

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 4 月 第 10 期 (总第 635 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 4 月 5 日

定价：人民币 15 元

## 版权声明：

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

# 目录 Contents

## 科技博览

- 001 超高压电缆立塔挤塑设备运行稳定性提升研究  
..... 翟西贝
- 004 基于辐射换热优化的毛细管网主动防结露核心技术研究  
..... 冯高奎
- 007 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的应用研究  
..... 邓 毅
- 010 基于动态控制鲸鱼优化算法的热电联产机组经济排放优化调度  
..... 闫 东
- 013 新能源接入背景下 35 kV 及以下新型智能电网的技术规范和设计策略  
..... 王慧超, 李 明

## 智能科技

- 016 面向数字孪生平台的软件开发范式研究  
..... 张巧莲, 刘 洋, 刘 东, 刘飞雁, 李万珍
- 019 智能化技术在矿山电气自动化控制中的应用  
..... 王保存, 李 姜, 董敏巍
- 022 高层建筑电气设备安装调试及智能化管理模式探析  
..... 周德俊
- 025 配电自动化系统在配网线路故障快速检修中的运用  
..... 柴世勇
- 028 智能诊断系统在火电集控运行故障预防中的应用剖析  
..... 唐明胜
- 031 城市轨道交通智慧运维中低空无人机技术应用探讨  
..... 彭朝仿, 廖龙飞, 莫珊珊
- 034 充电堆数据驱动的电动汽车动力电池智能安全评估与风险预警  
..... 马 宁, 李鹏程

## 应用技术

- 037 水利工程中深基坑支护技术分析  
..... 赵兴棚

# 目录 Contents

040	水利泵站底板钢筋安装施工质量控制	李浩
043	混凝土施工技术与质量控制研究	史如友, 张丽
046	钣金结构设计对装配效率的影响研究	刘秀珍
049	装配式混凝土楼板节点连接方式探析	张澄颖, 崔文潇, 陈子申, 方舰航, 马勇博, 魏光顺
052	市政道路施工对既有给排水管网的保护技术应用	张涛, 杜昌富
055	纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中的应用要点研究	刘春娣
058	岩土工程中地下排水系统对边坡稳定性的控制效应研究	徐丽霞, 邵坚强

## 科创产业

061	集散系统在电厂汽机锅炉中的应用	刘杏杏
064	工业热电偶测温计量误差的成因与校准对策	王小栋, 刘志杰, 张海鹏
067	基于膜分离技术的化工废水资源化利用研究	张敏
070	高精度测绘技术在城市规划中的应用与创新	赵瑞雄, 莫洪阳
073	城市道路交通分析与交通工程设计技术要点	杜宁
076	基于大数据的铸造生产能耗智能监控与节能优化	刘洪山, 刘文阔
079	工程造价指数编制方法改进及其在市场预测中的应用	张亚卓

## 技术管理

082	市政工程中海绵城市技术运用分析	张敦国
085	水利工程运行期沉降观测与安全评估	陈炳东
088	建筑工程房产测绘技术应用与质量控制研究	高春娥
091	建筑工程监理安全管控问题与优化对策探析	丁佳彬
094	水利工程施工项目风险管理与控制策略研究	傅俊波, 胡江武, 章春雷
097	配水厂配套管网工程安全管理精细化措施探析	张传峰
100	工程建设电力设备安装与土建施工协同作业机制探讨	占德坤
103	市政路桥工程监理工作中对沥青路面压实度管控要点的探究	王庆楼

## 科学论坛

106	绿色建筑技术在暖通设计中的应用研究	周忆宁, 王嘉迪
109	生态护坡技术在黄河堤防工程中的应用实践研究	毕华威, 巩汝涛
112	复杂地质条件下矿山建设工程风险防控机制研究	柯洪异, 徐付强, 李军伟, 王辉, 雷晓强
115	富水砂层地质条件下地铁盾构隧道掘进参数优化研究	姜宝, 屈德镇, 朱超
118	应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖局限与对策	韩艳艳
121	高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化及产品力学性能调控研究	岳鹏飞
124	软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道的变形控制技术 & 参数优化	张纯肖, 李恒, 王广栋

# 超高压电缆立塔挤塑设备运行稳定性提升研究

翟西贝

(特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司, 山东 泰安 271219)

**摘要** 超高压电缆立塔挤塑设备是超高压电缆绝缘层、护套层成型的核心装备, 其运行稳定性直接决定电缆产品的偏心率、绝缘性能等关键指标, 与电缆生产效率、产品合格率及电网输电安全密切相关。本文从硬件结构优化、工艺参数精准调控、智能监测预警三个维度探讨提升立塔挤塑设备运行稳定性的技术路径, 通过硬件升级、参数优化、智能赋能的协同措施, 解决设备运行中的温度波动、张力不均、挤出偏芯等问题, 推动超高压电缆立塔挤塑设备的长期稳定运行。

**关键词** 超高压电缆; 立塔挤塑设备; 运行稳定性; 工艺参数; 智能监测

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.001

## 0 引言

随着我国特高压电网建设的持续推进, 对超高压电缆的生产精度和效率提出了更高要求, 立塔挤塑设备的运行稳定性成为制约电缆制造企业发展的关键因素。传统设备稳定性提升多依靠事后维修和人工经验调控, 难以适应超高压电缆精细化、连续化的生产需求。基于此, 从硬件、工艺、智能监测、运维管理多维度开展立塔挤塑设备运行稳定性提升研究, 构建“预防为主、精准调控、智能预警、规范运维”的设备管理体系, 是保障超高压电缆生产质量、推动电缆制造业高质量发展的重要举措。

## 1 基于硬件结构优化的设备稳定性提升技术

### 1.1 核心部件精准选型与升级

立塔挤塑设备的挤出机螺杆、模头、温控模块、张力传感器是决定挤出精度和运行稳定性的核心部件, 针对传统部件存在的耐磨性差、测量精度低、抗干扰能力弱等缺陷, 进行精准选型和升级改造<sup>[1]</sup>。传统螺杆采用普通合金钢材质, 在高温熔融 XLPE 原料的过程中易出现磨损、塑化不均问题, 更换为双金属合金螺杆, 其表面硬度达 HRC60 以上, 耐磨性提升 3~5 倍, 同时优化螺杆螺距和长径比, 提升原料塑化均匀性, 避免因塑化不均导致的挤出压力波动。在模头结构优化中, 采用可调式偏心模头替代传统固定模头, 通过模头内部的调节螺栓实现对挤出间隙的微米级调控, 有效解决导体偏芯问题, 将电缆绝缘层偏心率控制在 1% 以内, 远优于国标 3% 的要求。在温度控制方面, 将传

