大多基于单一电气量或简单的逻辑判断,对于复杂故障的识别能力有限。在高压直流输电系统运行方式发生变化时,保护定值可能需要重新整定,否则可能导致保护误动或拒动。此外,现有保护策略对通信依赖程度较高,在通信故障时,可能影响保护的正常动作。

为了克服现有保护策略的不足,可从多个方面进行优化。优化保护判据,综合考虑多种电气量和设备状态信息,采用更加复杂和智能的逻辑判断,提高保护对复杂故障的识别能力。改进保护配置,根据换流站设备的重要性和故障风险,合理配置保护设备,提高保护的可靠性。融合先进的通信与控制技术,如利用高速通信网络实现保护信息的快速传输和共享,采用分布式控制技术提高保护的响应速度和可靠性。此外,还可引入智能电网技术,实现保护策略的自适应调整,提高保护对系统运行方式变化的适应性。

5 计算机网络技术在换流站故障诊断与保护中的应用前景

在故障诊断层面,基于网络的分布式监测系统可在换流站各关键设备,如换流阀、换流变压器和平波电抗器等部位,部署各类传感器。这些传感器通过有线或无线通信网络,将采集到的实时运行数据,如温度、振动、电气参数等,快速传输至分布式的数据采集节点。各节点再将数据汇总至中央数据处理中心,实现对换流站设备全方位、实时状态的监测。云计算技术在此过程中发挥着重要作用,它凭借强大的计算资源和弹性扩展能力,能轻松应对海量监测数据的存储需求。通过分布式存储架构,数据被分散存储在多个云服务器中,保障数据安全的同时提高了存储效率。在数据处理时,云计算可并行处理大量数据,运用数据挖掘、机器学习等算法,快速分析设备运行趋势,相较于传统本地计算,大大提升了数据处理效率。

大数据分析技术则进一步深挖监测数据的价值。

通过对设备长期运行积累的历史数据和实时数据进行关联分析,能够识别出不同故障类型对应的特征模式。例如:在换流变压器的局部放电监测中,大数据分析可根据放电脉冲的幅值、频率、相位等参数特征,精准判断绝缘故障的程度与位置,为故障诊断提供更为准确、可靠的依据。在保护领域,高速通信网络,如5G通信技术与光纤通信的结合,能以极低的延迟传输保护信息。当换流站设备发生故障时,保护装置可在毫秒级时间内接收到故障信号,迅速做出跳闸等保护动作,极大地提高保护的動作速度。在网络安全技术方面,运用加密算法对保护信息进行加密,防止信息在传输过程中被窃取或篡改;防火墙技术则阻挡外部非法网络访问,保障保护系统的网络安全,确保保护信息的安全性及可靠性。智能电网技术依托计算机网络,使换流站与周边变电站、发电厂等电力设备实现信息共享与交互^[5]。基于此,可根据电力系统整体运行状态,协同优化保护策略。例如:在电力系统发生大扰动时,各设备的保护装置可相互配合,实现精准、有序的保护动作,提升电力系统整体的安全性与可靠性。

6 结束语

高压直流输电系统中换流站的故障诊断与保护策略优化是保障电力系统安全稳定运行的关键。通过深入了解换流站的运行特性,分析常见故障类型及产生机理,采用先进的故障诊断技术和优化保护策略,能够有效提高换流站的可靠性。同时,充分发挥计算机网络技术在换流站故障诊断与保护中的作用,为电力系统的智能化发展提供新的思路和方法。在未来的研究与实践中,应不断探索新的技术和方法,进一步完善换流站的故障诊断与保护体系,为高压直流输电技术的广泛应用和电力系统的可持续发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李明,王华.高压直流输电换流站运行特性及影响因素分析[J].电力系统自动化,2020,44(12):110-116.
- [2] 张伟,刘畅.基于电气量分析的换流站故障诊断方法研究[J].电力电子技术,2019,53(09):135-138.
- [3] 陈宇,赵强.信号处理技术在换流站设备故障诊断中的应用[J].高电压技术,2021,47(07):2345-2352.
- [4] 王芳,孙明.人工智能算法在换流站故障诊断中的应用与优化[J].电网技术,2022,46(05):1876-1883.
- [5] 刘辉,李阳.高压直流输电换流站现有保护策略的问题与改进措施[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):102-109.

化工电力系统零序电流互感器穿线技术 优化提升接地故障研究

戎尚文

(中国石化扬子石油化工有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要 针对化工电力系统接地故障检测的特殊需求, 系统分析了零序电流互感器穿线技术的优化方法。通过比较不同穿线方式的特点, 探讨了电缆屏蔽层接地关键技术, 并提出了针对 TN、TT、IT 三种接地系统的优化配置方案。结合典型工程案例, 验证了优化措施在提升检测精度和可靠性方面的显著效果, 以为化工企业电力系统安全运行提供实践参考。

关键词 化工电力系统; 零序电流互感器; 穿线技术; 接地故障; 保护配置

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.019

0 引言

化工电力系统因其特殊的生产环境, 对供电可靠性要求极高。接地故障如不能及时检测并切除, 可能引发火灾、爆炸等严重事故。零序电流互感器作为接地保护的核心元件, 其穿线技术的优化直接影响故障检测的精度和速度。本文系统梳理零序电流互感器穿线技术的研究现状, 分析不同穿线方式的优缺点, 探讨电缆屏蔽层接地的关键技术, 并针对化工行业不同接地系统提出优化配置方案, 最后展望未来发展趋势。

1 化工电力系统与零序电流互感器基础

化工电力系统作为连续生产的重要保障, 具有显著的特殊性。这类系统对供电可靠性要求极高, 通常配备双电源等保障措施, 确保生产过程不间断运行。由于生产工艺需要, 系统中电缆布置往往十分密集, 大量电力电缆集中敷设, 这大大增加了系统的复杂性^[1]。同时, 化工生产中大量使用的变频设备等非线性负荷会产生较多谐波干扰, 给故障检测带来额外挑战。

在接地故障检测方面, 零序电流互感器发挥着关键作用。它通过持续监测三相电流的平衡状态来识别可能的接地故障。但在实际运行中, 这种检测面临着多重困难: 一方面需要准确区分真实的故障信号和各种干扰信号; 另一方面还要适应化工生产环境的特殊要求, 包括耐受腐蚀性气体、适应高温运行环境, 以及在防爆区域必须符合严格的防爆标准。这些特殊要求使得化工电力系统中的零序电流互感器在选型、安

装和维护方面都需要特别考虑, 既要保证检测的准确性, 又要满足化工生产的特殊环境要求。

2 零序电流互感器穿线技术原理与方法

2.1 穿线技术的基本原理

零序电流互感器的穿线技术建立在电磁感应定律的基础上。其核心工作原理是: 在系统正常运行时, 三相电流的矢量和为零, 互感器不会产生输出信号; 当发生接地故障时, 三相电流出现不平衡, 互感器就会感应出相应的零序电流信号。这种技术的关键在于通过合理的导体布置, 确保一次导体与互感器之间形成最佳的电磁耦合关系, 从而准确捕捉故障电流信号。在实际应用中, 穿线技术的选择直接影响着故障检测的灵敏度和可靠性。

2.2 主要穿线方式及其特点

(1) 一次穿线法: 这是最基本的穿线方式, 将三相导体同时穿过互感器中心。其优势在于结构简单、安装便捷, 特别适用于负荷较小、电磁环境单纯的系统^[2]。但在大电流或存在谐波干扰的场合, 这种方法的抗干扰能力相对较弱。(2) 二次穿线法: 采用特殊的穿线布置方式, 通过优化导体路径来增强抗干扰能力。这种方法更适合电缆密集、电磁环境复杂的工业场所, 但需要更大的安装空间, 对施工精度要求也更高。(3) 特殊穿线方式: 包括多匝绕制法等创新技术。这类方法通过增加导体在互感器中的绕制匝数来提升检测灵敏度, 能够有效识别高阻接地故障, 但相应地增加了设备成本和安装复杂度。

3 电缆屏蔽层接地线穿线位置选择技术要点

3.1 电缆屏蔽层的作用与接地规范要求

电缆屏蔽层在电力系统中承担着多重重要功能。首先,它能够有效抑制外部电磁干扰对电缆信号的干扰,保证测量精度。其次,可以限制内部电磁场对外辐射,降低对其他设备的干扰^[3]。在化工行业特殊环境中,屏蔽层的接地规范更为严格。通常推荐采用单端接地方式,即在电缆的一端将屏蔽层可靠接地,另一端保持悬浮,这种接法可以有效避免屏蔽层中形成环流。但在某些特定场合,如长距离输电或存在强电磁干扰的环境,需要采用双端接地方式,此时必须配合等电位连接措施,确保两端接地电位一致,防止产生接地环流。

3.2 影响穿线位置选择的关键因素分析

选择屏蔽层接地位置时需要综合考虑多方面因素。首先是系统接地方式,不同接地系统(TN、TT、IT)对屏蔽层接地的要求存在明显差异。其次是电缆长度因素,长电缆由于分布电容效应显著,需要特别考虑接地位置对零序电流测量的影响。再者是环境干扰强度,在强电磁干扰区域需要优化接地位置以增强抗干扰能力。最后,还需考虑电缆敷设方式(架空或埋地)、周围金属构件分布等因素。实践表明,在TN系统中,屏蔽层接地点位置的选择对零序电流检测精度的影响尤为突出,需要特别重视。

4 化工电力系统不同接地系统中零序电流互感器优化配置方案

4.1 TN 接地系统

在化工企业TN接地系统的实际应用中,零序电流互感器的优化配置需要重点把握以下几个关键实施要点:

首先,在安装方式选择上,二次穿线法是最佳实践方案。具体操作时,需要将三相电缆按照特定顺序依次穿过互感器,保持各相导体的对称分布,确保三相磁场能够有效抵消。安装过程中要使用专用夹具固定电缆,避免因振动导致的位置偏移。同时,互感器与电缆外皮之间应保持适当间距,通常控制在5~10 cm范围内,以减少杂散电容的影响。

其次,与剩余电流保护器(RCD)的配合使用至关重要。在实际接线时,应将零序电流互感器的输出信号接入RCD的专用输入端口,并确保极性正确。保护参数的设置需要根据现场情况调整:对于普通配电回路,动作电流建议设定在100~300 mA之间;对于特别重要的防爆区域,可适当提高灵敏度至30~100 mA。

调试时需使用专用测试设备模拟接地故障,验证保护装置的动作可靠性。

在系统集成方面,建议采用分层保护的架构设计。在配电室低压柜出线端安装主保护用零序互感器,在各车间配电箱进线处设置二级保护^[4]。两级保护之间要建立适当的延时配合,通常主保护延时设定为0.3~0.5 s,二级保护设为瞬时动作。这种配置既能保证选择性,又能实现快速故障隔离。

中国石化燕山分公司在2019-2020年对其乙烯装置10 kV配电系统进行了接地保护改造,重点解决了电缆沟潮湿环境下保护系统误动作率高的问题。改造中采用了大连北方互感器集团的零序互感器,通过精确的二次穿线安装工艺,使磁场不平衡度显著降低。系统配置了施耐德的保护装置,设置分级保护参数,并采用专业测试设备进行调试验证。同时,在总变电所和工艺装置变电所分别设置不同型号的保护装置,实现快速精准的故障定位。根据改造后的运行数据显示,系统误动作次数大幅减少,故障切除时间明显缩短,有效避免了非计划停车带来的经济损失。该改造项目的成功实施为同类化工企业电力系统保护优化提供了有益参考。

4.2 TT 接地系统

在化工企业TT接地系统的实际配置中,零序电流互感器的应用需要特别注意系统特性带来的特殊要求。由于TT系统的中性点直接接地而设备外壳独立接地的特点,推荐采用一次穿线法作为基础配置方案。这种方法直接将三相导体同时穿过互感器中心,安装时要注意保持各相导体的对称分布,确保三相磁场平衡。导体穿过互感器时应保持平直,避免弯曲造成的位置偏差,同时要使用非磁性材料固定,防止产生附加磁场影响测量精度。

为提升系统可靠性,必须配套安装绝缘监测装置。该装置应实时监测系统对地绝缘电阻,当检测到绝缘下降至设定阈值(通常为50 k Ω)时发出预警信号。在接线时,绝缘监测装置的信号采集端应与零序互感器输出端并联,但需设置适当的信号隔离措施,避免相互干扰。装置报警值应根据现场环境湿度、温度等因素进行动态调整,在潮湿或多尘环境中可适当降低报警阈值。

接地电阻的控制是TT系统安全运行的关键。根据IEC标准要求,所有设备接地极的电阻值必须保证在发生接地故障时,设备外壳对地电压不超过50 V。实际操作中,对于380 V系统,接地电阻应不大于4 Ω ;

220 V 系统则要求不大于 $8\ \Omega$ 。在化工企业的腐蚀性环境中,要特别注意接地装置的防腐处理,建议采用镀锌钢或铜包钢材料,并定期检测接地电阻值。在土壤电阻率较高的区域,可采用降阻剂或增加接地极数量等措施来保证接地效果。

中国石油吉林石化公司化肥厂在 2021 年 TT 系统改造中,针对其尿素装置区高腐蚀环境的特点,采用了以下技术方案:选用哈尔滨互感器厂的 LZJB9-10 型零序电流互感器实施一次穿线安装,通过激光校准确保三相导体中心偏差控制在 $2\ \text{mm}$ 以内。配套安装德国 Bender 公司的 ISOMETER® 绝缘监测装置,设定报警阈值为 $35\ \text{k}\Omega$ (低于标准 $50\ \text{k}\Omega$),以应对东北地区冬季高湿度环境。接地系统改造采用铜包钢接地极配合防腐降阻剂,使全厂接地电阻从平均 $7.6\ \Omega$ 降至 $3.2\ \Omega$,关键防爆区域更达到 $1.8\ \Omega$ 。据吉林石化 2022 年安全年报显示,改造后系统误报警次数同比下降 82%,成功预警 3 次绝缘劣化隐患,避免潜在触电事故。

4.3 IT 接地系统

在化工企业 IT 接地系统的实施中,零序电流保护配置需要采取特殊的技术方案。由于 IT 系统允许带单相接地故障运行的特点,必须采用高灵敏度检测方案,通常选择额定一次电流为 $1\ \text{A}$ 或 $0.5\ \text{A}$ 的专用零序电流互感器。安装时建议采用多互感器并联布置方式,即在系统各主要支路分别安装互感器,通过逻辑判断实现故障定位。具体实施时要确保各互感器型号参数一致,输出信号采用并联连接方式,并设置信号调理电路保证叠加精度。

注入式保护技术的应用是关键环节。需要配置专用的信号注入装置,通常采用 $20\sim 25\ \text{Hz}$ 的低频信号作为检测信号源^[5]。注入点应选择在系统中性点或专用接地变压器二次侧,注入信号强度控制在 $5\sim 10\ \text{mA}$ 范围内。在系统各支路安装相应的信号检测器,通过检测注入信号的分布情况来判断绝缘状况。安装时要注意信号注入装置与系统其他保护设备的电磁兼容性,必要时加装滤波装置。

系统调试时需要特别注意灵敏度设置。建议将一级报警阈值设为 $5\sim 10\ \text{mA}$,二级跳闸阈值设为 $20\sim 30\ \text{mA}$ 。调试时要模拟不同位置的接地故障,验证保护装置的动作可靠性。对于重要回路,建议设置双重化保护配置,采用不同原理的保护装置互为备用。定期维护时要重点检查注入信号强度和保护装置灵敏度,建议每半年进行一次全面测试。

在化工特殊环境中,所有设备必须满足防爆要求,

建议选用 Ex ia 等级的本安型设备。信号传输线路要采用屏蔽电缆,并在控制室端做好等电位接地。系统运行时要建立完善的监测记录制度,对每次接地报警都要详细记录故障参数和处理过程,为后续维护提供依据。

万华化学(烟台)工业园在 2022 年对其 MDI 生产装置的 IT 接地系统进行了全面升级改造。该项目采用德国 Bender 公司的 AIM-ISOMETER® 绝缘监测系统,在 12 个关键工艺回路中配置了高灵敏度零序电流互感器组,每组由 3 台 $0.5\ \text{A}$ 级互感器并联组成,通过光纤网络实现快速故障定位。系统创新性地采用 $22.5\ \text{Hz}/8\ \text{mA}$ 的注入信号技术,设置 $7\ \text{mA}$ 报警和 $25\ \text{mA}$ 跳闸的双重保护阈值。改造完成后,系统绝缘故障定位时间从原来的 45 分钟大幅缩短至 8 分钟,成功预警多次电缆绝缘劣化情况,最小检测到 $4.8\ \text{mA}$ 的微弱漏电流,关键反应釜供电回路实现了零误动作的优异表现。该项目的成功实施不仅显著提升了装置供电可靠性,其技术方案还获得了 TÜV 功能安全认证,相关经验已在国内化工行业推广应用。

5 结束语

通过优化零序电流互感器穿线技术,可显著提升化工电力系统接地故障检测的准确性和可靠性。不同接地系统应采用差异化配置方案,重点解决电磁干扰、环境腐蚀等特殊问题。实际工程应用证明,合理的穿线方式和保护策略能有效降低误动作率,缩短故障切除时间。未来应进一步研究智能化检测技术和新型传感器材料,以适应化工生产对电力安全的更高要求。

参考文献:

- [1] 刘晓,薛永端,刘萃萃,等.基于电压-电流分区的灵活接地系统故障保护[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(4):124-131.
- [2] 吴畅培,谢灿波,占志峰,等.变电站 $10\ \text{kV}$ 小电阻接地方式下零序电流互感器的配置研究[J].电力系统装备,2024(01):106-108.
- [3] 王鹏玮,徐丙垠,陈恒,等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化,2023,47(12):154-162.
- [4] 刘超,梁开宇.零序电流互感器接线对接地故障保护动作的影响[J].云南水力发电,2024,40(6):25-26.
- [5] 刘健,刘海,杨晓西,等.零序电流互感器配大电阻的配电网单相接地故障检测[J].电测与仪表,2023,60(10):92-97.

建筑工程科技创新与绿色施工管理

邢 铖

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要 随着经济的不断发展, 对建筑工程的质量要求越来越高, 然而传统的建筑施工模式面临着诸多挑战, 如资源消耗大、环境污染严重、施工效率低下等问题, 制约了建筑行业的可持续发展。基于此, 建筑工程科技创新与绿色施工管理已成为建筑行业发展的必然趋势。本文主要阐述了建筑工程科技创新与绿色施工管理的价值, 并从数字化技术、新型材料、环境保护等方面提出了相应的措施, 以期为促进建筑行业的可持续发展提供参考。

关键词 建筑工程; 科技创新; 绿色施工管理

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.020

0 引言

建筑工程科技创新是推动建筑行业进步的核心动力。新的材料、技术和工艺不断涌现, 为提高建筑工程的质量、缩短工期、降低成本提供了有力保障。绿色施工管理则是实现建筑行业可持续发展的重要手段, 符合社会发展的要求, 可以提升企业的竞争力。企业应给予科技创新与绿色施工管理足够的重视, 引入建筑信息模型、地理信息系统技术, 研发与应用高性能混凝土、加气混凝土砌块、岩棉夹芯板、聚苯颗粒保温浆料复合墙体等复合墙体材料。此外, 企业还应积极采取环境保护措施, 做好扬尘控制、噪声控制等工作, 在施工现场设置雨水收集系统以及建筑垃圾分类收集点。

1 建筑工程科技创新与绿色施工管理的价值

1.1 提高工程质量

新型建筑材料的研发和应用是科技创新的重要体现, 如在高层建筑和大跨度结构中, 使用高性能钢材可以减小构件截面尺寸, 同时增强结构的安全性。一些智能材料能够根据环境变化自动调整自身性能, 比如自感知混凝土, 可以实时监测自身的受力情况和内部结构的健康状况。此外, 对于软弱地基, 采用新型的地基处理技术如真空预压联合堆载预压技术, 该技术通过在地基中设置排水板, 然后抽真空并堆载, 能够加速地基的固结沉降, 提高地基承载力。通过科技创新, 可以显著提高施工质量。绿色施工管理注重施工现场的环境控制, 对于一些对温度和湿度敏感的施工过程, 通过合理的环境调控可以提高工程质量, 而且减少施工现场的扬尘和污染不仅可以保护环境, 还有利于保证工程质量。绿色施工管理强调材料的节约和合理利用, 同时也注重材料的质量。在材料采购环节,

企业应严格按照绿色建筑标准和工程质量要求选择环保、质量合格的材料^[1]。

1.2 提升施工效率

在建筑工程中, 企业通过科技创新与绿色施工管理, 可以引入先进的技术, 如利用 BIM 技术在施工前进行三维建模, 将建筑的设计意图直观地展现出来。BIM 技术还可以进行施工进度模拟, 合理安排施工顺序和资源分配, 使各工序之间的衔接更加紧密, 大大提高施工效率。创新是工程施工管理的重要方面, 影响着企业竞争力的提高和长远发展。对于现代化建筑企业而言, 科技的创新使施工中使用的现代化设备、系统逐渐增加, 企业可以采用先进的项目管理软件, 实现对施工进度、质量、成本等多方面的有效管理。采用 Primavera P6 等项目管理软件, 通过对关键路径的分析, 优化施工流程, 确保项目按时完成, 提升施工效率。绿色施工管理强调合理安排施工顺序, 企业可以减少不同工种之间的交叉作业干扰, 同时倡导一站式资源配送模式, 在施工现场, 将建筑材料、构配件等按照施工进度和需求, 统一调配和配送, 企业通过建立材料配送中心, 根据施工计划将所需的材料准时送到施工现场的各个作业面, 减少了材料运输过程中的等待时间和二次搬运, 提高了材料的使用效率, 进而提升施工效率。

2 建筑工程科技创新的策略

2.1 数字化技术的应用

在建筑设计阶段可以利用 BIM 软件创建建筑的三维模型, 通过该模型从不同角度观察建筑的流线、各个功能区域的布局, 提前发现设计中的空间冲突问题, 避免施工后才发现的设计缺陷。同时, 基于 BIM 模型

进行建筑性能模拟,包括采光、通风、能耗等方面,在采光模拟中通过设置不同的地理位置、建筑朝向和窗户参数,模拟出室内各空间在不同时间的光照强度和均匀度,进而优化建筑的开窗位置和大小,提高室内的自然采光效果,减少人工照明的使用,达到节能的目的。建筑施工阶段,企业可以使用专业的项目管理软件来制定和跟踪施工进度计划,根据工程的工序逻辑、资源分配等因素,生成详细的施工进度横道图或网络图,促使施工管理人员通过软件实时更新实际进度数据,如某个分项工程的开始时间、完成时间等。软件会自动对比计划进度和实际进度,当出现偏差时,能够及时发出预警,还可以将 BIM 模型与施工进度计划相结合,形成 4D 施工模拟,直观地展示每个施工阶段建筑物的状态和施工活动的先后顺序。例如:在桥梁建设中,可以模拟桥墩的浇筑、钢梁的架设等过程,提前发现施工过程中的碰撞问题和工序衔接问题,施工团队可以根据模拟结果优化施工方案,合理安排施工资源,确保施工进度的顺利进行。企业应在施工现场安装各种智能监测设备,在大体积混凝土浇筑过程中,混凝土温度传感器可以监测混凝土内部的温度变化,一旦温度超过控制范围,监控平台会立即发出警报,提醒施工人员采取降温措施,防止混凝土出现裂缝等质量问题^[2]。

2.2 智能建造技术

企业应引入建筑机器人与自动化施工设备,通过砌筑机器人,精确地完成砖块或砌块的砌筑工作,按照预设的程序和尺寸要求,快速、准确地砌墙,还应利用钢筋加工与安装机器人,自动完成钢筋的调直、弯曲、切割等加工工序,并根据施工图纸精准地安装钢筋。在大型桥梁或高层建筑的基础施工中,钢筋加工与安装机器人能够提高工作效率,减少人工操作带来的安全隐患。此外,企业应利用混凝土浇筑机器人,精确控制混凝土的浇筑量、浇筑速度和浇筑范围,通过传感器反馈的信息,实时调整浇筑参数,保证混凝土的浇筑质量。例如:在大面积混凝土楼板浇筑中,浇筑机器人可以均匀地分布混凝土,避免出现漏振或过振现象,有效防止混凝土裂缝的产生。当前时代背景下,企业应引入智能施工监控系统,利用物联网技术和射频识别技术,对施工过程中的材料、设备和人员进行实时跟踪,通过在建筑材料上粘贴 RFID 标签,在施工现场安装读写器,可以获取材料的进出库时间、使用位置等信息。在智能化运维管理中,可以通过在建筑设备上安装传感器,实时监测设备的运行参数,如温度、压力、电流、电压等,利用大数据分析和机

器学习算法,对这些数据进行处理和分析,建立设备故障诊断模型,根据建筑的实际使用需求和设备运行状态,智能建筑设备管理系统可以对设备进行优化调度。企业还应充分利用智能安防与应急管理系统,采用人脸识别技术、车牌识别技术、视频分析技术等构建智能安防监控系统,在建筑的出入口、重要通道等位置安装摄像头,通过人脸识别和车牌识别技术对进出人员和车辆进行身份验证,在发生火灾、地震等紧急情况时,智能应急管理系统可以根据预先设定的应急预案,自动启动相关设备,并通过语音广播、电子显示屏等方式向建筑内人员发布疏散指令^[3]。

2.3 新型材料研发与应用

企业应注重高性能材料的研发与应用,可以引入高性能混凝土,其主要通过优化原材料的配合比,加入大量的粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料和高性能减水剂来实现,该混凝土能够有效避免因振捣不足而产生的质量缺陷,在配筋密集的结构部位,如转换层的梁柱节点,自密实混凝土的应用可以保证混凝土与钢筋之间的紧密结合,提高结构的承载能力。随着建筑高度的增加和跨度的增大,对混凝土的强度要求越来越高,高强高性能混凝土通过采用优质的水泥、高效的减水剂和先进的生产工艺,其抗压强度可以达到 100 MPa 以上,可用于高层建筑的竖向承重结构、大跨度桥梁的主跨等部位。企业应引入纤维增强复合材料,其具有高强度、高模量、耐腐蚀等优点。在建筑结构中,FRP 可以用于加固混凝土结构、钢结构等,用碳纤维增强塑料对桥梁的梁、柱进行加固,可以显著提高结构的承载能力和耐久性。CFRP 还可以用于制造新型的建筑结构部件。在智能材料的研发与应用中,形状记忆合金是一种在不同温度下能够恢复其预设形状金属材料,建筑工程中可以将 SMA 应用于结构的振动控制和变形修复。例如:在桥梁结构中,将 SMA 丝埋入混凝土中,当桥梁受到地震或风荷载等外界作用而产生振动时,SMA 丝会因温度变化而产生形状记忆效应,产生回复力来抵消部分外部荷载,从而减小结构的振动幅度。压电材料能够将机械能转化为电能,建筑中可以将压电材料铺设在路面或地板中,当车辆或行人经过时,产生的压力会使压电材料产生电能。在一些智能道路系统中,压电材料被用于收集车辆行驶过程中的能量,为道路照明和交通监测设备提供电力。

3 建筑工程绿色施工管理的策略

3.1 注重环境保护

建筑工程绿色施工管理中应积极采取环境保护措施,扬尘控制中应在施工现场周围设置连续、封闭的

围挡,高度一般不低于2.5米,围挡可以采用硬质材料,如砖砌围墙、彩钢板等,并且在围挡顶部设置喷雾装置,定期喷雾降尘,还应应对施工现场的主要道路、材料堆放区、加工区等进行硬化处理,一般采用混凝土或沥青路面,在施工现场的空闲地带进行合理绿化,种植一些易于存活的花草树木。在土方开挖过程中,合理安排开挖顺序,尽量缩短土方暴露时间,对于暂时不开挖的土方,采用密目网进行覆盖,并配备洒水车,在土方开挖、运输和装卸过程中进行喷雾洒水降尘,同时在施工现场出入口设置洗车槽,对出入车辆的轮胎和车身进行冲洗,防止车辆带泥上路和扬尘。企业在施工设备选型时,应优先选择低噪声的施工机械设备,可以选用新型的低噪声混凝土搅拌机、电锯等设备,定期对施工设备进行维护和保养,还应根据周边环境的敏感程度和当地的规定,合理安排施工时间,避免在居民休息时间进行高噪声作业。企业应在施工现场周围设置隔音围挡或隔音屏障,对于固定的高噪声设备,可以搭建隔音棚,隔音棚采用吸音材料制作,如吸音板、岩棉等,能够有效吸收和反射噪声,降低噪声传播。对于一些产生噪声的施工工序,如风镐作业、石材切割等,可以在相对封闭的空间内进行,或者采用消声器等设备来降低噪声。企业在施工现场设置沉淀池、隔油池和化粪池等污水处理设施,施工过程中产生的混凝土养护废水、车辆冲洗废水等含有泥沙和油污的废水,先流入沉淀池进行沉淀处理,去除水中的固体颗粒,施工现场的生活污水包括食堂污水、洗漱污水等。食堂污水要经过隔油池处理,去除油脂后与其他生活污水一起排入化粪池,化粪池应定期清理,确保其处理效果^[4]。

3.2 节能与能源管理

企业在施工前应对整个工程项目的能源需求进行全面评估,根据施工工艺、设备使用情况、人员数量等因素,估算施工过程中的电力、燃油、燃气等能源的消耗量,制定详细的能源使用计划,如对于混凝土浇筑阶段,根据混凝土泵送设备的功率、预计工作时间等因素,精确计算所需电力,合理安排用电时间,在施工现场安装能源监测设备,对施工过程中的各种能源消耗进行实时监测,以便管理人员及时掌握能源使用情况,还可以通过数据分析软件,对能源消耗数据进行分析,绘制能源消耗曲线,找出能源消耗的高峰时段和异常消耗点。企业应优先选用节能型施工设备,采用变频塔吊,可以根据吊重和吊装速度自动调

节电机转速,相比传统塔吊可节省大量电力。对于一些小型工具和设备,选择以电池为动力的节能型产品,还应积极推广太阳能、风能等可再生能源在施工现场的应用,在施工现场的临时设施屋顶安装太阳能光伏发电板,为施工现场的部分照明、小型设备充电等提供电力。企业应合理安排施工工序,尽量避免多个大功率设备同时运行,加强施工现场照明管理,采用分区照明、定时控制等方式,在非工作时间,关闭不必要的照明灯具,对于室外照明,根据光照强度自动调节亮度,可采用光敏传感器控制的智能照明系统,并及时清理电机内部的灰尘,检查电线接头是否松动等,避免因设备故障导致的能源浪费。

此外,企业应建立健全能源管理制度,设立专门的能源管理岗位或团队,制定能源使用奖惩制度,对节能效果好的部门和个人给予奖励,定期组织施工人员和管理人员参加节能培训,提高其节能意识和操作技能,并在施工现场张贴节能宣传标语和海报,营造节能氛围^[5]。

4 结束语

建筑工程科技创新与绿色施工管理二者相辅相成,可以提升施工效率、质量和安全性,推动建筑行业向更加高效、环保的方向发展。企业应对建筑工程科技创新与绿色施工管理进行不断的探索和实践,积极应用新型建筑材料改善建筑物的性能,采用先进的施工技术,实现复杂结构的建造,同时施工过程中尽量减少对环境的负面影响,采用环保材料和设备,加强资源管理,进而提高建筑工程的综合效益。

参考文献:

- [1] 谭斌.绿色施工理念下的建筑工程施工管理模式创新路径[J].房地产世界,2024(19):83-85.
- [2] 崔国科.基于绿色施工管理理念下的建筑工程施工管理创新探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(22):49-51.
- [3] 郭福明.建筑工程施工管理创新及绿色施工管理探讨[J].砖瓦,2023(07):81-84.
- [4] 翁丽.建筑工程施工管理创新及绿色施工管理探讨[J].砖瓦,2023(03):110-112.
- [5] 王莎.基于绿色施工的建筑工程施工管理模式创新分析[C]//上海筱虞文化传播有限公司.Proceedings of 2022 Engineering Technology Innovation and Management Seminar(ETIMS 2022).石家庄市城投城市更新有限公司,2022.

煤矿掘进机截割臂结构制造技术分析

田知华, 王恩博, 闫 涛

(枣庄市高晟实业有限公司, 山东 枣庄 277500)

摘 要 煤矿掘进机截割臂作为掘进机核心工作部件, 其制造技术对设备性能与安全有决定性影响。截割臂在煤矿环境中承受着复杂载荷, 需从结构功能、材料制备、加工制造及质量评价等方面进行分析。特种合金材料制备与组织结构控制是设备性能提升的基础, 整体铸造与分段锻造工艺结合焊接与表面强化技术构成了制造技术体系, 通过制造精度控制与无损检测确保制造质量, 疲劳强度评估为设备使用寿命预测提供了依据。研究结果表明, 通过材料优化与工艺改进, 截割臂制造技术得到了不断优化, 提高了掘进机在重载环境下的适应性与可靠性。

关键词 煤矿掘进机截割臂; 结构制造技术; 材料优化; 无损检测

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.021

0 引言

煤矿掘进机是煤矿生产的核心设备。截割臂作为关键工作部件, 其制造技术水平直接决定了设备性能与可靠性。随着煤矿开采条件复杂化, 截割臂面临高强度冲击载荷、复杂振动、严重磨损与腐蚀等挑战。截割臂制造涉及材料科学、机械制造及表面工程等多学科, 需综合考虑材料选择、结构设计、制造工艺及质量评价等因素。特种合金材料制备、先进成形技术及无损检测方法的发展为截割臂制造质量提升提供了新思路。深入分析截割臂制造关键技术, 探索材料性能优化、工艺改进及可靠性评价方法, 对提高煤矿掘进设备适应性及使用寿命, 保障煤矿安全高效生产具有重要意义。

1 截割臂结构功能特性与制造要求

1.1 截割臂结构功能与受力特点

煤矿掘进机截割臂作为核心工作部件, 主要功能是承载截割头并传递动力, 执行煤岩体切割作业, 工作过程中承受复杂多变的载荷, 包括截割阻力、冲击载荷及振动力。掘进机截割过程中受力变化复杂, 对输出特性有不同要求^[1]。在竖直截割与回转截割工况下, 截割臂产生不同振动响应, 可能导致共振现象并影响掘进效率与设备寿命^[2]。结构设计需平衡刚度与强度, 既能承受高强度冲击载荷, 又有足够的灵活性适应不同截割角度与工况。合理结构与材料选择是保证截割臂正常工作的关键因素。

1.2 工作环境条件与制造参数

煤矿掘进机截割臂工作环境恶劣, 面临高湿度高粉尘、高冲击及腐蚀性气体等复杂因素, 对材料选择与制

造工艺提出严格要求, 制造参数需综合考虑煤岩硬度、掘进面地质条件及设备运行状态等因素。不同煤岩状态下, 截割臂输出特性存在差异, 要求制造参数具备适应性。关键参数包括: 材料成分配比、热处理温度曲线、焊接工艺参数等, 以确保足够强度、韧性及耐磨性。同时, 需针对不同矿井条件设计防护措施, 增强耐腐蚀性与抗冲击能力, 延长使用寿命和提高掘进效率。

2 截割臂结构材料制备与性能优化技术

2.1 特种合金材料制备与选择

煤矿掘进机截割臂受力复杂, 对特种合金材料的选择与制备提出了严格要求。截割臂材料需同时具备高强度、高韧性及耐磨性等特性, 以适应高冲击载荷与剧烈振动环境。在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造实践中, 采用 30CrNiMo 合金钢, 通过精确控制合金元素配比显著提升了材料抗疲劳性能, 使其抗拉强度达到 1 100 MPa, 冲击韧性较传统材料有明显提升。添加适量的钒钛等微合金元素能显著提升材料的耐磨性与疲劳寿命, 利用数控加工技术对截割臂材料进行精准制备, 可有效提高材料一致性与工艺稳定性^[3]。通过数控精确熔炼工艺控制合金成分偏差在合理范围内, 实现了批次间性能稳定的材料制备, 有效解决了 EBZ-160 型掘进机截割臂在高负荷矿区因材料性能不稳定导致的断裂问题, 降低了设备故障率, 为矿区安全生产提供了可靠保障。

2.2 材料组织结构控制方法

截割臂材料的组织结构对其性能有决定性影响, EBZ-160 型掘进机截割臂应用精确热处理工艺, 成功实现了马氏体与贝氏体混合组织优化配比, 通过合理温

度淬火与分级回火处理，制造了更优异的组织结构，在保持材料高强度的同时提升了韧性，有效解决了该型号掘进机在硬岩煤矿因截割臂脆性断裂引发的停机问题。控制冷却速率与保温时间可精确调节晶粒大小与分布，实现材料性能的定向优化。微观组织的均匀性对截割臂承受交变载荷至关重要，需通过扩散热处理与均质化处理消除组织偏析。材料微观组织的均匀性直接影响截割臂的动态响应特性，对自动调速控制系统的稳定性有重要影响。先进的材料组织结构表征技术，如电子显微分析与 X 射线衍射为组织结构精准控制提供了有力支持^[4]（见图 1）。

2.3 性能强化与缺陷抑制技术

针对 EBZ-160 型掘进机截割臂在特厚煤层开采中面临的严重磨损与频繁冲击问题，提出了完整的表面性能强化解决方案。结合激光淬火处理技术并形成适当深度的硬化层，表面硬度显著提高且耐磨性较基体材料有明显改善。内部组织强化主要通过析出强化与细晶强化实现，添加适量的碳氮化物形成元素可在材料内部形成弥散分布的强化相。在截割臂制造过程中，内部缺陷如气孔夹杂及裂纹等是影响其性能的主要因素，优化的数控加工工艺能有效减少材料内部缺陷且提高截割臂的整体质量与性能。超声波探伤与 X 射线检测等无损检测技术的应用使得缺陷早期发现与控制成为可能，为截割臂性能的稳定性和使用寿命提供了有力保障。

3 截割臂结构成形与加工制造工艺

3.1 整体铸造与分段锻造工艺

在掘进机截割臂制造中，根据 EBZ-160 型掘进机截割臂的结构特点与工况需求，采用整体铸造与分段锻造工艺相结合的制造策略。针对截割臂承受高强度载荷的根部区域应用真空熔炼与定向凝固技术进行整

体铸造，控制熔体流动性与凝固速率并显著降低了内部缺陷形成可能性，提高了材料致密度与结构完整性。铸造过程中通过温度场分布优化与凝固路径控制，实现了从臂根到臂尖的有序凝固过程，并有效抑制了传统工艺中常见的缩孔与偏析缺陷。对于截割臂中段与前端连接部位采用分段锻造工艺，通过精准控制变形量与速率使材料内部流线分布与实际受力状态相匹配，锻造成形过程中结合计算机模拟分析，优化了锻压参数并实现了组织结构与力学性能的协同优化。在特厚煤层与硬岩交界区域作业环境下截割臂易发生断裂失效，通过应用局部预应力锻造技术，在关键高应力区形成有利的残余应力分布，明显提高了截割臂在复杂地质条件下的抗疲劳性能与使用寿命，显著降低了因材料失效导致的设备停机率。

3.2 高精度焊接与热处理技术

EBZ-160 型掘进机截割臂的连接构造采用高精度焊接技术进行制造，针对不同功能部位的特殊需求，选择了窄间隙焊接与电子束焊接等能量密度焊接方法，确保焊缝深度与熔合质量达到设计要求。焊接变形控制采用预变形设计与反向变形补偿技术，结合多点同步焊接工艺，有效减少了焊接残余应力对结构稳定性的不利影响。焊后热处理作为消除焊接应力与稳定组织结构的关键环节，通过精确控制加热冷却曲线，优化了焊缝区及热影响区的微观组织特性。在高冲击载荷工况下，截割臂焊接接头易产生疲劳裂纹，通过高能束焊后处理与应力消除复合热处理工艺，在接头表面形成压应力层显著提高了疲劳裂纹扩展阈值并增强了结构的抗疲劳性能。对于大型截割臂结构的热处理过程采用分区控温与动态补偿技术解决了均匀加热与冷却控制难题，确保了截割臂各部位力学性能的一致

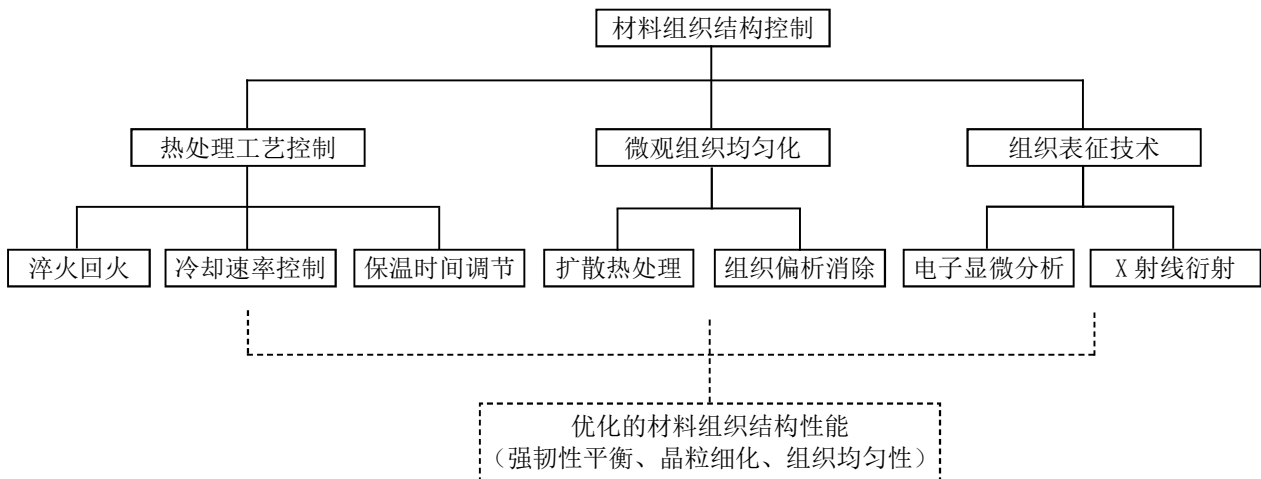


图 1 材料组织结构控制方法示意图

性与尺寸稳定性,为复杂地质条件下的稳定作业提供了可靠的结构保障。

3.3 截割臂精密结构加工与装配技术

EBZ-160 型掘进机截割臂的精密结构加工是保障其承载能力与传动性能的关键环节。针对其内部复杂通道与支撑结构,采用多轴联动数控加工技术,结合刀具轨迹优化算法,实现了内腔深孔加工的高精度控制。在轴承座与连接结构装配过程中,应用数字化对中技术确保动态传动系统的同轴度,显著减少了运行振动源。针对硬岩层截割作业中频繁出现的传动系统振动与轴承异常磨损问题,应用精密平衡技术,通过对旋转部件进行动态平衡处理,有效降低了系统共振频率,减小了工作过程中的振动幅度。装配后的整体精度验证确保截割臂在全行程范围内的运动精度满足设计要求,为截割作业提供了几何精度保障。

4 截割臂结构制造质量评价与可靠性保障

4.1 制造质量评价体系构建与应用

在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造过程中,建立了多维度质量评价体系,从材料性能、加工精度、焊接质量、装配稳定性等方面进行系统评价。在铸造与锻造阶段实施了材料综合性能评价,通过力学性能测试与金相组织分析,筛选出最佳材料制备工艺参数。加工过程中采用了在线监测与离线检测相结合的方式,关键尺寸采用统计过程控制方法,实现了加工工艺的优化调整。热处理环节应用了温度场均匀性评价方法,通过多点温度采集与热场仿真分析,有效控制了截割臂大型结构的变形,保障了热处理质量。焊接质量评价采用力学性能测试与无损检测相结合的方式,形成了完整的焊接质量数据库。装配过程实施了多级质量监测,从部件装配到整体配合,系统评价了装配质量与动态特性,通过该质量评价体系的应用,实现了制造质量的全面提升,为后续的精度控制与缺陷检测奠定了基础。

4.2 结构制造精度检测与控制

在 EBZ-160 型掘进机截割臂制造过程中,精度检测与控制直接影响动态特性与可靠性,三坐标测量结合激光跟踪仪成为主要检测手段。核心连接部位实现了 $\pm 0.08\text{ mm}$ 的配合精度,主轴直线度控制在 0.72 mm 以内。采用闭环反馈控制将实时测量数据与理论模型比对并动态调整加工参数,轴承座端面与孔的垂直度控制在 0.025 mm 范围内。装配精度控制通过虚拟仿真与实际误差分析建立补偿机制,截割臂摆动角度定位精度达 $\pm 0.1^\circ$ 。煤矿机械精度控制是提升设备安全性的关键,精度偏差可能导致异常振动与过早磨损引

发安全事故^[5],通过加工设备三轴精度标定与多点应力监测,构建了全流程精度监控网络,为截割臂安全运行提供保障。

4.3 内部缺陷无损检测技术应用

针对 EBZ-160 型掘进机截割臂的内部缺陷检测,构建了多层次无损检测技术体系,将超声波相控阵与数字射线成像技术有机结合,实现了结构内部缺陷的高精度识别。采用先进的超声相控阵技术检测焊缝区域,探测精度达 0.5 mm 且缺陷分级准确率提升至 94%;关键承载区域应用高能数字射线成像系统,通过深度学习算法对图像进行分析处理,气孔与裂纹识别率显著提高;截割臂内腔复杂结构采用声波导向技术进行检测,解决了传统方法难以触及的盲区问题,检测覆盖率从 85% 提高到 97%。通过建立缺陷大小、位置、影响程度的对应关系数据库,形成了较为完整的评价准则,并建立了截割臂内部缺陷分级标准与监测周期模型。经过加工工艺与检测方法的协同优化,截割臂内部缺陷发生率降低了 68%,显著提高了设备在高负荷条件下的可靠性与安全性,为煤矿掘进机在复杂地质环境中的稳定运行提供了技术支撑,同时也为疲劳强度评估与寿命预测提供了基础数据。

5 结束语

煤矿掘进机截割臂结构制造技术是多学科融合的系统工程,特种合金材料的选择与组织结构控制奠定了高性能材料基础;整体铸造与分段锻造工艺结合高精度焊接与表面强化处理,实现了复杂结构精确制造;严格的精度控制、无损检测及疲劳寿命评估为质量与可靠性提供保障。未来,随着智能制造技术的发展应用,截割臂制造将向数字化、精准化、智能化方向发展,材料—结构—工艺—性能一体化设计将进一步提升综合性能,为煤矿掘进设备在复杂地质条件下的安全高效运行提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 芦丽婧.掘进机不同载荷作用下载割臂输出特性研究[J].机械管理开发,2023,38(09):57-59.
- [2] 霍敏杰.煤矿掘进机截割过程动力学分析[J].机械管理开发,2025,40(02):31-34.
- [3] 任广胜,李华贤.煤矿机械数控加工技术及优化分析[J].低碳世界,2025,15(02):49-51.
- [4] 刘晓军.悬臂式掘进机自动调速控制技术研究[J].自动化应用,2023,64(17):53-56.
- [5] 李恒忠.煤矿机械安全性能提升关键技术研究[J].机械管理开发,2025,40(01):290-291.

