

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 4 月 第 11 期 (总第 636 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 4 月 15 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 风电大型设备运输对山地道路设计参数的影响研究
..... 周 翔
- 004 土石堤防填筑中压实遍数与干密度关系的现场验证分析
..... 王 瑜, 张 霞, 翟亮亮
- 007 天然气长输管线与城镇管网接驳工程施工关键技术研究
..... 阿迪里麦提·萨力木
- 010 整流变压器阀侧绕组结构优化降低杂散损耗技术方案研究
..... 孙 涛, 郭朋英, 祖鹤琼
- 013 电磁波测距三角高程测量在山区高程控制测量中的应用分析
..... 郑 干

智能科技

- 016 信息化技术赋能建筑工程管理实践研究
..... 王叶峰
- 019 智慧水务在供排水管理中的应用与实践
..... 张忠科
- 022 智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的价值
..... 张 超
- 025 基于 IIoT 与人工智能的工业生产过程监测与优化研究
..... 项本杰, 王 锐, 陈 杰, 陈圣贤
- 028 基于深度学习的工业互联网异常流量检测与入侵响应研究
..... 韩 彬, 杨晓雾
- 031 三维激光扫描技术在不动产测绘中的精度控制与应用研究
..... 王岳泽

应用技术

- 034 装配式建筑机电管线集成施工技术
..... 王立杰

目录 Contents

- 037 建筑电气设计中低压配电系统可靠性分析..... 马桥阳
040 一种空中倒挂三角结构施工方法分析..... 朱晨迪
043 水利施工中软土地基施工技术探讨..... 孙所勇
046 复杂地质条件下水利建筑施工关键技术研究..... 赵 苹
049 沥青路面平整度关键施工环节控制技术分析..... 沈永存, 常艳梅
052 装配式高层建筑给排水及消防管道施工技术研究..... 熊 飞
055 商业建筑装修改造中消防给水系统的适应性设计方法与工程实践..... 杨 蕾, 王传虎

科创产业

- 058 建筑工程造价风险识别与防控机制研究..... 邓贵宾
061 建筑工程全过程造价管理与控制策略研究..... 闫晓鹏, 邱 龙, 王国庆
064 现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径与实践..... 严来鑫
067 装配式建筑预制构件生产制约因素及优化研究..... 王新宇
070 半导体芯片制造流程中的自动化控制技术研究..... 王洪建
073 铝土矿企业生产运营全过程数字化管控平台构建措施..... 吴 波
076 云南省农村专业技术协会服务“三农”的探索实践与发展思考..... 李 焰

技术管理

- 082 房建外脚手架搭设过程安全管理研究..... 崔生虎
085 电力工程施工进度控制与优化措施探讨..... 刘 蒙
088 变电站土建与电气安装施工协调管理研究..... 史 聪
091 智能变电站设备日常巡检与维护策略探讨..... 陈 菁
094 水利施工机械设备现场作业安全管控策略研究..... 李洪伟, 周小璇, 程岩卫
097 电力工程装配式变电站施工技术要点与质量管控..... 高和波, 张 波
100 线缆设备液压系统常见故障排查与维护工艺优化..... 高海涛, 刘 峰, 李传鹏, 李自习, 王辉涛

科学论坛

- 103 水利工程安全检测标准体系研究..... 隋 峰, 刘志浩, 丁悦璐
106 长叶片水蚀机理与防护技术研究..... 王铁钢
109 沥青搅拌站燃烧器维护与能效优化研究..... 左东瑞
112 电梯中分式层门系统受冲击故障机理分析..... 魏小枫
115 淤浆法聚乙烯装置排放气处理工艺选择分析..... 范梦笔
118 化工环境下电力电缆绝缘老化机理及检测诊断技术研究..... 李俊梅
121 工业废溶剂资源化利用的化学萃取精制工艺及分离效能研究..... 高 鹏, 王一丹, 胡 聪
124 无碱熔前处理技术在钨钼矿石多金属元素含量精准分析中的应用研究..... 刘俊涛

风电大型设备运输对山地道路设计参数的影响研究

周翔

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 为了识别风电大型设备运输条件下山地道路的关键受限因素, 以典型山区风电场建设道路为例, 研究运输车组包络、纵坡受力与横向空间约束对道路几何参数的影响机制, 并提出平纵横要素的优化配置体系。结果表明, 基于包络重构与受力校核的设计参数可显著改善急弯半径不足、连续大纵坡比例偏高及横向安全裕度不足等问题, 验证道路在复杂地形中的运输适应性与结构安全性得到明显提升。

关键词 风电运输; 山地道路; 几何设计参数; 包络分析

中图分类号: TM61; U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.001

0 引言

大型风电机组装运规模持续扩大, 超长、超重构件的陆上运输愈发成为制约山地风电开发的重要环节。传统山区道路的线形、坡度及横向空间多以常规车辆特性为基准, 其安全裕度与力学边界难以满足特殊运输车组的包络需求, 导致工程建设阶段出现通行受限、改扩成本上升与安全风险累积等问题。深入揭示风电大型设备运输条件下的道路设计约束, 并构建适应复杂地形与极端工况的参数体系, 对于提升山地风电项目整体建设效率与运行安全具有关键价值。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

某风电项目位于典型山地丘陵地带, 场址海拔区间变化较大, 道路沿线高差在 120 ~ 380 m 之间, 坡面陡峭、地形起伏频繁, 路线需穿越多处山脊及 V 型沟谷, 整体地形条件限制明显。项目规划安装的风电机组额定功率多在 3.6 MW 以上, 其叶片长度普遍超过 100 m, 塔筒单段最大直径接近 4.5 m, 机舱运输总重量超过 90 t, 运输车组总长接近 80 m, 对道路空间条件和线形控制提出了较高要求。施工区域现状道路多为林区作业道和乡村简易路, 路基宽度普遍不足 5 m, 最小平曲线半径多小于 20 m, 纵坡变化频繁且局部坡度超过 9%, 难以满足超长叶片与重载设备的运输条件。为保障重型车辆、长大件运输车及挂车组合的通行安全与稳定性, 拟依托既有道路开展必要的路线复核、几何参数核定及局部路段的改扩建工程。

1.2 运输设备特性参数

本项目风电设备运输主要采用叶片工装牵引车、塔筒液压多轴平板车及机舱重载组合挂车等山地专用运输装备。运输车辆整体呈现“超长、超重、高重心、多轴组”的特征, 其中叶片单件长度普遍达到 100 m 以上, 进入场区后需更换为具备强牵引力的定制牵引车组, 匹配专用转盘支架及后轮自适应跟随系统, 整车组合总长接近 85 m, 转弯时尾部外摆显著增强。塔筒与机舱运输多采用 8 ~ 10 轴液压悬挂式平板车, 单组车重超 120 t, 轴载控制在 10 t 左右, 对路基承载能力与路面横坡设计形成直接约束。整体运输高度考虑车架、托盘结构及构件尺寸后一般控制在 5.5 m 左右, 对沿线净空构造(涵洞、门架、电缆)及边坡安全距离提出更高要求^[1]。

2 大型设备运输对道路设计参数的影响分析

2.1 平面线形影响分析

在风电大型设备运输条件下, 道路平面线形首先受到超长、超大组合车辆转弯包络的显著制约, 车辆总长接近 80 m、轴距超过 20 m, 使最小转弯半径远大于常规山地公路设计取值。现状林道中普遍存在最小平曲线半径小于 20 m 的急弯, 当特种运输车组进入此类弯道时, 内轮差和尾端外摆将导致车辆包络线大幅侵入对向车道甚至路缘外侧, 迫使道路在平面上必须通过加大弯道半径、延长缓和曲线以及对弯道外侧进行必要加宽来适配运输需求^[2]。结合设备几何参数与车辆转向特性, 可通过平面线形校核确定不同车速和

作者简介: 周翔(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源项目风电道路设计。

弯道半径下的车辆包络范围并形成“道路中心线—车辆外轮廓—边坡或防护构造物”的几何关系，如图1所示，其中清晰反映了在 $R=50\text{ m}$ 、车速 15 km/h 工况下，组合车辆内轮轨迹、外轮轨迹及叶片前端包络之间的相对位置变化。由此可见，平面线形的曲线半径、缓和曲线长度以及直曲组合方式不再仅以常规汽车行驶舒适性和安全性指标为控制，而是受到大型设备运输包络、会车条件和边坡稳定空间的综合影响，并将对纵断面控制及横断面布置形成联动约束。

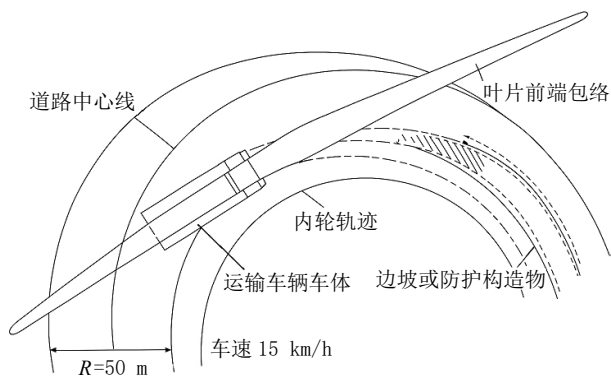


图1 大型风电设备运输车辆平面转弯包络关系

2.2 纵断面影响分析

在大型风电设备运输条件下，道路纵断面设计首先受到车组总质量与牵引性能的联合约束。多轴平板车与叶片运输车组合总重可超过 120 t ，在山地路段纵坡增加时，沿线路向分力显著增大，使得可采用的最大纵坡值远低于常规二级公路经验控制指标^[3]。若以牵引力平衡关系近似表示重载车在坡道上的运行条件，可写为：

$$F_t = G(i + f) \quad (1)$$

式(1)中， F_t 为车辆可提供的牵引力， G 为车组重力， i 为纵坡， f 为滚动阻力系数。在车组总质量给定且牵引能力接近极限时，纵坡参数的微小变化即会造成牵引力需求成倍放大，从而直接限制最大纵坡和连续长大坡段的布设长度。车辆离地间隙仅为 $0.25 \sim 0.35\text{ m}$ ，对竖曲线变坡点处的“托底”风险极为敏感，要求在纵断面设计中对凹形竖曲线半径和坡段组合进行专门校核。此外，重载车辆在下坡段制动距离显著增加，安全视距与制动视距控制反过来影响纵坡转换位置和高程布设，使纵断面几何形态与运输工况形成紧密耦合，也为横断面及构造物设计提供约束边界。

2.3 横断面影响分析

在大型风电设备运输条件下，道路横断面设计受到车组宽度、叶片外摆包络以及多轴平板车受力分布

的共同控制，其敏感性远高于常规公路的几何参数布设。由于运输车组整体宽度通常在 $3.2 \sim 3.5\text{ m}$ ，且叶片在小半径弯道处存在外摆加宽需求，使道路行车道宽度与路肩布置必须满足“车辆宽度+车体摇摆量+包络富余”的综合要求^[4]；在下弯和逆坡组合路段，车辆重心高度可达 4.5 m 左右，侧向离心力增大会加剧车辆向外侧偏移，对横坡值及横向稳定性形成直接约束。

3 道路设计参数优化建议

3.1 平面线形优化

在平面线形优化上，应将大型风电设备运输车辆的转弯包络和侧向动力学条件同步引入路线设计控制中，通过“设计车组—控制半径—加宽量”一体化校核确定合理的平曲线组合。针对前文分析中总长接近 80 m 的运输车组，可在限定运输设计速度的基础上，采用公路路线设计中常用的最小平曲线半径计算式：

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(e+f)} \quad (2)$$

式(2)中， R_{\min} 为最小平曲线半径， V 为运输控制车速(km/h)， e 为超高率(取 $0.04 \sim 0.06$)， f 为侧向力系数(一般取 $0.10 \sim 0.12$)，在保证侧向稳定的前提下，以车辆包络分析结果对理论 R_{\min} 进行修正，并结合叶片前端和尾部外摆确定弯道外侧加宽值^[5]。为便于工程应用，可按图1的包络校核结果和规范限值整理平面线形优化建议。

3.2 纵断面设计优化

在纵断面设计优化方面，需要将重载运输车组的牵引与制动能力、离地间隙及视距条件同步转化为纵坡值、坡段长度和竖曲线半径的控制指标，通过纵断面参数的精细化约束降低运输工况下的纵向风险。针对总重超过 120 t 、控制车速一般不大于 20 km/h 的风电运输车组，宜在现状山地地形条件允许的前提下，严格压缩长大纵坡的坡度与长度组合，并在坡段转换位置布设足够半径的竖曲线，以兼顾底部托底控制和驾驶员视距需求。不同工况下建议采用的最大纵坡值、极限纵坡、连续坡段控制长度和凹形竖曲线最小半径，如在运输控制车速 15 km/h 、山地重载工况下，最大纵坡宜控制在 6% 以内，单一连续坡段长度宜小于 250 m ，凹形竖曲线半径宜不小于 800 m ；在局部受地形强烈制约的路段，则应通过增加变坡点数量、缩短单一陡坡长度等方式，综合调整纵断面线形，为横断面加宽、防护结构布设及排水系统设计预留合理的高程与空间条件。

3.3 横断面设计优化

在横断面设计优化方面,应在满足大型风电设备运输车辆包络的前提下,对行车道宽度、路肩布置、横坡控制及边坡与防护体系进行整体重构,使横向空间既满足通行安全,又兼顾结构受力与排水需求。结合设备宽度 3.2~3.5 m 及叶片外摆特征,沿线宜以“单向重载通行+预留避车带”的组织方式为基础,将主行车带设计为不小于 4.5 m 的有效宽度,并在外侧布设 0.75~1.50 m 的安全带和必要的防护栏空间,使车辆在小半径弯道、超高及不利风向工况下仍保持足够的横向余量。横坡值宜在满足排水条件与侧向稳定之间取得平衡,重载路段可控制在 2.0%~2.5% 区间,并通过路拱型式和边沟高程保证雨水快速排出,避免路面局部积水削弱结构承载力。为直观体现各横向要素的空间关系,可构建如图 2 所示的组合形式,在图中明确主行车带、外侧加宽带、安全带、路缘带、边沟及防护栏的相对位置及尺寸关系,在此基础上再结合纵断面高程与边坡稳定要求,对临崖、陡坡等特殊路段的横断面进行进一步细化。

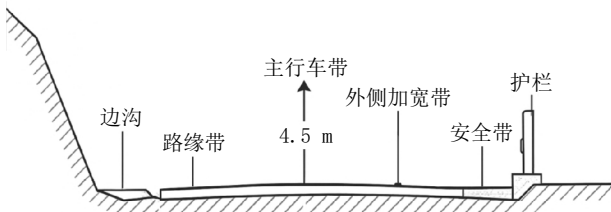


图 2 风电设备运输条件下山地道路横断面优化

4 工程实施效果验证

4.1 优化方案实施情况

在工程实施阶段,针对风电设备运输提出的三项设计参数优化建议已分阶段纳入改扩建施工流程。在平面线形方面,重点对 R 小于 50 m 的急弯路段开展现场转弯包络校核,并依据图 1 所示轨迹关系重构中心线走向与外侧加宽结构,通过爆破修坡、填方平台扩展等方式将关键弯道曲线半径拓展至 60 m 以上,并配套设置缓和段以改善转向过渡。纵断面优化主要集中于重载牵引受限的连续陡坡区段,实施过程中对既有 3 段平均坡度超过 8% 的路段进行定线微调,通过增加坡段变坡点与削坡处理将纵坡控制至 6% 以内,同时同步调整竖曲线半径以提升变坡处通行安全性。在横断面改造方面,在最小净空不足的临崖段增设外侧安全带及波形防护栏,扩宽主行车带至 4.5 m,并结合设备离地间隙控制对边沟高程与排水坡度作同步整合,确保

横向空间与排水能力兼容,形成了与设备通行特性深度匹配的空间断面系统。

4.2 实施效果评价

经过对典型运输路径的平面线形、纵断面及横断面优化后,工程实施效果在运输适应性、安全边界控制与结构协调性方面均展现出显著改善。以已完成调整的 5 段典型弯道为例,对比优化前后最小转弯半径与外侧净空裕度变化情况,其中最小转弯半径由原均值 43.5 m 提升至 62.7 m,外侧净空平均增加 0.82 m,显著减少车辆外摆侵限风险;纵坡控制区域中,连续大于 6% 的坡段长度比例由改造前的 18.2% 降至 9.4%,对应制动视距与底部离地安全余量得到实质性提升;在横断面方面,通过调整路拱型式与边沟断面结构,路肩排水通畅度提升明显,边坡稳定性也在结构复核中保持稳定安全状态。上述对比结果反映出本次道路设计参数优化措施在保障运输安全性与结构匹配性方面具备良好的应用成效。

5 结束语

风电大型设备运输对山地道路几何设计的约束呈现系统性与结构性特征,平纵横多要素需在包络需求、受力条件及安全冗余之间实现重新平衡。尽管提出的参数优化体系经工程验证具备适用性与可操作性,但受制于地形差异、运输装备更新及极端工况的不确定性,仍存在指标泛化范围有限的局限。未来有必要在连续空间建模、仿真推演与多源监测数据融合方面进一步深化,以构建可适用于不同山区场景的动态设计与评估机制。

参考文献:

- [1] 简贵有.复杂山地大型风电项目基础与风机设备施工技术研究[J].科技视界,2025,15(25):54-57.
- [2] 李典麒,颜宇光,刘杰.复杂山地风电场道路土石方工程量控制因素分析[J].电力勘测设计,2025(06):1-5,11.
- [3] 吕玉善,刘昕冲,夏莲.山地风电场设备运输车辆及道路研究[J].中国电力企业管理,2021(36):82-83.
- [4] 左得奇,刘国华,杨光,等.复杂山地条件下光伏场区道路设计优化与标准选取探讨[J].四川建筑,2025,45(03):79-83.
- [5] 谭明洪,张朝勇,李云天.露天矿山运输道路坡度对矿用卡车油耗的影响分析[J].产业与科技论坛,2025,24(09):39-41.

土石堤防填筑中压实遍数与干密度关系的现场验证分析

王瑜, 张霞, 翟亮亮

(青岛江达建设工程有限公司, 山东 青岛 266300)

摘要 为明确土石堤防填筑中压实遍数与干密度的内在关联, 依托沿江土石堤防工程开展现场验证试验, 设置4~12遍五组压实梯度, 采用灌砂法检测干密度并开展数据统计分析。本研究揭示了干密度随压实遍数增加呈快速增长—趋缓稳定的非线性规律, 明确了填筑层分层干密度响应特征, 通过模型拟合确定合理压实遍数阈值为8~10遍, 旨在为堤防填筑施工质量控制提供参考。

关键词 土石堤防; 压实遍数; 干密度

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.002

0 引言

土石堤防填筑压实质量直接决定工程结构安全与长期运行稳定性, 压实遍数与干密度是现场施工核心控制指标。目前针对两者关联的现场量化验证研究仍较为欠缺, 难以支撑精细化施工管控。本研究依托实际堤防工程开展原位试验, 系统分析压实遍数对干密度的影响规律及分层响应特性, 确定最优压实遍数阈值, 为同类土石堤防填筑施工与质量管控提供理论参考。

1 压实遍数与干密度关联体系

土石混填路基是道路建设中常见的基础结构形式, 其质量与道路的使用寿命和安全性息息相关^[1]。不同颗粒级配的路基填料, 其力学性质不同, 级配良好的土压实后具有高密实性和较大强度并且合适的碾压遍数也能提高土体的压实质量, 从而减少土体遇水后变形^[2]。土石堤防填筑质量控制离不开压实遍数与干密度之间的对应关系。在填筑施工中, 干密度可直观体现填筑体的压实状况, 反映土体颗粒排布疏密与孔隙占比情况, 数值大小关系到堤防防渗能力、承载水平与使用稳定性。压实遍数是调控压实效果的重要施工参数, 依靠碾压设备对填筑层施加往复作用, 使土石材料颗粒重新排布并相互嵌合, 不断排出孔隙内气体与水分, 推动干密度稳步提高。在适宜施工条件下, 干密度随压实遍数增多呈现非线性变化特征, 前期碾压次数增加可快速填补土体中大尺寸空隙, 干密度提升效果明显, 颗粒排布达到较高密实状态后, 持续增加碾压次数, 干密度上升幅度逐步减小并趋向平稳,

过量碾压还可能造成土体结构损伤使指标回落。这一先上升、后放缓、再稳定的变化特征, 可为压实遍数与干密度定量模型建立提供支撑, 也是工程现场检测与分析中需要明确的关键规律。

2 现场试验工况及工程概况

本次现场试验以某沿江土石堤防工程为实施载体, 堤防总长度约12 km, 填筑所用材料为级配优良的砂砾石混合料, 天然含水率控制区间为8%~12%, 填筑体干密度需满足不小于 2.15 g/cm^3 的设计标准, 碾压环节选用20 t自行式振动压路机, 设备额定激振力为350 kN, 行进速度控制在2.5~3.0 km/h。试验选取堤防K3+200~K3+400区段实施, 填筑层厚度统一设定为30 cm, 共布设5组压实遍数梯度, 依次为4、6、8、10、12遍, 单组试验段长度为40 m。各组施工均遵循先静压1遍再开展对应遍数振压的流程, 振压过程中激振频率稳定在28 Hz。干密度测定选用灌砂法, 每层检测点分别布置在试验段前部、中部、后部断面, 各断面左侧、中部、右侧各布设1处测点, 保障采集数据具备充分代表性, 为压实遍数与干密度对应关系的验证工作提供稳定的数据支撑。

3 土石堤防填筑现场实验数据分析

3.1 实验数据统计与质量评估

沿江土石堤防工程K3+200~K3+400试验段共采集135组有效干密度检测数据, 试验段选取兼顾代表性与均匀性, 避开地质突变区域及施工干扰路段, 保障试验结果真实呈现本工程填筑压实特性。检测工作

作者简介: 王瑜(1984-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

由具备水利工程质量检测甲级资质的第三方机构独立完成, 全程接受建设单位与监理单位旁站监督, 严格遵循《水利水电工程土工试验规范》(SL 237-1999) 中灌砂法操作流程, 以及《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 规定的质量控制要求, 现场检测人员均持有省级及以上水利工程质量检测资格证书, 拥有多年堤防工程检测实践经验。检测前对灌砂筒、标准砂、电子天平、烘箱等仪器设备统一标定校准, 电子天平称量精度达 0.01 g, 灌砂筒容积经多次标定确保误差符合要求, 样品采集、封装、运输及室内含水率测定均在规定时限内完成, 最大程度降低外界因素干扰, 从源头保障数据真实准确。

为确保压实遍数与干密度关系分析的科学严谨, 借助 SPSS26.0 统计分析软件对全部试验数据进行系统预处理与质量评定。对 4、6、8、10、12 遍五组不同压实工况下的干密度数据开展描述性统计, 计算各组均值、标准差、变异系数及极差等关键参数, 均值反映整体压实水平, 标准差与变异系数量化数据离散程度, 极差体现单组数据内部波动, 多参数结合全面评价现场填筑施工的均匀性与稳定性。采用格拉布斯检验法进行异常值判别剔除, 以 0.05 为显著性水平, 逐组计算数据均值与标准差, 通过格拉布斯统计量公式计算各测点数据统计量并与临界值对比, 最终剔除 3 组异常数据, 分别为 4 遍组 1.93 g/cm³、6 遍组 2.01 g/cm³、12 遍组 2.13 g/cm³, 经现场复核, 异常由灌砂筒密封不严、局部土体含大块孤石或取样扰动等非试验因素导致, 剔除后可降低误差对分析结果的影响。采用 Shapiro-Wilk 检验验证数据正态性, 各组检验统计量 W 值分别为 0.96、0.97、0.98、0.97、0.96, 均高于 0.05 显著性水平下的临界值, 满足后续统计分析与模型拟合的基础条件。

统计结果显示, 五组数据变异系数分别为 1.98%、1.43%、0.93%、0.87%、0.82%, 均控制在 3% 以内, 各组极差均小于 0.10 g/cm³, 离散程度低、波动范围小, 表明现场碾压施工控制稳定, 检测数据精度高、剪性强, 整体质量满足土石堤防填筑中压实遍数与干密度对应关系的深入分析需求, 为后续规律研究、模型构建及阈值确定提供坚实的数据支撑。

3.2 不同压实遍数下干密度监测结果分析

依托预处理后的 132 组有效数据, 分析 4、6、8、10、12 遍压实梯度下干密度的变化趋势、分布特征及增长速率差异。4 遍压实后, 干密度均值 2.02 g/cm³, 标准差 0.04 g/cm³, 变异系数 1.98%, 极差 0.09 g/cm³, 数据呈轻度右偏态分布, 累计频率曲线显示仅 15% 检测点干密度超过 2.08 g/cm³, 土体颗粒间大孔隙未充分填充, 颗粒嵌挤作用弱, 干密度远未达到 2.15 g/cm³

的设计要求。6 遍压实后, 干密度均值提升至 2.10 g/cm³, 较 4 遍增长 3.96%, 标准差降至 0.03 g/cm³, 变异系数 1.43%, 极差 0.07 g/cm³, 数据分布趋于对称, 干密度 ≥ 2.15 g/cm³ 的检测点占比 88%, 仍有 12% 未达标, 振动压路机激振力持续作用于土体, 颗粒间中孔隙逐步填充, 干密度保持较高增长速率。8 遍压实后, 干密度均值首次突破设计阈值达 2.16 g/cm³, 较 6 遍增长 2.86%, 标准差缩小至 0.02 g/cm³, 变异系数 0.93%, 极差仅 0.05 g/cm³, 数据呈正态分布, 96.74% 检测点满足设计要求, 土体颗粒排列已较紧密, 大、中孔隙基本填充完毕, 干密度增长速率开始放缓。10 遍压实后, 干密度均值 2.18 g/cm³, 较 8 遍仅增长 0.93%, 标准差 0.02 g/cm³, 变异系数 0.87%, 所有检测点干密度均 ≥ 2.15 g/cm³, 合格率 100%, 数据离散程度进一步降低, 土体颗粒排列接近最优密实状态。12 遍压实后, 干密度均值仅提升至 2.19 g/cm³, 较 10 遍增幅不足 0.5%, 各项统计指标与 10 遍基本一致, 部分检测点干密度出现轻微下降, 最大降幅 0.02 g/cm³, 过度碾压导致土体颗粒结构局部破坏, 细颗粒填充孔隙的同时, 颗粒破碎产生新的微小孔隙, 抵消部分压实效果。

现场数据与室内击实试验结果对比显示, 8 遍压实后干密度已达室内最优干密度 2.19 g/cm³ 的 98%, 10 遍时达到 99%, 印证了现场数据的合理性。干密度随压实遍数增加呈现“快速增长—趋缓稳定”的非线性趋势, 与土石混合料压实机理高度契合: 含石量对粗颗粒的分形维数影响较大, 表明含石量对碎石破裂及破碎有较大的影响, 这主要因为含石量会显著影响碎石之间的接触情况, 含石率越高, 碎石接触的概率越大^[3]。压实初期以颗粒重新排列为重, 干密度快速提升; 后期以颗粒破碎填充为重, 干密度增长趋缓直至稳定。

3.3 堤防填筑分层干密度与压实遍数响应分析

为揭示填筑层内部干密度对压实遍数的响应差异, 将 30 cm 填筑层按 10 cm 厚度划分为上层 (0~10 cm)、中层 (10~20 cm)、下层 (20~30 cm), 采用环刀法分层检测, 每层每个检测断面布设 3 个取样点, 每个试验段获取 9 组分层干密度数据, 保障数据代表性与全面性。取样时严格控制环刀切入深度, 避免扰动相邻土层, 样品取出后立即用保鲜膜密封, 防止含水率变化影响检测结果。4 遍压实后, 下层干密度均值 2.08 g/cm³, 中层 2.03 g/cm³, 上层 1.95 g/cm³, 层间最大差值 0.13 g/cm³, 下层变异系数 1.21% 小于中层 1.53% 与上层 2.07%, 振动压路机激振力通过接触面向下传递, 中下部土体承受有效压实能量更大, 上层受表层扰动、水分蒸发及压实能量衰减影响, 颗粒排列疏松, 压实均匀性较差。

6 遍压实后, 下层干密度均值提升至 2.15 g/cm³,

率先达标,中层 2.11 g/cm^3 ,上层 2.04 g/cm^3 ,层间差值缩小至 0.11 g/cm^3 ,各层变异系数下降,上层降至 1.62% ,压实遍数增加使压实能量逐步传递至上层,颗粒嵌挤作用增强,分层压实效果差距缩小。8遍压实后,三层干密度均值分别为 2.20 g/cm^3 、 2.17 g/cm^3 、 2.12 g/cm^3 ,均满足设计要求,层间最大差值 0.08 g/cm^3 ,各层变异系数控制在 1% 以内,下层 0.85% 、中层 0.91% 、上层 0.95% ,压实遍数增加促进颗粒全厚度均匀排列,填筑体整体均匀性显著提升。10遍压实后,三层干密度均值分别为 2.22 g/cm^3 、 2.20 g/cm^3 、 2.18 g/cm^3 ,层间差值 0.04 g/cm^3 ,各层变异系数一致,均在 $0.8\%\sim 0.9\%$ 之间,填筑层内部压实质量趋于均匀。

在力学机理层面,振动压路机 28 Hz 激振频率与土石混合料固有频率形成共振效应,压实遍数增加延长共振作用时间,深层土体颗粒获得足够动能重新排列,上层土体经多次碾压水分分布更均匀,颗粒嵌挤更紧密,分层差异缩小。这一规律表明,实际施工中可通过合理增加压实遍数弥补压实能量深度衰减,减小分层干密度差异,避免局部薄弱层导致堤防抗渗性能下降或不均匀沉降,保障堤防长期稳定运行。

3.4 压实遍数阈值及干密度达标验证分析

为确定本工程土石堤防填筑的合理压实遍数阈值,对干密度与压实遍数的关系开展多类数学模型拟合对比,涉及指数增长模型、双曲线模型、线性回归模型与幂函数模型。土石混合填料最大的特征就是具有不均匀性,即不同位置的填料其含石量、含水率和最大粒径都存在较强的不确定性^[4]。通过计算各模型拟合优度 R^2 、残差平方和及均方根误差,指数增长模型整体表现更优,回归方程为 $y=2.21-0.23e^{-0.32x}$,拟合优度 $R^2=0.98$,残差平方和 0.008 ,均方根误差 0.008 g/cm^3 ,对比结果优于双曲线模型 $R^2=0.92$ 、线性回归模型 $R^2=0.85$ 、幂函数模型 $R^2=0.90$,该模型可较好地反映干密度与压实遍数之间的定量关系。将设计干密度 $y=2.15\text{ g/cm}^3$ 代入指数增长模型,计算得到 $x\approx 7.8$,理论压实8遍便可满足干密度控制标准。结合现场试验数据对理论阈值开展多重验证,8遍压实条件下92个检测点中有89个干密度不低于 2.15 g/cm^3 ,合格率 96.74% ,10遍压实对应102个检测点全部满足标准,合格率达到 100% 。

采用核子密度仪对8遍与10遍压实区段开展平行检测,共计60个检测点位,核子密度仪与灌砂法所得结果差值均控制在 $\pm 0.02\text{ g/cm}^3$ 以内,数据一致性较好,可印证干密度检测结果的准确程度。对8遍压实区段开展为期7天的跟踪检测,分别在压实后1天、3天、7天测定干密度,数值变化幅度均小于 0.01 g/cm^3 ,压实效果稳定,未出现后期回弹现象。确定压实遍数

阈值时兼顾填筑质量与施工经济性,8遍压实合格率虽达到 96.74% ,但现场施工中材料级配、含水率、设备行走速度等因素存在波动,局部区域仍有干密度不达标的可能,整体存在一定质量风险。10遍压实可实现 100% 合格率,对应干密度均值更高,填筑体防渗能力与承载条件更具保障,整体质量稳定性更强。8遍压实机械台班消耗较10遍降低 20% ,施工周期缩短 15% ,单公里堤防施工成本可减少约8万元,10遍压实则有助于降低后期运维投入,延长堤防使用年限。

对堤防50年使用周期进行成本效益核算,8遍与10遍压实整体造价差距不足 3% ,质量控制水平提升效果更为突出。开展敏感性分析可知,填筑材料含水率波动 $\pm 1\%$ 时,8遍压实合格率下降至 90% ,10遍压实合格率仍维持在 98% 以上,对施工参数波动具备更强适应能力。综合多方面分析结果,本工程土石堤防填筑压实遍数阈值确定为 $8\sim 10$ 遍,8遍可作为施工控制下限,用于材料级配稳定、含水率控制严格的施工条件,10遍作为质量控制上限,多用于材料波动明显或关键堤段施工,普通堤段可结合现场条件选用9遍压实,在质量与效率间实现平衡。随着含石量的增加,碎石土的渗透系数不断增加^[5]。施工阶段可构建干密度动态监测体系,每完成2遍压实开展一次快速检测,依据检测结果灵活调整后续压实遍数,保障填筑质量持续满足设计标准。

4 结束语

本次现场试验明晰了土石堤防填筑压实遍数与干密度的量化关系,揭示了填筑层不同深度干密度的分布与响应规律,验证了 $8\sim 10$ 遍为兼顾质量与效率的合理压实遍数区间。研究成果可直接指导现场压实参数优化,提升填筑体均匀性与稳定性,有效规避过度压实或压实不足问题,为水利工程土石堤防现场施工与质量验收提供可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨长坡.静力贯入下土石混填路基压实度检测方法研究[J].现代交通技术,2025,22(04):21-26.
- [2] 严狄,王树英,郑响凑.基于灰度-图像识别级配方法的泥质粉砂岩回填土压实特征研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(06):2813-2823.
- [3] 李慎刚,石云方,刘晋宁,等.碎石土路基填料压实及渗透特性[J].工程科学学报,2024,46(05):918-926.
- [4] 余雄,于同生,王涛,等.土石混合料填方地基压实质量快速检测方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52(19):109-115,121.
- [5] 陈小翔.碎石土路基填料压实及渗透特性研究[J].江西建材,2024(10):52-54.

天然气长输管线与城镇管网 接驳工程施工关键技术研究

阿迪里麦提·萨力木

(新疆喀什新捷能源有限公司, 新疆 喀什 844000)

摘要 为提高天然气输送质量, 本文围绕天然气长输管线与城镇管网接驳工程, 分析接驳工程的施工技术。首先介绍管道连接、管道防腐、管道检测等常见施工技术, 并分析不同施工技术应用要点。其次以西部某接驳工程为实例, 分析该工程中“焊接+管道防腐+无损检测”组合技术应用思路与要点。该技术有效解决了管道敷设、异径异材质管道连接、施工工艺优化及质量管控等关键问题, 在施工质量、作业效率与综合成本控制方面表现突出, 旨在为同类管道接驳工程提供技术参考。

关键词 天然气; 长输管线; 城镇管网; 接驳工程

中图分类号: TE8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.003

0 引言

天然气作为一种清洁能源, 是现代能源结构中的重要组成部分, 尤其是城镇化建设不断深入的当下, 对天然气需求不断提升, 如何通过完善天然气输送体系保证能源输送质效与安全是目前相关工作的关键。在此背景下, 天然气长输管线与城镇管网接驳工程成为建设的要点。一方面, 此工程负责向消费终端输送天然气; 另一方面, 还关系到系统的安全稳定运行。鉴于天然气长输管线的运输路线较长, 且承担着极大压力, 而城镇管网则具有广泛覆盖、服务用户基数大等特点, 所以修建接驳工程必须考虑城镇管网特点和沿线地区地质条件, 以确保接驳工程能同时满足长输管线和城镇管网运输需求, 有效对接相关设施。然而, 通过对现有相似接驳工程施工经验的分析发现, 工程施工面临诸多技术挑战。为保证接驳工程施工质量, 本文在介绍天然气长输管线与城镇管网接驳工程常用技术应用要点的基础上, 结合西部某工程分析技术应用思路, 以验证本文所提接驳工程施工技术的应用价值, 为今后相关工程施工提供理论和实践参考。

1 天然气长输管线与城镇管网接驳工程施工技术类型与应用要点

1.1 管道连接技术

1.1.1 焊接技术

接驳工程施工过程中涉及管道焊接部分, 合理选择焊接技术可以保证管道焊接质量。现阶段接驳工程

中常见焊接工艺有氩弧焊和手工电弧焊, 氩弧焊工艺的热量比较集中, 而且熔池控制简单, 通常在薄壁管道、焊接精度高的焊接施工中应用; 手工电弧焊具有操作便利、适应能力高等优势, 如果接驳工程所在地形复杂、施工场地条件有限, 则可以采用此工艺。

在接驳工程管道焊接施工中, 施工人员需要科学设置焊接工艺的参数。为保证参数精准, 除了了解管材材质与壁厚, 还需要分析周边的施工环境^[1]。例如: 针对一些强度高的钢管, 施工人员必须精准计算焊接电流与电压, 确保这两项参数能精准匹配, 且与焊缝机械性能要求相符。

1.1.2 法兰连接技术

与传统的焊接技术不同, 法兰连接技术具有可拆卸性, 在接驳工程施工中具有关键作用。法兰连接技术往往更适合需要反复维修和检查、因空间有限而不能采用传统焊接工艺的管道^[2]。(1) 法兰选型。选择法兰型号时, 施工人员按照接驳工程管道设计压力、温度等综合分析, 确定法兰型号与等级; (2) 密封垫片。法兰连接技术还需参考管道介质、温变范围、压力数值等选择合适的密封垫片, 常用密封垫片材质有橡胶石棉板和金属缠绕垫片; (3) 法兰安装。安装法兰时, 施工人员检查法兰面平行度、同轴度, 要求螺栓预紧力能平均分布。

1.2 管道防腐技术

1.2.1 外防腐层技术

在接驳工程施工过程中, 对管道进行外防腐层处

作者简介: 阿迪里麦提·萨力木 (1972-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城镇燃气工程建设与安全管理。

理能延长管道使用寿命,增强管道性能。比较常见的管道外防腐层主要有环氧煤沥青和聚乙烯,此类材料能有效抵抗化学腐蚀,且机械性能强,在天然气长输管线与城镇管网接驳工程中得到广泛应用。以环氧煤沥青防腐层为例,将其应用于接驳工程,凭借该防腐层的附着力、抗冲击性优势,更多作为埋地管道,施工人员涂刷底漆、喷涂面漆,或是在外侧缠绕玻璃纤维布,以起到防腐的作用。在接驳工程施工中,施工人员采用“环氧粉末底层+胶黏剂中间层+聚乙烯外层”这一聚乙烯防腐层,并检查涂层参数,如厚度、表面粗糙度等,使防腐层质量达标。

1.2.2 阴极保护技术

管道防腐技术中的阴极保护技术是以电化学原理为基础,具有延缓金属管道腐蚀的作用,同样是接驳工程施工中的常用技术。施工人员采用该技术,面向管道施加外部电流,或通过牺牲阳极材料的方式极化管道表面,使其始终在保护电位范围以内,如此能杜绝管道腐蚀^[3]。

按照不同的保护方法,阴极保护技术有两类:一是牺牲阳极阴极保护,该技术适合在短距离管道或电阻率低的土壤中应用;二是外加电流阴极保护,该技术与牺牲阳极阴极保护的适用范围相反,保护范围更大,能根据管道实际情况进行调节,但要求是必须保证电源稳定。

1.3 管道检测技术

1.3.1 无损检测技术

无损检测技术在接驳工程施工中应用,主要负责接驳施工质量控制,相比其他管道检测技术,无损检测技术不会破坏管道结构,全面排查管道焊缝、连接处等位置的质量缺陷。一般比较常见的无损检测技术有超声波检测技术、射线检测技术等。超声波检测技术的原理是借助超声波传播性质,待分析了反射波时间、幅度变化后,明确具体缺陷位置和影响程度^[4]。该技术的优势主要是灵敏度和分辨率高,被更多地应用于焊缝内部缺陷的质量检测,可以排查出焊缝是否有气孔、夹渣等质量缺陷。射线检测技术的原理是使用X射线、 γ 射线达到穿透管道的效果,待穿透后可以形成影响,施工人员分析影响可了解管道质量缺陷所在部位和影响程度,同样被应用于焊缝几何形状、分布的检测^[5]。

1.3.2 压力试验技术

接驳工程竣工之后,使用压力试验技术是质量验收非常重要的环节之一,主要是检查管道强度与严密

性,确保接驳工程质量符合使用标准^[6]。压力试验主要由强度试验、严密试验两个环节组成,组织强度试验期间需在超设计压力的前提下测试管道承载性,耐压强度试验压力应达到设计压力的1.5倍代表达标^[7]。

2 案例分析

2.1 工程概况

为验证天然气长输管线与城镇管网接驳工程施工过程中相关技术使用的有效性,本文选择西部地区某接驳工程作为案例。该项目的目的在于向城镇供气系统长距离输送天然气,希望能满足城镇对能源的使用需求。该接驳工程总长度120 km,其他参数如表1所示。该接驳工程所在区域的地形比较复杂,不仅包括山区、河流穿越段,而且城镇人口密度大,对接驳工程施工带来诸多挑战。另外,因为该项目管道沿线的地质条件不同,所以有个别地段在施工中面临软土层、滑坡等问题,需在管道施工中选择合适的技术予以应对。

表1 天然气长输管线与城镇管网接驳工程基本情况

项目		数值
接驳工程总长度		总长度 120 km
长输管线	管径	DN1000
	设计压力	10 MPa
	材质	X70 高强度钢管
城镇管网	管径	DN200 至 DN600
	设计压力	1.6 MPa
	材质	PE管、无缝钢管

2.2 技术思路

为解决此接驳工程施工中存在的复杂地形下管道敷设、管径与材质管道连接、管道方法与质量检测等技术性问题,施工人员经过讨论决定使用“焊接+管道防腐+无损检测”组合技术。技术应用思路如图1所示。

2.3 技术应用方案

1. 焊接技术。该接驳项目选择的焊接技术为氩弧焊和手工电弧焊,其中氩弧焊打底,手工电弧焊则起到填充盖面的作用,保证最终成形焊缝质量达标。焊接技术施工过程中,主要有以下几道流程:(1)坡口加工;(2)清理;(3)组对;(4)焊接;(5)焊后热处理。上述焊接操作中,施工人员除了控制焊接过程中的电流、电压、焊接速度,还增加了焊条烘干这一道工序,能最大限度预防气孔、裂纹等质量问题。施工人员使用法兰连接技术,按照采集的管道压力数值

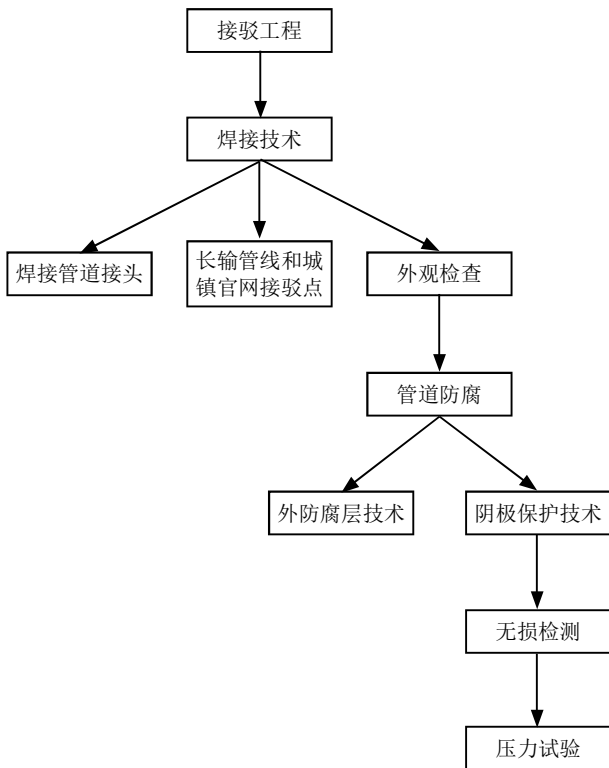


图 1 接驳工程技术应用思路

和介质，最终决定选择高压法兰，搭配性能高的密封垫片，保证连接处密封性。

2. 管道防腐技术。该接驳工程的外防腐层采用三层聚乙烯结构，施工过程中按照“先底漆后外防腐”的顺序，保证防腐层结构涂层厚度均匀，而且没有气泡产生。施工人员应用牺牲阳极法，在合适的位置布设锌合金阳极以形成保护电位，这对管道腐蚀具有抑制作用。

3. 无损检测技术。在管道质量检测环节，施工人员采用超声波检测技术扫描内部结构是否有质量缺陷，搭配射线检测技术增强检测结果精准性。检测过程中施工人员专门组织压力试验，分多个环节验证管道强度和严密性，保证该接驳工程管道系统不会出现泄漏。

2.4 效果分析

本文选择西部地区的接驳工程采用“焊接+管道防腐+无损检测”组合技术，在质量、效率、成本等多个方面均获得了显著效果。

1. 工程质量。管道焊缝采用无损检测技术进行内部结构检验，合格率大于 99%，压力试验的一次通过率为 100%。由此可知，该接驳工程使用无损检测技术和焊接技术应用效果良好。

2. 施工效率。因为该接驳工程前期制定了内容比

较完善的施工方案，且现场施工过程中加大管理力度，所以最后施工工期与计划工期相比提前了 15 天。分析原因：一方面与合理的工艺流程有关，另一方面则是得益于现场资源的合理配置。

3. 成本控制。该项目前期采购材料、调度施工现场设备均进行了严格管控，所以工程总体造价对比预算减少了 8%。选择防腐材料、部署阴极保护系统也能在成本和功能上实现平衡。

4. 接驳工程运行的稳定性。该项目自投入运行后长期观测，没有出现过一次安全事故，且通过管道运行参数满足设计要求。

由此可见，该接驳工程使用“焊接+管道防腐+无损检测”组合技术具有较好的应用效果，不仅解决了复杂地形下管道敷设、管径与材质管道连接、管道方法与质量检测相关问题，还提高了管道系统长期运行的稳定性与安全性。

3 结束语

天然气长输管线与城镇管网接驳工程具有复杂性和系统性，组织施工期间要科学选择焊接、防腐蚀以及检测技术，并且与施工地质条件、现场环境等相结合，能提高接驳工程施工质量，保证城镇管网天然气输送安全性。未来，接驳工程技术研究与应用需要不断优化施工流程，增强技术在接驳工程中的适用性。除此之外，现场施工还需加强对智能化焊接技术与设备的应用，以提高接驳工程施工质量，推动我国天然气行业高质量发展。

参考文献：

- [1] 刘金革,王刚,刘历美,等.基于人工智能与大数据的天然气长输管线选址与方案分析:以山东管网北干线为例[J].山东国土资源,2025,41(09):77-81.
- [2] 魏修路,谢强纯,马龙飞,等.天然气长输管线及场站阀室建设项目风险管控研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(22):78-81.
- [3] 刘阳,刘峻峰,张斌,等.我国长输天然气管线钢的发展现状与趋势[J].材料热处理学报,2024,45(03):98-112.
- [4] 潘玲,郭廷廷.天然气长输管线无人机智慧巡检应用[J].化工管理,2023(02):124-126.
- [5] 陈修伟,秦超.基于功率谱估计的长输天然气管道泄漏检测技术[J].化工技术与开发,2022,51(10):62-65.
- [6] 张闯龙,李超.城市天然气长输管线施工的管理研究[J].清洗世界,2022,38(09):164-166.
- [7] 全永志.城市更新改造项目与周边油气管线相互影响定量风险分析[J].化工管理,2021(28):185-186.

整流变压器阀侧绕组结构优化 降低杂散损耗技术方案研究

孙涛, 郭朋英, 祖鹤琼

(辽宁华冶集团发展有限公司, 辽宁鞍山 114000)

摘要 在工业整流系统中, 整流变压器阀侧绕组杂散损耗偏高的问题严重影响设备运行效率与能耗水平。为降低阀侧绕组杂散损耗, 本研究以漏磁通调控与电磁结构优化为核心, 从导线结构、绕制方式、排布间距及屏蔽结构四个维度开展阀侧绕组结构优化设计, 通过仿真建模、损耗计算分析完成方案验证, 并经样机试制与实测量化损耗改善效果。研究表明, 所提结构优化方法可有效调控阀侧绕组漏磁通分布, 显著降低杂散损耗, 同时保障变压器谐波抑制、阻抗匹配等核心电磁性能, 为整流变压器杂散损耗抑制提供了技术方案参考。

关键词 整流变压器; 阀侧绕组; 结构优化; 杂散损耗

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.004

0 引言

工业整流系统的稳定高效运行对工业生产至关重要。整流变压器作为系统核心换能设备, 其损耗特性直接影响整机能耗与运行效率。阀侧绕组作为整流变压器的低压大电流绕组, 受漏磁通分布畸变、电磁耦合作用显著等因素影响, 易产生大量杂散损耗, 成为制约变压器节能降耗的关键环节。当前针对整流变压器的损耗优化多聚焦整体结构, 针对阀侧绕组杂散损耗的针对性结构优化研究仍有待深入。本文围绕整流变压器阀侧绕组开展结构优化设计研究, 通过多维度结构优化调控漏磁通分布, 实现杂散损耗的有效降低, 为整流变压器的节能设计提供技术参考。

1 整流变压器阀侧绕组杂散损耗问题剖析

1.1 阀侧绕组杂散损耗的形成机制

阀侧绕组杂散损耗是变压器运行过程中, 泄漏磁通在绕组本体及周边金属结构件中感应生成的涡流损耗。绕组通电运行时形成工作主磁通, 其中一部分磁通无法沿铁心闭合形成有效磁路, 转而成为漏磁通, 持续切割绕组导线、夹件、油箱等金属构件, 在构件内部激发感应电动势并形成涡流, 最终以热能形式向外耗散^[1]。漏磁通的空间分布特征直接决定杂散损耗的产生位置与数值大小, 阀侧绕组作为整流变压器的低压大电流部件, 导线电流密度显著偏高, 其绕制结构与空间布局易造成漏磁通局部聚集。此外, 该绕组与金属结构件间距较小, 磁耦合强度更高, 进一步加

剧涡流效应, 进而形成明显的杂散损耗。其损耗数值与漏磁通密度的平方、感应频率均呈正相关关系, 且随两者的升高呈现快速增大的趋势。

1.2 阀侧绕组杂散损耗的影响因素

阀侧绕组杂散损耗的影响因素聚焦漏磁通分布与金属部件电磁特性, 绕组结构参数是核心影响因子。导线截面尺寸、宽厚比直接影响电流集肤效应与邻近效应, 进而改变绕组内部漏磁通的分布状态。绕制方式决定绕组空间排布形态, 饼式与层式绕制的漏磁通路径差异明显, 绕制节距与饼间间隙的变化会导致漏磁通在绕组端部与饼间集中。绕组轴向高度、辐向宽度与变压器铁心的配合尺寸, 直接关联漏磁通磁路磁阻, 磁阻越小则漏磁通密度越高。阀侧绕组与金属夹件、油箱的相对位置, 以及结构件材质的磁导率与电导率, 会改变漏磁通耦合效率与涡流损耗产生强度, 间距越小、结构件电导率越高, 杂散损耗越突出。

1.3 阀侧绕组杂散损耗的实测表征

阀侧绕组杂散损耗的实测表征依靠电磁测试手段获取损耗数值与分布特征, 测试过程依托变压器额定运行工况, 采用负载损耗分离法, 测量变压器总负载损耗, 计算分离绕组直流电阻损耗与涡流损耗, 剩余部分即为杂散损耗。红外热成像技术可实现杂散损耗的空间表征, 检测阀侧绕组及周边结构件的温度分布, 温度异常升高区域对应杂散损耗集中产生的位置, 温度差值可间接体现损耗大小。借助罗氏线圈与功率分

作者简介: 孙涛 (1966-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 电机与变压器。

析仪可检测阀侧绕组谐波电流与漏磁通密度,结合电磁感应定律计算杂散损耗实时数值,通过改变运行负载测试不同负载率下的损耗变化趋势,建立损耗与负载率的量化关系,实现对杂散损耗的全面实测表征。

1.4 阀侧绕组杂散损耗的问题症结

阀侧绕组杂散损耗的问题症结集中在绕组结构设计的固有缺陷与漏磁通的不可控分布^[2]。现有阀侧绕组设计多侧重满足电流承载能力,忽视绕组结构对漏磁通分布的调控,导线截面设计未充分考虑大电流下的集肤效应,宽厚比选取不合理,造成绕组内部漏磁通集中,加剧局部涡流损耗。绕组绕制的空间排布缺少对漏磁通路径的优化,端部绕组的漏磁通未做有效疏导,使得绕组端部与金属结构件磁耦合过强,形成损耗集中区域。绕组饼间、层间的绝缘间隙设计未结合漏磁通的磁路特性,间隙尺寸不合理使漏磁通在间隙处形成局部高密区。绕组与金属结构件的间距设计未考虑磁屏蔽效应,缺少针对性的空间阻隔措施,漏磁通大量耦合至结构件并转化为杂散损耗。绕组导线的换位设计不足,造成绕组各股导线电流分布不均,进一步加剧漏磁通的畸变与集中。

2 整流变压器阀侧绕组结构优化设计

2.1 阀侧绕组导线结构的优化选型

阀侧绕组导线结构的优化选型以抑制集肤效应和邻近效应、降低漏磁通耦合为核心,优先选用扁形铜导线并采用多股绞合的换位导线结构,导线截面尺寸根据阀侧绕组额定电流与允许电流密度精准设计,同时严格控制导线宽厚比在合理区间,兼顾导电性能与电磁特性。导线的轴向高度 m 与辐向宽度 n 需满足涡流损耗最小化的匹配关系,通过式(1)计算涡流损耗占比,以此迭代优化导线尺寸参数,确保 F_{ed} 处于低数值区间。

$$F_{ed} = \frac{15I^2 N^2 m^2}{1.07(100H)^2 J^2} \quad (1)$$

导线材质选用高电导率无氧铜,表面做绝缘涂层处理,涂层厚度根据绕组绝缘等级确定,既保证导线间的绝缘性能,又避免因涂层过厚增加绕组体积导致漏磁通分布畸变,实现导线结构与杂散损耗抑制的精准匹配。

2.2 阀侧绕组绕制方式的优化设计

阀侧绕组绕制方式的优化设计采用双饼连续式并联绕制结构,针对整流变压器阀侧大电流特性,合理设定并联饼数 M ,并通过饼间均流设计保证各并联饼的电流分布均衡,消除因电流不均引发的局部漏磁通集中。绕制节距的设计结合漏磁通路径优化,通过公式 $X_{ky} = \omega(L_{x\sigma} + L_{y\sigma} - M_{y\sigma} - M_{x\sigma})$ 计算绕组间短路电抗,以此调控绕制节距使绕组漏感处于合理范围,避免漏感过大或过小导致杂散损耗增加。绕制过程中保证绕组

线匝的紧密性与规整性,绕组端部采用阶梯式收匝设计,替代传统平直式端部结构,疏导端部漏磁通的扩散路径,减少端部漏磁通与金属结构件的磁耦合,同时在绕制中预留饼间散热与绝缘间隙,兼顾电磁性能与热性能,提升绕制结构对杂散损耗的抑制效果。

2.3 阀侧绕组排布间距的优化设定

阀侧绕组排布间距的优化设定围绕绕组间漏磁通分布调控展开,包括阀侧绕组与铁心、滤波绕组的径向间距,以及绕组饼间、层间的轴向间距,所有间距参数均以近似零等值漏阻抗为设计目标,通过式(2)计算绕组等值漏阻抗:

$$Z_{213} = \frac{Z_{k21} + Z_{k23} - Z_{k13}}{2} \quad (2)$$

迭代优化间距尺寸使:

$$|Z_{213}| \leq \frac{Z_{k21\min}}{10} \quad (3)$$

铁心与阀侧绕组的径向间距选取 15 ~ 40 mm 区间的最优值,既避免间距过小导致铁心对绕组漏磁通的屏蔽作用过强引发局部损耗,又防止间距过大增加变压器体积且造成漏磁通扩散。阀侧绕组与滤波绕组的间距设计兼顾谐波屏蔽与杂散损耗抑制,通过调整间距改变漏磁通的磁路磁阻,使漏磁通尽可能沿绕组间预设路径闭合,减少向金属结构件的泄漏,饼间轴向间距根据绕组散热需求与漏磁通分布特性确定,实现间距参数与杂散损耗、滤波性能的协同优化^[3]。

2.4 阀侧绕组屏蔽结构的优化配置

阀侧绕组屏蔽结构优化采用磁屏蔽与电屏蔽复合配置,从磁路疏导与电场抑制两方面协同管控漏磁通。绕组端部与金属夹件间设置高磁导率硅钢片磁屏蔽层,其厚度依据漏磁通分布密度进行精细化设计,使端部集中的漏磁通沿屏蔽层形成闭合回路,有效阻断与金属夹件的直接磁耦合,进而削弱涡流生成条件。绕组与油箱间设置铜质电屏蔽层,经可靠接地处理后,利用其内部感应涡流抵消部分向外扩散的漏磁通,降低周边结构件损耗。电屏蔽层截面面积按感应电流大小合理确定,屏蔽层与绕组之间设置绝缘支撑结构,保证间距均匀、受力稳定^[4]。屏蔽整体空间布置与绕组排布形式相匹配,磁屏蔽层完整覆盖端部漏磁通集中区域,电屏蔽层以圆筒状包裹绕组径向外侧,两层屏蔽之间预留适当空气间隙,避免相互干扰引发附加电磁耦合损耗。该复合屏蔽结构可有效改变漏磁通传播路径,显著降低金属结构件中的感应涡流,实现对杂散损耗的高效抑制。整体设计充分兼顾变压器内部空间与整体布局,不影响绕组正常装配与后期检修维护,具备较强的工程实用性与推广价值。

3 整流变压器阀侧绕组结构优化损耗验证

3.1 优化方案的仿真模型搭建

优化方案的仿真模型搭建依托 Ansys Maxwell 3D 的 Magnetic Transient 瞬态求解器完成,建模过程参照整流变压器实际结构与几何参数开展。为提升计算效率与仿真精度,模型中仅保留铁心、绕组等核心电磁部件,省略垫块、绝缘纸、紧固件等对磁场分布影响较弱的辅助结构件,绕组部分采用圆环形导体进行等效近似处理,在保证精度的同时简化计算流程。仿真模型完整匹配阀侧绕组优化后的导线结构、绕制方式与排布间距参数,精准还原变压器三相四绕组拓扑结构与外部电路连接形式。仿真步长设置为 $10\ \mu\text{s}$,总仿真时长设定为 $80\ \text{ms}$,合理的时间参数配置可有效捕捉变压器内部动态电磁特性与瞬态变化规律。模型中阻抗、匝数、电流等关键参数均采用理论设计值,铁心材料选用宝钢 30Q120 硅钢片,磁滞系数与涡流损耗系数严格依照行业设计规范赋值,确保仿真模型的电磁特性、损耗分布与实际变压器保持高度一致。

3.2 杂散损耗的仿真计算分析

杂散损耗的仿真计算分析依托搭建的三维电磁仿真模型,通过磁场仿真获取阀侧绕组及周边金属结构件的漏磁通密度分布云图,提取不同位置的磁通密度与感应电流数据。杂散损耗计算遵循 IEEE Std C57.110 标准,先分离绕组直流电阻损耗与涡流损耗,再依据谐波影响因子计算杂散损耗,其中涡流谐波影响因子按式(4)计算:

$$H_{h-cd} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2} \quad (4)$$

杂散谐波影响因子按式(5)计算:

$$H_{h-st} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2} \quad (5)$$

选取 31 次以下谐波为有效谐波参与运算。通过仿真计算分别获取优化前后阀侧绕组杂散损耗的数值与分布特征,定位损耗集中区域,为损耗改善效果的量化分析提供数据支撑。

3.3 优化样机的试制与测试

优化样机试制与测试依据仿真模型确定的优化参数展开,全过程遵循电力变压器设计制造规范与工艺要求^[5]。阀侧绕组按优化后的导线结构选型、绕制方式进行精密绕制,排布间距、屏蔽结构按理论设计值装配,确保样机物理结构与优化方案高度一致。样机在额定工况下完成全面性能测试,采用负载损耗分离法开展

杂散损耗测试,测量整机总负载损耗后,通过计算分离出直流电阻损耗与涡流损耗,得出阀侧绕组杂散损耗实测值。借助罗氏线圈与功率分析仪同步检测阀侧绕组谐波电流与漏磁通密度,利用红外热成像技术直观获取绕组及周边金属结构件温度分布,验证优化方案对损耗集中区域的改善作用。测试过程中同步记录阻抗电压、温升、电流密度等关键指标,全面校验样机运行稳定性,保障各项性能符合设计约束与工程应用要求,为结构优化效果的验证提供可靠试验依据。

3.4 杂散损耗的实际降低效果

杂散损耗的实际降低效果通过优化前后的损耗数据对比进行量化分析,提取仿真计算与样机实测中优化前后的阀侧绕组杂散损耗数值,计算损耗降低幅度与变化规律,对比损耗分布特征及区域差异,直观验证优化方案对损耗集中区域的改善作用。结合变压器整机总损耗数据,分析阀侧绕组杂散损耗降低对整机损耗水平与运行效率的影响,验证样机滤波性能,检测高压侧电流谐波畸变率变化,确保杂散损耗有效降低时,变压器谐波抑制、阻抗匹配等核心电磁性能保持稳定可靠。仿真数据与样机实测数据相互印证、互为支撑,精准量化表征优化方案对阀侧绕组杂散损耗的改善效果,验证结构优化设计的工程实用性与技术有效性,为同类整流变压器杂散损耗抑制与节能优化提供可复制、可推广的技术方案与设计参考。

4 结束语

整流变压器阀侧绕组杂散损耗偏高,通过导线结构、绕制方式、排布间距及屏蔽结构的多维度结构优化,可有效调控漏磁通分布,减少与金属结构件的电磁耦合,抑制杂散损耗的产生。仿真验证与样机实测表明,该方法在保障变压器阻抗匹配、谐波抑制等核心电磁性能的前提下,显著降低阀侧绕组杂散损耗,优化设计的合理性与工程可行性得到充分验证。相关优化思路与技术方法,可为整流变压器及同类电力设备的杂散损耗抑制提供参考,为电力设备节能降耗设计提供新的思路与方向。

参考文献:

- [1] 杜丽,蔡龙,张晓同,等.基于复合漏磁场的箔绕变压器负载损耗仿真计算[J].电气技术,2024,25(11):37-41,47.
- [2] 刘乾易,杨伊,刘芳,等.一种低损耗的感应滤波变压器结构参数分层设计方法[J].电工技术学报,2025,40(06):1695-1706.
- [3] 金承祥,李宁,王圳,等.变压器低压箔式绕组进出排模式性能分析与研究[J].变压器,2025,62(04):41-46.
- [4] 迟主升,王仁,罗振武,等.换流变压器阀侧绕组出线区域的电场仿真[J].机电工程技术,2021,50(08):177-180.
- [5] 杨在葆,梁红胜,刘永,等.换流变压器阀侧交流外施耐压试验故障的分析与判断[J].变压器,2023,60(05):42-47.

电磁波测距三角高程测量在山区高程控制测量中的应用分析

郑 干

(中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 江苏 南京 210031)

摘 要 利用电磁波测距三角高程测量可解决地形起伏较大的山区高程控制测量问题。本文阐述了三角高程测量原理及数学模型, 结合工程实例进行了数据处理分析。本次四等高程控制测量整体平差结果: 符合线路闭合差实测最大值为 13.45 mm, 限差为 ±78.84 mm; 闭合环线路闭合差实测最大值为 -33.20 mm, 限差为 ±88.14 mm, 可以满足四等高程控制测量规范的相关精度要求。

关键词 水准测量; 电磁波测距三角高程测量; 精度分析

中图分类号: TB22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.005

0 引言

目前, 国家高程控制网测量精度等级划分为一、二、三、四等, 各等级高程控制宜采用水准测量, 四等及以下可采用电磁波测距三角高程测量; 在工程测量场景中, 五等高程控制可采用卫星定位高程测量。^[1] 传统的水准测量方法精度较高, 但在地形起伏较大的山区, 实际操作起来费时、费力, 工作效率较低; 卫星定位高程测量受地球曲率、卫星信号等影响, 其测量精度较低, 很难满足测量需求。相比以上两种高程测量方法, 电磁波测距三角高程测量具有高效、作业简单灵活、适用范围广等优点^[2]。

1 电磁波测距三角高程测量原理

地面上两个不同高程的点 A、B (如图 1 所示), A 点的高程为 H_A , 则只需要知道两点的高差 h_{AB} , 再利用公式可得出另一个待测点 B 的高程 H_B ^[3]。当用水准测量方法测定 A、B 两点间的高差 h_{AB} 有困难时, 可以利用图中测得的斜距 S 、竖直角 α 、仪器高 i 、棱镜高 v , 依式 (1) 计算 h_{AB} :

$$h_{AB} = S \cdot \sin \alpha + i - v \quad (1)$$

由式 (2) 进而求得待测点 B 的高程 H_B :

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + S \cdot \sin \alpha + i - v \quad (2)$$

考虑地球曲率和大气折光 (合为球气差) 对三角高程测量的影响, r 为大气折光误差 (气差改正: $r = k(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R$), p 为地球曲率误差 (球差改正: $p = (S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R$), 由此得出球气差改正:

$$f = (1-k)(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R \quad (3)$$

式 (3) 中, R 为地球曲率半径, k 为大气折光系数。

结合式 (1) 和式 (3), 得出三角高程观测法计算公式:

$$h_{AB} = S \cdot \sin \alpha + i - v + (1-k)(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R \quad (4)$$

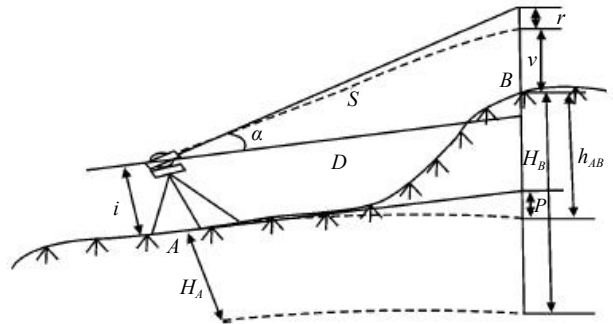


图 1 电磁波测距三角高程测量原理示意图

国家相关规范规定^[4]: 采用电磁波测距三角高程测量方法, 高程导线可布设为每一照准点安置仪器进行对向观测 (以下简称每点设站) 的路线, 即先在 A 点设站, B 点置棱镜, 计算得出高差 h_{AB} (往测); 然后, 在 B 点设站, A 点置棱镜, 计算得出高差 h_{BA} (返测), 求取往返测高差平均值为两点的高差 \bar{h}_{AB} :

$$\bar{h}_{AB} = (h_{AB} - h_{BA}) / 2 \quad (5)$$

在实际观测中, 考虑往返测两站点时间较短, 故认为 k 近似不变, 且往返测测距也近似相等, 得出:

$$(1-k_1)(S_1 \cdot \sin \alpha_1)^2 / 2R \approx (1-k_2)(S_2 \cdot \sin \alpha_2)^2 / 2R \quad (6)$$

作者简介: 郑干 (1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 工程测量。

式(6)中,下标1为往测观测,下标2为返测观测。结合式(4)、(5)、(6)得出:

$$\bar{h}_{AB} = \frac{1}{2}(S_1 \cdot \sin \alpha_1 - S_2 \cdot \sin \alpha_2 + i_1 - v_1 - i_2 + v_2) \quad (7)$$

因此,在气象条件稳定时,采用电磁波测距三角高程测量每点设站法,有效地消除了球气差的影响^[5],减小了测量误差,提高了测量精度。

2 实例应用分析

测区位于地形起伏较大的山区,平均海拔约2 685 m,高差约510 m。为在测区建立四等高程控制网,首先在测区收集到SQ02、GPS05、BT03、GPS02四个已知高程点;其次考虑测区地形实际情况,平坦地区采用水准测量方法;最后在地形起伏较大的山区采用电磁波测距三角高程测量每点设站法。外业观测步骤严格按照规范要求实施,测区高程控制网如图2所示。

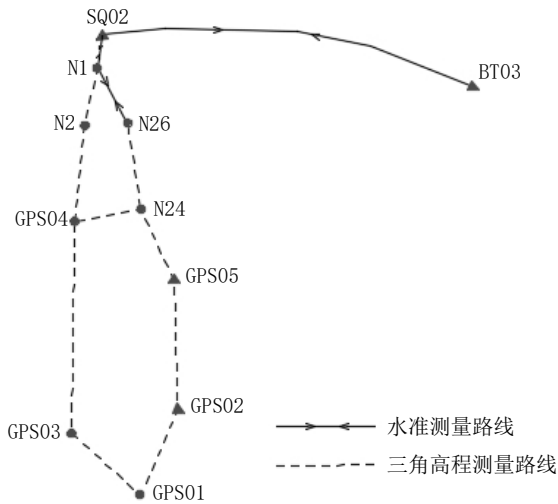


图2 高程控制网布设图

2.1 平坦地区水准测量

采用1台Trimble Dini03数字水准仪及配套条码因瓦水准尺进行观测,按照《国家三、四等水准测量规范》中四等水准测量技术要求进行观测,测量数据见表1。

表1 水准测量数据

起点	终点	高差(m)	往返高差不符值(mm)	距离(km)	测站数
SQ02	BT03	-99.3 595	-14.0	6.3 359	138
BT03	SQ02	99.3 455		6.1 371	128
SQ02	N1	15.5 925	11.5	1.3 843	54
N1	SQ02	-15.5 810		1.3 671	48
N1	N26	17.8 645	2.0	0.7 088	16
N26	N1	-17.8 625		0.7 008	16

由表1可知,最大往返高差不符值为SQ02~BT03测段,平均路线长度为6.24 km,实测高差不符值为-14.0 mm,限差为±49.5 mm;最小往返高差不符值为N1~N26测段,平均路线长度为0.71 km,实测高差不符值为2.0 mm,限差为±16.8 mm,可见各测段、路线往返高差不符值均满足规范±20√K(K为测段路线长度,单位为km)。

2.2 山区电磁波测距三角高程测量

2.2.1 外业数据采集

本次测量任务采用的仪器为拓普康GTS332W,仪器各项指标均满足国家检定要求。采用“每点设站”高程导线的观测方法,路线为单程,气象数据测定的时间间隔为每条边观测的始末,数据的取用为每边两端的平均值,边长往返各观测两个测回,各边长斜距观测读数误差和测回中数之间的互差分别为10 mm和15 mm,垂直角观测采用中丝法测量,观测4个测回,测回差和指标互差均不超过5″。观测前后,利用钢卷尺对仪器高和棱镜高各量测一次,两次互差不得超过3 mm^[6]。

实际测量中考虑两待测点之间的通视及观测视线长度等因素,在待测点之间增设部分临时转点,整个高程导线网共计32个测站。实测中对全站仪棱镜常数和气象参数进行设置,以便仪器在观测斜距时内置程序自动改正。

2.2.2 外业数据预处理

各测段往返测高差计算后,应对高程导线测量往返测高差不符值进行计算分析(因观测路线测站较多,只取部分测段进行表述),见表2。

由表2可知,最大往返测高差不符值为N14-GPS03测段,高差不符值为-37.5 mm,限差为±38.3 mm;最小往返测高差不符值为N5-GPS04测段,高差不符值为-0.4 mm,限差为±20.2 mm,可见各测段往返高差不符值均满足规范±45√D(D为测站间或照准间的观测水平距离,单位为km)^[7]。

表 2 高程导线测量往返测高差不符值

测段	高差 (m)	测段	高差 (m)	高差不符值 (mm)	限差 (mm)
SQ02-N1	15.5 898	N1-SQ02	-15.5 788	11.0	37.3
N1-N2	17.8 277	N2-N1	-17.8 297	-2.0	32.5
N5-GPS04	-11.7 374	GPS04-N5	11.7 370	-0.4	20.2
N14-GPS03	19.9 716	GPS03-N14	-20.0 091	-37.5	38.3
GPS01-N16	-36.4 993	N16-GPS01	36.4 747	-24.6	25.0
N16-GPS02	-91.6 535	GPS02-N16	91.6 595	6.1	43.5
N20-GPS05	-5.8 795	GPS05-N20	5.8 719	-7.7	16.6
N26-N1	-17.8 628	N1-N26	17.8 601	-2.7	32.5
N24-GPS04	7.2 413	GPS04-N24	-7.2 437	-2.4	12.8

2.3 数据平差及精度分析

待外业采集数据处理完成后,内业整体平差采用 CosaLEVEL 水准测量数据处理软件,高程起算数据选取测区 SQ02、GPS05、BT03、GPS02 四个已知高程点,平差结果见表 3。

由表 3 可知,符合线路闭合差实测最大值为 13.45 mm,规范允许限差为 ±78.84 mm; 闭合环线闭合差实测最大值为 -33.20 mm,规范允许限差为 ±88.14 mm,可见整体平差后各测段符合路线、环线闭合差均满足规范 $\pm 20\sqrt{K}$ (K 为测段路线长度,单位为 km) [8]。

表 3 符合路线、环线闭合差平差结果

观测线路	线路总长度 (km)	高差闭合差 (mm)	限差 (mm)
GPS05、N24、N26、N1、SQ02	6.29	1.94	50.16
符合线路 BT03、SQ02、N1、N26、N24、GPS05	12.43	0.45	70.51
GPS02、GPS05、N24、N26、N1、SQ02、BT03	15.54	13.45	78.84
闭合线路 GPS04、N2、N1、N26、N24	5.92	24.92	48.66
GPS02、GPS05、N24、GPS04、GPS03、GPS01	19.42	-33.20	88.14

3 结束语

本文采用电磁波测距三角高程测量方式进行山区高程控制测量,通过对外业观测和内业数据的处理,得出各项技术指标均满足四等高程控制测量相关规范要求,可知平差后的待测点高程值的精度可靠,有效地解决在地形起伏较大的山区高程控制测量较为困难的问题,在类似工程中可以推广应用。

[3] 覃辉,马德富,熊友谊.测量学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
 [4] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.国家三、四等水准测量规范(GB/T 12898-2009)[S].北京:中国标准出版社,2009.
 [5] 杨伟明.对全站仪三角高程测量方法的分析[J].运输经理世界,2022(14):41-43.
 [6] 董建鹏,乔伟国,刘继伟.全站仪三角高程测量在工程测量中的应用[J].公路交通科技,2020,16(05):141-142,149.
 [7] 何建权,吴垠,夏炜.精密三角高程测量误差规避探讨[J].地理空间信息,2022,20(06):121-123.
 [8] 郑文斌,赵春华,张书锋.三角高程控制测量的方法、应用和精度分析[J].测绘标准化,2025,41(02):131-137.