统热电偶温控模块替换为光纤光栅温度传感器, 其测量精度达  $\pm 0.1$  °C, 不受电磁干扰影响, 适用于挤出机料筒、硫化管等多区域的精准温控; 在张力测量方面, 选用高精度拉压力传感器, 量程比达 100:1, 实时监测导体放线张力, 避免因张力突变导致的导体偏移。

### 1.2 传动与张力系统结构优化

立塔挤塑设备的传动系统和张力系统是保障设备连续稳定运行的关键, 传统系统存在传动间隙大、张力调节滞后等问题, 通过结构优化实现传动同步性和张力稳定性的提升。挤出机主传动采用永磁同步伺服电机替代传统异步电机, 配合高精度行星减速器, 传动效率提升至 95% 以上, 转速波动控制在  $\pm 0.5$  r/min 以内, 实现挤出量的精准控制; 放线/收线系统采用多电机同步传动模式, 每个放线盘独立配置伺服电机, 通过电气同步控制实现多导体放线的张力同步<sup>[2]</sup>。在导体放线环节增设双级张力缓冲装置(如图 1 所示), 通过机械缓冲配合电气闭环控制, 吸收放线过程中的张

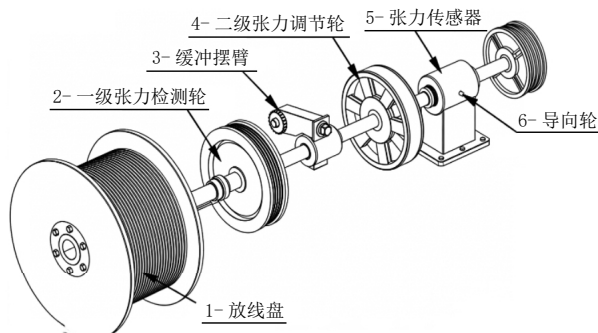


图 1 立塔挤塑设备双级张力缓冲装置结构示意图

作者简介: 翟西贝(1990-), 男, 本科, 研究方向: 电力工程。

力突变,将张力波动控制在 $\pm 5\text{ N}$ 以内;同时在立塔牵引环节采用恒张力牵引装置,实现电缆在交联固化过程中的匀速牵引,避免因牵引速度不均导致的绝缘层厚薄不均。

### 1.3 关键系统冗余配置设计

为避免因单点故障导致的设备停机,针对立塔挤塑设备的供电系统、温控系统、核心控制器采用冗余配置,构建“故障—安全”型硬件架构,提升设备的容错能力。通过配置UPS不间断电源与工业市电双路供电,设置自动切换装置,切换时间 $< 10\text{ ms}$ ,当市电中断时,UPS电源无缝衔接,确保设备控制系统、传感系统的连续供电,避免因突然断电导致的原料碳化、模头堵塞。在挤出机料筒、硫化管等关键温控区域采用双传感器冗余配置,当其中一个传感器失效时,系

统自动切换至备用传感器,同时发出报警信号,确保温控精度不受影响。设备主控制器采用PLC双机热备模式,主控制器正常运行时执行控制逻辑,备用控制器实时追踪主控制器的运行数据和状态,当主控制器故障时,系统无扰切换至备用控制器,保障设备连续运行<sup>[3]</sup>。

## 2 基于工艺参数精准调控的设备稳定性提升技术

### 2.1 挤塑工艺参数分区优化

立塔挤塑工艺分为原料塑化、挤出成型、交联固化三个核心阶段,各阶段的工艺参数需根据电缆截面规格、原料特性进行分区优化,制定标准化的参数区间。以XLPE绝缘料超高压电缆( $1\ 200\sim 2\ 000\text{ mm}^2$ )生产为例,确定各阶段核心工艺参数的优化区间,如表1所示。

表1 超高压电缆立塔挤塑核心工艺参数优化区间

工艺阶段	核心参数	1 200 ~ 1 600 mm <sup>2</sup> 电缆	1 600 ~ 2 000 mm <sup>2</sup> 电缆	调控要求
原料塑化	挤出机料筒一区温度	55 °C	50 °C	波动 $\pm 1\text{ °C}$ 以内
	挤出机料筒二区温度	86 °C	86 °C	波动 $\pm 1\text{ °C}$ 以内
	挤出机料筒三区温度	98 °C	98 °C	波动 $\pm 1\text{ °C}$ 以内
	挤出机料筒四区温度	120 °C	124 °C	波动 $\pm 1\text{ °C}$ 以内
	模头温度	133 °C	135 °C	波动 $\pm 0.5\text{ °C}$ 以内
挤出成型	挤出机螺杆转速	15 ~ 18 r/min	12 ~ 15 r/min	转速稳定 $\pm 0.5\text{ r/min}$
	挤出压力	0.8 MPa	1.0 MPa	波动 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 以内
	导体放线张力	80 ~ 100 N	100 ~ 120 N	波动 $\pm 5\text{ N}$ 以内
交联固化	硫化管一区温度	345 °C	350 °C	波动 $\pm 2\text{ °C}$ 以内
	交联压力	0.8 MPa	1.0 MPa	波动 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 以内
	牵引速度	1.2 ~ 1.5 m/min	1.1 ~ 1.3 m/min	速度稳定 $\pm 0.05\text{ m/min}$

从表1可见,不同截面规格的电缆,其塑化温度、挤出压力、牵引速度等参数存在明显差异,通过分区优化,使工艺参数与电缆生产需求精准匹配,避免因参数统一导致的设备运行负荷不均、产品质量波动。同时,在原料塑化阶段,XLPE绝缘料的熔融指数控制在 $1.65\sim 1.7\text{ g}/10\text{ min}$ ( $138\text{ °C}$ 测试条件),确保原料塑化均匀性,为挤出成型奠定基础。

### 2.2 基于PID智能整定的参数调控

PID控制是立塔挤塑设备参数调控的核心算法,传统PID参数采用人工经验整定,存在整定效率低、适应性差的问题,易导致参数调控滞后、系统振荡。引

入基于模型预测控制(MPC)的PID智能整定算法,实现工艺参数的自适应调控。以挤出温度、挤出压力、牵引速度为被控对象,通过采集设备历史运行数据,构建被控对象的数学模型,预测参数变化趋势。基于模型预测控制算法,在全局范围内搜索最优PID参数组合,根据设备运行工况的变化实时调整PID参数,提升参数调控的响应速度和精度。

### 2.3 多参数协同调控策略

立塔挤塑设备的运行是多参数协同作用的过程,单一参数的优化难以实现设备整体稳定性的提升,需构建多参数协同调控体系,实现温度、压力、速度、

张力的联动控制。通过数据分析明确各参数之间的耦合关系,如挤出机螺杆转速与挤出压力正相关、牵引速度与导体张力负相关,建立参数耦合矩阵。在控制系统中设置联动控制逻辑,当某个参数出现变动时,其他相关参数会自动进行适应性校准。例如:一旦检测到挤出压力上升,系统会自动下调螺杆转速,同时保持牵引速度与挤出量相一致,防止因压力过大损坏模头;若导体张力突然发生变化,系统会同步调节放线速度与牵引速度,使张力迅速达到稳定状态。