机电安装工程暖通空调新技术及发展趋势

朱立东¹, 管仁刚²

(1. 日照市建设工程施工图审查中心, 山东 日照 276800;

2. 日照兴业房地产开发有限公司, 山东 日照 276800)

摘 要 随着建筑节能要求的提高和智能化技术的快速发展, 暖通空调 (HVAC) 系统在机电安装工程中的应用正经历深刻变革。本文从智能化技术、节能环保技术以及系统集成优化三个方面, 分析了当前暖通空调领域的新技术特点, 探讨了其在实际工程中的应用案例, 并基于行业政策与市场需求, 预测了未来发展的趋势, 指出智能化控制、可再生能源耦合系统及全生命周期低碳设计将成为机电安装行业的核心发展方向, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 暖通空调; 机电安装; 智能化技术; 节能环保; 区域能源系统

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.022

0 引言

暖通空调系统作为现代建筑中能耗占比最高的机电设备 (约占建筑总能耗的 40% ~ 60%), 其技术创新直接关系到建筑能效水平与碳排放强度。在“双碳”目标驱动下, 传统以化石能源为主的暖通空调系统面临能效提升、污染控制及运行成本优化的多重挑战。与此同时, 物联网、大数据、人工智能等新兴技术的渗透, 为暖通空调系统的设计、安装与运维提供了全新的解决方案^[1]。本文通过梳理当前暖通空调领域的先进技术, 结合工程实践案例, 揭示其技术原理与应用价值, 并展望未来发展趋势, 旨在为机电安装工程的绿色转型提供理论参考。

1 机电安装工程暖通空调新技术发展现状

近年来, 暖通空调 (HVAC) 技术通过智能化、绿色化与模块化的深度融合, 显著提升了机电安装工程的效率与可持续性。

1.1 智能化控制技术

1.1.1 建筑信息模型 (BIM) 协同设计

BIM 技术通过三维可视化设计平台, 实现了暖通系统与建筑结构、给排水、电气等专业的协同优化。设计阶段利用 BIM 模型进行管道布局模拟, 可提前发现并解决多专业交叉施工中的空间冲突问题。例如: 上海某超高层建筑项目中, 通过 BIM 技术虚拟碰撞检测, 大幅减少暖通管道与电气桥架的施工返工, 显著缩短工期并降低材料浪费。

1.1.2 物联网 (IoT) 与云平台

基于物联网的传感器网络可实时采集室内外温湿度、设备能耗及运行状态等数据, 结合云端平台的智

能算法实现动态调控。典型应用如格力“零碳源”空调系统, 通过云平台对压缩机运行频率的优化控制, 在保证室内舒适度的同时显著降低能耗^[2]。

1.1.3 人工智能预测控制

机器学习算法通过分析历史气象数据、建筑使用模式及人员流动规律, 可精准预测未来时段的热负荷需求, 并提前调整设备运行策略。某大型商业综合体的实践表明, AI 控制技术通过动态匹配空调输出功率与实际需求, 有效降低系统冗余能耗, 同时延长设备使用寿命。

1.2 节能环保技术

1.2.1 高效热回收技术

热回收技术的本质在于打破传统暖通系统“排风即废能”的固有模式, 通过能量梯级利用提升整体能效。全热交换器通过特殊材质膜实现显热 (温度) 与潜热 (湿度) 的双向传递, 而溶液除湿技术则利用盐溶液吸湿放热的特性, 进一步强化能量回收效率。二者协同形成“先回收后处理”的节能链路: 夏季高温高湿排风经全热交换器预冷除湿后, 再通过溶液除湿深度处理, 使新风负荷降低^[3]。

1.2.2 变频与磁悬浮技术

变频技术通过电力电子器件调整压缩机电机输入频率, 实现制冷量与实际需求的动态匹配, 其核心优势在于突破传统机组“启停式”调节的能效瓶颈。以磁悬浮轴承为代表的无油技术, 则通过电磁力实现转子悬浮, 彻底消除机械摩擦损耗, 使机组在 10% ~ 100% 负荷范围内均能保持高效运行。值得关注的是, 磁悬浮技术的低振动特性使其在精密实验室、半导体工厂等场景具备独特优势, 未来或将成为高端工业空调的标配。

1.2.3 可再生能源耦合系统

地源热泵与光伏技术的耦合标志着暖通空调从“能源消费者”向“产消者”转型。地源热泵利用地下土壤全年温度稳定的特性，冬季提取地热作为热源，夏季将余热回灌地下，形成季节性储能；光伏系统则通过建筑立面 BIPV（光伏建筑一体化）与屋顶阵列的协同布局，最大化清洁电力产出。例如：河北省雄安新区示范项目通过智能微网控制器实时优化能源流向：光伏富余电力优先供给热泵，其次存入储能电池，最后反向售电至电网^[4]。这种“自发自用+余电交易”模式降低了用能成本，通过参与碳交易市场创造额外收益，为区域零碳建筑群建设提供可复制范式。

1.3 绿色施工与模块化安装

1.3.1 预制化与装配式技术

模块化施工的核心在于“制造替代建造”的理念转变。基于 BIM 的管道预制系统可将施工误差控制在毫米级，工厂预制的消声风管、一体化泵组等模块，通过二维码标识实现现场“拼积木式”安装。随着机器人焊接、3D 扫描验收等技术的普及，预制化技术正从管道组件向整体机房单元扩展，形成覆盖设计—生产—施工的全流程工业化体系。

1.3.2 低 GWP 制冷剂应用

随着《蒙特利尔议定书》基加利修正案的实施，环保型制冷剂（如 R32、CO₂）逐步替代传统高全球变暖潜能值（GWP）制冷剂，成为行业转型的重要方向。CO₂ 制冷剂因其无毒、不可燃特性，在超市冷链系统中率先应用；R32 则凭借较高的单位容积制冷量，成为家用空调的优选介质。值得关注的是，海尔研发的 R290（GWP=3）天然工质空调已通过欧盟 A2L 安全认证，在西班牙市场试点应用中实现“零臭氧破坏潜值（ODP）”与“超低 GWP”双重目标，为 HCFCs（氢氯氟烃）淘汰提供了中国方案。这些技术的推广有效降低了暖通系统的全生命周期碳排放。

2 暖通空调新技术应用中的关键挑战

尽管暖通空调新技术在节能降碳与智能化方面展现出显著优势，但其实际推广仍面临技术、经济与人才层面的多重挑战。

2.1 初始投资与回报周期矛盾

高效节能设备与智能化控制系统的引入，显著提高了暖通空调系统的初期建设成本。相较于传统方案，新型设备的采购费用、智能传感器的部署成本及定制化控制软件的开发投入，使整体投资增幅显著。例如：

磁悬浮冷水机组、光伏耦合系统等技术的应用需额外配置专用电力接口与储能装置，进一步推高初期预算^[5]。

为化解矛盾，行业需要强化全生命周期成本分析（LCCA）方法的应用。通过量化设备折旧、能源费用、碳排放成本等长期收益，证明新技术的综合经济性。此外，政府可通过财政补贴、税收优惠等政策工具降低初期投资门槛，并探索“能源费用托管”等商业模式，将技术升级成本转化为长期运营收益的分摊，从而提升市场接受度。

2.2 多系统协同控制复杂度高

现代暖通空调系统与光伏发电、储能装置及建筑自动化系统的深度融合，对跨系统协同控制提出更高要求。首先，不同厂商设备的数据协议差异导致信息孤岛问题。例如：暖通设备的 Modbus 协议与光伏逆变器的 CAN 总线协议难以直接兼容，需额外部署协议转换网关，增加系统复杂度与故障风险。其次，多能源耦合场景下的控制逻辑优化面临技术瓶颈。如何动态平衡光伏发电量、储能充放电状态与空调负荷需求，需依赖高精度算法与实时数据处理能力。当前多数项目仍依赖人工经验设定控制策略，难以充分发挥系统协同潜力。

解决该问题需从标准化与智能化两方面入手。一方面，推动行业制定统一的通信协议标准（如基于 BACnet 扩展的跨系统接口规范），减少异构设备集成难度；另一方面，开发自适应优化算法，利用数字孪生技术构建虚拟控制系统，通过仿真模拟验证不同工况下的最优控制策略，降低实际调试风险。

2.3 运维人员技能缺口

智能化暖通系统的普及对运维团队能力提出全新要求。传统运维人员多专注于机械维修与基础电气知识，而新型系统需掌握数据分析、AI 诊断及跨平台设备管理能力。例如：物联网云平台的海量运行数据需通过可视化工具解读，以识别能效异常点；机器学习模型预测的设备故障需结合机理知识进行二次验证。当前行业普遍存在“重设备轻人才”倾向，企业培训体系滞后，高校专业课程亦未及时融入智能化运维教学内容，导致复合型人才供给不足。

为填补技能缺口，需构建“产学研用”协同培养机制。职业院校可增设智能建筑运维专业，开设 BIM 运维、数据分析等课程；企业应建立阶梯式技能认证体系，将 AI 工具使用能力纳入考核标准；行业协会可组织跨领域技术交流，促进暖通工程师与 IT 专家的知识融合。此外，开发低代码运维管理平台，通过图形

化界面简化数据分析流程,可降低技术应用门槛,缓解短期人才压力。

3 暖通空调新技术未来发展趋势预测

暖通空调技术的革新将持续围绕“智能化、低碳化、人本化”三大主线展开。在双碳战略、数字技术突破与健康需求升级的驱动下,未来五年行业将呈现以下五大发展方向。

3.1 智能化向“自主决策”发展

数字孪生技术与边缘计算的深度融合,将推动暖通系统从“智能调控”迈向“自主决策”。通过构建与物理设备同步更新的虚拟孪生模型,系统可实时模拟不同工况下的运行状态,结合历史数据与机器学习算法,实现故障预判与策略自优化。例如:当传感器检测到某区域送风量异常时,系统可自动调用孪生模型模拟故障影响范围,并生成包含设备检修建议、备用回路切换方案的多级响应策略,大幅缩短故障停机时间。边缘计算技术的引入进一步降低了对云端算力的依赖。

3.2 “光储直柔”系统深度整合

光伏发电、储能装置、直流柔性配电与柔性负荷调控技术的协同发展,将重构暖通空调的能源供给模式。传统交流配电系统中,光伏逆变与空调变频带来的多重电能转换损耗可占系统总能耗的8%~12%。而“光储直柔”系统通过直流母线直接连接光伏板、储能电池与直流变频空调,减少交直流转换环节,使能源利用效率提升15%以上。该技术的核心价值在于构建建筑级微能源网络。

3.3 区域能源系统规模化应用

城市级区域能源系统通过整合工业余热、地热能与可再生能源,实现冷热能源的大规模集约化供应。相较于单体建筑分散式供能,区域系统可利用不同用户的负荷时空差异进行错峰调配。例如:商业综合体日间冷负荷高峰与住宅区夜间供暖需求形成互补,系统通过蓄冷罐与管网优化实现能源跨时空转移,整体能效提升20%~30%。广州大学城区域供冷项目的成功经验表明,此类系统的规模化需突破两大技术瓶颈:一是低损耗输配技术,采用大温差供水与高效保温管道降低输送能耗;二是智能调度平台,通过AI算法预测区域负荷变化并优化机组启停组合。未来,随着城市更新与新区建设加速,区域能源系统将成为降低市政基础设施碳排放的关键抓手。

3.4 低碳材料与循环设计普及

暖通空调的全生命周期减碳需求将驱动材料科学与循环经济模式的创新。可拆卸式管道连接技术采用

卡箍替代传统焊接,使管道组件可在建筑改造中快速拆解并重复利用,减少90%以上的施工废料。生物基保温材料(如菌丝体泡沫、秸秆纤维板)凭借可再生特性与低隐含碳优势,逐步替代石油基聚氨酯材料,其导热系数可达 $0.022\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,性能媲美传统材料。循环设计理念还体现在设备模块化升级中。例如:采用标准化接口的空调主机允许在技术迭代时仅更换压缩机或控制模块,而非整机报废。此类设计延长设备使用寿命,同时降低原材料开采与制造环节的碳足迹。

3.5 健康导向的空气品质控制

在用户对室内空气安全的关注从“温湿度舒适”转向“微生物与污染物防控”的背景下,紫外线-C(UV-C)光催化净化模块可通过破坏病毒DNA/RNA结构实现99.9%的病原体灭活,且无需更换滤网,成为医院、学校的优选技术。PM_{2.5}与CO₂浓度监测系统则从“单点采样”升级为“网格化传感”,结合CFD模拟优化气流组织,确保污染物快速排出。未来,空气品质控制将进一步与人体生理指标联动。例如:智能穿戴设备实时监测用户心率变异性(HRV)与皮肤电信号,通过AI算法推算个体热舒适偏好,并动态调整送风参数。此类人因工程技术的引入,标志着暖通系统从“环境调节”向“健康赋能”的范式转变。

4 结束语

暖通空调技术的创新已从单一设备能效提升转向系统级智能化、低碳化重构。未来,机电安装工程需以“数字赋能”与“双碳战略”为核心导向,通过BIM+IoT技术融合、可再生能源系统集成及标准化施工体系构建,实现暖通空调系统在能效、经济性与可持续性上的协同突破。建议行业主体加大研发投入,完善技术标准体系,并探索基于能源合同的商业模式创新,以加速新技术产业化落地。

参考文献:

- [1] 陈志坚.浅谈机电安装工程暖通空调新技术及发展趋势[J].中国建筑金属结构,2020(12):110-111.
- [2] 张原.机电安装工程暖通空调新技术及发展趋势探索[J].建材与装饰,2020(34):228-229.
- [3] 张旭明.关于机电安装工程中暖通空调的安装探讨[J].大众标准化,2020(16):184-185.
- [4] 刘志轩.探究机电安装工程暖通空调新技术及发展趋势[J].绿色环保建材,2020(02):236.
- [5] 朱航宇.机电安装工程暖通空调新技术及其发展研究[J].住宅与房地产,2021(09):93-94.

基于精益建造理论的建筑工程管理模式探究

董小虎

(湖北文旅建投工程有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘 要 精益建造理论是建筑领域中一种比较先进的理论思想, 对于建筑行业的发展至关重要。在建筑工程管理中, 引入精益建造理论有利于提高建筑质量、降低项目成本、提高企业竞争力、促进行业可持续发展。基于此, 要以精益建造理论为基础, 对建筑工程管理模式进行优化。通过制定科学的精益建造计划, 识别浪费和改进机会, 准确绘制价值流程图, 建立标准化的作业流程, 持续改进和优化, 积极应用先进技术, 使建筑工程管理效率及效益得到全面提升。

关键词 精益建造理论; 建筑工程管理; 企业竞争力; 价值流图

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.023

0 引言

随着我国建筑行业不断发展, 传统建筑工程管理模式已难以满足建筑市场的发展需求。为此, 将精益建造理论引入建筑工程管理领域中, 可以实现建筑质量的提升和成本的降低, 帮助企业提升竞争力。在精益建造理论中, 注重以客户为中心, 追求流程优化及持续改进, 进而达到资源利用最大化和浪费最小化的目标。在这一理论的支持下, 应积极推动建筑工程管理模式改革, 为建筑工程管理水平的强化奠定良好的基础。

1 精益建造理论的概述

1.1 概念

精益建造理论是将制造业中的“精益思想”在建筑业进行深度改造与创新应用的一种管理模式。其核心在于通过系统化、流程化的方法, 深入剖析并消除建筑施工过程中的各种浪费和不确定性因素, 如过度生产、等待时间、不必要的运输、过度加工、库存以及缺陷等, 从而实现资源的最优化配置和利用。该理论强调以客户的需求为导向, 通过持续改进和优化施工流程, 最大限度地满足客户对工程质量、进度、成本等方面的要求^[1]。同时, 精益建造还注重提升建筑企业的运营效率和市场竞争力, 减少浪费, 降低成本, 提高质量, 实现建筑企业利润的最大化。这一理论的应用, 对于推动建筑业的转型升级和可持续发展具有重要的意义。

1.2 特点

精益建造理论的特点主要体现在以下几个方面。首先, 该理论始终以客户为中心, 将满足客户需求作

为建筑设计和施工的首要目标。这意味着在项目的整个生命周期中, 都需要密切关注客户的需求和反馈, 确保最终交付的建筑产品能够完全符合客户的期望。其次, 精益建造强调持续改进和流程优化, 鼓励建筑企业在施工过程中不断寻找并消除浪费, 通过优化施工流程、提高资源利用效率等措施, 达到建筑质量和效率的双重提升。此外, 该理论还注重团队协作和跨部门沟通, 只有打破部门壁垒, 建立信息共享和协同作业, 才能更有效地应对施工过程中的各种挑战和问题。最后, 精益建造追求卓越的建筑质量和客户满意度, 致力于提供高质量的建筑产品和优质的服务, 赢得客户的信任和忠诚。

2 精益建造理论在建筑工程管理中的意义

2.1 提高建筑质量

精益建造理论在建筑工程管理中的应用, 为提高建筑质量提供了全新的视角和方法。该理论的核心在于消除施工过程中的浪费和错误, 显著降低返工率, 这是提高建筑质量的关键所在。在精益建造模式下, 建筑企业需要对施工流程实施精细化管理和严格控制, 确保每一步都能达到既定的质量标准。通过消除不必要的差错问题, 建筑企业能够减少因质量而导致的成本增加和时间延误, 从而提高整体施工效率。精益建造还强调对资源的有效利用和流程的优化。运用流程再造和持续改进策略, 使建筑企业进一步提高施工效率, 缩短工期, 同时保证建筑质量的稳步提升^[2]。这种以质量为核心的管理模式, 不仅有助于提升建筑企业的市场效益, 还能够为客户提供更加优质的建筑产品和服务。

2.2 降低项目成本

精益建造理论对于降低建筑项目成本具有显著的经济效益。该理论注重合理安排施工进度和资源利用,以达到资源的最优化配置,进而降低项目成本。在精益建造模式下,建筑企业需对施工进度进行精细化管理,确保施工计划与实际情况相符,避免因进度延误而导致成本增加。同时优化资源配置,充分利用现有资源,减少不必要的浪费,进一步降低项目成本。精益建造注重精确计算材料需求量和采购计划,避免材料过剩或短缺的情况,减少材料浪费和库存成本。这种精细化管理的方式有助于降低项目成本,提高建筑企业的运营效率。借助精益建造理论能够合理安排施工进度和资源利用,减少浪费和成本,为建筑企业带来显著的经济效益,促进企业盈利能力的提升。

2.3 提高企业竞争力

精益建造理论不但聚焦建筑质量与成本的优化,更在提升企业整体竞争力上展现出了独特的价值。在实施精益建造的情况下,建筑企业能够显著提升建筑质量和施工效率,进而为企业赢得市场,提升品牌形象。在质量方面,精益建造可消除施工中的不良现象,保证每一项工程都达到高标准,增强客户对企业的信任度和满意度。高效的施工流程意味着更快的交付速度和更强的应变能力,使企业在面对市场变化时能够快速响应,抓住机遇。在品牌形象与市场竞争力方面,精益建造带来的高质量、高效率成果,将成为企业区别于竞争对手的显著标志。这种以客户为中心、追求持续改进的企业文化,能够吸引更多客户,并在行业内树立良好口碑,进一步提升企业的市场地位和影响力,进而促进企业竞争力的增强。

2.4 促进行业可持续发展

精益建造理论着眼于当前建筑项目的经济性和效率,同时更将目光投向了行业的长远发展和环境保护。精益建造推动绿色建筑的发展,为行业的可持续发展注入新的活力。在绿色建筑方面,精益建造强调在设计、施工、运营等各个环节中融入环保理念,采用节能、节水、节材等技术手段,减少对自然资源的消耗和环境的污染。这样有助于提升建筑项目的环境友好性,为企业带来额外的经济效益和社会效益^[3]。同时,精益建造注重提高能源利用效率,优化建筑设计和施工流程,减少能源消耗和浪费。降低建筑项目的运营成本,减少对化石能源的依赖,为应对全球气候变化做出了积极贡献。精益建造理论除了为建筑行业带来经济效

益外,也在推动绿色建筑发展和环境保护方面发挥了重要作用,为行业的可持续发展奠定了坚实的基础。

3 基于精益建造理论的建筑工程管理模式

3.1 制定精益建造计划

制定精益建造计划,首先需要明确建筑项目的目标、范围和计划,以提供实施精益建造的具体指导。根据项目的具体需求,设定明确且可量化的目标,如降低成本、提高质量、缩短工期等。强调精益建造的核心价值,即通过优化流程和资源利用,实现效益最大化。详细描述项目的具体内容和边界,包括涉及的建筑区域、功能需求、材料选择等。确保项目范围与精益建造的理念相契合,避免不必要的浪费和冗余。编制项目进度表,明确各阶段的任务、时间节点和责任人。制定资源分配计划,确保人力、物力、财力等资源得到合理利用。引入精益管理工具和方法,如价值流图、5S 管理等,提高工作效率和减少浪费。建立监控与评估机制,设定关键绩效指标,用于监控项目进展和效果。定期进行项目评估,发现问题及时调整计划,确保精益建造目标的实现。

3.2 识别浪费改进机会

在精益建造理论中,识别浪费并寻求改进机会是提升项目效率和质量的关键步骤。为实现这一目标,建筑团队应采取现场观察与数据分析相结合的方法。团队成员应深入施工一线,观察施工过程中的各个环节,从中发现潜在的浪费源,如过度加工、不必要的运输、等待时间等。通过观察,团队成员能够直观了解施工现状,为后续改进措施提供有力依据。数据分析是对现场观察结果的深化和验证^[4],对施工过程中的数据进行收集、整理和分析,准确地找出浪费的类型和程度,从而制定出更具针对性的改进措施和计划。这些措施主要包括优化施工流程、提高资源利用效率、引入新技术等。在识别浪费的基础上,团队进一步制定具体的改进措施和计划,明确责任人和时间节点,确保改进措施得到有效实施。同时还应建立持续改进机制,不断寻求新的改进机会,推动项目向更高水平发展。

3.3 准确绘制价值流图

价值流图是精益建造中的一种重要的流程优化工具,能够帮助施工团队辨识和减少施工过程中的浪费,同时清晰地展示建筑项目各环节的相互关系和时间消耗,从而提高施工效率。具体绘制价值流图的方法为,先明确价值流图所涵盖的建筑项目范围,包括从设计

到施工、交付等各个环节。然后通过现场观察、访谈、文档审查等方式,收集关于项目流程、时间消耗、资源利用等方面的数据。根据收集到的数据,绘制出项目当前的流程状态图,涵盖各个环节的输入、输出、时间消耗以及潜在的浪费点。在绘制当前状态图的基础上,深入分析各个环节的相互关系和时间消耗,识别出潜在的浪费点,如过度加工、等待时间、不必要的运输等。针对识别出的浪费点,制定改进措施,绘制出优化后的未来状态图,展示改进后的流程、时间消耗以及资源利用效率。通过绘制价值流图,能够有针对性地制定改进措施,提高施工效率。

3.4 建立标准作业流程

为确保建筑项目的施工质量和效率,要建立标准作业流程 and 操作规范。首先,对建筑项目的各个环节进行细致分析,明确每个环节的作业内容、目标以及所需的资源和工具。基于作业内容,结合精益建造的理念,制定出一套标准作业流程。该流程应涵盖从准备到执行、检查、反馈的完整过程,使每个环节都有明确的操作规范。将标准作业流程以图文并茂的形式编写成操作手册,便于施工人员理解和记忆。手册中应包括关键步骤、注意事项、常见问题及解决方案等内容。组织施工人员参加标准作业流程的培训课程,通过理论讲解、实操演示等方式,使每位施工人员都能熟练掌握标准流程。同时,在施工过程中安排专人进行现场指导,及时纠正不规范的操作。其次,建立反馈机制,鼓励施工人员提出改进建议。定期对标准作业流程进行评估和优化,保证其与实际情况相符,以提高施工质量。

3.5 持续推进改进优化

为确保建筑项目的持续改进和优化,需要建立问题反馈机制和采用有效的改进方法建立问题反馈机制,设立问题反馈渠道,包括意见箱、在线平台等,鼓励施工人员、管理人员等各方积极反馈施工中遇到的问题。定期组织问题汇总和分析会议,对收集到的问题进行分类、评估,确定优先级,并制定改进措施。运用 PDCA 循环进行改进,根据问题反馈机制收集到的问题,制定具体的改进计划,明确目标、措施、责任人和时间节点^[5]。执行改进计划,并确保各项措施得到有效实施。对改进效果进行检查和评估,收集数据,分析是否达到预期目标。根据检查结果,对成功的经验进行总结和推广,对失败的教训进行分析和反思,为下一轮 PDCA 循环提供参考。还可实施单点改善和 5S

管理,针对施工中出现的具体问题,采用单点改善方法,进行小范围、快速、有效的改进。推行 5S 管理,提升施工现场的整洁度、秩序感和员工素养。

3.6 积极应用先进技术

在建筑项目中,应积极应用先进技术,实现全过程管理,提升效率和质量。将 BIM 技术与大数据、云计算、人工智能等技术结合应用,以 BIM 技术为核心,建立建筑项目的三维模型,实现设计、施工、运维等全生命周期的信息集成和共享。BIM 模型能够准确反映建筑项目的结构、设备、材料等信息,为数据分析和决策提供支持。利用大数据技术对 BIM 模型中的海量数据进行挖掘和分析,发现潜在的风险点和优化机会。借助云计算技术实现数据的云端存储和高效处理,保证数据的实时性和准确性。将人工智能技术应用于建筑项目的智能决策和优化。例如:利用机器学习算法对历史项目数据开展训练,建立预测模型,预测项目的成本、工期等关键指标。此外,还可以利用人工智能技术实现施工过程的自动化监控和预警,提高施工安全性和效率。

4 结束语

精益建造理论在建筑项目管理中的应用发挥了巨大的作用。推行基于精益建造理论的建筑工程管理模式,制定详细的计划,准确识别浪费并寻求改进,绘制价值流图并建立标准作业流程,可实现持续改进优化。积极运用先进技术,可使施工过程得到有效优化,提高资源利用率。该管理模式能有效提高建筑质量,降低成本,提高效益。

参考文献:

- [1] 黄振中. 基于精益建造理论的建筑工程项目管理研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020,14(03):55-58.
- [2] 唐培虎, 兰云皖. 基于精益建造管理模式下的绿色与智慧建造技术在冬奥场馆中的应用与探究[J]. 绿色建造与智能建筑, 2022,13(02):33-35.
- [3] 张爱环, 陈赞豪. 基于精益建造理论的工程项目设计优化探讨[J]. 中国建筑金属结构, 2021,12(01):76-77.
- [4] 张建栋. 基于精益建造理论的工程项目工艺优化及措施优化探讨[J]. 智能建筑与工程机械, 2022,04(02):71-73.
- [5] 黄超杰. 基于精益建造理念的建筑施工项目管理优化措施[J]. 住宅与房地产, 2023(04):133-135.

全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用

王翼飞

(大华天陆新(山东)项目管理有限公司, 山东 烟台 264000)

摘 要 全过程管理模式作为一种先进的工程项目管理方法,旨在从项目的规划、设计到施工直至竣工验收的每一个环节进行科学化、系统化的管理。该模式不仅能够优化资源配置,提高工程效率,还能有效减少项目实施过程中的风险,确保工程质量与安全。本文深入探讨全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用,分析其重要性、现状,并讨论其优势和具体应用措施。通过对招投标管理、合同管控、材料管理、安全管理及管理制度制定等关键环节的详细论述,揭示了全过程管理模式如何全面提升建筑工程项目的管理水平,以期对相关从业者提供有益参考。

关键词 全过程管理; 建筑工程项目; 资源配置; 工程管理; 合同管控

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.024

0 引言

随着社会经济的发展和技术的进步,建筑工程项目的规模和复杂性不断增加,对项目管理提出了更高的要求。传统的项目管理模式往往难以满足现代建筑项目对于高效、精准和灵活管理的需求。在此背景下,全过程管理模式应运而生,它强调在整个项目周期内对各个环节进行综合管理和控制,以实现资源的最优配置、质量的有效保障以及成本的合理控制。全过程管理模式不仅仅是一种新的管理理念,更是一套完整的管理体系,涵盖了从项目立项、设计、施工到竣工验收的所有阶段。

1 全过程管理在建筑工程项目管理中的重要性

全过程管理的重要性首先体现在其能极大地提升项目的整体效率。通过在项目各个阶段设定明确的目标和标准,确保每一环节都能有序衔接,避免因信息不对称或沟通不畅导致的延误。例如:在规划设计阶段,精确的需求分析和方案设计是成功的基础。而在后续的施工过程中,良好的前期准备使得现场作业更加顺畅,减少了返工和调整的时间成本。此外,全过程管理还促进了资源整合与优化。通过对人力、物力、财力等资源的统筹安排,实现了资源的最大化利用,降低了浪费现象。例如:在选择建筑材料时,基于全生命周期的成本考虑,选用性价比高的材料不仅能保证质量,还能节约预算。另外,全过程管理有助于风险控制。由于每个阶段都有详细的计划和预案,一旦出现意外情况,可以迅速采取措施应对,降低损失。如天气变化可能影响施工进度,提前做好防护措施则能减轻影响^[1]。

2 全过程管理在建筑工程项目管理中的现状分析

2.1 设计方案与实际情况相差甚远

设计方案与实际情况相差甚远,主要是因为设计阶段缺乏充分的现场调研和实地考察。设计团队通常依据初步的地质报告和地形图进行设计,但这些资料有时并不能完全反映施工场地的真实情况。例如:某些地区地下可能存在未被发现的障碍物或者地下水位异常,这会直接影响基础工程的设计和施工。另外,自然环境的变化也是一个不可忽视的因素。气候变化引起的极端天气事件频发,可能会对原有的设计方案提出挑战,如暴雨可能导致土方工程受阻,暴雪会影响混凝土浇筑的质量。此外,人为因素也不容小觑。在城市中心区域进行施工时,周边建筑物、道路状况以及地下管线布局都会对施工产生影响,而这些因素在初期设计阶段往往难以全面考虑到。为了缩小设计方案与实际情况之间的差距,必须强化设计前的现场勘查工作,结合最新的技术手段,如无人机航拍、三维激光扫描等,获取更为详尽的数据资料,同时建立动态调整机制,及时根据实际情况修改设计方案,确保工程顺利推进。

2.2 工程主体责任不明确

在建筑工程项目的实施过程中,工程主体责任不明确是一个长期困扰行业发展的难题。一方面,项目涉及多个利益相关方,包括业主、设计单位、施工单位、监理单位等,各自的角色和职责常常交织在一起,形成复杂的权责关系网。例如:在一个典型的建筑项目中,设计单位负责提供符合规范的设计图纸,但当实际施

工过程中遇到问题时,设计单位是否需要承担相应的调整责任;施工单位在执行过程中若发现设计缺陷,是否有权利暂停施工并要求重新设计;等等。这些问题如果没有清晰界定,很容易导致各方相互推诿责任。另一方面,现行法律法规虽有相关规定,但在具体操作层面存在解释空间,导致执行力度不足。尤其是在发生重大质量和安全事故时,追究责任往往变得异常艰难。为了改善这种情况,需要建立健全的合同体系和责任分配机制,明确规定各参与方的权利义务,同时加强监督和考核,确保各项规定得到严格执行。此外,还可以通过引入第三方评估机构,对项目进行全面的风险评估和绩效评价,以此来促进各参与方积极履行自己的职责。

3 全过程管理在建筑工程项目中应用的优势

3.1 优化资源配置

优化资源配置是全过程管理的核心目标之一,它贯穿于建筑工程项目的整个生命周期。在项目启动初期,需对所需资源进行全面评估,包括人力资源、物质资源和财务资源。首先,人力资源方面,应根据项目规模和复杂程度合理配置专业技术人员,确保每个岗位都有合适的人选。例如:大型桥梁建设项目可能需要结构工程师、岩土专家、施工管理人员等多方协作,通过精准匹配人员,可以最大限度地发挥每个人的专业特长。其次,物质资源的管理至关重要。这不仅涉及原材料的选择,还包括设备的租赁与购置。在施工过程中,通过精细化的库存管理和供应链优化,可以减少材料浪费,提高利用率。例如:使用智能仓储管理系统,实时跟踪库存水平,及时补充短缺材料,避免因缺货而导致的停工现象。最后,财务资源的合理分配同样不可忽视。制定详细的预算计划,严格控制各项开支,确保资金使用的透明度和有效性^[2]。

3.2 增强工程管理的科学性

增强工程管理的科学性是全过程管理模式的重要特征之一。随着信息技术的迅猛发展,建筑工程领域也开始广泛应用各类高科技手段来提升管理效率和决策准确性。其中,建筑信息模型(BIM)技术的应用尤为突出。BIM技术不仅可以创建建筑物的三维模型,还能集成时间维度,生成四维甚至五维模型,涵盖成本和可持续性等方面的考量。通过BIM技术,项目团队能够在虚拟环境中模拟施工流程,识别潜在的设计冲突和施工难点,提前制定解决方案,大大减少了实际施工中的变更和返工次数。此外,物联网(IoT)技术也为工程管理注入了新的活力。通过在施工现场部署

传感器网络,可以实时收集温度、湿度、振动等环境参数,以及机械设备的运行状态,为管理者提供即时反馈,便于他们及时调整施工计划,确保工程按期完成。大数据分析则是另一项关键技术,通过对海量项目数据的挖掘和分析,可以揭示隐藏在数据背后的规律,辅助决策制定。例如:利用历史数据预测未来市场需求,优化资源配置;或者通过分析事故案例,总结经验教训,预防类似事件的发生。

4 全过程管理在建筑工程项目中的应用

4.1 工程项目招投标管理

在建筑工程项目的初期阶段,招投标管理扮演着至关重要的角色。有效的招投标管理不仅能吸引优质供应商和承包商,还为后续工作的顺利开展奠定基础。明确招标文件的内容是关键步骤之一,确保其涵盖详细的技术规格、工期要求、质量标准以及合同条款等信息,使所有潜在投标人都能在同一基准上竞争。评审标准的制定应科学严谨,不仅要考虑价格因素,还需综合评估投标人的资质、业绩、技术水平和服务能力等多个方面。例如:在大型基础设施项目中,可以设置严格的资格预审程序,筛选出具备丰富经验和良好信誉的企业参与竞标。公开透明的评标过程同样是保证公平竞争的关键,通过建立独立的评标委员会并邀请行业内专家参与评审,确保评标结果客观公正。签订合同时,务必明确双方的权利和义务,特别是关于违约责任的规定,以便在未来可能出现争议时有据可依^[3]。

4.2 加强对工程合同的管控

全过程管理模式强调加强对工程合同的管控,这不仅是项目顺利推进的保障,也是双方合作的法律依据。合同起草阶段需要确保条款清晰明确,覆盖工程范围、质量标准、付款方式、工期安排、变更管理等方面内容。对于易产生分歧的条款如变更索赔、违约处罚等,应尽可能详细规定,避免日后纠纷。合同执行期间的监控不可或缺,建立定期检查机制,及时跟进合同履行情况,确保各项工作按计划进行。设立专门的合同管理部门或指定专人负责合同事务,并定期召开会议汇报进展情况解决问题。面对项目实施过程中不可避免的变化,完善的变更处理流程尤为重要,任何变更都应在可控范围内,并经过双方协商一致后方可实施。

4.3 施工材料的管理

施工材料的管理直接关系到建筑工程的质量与成本控制。在全过程管理模式下,材料管理被视为一个系统工程,从采购、运输、存储到使用,每一个环节

都需要精心策划和严格监管。根据项目需求制定详细的材料清单,明确规格、数量和质量要求,并选择信誉良好、价格合理的供应商。集中采购和批量订购可以获得更好的价格优惠,降低采购成本。运输过程中采用适当的包装和加固措施,并选择合适的运输工具和路线,防止材料在途中受损。例如:对于易碎品或贵重材料,使用专用车辆进行运输,并配备GPS定位系统实时监控货物位置。根据不同材料特性选择合适的存放环境,如水泥应存放在干燥通风的地方,钢筋需防锈蚀。建立完善的出入库登记制度,确保账物相符,避免材料丢失或浪费。施工过程中严格按照设计要求进行,严禁偷工减料。上述措施不仅能保证工程质量,还能有效控制成本,提升项目经济效益^[4]。

4.4 工程安全管理

工程安全管理在全过程管理中占据核心地位,直接影响到项目的安全性和从业人员的生命健康。建立健全的安全管理体系至关重要,包括安全规章制度、操作规程、应急预案等内容,覆盖从项目筹备到竣工验收的每一个环节。例如:制定详细的高空作业、电气安装等高危作业的操作规程,并定期组织培训,确保每位员工熟练掌握。现场安全检查和隐患排查是安全管理的重要组成部分,设立专职安全员每日巡查施工现场,及时发现并消除安全隐患。脚手架搭建不牢固、临边防护不到位等问题一旦发现应立即整改,杜绝事故发生。安全教育和培训同样重要,定期举办安全知识讲座、应急演练等活动,提高员工安全意识和应急处理能力。针对火灾、触电等常见事故,组织逃生演练,让员工熟悉紧急疏散路线。特殊气候条件下要提前做好防范措施,如遇台风、暴雨等恶劣天气,及时停止户外作业转移危险区域内的设备,确保人员的人身和财产安全。全方位的安全管理措施有效保障了建筑工程项目的顺利进行。

4.5 制定完善管理制度

制定完善的管理制度是全过程管理模式得以有效实施的重要保障。一套行之有效的管理制度应涵盖项目的各个阶段,明确各部门和人员的职责分工,确保各项工作有序开展。项目初期就制定详细的工作流程和标准操作程序(SOP),使每个参与者清楚了解自己的任务和工作要求。在质量管理方面,从原材料检验到成品检测的全套质量控制流程都要确保每一道工序符合既定标准。有效的沟通机制也是管理制度的一部分,通过定期召开项目例会、发布项目简报等方式保持信息畅通,及时解决工作中遇到的问题。每周一次

的项目协调会由项目经理主持,各部门负责人参加,汇报本周进展,讨论下周计划,协调解决跨部门问题。激励机制鼓励员工积极参与项目改进和创新,激发团队活力。对提出有价值改进建议的员工给予物质奖励或晋升机会^[5]。

4.6 竣工验收阶段管理

竣工验收阶段作为建筑工程项目的最后一个环节,验证项目是否达到预期目标至关重要。成立专门的验收小组,成员包括业主代表、设计单位、施工单位、监理单位等相关人员,确保验收工作的权威性和全面性。验收小组按照国家有关法规和标准对照设计图纸和合同条款,对建筑物的各项指标逐一检查。例如:对结构安全性、功能性设施的完备性、环保达标情况进行细致核查。资料整理和归档是竣工验收阶段的重要内容,所有相关文档资料如设计文件、施工记录、检验报告等要完整保存并按规定格式整理成册。这不仅有助于后期维护和管理,也为可能出现的纠纷提供证据支持。验收过程中发现的问题应及时记录并责令施工单位限期整改。只有所有问题得到妥善解决后才能出具正式的验收合格证书。

5 结束语

全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用,通过优化资源配置、增强工程管理的科学性,从根本上提升了项目的管理水平和实施效果。从招投标管理到合同管控,再到施工材料的管理、工程安全管理以及竣工验收阶段的管理,每个环节都体现了全过程管理模式的独特优势。通过科学规划和精细管理,全过程管理模式不仅提高了项目的成功率和市场竞争力,还为建筑工程项目的高质量完成提供了有力保障。全过程管理模式以其系统化、科学化的管理理念,成为现代建筑工程项目管理的重要方向。

参考文献:

- [1] 季军.全过程管理在建筑工程项目管理中的应用分析[J].大众标准化,2022(03):22-23,26.
- [2] 饶强.全过程管理在建筑工程项目管理中应用研究[J].陶瓷,2024(10):180-183.
- [3] 齐亚军.全过程造价控制在建筑工程项目管理中的作用探讨[J].工程技术研究,2020,05(01):141-142.
- [4] 任文明.全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用解析[J].时代金融,2020(17):173-174.
- [5] 凌贵强.全过程管理模式在建筑工程项目管理中的应用[J].居舍,2020(17):145-146.

