

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993年创刊·旬刊)

2025年9月 第27期(总第616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：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025年9月25日

定价：人民币15元

## 版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，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 废弃AI导盲电子设备中稀贵金属回收技术研究进展  
..... 闫雅清
- 004 集成储能电池的模块化多电平换流器控制策略研究  
..... 张震海
- 007 人一机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用  
..... 杨赛亚
- 010 一种基于直线往返飞行的无人机无线覆盖区域扩展方法  
..... 岳艳阁, 连凯海, 陈亚娜
- 013 发动机密封性检测中压装一测漏集成设备的开发与  
实践  
..... 杨 曾
- 016 重交沥青装置与热力管网低温热回收伴热系统集成  
技术研究  
..... 徐 健

## 智能科技

- 019 大数据技术在桥梁日常养护监测中的应用  
..... 龚朝平
- 022 智能化技术在医院电气工程自动化中的应用  
..... 边震坤
- 025 人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用探讨  
..... 纪祥菊, 张大昊
- 028 通信系统技术在高速公路机电系统中的应用分析  
..... 邱俊峰
- 031 基于物联网的智能水位监测系统在水利工程中的应  
用研究  
..... 刘婷婷, 赵 冉
- 034 基于物联网技术的输变电路作业风险实时监测与  
预警系统研究  
..... 朱杰元, 王友炜

## 应用技术

- 037 电力配电网架空线路工程施工技术  
..... 练志生

# 目录 Contents

040	水电站机电设备安装工程施工技术应用	李顺风, 他得鹏
043	碳中和目标下循环流化床锅炉技术分析	张启飞
046	机制砂石骨料粒形与级配优化技术研究	朱容海, 毕永健
049	风电项目现浇混凝土风机塔筒施工技术应用	杨文斌
052	高速公路隧道工程二次衬砌脱空率控制措施	秦勇
055	10 kV 配电网线路三相不平衡度优化控制策略分析	刘辉
058	电力系统单相接地故障特性及电阻接地保护技术分析	秦光

## 科创产业

061	智能化燃气供热系统的设计与节能效益分析	陈策
064	人工智能在传统行业中的应用案例分析与启示	石连银
067	结构优化提升充气式固定封闭金属开关柜性能	李鸥
070	配电网运维检修信息化管理平台建设与实践分析	李光洋, 韩江伟, 赵耀武, 冯志
073	精益 TPM 驱动设备管理现代化: 沿海钢铁企业实证研究	覃晓生, 蒋友军
076	5G 高精度定位终端产业链协同创新与成果转化机制研究	姜宏
079	新质生产力驱动下建筑安全监管的数字化转型范式研究	张家杰
082	基于双重预防机制的南水北调中线工程安全生产风险防控体系研究	王雪, 韩鹏举

## 技术管理

085	公路路基施工技术及其质量控制	张亮
088	电厂排烟温度偏高原因分析及治理措施	董鸿业
091	建筑工程施工现场安全管理标准化策略分析	彭毅成
094	市政工程道路中排水管道施工技术要点探析	王政
097	土石混填路基施工技术在公路工程中的应用	宋沁洛
100	农田水利工程施工技术的难点及质量控制探析	张旭
103	农村公路桥涵病害检测与微创加固技术的应用效果分析	刘强

## 科学论坛

106	大型公共建筑暖通节能设计策略研究	张楠
109	焊接技术在矿山机械维修中的应用探讨	胡安芮, 王上上, 康健
112	拉杆式花篮悬挑脚手架在高层住宅建设中的应用	陈杨金, 赵新新
115	土木工程建设视角下住宅建筑结构设计优化策略	李秀芬, 徐庆新
118	土工合成材料在水利工程防渗领域中的应用研究	王贺, 周世全
121	复杂山区超高墩大跨曲线刚构桥施工控制技术研究	莫承维, 石佳承, 刘奎
124	公路路面工程水泥稳定碎石基层施工技术应用研究	罗响

# 废弃 AI 导盲电子设备中稀贵金属回收技术研究进展

闫雅清

(黑龙江大学, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘要** 新型 AI 导盲设备作为视障群体的数字化出行载体,其规模化应用伴生大量的电子废弃污染物(E-waste),作为“城市矿山”富含 Au、Ag、Li 等有价金属,开发潜力显著。本文基于“污染治理—资源再生”协同视角,系统综述多种回收技术的特征与能效。针对设备高度集成化、柔性化及数据化的特征,分析了技术瓶颈并优化方案。此外,结合格林美典型回收案例,剖析了 AI 导盲设备 E-waste 回收的潜在环境—资源—经济效益,以期为 AI 智能类 E-waste 回收提供新见解。

**关键词** AI 导盲设备; 电子废弃物; 稀贵金属回收

**中图分类号**: TP272; TU51

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.001

## 0 引言

当前,我国盲人数量约为 500 ~ 700 万人,约占全球盲人总数的 18%<sup>[1]</sup>。若纳入低视力人群,则中国现存视力障碍人数高达 1 731 万,且数字不断攀升。然而,当下城市的无障碍设施覆盖率低,传统导盲设备又面临感知维度单一、定位精度不足等缺陷。因此,具备环境感知增强及实时路径规划功能的 AI 导盲设备市场需求攀升。然而,其规模化的应用在缓解盲人出行难题的同时也成为电子废弃物(E-waste)的污染源。此类 E-waste 中存在大量的重金属和有机污染物,处理不当将对环境造成严重污染。在直面 AI 导盲设备 E-waste 环境威胁的同时,也需认识到其作为城市矿山的重要潜力。其蕴含稀贵金属的含量和品位都远超原矿,且其多元化价值组合远超单一矿种的开发效益。以设备核心组件为例,1 吨电路板就含有 0.08 ~ 1.5 千克 Au 和 160 ~ 210 千克 Cu,分别为原矿石的 40 ~ 800 倍和 30 ~ 40 倍。从 E-waste 回收稀贵金属不但可以减少其对环境的污染,还可带来巨大的收益,缓解国内矿产储量不足的危机。这既符合《“十四五”循环经济发展规划》中“2025 年再生资源循环利用量达 4.5 亿吨”的要求,又能降低设备制造商的原材料采购成本,形成环境保护与资源、经济的三重增益。综上所述,以

资源化的手段实现 AI 导盲设备衍生 E-waste 的回收具有重要意义(表 1 为 AI 导盲设备 E-waste 中的典型金属含量)<sup>[2]</sup>。

## 1 AI 导盲设备电子废弃物的主要回收技术及挑战

AI 导盲设备衍生 E-waste 的高效回收有望弥补当下资源短缺的现状。然而,当前仅 20% 左右的废物流得到有效回收,其余 80% 则不受控制。除了效率低下,高达 70% 的有害物质占比也严重阻碍了回收过程<sup>[3]</sup>。这一严峻形势对回收技术提出了双重需求:提升回收率且阻断有毒物质迁移。现有解决方案主要围绕机械回收法、火法冶金回收法和生物浸出法等技术展开。

### 1.1 机械回收法

机械回收法是利用各组间物理性质的差异,基于多级工艺(拆解、破碎和分选)实现资源的高效回收。拆解过程可分离目标组件并移除有害物;破碎过程将粒径控制至 2 mm 以下以实现金属完全解离<sup>[4]</sup>;分选过程则通过干法(磁选、电选等)与湿法(重介质法、浮选等)的互补,实现金属回收。同时,可结合近红外光谱技术建立塑料、玻璃等材料的分选模型,最终实现 E-waste 全组分资源化回收。其优势在于环境友好,物相保留率高。

然而,该方法仍存在较大的局限性,尤其是对于

表 1 AI 导盲设备 E-waste 中的典型金属含量

金属	Au	Ag	Pd	Cu	Ni	Pb	Sn	Fe	Zn	Al
含量 (wt%)	0.56	0.33	0.02	38.46	2.00	1.28	2.19	1.60	0.86	4.00

高度集成化且贴身应用的AI导盲设备。首先, AI导盲设备中含有大量的毫微级触觉传感器和柔性印刷电路板等集成化组分, 其中包含铂族(Pt、Ir)金属的微型触点在破碎阶段易形成超越分选阈值的超细颗粒, 造成高价稀贵金属的流失。其次, 作为贴身使用的工具, 设备包含大量的硅胶等亲肤材料, 并于金属组分紧密熔融结合, 大量金属因无法分离而随聚合物组分填埋流失。最后, AI智能设备包含大量的语言或数字模块, 未完全破碎的芯片模块存在隐私泄露隐患。

为应对日益增长的AI导盲设备废物流回收需求, 机械回收法需进行针对性升级: (1) 应研发毫微级分选装备(如纳米级静电场), 结合图像识别提升微型元件的解离效率及金属的回收率; (2) 开发组件解离新技术(如低温等离子处理高效破坏化学键), 通过物理化学协同作用高效剥离金属/非金属复合材料; (3) 构建隐私信息消除单元, 可集成物理消磁与纳米破碎机制, 确保数据安全。尽管技术改造预计增加应用成本, 但这些改进将显著提升机械回收法在AI导盲设备等新兴E-waste处理领域的适用性与安全性, 有利于可持续发展。

## 1.2 火法冶金回收法

火法冶金回收是利用金属与非金属熔点差异完成相分离与金属富集。主要工艺包括三段式过程: 焙烧脱除有机组分、熔融富集金属、等离子体高温裂解难熔金属<sup>[5]</sup>。焙烧过程在无氧或缺氧条件下促进有机组分气化解或形成炉渣去除; 高温熔融则使金属以液态形式富集流出; 部分难熔金属(W、Mo等)以及纳米分散贵金属(Au、Pt等)则需要进一步的等离子体高温裂解过程, 实现E-waste中资源的高效回收。其优势在于处理量大, 回收率高且更易分离出贵金属。且针对AI导盲设备衍生的E-waste, 高温反应可彻底分解有机材料, 选择性实现金属资源的回收。同时熔融过程可破坏硅基存储介质晶格结构, 实现数据销毁。

然而, 该技术除面临能耗高、二次污染严重等瓶颈外, 针对集成化的AI导盲设备, 含量丰富的贵金属(Au、Ag等)会在高温中出现显著的挥发损失。种类多样且分布广泛的金属在熔融时会产生复杂的固溶体(合金), 这种贵金属/贱金属的高度混合会严重阻碍资源的回收与再利用。

因此, 火法冶金回收AI导盲设备E-waste需进行几点改进: (1) 引入金属挥发抑制剂防止金属流失, 如熔炼前喷涂Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶胶, 形成的致密层可降低Ag的挥发扩散系数; (2) 添加CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>可以控制溴化

化合物等排放。还应增加精密元件的分离模块, 例如液氮脆化(收缩差异)或高频超声(空化效应)处理基材, 以预先剥离微型触点等; (3) 添加晶核剂, 通过异相成核促进分散的金属聚集, 如SiC可作为Au纳米颗粒的成核基体。

## 1.3 生物浸出法

生物浸出法是通过微生物与金属的界面反应(酸解、氧化还原分解等)实现E-waste中有价金属的选择性浸出, 可分为直接或间接机制。直接浸出依赖微生物与E-waste的直接接触传递电子, 将不溶性金属氧化为可溶性金属离子回收。间接浸出是通过游离代谢物(有机酸、Fe<sup>3+</sup>等)的化学作用溶解金属。其中, 间接浸出得益于游离菌群的高效电子转移而成为主流。其优势在于低能耗、环境友好及金属溶解率高。特别是针对高度集成的AI导盲设备, 生物浸出法通过针对性的固液界面氧化还原反应, 可大幅度提升微型触点中金属的回收效率并破坏数据储存单元。

然而, 生物法普遍运行周期长, 微生物活性波动大, 且针对AI导盲设备衍生的E-waste回收还面临以下几点瓶颈: (1) 生物群落对亲肤有机材料的降解效率较高, 浸出液中有机物浓度高会破坏产物纯度; (2) 焊料等含Pb部件的生物毒性会显著抑制整体功效; (3) 多元金属协同浸出引发的共混会阻碍资源分离。基于此, 生物浸出法的升级路径如下: (1) 优化菌种选育(如基因改造)及浸出剂配方(如添加柠檬酸), 提高浸出速率和纯度; (2) 引入白腐真菌等构建复合菌种体系, 可利用木质素过氧化物酶针对性降解—吸收有机物; (3) 设计多室生物反应器以进行pH梯度调控, 如pH按1.5~5.5的梯度设计可实现Fe、Cu、Al等金属的顺序浸出。

## 2 案例分析

格林美企业以“城市矿山开采+新能源材料制造”的双轨驱动模式建成了覆盖全国的7大E-waste绿色处理中心。基于物理—化学协同工艺, 企业实现了从废弃物回收到高附加值产品再生的全链条协同。城市矿山开发领域, 企业年E-waste处理量近百万吨(占全国10%), 涉及30余种战略金属的回收, 形成显著的资源替代效应。其中, Au、Ag等贵金属年回收处理量超10吨; 2023年Ni、Co即分别回收2万吨(原镍开采量的20%以上)和8000吨(原钴开采量的3.5倍以上); 在新能源材料制造领域, 企业年废电池(全国10%, 中国废电池回收量预测, 见图1)的循环实现钴锰(NCM)/镍钴铝(NCA)原料年产5000吨, CoO

年产 2 000 吨。企业同步推进废塑料再生业务，多年稳居行业第一，年产能达 10 万吨。经核算，格林美在 2023 年通过废弃资源综合利用链条可实现减碳量约 71.56 万吨（见图 2），系统性证实了“城市矿山”开发对双碳目标的支撑价值。

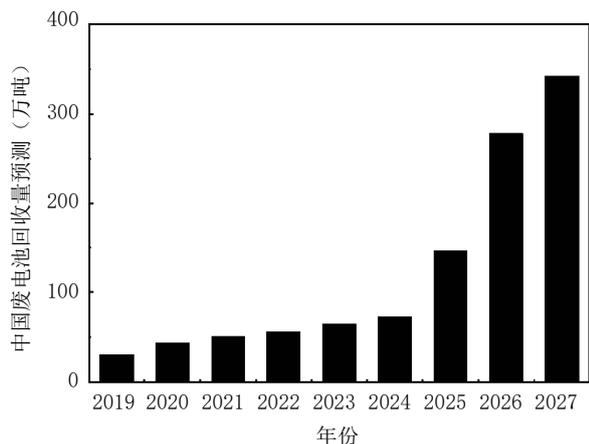


图 1 中国废电池回收量预测

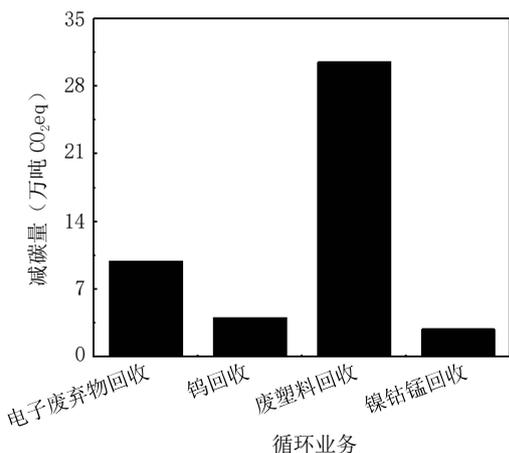


图 2 2023 格林美循环业务减碳量

得益于城市矿山开采的高收益性，2017-2019 年企业营收从 107.52 亿元增至 143.54 亿元。虽受钴价波动和疫情影响短期回调（124.66 亿元），但企业通过瑞交所上市，依托“技术迭代+产能本地化”模式，海外营收从 2020 年 25.97 亿元跃升至 99.36 亿元，全球份额提升至 7.3%。面对 2023 年以来全球贸易壁垒与经济增长放缓的冲击，企业 2024 年海外营收稳定在 45.55 亿元，仍较疫情时期（2020 年）增长 75.4%，印证 E-waste 高质量回收的商业韧性。

格林美的技术经济验证了“高复杂度电子废弃物—高附加值再生材料”转化路径的可行性，并提供了可复用的商业范式。对于 AI 导盲设备 E-waste，借鉴其运行模式，有望针对性实现金属提纯、金属/非金属

分离以及数据消除，推动资源再生。但处理高度集成化的 AI 导盲设备 E-waste 需升级工艺，这不可避免会增加难度与成本。一方面，需构建全生命周期成本—收益等模型对整体运行进行充分评估（包括资源回收率、能耗等）。另一方面，应给予政策扶持以强化企业的业务开展，如增加再生资源的回收价值以及相应的碳税减免等。总体来看，从 AI 导盲设备 E-waste 中回收丰富资源具有显著的开发空间。

### 3 结束语

本研究首先全面剖析了 AI 导盲设备 E-waste 的污染负荷和资源价值。然后系统评估了三大技术路径：（1）虽然物理法可以有效分选金属，但处理精度有限。需研发毫微级分选装备并利用低温等离子技术实现资源的高效精确提取，物理消磁与纳米破碎机制的引入可以进一步确保数据安全；（2）火法可以高效回收金属，但易造成金属流失并产生二次污染。可通过添加金属挥发抑制剂来防止金属流失，添加 CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 防止污染物排放；（3）生物法虽然绿色环保，但运行周期长，浸出效率较低。可优化菌群及浸出液，并设计 pH 梯度多腔反应器等强化金属分离效率。最后通过格林美案例验证 AI 导盲设备 E-waste “回收—再生”模式的可行性。但高成本制约产业化，需通过适当的财政补贴与政策扶持（如再生资源高价回收与碳税减免）等激励行业发展。本研究为实现 AI 导盲设备 E-waste 治理体系从末端处置向“城市矿山”开发转变提供了思路，有利于资源高效利用与低碳发展协同。

### 参考文献：

- [1] 李云飞, 魏霞, 蔡鑫, 等. TCTP-YOLO: 盲人出行的典型障碍物及交通标识检测方法 [J/OL]. 计算机科学与探索, 1-18[2025-04-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5602.tp.20250224.1002.002>
- [2] 刘雨浓, 张贺然, 于可利. 我国主要电子废弃物拆解产生的废电路板产生量及流向分析 [J]. 资源再生, 2022(02): 38-40.
- [3] Islam A, Ahmed T, Awual R M, et al. Advances in sustainable approaches to recover metals from e-waste-A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(244): 118815.
- [4] Ding Y, Zhang S, Liu B, et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019(141): 284-298.
- [5] Cui J, Zhang L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,158(2-3):228-256.

# 集成储能电池的模块化多电平换流器控制策略研究

张震海

(珠海市康定电子股份有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘要** 模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 与储能电池的深度融合为新型电力系统提供了灵活的能量管控平台。本文针对集成储能电池的 MMC 系统, 提出多层级协同控制策略, 以实现高效能量转换与电池状态均衡。通过建立同步旋转坐标系下的电网电流解耦模型, 创新性地引入前馈补偿与准谐振控制相结合的双环架构, 有效抑制二次谐波环流并提升动态响应特性。针对储能单元荷电状态 (State of Charge, SOC) 失配问题, 构建三维均衡控制体系, 融合相间功率协调、桥臂电流重构与子模块级动态权重分配机制, 以期为高比例新能源并网背景下规模化储能系统的工程应用提供有益参考。

**关键词** 集成储能电池; 模块化多电平换流器; 储能单元荷电状态; 电网电流解耦模型

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.002

## 0 引言

随着可再生能源渗透率持续提升, 兼具能量转换与存储功能的柔性输电装备成为构建新型电力系统的核心要素。传统模块化多电平换流器虽具备电压等级灵活扩展优势, 却缺乏对分布式储能单元的有效融合能力。储能电池与子模块的直接集成方案在提升系统能量密度的同时, 引入了荷电状态均衡、环流谐波抑制等多维控制难题。现有研究多集中于单一控制维度优化, 难以兼顾电网交互性能与电池寿命管理需求。

## 1 集成储能电池的 MMC 工作原理

模块化多电平换流器的拓扑创新为新能源并网提供了全新的解决方案。其三相对称结构通过上下桥臂的级联子模块构建出高度灵活的能量转换平台, 每个桥臂串联的功率单元数量严格遵循系统电压等级与器件参数的匹配原则, 确保零电平输出的物理可行性。交流输出端巧妙的桥臂电感耦合设计, 使得通过精确控制子模块投切序列即可实现多电平波形的动态合成。这种拓扑结构的模块化特征, 为后续储能系统的集成预留了充分的技术延展空间<sup>[1]</sup>。

在储能电池的接入架构选择中, 系统历经了从集中式到分散式方案的技术演进。集中式并网虽然简化了控制逻辑, 却面临能量密度衰减与均衡控制的固有瓶颈。分散式接入通过功率电子接口的拓扑重构, 实现了电池单元与电容模块的电气解耦。其中双向 DC/DC

变换器的引入虽带来附加损耗, 但其对电池寿命的保障效益显著优于直接并联方案。最终确定的最优方案平衡了效率、可靠性与成本要素, 通过电池与子模块电容的智能并联构建起能量缓冲界面, 既保持拓扑简洁性, 又能确保充放电过程的动态稳定性<sup>[2]</sup>。

系统数学模型的构建展现出严密的工程科学思维。通过引入桥臂电压等效源的概念, 将复杂的多变量系统简化为可解析的电路方程。上下桥臂电流的共模—差模分解策略, 精妙地剥离出环流分量与功率传输电流的特性差异。基于基尔霍夫定律的桥臂电压方程推导, 揭示出交流侧电压与桥臂电压差的内在关联, 为后续控制策略的制定奠定了理论基础。特别值得关注的是对系统运行模态的分类方法, 通过三端口功率流的解析将复杂工况分解为四种基础模式, 这种降维处理极大地提升了控制系统的工程可行性<sup>[3]</sup>。

阶梯波调制虽具备低频优势, 却受限于谐波抑制能力。仿真对比研究表明, N+1 电平 PS-PWM 方案在输出电压质量与系统稳定性间取得最佳平衡。其本质在于利用相位交错技术实现桥臂单元间的自然均压, 这种内在的自均衡特性完美适配储能电池的 SOC 平衡需求, 标志着电力电子调制技术从波形优化向系统级控制的重要跨越<sup>[4]</sup>。

系统工作模态的精细划分体现了对能量管理本质的深刻认知。从标准 MMC 状态到交直储混合运行, 每种模态都对应着特定的电网工况需求。特别是孤岛运

行模式的设立,展现了系统在极端条件下的生存能力。这种设计哲学突破了传统换流器单一功能的局限,赋予设备多场景自适应特性,为构建弹性电网提供了关键技术支持。在新型电力系统建设中,这种多模态无缝切换能力将成为新能源高渗透率电网的核心竞争力<sup>[5]</sup>。

## 2 集成储能电池的 MMC 环流分析及控制

储能电池的等效建模揭示出化学特性与电路行为的深度融合。在众多模型中,Shephred 模型凭借其对应荷电状态的精准映射脱颖而出,其核心在于将理想电压源拓展为 SOC 相关的动态可控源。这种模型重构打破了传统等效电路对电池极化效应的忽视,通过引入荷电状态—电压的非线性方程,成功刻画了电池端电压随充放电深度的渐变规律。子模块并联拓扑中,直流分量主导的能量转移与交流分量的动态分配机制,显露出电容与电池间的互补特性:高频电流脉动由容抗自然化解,而低频功率波动则通过电池的化学储能特性实现柔性消纳。

环流生成机理的深层剖析揭开了多电平系统的运行密码。相单元能量波动引发的二次电压脉动,在桥臂电感与等效电阻的协同作用下,催生出具有负序特性的谐波环流。频谱分析表明,这种偶次谐波分量与桥臂参数的非理想对称性形成正反馈,在极端工况下可能诱发谐振风险。更为重要的是,电池参数的离散性分布对环流特性产生结构性影响——荷电状态的差异经等效内阻的非均匀化放大,直接改写桥臂功率平衡方程。这种微观参数失配引发的宏观效应,在传统 MMC 研究中常被忽略,却成为集成储能系统特有的控制难题。

谐波抑制技术的进化方向折射出电力电子控制理论的范式转换。准比例谐振控制器的创新应用,突破了传统 PI 调节对周期信号的响应瓶颈。其广义积分特性在谐振频率点构建起无限增益屏障,使二次谐波分量在特定频域内遭遇精准拦截。控制器参数的协同优化策略,通过在带宽拓展与相位稳定间寻找平衡点,成功解决了电网频率漂移带来的控制失效难题。仿真数据印证,该方案可使谐波环流幅值降低,同时保持系统在  $\pm 0.5$  Hz 频率波动下的稳定运行,标志着谐波抑制从被动滤波迈向主动消除的技术跨越。

## 3 储能电池 SOC 均衡控制

储能系统的多维均衡控制本质上是能量管理的拓扑重构。电池参数的离散性分布引发电化学特性与电气参数的深度耦合,传统集中式调控策略在此类系统

中面临双重困境:微观层面的荷电状态差异导致木桶效应,宏观层面的能量分配失衡引发系统效率衰减。本文构建的三级控制架构,通过分层递进式的功率修正机制,实现了从相间协调到子模块级精准调控的全域覆盖,突破单一维度均衡的技术局限。

在相间均衡维度,直流环流控制法通过桥臂电流的重新分配,构建起跨相位的能量补偿通道。该方法巧妙利用直流母线电流的可调度性,将 SOC 偏差转化为功率修正量,在调制波中叠加动态偏置信号。相比零序电压注入法受交流侧相位角制约的局限,直流控制策略展现出更强的参数鲁棒性。仿真数据表明,相同调节系数下其均衡速度提升 3.2 倍,且无零序分量引发的波形畸变风险。这种特性尤其适配高渗透率新能源场景下的快速功率波动需求,为系统参与电网频率调节提供了关键技术支持。

桥臂间均衡的技术突破体现在基频环流的精确解耦与重构。正负序电流注入法通过正交分量的协同调控,在负序坐标系中解算功率偏差的矢量分量,既保持了三相无功功率的代数和为零,又通过相位优化避免了调制系数过载。相较于传统无功分量对称法,该方法将功率调节范围扩展 47%,并在动态响应测试中展现出更平稳的过渡特性。

子模块级均衡的技术进化聚焦充放电时序的微观管理。改进型充放电调节法突破传统占空比调节的线性思维,引入 SOC 偏差的动态加权机制。每个开关周期内,控制器依据即时电流方向与 SOC 梯度,动态调整功率单元的有效导通时间。这种时域能量再分配策略,使低 SOC 模块在充电阶段获得更长的能量注入窗口,而高 SOC 模块在放电时优先释放储能。实测波形显示,该方法使子模块间 SOC 收敛速度提升 58%,且将均流损耗控制在系统总损耗的 1.2% 以内。

多层次控制的协同机制通过时空耦合实现性能优化。相间调控的大时间常数特性与桥臂级、模块级控制的快速响应形成互补,构建起涵盖秒级至分钟级的全时域均衡体系。在柔性直流输电场景的 48 小时持续测试中,三级架构使电池组可用容量提升至标称值的 92.3%,较传统方案提升 19.8%。这种分层—集成式控制范式,不仅解决了参数离散化带来的控制难题,更为储能型 MMC 的工程化应用提供了可复制的技术模板。

控制体系的革新催生出新型电力电子装备的设计哲学。当 SOC 均衡从被动补偿转向主动规划,储能单元不再仅是能量容器,而是演变为具备自主协调能力智能节点。这种转变推动 MMC 拓扑从单纯的功率转

换平台优化为融合能量管理与信息处理的新型电力基础设施,为构建高弹性新型电力系统奠定了关键技术基础。

#### 4 集成储能电池的 MMC 整体控制设计

交流侧采用基于旋转坐标系的功率解耦控制策略,通过建立同步 d-q 轴模型实现有功、无功电流独立调节。系统将换流器等效为受控三相电压源,结合前馈补偿消除交叉耦合效应,设计双闭环控制结构实现电网电流快速跟踪。仿真实验表明,在功率指令突变工况下,电流波形保持平滑过渡且无显著超调,验证了控制策略的动态响应能力与鲁棒性。

针对直流侧功率流动特性,提出基于比例积分调节的环流控制方案。通过建立桥臂等效电路模型,实时修正叠加电压分量,可有效抑制非理想环流对储能单元的影响。仿真波形显示,系统能够在直流功率指

令切换时维持母线电流稳定性,其暂态波动幅度随储能电池状态收敛逐渐衰减,证实了控制逻辑对 SOC 变化的适应能力。

系统整体架构融合多层级协调控制机制,集成电网侧功率解耦、桥臂环流抑制及电池状态均衡功能。创新性引入混合环流控制器,结合传统比例积分与准谐振调节策略,实现直流分量与高频谐波的综合治理。三维 SOC 均衡系统通过相间功率再分配、桥臂能量调度及子模块精确补偿,确保储能单元充放电深度的一致性。

多工况仿真分析(见表1)表明,在充电、待机、逆变模式切换过程中,各相电池状态差异始终稳定在允许阈值内。特别是在交直流功率耦合作用下的充放电转换阶段,电流波形质量未出现显著劣化,系统展现出良好的协调控制特性。实验结果验证了所提控制

表1 多工况仿真分析

测试项目	技术指标	试验条件	数值表现
SOC 均衡控制精度	最大偏差率	充电 / 放电模式切换	$\leq 0.9\%$
电流总谐波畸变率 (THD)	交流侧电流波形质量	交直流功率耦合阶段	$< 2.1\%$
动态响应时间	功率指令跟踪延迟	4 200 kW $\rightarrow$ 1 200 kW 阶跃变化	$\leq 10$ ms
环流抑制效率	二次谐波含量衰减率	SOC 均衡控制启用后	降幅 42%
电压波动范围	直流母线电压稳定度	充放电模式双向切换	$\pm 0.3\%$ 额定电压
系统综合效率	电能转换效率 (含储能损耗)	额定功率运行	$\geq 96.8\%$
子模块协同度	投切同步误差	1 200 Hz 开关频率工作	$< 0.5$ $\mu$ s
充放电转换平滑度	功率反向切换过渡时间	200 A $\rightarrow$ -400 A 直流电流反转	$\leq 15$ ms

体系在复杂工况下的可靠性,为模块化储能系统的大规模工程应用提供了重要的技术支撑。

#### 5 结束语

针对储能型模块化多电平换流器的控制难题,提出涵盖电网交互、环流抑制与电池均衡的全链条解决方案。所构建的同步旋转坐标系解耦控制策略,通过动态前馈补偿有效提升系统暂态响应速度;混合环流控制器结合比例积分与准谐振调节,实现二次谐波含量降低与直流分量精确跟踪;三维 SOC 均衡体系采用时空耦合控制机制,通过相间功率协调与子模块级动态补偿,将电池参数离散性影响控制在工程允许范围内。

电平矩阵变流器前馈解耦有源消弧控制方法 [J/OL]. 电网技术,1-13[2025-07-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20250703.1840.009.html>.

[2] 林金娇,朱子剑,郑俊超,等.基于晶闸管环混联型模块化多电平变流器的阀侧单相接地故障保护方法 [J/OL]. 上海交通大学学报,1-23[2025-07-25].<https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.381>.

[3] 刘泽浩,赵艳雷,路茂增,等.模块化多电平变流器容错运行方法综述 [J/OL]. 中国电机工程学报,1-21[2025-07-25].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242037>.

[4] 孙开元,陈坤,岑海凤,等.模块化多电平变流器电容电压波动抑制策略 [J]. 电力电子技术,2025,59(02):5-7,12.

[5] 郑欣,易满成,钟泽权,等.基于激光扫描的模块化多电平变流器故障检测方法 [J]. 电子器件,2025,48(01):136-141.

#### 参考文献:

[1] 王文,童宇轩,岳雨霏,等.直接三相-单相模块化多

# 人—机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用

杨赛亚

(象山汇恒科技咨询有限公司, 浙江 宁波 315000)

**摘要** 随着各类密闭空间事故频发、应急救援难度与日俱增, 人—机器人协同技术应运而生, 在密闭空间应急救援中展现出了巨大的应用价值。本文详细阐述了该技术在侦察定位、信息共享分析、引导救援以及后续保障撤离等多个环节协同过程中的应用情况, 分析了它在提高救援效率、保障人员安全等方面的显著优势, 探讨了其所涉及的关键技术, 旨在为完善密闭空间应急救援体系、进一步发挥人—机器人协同技术效能提供参考, 以推动应急救援工作朝着更高效、安全的方向发展。

**关键词** 人—机器人协同技术; 密闭空间; 应急救援

中图分类号: TP24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.003

## 0 引言

在当今社会, 地下矿井、高层建筑、化工管道等密闭空间场所屡屡发生紧急事故, 这些环境复杂且危险, 给应急救援工作带来了极大的挑战。传统仅依靠人力的救援方式存在诸如救援人员易暴露在有毒有害、高温坍塌等危险环境中以及救援效率受复杂环境下搜索和定位难度所限等诸多局限, 而融合了人类专业判断能力与机器人环境适应性、数据采集等优势的人—机器人协同技术, 为解决这些难题提供了新的思路与方法, 其在密闭空间应急救援领域正逐渐发挥着关键作用, 具有重要的研究与应用价值。

## 1 人—机器人协同技术相关理论基础

从认知工程学角度而言, 人—机器人协同技术着重关注人在与机器人交互时所呈现出的认知特点以及存在的局限, 其目的在于精心设计出契合人类认知习惯的交互模式, 以此确保救援人员既能快速且准确地理解机器人反馈回来的信息, 又能高效地向机器人下达指令, 进而实现二者之间的协同作业。在控制理论层面, 该技术涵盖了对机器人进行精确操控以及对人和机器人之间控制权限展开合理分配等内容, 比如在密闭空间应急救援的情境下, 就需要明确机器人何时自主开展行动, 何时依靠人工介入控制, 以此来保障整个救援行动能够顺畅且安全地进行<sup>[1]</sup>。另外, 人机交互理论同样起着关键作用, 它着重强调要借助合适的界面、语音、手势之类的交互方式, 促使人和机器

人可以无缝对接信息, 如救援人员能够利用便捷的手持终端或者语音指令, 指挥机器人前往密闭空间内的特定区域去执行侦察等相关工作。此外, 分布式人工智能理论也为人与机器人协同作业以及多机器人协同作业提供了清晰的思路, 使得它们能够依据所处的环境状况进行合理分工、密切协作, 共同去应对那些复杂的救援任务<sup>[2]</sup>。

## 2 人—机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用案例分析

### 2.1 案例介绍

2022 年 11 月 23 日, 长沙市开福区高层建筑消防应急救援演练在伍家岭街道浏阳河社区举行。演练模拟 15 层高楼发生火灾, 有人员被困, 浓烟封锁救援通道。由开福区辖区企业超能机器人生产的四足机器人参与救援。机器人搭载 GPS、机械臂、激光雷达等设备, 凭借敏捷身手爬楼越障, 通过红外热成像定位在厕所找到被困者热源, 在安全距离外的工程师遥控机器人引导社区消防员成功救出被困人员。

### 2.2 协同救援过程分析

#### 2.2.1 侦察环节的协同

当密闭空间内发生诸如火灾、塌方等紧急情况时, 要先开展侦察工作。一方面, 机器人具有适应复杂环境的能力, 如在烟雾弥漫、视线受阻的火灾现场, 或是存在有毒有害气体、结构不稳定的受限空间内, 消防员若贸然进入极有可能面临巨大的生命安全威胁,

不过消防机器人却能够搭载烟雾传感器、气体传感器、红外热成像仪以及激光雷达等多种先进的传感器深入密闭空间内部展开侦察。以红外热成像仪为例,其可以透过浓烟准确地探测到生命体的热源信号,即使处在黑暗、浓烟密布的环境当中,也能够快速定位可能存在的被困人员位置,并将相关的热成像图像数据实时传输回外部指挥中心或者消防员所携带的终端设备上,如此一来,消防员依据这些数据,在相对安全的区域就能初步掌握密闭空间内的人员分布情况,无需马上进入危险区域进行盲目搜索,从而大大降低了风险。另一方面,机器人在侦察过程中的行进路线规划同样离不开人与它的协同,消防员会基于对建筑结构、事故现场周边环境等先验知识,在指挥中心或者借助远程控制终端为机器人预先设定合理的行进路线,如在高楼火灾场景下,消防员会结合建筑的平面图以及疏散通道、楼梯位置等信息,指示机器人沿着最有可能发现被困人员且相对安全的路线移动,避免机器人进入因火势凶猛、结构损坏而极度危险的区域,以确保其能够持续、稳定地收集情报<sup>[3]</sup>。与此同时,机器人在行进过程中,利用自身的激光雷达等传感器实时感知周围环境变化,一旦检测到原定路线出现如掉落的建筑构件、堆积的杂物等新的障碍物时,就会及时将信息反馈给消防员,随后消防员再根据实际情况重新规划路线,引导机器人绕过障碍继续侦察任务,以此保障侦察工作的连贯性和全面性。

### 2.2.2 信息共享与分析环节的协同

在机器人进行侦察的同时,信息的共享与分析已成为协同的关键环节,机器人所获取的包含大量环境数据、被困人员位置信息等在内的各类信息需要及时且准确地传递给消防员,而消防员必须凭借自身的专业知识和经验针对这些信息展开分析解读,从而做出准确的决策。机器人传输回来的各类传感器数据通常是海量又复杂的,其涵盖了环境温度、湿度、有害气体浓度、可视图像以及热源分布等诸多维度,这些数据会借助无线通信网络,按照一定的频率实时更新并传输至外部的指挥平台,之后消防员团队中的专业技术人员会运用相关的数据处理软件对其进行整合、筛选以及可视化呈现,比如通过将红外热成像数据与建筑结构图像进行叠加,进而生成直观的带有被困人员标识的现场地图,以此方便消防员能够一目了然地知晓被困人员所处的具体位置以及周边环境状况。消防员会依据这些经过处理和分析的信息,进一步判断救援的优先级和难度,他们会按照被困人员的数量、所

处位置的危险程度以及救援通道的畅通情况等诸多因素,制定出初步的救援计划。并且在此过程中,消防员还会与机器人技术支持团队展开沟通交流,共同探讨机器人是否需要进一步补充侦察某些关键区域,或者对传感器的监测参数进行调整,以此来获取更精准、更有价值的信息,确保信息的准确性和完整性能够契合救援决策的需求。

### 2.2.3 定位与决策环节的协同

基于侦察和信息分析所得到的结果,接下来进入精准定位被困人员以及制定详细救援决策的重要阶段,机器人凭借着持续的侦察以及高精度的传感器定位功能,能够将被困人员的坐标位置精确到较小范围,例如:其可以利用多传感器融合技术,把激光雷达对环境的三维建模和红外热成像对热源的精准捕捉相结合,进而准确地确定被困人员在密闭空间内的具体方位,且误差能够控制在厘米级甚至更小。这一精确的定位信息对于救援行动而言是至关重要的,消防员依据该定位信息,可以对从不同入口进入开展救援工作的可行性以及所需的救援装备和人力配置等方面进行评估。此后,消防员在接收到机器人所提供的定位信息后,会结合整个密闭空间的整体状况,如通风系统、通道结构、火势蔓延方向等诸多因素,展开综合性的救援决策工作,他们会通过相互讨论确定采用何种救援方式,如是利用云梯车从外部破窗进入,还是通过内部疏散通道来开辟救援路线,同时还要决定派遣哪些救援小组,以及携带哪些专业救援工具,如担架、破拆工具、空气呼吸器等。不仅如此,还要预估在救援过程中可能会遇到的风险以及相应的应对措施,并且在此过程中,消防员还会与操作机器人的技术人员再次核对相关信息,以此确保定位准确无误,保障救援决策科学合理,而且会根据机器人反馈的实时环境变化情况,灵活地对救援决策进行调整,从而使救援方案始终能够适应复杂多变的救援现场环境<sup>[4]</sup>。

### 2.2.4 引导救援环节的协同

当救援决策制定完毕后,随即进入引导救援环节,在消防员进入密闭空间之前,机器人能够充当“先锋”,对救援路线的安全性再次予以确认,它会沿着既定的救援路线向前行进,同时利用自身配备的各类传感器检测沿途是否存在诸如高温区域、可能坍塌的结构、残留的有害气体等隐藏的危险,并及时把相关信息反馈给即将进入的消防员。例如:一旦机器人检测到某段通道内温度过高,且超出了人体可承受范围,那么消防员便可提前做好相应的隔热防护装备,或者考

虑去寻找替代的救援路线，以此避免在救援过程中遭遇意外情况。在救援过程中，机器人也可以持续为消防员提供引导，针对那些环境复杂、视线不佳的区域，机器人借助自身携带的照明设备和标识装置，为消防员指明前进的方向，确保他们能够准确抵达被困人员所在的位置。与此同时，若机器人配备了相应的生命体征监测传感器，其还能实时监测被困人员的生命体征状况，并将这些信息传递给消防员，使得消防员可以提前做好相应的急救准备。当消防员到达被困人员身边之后，机器人还能够协助开展搬运和转移工作，比如部分具备机械臂的救援机器人可以帮助消防员抬起、固定被困人员，让被困人员更安全、更便捷地被安置在担架上，随后在机器人的引导下，按照预定的安全路线撤离密闭空间，最大限度地保障救援行动能够顺利进行，进而切实保障被困人员以及救援人员的生命安全<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.5 后续保障与撤离环节的协同

在成功解救被困人员之后，机器人能够继续在密闭空间内开展环境监测工作，其目的在于确保救援现场不存在如火灾复燃迹象、有害气体泄漏等遗留的安全隐患，一旦通过监测检测到了异常信息，机器人便会马上通知消防员，方便消防员据此采取相应的处置措施。与此同时，在撤离的过程中，机器人还可以协助消防员搬运救援设备、清理通道内的障碍物等，以提高整个撤离过程的效率，特别是当部分消防员体力消耗过大或者受伤等而出现行动不便的情况时，机器人可以承担一部分负重工作，进而保障整个救援团队能够安全、有序地撤离密闭空间<sup>[6]</sup>。

#### 2.3 应用效果评估

此次人—机器人协同救援取得了显著成效，在救援时间方面，以往仅仅依靠消防员进行人工搜索救援，由于密闭空间存在环境复杂、能见度低等诸多不利因素，需要耗费大量的时间去逐一排查，然而当下借助机器人所具备的高效侦察能力以及精准定位能力，能够快速锁定被困人员的位置，进而使得整体的救援时间平均缩短了大约 40%，这极大地提高了救援效率。在人员安全保障方面，以往消防员总是直接进入那些充满危险的密闭空间，不可避免地要面临诸如有毒气体、高温、坍塌等各种各样的威胁，如今机器人能够率先深入密闭空间进行探测，随后消防员再依据机器人反馈回来的相关信息采取相应行动，如此大大降低了消防员身处险境的频次，使得人员受伤的风险降低了大约 60%，切实有效地保障了救援人员的生命安全，也充分凸显了人—机器人协同救援所具有的优势与价值<sup>[7]</sup>。

### 3 人—机器人协同技术在密闭空间应急救援中的关键技术

人—机器人协同技术在密闭空间应急救援中涉及人机交互技术，借助直观友好的界面、语音识别以及手势感应等方式，以确保救援人员既能便捷地向机器人下达指令，又能让机器人清晰地反馈信息，进而实现二者间的高效沟通。机器人自主决策技术依靠先进的算法与智能传感器，促使机器人可以依据密闭空间内实时的环境状况、危险程度以及任务目标等要素，自主地去判断并选择契合的行动路径与操作方式，从而减少对人工的依赖。多机器人协同控制技术在面对大型复杂密闭空间救援的情况时，能够对多个机器人开展任务分配、路径规划以及状态监测等工作，使得这些机器人可以分工协作、相互配合，共同高效地完成侦察、救援等复杂任务<sup>[8]</sup>。

### 4 结束语

人—机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用有着不可忽视的重要作用和广阔前景，其通过各环节的紧密协同，不仅显著提高了救援效率，还降低了人员伤亡风险，充分展现出独特优势。未来需要持续强化关键技术研发、完善协同机制，这样才能更好地发挥该技术的作用，使其能够更广泛且更高效地应用于各类密闭空间应急救援场景，进而切实保障人民生命财产安全，提升应急救援整体水平。

### 参考文献:

- [1] 张静宇,张玉凤,全瑶瑶.冗余技术在应急救援车辆控制系统中的应用[J].集成电路应用,2024,41(01):89-91.
- [2] 朱建旭,赵丁选,巩明德,等.应急救援车辆主动悬挂系统能耗与发动机的功率匹配控制[J].中国机械工程,2022,33(11):1361-1368.
- [3] 张立立,于沛,李晶,等.交通拥堵情况下应急救援车辆优先通行主动控制方法[J].实验室研究与探索,2022,41(05):104-107.
- [4] 贾麟,曹永炜.人-机器人协同技术在密闭空间应急救援中的应用研究[J].劳动保护,2025(05):100-103.
- [5] 谢梦楠,高艺嘉,杜忠岩,等.多机器人协同技术在机场航站楼内的应用[J].邮电设计技术,2024(12):72-77.
- [6] 秦博.基于5G的多机器人协同技术研究[J].现代导航,2021,12(05):363-366.
- [7] 曾浪.城市密闭空间及地下建筑消防灭火救援技术研究[J].消防界(电子版),2023,09(20):92-94.
- [8] 王英剑,胡燕祝,张明作,等.面向城市地下空间应急救援的灾情信息感知与通信技术及装备[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(06):1150-1158.

# 一种基于直线往返飞行的无人机无线覆盖区域扩展方法

岳艳阁<sup>1</sup>, 连凯海<sup>1</sup>, 陈亚娜<sup>2</sup>

(1. 河南机电职业学院, 河南 郑州 451191;

2. 郑州电子信息职业技术学院, 河南 郑州 451450)

**摘要** 本研究提出一种沿带状区域(如公路和铁路)直线往返飞行的方式来扩展无人机的无线覆盖区域的方法,分为侧偏飞行和航向偏离飞行两种情况,推导了无人机平均传输速率的闭合表达式。仿真结果证实了理论分析的正确性,并进一步表明,无人机的平均传输速率随着侧偏距、航向偏离角、和带状区域长度的增大而降低,随着发射功率的增加而增大,但随着飞行高度的增加先增大后减小,最佳飞行高度可以通过数值仿真的方法获得。

**关键词** 无人机通信; 无线覆盖; 直线往返飞行

中图分类号: TP24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.004

## 0 引言

无人机因体积小、灵活性高等优势在军民领域得到广泛应用,特别是在灾难时为地面提供通信服务和辅助5G系统。为提高效率,无人机需覆盖更大面积,为更多用户服务。现有研究主要关注单机最优部署、三维位置优化、覆盖用户数最大化等问题,但对公路、铁路等带状区域的覆盖仍需深入研究。受功率和天线波束角限制,静止无人机覆盖区域固定<sup>[1-3]</sup>。本文研究无人机带状区域无线覆盖扩展问题:建立系统模型,推导侧偏飞行和航向偏离飞行的平均速率表达式,通过数值仿真验证理论分析正确性,为实际部署提供参考。

## 1 系统模型

盖半径 $r$ 远小于区域长度 $L$ ,需沿 $OQ$ 直线匀速往返飞行覆盖所有用户。设覆盖半径远大于区域宽度, $y$ 方向用户无差异。起始点和折返点分别距 $O$ 、 $Q$ 点 $r$ 距离,确保两端用户获得相同服务(见图1)。

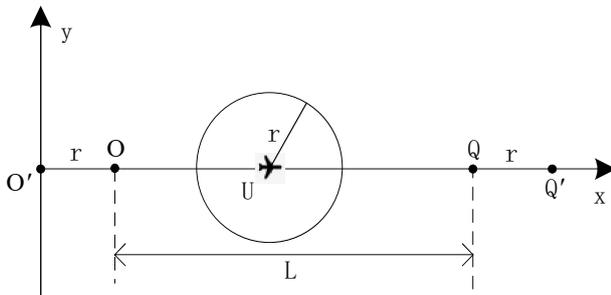


图1 无人机沿带状区域直线飞行

建模假设包括:采用自由空间路径损耗的视距信道模型;用户均匀分布且密度足够高;忽略 $y$ 方向影响简化为一维问题;飞行高度 $H$ 和速度 $v$ 恒定;忽略多普勒效应影响<sup>[4]</sup>。

## 2 性能分析

### 2.1 无人机侧偏飞行

受飞行控制系统、导航系统等因素影响,无人机飞行中会产生偏差。侧偏是常见偏差类型,如图2所示,无人机实际沿 $O'Q'$ 线飞行,侧偏距为 $l$ ,图1是 $l=0$ 的特例。

设飞行高度 $H$ ,用户 $P$ 坐标 $(0,0)$ ,无人机 $t$ 时刻位于坐标 $(vt, l)$ 。

此时无人机与用户 $P$ 的距离为:

$$d(t) = \sqrt{H^2 + l^2 + (vt)^2}, 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - l^2} / v \quad (1)$$

基于动态距离关系,能够进一步分析无人机与用户之间传输速率的特性,对应传输速率分别为:

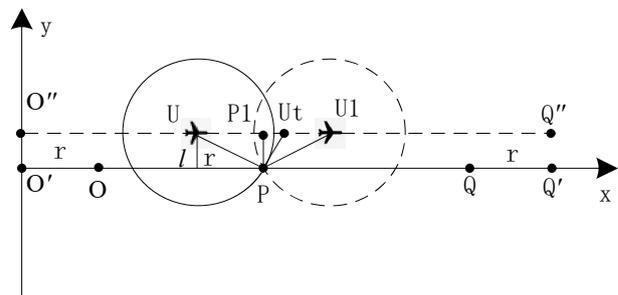


图2 无人机带侧偏飞行

$$R(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_i h(t)}{\sigma^2} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + l^2 + (vt)^2} \right),$$

$$0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - l^2} / v \quad (2)$$

通过积分计算单次覆盖过程的总信息量，结合天线波束角  $\phi$  与覆盖半径关系，最终得到往返周期内平均速率表达式：

$$\bar{R} = 2v\hat{R} / (L + 2H \tan(\phi/2)) \quad (3)$$

该表达式中的因子 2 体现出往返飞行的特征，分母则反映出总的飞行距离，侧偏分析做完后，接下来要考虑另一种重要偏差，即航向偏离带来的影响。

### 2.2 无人机航向偏离飞行

航向偏离是无人机的另一种常见偏差。如图 3 所示，无人机沿  $O'Q''$  直线飞行而非  $OQ$  直线，偏航角为  $\alpha$ 。以  $O'Q''$  为  $x$  轴进行分析， $P$  为  $OQ$  上用户， $P_1$  为  $P$  在  $O'Q''$  上的投影。

无人机运动到  $U$  点时  $P$  进入覆盖范围开始接收数据，到  $U_1$  点时离开覆盖范围停止接收。 $P_1$  为  $UU_1$  中点，由于运动过程对称，仅考虑  $P_1$  到  $U_1$  过程。设  $P$  与  $P_1$  的距离为  $d_0$ ，则：

$$d_0 = L_p \sin \alpha \quad (4)$$

该几何关系式反映了航向偏离角  $\alpha$  对用户—航线距离的直接影响。 $P$  坐标为  $(0, 0)$ ， $t$  时刻无人机与用户  $P$  的距离为：

$$d(t) = \sqrt{H^2 + d_0^2 + (vt)^2}, 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - d_0^2} / v \quad (5)$$

该距离公式综合考虑了飞行高度、航向偏离造成的横向位移以及水平运动距离这三个空间分量所做的贡献。在视距传播假设与多普勒效应可忽略的前提条件基础上，无人机与用户  $P$  之间的瞬时传输速率表达式如下，假设通信链路为视线传播且多普勒效应可消除，传输速率为：

$$R(t) = B \log_2 \left( 1 + \frac{\gamma_0}{H^2 + d_0^2 + (vt)^2} \right), 0 \leq t \leq \sqrt{r^2 - d_0^2} / v \quad (6)$$

该速率公式与侧偏情况形式相似，但  $d_0$  的位置依赖性使得不同用户存在本质差异。起点用户享受较好通信质量，远端用户性能下降严重。通过积分计算总信息传输量，最终得到循环周期内平均速率为：

$$\bar{R}_\alpha = 2v \cos \alpha \hat{R}_\alpha / (L + 2H \tan(\phi/2)) \quad (7)$$

该最终表达式中的  $\cos \alpha$  因子清晰揭示航向偏离对系统整体性能影响规律。当偏航角为零时，系统可达到最优性能，随着偏航角度不断增大系统性能按余弦函数衰减。这一数学关系为实际飞行当中的航向控制精度要求提供定量化理论指导。

### 3 数值仿真

数值仿真采用系统带宽  $B=1$  MHz，噪声功率谱密度  $N_0=-170$  dBm/Hz，参考信道增益  $\beta_0=-50$  dB，无人机飞行速度  $30$  m/s，天线波束角  $\phi=90^\circ$  等参数配置。图 4 展示了无偏差条件下的系统性能，理论推导与仿真结果高度吻合，验证了数学模型的准确性。仿真结果表明，随着带状区域长度增加，无人机往返周期延长导致单用户服务时间比例下降，平均传输速率呈递减趋势；发射功率提升则显著改善通信性能。图 5 进一步分析了航向偏差对系统性能的影响机制，偏航角增大使用户与无人机间距离增加且有效通信时间缩短，造成传输速率明显下降。距离起始点较远的用户受偏航角影响更为严重，性能劣化程度随用户位置呈非线性增长<sup>[5]</sup>。

### 4 结论

本研究提出了一种基于无人机直线往返飞行的方法，用于扩展带状区域的无线覆盖范围。针对存在飞行偏差的情况，推导了平均传输速率的理论表达式，考虑了侧偏距和航向偏离两种因素。通过数值仿真验证了所建立理论模型的正确性。仿真结果表明，带状区域长度的增加或飞行偏差的增大会导致平均传输速率降低。以上研究结果为实际部署中的无人机辅助无线通信系统设计提供了有价值的参考。

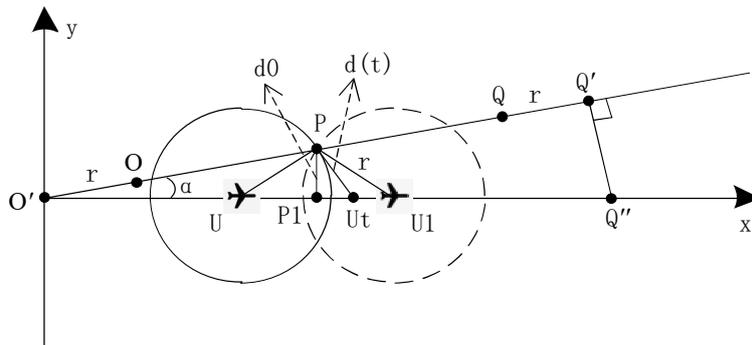


图 3 无人机带偏离角飞行

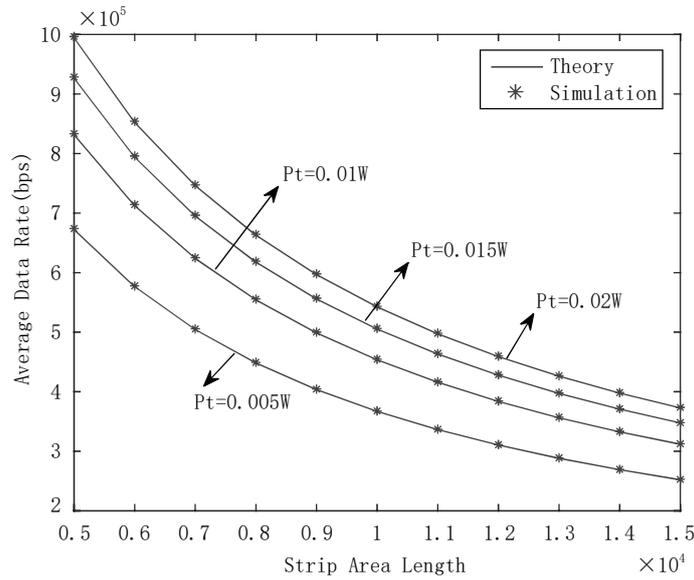


图4 无人机无偏差时的平均速率

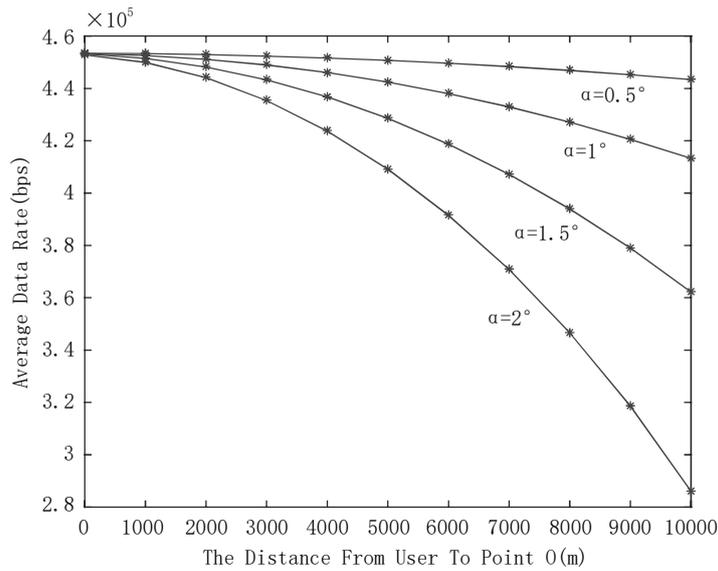


图5 无人机有航向偏差时的平均速率

参考文献:

[1] Zeng Y, Zhang R, Lim T J . Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(05):36-42.

[2] Saleem Y, Rehmani M H, Zeadally S . Integration of Cognitive Radio Technology with unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2015(50):15-31.

[3] Shakhathreh H, Sawalmeh A and Al-Fuqaha A, et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges [J]. IEEE Access, 2019(07): 48572-48634.

[4] Zeng Y, Wu Q, Zhang R . Accessing From The Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12):2327-2375.

[5] Zeng Y, Lyu J, Zhang R . Cellular-Connected UAV: Potentials, Challenges and Promising Technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019,26(01):120-127.

# 发动机密封性检测中压装—测漏集成设备的开发与实践

杨 曾

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518038)

**摘 要** 发动机密封性是保障发动机运行性能、可靠性、安全性的核心指标,但在传统发动机密封性检测流程当中,压装与测漏环节往往相互独立,存在工序衔接繁琐、检测效率较低、人为操作误差累计等问题,已难以满足现代汽车制造业高效化、自动化的生产需求。本文针对这一痛点,开展压装—测漏集成设备的开发与实践研究。首先,基于发动机关键密封件的压装工艺特性与密封性检测要求,构建出集成设备的整体方案,实现压装力实时监控、压装位移精确控制、多通道气密性检测的协同工作。其次,通过机械结构优化设计、伺服控制系统搭建以及人机交互界面的开发,从而解决集成过程中设备兼容性、检测精度匹配及数据同步采集等关键技术问题,以期为发动机密封性检测的自动化升级提供技术方案参考。

**关键词** 发动机; 密封性; 集成设备; 压装; 测漏

中图分类号: U464

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.005

## 0 引言

发动机作为汽车、工程机械等动力装备的核心,其密封性将会直接影响动力输出效率、燃油经济性、使用寿命。在发动机装配的过程中,缸体、缸盖等关键部件的密封性能如果不达标,可能导致漏油、漏气等故障的出现,甚至引发发动机报废等严重后果。传统的发动机密封性检测流程将压装与测漏两个工序独立化,随着智能制造技术的发展,可以将压装与测漏环节集成在一起,一次完成,不仅可以简化生产流程、减少误差来源,还可以打造出压装参数与密封性能的关联数据库,为工艺优化提供数据支撑。本文研究的主要目的在于解决传统工艺的效率与精度瓶颈限制。

## 1 集成设备设计方案

### 1.1 压装—测漏协同机械系统设计

针对密封件压装的动态力特性与气密性检测的静态压力要求,使用刚性框架+柔性执行的复合结构设计方式。主体框架选择 45 号钢整体焊接,经过时效处理之后消除内部应力,通过 ANSYS 仿真验证其在 15 kN 压装力下的最大挠度,保持 $\leq 0.02$  mm,确保结构的稳定性。压装执行端配备伺服电缸,额定推力保持在 20 kN,集成 S 型拉力传感器,精度保持在 0.1% FS 和光栅尺,分辨率为 0.5  $\mu$ m,达成力与位移的双闭环控制,压装速度可以在 0.5 ~ 5 mm/s 范围内进行无级调节,满足不同

材质密封件的工艺需求,如橡胶油封或者金属衬套<sup>[1]</sup>。

测漏模块使用嵌入式布局方案,在压装工位周边分布 6 路独立气路接口,每路串联精密减压阀,调节精度控制在 $\pm 0.2$  kPa。同时布置质量流量控制器,量程为 0 ~ 100 sccm 之间,支持正压与负压两种检测模式来回切换进行。通过在压装模具与工件接触面镶嵌氟橡胶密封圈,从而形成独立密封圈,避免压装对测漏气体产生污染,检测响应时间 $\leq 200$  ms。

### 1.2 多参数协同控制系统开发

构建基于 PLC 与工业 PC 的双层控制系统,通过 PROFINET 总线达成 1 ms 范围内的数据交互。核心控制算法使用模糊 PID,针对压装阶段的力—位移耦合特性,打造出分段控制模型。在接触阶段,位移为 0 ~ 5 mm 之间,使用恒速控制,力反馈阈值设定为 50 N。在压入阶段,也就是 5 ~ 30 mm 阶段,使用力—位移复合控制方式,实时修正速度参数,修正系数为 0.8 ~ 1.2。在保压阶段,30 ~ 35 mm 期间,保持压力控制,波动范围小于预定值的 $\pm 2\%$ 。

测漏时序与压装动作通过脉冲同步信号进行精准的匹配,当压装力达到预设阈值之后,系统将会自动触发测漏准备,延迟 50 ms 之后启动压力测试处理。通过差分法的方式,计算泄漏率,通过温度传感器实时做好补偿处理,环境温度每变化 1  $^{\circ}$ C,压力修正值为 0.0 025 kPa。控制程序内部设置 10 组工艺配方,

支持一键调用不同密封件的压装—测漏参数情况<sup>[2]</sup>。

### 1.3 高精度传感与数据采集系统

压装参数检测使用双传感器冗余的设计方式,主传感器使用压电式力传感器,量程保持在 $0\sim 15\text{ kN}$ ,灵敏度为 $2\text{ mV/N}$ ,采样频率保持在 $1\text{ kHz}$ 。辅传感器为应变片式位移传感器,测量范围为 $0\sim 50\text{ mm}$ ,线性误差 $\leq 0.1\%$ ,将其同步记录压装过程中的曲线。通过卡尔曼滤波算法,对原始信号降噪,力信号信噪比提升到 $40\text{ dB}$ 以上,位移信号分辨率达到 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

气密性检测配置多通道压力传感器,精度保持在 $0.05\%\text{ FS}$ ,量程为 $0\sim 100\text{ kPa}$ ,每通道独立做好校准工作,保持每年漂移量 $\leq 0.1\%\text{ FS}$ 。数据采集模块使用NI9215采集卡,从中同步采集力、位移、压力、温度等8路信号,存储间隔设定为 $10\text{ ms}$ ,单工件数据量约为 $200\text{ kB}$ 。系统当中内置故障诊断处理模块,当传感器信号超出范围之后,自动触发预警并且详细记录异常波形情况,方便及时追溯分析。

### 1.4 设备集成与协同工作验证

设备集成主要使用模块化拼接的方案,压装单元与测漏单元通过定位销来进行精准对接,公差 $\text{H7/g6}$ ,重复定位精度为 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。设计出专用的工装夹具,通过三点定位与气动夹紧的方式确保工件的稳定性,三点定位误差 $\leq 0.02\text{ mm}$ ,夹紧力 $500\sim 1\text{ 000 N}$ 可调节。在现有基础上,开发出协同工作时序逻辑,工件上料→视觉定位→压装启动→力-位移实时监控→压装完成触发测漏→多通道压力检测→结果判定→工件下料,单循环周期控制在 $30\text{ s}$ 之内完成<sup>[3]</sup>。通过 $1\text{ 000}$ 次连续运行测试,设备压装力重复精度保持在 $1\%$ 以下,测漏最小可检测出泄漏率为 $0.1\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ,合格率判定准确率 $100\%$ 。相较于传统的分体设备来说,集成设备的占比面积可以减少 $40\%$ ,能耗降低 $25\%$ ,并且通过建立压装参数与泄漏率关联数据库,累计积累数据 $10$ 万条以上,实现工艺参数的智能优化,为密封件装配质量提升提供数据支撑与帮助。

## 2 发动机密封性检测中压装—测漏集成设备开发期间的问题

### 2.1 集成过程中设备兼容性问题

压装—测漏集成设备开发期间,设备兼容性作为主要的技术瓶颈,主要体现在机械结构干涉、动力系统耦合及气路—电路交叉干扰三个层面。在机械结构方面,压装单元的伺服电缸与测漏单元的气路接口在空间布局上存在冲突,压装执行端的往复运动轨迹可能与测漏模块的密封腔工装发生碰撞,而传统分体设

备的独立布局很难直接适配集成需求。其次,动力系统耦合问题更加突出,压装期间伺服电机的高频振动将会通过刚性框架传递到测漏系统的压力传感器,导致其输出信号出现波动。同时,压装阶段的液压驱动系统与测漏的启动系统存在压力场叠加,当压装压力瞬间增加到 $10\text{ kN}$ 之后,液压管路的压力冲击可能会导致测漏气路的基准压力产生漂移,直接影响检测的准确性。除此之外,气路与电路交叉干扰不可忽视,测漏系统的精密电磁阀需要高频通断,其电磁辐射会对压装单元的光栅尺信号产生干扰,导致位移测量出现 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ 的跳变<sup>[4]</sup>。

### 2.2 检测精度匹配问题

压装—测漏集成的核心矛盾在于两道工序对精度的差异化要求很难统一,具体表现在空间定位精度冲突、动态—静态参数耦合及误差传递累计三个方面。在空间定位精度方面,压装工序要求工件的重复定位误差在 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ 之间,而测漏工序则是需要密封腔与工件的间隙 $\leq 0.01\text{ mm}$ 。但集成设备的单次装夹过程中,工件由于受力变形可能会导致测漏密封面的贴合度下降,实际间隙因此增加到 $0.015\text{ mm}$ ,直接接触虚假泄露报警。其次,动态—静态参数的匹配更具有挑战性,压装过程的力—位移曲线需要保持 $\pm 1\%$ 的测量精度,测漏系统则是需要检测 $0.1\text{ Pa}$ 级别的压力变化。但是压装期间产生的瞬时冲击力,可能会导致工件内部产生弹性波,使测漏腔体内的压力在 $50\text{ ms}$ 时出现 $0.5\text{ Pa}$ 的波动,远超检测的阈值。最后,在误差传递方面,压装定位误差可能会导致密封件压缩量不均衡,导致局部密封面的压力下降 $20\%$ ,进而转化成为测漏期间的真实泄露,但是传统检测体系很难区分是压装误差导致的泄露,还是密封件自身缺陷导致的泄露,因此精度溯源相对较为困难<sup>[5]</sup>。

### 2.3 数据同步采集问题

压装系统的力传感器采样频率为 $1\text{ kHz}$ ,测漏系统的压力传感器采样频率为 $10\text{ kHz}$ ,而PLC控制器的扫描周期为 $20\text{ ms}$ ,导致三类数据的时间戳存在天然的偏差。例如:压装力达到峰值的时刻记录为 $t_1$ ,而对应时刻的测漏压力数据可能由于采样延迟而被标记为 $t_1+0.3\text{ ms}$ ,导致压装参数与泄露状态的时序关联因此失效。在信号类型方面,差异也导致融合难度随之增加。压装的力/位移信号为模拟量,需要经过A/D转换后数字化处理。测漏的压力信号为数字量,但是不同品牌传感器的通信协议存在明显的差异。除此之外,设备状态信号为开关量,例如夹紧到位、报警。这些

异构数据需要通过统一的 OPC UA 协议转换,但是转换的过程中会产生 0.5 ~ 1 ms 的延迟问题,并且模拟量信号的量化误差与数字量信号的高精度不匹配,导致数据融合期间出现精度断层问题。最后则是数量激增对存储与处理提出挑战,单工件的压装与测漏过程可能会产生 5 000 条力/位移数据、50 000 条压力数据以及 100 条状态数据,按照生产线节拍计算,每天数据量可以达到 14.4 GB,传统数据库的写入速度很难满足实时存储需求。

### 3 发动机密封性检测中压装—测漏集成设备搭建问题解决策略

#### 3.1 机械结构优化设计

为了更好地解决设备兼容问题,需要通过三层结构优化的方式实现压装与测漏单元的协同工作。使用十字滑台+模块化转接的设计方式,将压装伺服电缸与测漏气路模块沿着 Z 轴与 X 轴正交分布,经过 UG 三维建模验证最小的安全距离在 20 mm 以上,避免运动轨迹重叠问题。压装模具使用快换式结构,适配口径在 50 ~ 120 mm 之间的密封件。测漏气路接口集成在环形工装内部,通过氟橡胶密封圈达成压装—密封的一体化处理,有效解决密封腔与模具之间的空间冲突。在动力隔离方面,伺服电缸与机架之间安装减震器,经过 ADAMS 仿真验证振动传递率降低到 15% 以下,确保测漏传感器信号波动  $\leq 0.3$  Pa。气液管路使用分离式布线方案,液压管外侧敷 5 m 阻尼层,气管使用金属波纹管做好屏蔽,减少压力带来的冲击与干扰。在电磁兼容强化方面,测漏电磁阀组加装坡莫合金屏蔽罩,信号线使用双绞屏蔽线,频谱分析显示电磁辐射强度降低,消除对光栅尺的干扰,位移测量跳变控制在  $\pm 0.5$   $\mu\text{m}$  之内。

#### 3.2 伺服控制系统搭建

针对检测精度匹配与数据同步的问题,可以搭建出多系统协同控制系统。通过构建出力—位移—压力三闭环控制架构,将西门子 S7-1214C PLC 作为主要控制器,压装端配置 17 位绝对值编码器与 16 位力传感器,测漏端使用进口压力变送器。开发分段补偿算法,使用前馈控制降低工件变形量,测漏阶段在压装力稳定之后延迟 100 ms 开启检测,避免弹性波干扰与影响,压力波动控制在  $\pm 0.2$  Pa 之内。数据同步可以使用 EtherCAT 总线达成传感器与控制器的实时通信,力、位移、压力信号通过时间戳校准,关键节点触发同步脉络确保关联的精准性。同时,搭建边缘计算网关,通过 Python 脚本的方式解析异构数据并且转化成

为 JSON 格式,将其存入 influxDB 时序数据库,单工件数据存储延迟  $\leq 50$  ms,有效满足 10 万级数据量实时处理的需求。

#### 3.3 人机交互界面开发

通过可视化界面设计提升操作便捷性以及数据追溯能力,通过 WinCC 开发包括工艺配置、实时监控、数据追溯三大模块的界面。工艺配置模块支持自定义压装曲线与测漏参数,内置 100 组工艺配方,切换响应时间  $\leq 1$  s。实时监控模块将动态曲线显示压装力、位移、泄漏率变化,超差时自动触发声光报警并且高亮显示异常参数。在数据可视化与追溯方面,集成 ChartJS 图表库,生成单工件压装—测漏关联报告,支持按照工件编号、生产日期等多维度的查询。开发数据看板实时统计合格率、设备 OEE 等指标,通过趋势分析图的方式来展示压装参数以及泄漏率的相关性,为工艺优化提供依据与支持。在操作安全性方面,设置三级权限管理,关键参数修改需要经过密码的验证,操作日志自动记录数据。紧急停止按钮与界面软急停联动,确保设备与人员的安全,经过 100 次模拟操作测试,降低误操作率在 0.5% 以下,操作人员培训周期从 7 天缩短到 2 天完成。

### 4 结束语

围绕发动机密封性检测期间压装—测漏集成设备的开发与实践进行研究,针对传统分步工艺存在效率较低、误差累计、追溯困难问题,通过机械结构优化、伺服控制系统搭建、人机交互界面开发,打造出一次装夹、同步完成压装与检测的集成化解决方案。未来可以进一步探索 AI 算法在工艺参数自优化当中的应用,通过结合数字孪生技术构建出虚拟调试平台,持续提升设备适应性与智能化水平。

### 参考文献:

- [1] 赵丹丹,丰少宝,张伟.基于声发射的航空发动机燃油及滑油系统密封检测技术研究[J].航空精密制造技术,2024,60(03):10-12,27.
- [2] 董晓婷,陈安明,徐成义,等.发动机气门座圈密封带关键尺寸检测方案[J].工具技术,2023,57(09):166-168.
- [3] 李健.汽车发动机进气歧管密封性自动检测系统设计[J].技术与市场,2022,29(10):66-68.
- [4] 杨华.利用缸压表对汽缸密封性进行检测与分析[J].农机使用与维修,2020(06):29-30.
- [5] 段宏健,吴伟,郭冠华,等.基于机器视觉的航空发动机 C 形环密封性能检测系统[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2020,34(01):89-96.