### 3 基于智能监测预警的设备稳定性提升技术

#### 3.1 工业互联网多维度监测平台构建

基于工业互联网技术搭建针对立塔挤塑设备的全维度运行监测平台,实现设备运行数据的实时采集、传送、存储和可视化展示。

在设备的挤出机、模头、硫化管、放线/收线系统、牵引系统等关键部位装设温度、压力、转速、张力、振动、电流等传感器,收集设备运行过程中的工艺参数及状态参数,采集频率达 10 Hz,确保数据具有实时性<sup>[4]</sup>。在 5G+ 工业以太网的传输路径中,数据传输的速率大于 100 Mbps,能够实现海量数据的零延迟传输,同时运用边缘计算技术,在设备端完成部分数据的前期加工,降低云端计算压力。

通过搭建云端数据管理平台,实现数据的可视化呈现方式、历史情况查找、趋势深入分析,运维人员可在电脑、手机等终端实时查看设备的运行情况,掌握参数变化趋势。

#### 3.2 人工智能故障诊断算法应用

为提高设备故障诊断的精度,通过采用机器学习、深度学习等人工智能算法实现对设备故障精准辨认与定位,解决传统故障诊断依赖人力、精准度低的问题。基于支持向量机(SVM)相关算法,构建设备故障诊断模型,根据设备运行数据进行训练,精准辨认传感器漂移、螺杆磨损、模头堵塞、张力不均等常见故障<sup>[5]</sup>。采用 BP 神经网络算法,应对多因素形成的复杂故障,如温度与压力共同波动引起的塑化不良现象,提升复杂故障的诊断实力。采用长短时记忆网络(LSTM)算法,对设备运行的时间序列数据进行分析,预测设备未来的运行情况,实现故障的早期报警。例如:通过分析螺杆振动数据的变化趋势,判断螺杆的磨损程度,提前进行检修预警,防止因螺杆过度磨损引起的设备故障。

#### 3.3 设备故障分级预警机制

根据监测平台的数据分析与故障诊断结果构建设备故障分级预警体系,根据故障严重度把预警分为三级,采用不同的处理方式保障故障得到及时处理。一级预警归为轻微故障,设备参数出现小规模波动,对生产质量没有影响,如当温度偏差处于  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围间,系统自动发出声光类报警,同时自动调整参数,无需人工干涉。一般故障会触发二级预警,设备参数的波动超出了正常区间,可能会影响产品质量,如张力波动处于  $\pm 10\text{ N}$  的范围,系统发出的报警信号,同时把故障信息推送至运维人员的终端,提示人工核对并处理。三级预警体现为严重故障,存在导致停机及设备损坏的可能,如模头压力快速大幅上升、电机电流超出负荷,系统立即发出紧急报警信号,同时启动设备保护机制,防止故障进一步扩大。

### 4 结束语

超高压电缆作为我国特高压电网建设的核心装备,立塔挤塑设备运行的稳定性直接影响超高压电缆的生产质量和效率。随着超高压电缆向更高电压等级、更大容量迈进,立塔挤塑设备稳定性的提升成为电缆制造行业的关键研究方向。本文围绕硬件结构优化、工艺参数精准调控、智能监测预警三个方面,提出超高压电缆立塔挤塑设备运行稳定性增强的技术路径,通过核心部件升级、冗余配置设计、分区优化工艺参数、整定智能 PID、搭建工业互联网监测平台等路径,解决设备运行过程中温度波动、张力不均、故障预警迟缓等问题,实现设备运行稳定性的大幅提高,推动我国电缆制造行业的高质量发展。

#### 参考文献:

- [1] 夏定友,刘守亮,何栋,等.高落差超高压电缆设计及敷设技术[J].四川水力发电,2025,44(05):62-65.
- [2] 乔文涛,裴震宇.超高压电力电缆选型及敷设技术应用[J].电力设备管理,2025(12):240-242.
- [3] 王阳.超高压电缆料基料的升温淋洗分级及链结构研究[J].齐鲁石油化工,2025,53(02):103-109,117.
- [4] 刘芝楠.大截面超高压排管敷设电缆温升特性及载流量提升措施研究[D].西安:西安理工大学,2025.
- [5] 林玮.超高压电力电缆选型及敷设技术探析[J].电力设备管理,2024(24):222-224.

# 基于辐射换热优化的毛细管网 主动防结露核心技术研究

冯高玺

(宁波财经学院, 浙江 宁波 315175)

**摘要** 毛细管网辐射空调系统是高效的绿色建筑供冷/热技术, 管网表面结露是其大规模应用的关键瓶颈。本研究提出融合辐射换热特性的“感知—预判—调控”一体化主动防结露核心技术, 构建基于长短时记忆网络(LSTM)的动态风险预判模型, 结合多参数协同调控算法, 实现结露风险的超前预警与精准控制。经测试与验证, 该技术结露抑制率达99.0%, 系统响应时间缩短至1.86秒, 较传统技术节能38.0%, 辐射换热效率提升5%~8%, 有效平衡防结露与高效换热目标, 为毛细管网系统稳定运行提供创新解决方案。

**关键词** 毛细管网; 辐射换热; 结露防护; 动态预判; 协同调控

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.002

## 0 引言

在“双碳”战略背景下, 高效节能的暖通空调技术发展意义重大。毛细管网辐射空调系统凭借高舒适性与节能性成为绿色建筑优选, 其辐射换热占总换热量60%~70%, 较传统空调节能25%~40%<sup>[1]</sup>。该系统的辐射换热高度依赖管网表面温度( $T_s$ )与室内温湿度( $T_a$ 、RH)的动态平衡, 当 $T_s$ 降至空气露点温度( $T_d$ )以下即发生结露。我国南方梅雨季结露发生率达68%, 结露不仅腐蚀管路、滋生霉菌危害健康, 还会使管网表面辐射发射率降低15%~20%<sup>[2]</sup>, 显著削弱辐射换热效率, 成为其推广应用的“卡脖子”难题。随着绿色建筑规模化发展及室内环境品质要求升级, 商业综合体、高端写字楼等人员密集场景的湿负荷波动愈发剧烈, 结露引发的设备故障、维修成本增加及用户投诉已成为运维方核心难点。当前建筑环境调控对防结露技术的精准性、快速性要求持续提升<sup>[3]</sup>, 发展基于辐射换热本质的主动防结露技术, 对推动毛细管网系统规模化应用、助力建筑节能降碳目标实现具有重要现实意义。