基于可持续发展理念的水利工程管理模式创新分析

孙大旺, 陈江云, 张 状

(江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223100)

摘 要 以江苏省三河闸管理所研究对象, 围绕水资源高效利用和生态环境保护与管理效能提升三大目标, 开展实地调研与数据分析, 构建智慧化、生态化以及多元化融合的管理框架, 提出基于物联网与人工智能技术的智慧管控方案, 旨在增强系统的智能感知与自主调控能力。研究表明, 该创新模式可有效降低运维成本, 提高资源调度效率, 增强生态承载力。研究成果为区域水利治理转型提供理论依据和实践路径, 具有推广价值。

关键词 可持续发展理念; 水利工程管理; 智慧水利; 三河闸; 管理创新

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.025

0 引言

随着可持续发展理念逐步深入人心, 传统管理模式在资源利用效率、生态保护意识以及管理协同机制等方面逐渐暴露出局限性, 亟需系统性变革。三河闸作为江苏省典型的平原河网水利枢纽, 其管理成效直接影响区域水资源调控能力和生态系统稳定性, 具有代表性和研究价值。为推动水利工程管理理念与技术手段的更新, 有必要从实际运行出发, 探索融合生态优先、智能管控和多元协同的新型管理路径, 提升水利设施运行效率与环境协调能力。本文立足三河闸管理所现状, 借助实地调研和数据支持, 构建适应可持续发展要求的管理模式, 为推动区域水利系统绿色转型和高质量发展提供参考。

1 可持续发展理论基础与政策背景

1.1 可持续发展理论

可持续发展理论起源于对资源过度开发和生态环境退化的深刻反思, 其核心在于实现经济增长、环境保护与社会公平的动态平衡。在水利工程管理领域, 该理论强调水资源系统应具备长期运行的稳定性、环境适应性和社会服务能力, 要求管理模式不仅要关注工程设施的运行效率, 也要重视生态系统的完整性和人类活动的协调关系。理论框架下的水利工程管理需要建立在科学配置资源、合理安排开发、系统整合技术与政策的基础之上, 以提升整体系统的韧性和适应能力。具体到工程实践要求管理体系具备动态调节机制, 可以根据自然条件、水文变化和区域发展需求做出快速响应, 避免管理目标与生态规律产生冲突^[1]。

基于此, 可持续发展理论还推动了工程从以“控制与改造自然”为主导, 向“顺应与调节自然”转变, 强调多目标统筹与全过程协调, 这对提升水利工程的生态价值和社会贡献具有深远意义。

1.2 管理政策导向

国家在水利管理政策上的转型与可持续发展理念密切相关, 体现出“安全、绿色、高效”并重的发展趋势。自“十四五”规划提出构建国家水安全保障体系以来, 水利政策在制度设计上不断强化系统观、整体观与长远观, 强调优化空间布局与资源配置, 推动流域统一治理与跨区域协调。2023 年发布的《国家水网建设规划纲要》明确提出以构建现代化水网为核心任务, 聚焦水资源优化配置、水生态系统保护和数字化基础设施建设, 要求各级水利工程以高质量发展为目标重塑管理模式^[2]。江苏作为水资源调控与防洪减灾任务重的省份, 近年来出台多项政策支持区域水利现代化建设, 包括推动智慧水利平台搭建、生态调度机制创新和工程运维机制转型。政策导向呈现出重视数据支撑、技术融合与制度创新的复合化特征, 为工程管理改革提供了政策基础与制度保障。三河闸作为典型的省级调控枢纽, 处于政策引导和制度变革的关键节点, 具备实施管理模式创新的良好政策环境与制度支撑。

2 三河闸管理现状与问题

2.1 工程运行现状

三河闸位于江苏省淮安市, 是淮河流域重要的水利枢纽工程之一, 主要承担防洪、排涝、灌溉和航运等多重功能。该工程始建于 1950 年代, 经过多次扩建

和技术改造，目前已形成较为完善的水利设施体系。三河闸共有闸孔12个，每孔宽度为8米，总宽度达到96米，设计过水能力为每秒3 000立方米，可以有效调控区域水位，保障下游地区的防洪安全。闸门采用钢筋混凝土结构，配备电动启闭机，具备远程控制和自动化操作功能。闸区还设有船闸，满足中小型船舶的通航需求，促进区域水运发展。近年来，三河闸管理所不断加强设施维护和技术升级，保障工程运行的安全性和稳定性。例如：定期对闸门、启闭机、控制系统等关键部位进行检修和保养，及时更换老化部件，提升设备的可靠性。基于此，管理所还引入信息化管理技术，建立了水情监测、设备管理和应急响应等系统，提高了管理效率和应急处置能力。然而，随着气候变化和区域发展对水资源调控提出更高要求，三河闸在运行管理中仍面临一些挑战，需要进一步优化管理模式，提升工程的综合效益^[3]。

2.2 管理中存在的问题

尽管三河闸在工程设施和管理体系方面取得了一定成效，但在可持续发展背景下，其管理模式仍存在一些制约因素。首先，信息化水平有待提升。目前，三河闸的监测系统主要依赖人工巡查和定点采集，缺乏实时、动态的数据获取和分析能力，难以满足精细化管理的需求。其次，生态调度机制尚未建立。在水资源调配过程中，主要考虑防洪和供水需求，忽视了对生态系统的影响，导致下游河道生态环境受到一定程度的破坏。最后，管理体制较为封闭，缺乏多方参与和协同机制。目前三河闸的管理主要由管理所负责，缺乏与地方政府、社区以及科研机构等的有效沟通与合作，难以形成合力推进可持续管理的局面。资金投入不足限制了设施的更新和技术的引进。由于经费有限，部分设备老化严重，影响了工程的运行效率和安全性。人员培训和技术储备不足，制约了新技术的应用和管理水平的提升。综上所述，三河闸在管理模式上需要进行系统性改革，引入先进的技术手段和管理理念建立多元参与的协同机制，提升信息化水平和生态调度能力，推动水利工程管理向可持续方向发展^[4]。

3 管理模式创新路径

3.1 智慧化管理手段

为提升三河闸的管理效率和响应能力，建议引入智慧水利系统，构建集数据采集和分析以及决策于一体的智能化平台。具体措施包括安装高精度水位传感器和流量计，实现对水情的实时监测；部署视频监控

系统，覆盖关键部位，增强安全管理；利用无人机进行巡查，提高巡检效率和范围。在数据处理方面，建立数据中心，集中存储和分析各类信息，支持科学决策。例如：利用历史水文数据和气象预报，结合人工智能算法预测未来水情变化，提前制定调度方案，减少洪涝风险。基于此，开发移动端应用，方便管理人员随时获取信息和下达指令，提高应急响应速度。智慧化系统还应集成预警发布功能，在雨情和水情突变时自动联动各级管理终端，提升调控的准确性与时效性。数据平台建议采用边缘计算技术，以便在现场数据量大的情况下依然保持响应及时，同时保障数据安全。三河闸可依托现有网络架构升级5G通信模块，提升数据回传与指令下达的速度与稳定性。从长期来看，智慧化建设不但能优化资源调度逻辑，也将大幅度降低人力依赖，推动管理重心由“人盯人”向“人机协同”转变，从而实现系统安全性、经济性与敏捷性的多重提升^[5]。

3.2 生态优先理念融合

为实现生态与工程的协调发展，需在三河闸管理中融入生态优先理念，采取具体措施保护和改善水生态环境。一方面，实施生态流量调度，保障下游河道在枯水期仍有足够水量维持生态功能；另一方面，建设鱼道和生态护岸，促进水生生物的迁徙和栖息。此外，还要定期监测水质和生物多样性，评估生态状况，及时调整管理策略。例如：在调度过程中考虑鱼类的繁殖期，适当调整水位变化，避免对其生存造成不利影响。生态调度技术应与遥感监测、河流建模和无人船测绘技术相结合，动态掌握区域水体演变趋势，为生态调度提供精准依据。建议设置闸区生态功能区，并根据软质护岸、生物滩地等形式构建水陆过渡带，有效缓冲水体波动对生态系统的扰动。生态优化过程中可试点建立“水生态账本”，将水体生态指标与调度计划挂钩，纳入年度考核和绩效反馈体系^[6]。对于受控范围内的入河排污口，还需设置实时水质传感装置，自动采集氨氮、总磷等关键参数数据，从而在污染物超限时立即触发预警并反馈至管理平台，推动水质改善与生态调度同步落实。通过这一系列系统化策略，不仅能提升工程的生态弹性，也能保证水资源配置的公平性与科学性。

3.3 多元协同机制建设

为提升三河闸的管理效能，需建立多元协同机制，整合各方资源和力量形成合力，具体措施包括：成立由水利、环保、农业等部门组成的联合管理委员会协

调各项工作，与科研机构合作，开展技术研究和培训，提高管理人员的专业水平。鼓励公众参与建立信息公开平台，收集社会反馈，提高管理的透明度和公众满意度。例如：在制定调度方案时，邀请相关专家和利益相关方参与讨论，保障决策的科学性和公平性。多元协同不仅指管理部门间的互动，还应扩展至行政区域之间的流域统筹与信息互通。设立三河闸流域治理联动机制，明确上下游城市在水量调配、生态保护及应急响应中的职责边界，形成跨行政区域的共治共管格局。在人才机制上，可以引入“水利工程+环境工程+信息技术”复合型岗位设置，以项目制方式鼓励青年专业人才参与实际运维。在公众参与层面，可根据建设“水利公众体验中心”或组织“闸区生态观测志愿者”计划，增强社区居民对水利设施运行的认同感与责任感^[7]。在制度设计方面，推动管理透明化与开放化，建立常态化公示机制，定期发布运行报告与调度纪要，拓展社会监督与舆情反馈渠道，为治理模式创新构建信任基础^[8]。

3.4 成本与效益优化

为实现三河闸管理的经济效益最大化，需采用成本效益分析方法，评估各项管理措施的经济性，优化资源配置（见表 1）。具体措施包括：引入节能设备，降低能源消耗；优化人力资源配置，提高工作效率；采用信息化技术，减少纸质材料和人工操作，降低运营成本。例如：安装太阳能照明系统，减少电力消耗；实施远程监控，减少现场巡查次数，节省人力成本。通过以上措施降低运营成本，提高经济效益，实现可持续的管理模式。

表 1 三河闸智慧化管理前后成本与效益对比

项目	实施前（万元/年）	实施后（万元/年）	变化（万元/年）
能源消耗成本	120	90	-30
人力资源成本	150	100	-50
维护与维修成本	80	60	-20
总成本	350	250	-100
系统运行效率提升收益	—	50	50
总效益	—	100	100

（数据来源：三河闸管理所年度报告，结合智慧化管理实施情况统计。）

由表 1 可知，在实施智慧化管理系统后，三河闸在各项运营成本中均实现了明显的下降。其中能源消

耗成本从每年 120 万元降至 90 万元，下降 30 万元，主要得益于照明系统改用太阳能、泵站运行优化调度减少无效运行时间等节能措施。人力资源成本由 150 万元降至 100 万元，下降 50 万元，说明远程监控和无人巡查等手段有效减少了对现场操作人员的依赖。维护与维修成本减少 20 万元，这与设备状态在线监测系统及时预警设备故障而避免大修密切相关。综合来看，总运营成本从 350 万元降至 250 万元，降低 28.6%，节支效应显著。在效益方面，智能调度系统提高了水资源利用效率和应急响应能力，带来年均直接经济收益 50 万元。总效益与成本相抵后实现 100 万元净增，表明智慧化措施不仅能提升管理水平，也显著改善了工程的经济效益，具有推广价值^[9]。

4 结束语

构建符合可持续发展理念的水利工程管理模式，是提升工程运行效能与生态协调水平的关键路径。三河闸在智慧化、生态化与协同化方面的实践探索，展示了传统水利工程管理向现代治理体系转型的可行方向。结合具体策略实施与实际数据支撑，可为区域水利系统改革提供有力参考，推动水利事业高质量发展与生态文明建设协同前行。未来应进一步强化数据智能分析与系统集成能力，提升调控精度与应急响应效率，实现管理效益的持续优化升级。

参考文献：

- [1] 葛燕.农村小型水利工程建设与管理模式创新研究[J]. 中国品牌与防伪,2024(07):76-77.
- [2] 钟阅.澧县河湖水网连通生态水利工程:创新水利管理的 PPP 模式实践[J]. 湖南水利水电,2024(02):49-51.
- [3] 王鹏,杨挺博,范书婷,等.行唐县小型水库管理模式创新及成效[J]. 河北水利,2022(06):32-33.
- [4] 李慧敏.城镇水系综合治理合同环境服务模式创新与管控[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
- [5] 陶春.西淝河泵站管理模式探索与创新[J]. 中国水利,2021(16):46-47.
- [6] 赵勇.新发展理念下水利投融资模式创新对工程建设的影响分析[J]. 水利水电快报,2024,45(S2):71-73,86.
- [7] 陈冯.精细化管理在海外精装工程项目施工中的探讨[J]. 建设机械技术与管理,2024,37(04):110-112.
- [8] 李元海,秦德吉.精细化管理在水利工程项目施工管理中的应用[C]//中国水利学会.2023 中国水利学术大会论文集(第二分册). 济南市水利工程服务中心,2023.
- [9] 刘宇.探讨可持续发展观为指导的水利水电管理方法分析[J]. 科技风,2022(05):81-83.

国土空间规划中的土地资源 配置与测绘技术应用

张大昊, 纪祥菊

(山东数维规划设计有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 国土空间规划是优化国土开发保护格局、实现可持续发展的重要路径, 而土地资源配置的合理性和测绘技术的准确性影响着规划效能。基于城镇化进程持续推进背景下, 为更好地解决土地资源配置问题, 测绘技术发挥了重要作用。测绘技术的应用有利于对土地面积、地貌、位置等数据测定, 确保土地资源配置科学、合理。测绘技术和规划需求的融合是重要课题, 本文对国土空间规划中土地资源配置与测绘技术的应用展开分析, 旨在为促进国土空间规划中土地资源配置与测绘技术应用提供有益参考。

关键词 国土空间规划; 土地资源配置; 测绘技术

中图分类号: TU98; P21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.026

0 引言

随着城镇化进程的加快, 土地资源供需问题逐渐突出。国土空间规划通过多规合一统筹生态保护、农业生产、城镇建设三大空间, 其关键在于土地资源的合理分配。传统规划手段准确性不足、效率不高, 无法满足动态变化需求。随着科学技术水平的进步, 各种新型测绘技术的出现解决了传统规划问题, 具有高准确性、时效性高的特点, 为土地资源分配提供了可靠的技术支持。

1 国土空间规划概述

国土空间规划是土地资源合理分配和保护的重要路径, 其核心目的是空间数据的准确性、方案设计的合理性与可执行性。为保证国土空间中土地资源的合理配置, 测绘技术起到了至关重要的作用, 通过准确的数据搜集为土地环境评估、资源分配规划提供数据支持^[1]。在传统规划体制下, 城乡规划、土地利用规划、生态保护规划等, 多规并行, 各自为政, 存在冲突。随着国土空间规划改革的深入, 明确了五级三类规划体系, 即国家级、省级、市级、县级、乡镇级, 以及总体规划、专项规划、详细规划。遥感影像技术可以准确地判断土地使用类型, 动态跟踪土地情况, 及时为方案规划提供资料。地理信息系统的广泛应用, 为方案规划提供了可视化支撑平台, 确保方案规划合理、方案实施可行。尤其是生态保护红线的规划、空间的规划等流程。测绘技术中 3D 建模和数据分析工具让方案规划和执行更加高效、准确, 为方案的实施工作指明了方向。

2 国土空间规划中的土地资源配置

近年来, 测绘技术的突破性进展, 如高分辨率遥感 (RS)、地理信息系统 (GIS)、全球导航卫星系统 (GNSS, 包括 GPS、北斗等) 以及激光雷达 (LiDAR) 等, 为国土空间规划中的土地资源配置提供了高精度、实时、动态的数据支持。这些技术的应用极大地提升了土地资源调查、空间分析和规划决策的科学性。

2.1 土地资源勘察的应用

土地资源勘察离不开遥感技术的应用, 为更好地掌握土地资源配置情况, 推荐选择分辨率 0.5 m 的高分二号卫星影像, 便于了解土地使用类型的边界和细节^[2]。同时, 7-8 月农作物生长茂盛, 植被广谱特征显著, 有利于更好地判断土地使用类型。为提高影像定位准确性, 还需通过 GPS 测量土地控制点; 选择控制点时要综合考量地貌、土地物质等因素, 保证各区域定位准确。GPS 接收机测量控制点时应多次测量, 避免偏差, 取平均参数为测量结果, 如测量某个控制点时至少测量 10 次, 保证测量结果偏差在 5 cm 内。最后, GIS 影像解译、数据处理。ENVI 软件对卫星影像预处理, 消除噪声、几何变形, 再结合土地类型广谱特征创建解译标志。以监督分类的形式将影像分为林地、草地、水域等各种类型。以 GIS 技术中的空间分析功能对解译结构处理, 如合并同类图斑, 确保数据精准。将解译结果和土地使用情况数据库进行比较, 更新数据资料。

2.2 土地动态监测的应用

通过遥感技术定期对土地使用变化进行影像资料搜集, 比较不同时期的影像数据, 及时发现土地使用

变化,常用图像差值法、分类后比较法等。前者主要是将各阶段影像对应像元的灰度值相减,获得差值影像,再通过阈值提取差值影像中灰度值变化明显的范围,该区域则是土地利用变化区域。后者主要是先进行各阶段影像分类,获得土地分类图后对比两张分类图,分析各土地利用类型间的转变情况^[3]。此外,借助 GPS 技术监测重点范围,如农田、城镇设置 GPS 监测点,实时监测土地变化情况。如果监测坐标变化即表示该范围土地发生变化,立即落实核查。以某地区某范围土地利用监测为例,该范围建设用地面积约 150 hm²,多为城镇、工业用地。5 年后,土地面积扩大至 200 hm²,新增长的面积用于城镇建设、工业园区建设,耕地面积减少。究其原因,耕地被占用,用于其他领域建设。通过分析土地利用变化数据发现异常情况。在监测时,发现乡镇违规占地建设养殖场,通过卫星影像确定违规占地面积、位置,有效保护了耕地资源。

2.3 土地规划和使用

在国土空间规划时,为确保土地资源配置合理,可利用 GIS 空间分析功能,如坡度分析时通过处理 DEM 数据生成坡度图,将该区域地形的坡度分布情况清晰展现。为避免水土流失,通常对于坡度大于 25 度的区域要求限制农业开发、建设用地,如坡度大的山区经过坡度分析将其设置为生态保护区。此外,适宜性分析综合考量气候、土地等因素,确定土地使用用途,如水源充分、土壤肥沃的地形设置为耕地;生态环境差、地形复杂的区域设置为林地,有计划地开展生态保护工作。测绘数据还有利于土地使用布局完善,提高使用率。

3 国土空间规划常用测绘技术

测绘技术主要是通过准确的测量和空间数据搜集获得地理空间信息,基本原理包含数据搜集、数据分析,在各领域均有广泛应用,如地籍测量、图形制作等领域。目前,全球导航卫星系统(GNSS)、无人机测绘技术、高分辨遥感技术迅速发展,测绘技术逐渐走向智能化水平,技术的进步有效提高了测绘效能,短时间内即可完成海量数据搜集;并提升了空间信息精准度,为测绘工作提供了新的技术动能。传统测绘技术局限于基础的测量内容,随着土地环境的改变,其局限问题越来越突出。所以,现代测绘技术逐渐向智能化发展,以满足土地资源配置。

3.1 全球定位系统(GPS)

GPS 通过卫星无线电信号找到接收器位置,包含空间、地面控制、用户设备几部分。空间部分分为 31 颗卫星,分布于 6 个轨道面。卫星搭载高精度原子钟与记录位置速度等数据的星历。地面控制部门是由主控

站、信息注入站、监控站构成。主控站的作用是管理和调度、计算卫星参数,将搜集的参数输送至注入站。监控站作用是探测卫星、搜集气象资料,随后传送至主控站。信息注入站的作用是把参数信息输送到卫星处。人们在操作 GPS 系统时主要通过接收机接收卫星,再利用时间差计算位置。该环节需要使用 3 颗以上卫星计算经纬度,一般情况下接收 4 颗甚至更多的信号,最后三角测量形式确定自身位置。在土地测量过程中,GPS 表现出高准确性、高效率的特点,且搜集的数据资料非常可靠,为土地配置提供依据。此外,GPS 不容易受恶劣环境影响,即使是复杂的地形也依然能够做到高效使用。

3.2 地理信息系统(GIS)

GIS 涵盖多学科理论,在储存、分析、地理空间展示方面均有广泛应用,主要作用是处理地理数据。数据搜集时借助 GPS 测量、遥感影像解译等形式获取地理位置、形状、属性等资料。数据储存需要用到数据库管理系统,如 Spatial、PostgreSQL/PostGIS 等^[4]。通常搜集的地理数据以矢量方式储存;地形数据以栅格方式储存。空间分析是 GIS 系统的重要组成部分,涵盖缓冲区、空间关系等内容分析,为土地资源规划、生态保护提供支持。地理数据展示分为图形形式、地图形式。

3.3 遥感技术

遥感技术多用于远距离、高层测绘,借助多种探测设备以扫描、拍摄形式判断地面情况。其原理是物体对电磁波的反射、吸收特性,分为遥感平台、信息传输、传感器、图像处理等几部分。其中,遥感平台搭载传感器探测地面物质并转为初始影像,接收设备接收数据信息,图像处理获取的数据资料。遥感技术对较大土地面积测绘优势显著,而且不会受到外部因素影响,还支持较大面积土地信息的搜集,确保土地使用及时性。另外,该技术还支持监测土地生态环境,有利于土地修复保护。

3.4 数字化成图技术

数字化成图技术通过 GPS 接收机、电子全站仪搜集地形数据,再借助计算机系统处理编辑生成数字化地图。数字化成图技术分为数据搜集、数据传输、地图编辑等。数据搜集主要通过电子全站仪监测,监测区域使用 GPS 接收机^[5]。数据传输与处理时,向计算机系统输送搜集的数据,再用专业软件进行处理,创建数字地面模型。地图编辑与输出时利用专业软件编辑地图,如分层管理、改正精度等,最后是格式输出。较传统技术而言,数字化成图技术不仅准确高效且管理简便,成图时间短、人为偏差小。

4 国土空间规划中测绘技术的具体应用

4.1 空间数据搜集和分析

国土空间规划中的空间数据是重要组成部分。测绘技术借助遥感卫星的远程探测、无人机航测、激光扫描完成地理空间信息的搜集,其中包含地形、土地特征、土地使用、土地环境等,为方案规划提供数据支持。数据分析时借助GIS进行信息精细处理、叠加、分析,有利于判断土地间的空间关系,掌握土地资源现状,为土地开发、保护和修复提供保障。

4.2 土地资源管理和监测

在土地资源管理中,测绘技术支持实时动态监测和分析,确保土地资源合理利用和生态保护。在动态监测层面,高分辨遥感影像和地理信息系统的融合有利于跟踪土地应用情况,对违规行为及时纠正。在管理环节,创建数字化的土地资源档案,将复杂的土地信息以数据库方式展现出来,确保规划方案的可行性。另外,无人机测绘技术在土地治理、项目工程方面占据较大优势,可准确掌握项目情况,避免资源不合理消耗^[6]。测绘技术有效提升了土地管理质量,以可视化的方式保证监测透明,为土地资源利用、生态保护工作的顺利开展奠定基础。

4.3 生态保护红线和空间开发管理

在界定生态保护红线时,测绘技术以高准确的数据搜集能力和分析工具进行保护区规划和管理。通过空间分析确定高生态敏感性区域,以此为依据界定保护区,维持生态健康。在管理过程中,测绘技术借助三维模型和遥感数据的叠加为土地规划提供支持,优化开发边界,科学划分功能区域,维持生态保护和经济进步稳定状态。在实际应用中,测绘技术对现有红线实时监测,及时发现风险区域并预先管控,最终实现规划目标和后期维护。

5 国土空间规划中的土地资源配置与测绘技术应用优化方案

5.1 数据整合和精准提升方案

在国土空间规划中,测绘技术的重要性主要体现于数据信息的精准、全面测绘中。但目前,数据来源复杂,格式多样,测量准确性差异较大,应用范围不同,这就导致数据割裂和缺乏统一的标准^[7]。对此,创建统一的空间数据标准机制、整合多元化测绘数据系统得到了重视。通过创建测绘数据平台实现地理信息、遥感影像的融合,提高数据利用效能。此外,数据搜集源头需引进更先进的技术,如遥感卫星、激光雷达技术,从而保证空间数据的高分辨率和精准性,保证

方案规划的顺利开展。自动化处理技术还应当融入数据清洗、深度分析、建模等重要流程,尽可能避免人为偏差。该优化方案的应用既有利于提高测绘准确性,还为国土空间规划中土地资源配置提供技术支持。

5.2 动态监测和调整机制

国土空间规划是一项长期工作,要不断地提升测绘技术水平,才能满足规划需求。对此,创建动态监测系统,通过动态数据搜集系统对土地使用情况、生态环境、使用活动展开实时监测。例如:引入物联网、遥感卫星,搭建全范围的监测网络,确保对规划范围的实时了解。此外,制定调整机制,主要以监测数据为核心,通过预测分析模型判断方案执行时潜藏的奉献问题,制定防范计划,保证规划工作的有效开展。以上两项优化方案中,数据可追溯性和透明化也尤为关键,建立可视化监测平台,用户可登录平台监测,既实现了透明,还提高了规划公信力。

6 结束语

测绘技术的快速发展为国土空间规划中的土地资源配置提供了强大的技术支撑。国土空间规划作为国家空间治理体系的重要工具,其科学实施对推动优质发展有重要意义。测绘技术通过提升数据精度、分析深度与响应速度,成为国土空间规划数字化转型的关键驱动力。未来,需进一步探索5G、数字孪生等新技术在资源配置中的应用,实现“智慧规划”目标,推动国土空间规划迈向智慧化、精细化的新征程。

参考文献:

- [1] 赵超仁.土地资源管理中测绘技术的应用[J].低碳世界,2024(05):34-36.
- [2] 刘正波.现代测绘技术在土地资源管理中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(11):196-199.
- [3] 王向前.无人机测绘技术在农业土地资源管理中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(11):225-228.
- [4] 吕俊涛.数字化测绘技术在土地资源管理中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(05):188-191.
- [5] 张鸾.数字化测绘技术在土地资源管理中的应用实践探索[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2024(11):172-175.
- [6] 郭建枫.无人机测绘技术在农业土地资源管理中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(08):152-155.
- [7] 刘乐瑶.测绘技术在土地资源管理中的应用分析[J].农业灾害研究,2024(06):73-75.

绿色建筑外墙保温材料的热工性能及其应用效果研究

常林学

(武威市凉州区物业管理服务中心, 甘肃 武威 733000)

摘 要 本研究针对绿色建筑外墙保温材料的热工性能及其应用效果, 系统梳理了各类绿色建筑外墙保温材料的热工性能指标、工作原理, 详细探讨了其在不同气候区域建筑中的应用成效, 涵盖建筑能耗降低、室内热环境改善及建筑耐久性提升等方面, 深入挖掘绿色建筑外墙保温材料在实际应用中面临的难题与挑战, 并针对性地提出了优化策略与前瞻性发展建议, 旨在为提升绿色建筑的整体性能与品质提供借鉴, 进而推动建筑行业的可持续发展。

关键词 绿色建筑; 外墙保温材料; 热工性能; 应用效果; 建筑工程

中图分类号: TU5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.027

0 引言

在全球积极践行可持续发展理念, 以及能源危机和环境问题日益凸显的大背景下, 绿色建筑作为实现建筑行业可持续发展的关键路径, 受到了人们的广泛关注。外墙保温系统作为绿色建筑的核心构成部分, 其性能优劣直接关系到建筑的能耗水平、室内热舒适性以及环境效益。绿色建筑外墙保温材料通过阻隔热量传递, 有效减少建筑物与外界环境间的热交换, 进而降低建筑能耗, 提升能源利用效率。同时, 良好的外墙保温还有助于营造更为舒适的室内热环境, 为居住者提供优质的生活空间。深入探究绿色建筑外墙保温材料的热工性能及其应用效果, 对于优化绿色建筑设计、提升建筑质量、推动建筑行业绿色转型具有极为重要的现实意义, 已成为建筑工程领域的研究焦点之一。

1 绿色建筑外墙保温材料的热工性能基础

绿色建筑外墙保温材料的热工性能主要由导热系数、热阻、蓄热系数等关键指标衡量。导热系数指在稳定传热状态下, 1 m 厚的材料, 当两侧表面温差为 1 °C 时, 在 1 小时内, 经由 1 m² 面积传递的热量, 单位为瓦 / 米 · 度 (W/(m · K))。该系数越低, 表明材料的保温隔热性能越出色。例如: 常规聚苯板的导热系数通常处于 0.03 ~ 0.041 W/(m · K) 区间, 岩棉板的导热系数则在 0.03 ~ 0.045 W/(m · K) 左右。热阻反映材料层对热流通过的抵抗能力, 与导热系数成反比, 热阻越大, 材料的保温性能越强。蓄热系数体现材料在周期性热作用下吸收和储存热量的能力, 对室内热

环境稳定性影响较大。材料的蓄热系数越大, 在温度波动时, 其表面温度波动越小, 越能有效维持室内温度稳定。

不同类型的绿色建筑外墙保温材料, 其热工性能实现原理各具特色。有机保温材料, 如聚苯板、聚氨酯泡沫等, 主要依靠材料内部封闭的微小气孔阻挡热量传递。这些微小气孔内的空气导热系数极低, 形成了良好的隔热层。无机保温材料, 如岩棉、玻璃棉等, 其纤维结构相互交织, 构建出大量孔隙, 热量在孔隙中不断反射、散射, 从而降低了热量传递速度。一些新型保温材料, 如气凝胶保温材料, 具备极低的导热系数, 其独特的纳米多孔结构极大地抑制了气体分子的热传导和固体骨架的热传导, 展现出卓越的保温性能。

2 绿色建筑外墙保温材料在不同气候区的应用效果

寒冷地区冬季漫长且温度低, 建筑供暖能耗巨大。绿色建筑外墙保温材料在此类地区应用效果显著。高效保温材料能够大幅削减建筑物的热量散失, 降低供暖能耗。采用保温性能优良的岩棉外墙保温系统, 可使建筑物的传热系数契合当地节能标准, 相较于未采取保温措施的建筑, 供暖能耗可降低 30% ~ 50%。同时, 良好的外墙保温能有效防止墙体表面结露, 减少霉菌滋生, 提升墙体耐久性。在室内热环境方面, 稳定的室内温度能提升居住者的舒适度, 减少因温度波动带来的不适。

夏热冬冷地区夏季炎热、冬季湿冷, 建筑需兼顾夏季隔热降温与冬季保温。绿色建筑外墙保温材料在

此区域能发挥双向调节作用。夏季，保温材料的低导热系数可有效阻挡室外热量传入室内，降低空调制冷能耗；冬季，又能减少室内热量散失，降低供暖需求^[1]。使用聚苯板外墙保温系统，可有效改善室内热环境，使室内温度在夏季保持相对较低，冬季保持相对较高，减小室内温度的昼夜波动，提升居住舒适度。并且，由于减少了空调和供暖设备的运行时长，降低了能源消耗，实现了较好的节能效果。

夏热冬暖地区，漫长炎热的夏季使得建筑制冷需求极为突出。该地区冬季相对温暖，建筑能耗主要聚焦于夏季制冷环节，这让绿色建筑外墙保温材料的隔热功能成为关键。以聚氨酯泡沫保温板为例，其独特的闭孔结构形成了高效的隔热屏障。当炽热的太阳辐射袭来，保温板能够有效反射和吸收大部分热量，极大地阻止热量传入室内。室内温度得以维持在相对较低水平，空调的运行时长大幅减少，从而显著降低了制冷能耗。良好的外墙保温效果不仅体现在能耗降低上，对建筑结构本身也有诸多益处。因保温材料阻隔热量，室内外温差缩小，墙体不再经受剧烈的温度变化冲击。这有效避免了因温差过大致使墙体材料热胀冷缩不均，进而产生开裂等损害结构稳定性的问题，延长了建筑的使用寿命，提升了建筑耐久性。从居住体验角度出发，稳定的室内温度让居民在炎炎夏日能尽享凉爽舒适的居住环境，无需频繁依赖空调调节室温，室内空气湿度和流通性得以更好保持，避免了因长时间使用空调导致的空气干燥、污浊等问题，为居住者营造出更健康、惬意的生活空间，切实提升了居民的生活品质。

3 绿色建筑外墙保温材料对建筑能耗与室内热环境的影响

绿色建筑外墙保温材料通过减少建筑物与外界环境间的热交换，显著降低建筑能耗。冬季，保温材料阻止室内热量向室外散失，降低供暖能耗；夏季，阻挡室外热量传入室内，降低制冷能耗。相关研究表明，合理选用外墙保温材料并进行科学设计，可使建筑能耗降低20%~60%。不同热工性能的保温材料对建筑能耗的影响程度各异，导热系数越低、热阻越大的材料，节能效果越显著。此外，保温材料的厚度与建筑能耗紧密相关，增加厚度可进一步降低能耗，但需综合考量成本和空间利用等因素^[2]。

在绿色建筑体系中，外墙保温材料对室内热环境的改善效果影响深远。在昼夜温差大的区域，温度的剧烈起伏常给居住者带来困扰。夏日白昼，室外骄阳

似火，温度飙升，而夜晚又迅速降温。若无优质外墙保温材料，室内温度便会随外界大幅波动，如同置身温度“过山车”。有了保温材料的防护，情况则大不相同。它如同给建筑穿上一层恒温铠甲，高效阻隔外界热量的侵袭与散失。白天，外界高温难以大量传入，室内温度不会过度攀升；夜晚，室内热量也不会快速逸出，始终将温度波动范围控制在一个适宜的小区间内。居住者无需在短时间内频繁增减衣物，也不必时刻依赖空调等设备调节室温，舒适度大幅提升，真正实现四季如春的居住体验。

室内结露现象也是影响居住环境的一大难题。当室内温暖潮湿的空气接触到冰冷的未保温墙体表面时，水汽极易凝结成水珠，形成结露。这不仅会导致墙面发霉、脱落，滋生大量霉菌，释放孢子污染室内空气，还会降低室内空气质量，威胁居住者的呼吸道健康。而外墙保温材料的介入巧妙化解了这一问题。它提升了墙体表面温度，使墙面温度高于露点温度，从根本上杜绝了结露现象的产生。室内环境始终保持干爽清洁，墙面历久弥新，居住者能安心享受健康舒适的生活空间。蓄热性能突出的保温材料在调节室内温度方面也发挥着关键作用。白天，在阳光的照耀下，这类材料凭借高蓄热系数，积极吸收并储存热量，如同一个个小型能量储蓄站^[3]。当夜幕降临，外界温度降低，材料又将储存的热量缓慢释放到室内，有效弥补室内热量的散失。室内温度因此得到平稳调节，避免了夜间温度过低带来的寒冷不适，为居住者营造出一个昼夜温差小、稳定且舒适的室内热环境，全方位提升居住品质。

4 绿色建筑外墙保温材料在实际应用中面临的问题与挑战

部分绿色建筑外墙保温材料在实际应用中存在性能不稳定状况。一些有机保温材料在长期使用过程中，受紫外线照射、温度变化等因素影响，可能出现老化，导致导热系数升高，保温性能下降。同时，市场上保温材料质量良莠不齐，部分产品以次充好，实际热工性能与标称值不符，影响建筑保温效果和工程质量。

绿色建筑外墙保温系统施工工艺繁杂，对施工人员技术水平要求高。在施工过程中，保温板粘贴不牢、拼缝处理不当、锚固件设置不合理等问题，都可能致使保温系统出现空鼓、开裂甚至脱落等质量问题，严重影响保温效果和建筑安全。而且，当前保温工程施工质量监管体系尚不完善，部分工程施工质量验收不严格，难以保障保温工程质量。

在建筑领域,有机保温材料以其出色的保温性能,在绿色建筑外墙保温中占据重要地位,然而其防火短板不容忽视。一旦遭遇火灾,有机保温材料中的有机成分会迅速与氧气发生剧烈反应,燃起熊熊大火。燃烧过程中,材料内部的化学键断裂,释放出诸如一氧化碳、氢氰酸等有毒有害气体。一氧化碳会与人体血红蛋白结合,阻碍氧气运输,导致人体缺氧中毒;氢氰酸则具有强烈的毒性,严重威胁人员生命安全。即便部分有机保温材料通过添加阻燃剂,在一定程度上提高了防火性能,但在实际复杂的建筑环境中仍存在诸多隐患。例如:在高层建筑中,火灾发生时热对流强烈,火焰容易顺着外墙向上蔓延,普通阻燃措施可能难以抵挡火势的迅猛发展。且在长期的使用过程中,阻燃剂可能因环境因素逐渐失效,降低材料的防火效果^[4]。因此,为确保建筑消防安全,不仅要持续研发更高效、持久的阻燃技术,还需在建筑设计阶段,合理规划防火分区,设置防火隔离带,配备完善的消防设施,从多方面构建严密的防火安全体系,最大程度降低火灾风险。绿色建筑外墙保温材料成本相对较高,特别是一些高性能、环保型保温材料。较高的材料成本增加了建筑工程造价,在一定程度上限制了其应用推广。此外,保温系统的施工成本、维护成本等也相对较高,需要综合权衡成本效益,探寻降低成本的有効途径。

5 绿色建筑外墙保温材料的优化策略与发展趋势

加大对绿色建筑外墙保温材料的研发投入,研发具有更高热工性能、更稳定质量和更优耐久性的新型保温材料。进一步优化气凝胶保温材料生产工艺,降低成本,提高其在建筑中的应用可行性;研发新型复合保温材料,将不同性能材料组合,发挥各自优势,提升保温材料综合性能。同时,加强对保温材料性能的研究,构建完善的材料性能评价体系,确保材料质量稳定可靠。

强化对绿色建筑外墙保温系统施工工艺的研究与培训,提升施工人员技术水平和质量意识。推广先进施工技术和工艺,如采用机械化施工设备,提高施工效率和质量。建立健全保温工程施工质量监管体系,加强施工过程质量控制和验收管理,确保保温工程质量符合相关标准。加强对绿色建筑外墙保温材料防火安全技术的研究,提高保温材料防火性能。研发新型阻燃剂和防火技术,使保温材料在满足保温性能要求的同时,具备良好的防火安全性。在建筑设计和施工中,合理划分防火分区,采取有效防火隔离措施,确保火

灾发生时,保温系统能有效阻止火势蔓延,保障人员生命安全和建筑结构安全。

通过技术创新和规模化生产,降低绿色建筑外墙保温材料成本。优化保温系统设计,合理选择保温材料和施工方案,在保证保温效果的前提下,降低工程总造价。同时,综合考虑保温材料使用寿命、维护成本等因素,提高保温系统长期效益。此外,政府可出台相关政策,对采用绿色建筑外墙保温材料的建筑项目给予补贴或优惠,促进其推广应用。绿色建筑外墙保温材料的发展将更注重可持续性。一方面,材料生产将更关注资源节约和环境保护,采用可再生原材料和环保型生产工艺,减少能源消耗和污染物排放^[5]。另一方面,保温材料设计和应用将更注重与建筑整体环境协调,实现建筑与自然环境和谐共生。随着智能化建筑发展,保温材料将与智能控制系统结合,实现对建筑能耗的智能调控,进一步提升建筑能源利用效率和舒适度。

6 结束语

绿色建筑外墙保温材料的热工性能及其应用效果对绿色建筑发展起着关键作用。通过深入研究各类保温材料的热工性能基础,分析其在不同气候区的应用效果,以及对建筑能耗和室内热环境的影响,明确了绿色建筑外墙保温材料在实际应用中面临的问题与挑战。针对这些问题,提出了涵盖材料研发与性能优化、施工工艺改进与质量控制、防火安全技术提升、成本控制与效益提升以及可持续发展等方面的一系列优化策略和发展建议。在未来建筑工程实践中,应持续关注绿色建筑外墙保温材料发展动态,加强技术创新和应用推广,不断提升绿色建筑性能与品质,推动建筑行业向更绿色、更可持续方向发展。

参考文献:

- [1] 王峰,李华.绿色建筑外墙保温材料热工性能的量化分析[J].建筑材料学报,2020,23(03):456-463.
- [2] 陈刚,赵强.新型有机保温材料在绿色建筑中的应用与性能研究[J].新型建筑材料,2019,46(05):112-116.
- [3] 张宇,刘悦.无机纤维类外墙保温材料的特性及应用效果[J].建筑节能,2021,49(04):87-92.
- [4] 周洋,吴昊.绿色建筑外墙保温系统对室内热环境及能耗的影响研究[J].暖通空调,2022,52(07):105-111.
- [5] 郑辉,孙明.绿色建筑外墙保温材料的质量问题与控制策略[J].工程质量,2023,41(06):67-72.