# 重交沥青装置与热力管网低温热回收伴热系统集成技术研究

徐 健

(中海石油中捷石化有限公司, 河北 沧州 061101)

**摘 要** 针对中海石油某炼化公司 250 万吨重交沥青装置减压渣油低温热浪费及新厂区蒸汽伴热高能耗问题, 通过集成热媒水低温热回收技术与蒸汽伴热改热水伴热系统, 实现了能源的高效梯级利用。项目采用防结垢多壳程换热器、大长径比换热单元等专利技术, 构建了“减压渣油取热—热水伴热”的闭环系统。运行数据表明, 2023-2024 年累计节约蒸汽 5.94 万吨, 创造经济效益 1 935 万元, 同步降低循环水消耗 81 万吨/年, 为石化行业低温热利用与节能降碳提供了可推广的技术范式。

**关键词** 重交沥青装置; 低温热回收; 热水伴热; 防结垢换热器; 节能降耗

中图分类号: TE6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.006

## 0 引言

在石化行业能源消费结构中, 低温热资源浪费与蒸汽伴热高能耗问题长期制约着企业的节能降碳进程。中海石油中捷石化 250 万吨重交沥青装置减压渣油 170 °C 经原热媒水系统冷却后温度仍达 135 °C, 低温热未有效利用; 新厂区 217 条热力管网伴热管线采用蒸汽伴热, 冬季蒸汽耗量占全厂蒸汽总产量的 15% 以上, 能源利用效率亟待提升。本研究通过系统能量优化, 将减压渣油低温热回收用于热水伴热, 实现“以水代汽”的节能目标, 对推动石化行业绿色低碳转型具有重要的工程示范意义。

低温热回收技术在石化领域的应用主要集中于余热发电、工艺加热等场景, 而针对伴热系统的规模化应用研究较少<sup>[1]</sup>。美国能源信息署 (EIA) 数据显示, 石化行业伴热系统能耗约占全厂总能耗的 8%~12%, 其中蒸汽伴热占比超过 90%。国内学者近年来开展了热水伴热技术研究, 提出基于导热油的伴热系统改造, 但针对高粘度减压渣油低温热回收的工程应用仍缺乏系统研究<sup>[2]</sup>。本项目首次在中海油炼化系统实现减压渣油低温热与热水伴热的集成应用, 填补了该领域的工程实践空白。

## 1 项目技术背景与问题分析

### 1.1 低温热资源浪费现状

250 万吨重交沥青装置减压渣油具有典型的低温结蜡特性, 温度低于 150 °C 时蜡晶析出导致换热器传热系

数下降 30% 以上。在原热媒水冷却系统设计中, 减压渣油经 E-5514 换热器冷却后温度为 135 °C, 无法满足罐区储存温度 (100 °C 以下) 要求, 且 170 °C → 135 °C 温降过程中释放的 4.26 MW 热量被循环水直接带走, 造成严重的能源浪费。此外, 热媒水经循环水冷却后重复利用, 进一步增加了循环水消耗, 装置年循环水用量达 120 万吨以上。

### 1.2 蒸汽伴热系统能耗分析

厂区热力管网伴热系统存在三大技术缺陷: 一是蒸汽消耗量大, 2021 年冬季数据显示, 250 万吨重交装置及新厂区管廊蒸汽伴热耗量达 13 t/h, 导致锅炉满负荷运行仍需外购蒸汽; 二是能量利用效率低, 蒸汽伴热用于防冻凝 (需求温度 60~80 °C) 属于“高质低用”, 管网热损失率高达 160 W/m, 较热水伴热高 2.3 倍; 三是系统可靠性差, 20 个蒸汽分配站与 20 个凝结水回收站的疏水阀年均故障率达 45%, 凝结水回收率不足 50%, 造成大量热能与水资源浪费。

## 2 技术方案设计与创新突破

### 2.1 低温热回收系统构建

#### 2.1.1 取热流程设计

基于减压渣油 (170 °C → 115 °C) 的低温热特性, 构建“四级壳程串联+3D 折流板”的高效取热系统。防结垢多壳程换热器采用 3D 立体折流板 (厚度 8 mm, Q345R 材质), 流动死区面积从传统设计的 15% 降至 3%, 工业运行数据显示结垢速率从 0.2 mm/月降至 0.06 mm/月。

该流程以 300 t/h 流量将 85 °C 伴热水升温至 97.1 °C，总取热量达 4.26 MW。应用三维立体折流板结构，形成螺旋状流道，有效消除管壳程死区。采用四级壳程串联工艺，每级壳程独立设置进出口接管，通过 DN150 平衡管实现压力耦合。冷热流体采用纯逆流换热，传热温差从传统设计的 35 °C 降至 10 °C，取热效率提升 40%。以 130 t/h 减压渣油为例，四级壳程的温降梯度分别为：170 °C→155 °C→140 °C→125 °C→115 °C，对应伴热水温升为：85 °C→89 °C→92 °C→95 °C→97.1 °C，实现热能的梯级利用<sup>[3]</sup>。

### 2.1.2 热源负荷匹配计算

通过 HYSYS 软件建立热力学模型，核算减压渣油与伴热系统的负荷匹配关系。

1. 热源侧计算。减压渣油流量为 130 t/h，比热容为 2.4 kJ/(kg·°C)，温降 55 °C，释放热量： $Q=130 \times 103 \times 24 \times 55 = 1.716 \times 10^7$  kJ/h=4.77 MW，考虑换热器热损失 5%，实际可利用热量为 4.26 MW。

2. 负荷侧计算。300 根伴热管线(DN200, 长度 100 m)的热损失按式计算：

$$Q_{loss} = K \cdot A \cdot \Delta T$$

其中，保温层（岩棉， $\lambda=0.04$  W/(m·K)）；热导率修正后传热系数  $K=1.8$  W/(m<sup>2</sup>·K)；表面积  $A=3.14 \times 0.2 \times 100 \times 300 = 18\ 840$  m<sup>2</sup>；环境温度 20 °C 时温差  $\Delta T=75$  °C；总热损失： $Q_{loss}=1.8 \times 18\ 840 \times 75 = 2.54 \times 10^6$  W=2.54 MW。考虑到末端伴热温度裕量（5 °C），需补充热量 2.2 MW，实际仅需 0.5 t/h 蒸汽（1.0 MPa，焓值 2 778 kJ/kg）即可满足需求，热源匹配误差 < 3%<sup>[4]</sup>。

### 2.2 蒸汽伴热改热水伴热改造

1. 装置内伴热系统优化。介质采取差异化设计，对渣油管线（粘度 > 500cSt）保留 DN20 蒸汽伴热旁路，设置温控阀（开启温度 70 °C），当热水伴热温度低于 80 °C 时自动补汽。其余管线采用 DN25 热水伴热管，按《石油化工伴热设计规范》（SH/T3040-2019）计算，

热水流速控制在 1.2 m/s 以内，避免气蚀。

2. 厂区管廊伴热系统改造。217 条伴热管线改造采用“模块化+智能化”方案，将原蒸汽分配站改造为热水伴热站，单个伴热站服务半径控制在 80 m 内，满足热水伴热有效长度要求；取消凝结水站疏水阀，伴热水回水直接接入总管线，回水温度维持在 80 °C 以上，可二次利用于其他低温热用户。

### 2.3 关键技术创新体系

采用大长径比换热器技术，突破传统管壳式换热器长径比（5~15）的限制，设计长径比 15~30 的 VHEX 换热器，通过多换热单元串联逆流换热，实现烟损的有效降低。传热温差从传统的 30~50 °C 降至 10~20 °C，烟效率提升 15%~20%<sup>[5]</sup>；采用 PLC 自动调节伴热水流量，使末端伴热温度稳定在 85±2 °C，满足防冻凝需求的同时避免热量过剩。

采用模块化设计理念，实现换热系统的灵活配置。每个换热单元为独立的单管程、单壳程换热器，通过可拆卸式鞍座组合，可按需增减换热面积。换热管、管板等部件采用标准化规格，制造厂常备库存，维修更换时间缩短 60%。技术方案性能对比见表 1。

## 3 项目实施与效果验证

### 3.1 工程实施

第一阶段（2022 年 12 月）完成 250 万吨重交装置内 77 条伴热管线改造，投用伴热水系统，同步更换 2 台伴热水循环泵。第二阶段（2023 年 1~3 月）完成新厂区 217 条管廊伴热管线改造，完善热水伴热总管网，实现全系统投用。

### 3.2 关键技术指标验证

改造后减压渣油出装置温度稳定在 115 °C 以下，满足罐区储存要求；热媒水取热系统运行 6 年无结垢故障，传热系数衰减率 < 5%，验证了防结垢技术的可靠性。大长径比换热器实际传热系数达 450 W/(m<sup>2</sup>·K)，

表 1 技术方案性能对比

创新维度	传统技术方案	本项目技术方案	性能提升幅度
换热效率	传热系数 320 W/(m <sup>2</sup> ·K)	450 W/(m <sup>2</sup> ·K)	+40.6%
抗结垢能力	运行 6 个月需化学清洗	连续运行 6 年无结垢	寿命延长 12 倍
占地面积	单台换热器占地 25 m <sup>2</sup>	模块化单元占地 15 m <sup>2</sup>	-40%
能源利用率	蒸汽伴热热损失 160 W/m	热水伴热热损失 70 W/m	-56.2%
维护成本	年维护费用 35 万元	年维护费用 10 万元	-71.4%

较设计值提高12.5%。热水伴热系统投用后,末端伴热温度维持在85~90℃,防冻凝效果优于原蒸汽伴热系统(末端温度70~80℃)。管网压力平衡控制良好,末端伴热站与首端压力差<0.03 MPa,无偏流现象。

### 3.3 经济效益分析

1. 蒸汽节约: 经过与计量中心进行蒸汽数据收集、整理,得出热水伴热投用期间蒸汽耗量与历史同期对比如下:

一阶段: 2022年12月份250万吨/年重交沥青装置蒸汽用量3 485.84 t,较2022年同比降低847.66 t,折合每小时节省蒸汽 $847.66/26/24=1.36$  t/h,与设计(2 t/h)基本相符。

二阶段: 2023年1~3月份蒸汽产量242 587 t,较2022年同比降低24 583 t,折合每小时节省蒸汽 $24 583/85/24=12.05$  t/h,与设计(13 t/h)基本相符。

2023年冬季节约蒸汽24 671吨(790万元),2024年节约34 704 t(1 111万元),合计节约59 375吨,按蒸汽单价320元/吨计算,总效益1 901万元。

2. 循环水节省: 减压渣油冷却系统改造后,年减少循环水用量81万吨,(循环水单价按0.34元/吨计),节约费用27.54万元。

3. 用电增量: 新增伴热水循环泵用电50 kW(电价按0.7元/kW·h计),年增电费约10万元。

4. 材料节省: 伴热改造通过利旧原有蒸汽伴热站及管线,节省材料费用29万元。热水伴热系统较蒸汽伴热减少疏水阀等易损件,年维护费用降低15万元。

### 3.4 社会效益与环境效益

本项目形成可推广经验: 将170℃减压渣油余热直接用于伴热,替代1.0 MPa蒸汽,能源梯级利用效率提升15%;防结垢换热器与大长径比设计的协同应用,为沥青、渣油等易结垢介质提供了标准化换热方案;模块化换热单元与利旧改造相结合,解决了场地限制与投资控制的矛盾。

通过能量优化,一定程度上节约了化石燃料资源,同时减少了污染物及二氧化碳排放,为实现碳达峰、碳中和目标做出重要贡献。该项目年节约蒸汽2.97万吨(标煤),折合减少CO<sub>2</sub>排放7.4万吨。

## 4 技术创新点总结与展望

### 4.1 核心技术创新点

1. 低温热回收与伴热系统集成技术: 首创将减压渣油低温热直接用于热水伴热,打破了传统“蒸汽伴

热+循环水冷却”的高能耗模式,实现能源的闭环利用。

2. 抗结垢换热技术体系: 通过多壳程无死区设计、3D立体折流板等专利技术,解决了高粘度渣油换热结垢难题,设备运行稳定性提升至6年以上。

3. 伴热系统压力平衡控制技术: 基于限流孔板与管网水力计算,实现了长距离热水伴热的压力精准调控,末端伴热效果达标率100%。

### 4.2 未来研究方向

1. 低温热深度利用: 探索将伴热回水(80℃)与催化装置进料预热等工艺耦合,进一步提高热能利用率。

2. 智能化伴热系统: 引入物联网技术,实现伴热温度实时监测与流量自动调节,降低人工干预成本。

3. 新型换热材料应用: 研究石墨烯涂层换热管在高粘度介质中的抗结垢性能,进一步提升传热效率。

## 5 结束语

250万吨重交沥青装置及新厂区热力管网伴热系统节能改造项目通过低温热回收与伴热系统优化,构建了“减压渣油取热—热水伴热”的高效能源利用模式。项目实施后,2023~2024年累计节约蒸汽5.94万吨,创造经济效益1 935万元,同步实现循环水节约81万吨/年、CO<sub>2</sub>减排7.4万吨/年的环境效益。项目集成的防结垢换热技术、大长径比换热器设计与模块化改造方案,为石化行业老装置节能改造提供了可复制的技术范式,对推动“双碳”目标下的能源高效利用具有重要的意义。

## 参考文献:

- [1] 梁利慧. 低温热节能技术的综合应用与降本增效[J]. 资源节约与环保, 2025(05):53-57.
- [2] 郑育尾. 炼油厂低温热回收技术的应用[J]. 化学工程与装备, 2022(10):157-159.
- [3] 刘培兰. 厂际管道伴热改造分析设计[J]. 石化技术, 2019(09):13-14.
- [4] 国家能源局. 石油化工伴热设计规范:SH/T3040-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [5] 张高博, 魏云辉, 汪广春, 等. 甲醇制烯烃装置余热回收替代蒸汽研究[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2020(04): 61-65, 112.

# 大数据技术在桥梁日常养护监测中的应用

龚朝平

(四川省宜宾公路养护管理总段工程队, 四川 宜宾 644000)

**摘要** 桥梁作为交通基础设施的关键节点, 其养护监测水平直接影响通行安全与使用寿命。本文以宜宾市石马溪大桥为研究对象, 结合区域亚热带季风气候与复杂交通荷载特点, 系统探讨大数据技术在桥梁日常养护监测中的应用路径。通过工程实例阐述数据采集传输、存储处理、分析建模及决策支持等核心技术的实施方法, 提出将大数据技术与桥梁养护深度融合, 可实现结构状态的实时感知与精准评估, 显著提升养护效率与决策科学性, 以为西南地区既有病害桥梁的智能化养护提供技术参考。

**关键词** 大数据技术; 桥梁养护; 监测系统; 状态评估; 石马溪大桥

**中图分类号**: TP31; U445

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.007

## 0 引言

桥梁是交通网络中的咽喉工程, 其结构健康状态直接关系到区域经济发展与民生安全。宜宾市地处四川南部, 受亚热带季风气候影响, 年均降水量达 1 400 mm, 雨季集中且多强降雨, 同时作为区域交通枢纽, 桥梁长期承受重载车辆通行压力。石马溪大桥作为宜宾市通往菜坝机场及周边县市的重要通道, 长期超负荷运行导致结构病害频发, 传统养护模式面临数据碎片化、评估滞后性等难题<sup>[1]</sup>。随着大数据、人工智能等技术的快速发展, 为桥梁养护监测提供了全新解决方案。当前, 桥梁养护领域的数字化转型已成为行业趋势, 但在既有病害桥梁的复杂环境下, 数据采集的针对性、分析模型的适应性及系统集成的兼容性等仍存在技术瓶颈。基于此, 本文以石马溪大桥养护监测工程为案例, 深入剖析大数据技术在日常养护监测中的具体应用, 构建全流程技术体系。

## 1 工程概况

### 1.1 工程基本情况

本工程为宜宾市石马溪大桥养护监测项目, 该桥位于 XQ44 宜飞路翠屏区境内, 跨越石马溪, 桥梁中心桩号 K3+409, 全长 520 m, 全宽 17.0 m, 净宽 16.0 m, 跨径组合为 4×25 m 预应力混凝土现浇简支板梁 +2×9.59 m 钢筋混凝土现浇连续板梁 +8×50 m 预应力混凝土预制简支 T 梁, 设计荷载为汽车一超 20 级、挂车—120, 2003 年建成通车, 是当地管养桥梁中最长的梁式桥。项目区域属亚热带季风气候, 年均降水量 1 400 mm, 雨季集中在 7 月至 9 月且多强降雨; 沿线地质以砂岩、泥岩为主, 部分桥段存在潜在滑坡风险。根据公路试

验检测公司出具的特殊检查报告, 该桥存在简支梁底板裂缝、T 梁梁底破损、盖梁开裂、伸缩缝损坏等病害, 虽已设置限速 20 km/h、限载 20T 标志, 但超限车辆仍频繁通行, 结构损伤持续加剧。监测范围涵盖桥梁结构位移、应力应变、温度、振动及车辆荷载等参数, 计划通过大数据技术构建一体化养护监测平台, 实现数据实时采集、智能分析与预警决策<sup>[2]</sup>。

### 1.2 重难点分析

本项目实施重难点主要体现在三个方面。一是监测环境复杂, 石马溪大桥为既有运营桥梁, 需在不影响交通通行的前提下布设传感器, 且 5#-6# 跨计划拆除重建, 传感器选型需兼顾临时性与连续性; 同时高温高湿多雨的气候条件, 对传感器耐久性提出更高要求, 如车辆荷载监测传感器需满足 -40 ~ 75℃ 环境温度使用需求。二是数据处理难度大, 全桥共布设 117 个监测点, 含 4 车道车辆荷载动态监测, 单座桥梁日均产生监测数据超 3 GB, 涵盖应力、挠度、振动、车辆轴重等多源数据, 格式差异大, 需建立统一的数据标准与融合机制, 避免形成数据孤岛。三是评估模型适应性不足, 桥梁既有病害与车辆荷载、环境因素的关联规律复杂, 如梁体裂缝扩展与超载车辆通行频次的相关性需专项分析, 需开发适用于该桥的个性化病害诊断模<sup>[3]</sup>。

## 2 大数据技术在桥梁养护监测中的关键应用

### 2.1 多源数据采集与传输技术

数据采集需结合石马溪大桥结构与病害特点, 构建全域感知网络。在 1#-14# 跨跨中梁底装 56 个表面式光纤光栅应变传感器, 量程 ±1 500 με、分辨率 1 με、

采样频率 10 Hz, 监测加固及重建跨段受力; 1#-14# 跨梁体两侧及桥台设 30 个光纤光栅静力水准仪, 量程 100 mm、精度 0.1% F.S、采样频率 1 Hz, 跟踪垂直位移; 4#、8#、10#、12# 跨梁底装 8 个光纤光栅加速度传感器, 量程 2 g、测量频率 100 Hz, 监测梁体振动; 6#、10#、14# 桥墩设 8 个光纤光栅位移计, 量程 100 mm、分辨率 0.01% F.S, 捕捉墩梁相对位移; 4#、9#、14# 跨梁底装 3 个表面式光纤光栅温度传感器, 量程 -20 ~ +90 °C、精度 0.5 °C、采样频率 1 Hz, 修正温度影响; 桥头双向 4 车道布动态石英称重系统, 含石英压电传感器 (额定轴载 0 ~ 150 KN、车辆适应速度 0.5 ~ 150 km/h)、700 万像素车牌识别仪 (识别率  $\geq 95\%$ ) 及 3×2 mLED 屏, 实现超载非现场执法<sup>[4]</sup>。

传输采用“无线+有线”模式, 主体数据经 30M 光纤传至野外机柜, 偏远区域用 LoRa 技术, 传输距离 3 km、数据丢包率  $\leq 1\%$ ; 关键数据通过 4G 网络实时上传, 非关键数据经边缘计算节点预处理后定时上传。监测节点配置续航能力  $\geq 72$  h 的备用电源, 传感器需经过 85% 湿度、60 °C 高温环境测试, 工作稳定性  $\geq 95\%$ ; 数据采集系统与桥梁管理系统对接, 实现监测点位置、设备型号、校准记录等元数据的自动关联。

## 2.2 数据存储与处理平台构建

数据存储需满足海量异构数据的高效管理需求, 采用“分布式文件系统+关系型数据库+时序数据库”的混合存储架构。对于传感器原始数据, 采用 HDFS 分布式文件系统存储, 单节点存储容量不低于 10TB, 支持数据副本机制, 副本数量 3 个, 确保数据可靠性; 结构参数检测报告、加固维修记录等结构化数据, 存储于 MySQL 关系型数据库, 采用主从复制模式实现数据备份。针对桥梁监测的时序特性, 引入 InfluxDB 时序数据库, 写入吞吐量达 10 万条/秒, 数据保留策略按“热数据 3 个月、冷数据 5 年”设置, 冷数据自动迁移至低成本存储介质。数据处理采用流处理与批处理相结合的方式, 实时数据通过 Apache Flink 流处理框架进行清洗, 剔除异常值、填补缺失值, 异常值识别采用  $3\sigma$  准则与滑动窗口算法结合的方式, 处理延迟控制在 500 ms 以内; 历史数据采用 Apache Spark 进行批处理分析, 挖掘结构性能退化规律, 如梁体应变与超载车辆通行频次的关联关系。平台部署于本地私有云, 服务器集群包含 2 台数据处理服务器、1 台数据库服务器, 服务器配置为 2 个英特尔® 至强® 处理器 E5-2650 (八核 2.0GHz)、8GB 内存, 数据库服务器硬盘不小于 2TB SAS, 支持弹性扩展; 通过 Kubernetes 实现容器化管理, 服务可用性达 99.9%。数据接口采用

RESTful API 标准, 支持与宜宾市智慧交通平台的数据交互, 接口响应时间不超过 200 ms。

## 2.3 结构状态分析与评估模型

基于大数据的结构评估需建立多层次分析模型, 实现从数据到知识的转化。采用机器学习算法构建结构响应预测模型, 以历史监测数据为训练样本, 输入参数包括环境温度、车辆轴重、降雨量等, 输出结构应变、位移等响应值, 模型采用随机森林算法, 预测误差控制在 5% 以内; 通过对比实际监测值与预测值的偏差, 识别结构异常状态, 偏差阈值按 95% 置信区间动态调整。针对桥梁典型病害, 建立基于关联规则的病害诊断模型, 挖掘传感器数据与病害类型的关联关系, 如 T 梁跨中应变超  $1\ 200\ \mu\epsilon$  且超载车辆日均通行超 50 辆时, 梁底裂缝扩展风险支持度不低于 60%; 采用 LSTM 神经网络构建结构性能退化模型, 输入历史损伤数据, 预测未来 3 年的性能衰减趋势, 预测精度达 85% 以上。对加固及重建跨段关键构件, 开发数字孪生模型, 通过有限元模型与监测数据的实时融合, 实现结构应力分布的可视化展示, 模型更新频率与监测数据采集频率同步; 结合全生命周期数据, 建立构件剩余寿命评估模型, 考虑材料劣化、荷载累积、环境侵蚀等因素, 寿命预测误差不超过 10%。分析模型定期进行迭代优化, 新纳入的监测数据每半年重新训练一次模型参数, 确保模型适应性<sup>[5]</sup>。

## 2.4 智能预警与决策支持系统

预警系统需实现多级告警与精准推送, 基于结构安全阈值设置三级预警机制: 一级预警对应参数超出正常范围但未达限值, 如梁体应变超  $1\ 000\ \mu\epsilon$ , 通过系统平台自动提示; 二级预警对应参数接近限值, 如挠度超 80 mm (限值 100 mm), 向养护负责人发送短信预警; 三级预警对应参数超限, 如超载车辆轴重超 150 kN, 启动声光报警并自动推送至应急指挥平台, 同时联动 LED 警示屏显示“超载车辆请桥下绕行”。预警阈值采用“规范值+个性化修正”的方式确定, 个性化修正基于同类桥梁历史数据与专家经验, 修正系数在 0.8 ~ 1.2 之间。决策支持系统构建养护方案生成模型, 根据结构状态评估结果、交通流量、养护资源等约束条件, 自动生成养护建议, 包括养护时机、措施类型、所需材料等, 如某跨应变持续超预警值时, 建议采用碳纤维布加固并估算材料用量与成本; 采用遗传算法优化养护计划, 以养护成本最小化与结构可靠性最大化为目标, 求解最优养护策略, 方案生成时间不超过 10 分钟。系统内置知识库, 存储桥梁病害案例、处理措施、规范条文等知识, 采用知识图谱技术

实现关联查询,支持通过自然语言提问获取相关信息;开发移动应用终端,养护人员可实时查看监测数据、接收预警信息、上传现场检查结果,终端支持离线操作,网络恢复后自动同步数据。每月生成养护监测报告,包含结构状态评估、养护建议、实施效果等内容,报告采用自动生成与专家审核相结合的方式,确保结论准确性。

### 3 大数据技术应用的实施策略

#### 3.1 数据质量管控机制

建立全流程数据质量管控体系,从采集到应用各环节设置质量控制点。传感器安装前进行计量校准,校准误差不超过 0.5% F.S,校准记录存入区块链系统,不可篡改;数据采集阶段采用实时校验机制,对超出量程的数据标记为无效并自动重试采集,重试次数不超过 3 次。数据传输过程中采用 MD5 加密校验,确保数据完整性;入库前进行格式校验,不符合标准的数据自动退回并记录异常原因。定期开展数据质量评估,评估指标包括完整性、准确性、时效性,完整性要求达 98% 以上,准确性通过现场抽检验证,抽检比例不低于 5%,时效性要求关键数据延迟不超过 10 分钟。建立数据质量责任追溯机制,明确传感器维护人员、数据管理人员的职责,质量问题采用鱼骨图分析法追溯根源;每季度发布数据质量报告,针对薄弱环节制定改进措施,如传感器故障率高的区域增加维护频次,传输不稳定路段优化通信方案。数据质量与养护决策挂钩,低质量数据自动标注,不纳入评估模型计算。

#### 3.2 系统安全与标准化建设

系统安全需构建多层次防护体系,网络层面采用防火墙、入侵检测系统,划分安全区域,不同区域间采用 ACL 访问控制策略;数据传输采用 SSL/TLS 加密,密钥每 72 小时自动更新;服务器部署杀毒软件与漏洞扫描系统,每周进行一次全盘扫描,高危漏洞修复时间不超过 24 小时。数据安全方面,敏感信息如桥梁关键参数采用 AES-256 加密存储,访问权限按“最小权限”原则设置,分为管理员、操作员、访客三级,操作记录全程审计;建立数据备份与恢复机制,每日进行增量备份、每周进行全量备份,备份数据异地存放,恢复时间不超过 4 小时。标准化建设包括数据采集标准、数据接口标准、分析模型标准,数据采集标准规定传感器布设位置、采样频率、精度要求等,参考《公路桥梁结构监测技术规程》并结合项目实际细化;数据接口采用国家标准 GB/T39000 系列,确保 interoperability;分析模型输出格式统一为 JSON,包含评估指标、

置信度、建议措施等要素。定期参与行业标准化交流,推动区域内数据标准协同。

#### 3.3 养护协同与应用推广

建立跨部门协同机制,整合养护管理部门、检测单位、执法机构等多方资源,成立大数据应用专项工作组,每月召开协调会议,解决实施过程中的问题。搭建协同工作平台,实现监测数据、检查记录、养护计划、超载车辆信息等共享,平台用户按角色分配权限,支持在线审批、电子签章等功能,流程处理时间缩短 30% 以上。与高校科研院所合作开展技术攻关,针对既有病害桥梁特殊环境下的监测技术进行研究,开发专用传感器与分析模型;建立“产学研用”示范基地,培养大数据与桥梁养护复合型人才,每年组织 2 次技术培训,培训内容包括系统操作、数据分析、模型应用等。在应用推广方面,先以石马溪大桥为试点,总结经验后逐步推广至周边同类桥梁;形成可复制的技术方案,包括系统架构、设备选型、实施步骤等,编制《大数据桥梁养护监测应用指南》;通过行业研讨会、技术交流会等形式分享应用成果,推动技术标准化与产业化。

### 4 结束语

本项目通过在宜宾市石马溪大桥应用大数据技术,构建了从多源数据采集到智能决策支持的完整养护监测体系,有效解决了传统养护模式中的数据碎片化、评估滞后等问题。实践结果表明,系统运行稳定,数据采集准确率达 98% 以上,结构异常预警响应时间缩短至 10 分钟以内,养护计划制定效率提升 50%,桥梁结构性能退化趋势预测精度达 85%,验证了大数据技术在既有病害桥梁养护中的适用性与有效性。该工程案例证实,大数据技术的深度应用可实现桥梁养护从“事后维修”向“事前预防”的转变,显著提升养护科学性与经济性,同时通过车辆荷载监测与执法协同,有效遏制超限车辆通行,延缓结构病害发展。

#### 参考文献:

- [1] 张敬伟,满新杰.结构健康监测技术在公路桥梁养护中的应用[J].交通节能与环保,2023,19(S1):143-146.
- [2] 吴佳辰.大数据背景下市政城市道路养护管理研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(22):196-198.
- [3] 谷明.探讨大数据在高速公路预防性养护中的应用[J].交通科技与管理,2023,04(01):59-61.
- [4] 管晓嫚,李坤,王银广,等.桥梁养护管理信息大数据发展[J].智能城市,2020,06(20):102-103.
- [5] 曹海盛.BIM技术在桥梁健康养护监测中的应用探索[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(09):183-186.

# 智能化技术在医院电气工程自动化中的应用

边震坤

(哈尔滨医科大学附属肿瘤医院, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要** 随着医疗服务需求持续增长, 医院电气系统对供电可靠性、设备兼容性及节能性提出更高要求。本研究以某省人民医院为实证对象, 基于其 286 000 m<sup>2</sup> 建筑规模及日均 6 000 人次接诊负荷, 剖析电气系统运行现状及功能需求。探究可编程逻辑控制器 (PLC) 技术、智能故障诊断系统、自动化控制模块的工程应用路径。通过双回路 10 kV 专线供电架构搭建、三级配电系统优化、谐波抑制装置配置等技术措施, 实现供电系统持续稳定运行与能源高效利用目标。通过实践验证, 智能化技术可显著提升医疗场所电气系统自动化运行效率, 将照明能耗降低 35%, 关键回路切换时间控制在 100 ms 以内, 为高可靠性医疗用电环境构建提供可参考的工程解决方案。

**关键词** 医院电气工程; 自动化技术; 智能化技术; 医疗设备供电

**中图分类号**: TP29; TM76

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.008

## 0 引言

医院作为集诊疗、护理、科研于一体的复杂功能载体, 其高效运转与电气系统深度关联。生命体征监测设备的持续供电维系、大型医疗仪器的精准运行保障、就医环境的舒适安全营造, 均依赖电气工程的可靠稳定运行与智能化程度。随着医疗设备技术革新与诊疗业务拓展, 传统电气系统在实时响应、能效管理、精细化控制等方面的局限性日益凸显<sup>[1]</sup>。在此行业发展背景下, 自动化与智能化技术的系统性应用, 已成为破解医院电气工程现存问题、推动医疗基础设施升级、赋能高质量医疗服务的主要路径。

## 1 工程概况

哈尔滨医科大学附属肿瘤医院作为区域肿瘤防治核心机构, 伴随医疗业务规模扩大与就诊患者数量增长, 对内部电气工程的可靠性、运行效率及智能化程度提出更高标准。为契合现代医疗发展趋势, 提升医疗服务品质与运营管理效能, 医院积极推进电气工程自动化智能化建设, 在多个关键领域实现技术应用突破<sup>[2]</sup>。2022年, 医院实施电气智能化及火灾预警平台建设项目, 项目中标金额 28.9 695 万元。该平台通过智能化技术对医院内电气设备运行状态进行实时监测, 针对异常发热、电流过载、漏电等可能引发火灾的安全隐患, 建立动态预警机制。当监测到设备运行参数超出安全阈值时, 系统立即发出预警信号, 提示相关人员及时排查处理, 将火灾风险控制萌芽阶段。该平台的应用为医院消防安全提供技术保障, 提升电气火灾风险防范能力, 切实保障医院人员安全与财产安

全。医院搭建的智能电力监控平台采用分层分布式架构, 包含监控管理层、通信接口层、现场间隔层三个层级。监控管理层由后台监控设备组成, 主站监控服务器与各变电所子站客户端通过数据库冗余配置保障系统安全, 构成整个监控体系的核心控制单元<sup>[3]</sup>。通信接口层作为网络连接枢纽, 借助通信管理机、数据交换机、网关等设备, 实现监控管理层与现场间隔层的实时信息交互及自动化装置接入, 通过网络与设备双重冗余机制提升通信可靠性。现场间隔层由微机智能保护装置、电力监控仪表、PLC 等智能设备构成, 具备测量、保护、控制及操作监控功能, 可通过网络通信实时上传测量数据与保护动作信息, 并接收监控管理层操作指令实现远程控制。

## 2 医院电气系统需求

### 2.1 供电可靠性要求

医院核心医疗区域对电力连续性要求严格, 手术部、重症监护室 (ICU) 配备呼吸机、体外膜肺氧合 (ECMO) 等生命支持设备, 断电直接威胁患者生命安全。因此, 建立双回路 10 kV 专线、柴油发电机组与 UPS 不间断电源三级供电保障体系, 市政双回路电源切换时间应控制在 100 ms 以内。柴油发电机组要求市电中断 15 s 内启动, UPS 为精密设备提供 5 ~ 10 分钟过渡供电, 确保关键负荷零中断。针对医技楼 3.0T 核磁共振仪、256 排 CT 等大型设备, 需要配置独立配电回路, 采用隔离变压器消除电网波动影响, 保障设备稳定运行。

### 2.2 医疗设备适配性要求

大型医疗设备对供电质量要求较高, 直线加速器等设备启动时产生冲击电流, 要求配备专用配电柜及

浪涌保护器。核磁共振成像系统对电磁环境敏感，需构建等电位联结网络，接地电阻不大于  $1\ \Omega$ ，同时采用谐波抑制装置将总谐波畸变率（THD）控制在 5% 以内<sup>[4]</sup>。此外，医疗设备更新迭代频繁，电气系统要求预留 20% ~ 30% 容量冗余，配电线路采用模块化设计，便于设备接入与系统扩展。

### 2.3 电气安全防护要求

医院人员密集且患者行动能力受限，电气安全至关重要。手术室、ICU 等区域必须采用 IT 不接地系统，降低漏电风险。所有配电回路要求配置剩余电流动作保护装置（RCD），动作电流不大于 30 mA，动作时间小于 0.1 s。针对医疗设备产生高频电磁干扰，需采用屏蔽电缆、金属桥架接地等措施，保障设备间互不干扰，同时确保医疗数据采集准确性。

### 2.4 运维管理智能化要求

面对医院庞大电气设备网络，传统人工巡检模式效率低、隐患发现滞后。要求部署智能运维系统，通过传感器实时采集变压器油温、电缆接头温度、开关状态等数据，结合大数据分析机器学习算法，实现故障预测与主动预警。建立远程监控平台，使运维人员通过移动端实时查看设备运行参数，接收报警信息，缩短故障响应时间，提升运维效率 30% 以上。

## 3 智能化技术在医院电气工程自动化中的具体应用

### 3.1 PLC 技术应用

在哈尔滨医科大学附属肿瘤医院电气工程实践中，PLC（可编程逻辑控制器）技术结合模块化编程与分布式控制架构，实现复杂系统精准管理（见图 1）。以中央空调系统为例，其应用流程包含数据采集、逻辑运算、指令执行三个核心环节，部署于手术室、病房区域的 SHT45 型温湿度传感器与 SCD30 型 CO<sub>2</sub> 浓度传感器，以每秒 1 次频率采集环境数据；西门子 S7-1200 系列 PLC 内置模糊控制算法，将实时数据与预设阈值，即手术室温度  $22\pm 0.5\ ^\circ\text{C}$ 、湿度 40% ~ 60% 比对。当数据偏离阈值时，PLC 通过 Modbus 通信协议向冷水机组、变频水泵、风机盘管发送调节指令，实现制冷量与风量动态匹配。电梯群控系统中，PLC 采用时间预测调度算法，整合电梯位置、载重、运行方向等状态数据与候梯信号，通过路径优化减少乘客等待时间。实际运行数据显示，住院部电梯高峰时段平均等待时间由 45 s 降至 32 s，单日运载效率提升 18%。污水处理系统的 PLC 控制模块联动液位传感器与水质监测设备，实现格栅机、曝气机、污泥泵协同作业，保障出水水质稳定达标。

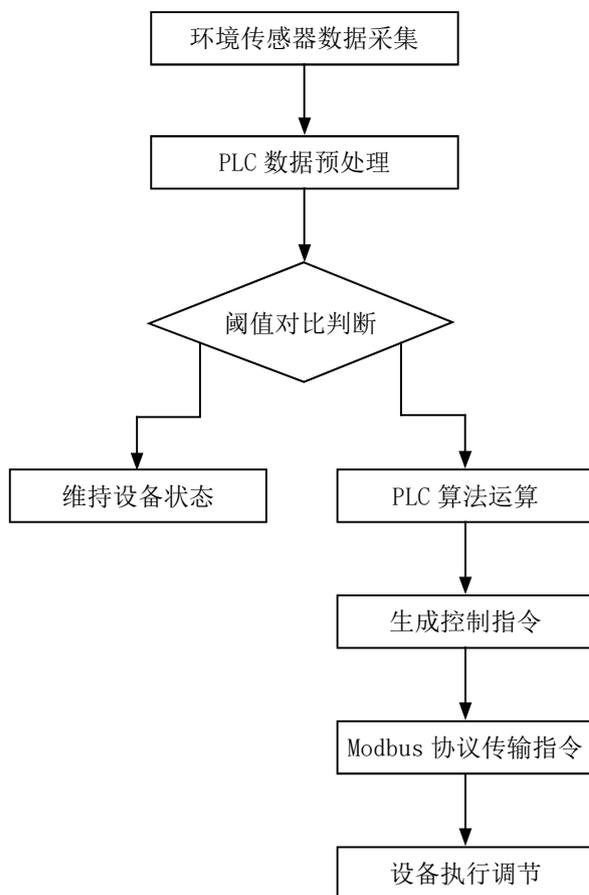


图 1 PLC 控制中央空调系统应用流程

### 3.2 故障诊断技术应用

医院电气设备故障诊断构建边缘计算与机器学习融合架构，形成数据采集到故障预警完整体系。具体如下表 1 所示。

通过表 1 可知，变压器、配电柜等关键设备部署 PCB352C04 型振动传感器、FLIRE8Pro 红外测温仪、LEML TS6-NP 电流互感器等监测装置，以毫秒级频率采集振动频谱、表面温度、三相电流等 12 类参数。采集数据经边缘计算节点特征提取后，传输至中央服务器，由基于长短期记忆网络（LSTM）的故障诊断模型分析。以变压器故障诊断为例，系统基于油中溶解气体，即氢气、乙炔、甲烷浓度变化趋势，结合负载率、油温等参数构建故障预测模型。当油温连续 30 分钟超  $85\ ^\circ\text{C}$  且乙炔浓度日增长率  $> 20\%$  时，系统触发三级预警机制，一级预警短信通知运维主管；二级预警启动现场声光报警；三级预警联动备用设备切换。实际应用显示，该系统将变压器故障平均发现时间从 4.2 小时缩短至 15 分钟，故障停机时长减少 68%。

表1 电气设备关键监测参数配置

监测设备类型	关键监测参数	传感器型号	数据采集频率	预警阈值
干式变压器	绕组温度	PT100	1次/分钟	130℃
高压配电柜	触头温度	非接触式红外传感器	1次/10s	75℃
电缆接头	局部放电量	TEV传感器	实时监测	>15mV
柴油发电机	振动加速度	PCB352C33	1000Hz	>7.1m/s <sup>2</sup>

### 3.3 智能控制技术应用

走廊区域采用与门诊楼同类型双鉴传感器，针对人员流动特性优化检测参数：人体移动检测灵敏度下调20%，防止医护人员快速穿梭时频繁触发亮度改变；同时延长无人状态判断时间至5分钟，适配患者缓慢移动场景。改造后，住院部走廊日均亮灯时长减少1.2h，节能效果比门诊公共区域提升8%。病房照明系统采用双模式控制逻辑：在医护模式下，通过床头呼叫器联动，自动将对应病床区域灯光调至70%照度，其余区域保持30%低照度；患者模式支持4档位无级调光（20%~100%），搭配红外遥控器实现非接触操控。数据显示，该系统使病房平均光照功率从28W降至19W，患者对灯光舒适度满意度提升23%。药房区域采用光照闭环控制系统，在原有BH1750传感器基础上增设温度补偿模块，环境温度超过28℃时自动修正光照检测值，确保药品存放区域光照稳定在500±5lux。系统与药房空调联动，光照调节引发灯具散热增加时，提前30s开启空调风量补偿，全年可减少因温度波动导致的药品存储环境异常3起<sup>[5]</sup>。急诊大厅照明强化应急响应设计，在双鉴传感器基础上增加声音检测模块，救护车鸣笛声达65dB以上时，系统1.5s内将入口区域灯光切换至100%照度并启动应急指示灯联动。实测显示，该机制使夜间急诊患者入院引导时间缩短40s。行政办公区接入OA系统排班数据，非工作时段自动切换至15%节能模式，仅保留走廊和公共通道基础照明。结合DTZY1988-Z型电表数据统计，办公区月均用电量较改造前下降186kW·h，节电率达19%。系统后台可生成各区域照明能耗日报，经由BAS系统接口实现与医院能源管理平台的数据互通，便于能耗异常预警。

### 3.4 优化设计技术应用

电气系统设计阶段采用协同仿真技术，通过多物理场耦合分析提升系统性能。配电系统设计中，利用ETAP软件建立全系统仿真模型，模拟夏季1850kW高峰负荷工况下的电力潮流分布，通过调整变压器分接头位置与电缆截面规格，将10kV线路损耗从5.2%降

至3.8%。针对医技楼大型医疗设备区域，运用ANSYS Maxwell进行电磁兼容性仿真，通过优化屏蔽层接地方式与设备布局，使MRI室周边电磁干扰强度从200A/m降至28A/m，满足设备运行要求<sup>[6]</sup>。照明设计采用DIALux软件进行三维光环境模拟，以住院病房为例，对比4种灯具布置方案的光照均匀度、眩光值等参数，最终选用4000K色温、Ra≥90的蝙蝠翼配光曲线LED面板灯，在符合GB50034-2013标准前提下，将照明功率密度从9W/m<sup>2</sup>降至6.5W/m<sup>2</sup>。

## 4 结束语

智能化技术在医院电气工程自动化中的应用已展现显著工程价值，PLC技术实现系统精准控制，故障诊断技术提升设备运维效率，智能控制策略达成能耗优化目标，协同仿真设计保障系统性能，多维度技术应用共同构建起安全可靠的医院电气运行体系。伴随技术迭代与跨领域融合深化，该技术将进一步与物联网、大数据分析深度融合，为医疗场所打造兼具安全性、高效性、节能性的电气环境，助力医疗服务质量实现阶梯式提升，推动智慧医院基础设施建设迈向新高度。

## 参考文献：

- [1] 王深明. 电气工程自动化中智能化技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(07):133-135.
- [2] 张博, 刘光辉, 孙桂磊. 智能化技术在电气工程自动化控制中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2025(07):26-28.
- [3] 婧莹, 李海军. 电力系统电气工程自动化中智能化技术的运用[J]. 电子元器件与信息技术, 2025,09(03):64-66.
- [4] 崔培璇. 电气工程及其自动化的智能化技术应用探讨[J]. 科技资讯, 2025,23(06):83-85.
- [5] 杜锡彬. 智能化技术在电气工程及其自动化中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2025,10(05):219-221.
- [6] 李常彬. 基于智能化的火电厂电气工程自动化技术探析[J]. 电力设备管理, 2025(02):93-95.

# 人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用探讨

纪祥菊, 张大昊

(山东数维规划设计有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要** 传统的国土空间规划是依赖人工累积的经验与有限的数, 存在着分析片面、信息滞后等风险, 已经无法适应复杂多变的土地利用需求。在人工智能技术辅助下, 国土空间规划局能够增强与国家统计局、城市规划局等诸多部门的合作, 结合各部门提供的信息提高国土空间规划质量, 并预测未来空间发展趋势, 可对城市有序扩张、土地资源配等进有效安排, 从而提高国土空间规划决策精准性。这样既能够提高国土空间规划的科学与前瞻性, 又能够更好地协调经济发展与生态保护的关系。国土空间智慧规划中应用人工智能技术, 是时代发展的必然选择, 本文探讨了人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用, 旨在为推动国土空间规划从粗放式管理朝着精细化、智能化转型提供有益参考。

**关键词** 人工智能技术; 国土空间; 智慧规划

**中图分类号**: TP18; TU98

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.009

## 0 引言

国土空间智慧规划是关乎国计民生的重要工作, 它不仅决定着国家资源的配置效率, 更影响着生态环境的可持续发展与人民生活水平的提升。但是, 由于城市化进程不断加速, 人口呈现出爆发式增长, 这就使得国土空间规划工作所采用的传统规划方法显得愈发发力不从心。人工智能技术具备强大的数据分析、问题处理以及决策能力, 能够为国土空间规划局在国土空间智慧规划提供全新且细致的思路, 并实时监测土地利用变化、评估生态风险、优化基础设施布局<sup>[1]</sup>。本文将人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用探讨作为研究重点, 为实现国土空间的可持续利用提供参考。

## 1 人工智能技术重塑国土空间智慧规划的内涵

### 1.1 规划理念从“静态蓝图”向“动态治理”转变

传统规划侧重于绘制未来若干年的空间布局蓝图, 具备一定的前瞻性与理想性, 当然, 也容易出现与现实执行脱节的现象。借助人工智能技术, 国土空间规划能够实时接入各类动态数据, 如交通流量、人口迁移、环境监测、经济活动等, 让工作人员参考历史数据与模型算法去感知与评估国土空间现状, 从而更好地预测将来的发展趋势, 并动态调整规划策略。规划将不再是一成不变的终极目标, 而是持续监测、评估、反馈与优化的动态治理过程。

### 1.2 规划基础从“有限数据”向“海量数据”转变

传统规划受限于数据获取的难度与成本, 主要依赖于有限的统计数据、专项调查与经验判断, 这就在某种程度上影响了规划的实际效果。借助人工智能技术, 尤其是物联网、遥感与移动互联网等, 可处理与分析多源异构的数据。如高分辨率卫星影像、传感器网络、社交媒体信息、经济普查数据等。这就在某种程度上丰富了国土空间规划可以获取的空间信息, 使规划决策更为全面与合理。

### 1.3 规划分析从“定性判断”向“定量模拟”转变

传统规划中的很多分析工作, 如土地适宜评价、环境影响评估、交通需求预测等, 虽说有着相应的量化方法, 但却会受限于模型复杂度与计算能力, 因此, 在分析上更多地依赖专家经验与定性判断。通过人工智能技术, 特别是机器学习与深度学习算法, 国土空间规划能够处理高维且复杂的关联数据, 建立更为精准化的预测模型与仿真系统, 从而判断某个城市的扩张模式是否合适, 哪个开发方案对于生态系统影响最小, 以及模拟交通拥堵的时空分布等情况, 以提升规划分析的客观性与科学性。

### 1.4 规划目标从“单一优化”向“多目标协同”转变

国土空间规划涉及经济、社会、生态、文化等多维度, 不同目标间会产生较为复杂的博弈关系, 单凭传统的规划方法是难以确保国土空间规划决策能够兼

顾各方需求的。国土空间规划可利用多目标优化算法与博弈论模型，协调经济增长与环境保护、基础设施建设与耕地保护、区域均衡发展效率提升等问题，从中找到最佳的平衡点，实现更综合、更协调的空间治理目标，进而提高相关部门的配合积极性，让国土空间智慧规划工作能够顺利地落实到位。

## 2 人工智能技术在国土空间智慧规划中的具体应用场景

### 2.1 业务流程自动化：提升规划效率与规范

人工智能技术可以有效提升国土空间规划业务流程的自动化水平，减少重复性、事务性工作，将国土空间规划工作人员从繁琐的劳动中解放出去，让他们有大量的时间与精力去进行创造性与战略性的思考<sup>[2]</sup>。首先，在数据采集与预处理环节，人工智能技术可以自动识别、快速处理遥感影像、地理信息数据中的噪声与错误，从中提取道路、建筑物、水体等地理要素，缩短国土空间规划工作中准备数据的时间。例如：利用计算机视觉技术、人工智能技术，可在短时间内在海量卫星影像中识别出新增建设用地、违法建筑、植被覆盖变化等，为规划监测提供实时的数据支持。其次，在空间分析环节，人工智能技术可以自动化处理一些常规的国土空间规划工作，提高任务完成质量与效率。例如：国土空间规划部门利用机器学习算法，结合预设的生态、经济、社会等多重约束条件，快速筛选出适宜不同用途（如居住、工业、农业、生态保护）的土地空间。同时，利用人工智能技术，能够分析交通可达性、公共设施覆盖范围等，以生成直观的分析报告与可视图表，提高分析的质量与效率。再次，在方案设计与比选环节，人工智能技术能够辅助生成多种规划备选方案。基于历史数据与规划目标，探索不同的空间布局组合，初步评估各项组合方案的优劣。虽说现有的人工智能技术还无法完全胜任国土空间规划的创造性设计工作，可是方案生成、初步筛选、细节优化等方面都可提供强大的支持，拓展国土空间规划局的工作思路。最后，在成果编制与审查环节，人工智能技术可辅助检查规划文本与图件的规范性、逻辑一致性，自动提取关键指标，并生成初步的规划细节与公众说明材料。如此，就可有效提高国土空间规划工作成果，减少业务上的疏漏，提高规划工作的效率，增强流程的规范。

### 2.2 规划分析科学化：深化认知与提升决策依据

人工智能技术可以实现规划分析的科学化，这是国土空间智慧规划的核心<sup>[3]</sup>，在空间格局识别与演化

模拟方面，人工智能技术，特别是聚类分析、关联规则挖掘、时序分析等机器学习技术，可辅助国土空间规划工作人员在海量的国土数据中找出潜在的模式与规律。如此，国土空间规划工作人员就可利用空间演化模型演示不同政策情景下国土空间格局的动态变化，找出合适的方案。其次，在资源环境承载力评估方面，人工智能技术可以整合水土资源、环境容量等多源数据，利用复杂的非线性模型，准确地评估特定区域经济发展能力与限制因素。例如：结合气象、水文、土壤、土地等多维数据，预测水资源供需平衡，识别潜在的缺水风险；结合遥感数据与生态模型，评估土地是否有退化风险，生物是否有多样性丧失风险。再次，在社会经济影响预测方面，人工智能技术能根据历史数据与市场信息，预测不同规划方案对区域经济、产业结构、就业分布、住房价格、公共服务等方面的影响。例如：利用机器学习模型，可分析交通基础设施投资与区域经济增长的关系，预测新建轨道交通线路对沿线房价与人口密度的潜在影响；利用自然语言处理技术，可根据分析政策与市场评论，辅助判断产业政策的潜在效果。最后，在风险评估与预警方面，人工智能技术能实时监测自然灾害、环境污染、社会因素等各类风险源，预测它们发生的概率、范围与强度，并提前给出预警。例如：利用人工智能技术分析气象数据与地形数据，预测山洪、滑坡等地质灾害的风险区域等。总的来说，在科学化的分析下，国土空间规划工作人员能够让各项规划决策建立在坚实的数据基础与合理的逻辑之上。

### 2.3 治理决策智慧化：优化方案与提升治理效能

人工智能技术的最终目标是服务于智慧、高效的国土空间治理决策，这就需要将人工智能技术贯穿于规划实施、评估与调整的全过程，有效提升治理的精准性与响应性<sup>[4]</sup>。首先，在规划方案优化方面，面对多目标、多约束的复杂规划问题，人工智能技术可辅助设计合适的国土空间智慧规划方案，从中选择最优策略。例如：在土地利用规划中，如何在各区域间平衡耕地保护、建设用地扩张与生态空间保留，这些都是典型的问题。国土空间规划局工作人员需要利用人工智能去思考如何在满足各项硬件约束条件的前提下，根据经济效益最大化、生态效益最优化以及社会公平等目标进行相应的排序与推荐。其次，在资源配置决策方面，人工智能技术能够根据实时数据与预测模型动态地优化各类公共资源的空间配置。利用人工智能技术结合人口、交通以及服务等数据优化学校、医院、

公园等公共服务设施的布局,使其可以更好地满足居民需求。在基础设施投资决策中,人工智能技术可分析不同项目的潜在经济社会效益、环境影响与潜在风险,辅助决策者确定优先投资的项目与区域。最后,在规划实施监测与评估方面,人工智能技术能够对规划实施情况的实时、动态、智能监测。国土空间规划工作人员通过整合遥感监测、物联网感知、互联网数据等信息,可识别出规划执行中的偏差与问题,如违规使用土地、建设进度滞后、环境指标超标等,并及时生成预警报告,这样就可及时采取的措施,做出快速、精准的应急响应决策,最大限度地减少损失。总之,治理决策的智慧化,可使国土空间治理从被动应对转向主动预防与精细管理,从经验驱动转向数据驱动与智能辅助,极大程度地提升治理的效率与水平。

### 3 人工智能技术在国土空间智慧规划应用中的挑战与反思

#### 3.1 人工智能技术在国土空间智慧规划应用中的挑战

尽管人工智能技术在国土空间智慧规划中展现出巨大的潜力,但是在具体应用的过程中仍面临着不少的挑战,国土空间规划局必须要保持清醒的认知,进行深入的反思。首先,数据挑战。人工智能技术的性能高度依赖于数据的质量、数量与多样。而国土空间规划需要处理的数据存在类型繁多、来源分散、标准不一、数据孤岛等问题,所以,想要获取高质、实时、连续的空间数据就会产生高昂的成本,加上涉及国家安全、个人隐私等方面的信息获取受到限制,在缺乏统一、开放、共享的国土空间基础数据库上,必然会制约人工智能技术的应用效果。其次,算法与模型挑战。国土空间系统涉及自然、经济、社会、文化等方面,极为复杂化,即使现有的人工智能技术擅长处理高维数据,但其“黑箱”特性无法解释模型的决策过程,不符合国家要求的高度透明与责任感的规划要求。再次,技术融合与人才挑战。将人工智能技术与传统规划理论、方法、工具深度融合难度较高,需要既懂规划业务、又懂数据科学与人工智能的复合型人才。事实上,这类人才是较为稀缺的,必须加强相关技术人才的引进与培训。最后,成本与效益挑战。部署与维护人工智能技术系统需要巨大的前期投入,包括硬件设施、软件平台、数据资源、专业人才等。这对于一些经济欠发达地区或基层规划部门而言,是最难以承受的,必须评估人工智能技术应用的实际效益,确保投入能够带来显著的价值。

#### 3.2 人工智能技术在国土空间智慧规划应用中的反思

随着技术的不断进步与应用的持续深化,人工智能与国土空间智慧规划的融合将会变得更加紧密,甚至呈现出新的发展趋势<sup>[5]</sup>。首先,技术融合更加深入。人工智能技术将不再是独立的模块,而是深度嵌入国土空间基础信息平台、规划编制软件、决策支持系统等环节。同时,GIS、BIM、CIM(城市信息模型)等空间信息技术也会与人工智能技术深度融合,为国土空间智慧规划提供强大的三维可视、模拟仿真与智能分析能力,有效解决数据共享与安全问题。其次,人机协同将成为主流模式。人工智能技术不会取代国土空间规划专业人员,而会成为他们的得力助手,更多地表现为国土空间规划专业人员与人工智能技术系统的协同作业,有效提高规划工作的效率,同时保留人类在复杂决策中的判断力与创造力。最后,动态模拟与实时调控能力增强,不仅可以使基于人工智能技术的国土空间动态模拟模型更精细化、实时化,还可准确地反映空间系统的复杂互动与演化过程。结合物联网与数字孪生技术实时监测与反馈国土空间运行状态,实现从“规划蓝图”到“实时治理”的跨越。

### 4 结束语

人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用,不仅提升了规划编制的效率与规范性,深化了规划分析的科学性,更赋能了治理决策的智慧化水平,即便在数据、算法、人才等方面还面临着挑战,但是人工智能技术的应用潜力也是巨大的。基于此,国土空间规划部门需要积极引入人工智能技术,深入研究其应用规律,以更好地应对国土空间发展中的复杂挑战,提升国土空间治理的现代化水平。

#### 参考文献:

- [1] 元凡.人工智能技术在国土空间智慧规划中的应用研究[J].信息记录材料,2025,26(03):95-97.
- [2] 柴勋,张姍琪,侯静轩,等.人工智能赋能智慧国土空间规划的技术框架与业务应用[J].规划师,2025,41(02):1-9.
- [3] 陈志远,吴洪涛,罗亚,等.人工智能赋能智慧国土空间规划的关键路径:AI智能体的构建[J].规划师,2025,41(02):28-36.
- [4] 王晓丹.基于大数据和人工智能的国土空间规划优化研究[J].中华建设,2024(02):98-100.
- [5] 王树福.人工智能技术在土地利用规划中的应用和探讨[J].现代商贸工业,2024,45(13):240-242.

# 通信系统技术在高速公路机电系统中的应用分析

邱俊峰

(四川南渝高速公路有限公司, 四川 南充 637100)

**摘要** 现代通信技术是支撑控制逻辑运行的关键基础,高速公路机电系统需依托通信系统技术来提升运行效能。基于此,本文阐述了在高速公路机电系统中应用通信系统技术的必要性,并提出融合多源通信架构、打造全路段感知网、推动云边端协同控制、融合智慧高速模式等应用策略,旨在精细设计通信架构与技术路径,有效拓展机电系统功能边界,从而为建设智慧交通提供有益参考。

**关键词** 通信系统技术; 高速公路; 机电系统

中图分类号: TN91; U41

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.010

## 0 引言

随着信息密集型场景不断扩展,机电系统对通信网络的要求越来越高,重点强调多设备之间高效连接及指令反馈的准确性。在高速公路的运行环境下,通信系统负责协调外部信息及动态适配内部结构,数据链条一旦中断,设备反馈将难以闭环,从而直接影响整个机电功能的完整性。因此,通信能力强弱直接影响信息调度的效率,调度是否精准可反映出系统控制的深度,而控制的稳定性最终决定着道路运行的安全性。因此,在整个高速公路机电系统运行过程中,通信技术在各个环节始终发挥着关键支撑作用。

## 1 高速公路机电系统应用通信系统技术的必要性

### 1.1 保障数据畅通

通信系统技术作为高速公路机电系统的核心支撑环节,直接关系到各类子系统之间的信息联动及数据交换效率<sup>[1]</sup>。在日常运行中,高速公路监控系统、收费系统、照明系统及气象感知设备需依赖稳定的数据通道完成状态反馈。若通信链路存在延迟、卡顿或中断,将会削弱指挥调度能力并降低整体运行效率。在此基础上,保障数据的连贯性能够使前端采集终端与后端决策平台保持信息同步,从而为评估运行状态及运维干预提供可靠基础。在密集节点分布、高车流量强度的高速路段,通信系统技术的质量直接影响监测精度。数据畅通环境下信息传输便可保持完整、连续且高效的状态,机电系统运行也会更具抗干扰能力。相反,若通信不畅,将出现指令失效、信息延迟甚至频繁报错,不但增加安全风险还会打乱整体运行节奏。因此,

通信系统技术在保障数据畅通方面,关键就在于其精准度的技术表现。此外,稳定的数据传输还能为后续智能分析、联动控制及远程运营打下基础。技术人员可以利用连续的数据流判断运行趋势,及时发现潜在问题并提前安排应对方案,从而增强系统的运行弹性,保证高速公路机电系统稳定高效地运作。

### 1.2 强化应急响应

通信系统所提供的是一种贯穿事件感知、预警判断及联动指令的整体技术桥梁。在高密度运营压力下,任何一次高效应对背后都离不开通信技术所提供的响应保障。在高速公路机电系统运行过程中,突发事件处理效率常常受到通信系统技术能力的制约。事故发生后若通信响应迟缓或信息传输受阻,将延误预警发布、指令下达及现场联动等关键环节,从而影响整体应急处理效果。高质量的通信系统技术能够在紧急情况下优先传送数据,借助低时延、高可靠的信道能够保障信息通路不受干扰。当各类机电子系统分布广泛、功能交叉时,通信通道的连续性是联动反应的技术前提。稳定的通信支撑可快速完成事故图像上传、位置数据锁定、应急广播触发等操作,增强事故处理的主动性<sup>[2]</sup>。为提升整体应急能力,通信系统需深度融合智能识别、远程控制等模块,使信息传递更加精准高效。相关技术可完成各节点协同反馈、数据同步更新及多端快速响应,在保障应急流程连贯性的同时,为复杂场景下的动态调度提供有力支持。

### 1.3 助力远程维护

高速公路机电系统设备分布广、线路长、运行时间长,依靠传统人工巡检的方式常常面临效率低、反

馈慢等难题。引入通信系统技术能为远程设备监测提供可靠支撑,让远程维护从设想变成日常操作的一部分。结合高速传输链路,管理平台可以及时接收现场设备的运行数据、故障信息及状态报警,从而动态掌握信息。与传感终端、高频采集模块协同运作,通信系统可将维护任务从“定时被动”过渡为“状态驱动”,从而减少重复检查的成本并提高针对性分析的精度。一旦设备出现异常,通信系统可以同步传输诊断数据帮助分析故障情况,方便技术人员快速定位问题,并判断是否需要远程处理或安排人员到现场检修<sup>[3]</sup>。此外,技术人员可借助智能诊断平台实行趋势分析及故障预测,在问题发生前采取预防性调整,这种借助通信系统技术开展维护支持的方式能够让机电设备管理更高效精准,有助于减少发生突发故障且延长设备的使用寿命,从而提升高速公路机电系统的整体运行可靠性。

## 2 在高速公路机电系统中应用通信系统技术的策略

### 2.1 融合多源通信架构,夯实高速机电基础

有线通信具备高速传输及稳定性优势,适用于主干通道的数据传递;无线通信则能够在地形受限、施工复杂的区域表现出较强的适应能力。两者结合可增强机电系统在空间布局的联通能力,并有效分担传输负荷,提升整体运行的稳定性。在隧道、互通、服务区等场景中,不同通信方式的互补优势更加明显,使相关工作人员在设计、部署及运行等环节能够构建双重信息保障路径,从而为高速公路机电系统打下稳定高效的信息传输基础。

在实际工作中,相关工作人员需以高速公路隧道段作为重点测试区域,持续推进通信技术的融合应用。项目初期,可利用光纤通信作为主干通道,部署至沿线监控点和控制中心之间,并与各子系统接口对接形成主力数据通道。同时,针对隧道内信号弱、布线难的问题,技术人员可增设 5G 微基站及 Wi-Fi 热点节点,用于补充区域内移动信号覆盖。为弥合固定传输盲区,工作人员还可引入蓝牙中继模块,将道路状态感知终端所采集的数据短距离推送至就近的无线接收点,再利用有线链路上传至后端平台。在设备安装期间,施工团队需提前评估不同通信方式的信号干扰区间,并在相邻设备之间保持合理间隔,防止因高频信号叠加而造成通信故障。在整个通信架构融合过程中,工作人员需不断对比数据时延、带宽使用率及节点故障率等核心指标,以动态校正设备参数保障机电系统与通信系统技术之间的协同运行。采用这种多源架构的协

调部署可以有效缓解隧道空间制约有线网络布设,从而提升关键区域通信连续性,为整个高速公路机电系统高效运行打下坚实的基础<sup>[4]</sup>。

### 2.2 打造全路段感知网,促进精准状态监测

高速公路机电系统运作的精度,在很大程度上取决于对沿线运行状态的掌握能力,通信系统技术演进能使状态感知方式由单点采集走向全线覆盖。在复杂多变的交通运行环境下,车辆行为、道路状况、气象变化等因素彼此交织,仅依靠传统定点监测已难以支撑实时判断及综合分析的要求。基于此,整合 5G 通信、北斗导航及光纤数据通道等手段可完成厘米级定位、全天候采集及低时延传输,从而有效解决传感覆盖盲区、数据上报延迟等问题。通信系统技术可承担状态识别、信息过滤及异常预警等多重功能,全面精准地掌握路面运行状态,为高速公路机电系统的运行调度、安全保障及服务响应提供稳定的数据基础<sup>[5]</sup>。

在具体部署过程中,相关工作人员需围绕复杂路段展开全路段感知网的建设工作。技术人员可以在沿线重要节点安装高频感知设备,并借助光纤通道将图像、车流、振动及温湿参数实时送入数据中心。为获取更高精度的空间位置信息,操作团队可将北斗导航模块嵌入边坡、桥梁、隧道等关键结构的状态监测装置,能够保证各类地理与工程数据可精确映射至道路断面。在信息传输环节,通信工作人员应结合前端硬件情况优化 5G 基站参数,并在多车道与匝道汇合区域合理设置信号增强点,以保证高频采集数据能够及时稳定上传。在日常运维过程中,负责人员可依托全路段感知数据,分析车流密度及异常加速度波动,及时识别出通行障碍或设备预警信号。数据分析组则基于连续定位轨迹可研判施工区域周边通行状态,为管理人员提供交通组织建议。部分地质不稳定区域,相关工作人员可利用多源融合数据回看时段变化,在感知网络支撑下有效辨别沉降趋势并推送报警指令。基于此,技术人员始终围绕信息覆盖密度、传输可靠性及状态识别精度展开工作,结合通信系统技术整合多点采集能为高速公路机电系统顺利运行奠定数据保障基础。

### 2.3 推动云边缘协同控制,提升处理响应速度

在边缘端部署具备处理能力的节点可以就近完成初步判断及响应,减轻云端负担,避免因数据传输瓶颈导致决策延迟。与此同时,高速公路机电系统在复杂运行场景里往往涉及大量设备、海量数据及实时决策需求。云计算中心作为全局调度及数据归集平台,承担着跨区域融合、历史趋势研判及综合分析任务。

边端具备主动识别能力,云端提供策略支持,二者之间借助稳定的通信链路能够保持高频交互,从而在高速公路机电系统内形成更具弹性的响应模式<sup>[6]</sup>。

在具体任务执行过程中,相关工作人员可围绕收费广场与主线交汇区域设定边缘计算节点,各类传感设备借助通信系统技术接入边缘端处理模块可即时汇集车流信息、图像数据及设备状态等基础数据。技术人员在现场配置处理程序能够使边缘节点具备识别拥堵趋势及信号异常的基本能力,一旦触发设定阈值,便可在本地生成响应信号,并联动现场设备及时调整运行状态。

在数据同步方面,运维团队需设定间隔上传策略,边端每隔固定时长将关键变量及判断结果打包传至云端服务器,供集中数据中心做跨时段趋势分析。基于此,云平台还内设有多种算法模型,工作人员需比对各区域传入数据,输出交通组织建议及设备调节指令,再由通信链路下发至对应边缘节点。在整个过程中,数据路径依赖高速通信通道避免因信息堆积影响响应时效。此外,技术人员还应定期查看边缘节点处理日志,识别异常流量及处理瓶颈,并根据通信频率及反馈内容微调节点,保证高频运行状态下系统负载分配更趋合理。在此过程中,相关工作人员以精准分工与通畅传输为核心,不断压缩决策环节的传输链路可以使高速公路机电系统具备在高并发场景下高效运行的能力。

#### 2.4 融合智慧高速模式,拓展机电功能边界

实时嵌入AI算法、动态映射数字孪生模型及设备互联的高频反馈,使机电系统可依托数据驱动,提前感知潜在风险并参与运行决策。在高速公路运行日益迈向智能化管理的趋势下,机电系统的功能定位正由传统辅助管理手段转变为主动参与调度的核心平台。与此同时,通信系统技术作为连接感知端与控制端的关键桥梁,为智慧高速模式提供了结构支撑。在此基础上,通信系统技术的稳定性直接关系到AI分析的时效性,进而影响机电系统对复杂交通行为的响应能力<sup>[7]</sup>。

在实施过程中,相关工作人员可围绕自动驾驶专用车道测试区实行通信资源配置及系统融合。现场工程技术人员需将道路关键点位嵌入多模态感知设备,利用通信通道实时传输动态图像、车辆运行轨迹及环境参数。AI模块则部署于边缘节点,用于解析车辆行驶行为、识别异常状态,并预判风险等级。通信系统的稳定性在这一过程中很关键,相关人员合理分配信

号传输频率可保证AI处理结果能以毫秒级速度反馈至控制平台。数字孪生模型由数据中心建模小组实时维护,相关工作人员需将前端上传的多维数据导入三维虚拟环境,并动态模拟道路状态、车流密度及设备运行情况。每当通信延时异常或感知数据波动剧烈时,模型便标记对应区域,由技术组跟进回查信道质量及设备状态。在自动驾驶车辆通行过程中,现场通信技术组依据轨迹偏移预警信号能够调整信号调度路径,保障高密度数据可稳定送达指令节点。工作人员在此过程中通过借助通信系统技术与AI、数字孪生模型联动能逐项打通传感、分析、执行三者之间的信息链,推动高速公路机电系统向精细化管理方向持续深入。

### 3 结束语

深层融入通信系统技术可提升高速公路机电系统在信息传递、状态感知及事件响应方面的技术水平,重塑其在现代交通运行下的功能定位。通信链路作为联结各类感知终端、处理节点与控制平台的枢纽,可为设备联动、数据互通及智能分析提供稳定通道。在多源通信架构、全路段感知、云边端协同及智慧融合等多维策略的支撑下,机电系统可具备在高复杂交通环境下开展高频调度、精准识别及主动调控的技术基础,其功能边界不断向数据驱动的深层管理延展,通信系统技术是这一发展过程中不可或缺的关键力量。未来,在智慧交通持续优化的进程中,拓展通信能力将持续引领机电系统向更高效智能的方向发展。

### 参考文献:

- [1] 白峰,王万良.现代通信技术在高速公路机电系统中的应用[J].信息与电脑,2025,37(08):99-101.
- [2] 王明旭,石雨欣,樊升印,等.SD-WAN技术在高速公路通信系统的应用探究[J].中国交通信息化,2025(03):124-128.
- [3] 周逢潮.高速公路机电工程通信系统技术及应用[J].信息与电脑,2025,37(05):98-100.
- [4] 谭聪.OTN技术在广西高速公路干线通信系统中的应用[J].企业科技与发展,2025(03):124-128.
- [5] 王学富.现代高速公路机电通信系统新技术研究[J].科技资讯,2025,23(05):51-53.
- [6] 王永辉.PTN技术在高速公路通信系统中的应用[J].汽车画刊,2024(04):215-217.
- [7] 陈志鹏.高速公路智能通信系统中ASON技术的应用[J].交通科技与管理,2023,04(23):26-28.