现有防结露技术主要分为三类: 一是固定参数控制, 极端工况防护失效概率达32%, 且造成15%~20%能源浪费; 二是被动物理防护, 属“事后补救”策略, 还会增加约23%系统维护成本; 三是单一反馈控制, 响应滞后5~10秒, 难以应对负荷突变<sup>[4]</sup>。近年研究

关注多参数耦合与动态调控, 但仍有不足: 不列颠哥伦比亚大学“冷管”技术能耗降低了50%, 却未解决高湿结露的问题; 清华大学智能电致变色光热调节系统, 未针对毛细管网辐射换热特性定制设计<sup>[5]</sup>。现有方法未能深度耦合辐射换热特性与多场动态变化, 且多数研究仅聚焦实验室稳态工况验证, 缺乏实际工程动态负荷下的长期稳定性数据, 也未形成可直接落地的标准化技术方案, 本研究旨在突破这一局限, 实现二者协同优化。

本研究聚焦“辐射换热特性感知—结露风险动态预判—多参数协同调控”一体化核心技术研发, 具体内容包括: 辐射换热与温湿度场、流场的耦合机理量化分析; 融合辐射换热强度的LSTM动态预判模型构建; 多参数协同调控算法与分级响应策略设计; 全尺寸实验验证与工程应用优化。研究目标为: 结露抑制率 $\geq 98\%$ 、响应时间 $\leq 2$ 秒、较传统技术节能 $\geq 30\%$ 且辐射换热效率不降低, 为毛细管网系统大规模应用提供理论与技术支撑。

## 1 辐射换热与结露耦合机理及动态预判模型

### 1.1 耦合机理分析

辐射换热强度 $q_r$ 是决定管网表面温度 $T_s$ 的关键因素, 遵循斯蒂芬—玻尔兹曼定律:  $q_r = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4)$  ( $\varepsilon$ 为发射率,  $\sigma$ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数)<sup>[6]</sup>。 $T_s$ 受供水参数、辐射换热负荷 $q_r$ 及对流换热 $q_c$ 综合影响, 满足

作者简介: 冯高玺(2005-), 女, 本科, 研究方向: 毛细管网防结露优化。

能量平衡方程。结露风险本质是辐射换热、对流换热与室内湿环境耦合失衡的结果，且辐射换热强度突变是结露主要诱因，结露触发条件为  $T_s \leq T_d$ ， $T_d$  由  $T_a$  和 RH 共同决定，采用 ASHRAE 标准推荐的 Magnus-Tetens 公式计算<sup>[7]</sup>。研究发现，空气流速  $v$  提升会使  $T_s$  升高  $0.8 \sim 1.2$  °C，传统方法忽略其主导作用，是防护效果不佳的核心原因。在人员密集的商业建筑中，人体散热散湿的动态波动会进一步加剧辐射换热与湿环境的耦合失衡，导致结露风险呈现非线性突变特征，这一现象在现有研究中尚未得到充分量化分析<sup>[8]</sup>。现有模型多采用稳态假设，难以还原人员密度、通风工况与温湿度实时变化带来的非稳态耦合效应，制约了毛细管网防结露控制策略的精准性与自适应能力。

## 1.2 基于 LSTM 的动态风险预判模型

本研究建立“辐射换热—多参数输入—风险等级输出”模型，引入结露风险系数  $R$  ( $[0, 2]$ ) 量化风险： $R \leq 0.3$  为极高风险、 $0.3 < R \leq 0.7$  为高风险、 $0.7 \leq R \leq 1.3$  为中风险、 $R > 1.3$  为低风险， $R$  的计算融合辐射换热强度与露点温度动态偏离度。模型以  $T_a$ 、RH、 $v$ 、 $T_s$ 、 $Q$ 、 $q_r$  六个核心参数为输入，采用 LSTM 神经网络为核心算法，网络含 4 层隐藏层，搭配 Leaky ReLU 激活函数及 Dropout 正则化防止过拟合。训练样本涵盖不同气候区、建筑类型的 15 万组数据，模型可预测未来 10 s、20 s、30 s 的  $R$  值，预测准确率达 98.2%，高风险状态准确率 99.1%，较传统 BP 神经网络提升 8.3%。为进一步提升模型在极端工况下的鲁棒性，本研究额外引入了 1.2 万组极端高温高湿、突发人流冲击等边缘工况数据进行强化训练，使模型对极端场景的风险预判准确率提升至 99.4%。同时通过自适应学习率与滑动窗口更新机制，实现模型在线迭代优化，可快速适配不同区域、不同业态建筑的实时运行特性，大幅提升长期预测稳定性。

在此基础上，将建立多物理场耦合数值仿真平台，精细化模拟表面温湿度分布、空气对流及辐射换热动态过程，量化不同材料与结构参数对结露风险与能效的影响机制，为系统迭代提供理论依据与数据支撑。同时引入边缘计算与分布式控制架构，降低云端传输延迟，提高系统响应速度与运行可靠性，满足大型公共建筑与高密度园区的实时调控需求。此外，开展全生命周期碳足迹核算，结合全生命周期成本分析，建立兼顾节能效益、经济成本与环境效益的综合评价体系，为技术选型、方案设计与政策推广提供量化依据。

## 2 核心技术架构与实现

### 2.1 系统总体架构

核心技术采用分层分布式架构，保障快速响应与可靠运行，各层级核心配置如下：

1. 感知层：部署高精度传感器网络，采样频率为 15 Hz，结露高发区域传感器间距  $\leq 1.5$  m，数据通过 LoRa 传输，延迟  $\leq 50$  ms。

2. 数据处理与预判层：以边缘计算网关为核心，本地完成数据融合与风险计算，延迟  $\leq 300$  ms。

3. 协同决策层：采用工业 PLC 控制器（响应周期  $\leq 10$  ms），运行融合辐射换热约束的协同调控算法<sup>[9]</sup>，引入辐射换热强度修正系数  $k_r$  ( $0.8 \sim 1.2$ )。

4. 执行层：包含变频水泵、电动调节阀、新风除湿机组等，其中除湿机组采用吸湿性相变胶囊材料，除湿效率提升 30%<sup>[10]</sup>。

为保障系统在复杂电磁环境下的稳定运行，感知层与数据处理层之间额外增加了 5G 备用传输链路，当 LoRa 信号受干扰时可自动切换，传输延迟仍控制在 100 ms 以内<sup>[11]</sup>。