建筑机械设备安装工程施工技术要点分析

文彦翔

(四川省第四建设有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 建筑机械设备安装是建筑施工中的关键环节,直接关系到整个工程建设质量。机械设备安装不仅要严格遵循技术标准,还要求施工团队精准把控复杂机械构造,科学合理地安排安装施工。建筑机械设备安装工程施工过程包括准备、安装、调试和验收等阶段,每个环节都需严格把控。本文主要围绕建筑机械设备安装工程施工技术要点,深入探讨建筑机械设备安装工程施工中的问题,并提出相应的技术措施,以为同类工程及工作人员提供参考。

关键词 建筑机械设备; 安装工程; 工程验收

中图分类号: TU8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.028

0 引言

建筑机械设备安装工程施工技术的核心在于将机械设备的结构特点和施工现场的条件相结合,使设备功能发挥到最大。施工过程中会遇到设备定位、连接精度、动力调试等技术难题,这就要求施工团队掌握全面的专业知识以及应对现场情况的能力。施工技术的发展不能仅依靠经验积累,还得有科学方法和创新手段来支持。施工团队需将施工技术要点掌握透彻,不仅能提高施工质量,还能加强项目整体的风险管控。只有完善了技术体系,施工标准才能统一,更好地推动建筑机械设备安装朝着高质量、高效率方向发展。

1 建筑机械设备安装工程概述

建筑机械设备安装工程在建筑施工领域涉及面广,对技术要求高,其核心任务是按照设计规范和施工标准,把各种机械设备准确摆放、牢固连接,保证后续运行的稳定与安全。这个过程不仅关系到设备本身是否稳定,还直接影响整个施工项目的运行效率,以及工程施工质量。现代化建筑机械设备施工逐渐依赖自动化,设备安装不再依靠单纯的体力劳动,而是慢慢转向系统化的管理模式。这类工程一般包括设备基础施工、主机放置、辅助系统对接和功能调试等关键步骤,每个步骤都需按照严格的技术规程进行操作,任何一个细节没做好都可能给后续使用留下隐患。特别是大型或特种机械设备,对安装精度要求很高,这就对操作人员的专业能力和管理团队的协调能力提出了更高要求^[1]。建筑机械设备的选型、搬运、安装和调试环节需形成完整的技术闭环,这样才能保证施工连续进行,工程安全也有保障。随着建筑行业标准不断提高,

施工团队在设备安装时也越来越重视规范性、合理性和可控性,推动建筑领域朝着技术成熟、管理精细的方向发展。

2 建筑机械设备安装工程施工中存在的问题

2.1 安装工程环节脱节

当前,建筑机械设备安装工程在实际施工中各环节衔接不够紧密,这种脱节问题会直接影响到整体施工秩序和工程质量。设备安装工作涉及多个工种、工序和专业的配合,如果施工团队施工前期和后期工作协调不充分,很容易造成信息传达不到位,进而导致施工安排混乱、工期延误、技术标准执行不统一。如果施工各阶段没有统一的技术依据和作业标准,各环节之间就不能有效衔接,整个安装过程就容易变得零散。例如:设备基础施工、构件到场、吊装作业、系统接入等流程,要是没形成清晰的时间顺序和作业链条,会直接影响到现场资源的合理调配。当遇到责任分工不明晰的情况,各单位之间还容易互相推卸责任,出现问题也难以找到原因,会让施工管理变得更混乱。整体环节管理没做好,就算单个环节执行得再好,也无法弥补整体配合不协调带来的系统性风险。如果缺乏整体的工程思路和连贯的施工安排,各阶段就会处于孤立状态,工序之间既没有技术上的闭环,也没有管理上的联动,最后很难形成稳定高效的施工体系。安装工程环节若不能科学地衔接起来,不仅会影响设备安装技术的执行效果,还会限制项目整体效率的提升空间。

2.2 设备安装施工不规范

在设备安装施工过程中,施工行为不规范常表现为施工团队没有充分理解设计图纸、操作流程执行不

到位、技术标准落实不严。有些施工环节没有严格遵循国家及行业规范, 结果导致设备定位出现偏差、连接部位松动、系统运转不顺畅。这些问题刚开始可能不容易显现, 但是随着设备运行时间增长, 很容易发生安全事故, 设备性能也会下降, 最后影响整个设备使用效果。施工规范贯彻执行不彻底与现场管理松散、施工人员专业水平参差不齐, 还有技术资料传达不到位都有关系。施工时若没有系统的技术指导, 就会导致设备安装和实际需求之间出现偏差。只要有一个施工节点没处理好, 就会直接影响后面工程的精度, 导致技术链条中出现薄弱环节。在这种状态下, 就算设备本身质量再好, 安装不规范也会影响其使用效果。设备安装一旦无规范约束, 质量控制和风险管理也起不到稳定作用, 自然就会降低整个安装工程的可靠性。

2.3 工程验收标准不统一

在工程验收阶段, 不同地区、不同单位对设备安装质量的评判标准不一样, 有些验收依据缺乏系统性, 导致验收结果带有主观色彩。因为验收标准不统一、尺度有差异, 就会出现工程其实没完全达到技术要求, 但还是能通过验收的情况, 这就为以后设备的使用埋下了安全隐患, 也削弱了技术规范的约束力^[2]。验收标准不明确, 项目中各参与方在施工时就无法形成统一的质量目标, 施工依据不清楚, 管理工作自然也难以规范开展。技术人员和验收人员对质量要求的理解不一样, 现场施工就容易出偏差, 技术落实无法对标, 设备安装精度和功能性能也统一不起来。验收标准不清晰, 还会影响问题追溯和整改效率, 安装工程中发现的质量问题无法明确责任, 也影响规范处理, 从而增加项目风险。多种验收标准并存, 还会造成验收流程不一样, 数据统计口径不一致的问题。

3 建筑机械设备安装工程施工技术要点

3.1 做好前期设备检查工作, 夯实工程施工基础

对设备进行全面检查, 不仅要看设备的外观有没有损坏, 还需检查其结构是否完整, 以及技术参数准不准确。施工团队在检查的时候, 需仔细核对设备零部件, 保证各项指标都符合设计和技术规范要求, 避免设备本身质量问题影响安装效果。施工团队对设备进行系统检查能及时发现运输过程中可能出现的损坏, 为后期调整和补充提供依据。另外, 检查内容还包括审核相关技术文件, 如合格证书、说明书、维护保养记录等资料, 都是验证设备性能和指导安装的重要参考。将这些文件核实清楚, 能明确设备工艺要求和安

装注意事项, 避免因信息不全导致设备安装出错。施工团队清楚设备实际状况, 就能根据情况合理安排安装顺序和施工方案, 让施工更有计划性^[3]。确认设备接口和连接部件是否匹配, 重点查看连接结构的精度和材料质量, 确保设备之间匹配度达到设计标准。同时, 施工团队进行设备检查需遵循规范流程, 每个环节都要有详细记录, 责任要明确清楚。施工团队建立完善的检查制度能够让设备验收工作更系统。施工团队严格按步骤进行质量检查能保证设备进入安装阶段前是合格的, 给施工技术实施打下可靠基础, 这样整个工程才能顺利推进。

3.2 加强机械设备安装管理, 保证工程施工质量

机械设备安装管理贯穿整个施工过程, 关键是施工团队要建立一套严谨有序的管理体系, 这样才能保证各项安装工作在可控的环境下高效推进。管理工作的基础是明确每道工序的技术要求和作业标准, 避免操作的时候因为理解有偏差出现问题。施工团队从施工方案、技术交底到作业流程, 全程都要做好管控, 准确把握安装节奏, 提高整体工作效率。设备安装涉及结构、土建、电气等多个方面, 如果管理上做不到信息互通、进度同步, 就会影响施工的连续性。施工团队应考虑多工序交叉施工的实际情况, 建立明确的接口制度, 把施工任务横向分解、纵向整合, 确保责任清楚、工序衔接紧密。管理层动态掌握每个阶段的时间控制和技术匹配情况, 能及时发现施工中的潜在问题, 调整作业计划。施工团队实施有效的安装管理还得关注施工资源的调配和作业人员技术能力是否匹配。设备安装通常需要特定机具和专业技术人员, 如果资源调配不到位, 很容易造成关键环节延误。施工团队要建立统一的资源调度体系, 对人员、设备、材料等分类管理、动态调配, 提高现场组织效率^[4]。施工团队需做好过程管理工作, 保持稳定的施工节奏, 确保设备安装整体质量在可控范围内。以塔式起重机安装为例, 设备安装涉及塔身、回转、升降系统和电气设备等部分。塔式起重机的结构庞大, 需要特定的吊装设备和专业的技术人员。若资源调配不合理, 吊装作业时可能会出现设备安装质量问题, 或者人工操作出现偏差, 耽误工程施工进程。施工团队必须严格按照操作流程执行, 每一步都需提前与土建、电气等其他工种人员沟通好, 这样各项工序才能衔接顺畅。在安装塔身时, 地基的承载能力和设备的稳定性很重要, 施工团队必须确保塔基与土建结构可以严丝合缝对上, 防止出现安装偏差。同时, 电气设备的接入需

要按照相关标准进行检验,避免因电气系统接入不当导致出现后续故障。施工团队在明确责任分工的同时需进行细致的资源调度,才能保证塔式起重机安装工作顺利进行。

3.3 进行全面的设备调试运行,确保设备性能达标

施工团队进行设备调试,就是把设备从安装好的静态状态转成动态运行状态,通过系统的方法来验证各项技术参数和运行指标,检查其是否跟设计要求一致。调试工作要覆盖设备运行的各个方面,如果哪个环节施工团队没考虑到,都可能影响系统运行。在进行调试过程中,施工团队要根据已经完成的安装条件进行,确保设备在不超载的前提下,完成启动、运转、加载等试运行动作。同时,施工团队需连续观察各项运行参数,及时发现不合理的振动、噪声、电流波动、温度异常情况,进而判断潜在问题的原因。施工团队在调试时要做好记录,将关键数值、运行趋势、负载变化和反应整理成标准数据,作为判断设备性能的重要依据。施工团队在执行调试程序时,每一步操作都要严格按照设备技术手册的标准流程进行,避免不规范操作造成误判。不同类型的设备,调试时的技术特点不一样,施工团队需要根据具体的功能模块,分阶段、分系统来推进调试,确保测试逻辑合理清晰、数据结果可靠。调试运行不只是检验设备本身,也是间接反映安装质量、技术方法和施工规范的执行情况^[5]。全面调试能让整个系统从静态结构到动态功能形成完整闭环,为最终的设备验收、交付使用提供可靠的技术依据。以施工升降机为例,在设备调试过程中,施工团队需要重点检查升降机的升降系统、动力传输系统和电气控制系统。升降机的调试不仅要验证其起升、下降的稳定性,还需保证控制系统反应够精准。施工团队需逐项检查每个电动机和传动机构的运行情况,确保没有振动异常或声音异常现象。此外,施工团队需反复调试升降机的限位开关和制动系统,确保其在负载状态下能安全停止运行。施工团队还要进行负载试验,验证升降机在高负载和长时间运行情况下的可靠性,保证其各项性能指标满足设计要求,而且能持续稳定工作。施工团队只有进行全面的调试,才能有效验证施工升降机的各项技术参数,为最终的安全验收和工程交付打下坚实的基础。

3.4 全面规范验收工作流程,实现安装工程顺利交付

规范的验收包括设备基础、安装精度、运行状态、技术文件,确保每个环节都符合施工图纸和相关标准。

施工团队要明确验收的范围和标准要求,有效避免因验收依据不明确导致的质量争议。施工团队在进行验收工作时要具备系统性思维,把设备本身、附件系统和外围配套设施当成一个完整的运行单元统一检验。验收不能只看表面,或者只看设备运行的短期情况,要用量化的标准和技术参数逐项对照核实。验证检测的内容,每一项指标都需有明确的判断标准,这样才能提高验收的技术精准度和结果的公正性。施工团队要将各项检查过程、检测数值、实测数据和问题记录都放进工程验收资料里,能给设备后期的运维提供准确的技术依据。标准化、可追溯的验收文档体系,有助于提高项目整体管理的透明度,也能给项目各参与方明确后续责任提供条件。验收文件里要有技术指标、检查要点、整改记录和最终签署等核心信息,确保交付的结果既系统又有法律效力。在验收组织方面,施工团队需建立由项目管理、专业技术人员和相关单位一起参与的多方协作机制。通过职责明确、流程清晰的验收架构,实现各专业环节的有效对接,避免出现标准冲突的问题。各单位的技术评价结果要形成统一意见,不能因为验收的标准不一样而产生评判分歧,这样才能确保安装工程具备完整的交付条件。

4 结束语

建筑机械设备安装工程是整个建筑施工体系中的核心部分,其施工质量既关系到设备的稳定安全运行,又能直接体现出整个项目管理的成熟程度。从施工准备、过程控制到最后交付三个环节,都要有系统化的管理思路来支撑,这样才能形成科学、高效的工程执行机制。施工团队依靠系统思维,掌握建筑机械设备安装的技术要点,把技术细节和管理执行有效结合,形成稳定的闭环,才能真正成为推动施工体系进步的重要力量,进而提高建筑项目的整体质量。

参考文献:

- [1] 戴博文.浅析建筑机械设备安装工程中机电设备安装[J].中国设备工程,2024(16):226-228.
- [2] 解国庆.建筑机械设备安装工程中机电设备安装调试[J].石材,2022(10):82-85,93.
- [3] 王来旺.建筑机械设备安装工程的施工要点探讨[J].居舍,2022(12):166-168.
- [4] 冯冰冰.建筑机械设备安装工程的施工要点研究[J].绿色环保建材,2021(11):126-127.
- [5] 王开朝.建筑机械设备安装工程施工的常见问题分析[J].江西建材,2021(10):198-199.

低影响开发技术在城市雨洪管理中的应用研究

张 慧¹, 陈步岳², 陈 双³

- (1. 山东浩景建设有限公司, 山东 东营 257000;
2. 东营市昌润建设工程有限责任公司, 山东 东营 257000;
3. 东营市东凯建设工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要 传统排水系统已难以应对频发的城市内涝问题, 针对某城市中心区域, 通过构建暴雨洪水管理模型(SWMM), 模拟分析不同重现期(1a 及 5a, 10a 与 30a, 50a)降雨条件下的内涝特征。研究选取绿色屋顶, 透水铺装与雨水花园三种低影响开发(LID)措施进行组合设计, 采用不同布设比例(20%、50%、100%)方案, 系统评估其对地表径流与管网负荷及节点溢流的控制效果。研究结果表明: LID 组合措施对雨洪有显著的削减作用, 当布设比例为 50% 时达到最优效果, 地表径流削减率可达 44% ~ 46%。

关键词 低影响开发; 雨洪管理; 暴雨洪水管理模型; 地表径流; 节点溢流

中图分类号: TU992

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.029

0 引言

随着城市化进程的加快, 城市不透水表面不断增加, 原有的自然下垫面被破坏, 导致城市雨洪问题日益突出, 传统的“快排”排水体系已难以应对日益频发的城市内涝灾害。低影响开发(LID)技术通过模拟自然水文过程, 采用源头分散式控制措施, 可有效削减地表径流, 已成为解决城市内涝的重要手段。LID 设施包括绿色屋顶、透水铺装、雨水花园等, 通过对降雨的渗、滞、蓄、净、用、排等过程进行控制, 维持土地开发前后水文特征基本不变^[1]。开展 LID 技术在城市雨洪管理中的综合应用研究, 对于提升城市排水防涝能力、推进海绵城市建设具有重要的理论和实践意义。

1 工程概况

1.1 研究区域概况

研究区域位于某市中心城区, 总面积 4.53 平方公里, 属于亚热带季风气候, 年均降水量 1187 毫米。区域内地势较为平坦, 地面海拔均在 8 米以下, 主要包括建筑区与道路、绿地等用地类型。近年来, 随着城市化进程加快, 区域内不透水面积不断增加, 在暴雨情况下易发生内涝, 区域内排水体制为雨污分流制, 现状排水管网总长度约 47.2 公里, 管径范围为 300 ~ 2 000 毫米。根据历史资料统计, 该区域内涝点主要分布在地势低洼处及排水管网老旧区域, 尤其在夏季暴

雨期间内涝问题突出。此外, 研究区域内的排水设施建设年代不一, 部分管网设施服役年限已超过 30 年, 管道淤积与破损等问题日益突出, 同时区域内分布有多个下沉式广场及地下商业空间, 这些区域在暴雨期间极易形成积水, 给居民生活及商业活动带来严重影响, 因此需采用创新的雨洪管理方案来提升区域防涝能力。

1.2 数据来源与预处理

数据主要包括 DEM 数据与土地利用数据、排水管网数据及降雨数据。DEM 数据来源于 ALOS PALSAR 数据, 空间分辨率为 12.5 米, 部分区域经过人工调整以适应实际地形。土地利用数据采用 0.5 米分辨率的遥感影像解译获取。排水管网数据由城市管理部门提供, 包含管道坡度与上下游底高程、管径及节点信息等。降雨数据采用国家气象科学数据中心的实测数据^[2]。数据预处理过程中采用 GIS 技术对用地信息进行分类统计, 结合实地调查对管网数据进行校核, 确保数据的准确性及可靠性, 对原始管网数据进行拓扑检查及概化处理, 保留主干管网共 565 条管线及 584 个节点, 确保管网连通性及合理性。为确保数据质量, 本研究进一步采用高程点实测数据对 DEM 数据进行了精度验证及局部校正, 重点针对建筑密集区及地形复杂区域进行优化; 同时结合无人机航拍影像对土地利用现状进行更新, 重点对新建区域及改造地块的用地性质进行核实, 提高了基础数据的时效性及可靠性。

1.3 研究方法

采用暴雨洪水管理模型 (SWMM) 进行雨洪模拟, 利用泰森多边形法划分 497 个子汇水区, 地表产流采用 Horton 下渗模型, 管网汇流采用动力波法, 模型中确定性参数如汇水区面积与坡度等通过 GIS 计算获得, 不确定性参数, 如下渗参数与曼宁粗糙系数等参考 SWMM 模型手册确定。在参数确定过程中, 充分考虑区域下垫面特征及土壤条件, 对关键参数进行敏感性分析, 确保模型能够准确反映研究区的水文特征。通过芝加哥雨型法对不同重现期降雨进行时程分配, 计算重现期为 1a 及 5a, 10a 和 30a、50a 的设计降雨过程, 模拟总时长 120 分钟, 时间步长 1 分钟。对于不同用地类型, 分别采用实地渗水试验获取土壤下渗特征参数, 并考虑土壤含水量的季节性变化对下渗能力的影响。在管网汇流模拟中, 充分考虑了管道堵塞与破损等因素对水力特性的影响, 通过实测数据对关键节点的水力参数进行了校准及验证。

2 低影响开发技术的应用

2.1 雨洪管理模型构建

SWMM 模型中地表汇流过程将子汇水区概化为透水区及不透水区两部分, 采用固定径流系数法计算径流量, 结合研究区实际情况, 建筑物屋面取值 0.95, 混凝土及沥青路面取值 0.90, 公园绿地取值 0.15, Horton 模型用于计算透水地面下渗量, 管网汇流采用动力波法模拟排水过程; 为提高模型精度, 对管网系统进行概化, 删除支线及细小管道, 保留主干道路上的排水管线, 经拓扑检查确保上下游连接合理, 概化后的排水系统包含 565 条管线与 584 个节点, 管径分布在 300~2 000 毫米之间^[3]。为提高模型精度, 本研究对子汇水区的划分进行了优化, 综合考虑地形特征、用地性质及排水分区等因素, 采用不规则多边形法进行划分, 确保每个子汇水区具有相对独立的汇流特征。同时, 通过实地调查获取管网实测数据, 对原有管网资料进行校核及更新, 建立了较为完整的排水管网数据库。

2.2 LID 措施选择与布设

根据区域用地特点, 选择绿色屋顶与透水铺装, 雨水花园三种 LID 措施进行组合设计^[4]。绿色屋顶主要布设在建筑物屋顶, 由 60 毫米蓄水深度的表面层, 120 毫米厚度的土壤层及 200 毫米厚度的排水层构成; 透水铺装设置在道路及广场, 包括 20 毫米蓄水深度的表面层, 150 毫米厚度的路面层及 400 毫米厚度的蓄水层; 雨水花园布设在公共绿地, 由 200 毫米蓄水深度的表面层, 750 毫米厚度的土壤层及 200 毫米厚度的蓄

水层组成, 所有 LID 设施的下垫面坡度设为 1%, 植被覆盖率为 0.10, 表面粗糙系数取 0.10。在 LID 设施的具体布设过程中, 充分考虑了区域用地条件及景观效果的协调性, 绿色屋顶选用耐旱与抗风的本地植物品种, 透水铺装采用符合城市道路承载要求的高性能透水材料, 雨水花园则融入了景观设计元素, 既确保了雨洪控制效果, 又提升了区域环境品质。

2.3 情景方案设计

基于《暴雨强度计算标准》, 采用芝加哥雨型请求 1a、5a、10a、30a、50a 五种重现期的设计降雨过程, 降雨历时 120 分钟; 降雨强度采用如下公式计算:

$$q=1686.867 \times (1+1.0571gP)/(t+11.300)^{0.628}$$

式中: q 为暴雨强度 (单位: $L/(s \cdot hm^2)$); t 为降雨历时 (单位: min); P 为设计重现期 (a), 针对每种重现期降雨, 设计 20%、50%、100% 三种 LID 布设比例情景, 组合布设比例指每种 LID 措施占其可布设区域最大面积的比例, 雨水花园取公共绿地面积的 30% 作为最大布设面积, 绿色屋顶及透水铺装, 分别在建筑屋面及道路铺装区域内实施。为提高设计降雨的代表性, 本研究收集了近 10 年的暴雨实测资料, 通过统计分析确定降雨峰值系数及时间分配特征, 同时考虑气候变化对极端降雨的影响, 对暴雨强度公式的参数进行了适当调整, 使设计降雨过程更符合当地降雨特征, 提高了情景模拟的可靠性。

3 应用效果评估与分析

3.1 地表径流削减效果

不同重现期下地表径流模拟结果显示, LID 组合措施具有显著的径流削减效果, 如表 1 所示, 在 1a 一遇条件下, 20%、50%、100% 布设比例的径流削减率分别达到 30.66%、66.15%、94.86%; 5a 一遇时, 径流削减率分别为 23.89%、54.51%、89.24%; 随着重现期增加, LID 措施对径流的控制效果逐渐减弱, 在 30a 及 50a 一遇时, 50% 布设比例下的径流削减率分别为 45.92% 及 44.09%。分析表明, LID 措施对于较小重现期降雨的调蓄效果更为明显, 当降雨强度增大时, 调蓄及渗透作用趋于饱和, 削减效果减弱^[5]。

3.2 管网负荷改善效果

排水管网负荷分析显示, LID 措施能够有效降低管网超载程度, 如表 2 所示, 1a 一遇时, 超载管段主要分布在文苑路西端、水月亭西路西段及隆兴港; 随着降雨重现期增加, 超载范围逐渐扩大, 5a 一遇时新增文宗路南端与海昌路北段超载点, 实施 LID 措施后,

管网运行状况得到显著改善,50% 布设比例方案下,各重现期的超载管段比例平均降低 45%,管网运行更加稳定;现场调查发现,这些超载区域多位于地势低洼处,且排水管网年代较早,管径偏小,在强降雨条件下易发生超载^[6]。

表 1 不同重现期下 LID 布设情景的地表径流量 (mm)

布设比例	1a 一遇	5a 一遇	10a 一遇	30a 一遇	50a 一遇
0%	35.42	67.30	81.41	103.40	113.62
20%	24.56	51.22	63.24	82.66	91.81
50%	11.99	30.61	40.10	55.92	63.53
100%	1.82	7.24	13.39	24.46	29.99

表 2 不同重现期下管网超载时长分析

重现期	超载管段比例 (%)	主要超载位置
1a 一遇	9.38	文苑路西端、水月亭西路西段、隆兴港
5a 一遇	15.39	文宗路南端、海昌路北段
10a 一遇	16.63	西山路、联合路
30a 一遇	19.46	管网负荷进一步加重
50a 一遇	20.70	超载范围无明显扩大

3.3 节点溢流控制效果

节点溢流模拟结果表明,随着重现期增加,溢流节点数量及溢流量逐渐增大^[7]。如表 3 所示,在 5a 一遇降雨条件下,研究区域出现 7 处溢流点;10a、30a 及 50a 一遇时分别增至 12、27 及 35 处,LID 措施的实施对节点溢流具有显著的控制效果。20%、50%、100% 布设比例下,各重现期溢流量平均削减率分别为 20.12%、42.47%、64.07%;对比不同布设比例发现,当布设比例从 20% 提高到 50% 时,溢流削减效果提升明显;而从 50% 增至 100% 时,边际效益递减,考虑经济性 & 实施效果,建议采用 50% 的布设比例方案。模拟结果还显示,LID 措施的溢流控制效果与设施布局密切相关,建议在溢流风险较高的区域加大 LID 设施密度^[8]。

表 3 不同重现期下节点溢流量对比 (m³)

布设比例	1a 一遇	5a 一遇	10a 一遇	30a 一遇	50a 一遇
0	531.50	1 557.27	2 029.93	2 802.50	3 165.59
20%	372.74	1 236.22	1 654.51	2 347.65	2 676.99
50%	234.66	861.39	1 207.07	1 795.40	2 078.83
100%	156.66	484.78	710.66	1 157.57	1 383.79

4 结束语

通过模型模拟与情景分析表明,LID 组合措施能够有效控制城市雨洪。研究发现,随着布设比例增加,对地表径流及节点溢流的削减效果逐渐增强,但在极端降雨条件下效果趋于饱和,当布设比例为 50% 时可实现较优的雨洪控制效果。研究结果可为 LID 技术在城市雨洪管理中的应用提供参考。未来,可进一步关注 LID 措施的成本效益分析、管网数据精度优化以及河道水位变化影响,同时应加强不同气候条件下 LID 措施的长期运行效果评估与维护管理研究,为城市雨洪管理决策提供更全面的科学依据。

参考文献:

- [1] 周力行.宿迁地区乡村景观环境低影响开发(LID)技术在雨洪管理中的应用[J].农业工程技术,2024,44(09):11-16.
- [2] 黄若琳,王锣洋,潘骁骏,等.低影响开发设施组合下的城市雨洪调控情景模拟研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(04):22-35.
- [3] 罗为维,周旭,刘晓林,等.基于雨洪风险模拟的城市低影响开发适建性分析[J].西华师范大学学报(自然科学版),2024,45(02):172-180.
- [4] 赵军,王雷,李春晓,等.城市雨洪 SWMM 构建与灰绿组合设施综合效能评价研究[J].科技风,2025(10):7-9.
- [5] 赵长森,李毛毛,段震,等.缺管网资料地区城市源汇雨洪模型构建及应用[J/OL].南水北调与水利科技(中英文),1-22[2025-04-16].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh_yDIYPzhDrPFsXXSOCrGOxm tmyZ9SRLc-nP-RvWHIRPla7U5JuXLGfPLE6a3xsaLjDGzUY5Hfux2cL-2SLK5_8WJ0jBqTG08WnLGtqnsTcFXabogAVwf9ndP1cMHLMR_pP1VtjP24uioqq079cslyrAzHuutdIJ0tiOEm7Nj2fQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [6] 陈潇潇.基于生物滞留措施的城市雨洪径流污染净化试验分析[J].水利技术监督,2025(03):171-175.
- [7] 王润梓.基于绿色基础设施视角下城市雨洪管理策略研究[J].新型城镇化,2025(02):50-53.
- [8] 刘正疆,张浩,马丽娜,等.城市地表雨洪特征的数值模拟研究(英文)[J/OL].水利水电技术(中英文),1-21[2025-02-14].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh9xtgFRYcal3s-BEeqdf_3nKw2Qj8oGxqPv4VZCLASih-MKAbguJ7RhHxsn8mYCPPts4ExL_pSj9ZteyFbnDuqHzXrvNWYtB06TfId3w1c7_JoqM_mHwwGBCzoP8ACykyUcGX4PhAwC_cBOUPTni8zziNOPs5U5ERMZogIFPArV-yA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用

何岳松

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘要 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用广泛, 可有效提高路基的稳定性和使用寿命。本文基于典型公路高边坡工程, 分析锚杆防护的作用原理与结构优势, 阐述了精确测放、钻孔控制、锚杆安装、注浆加固、张拉锁定以及喷护成层等应用环节的施工工艺, 旨在系统优化施工流程, 有效提升锚固质量与坡面整体稳定性, 为高边坡支护提供可参考的技术路径。

关键词 高边坡锚杆防护施工技术; 公路路基工程; 精确测放; 钻孔控制; 锚杆安装

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.030

0 引言

高边坡是公路路基结构中应力集中的薄弱环节, 其稳定性直接关系到道路运行的长期安全。受地形地质条件制约, 高边坡常面临岩土破碎、节理裂隙发育以及降雨侵蚀频繁等多重不利因素, 极易诱发滑坡等地质灾害。锚杆防护技术以其主动加固特性, 在改变坡体应力分布、增强结构协同承载能力等方面展现出独特优势。同时“锚固体—岩土体”协作体系, 可提升潜在滑移面抗剪强度, 并维持坡面完整性, 是现代高边坡治理中的重要支护手段。

1 工程概述

某高速公路拓宽改建工程全长 18.6 km, 其中 K5+320 至 K5+740 段为典型路堑高边坡, 地形破碎起伏明显, 原始坡体高差达 28 m, 部分段落陡率达到 1:0.4。边坡岩性以中风化凝灰岩夹碎屑泥岩为主, 结构松散, 裂隙发育, 受降雨浸润影响后强度迅速下降, 存在顺层剪切与结构面崩解的复合滑移风险。工程区属中等地震烈度区, 浅层地震波传播速度快, 对边坡稳定构成动态扰动。设计采用预应力锚杆加框架梁支护形式, 配合临空面径向排水孔削减孔隙水压力, 锚杆采用 HRB400 级螺纹钢, 直径 $\Phi 32$ mm, 锚固深度控制在 10~12 m, 支护水平间距 2 m, 竖向间距 1.8 m。坡面覆土层厚度变化较大, 地表径流易形成冲刷侵蚀, 设置三维植被网与喷混植草同步构建生态防护体系。

2 高边坡锚杆防护的优势与原理

2.1 高边坡锚杆防护的原理

高边坡锚杆防护的基本原理在于人工设置的锚固体系, 有效传递外界荷载与不稳定岩土体的自重、滑

动力至深层稳定结构中, 形成内外约束共同作用的支护机制。锚杆穿透潜在滑移面或弱结构层, 紧密结合基岩, 能在荷载作用下产生轴向拉力, 建立主动控制应力传递路径的受力状态。自由段可调节张拉力, 保证整体锚固系统具备应力协调能力, 并借助锚头将荷载反力封闭于框架梁与坡面结构间^[1]。同时, 锚杆受力后会改变坡体内部剪应力与主应力方向, 抑制结构面剪切破坏, 在边坡内部形成“剪切补强+拉力抗滑”复合力学体系, 增强整体防护体系的稳定性, 有效控制边坡的变形发展。

2.2 高边坡锚杆防护的优势

高边坡锚杆防护是边坡支护体系的重要构成形式, 具备结构轻质、布局灵活以及受力明确等综合优势。在复杂地质条件或不良地貌发育区域, 借助锚杆与岩土体形成复合受力体系, 可有效改变边坡原有应力分布状态, 提升坡体整体稳定性。锚杆系统能将荷载传导至稳定岩层深处, 形成连续稳定的抗滑支撑带, 具备良好的抗剪、抗拉与抗拔性能。锚固技术对原生岩土扰动小, 支护施工工序相对简洁, 适用于不同边坡形态^[2]。在动态荷载作用频繁的边坡段, 锚杆体系能够迅速分担瞬时应力, 降低滑移诱发概率, 提升抗震响应能力。而锚固体的预应力施加, 也有助于进一步提升结构刚度, 具备良好的长期耐久性。

3 高边坡锚杆防护施工技术具体应用分析

3.1 精确测放定位孔位, 提升施工初控精度

在高边坡锚杆防护施工过程中, 测量放样是先导工序, 直接关系到锚固系统的精度。锚杆布置的几何精度对后续钻孔、注浆以及张拉等工序具有传导效应,

若初始孔位偏差,将导致锚杆倾角与结构主应力方向错位,降低锚固效率^[3]。精确定位要求施工人员综合分析边坡坡度、岩性分布及滑移带特征,依据设计图纸与实际地形条件定位三维坐标,严控横纵向误差,进而提升施工首道控制点的工程可靠性,也为边坡支护提供规范化、序列化施工基础。

在 K5+320 至 K5+740 段高边坡支护工程中,边坡平均高度约 26 m,最大坡率达 1:0.4,坡体由中风化凝灰岩与碎屑泥岩互层构成,节理裂隙多向发育,稳定性极差。根据地质勘察成果与坡面地形实测数据,施工人员应采用预应力锚杆配合框架梁防护形式,按照 2 m 水平间距、1.8 m 竖向间距布设锚杆,钻孔入岩深度不小于 10 m,倾角控制在 15°。施工现场采用中纬 ZT30R 全站仪与数显测斜仪,定位孔位的三维定点,并结合坡面实际高差校核坐标。测量放样环节技术人员引入激光垂直投点设备,同步调整设计角度与钻进方向,保证钻孔轴线与结构滑移趋势反向交叉,增强锚固效果。现场测放完成后,项目部还要组织专项复核,统一调整误差超过 5 cm 的孔位,剔除受滑塌威胁的边缘锚点,从而提升锚杆入岩精度,显著降低高差误差对整体支护体系稳定性的影响。

3.2 严控钻孔参数工艺,保障锚固结构质量

钻孔是高边坡锚杆施工的核心环节,其参数直接决定锚固结构的承载性能。为确保钻孔质量,项目部需采用低扰动钻进技术控制入岩节奏,配置具有抗扭性能的钻具系统,在钻进过程中维持恒定推进力,及时排渣降温,减少孔壁坍塌风险^[4]。同时,实时监测钻孔角度与方位,引入测斜系统持续校核轴线方向,避免因地质变化造成锚固无效,提升支护系统整体可靠性。

在 K5+320 至 K5+740 段高边坡支护施工中,锚杆布设密度高、岩层差异显著,钻孔作业面多位于陡峭坡体,孔位周边岩体节理裂隙分布不均,易引发塌孔与轴向偏移。施工单位应使用液压履带钻机,配合 $\Phi 90$ mm 合金钻头与高韧性钻杆,控制钻孔倾角在 15°,入岩深度 10 ~ 12 m。施工前对钻机平台进行稳固处理,采用锚固桩与钢构基座加固,避免钻进过程中平台位移造成钻具倾斜。钻孔初期采用低转速低风压参数推进,控制进尺速率在 5 cm/min 以内,钻至稳定层后提升转速与风压,以应对岩体强度变化。每完成 50 cm 钻进,技术人员即用数显测斜仪校核孔轴角度,保证轴向偏差不得超过 $\pm 2^\circ$ 。为防止孔壁坍塌,每钻进 1 m 施工人员即实施一次高压气吹清孔作业,清除碎屑,保证孔底洁净无积水。针对强风化泥岩段钻孔易缩孔现象,技术组调整进尺策略,缩小步进长度至 30 cm,

在孔壁同步注入稀释黏结剂以临时固壁,增强成孔稳定性。施工过程中设专岗质检,定期记录每孔的孔深、孔径、孔向以及孔口稳定性,并符合关键工位二次钻进方案。钻孔完成后立即进行封孔,避免长时间暴露引发孔壁变形,进而降低锚固力衰减风险,保障整体防护系统在高边坡路段的适应性。

3.3 规范制作安装锚杆,确保杆体受力稳定

锚杆安装质量直接关系整体支护系统的受力性能,项目部应控制锚杆材质、几何尺寸、连接方式及安装姿态等全过程,保证杆体严格按照设计参数选用螺纹钢,延伸率与抗腐蚀等性能满足工程等级要求。在安装过程中,工程人员需以轴线对中、角度精确、推力均匀的方式缓慢将锚杆插入预设孔位,避免强行冲击造成杆体变形,并配置定位器控制杆体姿态,提升锚固效果,预埋灌浆管,便于后续浆液充填密实。若安装过程中未达预定入孔深度,不得扭转或撞击杆体矫正,而应排查孔内残障后重新清孔,进而保证锚固张拉均匀与结构协同变形。

在高边坡支护工程中,项目部可以采用 $\Phi 32$ mm HRB400 级螺纹钢锚杆,控制锚固长度在 10 ~ 12 m,单根杆体由全长滚丝端头加工、中心段防腐涂层处理及螺帽锁定端预设锚具。同时于工区内封闭式钢筋加工棚加工,使用数控滚丝机加工两端螺纹,由质检人员逐件检验螺纹饱满度与尺寸偏差,且使用环氧富锌底漆进行防腐处理,全长喷涂厚度在 120 μm 至 150 μm 间,干燥后统一编号分类堆放,严禁交叉堆压。安装环节中每根锚杆均要配置两道定向定位器,保持其在插入过程中与孔轴重合,双人协同缓推,严禁用撬棒等方式助力。入孔后立即插入高压注浆管与 $\Phi 10$ mm 通气软管,双管距在 120 cm 以内,确保浆液可均匀充盈孔底、排除孔内空气。若遇局部孔位插杆受阻,工程人员立即启动清孔操作,使用高压风水交替冲洗直至障碍排除。安装作业完成后统一封口处理,设置临时支撑防止杆体位移,进而提升锚杆构件受力一致性,为后续注浆与张拉环节奠定基础,确保边坡锚固系统长期稳定运行。

3.4 优化注浆配比流程,增强岩体结合强度

注浆施工质量直接决定锚固系统与岩体的黏结性能及荷载传递能力,合理的配比体系能兼顾流动性、稳定性,保证浆液在注入后能够充盈孔壁缝隙、紧贴杆体表面并固结成型,形成高强度的锚固界面^[5]。由此,技术人员需根据现场岩体裂隙特征与孔壁粗糙度调整水灰比、添加剂种类,且动态调整注浆压力,防止浆液离析、沉降等质量隐患,进而实现优化注浆配比流程。

施工中宜采用机械搅拌方式保障浆液均质性,借助反压或段塞注浆工艺提升注浆饱满度,并有效封闭孔壁裂隙,提高锚固段与基岩的整体强度,为后续施工环节提供可靠保障。

在实际工程中,施工人员要采用水泥基注浆材料,基础配比为水泥:水=1:0.5,掺入3%高效减水剂与0.5%膨胀剂,在施工前进行室内试配试验,控制初凝时间在45分钟以内,保证28天抗压强度不低于30 MPa。搅拌环节采用双轴卧式搅拌机,控制拌合时间在120 s,浆液经循环管道送至注浆泵系统,防止二次沉降。注浆采用单孔单管压密注浆工艺,注浆压力控制在0.6~1.2 MPa之间,压入速度约为2 L/min,现场施工人员根据孔口返浆情况及孔内压力变化动态调整注浆速率。每孔注浆前还要设定试压段,观察孔口是否漏浆,确认密闭性良好后再行注入。为提升注浆密实度,在主注浆完成后管理人员还应设置间歇补浆程序,于初凝前再次注入同等配比浆液,保障孔壁接触面与杆体表面形成连续无空腔浆膜层,保障高边坡支护工程的长期稳定运行。

3.5 落实张拉锁定制度,防止预应力应力流失

在高边坡预应力锚杆防护体系中,若张拉控制不当或锁定程序不严,将导致应力值偏低、传力失衡,甚至出现预应力衰减等现象。施工人员应在锚固段强度达到标准值后进行锚杆张拉,采用多点同步控制策略,保证张拉力均匀传递至锚固体中,并实施双控管理,即以控制张拉力为主、伸长量为辅,量化受力过程。锁定锚具时,技术人员还要充分考虑锚夹回缩与应力回弹,预留安全裕度,形成可靠的应力保持机制,进而建立标准化张拉锁定制度,有效落实设计张力,也为锚杆系统后期维稳提供技术支撑。

施工现场需设专用张拉平台,配置双缸同步千斤顶与数字张拉仪,实时读取张力数据。锚杆张拉前,由技术人员使用超声波实测锚固段注浆强度,确认其已达到设计要求的75%以上并不低于15 MPa。预张拉阶段采用50%、80%以及100%分级加载法,观察锚具夹持状态与杆体响应变化,判断锚固体是否黏结孔壁。张拉至设计张力后,技术人员立即测定实际伸长值,理论允许误差控制在 $\pm 10\%$,如实测偏离明显,则启动复张并校核孔内施工参数。同时按标准程序操作锁定环节,在张力达到设计值1.1倍后缓降至设计张力,实施锚具夹片压紧,避免瞬时卸载引起回缩。锁定完成后,杆体外露部分涂覆环氧树脂封闭层,防止环境因素影响锚具性能,有效确保预应力系统稳定运行,为高边坡长期安全提供有力保障。

3.6 完善混凝土养护层面,巩固坡面结构完整

混凝土养护主要承担抗风化侵蚀等多重功能,既能提供锚杆杆体外露段的防护隔离,又能紧密贴合框架梁、坡面基层,提高整体结构的抗变形能力。施工中技术人员需控制喷射压力、喷嘴角度与作业间距,保证混凝土均匀附着、密实成层。为提升成型质量,施工人员应分层分段逐次推进,在初凝前及时修补空鼓、脱落部位,避免界面脱离导致结构裂损。高质量的喷护层可有效减缓地表水冲刷、热胀冷缩及干湿循环破坏坡面结构,进一步巩固高边坡锚固系统的稳定性。

在高边坡支护工程中,喷护层厚度需控制在6~8 cm之间,混凝土强度等级为C25,骨料最大粒径不超过10 mm,配比控制为水灰比0.42,掺入早强剂与微膨胀剂以提升收缩补偿性能。施工前施工人员系统清理坡面,清除风化层、浮石以及植被残根,使用高压水枪湿润作业面,降低界面吸水率,提升黏结效果。喷护作业时采用双料腔干喷机,喷嘴距离在1.2 m以内,喷射角度保持垂直于坡面 $\pm 15^\circ$,推进顺序自上而下、先梁后面,保证锚杆周边喷层密实贴合,且遣专人修补锚杆周边,填实边角空隙、消除死角积灰。喷层作业完成后洒水养护72小时以上,保持喷面湿润状态以促进水化反应,并在喷护完成后设置表面防裂网格层,铺设 $\Phi 4$ 钢筋焊网搭接固定喷护层,提升其抗拉性能。进而封闭坡面不稳定结构暴露面,显著提升了边坡的整体完整性。

4 结束语

高边坡锚杆防护技术是应对复杂地质条件下边坡稳定问题的重要手段,其结构性能依赖全过程工艺。施工过程中需要结合坡体构造特征与受力机制,构建高度匹配的技术响应体系。借助系统化、标准化的施工路径,有效构建坡面稳定结构,强化锚固与岩体间的关系,提升整体结构适应环境扰动的能力,为高边坡支护提供安全、耐久的工程支撑。

参考文献:

- [1] 邓铭武. 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J]. 工程技术研究, 2023,08(21):26-28.
- [2] 黄富兴. 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J]. 交通世界, 2023(18):38-40.
- [3] 蔡泽辉. 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2022(21):186-189.
- [4] 邢宗锐. 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基中的应用分析[J]. 交通世界, 2021(33):129-130.
- [5] 余健雄. 高边坡锚杆防护施工技术在公路路基工程中的应用[J]. 中华建设, 2021(08):100-101.