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部.工程测量标准(GB 50026-2020)[S].北京:中国计划出版社,2020.
 [2] 严伯锋,张立臣,孙久长,等.全站仪三角高程测量的精度分析及其应用[J].岩土工程技术,2021,35(06):351-355,360.

信息化技术赋能建筑工程管理实践研究

王叶峰

(绿城房地产建设管理集团有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要 随着信息化技术的不断进步, 建筑工程管理日益趋向智能化、信息化发展。信息化技术对建筑工程的应用不但可以提高工作效率, 还可以有效实现对工程进度、成本、质量和安全管理等进行精细化管理。本文主要介绍了信息化技术在建筑工程管理中的应用情况以及所面临的困难, 并提出相应的对策。通过对建筑工程管理相关情况进行分析可知, 信息化技术赋能可促进管理水平提升、合理配置资源以及实现建筑行业的数字化转型, 为推动建筑工程管理模式改革及提升建筑工程管理水平提供参考。

关键词 信息化技术; 建筑工程管理; 数字化; 智能化

中图分类号: TP3; TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.006

0 引言

建筑工程项目是一项复杂的系统工程, 包含进度管理、成本控制、质量保证等多项关键工作。信息化技术的快速普及, 给建筑项目管理既带来了创新发展的机遇, 也带来了适配转型的挑战。信息技术的应用使管理模式发生根本改变的同时也极大地提高了管理决策的准确性及效率。但是目前信息技术在建筑项目管理中的应用仍然存在诸多不足之处, 如技术不成熟、信息孤岛现象严重等, 这就要求整个行业进行改革以适应时代发展的需求。如何合理利用信息技术使之更好地服务于建筑项目管理成为现阶段的一大难题。

1 信息化技术在建筑工程管理中的现状与挑战

1.1 信息化技术的引入与发展

近年来, 建筑行业逐渐认识到信息化技术对于提高管理水平的重要性, 信息化技术的应用使建筑工程管理工作更为便捷高效, 降低人为失误以及大量的人力资源浪费。建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)、云计算等信息技术不断融入项目的各个部分, 促进工程建设实现信息化。而伴随着大数据时代的到来, 建筑工程的工期、质量及造价均可利用信息技术进行有效管理与监控。但是总体而言, 目前行业内信息技术的应用仍处于初级水平, 很多单位对于信息技术的理解和使用都还不到位, 全面推广信息技术还存在一定的难度。

1.2 现阶段面临的技术瓶颈

建筑行业技术水平相对较低, 特别是小规模企业及项目在信息化方面差距较大, 各种技术平台之间互

不相通, 造成信息不畅通、形成信息孤岛, 不利于资源最大化合理使用^[1]。信息化所需要的各种设备以及软硬件投入成本较高, 部分企业无力承担, 缺少相应人才和技术支持, 现有的技术也无法进行有效应用。技术障碍和资源短缺仍然是阻碍信息化发展的主要问题。

1.3 信息化技术的管理应用障碍

项目管理人员对于信息化技术的认知水平参差不齐, 有些管理者习惯使用传统手工方式完成工作, 对于新事物缺乏兴趣及主动性。建筑工程项目的复杂程度较高, 涉及多个单位、多个环节, 给信息化管理系统进入项目带来很大阻力。技术应用中的信息交流问题突出, 特别是不同部门之间, 由于各自职责不同, 在信息传递上容易出现延迟, 导致工作效率低下。虽然信息化技术有优势, 但是由于应用难度大以及现行体制的影响, 使得它不能很好地融入工作中并得到普及。

2 信息化技术赋能建筑工程管理的实施路径

2.1 数字化平台的搭建

数字化平台建设是信息化技术助力建筑企业管理的前提条件, 建立一个统一的数字化平台可以把整个项目的相关信息汇总, 实现信息及时更新反馈。这个平台需要对项目施工进度、资源配置、费用管理等综合管理的功能, 使各种工作都能够在数字化平台上顺利开展。还需考虑不同岗位以及不同部门间合作的需求, 使各方人员能够及时交流沟通以及分享信息, 减少信息孤岛出现的情况, 提高工作效率, 在技术上要支持多种设备接入, 如手机和平板电脑, 实现

作者简介: 王叶峰(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程施工管理。

工地与办公室的信息互通。数字化平台也应具有良好的伸缩性,以适应项目越来越大或者管理要求变化时,可以方便地对其进行更改和完善其功能。

2.2 智能化工具的应用与推广

智能化工具应用与普及对提高建筑工程管理水平起着至关重要的作用,利用物联网技术、人工智能、无人机等先进设备手段能显著提高工程管理的智能化程度。人工智能可以用于工程进度预测及成本核算,智能传感器可以监测材料消耗量,及时反馈施工现场的环境参数以及机械设备工作状态,而无人机可用于施工现场巡查及监管工作,节省大量人力物力开支^[2]。广泛使用智能化工具可以让管理者随时了解工程建设情况,并根据收集信息预见可能出现的问题,尽早做好防范准备,以更好地完成管理工作。而为使智能化工具真正发挥作用,在推广应用时要加强相关人员培训,使其能正确运用并且认识到该工具的重要性。

2.3 信息共享与协同管理的推进

信息共享以及协同管理是建筑工程管理中信息化技术应用的重点,由于建筑工程项目的规模大、复杂程度高,单凭一方力量进行管理已不能达到预期效果,所以推广信息共享及协同管理十分必要。在此之中各个参与方需利用同一个管理系统使信息能及时更新,这样就可以让整个项目管理工作更加顺利进行。借助开放的信息接口可以使得各部门之间或者各种不同的系统之间相互连接,使得各种信息可以在各参与方之间无障碍传递。而协同管理并不仅仅是信息共享,还需要有合理分工和良好的沟通配合,这样才能使各参与方基于信息共享基础上共同工作。加强协同管理有利于降低管理上的障碍,促进互相合作,从而使得建筑工程可以顺利开展并且质量达标。

3 优化建筑工程管理的解决方案

3.1 提升技术适应性与人员培训

为保证信息技术应用于建筑行业管理发挥良好作用,提高技术适用性是重要手段。在技术引进及使用中,管理者及技术人员要具有相应技术水平和适应性,在此基础上进行经常性培训和学习,使管理者了解新设备、新系统功能等核心内容;工人及班组也要经过反复训练,增强他们对于数字工具和服务的使用程度。技术培训不只是学习如何操作软件工具,还要了解技术变化和发展情况以及保养方法,在技术不断进步的情况下,使管理阶层可以更好地迎接新技术所带来的问题。技术适应性还包括根据企业自身情况制定适合自己的技术支持方案来降低技术导入时的不适感,进而提高整个工作效率和技术应用水平。

3.2 加强信息化与传统管理模式的结合

建筑工程管理中的信息化建设并非要完全取代传统管理模式,而是要在两者之间实现有效的结合。传统管理模式虽然在一些领域已被信息化技术所替代,但仍有其在现场管理、工地协调和项目执行中的不可替代性。将信息化技术与传统管理模式相结合,可以实现传统方法和新技术的互补,从而形成更加高效的管理体系^[3]。通过传统管理流程中嵌入信息化手段,提升其精准度与响应速度,能够在保持传统管理优势的基础上,利用现代技术实现数据的即时采集与分析。信息化系统能够帮助管理者更好地理解项目全貌,优化决策过程,而传统管理经验则可以为技术的实施提供实际操作背景,确保新技术能够顺利融入日常工作中,提升整体项目执行的顺畅度和效率。

3.3 完善信息安全保障措施

信息化技术在建筑工程建设中的大量使用使信息安全成为一个迫切需要解决的问题。在建筑项目中各种各样的信息,如项目的进展、费用、质量和人员等都在信息化平台上保存并传递,有泄露或者被篡改的可能性,要重视信息安全保护工作,保证信息的安全性和真实性。企业要建立健全的信息安全管理机制,对于信息的读取、传送以及存储等都要有严格的权限控制,以免重要的资料被非授权的人接触。要用加密技术以及防火墙等方式保证信息在传输过程中的安全性,还要经常检查信息系统安全情况,及时修补存在的问题,避免外来入侵和内部泄密。对参与项目的所有人都要开展信息安全教育,提高他们对于安全的认识,这是保证信息安全必不可少的一部分。采取以上方法可以降低信息安全的风险,使建筑工程在信息化管理下正常运作。

4 信息化技术提升建筑工程管理效率的案例分析

4.1 典型案例: 数字化项目管理

在数字化项目管理过程中,信息技术的应用极大地提高了项目管理水平,在项目中所涉及的各种信息,如进度、成本、资源配置等都可及时更新并跟踪,使管理者可以随时掌握项目情况并迅速作出相应决策。利用 BIM(建筑信息模型)技术对项目设计以及施工情况进行整合,在一定程度上预见可能出现的问题,从而避免施工期间出现变更或延期现象。数字化管理系统使得工地上的工作与公司内部办公之间沟通更加便捷有效,信息交流速度及精确度都有所改善,这无疑降低了人为因素造成的差错概率,同时也大大提高了工作效率。

4.2 案例分析中的问题与应对策略

虽然数字化项目管理提高了工作效率,但是也存在一定的困难。在具体的应用过程中,信息化系统刚上线时会存在数据不能及时同步的问题以及系统之间连接度不高,这都会给项目的管理工作带来不便^[4]。要克服这些问题就需要使系统更加便捷,让各个不同的管理和控制模块之间可以顺畅地沟通。而人员的问题是实施的时候经常遇到的难题,有些项目的工作人员对于新系统不太熟悉,所以不能够很好地更新信息或者做出错误的操作。而对于这个问题,加强员工的培训、改善系统的易用性以及提供更好的技术支持都是很好的解决方案,不断地完善系统功能,使员工更好地应用信息化手段来处理工作。

4.3 信息化技术的实际效益与展望

信息化技术在建筑工程管理中发挥着重要作用,项目进度及资源配置公开使管理者易于及时发现项目中存在的问题并采取相应解决办法,从而降低拖延与费用超支的可能性。利用信息技术手段进行质量管理也更便捷有效,保证工程质量达标,随着新技术不断进步,建筑工程管理进一步实现智能化、自动化是必然趋势。人工智能、机器学习以及大数据分析等技术相结合可以提供更为精细的预测,使项目组作出更好的判断。随着信息化程度不断提升,建筑工程管理也会越来越高效、精确,并且能更好地面对未来的各种问题。

5 建筑工程管理中信息化技术的发展趋势

5.1 信息化技术的发展方向

随着信息化技术的进步,建筑行业的管理将越来越智能化、自动化。未来,人工智能以及机器学习将会在项目的预测、风险管理以及决策上起到更大的作用。利用智能化工具可以及时发现项目中可能出现的问题并且给出相应的建议,无需人工干预。物联网的应用也会越来越广泛,在设备和物资的管理和监控上会越来越精确,在工地上各种信息都会被收集并进行分析。而虚拟现实以及增强现实也会逐渐地应用到工程的设计及施工当中去,使得设计更直观、施工更便利,而这些新技术的应用会让未来的建筑工程管理更加便捷、准确和环保。

5.2 建筑行业数字化转型的机遇

建筑行业的数字化转型是提高管理水平、节约成本的有效途径,而随着云计算、大数据以及BIM技术的应用,建筑业的项目管理模式也发生了翻天覆地的

变化,信息化已经渗透到建筑项目的方方面面,在项目前期的设计、施工乃至后期的运维都可以在云上实现管理和控制^[5]。这既是对资源进行合理配置、促进信息交流的一种有效方式,也是推动建筑行业走向绿色环保、可持续发展的重要手段。建筑企业借助数字化转型来适应市场的变革与竞争的压力,提升企业的自主研发能力和核心竞争力。而数字化转型既是建筑行业自身发展的要求,也是提升建筑工程管理能力和执行能力的必由之路。

5.3 如何构建信息化技术长效机制

为保证信息化技术在建筑工程管理中发挥持久作用,在此基础上还要建立长效工作机制,该机制要从技术、管理和人员三方面进行。在技术方面,建筑企业要经常对系统进行更新和完善工作,使信息化平台能够与新的技术相适应并且不断进步。在管理方面,企业要有一套完善的信息管理制度以及规定,保障信息安全,还要促进各部门之间沟通交流以及资源共享,从而构成良好的决策支持体系。在人员方面,要不断加强技术人员培养及招聘,让项目管理者了解最新信息技术并能够在工作中有效运用,这样就可以使信息化技术在建筑工程管理中得到长久良好的应用与发展。

6 结束语

信息化技术在建筑工程管理中的应用可以提高工作效率以及减少成本开支,而随着技术不断进步与发展,数字化、智能化也将逐渐成为建筑行业的主要管理模式。未来,信息化技术将更有利于建筑项目的精细化管理、及时掌握情况并做出合理判断,是推动行业发展的重要推动力量。为此,必须加强信息技术的应用与人才培训工作,健全相关制度,保证信息化技术在建筑工程管理中长期发展并得到良好的应用。

参考文献:

- [1] 张盼兄. 信息化技术在建筑工程造价管理中的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026(01):111-113.
- [2] 徐书建. 智慧城市视域下建筑工程管理信息化技术应用研究[J]. 新城建科技, 2025,34(12):182-184.
- [3] 王成涛. 利用信息化技术, 赋能建筑工程管理升级[J]. 楼市, 2025(12):32-35.
- [4] 欧灿光. 建筑工程质量管理中信息化技术的应用研究[J]. 中国住宅设施, 2025(11):56-58.
- [5] 梁雅静. 建筑工程管理中数字信息化技术应用研究[J]. 信息系统工程, 2025(10):110-113.

智慧水务在供排水管理中的应用与实践

张忠科

(山东省滕州市中润供水有限公司, 山东 滕州 277599)

摘要 随着城市化进程的加快和水环境的复杂化, 传统的供排水管理模式已经不能满足现代社会对水资源配置和运行的要求。智慧水务是新技术和水务行业相结合产生的, 对供排水的管理方式和模式进行了重塑。本文主要对智慧水务技术支撑体系进行研究, 在生产运行、管网运维、客户服务等场景中分析它的应用情况, 并提出技术赋能到管理变革的实践途径。通过策略和场景推演来阐明智慧水务由被动响应到主动预测、由经验驱动到数据驱动的变化, 以期为现代水务体系提供有益参考。

关键词 智慧水务; 供排水管理; 物联网; 数字孪生; 全生命周期

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.007

0 引言

水资源是城市生存与发展的命脉, 供排水系统则是维系城市正常运转的保障性基础设施。长期以来, 水务行业存在管网老化导致漏损率居高不下, 调度决策过度依赖人工经验, 突发事件响应滞后, 客户服务渠道单一等诸多结构性问题。工业 4.0 和数字经济大潮之下, 智慧水务应运而生, 它不是简单的设备自动化升级, 而是对感知方式、决策机制、管理流程的一种革命。依靠创建全域感知网络、搭建起海量数据处理平台并融入智能算法模型, 智慧水务可以把物理世界里的水务设施变成数字空间里的动态孪生体, 进而实现对水循环全过程的精细化治理。当前智慧水务建设的重点已经由原来的信息化基础建设转变为深度智能化, 其主要目的在于用数据要素去挖掘出隐藏的价值, 改善资源配置, 提高应急韧性。

1 智慧水务的技术支撑体系

1.1 物联网感知技术

物联网感知技术是智慧水务的神经末梢, 它是连接物理世界到数字世界的第一个环节。现代物联网技术依靠设置高精度智能水表、多功能压力传感器等装置来构建全方位感知网络^[1]。智能终端具有高频数据采集特性, 自带边缘计算模块, 在源头对数据进行清洗和识别后, 就可以减少传输带宽需求, 提高数据的实时性和准确性。在排水方面, 如液位计等设备联动部署, 配合低功耗广域网通信技术, 可以提前发现并量化城市内涝风险。泛在化感知体系冲破信息孤岛, 把水务设施变成智能节点, 为数字化分析提供了数据根基, 保证水务系统运转透明可见。

1.2 大数据与云计算平台

大数据与云计算平台是智慧水务的中枢, 它们将大量的异构数据进行汇集、保存、运算和分析。供排水系统数据多源、高频、量大、类型复杂, 包含结构化 SCADA 数据、非结构化视频图像和半结构化巡检记录等。云计算架构用弹性伸缩的计算资源来解决传统本地服务器算力和扩展性的问题, 可以对 PB 级的历史数据进行毫秒级的检索, 并且可以进行实时流处理。在此基础上, 大数据技术建立统一的数据湖, 消除各个业务系统的数据壁垒, 从而实现各方面的数据融合与共享。从长周期运行数据中挖掘用水规律、管网压力变化趋势、设备故障早期征兆, 将沉睡数据转化为高价值资产^[2]。

1.3 人工智能与机器学习应用

人工智能和机器学习的应用使智慧水务有了“大脑”, 具有自我学习、逻辑推理和预测预判的能力。传统的水务调度依靠资深工程师的经验来判断, 存在主观性强、反应慢、无法应对复杂工况的缺陷。加入深度学习、强化学习等算法后, 系统依靠历史数据训练出需水量预估模型、爆管预警模型、泵站优化调度模型等高精度模型。利用卷积神经网络分析管网声纹数据, 精准定位隐蔽漏点; 利用递归神经网络对降雨量和管网液位时序进行分析, 提前数小时模拟内涝演进并生成排涝方案。知识图谱技术把分散的信息联系起来形成专业知识库, 使得系统在遇到突发事故时能够立即生成综合应急预案。人工智能的应用使水务管理由“人防”转变为“技防”“智防”, 提高了系统的自适应性以及运行效率。

作者简介: 张忠科 (1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 给排水工程。

2 智慧水务在供排水管理中的应用核心场景

2.1 生产运行智能化

生产运行智能化指的是对水厂、泵站的全过程自动化控制以及能效最优管理。在水厂，将原水水质在线监测数据与出水指标要求相结合，利用前馈—反馈控制算法实时调节混凝剂、消毒剂的投加量，使出水水质达到标准，降低药剂消耗和污泥产生。泵站智能调度依靠管网压力分布模型和用电峰谷电价策略，自动调整水泵的启停组合和频率转速，以保证末端服务压力合格的同时减少能耗。数字孪生技术也被应用于生产环节的模拟和预演，管理者可以在虚拟空间里模拟出各种工况下工艺流程的状态，预测设备出现故障所产生的影响，然后制定相应的预防性维修计划。这种智能化模式减少了对人工操作的依赖，降低了误操作的风险，通过精细化的控制实现水资源处理的绿色、低碳、高效，促进水务生产力的飞跃^[3]。

2.2 管网运维数字化

管网运维数字化主要解决地下管网“看不见、摸不着、管不住”的问题，构建全生命周期的数字管理架构。依靠高精度地理信息系统和三维建模技术，把地上地下管网资产转化为数字资产，管道信息一目了然。采用智能检漏车、卫星遥感技术对大面积管网漏损进行快速筛查，用分布式光纤传感、智能听音杆对微小泄漏进行精准定位，降低漏损率。排水管网采用实时联动分析液位、流量数据的方式，对管道问题进行自动识别并下发清淤疏通工单。此外，根据水力模型建立管网健康度评价体系，可以预测管道破裂的风险，使运维人员由“事后抢修”转变为“事前预防”，从而延长管网寿命，保证城市供水和排水的安全，提高市政基础设施的韧性、可靠性。

2.3 客户服务智慧化

客户服务智慧化在于改变供水企业同用户之间的交互方式，构建便捷的服务体验。传统的营业厅柜台服务逐渐被线上多渠道平台所取代，用户可以利用微信公众号、APP等进行“指尖办”“零跑腿”的报装申请、水费缴纳等业务。智能客服机器人依靠自然语言处理技术，24小时在线回答用户的问题，指导用户完成各种操作，从而提高服务的响应速度以及客户满意程度。智慧水务系统向用户提供用水行为分析报告，将同类数据与历史趋势进行对比，使用户察觉到异常之处并提出节水建议，从而增强用户的参与意识和满意度。突发停水或者水质出现异常时，系统利用大数据分析

出影响的范围，并准确地发出预警和抢修进度信息，从而消除用户的焦虑情绪。

3 智慧水务在供排水管理中的应用实践路径

3.1 构建全域感知与数据治理底座

高质量的数据输入是算法模型输出准确决策指令的前提，若不能保证高质量的数据输入，再先进的算法模型也难以做出正确的决策指令，所以必须先解决感知盲区的覆盖问题和数据质量参差不齐的问题。这就需要在城市供水和排水的重要节点安装智能化的传感器，形成密集的监测网络，要制定统一的数据标准规范，对各种各样的数据进行清洗、转换和融合，消除数据孤岛，保证数据的一致性、完整性、时效性。只有建立可信、可用的数据资产体系，才能给上层应用提供有力的支撑，使水务系统真正具有感知的能力^[4]。

以某大型沿海城市智慧水务一期建设为例，这一城市并未能急于上线复杂的AI预测模型，而是先开始了为期两年的“感知网织密、数据焕新”专项行动。项目组对全市数千公里的供水管网展开地毯式的排查，就压力监测盲区和老旧机械水表区域，大规模地部署了NB-IoT智能压力计和超声波智能水表，在排水主管管关键节点处还安装了雷达液位计和COD在线分析仪，使监测点位密度提高到原来的三倍。与此同时，对于历史数据缺失和格式杂乱的问题，该城市创建了市级水务数据中台，制订出包含数据采集、传输、存储、共享等各个环节的《水务数据治理白皮书》。技术团队开发出自动化ETL工具，对过去十年的SCADA历史数据进行回溯清洗，去除异常噪点，填补缺失序列，把GIS地理信息、营收系统用户数据以及工单系统维修记录做唯一标识关联，创建统一的“水务对象编码体系”。

3.2 深化数字孪生与仿真推演应用

数字孪生不是物理设施的三维可视化复刻，它是机理模型和数据驱动的虚拟实验场，管理者可以在虚拟空间里对各种极端工况、突发事件进行低成本的试错和预演。将实时监测的数据输入高保真的水力模型中，系统可以实时反映管网运行的状态，根据预测出的未来短时间内的压力分布、水质变化和内涝风险，来辅助做出最佳的调度方案。虚实相生、以虚制实的模式大大提高了应对复杂水问题的科学性和前瞻性。

以某流域性特大城市防洪排涝智慧化改造项目为例，该项目并不是简单地将视频监控、液位报警这些技术应用到其中，而是创建了一个包含主城区2000平方公里的“城市水务数字孪生体”。技术团队将高精度

地形地貌数据同地下管网拓扑结构以及实时气象雷达图结合起来, 创建了一个具备毫秒级响应速度的二维—三维耦合水动力模型。台风暴雨来临之前, 系统不会等待积水出现, 而是根据气象预报数据, 在数字孪生体里提前 6 个小时模拟出各种重现期的暴雨对各个低洼路段造成的积水深度、退水时间以及管网超载状况。根据推演的结果, 指挥中心自动生成差异化的预排涝调度指令, 准确计算出各个泵站提前预降水位的幅度、各个闸门开启的时间、应急抢险队伍最佳布控点的位置。

3.3 推动算法驱动与自主决策进化

随着机器学习、强化学习技术的发展, 水务系统已经从原来只能告诉管理者“发生了什么”“可能会发生什么”这样的简单任务中解脱出来, 可以给出更加具体的“应该怎么做”的最优解, 在某些规则下还可以自动执行控制指令。这就需要建立一个面向具体业务场景的算法仓库, 不断地对它进行数据喂养和模型迭代, 从而提高算法对于复杂非线性环境的鲁棒性以及适应性, 实现由“人脑决策、机器执行”到“机器决策、人机协同”的转变。

以某现代化工业园区供水节能优化项目为例, 园区用水存在波动大、峰值高、水压稳定性要求高的特点, 传统的、人工化的调度不能同时达到节能和安全的要求。项目实施方未能使用固定的 PID 控制算法, 而是一套自适应的强化学习驱动的泵站群控制算法。该系统把泵站电耗最低和管网压力波动最小作为双重奖励函数, 经过和数字孪生环境数百万次虚拟交互训练之后, 学会了在不同的用水时段、不同的管网阻力特性下, 最佳的水泵组合以及变频策略。在实际运行中, 当夜间用水量突然下降或者某大型企业启动高压清洗设备时, 系统不需要人工干预, 在秒级之内就可以自动调节多台水泵的频率和启停状态, 平滑消除压力波动, 将千吨水电耗降低 15%。

3.4 重塑业务流程与组织协同机制

重塑业务流程和组织协同机制在于制度层面保证智慧水务技术红利变成实际的管理效率。技术的引入必然要引起组织架构和管理方式的改变, 如果沿用传统的条块分割、层级汇报的方式, 再先进的系统也只能是摆设。因此必须打破部门壁垒, 建立以数据流为导向的扁平化、网格化管理体系, 把智慧水务平台嵌入日常巡检、维修、调度、客服等全流程业务当中, 使工单能够自动流转, 任务可以智能派发, 绩效能够被量化考核, 从而形成一个数据驱动业务、业务反哺数据的良性循环^[5]。

以某省会城市水务集团为研究对象, 在其数字化转型过程中出现的管网漏损率高、抢修响应慢等问题, 未能简单地依靠新设备去解决, 而是一次性对流程进行重组, 并且对组织进行了重新塑造。依靠智慧水务平台, 废除了原来热线接单、中心派单、班组领单、现场处置、反馈销单的长链条模式, 创建智能识别、自动派单、网格处置、即时评价的敏捷响应机制。当物联网传感器检测出可疑爆管信号或者 AI 模型判断漏损概率大于阈值时, 系统则会自动产生一个紧急工单, 按照 GIS 定位将任务直接推送到离它最近的网格化巡检员手持终端上, 并且同时通知附近的阀门操作员做好关阀的准备。一线员工完成现场处理工作之后, 用 APP 上传修复照片和测试数据, 系统会自动进行核验并闭环管理, 不会出现人工调度的环节。集团对绩效考核体系做了相应的调整, 将漏损控制指标、响应时间、一次修复率等数据同个人的薪酬联系起来, 从而调动起所有员工的积极性去开展智慧化的管理工作。

4 结束语

智慧水务在供排水管理中的应用和实践属于深刻的技术叠加, 也是理念的重新塑造以及流程的重新再造。完善的体系, 即物联网感知、大数据和云计算的中枢以及人工智能决策大脑, 给水务行业的转型升级赋予了可能性。智慧水务在生产运行、管网运维、客户服务等主要场景中起到提高效率、保证安全、改善服务的作用。但是技术落地不是一件容易的事情, 要依靠扎实的数据基座、深入的数字孪生应用、推动算法自主决策和重塑组织协同机制等诸多方面共同努力才能实现由“数字化”向“智慧化”的飞跃。未来, 5G、区块链、边缘计算等技术被应用到智慧水务当中, 将会促使智慧城市生态的可持续发展, 给城市的生态文明建设提供科技支持。

参考文献:

- [1] 陈外才, 甘逸伦. 国内智慧水务建设研究进展 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(13): 5-8, 13.
- [2] 赖敏达. 水务大数据背景下的城市智慧水务物联设计研究 [J]. 水利技术监督, 2025(02): 66-69, 102.
- [3] 刘宾, 胡译文. “四水合一”的智慧水务系统构建 [J]. 供水技术, 2024, 18(06): 14-18.
- [4] 李金龙, 张彬, 王海霞, 等. 智慧水务建设现状与难点调研分析 [J]. 智能城市, 2024, 10(10): 72-74.
- [5] 景静. 城市智慧排水系统的设计与应用 [J]. 建设科技, 2024(05): 20-23.

智能化施工技术在装配式建筑工程 施工管理中的价值

张超

(淮南乾城置业有限公司, 安徽 淮南 232099)

摘要 装配式建筑工程施工管理的质量与效率会影响建筑工程的施工进度、安全水平与造价控制,是装配式建筑产业规模化发展的重要保障,也是建筑产业转型升级的关键支撑。智能化施工技术的应用,打破了传统装配式建筑施工管理的粗放模式,通过各类智能设备与信息技术的融合运用,实现施工管理各环节的精准化、高效化与规范化,解决传统施工管理中效率低下、质量管控不严等实际问题。本文结合装配式建筑工程施工管理的实际场景,阐述智能化施工技术在各管理环节的应用,总结应用价值,以期在施工管理智能化升级提供实践参考。

关键词 智能化施工技术;装配式建筑;施工管理;应用价值

中图分类号:TP2;TU767

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.008

0 引言

装配式建筑凭借构件预制生产、现场装配施工的特点,具有施工周期短、资源消耗少、环保效益突出、施工效率高等优势,已成为建筑产业转型升级的重要方向。装配式建筑工程施工管理涉及构件生产、运输、吊装等多个相互关联的环节,各环节的衔接性要求较高。传统施工管理模式依赖人工操作与经验判断,管理方式粗放,存在诸多不足,而智能化施工技术以计算机、物联网、大数据技术为核心,将智能设备与施工管理流程深度融合,可实现各环节的实时监测、精准调控与高效协同,弥补传统模式短板。

1 装配式建筑工程施工管理的特点

装配式建筑的施工管理,与传统现浇混凝土建筑的施工管理模式存在明显差异,施工流程的分段性与协同性是其关键,管理工作的开展始终围绕构件全生命周期,涉及构件预制阶段的质量管控、运输环节的调度管理、现场装配的工序把控,以及节点处理、防水构造、竣工验收等所有环节的统筹协调,形成贯穿始终、环环相扣的管理体系。各环节的关联性极强,每一个环节的施工质量与进度把控,都会影响整个工程的建设成效,不存在独立于整体流程之外的单一管理节点,任一环节管控疏漏或执行不到位,都可能引发施工停滞、成本增加,甚至留下难以整改的工程质量隐患。

构件的预制生产与现场装配作业分属不同作业场

景,工厂化的标准化生产环境与露天的现场施工环境,作业条件、技术要求、管理重点的差异明显,构件的规格型号、外形尺寸、成品质量,必须与现场施工实际条件、设计要求高度适配,不允许出现任何偏差,这就要求施工管理打破传统单一场景局限,强化两个环节的衔接,做好生产计划、运输调度与装配节奏的协同。施工管理的精度要求极高,构件装配精度关联建筑结构稳定与安全,节点连接的牢固性、密封性及防水构造的可靠性,决定建筑结构安全性能与长期使用耐久性,应严格遵循施工规范与技术标准,对每道工序严格管控^[1]。施工过程涉及的参与方、人员、设备、材料种类繁多,空间管控与进度管控难度较大,管理内容繁杂且专业性突出,需要管理团队具备全面专业的知识与丰富的管理经验,才能保障管理工作有序推进,实现工程质量与进度的有效管控。

2 智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用

2.1 智能化施工技术在施工进度管理中的应用

智能化施工技术围绕进度计划编制、进度实时监测与进度动态调控三个方面展开,应用价值体现在提升进度管理的精准程度与运行效率,解决传统进度管理存在的盲目性、滞后性等问题。

进度计划编制阶段,BIM技术搭建的装配式建筑三维模型,可将构件预制的生产周期、各类型构件的生产顺序、场外运输的路线规划与时间估算、现场吊装

作者简介:张超(1985-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程管理。

的作业流程与台班安排,以及各环节的施工时间分配、人员数量与技能配置、设备型号与使用时长、材料进场批次与用量等详细信息,全面且精准融入模型内部,实现施工全流程的数字化呈现。通过计算机技术对整个施工进度开展多轮模拟推演,模拟不同施工场景下的进度推进情况,反复优化进度计划的合理程度,减少传统进度计划编制中仅凭经验判断带来的盲目性,确保进度计划与工程实际施工条件高度适配。BIM 技术的可视化功能,可清晰呈现各施工环节的衔接逻辑与时间节点,方便管理人员明确各岗位的施工任务与时间要求,合理规划施工人员的排班计划、施工设备的进场时间与调试安排,避免各环节出现脱节、等待等问题^[2]。

进度实时监测阶段,物联网技术将现场所有施工设备、构件运输车辆、各岗位施工人员与管理平台建立稳定的数据连接,实现施工进度相关各类数据的实时采集、传输与更新。采集的数据包括构件预制环节的完成数量、未完成构件的生产进度,运输环节的运输车辆行驶轨迹、实时速度与预计到场时间,现场施工环节的吊装构件数量、安装完成比例与各工序的施工时长,保障管理人员全面、实时掌握各环节的施工进度情况。管理人员通过管理平台可随时查看各环节的实际施工进度,对比计划进度与实际进度的偏差,快速发现进度滞后的具体环节,精准分析滞后原因,及时排查并采取应对措施。

进度动态调控阶段,基于实时监测收集的各类数据,大数据技术对施工进度进行科学分析与趋势预测,针对进度滞后的环节自动调整施工计划,优化资源配置方案,改变传统进度管理“事后补救”的模式,有效缩短施工周期。

2.2 智能化施工技术在施工质量管理中的应用

装配式建筑的施工特点决定其质量管理难度远高于传统现浇建筑,构件质量、现场装配质量、关键工序质量等任一环节出现问题,都可能留下质量隐患。智能化施工技术的应用,可实现质量管理的全面覆盖、精准把控与规范运行,解决传统质量管理中人工检测精度低、管控不全面、追溯难度大等问题,提升工程施工质量。

在构件质量管控方面,预制构件作为装配式建筑的重要组成部分,其质量直接影响现场装配质量与建筑整体安全性,构件生产过程中的质量管控尤为关键。在预制构件生产过程中,智能检测设备对构件的尺寸精度、混凝土强度、外观平整度、钢筋布置等关键指标进行实时检测,各类高精度传感器采集构件生产过

程中的各项参数,包括混凝土浇筑的实时强度、振捣密实度,钢筋布置的间距、规格与保护层厚度,构件成型后的尺寸偏差,预埋件的安装位置与牢固程度等,所有数据实时传输至管理平台,保障构件质量符合设计标准与规范要求。智能检测设备的检测精度远高于人工检测,能及时发现构件生产过程中的细微质量隐患,及时提醒工作人员整改,杜绝不合格构件进入施工现场,实现检测数据的实时记录与存储,形成构件生产全过程的质量数据档案^[3]。

在现场装配质量管控方面,BIM 技术与物联网技术的融合应用,实现对现场装配施工各道工序的实时监测与精准管控,打破传统装配质量管控“事后检查”的局限。将 BIM 三维模型与现场施工的实际情况进行实时对比,智能定位设备、智能监测传感器等采集现场装配的各项数据,实时查看构件的安装位置偏差、标高偏差与垂直度偏差,节点连接的紧密程度、螺栓紧固力矩与焊接质量,及时发现装配过程中的偏差与质量问题并整改。防水、保温等关键工序施工中,智能检测设备对施工质量进行实时监测,精准把控防水涂层的厚度、均匀度与密封性,检测防水施工中的渗漏隐患;检测保温层的厚度、铺设密度与导热系数,确保保温层的保温性能符合规范要求,提升建筑的防水保温性能与使用寿命。

2.3 智能化施工技术在施工安全管理中的应用

智能化施工技术的应用,可强化安全管理的针对性与有效性,实现安全风险的实时监测、提前预警与及时处置,降低安全事故发生率,保障施工人员的人身安全与施工现场的财产安全。施工人员配备的智能安全帽、智能手环等智能防护设备,可实时采集施工人员的现场位置、心率变化、运动状态与作业轨迹等数据,与管理平台建立实时连接,实现施工人员安全状态的全程监测。施工人员进入高空作业、基坑作业等高危区域时,智能设备会及时发出声光报警信号,提醒施工人员注意安全,将预警信息传输至管理平台;施工人员出现违规操作或身体不适时,智能设备立即报警,管理人员可及时介入制止或安排救援。物联网技术对现场吊装设备、塔吊、施工电梯等关键设备进行实时监测,实时采集设备的运行参数、故障信息或使用时长等数据,建立设备运行档案,参数超过安全限值时,设备自动停止运行并发出声光报警信号。在施工现场环境安全管理方面,智能监测设备对施工现场的扬尘浓度、噪声分贝、基坑沉降量等环境参数进行实时监测,参数超过安全标准时,及时发出报警信号并自动启动相关治理设备^[4]。

2.4 智能化施工技术在施工造价管理中的应用

传统造价管理多采用人工核算、事后管控的模式,易出现预算漏算、错算、造价超支、结算纠纷等问题,难以实现造价管控的精准化与精细化。智能化施工技术的应用,可实现造价管控的全流程覆盖、精准化核算与动态化管控,有效降低工程成本,避免造价超支问题,提升造价管理的效率与准确性。造价预算编制阶段,BIM技术构建的装配式建筑三维模型,将构件的规格数量、型号参数与制作成本,材料的种类用量、采购单价与运输成本,设备的租赁价格与使用时长,人工的薪酬标准与人员数量等各项造价相关信息全面、精准地融入模型内部,实现造价预算的数字化编制。通过计算机技术对造价进行精准核算,自动统计构件数量、材料用量与人工工作量等,优化预算编制方案,减少传统预算编制中因人工核算失误导致的漏算、错算等问题,为造价预算编制提供精准的数据支撑。施工过程造价管控阶段,物联网技术与大数据技术的融合应用,实时采集施工过程中的各项造价相关数据,包括材料的采购数量、采购单价与实际消耗量,设备的租赁时间与租赁费用,人工的实际工作量与薪酬支出等,管理人员可随时查看各项费用的支出明细,对比实际支出与预算的偏差,及时发现造价超支隐患。工程结算阶段,智能化技术实现结算数据的快速整理与精准核算,基于施工过程中实时记录的造价数据自动生成结算报告,减少人工结算的工作量与误差,实现造价数据的全程追溯^[5]。

3 智能化施工技术在装配式建筑工程施工管理中的应用价值

3.1 提升施工管理效率,缩短施工周期

智能化施工技术的应用,对传统装配式建筑施工管理的粗放模式形成根本性改变,提升施工管理各环节的自动化、智能化与协同化水平,带动施工管理整体效率的提高,推动施工周期的有效缩短。智能化施工技术的引入,将施工管理人员从繁琐且重复性强的基础工作中解放出来,智能设备与信息技术的深度融合,使各类管理工作高效精准开展,减少不必要的人力投入与时间消耗,实现施工各环节的无缝衔接与流程优化,压缩施工等待时间、合理调配闲置资源,缩短各工序衔接耗时,带动整个工程施工节奏加快,确保工程按时竣工交付,提升工程建设的整体效益。

3.2 强化施工质量管控,提升工程质量

装配式建筑的施工质量直接决定建筑建成后的安全性、耐久性与使用功能,是工程建设的核心诉求。智能化施工技术的应用,改变了传统质量管理依赖人

工的局限,构建覆盖施工全流程的质量监测体系,实现各环节质量的实时监测与精准检测,确保每一道工序都符合设计要求与规范标准,从源头杜绝质量隐患。智能化技术可实现施工质量数据的全程记录与可追溯,形成完整规范的质量管控体系,为后期工程验收与质量排查提供精准数据支撑,提升工程质量的稳定性与可靠性,延长建筑使用寿命,减少后期维修维护成本,提升建筑使用价值与经济效益。

3.3 降低安全事故发生率,保障施工安全

施工安全是装配式建筑工程施工管理的首要前提,直接关系到施工人员的生命财产安全与工程建设顺利推进。智能化施工技术的应用,打破了传统安全管理的局限,构建覆盖施工人员、施工设备、施工现场环境的全方位安全监测体系,实现各类安全风险的实时监测与动态管控,及时捕捉各类安全隐患并发出报警信号,提醒管理人员及时处置,将隐患消除在萌芽状态。智能化技术从多个维度强化施工安全管理能力,规避施工人员违规操作与高危区域作业风险,排查设备运行隐患,改善施工现场作业环境,保障施工人员身体健康,有效降低安全事故发生概率,减少人员伤亡与财产损失,营造安全有序的施工环境,为工程顺利开展提供有力支撑。

4 结束语

装配式建筑工程施工技术的智能化进程,逐渐改变传统的施工方式,展现了其在改进产业链配置、提高项目质量与施工效率等方面的巨大潜能。装配式建筑工程施工技术的应用,使建筑工程设计的精确性得以大幅提高,同时实时监控施工活动,保证了建筑工程的最终品质。未来,随着科技持续发展及行业人力资源日益专业化,企业间的协作关系将更加紧密,智能化建筑技术也将持续创新,为更智能化、更环保的装配式建筑奠定基础。

参考文献:

- [1] 龙云,路义晨,李长江,等.装配式建筑施工技术在建筑工程施工管理中的应用[J].建筑技术开发,2020,47(18):42-43.
- [2] 李沐鸿.浅析装配式建筑施工技术在建筑工程施工管理中的应用[J].居舍,2021(04):33-34,36.
- [3] 刘婷.装配式建筑施工技术在建筑工程施工管理中的应用研究[J].中阿科技论坛(中英阿文),2020(01):27-31.
- [4] 寇园园,刘凯.基于BIM技术的装配式建筑精细化施工管理研究[J].工程管理学报,2020,34(06):125-130.
- [5] 刘宇,杨淑娟,于德湖.基于BIM的装配式建筑智慧建造应用研究[J].青岛理工大学学报,2020,41(05):52-57.

基于 IIoT 与人工智能的工业生产 过程监测与优化研究

项本杰, 王 锐, 陈 杰, 陈圣贤

(安徽祯欣互联科技有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要 面向工业生产过程中数据割裂、决策滞后、效率与安全难以协同的现实难题, 本文围绕工业物联网与人工智能融合应用展开系统探究, 明确二者在工业数字化转型中的支撑作用与升级目标。构建多维度数据感知、异常智能识别的生产过程监测体系, 形成工艺参数调优、资源流程配置的优化路径, 并提出技术集成、应用推广与长效运维的实施策略。研究成果旨在为工业生产从自动化向智能化跃迁提供理论参考与实践思路, 助力企业提升生产质量、降低能耗损耗、强化安全防控水平, 推动工业生产实现高效稳定与绿色可持续发展。

关键词 工业物联网; 人工智能; 工业生产; 过程监测; 智能优化

中图分类号: TP18; F407

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.009

0 引言

工业数字化转型进入高质量发展新阶段, 培育新质生产力成为工业发展核心导向。工业物联网 (IIoT) 与人工智能深度融合, 成为破解传统生产数据割裂、决策滞后、效能与安全失衡的关键路径, 契合《推动工业互联网平台高质量发展行动方案 (2026-2028 年)》中强化 AI 赋能的部署要求。当前工业生产仍面临数据要素流通不畅、智能应用深度不足等难题, 制约转型升级步伐。立足于这一现实, 聚焦生产全流程监测与优化, 探究 IIoT 与人工智能协同应用模式, 破解生产瓶颈、释放增效空间, 为工业生产向智能化、绿色化跃迁提供支撑, 助力制造业实现质的有效提升和量的合理增长。

1 IIoT 与人工智能赋能工业生产的价值定位

1.1 工业生产数字化转型的技术支撑

IIoT 与人工智能构成工业生产智能化升级的核心技术基础, 二者协同发力, 为工业生产数字化转型提供不可替代的技术支撑。IIoT 通过各类传感器、射频识别设备、工业网关等终端, 打破生产环节中设备、物料、人员、环境等要素的信息孤岛, 实现生产全要素全域互联与数据贯通, 让原本分散的生产数据形成完整的数据流, 为后续的分析与优化提供真实、全面的基础素材。人工智能依托机器学习、深度学习等算法,

对 IIoT 采集的海量生产数据进行深度挖掘与智能分析, 摆脱传统人工决策的主观性与滞后性, 为生产决策提供智能分析与自主执行能力, 推动生产决策从“经验驱动”向“数据驱动”转型^[1]。多技术融合并非简单的技术叠加, 而是通过 IIoT 的数据采集能力与人工智能的数据分析能力深度耦合, 打破传统生产模式中效率低下、精度不足、决策滞后的瓶颈, 重构生产模式的运行逻辑, 推动工业生产从“自动化”向“智能化”跨越, 为工业生产数字化转型筑牢技术根基, 支撑生产模式的根本性变革。

1.2 生产过程智能化升级的核心目标

以监测与优化作为核心落实生产系统提质增效与安全可控, 成为工业生产过程智能化升级的核心目标。这一个目标贯穿整个生产流程, 兼顾质量、效率与安全三个核心诉求, 提升生产过程稳定性与产品一致性, 核心是借助智能化手段规避生产过程中的人为误差与环境波动, 让生产工艺保持在稳定运行状态, 确保每一批次产品的质量指标都符合标准, 减少因为生产波动带来的不合格产品, 提升生产质量的稳定性与可靠性, 降低生产能耗与资源冗余损耗, 聚焦在生产过程中的能源消耗与物料利用, 借助智能监测与优化, 精准匹配生产需求与资源供给, 避免能源浪费与物料损耗, 实现生产过程的绿色化、高效化, 在提升生产效益的同时降低环境压力。强化生产安全预警与风险防

作者简介: 项本杰 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 网络与数据安全、人工智能。

控能力,依靠智能化监测体系,实时捕捉生产过程中的安全隐患,提前预判风险发展趋势,及时发出预警信号并联动相关环节采取防控措施,规避生产安全事故的发生,保障生产人员安全与生产系统的稳定运行,实现生产安全与生产效率的协同提升。

2 基于 IIoT 与人工智能的生产过程监测体系构建

2.1 多维度生产数据感知与采集策略

全域感知为生产过程精准监测提供数据基础,多维度生产数据感知与采集策略围绕生产全流程,构建全面、实时、精准的数据采集体系,确保监测数据的完整性与有效性。生产设备运行状态数据实时采集,聚焦生产设备的核心运行参数,包括转速、温度、振动、负载等,通过 IIoT 终端设备实现 24 小时不间断采集,精准捕捉设备运行过程中的细微变化,为设备状态评估与故障预判提供数据支撑,避免因设备故障导致的生产中断^[2]。生产工艺参数动态跟踪与采集,针对生产过程中的核心工艺指标,如压力、流量、浓度、反应时间等,进行动态跟踪采集,实时掌握工艺参数的波动情况,确保工艺运行符合标准要求,为后续工艺优化提供精准的数据依据。生产环境与物料质量数据同步获取,兼顾生产环境的温湿度、粉尘浓度等环境参数,以及原材料、半成品、成品的质量指标,实现环境数据与物料数据的同步采集,全面覆盖生产过程中的各类影响因素,为生产过程的全面监测与精准分析奠定坚实的基础,确保监测体系能够全面反映生产实际状态。

2.2 生产过程异常智能识别与诊断

人工智能技术能够对生产过程中出现的异常情况做出精准识别和根源定位,生产过程异常智能识别与诊断借助人工智能算法和多方面来源的生产数据,建立高效的异常识别与诊断体系,从而提高生产过程的风险防控水平。多源数据融合有助于提高异常识别的准确程度,将设备运行数据、工艺参数数据、环境数据以及物料质量数据整合并加以分析,突破单一数据维度带来的限制,借助数据之间的相互补充来提升异常识别的全面性和准确性,防止由于单一数据偏差造成误判,准确找出生产过程中可能出现的各类异常状况,如设备异常、工艺异常、质量异常等。智能算法可以快速完成生产故障的诊断工作,依靠深度学习、神经网络等智能算法,对已经识别出来的异常数据进行深入分析,迅速确定异常产生的根源,明确异常发生的具体环节和原因,避免传统人工诊断方式耗时较

长、准确率不高的问题,为异常处理给出明确指引。异常趋势预判有助于降低生产中断带来的风险,通过对历史异常数据和实时数据的分析,提前判断异常发展的趋势,及早发现潜在的异常隐患,在异常扩大之前发出预警并联动相关环节采取应对措施,尽可能减少生产中断的可能性,保障生产过程的连续性和稳定性。

3 基于 IIoT 与人工智能的生产过程优化路径

3.1 生产工艺参数智能调优

数据驱动实现工艺参数动态适配与最优控制,生产工艺参数智能调优以 IIoT 采集的多源数据为核心,依托人工智能算法构建优化模型,实现工艺参数的动态调整与持续优化。基于历史与实时数据构建参数优化模型,整合生产过程中的历史工艺数据、质量数据、设备运行数据,结合实时采集的生产数据,通过人工智能算法构建工艺参数优化模型,明确工艺参数与生产质量、效率之间的内在关联,确定不同生产工况下的最优参数区间^[3]。生产工况变化下参数自适应调整,依托实时数据监测,精准捕捉生产工况的变化,包括原材料特性变化、设备运行状态变化、环境条件变化等,通过优化模型实现工艺参数的自适应调整,确保工艺参数始终处于最优区间,规避因工况变化导致的生产质量波动与效率下降。工艺优化持续迭代提升生产质量,通过对生产数据的持续采集与分析,不断优化参数模型,结合生产实际需求调整优化策略,实现工艺优化的持续迭代,逐步提升生产质量与生产效率,推动生产工艺向更高效、更精准、更稳定的方向发展。

3.2 生产资源与流程智能配置

从生产系统全局最优的核心目标出发,实现生产资源的高效利用与业务流程的顺畅流转,从生产全局视角出发,以工业物联网和人工智能为技术支撑,对生产资源与流程进行智能配置,可精准协调资源调度与生产流程的适配关系,实现生产系统整体运行的最优化。设备负荷与产能之间实现动态匹配和优化,通过工业物联网实时观察每台生产设备的运行负荷和产能情况,再配合生产任务的实际需要,使用人工智能的计算方法,将设备负荷做动态分配,避免有的设备超负荷运转,而有的设备却闲置,这样设备资源就能高效使用,整体生产产能也会提升。生产物料的流转和调度进行智能规划,依据生产任务和物料需求,把物料库存信息、生产进度信息整合到一起,用智能算法来安排物料流转的路线和调度办法,优化物料入库、出库、转运环节,减少物料积压和流转时间,保证物

料能及时供应,让生产流程能够顺利推进,生产各环节之间优化协同,降低流程耗时^[4]。以生产全流程的系统性梳理为基础,通过数据驱动的跨环节信息互联互通与协同联动,识别并剔除流程冗余节点,同时优化环节间的衔接机制,进而压缩生产周期,实现生产流程整体运转效能的提升。

4 工业生产监测与优化系统实施策略

4.1 技术落地与系统集成方案

技术落地与系统集成方案立足于工业生产实际场景,聚焦 IIoT 与人工智能技术的落地应用,构建兼容、稳定、安全的一体化系统。IIoT 设备与现有生产系统兼容部署,充分考虑现有生产设备与系统的技术规格,选择适配性强的 IIoT 终端设备,通过接口适配、协议转换等方式,实现 IIoT 设备与现有生产系统的无缝对接,避免因设备不兼容导致的系统冲突,确保数据采集的顺畅性与稳定性,最大限度降低技术落地的改造成本。人工智能模型轻量化适配工业现场环境,针对工业现场算力有限、环境复杂的特点,对人工智能模型进行轻量化处理,简化模型结构、优化算法流程,确保模型能够在工业现场设备上高效运行,实现数据的实时分析与决策输出,满足工业生产的实时性需求。数据传输与存储安全体系构建,聚焦生产数据的安全性、保密性,构建全方位的数据安全体系,采用加密传输技术保障数据在传输过程中的安全,建立分级存储机制实现数据的安全存储,同时完善数据访问权限管理,防范数据泄露、篡改等风险,为监测与优化系统的稳定运行提供安全保障^[5]。

4.2 应用推广与长效运维机制

应用推广与长期运维机制围绕体系实际使用与不断改进,建立分段和全流程保障架构,保证体系能够长时间平稳发挥作用,实现技术应用规模化落地与持续化价值输出,按场景按阶段带动智能化体系使用,充分结合不同行业、不同产线工业生产场景特性与实际生产需要,组织技术团队与生产班组开展联合调研,梳理各生产环节难点与改进潜力,为不同场景配备具有差异性使用推广计划^[6]。遵循“试点先行、以点带面”原则,先在生产瓶颈明显、质量波动大、能耗损耗高的核心场景进行试点应用,组建专项技术保障团队,实时跟踪系统运行情况,及时解决试点过程中出现的设备适配、操作适配等问题,积累成熟应用经验与优化方案后,再逐步向整个生产流程推广,防止盲目推广带来资源浪费、生产脱节与投入产出比失衡问

题,保证体系使用完全符合生产实际需要,生产人员数字化技能同步加强,面对智能化体系操作与使用需要,构建“分层分类、理论+实操”系统化培训体系^[7]。针对生产管理人员、一线操作工人、设备运维人员制定不同培训内容,管理人员重点培训数据决策分析能力,操作工人重点培训系统实时监测、异常反馈操作能力,运维人员重点培训设备故障排查、模型基础调试能力。培训采用线下实操教学、线上视频课程、现场案例讲解相结合方式,搭配考核与实操认证机制,确保生产人员能够熟练掌握体系操作流程,提升数字化操作水平、数据理解水平与异常处理水平,使生产人员可以高效使用体系开展生产监控与改进工作,充分体现体系使用价值,带动人与体系高效配合运转,消除“技术与人员脱节”应用壁垒。

5 结束语

工业物联网与人工智能的深度融合,正在重塑传统生产运行逻辑,为工业生产全过程监测与优化开辟全新路径。依托全域数据感知与智能分析能力,生产系统可摆脱经验依赖,实现状态可感知、异常可预判、过程可调控、资源可优配。未来,随着技术持续迭代与场景深度渗透,监测与优化体系将更趋轻量化、自主化与协同化,持续破解生产瓶颈、释放增效空间。企业需立足于自身生产场景,稳步推进技术落地与人才适配,在实践中不断完善系统功能与运维机制,让智能化技术真正转化为核心竞争力,为工业高质量发展注入持久动力。

参考文献:

- [1] 刘鹏威.IIoT 和云计算在智能制造中的应用[J].信息记录材料,2023,24(05):196-198.
- [2] 贝加莱.基于人工智能的机器健康追踪系统[J].现代制造,2025(12):68.
- [3] 张影,徐杨,王京.AI+背景下工业互联网平台开放策略演化博弈与仿真模型[J/OL].计算机集成制造系统,1-29 [2026-03-02].<https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTTotal-JSJJ20250926002.htm>.
- [4] 宋寒.电子信息工程在工业领域的应用研究[J].电子元器件与信息技术,2024,08(04):41-43,47.
- [5] 汤敏贤,史勇民,李日南.工业物联网关键技术及发展挑战[J].中国信息化,2021(09):76-78.
- [6] 陈宏,苏征,张菁,等.基于人工智能的工业运行数据短期预测方法探析[J].数字技术与应用,2024,42(12):19-21.
- [7] 张朋,张洁.生成式人工智能的工业应用技术与前景[J].自动化仪表,2024,45(08):1-10.

基于深度学习的工业互联网 异常流量检测与入侵响应研究

韩彬, 杨晓雾

(武警保定支队勤务保障大队信息保障站, 河北 保定 071000)

摘要 从工业互联网安全防护实际需求出发, 开展基于深度学习的异常流量检测与入侵响应对策研究, 对遏制网络攻击、保障生产安全、维护产业链稳定具有重要意义。当前, 工业互联网面临设备防护薄弱、攻击手段迭代等安全困境, 传统检测方法已难以适配其“人、机、物”协同的开放特性。通过剖析深度学习技术在特征提取、模式识别上的优势, 结合工业互联网流量特点, 从检测框架构建、模型优化、响应机制完善等维度, 提出系统化解决方案, 以期提升工业互联网安全防护的智能化与精准化水平提供借鉴。

关键词 深度学习; 工业互联网; 异常流量检测; 入侵响应; 网络安全

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.010

0 引言

工业互联网是将工业领域的设备、传感器、机器和系统通过互联网连接起来, 实现数据交换、信息共享和智能化管理的应用生态, 是未来全球制造业发展的重要基石。但与此同时, 工业互联网遭到的网络攻击愈加严重^[1]。深度学习技术凭借强大的自主学习与模式识别能力, 为工业互联网安全防护提供了新路径。基于此, 聚焦基于深度学习的工业互联网异常流量检测与入侵响应展开研究, 可为工业互联网高质量发展提供安全支撑。

1 基于深度学习的工业互联网面临的安全挑战

1.1 工业互联网自身特性引入的安全挑战

工业互联网“人、机、物”协同的开放互联特性, 是其安全挑战的主要来源, 在提升生产效能的同时, 也让安全风险显著增加。传统工业系统多处于封闭可信环境, 攻击面有限, 而工业互联网的开放性, 使得大量制造资源直接暴露在网络空间, 易被外部攻击者触达利用。其接入设备种类繁多、规模庞大, 多数工业控制终端计算资源不足, 原生防护能力薄弱, 部分设备甚至无基础防护, 难以抵御恶意攻击^[2]。工业互联网对实时性、可靠性要求极高, 系统中断或控制指令篡改, 不仅会导致生产停滞, 还可能引发设备损坏、人员伤亡等严重后果。此外, 平台连接海量系统、承载核心数据, 针对关键节点的攻击会快速扩散至全产

业链, 进一步放大安全隐患, 给企业带来不可估量的损失。

1.2 深度学习模型在训练阶段面临的安全威胁

深度学习模型训练阶段的安全威胁主要集中在数据和模型层面, 其中投毒攻击与模型逆向攻击危害最为突出, 直接影响模型可用性与安全性。投毒攻击通过恶意篡改训练数据, 破坏模型决策逻辑或植入隐蔽后门。例如: 攻击者操纵传感器测量值, 导致设备故障检测器在特定场景下失效, 造成生产异常漏报。后门攻击作为投毒攻击的特殊形式, 会在训练数据中植入不易察觉的触发器, 使模型正常输入时表现正常, 遇到触发器则输出错误结果, 隐蔽性强且常规测试难以发现。模型逆向攻击通过分析模型输出或获取参数, 推断训练数据中的敏感信息, 而工业互联网训练数据多包含商业机密, 此类攻击会导致核心知识产权泄露, 破坏企业竞争力。

1.3 深度学习模型在预测阶段面临的安全威胁

深度学习模型进入预测阶段后, 安全威胁主要围绕输入干扰、模型窃取和物理欺骗展开, 直接影响工业生产的准确性与安全性。对抗性攻击最为常见, 通过向输入数据添加人眼难以察觉的微小扰动, 诱导模型输出错误结果, 如质量检测系统误判次品为合格品, 或传感器读取异常触发错误控制指令, 影响生产质量与安全。模型提取攻击针对模型知识产权, 攻击者通过反复调用模型 API, 分析输入输出对应关系, 复现功

作者简介: 韩彬(1984-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 网络安全。

能相近的替代模型, 给企业投入大量资源训练的工业模型带来巨大的经济损失^[3]。物理欺骗攻击操作简单、难以追踪, 通过改变现实物体属性欺骗模型, 如在工业产品上添加微小标记导致检测误判, 对依赖视觉识别和传感器数据的工业自动化系统构成严峻挑战。

1.4 大模型等新技术应用带来的潜在风险

大模型为工业互联网安全赋能的同时, 也从实时性、成本、可靠性等方面带来新型潜在风险, 制约其实际应用价值。在实时性方面, 大模型流量检测速度无法满足工业场景高实时要求, 且误报率较高, 影响威胁判断准确性, 多数实时检测任务仍需依赖传统小模型或规则引擎。在成本层面, 大模型训练与推理需消耗海量算力, 如训练 650 亿参数的模型需上千块 GPU 连续运算数周, 高昂成本让资源敏感型工业环境难以普及。同时, 大模型“黑盒”特性导致决策过程不可解释, 生成结果可信度不稳定, 直接用于安全运营或控制决策, 可能引发生产安全事故。

2 基于深度学习的工业互联网异常流量检测的必要性

2.1 应对工业互联网安全态势的现实需求

工业互联网高速发展的同时, 早已成为网络攻击的核心目标, 勒索软件、供应链攻击、挖矿攻击等新型安全威胁持续高发, 再加上人工智能技术推动攻击手段不断迭代升级, 工业互联网安全防御的难度陡增。在此背景下, 基于深度学习的工业互联网异常流量检测技术成为应对当前安全态势的关键。它能深度分析海量网络流量数据, 自动识别异常攻击模式, 及时挖出潜在安全隐患, 有效防范数据泄露、生产中断等风险, 而构建高效的异常流量检测机制, 既是提升工业互联网整体防护水平、保障其稳定运行的现实刚需, 更是维护关键基础设施安全、筑牢国家经济安全防线的必然要求。

2.2 弥补传统检测方法应对新型威胁的局限性

传统工业互联网入侵检测系统大多依靠预定义规则库或浅层机器学习模型开展工作, 场景适配性差, 难以有效识别未知攻击与变种威胁, 尤其是在加密流量解析、低频攻击捕捉、跨域渗透监测这些复杂场景中, 其短板愈发明显, 识别精度低、误报率高, 严重影响实际检测效果^[4]。基于深度学习的异常流量检测技术恰好能弥补这些不足, 破解传统方法应对新型安全威胁的技术瓶颈, 它具备强大的自动特征提取能力, 不用依赖专家知识进行人工特征工程, 可直接从原始流量数据中自主学习复杂的时空特征, 大幅提升对新型威胁的识别能力。

2.3 深度学习适配异常流量检测的技术优势

相较于传统检测技术, 深度学习处理工业互联网异常流量数据的优势十分突出。其一, 支持无监督或半监督学习模式, 能直接从非结构化流量数据中提取高维特征, 有效解决工业场景中标记样本稀缺、数据分布不平衡的行业痛点; 其二, 大幅降低对专家经验的依赖, 如变分自编码器与 Transformer 相结合的检测方法, 不用人工标注样本, 就能精准识别加密流量中的异常模式; 其三, 泛化能力强, 能灵活适配不同工业场景的流量特征, 依托端到端学习框架, 捕捉人工分析难以察觉的细微流量异常, 实现对网络攻击的精准前置预警。

2.4 契合智能化安全运营与合规性建设要求

基于深度学习的异常流量检测技术, 是工业互联网实现智能化安全运营、满足行业合规性要求的必由之路。它能推动网络安全防护实现实时威胁发现、动态信任评估、自动响应处置的全流程闭环管理, 助力企业构建主动防御体系, 如融合零信任架构的深度学习检测方案, 可通过动态信任分级与持续行为监测, 实现对跨域流量的精细化管控, 有效阻断网络攻击的横向渗透路径, 而深度学习驱动的异常流量检测, 不仅能大幅提升企业安全运营的效率与水平, 还能为企业合规性建设提供坚实的技术支撑。

3 基于深度学习的工业互联网异常流量检测与入侵响应对策

3.1 构建融合时空特征与工业协议解析的智能检测技术框架

传统检测方法在协议理解、时空特征提取上存在明显不足, 核心对策是构建智能检测框架, 实现从流量统计到行为分析的升级, 让检测更贴合工业场景需求。该框架核心为 CNN 与 GRU 异构神经网络模型, CNN 专注提取数据包字节序列、协议字段中的局部空间特征, GRU 则捕捉流量时间维度的依赖关系, 一静一动间既能识别周期性通信异常与指令偏离, 又能兼顾局部特征与动态变化, 让特征提取更全面^[5]。

为赋予模型工业场景上下文理解能力, 可内嵌多种主流工业协议解析模块, 吃透功能码语义、寻址逻辑与正常交互模式, 避免仅靠流量表象判断, 大幅减少误判。针对异常样本稀缺的数据不平衡问题, 需引入动态焦点损失函数让模型重点关注难分类异常样本, 采用 GAN 过采样技术合成代表性少数类样本, 提升低频攻击识别灵敏度。同时, 采用无监督学习与有监督微调的混合范式, 先在大量未标注流量中学习正常行为, 再针对特定异常优化, 这种方式能增强模型在复

杂工业场景下的泛化性与鲁棒性，适配不同工业领域的差异化流量特征，为后续入侵响应奠定坚实的基础。

3.2 设计数据预处理与模型优化方案以提升检测效能

高效检测离不开高质量数据与轻量化模型，针对性设计数据预处理流程与模型优化方案，在检测精度与实时性之间找到最佳平衡点。工业互联网流量来源复杂，易掺杂各类无效信息，数据质量直接影响检测效果，因此数据预处理环节必须全面细致。预处理过程中，先利用 DPI 技术还原会话上下文，提取源/目的 IP、工业协议功能码、通信时序等关键元数据，筛选剔除无关冗余信息，再通过标准化消除量纲影响，将离散协议字段转化为神经网络可处理的嵌入向量，彻底清理噪声、缺失值与非标准化数据，确保输入模型的数据规范、有效，为精准检测筑牢数据根基。

模型优化聚焦实时性提升，采用剪枝技术移除冗余连接降低计算复杂度，通过量化操作将浮点权重转化为低精度定点数减少内存占用与能耗，实现边缘节点轻量化部署，完美适配工业现场边缘设备资源有限的场景。此外，建立模型动态更新机制，通过增量学习融入新流量模式，适应设备入退网、工艺调整带来的分布漂移，及时适配场景变化，确保持续稳定的检测效能，满足工业生产对安全检测的实时性与可靠性需求。

3.3 建立基于威胁情报的智能入侵响应与闭环管理机制

异常检测只是安全防护的起点，关键在于构建与威胁情报联动的智能响应体系，形成闭环管理，真正实现主动防御。可建立“检测、响应、评估、优化”的自治循环机制，打破检测与响应脱节的困境，让安全防护更具主动性与连贯性。当深度学习模型识别出可疑流量，会立即自动关联内外部威胁情报库，核查恶意 IP 信誉、漏洞利用特征，精准评估事件严重等级，再结合工业生产优先级明确处置顺序，避免因盲目响应影响正常生产，实现安全与生产的协同推进。

针对不同等级威胁，建议触发差异化响应，高危攻击实时阻断连接、隔离失陷设备以快速遏制攻击扩散，潜在渗透行为则启动攻击链路还原，利用知识图谱关联多源日志，可视化展示攻击路径与影响范围，为工作人员精准处置提供有力支撑。同时，定义响应时长、误阻断率、业务恢复时间等量化指标，全面评估响应效果，借助强化学习算法，根据历史处置经验动态优化响应策略、完善响应流程，通过闭环管理，系统既能提升事件处置效率，又能持续学习新型威胁特征、积累处置经验，增强自适应能力，适配不断变化的安全态势。

3.4 构建协同防护体系并强化模型自身安全

单一检测节点易被绕过，且深度学习模型自身存在安全隐患，这两大短板需通过构建协同防护体系、强化模型自身安全来补齐，筑牢工业互联网安全最后一道防线。工业互联网涉及云、管、边、端多个层面，单一节点防护存在明显漏洞，各类攻击可通过跨域渗透突破防护，因此协同防护至关重要。对策主要分为两方面：一方面，构建“云、管、边、端”协同纵深防御体系，在工厂现场层、监控层等不同区域部署差异化检测模型，边缘侧重实时轻量检测以快速处置现场突发威胁，云端聚合多分支数据开展深度分析与威胁狩猎，挖掘潜在跨域威胁，同时融入零信任理念，对所有跨域流量进行动态信任评估与强制访问控制，遏制横向渗透，形成多层次、全方位的防护格局；另一方面，强化模型自身安全，深度学习模型易遭受对抗攻击、数据投毒等威胁，直接影响检测可靠性，对此采用多种技术手段加固，通过对抗训练引入扰动样本提升模型抗干扰能力，利用差分隐私技术添加噪声防止数据泄露，定期开展安全审计排查隐蔽攻击、修复安全漏洞，最终通过融合零信任架构与模型加固技术，有效免疫对抗性样本，降低模型误判率，确保检测系统可靠运行，守护工业互联网安全。

4 结束语

深度学习技术能够有效突破传统检测方法的局限，精准识别工业互联网中的异常流量与恶意入侵，提升安全防护的智能化水平。在复杂工业环境下，其自适应学习能力可大幅降低误报率，增强对未知威胁的感知与响应能力。未来，可进一步优化模型轻量化部署效果，提升极端场景下的检测实时性，同时探索大模型与工业互联网安全防护的深度融合，持续完善智能防护体系，为工业互联网安全稳定运行提供更坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 王阳,谭振江.生成对抗网络赋能工业互联网入侵检测研究[J].福建电脑,2025,41(12):1-8.
- [2] 何承润,闫皓楠,侯志青,等.面向工业互联网的恶意流量智能检测模型[J].移动通信,2025,49(05):49-56.
- [3] 支祖利.深度学习算法在工业互联网入侵检测中的应用研究[J].现代工业经济和信息化,2024,14(07):77-79.
- [4] 胡向东,张婷.基于时空融合深度学习的工业互联网异常流量检测方法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2022,34(06):1056-1064.
- [5] 邓华伟,李喜旺.基于深度学习的网络流量异常识别与检测[J].计算机系统应用,2023,32(02):274-280.