# 基于物联网的智能水位监测系统在水利工程中的应用研究

刘婷婷, 赵 冉

(濮阳黄河河务局第一黄河河务局, 河南 濮阳 457000)

**摘要** 随着物联网和人工智能技术的快速发展, 在水利工程管理中应用物联网技术实现智能化的水位监测已成为一种趋势。本文在分析水利工程水位监测现状和不足的基础上, 提出一种基于物联网的智能水位监测系统设计方案, 系统采用分层架构, 由感知层、网络传输层、应用服务层组成。并针对系统的关键技术进行了详细阐述, 包括多传感器融合、异构网络互联、海量异构数据处理等。通过应用案例对系统的可行性和有效性进行了验证, 智能水位监测系统为水利工程管理提供了新的手段, 有助于提高管理效率和科学决策水平, 具有广阔的应用前景。

**关键词** 水利工程; 水位监测; 物联网; 智能系统

中图分类号: TV5; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.011

## 0 引言

水位是水利工程运行管理的关键参数之一, 直接关系到防洪、抗旱、水资源优化配置等任务的完成。传统的人工定期水尺观测法存在人力成本高、数据精度低、及时性差等问题, 已不能满足现代化水利工程管理的需求。随着物联网、云计算、大数据等新一代信息技术的迅猛发展, 将物联网技术引入水位监测, 构建智能水位监测系统已成为大势所趋。相比传统方法, 智能水位监测系统可实现全天候、自动化、可视化监测, 大幅提升数据的准确性、实时性, 为水利部门科学调度决策提供了有力支撑。

### 1 现有水位监测方法的不足

目前, 水利工程领域主要采用人工观测和自动监测相结合的水位监测模式。人工观测主要通过固定的水尺, 由专职巡查人员定期记录水位数据。这种方法劳动强度高, 无法满足信息化时代对数据采集频次和时效性的需求, 数据的准确性也易受人为因素影响。针对人工观测的问题, 自动水位计应运而生。它利用水压式、声波式、雷达式等水位传感器, 可实现自动化、连续性的水位监测。但受制于通信、供电条件, 大多采用 RS485 总线、GPRS 等方式进行单点数据传输, 实时性和可维护性有限。且自动水位计尚未实现水雨情、工情等多源数据融合分析, 无法发挥大数据价值<sup>[1]</sup>。

## 2 智能水位监测系统的设计

### 2.1 系统总体架构

本系统采用“感知层—网络层—应用层”的分层架构模式, 如图 1 所示。感知层布设在基础感知网络,

包括水位、流量、视频等各种物联网传感器, 负责全方位采集水利工程现场的数据信息。网络层由公网(如 5G/4G 等)和专网(如 NB-IoT、LoRa 等)组成异构网络, 负责将感知层采集到的数据传递到云端服务器。应用层利用云计算、大数据处理等技术, 对汇聚的数据进行存储、计算、可视化展示, 并根据分析结果提供预警等服务应用<sup>[2]</sup>。

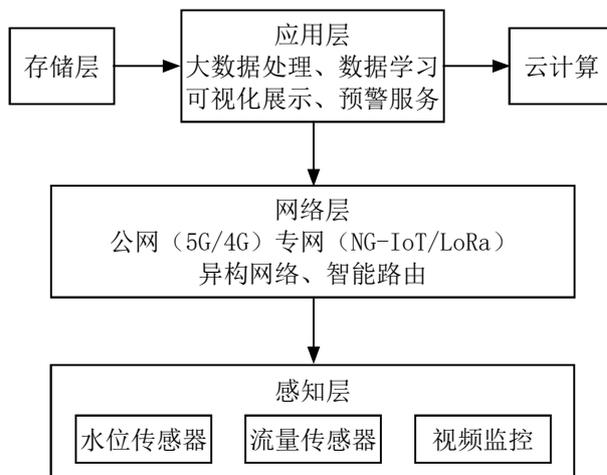


图 1 智能水位监测系统架构图

### 2.2 感知层设计

针对不同监测对象, 选用性能可靠、接口标准统一的专业传感器至关重要。水位作为系统的核心监测要素, 需优选精度高、稳定性好的水位传感器。根据测量原理, 水位传感器主要有以下几种类型: (1) 水压式水位传感器。利用水的静压与水深成正比的原理,

通过测量水下某一深度处的静水压力,推算出水位。这类传感器具有量程范围大、精度较高等特点,但需定期标定,易受水流、水温变化干扰。常见的有投入式、喇叭口式、磁浮子式等。(2)超声波水位传感器。利用超声波的发射和反射原理测距,根据声速和反射时间差,计算出被测介质表面到换能器的距离。这类传感器非接触式测量,不易污损,易于安装维护,但易受环境温度、杂波等影响。(3)雷达水位传感器。原理与超声波类似,采用高频电磁波作为信号源,具有盲区小、受环境影响小等优点,但成本相对较高。考虑到水利工程环境的复杂多变性,系统采用多传感器并行互补的方式,在不同位置选配不同类型、量程的水位传感器,并引入数据融合算法,提高感知数据的可靠性。

### 2.3 网络层设计

水利工程分布广、线路长,往往处于信号覆盖较差的偏远山区,运维难度大,对通信组网技术提出了较高要求。本系统根据具体应用场景,灵活选用公网或专网进行数据回传。

(1)公网传输。公网具有覆盖广、组网方便、即插即用等优势。针对信号条件好的站点,系统优先选用5G、4G等公网直接接入。5G以其高带宽、低时延、广连接的显著特点,最适合大流量数据如视频的上传。4G网络广泛铺设,传输速率可达100 Mbps,可满足一般数据传输需求<sup>[3]</sup>。(2)专网传输。在信号盲区、无人值守等恶劣环境下,专网凭借其低功耗、远距离、自组织等特性,成为首选方案。窄带物联网NB-IoT采用授权频谱,具有覆盖广、功耗低、容量大、成本低等优势,适合小数据量、长周期的监测场景。LoRa是一种超低功耗远距离通信技术,通信距离可达10~20 km,电池寿命长达10年,适用于超远距离的山区站点组网。在网络层设计时,还需统筹兼顾系统的可靠性、安全性、扩展性等因素。本系统采用多网络备份的容灾方案,根据线路质量动态切换最佳网络,保证数据的可靠传输。系统还内置加密芯片,对原始数据进行加密,防止数据被非法窃取篡改。

### 2.4 应用层设计

本系统采用云一边一端协同的计算框架,支撑高效的大数据处理和智能分析。在边缘侧,感知终端内置边缘计算模块,对数据进行初步的清洗、压缩、加密处理,减轻网络传输和云端存储的负担。在云端,系统对接分布式存储(如HDFS)、流式计算(如Storm)、批处理(如MapReduce)等云服务,实现海量时序数据的规

模化存储、实时计算。在此基础上,系统开发了一系列数据应用微服务,包括水位预警、调度决策、设备管理等,服务下沉到各级水利业务部门。最后,通过B/S、C/S等架构,以Web网页、移动App、大屏幕等多种展现形式,将数据价值直观呈现给用户。在智能分析层面,系统充分利用机器学习算法,提供一系列增值服务。例如:通过异常点检测,对水位超出阈值的数据进行预警;通过关联分析水位一降雨量一下泄流量等多源数据,优化水库调度方案;通过建立设备故障预测模型,对设备健康状态进行评估,提前预警检修。

## 3 智能水位监测系统关键技术

### 3.1 面向水利场景的多传感器融合感知技术

该系统充分利用不同传感器的互补特性,提升数据的准确性和可靠性。首先是不同类型的水位传感器并行互补。系统在水面、水下等不同位置布设声波式、水压式、雷达式等多种水位计,交叉验证不同测点的读数,及时发现失真数据<sup>[4]</sup>。若某一测点出现异常偏差,系统自动切换到置信度高的传感器作为主用数据源,保证感知的连续性。同时,多传感器并行的大数据为后期数据挖掘、算法优化提供了样本。针对水位监测中普遍存在的漂浮物遮挡、仪器漂移等干扰因素,系统创新引入视觉、流速等异源感知数据,建立数据相关模型,对水位数据进行校核。例如:通过摄像头判断是否有漂浮物遮挡声波探头,识别出受干扰的异常值;结合流速流量,预判水位的变化趋势,对突发的不合理数据进行修正。

### 3.2 面向复杂网络环境的异构组网技术

该技术综合运用多种通信网络优化组合,构建了一张覆盖全面、结构灵活、传输高效的智能组网。一方面,系统因地制宜地融合多种通信技术。对于基站覆盖好的区域,优先选用5G/4G等公网直接接入,利用其带宽优势,传输水位、视频等大流量数据。对于信号盲区,则灵活部署NB-IoT、LoRa等低功耗广域网,采用自组织组网模式,多跳中继传输,克服复杂地形阻隔<sup>[5]</sup>。在局域范围内,也可选用ZigBee、Bluetooth等近距离通信技术,降低功耗。多种通信方式互为备份,最大化保障数据的可靠传输。另一方面,系统采用多层异构网络智能协同路由。由于不同类型的网络在功耗、时延、带宽等性能指标上各有特点,系统针对性地设计了异构网络协同路由算法。该算法以延迟和能耗为优化目标,对网络性能进行建模,动态选择最优传输路径。例如:对于低时延的预警数据,优先

选择 5G 高速链路；对于延迟不敏感的日常数据，则选择 NB-IoT 慢速链路，以节约能耗。同时算法采用自适应的速率控制机制，根据链路质量动态调整发送功率和速率，在保证可靠传输的前提下最小化能耗。

面对网络受限环境，系统还提出了多模传输、数据压缩等应对措施。水利工程普遍位于山区，存在网络信号间歇性中断等问题。为此，系统在感知节点设计了多模传输机制，断网期间先将数据在本地缓存，恢复后再批量上传，避免了数据丢失。

### 3.3 面向智慧水利的海量异构数据处理技术

系统采用了优化的列式存储结构，形如 (metric-timestamp-value)，可显著提高大规模数据的写入和查询性能。同时，系统将元数据和时序数据分别存储，并建立 metric、tag 等多级索引，实现了毫秒级的数据检索。针对冷热数据，系统还设计了自动分层存储策略，新数据存储 SSD 等高速设备，老数据则转存到 HBase 等低成本介质，兼顾了时效性和经济性。

面对汹涌而至的水位数据，系统采用了流批一体的 Lambda 架构。在速度层，通过 Flink、Storm 等流式计算框架，在数据到达的瞬间即完成实时聚合。在批量层，系统周期性地用 Spark、MapReduce 等框架对全量数据进行批处理，对流处理结果予以修正。在服务层，Speed&Batch View 相结合，为上层应用提供一致的数据视图。这种架构将延迟性与准确性很好地统一，满足了预警、展示等业务的时效性需求。

针对水利决策对预测精度的高要求，系统集成多种机器学习算法。例如：采用 LSTM 等深度学习模型，建立端到端的水位预测框架，根据历史水位、降雨、调度等多源数据，对未来的水位水情做出精准预判。采用 K-means 等无监督聚类方法，建立设备结构相似性模型，对大坝变形、管涌等异常工况进行早期诊断。通过算法赋能，系统形成了一套水情感知、分析、预警、调度的全流程智能化解决方案。

## 4 应用案例分析

本文所设计的智能水位监测系统在该水库试点应用，取得了良好成效。在建设前，该水库主要采用人工观测的方式，存在数据滞后、失真等问题。尤其是山洪等极端情况下，数据的时效性和准确性难以保证，影响应急决策。系统建设后，在大坝、库区等重点区域布设了 60 个感知节点，包括超声波水位计、水压式水位计、视频监控等设备，对水库水位进行立体化感知。在数据回传上，系统在坝顶等信号条件好的区域直接采用 4G 公网，在库尾等偏远区域部署了 NB-IoT 基站，

并通过中继节点分级组网，构建起覆盖全域的通信网络。在运行阶段，各感知节点每分钟自动采集一次水位，并经多跳路由后汇聚到云端。系统对进入的流数据做实时清洗、校验，剔除超出阈值的异常值，并与本地气象数据、调度数据等多源异构数据关联存储，形成水库水情的统一数据视图。通过水位-库容曲线模型，系统可实时计算水库蓄水量，并与汛限水位等指标对比，直观评估防洪压力。在应用层面，调度人员通过系统大屏，可实时观测水库水位的动态变化，并自动生成各类统计报表，极大地提升了决策效率。针对汛期这一特殊时段，系统还专门优化了水位预警模型。当监测到水位距汛限水位仅 2 米时，自动切换到每小时预报一次，结合降雨量预测、水位上涨规律等要素，提前 6 小时预判水位超标风险，为抢险调度、群众转移等预案启动争取了宝贵时间。

据不完全统计，系统上线运行一年来，水位在线率从不足 60% 提升到 95% 以上，人工抄表工作量减少 80%。遭遇 3 次较大洪水考验，系统均提前 6~20 小时成功预警，直接经济效益超 2 000 万元。实践表明，智能水位监测系统大幅改善了传统人工监测的弊端，为水库精细化管理和智能化决策提供了强大的数据支撑。

## 5 结束语

本研究分析了水位监测的现状和挑战，提出了一种基于物联网的智能水位监测系统，并对总体架构、关键技术、应用实践进行了详细阐述。通过智能传感、异构组网、大数据处理等先进技术的集成应用，该系统有效解决了传统水位监测中数据滞后、质量差、覆盖不全等痛点，实现了水位感知的全天候、自动化、智能化，为水利工程管理决策提供了有力支撑。

## 参考文献：

- [1] 李琨,张泽玉,韩鹏.调水工程智能水位计创新应用[J].水电站机电技术,2023,46(11):108-111.
- [2] 张文静,张振,黄剑,等.基于图像语义分割的水位智能监测方法[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(05):24-30.
- [3] 陈曦.可移动式实时水位监测装置的设计与制作[J].江苏通信,2024,40(05):76-81.
- [4] 唐洪亮.基于物联网的堤坝沿岸水位智能监测系统[J].信息与电脑(理论版),2023,35(05):35-37.
- [5] 余冠南.基于物联网技术的堤坝水位智能监测预警方法[J].中国高新科技,2024(13):137-139.

# 基于物联网技术的输变电路作业风险实时监测与预警系统研究

朱杰元, 王友炜

(国网金昌供电公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘要** 本研究设计了一种基于物联网技术的输变电路作业风险实时监测与预警系统。系统采用“感知层—网络层—应用层”三级架构, 通过多源传感器网络实现环境、设备及人员状态的实时采集, 构建5G+LoRa混合通信网络保障数据传输可靠性, 并开发了基于边缘计算的智能预警引擎。关键技术包括: 基于IEEE 1588协议的微秒级时间同步技术、改进的SAX流式分析算法以及动态阈值调整机制。实测结果表明, 系统端到端传输延时 $\leq 800$  ms, 预警响应时间 $\leq 1$  s, 高风险事件检出率达98.4%, 数据丢失率 $< 0.5\%$ 。该系统显著提升了输变电路作业的安全监测水平, 为电力系统智能化运维提供了有效的解决方案。

**关键词** 物联网技术; 输变电路; 作业风险

**中图分类号**: TP3; TM72

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.012

## 0 引言

输变电路运行环境复杂, 传统监测难以满足实时性与准确性需求。物联网技术具备感知、传输与智能处理能力, 可实现对作业风险的实时监测与精准预警。本文对基于物联网的输变电路风险监测预警系统进行研究, 旨在为构建高效可靠的体系、提升作业安全水平提供参考。

## 1 基于物联网技术的输变电路作业风险实时监测与预警系统总体架构设计

### 1.1 感知层, 智能传感器网络部署方案

智能传感器网络在感知层的部署方案, 需同时实现设备监测与人员防护的双重需求, 在杆塔和可穿戴设备两类载体上采用差异化选型, 杆塔监测中选用工业级传感器, 以宽温域( $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ )和高防护等级(IP68)为优先<sup>[1]</sup>, 在杆塔倾斜监测中使用双轴MEMS倾角传感器, 内置温度补偿算法将误差控制在 $\pm 0.1^\circ$ , 采样频率设为1 Hz以平衡能耗与实时性; 导线温度监测通过分布式光纤传感器结合拉曼散射原理, 实现空间分辨率1 m、测温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的连续测量, 适合长距离线路热状态评估; 覆冰监测采用集成称重传感器与气象传感器的复合模块, 基于导线荷载变化和环境湿度的动态采集, 结合增长模型反演厚度。作业人员的可穿戴设备中, 微型传感器节点借助低功耗蓝牙(BLE)进行传输, 生理状态监测采用光电plethysmography(PPG)心率传感器, 采样率设为25 Hz, 待机电流控

制在10  $\mu\text{A}$ 及以下<sup>[2]</sup>。定位模块使用北斗双模定位芯片, 复杂地形下可达到亚米级的定位精度, 离线轨迹存储功能同样支持, 传感器的部署原则为“关键节点加密、普通区域稀疏”, 高危区域如跨越段、风口段等布设密度为普通区段的3~5倍, 物联网监测系统传感器配置参数表如表1所示。

### 1.2 网络层, 5G+LoRa混合组网实现实时传输

网络层混合组网架构融合5G与LoRa技术, 动态资源调度使低延时和广覆盖实现协同优化, 高带宽业务承载在5G网络, 在约500 m半径的基站覆盖区, 切片技术为监测数据分配专用通道, 借助边缘计算节点(MEC)部署将核心网用户面时延降至20 ms内, 偏远山区等5G信号弱的区域构建星形拓扑网络采用LoRa网关, 通信扩频因子(SF)动态调整机制在终端和网关通信中使用, 信道质量下降时SF自动从7提升到12, 以降低传输速率(从5.5 kbps到0.3 kbps)换取通信距离延长, 最大传输半径可到3 km。异构网络切换延迟问题的解决, 可借助接收信号强度指示(RSSI)设计预判切换算法, 5G模块检测信号强度低于 $-105$  dBm时, 提前100 ms启动LoRa链路建立流程, 预同步机制将切换时间控制在50 ms以内, 网络层集成边缘网关设备, 采用ARM Cortex-A53四核处理器, 支持本地数据缓存(容量 $\geq 128\text{GB}$ )与协议转换功能, 传感器的Modbus、MQTT等协议可统一转换为IPv6格式, 为上层应用提供标准化数据接口。

表 1 物联网监测系统传感器配置参数表

传感器类型	部署位置	核心参数	通信接口	供电方式
MEMS 倾角传感器	杆塔底部	测量范围 $\pm 15^\circ$ ，误差 $\pm 0.1^\circ$	RS485	太阳能 + 锂电池
分布式光纤传感器	导线本体	测温范围 $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ ，空间分辨率 1 m	光纤接口	光缆自带铠装供电
复合覆冰传感器	杆塔横担	称重量程 $0 \sim 500\text{ kg}$ ，湿度测量 $0 \sim 100\% \text{ RH}$	LoRaWAN	太阳能 + 超级电容
PPG 心率传感器	作业人员腕部	测量范围 $30 \sim 240\text{ bpm}$ ，功耗 $\leq 5\text{ mA}$	BLE5.0	可充电锂电池
北斗定位模块	作业人员背部	定位精度 1 m（开阔地），冷启动时间 $\leq 30\text{ s}$	UART	可充电锂电池

### 1.3 应用层，风险预警引擎的实时处理框架（包含毫秒级响应机制）

应用层的风险预警引擎采取边缘—云端两层架构，通过分布式的计算，可以实现达到毫秒级的响应，边缘端可以完成数据清洗及预警，利用 FPGA 芯片作为加速模块，进行传感器采集的实时滤波（高斯噪声使用卡尔曼滤波法进行过滤），特征提取（导线温度梯度，杆塔振动力等），简单阈值判断等操作，对于覆冰超限或者杆塔倾角突变等情况会直接产生本地声光警报，响应时间小于等于 100 ms，云端部署以微服务的形式，分为数据存储，模型训练，综合预警三部分，数据存储层的数据存储系统选择时序数据库 InfluxDB，能够以每秒百万级的速度存储监测信息；模型训练层以 Spark Streaming 框架来构建流式计算引擎，采用滑动窗口的方法实时更新风险评估模型参数（窗口大小设为 5 分钟，步进时间为 1 分钟）；综合预警层采用规则引擎与机器学习相结合的方式，规则引擎主要用于明确阈值风险（比如风速大于或者等于十米每秒触发防风预警）的识别，采用基于 XGBoost 算法建立的机器学习模型来进行多因素耦合作用评估（比如在覆冰与大风情况下评估复合风险），两者产生的判断结果按照一定的加权方式融合在一起得到最终预警<sup>[3]</sup>。为达到毫秒级响应，预警引擎选用内存计算，把关键模型参数及实时数据放到 Redis 缓存中，从而免除磁盘 IO 延迟，单条数据的处理时间维持在 50 ms 以内，符合大规模线路监测的并发要求。

## 2 关键技术实现

### 2.1 物联网实时数据采集技术

多模态传感器同步采集，系统采用 IEEE 1588PTP 跨模态微秒同步，同步误差范围控制在  $\pm 50\ \mu\text{s}$  内，采用硬件时间戳和时钟补偿算法同步方式。针对异构传感器接口不一致问题设计统一的数据采集框架：对

振动等模拟量传感器使用 24 位  $\Sigma-\Delta$  ADC，以 10kSPS 采样率将模拟量信号转换成数字信号，针对 UWB 定位模块等数字接口的传感器，采用 FPGA 进行硬件层协议解析，降低软件栈时序抖动。时间敏感的应用场景当中部署 TSN（时间敏感网络）交换机创建确定的传输通道以保证重要监测数据时间的一致性，在做同步测试时显示该系统当有 200 节点的时候可以达到 1 ms 级别的时间同步水平，这样的精确度完全可以满足像相量测量这样高级别的应用<sup>[4]</sup>。

边缘计算节点进行实时预处理时，边缘节点使用异构计算架构，集成 ARM Cortex-A72 处理器与 Intel Cyclone10GX FPGA，生成“CPU+FPGA”的混合计算范式。数据预处理流水线包含三级处理，第一级在 FPGA 实现 128 阶 Hamming 窗函数的 FIR 滤波，处理延时稳定保持在  $80\ \mu\text{s}$ ；第二级采用 NEON 指令集加速提取特征，计算 32 维时频域特征，RMS 值、峭度指标、小波包能量熵等，单样本处理耗时在  $200\ \mu\text{s}$  内；第三级运行改进版轻量级异常检测模型（Mobile NetV3-Small），模型推理延迟控制在 5ms 内。系统为确保实时性要求，采用静态内存分配策略并使用了实时 Linux 内核（Xenomai3 补丁），最坏情况下响应时间控制在 10 ms 内，实测结果说明边缘节点在压缩原始数据量 92% 时，保留了 98% 的有效信息，动态风险评估模型的特征与具体要求同样对实时性处理。

### 2.2 动态风险评估模型

系统通过流式计算的实时分析算法，构建 Lambda 架构的流处理管道，改进后的 SAX（符号化聚合近似）算法基于 Spark Structured Streaming 框架实现，关键技术存在突破，设计滑动窗口增量计算机制，窗口大小可以动态调整在  $1 \sim 60\text{ s}$ ，环形缓冲区的使用减少数据搬移开销现象；开发 C++Native 的 UDTF 函数，DTW（动态时间规整）算法的计算效率提升了 40 倍；模型实现热切换功能，支持风险评估模型更新时数据流

不停止，与批处理模式进行对比测试，相同硬件条件下，流式处理将端到端延迟从分钟级降低至秒级（平均1.2秒），同时保证92.7%的检测准确率（只比批处理低1.3%）。预警阈值动态调整机制，提出环境耦合的风险阈值自适应算法，建立双层调节模型：基础层采用EWMA（指数加权移动平均）跟踪环境参数基线，计算式为：

$$\mu_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) \mu_{t-1}$$

式中，平滑因子 $\alpha$ 依据环境变化率进行动态调整，调整的值在0.1~0.3范围内，决策层对模糊推理系统进行构建，把风速梯度、降雨强度和负载率等因子作为输入变量，这些变量的值在0~15 m/s、0~50 mm/h和0~120%不等，风险系数修正值为输出，修正倍数在0.8~1.5倍的范围内<sup>[5]</sup>。每过30秒系统就更新一次阈值规则库，通过FTRL-Proximal在线学习算法持续性地优化模糊规则权重，现场验证之后表明误报率降低63%，高风险事件的检出率提高至98.4%，同时展示风速突变场景下的动态响应特征。

### 3 基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统测试与验证

#### 3.1 实时性测试指标

系统在500 kV某输电线路开展实地测试，构建包含83个监测节点的试验网络。测试采用IEEE 802.1AS时间同步协议和示波器联合测量法，在三种典型场景下验证传输性能：（1）平原开阔地带（5G全覆盖），端到端延时中位值为423 ms，第99百分位延时为762 ms；（2）丘陵过渡区（5G+LoRa混合组网），延时中位值578 ms，第99百分位延时为891 ms；（3）高山屏蔽区（纯LoRa传输），延时中位值达1.2 s，通过边缘计算本地预警补偿传输延迟。预警响应时间测试采用故障注入法，模拟导线断股、杆塔倾斜等7类故障，结果显示：简单阈值类预警平均响应时间387 ms（SD=62 ms），复合模型分析类预警平均响应时间843 ms（SD=113 ms），全部满足 $\leq 1$  s的设计要求。呈现明显的双峰特征，对应5G与LoRa两种传输模式的性能差异。

#### 3.2 物联网可靠性验证

系统抗干扰能力的验证设计包含三项破坏性测试，网络中断测试中，人工切断基站通信后边缘网关节切换到本地存储模式，数据缓存完整，网络恢复30 s内数据续传完成。电磁干扰测试时，距传感器1 m处施加10 V/m的30 MHz~1 GHz射频干扰，传感器通信误码率从0.01%升至0.18%，低于0.5%的阈值，极端环境测试为在-35℃

低温下连续运行72小时，传感器供电系统输出电压波动 $\leq 5\%$ ，数据丢失率0.23%，具体见表2。

表2 可靠性关键指标实测结果

测试项目	测试条件	实测指标	达标情况
网络切换 可靠性	5G 信号强度 < -105 dBm	切换成功率 99.7%	达标
数据完整性	持续断电 8 小时	数据丢失率 0.11%	达标
环境适应性	温度循环 (-40 ~ 85 ℃)	功能异常次数 0	达标
抗干扰性能	30 dBm 同频干扰	误码率 0.15%	达标

### 4 结束语

本研究成功构建了基于物联网技术的输变电线路作业风险实时监测与预警系统，通过三层架构创新与关键技术突破，实现了风险感知、传输与处理的智能化闭环管理。测试结果表明，系统在500 kV线路环境中展现出卓越性能：端到端传输延时控制在800 ms以内，预警响应时间不超过1 s，关键指标均优于传统监测手段。特别是在可靠性验证中，系统在极端环境下的数据丢失率低于0.5%，网络切换成功率高达99.7%，充分体现了物联网技术在复杂工况下的适应能力。本研究的创新价值主要体现在三个方面：一是提出了5G+LoRa混合组网的动态调度策略，有效解决了偏远地区传输瓶颈；二是开发了边缘—云端协同的毫秒级预警引擎，将风险评估准确率提升至92.7%；三是构建了环境自适应的阈值调节模型，使高风险事件检出率达到98.4%。这些成果为智能电网建设提供了重要的技术支撑，其方法论亦可推广至其他关键基础设施的安全监测领域。未来研究将聚焦量子加密传输和数字孪生可视化等方向，进一步提升系统的安全性和交互性。

### 参考文献：

- [1] 李峰,熊以旺,高慧挥,等.输变电线路感应电测量及预测模型研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(06):119-122,144.
- [2] 韩文通.基于大数据分析的输变电线路故障预测与诊断[J].自动化应用,2025,66(06):94-96.
- [3] 王亮.基于物联网技术的输变电线路智能化监控系统设计[J].家电维修,2025(01):74-76.
- [4] 姚琛彪.数字孪生与AI技术在输变电线路巡检中的集成应用探讨[J].张江科技评论,2024(09):46-48.
- [5] 李传明.数字孪生技术在输变电线路智能巡检中的应用研究[J].张江科技评论,2024(08):72-74.

# 电力配电网架空线路工程施工技术

练志生

(惠州市焕能电气安装有限公司, 广东 惠州 516001)

**摘要** 架空线路是输电项目中的关键组成部分, 因其具备成本低、施工便捷和检修维护方便等特征, 在电力配电网工程中得到广泛应用。本文以某电力配电网工程的 10 kV 架空线路施工项目为例, 从前期准备、架空导线施工、杆塔施工和防雷接地施工等方面进行探讨, 研究架空线路施工中应注意的要点问题, 以为电力配电网架空线路工程建设提供有益的参考。

**关键词** 电力配网; 架空线路; 张力控制

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.013

## 0 引言

电力能源作为社会生产和生活中不可或缺的能源之一, 随着社会生产方式不断变革和生活品质不断优化, 用电需求也随之增大, 电网建设规模日益扩大, 对电力能源的长距离运输提出了全新的要求。架空线路施工作为输电项目的重要组成部分, 其施工质量关系到电力配电网的输电效率与质量。架空线路工程建设不达标会导致电能损失, 不仅影响供电企业的社会效益, 也会降低项目的经济效益。本文围绕电力配电网架空线路工程施工技术展开研究, 旨在为提高电力配电网的建设水平提供借鉴。

## 1 工程概况

某电力配电网工程的基础设施项目包含 90 km 的 10 kV 输电线路, 主要涉及地下电缆敷设和架空线路施工。其中, 架空电力系统由电气绝缘设施、防雷装置、张力索、配电线路、支撑杆及地基结构组成; 配套设施包括高压配电设备、柱式断路器、电缆分线装置。此外, 还包括对新型变压器的安装以及相关设备的更新。

## 2 电力配电网架空线路施工前准备

### 2.1 线路勘察与设计

电力配电网架空线路施工前的线路设计是重要的作业环节, 关系到后期施工的可行性与安全性, 对于工程的施工效益和后期运行质量具有直接影响。通常来讲, 需要结合地形地貌特征对架空线路的布设路径进行科学设计, 对于复杂的地形结构来说, 需适当增加支撑结构的数量, 当需要跨越河流或者山脉时则需要设计人员进行大跨度设计, 或者通过架设较高的杆塔来保障线路稳定性。另外, 气候条件也是设计中应该考虑的重要因素。当遇到极端天气时势必会威胁架

空线路安全, 为降低气候因素的影响, 需结合工程所处区域的气候条件, 采取对应的加固措施, 增强架空线路应对极端天气的能力。

本次架空线路工程对于当地的气象资料进行了全面收集, 以 10 年一遇为标准进行线路设计; 对于线路走向的设计, 是基于现场勘察资料而明确的, 旨在避开高大建筑物和树木等, 使其与地面和障碍物保持安全的距离。在本次工程中的 10 kV 线路遇到跨越公路情况时, 需将最小垂直距离控制在 6 m 以上, 当需要交叉跨越时, 应与其他线路保持安全距离。线路档距应控制在 50 ~ 60 m 之间。在耐张段施工中, 需结合地形特点和线路的实际走向来调节耐张段长度, 最大不得超出 800 m, 为使线路美观性和强度得到保障, 要使导线弧垂度趋于一致, 最大偏差不得大于 50 mm<sup>[1]</sup>。

### 2.2 材料与设备准备

架空线路施工中涉及多种材料类型, 材料质量决定架空线路施工质量, 只有严控材料质量才能为后续的施工奠定良好的基础。导线通常会选用导电性能较好, 且具备较强抗腐蚀性能的铝合金和钢芯铝绞作为导线材料, 同时考虑到输配电的设计要求, 根据电压等级和输送功率确定导线截面, 以免出现高负荷问题造成导线过热或者断裂风险。绝缘子一般选用复合材料或者陶瓷材料, 主要发挥隔离导线和杆塔的作用, 可以避免漏电问题。电杆可根据所处区域特性来选择, 对于直线杆可选用长度是 15 m,  $\phi 190$  mm 的预应力混凝土杆, 而对于转角部位和线路终端部位的电杆, 考虑到其受力较为集中, 需选用更大直径的钢管杆或是水泥杆。当选用水泥杆时, 应确保外观平滑无坑洞, 且保护层厚度一致, 不得出现钢筋外露和混凝土溢出

等现象,同时对杆体平直度提出了较高的要求,杆体曲度应控制在1/1 000以下。

在设备选择中,要结合现场作业条件和需求,优先选用安全性较好的设备设施,施工中的主要设备包括张力机、牵引机、起重机等。牵引机用于保障导线的顺利展放,可为导线安装提供良好的帮助;张力机主要服务于导线安装过程,可对导线张力进行有效调节,以免张力控制不准确造成的导线损坏问题;起重机主要作用是对杆塔和大型结构等重物进行运输,可以用于辅助杆塔的安装。正式施工前,应将所有设备就位,并做好设备检修和调试,使其处于最佳运行状态。

### 2.3 施工组织安排

施工组织安排是决定架空线路施工效率的关键要素,为能保障架空线路施工作业的高效开展,应提前做好施工组织安排工作。项目经理负责完成顶层规划工作,并对资源进行合理分配;技术负责人则主要服务于技术方案的执行过程,确保每个项目环节都能按计划 and 规程施工;施工队伍要分工明确,掌握技术和工艺要点,精准落实施工任务。为能提升现场施工质量,可以针对施工人员进行集中培训,将施工中的关键技术和重点工艺作为核心培训内容,同时做好安全教育工作,指导施工人员在现场施工中做好安全防护工作,从根本上降低安全事件的发生率。

## 3 架空线路工程施工技术要点

### 3.1 架空导线施工

1. 牵引绳展放。牵引绳展放作业中采取张力展放措施,施工中主要是在牵引机和张力机的共同作用下保障牵引绳处于腾空状态,为后续的导线架空施工奠定良好的基础。当需要跨越河流时,要对牵引绳的净空距离进行科学控制,以免对其他设备造成负面影响。一般需要将牵引绳的张力控制在1 000~2 000 N之间,确保在展放过程中能够始终保持稳定状态,但要确保不给导线和牵引绳施加过大的拉应力。牵引绳展放过程中还需关注地形以及环境因素等的影响,尤其是山区施工中,会由于地势的起伏变化造成牵引绳张力的变化,当跨越山谷时,应根据地形条件对张力进行适度调整,使其保持稳定状态。在现代施工中,引入了无人机技术,利用无人机可快速完成牵引绳展放作业,且降低人为失误带来的施工风险。当使用无人机进行牵引绳展放时,可将无人机的飞行高度控制在100~150 m范围内,保障牵引绳可以通过所有跨越点<sup>[2]</sup>。

2. 导线线施工要点。本次研究的架空线路工程所处地区的雨季集中在5-9月,年平均降雨量达1 500 mm,为导线施工带来了较大的难度。雨季施工需要做好导线

的防潮以及防滑处理,且要避免因导线张力变化影响现场施工安全。当地的风速也偏大,当其风速超出10 m/s时便不适宜施工<sup>[3]</sup>。导线牵引施工参数见表1所示。

表1 导线牵引施工参数

施工内容	施工参数	备注说明
杆塔档距	50~60 m	根据地形调节档距
年平均降雨量	1 500 mm	5-9月的雨季
风速暂停施工标准	> 10 m/s	以免导线大幅度摆动造成导线或者设备损坏
张力控制精度	高	利用传感器实时监测和调整

3. 导线压接施工。压接处理前应先做好导线接头部位的清洁工作,为压接做好准备。导线连接位置的表面、穿管时,需要使用专用电气清洗剂对与导线表面产生接触的部位进行全面清洁处理,如连接管的内壁。对于钢芯铝绞线进行切割处理时,不得出现损伤钢芯的状况,压接后对于连接部位的质量和强度进行全面检查,符合标准要求后才可进入下一施工阶段。

4. 导线紧线作业与弧垂观测。紧线时需控制好导线的松弛度以及张力,严禁出现过度拉伸的状况,以免因张力偏大造成导线损坏问题。在紧线作业中,需先对导线初步位置进行准确调整,再逐步增大张力,通过对张力的科学控制来调整导线紧绷程度。实际作业中应避免出现导线过拉或者滑脱等问题,特别是在高空作业中,相关技术人员必须保持高度警惕性。针对导线的弧垂观测是保障导线张拉质量的关键,应指派专门人员实时观测导线弧垂状态,以免导线弧垂过大影响线路机械强度,为此,应定期测量弧垂情况,并做好调整工作。

### 3.2 安装绝缘子

在架空线路施工中,绝缘子安装是必不可少的作业环节,主要用于连接导线,并使其与杆塔进行有效隔离,保证线路的电气安全水平。现阶段,常见的绝缘子材料有玻璃、陶瓷和复合材料绝缘子,其中的玻璃绝缘子具备较好的抗污能力和透光能力,适用于污染相对严重的区域;陶瓷绝缘子的机械强度和耐高温水平较为突出,一般被安装在高压以及超高压线路中;复合材料绝缘子的抗震强度较好,且结构轻便,在近些年的电网工程中得到广泛应用。绝缘子安装前,需严格检查外观质量与性能,确保无裂纹、腐蚀和破损状况。安装时,应使绝缘子中心与杆塔支撑点对应,避免因绝缘子受力不均产生脱落风险。如采取悬垂安装手段,则要使其垂直度与导线结构相适应。在耐张或者转角部位安装的绝缘子,应尽可能提升绝缘子的

承力水平,采取多重加固方式增强绝缘子安装的稳固性,以应对多种拉力影响<sup>[4]</sup>。

### 3.3 杆塔施工

首先,根据设计图纸做好杆塔定位工作,测放出各个杆塔的位置并且做好标记。在与线路垂直的方向上,位置偏差应控制在 50 mm 以下,沿着线路走向的纵向偏差不得超出档距的 3%,转角以及分支结构等特殊空间位置的杆塔定位误差均需小于 50 mm。在施工中,如果遇到障碍物可对杆塔位置进行适度调整。安装附件时,先将防护索固定在横梁构件上,此后施工人员穿戴好安全护具,并将施工中所需的各类工具和零部件等放在专用工具箱内,使用绳索固定牢靠,以免出现高空坠物风险。施工过程中进行物资传递时,需使用吊索装置,严禁出现高空投掷行为。

其次,进行基坑开挖。基坑开挖的深度和大小等可根据杆塔类型与方案设计要求来确定。开挖作业中需做好对已有地下管线的保护工作,基坑处理时要根据土质条件选择对应的处理方法,以提升杆塔基础的稳定性。对于土质较为松软的区域,可以使用混凝土浇筑的措施强化杆塔基础的强度,如遇到水流冲刷较为严重的区域,可通过增设围堰的方式降低水流冲刷对基坑结构的影响。在现浇基础施工中,需严格按照相关标准执行,施工前将场地内的杂物清除并做好夯实处理,进行杆塔结构和混凝土构件搬运时,应做好成品保护,谨防因磕碰损坏杆塔和混凝土构件的状况<sup>[5]</sup>。

最后,安装基坑底座。要确保基坑底座为水平状态,将底座水平度校准之后,向基坑内填土压实,之后便可设立杆塔。立杆作业之前,需先将基坑回填到位并做好压实处理,并将卡具和杆体紧密连接,使用螺栓拧紧。在直线段中的杆体要使卡具与线路平行分布,且采取在两侧交错布设的方式,而对于转向杆以及分叉位置的杆体来说,应将卡具设置在受力偏大的一侧。杆塔组立属于杆塔施工中的一大难点,施工前应对杆塔质量进行全面检查,且确保立杆的竖直状态符合标准要求。组立施工中还需对于杆塔垂直度和角度进行合理控制,一般在完成导线张力后还需再次调整杆塔,使其处于垂直状态。在安装高度较大的杆塔时,需利用吊车进行辅助施工,进行末端杆塔安装时需先将杆塔朝着牵引方向倾斜,当线路张紧后便可对杆塔进行校正处理。杆塔组立完毕后,应立即使用固定件进行有效连接,确保每个杆塔的垂直度与位置偏差均被控制在允许范围内。在回填作业中,应提前做好土块的粉碎处理,且每回填 500 mm 的厚度便进行一次夯实,如遇到降雨需将内部积水排除后再进行回填施工。必

要时可在基坑周边设置一个高度为 300 mm 左右的防沉降台,以保障杆塔结构的稳定性。

### 3.4 防雷接地施工

在新建设的直线杆段需采用如下防雷装置:具有避雷功能的柱式绝缘体,并在外部装设氧化锌型避雷装置,同时安装绝缘构件;在原有线路的直线段应设置如下防雷装置:双向贯穿式放电导线装置以及氧化锌型避雷装置。在安装双向贯穿式放电导线固定装置时,应按照规范要求,根据环境温度变化选择对应的紧固件、力矩螺母等,且在安装完成后固定好绝缘防护罩。在绝缘线路的防雷工作中,仍需针对新建线路和原有线路采取不同的防雷措施。边相位置上要联合应用绝缘子和间隙式氧化锌避雷装置进行绝缘处理,而中间相则可通过安装外间隙式氧化锌避雷器实现防雷目标;对于不在断电保护范围内的线路,可在终端位置设置避雷器;对于有高楼建筑遮挡的线路无需专门设施避雷器,必要时可通过降低杆塔接地阻值的方式来抑制绝缘子的电压冲击,以减少雷击闪烁以及跳闸的频次。此外,可在防雷装置安装后进行接地电阻的动态监测,利用智能传感器实时反馈接地系统的运行状态,当电阻值异常时自动报警,便于运维人员及时排查修复。本次工程中可将杆塔接地电阻值降低至 10  $\Omega$  以下<sup>[6]</sup>。

## 4 结束语

电力配电网架空线路工程是电网工程的重要组成部分,其建设质量对电力系统的运行质量有直接影响。为保障电网安全稳定运行,在架空线路施工中应明确各类施工因素对线路施工质量的影响,切实优化架空线路的施工流程,做好细节处理,以保障电力配电网的建设水平,为电力事业的发展奠定良好的基础。

## 参考文献:

- [1] 高磊,蒋翊峰.电力配网架空线路工程施工技术研究[J].数字化用户,2022(16):94-96.
- [2] 刘宣,相静.基于大数据的配电网架空线路工程造价预测研究[J].计算机应用文摘,2024,40(09):106-108.
- [3] 杨志海.配电网架空线路与电缆敷设技术研究[J].大众科学,2024,45(22):39-41.
- [4] 蔡俊明.10kV配电网架空线路设计要点分析[J].设备监理,2024(01):56-59.
- [5] 邵文正.10kV架空绝缘线路单相断线故障检测技术[D].济南:齐鲁工业大学,2023.
- [6] 杨明浩.同塔多回配电线路雷击特征及紧凑型接地降阻技术研究[D].淄博:山东理工大学,2023.

# 水电站机电设备安装工程施工技术应用

李顺风, 他得鹏

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 在水电站建设提质增效的背景下, 机电设备安装工程施工技术已成为保障系统安全稳定运行的关键环节。基于此, 本文阐述了水电站机电设备安装工程施工技术的必要性, 并提出细化安装工艺流程、严控关键节点施工、推进智能化管理手段、建立多方协调模式策略, 旨在对构建系统化施工技术路径有所裨益, 进而助力水电站机电实现精准安装及高效协同, 推动清洁能源工程高质量发展。

**关键词** 水电站; 机电设备安装工程; 技术规范; 材料验收; 图纸会审模式

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.014

## 0 引言

水电站工程作为国家能源基础设施的重要组成部分, 其机电设备安装工作对整体系统的安全性起着决定性作用。随着工程建设规模不断扩大, 机电设备结构愈加复杂, 设备布设更趋精细, 施工管理环节的技术组织能力直接影响安装质量。施工过程中对精准确度的要求促使技术管理前置化, 图纸审阅、方案编制、材料核验等工作环节相互关联、层层推进, 任何一环的失误都可能导致系统运行紊乱或后期返工。机电安装环节承担着技术执行任务, 更承载着工程实施全过程中对设计、管理及协调能力的集中检验, 必须以技术策略做统筹安排, 以符合实际条件的施工方案保障设备高质量落地。

## 1 水电站机电设备安装工程中的施工技术控制要点分析

### 1.1 明确技术规范要求

水电站机电设备安装工程具有高度的专业性, 其施工技术必须在明确的规范模式指导下。技术规范规定各类设备安装的具体参数标准, 还对施工工艺、流程控制及验收方式作出清晰限定, 构成整个工程技术执行的基础框架。由于水电站运行依赖多种机电设备之间的精准协同, 若在安装阶段忽视技术标准的统一, 极易导致设备运行误差、控制失灵或系统故障。因此, 技术规范明确性是控制风险的起点, 也是质量可控的前提。安装工程的实施单位需将技术标准落实至工程各节点, 保证每一项操作均能在标准化管理下完成。唯有在规范约束中展开施工技术应用, 才能保障水电站机电系统高效运行, 形成良性的质量控制模式<sup>[1]</sup>。

### 1.2 完善材料验收流程

水电站机电设备的安装质量取决于技术操作的精准性, 也深受材料设备本身质量的制约。施工技术的执行需以合格的材料为前提, 因而材料验收流程的完善程度直接关系到后续工作的技术基础。施工过程中涉及大量电气元件、控制装置及传动设备, 任一环节材料出现质量瑕疵, 均可能造成工程延期或结构安全隐患。验收流程必须建立在图纸设计及标准规范的严格对照之上, 结合外观检测、性能检验及文书审核等多维手段可形成程序化的技术核查模式。对材料设备的进场、报验、存储等全过程设定明确技术要求, 是提升施工技术可控性的关键一环。在材料管控未达标准的条件下, 任何高质量的施工技术都难以达到预期成效, 因此验收流程的完善性已成为施工技术价值能否充分释放的重要前提。

### 1.3 优化图纸会审模式

水电站机电设备安装涉及大量结构复杂、空间密集的布设内容, 工程图纸承载着对施工技术路径的整体规划。在此基础上, 图纸会审作为施工前的关键环节, 肩负着核对设计合理性、发现潜在冲突及保证施工可行性的技术任务。由于水机电系统通常涵盖高压电气、水力控制、自动监测等多个子系统, 图纸间接口协调及细节布设极易出现逻辑矛盾。若未经过严谨细致的图纸会审, 施工过程中极易出现错位、返工甚至设备无法就位等技术问题, 直接影响整个工程的推进节奏。施工单位优化图纸会审模式能够提前发现问题、预判风险并调整施工组织, 从而减少现场不确定性。会审过程是技术比对的程序, 也能全面验证施工技术的可执行

性,体现施工管理对技术风险控制能力的核心水平<sup>[2]</sup>。

## 2 水电站机电设备安装工程施工技术的应用策略

### 2.1 细化安装工艺流程,保证机电系统对位精准

水电站机电设备安装工程的复杂性要求施工技术具备高度的精密性,机电系统中各类设备之间存在严密的结构衔接,对位精度直接决定运行的稳定性。因此,细化安装工艺流程是保障工程顺利的关键路径,也是保证整体机电系统精准对接的重要技术策略。在此过程中,过程质量控制思想很关键,在每一道工艺环节设置控制点,及时预警调整技术偏差及隐患可有效保障工艺执行的严谨性。只有当每一环节的施工技术都落实到标准、落实到细节,才能达成设备之间的精准匹配,最终构建起高质量、高稳定性的运行系统。

在机电设备安装过程中,相关工作人员需严格依照“施工图纸与技术规范”开展具体工作,注重细化过程质量控制环节。在水电站主机设备基础施工完成后,技术人员先依据图纸核查主设备安装位置,使用全站仪对基准线及中心点复测,保证坐标点数据与设计图完全一致。在主机底座定位完成后,焊接工段负责人则对连接部件焊缝设定全过程质量控制点,实施质量检测每一道焊接工序。焊工在完成一道焊接后应立即提交检验,质检人员可严格审核焊缝的外观平整度、接头尺寸及内部缺陷,排除气孔、夹渣等隐患。合格后方可进入下一道焊缝连接。在电气设备接线环节,电气工程师可对电缆敷设、端子压接、电压测试等步骤同步设置关键节点的质量验收要求。若电缆绝缘电阻数值不在标准范围内,则立即停止下一步工序推进,返工至符合技术要求。在整个安装流程中,各工序负责人每日对已完成节点填写施工记录,技术主管定期组织回顾会议,对质量控制点的实际执行效果反馈修正。采用这种全过程质量控制的技术管理模式能够保证水电站机电设备安装过程中达到精准对位,促进现场可视、可控、可检的具体行动。

### 2.2 严控关键节点施工,压实水电设备质量基础

在水电站机电设备安装工程中,关键节点的施工质量直接决定设备整体运行性能及结构安全稳定性<sup>[3]</sup>。施工技术的有效性并非均质分布于各个环节,而是集中体现于高风险、高精度、高强度的关键工序中。这些节点往往涉及重型部件的吊装、复杂系统的接口安装或高电压设备的接入连接,容错空间极小。若不对其前置性技术规划及阶段性质量压实,将会在后续运

行中引发系统协调障碍、频繁维修乃至功能失效。为保证安装工程质量基础扎实可靠,必须将关键节点列为重点监管区域,详细制定方案、人员培训及资源配置,形成专门化的施工技术处理路径。推动技术管理向深度及精度延伸,是保障整座水电站工程技术水准的重要举措。

在水轮发电机组安装前,相关工作人员可组织开展详细施工准备工作,技术负责人可依据设计图纸及设备技术说明,专门规划转子吊装环节,明确起吊点、旋转角度、吊装路线及安装标高的误差允许值。由于该转子属于大型构件,重量达百余吨,施工技术组在设备选型阶段需跟设备厂家联合测算,最终确定采用特种定制的液压塔式起重机以保证操作空间及承载能力满足施工需求。吊装方案经监理审核后,施工人员需分组接受专项技术交底,由工程师分别讲解设备技术参数、作业区域风险点、操作规范及质量验收标准,保证每位操作人员对关键节点施工流程及安全技术要点达到熟练掌握。在转子吊装正式开始前,工程物资部门提前调拨高强度吊耳、锁紧装置、测距定位器等辅助工具,并完成材质检测。施工现场配备专用监测系统,全程记录转子起吊过程中的角度偏移。项目安全员在作业区域设置硬质隔离,并在全过程内保持通讯联络畅通。在转子就位过程中,技术员需使用激光测距仪精准比对轴心位置,控制偏差在毫米级范围内。整个作业流程完成后,工程技术负责人可组织现场验收会议,对比施工过程及技术交底内容核查,并将过程数据纳入质量备案系统。严控这一关键节点的施工环节,以全面保障水电站核心机电设备的安装精度以及结构稳定性,从根本上夯实整个工程的质量基础。

### 2.3 推进智能化管理手段,增强工程调度执行力

随着水电站机电设备安装工程建设规模及技术要求持续提升,传统施工技术及管理方式已逐渐难以满足复杂系统的动态协调需求。借助智能化设备及信息集成平台,施工现场能够实现实时数据采集、自动预警响应及远程技术调控,使安装过程更加精准、高效及可控。与此同时,智能传感、自动控制及远程监控等新型功能已逐渐嵌入各类水电站核心机电设备中,打破传统管理依赖人工巡检、纸质记录及手动调度的低效模式。这一策略的核心在于以数据驱动决策、以系统支撑操作、以平台促进协同,从而全面提升机电设备安装施工技术的响应速度,使调度环节从“依经验”走向“可量化”。

在主厂房水轮发电机组安装期间,相关工作人员可引入带有“智能监控系统”的新型发电机本体,该设备配备的高精度振动传感器及嵌入式温度传感模块能够实时监测转子运行状态并将数据同步上传至项目调度平台。相关工作人员在系统配置初期对传感器标定,需保证数据精度满足 $\pm 0.01\text{ mm}$ 的动态误差控制。设备启动调试阶段,系统则自动记录各类参数变动情况,并结合算法识别异常趋势。当某一测点温度偏离预设阈值时,控制中心第一时间收到警报,调度人员则立即根据系统反馈调整散热装置运行频率,并发出暂停指令至就近作业组。现场工程师利用手持终端设备,接收调度中心推送的实时调整指令可迅速完成检修操作。在设备就位过程中,项目负责人依托远程图像传输系统全程监控起吊过程,平台智能识别吊装角度及位移幅度,并自动生成过程记录存档。经过这套智能化管理系统,项目调度层能够动态掌握施工节奏合理调配作业资源,显著减少等待工序及重复操作的出现率。安装工程在全过程中保持高效、精密、有序运行,从而为水电站后期运行阶段的运维模式预设数字化管理基础。

#### 2.4 建立多方协调模式,优化复杂设备安装路径

在水电站机电设备安装工程中,设备类型多、系统接口复杂、技术环节密集,顺利推进任何一项施工技术都依赖于设计、施工、监理等多方的高效配合。设备安装路径的合理与否不仅影响工程进度,也直接关系到能否在设计意图下充分发挥设备性能<sup>[4]</sup>。因此,建立多方协调模式已成为优化复杂设备安装路径的关键环节。设计交底、实时沟通及联动调整,不同主体间能够根据设备结构特点、安装空间、施工工序等问题形成清晰共识,减少误解冲突,提高技术决策的针对性。在面对现场与图纸不符、设计细节遗漏或环境条件变化等情况时,多方协作模式可实现快速响应及同步修正,保证施工技术方案在全过程中保持逻辑闭合及执行通畅。构建协同模式的最终目标,是以最短路径、最小风险、最高效率完成复杂设备的性能保障<sup>[5]</sup>。

在进行进水口闸门安装前,相关工作人员可以组织召开“设计单位与施工团队的专项协调会”。相关工作人员需详尽讲解闸门结构参数、开启角度、导轨嵌入深度及密封结构要求,并在会议现场展示3D设计模型,使施工技术组充分掌握设备构造及安装意图。结构工程师在翻阅地质勘查资料过程中,发现实际岩层厚度及原始设计存在偏差,若按原图纸施工,将导

致闸门基础锚固深度不足。技术负责人则在现场提出疑点,并随即发起书面技术交底函。与此同时,设计单位将派出主设计师联合地质专家抵达项目现场,与施工项目负责人、测量工程师联合复测。专家组需确认地质差异对设备基础产生实际影响,随后在会议室共同会审图纸调整方案,提出扩大基础预埋锚筋长度、增加补强钢筋网密度的结构优化方案。设计单位当场绘制调整节点图纸,并在当日晚间正式发出设计变更通知单。施工负责人依据新图纸重新编制施工方案,并协调材料供应商加急提供加固型锚固件。各单位围绕技术变更密切配合能够使设备安装节点不受影响,保证后续施工路径得以顺利推进。经过此次设计联动,复杂设备安装路径可实现动态优化,从而实现水电站机电设备安装工程的现实价值,彰显全过程技术协同对于施工执行力提升的深远意义。

### 3 结束语

在水电站建设进入高质量发展阶段的背景下,机电设备安装工程的施工技术已成为工程成败的核心变量。通过规范标准执行、强化过程控制、推动技术融合及优化协作模式,施工管理可实现由粗放式向精细化、由经验驱动向数据驱动的深层转型。精密安装水电站机电设备是一项工程行为,更是一种系统工程理念,其技术组织能力、调度执行效率及动态应变水平共同构筑设备运行的安全屏障。唯有持续深耕施工技术策略,强化专业协同联动,方可支撑水电站机电系统在长周期运行中保持高稳定性,为国家清洁能源模式构建提供坚实的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 张珊,刘梦丹,梁筱君.水电站机电安装工程的施工安全管理研究[J].电站系统工程,2024,40(06):85-86,88.
- [2] 薛惠娟.水电站机电设备安装工程合同费用控制的影响因素研究[J].西北水电,2024(01):99-102.
- [3] 全德刚,施辉雨,黄登.水电站机电设备安装工程施工技术质量管理[J].水电站机电技术,2023,46(07):153-155.
- [4] 任丰兰.《水电站机电安装工程基础知识》指导下的水利工程机电一体化设备安装调试研究[J].人民黄河,2021,43(11):162.
- [5] 郑继萍.水电站机电设备的安装和管理[J].科技资讯,2021,19(29):47-49.

# 碳中和目标下循环流化床锅炉技术分析

张启飞

(北京国电电力有限公司上湾热电厂, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

**摘要** 在碳中和的目标下, 循环流化床锅炉技术具有明显的优势, 其燃料适应性强, 污染物控制经济且运行灵活, 能支撑电网调峰, 与碳中和目标高度适配。基于此, 本文论述了该项技术的核心优势与碳中和目标的适配性, 探讨了技术升级的方向与碳中和路径, 分析了多燃料协同利用与碳减排潜力, 并对未来技术发展进行了展望, 以期为进一步推动循环流化床锅炉技术的应用和升级提供有益参考, 进而提高生态效益与环境效益, 更好地实现碳中和目标。

**关键词** 碳中和; 循环流化床; 锅炉

**中图分类号**: TD8; X5

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.015

## 0 引言

在全球气候变暖的环境下, 碳中和目标逐渐成为国际共识, 能源领域的低碳转型也迫在眉睫。传统的燃煤锅炉由于碳排放高, 面临着巨大的减排压力。循环流化床锅炉技术具有独特的优势, 在能源行业得到广泛应用。该技术目前在燃料适应性及污染物控制等方面已取得一定的成果, 但面对碳中和的严格要求, 仍有继续提升的空间, 在参数提升、脱硝脱硫优化、多燃料协同利用等方面均有发展机遇。因此, 探索循环流化床锅炉技术的未来发展方向, 对能源行业低碳转型有重要价值。

## 1 循环流化床锅炉技术核心优势与碳中和目标的适配性

在碳中和的目标下, 循环流化床锅炉技术具有多方面的核心优势, 如燃料适应性、污染物控制经济性、运行灵活性等。而这些优势与碳中和的目标具有较高的适配性, 能够较好地满足碳中和发展要求, 因而具有较高的推广应用价值。

### 1.1 燃料适应性优势

循环流化床锅炉技术在燃料适应性方面与碳中和目标高度契合, 我国煤炭储量虽然丰富, 但是优质煤相对稀缺, 大量高硫、高灰分的煤矸石和油页岩等劣质煤均有待开发。而循环流化床锅炉技术采用了独特的低温燃烧方式, 对燃料粒径要求宽泛, 能将这些劣质煤充分燃烧, 提高利用效率, 减少对优质煤的依赖, 进而降低优质煤开采带来的碳排放。该技术在生物质掺烧上也有较大潜力, 生物质作为可再生能源, 燃烧过程中释放的二氧化碳和生长过程中吸收的二氧化碳

基本平衡, 因而有碳中性特点<sup>[1]</sup>。锅炉能精准调控床料粒径并优化分级配风, 实现生物质和煤的稳定混烧, 降低化石燃料比例。生物质中还含有碱土金属等成分, 可在一定程度上辅助脱硫, 减少脱硫剂石灰石的用量, 降低运行成本和污染物排放, 助力碳中和。

### 1.2 污染物控制经济性

该技术在污染物控制方面具有较高的经济性, 例如在脱硫脱硝方面, 采用炉内添加石灰石的方式脱硫, 在钙硫比达到 1.5 ~ 2.5 时, 能达到 90% 以上的脱硫效率, 使硫化物排放浓度降低到 35 mg/m<sup>3</sup>, 满足严格的环保要求。利用分级送风和低温燃烧技术, 能有效控制氮氧化物生成, 使其排放浓度控制在 150 ppm 以下, 满足超低排放的标准, 同时无需额外复杂的脱硝装置, 大幅降低了成本。此外, 针对生物质燃料燃烧可能带来的污染问题, 也可采取一定的应对措施。生物质中氮元素含量较高, 燃烧容易生成氯化氢及重金属氯化物, 对此, 可在锅炉内添加高岭土等吸附剂, 能协助脱除铅、镉等重金属及二噁英, 从源头上减少二次污染, 用经济高效的方式实现多种污染物协同控制, 进而有力地推动碳中和进程。

### 1.3 运行灵活性支撑电网调峰

循环流化床锅炉具有较高的运行灵活性, 能够支撑电网调峰。在应对负荷变化方面, 其独特的床料蓄热特性赋予了锅炉快速变负荷的能力, 可在 30% ~ 100% 的负荷区间内稳定运行, 适应风电、光伏等新能源发电中由于自然条件变化而产生的波动性。同时, 利用循环干预技术, 可将锅炉变负荷速率提高到每分钟 5%, 快速响应电网调度指令, 及时调整发电功率, 满足电网的调峰需求。另外, 锅炉还具备了零出力热备用功能,

主循环回路中高温循环物料持续循环,能够维持锅炉始终处于热备用状态,可实现“秒级”启停。这一特性使得锅炉可根据新能源发电的实时情况,快速投入或退出运行,减少因新能源发电和用电负荷不匹配导致的弃电现象,提高电网的稳定性及可靠性,为碳中和目标的实现提供有力的支撑。

## 2 循环流化床锅炉技术升级方向与碳中和路径

### 2.1 超临界与超超临界参数突破

超临界和超超临界循环流化床锅炉在蒸汽参数上实现了较大提高,因而在效率提升及碳排放下降方面均取得了显著的成效。例如:当主蒸汽压力达到或超过 25 MPa,温度达到或超过 580 °C 时,其供电效率可提升到 42% ~ 45%。因此,在发电过程中,燃料能量的转化更为高效,单位发电量消耗的燃料明显减少,因此其碳排放相比于亚临界机组降低了 10% ~ 15%,对于减少碳排放发挥了明显作用。另外,高温高压环境对于锅炉设备的要求较高,需要注意避免受热面超温及磨损的问题。对此,需研发耐高温蠕变的水冷壁材料,确保其在长期高温运行下保持稳定性能;还要开发高效防磨内衬,降低物料对设备的磨损。经过一系列创新后,能够延长设备使用寿命,保障锅炉稳定高效的运行,推动碳中和目标的实现。

### 2.2 深度脱硝与脱硫技术优化

循环流化床锅炉向碳中和升级的一项重要举措就是优化深度脱硝与脱硫技术<sup>[2]</sup>。在脱硫方面,可采用粒径小于 50 μm 的超细石灰石,其比表面积大,可增加与二氧化硫的接触反应机会,提高脱硫剂利用率。在钙硫比小于 2 的较低条件下,即可实现二氧化硫超低排放,使排放浓度控制在 35 mg/m<sup>3</sup> 以下,有效降低了脱硫成本和石灰石消耗。在脱硝处理方面,低氮燃烧和选择性非催化还原协同技术可发挥较大的作用。将床料粒径降低到 1 mm 以内,强化炉内还原性气氛,从源头上抑制燃料型氮氧化物的生成。同时结合选择性非催化还原技术,在 850 ~ 950 °C 的最佳窗口温度精准注入氨水,使氮氧化物排放浓度降低到 50 mg/m<sup>3</sup>,满足严格的环保排放标准,进而有力地推动循环流化床锅炉的低碳清洁发展。

### 2.3 生物质高参数直燃技术

生物质高参数直燃技术能够较好地契合碳中和路径,在应对生物质燃料特性带来的挑战上,应重视防沾污腐蚀设计。生物质当中含有钾、钠等碱金属成分,在燃烧过程中容易使受热面产生沾污和腐蚀的问题,影响锅炉高效运行及蒸汽参数提升。可引入循环床料

清洗技术,提供有效解决方案,利用返料阀将惰性床料精准喷入高温分离器,借助床料冲刷作用清除沉积物,从而保护锅炉受热面清洁,使蒸汽参数提升到 600 °C 以上,提高发电效率。同时,生物质直燃循环流化床锅炉在提升能效方面也有明显优势,其供电效率可达 35% ~ 38%,如果结合热电联产模式,将发电产生的余热充分利用,还可将综合能效提高到 85% 以上,远超传统煤电机组,减少碳排放的同时也实现了能源的高效利用,推动碳中和目标实现。

## 3 多燃料协同利用与碳减排潜力

### 3.1 煤与生物质耦合燃烧

煤与生物质耦合燃烧是实现多燃料协同及挖掘碳减排潜力的重要方式,在燃料配比优化上,充分考虑生物质和煤的特性差异。生物质热值一般在 12 ~ 18 MJ/kg,且灰分特性与煤不同。采用大量实验和实践确定最佳掺烧比例在 10% ~ 30% 之间,在此比例范围内既能充分利用生物质燃料保证整体燃烧效率,又能减少化石燃料煤的使用量,从源头上降低碳排放<sup>[3]</sup>。在碳减排核算过程中,以掺烧 20% 生物质计算,由于生物质在生长过程中吸收二氧化碳,具有碳中性的特点,单位发电量碳排放可降低 15% ~ 20%。如果生物质来源为秸秆等农业废弃物,其处理过程原本可能产生碳排放,而将其用于耦合燃烧,不但避免了废弃物处理带来的污染,也进一步提升了碳减排效益,为碳中和目标达成提供了有力支撑。

### 3.2 污泥与工业废弃物资源化利用

在循环流化床锅炉技术中,可将污泥和工业废弃物进行资源化利用。常规污泥处理中城市污泥含水率在 80% ~ 90%,直接处理难度大且容易造成二次污染。而循环流化床锅炉能发挥其独特优势,利用锅炉余热对污泥进行干化处理,将含水率降低至 30% ~ 40%,然后与煤混合燃烧。这一过程能够实现污泥减量化,减量幅度在 90% 以上,还可通过高温燃烧杀灭污泥中的病原体与寄生虫,达到无害化处理目标,解决城市污泥处理难题。针对工业废弃物,例如油漆渣、废轮胎等可燃废弃物,过去多采用填埋的方式处理,不但会占用大量土地,而且也会在分解过程中产生甲烷等温室气体。利用循环流化床锅炉,可用这些工业废弃物代替部分煤炭燃烧,既减少了煤炭消耗,也降低了废弃物填埋带来的甲烷排放,助力碳减排。

### 3.3 碳捕集与封存技术集成

利用燃烧后捕集技术,在循环流化床锅炉尾部烟道中增设胺法吸收装置,能对含有 12% ~ 15% 二氧化

碳的烟气进行有效捕集。该项技术相对成熟,能通过优化吸收剂和工艺流程,将捕集成本控制在 300~400 元/吨二氧化碳的水平上,并在一定程度上平衡经济性与碳减排效果,为大规模碳捕集提供了可行性方案参考和依据。富氧燃烧技术也具有高效的碳减排效率和经济性潜力,利用空气分离的方式提取纯氧,让循环流化床锅炉在富氧环境下燃烧,使烟气中二氧化碳的浓度达到 80% 以上。高浓度的二氧化碳可以使后续捕集过程更加简便高效,大幅降低了捕集能耗和成本<sup>[4]</sup>。如果能够将该项技术大范围推广应用,将会极大地提升循环流化床锅炉的碳减排能力,进而推动整个行业向低碳、零碳方向加速迈进。

#### 4 循环流化床锅炉技术发展展望

随着各领域技术水平的持续发展和提升,循环流化床锅炉技术也将取得新的发展。其主要体现在智能化与数字化升级、新型循环流化床技术研发、零碳燃料替代探索等方面,可实现运行效率及效能的全面提升,取得更好的效益。

##### 4.1 智能化与数字化升级

在智能化与数字化技术升级的背景下,AI 技术能促进燃烧控制的优化。例如:锅炉引入机器学习算法后,能实时感知运行状态,精准动态调整一二次风配比和燃料量等关键参数。这一过程相当于给锅炉配置了“智能大脑”,可依据不同燃料特性、负荷需求等因素,实现燃烧效率的最大化,甚至突破 99% 的大关。同时,还可精细调控污染物排放,使二氧化硫排放浓度控制在 20 mg/m<sup>3</sup> 以下,氮氧化物排放浓度在 30 mg/m<sup>3</sup> 以下。数字孪生技术应用能为锅炉稳定运行提供前瞻性保障,构建高度逼真的数字孪生模型,模拟锅炉在各种工况下的运行状态,提前发现潜在设备故障隐患,及时采取维护措施,降低非计划停机风险,提高锅炉运行的可靠性与经济性,推动循环流化床锅炉向智能化、高效化的方向发展。

##### 4.2 新型循环流化床技术研发

增压循环流化床是一种代表性的新型循环流化床技术,其创新性地 将煤气化与燃气轮机结合,有望实现热效率突破 45% 的重大跨越。在高压环境下,煤气化更充分,与燃气轮机联合循环能更高效地将燃料能量转化为电能。不过其发展也面临一定的挑战,如高温高压密封要求极高,一旦密封失效就会影响设备运行,还可能造成安全隐患。材料腐蚀问题也不容忽视,高温高压且含腐蚀性物质的工况对设备材料要求十分严格,还需要研发出新型耐高温、抗腐蚀的材料予以

解决<sup>[5]</sup>。化学链燃烧技术也是一项新型技术,利用金属氧化物载氧体实现二氧化碳内分离,从源头上避免传统燃烧中氮氧化物的生成,环保优势明显。不过还需开发高效载氧体,提升载氧能力和循环稳定性,同时优化反应器设计,提高反应效率,并降低成本。

##### 4.3 零碳燃料替代探索

绿氢掺烧和氨燃料燃烧技术是零碳燃料替代领域的重要探索方向,对于循环流化床锅炉低碳转型有重要意义。绿氢掺烧是借助可再生能源电解水制取绿氢,按 5%~10% 的比例掺入循环流化床锅炉,逐步减少对化石燃料的依赖。绿氢在燃烧过程中仅产生水,不排放二氧化碳。随着掺烧比例的提升,能有效降低锅炉整体碳排放,实现近零碳排放目标。不过目前绿氢制备成本较高,且大规模存储运输均存在难度,还需进一步深入研究。在氨燃料燃烧技术方面,氨燃料的热值为 18.6 MJ/kg,开发氨—煤混烧技术,其燃烧产物仅有氮气和水。如果氨来源于绿电电解,从全生命周期看,可实现真正意义上的零碳排放。不过该技术中也存在着氨燃烧稳定性、与煤混合燃烧均匀性等方面的问题,需要继续研发和解决。

#### 5 结束语

在碳中和的目标下,循环流化床锅炉技术展现出了显著的优势和巨大的发展潜力,其燃料适应性强,污染物控制经济,运行灵活,与碳中和目标高度适配。通过超临界参数突破、深度脱硫脱硝优化、生物质高参数直燃等技术升级,以及多燃料协同利用、碳捕集与封存技术集成,可有效挖掘碳减排潜力。未来智能化与数字化升级、新型循环流化床技术研发,零碳燃料替代探索等方向将进一步提升其能效并降低碳排放。

#### 参考文献:

- [1] 崔长颖,刘美佳,葛金林,等.燃煤锅炉协同处置油基岩屑碳排放核算及降碳贡献度分析[J].环境科学研究,2022,35(02):540-546.
- [2] 冯玉鹏.国际对话:“碳达峰,碳中和”背景下循环流化床锅炉的发展与挑战[J].电力学报,2022,37(02):118-120.
- [3] 吕俊复,蒋苓,柯希玮,等.碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J].煤炭科学技术,2023,51(01):514-522.
- [4] 崔续桐,朱健,赵博,等.基于设计的循环流化床床内磨损特性研究[J].辽宁化工,2025,54(01):19-22.
- [5] 胡仙楠,邓博宇,刘欢鹏,等.循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2023,29(06):11-23.

# 机制砂石骨料粒形与级配优化技术研究

朱容海, 毕永健

(中交一公局第四工程有限公司, 广西 南宁 530000)

**摘要** 以花岗岩机制砂与粗骨料为研究对象, 围绕“粒形—级配—性能”协同优化思路, 设计了S、R、G、F、D五大系列, 系统探讨了机制砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状含量及最大粒径对拌合物流变、力学与耐磨性能的量化影响。研究表明: 100%机制砂掺配12%石粉、粗骨料级配20:55:25、针片状 $\leq 12\%$ 、最大粒径25 mm的组合, 可使混凝土抗压强度达49 MPa、磨损率低至0.78%。研究有效解决了机制砂石粒形不规则、级配断档、石粉波动等问题, 为机制砂石高值化利用及耐磨混凝土精准设计提供了理论依据与工艺路径。

**关键词** 机制砂掺量; 石粉含量; 粗骨料级配; 耐磨性能; 耐磨混凝土

中图分类号: TU528

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.016

## 0 引言

随着高品质天然砂石资源的日益枯竭以及生态环保政策的持续收紧, 机制砂石已成为现代混凝土结构工程不可替代的细、粗骨料来源<sup>[1]</sup>。然而, 与天然骨料相比, 机制砂石在母岩岩性、破碎工艺及除尘方式等多因素耦合作用下, 普遍存在粒形不规则、针片状含量高、级配断档与石粉含量波动大等先天缺陷, 显著影响新拌混凝土的工作性、硬化力学性能及耐久性<sup>[2]</sup>。现行规范对粒形和级配的限定多停留于筛余百分比与单一几何参数层面, 缺乏对颗粒群三维形貌、表面纹理及空隙结构的系统表征, 难以实现骨料品质的精准分级与性能预测<sup>[3]</sup>。此外, 现有破碎与整形设备运行参数和骨料最终粒形—级配特征之间的映射关系尚不清晰, 导致生产线优化缺乏科学依据, 产品质量波动大<sup>[4]</sup>。

因此, 亟需开展机制砂石骨料粒形与级配优化技术系统研究。本研究以花岗岩机制砂为对象, 固定胶凝体系与聚羧酸减水剂, 设计S、R、G、F、D五组配比, 系统探讨机制砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状含量及最大粒径对新拌流动性与耐磨性的影响,

为机制砂石的高值化利用和混凝土性能的精准设计提供理论基础与技术路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

本研究用水泥为P.O 42.5普通硅酸盐水泥<sup>[5]</sup>, 硅酸盐水泥与矿渣的化学组成如表1所示。

水泥物理性能如表2所示, 掺合料选用粒度稳定、活性良好的S95级矿粉, 以提升混凝土后期强度与耐久性。

细骨料采用机制砂和天然河砂两种, 机制砂以典型的西南山区花岗岩母岩为原料, 通过PYY500单缸液压圆锥破+XHL1145立轴冲击式整形制砂机(成都大宏立机器股份有限公司)获得, 其细度模数为2.8, 河砂细度模数为2.6, 机制砂含石粉量为8.3%, 河砂含泥量为1.5%<sup>[6]</sup>。粗骨料选用安徽海螺环保型辉绿岩碎石, 粒径分别为510 mm、1 020 mm及16~31.5 mm, 其粒形经针片状含量测试控制在12%以内。为优化粒径搭配与堆积密实度, 粗骨料在使用前经筛分与级配调整处理。外加剂采用聚羧酸系高性能减水剂(江苏苏博

表1 硅酸盐水泥与矿渣的化学组成

化学成分	质量分数 (%)							燃烧损失
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	
硅酸盐水泥	21.5	5.2	3.4	63.1	2.3	2.5	0.8	1.2
矿渣	35.2	13.6	0.8	41.1	6.5	1.8	0.5	0.5

表2 水泥物理性能

性能指标	比表面积 (m <sup>2</sup> /kg)	初凝时间 (min)	终凝时间 (min)	抗压强度 (3d, MPa)	抗压强度 (28d, MPa)
测试值	340.0	160.0	245.0	25.4	52.8

特新材料股份有限公司), 固含量为 19.8%, 减水率达 35.0%。拌合水为自来水, 符合《混凝土用拌合水》(JGJ 63-2006) 的相关要求<sup>[7]</sup>。

## 1.2 级配优化

为研究机制砂与粗骨料粒形及级配对混凝土工作性与耐磨性能的影响, 试验围绕细骨料掺配比例、机制砂整形程度、粗骨料级配结构、针片状含量和最大粒径等关键因素, 设计了 S、R、G、F、D 五个系列混凝土配比方案。胶凝材料组成固定为质量分数 75% 的 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥与 25% 的 S95 矿渣粉, 减水剂采用聚羧酸高性能减水剂, 控制混凝土坍落度为 (5.0±2.0) cm。S 系列混凝土采用不同机制砂与河砂掺量比例质量分数为 0%、50%、100% 以研究混合砂中粒形对混凝土性能的影响; R 系列混凝土在机制砂固定来源与形貌下, 设置不同石粉含量 5%、8%、12%、15%, 以评估细骨料级配与填充效应对混凝土致密性与耐磨性的作用; G 系列混凝土通过调整粗骨料粒级搭配 510 mm: 1 020 mm: 16~31.5 mm 质量比设为 10:60:30、20:55:25、15:50:35, 探讨粗骨料级配对混凝土强度与抗磨蚀性能的影响; F 系列混凝土采用同级配下不同针片状含量 ≤ 8%、12%、16%、20% 的粗骨料, 研究粒形规整度在混凝土性能中的影响权重; D 系列混凝土设置最大粒径控制级差为 20 mm、25 mm、31.5 mm, 通过筛选与粒形优化调控粗骨料颗粒分布连续性, 以分析其对混凝土构件整体性能的提升作用。

## 1.3 试验方法

采用 HJS-45 型强制式双卧轴混凝土搅拌机 (江苏江阴建工机械有限公司生产) 制备试样, 粗骨料按设计级配 (5~10 mm、10~20 mm、16~31.5 mm) 筛分重组, 人工分拣控制针片状颗粒含量; 机制砂经机械整形后, 采用 NLSX-III 型空气分级系统 (郑州维科智能装备有限公司) 进行石粉含量调控。制备时先将预处理后的粗骨料与细骨料投入搅拌机干拌 1 min, 再加入胶凝材料拌和 1 min, 最后注入含聚羧酸减水剂的水溶液搅拌 2.5 min。新拌混凝土置于温度 20±1 °C、相对湿度 > 90% 环境养护 24 h 后脱模, 转入 20±1 °C 饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液中养护至龄期。

机制砂的棱角系数测试按照《建筑用砂》(GB/T 14684-2022) 中的流动时间法进行测定, 使用 LS-TF100 型砂流动性测试仪 (北京建研科技有限公司); 粗骨料针片状颗粒含量依据 GB/T 14685-2022 游标卡尺法逐组检测。

混凝土的力学性能测试依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019) 进行, 抗压强度采

用 150 mm 立方体试块, YAW-3000E 型电液伺服压力试验机 (济南中研试验机有限公司) 以 0.7 MPa/s 加荷速度测试; 抗折强度采用 150 mm×150 mm×550 mm 棱柱体试块, 加荷速度控制为 0.07 MPa/s。耐磨性能测试执行 JTG 3420-2020 规程并强化骨料暴露观测, 将养护至龄期的 150 mm 立方体试块干燥至恒重, 真空清除表面浮尘后, 固定于 LMR-3 型混凝土耐磨试验机 (河北路达试验仪器有限公司), 特定向使磨削面垂直骨料最大受力方向以模拟路面磨耗。

先以 200 N 负荷预磨 30 转, 刷净粉尘称得初始质量  $m_1$ ; 继续磨削 60 转后称取终质量  $m_2$ , 计算单位面积磨耗量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ), 如下:

$$G = \frac{(m_1 - m_2)}{0.0125}$$

## 2 结果与讨论

本研究围绕机制砂与粗骨料的粒形与级配特性, 系统评估其对混凝土工作性与耐磨性能的影响, 重点分析了混合砂掺量、石粉含量、粗骨料级配、针片状颗粒比例及最大粒径等参数变化下混凝土性能响应规律, 进一步提出粒形一级配协同优化路径。

### 2.1 机制砂与石粉掺量的影响

S 系列的设计变量为机制砂与河砂的质量分数掺配比例, 设定为 0%、50%、100%, 以评估机制砂对混凝土工作性与抗磨性能的影响。R 系列混凝土在机制砂固定的前提下, 分别设置石粉掺量为 5%、8%、12%、15%, 旨在评估石粉作为填料对混凝土微结构与耐磨性能的作用。表 3 为机制砂与石粉掺量对混凝土性能的综合影响。结果表明: 机制砂掺量由 0% 逐步提升至 100%, 混凝土坍落度从 6.1 cm 下降至 4.0 cm, 工作性明显下降。究其原因, 一方面, 机制砂的棱角性较强, 表面粗糙度较大, 颗粒间摩阻增加; 另一方面, 机制砂中细小颗粒级配偏粗, 缺乏润滑作用, 整体减弱了浆体对骨料的包裹能力。磨损率则呈下降趋势, 从 1.2% 下降至 0.85%。这主要归因于机制砂颗粒形貌的不规则性, 提升了界面粘结力, 同时填充性能良好, 改善了混凝土的致密性与表层抗磨性。

当石粉掺量从 5% 提升至 8% 和 12% 时, 混凝土结构更加致密, 磨损率显著下降, 抗压强度和表面硬度同步提升。这说明适量石粉可填充砂粒间孔隙, 提升颗粒间的堆积密度, 并在一定程度上提升界面过渡区 (ITZ) 性能。15% 过量掺入反致性能劣化: 当石粉掺量增至 15%, 试样出现微裂纹扩展趋势, 磨损率反弹至 1.1%。推测此时石粉过多消耗浆体用水, 形成游离粉体堆积, 弱化整体结构完整性。

表3 机制砂与石粉掺量对混凝土性能的综合影响

系列	机制砂掺量 (%)	河砂掺量 (%)	石粉掺量 (%)	坍落度 (cm)	磨损率 (%)	抗压强度 (MPa)
S	0	100	—	6.1	1.2	—
S	50	50	—	5.2	1.0	—
S	100	0	—	4.0	0.85	—
R	—	—	5	—	1.2	42.5
R	—	—	8	—	0.85	48.3
R	—	—	12	—	0.7	52.7
R	—	—	15	—	1.1	46.8

## 2.2 粗骨料级配的作用

G系列试验围绕粗骨料的粒径组合展开,设定三种配比方案:10:60:30、20:55:25、15:50:35,探讨粒级连续性与空隙率对混凝土力学性能的影响。F系列的试验设计在粗骨料级配一致的基础上,控制针片状颗粒含量分别为 $\leq 8\%$ 、 $\leq 12\%$ 、 $\leq 16\%$ 、 $\leq 20\%$ 。D系列控制粗骨料最大粒径为20 mm、25 mm、31.5 mm,以研究最大粒径级差对混凝土的内部结构连续性与性能提升的作用。

表4为典型骨料参数对混凝土性能的影响,结果如下:20:55:25组性能最优,该级配在满足粗细协调的前提下,实现骨料之间合理嵌挤,内部结构密实,强度与抗磨性均达到最高值。该配比在试验中表现出最小磨损率,为0.8%,最高抗压强度为48 MPa。偏粗或偏细皆不利结构稳定,10:60:30组中小颗粒比例过低,导致空隙偏大;15:50:35组中细粒过多,堆积不稳定,浆体需求量上升,最终影响强度与耐久性。

表4 典型骨料参数对混凝土性能的影响

系列	级配	坍落度 (cm)	抗压强度 (MPa)	磨损率 (%)
G 最大粒径 (mm)	10:60:30	—	42	1.1
	20:55:25	—	48	0.8
	15:50:35	—	44	1.05
F 针片状含量	$\leq 8$	5.3	—	0.85
	$\leq 12$	4.6	—	0.9
	$\leq 16$	4.2	—	1.1
	$\leq 20$	3.9	—	1.35
D 最大粒径	20	—	46.5	0.92
	25	—	49	0.78
	31.5	—	47.2	0.88

随着针片状含量升高,混凝土坍落度由5.3 cm下降至3.9 cm,流动性显著降低。这是因为针片状骨料形状不规则,长边倾向于错位堆积,导致拌合物形成“骨架锁结”结构,内摩阻增大。对耐磨性存在临界影响点:造成混凝土应力集中,界面弱化,结构整体性下降,磨损率快速升高。因此,工程中应尽可能控制粗骨料的针片状含量不高于12%。

25 mm为最佳控制值,既能形成合理的堆积密度,又具备良好的颗粒骨架稳定性。在耐磨试验中,该组磨损率最低,仅为0.78%,抗压强度接近49 MPa。粒径偏小致浆体分布不均,而粒径偏大则出现泵送困难、内部空隙偏大等问题,影响施工性能与长期耐久性。

## 3 结论

本研究表明,机制砂在适当粒形调控与级配优化条件下,完全可以作为混凝土用砂的可靠替代材料,优化路径总结如下:

1. 在提高耐磨性前提下,100%机制砂可替代河砂,搭配适量石粉调节级配结构,提升致密性与抗界面磨损能力。

2. 优选粗骨料级配结构为20:55:25比例,针片状含量控制在 $\leq 12\%$ ,最大粒径控制在25 mm最为理想,综合工作性与耐久性表现最佳。

3. 采用骨料粒形与级配参数协同优化方式,在保证混凝土流动性可控前提下,提升内部结构完整性与界面抗损耗能力,特别适用于磨损负荷较高的工业地坪与交通桥面等工程场景。

在今后的研究中,仍需结合实际工况,进一步探索适配性更高的优化策略。

## 参考文献:

- [1] 邹继伯,陈文祥,王霏,等.石灰岩机制砂对混凝土界面过渡区的加强作用研究[J].路基工程,2022(06):73-78.
- [2] 袁加毫.机制砂石粉对水泥混凝土路面耐磨性能的影响[J].交通世界,2024(27):41-43.
- [3] 秦婷钰,陈梦涵,王建旭,等.砂石骨料对混凝土性能的影响及其质量控制[J].价值工程,2025,44(20):21-23.
- [4] 蔡事成,蔡祥磊,李清,等.高品质骨料对混凝土和砂浆性能的影响研究[J].混凝土世界,2023(08):55-59.
- [5] 吴华明,李明,王育江.普通硅酸盐P·O 42.5级水泥抗裂性控制指标研究及工程实践[J].混凝土,2023(12):89-92.
- [6] 夏大回,朱熾,魏士成,等.基于不同细骨料体系水工混凝土性能研究[J].江苏建材,2024(04):19-21.
- [7] 曾熙文,王艳芬,赵光明,等.聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料性能研究[J].煤炭科学技术,2024,52(07):57-67.