### 2.2 协同调控策略

调控策略基于风险系数  $R$  分级触发，实现“预防—响应—强化”全链条防护，核心措施如下：

1. 常态运行 ( $R > 1.3$ )：动态调整供水流量，使系统 COP 值维持在 4.5 以上。

2. 一级调控 ( $0.7 < R \leq 1.3$ )：微调供水温度 ( $\pm 0.5$  °C) 或流量 ( $\pm 0.1$  m<sup>3</sup>/h)，优先采用流量调节。

3. 二级调控 ( $0.3 < R \leq 0.7$ )：联动调节供水参数与末端风速，快速提升  $T_s$ 。

4. 三级调控 ( $R \leq 0.3$  且 RH  $> 78\%$ )：启动新风除湿系统降低  $T_d$ ，供水侧强化调节，关闭部分辐射换热区域<sup>[12]</sup>。

该策略防结露成功率较传统单参数控制提升 25% 以上，所有调控动作目标为 2 秒内将  $R$  提升至安全阈值，在实际工程应用中，本策略还可与建筑能源管理系统 (BEMS) 深度联动，结合天气预报数据提前调整供水参数，进一步降低结露风险与系统能耗。

## 3 性能测试与工程验证

### 3.1 实验室测试与分析

在全尺寸环境舱 (3 m $\times$ 4 m $\times$ 2.8 m) 内开展对比验证，测试工况涵盖我国主要气候区典型条件，结果显示技术性能优势显著。

1. 结露防护: 极端工况下结露抑制率达99.0%, 较传统固定阈值技术、单一反馈控制技术分别提升35.4%、20.8%, 系统平均响应时间1.86秒。

2. 能效与舒适性: 室内温度波动 $\pm 0.29$  °C以内, 辐射换热效率提升5%~8%, 相对湿度波动 $\leq \pm 3\%$  RH, 平均运行能耗 $1.32$  kW·h/h, 较传统技术节能38.0%。

3. 长期稳定性: 120天连续运行测试显示, 关键指标衰减率小于4%, 设备联动可靠性达99.9%<sup>[13]</sup>, 更加稳定。

### 3.2 工程应用案例

广州某5.2万 $m^2$ 高端商业综合体应用该技术, 项目安装传感器495个, 配置12套边缘网关与PLC控制单元, 构建多测点、分布式实时监测与闭环调控体系, 经一个夏季运行考验, 效果显著: (1) 实现零结露投诉, 实际结露控制率达99.3%, 与同期传统技术相邻建筑形成鲜明对比; (2) 温度控制精度 $\pm 0.3$  °C内, 湿度控制在55%~65% RH, 用户舒适度满意度达96%; (3) 夏季运行能耗 $85.6$  kW·h/ $m^2$ , 较常规技术项目节能37.8%; (4) 经济效益突出, 初期投资增加30.4万元, 每年节省电费88.7万元、维护费49.4万元, 投资回收期仅约2.8个月, 全生命周期成本优势显著, 具备大规模推广价值。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本研究成功研发基于辐射换热优化的毛细管网主动防结露核心技术, 主要结论如下:

1. 量化了辐射换热强度对结露风险的主导作用, 明确空气流速等关键参数对管网表面温度的调控效应, 阐明结露是辐射换热与温、湿、流场耦合失衡的结果, 为主动防结露技术研发奠定理论基础。

2. 构建融合实时辐射换热强度的LSTM动态预判模型, 通过多场景数据强化训练, 实现10~30秒超前预判, 准确率达98.2%, 极端工况下更是提升至99.4%, 为风险前置防控提供可靠支撑。

3. 提出基于风险系数分级的多参数协同调控策略, 结合分层分布式系统架构, 2秒内消除高风险状态, 兼顾99.0%结露抑制率与38.0%节能效果, 同时使辐射换热效率提升5%~8%, 实现防结露与高效换热的动态平衡。

4. 实验室120天连续测试与广州商业综合体工程应用验证表明, 关键指标优于现有技术, 技术具备有效性、稳定性和显著经济效益, 投资回收期仅约2.8个月, 为毛细管网系统大规模推广应用提供了可直接落地的理论、技术与工程示范支撑。

### 4.2 展望

本研究提出了融合辐射换热特性的“感知—预判—调控”一体化主动防结露核心技术, 未来发展将从四方面深入: 一是引入强化学习算法, 通过实时迭代优化调控参数, 提升系统对极端高温高湿、突发人流冲击等复杂工况的自适应能力, 实现“预判—调控—反馈”的闭环自进化; 二是结合物联网与数字孪生技术, 构建云端一体化智慧管控平台, 融合建筑全生命周期数据与区域气候大数据, 实现跨建筑集群的协同优化调度, 为城市级建筑节能提供技术支撑; 三是将技术拓展至低温辐射供暖、工业除湿冷却等领域, 针对不同应用场景优化辐射换热耦合模型与调控策略, 拓宽技术适用边界; 四是融合高发射率涂层、相变储能材料等新型功能材料, 研发“材料改性—结构优化—智能控制”深度融合的下一代毛细管网系统, 进一步提升换热效率与防结露稳定性。同时, 将开展不同气候区、不同建筑类型的长期工程示范, 积累多场景应用数据, 形成标准化设计规范与运维指南, 推动技术规模化落地, 为建筑行业低碳转型注入持续动力。

### 参考文献:

- [1] 姚春涛. 毛细管辐射空调系统基本原理及应用分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(07): 85-88.
- [2] 张洪英, 章安福, 谭华纳. 基于STM32单片机的空调智能除湿器设计与制作[J]. 电子制作, 2023, 31(24): 11-15.
- [3] 程瑞, 严继光. 辐射和新风(RCF)空调技术在工程中的应用及防结露控制研究[J]. 中国设备工程, 2024(10): 234-236.
- [4] 李学媚. 解耦式低温辐射供冷系统的室内热环境特性及热舒适性研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- [5] 常佳佳. 自动调光装置对室内能耗及采光影响的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021.
- [6] 史静, 刘嘉锋. 基于动态露点预测的辐射空调调湿解耦协同控制方法: CN202610040841.8[P]. 2026-01-13.
- [7] 美国供热、制冷与空调工程师学会. ASHRAE手册—基础篇[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [8] 杨平港, 隋学敏, 张展鹏. 毛细管辐射供冷墙体表面及内部结露特性研究[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(06): 8-17.
- [9] 殷青, 王春兴, 韩昀松. 基于多视角图像的建筑环境信息建模方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(02): 104-110.
- [10] 肖鑫, 胡永威, 苟建勇. 吸湿相变胶囊在温湿度调节及大气集水领域的研究[J]. 应用热能工程, 2025(201): 118567.
- [11] 李玉娜, 杨昱, 付瑜. 绿色建筑中暖通空调节能控制方法研究[J]. 洁净与空调技术, 2025(04): 75-79.
- [12] 王立峰. 低温再生转轮除湿技术在民用建筑中的应用潜力[J]. 暖通空调, 2025, 55(07): 38-42.
- [13] 同[9].