三维激光扫描技术在不动产测绘中的精度控制与应用研究

王岳泽

(山东同信仁和地理信息科技有限公司, 山东 济南 250100)

摘要 三维激光扫描技术凭借非接触、高效率、高密度点云数据获取的优势, 已经成为破解传统测绘难题的利器。本文从技术角度出发, 对三维激光扫描技术在不动产测绘中精度控制的机理及应用进行分析。通过对地面式和同步定位与地图构建 (SLAM) 移动式扫描系统原理的阐述, 结合房产测绘、地籍调查、农村不动产确权等各方面的实证分析发现, 该技术可在复杂环境中实现毫米级精度的技术途径。研究结果表明, 通过对设备进行优化选择、严格控制环境干扰、将多种算法融合在一起, 并且建立全流程的质量控制体系, 三维激光扫描技术不但可以提高外业效率达到 5 倍以上, 而且可以将中误差稳定在厘米级或者亚毫米级的范围内, 为不动产测绘高质量发展提供参考。

关键词 三维激光扫描; 不动产测绘; SLAM 技术; 点云数据; 数字化转型

中图分类号: TN24; P2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.011

0 引言

不动产测绘事关重大财产权益, 测绘精度是保障权益的生命线。如何在高效率的同时保证高精度? 在复杂的电磁环境以及物理遮挡之下, 如何剔除噪声? 如何才能实现多站点云的无缝拼接呢? 这些问题成为三维激光扫描技术深入应用中亟待解决的问题。本文主要对精度控制机理进行深层次的剖析, 并且对应用对策进行系统的整理, 给行业提供一套行之有效的技术范式, 促使不动产测绘朝着智能化、精细化、法治化的方向发展。

1 三维激光扫描技术和不动产测绘中的精度控制

三维激光扫描技术成为不动产测绘新宠的根本原因是它克服了传统光学测量的物理极限, 对空间信息进行了数字化重构^[1]。要理解它的精度控制, 首先要了解它的工作原理和误差来源。

1.1 技术原理

三维激光扫描仪是一种高速的激光测距仪。它发射激光脉冲, 用激光在空气中传播速度来测量激光从发射到经过目标反射回接收器的时间 (飞行时间法, TOF), 或者用发射波和反射波之间的相位差来计算出目标点的三维坐标 (X, Y, Z)。

不同于传统的测量, 它属于一种“面状”的采集

技术。激光束以高速旋转的棱镜为载体, 发出大量的扫描线, 快速覆盖测量区域^[2]。三维激光扫描仪不但可以记录距离、角度, 还可以同步采集 RGB 色彩信息, 并且使用惯性测量单元 (IMU) 实时记录姿态, 为之后的数据处理提供大量信息。

1.2 精度控制的核心挑战

尽管理论精度很高, 但是实际不动产测绘中精度受到很多因素的影响, 这些因素有:

仪器误差由激光发射器和接收器同轴度、扫描镜机械振动、内部时钟漂移、测距系统固有噪声等造成^[3]。

大气折射、温度变化造成的仪器热胀冷缩、强光引起的传感器饱和、雨雾天气对激光的衰减, 都是不能忽略的变量。尤其在户外长距离测量的时候, 空气湿度的小幅波动都会造成毫米级的差别。

目标特性为被测物体材质 (高反光的玻璃幕墙、吸光的黑色橡胶)、表面粗糙度、入射角等都会影响激光的反射强度, 从而影响测距精度。透明或者半透明的材质会使得激光穿透或者折射, 造成虚假点云。

配准误差指的是在多站扫描的时候, 各个测站的点云要拼接起来 (配准)。公共点 (靶标) 识别不准或者特征匹配算法鲁棒性差, 误差就会像涟漪一样在模型里扩散。

作者简介: 王岳泽 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程测量、不动产测量。

1.3 精度控制的理论基础

现代精度控制系统是依靠严格的数学模型建立起来的。利用卡尔曼滤波等算法,在数据采集过程中可以实时地把IMU和GNSS数据融合起来,抑制随机噪声^[4]。在后处理阶段,采用迭代最近点(ICP)算法以及改进版,利用高精度的靶标或者自然特征,达到多视点云亚毫米级对齐的目的。另外,使用深度学习的去噪算法可以自动找到并去除由于移动车辆、行人等动态物体造成的干扰点云,保证数据的干净。就研究结果来说,在规范操作的条件下,三维激光扫描单点精度可以达到毫米级,在不动产测绘关键尺寸检测中误差小于2厘米,有时还可以达到亚毫米级,比传统测量方法更精确。

2 三维激光扫描技术在不动产测绘精度控制中的具体应用

理论的价值在于实践。三维激光扫描技术由于具有很强的适应性,在不动产测绘的各个细分领域中都表现出比其他技术更高的精度优势。

2.1 房产测绘

房产测绘是不动产登记的关键部分,它同产权面积的计算有着直接联系。现代城市中,异形建筑、商业综合体不断涌现,传统的皮尺加全站仪方法既慢又不能很好地反映弧形墙体、悬挑结构等复杂的细节^[5]。例如:某大型商业综合体项目,占地面积为2.4万平方米,总建筑面积为10.5万平方米,有22层塔楼和3层裙楼,地下结构比较复杂。用传统的方式需要2名测量人员花5天到6天的时间。而使用SLAM三维激光扫描仪后,只需要1名操作员在1.5天内就可以完成全楼层的数据采集。对70条关键边长进行比对,扫描数据和实测数据最大差为0.024米,最小为0.001米,中误差为0.017米,满足了《房产测量规范》(GB/T 17986-2000)的要求。更重要的是,点云数据生成的切片图可以清楚地看出墙体内部构造柱、圈梁的位置,避免了传统测量中由于视线被遮挡而造成漏测的情况,保证房产面积计算的公平。

2.2 地籍测绘

地籍测绘包含界址点的准确测定以及大比例尺地形图的绘制。山区或者丘陵地带,传统的测绘工作既辛苦又难以达到精度要求^[6]。相较于传统模式,三维激光扫描技术无需人员近距离接触待测区域,大幅降低了野外作业的安全风险和体力消耗,单次扫描覆盖范围广,能同步采集地表、地物、界址点的全方位三维数据,避免人工逐点测量的重复性工作,有效压缩

外业作业周期,同时依托高密度点云数据,能完整还原复杂地形地貌,精准锁定每一个界址点的空间坐标,解决传统测绘漏测、点位偏差的难题,适配地籍测绘高精度、高完整性的核心需求。地面三维激光扫描仪依靠其远距离非接触测量的特点,在通视良好、制高点的情况下,可以快速得到数平方公里的地形点云。高分辨率可以清楚地看到田埂、沟渠等微小地形起伏,甚至可以穿透植被间隙得到地面点数据。例如:在某露天矿山测量中,长距离扫描仪不但可以快速完成边坡稳定性分析所用的断面测量,还可以通过两期点云数据的比对,得到毫米级的地表位移,给地质灾害预警提供精准的数据支持。

2.3 地下空间与古建筑

地下停车场、人防工程、深邃的古建筑内部缺少光照,结构复杂,属于传统测量的禁区^[7]。SLAM技术的出现从根本上改变了这样的局面。依靠背包式或者手持式的SLAM扫描仪,不需要GNSS信号,在黑暗中也可以建立高精度的地图。

GeoSLAM扫描仪在某地下矿山采空区测绘时,迅速完成了复杂巷道三维建模,准确地计算出空区体积,并且给采矿设计提供真实的地质依据。在古建筑测绘中,非接触式扫描不会对文物造成损伤,数以亿计的点云数据完整记录了建筑的斗拱、雕花等细微结构,给文物保护和数字化存档创建了“数字孪生”体系。

2.4 农村不动产

农村不动产测绘存在点多面广、交通不便的问题。三维激光扫描技术用车载或者无人机搭载的方式完成宅基地和农房的测绘工作。特别是对于沼气池、牲畜棚等附属设施,扫描技术可以准确地得到它们的罐体形状、井口位置等几何信息,通过高密度点云精准还原房屋结构、院落边界、附属构筑物的三维形态,有效避免人工量测带来的错测、漏测与尺寸偏差,确保不动产权属信息真实、完整、唯一。再结合主体建筑数据,就形成了一个完整的不动产信息体系,很好地保护了农民的财产权益,助力乡村振兴战略的实施。

3 三维激光扫描技术在不动产测绘精度控制中的应用对策

要把三维激光扫描的精度潜力变成现实成果,就必须创建可以覆盖全生命周期的质量控制体系。

3.1 源头控制:设备选型与场址勘察

精度来自选择。根据不同的测绘对象选择相应的设备。长距离地形测绘时用脉冲式长距离扫描仪,室内精细建模时用相位式高分辨率扫描仪。设备要定期

做校准工作，内部参数（测距偏移、镜头畸变等）和外部参数（激光头与 IMU 的相对位置等）都要进行校准，一般半年到一年校准一次，长途运输后立即校准。

外业前要对现场进行详细的踏勘。合理安排扫描站点，相邻站点之间要有足够的重叠度（建议不小于 30%），在重要的位置（转角、边缘）设置高对比度的球形靶标。靶标是多站拼接的“锚点”，靶标的稳定性以及识别精度会直接影响到整个模型几何精度^[8]。

3.2 过程控制：环境适应与数据采集优化

环境是精度最高的一种干扰源。作业时要避开强光直射、雨雾天气和强风环境。如果不能避免，就应当采用改变激光功率、曝光时间等参数的方式进行补偿。高反光表面可以喷涂显影剂来加强漫反射，黑色吸光表面要增大扫描密度。

数据采集时操作人员要遵循闭环路线原则，即扫描轨迹最后回到起点，用闭合差检验消除累积误差。对 SLAM 设备来说，在特征稀少的长走廊或者快速移动的时候扫描，会使得算法丢失定位。还要根据移动的人、车来动态避开幽灵点，防止它成为数据的污染源。

3.3 算法控制：多源融合与智能处理

内业处理属于精度提炼的重要部分。首先用专业软件（Cyclone、CloudWorx 等）做粗差剔除，用统计滤波法去除离群点。其次用基于靶标的配准和基于特征的配准相结合的方法，用 ICP 算法进行精配准。为了提高精度，可以采用多源数据融合技术。例如：把三维激光扫描的高精度几何数据与无人机倾斜摄影的高分辨率纹理数据融合起来，依靠扫描数据修正倾斜摄影的几何畸变，凭借影像数据赋予点云真实的色彩，达成“几何+纹理”的双重高保真。另外，使用深度学习模型（Siamese 网络）做特征匹配，在弱纹理区域（白墙）也能得到比较鲁棒的配准结果，配准误差可以控制在毫米级别。

3.4 制度控制：全流程质量检验

建立三级质量检查制度。一级检查为作业组互检，主要检查数据是否完整、初步配准效果如何；二级检查由项目质检员进行，从抽取的关键尺寸和实地丈量数据出发，计算误差和最大较差；三级审核由技术负责人负责，主要看模型的逻辑是否一致、法律效力如何。对于不动产登记成果，需做野外实测验证。随机选取不少于 10% 的界址点或者房角点进行全站仪复测，保证扫描成果的绝对精度符合国家标准。同时用区块链技术对测绘成果的对标定过程、关键数据进行存证，保证测绘成果的不可篡改性、可追溯性，给不动产登记司法效力赋予技术背书。

4 结论

三维激光扫描技术，继 GPS 之后测绘领域又发生了一次技术革命，正在以不可阻挡之势改变不动产测绘的格局。它不但是工具的更新，更是生产方式和思维方式的变革。本文通过系统研究得出以下结论：第一，三维激光扫描技术由于具有非接触、高速度、高密度数据获取的能力，解决了传统不动产测绘在复杂环境下作业的难题，将作业效率提高 5 倍以上，大大降低了劳动强度和安全风险。第二，精度控制是技术应用的核心。经过严格的误差溯源、科学的设备校准、规范的作业流程、先进的算法融合，可以将扫描精度控制在毫米级到厘米级，满足房产测绘、地籍调查、工程测量等严格的精度要求。从实测数据来看，在满足规范操作的情况下，其精度已经可以和传统的全站仪相当或者更好。第三，应用场景的广度、深度越来越大。从城市的摩天大楼到乡村的田间地头，从地下矿山巷道到空中倾斜摄影，三维激光扫描技术同 5G、AI、大数据等新技术深度融合，创建“地上下、室内外”一体化的实景三维世界。未来，随着激光器成本的降低、算法算力的提升以及多传感器集成技术的成熟，三维激光扫描设备将更加轻便、智能、低成本。它将不再仅仅是数据采集工具，而是成为不动产全生命周期管理的智能感知终端。对于测绘从业者而言，三维激光扫描技术不仅是提升效率的选择，更是适应数字化时代、守护不动产权益底线的必然要求。

参考文献：

- [1] 陈长浩,姚传仪,周祥杰.基于无人机倾斜摄影测量与背包式三维激光扫描的不动产确权登记研究[J].资源导刊,2025(06):46-49.
- [2] 朱善桥,恽逸琪.手持三维激光扫描技术在农村房地一体测绘中应用分析[J].城市勘测,2024(06):163-166.
- [3] 杜艳忠,黄东锋.不动产测绘中地面三维激光扫描技术的应用[J].有色金属设计,2024,51(04):70-74.
- [4] 刘明义.基于机载无人机三维激光扫描技术的不动产测绘研究[J].模具制造,2024,24(09):164-167.
- [5] 林颖达.三维激光扫描技术在不动产权籍调查中的应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(08):189-191.
- [6] 李云云.地面三维激光扫描技术在不动产测绘中的应用研究[J].信息记录材料,2024,25(06):26-28,31.
- [7] 彭官祥.探讨地面三维激光扫描技术在日常不动产测绘中的应用[J].居业,2024(01):64-66.
- [8] 卢欣.农村不动产测绘中地面三维激光扫描技术的应用[J].智能建筑与智慧城市,2023(12):45-47.

装配式建筑机电管线集成施工技术

王立杰

(金隅住宅产业化(唐山)有限公司, 河北 唐山 064100)

摘要 本文以装配式建筑机电管线集成施工技术为核心研究对象, 主要论述其技术体系、技术特点和技术构成。采用 BIM 平台下的管道综合设计技术以及模块化装配类预制构件技术, 其最大的特点就是采用了标准接口技术设计和防误操作技术。同时使用管线分离空间优化方案, 使该项目具有明显的优势, 成效广泛而显著。该技术可以大幅度减少现场湿作业, 降低交叉污染和频次调整, 在保证安全的前提下, 可控的环境下实现全生命阶段动态监测能力达标, 给项目执行提供强有力的技术支持。在项目实施过程中构建质量服务体系, 数据信息在工程中都有所体现。项目运维阶段依靠协同管理网络支撑设备维修工作, 优化运维系统以提高装备维修能力, 实现相似数据的整合, 助力数字孪生模型和实体建筑深度融合, 促进绿色环保建造概念的实现, 为绿色建造服务。

关键词 装配式建筑; 机电管线集成; BIM 技术; 全生命周期管理

中图分类号: TU85; TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.012

0 引言

建筑行业正朝着工业化和智能化相结合的方向发展, 而装配式建筑是其重要发展形式。机电管线系统是建筑的重要组成部分, 其安装质量、效率直接影响建筑的整体性能以及交付时间。装配式建筑机电管线集成技术应运而生, 依靠多专业协同设计、标准化生产、数字化管理来实现机电管线系统与装配式结构的高效衔接, 为解决传统机电安装难题提供了一种有效的方法, 具有重要的研究与应用价值。

1 装配式建筑机电管线集成技术体系

1.1 技术内涵与特征

装配式建筑机电管线集成技术的核心精神是“机电和结构一体化协同规划”。其本质特点是依靠三维数字模型, 综合建筑、结构、机电、装修等各方面的因素, 打破传统先结构后管道的分步施工流程, 用标准化接口定义、模块化单元划分、工厂预制工艺流程把机电管线系统转变为具有工业化属性的产品形式, 大幅度提高现场装配效率, 明显减少资源浪费现象。

1. 标准化: 制定统一管线规格、连接方式、预埋预留标准, 彻底消除现场加工时随意操作的现象。制定管槽、桥架的标准化尺寸, 严格控制穿墙套管直径、安装位置, 保证模块之间高度兼容。

2. 模块化: 将机电管线系统分为独立的功能单元,

如电气箱体单元、给排水管路单元等。工厂完成预制加工后运送到现场进行组装, 大幅度降低高空作业以及交叉施工造成的安全隐患。

1.2 技术架构

利用 BIM 技术创建多专业协同设计平台, 用统一的数据标准实现建筑、结构、机电、装饰工程之间实时碰撞检测和动态调整。自动生成带精确预留预埋信息的三维施工图, 用管线综合优化算法找到最优布设方案, 输出加工详图和模块化构件清单, 用于工厂预制。

用 BIM 技术对机电管线系统进行模块化设计, 管路联接、设备装置和防腐工艺在工厂内完成。施工现场用螺栓紧固或者卡扣固定的方式快速搭建, 施工路径融合了“装配式建造+智能化辅助”的生产技术。利用 BIM 空间定位引导机械臂准确布置管线, 用激光测距仪校正模块垂直度偏差, 提高作业精度和效率^[1]。

2 关键技术方法

2.1 基于 BIM 的管线综合设计技术

利用 BIM 平台将建筑、结构、机电、装饰等多专业模型数据整合起来, 创建三维可视化协同作业环境。设计阶段用碰撞检测算法 (Clash Detective) 来自动找出管线与结构构件、设备之间存在的硬性或柔性碰撞情况, 并生成详细的报告引导模型随时进行修改。使用 BIM 技术进行协同设计后, 管道碰撞率比传统的

作者简介: 王立杰 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 装配式建筑预制构件设计、生产及安装。

二维设计下降了大约 87%，现场返工费减少近 30%。

依靠 BIM 技术提取机电管线穿墙及楼板重要节点信息，制作孔洞位置、大小、标高的预留预埋图。施工时用激光投影仪或者增强现实（AR）设备把虚拟模型实时投射到实体结构表面上，指导作业人员准确定位开孔，避免二次凿破造成的结构损伤。某医院项目采用 BIM 定位系统，预留孔位精度控制在 ± 2 毫米以内，使机电设施与建筑主体高度契合。

2.2 预制模块化施工技术

按照机电系统的功能属性（电气、给排水、暖通）以及施工逻辑属性将管线集成分成不同的模块单元，如配电箱体组件、卫生间供水供排模块等。每个模块的设计都按照少规格多组合的原则来设计，统一接口标准以及连接方式。用自动化流水线设备在工厂车间完成管道切割、焊接等工序，用数控机床保证加工精度。某住宅工程项目的电气管线预制比例为 85%，现场装配效率提高约 60%。

预制构件运到现场之后，采用定位销和螺栓或者卡扣式的机械装配技术拼接，大大减少了焊接环节和传统湿法施工的工作量。对于管线穿过墙体等复杂节点处，设计专用配套件，伸缩套管、快速密封接头等，制定标准作业程序来缩短单体模块的安装时间。例如：某商业综合体项目采用装配式支撑体系之后，管线敷设时间由原来的 15 天缩短为不超过 5 天^[2]。

2.3 标准化接口与防呆设计

为解决传统管线连接中容易出现的错位、漏装等问题，在物理防呆接口设计上，采用梯形槽口、异形螺栓孔等特殊形状，确保模块只能按照唯一正确的方向进行对接。同时，研发 D 型电气导管接口，通过独特的形状设计有效防止不同电压等级的管线发生混接；开发磁吸式快速接头，利用磁力引导作用，实现管线的盲装操作，提升安装便捷性与准确性。

考虑到预制构件在现场安装时可能存在的各种情况，建议在预制构件上预先留出余量接口。这些余量接口不仅能应对现场安装过程中因尺寸偏差、位置调整等带来的连接难题，还能为后续可能出现的管线增设、改造等情况提供便利，方便现场安装时灵活借用。

在接口处构建双重防护体系，一方面运用结构冗余方法，如加大连接件的截面面积，以此提高其抗拉、抗剪能力，增强连接的稳固性；另一方面采取功能冗余策略，预留多条备用管线通道，满足未来维修及可能的管线增设需求。此外，在高层建筑的消防系统中，

可在管道接头处安装压力传感器装置，实时检测密封状况，一旦发现异常便自动发出警报信息，实现异常情况的及时预警与快速处理。

2.4 管线分离与空间优化技术

在实际工程建设中，为提升建筑的使用功能与运维便利性，需积极推行结构主体和管线系统分离、管线层与装饰面层独立的双分离体系。结构构件专注于发挥其承载作用，不再承担管线布置的复杂任务。而各类管线设施则巧妙地安置于预制墙体或者架空层（架空层本质上可视为装修层）内部，采用可拆卸模块化组件进行安装。这种设计方式极大地便利了后期的运维工作，当需要对管线进行检修、更换或升级时，无需大规模破坏建筑结构，只需对相应模块进行操作即可。

以某实际酒店项目为例，该项目在装修过程中采用了双层吊顶和模块化管线舱的创新设计。在双层吊顶结构中，上层吊顶主要用于隐藏和布置各类管线，下层吊顶则作为装饰面层，营造出美观舒适的室内环境。模块化管线舱将不同类型的管线进行集中整合，每个舱体都具备独立的功能和便捷的开启方式。在实际检修工作中，工作人员无需破坏原有的装修界面，只需打开相应的模块化管线舱，就能轻松完成设备的调试、维修等工作，大大缩短了检修时间，降低了对酒店正常运营的影响^[3]。

对于设备机房、管井等受限空间，管线布置的合理性直接关系到设备的运行效率和空间的利用效果。为解决这一问题，建立了一个基于遗传算法的三维管道排布模型。该模型以实现最优的管线布置方案为目标，其目标函数综合考虑了多个关键因素，包括最短路径，以减少管线的长度和材料成本；最少交叉冲突，避免管线之间的相互干扰，降低故障发生的概率；最大检修通道宽度，确保在后期运维过程中有足够的空间进行操作。通过该模型强大的计算能力，能够自动生成三维排布方案，为管线布置提供科学合理的指导。

3 装配式建筑机电管线集成施工技术核心优势分析

3.1 减少现场湿作业，缩短工期

传统的机电安装工程大多采用现场焊接、浇筑和防腐，湿作业占到 60% 左右，受天气、环境影响较大。而装配式技术工厂预制 80% 管线组件，现场组装，现场湿作业比例降至 15% 以下。采用该技术以后，机电安装周期由平常的 120 天缩短为 55 天，整个项目竣工时间提前了近四分之一。该模式大幅度减少了建筑工地扬尘、噪声污染，符合绿色建筑的发展方向。

3.2 降低交叉污染与返工率,提升质量

传统施工时,机电管线和结构装修工程交叉作业,经常发生碰撞返工,平均返工率为8%到12%。而装配式建筑依靠BIM技术实现全生命周期协同设计,在前期用三维建模完成碰撞检测与空间优化之后,整体返工率降到了约2%。例如:某医院项目在深化设计阶段用BIM软件找出并解决了上千项管线冲突,经少量现场调整控制实际返工量只有23处,节约了超过300万元的相关费用。预制构件的生产环节严格按照标准化的工艺流程和质量控制方法进行,有效地改善了管道的连接密封性能以及设备的安装精度,在运维阶段故障率比一般情况低近四成^[4]。

3.3 提升施工安全性与可追溯性

装配式技术用模块化安装降低高空作业和交叉施工的风险。采用预制支架系统之后,现场脚手架搭设量减少70%,高空坠落事故的发生概率下降65%。再加上RFID或者二维码标识技术,实现“一物一码”全生命周期追溯,原材料检验、运维检修等数据都可以扫码查询。例如:某数据中心项目依靠质量追溯系统,在3小时内发现某段电缆接头松动的问题,避免了火灾隐患,责任追溯效率提高了90%。

4 全生命周期管理支撑体系

4.1 质量追溯系统构建

4.1.1 RFID/二维码标识技术应用

给机电管线模块创建唯一的编码标识(RFID标签或者二维码),整合类型、规格、生产批次、安装位置等重要信息。工厂预制阶段用自动化设备完成标识嵌入,施工现场操作人员手持终端扫描并读取标识数据,自动关联BIM平台上的设计参数和施工记录,创建“一物一码”的数字化档案系统。用这项技术来管理2万个模块的全生命周期,故障排查的速度比传统方法要快80%左右。

4.1.2 施工过程数据实时采集与存储

依托物联网传感器与移动终端,实时采集施工关键数据:(1)环境数据,通过温湿度传感器监测焊接、防腐等工艺的环境条件。(2)工艺数据,利用激光测距仪、扭矩扳手等工具记录管线安装精度、连接强度。

(3)人员数据,通过人脸识别系统绑定操作人员与施工任务,落实质量责任追溯。所有的数据都通过5G网络实时上传到云端数据库,和BIM模型建立动态关联,形成从原材料检测、工厂加工、现场安装、竣工验收全过程质量管理的数字化档案。例如:某医院建设项目用过程监控法使机电工程验收合格率从92%大幅提高到98%,说明了过程监控法对保证工程质量的积极作用^[5]。

4.2 运维阶段协同管理

4.2.1 管线检修与空间改造支持

基于BIM运维模型开发智能检修系统:(1)故障定位,利用扫描管线标识或者输入设备编号来获取三维模型中管道位置、阀门分布及相关设施的数据信息,给维修工作提供准确的指导。(2)空间冲突预警,在管线或者设备布置的时候,系统自动分析新布局 and 已有设施的空间关系,并出具碰撞检测报告及改良建议方案,防止盲目施工造成原有系统受损。在前期规划阶段,系统提前发现了新增消防管道和电缆桥架存在潜在冲突的问题,避免了后续返工造成经济损失。

4.2.2 数字化模型与实体建筑映射

建立BIM模型与实体建筑的动态映射机制:(1)数据同步更新,物联网传感器实时采集管线运行数据(流量、温度、压力等),发送到BIM平台,使虚拟模型和物理系统动态同步更新。(2)可视化运维,用增强现实(AR)技术把BIM数据和物理环境深度结合,运维人员通过移动终端可以直观地看到管线分布、设备参数、历史维修记录等重要信息,大大加快了决策速度。例如:某住宅工程试点研究表明,使用AR辅助设施维修之后,一处管道检修耗时比传统方法减少约70%,从原来的2小时缩短到20分钟以内。

5 结束语

装配式建筑机电管线集成施工技术依靠先进的技术体系,利用多种关键技术手段,大大提高了施工效率、质量、安全性。质量追溯系统建立和运维阶段协同管理的完成,拓宽了该技术的应用领域以及深度,使建筑全生命周期数据贯通并高效地管理。随着建筑行业的发展,装配式建筑机电管线集成施工技术将不断完善和普及,为提高建筑工业化水平、推动建筑行业转型升级提供有力支持,助力建筑行业迈向绿色、智能、高效的新时代。

参考文献:

- [1] 彭鹏,张文文.装配式建筑实施管理策略分析[J].建筑技术,2022,53(01):124-127.
- [2] 刘东卫,李静,秦姝.装配式建筑设计与系统集成建造的探究[J].建筑技艺(中英文),2021,27(02):6.
- [3] 樊则森,张玥.装配式建筑的物质性特征及其系统集成设计方法[J].新建筑,2022(04):15-19.
- [4] 郑云德.装配式建筑叠合楼板上机电管线的配合施工[J].四川建筑,2021,41(增刊1):159-164.
- [5] 张海峰.装配式建筑机电工程施工技术研究[J].建材与装饰,2019(15):39-40.

建筑电气设计中低压配电系统可靠性分析

马桥阳

(山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250101)

摘要 低压配电系统是建筑电气设计的重要组成部分, 承担建筑内部电力的传输、分配与控制任务, 运行的可靠性关系到建筑使用的安全性与舒适性, 也影响建筑功能的正常发挥。本文结合实际工程经验, 分析低压配电系统可靠性的内涵与评价指标, 探究影响可靠性的主要因素, 提出优化设计措施, 以期为建筑电气设计中低压配电系统可靠性提升提供实践参考, 进而降低系统故障发生率。

关键词 建筑电气设计; 低压配电系统; 配电线路; 保护装置; 设备选型

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.013

0 引言

低压配电系统是建筑电力供应的末端环节, 连接高压配电系统与建筑内部各类用电设备, 包含配电柜体、线路、保护装置等组成部分, 是保障建筑用电安全的基础。住宅、商业综合体等不同类型建筑的用电负荷数量与性质差异明显, 对低压配电系统可靠性的要求也各不相同, 设计水平的高低直接决定系统运行的稳定性与安全性。因此, 分析建筑电气设计中低压配电系统可靠性具有重要的现实意义。

1 建筑电气设计中低压配电系统可靠性的评价指标

平均无故障工作时间的计量单位为小时, 具体是低压配电系统从正式投入运行开始, 到第一次发生非计划内故障为止的平均时长, 是衡量系统稳定运行能力的重要指标。不同类型建筑的低压配电系统, 用电负荷的复杂程度、运行时间长短各不相同, 对这一指标的要求也有差异。住宅建筑的低压配电系统, 平均无故障工作时间不低于 8 760 小时; 商业综合体与工业厂房的低压配电系统, 负荷更复杂、运行时间更长, 平均无故障工作时间不低于 10 000 小时。指标数值越大, 系统发生故障的频率越低, 运行的可靠性也就越高, 电力传输与分配的稳定性也更强^[1]。

故障平均修复时间以小时为单位, 反映低压配电系统发生故障后, 工作人员从发现故障、排查原因到修复系统、恢复正常运行平均耗时。与平均无故障工作时间不同, 故障平均修复时间数值越小, 故障排查与修复的效率越高, 故障对建筑用电的影响也越小, 能减少停电或电力不稳定带来的损失。普通建筑的低压配电系统, 故障平均修复时间应控制在 2 小时以内;

工业厂房对供电连续性要求高, 其低压配电系统的故障平均修复时间应控制在 1 小时以内, 保障生产活动连续进行。

供电可靠率以百分比呈现, 计算方式是规定时间内系统实际供电时间与计划供电时间的比值, 衡量低压配电系统供电的连续性, 指标数值越高, 系统供电中断的次数越少、时间越短, 可靠性越强, 能更好地满足建筑内部各类用电设备的运行需求。住宅建筑的供电可靠率应不低于 99.9%, 商业综合体与工业厂房用电负荷大、对供电稳定性要求更高, 供电可靠率不低于 99.95%, 避免频繁停电影响各类用电活动。

故障率是单位时间内低压配电系统发生故障的次数, 计量单位为次/年, 反映系统故障发生的频繁程度, 与系统可靠性呈反向关联。数值越低, 系统单位时间内故障次数越少, 运行状态越稳定, 可靠性越高。普通建筑的低压配电系统, 故障率应控制在 2 次/年以内, 工业厂房的低压配电系统负荷波动大、设备运行强度高, 故障率可适当放宽, 但不能超过 3 次/年, 避免影响生产、造成经济损失。

2 建筑电气设计中影响低压配电系统可靠性的主要因素

2.1 配电系统结构设计的合理性

配电系统结构设计的合理与否, 是影响低压配电系统可靠性的首要因素, 决定系统电力传输与分配的效率, 也决定系统运行的稳定性, 结构设计的任何疏漏, 都可能导致系统故障, 影响建筑用电供应。在实际设计中, 部分设计人员对建筑用电负荷的计算不够精准, 未结合建筑使用功能、负荷分布特点, 导致配电系统

作者简介: 马桥阳 (1993-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

结构存在不合理之处。部分建筑采用四级及以上配电级数,增加线路损耗与电压降,提高故障概率,某一级配电故障会影响整个系统运行;部分设计人员未结合实际选择配电方式,导致区域负荷过载与负荷不足并存,破坏系统运行稳定性,降低可靠性^[2]。

2.2 配电设备选型的规范性

配电设备是低压配电系统的重要组成部分,包括断路器、接触器、熔断器、变压器、配电柜等,设备的质量、规格与性能,关系到系统运行的可靠性,选型的规范性是系统稳定运行的关键。部分设计人员为控制成本,选用质量不合格、规格与系统需求不匹配的设备,甚至选用淘汰型号,导致系统频繁出现设备故障。部分设计人员选型时未考虑配电回路的负荷电流、短路电流,断路器额定电流、分断能力与回路参数不匹配,出现误动作或拒动;变压器容量过小会长期过载运行,加速绝缘老化、缩短使用寿命;接触器选型不当会出现触头粘连、线圈烧毁,影响回路通断;质量不合格的设备易出现零部件损坏、接触不良,增加故障发生率。

2.3 线路布置的科学性

低压配电线路是电力传输的载体,线路布置的科学性与合理性直接影响电力传输的效率与安全性,也影响系统的可靠性。线路布置的敷设方式、截面确定、固定防护及接头处理,任何环节不规范,都可能引发线路故障。一些设计人员未考虑建筑结构特点、环境条件,线路布置不合理。潮湿、多粉尘环境采用明敷方式,会导致线路绝缘层受潮损坏,引发短路、漏电;高温环境线路敷设过密,散热不良、温度升高,加速绝缘老化、缩短寿命。线路截面过小会增加电阻与损耗,电压降过大无法满足设备额定电压,易发热烧毁;截面过大则增加成本、加大敷设难度,浪费电力资源。

2.4 保护装置配置的合理性

低压配电系统的保护装置有短路保护、过载保护、漏电保护、过电压保护等,作用是系统故障时快速切断故障回路,避免故障扩大,保护设备安全、减少损失,配置的合理与否决定保护效果,影响系统可靠性。部分设计人员对保护装置重视不足,配置存在不合理之处。一些设计人员为控制成本,未按规范配置漏电保护、过电压保护等必要装置,故障时无法及时切断回路,易引发电气火灾、设备损坏。保护装置参数设置不当,短路保护参数过大无法及时跳闸、过小易误动作;过载保护参数不合理,无法及时发现过载故障,线路长期过载易发热烧毁。

3 建筑电气设计中低压配电系统可靠性的优化设计路径

3.1 优化配电系统结构设计

配电系统结构的优化设计,是提升低压配电系统可靠性的关键手段。设计人员应精准把握建筑使用功能与负荷分布的实际特点,把用电负荷的精准计算落到实处,科学确定配电级数与配电方式,从结构设计的源头减少故障隐患,保障系统长期稳定运行。用电负荷的计算是结构优化的基础前提,设计人员可先明确建筑的具体类型与实际使用功能,划分出不同的功能区域,逐一统计建筑内部各类用电设备的数量与额定功率,精准核算出建筑总用电负荷与各区域的分项用电负荷,同时充分考虑负荷的同时系数与波动系数,避免因计算偏差造成结构设计的不合理。配电级数应严格控制在三级以内,一级主配电柜的主要作用是将高压电降压后进行分配,二级分配电柜承担着电力中转与分流的任务,三级终端配电柜直接为各类用电设备供电,这样的分级设置能有效减少故障的传导。住宅建筑的负荷分布相对均匀,可采用树干式与放射式相结合的配电方式,商业综合体与工业厂房的负荷集中且波动大,采用放射式配电,为各功能区域与重要用电设备划分独立回路,避免负荷过载情况的发生^[3]。对供电连续性要求高的建筑,可以设置柴油发电机作为备用电源,电源容量需结合重要用电负荷总量确定,切换时间控制在10~30秒内,最大限度减少主电源故障带来的损失。

3.2 规范配电设备选型

规范配电设备选型,确保设备的质量、规格与性能符合系统运行的实际需求,是提升低压配电系统可靠性的重要环节。断路器的选型需结合回路的负荷电流与短路电流,精确定额电流与分断能力,短路电流较大的动力回路,选用分断能力较强的塑壳断路器,负荷波动较大的回路,选用具备过载长延时、短路瞬时保护功能的断路器,防止出现误动作或拒动现象。接触器的选型需结合负荷类型与额定电流,额定电流需大于负荷电流的1.2倍,以应对运行过程中可能出现的瞬时过载,同时根据感性、阻性负荷的不同,选择适配的接触器型号,避免触头粘连、线圈烧毁等问题的发生。变压器的选型需结合建筑总用电负荷,预留10%~15%的负荷余量,防止变压器长期处于过载运行状态,优先选用节能高效的干式变压器,这类变压器的散热效果好,适配建筑内部的运行环境,且后期维护便捷。配电柜的选型应结合系统结构、设备

数量与环境条件,潮湿多粉尘的环境选用防护等级不低于 IP54 的产品,干燥清洁的环境可适当降低防护等级,配电柜的尺寸要适配内部设备的安装与后期维护。在选型过程中,优先选用符合国家标准的知名品牌,仔细查看设备的质量检验报告与认证证书,确保设备的兼容性与可维护性。

3.3 科学布置配电线路

科学布置配电线路,减少线路故障的发生,保障电力传输的效率与安全性,是提升低压配电系统可靠性的重要举措。设计人员应结合建筑的结构特点、环境条件与负荷分布情况,合理选择线路敷设方式、精准确定线路截面,规范处理线路接头,做好线路的固定与防护工作。干燥清洁的区域,可采用明敷方式敷设线路,这种方式便于后期的维护与检修;潮湿、多粉尘、高温、腐蚀性较强的环境,需采用暗敷方式,将线路敷设在墙体、楼板或电缆沟内,同时选用防水、防尘、耐高温、耐腐蚀的绝缘导线,防止线路绝缘层损坏引发故障。在线路敷设过程中,需避免线路交叉与重叠,敷设间距需符合相关规范要求,保障线路散热良好与传输稳定,避开建筑的结构受力部位与易燃易爆物品,降低安全隐患^[4]。

线路截面应根据回路的负荷电流与传输距离精准计算,优先选用导电性能好、损耗小的铜芯导线,负荷小、传输距离短的回路可选用铝芯导线;传输距离长、负荷大的回路,需适当增大线路截面,减少线路损耗与电压降,兼顾经济性与实用性。线路接头需采用压接、焊接等可靠的连接方式,连接后做好绝缘处理,接头位置尽量设置在配电柜、接线盒等便于维护的地方,避开恶劣环境。线路需用支架、卡子固定牢固,振动较大的区域需加强固定,线路穿越墙体、楼板时,需设置保护套管,防止线路松动、磨损与损坏。在控制逻辑中,系统应当构建动态窗口切换器与负荷响应均衡器,实现负载切换频率的统计调节与同步冲击的控制性削弱。在图纸设计与控制说明文档中最好明确调频区间划分规则、负载切换延迟容忍度及负荷聚集系数的时间趋势图。同时,路径调频控制信号应设定优先转发机制,防止关键负载在调频过程中的响应滞后影响系统主功能的实时性。

3.4 合理配置保护装置

合理配置保护装置,确保其充分发挥保护作用,在系统发生故障时快速切断故障回路、避免故障扩大,是提升低压配电系统可靠性的重要保障。设计人员应严格按照规范要求,结合系统运行特点与负荷参数,配置完整的短路保护、过载保护、漏电保护、过电压

保护装置。短路保护装置可选用断路器或熔断器,安装在配电回路的首端,其分断能力需大于回路的最大短路电流,确保能快速切断短路故障;过载保护装置可选用热继电器或断路器,与用电设备、线路配合使用,动作电流需略大于回路的额定负荷电流,根据过载程度调整动作时间,及时切断过载故障回路^[5]。

漏电保护装置可选用漏电断路器或漏电保护器,重点安装在住宅、潮湿环境等易发生漏电的区域,漏电动作电流控制在 30 mA 以内,潮湿环境与手持电动工具使用场景,漏电动作电流需控制在 15 mA 以内,保障人身安全;过电压保护装置可选用避雷器或浪涌保护器,安装在配电系统的输入端,抵御雷电与过电压对系统的冲击,保护设备与线路不受损坏。保护装置的参数应精准设置并反复校验,选用性能稳定、质量合格的产品,定期进行校验与维护,每年至少校验一次,及时处理触点氧化、参数漂移等故障,根据配电系统的运行情况与负荷波动变化,及时调整保护装置的参数,确保其能精准响应各类故障,保障系统稳定运行。

4 结束语

建筑电气设计中低压配电系统的可靠性直接关系到建筑用电的安全与稳定,也深刻影响建筑各项功能的正常发挥,其设计质量的高低决定建筑投入使用后用电的安全性与连续性,更是保障建筑内人员生命与财产安全的重要基础。设计人员开展电气设计工作时,需重视低压配电系统的可靠性设计,结合建筑的具体使用功能与用电负荷的实际特点,全面考虑各类影响系统可靠性的因素,严格按照国家相关设计规范与行业标准,优化设计方案、规范设计流程,确保设计质量。同时,应加强系统运行后的维护与管理,定期检查保养设备与线路,及时处理运行中的问题,延长设备与线路的使用寿命,进一步提升系统的可靠性,保障建筑用电安全与建筑功能正常发挥。

参考文献:

- [1] 罗柳萍.试析高层建筑电气设计中低压供电系统可靠性[J].中国住宅设施,2020(10):27-28.
- [2] 张霏年.高层建筑电气工程中低压供电系统可靠性设计研究[J].房地产世界,2024(03):42-44.
- [3] 毛澍,闫志彬,闫涛,等.基于改进最小路的低压配电系统可靠性评估[J].宁夏电力,2021(03):6-11,24.
- [4] 雷小军.低压电气配电系统安全运行及维护策略研究[J].产品可靠性报告,2025(04):116-117.
- [5] 崔旻.低压配电系统升级改造[J].中国氯碱,2025(02):1-3,8.

一种空中倒挂三角结构施工方法分析

朱晨迪

(上海建工四建集团有限公司, 上海 201600)

摘要 常规混凝土结构施工在原位进行钢筋绑扎后再进行模板排架支护并浇筑混凝土。然而,对于空中连廊倒挂的三角混凝土结构,其存在空中缺乏作业面、模板排架支护搭设困难等问题。本文针对这些施工难题,结合东航金叶苑4#地块项目实际施工过程中的方案策划和选择,探讨从阶梯式下挂平台、结构体系、型钢自承载模板等方面化解问题,提出一种经济、安全、高效实现类似倒挂结构施工的方案,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 斜撑;下挂平台;型钢自承载模板;劲性结构

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.014

0 引言

在建筑工程向高空、异形化发展的趋势下,空中连廊倒挂三角结构因建筑造型与空间需求应运而生,却因作业面缺失、模板排架搭设困难,成为混凝土结构施工的技术难点。常规施工方法或存在节点拼接质量隐患、混凝土开裂风险,或受限于高空作业条件,难以兼顾安全性与经济性。本文以东航金叶苑4#地块项目为工程依托,针对空中连廊倒挂三角劲性混凝土斜撑结构的施工难题,探讨多种施工方案的适用性,通过结构优化与施工工艺创新,提出型钢自承载模板结合地面预制、空中浇筑的施工方法,为同类空中倒挂结构施工提供技术参考与实践思路。

1 工程概况

东航金叶苑4#地块项目钢结构连廊共计五层,长约29 m、宽约17 m,与1#A楼一侧剪力墙结构连接于25F-RF、与1#-B楼一侧钢框架结构连接于22F-RF。由于建筑内部视觉效果需求,连廊为钢框架结构体系,立面无桁架支撑。其下方设置斜支撑增加结构刚度。

斜支撑为倒挂三角结构,上端支撑于连廊底部,下端与1#-A楼连接于20F~25F。由于刚度和强度需求,斜支撑的原结构形式为三榀倒三角构件通过次梁连接的混凝土+劲性结构^[1]。

2 原结构施工的方法探讨

每榀斜撑除了水平和斜向两根劲性构件,其余结构为钢筋混凝土构件。因此常规的施工路线有预制提升拼装、地面整体浇筑提升施工和悬挑平台原位施工

等方式,除此之外,本文还探讨了一种阶梯式下挂平台原位施工方法。

2.1 预制提升拼装施工

预制提升拼装即将斜撑结构拆分成单独构件,在地面或工厂施工完成后起吊组装。这种方式有以下两个施工难点:

一是构件拼装的湿接头非常复杂。斜撑为倒三角形式,斜撑自身构件之间、斜撑与主楼之间有大量斜交连接,因此拼接节点可行性很差,质量难以保证。

二是预制拼装缺乏施工面。由于斜撑底部悬空,拼接节点处钢筋和混凝土浇筑施工没有作业面。

2.2 地面整体浇筑提升施工

与前述的原位施工不同,地面整体拼装将连廊倒挂三角结构与连廊自身一起在地面全部完成,即在地面完成混凝土结构的支护浇筑,将混凝土构件随钢结构一同提升。但是此方案存在以下两个问题:

1. 混凝土开裂问题。在受拉时,混凝土的极限应变0.001仅为钢材的弹性应变0.001的十分之一,提升过程中钢结构可以抵抗较大的变形,但是混凝土结构和可能开裂。

2. 混凝土节点连接。连廊提升就位后需要进行节点合龙连接,而混凝土构件的节点合龙对精度要求很高,此时大量混凝土构件节点的合龙连接面临比预制提升施工更加困难的挑战。

2.3 悬挑平台原位施工

1. 平台设计。悬挑平台施工是在1#-A楼一侧设置悬挑平台提供施工作业面。在空中搭设模板排架进行

作者简介:朱晨迪(1991-),男,本科,助理工程师,研究方向:建筑施工。

原位施工。采用工字钢作为主次梁形成平台底部框架，其中主梁间距以 1.5 m 为主、次梁间距以 0.9 m 为主。工字钢框架上铺设 2 mm 钢板形成平面。在工字钢主梁远端设置型钢斜杆向上拉结至主楼结构。

2. 可行性分析。(1) 荷载统计：其中施工活荷载按 2.5 kN/m² 均布于整个施工平台。恒荷载按整个楼层梁板自重均布于施工平台简化计算，根据表 1 计算出恒荷载为 5.68 kN/m²。(2) 荷载组合：1.3× 恒荷载 + 1.5× 活荷载（见表 1）。

表 1 楼层构件信息表

楼层面积 (m ²)	129.36		
梁截面规格 (mm)	400×600	400×800	300×600
总长度 (m)	19.8	12.67	37.886
混凝土容重取值 (kN/m ³)	25.1		

根据建模验算结果，主次梁分别需要采用 25a、18 号工字钢，上拉件需要用到 14 号工字钢才能保证平台承载力满足。并且工字钢主梁最大长度达到了 13.8 m，上拉构件最大达到 15.6 m，总用钢量为 15.3 t。并且由于没有考虑模板排架自重和恒荷载的局部集中分布，根据实际荷载细化计算后，悬挑平台的构件需求截面很可能会更大。

2.4 阶梯式下挂平台原位施工方案

1. 下挂平台概述。根据 2.3 节所述，采用结构端型钢悬挑和远端型钢上拉的由于平台支座数量较少导致悬挑平台大且重，不便施工。

针对悬挑平台存在的两个问题，考虑可以借用已经提升施工完成的结构，将平台按施工次序分块并悬挂连接于连廊 25F 钢梁底部，减少平台大小的同时增加支座。如图 1 所示，由于下挂结构为倒三角形，由下向上层层施工的情况下，可以利用已经施工完成的部分作为下一层的施工面，仅需要通过平台提供未能覆盖的待施工区域的施工面^[2]。

2. 下挂平台原位施工流程。以下借助东航金叶苑 4# 地块项目连廊劲性斜撑来表述下挂平台原位施工流程。

(1) 通过悬挑平台施工 21F 结构；(2) 提升 GPT1 至 21F 已完成结构进行侧向拉结，并完成竖向拉结→提升 GPT2 至同一高度并与 GPT1 拉结，用作防护和操作平台→两个平台固定与拉结完成后，在 21F 已完成结构以及 GPT1 上搭设排架模板进行 22F 结构施工；(3) 22F 结构施工完成→断开 GPT1 与 GPT2 之间的拉结→提升 GPT2 至 22F 与已完成结构做侧向拉结，并完成竖向拉

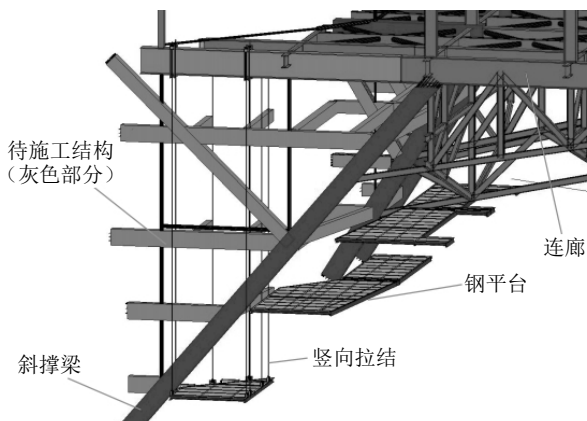


图 1 下挂平台三维模型

结→提升 GPT3 至同一高度并于 GPT2 拉结，用作防护和操作平台→两个平台固定与拉结完成后，在 22F 已完成结构以及 GPT2 上搭设排架模板进行 23F 结构施工；

(4) 23F 结构施工完成→断开 GPT2 与 GPT3 之间的拉结→提升 GPT3 至 23F 已完成结构做侧向拉结，并完成竖向拉结→平台固定与拉结完成后，在 23F 已完成结构以及 GPT3 上搭设排架模板进行 24F 结构施工^[3]。

3. 下挂平台施工难点。平台拟通过精轧螺纹钢与已提升就位连廊 25F 钢梁连接，平台自身受力已通过验算，因此还需要保证平台竖向连接的安全。根据平台受力计算结果，得到支座反力平均约为 100 kN（设计值），可以采用 φ28 精轧螺纹钢作为平台竖向吊杆。吊杆应力 $\sigma = F/A = 100 \text{ kN}/615 \text{ mm}^2 = 162.5 \text{ MPa} < f_y = 700 \text{ MPa}$ ，可以满足设计，但是如何保证精轧螺纹钢与平台和连廊钢梁有效连接是一难点。

另外，原位施工存在大量高空作业，高空坠落和物体打击风险较大。

3 结构优化与型钢自承载模板施工

3.1 结构优化—减少混凝土构件

根据前文讨论，倒挂结构中混凝土构件的存在给施工带来了种种困难，但是斜撑强度与刚度的需求使得连廊斜撑无法简化为纯钢构件。因此考虑将连廊主要提供强度和刚度构件加大，并将其他构件改为纯钢构件。如表 2、图 2 所示，劲性构件中横梁称为劲性梁，大斜向构件称为劲性柱，另一个斜向构件称为反拉梁。

3.2 型钢自承载模板的设计与施工思路

型钢自承载模板设计与施工思路：经过结构优化之后，连廊倒挂三角结构中含混凝土部分均为劲性构件。通过以劲性结构型钢钢骨来承担模板受力，便可以免拆外部排架搭设，从而解决空中作业面的施工难题。

表2 斜撑劲性构件表

构件	原截面(内插型钢)	优化后(内插型钢)
劲性梁	600×1600 (HH1 300×400×25×32)	700×1 600/700×1 800 (H1 300×500×30×40/H1 500×500×30×50)
劲性柱	600×900 (H600×400×25×36)	600×1 100 (H600×400×25×36)
反拉梁	600×600 (\)	600×800 (H400×40×25×30)
其他梁	现浇混凝土梁	钢梁
楼板	现浇板	钢筋桁架楼承板

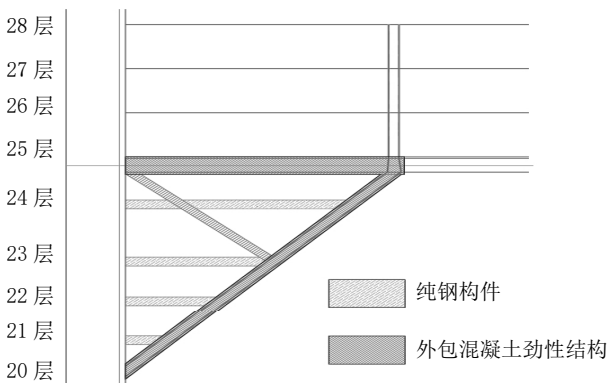


图2 斜撑优化后构件示意图

以钢板作为构件面模,方钢管作为围檩网格,通过拉结螺杆将围檩拉结于型钢钢骨上,从而将混凝土压力按照钢面板、围檩方管、拉结螺杆的次序传递至型钢钢骨,以此实现劲性构件自承载^[4]。通过该模板设计与结构优化,可以在地面完成全部完成钢连廊和倒挂钢结构施工,其中包括劲性构件的钢骨,然后在地面完成钢筋绑扎和钢模支护,使劲性构件钢筋模板随连廊一起整体提升。

3.3 采用型钢自承载模板的斜撑施工方法

1. 施工流程。采用型钢自承载模板后,连廊倒挂结构可以在地面完成大部分钢筋模板施工,待连廊提升连接完成后进行合龙节点处钢筋、模板连接,最后在空中通过钢模浇筑口完成混凝土结构施工。

2. 型钢自承载施工部分。连廊倒挂结构钢结构完成后,首先进行劲性构件拉结螺杆焊接固定,完成后进行钢筋绑扎和钢模安装。

连廊提升就位以及钢结构合龙完成后,进行劲性构件合龙连接处钢筋模板补缺,最后在钢模浇筑口处进行混凝土浇筑^[5]。

3. 型钢自承载模板施工优势。型钢自承载模板免除了倒挂结构含混凝土部分构件外部排架支护,并尽可能地将施工内容转移至连廊地面拼装阶段,免除了大量的空中作业工作,降低施工难度和风险。同时与

预制构件合龙连接不同,混凝土浇筑施工在连廊提升连接后再进行施工,降低了劲性节点连接难度的同时提高了劲性构件混凝土的整体性。

4 结束语

本文通过对含有钢筋混凝土构件的连廊倒挂三角结构预制提升拼装、地面整体浇筑提升和悬挑平台原位施工方法的讨论以及阶梯式下挂平台原位施工方法的探讨(其中阶梯式下挂平台的施工方法若是能够解决精轧螺纹钢与平台、结构之间有效连接的问题,应作为一种可行的方案),在倒挂结构强度、刚度高需求的前提下,得到将混凝土构件改为纯钢构件并保留劲性构件的结构优化思路,并通过针对空中倒挂劲性构件设计型钢自承载免拆模板的设计,使劲性构件的“钢筋模板工程”和“混凝土工程”工序在空间上实现分离,最终得出钢构拼装、钢筋模板工程地面施工,混凝土工程空中施工的创新性施工方法。该方法从减少空中作业量,降低连廊带混凝土结构的节点合龙难度以及提高施工效率等方面形成了一种针对空中倒挂结构可行、可靠的方案。

参考文献:

- [1] 陆开锋. 高空大跨度劲性混凝土连廊综合施工技术[J]. 江苏建筑, 2020(05):69-71,85.
- [2] 李文盛,张继承,何磊,等. 高空超限型钢混凝土梁本体悬挂平台支模技术研究[J]. 结构工程师, 2022,38(04):169-175.
- [3] 陈康,李成飞,杨金勇,等. 型钢混凝土梁模板支设的优化设计[J]. 建筑技术, 2024,55(18):2270-2273.
- [4] 牛牧野. 大跨度高空混凝土连廊施工技术应用[J]. 建筑机械, 2025(09):222-224.
- [5] 姜焱,朱效民,韩永明,等. 大跨度悬挑混凝土结构高空支模平台施工技术[J]. 建筑技术, 2023,54(18):2252-2254.

水利施工中软土地基施工技术探讨

孙所勇

(惠民县恒安水利工程有限公司, 山东 滨州 251700)

摘要 在水利工程中, 软土地基处理是关键技术难题, 这一难题会影响工程质量和长期安全运行。并且, 软土天然含水率相对比较高, 压缩性非常大, 抗剪强度相对较低。在施工荷载的作用之下, 软土地基很容易引发一些问题, 如地基沉降、边坡失稳以及结构开裂等情况, 这些问题会直接对水利设施的建设效率和服役寿命形成制约。本文深入探究一些常用技术的施工要点, 包含排水固结法、深层搅拌法、换填垫层法、高压喷射注浆法以及振冲密实法等, 以期对水利工程软基处理方案的优化选择提供有益参考, 进而推动水利建设技术可持续发展。

关键词 水利施工; 软土地基; 排水固结法; 置换法; 加筋法

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.015

0 引言

水利工程作为国家基础建设领域的重要组成部分, 在水资源调度管理、防洪减灾以及农业灌溉等方面发挥着关键作用。但是在实际施工过程中, 软土地基处理始终是需要重点解决的难题。这类地基具有含水量偏高、承载力较弱、容易压缩变形等特点, 这些特性容易导致地基下陷、边坡滑动甚至建筑物开裂等问题, 直接影响工程的整体质量与安全性能, 因此深入探索水利施工中软土地基施工技术至关重要。

1 软土地基概述

软土地基简单来说就是由那些强度不够、容易压缩的软弱土层形成的基础地层。具体分类的话, 常见类型主要包括像淤泥、淤泥质土这些典型类型, 还有像泥炭、泥炭质土这种有机质含量较高的特殊土层^[1]。例如: 淤泥一般在流速较缓的水体环境中经长期沉积形成, 其含水量极高, 孔隙比通常超过 1.5; 淤泥质土则属于黏性土向淤泥过渡的中间类型, 孔隙比介于 1.0 至 1.5 之间。并且, 软土地基在我国分布广泛, 尤其在东南沿海、长江中下游及河口三角洲地区, 这类土层厚度大、埋藏浅, 常常成为水利工程建设中必须面对的主要工程地质问题。从成因上看, 软土多形成于滨海、湖沼、河谷等静水或缓慢流水环境中的沉积, 有机质含量较高, 土质多呈软塑至流塑状态^[2]。在水利工程中, 软土地基的存在会对施工期间基坑的开挖以及边坡的稳定产生影响, 而且它还直接和堤防、水

闸等永久建筑物的沉降控制以及防渗安全有关系, 对软土地基进行系统的分析以及合理的处理, 就显得特别关键。

2 水利施工中常用的软土地基施工技术

2.1 排水固结法

排水固结法的关键之处在于先对软土预先施加一定的荷载, 并且把竖向排水体系结合起来使用, 这样做是为了人为地加快软土孔隙水排出的速度, 让土体在固结的过程当中, 慢慢地变得更加压密。借助这样的方式, 既能够有效地提升地基的承载力, 也能提高地基的抗剪强度, 还可以对工程结束之后的沉降情况进行控制。

在具体实施过程中, 排水固结法的施工通常遵循系统化的作业流程。首先, 在清整后的软土地基表面铺设一层厚度约为 0.5 米至 1.0 米的砂垫层, 作为水平排水通道, 并确保其具有良好的透水性。随后, 根据设计图纸采用打设机械将塑料排水板或袋装砂井有序地打入软土层预定深度, 这些竖向排水体通常按等边三角形或正方形布置, 间距经过计算确定, 以缩短排水路径。在排水系统施工完毕后, 开始进行分级堆载预压^[3]。堆载材料一般采用土石料或水, 加载速率需严格依据地基土的强度增长情况通过监测数据控制, 防止发生剪切破坏。施工的过程中, 在地基的表面以及不同的深度位置, 需要埋设沉降板、孔隙水压力计等用于监测的仪器设备, 从而能够实时地对沉降的速

作者简介: 孙所勇 (1997-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程。

率以及孔压的消散程度展开观测。只有当连续多天的沉降量都趋向于稳定，并且固结度也已经达到了设计所提出的要求之后，才可以逐步地将堆载卸除掉。

2.2 置换法

置换法应用在水利软基处理过程中，核心操作逻辑围绕以优替劣展开，工程人员取出施工区域原位存在的软弱土层，换填拥有高强度与高稳定性的材料，能从根源调整地基受力状态，优化地基变形性能。在诸多置换工艺中，开挖换填法因其工艺成熟、质量控制直观，成为应对浅层软土最常用的技术手段^[4]。面对表层分布着淤泥或流塑状泥炭且需处理深度通常在3米以内的工况时，采用此法往往能在成本控制与工程效果之间取得理想的平衡。其施工的精髓在于“挖得干净”与“填得密实”：首先要将设计范围内的软土彻底清除，直至露出相对坚实的下卧层，槽底不得留有积水或扰动；随后根据水文条件和荷载需求遴选填料，比如在排水条件较好的区域中，级配良好的砂砾石拥有棱角咬合结构，同时具备较强透水性，可以在短时间内形成稳定承载结构，对防渗有要求的施工部位，施工方多采用掺入定量石灰的灰土，依靠灰土内部缓慢发生的胶凝反应，让地基板结成相对封闭的整体^[5]。

当软土层较厚或荷载极大时，单纯的浅层换填便难以奏效，此时强夯置换法则展现出其独特优势。该技术并非简单地将软土挖除，而是利用高能量夯锤反复起落产生的巨大冲击和振动，将碎石、矿渣等粗颗粒骨料强行“砸入”软土中，形成一个个与周围土体共同作用的碎石桩体。这一过程既是物理置换，也是深层挤密，高夯击能使桩体向四周排开软土并与之紧密嵌固，形成竖向增强体。这些坚固的碎石桩不仅像“销钉”一样将上部荷载传递至深层持力层，其自身构成的排水通道还能加速桩间土固结，最终形成承载力大幅提升的复合地基^[6]。在水利堤防或水闸地基处理中，两种置换方法适用场景不同，施工人员会结合现场地质条件，匹配工程结构特点，选择对应方法，也可将两种方法组合使用，共同保障水利工程基础长期稳固。

2.3 加筋法

加筋法在水利软基处理中遵循的是一种“复合增强”的力学逻辑，通过将高抗拉强度的筋材植入土体，借助筋土界面的摩擦与咬合作用，弥补土体抗剪强度不足的天然缺陷，从而构建出能协同受力的复合地基^[7]。在面对淤泥质土或高含水量的流塑状软土时，这种方法往往能有效约束土体的侧向滑移与隆起变形，其效

果类似于在素混凝土中配置钢筋，虽不改变土的基本性质，却能显著提升整体的结构稳定性。

工程实践中应用最广的当属土工合成材料加筋，其中土工格栅凭借其网格状结构能与土颗粒形成强有力的嵌锁效应，尤其适合应用于受力方向明确的堤坝底部或挡土墙墙背；而土工织物除了具备一定的加筋功能外，其良好的过滤与排水特性，还能在加固的同时加速软土中超静孔隙水压力的消散，对控制工后沉降大有裨益。

在具体施工时，多数施工选择水平铺设或分层铺设，首层直接铺设完成清表作业的软基面之上，后续各层依照设计间距，分层埋入填筑体内部，施工过程中的核心控制内容为搭接长度。通常纵向搭接不小于30厘米、横向搭接不小于50厘米，并在其上及时覆盖填料，避免暴晒老化或被施工机械直接碾压损伤^[8]。无论是用于提高防洪堤边坡的抗滑稳定性，还是增强水闸底板下软土的抗冲切能力，加筋法的核心，是借助筋材与土体共同受力，改变松散土体原有的力学特性，让土体呈现类似柔性板梁的受力状态，在水利工程长时间运行过程中，完成变形协调，分散外部荷载。

3 提升软土地基处理效果的施工策略

3.1 深化地质勘察与工艺方案优化

软土地基处理最终实现的效果，取决于对地下实际情况的掌握，地质勘察不应当仅作为施工开始前的一道程序性工作，需要贯穿方案设计的整个过程，成为技术判断的依据。以排水固结法为例，如果勘察时只摸清了软土的大致厚度，却忽略了中间可能存在的薄砂夹层或透镜体，那么设计出来的排水井间距就可能偏大或偏小，直接影响固结效率^[9]。在实际操作中，遇到淤泥质土深厚且分布不均的工况，可以在常规钻探基础上加密静力触探孔，借助连续贯入的阻力曲线精准划分软土的力学分层，把那些容易被人忽视的粉土薄层也识别出来，这些薄层恰恰可能成为水平排水的天然通道。对于计划采用高压喷射注浆法的区段，有必要专门做抽水试验查明地下水的流速和流向，因为当地下水流速过快时，水泥浆液还没凝固就被冲走了，这时候就需要调整注浆压力或者掺入适量的速凝剂。同样，在考虑振冲密实法处理可液化砂基时，绘制颗粒级配曲线环节必须精确到特征粒径，以此判断振动挤密作业的实施难度，细颗粒含量超出限定范围时，单独用振冲工艺达不到工程要求，可以换用置换率更高的碎石桩方案。

3.2 强化关键工序的质量精细化管控

软土地基处理是典型的隐蔽工程，它的质量形成于每一道工序之中，这些工序看似普通，最终效果需要承受水工建筑物长期荷载的检验，管控工序质量的精细化方向，本质是把设计图纸标注的技术参数，转换为施工现场能够操作，能够检查，能够追溯的行为准则，让工程建设的每一个环节都有规则可依，有专人负责。

在换填材料铺筑现场，常常出现填料级配失控的情况，有的施工队为了赶进度，直接从料场拉来混配料就卸入基坑，结果大粒径石块集中在一侧，细料填充不足，压实后空隙率偏高。遇到这种情况，就应该在填料进场时安排专人目测初筛，定期取样做颗粒分析，一旦发现超粒径颗粒过多或含泥量超标，立即要求退场。分层碾压时，松铺厚度必须用钢钎插入法随时抽检，不能轻信现场的目测估算，尤其是靠近边坡或结构物边缘的部位，大型压路机难以到位，必须辅以小型振动夯或平板夯逐层夯实，直到边缘压实度达到设计要求才能继续向上填筑。加筋材料铺设作业中，土工格栅或土工织物长时间在阳光下暴露，会出现老化变脆问题，铺筑完成后，当天必须完成上层填料覆盖，作业过程中要检查搭接位置绑扎是否牢固，确认材料是否因为填料推移出现褶皱或悬空。

3.3 完善全过程动态监测与信息反馈机制

软土地基处理存在复杂性，施工过程无法完全依照既定图纸不变更推进，施工阶段进行的动态监测，可及时掌握地基的真实变化，辅助工程推进调整，监测数据并非为满足存档填报要求生成，可直接服务于施工调整，验证设计方案的合理性，提前判断施工过程中可能出现的风险。

在堆载预压现场，沉降板和孔隙水压力计埋设的位置和深度要有代表性，每天定时观测沉降速率和孔压消散情况，如果发现沉降突然加快或孔压急剧上升，就意味着加载速率太快了，土体可能接近极限状态，这时候必须暂停加载，等孔压消散一些再继续。测斜管的布设能直观反映深层土体的侧向位移，一旦位移速率超过警戒值，就得考虑放缓填筑速度或增设反压护道。强夯置换施工中，可以通过夯沉量和夯坑周围隆起情况判断置换效果，如果连续夯击若干次后单次夯沉量依然很大，说明底下软土还没挤开，可能需要补料继续夯。监测反馈的价值不仅在于防止失稳，还在于优化后续施工参数。比如在前期对排水板进行孔

压监测，从得到的数据中能发现，实际的固结速度比设计时预想的要快，在这种情况下，就能够适当地把预压时间缩短一些，从而提前去开展下一道工序。在进行高压喷射注浆施工的时候，可以采用围井的方式或者开挖检查取芯，借助这样的方式来验证桩体的直径以及强度，如果发现桩体的直径偏小，那就必须对喷射压力和提升速度进行调整。

4 结束语

软土地基处理是水利工程建设的关键环节，其技术选择是否合理和施工质量的高低，直接影响工程整体安全和耐久性。本文系统梳理了排水固结、置换、加筋等常用软基处理技术的核心要点，明确了各技术的适用条件，结合梳理内容整理出了多类施工策略，内容涉及深化地质勘察，强化工序管控，完善动态监测等，可帮助提高软土地基处理效果。实际应用中，把符合场地条件的技术方案和严格的过程管理结合，可应对软土高压缩性、低强度等不利特性，保证地基承载力和变形控制符合设计要求。未来，新材料新工艺不断出现，软土地基处理技术将持续优化，为水利事业高质量提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李雨才. 水利工程施工中软土地基处理技术的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2025(S2):266-269.
- [2] 李海林. 浅谈水利工程施工中软土地基处理[J]. 水电科技, 2024,07(05):10.
- [3] 张腾, 王大伟. 浅谈水利工程施工中软土地基处理技术[J]. 治淮, 2025(03):49-50.
- [4] 郭鸿超. 水利建设的软土地基施工处理质量管理探究[J]. 水电科技, 2024,07(02):25.
- [5] 潘增翼. 振冲碎石桩在水利工程软土地基处理中的应用: 以卫河干流治理工程为例[J]. 四川水泥, 2025(11):31-33.
- [6] 吕绪明, 杨冠婷. 软土地基处理技术在大型水利工程施工中的应用[J]. 大众科学, 2025,46(19):173-175.
- [7] 李秉宏. 水利水电工程基础处理施工技术的分析[J]. 水上安全, 2024(12):46-48.
- [8] 黄平志. 无砂混凝土小桩复合路基预防性养护施工技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(08):142-144.
- [9] 李思峰. 水利施工中软土地基处理技术的分析[J]. 中国房地产业, 2025(04):186-189.

复杂地质条件下水利建筑施工关键技术研究

赵 苹

(桐庐鸿瑞建设工程有限公司, 浙江 杭州 311500)

摘 要 在复杂地质条件下开展水利建筑施工, 常面临不稳定土层、高水位侵袭、地下水渗透等多重难题, 严重影响工程整体质量和安全。本文从当前水利建筑施工的实际出发, 深入探讨了复杂地质条件下水利施工的关键技术, 通过引入先进施工装备、创新施工工艺, 严格落实环境与安全管理措施, 切实保障施工成效, 突出各项技术的优势, 以期为同类复杂地质水利工程施工提供参考。

关键词 复杂地质条件; 水利建筑施工; 岩土工程; 地下水位; 地质灾害

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.016

0 引言

随着水利工程规模不断增大, 复杂地质条件下的施工问题日趋突出, 而水利建筑施工本身又常常在软土、高水位等不利地质条件下进行, 传统施工方法及设备难以直接解决常规问题。因此, 为保证施工顺利进行, 提高工程质量及施工安全, 需研发适应复杂地质环境的先进技术, 在满足工程施工需求的同时还能改善地质条件, 降低施工难度和安全风险。

1 复杂地质条件对水利建筑施工的影响

1.1 岩土工程问题

软弱土层是建筑施工中常见的地质问题, 因其承载力低, 容易发生沉降和变形。在此类土层上施工时, 通常需采用土质改良或深基础技术, 如桩基和灌浆加固等, 以确保基础的稳定性和结构的安全性^[1]。而地下水位的变化, 特别是高地下水位极易导致水土流失、基础沉降, 因此施工时应主动、合理地进行地下水控制, 采用井点降水或深井降水等降水技术稳定水位, 避免水位波动带来的不利影响。此外, 断层对施工的潜在重大影响, 尤其是在隧道、水库等地下工程中, 断层带的复杂地质构造极有可能引起地表变形、断裂, 极端情况下甚至会诱发地震或滑坡等灾难性事故, 也需引起各单位的高度重视。

1.2 地下水位变化与渗透问题

由于地下水位过高, 施工场地易发生水土流失, 这直接危及施工安全。更严重的是, 在软弱土层中水的渗透性较大, 地下水位过高会使土壤抗剪强度大大降低, 土体容易滑动, 基础容易沉降。此外, 施工中

地下水位的变化又极易引起地基不均匀沉降, 从而直接损害结构安全。

1.3 地质灾害

地质灾害(滑坡、地震、泥石流等)对施工安全有直接、重大的威胁, 复杂地质条件会使此类灾害发生频率增加, 危害程度加大。具体而言, 滑坡多发生在山地及丘陵地区, 雨季时地表水渗透、地下水位抬升极易诱发土体滑移, 因而对施工场地及周边环境都构成极大危险。此外, 地震是突发性极强的灾害, 地震带附近的施工会面临更紧迫的安全风险, 建筑物基础及主体结构在地震中可能发生位移、倾斜, 甚至倒塌, 影响工程进度与安全。

2 复杂地质条件下水利建筑施工关键技术

2.1 勘察与设计技术

在复杂地质条件下, 为确保工程安全, 其基础条件是勘察与设计。勘察工作的开展对工作人员的专业能力提出更高要求, 对现代化技术手段灵活应用, 主要是对现场的地质情况进行详细调查, 获取可靠数据, 包括地下水分布、潜在地质灾害和岩土层结构等信息, 进而编制详细的地质报告, 该报告应包括地质层分析, 为施工方案的设计提供科学依据, 确保施工过程中的安全与稳定^[2]。在设计阶段要考虑水利建筑结构的特殊性, 在复杂地质条件下会涉及泥石流易发区域、软弱土层, 设计过程中要注重加固措施的制定与实施, 如深基坑支护、桩基等, 符合防渗设计的要求的同时, 整体抗震效果更加突出。关于地质灾害的评估也比较重要, 主要是对地震、滑坡等自然灾害的提前预判,

作者简介: 赵苹(1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利施工及造价。

在设计阶段就会制定详细的应急措施,如采用特殊的基础设计、设立防护墙等,都能避免因地质条件不佳而引发的施工问题。通过前期细致勘查与高效设计,为后续施工提供了可靠的技术保障,使水利建筑工程能在复杂地质条件下稳定运行。

2.2 基础处理技术

在复杂地质条件下,水利建筑的基础处理技术是增强工程安全性、稳定性的必要条件。水利工程一般位于地质条件不均匀,或者是地层比较复杂的区域,为保证技术处理的良好效果,还需对各种技术灵活应用,避免出现地基沉降不均匀或滑坡等问题。例如:土层加固技术的应用,最常用于解决软弱地基问题,通过改变地基结构,提高其承载力,减少沉降。其中,深层搅拌法通过使用专业的设备,将固化剂与软弱土层混合,逐渐形成加固土柱,能增强地基结构的稳定性,在一些淤泥、软土等条件中应用比较广泛。而灌浆加固法主要是通过钻孔,将化学浆液、水泥浆液或者其他填充材料注入土体中,使土体中的空隙得到充分填充,土体的物理性得到明显改变,整体抗压强度持续增强,此方法适用于砂土、粘土等不均匀土层。关于地下水的控制也比较重要,受复杂地质条件的影响,尤其是在水利建筑施工过程中,地下水会影响施工进度,还会引发基坑坍塌问题。对此,可以采用井点、井管、深井等设备,使施工场地干燥,降低地下水位,避免地基受水土流失的影响而引发质量及安全问题,或者设置防渗墙,可以采用混凝土防渗结构,使地下水不再流入施工区域,有利于水利建筑的结构改善,尤其是在一些渗水比较严重的区域,可以采用此方法,治理效果突出。

深基坑施工中常用的桩基形式有旋挖桩、冲击桩,而桩基的选择一般要根据土层厚度及土质类型来确定。本工程中由于地基承载力较差,因此采用了混凝土灌注桩,桩长 25 m,桩径 60 cm,桩基处理后的沉降量严格控制在 10 mm 以内,从而保证上部结构的安全。在地下水位较高的地区,应采用排水、降水技术,如井点降水和深井降水等,主动控制地下水位,防止基础土体软化、流滑,切实保障施工安全。例如:在坡度较大或者软弱土层条件下施工作业时,采用土钉墙支护技术,将钢筋或者其他材料制成的土钉打入土层,以加固土层稳定性,避免基坑边坡坍塌问题的发生。

2.3 地下工程施工技术

地下工程施工所面临的主要问题可以归纳为岩土层稳定性、地下水渗透、施工设备的适应性等方面,

因此常见施工方法有盾构法、爆破法、暗挖法、机械开挖法等。其中,盾构施工技术是目前最常用、最成熟的地下工程施工方法之一,其基本原理是用盾构机在地下土层中向前掘进的同时可靠地进行土体支护。在复杂地质条件下,盾构机的选型及施工参数的确定有极强的技术意义。某水利项目中地下土层十分松软,施工方合理地选用配有液压支撑系统的盾构机,盾构机刀盘直径 6.5 m,推进速度 20 m/d。它既保证了土体的稳定,又最大限度地提高了施工效率。同时,盾构机配备有实时监测土壤压力、地下水位的系统,能据此及时、主动地优化施工参数。由于盾构法不适用于硬岩地层,因此对不适合盾构的硬岩区域宜采用爆破法或机械开挖法开挖,而爆破法一般用于硬岩及断层区域,施工时要严格控制爆破力及施工区周边的安全距离,最大限度地保护周围环境。

此外,地下水渗透又是水利建筑工程中十分常见且棘手的问题,故防止地下水渗透到施工现场的常用手段是注浆封堵、施工防水层等。结合工程的建筑要求及标准,应提前对复杂地质条件进行勘察与分析,结合可靠数据制定详细的施工计划,细化各部门的工作内容与职责,以推动工程建设顺利进行,从根本上杜绝常规问题的发生。

2.4 施工监测与控制技术

对监测技术的应用,能实时采集、分析施工过程中的各种数据并及时、可靠地反馈异常信息,工程中有很多成熟技术可供应用,如地质勘探监测、沉降监测、振动监测及结构健康监测。某大型水利工程,施工方采用了基于 GPS 的沉降监测系统对施工区域地面沉降做了严密的实时监控。施工过程中地面沉降量始终未超过设计允许范围(≤ 15 mm),保证周边建筑物的安全^[3]。

在地下工程施工中,尤其是软土或不稳固岩层中的施工场合,使用应力应变监测技术对支护结构进行实时监控具有明确的工程价值。在现场布设应力传感器后,施工人员可实时掌握支护结构的受力状态,及时调整施工参数,切实防止支护结构破坏。施工中使用的应力应变监测技术在隧道壁受力突变时能及时触发预警,施工方据此迅速调整支护结构的加固方案,最终成功避免了隧道坍塌。此外,由于施工过程中的安全监控具有重要意义,因此在地震活跃地区施工时,宜布置振动传感器对施工中可能出现的地震波进行监测,以可靠地报警振动超标情况,从而保护人员和设备安全,有效控制施工风险。

3 复杂地质条件下水利建筑施工策略

3.1 先进施工装备的应用

由于先进施工装备在复杂地质条件下的应用对水利建筑施工的顺利进行有重要意义,因此现代化施工装备既有利于提高施工效率,又能保证施工安全和施工质量。近年来,水利建筑施工中智能化、高效化设备的应用已有明确的进展:激光扫描仪和无人机都已被很好地引入勘察及施工环节,且各展所长,互为补充。其中,激光扫描仪可快速、高精度地采集施工现场三维数据,有利于工程师对地形、地质条件做出可靠分析,制定科学的施工方案。无人机可对大范围区域进行地质勘察及施工监测,在不干扰施工进度的前提下实时获取空气质量、土层参数等关键数据,能对工程建设进行动态化监管及优化^[4]。通过先进施工装备的应用,可高效改善复杂地质条件,为水利建筑施工奠定良好基础。

3.2 施工方法的创新

传统施工方法在复杂地质条件下难以妥善解决土层差异性、地下水渗透等问题,因此需创新施工方法,这对水利建筑施工质量及安全有直接影响。近年来,得益于技术进步及施工经验的积累,已有不少能良好适应复杂地质条件的新施工方法出现。比如,地下连续墙技术,将钢筋混凝土墙体深埋地下形成围护结构,能合理解决地下水渗透问题,特别适合软土、高水位环境下的水利工程。某水利工程便应用了地下连续墙技术,先钻孔,后灌注混凝土,再布置钢筋,层层有序地隔绝了地下水对施工区的影响,为之后的主体结构施工创造了十分有利的条件。另外,复合地基处理技术也比较成熟。由于传统桩基技术在软土及承载力极低的地区不能很好地满足工程要求,而复合地基处理技术将加固土体、注浆加固等方法结合起来,能提高地基的承载力,降低沉降^[5]。某大型水利工程应用复合地基处理技术,先进行若干次注浆,再进行土体加固。最终保证大坝基础的稳定性。目前水利建设技术正在迅猛发展,会有越来越多适应复杂地质条件的先进施工方法出现,如智能化施工监测与控制方法、模块化施工技术,都将进一步提高施工效率,更有利于保证施工安全。

3.3 环境与安全管理

复杂地质条件下水利建筑施工中环境、安全两者都是重要的课题,合理的环境及安全控制措施既是施工顺利进行的前提,又有利于保护生态环境、保障施工人员安全,施工过程中的环境保护措施有极其明确

和重大的意义^[6]。具体而言,水利工程的施工区域多临近水源或生态保护区,若不严格防范施工对环境的污染,就会造成不可逆的生态损害。因此,水库工程中施工方一般采取土壤覆盖、泥浆池隔离、废弃物分类处理等方式,切实防止泥浆渗入地下水或流入周边水体。再加上施工方主动与环保部门的协作,对施工区域内动植物开展系统监测,遵循因时制宜原则制定及落实保护措施,最大限度减少对生态系统的干扰。

复杂地质条件下地质不稳定、地下水位高,在施工中伴有一定的风险,建议项目方先进行系统、严谨的安全风险评估,再据此制定切实有效的应急预案。在施工过程中采取严格的支护结构监测措施保证隧道壁稳定,还能在施工现场配备气体检测仪、防护面具等应急设备,最大限度地保障施工人员安全。此外,施工过程中还需重视对设备、施工质量的监控:施工人员要按施工进度有计划地对施工现场所用设备进行检查,保证机械设备正常运转,由此防止设备故障引发事故。同时,在施工过程中进行土层变形、地下水位变化的实时监测,对各种突发情况做到早发现、早处理。因此能以科学合理的环境及安全控制措施切实降低施工风险,提高工程的可持续性及其安全性,为复杂地质条件下的水利建筑施工创造可靠条件。

4 结束语

复杂地质条件下水利建筑施工需要技术创新,经过施工实践总结、优化施工方案等,引进盾构机、地下连续墙技术及复合地基处理方法,高效解决地质问题,保证工程顺利进行。同时,配套智能化施工监控及安全管理系统,使施工精度、施工安全都能得到提高,有利于增强水利建筑施工整体结构的稳固性,助力工程稳定发展。

参考文献:

- [1] 慕娟.复杂地质条件下水利工程基础灌浆施工技术要点研究[J].水上安全,2025(17):174-176.
- [2] 张金兰.大型水利工程中复杂地质条件下的施工技术挑战与解决方案[J].散装水泥,2025(01):112-114.
- [3] 刘松良.复杂地质条件下水利工程施工地基处理灌浆技术研究[J].工程技术研究,2024,09(22):85-87.
- [4] 田光辉.复杂地质条件下水利工程高水位深基坑降水施工方法研究[J].价值工程,2024,43(26):67-70.
- [5] 唐振东.复杂地质区水利工程施工地基处理灌浆技术[J].水上安全,2023(10):196-198.
- [6] 李立权.涉及复杂地质的水库除险加固工程防浪墙施工技术[J].水利技术监督,2023(01):247-251.