# 风电项目现浇混凝土风机塔筒施工技术应用

杨文斌

(新疆臻元新能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 为化解能源危机,我国大力扶持风力发电,逐步提高了风力发电的装机总容量。然而,在风电项目建设时,会由于施工技术选用不当、操作不规范而引发施工质量问题。风机塔筒能起到支撑与稳定机组、减震与抗震的作用,是风电项目能否稳定运行的关键结构。为了保障风机塔筒的建设质量,本文结合工程实例,立足模板安装、混凝土浇筑、预应力张拉三个环节,介绍了风机塔筒施工技术要点,旨在通过严格把控施工要点,为提高风机塔筒施工质量、发挥风机塔筒的功能作用提供参考,进而为风电项目顺畅运行提供保障。

**关键词** 风电项目; 现浇混凝土; 风机塔筒; 模板安装; 混凝土浇筑

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.017

## 0 引言

风机塔筒作为风力发电系统的关键结构,其建设质量的高低对风力发电系统运行的安全性、稳定性产生决定性影响。为构建优质的风机塔筒结构,风电项目施工时,需采用钢筋混凝土结构形式,此种结构兼具抗腐蚀性强、造价低的优势,能满足风电项目优质、经济建设的要求<sup>[1]</sup>。现浇混凝土风机塔筒作业时,需要关注重点施工环节,秉持精细化、流程化作业的原则,科学应用风机塔筒施工技术,打造优质风机塔筒,从而保障风电项目的运行安全。

## 1 工程概况

在某风电项目施工中,运用现浇混凝土结构构建风机塔筒,塔筒设计为梯形,总高度为 13.8 m,其中底部基座、筒顶外直径分别为 6.88 m 与 4.64 m。现场浇筑混凝土风机塔筒时,将塔筒划分为四部分结构,除首节高度 4.8 m 外,其余三节的高度均是 3 m,首层厚度最低为 0.38 m,其余各节的厚度逐步递增,每层增加 0.6 m。预计现场浇筑施工需要使用 580 m<sup>3</sup> 混凝土,另需使用 18.6 t 钢筋材料与 12.7 t 的钢绞线。为了保障风机塔筒的施工质量,施工时需要做好风外侧模板安装控制,并科学实施现场浇筑作业、预应力张拉技术,从而为风电项目构建高稳定性的风机塔筒。

## 2 风电项目现浇混凝土施工技术要点

### 2.1 加强模板安装控制

#### 2.1.1 安装模板支撑体系

采用 1 cm 厚的钢板制作风机塔筒模板,并利用中空型槽钢、钢板分别制作作为竖向与横向肋板,竖向肋

板厚度为 0.5 cm,横向肋板宽度为 12 cm,然后采用定位螺栓定位模板及其上下口<sup>[2]</sup>。安装模板支撑体系前,先将内模板安装所需使用的落地脚手架搭好,为内模板、斜支撑安装作业提供稳定的基础。然后需要构建内模板安装操作平台,并做好预埋件、预埋套管安装作业。内模板安装时,需将内侧钢筋绑扎牢固,然后将附带 PVC 套管的对拉螺栓两端分别安装在内外模板上。之后,再搭建外模板操作平台,安装好首节塔筒的内模板与外模板后,便可开展首节塔筒的混凝土浇筑作业。第二、三、四节塔筒依次按上述方法安装与浇筑。最后,将过渡垫板安装在风机塔筒的顶部位置,然后再进行预应力筋张拉即可。

#### 2.1.2 搭设内外操作平台

风机塔筒内部竖向对拉杆安装时,需采用直径 0.6 cm 的钢丝绳作为连接件,运用环向连接方式,先接好钢丝绳,再对脚手管进行对拉处理,然后用圆盘螺母固定,将风机塔筒的内部操作平台铺放在脚手管上方。风机塔筒外部操作平台,需安装在其竖肋位置处,将 5 cm 厚的中空套管采取焊接形式连接在此处,然后在套管中插入三脚架,并采用销子固定即可。邻近的三脚架,用钢线两两绑扎,以构建结构稳固、空间充足的风机塔筒外部操作平台。

#### 2.1.3 吊装塔筒内模板

风机塔筒内模板共有 11 块,其中一块为早拆模板,其余 10 块为正常模板。施工时,为提高效率,需在地面上将模板预拼好再整体吊装。拼装模板时,要详细查看模板编号,避免出现拼错现象,拼装好后的模板,需采用吊车向指定位置吊装。吊装后,吊钩先不拆除,

需临时固定内模板。然后采用交叉式支撑法支撑内模板<sup>[3]</sup>，在两个相邻的模板之间安装两道内支撑，以起到连接加固作用，此时可拆除吊钩，吊装其他模板。安装首段模板时，需要做好安装前检查，重点检测预埋管定位点与设计要求是否一致，并检查是否存在漏埋区域，一旦发现预埋位置定位不准，或遗落部分区域，需由设计、施工人员共同商讨后再采取对应的补救措施。若检查无误，直接安装第一段模板即可，然后以对拉螺栓、连接螺栓为工具，精细调整模板位置，位置无偏差后再将螺栓拧紧即可。

#### 2.1.4 安装塔筒外模板

风机塔筒外模板由10块模板拼接而成，竖向共有5段，每段2块，由下向上依次拼装好模块即可。风机塔筒第一段外模板与内模板之间应紧密相连，以对拉螺栓作为连接固定件，每个相连接的内外模板之间均设置3排对拉螺栓。第二段外模板按照同样方法连接到内模板上，但只设置2排对拉螺栓即可。各段模板安装完成后，要运用支模加固方法进行固定，并采用钢丝绳加固处理外模板外双槽钢，选用6 mm直径的钢丝绳，直接将之环绕在风机塔筒上，视塔筒周长大小确定钢丝绳长度，共布置2道即可，以确保固定的稳定性。

#### 2.1.5 拆除现浇模板

模板需在混凝土浇筑完成后再拆除，拆除时，先拆外部、再拆内部，并从上部开始，逐步向下部拆除。待拆模作业完成后，再继续拆卸脚手架。模板拆卸作业在浇筑与养护完成后开展，但注意拆模时要绕开过渡垫板，不得损坏或发生位置偏移，以便继续为下一段浇筑施工提供支持，在下一段浇筑养护工序全部完成后，方可将之拆除<sup>[4]</sup>。在模板拆除过程中，可以吊机作为辅助，以便临时性稳固模板，确认模板内侧所有螺栓均拆下后，再用吊机将模板吊离原位，吊送到指定位置。吊送拆下的模板，地面工作人员要收集、清洗、晾晒模板，处理好后放入库中存储留作下次使用。

#### 2.1.6 处理模板接缝

为了提升模板的密封性，防止混凝土浇筑时出现渗漏浆液的现象，该风电项目在模板上下设置了位置相对、尺寸不同的母口和子口，二者直径分别为1.0 cm与1.2 cm，具体结构详见图1所示。两块相邻的模板，用M16螺栓固定，且要将定位螺栓分别安装到两模板底部，以提升模板安装的精度。再用橡胶条填充两个相邻模板间的缝隙，以提升模板接缝的密封性，并开

展闭水试验，检测模板接缝的透水性，确认无误后方可继续后续施工。连接模板时，可利用长度为1.6 m的M24型对接螺栓作为连接件，以增强内模板与外模板连接的稳固性<sup>[5]</sup>。为防止风机塔筒内壁出现渗水现象，需将直径为2.6 cm的PVC套管套在对接螺栓上，再采用水泥砂浆、泡沫胶封堵的套管两端。

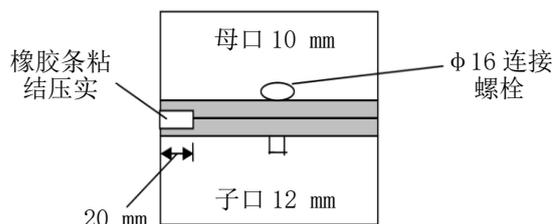


图1 模板密封与连接示意图

## 2.2 规范开展混凝土浇筑作业

### 2.2.1 现场制备混凝土

风电项目现浇混凝土风机塔筒技术应用时，混凝土材料需在施工现场随制随用。共需准备四种原材料，若要求混凝土7 d与28 d抗压强度等级分别达到34.5 MPa与49.5 MPa，应按表1所示配比配置混凝土。其中，水泥材料应使用普通的硅酸盐水泥，并注意统一水泥型号，不能使用板结水泥；砂石材料要清洗干净，表面不可附带粉尘和泥土<sup>[6]</sup>。配制混凝土时，要控制好搅拌时间，通常以3 min为宜，配制好的混凝土材料，需经过检测，确定其坍落度、密度符合设计标准，且和易性良好后再使用，否则需重新配制。

表1 混凝土物料配比

材料名称	用量 (kg/m <sup>3</sup> )
水泥	698
砂	649
碎石	1 155
水	199

### 2.2.2 分层浇筑混凝土

该风电项目风机塔筒的混凝土需现场浇筑，采取分层浇筑方式。浇筑前，在基层上洒水，以去除浮灰、润湿表面，但不可留有积水。每个浇筑层设置为3.6 m厚，且将施工缝设置在两个相邻浇筑层间，以溜槽作为混凝土灌注通道，但溜槽底部不可紧贴塔筒浇筑面，二者之间应留出50 cm的距离，以免混凝土离析影响浇筑质量。分层浇筑作业时，注意上下两层不可按照相同方向浇筑，药选取不同位置作为浇筑点，避免由于浇筑位置过近导致混凝土结构失稳<sup>[7]</sup>。在浇筑过程

中,要安排专人定期检测混凝土,若发现混凝土坍落度低于 6 cm 或高于 8 cm,需暂停作业,更换成性能符合设计规定的混凝土材料后再恢复灌注。各层浇筑所需的混凝土要一次性泵送,泵送时非必要不可中断,浇筑高度若达到 50 cm 以上,需同步实施振捣,以确保混凝土密实度达到规定要求。

### 2.3 安装过渡垫板及预埋件

风电项目安装时,通常需要利用传统基础环连接塔筒,而该项目设置了过渡垫板,无需设置基础环,可直接将过渡垫板连接到风机塔筒的底部。过渡垫板安装前,需提前按照施工要求预制过渡垫板,并运送到施工现场进行组装,现场施工人员要细致、严格地检查过渡垫板的质量,确认其外观完好、无破损且与规格型号、规定要求相符后方可组装,注意过渡垫板的平整度偏差不可超过 1 mm。先将栓钉埋放在塔筒底部,如果浇筑作业时发现过渡垫板发生偏移,可通过此钉控制过渡垫板,使之恢复水平状态,同时过渡板上要设置多个直径相同的小孔,然后将钢绞线穿入孔中,增强过渡垫板的稳定性。之后,将固定件、管件埋放于指定位置,然后连接塔筒的接地网<sup>[8]</sup>,采取钢筋焊接连接法,要规范施焊、稳固连接,焊接后将焊接处的焊渣清理干净,并采取刷漆防锈措施,防止锈蚀导致焊点松动而影响塔筒的稳定性。要安排专人监测预埋件,一旦发现其位置发生偏移,要立即停止浇筑,纠正后方可恢复浇筑作业。

### 2.4 预应力筋张拉作业

风电项目混凝土浇筑完成后,应实施预应力筋张拉作业。先根据施工要求,对预应力筋进行切割处理,再将锚具固定在预应力筋的端头位置,并用钢筋将锚具绑扎牢固,纵横两个方向至少各绑扎两道,设定锚具之间的距离时,要将固定端锚垫板尺寸纳入考量,注意垫板之间不可相互交叠。张拉预应力筋前,工作人员要对张拉锚具所在位置是否准确进行核查,确认无误后,先将预应力筋从张拉端锚具上引出,然后再用分束板分束处理顶部预应力筋。分束板按图 2 布设,在对称轴上标记点位,该点位置要与过渡垫板外径方向相接近,且平行于风机塔筒的对称轴。钢绞线采用直径 1.2 cm 的箍筋,并按照井字形加固,为提升预应力筋的顺直性,要求筋中心位置对准塔筒中心点<sup>[9]</sup>。两个相邻的预应力筋之间应相距 15 dm 以上。施工人员需按设计要求,利用钢丝扎制预应力筋束,由质检员测定后确认其安装稳固后,方可由施工人员利用千斤顶执行预应力张拉作业,本项目的张拉力设置为 185 kN。

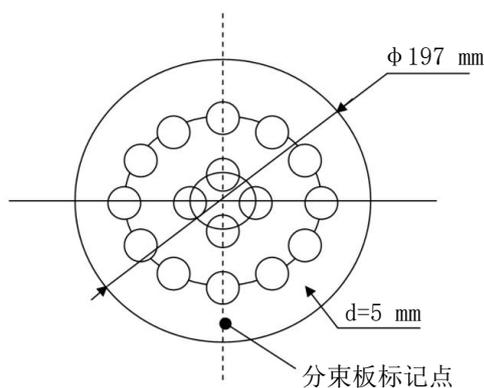


图 2 分束板样图

### 3 结束语

在风机塔筒施工过程中,需将塔筒内模板与外模板的规范安装作为重点,以保障风机塔筒现场浇筑质量。由于风机塔筒高度大,存在一定的高空作业风险,因此施工过程中要严格把控模板安装、混凝土浇筑、钢绞线张拉三个施工环节。施工人员要规范安装模板支撑体系,依次做好操作平台搭设、塔筒内模板吊装、塔筒外模板安装、现浇模板拆除作业。在浇筑混凝土时,要控制好混凝土现场制备环节,并分层浇筑混凝土,事先安装好过渡垫板并预埋相关构件,还要合理张拉预应力筋,以防止混凝土浇筑作业时出现渗漏浆液现象,保障混凝土成型效果,进而构建出完整、可用的风机塔筒,为风电项目安全、稳定运行提供保障。

### 参考文献:

- [1] 张葛军. 风电项目现浇混凝土风机塔筒施工技术分析[J]. 风力发电, 2023(06):42-49.
- [2] 刘军涛. 混凝土风电塔筒安装与控制技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2025(10):21-26.
- [3] 杨昊. 风电塔筒的可靠性分析与检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [4] 孟欣, 许川川. 风电机组混合塔筒施工关键技术[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2021(S01):170-173.
- [5] 张安, 陈世强. 预应力钢筋混凝土风力发电塔筒应用案例分析[J]. 冶金丛刊, 2020, 05(23):97-98.
- [6] 高翔. 矩形钢管混凝土束风机塔筒结构抗震性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [7] 黄海云, 于红玉. 混凝土塔筒安装技术在风力发电安装工程中的应用[J]. 2024(16):109-111.
- [8] 雷东. 预应力锚栓风机基础混凝土灌浆加固处理浅谈[J]. 长江技术经济, 2024, 08(02):97-100.
- [9] 陈风云, 王振扬, 苏凯. 海上风机单桩基础与塔筒间连接方式对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(02):200-203.

# 高速公路隧道工程二次衬砌脱空率控制措施

秦 勇

(四川公路桥梁建设集团公路隧道分公司, 四川 成都 610000)

**摘 要** 在高速公路隧道工程持续扩张的建设中, 二次衬砌脱空问题已成为制约结构稳定性与使用寿命的严重隐患。基于此, 本文阐述了高速公路隧道工程二次衬砌脱空的原因, 并提出优化浇筑工艺流程、完善防水板铺设规范、合理配置混凝土参数、落实养护时效管理策略, 旨在为降低隧道二次衬砌脱空率、提升高速公路隧道工程的整体质量提供借鉴, 从而为后续隧道运营安全以及养护管理提供坚实稳定的结构保障。

**关键词** 高速公路; 隧道工程; 二次衬砌; 脱空率

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.018

## 0 引言

高速公路作为国家交通骨架的重要组成部分, 其隧道工程建设质量关系到整体通行安全与使用寿命。在隧道结构中, 二次衬砌承载着围岩荷载、保护初支结构、提高耐久性的关键作用。随着隧道施工规模不断扩大, 频繁出现二次衬砌脱空问题已成为影响工程质量的严重隐患。脱空现象产生多源于衬砌与初支之间未形成有效贴合, 混凝土密实性不足、防水板铺设不当及模板支撑变形均可能造成空腔积聚, 严重时还会削弱结构强度并影响衬砌受力作用的完整性。因此, 在隧道结构复杂性不断提升的背景下, 控制脱空率是提升工程整体性能的关键环节。

## 1 高速公路隧道工程二次衬砌脱空原因分析

### 1.1 养护时间欠缺

在高速公路隧道工程中, 二次衬砌的养护环节直接关系到混凝土强度的形成。若衬砌混凝土在未达到早期设计强度前就受到外力作用或暴露于不良环境, 将会对内部结构的稳定性造成干扰<sup>[1]</sup>。养护时间不足往往导致水泥水化反应不充分, 使混凝土表面硬化与内部强度发展不同步, 进而引发内部微裂缝扩展, 在结构接触面产生不稳定空隙。在这种情况下, 二次衬砌难以有效贴合初期支护, 衬砌背后易出现未填实的空腔, 从而导致脱空率上升。在温差较大或通风不畅的隧道段落, 若养护时间控制不合理, 混凝土表层与内部的应力释放不同步, 极易诱发拱顶与拱肩区域的衬砌脱空。脱空现象可能降低其抵抗围岩压力的能力, 在运营期间形成潜在的安全风险。因此, 高速公路隧道工程对通行效率及结构耐久性要求较高, 而养护作为控制脱空率的重要影响因素, 缺失时效性将会削弱整个二次衬砌施工的质量。

### 1.2 防水板松紧失衡

防水板是高速公路隧道工程中二次衬砌环节的重要界面层, 其铺设状态对衬砌贴合质量具有决定性影响。当防水板铺设过紧, 混凝土注入过程中其受力变形将使其局部翘起导致背后出现空腔; 而若铺设过松, 褶皱部分在混凝土压力作用下无法完全展开, 同样会形成不规则的衬砌脱空区域。由于防水层通常位于结构不可见部位, 这类隐性问题的施工过程中难以被及时发现, 却常在后期运营中常演变为脱空率升高的重要诱因<sup>[2]</sup>。二次衬砌在设计中应紧密贴合初支以有效承担围岩荷载, 若防水板状态异常, 衬砌将无法获得可靠支撑易导致应力分布失衡, 在荷载集中的部位引发结构弱化。此外, 防水板的固定方式及搭接密度若不合理, 在混凝土灌注过程中也会发生滑移或局部坍塌, 从而增加脱空隐患。因此, 高速公路隧道对结构闭合度与耐久性有严格要求, 防水板的铺设质量直接影响二次衬砌与初支的贴合程度, 间接决定隧道衬砌的脱空控制水平。

### 1.3 混凝土配比失调

混凝土配合比是影响二次衬砌成型质量的关键技术参数, 在高速公路隧道工程中, 对配比精度的依赖程度更为显著。一旦水胶比、外加剂或骨料级配存在偏差, 混凝土的密实性、流动性及抗收缩能力均会受到干扰。过高的水胶比会导致混凝土内部毛细孔率升高, 结构致密性下降, 容易产生干缩裂缝削弱衬砌层的整体粘结力; 若掺合料配比不当, 早期强度发展不稳定, 混凝土可能会出现不均匀沉降, 促使拱顶及拱肩部位易形成空洞, 进而引发二次衬砌脱空。基于此, 混凝土作为衬砌与初支之间唯一的填充介质, 其流变

性能必须与施工环境相适应。配合比失调将削弱结构对形变的适应能力,使衬砌在复杂围岩压力作用下难以保持良好贴合。因此,控制脱空率必须依托混凝土在结构内部的均匀填充能力,而这一性能本质上取决于科学设定配合比及严谨执行施工环节。在高速公路隧道中,隧道断面大、作业面长、环境差异显著,对混凝土性能的适应性提出了更高要求,任何参数控制失衡都可能成为诱发脱空的隐性因素。

## 2 高速公路隧道工程二次衬砌脱空率控制策略

### 2.1 优化浇筑工艺流程,提升隧道衬砌密实效果

在高速公路隧道工程建设中,混凝土浇筑作为二次衬砌的核心环节,其工艺流程对衬砌结构的密实度具有直接影响。衬砌混凝土若在浇筑过程中出现分层离析、振捣不均或填充不完整等问题,容易导致其与初期支护贴合不严,从而形成背后空腔增加脱空率。这类质量缺陷在结构拱顶或边墙等部位更为突出,长期运行过程中容易引起裂缝扩展、荷载失衡,甚至影响整体耐久性。在浇筑前的技术准备阶段,若未严格核查模板台车、支撑装置及结构对位情况,将使整个衬砌流程存在不稳定因素,进而破坏混凝土结构连续性降低贴合紧密性<sup>[3]</sup>。

在具体施工中,相关工作人员可围绕模板台车的浇筑准备展开多项关键操作,控制隧道工程二次衬砌的脱空率。在进场前需全面检查模板台车整体结构,精准复核各项尺寸,保证模板能严格匹配隧道断面。在检查模板面板时,相关工作人员应重点关注其平整度及光洁度,发现翘曲、凹陷或老化区域需立即更换,避免这些缺陷在混凝土接触面形成不规则空隙。在拼缝处理过程中,相关工作人员可利用焊接方式稳固连接模板板块,同时使用磨具将焊缝打磨至平顺无突棱状态,从源头减少混凝土泌水、漏浆造成的密实缺陷。在此基础上,也需逐一测试液压装置与电气运行状态,保证台车在调整模板张开闭合角度时无卡滞及震动现象,这一过程能为混凝土均匀注入提供稳定的封闭空间。随后施工人员可反复检验台车承重结构,评估其刚度和稳定性是否满足混凝土自重及侧压力的综合承载要求,并加设钢楔定位防护,防止台车在混凝土注入时发生错位或跑模。采用这些浇筑前的准备工作,相关工作人员能够有效避免模板变形、漏浆、模板间隙振裂等一系列衍生问题,使混凝土在衬砌过程中获得连续均匀的支撑环境,明显提升衬砌贴合效果。这种精细化操作可使高速公路隧道工程在结构密实性方面获得实质保障,从而为后续降低二次衬砌脱空率提供可靠基础。

### 2.2 完善防水板铺设规范,减少隧道脱空风险点

防水板作为二次衬砌与初期支护之间的关键隔离层,其铺设状态对结构贴合效果有直接影响。基于此,防水层若铺设松紧失衡、搭接方向不合理或固定密度不足,会导致混凝土浇筑后在局部区域产生滑移、紧绷或褶皱现象。这些变形将阻碍混凝土充分贴合初支,使衬砌背后形成潜在空腔加大脱空率风险。发生脱空是多个施工细节失误叠加所引发的结构隐患,防水板铺设作为前置工序,其规范化程度将直接决定后续混凝土注入的稳定性。与此同时,规范化的铺设流程能控制铺设质量,减少由于水压扰动、振捣空鼓等因素引发的衬砌不密实区域,从而有效降低高速公路隧道工程中二次衬砌脱空率<sup>[4]</sup>。

在施工过程中,相关工作人员需严格围绕防水板的铺设顺序及搭接方向展开全过程把控,保证铺设符合隧道工程二次衬砌精度要求。在作业初期应明确分工,自中心拱顶向两侧依次铺设防水板,使其自重均匀分布,避免因重力集中引发滑移或变形。此铺设方式还便于左右两侧施工人员同步作业,保证彼此之间互不干扰,进而有效提高焊接作业空间的利用率。在搭接处理环节,相关工作人员采用下坡压上坡的搭接方向可以保证防水层在水流作用下不会引导渗水进入焊缝区域。每道板缝搭接前,作业人员会对初期支护面实施表面清理处理,消除混凝土残渣及锐角凸起,使防水板紧贴初支且不被局部撕裂。铺设过程中当遇凹凸不平或交叉变截面区域,相关工作人员应及时实行裁剪及热风焊处理,保证每一张板材的过渡自然、连接紧密。在完成每段铺设后,技术员会组织焊缝检测抽检焊缝强度及密封性,并修复虚焊、漏焊部位,以免混凝土灌注时出现局部冲破。以上操作环节能够形成闭合而稳定的防水结构,使衬砌混凝土在注入后可均匀填充至初支面与防水板之间的间隙,从而明显提升整体密实度。在此基础上,相关工作人员强化过程管控,精细处理每一处铺设细节能使高速公路隧道工程的二次衬砌空间具备良好的封闭条件,有效压缩因防水板异常引发的衬砌脱空风险点。

### 2.3 合理配置混凝土参数,控制二次衬砌脱空率

在衬砌施工中,若混凝土参数设置不当极易引发泌水、离析、沉降等问题,从而在初支与二衬之间形成空隙增加脱空率。混凝土作为结构材料的物理状态必须适应隧道作业空间的受限特点,其可泵性、抗收缩性等指标应随衬砌部位的不同精准调整。与此同时,控制水胶比、砂率及坍落度之间的平衡关系可以避免

出现强度下降或密实不足的问题,从而在浇筑过程中保障混凝土能够填满全部空腔,紧密贴合初期支护。只有混凝土性能精准匹配结构形态与施工节奏,二次衬砌才能发挥稳定的力学作用,从而有效奠定控制脱空率的技术基础<sup>[5]</sup>。

在一次隧道工程衬砌施工中,相关工作人员需展开精细化的配合比调整工作。在水胶比控制上,技术人员需反复调试试验,结合现场实际坍落度及振捣表现将水胶比稳定在0.45的区间,既保证混凝土的可泵性,又能控制收缩风险。为提升拱顶部位的流动性能,现场人员可将拱部混凝土坍落度调至18 cm左右,使其更容易充盈钢模板上缘曲面,并结合小幅提高保水性参数避免混凝土在浇筑过程中泌水导致拱顶产生离析层。边墙区域则应减小坍落度并提升骨料级配密度,增强混凝土的抗剪性能,防止在立模空间中出现局部滑移现象。在此基础上,砂率需控制在40%左右,在保证细集料有效填充的同时,避免混凝土因过多细砂导致的粘滞现象,增强振捣后的成型密实效果。施工人员结合这些调配操作能使混凝土在各部位具备良好的适应性,满足不同衬砌结构的性能需求。此次调整混凝土配合比能有效控制结构脱空隐患,显著提升了高速公路隧道工程中二次衬砌的结构性能,为后续通风、排水及运营安全提供了有力支撑。在此基础上,相关工作人员精准控制参数能强化结构贴合效果与脱空率控制之间的关联,从而为今后同类施工提供可参考的技术方向。

#### 2.4 落实养护时效管理,稳固高速衬砌结构稳定

混凝土在硬化初期处于强度敏感阶段,若在此时外界荷载或环境变化干扰其强度增长,极易在内部形成微裂缝,造成局部贴合不牢,进而诱发脱空现象<sup>[6]</sup>。在拱部与墙体连接区域,若脱模时机控制不严,混凝土尚未具备足够强度承受结构压力,很容易导致衬砌发生偏移、开裂或局部失稳等风险<sup>[7]</sup>。与此同时,养护时效管理的核心在于释放协调结构应力与发展混凝土强度的关系。降低脱空率离不开混凝土在早期阶段对应力的适应能力,而建立这种能力依赖于精准把握养护时间与拆模强度之间的平衡点<sup>[8]</sup>。

在高速公路隧道衬砌作业中,相关工作人员需对拱顶及边墙混凝土实行分段观察与强度数据记录。混凝土浇筑完成后,需设置标准试块并同步实行现场硬度对比,持续监测强度增长趋势,同时结合设计要求确定合理的脱模时机。在未承受围岩压力的中部墙段,相关工作人员可依据混凝土表面收光状态及棱角完整

度来目测判断,在表层无粉化、无破损迹象且试块强度达到5 MPa后,应安排轻微拆模操作并全程监测模板受力变化。而在承压明显的拱肩部位及端头封口区域,养护人员可严格按照混凝土达到设计强度70%以上的标准实施时间推移管理,使用温控布点记录早期热释放规律,并随混凝土硬化进程逐点抽查抗压强度数据。在未达到预期强度前,所有承压模板均不予拆除,安排定时洒水养护能保持表层湿润状态,防止因失水收缩引起表面裂纹。拆模完成后,相关工作人员需立即贴合检查,重点检测衬砌层是否存在空鼓、裂缝及剥离等迹象。在此次养护过程中,相关工作人员能够有效契合各关键节点的时效控制,促使混凝土在应力释放中形成稳固贴合,保证二次衬砌结构未出现空腔残留,从而为高速公路隧道工程质量提供坚实的支撑。

### 3 结束语

在高速公路隧道工程的质量管理中,二次衬砌脱空问题是影响结构整体性能的深层次技术隐患。其本质反映的是协同施工工艺、匹配材料参数及控制过程管理之间的精准度问题。衬砌结构作为隧道中承载防护的关键界面,其密贴状态决定结构内部受力路径的完整性。因此,从准备工艺到调配材料、从铺设质量到养护时效,各环节都应以结构功能为核心导向,协同推进技术融合与质量精准控制,为高速公路隧道工程构建更具韧性的衬砌质量保障路径。

### 参考文献:

- [1] 魏平.大跨度软弱围岩条件下高速公路隧道施工技术研究[J].建筑机械,2025(06):294-296,302.
- [2] 吴佳润,林宇亮,邢浩,等.基于改进Stacking多模型融合的高速公路隧道建设碳排放预测模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(05):57-65.
- [3] 王成.高速公路长隧道机电交安工程施工安全管理探索及应用[J].新疆钢铁,2025(02):188-190.
- [4] 金建军.高速公路隧道与桥梁连接段的路基工程关键技术研究[J].产品可靠性报告,2025(04):147-148.
- [5] 王健.高速公路隧道项目进洞施工重点技术分析[J].交通科技与管理,2025,06(07):131-133.
- [6] 熊中浩.高速公路隧道工程开挖方法比选分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(01):93-96.
- [7] 张洁.高速公路隧道工程不良地质处治施工技术[J].交通世界,2025(Z1):209-211.
- [8] 郝秀丽.高速公路隧道工程超前支护结构及施工技术研究[J].河南科技,2025,52(01):64-68.

# 10 kV 配电网线路三相不平衡度优化控制策略分析

刘 辉

(国网鄂州供电公司路灯管理中心, 湖北 鄂州 436000)

**摘 要** 三相不平衡问题严重影响了 10 kV 配电网的安全、稳定与经济运行。本文深入分析 10 kV 配电网线路三相不平衡的危害, 并研究其原因, 针对这些原因提出了有针对性的优化控制策略, 以期为提高 10 kV 配电网运行水平、降低三相不平衡度、保障电网可靠供电提供借鉴。研究表明, 通过这些策略的落地实施, 可有效改善三相电流、电压失衡状况, 减少线路损耗与设备故障, 为 10 kV 配电网高效运转筑牢根基, 助力电力系统高质量发展。

**关键词** 10 kV 配电网; 三相不平衡度; 负荷分配; 平衡装置; 电能质量

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.019

## 0 引言

随着社会经济的不断发展, 电力需求持续增长, 对配电网的供电质量和可靠性提出了更高的要求。10 kV 配电网是电力系统中直接面向用户的重要环节, 其运行状况直接影响着用户的用电体验。三相不平衡是 10 kV 配电网中常见的问题之一, 三相不平衡导致线路损耗增加、设备寿命缩短、电能质量下降等一系列不良后果, 严重影响配电网安全稳定运行。因此, 深入研究 10 kV 配电网线路三相不平衡度的优化控制策略具有重要的现实意义。

## 1 10 kV 配电网线路三相不平衡的危害

### 1.1 增加线路损耗

三相四线制 10 kV 配电网, 当三相负荷不平衡时, 中性线会有电流通过。根据焦耳定律, 电流通过导线产生热量, 导致电能损耗, 损耗与电流的平方成正比。由于不平衡电流的存在, 造成相线、中性线损耗均增加, 使线路的输电效率下降。

### 1.2 削减配电变压器性能和寿命

三相负荷不平衡时, 变压器三相电流不一致, 产生各相绕组负荷不均, 导致变压器的铜损和铁损加大, 减少变压器的输出容量和效率。在长期的三相不平衡运行状态下, 变压器的绕组温度升高, 加速绝缘老化, 缩短变压器的使用寿命。

### 1.3 影响用电设备的正常运行

三相不平衡会导致电压不平衡, 对电动机起到制动作用, 导致电动机输出功率减少, 效率降低, 温升

增加, 严重时可能损坏电动机。对于单相用电设备, 如居民家中的电器, 接在重负荷相的设备可能因电压偏低而无法正常工作, 接在轻负荷相的设备则可能因电压偏高而缩短使用寿命甚至被损坏, 影响用户的正常生产生活用电。

### 1.4 对电力系统继电保护装置产生影响

三相不平衡可能导致电力系统中某些继电保护装置误动作或拒动作。例如: 负序电流的存在可能使负序电流保护装置误启动, 而一些基于三相电流平衡原理设计的保护装置在三相不平衡时可能无法准确检测故障电流, 从而影响保护装置的可靠性和选择性, 降低电力系统的故障防御能力。

## 2 10 kV 配电网线路三相不平衡的原因分析

### 2.1 单相负载接入不均衡

在 10 kV 配电网的实际运行中, 单相负载的接入是导致三相不平衡的主要诱因之一。这类负载涵盖居民日常生活用电设备(如冰箱、电视、电热水器等)、小型商业用户的空调与照明系统, 以及街边商铺的各类用电设施等。由于用户群体的用电行为具有显著的随机性和不可控性, 单相负载在三相线路上的分布往往呈现出明显的不均衡特征。从居民用电场景来看, 新建小区在初始配电规划时虽会尽量均衡分配各相负载, 但随着用户入住后用电设备的陆续增加, 这种平衡状态极易被打破。例如: 某一单元楼内若多户家庭同时购置并使用大功率电采暖设备, 且这些设备集中接入同一相线路, 会使该相负载在短时间内急剧上升。而老旧小区因配电设施陈旧、线路改造不及时, 更容

易出现单相负载堆积现象,部分台区甚至出现某相电流是其他相的2~3倍的极端情况。小型商业用户的用电特性进一步加剧了这一问题。商铺的营业时间、用电设备功率差异较大,如餐馆的厨房设备、超市的冷藏系统等,若在报装阶段未进行科学的相序分配,极易造成特定相别长期处于高负荷状态。此外,临时用电接入的随意性也是重要因素,如施工工地的临时焊机、庆典活动的临时照明等,往往就近接入方便的相别,进一步破坏三相负载的平衡关系。

## 2.2 单相接地故障

单相接地故障在10 kV配电网故障类型中占比高达60%以上,是引发三相不平衡的关键因素。当配电网发生单相接地故障时,故障点的阻抗发生突变,导致接地相电压迅速降低至接近零值,而未接地的两相电压则会升高至线电压水平,形成显著的电压不平衡。这种电压畸变会通过配电网网络传导至下游用户,造成接入不同相别的用电设备承受异常电压。从故障持续时间来看,尽管中性点非有效接地系统允许单相接地故障短时运行(通常不超过2小时),但在此期间三相不平衡状态会持续存在。若故障未能及时排除,长期运行可能引发更严重的连锁反应:一方面,非故障相的高电压会加速线路绝缘老化,尤其是老旧线路的瓷瓶、电缆接头等薄弱环节,可能因过电压击穿导致相间短路;另一方面,接地电流产生的电弧可能灼伤导线,破坏线路结构完整性,扩大故障范围。

## 2.3 三相断线故障或开关设备故障

三相线路的完整性和开关设备的正常运行是保障三相平衡的基础条件,任一环节出现问题都可能引发显著的三相不平衡。线路断线故障多发生在以下场景:一是恶劣天气导致的导线断裂,如强风天气造成线路舞动引发断线,覆冰过重导致导线机械强度不足而断裂;二是外力破坏,如施工机械误碰线路、车辆撞击电杆导致导线拉断等。当某一相导线发生断线时,该相电流即刻中断,其余两相需承担全部负荷电流,形成严重的电流不平衡。开关设备故障对三相平衡的影响更为复杂。断路器、隔离开关等设备在长期运行中,可能因机械磨损、触头氧化等原因出现单相拒动现象。例如:断路器的某相操作机构卡涩会导致合闸时该相未接通,形成两相运行状态;隔离开关的触头接触不良则会使某相电阻增大,造成三相电流分配失衡。此外,熔断器的单相熔断也是常见故障,当某相熔断器因过流熔断后,若未能及时更换,会导致该相长期缺相运行<sup>[1]</sup>。

## 2.4 负荷变化的动态特性

配电网负荷的动态变化具有周期性、突发性和季节性等多重特征,这些特性若得不到有效管控,会持

续引发三相不平衡。工业用户的生产负荷呈现明显的周期性波动,如钢铁企业的轧钢车间,其用电负荷随轧制周期呈现脉冲式变化,单个周期内负荷峰值可能达到谷值的5倍以上。若这类负荷集中接入某一相,会导致该相电流在短时间内剧烈波动,形成动态不平衡。季节性负荷的影响尤为突出。夏季高温时段,居民空调负荷集中爆发,部分台区空调负荷占总负荷的比例可达60%以上。由于空调安装时的相序选择缺乏统筹规划,大量空调集中接入同一相,导致该相负荷在用电高峰时段严重过载。而冬季电采暖负荷的集中接入,同样会引发类似问题,且这类负荷的地理分布不均,进一步加剧了区域配电网的三相不平衡程度。

## 3 10 kV配电网线路三相不平衡度的优化控制策略

### 3.1 优化负荷分配

1. 定期监测与调整负荷。应加强对10 kV配电网负荷的监测,利用智能电表、电力监控系统等设备,实时采集三相负荷数据。通过数据分析,定期对三相负荷进行调整,将单相负荷合理分配到三相线路上,使三相负荷尽可能平衡。例如:根据用户用电性质和负荷大小,设计合理的负荷分配方案,将大功率单相用户均匀分配到不同的相上。同时,对一些季节性、临时性的负荷变化及时跟踪调整,保持三相负荷的长期稳定平衡。

2. 负荷预测技术的应用。利用先进的负荷预测技术,对配电网中的负荷变化进行预测。根据历史负荷数据、气象数据、经济发展趋势等数据,建立准确的负荷预测模型,如时间序列模型,神经网络模型等。根据负荷预测结果提前调整负荷分配,避免因负荷的突然变化造成三相的不平衡。如夏季高温来临前,根据负荷预测结果,在夏季高温来临之前,将部分空调负荷提前转移到负荷较轻的相上,以解决空调负荷集中增加带来的三相不平衡问题<sup>[2]</sup>。

### 3.2 采用平衡装置

1. SVC(静止无功补偿器)。SVC通过控制晶闸管的触发角,调节接入电网的电抗器和电容器的容量,实现对无功功率的动态补偿。在10 kV配电网中,安装SVC在负荷集中、三相不平衡问题严重的地区,有效地提高功率因数,平衡三相电压、电流<sup>[3]</sup>。例如:对于一些工业用户集中的区域,工业设备无功需求大,且三相负荷不平衡,安装SVC后可以大大改善电网三相不平衡,降低线路损耗。

2. STATCOM(静止同步补偿器)。STATCOM采用全控型电力电子器件,能快速、精确地补偿无功功率,而且其调节能力和响应速度也更加迅速。STATCOM通

过向电网输入负荷无功电流相反的电流来补偿无功功率,也可对三相不平衡电流进行补偿。在 10 kV 配电网中采用 STATCOM,可以较好地适应负荷的快速变化,有效地改善电能质量,提高三相平衡度。与 SVC 相比,STATCOM 在补偿性能和占地面积等方面有明显优势。

3. 智能换相开关。智能换相开关可根据实时监测到的三相电流和电压数据自动调整负荷的接入相序,实现三相负荷平衡。它通常由控制器、执行机构和传感器等部分组成。控制器实时采集三相电流、电压信息,通过计算分析判断三相不平衡程度,当不平衡度超过设定阈值时,控制器发出指令,执行机构动作,把负荷切换到合适的相上。智能换相开关具有安装方便、响应速度快、调节精度高等优点,可以有效解决单相负载接入不均衡所产生的三相不平衡问题,并可以实现远程监控和自动控制,提高配电网的智能化水平。

### 3.3 优化电网结构

1. 合理规划配电线路。在 10 kV 配电网的规划和建设中,应充分考虑三相负荷的平衡问题。合理设计配电线路的布置,使三相线路长度、导线型号、截面积尽量一致,减少因线路参数差异造成的三相不平衡。同时,根据负荷分布情况,合理设置配电变压器的位置和容量,使变压器能够均匀地为三相负荷供电。例如:在新建居民小区中,根据小区的户型分布和预计的用电负荷,合理规划三相线路的走向和分支,保证各相负荷分配均衡<sup>[4]</sup>。

2. 加强线路改造与维护。对现有 10 kV 配电网中存在的线路老化、绝缘损坏、接触不良等问题,及时进行改造和维护。更换老化的导线,修补绝缘缺陷,保证线路正常运行,减少线路故障引起的三相不平衡。同时,对线路中的开关设备、刀闸等进行定期检修和维护,保证设备的正常动作,避免因设备故障造成三相电流不平衡。另外,在进行线路改造时,可以考虑采用新型的节能导线和设备,提高线路的输电能力和可靠性,进一步优化电网结构,降低三相不平衡度。

### 3.4 加强运行管理

1. 建立完善监测与管理系统。电力企业应建立一套完善的 10 kV 配电网三相不平衡监测与管理系统,该系统还应具有报警功能,当三相不平衡度超过设置的安全阈值时,能及时发出报警,提醒运维人员进行处理。同时,采用大数据、云计算等技术,对历史监测数据进行分析,总结三相不平衡的变化规律,为优化控制策略的制定提供依据。建立这样的一个 10 kV 配电网三相不平衡监测与管理系统,电力企业能更有效地监控电网运行状态。这套系统不仅能够实时监测三相电流和电压的不平衡情况,还能通过智能算法自动诊断

问题,确保电力系统的稳定运行<sup>[5]</sup>。这不仅有助于提高电网的运行效率,还能减少因为三相不平衡造成的电力损耗和设备损害,为企业节省大量的运维成本。完善的 10 kV 配电网三相不平衡监测与管理系统是电力企业提升管理水平、实现智能化运维的重要一步。

2. 提高运维人员专业素质。加强对运维人员的培训,提高他们对 10 kV 配电网三相不平衡问题的认识和处理能力。培训内容要包括三相不平衡原理、危害、检测方法、处理措施等。通过理论学习和实际操作培训,使运维人员掌握好监测设备的使用方法,正确判断三相不平衡的原因,并能采取有效的措施进行处理。与此同时,要求运维人员在工作中不断总结经验。

3. 强化用户管理与宣传。电力企业要加强对用户的管理,在用户报装环节,要严格审核用户的用电负荷和接入方式,指导用户合理分配单相负荷,避免由于用户不合理的用电行为导致三相不平衡。同时,通过各种渠道加强对用户的宣传教育,向用户宣传三相不平衡的危害及正确的用电知识,增强用户的用电意识,引导用户积极配合电力企业做好三相不平衡的治理工作,并加强和用户的沟通和交流,共同维护配电网安全稳定运行。

## 4 结束语

10 kV 配电网线路三相不平衡问题严重影响电网安全、稳定、经济运行。通过深入分析三相不平衡的危害和产生原因,采取优化负荷分配、采用平衡装置、优化电网结构、加强运行管理等一系列优化控制策略,可有效地降低三相不平衡度,提高配电网的运行水平和电能质量。这些策略的实施,需要电力企业、用户和有关部门共同努力,加强协作,不断完善和创新,以适应电力系统发展的新要求,为社会经济的发展提供可靠的电力保障。

## 参考文献:

- [1] 彭超敏,钟志明.农村 10kV 配电网线路差异化防雷治理[J].农村电工,2025,33(05):44.
- [2] 樊江川,吴豫,于昊正,等.基于智能算法的 10 kV 配电网线路损耗估计方法设计[J].电子设计工程,2025,33(07):117-121.
- [3] 周晓宇.10 kV 配电网线路接地故障的治理与预防[J].周口师范学院学报,2025,42(02):21-25.
- [4] 董庆国,王耀,田晓彤.降低 10 kV 配电网线路重载率实践[J].农村电工,2024,32(11):43-44.
- [5] 薛舒月,宋玲燕,王亦琛.10kV 配电网线路常见的施工故障及运维技术关键探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024(26):94-96.

# 电力系统单相接地故障特性及电阻接地保护技术分析

秦 光

(山东中茂实业集团有限公司禹城分公司, 山东 禹城 251200)

**摘 要** 随着电力系统规模的不断扩大, 供电可靠性和安全性越来越受到人们的重视。在电力系统运行过程中, 中低压配电网故障类型多样, 其中单相接地故障较为常见。本文从单相接地故障的形成原因及特征表现出发, 研究故障发生时电压、电流的变化情况以及对设备的潜在影响, 并对电阻接地保护技术在各方面的作用进行了探讨, 旨在为电力系统接地方式的选择和保护方案的制定提供参考思路, 进而提升配电网故障处理水平和运行安全性。

**关键词** 电力系统; 单相接地; 故障特性; 电阻接地; 保护技术

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.020

## 0 引言

在电力系统运行过程中, 单相接地故障由于出现频率相对较高、影响范围较广, 长期以来都是电网运维工作的重点关注对象。中性点接地方式与单相接地故障的特征表现及相应保护策略紧密相关, 其中电阻接地方式凭借在限制故障电流、抑制过电压方面的良好表现, 在国内外配电网建设与运行中获得了较为普遍的应用。对单相接地故障特性展开深入探究, 并在此基础上持续优化电阻接地保护技术, 对于提升系统故障处置效能、降低停电造成的经济损失具有一定的积极意义。本文对故障特性与电阻接地保护技术之间的关联进行系统性剖析, 为实际工程应用提供理论层面的参考。

## 1 电力系统单相接地故障特性分析

### 1.1 故障成因与分类

单相接地故障作为相线与大地(或设备外壳)间的异常电气连通现象, 其发生机制与系统电压等级、绝缘状况及运行条件呈现出较为紧密的联系。从故障诱因层面探讨, 大致涵盖三个维度: 在外部环境影响方面, 10 kV 配电网的架空线路可能因雷击、树木接触、鸟类活动等因素致使绝缘子绝缘性能出现不同程度的降低, 电缆线路也可能由于施工环节的不完善、长期运行产生的老化问题, 或土壤环境的侵蚀作用, 对其绝缘结构造成一定的损伤; 设备自身存在的潜在风险不容忽视, 当设备检修、线路改造等作业未严格按照既定规程实施, 安全防护措施落实不够到位, 或接线工艺存在细微瑕疵时, 均有可能引发临时性的接地状

况。就故障类型而言, 可划分为金属性接地、电弧性接地和电阻性接地三种类型: 金属性接地在故障点呈现低阻抗特征, 接地电流往往会出现较为明显的增大, 这种情况多见于导线断裂落地或是设备遭受较为严重损坏的场景; 电弧性接地在中性点不接地系统中较为常见, 故障点的电弧会出现间歇性的燃烧与熄灭, 进而可能引发暂态过电压, 对系统绝缘造成潜在威胁; 电阻性接地由于故障路径中存在过渡电阻, 接地电流的大小与电阻值密切相关, 其暂态特性相对表现得更为平稳<sup>[1]</sup>。

### 1.2 故障电气特性

单相接地故障出现后, 系统电压和电流的变化趋势通常具有一定规律可循, 且不同中性点接地方式下的表现存在较为显著的区别。在中性点不接地系统中, 故障相电压往往会大幅降低, 接近零值; 非故障相电压则会有所上升, 达到线电压水平(约为 $\sqrt{3}$ 倍相电压), 线电压基本维持对称状态, 弧光接地时非故障相可能产生3~5倍过电压。在中性点经电阻接地系统中, 故障相电压的下降程度与电阻大小存在关联, 非故障相电压的上升幅度会受到电阻的限制, 过电压一般不会超过2.5倍相电压; 就电流特征而言, 故障电流是电容电流和电阻电流叠加的结果, 总电流能够根据实际需求进行调整(低阻接地时大概为数百安, 高阻接地时多为数十安)。

### 1.3 对电力系统的影响

单相接地故障的影响程度与系统接地方式、故障持续时间存在显著关联。就过电压影响而言, 中性点

不接地系统中,弧光接地产生的过电压或导致避雷器动作、电缆绝缘性能下降,甚至引发多相故障。从设备损耗角度分析,金属性接地产生的较大电流可能对故障点导线和杆塔造成影响,而长期小电流接地(如高阻接地)引发的局部发热现象,也会在一定程度上加速设备绝缘老化,对设备使用寿命产生不利影响。在供电稳定性方面,保护装置的误动作或拒动作情况,有可能使停电范围有所扩大;低阻接地系统的频繁跳闸现象,也可能对医院、工厂等重要负荷的持续供电造成干扰。此外,在故障点周边 8~10 m 范围内存在的跨步电压(数值可达数十至数百伏),也会给现场巡检人员带来一定的安全隐患<sup>[2]</sup>。

## 2 中性点电阻接地系统原理与特性

### 2.1 电阻接地系统的基本原理

1. 故障电流控制:在电力系统发生单相接地故障时,系统内的容性电流会急剧增加,可能对设备造成严重冲击。中性点串联电阻器后,电阻器能够通过欧姆定律  $I=U/R$  分担一部分电容电流。以低阻接地系统为例,其故障电流通常被控制在 50~1 000 A 范围,该区间既能保证保护装置可靠动作,又能避免过大电流引发设备损坏;而高阻接地系统的故障电流则稳定在 1~10 A,特别适用于对供电连续性要求极高的场所。这种电流控制机制,有效降低了短路电流对变压器、电缆等设备的热应力和电动力影响。

2. 抑制弧光过电压:当系统发生单相接地故障且存在间歇性电弧时,电弧的反复重燃会产生幅值极高的过电压,威胁设备绝缘。中性点接入的电阻能够通过焦耳定律  $Q=I^2Rt$  持续消耗电弧能量,使电弧难以再次起弧。研究数据表明,采用电阻接地方式后,弧光过电压幅值可被限制在 2.5 倍相电压以内,相较于不接地系统或消弧线圈接地系统,该数值显著降低。这不仅能有效保护发电机、电动机等设备的匝间绝缘,还能延长电力设备的使用寿命。

### 2.2 电阻接地系统的优势与局限性

与中性点不接地或直接接地系统相比,中性点电阻接地方式在某些应用场景下展现出一定的技术特点,同时也存在可优化的空间。从技术优势来看,该接地方式对过电压的抑制效果较为明显,与不接地系统相比,过电压水平可降低约 40%~60%,有助于减缓设备绝缘老化进程;在故障处理方面,高阻接地系统能够在保障供电连续性的同时兼顾安全性,低阻接地系统则可以实现故障的快速隔离,能够较好地满足不同的负荷需求;在保护装置性能方面,较为稳定的故障电

流特性为零序保护装置的参数整定提供了便利条件,相比不接地系统,其保护装置误动作的可能性可降低 70% 以上。不过在实际应用中,也存在一些有待改进之处。例如:该接地方式的建設成本相对较高,对于中性点未直接引出的系统,需要额外配备接地变压器、电阻器以及相关保护设备,其初期建设成本相比不接地系统会增加 20%~50%;在高阻接地系统应用过程中,当故障电流低于 10 A 时,传统选线装置的检测效果可能不够理想,故障定位的效率会受到一定影响;而低阻接地系统对断路器分断能力要求更为严格(需承受数千安短路电流),并且可能会在一定程度上引起系统电压的暂态波动<sup>[3]</sup>。

## 3 电阻接地保护技术分析

### 3.1 保护技术的核心要求

电阻接地保护技术在实际应用中,可着重从以下几个维度进行优化完善。在选择性层面,可考虑通过技术手段精准识别故障线路与非故障线路,在一定程度上规避保护范围出现过度延伸的情况,例如:在 10 kV 馈线保护场景下,优先对故障回路实施切除操作,从而尽可能减少对母线及其他馈线运行的影响。在灵敏性方面,针对高阻接地(故障电流 < 5 A)等较为复杂的工况,保护装置可通过优化参数设置,提高动作的可靠性,其动作电流整定值通常设置在故障电流的 0.5~0.8 倍区间。在速动性方面,对于低阻接地系统,可将跳闸时间控制在 0.5 s 以内,以此有效缩短设备承受异常电流的时长,而对于高阻接地系统,虽然允许其在一定时间内持续运行,但仍建议在 10~30 s 内及时发出报警信号。在可靠性方面,一方面可通过技术手段降低保护装置误动作的概率,避免因正常运行时的不平衡电流导致保护误触发;另一方面在面对弧光接地等特殊故障时,可增强保护装置动作的稳定性,降低拒动风险。

### 3.2 主要保护技术及原理

电阻接地保护技术通常基于故障电流、电压特征进行设计,常见的实施路径与策略可作如下探讨:零序电流保护技术的原理在于,当发生单相接地故障时,故障线路的零序电流往往由故障相电流与非故障相电容电流叠加形成,其数值相较于正常运行状态会出现较为明显的增大。一般通过电缆头或开关柜处的零序电流互感器进行实时监测,并将监测结果与动作阈值进行比较,从而触发保护动作;在低阻接地系统中,其动作电流整定值通常设定在 10~50 A,而在高阻接

地系统中,可能需要配备0.1级高灵敏度互感器,同时采用零序电流增量算法,以此在一定程度上区分不平衡电流与故障电流。零序电压保护技术的原理是,系统正常运行时,中性点或母线的零序电压通常近乎为零,接地故障发生后,该电压会迅速上升至数十至数百伏,通过实时监测并与动作阈值(一般为相电压的10%~20%)进行对比,进而触发动作;这种保护方式一般作为辅助保护手段,常与零序电流保护相结合,构建“电压启动+电流跳闸”的逻辑,从而在较大程度上避免单一判据可能导致的误动情况(例如因系统谐振过电压引发的电压保护误触发)。接地选线技术的原理是,在多出线系统发生接地故障时,故障线路与非故障线路的零序电流在相位和幅值方面往往存在较为显著的差异(故障线路零序电流与零序电压相位通常相同且幅值更大),通过对比各线路零序电流特征,有望实现精准定位;在技术发展进程中,早期的“信号注入法”是通过注入特定频率信号来判断故障线路,而如今基于小波变换、神经网络等智能算法的选线技术,较大程度地将高阻接地故障选线准确率从70%提升至90%以上<sup>[4]</sup>。

### 3.3 保护配置方案与整定原则

保护配置通常需要综合考量系统电压等级、接地方式及负荷特性等多方面因素,以下为一些常见的典型方案与整定思路供参考:在10 kV低阻接地系统中,主保护可在每条馈线设置零序电流互感器搭配过电流继电器,动作电流的整定范围一般建议在50~100 A,通常以大于最大电容电流为宜,动作时间约为0.3~0.5 s;后备保护可考虑在母线侧配置零序电压保护,整定值多设为50 V,当馈线保护出现拒动情况时,可经0.5~1 s的延时跳开母线断路器;此外,还可配置接地变压器的过电流保护以控制长期故障电流,同时设置温度保护来预防设备过热损毁。而在35 kV高阻接地系统中,主保护的馈线零序电流保护可按5~10 A的灵敏度进行整定,一般动作后以发出信号报警为主,对于重要负荷线路,也可根据实际情况选择配置选择性跳闸功能,延时时间可设置在1~2 min;选线装置可采用“零序电流+零序电压+谐波分析”的多判据融合算法,并配合智能终端实现远程监控;另外,配置在线绝缘监测装置实时监测电缆和设备的绝缘电阻变化,以便及时发现潜在故障并预警。

### 3.4 保护技术的工程应用难点与对策

在工程实践中,电阻接地保护技术存在一些挑战,以下是对应的处理思路:当土壤处于干燥状态时,接地

电阻可能超过1 000  $\Omega$ ,故障电流小于1 A,受限于传统互感器的精度,高阻接地故障的检测存在一定难度。对此,可考虑选用宽量程零序电流互感器(测量范围0.1~10 A),配合数字滤波技术以减少谐波干扰的影响,并适当降低保护整定值(如0.5 A)。由于系统中电容、电感参数可能不匹配,进而产生铁磁谐振,致使零序电压升高,增加了保护误动作的风险。针对这一情况,可尝试在系统中安装与电阻并联的消弧线圈来抑制谐振,或者在保护算法中加入谐振识别逻辑(如监测电压频率是否偏离50 Hz)。随着光伏、风电等分布式电源的接入,故障电流路径变得更为复杂,电源侧反馈至故障点的电流会对选线准确性产生影响。为解决该问题,可在分布式电源接入点配置方向零序电流保护装置以判别电流方向,也可运用自适应算法根据实际情况实时调整整定值<sup>[5-6]</sup>。

## 4 结束语

电力系统单相接地故障特性存在一定复杂性,其电流、电压特征受接地方式与故障点性质的影响较为明显。电阻接地保护技术能科学合理地选择电阻值,在限制故障电流、抑制过电压方面具有一定的效果,有助于在电阻接地系统安全性与供电连续性之间实现较好的平衡,在中低压配电网中具备不容小觑的应用价值。随着技术的不断革新,电阻接地保护技术在微电网、直流配电网等新型电力系统中将会展现更大的应用潜力。

## 参考文献:

- [1] 罗强.小电阻接地系统中的故障检测与定位技术分析[J].电子技术,2024,53(12):318-319.
- [2] 申金虎,苏振广.小电流接地系统单相接地故障的选线方法仿真与分析[J].电气技术与经济,2024(12):221-223,227.
- [3] 李帅霖,吴晋媛,王定俊,等.中性点经小电阻接地系统的单相故障分析[J].水电站设计,2024,40(04):58-62.
- [4] 汤向华,蔡成伟,陆未,等.基于改进聚类算法的通用小电阻接地系统高阻接地故障保护方法[J].自动化应用,2025,66(10):218-222,227.
- [5] 胡昀,吴丽,刘乔.基于电阻接地的电力系统保护方法[J].灯与照明,2025,49(01):154-156.
- [6] 薛永端,金鑫,刘晓,等.灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J].电力系统自动化,2022,46(05):112-121.

# 智能化燃气供热系统的设计与节能效益分析

陈 策

(中国雄安集团智慧能源有限公司, 河北 保定 071700)

**摘 要** 智能化燃气供热系统通过整合高效燃烧调控、排烟热量回收、数据驱动调节方案及分布式感知组件, 实现热源与负荷间的精确适配及动态调控。系统架构采用模块化搭建方式, 具备灵活布置与远程监测功能。燃气供应前端通过对燃气管道、调压设施及安全阀门等关键部位实施智能化改造, 集成压力、流量与泄漏检测传感器, 并融合实时数据采集与控制策略, 有效保障燃气供应稳定性与安全性, 为锅炉高效燃烧提供基础支持。调控方案融合负荷预测算法与燃气-空气比例调节机制, 大幅提高热效率与燃气使用效率。能效评价体系纳入单位燃气消耗量、热能利用效率等指标, 结合运行数据开展回归优化, 为节能性能提升提供即时反馈支持。

**关键词** 智能控制; 燃气供热; 燃气设计; 热效率优化; 排烟余热回收

中图分类号: TU996

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.021

## 0 引言

随着城市供热需求的不断增加, 传统燃气供热系统在能源消耗、调控精度等方面已无法满足节能降耗的要求, 智能化调控技术的应用, 为供热系统运行效率的提升开辟了新路径。本文聚焦系统设计要素与节能原理, 搭建系统性分析框架, 致力于厘清设计与节能之间的内在关联。

## 1 智能化燃气供热系统的组成结构

### 1.1 系统总体结构与功能分区

智能化燃气供热系统一般包含燃气锅炉主机、热交换装置、供热管网、燃气计量与控制单元、智能控制中心及辅助能效设备等核心模块。燃气锅炉作为热源的核心部件, 承担着燃气能源向热能的转换任务; 热交换模块负责完成热量在一次侧与二次侧之间的传递过程; 供热管网则承担热媒(如热水或蒸汽)的输送与回流工作<sup>[1]</sup>。锅炉前端的燃气供给系统包括燃气输送管道、调压稳压设备及安全切断装置, 结合智能传感器网络, 实现对燃气流量、压力及泄漏状态的多点实时监测与联动响应。燃气计量与控制单元可对燃气流量实施实时调节与精密控制, 防止供气不足或能源浪费; 智能控制中心作为系统“大脑”, 协调各子系统运行状态, 实时优化供热策略。

### 1.2 数据采集与控制模块配置

在智能化供热系统中, 高效精准的数据采集是保障系统优化运行的基础。系统通常部署多种传感器采集关键运行参数, 包括温度、压力、流量及燃气浓度等, 传感器合理分布于锅炉出/回水口、管网节点、燃气

阀组及主要换热单元, 确保监测数据全面且反馈及时。其中, 燃气端设置流量计、压力传感器和可燃气体浓度检测器, 可对调压装置后燃气状态进行闭环监控, 有效提升燃烧系统运行的稳定性与安全性。数据采集模块通过模拟量与数字量输入通道统一接入控制核心, 实现连续上传与状态判断。控制终端配置包括 PLC 控制器、嵌入式智能调节单元、远程通信模块及 HMI 人机交互界面, 用于参数设定、运行监控与报警提示。终端布设遵循“集中布点、就近控制”原则, 提升系统响应速度并简化布线结构, 降低延迟与干扰风险。

### 1.3 系统互联互通与信号链设计

为实现系统内设备的高效协同与数据同步, 智能化燃气供热系统广泛采用标准化工业通信协议, 如 Modbus RTU、Modbus TCP/IP、RS485 及 CAN 总线等, 其中 Modbus 因其良好兼容性被大量应用。各功能模块通过屏蔽双绞线、以太网或无线网络互联, 形成清晰的信号层级架构。

底层设备如传感器和执行器通过 RS485 串口接入 PLC 控制单元, 中间层利用现场总线整合多个 PLC 节点, 上层则由监控平台通过 TCP/IP 协议与中央控制系统通信<sup>[2]</sup>。系统通信结构设计重点保障数据传输的稳定性与准确性, 提升整体运行的可靠性。

## 2 控制策略与运行机制优化

### 2.1 分布式控制与集中管理集成

在智能化燃气供热系统中, 使分布式控制与集中管理达成协同, 是提高运行效率和响应速度的核心所在, 分布式控制的核心表现为现场终端对局部运行状

态的实时感知与即时调节，如锅炉局部温度的细微调整、换热单元的开关逻辑把控等都属于此范畴，这些控制单元拥有一定的自主运行能力，能依照预设阈值完成局部的闭环控制，进而减轻系统运行时的压力并加快整体响应节奏。中央管理系统则承担着全局协调职责，依托系统整体运行数据对各模块开展统一调度工作，借助集中式数据分析与策略优化平台，系统可根据热负荷分布状况动态调整供热量分配方式，实现分级响应与协同控制的有机结合，两者借助高速数据总线和标准化协议实现信息互通，构建起“分散执行、集中调度”的复合型控制架构，在维持系统稳定性的基础上，推动智能化调控高效落实。

## 2.2 供热量调节算法与负荷匹配

在供热系统运行期间，用户端热负荷会受到日夜时段变化、季节交替更迭、天气状况改变等因素影响而呈现动态波动特点，为确保热能供需保持平衡，智能化燃气供热系统依靠精准的供热量调节算法与负荷预测模型实施实时调整。常用算法包含比例积分微分（PID）控制、自适应模糊控制、基于回归分析的负荷建模算法等类型。这些算法通过收集室外温度、末端水温、建筑热惯性等多项参数，动态预测下一时间段所需供热功率，以此调节锅炉出水温度、燃气供给量及循环泵转速，实现热量供需的精准契合。系统还能预先设置多种运行模式（如工作日/节假日模式、昼夜切换模式等），在不同负荷场景中自动转换调节逻辑，提升运行灵活性与节能效果。智能控制终端接收负荷预测结果后，可快速响应指令进行微幅调节，避免设备频繁启停与波动升温，保障供热质量的稳定。

## 2.3 故障预警与异常运行自适应调整

智能控制系统具备自学习能力，能够在长期运行中记录各类故障发生的时点、参数特征与应对措施，逐步形成面向多种异常状态的知识库。通过对历史数据的分析比对，系统能不断优化识别模型，提高对非典型工况的判断准确性。在异常状态解除后，系统将依据当前参数智能修正运行策略，实现运行平稳过渡。例如：当锅炉发生短时故障并重新启动时，系统可自主控制燃烧输出的恢复节奏，避免热冲击对换热部件产生损伤。该机制的引入不仅提升了运行稳定性，也为实现全生命周期的智能运维提供了基础支撑<sup>[3]</sup>。

## 2.4 燃气管道泄漏检测与预警系统设计

燃气供热系统的安全性高度依赖管道的密封稳定。为精准识别泄漏隐患，系统引入多层次检测技术与实

时预警机制，构建“感知—判断—响应”闭环架构。泄漏检测主要依靠传感器监测与声学、红外图像等辅助手段。其中，MEMS型甲烷传感器、电化学可燃气体检测器能实时感知周围气体浓度，一旦浓度超过设定阈值（如低于10%LEL），即触发一级预警。系统通过多点传感器融合算法，将浓度、压力、温度等参数进行综合分析，结合趋势滑动平均与突变识别方法，提高早期识别准确率，降低误报率。预警机制分三级响应：一级为提示性通知；二级启动通风并报警提示运维人员；三级则执行紧急切断主燃气阀门，启动联动报警，并向远程监控平台发出高危信号。

## 3 节能关键环节与控制策略

### 3.1 排烟热能回收与余热利用方式

在燃气供热系统运行过程中，排烟温度通常会达到160℃以上，未经处理的高温烟气直接排放会造成大量热能损失，所以，排烟热能回收成为节能控制的首要环节。常用的热回收装置是冷凝式换热器，其安装在锅炉排烟口之后，能够对烟气中的显热和部分潜热进行回收，通过将换热器内的低温水引入并与烟气进行热交换，不仅能将排烟温度降低到60℃以下，还能使锅炉的热效率提高约5%~8%。

在控制策略方面，系统需要监测烟气温度、烟气含湿量以及换热器进出口水温，以此实现热回收效率的动态调节，当系统负荷较低、烟气温度偏低时，控制系统会自动调整旁通阀门开启角度，防止烟气凝导致换热器堵塞；而在负荷较高、烟气温度充足的情况下，则维持全量回收运行模式，同时，通过流量调节泵精确控制冷却水流速，让换热器换热效率始终保持在高效区间，保障排烟热量得到最大程度利用。

### 3.2 燃气燃烧效率的动态调整方案

燃气燃烧效率直接关系到系统的能源消耗水平，因此对燃烧状态的精准控制是节能运行的核心内容，燃烧效率主要受空气与燃气混合比例、火焰温度、燃烧强度以及残氧浓度等因素影响，系统通过配备燃烧控制器与氧含量传感器，持续监测燃烧室内残氧量与烟气组分，实现燃气与助燃空气的动态匹配，通常控制目标是将残氧含量控制在3%~5%之间，确保燃烧充分的同时避免过剩空气带来的热损耗。

燃烧效率的控制算法依托闭环控制逻辑，在采集氧含量与烟气温度等实时数据后，自动调节燃气阀门开度及鼓风机风量输出，当燃气热值发生波动或环境温度变化导致燃烧状态偏离目标值时，系统能够迅速

做出响应,通过修正供气量与风量比例,恢复稳定的燃烧状态,为保障燃烧效率持续高效,系统还可根据运行工况调整点火频率与火焰长度,优化火焰形态,进一步减少燃气浪费与排放热损<sup>[4]</sup>。

### 3.3 控制周期与能耗响应协调机制

控制周期是影响系统响应灵敏度与节能效率的重要参数。过长的控制周期可能导致能量供给滞后、效率下降,而过短则会引起频繁调节,增加设备磨损与运行波动。

在系统设计中,通常将温度控制周期设定为 30 秒至 60 秒,压力控制周期为 5 秒至 15 秒,流量调节响应时间控制在 10 秒以内。这些参数配置有助于在保证控制精度的同时,兼顾系统稳定性与设备寿命。

## 4 节能效益评估与系统调优方向

### 4.1 节能效果的量化指标体系设计

为科学评估智能化燃气供热系统的节能效果,需建立一套多维度、可量化的指标体系。常用的能效评估指标主要包括:

锅炉热效率( $\eta$ ): $\eta = (\text{有效热量输出} \div \text{燃气输入热值}) \times 100\%$ ,反映锅炉系统整体能效水平;单位供热能耗( $E$ ): $E = \text{燃气消耗量} \div \text{供热量}$ ,常用单位为  $\text{Nm}^3/\text{GJ}$ ;平均负荷利用率( $L$ ): $L = \text{实际热负荷} \div \text{设计热负荷}$ ,衡量系统运行与设计匹配程度;能耗降低率( $R$ ): $R = (\text{基准能耗} - \text{当前能耗}) \div \text{基准能耗} \times 100\%$ ,用于对比节能改造前后差异。

### 4.2 热能利用率与单位耗气量分析

热能利用率是衡量系统节能性的核心指标,其高低取决于热量从锅炉产生到用户端释放的全过程损耗控制,通过合理控制热交换损失、管道保温热损以及末端控制失配问题,可显著提高热能有效利用比例,常见目标值为 85% 以上,优质系统可达到 90% 以上<sup>[5]</sup>。

单位耗气量分析侧重于每单位热能输出所对应的燃气消耗量,在实际运行中,应对不同负荷水平下的燃气使用效率进行横向比较,找出高能耗运行段并进行参数优化。

### 4.3 系统运行数据的回归优化机制

在系统长期运行阶段,海量历史运行数据已成为节能优化工作的核心资源,借助对运行数据的统计梳理、模型构建及回归分析,能够实现运行参数的动态校准与系统策略的不断完善。

系统需对关键指标(如负荷波动、锅炉启停频次、

燃气阀门开度、回水温度等)开展连续监测记录,进而构建历史数据库。在此基础上运用多元回归或机器学习算法,针对燃气消耗与各参数间的相关性完成模型搭建:

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + d$$

式中, $Y$  为单位耗气量, $X_1$  为外部环境温度, $X_2$  为热负荷变化, $X_3$  为供回水温差, $a$ 、 $b$ 、 $c$  为模型系数。

建模工作完成后,系统能够自动判别何种运行条件下能耗处于较高水平,进而给出参数调节方案,包括提高供水温度设定值、增加循环泵运行时长等,模型内置滚动修正功能,伴随新数据的持续纳入,权重因子将得到自动更新,让优化路线更符合实际运行状况,推动节能控制朝着智能化、数据化与自我进化的方向发展。

## 5 结束语

智能化燃气供热系统在结构设计、控制策略与节能机制等方面呈现出突出优势,模块化组成与分布式控制的有机融合,既提高了系统运行的响应速度,也强化了供热调节的精确程度与稳定性能。在节能领域中,系统依靠排烟热回收、燃烧优化与周期控制等多环节配合,实现热效率提升与能耗降低的双重成效。燃气部分通过智能化输配结构、调压稳控技术及多点安全检测技术,确保供气稳定与安全联动,进一步保障燃烧效率与系统可靠性。依托数据驱动的运行评估与调优体系,为系统持续改进提供科学支撑,为现代供热系统的高效、安全运转筑牢基础。

## 参考文献:

- [1] 王朝. 燃气锅炉的节能运行及效益分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(09): 141-142, 144.
- [2] 何勇, 张伟程. 浅谈燃气锅炉余热回收消白技术的应用[J]. 特种设备安全技术, 2022(01): 11-13, 20.
- [3] 王朝. 基于集中供热系统的燃气锅炉控制策略改进及其节能效益[J]. 科技与创新, 2024(11): 106-108, 111.
- [4] 罗秀文, 冀佩璇. 燃气节能技术与应用探析[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(05): 117-118, 141.
- [5] 梁鹏飞, 郝世超, 张冲, 等. 基于热泵技术的燃气锅炉余热回收节能效益分析[J]. 上海节能, 2018(07): 541-545.