市政给排水施工中长距离顶管施工技术的运用探讨

徐淑鹏¹, 王 健²

(1. 济南普利给水工程设计院有限公司, 山东 济南 250000;

2. 济南水务集团, 山东 济南 250000)

摘 要 随着城市化进程的持续推进和地下空间开发利用需求的日益增长, 长距离顶管施工技术作为一种高效、环保的非开挖施工方法, 在市政给排水工程领域得到了广泛应用。本文系统分析了该技术的原理、关键问题(如管材选型、动力配置、轴线控制)及核心施工要点(前期准备、进出洞技术、顶进控制), 并在设备选型、土压平衡及防水密封方面提出质量控制措施, 以期为提高施工安全性及工程效率提供实践参考。

关键词 市政给排水施工; 长距离顶管施工技术; 顶进过程控制技术

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.031

0 引言

随着城市化进程加快和基础设施建设持续发展, 长距离顶管施工技术被广泛运用于城市给排水、燃气输送、电力通信中。但长距离顶管施工遇到了地质条件复杂、施工难度高、质量控制要求高等多种挑战。如何保证顶管施工质量和安全已成为工程领域急需解决的重点问题。文章对长距离顶管施工技术质量控制要点进行系统分析, 以期为促进工程质量和确保施工安全提供参考。

1 长距离顶管施工技术原理与关键问题分析

1.1 技术原理与工艺特征

长距离顶管施工技术是当代市政给排水工程的关键技术之一。该技术的核心原则是借助先进顶推设备和精密导向系统, 实现无需挖掘或较少挖掘地表就可将管道沿着预设轴线远距离、高精度地敷设于井下。该项技术具有明显的工艺特征, 集机械、液压、电子控制、材料科学等多个学科的前沿研究成果于一体, 表现出高效、环保、适应性好等突出优点^[1]。施工期通过顶进路线的科学规划、顶推力和方向的准确控制以及土压平衡的动态调节等关键技术环节的实施, 有效地克服传统开挖施工给城市交通带来的影响、环境和地下管网网络受到扰动和损害, 施工效率和工程质量大大提高。同时, 长距离顶管技术具有适应复杂地质条件的特点, 可在软土、砂层、岩层等各种地质环境下稳定运行, 为综合开发利用城市地下空间提供有力的技术支撑^[2]。

1.2 关键技术难点

1.2.1 管体材料选型与性能要求

考虑到长距离顶管作业面临着高压力、强摩擦、潜在腐蚀性环境、地质条件不确定等极端工况, 管体材料选用必须考虑高强度、耐腐蚀、优良耐磨性和抗疲劳性能等。具体地说, 材料需要有足够大的抗拉强度和抗压强度来抵抗顶进时较大的推力和地层反力。与此同时, 它的耐腐蚀性也直接影响着管道的使用寿命和安全性, 尤其在含盐、含酸或者高湿度的特殊地质环境下, 材料耐蚀性问题不容忽视^[3]。另外, 管体材料耐磨性对降低顶进时摩擦阻力和提高施工效率具有重要意义, 同时优良的抗疲劳性能可保证管道长期运行时结构的完整性和稳定性。

1.2.2 动力系统配置与稳定性保障

针对长距离顶管作业需要穿越复杂多变地质条件这一特点, 动力系统既需要有较强的顶推能力来克服地层阻力, 又需要有一定的灵活性和适应性来处理施工中可能遇到的各类突发状况^[4]。为此, 动力系统设计需要考虑顶管机功率输出、扭矩特性、速度调节范围、多级中继之间协同工作机制等因素, 以保证顶进时能根据地质反馈对动力参数进行实时调节并达到精准控制。与此同时, 为确保动力系统长时间稳定工作, 需要利用高可靠性液压传动元件、先进电子控制系统和智能化故障诊断及预警机制等手段来实现动力系统工作状态的实时监控和维修。另外, 制定良好的应急预案和快速响应机制来处理可能发生的动力中断和设

备故障等应急问题,是保证长距离顶管施工动力系统稳定运行的重要措施^[5]。

1.2.3 管道轴线控制与纠偏技术

考虑到地下地质条件复杂多变以及顶进时可能遇到的难以预料的因素,管道轴线很容易出现偏移现象,如果没有得到及时有效的纠偏,就会对管道铺设精度和后续使用功能造成严重的影响。因此,需要建设具有高精度测量、实时数据传输、智能分析、快速响应等功能的轴线控制系统。在先进激光导向技术的支持下,管道轴线控制与纠偏技术实现对管道轴线定位的持续、动态监控,同时配合液压纠偏装置,根据实测数据对顶管机前进方向和姿态进行自动或者人工调节,保证管道轴线严格遵守预设轨迹。与此同时,针对复杂工况轴线偏移,需要研究和开发高效纠偏算法和策略,充分考虑地质条件、顶进参数、管道受力状态等诸多因素,制定科学合理的纠偏方案。另外,在施工期间加强监测和数据分析,对可能存在的轴线偏移风险进行及时识别和预警,是提高管道轴线控制和纠偏技术的重要手段。

2 长距离顶管施工技术核心要点

2.1 施工前期准备与方案优化

施工前的准备工作需要全面详细,涉及地质勘察、地下管线探测、施工场地安排、设备选型及调试、人员培训、安全教育等诸多方面。通过详细的地质勘察准确地掌握了施工区域地层结构、岩土性质、地下水情况,为顶管机选型和施工参数提供科学依据;地下管线探测的主要目的是防止施工过程中对现有管线造成损害,从而确保城市基础设施能够安全、稳定地运行。合理安排施工场地和认真选择设备可显著提高施工效率和作业安全性。但方案优化是根据工程实际情况和施工经验在前一阶段的准备工作中迭代提升施工方案。通过引进先进数值模拟技术,精细化分析顶进时力学行为、土压平衡状态、管道受力特性等,为优化调整施工参数提供数据支持;同时吸取同类项目成功的实例和失败的经验教训,从施工流程、工艺参数、风险防控措施等方面进行综合考察和完善,保证施工方案科学、合理、可行。

2.2 进出洞口关键施工技术

在出入洞施工之前,需要对洞周围地质状况做全面深入的检测和分析,准确把握土层分布、地下水位、岩土力学参数,并在此基础上制定科学合理的加固方案。加固措施常用注浆加固、旋喷桩、钢板桩支护来提高洞口土体稳定性和承载能力,避免顶管机出入过

程中出现土体坍塌和涌水涌砂险情。施工时严格控制顶管机出入速度和姿态,以保证顺利准确地出入洞。同时,对洞口密封系统做了精心设计和安装,使用优质密封材料和先进密封工艺有效地阻止了地下水、泥浆等向外渗透,确保施工环境干燥和安全。另外,建立完整的监测体系来实时监测洞口土体变形、地下水位变化、顶管机工作状态等信息,并在出现异常时,随即采取相应对策,保证出入洞口施工安全顺利。

2.3 顶进过程控制技术

顶进时需要结合先进监测设备和智能算法对顶管机推进速度、顶推力、扭矩、姿态等关键参数实时准确监测和调节。利用高精度传感器网络实时获取顶管机附近土体压力、变形等信息,并结合数值模拟技术动态分析土体应力状态和变形规律,从而为顶进参数优选提供科学依据。同时,利用先进的液压控制系统和自动化调节装置对顶推力和推进速度进行基于实时监测数据的自动调节,保证顶管机能在复杂的地质情况下顺利高效推进。另外,顶进时姿态控制也是非常关键的,利用激光导向系统和高精度陀螺仪对顶管机轴线偏差实时监控和纠偏,保证管道按设计轴线精确敷设。顶进时也需要密切注意土压平衡情况,并通过调节注浆压力和注浆量来保持土压平衡以避免地面隆起或者沉降等不利现象。

2.4 减阻注浆工艺控制

在长距离顶管施工中,减阻注浆工艺的控制是核心技术之一,它的精细调控直接影响到顶进效率和工程的安全。其过程是将特制浆液灌注到顶管机附近土体中形成润滑层来有效地减小顶管机和土体之间的摩擦阻力,提高顶进速度和减少设备磨损。实施时需要对浆液配比进行准确控制,并根据地质条件对水泥浆、膨润土、外加剂配比进行动态调节,保证浆液既具有较好的流动性,使其能够完全穿透土体,同时也具有足够的强度,使其保持稳定。同时,注浆压力和注浆量控制也要求准确无误,压力过高会对土体造成扰动甚至损伤,注浆量过大不能形成有效润滑层。为此,借助先进注浆设备和智能控制系统对注浆参数进行实时监控,根据顶进速度和土体反馈适时进行调节。另外,减阻注浆工艺需要和顶进过程密切协同配合,保证浆液在顶管机前形成一条持续均匀润滑带,才能达到最佳减阻效果。

2.5 辅助施工技术的应用

对于复杂多样的地质条件而言,泥水循环系统和触变泥浆减阻技术互为补充,泥水循环系统将泥水混

合物循环运输,不仅可以均衡地下水压力、避免涌水涌砂,还可以将钻屑带出,保持顶进面稳定;触变泥浆减阻技术是通过利用泥浆的润滑属性,在管道和土体之间创建一个隔离层,从而显著减少摩擦阻力并提高推进效率。另外,巧妙地应用中继间技术,在管道内布置若干中继环实现分段顶进和接力推进,从而有效地解决远距离顶进时顶推力传递困难的问题,确保顶进过程连续稳定。同时,激光导向及自动纠偏系统是精准控制中的“智慧之眼”,通过激光束对管线轴线偏差进行实时监控,配合自动化控制系统对顶进方向进行快速反应和调节,保证管线严格遵循设计轨迹敷设。在地质条件较差的地区,冻结法加固、注浆加固及其他辅助技术起到不可取代的作用,其方法是对土体进行冻结或者灌注固化剂,为确保顶管施工的安全和可靠性,要增强土壤的强度和稳定性。

3 长距离顶管施工质量控制要点

3.1 顶管设备选型原则

在选择顶管设备的过程中,需要遵守一系列原则,才能保证设备性能和工程需求之间的高度一致。一是适应性原则,这意味着设备必须完全适应施工区域的地质条件,包括土壤类型、地下水情况、岩石硬度等,并选择具有相应顶推力的设备、扭矩、耐磨性顶管机克服地质阻力,确保顶进过程顺利进行。二是可靠性原则,强调设备要具有高稳定性和耐用性,关键部件需要高质量的材料和先进的制造工艺来保证长期使用、在高负荷运行时依然能够保持良好的性能,缩短故障停机的时间并提高施工效率。三是经济性原则,需要在满足工程需要的同时,充分考虑设备购置成本、运行维护费用、使用寿命等因素,并进行技术经济比选性价比最佳设备方案。另外,智能化和自动化水平是选择现代顶管设备时的一个重要考虑因素,对先进设备进行自动监测、故障预警及远程控制等可以显著提高施工安全性和质量控制水平。

3.2 土压平衡控制体系

土压平衡控制体系是通过精密调控顶管机刀盘切削作用下土体压力和外界水土压力之间的动态平衡来达到顶进过程平稳和安全。它的建设是建立在地质条件深度解析和土力学原理准确运用的基础上,需要根据地层特性制定合理土压目标值并需要考虑土体稳定性和顶进效率等因素。然后,利用高灵敏度土压传感器对顶进面上土压的变化情况进行实时监控,并与先进自动控制系统相结合,实现了顶管机推进速度、螺旋输送机速度、注浆量的动态调节,保证土压波动在

容许范围之内。对于复杂地质条件,如软硬不均匀的地层或者富含水的地区,也需要辅之以泥水循环系统或者触变泥浆技术来进一步优化土压平衡的效果和降低对土体的扰动。另外,还需建立一套完整的土压平衡预警机制来对可能存在的风险进行数据分析和预测,并在处理突发地质变化时适时采取防范措施,例如调整顶进策略和加强土体加固。

3.3 防水密封技术措施

落实防水密封技术措施需要遵循多层防护和精细施工等原则,从管道接口的设计开始,利用高精度加工和高质量密封材料保证接口处不出现缝隙和渗漏点。具体地说就是可以选择橡胶止水带和遇水膨胀止水条这类性能优良的密封元件并配合先进注浆工艺将防水性能突出的化学浆液充填到接口缝隙中,从而构成牢固的物理和化学双防水屏障。同时,根据管道在通过不同地质层过程中可能遇到的水压力变化情况,设计合理的排水系统和压力平衡装置来对管道内、外部水压力进行动态调整,降低压力差造成渗漏的风险。施工期加强现场管理和质量监控,防水密封作业全过程跟踪检测,采用超声波探伤、无损检测技术、红外热成像等技术,及时发现和修补可能存在的渗漏隐患。

4 结束语

长距离顶管施工技术在城市基建中的运用至关重要,其质量控制关系到项目的成败和使用寿命。从顶管设备的选择、土压平衡控制、防水密封技术几个方面,论述质量控制的要点。合理的选择能保证设备的性能符合工程需求;完善土压平衡体系,可确保顶进面稳定和安全;精细防水密封措施,能有效阻止地下水渗入和环境破坏。通过这些措施可提高施工质量和管理水平。随着科技进步和实践的不断深入,长距离顶管施工质量控制必将朝着智能化、自动化、精细化的方向迈进,助力城市基建可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘壮,兰春雨,戴志福,等.市政给排水施工中长距离顶管施工技术研究[J].科学技术创新,2024(16):183-186.
- [2] 栾梓铭,师磊.市政给排水长距离顶管施工技术研究[J].现代工程科技,2024,03(23):53-56.
- [3] 张开浩.市政给排水施工中长距离顶管施工技术探讨[J].门窗,2024(15):70-72.
- [4] 刘瑜.市政给排水施工中的长距离顶管施工技术解析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(18):105-107.
- [5] 张瀚文.探究市政给排水施工中长距离顶管施工技术的应用[J].大陆桥视野,2024(09):127-129.

斜板沉降池技术在回收水池改造中的应用与优化研究

钟 炆, 杨成应, 熊 伟*

(瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550500)

摘 要 本文分析了斜板沉降池的设计与安装, 重点研究了水流优化与流速控制对沉降效果的影响, 提出了斜板与水池系统的有效集成方案, 并围绕斜板角度、间距、沉降池深度、水流分布等因素, 提出了优化设计策略, 并对斜板结构与材质的提升进行了深入分析。优化后的回收水池实际运行效果评估结果表明, 斜板沉降池技术能显著提高水质、提升沉降效果、节能降耗、减少环境影响, 并为回收水池的高效改造提供技术支持。

关键词 斜板沉降池; 回收水池改造; 水流分布; 斜板材质; 沉降效果

中图分类号: X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.032

0 引言

随着工业化进程的推进, 水资源的紧缺问题日益严重, 水资源的回收和再利用成为解决水危机的重要途径。回收水池作为水处理系统中的核心设施, 承担着重要的水质净化和沉降作用。然而, 传统回收水池在沉降效率、空间利用及水质改善等方面存在诸多不足。为提升回收水池的处理效果, 斜板沉降池技术作为一种创新的水处理技术, 近年来广泛应用于水处理系统中^[1]。斜板沉降池技术通过优化水流路径和沉降过程, 提高沉降效果, 减少占地面积, 具备了显著的经济性与环境效益。

1 斜板沉降池技术在回收水池改造中的应用

1.1 斜板沉降池的设计与安装

斜板沉降池是一种通过斜板结构来提高沉降效率的水处理技术, 其设计原理主要基于加速颗粒物在水中的沉降过程(见图1)。传统的沉降池因水流路径长、占地面积大而影响处理效率, 而斜板沉降池通过斜板倾斜布置, 增加了沉降面积, 使颗粒物在较短的路径内完成沉降, 从而提高处理效果。

在设计过程中, 斜板的角度、间距以及板的材质是关键因素。斜板的倾斜角度一般选择在 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间, 角度越大, 沉降效果越好, 但也需要考虑水流的稳定性。斜板间距通常设定为 $2 \sim 5$ cm, 以保证较大的沉降面积和较小的水流阻力。斜板材质多选用耐腐蚀、抗污物附着材料, 如不锈钢或聚乙烯。安装时,

斜板需要固定在沉降池的支架上, 确保角度和位置精确, 以便实现最佳的水流分布和颗粒物沉降。

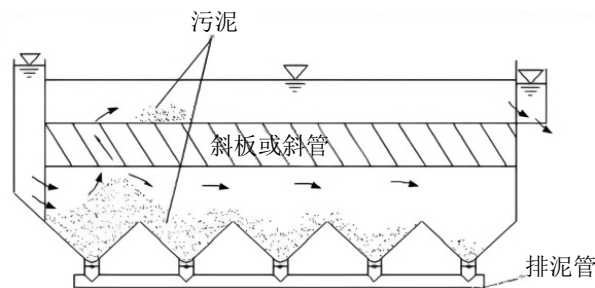


图1 斜板沉降池设计原理

1.2 水流优化与流速控制

通过控制进水口的位置和设计, 确保水流在进入沉降池时分布均匀, 避免局部水流过快或过慢。这一过程通常通过设置分布均匀的进水口或导流装置实现, 从而优化水流的流向和流量, 减少水流的不均匀性。同时, 流速控制通过调整斜板的角度和间距来实现。斜板的设计原理是利用倾斜角度增大沉降面积, 同时通过调节斜板间距来控制水流的流速。较小的间距有助于减小水流的阻力, 使水流保持较低的速度, 以便悬浮物质能在较短时间内沉降。较大的间距则适用于处理较大颗粒物, 保证颗粒在沉降过程中不会因水流过快而重新被搅动。

1.3 斜板与回收水池系统集成

斜板沉降池技术在回收水池改造中的集成是通过将斜板结构与现有回收水池系统相结合, 优化水流与

*本文通信作者, E-mail: 670219273@qq.com。

沉降效果的关键步骤。斜板沉降池的设计需要与回收水池的水流布局紧密匹配。斜板通常被安装在回收水池的沉降区域,倾斜角度、间距和数量根据水池的容积和水流量进行合理规划。斜板的安装必须确保其与水流动向平行,并且避免倾斜角度过大或过小,以免影响沉降效率^[2]。在集成过程中,回收水池的进水口和出水口位置也需调整,以确保水流能够均匀分布在斜板表面。进水口通常设在池体的一端,通过导流装置将水流分配至各个斜板区域,避免水流过于集中或偏向某一部分,影响整体沉降效果。

1.4 自动化监控与调整

系统通过安装传感器监测水流量、沉降池内水位、流速以及水质等关键参数,通过 PLC(可编程逻辑控制器)进行实时分析。根据水池的运行状态,系统自动调整进水流量、出水流量和流速,确保水流在最佳范围内流动。监控系统能够根据沉降效果动态调节水流路径和流速,避免局部区域水流过快或过慢影响沉降效率。

2 斜板沉降池技术在回收水池改造中的优化设计

2.1 斜板角度与间距的优化设计

优化设计的核心目标是提高沉降效率,同时降低运行成本。斜板角度和间距的选择直接决定了水流的速度、流态以及颗粒物的沉降性能。因此,精确计算与优化是实现技术提升的关键。斜板的角度直接影响水流的倾斜度和颗粒物的沉降时间。根据沉降理论,沉降速度 u_s 可用下式计算:

$$u_s = \frac{d^2(\rho_p - \rho_w)g}{18\mu} \quad (1)$$

式(1)中, d 是颗粒直径, ρ_p 是颗粒的密度, ρ_w 是水的密度, μ 是水的动力粘度, g 是重力加速度。角度的增大会减少水流路径的长度,有利于颗粒物的沉降,但过大角度会导致水流紊乱,影响沉降效果。同时斜板间距是影响沉降池性能的另一个关键因素。斜板间距 s 对水流的流动阻力和水流分布均匀性有显著影响。斜板间距过小会增加水流的摩擦阻力,导致水流不均匀,影响沉降效果;而间距过大会导致沉降池占地面积过大,影响水流的有效沉降空间。通过结合流体力学模型,斜板间距 s 的优化可以通过以下公式计算:

$$\Delta P = \frac{8\mu L Q}{\pi r^4} \quad (2)$$

式(2)中, ΔP 是水流通过斜板时的压力降, μ 是水的动力粘度, L 是水流经过的斜板长度, Q 是流量, r 是斜板间距的半径。通过此公式,结合不同间距下的流量变化,能够实现最佳的水流优化设计。在优化过

程中,流体动力学模拟(CFD)是一个非常重要的工具。通过对不同角度和间距设置的模拟计算,可以预测水流的分布、流速以及沉降效率。例如:若斜板角度为 45° ,斜板间距设为 3 cm,通过 CFD 模拟可以得到水流在不同区域的流速分布,从而进一步调整设计参数,以实现最大沉降效果和最小能量消耗。

2.2 沉降池深度与尺寸的优化

对于沉降池的深度设计,一般会采用 3~6 m 的深度,但为了提升沉降效果,可以根据颗粒物的大小和沉降速度进行创新设计。对于含有高浓度悬浮颗粒的水,设计时可采用“分段式深度”设计,将沉降池分为两个不同深度的段落。第一个段落采用较浅深度(约 3 m),用于较小颗粒物的初步沉降;第二段落则设计为较深的沉降区域(5~6 m),用于较大颗粒的进一步沉降。这种设计可以提高沉降效率,并减少能耗,因为较大的颗粒物在较深的沉降池段能够更快地沉降,而较小颗粒物在浅段会避免不必要的沉降时间浪费。在池体尺寸优化方面,以往都是根据水流量来设定池宽和池长比例(通常为 2:1 到 4:1)。但在优化设计中可以通过引入“可调式池宽”设计来优化水流分布。根据实际流量和水质波动,池宽可以设置为可调节的结构,通过机械装置或自动化系统调整池宽,以实现水流分布的动态优化^[3]。

2.3 水流分布的优化设计

在每个进水口处,加装导流板或导流槽,这些导流装置的作用是将水流均匀地引导至池体的不同部分,避免水流集中。导流板的角度一般设置在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,确保水流进入沉降池时具有适宜的方向性。并且池体内水流的均匀分布要求在沉降池内设计导流板和分流器。导流板的数量和布局必须根据实际池体尺寸、进水流量以及水流路径来调整。一般来说,导流板可以设置在每个斜板段的前端,分隔不同的水流通道,避免水流因斜板引起的不均匀流动。导流板的间距应根据水流量、沉降池深度和水流速度来确定,一般建议每个导流板之间的距离为 2~4 m。设计时,导流板的角度应与水流方向相匹配,通常角度设置在 30° 左右,可以有效地分散水流,减少水流的局部聚集和湍流。

2.4 斜板材质的提升设计

在当前斜板沉降池设计上,斜板材质的提升设计主要通过选用更先进、更适应实际工况的材料,进一步提高沉降池的耐用性、效率和成本效益。传统的斜板一般使用不锈钢或碳钢等材质,这些材质具有较好

的强度和耐腐蚀性,但在长期的使用过程中,依旧存在磨损、腐蚀、结垢等问题,尤其在高腐蚀性水质中,容易影响沉降效率,增加维护成本。建议使用高性能工程塑料(如聚乙烯、聚丙烯或聚氯乙烯),这些材料比传统的不锈钢具有更强的耐腐蚀性和抗磨损性能,能够应对更加苛刻的水质条件。与金属材料相比,塑料斜板的质量更轻,安装和维护更为便捷,且不易受水质变化的影响,特别适合处理酸性或碱性较强的废水。同时,复合材料的应用也是一种值得推广的优化设计。例如:使用玻璃钢(FRP)作为斜板材料,其耐腐蚀性、抗压强度和抗老化能力远超传统金属材质,特别适合长期暴露在恶劣水质中的使用环境。复合材料的耐磨性和抗结垢性能也能有效延长斜板的使用寿命,降低维护频率,减少系统的运行成本。对于高强度的斜板,表面涂层技术可以进一步提升其耐用性。例如:在斜板表面涂覆一层陶瓷涂层或耐腐蚀涂层,可以显著提高斜板的抗磨损能力,避免沉积物的附着和生物膜的形成,确保斜板在长时间运行下保持高效的沉降性能。

3 斜板沉降池技术在回收水池改造中的优化效果

3.1 沉降效果与水质改善

通过采用多点进水口设计、优化水流分布和提升斜板材质,沉降池能够有效降低水流速度,增加水流停留时间,从而实现更高效的颗粒物沉降。例如:在杭州某市污水处理厂的回收水池改造项目中,采用了优化设计的斜板沉降池。改造前,由于水流不均和沉降时间不足,水池的沉降效率较低,导致颗粒物难以完全沉降,最终影响水质。在进行设计优化后,沉降池通过多点进水口设计和水流导向装置改善了水流分布,使得水流速度均匀,沉降时间增加。优化后的沉降池不仅有效去除了水中的悬浮固体,还使水质得到显著改善。该回收水池的颗粒去除率提高了约30%,出水水质的悬浮物浓度降至原来的50%以下,明显提高了处理能力和水质,符合国家排放标准^[4]。同时使用高耐腐蚀复合材料和耐磨涂层的斜板设计,降低了结垢和腐蚀问题,延长了设备的使用寿命,进一步保障了回收水池的长期高效运行。

3.2 运行效率与经济性分析

改造后的回收水池不仅提升了处理能力,还降低了运行和维护成本。改造前,回收水池的处理水量为每日15 000 m³,经过优化后,处理水量提高到每日20 000 m³,提升了33%。沉降效率也得到了提升,从75%提高到95%,这意味着更多的悬浮物得到了有效去除,水质得到了改善。同时,水质改善的效果从50%提升至80%。在经济性方面,优化后的设计使年运行成本

从120 000元降至100 000元,节约了约16.7%的能耗支出^[5]。在维护成本方面,改造后的回收水池由于采用了耐腐蚀性更强的斜板材质,维护频率和成本明显降低,年维护成本从30 000元降至15 000元。这些优化设计显著提高了回收水池的处理能力,并降低了运营成本,提升了水质和经济效益。

3.3 环境影响与可持续性

以北京污水处理厂的回收水池改造项目为例,改造后的斜板沉降池技术通过多点进水口设计和优化水流路径,使水流分布更加均匀,有效提高了沉降效率。改造后,废水中悬浮固体的去除率提升了约40%,从原来的60%提高至90%以上。经过优化后的回收水池,出水水质中悬浮固体浓度从30 mg/L降低至12 mg/L,符合更严格的环保排放标准,极大地减少了水体污染,避免了对周围水域的富营养化和水质恶化问题^[6]。在可持续性方面,优化设计采用了高耐腐蚀的复合材料和涂层技术,使得斜板的耐用性和抗结垢能力得到了显著提升。

4 结束语

斜板沉降池技术在回收水池改造中的应用展示了显著的优势,尤其在提升沉降效果、改善水质和节约空间方面表现突出。通过优化斜板的角度、间距以及沉降池的深度和水流分布等设计,能够有效提高回收水池的处理效率,降低系统能耗,并减少运营成本。此外,优化后的设计提升了系统的经济性和可持续性,为水处理行业提供了更为高效的技术方案。随着技术的不断进步,斜板沉降池的应用将得到进一步推广,成为水资源回收和管理领域中的重要技术支撑。

参考文献:

- [1] 周启涛,张小莹,艾玉林,等.V型斜板新型结构泥沙池沉降特性试验研究[J].新疆农业大学学报,2022,45(04):330-336.
- [2] 魏家琦,吴璇,申琳,等.不同污泥斗倾角对竖式沉淀池沉降效果的影响[J].广东化工,2024,51(20):111-113.
- [3] 张颖娴,丁康康,于印鑫,等.振动式斜板浓密机振动特性与试验研究[J].机械设计,2021,38(10):41-46.
- [4] 李琳,付海林,谭义海,等.新型异向流泥沙池泥沙沉降特性试验与机理分析[J].农业工程学报,2021,37(16):90-98.
- [5] 李为堂,刘荣,王敏.雨水收集远程自动控制系统改造及应用[J].云南冶金,2024,53(01):161-167.
- [6] 刘婧.净水厂回收水池和排泥池设计研究[J].皮革制作与环保科技,2024,05(11):161-163.

岩土工程勘察中的水文地质勘察 技术要点与施工应用分析

赵宇乾，来振义

(河南黄河水文勘测规划设计院有限公司，河南 郑州 450003)

摘 要 随着基础设施建设规模的不断扩大与建设要求的提高，岩土工程条件对工程建设的影响日益凸显。在工程建设中，若忽视岩土工程勘察，可能引发地基沉降、边坡失稳、突水涌砂等工程灾害，造成巨大的经济损失和安全隐患。基于此，本文分析了岩土工程勘察的主要问题，从勘察技术要点、勘察施工双重维度出发，详细阐述了岩土工程勘察技术要点，以及多项关键勘察技术的施工方法，旨在为提升岩土工程勘察质量提供借鉴，进而规避潜在的工程风险。

关键词 水文地质勘察；岩土工程勘察；地下水动水压力；地下水水位升降；物探施工

中图分类号：P641

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.033

0 引言

岩土工程勘察作为现代建设工程的重点内容，通过组织开展一系列勘察活动，能够准确了解和掌握工程现场的地质、环境特征和岩土工程条件，识别不良地质问题和总结地下水位变动规律，制定科学的设计方案与施工方案。目前，部分建设工程尚未建立起标准化岩土工程勘察体系，技术要点把握不足，施工经验匮乏，导致岩土工程勘察结论存在偏差。因此，深入研究岩土工程勘察技术要点及具体施工应用，探索有效的技术手段和管理方法，对于保障工程建设顺利进行、提高工程质量具有重要的现实意义。

1 岩土工程勘察中的水文地质勘察难点

1.1 地下水动水压力

地下水动水压力是在地下水流动期间形成的水压力，压力大小取决于水体流动速度和地层渗透性能，水体流动速度越快，地层渗水系数越高，动水压力越大。地层结构在动水压力作用下，容易引发土体侵蚀、地基沉降、土体位移等问题，进而破坏建设成果。同时，地下水动水压力具备动态变化特征，不同时刻的动水压力值有着显著差别，压力骤然增减，进一步降低地层结构稳定性。岩土勘察阶段，勘察人员应准确掌握各项水文参数，包括地下水位、地下水流速等，按照参数变化，推算地下水动水压力，总结变化规律，客观评估动水压力对地层结构状态、现场施工活动造成的现实影响。在必要情况下，需采取注浆防渗等技术手段，人为调节地下水动水压力^[1]。

1.2 地下水水位升降

岩土工程勘察阶段与现场施工阶段，地下水位动态变化，地下水位变化会对工程建设质量和施工安全造成影响。其中，地下水位上升会导致地基结构出现软化膨胀现象，地基承载能力下滑，出现地基沉降、基坑渗漏水等问题；地下水位下降则会导致土体固结变形，地层内部形成中空空间，并引起地面开裂、地基不均匀沉降等问题^[2]。地下水位变化原因包括岩土形态、含水层结构、现场气候条件等，如何准确掌握地下水位升降规律，及时察觉水位异常变化问题，并采取专项处理措施，是岩土工程勘察的重点问题。对此，勘察人员既要全面掌握各项水文参数，绘制各项参数和地下水位的关系曲线，同时也要延长勘察时间。工程建设阶段，全程开展地下水位监测活动，预设警戒值，确认地下水位剧烈变化、未能处于安全区间后，即刻采取轻型井点降水等施工措施。

水文地质勘察是一项专业性较高的综合活动，勘察流程繁琐，勘察项目多。结合实际情况来看，水文地质勘察操作过程存在错误操作、违规操作等问题，导致岩土勘察报告与工程现场水文地质条件形成偏差，这也是推行标准化岩土勘察模式的现实需求。例如：在抽水试验环节，常见操作问题包括抽水孔和含水层透水/隔水边界未保持足够间距、未在地下水流垂直方向设置观测孔、提前结束抽水作业、省略验前试抽步骤，这些问题将导致试验结果无法准确反映工程现场水文条件。

2 岩土工程勘察中的水文地质勘察技术要点

2.1 选择勘察方法

岩土工程勘察方法主要分为钻孔取样、地球物探、化学分析和遥感技术四种类型,各类技术的勘察原理、适用范围不同。(1)钻孔取样需要在现场布设若干点位,钻孔采取岩土体样品,再将样品送往实验室化验分析,或是直接在工程现场检验样品,根据检验结果,掌握工程现场水文地质条件和地层结构物理力学参数。(2)地球物探全称为地球物理勘探方法,包含重力勘探、地震勘探、电法勘探、磁法勘探等技术手段,精准测量地下岩土体物理性质差异情况,掌握地层分布状况,具有不破坏地层结构完整状态、具备大面积勘测条件的优点,但勘探精度较低。(3)化学分析用于勘察工程现场水文条件,采集地下水样品,检测地下水化学成分,找出地下水来源,确定地下水运动轨迹。(4)遥感技术包含卫星遥感和无人机遥感,拍摄遥感影像和大范围采集遥感信号,从中提取地表参数,构建场地模型和绘制大比例尺地形图。

勘察人员在水文地质勘察方法选择环节必须遵循针对性、经济适用性和创新性三项基本原则。(1)针对性原则强调初步了解工程现场地形地貌条件,结合实际情况,针对性选择勘察方法。(2)经济适用性原则强调提前估计采取各项勘察方法时的总体勘察成本,确定勘察精度、勘察内容完整程度均满足水文地质岩土勘察要求的前提下,从中挑选实际成本费用较为低廉的勘察方法。(3)创新性原则强调优先采取新推出的现代勘察方法,综合应用表现远超传统技术手段,如采取三维地质雷达取代传统地质雷达技术,采取无人机航空摄影与激光扫描技术,取代传统人工测量技术^[3]。此外,单一类型勘察方法往往存在一定的局限性,无法满足复杂地质条件下的岩土勘察需求,如钻孔取样方法存在取样精度低、勘察速度慢、数据采集滞后的局限性,遥感技术存在无法掌握深层地层结构水文地质条件与物理力学参数的局限性。勘察人员应尽量组合采取多种类型的勘察方法,通过增加技术种类,弥补单一技术局限性,并通过相互验证勘察成果,从中找出岩土勘察误差。

2.2 确定勘察点间距

在工程现场分散布设多处勘察点,根据钻孔取样检验报告、化学分析报告来掌握工程现场水文地质条件,相邻勘察点间距越小,勘察密度越大,勘察结论越能真实反映建设工程水文地质条件,但也会加重勘察工作负担。勘察人员必须结合实际情况,合理设定

勘察点间距,做到对勘察效率、勘察精度的完美兼顾。具体来讲,勘察人员提前掌握工程资料信息,前往现场实地考察,按照地质环境复杂程度,确定勘察点间距,优先在土工建筑物周边线和角点位置布设勘察点,在地质环境较为复杂或工程建设质量标准严格的情况下,酌情增加勘察点数量,缩小勘察点间距,相邻勘察点间隔距离控制在20~25 m区间。同时,在工程现场局部区域地质条件复杂的情况下,需调整对应勘察点的位置、间距,如在地势起伏明显区域内,原有勘察点间加密布设全新勘察点,以勘察范围内最高点和最低点,作为新增勘察点布设位置。

2.3 编制勘察方案

岩土工程勘察是一项综合性活动,勘察流程繁琐,技术要求严格。在早期建设工程中普遍存在勘察方案内容缺失的共性问题,粗略编制勘察方案,仅对勘察方法、勘察技术路线进行规定,没有标注执行标准和操作流程,勘察活动主观性过强,频繁出现错误操作行为。因此,必须遵循标准化原则,编制内容详尽的水文地质岩土勘察方案,方案内容包含勘察目的、技术类型、操作流程、执行标准、精度要求等,作为岩土勘察施工活动的指导性文件。例如:在某套岩土勘察方案中,以查明不良地质作用类型、查明岩土体类型及工程特性、提供地基变形计算参数、查明地下水埋藏条件和分布状况、评价场地地震效应、提出基础设计可行方案作为岩土勘察目的,按照场地地层情况,布设多个勘探孔,包括控制性孔、一般性孔和基坑孔,以及在持力层坡度大于10%、暗沟、暗塘等异常地带加密布设勘探孔,逐一设定各类勘探孔的深度。按照所选取勘察方法,制定专项勘察计划,如钻孔取样计划、原位测试计划。以钻孔取样计划为例,按照地层种类来确定取样间距,按照地质结构确定取样深度,采取原装岩土样,并在场区内采集多组代表性水样,详尽规定钻进方法、取样方法、取土器型号、样品封存运输、试验样品制备等环节步骤的操作标准。

3 岩土工程勘察中的水文地质勘察施工应用要点

3.1 物探施工

物探施工环节,初步掌握岩层物理性质,采取多项物探技术,准确获取地下深处地质土体信息,包括断层破碎带位置、覆盖层厚度、基岩情况、含水层位置及厚度等。可选物探技术众多,包括高密度电阻率法、激电法、瞬变电磁法、地震折射波法等,各项技术手段的操作方式、施工要点有着本质区别,勘察人员必须熟练掌握物探技术的施工要点。以高密度电阻率法

为例,营造电流场,根据岩土体导电特征差异情况,获取地层结构断面数据,确定地层总体结构,测量各层级结构的埋深与厚度^[4]。现场部署 DUK-2A 或其他型号的电阻仪,布设测线,侧线沿途埋设多组电极,埋设位置避开高阻物体,电极间距设定为 10~20 m,根据桩点测绳,测量调整电极埋设位置。随机测量或全部测量电极接地电阻,接地电阻测量值限制在 100 k Ω 以内,如果接地电阻超标,则对电极埋设位置加以调整,也可选择并联多根电极。完成前置作业后,即可接通电源,供电电流稳定维持在 50 mA 以上,同步记录观测数据,根据电阻测量结果,判定岩土体种类,绘制地层结构图。如果存在读数困难、曲线畸变或极化不稳定等问题,表明测量过程异常,调整物探施工方案以解决问题,重复开展观测作业^[5]。

3.2 钻探施工

钻探技术也被称为钻孔取样方法,利用钻机旋转切割地层结构,破坏岩土体原状结构,形成一定深度、孔径的钻孔,从中采集岩土体样品,根据化验分析结果来掌握岩层性质、风化程度等信息,也可利用现有钻孔采集水样和开展灌浆试验、抽水试验。钻探施工环节,重点关注钻孔方法、样品采集两项问题,施工要点如下:(1) 钻孔方法。按照地层种类来选择钻孔方法,如在工程现场主要分布卵石层,或是地层夹杂大量块石的情况下,优先选择振动回钻方式,根据岩层坚硬程度,选择钻头种类,岩层松软时配备双层岩芯管钻头,岩层坚硬时配备金刚石钻头,并在湿陷性黄土层内配备螺旋钻头。全程观察钻孔过程,重点控制钻进方向、钻孔速度、钻孔深度,后续检查成孔质量,如把钻进深度偏差限制在 ± 50 mm 以内^[6]。(2) 样品采集。勘探孔成型,并通过质量检查后,立即在孔内采集岩土体样品和地下水样品,并把样品密封保存,限定时间内送往实验室化验分析。以岩土体样品采集方法为例,具体选择取土器采样方法,样品直径小于勘探孔孔径,孔内静压送入取土器,有效灌入深度必须超过 90% 勘探孔深度,再平稳上提取土器。如果地层结构土质坚硬,常规方法无法顺利采集岩土体样品,则由锤击贯入方式,取代静压贯入方式,严格遵循重锤少击原则,连续锤击打入取土器。

3.3 室内试验

室内试验包含室内土工试验和岩石试验,按照试验结果,掌握岩土体样品物理性质,进而推算工程现场地质结构参数信息。室内试验项目多,包含直接剪切试验、压缩模量试验、固结系数试验等,勘察人员应熟

练掌握各项试验的操作方法^[7]。以直接剪切试验为例,用于检测岩土体承受外部荷载所形成剪切力极限抵抗能力,确定土体抗剪强度,以内摩擦角和内聚力为检测指标。现场准备环刀样和四联直剪仪,可采取快剪、固结快剪或慢剪三种试验方法。快剪是向样品施加压力,剪切速率维持在 0.8~1.2 mm/min,试样短时间内出现剪切破坏问题,总体试验时间为 3~5 min。固结快剪是向试样施加一定程度的垂直压力,逐步挤出试样所含水分,固结过程趋于稳定后,继续施加水平剪应力,剪切速率维持在 0.8~1.2 mm/min,持续施加到试件完全剪切破坏,总体试验时间同样为 3~5 min。慢剪则是提前向试样施加垂直压力,直至试件经过充分排水,并处于稳定固结状态后,缓慢施加水平剪应力,剪切速率必须限制在 0.2 mm/min 以内。直剪试验结束后,汇总整理试验数据,绘制试样剪切力、剪切位移两项参数的关系曲线,以曲线峰值或稳定值作为岩土体抗剪强度^[8]。

4 结束语

水文地质勘察作为岩土工程勘察的核心组成部分,既是现代建设工程的技术重点,也是施工风险的高发环节,勘察报告内容直接关乎工程总体施工情况。施工单位应提高对水文地质勘察活动的重视程度,认识到当前实际面临的水文地质勘察复杂形势,并掌握正确的勘察技术,以及各项勘察技术的施工要点,专业开展水文地质勘察活动,真实反映工程现场水文地质条件,为工程建设顺利进行提供保障。

参考文献:

- [1] 易刚云. 水文地质岩土工程勘察设计及施工实践分析[J]. 四川建材, 2022, 48(09): 22-23, 48.
- [2] 陈永, 徐晓明. 水文地质岩土工程勘察设计及施工的研究[J]. 中国金属通报, 2020(05): 170-171.
- [3] 陈志. 水文地质岩土工程勘察设计及施工实践研究[J]. 工程建设与设计, 2024(16): 34-36.
- [4] 黄兴久, 牛延森. 岩土工程勘察、设计与施工一体化模式研究[J]. 科技与创新, 2025(05): 124-127.
- [5] 王娟, 吴业聘, 谭希鹏. 复杂地质条件下岩土工程勘察设计方案[J]. 科技创新导报, 2021, 18(30): 98-100.
- [6] 黄辉雄. 复杂地质条件下岩土工程勘察设计和施工的质量控制因素分析[J]. 西部探矿工程, 2023, 35(10): 1-3.
- [7] 穆岩. 岩土工程勘察、设计与施工一体化模式研究[J]. 房地产世界, 2023(13): 51-53.
- [8] 卜朦朦, 孟宪中. 某项目岩土工程勘察设计理论探究[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(03): 142-144.