沥青路面平整度关键施工环节控制技术分析

沈永存¹, 常艳梅²

(1. 青岛城市海岸建设有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛西海岸公用事业集团市政管理有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 沥青路面平整度作为衡量路面工程质量的核心指标, 直接影响行车舒适性、安全性及路面使用寿命。当前, 我国沥青路面施工中普遍存在原材料管控不严、施工工艺不规范、设备操作不当等问题, 导致路面平整度达标率偏低, 易出现车辙、裂缝、沉降等早期病害。本文以沥青路面平整度控制为核心, 系统梳理沥青路面施工全流程, 明确影响平整度的关键施工环节, 深入分析各环节平整度控制的核心技术要点。结果表明, 通过优化原材料配比、规范基层施工、精准控制摊铺与碾压工艺、强化施工质量检测, 可使沥青路面平整度 (IRI 值) 控制在 1.2 m/km 以内, 显著提升路面施工质量与使用性能。

关键词 沥青路面; 平整度; 沥青混合料摊铺; 沥青混合料碾压; 工程质量

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.017

0 引言

沥青路面凭借行车舒适、抗滑性能好、施工便捷、维修成本低等优势, 广泛应用于高速公路、城市主干道等交通基础设施建设中。平整度作为沥青路面的核心质量指标, 不仅直接决定行车舒适性, 还影响车辆行驶安全性与路面服役寿命——平整度不佳的路面易导致车辆颠簸、轮胎磨损加剧, 增加行车安全隐患, 同时加剧路面结构受力不均, 诱发车辙、裂缝、沉降等早期病害, 缩短路面使用寿命, 增加后期养护成本。近年来, 随着我国交通流量持续增长、重载车辆比例不断提升, 对沥青路面平整度的要求日益严格。然而, 在实际施工过程中, 受原材料质量波动、基层施工缺陷、摊铺碾压工艺不规范、施工环境影响等多因素制约, 沥青路面平整度往往难以达到设计标准。

1 沥青路面平整度影响因素及关键施工环节识别

1.1 核心影响因素分析

沥青路面平整度的形成受施工全流程多因素综合影响, 涵盖原材料、基层施工、沥青混合料摊铺、碾压、接缝处理等多个环节, 各环节相互关联、相互影响, 任一环节出现管控疏漏, 都会导致路面平整度下降。通过对大量沥青路面施工案例的梳理与分析, 结合现场试验数据, 明确影响平整度的核心因素包括原材料质量、基层平整度、摊铺工艺参数、碾压工艺水平、接缝处理质量及施工环境条件六大类, 其中基层施工、

沥青混合料摊铺、碾压、接缝处理是决定路面平整度的关键施工环节, 其管控质量直接影响路面最终平整度达标率。

原材料质量是基础保障, 沥青、集料、填料等原材料的性能指标与配比合理性, 直接影响沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性与水稳定性, 若原材料性能不达标或配比不当, 易导致混合料摊铺后出现离析、结团等问题, 影响路面平整度; 基层平整度是前提条件, 基层作为沥青路面的承载层, 其表面平整度直接决定沥青面层的摊铺基准, 若基层表面凹凸不平, 即使沥青面层摊铺均匀, 也会因基层起伏导致路面整体平整度下降; 摊铺工艺是核心环节, 摊铺速度、摊铺温度、摊铺厚度、摊铺机操作精度等参数的合理性, 直接决定沥青混合料的摊铺均匀性与表面平整度; 碾压工艺是关键保障, 碾压温度、碾压速度、碾压遍数、碾压顺序等参数的控制, 影响沥青混合料的压实度与密实度均匀性, 压实不足或压实不均都会导致路面后期沉降、车辙, 降低平整度; 接缝处理质量是薄弱环节, 横向接缝、纵向接缝处易出现错台、裂缝、凹陷等缺陷, 是路面平整度的主要失分点^[1]。

1.2 关键施工环节识别

基于影响因素分析, 结合沥青路面施工流程, 识别出四大关键施工环节: 一是基层施工环节, 基层平整度直接为沥青面层提供摊铺基准, 其管控优先级最

作者简介: 沈永存 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

高；二是沥青混合料摊铺环节，作为沥青面层成型的核心工序，直接决定路面表面初始平整度；三是沥青混合料碾压环节，通过压实作业保障路面密实度均匀性，避免后期变形影响平整度；四是接缝处理环节，作为路面施工的薄弱部位，其处理质量直接影响路面整体平整度的连续性。这四大环节构成沥青路面平整度控制的核心管控体系，需针对性制定专项控制技术措施。

2 关键施工环节平整度控制技术

2.1 基层施工环节平整度控制技术

路基处理是基层平整度控制的前提，需严格控制路基顶面平整度与压实度，路基顶面平整度 IRI 值应控制在 2.0 m/km 以内，压实度需达到 96% 以上。施工中采用平地机进行路基顶面找平，找平前对路基顶面高程进行精准测量，每隔 5 m 设置高程控制点，采用方格网法进行高程控制，确保路基顶面高程偏差控制在 ± 5 mm 以内；同时，对路基顶面浮土、杂物进行彻底清理，避免基层与路基结合不紧密导致后期沉降。基层材料摊铺环节，选用级配合理、性能稳定的基层混合料（水泥稳定碎石、石灰粉煤灰稳定土），摊铺前对摊铺机进行调试，确保摊铺机行走速度均匀、摊铺厚度一致，摊铺速度控制在 1.5 ~ 2.5 m/min，摊铺厚度按设计厚度增加 5% ~ 8% 的虚铺系数；摊铺过程中安排专人跟踪检测，及时调整摊铺机熨平板高度与横坡，避免出现摊铺离析、波浪等问题。基层压实环节，根据基层混合料类型选择适配的压路机（振动压路机、静压压路机），压实顺序遵循“先轻后重、先慢后快、先边后中”的原则，压实速度控制在 2 ~ 4 km/h，振动压路机振动频率控制在 25 ~ 30 Hz、振幅控制在 0.5 ~ 1.0 mm；压实过程中分层检测压实度与平整度，每压实一遍检测一次，确保基层压实度达标且表面平整度 IRI 值控制在 1.5 m/km 以内^[2]。压实完成后及时进行覆盖养护，避免基层开裂影响平整度。

2.2 沥青混合料摊铺环节平整度控制技术

沥青混合料摊铺是沥青面层成型的核心工序，其平整度控制的核心是保障摊铺温度、摊铺速度、摊铺厚度的稳定性与摊铺机操作的精准性，同时严控沥青混合料质量，避免因混合料性能波动影响摊铺效果。沥青混合料质量管控是前提，进场前需严格检测沥青、集料、填料等原材料性能，确保符合设计标准；混合料生产过程中严控配合比，马歇尔稳定度应控制在 8 ~ 16 kN、流值控制在 20 ~ 40 (0.1 mm)，混合料出场温度控制在 150 ~ 170 °C (AC-13 型沥青混合料)，

出场前对混合料进行均匀性检测，避免出现离析、结块等问题；混合料运输过程中采用保温运输车辆，运输时间控制在 30 min 以内，到场后检测温度，温度低于 130 °C 的混合料严禁摊铺。摊铺前准备工作需充分，对基层表面进行清理与粘层油喷洒，粘层油喷洒量控制在 0.3 ~ 0.5 L/m²，喷洒均匀且无遗漏，待粘层油破乳后再进行摊铺；对摊铺机进行全面调试，检查熨平板加热温度（加热至 100 °C 以上）、行走系统、布料系统，确保摊铺机运行稳定；根据路面宽度与摊铺厚度确定摊铺幅数，单幅摊铺宽度不宜超过 6 m，避免摊铺幅度过大导致平整度下降。摊铺过程参数控制是核心，摊铺速度采用匀速控制，一般控制在 2 ~ 6 m/min，严禁随意调整摊铺速度，避免出现摊铺波浪、离析等问题；摊铺厚度按设计厚度增加 10% ~ 15% 的虚铺系数，通过摊铺机熨平板高度进行精准控制，每隔 5 m 检测一次摊铺厚度，偏差控制在 ± 3 mm 以内^[3]；摊铺过程中摊铺机熨平板采用自动找平系统，依托基层高程控制点进行精准找平，横坡控制在 2% ~ 3% (城市主干道)。安排专人在摊铺机后方跟踪检测，及时处理摊铺过程中出现的离析、杂物等问题，避免影响路面平整度。

2.3 沥青混合料碾压环节平整度控制技术

沥青混合料碾压的核心目标是保障路面压实度均匀性，避免因压实不足或压实不均导致后期沉降、车辙等问题，进而影响路面平整度，其控制核心是合理选择碾压设备、优化碾压参数与碾压顺序，同时严控碾压温度。碾压设备选型需适配沥青混合料类型，AC-13 型沥青面层碾压宜采用“双钢轮振动压路机 + 胶轮压路机”组合，双钢轮压路机用于初压与终压，胶轮压路机用于复压；碾压前检查压路机性能，确保压路机行走平稳、刹车灵敏，钢轮表面洁净无杂物。碾压温度控制是关键，初压温度控制在 130 ~ 150 °C、复压温度控制在 110 ~ 130 °C、终压温度控制在 90 °C 以上，碾压过程中实时检测路面温度，温度低于终压温度时立即停止碾压，避免低温碾压导致路面开裂。碾压参数与顺序控制需科学，初压采用双钢轮压路机静压，碾压速度控制在 2 ~ 3 km/h，碾压遍数 2 遍，碾压过程中轻压慢碾，避免破坏摊铺层初始平整度；复压采用胶轮压路机碾压（或双钢轮振动压路机振动碾压），碾压速度控制在 3 ~ 5 km/h，碾压遍数 4 ~ 6 遍，确保路面压实度达到 96% 以上；终压采用双钢轮压路机静压，碾压速度控制在 2 ~ 4 km/h，碾压遍数 2 遍，主要目的是消除复压留下的轮迹，提升路面平整度。碾压过程中需注意避免压路机在路面上急刹车、急转

弯, 碾压路线采用纵向进退式, 相邻碾压轮迹重叠宽度控制在 $1/3 \sim 1/2$ 轮宽, 确保碾压无死角; 同时, 安排专人跟踪检测路面平整度与压实度, 及时调整碾压参数, 确保路面平整度 IRI 值控制在 1.2 m/km 以内^[4]。

2.4 接缝处理环节平整度控制技术

接缝处理是沥青路面施工的薄弱环节, 分为横向接缝(施工缝)与纵向接缝(摊铺幅间缝), 其平整度控制的核心是保障接缝处衔接紧密、高程一致, 避免出现错台、裂缝、凹陷等缺陷。横向接缝处理技术方面, 摊铺结束后及时对端部进行切割处理, 切割位置选择在摊铺层平整、压实度达标的部位, 切割面与路面垂直, 切割后清除端部松散混合料与杂物; 下次摊铺前, 在切割面涂刷粘层油, 粘层油喷洒量控制在 $0.3 \sim 0.5 \text{ L/m}^2$, 确保接缝处粘结紧密; 摊铺时摊铺机熨平板跨越接缝处 $5 \sim 10 \text{ cm}$, 摊铺厚度略高于已铺路面 $2 \sim 3 \text{ mm}$, 采用热接缝方式进行衔接; 碾压时先采用双钢轮压路机横向碾压, 碾压顺序从已铺路面向新铺路面推进, 碾压速度控制在 2 km/h 以内, 碾压遍数 $3 \sim 4$ 遍, 确保接缝处压实度达标, 然后再进行纵向碾压, 消除横向碾压轮迹。纵向接缝处理技术方面, 单幅摊铺完成后, 在摊铺幅边缘设置高程控制点, 确保后续摊铺幅高程与已铺幅一致; 后续摊铺时, 摊铺机熨平板紧贴已铺路面边缘, 采用热接缝方式摊铺, 摊铺厚度与已铺路面保持一致; 碾压时先采用双钢轮压路机纵向碾压接缝处, 相邻碾压轮迹重叠宽度控制在 $10 \sim 15 \text{ cm}$, 碾压遍数 $2 \sim 3$ 遍, 然后再进行全幅碾压, 确保接缝处平整、无错台, 平整度偏差控制在 3 mm 以内^[5]。

3 施工质量检测与控制优化建议

3.1 全流程质量检测体系构建

过程检测重点针对关键施工环节, 基层施工阶段每完成一层施工, 检测平整度(IRI 值)、压实度、高程偏差等指标, 平整度检测采用连续式平整度仪, 每 200 m 检测一次, 单次检测长度不少于 100 m ; 沥青混合料摊铺阶段, 实时检测摊铺温度、摊铺厚度、摊铺均匀性, 摊铺厚度采用钻芯法或激光厚度检测仪, 每 50 m 检测一次; 碾压阶段, 分层检测压实度与平整度, 压实度采用核子密度仪(或钻芯法)检测, 每 200 m 检测 4 个点, 平整度采用连续式平整度仪实时检测。终检验收阶段, 路面施工完成后按规范要求进行全面检测, 平整度 IRI 值作为核心指标, 高速公路与一级公路需控制在 1.2 m/km 以内^[6], 二级公路控制在 1.5 m/km 以内; 同时检测路面压实度、厚度、抗滑性能等指标, 确保各项指标均符合设计标准。检测过程中建立质量

台账, 对检测数据进行记录与分析, 及时发现质量波动规律, 针对性调整施工管控措施。

3.2 施工控制优化建议

一是强化人员培训, 定期对施工管理人员、操作人员进行技术培训, 提升其对平整度控制技术、设备操作规范、质量检测标准的掌握程度, 避免因人为操作失误影响平整度; 二是优化设备配置, 选用性能稳定、精度高的摊铺机、压路机、检测设备, 定期对设备进行维护与校准, 确保设备运行状态良好; 三是严控施工环境, 避开高温、低温、降雨、大风等恶劣天气施工, 在高温天气(气温超过 $35 \text{ }^\circ\text{C}$)施工时, 适当降低摊铺速度、缩短运输时间, 低温天气(气温低于 $5 \text{ }^\circ\text{C}$)严禁施工; 四是加强信息化管控, 引入路面施工信息化管理系统, 实时采集摊铺温度、速度、厚度、压实度等数据, 实现施工过程的动态监控与精准调控, 提升平整度管控的智能化水平。

4 结束语

沥青路面平整度的提升依赖于施工全流程的精细化管控, 其核心影响因素包括原材料质量、基层平整度、摊铺工艺、碾压工艺、接缝处理质量及施工环境条件, 其中基层施工、沥青混合料摊铺、碾压、接缝处理是关键施工环节。本文通过系统分析各关键施工环节的平整度控制技术要点, 明确了基层施工需严控路基处理、摊铺与压实质量, 摊铺环节需保障混合料质量与摊铺参数稳定, 碾压环节需优化碾压设备、参数与顺序, 接缝环节需采用科学的衔接与碾压技术。研究结果表明, 通过构建全流程质量检测体系, 强化关键施工环节管控, 可使沥青路面平整度(IRI 值)控制在 1.2 m/km 以内, 显著提升路面施工质量与使用性能。

参考文献:

- [1] 杨玉山. 市政道桥施工中沥青路面平整度控制技术与实践[J]. 模型世界, 2025(25):176-178.
- [2] 姚里丰, 彭江. 市政沥青砼路面平整度控制因素和施工要点分析[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(12):143-146.
- [3] 郝汉洲. 沥青路面平整度施工质量控制分析[J]. 运输经理世界, 2024(11):4-6.
- [4] 刘宝超. 沥青路面材料质量控制和施工关键工序研究[J]. 工程建设与设计, 2024(13):226-228.
- [5] 许政. 公路沥青路面同步碎石罩面施工关键技术[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(06):42-45.
- [6] 陈圆圆. 剖析市政道路沥青路面施工摊铺技术的关键要点[J]. 散装水泥, 2025(05):94-96.

装配式高层建筑给排水及消防管道施工技术研究

熊 飞

(合肥越合房地产开发有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘 要 装配式建筑技术推广的覆盖面正持续拓宽, 高层建筑领域中装配式结构应用的占比也在逐步提升, 与这类建筑配套的给排水及消防管道施工质量关系到建筑使用功能的正常使用与居住环境的安全稳定。本文结合装配式高层建筑结构装配化程度偏高、构件预制精度要求偏严、管道安装可用空间紧张的实际情况, 梳理关键施工环节的技术要点, 剖析预留孔洞偏差等常见问题, 提出对应的解决办法与质量控制核心要点, 旨在有效提高这类管道施工的整体效率, 保障管道系统运行的稳定与安全, 为同类工程的施工提供实践层面的参考。

关键词 装配式高层建筑; 给排水; 消防管道; 预制构件预留预埋技术; 现场管道装配连接技术

中图分类号: TU976

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.018

0 引言

装配式建筑凭借施工周期较短、资源消耗不多、现场污染较轻等优势, 已成为高层建筑发展的重要方向之一。建筑的核心构件大多在工厂预制完成后, 运输到施工现场进行装配作业, 与传统现浇结构的施工工艺有着明显差异。这样的施工模式, 对配套的给排水及消防管道施工提出更为细致的要求。高层建筑给排水及消防管道的施工质量与装配精度, 影响建筑使用过程的实际体验, 关乎建筑整体安全性能的达标情况。开展高层建筑给排水及消防管道施工技术的相关研究, 梳理施工要点、解决实际难题, 对于完善装配式建筑配套施工技术、提升工程施工质量, 有着重要的现实意义。

1 装配式高层建筑给排水及消防管道施工的特点与难点

1.1 施工特点

高层建筑的给排水系统需要满足日常用水需求, 还要应对突发情况, 如火灾等紧急情况下的消防用水需求。高层建筑结构复杂、人员密集, 如果火灾发生, 蔓延速度快, 危害性大, 给排水及消防管道系统的设计与施工尤为重要。这些系统需要具备高效、稳定的特点, 还需要具备灵活性与可扩展性, 以应对可能的改造与升级需求。装配式建筑的管道施工, 前置性要求的突出程度远超传统施工模式。构件在工厂预制的

关键阶段, 管道相关的预留孔洞开挖、预埋套管布设等基础工作必须同步落实。管道施工深化设计的全部内容, 必须在构件正式生产启动前彻底落地, 最终形成的设计方案, 还需与构件预制的整体方案建立高度协同的配合关系, 以此规避衔接环节可能出现的断层问题。预制构件自身存在的尺寸偏差, 会直接传导至管道预留预埋的位置精度层面。一旦预留孔洞或预埋套管的位置出现偏差, 现场装配工序全部完成后, 调整空间便会大幅缩减, 大概率对管道安装环节的推进形成阻碍, 影响整体施工的顺畅程度^[1]。

1.2 施工难点

预留预埋工作的协同推进存在较大难度。装配式建筑涉及的构件类型较为繁杂, 整体装配流程也相对复杂, 给排水及消防管道的预留预埋工作, 需与结构施工、机电布设、装修规划等多个专业开展协同配合, 不同专业之间若设计衔接存在疏漏, 或沟通配合不够紧密, 就容易出现预留点位遗漏、预埋位置偏差等影响后续施工的问题。管道连接的密封性控制难度偏高。装配式建筑的管道接口, 大多依靠现场装配完成连接, 接口的连接质量直接决定管道系统的密封效果。尤其是消防管道系统, 接口若出现渗漏问题, 会直接削弱消防系统的灭火效能。现场施工的环境条件、操作人员施工工艺的熟练度等多种因素, 都会直接影响接口连接的最终质量, 这也进一步提升了密封性控制的难度。

作者简介: 熊飞(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

2 装配式高层建筑给排水及消防管道施工关键技术

2.1 预制构件预留预埋技术

预制构件预留预埋的质量, 直接关系后续管道安装的精度控制与施工质量, 是装配式高层建筑给排水及消防管道施工中的关键环节。构件生产厂家在接收深化设计图纸后, 需组织专业技术人员开展图纸会审, 重点核对预留孔洞的位置坐标、孔径尺寸, 以及预埋套管的规格型号、材质标准、壁厚参数等核心内容, 确认所有参数均符合设计要求后, 方可启动预留预埋的施工准备。预留孔洞施工需采用定制化专用模具进行定位与固定, 模具定位精度严格控制在规范允许的 ± 3 mm 范围内, 且模具与构件钢筋骨架的连接需采用焊接或螺栓紧固方式加固, 防止混凝土浇筑过程中模具移位导致预留孔洞位置偏差。混凝土浇筑作业期间, 需安排专人全程监护预留预埋构件, 实时观察模具及套管的固定状态, 若发现因混凝土冲击、振捣产生的松动迹象, 立即暂停浇筑作业, 及时采取加固整改措施。

预埋套管的材质与规格选型, 需结合管道使用功能及所处环境条件综合确定。消防管道所用预埋套管, 因需承受火灾场景下的高温环境, 必须选用耐热性强、耐腐蚀性能优异的无缝钢管材质, 且套管内径应比对应管道外径大一个规格等级, 如 DN100 消防管道应选用 DN125 预埋套管, 确保管道安装时具备足够的水平与垂直调整空间^[2]。预埋套管与构件混凝土的连接需保证牢固可靠, 通常在套管外壁焊接定位钢筋, 与构件钢筋骨架相连以增强套管与混凝土的结合力, 避免后期使用过程中出现松动。

2.2 现场管道装配连接技术

现场管道装配连接的施工质量, 直接决定装配式高层建筑给排水及消防管道系统的运行稳定性与密封可靠性, 作为施工核心环节, 各流程细节必须严格把控。施工前, 施工人员需对预制构件上预留孔洞、预埋套管的实际位置进行二次复核, 借助卷尺、水准仪等工具核对坐标与标高, 确认与设计图纸一致后再开展后续工作。对进场管道及配件进行全面质量检查, 核查产品合格证、性能检测报告等资料, 检查管道外观有无破损、裂纹、锈蚀等缺陷, 测量管道外径、壁厚等尺寸参数, 确保所有材料均符合设计要求。不同类型管材对应的装配连接方式存在差异, 需结合管材特性选择适配方式并严格遵循施工工艺标准。以给排水管道常用的 PPR 管材为例, 采用热熔连接时, 选用与管材规格匹配的热熔机, 将热熔温度控制在 260 ± 10 °C 范围, 根据管材直径确定热熔时间, 直径 20 mm 的 PPR 管热熔时间约 5 秒, 直径 32 mm 的 PPR 管热熔时间约 8

秒, 热熔完成后保持接口对接状态直至冷却固化, 确保接口紧密无渗漏^[3]。

消防管道承载灭火救援关键功能, 对连接质量要求更为严格。镀锌钢管作为消防管道常用管材, 多采用螺纹连接或沟槽连接。螺纹连接时, 需用套丝机加工管螺纹, 确保螺纹精度达到 60° 锥管螺纹标准、牙型完整无毛刺, 连接前在螺纹表面均匀涂抹聚四氟乙烯密封带或铅油麻丝等密封填料, 涂抹范围覆盖整个螺纹段, 连接时用管钳均匀用力拧紧以保证接口密封严密; 沟槽连接时, 先采用沟槽机加工管道沟槽, 控制沟槽深度在 2.1 ± 0.1 mm、宽度在 7.5 ± 0.5 mm, 选择与管道规格匹配的沟槽管件, 安装时在管件密封胶圈表面涂抹润滑剂确保胶圈安装到位, 再用扭矩扳手均匀紧固连接螺栓, 避免局部过紧或过松导致接口松动渗漏。

管道装配连接过程中, 同步控制水平度与垂直度, 水平管道水平度偏差不超过 2 mm/m, 垂直管道垂直度偏差不超过 3 mm/m; 管道支架安装间距根据管材类型与管径确定, 钢管支架间距一般不超过 2.5 m, 塑料管道支架间距一般不超过 1.5 m, 且支架与管道连接需牢固, 防止管道运行时产生振动。

2.3 防火与防水密封处理技术

管道穿越预制构件部位的防火与防水密封处理质量, 直接关联装配式高层建筑的使用安全与功能完整性, 是施工过程中需重点把控的关键环节, 不同部位密封处理需结合功能需求采用针对性技术措施。

防火密封处理的核心是阻止火灾发生时火势与烟气通过管道穿越部位蔓延, 因此管道穿越防火分区、防火墙、楼板等防火关键部位时, 必须采用符合规范要求的不燃材料实施防火封堵。常用防火封堵材料包括柔性有机防火堵料、无机防火堵料、防火密封胶、防火隔板等, 具体选型根据预留孔洞大小与穿越管道数量确定。施工遵循清理—填充—加固—验收步骤, 彻底清理预留孔洞周围杂物、浮尘及松散混凝土, 保证封堵部位干净、干燥, 孔径较小的孔洞可直接将柔性有机防火堵料揉成条状填充, 填充深度不小于 100 mm 且密实无空隙; 孔径大于 300 mm 的较大孔洞, 应先将防火隔板切割成与孔洞匹配形状, 固定在孔洞内侧形成加固层, 在隔板与管道、隔板与孔洞壁的间隙填充防火堵料, 在表面涂刷防火密封胶密封^[4]。消防管道穿越防火部位的防火封堵, 还需符合消防规范关于耐火极限的要求, 封堵材料耐火极限不低于所在防火构件的耐火极限, 确保火灾场景下可长时间阻挡火势蔓延。

防水密封处理的核心目标是防止水渗透通过管道穿越部位, 尤其管道穿越屋面、卫生间、厨房等有水

区域的预制构件部位,必须采用多道设防的密封处理方案。施工前先清理管道与构件连接间隙内的杂物与油污,确保间隙内壁干燥、洁净,间隙宽度小于10 mm的部位,可直接填充高性能聚氨酯密封胶,填充时分层按压密实,保证密封胶与管道外壁、构件混凝土紧密贴合,间隙宽度大于10 mm的部位,需先在间隙内填充聚乙烯泡沫板作为背衬材料,再在外侧填充密封胶,最后在密封胶外侧粘贴SBS改性沥青防水卷材或涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料,形成连续完整的防水密封层。

2.4 消防系统调试技术

消防系统调试是验证装配式高层建筑消防功能是否符合设计要求与规范标准的关键环节,要在消防管道安装完成且压力试验合格后,按既定流程有序开展。消防水泵调试分阶段进行。开展单机空载调试,检查水泵电机转动方向是否正确,运行过程中有无异常振动、异响,轴承温度是否控制在允许范围。空载调试合格后开展带负荷调试,启动水泵后测量出水压力,确保出水压力达到设计压力的 $\pm 5\%$ 范围,同时检查水泵手动、自动及应急启停功能的可靠性,验证水泵控制柜信号显示是否准确。消防栓系统调试逐区、逐层开展,打开各楼层消防栓阀门,测量出水压力与水枪射程,确保最不利点消防栓出水压力不低于0.15 MPa、水枪射程不小于13 m,检查消防栓箱内水带、水枪连接可靠性,以及消防栓启泵按钮信号传输功能是否正常。自动喷水灭火系统调试重点关注喷头安装质量与系统动作灵敏度,检查喷头安装方向是否正确、有无破损变形,用专用测试仪器触发水流指示器动作,验证其信号能否准确传输至消防控制中心,启动末端试水装置,检查压力开关动作响应时间与信号传输功能,确保系统可在规定时间内启动喷淋泵并发出报警信号。调试过程中应安排专人做好详细记录,内容涵盖调试时间、部位、测试参数、合格情况等,发现不合格问题及时分析原因、制定整改措施并完成整改,整改后重新调试直至所有项目符合规范要求,调试记录整理归档作为工程验收的重要依据^[5]。

3 装配式高层建筑给排水及消防管道施工常见问题与解决措施

3.1 常见施工问题

预留预埋位置偏差是装配式高层建筑给排水及消防管道施工里较为突出的问题。这类问题的产生,多和深化设计工作的不到位有关,也可能是构件生产环节中模具定位的不准确所引发。一旦出现,预留孔洞与预埋套管的实际位置就会偏离设计要求,无法满足

后续管道安装的基本需求,给施工推进带来阻碍。管道接口渗漏则是另一类高频问题,施工人员操作流程的不规范、进场管道及配件本身的质量不合格,再加上接口密封材料选择不匹配,这些因素叠加起来,都会导致管道连接接口出现渗漏,直接影响管道系统运行的稳定性。

3.2 解决措施

应对预留预埋位置偏差,深化设计阶段要强化各专业协同配合,借助BIM技术的精准定位优势布设预留预埋点位。构件生产时加大质量管控,严格按设计图纸完成模具定位固定;出厂前全面检测,发现偏差及时整改至合格。现场施工前再次核对位置,偏差较小时可通过扩大孔洞、增设套管调整;偏差较大则联动设计单位制定专项方案处理。针对管道接口渗漏,严控管道及配件进场质量,筛选合格产品,强化施工人员培训,规范操作流程,结合管材特性选适配连接方式与密封材料,管道连接后按标准做压力试验,渗漏接口及时修复。

4 结束语

装配式高层建筑给排水及消防管道施工技术的应用,核心落在充分结合装配式结构的自身特性上。前期深化设计与各专业协同配合的重要性需重点凸显,预制构件预留预埋的质量把控要持续强化,现场装配连接的工艺细节需严格规范,防火与防水密封的处理要求要切实落实,系统调试与全过程的质量管控也不能松懈。关键技术的研究应用,能有效化解预留偏差、接口渗漏等实际施工问题,提升施工质量与效率,保障管道系统运行稳定安全,实际施工还应结合工程具体特性灵活运用技术措施,积累经验提升整体质量,确保建筑使用功能与安全性能得到充分保障。

参考文献:

- [1] 许龙辉.建筑给排水管道工程施工质量管理策略分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(30):52-54.
- [2] 王雷,李康.市政给排水预应力钢筋混凝土管道施工工艺研究[J].混凝土世界,2024(10):52-55.
- [3] 何文权.市政道路给排水管道长距离顶管施工技术研究[J].工程建设和设计,2024(19):93-95.
- [4] 崔泽天.浅论工业厂区给排水管道的施工策略和后期的维护管理[J].建材发展导向,2024,22(19):59-61.
- [5] 赵力军,史文荣,李康,等.全装配式给排水及消防给排水管道安装一场正在到来的管道安装技术革命[C]//中国建筑学会建筑给排水研究分会第三届第二次全体会员大会暨学术交流会,中国建筑学会,2018.

商业建筑装修改造中消防给水系统的适应性设计方法与工程实践

杨 蕾¹, 王传虎²

(1. 青岛东盛建筑设计股份有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 深圳中海世纪建筑设计有限公司济南分公司, 山东 济南 251400)

摘 要 在城市更新与商业业态迭代的背景下, 既有商业建筑功能重构与装修改造项目日益增多。此类改造通常受限于原有结构、空间及已安装的管网系统, 使得消防给水系统的规范符合性提升与安全可靠性保障成为改造工程的关键难点。通过引入“适应性设计”理念, 构建“现状系统精准诊断—核心技术靶向优化—多专业全过程协同管理”的一体化技术体系, 为同类既有商业建筑消防给水系统改造提供兼具理论价值与实践意义的技术参考。

关键词 商业建筑改造; 消防给水系统; 规范符合性; 协同设计; 工程实践

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.019

0 引言

面对时代发展需求, 传统商业建筑亟需通过内部功能重构、业态优化升级实现资产盘活与可持续运营。此类改造项目其建筑主体结构、消防基础设施仍沿用建设时期的设计标准, 与现行《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974-2014)^[1]、《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014, 2018 年版)^[2]等国家强制标准相比, 在消防水源保障、水压流量参数、系统联动逻辑、防火分区适配等核心维度存在显著脱节。

更为突出的是, 既有商业建筑改造普遍面临结构荷载受限、管线路由紧张、室内净高管控严格、项目投资有限等多重刚性约束, 若采用“大拆大建”的改造模式, 不仅会造成严重的资源浪费, 还可能破坏建筑主体结构安全, 且难以适配商业运营的实际需求。

基于此, 本文结合实际工程落地经验, 系统阐述既有商业建筑消防给水系统的现状诊断方法、核心优化设计策略及全过程管控要点, 为城市更新背景下既有建筑消防安全提升提供技术支撑。

1 改造前期系统性诊断与现状评估体系构建

科学有效的改造方案建立在对现状全面、准确把握的基础之上, 前期系统诊断是实现精准改造的前提。

1.1 资料溯源与现场核查

项目启动初期, 需全面溯源既有建筑消防系统的竣工图纸、设备出厂参数、历年运行维护记录及历次改造档案, 梳理系统原始设计逻辑与运行短板; 同步

开展现场 1:1 实测工作, 缩小图纸与现场实际的偏差。借助高精度设备测试最不利点的水压与流量, 校核供水与稳压能力, 最终形成包含现状性能评估、问题清单梳理、风险等级划分的完整诊断报告, 为后续改造设计提供数据支撑。

1.2 规范对标与合规性短板分析

以现行国家消防技术标准为核心依据, 结合地方既有建筑改造消防设计审查相关规范^[3], 开展全方位合规性核查: 一是消防水源与储水设施核查, 评估有效容积、补水效率、防护措施及水质是否符合标准; 二是复核供水压力、流量及分区的科学性, 排查潜在安全风险; 三是检测水泵、阀门等核心组件的运行性能, 判断其与规范及新业态的适配情况, 为组件的处置提供依据。

1.3 改造冲突预判与前置协同优化

结合商业建筑改造多专业交叉的特点, 在设计初期建立跨专业协同机制, 加强与其他专业的深度对接, 提前识别消防改造与空间布局、装修方案之间的潜在矛盾, 重点分析吊顶设置对喷头设置、功能调整对防火分区、墙体拆改对消火栓布置及管线碰撞的影响, 通过前期优化减少后期施工变更, 提高方案的可实施性与施工效率。

2 消防给水系统核心优化设计策略

坚持“最小干预、效能优先、经济合理、美学适配”原则, 从水源、泵房、管网、末端设施四个维度, 实现消防安全与工程经济、空间美学的统一。

作者简介: 杨蕾 (1990-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑给排水消防设计。

2.1 消防水源与储水设施适配性优化

针对既有消防水池容量不足、受结构与空间限制难以扩建的难题,采用“保留利旧+局部扩容+多源协同”的组合式解决方案。在满足饮用水卫生安全、消防用水不被挪用的前提下,科学论证消防储水设施的技术可行性,最大化利用既有储水资源;结合地下室闲置空间、设备边角区域,开展消防水池局部扩容改造,补足有效容积缺口;在屋顶、室外或地下室边角区域,增设成品集成式消防水箱及配套稳压设施,同步复核建筑结构承载能力,落实防冻、保温、防腐等措施,确保储水设施安全稳定运行。同时,加强与城市供水部门的协同对接,充分挖掘市政管网供水保障潜力,通过增设管道增压稳压设施,提升市政直接供水的可靠性,构建“市政水源+储水设施+增压保障”的复合供水体系,提升水源保障能力。

2.2 消防泵房与供水设备集约化升级

以“高效节能、低噪运行、空间集约、智能管控”为核心目标,对消防泵房及供水设备进行集约化升级改造。对运行参数达标、工况良好、无重大安全隐患的既有水泵设备,采用全面维护检修、易损部件更换、智能控制升级的方式,延长设备安全使用周期,实现科学利旧;对性能不达标、能耗高、噪声超标的老旧设备,更换为占地更小、运行效率更高、能耗更低的立式多级离心泵或集成式消防泵组,优化设备布局,节约泵房空间。针对商业建筑对噪声控制的严格要求,采取专项减振降噪措施,设备设置多级减振装置,供水管道采用柔性接头、弹性支吊架,全程阻断振动与噪声传导,确保泵房噪声达标,不影响上层商业正常运营。同步升级消防泵智能控制系统,实现设备全自动启停、运行状态实时监测、故障报警远传,确保全部信号稳定接入消防控制室,提升系统运维智能化水平。

2.3 管网系统优化与既有设施科学利旧

管网改造是平衡消防安全、改造成本与施工工期的关键环节。

坚持“能利旧不更换、能修复不拆改、能优化不重建”的原则,实现管网系统的合规化升级^[4]。对既有供水主干管开展全面检测评估,对结构完好、通水能力、承压性能满足安全要求的管路,全部保留利用,减少拆改工程量;对局部老化、轻微腐蚀、结垢的管段,采用非开挖内衬修复、管道清洗防腐等绿色改造技术,大幅提升管路防腐性能与通水能力,避免大面积拆改对结构与装修基层的破坏。结合商业装修与吊顶标高,优化管线,复杂管线区域采用BIM三维综合排布技术,

提前规避管线碰撞、净高不足的问题,提升空间利用效率。针对建筑功能调整、火灾危险等级提升、防火分区重新划分的区域,重新开展全系统水力计算^[5],复核系统设计流量、水压、供水分区设置,确保系统全工况达标。管材选用以耐用性强、施工便捷、适配改造工程为原则,优先选用成熟可靠的金属管材与复合管材,兼顾经济性与使用寿命。

2.4 末端设施与商业空间融合化设计

在严格满足消防安全规范、灭火性能达标的前提下,突破传统消防设施“重功能、轻美观”的设计局限,实现末端设施与商业空间装饰效果的深度融合。中庭、挑空大空间、异形造型区域,结合消防性能分析,合理选用大流量、大覆盖范围的适配灭火设施,兼顾灭火效能与空间美学;消火栓箱优先采用暗装方式,确需明装的消火栓,采用与装修风格统一的装饰化处理,确保消防标识清晰醒目、箱体开启方便快捷,完全满足应急操作与规范要求。通过BIM三维建模技术,对喷头、消火栓、风口、电气点位进行精准定位排布,严控现场开孔精度,大幅提升一次施工合格率,减少现场拆改,实现消防安全与商业空间美学的统一。

3 全过程协同设计与施工管控体系

既有商业建筑改造项目涉及专业多、施工界面交叉复杂、现场约束条件多,消防给水改造必须实施全周期、跨专业、闭环式协同管控,才能保障改造方案顺利落地、一次性通过消防验收,实现质量、工期、投资的全面管控。

3.1 设计阶段全专业早期协同

在方案设计、初步设计阶段,给排水专业提前明确消防系统改造的核心设计条件、设备空间需求、室内净高控制要求、结构荷载条件,以书面对接形式,向建筑、结构、装饰、电气等专业提出刚性技术要求,明确各专业协同节点与责任分工。

3.2 施工阶段工序管控

施工过程严格执行工序交接验收、隐蔽工程闭环验收制度,建立“施工自检—监理复检—建设单位验收”的三级验收体系。

4 工程实例分析

4.1 项目概况与核心改造难点

原建筑为1995年建造的6层百货商场,总建筑面积约2.8万m²,原建筑消防系统按当时旧版规范设计施工,设施设备老化严重。本次改造目标为多功能城市生活广场。项目核心改造难点主要体现在四个方面:

一是原有地下消防水池有效容积仅为 200 m³, 远低于现行规范要求的 450 m³, 且受地下室结构、周边管网及相邻建筑限制, 无法大面积开挖扩建; 二是新增大量餐饮业态使火灾危险等级提升, 原系统参数不达标; 三是原泵房噪声偏高, 无法满足商业运营要求; 四是业主要求商场公共区域吊顶净高不低于 2.8 m, 对消防设施隐蔽性、空间美观性要求极高, 管线路由约束极强, 难以满足常规管网排布需求。

4.2 针对性适配性改造技术措施

结合项目核心难点, 基于本文提出的改造技术体系, 制定针对性的适配性改造方案, 具体措施如下:

1. 消防水源系统优化: 保留原有地下消防水池主体结构, 完成池体清淤、全面防腐防渗处理, 利用地下室闲置设备用房, 通过局部扩容改造将水池有效容积补足至 480 m³, 满足规范要求; 在屋顶闲置区域, 增设 18 m³ 成品装配式消防水箱与配套稳压设备, 提升系统稳压能力; 扩容市政消防引入管至 DN200, 增设管道倒流防止器, 构建“市政供水+地下水池+屋顶水箱”的三级供水保障体系, 确保水源供应稳定可靠。

2. 消防泵房与设备升级: 拆除原有老旧高噪水泵, 更换 3 台高效节能低噪立式多级消防泵组 (2 用 1 备), 优化泵房设备布局, 节约泵房空间约 30%; 泵房设备配套多级减振器, 增加水锤消除器, 管道全部采用柔性接头、弹性支吊架, 将泵房运行噪声控制在 55 dB 以内, 完全满足商业运营要求; 升级消防泵智能控制柜, 实现设备全自动启停、远程监控、故障报警, 信号全部接入消防控制室, 提升系统运维智能化水平。

3. 管网与末端设施改造: 对既有消防主干管开展内窥检测与压力试验, 合格管路全部保留利旧, 完成全管网清洗、防腐、刷漆处理^[6]; 餐饮区域、影院区域按对应火灾危险等级独立划分供水系统, 厨房区域选用 K=115 的耐高温喷头; 通过 BIM 管线综合排布技术, 优化管线路由, 解决管线碰撞、净高不足的问题, 确保公共区域吊顶净高达到 2.9 m。

4. 空间与多专业协同优化: 消火栓采用暗装及装饰面板, 协调各专业避免冲突, 兼顾消防合规性与空间美观性; 同步协调电气、暖通专业, 优化管线排布, 确保改造方案顺利落地^[7]。

4.3 项目实施效果

本项目改造完成后, 消防给水系统一次性通过消防专项验收。系统设计流量、最不利点水压、储水容积、联动控制等全部核心指标, 均满足现行国家消防规范要求; 泵房振动噪声控制达标, 完全不影响上层商业

运营; 消防设施运行稳定可靠, 与商业装修高度融合, 实现了消防安全与空间美学的有机统一。项目投入运营以来, 消防给水系统无故障运行, 各项性能指标持续达标, 有效提升了建筑消防安全水平, 为所在区域同类型老旧商业建筑消防改造项目提供了成熟的应用示范, 验证了本文提出的改造技术体系的可行性与实用性^[8]。

5 结束语

既有商业建筑消防给水系统改造不同于新建建筑的消防设计, 其核心在于“适配性”与“精细化”, 必须立足于建筑现状、现行规范要求与现场多重约束条件, 摒弃“大拆大建”的传统模式。通过构建“现状诊断—技术优化—协同管控”的一体化技术体系, 可在保障消防安全的同时, 实现投资、工期可控与空间美学提升。随着城市更新战略的持续推进, 既有商业建筑改造将成为建筑行业的重要发展方向。同时, 新型环保建材、集成化消防设备、智慧消防运维技术的不断迭代升级, 为既有建筑消防改造提供了更多高效、低扰、经济的技术选择。未来, 设计人员应持续结合工程实践, 不断优化适配改造项目的技术体系, 强化跨专业整合设计能力, 为城市更新背景下既有建筑消防安全提升提供可靠、更完善的技术支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 消防给水及消火栓系统技术规范 (GB 50974-2014)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范 (2018 年版)(GB 50016-2014)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [3] 山东省住房和城乡建设厅. 山东省既有建筑改造工程消防设计审查验收技术指南[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2023.
- [4] 张晓, 刘伟. 既有建筑消防给水系统与灭火设施安全性能评估技术研究 [C]// 第 16 届建筑给水排水大会论文集, 2024.
- [5] 李光华, 王磊. 消防给水稳压设备的压力设计及消防给水系统分区的探讨 [J]. 工程建设与设计, 2024(02):41-43.
- [6] 刘民杰. 既有商用建筑消防给排水管道改造设计与施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(04):127-129.
- [7] 赵强, 孙颖. 消防流量和压力限值对供水管网建造成本的影响规律 [J]. 给水排水, 2022, 48(S1):356-361.
- [8] 韩冬, 陈悦. 超高层办公楼消防水系统及系统分区探讨 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023(05):134-136.

建筑工程造价风险识别与防控机制研究

邓贵宾

(安徽建皖工程项目管理有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要 为解决建筑工程造价各阶段风险突出、管控成效不佳的问题,本研究以全生命周期造价管控为核心框架,对建筑工程前期决策、设计、招投标、施工及竣工结算各阶段的造价风险进行系统识别。通过明确各阶段风险核心表现与影响路径,结合风险特征构建针对性防控机制,覆盖各阶段管控要点,优化流程、强化协同、完善管控体系,实现造价风险精准防控,保障工程投资效益。本研究成果旨在有效遏制各阶段造价风险的传导与扩散,实现造价风险全周期精准防控,为建筑工程造价管理的精细化、智能化升级提供参考。

关键词 建筑工程造价; 风险识别; 防控机制; 市场化计价; 全生命周期

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.020

0 引言

当前建筑行业正处于结构调整与高质量发展转型期,新版工程量清单计价标准实施推动造价管理进入市场化新阶段,叠加行业绿色化、智能化转型需求,造价管控难度持续提升。行业供需结构调整、市场价格波动加剧及智能化技术应用,让项目全生命周期各环节造价风险呈现出新特征、新态势,部分项目因风险管控缺位导致投资效益受损。在此背景下,精准识别各阶段造价风险,构建适配行业新形势的防控机制,破解管控难点,成为保障工程投资合理、推动行业可持续发展的关键,也是应对行业变革、提升企业核心竞争力的必然要求。

1 建筑工程造价风险识别

1.1 前期决策阶段造价风险识别

前期决策环节的核心风险源于信息不对称与决策偏差,直接影响造价基准合理性。项目可行性研究不充分会造成造价预估偏差,这种偏差并非简单的数值误差,而是缺乏对项目建设条件、市场环境及工艺要求的全面调研,导致预估结果与实际建设需求脱节,后续需频繁调整造价基准,打乱整体管控节奏。建设标准定位不合理会引发成本失控,过高的建设标准超出项目实际功能需求,额外增加材料、工艺及施工成本,过低则可能导致项目建成后无法满足使用要求,需返工整改而产生额外造价。决策流程不规范带来的盲目投资风险,主要体现为决策过程缺乏系统性论证,未充分征求造价、施工、设计等专业人员意见,仅凭

主观判断确定建设方案,最终导致投资方向偏离实际需求,造成造价浪费与投资效益低下,所有风险均直接作用于造价基准,影响后续各环节造价管控的科学性与合理性。

1.2 设计阶段造价风险识别

设计环节成为造价控制的关键节点,风险主要集中在设计质量、深度与实际需求的适配性方面。设计方案不合理引发施工变更,过度追求形式美观忽视施工可行性与经济性,造成施工过程中需要调整结构形式、材料规格,每一次变更都会带来造价增加,而且变更发生得越晚,造价增量就越高。设计深度不足,缺少详细的节点说明、工程量清单以及工艺要求,施工单位无法准确核算工程量与造价,施工过程中需要补充设计内容,进而导致造价调整频繁,增加了管控难度。设计与规范、现场条件脱节会直接带来成本增加,设计内容没有严格遵循建筑行业现行规范,可能导致施工后无法通过验收,需要返工整改。设计没有结合现场地质、水文等实际条件,会加大施工难度与施工成本,甚至引发安全隐患,间接推高整体工程造价,这些风险从源头制约造价管控效果,需要在设计环节重点加以防范^[1]。

1.3 招投标阶段造价风险识别

招投标阶段的风险关键点在于交易过程的公平性与合同条款的合理性。招标文件不严谨很容易在造价问题上引发争论,如条款没有把造价调整的具体启动情况、计算办法以及双方各自的责任列明,一旦遇到

作者姓名: 邓贵宾(1986-),男,本科,工程师,研究方向:工程造价。

人工费用、材料价格发生变化,或者施工内容需要改动,双方就很容易在造价要不要调整、怎么调整上产生不同看法,这不但会影响工程进度,还会让管控造价的成本变高。部分投标单位为了中标,会采用低报价的竞争办法,中标之后就会想办法通过办理变更签证、在用料或工艺上打折扣等方式来弥补自己的损失,导致项目造价失去控制。评标时所采用的机制如果不够科学,会带来不合理的低价中标风险。评标的时候如果太过看重报价是不是够低,而忽略了投标单位实际的施工能力、履行合同的水平以及他们管控造价的经验,就可能中标的单位没有能力完成施工任务,最后引发造价上涨、工期延长等一系列问题,这不仅破坏了招投标环节应有的公平和科学原则,也影响了合同造价的稳定状态。

1.4 施工阶段造价风险识别

施工阶段涉及的变量最多,风险主要来自现场管理、资源管控以及外部环境波动。人工、材料、机械价格的波动会直接带来成本上涨,建筑行业人工薪酬受劳动力市场供需影响较大,材料价格受市场行情、供应链稳定性等因素制约,机械价格则与设备租赁市场、燃油价格相关,这些价格的不可预测性的波动,会打破原有的造价预算,导致成本超出预期。施工变更、签证不规范会引发造价增加,部分施工单位为追求施工便利或规避施工难度,随意提出变更需求,且签证流程不规范、资料不完整,导致变更造价无法准确核算,部分变更甚至超出项目实际需求,造成造价浪费^[2]。现场管理不善会带来工期延误及成本损耗,施工流程混乱、人员调配不合理、设备维护不到位,会导致施工效率低,工期延误产生额外的人工、机械租赁成本,同时材料浪费、施工质量不合格导致的返工,也会进一步推高工程造价,各类风险相互关联,放大造价管控难度。

1.5 竣工结算阶段造价风险识别

竣工结算环节的风险主要在结算审核和资料完整性上,这些因素决定了造价最终能否准确收尾。结算资料若不够完整或不符合规范,会影响审核进程,不少施工单位并未依照规定整理好竣工图纸、工程量清单以及签证文件等结算材料,常常出现资料丢失、填写不标准、签字盖章遗漏等情况,审核人员难以准确核对工程量和造价,导致结算审核卡壳,结算周期拉长,资金占用成本也跟着上升。工程量的核算和定额套用若产生分歧,容易引发结算上的争执,施工单位与审核单位对于工程量计算规则和定额套用标准理解不一,

部分施工单位会虚报工程量、错用定额等做法,试图抬高结算造价,而审核单位则严格按照规范来核算,双方意见不合若不能快速化解,便会升级为结算纠纷。竣工结算审核如果不严格,就会带来造价上的偏差,审核人员专业能力不够、审核流程过于简化,便难以发现结算资料里的漏洞、工程量核算中的错误以及定额套用中的问题,最终导致结算造价和实际造价出现差距,要么让建设单位多花资金,要么侵害施工单位的正当权益,从而影响造价管控的最终成效。

2 建筑工程造价风险防控机制构建

2.1 前期决策阶段造价风险防控

完善决策流程、强化信息支撑,可降低决策偏差,奠定造价管控基础。健全项目可行性研究论证体系,组建由造价、设计、施工、市场调研等专业人员组成的论证团队,全面调研项目建设条件、市场环境、工艺要求及投资效益,采用科学的预估方法,结合同类项目造价数据,提高造价预估的准确性,避免因调研不充分导致的预估偏差。科学定位建设标准,结合项目实际功能需求、投资预算及使用年限,制定合理的建设标准,平衡项目功能与经济性,既不盲目追求高端标准造成成本浪费,也不降低标准影响项目使用效果,确保建设标准与造价预算相匹配^[3]。规范决策审批流程,明确决策各环节的责任主体、审批标准及流程时限,引入多方专业意见,对建设方案、造价预算进行多轮论证,杜绝主观决策、盲目投资,确保决策过程科学、严谨,从源头降低决策环节的造价风险,为后续造价管控提供坚实的基础。

2.2 设计阶段造价风险防控

以设计优化作为核心,加强对设计环节的管控,推行限额设计,与项目造价预算挂钩,明确每一个专业领域和各个流程环节的造价控制具体目标,让造价控制的要求贯穿到设计的全过程。设计人员在方案设计、初步设计及施工图设计阶段,需要严格遵守限额的规定,对设计方案进行优化,防止因为设计超标引发的成本额外增加,同时建立针对限额设计的考核机制,确保设计人员真正落实造价控制责任。建立设计评审机制,组建一支专业的评审队伍,对设计方案、施工图进行全面细致的评审,重点核查设计方案的可行性、经济性以及它跟实际需求的匹配程度,及时发现设计中存在的不合理地方,并且给出优化建议,以减少施工阶段出现变更的风险,保证设计方案既科学又经济可行。此外,要加强设计与施工、造价之间的

协同配合,设计人员要主动去对接施工和造价方面的专业人员,了解施工工艺、现场条件以及造价控制的关键点,把施工可行性和造价经济性都融入设计过程之中,避免设计与施工、造价之间出现脱节情况,从而提升设计的实用性和经济性,从源头把控造价风险。

2.3 招投标阶段造价风险防控

规范招投标流程,完善合同条款,明确双方权责。细化招标文件里的各项条款,结合项目实际状况,明确造价调整的触发情形、计算准则、调整流程以及双方权责,清晰界定工程量清单、计价办法、付款时点等核心内容,避免条款表述模糊或存在歧义带来的造价争议,确保招标文件具备可操作性及严谨性,建立一套科学的评标机制,完善评标指标体系,兼顾投标报价合理性、投标单位施工实力、履约能力、造价管控水平以及过往业绩,避免过于侧重报价高低,采用综合评分方式,保证评标过程公平、公正、科学,筛选出实力雄厚、报价合理、履约能力强的投标单位,杜绝不合理低价中标现象^[4]。规范投标报价管理,加强对投标单位报价的审核,核查报价的合理性、完整性,杜绝投标单位虚增工程量、错套定额、低价竞标等行为,引导投标单位理性报价,确保中标报价符合项目实际造价水平,保障合同造价的稳定性。

2.4 施工阶段造价风险防控

加强现场管理控制与动态观察,能够及时应对各种变化因素,从而有效把握成本浮动,设立人工费用、材料费用、机械使用费用的动态观察体系。安排专门人员实时掌握劳动力市场、材料市场、设备租赁市场的价格变动情况,搜集价格信息,分析价格变化趋势,提前预判价格波动带来的风险,制定应对方案,比如签订长期供应合同、建立材料储备制度等,减少价格波动对造价带来的影响^[5]。规范施工变更与签证管理,明确变更的审批权限和审批流程,施工单位提出变更需求时,需要提交详细的变更方案和造价影响分析报告,经过建设方、设计方、监理方等多方审核确认后,才能实施变更;签证工作必须及时、准确,确保签证资料齐全、规范,明确签证内容、工程量以及造价,避免虚假签证和无效签证引起的造价上升,加强现场施工管理,优化施工流程,合理调配人力、物力、财力资源,加强设备维护和材料管控,减少材料浪费和设备闲置,提高施工效率,避免工期延误,降低工期延误带来的额外成本,确保施工过程有序推进,有效控制造价波动。

2.5 竣工结算阶段造价风险防控

完善结算审核体系,规范审核资料管理,让结算工作高效又准确,形成结算审核体系闭环。健全结算资料的归档与审核机制,需要明确结算资料的整理标准以及归档流程,要求施工单位按照规定及时整理竣工图纸、工程量清单、签证文件、验收报告等结算资料,确保资料完整、规范、真实有效。审核单位要建立分级审核制度,安排专业能力强、经验丰富的审核人员,对结算资料进行全面又细致的审核,重点核查资料的完整性、工程量核算的准确性以及定额套用的规范性,及时找出并纠正资料里的问题。加强工程量核算与定额套用的审核,严格遵循工程量计算规则与定额套用标准,对施工单位交上来的工程量清单逐一核对,核查是否存在虚增工程量、错套定额、重复计费这类情况,确保工程量核算准确、定额套用合理,减少结算中的偏差。建立结算争议协调机制,针对结算过程中出现的分歧,组织建设、施工、审核等多方进行沟通协商,明确争议解决流程与时限,结合项目实际情况及相关规范,公平、公正地解决结算纠纷,这样能够推进结算工作高效进行,最终实现造价管控的闭环。

3 结束语

建筑工程造价风险贯穿项目全生命周期,各阶段风险相互关联、相互影响,直接关系到工程投资合理性与项目整体效益。本文通过精准识别各阶段核心造价风险,结合风险成因与实际管控需求,构建全流程防控机制,可有效规避各类造价隐患,规范管控流程。造价风险防控是一项长期系统性工作,需结合行业发展与项目实际动态优化管控措施,强化各参与方协同配合,将风险防控融入每一个环节,持续提升造价管控水平,推动建筑工程行业高质量、可持续发展。

参考文献:

- [1] 魏丹,刘晓薇.EPC模式下建筑工程造价风险识别与防控策略研究[J].建筑监督检测与造价,2025,18(Z1):78-82.
- [2] 潘涛,雷小文.房屋建筑工程造价风险识别与控制策略研究[J].居业,2025(07):253-255.
- [3] 邵威.基于AHP的建筑工程造价风险指标体系构建与应用[J].房地产世界,2025(12):98-100.
- [4] 陈亚渲.人工智能技术在建筑工程造价风险控制中的应用与展望[J].住宅与房地产,2025(17):101-103.
- [5] 蒋萍.建筑工程造价风险识别与控制策略[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):172-174.

建筑工程全过程造价管理与控制策略研究

闫晓鹏¹, 邱 龙², 王国庆³

1. 无棣县建设监理有限责任公司, 山东 滨州 251900;
2. 烟台骅达农产品冷链物流有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 平度市旧店镇人民政府, 山东 青岛 266748)

摘要 针对建筑工程全过程造价管理中阶段脱节、管控粗放等突出问题, 本文聚焦工程全流程, 研究造价管控核心策略, 明确各阶段管控要点与难点, 构建“全过程、全要素、动态化”管控体系, 融入信息化与精细化技术及配套保障措施, 实现造价闭环管理, 重点解决造价超支、成本浪费等难点, 兼顾工程质量与进度, 以期为建筑工程全过程造价管控提供实践参考, 助力提升工程投资效益与管控规范化水平。

关键词 建筑工程; 全过程造价管理; 造价控制; 动态管控; 信息化技术

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.021

0 引言

建筑工程全过程造价管理贯穿工程全生命周期, 涵盖决策、设计、招投标、施工、竣工结算等环节, 直接影响工程投资效益、质量与进度。当前, 建筑工程规模扩大、工艺复杂, 全过程造价管理存在各阶段管控脱节、管控方法传统、措施流于形式等问题, 易导致成本浪费、造价超支, 因此构建科学可落地的全过程造价管控策略, 强化协同管控、提升管控精准度, 是破解该难题的关键。

1 建筑工程全过程造价管理核心内涵与管控原则

1.1 核心内涵

建筑工程全过程造价管理是指以工程全生命周期为核心, 对工程决策、设计、招投标、施工、竣工结算等各个阶段的造价进行全面规划、控制、核算与监管, 实现工程造价的合理确定与有效控制。其核心目标是在保障工程质量、安全与进度的前提下, 最大限度降低工程投资成本, 提高投资效益, 避免成本浪费与造价超支。全过程造价管理强调“全阶段协同、全要素管控、动态化调整”, 打破各阶段造价管理的壁垒, 实现信息互通、协同发力, 确保造价管控贯穿工程建设的每一个环节^[1]。

1.2 核心管控原则

全过程造价管控需遵循四大核心原则, 确保管控工作科学有序开展。一是系统性原则, 将各阶段造价管控作为一个有机整体, 统筹规划、协同推进, 避免

单一阶段管控脱节导致的造价失控; 二是精准性原则, 强化各阶段造价核算与估算的精准度, 基于详实的数据支撑, 避免粗放式估算与核算, 减少造价偏差; 三是动态性原则, 结合工程建设过程中的各类变量(材料价格波动、施工工艺调整、设计变更等), 及时调整造价管控策略, 实现造价的动态平衡; 四是权责对等原则, 明确各参与方(建设单位、设计单位、施工单位、监理单位)的造价管控职责, 将管控责任落实到具体岗位与个人, 确保各项管控措施落地见效^[2]。

2 建筑工程各阶段造价管理与控制策略

2.1 决策阶段造价管理与控制

决策阶段是建筑工程造价管控的源头, 直接决定投资规模与造价水平, 核心是保障投资估算的精准合理。需开展前期调研, 收集地质、材料价格等相关数据, 明确建设规模与工艺选型, 采用科学估算方法(系数估算法、指标估算法等)细化指标, 将估算误差控制在±10%以内。同时, 需对比分析不同建设、工艺及材料方案, 选择造价合理、技术可行的最优方案, 避免后期造价超支; 强化投资估算审核, 排查漏洞, 确保估算符合工程实际, 为后续造价管控奠定基础。

2.2 设计阶段造价管理与控制

设计阶段是造价控制的关键环节, 设计方案的经济性与合理性直接影响工程全过程造价, 其管控重点是将造价控制融入设计全过程, 实现设计与造价的协同优化。推行限额设计制度, 根据决策阶段确定的投

作者简介: 闫晓鹏(1991-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

资估算,明确各专业、各分项工程的造价限额,设计单位需在限额范围内开展设计工作,严禁超限额设计,确保设计方案的经济性。强化设计方案的经济性审核,组织造价人员与设计人员协同工作,对设计方案进行经济性分析,优化设计细节,减少设计冗余,避免因设计不合理导致的成本浪费。例如,优化建筑结构形式,选用经济合理的材料与构件,减少不必要的工程量;优化机电安装设计,实现管线布局合理,降低施工难度与材料消耗。同时,推行设计交底与设计变更管控制度,设计交底时明确造价控制要点,设计变更需经过严格的审核流程,分析变更对造价的影响,未经审核不得擅自变更,避免因设计变更导致造价大幅增加。

2.3 招投标阶段造价管理与控制

招投标阶段造价管控的核心是规范招投标流程,合理确定中标价格,防范招投标过程中的造价风险。首先,完善招标文件编制工作,明确工程范围、工期、质量标准、计价方式、付款方式等核心条款,确保招标文件的严谨性与规范性,避免因条款模糊导致后期造价纠纷。计价方式的选择需结合工程特点,采用工程量清单计价模式,明确工程量计算规则、综合单价组成,确保计价的公平、公正、透明。

加强工程量清单编制与审核,确保工程量清单的准确性与完整性,避免漏项、错项导致的造价偏差;严格审核投标单位的投标报价,对比分析各投标单位的报价组成、优惠条件,排查不平衡报价、恶意低价竞标等问题,确保中标价格合理,既符合工程实际造价水平,又能保障施工单位的合理利润。同时,规范评标流程,建立科学的评标体系,结合报价、技术方案、企业信誉等多方面因素综合评标,避免单纯以低价作为中标的唯一标准,确保工程质量与施工进度。

2.4 施工阶段造价管理与控制

施工阶段是造价消耗核心与管控难点,重点是强化成本动态管控、减少浪费、控制超支。需建立动态管控体系,实时跟踪进度与成本消耗,对比实际与预算偏差并及时调整,实现成本动态平衡。

强化工程量计量与工程款支付管控,按进度精准计量、依规支付,杜绝超付、提前支付;加强材料设备管控,建立价格动态监测机制,推行集中比价采购降本,严格进场验收,避免返工浪费。

严格管控施工变更与现场签证,变更需经审核并明确价款计算,签证需及时准确、多方确认;同时优化施工方案、合理安排工序,减少窝工返工,提升效率、降低成本。

加强施工变更与现场签证管控,施工变更需经过

严格的审核流程,分析变更对造价与进度的影响,明确变更价款的计算方法;现场签证需及时、准确,详细记录签证内容、工程量、费用等信息,经多方确认后生效,避免虚假签证、无效签证导致的造价增加。同时,优化施工方案,合理安排施工工序,减少窝工、返工,提高施工效率,降低施工成本^[3]。

2.5 竣工结算阶段造价管理与控制

竣工结算阶段是造价管控的收尾环节,其核心是做好结算审核工作,确保结算价款的准确性与合理性,实现工程造价的最终控制。首先,规范竣工结算资料的整理与提交,施工单位需按照合同约定与结算规范,整理完整的竣工结算资料,包括工程量清单、竣工图纸、施工记录、现场签证、设计变更、材料价格证明等,确保资料的真实性、完整性、规范性。

加强竣工结算审核工作,组织专业的造价审核人员,采用全面审核法、重点审核法、对比审核法等方法,对竣工结算资料进行全面审核,重点审核工程量计算、综合单价套用、取费标准、材料价格、施工变更与现场签证等内容,排查结算中的漏洞与不合理之处,纠正结算偏差^[4]。严格按照合同约定与计价规范,确定结算价款,避免高估冒算、虚增工程量等问题。同时,建立结算审核争议协调机制,针对审核过程中出现的争议,组织建设单位、施工单位、监理单位等多方沟通协调,妥善解决争议,确保竣工结算工作顺利推进。

3 建筑工程全过程造价管理信息化与精细化技术应用

3.1 信息化技术应用

引入信息化技术,构建全过程造价管理信息平台,实现造价管控的数字化、智能化升级,提升管控效率与精准度。依托BIM技术,构建建筑工程三维模型,将造价数据与三维模型相关联,实现各阶段造价的可视化管控,直观呈现造价分布与变化情况,便于及时发现造价偏差。通过BIM模型开展工程量自动计算、造价估算、结算审核等工作,减少人工计算误差,提高工作效率^[5]。

搭建造价管理信息共享平台,实现建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等各参与方的信息互通,共享工程量、材料价格、设计变更、现场签证等相关数据,打破信息壁垒,实现协同管控。引入大数据技术,收集整理建筑工程各类造价数据,建立造价数据库,通过大数据分析,预测材料价格波动趋势、造价偏差风险,为造价管控决策提供数据支撑。同时,推广使用造价管理软件,实现工程量计算、综合单价套用、取费计算等工作的自动化,提升造价核算与管控的效率。

3.2 精细化管理技术应用

推行精细化造价管理,将造价管控细化到每一个分项工程、每一道施工工序、每一种材料设备,实现全方位、精细化管控。建立精细化造价核算体系,细化造价核算指标,明确各分项工程、各工序的造价标准,确保造价核算的精准性。加强材料与设备的精细化管控,建立材料台账,详细记录材料的采购、进场、使用、消耗等情况,实现材料消耗的精准控制;优化材料使用方案,减少材料浪费,降低材料成本。

强化施工工序的精细化管控,合理安排施工工序,优化施工流程,减少窝工、返工,提高施工效率;对每一道施工工序的造价消耗进行实时跟踪与核算,对比实际消耗与预算消耗的偏差,及时采取调整措施。建立精细化造价管控责任体系,将管控责任细化到具体岗位与个人,明确各岗位的管控职责与工作标准,确保各项精细化管控措施落地见效。

4 建筑工程全过程造价管理保障措施

4.1 制度保障

建立健全全过程造价管理制度体系,结合建筑工程特点与造价管控需求,制定完善的造价管理办法、估算审核制度、设计变更管理制度、招投标管理制度、施工阶段造价管控办法、竣工结算审核制度等,明确各阶段造价管控的流程、标准与责任,确保各项管控工作有章可循。加强制度执行力度,建立制度执行监督机制,定期检查制度落实情况,对违反制度的行为严肃处理,确保各项制度落到实处。定期对制度进行修订完善,结合工程建设技术、计价规范、政策法规的变化,及时调整制度内容,适应造价管控的新需求。

4.2 人员保障

加强造价管理专业队伍建设,培养一批具备专业知识、实践经验、责任意识的造价管理人员,提升队伍的专业素养与履职能力。定期开展造价管理人员培训工作,培训内容包括计价规范、造价管理技术、信息化工具应用、法律法规等,不断更新知识储备,提升专业技能。建立造价管理人员绩效评价体系,将管控成效、工作质量与绩效挂钩,激励管理人员提升工作水平。同时,明确各参与方造价管理人员的职责,加强各参与方之间的协同配合,形成管控合力。

4.3 技术保障

加强造价管理技术研发与应用,推广先进的造价管控技术、信息化工具与精细化管理方法,提升造价管控的科学性与高效性。与科研机构、高校开展合作,针对全过程造价管控的难点问题,开展技术攻关,研

发适配建筑工程场景的造价管控技术与工具。加强技术推广与应用指导,确保信息化技术、精细化管理方法在各阶段造价管控中有效落地,提升管控效率与精准度。建立技术支撑体系,为造价管理人员提供技术指导与支持,及时解决管控过程中遇到的技术难题。

4.4 监督保障

建立多元化监督机制,构建“内部监督+外部监督”相结合的监督体系。内部监督由建设单位造价管理部门负责,定期开展全过程造价管控监督检查,排查管控漏洞与问题,督促整改落实;外部监督由行业主管部门、监理单位、造价咨询单位负责,加强对建筑工程全过程造价管控的监督检查,对违规操作、造价失控等问题进行查处。建立监督反馈机制,及时收集监督检查过程中发现的问题与建议,优化造价管控策略与措施,持续提升造价管控水平。

5 结束语

建筑工程全过程造价管理与控制是提升工程投资效益、保障工程质量与进度的核心手段,贯穿工程建设的全生命周期,面临着各阶段管控脱节、管控粗放、动态调整不足等诸多难题。本文通过明确全过程造价管理的核心内涵与管控原则,针对性提出各阶段造价管控策略,融入信息化与精细化技术,配套完善的制度、人员、技术、监督保障措施,构建了科学系统的全过程造价管控体系,实现了造价的事前预判、事中控制、事后复盘的闭环管理,可有效提升造价管控的精准度与效率,降低成本浪费,避免造价超支。未来,需进一步深化信息化技术与造价管理的融合应用,引入人工智能、大数据等先进技术,优化造价管控模型,提升管控的智能化水平;同时,持续完善全过程造价管控制度与保障体系,推动造价管控向精细化、规范化、智能化方向发展,为建筑工程高质量发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 贾灿灿. 建筑工程造价管理中全过程控制的应用探讨[J]. 建筑设计与研究, 2025, 06(09): 77-79.
- [2] 宋姝. 全过程工程造价管理控制策略研究[J]. 现代装饰, 2025(23): 208-210.
- [3] 陈弘隽. 房屋建筑工程测量全过程质量控制体系构建与实践[J]. 科海故事博览, 2025(35): 124-126.
- [4] 宣晶, 邓悦, 张强, 等. 基于 BIM 技术的智能建造项目管理平台构建与应用研究[J]. 建筑科学, 2025(10): 239-248.
- [5] 张雁. BIM 技术在建筑施工全过程造价预估中的应用研究[J]. 陇东学院学报, 2022, 33(02): 85-88.