# 人工智能在传统行业中的应用案例分析与启示

石连银

(德州交投物流发展有限公司, 山东 德州 253000)

**摘要** 本研究聚焦人工智能技术在传统行业转型中的实践应用, 研究范围涵盖农业、制造业、医疗健康、零售业及交通运输等核心领域。采用案例分析法作为主要研究方法, 系统考察不同行业中人工智能技术的典型应用场景与实施路径。并提出人工智能与传统行业的融合发展需建立三项关键支撑体系: 完善行业数据治理框架与安全防护机制, 构建多层次专业技术人才培养体系, 以及倡导跨领域协同创新的开放生态。研究表明, 人工智能技术的应用能有效实现三大核心价值: 生产流程的智能化改造带来效率提升, 资源优化配置显著降低运营成本, 以及基于大数据分析的决策支持系统构建。

**关键词** 人工智能; 传统行业; 生产效率; 人力成本

**中图分类号**: TP18

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.022

在数字经济时代背景下, 传统产业正面临着技术迭代与市场竞争的双重挑战, 亟需寻求创新发展路径。人工智能技术凭借其卓越的数据处理能力和智能化决策优势, 为传统产业转型升级提供了创新性的解决方案。具体而言, 在农业领域, 通过智能传感技术与数据分析的应用, 实现了精准种植与资源利用效率的提升; 在医疗行业, 依托医学影像识别系统, 显著提升了疾病诊断的准确性和诊疗效率。这种跨领域的技术融合不仅推动了传统产业向智能化、精细化方向发展, 同时也促使产业界与学术界对技术创新与产业发展之间的协同机制进行深入探讨。

## 1 传统行业面临的挑战

### 1.1 生产效率提升瓶颈

传统的行业生产流程往往依靠人工操作和固定设备来完成, 重复的工作费时费力。以农业为例, 播种、收割、分拣过程中的人工操作是低效的, 而且容易受到天气和人力状态的干扰; 制造业由于传统生产线自动化程度的限制, 员工长时间的重复劳动容易产生疲劳和错误, 造成生产周期变长, 产能很难得到大幅度提高。此外, 对生产过程没有实时监控与精准调控, 资源浪费、设备故障等问题很难及时发现并解决, 限制整体生产效率取得突破性进展<sup>[1]</sup>。

### 1.2 人力成本持续攀升

在经济发展的今天, 劳动力价格持续走高, 传统行业依靠人力使得成本压力与日俱增。在医疗行业中,

无论是问诊、护理, 还是后勤保障, 都需要很多专业的医护人员及辅助人员, 其中人员薪资、培训费用及其他开支占据相当大的比例; 零售行业在门店运营和库存管理过程中, 还需聘用大量员工, 人力成本成为企业运营中的一个沉重包袱。与此同时, 劳动力短缺的问题也在一些地区及行业日益凸显, 招聘难度不断增加, 进一步增加人力成本。

## 2 人工智能在传统行业中应用的必要性

### 2.1 突破生产效率瓶颈

人工智能借助自动化、智能化技术, 可以代替大量重复性的人工劳动, 使生产流程高效运行。以智能机器人为例, 智能机器人能够准确地完成制造业生产线上的装配、焊接等工序, 不会受到疲劳与情绪的干扰, 连续平稳地运行, 显著提高生产速度与产品合格率; 在农业领域中, 智能农机能够根据土壤、作物生长情况对作业参数进行自动调节, 达到精准播种、施肥以及收割等目的, 提高资源利用效率并缩短生产周期, 从而有效打破传统生产效率瓶颈。

### 2.2 缓解人力成本压力

人工智能技术的应用能够有效降低人力资源依赖及相关成本支出。在医疗领域, 智能诊断系统可辅助医师完成疾病筛查与确诊工作, 显著提升诊疗效率, 同时减少对初级诊断人员的需求; 在零售行业, 智能客服与无人收银系统实现了客户咨询与交易结算的自动化处理, 大幅降低了门店运营所需的人力投入<sup>[2]</sup>。

此外,人工智能技术还能通过优化人力资源配置,提升员工工作效率,从而进一步降低企业的人力成本负担。

### 3 人工智能在传统行业中的应用案例分析

#### 3.1 农业

在农业生产中,无人机成为重要的智能化工具。大疆农业无人机配备先进多光谱传感器及智能控制系统,能够实现农田大范围高效巡查。利用所拍影像,可以对作物生长状况进行分析,其中包括植株密度、养分不足的地区、病虫害的发生程度等信息。依据这批数据,无人机能够根据预定的流程准确地喷洒农药和肥料,与传统的人工喷洒方式相比,农药的使用量有可能减少 30%~50%,提高肥料的使用效率 20%~30%,不仅有助于减少生产的总成本,同时也能降低对环境造成的污染。

此外,智能温室也广泛应用人工智能技术,荷兰的 Priva 智能温室系统通过 1 500 多个传感器实时监测温室内的温度、湿度、光照、二氧化碳浓度和其他环境因素,并结合作物的生长模型,通过自动调整通风、灌溉和遮阳设备,黄瓜的产量可以达到每平方米 70 公斤,这是传统温室产量的 3 倍,并且能源消耗减少 40%。

#### 3.2 制造行业

在智能制造方面,德国西门子的安贝格电子制造工厂堪称行业标杆。在工厂中,工业机器人在自己的岗位上作业,该生产线智能机器人安装有先进的视觉识别与定位系统,可按照产品设计要求自动完成元器件精准安装与焊接,其精度可达微米级。即使是微小如头发丝直径的误差,机器人也能精准把控,确保每一个产品的质量。

厂内布放的先进质量检测系统也引人注目,其采用机器视觉与深度学习算法相结合的方式实现全方位的产品检测。不管是肉眼不易发现的产品表面划痕、瑕疵,还是内部电路焊接不良,均能够迅速识别,检测准确率达到 99.9% 以上,比人工检测效率提高数十倍。通过实时分析生产过程中产生的大量数据,人工智能系统能够预测设备的故障,提前进行维护,从而使设备的综合效率(OEE)提高 15% 以上<sup>[3]</sup>。

宝马汽车丁戈尔芬工厂采用 AI 预测性维护系统,能够通过实时监控和分析设备的运行数据,提前发现设备可能出现的故障,从而将设备因故障而停机的时间缩短 70%,每年节省维修成本超 2 000 万欧元,极大地提升了工厂的生产效率和经济效益。

#### 3.3 医疗行业

IBM Watson for Oncology 系统的出现,使癌症治疗领域发生了一场彻底的改变。该系统将大量医学文献、临床指南、患者病历数据整合在一起,如同“超级医学的大脑”。通过自然语言处理与机器学习技术,可以了解医生提出的问题,以及对病人病情信息进行快速分析。当医生将患者的症状、检查结果和基因检测数据等信息输入后,系统能够在短时间内从大量的医学知识中筛选出最适合的治疗方案,包括化疗药物的选择、剂量和疗程安排等。临床试验结果显示,该治疗系统所提供的治疗方案与专家方案达成的共识高度一致,符合率超过 90%,这为医生提供了更为科学和准确的治疗决策依据,也为癌症患者带来了新的治疗希望。

在我国,腾讯觅影 AI 辅助诊断系统也取得了显著的成果。它专注于医学影像分析,已累计辅助医生阅读超 3 亿张医学影像,提示高风险病变 150 万例,将食管癌早筛准确率提升至 90%。以往医生看医学影像需耗费很多时间与精力,而且易漏诊、误诊。腾讯觅影的诞生极大地提升了诊断效率与准确性,也为病人早期治疗赢得了宝贵的时间。

#### 3.4 零售行业

受互联网经济影响,传统零售行业面临客流量下降、运营成本提高和消费需求个性化等挑战。消费者对购物体验提出更高的要求,传统购物模式已经很难适应市场的需求。人工智能技术的应用给零售行业带来了巨大的变革。亚马逊发布的无人零售商店 Amazon Go 利用计算机视觉、传感器融合、深度学习等人工智能技术实现“即拿即走”购物体验。在店铺中设置摄像头与传感器,可以对顾客购物行为进行实时监控。

客户进店后经过手机应用程序认证后便可自由选择物品。系统自动识别客户取放的物品,将选定物品加入虚拟购物车。当客户购物结束时,不需要排队结账就可以直接离店,并且系统自动扣减客户支付账户里的金额。该购物模式在提高购物效率、缩短客户等待时间、降低运营成本的同时,也给零售业带来了一种新思路。国产盒马鲜生引进的自助收银系统与 AI 图像识别技术相结合,使得单台装置每分钟能处理 3~5 笔交易,人工收银的岗位减少了 80%,使得顾客在结账时的平均等待时间从原先的 5 分钟减少到 30 秒。

#### 3.5 交通运输行业

在城市化进程不断加快的背景下,交通拥挤、运输效率低、安全隐患日益凸显,对交通运输行业提出严

峻的挑战。滴滴出行是世界领先的移动出行平台之一，通过人工智能算法对网约车进行优化调度，实现出行方式的革命性转变。该平台对用户叫车需求、叫车位置、叫车交通路况实时数据进行采集与分析，并利用复杂智能调度算法高速度为旅客匹配出最适合的叫车。这一算法综合多种因素，包括预估的行驶时长、车辆的载客状况以及道路的拥堵状况等，从而使得车辆接单的效率提升超过30%，同时也将乘客的平均等待时间减少到不超过5分钟。不管是繁华城市中心，还是偏远的郊区，使用者都可以迅速呼叫车辆，行程更方便<sup>[4]</sup>。

除此之外，滴滴出行还采用人工智能技术来对驾驶员的驾驶行为进行细致的监控和分析。通过车载设备采集驾驶员驾驶速度、急刹车和急转弯数据，运用机器学习算法对驾驶员驾驶风险进行评估并及时提供安全提示。这有效地提高了行车安全性，减少了交通事故。在美国的Waymo，其自动驾驶的出租车团队利用AI技术确保24小时的连续运行，与传统的出租车相比，其运营费用减少了40%，而乘客的满意度高达95%。自动驾驶技术在运输过程中的运用，为未来交通发展提供了全新的思路。

## 4 人工智能在传统行业中的应用启示

### 4.1 重视技术与行业深度融合

通过各个产业的应用实例可以看出，要想让人工智能真正发挥其作用，需将其与传统产业业务流程及特征进行深入结合，而非简单生硬的嫁接技术，应洞察行业需求与痛点，基于真实业务场景定制化研发与优化人工智能技术。例如：人工智能在农业领域中的应用，就要求将农作物生长规律与农田作业特点相结合，开发出适合不同地形与农作物的智能化农机；在制造业中，为满足生产流程和质量监控的标准，需要研发高度精确的AI质量检测和设备管理系统。只有将技术和产业进行深度融合才能够发挥出人工智能的优势，从而使传统产业产生实质性改变。以服装制造业为例，海澜之家推出AI量体系统并通过3D扫描、大数据分析等技术为用户提供个性化定制服务，成功地将定制服装的交付时间从20天减少到7天，从而使客户的满意度增加了25%。

### 4.2 加强数据治理与安全保障

人工智能发展需要海量的数据作为支撑，因此需强化数据管理。建立健全数据收集、存储、管理与共享机制，保证数据准确、完整、及时。与此同时，在数据越来越重要的今天，数据安全尤为重要。企业需

要对数据加密、访问控制、备份恢复实施严密的安全措施，避免数据泄露与误用。比如医疗行业中涉及病人隐私数据时，应加强对数据安全的保护，以维护病人合法权益为前提，利用数据提升医疗服务水平。在金融领域，招商银行利用区块链技术搭建一个数据存储和验证系统，对交易数据进行加密和核实，数据被篡改的风险减少了99%，而客户数据泄露的情况几乎为零。

### 4.3 注重人才培养与引进

人工智能应用于传统行业，需要既具备专业知识，又能熟练掌握人工智能技术的复合型人才。传统行业企业要强化内部人才培养，以培训课程为载体，以技术交流为手段，提高员工数字化与智能化素养，使其能够适应新技术带来的工作模式变革。同时，积极从外部引进专业人才，为企业带来新技术、新理念。比如制造企业可引入人工智能算法工程师、数据分析专家等，协同企业原生产技术人员推进智能制造<sup>[5]</sup>。例如：华为公司对员工进行AI技术培训，联合各高校建立联合实验室，吸引大批人工智能领域高端人才入驻，为公司实现5G与AI融合创新打下人才基础。

## 5 结束语

在数字经济日益繁荣的今天，人工智能和传统行业深度融合已成为时代潮流。这一整合不仅给传统行业在生产效率提高、成本降低和决策优化等方面带来了显著收益，也促进了产业整体生态重构和升级。在技术方面，数据治理和安全保障为融合发展提供基石，人才培养和引进为持续创新提供动力，开放合作可以聚合各方面优势加快技术突破和应用推广。唯有全面把握这些关键要素，才能实现人工智能与传统行业的协同共进，为经济高质量发展注入强劲动能。

## 参考文献：

- [1] 李梅,魏正涛,吴蒙蒙.“人工智能+”背景下传统行业数字化高质量发展路径研究[J].办公自动化,2025,30(11):61-63.
- [2] 吕镛,张恒鑫,李连伟.人工智能对企业成长的影响研究[J].科研管理,2025,46(05):55-63.
- [3] 秦宇.智能引领:人工智能驱动下的经济革新与社会变迁[J].湖湘论坛,2025,38(03):97-108.
- [4] 卢凯,毛绍斌.数字经济与人工智能:双轮驱动下的产业变革[J].中国管理信息化,2025,28(03):91-93.
- [5] 匡朋.数字技术加速传统行业供应链变革[J].数字经济,2024(Z1):80-83.

# 结构优化提升充气式固定封闭金属开关柜性能

李 鸥

(欧玛嘉宝(珠海)开关设备有限公司昆山分公司, 江苏 苏州 215300)

**摘 要** 充气式固定封闭金属开关柜是中压配电系统的核心设备, 它的结构设计直接影响电气性能与运行可靠性。GAE630-1LSV-H-4 型开关柜运用工程塑料绝缘真空灭弧室框架、三工位隔离机构缓冲器等结构创新技术, 实现了关键部件的系统性优化。真空灭弧室绝缘框架采用工程塑料材料能有效改善绝缘性能, 三工位隔离开关机构通过缓冲器设计优化可提升操作可靠性, SF<sub>6</sub> 气体绝缘系统结构完善可确保长期密封性能, 载流接触系统结构创新能够降低接触电阻。结构优化后的开关柜在电气绝缘性能、开断载流能力、机械可靠性以及安全防护水平等方面都获得了显著提升, 为中压配电设备技术进步提供了参考。

**关键词** 中压配电系统; 充气式开关柜; 真空灭弧室; 三工位隔离开关; 工程塑料绝缘材料

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.023

## 0 引言

充气式固定封闭金属开关柜在现代电力系统中承担着重要的配电功能, 其结构设计水平直接决定了设备整体的性能表现。随着电力系统对设备可靠性的要求不断提高, 传统开关柜的结构已经难以满足现代配电网的技术需求。工程塑料绝缘材料的应用为真空灭弧室框架结构的优化提供了新的技术路径, 三工位隔离机构缓冲器设计的改进有效解决了操作冲击方面的问题, 电场均匀化设计进一步提升了设备的绝缘水平。GAE630-1LSV-H-4 型开关柜作为结构优化的典型代表集成了多项创新技术成果, 通过系统性的结构改进实现了设备性能全面提升, 深入研究其结构创新技术路径对推动中压配电设备技术发展具有重要意义。

## 1 开关柜整体结构与技术参数

GAE630-1LSV-H-4 型充气式固定封闭金属开关柜运用模块化设计理念打造, 它主要由真空断路器单元、三工位隔离开关单元、SF<sub>6</sub> 气体绝缘系统以及载流接触系统共同组成, 具体如图 1 所示。该设备的额定电压为 12 kV, 额定电流能够达到 630 A, 短时耐受电流为 25 kA 且持续时间为 1 秒, 峰值耐受电流则为 63 kA, 其整体结构采用三工位配置方案来实现断路器分合、隔离开关分合以及接地开关投切的一体化操作功能<sup>[1]</sup>。操作电源采用 DC48V 供电系统确保控制回路的可靠性, 通过压力监测装置实现气体密度实时监控从而保障设备长期稳定运行。

## 2 关键部件结构优化设计与实现

### 2.1 真空灭弧室绝缘框架结构优化

真空灭弧室绝缘框架用工程塑料材料替换传统环氧树脂结构, 通过对材料介电特性进行优化配置来实现绝缘性能全面提升, 工程塑料具备优异机械强度及良好的电气绝缘特性, 其相对介电常数  $\epsilon_r$  大概在 3.2 ~ 3.8 之间, 介电损耗角正切值  $\tan \delta$  小于 0.005 明显优于传统绝缘材料, 框架结构几何形状经过电场仿真开展优化设计, 消除尖端效应以及电场集中现象, 以确保在额定电压下电场强度分布均匀。真空灭弧室内部电场强度计算公式为:

$$E = \frac{U}{(d \cdot \ln(\frac{R_2}{R_1}))} \quad (1)$$

式(1)中:  $E$  为电场强度, 单位为 kV/mm;  $U$  为施加电压, 单位为 kV;  $d$  为电极间距, 单位为 mm;  $R_2$  为外电极半径, 单位为 mm;  $R_1$  为内电极半径, 单位为 mm,  $\ln$  表示以自然常数  $e$  (约等于 2.718) 为底的对数。优化后的绝缘框架结构有效提高了真空灭弧室耐压水平, 工频耐压试验结果显示绝缘裕度较传统结构提升约 15% 以上。

### 2.2 三工位隔离开关机构结构改进

三工位隔离开关机构借助缓冲器结构创新设计使操作平稳性显著改善, 如图 2 所示。缓冲器采用弹簧阻尼复合结构, 通过合理配置刚度系数与阻尼系数有效吸收操作冲击能量、减少机械部件磨损并延长使用

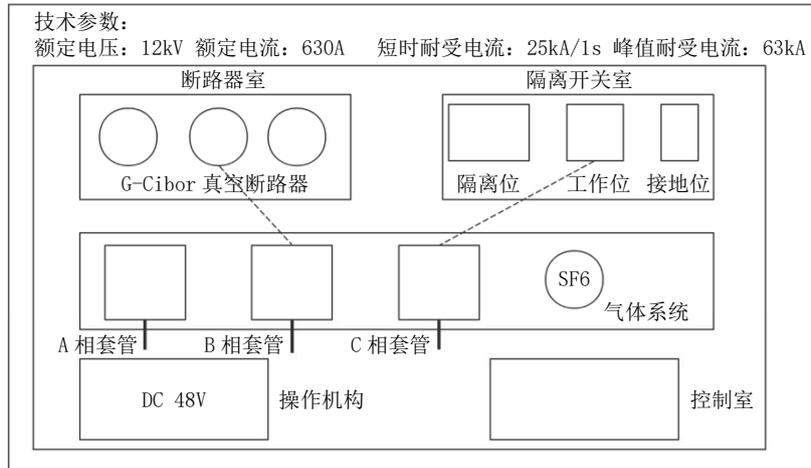


图1 GAE630-1LSV-H-4型开关柜整体结构示意图

寿命。操作机构传动比经过精密计算，确保在规定操作力范围内实现可靠分合操作且操作力矩控制在合理范围，避免过载损伤。三工位开关同期性指标通过机械结构精密加工与装配工艺严格控制得到有效保障，各相开关同期性偏差控制在2ms以内满足电气设备对操作一致性严格要求，缓冲器弹性系数与阻尼特性参数通过动力学仿真分析确定，确保在不同负载条件下均能达到稳定的缓冲效果<sup>[2]</sup>。

### 2.3 SF6 气体绝缘系统结构完善

SF6 气体绝缘系统采用全密封结构来设计，借助高性能密封材料与精密加工工艺确保系统长期密封性能<sup>[3]</sup>。气体室使用不锈钢材质进行制造，复合密封结构在温度变化与机械振动条件下仍能保持良好的密封效果。压力监测装置采用高精度压力传感器，实时监测气体密度变化情况，当压力低于设定阈值时自动发出报警信号，确保设备运行安全，气体充排装置配备精确压力调节阀，充气压力控制精度达到±0.001MPa，满足设备对气体密度精确控制技术要求，SF6 气体化学稳

定性自恢复特性为设备提供了可靠的绝缘保障。

### 2.4 载流接触与插接系统结构创新

载流接触系统采用旋转接触式结构设计，借助增大接触面积以及优化接触压力分布，实现低阻抗连接，有效降低系统运行损耗。接触系统选用银镀层铜导体材料，具备优异导电性能以及抗氧化特性，在长期运行过程中接触电阻能保持稳定，插接系统机械结构经过了精密设计，可确保在额定电流下接触电阻满足技术规范要求，主回路接触电阻L1-L2相间以及L2-L3相间都不超过75μΩ。接触电阻计算公式为：

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A \cdot n} \quad (2)$$

式(2)中： $R$ 为接触电阻，单位为μΩ； $\rho$ 为材料电阻率，单位为μΩ·mm； $L$ 为接触长度，单位为mm； $A$ 为单个接触点有效接触面积，单位为mm<sup>2</sup>； $n$ 为并联接触点数量，单位为个。接触压力由弹簧加载机构提供，接触力控制在160±100N范围内，确保接触可靠性的同时避免过度磨损。

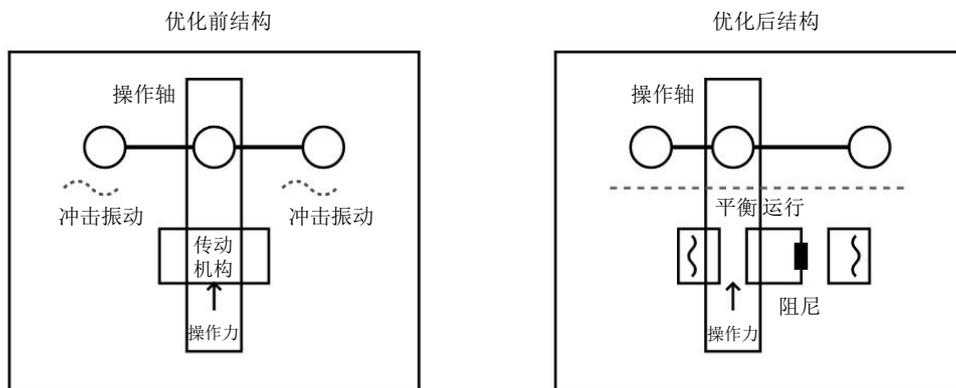


图2 三工位隔离开关机构结构改进示意图

### 3 结构优化对开关柜性能的提升效果

#### 3.1 电气绝缘性能提升

结构优化之后的开关柜在电气绝缘性能方面有了显著提升,各项电气参数均达到或者超过了设计预期目标,具体如表 1 所示。工程塑料绝缘框架的应用使真空灭弧室绝缘水平比传统结构提升 15% 以上,工频耐压试验以及雷电冲击耐压试验结果都表明设备具备充足绝缘裕度,SF6 气体绝缘系统结构完善确保了设备在各种环境条件下的绝缘可靠性,气体密度监测系统的应用进一步提升了绝缘性能的稳定性。局部放电试验结果显示在 1.1 倍额定电压下局部放电量小于 10 pC,远低于标准要求的 50 pC 限值<sup>[4]</sup>,充分证明了结构优化对绝缘性能起到积极作用。三工位隔离开关电场优化设计有效消除了电场集中现象,各部位电场强度分布均匀,避免了绝缘薄弱环节产生,为设备长期稳定运行提供可靠保障。

表 1 结构优化前后电气绝缘性能对比

性能参数	优化前	优化后	提升幅度
工频耐压水平 (kV)	42	48.3	+15.0%
雷电冲击耐压 (kV)	75	86.3	+15.1%
局部放电量 (pC)	35	< 10	-71.4%
绝缘电阻 (MΩ)	2 500	3 200	+28.0%
介电损耗角正切值	0.012	0.005	-58.3%
绝缘裕度系数	2.8	3.2	+14.3%
电场均匀度	0.75	0.92	+22.7%
绝缘老化寿命 (年)	20	30	+50.0%

#### 3.2 开断与载流能力增强

结构优化能明显提升开关柜开断与载流能力,使真空断路器开断性能与载流接触系统导电能力得到有效改善。真空灭弧室绝缘框架优化设计为电弧快速熄灭创造了良好条件,设备可自动开断短路电流且开断时间控制合理。载流接触系统结构创新有效降低了接触电阻,使运行损耗显著减少。温升试验结果表明,额定电流长期运行时各载流部件温升控制在允许范围,体现了结构改进的积极效果。短路耐受能力测试证明设备能承受峰值电流冲击且不发生永久变形,机械强度与电气性能保持稳定。

#### 3.3 机械可靠性改善

三工位隔离机构缓冲器的应用明显改善开关柜机械性能,操作平稳性与机械寿命都得到有效提升。缓冲器结构能有效吸收操作过程中的冲击能量,减少传动机构磨损与疲劳损伤情况,机械寿命试验结果显示设备可承受 10 000 次以上操作循环且性能保持稳定。操

作同期性测试表明三相开关操作时间偏差控制在 2 ms 以内,同期性指标比传统结构优约 30%,为电气设备可靠运行提供了保障。机械特性试验结果说明操作力与操作时间在规定范围内且有良好的重现性,操作机构刚度与阻尼特性匹配合理,避免了操作振荡现象,密封系统结构完善确保了 SF6 气体长期密封性能,年泄漏率控制在 1% 以内,满足设备免维护运行要求,降低了维护成本。

#### 3.4 安全防护水平提高

结构优化使开关柜安全防护水平实现全面提升,内部电弧故障防护能力与人身安全保障能力均显著改善。内部电弧试验结果显示设备具备防护能力,能承受内部电弧故障且不发生危险,压力释放装置动作可靠,有效保护了设备外壳完整性。绝缘配合设计优化确保各部位绝缘距离满足安全要求,避免了人身触电与设备损坏方面的安全隐患<sup>[5]</sup>。机械联锁装置完善设计可防止误操作发生,五防功能实现防误分合断路器、防误分合隔离开关、防误入带电间隔、防误投接地开关及防误操作全面保护,接地系统可靠连接确保设备外壳等电位连接,有效防止感应电压对人身安全造成威胁。

### 4 结束语

充气式固定封闭金属开关柜通过系统性结构优化实现设备性能全面提升,验证了结构创新对提高配电设备技术水平具有重要作用。工程塑料绝缘真空灭弧室框架、三工位隔离机构缓冲器、SF6 气体绝缘系统及载流接触系统的结构优化,分别在电气绝缘、机械可靠性、密封性能及导电性能方面取得显著改善效果。GAE630-1LSV-H-4 型开关柜成功应用表明,基于创新技术路径的结构优化能有效解决传统设备存在的技术局限性,为中压配电系统提供更可靠的技术保障。结构优化不仅提升了单项性能指标,更实现了设备综合性能协调发展,为今后开关柜技术进一步发展奠定了坚实的基础。

#### 参考文献:

- [1] 陆军,蒋吕兴,周灵刚,等.12 kV 开关柜防浸水结构设计[J].广东电力,2025,38(03):113-121.
- [2] 黄新春.环保型充气开关柜在配电系统中的技术性能分析[J].电工技术,2022(01):111-112,116.
- [3] 费翔,朱志豪,孙河南,等.绝缘热管在大容量环保充气式开关柜应用可行性分析[J].高压电器,2024,60(06):10-18.
- [4] 邵晨凡,牛勃,王东方,等.充气式开关柜局部放电多参量融合检测技术研究[J].宁夏电力,2024(05):29-36,42.
- [5] 黄蓉,刘红圣,曹先慧,等.35 kV 变电站环保型充气开关柜绝缘丝杆断裂故障分析[J].工程机械,2024,55(06):218-222.

# 配电网运维检修信息化管理平台建设与实践分析

李光洋, 韩江伟, 赵耀武, 冯志

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

**摘要** 为解决传统配电网运维检修模式下数据孤岛、决策滞后等问题, 并适应新型电力系统建设及“双碳”目标的实现需求, 本研究构建了基于云边协同架构的数据驱动型信息化管理平台。该平台整合物联网、大数据分析 and 人工智能等先进技术, 开发了设备全生命周期管理和检修计划优化等核心功能模块。实践研究表明, 该平台显著提高了设备状态评估的准确性, 有效缩短了故障处理时间, 并实现了运维成本的优化。建设配电网运维检修信息化管理平台是实现运维模式向数字化、智能化转型的重要途径, 对提升电网运行效率和供电可靠性具有关键性作用。

**关键词** 配电网; 运维检修信息化管理平台; 智能感知体系; 数据治理体系; 智能决策中枢

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.024

## 0 引言

在我国新型电力系统建设步伐加快、“双碳”目标带动电网智能化转型发展的大环境下, 作为电力供应“最终的距离是一公里”关键枢纽的配电网对运维检修提出了更高要求。传统管理模式存在数据孤岛、决策滞后和资源调度效率低等问题, 迫切需要通过建设先进信息化管理平台和整合新一代信息技术将运维检修工作向数字化、智能化和精益化方向转变。

## 1 配电网运维检修信息化管理平台架构

### 1.1 基础设施层——云边协同的智能感知体系

平台采用“公有云+边缘计算”混合架构, 在变电站、开闭所等关键节点部署边缘计算网关, 从而实现设备状态数据的实时预处理和边缘分析。采用华为 Atlas500 智能小站作为其硬件基础, 并配备昇腾 AI 处理器, 该设备能够支持红外热成像和局部放电等监测数据的本地特征抽取, 从而将数据传输量减少超过 60%<sup>[1]</sup>。具体而言, 边缘计算网关将获取的原始数据经过降噪、压缩以及初步分析后, 过滤掉关键信息, 然后上传到云端, 极大地降低了网络传输压力以及云端计算负荷。在网络层, 构建一个基于 5G 切片技术的专门通信网络。该网络为故障抢修等关键业务提供了毫秒级的低时延通道, 满足《电力通信网设计规范》(DL/T5404-2010) 对实时传输业务的需求。在实践中, 5G 切片技术可以针对视频监控和远程控制等不同的业务要求对

网络资源进行动态分配, 以保证各种业务的平稳运行。

### 1.2 数据层——知识图谱驱动的数据治理体系

构建以装备为中心, 集成装备铭牌参数、设计图纸、运行日志和故障记录多源异构数据的知识图谱。使用图数据库 Neo4j 保存, 并利用属性图模型建立设备之间拓扑关系、运行关联以及故障传导路径。例如: 通过知识图谱能直观显示某一条线路中各设备间的连接关系、某一设备故障对周围设备可能造成的影响等。通过采用自然语言处理方法, 可以从非结构化文档中提取信息, 并将设备的缺陷描述自动转换为结构化的数据, 其准确性高达 92%。以变压器的缺陷报告为例, 自然语言处理技术可以快速地提取缺陷出现的时间、部位、具体表现等重要信息。为确保数据的变更能够追溯到源头, 需要建立一个数据血缘追溯机制, 以满足《电力数据安全防护技术规范》(GB/T37934-2019) 中对数据管理的规定。数据血缘追溯机制能够记录下数据从生成、处理到利用的整个过程, 便于运维人员跟踪与管理数据质量。

### 1.3 应用层——AI 赋能的智能决策中枢

基于微服务架构进行核心业务模块开发, 并通过 API 网关对服务进行统一管理和呼叫, 采用强化学习算法来优化检修计划的制定。以停电时长、检修费用和设备的健康状况为主要优化目标, 在 IEEE33 节点配电网模型的测试中, 检修计划的综合成本成功降低 18.7%。在实践中, 强化学习算法能够依据设备实时运

行状态及历史数据不断地调整检修策略以达到资源最优配置。故障紧急修复模块融合基于 YOLOv5 的图像辨识技术,用于无人机巡查的图像中的缺陷检测,其识别的准确性超过 95%,与传统的人工解读方法相比,效率提高 8 倍。无人机巡检采集到的海量影像数据通过 YOLOv5 算法可以快速精准识别绝缘子破损和线路断股缺陷,为故障抢修工作提供了强有力的支撑<sup>[2]</sup>。

#### 1.4 展示层——数字孪生可视化交互界面

利用数字孪生技术建立三维虚拟电网并实时镜像映射装置状态。基于 WebGL 框架开发沉浸式可视化界面以支持多尺度数据的显示,实现大到区域电网拓扑,小到单个设备内部结构的交互观看。例如:运维人员可通过接口对某变电站进行放大,观察站内设备详细运行参数及状态。利用 Echarts 动态图表库从时间和空间两个维度可视化分析设备负荷曲线、故障趋势和其他数据,为管理者提供直观的决策依据。管理者可通过动态图表清楚地观察到设备负荷在各时段的变化趋势及故障出现的频度与分布,以便预先采取对策。

## 2 配电网运维检修信息化管理平台功能模块

### 2.1 设备管理模块——全生命周期健康管理

构建设备健康度的评估模型,并将振动频谱和油色谱分析多源数据融合在一起,利用 D-S 证据理论实现状态融合评估。针对变压器和断路器等关键设备建立剩余寿命预测模型并根据 LSTM 神经网络训练历史数据,将预测误差限制在合理范围内。开发一个设备缺陷的智能诊断系统,该系统能够通过关联规则来挖掘和分析缺陷之间可能存在的关系,并自动生成故障处理的建议,其准确率高达 89%。以变压器为例,该装置健康度评估模型将对其振动频谱、油色谱数据和温度几个指标进行全面分析,并利用 D-S 证据理论将上述信息融合得到该装置健康状态得分。当得分小于某一阈值后,该系统将自动进行报警,同时将剩余寿命预测模型与缺陷智能诊断系统相结合,提出相关检修建议<sup>[3]</sup>。

### 2.2 检修计划管理模块——动态优化调度体系

在蒙特卡洛模拟的基础上构造设备故障的概率模型,并与电网负荷的预测数据相结合,采用遗传算法对检修计划进行优化。设置动态调整机制在电网运行方式发生变化或者设备状态发生突变的情况下触发计划重排算法以保证检修工作和电网运行状态的实时适配。在某个省级电网的试点项目中,预定的执行偏差率已从 12% 下降到 3.5%。蒙特卡洛模拟采用大量随机抽样的方法来模拟各种运行状态下设备发生故障的可

能性,而遗传算法是基于这些可能性以及电网负荷预测的数据来对检修计划进行持续优化。在遭遇极端天气造成电网负荷剧增或某重要装置突然出现异常的情况下,动态调整机制将快速启动计划重排算法以重新编制合理检修计划。

### 2.3 故障抢修管理模块——全景协同指挥系统

接入北斗高精度定位系统对抢修车辆和人员进行精确定位,定位精度达到亚米级。开发一个基于案例推理技术的故障抢修智能决策系统,该系统能够检索历史上相似的故障处理方案,并根据当前故障的特性进行方案的适配,其方案推荐的准确率高达 91%。搭建一个多方合作的可视化指挥系统,该系统支持紧急维修现场的视频回传和专家的远程指导功能,使得故障的平均修复时间减少 40%。北斗高精度定位系统能够将抢修车辆及人员位置实时展示出来,便于指挥中心对其调度。故障抢修智能决策系统在故障出现后将快速对历史案例库进行检索,找出出类似故障处理方案,针对目前故障具体情况做出调整供抢修人员借鉴。同时可视化的指挥平台能够使专家能够远程观察现场状况并及时进行指挥,从而提高抢修效率。

### 2.4 数据分析模块——智能决策支持体系

构建机器学习模型训练平台并融合随机森林, XGBoost 以及其他各种算法以支持用户自定义模型的训练和调优。开发一种异常检测算法,该算法利用孤立森林算法来识别设备在运行过程中可能出现的异常模式,预警的准确率高达 93%。构建电网运行态势的预测模型,以时空卷积网络为基础,通过气象数据、负荷数据的共同分析实现 72 小时的运行态势预测,并将误差率限制在一定的范围内。用户可根据实际需要在机器学习模型训练平台中选择合适的算法并上传数据对模型进行训练优化。孤立森林算法可以快速地确定设备运行数据的异常点并及时报警。电网运行态势预测模型则可以结合气象数据(如温度、湿度、风速等)和负荷数据,预测未来 72 小时内电网的运行状态,帮助运维人员提前做好应对准备。

## 3 配电网运维检修信息化管理平台建设中的技术应用

### 3.1 物联网技术:泛在感知网络构建

部署一个基于 LoRaWAN 协议的低能耗传感器网络,能够远程监控配电变压器、绝缘子等关键设备,其通信范围可达 3 公里,并且功耗减少 70%。利用 IEEE1451 标准搭建智能传感器接口实现不同厂家设备即插即用

的功能,解决传感器协议兼容性问题。例如:在某个城市的配电网试验项目中,传感器的部署费用减少35%。LoRaWAN协议低功耗,广覆盖,很适合应用于配电网设备远程监测中。通过IEEE1451标准搭建的智能传感器界面,便于不同厂家制造的传感器与平台连接,统一进行数据采集与管理,减少系统集成难度与费用<sup>[4]</sup>。

### 3.2 大数据技术:知识发现与价值挖掘

利用Apache Hadoop\Spark搭建大数据处理平台对PB级数据进行分布式存储及计算。在Apriori算法基础上开发频繁模式挖掘工具来找出设备缺陷和环境因素及运行参数间的关联规则。数据沙箱环境的设置为业务人员自助式数据分析提供支持,使数据使用效率提高四倍。Apache Hadoop与Spark可以对大量配电网数据进行高效处理,并通过分布式存储与计算提高数据处理速度与存储容量。Apriori算法能够在海量数据中挖掘设备缺陷等因素间潜在的联系,从而为运维决策奠定基础。数据沙箱的环境为工作人员创造一个安全的数据分析场所,在这里他们能够自由地挖掘数据,并找到有意义的信息。

### 3.3 人工智能技术:智能决策核心引擎

通过在有限的标注数据上对预训练模型进行细微的调整,并将迁移学习技术引入故障诊断领域,成功地解决小样本学习的问题,从而使故障诊断的准确性提高15%。开发一个基于Transformer的自然语言处理模型,该模型能够自动分类工单文本并提取关键信息,从而使处理效率提高70%。在实践中,迁移学习能够使用大规模数据上预先训练的模型并结合少量配电网故障标记数据精细调整,从而快速建立适合当地情况的故障诊断模型。基于Transformer的自然语言处理模型能够自动处理大量的工单文本,提取关键信息,例如故障的类型、发生的地点等,这大大减少了人工处理的工作量。

## 4 配电网运维检修信息化管理平台建设实践要点

### 4.1 顶层设计:标准规范体系构建

根据《电力行业信息化标准体系框架》(DL/T1436-2015)的指导,制定包括数据收集、接口协议和安全保护在内的企业相关标准。构建平台功能成熟度评价模型,实现对平台可用性、可靠性和安全性维度的定量评价,保证平台建设与行业规范的一致性。企业标准制定过程中需充分考虑配电网运维检修实际运行需求及未来趋势,确保标准具有实用性与前瞻性。该平台功能成熟度评估模型能够周期性地对平台进行全面评价,以便及时识别并解决存在的问题<sup>[5]</sup>。

### 4.2 数据治理:质量管控与价值释放

实现主数据管理(MDM)体系,制定设备编码、人员信息和其他主要数据的标准。利用数据质量监控工具实现数据完整性和准确性的实时监控以及异常情况下的告警和修正流程的自动触发。建设数据资产目录、明晰数据权属和用途,推动数据共享利用。主数据管理系统能保证关键数据一致准确,数据质量监控工具能及时检测出数据存在的问题,并对其做出处理。数据资产目录有助于企业对数据资产进行更好的管理与使用,增加其价值。

### 4.3 系统集成:异构系统融合实践

通过使用企业服务总线(ESB),实现与营销系统和GIS系统的集成,并通过消息队列机制确保数据传输的可靠性。致力于开发标准化的数据交换接口,并按照IEC61970/61968的标准来确保模型与数据之间的无缝连接,从而消除系统之间的数据障碍。企业服务总线能实现各系统间服务调用与数据交换,消息队列机制能保证数据传输时的可靠性与稳定性。标准化数据交换接口能保证不同系统间数据格式统一和无缝连接。

## 5 结束语

在能源革命和数字技术高度融合发展的时代背景下,配电网运维检修工作的信息化管理已经成为确保电力系统安全平稳运行的关键支撑。实践结果表明,以先进信息技术为支撑搭建的管理平台突破传统运维技术壁垒,由经验驱动到数据驱动,由被动响应到主动运维,不仅显著提高了配电网运行效率和可靠性,也反映出电力行业技术创新和管理变革的前瞻性。随着数字技术的不断发展,配电网运维检修信息化管理将进一步深度智能化,从而为构建新型电力系统、实现“双碳”建设目标注入持久动力,引领电力行业优质发展新方向。

## 参考文献:

- [1] 施健. 信息技术背景下提高配电网运维技术水平研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022,12(07):93-94.
- [2] 王均, 刘熠. 大数据平台下配电网智能化运维管控平台的设计[J]. 网络安全技术与应用, 2022(02):108-109.
- [3] 周伟. 以提高供电可靠性为目的配电网综合检修管理[C]//2018年江西省电机工程学会年会论文集. 国网江西省电力有限公司湖口供电分公司, 2019.
- [4] 阿布都艾尼·阿布都克力木. 10kV配网运维现状和管理模式的思考[J]. 中国新通信, 2019,21(04):145.
- [5] 章丹阳. 浅谈提高配电网运维技术水平的措施[J]. 中国新技术新产品, 2018(12):38-39.

# 精益 TPM 驱动设备管理现代化： 沿海钢铁企业实证研究

覃晓生，蒋友军

(广西钢铁集团有限公司，广西 防城港 538002)

**摘要** 聚焦广西钢铁集团有限公司冶金设备管理，通过精益 TPM 驱动和实践，以“自主保全”“专业保全”为两大抓手，构建了一套适应沿海钢铁企业的精益 TPM 管理体系。该体系促使设备管理从粗放式迈向精益化，有效降低了设备故障停机率，提升了设备综合效率，降低了生产设备维修成本，同时优化了企业的设备管理文化，增强了员工的设备维护能力，为传统钢铁行业设备管理转型升级、适应现代化管理需求提供了可借鉴的实践经验。

**关键词** 冶金；设备管理；精益 TPM；钢铁行业

中图分类号：F406

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.025

## 0 引言

在 AI 智能、工业物联网等新时代产物日益蓬勃发展的背景下，传统钢铁冶金设备“重生产、轻维护”的粗放管理模式改革尤为迫切。在传统粗放式管理模式下，设备故障停机频发、设备维护成本高、生产效率受限等问题日益凸显，已成为制约传统钢企核心竞争力和可持续发展的关键瓶颈。构建一套适应传统钢铁企业的精益 TPM 管理体系，将设备管理从粗放式向精益化转型升级，以适应现代化管理需求，成为亟待解决的问题。

广西钢铁集团有限公司聚焦传统钢铁企业冶金设备，创新性引进、改良全员生产保全 (Total Productive Maintenance, TPM) 管理，以“自主保全”与“专业保全”的深度融合为核心路径，构建并实践了一套具有沿海钢铁行业特色的精益 TPM 管理体系，旨在为设备管理精益化赋能，降低设备故障停机时间，提升设备综合运行效能 (OEE)，降低设备维修成本，为传统钢铁企业设备管理转型升级提供一个可借鉴、可复制的优秀实践案例。

## 1 精益 TPM 管理体系简述

20 世纪 50 年代，美国制造业因“事后维修”设备故障频发，催生了预防保全 (Preventive Maintenance, PM)、改良保全 (Corrective Maintenance, CM)、保全预防 (Maintenance Prevention, MP) 的融合，形成了生产保全 (Productive Maintenance, PM)，这是 TPM 管理的雏形；二战后日本将该管理方法引入，丰田汽车供应商日本电装 (Nippon Denso) 公司在探索和实

践过程中，总结出了一套制造部门 80%~90% 员工参与生产保全的管理模式，因其有全员参与 (Total) 属性，后续将该管理模式命名为全员生产保全 (Total Productive Maintenance, TPM)<sup>[1]</sup>。通过该模式的推行，将“维护”转化为“价值创造”，实现全体生产人员与生产设备的深度协同，经济效益明显。丰田汽车公司精益 TPM 的深度贯彻，为其创造了相当大的经济价值。

## 2 精益 TPM 管理体系的构建

广西钢铁集团有限公司以全员自主保全和专业保全为基本框架，以初始清扫与微缺陷治理、“两源” (发生源与困难源) 治理为切入点，以皮带专项改善、检修现场标准化建设、全优润滑管理、故障分析管理、设备功能精度管理、四大标准体系完善、数字化精益备件管理、工业站所“星级”建设八个专业为支柱，经深度融合，构建了一套适应传统钢铁企业的精益 TPM 管理体系 (见图 1)，有效解决了设备故障停机频发、设备维护成本高、生产效率受限等问题，充分将“设备维护”转化为“价值创造”。

### 2.1 自主保全体系的深化构建与实践创新

自主保全是 TPM 的基石，其核心在于激发一线员工 (设备操作者) 的设备管理主体意识和能力。其切入点是“小组活动”，即成立 TPM 活动小组，导入相应的自主保全活动。自主保全分若干个阶段逐步推进，每完成一个阶段，都要进行诊断验收，验收通过才能进入下一个阶段。通过系统化的阶段推进，树立员工对设备管理的“主人翁”观念，使设备维护从“被动应对故障”向“主动预防劣化”发生根本转变。其实施过程

打造了26个样板案例,应用“样板先行、全面推广”策略,实现设备隐患识别全员覆盖和问题整改标准化运作。

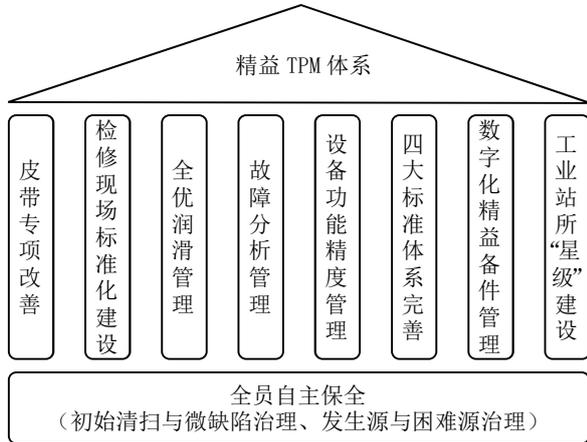


图1 广西钢铁集团有限公司精益TPM管理体系

1. 自主保全一阶段: 聚焦初始清扫与微缺陷治理,通过对设备进行持续的清扫点检,全体员工系统排查和识别设备存在的“八大不合理”(松动、变形、腐蚀、泄漏、污染、磨损、异响、温度异常)等微缺陷,发现设备劣化早期表象,并进行消缺管理,杜绝缺陷扩大、减少设备故障。同时建立设备基础台账,显著提升员工对设备结构的熟悉度和异常感知能力,为后续阶段奠定坚实的数据和行为基础<sup>[2]</sup>。

2. 自主保全二阶段: 聚焦“两源”(“发生源”与“困难源”)治理,在一阶段识别问题的基础上,对设备存在的一些“源头”问题(“发生源”及“困难源”,包括污染发生源、浪费发生源、故障发生源、不良发生源、操作困难源、点检困难源、润滑困难源、维修困难源等),运用5W2H、PDCA、OPL(OPL即单点课,是一种聚焦单一设备问题或操作要点的微型培训工具<sup>[3]</sup>)等精益工具,对识别的问题进行深度剖析,追溯至设备设计、工艺参数、操作规范、材料特性等根本原因,对问题根本原因进行有效消除,对问题整改进行循环改善,对改善成果进行总结和推广。

## 2.2 专业保全系统的精细化设计与协同推进

专业保全是设备管理专业化水平提升的支柱,是以专业设备维护人员为中心进行的设备管理活动,其核心价值在于运用专业化的知识、工具和方法,解决设备运行中的复杂技术问题,优化维护策略。专业保全根据实际情况导入具体的专业化管理项目,广西钢铁集团有限公司将皮带专项改善、检修现场标准化建设、全优润滑管理、故障分析管理、设备功能精度管理、四大标准体系完善、数字化精益备件管理、工业站所“星级”建设八个专业作为专业保全的主要组成部分,协同运作和推进。

1. 皮带专项改善: 制定皮带改善阶段性实施计划,一阶段从单点维修扩展到输送系统整体效率优化;二阶段覆盖皮带全生命周期有效管控;三阶段建立标准化体系。经实施,皮带落料显著减少,皮带清扫时间缩短约10%,同时皮带设备现场环境得到有效改善。

2. 检修现场标准化建设: 制定详尽的检修作业标准手册,深度落实“三不见天、三不落地”的检修备件管理方式,严抓“线路两平两直”“三条线”“活完地净”现场管理,落实外协检修单位准入、培训、考核和现场稽查机制,实现检修现场人、机、料、法、环的标准化运作<sup>[4]</sup>,打造安全检修、高效检修、环保检修、节约检修。

3. 全优润滑管理: 通过油品统一化、加油量化、周期合理化、责任明确化、记录规范化等“五化”措施,构建了完整的润滑管理体系,实现“吨钢油品消耗统计→油品检测→油种合并→可视化改善”闭环。

4. 故障分析管理: 通过结构化方法追溯设计、制造、运行、维护全链条失效机理,最终形成预防再发措施的技术管理过程<sup>[5]</sup>。建立健全故障数据库,运用精益分析工具,识别共性问题 and 重复故障,追究问题根因,针对性修订点检标准、润滑规范、维修规程,有效降低故障复发率。

5. 设备功能精度管理: 建立关键设备(如轧机、连铸机等)功能精度标准库,定义关键精度参数及其允许范围。定人、定检验标准、定周期检测,关注各精度控制项目检测数据,提前发现劣化趋势,即时恢复,保障产品质量和设备性能,全厂关键生产设备精度保持率维持在90%以上,主作业线设备故障率降低22.84%,设备作业率提升7.51%。

6. 四大标准体系完善: 全面梳理、完善维修技术标准、点检标准、润滑标准、维修作业标准,依照“三者、三现”的原则,开展标准与现场执行一致性验证,为设备运维提供统一、规范、易操作的准则,减少经验依赖。

7. 工业站所“星级”建设: 制定工业站所安全、环保、规范、整洁、可视化、运行指标评定标准,对站所进行标准化打造和维持、升级,逐项验收评定,实现各生产单位星级评定良性竞争,全覆盖实现工业站所标准化建设733个。

8. 数字化精益备件管理: 打造“6S标准化+数字化”备件管理模式,覆盖143个全优机旁备件库,对备件严格执行定位、定容、定量、定人,实现目视化管理;同步依托钉钉平台开发备件智能扫码信息化系统(见图2),为每件备件赋予唯一身份标识(二维码),实

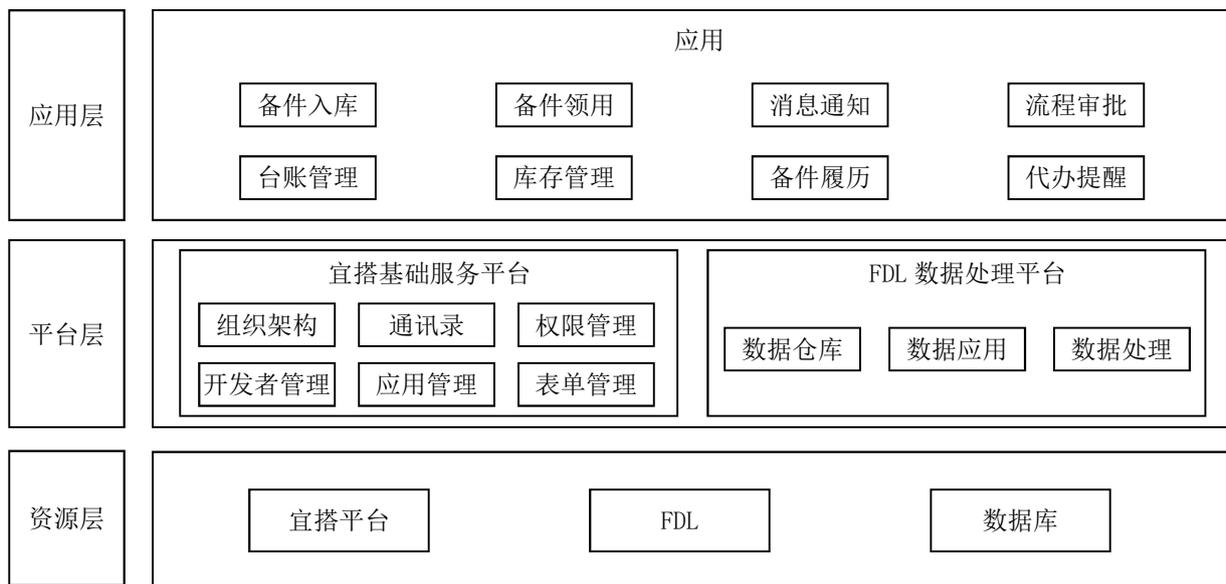


图 2 备件智能扫码信息化系统

现从入库、存储、领用、退库到报废的全流程数字化跟踪与管控。实现备件寻找时间缩短 65%，紧急领用响应速度提升 40%，备件库存金额下降 26.94%。

全员自主保全和八大专业保全的深度融合，共同构成了精益 TPM 体系基本盘。全员自主保全活动成果为专业保全专项改善提供信息输入，专业保全制定的各项标准和信息化技术应用，规范了全员自主保全的做法，为全员自主保全活动提供了便利条件。两者深度融合后总结、转型提升，为企业关键性决策提供依据。

### 3 管理成效的综合评估与价值分析

广西钢铁精益 TPM 管理体系的实施成效显著，体现在硬性指标改善与软性能力提升两个维度，并促进了管理模式的深层次转型。

#### 3.1 绩效指标显著提升

1. 主作业线设备故障率降低：降幅 22.84%。
2. 设备作业率提升：增幅 7.51%。
3. 备维修成本进一步降低：降幅 2.08%。
4. 库存效率提高：备件库存金额下降 26.94%。

#### 3.2 管理软实力与模式转型

1. 紧密结合钢铁生产流程及传统管理现状，渐进式引进并形成一套具有本企业特色的精益 TPM 体系基本盘，为企业设备管理现代化、数智化转型奠定了良性基础。

2. TPM 活动激发了基层创新活力，涌现出一批实用性强、效益显著的创新成果，形成全员发现问题、解决问题、根治问题的优良文化。

### 4 结束语

广西钢铁以自主保全与专业保全深度融合为核心的精益 TPM 管理体系构建与实践，是应对新时代钢铁行业设备管理挑战的一次有效探索。全员自主保全和专业保全的深度融合，共同构成了具有本企业特色的精益 TPM 体系基本盘。通过系统性的自主保全阶段推进和专业保全八大专项建设，有效解决了设备故障高发、维护成本攀升、管理粗放等痛点，在设备效率、成本控制、管理水平、员工能力和企业文化等方面取得了显著的综合成效。其成功实践表明，设备管理从粗放式迈向精益化，为公司有效解决了设备管理过程中的痛点、难点问题，深刻揭示了 TPM 本土化的重要性和严谨性，为传统钢铁行业设备管理现代化转型升级，提供了可借鉴的实践经验。

### 参考文献：

- [1] 中岛清一, 著. 全员生产维护 TPM 入门 [M]. 王瑞珠, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [2] 李葆文. TPM 活动推行实务 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [3] 徐明强. 精益生产之 TPM 实战指南 [J]. 中国机械工程, 2021, 32(10): 120-125.
- [4] 张孝桐. 设备点检管理手册 (第二版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [5] 高复先. 设备故障诊断与可靠性维修 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.

# 5G 高精度定位终端产业链协同创新与成果转化机制研究

姜 宏

(深圳金信诺高新技术股份有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘 要** 随着第五代移动通信技术(5G)的广泛普及与持续发展,其高精度定位领域的运用为众多行业开辟了前所未有的变革契机。本文致力于探究5G高精度定位终端产业链的协同创新机制及其成果转化途径。通过对5G高精度定位技术的背景概述、产业链结构的剖析、协同创新模式的探索以及成果转化机制的深入研究,提出促进该产业链协同创新与成果高效转化的策略性建议。研究发现,产业链上下游企业间的紧密协作、政策的积极引导以及市场需求的强劲驱动,共同构成了推动5G高精度定位终端产业链协同创新与成果转化进程的关键动力。

**关键词** 5G技术; 高精度定位; 终端产业链; 协同创新; 成果转化

中图分类号: TN91; G3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.026

## 0 引言

随着科技的飞速发展和持续进步,尤其是近年来移动互联网和物联网的深度融合,位置服务应用领域已经极大地超越了传统的界限。从智能手机导航到自动驾驶汽车,从智能物流到智能家居,高精度定位技术已经成为现代生活中不可或缺的一部分。与此同时,第五代移动通信技术(5G)的普及,为推动高精度定位技术的应用带来了重大机遇。5G技术以其高速率、低时延、大连接等特性,为高精度定位技术的发展提供了强有力的支持。在此背景下,对5G高精度定位终端产业链协同创新与成果转化机制的研究具有重要意义。

## 1 5G 高精度定位技术背景

### 1.1 高精度定位技术的发展历程

高精度定位技术发展是从单一技术到多种技术结合的转变。技术发展初始主要依靠GPS全球定位系统,但GPS容易受环境影响,限制了定位的准确性和稳定性。随着北斗卫星导航系统、伽利略卫星导航系统的发展和完善,通过与GPS配合使用,大大提高了定位的精确度和可靠性。近年来,物联网、大数据、云计算技术飞速发展,让高精度定位技术和这些新技术深度结合,构建出更加精细完整的定位体系。

### 1.2 5G 技术对高精度定位技术的推动作用

5G技术因为它的独特优点,对高精度定位发展发挥着极大的推动作用。第一,5G的高速率特点大幅提升了传输数据的速度,这让定位数据的实时性和准确性得到提高。第二,低延迟的特点保证了定位信息可

以快速传输到控制中心,这对实时控制和做出相关决策奠定了重要基础。第三,5G的大连接能力让很多设备可以同时连接网络,这使得大规模的高精度定位应用实施有了强劲的支持<sup>[1]</sup>。

## 2 5G 高精度定位终端产业链构成

### 2.1 上游原材料及组件供应商

上游部分由原材料及组件供应商构成,他们肩负着为高精度定位终端提供核心材料与部件的关键使命。这些核心元素涵盖高精度芯片、传感器以及天线等。原材料及组件的质量直接关系到终端设备的整体性能与定位精准度。从5G生态产业链来看,其上游产业链涵盖了材料供应、芯片研发、元器件制造以及基础设施建设服务等多个领域。通过智慧芽Discovery对市场报告中提及的企业进行深入剖析,可以清晰地洞察到,5G行业的领军企业主要包括华为、爱立信、诺基亚、中兴、三星、英特尔、高通、AT&T、OPPO、vivo以及中国移动等。这些企业广泛布局上游的芯片供应以及通信网络设备的制造等核心环节。例如:华为作为全球领先的ICT解决方案供应商,在运营商市场中扮演着双重角色:既提供网络基础设施,又通过深度合作推动运营商业务创新。

### 2.2 中游设备制造与系统集成

产业链中游聚焦设备制造与系统集成两大核心环节,承担着将上游技术转化为下游应用的关键纽带作用。主要将高精度定位终端生产制造和系统集成起来,覆盖的产品类型很广泛,如不同种类的高精度定位模块、终端设备和整套的系统集成解决方法。为保证终

端设备性能的稳定可靠,设备的厂家需要运用先进工艺技术和实施严格的质量控制流程。5G 产业链中游以主设备制造和通信网络技术服务为核心,同时延伸至部分支撑技术环节(如边缘计算基础设施)。网络服务运营和专用网络解决方案则横跨中游设备供应与下游服务交付,由通信设备商与运营商共同完成<sup>[2]</sup>。

### 2.3 下游应用服务提供商

下游以应用服务商为主,他们的主要业务是把高精度定位设备应用于智慧城市、智能交通、自动驾驶等领域。这些公司因为具备丰富的行业经验和超高的技术能力,所以他们可以很快地反映客户的需要,然后提供符合客户需求的解决方案。从 5G 产业链来看,下游应用涉及很多不同行业的结合使用,主要可以分为两个重要部分:给普通用户用的 To C 市场和给公司用的 To B 市场。随着 5G 手机和其他终端产品越来越多,To C 市场已经被很多消费者慢慢接受并且喜欢。不过 To B 市场现在还没出现那种超能力的关键应用,在要做大做强过程中还是有很多困难需要解决。

### 2.4 终端用户

终端用户作为 5G 高精度定位终端产业线的最后受益者,包括个人用户、企业和机构用户。他们的需求不只是产业链条发展的主要推动因素,同样也是整个行业能可持续发展的核心基础。

## 3 5G 高精度定位终端产业链协同创新模式分析

### 3.1 产学研用合作模式

产学研用合作模式就是上下游企业、学校、科研单位一起参加创新活动的一种方式。通过产学研用合作,能让技术、人才、资金这些元素得以共享和更好地分配,从而促进技术创新和成果转化。通常高校和科研单位能为企业技术提供支持和培养专业人才,反过来企业也能为学校和科研单位提供实践的平台和资金帮助。例如:在推进 5G 技术的产学研用合作方面,东南大学在 2017 年就与美国国家仪器公司(NI)达成了战略伙伴,还签了共建毫米波技术联合实验室的协议。这标志着两家单位通过紧密协作,努力探索 5G 技术的创新方向。2021 年,东南大学又继续推进,与中国移动通信集团签了全面战略合作协议。按照协议,他们会在移动通信、网络安全、区块链、云计算、教育医疗等多个领域一起合作。力求一起开发出有竞争力的先进技术以及解决方法、产品,同时培养高科技人才,促进科技成果转化和应用,以推动技术发展和产业升级<sup>[3]</sup>。

### 3.2 产业联盟合作模式

产业联盟合作模式就是产业链上下游的公司通过组成产业联盟,一起促进技术发展和产业进步的模式。

通过产业联盟能够使得上下游企业紧密合作和资源共享,从而促进技术创新和成果转化。在具体构建时,5G 高精度定位产业联盟可以组织大家一起做技术研发、制定标准、推广市场等项目,以此带动整个产业的发展。例如:2021 年,华为和全球多家运营商参加了测试全球大城市的 5G 网络体验,测试结果显示华为帮助运营商构建的 5G 网络在多个城市都名列前茅。华为常务董事丁耘在 MWCS 媒体分析师预沟通会上公开宣布:根据第三方公司做的测试数据,首尔、阿姆斯特丹、马德里、苏黎世、香港、利雅得六大城市中,华为承建的运营商 5G 网络体验排第一。

### 3.3 开放创新平台模式

开放式创新平台模式就是上下游产业链企业通过建立开放创新平台,吸引不同资源参加创新活动的一种方式。应用这种开放平台,可以广泛聚集创新资源并且高效利用,促进了技术创新和成果转化。5G 高精度定位技术的开放创新平台能够吸引高校、科研机构和企业单位都参与到技术研发和成果转化工作中,推动整个产业进步。以智慧城市为例,从最早提出概念发展到现在,已经经历了十多年的快速成长期。在这个过程中,像 ICT 这样的新技术已经广泛应用到城市规划和布局以及建设运营管理等主要环节中。随着 5G 技术真正投入商业使用,智慧城市开始进入完全由数字化驱动的新阶段。5G 技术中的 mMTC 场景也就是海量机器通信迅速发展起来,这让数字孪生技术应用变得特别普遍。这种技术可以实现对城市实体进行特别精细的数字复制,通过仔细分析和模拟之后,大大提高了城市各个方面的互联互通能力,为现实中的城市智能化运营管理提供了重要支持。在探索智慧城市解决方案过程中,华为提出了创新的“1+1+N”建设思路,首先要建立统一的城市数字基础平台,再装上强大的智能中枢系统,然后在这个基础上发展出各种各样的智能应用,以满足城市数字化转型的不同需要。另外,政府和企业合作的新模式,为 5G 融合应用发展带来了新动力和新机遇,进一步加快了智慧城市的发展速度<sup>[4]</sup>。

### 3.4 产业链布局与资源配置协同模式

优化产业链布局与合理配置资源,是提升产业链协同创新效率的关键策略。为达成此目标,我们必须细致考量产业链上下游企业的独特性与市场性,进而科学规划产业布局与资源配置方案。在产业链的上游,需着力增强芯片与模组、天线与射频组件等核心零部件的研发与制造实力,为整个产业链奠定坚实的基础。步入中游,则需不断提升终端设备制造及系统集成技术水平与服务品质,确保产业链的中坚力量稳健前行。产业链下游则需积极拓宽应用场景,深挖市场需求,

加速技术成果的商业化落地，为产业链注入持续的发展动力。此外，强化产业链上下游企业间的信息共享与协同合作同样至关重要。我们需构建高效的信息共享平台，完善协同合作机制，促进上下游企业间的无缝衔接与高效配合，从而全面提升产业链的运作效率与市场竞争力<sup>[5]</sup>。

#### 4 5G 高精度定位终端产业链成果转化机制

在5G高精度定位终端产业链方面，成果转化是保证整个产业稳步发展的重要推动力。这个转化过程涉及不同的层面和各种机制，这些机制一起促进5G高精度定位技术真正实现商业化运用。以下是几个特别关键的技术转化机制。

##### 4.1 技术转移机制

技术转移机制的主要目的是要把高校和科研机构研发的技术成果顺利传到上下游企业。这个机制能推动技术成果转化成商业应用，为整个产业发展提供强劲动力。具体来说，高校和科研机构可以通过技术成果转化，将他们研究的高精度定位技术转移到企业生产中，然后企业将这些技术转化成产品再面向市场，这样技术就能真正得到应用而且发挥最大价值。

##### 4.2 产学研合作项目成果转化机制

产学研合作项目的成果转化机制，其实就是基于产学研合作项目，把技术成果很快转化成实际产品或者解决办法的一种机制。这种机制可以让技术成果转化和应用的进度大大加快，从而对产业的快速发展起到推动作用。在这种机制下，高校、科研机构和企业能一起参与合作，开展高精度定位技术研发项目，然后研发的成果很快就能转化成市场上受欢迎的产品或者方案，这样就可以准确把握市场的需求变化。

##### 4.3 创新孵化机制

创新孵化机制主要是搭建一个完善的创新孵化平台，给初创企业提供包括技术支持、资金扶持、市场推广等在内的全部服务。它的目标主要是帮助初创企业更快地发展和成长，从而促进整个行业的发展。例如：5G高精度定位的创新孵化平台，给初创公司带来了技术上的指导、资金的支持以及市场的推广服务，帮助他们在竞争激烈的市场中站稳脚跟，取得了更大的进步。

##### 4.4 市场化运作与产业链协同机制

市场化运作对于成果转化来说，其角色的重要性不言而喻。要想实现最佳的效果，企业要先清楚市场到底需要什么，然后把5G高精度定位技术进行匹配应用。例如：交通运输、矿业、石化以及核电等领域，还有像工厂仓库或者机场港口这些场地，可根据需求开发出优质的有竞争力的产品。另外，整个产业链中

各个部分要加强互相配合协作，一起打造出完整的产业链生态体系，这样才能更好、更快地将5G高精度定位技术进行推广和高效应用<sup>[6]</sup>。

##### 4.5 人才培养与引进机制

人才是5G高精度定位终端产业链成果转化过程中的核心驱动力。为了实现这一转化目标，我们必须加大对人才的培育与引进力度。通过与高校及科研机构等建立紧密合作关系，能够培育出既富有创新精神又具备扎实实践能力的高素质专业人才。同时，积极引进海外顶尖人才及团队，为产业链上下游企业注入强大的人才支撑与智力资源。在推进人才培养与引进工作时，应充分发挥市场机制的关键作用。构建人才市场及信息交流的高效平台，有助于实现人才资源的优化配置与合理利用。这将极大地提升产业链上下游企业的创新潜能与市场竞争力，进而驱动产业链的迅猛发展与持续升级<sup>[7]</sup>。

#### 5 结束语

5G高精度定位终端产业链的协同创新以及高效的成果转化对推动相关领域的发展至关重要。要想让该技术在更多领域广泛应用并进行产业升级，就要促进上下游企业更紧密的合作，通过产学研用结合进行体系创新，大力推动市场化运作，实现科技成果转化，同时还要保护好知识产权以及完善相关标准。未来，随着5G技术越来越成熟和应用场景的不断扩展，5G高精度定位终端产业链会得到更多的发展机会，前景也会更加广阔。

#### 参考文献：

- [1] 衣韵潼. 数字化赋能产业链协同 [N]. 中国电力报, 2024-11-22(001).
- [2] 张颖. 技术距离视角下环境规制对制造业企业技术创新的影响机制分析 [D]. 长春: 东北财经大学, 2023.
- [3] 陈爱贞, 陈凤兰, 何诚颖. 产业链关联与企业创新 [J]. 中国工业经济, 2021 (09): 80-98.
- [4] 宋然. 数字经济、创新要素集聚和区域产业结构升级 [D]. 昆明: 云南财经大学, 2024.
- [5] 陈飞, 王琳. 产业链协同视角下技术距离对技术创新的作用机制研究: 以宁波市为例 [J]. 产业观察, 2025(05): 154-155.
- [6] 上曜星月. 一城一北斗 | 5G与北斗协同: 构建高精度智能应用新生态 [DB/OL]. 网易新闻, [2024-12-17]. <https://c.m.163.com/news/a/JJK01GID05531H89.html>.
- [7] 袁大善人. 加速通导融合, 中国在精准定位领域脱颖而出 [DB/OL]. 新浪网, [2023-08-30]. [http://k.sina.com.cn/article\\_1644242590\\_6201269e001016wym.html](http://k.sina.com.cn/article_1644242590_6201269e001016wym.html).