基于 BIM 技术的建筑项目管理与工程监管协同工作模式研究

王大丰

(安徽恒升工程项目管理有限公司, 安徽 宣城 242500)

摘要 在建筑业信息化转型不断推进的背景下, 如何构建高效的项目管理与工程监管协同机制成为行业关注的重要课题。传统的管理与工程监管体系多依赖文档传递与定期会议, 难以实现对工程动态的实时掌控与全过程质量管控。而 BIM 技术以其三维可视、数据联动、信息集成等优势, 突破了以往“平面化”管理的局限, 为实现项目管理与工程监管工作的深度融合提供了可能。本文基于 BIM 技术, 构建了建筑项目管理与工程监管一体化协同工作模式, 并结合实际工程案例, 探讨了该模式在任务协调、信息共享、质量控制与进度监管等方面的实践路径。研究表明, BIM 技术能够有效提升项目各参与方之间的协同效率, 促进信息透明化与实时化, 增强工程监管工作的前瞻性和主动性, 从而推动建筑项目管理向智能化、精细化转型。

关键词 BIM 技术; 建筑项目管理; 工程监管

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.034

0 引言

随着我国建筑产业规模不断扩大, 工程复杂度与管理难度显著上升, 传统项目管理与工程监管模式面临诸多挑战, 如信息割裂、响应滞后等问题, 直接影响工程质量与安全控制成效。在此背景下, 推动信息化手段与全过程协同管理机制的融合创新, 已成为提升建筑项目综合管控能力的迫切需求^[1]。BIM 技术作为当前建筑业数字化转型的核心支撑, 其以三维可视、参数驱动等特性为项目管理与工程监管的高效协同提供了全新可能。尤其在住建部等部委发布《建筑信息模型技术应用统一标准》《“十四五”建筑业发展规划》等政策文件之后, BIM 技术的推广被明确纳入行业发展的主线任务。然而, 在实际应用中, BIM 技术更多被应用于设计建模与碰撞检测环节, 其在项目全过程管理与工程监管融合上的系统性探索仍较薄弱, 缺乏成熟的协同体系与实施范式^[2]。为破解这一瓶颈, 本文从建筑项目全生命周期管理视角出发, 围绕“模型驱动的协同控制”核心逻辑, 结合工程管理实践, 对基于 BIM 技术的协同机制设计、实施路径与操作策略进行系统研究, 旨在构建一套具有技术可行性与应用推广价值的建筑项目管理与工程监管融合模式。

1 BIM 技术赋能下的协同工作机制建构逻辑

在传统的建筑项目管理与工程监管模式中, 信息孤岛、沟通障碍与流程断裂是普遍存在的问题, 严重

制约了项目执行效率与质量监管的实时性。BIM 技术作为数字建造的重要支撑手段, 其本质是以三维数字模型为载体, 集成工程全生命周期的信息资源, 从而构建一个动态、共享、高效的协作环境。在这一技术赋能下, 协同工作机制的重构不再依赖单一职能部门的协调, 而是依托模型驱动的任务逻辑、权限体系与数据链条进行全过程整合与协同控制^[3]。

BIM 技术构建统一建筑信息模型, 打破不同岗位及不同阶段的信息壁垒, 实现施工单位、设计单位、监理机构和项目管理部门的数据互联互通, 所有参与方围绕同一数据源开展任务分解与进度跟踪, 减少重复劳动及信息失真情况。在任务执行方面, 借助 BIM 平台内置的流程引擎与标准化接口, 可对施工任务、监理检查点以及进度节点进行可视化配置和绑定, 实现“事件触发—任务分配—过程监管—成果反馈”的闭环管理逻辑, 保证每项任务有明确的责任归属和执行反馈路径。BIM 平台还可以嵌入智能预警机制, 凭借参数化分析和规则设定, 实时监控进度偏差、质量缺陷以及施工安全风险, 促使监理由事后控制转向过程控制和事前干预, 这种协同机制提升了信息处理的实时性与透明度, 加强了管理与监督的联动性和主动性, 为构建智能化、精细化的建筑项目管理模式奠定技术基础。

2 基于 BIM 技术的建筑项目管理与工程监理协同体系设计

2.1 构建统一的数据协同平台：模型主控、权限分层、多终端接入

在 BIM 协同体系设计的基础架构里，首先要搭建起统一的数据协同平台，实现多专业以及跨岗位的工程信息共享和流程对接，这个平台把 Revit、Navisworks 等建模工具生成的 BIM 模型当作核心，接入项目管理系统（如 PMIS）、监理系统（如智慧监理平台）、施工管理平台（如施工日志、巡检模块）等子系统，并且借助 IFC 标准或者 API 接口实现数据互通。为了保障数据安全以及流程有序，平台应该引入角色分级权限控制策略，依据用户类型如总包项目经理、专业监理工程师、业主代表来限定模型操作权限、信息可见范围以及审批链路径，为了提升现场可达性，可以部署移动端 BIM 应用，如 BIM5D 移动平台、BIMer 等，现场人员依靠平板电脑或者手机实时查看构件信息、记录问题、标注缺陷，实现数据在设计、施工、监理多环节之间的无缝贯通^[4]。平台应该配套搭建服务器，推荐采用私有云架构，并配置数据加密与备份机制，保证工程数据资产的安全和可追溯性。

2.2 任务驱动的项目与监理流程配置体系：节点绑定、路径追踪、反馈闭环

协同体系的关键之处在于把管理任务和 BIM 模型构件或者施工流程精确地联系在一起，并且依靠流程引擎来进行动态的推动。项目管理方可在 BIM 模型里按照构件编码以及工程量清单构建“构件—任务—责任人”三维任务库，举例来讲，当像“钢筋混凝土梁 L001”这样的某个构件进入施工阶段的时候，系统会自动启动“钢筋验收”“模板安装验收”“混凝土浇筑监督”这三个子任务，并且分别推送给对应的监理工程师。每一个任务节点都设置了时间范围、质量标准以及检查流程，完成之后上传结果文档或者照片，并且绑定签名信息，流程引擎支持串行、并行、条件分支、驳回以及自动转交等多种逻辑路径，对于应对复杂的工程审批场景有帮助，所有任务的轨迹都可在平台上实时呈现。这种机制让施工和监理行为不再是被动等待以及纸质对接，而是实现了精细任务推送、数据留痕以及过程控制的全流程闭环管理。

2.3 基于 BIM 模型的动态进度—质量双轨管控系统：构件状态驱动、同步监理节点集成

项目建设进程中的关键是控制进度和质量，在 BIM 协同体系当中，要构建以模型构件作为最小颗粒度的

“状态驱动”双轨控制体系，此体系借助进度模型以及施工仿真功能比如 Navisworks TimeLiner 实现施工计划动态可视化，模型里各个构件依据状态如未开始、施工中、已完工、待验收等被赋予不一样的颜色编码，项目管理人员可实时知晓施工推进的节奏。把监理控制点和进度节点做“映射”式嵌套，也就是说某构件需要在浇筑前完成材料检验、钢筋绑扎核查等监理子任务，这个过程在 BIM 模型中依照“进度触发监理”的逻辑来联动，监理人员借助 BIM 平台调取当前构件状态，核查相关工序流程以及问题日志，并且凭借“电子签署”机制确认验收完成，后续施工节点才可以继续执行。系统记录所有签署行为并自动生成质量台账，为后期溯源审计提供支持，该体系从数据层面实现了项目节点与监理工作的同步控制，切实杜绝了传统监理与施工“错步而行”的问题，保障工程进展与质量监管双向同步。

2.4 问题闭环与风险预警体系：模型标注、信息溯源、智能分析联动响应

建筑施工期间问题和风险难以避免，协同体系要搭建有高响应效率的“问题闭环管理系统”，此系统依靠 BIM 模型，能对构件级问题进行标注，如碰撞、漏项以及质量缺陷等，监理人员在现场可借助移动端扫描二维码来定位构件，及时拍照上传问题信息，还可以依据预设分类来建立问题档案。每条问题数据都与模型构件相绑定，同时记录责任单位、发现时间、处理进度等元数据，平台凭借工作流引擎，会自动把问题转发给责任单位，并且设定整改期限与反馈路径，要是超期未完成就会升级推送给上级监理或总包负责人，针对高频问题区域或者历史质量差点位，系统可依靠数据挖掘生成“风险热区图”与“问题趋势曲线”，为管理层制定预控策略提供决策支持。

3 BIM 技术中建筑项目管理与工程监理协同体系应用策略

3.1 基于 BIM 实施的“监理前置介入”策略

在传统的项目流程中，监理单位大多是在施工阶段才开始介入，一般情况下只能做到“事后监督”，没办法对前期的设计方案以及施工策划产生有效的影响，要实现基于 BIM 技术的协同优化，就得推行“监理前置介入”这一策略，也就是说在 BIM 模型开始建立的初期，就要把工程监理单位纳入模型会审以及设计优化的流程当中。这个策略的关键之处在于把监理人员当作模型审查的参与者，运用如 Solibri Model Checker、Navisworks 等的审图工具，针对设计模型展

开专业性的质量评估、施工可行性的验证以及工序协调性的预判,比如说,在土建阶段,监理工程师应该和设计方一起去识别梁柱碰撞、预埋管道冲突、结构荷载边界等这些潜在的问题,并且提出整改意见直接嵌入模型注释里面。监理可依据施工阶段的工程节点来制定预控策略,如制定关键节点之前的风险排查计划以及材料到场评估标准,并且同步写入施工组织模型,通过这样的介入方式,监理的职责从“监督执行”提升到“源头控制”,形成以模型作为依据的多方协同审查机制。项目一旦进入施工阶段,各个关键控制点的模型依据以及责任分工已经明确,监理工作的开展更有前瞻性和操作性,可有效地减少返工率和质量盲区^[5]。

3.2 基于BIM模型的“监理数字巡检与问题闭环整改”策略

在工程执行的阶段,项目现场的状况较为复杂,传统的纸质巡检记录无法实时同步以及结构化存档,这对问题响应效率造成了影响。针对这种情况,可以在BIM协同体系中推行“监理数字巡检”的策略,这个策略依靠BIM模型构件二维码识别、移动终端采集以及基于位置服务技术,实现施工现场和模型数据的实时联动。监理人员在现场利用平板或者手机扫描构件编码,可快速调出该构件的施工图纸、设计参数、上次检查记录以及整改状态,并且在现场完成拍照、标注、语音记录等操作,所有数据会自动绑定到对应模型构件并同步到BIM云平台,一旦问题被提交,系统会按照设定的流程推送给相关施工单位和责任人,并且设置反馈期限以及二次复检任务,若反馈超期没有闭环,平台会自动上报给项目管理单位或者业主代表。该策略有统计分析功能,可自动生成问题清单、责任单位统计报表等内容,为项目月度例会、施工评估以及阶段性总结提供量化数据方面的支持。采用数字巡检与模型绑定的方式,监理人员可以对进度、质量、安全等多个维度进行全方位的实时监管,同时强化问题追溯能力,有效避免“口头整改”“文档丢失”等传统管理漏洞。

3.3 基于BIM与5D集成的“进度—成本—质量”联动控制策略

建筑项目的核心目标不仅限于进度与质量,更包括对成本控制的实时管理。因此,在BIM协同应用中,需引入5D BIM(三维模型+时间维+成本维)策略,以支持项目管理方与监理方对施工任务的多维联动控制。此策略的实施关键在于将WBS(工作分解结

构)编码体系与构件模型绑定,同时关联采购合同、预算条款、工程量清单等信息,实现从构件级到系统级的成本与进度联控。每个施工任务节点的完成状态一经更新,系统可实时推送工程量完成比例、材料消耗情况与结算预估值,并生成动态成本曲线。监理单位可根据平台推送的实际进度与预算偏差情况,开展“同步审核”与“阶段性付款”监管,确保实际执行与财务支付匹配。例如:若某一楼层模板与钢筋完成量达90%,系统即自动比对该项清单完成比例并更新成本支付建议,供监理审核后通过。此策略还可集成施工进度仿真功能,监理人员通过可视化方式掌握关键线路偏差与工序堆叠情况,及时调整质检计划与现场监管重心。

4 结束语

通过对基于BIM技术的建筑项目管理与工程监理协同工作模式的系统分析与策略设计,提出了一套集成数据协同平台、任务驱动流程配置、动态进度—质量双控机制及问题闭环反馈体系的协同管理架构。在此基础上,进一步制定了监理前置介入、数字巡检联动和5D多维度集成控制等应用策略,强调从技术层面强化信息流动、提升响应速度与决策透明度。实践证明,BIM协同体系不仅打破了传统“施工—监理”之间的信息壁垒,还推动了管理与监督行为由线性被动向闭环主动转变,为建筑行业管理模式转型升级提供了可复制、可推广的技术路径。未来,随着BIM技术与物联网技术、AI技术的融合深化,该协同模式将在智能建造领域发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 李志昂. 建筑工程施工中工程监理的作用及质量控制管理[C]// 重庆市大数据和人工智能产业协会, 西南大学, 重庆工商大学, 重庆建筑编辑部. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 浙江明康工程咨询有限公司, 2025.
- [2] 黄明非, 刘佳, 王维. 桥隧工程试验与检测[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2023.
- [3] 刘昌明. BIM+ 建筑设备系统与识图[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2023.
- [4] 薛传中. 基于BIM技术的建设工程监理精细化管理研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(06):108-110.
- [5] 崔晓铭. 基于BIM技术下建设工程监理精细化管理的思考[J]. 建材与装饰, 2018(31):170-171.

基于复杂城区环境的浅埋暗挖隧洞施工安全风险识别与防控研究

李瑞军¹, 普 恒²

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500;
2. 云南省滇中引水二期工程有限公司, 云南 昆明 650000)

摘 要 复杂城区环境下浅埋暗挖隧洞施工面临诸多安全挑战, 地质条件不明、地面沉降、邻近建筑影响等问题易引发安全事故。本文系统识别了城区浅埋暗挖施工中的主要风险因素, 分析动态风险评估防控对策, 提出精细化管理与技术手段协同优化路径, 以期对实现风险可控、施工高效的目标有所裨益, 进而保障工程质量与周边环境的稳定性, 推动隧道工程可持续发展。

关键词 复杂城区环境; 浅埋暗挖; 隧洞工程; 安全风险识别

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.035

0 引言

在城市轨道交通和地下管廊工程中, 浅埋暗挖法因其对地表扰动小、适应性强而广泛应用于城区地下施工, 受限于城市密集建筑、地下管线复杂、地质条件多变等因素, 浅埋暗挖隧洞施工安全风险显著提升, 如何在复杂城区环境中有效识别风险、构建科学的安全管理体系, 成为当前隧道工程领域的重要研究课题^[1]。

1 浅埋暗挖隧洞施工安全风险识别体系构建与评估方法

1.1 风险影响机制分析

1. 地质条件引发风险机制。浅埋暗挖隧洞施工常处于人工填土、淤泥质土、粉砂层与风化岩等多种岩土交替叠置区, 下述三点为主要风险机制: (1) 围岩分层厚度差异: 人工填土厚度约 3 m, 淤泥质土厚度约 2.5 m, 风化岩仅 1 m, 软硬层交替导致开挖面附近围岩发生不均匀收敛, 开挖时必须采用超前支护; (2) 节理裂隙密集发育: 在断层或褶皱带段, 裂隙间距仅 0.3 ~ 0.6 m, 裂隙面倾角多变, 每隔 4 m 需布设钻孔探测一次以掌握裂隙走向及孔隙水压力; (3) 局部应力集中效应: 开挖面前缘围岩动载激活节理带, 裂缝迅速扩展形成塑性区, 常见裂缝带宽度可达 0.8 m, 若支护设计未提前考虑此荷载增量, 支护滞后将导致掌子面局部失稳^[2]。

2. 施工扰动与地表沉降风险机制。(1) 开挖一支护节奏失配: 当单次开挖环节长度超过 1.5 m 且支护跟进落后超过 6 h, 扰动引发的围岩收敛量常超过 3 mm,

地表沉降漏斗随之出现; (2) 沉降传导路径: 扰动区范围一般为开挖直径的 1.7 倍, 在最严重的工况下监测网格点 (网格间距 5 m) 上日累积沉降量可达到 2.2 mm, 通过管形水准仪和倾斜计实时监测^[3]; (3) 振动诱发二次沉降: 施工振动幅度超过 4 mm 时, 泥质土层内的剪切弱带会扩展, 导致应变局部放大并加快沉降速率。严格控制单次环节开挖长度为 1.2 m 以内, 支护同步率保持在开挖后 30 min 内完成并配备微振监测仪, 对振动水平进行在线预警与调整^[4]。

3. 地下水条件对工程风险的影响机制。(1) 孔隙水压力释放: 隧顶若位于含水层顶板下 1 m 范围内, 一旦破坏水力平衡, 涌水流量可达到 15 L/min, 易形成管涌并引发坍塌; (2) 渗流侵蚀与空洞形成: 在渗透系数为 1×10^{-4} m/s 的砂土中, 长时间渗流会在支护背后冲刷出直径约 0.5 m 的空洞, 削弱背后土体支撑; (3) 降水引发附加沉降: 采用井点降水法时, 井点间距 2 m、单井抽水量 25 L/s, 可将水位降低 2 m, 伴随地表平均沉降梯度约 1.4 mm/m, 需平衡降水方案与沉降控制。

1.2 安全风险评价指标体系构建

构建浅埋暗挖隧洞施工安全风险评价指标体系, 需明确评价维度及其相应指标, 总体可划分为“地质环境”“施工工艺”“结构响应”“环境影响”四大准则层, 每层设置 4 至 5 项具体评价指标共计 17 项指标, 地质环境维度包括围岩类别指数、地层厚度、节理裂隙密度与地下水位深度, 施工工艺维度涵盖单环开挖长度、支护同步率、施工振动幅度和降水方式; 结构响应维度由掌子面收敛量、环向应力峰值、支护变形量和数

值模拟安全系数组成,环境影响维度则包含地表沉降量、邻近建筑裂缝等级、管线位移量和施工噪声级。层次分析法,专家问卷与现场监测数据对各指标进行比较判断,可获得初步权重向量,采用熵权法对监测数据进行客观赋权,校正主观权重,最后通过权重互补融合得到综合权重。例如:地质环境维度权重为0.30,施工工艺为0.25,结构响应为0.23,环境影响为0.22,结合现场监测得到的掌子面平均收敛数值、地表最大沉降数值及支护应力测点读数等原始数据,利用归一化处理 and 加权求和方法生成综合风险得分,综合得分大于0.65时启动红色预警并实施应急方案,介于0.45~0.65之间维持黄色预警并加强监控,小于0.45则为绿色安全区,该评价体系既能依据连贯的结构逻辑揭示风险要素,又能结合实时监测数据实现动态分级预警,为施工安全管理提供量化依据和决策支持。

2 复杂城区浅埋暗挖隧洞风险类型及特征分析

2.1 地表沉降与邻近建筑损伤风险

在复杂城区环境中,浅埋暗挖隧洞施工所引发的地表沉降主要由隧道开挖扰动、支护滞后及土体自重释放三大因素共同作用而成,开挖过程中围岩收敛和隧顶拱部变形沿开挖面外部不断传导至地表,使隧道中心线两侧形成沉降漏斗,其影响半径一般可达开挖直径的两倍,微振动和施工振动会加速近地表软土层内部剪切变形并叠加大变形,形成不规则沉降形态,常在附着排水层与软土夹层交界处出现沉降突变。基于监测网格布设,可对沉降轮廓进行拟合,预测施工完成后地表最大沉降及波及范围,邻近建筑物其变形控制要求需满足沉降差值 $\leq 1\text{ mm/m}$,倾斜度 $\leq 1\text{ mm/m}$,裂缝宽度控制在 0.3 mm 以内,超限时应立即采取注浆加固或桩基下托等补救措施。具体容许标准可参照《城区建(构)筑物基础沉降规范》,对不同结构类型(框架、砖混、钢筋混凝土剪力墙)制定分级限值并结合工程监测结果实施分段预警,以有效防止沉降对构筑物安全造成的损伤^[5]。

2.2 掌子面稳定性与坍塌事故风险

掌子面的稳定性是浅埋暗挖隧洞安全的关键指标,其评价判据通常采用结构安全系数和围岩变形量相结合的方法:一方面,通过数值模拟或理论分析计算掌子面应力分布,获取最大主应力与岩体抗剪强度比值作为安全系数;另一方面,结合现场测得的掌子面收敛量、围岩裂缝宽度和支护变形量进行对比,当收敛量超过 3 mm 或裂缝宽度超过 0.5 mm 时视为不得继续掘进状态。坍塌事故多因围岩软弱、支护滞后或超挖荷载作用而起,当掌子面出现裂隙贯通、滚石脱落或

喷锚混凝土层破碎时,即为预警信号,需立即停止开挖并实施超前排桩、注浆或冻结加固,将掌子面稳定性监测数据与数值模拟结果实时对照,可动态调整支护形式与施工节奏,防范坍塌风险对施工进度和周边环境造成的严重影响。

2.3 地下水突涌及管涌风险

隧洞开挖扰动引发的地下水突涌主要发生在含水饱和砂土或砂卵石地层中,当隧道开挖面破坏了原有的水力平衡,孔隙水压力快速释放并沿围岩节理或支护背后路径澎湃涌入开挖空间,形成“水柱”喷射现象,突涌流量可达 10 L/min ,水流携带的土体颗粒在支护背后累积成直径约 0.3 m 的淤砂柱,若不及时截洪和排水则淤砂区与原土体界面产生空洞,引发局部坍塌甚至大范围透水破坏,管涌则多出现在隧底或附属排水设施处,地下水自底板缝隙或管道接口处高压喷出形成轴向或横向渗流通道,淤砂堆积高度可达 0.5 m ,持续排水后导致底板承载减弱与支护结构下沉,管涌事故的诱因包括施工中未进行充分的降水预报与控制、注浆帷幕不连贯、支护环间隙过大以及周边已有地下水排水管网影响,在监测端应结合孔隙水压力传感器与流量计,对突涌点进行全天候监控并在探测到水流或压力突变时立即启动注浆封堵或合流排放措施,避免突涌与管涌风险扩大对隧洞结构和周边地层稳定的严重威胁。

2.4 城市管线损坏与次生灾害风险

浅埋暗挖隧洞施工所穿越的城市管线网络通常包括给水、燃气、电力、通信和排水等多种类型,管线埋深多在 $1.5\sim 2.5\text{ m}$ 之间,管径从 $100\sim 800\text{ mm}$ 不等,材料以球墨铸铁、钢管和聚乙烯管为主,开挖震动和围岩收敛会导致管线发生弯曲、错位或裂缝,尤其当管线与隧道轴线平行或交叉角小于 30° 时应力集中效应更为显著。管线损坏后会造成供水中断或燃气泄漏,泄漏介质自高压管道喷溅入隧洞极易形成积水或可燃气体聚集,引发电气短路、火灾或爆炸等次生灾害。给水管破裂产生的湍急水流还会冲刷邻近土体形成地表沉陷或下沉漏斗,严重时在道路或建筑物下方出现开放性塌陷,依托管线信息化管理平台与地质雷达对管线走向、埋深及结构状态进行实时核查,以杜绝管线损坏带来的重大次生事故。

3 城区复杂环境下浅埋暗挖施工安全管理水平提升对策

3.1 优化设计与前期调查

在浅埋暗挖隧洞工程中,设计方案的科学性与前期调查的精准性关系到整个施工过程的安全控制能力,

城区复杂环境下地质、水文、市政设施密集交错,优化设计与调查策略不仅是技术准备的必要环节,更是系统性风险防控的关键前置手段。第一,深化工程地质与环境风险调查,构建高分辨率风险图谱。前期调查需突破传统钻孔式调查“点状信息”不足的局限,应结合高密度物探技术、激光扫描与地质信息建模,全面获取浅层结构、断裂带、软弱夹层、富水区等关键风险源的空间分布特征,将地下管线、基坑、高层建筑基础、地铁线路等与施工区域存在物理干扰的外部设施纳入调查范围。第二,优化设计参数与施工方案匹配,增强方案适应性与韧性。设计阶段充分考虑复杂地质条件下的变形机理与力学响应,采用非线性有限元分析或数值模拟技术,开展多情景工况模拟,评估不同支护结构、开挖方法与衬砌组合的稳定性与经济性,设计应体现“强支护—快封闭—分步施工”的原则,预留工艺调整空间,满足不同地段与突发变化的适应能力。

3.2 强化施工监控与技术保障

施工阶段是浅埋暗挖隧洞安全风险暴露最频繁、事故发生概率最高的时期,尤其在城区密集建筑与既有管线交织的环境下,任何细微扰动都可能引发系统性连锁反应,必须构建以“主动预警+技术支撑”为核心的多维监控与技术保障体系,实现施工风险的实时掌控与智能调控。第一,构建“全要素—多维度—高频次”的智能化监控系统。施工过程中围绕掌子面、拱顶、隧道周边、覆土层及邻近建筑等关键部位部署监测设备,形成涵盖地表沉降、围岩变形、支护结构应力、水位变化、瓦斯浓度等在内的多参数监测体系,采用自动化采集与远程传输技术,将数据实时汇聚至项目监控平台设置合理的预警阈值与响应梯度,实现“秒级感知、分钟级反馈、小时级响应”的风险控制能力。第二,引入数值仿真与施工反馈耦合机制,实现过程动态优化。结合施工进度与实时监测数据,构建数值反演模型与地下空间力学响应模拟系统,动态评估结构稳定性与围岩应力演化过程,如在拱顶沉降加速时可加强喷锚支护并缩短循环长度,在侧壁位移突增时则考虑加设中间支撑或改变开挖形态。第三,完善“监测—预警—处置”联动体系,确保快速响应落地。监控系统不仅要“看见问题”,更要能“处理问题”,项目部应设立风险指挥小组,实时分析监测数据波动并比对预案触发条件,对应风险等级自动生成响应措施建议,如加固支护、暂停开挖、疏散人员等并同步推送至调度平台、手机终端与值班系统,实现从感知到响应的快速闭环。

3.3 完善安全培训与管理制度

在城区复杂环境中,作业空间受限、工序交叉密集,任何疏忽都可能放大安全风险,必须以制度建设为支撑,以人员素质提升为抓手,全面构建“制度保障+人员能力”双轮驱动的管理体系。第一,强化分工明晰与岗位责任制,构建制度性安全网。项目应建立“横向到边、纵向到底”的安全责任体系,明确各岗位的安全职责与监督流程,从项目经理、安全总监到各班组长,应分级签署安全责任书,形成压力层层传导、责任逐级落实的组织架构,完善危险源辨识、隐患排查、违章行为通报等制度,设置奖惩机制,激励一线安全执行力,推动管理制度从“纸面化”走向“行为化”。第二,开展精准化、常态化的安全教育培训,提升实操能力与风险意识。进场施工人员实行“三级安全教育+专项技术培训”制度,确保其熟悉工程特点、施工工艺与应急流程,针对掌子面作业、注浆止水、支护施工等高风险工种采用“理论讲解+现场实训+情景演练”的混合模式,提升其应对突发事件的反应能力与处置规范性,项目部应定期开展典型事故案例剖析会和安全技术交底,推动安全知识向作业层面深度渗透。

4 结束语

城区复杂环境下的浅埋暗挖隧洞施工,安全风险高度集中,涉及地质、水文、设计、施工与管理等多个环节,只有实现“前期精准识别—中期动态控制—后期制度保障”的闭环管理,才能有效应对复杂城市地下工程中的多重风险,为类似项目提供系统性、实用性的安全管理参考,提升城市基础设施建设的安全水平与工程运维的长效机制建设能力,推动地下空间开发的规范化、智能化与可持续发展。

参考文献:

- [1] 李建贺,许然,高仝,等.浅埋暗挖隧洞下穿高速公路路基沉降控制[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(07):1252-1263.
- [2] 程玉泉,李明,李炜杰,等.浅埋暗挖输水隧洞塌腔处理复合技术[J].水利科技,2024(01):49-53.
- [3] 田盛兰.浅埋暗挖施工技术在隧洞穿越河流中的应用[C]//水与水技术(第9辑).辽宁水利土木工程咨询有限公司,2019.
- [4] 魏欣.基于浅埋暗挖法的桥梁涵洞隧道工程施工技术[J].工程机械与维修,2024(02):105-107.
- [5] 高德存,张笑林.浅埋暗挖隧洞穿越防渗墙施工技术[J].建筑技术,2023,54(16):2006-2008.

抗浮锚杆筏板漏水防治探究

王文昌

(中航建设集团有限公司, 北京 101407)

摘要 在建筑工程中, 抗浮锚杆与筏板基础作为地下结构抗浮体系的关键组成部分, 其施工质量直接影响整体结构的耐久性与安全性。随着地下空间开发规模的扩大, 抗浮锚杆筏板系统的应用日益广泛, 但与之相关的渗漏问题也逐渐显现。渗漏不仅会导致混凝土结构内部钢筋锈蚀, 还可能引发地基土体流失, 进而威胁建筑物的长期稳定性。基于此, 本文认为需积极探索新型防水材料和优化施工工艺, 通过改进节点构造和加强质量管控来提升抗浮体系的防水性能。

关键词 抗浮锚杆; 筏板漏水; 地下水压力; 外观检查; 渗透检测技术

中图分类号: TU94

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.036

0 引言

抗浮锚杆筏板系统的防水性能是地下工程设计与施工中的核心课题之一。由于地下水位变化、混凝土收缩及外部荷载作用等因素, 筏板与锚杆连接部位易成为渗漏的薄弱环节。传统的防水措施往往侧重于单一材料的性能优化, 而忽略了系统整体的协同作用。现代工程实践表明, 仅依靠材料防水难以完全避免渗漏风险, 需结合构造防水与工艺控制形成多层次的防护体系。工程实践中需重点把控锚杆节点防水处理、筏板混凝土抗渗性能及施工缝质量控制, 同时建立完善的渗漏监测系统。

1 抗浮锚杆筏板漏水原因分析

1.1 锚杆施工质量缺陷

抗浮锚杆施工质量缺陷是导致筏板漏水的重要因素。在锚杆钻孔过程中, 若孔壁垂直度不足或孔径不符合设计要求, 可能导致注浆不密实, 形成渗水通道。锚杆注浆材料配比不当或注浆压力不足, 会使浆液无法充分填充钻孔间隙, 降低锚杆与周围土体的粘结力, 进而影响防水效果。锚杆端部与筏板连接处的防水处理不到位, 如止水环安装不规范或密封材料失效, 也会造成局部渗漏。锚杆防腐层破损或施工过程中机械损伤, 可能加速锚杆锈蚀, 进一步削弱其抗渗性能^[1]。

1.2 筏板混凝土浇筑问题

筏板混凝土浇筑过程中的质量控制不当会直接影响其防水性能。混凝土配合比不合理, 如胶凝材料过少或骨料级配不良, 可能导致混凝土内部孔隙率增加, 降低抗渗性。浇筑过程中振捣不充分或过度振捣, 均可能引发混凝土离析或泌水, 形成薄弱层或微裂缝。施工缝处理不当, 如接茬面清理不彻底或新老混凝土

接合不良, 易成为渗水路径。混凝土养护不足会导致早期收缩裂缝, 尤其在高温或干燥环境下, 裂缝扩展速度加快, 进一步加剧渗漏风险。

1.3 地下水压力影响

地下水压力是抗浮锚杆筏板渗漏的主要外部驱动力。当地下水位较高且水压较大时, 水体易通过锚杆与筏板连接处的微小缝隙渗入结构内部。季节性水位波动或降水集中期, 动态水压变化会加剧渗流作用, 导致原有防水层失效。地下水长期浸泡可能侵蚀混凝土中的可溶性成分, 使毛细孔道逐渐扩大, 进一步降低结构抗渗能力。在高水压环境下, 锚杆与周围土体之间的结合面易发生水力劈裂, 形成新的渗漏通道。

1.4 周边环境因素干扰

周边环境因素对抗浮锚杆筏板防水性能的影响不容忽视。邻近工程施工振动或重型机械作业可能引发筏板微裂缝扩展, 破坏原有防水体系。温度变化引起的热胀冷缩效应会使混凝土产生温度应力, 尤其在温差较大的地区, 反复应力作用易导致裂缝生成。化学污染地下水或土壤中的侵蚀性介质, 如氯离子或硫酸盐, 可能腐蚀混凝土和锚杆钢材, 加速材料劣化进程。周边建筑物基坑降水或地下管道渗漏, 可能改变局部水文地质条件, 增加筏板承受的不均匀水压。

2 抗浮锚杆筏板漏水检测方法

2.1 外观检查手段

外观检查是抗浮锚杆筏板漏水检测的基础方法, 主要通过目视观察和辅助工具识别渗漏迹象。检查人员需重点观察筏板表面是否存在湿润痕迹、钙化沉积或明显裂缝, 这些现象通常与渗水活动相关。锚杆外露部位应仔细查验, 关注锈蚀、析出物或潮湿状况。

利用强光手电筒照射混凝土表面,可增强细微裂缝的辨识度。对于可疑区域,可采用湿度检测仪测定表面含水率,辅助判断渗漏范围。检查过程中需记录渗漏点的分布特征和形态,为后续分析提供依据^[2]。该方法操作简便且成本较低,适用于大面积初步筛查,但受限于表面可见性,难以检测内部隐蔽渗漏。

2.2 压力测试方式

压力测试通过施加可控水压评估抗浮锚杆筏板的整体密封性能。测试前需封闭所有排水孔道,在特定舱室内注水并维持规定压力值,观察压力表读数变化。稳压阶段若出现压力持续下降,表明存在渗漏可能。对于锚杆节点,可采用局部加压装置检测连接部位的密封效果。测试过程中需监测不同标高位置的响应差异,以识别潜在渗漏路径。该方法能定量反映结构防水的完整性,尤其适用于新建工程的验收检测。但需注意测试压力不得超过设计允许值,避免造成结构损伤,且实施前需做好充分的准备工作^[3]。

2.3 渗透检测技术

渗透检测技术利用示踪物质揭示渗流路径和渗漏点位置。常用的荧光染料检测法将着色剂注入可疑渗漏区域,通过紫外线灯照射观察染料渗出位置。气体示踪法通过注入氦气等惰性气体,采用嗅探仪检测气体逸出点定位渗漏。对于混凝土内部渗流,可钻孔埋设渗压计测量不同深度的水压梯度变化。红外热成像技术通过捕捉渗水区域与周边混凝土的温度差异,实现非接触式检测。这些方法能有效识别隐蔽渗漏,尤其适用于复杂节点部位的精细检测,但需要专业设备和操作技能支持。

2.4 仪器监测途径

仪器监测通过安装自动化设备实现渗漏的长期动态监控。光纤传感系统可沿锚杆布设,通过测量光信号衰减定位渗湿位置。混凝土湿度传感器阵列嵌入筏板不同深度,实时传输含水率数据并生成三维湿度分布图。声发射监测装置捕捉渗水引发的微振动信号,通过频谱分析判断渗漏活跃度。自动化监测平台整合多源数据,运用算法模型预测渗漏发展趋势^[4]。该途径能实现全天候连续监测,特别适用于重要地下工程的预防性维护,但初期投入较高且需定期校准仪器精度。监测数据的积累可为渗漏机理研究提供实证基础。

3 抗浮锚杆筏板漏水防治措施

3.1 锚杆施工优化策略

锚杆施工优化是提升抗浮锚杆筏板防水性能的关键环节。在钻孔阶段,应采用高精度定位设备确保孔位准确,并使用导向装置控制钻孔垂直度,避免孔斜导致注浆不密实。注浆材料宜选用微膨胀水泥基浆液,

通过优化水灰比和掺入适量外加剂,提高浆液的流动性和后期强度。注浆过程中需采用分段压力注浆工艺,先低压填充孔底,再逐步增压确保浆液充分渗透至周围土体。锚杆自由段应设置双层防腐体系,外层采用环氧涂层,内层包裹聚乙烯套管,并在套管两端进行热熔密封。锚杆与筏板连接部位应预埋钢制止水环,环内填充聚硫密封胶,形成多道防水屏障。施工完成后需进行锚杆预应力张拉,通过预加应力减少后期变形引起的接缝开裂风险^[5]。

3.2 筏板防水设计改进

筏板防水设计需构建多层次防护体系。结构自防水方面,应采用抗渗等级不低于 P8 的补偿收缩混凝土,通过掺入膨胀剂抵消收缩应力,并优化骨料级配减少孔隙率。在构造防水层设置上,筏板底部应铺设 4 mm 厚高分子自粘防水卷材,接缝处采用热风焊接处理,顶部涂刷 2 mm 厚聚氨酯防水涂料形成连续膜层。对于锚杆穿越筏板的节点,设计三重防水构造:筏板混凝土内预埋遇水膨胀橡胶止水环,环外设置钢板止水带,表面再覆盖聚合物水泥防水砂浆。筏板后浇带应做成阶梯形接口,内置镀锌钢板止水带,并采用微膨胀混凝土浇筑。设计阶段还需建立有限元模型,模拟不同水位工况下的渗流路径,针对性加强高水压区域的防水措施。

3.3 地下水控制方法

地下水控制需采取主动干预与被动防护相结合的策略。在施工前期,应通过井点降水系统将地下水位降至筏板基底以下,降水井布置需根据水文地质勘察数据优化井距和深度。永久性防水体系应设置盲沟排水网络,采用级配碎石填充沟槽并包裹土工布,引导渗水汇入集水井后机械排出。对于高水位地区,可在筏板外围施作高压旋喷桩止水帷幕,形成封闭的截水屏障。动态水位监测系统需安装电子水压计,实时传输数据至控制中心,当水位超过预警值时自动启动应急排水泵。在建筑使用阶段,应保持地下室集水井抽排设备的持续运转,并定期清理排水管道防止堵塞。季节性水位变化显著区域,可增设备用电源确保极端天气下的排水系统正常运行。

3.4 后期维护管理要点

后期维护管理对维持防水系统效能具有持续性作用。应建立季度巡检制度,重点检查筏板表面有无新增裂缝、锚杆头部的防腐层状态以及排水沟畅通情况。采用红外热像仪对疑似渗漏区域进行扫描,发现异常温度场立即开展钻孔取芯验证。维护记录需实施数字化管理,通过 BIM 平台整合历次检测数据,生成渗漏风险热力图指导重点维护区域。针对微小裂缝应及时采用低压注浆修复,材料选择环氧树脂或聚氨酯类灌浆料,注浆压力控制在 0.3 MPa 以内。防腐涂层每三

年应进行全面检测,对破损部位先进行喷砂除锈处理,再涂刷改性环氧煤沥青涂料。排水系统每月需测试水泵启停功能,每年汛期前更换磨损的机械密封件。维护人员应接受专业培训,掌握新型检测设备和修复工艺的操作规范^[6]。

4 抗浮锚杆筏板漏水防治案例分析

4.1 案例1:某商业综合体项目

该商业综合体项目地下结构采用抗浮锚杆与筏板基础结合的设计方案。施工过程中发现筏板局部渗漏,主要出现在锚杆穿孔位置及后浇带接缝处。针对锚杆穿孔渗漏,采取钻孔注浆封堵工艺,使用超细水泥基渗透结晶材料进行高压注浆,确保浆液充分填充锚杆与混凝土之间的空隙。后浇带接缝渗漏处理采用环氧树脂化学灌浆,配合外贴高分子防水卷材加强层。在结构自防水方面,优化混凝土配合比,掺入抗裂纤维与膨胀剂,减少收缩裂缝产生。施工阶段实施全过程质量控制,重点监控锚杆安装垂直度与密封处理,采用BIM技术模拟锚杆排布,避免密集穿孔导致混凝土浇筑不密实。养护期间保持筏板表面湿润覆盖,控制内外温差。后期验收采用红外热成像检测潜在渗漏点,确保防治措施有效性。

4.2 案例2:某地下车库项目案例

该地下车库项目为两层框架结构,抗浮锚杆与筏板连接节点出现系统性渗水。治理方案分三个层次实施:结构层修复采用钻孔泄压后注入聚氨酯发泡止水剂,形成弹性密封体;防水层增设1.5 mm厚喷涂聚脲涂层,覆盖锚杆头周边500 mm范围;面层处理则浇筑80 mm厚细石混凝土保护层,内配 $\Phi 4@150$ 钢丝网防裂。针对锚杆根部渗漏,创新采用不锈钢套管密封工艺,套管与锚杆间隙填充遇水膨胀橡胶条。施工过程实行样板引路制度,先完成典型节点试验段验证工艺可行性。材料选择上,锚杆防腐采用三重防护体系(热镀锌层+环氧涂层+阴极保护),减少电化学腐蚀导致的密封失效。监测系统安装渗漏报警传感器,实时反馈水位变化与渗流状态,为维护提供数据支持^[7]。

4.3 案例对比分析

两案例在技术路线上呈现差异化特征。商业综合体案例侧重材料性能提升与精细化施工,通过改性混凝土与高精度注浆解决局部渗漏;地下车库案例则强调系统防护,构建“结构修复+主动防水+实时监测”的三重防御体系。在锚杆处理方面,前者采用常规注浆封堵,后者引入机械密封装置,体现从被动治理到主动预防的技术演进。在防水材料选择上,综合体项目依赖传统水泥基材料,车库项目应用新型高分子涂层,反映材料技术进步对防治效果的提升。施工管理

差异体现在:综合体项目依托BIM技术优化构造节点,车库项目通过样板试验验证工艺可靠性。监测手段上前者侧重事后检测,后者建立全过程监控网络。两种模式各具优势,商业综合体方案更适合修复工程,地下车库方案更适用于新建项目的预防性设计。

4.4 案例应用启示思考

案例实践表明,抗浮锚杆筏板漏水防治需构建全链条技术体系。设计阶段应进行专项防水构造设计,明确锚杆穿孔部位的密封等级与验收标准。材料研发方向应聚焦高性能注浆料与长效密封剂的开发,重点解决动水环境下材料的粘结耐久性问题。施工工艺标准化是质量保证的关键,需编制锚杆防水施工工法,规定钻孔清孔、密封安装、注浆压力等关键参数。项目管理层面建议建立“设计—施工—运维”一体化协作机制,将防水工程纳入主体结构质量终身责任制。技术创新路径可探索智能密封系统,如预埋感应式止水胶囊,在发生渗漏时自动激活膨胀密封。未来规范修订应考虑增加抗浮锚杆防水专项条款,明确不同水文地质条件下的防护等级要求与技术措施,推动行业防治水平整体提升。

5 结束语

抗浮锚杆筏板漏水的防治是一项综合性技术课题,涉及设计、材料、施工及后期维护等多个环节。通过优化节点构造、严格施工质量控制及采用新型防水材料,可显著降低渗漏风险。未来,随着智能监测技术与新型防水工艺的发展,抗浮锚杆筏板系统的防水性能将得到进一步提升。工程人员需持续关注技术创新与实践经验,以确保地下结构的安全性与耐久性,为城市地下空间的可持续发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 刘毅.抗浮锚杆于筏板后施工技术分析及研究[J].建筑技术,2024,55(15):1825-1828.
- [2] 戴国鸿,李敏子,朱效民,等.一种大直径压力型抗浮锚杆底板加固技术[J].建筑施工,2023,45(10):1956-1958,1962.
- [3] 王波.地下水丰富地区抗浮锚杆施工技术及其防水构造研究[J].建筑机械化,2023,44(09):66-69.
- [4] 董崇海,吴大鹏,陈中华,等.复合地基筏板基础地库上浮成因与处置方案研究[J].山西建筑,2023,49(17):73-76.
- [5] 邵浩祥.地下室抗浮问题分析及处理措施研究[J].居舍,2021(33):163-165.
- [6] 张卓然.考虑上部荷载影响区的抗浮锚杆合理布置研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [7] 肖娅婷.地下工程抗浮锚杆受力机理及设计优化研究[D].兰州:兰州理工大学,2019.