现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径与实践

严来鑫

(贵溪冶炼厂, 江西 贵溪 335400)

摘要 本文着眼于现代铜冶炼工艺存在的高能耗、高排放等难点,以推动铜冶炼行业绿色低碳转型发展为目的,立足于现代铜冶炼工艺的主要能耗环节与瓶颈,从工艺革新、余热循环、智能赋能和设备迭代四个方面,积极探讨并总结现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径,包括熔炼强化与流程精简、梯级回收与高效利用、精准调控与操作优化、升级改造与淘汰落后。之后,结合实际案例,通过具体工艺参数、设备型号、能耗数值的对比,进一步验证了工艺革新缩短流程、余热循环梯级利用、智能赋能精准调控以及设备迭代淘汰落后的有效性,以期显著降低冶炼过程能耗,推动铜冶炼行业绿色化、高效化发展提供借鉴。

关键词 铜冶炼工艺; 节能降耗; 余热循环; 智能赋能; 设备迭代

中图分类号: TF81

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.022

0 引言

新时代,铜冶炼行业面临能源消耗、环境污染的双重压力。在“双碳”目标持续推进以及能源成本不断攀升的背景下,节能降耗俨然成为铜冶炼企业提升竞争力的关键手段。近年来,铜冶炼行业对铜冶炼工艺的研究多局限于单一环节改进,缺乏全流程系统性优化方案。基于此,本文拟从现代铜冶炼工艺的主要能耗环节切入,研究现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径。

1 现代铜冶炼工艺的主要能耗环节与瓶颈分析

1.1 主要能耗环节

现代铜冶炼工艺的主要能耗环节,主要体现在熔炼阶段、吹炼与精炼阶段、电解精炼阶段。其中熔炼阶段的能耗占比为50%,为最高能耗环节。该阶段的主要能源为煤炭、天然气,对温度的要求为1 200 ~ 1 300 °C,且以富氧熔炼、悬浮熔炼技术为主。吹炼与精炼阶段的能耗占比为25% ~ 30%,该阶段的主要能源为氧气、电力,温度需保持在1 200 °C左右,依赖连续吹炼、自动化控制技术。电解精炼阶段的能耗占比为15% ~ 20%,该阶段的主要能源为电力,电解液的温度需保持在55 ~ 65 °C,主要依赖高效电解槽、电流优化技术。

1.2 主要能耗瓶颈

当前,现代铜冶炼工艺能耗方面,面临热效率损失严重、电解效率不足以及装备技术滞后等困境^[1]。

从热效率损失严重的维度来看,熔炼环节约30%热能随烟气散失,传统余热回收率仅40% ~ 50%,回收效率较低。同时,受间歇作业的影响,吹炼工序会致使炉体蓄热浪费,从而增加能耗。从电解效率不足的维度来看,电解液杂质会令无效电耗升高,且通常情况下,每降低1%电流效率,便会增加电耗100 kW·h/t铜。同时,电解槽的落后设计,也导致吨铜电耗较大。从装备技术滞后的维度来看,鼓风机、反射炉等落后装备,也在一定程度上增加了粗铜综合能耗^[2]。

2 现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径

2.1 工艺革新: 熔炼强化与流程精简

在熔炼环节,传统工艺受到反应速率不足、物料停留时间长等因素的影响,致使燃料、电力消耗居高不下^[3]。故而,需要从熔炼和流程两方面着手,对工艺进行革新,从而降低冶炼基础能耗、减少无效能量投入。

首先要积极推广短流程连续冶炼技术,即要加强对“双侧吹熔炼+多强顶吹连续吹炼”一体化工艺的应用,取消传统转炉吹炼环节,达到缩短流程、减少热损失的目的。同时,要主动采用旋浮熔炼炉代替反射炉,提高氧气浓度和熔炼强度,并在最终切实降低燃料消耗;其次要优化熔炼过程反应,即可以在阳极精炼阶段利用纯氧替代空气燃烧,减少氮气带走的热量,并降低烟气量以及天然气单耗。针对铜铈吹炼环节,则可以利用连续吹炼技术实现24小时不间断生产,且充分保证烟气SO₂浓度稳定,并显著提升硫回收率,降

作者简介: 严来鑫(1997-),男,本科,助理工程师,研究方向: 冶金工程。

低无组织排放风险。针对含铅铜精矿，则可以直接采用直接还原工艺，避免渣冷却再熔的二次能耗，提升金属回收率。

2.2 余热循环：梯级回收与高效利用

传统工艺因余热回收装置不完善、梯级利用不足，致使较大比例的可用热能被直接排放^[4]。因此，应从梯级回收和高效利用两方面入手，促进余热循环，将原本浪费的热能转化为电能、余热能等，从而切实提升能源自给率、减少化石燃料消耗。

第一，要加强烟气余热梯级回收系统应用。具体来说，可在 400 ~ 600 °C 高温烟气驱动余热锅炉的条件下，耦合有机朗肯循环（ORC）发电技术，进一步提高低温烟气效率以及吨铜发电量。在此基础上，也应积极优化烟道结构设计，即加强对“一进二出”汽化烟道分流技术的有效应用，切实提升粉尘适应性和余热转化效率。夏季还可以利用余热驱动溴化锂机组制冷，替代传统电制冷能耗。冬季则可以将 10 ~ 200 °C 烟气用于厂区供暖。第二，要实现工艺热耦合。例如：可利用高温焙烧余热直接加热浸出液，降低湿法炼锌能耗。还可以利用熔炼段高温蒸汽预热电解液至 60 °C，从而切实减少电解槽外部蒸汽消耗。江西铜业主动将闪速熔炼炉 1 200 °C 高温余热引入制氧系统中，实现对电加热再生吸附剂的有效替代，年节电 8 000 万度、制氧成本降 40%。

2.3 智能赋能：精准调控与操作优化

传统铜冶炼主要以人工经验调节工艺参数为主，所以，非常容易因操作偏差而致使局部过热、反应不完全等情况出现^[5]。针对此种情况，可以以精准调控、操作优化为目的，实现智能赋能，切实解决人为因素导致的能源浪费。

从工艺参数的角度来看，可以积极部署电流密度自适应系统，使其可以依据电解液杂质浓度，对槽电压进行动态调整，并切实降低吨铜电耗。在此基础上，也要加强对在线成分分析仪（LIBS）的应用，进而动态调节氧气、精矿比例，减少因过剩氧导致的烟气热损失。从设备管理和维度的角度来看，可以积极打造冶炼炉数字模型，并利用该模型模拟温度场、流场分布，从而实现对炉衬侵蚀的提前预警，减少非计划停炉次数^[6]。例如：可利用数字化技术改造构建全流程智能管控系统，并有机集成熔炼、电解工序数据，实现阳极板质量自动检测和搬运，切实降低综合能耗。同时，对关键设备的振动数据、温度数据等进行实时分析，提高预测准确率、降低维修成本。例如：可利用 AI 巡检系统对皮带运输机堵料、跑偏等工况进行监测，实现年增经济效益，并显著降低维修成本。

2.4 设备迭代：升级改造与淘汰落后

老旧设备电力转换效率低、传统耐火材料保温性能差，导致各环节的实际能耗相对较高。所以，要积极对设备开展升级改造和淘汰落后工作，进而能从生产工具层面消除能源浪费，并满足国家能效标准。

针对在基准水平以下的鼓风机、反射炉等，将其替换成旋浮熔炼炉、双熔池连续炼铜炉，进而实现连续化生产，并切实减少热能损失。同时，为能进一步降低阴极剥离能耗、备件成本，并提升电流效率和阴极铜合格率，则还可以将电解槽升级为永久阴极不锈钢电解槽。在新的时期，也要用倾动式精炼炉替代固定式阳极炉，提高倾转出铜速率，降低天然气单耗。除此之外，还要加快淘汰高耗能、低效率的传统电炉、敞口式熔炼炉等落后工艺设备，积极推广使用高效、节能的短流程冶炼技术、装备，切实降低传输过程中的电力消耗。同时，这也可以充分彰显企业践行绿色低碳发展的责任担当。

3 典型案例分析

本文从工艺革新、余热循环、智能赋能和设备迭代四个维度出发，选取具有代表性的铜冶炼企业，对本文提出的节能降耗优化路径进行分析。

3.1 工艺革新案例

某企业原本采取的是反射炉熔炼 + 转炉吹炼的传统工艺。其中，熔炼环节燃料消耗占吨铜总能耗的比例较大，约 60%，烟气余热回收率也相对较低，约 45%。同时，转炉每 2 小时需要换炉一次，这增加了炉体蓄热损失。故而，该企业选择对工艺进行革新：积极引进双侧吹熔炼和闪速吹炼短流程工艺，实现了对传统转炉环节的有效替代。且在新工艺的支持下，熔炼流程也从原本的熔炼、吹炼、精炼三段式，有效缩短为熔炼、直吹精炼两段式。该工艺下，中间物料转运次数从每日 12 次减至 3 次，切实降低了热损失，约为 20%。此外，该企业还利用旋浮熔炼炉替换反射炉，进一步提高了富氧浓度、优化了喷嘴结构使熔炼强度，使得天然气单耗从 180 m³/t 降至 129.6 m³/t，熔炼温度稳定性也从 ±20 °C 提升至 ±10 °C。综合所述，该企业通过革新工艺，使得吨铜综合能耗从 380 kgce 降至 285 kgce、硫捕集率从 98.5% 提升至 99.6%、烟气 SO₂ 浓度从 800 mg/Nm³ 降至 50 mg/Nm³。

3.2 余热循环案例

某企业熔炼炉烟气流量为 120 万 Nm³/h、为温度 1 200 °C，但原有余热锅炉在回收热量方面稍微逊色，仅能回收 400 ~ 600 °C 区间热量，且 100 ~ 300 °C 低

温烟气直接排放,导致热效率损失超50%。同时,该企业冬季厂区供热主要依靠2台20 t/h燃煤锅炉,使得能耗成本占辅助生产成本的18%。针对该实际情况,该企业选择对系统进行优化设计,并实现多能利用。首先,打造三级回收系统,即针对400~600℃高温段,科学配套2台35 MW余热锅炉,用回收烟气热量产生的3.82 MPa饱和蒸汽,驱动25 MW汽轮机组年发电;针对150~300℃中温段,加强有机朗肯循环(ORC)技术利用,并实现氟利昂工质发电;针对80~150℃低温段,利用板式换热器将电解液预热至50℃,切实降低了20%蒸汽消耗。同时,还实现了季节性多能联供,即夏季利用余热驱动2台2 000 kW溴化锂机组制冷,满足办公楼空调需求。冬季将10~200℃烟气接入厂区供暖管网,替代原燃煤锅炉。综合所述,该企业通过对系统进行优化设计,使得余热综合利用率从55%提升至82%、年节约标煤5.6万吨,且减少了外购电1 200万kW·h。

3.3 智能赋能案例

某企业在电解工序环节,主要以利用人工经验调节电流密度、槽电压为主,致使电流效率波动大,且吨铜电耗偏高。同时,该企业还存在熔炼炉炉衬侵蚀无实时监测、非计划停炉次数年均8次的情况,使得维修成本占比占据较大比例。针对该实际情况,该企业主动加强数字技术应用:首先利用数字技术构建覆盖熔炼炉、电解槽的能源管理中心,并依托该中心,对熔炼氧料比、电解液As/Sb杂质浓度等2 000+参数进行实时采集,并基于采集到的数据,协同AI算法,对熔炼氧料比、电解液杂质控制阈值等进行动态优化。同时,该企业还积极打造了精准调控系统,即在电解环节,科学部署电流密度自适应系统,由该自适应系统依据实时杂质浓度,自动调节槽电压,以此达到将电流效率稳定在98.5%以上、降低铜电耗的目的;在熔炼环节利用数字模型,模拟温度场、流场分布,并实现对炉衬侵蚀速率的有效预测,旨在达到降低非计划停炉次数的目的。并且,该企业也在风机、泵类等关键设备上合理部署了振动传感器、温度监测模块,实现了对机械故障的提前预测,这切实降低了维修成本。综合所述,该企业通过加强数字化技术应用,使得吨铜电耗从310 kW·h降至295 kW·h、电流效率稳定在98.5%~99%区间、设备运维效率提升40%。

3.4 设备迭代案例

某企业原有2台鼓风机、3台反射炉,且综合能耗350 kgce/t阴极铜、烟气中颗粒物(PM)浓度150 mg/Nm³、

SO₂浓度600 mg/Nm³。同时,该企业的电解槽为传统始极片工艺,电流效率仅97%。基于该情况,该企业选择对设备进行升级:将鼓风机、反射炉全部替换为旋浮熔炼炉、双熔池连续炼铜炉,切实降低了燃料消耗、提高了熔炼强度,令天然气单耗从180 m³/t降至126 m³/t、日处理量从1 500 t增至2 250 t;将电解槽升级为永久阴极不锈钢电解槽,且在阴极剥离采用液压机械手作业,实现对手工作业的有效替代,这切实降低了剥离能耗、提升了电流效率;利用倾动式精炼炉代替固定式阳极炉,提高了出铜速率,降低了天然气单耗;同时,对风机、泵类等积极开展变频改造工作,进一步减少了电力传输损耗。综合所述,该企业通过积极落实设备升级工作,使得吨铜综合能耗从350 kgce降至260 kgce、年减少碳排放12万t、烟气颗粒物浓度降至10 mg/Nm³、SO₂浓度降至20 mg/Nm³。

4 结束语

本研究通过工艺革新、余热循环、智能赋能、设备迭代,积极总结了现代铜冶炼工艺的节能降耗优化路径,这既可以有效回应“双碳”战略,也可以推动铜冶炼行业绿色低碳发展。未来,在全球能源格局加速重构的背景下,铜冶炼行业需进一步突破传统生产模式的惯性依赖,持续通过技术创新、管理优化、模式变革,包括引入电炉熔炼、氧气底吹等先进工艺降低综合能耗,积极借鉴能效“领跑者”企业的余热梯级利用经验,加强低品位铜矿的浮选工艺优化与资源闭路循环体系建设,推动铜冶炼行业走上绿色低碳的高质量发展道路。

参考文献:

- [1] 金钊,李春雷,杨顺贵,等.粗铜冶炼企业提升能效水平降低碳排放的研究与应用[J].低碳世界,2026,16(01):107-109.
- [2] 许英豪.基于浮选药剂回用技术在铜冶炼厂节能减排中的应用[J].中国金属通报,2025(09):171-173.
- [3] 郝晓东.铜冶炼烟气制酸系统中污酸污水装置节能增效改造实践[J].硫酸工业,2024(06):38-41.
- [4] 谢钿生.大型铜冶炼高效节能铜电解新技术研究[J].有色金属(冶炼部分),2025(03):58-104.
- [5] 陈薪光.浅谈海外铜冶炼企业节能减排降碳管理实践与探索[J].有色矿冶,2024,40(03):58-60.
- [6] 林世凡,自振华.铜冶炼烟气制酸系统浓酸泵变频器节能改造实践[J].硫酸工业,2024(04):34-37.

装配式建筑预制构件生产制约因素及优化研究

王新宇

(东北电力大学经济管理学院, 吉林省 吉林市 132000)

摘要 在我国建筑产业化进程不断加快的背景下, 装配式建筑已经成为推动我国建筑业高质量发展、实现双碳减排的重要载体。预制件是建筑施工的关键材料, 其生产效率、质量稳定性和造价控制直接影响到工程的总体效益。但目前预制件生产过程中还存在诸多限制。本文拟从深化标准化设计、推进智能制造升级、完善供应链协同机制、构建动态成本管控机制等方面, 对预制构件生产效率的提高和建筑行业的现代化建设进行研究, 以期为提升预制构件生产效能、推动建筑产业现代化提供理论参考。

关键词 装配式建筑; 预制构件; 生产制约; 标准化; 智能制造

中图分类号: TU56

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.023

0 引言

随着现代城市建设对施工效率、成本管控与生态环保的要求日益提升, 装配式建筑凭借施工速度快、工程质量高的优势, 成为城市建筑领域备受青睐的建造方式。在城市装配式建筑的全过程质量管理体系构建中, 韩宴羽等^[1]构建了以预制构件为核心, 包含事前指导、事中控制和事后反馈的装配式建筑质量管理体系。该系统能针对各阶段的质量影响因素进行有效管理。孙玉芳等^[2]针对城市装配式建筑项目中暴露的问题, 指出设计人员专业能力不足、材料选用不当、现场施工工艺不规范是制约工程质量的核心因素, 进而提出需强化城市项目中的设计能力、图纸精度与预制构件质量管理。张克等^[3]结合城市建筑的背景, 运用 ISM 模型以及 MICMAC 方法对质量影响因素进行分析, 发现装配式建筑的法律法规不健全、政府对装配式建筑的质量重要性引导不足是主要影响因素。刘光忱等^[4]基于装配式混凝土建筑质量影响因素的分析, 发现政府导向是根本性影响因素, 能直接或间接地影响预制构件质量、参与方的沟通与协调、业主合同管理水平等。陈雯甜^[5]认为预制构件的主要生产制约因素在于原材料的使用及原材料的监管。邓海旺^[6]则指出生产人员和设计人员等相关人员的水平会影响预制构件的质量。

在我国传统建筑产业迈向现代产业的大环境中, 生产模式的转变已经成为产业发展的主要动力。预制件的制造与管理在整个城市装配式建筑建造过程中起着至关重要的作用。预制构件装配工艺由现场的操作转变为在工厂内部进行, 理论上要求其具有高精度、

高效率和低成本等特点。但当前很少有预制构件制造企业能够具备这些特点。目前, 我国正在积极推进绿色施工和智慧施工, 对预制混凝土构件的需求也在不断增加。

在产业规模日益壮大的同时, 预制构建工业目前还处在量增质疑的情况。很多工厂都是在短期内盲目扩大产能, 造成了产能的不平衡, 并且这些工厂的生产方式大多是工地搬家式的简单置换, 而没有在制造层次上实现精细的管理。在生产实践中, 制造企业普遍存在着盈利空间被压缩, 生产计划变更频繁, 质量问题难以根治的问题。产能扩张与生产效率落后的矛盾已经成为我国装配式建筑进一步降低成本和提升竞争力的重要瓶颈。

1 预制构件生产过程中的主要制约因素

根据对行业现状的理论分析, 当前制约预制构件生产效率与效益的因素主要集中在设计标准化、工艺技术、管理体系及市场要素四个方面。

1.1 设计标准化缺失, 模具与转换成本高

在预制件生产过程中, 标准化水平不高是其主要限制, 低标准化会使其规模效应不再有效, 工业化生产的核心优势是通过标准化的重复制造实现固定成本的分摊。但是, 当前我国建筑设计和制造环节都有很大的割裂。由于缺少工业化的思路, 过分地追求立面的丰富和构造的独特, 造成了在同一个工程乃至同一层中存在大量规格不一、尺度不一的异型构件。

模具费用呈指数增长, 预制部件规格多样化, 这直接造成了模具品种的急剧增加。模具是一种高附加

作者简介: 王新宇(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 装配式建筑及预制构件的发展。

值的生产设备，它的摊销费用与周转次数密切相关。但当构件缺少标准化时，会导致模具通用性较低，重构和重置成本较高，最终导致产品制造成本随着产品产量的提高而不断降低，从而降低了企业的经济竞争力。

1.2 工艺与信息化脱节，生产技术资料管理滞后

技术资料与信息流的不完善，是制约生产精细化的重要障碍。

1. 设计生产信息断层：在深入设计的过程中，常常存在着将建筑物信息模型与生产装备系统进行直接对接的问题。大量的设计图纸仍然需要手工进行拆卸和转换，这样既影响工作效率，又容易出现人为误差。

2. 生产过程数据杂乱：目前，很多预制构件企业还没有健全的制造执行系统，生产计划、材料消耗、质量检验记录等重要信息都是依赖于纸质文件或者是零散的 Excel 表格来传递。由于管理人员不能及时把握各生产线的生产瓶颈，造成了生产计划与实际生产相脱离、仓库积压和缺货停产并存的问题。这样的信息不透明性，导致了企业的生产计划陷入了被动。

1.3 生产工艺自动化水平低，质量控制依赖人工

尽管预制构件在工厂生产，但目前的工艺水平仍不完全脱离劳动密集型特征。

1. 自动化装备普及率低：目前，除极少数龙头企业之外，许多中小规模的工厂在钢筋加工、装配模具、浇筑混凝土和表面加工等方面仍然依靠手工。由于人为因素的不确定，造成预制构件尺寸不均匀和保护层厚度不均匀。

2. 养护工艺的能耗与效率矛盾：蒸养是加速铸型的重要工序，然而，传统养护窑控温精度较低，能耗高，温度调控不合理，易引起构件开裂。生产工艺的滞后制约了生产能力的发挥，同时也加大了产品的返工费用。

1.4 供应链协同弱，受市场要素波动影响大

构件生产同样深受上游要素市场的不确定性影响。

1. 原材料价格传导机制缺失：预制混凝土构件的成本主要包括钢材、水泥、砂石和人工。建设项目的工期较长，而部分合约大多是封闭的或价格调整机制的落后。在原料价格变动较大的情况下，制造企业面临着很大的成本倒置风险。

2. 物流与运输半径限制：预制混凝土构件属于重资产、大体积产品，运输成本占比较高。受限于运输半径，构件厂的市场覆盖范围有限，导致区域内产能过剩与区域外供应不足并存，供应链缺乏弹性。

1.5 生产设备精度衰减与非计划停机对效率的制约

在预制构件迈向工业化量产的过程中，生产设备本身的可靠性与精度动态漂移已成为制约效率与质量

的隐性瓶颈。目前多数工厂虽引进了自动化产线，但在高强度、高频次的生产压力下，缺乏对关键设备的预测性维护机制，导致设备因磨损或标定失效产生精度偏差，直接威胁到构件的尺寸稳定性。由于缺乏对设备健康状态的实时监控，工厂往往陷入出故障才维修的被动局面，突发性的非计划停机不仅彻底打乱了原有的生产节奏，造成各工序间的严重窝工与等待浪费，更在设备故障初期产出了大量外观合格但内部结构精度不达标的亚健康构件。这种设备管理逻辑的滞后，使得工厂在追求极致周转效率的同时，不得不预留大量的冗余工时来应对设备的不确定性，这种效能的内耗在很大程度上抵消了自动化技术带来的提速优势，成为制约工厂实现精益化生产目标的重要障碍。

2 预制构件生产优化的理论对策

针对上述制约因素，必须从系统的角度出发，通过对其他龙头企业或制造业的借鉴和标准化、数字化、精细化及动态化的策略，重构预制构件的生产体系。

2.1 推行少规格和多组合设计，建立标准化产品体系

从源头上解决预制件制造过程中的非标准化问题，是实现预制件制造过程优化的最关键的一步。

1. 建立数字化和模型化思维：要把智能化和数字化的思想融入建筑方案的设计中，并按照数据和模型协同的原理进行。在此基础上，构建一种标准化的分解方式，实现对复杂建筑物的逐步分解。倡导少规格和多组合的设计思路，以尽量少的构件类型进行生产，以多种组合形式来满足建筑的各种功能和立面要求。

2. 实施通用模具战略：预制构件制造企业应该在其部件的设计中起到牵头或参与的作用，促进模具通用化。研究开发通用的模具和模板，实现一套模具可适用于特定尺度零件的制造，极大地提升模具周转速度与利用率，实现固定资产折旧费用的本质削减。

2.2 搭建数智化管理平台，完善技术资料全流程闭环

借鉴完善技术资料管理，建立信息化平台的经验，构件生产必须实现数据驱动。

1. 建立 BIM+MES 综合系统：将 BIM 模型和生产执行机构的数据连接起来，将预制构件的几何信息和布局信息直接输入到数控机床上，减少人为转换带来的错误。构建一物一码的预制构件标识体系，实现预制构件从原材料入库、生产浇筑、养护、质量检验、出厂出库等环节均可利用条码等技术对部件进行追溯。

2. 实现生产调度的动态优化：通过大数据的计算，实现生产调度的智能化调度，系统应能够基于工程现

场的安装进度、工厂的模具库存以及员工的排班等信息，自动制定最佳的生产计划，从而减少模具更换的次数，达到准时制的目的，从而减少库存的积压。

2.3 升级智能制造工艺，提升专业化生产素养

加强技术培训与工艺升级是提升生产质量的关键。

1. 推广自动化产线与机器人应用：加大对自动划线机、焊接机器人、自动布料机等智能装备的投入，替代高强度的重复性体力劳动。通过机器视觉技术进行在线质量检测，实时监控构件的尺寸精度与外观质量，确保出厂合格率。

2. 培育新型产业工人：建立完善的产业工人培训体系，将传统的建筑农民工转化为掌握数控设备、懂得工业化流程的现代产业工人。加强对工艺纪律、质量意识的培训，建立基于技能等级的晋升与激励机制，保障生产队伍的稳定性与专业性。

2.4 建立动态成本响应机制，增强供应链韧性

应对市场波动，需要建立灵活的价格与供应链机制。

1. 建立原材料价格联动机制：在构件供需合同中，应设立原材料价格波动调整指标。以权威部门发布的材料价格指数为基准，当钢材、水泥等主要原料价格波动超过约定幅度时，自动触发构件销售价格的调整公式，在建设单位与生产单位之间合理分担市场风险。

2. 优化供应链库存策略：建立基于市场预测的战略库存机制。对于通用性强的标准原材料，可在价格低位时进行适度储备，对于非标准辅助材料，则严格执行按需采购。同时，拓展物流合作伙伴，探索多式联运模式，在一定程度上突破运输半径的物理限制。

2.5 引入精益生产的管理思想

1. 消除生产浪费：针对预制构件生产中常见的等待浪费、搬运浪费和库存浪费，应当运用价值流图工具进行全流程诊断，通过重新规划堆场布局，缩短无效行程。通过平衡各工序节拍，消除各工序之间的瓶颈等待时间。

2. 推行 5S 与目视化管理：在生产车间全面推行整理、整顿、清扫、清洁、素养活动。对模具零部件进行定置管理，利用颜色编码区分不同规格的模具与预埋件，防止因拿错零件导致的组模返工。建立生产状态看板，实时显示各台位的生产进度、次品率及设备运行状态，使管理从事后统计转向现场即时控制。

2.6 引入全流程传感监测与设备预测性运维机制

针对设备端对质量与效率的干扰，预制构件制造企业应从被动响应转向主动感知，通过构建全流程传

感监测体系来重塑生产底座。首先，应在搅拌站、振捣台及浇筑机等核心点位部署高精度传感器，实现对混凝土坍落度、振捣密实度及浇筑速度等工艺参数的实时数据采集与闭环控制，利用算法自动纠偏，确保每一枚构件在成型阶段的质量一致性，减少因工艺波动导致的返工与次品率。其次，应建立基于大数据分析的预测性运维平台，通过监控设备运行的电流、振动及温度参数，在设备发生实质性停机前识别故障先兆，实现精准的错峰维护，从根本上消除非计划停机导致的效率损耗。此外，企业应将设备精度校验纳入目视化管理的范畴，建立基于设备运行里程的动态标定机制，确保数控指令与机械执行动作的高度同频。通过这种将工艺感知与设备管理深度融合的策略，企业不仅能够从技术维度筑牢质量防线，更能通过保障生产链条的连续性与稳定性，实现产线综合效能的本质提升，为建筑产业的高质量转型提供坚实的制造基础。

3 结束语

预制构件的生产质量管理是一项涉及设计源头、制造工艺、信息交互及市场的复杂工程。当前，生产环节中存在的标准化程度低、技术与管理脱节、市场适应性差等问题，本质上是传统建筑业粗放式管理思维与现代工业化生产要求之间的必然结果。要突破这些制约因素，需坚持系统观念与创新驱动。一方面，要向标准化设计延伸，通过标准化的设计解决生产的源头效率问题；另一方面，要通过技术应用获取效益，通过数字化、智能化的手段重塑生产流程，实现从制造向智造的跨越。只有通过技术进步与管理创新的双轮驱动，建立科学、规范、动态的生产环境，才能从根本上促进预制构件的蓬勃发展。

参考文献：

- [1] 韩晏羽. 装配式建筑全过程质量风险评价研究[D]. 青岛：青岛理工大学, 2020.
- [2] 孙玉芳, 杨辉, 高旭林, 等. 装配式建筑全过程质量影响因素研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(05): 21-29.
- [3] 张克, 蔡锦松, 黄清云. 装配式建筑质量影响因素相互关系研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(10): 95-98.
- [4] 刘光忱, 温振迪, 何雪礼, 等. 基于 ISM-MICMAC 的装配式建筑质量影响因素[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(05): 33-39.
- [5] 陈雯甜. 装配式建筑 PC 构件质量链管理研究[D]. 郑州：郑州航空工业管理学院, 2022.
- [6] 邓海旺. 混凝土预制构件生产质量风险评价研究[D]. 北京：北京交通大学, 2020.

半导体芯片制造流程中的自动化控制技术研究

王洪建

(中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176)

摘要 自动化控制技术是半导体芯片制造流程的核心支撑, 其应用贯穿晶棒制备、光刻工艺至车间流转全环节, 可有效破解人工操作的效率与精度局限。在晶棒制备与硅片加工环节, PID 闭环自动控制技术通过模型建立、数据采集与参数优化, 实现晶棒直径的精准稳定控制; 在光刻工艺中, 对准标记识别、工作台运动补偿与闭环反馈控制协同作用, 保障纳米级套刻精度; 在车间流转环节, AGV 分布式多机协同控制技术依托分层通信架构与动态任务分配, 提升工艺间传输效率。自动化控制技术的合理应用不仅能大幅提升芯片生产线产能与工艺精度, 还能降低人为误差带来的损失, 为芯片高性能与高良率提供坚实的保障。

关键词 半导体芯片; 制造流程; 自动化控制

中图分类号: TN3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.024

0 引言

半导体芯片制造已进入纳米级工艺时代, 生产效率与工艺精度的提升成为行业发展的核心诉求, 自动化控制技术逐渐成为破解行业瓶颈的关键支撑。当前芯片制造流程复杂度不断提升, 人工操作已无法满足纳米级精度要求, 且易受疲劳、干扰等因素影响, 导致生产效率偏低、产品良率不稳定。同时, 传统控制技术在晶棒生长、光刻对准、车间流转等核心环节的适配性不足, 难以实现全流程精准协同控制。基于此, 聚焦半导体芯片制造的关键工艺环节, 优化自动化控制技术的应用方案, 完善控制体系, 成为推动芯片制造产业高质量发展的重要方向, 也是本次研究的核心目标。

1 半导体芯片制造流程中自动化控制的重要性

1.1 破解人工局限, 筑牢产能提升根基

自动化控制体系是半导体芯片制造流程中推动生产效率跨越式提升的核心支撑, 其凭借全流程自动化设备的高效协同联动, 彻底冲破了人工操作在时间维度与效率层面的双重局限。相较于人工操作易产生疲劳、必须间歇休息的固有短板, 自动化设备能够全天候 24 小时不间断持续运转, 这一优势有效缩减了人工干预所引发的停机调试耗时, 进而显著提升芯片生产线的整体产能输出。在芯片制造的全流程中, 自动化控制体系始终发挥着统筹调控的关键作用, 它不仅能规避人工操作的低效问题, 更能通过精准调度让各类

设备高效配合, 让整条生产线的运转更具连贯性^[1]。

1.2 赋能核心设备, 挖掘产能提升潜力

如果说自动化控制体系是产能提升的整体支撑, 那么自动化控制技术就是激活芯片制造关键环节效能的核心抓手, 它以精准化、智能化的调控能力, 让芯片制造的核心设备发挥出最大效用。芯片制造的关键环节对作业环境与设备精度有着严苛要求, 光刻机、刻蚀机等核心设备必须在超高洁净度的环境中持续稳定运行, 而自动化控制技术恰好能完美适配这一需求, 它可实时精准调控核心设备的运行参数, 细致把控设备的每一个运行节点, 有效规避人工操作可能带来的环境干扰与设备停机隐患。不同于人工操作的粗放式管控, 自动化控制技术能实现对核心设备的精细化、全流程管控, 它既可以实时监测设备的运行状态, 及时发现并处理设备的微小异常, 也能通过智能化调度优化设备的运行节奏, 最大限度提升核心设备的利用率。

2 半导体芯片制造流程中自动化控制技术的应用

2.1 晶棒制备与硅片加工, 晶棒直径 PID 闭环自动控制技术

2.1.1 PID 闭环控制系统的模型建立与参数初始化

在晶棒制备与硅片加工环节, 晶棒直径的精准控制直接决定后续硅片质量与芯片性能, 企业可通过 PID 闭环自动控制技术实现对直径误差的精准调控。要实现这一目标, 企业首先需基于大量实验数据与理论分析, 搭建晶棒生长过程的动态模型, 明确输入参数与

作者简介: 王洪建 (1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 半导体设备。

输出参数之间的传递函数，为 PID 控制器的高效运行提供理论支撑，具体参数设置如表 1 所示。参数初始化阶段，技术人员需严格按照工艺要求设定晶棒的目标直径，再结合已建立的动态模型特性，合理确定 PID 控制器的初始参数，比例系数直接决定系统的响应速度，积分系数用于彻底消除系统的稳态误差，微分系

数则可有效抑制系统超调或震荡现象。参数调整需严格遵循“先比例、后积分、再微分”的科学顺序，通过阶跃响应实验，细致观察系统的动态特性，逐步优化参数组合，反复调试直至控制器在初始状态下既能实现快速响应，又能保证无超调的基本性能，为晶棒直径的稳定控制筑牢基础^[2]。

表 1 参数设置

技术环节	核心控制目标	典型参数范围	关键传感器类型	预期控制精度	主要挑战
晶棒直径控制	维持生长直径恒定	目标直径：150 ~ 300 mm	激光测径仪、CCD 视觉传感器	±0.5 mm	热场波动、提拉速度稳定性
PID 参数整定	系统快速无超调响应	Kp: 1.5 ~ 3.5, Ki: 0.01 ~ 0.1, Kd: 0.5 ~ 2.0	—	阶跃响应超调量 < 5%	模型非线性、参数耦合
执行机构	调节加热功率与提拉速度	加热功率：20 ~ 80 kW, 提拉速度：0.5 ~ 2.0 mm/min	热电偶、编码器	功率调节精度 ±1%	执行器滞后、非线性

2.1.2 晶棒生长过程的数据采集与误差处理

晶棒生长过程中，实时、精准的数据采集是确保直径稳定的基础前提，高精度传感器始终承担着核心采集职责。它需持续捕捉晶棒直径的每一个瞬时数据，既不能遗漏关键生长节点，也不能出现数据滞后的情况；为实现信号的高效转换，传感器会快速将模拟信号转化为数字信号，再平稳传输至控制系统，这份高效传输能最大程度规避信号失真的问题。采集频率的把控同样关键，传感器设定的采集频率须高于系统动态响应频率，借此，才能让采集到的数据真实复刻晶棒生长的实时状态，不出现任何偏差；技术人员也会全程监测传感器的运行状态，及时排查采集过程中的各类隐患，确保传感器始终处于最佳工作状态，为后续误差处理与控制输出，提前筑牢精准的数据根基。

2.1.3 PID 控制器的控制输出及分项作用

PID 控制器会基于处理后的误差数据快速生成对应控制输出，再通过执行机构作用于晶棒生长系统，进而实现工艺参数的动态调整。比例项会依据瞬时误差迅速做出响应，及时修正误差偏差；积分项则针对长期累积的误差开展调节工作，彻底消除稳态误差；微分项能够精准预测误差变化趋势，提前采取有效措施抑制系统超调或震荡。执行机构需紧密配合控制器输出，其中加热功率调节器、提拉速度伺服电机等设备会协同运作，动态调整晶棒生长的各项工艺参数；调节过程中还需严格实施抗饱和策略，当积分项累计值超过预设阈值时，便立即暂停积分作用，防止系统出现超调现象；同时可借助微分先行或不完全微分算法，优化微分相性能，避免高频噪声被过度放大。

2.1.4 PID 控制器的动态参数优化及闭环保障

晶棒生长系统运行期间，工作人员需持续监测 PID

控制器的控制效果，结合实际误差动态调整 PID 参数，全力构建自适应闭环控制体系。既要确保参数调整的及时性与精准性，也要兼顾系统运行的稳定性与可靠性；既要避免参数波动过大导致晶棒直径偏差，也要防止参数调整滞后影响晶棒生长质量。通过动态参数优化，PID 控制器能更好适配晶棒生长全周期的误差变化，让晶棒直径始终稳定于设定值范围内；唯有做好参数优化与实时监测，才能为后续硅片加工提供高质量的晶棒原料，才能保障整个晶棒生长工艺的连续性与规范性^[3]。

2.2 光刻工艺：光刻机纳米级套刻精度自动对准控制技术

2.2.1 对准标记的设计与精准识别

对准标记是光刻工艺中实现纳米级套刻精度的核心基准，它的科学设计直接关乎套刻精度的达成与否，更是光刻机精准完成纳米级套刻操作的关键前提。在设计过程中，对准标记需兼顾信号强度与抗干扰能力，通常会采用十字形、棋盘格或同心圆等优化结构，既将自身尺寸严格控制在微米级范围，又把精度打磨至纳米级别，确保后续每一步光刻工序中都能被高分辨率相机精准捕捉；为强化信号识别效果，对准标记的材料需与晶圆表面形成显著对比度，金属标记或沟槽标记便是理想之选，它们能有效提升信号辨识度，从根源上规避识别偏差的出现（见表 2）。不仅如此，对准标记的设计还需适配晶圆的整体加工流程，既要避免与晶圆电路区域发生冲突，又要适配不同光刻步骤的识别需求，让每一处设计都服务于套刻精度的提升，为后续精准识别环节奠定坚实基础，全方位保障纳米级套刻的可行性。

表2 对准标记的设计与精准识别

标记类型	典型结构	尺寸范围	材料 / 形成方式	对比度增强方法	识别算法精度
十字线标记	正交线条	5 μm×5 μm	硅片上刻蚀沟槽	相差显微镜照明	亚像素插值, 重复性< 0.3 nm
棋盘格标记	交替黑白方格	10 μm×10 μm	金属(如Cr)沉积	优化照明波长与偏振	图像相关匹配, 精度< 0.5 nm
同心圆标记	多圈同心圆环	外径 20 μm	浅沟槽隔离(STI)形成	光学散射模型校正	圆心拟合算法, 精度< 0.4 nm

2.2.2 光刻机精密工作台的运动补偿控制

光刻机精密工作台运动补偿控制,是实现纳米级对准、保障套刻精度的关键环节,其以工作台为核心执行主体,在自动化控制体系中全面覆盖平移、旋转、缩放三大自由度,每一项补偿动作都紧密围绕“提升运动精准度”这一核心目标有序推进。平移补偿依托压电陶瓷驱动台高效运行,该驱动台凭借0.01纳米的超高分辨率,能实时捕捉晶圆曝光时的微小位移,进而快速修正偏差,从根源上避免位移偏差诱发的套刻误差;旋转补偿由陀螺仪反馈系统全程主导,这套系统通过高速采样晶圆角速度信号,动态校准工作台姿态,且必须将旋转精度严格控制在0.001度以内,以此确保晶圆与掩模板的相对角度分毫不差;缩放补偿则借助激光干涉仪的实时测量数据灵活调整,其通过精准调控掩模板与晶圆的相对距离,有效消解热膨胀、机械应力带来的尺寸偏差。这套完整的运动补偿流程需在毫秒级时间内高效完成,快速响应环境扰动引发的各类偏差,坚决杜绝曝光过程中额外误差的引入,持续维持工作台运动的精准性与稳定性,为纳米级套刻精度筑牢坚实支撑^[4]。

2.3 车间工艺间流转,金源传输AGV分布式多机协同控制技术

分层式通信架构,是分布式多机协同控制系统实现高效信息交互的载体,其以支撑AGV群体实时互通、保障车间工艺流转稳定为核心使命,全程串联起架构设计、功能划分、指令传递的每一个关键环节。为达成这一目标,分布式多机协同控制系统专门精心搭建了该分层式通信架构,让AGV群体间的信息传递更高效、更精准,为整个车间工艺间的顺畅通转筑牢通信根基。该架构清晰界定上下两层功能模块,互不干扰且协同联动;上层部署的中央调度服务器,主动牵头承担全局任务规划与路径优化的核心职责,全面统筹车间内所有AGV的运行节奏与任务方向,确保全局运行有序可控;下层为每台AGV逐一配备独立本地控制器,精准高效执行中央服务器下发的具体运动指令,同时实时采集自身运行状态数据,第一时间反馈至上层调度

端,最终形成“统筹、执行、反馈”的闭环通信链路。在关键的任务分配阶段,中央调度服务器会优先梳理车间工艺需求,严格遵循光刻、刻蚀、清洗等工序的先后逻辑,科学分层构建任务队列,切实保障任务分配与工艺流转节奏高度契合,让整个通信架构的价值充分发挥。

为实现任务的高效动态分配,系统灵活采用拍卖算法或压力算法,精准筛选空闲AGV并完成任务指派,指派过程中会综合考量AGV当前位置、剩余电量、负载能力以及工艺任务优先级等多重因素,保障分配结果的合理性与可行性。任务分配完成后,中央调度服务器会通过无线通信协议,将分配结果实时、精准地下发至对应AGV的本地控制器,切实确保每一项工艺传输任务都能快速启动、有效执行,为后续AGV的高效运行奠定坚实基础^[5]。

3 结束语

自动化控制技术在半导体芯片制造各核心环节的应用实践,充分印证了其在提升生产效率、保障工艺精度、优化流转流程中的核心价值。通过针对性的技术优化与体系完善,PID闭环控制、纳米级对准控制、AGV多机协同控制等技术已实现与芯片制造工艺的深度适配,有效解决了传统控制模式下的精度不足、协同性差、效率偏低等问题。

参考文献:

[1] 郭美丽.自动检测技术在半导体芯片制造中的应用研究[J].科技创新与生产力,2025,46(10):114-116,120.
 [2] 付洋洋,王新新,邹晓兵,等.气体放电与等离子体在芯片制造领域中的应用[J].高电压技术,2025,51(08):4458-4477.
 [3] 魏峥嵘,庄均珺.半导体芯片制造中缺陷图像的分层诊断策略分析[J].集成电路应用,2025,42(06):356-357.
 [4] 冯昭奎.中日高科技发展的比较与思考:以半导体芯片制造技术为案例[J].日本研究,2022(03):1-15.
 [5] 何雨浩,陈伟,裴倩倩.基于离散教与学算法的半导体芯片终端测试阶段调度问题研究[J].自动化应用,2021(12):5-8.

铝土矿企业生产运营全过程 数字化管控平台构建措施

吴波

(铝电金海有限公司, 北京 102209)

摘要 针对偏远铝土矿区存在的通信孤岛、恶劣工作环境、结构性人员不足等问题, 为了解决长距离跨域管理和物资调度的困难, 本文构建了一个全过程数字化管控平台, 采用端网边云用五方面共同工作的模式。阐述了下沉边缘算力打通底层断点数据、重新形成虚实映射的跨域集控中枢、依靠状态预判提前维保物资等主要形成方法, 旨在实现了现场高危物理空间和核心操作权的解耦, 依靠底层数据流来精确驱动生产业务流, 达到偏远矿山少人化作业和连续运转的目的, 为同类恶劣场景的数字化重构提供可参考的方式。

关键词 铝土矿企业; 偏远矿区; 生产运营; 数字化管控

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.025

0 引言

随着《金属非金属矿山智能化建设指南(2025年版)》等国家政策的深入推进, 传统矿业的数字化转型已成行业共识。在此宏观导向与客观现实的双重驱动下, 传统的局部自动化改造已难以破局。企业亟须依托工业互联网与先进的信息技术, 构筑跨越物理空间限制的全过程数字化管控体系, 重塑偏远矿山的生产运行逻辑与安全基础。

1 偏远地区铝土矿生产运营的数字化需求分析

1.1 复杂地形与弱网环境下的底层数据贯通需求

偏远铝土矿区处在复杂地貌相互交错的地带, 地形起伏和深凹岩体明显削弱无线信号覆盖和衍射能力, 使采剥作业面长期处在高丢包率和高延迟的弱网环境当中。受到物理信道条件限制, 移动采装设备和现场监测终端所产生的海量时序数据很难达到连续稳定的回传^[1]。大量关键运行参数受阻于信号盲区而滞留于端侧, 不可避免地在物理方面形成了数据孤岛, 在底层传输通道上数据发生堵塞, 会让总控系统不能够及时得到作业现场的信息, 也不能够准确对应现场的状况, 造成生产协同调度响应变慢, 并且产生安全监管的空白区域。

1.2 恶劣环境与用工短缺下的异地集控需求

偏远铝土矿区长期处在高粉尘、强震动、边坡形变等恶劣物理环境之中。这种极端的现场环境让操作

人员的职业健康风险变得更大, 造成一线专业技术人才流失严重和常态化结构性用工短缺发生。传统深度和高危作业面绑定的粗放生产模式, 由于长期存在较大安全隐患, 并且受到劳动力供给不足的限制。在此双重企业受到的挤压情况下, 客观上必须把核心操作岗位和高危采掘工作面在物理空间上实现空间解耦。由此, 矿山必须把附着在生产现场的近程操作属性剥离, 并将采装运和核心环节控制权、调度中枢转移到远端安全区域, 尝试通过异地集控模式对现有的劳动组织架构进行重塑, 这已经成为解决偏远矿区运营停滞、维持连续生产的必要条件。

1.3 偏远区位与物流受限下的智能运维需求

偏远铝土矿大多位于内陆深处, 客观上缺乏核心工业支撑和成熟的供应链枢纽。这种区位上的隔离使矿区物资补给线变长, 重型机电设备在高负荷磨损时, 很容易陷入长时间的非计划停机困境。传统的被动式抢修模式严重依赖外部资源的及时介入^[2]。然而, 长距离物流存在限制, 这大幅延长了备件调拨和专家支援的响应时间, 进而容易导致连续生产链条局部中断。为规避供应链滞后对矿山产能的冲击, 生产运营系统需彻底摒弃对事后维修的路径依赖。企业应尽快建立一种能提前洞察机组劣化的内生机制, 通过精准预判设备运行状态, 来消除物理距离造成的阻隔, 进而在孤岛式工矿环境中实现物资调度与设备运转的动态平衡。

作者简介: 吴波(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 信息化技术。

2 全过程数字化管控平台总体架构设计

铝土矿作为重要的工业原料，其需求量随全球工业化进程不断增长，广泛应用于建筑、交通、电力，以及航空航天、国防科技等尖端产业领域。针对偏远铝土矿区多源异构数据并发与长距离弱网环境的客观矛盾，全过程数字化管控平台在顶层设计上摒弃传统集中式数据处理模式，系统性确立“端—网—边—云—用”五维协同的分布式架构。

2.1 端侧感知与执行层

端侧节点作为物理架构的延伸部分，可以完全覆盖深凹采掘面、排土场和运矿道路。该层级聚合高精度组合导航终端、工况传感器与机载数据网关，可以在粉尘和高频震动环境下将物理实体的状态量进行数字化，并对异构通信协议进行初步标准化。该结构功能主要用来形成最底层的初始数据源，并且可以作为远端控制指令的最末端执行单元。

2.2 网侧异构融合传输层

为解决复杂地貌阻碍物理信道的问题，网络层采用高冗余的异构融合拓扑结构。骨干网利用5G独立专网切片技术，并发低时延控制信令和高带宽视频流进行传输，同时保留平行架构微波通信和宽带卫星链路作为骨干断点后的物理热备份。该层级在云端中枢和边侧节点之间建立起稳健的交互通道，用来对长距离跨区域的数据穿透进行支持。

2.3 边侧计算与控制层

鉴于偏远矿山骨干外网很脆弱，在靠近高频作业面的矿区枢纽处需要配置前置的边缘计算节点。边侧主导海量时序数据在本地进行过滤、视频流在近处完成解析、达到毫秒级别的控制指令即时下发，该层级在系统拓扑中为主要缓冲区，现场主要采剥设备和安全监测子系统在和主网完全断开的孤岛工况下，仍可以维持基本的局部自治及闭环运行。

2.4 云端数据与调度中枢层

云端算力中心整体迁至远离恶劣矿区的城市总部。该层级部署企业级数据中台和工业大模型底座，承载时空演化数据库、三维地质块段模型以及多维AI调度算法。云层专门负责处理跨矿区、长周期历史数据的深度清洗与机理模型训练，并持续向边缘节点下发优化后的算法模型，形成“云端训练全局寻优、边侧推理局部速决”的算力协同机制。

2.5 用侧业务微服务展现层

最顶端的应用层采用微服务架构，对矿山运营的全业务流进行组件化的解构与重组。这一层级直接承

担跨地域异地集控的系统级逻辑，聚合了采装运协同调度、机电设备寿命预测、边坡形变地质灾害预警等核心微服务群。所有业务流最终汇集到数字孪生框架中，实现复杂矿区物理空间向虚拟高维空间的精准映射和穿透式管控。

3 铝土矿企业生产运营全过程数字化管控平台构建措施

3.1 下沉矿区边缘算力，贯通现场断点数据

形成全过程管控平台的重点在于将算力资源部署在物理底层，依靠在前端感知终端和云端数据中枢之间添加具备高度自治能力的边缘计算层，来调整底层数据流转逻辑，把数据处理安排在矿区枢纽或采装移动装备旁边，系统可以在当地对多源异构数据进行毫秒级过滤和清洗^[3]。这种边缘介入模式截留了大量无效的数据冗余数据，让主干网络的并发传输压力得到缓解，边缘节点给现场装备提供了局部闭环的计算和决策能力，在不依靠主网调度的情况下仍然可以维持基础安全逻辑，由此在物理底座上实现了生产管控连续数据链的贯通。

在进行具体部署过程中，可以直接把工业级抗震边缘网关接入到重型矿卡、电铲控制系统的内部。车辆进入深凹采场这种典型的信号盲区后，网关会接管底层数据链路，把设备运行状态和周边环境感知的雷达点云数据在本地进行高速缓存，车辆依靠内置的轻量化规则引擎进行操作，在失联时仍然可以自主进行轨迹测算和障碍物干预，遇到极值工况会直接启动车载紧急制动，以达到保证单机绝对安全的目的。待设备物理位移至网络覆盖区，断点续传机制自动激活，将静默期积压的时序数据依时间戳序列异步回传至云端数据湖。针对固定破碎站等场景，则通过部署区域级微型边缘节点聚合多路视频流。节点端载入机器视觉算法实施近端抽帧比对，自主筛查矿石堵塞或违规闯入，仅向异地中枢发送报警切片与结构化日志。此路径剥离了云端对全量冗余数据的依赖，精准缝合了因通信受限产生的时空轨迹断层。

3.2 剥离高危现场岗编，重塑跨域集控中枢

面对偏远矿区恶劣工况与结构性缺工的双重困境，管控平台需从空间维度对传统高危作业模式进行解构。其底层逻辑是依托大带宽融合网络与数字孪生底座，将生产指挥权从矿区剥离至城市中心。这种跨地域的集控重塑并非简单的视频监控堆叠，而是将物理开采实体精准映射到虚拟高维空间，并实现双向闭环交互。通过深度解绑人机，从根本上消除采掘工作面的物理

危险属性, 重塑矿山劳动力组织结构, 为连续化安全生产构筑坚固的隔离屏障^[4]。

具体实现方式需要在装备线控化改造方面和数字孪生舱建设方面同时努力, 对主要采矿装备来说, 应当把原有机械或液压先导操作回路进行拆解, 并联高频数字比例阀和专用车载 PLC 控制器, 使其可以接收数字电信号以实现直接驱动, 具备线控底盘功能。同步在车身边外安装防爆超高清摄像机阵列和三维激光雷达, 获取全景视频流、环境点云。远端城市总部集控中心利用无人机航测数据和地质勘探信息, 并结合矿区真实坐标, 反向建立高精三维地质块段模型。操作员落座于集成动感平台的远程操控台, 视线前方为融合了实景视频拼接与虚拟数字地形的增强现实视界^[5]。操控手柄发出的微调信令, 经由 5G 专网网络切片以极低时延穿透至矿坑底部, 精准驱动铲斗挖掘。为规避长距离广域网抖动带来的操作迟滞风险, 必须在设备侧固化本地防撞逻辑。当车载视觉模型侦测到进入作业包络面范围的人员或车辆后, 边缘控制器会迅速截断来自远端的指令, 并且触发底层液压系统进行紧急制动, 远端驾驶配合近端边缘防线的实际配置, 把现场操作员变成室内的系统监控者, 完成安全底线的基础保障。

3.3 预判机组劣化趋势, 前置偏远物资调度

数字平台应当把设备维保逻辑进行调整, 从被动响应变成内生前置干预, 用来处理偏远矿区供应链末端在地理空间上的隔离问题, 长距离物流障碍造成突发停机后备件调拨经历很高时间消耗, 严重打断连续生产。因此, 控制系统需要把物联网高频采集数据和时序预测算法结合起来, 在云端对重型机电设备的衰减特征进行分离。通过精准锚定核心部件的物理劣化临界点, 系统利用算法模型提前跨越时间差, 将滞后的事后抢修转化为基于健康状态的定向物资前置。这种底层运维逻辑的升维, 本质上是以算力预判来对冲物理距离带来的调度迟滞, 从而在空间受限的工况下谋求物资补给与连续生产的动态平衡。

具体形成过程中需要仔细结合矿区中心主要重资产的物理运行参数, 在三轴高频振动传感器和油液在线理化探头的安装上, 半移动式旋回破碎机、大型球磨机和重型矿卡这类关键设备的减速箱、主轴承和液压缸等易损部件被进行了大规模部署。这些端侧感知元件高频捕捉机械运转过程中的温度漂移、金属磨粒浓度及振动包络信号, 并经由工业网关实时推流至云端数据中台。

在数据中台层, 部署基于长短期记忆网络或支持向量机的设备劣化趋势推理模型。该模型摒弃传统的人工静态阈值报警方式, 持续摄取设备全生命周期内的时序波形, 通过自监督学习动态拟合专属健康基线。当实际回传的振动频谱中高频谐波能量开始异常聚集, 或润滑油铁磁性颗粒斜率出现微小拐点时, 系统即可在物理断裂发生前数周, 精准定标出轴承内圈剥落或齿轮面点蚀的早期微弱特征。确认劣化趋势后, 管控平台直接击穿底层业务孤岛, 向下级物资管控模块与企业 ERP 系统抛出联动指令。系统根据衰减曲线推算出的设备剩余有用寿命, 结合偏远矿区的平均物流配送周期, 自主生成前置采购清单与定向调拨单。在设备接近功能失效临界点之前的这段时间里, 需要的备品备件已经提前运送到矿区前置仓, 利用数据流来推动实物物资流动的这种实际操作方式, 把偏远地区导致供应链断裂的问题给解决了, 让高价值装备能够保持可控的连续运转。

4 结束语

偏远铝土矿区处在极端工况和空间孤岛的硬性约束下, 全过程数字化管控平台的形成, 实际上是对矿山传统生产组织逻辑的彻底重构, 企业利用边缘算力下沉、跨域集控解耦和时序预判的前置运维, 打破物理空间界限, 进行人机深度解绑和对底层业务流的精准驱动。这一模式从根本上对冲了高危作业风险与长距离供应链迟滞, 为矿山连续安全运转确立了坚实的数字基础。随着工业大模型与多模态感知底座的深度介入, 管控平台将由当前的“自动化协同”向“认知型智慧矿山”转变。未来, 偏远地区的铝土矿开采将具备在复杂地质环境下进行全域自主决策与自适应调度的能力。

参考文献:

- [1] 娄德波, 张起钻, 江沙, 等. 中国喀斯特型铝土矿找矿预测研究进展 [J]. 地质学报, 2025, 99(02): 649-665.
- [2] 王文韬. 国有企业绿色转型背景下铝土矿开采及物流运输项目管理创新研究: 基于全产业链协同与 ESG 治理的视角 [J]. 张江科技评论, 2025(03): 161-163.
- [3] 同 [1].
- [4] 蒋玲. 数字化转型背景下的国有企业预算管理智能化体系探究 [J]. 中国集体经济, 2023(22): 41-44.
- [5] 尚莹莹. 数字化转型背景下矿产企业预算管理创新路径探索 [J]. 投资与创业, 2025(18): 101-103.

云南省农村专业技术协会服务“三农”的探索实践与发展思考

李 焰

(云南省少数民族科普工作队, 云南 昆明 650023)

摘 要 “三农”工作是关系到国计民生的根本性问题, 稳住农村基本盘在应对国内外风险挑战中发挥着重要作用。云南农村专业技术协会(以下简称“云南农技协”)是服务“三农”工作、推动乡村振兴的重要社会力量。云南农技协聚焦“三农”服务, 构建“党建引领、科技赋能、组织健全、服务精准”的发展新格局, 推动高原特色农业转型升级, 助力乡村振兴与边疆民族地区共同富裕。本文通过对全省农技协扎根基层、服务“三农”的实践调查, 介绍了农技协发展现状与服务“三农”的工作探索和实践, 分析了农技协工作的重要性以及在云南加强该工作的必要性, 指出了农技协发展面临的挑战与压力, 并规划了未来发展路径及长效机制, 以期对探索新时期农技协工作高质量发展有所裨益。

关键词 云南; 农技协; “三农”服务; 高原特色农业; 科技小院

中图分类号: F303

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.026

0 引言

在全面建设社会主义现代化国家的新征程中, 乡村振兴战略作为国家重大战略部署, 已成为推动农业农村现代化、实现共同富裕的关键路径。农村专业技术协会扎根农村、贴近农民、服务产业, 在推广现代农业生产适用技术、培育新型农业经营主体、促进小农户与现代农业有机衔接等方面具有不可替代的作用。云南农技协充分发挥组织优势和专业优势, 进一步畅通现代农业生产技术进村入户“最后一公里”, 为乡村产业、人才、文化等提供支撑。加强云南省农技协工作, 是服务云南省乡村全面振兴的迫切需要。

1 农村专业技术协会工作的重要性

农村专业技术协会作为社会化农业科技服务体系的重要组成部分, 与科研院所、农业企业、基层农技推广机构形成互补协同格局。加强和改进农村专业技术协会工作, 有助于完善多元化农业科技服务网络, 提升农业科技服务的覆盖面、精准度和实效性, 为实现高水平农业科技自立自强夯实基层基础。加强农村专业技术协会工作, 是强化农业科技服务体系的重要举措。

农村专业技术协会通过技术服务、产业带动、科普宣传等方式, 紧密团结引领广大农业农村科技工作

者和乡土人才, 密切联系服务广大农民群众, 是党在农村服务基层、凝聚人心的重要组织阵地。当前, 亟须通过加强农技协建设, 更好地发挥桥梁纽带作用, 零距离服务农民群众, 汇聚推进乡村全面振兴的强大合力。加强农技协工作, 是扎实推进科协农业农村组织建设的重要措施。

2 加强云南农技协工作的必要性

作为连接科技与农业、政府与农民的重要桥梁, 云南农技协在新时代背景下承担着前所未有的历史使命。云南省与缅甸、老挝和越南3国接壤, 共有8个边境州(市)、25个边境县(市), 国境线4 060公里, 占全国国境线近五分之一, 16个少数民族跨境而居, 25个世居民族紧紧相拥, 是全国世居少数民族最多、跨境民族最多、特有民族最多、人口较少民族最多、自治地方及实行民族区域自治的民族最多的省份^[1]。云南有国家乡村振兴重点帮扶县27个, 也是全国最多的省份。同时, 云南省公民科学素质, 特别是农民科学素质水平低于全国、全省平均水平, 与全国平均水平差距明显。基于此, 大力推动农村专业技术协会高质量发展, 不仅是落实党中央关于“三农”工作决策部署的必然要求, 更是实现云南高原特色农业转型升级、促进边疆民族地区共同富裕的现实需要。

作者简介: 李焰(1974-), 女, 本科, 助理研究员, 研究方向: 科学技术普及。

从国家战略维度看，党的二十大明确提出“加快建设农业强国”“全面推进乡村振兴”的目标，强调要“强化农业科技和装备支撑”。农村专业技术协会作为国家创新体系的重要组成部分，是推动科技成果转化、提升农民科学素质、服务农业产业发展的关键载体。特别是在云南“3815”战略发展目标指引下，省委、省政府提出“一县一业”特色农业产业布局，要求聚焦重点产业、打造产业集群、提升产业链水平。这一战略构想的落地，离不开农技协在技术推广、组织动员、资源整合等方面的系统性支撑。因此，高质量推进云南农技协发展，是实现云南农业由传统模式向现代高效模式跃迁的核心引擎。

从区域发展视角看，云南地处中国与东南亚、南亚的交汇地带，是“一带一路”倡议的重要节点。随着中老铁路开通、RCEP 深入实施，云南农业对外合作空间不断拓展。然而，当前云南部分农村地区仍存在科技服务“最后一公里”难题，农民对新技术、新品种、新模式的接受度不高，基层科技服务体系薄弱。农技协作为扎根基层、贴近群众的组织，具备组织动员能力强、服务响应速度快、群众基础深厚等优势，能够有效填补政府公共服务与市场服务之间的空白，是推动边疆地区农业现代化、提升区域竞争力的重要力量。

从社会民生维度看，云南是全国世居少数民族最多的省份，“直过民族”和较少民族聚居区众多，经过脱贫攻坚战，这些地区已历史性告别绝对贫困，实现“一步跨千年”的发展跨越。但是，部分乡村在巩固拓展脱贫攻坚成果、推进乡村振兴过程中，仍面临基础设施有待完善、专业人才短缺、产业发展基础薄弱等问题。农技协通过组织科技志愿服务、开展乡土人才培养、推动特色产业发展，不仅能够直接带动农民增收致富，更能增强群众对党和政府的认同感与凝聚力。特别是在巩固拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接的关键阶段，农技协的组织功能与服务功能具有不可替代的价值^[2]。

新时代推进云南农村专业技术协会高质量发展，既是落实国家战略的必然选择，也是破解区域发展难题的现实路径，更是实现边疆稳定、民族团结、共同富裕的重要保障。唯有将农技协建设纳入全省乡村振兴整体布局，强化顶层设计、优化资源配置、完善体制机制，才能真正释放其在科技赋能、产业带动、民生改善等方面的综合效能，为云南建设成为我国面向南亚东南亚辐射中心提供坚实的支撑。

3 云南农技协发展现状与服务“三农”的工作探索与实践

云南省的农村专业技术协会起步较早。1984 年 5 月 23 日，我省首个农技协（农研会）——蒙自县余家寨水稻制种研究会正式成立。1994 年，云南省科协成立了省级农村专业技术协会联合会，是在云南省科协领导下，由基层农技协、农技协联合会、农村专业合作组织及全省从事农村专业技术研究、科学普及、技术推广的科技工作者、科技致富带头人自愿组成，依法登记成立的非营利性科普社团，是党和政府联系科技工作者和农民的桥梁和纽带，以提升农民科学素质、推广农业实用技术、助力乡村振兴为宗旨。2004 年，省委办公厅，省政府办公厅出台了《关于进一步推进农村专业技术协会发展的意见》（云办发〔2004〕11 号），提出农技协的发展工作由省委农村工作领导小组直接领导，由省科协主管农技协，并负责具体组织实施^[3]。2015 年 3 月，省科协与省农业厅联合转发了中国科协，农业部《关于支持农村专业技术协会开展农技社会化服务的意见》（科协发普字〔2014〕102 号），明确农技协是在各级科协领导下，由农业技术使用者、推广者、研发者及经营者自愿组成的，以农业科技传播为纽带，自主经营，民主管理的社会组织，是一支重要的农技社会化推广服务队伍。要求各级科协和农业部门积极为农技协开展农技社会化服务创造条件，搭建平台；进一步促进农技协做大做强，不断提升农技协参与农技社会化服务的能力；大力支持鼓励农技协创新创造，先尝先试参与各类农技社会化服务，为推进我省农业科技进步做贡献。为支持农技协发展，从 2006 年开始，中国科协和国家财政部实施了“科普惠农兴村计划”，通过“以奖代补、奖补结合”机制表彰农村专业技术协会、科普示范基地、农村科普带头人等先进主体，以发挥示范引领作用。2012 年，该计划与“社区科普益民计划”整合为“基层科普行动计划”；2017 年，资金拨付方式从中央财政专项转移支付调整为一般性转移支付，由各省结合实际组织实施，继续以财政转移支付方式支持农技协发展^[4]。近年来，云南省广大基层农技协紧紧围绕“服务三农、助力振兴”的核心使命，持续推进组织体系建设、科技服务创新与党建引领融合，取得了一系列具有标志性意义的阶段性成果，为高质量发展奠定了坚实的基础。

一是组织体系持续健全，基层覆盖能力显著增强。根据 2024 年全省农技协统计调查报告，全省现有基层农技协组织 1 964 个，涵盖种植、养殖、农产品加工

等农业全产业链类别，会员总数达30万余人，形成了覆盖广泛、结构多元的基层组织网络。其中，243个基层农技协已建立功能性党支部，党组织覆盖率超过12%，初步构建起“党建引领、协会运作、科技支撑”的组织架构。在组织建设方面，2023年全省开展农技协组织摸底调查，推动2433个基层组织完成登记备案，为后续规范化管理提供数据支撑。2024年，云南省农技协联合云南农业大学成功申报“基层农技协组织提能行动项目”，通过建立乡土人才库、实施“一对一”结对帮扶机制，推动形成可复制、可推广的县级农技协发展模式，显著提升了组织的凝聚力与服务能力。广大农技协立足当地“三农”实际，不断探索科技研究成果创新和科技服务模式创新，为助农惠农提供内容丰富的农技服务，示范引领推动农村产业结构调整，促进农业产业化，提高农民科学文化素质，带领群众共同致富。例如：西双版纳景洪市曼戈龙芒果种植协会和景洪市勐旺乡蔬菜协会按照“支部+协会+农户”“协会+会员+农户+公司”的发展模式，实现“协会得发展、农民得实惠”的发展目标；保山市科协采取“合作社+协会”模式，走合作社与农技协联合协作发展之路，走出“一套班子两块牌子，会社一体，绑定发展”的农村合作组织发展之路；腾冲市中和镇东山中蜂养殖协会采取“协会+合作社+基地+农户”的运作模式，实现“协会、合作社、基地、会员、农户都增收两推进双提升”共赢；云南台茶茶业有限公司联合腾冲市高山乌龙茶协会，采取“企业+协会”模式，在龙头企业中发展农技协，以“协会+基地+农户”的发展模式，通过抓基地、建厂房、创品牌、拓市场，“极边”高山乌龙茶产业得到了健康、快速、高效的发展，高山乌龙茶种植成为农民收益稳定的产业。

二是科技小院建设实现跨越式突破，成为切实解决农业科技服务“最后一公里”的典范模式。科技小院作为农技协工作的新探索，通过整合高校人才培养、科技研究和社会服务资源，开展科技服务，有效地解决农技服务不够用、不及时、不全面的问题。2023年，云南省积极响应习近平总书记给中国农业大学科技小院学生重要回信精神，启动各级科技小院申报工作，明确建设标准、管理职责与运行机制。截至2025年，全省已成功建设36家中国农技协科技小院，涵盖永胜程海玉米科技小院、大理洱海人文科技小院等重点示范项目。这些科技小院聚焦高原湖泊治理、生态农业转型等重大现实问题，通过“高校+科研+企业+农户”四位一体协作机制，实现科研人员长期驻点、技术成

果精准落地。2024年，协会组织对首批科技小院开展绩效评价，从科研创新、农技推广、社会影响力等维度建立科学评估体系，推动形成“建一评一改一优”闭环管理机制，有效提升了科技服务的精准性与可持续性。科技小院构建政府政策引导、社会组织积极参与、企业投入资金技术和大学科研机构发挥专业优势的协同合作模式，打破了传统教育与产业之间的壁垒，加速了农业科技成果的转化应用。创新人才培育模式，将课堂移至农业生产一线，研究生长期驻扎农村，深入田间地头，结合理论知识与农业生产实际问题开展研究，提升学生们解决实际问题的能力。发挥桥梁纽带作用，牵手科研院所与农业企业，在人才培养、联农带农、产业升级等方面取得了显著成效。

三是科技志愿服务体系日益完善，服务广度与深度持续拓展。2025年3月15日，云南省农技协组织16个州市、2187支科技志愿服务队，开展“学雷锋·助春耕”联合行动，累计开展科技志愿服务活动11001次，注册科技志愿者达205632人，服务农民超40万人次。活动期间，科技志愿者深入田间地头，围绕春耕备耕、病虫害防治、农产品质量安全等关键环节提供技术指导，有效解决了农民在生产实践中遇到的“急难愁盼”问题。此外，随着云南省社会工作部的成立，科技志愿服务系统被纳入统一管理范畴，进一步规范了队伍管理、项目申报与绩效考核流程，推动志愿服务从“活动化”向“制度化”转型。

四是党建引领作用不断强化，组织凝聚力持续提升。协会坚持将党建工作融入业务全过程，通过组织参观扎西会议遗址、重走长征路等主题党日活动，强化党员理想信念教育。2025年，全省农技协系统累计开展特色党建活动百余场，覆盖党员超5000人次。在党建引领下，农技协组织的政治属性更加鲜明，服务“三农”的责任感与使命感显著增强。例如：丽江永胜程海玉米科技小院党支部在治理高原湖泊污染过程中，主动联合地方政府、环保部门与农户代表成立联合攻坚小组，实现党建与科技服务深度融合，成为“党建+科技+生态”协同治理的标杆案例。

通过多年努力，云南省农技协已构建起“组织健全、科技赋能、服务精准、党建引领”的发展新格局。这些阶段性成果不仅体现了政策推动与基层实践的良性互动，也为下一步实现高质量发展提供了坚实的支撑。然而，面对新时代更高要求，仍需在体制机制创新、资源整合能力、长效运行机制等方面持续发力，推动农技协从“有形覆盖”向“有效覆盖”跃升。

4 云南农技协发展面临的挑战与压力

尽管云南农村专业技术协会在组织建设、科技服务与党建融合等方面取得显著成效，但对照新时代高质量发展的目标要求，其发展仍面临一系列深层次结构性矛盾与现实挑战，亟需系统性破解。

4.1 基层组织面临财政与制度双重压力

部分基层协会长期依赖政府项目资金或临时性补贴，缺乏稳定的运营机制与可持续的收入来源。根据云南省农技协 2024 年调查数据显示，超过 60% 的县级以上农技协组织存在“项目依赖”现象，一旦项目结束即面临“人走组织散”的风险。同时，部分协会因缺乏专业管理人才，内部治理机制不健全，存在财务管理不规范、决策程序不透明等问题，影响组织公信力与长期发展能力。此外，部分农技协在登记注册后未能有效开展实质性活动，出现“空壳化”“僵尸化”倾向，导致资源浪费与服务真空并存。

4.2 科技小院运行机制存在“短平快”倾向，长效发展机制尚未健全

尽管科技小院在 2024-2025 年实现数量突破，但部分小院仍存在“重申报、轻管理”“重项目、轻持续”问题。部分小院在支持期结束后缺乏明确的接续机制，科研团队撤离后，技术推广与服务出现断档。同时，由于缺乏统一的管理协调机构，各科技小院之间存在“各自为政”现象，资源重复配置、信息壁垒严重，难以形成区域协同效应。此外，部分小院在项目设计上仍停留在“技术输出”层面，未能深度嵌入地方产业链，导致科技成果难以实现规模化转化与产业化应用。

4.3 党建与业务融合有待提升，组织引领力有待深化

虽然全省已建立 243 个农技协党组织，但部分党组织存在“重形式、轻实效”问题，组织生活与业务工作的融合度有待提升。部分党支部未能有效发挥战斗堡垒作用，未能将党的政治优势转化为组织动员优势与科技服务优势。此外，部分农技协党员科技人员在服务群众中缺乏主动作为意识，未能真正成为技术传播的“先锋队”与群众信赖的“主心骨”。

4.4 基层科技服务队伍专业能力与数字化素养亟待提升

尽管全省注册科技志愿者达 20.5 万名，但整体队伍结构仍存在“重数量、轻质量”问题。部分志愿者缺乏系统培训，对现代农业技术、数字农业工具、市场风险应对等知识掌握不足，难以满足农民日益增长的多元化、精准化服务需求^[5]。尤其在面对智慧农业、

电商营销、品牌建设等新兴领域时，部分基层科技人员存在“本领恐慌”与“能力断层”现象。同时，科技志愿服务的数字化平台建设滞后，尚未形成统一的信息发布、任务派发与绩效评估系统，导致服务资源调配效率低下，难以实现精准匹配与动态管理。

4.5 区域发展呈现差异化特征，边远民族地区服务覆盖还有待完善

云南地域广阔，民族分布复杂，部分边境地区、“直过民族”聚居区交通不便、信息闭塞，农技协组织覆盖薄弱，科技服务触达能力有限。部分偏远地区农技协组织长期处于“缺人、缺钱、缺技术”状态，难以开展常态化服务。此外，由于语言、文化差异，部分科技服务内容未能充分本土化，导致农民理解困难、接受度低，影响服务实效。