# 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的应用研究

邓毅

(国能重庆电厂有限公司, 重庆 400800)

**摘要** 变频调速技术因为具有精确的转速调节能力以及高效能量转换的特点, 已经成为火电厂集控运行系统优化控制的主要支撑技术。本文从变频调速技术与火电厂集控系统的适应性入手, 对变频调速技术在锅炉燃烧控制、汽轮机辅助调节和循环水系统调控中的主要应用逻辑进行分析, 探讨在技术融合过程中控制策略优化路径, 阐述变频调速技术在提高集控系统响应速度、加强运行稳定性、实现精准调节方面的关键作用。研究结果表明, 变频调速技术与集控系统相融合后可以构成一个灵活、高效的控制系统, 为火电厂集控运行智能化升级提供技术支持。

**关键词** 变频调速技术; 火电厂; 集控运行系统

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.003

## 0 引言

火电厂集控运行系统是电力生产的核心中枢, 承担着对机组各个设备进行集中监视、协调控制和优化调度的功能, 它的控制精度和运行效率直接影响电厂的生产效率和安全水平。随着电力行业对于节能降耗以及智能化运行的要求越来越高, 传统控制技术所存在的动态调节灵活性不足、负荷适配精度不够等问题也逐渐暴露出来。变频调速技术依靠改变供电频率来达到电机转速无级调节的目的, 具有响应迅速、调节平滑、能耗优化等优点, 正好符合集控系统对多设备协同控制、动态负荷匹配的要求。变频调速技术被运用到火电厂集控运行系统控制流程之中, 不仅可以对锅炉、汽轮机等辅助系统进行精细化的控制, 也可以利用 DCS 系统来实现联动, 形成闭环控制系统, 从而把集控运行由被动调节转变为主动适应。本文从变频调速技术原理出发, 分析火电厂集控系统控制特点, 系统地提出其应用模式和优化方案, 为相关技术的应用及工程实践提供参考。

## 1 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的技术适配与核心原理

### 1.1 变频调速技术的核心控制特性

变频调速技术以电力电子器件为依托, 依靠整流、逆变等电力转换过程来改变输出频率, 从而实现异步电机转速的精确控制, 其最大的优势就是调速范围广、

动态响应快, 并且能够根据负载需求实时调节运行参数。该技术利用电压空间矢量脉宽调制等控制算法, 可达到输出电压与频率的匹配, 使电机在不同转速下都能保持较高的效率, 具有软启动、过载保护、故障预警等功能集成, 给集控系统的集中控制提供丰富的控制接口和状态反馈渠道。

### 1.2 火电厂集控运行系统的控制需求适配逻辑

火电厂集控运行系统通过 DCS 平台来集中控制锅炉燃烧、汽轮机发电、循环水冷却等各个子系统, 核心控制需求为负荷动态适配、多设备协同联动、运行状态精确监控、故障快速响应。变频调速技术与集控系统之间的匹配性主要从控制指令传递、负荷调节和状态监控三方面进行论述。在控制指令传递方面, 变频装置支持 MODBUS、PROFIBUS 等工业通信协议, 能和 DCS 系统无间断数据交流, 保证控制指令快速传递与执行; 在负荷调节方面, 按照集控系统下达的负荷命令调整风机、水泵等动力设备的转速, 实现能量供需动态平衡; 在状态监控方面, 变频装置利用模拟量输出接口将电机转速、电流、温度等关键参数传送到集控中心, 给运行人员提供全方位的设备运行状况信息, 支撑集控系统的全局协调决策。

### 1.3 技术融合的核心控制原理

变频调速技术与火电厂集控运行系统相融合是以“指令下达、动态调节、状态反馈、优化修正”闭环

作者简介: 邓毅 (1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 火电集控。

控制为原理的。集控系统根据电网负荷、设备运行状态等信息综合生成的控制指令，经过通信网络传送到各个子系统的变频调速装置，变频装置再通过自身的控制算法把指令转化成频率调节信号，驱动电机转速发生变化，进而调节风机风量、水泵流量等关键运行参数；同时变频装置会实时采集电机运行数据及设备工况信息，经过处理后传送给集控系统，集控系统再将反馈的数据和预设的目标进行比较分析，如果存在偏差就及时下发修正指令，通过变频装置调整运行参数，直至被控对象达到最优运行状态。

## 2 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的关键应用场景

### 2.1 锅炉燃烧系统的变频调速控制应用

锅炉燃烧系统是火电厂能量转换的关键步骤，燃烧效率和稳定性的好坏直接影响机组的发电能力，集控系统对该系统的控制核心是实现燃料燃烧和空气供给的动态平衡<sup>[1]</sup>。变频调速技术在锅炉燃烧系统中主要应用在引风机、鼓风机、给粉机等关键设备的控制上；集控系统根据锅炉负荷需求和炉膛燃烧状态，通过DCS平台向变频装置发送转速调节指令，鼓风机变频装置根据指令调节风机转速，精准控制送风流量，保证燃料燃烧所需要的氧气供给；引风机变频装置同步响应，通过调节转速控制炉膛负压，防止出现正压喷烟或者负压过大导致的热量损失，实现送引风系统的协同联动；给粉机的变频控制根据燃烧效率反馈信号，动态调整给粉量，使燃料供给与负荷需求相匹配。

### 2.2 汽轮机辅助系统的变频调速控制应用

汽轮机为发电机的核心，汽轮机运行稳定性及调节精度需要辅助系统进行有效的配合，集控系统对于汽轮机辅助系统控制的重点是保证机组稳定运行、负荷匹配。变频调速技术在汽轮机辅助系统中的应用主要是循环水泵、凝结水泵和润滑油泵等设备的控制上；循环水泵的变频控制由集控系统根据汽轮机凝汽器真空度、冷却水温度等参数来动态调节水泵转速，保证凝汽器在最佳真空状态下运行，提高汽轮机的循环热效率；凝结水泵通过变频装置接收集控系统的液位控制指令，实时调节泵体转速，精准控制凝结水流量，保持除氧器水位稳定，防止因水位波动影响汽轮机正常运转；润滑油泵的变频调速是按照汽轮机转速、油温等运行参数，自适应调节供油量、供油压力，给汽轮机转动部件提供稳定的润滑保障<sup>[2]</sup>。