屋面防水施工质量控制研究

杨 超

(安徽兴慎工程建设管理有限公司, 安徽 阜阳 236226)

摘 要 以某项目屋面防水工程为案例, 针对其屋面渗漏、排水不畅及卷材破损等质量问题展开分析。研究发现, 屋面渗漏主要由施工工艺不当、材料质量缺陷及后期维护缺失导致; 排水不畅归因于雨水管堵塞、坡度不足及管道设计不合理; 卷材破损与基层清洁不彻底、施工操作违规及环境侵蚀密切相关。基于此, 提出优化施工工艺并强化质量监管, 严控材料采购与检测, 完善后期维护体系; 改进排水设计并定期清理管道; 加强施工人员培训, 选用耐候性材料并规范基层处理等解决措施, 以期提升屋面防水工程质量提供参考。

关键词 屋面防水; 渗漏; 排水不畅; 卷材破损

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.037

0 引言

屋面防水工程是建筑功能与耐久性的关键保障, 但在特殊气候地区, 其施工质量面临严峻挑战。低温、高紫外线及强气压等环境因素对防水材料 & 施工工艺提出了更高要求。本文通过对某项目进行实地调研与案例分析, 系统梳理该工程的质量问题成因, 发现施工工艺不规范、材料适应性不足及维护机制缺失是主要症结。从技术优化、管理强化及材料改进三方面提出针对性措施, 为解决屋面防水工程的质量通病提供参考, 同时为类似气候条件下的施工质量控制积累经验, 助力提升建筑工程整体可靠性^[1]。

1 项目概况

A 项目为住宅类低层建筑, 地上六层, 建筑结构为钢筋混凝土框架结构, 设计建筑耐久年限为 50 年, 建筑面积 3 000 m², 建筑物最大高度 18.40 m, 设计建筑耐火等级为二级, 建筑物抗震设防烈度为七度。

A 项目屋面防水工程采用的是 SBS 改性沥青防水卷材, 该材料具有优良的耐水、耐候、耐老化性能, 能够有效地保护建筑物免受水分侵蚀, 延长其使用寿命。

在实际施工过程中, 由于项目位于西部某省, 该地区气候特点为平均气温偏低, 气压相对较高。由于这些特殊的气候条件, 工程在实施过程中面临着一系列挑战, 如屋面渗漏、排水系统不畅等问题。

此外, 施工过程中由于工人操作不当, 还可能導致卷材施工后受损。其中各部分的问题大致为屋面渗漏 25%, 排水不畅 35%, 卷材破损为 40%。

2 屋面防水工程质量问题原因分析

2.1 屋面渗漏的问题原因分析

2.1.1 施工工艺不当

首先体现为施工队伍专业资质不足, 非专业施工人员占比过高, 致使技术操作规范性缺失, 工艺标准执行存在偏差。其次, 工序衔接失序问题突出, 尤其在多层屋面施工中, 未遵循“分层固化、逐层保护”原则, 工序交叉混乱。具体表现为上层结构施工过早开展, 导致下层未完成面直接暴露于外界环境, 丧失基础保护功能。典型案例如防水层未达到粘结剂初凝强度即进行面层覆盖施工, 严重削弱防水层整体性^[2]。

2.1.2 材料选型问题

材料适配性缺陷在西部地区的特殊气候环境下尤为显著。设计阶段选材存在与环境脱节的问题, 未针对性考量极端低温(年均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$, 极端低温达 -30°C)及强紫外线辐射(海拔 3 000 m 区域紫外线强度较平原地区增加 30%~40%)等气候特征, 错误采用普通改性沥青卷材, 而忽略耐候型 TPO/PVC 高分子材料或低温专用防水涂料的必要性^[3]。

2.1.3 后期维护不当

后期维护不当主要体现在三方面。一是周期性维护缺位, 检查频次未达《屋面工程技术规范》要求的季度检查标准(实际间隔 > 6 个月), 且缺乏系统化维护方案及预防性维护档案。二是检测技术应用不足, 过度依赖传统目测法, 未采用红外热成像检测技术(可识别 90% 以上隐性渗漏点)及规范要求的蓄水试验法(实际执行率 $< 60\%$, 且未满足 48 小时观测要求)。三是关联系统协同失效, 包括排水系统维护缺失(屋

面排水口堵塞率 $>30\%$ ，结构沉降引发排水坡度倒坡未修正）、建筑伸缩缝防水节点老化失效（未按规定设置弹性密封层），以及设备基座防水薄弱（如通风管道根部未采用金属泛水加强处理）^[4]。

2.2 排水不畅问题原因分析

2.2.1 雨水管堵塞

由于在施工以及使用过程中未及时注意到树叶和杂物堆积，树叶和其他杂物可能会被吹到屋顶和雨水口附近，堵塞雨水管道的进水口，导致屋面排水不畅；水泥或砖砂等建筑材料堵塞，在建筑或屋顶维修过程中，可能会有水泥、砖砂或者其他建筑材料掉落到屋面上，这些材料会被雨水冲刷到雨水管内，阻塞管道的通畅；雨水口防虫网堵塞也是影响排水的重要原因，有些雨水口上会覆盖防虫网，目的是防止小虫子进入管道^[5]。但是，防虫网没有定期清理，会被灰尘和杂物堆积，最终导致雨水管堵塞。

2.2.2 屋面下坡斜度不足

对于屋面排水坡度的设计存在屋面坡度不足，雨水无法迅速流入雨水管道，而是在屋面上滞留或慢慢渗透。这将导致排水不畅，积水现象增加，长期积水可能会引起屋面渗漏和损坏。

2.2.3 雨水管道设计不当

首先，工程中所应用到的雨水管道管径不足，无法满足屋面排水的需求，会导致排水不畅甚至堵塞。这将导致雨水无法迅速排出，增加积水风险，可能引起屋面渗漏和损坏。其次，坡度不当。雨水管道应该具备适当的坡度，以确保雨水能够自由流动。如果管道的坡度不足或者存在不正确的坡度方向，可能会导致积水和排水不畅的问题。此外，还有防倒流措施不足等问题。

2.3 卷材施工后破损质量问题原因分析

2.3.1 基层清扫不干净

在施工过程中，基层表面易积聚灰尘、油污等污染物及施工残留物，导致表面平整度不满足规范要求，屋面防水卷材贴附在不平整的基层表面上，容易出现剥离和破裂的情况。

除此之外，还可能因为油污和腻子层的存在，基层表面存在油污以及未经充分处理的腻子层，这些物质会使得屋面防水卷材无法与基层充分黏合，导致破裂。

2.3.2 施工人员违规操作

施工人员在操作过程中使用了锋利或尖锐的工具，如穿着钉鞋施工等，不小心划伤防水卷材表面，导致卷材破裂^[6]。另外，还存在工人采用了错误的安装方法，

施工人员没有按照正确的安装方法进行操作，对卷材施加过大的张力或过度弯曲，导致卷材破裂。强力撕扯，施工人员在处理卷材时如果使用了强力撕扯的方法，可能会导致卷材的纤维破裂，从而导致破裂。

2.3.3 屋面防水卷材长期受到环境侵蚀

此工程位于西部地区，平均气温较低，压强较高，紫外线强度也相对较高，长时间的阳光暴晒导致防水卷材表面的材料老化或受损。太阳紫外线的辐射破坏了卷材材料的分子结构，使其变得脆弱，容易破裂。另外，防水卷材的主要功能是抵御水分的渗透。然而，卷材的材料无法耐受或抵抗水分的长期暴露，水分逐渐渗透到卷材的表面或内部，并导致防水层的破坏。外部物体的碰撞、撞击或压力也是导致防水卷材的损坏或破裂。机械冲击破坏卷材的材料结构，使其无法有效地抵御水分渗透。

3 防水工程质量问题的解决措施

3.1 屋面渗漏质量问题的解决措施

3.1.1 施工工艺不当的解决措施

施工人员的操作行为需要得到规范，避免因人为因素导致的施工质量问题。除此之外，建立专门的质量控制机制也是至关重要的。这一机制应涵盖对施工过程的全面监督，包括对每个施工环节的检查 and 测试，确保施工符合规范要求。同时，对于不符合要求的施工部分，应及时进行整改和修复，确保整个施工过程的连贯性和质量的稳定性。在关键节点的施工前，进行技术交底和方案评审也是必要的步骤。这有助于确保施工方案的可行性和合理性，避免因方案问题导致的施工延误和质量问题。同时，这也为施工过程中问题解决提供了有力的技术支持。

3.1.2 材料质量问题的解决措施

对于材料质量应从选择合格材料供应商和材料进场前的检测进行严格把控。建设单位或监理单位在选择和评估供应商时，应重点考察供应商的相关资质，相关产品的出厂合格证和检测证明，并了解供应商在以往的项目中是否存在供应不合格材料的情况，必须严格把关，确保所采购的材料符合国家和行业的相关标准和要求。在选择供应商时，不仅要考虑价格因素，更要注重供应商的质量保证能力和信誉度。

为了确保材料的质量，所有防水材料在进场前必须提前报备，并联合建设单位、监理、总承包单位和供应商，四方联合进行检测。从材料的外观进行初步检查，并重点核查材料的出厂合格证，检测证明和标识牌，并按照相关规定对每批次的防水材料进行抽样

检测,以确保所采购的材料符合设计要求和质量标准。

3.1.3 后期维护不当的解决措施

施工单位建立起完整的维修保养计划和体系,明确维修保养的内容、频率和责任人,确保及时进行维护^[7]。发挥维修保养团队的作用,加强对设备和建筑物的巡检和定期维修。配备充足的维修保养人员和相应的设备、工具,确保维修保养工作的高效进行。加强维修保养管理,建立维修保养记录和档案,及时记录维修保养工作的过程和结果,便于后期跟踪和分析维护情况。

3.2 排水不畅质量问题的解决措施

3.2.1 雨水管堵塞的解决措施

物业单位要加强定期清洗雨水管道,清除积水、污物和杂物,保持管道畅通。检查并清理管道入口的排水格栅和过滤器,防止杂物进入管道。安装防止叶子和杂物进入管道的过滤器和防止小动物进入的防护措施。对于长期堵塞或频繁堵塞的管道,可以考虑改变管道设计或增加清洗点。

3.2.2 屋面下坡斜度不足的解决措施

在屋面下坡斜度施工过程中,应注意严格按照图纸设计和规范要求进行,确保坡度能够达到设计要求。验收时对屋面施工质量进行检查,确保屋面坡度符合设计要求。若屋面下坡斜度不足,可以进行改造,从落水口的位置向上进行找坡,增加坡度以提高排水效果。在维护保养过程中,及时清除屋面积水,避免水滞留导致渗漏问题。针对频繁积水的区域,可以安装雨水收集设施或加装排水系统以改善排水情况。

3.2.3 雨水管道设计不当的解决措施

在初期规划阶段,应充分考虑降水量、屋面结构和周围环境等因素,合理设计雨水排放系统采用合适尺寸和材质的管道,保证管道足够大,便于排水,且材质耐久耐腐蚀。合理布置雨水管道,避免管道之间交叉、拐弯过多或局部堆积。定期对雨水管道进行检查和维护,及时修复或更换老化和破损的部分。加强与设计单位的沟通,及时反馈使用中出现的問題,共同解决并改进设计。

3.3 卷材施工后破损质量问题的解决措施

3.3.1 基层清扫不干净的解决措施

增加清扫频率,定期对基层进行清扫,确保无杂物和污垢。使用合适的清洁工具和清洁剂,彻底清洁基层表面。可以考虑使用高压水枪或专业的清洗设备进行清洗。对于积存较深的污垢或难以清洁的地方,可以考虑使用专业清洁服务。

3.3.2 施工人员违规操作的解决措施

可以加强施工人员的培训和管理,确保施工人员熟悉施工工艺和操作规范。建立工作纪律和安全规程,要求施工人员按照规定的程序和要求进行作业。加强现场监督和检查,及时发现和纠正违规操作行为。对于严重违规行为,可以采取处罚措施,如停工整改、罚款等。

3.3.3 屋面防水卷材长期受到环境侵蚀的解决措施

定期进行检查和维护,及时修补或更换老化和破损的防水卷材^[8]。加强防水卷材的保护,可以对其进行喷涂或覆盖防水涂料、沥青等耐候材料,增加其耐久性。考虑使用耐候性更好的防水卷材,如合成高聚物材料,具有较长寿命和良好的耐候性能。对于环境特别恶劣的地区,可以考虑使用更耐久的屋面防水系统,如瓷砖、金属板等。如果屋面防水卷材已经严重老化,建议进行彻底更换,并采取相应的防水工程措施,以确保长期使用的防水效果。与此同时,应重点关注防水卷材与雨落口位置的搭接处理,严格按照图集的做法进行施工,确保此位置的防水效果达到设计要求。

4 结束语

通过对西部地区某项目屋面防水工程的质量问题分析表明,屋面渗漏、排水不畅及卷材破损等问题的根源主要集中于施工工艺不规范、材料适配性不足及后期维护机制缺失。针对西部地区特殊气候条件,提出系统性解决方案:通过规范施工流程、强化材料质量管控、完善维护体系,可显著提升防水工程可靠性;优化排水设计、定期清理管道及选用耐候性卷材,能够有效应对极端环境影响。

参考文献:

- [1] 袁琳.浅析建筑工程中屋面防水施工技术及其质量控制路径[J].全面腐蚀控制,2022,36(06):79-81.
- [2] 白亦嘉.高原地区屋面防水施工技术改进[J].工程机械与维修,2023(05):74-76.
- [3] 任瑞祥.建筑工程中屋面防水施工技术及其质量控制策略[J].中国建筑装饰装修,2023(17):71-73.
- [4] 胡德军.关于房屋建筑中屋面防水问题的探讨[J].中华建设,2023(07):134-135.
- [5] 李红玲.房屋建筑工程屋面防水施工技术[J].散装水泥,2023(03):117-119.
- [6] 毛瑶.建筑工程屋面防水工程技术对策分析[J].中国建筑装饰装修,2023(09):170-172.
- [7] 同[5].
- [8] 同[6].

基于偏联系数定级法的某河流健康评价研究

阳祥媛

(自贡市大安区水利管理站, 四川 自贡 643012)

摘要 随着社会经济不断发展, 河流健康问题日益受到社会各层面的广泛关注, 对河流健康情况进行科学评价, 具有十分重要的理论意义和实践应用价值。本研究以四川省自贡市某河流域为例, 探讨了基于偏联系数定级法的河流健康评价问题。评价结果显示, 该河河道健康水平整体为亚健康水平, 河流下游的健康水平明显低于上游。研究结果可为河流治理和相关研究提供有益的理论和方法借鉴。

关键词 偏联系数法; 河流健康; 组合赋权

中图分类号: TP3; X82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.038

0 引言

河流承担着航运、灌溉、防汛抗旱、优化环境等诸多经济和生态功能, 是人类赖以生存的重要物质基础, 对河流进行治理和保护极为重要^[1]。但是, 从全国范围内来看, 河流的健康状况不容忽视。特别是随着科技和经济的发展, 城镇化建设得到迅速推进, 导致河流原有的自然生态环境遭受不同程度的破坏, 使河流在水生态、水文水资源及水环境方面存在比较严重的问题^[2]。近年来, 我国不断加大河流生态建设和治理力度且初见成效, 但是该领域仍旧存在诸多亟待解决的问题。可以说, 水环境和水生态建设是一项长期性和历史性的问题。同时, 要实现河流的有效治理和保护, 就需要有效了解和评价河流的健康状况, 为水环境治理和生态恢复提供决策支持, 这是一项极为重要的研究课题^[3]。从国家层面来看, 进行积极有效的河流健康评价, 有助于了解河流的健康状态, 分析发现河流生态建设和管理领域的实际问题, 为河流生态管理工作的顺利开展提供现实依据。从公众层面来看, 政府部门通过网站等各种途径公布河流健康评价结果, 有利于广大社会公众了解河流健康状态, 保证广大社会公众的知情权和监督权。

当然, 要做好河流健康评价, 还要有科学、合理的评价方法。在当前的河流健康评价研究中, 大多学者采用层次分析法^[4]、集对分析法^[5]等数据统计模型进行定量评价, 也有学者采用偏联系数法计算评价指标和评价等级之间的贴合度, 但是相关研究主要应用三元偏联系数^[6], 尚未发现采用五元偏联系数在河道健康评价领域的应用。基于此, 此次研究以四川省自贡地区某河为例, 应用改进的五元偏联系数法进行河流健康评价研究, 以便更直接与客观地反映河流的健康状况。

1 研究区概况

四川省自贡市某河流属于长江支流沱江支流釜溪河的支流, 发源于四川省九宫山余脉荣县东兴大尖山, 该河全长 118 km, 流域面积为 733.7 km², 多年天然平均流量为 12.88 m³/s。该河上游流经低山带与丘陵过渡带, 上游河谷幽深, 河床坡降大, 滩口多, 水流急; 中、下游流经浅丘区, 河道迂回曲折, 河床坡降小, 水流平缓。该河流域属于亚热带湿润季风气候, 年平均气温 17.8 ℃, 年均降水量 1 080 mm。流域有水库 6 座, 最大水库库容 58 000 km³, 最小库容约为 300 km³。

2 河道健康评价五元偏联系数定级模型

2.1 评价指标体系的构建

在河流健康评价中, 按照科学性、目的性、时效性和实用性的原则, 结合研究目的以及该河流域的实际情况构建如表 1 所示的健康评价指标体系。

2.2 组合赋权权重计算

在权重计算领域, 有学者通过对传统层次分析法的改进, 提出主观权重赋权方法, 也就是主观权重 G1 法^[7]。与传统层次分析法相比, 该方法主要比较不同评价指标之间的重要性, 可以大幅减少评价工作量。但是, 该方法对本研究而言也有一定的不足, 特别是权重本身没有考虑数据的客观性。熵权法主要通过指标的离散程度进行判断, 离散程度越大说明信息熵越小, 对应的指标权重越大。与主观赋权法相比, 该方法主要通过原始数据赋权, 可以对数据中蕴含的客观信息进行有效反映。但是, 该方法得到的权重缺乏主观性且不能单独进行判断。研究中为了弥补上述不足, 利用变异系数修正组合赋权法获得评价指标的权重, 其基本流程如下:

表 1 健康评价指标体系

目标层	准则层	评价指标
河流健康 A	水文水资源 B1	生态流量 C11
		水土保持 C12
		连通指数 C21
	物理结构 B2	植被覆盖 C22
		天然湿地 C23
		水质达标率 C31
	水质状况 B3	水质劣化度 C32
		生物完整性 C41
	水生生境 B4	鱼类保有指数 C42
		堤防建设 C51
	社会服务 B5	社会满意度 C52
		排污口管理 C61
	河道管理 B6	取水口管理 C62

建立组合赋权模型:

$$\omega_j = \alpha \omega_j^m + \beta \omega_j^n \quad (1)$$

式(1)中, ω_j 为组合赋权权重; ω_j^m 为主观权重; ω_j^n 为客观权重; α 为主观权重系数; β 为客观权重系数。

构建目标函数:

$$\max D = \sum_{i=1}^m d_i = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} (\alpha \omega_j^m + \beta \omega_j^n) \quad (2)$$

研究中选择拉格朗日法进行求解, 最后得到组合权重。

2.3 偏联系数模型

集对分析理论的基本原理是对研究对象的确定性和不确定性进行分析, 然后通过关联度计算实现对不同集合的联系, 其基本思路是构造指标值和评价标准等级之间的联系^[8]。对本文研究而言, 可以将样本划分为 5 个等级, 分别为非常健康(等级 5)、健康(等级 4)、一般(等级 3)、不健康(等级 2)和劣态(等级 1), 单指标联系数的计算公式为:

$$u = a + bI_1 + cI_2 + dI_3 + eJ \quad (3)$$

式(3)中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为评价指标的各分量, 其中, a 、 e 两个分量分别为同一度和对立度分量, 其余 3 个分量为差异度分量; I_1 、 I_2 和 I_3 分别为 b 、 c 、 d 等 3 个差异度分量的差异度系数, J 为对立度系数。

对式(3)而言, 其五元减法集的对势为:

$$S_j = (a - e) * (1 + b + c + d) + 0.5(b - d) * (b + c + d) \quad (4)$$

结合相关研究成果, 式(4)的取值一般可以划分

为如表 2 所示的 5 个等级。其中, 反势和偏反势的指标为河流管理中需要重点关注的指标。

表 2 五元减法集等级和对势值

序号	等级	对势值
1	反势	-1.0 ~ -0.6
2	偏反势	-0.6 ~ -0.2
3	均势	-0.2 ~ 0.2
4	偏同势	0.2 ~ 0.6
5	同势	0.6 ~ 1.0

偏联系数使刻画研究对象同异反确定不确定联系状态的结构函数, 能有效反映联系数分量的动态演化特征。一般来说, 偏联系数大于 1 或小于 1 时, 分别代表同异反状态联系数存在正向或负向发展趋势, 如果偏联系数等于 1, 说明发展趋势处于临界点。对于 1 阶演化, 记联系数向量为 $U = (a, b, c, d, e)$, 则各支持度向量分别为 $S = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)$, 对 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 进行大小比较, 并根据支持度最大的原则进行评价等级确定, 也就是其中数据最大者为河流的健康等级。如果同时考虑 1 阶和 2 阶演化, 那么支持度向量为 $S' = (S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5)$ 。比较 $S'_1, S'_2, S'_3, S'_4, S'_5$ 的大小, 数据最大者即为河流的健康等级。

3 健康状况评价

3.1 评价结果

通过该河流域各级政府的水利、农业、气象等部门及相关网站获取与研究有关的相关数据, 对于缺失的部分数据通过现场调查的方式补齐。利用上文构建的模型对该河上游、中游、下游及全流域的评价指标联系数支持度进行计算, 结果如表 3 所示。从支持度的计算结果来看, 该河流域河道整体处于亚健康(等级 3)状态, 上游河段处于健康状态(等级 4), 其余河段均为亚健康状态。究其原因, 主要是该河上游河段位于山地丘陵区, 植被状态好, 流域内没有大量的工矿业分布, 人类活动对河道的扰动作用相对较小, 整体有利于河道生态的保护, 因此河流的健康状态较好。

3.2 问题与建议

由于该河流域工矿业比较发达, 同时缺乏良好的环境保护意识, 导致该流域水体污染情况比较严重。近年来, 该河被列入重点整治河流, 经过多年治理, 该河水质得到了显著改善。再加上当地加大河道治理工作力度, 河道两岸的岸带也有相当程度的改善, 进一步提升了社会公众的满意度。但是, 改河在河流管

表3 各河段健康评价字表联系数支持度计算结果

方法	河段	支持度					评价等级
		等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5	
1 阶	上游	0.762	0.489	0.778	0.783	0.297	等级 4
	中游	0.746	0.358	0.769	0.666	0.323	等级 3
	下游	0.583	0.787	0.701	0.699	0.475	等级 2
	全流域	0.730	0.295	0.770	0.673	0.367	等级 3
2 阶	上游	0.556	0.779	0.770	0.758	0.402	等级 4
	中游	0.602	0.514	0.769	0.766	0.427	等级 3
	下游	0.660	0.587	0.701	0.590	0.570	等级 3
	全流域	0.729	0.520	0.770	0.762	0.471	等级 3

理和生态维护方面也存在一定的问题,直接影响到河流的健康状况。例如:偏联系数的计算结果显示,该河上游、中游、下游三个河段的连通指数和鱼类保有指数指标均为反势,同时关系较密切。究其原因,主要是干流上的闸坝由于建成较早,均未设置鱼道,最终对鱼类造成阻隔。此外,现场调查显示,该河在旱季农业灌溉高峰期仍存在流量偏低的问题;部分水库景观适宜度不足,缺乏文化宣传和娱乐场所;河道沿线有部分私设的农田灌溉取水口,存在一定程度的无序取水现象;部分排污口未按要求设置标志牌。

针对上述问题,建议该河流域生态恢复过程中要注意构建河道生物多样性监测网,结合工程新建和原有水利工程的除险加固,修建必要的鱼道。对河流中上游加大水土保持力度,特别是高标准规划水土流失综合治理举措。进一步加大高标准农田建设,对坡度在 30° 以上的额坡耕地尽量实施退耕还林,最大限度降低农田水土流失率,降低农业面污染。进一步加大下游城区防洪工程建设,提高沿河整体防洪标准。进一步强化流域水资源刚性约束,严格按照相关政策要求进行取水口审批、设计和建设。积极推进农田水利建设,加大用水管理力度,梳理良好的灌溉节水意识,提升农业灌溉用水利用率。

4 结论

通过构建包括6个一级指标和13个二级指标的河流健康评价体系,采用组合赋权法对各评价指标权重进行计算,并利用偏联系数定级法对四川省自贡市某河流的河流健康状态进行定量评价。评价结果表明:该河河道健康水平整体为亚健康水平,且下游的健康状况明显要低于上游。当然,此次研究中评价指标的

选取相对比较简单,系统性还不足,使构建的评价指标体系相对比较单薄,在今后需要进一步优化和完善。此外,偏联系数法的应用需要充足的数据资料,在今后的研究中需要进一步增加数据量,以提升模型的评价精度。

参考文献:

- [1] 沈凯,陈末,梅嘉恒.基于组合赋权和GRA-TOPSIS法的湖南省水资源承载力综合评价[J].水资源开发与管理,2024,10(02):1-7.
- [2] 张祖鹏,张泽贤,刘思远,等.太湖流域河流健康评价指标体系研究及应用[J].人民长江,2023,54(11):8-15.
- [3] 王平,周亮广,金菊良,等.基于集对分析的区域水利高质量发展评价方法[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(01):52-62.
- [4] 于晓秋,董方慧.河流水生态系统健康评价指标体系和评价方法研究[C]//中国水利学会.2023中国水利学术大会论文集(第五分册).黄河水利委员会山东水文水资源局,2023.
- [5] Zhan J, Wang W, Alcantud J C R, et al. A three-way decision approach with prospect-regret theory via fuzzy set pair dominance degrees for incomplete information systems[J]. Information Sciences, 2022(617): 310-330.
- [6] 刘千禧,金琪华,乔海娟,等.基于熵值修正G2法的改进多指标河流健康评价[J].人民长江,2023,54(09):68-75.
- [7] 宫远乔,刘莹,李铁男,等.北方寒冷地区农村河流健康评价应用研究[J].黑龙江水利科技,2023,51(07):99-102.
- [8] 陆威好,刘博,苏晓鹭,等.基于ESG理念的河流健康评价体系构建[J].人民长江,2023,54(06):34-40.

城市道路沥青路面平整度影响因素及改善措施

徐泉城, 王 浩, 赵浩凯

(济南市市政工程建设集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 城市道路沥青路面的平整度直接影响行车舒适性、安全性及道路使用寿命。本文结合济南市市政工程建设实践, 从材料控制、基层处理、施工机械、工艺操作及环境因素等方面, 分析影响沥青路面平整度的关键问题, 包括材料级配偏差、基层不均匀沉降、摊铺机作业参数不稳定等具体影响因素, 并以济南经十路、奥体西路等项目为例, 提出精细化材料配比设计、智能压实监控技术应用、施工工艺标准化管控等针对性改善措施, 以期为同类工程提供实践参考。

关键词 沥青路面; 平整度; 材料性能; 市政工程

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.039

0 引言

沥青路面因具有噪声低、易维护、行车舒适等优点, 成为城市道路建设的首选。平整度作为衡量路面质量的核心指标, 不仅影响车辆行驶体验, 更与路面结构耐久性密切相关。济南市近年来城市更新项目频发, 如轨道交通配套道路改造、城市快速路建设等, 对沥青路面施工提出更高要求。在实践中发现, 部分路段通车后短期内出现波浪、裂缝、局部沉降等问题, 暴露出施工环节中对平整度控制的薄弱环节。本文结合本地工程案例, 从施工全流程剖析影响因素, 提出可落地的改善策略。

1 影响沥青路面平整度的主要因素

1.1 材料性能的稳定性不足

沥青混合料的级配、油石比及材料均匀性, 直接决定路面成型后的整体刚度与密实度。若矿料级配偏差过大或沥青用量波动, 易导致摊铺时混合料流动性不均, 形成局部离析或压实度差异^[1]。例如: 2022 年济南某支路改造工程中, 因沥青拌合站冷料仓皮带秤传感器故障, 未及时发现矿粉实际用量超出设计值, 导致摊铺后表面细集料偏少, 压实过程中出现“骨料架空”现象, 通车 3 个月后局部出现松散及细微裂缝, 返工处理时发现平整度标准差达 1.8 mm (规范要求 ≤ 1.5 mm)。

1.2 基层处理的质量传导效应

基层是路面结构的支撑基础, 其平整度缺陷会通过“刚度传递”直接影响沥青面层。若基层存在不均匀沉降、局部松散或平整度超标, 沥青层难以通过厚度调整完全弥补差异。例如: 济南经十路东段 2019 年拓宽改造时, 部分段落因原水泥稳定碎石基层龄期不

足, 新老基层衔接处压实度检测值相差, 导致沥青下面层摊铺后出现“波浪形”起伏。现场实测数据显示, 基层平整度标准差为 1.2 mm 时, 面层平整度标准差升至 1.6 mm, 超出规范允许范围。

1.3 施工机械的调试与协同问题

摊铺机和压路机的性能状态及操作参数, 是影响平整度的关键设备因素。摊铺机熨平板拼装精度不足、振捣频率不稳定或压路机碾压速度忽快忽慢, 均会导致压实度不均^[2]。例如: 2023 年奥体西路快速路施工中, 某标段摊铺机因液压系统漏油导致摊铺速度从 2.5 m/min 突然降至 1.8 m/min, 未及时调整振捣频率, 造成已摊铺段落出现“台阶式”接缝。事后取芯检测发现, 速度波动段压实度比正常段低 3%, 平整度仪检测值超限率达 20%。

1.4 施工工艺的细节把控缺失

摊铺与碾压工序的规范性直接影响路面成型质量。摊铺过程中混合料温度控制不当、接缝处理粗糙, 或碾压顺序混乱、重叠宽度不足, 易形成轮迹、推移等缺陷^[3]。例如: 济南纬十二路改造工程中, 某施工班组为追赶进度, 将初压、复压、终压的压路机组合从“双钢轮+胶轮+双钢轮”简化为“双钢轮+双钢轮”, 且复压速度提升至 6 km/h (规范建议 ≤ 5 km/h), 导致路面压实度达标但平整度不合格, 局部出现“搓板状”纹理, 返工耗时增加 15%。

1.5 环境因素的动态影响

施工时的温度、风速及下卧层含水率会间接影响混合料的摊铺和压实效果。高温环境下沥青黏度降低, 易出现摊铺推移; 低温时混合料冷却快, 压实难度增加,

易形成表面松散。例如：2021年冬季二环南路延长线施工中，某日平均气温降至5℃以下，未采取预热路床及缩短运输时间等措施，部分段落摊铺后初压温度已低于130℃（规范要求 $\geq 140^\circ\text{C}$ ），终压后表面构造深度不足，且平整度检测值较正常施工段高0.3mm。

2 提升沥青路面平整度的改善措施

沥青路面平整度的提升需贯穿施工全流程，从材料选择到工艺实施，再到环境应对，每个环节均需建立精细化管控体系。结合济南地区工程实践，具体改善措施如下。

2.1 材料控制：从源头确保混合料均匀性

2.1.1 严格配合比设计与动态验证

目标配合比确定后，需通过生产配合比调试验证实际生产可行性。针对济南常用的AC-13C、SMA-16等混合料类型，重点监控矿料级配中4.75mm、2.36mm筛孔的通过率，确保波动范围控制在合理区间。例如：2024年二环东路快速路改造时，拌合站引入在线级配监测系统，每车混合料出厂前自动检测3次级配数据，一旦发现矿粉或粗骨料比例异常，立即停机校准。这种动态监控手段使摊铺后路面平整度标准差稳定在1.2mm以内，远低于规范要求的1.5mm，为面层平整奠定了材料基础。

2.1.2 加强原材料进场检验

原材料质量直接影响混合料性能，需对沥青、碎石、矿粉实施“一车一检”制度。以碎石为例，重点控制针片状颗粒含量和含泥量，前者影响骨料间嵌挤结构，后者降低沥青与矿料的黏结力^[4]。济南某工业区道路施工初期，因误用含泥量超标的机制砂，导致混合料成型后局部松散，不得不返工处理。后续工程改用河砂并增加水洗工序，从源头杜绝了杂质影响，有效提升了混合料均匀性。

2.2 基层处理：构建坚实均匀的支撑体系

2.2.1 强化基层平整度验收标准

基层是路面结构的受力基础，其平整度缺陷会逐层传导至面层。济南将水泥稳定碎石基层平整度控制标准从规范要求的1.5mm提升至1.2mm，采用3m直尺每20m检测10处，一旦发现超标段落，必须用铣刨机彻底处理。例如：2023年经十路中央隔离带改造时，部分原基层因长期荷载出现局部下沉，施工团队先对沉降区域注浆加固，再铺设10cm厚C30混凝土调平层，确保基层平整度达标后才进行沥青摊铺，从根本上避免了“下糙上不平”的质量隐患。

2.2.2 重视新老结构衔接处理

在道路拓宽或交叉口改造工程中，新旧基层衔接

处易因刚度差异产生裂缝或沉降。例如：济南奥体中心周边道路扩建时，对新旧基层采用“阶梯式”搭接工艺，搭接宽度不小于30cm，并在结合部铺设钢塑格栅，增强界面整体性。实测数据显示，此类处理使沥青面层接缝处平整度差异从0.8mm降至0.3mm，显著提升了衔接区域的平顺性。

2.3 机械管理：精准调试与规范操作并重

2.3.1 摊铺机参数标准化设置

摊铺机性能直接决定摊铺精度，需在施工前校准关键参数。以济南工业南路快速化改造为例，摊铺前将熨平板拼装间隙控制在1mm以内，设定振捣频率50Hz、振幅1.2mm，摊铺速度根据混合料类型控制在2~3m/min，并配备激光找平仪实时监测标高。同时，固定操作手并建立参数日志，避免人为操作波动。通过标准化调试，该项目摊铺精度较常规施工提升，为后续压实工序创造了有利条件。

2.3.2 压路机组合与速度控制

碾压工序需遵循“初压稳、复压密、终压平”的原则，采用合理的机械组合。例如：济南西站片区道路施工中，严格执行“初压双钢轮（11~13t，速度2~3km/h）→复压胶轮（25t以上，速度3~4km/h）→终压双钢轮（13~16t，速度3~5km/h）”的流程，轮迹重叠宽度不小于30cm。这种分层压实工艺使路面压实度合格率达99%，平整度一次验收通过率提升至95%，有效避免了轮迹、推移等缺陷。

2.4 工艺优化：细节把控提升施工精度

2.4.1 摊铺接缝精细化处理

接缝是平整度控制的难点，需区分纵缝与横缝采取不同工艺。纵向接缝采用热接缝时，相邻摊铺机保持10~20m间距，重叠摊铺5~10cm，确保混合料温度一致；横向接缝则采用垂直接缝，用3m直尺检测后切除不平整段落，涂刷粘层油增强粘结^[5]。2021年旅游路东段大修工程中，在横接缝处增设木模固定，使接缝平整度差异从1.0mm降至0.5mm以下，肉眼几乎难以察觉衔接痕迹。

2.4.2 温度控制贯穿全流程

温度是影响混合料压实效果的关键因素，需对拌合、运输、摊铺、碾压各环节严格控温。以济南黄河大道施工为例，混合料出厂温度控制在160~170℃，运输过程加装保温帆布，确保到达现场温度不低于150℃；摊铺温度不低于140℃，初压在135℃以上进行，终压完成时温度不低于90℃。通过红外测温仪每车检测，实时调整施工节奏，避免因温度离析导致压实不均，保障了面层整体平整度。

2.5 环境应对：针对性制定季节性施工方案

2.5.1 高温季节防推移措施

夏季高温易导致混合料软化，摊铺时易出现推移现象。例如：济南二环西路暑期施工时，通过调整混合料级配，适当增加 3%~5% 的粗骨料比例，提高骨架结构稳定性；同时将摊铺速度降至 2 m/min 以下，压路机紧跟摊铺机碾压，减少高温停留时间。这些措施使路面成型后未出现任何波浪式缺陷，平整度检测全部达标。

2.5.2 低温季节防开裂策略

冬季低温环境下，混合料冷却快、压实难度大，易产生早期裂缝。例如：2022 年腊山北路冬季施工时，提前对路床预热至 15℃ 以上，混合料中添加抗剥落剂增强粘结力，从拌合到终压控制在 90 分钟内完成，并在压实后覆盖土工布保温。实测显示，该路段早期裂缝发生率较常规施工显著减少，平整度较同类工程提升 0.3 mm，验证了低温施工工艺的有效性。

3 工程案例：以济南经十路改造工程为例

济南经十路作为贯穿城市东西的交通主干道，日均车流量超过 15 万辆，对路面平整度要求极高。2023 年东段拓宽改造工程中，针对老路沉降、新老路基衔接及复杂交通导改等挑战，形成了一套系统化平整度控制方案，成为同类工程的标杆案例。

3.1 工程概况与难点

改造段落全长 3.2 km，包含桥梁段、隧道段及地面段，原水泥稳定碎石基层存在局部松散（取芯强度变异系数达 18%）和不均匀沉降（最大沉降差 5 mm/10 m），新老路基差异沉降风险突出。此外，施工期间需维持半幅通车，摊铺机、压路机作业空间受限，对机械协同和工艺精度提出更高要求。

3.2 针对性控制措施

3.2.1 基层处理双保险

对原基层采用“探地雷达全断面扫描+取芯验证”，定位 23 处强度薄弱区，采用 C25 混凝土置换处理；新老路基衔接处设置 50 cm 宽台阶，铺设两层钢塑格栅（抗拉强度 ≥ 50 kN/m），并增加 3 遍振动碾压，使衔接段压实度从 96% 提升至 98.5%。

3.2.2 智能摊铺系统应用

引入 ABG8620 型摊铺机，搭载超声波找平仪与 BIM 模型联动，每 10 cm 自动校准摊铺标高，针对桥梁段预应力反拱变形（最大拱度 3 mm），提前在找平仪中输入补偿参数，使桥面沥青层厚度偏差控制在 ± 2 mm 以内。

3.2.3 精细化接缝管理

横向接缝采用“隔夜切割+热再生搭接”工艺，即每日收工前用切割机划出垂直缝，次日摊铺前对旧茬加热至 140℃ 以上，重叠摊铺 15 cm 并重点碾压，实测接缝处平整度标准差从 1.1 mm 降至 0.6 mm。

3.3 实施效果与数据验证

工程完工后，采用 3D 激光断面仪全幅检测，平整度标准差均值 1.0 mm，优于规范要求（ ≤ 1.5 mm）；通车 1 年后复测，路面纵断高程偏差 ≤ 3 mm，无明显车辙或波浪形缺陷，平整度合格率保持 98% 以上。该项目实践证明，通过“精准诊断—智能装备—工艺创新”的组合应用，可有效解决复杂工况下的平整度控制难题。

3.4 经验推广价值

经十路改造中形成的“检测定位—分层处理—动态校准”技术路线，已在济南奥体中路、二环南路等项目复制应用。例如：奥体中路隧道出口段通过类似措施，将因温度梯度导致的平整度缺陷率从 12% 降至 2%，为城市快速路、主干道的高品质建设提供了可迁移的工程范式。

4 结束语

城市道路沥青路面平整度的控制，是材料、机械、工艺与环境多因素协同作用的结果。通过济南地区多年工程实践可知，需从三个层面强化管控：一是源头治理，严把材料质量与基层验收，杜绝“上粗下糙”的质量隐患；二是过程控制，通过机械参数标准化、工艺操作规范化，减少人为因素干扰；三是动态调整，根据环境变化灵活优化施工方案，实现对平整度的全流程精准把控。在实际工程中，要紧扣施工各环节的薄弱点，以问题为导向落实细节管控，才能实现沥青路面平整度的显著提升，为城市道路品质化建设提供可靠支撑。

参考文献：

- [1] 夏勇. 探析沥青路面机械施工技术的应用[J]. 低碳世界, 2023, 13(08): 148-150.
- [2] 《中国公路学报》编辑部, 董侨, 杜豫川, 等. 中国路面工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(03): 1-81.
- [3] 吴育城. 论市政道路沥青路面施工技术控制要点及通病防治[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(15): 148-150.
- [4] 王晓鑫. 就地热再生工艺在城市道路改造中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(04): 174-177.
- [5] 陈增锋. 沥青混凝土路面施工的平整度控制措施与分析[J]. 四川水泥, 2021(03): 20-21.