此外，与全国的农技协一样，云南农技协面临着组织建设薄弱、资金保障不足、人才队伍匮乏、服务精准度不高等一系列问题。云南农技协高质量发展面临的挑战，本质上是组织能力、运行机制、人才支撑与制度保障之间的系统性失衡。唯有正视这些深层矛盾，才能从根本上推动农技协从“被动响应”向“主动引领”、从“单点突破”向“系统集成”转变。

5 云南农技协发展路径思考

面对云南农技协发展中的结构性矛盾与现实挑战，必须立足新时代乡村振兴战略全局，构建以“组织赋能、融合发展、科技驱动、党建引领、数字支撑”为核心的“四位一体”协同发展机制，系统提升农技协的组织力、服务力、创新力与可持续发展能力。

5.1 加强统筹，集成资源，形成农技协全面发展合力

基层（县级及以下）科协面临编制不足、队伍松散、经费紧缺、激励缺乏、地位不高、机关化和行政化等问题，专家资源极为有限，作为科协的最基层的组成组织，其组成多为田间地头的“土专家”，所开展的服务很难实现与广大人民群众对接“最后一公里”的任务，也制约着农技协组织的可持续发展。但建立在农村产业基础之上的农技协，在乡村全面振兴中，基层农技协工作可以实实在在做到科技与产业、农技成果转化、助力乡村全面振兴。由省级农技协联合会牵头，外引内联，集成“中国农技协—省农技协—市农技协—县农技协—基层农技协”一体化专家、人才、农技等资源库，是推动资源下沉、推动基层农技协做大做强有效举措。

5.2 强化组织赋能，构建“上下联动、区域协同”的组织生态体系

推动建立省级农技协统筹协调、州市级平台整合、县级组织落地、村级服务延伸的四级联动机制。在省级层面，由云南省农技协牵头成立“云南省科技小院省级联盟”，整合全省科技小院资源，建立统一的项目申报、绩效评估与成果共享平台，打破“各自为政”格局。在州市层面，依托农科院、高校资源，设立区域性科技服务枢纽，实现技术资源的集约化配置与跨区域调配。在县级层面，推动“农技协+科技小院+乡土人才”融合发展，鼓励县级农技协与科技小院共建共享人员、场地与项目资源，形成“一院多协、一协多点”的服务网络。同时，建立“动态评估+优胜劣汰”机制，对运行不力、服务缺位的基层组织进行预警与调整，确保组织体系始终充满活力。

5.3 推动融合发展，形成农技协良性发展互动格局

推动农技协与科技小院、农民院士科技服务站融合发展，支持农技协骨干参与科技小院建设，探索建立农技协与科技小院科技工作者短期挂职、兼职机制。鼓励科技小院的科技成果优先通过农技协网络进行示范推广，形成“专家驻小院、技术进协会、服务到农户”的良性互动格局。

5.4 深化科技驱动，打造“研用贯通、产业融合”的创新服务体系

以科技小院为关键节点，推动形成“科研—转化—应用—反馈”闭环。在科研端，强化高校、科研院所与地方产业的对接机制，围绕“一县一业”主导产业，设立“产业技术攻关专项”，支持团队开展定制化研发。在转化端，建立“技术清单+服务地图”制度，根据各地实际需求，梳理可推广、易落地的成熟技术，形成标准化服务包。在应用端，推广“科技特派员+农技协+合作社”模式，由科技人员长期驻点，开展“点对点”技术指导与“手把手”培训。在反馈端，建立农户满意度评价与技术效果追踪机制，实现服务效果可量化、可追溯。同时，鼓励科技小院与龙头企业、电商平台合作，推动技术成果向品牌化、市场化转化，助力打造“云品出滇”特色农业品牌。

5.5 突出党建引领，实现“政治引领、组织凝聚、服务群众”有机统一

将党建工作深度融入农技协运行全过程，推动实现“党建强、组织强、服务强”三者统一。在组织设置上，推动在所有具备条件的县级及以上农技协建立党组织，探索在科技小院、志愿服务队中设立临时党支部或党小组，实现党的组织全覆盖。在活动设计上，

推行“党建+科技服务”主题行动，如“科技先锋行”“党员科技助农日”等，引导党员科技人员在春耕、抗灾、技术推广等关键节点亮身份、作表率。在考核评价上，将党建成效纳入农技协绩效评估体系，重点考核党组织在推动产业发展、解决群众难题、凝聚人心方面的实际贡献，杜绝“重材料、轻实效”现象。通过打造“红色科技服务队”“党员示范岗”等品牌，增强组织的凝聚力与公信力。

5.6 推进数字支撑，构建“智慧管理、精准服务”的平台化运行机制

加快搭建“云南省农技协智慧服务平台”，整合现有科技志愿服务系统、科技小院管理平台、农技协组织数据库等资源，实现“一网通管、一屏统览、一键调度”。平台应具备四大功能：一是资源管理，实现科技专家、志愿者、项目、技术成果等信息的动态更新与智能匹配；二是任务派发，根据农户需求与服务资源分布，自动推送服务任务，提升响应效率；三是过程监管，通过GPS定位、服务记录上传、满意度评价等功能，实现服务全过程可视化、可追溯；四是数据分析，基于平台积累的大数据，生成区域科技服务热力图、技术需求趋势图、服务成效评估报告，为政策制定与资源配置提供科学依据。同时，开发移动端应用，方便农民“一键求助”、志愿者“一键接单”，推动科技服务从“被动响应”向“主动推送”转变。

通过构建“六位一体”协同发展机制，云南农村专业技术协会通过多措并举，可切实确解组织建设薄弱问题、资金保障不足问题、人才队伍匮乏问题和服务精准度不高问题，从而实现从“单点发力”到“系统集成”、从“服务供给”到“价值创造”的根本性跃升，真正成为推动云南农业现代化与乡村振兴的核心引擎。

此外，要注重宣传，着力打造云南农技协品牌协会和农技协工作品牌，使农技协工作成为“科普云南”品牌重要组成部分。充分利用线上线下各类媒体平台，宣传农技协的重要作用、先进经验和典型案例，发出农技协声音，讲好农技协故事，不断提高农技协社会认知度和影响力。引领农技协积极主动参加科普月、科技周、三下乡等全国性主题宣传活动，展示农技协在服务乡村振兴、促进农业科技进步等方面的成效，吸引更多农业科技工作者和农民群众加入农技协，为农技协和农技协事业发展营造良好的社会氛围。

6 构建助力云南农技协可持续发展的长效机制

为确保云南农村专业技术协会高质量发展行稳致远，必须从政策支持、制度设计与资源保障三个维度构建系统性、可持续的长效机制，破解“建而难续”“推而难深”的制度性瓶颈。

6.1 健全财政支持与项目管理机制,保障可持续投入

建议由省级财政设立“云南省农技协发展专项资金”,实行“以奖代补”与“绩效拨款”相结合的激励模式。对在科技推广、组织建设、党建融合等方面成效显著农技协组织,给予连续三年的稳定资金支持。同时,推动建立“省级统筹—州市配套—县级落实”的三级财政分担机制,明确各级政府农技协发展中的责任边界。在项目管理上,全面推行“全生命周期管理”制度,从项目申报、专家评审、实施监督到绩效评估、成果推广、后续跟踪等环节实行全流程闭环管理。引入第三方评估机构,对项目实施效果进行独立审计,确保资金使用精准高效。对绩效评价不合格的项目,实行“一票否决”并暂停后续支持,形成“能上能下、能进能出”的动态调整机制。

6.2 完善人才激励与职业发展制度,激发内生动力

针对基层农技协“引才难、留才难”问题,应出台专项政策,将优秀科技志愿者、乡土人才、农技协负责人纳入“云南省乡村振兴人才库”,享受职称评审绿色通道、人才津贴、项目优先支持等政策待遇。探索建立“科技服务积分制”,将志愿者的服务时长、技术成果、群众满意度等量化为积分,积分可兑换培训机会、荣誉表彰、晋升资格等。鼓励高校将科技小院实践经历纳入研究生培养学分体系,提升青年科技人才参与积极性。同时,推动建立“农技协职业化”发展路径,支持符合条件的农技协负责人考取社会工作者、农业技术推广师等职业资格,提升职业认同感与社会地位。

6.3 强化法治保障与规范管理,提升治理效能

加快推动《云南省农技协条例》立法进程,明确农技协的法律地位、组织架构、权利义务与监督管理机制,为协会依法依规运行提供法治保障。健全内部治理结构,推动所有县级及以上农技协建立理事会、监事会制度,实现决策、执行、监督分离。建立“阳光公示”制度,定期向社会公开财务收支、项目进展、服务成效等信息,接受社会监督。对存在违规行为的协会,依法依规予以警告、整改、撤销登记等处理,维护行业秩序。

6.4 构建多元协同治理格局,激活社会资源

推动建立“政府引导—科协牵头—高校支撑—企业参与—农民受益”的多元共治模式。鼓励企业通过设立“科技助农基金”、捐赠设备、提供就业岗位等方式参与农技协发展。支持金融机构开发“科技服务

贷”“乡村振兴贷”等金融产品,为农技协组织提供低成本融资支持。引导媒体平台开设“科技助农”专栏,宣传先进典型,营造全社会关心支持“三农”事业的良好氛围。

通过构建“政策—制度—资源”三位一体的长效机制,云南农村专业技术协会将彻底摆脱“项目依赖”与“临时性”困境,真正实现从“输血”到“造血”、从“被动服务”到“主动引领”的根本性转变,为新时代云南农业农村现代化提供持久动力。

7 结束语

云南广大基层农技协是我省服务“三农”高质量发展工作的重要力量。云南农技协的高质量发展,不仅是技术推广与组织建设的升级,更是一场深刻的社会变革。它承载着科技赋能农业、人才扎根乡土、组织服务群众的多重使命,是实现中国式现代化在边疆民族地区落地生根的关键支点。未来,云南农技协应以“科技小院”为支点,以农技协联合会建设为抓手,以提升农技服务为重点,撬动“组织—人才—技术—制度”四位一体的系统性变革,打造集科技创新、成果转化、人才培养、社会服务于一体的现代农业科技服务平台。农技协将不再是传统意义上的“技术推广站”,而将成为连接政府、高校、企业与农民的“创新枢纽”与“信任桥梁”。通过构建智慧化管理平台,实现科技服务的精准匹配与高效响应;通过深化党建引领,将党的政治优势转化为组织动员优势与群众凝聚力;通过完善政策与制度保障,确保发展成果可持续、可复制、可推广。云南农村专业技术协会将走出一条具有边疆特色、民族特点、科技含量的乡村振兴新路径,为全国农业现代化提供“云南经验”和“云南样板”,为实现全体人民共同富裕贡献更多更大的力量。

参考文献:

- [1] 李正洪.加快边疆民族地区现代化建设[N].中国民族报,2022-12-27(06B).
- [2] 宋潘婷,王桃金.新质生产力赋能民族地区全面推进乡村振兴:内在逻辑与路径选择[J].农村经济与科技,2024,35(16):28-31.
- [3] 苏正玺,王丽芝.楚雄州农民专业合作社发展问题调研分析与思考[J].云南科技管理,2004,17(05):57-63.
- [4] 贺茂斌,任鹏.“基层科普行动计划”政策变迁的历程、演进逻辑与未来展望[J].科普研究,2024,19(06):47-56.
- [5] 陈锡文.当前农业农村的若干重要问题[J].中国农村经济,2023(08):2-17.

房建外脚手架搭设过程安全管理研究

崔生虎

(中铁十二局集团华南工程有限公司, 广东 广州 528400)

摘要 房屋工程项目施工阶段, 外脚手架属于工程高处作业的临时基础设施, 外脚手架搭设的安全关系到施工人员的生命以及工程项目的稳定开展。本文在探讨房屋建筑工程外脚手架搭设安全风险内容的同时, 针对外脚手架搭设阶段安全管理原则进行了研究, 并从外脚手架搭设施工方案确定、架体材料进场以及验收管理等多个方向深入解析了外脚手架搭设过程中的安全管理细节, 以期为同类工程项目提供有益参考。

关键词 房屋建筑; 外脚手架; 搭设过程; 安全管理; 高处作业

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.027

0 引言

房屋建筑工程具有楼层高, 施工难度大, 交叉作业密集等特点, 而外脚手架的搭设作为工程项目开展的临时主要结构, 其安全性控制非常重要。然而, 近年来因脚手架搭设不规范引发的全事故频发, 暴露出施工方案脱离实际、材料以次充好、工序违规操作等管理缺陷, 凸显了传统安全管理模式中“重事后处罚、轻过程控制”的局限性。为从根本上遏制此类事故, 须将安全管理前置于搭设的全过程, 通过构建涵盖设计、材料、施工、监管全环节的闭环管理体系, 从而为项目工程的顺利推进提供坚实的安全保障。

1 外脚手架搭设过程安全风险识别

1.1 架体基础与支撑失稳风险

房建工程外脚手架作为重要辅助设施, 其需要保证基础达到平整与夯实效果。然而在外脚手架运行过程中, 若基础结构承载力不足或者木垫板面积不能达到要求, 会导致脚手架立杆承受不均匀沉降荷载引发结构失稳。同时, 悬挑脚手架所使用工字钢锚固长度未达标, U型螺栓未拧紧或预埋位置偏移, 且没有设置下拉卸荷钢丝绳造成悬挑结构在荷载作用下持续下挠, 进而出现工字钢根部拔出或断裂风险。这一类型风险发生率高, 并且随脚手架高度增加作业荷载增大, 短时间内发生整体失稳, 进而引发大面积坍塌造成设备损坏与人员伤亡^[1]。

1.2 杆件安装与连接构造缺陷风险

房建外脚手架搭设施工阶段, 有些工作人员盲目地缩短项目工期, 随意调整杆架间距, 立杆纵距与横

距严重超出设计标准, 这造成脚手架结构承载力未能达到要求。同时, 脚手架安装阶段, 扫地杆遗漏或安装高度在 200 mm 以上, 导致脚手架底部约束力不足影响整体稳定性。脚手架剪刀撑未沿架体全高度设置, 或者斜杆与地面夹角在 45° 以下或超过 60°, 都会造成脚手架结构侧向抗变形能力下降。

脚手架连墙件安装环节滞后于架体搭设高度, 甚至采用铁丝绑扎取代刚性拉结, 造成架体在风荷载作用下形成位移。此外, 脚手架施工阶段扣件螺栓未按照规定扭矩拧紧, 其测量值在 40 N·m 以下, 或者使用滑丝、裂纹、变形、扣件, 导致结构出现严重脱落或杆件滑脱问题。

1.3 高处作业与物料堆放失控风险

外脚手架搭设施工阶段, 其作业面一般处于临边或悬空状态。如果没有按照要求设置防护栏杆, 或作业人员未佩戴安全带, 一旦出现踩空或失稳情况必然引发人员伤亡。在脚手架作业层临时堆放钢管、扣件等材料, 如果其堆载总量超过 3 kN/m², 或者某个架体位置集中堆放偏心荷载, 进而造成脚手架出现局部失稳现象。脚手架上部作业平台放置零散扣件、小型工具, 或未采取必要固定措施, 在发生大风天气下导致零散部件坠落, 下方人员或物体面对打击风险造成伤害事故。此外, 房建工程施工中夜间照明度不足, 脚手架表面的抗滑性较差, 且作业人员未穿戴防滑鞋等装置, 导致施工阶段引发踏空、滑倒等风险。这些风险发生极易引发人员伤亡与设备损坏, 并且属于突发性事故, 这对整个房建工程项目顺利进行造成影响。

作者简介: 崔生虎 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑安全管理。

2 外脚手架搭设过程安全管理原则

2.1 方案先行, 技术引领

房建外脚手架搭设需遵循科学、具体、可操作性原则, 确保脚手架设计方案达到可行性要求。外脚手架设计方案需综合分析工程结构特点、高度、荷载要求、现场环境, 通常选择使用落地式、悬挑式或附着式升降架形式。而在外脚手架搭设施工阶段, 需严格执行设计方案, 确定立杆间距、步距、剪刀撑布置、连墙件设置等, 并由技术人员进行脚手架的受力验算, 从而确保脚手架在运行过程中具备较高承载力。在外脚手架设计方案确定中, 需在设计方案中设置关键节点大样图、材料规格要求以及应急处置措施, 保证脚手架技术内容和现场实际一致。外脚手架设计方案确定后, 组织施工单位技术负责人审核, 总监理工程师批准, 若存在任何安全隐患禁止投入工程中施工^[2]。

2.2 过程受控, 工序闭环

房建外脚手架搭设施工保证各工序严密控制, 确保基础处理、杆件安装、连墙固定、防护设置等多个环节紧密配合, 每个环节质量符合要求, 以提高外脚手架稳定性与可靠性。而在外脚手架搭设过程中, 需在上一道工序施工结束, 且经过质量检验合格后, 再组织开展下一道工序施工。在外脚手架施工质量检测阶段, 由施工员、安全员、班组长联合检查, 严格按照设计方案要求开展施工作业, 确保外脚手架搭设达到要求。例如: 外脚手架立杆安装结束后, 经过垂直度检测达到要求再进行水平杆搭设施工。

2.3 防护到位, 本质安全

房建外脚手架搭设施工作业阶段落实各项防护性措施, 这是保证施工人员安全性的关键。在脚手架搭设作业阶段, 周边需设置超过 1.8 m 的硬质围挡, 禁止无关人员进入现场引发伤害事故。在外脚手架作业层铺满脚手板, 板端使用铁丝连接固定, 临空侧设置高度 180 mm 挡脚板, 且在外立杆内侧张挂密目网以实现安全防护。上述所有作业人员需佩戴安全帽, 并系挂双钩五点式安全带, 作业环节保证各项安全设施与牢固杆件紧密连接, 防止作业阶段出现滑动或脱落等现象造成人员伤害事故。

3 外脚手架搭设过程安全管理实施要点

3.1 编制专项施工方案

房建外脚手架在专项施工方案编制时, 由技术人员进入现场进行全面勘察, 并结合现场实际情况确定适宜方案。在该环节中, 技术人员重点检查建筑外立面变化、悬挑结构位置、周边既有构筑物以及地下管

线分布情况, 从而确保外脚手架设计方案符合现场施工环境需求。同时, 由技术人员复核检测外脚手架搭设高度、悬挑长度、作业荷载、风荷载。其中, 作业荷载按 3 kN/m^2 选取, 保证外脚手架架体选型和主要构造形式达到工程施工要求。外脚手架设计方案在确定的过程中, 由设计人员根据总体设计方案绘制架体平面布置图、立面图、剖面图、关键节点大样图, 确定悬挑工字钢型号。根据以往房建工程施工经验, 外脚手架设计方案如下: 悬挑工字钢型号 16 号、锚固长度不小于 1.25 倍悬挑长度、U 型锚环直径不小于 18 mm、立杆纵距不大于 1.5 m、横距不大于 0.9 m、步距不大于 1.8 m 以及连墙件按两步三跨方式布置。外脚手架设计方案确定后, 通过可视化软件进行技术交底, 确保施工人员充分了解外脚手架结构组成以及施工工艺。而在外脚手架设计方案技术交底环节, 由技术负责人主讲, 安全员、施工员、班组长以及全体架子工共同参与, 并且所有技术交底人员签字记录, 确保技术交底有序落实^[3]。

3.2 架体材料进场与验收管理

房建外脚手架施工材料进入到现场前, 需组织技术人员进行质量监督检测, 并构建形成外脚手架材料管理台账。在该环节中对外脚手架验收进行全面监控, 逐一登记每批次钢管、扣件、工字钢、密目网, 确保各种材料的规格型号、数量、生产厂家、出厂合格证编号以及第三方检测报告完整, 从而形成外脚手架施工材料的全面管控。外脚手架钢管进入现场后, 由专职质量人员使用精度 0.02 mm 游标卡尺进行壁厚抽检, 按照每 30 根随机抽检 3 根的比例, 每根测量 3 个截面, 实际测量厚度超过 3.0 mm; 外脚手架钢管锈蚀深度超过 0.5 mm, 或钢管出现压扁、弯曲、裂纹等现象, 禁止进入到施工作业现场。外脚手架扣件检测无滑丝、裂纹、变形的风险, 由技术人员逐一进行检测, 并使用数显扭力扳手测量力学性能。通常来说, 外脚手架中直角扣件螺栓拧紧预计为 $40 \sim 65 \text{ N}\cdot\text{m}$, 禁止在施工作业阶段因为损坏导致连接性能下降^[4]。此外, 工程建设阶段中, 对于材料的堆放要按照指定的区域存放, 不能够出现混用或者是误用的情况。其中钢管需要设置防潮垫, 扣件应按照库存的摆放要求配置, 相应的密封网不能够出现在室外不能够接触到辅助性的物质。而在材料验收的阶段中, 要全程做好照片记录以及工作人员的签证, 同时纳入到电脑信息系统当中。对于不达到工程施工的材料需马上退换, 不能以次充好或者是临时代替, 以免影响到外脚手架搭设的稳定, 而引起安全事故出现。

3.3 搭设工序标准化作业

房建外脚手架搭设施工遵循标准化原则,各工序严格执行设计方案与技术标准,并明确施工质量要求。在外脚手架搭设环节需制定详细施工进度计划,明确各环节施工要点和要求。通常来说,施工环节早班作业时间为7:00~11:00,主要进行立杆竖立、纵向水平杆安装以及初步矫正;11:00~12:00为自检与报验阶段,由班组长自检合格后,将其上报给监理工程师进行复检;中班作业时间为13:00~15:00,主要进行剪刀撑搭设、连墙件安装以及节点紧固;15:00~17:00为整体脚手架验收与问题整改,各时间段紧密配合,确保各项施工任务有序完成。房建外脚手架搭设施工阶段做好技术参数控制工作,保证各项施工质量参数达到工程技术标准。脚手架立杆安装后,通过经纬仪检测垂直度,确保其偏差为架体总高度 H 的 $1/200$,并且控制在100 mm以下。脚手架剪刀撑沿架体外侧连续布置,其斜杆和地面夹角为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。脚手架搭设施工环节采取搭接方式接长,保证搭接位置长度超过1 m,并且等间距设置2个以上旋转扣件固定。脚手架连墙件采取两步三跨方式布置,其竖向间距不大于2倍步距,一般为3.6 m以下;水平间距控制在3倍纵距以下,一般在4.5 m以下^[5]。

3.4 高处作业安全防护与监护

房建外脚手架需在周边搭设高度超过1.8 m的硬质围挡,选择定型化钢板或砌体结构形式,保证其连接具备严密性。在围挡中设置“禁止入内”警示标识,禁止无关人员进入现场导致人员伤亡。同时,在施工现场设置一个出入口,并组织专人进行把守,进入现场人员实名登记、核验人员身份。外脚手架搭设施工阶段需在作业层下方垂直方向间隔10 m设置一道水平安全网,首道平网距离地面高度在3 m以内,后续平网间距在10 m以下。平网选择棉轮或维纶材质,其宽度应超过3 m,网边绳和支撑架体牢固绑定,相邻网片搭接宽度超过0.5 m。作业层脚手板铺设达到完整、稳定的效果,并且和墙体距离在150 mm以下,板端使用12号镀锌钢丝双股固定在横杆上。脚手架临空一侧设置高度超过180 mm的挡脚板,并在外立杆侧张挂密目式安全网,其网目密度超过2 000目/100 cm²。外脚手架搭设施工高空作业量较大,所有施工人员配置符合国家标准的安全带,并采用双钩五点式结构,确保安全带与固定结构紧密连接。在人员需要移动时需交替使用挂钩,禁止采用低挂高用或系挂于未固定的横杆、剪刀撑上。外脚手架搭设施工采取专职安全员轮班制,每班设置2名以上安全员,并间隔2 h进行

一次全面巡查。如果在安全员巡查过程中存在违章作业情况,立即勒令人员停止施工,并加强对施工班组的安全培训。

3.5 架体搭设过程检查与阶段性验收

房建外脚手架搭设施工阶段,采取分段检查与阶段性验收制度。在脚手架搭设施工阶段,每完成一个标准步距或一个结构层高度,组织施工员、安全员、班组长建设联合工作小组,加强现场施工环节的巡视检查,其重点检查立杆垂直度、水平杆水平度、扣件紧固状态以及连墙件安装情况。在脚手架搭设质量检测阶段,使用经纬仪测量立杆垂直度偏差,再使用专用扭矩扳手检测扣件螺栓连接的状况,确保测量值达到40~65 N·m。外脚手架搭设施工阶段,在搭设高度6 m、12 m、18 m以及最终设计高度,组织专业技术人员进行阶段性验收。外脚手架验收阶段先由施工班组自检,项目技术负责人牵头,会同监理工程师、安全监理人员共同参与。若脚手架质量检测阶段存在性能不合格或者稳定性不达标等情况,任何隐患都要停止施工,组织施工人员进行整改后再开展后续施工作业。

4 结束语

在房屋工程项目建设中,外脚手架搭设作为项目建设安全控制中的重点内容。在外脚手架搭设阶段中,只有严格地按照方案的要求做好搭设过程细节控制,才能够确保安全管理工作能够嵌入每一个操作细节,从而在根本上减少安全事故的发生。由于房建工程项目的规模不同,在外脚手架搭设阶段,对于搭设的安全管理控制要求也存在一定的差异性,因此在项目开展时,需要以标准化、精细化、信息化为基础,不断完善脚手架搭设过程的安全控制机制,才能真正实现“本质安全”,为建筑行业高质量发展筑牢安全基石。

参考文献:

- [1] 梁鑫.建筑脚手架搭设安全管理分析[J].中国房地产业,2021(30):20-23.
- [2] 杨耀辉.现代化电厂脚手架搭设及使用安全风险管控研究[J].河南科技,2020,39(25):97-99.
- [3] 孙智佳.高层建筑工程中的悬挑式外脚手架搭设施工技术[J].绿色环保建材,2021(11):102-103.
- [4] 崔毓霖.承插型盘扣式脚手架搭设技术和安全风险控制措施[J].工程机械与维修,2024(07):40-43.
- [5] 张建业.花篮式外墙悬挑脚手架搭设与安全应用技术研究[J].工程质量,2025,43(06):80-85.

电力工程施工进度控制与优化措施探讨

刘 蒙

(山东济宁圣地电业集团有限公司, 山东 济宁 272000)

摘 要 电力工程施工工期长、工序交叉多, 进度控制效果直接影响工程投资效益、供电可靠性及项目交付质量。随着电网建设规模持续扩大, 施工现场受到地形环境、材料供应、人员组织、外部协调等因素的影响愈发明显, 进度管理难度也随之增加。施工单位若无科学的计划与动态调度机制, 很容易造成工期延误、资源浪费、返工隐患、安全隐患等问题, 甚者会引发安全事故。本文从电力工程施工的特点出发, 阐述了施工进度控制的意义, 并对进度控制的主要内容进行分析, 针对常见问题提出优化措施, 旨在为施工管理实践提供参考。

关键词 电力工程; 施工进度控制; 动态保障体系; 进度监测精度

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.028

0 引言

电力工程作为国民经济的重要基础设施, 其建设质量同交付周期存在关联, 二者关系着区域供电保障和社会运行秩序。近年来, 电网建设任务愈发密集, 存在线路跨度大、交叉作业繁多、施工条件复杂等状况, 进度控制成了施工管理的核心环节。在实际建设过程中, 工期要求与施工难度之间存在矛盾, 由于计划安排不合理、资源调配不及时、现场协调不到位等原因, 工程进度就会受到影响, 进而造成成本增加和履约风险。进度控制不是一味追求速度, 而是在保证质量、安全的前提下实现阶段目标的稳定达成。本文结合电力工程施工管理现状, 对进度控制体系和优化路径进行研究, 提出更具实践价值的改进思路。

1 电力工程施工中的进度控制

电力工程施工进度控制是在合同工期的约束下, 根据施工组织设计和阶段性节点目标, 对施工活动进行计划、执行、检查和调整的全过程管理。由于电力工程涵盖土建、安装、调试、验收等许多工序, 各环节之间存在很强的逻辑依赖关系, 一旦某一工序延误, 就会导致后续施工整体滞后。同时部分工程为了压缩工期而采取交叉施工的方式, 虽然可以提高表面效率, 但是如果没有精细化的协调, 极易造成施工干扰、工序冲突与质量返工风险。

在进度控制实践当中, 管理人员要依照施工任务分解结果, 确定关键线路和关键工序, 科学安排资源投入的节奏, 结合天气、运输状况和外部协调情况制定可执行的进度计划。进度控制也要搭建动态监测体

系, 及时对比计划值和实际值, 剖析偏差缘由并采取调整举措。尤其是现代电力工程施工技术日趋复杂, 施工人员专业水平和组织水平要求越来越高, 进度控制需体现标准化、精细化、协同化管理特点, 才能保证工程节点的兑现^[1]。

2 电力工程施工进度控制的重要意义

2.1 保障工程履约能力与项目综合效益

电力工程施工一般具有投资规模大、合同约束强、社会关注度高等特点, 进度控制的第一要义就是保证工程按期履约。对于输变电工程来说, 建设周期影响电网规划落地速度, 工期延误可能导致配套工程不能同步投运, 影响区域供电能力以及产业用电需求。进度失控还会引起合同索赔、管理成本的增加与资金占用的时间延长, 使项目经济效益受到削弱。

施工进度也体现了一家企业经营管理水平以及资源整合能力。科学的进度控制可以保证资金、设备、人员的投入有条不紊, 减少因窝工、重复工作而造成的浪费, 避免盲目抢工造成的成本失衡。同时进度控制并不只是单纯加快施工, 而是以保证质量、安全为前提, 提高资源利用率, 使各个工序按规定的流程进行, 达到工期目标和效益目标的统一。只有建立规范的进度管理体系, 施工单位在激烈的市场竞争中才会形成稳定的履约信誉。

2.2 提升施工质量稳定性与工程可靠性

电力工程质量具有高度不可逆性, 特别在隐蔽工程、线路基础、设备安装等环节出现问题之后很难通

作者简介: 刘蒙(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

过后期修复来解决,甚至会埋下长期运行的风险。进度控制的意义在于给质量管理提供稳定的施工节奏,使施工活动按照工艺要求有条不紊地进行。若施工进度缺乏控制,现场容易出现赶工现象,施工人员可能压缩必要工序时间,造成工艺执行不到位,从而产生质量隐患。

电力工程一般需要多专业协同,如土建基础施工与设备安装调试存在严格的衔接要求,如果进度安排不合理,容易出现交叉作业干扰,造成施工条件不足、工序衔接混乱、重复拆装等问题。表面上看只是造成了进度滞后,实质上破坏了质量控制体系,增加返工率。科学进度控制用节点管理的方式,将关键工序预留出合理的空间,使验收、试验、调试等环节按照标准进行,最终保证电力设备投运后的稳定性、可靠性^[2]。

3 电力工程施工进度控制存在的问题

3.1 进度计划编制缺乏严谨性与可操作性

部分电力工程在开工阶段虽然制定了总体进度计划,但是计划内容一般只停留在粗略安排的层面,缺少对关键工序、关键资源和外部协调事项的深入分析,造成计划缺乏执行依据。有的施工单位由于受到合同工期的压力而压缩工期,把施工节点定的过于理想化,没有考虑到地形条件、气候变化、审批手续、交通运输等实际情况,最终使计划与实际不相符。

计划分解不细也是经常出现的问题。施工任务没有落实到班组和人员,节点目标缺少明确的验收标准,现场管理人员不能及时发现并解决施工过程中遇到的问题。施工过程中出现设计变更或者外部条件变化时,原计划缺少调整机制,导致施工组织被动,影响工期兑现。

3.2 资源供应与设备调配存在不确定性

电力工程施工对材料、设备、专业机械的依赖程度高,特别是导线、电缆、变压器、开关柜等重要物资,如果供应链组织不到位,进度就会受到直接的影响。部分工程由于采购计划不合理,材料到货时间与施工进度不协调,现场出现等待材料或者重复搬运的情况,造成工期浪费。

在设备管理方面,机械设备维护不好也会造成进度延误。比如吊装设备故障、运输车辆调度不及时、试验设备缺乏校验都会导致关键工序不能按时进行。施工现场没有开展资源消耗的动态统计,管理人员无法掌握库存和使用情况,导致材料浪费和设备闲置同时存在。资源和设备因素表面上属于保障环节,但是其波动会直接造成施工计划执行的紊乱。

3.3 施工组织协调不足与安全意识薄弱

电力工程施工通常牵涉到多个参建单位以及多个专业工种,协调工作比较繁杂。部分项目的现场管理制度不健全,部门间信息沟通不畅,导致工序交接效率低,责任不明,重复安排或漏项时有发生。当交叉施工增多的时候,如果缺乏统一的调度机制,施工现场很容易出现作业冲突,使进度被动拖延。

同时部分施工人员的安全意识不强,违章操作行为仍然存在。安全管理不到位,一旦发生事故或者出现重大隐患,工程就会停工整改,工期受到更大的影响。更值得重视的是,一些项目发生事故之后没有对事故进行系统的复盘总结,隐患再度出现,形成长期风险堆积。进度管理与安全管理不能很好地结合起来,这也是目前电力工程施工组织中比较突出的薄弱环节^[3]。

4 电力工程施工进度控制的优化措施

4.1 优化进度计划编制机制,突出关键线路管控

施工单位在开工前组织技术、物资、施工、安全等多部门联合编制进度计划,保证计划内容符合合同工期要求,又能与施工资源条件相匹配。计划编制要突出关键线路管理思想,对基础施工、设备安装、线路架设、调试验收等关键工序进行逻辑分析,确定工序间的先后顺序和时间依赖关系,给关键节点留出合理的缓冲时间。

计划细化上,施工单位要将总体工期目标分解成月计划、周计划、日计划,落实到具体的作业面和责任班组,同时建立节点验收标准,使进度控制具有可检查、可追溯的特征。当设计变更、天气变化、外部协调条件改变的时候,管理人员要立即执行计划调整程序,不能在施工现场随意变更工期。

在某220 kV变电站扩建工程中,项目初期把设备到货时间纳入关键线路管理,提前对主变压器运输路线和吊装场地进行复核,在计划中设置到货验收节点。由于前期的统筹工作做得好,主变安装和后续的调试环节没有出现以前经常出现的设备滞留、工序等待的现象,保证了关键节点按期完成。该案例说明,计划编制如果能够体现关键线路思维,进度控制就从被动补救转向主动预防。

4.2 强化资源统筹与供应链管理,建立动态保障体系

施工进度的顺利进行要靠资源保障。要建立以施工节点为依据的资源需求预测机制,把材料采购计划同施工计划同步编制,重点考虑导线、电缆、铁塔构件、开关设备等关键物资的到货周期,防止出现材料

到场过早造成堆放损耗,或者到场过晚造成工序停滞。对周期长、运输要求高的大型设备,必须在设备到场前就做好供应商评价、运输方案论证工作,确保设备到达施工现场并吊装就位。

在机械设备管理层面,项目部对吊装机械、张力放线设备、试验检测设备要建立台账制度,明确使用频率、维护周期与备件储备。现场管理人员应当定期对设备进行检查,防止由于设备故障导致关键工序停工。施工单位也要建立材料库存动态统计制度,按照每天消耗量及时调节采购和调拨方案,保持资源供给同施工进度一致^[4]。例如:某山区输电线路施工因部分施工段道路条件所限,使得材料运输效率低。项目管理团队提前把塔材分批运到沿线临时堆场,安排专用车辆进行短驳转运,并把运输计划同架塔计划紧密绑定。施工现场可按照规定的时间领取材料,减少了由于运输高峰期而造成的交通风险,提高了作业效率。经实践检验,建立资源统筹动态保障体系之后,进度控制便拥有了更强的稳定性与抗干扰性。

4.3 推进信息化与数字化管理,提高进度监测精度

传统的进度管理依赖人工统计、经验判断,数据滞后性较强,不能及时反映现场实际情况。电力工程施工要积极采用信息化管理手段,利用项目管理系统对计划节点、材料到货、人员投入、机械利用率等数据进行实时汇总,达到进度信息可视化呈现的目的。管理人员能根据数据进行对比,很快可以发现偏差所在并分析原因来提高决策效果。

在复杂工程中,信息化技术还可以用来做施工模拟和风险预测,如利用工程模型对施工区域进行模拟推演,提前找出交叉作业冲突点,改善作业面布置和施工顺序,缩减返工和停工的情况。对于高风险工序,信息化平台依靠现场巡检记录和隐患整改情况,形成闭环管理机制,让进度控制同安全管理一起推进。例如:某城市地下电缆隧道施工中,项目部用移动端巡检系统每天对开挖长度、支护完成量、材料消耗情况进行记录,并上传到管理平台。管理人员经由数据分析得知某段施工效率一直偏低,之后再查证发现是因为通风设备配置不够,造成作业时间受限。项目部随即调整设备投入和班组轮换方式,使该施工段进度恢复正常。这说明数字化管理将进度控制从事后统计变成过程预警,有利于提升工程整体管理水平^[5]。

4.4 完善现场协同与节点考核机制,提升执行力与应变能力

以节点为单位确定各个参建方的责任范围,达到统一调度、信息共享的目的。项目部应当定期召开现

场协调会,就由于设计变更、停电计划、交通管制等因素导致的工期延误问题进行解决。交叉施工区域要提前编制作业面协调方案,确定作业顺序、人员进出路线和安全隔离措施,保证现场秩序的稳定。

节点考核机制也不能缺少。施工单位要将关键节点的完成情况同班组绩效、分包管理评价联系起来,使进度目标具有约束力。对进度滞后环节及时进行原因分析,区分管理原因、资源原因、外部原因,并制定纠正措施,防止抢工形式加剧质量、安全风险。例如:在某 110 kV 线路改造工程中,由于老线路停电窗口期有限,施工时间非常短。项目部开工前编制节点责任清单,将拆旧、立杆、放线、接线等工序分派到各个班组,倒排停电窗口计划。在施工期间,项目经理每天对节点完成情况做出检查,并协调物资和车辆的调配。工程最后在停电计划期内送电,避免了因为延期造成的用户停电扩大。因此完善的协同机制、节点考核制度可以大大提高现场的执行力,使进度控制更具可控性与应变能力^[6]。

5 结束语

电力工程施工进度控制本质就是把复杂的工序、资源配置、外部条件纳入统一组织框架,使施工活动在质量、安全可控的前提下有序进行。随着工程规模的不断扩大、施工环境的日益复杂,应从计划编制、资源保障、信息化监测、现场协同等方面不断改善进度控制体系,使节点目标更加明确、调度更加灵活、执行更加可追溯。只有在管理理念和实践措施都得到提升的基础上,电力工程才能更好地达到按期投运的目标,降低施工风险,最终提高工程综合效益。

参考文献:

- [1] 白龙. 电力工程施工中的进度控制与安全管理优化措施[J]. 工程建设, 2023, 06(07): 145-147.
- [2] 田素娜. 电力工程施工进度管理中的关键节点控制研究[J]. 消费电子, 2025(24): 122-124.
- [3] 缪海雷. 电力工程施工中的项目管理与进度控制研究[J]. 葡萄酒, 2024(09): 49-51.
- [4] 钟鹏. 区块链在电力工程施工进度与成本控制中的应用[J]. 信息与电脑, 2025, 37(05): 59-61.
- [5] 刘维蒙, 王宝坤. BIM技术在电力工程施工进度控制中的应用[J]. 消费电子, 2025(12): 49-51.
- [6] 马贤钦. 电力工程施工中的进度控制与安全管理优化措施分析[J]. 广东安全生产技术, 2024(10): 103-105.

变电站土建与电气安装施工协调管理研究

史 聪

(山东济宁圣地电业集团有限公司, 山东 济宁 272000)

摘 要 在变电站工程建设全流程中, 土建施工与电气安装的协同成效直接决定着工程的建设质量、推进效率与综合效益。本文首先从工程质量管控、施工效能提升、安全风险防控及成本优化四个维度, 系统剖析协调管理的实践价值; 其次结合变电站工程施工的全流程特性, 构建涵盖前期规划统筹、过程动态管控、技术支撑保障、协同机制完善在内的全链条协同策略, 重点针对设计冲突、工序衔接不畅等核心矛盾, 强化参建各方的沟通协同。研究表明, 科学高效的协调管理可显著降低工程返工率, 为变电站工程标准化建设提供切实可行的实践指引。

关键词 变电站; 土建施工; 电气安装; 协调管理

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.029

0 引言

伴随电力系统基础设施的更新升级, 变电站工程展现出结构复杂、技术高度集成的发展态势, 土建施工和电气安装的交叉作业愈发频繁。根据行业实践表明, 由于这两项作业协调不充分而造成的工期延误占比高达 25%, 返工成本占项目总投资的 5%~8%。因此, 加强土建工作和电气安装工作之间的协调管理, 构建全周期的协同运作机制, 是确保工程顺利推进、提高建设综合效益的重要因素。本文依据实际需求, 着重探究协调管理的核心意义及实际操作策略, 为类似的工程项目提供科学的实践参考。

1 变电站土建与电气安装协调管理的意义

1.1 保障工程质量稳定性

电气设备的基础支撑由土建工程予以提供, 而电气安装质量会直接受到土建工程结构强度以及预埋件精度的影响。特别是 GIS 设备、主变压器等关键设备, 对基础的平整度、沉降量有着极高的要求。经过协调管理举措, 能够在设计阶段对双专业实施现场联合踏勘活动, 同时将设备参数和施工条件相结合, 以此解决空间布局冲突, 从而保证设备基础尺寸、预留孔洞位置可以精准地契合电气安装要求, 防止因为基础存在偏差而引发设备倾斜、接线错位等质量问题。在施工阶段开展协同管控, 可达成工序之间的有序衔接。例如: 土建主体结构施工能够与电气预埋件的安装同步开展, 借助对位置偏差进行实时校验, 并及时对施

工工艺予以调整, 能够降低二次整改对混凝土结构强度以及设备安装精度所造成的影响^[1]。

1.2 提升施工进度效率

变电站的施工工作涉及多个专业以及多道工序的交叉作业, 其过程包含基础施工、主体搭建、设备安装、调试投运等诸多阶段。一旦协调工作不当, 就容易引发工序颠倒、资源争抢等状况。高效的协调管理能够借助网络技术对施工流程进行优化, 清晰界定土建施工与电气安装的时间节点以及衔接逻辑。例如: 要合理安排设备吊装和土建收尾工作的先后次序, 防止因为场地被占用、机械调配冲突而导致劳动力闲置的情况发生。经由对人力、机械资源实施统一调度, 达成关键工序的同步作业。再如: 当土建方开展墙体砌筑工作时, 电气专业同时推进管线预埋工作, 以此缩减施工所需的时间周期。实践表明, 借助科学的协调手段, 能够让工程的进展速度提高 15%~20%, 从而保证项目可以按照预先设定的时间投入运行。

1.3 降低安全风险隐患

在交叉作业中, 如高空作业、带电操作等环节所蕴含的安全风险极为显著。在土建施工时, 模板拆除以及材料堆放等行为, 很容易对电气安装工作带来如物体打击、触电等隐患。与此同时, 电气设备开展临时通电调试作业, 同样可能对土建作业人员的安全产生威胁。协调管理工作可借助构建统一的安全管控体系达成, 要明确各个作业区域的安全责任, 还要明晰

作者简介: 史聪(1995-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

防护要求。例如：划分交叉作业隔离带、规范施工机械的运行路线，并且设置清晰明显的安全警示标识。与此同时，进一步强化安全技术详细告知工作，针对各类交叉作业中存在的风险关键点，专门拟定对应的防护举措，以此增强施工人员协同防护的认知以及应急处置能力。

1.4 优化工程建设成本

因协调不足而产生的返工整改情况以及工期延误现象，是造成成本超支的主要因素。例如：基础尺寸出现偏差进而致使设备基础需要重新建造，管线之间发生冲突从而引发墙体需要进行凿改等状况，均会使额外的费用有所增加。协调管理借助前期开展的设计会审环节削减变更成本，通过过程管控措施降低材料的损耗以及机械闲置费用。再如：精确地核算预埋件的用量以避免出现浪费，合理地安排施工机械的使用时间以提升其利用率。与此同时，降低由于质量问题而致使的后期运维成本，如规避因基础沉降而引发的设备维修、线路故障排查等费用，达成建设整个周期成本的优化^[2]。

2 变电站土建与电气安装协调管理策略

2.1 强化前期规划协同

前期规划作为协调管理的根基，应构建包含设计方、施工方、监理方等多方共同参与的会审制度，清晰界定会审的流程以及责任的划分，以此防止出现流于形式的审核。在设计阶段，要召集土建专业人员以及电气专业人员共同开展对图纸的审核工作，着重审查如设备基础的大小、管线的走向、预留孔洞的位置等关键参数。利用三维模拟技术预先判断空间中可能出现的冲突。例如：电缆沟和给排水管道之间如何进行交叉避让、高压设备和墙体之间的安全距离是否符合标准等情况，从而保证设计方案既能够让土建结构具备稳定性，又可以使电气安装具有可行性。在拟定一体化施工方案时，应综合考量工程的地质状况、气候环境要素以及设备到货的时间周期等方面。针对土建与电气安装工作，要进一步细化其工序的衔接之处、时间的关键节点以及资源的需求情况。再如：要清晰确定预埋件安装完毕后进行混凝土浇筑的时间段，明确规定电缆沟开挖和设备基础施工的先后顺序，避免由于工序衔接不合理而对施工质量产生不利影响。与此同时，要构建多层次的技术交底机制，技术交底对象不但要涵盖施工班组的负责人，还要延伸到一线操作工人。通过开展现场操作演示、进行图纸详细解

读等方法，保证施工人员能够精准掌握施工协同的要求以及技术标准，从根源避免出现协同偏差^[3]。

2.2 完善过程管控机制

在开展施工工作的进程中，有必要搭建动态化的协调体系，要组建现场协调小组。此小组由建设单位发挥引领作用，土建施工单位、电气施工单位以及监理共同参与其中，要清晰地界定该小组的职责，具体涵盖对施工进度进行全面统筹、化解施工过程中出现的冲突状况、合理调配施工所需资源。要施行每日晨会以及每周例会制度，每日的晨会重点关注当天各道工序之间相互衔接的细微之处。对交叉作业管理予以优化，运用“空间分区、时间分段”的作业模式，按照施工区域的风险等级，将管控区划分成红、黄、蓝三种颜色的区域，清晰界定不同区域交叉作业的审批流程，防止同一区域内多个专业同时开展作业而引发冲突。强化隐蔽工程的验收工作，构建“土建自检+电气复核+监理验收”的三级验收体系。例如：当土建基础施工完毕后，需要电气专业的人员核查预留孔洞的位置、预埋件的标高是否与安装要求相契合，在签署验收文件后才能够开展下一道工序。采用信息化的办法构建项目管理平台，将进度管理、质量检测、资源调度等功能模块进行整合，让施工日志、检测数据、设备到货信息能够做到实时共享，达成全流程的可视化管控^[4]。

2.3 加强技术支撑保障

技术革新是提高协同效率的核心所在，全方位推行 BIM 技术在施工中的深入运用，搭建包含土建架构、电气装置、管道线路体系的全专业三维模式，凭借碰撞检测功用预先排查管道线路碰撞、设备安置冲突等状况。例如：对高压开关柜和电缆沟的连接样式加以优化、对预埋构件与钢筋的空间分布进行调整。就大型设备起吊、高空管道线路铺设等关键施工环节而言，拟定专门的技术规划，安排土建与电气专业的技术人员共同核算施工负载、校验结构承载能力，明确起吊机械的停放位置、起吊路线以及土建架构的防护办法，以此保证施工的安全性和质量。开展对施工人员专业能力的强化培训，拟定跨专业领域的培训方案，安排土建施工人员开展对电气设备基础安装的标准规范、安全使用电力基本知识的学习活动，促使电气安装人员熟悉土建施工的具体流程、建筑结构的受力特性。凭借案例分析教学、实际操作演练等途径，增强其跨专业合作操作能力。与此同时，引入智能化监测手段。

例如：在预埋件进行安装的进程中，运用激光测距仪对位置偏差进行实时监测；在交叉作业的区域安装智能预警装置，达成对风险隐患的即时提醒，为协调管理工作给予技术支持。构建技术难题的共享库，对同类工程的协同经验加以汇总，以此助力现场问题能够迅速得到解决。

2.4 健全制度保障体系

搭建并完善具备协调管理功能的规章制度体系，颁布实施变电站土建与电气安装协同管理办法，清晰界定建设、施工、监理等各个参与方的责任与权力范围。例如：建设方承担整体统筹协调以及资源合理调配的重任，施工方需切实执行协同举措，并承担对应的安全责任，监理方则负责对项目全过程进行监督并及时反馈问题。拟定一套量化的考核奖惩制度，将协调配合的实际状况纳入每个施工班组的绩效考核框架中，设定如协同效率、冲突解决的及时程度等考核指标。对于在协同工作中表现卓越、成效显著的班组，给予资金奖励或者授予评优的资格；相反，对于在协调工作中表现欠佳，进而致使项目进度拖延、出现质量问题的班组，要进行相应的处罚，并且要求其在规定的期限内完成整改。对沟通反馈机制加以完善，设置专门用于沟通的渠道。例如：创建协同管理微信群、开启24h不间断的沟通热线，以此保证施工进程中的各类问题能够迅速上报，并且得到及时回应。与此同时，构建分级的应急预案，针对如暴雨、台风等自然灾害，还有设备出现故障、人员遭遇伤亡等突发事件，拟定土建施工和电气施工的应急协同策略，清晰界定应急组织架构、响应流程以及资源调配办法。就如在暴雨天气状况下基坑排水和电气设备防护的协同举措，从而保障出现突发情形时施工的秩序维持稳定，以及人员的安全得以保障。按既定周期开展应急演练活动，增强各参与主体之间协同开展应急处置工作的能力，确保施工进程能够持续、稳定地进行。将协同管理成效纳入到项目全盘的验收衡量指标体系中，对于未达到既定标准要求的情况，相关方面必须在规定的期限内完成整改后，才能够顺利通过验收^[5]。

2.5 强化多方沟通协同

多方沟通交流是协调管理工作中的关键连接要素，有必要构建常态化、多层次的沟通机制。在项目开展的进程中，要搭建“线上与线下相结合”的沟通平台。在线上，凭借协同管理系统达成文件的传送、问题的反馈以及进度的同步；在线下，定时组织开展跨专业

的沟通会议，以此保证信息的传递能够做到及时且精准无误。要清晰界定沟通的责任主体，各个施工班组需设置专门的协调人员，其职责在于承担日常的对接工作以及问题的上报事宜，从而防止信息传递出现中断。针对如设备进场、工序交接等关键节点，举办专门的沟通会议，将土建施工的进度和电气安装的准备状况进行同步，提前对可能出现的冲突加以预判。与此同时，着重培养沟通技巧，增强施工人员跨专业的沟通能力，倡导积极主动地进行对接、站在对方角度思考问题，营造相互协同配合的工作环境。借助高效的沟通达成信息的共享、意见的统一，为协调管理提供畅通无阻的沟通支撑，保证各项协同举措能够切实发挥成效。构建沟通信息的记录账本，针对沟通的具体内容、问题的解决办法以及落实的实际状况开展全面且持续的记录，并进行整理归档^[6]。

3 结束语

变电站土建施工与电气安装施工的协调管理工作，是确保工程项目质量、效率、安全以及成本优化等得以保障的关键方法，其重要意义为使工程质量维持稳定、让施工效率得到提升、降低潜在风险及优化成本。借助强化前期规划协同合作、完善施工管控机制、加强技术支撑保障、健全相关制度保障体系及积极强化多方面的沟通等，能够有效解决冲突问题、施工工序脱节等状况，从而达到变电站土建施工与电气安装施工之间的高效协同。未来，应不断地融合信息化、智能化技术以提高协同水准，从而为变电站工程的建设提供可靠的保障。

参考文献：

- [1] 郭文龙. 浅谈建筑工程电气安装与土建施工的技术配合[J]. 建材发展导向, 2025, 23(05): 85-87.
- [2] 李小虎. 智能技术在变电站施工质量控制中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(09): 150-151.
- [3] 王威. 变电站土建施工质量监管控要点探讨[J]. 大众标准化, 2023(18): 28-30.
- [4] 孙丹妮. 变电站土建施工与电气施工的配合与管理分析[J]. 电气技术与经济, 2023(04): 193-195.
- [5] 胡俊竹. 变电站土建施工与电气工程协调管理思考与实践[J]. 农村电气化, 2023(10): 8-11.
- [6] 乔顺. 变电站土建施工与电气工程协调管理实践分析[J]. 电气技术与经济, 2024(10): 296-298.

智能变电站设备日常巡检与维护策略探讨

陈菁

(江苏苏星资产管理有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 传统的巡检与维护模式在智能化转型过程中面临巡检手段滞后、故障定位复杂、数据孤岛严重、人员技能不足等一系列挑战。本文探讨智能变电站设备在日常巡检与维护中存在的 key 问题, 并从巡检模式转型、故障诊断体系构建、标准体系健全、人才能力提升及智能平台建设等方面提出系统性的优化策略与实践路径, 以期提升智能变电站运维的精准性、高效性与安全性提供参考。

关键词 智能变电站; 日常巡检; 二次系统; 智能组件; 智能运维平台

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.030

0 引言

智能变电站是构建坚强智能电网的核心枢纽, 其设备与系统的高度智能化在提升电网自动化水平与运行效率的同时, 也对传统的设备运维管理体系提出了革命性挑战。当前, 运维工作正面临从被动、定期、基于经验的模式向主动、动态、基于数据与状态的模式转型的关键时期。深入探讨智能变电站设备的日常巡检与维护策略, 不仅对保障变电站自身的安全稳定运行、延长设备寿命、降低运维成本具有直接的现实意义, 更是支撑智能电网实现高效自愈、优化运行、提升供电可靠性的重要基础。

1 智能变电站设备概述

1.1 设备分类与功能

智能变电站的设备体系在传统一次、二次设备分类基础上, 深度融合了信息技术, 可重新划分为三大类: 智能化一次设备、网络化二次设备及支撑自动化系统。智能化一次设备是电能转换与传输的核心, 主要包括集成智能组件的变压器、断路器、组合电器、互感器等。其功能不仅限于通断、变压和测量, 更通过内置或外置的智能单元实现对本体的实时状态监测、就地数字化转换及接收和执行远程控制命令^[1]。网络化二次设备构成了变电站的“神经中枢”与“大脑”, 包括保护装置、测控装置、在线监测主IED、同步相量测量装置等。它们的功能从传统的单点信号处理转变为基于高速通信网络的信息共享与协同运作, 实现保护、测量、控制、计量、状态监测等功能的集成与优化。支撑自动化系统则主要指站控层设备, 如监控主机、数据通

信网关机、一体化电源系统、时间同步系统等, 负责全站数据的集中处理、人机交互、对外通信和对内调度, 是实现变电站智能化高级应用的基础平台。

1.2 智能化特征分析

智能变电站设备的根本特征在于其“信息数字化、功能集成化、结构紧凑化、状态可视化及互动高级化”。首先, 信息传递方式发生了革命性变化, 模拟信号和硬接线被光数字报文取代, 实现了信息采集、传输、处理的全过程数字化, 提升了精度与抗干扰能力。其次, 设备功能高度集成与协同, 如合并单元集成多路采样、智能终端集成多路控制与状态采集, 打破了传统装置功能单一的界限。在结构上, 一次设备与智能组件深度融合, 二次设备趋于“硬件平台通用化、软件功能模块化”, 减少了屏柜数量, 布局更加紧凑。核心特征“状态可视化”依托于广泛部署的在线监测系统, 使设备从“定期检修”对象转变为可实时感知其健康状态的智能实体, 为预测性维护提供了数据基础。最终, 所有智能化特征支撑了变电站与调度中心、运维人员乃至分布式电源之间的高级互动, 实现了远程精准操控、智能决策支持和电网优化运行, 构成了智能电网的关键节点。

2 日常巡检与维护中存在的问题

2.1 巡检手段滞后, 难以匹配智能化设备特性

当前部分变电站仍沿用传统人工巡检模式, 依赖运维人员目视检查、红外测温、听音棒等基础工具, 缺乏对智能设备状态数据的深度利用。尽管智能变电站配备了大量在线监测装置, 但这些数据往往未被有

作者简介: 陈菁 (1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电力系统及其自动化。

效整合到日常巡检流程中，导致“有数据不用、有系统不联”。此外，部分老旧站虽进行了智能化改造，但巡检策略未同步升级，仍按固定周期开展全面巡视，忽视了基于设备状态的差异化、动态化巡检需求。这种“重形式、轻实效”的巡检方式，不仅效率低下，还可能遗漏早期故障征兆，无法体现智能变电站“状态可视化”和“预测性维护”的核心优势。

2.2 二次系统网络复杂，故障定位难度大

智能变电站采用 IEC61850 标准构建全站通信网络，过程层、间隔层、站控层通过 GOOSE、SV、MMS 等报文实现信息交互^[2]。这种高度网络化的架构虽提升了系统集成度，但也带来了新的运维挑战。一旦出现保护误动、遥信异常或通信中断等问题，故障溯源极为困难。一方面，故障可能源于交换机配置错误、光纤链路劣化、IED 装置软件缺陷或时间同步偏差等多个环节；另一方面，现有运维人员对网络协议、报文分析、SCD 文件管理等数字通信知识掌握不足，缺乏专用诊断工具的支持，导致排查周期长、误判率高。尤其在多厂家设备混用场景下，互操作性问题进一步加剧了维护复杂度。

2.3 智能组件可靠性不足，维护标准缺失

智能化一次设备所依赖的智能终端、合并单元、传感器等附属组件，长期暴露于强电磁、高温、高湿等恶劣环境中，其可靠性往往低于主设备本体。在实践中，智能组件故障率较高，如光模块老化导致采样异常、电源模块失效引发装置失电、传感器漂移造成数据失真等。然而，目前针对这些智能组件的维护规程尚不健全，缺乏统一的寿命评估模型、性能检测标准和更换阈值。部分单位甚至将智能组件视为“免维护”部件，仅在故障发生后被动处理，未能建立预防性维护机制。此外，组件更换常需重新配置参数、校验通信链路，若无标准化作业指导书，极易引入人为错误，影响系统整体稳定性。

2.4 运维人员技能结构不适应智能化转型

智能变电站的运维已从传统的“电气+机械”向“电气+通信+自动化+数据分析”复合型能力转变。然而，现有运维队伍普遍存在知识断层：老员工熟悉一次设备但对数字化通信、网络架构理解有限；新员工虽具备信息技术背景，却缺乏现场实践经验与高压设备安全意识。培训体系也未能及时跟进，多数培训仍聚焦于单一设备操作，缺乏对全站信息流、逻辑闭锁、虚回路配置等系统级知识的系统讲授。在面对复杂告警、网络异常或 SCD 文件变更时，运维人员往往束手无策，过度依赖厂家技术支持，严重影响应急响应速度和自主运维能力。

2.5 数据孤岛现象严重，智能运维平台支撑不足

尽管智能变电站采集了海量运行数据，但这些数据分散在监控系统、保信子站、在线监测系统、辅助控制系统等多个独立平台中缺乏统一的数据模型与接口标准，形成“数据孤岛”^[3]。运维人员需在多个系统间切换查询，难以实现设备状态的全景感知与关联分析。同时，现有运维管理系统功能较为基础，主要支持工单流转和台账管理，缺乏基于大数据的故障预警、健康评估、检修决策等高级应用。即使部分单位部署了智能巡检机器人或无人机，其采集的图像、红外等非结构化数据也未能与设备台账、历史缺陷、试验报告有效融合，限制了 AI 算法在缺陷识别与趋势预测中的应用潜力。这种“有数据、无智能”的局面，严重制约了运维模式从“被动响应”向“主动预防”的转型升级。

3 日常巡检与维护策略优化路径

3.1 推进差异化、智能化巡检模式转型

针对巡检内容复杂化与传统手段不匹配的问题，必须推动巡检模式向差异化、智能化转型。其核心是从“周期性固定巡检”转向“基于风险评估与设备状态的动态巡检”。首先，建立设备健康状态评估模型，综合在线监测数据、历史缺陷、家族性故障、运行年限、环境因素等多维信息，对全站设备进行风险分级。高风险设备（状态异常或处于关键路径）缩短巡检周期并增加特巡；低风险、状态稳定的设备则可适当延长巡检间隔。其次，将巡检计划与生产管理系统、在线监测系统深度联动，当监测数据出现趋势性劣化或越限告警时，系统能自动生成特巡任务，实现“数据驱动”的精准响应。

在此基础上，大力引入智能化巡检装备与手段。推广应用巡检机器人、无人机、智能安全帽等，实现设备外观、红外测温、局放检测、表计识别的自动化采集与 AI 智能分析。同时，将“数字巡检”纳入常态化工作：运维人员需在后台定期查看网络通信状态、报文丢包率、软件进程健康度、虚回路链路状态等数字信号，并利用便携式网络报文记录分析仪进行现场核查。

3.2 构建二次系统网络化故障诊断与治理体系

面对复杂的网络化二次系统，需构建体系化的故障诊断与治理能力。首要任务是装备专业化的工具并建立标准化的排查流程。为运维班组配备网络报文分析仪、光功率计、便携式时间同步测试仪等专用工具，并制定从现象到根源的“阶梯式”诊断流程图。例如：针对保护异常，流程应依次涵盖：检查装置指示灯与

告警信息、验证光纤链路与光功率、分析 SV/GOOSE 报文质量与同步性、核对 SCD 文件配置与虚端子连接、最终定位至具体 IED 或交换机。标准化的流程能大幅压缩故障定位时间。

更深层次的策略是建立网络健康状态的常态化监测与预警机制。在站控层部署网络流量分析与安全监控系统,对过程层和站控层网络的流量、带宽、关键报文延时、丢包率、错误帧等进行 7×24 小时不间断监视。系统应能自动建立正常工况下的通信基线,并对异常流量、通信中断、同步偏差等事件进行实时告警和初步定位。同时,需严格规范 SCD 文件的全过程管控,建立从设计、验收、变更到归档的闭环管理机制,任何修改均需履行严格的审核、测试与备份流程,从源头上减少因配置错误引发的系统性风险。

3.3 健全智能组件全寿命周期维护标准体系

为解决智能组件可靠性问题与维护标准缺失的挑战,需从设计选型、现场运维到退役更换,建立覆盖其全寿命周期的标准体系^[4]。在设备准入与采购阶段,应制定高于国标的智能组件技术规范,明确关键元器件的选用等级、工作温度范围、电磁兼容性及平均无故障时间要求,并鼓励开展型式试验与入网检测,从源头提升设备可靠性。

在运行维护阶段,需加快制定并推行智能组件的专用检修规程。规程应明确合并单元、智能终端、在线监测传感器等设备的例行检验项目、周期、方法及性能指标阈值。特别是要建立智能组件的状态评价与主动更换策略。例如:对运行超过一定年限或故障率较高的光模块、风扇等部件,实施预防性更换。

3.4 实施复合型运维人才能力提升工程

应对人员技能结构性矛盾,需实施系统化、多层次、理论与实践结合的能力提升工程。

首先,构建分阶段、模块化的培训课程体系。初级阶段聚焦智能站架构、IEC61850 基础、SCD 文件结构、网络与安全常识;中级阶段深入报文分析、虚回路辨识、常见故障诊断;高级阶段涵盖系统集成测试、高级应用配置及大数据初步分析。培训应采用“理论授课+虚拟仿真+现场实操”相结合的模式,利用数字孪生或仿真培训系统,让学员在无风险环境下反复练习配置、调试和排故。

其次,创新运维组织模式与激励机制。推动一次、二次专业融合,组建跨专业的“全科医生”式运维团队,通过联合巡检、共同消缺项目促进知识共享。设立“技能专家”岗位和专项奖励,鼓励员工钻研网络分析、数据挖掘等新技术,并承担内训师职责。

最后,建立“厂家—科研机构—运维单位”协同培养机制,选派骨干参与新站验收、大修技改项目,在实战中快速积累经验,最终打造一支既懂电力系统原理,又精通信息通信技术,具备全局视野和解决复杂问题能力的现代化运维队伍。

3.5 打造一体化智能运维平台,打通数据孤岛

破解数据孤岛、提升决策智能水平的关键在于构建一个横向集成、纵向贯通的一体化智能运维平台。该平台的核心是建立符合 IEC61850 或 CIM 等标准的企业级统一数据模型,并设计标准化服务总线,实现与监控系统、在线监测、保信系统、生产管理系统、机器人巡检系统等异构数据源的互联互通^[5]。通过数据清洗、对齐与融合,形成覆盖设备台账、实时状态、历史事件、试验报告、图像视频的“全景数字档案”。

在数据融合的基础上,平台需内置或集成各类智能分析应用。利用机器学习算法,对多源监测数据进行融合分析,实现设备健康状态的综合评价与早期故障预警。结合设备可靠性模型、电网运行方式及风险评估算法,生成预测性维护建议和优化的检修策略。最终,通过平台实现“数据汇集—智能分析—策略生成—工单派发—效果反馈”的运维全流程闭环管理,驱动运维模式向数据驱动、主动预防的高级阶段演进。

4 结束语

智能变电站的运维工作逐渐从分散、被动、经验驱动向集中、主动、数据驱动深刻转型。这一目标的实现不仅需要持续的技术创新与装备升级,更需要管理理念的革新、标准体系的完善和人才队伍的重构。通过构建“状态全面感知、数据深度融合、分析高度智能、决策精准高效”的现代化运维体系,才可以充分释放智能变电站的潜能,为智能电网的安全、可靠、经济运行奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 陈舸. 数字化智能化技术在智能变电站设备巡检系统中的应用研究[J]. 电工技术, 2024(02):200-202.
- [2] 洪天星. 智能变电站巡检机器人路径规划的改进 ABC 算法及其应用研究[J]. 成都工业学院学报, 2024, 27(05): 35-40.
- [3] 谢剑翔, 张琦, 吴嘉琪, 等. 基于数字孪生技术的智能变电站巡检方法[J]. 电气开关, 2023, 61(06):87-89, 113.
- [4] 熊玲, 熊信恒. 智能变电站辅控系统在电网巡检中的应用[J]. 无线互联科技, 2023, 20(16):28-30.
- [5] 韩建波. 智能变电站二次设备安装工况在线巡检系统设计[J]. 农村电气化, 2021(09):56-58.

水利施工机械设备现场作业安全管控策略研究

李洪伟¹, 周小璇², 程岩卫^{3*}

- (1. 山东鲁能泰山工程技术咨询有限公司, 山东 泰安 271600;
2. 青岛海达诚采购服务有限公司, 山东 青岛 266101;
3. 山东禹科检测技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 针对水利施工机械设备现场作业环境复杂、风险密集、管控难度大等问题, 本文聚焦设备全生命周期管控, 从风险识别、管控体系构建、智能技术应用、全流程保障四个维度, 研究其现场作业安全管控策略。明确各类安全风险特征与诱发机制, 构建“人员—设备—环境—管理”四位一体管控体系, 融入智能监测等技术, 实现风险闭环管理, 以期为水利工程施工安全提供技术参考。

关键词 水利施工; 机械设备; 现场作业; 安全管控; 风险识别

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.031

0 引言

水利施工具有露天作业、环境复杂、周期长等特点, 机械设备作为施工核心支撑, 其现场作业安全直接影响施工进度、人员安全与工程质量。水利施工机械设备类型多样, 不同设备的安全风险差异明显, 且受暴雨、大风等自然环境影响, 进一步加剧了作业风险。当前, 机械设备现场安全管控存在风险识别不精准、管控体系不完善、技术应用不深入等短板, 易引发安全事故, 因此构建科学可落地的安全管控策略、强化全流程管控, 是破解该管控难题的关键。

1 水利施工机械设备现场作业安全风险识别

1.1 设备自身风险

设备自身风险是引发现场作业安全事故的核心诱因之一, 主要源于设备老化、性能衰减、维护不当与质量缺陷。水利施工机械设备长期在恶劣环境下高强度作业, 易出现零部件磨损、腐蚀、疲劳变形等问题, 若未及时开展维护保养, 会导致设备运行精度下降、故障频发, 如起重机械的钢丝绳磨损、吊钩变形, 挖掘机的液压系统泄漏, 混凝土泵车的管道堵塞等, 均可能引发安全事故。部分老旧设备未及时更新淘汰, 存在安全防护装置缺失、性能不达标等问题, 进一步放大安全风险。此外, 设备采购环节若存在质量管控疏漏, 选用不合格设备或配件, 会从源头埋下安全隐患, 导致设备在作业过程中易出现突发性故障, 引发安全事故^[1]。

1.2 人员操作风险

人员操作风险主要体现在操作人员专业能力不足、安全意识薄弱与操作不规范三个方面。水利施工机械设备操作专业性强, 对操作人员的技能水平与应急处置能力要求较高, 若操作人员未经过系统培训、未取得相应操作资质, 易出现操作失误, 如起重机械吊装角度偏差、挖掘机开挖深度超标、疏浚机械作业路线偏移等, 引发设备损坏或人员伤亡。部分操作人员安全意识淡薄, 存在违规操作行为, 如酒后作业、疲劳作业、违规超载、未按规定佩戴安全防护用品等, 无视安全操作规程, 人为加剧安全风险^[2]。此外, 现场管理人员履职不到位, 未及时发现并制止违规操作行为, 未开展常态化安全交底与培训, 也会导致操作风险管控失控。

1.3 作业环境风险

水利施工露天作业、野外作业的特点, 决定了作业环境对机械设备安全作业的显著影响, 主要包括自然环境风险与现场作业环境风险。自然环境风险主要源于暴雨、洪水、大风、高温、严寒等恶劣天气, 暴雨与洪水会导致作业场地积水、泥泞, 影响设备行驶与作业稳定性, 甚至引发设备被淹、滑坡掩埋等事故; 大风天气会影响起重机械、高空作业设备的稳定性, 易引发设备倾覆; 高温、严寒天气会影响设备性能与操作人员状态, 导致设备故障增多、操作失误概率上升。现场作业环境风险主要包括作业场地狭窄、地面不平整、周边障碍物多、用电线路杂乱等, 易导致设备碰撞、

作者简介: 李洪伟 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械安全。

*通信作者: 程岩卫 (1983-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程。E-mail: 15965461397@163.com

倾覆、触电等安全事故，同时作业区域未设置明显安全警示标识、未划分安全作业区域，也会加剧环境风险。

1.4 管理体系风险

管理体系风险主要表现为管控机制不完善、责任落实不到位、管理制度不健全等。部分水利施工单位未建立完善的机械设备安全管控体系，未明确各岗位人员的安全职责，导致安全管理出现真空地带，设备维护、人员培训、风险排查等工作流于形式。管理制度不健全，未结合水利施工特点与设备类型制定针对性的安全操作规程、维护保养制度、风险排查制度，导致现场作业缺乏明确的规范指引。此外，安全考核机制不完善，未将安全管控成效与岗位绩效挂钩，难以调动操作人员与管理人員的工作积极性，导致安全管控措施难以有效落实，风险隐患长期存在。

2 水利施工机械设备现场作业安全管控体系构建

2.1 管控体系核心框架

构建“人员—设备—环境—管理”四位一体的安全管控体系，以“风险管控为核心、全员参与为基础、全程管控为目标”，实现现场作业安全的系统化、规范化管理。该体系涵盖事前预防、事中管控、事后处置三个环节，明确各环节的管控重点与实施路径，形成闭环管理^[3]。其中，人员管控聚焦技能提升与意识强化，设备管控聚焦全生命周期维护与性能保障，环境管控聚焦风险预警与隐患治理，管理管控聚焦责任落实与制度完善，四者协同发力，全面提升现场作业安全管控水平。

2.2 人员管控模块

人员管控是安全管控体系的核心，重点落实“培训—考核—上岗—监管”全流程管理。建立常态化培训机制，结合水利施工机械设备类型与作业特点，开展针对性的技能培训与安全培训，培训内容包括设备操作规范、安全操作规程、应急处置方法、风险识别技巧等，确保操作人员熟练掌握相关技能与知识。建立严格的考核上岗制度，操作人员必须经过培训考核合格、取得相应操作资质后，方可上岗作业，严禁无证操作、违规上岗。加强现场操作监管，安排专人负责现场作业监督，实时排查违规操作行为，对发现的问题及时制止并整改，同时建立操作人员绩效评价体系，将操作规范性、安全履职情况与绩效挂钩，强化人员责任意识。

2.3 设备管控模块

设备管控聚焦全生命周期管理，涵盖采购、进场验收、现场使用、维护保养、报废淘汰五大环节。采购环节严格把控设备及配件质量，符合国家标准与施

工需求并明确售后；进场验收需全面检测设备型号、性能及防护装置，不合格设备严禁进场。现场使用需严守操作规程，杜绝违规作业，同步建立设备运行台账记录相关信息。维护保养需制定专项计划，定期开展检修保养，及时更换老化零部件。报废淘汰环节需按规定处理老旧失效设备，严禁违规继续使用。

2.4 环境管控模块

环境管控重点落实风险预警与隐患治理，实现作业环境的动态管控。建立自然环境监测预警机制，配备相应的监测设备，实时监测暴雨、洪水、大风、高温等恶劣天气，及时发布预警信息，暂停高风险作业，制定应急处置方案，确保人员与设备安全。优化现场作业环境，合理划分作业区域、运输通道与安全防护区域，清理作业场地的障碍物，平整作业地面，确保设备作业空间充足、行驶安全。规范现场用电管理，梳理用电线路，做好线路防护与绝缘处理，避免线路老化、破损引发触电事故。在作业区域设置明显的安全警示标识，包括禁止标识、警告标识、指令标识等，提醒操作人员注意安全，严禁无关人员进入作业区域。

2.5 管理管控模块

管理管控聚焦责任落实与制度完善，为安全管控体系落地提供保障。建立健全安全管理制度，结合水利施工特点与机械设备现场作业需求，制定安全操作规程、维护保养制度、风险排查制度、应急处置制度等，明确各岗位人员的安全职责，确保各项工作有章可循。落实安全责任追究制度，明确各级管理人员、操作人员的安全责任，对因违规操作、管理失职导致安全事故的，严肃追究相关人员责任。建立常态化风险排查机制，定期开展现场作业安全风险排查，对排查出的风险隐患分类登记、建立台账，明确整改责任人、整改措施与整改时限，确保隐患及时整改到位。加强安全管理队伍建设，提升管理人员的专业能力与履职水平，确保各项管控措施有效落实。

3 水利施工机械设备现场作业智能管控技术应用

3.1 智能监测技术

引入智能监测技术，实现对机械设备运行状态、作业环境、人员操作的实时监测，提升风险识别与管控的精准度。针对机械设备，在核心零部件（钢丝绳、吊钩、液压系统、发动机等）上安装传感器，实时采集设备运行参数（温度、振动、压力、转速等），通过无线通信模块上传至后台管控平台，平台对数据进行分析处理，当参数超出安全阈值时，立即发出声光预警，提醒管理人员及时处置，实现设备故障的早发现、早预警、早处理。针对作业环境，采用视频监控、环

境监测设备,实时监测作业场地的积水、风速、温度等环境参数,结合气象预警信息,实现环境风险的动态管控。针对人员操作,通过视频分析技术,实时识别违规操作行为(未佩戴安全防护用品、违规超载、酒后作业等),及时发出预警并记录,强化现场操作监管。

3.2 远程管控技术

依托物联网与大数据技术,搭建远程管控平台,实现对水利施工机械设备现场作业的远程监控与调度。管理人员可通过平台实时查看设备运行状态、作业进度、人员操作情况,远程下达作业指令,调整作业计划,避免现场管理人员不足导致的管控漏洞。针对偏远作业区域、高空作业、水下作业等高危作业场景,采用远程操控技术,操作人员可在安全区域远程操控机械设备作业,减少人员直接暴露在高危环境中的风险,提升作业安全性。同时,通过远程管控平台,实现设备维护保养的远程指导,专业技术人员可远程查看设备故障数据,指导现场人员开展故障排查与维修,提升维护保养效率。

3.3 应急处置智能化技术

构建智能化应急处置体系,提升安全事故的应急响应与处置能力。建立应急处置数据库,存储各类设备故障、安全事故的应急处置方案、处置流程、救援物资信息等,当发生安全事故时,平台可根据事故类型、严重程度,自动匹配最优应急处置方案,指导现场人员开展救援工作。配备智能化应急救援设备,如智能救援机器人、应急照明设备、远程通信设备等,提升救援效率与安全性。同时,通过智能化技术实现应急救援的协同联动,当发生重大安全事故时,可快速联动相关部门、救援队伍,实现资源共享、协同处置,最大限度减少人员伤亡与财产损失^[4]。

4 水利施工机械设备现场作业安全管控保障措施

4.1 制度保障

完善各项安全管理制度,结合水利施工机械设备现场作业特点,细化安全操作规程、维护保养制度、风险排查制度、应急处置制度等,确保制度的针对性与可操作性。加强制度执行力度,建立制度执行监督机制,定期检查制度落实情况,对违反制度的行为严肃处理,确保各项制度落到实处。定期对制度进行修订完善,结合施工技术、设备类型、作业环境的变化,及时调整制度内容,适应安全管控的新需求^[5]。

4.2 资源保障

加大安全管控资源投入,配备充足的安全防护设备、智能监测设备、应急救援设备等,确保现场作业安全管控的硬件支撑。加强安全培训资源投入,聘请

专业技术人员开展培训工作,配备培训教材、实训设备等,提升培训质量。合理调配人力资源,配备足够的现场管理人员、技术人员与操作人员,明确各岗位人员的数量与职责,确保各项管控工作有序开展。

4.3 技术保障

加强技术研发与应用,推广先进的安全管控技术、设备维护技术、应急处置技术等,提升安全管控的智能化、专业化水平。与科研机构、高校开展合作,针对水利施工机械设备现场作业安全管控的难点问题,开展技术攻关,研发适配水利施工场景的智能管控设备与技术看方案。加强技术培训,提升管理人员与操作人员的技术应用能力,确保智能管控设备与技术看方案有效落地。

4.4 监督保障

建立多元化监督机制,构建“内部监督+外部监督”相结合的监督体系。内部监督由施工单位安全管理部门负责,定期开展现场作业安全监督检查,排查风险隐患,督促整改落实;外部监督由行业主管部门、监理单位负责,加强对水利施工机械设备现场作业安全的监督检查,对违规行为进行查处。建立监督反馈机制,及时收集监督检查过程中发现的问题与建议,优化安全管控策略与措施,持续提升安全管控水平。

5 结束语

水利施工机械设备现场作业安全管控是水利工程施工安全的重要组成部分,针对其作业环境复杂、风险密集、管控难度大的问题,需构建科学系统的全流程管控体系。本文通过识别四类核心安全风险,构建“人员—设备—环境—管理”四位一体管控体系,融入智能管控技术并配套完善保障措施,实现风险闭环管理,可有效提升管控水平、降低事故发生率。未来,需深化智能化技术融合,引入先进技术优化管控模型,完善管控制度与保障体系,推动现场作业安全管控向规范化、智能化、精细化发展,为水利工程安全有序施工提供保障。

参考文献:

- [1] 许建军,徐建梅,平华.水利工程中的施工安全与风险管理[J].水利与电力技术及应用,2025,07(12):4-6.
- [2] 艾志文,李发举,薛玉东.水利工程施工安全风险管控体系构建[J].广东安全生产技术,2025(08):16-18.
- [3] 王全营,赵锦锦.简论水利工程施工管理特点及质量控制策略[J].砖瓦世界,2020(02):249.
- [4] 郑波德,姚学健,周沙沙,等.基于PDCA的水利施工安全防范机制研究[J].治淮,2023(03):59-61.
- [5] 杨岩.数字孪生在水利泵站智能化管理中实践应用[J].水上安全,2024(19):74-76.