### 2.3 循环水与补给水系统的变频调速控制应用

循环水、补给水系统是火电厂保证机组正常运转的辅助系统，集控系统对循环水、补给水系统的控制

核心是保证水压、水量的稳定供应，满足各设备的冷却和补水需求。变频调速技术的应用使供水系统实现了智能化控制，集控系统通过压力传感器、流量传感器等实时采集循环水供回水压差、补给水压力等关键参数，将采集的数据和预设的控制目标相比较，产生压力调节指令；循环水泵变频装置接受指令之后，通过改变转速来调整供水流量，使供回水压差维持在设定的范围内，避免因为水压波动影响冷却效果；补给水系统的变频控制采用“压力闭环+备用联动”的方式，集控系统根据补给水母管压力信号，控制变频装置调节补给泵的转速，实现自动定压补水；当变频运行设备出现故障时，集控系统可以迅速切换到备用泵工频运行模式，保证补给水系统连续可靠。

## 3 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的优化路径

### 3.1 控制逻辑的精准化优化

为了提高变频调速技术在集控系统控制中应用的效果，需要根据火电厂的运行特性来优化控制逻辑，使变频调节更加符合集控系统的全局控制目标<sup>[3]</sup>。控制策略的设计要根据不同的设备运行特性和控制要求来确定，使用分段式的控制逻辑，对响应速度要求较高的引风机、鼓风机等设备采用PID闭环控制算法，集控系统实时采集炉膛负压、燃烧效率等反馈信号，动态调节变频装置的输出频率，缩短调节响应时间；对于负荷波动较大的循环水泵、补给泵等设备，用模糊控制逻辑，根据历史运行数据和实时工况自动优化调节参数，提高系统对负荷突变的适应能力。

### 3.2 集控系统的联动机制优化

变频调速技术与集控系统的深度融合，要依靠联动机制的高效运行，因此要从信号传输、指令执行、状态反馈三个方面优化联动机制<sup>[4]</sup>。从信号传输角度来讲，采用工业以太网和现场总线相结合的通信结构，提高了控制指令和反馈信号的传输速度，减少了信号延迟，使变频装置能够及时响应集控系统的调度指令；从指令执行来说，设置变频装置的分级执行制度，集控系统根据设备的重要性和运行工况把控制指令分为紧急指令、常规指令和优化指令，变频装置优先执行紧急指令，保证关键设备的运行安全；从状态反馈而言，改善变频装置的信号采集、处理过程，丰富反馈信息的种类，除了常规的转速、电流参数以外，增加设备运行温度、绝缘状态等状态信息，为集控系统的故障诊断和优化决策提供更加全面的数据支持。

### 3.3 安全冗余设计的强化优化

火电厂集控运行系统安全是变频调速技术应用的前提条件,因此要增强安全冗余设计,保证控制过程的稳定可靠。从硬件配置来说,使用“一拖二”或“N+1”的冗余配置方式,对重要的变频装置设置备用单元,当主用变频装置出现故障的时候,集控系统可以通过联动逻辑快速切换到备用变频装置,防止变频装置故障导致设备停机;从控制逻辑上来说,设置多重保护措施,变频装置内置过流、过压、过热等保护功能,集控系统建立设备运行安全阈值监测,在检测到参数超标时,及时下达停机或者降负荷指令,通过变频装置来实现设备的安全保护;在故障处理方面,建立集控系统和变频装置的故障联动响应机制,变频装置发生故障的时候立即向集控系统发出报警信号,集控系统会自动启动故障处理程序,调整其它相关设备的运行状态,减小故障影响范围,保证机组稳定运行。这种安全冗余设计给变频调速技术在集控系统中的应用提供安全保障,提高集控运行的安全性和稳定性。

## 4 变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的应用效能与发展展望

### 4.1 核心应用效能体现

变频调速技术在火电厂集控运行系统中应用带来的控制效能的提升策略:从控制精度上讲,依靠无级调速的特点实现对风量、流量、压力等关键参数的精细调节,使得被控对象运行参数的误差控制在很小的范围里,从而提高了集控系统控制精度和稳定性;从运行效率方面来讲,变频调速技术按照负荷需求动态调整设备运行状态,避免了传统工频运行模式下无效能耗,降低了设备启动时的电流冲击,减少了设备的磨损,延长了设备的使用寿命;从系统响应方面来讲,变频装置的快速响应特性使集控系统控制指令迅速转化为设备动作,提高了整个控制系统的动态响应能力,加强了机组对于电网负荷变化的适应能力;从操作便捷性方面讲,变频调速技术与 DCS 系统相结合实现了设备的集中控制和远程操作,减少了人工干预,降低了运行人员的劳动强度,提升了集控运行的智能化水平<sup>[5]</sup>。这说明变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中起到的作用。

### 4.2 未来发展展望

火电厂智能化转型不断深入,变频调速技术在集控运行系统控制中的应用将会更广泛。从技术融合的角度来说,变频调速技术将会和人工智能、大数据分

析等先进技术深度融合,在集控系统上创建智能控制模型,实现工况预测的自适应调节,使控制更加精准和前瞻;从控制范围上看,应用场景将从传统的风机、水泵等辅助设备向汽轮机调速、发电机励磁控制等核心环节拓展,实现全机组设备的变频调速控制覆盖;从技术升级的角度来讲,高压变频技术、大功率变频装置的性能会不断优化,具备更高的可靠性和适应性,可以满足大型火电机组的控制需求;从绿色低碳角度来讲,变频调速技术将会和节能优化算法结合在一起,在集控系统的全局协调下,实现机组能耗的进一步降低,为火电厂的低碳转型提供技术支撑<sup>[6]</sup>。变频调速技术将会进一步推进火电厂集控运行系统向着智能、高效、可靠方向发展,成为电力行业高质量发展的重要驱动力。

## 5 结束语

变频调速技术与火电厂集控运行系统控制的深度融合,建立精准、高效、协同的控制体系,为火电厂的安全稳定运行和智能化升级提供核心技术支撑。本文系统研究变频调速技术在集控系统控制中技术适配的原理、关键应用场景、优化路径和应用效能,揭示了变频调速技术在集控系统控制中的核心作用与价值。实践证明,该技术利用集控系统的闭环协同,显著提高了锅炉燃烧、汽轮机运行及辅助系统的控制精度和运行效率,降低了能耗和设备损耗,有明显的技术优势。随着电力行业智能化、低碳化转型不断推进,变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中会得到更深、更广的应用,未来要持续加强技术创新和工程实践,优化控制策略与融合机制,提高技术应用深度和广度,为火电厂集控运行系统持续优化及电力行业高质量发展提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 邵丰.变频调速技术在火电厂集控运行系统控制中的应用[J].电气技术与经济,2025(11):148-150,154.
- [2] 李小龙.火电厂集控运行中节能减排与环保方面的技术创新策略分析[J].价值工程,2025,44(28):141-144.
- [3] 李伟.火电厂集控运行及机组协调控制系统优化设计[J].电气技术与经济,2025(08):159-161.
- [4] 韩彦廷.基于自动化技术的火电厂集控运行节能降耗系统设计探析[J].模具制造,2025,25(08):210-212,215.
- [5] 同[4].
- [6] 付业东.基于自动化技术的火电厂集控运行节能降耗系统设计[J].自动化应用,2025,66(01):206-208.