高速公路沥青混凝土路面的早期病害与治理措施

梁峻信

(四川成宜高速公路开发有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘要 高速公路作为重要的交通基础设施,通过缩短地区间的时空距离,加速资源流通与产业布局调整,对社会与经济发展具有深远影响。在高速公路建设中,沥青混凝土路面因其良好的路面性能和经济适用性而被广泛采用。在投入使用过程中,其病害给高速公路交通安全和路面耐久性带来了诸多挑战。基于此,本文详细探讨了高速公路沥青混凝土路面早期病害的类型及形成原因,并提出相应的治理措施,以期在高速公路建设提供参考。

关键词 高速公路; 沥青混凝土路面; 早期病害; 质量控制

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.040

0 引言

沥青混凝土路面因其施工便捷、平整度高、抗滑性能好和适应性强等优点,被广泛应用于高速公路建设中。沥青混凝土路面的早期病害主要包括泛油、裂缝、松散、车辙、沉陷、坑槽等问题。这些病害的发生,不仅降低了路面的行驶舒适性和安全性,还增加了后期的维修和养护成本,严重时可能影响正常的交通运行。因此,实行严格的质量控制措施具有重要意义。通过对材料的严格检验、施工过程的细致管理以及后期桥面状况的定期检查,可以有效降低早期病害的发生率。

1 案例概况

以某高速公路K158+673~K202+673段落为典型案例,对其路面病害问题展开全面剖析,并详细介绍对应的治理举措。为有效遏制公路病害的蔓延,延长公路的使用年限,详尽且深入的勘察工作是首要环节。在勘察过程中,需精准界定病害的具体类型,如裂缝的走向、泛油的程度;明确病害所处的精确位置,精确至桩号范围;掌握病害的影响范围,包括横向波及的车道数量以及纵向延展的长度等,为后续制定针对性强、切实可行的治理方案筑牢根基。经勘察得知,该路段沥青路面饱受泛油、裂缝(含横向、纵向及网状裂缝)、松散、车辙以及坑槽等多种病害的困扰。

基于该高速公路当前的运营状况以及上述病害问题,相关部门迅速出台了一系列养护工作要求。

其一,秉持“早发现、早治理”的原则,一旦察觉路面病害迹象,即刻启动有效的治理行动。时间是

控制病害恶化的关键因素,快速响应与处理能最大程度降低病害对路面结构的损害。

其二,依据不同病害类型,量身定制治理方案,并提前筹备好适配的施工材料。以路面凹坑、沉陷这类严重病害为例,在开展治理作业前,需先妥善处理路面表层存在的松散、网裂等病害,为后续的修补工作营造良好条件,确保修补过程顺利推进,修补效果稳固持久。

其三,在病害修复实操阶段,充分发挥各类路面病害治理技术的实际效能。施工团队应严格按照技术规范执行,避免在修复区域引发新的病害或使既有病害加剧。这不仅是保证单次修复成效的必要手段,更为公路的长期稳定使用提供了坚实的保障。整个技术方案实施过程必须遵循科学、合理、系统的方法论,从人员调配、设备选用到工艺执行环环相扣、紧密协同^[1]。

其四,针对需要重新构建沥青混凝土路面结构的区域,严格依照《公路路面基层施工技术细则》(JTG/TF20—2015)开展修复技术应用。在施工过程中,严禁随意变更修复流程和关键技术参数,切实保障工程质量,从根本上提升公路的安全性与耐久性,为过往车辆打造安全、平稳的通行环境。

2 高速公路沥青混凝土路面常见病害及原因

2.1 泛油

泛油是指沥青混凝土路面表面出现的油状涂层,使得路面光滑而发亮。这一现象主要由几种因素导致,主要包括过高的沥青含量、高温气候条件和施工时沥青温度过高。当使用的沥青量超出合理范围时,路面的表面容易形成油膜。同时,炎热的天气使沥青的流动性增强,导致其向表面迁移;在施工过程中,如果

未能及时铺设或压实,也会加剧泛油现象的发生。泛油不仅影响路面的美观,还会导致表面失去附着力,增加车辆打滑的风险,进而对交通安全构成威胁。研究项目中该高速公路位于江苏省,地处亚热带与暖温带的过渡地带,属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,这些气候条件为泛油问题的产生提供了有利的环境,进一步突显了需要采取有效治理措施的重要性^[2]。

2.2 路面裂缝及松散

路面裂缝是高速公路沥青混凝土路面早期病害中较为常见的一种。裂缝类型多样,主要有横向裂缝、纵向裂缝和网状裂缝。横向裂缝通常是由于温度变化,路面在低温时收缩产生的应力超过沥青混凝土的抗拉强度所致。特别是在昼夜温差较大的地区,这种现象更为明显。纵向裂缝一般是由于路基压实不均匀,在行车荷载作用下,路面产生不均匀沉降而引发。此外,在施工过程中,路面基层质量不佳、接缝处理不当等因素也会导致纵向裂缝的出现。网状裂缝则多因路面材料老化、疲劳,加上长期承受车辆荷载反复作用,使得路面结构强度逐渐降低,从而形成类似网状的裂缝。

路面松散表现为路面集料颗粒间的粘结力丧失,导致集料脱落。其主要原因在于沥青与集料的粘附性不足。若集料表面存在杂质、潮湿,或者沥青的粘结性能较差,都会影响二者的粘附效果。同时,施工过程中沥青用量过少,无法充分包裹集料,也会造成路面松散。另外,车辆荷载的长期磨损以及雨水的冲刷,会不断侵蚀路面结构,削弱集料间的粘结力,加速松散病害的发展。在某高速公路中,由于部分路段靠近河流,空气湿度较大,雨水频繁,使得沥青混凝土路面更容易受到水的侵害,加剧了路面裂缝和松散病害的发生,对道路的正常使用寿命造成了较大影响。

2.3 车辙

车辙是重型车辆在沥青混凝土路面上反复行驶所形成的凹陷,通常会出现在车轮的轨迹上。这一现象主要由以下几个因素造成。首先,环境温度升高使沥青在高温下的流动性增强,导致路面在重负荷下发生塑性变形。其次,交通负荷过大超出了设计承载能力,使得路面在高强度的持续应力下变形,从而形成车辙。此外,材料选择不当,使用不合适的沥青或集料粒度不足,都会降低路面的抗车辙能力。而施工问题,如压实不足或摊铺厚度不当,也会显著影响路面对车辙的抵抗能力。车辙不仅会影响行车的稳定性和安全性,长期积水问题还可能加剧凹槽内的损坏。积水在车辙处停留,可能会加速混凝土材料的劣化,进一步增加公共安全隐患,并造成驾驶风险^[3]。

2.4 坑槽

坑槽是沥青混凝土路面中因局部沉降或破坏形成的凹陷,通常呈圆形或多边形。这些坑槽不仅影响路面的美观,更对行车安全构成隐患,特别是在高速行驶时,可能导致车辆失控。坑槽的形成原因多样,基础处理不当是关键因素。如果施工前对基础土体的处理不够周全,可能导致不均匀沉降,从而形成坑槽。此外,材料的劣化也是坑槽形成的重要原因。长期的交通荷载和恶劣的环境条件会导致沥青和底材的强度降低,出现开裂和剥离现象,从而促进坑槽的形成。另一个促使坑槽出现的因素是水浸泡。当水渗透到路面下方后,基层材料会软化,导致局部的破坏和坍塌,这不仅加速了坑槽的生成,还可能引发更大范围的结构损坏。同时,施工质量问题亦不可忽视,如粘结力不足、压实度不够,都会导致坑槽的形成。施工前如果未能确保基层的充分压实和材料的充分干燥,则在后期使用过程中,随着交通荷载的增加和环境条件的变化,容易导致材料变形并最终形成坑槽。坑槽一旦出现,极大地影响了行驶安全性,尤其是在高速行驶时,驾驶员会面临更大的失控风险。

3 高速公路沥青混凝土路面病害治理措施

3.1 泛油问题治理措施

针对案例高速公路存在的泛油问题,特别是含油量过大的软层,处理措施的首要步骤是将软层完全挖除,并根据原路面设计要求重新铺筑沥青面层。具体治理步骤如下:首先,在处理区域的表面撒上一层厚度为 10 ~ 15 mm 的碎石,以设置基础层。其次,利用压路机对撒入的碎石进行强力压实,这一“强行压入”的方式确保了碎石与原路面之间的紧密结合,从而为后续的施工提供了稳定基础。在基础层稳定后,分次撒入厚度为 5 ~ 10 mm 的碎石。通过引导交通的碾压作用,这一过程可令碎石逐渐成型并融入路面。在治理工作中,掌握正确的施工时机至关重要。一般推荐选择在高温季节进行施工,这样可以确保沥青与碎石材料之间达到最佳的粘结性能。在撒料时,需遵循顺行车方向的原则,先撒入粗矿料,再依次撒入细矿料,以确保路面材料逐层渗透和结合。同时,每次撒料的量应控制在合理范围,以确保均匀分布,避免堆积和出现空白区域。特别需要注意的是,禁止使用含有粉料的细颗粒料,这将防止形成软的油石层,最终影响沥青路面的稳定性和使用寿命^[4]。

3.2 裂缝修补治理措施

针对案例高速公路 K158+673 ~ K202+673 段裂缝修补,需从两方面进行治理。首先,对于未处理的裂

缝,必须彻底清理杂物和多余水分,然后及时灌注热沥青以阻止水分进一步渗透。对于那些有明显凸起的裂缝,需要进行整平处理,以恢复路面的平整性。其次,对于密集且严重的裂缝,建议采用连片铣刨处理。根据路面的承载能力和裂缝的严重程度,确定铣刨的厚度,至少应铣刨一层。对于特殊路段,可以通过取芯检测来确定铣刨的厚度,以确保修补效果的持久性。针对不同类型的裂缝,应采取相应的治理措施。对于轻微裂缝,可以采用常规处理方法;对于严重病害,则需要清除松动部位,并使用热沥青或其他混合料进行修补。对于大面积深度病害,应制定分层修补方案,以确保路面的平整性和行驶的安全性。

3.3 车辙治理措施

在案例高速公路的局部段落,车辙病害集中且严重。治理车辙时,需重点关注以下方面:当车辙深度不足1 cm时,一般无需处理;若车辙深度超1 cm,则必须进行铣刨。具体操作是,先铣刨掉受损的表面层,接着铺筑4 cm厚的AC-13C SBS改性沥青混凝土。选用SBS改性沥青,因其具备出色的耐低温与抗高温流变特性,在沥青路面设计施工及病害治理中广泛应用。使用该改性沥青材料,不仅能增强路面耐久性,提升使用性能,还能有效降低未来病害的发生概率,切实保障路面的长期稳定与行车安全。

治理车辙时,还应确保铣刨操作的精确性,避免对周围原路面产生不必要的损伤。在铺筑新沥青后应确保新沥青层与下层的良好结合,以提高整体路面的稳定性和耐久性^[5]。新铺设的改性沥青混凝土层应在适宜的温度下施工,确保其能够良好地融合到原有路面中,具体性能如表1所示。施工完成后,需进行一段时间的交通管控,以使新铺设的沥青充分冷却凝固,保障路面的初始强度和稳定性。同时,为了进一步减少车辙现象的重复发生,建议在施工前对路段的交通流量进行评估,合理设计路面的承载能力,尽可能避免超载车辆的行驶。对于已经存在车辙的路段,应定期进行监测和评估,以便及时发现新的变形,并进行适时的处理和修复。

3.4 坑槽问题治理措施

对于出现坑槽的路段,首先需要对受损区域进行充分的勘察和评估,了解坑槽的深度、宽度及其形成原因。鉴于坑槽通常是由于基础处理不当、交通荷载影响以及环境因素所致,治理时应遵循科学合理的步骤。初步处理时,需将坑槽内的松散材料和杂物彻底清除,然后对坑槽的边缘进行修整,以保证新填充材料的良好附着力。随后,可以使用热沥青或其他合适

的混凝土材料进行填补,确保填充材料能够完全填充坑槽,避免出现空隙或不密实现象。在施工过程中,使用适当的振动器具对填充材料进行密实处理,确保其强度和稳定性。同时,对于较大或较深的坑槽,建议进行分层填充,即分多次进行填补,每层材料铺设完成后都需进行压实,以提高整体的承载能力^[6]。在施工完成后,应对修复的区域进行一段时间的交通管控,防止过早进入交通造成的损害。建议定期对公路的基础进行检查与维护,确保其获得必要的强度和稳定性。同时,借助监测技术,及时发现潜在的路面病害,对于重大交通荷载的路段采取必要的交通控制措施,以减少其对路面的影响。

表1 SBS改性沥青性能特点

项目	指标
外观	黑褐色不透明液体
密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.9 790
水分	痕迹
凝点 / $^{\circ}\text{C}$	-2
运动黏度	29.58
闪点 (开口) / $^{\circ}\text{C}$	240
酸值 / [$\text{mg} \cdot (\text{KOH} \cdot \text{g}^{-1})$]	0.009

4 结束语

高速公路沥青混凝土路面的早期病害对交通安全与经济效益的影响不容忽视。通过建立科学合理的质量控制体系,从材料选择、施工过程到后期维护各个环节都进行全面监管,可以有效降低病害的发生率,提升路面的整体性能,确保高效平稳的交通运行。未来,随着新材料和新技术的不断发展,持续关注和适时调整质量控制策略,将是提升高速公路沥青混凝土路面质量的重要方向。

参考文献:

- [1] 崔美娜.高速公路沥青混凝土路面振荡压实技术研究[J].交通世界,2024(28):75-77.
- [2] 李晓亮.高速公路胶粉复合改性沥青混凝土路面施工问题[J].交通世界,2024(26):14-16.
- [3] 桑晓,王钰权.高速公路沥青混凝土路面纵横向裂缝修补技术研究[J].交通科技与管理,2024,05(17):143-145.
- [4] 同[3].
- [5] 杨文光.沥青混凝土路面检测技术在高速公路中的应用[J].工程技术研究,2024,09(15):51-53.
- [6] 张斌.高速公路沥青混凝土路面施工技术研究[J].交通世界,2024(20):102-104.

化工设备腐蚀失效的成因分析与预防对策研究

李帮洪, 冉江林*, 罗 飞, 杨 坤

(瓮福(集团)有限责任公司, 贵州 贵阳 550500)

摘 要 化工设备腐蚀失效问题严重影响化工生产效率、产品质量与安全。本文深入分析了化工设备常见的腐蚀失效类型, 包括均匀腐蚀、局部腐蚀和磨损腐蚀等, 探讨了材料、环境、设计及操作维修等因素导致腐蚀失效的具体原因, 并针对腐蚀失效成因提出了材料选择与改性、设计优化、环境控制与介质处理、操作与维护管理、新技术新工艺应用等预防对策, 以为化工设备防腐蚀提供有益参考, 保障化工生产的安全稳定运行。

关键词 化工生产; 化工设备; 设备腐蚀; 腐蚀失效; 抗腐蚀能力

中图分类号: TQ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.041

0 引言

在化工行业蓬勃发展的当下, 化工设备作为生产流程的关键物质基础, 其运行状态直接关系到化工生产的效率、产品质量以及整体经济效益, 更与生产安全紧密相连。然而, 腐蚀失效问题却如同隐形的“杀手”, 广泛存在于各类化工设备之中, 严重制约着化工生产的连续性与稳定性, 甚至可能引发灾难性的安全事故, 造成巨大的经济损失与环境破坏。鉴于此, 对化工设备腐蚀失效的成因进行深入探究, 并探寻切实有效的预防对策, 已成为化工领域亟待解决的关键课题, 具有重要的现实意义与应用价值。

1 化工设备腐蚀失效的常见类型介绍

1.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀是指金属表面与周围环境发生化学或电化学反应, 导致金属以相对均匀的方式逐渐减薄的现象。从化学角度来看, 当化工设备的金属材料与腐蚀性介质(如酸、碱、盐溶液等)接触时, 金属原子会失去电子变成离子进入溶液, 同时介质中的氧化剂得到电子, 发生氧化还原反应, 使得金属表面不断被腐蚀。在电化学方面, 金属表面不同区域由于杂质、应力等因素存在电位差, 形成无数微小的腐蚀电池。以碳钢设备在电解质溶液中为例, 其中杂质颗粒或缺陷处可能成为阳极, 周围相对纯净区域作为阴极, 在电解质溶液的导电作用下, 阳极金属溶解进入溶液, 阴极发生还原反应, 整个金属表面遭受均匀腐蚀^[1]。

1.2 局部腐蚀

局部腐蚀是一种在腐蚀介质作用下, 金属材料仅在特定局部区域发生腐蚀, 而其余部位相对完好的现

象。在众多金属腐蚀形式中, 局部腐蚀因具有隐蔽性强、危害性大等特点, 常常给工业生产和设备运行带来严重威胁。

常见的局部腐蚀类型主要包括孔蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等。其中, 孔蚀是一种高度局部化的腐蚀形态, 它通常会在金属表面形成小而深的孔洞。这些孔洞的尺寸可能微小到难以察觉, 但深度却较大, 极具隐蔽性。一旦孔蚀形成, 它就会像一颗“定时炸弹”, 快速向金属深处发展, 最终可能导致设备穿孔泄漏, 进而引发一系列严重的安全事故和经济损失。

而缝隙腐蚀则容易发生在设备的缝隙或屏蔽部位, 如法兰连接处、垫片下方等位置。在这些部位, 由于缝隙的存在, 介质容易滞留并且发生浓缩, 从而引发腐蚀反应。而且随着缝隙宽度的减小, 腐蚀速率反而会增大, 这使得缝隙腐蚀的防控难度进一步提升。在实际工业设备中, 因缝隙腐蚀导致的设备损坏和维修成本占据了相当大的比例, 因此对缝隙腐蚀的深入研究和有效预防至关重要。

1.3 磨损腐蚀

磨损腐蚀, 又称为磨蚀, 是指金属表面在腐蚀性介质与相对运动的固体颗粒、流体等共同作用下发生的腐蚀损坏现象, 是机械磨损与化学或电化学腐蚀联合作用的结果, 其腐蚀速率往往比单纯的机械磨损或化学腐蚀要快得多。在化工设备中, 磨损腐蚀常见于流体输送管道、泵、阀门以及搅拌设备等部件, 在输送含有固体颗粒的浆液管道内, 固体颗粒在流动过程中对管道内壁产生冲刷作用, 同时管道内的腐蚀性介质会与金属表面发生化学反应, 加速金属的腐蚀。

*本文通信作者, E-mail: 2691945482@qq.com。

2 化工设备腐蚀失效的成因分析

2.1 材料因素

不同的金属或合金在特定的化工介质环境下,其化学稳定性差异巨大,不锈钢在一般大气环境下具有良好的耐腐蚀性,但在含有氯离子的溶液中就容易发生点蚀。这是因为氯离子会破坏不锈钢表面的钝化膜,使金属基体暴露在腐蚀介质中,进而引发局部腐蚀。晶粒大小、相组成以及晶界状态等微观特征都与腐蚀行为密切相关。细晶粒材料往往具有更好的抗腐蚀能力,因为其晶界数量多,能够分散腐蚀应力,同时晶界处的原子排列相对混乱,不利于腐蚀反应的快速进行。而多相合金中不同相之间的电位差异,可能会形成微观电池,加速某一相的腐蚀。在材料加工过程中,如焊接、热处理等工艺,会改变材料的局部成分和组织结构^[2]。焊接热影响区的材料性能通常会变差,容易成为腐蚀的薄弱环节。热处理不当可能导致材料内部残余应力过大,这些残余应力会促使腐蚀裂纹的萌生和扩展。

2.2 环境因素

大气环境对化工设备腐蚀影响显著,大气中的氧气、水蒸气以及各种污染物如二氧化硫、氮氧化物等是腐蚀的“催化剂”。氧气在金属表面发生氧化反应,加速金属腐蚀进程;水蒸气则为腐蚀反应提供了必要的介质,使得金属表面容易形成电解质溶液,进而促进电化学腐蚀的发生;而二氧化硫等污染物会与水蒸气结合生成酸性物质,进一步降低金属表面的pH值,加剧腐蚀程度。化工生产过程中接触到的各种化学介质环境也是腐蚀失效的重要诱因。例如:强酸、强碱溶液会直接与金属发生化学反应,使金属逐渐溶解或被置换,如不锈钢在浓硫酸环境中,其表面的钝化膜会被破坏,导致基体金属遭受严重腐蚀。含有氯离子的溶液对许多金属具有极强的腐蚀性,氯离子能够穿透金属表面的保护膜,引发点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀现象,这种局部腐蚀往往难以察觉,但一旦发生,可能会迅速导致设备穿孔、泄漏等失效情况。高温环境下,金属的腐蚀速率通常会加快,一方面是因为化学反应速率随温度升高而增加;另一方面,高温会使金属材料的微观结构发生变化,降低其抗腐蚀性能。而湿度的高低则直接影响金属表面的水膜形成和厚度,进而影响腐蚀反应的进行。在高湿度环境中,金属表面容易长期保持湿润状态,为腐蚀提供了持续的条件^[3]。这些环境因素相互交织、相互影响,共同构成了化工设备腐蚀失效的复杂外部条件。

2.3 设计因素

在设备选材阶段如果未充分考虑化工生产环境中介质的腐蚀性,如在强酸环境下选用普通碳钢而非耐酸的不锈钢或其他合金材料,就会使设备在投入使用后很快遭受腐蚀。设备的结构设计同样至关重要,存在不合理结构时,例如设备内部有死角或缝隙,这些区域容易积聚腐蚀性介质,导致局部腐蚀加剧,而且在这些部位介质的流动不畅,难以通过正常的工艺操作进行清洗和置换,使得腐蚀介质长期滞留,加速腐蚀进程。设备的焊接设计也会影响腐蚀失效,焊接接头处往往是应力集中区域,若焊接工艺不当,如焊接缺陷、焊缝形状不佳等,会使接头处的金属材料更容易受到腐蚀介质的侵蚀,而且焊接过程中可能会改变材料的微观结构,降低其耐腐蚀性能。在设备的密封设计方面,若密封结构设计不合理,密封材料选择不合适,就会导致介质泄漏,加速设备整体的腐蚀失效。

2.4 操作与维修因素

在操作过程中,如果工艺参数控制不稳定,如温度、压力、流量等超出设备设计范围,会使设备长期处于超负荷或异常工况下运行,加速腐蚀进程,温度过高会加剧化学反应速率,使腐蚀介质与设备材料的反应更加剧烈,从而加快设备腐蚀。操作人员未严格按照操作规程进行操作,如在设备启动、停车过程中未遵循正确的顺序,可能导致设备内部介质分布不均,形成局部腐蚀环境。在维修方面,维修不及时或维修不当也是导致腐蚀失效的重要原因。设备出现局部腐蚀或损坏后,若未能及时发现并维修,腐蚀会进一步扩散,最终导致设备整体失效。而且在维修过程中,若选用的维修材料与原设备材料不匹配,或者维修工艺不符合要求,如焊接修复时焊接工艺不当,不仅无法有效修复腐蚀部位,还会引入新的腐蚀隐患,进一步降低设备的耐腐蚀性能,缩短使用寿命。

3 化工设备腐蚀失效的预防对策

3.1 材料选择与改性

从材料选择方面来看,首先需根据化工介质的性质精准选材,对于处于酸性环境中的设备,如硫酸、盐酸等强酸介质,不锈钢很快就被腐蚀,而采用高硅铸铁或者衬有橡胶、塑料等耐酸材料的设备则能有效抵御腐蚀。若是处理碱性介质,如烧碱溶液,普通碳钢易被腐蚀,这时选用耐碱的镍基合金材料就会是更好的选择。考虑到不同材料在不同温度、压力下的稳定性也至关重要,在高温环境下,一些材料可能会加速腐蚀,此时就得选用具有高温稳定性的合金材料,

如在高温高压的合成氨设备中,常采用铬钼钢来增强抗腐蚀能力。材料改性更是为化工设备防腐蚀开辟了新路径。一方面,可以改变材料的微观组织结构来提升其耐蚀性,如对普通碳钢进行热处理,在特定的温度和冷却速度下,使其内部的晶粒细化、组织均匀化,从而降低腐蚀速率。另一方面,添加合金元素是常用的改性手段,以不锈钢为例,在铁中添加铬、镍等元素,铬能使不锈钢表面形成一层致密的氧化铬膜,这层膜能有效隔绝腐蚀介质与基体的接触,而镍则能进一步稳定不锈钢的组织结构,提高其耐蚀性。

3.2 设计优化

从结构设计层面而言,应尽量选择简洁流畅的外形,避免出现过多的缝隙、死角和凹槽,因为这些部位极易残留腐蚀性介质,难以清理,从而加速腐蚀进程。在设计管道连接处时,优先采用焊接方式代替螺纹连接,焊接连接的密封性更好,能减少介质在连接处的积聚,降低缝隙腐蚀风险;对于一些复杂结构的设备内部,要合理设置排水孔和排气孔,确保在设备停机时,内部液体顺利排出,防止液体长期停留造成腐蚀,如在卧式储罐底部设计适当的坡度并安装排液阀,便于将残留液体排空。在材料布局上,应充分考虑不同部位所处的腐蚀环境差异。对于直接与腐蚀性介质接触的部位,如反应器的内壁、管道的内表面等,即使整体结构选用同一基础材料,也应通过合理设计,如增加局部衬里、涂层等方式增强其耐蚀性^[4]。以常见的碳钢设备为例,在其内部可衬上一层耐腐蚀的橡胶、塑料或玻璃钢等材料,这些衬里材料能形成一道有效的防护屏障,将碳钢基体与腐蚀介质隔离开,大幅延长设备的使用寿命。

3.3 环境控制与介质处理

湿度是引发腐蚀的重要因素,特别是在含有腐蚀性气体的环境中,高湿度会使金属表面形成水膜,加速电化学腐蚀。因此,在设备存放区域及部分非连续作业的化工厂房,可采用除湿设备将相对湿度控制在 60% 以下,如一些对湿度敏感的电子化工设备车间,可配备工业除湿机,定期监测湿度并自动调节,降低腐蚀风险。通风换气也是重要的环境控制手段,在酸性或碱性气体易积聚的反应釜车间,安装轴流风机等通风设备,每小时换气次数不少于 5~10 次,及时排出有害气体,避免其在设备表面凝结成腐蚀性液滴。在一些沿海化工企业,还需考虑海水飞溅及海雾中的盐分对设备的侵蚀,可通过设置防风帐篷、厂房封闭等措施阻挡盐雾侵蚀^[5]。在介质处理方面,去除腐蚀性杂质是有效手段。以循环冷却水系统为例,水中常含

有溶解氧、硫化氢、氯离子等腐蚀性成分,可采用离子交换树脂法去除氯离子,利用鼓风机曝气或真空脱气法去除溶解氧,运用生物处理法消除硫化氢。

3.4 操作与维护管理

在日常操作环节,严格遵守操作规程是基础中的基础,每一位操作人员都必须精准按照既定流程进行开工、停工以及正常运行时的各项操作,精准控制工艺参数至关重要,依据不同化工设备与工艺要求,将温度、压力、流速等参数稳定在合理区间,如在一些酸性水溶液的化工反应釜中,温度每升高 10℃,腐蚀速率可能会成倍增加,所以借助高精度的温度传感器与自动控制系统,把温度波动范围控制在极小的幅度内,可显著降低腐蚀风险。设备维护管理同样不可小觑,定期巡检是发现问题的“千里眼”和“顺风耳”,维护人员需按照固定的时间周期和详细检查清单,对设备的外观、焊缝、连接处等易腐蚀部位进行全面细致的检查,如检查管道外表面是否有腐蚀产物附着,设备表面的防腐涂层是否出现鼓泡、脱落等现象,一旦发现异常,立即记录并安排处理^[6]。

4 结束语

化工设备的腐蚀失效问题给化工行业的安全生产与经济效益带来了严峻挑战。本文深入剖析了化工设备腐蚀失效的类型、成因,从材料选择与改性、设计优化、环境控制、操作维护管理到新技术应用,为化工设备防腐蚀提供参考。未来,化工行业应强化腐蚀防控意识,将先进理念与技术融入设备全生命周期管理,以降低腐蚀风险,保障生产安全稳定,延长设备寿命,推动化工行业绿色、高效、可持续发展。

参考文献:

- [1] 代军荣,谭隆,王盛洁.石油机械设备防腐设计要点分析[J].中国设备工程,2025(10):90-92.
- [2] 张荣华.浅谈化工机械设备管理与维修保养技术[J].中国设备工程,2025(09):60-62.
- [3] 李小松,龚升武.浅析化工生产装置的设备腐蚀与防护[J].中国设备工程,2025(09):178-179.
- [4] 杨廷全.化工设备的腐蚀问题与防腐措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(08):16-18.
- [5] 陈畏畏.化工设备检修作业中的安全隐患及对策[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(04):25-27.
- [6] 刘琪.化工设备换热器的常见腐蚀问题与防腐措施探讨[J].中国设备工程,2025(04):185-187.

复杂地质条件下煤矿地质勘探技术的应用与优化

张园, 李雷雷, 王光宇

(陕西银河煤业开发有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要 通过阐述复杂地质条件下煤矿地质勘探的重要性, 论述煤矿地质勘探的主要内容以及电法勘探技术、遥感勘探技术、磁法与重力勘探技术、地震勘探技术、钻孔勘探技术的应用要点, 提出了煤矿地质勘探技术应用的优化建议, 包括借助仿真软件进行模拟分析、完善和优化各工种协同合作机制、推动煤矿地质勘探数据库建设、加强对勘探人员专业能力评估等, 以期相关人员提供借鉴。

关键词 复杂地质条件; 煤矿地质勘探技术; 电法勘探技术; 遥感勘探技术; 地震勘探技术

中图分类号: TD1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.042

0 引言

煤矿地质勘探技术在复杂地质条件下应用时, 工作人员需注意把控技术应用要点, 根据不同的地质环境与勘探方案, 细化相关技术应用的管理对策, 并采取相应的优化措施, 以充分发挥出煤矿地质勘探技术的应用价值。本文探讨煤矿地质勘探技术在复杂地质条件下的应用与优化路径, 重点阐述常用的几种地质勘探技术及应用优化策略, 以期相关人员的工作开展提供参考。

1 复杂地质条件下进行煤矿地质勘探的重要性分析

1.1 识别地质构造潜在的风险

在煤矿资源开发过程中, 由于地质环境的复杂性, 使得煤矿开发存在着很大风险。为此, 在煤矿开采前, 技术团队应根据煤矿所在地区的地质环境特点, 开展针对性的煤矿地质勘探, 从而对地质构造潜在的风险进行识别, 如地质构造断层结构、褶皱结构等, 为后续的煤矿开采计划制定提供参考依据。

1.2 为找矿探矿提供参考依据

新时期煤矿资源开发过程中, 为实现对煤矿资源更好的规划利用, 需要不断加大找矿探矿的力度, 为资源战略储备管理提供支持。在相关工作开展过程中, 可灵活应用煤矿地质勘探技术, 系统全面地进行找矿探矿, 科学分析评估, 以提高找矿探矿的工作效率。

1.3 为矿产资源开发提供支持

在矿产资源开发过程中, 需要综合分析周边的地质地貌环境, 制定详细的开采方案, 避免在开采过程中造成较大的生态破坏、环境污染、资源浪费。为此,

在矿产开采筹备时, 工作人员需分析煤矿地质勘探报告, 基于勘探报告中的详细数据支持, 对矿产资源的开发方案优化提供依据, 保证煤矿资源后续开发的可行性与安全性。

2 煤矿地质勘探的主要内容概述

2.1 地质水文条件勘探

在煤矿地质勘探工作开展过程中, 工作人员需要对地质水文条件进行专项勘探, 了解目标地质区域的水层内压、含水层, 以及水层与工作面之间的相互距离。鉴于水文信息易发生变化, 在实际勘探工作开展时, 应确保勘探数据的精准度, 开展多次勘探, 对相关的数据进行交叉验证, 防止数据偏差, 影响到后续的工作。此外, 在煤矿构造区水文地质环境进行勘探时, 需要查明该区域水资源分布的具体情况^[1]。

2.2 地质构造特征勘探

在地质构造特征勘探过程中, 工作人员需要了解煤层的走向、厚度与岩层成分。为达到预期工作目标, 工作人员首先需进行地表探查, 对煤矿的地质构造进行基本的判断分析, 为便于后续勘探图的绘制, 应设定地表等高线、信息条形图等。在地层深部进行勘探时, 工作人员需要根据实际工作的需求, 选择合适的煤矿地质勘探技术, 以了解煤矿深层的地质构造特征。

2.3 煤炭储量多少勘探

在煤矿地质勘探工作开展过程中, 工作人员可应用相应的技术, 了解煤矿的矿产资源储量。为保证后续煤矿开采计划的严谨性与合理性。在勘探煤炭的具体储量时, 工作人员需要结合不同的勘探技术, 更精

准地评估计算出煤炭的储量,避免由于储量计算偏差较大,影响到后续煤矿的正常开采。因为部分煤矿的储量相对较小,且处于较为复杂的地质环境下,在对其开采过程,开采成本较高,若没有预先进行精准严谨的地质勘探就盲目开采,将浪费较多的人力物力,造成社会资源的浪费^[2]。

3 复杂地质条件下不同煤矿地质勘探技术的应用探讨

3.1 电法勘探技术

电法勘探是煤矿地质勘探的主流技术之一,此技术主要是基于矿体电阻率的差值,从而获得地质构造中的相关信息,能够快速探明煤矿的储层特点。工作人员在实际操作过程中,借助专业设备的辅助对地表或矿体施加一定的电流,而后检测地质体的电场响应数据信息,再对数据信息汇总后,可推测评估出矿体地质构造情况。在复杂地质环境下应用电法勘探时,常用以下几种勘探技术方案。

一是直流电阻率法,此法可在地表布设电极,而后注入一定的直流电,工作人员通过测量不同电极的电位差,可计算出对应的电阻率,为煤矿地层构造的分析评估提供依据^[3]。不同岩层与矿体之间的电阻率不同,技术人员基于勘探所得的电阻率素质,可判断出煤层的厚度,以及地质结构存在的断层情况。鉴于此法的应用特殊优势,在煤矿开采前或浅层煤矿勘探时,可应用此技术,以充分发挥此技术的应用优势。

二是激电法的应用,该勘探技术可通过测量出地层中暂态电场的的数据信息,实现对煤矿地层结构的评估判断。矿体在特定的电流作用下会产生极化现象,而当电流断开后,矿体的极化电势将呈现逐渐衰减的态势。工作人员可利用机电设备记录下这一过程的数据信息,从而评估煤矿地质的实际情况。鉴于此法应用的特殊性,在有有色金属的矿床勘探中应用较为普遍。

三是大地电磁法,此种勘探技术应用时,将天然的大地磁场作为信号源,测量出地表电磁波的传播规律,可依据相关数据信息,判断出地下矿床的结构特征。在对储层较深的煤矿进行勘探时,为应对复杂地质环境的影响,工作人员可应用此法进行勘探。

3.2 遥感勘探技术

在新时期煤矿地质勘探工作开展过程中,为有效应对复杂地质条件,保证煤矿地质勘探的可靠性与准确性。工作人员可应用遥感勘探技术,此技术可基于传感器与遥感卫星的支持,实现对远距离地表特征信息的采集,能够高效精准地获取地质数据资料。通过对该技术的应用原理分析可知,此技术主要是基于地

表反射的电磁波变化,从而判断出地表地质环境的特点,在实际应用中,需根据煤矿地质勘探的工作要求,配置激光雷达、光学传感器、热红外像仪等,能够实现对地表不同信息的采集,如地表植被、地质类型、土壤成分、岩层特点等^[4]。

在煤矿地质勘探工作开展过程中,技术人员基于此技术的应用支持,可解决煤矿地质勘探中的很多问题,如在遥感勘探过程中,可基于数字高程模型的创设,分析勘探目标区域的地质地貌特点,分析评估不同地质灾害的发生记录、出现概率、引发的负面影响等。由此可见,在复杂地质条件下,工作人员应用遥感勘探技术,不仅能够对煤矿的储层特征进行分析判断,同时可覆盖更多的勘探区域,以形成综合性的地质模型,为后续的煤矿资源开发利用提供支持。

3.3 磁法与重力勘探技术

在初步确定勘探区域时,为快速高效地探明地质构造特点,可应用磁法勘探技术与重力勘探技术。工作人员应用磁法勘探技术时,主要是基于地球磁场的局部变化,推算出煤矿的实际分布情况,这是因为不同的矿体对磁场强度产生的影响各不相同,技术人员可借助专业的磁力仪器记录下磁场的的数据变化,而后在数据深度分析后绘制出磁场异常图。为更高效地开展地质勘探,技术人员可将此技术与其他煤矿地质勘探技术进行结合。

在应用重力勘探技术过程中,主要是基于地层密度的差异,记录下矿体重力场发生的变化,这是因为矿体的岩层与密度各不相同,受到重力场的影响也存在差异。借助重力仪的检测,可捕捉到微弱的重力异常变化,为煤矿地质勘探提供依据。一般在地下矿床断层、构造变形勘探时,可应用此技术。

3.4 地震勘探技术

由于煤矿储层地质环境的特殊性,工作人员在复杂地质条件下进行煤矿勘探时,可应用地震勘探技术,以发挥该技术的应用优势。通过对地震勘探技术的应用原理分析可知,技术人员通过检测地震波在地下介质中的传播数据信息,以及相关的反射波形,可分析推测出地下煤层的基本特征。在煤矿正式开采前,为深入系统地研究煤矿的地质构造,工作人员可采取此方案,识别出煤层的褶皱、断层及厚度等相关数据。此技术主要包含折射法与反射法。

折射法应用时,主要是基于地震波在岩层界面处发生的折射现象,以获得相关的数据,为煤矿勘探提供依据,一般在浅层煤矿地质勘探时,工作人员可基于此法测量勘探出覆盖层的具体厚度;反射法应用时,需在地表设计人为的地震源,并使用地震接收仪收集

地震波反射的数据,测算出反射波的强度与时间差值,以此探明煤矿的地质构造特点。

为保证复杂地质条件下煤矿地质勘探工作开展的质量与效果,可应用三维地震勘探仪实现对煤矿地质结构的快速勘探,以获得三维立体的成像信息,为后续的煤矿开采利用提供依据。因为在三维立体的地震成像模型中,可以清晰地展示出地质断层的具体情况,有效规避煤矿开采的安全隐患。鉴于地震勘探技术应用精度很高、覆盖范围较广,在实际应用时,需要多种精密设备配合辅助,才可发挥此技术的应用优势,为此在应用此技术方案时,工作人员需要配合其他的煤矿地质勘探技术方案,保证最终勘探方案的可行性与有效性。

3.5 钻孔勘探技术

煤矿地质勘探中最常见的方式是钻孔勘探技术,此方法可获取地质构造的岩心样本,为煤层地质构造的判断提供依据。为充分发挥此技术的应用优势,工作人员应当设定钻孔横切面,并绘制立体投影,分析不同角度钻孔的可行性,以保证钻孔后可获得有效样本。因为,在实际煤矿钻孔勘探过程中,由于设备、环境、操作的多方面因素影响,致使钻孔过程中出现横向偏移与纵向偏移,无法保证最终钻孔取样的质量。因此,在钻孔勘探技术应用过程中,可采取定向钻进减阻技术,并应用轨迹校正技术,及时对钻进位置进行调整校正,以保证钻孔勘探工作开展的有效性。基于钻孔工作的开展,工作人员可对煤矿地质环境的整体构造进行综合研判。

4 复杂地质条件下煤矿地质勘探技术应用的优化策略

4.1 借助仿真软件进行模拟分析

复杂地质环境下进行煤矿地质勘探时,为保证勘探技术方案应用的可行性与安全性,工作人员应借助现代仿真软件的辅助,对设计的煤矿地质勘探技术方案进行模拟分析,评估方案执行过程中存在的风险与隐患,并组织技术人员对勘探计划进行优化完善,改进勘探操作细节,加强对勘探过程的管理。在可视化的三维仿真模拟分析过程中,工作人员可客观了解自己的工作职责与内容,以及相关误操作与违规行为引发的风险,这样可有效增强勘探人员的工作责任感与安全意识,使其严格执行设定的煤矿地质勘探技术方案^[5]。

4.2 完善和优化各工种协同合作机制

在煤矿地质勘探工作中,需要多个工种的协同配合,才可保证对复杂地质构造进行有效的勘探。当各工种的协同合作效果不佳时,将直接影响到煤矿地质

勘探工作开展的可行性。为避免此类问题的出现,在复杂地质条件下进行煤矿地质勘探时,管理人员应不断完善各工种的协同合作机制,细化各工种的协同职责、工作交接流程、信息共享机制、问责追溯制度等。通过打造完善严谨的协同合作体系,不断加强各工种之间的配合,提升煤矿地质勘探工作的整体效率与质量。

4.3 加强对勘探人员专业能力的评估

煤矿地质勘探人员的工作能力直接影响到最终的勘探结果,因为当勘探人员的能力不达标时,在实际操作时将存在诸多风险,如误操作、更改工艺、篡改数据、勘探偏差等。由此可见,在复杂地质条件下应用煤矿地质勘探技术时,打造核心人才团队的重要性与必要性。为此,在相关工作开展过程中,管理人员应当加强对地质勘探人员的专业技能考核评估,根据最新的煤矿地质勘探岗位职责要求,客观评估每一位勘探人员的综合素质与专业能力,根据评测的结果,要求相关人员进修学习,防止个别人员在勘探队伍中滥竽充数,给后续的煤矿地质勘探工作开展埋下安全隐患。

5 结束语

以煤矿地质勘探技术的应用为例,重点阐述了复杂地质条件下相关勘探技术的应用与优化策略,以说明做好煤矿地质勘探工作的重要性与必要性。为探明复杂地质环境的构造特点,在地质勘探过程中应将多种勘探技术相结合,多源数据验证地质勘探结果,以保证煤矿地质勘探报告的真实性和准确性。在今后的煤矿地质勘探工作开展中应不断总结相关经验,为应对复杂地质条件的勘探提供支持,筑牢煤矿开发的安全根基,推动我国煤矿事业的高质量发展。

参考文献:

- [1] 金校锋,刘强,杨金松,等.复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术应用解析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(01):33-36.
- [2] 姚晓峰.复杂地质条件下煤矿掘进技术应用[J].矿业装备,2025(01):14-16.
- [3] 任磊.复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(01):74-77.
- [4] 王书刚.复杂地质条件下煤矿开采工艺与支护设计的优化与应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(02):33-36.
- [5] 郭志光,王志杰.复杂地质条件下岩土工程勘察技术的应用探析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(01):144-147.