电力工程装配式变电站施工 技术要点与质量管控

高和波¹, 张波²

(1. 山东凯佳瑞建设工程有限公司, 山东 济南 250000;

2. 山东赋能电力工程有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 特高压输电和智能化配电网目前处于融合发展阶段, 变电站工程面临空间约束、多工种协同以及环保标准提升等难题, 装配式变电站凭借标准化构件、环保施工以及便捷维护等优势, 已成为电力网络建设方面的主流方案。本文重点关注装配式变电站从规划设计、构件制造、现场组装直到调试运行的完整周期, 提炼其中的关键技术环节, 建立覆盖“监测—评估—预警—控制”的全过程质量保障机制, 并且融合建筑信息模型、物联网技术以及人工智能视觉识别等智慧化手段, 旨在为变电站的精细化、智能化建设提供技术路径, 进而促进电力行业绿色可持续发展。

关键词 装配式变电站; 质量管控; BIM 技术; 智能监测; 绿色施工

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.032

0 引言

变电站是电力系统中的关键节点, 其建设品质对电网安全稳定运行有决定性影响。在“双碳”目标背景下, 传统现浇式变电站暴露出建设周期长、资源消耗高、环境污染大以及质量管控不稳定等弊端, 难以适应新型电力系统高效化、绿色化发展需求。装配式变电站采用工厂化预制与现场拼装建设模式, 在提升施工效率和保障工程质量方面优势显著, 已成电力行业转型发展必然趋势。本研究结合最新工程实践经验, 深入解析施工过程核心技术要点, 通过融合智能监测技术与数字化管理手段, 构建覆盖全生命周期质量保障机制, 最终形成系统性技术集成与实施管理方案。

1 电力工程装配式变电站核心技术体系

1.1 装配式构件设计与生产技术

装配式变电站设计把“模块化、标准化、通用化”当作核心理念, 借助 BIM 技术来搭建三维协同设计平台, 以此促进电气系统与结构部件的一体化整合^[1]。其主要工作包含三个方面内容, 首先要进行构件模块化划分, 按照功能设置变压器间、开关间等标准化单元, 确保这些单元尺寸符合运输与吊装条件, 且单个模块质量要控制在 50 t 以下。其次是优化节点连接构造, 综合运用螺栓连接与现浇混凝土技术, 使其满足 8 度

抗震设防标准并设置温度变形缝。最后要实施管线集成规划, 利用 BIM 模型合理排布管线并提前预埋接口, 从而降低现场施工作业量。

构件生产采用工厂化流水作业的方式, 钢筋加工使用数控设备, 保证钢筋间距误差不超过 ± 5 毫米, 且焊接接头强度需达到母材标准。混凝土浇筑选用自密实材料, 将坍落度控制在 220 ~ 250 毫米, 并通过振动传感器监控振捣质量。蒸汽养护时温度维持在 50 ~ 60 °C, 湿度保持 90% 以上, 养护时长不少于 72 小时, 要等混凝土强度达到设计值的 85% 后方可出厂。出厂检测采用超声回弹法评估强度、用激光测距仪核查尺寸精度, 结合 AI 视觉系统识别表面缺陷, 合格产品粘贴 RFID 标签以实现全过程质量追踪^[2]。

1.2 现场装配施工关键技术

现场安装工作要遵循“先做地下工程再建地上部分, 先完成主体结构后处理附属设施”基本准则, 主要包含三个关键步骤。基础施工阶段, 选用预制桩及灌浆套筒连接工艺, 要求预制桩垂直度误差不超过 0.5%, 桩位偏差控制在 50 毫米以内, 注浆压力维持在 0.3 ~ 0.5 兆帕范围, 还要预埋传感器保障注浆密实度达 100%。模块吊装环节, 需根据构件重量选择相应起重设备, 50 吨以下构件用汽车起重机吊装, 超过 50 吨则采用履带式起重机, 钢丝绳安全系数要保证在 6 倍以上。

作者简介: 高和波 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程。

吊装前通过BIM与GIS技术联合模拟吊装路径。在吊装过程中,利用倾角传感器和水平仪实时监测构件状态,要求水平偏差不超过 ± 2 毫米/米,垂直度误差控制在3毫米/米以内,构件就位后须立即进行临时固定,采用可调节支撑系统控制沉降,确保单日沉降量不超过1毫米。节点的连接处理对整体结构稳定性至关重要,螺栓连接前必须彻底清理接触表面,并严格按设计扭矩值紧固(M24螺栓扭矩为450牛·米),确保复检合格率达到100%。后浇混凝土选用微膨胀型混凝土,水胶比需控制在0.45以下且养护时间不少于14天,同时要求内外温差不超过25摄氏度。防水节点采用遇水膨胀止水条与密封胶双重防护措施,确保施工后无气泡和裂缝产生。

1.3 智能监测与数字化管理技术

通过物联网、人工智能以及建筑信息模型等技术,构建一个数字化管理体系。在感知层安装温度、湿度、应力这类监测设备,数据采集频率要保证每分钟不少于1次,传输响应时间需控制在不超过500毫秒^[3]。传输层采用5G和LoRa融合组网的方式,并且实施加密措施,以此保障信息传输的安全性。支撑层基于云计算搭建BIM数字孪生平台,对工程进度、质量状况和安全隐患进行可视化监管,把人工智能算法应用到质量检测环节中。应用层通过移动设备实时展示数据并向相关人员推送预警提示,最终实现管理的智能化。

2 电力工程装配式变电站施工技术要点

2.1 施工准备阶段技术要点

施工准备阶段,重点落实三项核心任务。技术交底方面,借助BIM可视化技术向各参与方阐释设计理念、施工工艺、质量规范以及安全准则,着重明确吊装流程、节点连接方式和智能监测装置安装要点。现场布局要实施分区优化,预制构件存放区采用分类摆放模式,垫木间隔不超过1.5米、堆叠高度限制在3层以内。设备与构件验收要执行严格标准,核验产品合格证明、检测文件及RFID电子标签信息,外观检查结合人工目检与AI视觉识别技术,裂缝宽度超过0.2毫米的构件严禁进场使用^[4]。尺寸误差需控制在长度 ± 10 毫米、截面 ± 5 毫米、预埋螺栓 ± 2 毫米的范围内,智能监测设备入场前,必须完成校准以确保传感器测量误差不超过 $\pm 0.5\%$ 。

2.2 主体结构装配施工要点

主体结构装配流程采用“基础预制桩—基础梁—模块吊装—节点连接—屋面装配”。基础预制桩采用静压工艺进行沉桩,下沉速率要控制在1~2米/分

钟,承载力得达到设计值的1.1倍以上。基础梁要进行分段对接,采用0.4兆帕压力灌浆,完成24小时养护之后再开展上部模块吊装工作。模块吊装需要编制专项方案,执行“由内向外、均衡对称”的原则。配备专职指挥人员并保障通讯联络通畅,全程监测风速与构件状态,一旦发现异常要立即暂停作业。构件就位之后需要校准水平度(偏差不能超过 ± 1 毫米/米),临时支撑间距要控制在2米以内。节点连接必须严格按照规范进行操作,螺栓要采用双螺母防松处理,外露螺纹需要保留2扣以上。后浇混凝土施工之前,要清理并润湿接合面,浇筑分层厚度不能超过300毫米,每点振捣时间要控制在20~30秒。要利用应力传感器实时监测连接部位受力状况,确保其满足设计标准。

2.3 电气设备安装与调试要点

设备安装和结构装配采取同步实施方式,利用激光精确定位让设备位置偏差不超过 ± 0.3 毫米,保证基础与预留接口配合度达95%以上。重型设备借助液压千斤顶进行吊装就位操作,确保其水平度和垂直度能满足技术要求。接线作业严格执行标准化流程,运用BIM技术对电缆敷设路径进行优化,使弯曲半径达到规范要求10倍以上。端子压接将压力控制在5~8兆帕范围内,二次回路选用冷压端子。接地系统采用双重设计方案,主接地网选用50×5毫米热镀锌扁钢进行铺设,网格间距控制在10米以内,接地电阻不超过0.5 Ω 。调试环节融合智能技术手段,通过BIM数字孪生模型辅助开展调试工作,一次系统重点检测变压器变比、断路器动作时间等参数,二次系统完成保护装置定值校准、测控联动测试等工作,实现数据实时比对与异常报警功能。

3 装配式变电站施工质量管控体系

3.1 质量管控组织架构

为了有效加强工程质量方面的监管工作,专门建立“业主—监理—施工—工厂”四方协同的质量管理体系。业主方需要负责制定整体质量方案与分阶段目标,并且明确各方在质量方面所承担的责任,还要通过定期召开质量专题会议,统一协调处理重大质量问题。监理方要执行全方位的质量监督工作,按照标准规范对施工工序进行现场巡视,针对隐蔽工程、关键部位等重点环节实施独立检测。施工方需设立由技术骨干领导的质量专项小组,严格落实“自检、互检、交接检”三级检查制度,对每道工序执行质量否决权,不合格工序不能转入下一道工序。构件与设备制造厂家要建立全程可追溯的系统,通过唯一编码关联原材

料检测、生产流程参数、出厂检验报告等信息,实现从制造到安装的质量责任精准追溯,进而构建严密的质量控制链条。借助 RFID 技术赋予每个构件和设备专属编码,全程记录责任人以及质量信息确保问题可快速确定^[5]。

3.2 全流程质量管控措施

在设计阶段,运用 BIM 开展协同设计工作,执行多专业的详细交叉校验任务,组织各相关方共同参与方案评审活动,并完善设计变更管控的具体流程。在生产阶段,制定标准化的作业规范内容,在核心工序位置设置质量监控要点,通过智能设备采集各项工艺参数信息,同时强化产品出厂之前的全面检验工作。在施工阶段,借助智能监控系统实时追踪,实时追踪各项关键指标动态情况,采用“人工复核加智能识别”的质量检验方式,建立问题整改方面的闭环管理体系,并且每周定期举行质量专题会议^[6]。在验收阶段,实施分项分部及单位工程的逐级验收,重点检查安装精度和连接牢固度等内容,检查设备性能指标以及系统运行稳定性,全部达标之后才允许进入试运行环节。

4 工程案例

4.1 工程概况

某坐落于市郊的 220 kV 智能装配式变电站,占地面积大约有 12 亩,建筑的总面积达 3 200 平方米,项目总投资金额为 1.8 亿元。该工程于 2024 年 3 月启动施工,到同年 10 月完成了建设工作,整个建设周期一共是 7 个月,和传统现浇方式相比节省了 4 个月时间。项目建设采用了 6 个标准化模块,是通过工厂预制和现场装配相结合的方式完成的。同时还配置了 120 套监测传感器和 8 台巡检机器人,并且集成了 BIM 数字孪生平台,全面实现智能化监测与运营管理工作。

4.2 技术应用与成效

在设计阶段,借助 BIM 协同平台化解了 5 处设计矛盾,并对 32 处连接点做优化调整。在生产环节中,构件出厂首次检验达标率达到了 99.8%。在施工阶段,模块吊装误差控制、螺栓紧固达标情况和设备定位精确度等指标均符合标准要求,且智能监测系统发出的 12 次预警已完成整改,实现闭环管理。在成果方面,效益十分突出,项目周期相比传统建造方式压缩 30% 以上。工程质量评定一次性通过率达 100%,质量问题出现频率减少 75%,现场作业人员配置缩减 40%,能源消耗下降 40%,年度维护开支减少 30 万元,建筑废弃物排放量降低 85% 满足环保施工标准。

5 电力工程装配式变电站施工现存问题与优化方向

恶劣气候条件会严重削弱节点连接可靠性,造成设备通信时常中断。强电磁干扰环境中,传感器数据采集会产生系统性误差,大幅降低监测准确性。BIM 模型与现场施工数据存在格式不兼容及更新延迟问题,致使数据对接效率低下协同作业陷入困境。预制构件受限于模具定制和材料标准严格,使得前期投入成本比传统施工高出 20% ~ 30%,特殊规格构件因运输保护要求高,导致物流成本较标准构件超出 40% 以上,压缩了项目盈利空间。同时掌握 BIM 技术、智能建造与项目管理知识的复合型人才缺口达 30%,无法满足数字化施工要求。技术优化应重点研发耐高低温、抗腐蚀的节点材料及快速连接工艺,增强传感器在强电磁干扰中的信号过滤能力,开发基于 5G+ 边缘计算的 BIM 模型动态同步系统,实现现场数据与模型的实时交互。成本控制需推动预制构件标准化设计与批量生产,通过区域集中配送和智慧物流调度降低运输成本,创新“构件租赁+技术服务”模式,将一次性采购支出转化为周期性服务费用,缓解资金压力。

6 结束语

装配式变电站是实现电力工程绿色化智能化的关键设施,其施工工艺与管理效能直接关系着电网建设品质。本文对各阶段技术要点进行了系统梳理,提出“四级管控+智能监测+闭环管理”集成体系,还借助实际案例验证该方案具有可行性。实践证明,规范运用这项技术能够大幅提高施工效率、工程品质和经济效益。未来需要深化数字孪生技术应用,研发高精度智能监测装备,构建统一技术标准与质量评价机制,同时还要加强复合型人才培养。后续可重点研究构件可循环利用技术,以及 AI 算法在质量预测中的深度应用,为装配式变电站高水平发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王磊. 基于 BIM 的装配式变电站协同设计与施工技术研究[J]. 电力工程技术, 2024, 43(02): 89-95.
- [2] 舒文金. 变电站装配式结构施工质量控制措施研究[J]. 模型世界, 2023, 27(09): 102-104.
- [3] 殷建刚, 熊川羽, 周林涛. 新型变电站建筑模块化装配式基础承载性能研究[J]. 湖北电力, 2025, 49(01): 1-10.
- [4] 李瑞祥, 张晓晶, 戚俊峰. 变电站装配式结构连接节点防腐防水措施研究[J]. 科技创新与应用, 2026, 16(01): 143-146.
- [5] 张曦, 周光尧, 董静. 装配式智能变电站电气设备全数据感知研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(07): 42-45, 50.
- [6] 田堂金. 变电站一次电气设备安装调试质量管控方法研究[J]. 流体测量与控制, 2023, 04(06): 33-35, 43.

线缆设备液压系统常见故障排查与维护工艺优化

高海涛, 刘峰, 李传鹏, 李自习, 王辉涛

(山东太平洋电力通信装备有限公司, 山东 聊城 252311)

摘要 液压系统是线缆设备正常运转的“心脏”, 工作状况好坏直接关系到设备的生产效率和使用寿命。但是由于工作环境复杂、负载变化频繁等原因, 线缆设备液压系统在实际运行中很容易出现压力异常、元件泄漏、噪声振动等各种故障, 如果不及时排查处理, 会造成严重的设备损坏和生产损失。本文以线缆设备液压系统为研究对象, 对常见故障类型和原因进行了梳理, 对压力检测、元件性能诊断、智能化数据监测等故障排查方法进行了分析, 从日常维护规范、预防性维护工艺改进、管理体系建立三个方面提出了维护工艺优化策略, 以期有效降低故障的发生率提供参考。

关键词 线缆设备; 液压系统; 故障排查; 维护工艺; 预防性维护

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.033

0 引言

线缆制造行业是现代工业体系的重要组成部分, 其生产设备对液压系统有很高的依赖性。液压系统凭借传动平稳、功率密度大、易于自动控制等优点, 在放线机、绞线机、挤塑机等各种线缆生产设备中被广泛应用, 起到驱动、夹紧、张力控制等作用。但是由于液压系统结构复杂、工作介质特殊, 再加上线缆生产环境中粉尘、高温、振动等不利因素长期交织在一起, 液压系统的故障频发问题越来越突出。根据生产现场调查得知, 一部分设备停机事故与液压系统故障有着直接联系, 严重影响着企业的连续生产能力以及经济效益。目前, 我国的线缆企业在液压系统的维护上普遍存在缺少完善的维护体系、故障诊断手段落后、维护工艺没有标准化等问题。

1 线缆设备液压系统常见故障类型与成因分析

1.1 液压系统压力异常故障及其成因

压力异常属于线缆设备液压系统最常见的一种故障形式, 主要有系统压力不足、压力剧烈波动或者压力无法建立这三种情况。压力不足一般是由液压泵磨损造成容积效率降低、溢流阀调定值过低或者内泄流量过大引起的; 压力波动大多和液压油中混入气体、油液污染造成阀芯动作不稳定有关; 压力无法建立多半是由于溢流阀弹簧失效、液压泵严重损坏或者管路

大面积破损所致。另外, 液压油黏度选型不当也会造成压力异常, 过低的黏度会造成内泄漏加剧, 过高则会使系统阻力增大, 两者都会使压力参数偏离正常工作范围, 从而影响线缆设备的正常运行^[1]。

1.2 液压元件泄漏故障及其诱发因素

泄漏故障属于液压系统中危害性大、发生率高的故障, 分为内泄漏和外泄漏两种形式。内泄漏指的是液压油在系统内部从高压侧向低压侧渗漏, 主要发生在液压缸活塞、控制阀阀芯等配合副处, 直接后果就是系统效率降低、温度异常升高。外泄漏是液压油渗漏到设备外面, 主要发生在管接头松动、密封件老化失效和缸体端盖密封面损伤等地方。从成因上看, 密封件的老化和变形是造成泄漏故障的主要原因, 装配工艺不当、管路振动冲击造成接头松弛、油液污染加速密封件磨损等都会引起泄漏故障的发生, 因此需要在维护工作中加以综合防控^[2]。

1.3 液压系统运行噪声与振动故障分析

液压系统工作时出现异常的噪声和振动, 既扰乱了工作环境, 又是系统内部有故障的信号。噪声故障根据来源分为机械噪声、流体噪声和空穴噪声三类。机械噪声主要是由于液压泵和电动机的轴承磨损、联轴器失中等造成的; 流体噪声主要是由于液压油流速过高、节流口压差过大、管路设计不合理等因素造成的;

作者简介: 高海涛 (1985-), 男, 专科, 高级技师, 研究方向: 电子信息。

空穴噪声是油液中溶解气体在低压区析出、气泡破裂所引起的,对元件的破坏性很强。系统振动主要是由于管路固定不牢固、液压冲击大、泵流量脉动造成的。以上问题如果不能得到有效的解决,就会使元件的疲劳损伤加重,从而产生更严重的连锁故障^[3]。

2 线缆设备液压系统故障排查方法

2.1 系统压力检测与故障定位技术

系统压力检测是液压故障排查的基础方法,用压力表或者压力传感器在液压系统的各个节点上安装,可以得到各个回路的压力分布情况,为故障的定位提供直接的依据。在具体操作时,排查人员要依照从主回路到支路、从泵出口到执行元件入口的顺序,逐级测量并对比各个节点的压力值同设计额定值的差别。当主泵出口压力正常,但执行元件压力不足时,故障点一般在中间控制阀或者管路段;如果主泵出口压力本身偏低,那么就要检查液压泵的输出性能和溢流阀的调定状态。压力脉动幅度检测对识别泵体磨损程度和阀芯异常有很重要的作用。在实际的排查当中还要联系温度检测手段,借助于对各个元件表面温升状况的观测来辅助判定内泄漏的严重程度,进而实现准确的故障定位以及高效的操作决策。值得注意的是,在压力检测过程中应确保检测仪器本身的精度与量程匹配系统工作压力范围,避免因仪器误差导致判断失误^[4]。

2.2 液压元件性能检测与诊断流程

液压元件的性能检测是在系统压力诊断的基础上进行的深层次故障识别工作,它的主要目的是对各个重要的液压元件逐一进行功能性测试,从而找出故障元件并对其损坏程度做出评价。液压泵性能检测主要为容积效率测定、输出流量测定,当泵的容积效率小于设计值的 85% 时,就认为是需要检修或者更换了。液压阀的诊断重点是检验换向响应时间、内泄漏量、压降特性是否符合设计参数,阀芯卡滞现象可以借助手动操作测试和电信号响应对比来发现。液压缸检测主要用活塞杆密封性能和爬行现象作为判据,必要时用超声波检测仪对缸体内壁磨损情况进行无损检测。整个诊断过程要遵照“先易后难、先外后内、先调整后拆检”的基本准则,在保证诊断准确性的基础上尽量削减不必要的元件拆解,从而缩减设备停机时长,缩减维修开支。在诊断流程执行过程中,还应充分重视元件拆检记录的规范填写,将每次检测所得的磨损量、泄漏量等实测数据完整保存,以便与历史数据进行纵向对比,为元件剩余寿命评估与更换周期的动态调整提供可靠依据^[5]。

2.3 基于数据监测的智能化故障诊断

随着传感技术和数据处理技术的发展,以实时数据监测为基础的智能化故障诊断方法在电缆设备液压系统维护中越来越深入。该方法是在液压系统泵站、主控阀组、执行机构等关键部位布置压力、温度、流量和振动等各种类型的传感器,不断采集系统运行状态数据,用数据处理算法对多维参数进行综合分析,从而达到早期故障征兆识别和预警的目的。从数据分析角度来讲,可以创建液压系统各个参数的正常运行基准模型,把实测数据同基准模型的偏差程度当作故障判定的准则,当偏差超出预设阈值的时候立刻发出报警并推送故障提示信息。该方法的优势是可以实现不停机的在线诊断,很好地弥补了定期人工检测时效性差的缺点,给维护人员提供及时、客观的故障预警支持,大大提高了液压系统维护工作的主动性、精准性。在系统推广应用智能化诊断手段的同时,还需注重维护人员对数据解读能力的培养,避免过度依赖自动报警而忽视人工经验判断的辅助作用,确保智能诊断系统与人工复核机制有效协同,共同提升故障识别的准确率与处置效率。

3 线缆设备液压系统维护工艺优化策略

3.1 液压系统日常维护规范与标准化管理

日常维护是液压系统长久稳定运转的根基工作,创建科学规范的日常维护体系,对削减液压系统故障出现量有着决定性的作用。就实际的维护管理实践而言,液压系统日常维护工作应当以“看、查、测、记”这四个主要环节来创建规范化的操作流程。“看”是操作人员在每天上班时对液压系统进行目视检查,主要观察管路接头、缸体有无渗漏、液位计显示是否正常、各仪表读数是否正常等,发现异常立即报告。“查”是指维护人员按照规定的周期对液压油过滤器、冷却器、蓄能器等辅助元件进行状态检查,看其工作性能是否满足系统的要求。“测”是用仪器定期测定液压油的黏度、酸值、含水量和颗粒污染度等主要理化指标,根据检测结果来判断液压油是否需要更换或者补充。“记”则是指每次检查、检测结果要详细地记录在维护台账上,形成系统运行状态历史数据的档案,给故障分析和趋势判断提供数据支持。从标准化管理的角度来说,应当就不同型号的线缆设备制定专门的液压系统维护规程,对各种维护操作的具体步骤、技术参数要求以及质量验收标准做出规定。根据生产现场统计,对实施规范化日常维护管理的设备进行液压系统保养,液压系统年均故障停机次数比未实施规范

管理的同类设备低很多,设备综合可用率也有所提高。同时定期对维修人员进行液压知识、操作技能的培训,提高维修人员对液压系统工作原理、常见故障特点的认识程度,保证各项保养工作按要求进行,充分发挥日常维护防止故障的作用。

3.2 关键液压元件的预防性维护工艺改进

预防性维护是在液压元件发生功能性失效之前,根据它的使用周期规律和状态监测数据,主动对它进行检修或者更换的维护方法,比事后维修更具有经济性、可靠性。在关键液压元件的预防性维护工艺优化上,液压泵、控制阀、液压缸这三种主要元件应该受到最重视。对液压泵根据不同的设计寿命和工作状况来确定合理的定期检修周期。一般来说,对重载连续工作的齿轮泵、柱塞泵等,每运行3 000~4 000小时做一次预防性拆检,测量重要摩擦副的磨损量,与设计允许差值比较,决定是否需要更换。经过对多台设备连续跟踪观察后发现,按上述周期进行预防性拆检的液压泵,由于磨损引起的突然失效的比例明显减少。对控制阀来说,预防性维护的主要内容是清洗阀芯、更换密封件。液压油中含有的污染颗粒是造成阀芯卡滞、密封件加速磨损的原因,因此在维护工艺上要将精细过滤和定期清洗阀体作为标准作业项目。从维护记录可知,经过定期清洗的控制阀换向响应时间异常发生率比未定期清洗的同类阀件低很多,阀件使用寿命也有所提高。液压缸预防性维护的核心工艺是密封件的计划性更换。密封件老化失效有规律可循,对同种液压缸密封件在相同工况下所用的更换周期进行统计分析,可以得到密封件的预期更换周期模型。不能等到密封件有明显的泄漏才更换,而应该在预计失效时间的一定提前量内有计划地更换密封件,从而把外泄漏的风险控制在可以接受的范围内。预防性维护工艺全面推广之后,要创建与之相适应的备件储备管理机制,保证常用易损件库存充足,防止因备件缺货而影响维护时间。

3.3 维护工艺流程优化与管理体系统构建

维护工艺流程的系统性优化是提高液压系统维护效能的重要途径,其关键之处在于对现有的维护操作流程进行系统的分析,找出其中存在的低效环节,从而形成以提质增效为宗旨的优化工艺标准。流程优化的实施路径,就是对整理、评价各类维护作业操作步骤、工时消耗、资源占用等,对工序排列是否合理、工具配置是否恰当、操作规范是否完备等问题进行审查,提出相应的改进措施。在具体的工艺优化措施上,

应该推广模块化维护作业方式,即把液压系统按照功能单元分成若干相对独立的维护模块,对每一个模块都制定出标准化的作业卡,明确作业步骤、技术要点、安全注意事项和验收标准。模块化的方式可以降低由于操作人员个人经验而造成的维护作业的影响,也可以使各个模块的维护质量可以独立评价、持续改进。根据对维护流程优化前后效果的对比分析可知,实行模块化标准作业之后,相同项目的平均作业工时明显减少,维护质量较好,返修率降低。从管理体系创建角度来讲,应当创建包含维护计划管理、作业过程管理、维护质量管控和维护档案管理这四个方面的液压系统综合维护管理体系。维护计划管理按照设备运行数据和历史故障信息来制定动态化的维护计划,保证维护工作具有前瞻性、针对性;作业过程管理实行维护作业票制度和现场确认制,保证每一个维护操作都按规范执行;维护质量管理制订详细的质控标准并定期进行质控审核,对维护工作实施全过程的监督。

4 结束语

液压系统是线缆设备的主要动力源,其运行可靠程度直接影响到整个生产效率。本文对线缆设备液压系统常见故障类型和原因进行系统的整理,采用压力检测、元件诊断、智能化数据监测等方法对故障进行排查,并从日常维护规范化、预防性维护工艺改进、维护管理体系建立三个方面提出优化策略。研究表明,创建系统化、标准化的液压维护体系,可以明显改善故障识别的及时性以及处置的精确度,大幅度削减非计划停机的危险。未来,随着状态监测技术、数据分析技术的发展,液压系统维护工作会向着更高级别的智能化、预测性方向发展,给线缆企业高质量发展提供更加坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 魏启明.高炉炉前设备液压系统的常见故障及解决方案[J].冶金与材料,2024,44(02):121-123.
- [2] 张小林.飞机液压系统的常见故障与日常维护探究[J].标准生活,2025(06):128-130.
- [3] 田丽晶.农业机械液压系统常见故障分析与维护[J].河北农机,2025(05):58-60.
- [4] 占伟,胡雪松,武彦阳.风电场东汽风电机组液压系统常见故障检测技术[J].电子元器件与信息技术,2025,09(05):96-98.
- [5] 谈鑫,王力,杨亚飞.农业机械液压系统常见故障及维护措施[J].农机使用与维修,2024(01):81-83.

水利工程安全检测标准体系研究

隋峰, 刘志浩, 丁悦璐*

(山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257091)

摘要 为了提高水利工程运行安全管理水平, 本文以某大型水库安全检测项目为例, 通过分析水利工程安全检测标准体系构建及关键技术应用要点, 剖析无人机载智能化快速巡检、水下综合一体化检测以及水下地层精细检测等方法, 提出系统标准建设配技术应用的实施措施。研究表明, 构建健全的安全检测标准体系, 采用先进检测技术, 可切实提升水利工程运行安全性能和管理效率, 为相关工程提供参考。

关键词 水利工程; 安全检测; 标准体系; 风险预警

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.034

0 引言

水利工程是承担防洪、灌溉及供水功能的关键基建项目, 其安全运行直接关系到经济发展和人民生命财产安全。工程规模逐步扩大, 运行环境愈发复杂, 人工巡检结合单一检测的传统模式, 已无法契合现代水利工程安全管理的需求。为提高检测效率和精准度, 构建科学、系统的水利工程安全检测标准体系十分关键。以某大型水库项目为研究样本, 借助无人机智能巡检、水下综合检测及地层精细检测等关键技术, 研究水利工程安全检测标准体系的构建与运用, 为强化工程运行安全效能提供理论参考。

1 水利工程安全检测标准体系的重要意义

防洪、供水、灌溉及水资源调控都离不开水利工程这一重要基础设施, 其运行安全直接关系到区域经济发展、社会稳定和人民生命财产安全。水利工程规模不断扩大, 运行环境愈发复杂, 传统人工巡检加经验式管理模式面临诸多挑战, 如检测效率低、数据缺乏体系、风险预警滞后等问题。构建科学健全的水利工程安全检测标准体系意义重大。标准体系可统一检测规范, 规范检测环节, 划定检测指标、方法和技术要求, 能让各类水利工程的安全巡检、数据采集及分析等环节遵循统一标准, 提升检测工作的科学属性与可比水平, 降低操作不统一引发的安全风险^[1]。其次, 标准体系可促进先进技术应用和整合, 无人机巡检、水下综合检测及地层精细检测等新技术不断发展, 标准化体系为推广这些技术提供规范依据, 推动先进设

备和方法实现系统化落地, 进一步强化工程检测效率和精度, 完成快速、全面、精细化安全评估。此外, 标准体系对风险预警和决策支持有推动作用, 建立统一的检测数据采集、处理及分析标准, 可构建完善数据库和风险评价模型, 对潜在安全隐患做早期识别与科学预警, 给管理部门制定维护、加固或应急方案提供凭据, 降低事故发生概率。

某大型水库位于我国南方地区, 主要履行防洪调蓄、农业灌溉及城市供水等数项任务, 库区设施有混凝土重力坝、输水隧洞、溢洪道及多条主、次级输水渠道, 累计运行 25 年; 例行巡检发现坝体局部存在渗水现象, 输水隧洞结构出现轻微裂缝变形, 部分输水渠道衬砌有明显破损, 需实施系统化安全检测和维护行动, 维持工程长期安全稳定运行。

2 水利工程运行安全检测关键技术分析

2.1 无人机载智能化快速安全巡检技术

在大型水库安全管理中, 常规的人工巡查方式弊端在于工作强度繁重, 巡查速度较慢, 对于隐蔽部位以及险要之处无法进行探测等缺陷; 为了提高巡查的速度和准确性, 使用固定翼无人机与多旋翼无人机结合的自动化巡查, 制定出“大规模快速勘探——重点部位精确探测”的工作流程, 固定翼无人机的主要工作任务是对库区以及上下游的大规模巡查, 搭载有高像素可见光学镜头以及红外热成像装置, 可以采集到库区大坝以及溢洪道和输水道的大尺寸图像。同时, 设定飞行高度为 250 m, 单次巡查面积可达约 120 km²

作者简介: 隋峰 (199-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

***通信作者**: 丁悦璐 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。E-mail: 609858341@qq.com

左右,获取的数据分辨率达到12 cm,能够迅速发现大坝裂缝漏水、渠道堵塞以及植被异常问题,为后期的精查预警发出提示;多旋翼无人机能够对重要结构进行近距离详细勘查,搭载有高精度LiDAR设备、多光谱相机以及高解析度可见光学镜头,飞行高度限制为40~60 m范围内,可实现对混凝土重力坝体、输水隧道以及主干输水道的精细化点云建模^[2]。

同时,LiDAR点云密度最大达1 500点/m²,多光谱信息可以用来研究大坝体表面湿润程度、裂缝宽度及衬砌老化情况,依托三维建模和多光谱分析,能够精准捕捉到大坝局部漏水的风险、隧道微弱变动及衬砌破坏的情况等;数据分析上,利用无人机航拍影像无缝拼接、点云建模以及AI图像智能识别软件,对巡视信息进行迅速地解析并转化为可视化图像,同时还能自动生成大坝体健康指标、结构偏移程度与渗漏部位分布图供决策者参考,降低人工巡视的安全隐患,大幅提高了巡视速度与精度。精确锁定库区大坝体出现漏水的地方与输水道的损坏部分,测算出细微的隧道变化,为后期维护加固提供参考^[3]。具体流程如图1所示。

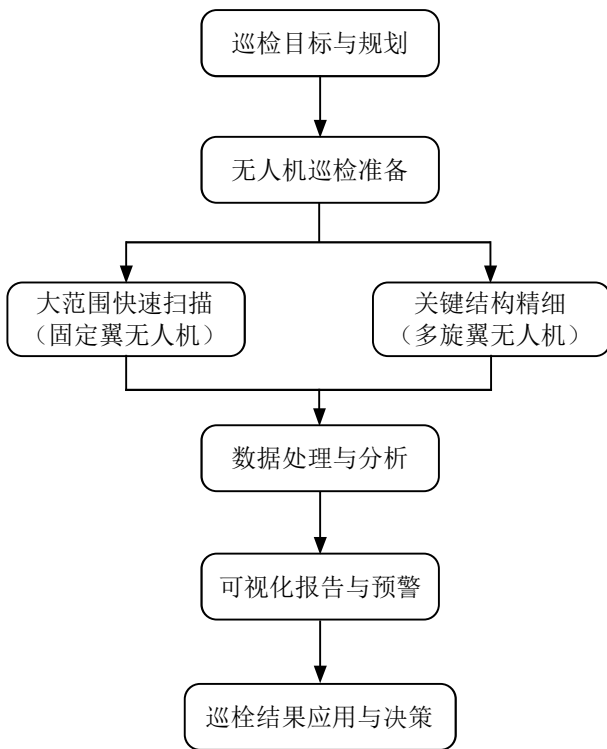


图1 水库无人机智能化巡检流程图

2.2 水下综合一体化安全检测技术

水库引水隧洞、大坝下游和下水渠道的安全状况是整个水利工程建设是否稳定的关键。光衰减、散射

和悬浮粒子经常影响水下光学成像,导致对比度较低、细节损失等严重阻碍了现有的基于传统的视觉检查的应用;为了克服这些问题,本工程采用水下一体化综合安全检测技术,该技术结合了高清晰度光学摄像、多频段声纳扫描和时空间重建的图像重构技术,对水下的结构进行精确的探测。

聚焦光学图像退化问题,采用时空信息联合建模的水下图像复原技术(见表1)。首先,把采集的降质图像切分成三种规格的图像块,创建多尺度对比度编码图像,并制作两类增强图像:一类突出细节内容,主打裂缝、剥蚀及衬砌破损检测;另一类暗度消除,实现整体亮度恢复^[4]。采用多尺度融合算法,把增强图像与原始图像合并,同步保留水下结构的纹理信息和亮度信息,单帧图像分辨率达0.5 mm/pixel,图像对比度提升35%左右,可契合微小裂缝检测需求,处理悬浮物干扰,建立时空显著性模型,解析视频序列不同帧的像素特征,自动检测不同形态(圆形、纤维状)、不同大小(直径1~50 mm)的悬浮颗粒。其次,依托视频帧冗余特性,高保真修复被遮挡的区域,实现图像连续特性和空间一致特性,水下多波段声纳系统(频率500~1 200 kHz)和光学成像联动作业,可生成三维点云,点云密度最高1 000点/m²,为隧洞拱顶、坝体底板及渠道衬砌打造精准模型。该技术整合自动化定位和导航功能,无需人工安放标定点,无人水下航行器,可实现±2 cm的定位精度,给结构缺陷检测可靠空间参照,数据处理平台可同步处理60 fps的图像视频流,实现水下结构的连续监测与精细建模,给水利工程安全检测提供完整的技术支撑。

2.3 水下地层精细安全检测技术

水利工程水下的地层稳定状态关系到工程中坝基的安全和水库后期使用可靠与否;在应对地质基础土质较杂、水中的沉降物质厚度起伏较大、传统的地质钻探难以了解清楚的问题上,该工程采用了水下地层精确安全探测技术来对水中地基和沉降层进行精确探测研究,核心技术即声测、亚底界反射地震成像以及水下电磁法三种探测技术的应用^[5]。首先,水下声探测仪(频率范围:3~15 kHz)用于测量地层厚度和软硬土层次界线,可以探测大约15 km²的库床,垂直分辨率可达0.05 m,水平探测间距为0.5 m,能够较为准确地反映大坝底部和输水渠道沿线的沉降物质分布情况,基于多个反射波的研究,可以量化地层的厚度,水分含量以及孔隙度等参数,取得沉降层最大可达12 m厚的空间分布情况信息。其次,亚底部反射地震利用

表 1 水下综合一体化安全检测技术参数

技术模块	设备与方法	核心参数	功能与应用
光学图像复原	多尺度图像块建模	图像块尺寸: $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$; 单帧分辨率: 0.5 mm/pixel	提升图像对比度与细节保留
悬浮物检测	时一空显著性模型	检测颗粒形态: 圆形 / 纤维状; 颗粒直径: $1 \sim 50 \text{ mm}$	自动识别水体悬浮物, 修复遮挡区域
三维建模	多波段水下声呐 + 光学相机	声呐频率: $500 \sim 1\ 200 \text{ kHz}$; 点云密度: $1\ 000 \text{ 点/m}^2$	精细建模隧洞拱顶、坝体底板及渠道衬砌
定位与导航	AUV+INS+USBL	定位精度: $\pm 2 \text{ cm}$; 视频流处理: 60 fps	实现水下结构连续监控与高精度空间定位

高频 (200 ~ 500 Hz) 震源和多个水下检波器, 通过普通的时间-深度转换法可获得水下地层结构三维切片图像, 垂直方向上的探测精度可达 0.02 m, 水平方向精度约为 0.3 m, 可以探测到断层面、松散层以及一些小规模坍塌区域, 从而为地基加固设计提供参考。探测过程中发现坝基地表下有 0.8 ~ 1.5 m 的高压淤泥夹层, 输水隧道下部分砂层的孔隙率为 32%, 为风险预警和维护提供了相关信息; 使用频率 50 ~ 200 Hz 的水下电磁感应仪测试不同的地层之间的导电性能差异, 与声学数据以及反射地震数据进行多元数据分析整合, 可精准评定地层含水量、渗透性及孔隙结构。

此外, 纵向探测精度达 0.1 m, 5 m^2 空间分辨率, 有助于发现潜在的液化区和流砂层。在数据处理方面, 借助三维建模软件融合声波、地震及电磁数据, 生成高精度地层模型, 完成坝基及渠道底部地层可视化分析, 为后续地基加固、沉积物清理及结构优化提供科学支撑。该技术能连续、高精度监测水下地层, 给水利工程安全运行奠定了技术基础。

3 水利工程运行安全检测关键技术应用效果分析

结合无人机智能巡检、水下综合检测及水下地层精细检测技术, 水利工程的安全监测实现了量化与可视化管理。为了客观评估工程整体运行状态, 本文采用健康指数模型 HI 对各类检测数据进行综合评价:

$$HI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \quad (1)$$

式 (1) 中, S_i 表示各检测指标 (包括裂缝宽度、渗水量、衬砌破损率、地层孔隙率等), w_i 为各指标权重, S_{min} 与 S_{max} 分别为该指标的最小和最大允许值。通过这个模型, 可统一量化无人机巡检、光学和声呐及地层精细检测结果, 得出工程健康指数, 直接体现水利设施安全水平, 实际应用反馈, 健康指数落在 0.80 ~ 0.90 区间, 坝体局部及渠道底部稍低于整体平均水平, 需

着重抓好局部加固与维护; 以公式量化推导, 实现了不同技术检测结果的统一评价, 也可动态监测工程健康状态变化, 为运维决策提供科学参照。此方法全面展现数据驱动智能安全管理的各项优势, 能精准识别并预警水利工程运行风险。

4 结论

本文围绕大型水利工程运行阶段出现的坝体渗漏、输水隧洞微小变形及渠道衬砌破损等安全问题, 探究了水利工程安全检测标准体系及关键技术应用。测试结果表明: (1) 依靠无人机智能巡检技术, 能快速覆盖库区及上下游重点结构, 构建高精度模型, 给结构健康评估提供可靠数据; (2) 水下综合一体化检测技术采用时空联合建模和多源数据融合, 优化水下结构成像效果及悬浮物干扰处理能力, 实现监控的连续性;

(3) 声波、地震反射及电磁感应与水下地层精细检测技术结合, 对坝基及渠道底部地层做精准量化分析, 为地基稳定性评估及加固决策提供依据。因此, 统筹各类技术, 可构建全链条、安全、规范的水利工程安全检测体系, 为长期运行、风险预警提供支撑。

参考文献:

- [1] 赵一琦, 曾彬. 新型水利工程智能安全监测系统研究 [J]. 科技与创新, 2025(24):80-82.
- [2] 柴晓燕, 王利娟. 水利水电工程施工安全管理技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(35):193-195.
- [3] 徐子轩. 水利工程管理中安全生产的实践与思考 [J]. 江苏水利, 2025(12):65-68.
- [4] 任云. 厦门港航道疏浚工程施工全过程安全管控机制研究 [J]. 珠江水运, 2025(22):59-61.
- [5] 刘晓瑞. 水利工程管理安全生产标准化存在的问题及对策研究 [J]. 水上安全, 2025(22):22-24.

长叶片水蚀机理与防护技术研究

王铁钢

(中石化(天津)石油化工有限公司, 天津 300270)

摘要 本研究以汽轮机末级长叶片的水蚀问题为研究对象, 系统阐述了水蚀现象的形成条件及影响因素, 从微观和宏观两个层面深入分析了其作用机理。在全面总结现有防护技术的基础上, 客观评价了各类技术的优缺点及适用范围, 并对未来技术发展方向进行了前瞻性探讨。研究成果可为汽轮机末级长叶片的设计优化、制造工艺改进及运行维护提供理论依据, 对确保机组安全稳定运行、提高发电经济性具有重要的工程指导意义。

关键词 汽轮机末级长叶片; 水蚀机理; 防护技术

中图分类号: TK26

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.035

0 引言

汽轮机作为火电、核电及联合循环发电系统的核心动力装置, 其运行效率与可靠性直接影响整个发电系统的经济性和安全性。其中, 末级长叶片作为汽轮机通流部分的关键部件, 承担着将蒸汽热能转化为机械能的最终环节, 工作环境极其恶劣。随着汽轮机向高参数、大容量、长周期方向发展, 末级长叶片的长度不断增加, 所承受的蒸汽载荷、气动载荷及机械应力显著提升, 同时面临严重的水蚀问题。水蚀是导致汽轮机末级长叶片失效的主要形式, 具体表现为叶片表面出现麻点、凹坑、沟槽乃至裂纹等损伤。因此, 深入研究末级长叶片的水蚀机理, 开发高效可靠的防护技术, 不仅有助于延长叶片使用寿命, 保障汽轮机安全稳定运行, 而且对降低发电成本具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 汽轮机末级长叶片水蚀机理

1.1 水蚀产生的前提条件

汽轮机末级长叶片发生水蚀现象的本质原因在于高速流动的湿蒸汽中所携带的液态水滴与叶片表面发生剧烈碰撞和切削作用, 从而导致叶片材料产生塑性变形、疲劳剥落及质量损失等损伤^[1]。该现象的产生必须同时满足两个基本条件: 首先, 蒸汽介质中必须存在液态水滴; 其次, 水滴与叶片表面之间需保持足够高的相对冲击速度。在汽轮机常规运行工况下, 末级蒸汽处于湿蒸汽区域, 这是由于蒸汽在膨胀做功过程中, 其压力和温度持续下降, 当温度降至对应压力下的饱和温度时, 蒸汽开始凝结形成大量微细液态水

滴。这些水滴在高速蒸汽流带动下与旋转叶片发生强烈冲击, 最终导致叶片表面材料逐渐流失, 形成水蚀损伤。这一过程不仅影响叶片的气动性能, 还会显著降低叶片的结构强度和使用寿命。

1.2 水蚀的核心机理

1. 弹性冲击与塑性变形阶段。当高速水滴撞击叶片表面时, 首先会产生瞬时弹性冲击, 导致叶片表面发生极短暂的弹性变形。若水滴冲击速度超过临界值, 其产生的冲击载荷将超过叶片材料的屈服强度, 从而引发叶片表面永久性塑性变形, 最终形成微观凹坑。这一过程涉及从弹性变形到塑性变形的转变, 其临界条件取决于材料特性和冲击参数。

2. 疲劳损伤与裂纹扩展阶段。在汽轮机运行过程中, 高速旋转的叶片持续受到蒸汽中水滴的反复冲击, 这种周期性冲击载荷会在叶片表面特定区域形成应力集中。随着时间推移, 应力集中区域会逐渐产生微米级的疲劳裂纹。这些初始裂纹主要沿着金属晶界扩展, 或在塑性变形区域延伸。值得注意的是, 这种损伤机制具有明显的累积效应, 裂纹的萌生与扩展过程呈现出典型的疲劳失效特征, 对汽轮机叶片的长期运行可靠性构成潜在威胁。

3. 材料剥离与失效阶段。当疲劳裂纹扩展至临界尺寸时, 叶片表面金属材料因失去有效支撑, 在高速水滴冲击与旋转离心力的复合作用下, 发生片状或块状剥落现象, 从而形成显著的凹坑、缺口甚至穿孔。若此类损伤持续发展, 剥落区域将不断扩大, 导致叶片原有的机械强度和结构刚度显著降低。这一渐进性损

作者简介: 王铁钢(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 热能与动力工程。

伤过程最终会严重影响叶片的力学性能和使用寿命^[2]。

1.3 影响水蚀的主要因素

1. 水滴特性。在影响水蚀损伤的关键参数中,水滴直径、浓度及冲击速度尤为重要。具体而言,水滴直径的增大会显著提升其冲击动能,从而增强对叶片表面的冲击作用,加剧材料的水蚀破坏程度。同时,当水滴浓度提高时,单位时间内撞击叶片表面的水滴数量随之增加,这将加速疲劳损伤的累积进程。这些因素共同作用,直接影响着水蚀损伤的发展速率和严重程度。

2. 叶片特性。叶片特性主要涉及材料性能、表面状态及结构设计三个关键方面。在材料性能方面,硬度、韧性和耐磨性等力学特性对抗水蚀能力具有决定性影响。研究表明,材料硬度与韧性呈正相关时,其抗水蚀性能显著提升。以马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢为例,其抗水蚀性能明显优于普通碳钢。此外,通过降低叶片表面粗糙度,可有效缓解水滴冲击时产生的应力集中现象,从而显著减轻水蚀损伤程度^[3]。

3. 运行工况。机组运行工况涵盖多个关键参数,包括负荷水平、启停频率以及蒸汽特性等。在低负荷运行状态下,末级蒸汽湿度会显著上升,导致水滴浓度增加,从而加剧水蚀损伤程度。特别值得注意的是,在机组启停过程中,蒸汽参数往往出现较大幅度的波动,其中末级蒸汽湿度的变化尤为剧烈。与此同时,叶片还需承受热应力和机械应力的双重作用,这两种应力的叠加效应极易引发叶片表面裂纹的形成,进而加速水蚀的发展进程。这种复合作用机制使得机组在特定工况下更容易出现严重的侵蚀问题,对设备长期运行的可靠性构成显著威胁。

2 汽轮机末级长叶片水蚀防护技术

2.1 表面改性防护技术

表面改性防护技术通过物理和化学方法对叶片表面金属组织进行优化处理,从而显著改善其硬度、韧性和耐磨性等关键性能指标。这种技术能够有效提升叶片表面的抗水蚀能力,延长其使用寿命。

1. 喷丸强化。喷丸强化是一种通过高速喷射硬质弹丸(如钢丸或陶瓷丸)冲击叶片表面的表面处理技术。该工艺能够使叶片表层材料产生塑性变形,从而在表面形成残余压应力层,同时实现晶粒细化,显著提升表面硬度和疲劳强度。这种强化机制能有效抑制疲劳裂纹的萌生与扩展,显著延长叶片使用寿命。该技术具有工艺简单、成本低廉等优势,在汽轮机叶片水蚀

防护领域应用最为广泛,尤其适用于叶片排气边等水蚀情况严重的区域。作为当前最经济有效的防护手段之一,喷丸强化技术已在工业实践中获得充分验证。

2. 激光淬火。激光淬火是一种先进的表面改性技术,其原理是利用高能量密度的激光束对叶片表面进行快速加热。当激光照射时,材料表层可在极短时间内达到奥氏体化温度,随后通过快速冷却形成马氏体组织。这种处理工艺显著提升了材料表面的硬度和耐磨性能,同时由于加热和冷却过程极为迅速,对基体材料的性能影响极小。该技术特别适用于对尺寸精度要求严格的叶片类零件的表面强化处理,具有工艺稳定、变形量小等显著优势^[4]。

3. 离子注入。离子注入技术是一种通过高能离子束轰击金属表面,从而改变材料表面特性的先进表面改性工艺。该工艺利用加速电场将特定离子注入叶片表面,使其与基体金属原子发生相互作用,形成化合物或固溶体,进而显著改善材料表面的微观组织结构。这种处理方式能够有效提升叶片表面的硬度和耐磨性能,同时增强其抗腐蚀能力。该技术的主要优势在于可在常温条件下实施,避免了热处理可能导致的变形问题,且形成的防护层具有优异的稳定性与持久性。然而,该工艺也存在设备投资成本高、处理周期较长等局限性,因此目前主要应用于特殊工况条件下的叶片防护领域。

2.2 涂层防护技术

涂层防护技术是指在叶片表面制备一层具有高强度和高耐磨性的防护涂层,通过该涂层将叶片基体与水滴隔离,使其承受水滴冲击造成的损伤,从而有效保护叶片基体。该技术通过物理隔离和能量吸收的方式显著提升了叶片的抗侵蚀性能。

1. 金属涂层。金属涂层主要通过等离子喷涂和火焰喷涂等工艺,将钴基合金、镍基合金等耐磨金属材料均匀覆盖于叶片表面。该涂层与基体结合紧密,具有良好的韧性和耐磨性,其抗水蚀性能显著优于叶片基体材料,因此特别适用于中等水蚀程度的叶片防护。然而,由于涂层硬度相对较低,在长期运行过程中易发生磨损和剥落现象,这在一定程度上限制了其使用寿命。这种防护方式在特定工况下仍具有重要的应用价值。

2. 陶瓷涂层。陶瓷涂层主要通过等离子喷涂和激光熔覆等先进工艺,将氧化铝、氧化锆及碳化硅等陶瓷材料均匀沉积于叶片表面。这类材料具有优异的硬度、耐磨性以及突出的抗水蚀性能,尤其适用于水蚀

环境恶劣的工作区域。然而，陶瓷涂层存在韧性不足的固有缺陷，在应力作用下易产生裂纹甚至剥落。为此，需结合表面改性技术进行协同处理，以显著提升涂层与基体的结合强度，确保其在复杂工况下的长期稳定性。

3. 复合涂层。复合涂层通过将金属涂层与陶瓷涂层的优势特性有机结合，采用“金属底层—陶瓷表层”的层状结构设计。其中，金属底层可显著增强涂层与基体材料的结合强度，而陶瓷表层则能提供优异的耐磨性和抗水蚀性能。这种复合结构在保持材料韧性的同时提高了表面硬度，其综合防护性能明显优于单一涂层体系，已成为当前涂层防护技术的重要发展方向，并已在大型汽轮机末级长叶片等关键部件中得到实际应用。

2.3 结构优化防护技术

结构优化防护技术是一种通过优化叶片气动外形、改进排气边设计以及合理配置叶片组布局，从而有效减少蒸汽中水滴生成和撞击的防护方法。该技术从水蚀产生的机理入手，通过控制水蚀源头的形成条件来实现防护目的。其优势在于能够与其他防护技术形成协同效应，共同提升整体防护性能。这种基于结构优化的防护方案，不仅能够显著降低水蚀损伤，还能提高机组运行的安全性和经济性。

1. 叶型结构优化。叶型结构优化的核心在于通过改进叶片气动外形来降低末级蒸汽湿度并抑制水滴形成。具体而言，采用分流叶型设计将末级叶片分为主叶片和分流叶片两部分，其中分流叶片可提前分离蒸汽中的部分水滴，从而显著减少撞击主叶片的水滴数量。此外，对叶片曲率和弦长的优化处理能够有效改善蒸汽流动特性。

2. 排气边优化。针对叶片排气边水蚀现象严重的问题，本研究提出了一套系统性的优化方案。首先，通过增加排气边厚度并采用圆角过渡设计，有效缓解水滴冲击造成的应力集中问题。其次，在排气边区域设置导流槽结构，引导水滴沿预定路径流动，避免直接撞击叶片表面。此外，在叶片表面涂覆疏水涂层，显著降低水滴附着率，从而减少水滴与叶片的冲击频率。这些措施共同作用，能够显著提升叶片排气边的抗水蚀性能，延长叶片使用寿命^[5]。

3. 叶片组布局优化。叶片组布局优化的核心在于合理调整末级叶片的间距与排列方式，通过优化蒸汽流动特性来减少水滴聚集和冲击现象。此外，在末级叶片后加装水滴分离装置可有效分离蒸汽中的水滴，从而显著降低水蚀损伤的发生概率。

2.4 运行工况优化防护技术

运行工况优化防护技术是通过科学调控汽轮机运行参数及运行模式，从而有效抑制水蚀损伤的形成与发展。

1. 合理控制机组负荷。为确保机组安全稳定运行，需科学调控机组负荷，避免长期处于低负荷工况运行。当负荷降至临界值以下时，应及时调节蒸汽参数以降低末级蒸汽湿度，从而有效控制水滴浓度。同时，应持续优化机组启停程序，通过缩短启停时间、减小蒸汽参数波动幅度等措施，降低叶片承受的热应力和机械应力，防止表面裂纹的产生。

2. 加强蒸汽品质控制。为确保机组安全稳定运行，需重点加强蒸汽品质管控，严格执行蒸汽管道及汽轮机通流部位的定期清垢除杂工作，有效控制水滴形成与积聚。同时应建立末级叶片定期巡检维护机制，通过专业检测手段及时发现叶片表面微损伤，并采用打磨、补焊等工艺进行修复处理，防止损伤进一步扩展。建议引入在线监测系统对末级叶片水蚀状况进行实时监控，根据监测数据及时优化运行参数，切实保障叶片运行安全。

3 结束语

汽轮机末级长叶片的水蚀现象是由多种因素共同作用所致。目前，表面改性技术、涂层防护技术、结构优化技术以及运行工况优化技术等防护措施已在汽轮机末级长叶片领域得到广泛应用。在实际应用中，需根据机组运行工况、叶片材料特性及水蚀程度等具体情况，选择最适宜的防护技术或组合方案，以实现最优的防护效果。

参考文献:

- [1] 方镜森,孙长青,董子豪,等.激光熔覆技术在汽轮机末级叶片水蚀防护中的应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2024,20(02):83-90.
- [2] 杨建道.汽轮机低压缸末级长叶片水蚀研究[J].发电设备,2022,36(04):235-240,248.
- [3] 李戈,景岗呈,朱海宝,等.电厂汽轮机低压转子末级叶片水蚀防护分析[J].黑龙江电力,2020,42(05):453-456.
- [4] 高照.汽轮机末级叶片水蚀机理及数值模拟[D].保定:华北电力大学,2020.
- [5] 刘云锋,杨晓辉,李宇峰,等.大型核电汽轮机末级长叶片开发中若干问题讨论[J].热能动力工程,2022,37(03):81-85.

沥青搅拌站燃烧器维护与能效优化研究

左东瑞

(中国路桥工程有限责任公司, 北京 101100)

摘要 本文围绕沥青搅拌站燃烧器展开研究。首先阐述了燃烧器的类型、结构及其在沥青搅拌站中的作用;其次从日常维护、定期检修、备件管理、维护人员培训及管理四个方面制定维护策略;最后从燃烧控制技术改进、燃料选择与预处理、余热回收利用、智能监控与诊断系统应用四个方面探讨能效优化方法,旨在为沥青搅拌站燃烧器的稳定运行和高效节能提供参考。

关键词 沥青搅拌站; 燃烧器; 日常维护; 定期检修; 能效优化

中图分类号: TU64

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.036

0 引言

在公路基础设施建设过程中,沥青搅拌站属于重要的生产设施,对路面材料品质的保障以及施工效率的提高起着决定性的作用。燃烧器是沥青搅拌站的重要部件,主要起到工艺热量支撑的作用。运行状况影响产品质量、能耗、整个运作成本。随着环保要求越来越严格、能源供应紧张的局面越来越严重,如何保证燃烧器高效稳定运行并实施系统化的节能优化措施,成为行业亟待解决的重要问题。本文主要研究沥青搅拌站燃烧器运维管理及节能改进设计,为同类设备技术升级提供理论依据和操作手册。

1 沥青搅拌站燃烧器概述

1.1 燃烧器的类型与结构

沥青搅拌站主要使用燃油燃烧器和燃气燃烧器这两种主流设备。燃油燃烧器以重油或者柴油为燃料,具有高热值、强发热量和良好的稳定性,可以迅速提供充足的热量,满足大规模生产的要求。但是其排放物中含有的有害成分较多,在环境敏感区运行时必须配备尾气处理设施才能达到环保标准。燃气燃烧器主要用天然气或者液化石油气作为能源,具有清洁高效、污染物排放量小的优势,更容易通过现行法规标准进行评价。但是由于基础设施条件的限制,部分地区会出现供气稳定性差的情况。

燃烧器主要是由供油(气)系统、供风系统、点火系统、燃烧室、控制系统等部分组成。供油(气)系统将燃料平稳地输送到燃烧器里,通过油泵(气泵)、管道等部件精确控制燃料的流量和压力,保证燃烧过程稳定。供风系统给燃烧提供必要的氧气,风机吸入

空气后经风道输送到燃烧室,调节风门开度控制空气流量和风速,使燃料和空气的最佳混合比例得到保证,提高燃烧效率。点火系统用来点燃燃料和空气的混合物,常用的点火方式有电火花点火和高压点火等,在短时间内产生高温火花,点燃混合气体,启动燃烧过程。燃烧室是燃料进行化学反应的主要场所,燃烧室的设计特点会影响燃烧效率和火焰形态。科学合理的燃烧室设计有利于燃料充分氧化,减少能量损失。控制系统是整个装置的中枢神经,它通过各种传感器实时采集温度、压力、流速等重要参数,并根据预先设定的算法对各个子系统的运行状态进行动态调节,保证燃烧过程的安全、稳定、高效^[1]。

1.2 燃烧器在沥青搅拌站中的作用

沥青制备工艺的关键是准确控制骨料加热到一定的温度,使骨料和基质材料均匀混合。燃烧器依靠燃料完全燃烧产生的高温火焰,借助热传导作用把热量传送给骨料和沥青,使其达到最佳的加工状态,进而保证产品品质和性能指标。

燃烧器工作状况对沥青品质有一定影响。燃烧不充分时会产生一氧化碳、碳氢化合物等有害物质,这些物质会和沥青发生化学反应,破坏沥青的物理性质和化学稳定性,造成沥青老化硬化。燃烧稳定、高效时,沥青在合适的温度范围内进行加工,从而提高沥青的质量和耐久性。

燃烧器是核心部件,和烘干设备、混合系统有关。烘干时燃烧器产生的热量使骨料内部水分迅速蒸发并完成干燥,在拌合时燃烧器提供合适的温度,使沥青和集料结合良好。为了保证整个系统稳定运行,燃烧器

作者简介: 左东瑞(1991-),男,本科,工程师,研究方向:燃烧器维护与能效优化。

的工作参数要根据搅拌站的实际负荷状况、骨料初始含水量等实际情况进行实时调节,以达到最佳性能目标。

2 沥青搅拌站燃烧器维护策略

2.1 日常维护

燃烧设备在运行过程中容易受到积灰、油渍的侵蚀。风道、喷嘴通道积灰堵塞会影响空气与燃料的混合,降低热效率,油渍有引发火灾的危险。为了保证燃烧器高效地工作,每天作业结束之后使用专门的清洁工具,比如软毛刷、吸尘器等,对燃烧器的外壳、风管、燃烧室等主要部件进行清理,清除外部的污染物。对于顽固的油渍污染,应该用合适的溶剂擦拭,并采取预防措施防止清洗液渗入内部造成损害。同时要定期维护周边环境,保证通风顺畅,防止二次扬尘^[2]。

启动前需要对燃烧器的核心运行参数进行核查,重点检查燃油(气)的压力、空气的供给量、点火电极之间的间距等指标,保证其处于安全稳定的区间。设备运转过程中要一直注意火焰的形态、温度分布以及系统压力变化趋势,随时做好数据记录。将测得的数值同已定的标准范围加以比较分析,从而尽早找出隐患。火焰黄色且不稳定时,燃料供应不足或者助燃比失调;温差剧烈波动时,控制系统有故障。根据这些动态观测信息,可以为以后的维护保养工作提供科学依据和技术支持。

燃烧器部分的风机轴承、电机等重要运动部件要定期润滑保养,减缓磨损速度,延长使用寿命。按照设备操作手册的要求选择合适的润滑油品,并严格按照推荐的时间节点进行加注或者更换。加油作业时控制用量,防止溢出,防止油脂渗入其他敏感部位造成污染。同时要保持润滑接口的清洁,无灰尘,防止异物进入造成润滑效果不好^[3]。

2.2 定期检修

根据燃烧器使用频率、设备运转情况、外部环境条件来建立系统化的定时养护经营体系。一般维修分为三个等级,小修一个月一次,主要对重要零部件的损耗情况进行检查,对校准、清洗;中修半年到一年一次,主要对核心部件进行检测和保养;大修三到五年一次,包括完全拆卸、深度清理、更换严重损坏的部件等。

风机叶轮是燃烧器供风系统的核心部分,在长时间的运行中容易受到磨损、形变的影响。设备维护期间重点检查其动态平衡参数是否符合技术标准,一旦超出允许范围,则要立即进行校正或更换,保证平稳运转。还要检查叶轮与传动轴之间连接的牢固程度,排除松动隐患。喷嘴性能影响燃料雾化效果及燃烧效率,所以要定时检查各个喷孔是否被堵塞或者严重腐

蚀,根据实际情况制定针对性的修复计划,清理疏通或者全部更换。

检修完毕后,要对燃烧器进行全部调试。首先对各个部件的安装进行检查,运转是否灵活,电气连接是否牢固,然后对热态参数进行调节,逐步调整燃油(气)压力、空气压力等参数,使火焰处于最佳状态,监测温度、压力等运行参数是否符合要求。调试合格后组织人员进行验收,保证燃烧器正常运行^[4]。

2.3 备件管理

根据燃烧器运行参数及维护历史数据,用统计学方法找出常用的备件种类和数量,进行系统设计。创建专门的备件库存管理系统,对入库、出库和存量信息实施实时监控并加以准确管理。按时开展库存盘点,保证账实相符,及时补充缺少的部件,满足设备运维的实际需要。

选择配套零部件时,要考虑其技术参数是否符合燃烧器的设计要求。优先选择原厂指定的组件或者信誉良好的供应商提供的合格替代品,不得使用质量低劣的产品,以免破坏设备的运行性能和使用寿命。还要对所选配件的兼容性、互换性进行考察,保证它能和现有的部件很好地配合,使整个系统保持稳定。

2.4 维护人员培训与管理

建立常态化的专业培训机制,定期对运维人员开展专门的技能培训课程。培训内容要全面包含燃烧器结构特点、运行原理、维护标准和常见故障诊断技术等各个方面。采用理论讲授、实际操作训练、案例分析等多种形式,全方位提高维护团队的技术水平以及现场应急处理能力。

构建全员范围的运维绩效管理体系,定期对技术人员的服务质量、响应速度、故障解决水平进行评定。根据评定结果进行奖惩,调动员工提高自身专业水平和服务意识,提高团队协作精神。对基层岗位进行系统的职业发展道路和晋升通道的设计,调动员工的工作积极性,增强组织内部的凝聚力。

3 沥青搅拌站燃烧器能效优化途径

3.1 燃烧控制技术改进

合理分配燃料和助燃介质,使燃料完全燃烧,是提高能源利用率的主要途径。对燃烧器风道进行改进,采用变截面通道、增加导流叶片等技术,使空气在进入燃烧室之前形成均匀稳定的流动场,从而达到燃料和助燃介质最佳混合的效果。根据运行工况和燃料性质参数变化的要求,准确控制进风口阀门开度,动态调节供氧量,防止由于供氧过多或者不足造成能量损失,大幅度提高燃烧性能,降低能耗。

采用先进的燃烧控制算法,如模糊逻辑、神经网络等。根据燃烧器当前运行参数中的温度、压力、火焰状态等实时数值,动态调节燃料和助燃空气的比例,不断改善系统的性能。该技术具有很强的自适应性以及快速响应的特点,在燃料品质发生改变或者负荷出现波动的时候,其优势更加明显,可以保证设备一直处在最佳的工作状态,大幅提高能源利用效率,明显降低能耗水平。

利用传感器,依靠自动化控制系统以及各种执行机构,对燃烧过程实施智能化的控制。实时采集燃烧器的有关参数并加以分析,依照事先设定好的算法动态调节运行状况。当发现火焰有波动的时候,自动增大燃料供应或者改善空气配比;当达到预设温度阈值的时候,减少供能水平,防止过热。这项技术方案大大提高了燃烧系统的稳定性以及能源的利用率,明显减少了由于人工操作不当造成的操作失误和体力劳动。

3.2 燃料选择与预处理优化

常见的燃料有重油、柴油、天然气等,它们在热值、经济成本、环境影响上存在较大的差别。重油能量密度高、价格便宜,但是硫含量高,燃烧后排放物多;柴油燃烧过程比较清洁,但是价格高;天然气作为清洁能源,应用前景广阔,但是在部分地区由于资源分布不均,会出现供不应求的情况。燃料选定环节要兼顾搅拌站实际产能需求、环保标准约束、成本控制等各方面因素,系统考虑后制定最佳方案,达到经济效益和社会效益的统一。

燃料预处理技术对提高燃烧性能起着非常重要的作用。对液态燃料,采用过滤、沉淀的方式除去杂质和水分,防止喷嘴堵塞,改善雾化效果;对气态燃料,经过净化流程去除尘埃、湿分及有害组分,保证燃料质量稳定。合理控制加热温度可以提高燃油的流动性,从而改善燃油的雾化性能,达到高效能燃烧的目的。

采用改进的喷嘴结构或者使用专业的雾化设备,可以明显提高燃料的分散性能。燃料颗粒更细小,和空气混合得更均匀,燃烧接触面积增大,燃速加快,能源利用率提高。精确调节供油量、助燃气体比例、充气时间,使燃料完全氧化分解于燃烧室内,大大减少未完全燃烧所造成的能量损耗。

3.3 余热回收利用

在燃烧器排烟系统中设置余热回收装置,如换热器,可以利用排烟的热量。设计阶段要综合考虑换热设备的选择、传热表面积分配、材质特性等各方面的因素,保证能量转换效率高、压力降低。合理布置管道的布置方案,减小热量损失^[5]。

从经济效益上来说,余热回收技术虽然初始投资

费用高,但是运行阶段可以大幅度降低燃料消耗成本,投资回收期短。从环保角度来讲,该技术依靠有效地利用废气中的潜热,减缓大气升温,削减燃烧时有害污染物的排放量,具备较好的环保和社会效应。

3.4 智能监控与诊断系统应用

智能监测系统可以实时获取燃烧设备运行参数,温度、压力、流量、火焰图像等全部数据,再经由通信网络传送到监控中心。该平台使用先进的数据分析技术对所获得的数据进行处理,用图表或者曲线等直观的方式显示燃烧装置的工作状况,具有远程监管的功能,可以及时发出警报。

利用故障诊断算法、建模技术对收集到的数据进行详细的分析,做出合理的判断,及时发现燃烧器存在的潜在运行缺陷。通过对温度、压力等主要参数的变化规律进行观测,来评价设备的磨损情况,用火焰图像特征提取方法对燃烧状态是否符合标准进行评定。该系统可以实现早期警报功能,保证运维人员精确实施维修,减少停机时间,提高设备总体运转效率和可靠性^[6]。

4 结束语

沥青搅拌站燃烧器的养护优化对于保证沥青产品的品质、实现节能降耗和减少环境污染有着十分重要的意义。开展科学合理的养护工作,从日常养护、定期检修、备件管理、养护人员的培训和管理等方面入手,可以延长燃烧器的使用寿命,提高燃烧器的稳定性、可靠性。燃烧控制技术、燃料种类选择和预处理改善、燃烧余热回收再利用、智能监控与诊断系统优化等各个方面的燃烧器高效利用,可以大大提高燃烧器的能源利用率,降低生产成本,带来经济和环境方面的效益。燃烧器在技术不断变革的过程中,将会迎来更多的发展机遇和挑战,在实践中要不断关注并加以研究。

参考文献:

- [1] 王复影.沥青搅拌站设备的日常维护和保养[J].中国高科技,2021(19):151-152.
- [2] 邓贵营.沥青搅拌站的使用和维护探讨[J].西部交通科技,2019(07):203-205.
- [3] 何伟.新时代下沥青拌合站机械设备维护和保养技术策略浅析[J].建材与装饰,2019(11):222-223.
- [4] 孙晨,程基凯,王忠林,等.煤制气技术对沥青拌合碳排放及能耗影响研究[J].山西建筑,2025,51(23):23-27.
- [5] 张文学,郭彩武,郭建新.三次风速对LB2000型沥青搅拌站煤粉燃烧器燃烧效率的影响[J].热力发电,2026,55(01):112-118.
- [6] 刘战猛,赵崇.沥青混合料搅拌设备用燃油燃烧器燃尽率分析[J].工程机械与维修,2025(05):124-126.