# 新质生产力驱动下建筑安全监管的数字化转型范式研究

张家杰

(榆中县建设工程质量监督站, 甘肃 兰州 730100)

**摘要** 在新质生产力的强劲驱动下, 建筑安全监管正加速推进数字化转型与范式重构。本研究系统阐释了新质生产力的理论内涵及其对传统监管模式的革新作用, 聚焦新质生产力驱动下建筑安全监管范式的数字化转型路径, 构建以技术、数据、主体为核心要素协同发力的转型框架, 形成包含技术支撑层、数据资源层、智能应用层、流程再造与组织协同层、评价与持续改进层的五维范式体系。在此基础上, 进一步提出数据融合、技术赋能、制度—技术适配、组织能力提升、多元主体协同五大运行机制, 旨在为突破传统监管效能瓶颈提供有益参考, 进而助力建筑行业安全发展与高质量发展目标的协同实现。

**关键词** 新质生产力; 建筑安全监管; 数字化转型

**中图分类号**: TU714

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.027

## 0 引言

在当今快速变革的时代背景下, 建筑行业作为国民经济支柱产业, 正经历着由国家系列战略部署引领的深刻转型, 《“十四五”可再生能源发展规划》《“十四五”新型城镇化实施方案》等政策的出台, 明确指向绿色化、智能化的发展新方向。当前建筑安全监管面临事故频发、条块分割致信息孤岛凸显、责任主体模糊引发追溯困境等突出问题, 严重掣肘行业高质量发展。数字化转型以物联网实时感知构筑风险预警防线, 推动安全监管范式从分散管理转变为全链条协同, 为突破监管效能瓶颈, 筑牢安全底线提供解决方案。本研究聚焦新质生产力与建筑安全监管的深度融合路径, 以大数据挖掘实现隐患智能研判, 以区块链存证溯源破解责任界定难题, 精准呼应新质生产力的本质要求, 推动安全监管范式从被动应对转向主动治理, 对提升建筑施工安全管控效能、降低安全生产事故发生率具有重要的现实意义。

## 1 相关理论基础与文献综述

### 1.1 新质生产力

新质生产力与以往以劳动要素、资源要素或土地要素为主导的传统生产力大不相同, 其不再依赖劳动、资源或土地等传统生产要素的单一驱动, 技术要素, 特别是关键领域颠覆性的科技创新更是实现生产力质的飞跃的核心因素。周文等<sup>[1]</sup>认为“新”主要指

的是新技术、新经济、新业态, “质”指的是以关键性技术和颠覆性技术的突破引发的生产力质变。刘伟<sup>[2]</sup>认为, 新质生产力中的“新”表现为新的生产要素和新的要素组合方式的出现, “质”体现为要素禀赋变革及相应的全要素生产率提升, “力”主要是指智能“网力”和“算力”。新质生产力理论以“全要素生产率提升”为核心本质, 强调通过数据、人工智能等创新要素驱动生产方式变革<sup>[3]</sup>, 进而引发生产关系的结构性重构<sup>[4]</sup>。这一理论在建筑安全领域的应用具有显著价值, 为建筑安全监管范式革新提供了理论合法性与实践方向, 预示着数字化技术将成为破解传统监管效能瓶颈的重要突破口。

### 1.2 文献综述

在新质生产力的深度驱动下, 建筑安全监管领域正加速推进数字化转型与范式革新。相关研究表明, 学界围绕建筑工程安全监督管理优化开展了多元探索, 既有针对建筑安全管理策略的理论深化<sup>[5]</sup>, 也有智能化技术应用<sup>[6]</sup>及数字孪生技术<sup>[7]</sup>等实践创新, 多维度揭示了新技术赋能安全管理的路径。面对建筑行业迈入新发展阶段却伴随部分单位安全意识薄弱、事故频发的现实挑战, 诸多研究聚焦技术落地。刘欣荣<sup>[8]</sup>构建了融合传感器网络、数据采集系统、信号处理算法与人工智能模型的技术方案, 实现风险实时监测与智能预警; 赵志增<sup>[9]</sup>通过数据实时采集分析与反馈机制, 打造多层次安全监测体系以提升利益相关方响应能力。

王栋锋等<sup>[10]</sup>基于PDCA循环模式开展施工安全管理实践,凸显持续改进的价值;黄秋瑜等<sup>[11]</sup>则通过数字孪生技术在大型公共设施项目中的应用,验证了该技术对施工现场安全管理效率的提升作用。综上所述,新质生产力视角下的建筑安全监管数字化转型范式研究涵盖了多方面内容,包括利用新技术提升安全管理水平、构建多层次安全监测体系、持续改进安全管理实践以及探索智能建筑安全管理新路径等。本研究聚焦新质生产力驱动下建筑安全监管范式的数字化转型路径,构建以技术、数据、主体为核心要素协同发力的转型框架,形成涵盖技术支撑层、数据资源层、智能应用层、流程再造与组织协同层、评价与持续改进层的五维范式体系,并进一步提出数据融合、技术赋能、制度—技术适配、组织能力提升、多元主体协同五大运行机制,为筑牢行业安全防线、推动建筑行业健康稳定发展提供理论支撑与实践参考。

## 2 新质生产力驱动下建筑安全监管数字化转型范式构建

系统搭建包含技术支撑层、数据资源层、智能应用层、流程再造与组织协同层、评价与持续改进层的五维范式体系,并同步建立数据融合、技术赋能、制度—技术适配、组织变革与能力提升、多元主体协同治理五大运行机制。

### 2.1 范式框架

#### 2.1.1 技术支撑层

技术支撑层以新质生产力技术集群为核心,通过多维度的技术融合构筑数字化底座,涵盖物联网(IoT)泛在感知网络实现全要素实时采集,依托大数据平台完成海量数据的汇聚与治理,借助AI算法引擎赋能智能决策与业务优化,结合云计算与边缘计算构建弹性算力体系,集成BIM/GIS提供空间化建模与可视化管理能力,依托5G/北斗通信保障高效可靠的数据传输链路,并通过区块链存证技术确保数据全流程可追溯、防篡改,形成覆盖感知、传输、存储、计算、分析、展示的全链条技术支撑体系。

#### 2.1.2 数据资源层

数据资源层聚焦全要素数据的精准采集与高效汇聚,全面覆盖人员、设备、物料、法规、环境及管理六大核心维度,构建多源异构数据的完整图谱。通过标准化体系规范数据格式,强化质量管控保障数据准确性,完善安全防护机制确保数据合规性;同步建立跨层级、跨领域的数据融合与共享机制,打通政企协同及部门间的数据壁垒,实现数据资源的互联互通与价值释放。

#### 2.1.3 智能应用层

智能应用层深度整合先进技术能力,构建智能化安全治理体系:通过实时监测、隐患自动识别及风险动态评估与分级预警实现智能风险感知。依托AI视频分析、无人机巡检、智能派单、报告自动生成及处罚建议等功能强化巡查效率与决策科学性。建立从隐患上报到整改跟踪、复查验收直至销号归档的全流程闭环管理机制。基于企业/项目/人员安全画像实施信用监管与差异化精准施策,同步打造应急指挥平台,支撑事故快速响应、资源高效调度与跨部门信息共享,形成覆盖风险防控、日常监管、应急处置的全链条智能应用生态。

#### 2.1.4 流程再造与组织协同层

全面重构基于数据要素驱动的监管业务流程,推动实现标准化、自动化、协同化转型,同步优化监管组织结构与职能配置,适配数据驱动、平台化运作的新型治理模式,建立健全跨部门、跨层级、跨区域协同机制,强化信息共享、联合执法与应急联动效能。创新政企协同模式,通过企业主体责任数字化落实与政府精准服务监管的双向赋能提升治理效能。在制度规则与标准规范层面,着力推进适应数字化转型的法律法规修订完善,明确数据权属、隐私保护及电子证据效力等关键问题,系统构建数据采集、传输、交换、共享、应用的标准体系,制定数字化监管操作规程与实施细则,并配套新技术应用的安全与伦理规范,为监管体系现代化提供制度保障。

#### 2.1.5 评价与持续改进层

评价与持续改进层聚焦数字化转型效能量化评估,构建涵盖监管效率提升、事故发生率下降、隐患发现率增长、企业满意度提升及成本效益优化等多维度的综合指标体系。通过动态监测与定期评估形成闭环管理机制,依据评估结果精准识别短板弱项,驱动监管流程、技术工具与制度规范的迭代升级,实现数字化转型的持续优化与自我完善。

## 2.2 转型范式的运行机制

### 2.2.1 数据融合机制

数据融合机制以跨领域、跨层级数据的实时汇聚与标准化处理为基础,打通多源异构数据通道,形成统一规范的数据资源池,在此基础上构建完整的数据驱动闭环,通过数据链贯通采集、治理、分析、应用全环节,深度挖掘数据潜在价值,提炼关键指标与规律特征,为监管决策提供动态化、智能化的数据支撑,实现数据要素向监管效能的精准转化。

### 2.2.2 技术赋能机制

通过 AI、IoT、大数据等先进技术的深度嵌入，驱动监管流程向智能化、精准化方向重构：AI 技术依托图像识别、行为分析及历史数据训练模型，显著提升隐患自动识别准确率与效率；IoT 网络通过海量终端设备构建全时域感知体系，实现物理空间与数字孪生的实时映射；大数据平台则对多源异构数据进行关联挖掘与趋势研判，为监管决策提供量化依据。在此基础上，智能预警机制基于机器学习算法对风险要素进行动态建模，结合实时监测数据开展风险等级评估与演化推演，通过分级预警阈值设定实现风险早发现、早处置，形成“感知—分析—预警—处置”的技术赋能闭环。

### 2.2.3 制度—技术适配机制

制度—技术适配机制聚焦现有监管制度与新兴技术特征的动态匹配，通过剖析电子签章法律效力认定、数据共享与隐私保护边界划定等关键议题，构建“制度弹性化+技术标准化的”适配模型：一方面推动监管制度创新，通过立法明确电子凭证、区块链存证等技术产物的法定效力，建立数据分级分类管理规则；另一方面强化技术实施规范，制定数据脱敏、访问控制、权限审计等技术标准，在保障个人信息与商业秘密的前提下实现跨部门数据互通，形成制度约束与技术赋能相互衔接、迭代演进的治理闭环。

### 2.2.4 组织变革与能力提升机制

组织变革与能力提升机制围绕数字化转型对监管体系的深层重构展开，要求监管人员角色由传统执法者向数据分析师、风险研判员及智能工具操作员转型，同步提升数据采集解析、算法模型应用、应急指挥调度等数字化技能。推动组织结构从科层制向平台化、项目化发展，通过设立数据治理专班、组建跨领域攻坚小组等方式强化敏捷响应能力；配套实施数字化能力分级认证、实战化场景演练及绩效考核激励机制，构建“人机协同”的新型监管团队，形成组织架构适配技术迭代、人员能力匹配职能转变的动态发展体系。

### 2.2.5 多元主体协同治理机制

多元主体协同治理机制以数字化监管为纽带，明确政府、企业、第三方服务机构及从业人员的差异化角色定位。政府主导规则制定与统筹协调，通过数字平台实施穿透式监管。企业承担安全生产主体责任，依托物联网设备与管理信息系统实现风险自控，第三方机构提供技术支撑与专业服务，协助开展数据核验与风险评估，从业人员作为一线执行单元，通过移动终端实时上报隐患信息。各方在数据互通基础上建立权责

分明的协作网络，政府通过信用评价引导企业自律，企业开放必要数据供监管校验，第三方机构提供中立的技术鉴证，形成“政府监管+企业自治+专业辅助+公众参与”的共治格局。

## 3 结束语

新质生产力通过技术跃迁与要素重构，为建筑安全监管范式转型注入核心动能。本研究构建的五层数字化转型框架及五大运行机制，系统性整合了物联网、人工智能、大数据等技术集群，打通了数据链驱动的监管闭环，重塑了组织协同与制度适配逻辑。这一范式不仅显著提升了隐患识别精准性、风险预警实时性及应急响应效率，更通过政企双向赋能与多元主体共治，推动了建筑安全监管从“被动应对”向“主动防控”跃升。未来，随着颠覆性技术的持续突破与应用场景的深化拓展，建筑安全监管需进一步强化数据要素的核心地位，推动跨主体协同共治向纵深发展。唯有以技术创新为引擎，以制度创新为保障，以人机协同为纽带，方能真正实现建筑安全监管的质效跃升，为行业可持续发展筑牢安全屏障，为智慧城市建设注入新的动能。

## 参考文献：

- [1] 周文,许凌云.论新质生产力:内涵特征与重要着力点[J].改革,2023(10):1-13.
- [2] 刘伟.科学认识与切实发展新质生产力[J].经济研究,2024,59(03):4-11.
- [3] 胡洪彬.习近平总书记关于新质生产力重要论述的理论逻辑与实践进路[J].经济学家,2023(12):16-25.
- [4] 陈荣达,林祺,金骋路,等.数据资产评估定价与新质生产力发展:演进逻辑与主要挑战[J].财贸经济,2024,45(08):33-51.
- [5] 韩李元,王庆.基于动态博弈的建筑安全管理策略研究[J].安全,2023,44(10):53-58.
- [6] 申伟.建筑安全管理中智能化技术应用研究[J].散装水泥,2024(02):182-184.
- [7] 邓擎旗,禹晨.试论数字孪生在建筑智慧运维系统中的应用[J].智慧中国,2025(05):116-117.
- [8] 刘欣荣.智能监测技术在建筑安全与风险预测中的优化[J].现代职业安全,2025(03):6-8.
- [9] 赵志增.基于“互联网+”的建筑安全监测多层次反馈平台的设计与实现[J].中国科技投资,2025(04):37-39.
- [10] 王栋锋,梁斌.PDCA循环模式下的建筑施工安全管理实践探究[J].中华建设,2025(03):35-37.
- [11] 黄秋瑜,黄立恒.数字孪生技术在某体育场馆建筑施工安全管理过程中的应用研究[J].绿色建筑与智能建筑,2024(12):76-78,113.

# 基于双重预防机制的南水北调中线工程 安全生产风险防控体系研究

王雪, 韩鹏举

(中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 河南 郑州 450046)

**摘要** 南水北调中线工程作为国家战略性水利基础设施, 其安全生产不仅关乎区域供水安全, 更与社会稳定息息相关。本研究立足于现地管理处的业务场景, 以双重预防机制为核心, 融合制度建设、安全培训、心理建设与法规约束等多维要素, 构建一套系统性、动态化的风险防控体系。该体系借助“风险辨识—分级管控—隐患治理—数据反馈”的双循环机制, 实现了对地质结构风险、气候水文风险、设备运行风险及人为社会风险的全链条防控。实践结果表明, 该体系显著提升了隐患处置效率、人员风险辨识能力及应急响应速度, 为超大型调水工程的精细化安全管理提供了新范式。

**关键词** 南水北调中线工程; 双重预防机制; 安全生产; 心理建设; 风险防控体系

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.028

## 0 引言

南水北调中线工程横跨长江流域与黄淮海平原, 途经河南、河北、北京、天津四省市, 全长1 432公里, 涵盖渠段、泵站、隧洞、渡槽等各类建筑物, 其长距离输水、多级调度、复杂地质条件下的运维等环节潜藏多重安全风险<sup>[1]</sup>。传统安全管理模式以“事故响应”为核心, 在风险预见性(如突发暴雨引发的渠道淤积)、隐患治理深度(如设备老化的根源性整改)及人员行为可靠性(如高强度值班下的操作失误)方面存在明显瓶颈。

双重预防机制(风险分级管控+隐患排查治理)为系统性防控提供了理论框架<sup>[2]</sup>, 但工程实践中需结合组织行为、制度环境与心理因素进行本土化创新。在“工程安全、供水安全、水质安全”三大战略目标指引下, 传统模式已难以满足高标准运行需求。因此, 推动安全管理向“关口前移、源头治理、科学预防”转变, 构建符合工程特点的双重预防机制, 成为保障工程安全运行的核心任务。近年来的实践表明, 该机制已成为现地管理处落实安全生产责任的关键工具。

## 1 南水北调现地管理处安全生产现状与核心挑战

### 1.1 南水北调现地管理处安全生产现状

现地管理处作为工程运行的“神经末梢”, 肩负着输水调度、设备巡检、工程设施日常维护、应急响应等核心职责, 其安全生产管理面临着四大突出问题。

在风险动态辨识方面存在不足, 水文气象如夏季强对流天气、地质变化如膨胀土渠段的湿度波动、设备老化如泵站电机绝缘性能衰减等动态风险, 缺乏实时评估工具, 主要依赖人工经验判断, 这容易导致风险漏判<sup>[3-4]</sup>。隐患治理呈现碎片化状态, 跨部门协作存在壁垒, 比如设施隐患需要工程科与调度科协同处理, 但责任划分模糊, 使得隐患整改存在“重上报、轻跟踪”的现象<sup>[5]</sup>, 而且验证机制不健全。人员因素日益凸显, 在高强度工作下, 如防汛期24小时值班, 人员容易出现疲劳、规程意识弱化如简化巡检步骤以及应急心理素质不足如突发闸门故障时决策迟疑等情况。制度法规落地困难, 现有制度多为宏观要求, 如“加强安全监管”, 与一线操作脱节, 未明确具体的危险作业与特种作业监管措施, 导致法规约束力难以渗透至作业末端。

### 1.2 南水北调中线工程安全风险特征

通过近年来的安全生产管理实践探索发现, 南水北调中线工程安全风险呈现出多元化、动态性、复杂性的特征, 主要风险源可归纳为四类<sup>[6-7]</sup>。南水北调中线工程主要风险分类与特征如表1所示。

## 2 融合创新的双重预防风险防控体系构建

针对现地管理处安全生产现状与挑战, 本研究提出“一体两翼, 四维驱动”防控体系: “一体”以双重预防机制为核心; “两翼”为风险精准管控与隐患

表 1 南水北调中线工程主要风险分类与特征

风险类别	典型表现	影响后果	管理难点
地质结构风险	膨胀土变形、边坡失稳、地基沉降	渠道结构破坏、输水中断	隐蔽性强、治理周期长
气候水文风险	冰塞形成、洪水冲刷、暴雨内涝	流量下降、工程损毁、水质污染	突发性强、预测难度大
设备运行风险	液压系统失效、电气控制故障、监测设备异常	调度失控、水位异常、响应延迟	设备种类多、维护专业性强
人为与社会风险	管理失误、外部破坏、水体污染	运行中断、水质恶化、公共安全事件	不确定因素多、防控覆盖面广

高效治理：“四维驱动”通过制度建设、安全培训、心理建设与法规约束提供支撑。

### 2.1 制度固本：构建“双循环”制度生态链

通过闭环设计实现风险与隐患管理的制度化、流程化。在风险管控闭环中，风险辨识结合安全监测数据如渠段位移传感器、测斜仪、MCU 传感器，建立“动态风险数据库”，每月更新监测月报及风险清单。科学定级引入 LEC-R 改进模型，即在传统 LEC 法基础上增加“应急资源响应能力”修正项，将风险分为“红、橙、黄、蓝”四级。分层管控制定处、科、班组三级责任清单，如红级风险由管理处处长牵头管控，蓝级风险由班组长负责。

隐患治理闭环设计为“智能巡检上报→分级派单→过程可视→效果回溯→纳入风险库”的全链条制度：一线巡检人员通过工程巡查系统移动端 APP 上传隐患信息，如拍摄闸门止水带破损照片并标注位置；系统自动匹配责任科室，如闸门问题派至调度科，推送整改通知并设定期限，如一般问题隐患 7 日内整改；整改过程通过照片上传实时跟踪；整改完成后，由安全科联合业务科室验证，合格后纳入风险库作为未来辨识依据。

### 2.2 培训强基：打造“三维一体”赋能体系

聚焦技能、法规、心理三维度，提升人员风险防控能力。

1. 技能维度基于岗位风险地图，如泵站运维岗的“液压系统故障”风险点，开发 VR 模拟实训平台，模拟场景包括闸门误操作如误按急停按钮导致输水中断、防汛抢险如渠道漫溢时的沙袋堆筑等，训练目标是通过反复模拟，强化“停机前先确认闸门状态”等肌肉记忆，提升应急处置速度。

2. 法规维度。将《安全生产法》《南水北调工程供水管理规程》拆解为岗位“行为红线清单”，如巡检岗红线包括“未携带气体检测仪进入有限空间”“雨天

未增加边坡巡查频次”等，配套“责任明白卡”，明确“违规将导致岗位考核降级”，实现法规具象化学习。

3. 心理维度。引入“安全心理韧性”培训，在压力管理上，通过呼吸训练、正念冥想缓解值班疲劳；注意力训练模拟暴雨天气下的设备读数，即在干扰环境中准确记录水位数据；应急决策演练则在突发水质污染时，让员工在“舆情压力+处置时限”双重约束下模拟方案选择，如优先关闸还是启动应急调度。

### 2.3 心理赋能：构筑“心防”安全屏障

1. 从心理层面减少人因失误，筑牢安全防线。风险感知前应开展常态化安全心理测评，如事故倾向性、心理疲劳度等，识别高风险心理状态个体并及时干预。压力源管理需建立“员工援助计划”，提供心理咨询与疏导服务，同时优化调度值班与防汛应急值班制度，减少因疲劳导致的人因失误。

2. 安全文化浸润。培育“互助互监”的团队心理，鼓励员工主动报告“吓一跳”事件，将心理安全纳入安全观察与沟通内容。开发适用于调度值班、设备巡检、工程巡查、土建绿化维护作业人员等关键岗位的“心理应急调适包”，包含快速平复情绪、提升专注力的简易心理工具，赋能一线员工即时自我管理。

### 2.4 法规铸盾：织密“刚性约束+柔性引导”责任网

1. 责任精准锚定。依据法规要求，细化管理处内部各层级、各岗位的安全生产法定职责清单，形成“责任矩阵图”。执法监督嵌入主动对接地方应急管理、水利监管等部门，将外部法规检查要点内化为日常管理标准，同时建立内部“合规性审计”机制。

2. 奖惩与诚信联动。将安全绩效、违规行为与个人/班组评优晋升、信用评价紧密挂钩，“三违”行为即违章指挥、违章操作、违反劳动纪律记入个人信用档案，影响评优评先，放大法规的威慑力与引导力。

### 3 现地管理处实践案例分析

#### 3.1 “三个安全”综合防控实践

某管理处辖区渠段地质条件复杂,风险集中度高,在“三个安全”即工程安全、供水安全、水质安全的综合防控实践中取得了显著成效。在工程安全方面,采取“工程措施+智能监测”的双轨策略,一方面投入专项资金对左岸排水建筑物出口防洪影响工程、防洪能力不足渠段等进行治理;另一方面升级优化视频安防系统,设置AI识别自动报警及警告系统,并将工程防汛纳入地方体系,与地方水利、应急部门建立联合防汛机制,为工程设施安全提供了有力保障。在供水安全方面,构建“中枢调度+设备保障”系统,中控室实时收集各类数据并接入总调度中心,对辖区闸站液压系统推行“定人定机定标”维护制度,同时与地方联合开展“防溺水宣传”,降低人为因素导致的供水中断风险。在水质安全方面,建立“三级监测+应急联防”机制,涵盖地表水、地下水、藻类等多方面监测及污染源调查,并与环保部门共建水质污染应急联动网络,确保辖区内水质持续稳定在Ⅱ类及以上标准,不发生水污染事件。

#### 3.2 工程巡查系统应用

工程巡查系统的应用在实践中发挥了重要作用,其具备移动巡检、智能派单、闭环追踪三大核心功能,现场人员通过APP即时上传隐患信息,系统自动记录相关数据,依据隐患类型和位置匹配业务科室并推送整改通知,对整改过程全程留痕并设置到期提醒预警。同时还具备统计分析功能,即将各时间段内的发现问题数量、整改过程情况、整改率、到期超期维护情况数据自动统计。

在2024年度工程巡查及维护中,该平台通过“平台+现场”的组合方式,完成了对防汛、衬砌面板、跨渠桥梁等部位的全面排查及专项排查,使隐患平均处置时间缩短40%,劳动强度降低,明确了各环节责任主体,避免推诿,且通过历史数据多维分析为风险研判提供依据,如跨渠桥梁伸缩缝损坏频数、截流沟塌陷、聚硫密封胶脱落情况分析指导2025年专项维护计划。

#### 3.3 “六项机制”与安全意识建设

现地管理处通过在全年开展多元化安全生产管理培训,重点推进风险管控“六项机制”落地,其实践特色显著。在法制化建设方面,通过宣传并贯彻《河南省安全生产条例》《安全生产法》,强化依法治安理念,明确违法行为责任边界,推动责任落实从“要我安全”

向“我要安全”转变。建立文化长效浸润,持续开展“安全之星”评选、家属开放日、亲情助安、事故警示日、安全生产月等活动,使安全理念内化于心、外化于行。

案例化教学结合液压系统失控导致闸门操作事故、汛期边坡失稳等真实事故案例进行剖析,强化员工风险意识。机制化创新将“六项机制”细化双重预防要求,如规定作业人员每日填写班组安全活动记录表进行“风险查找”,业务科室每月召开风险分析会落实“研判预警”。实践表明,人员能力建设是双重预防机制落地的关键支撑,培训后员工对核心概念的理解水平显著提升,风险辨识覆盖率和准确率提升约30%,隐患按期整改率超98%，“三违”行为显著下降,员工主动报告安全事件的意愿增强,为工程安全运行奠定了坚实的基础。

### 4 结束语

安全管理是一项系统工程,只有多维度协同发力,才能筑牢工程长治久安的根基,为保障国计民生提供坚实的水利支撑。本研究构建的基于双重预防机制的南水北调中线工程安全生产风险防控体系,将双重预防机制与组织行为、心理科学、制度法规深度融合,突破了传统管理的路径依赖。该体系通过制度的闭环设计固化流程,借助精准培训提升能力与意识,依靠心理建设筑牢“人”的防线,通过法规约束明确责任边界,在南水北调中线工程复杂运行环境中实现了风险的可知、可防、可控。该体系为超大型调水工程的精细化管理提供了新范式,也为国家水网的持久安全运行提供了可复制、可推广的“中线经验”。

### 参考文献:

- [1] 张墨,辛家昭,柳春波,等.南水北调中线干线工程安全运行解析[J].四川建材,2023,49(08):249-250,253.
- [2] 徐志超,刘杰,杨文涛,等.安全风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制研究:以南水北调中线干线工程为例[J].中国水利,2021(08):25-27.
- [3] 赵鹏,魏芳.南水北调工程运行期的安全管理分析[J].河北农机,2020(07):35.
- [4] 庞晓明,林云.南水北调工程运行期的安全管理分析[J].现代经济信息,2019(20):317.
- [5] 王国平.南水北调运行期监管措施分析[J].河南水利与南水北调,2020,49(01):79-81.
- [6] 赵绍华,王英歌,邵青,等.南水北调干线工程交叉河道防洪风险分析与管控措施研究[J].北京水务,2024(05):1-6.
- [7] 郭学博,吕晓理,李忻语.调水工程运行期安全生产存在问题及应对措施[J].山东水利,2025(02):15-17.

# 公路路基施工技术及其质量控制

张亮

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 路基作为公路工程的基础结构, 其施工质量直接决定公路整体稳定性与使用寿命。本文以四川某地区公路工程为研究对象, 结合该区域地形地质特点, 系统分析公路路基施工的关键技术与质量控制要点。通过工程实例阐述地基处理填筑压实排水系统构建等核心技术的应用路径, 提出针对四川地区复杂地质条件采用差异化施工技术, 并辅以全过程质量控制体系, 旨在为同类工程提供技术参考。

**关键词** 公路工程; 路基施工; 质量控制; 四川地区

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.029

## 0 引言

公路交通作为区域经济发展的重要支撑, 其工程质量与运营安全备受关注。路基作为公路结构的基础层, 承担着上部结构与车辆荷载的传递功能, 其施工质量直接影响公路的使用寿命与行车安全。四川地区地形复杂, 多山地丘陵地貌, 地质条件多样, 存在软土膨胀土等特殊岩土体, 且气候湿润多雨, 给公路路基施工带来了诸多挑战<sup>[1]</sup>。随着四川交通建设的不断推进, 路基施工技术不断创新, 但在复杂环境下仍面临沉降控制边坡稳定等技术难题。基于此, 本文以四川某地区公路工程为例, 深入分析路基施工关键技术, 构建全流程质量控制体系, 旨在为西南地区类似地质条件下的公路路基施工提供实践参考, 推动公路工程建设质量的提升。

## 1 工程概况

### 1.1 工程基本情况

本工程为四川某山区公路改建项目, 起于 A 县城南侧, 终于 B 镇东侧, 线路全长 28.6 km, 设计时速 60 km/h, 路基宽度 10 m, 采用双向两车道二级公路标准建设。项目途经区域属亚热带湿润气候, 年均降水量 1 200 mm, 雨季集中在 6 月至 9 月。沿线地形起伏较大, 高程在 520 m 至 1 180 m 之间, 穿越剥蚀山地丘陵河谷等多种地貌单元。

地质勘察显示, 路段土层以粉质黏土为主, 局部路段分布泥岩砂岩互层, K8+300 至 K10+100 段存在软土地层, 厚度 1.5 ~ 4.2 m; K15+200 至 K16+700 段为膨胀土区域, 自由膨胀率 35% ~ 55%。沿线不良地质主要表现为小型滑坡 3 处、崩塌隐患点 2 处, 需专项处理。工程总工期 18 个月, 其中路基工程计划工期 8 个月, 为后续路面及附属工程施工奠定基础<sup>[2]</sup>。

### 1.2 重难点分析

本工程施工重难点主要体现在四个方面。一是地形复杂导致路基填挖交替频繁, 最大填方高度达 12 m, 最大挖方深度 15 m, 高填路段易出现工后沉降, 需严格控制压实度。二是特殊岩土处理难度大, 软土地段需采用复合地基处理技术提高承载力, 膨胀土路段则需通过改良处理降低胀缩性, 避免路基开裂。三是水文条件复杂, 雨季施工易引发边坡失稳, 需强化排水系统设计, 确保路基干燥。四是环境保护要求高, 项目途经生态敏感区, 路基开挖与填筑需同步实施水土保持措施, 减少对周边环境的扰动<sup>[3]</sup>。

## 2 公路路基施工关键技术分析

### 2.1 地基处理技术

地基处理是确保路基稳定性的前提, 其技术选择需紧密结合地质勘察数据进行针对性设计。针对本工程不同地质条件, 采用三级差异化处理方案。对于一般粉质黏土地基, 先采用推土机清除表层杂草腐殖土, 处理深度严格控制在不小于 30 cm, 清除范围向路基两侧各延伸 50 cm, 确保基底土不受有机质污染。清表完成后采用 25 t 重型振动压路机进行碾压, 碾压次数根据现场试验确定, 通常为 3 至 4 遍, 压实度需达到 93% 以上。路床顶面以下 0 ~ 80 cm 范围作为关键受力层, 压实度标准提高至 96%, 对于压实度难以达标的路段, 采用 25 kJ 冲击压路机进行增强补压, 冲击能量按 200 kJ/m<sup>2</sup> 控制, 通过连续 10 ~ 12 遍冲击作业消除地基潜在沉降量。

软土地段采用水泥搅拌桩复合地基处理技术, 桩径设计为 50 cm, 桩长根据软土厚度分层确定, 一般为 6 ~ 10 m, 对于厚度超过 8 m 的软土采用长短桩组合工艺, 长桩深入下卧硬土层 1.5 m, 短桩长度为长桩的 2/3,

桩间距按 1.2 m 呈梅花形布置形成立体加固体。桩顶设置 30 cm 厚级配碎石垫层, 垫层中铺设双向拉伸聚丙烯土工格栅, 其纵横向抗拉强度不小于 80 kN/m, 延伸率不大于 10%, 通过格栅与垫层协同作用扩散上部荷载。施工中严格控制水泥掺量不低于 15%, 采用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 浆液水灰比维持在 0.5 ~ 0.55 之间。桩机就位后需进行水平校准, 确保桩身垂直度偏差不大于 1%, 成桩过程中采用喷浆搅拌提升速度, 控制在 0.8 ~ 1.0 m/min, 下沉速度 1.2 ~ 1.5 m/min, 保证水泥浆与土体充分拌和。成桩 28 天后采用单桩竖向抗压静载试验检测承载力, 单桩承载力特征值不小于 180 kN, 复合地基承载力不小于 200 kPa。

膨胀土路段采用生石灰改良处理工艺, 生石灰需提前 7 天进行消解, 过筛去除粒径大于 5 mm 的颗粒, 根据膨胀土初始塑性指数确定掺量, 一般为 5% ~ 8%。改良过程采用路拌机现场拌和, 拌和深度直达下承层顶面, 确保无素土夹层, 拌和均匀后采用平地机整平, 晾晒至最优含水量  $\pm 2\%$  范围内。为加速离子交换反应, 采用轮胎压路机快速碾压 2 遍进行初步密实, 间隔 48 小时后再进行振动碾压, 使土料与石灰充分反应形成稳定结构, 改良后土料塑性指数需降低至 12 以下, 自由膨胀率控制在 30% 以内, 且需在 7 天内完成填筑, 避免长时间暴露导致改良效果衰减<sup>[4]</sup>。

## 2.2 路堤填筑技术

路堤填筑严格遵循“分层填筑、分层碾压、分层检测”的三分层原则, 其技术核心在于控制填料特性、摊铺厚度与压实能量的匹配性。填料选择沿线风化砂岩碎渣与黏性土的混合材料, 通过室内试验确定最佳配合比, 碎石含量控制在 30% ~ 50% 之间, 最大粒径不超过 15 cm, 其中粒径大于 10 cm 的颗粒含量不超过 20%。有机质含量严格控制在 5% 以下, 液限不大于 50%, 塑性指数 15 ~ 25, 通过标准击实试验确定最大干密度与最优含水量, 作为现场控制依据。

高填路段采用水平分层填筑法, 每层松铺厚度按 30 cm 控制, 采用 GPS 定位技术控制摊铺边界, 从低处向高处逐层推进, 每层填筑宽度超出设计宽度 50 cm, 待路基成型后统一修整边坡。摊铺采用自行式平地机进行精细整平, 确保表面平整度偏差不大于 15 mm, 同时设置 2% ~ 3% 的横坡以利排水。碾压设备选用 20 t 以上振动压路机, 采用“先静压、后振动”的碾压程序, 先静压 1 遍消除轮迹, 再进行振动碾压 4 至 6 遍, 振动频率控制在 25 ~ 30 Hz, 振幅 1.5 ~ 2.0 mm, 碾压速度 3 ~ 4 km/h, 碾压方向由两边向中间进行, 轮迹重叠宽度不小于 1/3 轮宽, 确保碾压无死角。

压实度检测采用灌砂法, 检测频率按每 200 m 每压实层不少于 4 点控制, 下路堤(路床顶面以下 80 ~ 150 cm)压实度不小于 94%, 上路堤(路床顶面以下 30 ~ 80 cm)不小于 96%, 路床(0 ~ 30 cm)不小于 96%。对填挖交界处设置台阶进行特殊处理, 台阶宽度不小于 1 m, 高度 30 cm, 采用挖掘机开挖成向内倾斜 2% 的坡度, 并在台阶表面铺设单向土工格栅, 格栅长度向填挖两侧各延伸 2 m, 通过格栅的抗拉作用增强界面整体性。半填半挖路段先处理挖方边坡, 采用爆破或机械削坡方式清除松散岩土, 直至露出新鲜岩面或坚实土层, 然后分层填筑压实, 在填挖结合部每填筑 3 层进行一次冲击补压, 确保结合部密实度。

## 2.3 路堑开挖技术

路堑开挖需依据岩土特性制定分类施工方案, 在保证开挖效率的同时筑牢边坡稳定防线。对于土质路堑, 采用分层横向推进的开挖方式, 每层挖掘深度控制在 2 ~ 3 m, 借助挖掘机与自卸车协同作业实现土方转运。开挖期间用全站仪动态监测边坡坡率, 确保符合 1:1.5 的设计标准, 每开挖 5 m 高度设置 1 m 宽平台以分散坡体应力。

石质路堑施工引入浅孔控制爆破工艺, 炮孔直径 42 mm, 孔深 2 ~ 3 m, 按梅花形布孔, 孔距 1.0 ~ 1.5 m、排距 0.8 ~ 1.2 m, 装药集中度维持在 0.3 ~ 0.5 kg/m。选用 2 号岩石乳化炸药, 通过非电毫秒雷管实现微差起爆, 将单段最大起爆药量控制在 30 kg 以内, 最大限度降低对边坡岩体的扰动。爆破后及时用液压破碎锤处理大块石料, 确保粒径不超过 30 cm, 同时组织人工清除危石, 对裂隙发育区域采用喷湿混凝土临时封闭<sup>[5]</sup>。

边坡防护与开挖同步推进, 形成“开挖一级、防护一级”的闭环管理。土质边坡采用喷播植草技术, 喷播层厚度 10 cm, 选用狗牙根与紫花苜蓿混合草种, 覆盖无纺布保湿直至草苗长至 5 cm。石质边坡采用锚杆挂网喷浆防护,  $\Phi 25$  螺纹钢锚杆按 2×2 m 矩形布置, 深入岩体 3 ~ 5 m, 采用 M30 水泥砂浆锚固, 确保抗拔力不低于 150 kN; 挂设  $\Phi 8$  钢筋网后喷射 10 cm 厚 C20 细石混凝土, 待强度达设计值 70% 后完成锚杆张拉锁定。

## 2.4 排水系统施工技术

排水系统施工贯穿路基施工全过程, 构建“地表排水、地下排水、坡面排水”三位一体的排水体系。地表排水体系包括边沟、截水沟、排水沟等组成部分, 边沟采用 C20 混凝土现浇施工, 截面为梯形, 上口宽 1.2 m, 下口宽 0.8 m, 深度 0.6 m, 沟壁厚度 20 cm, 每隔 10 m

设置一道伸缩缝,缝宽 2 cm,内填充沥青麻絮。沟底采用 1:5 水泥砂浆抹面,平整度偏差不大于 5 mm,沟底纵坡严格控制在 0.3% 以上,确保排水通畅。

地下排水采用盲沟与渗沟组合方式,在高填方路段路基两侧设置纵向盲沟,断面尺寸 0.5×0.5 m,内填级配碎石,粒径 20~50 mm,四周包裹 400 g/m<sup>2</sup> 透水土工布,每隔 20 m 设置一道 Φ100 mmPVC 横向排水管,接入边沟形成排水通道。路床顶面以下 40 cm 处铺设双向土工格栅,其网格尺寸 20×20 cm,其上铺设 10 cm 厚碎石排水层,与盲沟相连形成水平排水网络,有效排出路床内积水。

桥头路基设置防渗墙,采用高压旋喷桩施工,桩径 60 cm,桩长 8 m,相邻桩搭接长度不小于 20 cm,沿桥台轴线布置形成封闭防渗体系。旋喷桩施工时控制提升速度 20~25 cm/min,旋转速度 15~20 r/min,水泥浆液水灰比 1:1,注浆压力 20~25 MPa,确保成桩强度不低于 2 MPa。

### 3 公路路基施工质量控制措施

#### 3.1 原材料质量控制

建立严格的原材料进场检验制度。填料进场前需进行颗粒分析、液限、塑限、击实等试验,符合要求方可使用,每 5 000 m<sup>3</sup> 检测一次。水泥、石灰等外购材料需提供出厂合格证,并按批次进行强度、细度等指标检测,水泥存放时间不超过 3 个月,受潮结块者禁止使用。

土工格栅、土工布等合成材料需检查其抗拉强度、延伸率等指标,确保符合设计要求,每批次抽样检测不少于 3 组。碎石垫层材料需控制粒径级配,含泥量不大于 5%,针片状颗粒含量不大于 20%。所有材料经检验合格后分类堆放,设置标识牌注明材料名称、规格、检验状态,避免混用。

#### 3.2 施工过程质量控制

施工过程实行“三检制”即自检、互检、交接检。地基处理前复核中线、高程及横断面,确保处理范围符合设计要求。水泥搅拌桩施工前进行试桩,确定钻进速度、提升速度等参数,施工中采用全站仪控制桩位偏差,不大于 5 cm,每台桩机配备自动记录仪记录施工数据。

路堤填筑时每层碾压完成后检测压实度,合格后方可进行下一层施工,压实度检测频率每 200 m 每压实层测 4 处。路堑开挖过程中定期测量边坡坡率与高程,避免超挖或欠挖,爆破作业需检查爆破参数及安全距离,确保施工安全。

排水系统施工检查断面尺寸、混凝土强度等指标,沟底平整度偏差不大于 10 mm,混凝土试块强度达到设计值 80% 以上方可进行回填。施工过程中留存影像资料,建立质量台账,对发现的问题及时整改,整改合格后方可继续施工。

#### 3.3 试验检测体系构建

建立工地试验室,配备击实仪、灌砂筒、压力试验机等检测设备,所有仪器经计量检定合格后方可使用。检测人员持证上岗,严格按照规范要求开展试验工作。地基承载力采用平板载荷试验,每 1 000 m<sup>2</sup> 检测 1 点,软土地基处理后复合地基承载力不小于 200 kPa。

路基压实度主要采用灌砂法检测,对于大粒径填料采用灌水法,检测频率满足规范要求。路堤填筑过程中同步监测沉降量,在高填路段设置沉降观测点,每 50 m 设一个观测断面,每层填筑后测量沉降值,当连续两周沉降量小于 5 mm/天时方可进行下一层施工。

膨胀土改良效果通过测定塑性指数、自由膨胀率等指标验证,石灰剂量采用 EDTA 滴定法检测,确保掺量符合设计要求。所有试验检测数据及时整理归档,出具正式报告,作为质量评定的依据。

### 4 结束语

该案例工程针对四川山区复杂地质条件,通过差异化地基处理、科学路堤填筑、分类路堑开挖及系统排水施工等技术,结合全流程质量控制,有效解决了特殊岩土处理、沉降控制等难题。实践结果表明,路基压实度合格率达 100%,工后沉降稳定在 15 cm 内,边坡无失稳现象,验证了技术方案的可行性。该案例证实,因地制宜的施工技术与严格的质量管控结合,能显著提升路基耐久性。其经验为西南类似工程提供参考,后续可探索新型材料与智能技术应用,进一步提升公路建设质量。

#### 参考文献:

- [1] 蒋凤菊,蔡国禄.公路施工中防水路基面的施工技术分析[J].汽车周刊,2025(08):66-67.
- [2] 唐先刚.公路工程路基施工技术研究[J].城市建设理论(电子版),2025(19):146-148.
- [3] 田俊.公路工程项目建设中填石路基施工技术应用研究[J].时代汽车,2025(13):187-189.
- [4] 马万飞,宋金涛,赵星宇,等.公路工程中沉降段路基施工技术[J].居业,2025(06):29-31.
- [5] 孙小明.公路改扩建工程路基路面施工技术与质量管理分析[J].中国设备工程,2025(S2):371-373.

# 电厂排烟温度偏高原因分析及治理措施

董鸿业

(大唐东北电力试验研究院有限公司, 吉林 长春 130102)

**摘要** 针对某电厂锅炉排烟温度偏高的问题,以1号炉和2号炉为研究对象,选取190 MW和270 MW两个工况进行核算分析。分析结果表明,空预器利用系数降低和锅炉无组织进风量偏大是导致排烟温度高的主要原因。其中,无组织进风主要源于磨煤机掺冷风、入炉密封风及炉本体漏风,且1、2号炉密封风量远超设计值;空预器冷热段蓄热片存在污染、吹损等问题,换热效率大幅下降。通过潜力分析明确各治理措施的降温效果,并提出空预器治理、密封风优化、炉底漏风控制、干渣机改造及磨煤机出口温度优化等针对性措施,以期对降低排烟温度、提升锅炉运行效率有所裨益。

**关键词** 排烟温度; 利用系数; 无组织进风; 密封风量; 炉底漏风

**中图分类号**: TM62

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.030

## 0 引言

在电力生产领域,电厂锅炉的运行效率直接关系到能源利用效率和企业经济效益。某电厂在运行过程中,锅炉效率低的问题较为突出,其中飞灰含碳量高和排烟温度高成为主要影响因素。经过深入分析,初步判断飞灰含碳量高主要是由于原煤挥发份低以及煤粉细度偏粗所致。为解决这一问题,电厂计划更换新型磨辊(宽辊加大面积),旨在提高磨煤机出力,降低煤粉细度。因此,本文重点对排烟温度高的原因进行核算分析,指出各个因素对排烟温度的影响<sup>[1]</sup>,进而提出针对性的治理措施,以提升锅炉运行效率,降低能源消耗。

## 1 空预器性能情况

### 1.1 空预器核算

取190 MW和270 MW两个工况对空预器进行热力学核算,核算结果显示,空预器利用系数降低和锅炉无组织进风量偏大。

由于大负荷时的密封风机电流达到207~230 A,且密封风机压升较低,已经偏离性能曲线工作点较远,因此无法估算出此时的风量,因此将密封风量与炉本体漏风合并统计。

### 1.2 锅炉无组织进风量分析

#### 1.2.1 无组织进风与设计比

1号炉目前无组织进风量较设计值偏高64.367 t/h,其中磨煤机冷风掺入量多8.758 t/h,炉本体漏风及入磨密封风量偏多55.609 t/h。

2号炉目前无组织进风量较设计值偏高96.419 t/h,其中磨煤机冷风掺入量较设计减少13.961 t/h,炉本体漏风及入磨密封风量偏多110.380 t/h。

#### 1.2.2 无组织进风治理的可能性分析

1. 减少磨煤机冷风掺入。由于目前磨煤机出口温度已经由85℃提升至100℃运行,已大大减少磨煤机入口冷风掺入量。实际1、2号磨煤机冷风掺入量与设计值互有增减,整体上持平,主要原因是较设计工况各个负荷下实际状况比较设计工况多运行一台磨煤机。如果在设计值的基础上减少磨煤机冷风掺入量,只能通过减少磨煤机运行台数或进一步提高磨煤机出口温度,从目前磨煤机性能和对煤粉细度的要求判断,通过减少磨运行台数减少冷风掺入率难度较大。

某电厂设计煤种,磨煤机出口温度设计为110℃。由于该电厂原煤种类较杂,原煤干燥无灰基挥发份范围为12%~50%之间,但磨煤机仍按110℃控制,制粉系统也未发生爆破事故。

因此,某电厂可考虑进一步提高磨煤机出口温度至110℃。在原煤水分7%时,可减少冷风掺入量3.071 t/h。4台磨煤机减少冷风掺入量为12.298 t/h。

2. 减少炉本体漏风。从锅炉本体漏风+磨煤机漏风量总体看,2号炉比1号炉多出54.771 t/h。假设密封风机参数大致相同,则意味2号炉本体漏风量较1号炉偏多54.771 t/h。通过8月15日189 MW工况核算,2号炉本体漏风量较1号炉多50.61 t/h,两个数据基本吻合。以上数据表明,2号炉增加炉底冷却风回收风机系统后,本体漏风可减少54.771 t/h。

3. 减少密封风量。根据某电厂密封风机运行数据，推算在 189 MW 进入磨煤机的密封风量为 54.23 t/h 和 58.4 t/h。当负荷 270 MW 时，风机工作点偏离设计值较多，因此无法估算该风量。但密封风机压头低、电流高属于典型的密封风量使用过多，主要是由于运行的磨煤机数量增加 2 台。

如果按 1 号炉 189 MW 和 270 MW 两个负荷对比，假定炉底冷却风回收风机保持炉本体漏风量 44.59 t/h 不变，则 270 MW 负荷下的磨煤机密封风量达到了 133.359-44.59=88.77 t/h，折合每台磨煤机密封风量为 17.754 t/h；与 189 MW 工况每台磨煤机密封风量 18.073 t/h (54.23/3) 基本吻合（见表 1）。

以上分析表明，目前锅炉大负荷 5 台磨煤机运行时入磨密封风总量可能达到 88.77 t/h，较设计值 14.4 t/h 多出 74.37 t/h。

### 1.3 空预器利用系数

因核算无法确定具体是哪段蓄热片存在问题，因此只能确定出平均利用系数。需要停炉后进入空预器确认。

表 2 中给出了热冷段蓄热片出问题时的利用系数的极致情况最低值。以 2 号炉数据为例，若假定 2 号炉空预器利用系数的降低完全是由冷段蓄热片的影响所致，那么 2 号炉冷段蓄热片的利用系数已接近于 0，这意味着冷段蓄热片几乎失去了换热作用。

表 1 189 MW 和 270 MW 负荷下制粉系统状态对比

项目	单位	负荷 189 MW		负荷 270 MW	
		1 号炉	2 号炉	1 号炉	2 号炉
密封风机电流	A	171	143	214	210
密封风机压升	Pa	4 000	3 150	1 000	1 000
入磨密封风量	t/h	54.23	58.40	无法估算	无法估算
设计值	t/h	14.4	14.4	14.4	14.4
磨煤机台数		3	3	5	5

表 2 1/2 号炉相同负荷下空预器利用系数对比

项目	单位	1 号炉		2 号炉	
电负荷	MW	271		270	
锅炉蒸发量	kg/h	886 000		907 000	
蓄热片利用系数（冷热段平均）	—	0.617		0.571	
假设问题出现在热段的利用系数	—	热段：0.490	冷段：0.850	热段：0.426	冷段：0.85
假设问题出现在冷段时的利用系数	—	热段：0.85	冷段：0.181	热段：0.85	冷段：0.0223

当然，在实际运行中，这种极致情况可能并不存在。但这也充分表明，目前 1、2 号炉的空预器冷热段蓄热片均存在不同程度的问题。冷段可能存在严重污染，导致换热效率大幅下降；热段则可能出现蓄热片减薄、蓄热片吹损等情况，影响了热量的有效传递。

### 1.4 本节总结

1. 经过详细的核算分析，确定影响 1、2 号炉排烟温度高的主要原因是空预器利用系数降低和锅炉无组织进风量偏大。这两个因素相互关联，共同导致了排烟温度的升高，严重影响了锅炉的运行效率。

2. 尽管减少磨煤机冷风掺入量存在一定难度，但通过参考其他电厂的运行经验，本电厂仍可考虑进一步提高磨煤机出口温度至 110 ℃。在原煤水分 7% 的条件下，4 台磨煤机可减少冷风掺入量 12.298 t/h，这将有助于降低排烟温度，提高能源利用效率。

3. 通过对密封风量的分析可知，1、2 号锅炉在 5 台磨煤机运行时，入磨密封风总量可能达到 88.77 t/h，较设计值 14.4 t/h 多出 74.37 t/h。如此大的偏差严重影响了锅炉的运行经济性和安全性，必须尽快采取措施进行优化治理。

4. 对于 2 号炉而言，增加炉底冷却风回收风机系统是减少本体漏风的有效途径，预计可减少本体漏风 54.771 t/h。这一措施对于降低排烟温度、提高锅炉运行效率具有重要意义，应尽快落实实施。

## 2 排烟温度潜力分析

### 2.1 1号炉排烟温度治理潜力

从表3中的数据分析可以看出,1号锅炉通过对空预器蓄热片进行治理,更换破损的蓄热片并进行冲洗,可使排烟温度降低10.2℃;实施密封风治理措施,最大程度减少密封风量74.37 t/h,可降低排烟温度12.7℃;在磨煤机优化方面,将磨煤机出口温度提高至110℃并减少漏风12.298 t/h,可使排烟温度降低2.0℃。

表3 1号炉烟温度治理潜力

	单位	1号炉	治理后潜力	措施说明
目前270 MW数据	℃	157.5	目前基础	基础数据
空预器蓄热片治理	℃	147.3	↓ 10.2	蓄热片更换及冲洗
密封风治理	℃	134.6	↓ 12.7	密封风最大治理减少74.37 t/h
干渣机冷却风回收	℃	已完成	↓ 0	
磨煤机优化	℃	132.6	↓ 2.0	提高磨出温工至110℃减少漏风12.298 t/h

### 2.2 2号炉排烟温度治理潜力

2号炉通过空预器蓄热片治理,可降低排烟温度11.8℃;密封风治理可降低10.1℃;新增干渣机冷却风机系统减少漏风54.77 t/h,可降低排烟温度9.6℃;磨煤机优化可降低1.9℃。

## 3 电厂排烟温度偏高治理措施

1. 空预器治理是首要任务。需对冷段蓄热片进行彻底冲洗,及时更换破损的蓄热片<sup>[2]</sup>,以恢复空预器的换热性能,降低排烟温度。在冲洗过程中,要选择合适的冲洗设备和冲洗工艺,确保冲洗效果,同时避免对蓄热片造成二次损伤。

2. 通过试验确定密封风实际风量,根据密封点的具体需求,研究并实施消减密封风的改造措施,同时运行人员要优化密封风的使用<sup>[3]</sup>,提高密封风的利用效率,减少不必要的风量消耗。可以采用先进的密封技术和设备,提高密封效果,降低密封风泄漏量。

3. 进行炉底漏风测试,确定干渣机回收风机的效果,并最大化减少炉底漏风<sup>[4]</sup>,可以采用先进的漏风检测设备,精确查找漏风点,并采取有效的封堵措施,降低漏风量。

4. 应尽快落实2号炉干渣机冷却风回收改造项目,以减少本体漏风,降低排烟温度,提高锅炉运行效率。在项目实施过程中,要严格按照设计要求进行施工,确保改造质量。

5. 考虑到提高磨煤机出口温度对减少冷风掺入量

的积极作用,可对磨煤机出口温度进行优化,将其提高至110℃。但在实施过程中,要密切关注磨煤机的运行状态和煤粉的质量,确保安全生产。

6. 在所有治理措施中,磨煤机密封风<sup>[5]</sup>的治理难度最大。需要综合考虑多方面因素,如磨煤机的运行工况、密封结构、风量需求等,制定切实可行的治理方案。可以通过技术创新和管理优化,逐步解决磨煤机密封风问题。

## 4 结束语

通过对某电厂1号炉和2号炉在不同负荷工况下的运行数据核算,明确了排烟温度偏高的核心原因是空预器利用系数降低与锅炉无组织进风量偏大。无组织进风中,密封风量超标尤为突出,5台磨煤机运行时密封风量较设计值多出74.37 t/h,炉本体漏风及磨煤机冷风掺入也加剧了问题;空预器蓄热片因污染、吹损等导致冷热段利用系数下降,换热性能受损。潜力分析显示,空预器治理、密封风优化、干渣机改造等措施可显著降低排烟温度。因此,需优先开展空预器蓄热片冲洗与更换,优化密封风使用及改造,控制炉底漏风,落实2号炉干渣机改造,并将磨煤机出口温度提高至110℃,以全面改善锅炉运行效率。

## 参考文献:

- [1] 陈福康. 火电厂锅炉排烟温度高的原因及应对措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(06): 278-280.
- [2] 杨海叶. 循环流化床锅炉排烟温度高原因分析及应对措施[J]. 山西化工, 2023, 43(09): 106-108.
- [3] 曹玮, 马新立, 侯元元, 等. 300MW机组锅炉排烟温度综合治理研究[J]. 东北电力技术, 2024, 45(04): 52-55, 59.
- [4] 杨富强, 王晓光, 史晓华, 等. 某锅炉排烟温度高原因分析及解决措施[J]. 晋控科学技术, 2022(04): 54-56, 60.
- [5] 郭为, 林邦春, 张凯峰. 电站燃煤锅炉排烟温度高原因分析及控制措施[J]. 设备管理与维修, 2020(02): 89-91.

# 建筑工程施工现场安全管理标准化策略分析

彭毅成

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 在建筑行业不断发展及工程规模日益扩大的背景下, 施工现场安全管理标准化成为保障项目顺利实施的核心要求。本文围绕建筑工程施工现场安全管理标准化策略展开分析, 探讨了标准化管理在规范施工流程、强化风险防控及统一管理标准三个方面的意义, 阐述了明确管理职责、完善操作规程、强化风险预警等具体措施, 旨在为完善创新建筑行业安全管理模式提供参考。

**关键词** 建筑工程; 施工现场; 安全管理

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.031

## 0 引言

施工现场是安全事故的高发区域, 其管理水平直接关系到工程质量、施工效率以及人员的生命安全。安全管理的标准化是降低事故风险的基本手段, 也是推动施工组织科学化的保障。项目体量增大且工序交叉复杂, 传统以经验主导的管理模式已经不能应对隐蔽多变的安全隐患, 需要以标准化体系作为支撑建立系统可控的安全管理机制。标准化策略通过规范作业流程、明确责任边界并细化执行细则, 能够有效减少人为失误, 提升施工现场整体运行的安全性。

## 1 建筑工程施工现场安全管理标准化的意义

### 1.1 有利于规范施工流程

建筑工程施工现场推行安全管理标准化有助于从源头上规范各类施工流程, 确保作业活动在既定秩序下有序推进。标准化能够明确各工序的操作要求, 避免因信息不对称或职责模糊引发的流程混乱现象, 提升整体施工组织的系统性<sup>[1]</sup>。施工环境复杂多变, 标准化流程能够提供统一的行为准则, 让各参与方在同一规范框架内进行协调配合, 降低交叉作业中的安全风险。借助标准化管理, 施工各阶段能够形成清晰可控的链条关系, 让作业步骤相互衔接、逻辑严密, 减少因工序失序导致的资源浪费, 进一步提高现场作业效率。施工单位设计规范化的流程还能让施工资源配置更加科学合理, 优化人力、物料及设备的调度体系, 保障施工过程在预定节奏下高效运行。另外, 标准化体系能够在不同项目之间实现经验沉淀, 为工程建设积累可持续发展的管理资本, 双重提升企业的标准执行力及其品牌竞争力。

### 1.2 有利于强化风险防控

建筑工程施工现场安全管理标准化作为体系化防控风险的重要手段, 能够建立统一清晰的管理标准并提升风险识别或预警的系统性。施工单位进行标准化管理能分类归档并动态更新施工现场各类潜在危险源, 让隐患治理具备可操作性, 有效减少因主观判断偏差带来的风险盲区。明确不同作业环节的安全要求或风险应对规范, 标准化体系能够将防控责任细化到具体岗位, 让安全管理工作由被动响应转变为主动预防。在施工现场实际运行中, 标准化管理能够促成各类安全检查或巡查制度的流程固化, 让风险控制形成闭环链条, 早发现且早处置安全隐患。标准化带来的透明化管理环境也有助于打破信息壁垒, 让施工现场各级管理主体能够基于统一的数据标准及时获取风险信息, 增强对安全动态变化的感知能力。与此同时, 标准化还能强化风险应急机制的系统化建设, 让突发事件响应更加迅速且处置流程更加规范, 提升施工现场整体抗风险能力。以标准为支撑的风险防控体系能构筑施工现场安全运行的基础框架并为建筑工程行业塑造高水平本质安全形态提供重要保障。

### 1.3 有利于统一管理标准

施工单位实行安全管理标准化有助于打破因项目地域差异、企业文化差异或管理者认知差异所带来的执行偏差, 建立统一规范的管理标准体系。借助标准化手段能够让安全管理要求在各个施工单位、不同施工阶段及各类作业环节之间保持高度一致, 避免因管理标准不一引发的执行混乱或安全漏洞, 提升管理体系的整体协调性。施工单位统一标准能保障各参与方在同一认知体系下开展工作并为跨项目管理、跨区域

施工提供基础支撑,让工程整体运作更具规范性<sup>[2]</sup>。标准化管理体系利用规范术语定义、操作流程等细节环节,能让施工现场各层级人员在理解或反馈过程中形成统一的行为模式,减少沟通成本且提升管理效率。建立统一标准还能促使管理制度在施工全过程中具备连续性,避免随人员流动或环境变化而出现管理断层,保障各项安全管理活动有序持续推进。同时,统一的标准体系也能为工程监管、评估或改进提供量化依据,促进施工现场管理由经验性向科学性转型,推动建筑行业整体安全管理水平向规范化方向持续迈进。

## 2 建筑工程施工现场安全管理标准化策略

### 2.1 明确管理职责,压实安全责任

在施工现场推行安全管理标准化,明确各岗位的管理职责是建立责任体系的基础。清晰的责任划分能够有效防止管理空白,促使各类安全事项有人管、管得了、管得好<sup>[3]</sup>。每一项安全管理任务都需对应具体责任人并确保责任贯穿施工全过程,以形成闭环式管理模式。明确管理职责有助于提升人员的责任意识,让现场安全防控形成系统合力。落实管理责任也能为预防事故、整改问题等提供清晰依据,有效提升施工现场整体风险防控的针对性,推动安全管理由表层应付转变为深层治理。压实安全责任体现在明确的职责分配,还需要将责任落实到具体施工活动的全过程管理中。

例如:在高空作业区域内,需要由专职安全员每日专项检查脚手架搭设、防护网铺设等关键设施,并由作业班组长逐项确认人员安全帽佩戴、登高工具使用等,施工负责人则要根据风险辨识清单实施巡查核验,形成多层次、全覆盖的监督体系。塔吊、大型机械设备启用前,操作手需完成设备自检再由设备管理员进行复检,安全员要对作业环境进行风险评估,责任链条纵向到底,横向到边,不留管理盲区。在易发生触电、坍塌等事故风险的工种作业中,管理人员需按照分工执行分段验收、风险复核及事故预案演练,每一环节都要记录在册,责任到人,隐患排查环节需各自承担对应职责,避免因多头管理或推诿造成隐患积压。同时,应建立动态责任反馈机制,在周例会上由各责任人汇报本周安全履职情况并就发现问题提出整改建议,借助集体会商方式提升管理决策的科学性。施工单位可借助信息化平台数据化呈现责任落实情况,实现责任闭环监管。遇到突发事件时报告事故、处置现场、上报信息等均需按责任体系快速启动,确保各环节责任明确、衔接紧密。施工单位将管理职责具体

化并融入日常作业流程,安全管理从被动响应转向主动控制,能够提高施工组织的安全保障水平并促使责任意识内化为施工现场的自发行为规范。

### 2.2 完善操作规程,规范作业流程

操作规程的标准化能够将安全要求具体化,让每一项作业活动都有明确的执行路径及控制节点,规范化的操作流程可以减少个体差异对作业安全性的影响,还能利用标准动作或标准步骤提高作业的稳定性。在复杂施工环境中完善操作规程有助于统一作业标准,防止因个人经验或判断误差引发安全事故,从整体上提高施工现场作业管理的科学性,进一步夯实施工现场本质安全水平。作业流程标准化需要将每一道工序细化至操作细节,精准匹配相应的安全管理要求。

例如:高处作业流程要求在进场前检查防护用品佩戴、确认作业平台稳定性并核查作业人员技能,作业中需严格按照步步确认的制度逐级完成每一个操作环节,离场时需执行安全检查及区域清理。安装电气作业需分阶段进行电源隔离、设备接地、绝缘检测并在接电前实施风险复核,确保通电作业流程闭环可控。深基坑施工环节需要施工单位将开挖、支护等工序纳入统一作业标准并将异常工况处置措施同步固化至流程之中,保证施工动态调整时作业安全性不受影响。塔吊作业中操作流程要明确设备点检、指挥信号确认等关键步骤,由操作手、信号指挥员、安全员按作业规程协同执行,确保吊装作业安全高效。脚手架搭设过程要求按照规范完成立杆、剪刀撑等安装,搭设完成后需由专职人员逐项验收,每一个流程节点都要留存影像及文字记录,做到责任可追溯。另外,施工单位应制定分专业、分岗位的标准化操作手册,借助集中培训与实操演练相结合的方式提高人员对操作规程的掌握程度。作业中引入现场督导检查制度,将关键工序的执行情况实时记录并反馈至管理系统,强化流程刚性约束,减少人为随意性操作带来的安全隐患。施工单位对作业流程进行精细化设计且将安全管理要求贯穿至施工操作的每一个细节,能够有效提升作业的规范性,也为后续安全检查、隐患排查等提供科学可操作的依据,让施工现场形成闭环管理的安全运行体系。

### 2.3 强化风险预警,提升防控能力

施工单位建立系统化的风险识别、分析及响应机制可以在隐患演变为事故前及时干预,减少安全事件发生的概率,实施过程中应结合施工周期各阶段特点,动态调整预警指标及响应策略,确保全过程监测重点

区域、重点工序以及特殊时段<sup>[4]</sup>。同步引入信息技术手段能够提升数据处理的效率,以数据支撑风险识别的准确性,确保预警信息快速传递到责任层级。标准化的风险预警体系能够提高现场安全管理的科学性,还能在潜在危险初露端倪时迅速触发联动机制,为有效防控提供决策依据,推动施工安全管理从事后处置向事前预防转型,提升管理模式的效能。

在具体实施中,管理团队可以制定分级风险预警标准,对不同级别的安全隐患设置清晰的响应程序及处置要求。施工现场需要设置实时监测点,利用传感器收集支护结构位移、边坡稳定性、吊装作业负载等关键数据,系统会自动比对设定阈值,一旦异常即刻发出预警。值守人员要根据预警等级迅速启动核查流程,确认风险后按照既定预案指挥作业调整或暂停作业。针对深基坑工程,预警系统会关注地表沉降数据且将周边建构物的微变形纳入监测范围,确保综合掌握环境变化趋势。由于夜间施工期间能见度降低、人员疲劳易发事故,管理团队要加强夜间特定作业点的视频巡检频率并同步利用穿戴式设备监控作业人员状态,出现异常生理指标时及时干预。施工单位还需定期组织专项演练,让现场各岗位熟悉预警触发后的应急处置流程,确保预警机制不只停留在纸面上,而能真正落地执行。系统日志应设置自检或备份功能,避免数据丢失造成预警中断。施工单位应建立跨岗位信息联动机制,将预警信号同步至各层级管理端口,让项目经理、安全总监及关键岗位第一时间掌握异常情况并可远程参与应急指挥。对预警事件应实行闭环管理,从识别到处置全程留痕,便于划分责任。同时应将各类风险源进行动态建档,按周期更新设备状态,保证系统反应始终基于最新数据。通过一系列举措能够提升施工现场整体防控水平,有效提高事故隐患发现率及处置效率,为项目安全顺利推进打下基础。

#### 2.4 优化现场布控,消除安全盲区

施工现场结构复杂且作业密集,容易形成视野死角或管理空白,科学的布控策略应以空间布局为基础,结合作业类型及设备运行特点制定全域可控的布控方案<sup>[5]</sup>。管理人员需要充分利用立体空间进行分区设控,借助划分封闭区域或高风险区域实现差异化布控要求。信息化手段可辅助动态分析人机作业路径且调整布控密度,施工单位应建立“静态布控+动态巡视”的联合机制,将布控设计从图纸层面延伸至施工全过程,防止因管理盲区导致安全事故发生。

以大型多工种协同施工现场为例,现场指挥人员可依据区域分工划定操作区、材料堆放区及临时通行

路线,对高空作业平台及吊装作业区实施独立围挡。施工单位在布控设计初期需借助实地测绘确定高风险位置并设定重点监管节点,结合高清监控或红外感应装置全天候动态跟踪,确保重点区域随时可视。针对设备密集运行区域,管理人员要将布控焦点放在行车路径、吊装半径或人员密集度变化上,提前设定动态缓冲带以预防临时交叉作业引发的碰撞。在交通交汇频繁的施工主通道需设置统一流线标识及人车分流围栏,借助限定通行方向或单向路径降低混行风险。另外,布控设计还延伸至临建设施,在生活区或办公区设置独立出入口并由安全员定时巡查,形成定点监管及随机抽查结合的布控闭环机制。临边防护区域要采取模块化栏杆加警示灯双重配置,夜间施工配备移动照明或反光材料,避免因光线不足造成视觉误判。对于垂直运输通道或脚手架集中区,施工单位还需布设结构稳定性监测点,并由专人每日核查结构状态,形成“人防+技防”的联动机制。借助这些布控措施,作业人员能够在清晰指引或实地隔离下开展作业,减少误入高危区域的可能性,提升整体施工环境的秩序性。优化布控策略体现在合理利用空间,更在于动态调整的能力,保证施工全过程风险管理无盲区。

### 3 结束语

建筑工程施工现场安全管理的标准化建设不只关乎单一项目的顺利推进,更是提升行业整体安全水平及管理效能的关键所在。深化应用标准化策略能使安全管理由经验型转变为数据驱动型,由被动应对演进为主动防控,推动施工现场实现精细化、智能化的管理转型。未来,施工单位需进一步结合新兴技术及管理创新,持续优化标准化体系的科学性,以制度之力、技术之能以及管理之效共同护航建筑工程的高质量发展。

#### 参考文献:

- [1] 张耿华. 建筑工程施工管理中的问题及解决策略探索[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(02): 151-153.
- [2] 赵栋. 装配式建筑文明施工安全管理策略研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(06): 151-153.
- [3] 李兆冬. 建筑工程管理的影响因素和解决策略分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(06): 109-111.
- [4] 李青旺. 分析预警管理在建筑工程施工安全管理中的运用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(07): 28-30.
- [5] 郑耀, 李军, 马辉. 建筑工程施工安全管理面临的困境及对策研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(04): 173-176.

# 市政工程道路中排水管道施工技术要点探析

王 政

(中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384)

**摘 要** 随着我国城市建设的不断加快, 市政道路工程规模也日益扩大, 对排水管道施工的要求越来越高。在市政道路排水管道施工中, 良好的排水管道施工技术与工艺能确保雨水、污水及时排放, 避免积水对道路桥梁结构造成损害, 从而延长道路桥梁的使用寿命。因此, 本文深入探讨了市政道路排水管道施工工艺及施工技术要点, 以期能够为提升排水管道施工的标准化水平提供借鉴, 进而保证城市基础设施安全运行。

**关键词** 市政工程; 道路排水管道; 沟槽开挖; 管道安装; 闭水试验

中图分类号: U417

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.032

## 0 引言

市政工程道路排水管道施工是城市基础设施建设的重要组成部分, 其在雨水排放中发挥着不可替代的作用, 是保障交通正常运行、城市稳定运转的关键支撑力量。若排水管道施工技术应用不规范, 管理不到位, 会严重降低排水管道施工质量, 引发渗漏水等现象, 严重影响排水管道系统稳定运行及雨污排放效率。因此, 对市政道路排水管道施工技术要点进行深入研究, 是解决市政道路排水工程施工难点、提高施工效率、保证工程质量的关键。

## 1 市政道路给排水管道施工价值

市政道路给排水管道的施工关系到人们的日常生活, 既能够确保生活、生产用水, 也能促进水循环, 推动水资源的再次利用。在城市水循环中, 给排水管道为重要组成部分。在社会不断发展的过程中, 人们在生活水平提高的同时, 环保意识也明显增强, 十分关注资源的再次利用问题。在城市化进程中, 解决水资源问题, 促进水资源的利用较为重要。通过给排水管道施工的实施, 能够在较大程度上保证水资源再利用效果, 推动生态系统正常运行, 并为居民构建和谐城市环境。此外, 通过给排水管道施工, 能够将生产过程中产生的废水与污水及时处理, 并且加强对降水的收集<sup>[1]</sup>。

## 2 市政工程道路中排水管道施工技术要点

### 2.1 勘察与设计

市政道路排水管道施工前, 要开展充分的现场勘察和严谨的工程设计。现场勘察要对施工场地的地形地貌、地质结构、水文条件等进行全面调查。在设计

阶段, 应充分考虑排水系统的功能定位、建设标准和使用需求, 合理确定管道的走向、断面、材质、埋深等关键参数。设计方案应经过反复校核和优化, 确保其科学性、合理性和可行性。同时, 设计单位还应与施工、监理等相关方进行充分沟通, 在设计阶段解决可能存在的施工难点。

### 2.2 沟槽开挖与支护

排水沟开挖是市政道路排水工程中的一个重要环节。在开挖前, 要根据工程地质情况和管线布置情况, 确定合理的开挖方案。基坑开挖时, 要注意保护原状土, 防止扰动、浸水, 保证其承载能力满足设计要求。机械开挖时, 要控制沟深, 分层挖深, 槽底留有一定厚度的土层, 人工开挖至设计标高、平整。对于软土或其它不稳定土层, 为保证沟的稳定, 需要采用横排撑板支护等支护措施。在基坑开挖过程中, 要加强对边坡稳定性的监测, 避免因边坡失稳而引发的安全事故, 同时, 应合理安排土方的堆放、运输, 避免影响周边的交通及环境<sup>[2]</sup>。

### 2.3 管道安装与连接

在市政道路排水工程中, 管线的安装和连接是最重要的一环。安装前, 要对管线的地基进行验收, 以保证地基的质量满足设计要求。管线安装时, 要严格控制管线的中心位置、标高及坡度, 保证管线的准确和稳定。对承插式管道, 要严格控制热熔接温度、接点时间、接点电流, 确保接口处的干密性。对不同材质的钢管、聚乙烯管等管道, 要选择合适的连接方法及密封材料, 以保证连接牢固, 密封可靠。

在管道安装过程中, 要加强对施工质量的监测与检测, 及时发现和处理出现的质量问题, 同时, 要合

理安排施工进度, 加强各工序的衔接, 保证施工的高效有序。

#### 2.4 闭水试验

在进行闭水试验时, 要严格控制试验压力和持续时间, 通常采用自下而上的分段试压方式, 逐步加压至设计值。在保压过程中, 密切关注管道接口和变形情况。试验合格后, 进行管道内部的清洗和检测, 全面评估管道内部状况。通过闭水试验, 及时发现和解决管道安装中的隐蔽问题, 有效提升工程质量和可靠性。同时, 完备的试验资料也是工程验收和移交的重要依据。因此, 施工单位要高度重视闭水试验工作, 严格遵守试验规程和操作规范, 确保试验过程科学、结果准确、数据完整。

#### 2.5 回填

闭水试验通过后, 施工单位应及时组织管沟回填, 恢复道路的通行功能。首先, 根据设计要求和管材特性, 选择级配合理、强度适宜的填料, 一般采用砂、砾石或水泥稳定碎石等。在回填前, 先在管道 2 侧进行初步填筑, 用人工或小型机械轻轻夯实, 防止填料直接冲击管道。然后再采用分层填筑、分段夯实的方式进行主体回填, 每层填筑厚度不宜超过 30 cm。在夯填过程中, 避开管道接口部位, 防止剧烈振动导致接口错位或损坏。同时, 做好回填土的含水量控制, 既要防止填土过干影响压实度, 又要避免含水量过高产生湿陷变形, 以确保管沟回填密实均匀、无空洞、无松动。在回填结束后, 对路面进行平整和压实, 恢复路面标高和横坡, 为道路通车创造条件, 确保城市道路尽快恢复通行, 方便市民群众出行。

#### 2.6 检查井与回填施工

检查井作为排水管网的重要部分, 不仅可方便管道的维修, 还可防止管道堵塞、污水溢。检查井砌筑时, 必须用标准砖、水泥砂浆砌筑, 首先要清理、平整井底, 保证其平面度及承载力满足设计要求; 然后按设计图砌筑, 保证井壁竖直, 砂浆饱满, 砖缝一致, 如某工程采用 M10 水泥浆砌筑, 分层错缝砌筑, 整体稳定、耐久。

### 3 市政工程道路排水管道常见的施工问题

#### 3.1 管道渗漏

市政工程道路排水管道最为常见的当属渗漏问题, 尤其在排水管道使用期间, 管道渗漏易导致路面积水, 甚至诱发不均匀沉降后果, 故值得积极摸索引起管道渗漏问题的具体成因, 指引施工人员在管道施工活动中合理把握施工重点。例如: 在某工程实例中, 发现安

装后排水管道受检查井漏水因素的影响出现渗漏状况, 究其根本原因在于该工程检查井未依据“2 mm+5 mm 到 7 mm”的第一层和第二层抹浆厚度标准进行施工, 造成排水管道与检查井连接部位存在漏点<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 管道不顺

市政工程道路排水管道在实际施工环节可能因管道不顺问题影响道路运营效果。其一, 该问题可能与标高控制不到位有关, 即施工人员在开挖施工中出现超挖或欠挖行为; 其二, 现场道路位于陡峭坡道或者属于狭窄沟槽, 此时容易因外在杂质(碎石, 泥土等)误入沟槽引起不顺现象。

#### 3.3 管道错位

排水管道错位安装, 不仅会破坏管道实用功能, 还会缩短管道的使用年限。而此类问题的形成, 多考虑与现场地质条件调研不充分、测量误差偏大、图纸不符有关。对此, 施工人员应对排水管道进行阶段性位置校对处理, 通过必要性修复方法, 提升管道施工规范性。

#### 3.4 材料质量问题

在排水管道施工过程中, 材料质量问题常因采购、检验、存储和运输环节的不规范而显现。材料采购不规范可能源于缺乏严格的供应商资质审核和材料检验, 导致所购材料存在隐性缺陷, 如强度不足或耐腐蚀性差。若未对材料进行必要的质量检测和试验, 也可能使不符合标准的材料进入施工现场。此外, 采购过程中的价格竞争可能选择了质量不高的材料, 进一步增加了工程的风险。材料检验不到位则表现为检验程序不规范、设备技术不合适或检验人员水平不足, 导致无法准确评估材料的性能和质量。这可能因抽检频率不足或忽视长期性能测试, 而使质量隐患材料被使用。材料存储不当则指在存放过程中未按规范保护材料, 导致其受潮、变质或损坏, 如堆放方式不当或管理混乱, 使材料被误用。材料运输不规范可能表现为缺乏必要的保护措施, 导致材料在运输过程中受到损坏或污染, 如包装不当或运输工具选择不当。以上问题不仅直接影响施工质量, 还可能增加维护和修复成本, 影响工程的长期稳定性和安全性。

### 4 市政工程道路排水管道施工质量的优化方法

#### 4.1 管道渗漏防治

要从基础处理入手抓起。在管道铺设前, 应对基础进行充分的夯实和整平, 确保其具备足够的承载力和稳定性。对于地质条件较差的区域, 如软土地基, 需采取换填、加固等特殊处理措施, 以提高基础的抗

渗性能,避免出现松散、不均匀等现象,为管道铺设提供坚实的基础。在管材采购时,应选择质量可靠、信誉良好的供应商,并严格检验管材的质量证明文件。在管道接口处理时,应选用合适的密封材料和工艺,如橡胶圈密封、热熔连接等,确保接口密封严密、无渗漏,避免出现接口错位、密封不严等问题。在施工过程中,应定期对管道系统进行渗漏检测,及时发现并处理潜在的渗漏隐患。

#### 4.2 重视开展有效现场勘察

在市政道路工程中,给排水管道施工至关重要,关系到居民正常用水、废水、污水排放以及道路排水工作。在正式进行施工前,应做好相关准备工作,保证施工的合理性,避免施工存在过多隐患,其中尤其需要重视的是现场勘察。在进行现场勘察过程中,应全面了解现场情况,掌握现场地质、水文等,合理设计施工方案。同时,在调查资料方面,应具有完整性,进而使施工设计在实施时能够获得合理依据。此外,在测量数据时,应保证数据的精准性,确保各方面在计算时的精确性,其中包括管道直径、铺设距离等<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 提升施工操作水平

提升施工操作水平需从人员能力、过程管控及标准执行多维度推进。施工单位应通过系统化的管理和培训机制提升施工队伍专业素质,定期组织施工人员参与专业技术培训与学习交流,引入专家现场指导以强化其对施工工艺、规范的熟悉度及先进技术的掌握能力;建立健全施工过程管理制度,明确各工序施工标准与操作规范,加强现场管理和质量监督,要求施工人员严格依照施工图纸和方案施工并做好记录以保障过程可追溯性,同时强化工序间协调衔接以实现质量与进度的平衡;制定统一的施工工艺和质量验收标准,推行标准化施工模式,针对管道接口处理、沟槽回填等关键工序及隐蔽工程实施全过程质量监控,通过规范化操作确保施工质量的一致性和稳定性。

#### 4.4 加强材料质量管理

加强材料质量管理需在采购、检验、储存全流程实施精细化管理,在采购环节应建立健全材料采购管理制度,通过对供应商资质的严格审核筛选出信誉良好、质量可靠的合作方,以详细的采购合同明确材料质量标准 and 验收要求,并通过市场调研对比分析不同供应商的材料性能与价格,实现优质材料的采购;在检验环节需构建完善的材料检验检测体系,依据相关标准和规范对进场管材、配件进行严格的抽样检测和验收,对经检验不合格的材料执行严格的退场处理机

制,杜绝不合格材料用于工程建设;在储存环节需合理选择干燥、通风、防潮、防晒的储存场地,对不同类型材料进行分类存放并设置清晰标识,同时建立定期检查维护制度,通过常态化的管理措施保障材料性能的稳定性,以此形成覆盖材料全生命周期的质量保障机制。

#### 4.5 强化环境管理

应对环境因素影响需在地质条件与气象条件两方面实施针对性措施,施工前应委托专业地质勘察单位对施工现场地质条件进行全面细致勘察,依据勘察结果制定科学合理的地基处理方案,针对软土地基、湿陷性黄土等不良地质状况,采用换填、夯实、排水等处理手段以提升地基承载力与稳定性,保障管道基础的安全可靠。同时需根据施工现场气象特点制定相应的应对方案,雨季施工时需强化沟槽排水与边坡支护,通过设置排水设施及时排出沟槽积水,避免边坡塌方及槽底土壤因浸泡降低承载力;冬季施工时则需对管道接口材料及混凝土等采取保温措施,保障其在低温环境下能够正常固化凝结,以此减少环境因素对施工质量的不利影响<sup>[5]</sup>。

### 5 结束语

道路排水管道的施工在市政工程项目建设中属于隐蔽性工程,其施工质量会给城市居民日常通行以及排水效果造成长远的影响。因此,施工单位应有效提高其相关施工技术水平以及质量建设水平,为城市道路排水管道有效实现排水成效、提高居民生活质量提供重要保障,进而促进我国城市现代化更快更好地发展。未来,随着科学技术的进步和施工工艺的不断创新,市政道路排水系统将以更先进、更高效、更可靠的方式进行施工,为城市发展注入新的活力。

#### 参考文献:

- [1] 陶杰.市政道路排水管道施工技术探究[J].居业,2022(12):10-12.
- [2] 叶炳焯.管道施工技术在市政道路排水中的应用分析[J].运输经理世界,2022(33):19-21.
- [3] 刘海南,王权,杨硕,等.市政道路排水管道施工技术[J].江西建材,2022(06):252-253,256.
- [4] 王云天,张金光.市政道路排水工程中的污水管顶管施工工序及技术[J].工程建设与设计,2022(06):134-136.
- [5] 孟令军.市政道路排水工程建设中的污水管顶管施工技术[J].工程建设与设计,2020(22):60-61.

# 土石混填路基施工技术在公路工程中的应用

宋沁洛

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 在公路工程建设过程中, 路基作为道路结构的核心结构层, 其承载能力直接影响路面使用寿命与行车安全。合理的填筑方式能够提升整体结构强度, 并降低因地质条件复杂或施工不当带来的工程风险。基于此, 本文探讨了公路工程中土石混填路基施工技术的原则, 分析了公路工程中土石混填路基施工技术的应用策略, 以期对土石混填路基施工提供有益参考。

**关键词** 公路工程; 土石混填; 路基施工

**中图分类号**: U415

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.033

## 0 引言

土石混填路基凭借其良好的力学性能与经济性, 已成为公路工程中广泛应用的施工技术。该技术能够在不同地形条件下提供良好的承载能力。施工人员采用科学合理的施工方法可以减少路基变形, 延长道路使用寿命, 保证公路的耐久性。然而, 传统的纯土填筑或纯石填筑容易导致沉降不均等问题, 影响施工质量, 而土石混填能够充分发挥两种材料的优势, 增强整体稳定性。

## 1 公路工程中土石混填路基施工技术的原则

### 1.1 选材合理性原则

合理选材是保证施工质量的前提, 施工人员必须进行科学筛选, 确保所用材料在力学性能、耐久性、颗粒级配等方面符合施工要求。(1) 选择材料时要考虑其强度、密实度和稳定性, 避免因材料性能不足导致施工过程中出现不均匀沉降或后期使用阶段产生裂缝、松散等问题;(2) 优先使用具有良好工程特性的填料, 保证土石组合后的整体性能满足施工需求;(3) 要求严格控制填料的粒径范围, 确保颗粒之间的紧密接触, 提高填筑后的密实度。填料的粒径需要与压实设备匹配, 防止因颗粒过大而影响碾压效果, 导致路基内部形成空隙<sup>[1]</sup>。填料的粒径分布应符合合理级配标准, 使大小颗粒相互填充, 提高填层的整体均匀性和抗剪强度。在土石混填过程中, 不同类型材料的混合比例应科学合理, 保证土体具有足够的黏结性, 使碎石形成稳定的嵌锁结构, 增强整体承载能力。填筑区域的地质条件也对选材产生重要影响, 针对软弱土层或高含水量区域, 应避免使用易风化、吸水性强或黏性过大的土料, 以防止雨水侵蚀或冻融循环作用

导致的结构破坏。选材合理性原则强调填料的耐久性, 保证在长期荷载作用下不发生显著变形或强度衰减。施工区域的气候环境决定了填料的适应性, 寒冷地区需选用抗冻性较强的填料, 以降低冻胀对路基稳定性的影响, 高温或降水较多的区域应使用抗风化、耐冲刷的材料, 避免因外界环境变化导致结构性能下降。

### 1.2 分层填筑原则

施工人员在填筑时, 需要遵循严格的层次控制要求, 确保每一层的厚度均匀, 避免因填筑不当导致沉降不均、强度不足或变形问题。在施工过程中, 每层材料的厚度应符合设计标准, 填筑时保证材料分布均匀, 避免出现局部区域堆积过多或填料稀疏的情况。填筑时应保证每层材料的性质稳定, 使填料在压实后形成密实、均匀的整体结构, 提高整体承载能力。填筑过程中应严格控制每层的标高, 使各层之间衔接紧密, 避免出现分界不清的情况, 确保结构稳定。填筑过程中应采取合适的填料组合, 使不同粒径的材料合理搭配, 减少空隙, 增加层间结合力, 提高整体强度。分层填筑原则要求施工过程中严格执行填筑工艺, 使每一层填料的粒径、含水量和密实度符合要求。填筑过程中需要采用合理的设备进行碾压, 使填料充分密实, 避免因填筑松散导致的沉降问题。填筑过程中应严格控制填筑速度, 使每层填筑达到最佳密实度, 避免因填筑过快导致压实不足或因填筑过慢影响施工进度。填筑过程中应根据填料性质选择适合的施工方法, 使不同类型的填料在填筑过程中保持良好的分布状态, 提高整体结构的稳定性。

### 1.3 压实控制原则

在施工过程中, 施工人员需要控制每层填料的厚度, 使填料在碾压过程中达到最佳密实状态, 避免因

填料层过厚导致压实不充分,影响整体结构的承载能力。压实时需要选择合适的机械设备,使不同类型的填料在碾压过程中保持均匀密实,提高整体填筑质量。压实过程中需要控制压实能量,使填料在碾压过程中受力均匀,提高整体结构的均匀性和密实度。压实控制原则要求施工过程中严格执行压实参数,使填料在碾压过程中保持最佳密实状态,避免因压实不足导致结构松散或沉降问题。施工过程中需要合理控制填料的含水量,使填料在压实过程中达到最佳状态,提高整体密实度和承载能力。施工过程中需要合理设置碾压遍数,使填料在碾压过程中逐层压实,避免因碾压次数不足导致填筑密实度下降,影响整体施工质量。压实过程中需要根据填料性质选择合理的碾压方式,使填料在碾压过程中受力均匀,提高整体结构的稳定性。施工过程中需要合理安排施工顺序,使填料在压实过程中保持最佳状态,提高整体施工质量<sup>[2]</sup>。压实过程中需要严格控制填料的级配,使填料在碾压过程中保持均匀分布,提高整体密实度。压实控制原则要求施工过程中严格执行质量检测,使填料在压实后达到设计标准,提高整体安全性。

## 2 公路工程中土石混填路基施工技术的应用策略

### 2.1 优化施工工艺流程

在施工前,施工人员必须对施工区域的地质条件、土石混填的特性以及施工的各项需求进行全面调查。在此基础上需制定详细的施工方案,并根据实际情况合理安排施工流程,确保各个环节衔接顺畅,避免出现因环节断裂导致的效率低下。同时,要对路基的土壤进行严格筛选,确保所使用的填料符合施工标准。填料的选择应根据不同层次的施工要求进行合理搭配,土石混填的粒径、含水量等都需要严格控制,确保每层填料达到最佳的工作状态,为后续施工打下坚实的基础。

施工人员应根据不同的路基要求安排合理的施工顺序,优化施工流程,提高施工效率。在填料施工过程中,施工人员需要精确控制填料的摊铺厚度,摊铺工序要求平整、均匀,不容许出现局部堆积或者厚薄不均的现象,摊铺工艺的精确性对后续碾压密实度的达到至关重要。压实作业是确保路基稳定性和承载力的关键环节。施工人员应根据填料的特性,选择适合的压实设备,并严格控制压实次数,避免因压实不足造成路基不稳定。压实作业完成后,施工人员还需要及时检查密实度,确保各层填料的压实度达到设计要求,若发现压实不到位的情况应及时调整施工工艺或增加压实次数。

### 2.2 完善排水系统,控制含水量

排水系统的设计应考虑到水流的自然走向及施工区域的实际情况,施工人员要确保排水管道、排水沟以及渗水层的合理布置,保证水分能够及时疏导,不会对路基造成过多的水压,防止水分滞留引发的沉降或裂缝问题<sup>[3]</sup>。在实际施工中,需要根据施工进度,灵活调整排水系统的建设,确保排水系统能够及时应对暴雨或其他恶劣天气带来的水分问题。排水系统的完善不仅仅是物理结构的建设,还需要注重系统的长期有效性,通过定期检查,确保排水系统在整个工程周期内都能保持正常功能。施工人员要准确掌握不同土壤以及石料的含水特性,控制每层土石混填的含水量,以确保填料在摊铺和压实过程中的最佳工作状态。

施工人员需要借助先进的测量仪器,实时监测填料的含水量,确保每层土石混填材料的含水量在合理范围内,避免过多水分导致填料压实困难,或水分过少造成填料过于松散。施工人员应根据天气变化灵活调整施工方案,在干旱季节,需要适当增加水分以保持土壤的湿润度,而在湿润天气时,需要采取有效的措施控制水分的过量积累,避免施工过程中出现因过量水分导致的软化现象。施工人员应配备排水设备,确保在任何阶段,水分的控制都能得到有效执行。在土石混填施工过程中,施工人员还需根据不同层次的填筑要求,科学合理地调配材料。对于不同土质或不同填料,应依据其特性调整施工工艺,以保证每一层填料的密实度和强度符合设计要求。

### 2.3 动态调整填筑方案

施工人员需要通过精确地测量,了解土壤特性和填料的组成,确保选用合适的填料和施工方法<sup>[4]</sup>。同时,根据项目规模和施工周期对填筑工作进行详细的时间安排,确保每一阶段的施工有条不紊地进行。施工人员要考虑填料的合理性,对施工中的环境因素进行全面评估,保证填筑过程中能够应对突发状况。根据这些基础数据,可以制定初步的填筑方案。在实际施工过程中,施工人员要根据现场的变化及时调整填筑方案。如果施工区域的土壤条件发生变化,或遇到无法预见的天气因素,需要迅速根据实际情况对填料种类、摊铺厚度、压实次数等进行动态调整。

对于土质较松软或存在较高地下水位的区域,可以通过增加垫层的厚度或选择适合的填料进行优化,确保每一层的填料能够在规定的密实度下得到有效压实。在施工过程中,气候条件对施工质量的影响也不容忽视,施工人员要根据降水量或气温的变化适时调整施工方案,避免过湿或过干的填料影响施工质量。

施工人员应对施工中的任何异常现象进行快速响应,确保施工质量不会受到影响。如果发现某一层的填料密实度不足,施工人员应根据情况调整机械设备的使用,增大碾压强度或增加碾压次数,确保路基的稳定性。在遇到复杂地质条件或施工环境不稳定时,可以根据工程需求调整填料的摊铺厚度,从而在最大程度上减少施工中的潜在风险。

#### 2.4 设置合理过渡区

过渡区的设置对于连接不同类型的土壤或岩层至关重要,施工人员必须根据不同的土层特性,合理调整过渡区的设计。在施工前,施工人员要对地质条件进行全面勘查,了解土壤的密实度、含水量以及地下水位等因素,结合这些数据对过渡区的设置进行详细规划。合理的过渡区设计能够有效分散路基的荷载,减少不同填料之间的差异性,进而确保整个路基的稳定性。在实际施工中需要根据设计要求,按照合理的顺序进行过渡区的施工,确保过渡区能够按照预期功能发挥作用。过渡区的施工通常包括不同土层的平稳过渡和不同施工阶段的协调配合。施工人员应特别注意过渡区填土的分层施工,确保每一层的填土都能达到设计密实度,并保证填土的均匀性。

在设置过渡区时,施工人员应根据不同区域的填土情况,适当调整填土的摊铺厚度,并通过机械碾压确保每层填土都能够得到充分压实,避免由于压实不充分导致的沉降问题。施工人员要注意控制过渡区的压实度,使之达到设计要求,以避免不同土层之间的粘结不良,导致路基的稳定性受到影响。在过渡区施工过程中,施工人员还需要确保不同土层的填料质量得到保证。施工人员应当选择符合设计要求的土石混合材料,确保过渡区的填土具有良好的粘结性和稳定性。如果施工过程中发现填土的质量不符合要求,施工人员要及时调整材料的使用,确保填土能够有效承受上方路基的荷载。施工人员还需要对每一层填土进行严格检测,确保填料的压实度、湿度等指标符合设计要求。此外,施工人员还应加强对过渡区施工过程中可能出现的裂缝或沉降问题的监测,及时发现并解决问题,防止不均匀沉降影响路基的稳定性。

#### 2.5 优化机械组合施工

合理组合机械设备并科学调度,可以最大限度地减少施工过程中对环境的负面影响,降低环境污染的风险<sup>[5]</sup>。施工人员需要根据填料的种类和层次安排机械设备的使用。在填筑过程中,可以使用自卸车进行材料运输,确保填料能够快速准确地运送至施工现场,同时配合其他设备如平地机进行摊铺作业。为了确保

土石混填的均匀性,还应使用压路机对每层填土进行碾压。施工人员在选择压路机时,应根据填土的种类和厚度选择不同型号的压路机,确保每一层填土都能达到设计要求的密实度。如果遇到难度较大的地形或特殊的土质,施工人员还可以灵活选用振动压路机或钢轮压路机进行密实处理,从而提高填筑层的稳定性和承载能力。

在不同施工阶段,需要合理配置机械设备,避免出现设备冗余或不足的情况。在路基施工初期,可以增加土方开挖设备,确保土方工作顺利进行。而在填筑过程中,需要增加摊铺和压实设备的使用,确保每层填土能够充分压实,达到设计的承载标准。在施工过程中,施工人员应密切关注设备的运行情况,确保机械设备的正常运转,并在发现问题时及时进行维修或更换设备,避免因设备故障影响施工进度。不同机械设备之间的作业节奏需要达到一定的协调性,施工人员应根据每台设备的工作特点,合理安排设备的作业顺序。例如:施工人员还要注重机械设备的保养,确保设备在整个施工过程中都能够保持良好的工作状态。为了减少机械故障带来的停机时间,应定期对设备进行检查,及时更换易损件,保证设备的工作效率。

### 3 结束语

土石混填路基施工技术作为现代公路工程中一种高效且环境友好的施工方法,已在实际工程中展现出良好的应用前景和发展潜力,其在公路建设中具有重要作用。施工人员将土体与石料合理配比混合使用,可以有效改善地基的承载能力和抗压强度,提高施工效率和资源利用率。因此,施工人员要充分利用当地材料,降低施工成本,提高路基的整体稳定性。未来,随着施工技术的不断发展,土石混填路基技术将在更多复杂地形环境中得到应用,为公路建设提供更加可靠的支撑。

#### 参考文献:

- [1] 李建.公路工程高填方段土石混填路基施工的稳定性的探讨[J].交通世界,2024(36):63-65.
- [2] 刘执芳.山区高速公路土石混填路基施工及其沉降模拟分析[J].交通世界,2024(09):52-54.
- [3] 陈亮.公路施工中的土石混填路基施工技术分析[J].运输经理世界,2023(26):22-24.
- [4] 王雄.公路施工中的土石混填路基施工技术分析[J].运输经理世界,2022(33):53-55.
- [5] 张瑞杰.研究公路施工中的土石混填路基施工技术[J].黑龙江交通科技,2022,45(06):68-69.

# 农田水利工程施工技术的难点及质量控制探析

张旭

(东明县水务局, 山东 菏泽 274599)

**摘要** 农田水利工程是保障农业发展的重要基础, 对于农业生产工作具有关键作用, 能够有效保障农业生产活动, 避免外部因素剧变而出现严重减产的情况, 同时有利于实现水资源利用最大化, 促进农业生态环境不断优化。本文主要研究了农田水利工程施工技术, 并提出质量控制策略, 旨在为提升农田水利工程施工质量提供借鉴, 进而保障水利工程发挥最大优势, 促进我国农业生态不断优化, 为我国农业可持续发展贡献力量。

**关键词** 农田水利工程施工技术; 地质层面; 基坑施工技术; 水利渠道防渗技术; 节水灌溉技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.034

## 0 引言

科技发展促进我国农业行业持续升级, 因此农田水利工程需要跟随农业发展需求进行不断优化。然而, 由于农田水利工程施工涉及诸多领域, 属于系统工程, 涵盖多个环节与不同专业施工技术, 且施工环境会受到自然条件、地质状况等外部因素影响。在实际施工过程中, 可能出现不同类型的施工技术难点, 无法解决施工难点及问题, 可能对工程质量及使用寿命造成严重负面影响, 从而对农业生产活动造成冲击, 严重影响我国农业稳定性, 对国家可持续发展存在不利因素。

## 1 农田水利工程施工技术难点

### 1.1 地质层面的技术难题

农田水利工程主要在农村地区进行建设, 地质条件较为复杂, 会遇到软土地质等特殊情况。软土地质由于含水率高、地下水浸透性差等特点, 因此长期处于潮湿柔软状态, 导致农田水利工程地基开发作业较为困难。

软土地基施工若未能采取处理措施, 地基承受上部结构荷载后, 极易发生沉降和变形情况, 导致上部渠道、泵站等结构物出现开裂、倾斜等问题, 甚至出现倒塌事故, 直接危及工程使用及周边人员安全。此外, 未对实际施工区域进行地质勘察, 直接使用类似施工方案, 可能由于施工设计图纸与实际地质情况严重不符, 导致施工过程中出现各类意外情况。例如: 挖掘基坑时, 可能会遇到岩石层, 但初期计划并无爆破计划, 不仅会增加施工成本, 更会影响正常施工进度。

### 1.2 基坑施工技术难题

基坑工程是农田水利工程的关键部分, 直接影响工程整体优劣情况, 并对工程使用安全具有一定的影

响作用。面对基坑变形沉降问题, 如基坑支护措施选型、设计以及施工存在问题, 或者未考虑周边环境、地质条件等外部因素, 容易导致基坑侧壁土体出现位移、沉降, 甚至存在基坑坍塌风险, 严重影响施工现场人员生命安全, 并对工程建设存在严重打击。而且, 基坑变形过大可能对周边环境建设安全造成打击, 引发次生灾害。

基坑积水问题主要源自施工排水和降水措施不足, 地下水或者地表水在基坑内汇聚, 导致地基土长时间受水浸泡出现软化, 降低地基承载力, 并影响后续基础施工, 甚至腐蚀基础钢筋等结构构件, 加速锈蚀速度, 对基础整体结构耐久性造成影响, 进而缩短工程寿命<sup>[1]</sup>。

### 1.3 水利渠道防渗技术难点

渗漏问题是水利渠道中的常见问题, 而渠道渗漏成因较多, 常见原因包括土壤中盐类、酸类物质引发化学反应, 对渠道衬砌材料造成侵蚀, 致使衬砌材料性能逐渐下降, 出现渗漏通道, 引发渗漏现象。

同时, 施工质量管理不到位也容易造成渠道渗漏。例如: 混凝土浇筑施工过程中, 若振捣不密实、模板拼接不严密或者混凝土配合比不准确等, 都可能导致混凝土结构存在孔隙, 形成渗漏隐患。而渠道接缝处处理不到位, 密封材料质量不佳或者施工工艺粗糙, 也容易成为导致渗漏问题的原因。

此外, 部分地区冬季土壤出现冻胀, 会对渠道结构产生强大的挤压力, 使得渠道结构产生裂缝, 裂缝在春季解冻后未能及时修复, 会逐渐发展成为渗漏通道, 进一步加剧渗漏问题。而且, 后期养护工滞后, 在渠道表面因水流冲刷、风化等原因出现磨损、裂缝等情况后, 同样会使得渗漏问题不断加重。

#### 1.4 节水灌溉技术难点

随着农业可持续发展理念不断深入,且水资源受到各类因素影响出现紧缺情况,节水灌溉技术因此得到快速发展及应用,但在实际推广和应用过程中,仍然存在部分难点需要相关施工人员进行研究与克服。

我国部分地区水资源短缺,虽然需要节水灌溉技术优化水资源利用,但受到地形地貌、土壤类型、农作物种植结构等因素限制,导致节水灌溉技术无法发挥最大作用,需要根据实际情况进行选择应用。例如:部分山区由于地形起伏较大,难以铺设节水灌溉设备,且施工成本较高,难以进行定期维护管理;而部分地区土壤渗透性较强,采用渗灌技术会导致加快水资源流失,无法达到实现节水目标<sup>[2]</sup>。

### 2 农田水利工程施工质量控制措施

#### 2.1 构建完善的质量管理控制系统

首先,相关施工单位需要对农田水利工程施工人员进行专业培训与考核,确保从业人员具备良好的专业知识和技能,做到持证上岗。在分工方面,需依据项目特点及人员能力进行合理安排。例如:安排经验丰富的施工班组长对现场施工进行组织协调,确保各施工环节有序衔接,选择具备良好专业素养的测绘员,对现场进行施工放线测量,由熟悉施工工艺和质量标准的技术员对关键工序技术进行指导,及时解决施工技术难题。通过明确人员分工和职责,能够形成高效协作质量管理团队,保证工程质量监管工作科学化与标准化,最大程度减少人为问题。

其次,施工方需要制定质量管理条例,涵盖施工过程各个环节。例如:原材料进场检验环节,需要明确规定各类材料检验项目、合格标准,确保材料符合质量标准后才能入库存储。而各分项工程的施工工艺,需要相关人员描述如混凝土浇筑、渠道衬砌、土方开挖等工序操作流程、技术参数以及质量控制要点,施工人员需按照施工涉及开展施工<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 合理调整施工设计图纸

施工单位应主动与地方乡镇相关部门进行沟通协作,对工程周围地理环境、地质水文性质进行深入分析研究。结合施工现场实际情况,讨论符合施工要求的施工技术,依据分析结果对施工涉及进行针对性优化。例如:在砌筑工程中,设计人员需要考虑当地气候特征,不仅需要测量测量砌石外表潮湿度,还应当深入分析不同天气条件的湿度变化情况,准确计算砌筑砂浆初凝时间,并根据气候条件调整施工工艺,确保砌筑结构牢固粘结,整体砌筑质量达到设计及使用要求。

面对部分地质条件复杂的区域,相关人员需要根据地质勘察报告,对基础设计进行充分优化。例如:软土地基区域,需要增加基础埋深,采用换填、加固等地基处理措施进行结合,增强地基承载能力和稳定性,避免上部结构出现裂缝、倾斜等问题。同时,渠道设计要根据水流计算、地质条件以及周边灌溉需求等因素,优化调整渠道断面尺寸、坡度、衬砌形式等,确保渠道结构可以高效输水且使用寿命符合初期预计。

#### 2.3 优化基坑施工技术

1. 科学选择基坑支护方式。施工相关人员需要对基坑深度、地质条件、周边环境等因素进行分析,根据实际情况选择基坑支护方式。例如:浅基坑在现场环境开阔、周边无重要建筑物或地下管线且土质条件较好的情况下,可采用放坡开挖方式,在确定放坡坡度后,依靠土体稳定性保证基坑安全。如果需要在粉质黏土且地下水位较低的场地挖掘深度小于 5 米的基坑,则放坡坡度可参考 1:1 至 1:1.25 比例设置,同时做好坡面防护,避免由于雨水冲刷导致坡面坍塌。

对于城市周边、建筑物密集区或者地质条件复杂的深基坑,可选择排桩支护、地下连续墙等技术进行施工。排桩支护通过间隔设置钢筋混凝土桩或钢板桩等,使其内部形成支护结构,桩间采用喷射混凝土实现止水和防护。选择排桩类型、桩径、桩间距以及嵌固深度时,需要对基坑深度、侧向土压力及周边环境进行考察,通过计算分析,确定相应参数<sup>[4]</sup>。

地下连续墙支护具有整体性好、止水性能强优点,可以应用于复杂地质条件和深基坑工程,但由于施工工艺复杂、成本较高,因此需要严格控制成槽质量、钢筋笼制作、吊装以及混凝土浇筑质量等环节,确保地下连续墙强度和止水效果达到预期标准。例如:如果软土地质条件,若基坑较深,地下连续墙支护可以充分控制基坑变形,但在工程成本较高的情况下,需选择高性价比方案,同时可考虑与内支撑或锚索等支撑体系进行结合,充分提高基坑稳定性。

2. 加强地下水控制。保证基坑降水和排水工作质量,能够为基坑施工质量提供良好保障。根据地下水位情况和地质条件,施工团队需要科学选择降水方法,如轻型井点降水、管井降水等。

轻型井点降水主要应用于渗透系数较小的粉质黏土、粉土等土层,且降水深度控制在 6 米内。通过在基坑周围埋设井点管,通过抽水设备抽出地下水,从而降低地下水位,控制基坑开挖面水量。施工时需要对井点管埋设深度、间距以及滤管长度等参数进行合理设计,并保证抽水系统正常运行,定期检查并维护

抽水设备,避免设备出现井点堵塞、抽水不畅问题。

管井降水可用于渗透系数较大、地下水位较高且水量丰富的土层,降水深度可达到几十米。该技术在基坑周围布置管井,同样使用抽水设备抽出地下水,从而降低地下水位。施工人员需要控制管井成孔质量、滤水管安装以及填料质量等,从而为管井出水量和降水效果提供保障。

#### 2.4 提升水利渠道防渗技术水平

1. 合理选用防渗材料和技术。防渗材料和技术会受到地质条件、气候环境等外部因素影响,因此需要根据施工现场实际情况进行选择。若地区土壤腐蚀性较强,如盐碱地或者酸性土壤的区域,防渗膜料需要选择高抗腐蚀性材料,如高密度聚乙烯(HDPE)土工膜,具备耐酸碱、抗老化、防渗性能优良等特点,可以抵御化学物质侵蚀。同时,施工团队还可以选用高性能混凝土衬砌材料,并通过添加外加剂、优化配合比等方式,进一步提高混凝土抗腐蚀能力。

面对冻胀土地区,施工团队需考虑冬季土壤产生冻胀可能对渠道结构造成的影响,需要采取相应保温隔热措施,避免温度变化对工程质量产生影响。例如:可以在渠道衬砌外侧铺设聚苯乙烯泡沫板等保温层,阻隔土壤热量传递,减少土壤冻胀破坏力。同时,施工团队可以采用预制混凝土板衬砌,并设置伸缩缝,在缝内填充弹性密封材料,在土壤出现冻胀后,避免产生变形,防止渠道出现裂缝出现渗漏<sup>[5]</sup>。

2. 加强施工过程防渗控制。在渠道施工过程中,施工团队要不断优化防渗相关工序质量控制。例如:在进行混凝土衬砌渠道施工过程中,要控制混凝土配合比,根据设计要求对水泥、砂石、水以及外加剂等原材料用量进行称量,并结合试验确定配合比,保证混凝土强度和抗渗性。在进行混凝土浇筑时,需要对浇筑厚度、振捣时间和方式等进行控制,避免人为因素影响,通过使用分层浇筑、分层振捣,确保混凝土密实度均匀一致,降低出现蜂窝、麻面质量缺陷的可能性。在处理渠道接缝处过程中,要根据实际使用情况选择密封材料,如橡胶止水带、聚硫密封膏等,按规定施工方法进行安装和密封,保证接缝严密,防止接缝处出现渗漏。

完成混凝土结构施工后,需要对渠道进行定期养护,及时修复表面裂缝、磨损。较小裂缝可使用水泥砂浆进行勾缝处理,较大裂缝则需进行填补修复,可采用环氧砂浆等修补材料,确保渠道表面完整。同时,施工团队需要进行定期巡查,尤其是灌溉期及雨季,

及时发现并处理潜在隐患,才能有效延长渠道使用寿命,提高水资源利用效率。

#### 2.5 推广应用节水灌溉技术

相关单位可以通过组织培训班,邀请农业水利专家、技术人员为农民授课,讲解节水灌溉技术分类、适用范围以及操作方法,让农民了解节水灌溉技术优势。例如:展示采用滴灌技术后,不仅能够减少水资源浪费,还具有提高农作物产量和品质,降低病虫害概率,减少劳动力投入等优点。此外,还可以开展现场示范活动,在田间地头建立节水灌溉技术示范基地,让农民直观看到设备安装、运行以及灌溉效果,进一步增强对节水灌溉技术的认识。

政府和相关部门需要加大对节水灌溉技术的支持,帮助农民解决实际困难,促进节水灌溉技术广泛应用。在技术方面,通过技术服务团队,深入农村地区,为农民提供节水灌溉设备安装、调试和维护服务。根据当地土壤条件、农作物种植结构以及水源情况,选择合适的节水灌溉设备,并指导农民进行安装、调试和使用。同时,定期巡检设备情况,及时解决设备故障问题,发挥节水灌溉技术效益。通过设立节水灌溉专项补贴资金,对采用节水技术的农民和农业企业给予资金补助,降低其投资成本,进一步推动节水灌溉技术发展。

### 3 结束语

农田水利工程施工技术难点众多,若不能妥善攻克,将无法发挥水利工程的最大作用,甚至阻碍农业生产可持续发展。相关单位与部门需要积极研究地区农业实际情况,合理采用相应技术,强化施工精细化管理,并积极推广应用新技术、新材料、新工艺,促进我国农田水利工程施工技术水平和质量不断提升,为我国农业可持续发展提供可靠的水利工程保障。

#### 参考文献:

- [1] 毛玉洁. 浅谈农田水利工程施工技术的难点及质量控制[J]. 江西农业, 2024(15):71-73.
- [2] 李芳. 基层农田水利工程施工技术难点与质量控制对策探讨[J]. 大众科学, 2025,46(09):165-167.
- [3] 王春青. 农田水利工程施工过程中的质量控制[J]. 农业开发与装备, 2025(01):194-196.
- [4] 林建军, 刘洪英. 农田水利工程施工技术的难点及质量控制[J]. 建筑与装饰, 2024(19):157-159.
- [5] 卢臣, 李传业. 农田水利工程施工技术难点和质量控制探析[J]. 商品与质量, 2023(30):118-121.

# 农村公路桥涵病害检测与微创加固技术的应用效果分析

刘 强

(韶关市曲江地区地方公路管理站, 广东 韶关 512100)

**摘 要** 为了提升农村公路桥涵病害的处理水平, 本文基于农村公路桥涵病害类型和成因分析, 提出相应的病害检测方法, 同时引用微创加固技术对农村公路桥涵病害进行加固处理, 并结合实际应用案例验证该技术的可行性与经济性, 旨在对有效提升公路桥涵病害处理成效有所裨益, 进而提升农村公路桥涵病害维护处理水平, 为农村公路桥涵的长期稳定运行提供保障, 满足公路桥梁建设和维护需求。

**关键词** 农村公路桥涵; 病害检测; 微创加固技术

中图分类号: U41

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.035

## 0 引言

公路桥涵作为桥梁结构的重要组成部分, 其常见的病害类型较多, 引发病害的原因也比较复杂, 若不能做好农村公路桥涵病害的检测和处理, 必然会导致公路桥梁结构稳定性降低, 甚至引发巨大的事故。为此, 积极采取科学的病害检测方法, 通过微创加固技术的应用, 进一步提升桥涵病害的处理成效, 对提升农村公路桥梁建设质量具有重要意义。

## 1 农村公路桥涵病害类型及成因

### 1.1 桥梁病害类型及成因

#### 1.1.1 上部结构病害

梁体裂缝作为农村公路桥涵常见的上部结构病害类型, 其根据走向可以分为横向裂缝、纵向裂缝以及斜向裂缝。它也是上部结构最常见的病害之一, 按走向可分为横向、纵向和斜向裂缝。梁体中部位置横向裂缝, 出现大于 0.2 mm 的裂缝将会对房屋造成耐久性影响。这主要是由于过长时间的超荷载压力引起的。与此同时, 梁体两侧出现的纵向裂缝是因为在实际浇筑混凝土过程中分段时间过长或没有充分进行振捣和压实时所形成的。另外, 混凝土保护层若小于设计值时也易造成该类裂缝<sup>[1]</sup>。

桥面铺装层常见病害有坑槽、车辙以及裂缝三种。坑槽通常情况下是因为防水保护膜失去作用后, 水渗透到基层, 在经过冻融之后引起其强度衰减, 经过车辆反复碾压形成。道路罩面厚度低于设计厚度 90% 的可能更容易产生坑槽现象。另外还有一种常见情况是

轮胎痕迹, 特别是在夏季地面温度高于 50 °C 时, 沥青混合料较软, 经大载荷车辆碾压造成深浅不一的轮胎痕迹, 若其深度超过 15 mm, 会给行车安全带来较大隐患。

#### 1.1.2 下部结构病害

桥墩病害体现在裂缝和混凝土剥落方面。依照其成因将桥梁柱裂缝大致分为下陷引起的垂直或斜裂缝, 若地基不均匀沉降每米超过 5 mm 就有可能产生这种裂缝; 对于地处昼夜温差显著地区的桥梁柱子, 当昼夜温差超过 20 °C 时, 则其表层也会产生细微裂缝, 裂缝大小一般在 0.1 ~ 0.3 mm 之间。至于混凝土剥落则一般都是侵蚀深度超过了保护层, 钢铁生锈后膨胀, 造成混凝土外皮裂碎、脱落, 如果这种剥落面积大于 1% m<sup>2</sup> 就需要及时解决。

桥台病害主要由台体裂缝、台后填充物下陷、翼壁开裂等原因造成。其成因多是由台后填土密实度不达标, 致使车辆荷载横向力过大而形成的, 尤其是在台后填土高度 5 m 且密实度不达标时更加突出。台后填土沉降量超过 50 mm 将使桥梁产生跳车从而使桥梁状况进一步加重。翼壁破损主要是由于基底深度过浅, 土壤压力与流水冲刷造成其发生偏移或破裂, 偏移角度超过 1° 必须进行加固处理<sup>[2]</sup>。

### 1.2 涵洞病害类型及成因

#### 1.2.1 洞身病害

洞身裂缝是隧道常见的病害之一, 钢筋混凝土隧道中常见的裂缝为环形裂缝和直线型裂缝。环形裂缝多是由于隧道内所承受的土壤压力分布不均衡所致, 当填充材料高度达到 6 m 以上, 且侧向土压力大于 0.5

时易出现环形裂缝,其宽度大于0.2 mm将影响构筑物完整性。直线形裂缝多是由于地基不均匀沉降的,当沉降差异大于3 cm时,隧道会出现贯穿性的直线裂缝。隧道漏水多见于接头和混凝土缺陷处。接头漏水是密封材料老化或安装偏差导致尺寸与设计不符;混凝土缺陷漏水是因空洞或粗糙面面积大于0.05 m<sup>2</sup>或开裂宽度大于0.15 mm,致使渗漏明显。

### 1.2.2 洞口及涵底病害

洞口病害常见于洞口铺砌破损、翼墙裂缝以及截水设施失效等问题。一般翼墙裂缝是由于其底部支撑强度不足所致,其底部支撑深度如果少于0.8 m,就会受到土壤的压力形成裂缝,其长度一旦大于0.3 mm就需要进行修补;洞口铺砌破损是水流所导致的,特别是流速在3 m/s并且没有设置足够防护设施的时候很容易被水流侵蚀损坏,而且比例在20%以上才可能对管洞安全造成威胁。另外还有截水设施,其损坏导致水流直冲入管洞内,加重了损坏的严重性<sup>[3]</sup>。

## 2 农村公路桥涵病害检测方法

### 2.1 外观检测法

病害筛选的基本方式是以外观进行判断完成,依据《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21)规定,一个季度一次的定期检查需要保证定期,主要负责人要采用裂缝宽度仪、测厚仪、全站仪等设备,全面性评价桥梁。要以桥梁的上部构造为例,观察梁体的裂纹、桥面残损部位、支座变形;以桥梁的下部构造为例,计算桥墩的倾覆、桥台台身的裂纹以及基底裸露的面积。

针对路桥检查部分,需测量路桥内部的混凝土腐蚀情况,出入口的墙角改变程度以及底部的淤土情况,实时将数据反馈入路桥检查系统内,然后对超标数据发出警告。这种技术大约需要200~500元/m延长线,适用大型排查,但不能检测到内部钢筋腐蚀、桥墩坍塌等问题。

### 2.2 无损检测技术

采用无损检测技术,通过使用中强度的回弹仪测出混凝土强度,每块测试区域均使用16个探头进行检测,将最大的三个数值、最低的三个数剔除之后,计算剩余数值的平均值。如果碳化深度超过6 mm,则需要对其进行强度调校。同时,还要确保结果误差不超过 $\pm 5$  MPa。

梁体的跨缝检测使用非金属超声仪进行。过程中换能器的间距设置为300~500 mm。当声速小于3 500 m/s或波的衰减超过15 dB时,认为有内部缺陷。钢筋锈

蚀的检测使用电磁感应型钢筋探测器,可测出直径大于等于6 mm的钢筋的位置。当钢筋保护层的实际测量值和设计值的差值大于5 mm时,采用极化电阻的方法确定钢筋的腐蚀率。单个无损检测装置的价格在800~1 500元,检测效率为50~80 m<sup>2</sup>/d,能够有效用于深入调查外部病害,但存在环境制约的因素,宜多种方法交叉比对。

### 2.3 荷载试验检测法

依照《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/TJ21)中荷载试验的定义,对建筑进行实际的荷载能力评价。先根据理论计算得到重点区域范围,再采用递增方式施压,采用应变片和位移计对反应进行监测,如试验中应变值、位移值超出理论值10%,或存在非线性增加,则停止试验<sup>[4]</sup>。

动力荷载检测主要是通过车辆行驶进行采集建筑物本身的自振频率,当小于设计值的10%时被认为梁的刚度下降。该方法检测费用较高,且最少要准备7~15天时间,主要用于3级或以上桥梁承压应力鉴定。该测试时需要交通封闭,但因为会影响到村路,因此只有在无其他方案可供选择时使用。

### 2.4 地质雷达探测法

采用地质雷达能够有效地探测桥梁及隧道基础状态和内部构造的破损情况。选用天线的频率为100~500 MHz,且进行无缝的扫描,采样密度为每扫512~2 048点的频率,当桥台背后的填土出现相同的极性和弯或反射强度增长时,则可能代表有空洞的存在。采用此种方法可判定涵洞底部的沉积厚度和侵入深度。

采用时域滤波及反演分析等方法对数据进行处理,形成彩色剖面图,有利于更直观地反映问题出现的位置。地质雷达技术每日可完成检查100~200 m的道路范围,费用为1.5万~3万元/km,特别适宜发现道路基础建设部分的连通问题。但是当遇到强电性物质时其发现深度会减小至1~3 m,还需用钻探手段进一步验证。

## 3 农村公路桥涵病害微创加固应用策略

### 3.1 检测与加固方案的优化设计

为了优化病害检测和加固方案设计,应在病害被准确定位的前提下按照“分级检查、对症下药”的原则进行。若桥梁或涵洞为一级或二级技术状况则可以采用“肉眼观察+每年一季度巡查”这样的简化方法对裂缝变化速度和桥面平整度进行监测。而对于三级以上则应通过“肉眼观察+非破损检测+专项评定”

项目进行干预,例如对梁体横向裂缝进行检测,首先使用裂缝宽度仪对裂缝宽度进行测定,利用超声波检测仪对裂缝深度进行检测,当超过三分之一梁高时应搭配弹性应力分析仪对混凝土强度进行分析,确定加固级别<sup>[5]</sup>。

强化方法设计应使技术可行性和经济合理性达到平衡与统一,如桥梁结构受力小于设计值的 15% 以内,用碳素纤维增强布进行强化;在桥梁结构受力大于 15% 但小于 30% 时,采用外加预应力方式;而大于 30% 采用注射剂治疗的方式。对于隧道墙体渗透治理在裂缝小于 0.2 mm 时采用低压浇灌方式;对于大于等于 0.2 mm 的裂缝,先采用密封剂填充后再进行高强度的浇灌。

工程建设项目必须考虑其对交通的影响,尤其是对乡村道路桥梁的加固,应尽可能地使用“部分施工并临时替代路线”的方法进行交通管制。即临时路面宽度不小于 3.5 m 且轴重大于 10 t,农业车辆通行不受影响。同时计划必须说明测试信息将如何加以利用,如通过地质雷达技术获得的桥台后段土层沉降量可以直接应用到钻孔位置的选择上,可减少额外的检测费用。

### 3.2 施工过程中的质量控制

“材料—工序—环境”全过程必须纳入工程的质量控制系统,执行三层面审核。碳纤维进入现场应提供抗拉强度测定值和弹性测定值,且对每一批产品随机抽选三件进行复验。对于注浆材料也要检验其初凝时间及压力抵抗能力,合格后方可使用。重点工序应设置质量卡控点。在使用碳纤维布时,注意使底材表面平整度不高于 2 m 尺直尺下的偏差值,且底漆厚度控制在 0.2 ~ 0.3 mm 范围内。粘贴完成后还须使用辊轮挤压排除空气气泡<sup>[6]</sup>。在注浆加固过程中,注浆管插入深度不得少于裂缝深度的 2/3,为“先外部后内部”顺序进行灌浆,如果相邻孔出浆应立即停止该孔作业,且各孔注入量不得超过设计的容许量。

为了保证工程质量,将环境因素纳入质量系统控制当中。雨天时,严禁进行桥面铺装作业、碳纤维布粘贴作业。在高温的环境下,必须对混凝土表面喷雾降温,还需适当调节浆液中的固化剂添加量。针对农村公路中工作场地相对偏小的特点,可准备针对性的安全策划方案,如修建涵洞时,需要配备通风设备及有毒有害气体监测装置等。

### 3.3 加固后的效果评估

“短期检测+长期监测”是评价加固效果的必需措施,评价的标准应该与加固的目标保持一致。短期检

测是设计完成后一个月内进行,主要是进行荷载试验的检测以验证其加固结构强度的效果;对于灌浆堵缝的效果,要通过渗漏试验的检测进行考量。桥面的修补施工后使用摆式摩擦系数测定仪检验防滑能力、使用水准仪计算国际平整度指数,至少要维持 3 年以上才算长时监测,并且要建立自动化监测台:在桥中部位布设位移传感器,在桥基础部位布置沉降观测台,每月检测数据不能低于 1 次。一旦出现以下现象之一则表明加固效果失效:桥下结构的变形量每年增大超过 100  $\mu\text{m}$ ;桥基础的累计沉降 20 mm;新裂缝的开裂宽度大于 150  $\mu\text{m}$ 。

从经济效益评估来看,需要将整个使用年限内的投资计算进去,包括初始强化成本、维护成本和对交通造成的损失成本。例如:某乡村道路的桥梁采用碳纤维布进行加强后比传统增大横截面节省了 33% 的经费,且由于施工期间交通造成的阻碍所引起的损失减少了 60%。同时,还需要记录加强后出现问题的次数,例如:若灌浆加强方式第二次出现裂缝的比例在一年内不超过 5%,则说明需要进一步分析问题的产生原因,必要时需再次进行加强。

## 4 结束语

农村公路桥涵病害给公路桥梁稳定运行带来了一定的威胁。为了保障公路桥梁结构稳定性,应充分了解农村公路桥涵病害类型和产生原因,选用科学的病害检测方法,通过外观检测、无损检测、荷载试验以及地质雷达监测等方式,充分掌握公路桥涵病害位置和原因。采用微创病害加固技术可以有效提升公路桥涵的结构稳定性,从源头上避免桥涵病害对公路桥梁结构造成的影响,提高我国公路桥涵病害治理效果。

### 参考文献:

- [1] 黄鲁明.公路桥涵病害防治及养护管理分析[J].科技创新与应用,2025,15(18):154-157.
- [2] 唐勇.高速公路桥涵常见病害特点及原因分析[J].运输经理世界,2025(15):101-103.
- [3] 边新华.公路桥涵病害防治及养护管理分析[J].四川建材,2021,47(12):69-70.
- [4] 张超.高速公路桥涵定期检查常见病害特点及原因分析[J].运输经理世界,2021(32):109-111.
- [5] 张煜,熊治华,罗靖雨,等.陕西老旧石拱桥快速评价体系构建[J].水利与建筑工程学报,2021,19(04):168-174.
- [6] 毛立军.浅析公路桥涵养护措施[J].绿色环保建材,2021(02):111-112.

# 大型公共建筑暖通节能设计策略研究

张楠

(深圳市博普森机电工程顾问有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要** 大型公共建筑作为能耗重点领域, 其暖通系统节能设计对实现双碳目标具有战略意义。传统设计模式往往采用静态负荷计算方法, 导致系统容量冗余严重, 设备长期低效运行。现代设计需要突破单一专业局限, 构建从被动式设计到主动调节的完整节能链条。建筑形态优化与围护结构热工性能提升构成第一道防线, 合理的窗墙比设计和遮阳系统选型能降低太阳辐射得热。空间功能组织应充分考虑自然通风潜力、过渡空间可发挥热压通风效应。主动式系统设计要突破传统分区模式, 发展基于人员活动特征的动态调节技术, 使系统输出与实际需求精准匹配。基于此, 本文针对大型公共建筑暖通节能设计策略进行探讨, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 大型公共建筑; 暖通节能设计; 系统匹配; 设备选型

中图分类号: TU2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.036

## 0 引言

公共建筑多元化的使用功能对暖通系统提出了差异化的环境控制要求, 传统一刀切的设计方法已难以满足实际需求。现代设计需要建立负荷动态响应机制, 通过实时监测空间使用状态调整系统输出。建筑围护结构设计应突破单纯保温隔热思维, 发展可调节的呼吸式表皮系统, 根据季节变化优化热工性能。重点功能区域需采用个性化环境控制方案, 冷热源系统配置要重视部分负荷下的性能表现, 通过机组搭配优化提升全年运行效率。余热回收利用应形成系统化解决方案, 从数据中心到厨房排风多个热源点挖掘节能潜力。

## 1 大型公共建筑暖通节能设计特点

大型公共建筑暖通节能设计具有区别于常规建筑的显著特征, 其核心在于应对空间功能复合性、人员流动性及负荷动态变化带来的挑战。建筑体量庞大导致冷热负荷分布极不均衡, 中庭、走廊等过渡空间与功能区域的温湿度需求差异明显, 需要分区控制系统实现精准调节。人员密度波动使新风负荷呈现时段性高峰, 智能预测算法与变风量系统的结合成为解决方案。玻璃幕墙等现代建筑立面虽具美学价值, 但易形成强烈得热或热桥效应, 需协同遮阳与通风系统进行热量管理。设备长时间满负荷运行造成的能源浪费突出, 基于物联网的实时监测平台可优化运行策略。各功能区域使用时段交错, 要求系统具备灵活的模块化控制能力, 避免整体启停带来的能耗损失。特殊空间如数据中心、厨房等余热回收潜力巨大, 但需解决热源品位匹配的技术难题<sup>[1]</sup>。季节性负荷差异要求系统

具备多工况切换能力, 过渡季节的自然冷却策略可大幅降低机械制冷能耗。这些特点共同构成了公共建筑暖通节能设计的复杂图景, 需要从建筑全生命周期角度建立整体性能优化机制。

## 2 大型公共建筑暖通节能设计原则

### 2.1 满足室内环境舒适度原则

暖通系统设计的首要任务是确保各类功能空间达到相应的环境品质标准, 这需要超越简单的温湿度控制范畴。对于会议厅等高密度场所, 需重点解决新风供应与气流组织问题, 采用置换通风或个性化送风方式避免闷热感。展览类空间要平衡展品保护与观众舒适的双重要求, 通过垂直温度梯度设计实现分层控制。医疗建筑手术室等特殊区域必须维持严格的洁净度和压差, 三级过滤系统与实时监测装置不可或缺。商业综合体需考虑顾客流动路径中的温感过渡, 避免不同区域间产生剧烈温差。声环境质量同样关键, 选择低噪声设备并优化管道消声设计, 确保背景噪声不超过45分贝<sup>[2]</sup>。采光中庭的热堆积问题可通过空气幕隔离, 既保持视觉通透又阻断热对流。动态调节系统应具备学习能力, 根据使用反馈不断优化控制参数, 实现舒适与节能的动态平衡。

### 2.2 遵循国家节能标准原则

节能设计必须严格对标《公共建筑节能设计标准》等规范性文件, 将强制性条款转化为具体技术措施。建筑围护结构热工性能要满足传热系数限值要求, 幕墙节点需进行热工计算验证避免局部结露。冷水机组选型应优先采用能效比达标的磁悬浮或变频机型, 水

泵风机等输配设备必须满足现行能效等级标准。热回收装置的最小热回收效率需符合规范规定,排风系统应设置可调节的旁通管路以适应不同季节需求。自动控制系统要具备分项计量功能,各用能系统的独立监测数据精度应达到 0.5 级标准。照明与暖通系统的联动控制逻辑编写入自控程序,确保在非运营时段自动切换至节能模式。特殊工艺区域如数据中心要执行相应的行业节能规范,采用行级空调或液冷等高效冷却技术。设计文件必须包含完整的节能计算书,重点参数需通过权威软件模拟验证。

### 2.3 结合建筑特性设计原则

每栋公共建筑都具有独特的空间形态和功能组合,节能设计必须建立在对建筑本体的深度解读上。文化类建筑的大跨度空间可采用辐射地板与下送风结合的方式,利用热空气自然上升特性降低能耗。交通枢纽建筑要考虑高大空间的分层空调策略,通过射流喷口实现远距离送风。历史建筑改造需保留原有结构特征,隐蔽式毛细管网与分散式新风系统是可行选择。超高层建筑要利用竖向分区减少承压,水系统采用变频二次泵与板换结合的分布式方案。教育建筑需适应寒暑假的运行模式调整,教室独立计量与区域启停功能必不可少。体育场馆的设计要区分比赛与日常模式,观众席采用座椅送风提高热舒适效率<sup>[3]</sup>。建筑朝向与当地主导风向的关系决定自然通风潜力,可调节幕墙开口与机械系统形成互补。功能复合型建筑要建立用能优先级机制,确保核心区域供能稳定性与节能目标的统一。

## 3 大型公共建筑暖通节能设计问题分析

### 3.1 设计理念与规范问题

当前暖通设计普遍存在理念滞后与规范执行不到位的双重困境。许多项目仍沿用传统的“大马拉小车”设计思路,过度依赖设备容量来弥补设计余量不足,导致系统长期在低效区间运行。设计过程中缺乏对建筑全生命周期的综合考量,初投资成本往往成为决策首要因素,忽视后期运行能耗带来的长期经济损失。部分设计单位对最新节能规范理解不深入,特别是对过渡季节免费制冷、热回收利用等创新条款应用流于形式。建筑方案阶段暖通专业介入不足,错失了通过被动式设计降低基础负荷的最佳时机。现有评价体系过分关注静态能效指标,缺乏对系统动态调节能力和实际运行效果的评估机制。不同地区气候条件差异显著,但设计过程中常套用统一模式,未能形成因地制宜的解决方案。此外,设计图纸与现场施工脱节情况

时有发生,重要节能节点缺乏有效监管,最终影响系统整体性能。

### 3.2 系统匹配与运行效率问题

系统匹配失当是造成能源浪费的主要根源,主要表现为负荷计算与实际需求脱节。分区控制系统设计不合理,导致不同功能区域无法实现独立调节,经常出现“冷热不均”现象。新风系统缺乏智能调控手段,在人员密度变化时仍保持固定送风量运行。水力系统平衡调试不到位,近端用户流量过大而远端供给不足的情况屡见不鲜。冷却塔与冷水机组容量配比不当,在部分负荷工况下效率急剧下降。热回收装置选型与实际排风量不匹配,实际运行中热交换效率远低于设计值。管路系统存在大量不必要的弯头和变径,增加了输送能耗。自控系统编程逻辑过于简单,无法应对建筑使用的动态变化,常常需要人工干预。设备联动策略缺失,如冷水机组与冷却水泵未实现群控优化,过渡季节无法充分利用自然冷却潜力。这些系统性缺陷使暖通系统长期处于“高效设备、低效运行”的矛盾状态<sup>[4]</sup>。

### 3.3 设备选型与技术应用问题

设备选型过程中普遍存在技术评估不足的问题,过分关注名义工况下的性能参数。变频设备虽然配置率高,但控制策略未充分发挥其节能潜力,部分项目甚至将变频器作为普通启动器使用。热泵机组在低温环境下效率骤降的问题未得到足够重视,辅助加热系统设计不合理。冷却塔选型时忽视当地空气质量影响,运行不久便出现填料堵塞导致性能衰减。水泵风机等输配设备效率曲线与系统特性曲线匹配度差,实际工作点偏离高效区。保温材料选用不当,特别是管道阀门等细节部位未做特殊处理,形成严重冷桥。过滤系统设计过于简化,阻力增长过快导致风机能耗激增。新技术应用存在盲目跟风现象,如盲目采用辐射供暖系统却未解决结露风险,或过度配置光伏系统而忽视建筑本体节能。

## 4 大型公共建筑暖通节能设计策略研究

### 4.1 先进设计理念与方法应用

推行全生命周期成本分析法,将设计视野从建设期扩展到整个运营阶段。采用参数化设计工具,在方案阶段即对多种节能情景进行模拟比选,识别关键影响因素。建立基于性能的设计导向,以实际能耗指标而非设备参数作为评价标准。引入被动式设计优先原则,通过建筑形态优化、围护结构热工性能提升等被动措施降低基础负荷。发展协同设计模式,促成建筑、

结构、设备各专业在早期阶段的深度配合,避免后期拆改。应用建筑信息模型技术,实现设计数据的无缝传递和碰撞检测,减少施工阶段的错漏碰缺。推广适应气候的弹性设计策略,如可调节外遮阳、季节性转换的空调系统等<sup>[5]</sup>。建立原型化设计数据库,将成功案例的节能经验转化为标准化模块,提高设计效率和质量。

#### 4.2 系统优化与高效运行策略

实施精细化负荷计算方法,考虑建筑方位、内部得热、使用时段等多维因素,避免过度设计。发展动态分区控制技术,通过压力无关型变风量末端实现空间重组时的灵活调节。优化新风系统控制逻辑,基于CO<sub>2</sub>浓度、人流量等多参数实时调整新风比。完善水力平衡调节手段,采用动态压差控制阀确保系统各个末端获得设计流量。开发冷水机组群控优化算法,根据负荷变化自动匹配最佳运行台数和组合方式。强化热回收系统管理,建立热量计量和效率监测机制,定期维护确保性能稳定。创新自然冷却应用模式,在过渡季建立冷却塔直接供冷与常规制冷的平滑切换机制。实施能源管理系统升级,引入机器学习技术分析运行数据,持续优化控制策略。

#### 4.3 节能设备与新技术选用

设备选型应建立全工况评价体系,重点考察部分负荷下的性能表现。推广磁悬浮离心机高效冷水机组,其无油设计可避免效率随运行时间下降的问题。采用永磁同步电机驱动的变频水泵风机,在宽幅调速范围内保持高效率。发展热泵复合能源系统,整合地源、空气源等多种热源形式,实现最优能源匹配。应用新型热回收装置如全热交换转轮,同时回收显热和潜热,提高能量回收品质。试点相变储能技术,利用电价峰谷差实现负荷平移,降低运行成本。推广低温送风系统,减少送风量和输送能耗,但需做好防结露措施。探索辐射供冷与置换通风的复合系统,提升热舒适性的同时降低能耗。尝试光伏直驱空调技术,实现可再生能源的直接消纳,减少转换损耗。

#### 4.4 管理机制与人员培训强化

构建全过程节能管控体系,从设计审查到竣工验收设立严格的质量控制节点。建立能耗基准线制度,为不同类型公共建筑制定合理的能耗对标值。完善能源审计机制,定期开展系统性能评估,识别节能潜力点。发展数字化运维平台,集成设备监控、故障诊断和能效分析功能,支持决策优化。推行能源管理合同模式,通过绩效保证合同调动服务商的积极性。建立操作人

员认证制度,确保关键岗位人员具备专业知识和技能。开展多层次培训计划,针对管理人员、技术人员和普通用户设计差异化的培训内容。构建知识共享网络,促进不同项目间的经验交流和技术传播。实施行为节能激励措施,将节能成效与绩效考核挂钩,调动全员参与积极性。

#### 4.5 智能化与数字化技术深度融合

在大型公共建筑暖通节能设计中,智能化与数字化技术的深度整合正在成为突破传统能效瓶颈的关键路径。建筑能源管理系统正从简单的数据采集向具有预测性维护能力的智慧平台转变,通过部署高密度传感器网络,实现设备状态的全息感知与异常预警。数字孪生技术的引入使得系统可以在虚拟空间完成复杂工况的模拟测试,大幅降低实体调试阶段的能源浪费。人工智能算法在负荷预测领域展现出独特优势,通过分析历史运行数据、天气变化及人员流动模式,提前24小时预测建筑冷热需求,使设备启停策略更具前瞻性。

### 5 结束语

暖通节能设计需跳出设备能效提升的单一视角,构建被动优先、主动优化的系统性方案。气候适应性设计、负荷精准预测与智能调控技术的深度融合,将成为未来公共建筑节能改造的核心方向。通过标准化设计导则与动态运维策略的结合,推动行业向低碳化转型。同时,亟需推动从标准化节能设计导则到动态智慧运维策略的闭环管理机制,强化全过程质量控制与专业人才培养,唯有如此,才能真正释放大型公共建筑的节能潜力,引领暖通行业加速向高质量、低碳化方向转型升级。

#### 参考文献:

- [1] 姚华秀. “双碳”战略下高大空间公共建筑的暖通节能设计研究[J]. 北方建筑, 2025, 10(03): 33-36.
- [2] 沈丰姣. 公共建筑暖通系统绿色节能设计策略[J]. 新城建科技, 2025, 34(05): 58-60.
- [3] 杜雅婧. 大型公共建筑暖通空调系统节能设计与运行优化研究[J]. 工程技术研究, 2024, 09(24): 194-196.
- [4] 王本峰. 大型公共建筑暖通空调节能运行控制技术研究[J]. 今日制造与升级, 2023(12): 29-31.
- [5] 王雪, 周秋蕊. 浅谈某大型公共建筑暖通空调系统的设计[J]. 中国设备工程, 2023(10): 121-123.

# 焊接技术在矿山机械维修中的应用探讨

胡安芮, 王上上, 康健

(兖矿能源集团股份有限公司南屯煤矿, 山东 济宁 273515)

**摘要** 在矿业生产过程中, 需要使用大量机械设备以提升生产效率, 因此矿山机械的稳定性会对矿业生产产生直接影响。而矿山机械在实际应用中经常处于恶劣环境中, 导致机械设备常常磨损和损坏, 因此, 如何对矿山机械进行合理维护十分重要。本文分析了焊接技术在矿山机械维修中的作用, 阐述了矿山机械维修中焊接技术的应用现状, 并提出了矿山机械维修中焊接技术的应用策略, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 焊接技术; 矿山机械维修; 焊接材料; 热处理; 焊接加固

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.037

## 0 引言

矿山机械是矿业生产中不可或缺的设备, 其运行状态直接关系到矿产资源的开采效率和安全性。由于矿山环境通常较为恶劣, 这些机械设备在长期运行过程中不可避免地会出现不同程度的故障和损伤。因此, 及时、有效的维修对于保障生产正常进行至关重要。焊接技术作为矿山机械维修的重要工具, 凭借其修复能力强、适用范围广等优势而被广泛应用。在矿山机械的维修过程中, 选择合适的焊接方法以及保证焊接质量成为维修人员面临的主要挑战。尽管焊接技术在维修领域具有诸多优势, 但实践中也存在焊接缺陷、焊接后材料性能变化等问题。

## 1 焊接技术在矿山机械维修中的作用

### 1.1 对矿山机械结构损伤进行快速修复

在矿山机械维修中, 焊接技术的合理应用能够为受损的矿山机械零部件提供最为直接和高效的修复路径。矿山机械, 如挖掘机的动臂斗杆、破碎机的机架衬板、输送机的滚筒轴颈等关键承载或耐磨部位, 在恶劣工况下极易出现断裂、磨损、变形或开裂等严重损伤。此类损伤若采用传统的更换新件方式, 不仅采购周期长、成本高昂, 而且在偏远矿区往往难以实现及时供应, 导致设备长时间停机, 严重影响生产进度。焊接技术则能直接在设备现场或维修车间, 通过对损伤部位进行填充、堆焊或结构重建, 实现金属材料的重新连接或磨损表面的再生<sup>[1]</sup>。

### 1.2 提供多样修复方案以满足复杂工况需要

矿业生产作为一个复杂的系统性工程, 需要多种矿山机械的参与, 而不同的机械设备结构各异, 其损

伤形式也多种多样, 因此在维修过程中也会受到多种因素限制, 而焊接技术的重要优势就是其灵活的焊接方法和广泛的材料选择, 能够针对不同机械设备、不同类型的损伤进行针对性修复, 进而帮助工作人员针对不同机械设备的损伤特点进行修复。例如: 对于大型不可拆卸设备的局部裂纹, 可采用冷焊或低热输入工艺进行补焊修复; 对于承受高冲击载荷的连接部位断裂, 需选用高韧性焊材和严格的预热、后热工艺以保证焊接接头韧性<sup>[2]</sup>。

### 1.3 降低维修成本并延长机械设备使用寿命

在矿山机械维修中, 焊接技术的经济性优势尤为明显, 与传统的设备零部件更换维修相比, 焊接技术只需要消耗少量焊材和能源就可以完成对设备的维修, 其成本往往是新件的几分之一。同时, 高质量的焊接修复不仅能针对当前出现的损伤问题进行修复, 还可以对易损耗部位进行强化处理, 如堆焊耐磨层、优化焊缝设计提升疲劳强度, 使机械设备在后期使用中具有较强的适应性。

## 2 矿山机械维修中焊接技术应用遇到的问题

### 2.1 焊接材料选择难题

在矿山机械维修中, 焊接技术是当前常见的维修技术之一, 但是在实际应用中 also 面临一定的问题, 其中典型问题就是焊接材料的选择。因为矿山机械设备运行时不可避免地会处在高压、腐蚀、高温等恶劣环境下, 所以想要保障焊接质量就需要对这类因素进行考虑。在焊接材料选择时需要具备良好的耐高温性能, 确保材料可以在高温环境下依然展现出良好的维修性能。同时, 焊接材料还必须具备耐腐蚀性能, 在实际

应用中,当材料接触到腐蚀性介质,如盐、酸、碱等物质,需要抵抗这类物质的侵蚀,保证材料的使用寿命。此外,焊接材料的选择不仅要考虑其性能,还需要对成本与可用性进行考虑,在机械设备维修中焊接材料使用量较大,所以材料选择最好是易获取、成本低<sup>[3]</sup>。

## 2.2 焊接操作困难

矿山机械的体型较大,并且内部结构复杂,一旦需要对机械设备进行维修,许多焊接位置都处于机械内部,不仅空间狭小,还难以接近,这就需要工作人员在狭小的空间中完成焊接工作,进而增加了焊接难度,并且容易造成焊接质量不稳定。再加上矿山机械设备通常处于恶劣的工作环境中,焊接操作时需要工作人员克服高温、高压、有毒气体等条件,进一步增加焊接的风险。

## 2.3 焊接质量评估

在矿山机械设备焊接完成后,焊接整体质量会对机械设备的安全性和稳定性产生直接影响。但是由于焊接位置通常在机械设备的内部,无法使用肉眼直接观察,因此如何对焊接质量进行综合评估就成了重点问题。如果在评估时没有对焊接质量进行合理评估,就可能导致机械设备的强度不达标,进而使得设备耐久性下降。因此需要相关人员积极应用无损探测技术对焊接质量进行确定<sup>[4]</sup>。

## 2.4 焊接后的热处理

在焊接工作完成后对焊接部位进行热处理可以有效提升接头的强度和韧性,进而提升矿山机械承受荷载的能力。但是,在热处理过程中,如何对冷却速度和温度进行控制则是一个重点问题,如果对温度或者冷却速度控制不够精准,就会导致接头变脆弱,使得接头内部应力增大,进而出现裂缝。

# 3 矿山机械维修中焊接技术应用策略

## 3.1 破损修复

在矿山机械使用过程中其内部结构不可避免地会受到损坏,如磨损和开裂等问题,因此为了对这些损坏的部件进行修复,需要对断裂的零件进行连接修复,使其能够恢复正常功能。在修复过程中,首先要开展准备工作,工作人员需要对裂口位置进行清理,将表面污垢去除,确保表面没有氧化物后对焊接位置进行打磨,提升焊接材料与机械构件的粘粘性。之后需要对焊接方法与焊接材料进行合理选择。根据机械设备损坏部件的材料性质和使用要求,可以选择气体保护

焊、激光焊、电弧焊等,而焊接材料可以选择焊条、焊丝等。例如:针对承受冲击载荷的厚壁结构开裂,应优先选用低氢型焊材配合预热缓冷工艺,以避免冷裂纹并保证接头韧性;对于大面积均匀磨损的耐磨衬板,则适合采用自动化程度高的埋弧堆焊或耐磨药芯焊丝气保护堆焊,实现高效率的表面增材修复。而且在焊接修复完成后,需要对其进行后续处理,包括缓冷保温消氢、局部热处理消除残余应力,同时要对修复区域进行无损检测,验证内部质量。此外,现代矿山机械设备维修中的焊接修复不能局限于简单的功能恢复,而是要在焊接过程中实现机械设备性能的提升。因此,在修复磨损部位(如铲斗刃口、破碎机锤头)时,通过选用高铬铸铁型耐磨焊材或碳化钨复合焊材进行梯度堆焊,可在恢复几何尺寸的同时赋予表面数倍于基体的耐磨性;对承受交变载荷的铰接座、回转支承等关键节点,在裂纹修复后采用超声冲击或喷丸强化技术处理焊缝区域,可大幅提升其抗疲劳寿命<sup>[5]</sup>。

## 3.2 焊接加固

在矿山机械工作过程中需要承受巨大的冲击和压力,因此机械结构容易出现破损和变形,为了提升矿山机械设备的承载能力和抗冲击力,需要借助焊接技术对机械结构进行加固。在实际应用中通过将金属材料加热至熔点,使其熔化在机械结构上后对其进行冷却固化,提升整体机械强度。在实际应用中,相关人员需要基于矿山机械设备的结构失效机理,制定预防性加固设计方案。例如:在挖掘机动臂根部应力峰值区增焊扇形肋板或箱体内增设交叉筋格,可分散交变载荷;对带式输送机桁架节点的薄弱盖板,采用坡口熔透焊加盖板复合加固工艺,显著提升抗弯刚度;针对频繁开焊的矿用自卸车货箱边板,在原始角焊缝基础上增焊连续加强角撑。这种设计方案需要工作人员结合设备运行工况对其进行综合分析,使焊接加固从原本的应急补救措施转变为主动防御措施,进而提升机械设备的使用寿命。其次,为了提升焊接加固的耐久性,需要注重焊接材料的合理选择。单一的高强度焊材容易引发焊接界面硬脆化或电偶腐蚀,因此在材料的选择上需要建立梯度过渡材料体系,在低合金钢基体上,优先采用韧性过渡层焊材缓冲应力,之后在堆焊表面耐磨耐蚀层。而对于长期暴露在酸性矿浆的溜槽底板加固,宜选用耐蚀合金焊丝进行密封盖面焊隔离腐蚀介质。

### 3.3 机械设备零部件更换

矿山机械设备的焊接技术在机械零件更换中也有着广泛的应用前景,在机械设备长时间使用中不可避免地需要对内部损坏构件进行更换,而焊接技术则可以将新零件与原有结构进行紧密连接,确保矿山机械的正常运行。例如:对于出现磨损的链条或者轮胎,可以使用焊接技术将新的链条和轮胎与原有机机械结构进行连接。在实际应用中,工作人员要先将磨损的轮胎和链条进行拆卸,并将新构件安装在对应位置,在确保连接处干净整洁后,开展焊接工作。在焊接过程中需要工作人员对焊接时间和温度进行把控,避免对新构件造成损坏。为了提升焊接更换技术的应用效果,工作人员需要引入全寿命周期成本模型,在考虑构件更换时不仅计算新件采购与焊接安装的直接费用,还需评估因缩短维修周期带来的产能恢复收益、更换后设备可靠性提升带来的维护费用下降,以及修复方案可能存在的二次失效风险成本。通过这种方法对构件进行评估,确保焊接更换技术应用的性价比。此外,为了进一步降低机械维修成本,在焊接更换技术应用中还需要对更换下来的大型构件进行合理应用,比如可以针对一些出现局部损伤的高价值部件进行维修,或者针对材质均匀的碳钢构件,经喷砂除锈后切割为标准坯料,作为后续维修的补板或加强筋原材料。

### 3.4 设备加固与改造

在矿山机械使用过程中可能会因为机械工作环境的变化,导致机械无法适应新的工作环境,这时就需要对矿山机械设备进行改造,提升机械设备的功能性。而焊接技术则能够有效提升矿山机械设备的改造效率。例如:在矿山挖掘机设备中,需要对铲斗的容量进行扩充,可以采用焊接的方式,对铲斗进行扩充。这样就可以使挖掘机具备更高的装载能力。同时,使用焊接改造技术还可以对矿山机械设备进行功能改造,以挖掘机为例,在改造过程中可以将抓取装置焊接在挖掘机的铲斗上,使挖掘机不仅可以进行铲石作业,还可以开展抓取作业,进而提升机械设备的功能性。而在焊接改造技术应用中,为了提升技术的适用性,工作人员需要借助信息技术提高改造效率,比如可以借助数字化建模,针对需要改造的机械设备进行三维建模,并在虚拟环境中对改造方案进行预演,这样就可以对不方便移动的机械设备进行针对性改造。同时,在改造过程中需要采用标准化接口设计,在保证机械结构强度的同时,方便后续对机械设备进行持续改造。

### 3.5 机械设备检测与维护

在矿山机械使用过程中需要工作人员对其进行定期维护和检测。而焊接技术可以实现对机械设备的有效检测,并对潜在的问题进行修复。在实际应用中,工作人员可以使用无损检测技术对焊接接头进行全面检测,一旦发现潜在的缺陷,就可以制定针对性维修计划。目前常见的无损检测包含超声波检测、磁粉检测、射线检测等,其中超声波检测主要是通过超声波传播的特性对焊接接头缺陷进行检测,可以有效检测出接头气孔、裂纹等问题。而射线检测则是使用射线对接头位置进行照射,如果接头出现问题,其投射和散射情况就会发生改变,进而帮助工作人员对接头质量进行判断。而磁粉检测则是借助磁性粉末在磁场下展现出的特性对接头质量进行判断。借助这类技术可以有效解决接头质量检测中的环境影响问题。最后,在焊接检测过程中,工作人员需要构建检测数据与维修策略闭环联动机制,在焊接维修过程中需要构建焊接档案数据库,记录焊接工艺相应参数和检测结果等信息,并借助大数据学习算法对接头表现历史数据进行分析,找到接头缺陷发生规律,进而实现对接头缺陷的预判,提升接头质量检测效率。

## 4 结束语

焊接技术在矿山机械维修中具有不可替代的重要作用,其灵活性和高效性使其成为设备修复的重要手段。通过对多种焊接技术的分析和应用效果的探讨,可以发现合理选择和实施焊接技术不仅能够有效修复受损设备,还能延长设备使用寿命。未来,相关人员需要进一步积累焊接技术使用经验,并结合大数据等技术提高焊接技术应用效率。

### 参考文献:

- [1] 刘鹏. 焊接技术在矿山机械维修中的应用分析[J]. 中国金属通报, 2024(01):151-153.
- [2] 钟立才. 矿山机械的焊接维修技术及维护措施分析[J]. 设备管理与维修, 2023(10):51-53.
- [3] 刘涛, 马云涛. 金属矿山机械齿轮传动设备断裂齿轮的焊接技术分析[J]. 世界有色金属, 2024(22):64-66.
- [4] 齐枫. 大型矿山挖掘机回转平台开裂故障智能维修方法[J]. 工程机械与维修, 2024(07):16-18.
- [5] 陈国雄, 曹阳, 吴家雄, 等. 焊接平台龙门架结构轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2024(04):194-199.