电梯中分式层门系统受冲击故障机理分析

魏小枫

(达州市特种设备监督检验所, 四川 达州 635000)

摘要 电梯中分式层门系统是电梯安全防护的核心部件, 承担着防止人员坠落、隔绝井道风险的功能, 该系统运行可靠性与乘员人身安全、设备财产安全密切相关。本文基于电梯中分式层门系统的结构组成及工作原理, 对系统受冲击的类型及特性进行分析, 把握其受冲击故障机理, 揭示冲击荷载与故障演化的内在关联, 以期对电梯层门系统的故障诊断、日常维护及抗冲击优化设计提供参考, 进一步提升电梯运行的安全性及稳定性。

关键词 电梯; 中分式层门系统; 冲击荷载; 故障机理

中图分类号: TU976

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.037

0 引言

随着城市化进程的日益加快及高层建筑的普及, 电梯逐渐成为人们日常出行、货物运输中不可或缺的特种设备, 其运行安全性及可靠性成为人们关注的一个重要议题。电梯层门系统是电梯与外界连通的唯一通道, 也是电梯安全防护体系中的第一道防线。中分式层门系统由左右两扇门体组成, 并通过门机驱动机构、联动机构、锁紧机构、导向机构等协同工作, 实现门体的同步启闭与可靠锁紧。在电梯运行过程中, 层门系统需要频繁承受多种冲击负荷, 这给层门系统的安全性、稳定性带来不利影响, 并因此引发一系列的安全故障。针对这一情况, 通过对电梯中分式层门系统故障问题进行深入剖析, 把握好冲击荷载类型及特性, 提升电梯层门系统设计效果, 以实现故障的精准诊断及维护目标, 确保电梯稳定、可靠运行。

1 电梯中分式层门系统的结构组成及工作原理

1.1 系统结构组成分析

电梯中分式层门系统主要由机械结构与电气控制系统两个部分组成。其中, 机械结构的作用在于承担冲击荷载, 电气控制系统则实现对门体的精准控制与安全监测目标。在电梯中分式层门系统当中, 机械结构与电气控制系统协同工作, 保证系统处于稳定、可靠的运行状态。

在该系统结构中, 机械结构是层门系统的主体部分, 其结构组成复杂, 且各部分分工明确, 分为门体结构、驱动传动机构、锁紧跟位机构、导向支撑机构四个核心模块。其中, 门体结构主要由左右两扇对称

的门扇组成, 门扇内部设置了加强筋来提升结构的刚度; 外部则装配耐火密封条来保证密封效果和缓冲效果。驱动传动机构包括门机驱动电机、减速器、传动皮带、挂轮组、联动连杆等部分, 其通过动力传递实现两扇门扇的同步对称启闭, 是门体运动的动力来源。锁紧限位机构的应用, 则注重以门锁装置为核心, 搭配有锁钩、锁扣组件、门锁滑轮等部件, 可以实现层门的可靠锁紧及紧缩。同时, 在设计过程中, 通过位置限位部件的应用, 有助于防止门体启闭超程, 对于保障层门锁紧性能、防止意外开启有着重要作用。导向机构的设计则主要由门导轨、门地坎、吊臂/门挂板等部分组成, 为门体启闭提供精准的导向路径, 并承担门体的重要支撑, 有助于减少门体滑动过程中的晃动及摩擦问题, 有助于提升运行平稳性。

从电气控制系统来看, 其主要由门机控制器、电柜控制器、各类传感器、执行元件及线路组成, 并与机械结构之间形成有效的配合, 进一步实现对层门系统的智能化控制及安全监测目标。其中, 门机控制器是电气控制的核心所在, 主要负责接收电梯控制柜的启闭指令, 实现对驱动电机转速、转向的精准调节, 以保证门体的平稳加速、匀速运行, 有助于减少门体启停过程中产生的惯性冲击问题。在该系统当中, 各类位置传感器、压力传感器、振动传感器的设计, 分布于门锁装置、门体导轨、驱动机构等关键部位, 并可以实时采集门锁紧状态、门体运行位置、部件受力情况等信号, 将其反馈给控制系统, 实现对层门运行状态的评估分析。当检测门体锁紧失效、运行卡顿、遭受异常冲击等问题后, 电气控制系统会及时发出指

作者简介: 魏小枫 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电类特种设备检验。

令, 切断驱动动力, 并触发安全保护装置, 以防止故障的扩大化, 确保系统处于安全、稳定的运行状态。

1.2 系统工作原理

电梯中分式层门系统工作过程主要包括启动控制与锁紧保护两个阶段。其核心工作原理如下:

1. 启动控制阶段。电梯轿厢运行至目标楼层并平稳停靠之后, 电梯控制柜向层门系统门机控制器发送启闭指令。门机控制器收到指令后, 会控制门机电机启动, 通过减速器、传动皮带带动联动机构运行, 联动钢丝绳与挂轮组协同作用, 驱动左右两扇门扇沿着 U 型导柱与门地坎同步对称滑动^[1]。在门体启闭过程中, 门机控制器还会对电机转速进行调整, 减少惯性冲击的影响。

2. 锁紧保护阶段。在锁紧保护阶段, 当门锁装置机械锁钩与电磁锁协同作用, 将门锁紧。同时, 位置传感器向电梯控制柜发送锁紧信号, 并确认层门锁紧后, 电梯方可继续启动运行。在此过程中, 电梯运行至非目标楼层时, 门锁装置保持锁紧状态, 防止层门意外开启。当门机动力系统失效时, 闭门器会依靠弹簧力驱动门扇关闭并锁紧, 保证电梯运行安全。在电梯运行过程中, 当电梯门遇到异常冲击时, 安全保护装置检测异常冲击信号, 并将其反馈给控制器, 控制器会切断门机动力, 停止门体的运动, 有效地避免故障的扩大化^[2]。

在电梯中分式层门系统受冲击故障问题防控时, 应注重从“启动控制”和“锁紧保护”两个方面入手, 把握好电梯中分式层门系统冲击载荷情况, 为故障防控及解决提供重要支持。

2 电梯中分式层门系统冲击载荷类型及特性分析

2.1 惯性冲击

惯性冲击是层门系统在正常启闭过程中, 由于扇的加速、减速运动中产生惯性力引发的冲击, 是系统最为常见、最频繁的冲击载荷。从惯性冲击产生的原因来看, 主要是由于门体启闭过程中, 门机驱动装置控制电机加速、匀速、减速运行, 门扇会在惯性作用下产生惯性力^[3]。例如: 在门体开启初期, 电机处于加速转动的状态; 门体启闭到位时, 电机会突然停止运转, 而门扇会在惯性作用下继续运动, 惯性力作用于缓冲器与门框, 形成冲击力。从惯性冲击的特性来看, 惯性冲击的载荷值与门体质量、加速度呈现正相关关系, 当门体质量越大、加速度越快时, 关系冲击负荷峰越高。同时, 惯性冲击作用时间较短, 通常在

0.05 ~ 0.2 s 之间, 并且冲击载荷呈现出周期性变化, 与门体启闭频次保持一致性, 为 0.5 ~ 1 次/min。除此之外, 惯性冲击载荷大小还与门机驱动系统的刚度有关, 刚度越大时, 冲击载荷传递速度越高, 零部件承受的冲击应力也就越大。惯性冲击主要作用于门扇、联动钢丝绳、导向滑块等部件。

2.2 接触冲击

接触冲击主要发生于层门系统启闭过程中, 各零部件之间发生接触碰撞产生的冲击, 属于正常附加冲击。从其产生原因来看, 表现在以下几个方面: 一是门体启闭到位时, 门扇端部缓冲条会与门框、门扇之间发生接触碰撞; 二是联动机构之间的间隙过大, 导致传动部件之间发生相对运动, 产生撞击, 进而形成接触冲击; 三是导向滑块与 U 型导柱、门地坎之间间隙过大, 门扇滑动过程会发生偏移、晃动, 导致滑块与导柱、地坎之间发生碰撞, 产生接触冲击。此外, 门锁装置在锁紧及解锁过程中, 电磁锁钩与锁扣接触也会产生轻微的接触冲击, 并且在磨损后, 冲击强度会逐步增强。从接触冲击的特性来看, 接触冲击载荷峰值与碰撞速度、碰撞刚度成正比关系, 当碰撞速度越快、零部件刚度越大时, 产生的载荷峰值越高。接触冲击的作用时间较短, 在 0.01 ~ 0.05 s 之间, 属于高频顺势冲击。接触冲击主要作用于门锁端部、缓冲条、门框等部位^[4]。

2.3 外部冲击

外部冲击主要是由于电梯外部人员、物体等对层门系统产生的撞击, 属于非正常运行过程中的意外冲击, 其冲击强度具有不确定性^[5]。从外部冲击产生的原因来看: 一是人员错误操作, 如乘客等待电梯时, 用手脚或其他物体撞击层门; 二是货物搬运过程中出现的意外撞击, 如叉车、手推车撞击层门; 三是建筑施工、设备检修过程中产生的意外撞击, 如施工工具、检修设备碰撞层门等。从外部冲击的特性来看, 取决于撞击物体的质量、速度及撞击角度等。外部撞击主要作用于门扇表面、门框、门锁装置等。

2.4 冲击载荷特性对比分析

对比各类冲击载荷的差异, 方便后续故障机理处理, 关于不同撞击的特性对比统计如表 1 所示。

结合表 1 所示, 对比惯性冲击、接触冲击、外部冲击情况来看, 对于电梯运行稳定性危害最大的为外部冲击, 惯性冲击及接触冲击危害处于中等状态。对此, 在电梯中分式层门系统受冲击故障处置时, 应对外部冲击问题加强控制, 保证电梯运行的安全性、稳定性。

表1 不同冲击载荷特性对比统计表

冲击载荷类型	产生原因	峰值范围	作用时间	作用部位	危害程度
惯性冲击	门体启动加速、减速产生的惯性力	200 ~ 1 000 N	0.05 ~ 0.2 s	门扇、联动机构、导向机构、缓冲器	中等
接触冲击	零部件接触碰撞、传动间隙撞击	100 ~ 800 N	0.01 ~ 0.05 s	门扇端部、缓冲条、导向滑块、门锁	中等
外部冲击	人员、物体、施工设备撞击	< 500 N (轻微) ; 500 ~ 2 000 N (中等) ; > 2 000 N 严重	0.005 ~ 0.02 s	门扇表面、门框、门锁、门地坎	严重

3 电梯中分式层门系统受冲击故障机理应对策略分析

3.1 明确标准化安装规范，满足抗冲击运行要求

电梯中分式层门系统冲击故障的应对，需要从安装层面入手，严格遵循标准化安装规范，以提升抗冲击能力，保证电梯中分式层门系统运行的安全性、稳定性、可靠性。在安装过程中，门套立框与墙体采用膨胀螺栓与加固件双重固定方式，保证抗侧向冲击能力达标。门地坎安装时，水平度偏差 ≤ 0.3 mm/m，并与门扇之间的配合间隙控制在4~6 mm，减少门扇晃动与冲击。导柱及门机支架安装时，垂直度偏差 ≤ 0.4 mm/m，固定牢固，避免冲击导致的松动问题。在安装完成之后，对层门系统做好调试，优化门机运行参数，以保证门体启闭平稳性。

3.2 强化日常运维工作，延长层门系统使用寿命

电梯中分式层门系统受冲击故障的有效处理，应注重延长层面的使用寿命，建立常态化的运维机制，实现精准维护、及时处置的目标。在此过程中，注重建立起分级维护计划，注重加强日常巡检、月度检查与年度大修的结合。在日常巡检工作开展时，重点检查门扇是否存在变形、磨损、缓冲条老化、脱落问题，连接部位是否松动。月度检查工作开展时，重点在于检测导向滑块、挂轮组的磨损情况，门锁装置的锁紧性能，联动钢丝绳的张紧度与磨损情况等，并对磨损零件及时处置，保证系统运行稳定性。在开展年度大修工作时，则注重对层门系统进行彻底整改，并对门机驱动系统进行调试及维护，保证系统整体性能达标。

3.3 建立完善的监测预警体系，对冲击故障有效应对

电梯中分式层门系统冲击故障机理的应对，需要建立完善的监测预警体系，注重对冲击故障问题进行针对性把握。实际工作开展时，注重在层门系统关键部位安装检测设备，如门扇表面位置安装应变传感器，监测因冲击引发的门扇应变变化；导向机构与联动机

构位置安装振动传感器，监测冲击振动信号；门锁装置位置安装压力传感器，监测锁紧力变化情况；门机控制器位置增设冲击载荷监测模块，记录冲击发生的时间、载荷峰值参数信息等。通过做好数据的搜集、获取，构建冲击故障预警模型，并设定预警阈值。在数据监测时，若超过预警阈值后，系统发出报警信号，运维人员对电梯故障及时排查解决，以保证电梯运行安全性及稳定性。

4 结束语

针对电梯中分式层门系统受冲击故障机理的应对及解决，应把握电梯中分式层门系统故障产生的主要原因，从惯性冲击、接触冲击、外部冲击等各类因素引发的故障问题予以把握，并遵循“预防为先、源头管控、精准治理、长效维护”的理念，注重强化源头管控，提升安装规范，强化运营管理及监测预警工作，以保证电梯中分式层门系统运行的稳定性及可靠性，对电梯故障问题做好针对性处置，提升电梯运行的安全性及可靠性。通过建立全面、长效的应对机制，实现对电梯故障问题的系统化防护目标，有效地降低故障发生率。在未来发展过程中，针对电梯中分式层门系统受冲击故障问题解决时，应注重加强技术赋能，积极推进数字化、智能化技术的有效应用，建立智能化防控系统，以保证电梯运行的安全性、可靠性。

参考文献:

- [1] 袁锐,范奉和,林景全.基于磁簧开关的电梯层门开锁监测系统[J].中国电梯,2025,36(09):12-14.
- [2] 刘鑫,滕荣蓉,王光楚,等.一种电梯噪声测试项目开发[J].中国电梯,2025,36(07):49-51.
- [3] 冯军,戴俊豪,丁奇,等.基于故障树的电梯门系统可靠性分析[J].产品可靠性报告,2024(12):119-120.
- [4] 胡伟楠,杨克雷.基于Simulink软件的电梯门机控制系统模型的建构及其应用[J].中国电梯,2024,35(07):5-9.
- [5] 黄杰勋.电梯门系统的结构及选型分析[J].中国机械,2023(22):60-63.

淤浆法聚乙烯装置排放气处理工艺选择分析

范梦笔

(中石化英力士(天津)石化有限公司, 天津 300450)

摘要 本文关注淤浆法聚乙烯装置排放气处理工艺相关内容。首先对聚乙烯的生产状况以及排放气的具体情况加以阐述, 同时深入分析排放气的来源、组分, 以及其理化参数所呈现出的特性和相应的处理需求。其次剖析主流的资源回收型工艺和末端治理型工艺的各自原理、特点以及适用场景, 并且构建一套评价体系, 以对各类工艺展开综合性的评价。最终提出工艺选择应当遵循的原则以及可采取的优化路径, 旨在为相关工艺的选择提供参考。

关键词 淤浆法聚乙烯; 排放气; 处理工艺

中图分类号: TQ32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.038

0 引言

作为合成树脂家族中的重要一员, 聚乙烯不仅产量可观, 应用范围也极为广泛, 在包装、建筑、农业等领域都发挥着重要作用。淤浆法聚乙烯工艺有着技术较为成熟这一特点, 而且其产品所呈现出的密度范围也相对宽泛, 该工艺在分子量分布方面也较容易实现调控, 凭借这些优势, 其在高密度聚乙烯的生产环节中占据着极为关键的地位。但是, 聚乙烯在生产期间会产生数量颇多的排放气, 这些排放气主要源自聚合反应器所产生的尾气、闪蒸罐进行排气时的情况、脱气仓实施排气的相关环节以及溶剂回收单元出现的尾气等诸多方面。随着大气污染治理工作的不断向前推进, 石油化工行业针对挥发性有机物的排放管控举措日益严格, 这也对淤浆法聚乙烯装置排放气的处理工作提出了更高的要求。当下有一部分装置采取的是直接将其排放出去或者仅仅通过简单的焚烧等方式来处理, 如此一来便造成了资源的极大浪费并且还引发了大气污染问题。所以, 针对其排放气处理工艺展开更为细致的研究, 在理论层面以及工程实践层面都有着十分重要的意义。

1 淤浆法聚乙烯装置排放气特性分析

1.1 排放气来源

排放气在聚乙烯生产的诸多关键环节均有贯穿体现。就聚合反应器而言, 其尾气当中含有未充分完成反应的单体以及数量较少的副产物。闪蒸罐所排放的气体则是在物料进行闪蒸的时候, 其中部分轻组分发生气化而产生的。脱气仓排放出来的气体, 是聚乙烯

产品在脱气期间所释放出的吸附气体以及残留的单体。溶剂回收单元的尾气, 是溶剂回收过程中开展蒸馏、萃取等一系列操作时所产生的气体^[1]。各个不同环节所排放出的气体, 在组分方面以及工况上都存在较大的差异, 这无疑给后续处理工艺的选择带来了不小的挑战。

1.2 排放气组分特性

排放气所含组分颇为复杂, 其中包含了尚未发生反应的单体, 这些单体有着较高的回收利用价值; 另外还有惰性气体, 如氮气、甲烷等, 它们在相关操作中起到稀释以及保护的作用, 通常不会参与到化学反应当中; 溶剂蒸汽也在排放气里有所体现, 这些在生产环节会有一部分出现挥发的情况并进入排放气之中。

1.3 排放气理化参数特性

排放气的各项理化参数如压力、温度以及流量等因素, 会对处理工艺的选型产生影响。不同来源的排放气其压力存在较大差异, 其中聚合反应器尾气的压力有可能处于较高的状态, 而脱气仓排气的压力相对来说则比较低。温度一般是在 20 ~ 80 °C 这个区间范围之内, 并且会随着生产工况的不同而出现波动的情况。

1.4 排放气处理核心需求与约束

处理核心需求涵盖环保达标、资源回收、安全可靠以及节能高效等方面。环保达标意味着经处理后的排放气体污染物指标要契合环保标准, 以此来削减大气污染。资源回收在于回收那些具有价值的组分, 提升资源的利用率, 进而降低成本。安全可靠则要求处

作者简介: 范梦笔(1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高密度聚乙烯。

理工艺不能对生产设备以及人员构成危害。节能高效是要降低能耗,提高能源的利用效率^[2]。

2 主流处理工艺分析

2.1 资源回收型工艺

2.1.1 压缩冷凝工艺

其原理在于借助气体组分所存在的饱和蒸汽压方面的差异,凭借压缩设备来提升排放气的压力,进而使得饱和蒸汽压得以降低,随后运用冷凝冷却装置促使可凝组分发生液化现象,如此便能够达成与惰性气体相分离的目的。此工艺自身较为成熟,操作起来也相对简单,而且所需的投资成本并不高,它能够适用于各种不同规模的装置,并且特别契合高浓度可凝组分排放气的处理需求。

2.1.2 膜分离工艺

依靠不同气体组分在膜材料中的渗透速率存在差异这一特性来达成选择性的分离效果。该方法有着分离效率颇为可观、能耗相对较低、设备所占的地面面积不大、操作起来较为灵活以及能够较好地抵御各种波动等诸多优点,可有效地将有价值的组分分离出来,实现资源的回收与再利用,并且其对环境所产生的影响也相对较小。但是它也有着投资成本偏高的缺点,而且膜材料很容易受到污染,对于高浓度溶剂蒸汽的耐受能力也比较差,所以更适宜在大型装置当中用于开展深度回收方面的处理工作,尤其适合用来处理那种低浓度且处于低压力状态下的排放气体^[3]。

2.1.3 深冷分离工艺

利用深度冷却的方式把排放气的温度降到非常低的水平,如此一来,其中的可凝组分便会液化,进而和惰性气体实现分离,其分离的效率相当高,能够实现单体的深度回收,并且所回收的单体纯度也很高。然而,它的投资成本极其高昂,需配备复杂的制冷设备以及低温储存设施,能耗颇高,运行成本也很大,操作起来难度颇大,对操作人员的技术要求很高,抗气量波动的能力较差。

2.1.4 吸附分离工艺

利用吸附剂针对排放气中可凝组分所具备的选择性吸附特性,实现和惰性气体的分离效果。其投资成本处于中等水平,设备结构相对简单,操作起来也比较灵活,能够对低浓度以及低压力的排放气加以处理。但是吸附剂存在吸附容量方面的限制,这就需要频繁地去切换吸附以及脱附工序,如此一来,运行成本就会比较高。

2.2 末端治理型工艺

2.2.1 焚烧处理工艺

把排放气送进焚烧炉,在高温条件下让其其中的可燃组分和氧气能够充分地燃烧起来,进而分解成没有危害的物质,如二氧化碳以及水这类物质。这种工艺是比较成熟的,其处理效果也比较稳定,可以将可燃组分以及有害杂质分解掉,而且环保方面的达标率是比较高的^[4]。但是它无法实现资源的回收,这就造成了资源的浪费情况。另外,它的能耗是比较高的,需要耗费大量的燃料来维持高温焚烧的状态。

2.2.2 催化氧化工艺

借助催化剂的作用,能够使排放气中可燃组分的燃烧温度得以降低,进而让其可以和氧气充分地发生氧化分解反应,最终转化为无害物质。相比于焚烧处理工艺来讲,它在能耗方面表现得比较低,处理效率也相对较高,燃烧过程较为平稳,所面临的安全风险也比较低,而且产生的二次污染物数量较少。

3 评价体系构建

3.1 评价体系构建原则

遵循全面性、针对性、可操作性和动态性原则。其中,全面性这一原则要求将处理工艺的各个方面都涵盖进去,如处理效率、环保性能、能耗成本、资源回收、操作安全以及设备寿命这些核心维度都要涉及;针对性则是要依据排放气的特点以及处理需求来设计,把重点指标凸显出来;可操作性要求评价指标能够比较容易地被量化,而且相关数据也比较容易获取到,同时评价方法得是简单的且易于施行的;动态性是考虑到处理工艺会随着技术不断进步、环保政策发生变化等诸多因素而不断发展改进,所以评价体系也应当灵活地做出调整和完善。

3.2 评价指标与权重确定

评价体系涵盖了处理效率、环保性能、能耗成本、资源回收、操作安全以及设备寿命这六大核心维度。运用层次分析法来确定各个指标所对应的权重,具体是借助专家打分这一方式,同时通过建立判断矩阵等手段,全面且综合地考量各项指标彼此之间相对的重要程度,进而对权重值展开相应的计算。其中,处理效率指标对有价值组分的回收率以及污染物去除率加以考察;环保性能指标主要关注经过处理之后排放的气体是否能够契合环保标准的相关要求。另外,还要留意其对于环境所产生的影响程度。能耗成本指标包含了能源方面的消耗情况以及运行时的各项成本开支;

资源回收指标用来衡量哪些有价值资源得以回收并加以利用的具体程度^[5]。

3.3 各类工艺综合评价

将 6 类工艺予以综合评分,依据各个评价指标所具有的权重以及各类工艺在每个指标上所获得的得分来计算综合得分,最终得出的结果显示,膜分离工艺的综合得分是最高的,其拥有的高效、节能、环保等诸多优势让它成为对于资源回收有着较高要求且环保标准极为严格的大型装置的首选工艺。深冷分离工艺在处理效率以及资源回收效果方面表现得最为出色,然而它的能耗以及投资成本都相对较高,所以比较适合那种对于单体纯度要求极其严格的大型装置。吸附分离工艺的操作较为灵活,投资额度处于中等水平,能够作为中小型装置对微量可凝组分进行回收的工艺,或者作为大型装置末端的深度处理工艺。

4 工艺选择原则与优化路径

4.1 工艺选择原则

遵循与排放气工况相契合的原则,把环保达标放在首位来考量,力求资源回收能够达到最大化的程度,确保投资以及运行成本相互匹配,并且保证安全可靠以及操作是可行的等一系列原则。其中,贴合排放气工况这一原则,需要依据排放气的来源情况、所含组分状况以及理化参数等相关特性来挑选适宜的处理工艺。环保达标优先这一原则在于优先思考经过处理之后的排放气是否能够符合环保方面的标准要求。资源回收最大化原则,要求尽最大可能地去回收那些具有价值的组分。

4.2 工艺优化路径

4.2.1 采用联合工艺

采用“压缩冷凝+膜分离”以及“膜分离+深冷分离”这类联合工艺,以此来充分发挥各种不同工艺所具备的优势,同时在效率方面和成本方面都予以兼顾。例如:“压缩冷凝+膜分离”这种联合工艺,其先是针对排放气展开初步的处理工作,借此去除掉其中大部分属于高沸点的组分,进而使得后续的处理负荷得以降低,之后再进一步开展深度回收方面的处理操作,从而促使资源回收率以及处理效率都能够得到提升。

4.2.2 优化工艺参数

通过优化压缩机压力、冷凝温度、操作压力以及温度等一系列关键的操作参数,进而促使处理效率得以提升,并且节能效果也能获得改善。例如:对压缩

机压力加以调整,能够使冷凝效果得以提高,同时让可凝组分的回收率有所增加。对冷凝温度予以优化处理,能够在一定程度上降低能耗,而且还能确保可凝组分实现较为充分的液化状态。

4.2.3 研发与应用新型技术

研发具备高性能且成本较低的膜材料、高效能的吸附剂以及新型的催化氧化催化剂等,以此来促使投资成本以及运行成本得以降低。例如:研发具有高选择性并且渗透性好的膜材料,能够提升膜分离工艺在分离方面的效率,同时也能让资源回收率有所提高,进而使得膜材料的成本得以降低。又如:开发高效的吸附剂,能让吸附分离工艺在吸附容量方面以及处理效率上都得到提升,同时也能够减少吸附剂的使用量,并且降低其更换的频次。

4.2.4 加强工艺集成与资源循环利用

把排放气处理方面的相关工艺同装置生产工艺加以深度融合,可实现资源循环利用以及能量梯级利用,促使装置的整体能效以及经济效益都得以提升。

5 结束语

本文依据淤浆法聚乙烯装置排放气的来源状况、组构成以及理化特性等相关情况,全面且细致地剖析了主流处理工艺的各项技术特点及其适用的具体场景,并在此基础上构建一套较为科学合理的评价体系,进而提出了有关工艺选择的原则以及优化的相关路径。经过研究可以发现,膜分离工艺凭借其高效性、节能性以及环保性等诸多优势,已成为大型装置在处理排放气方面的优选工艺。

参考文献:

- [1] 李泽博,曹云峰,王鹏,等. Hostalen 工艺淤浆法高密度聚乙烯装置己烷精制系统堵塞原因分析[J]. 石油化工, 2021, 50(08):802-807.
- [2] 贺林博,廖祖维,黄正梁,等. 双膨胀自深冷分离技术在环管淤浆法聚乙烯装置尾气回收中的应用[J]. 化学反应工程与工艺, 2020, 36(04):379-384.
- [3] 罗睿,陈永强. 膜分离和深冷分离组合技术在高密度聚乙烯装置的应用及优化[J]. 广州化工, 2018, 46(17):114-117.
- [4] 杨味. 淤浆法聚乙烯聚合系统堵塞分析及措施[J]. 石化技术, 2025, 32(11):53-55.
- [5] 张勇,柴立平. 聚乙烯淤浆输送泵流场数值模拟研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025, 43(09):54-57.

化工环境下电力电缆绝缘老化机理及检测诊断技术研究

李俊梅

(中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司党校(培训中心), 山东 淄博 255400)

摘要 化工生产环境中存在着大量的腐蚀性介质、高低温交替、机械应力和强电磁干扰等, 这些都会加快电缆绝缘层的老化速度, 造成绝缘性能变差、局部放电或者击穿故障的发生, 给化工生产的连续性和人身、设备的安全带来很大的隐患。本文从化工环境特殊性出发, 对电缆绝缘电、热、化学、机械和多因素耦合老化机理进行系统的分析, 整理出传统的、新型的以及在线监测智能诊断技术的应用原理和应用场景, 并且研究检测技术在化工环境中的适应性改进方法, 以期对电缆绝缘状态评价、故障预知和运维改善提供参考, 助力企业削减故障出现次数。

关键词 化工环境; 电力电缆; 绝缘老化; 老化机理; 检测诊断技术

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.039

0 引言

化工企业是国民经济的支柱产业, 其生产过程存在连续性高、工况繁杂以及介质腐蚀性高的特点。电力电缆是企业设备、控制系统等用电的输送线, 运行状况好坏直接影响到整个生产系统的正常运转。绝缘老化属于缓慢的不可逆过程, 刚开始时只是绝缘电阻变小、介电损耗增加, 后来才会有绝缘层开裂、击穿的情况发生, 进而引发电缆短路或者漏电现象, 导致生产被中断并带来火灾或爆炸的风险。本文对化工环境下电力电缆绝缘老化机理进行分析, 整理出检测技术要点, 提出适应性改进方案, 为电缆的安全运维提供技术支持。

1 化工环境下电力电缆绝缘老化机理及检测诊断的重要性

化工企业的生产连续性需要电力系统的稳定运行, 电力电缆是主要的传输部件, 它的绝缘情况直接影响到运行的安全。化工环境的复杂性, 使得电缆绝缘的老化速度大大加快, 导致电缆绝缘故障的发生率比一般的工业环境要高得多。在化工企业的电力系统当中, 超过六成的故障是由电缆绝缘老化引起的, 造成生产被迫中断的同时也可能会引发腐蚀性介质泄漏以及电气火灾这类次生危害事件, 并对人员的生命安全以及财物造成损害。对化工环境下电力电缆绝缘老化机理进行深入研究, 可以使得技术人员清楚地认识到电力

电缆绝缘老化的原因、规律以及影响因素, 从而给电力电缆绝缘老化预防和控制提供理论基础。通过对机理的解析, 技术人员可以对电缆进行选择、敷设方式加以改善、运维措施予以制订, 从而减缓老化速度、提升电缆使用寿命。精确的检测诊断技术可以对老化过程进行及时监控, 并且能够快速识别出存在的隐患问题, 从而达成对可能出现的故障做出准确预判的目的, 进而采取有效的措施加以处理, 防止事故的发生。化工生产的关键环节对于电力供应的可靠程度要求非常高, 一旦发生停电事故, 就会造成无法挽回的巨大损失。电缆绝缘老化故障有隐蔽性、突然性的特点, 传统的手工巡检不能及时发现早期的缺陷。对老化机理进行研究并应用于检测技术的使用上, 可以促使运维方式由原来的“事后维修”变为现在的“事前预警、状态检修”, 从而减少运维成本并提高供电的稳定性。另外, 还可以为化工企业的智能化、绿色化转型和智能运维体系创建提供支持。

2 化工环境下电力电缆绝缘老化机理

2.1 电老化机制

电老化是电缆绝缘老化的主要因素, 本质就是电场作用下绝缘材料的电气性能劣化的过程。在化工环境中, 电缆一直处在额定电压之下, 由于敷设不合理、接头制作不合格或者绝缘层有微小的缺陷, 容易产生局部电场集中现象, 从而加快老化速度。局部放电属

作者简介: 李俊梅(1980-), 女, 本科, 讲师, 研究方向: 电力系统及其自动化。

于电老化的主要体现和主要因素。绝缘层内存在气隙、杂质等缺陷的时候,局部的电场强度会比其他地方高得多,到达气体击穿场强后就会产生局部放电。放电时产生的高能电子撞击绝缘分子,使分子链遭到破坏,导致介电性能下降。另外,产生的臭氧、氮氧化物等活性物质还会继续氧化绝缘材料,从而加快老化进程。化工环境中腐蚀性气体、水分会渗透到绝缘层里,使材料的击穿场强降低,局部放电的可能性增大。

2.2 热老化机制

热老化是化工环境电缆绝缘的老化要素之一,主要是由于电缆运行产生的热量不能迅速散发出去或者环境温度过高,造成绝缘材料发生热分解和氧化反应,进而影响到它的物理以及化学性质。化工车间高温设备、蒸汽管道较多,环境温度较高,再加上电缆敷设密集、散热条件不好,使得热老化更加严重。电缆在运行中,由于导体通流会产生焦耳热,将热量传给绝缘层,使绝缘层的温度上升。当温度超过允许工作温度的时候,绝缘材料分子链会发生热裂解,大分子分解成小分子,使机械强度降低、弹性变差,造成变硬、变脆、开裂。高温加快氧化反应,产生羰基、羟基等极性基团,使介电性能变差,介损增大,从而加快老化。化工环境温度的变化也会加重热老化,一些工艺中升降温交替造成绝缘层热胀冷缩,产生热应力而产生微小裂纹,从而成为腐蚀性介质和水分渗透的途径。另外,电缆接头的接触电阻大,运行中发热多,绝缘层热老化速度比其他地方要快得多,是故障易发点。

2.3 化学老化机制

化学老化是化工环境下的电缆绝缘特有的老化类型,它是指绝缘材料同腐蚀性介质发生化学反应而造成分子结构被破坏,并使性能变差的过程。化工生产中产生的酸碱溶液、有机溶剂、腐蚀性气体等会通过绝缘层的裂纹、接头缝隙渗入绝缘材料里,并和绝缘材料发生化学反应。不同的腐蚀性介质有不同的破坏机理,酸性介质会和绝缘材料中的酯键、醚键发生水解反应,使分子链断裂,机械性能和介电性能都会受到影响,碱性介质会使氧化加快,造成绝缘层变色、发黏、脱落,有机溶剂会溶解增塑剂,使绝缘材料失去弹性而变脆,从而影响到绝缘性能。交联聚乙烯(XLPE)电缆接触有机溶剂之后会发生溶胀,分子间的距离变大,介电常数上升,绝缘电阻降低,最后会失效。

2.4 机械老化机制

机械老化指的是绝缘层在长时间的机械应力影响之下出现物理性损害以及性能变差的情况。化工车间

机械设备繁杂,运行过程中产生的振动传到电缆上,再加上敷设过程中的拉伸、弯曲、挤压等应力作用,都会造成绝缘层受损。敷设时拉伸强度太大,会使得绝缘层分子链断裂产生裂纹,弯曲半径太小会造成应力集中裂纹扩展。设备振动给电缆带来不断的机械冲击,使绝缘层产生疲劳老化、开裂剥落;车间的重物撞击、施工破坏等也会造成机械上的缺陷。机械裂纹是腐蚀性介质、水分、氧气的渗透途径,加快了化学、热、电的老化速度。机械损伤会降低绝缘层的机械强度和击穿场强,增加故障的概率,和其他的老化方式一起使电缆寿命变短。

2.5 多因素耦合老化

化工环境下的电缆绝缘老化是由电、热、化学、机械等许多因素共同起作用而引起的,这些因素的相互影响会产生协同效应,从而使老化速度远远大于单一因素的作用。协同效应主要表现在两个方面:一是老化给另一种老化创造了条件,比如机械裂纹加快化学介质渗透,化学老化降低击穿场强加重电老化,热老化减小机械强度加大损伤概率。二是多种因素一起破坏分子结构,高温加快化学反应和局部放电,造成绝缘性能迅速下降。不同的化工场景耦合老化模式也不同,高温、腐蚀性气体环境主要为热、化学、电耦合;机械设备密集、振动频繁的车间主要是机械、热、化学耦合。确定耦合老化机理,就是对绝缘老化进行准确的评价和控制^[1]。

3 化工环境下电力电缆绝缘检测与诊断技术

3.1 传统检测技术

传统的检测技术为化工企业的主流使用技术,主要有绝缘电阻试验、介损试验、直流耐压试验等。其优点在于操作简单、成本低、设备体积小。绝缘电阻试验属于基本检测手段,利用兆欧表对绝缘层施加直流电压并测得电阻值来评价其性能,比较不同时间段的数据可以判定老化情况。该方法只能反映整体的绝缘性能,不能发现局部的缺陷,并且受到环境温湿度的影响,在化工高湿、高腐蚀的环境下准确性会受到影响。介损试验是用于测定介质的损耗因数来评价介电性能的方法,损耗因数越大,说明介质的老化程度越高,可以检测出早期局部老化的部分以及受潮的情况,但是由于化工环境中存在较强的电磁干扰而信号不稳定,从而产生误差。直流耐压测试是用直流电压来检验耐压性能,可以直接发现击穿缺陷,但是属于破坏性的试验,不能进行多次检测,并且需要具有良好的防腐防潮性能的设备^[2]。

3.2 新型检测技术

新型检测技术克服了传统技术的不足之处,具有检测精度高、非破坏性、可以检测局部缺陷的特点,已经被广泛地应用到化工环境中,主要有局部放电、红外热成像、超声波检测等。局部放电检测属于早期老化主要检测手段,依靠捕捉到的放电产生时所发出的电、超声波或者光信号来判定放电强度、位置以及种类,并以此来评价老化状况。常用的超高频、特高频等检测方法要依靠改进的传感器,并且使用抗干扰算法来克服化工环境下电磁干扰以及介质腐蚀的困难。该石化公司使用特高频技术,对电缆接头早期放电缺陷进行了检测,并且防止了由于放电而造成的击穿故障的发生。红外热成像技术用热像仪来观测电缆表面的温度分布,依靠温度异常找到老化和缺陷的位置,具备非接触式、检测速度快、可以对大面积进行检测的特点,适合于车间快速巡检。使用抗干扰镜头和图像处理算法来克服高温蒸汽、烟雾给成像带来的影响。超声波检测是用超声波发射器向被测物发出超声波,然后接收反射回来的信号来判断绝缘层内有无裂纹、气隙等缺陷的一种方法,主要用于对接头、终端等重要部位进行检测。需要使用防腐型传感器来解决化工介质对设备造成的腐蚀问题^[3]。

3.3 在线监测与智能诊断技术

传统的和新型的技术都是离线检测的,不能对绝缘进行实时监测,不能满足化工企业的实时运维要求。在线监测和智能诊断技术依靠在设备上安装各种传感器来获取数据,并用大数据、人工智能进行实时评价和预警,属于运维的发展方向。在线监测系统是由传感器、数据采集、传输和智能诊断平台组成的。传感器采集局部放电、温度、绝缘电阻等参数,采集单元处理转换信号,传输单元用光纤或者无线把数据传到平台上,平台根据诊断模型和历史数据来评价绝缘状况并发出预警。智能诊断技术依靠大数据以及人工智能算法来剖析绝缘数据,从而创建起老化预估模型,可以准确地预知老化走向和剩余寿命。在该化工园区建立的在线监测及智能诊断系统中,采用对局部放电进行监测的同时配合温度监控的方式,并借助人工智能的预警手段来达到减少电缆故障的目的,在整个过程中实现了电缆故障发生频率下降到原来的30%以下的效果。在线监测和智能诊断技术可以对绝缘状态进行实时的监测和准确的预警,提高运维效率,但是需要解决化工环境中高温、高腐蚀、强电磁干扰等问题来保证传感器和传输单元正常工作^[4]。

3.4 化工环境适应性改进技术

化工环境中的高温、高腐蚀、强电磁干扰对检测技术提出了更高的要求。需做防腐、抗干扰、耐高温处理,保证检测准确性及可靠性。防腐改善对传感器、采集单元等设备用氟塑料、不锈钢等防腐材料做外壳,密封内部的电子元件,防止介质渗透。把局部放电传感器外壳做成氟塑料密封圈,密封等级达到IP68级,可以抗腐蚀性介质。抗干扰改善依靠优化电路设计,使用金属屏蔽罩等屏蔽手段来削减电磁干扰,联合小波去噪,自适应滤波这些算法对信号实施处理,从而加强稳定状况。介损试验使用小波去噪法可以去除设备的电磁干扰,提高测试准确度。耐高温改进就是选择耐高温的电子元件和材料,并对散热结构进行优化,保证设备正常工作。在线监测采集单元使用耐高温芯片,并且用散热片和风扇组合来散热,在-40℃到85℃的环境下可以正常工作。另外,还要考虑化工生产的连续性,对检测过程进行优化,使用非接触式检测手段来保证生产不受影响,并且创建检测数据的标准化管理体系,实现数据共享和分析的目的,从而给运维决策提供全方位的支持^[5]。

4 结束语

化工环境的复杂性,使得电缆绝缘的老化表现出多种因素相互作用、老化速度快、故障不易被发现等特点,对安全生产和供电可靠造成隐患。未来,随着化工企业的智能化转型,电缆绝缘检测技术将向着更加准确的、智能化的、高效的方向发展。可以进一步研究耦合老化定量评价的方法,研发适合复杂工况的新型检测技术,依托数字孪生、物联网构建全生命周期的运维体系,并推进技术标准化的建设工作,从而为电缆的安全运行提供更为强大的支撑力量,推动化工行业的绿色安全高效发展。

参考文献:

- [1] 吴娟. 化工行业低压电动机电缆与断路器选型研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11): 120-122.
- [2] 王娟. 石油化工行业单芯电缆屏蔽层电压计算及接地方式综合研究[J]. 电气应用, 2025, 44(11): 147-152.
- [3] 马欣, 武传姣, 李树正. 石油化工企业电力电缆敷设技术分析[J]. 化工管理, 2025(32): 149-152.
- [4] 王娟. 石油化工行业单芯电缆屏蔽层电压计算及接地方式综合研究[J]. 电力与能源, 2025, 46(05): 497-501.
- [5] 祝玉政, 赵文迪, 于新江. 基于绿色化工工艺的电缆生产尾气处理研究[J]. 四川化工, 2025, 28(04): 52-55.

工业废溶剂资源化利用的化学萃取精制工艺及分离效能研究

高 鹏, 王一丹, 胡 聪

(济南瑞东实业有限公司, 山东 济南 250101)

摘 要 为实现工业废溶剂高效资源化回收, 解决传统工艺分离效率低、回收率差、易产生二次污染等问题, 本文以丙酮-乙酸乙酯混合废溶剂为对象, 筛选最优萃取体系, 通过单因素与正交实验确定工艺参数, 结合气相色谱法及可靠性实验验证效果, 并与传统蒸馏工艺对比。结果表明, 最优萃取体系为磷酸三丁酯(TBP)-正己烷(3:7, 体积比), 最优工艺参数为萃取剂用量 20 mL、温度 30 °C、时间 20 min、相比 1:1、pH 值 6.0, 此时丙酮、乙酸乙酯萃取率分别达 98.72%、97.85%, 精制后纯度均高于 99.2%, RSD 小于 2.0%; 与传统蒸馏工艺相比, 溶剂回收率提升 12.4%~15.7%, 能耗降低 30% 以上且无二次污染。

关键词 工业废溶剂; 资源化利用; 化学萃取; 精制工艺; 分离效能

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.040

0 引言

工业废溶剂主要来源于化工、制药、电子、涂装等行业的生产过程, 多为混合溶剂体系, 含有丙酮、乙酸乙酯、甲醇、甲苯等多种有机溶剂, 具有挥发性强、毒性大、难降解等特点, 若直接排放会造成严重的环境污染, 同时浪费宝贵的溶剂资源。化学萃取作为一种高效的分离提纯技术, 凭借操作简便、分离效率高、能耗低、无二次污染等优势, 已广泛应用于有机混合物的分离回收领域。其核心原理是利用不同物质在萃取剂与原料液中溶解度的差异, 实现目标组分与杂质的分离, 进而通过反萃取、精馏等后续工序获得高纯度溶剂, 实现资源化利用。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

1. 实验材料。实验所用工业废溶剂样品取自某化工企业涂装废水处理环节, 经气相色谱检测, 主要组分及含量为: 丙酮 42.3%、乙酸乙酯 38.7%、水 17.2%、少量甲苯(1.8%)及杂质。实验试剂包括: 磷酸三丁酯(TBP, 分析纯)、二(2-乙基己基)磷酸(P204, 分析纯)、三辛胺(TOA, 分析纯)、正己烷(分析纯)、环己烷(分析纯)、无水乙醇(分析纯)、盐酸(分析纯)、氢氧化钠(分析纯), 均购自国药集团化学试剂有限公司; 实验用水为超纯水(电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)^[1]。

2. 实验仪器。实验所用仪器包括: 气相色谱仪(型号 GC-9790, 浙江福立分析仪器股份有限公司), 配备氢火焰离子化检测器(FID); 数显恒温水浴锅(型号 HH-S4, 金坛区西城新瑞仪器厂); 高速离心机(型号 TGL-16G, 上海安亭科学仪器厂); 电子天平(型号 FA2004, 精度 0.1 mg, 上海精密科学仪器有限公司); pH 计(型号 PHS-3C, 上海雷磁仪器厂); 磁力搅拌器(型号 HJ-3, 常州荣华仪器制造有限公司); 移液管(10 mL、25 mL)、容量瓶(50 mL、100 mL)等玻璃器皿, 所有仪器经校准合格后使用。

1.2 实验方法

1. 萃取体系筛选。选取 TBP、P204、TOA 三种常用萃取剂, 分别以正己烷、环己烷为稀释剂, 配制不同体积比的萃取体系(萃取剂: 稀释剂=1:9、2:8、3:7、4:6、5:5)。准确量取 20 mL 工业废溶剂样品置于分液漏斗中, 加入 10 mL 不同萃取体系, 在室温(25 °C)、搅拌速度 300 r/min 条件下萃取 15 min, 静置分层后, 取有机相, 采用气相色谱法测定丙酮、乙酸乙酯的萃取率, 筛选出萃取效果最优的萃取剂、稀释剂及二者体积比^[2]。

2. 工艺参数优化实验。以筛选出的最优萃取体系为基础, 采用单因素实验法, 分别考察萃取剂用量(10 mL、15 mL、20 mL、25 mL、30 mL)、萃取温度(20 °C、25 °C、30 °C、35 °C、40 °C)、萃取时间(10 min、15 min、

作者简介: 高鹏(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化学工程。

20 min、25 min、30 min)、相比(萃取剂体积:废溶剂体积=1:2、1:1、2:1、3:1、4:1)、pH值(4.0、5.0、6.0、7.0、8.0)对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响,确定各单因素的最优水平。

在单因素实验基础上,选取萃取剂用量、萃取温度、萃取时间、相比4个影响显著的因素,各选取3个水平,设计L₉(3⁴)正交实验,进一步优化工艺参数,确定最优工艺组合,以实现萃取率最大化。

3. 分离精制与检测方法。将优化后的萃取体系与工业废溶剂按最优工艺参数混合,经磁力搅拌、静置分层后,收集有机相(含目标溶剂与萃取剂);向有机相中加入15 mL超纯水,在30 °C条件下反萃取10 min,静置分层后,收集水相,经蒸馏处理获得高纯度丙酮、乙酸乙酯;有机相(萃取剂)回收后循环使用。采用气相色谱法测定废溶剂、萃取后有机相、精制后溶剂中丙酮、乙酸乙酯的含量,色谱条件优化如下:毛细管柱(SE-30, 30 m×0.32 mm×0.5 μm);柱温程序:初始温度60 °C,保持2 min,以5 °C/min升温至120 °C,保持3 min;检测器温度250 °C,进样口温度200 °C;载气为氮气,流速1.0 mL/min;进样量1 μL,分流比10:1。

4. 工艺可靠性验证。按照最优工艺参数,对同一工业废溶剂样品进行6次平行实验,计算丙酮、乙酸乙酯萃取率、回收率的相对标准偏差(RSD),考察工艺的精密性;将萃取剂循环使用5次,测定每次循环的萃取率,考察工艺的稳定性;同时,选取3批不同批次的工业废溶剂样品,按最优工艺处理,验证工艺的适用性。

5. 与传统蒸馏工艺的对比实验。选取同一批工业废溶剂样品,分别采用优化后的化学萃取精制工艺与传统蒸馏工艺进行处理,对比两种工艺的溶剂萃取率、回收率、纯度、能耗及处理周期,评价化学萃取精制工艺的优越性。

1.3 质量控制措施

实验过程中严格执行质量控制标准,每批样品均设置空白实验、平行实验和标准物质验证实验。空白实验用于扣除试剂空白对检测结果的影响,平行实验相对偏差需控制在5%以内;采用丙酮、乙酸乙酯标准品配制标准系列溶液,绘制标准曲线,相关系数R²需大于0.999,确保检测结果的准确性;定期对气相色谱仪、电子天平、pH计等仪器进行校准和维护,避免仪器误差对实验结果的影响;实验试剂均为分析纯,使用前进行纯度验证,确保试剂质量符合实验要求。

2 结果与讨论

2.1 萃取体系筛选结果

不同萃取体系对丙酮、乙酸乙酯的萃取效果存在显著差异,筛选结果表明:TBP作为萃取剂时,萃取效果明显优于P204和TOA,这是因为TBP对酮类、酯类有机溶剂具有较强的萃取能力,且与水相的分层效果良好,不易产生乳化现象;正己烷作为稀释剂时,萃取体系的稳定性优于环己烷,可有效降低萃取剂的黏度,提高萃取效率。当TBP与正己烷体积比为3:7时,萃取体系的萃取效果最佳,此时丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别达到95.32%、94.18%,显著高于其他体积比的萃取体系^[3]。因此,确定最优萃取体系为TBP-正己烷(体积比3:7)。

2.2 单因素实验结果与分析

1. 萃取剂用量的影响。固定萃取温度25 °C、萃取时间15 min、相比1:1、pH值6.0,考察萃取剂用量对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响。结果表明,当萃取剂用量从10 mL增加至20 mL时,丙酮、乙酸乙酯的萃取率显著上升,分别从82.15%、80.36%提升至97.86%、96.92%,主要原因是萃取剂用量增加,提供了更多的萃取位点,促进了目标组分从水相转移至有机相;当萃取剂用量超过20 mL时,萃取率无明显提升,反而会增加试剂消耗和后续反萃取的难度,提高处理成本。因此,确定萃取剂用量的最优水平为20 mL。

2. 萃取温度的影响。固定萃取剂用量20 mL、萃取时间15 min、相比1:1、pH值6.0,考察萃取温度对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响。结果显示,当萃取温度从20 °C升高至30 °C时,萃取率缓慢上升,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别从96.23%、95.17%提升至98.15%、97.24%,这是因为温度升高加快了分子扩散速度,促进了萃取反应的进行;当温度超过30 °C时,萃取率开始下降,主要原因是温度过高导致萃取剂的溶解度增加,部分萃取剂进入水相,降低了有机相的萃取能力,同时目标溶剂的挥发性增强,造成少量损失。因此,确定萃取温度的最优水平为30 °C。

3. 萃取时间的影响。固定萃取剂用量20 mL、萃取温度30 °C、相比1:1、pH值6.0,考察萃取时间对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响。结果表明,萃取时间为10 min时,萃取反应未达到平衡,目标组分未充分转移,萃取率较低;随着萃取时间延长,萃取率逐渐上升,当萃取时间达到20 min时,萃取反应达到平衡,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别达到98.67%、97.78%;继续延长萃取时间至25 min、30 min,萃取率无明显

变化,反而会增加实验耗时和能耗。因此,确定萃取时间的最优水平为 20 min。

4. 相比的影响。固定萃取剂用量 20 mL、萃取温度 30 °C、萃取时间 20 min、pH 值 6.0,考察相比对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响。结果显示,当相比从 1:2 增加至 1:1 时,萃取率显著上升,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别从 94.35%、93.26% 提升至 98.72%、97.85%;当相比超过 1:1 时,萃取率无明显提升,反而会增加萃取剂的用量,提高处理成本,同时增加后续反萃取的工作量。因此,确定相比的最优水平为 1:1。

5. pH 值的影响。固定萃取剂用量 20 mL、萃取温度 30 °C、萃取时间 20 min、相比 1:1,考察 pH 值对丙酮、乙酸乙酯萃取率的影响。结果表明, pH 值在 4.0 ~ 6.0 范围内,随着 pH 值升高,萃取率逐渐上升;当 pH 值为 6.0 时,萃取效果最佳,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别达到 98.72%、97.85%;当 pH 值超过 6.0 时,萃取率开始下降,主要原因是 pH 值过高,会导致萃取剂发生水解反应,降低萃取能力,同时水相的极性增强,不利于目标溶剂的转移。因此,确定 pH 值的最优水平为 6.0。

2.3 正交实验结果与分析

选取萃取剂用量(A)、萃取温度(B)、萃取时间(C)、相比(D) 4 个因素,各选取 3 个水平,设计 L₉(3⁴) 正交实验,正交实验因素与水平如表 1 所示,实验结果如表 1 所示。

表 1 萃取时间水平数据

因素	水平 1	水平 2	水平 3
A. 萃取剂用量 (mL)	15	20	25
B. 萃取温度 (°C)	25	30	35
C. 萃取时间 (min)	15	20	25
D. 相比	1:2	1:1	2:1

由正交实验结果可知,各因素对丙酮萃取率的影响程度依次为:萃取剂用量(A) > 相比(D) > 萃取温度(B) > 萃取时间(C);对乙酸乙酯萃取率的影响程度依次为:萃取剂用量(A) > 相比(D) > 萃取时间(C) > 萃取温度(B)。结合极差分析与单因素实验结果,确定最优工艺参数组合为 A2B2C2D2,即萃取剂用量 20 mL、萃取温度 30 °C、萃取时间 20 min、相比 1:1、pH 值 6.0,在此条件下,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别达到 98.72%、97.85%,与单因素实验结果一致,验证了工艺参数优化的合理性^[4]。

2.4 工艺可靠性验证结果

1. 精密度实验。按照最优工艺参数,对同一工业废溶剂样品进行 6 次平行实验,结果显示,丙酮萃取

率的平均值为 98.68%,RSD 为 1.23%;乙酸乙酯萃取率的平均值为 97.82%,RSD 为 1.35%;丙酮回收率的平均值为 97.36%,RSD 为 1.42%;乙酸乙酯回收率的平均值为 96.58%,RSD 为 1.57%。所有 RSD 均小于 2.0%,表明该化学萃取精制工艺精密度良好,检测结果稳定可靠。

2. 稳定性实验。将最优萃取体系(TBP-正己烷,体积比 3:7)循环使用 5 次,测定每次循环的丙酮、乙酸乙酯萃取率,结果显示,5 次循环后,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别为 97.95%、96.82%,与第一次萃取率相比,下降幅度均小于 1.0%,表明萃取剂循环使用性能良好,工艺稳定性强,可有效降低处理成本^[5]。

3. 适用性实验。选取 3 批不同批次的工业废溶剂样品,按最优工艺参数进行处理,结果显示,3 批样品中丙酮、乙酸乙酯的萃取率均在 97.5% 以上,回收率均在 96.0% 以上,精制后溶剂纯度均高于 99.2%,表明该工艺适用于不同批次的工业废溶剂处理,适用性较强。

3 结论

本文围绕工业废溶剂资源化利用,开展化学萃取精制工艺优化及分离效能研究,通过萃取体系筛选、单因素实验与正交实验,确定了最优工艺参数,验证了工艺的可靠性与优越性,得出以下结论:最优萃取体系为 TBP-正己烷(体积比 3:7),最优工艺参数为萃取剂用量 20 mL、萃取温度 30 °C、萃取时间 20 min、相比 1:1、pH 值 6.0;在此条件下,丙酮、乙酸乙酯的萃取率分别达到 98.72%、97.85%,精制后溶剂纯度均高于 99.2%,回收率分别为 97.36%、96.58%,工艺精密度和稳定性良好。与传统蒸馏工艺相比,该工艺具有溶剂回收率高、能耗低、无二次污染、操作简便等优势,可实现工业废溶剂的高值化回收。

参考文献:

- [1] 高慧娟,张佳奇,张乐乐,等.乙醇硫酸铵双水相体系萃取香椿籽总黄酮工艺优化及其抗氧化活性研究[J].中成药,2023,45(12):3879-3883.
- [2] 张鹏,王月娇,张莹莹,等.三烷基胺和磷酸三丁酯于盐酸介质中协同萃取铈(Ⅶ)研究[J].大连理工大学学报,2019,59(04):331-335.
- [3] 徐浩川,孙泽,于建国.磷酸三丁酯体系萃取分离磷酸中氟化物机理[J].华东理工大学学报:自然科学版,2020,46(05):589-597.
- [4] 勾明雷,牛青山.用 TBP 从 POX 工艺酸沉浓缩液中萃取分离 Mo、Re 的研究[J].现代化工,2019(03):152-155.
- [5] 张颖,李军,金央,等.磷酸三丁酯脱色活性炭热解再生研究[J].无机盐工业,2024,56(01):59-66.

无碱熔前处理技术在钨钼矿石多金属元素含量精准分析中的应用研究

刘俊涛

(洛阳豫鹭矿业有限责任公司, 河南 洛阳 471000)

摘要 本文针对钨钼矿石传统碱熔前处理技术存在的基体干扰强、流程烦琐、易引入污染、伴生元素易损失等核心问题,以矿石化学分析国家标准为基准,构建了以无碱熔分步酸溶消解为核心的钨钼矿石多金属元素全流程分析技术体系,明确了无碱熔前处理的关键参数控制边界,配套建立了适配钨、钼、铁、铜、钙、铅、锌等多元素含量区间的标准化分析方法,形成了覆盖全流程的质量控制体系。研究验证了无碱熔前处理技术可实现不同类型钨钼矿石的完全消解,多元素同步测定结果与标准碱熔法相对偏差 $\leq 2\%$,消解率 $\geq 99.5\%$,解决了传统方法中多元素无法同步精准分析的难点,可为钨钼矿石勘查、选冶生产提供高效、环保、精准的分析技术支撑。

关键词 无碱熔前处理;钨钼矿石;多金属元素;精准分析;化学分析

中图分类号:TD85

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.041

0 引言

钨钼矿石作为重要的战略矿产资源,其多金属元素含量的精准分析对资源高效开发、综合利用及产品质量管控具有关键支撑作用。本研究聚焦无碱熔前处理技术在钨钼矿石多金属元素含量精准分析中的核心应用问题,以钨矿石、钼矿石化学分析国家标准为合规基准,系统构建无碱熔前处理的核心技术体系,明确分步酸溶消解的关键参数与控制阈值,配套建立适配多元素含量区间的标准化分析方法,形成覆盖样品采集、制备、前处理、分析测定、数据处理、质量控制的全流程闭环技术路线。本研究核心范畴限定于钨钼矿石中钨、钼、铜、铅、锌、铁、钙等多金属元素的无碱熔前处理与精准分析,不涉及碱熔法、火试金法等其他前处理技术,不超出矿石化学分析国家标准的技术规范范畴。

1 钨钼矿石多元素分析全流程技术路线框架

本研究参照矿石关键元素化学分析的标准化技术路线逻辑,结合钨钼矿石的矿物学特性与无碱熔前处理的技术特征,构建全流程闭环分析技术路线,整体框架为:样品采集→样品制备→无碱熔前处理体系构建→配套分析方法选型→标准化分析测定→数据处理与结果计算→全流程质量控制→技术路线优化与改进。全路线各环节严格对标钨钼矿石化学分析国家标准,以无碱熔前处理为核心枢纽,实现样品消解与多元素同步释放,衔接适配的定量分析方法,通过全流程质

量控制消除系统误差与随机误差,形成可复现、可追溯、合规性强的分析技术体系,确保分析结果的精密度与准确度满足钨钼矿石勘查与生产的实际应用需求。

2 样品采集与制备环节标准化规范

2.1 样品采集规范

样品采集严格遵循随机、均匀、有代表性的核心原则,确保采集的样品可真实反映矿体整体的元素含量特征,所有操作完全按照《钨矿石、钼矿石化学分析方法》(GB/T 14352)、《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130)等国家标准与技术规定执行。取样部位需覆盖矿体的不同矿化带、不同品位区段、不同矿物类型,避免选择性取样;原始样品经现场破碎后,按四分法缩分,最终送检样品量不少于1 kg,确保缩分后样品的代表性符合规范要求;针对硫化矿型钨钼矿石,样品采集后需密封保存,避免氧化导致元素价态变化与含量损失^[1]。

2.2 样品制备规范

样品制备严格按照地质矿产实验室样品制备的国家标准执行,送检样品经颚式破碎、对辊破碎、圆盘研磨等工序逐级破碎缩分,最终样品全部通过200目标准筛,确保样品粒度均匀,消除粒度效应对消解效率与分析结果的影响。除分析方法有特殊规定外,所有样品在称量前需置于105~110℃的恒温烘箱中烘干2 h,烘干至恒重后立即转移至干燥器中,冷却至室

作者简介:刘俊涛(1995-),男,本科,助理工程师,研究方向:钨钼矿石。

温后进行称量,避免样品吸湿导致的称量误差,确保试样量的精准可控。

3 无碱熔前处理核心技术体系构建

3.1 无碱熔前处理技术原理

针对钨钼矿石中钨、钼主要以白钨矿、黑钨矿、辉钼矿等矿物形态存在,伴生铜、铅、锌、铁等硫化矿物与硅酸盐矿物的特征,无碱熔前处理技术采用分步混合酸溶体系替代传统过氧化钠、氢氧化钠高温碱熔体系^[2],通过不同酸体系的分步消解,依次分解硫化矿相、硅酸盐矿相与氧化矿相,破坏矿物晶格,实现钨、钼及伴生多金属元素的同步完全释放,同时避免碱熔过程中大量碱金属离子引入造成的基体干扰、坩埚污染,以及易挥发元素的高温损失,为多元素同步精准测定提供澄清、无沉淀的待测溶液体系。

3.2 分步酸溶消解体系与关键参数控制

针对不同类型钨钼矿石的矿物组成特征,构建三级分步混合酸溶消解体系,明确各环节的关键参数控制阈值,确保矿石样品完全消解。第一阶段为硫化矿相预消解,准确称取 0.1 000 ~ 0.5 000 g 制备好的试样,置于聚四氟乙烯消解坩埚中,加入 10 mL 盐酸—硝酸混合酸(体积比 3:1),加盖后置于控温电热板上,120 ~ 150 °C 低温消解 30 min,分解辉钼矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化矿物,避免硫化物高温爆溅导致的样品损失。第二阶段为硅酸盐与氧化矿相消解,预消解完成后,向坩埚中加入 8 mL 氢氟酸+5 mL 高氯酸,摇匀后置于电热板上,升温至 180 ~ 200 °C 继续消解,直至高氯酸白烟冒尽,彻底破坏硅酸盐矿物的硅氧晶格,释放包裹态的钨、钼及伴生金属元素,同时去除残留氢氟酸,避免其对后续容量法、分光光度法测定的干扰。第三阶段为待测液定容制备,消解完成后,取下坩埚冷却至室温,加入 10 mL 盐酸—水溶液(体积比 1:1),置于电热板上 100 °C 温热溶解可溶性盐类,确保钨酸、钼酸完全溶解无析出,冷却后转移至 100 mL 容量瓶中,用超纯水定容至刻度,摇匀后得到澄清待测溶液,同步制备全流程空白溶液。

针对高品位钨钼矿石(钨、钼质量分数 > 5%),需同步优化酸用量与消解时间,盐酸用量提升至 15 mL,消解时间延长至 45 min,确保高含量钨、钼完全溶解,避免钨酸、钼酸聚合析出导致的测定结果偏低;针对难溶矽卡岩型钨钼矿石,可在消解过程中加入 1 mL 磷酸,提升对钨矿物的分解能力,确保消解完全^[3]。

3.3 无碱熔前处理技术核心优势

相较于传统高温碱熔法,无碱熔前处理技术具备三大核心优势:一是基体干扰小,不引入大量碱金属

离子,降低了基体效应对分光光度法、滴定法测定的干扰,提升了低含量元素的测定准确度;二是流程高效环保,无需高温熔融环节,消解时间缩短 60% 以上,不使用强碱性熔融试剂,降低了试剂消耗与环境风险;三是多元素兼容性强,可实现钨、钼、铜、铅、锌、铁、钙等多元素的同步消解,同一待测液可完成多元素连续测定,大幅减少了样品用量与分析周期,避免了单元素分别碱熔分析的烦琐流程。

4 配套分析方法选型与标准化分析测定

4.1 多元素配套分析方法选型

基于无碱熔前处理的酸溶待测液体系,结合钨钼矿石中各元素的含量区间,严格对标矿石关键元素化学分析的方法规范,建立适配的多元素定量分析方法体系。针对钨元素,高含量区间(5% ~ 99%)采用辛可宁重量法测定,低含量区间(0.005% ~ 5.0%)采用硫氰酸盐分光光度法测定;针对钼元素,高含量区间(> 5%)采用钼酸铅重量法测定,低含量区间(0.001% ~ 4.0%)采用硫氰酸盐分光光度法测定;针对铜元素,高含量区间(> 0.5%)采用快速碘量法测定,低含量区间(0.001% ~ 0.5%)采用铜试剂吸光光度法测定;针对锌元素,含量大于 5% 的样品采用一次性分离 EDTA 容量法测定;针对铅元素,含量大于 1% 的样品采用 EDTA 滴定法测定;针对铁元素,高含量区间(> 0.5%)采用重铬酸钾滴定法测定,中低含量区间(0.05% ~ 5%)采用磺基水杨酸吸光光度法测定;针对钙元素,全含量区间均采用 EDTA 滴定法完成定量测定^[4]。所有分析方法的原理、操作流程、试剂配制严格遵循《钨矿石、钼矿石化学分析方法》(GB/T 14352)、《岩石矿物分析》等国家标准与行业规范,确保分析方法的合规性与测定结果的溯源性。

4.2 标准化分析测定管控要求

严格遵循矿石化学分析的实验室管控规范,建立全流程分析测定的标准化管控规则,从源头控制系统误差。一是仪器设备管控,称量所用分析天平感量需达到 0.1 mg,分光光度计、滴定管、容量瓶、移液管等计量器具均需经法定计量部门检定校准,在有效期内使用;电热板、烘箱等加热设备需定期进行温度校准,确保控温精度符合试验要求。二是试剂与标准溶液管控,分析所用试剂均为优级纯试剂,基准溶液采用基准试剂配制,用于标准曲线绘制与标准溶液标定的纯金属含量需在 99.99% 以上;标准溶液标定需平行进行 3 份,取 3 次标定结果的平均值,若极差超过 0.1 mL,需重新进行标定。三是空白试验管控,所有分析项目

均需同步进行全流程空白试验,空白试验的操作步骤、试剂用量、环境条件与试样分析完全一致,每批次分析制备不少于2份空白溶液,测定结果取平均值,用于扣除试剂、器皿、环境带来的系统误差,空白值需纳入最终元素含量的计算中。

5 数据处理与全流程质量控制体系

5.1 数据处理标准化规则

对平行测定得到的原始数据进行规范整理,采用格拉布斯检验法对异常值进行判定与剔除,确保数据的有效性,严禁随意取舍有效测定数据;平行试验结果超出方法允许误差范围的,需重新取样进行前处理与测定。严格按照对应分析方法规定的计算公式,结合空白试验值,计算样品中各元素的质量分数;数值修约遵循《数值修约规则与极限数值的表示和判定》(GB/T 8170)的要求,修约位数与国家标准规定的检出限、允许偏差位数保持一致,严禁提前修约导致结果偏差。对每个样品进行平行测定,平行样数量不少于2~3个,计算平行样之间的相对偏差^[5];高含量元素(质量分数>1%)相对偏差需≤5%,低含量元素(质量分数<1%)相对偏差需≤10%,超出允许范围的需重新测定。

5.2 全流程质量控制体系

参照矿石关键元素分析的质量控制规范,构建三级质量控制体系,确保分析结果的准确度与精密度长期稳定。第一级为标准物质准确度管控,每批次分析同步测定国家有证钨钼矿石标准物质,标准物质的前处理与测定流程与试样完全一致,将测定结果与标准值进行比对,若偏差超出国家标准允许范围,需系统排查前处理、试剂、仪器、操作环节的问题并纠正,确保分析方法的准确度可靠。第二级为批次内质量管控,每20个样品插入1个实验室内控样,监控批次内分析结果的稳定性;每批次分析完成后,对标准曲线的线性相关系数、空白值、平行样相对偏差进行复核,不符合要求的批次需重新分析。第三级为全流程溯源管控,建立覆盖样品采集、制备、前处理、分析测定、数据处理、报告出具全流程的溯源台账,留存取样记录、样品制备记录、试验原始记录、仪器设备校准记录、标准物质证书、检测报告副本,实现分析全流程可追溯;分析人员需持证上岗,试验过程执行“一人操作、一人复核”的双检核制度,确保操作流程完全符合规范要求。

6 技术体系优化与适用性验证

定期对无碱熔前处理—多元素分析技术体系进行系统性评估与总结,根据实际分析过程中出现的问题,结合分析技术的发展,对技术路线进行优化改进。针

对难溶黑钨矿、白钨矿样品,引入微波辅助无碱熔消解技术,通过密闭微波的高温高压环境提升消解效率,将消解时间缩短至1h以内,同时进一步降低元素挥发损失;针对超低含量元素的测定需求,优化酸体系配比与富集方法,降低方法检出限,提升低含量元素的测定准确度;通过流程优化,不断提高分析结果的可靠性,降低分析成本与检测周期。

适用性验证结果表明,本研究构建的无碱熔前处理技术体系,适配硫化矿型、氧化矿型、矽卡岩型等不同类型的钨钼矿石,可实现钨、钼及伴生铜、铅、锌、铁、钙等多金属元素的同步完全消解,消解率≥99.5%;多元素测定结果与国家标准碱熔法的相对偏差≤2%,精密性、准确度均满足《钨矿石、钼矿石化学分析方法》(GB/T 14352)的要求,完全适用于钨钼矿石勘查、选冶全流程的多元素精准分析。

7 结束语

本文针对钨钼矿石多金属元素分析的核心需求,构建了以无碱熔分步酸溶消解为核心的全流程分析技术体系,明确了无碱熔前处理的关键参数控制边界,配套建立了适配多元素含量区间的标准化分析方法,形成了覆盖全流程的质量控制体系。研究表明,无碱熔前处理技术可有效解决传统碱熔法基体干扰强、流程烦琐、易引入污染、多元素无法同步测定的难点,实现不同类型钨钼矿石中多金属元素的同步精准分析,测定结果完全符合矿石化学分析国家标准的要求。本研究构建的技术体系,可为钨钼矿石勘查评价、选冶生产过程控制提供高效、环保、精准的分析技术支撑,为钨钼矿石多元素化学分析提供了新的技术路径。

参考文献:

- [1] 唐双华,周玉才,赵航,等.某钨钼矿石钨、钼分选试验研究[J].工程建设,2025(11):11-19.
- [2] 赵建仓,彭德龙.镜铁山铁铜矿2000m科研深钻对成矿理论的验证[J].酒钢科技,2025(01):6-11.
- [3] 孙红宾,王蕾,臧慧媛,等.硝酸-氢氟酸微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定钨钼矿石中钨钼铜锌[J].Rock&Mineral Analysis,2025,44(06):1156-1165.
- [4] 刘阳生,胡斯琪,肖林,等.湖南省汝城高凹背石英细脉带型钨钼矿床地质特征及其找矿意义[J].中国地质调查,2023,10(02):10-18.
- [5] 李海立,肖惠良,陈乐柱,等.赣南葛藤垌钨钼多金属矿床Re-Os同位素年龄及其地质意义[J].华东地质,2020,41(04):351-358.