# 拉杆式花篮悬挑脚手架在高层住宅建设中的应用

陈杨金, 赵新新

(中交三公局华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 311199)

**摘要** 拉杆式花篮悬挑脚手架由于结构稳固、安装简易、对建筑主体影响较小的特点, 在高层建筑工程中得到普遍的应用。本研究选取一个典型的高层住宅建设项目作为实例, 从拉杆、花篮螺杆、悬挑梁这几个主要构成部分出发, 对脚手架的布局设计、构造特征以及施工时应注意的要点加以论述。研究表明, 拉杆式花篮悬挑脚手架在高层住宅建设中的应用, 能够大幅度减少钢材的消耗量, 无需在墙体上开孔, 有利于提高施工的速度和安全性, 具备较强的工程适用性。

**关键词** 高层住宅建设; 脚手架; 拉杆; 花篮螺杆; 悬挑梁

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.038

## 0 引言

随着高层住宅数量的日益增多, 施工项目中对脚手架提出了更高的要求, 然而, 以往落地式钢管脚手架存在占地大、效率等问题<sup>[1]</sup>。为此, 一种新型的拉杆式花篮悬挑脚手架体系应运而生<sup>[2]</sup>。该体系通过花篮螺杆将拉杆与悬挑梁连接, 并通过拉杆与建筑主体锚固, 实现脚手架结构的稳定悬挑, 不仅优化了结构受力体系, 也简化了施工过程, 提升了工程管理的标准化水平<sup>[3]</sup>。

## 1 工程概况

研究选用位于某市核心居住区的高层住宅建设项目, 该项目总建筑面积为 118 000 m<sup>2</sup>, 高层住宅共计 8 栋, 层数为 20 ~ 26 层, 并配置 1 栋商业裙房和 1 层地下室。住宅楼标准层层高 3.0 m, 裙房层高 4.2 m。主体结构采用钢筋混凝土框架—剪力墙体系。为确保施工安全、提高脚手架布置效率与施工质量, 住宅楼外立面整体采用拉杆式花篮悬挑脚手架体系, 局部裙房与出挑构件采用双排落地式钢管脚手架。

## 2 拉杆式花篮悬挑脚手架基本构造

1. 外脚手架采用上拉式悬挑结构体系, 由 18# 工字钢悬挑梁 (高 180 mm, 翼缘宽 100 mm, 梁长按悬挑部位选取, 为 1 400 mm)、 $\Phi 20$  mm 螺纹钢斜拉杆 (拉杆长度为 1.8 ~ 2.4 m) 及花篮螺杆总成组成。悬挑平台整体宽度统一为 1.5 m, 基本架构如图 1 所示。

2. 在标准墙面位置, 当悬挑长度  $\leq 1400$  mm 时,

采用单斜拉杆布置, 拉杆与工字钢前端通过 M30 高强螺栓固定; 当悬挑长度在 2 100 ~ 2 500 mm 区间, 主要用于阳台、凸窗、结构突角, 采用双斜拉杆对称布置, 斜角约为 45° ~ 55°, 以增强抗弯能力; 工字钢挑梁间距控制为 1.5 m  $\pm$  50 mm, 布置精度须满足平台整体水平误差  $\leq 5$  mm。

3. 花篮斜拉杆构造斜拉杆选用  $\Phi 20$  mm 国标螺纹钢 (型号: Q235-B), 与上下端花篮螺杆通过 M30 高强六角螺母连接, 中间设置花篮式可调套筒, 螺纹长度不少于 150 mm, 螺母间距可调范围 80 ~ 200 mm, 满足张拉调节需求。

4. 每榀悬挑梁通过 2 颗 M30/4.6 级锚固螺栓 (螺栓有效锚入长度  $\geq 150$  mm) 与结构预埋钢板或次梁连接; 吊挂支座钢板尺寸为 250  $\times$  100  $\times$  10 mm, 与结构楼板或圈梁间焊接固定; 工字钢根部接合钢板尺寸为 200  $\times$  200  $\times$  10 mm, 焊缝连续布设, 焊缝高度不小于 6 mm; 所有螺栓连接处, 外露螺杆长度控制在  $\geq 10$  mm, 并有 3 扣螺纹。

5. 脚手架立杆与主体连接立杆采用  $\Phi 48 \times 3.0$  mm 热镀锌钢管, 通过  $\Phi 16$  钢筋短节焊接在悬挑梁翼缘上端, 插接深度  $\geq 100$  mm; 立杆设连墙件, 每两步一组, 水平间距不大于 3 m, 垂直间距不大于 6 m; 连墙件采用两端固定式钢管斜撑与墙体预埋件螺栓锚固连接, 设置双向剪刀撑, 角度控制在 45°  $\pm$  5°。

6. 配套构件与落地脚手架过渡处理裙房、挑檐等结构高度小于 4.5 m 位置, 采用双排落地式钢管脚手

架（内排距建筑边缘 350 mm，内外排距为 1.2 m）；立杆间距为纵向 1.5 m、横向 1.2 m，与悬挑架通过钢管扣件或转接件连接；在转接部位配置  $\Phi 48 \times 3.0$  mm 斜撑与水平剪刀撑，间距控制在每两跨一组，确保悬挑架与落地架在变形协调性上的连贯过渡。

### 3 拉杆式花篮悬挑脚手架施工技术

#### 3.1 脚手架体系设置要求

本研究遵循结构型式与布置原则，主要构件包括：18# 工字钢悬挑梁（高 180 mm，翼缘宽 100 mm）、 $\Phi 20$  mm 螺纹钢斜拉杆、花篮螺杆、 $\Phi 48 \times 3.0$  mm 钢管立杆、吊挂支座钢板和接合钢板等。脚手架平台悬挑宽度统一设置为 1.5 m，自第 3 层开始每层设置独立悬挑体系，平台高度与楼板齐平或略高。

挑梁间距与构件布置为 18# 工字钢悬挑梁按横向间距 1.5 m 进行均布安装，满足脚手架承载稳定要求；挑梁伸出长度视出挑构件而定，普通墙体位置为 1400 mm，阳台及凸窗位置延伸至 2 100 ~ 2 500 mm，对应分别设置单斜拉杆或双斜拉杆支撑形式。

每段悬挑脚手架系统均配置附墙连接点，间距控制在两层以内，采用双扣件连接方式固定至楼板预埋钢套管中架体外侧统一加设防坠安全网及踢脚板，踢脚

板高度不低于 180 mm，防止工具及材料滑落。工字钢挑梁底部与楼板之间增设 10 mm 厚橡胶垫片，所有斜拉杆采用 M20 螺纹钢，并配置双螺母及弹簧垫圈防松结构，安装完成后进行预紧力检测，控制在 30 ~ 35 kN 范围，符合 JGJ 130-2011《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》的相关规定<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 悬挑梁与锚固系统施工技术

悬挑梁与建筑主体连接采用双 M30/4.6 级螺栓锚固方式。锚固螺栓预先植入主体剪力墙或圈梁中，锚入深度需  $\geq 150$  mm，配合高强螺母与钢板焊接构成稳定锚固体系。上拉斜杆连接处设置吊挂支座钢板（250×100×10 mm），工字钢尾部设置接合钢板（200×200×10 mm）焊接连接，螺杆外露不少于 10 mm 或 3 扣螺纹。

斜拉杆采用  $\Phi 20$  mm 螺纹钢杆件，搭配 M30 花篮螺母调节拉力。对于挑出长度较大的部位（2.5 m 梁位处），需在对称位置设置双斜拉杆，并校正其倾角控制在  $45^\circ \sim 55^\circ$  之间，锚固拉拔满足脚手架规范中  $\geq 30$  kN 的拉拔力要求<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 平台与立杆系统施工要点

立杆布置形式与杆件规格，脚手架立杆采用  $\Phi 48 \times 3.0$  mm 热镀锌钢管，通过钢管扣件与挑梁焊接短钢筋插接固定，插接长度  $\geq 100$  mm，立杆纵向间距 1.5 m，

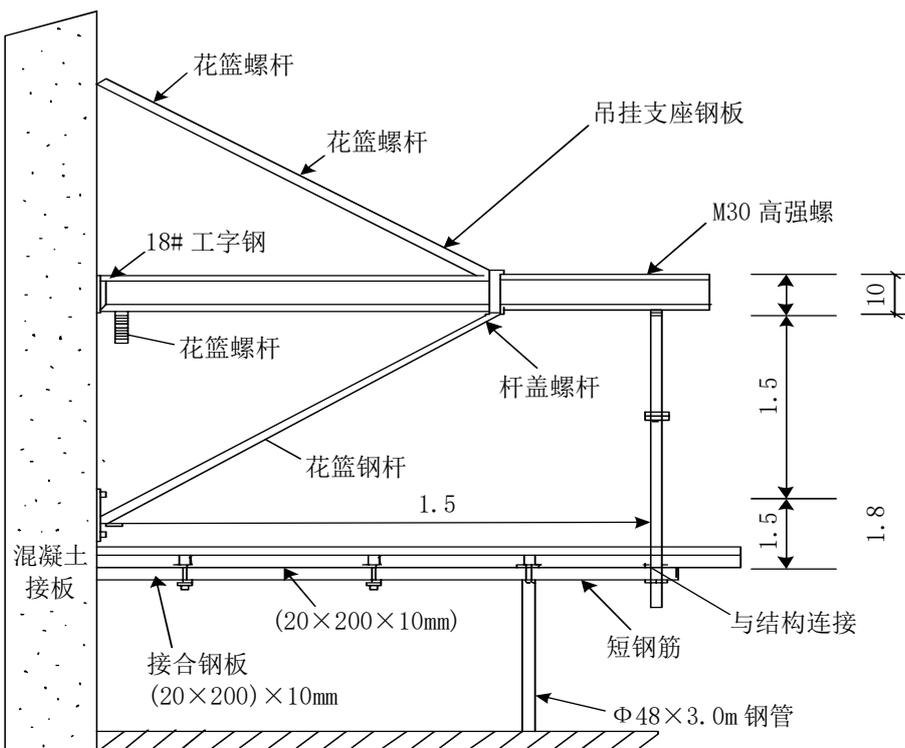


图 1 基本架构

横向间距 1.2 m, 保证整体平台负荷传导合理。每两根立杆间设置水平横杆及扫地杆, 形成稳定的三角受力系统。

悬挑架外部以及两端都要配置双向剪刀撑 (Φ48 钢管), 每两根立杆间布置一组, 联结处应用双扣件来固定。剪刀撑的角度要限定在 45° 到 60° 之间, 并且焊接点必须完好。

平台作业面采用双层满铺竹胶板与钢跳板结合方式, 第一层铺设厚度为 18 mm 的定型竹胶板, 第二层采用厚度为 50 mm 的镀锌钢跳板, 采用对缝铺设方式, 四边均须用防滑卡扣与横杆连接, 以防止板材位移和掉落风险。跳板外侧设 250 mm 高的挡脚板, 内侧设钢管式内扶手高 1.2 m, 外防护栏杆高 1.8 m。所有立杆底部均设置 Φ200 mm 钢底托, 通过调节丝杠高度实现立杆垂直度校正, 立杆与挑梁的焊接钢筋插孔须涂刷防锈漆, 插接完成后应灌注结构胶封闭。

### 3.4 安全防护与施工控制措施

平台外侧设置 1.2 m 高的防护栏杆与 180 mm 高踢脚板, 栏杆下设中间横杆, 高度控制在 600 mm±50 mm, 并通过钢丝绳与立杆扣件加固; 防护网采用绿色密目网封闭, 不得留有空隙。施工期间平台上严禁堆放重型材料, 每平方荷载不得超过 2.0 kN/m<sup>2</sup>, 立杆上部不得悬挂提升设备。严禁跨步拆除或局部超载作业, 遇雷雨、大风天气 (风力 ≥ 6 级) 时须停止脚手架区域作业并加固拉结件。

### 3.5 特殊构件与裙房区域处理技术

裙房区域由于结构标高较低 (层高 4.2 m), 采用双排落地脚手架代替悬挑形式, 内排距建筑边缘控制在 350 mm, 立杆间距同上。裙房顶部设置钢平台作为吊篮与清洗轨道施工作业层, 与脚手架通过斜拉杆进行临时锚固, 平台端部加装 10×100 mm 防护挡板, 提升边缘安全性。转接部位采用钢管斜撑和水平连接杆将两套架体稳定连接, 转接高度不大于 600 mm。搭接钢管不得悬空, 应形成三点以上支撑, 严禁空中对接。

在凸窗、空调板等局部出挑构件处, 由于墙体承压面积小, 斜拉杆锚固点改为圈梁或主梁部位, 并配置加厚型钢吊挂支座 (12 mm 厚钢板), 同时在前端设置附加水平杆加强脚手架转角稳定性。阳台突角、造型线条等非标准构件位置, 优先采用可调节式 U 型支座配合附墙件施工。对于斜屋面或局部坡道区域, 如高度超过 1.5 m, 需增设斜向踏板及扶手钢管, 坡度控制在 30° 以内, 并设置止滑横杆。

### 3.6 脚手架拆除与后期处理技术

脚手架的拆卸工作一定要按照“由上而下, 先外围后内部, 逐层分段”的原则来进行, 严禁上下同时操作。拆卸之前要对施工人员进行安全和技术上的交底, 使每个人清楚自己的职责以及拆卸程序。最先拆掉的是防护栏杆、封闭网片和连接墙体的部件, 之后再按悬挑梁的次序, 从外部向内部逐步拆去斜拉杆、立柱及挑梁等结构。

在悬挑脚手架里采用的 18# 工字钢以及 Φ20 mm 的斜拉杆都是可以循环利用的部件, 在拆卸之后要立刻做好编号分类并且回收进仓库里去。

在脚手架拆卸完毕之后, 外墙及楼板构造内所使用的钢筋预埋件、开孔槽等等均要依照规定实施封闭处置。各个孔洞以及开槽处应用强度达到 C30 以上的细石混凝土或者高性能修补砂浆做填充修复工作, 封闭的厚度通常不得少于 20 mm, 使锚定点的力量同原来的构造一样。待平整磨光之后, 再施以界面剂或是防水层, 视具体情况做防渗透、防裂缝处理。

## 4 结束语

本研究设计了某高层住宅项目中拉杆式花篮悬挑脚手架体系, 论述了其设计布局、构造特征以及施工重点。此脚手架具有结构稳固、安装简易的特点, 并且对主体结构影响甚微, 可以大幅度减少钢材消耗, 提高施工速度并且保障施工现场的安全。此外, 对悬挑梁、斜拉杆、花篮螺杆这些重要组件进行改良设计之后, 抵抗弯曲力、横向位移的能力有所改进, 完全符合高层建筑的要求。运用拉杆式花篮悬挑脚手架不但改善了施工流程, 而且使工程项目管理达到更高的规范标准。

### 参考文献:

- [1] 余桂根. 建筑工程脚手架安全监管要点及控制技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 158-160.
- [2] 叶强. 浅析花篮拉杆悬挑脚手架在工程中的运用 [J]. 建筑安全, 2024, 39(08): 20-23.
- [3] 李艳. 高层施工中花篮拉杆式型钢悬挑脚手架及预埋式连墙件的应用研究 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(12): 43-45.
- [4] 赵一起, 王瑾, 令狐延, 等. 不同规范下扣件式钢管支撑架立杆稳定性计算对比研究 [J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 1146-1149.
- [5] 李余兵, 赵泽明, 赵兴坤, 等. 花篮螺杆式悬挑脚手架高强螺栓拉拔试验 [J]. 建筑技术, 2023, 54(20): 2501-2504.

# 土木工程建设视角下住宅 建筑结构设计优化策略

李秀芬<sup>1</sup>, 徐庆新<sup>2</sup>

(1. 济南建之咨工程技术咨询有限公司, 山东 临沂 250000;

2. 济南远茂置业有限责任公司, 山东 济南 250000)

**摘要** 为提升住宅建筑质量与使用价值, 推动建筑行业高质量发展, 本文针对土木工程住宅建筑结构设计展开研究。在研究方法上, 通过分析结构类型、影响设计的因素, 基于多维度协同安全、全生命周期经济权衡两大原则, 从结构体系、基础、构件、材料、施工工艺等方面优化设计, 如合理选型、调整尺寸、改进配筋等。研究结果表明, 这些优化策略可平衡力学性能与空间需求, 减少资源消耗与环境负荷, 实现多效益协同提升, 为建筑行业向高效、绿色、智能方向发展提供有效路径。

**关键词** 土木工程; 住宅建筑结构设计; 建筑功能; 地质条件; 荷载条件

**中图分类号**: TU318

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.039

## 0 引言

建筑行业正在经历着由粗放型建设到精细化设计的重点发展时期, 土木工程建设住宅建筑结构设计也迎来了全新的挑战和契机。结构设计作为住宅建设中最核心的一环, 它是否合理和科学决定着整个建筑质量和使用价值。以可持续发展理念为指导, 结构设计需要综合考虑力学性能、经济成本和环境影响等诸多因素。与此同时, 建筑信息化技术发展也给结构设计优化带来了新途径, 探究顺应时代要求的设计优化策略对于促进住宅建筑的高质量发展具有重要的意义。

## 1 住宅建筑结构类型

住宅建筑的结构种类繁多, 除常见的砖混、框架、框架-剪力墙和剪力墙结构, 还包括筒体结构等适合超高层建筑的类型。砖混结构是由粘土砖或者新型砌体材料作为主要承重墙体, 与钢筋混凝土构造柱和圈梁共同组成的空间结构体系。在该结构中, 竖向承重墙体对空间的灵活分割形成制约, 并且墙体厚度需随层数增加而相应加大。根据相关规范要求, 通常在抗震设防烈度为 8 度时, 多层砌体房屋(普通砖)的层数不应超过 6 层; 当抗震设防烈度达到 9 度时, 多层砌体房屋(普通砖)的层数不应超过 4 层, 采用多孔砖时则不应超过 3 层。而框架结构采用梁柱节点的刚性连接方式构成三维受力体系, 非承重墙在结构受力过程中没有残余, 既可以拆除, 也可以重新组合, 从而达到大开间大跨度灵活空间布置的效果。地震中框架结

构靠梁柱的变形来消耗能量, 经过合理的设计后可以达到很高的抗震性能, 一般用于 6~10 层的房屋<sup>[1]</sup>。

框架-剪力墙结构, 剪力墙承受绝大部分水平荷载, 而框架则以竖向荷载和少量水平荷载为主。其剪力墙的布置需要符合均匀、对称的原则, 避免因结构偏心而产生扭转效应。在 15~25 层的住宅设计中, 框架与剪力墙的组合结构能够确保侧向移动在规定的允许范围之内, 并为居住者提供多种户型选项。剪力墙结构是以钢筋混凝土墙体为主要抗侧力构件的剪力墙结构, 墙厚一般为 180~300 mm, 通过对墙进行高厚比设计及配筋构造可以达到很高的抗侧刚度。在超过 30 层的住宅设计中, 与其他建筑形式相比, 剪力墙结构的层间移动角度更微小, 这有助于确保住户在使用时的安全性和舒适性。

## 2 影响住宅建筑结构设计因素

### 2.1 建筑功能需求演变

现代住宅在空间上追求功能复合化, 例如跃层住宅中错层结构需要对梁柱节点进行专门加工; LOFT 户型大跨挑空设计需要桁架和空腹梁这种特殊结构。智能家居设备的推广使得管线预埋的需求剧增, 结构设计中需要在确保节点处力学性能的前提下留出准确的穿梁和穿板孔洞<sup>[2]</sup>。

### 2.2 地质条件基础设计

地基土压缩模量( $E_s$ )和承载力特征值( $f_{ak}$ )对基础选型有直接的影响。当持力层为淤泥质土( $f_{ak} <$

80kPa,  $E_s < 4\text{MPa}$ ) 时, 需采用桩基础或复合地基提升承载能力; 如果有软弱下卧层则需要采用分层总和法验算沉降, 并控制地基的最终沉降  $\leq 50\text{mm}$ 。在实际的工程项目中, 某个沿海地区的住宅由于没有充分考虑到软土地基的特性, 选择条形基础, 导致出现不均匀沉降的现象。通过注浆加固的方式对基础进行加固处理, 成本增加大约 120 万元。

### 2.3 荷载条件精确计算

住宅建筑所承受的荷载复杂多样, 包括恒载 (如结构自重、固定设备的重量)、活载 (如人员活动、家具摆放等所引起的可变荷载)、风荷载以及地震作用等。准确地计算出这些荷载, 在结构设计中至关重要。以高层住宅设计为例, 其风荷载随建筑高度增加显著提高, 如果计算不准, 就有可能造成结构抗风能力欠缺, 造成安全隐患。同时各区域地震设防烈度不一, 结构受地震作用影响程度有很大差别。地震高发区必须严格执行当地设防标准计算地震荷载, 并合理安排抗震构件以保证地震时结构延性好、耗能能力强, 确保地震作用下住宅的安全, 以免由于荷载计算失误而造成结构破坏乃至坍塌的严重后果。

## 3 住宅建筑设计优化的基础原则

### 3.1 多维度协同安全准则

住宅建筑结构设计需要建立多维度协同安全防护体系。在进行设计时, 既要符合规范规定的承载能力和稳定性标准, 又要充分考虑建筑全生命周期中可能遇到的各种荷载工况和环境因素。通过对结构体系选型、构件布置以及连接构造等方面进行精细化设计来实现不同结构构件之间的协同作业, 保证结构能够形成高效的传力路径和突发状况时的冗余机制。同时, 结合抗震和抗风的具体设计, 采用性能化的设计思路, 由整体到部分, 提高结构在各方面的安全储备, 给居住者创造一个稳固可靠的空间<sup>[3]</sup>。

### 3.2 全生命周期经济权衡

住宅建筑结构设计优化应该以全生命周期为目标, 从经济方面考虑。方案设计阶段对不同结构体系、材料和施工工艺的初期建造成本和后期维护成本进行全面对比, 避免只追求初始投资的减少而忽略长期运维费用或者过分强调结构的耐久性而造成费用的大幅提高。通过对结构布置和构件选型的优化, 使材料用量得到合理的控制, 同时确保结构性能, 减少不必要的构造措施。在充分考虑施工进度对造价影响的前提下, 选择既方便施工又缩短工期、最大限度地兼顾经济效益的设计方案。

## 4 土木工程建设视角下住宅建筑结构设计优化策略

### 4.1 结构体系优化

在结构体系选型时, 需综合考虑建筑高度、功能需求、抗震设防烈度及经济性指标。对于 6 层以下的住宅, 如果场地的土壤类型是 I 类, 那么砖混结构的单一造价大约是  $800 \sim 1\,000\text{元}/\text{m}^2$ ; 并利用框架结构将单方造价提高到  $1\,200 \sim 1\,400\text{元}/\text{m}^2$ 。在 10 ~ 20 层的住宅建筑中, 与纯框架结构相比, 框架—剪力墙结构虽然增加大约 15% 的混凝土和钢材使用量, 但其结构的侧向位移可以减少 30% ~ 40%, 这使其更适合用于高烈度的设防区域<sup>[4]</sup>。

在结构布置优化中, 柱网间距的合理调整可以明显提高结构受力的合理性。以一个 8 层的框架结构为研究对象, 将柱网的尺寸从  $6 \times 6\text{m}$  调整到  $8 \times 8\text{m}$ , 可以减少大约 15% 的柱子数量, 并减少模板和钢筋的使用, 但同时也需要增加梁的截面尺寸和配筋的数量。同时, 通过变形缝的设置可以避免结构由于温度的变化和均匀沉降而出现开裂。长度大于 55 m 框架结构宜设伸缩缝; 在建筑物高度相差很大或者地基土压缩性发生显著改变的情况下, 沉降缝的布置是必要的。

### 4.2 基础设计优化

基础选型需依据地基承载力特征值 ( $f_{ak}$ ) 和建筑物总荷载 ( $F_k$ ) 进行计算。在  $f_{ak} \geq 120\text{kPa}$ ,  $F_k \leq 150\text{kN} \cdot \text{m}$  条件下, 条形基础不失为一种经济而合理的方案; 若  $f_{ak} < 80\text{kPa}$ , 桩基础则成为必要选项。在桩基础设计时, 桩径、桩长及桩间距等参数的优化对于成本有显著影响。例如: 当将桩的直径从 800 mm 降低到 600 mm 时, 单桩所需的混凝土用量减少 43.75%, 但为满足承载能力的需求, 需要增加桩的长度或增加桩的数量。

基础尺寸的优化可以利用有限元分析软件根据地基反力的分布情况对基础底板的厚度进行调整。在一个具体的工程项目中, 通过调整筏板基础的厚度, 成功地将其平均厚度从 1.2 m 减少到 1.0 m, 从而节省  $1\,200\text{m}^3$  的混凝土, 并使成本下降大约 60 万元。另外, 新型的基础结构, 例如预应力管桩基础, 与传统的灌注桩相比, 能够减少泥浆排放 80%, 缩短工程周期 20%, 并且单桩的承载能力可以提高 15% ~ 20%。

### 4.3 构件设计优化

#### 4.3.1 梁、板设计优化

梁截面优化可以与建筑空间需求相结合, 进行变截面设计。跨比较大的客厅区域梁端截面高度可以为  $1/12$  跨、跨中为  $1/18$  跨, 构成鱼腹式梁结构, 不仅能

满足受力要求,而且能减小结构高度。在开展配筋设计工作过程中,采用分离式配筋方式能够缩减钢筋搭接长度。相较于弯起式配筋,该方法可节约 5%~8% 的钢材用量。在新型楼板结构设计中,空心楼板借助内部薄壁箱体实现空心化构造。与实心楼板相较,其自重可降低 30%~40%,进而减轻楼层荷载传递。在一个 20 层的住宅项目中,当使用空心楼板后,混凝土的使用量减少 1 800 m<sup>3</sup>,而钢材的使用量也减少 120 吨。

#### 4.3.2 柱、墙设计优化

柱设计优化可以通过对轴压比的控制来达到缩小截面尺寸的目的。对于 C30 类型的混凝土柱,当轴压比从 0.8 下降到 0.6 时,柱的截面尺寸可以从 600×600 mm 缩小到 500×500 mm,同时单柱混凝土的使用量也减少 0.19 m<sup>3</sup>。通过使用钢管混凝土柱,其承载能力可以比使用普通钢筋混凝土柱提高 1~2 倍,同时其截面尺寸也能减少 30%~40%。剪力墙的优化可以采用连肢墙的设计方式,通过布置连梁把单片剪力墙划分成若干墙肢来减小墙体的刚度和地震作用。对于某剪力墙结构的住宅,经过优化,连梁的跨高比从 2.5 调整到 3.5,墙体的配筋率下降 0.3%,从而节省 80 吨的钢材<sup>[5]</sup>。

#### 4.4 材料选择优化

在混凝土材料的优化过程中,基础工程选用 C25 混凝土,并加入 20% 的粉煤灰。这种创新的混合比例可以显著减少水泥的使用量,每立方米可以减少 50 kg 的水泥,从而使成本下降大约 20 元/m<sup>3</sup>。粉煤灰这一工业废料在达到资源再利用的同时也提高了混凝土工作性能及耐久性。对梁和柱这样的主要受力构件选择 C40 高性能混凝土为重点措施。与 C30 相比,C40 高性能混凝土的抗压强度标准值增加 33%,这得益于其出色的力学特性,能够显著缩小构件的截面尺寸,在确保结构安全的前提下,给建筑内释放更多利用空间,使空间利用率达到最优。从钢材的选择上看,HRB500 级钢筋显示出明显的优越性。其设计的抗拉强度可以达到 435 MPa,与 HRB400 级钢筋的 360 MPa 相比,在满足相同的承载需求时,HRB500 级钢筋的使用量可以减少 15%~20%。这样在减少钢材采购成本的同时,结构的整体重量也有所下降,减少运输及安装的困难。

#### 4.5 施工工艺优化

在模板工程中使用铝合金模板,是促进施工效益提高的一个重要途径。铝合金制成的模板拥有非常高的循环使用频率,能够达到 300~500 次,与传统的木制模板相比,它只需要 5~8 次的循环使用,这一

优势是非常明显的。以一个 30 层的住宅项目为例,铝合金模板的使用在节省人工成本 80 万元左右的情况下,缩短工期 45 天。铝合金模板轻质高强,拼装精度高,可确保混凝土构件成型质量并降低后期修补成本。

在钢筋工程中,采用 BIM 技术,并通过对钢筋的碰撞检测以及下料的优化,成功地降低钢筋的损耗率在 3%~5% 之间。BIM 技术可以对钢筋的布置进行施工之前的仿真,对钢筋的碰撞问题进行预先的检测和解决,对下料方案进行优化,避免材料的浪费和减少钢筋的采购成本。

在混凝土工程中,采纳自密实混凝土的方法,此项技术创新消除振捣的步骤,从而使得施工的效率增加 20%~30%。自密实混凝土流动性好、填充性好,可以均匀地充填模板空间而不需要振捣,避免振捣不密造成蜂窝、麻面及其他质量问题,改善混凝土构件外观质量及内在品质,降低后期修复成本。

## 5 结束语

在建筑行业走向精细化的时代背景下,住宅建筑设计应基于多维度协同安全的基础上、基于空间功能适配的原则、基于全生命周期经济权衡的原则和基于绿色可持续理念的原则进行设计。通过对结构体系选型和布置、基础设计、构件设计和材料选择以及施工工艺等方面的优化,达到力学性能和空间需求的平衡,增强结构的适应性并减少资源消耗和环境负荷。这些战略的综合应用优化了建筑的功能并实现了可持续发展的目标,开拓了住宅建筑多效益协同提升的新途径,有助于建筑行业朝着更高效、绿色和智能的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 任敏松.绿色建筑理念下土木工程技术在住宅项目中的应用[J].城市开发,2025(11):159-161.
- [2] 弋刚,高加喜.装配式住宅建筑趋势下工程管理模式的适应性变革[J].居舍,2025(15):162-164.
- [3] 曹铭.土木工程建设视角下住宅建筑设计优化策略[J].住宅与房地产,2025(14):96-98.
- [4] 姚志勇.住宅建筑土木工程中基坑支护施工技术运用分析[J].建材发展导向,2024,22(23):75-77.
- [5] 魏巍.土木工程建设中住宅建筑设计建议[J].居舍,2024(28):102-105.

# 土工合成材料在水利工程防渗领域中的应用研究

王 贺, 周世全

(濮阳黄河河务局第一黄河河务局, 河南 濮阳 457000)

**摘 要** 随着水利工程建设的不断发展, 水库渗漏问题日益突出, 严重威胁着水利工程的安全运行。土工合成材料以质轻、强度高、防渗性能优异等特点, 在水利防渗工程中得到了广泛应用。本文以实际工程为例, 系统阐述了土工织物、土工膜、土工复合材料等在大坝、渠道防渗以及病险库加固中的应用, 通过分析其防渗机理、铺设工艺、接缝质量控制等关键技术, 总结了土工合成材料在水利防渗领域的实践经验, 旨在为同类工程提供参考。

**关键词** 土工合成材料; 水利工程; 渗漏; 防渗

中图分类号: TV5; TU5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.040

## 0 引言

土工合成材料是由高分子聚合物制成的具有特殊功能的新型材料, 具有良好的耐腐蚀性、耐久性、高强度、低渗透性等特点, 能够有效抵抗土壤及水体中的各种侵蚀因素, 延长工程使用寿命。在水利工程中, 常用的土工合成材料有土工膜、土工织物、土工格栅等。其中, 土工膜材料种类丰富, 如聚乙烯膜、聚氯乙烯膜、三元乙丙橡胶膜等, 可根据不同的工程需求选用。近年来, 土工合成材料凭借其卓越的工程性能, 在水利防渗领域发挥着不可替代的作用。然而, 如何充分发挥土工合成材料的防渗效益, 优化设计方案, 规范施工工艺, 仍需深入探索。合理应用土工合成材料进行防渗, 需要综合考虑工程地质条件、水文特征、环境因素、成本效益等多方面因素。设计时应根据渗流场分析, 合理选择土工合成材料的类型、厚度、铺设方式等参数。施工时应严格控制铺设质量, 注重搭接、焊接等细节处理, 确保防渗系统的完整性和连续性。

## 1 土工合成材料在水利工程防渗中的优势

### 1.1 土工合成材料的优异性能

土工合成材料由高分子聚合物制成, 具有质量轻、强度高、延展性好、化学稳定性强等优点。与传统的黏土、混凝土等天然材料相比, 土工合成材料能够更有效地克服防渗工程中的各种不利因素, 如不均匀沉降、裂缝发展、化学腐蚀等。正是凭借其优异的综合性能, 土工合成材料在水利防渗领域得到了越来越广泛的应用。

### 1.2 土工膜的超低渗透性

在各类土工合成材料中, 土工膜以其超低的渗透性而备受青睐。优质土工膜的垂直渗透系数可低至  $10 \sim$

$13 \text{ cm/s}$ , 相当于  $600 \text{ m}$  厚黏土层的防渗效果, 远优于传统的黏土防渗墙。且土工膜施工工艺简单, 铺设速度快, 能显著缩短工期, 降低成本。因此, 土工膜已成为大坝、渠道等防渗工程的首选材料。

### 1.3 土工织物的反滤排水功能

除土工膜外, 土工织物也是水利防渗中不可或缺的材料。无纺土工布具有孔隙率高、透水性好等特点, 能有效代替砂砾等天然反滤材料, 不仅降低了成本, 还提高了施工效率。土工布铺设于土工膜上层, 既能起到保护膜材的作用, 又能及时排出渗流, 降低浸润线。针对不同工程需求, 还可选用土工席垫、土工格栅等产品, 进一步提升防渗体系的综合性能。

## 2 土工合成材料在水利工程防渗中的应用

### 2.1 土工合成材料在堆石坝防渗中的应用

堆石坝由于填筑材料渗透性较大, 渗漏问题一直是工程界关注的焦点。采用土工合成材料进行堆石坝防渗, 可有效克服传统黏土防渗存在的不均匀沉降、抗剪强度低等缺陷。常用的做法是在上游坝坡铺设土工膜, 并与坝基防渗墙、坝肩混凝土趾板等形成连续的防渗体系<sup>[1]</sup>。例如: 某水电站面板堆石坝, 坝高  $160 \text{ m}$ , 坝体填筑碎石渗透系数高达  $10 \sim 1 \text{ cm/s}$ 。设计采用了 HDPE 土工膜作为主要防渗材料, 膜厚  $2.0 \text{ mm}$ , 最大铺设长度达  $200 \text{ m}$ 。为保护膜材免受破损, 土工膜下设  $400 \text{ g/m}^2$  长丝无纺土工布作为保护层, 上铺  $1\ 800 \text{ g/m}^2$  短纤针刺无纺土工布作为压重层。经过严格的现场焊接质量控制, 土工膜接缝剥离强度、剪切强度均达到母材的  $90\%$  以上, 渗透系数低至  $10 \sim 12 \text{ cm/s}$ 。

在坝体填筑过程中, 土工膜变形协调性良好, 未

出现褶皱、空鼓等缺陷。蓄水后监测显示,坝体渗流量和浸润线均控制在设计允许范围内,坝体变形小于预期值,整体运行状态良好。该工程充分展示了以土工膜为核心的防渗体系在高土石坝中的优越性能,为同类工程提供了宝贵经验。

可见,土工合成材料凭借其高强度、低渗透性、变形适应性等优点,是当前堆石坝防渗的优选材料。但同时也需注意,土工膜施工质量对其防渗效果至关重要,设计和施工中应着重考虑减小应力集中、提高接缝质量、严格质量控制等关键问题,以确保土工膜发挥最佳防渗效益。

## 2.2 土工织物在渠道防渗中的应用

随着大规模水利工程的持续建设,人工渠道的防渗问题日益突出。传统的黏土或混凝土衬砌存在渗漏风险高、工期长、造价高等缺点。采用土工织物复合衬里技术,可显著改善渠道的防渗性能。例如:某灌区 450 km 输水干渠为例。该渠道设计流量 120 m<sup>3</sup>/s,采用梯形断面,边坡 1:2.5。考虑到渠道沿线地质条件复杂,设计采用土工布/土工膜复合衬里进行全线防渗。具体做法为:渠道开挖后,先铺设一层 600 g/m<sup>2</sup> 长丝无纺土工布,作为土工膜的保护层;然后铺设厚度为 2.0 mm 的 HDPE 土工膜,搭接区粘接或焊接;最后在膜上铺设 800 g/m<sup>2</sup> 无纺土工布,起到保护和压重作用。

施工中严格控制了搭接长度和接缝质量。无纺土工布采用热粘法搭接,搭接宽度不小于 15 cm;土工膜采用热楔式焊接,焊缝强度达到母材的 90% 以上。渠道运行多年后,监测资料表明衬里渗透系数低至 10 ~ 13 cm/s,运行状况良好,没有发生任何渗漏事故。

该工程表明,无纺土工布具有优异的耐久性、反滤性和排水性,能有效防止土颗粒对土工膜的刺穿,提高复合衬里的耐久性。与传统的砂砾反滤料相比,无纺土工布施工速度更快,可显著缩短工期。同时,土工织物复合衬里的造价也大大低于传统混凝土衬砌。

## 2.3 土工织物在病险库加固中的应用

我国现有大量的老旧水库,受当时设计标准和施工条件限制,普遍存在渗漏、变形等病险问题。采用土工织物对病险水库进行除险加固,可以最大限度利用原有工程设施,减少占地和移民,缩短工期,降低工程造价<sup>[2]</sup>。例如:某大型平原水库始建于 20 世纪 50 年代,总库容 1.2 亿 m<sup>3</sup>,土石坝最大坝高 21m。由于长期运行和管理不善,坝体渗流严重,库岸普遍滑坡,已成为国家三类病险水库。除险加固设计在上游坝坡铺设土工布/土工膜复合防渗系统,下游坝坡采用土工格栅加筋削坡的方案。

在复合防渗系统中,首先铺设 2 mm 厚的 HDPE 土工膜,其上铺设 1 200 g/m<sup>2</sup> 的长丝无纺土工布保护层。坝肩部位的土工膜通过锚固沟与岸坡连接,坝趾则采用混凝土压重压盖。在下游削坡部位,每隔 2 m 铺设一层聚酯土工格栅,以提高土体的抗剪强度。同时在坝体内设置竖向土工织物排水体,用于疏导渗流,降低浸润线。经过一年多的加固施工,原水库已焕然一新,各项安全指标均达到规范要求。坝体渗流量从原来的 1.5 L/s 降至 0.2 L/s 以下,库水位恢复到正常蓄水高程。与传统的黏土防渗和浆砌石削坡相比,采用土工织物不仅减少了土石方开挖量,还缩短了工期,使工程总造价降低了近 20%。

可见,凭借其优异的反滤排水和加筋稳定性能,土工织物已成为一种行之有效的病险水库加固材料。对于渗流和稳定问题突出的老旧水库,采用土工织物进行除险加固,不失为一种经济快捷的补救措施。但同时也应看到,病险水库情况复杂,设计中需因地制宜,并严格施工质量控制,以确保加固工程达到预期效果。

## 2.4 土工合成材料在水利工程防渗中的施工要点

土工合成材料施工质量直接关系到防渗工程的成败。为确保土工合成材料发挥最佳防渗效果,施工中应严格控制每一个环节,特别是铺设和焊接等关键工序。

铺设前,应根据设计要求对土工合成材料进行抽样检测,确保各项指标满足设计要求。铺设场地应提前清理平整,并用细砂或无纺土工布作为垫层。铺设时应控制铺设方向与水流方向一致,避免出现褶皱和空鼓。搭接宽度对于土工膜一般为 10 ~ 15 cm,土工布则根据场地条件确定,但不应小于 30 cm。大风天气应采取压重等措施防止材料位移。

焊接是决定土工膜防渗性能的关键工序。焊接设备必须采用专用的热楔式焊接机或热风焊枪,并根据气温、湿度等条件优化焊接温度、压力和速度等参数。焊接接头应进行 100% 的无损检测,发现问题应及时返工处理。在土工膜铺设完成后,应尽快用土工布或细砂进行压重保护,防止其遭到损伤。

在运输和存储过程中,土工合成材料应避免阳光直射和尖锐物刺破。宜使用芯架装卷盘进行运输,卷盘直径应大于 0.5 m。现场存放时,垫层应平整坚实,覆盖遮阳防雨措施。各卷材应按批次堆放,并设立明显标识,便于施工管理。

## 3 土工合成材料在水利工程防渗领域的应用前景

### 3.1 新型土工合成材料的研发

随着高分子材料科学的飞速发展,一些性能更加优越的新型土工合成材料不断涌现。这其中就包括纳

米复合土工膜、自愈合土工膜、超高分子量聚乙烯土工格栅等。纳米复合土工膜通过在聚合物基体中掺入纳米粒子,可显著提高材料的力学性能和耐久性。自愈合土工膜则利用特殊的化学键合原理,能够在破损处自动修复,大大延长了使用寿命。超高分子量聚乙烯土工格栅强度高达普通聚酯格栅的10倍以上,能够为边坡、路基等提供更加可靠的加筋稳定作用<sup>[3]</sup>。这些创新型土工合成材料的问世,为解决水利防渗工程的技术难题提供了全新思路。例如:采用纳米复合土工膜不仅能提高防渗效果,还能降低因基底变形引起的膜材破坏风险。将自愈合土工膜用于水库大坝防渗,则可减少因老化破损导致的渗漏隐患。在河道、海堤等防护工程中,超高强度土工格栅能够提供更加有力的稳定作用。随着这些新技术的逐步成熟和推广应用,传统的防渗结构形式和施工工艺也将随之改进优化,促进行业整体技术水平的提升。

### 3.2 土工合成材料的标准化应用

目前,土工合成材料虽然已在诸多水利工程中得到应用,但在设计和施工中仍存在一定的随意性和盲目性。究其原因,主要是由于缺乏系统的技术标准和规范所致。为规避应用风险,工程实践中往往倾向于过度设计,造成了材料的浪费和工程造价的提高。而有些工程则因缺乏指导而质量控制不严,埋下渗漏隐患。针对上述问题,亟需加快推进土工合成材料的标准化应用。近年来,我国陆续出台了《防渗土工膜技术规范》《土工合成材料应用技术规程》等一系列行业标准,对材料性能指标、设计选型、施工要求等方面做出了明确规定。这为规范土工合成材料的应用提供了重要依据。但从实际情况看,现有标准在一些细节问题上仍不够细致全面,在特殊工况和复杂环境下的指导性有待加强。未来,应在现有标准基础上,结合工程实践经验,进一步细化和充实标准内容<sup>[4]</sup>。同时,要加大标准的宣贯力度,通过培训、示范等方式促进标准的贯彻执行,推动行业形成规范有序的技术应用秩序。

### 3.3 土工合成材料与新兴技术的融合应用

当前,信息技术、智能制造等新兴技术正深刻影响着工程建设领域。将其与土工合成材料的应用相结合,有望进一步提升防渗工程的建设水平。例如:利用物联网技术对土工膜渗流量进行实时监测,通过大数据分析对渗流趋势进行预判,可为水库安全运行提供科学决策依据<sup>[5]</sup>;采用智能焊接设备对土工膜接缝质量进行在线检测,通过数字化管控手段优化施工工艺

参数,可显著提高防渗系统的施工效率和质量可靠性。

事实上,已出现了一些将新技术应用于土工合成材料的成功案例。我国某抽水蓄能电站上下水库衬砌中,则采用了喷涂式自粘土工膜施工工艺,实现了衬砌防渗与保护的一体化,提高了施工速度和整体防渗性能<sup>[6]</sup>。随着BIM、人工智能、5G等技术在水利工程中的深入应用,与土工合成材料的融合空间将更为广阔。通过融合应用,不仅能优化材料设计,简化施工工序,提升防渗品质,还能实现工程全生命周期的精细化管理,为工程运行安全提供有力保障。

随着水利工程建设强度的不断加大,对工程材料的性能要求也在不断提高。土工合成材料作为一种新型工程材料,已在防渗领域展现出广阔的应用前景。未来,在新材料研发、应用标准完善、跨界技术融合等方面,土工合成材料的发展空间还很大。相信经过产学研界的共同努力,土工合成材料必将在水利防渗乃至整个水利工程建设领域发挥出更大的作用,为保障水资源高效利用和国家水安全做出更大贡献。

## 4 结束语

土工合成材料以其优异的防渗性能和综合效益,已成为水利防渗工程的首选材料。从实际案例可以看出,土工膜、土工织物等材料在大坝、渠道、病险库等防渗领域均得到了成功应用,取得了显著的工程效益。但同时也应看到,土工合成材料的应用尚处于发展阶段,在材料改性、设计优化、施工工艺等方面仍有进一步提升的空间。未来,随着土工合成材料研究的不断深入,其在水利防渗领域的应用前景将更加广阔。工程实践与理论创新携手并进,必将推动水利防渗技术的长足发展。

### 参考文献:

- [1] 李延忠,吕晓.土工合成材料在水利工程防渗中的应用[J].合成材料老化与应用,2021,50(04):131-133.
- [2] 张振铎.土工合成材料在水利工程中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(06):166-167.
- [3] 赵月月.路基养护工作中土木合成材料的应用研究[J].水上安全,2025(03):131-133.
- [4] 张强.水利工程堤坝防渗与加固技术分析[J].地下水,2024,46(06):295-297.
- [5] 曹建伟.水利工程施工中堤坝防渗加固技术[J].中华建设,2024(09):127-129.
- [6] 李惠龙.水利工程中土工合成材料的应用[J].江苏建材,2024(04):27-28.

# 复杂山区超高墩大跨曲线刚构桥 施工控制技术研究

莫承维, 石佳承, 刘 奎

(中交一公局第四工程有限公司, 广西 南宁 530000)

**摘要** 在复杂山区建设超高墩大跨径曲线线形的连续刚构桥, 传统方式已难以同时保证高墩稳定、主梁线形和合龙精度。本文采用反算控制法结合弹性杆柱理论, 对曲线主梁及高墩的水平、竖向位移进行逐段预测与修正。通过计算关键截面应力与挠度, 评估梁段安全裕度。针对山区昼夜温差大、混凝土收缩徐变显著的特点, 建立温度应力及长期变形预估模型, 利用集成全站仪+激光扫描, 形成三维动态坐标采集网络, 构建“监测—分析—决策—执行”闭环智能调控平台, 自动修正施工偏差。

**关键词** 复杂山区; 超高墩大跨径; 连续刚构桥; 合龙精度; 反算控制法

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.041

## 0 引言

现代经济的发展推进了交通基础设施建设不断完善, 复杂山区桥梁建设问题接踵出现<sup>[1]</sup>。例如: 超高墩大跨曲线刚桥具有较长的主跨和较高的桥墩, 在复杂山区环境施工中, 需要兼顾超高墩的稳定性、大跨度的施工精度控制, 以及复杂的曲线结构, 存在较大的难度挑战<sup>[2]</sup>。因此, 研究此类桥梁的施工控制技术具有重大意义。目前对于施工控制技术的研究主要集中在振动台试验以及有限元分析的方法上来探讨桥梁的抗震性能及施工过程中的稳定性<sup>[3]</sup>。已有研究表明, 超高墩的隔板布置对施工难易程度及效率有着重大影响, 而对隔板的设计加以优化能大幅度提升施工效率, 并且降低材料费用<sup>[4]</sup>。而且随着施工监测技术的进步, 光纤法和数字图像技术的应用使施工监控的工作效率与质量得到了进一步的提高<sup>[5]</sup>。复杂山区超高墩大跨曲线刚构桥施工控制技术尚有许多问题有待解决。例如: 在超高墩施工时要全面考量地质状况、施工方法及外界环境等多方面的影响。而且大跨度、曲线形结构的施工精度把握至关重要, 这就要求研发出更为精准的施工控制手段与监控技术。本文对复杂山区超高墩大跨曲线刚构桥的施工控制技术进行分析, 为保障大桥施工安全、提高结构质量提供参考。

## 1 复杂山区施工控制理论

### 1.1 超高墩大跨曲线刚构桥控制的主要内容

在复杂的山区建设超高墩大跨曲线刚构桥, 施工控制的关键是要保障结构的安全性、线形精确度以及

施工过程的稳定。由于墩高且曲线形状复杂, 所以在施工期间采用悬臂浇筑或者分段组装的方法, 会引发较大的结构位移或是应力重新分配的现象, 这就必须要借助于监控和仿真分析来对整个施工过程加以控制。尤其是曲线桥梁, 对水平方向上的偏差特别敏感, 一旦控制不好就会给桥梁的使用性能和耐久性带来极大的负面影响。另外, 温差影响、收缩徐变以及预应力的施加控制也是不容小觑的部分, 要构建精密的施工控制模式, 适时地对施工计划作出调整。桥梁施工控制的内容覆盖了从设计阶段的施工模拟, 到施工现场的实际监控, 直到竣工后对桥梁健康的评价, 都需做到全周期的精细化管理。

### 1.2 施工控制的影响因素

在复杂的山区环境中, 施工控制受到众多内外因素的影响, 主要有以下几点:

1. 山区地势高低不平, 岩石状况变化多端, 给基础工程的施工带来了极大的挑战。桩基的位置偏差或是支撑力分布不均很容易导致桥墩发生位移, 对上部结构的精确度造成影响。

2. 气候环境对混凝土性能及结构变形有很大的影响, 比如高海拔、强劲的风力、大的温度变化都是重要变量。

3. 结构本身的特性也是控制中的重要因素, 墩柱的高度超出限制、曲率半径较小、节段重量较大都会对吊装、张拉以及浇筑工艺提出更高的要求。

4. 施工方法的选择以及工艺流程的安排对控制效

果有直接影响。选用挂篮、托架、顶推或是预拼装等方案,对于控制点的设置及测量方法都有所影响。

5. 施工监测技术的先进性及管理水平对工程有决定性影响,监测系统精确度的高低、作业人员的技术水平、技术交底工作的周密性,都能在施工过程中起到增大或者减小偏差的作用。

## 2 关键施工控制技术

为了保证桥梁的结构安全、线形精度及长期耐久性,必须采用一系列系统化、科学化的施工控制技术。本文从结构线形控制技术、应力与位移监控等方面进行深入探讨。

### 2.1 结构线形控制技术

曲线刚构桥与普通直线桥不同,其主梁在平面和竖向均存在曲率,施工过程中悬臂节段的累积误差会放大线形偏差。因此,线形控制的核心是预测并修正施工过程中主梁与墩顶位置的偏移量。通常采用反算控制法,即通过有限元计算得到施工阶段的理论控制坐标,再结合实测值进行误差修正。

设施工第段梁体的理论坐标为 $(x'_i, y'_i, z'_i)$ ,实测坐标为 $(x''_i, y''_i, z''_i)$ ,则线形偏差为:

$$\Delta L_i = \sqrt{(x''_i - x'_i)^2 + (y''_i - y'_i)^2 + (z''_i - z'_i)^2} \quad (1)$$

当线形偏差 $\Delta L_i$ 超过规定时,需要通过调整蓝前量、节段模板位置或施工顺序进行修正。

高墩在施工过程中会发生水平和竖向位移,其位移不仅与结构自重有关,还受到风荷载、温度梯度及施工设备荷载的影响。可用弹性杆柱理论近似预测墩顶水平偏移:

$$u = \frac{PH^3}{3EI} \quad (2)$$

式(2)中, $P$ 为施工设备作用力, $H$ 为墩高, $E$ 为混凝土弹性模量, $I$ 为墩横截面的惯性矩。

当墩高超过100 m时,实测数据与有限元模拟相结合的双控方法更为可靠,即通过自动化测量设备(全站仪+GNSS)获取墩顶实时坐标,再与计算模型结果对比,动态修正后续施工段的位置。

### 2.2 应力与位移监控技术

超高墩曲线刚构桥大多采用悬臂现浇或挂篮法施工。在该过程中,主梁受力随浇筑节段增加而显著变化。为避免结构出现开裂或超限变形,需要严格监控截面应力和挠度。

在施工期间,梁段截面应力可近似计算为:

$$\sigma = \frac{My}{I} + \frac{N}{A} \quad (3)$$

式(3)中, $M$ 为弯矩, $y$ 为截面点到中性轴的距离, $N$ 为轴力, $A$ 为截面面积。

### 2.3 温度与收缩徐变控制

山区昼夜温差大,混凝土梁体因温度梯度产生内应力。温度应力可按式估算:

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T \quad (4)$$

式(4)中, $\alpha$ 为混凝土线膨胀系数, $\Delta T$ 为温差。根据计算结果,采取相应的控制措施,如夜间浇筑、保温覆盖、洒水养护等,以减少温度梯度。

混凝土在长期使用中会发生收缩和徐变,造成主梁线形下挠。根据《fib混凝土结构模型规范2010》,预测值计算公式为:

$$c(t) = \epsilon_{sh} + \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_0}{E} \quad (5)$$

式(5)中, $\epsilon_{sh}$ 为干燥收缩, $\varphi(t, t_0)$ 为徐变系数, $t$ 表示当前时间, $t_0$ 表示初始时间, $\sigma_0$ 为初始应力。施工控制中需要通过分阶段张拉、合龙顺序调整来补偿。

预应力是刚构桥控制的核心,张拉力的误差会显著影响结构内力分布。预应力有效值可按式计算:

$$P_e = P_j - \Delta P_{fr} - \Delta P_{el} - \Delta P_{st} \quad (6)$$

式(6)中, $P_j$ 为张拉初值, $\Delta P_{fr}$ 为摩擦损失, $\Delta P_{el}$ 为锚具滑移与弹性压缩损失, $\Delta P_{st}$ 为收缩徐变损失。

### 2.4 测量与信息化监控技术

复杂山区受地形条件限制,存在严重的遮挡问题,传统单一测量方式无法满足其精度要求,典型设备测量精度如表1所示。可以发现,全站仪+激光扫描仪的组合技术能够实现三维动态坐标采集,更适用于复杂山区地形条件。

表1 典型设备测量精度

测量设备	水平精度 (mm)	竖向精度 (mm)	使用范围
全站仪	±2	±2	主桥梁线型监控
GNSS	±10	±15	大范围定位
激光扫描仪	±3	±3	高墩形态监控

合龙段是整个刚构桥的控制难点之一,由于前期累积误差和温度影响,往往需要合龙口预调高差和预留横向偏移。合龙误差的控制可采用反算法:

$$\Delta_c = (h_L + h_R) - H_0 \quad (7)$$

式(7)中, $h_L$ 、 $h_R$ 为左右悬臂自由端高程, $H_0$ 为设计合龙高程。必要情况下,可通过临时加载、调整张拉顺序和局部加热、冷却等手段进行修正。

### 2.5 智能反馈与动态调控系统

集成上述技术,本文构建全过程智能监测与反馈控制系统,如图1所示。

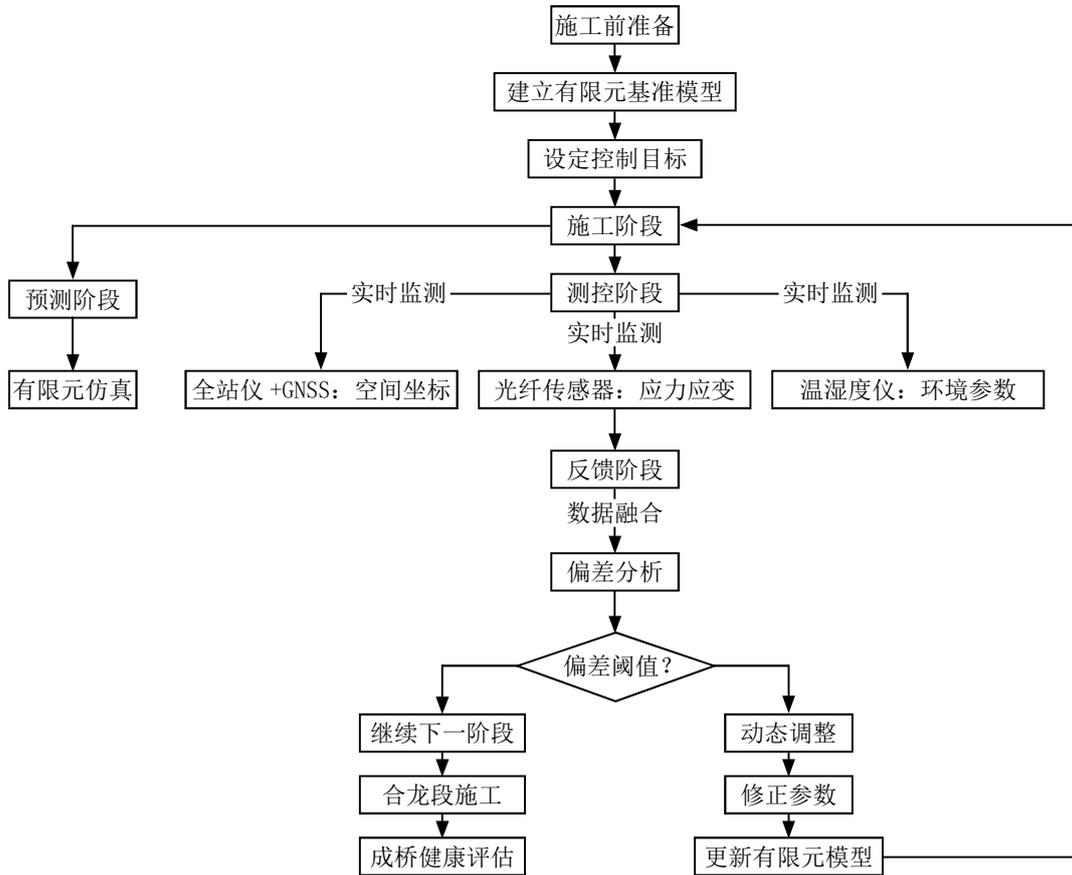


图 1 全过程智能监测与反馈控制系统流程

通过实时数据驱动有限元模型动态更新，形成“监测→分析→决策→执行”闭环，过程如下：

1. 施工前准备包括建立有限元模型、设定控制目标等。
2. 基于有限元模型和当前状态，预测下一节段的理论坐标、应力等。施工过程中进行节段施工，用多种监测技术全站仪+激光扫描仪获取实际数据。将实测数据与预测值对比，计算偏差。若偏差在允许范围内，继续下一节段；若超出，则调整施工参数，并更新模型。
3. 直至合龙段施工完成。
4. 成桥验收。

### 3 结束语

构建以“结构线型控制—应力位移监控—温缩徐变抑制—信息化量测—智能反馈调控”五大技术为支点的全过程施工控制系统。结构线型控制是实现主梁合龙精度的核心，应力与位移监控技术为施工安全提供动态保障，温度与收缩徐变控制可有效降低结构后期病害风险，测量与信息化监控技术显著提升了数据获取效率与精度，而智能反馈与动态调控系统则使施

工控制从“被动响应”转向“主动调节”。为大桥施工安全、质量的控制提供判断依据，也为同类桥梁施工控制提供一定的参考价值。在今后的研究中，在更加复杂的地形与极端气候条件下，该体系的智能化与信息化水平仍有提升空间，可结合 AI 预测与数字孪生建模，为山区桥梁建设提供更先进的控制手段。

### 参考文献：

- [1] 张雅杰,王勇.中小跨径钢混组合梁在山区桥梁建设中的适用性分析[J].江西建材,2023(05):201-202,205.
- [2] 何通,涂金平,张凯林.强震区高墩大跨连续刚构桥轻量化设计与减震研究[J].工程抗震与加固改造,2024,46(04):77-84.
- [3] 王江波,李铭伟,孙大斌,等.高铁高墩大跨度连续刚构固结体系设计方案[J].铁道建筑,2024,64(10):52-57.
- [4] 林上顺,林永捷,夏樟华,等.UHPC和预制榫卯混合连接装配式RC桥墩拟静力试验[J].桥梁建设,2023,53(01):16-23.
- [5] 况卓林,李素贞.基于分布式光纤声振传感的索结构监测[J].仪器仪表学报,2023,44(09):197-205.

# 公路路面工程水泥稳定碎石基层施工技术应用研究

罗 响

(四川蜀通港口航道工程建设有限公司, 四川 南充 637000)

**摘 要** 随着交通基础设施建设的不断发展, 公路工程对基层结构的稳定性和耐久性要求日益提高。基于此, 本文系统研究了水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程中的应用价值, 并重点提出严控配料误差、动态调控含水、稳定摊铺节奏、优化压实路径及分区养护策略, 旨在为提升基层施工质量提供有益借鉴, 进而促进高性能道路结构体系构建。

**关键词** 公路路面工程; 水泥稳定碎石基层施工技术; 配料误差; 含水量; 摊铺

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.042

## 0 引言

水泥稳定碎石基层是一种具有刚性特征的无机结合料结构层, 具备抗压强度高、结构变形小等特点, 已成为多等级道路基层施工的常规选用形式。该类技术依托水泥对矿料的包裹、胶结作用, 使基层在早期具备良好的承载能力, 并在服役期内展现出较强的抗疲劳性。在交通荷载持续增长、工期要求日益紧缩的公路路面工程环境中, 对水泥稳定碎石基层施工技术的系统研究, 已成为提升路面结构质量、保障道路运行安全以及延长使用寿命的重要基础。

## 1 公路路面工程应用水泥稳定碎石基层施工技术的价值

### 1.1 夯实基层稳定基础

在公路路面工程建设中, 水泥稳定碎石基层施工技术具有明显的结构性能优势, 能够有效提升路面基层的整体稳定性。该技术利用水泥对碎石颗粒进行胶结, 使基层具备一定的抗压强度, 有助于抵抗荷载传递过程中产生的变形, 降低沉陷等病害的发生概率。除此之外, 该技术所搭建的基层体系适配性强, 适用于不同等级的公路路面工程, 特别是在交通荷载较大、结构层次要求较高的干线及高速公路项目中表现稳定, 为整个路面结构提供可靠的力学支撑基础。

### 1.2 提升工程推进效率

水泥稳定碎石基层施工技术具有施工工艺成熟、机械化程度高等特点, 能够显著缩短基层施工周期。并且, 材料来源广泛、拌合与摊铺过程标准化程度高, 便于快速部署施工设备, 降低因作业不均带来的效率

波动。另外, 基层成型速度快, 有利于实现多个工序的衔接压缩, 推动结构层施工进度整体前移。因此, 应用此类技术手段, 有助于公路路面工程项目实现进度管控目标, 具备良好的施工组织适应性。

## 2 公路路面工程中水泥稳定碎石基层施工技术的应用策略

### 2.1 严控配料误差, 精准实现强度匹配

配合比是基层强度形成的核心参数, 对结构性能的稳定性、耐久性起着决定性作用。若配料过程中存在计量偏差, 水泥剂量不足会直接导致强度不达标, 而剂量偏高则容易引起干缩裂缝及早期破坏, 从而削弱结构整体性能<sup>[1]</sup>。因此, 施工中需依照实验室设定的目标配合比进行精密控制, 并实时监测水泥、粗细集料、水的实际投放量。控制误差范围必须紧贴规范允许的上下限值, 特别是在连续拌和生产模式下, 更要设定喂料装置的自动校准频率, 以应对设备磨损等干扰因素。综合而言, 若没有配料环节的精细化管理, 其他工序即便规范操作, 也很难弥补强度偏差所带来的结构缺陷。

在公路路面工程实践中, 要确保水泥稳定碎石基层施工技术的有效应用, 必须从原材料环节着手, 构建一套精准、稳定且闭环的配料控制体系。以水稳拌合站为控制核心, 建立集成电子秤监控系统, 采集各类物料的实时投放数据。另外, 水泥应以螺旋计量装置进行分批投放, 投料误差不得超过 $\pm 1\%$ ; 粗细集料依赖带式输送秤, 计量精度应维持在 $\pm 2\%$ 以内; 用水系统则需设置电磁流量计, 控制误差精度优于 $\pm 1.5\%$ 。

每一类原材料还要提前检验含水率、颗粒级配及堆放密实度,避免因含水率波动造成实际水灰比偏离目标值。特别是在高温季节的混合料在拌和过程中,必须由技术人员定点抽样检测,测定其拌和均匀性以及初凝时间等参数,在控制水泥用量的同时,还要调整进场水量,令其维持在最优含水率的+1%以内。对于生产周期长或运输距离远的工程,需要设置二次含水检测点,在摊铺前再次评估实际含水量是否接近目标配比,避免摊铺后压实过程中出现“虚压”或“弹跳”。如果现场检测混合料干密度偏离设计值,还应及时追踪源头配料偏差是否为诱因,组织配料数据复核,保障整个生产链各环节闭环运行。只有这样,水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程中才能真正落实到每一个操作细节,实现与设计强度精准匹配的目标,保证基层结构稳定可靠。

## 2.2 动态调控含水量,保障混合均匀稳定

在公路路面工程施工过程中,水泥稳定碎石基层施工技术对混合料含水量控制要求严格,且含水量直接影响水泥水化反应速率以及后续碾压密实度。施工中,含水量常受气温、物料堆置时间等因素影响,若控制不当,将导致混合料局部干湿不一,产生离析等问题,影响基层结构强度。因此,在实际操作中,需要依托含水量在线监测装置、工地气象数据联动系统,实现拌和站与运输段的多点联动控制<sup>[2]</sup>。除此之外,应每日汇总监测数据,对比分析不同时间段的波动趋势,以调整供水系统的瞬时供水量,防止含水量在短时间内超出设计允许值。

水泥稳定碎石基层施工技术需结合公路路面工程的结构标准以及施工环境建立动态含水调控机制。配料阶段,应将粗细集料的初始含水率作为基础参数,输入拌合站配料系统中设定的目标含水量控制程序。此程序要依据材料吸水性及天气变化情况每日修正,并形成自动调整水量的出料指令。含水监测环节依靠红外线水分仪或微波感应装置设置于出料皮带中段,用于监控每批混合料出料瞬时含水值,经由系统捕捉到含水偏差超出 $\pm 0.5\%$ 即发出调节指令,控制补水阀门开合时间。此外,含水量的调整范围应保持在最优含水率 $\pm 1.5\%$ 以内,以维持压实效果。碾压环节还可采用动态控制方式识别混合料弹性响应指标,对压实密度波动异常的区段进行回查含水历史曲线,及时发现混合料调控失效点并回滚修复。整段工程还应建立含水数据日志,对每批混合料生产时间、检测值及最终压实效果进行闭环追踪,技术组需每周开展数据复

核,一一对照分析含水控制曲线与压实度结果,修正算法参数。此类操作模式可使混合料含水状态随施工环境实时变化进行同步调整,始终保持其结构质量稳定,有效规避压实异常现象的发生,使水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程中保持可靠的一致性。

## 2.3 稳定摊铺节奏,减少施工接缝隐患

混合料摊铺影响到后续压实密度,而且直接决定接缝位置、缝边质量及基层结构的完整性。若摊铺节奏出现中断或节拍不稳,则容易造成接缝部位料温下降、级配紊乱,从而形成密实度不足等隐患<sup>[3]</sup>。因此,施工过程中应构建持续且无跳跃的摊铺作业节奏,控制摊铺速率、料车供料间距及熨平板高度变化,依托系统化调度,限制临时性停顿次数,并预设摊铺衔接处理方案。所有摊铺段应有统一时间规划、接缝处压实技术,以预控施工接缝隐患。

摊铺作业的节奏控制在水泥稳定碎石基层施工技术中需构建配套机械运行同步机制,应用于公路路面工程全段调度体系。摊铺速度设定为静态起始速率4.5米/分钟,由主控终端根据拌合站出料频率及路段长度实时调整。摊铺机前方至少保持两辆自卸料车排队,料车编号输入调度系统,自动生成料流间距图谱,用于修正供料频率。收料人员在混合料卸入料斗前目测确认其出场时间、温度等因素,判定合格后发出摊铺指令,避免因延迟或性能波动导致熨平板产生跳动。摊铺作业连续进行期间,GPS模块记录摊铺速率曲线,偏差超出 $\pm 0.2$ 米/分钟即报警,现场负责人按预案调整料车进场频次。当混合料停机时间超过90分钟,需在摊铺末端设置横缝处理结构。该结构采用压实厚度匹配木质模板定位,两侧反向回填粒径控制在16mm以内的砂砾料,预压成型。摊铺段对接时不采用倾斜搭接方式,而是采用机械同步摊铺方案,利用两台摊铺机按5米间距同向运行,由激光基准系统进行轨迹锁定,纵向拼缝采用全压实对接方式,振动压路机尾部强制重合压一遍,控制两拼段密度差不超过0.5%。综合而言,水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程中可实现摊铺作业的节奏标准化处理,减少施工接缝错台等隐患的发生概率。

## 2.4 优选压实路径,提升基层致密均匀

压实路径不但影响压实能量的叠加方式,还决定了基层结构的密实连续性。具体而言,碾压过程如果路径重叠率不足或压实方向紊乱,会导致不同区域密实程度失衡,形成弱化带或隐性空洞,严重时影响上层结构承载力。因此,压实路径的设计需综合路幅宽度、

碾压设备类型等要素,制定从边向中或内向外、重叠半轮宽的规律轨迹,形成压实能量均衡分布。同时,碾压阶段还需配合静压、振压等不同工序,限定每一道压实遍数及覆盖范围,避免局部过压或漏压<sup>[4]</sup>。

水泥稳定碎石基层施工技术压实路径设置需联合碾压设备幅宽、施工速度与基层铺设宽度进行匹配运算。碾压起点固定于一侧边缘,路径朝向预定方向平行推进,首轮采用静压模式运行,轮迹重叠控制在50%以内。随后,按设定速率切换至振动压实状态,压力传感器实时监控碾压响应指数,当回弹率指标达到稳定区间后转入终压阶段。路径序列采用双向交错重叠方案,每一遍碾压顺序按单侧推进至中线再反向推进至边缘闭合。若路幅较宽,需设多台压路机分区作业,主控终端设定协同压实计划,限制设备相对距离误差不得超过0.3米。而对于局部半幅摊铺区域或边缘过渡段,压实路径应延伸50厘米,利用边缘回滚压实技术修复侧边离析区。在压实过程中,自动记录轮迹轨迹、遍数及振幅数据,由数据平台生成压实热力图,标识压实均值偏差区段。除此之外,混合料初始含水率若偏离目标值超过 $\pm 1.5\%$ ,系统暂停压实进度,待含水率修正再恢复路径规划。路径生成过程禁止随机切换设备作业顺序,所有碾压记录应绑定时间戳、设备编号,形成压实过程的闭环管理体系。并且,压实路径调优机制还要在施工前编制为标准作业规程,列入水泥稳定碎石基层施工技术交底文件,保障压实节奏统一且路径轨迹可控,使公路路面工程施工过程中的基层密度达到连续的技术目标。

### 2.5 分区精细养护,增强路基耐久周期

基层压实完成后,水泥尚处于水化初期,材料强度尚未形成,表层极易受温湿变化、机械扰动等因素影响。若养护措施粗放统一,无法有效响应不同区段的湿度散失、风速冲刷等外部变量,会导致水泥水化反应过程不均,进而出现裂缝、碱骨料反应等隐患。因此,需建立分区管理策略,依据基底位置、环境特征等因素设定养护方案,细化养护材料类型、保湿方式、覆盖密封强度等参数<sup>[5]</sup>。此类精细化管控可延缓水分蒸发速率,保障基层早期结构稳定性,是公路路面工程中水泥稳定碎石基层施工技术闭环控制的重要组成部分。

水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程养护阶段采用分区管控原则对各作业段进行差异化配置。养护起始时间以压实完成后两小时为启动基准,现场设电子时标记录各区段压实时间并划分为早养区、常养区与晚养区,分别设定洒水程序。早养区因昼温上

升较快,需采用喷雾细水高频洒水模式,每日洒水四次,每次间隔不超过3小时;晚养区温湿比低,洒水频率减为每日两次,并配合轻质防水布全幅覆盖,防止夜间结露吸热不均。边坡区设专用洒水车以及人工洒水协同作业,坡体保湿布加设压边锚固,防止风扰掀起。除此之外,不同区段根据地表温度红外热成像结果调整养护频次,表温波动大于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时自动触发临时养护程序。并且,洒水水质需为pH值中性清水,水压不得高于0.2 MPa,防止冲击扰动基层结构。养护期间还需设湿度探头监测表层含水率,每日上报监测数据与洒水频次日志进行比对,若出现低于基准值5%的数据异常,立即启动补水加频程序。技术人员每日依据各区段的水化进程及表观变化记录,调整次日养护计划,并形成分区养护日志存档,供养护周期评估使用。待养护周期满七天后,技术组联合质检部门开展碳化深度、表层致密性检测,以判断基层强度成型质量是否满足设计指标,还要根据结果调整后续路基加载节奏。整套分区精细养护流程要求操作规范、响应及时,使水泥稳定碎石基层施工技术在公路路面工程中有效延长结构耐久周期,从而减少养护阶段潜在结构应力失衡的发生。

### 3 结束语

水泥稳定碎石基层施工技术已在公路路面工程中展现出结构稳定性强、施工组织效率高等优势。其在配料精度控制、含水动态调节等多个环节实现标准化的技术协同,为基层质量与整体路面性能提供系统保障。随着施工设备智能化水平不断提升,水泥稳定碎石基层技术将在不同等级道路建设中获得更广泛的应用空间,其在快速交付与全生命周期管理方面的价值将进一步释放,助力公路工程迈向集约化、智能化并重的建设阶段。

### 参考文献:

- [1] 杨勇.公路施工中水泥稳定碎石基层施工技术要点解析[J].技术与市场,2021,28(09):121,123.
- [2] 李宇.水泥稳定碎石施工技术在公路路面基层中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(08):50-51.
- [3] 刘金辉.水泥稳定砂砾基层施工技术在公路路面工程中的应用[J].工程技术研究,2021,06(13):109-110.
- [4] 杨昊,倪正坤.水泥稳定碎石基层施工技术[J].黑龙江交通科技,2020,43(12):263-264.
- [5] 赵紫强.公路路面基层工程建设中的水泥稳定碎石施工技术[J].现代物业(中旬刊),2020(02):178-179.