# 基于动态控制鲸鱼优化算法的热电联产机组经济排放优化调度

闫东

(绿能慧充数字技术有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要** 热电联产经济排放调度 (CHPEED) 旨在协同优化系统的燃料成本与污染物排放, 属于典型的多目标、非线性与非凸优化难题。本文提出的一种动态控制鲸鱼优化算法 (DCWOA), 是在传统鲸鱼优化算法 (WOA) 中引入动态收缩函数, 增强其处理多目标非凸 CHPEED 问题的能力。针对多目标热电联产经济排放调度问题, DCWOA 的表现显著超越了现有优化算法。该算法在求解效率、解集质量及稳定性方面均展现出明显优势, 能够更精准地捕捉成本与排放目标之间的最佳折衷关系。

**关键词** 热电联产机组; 经济排放调度; 改进鲸鱼优化算法

中图分类号: TP3; F407

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.004

## 0 引言

热电联产经济排放调度问题的目标是同时降低成本和减少排放<sup>[1]</sup>。为了解决这个多目标、多约束的复杂问题, 需要一种能权衡目标并提供最佳折衷方案的优化技术。近年来, CHPEED 的求解方法不断丰富。研究者提出了一系列创新方法, 涵盖了动态参数调整策略、混合多目标优化框架、改进型进化算法以及基于新型支配机制的两阶段方法等, 并在多机组系统中验证了其有效性<sup>[2]</sup>。

鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 是 Mirjalili 提出的一种模拟座头鲸气泡捕食行为的仿生优化算法。该算法因结构简洁、收敛较快等特点, 在热电联产经济调度等领域得到应用。然而, 面对多峰、高维的大规模复杂优化问题时, WOA 仍存在易陷入局部最优、收敛速度慢等不足。学者们从平衡探索与开发能力的角度提出了多种改进策略, 如引入惯性权重的 WOA<sup>[3]</sup>、增强型 WOA<sup>[4]</sup>, 将 WOA 与模拟退火 (SA) 相结合<sup>[5]</sup> 以及引入 Tent 混沌映射生成初始种群等算法<sup>[6]</sup>, 以提升其全局寻优性能与收敛精度。

本文提出了一种动态控制鲸鱼优化算法 (DCWOA), 通过引入动态收缩函数对 WOA 改进。该机制可有效调节算法探索与开发阶段的平衡, 提升整体收敛性能与求解效率。在处理热电联产经济排放调度优化问题时, DCWOA 能获得分布更广且均匀的帕累托前沿, 为决策者提供更清晰的成本与排放权衡信息, 有助于制定科学经济的调度策略。

作者简介: 闫东 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源产业。

## 1 热电联产问题表述

### 1.1 热电联产经济调度问题

热电联产经济调度问题的目标是通过优化分配发电和供热单元的输出, 最小化热电联产系统的总成本:

$$Cost_{fuel} = \text{Min} \left[ \sum_{r=1}^{N_E} C_r(P_r^E) \sum_{s=1}^{N_C} C_s(P_s^C, H_s^C) + \sum_{t=1}^{N_H} C_t(H_t^H) \right] \quad (1)$$

热发电机的非凸成本函数  $C_r(P_r)$  为:

$$C_r(P_r) = \left[ u_r (P_r^E)^2 + v_r P_r^E + w_r + \left| x_r \sin(y_r (P_r^{E_{\min}} - P)) \right| \right] \quad (2)$$

联合循环机组的二次成本函数  $C_s(P_s^C, H_s^C)$  为:

$$C_s(P_s^C, H_s^C) = \left[ u_s (P_s^C)^2 + v_s P_s^C + w_s + x_s (H_s^C)^2 + y_s H_s^C + z_s H_s^C P_s^C \right] \quad (3)$$

式 (3) 中,  $u_s$ 、 $v_s$ 、 $w_s$ 、 $x_s$ 、 $y_s$  和  $z_s$  是第  $s$  个热电联产机组的成本系数。

热单位的成本函数  $C_t(H_t^H)$  为:

$$C_t(H_t^H) = \left[ u_t (H_t^H)^2 + v_t H_t^H + w_t \right] \quad (4)$$

式 (4) 中,  $u_t$ 、 $v_t$  和  $w_t$  分别是第  $t$  个纯供热机组的成本系数。

### 1.2 热电联产排放调度问题

热电联产排放调度问题的目标为:

$$\text{Min} [Mass_{emission}], Mass_{emission} = E_s + E_c \quad (5)$$

$$E_S = \left[ \sum_{r=1}^{N_E} \left[ a_r + b_r P_r + c_r P_r^2 + d_r e^{(f_r P_r)} \right] + \sum_{s=1}^{N_C} (g_s + h_s) \right. \\ \left. P_S + \sum_{t=1}^{N_H} (i_t + j_t) H_t \right] \quad (6)$$

$$E_c = \left[ \sum_{r=1}^{N_E} l_r P_r + \sum_{s=1}^{N_C} k_s P_s + \sum_{t=1}^{N_H} m_t H_t \right] \quad (7)$$

### 1.3 多目标热电联产经济排放调度 (MO-CHPEED)

MO-CHPEED 的目标是以能够获得最佳折衷方案的方式处理成本和排放这两个相互冲突的目标。

$$\text{Min} [ \text{Cost}_{fuel}, \text{Mass}_{emission} ] \quad (8)$$

本文采用梯形模糊隶属函数，将各目标的隶属度映射至 [0, 1] 区间，从而实现最佳折衷解的获取。映射关系数学模型为：

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} 1, & v_i \leq v_{\min i} \\ Rx_i + S, & v_{\min i} \leq v_i \leq v_{\max i} \\ 0, & v_{\max i} \leq v_i \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中， $v_{\min i}$  和  $v_{\max i}$  分别是目标的最小值和最大值限制。系数  $R$  和  $S$  是根据模糊指标  $v_i$  的最小值和最大值界限计算得出的。

$$R = -\frac{1}{v_{\max i} - v_{\min i}} \quad (10)$$

$$S = \frac{v_{\max i}}{v_{\max i} - v_{\min i}} \quad (11)$$

为了在两个相互冲突的目标之间获得最佳折衷方案，适应度函数为：

$$\text{Max fitness} = \sqrt{\text{fitness}_1 \times \text{fitness}_2} \quad (12)$$

### 1.4 限制条件

$$P_r^{E_{\min}} \leq P_r^E \leq P_r^{E_{\max}} \quad (13)$$

$$P_s^{C_{\min}} (H_s^C) \leq P_s^C \leq P_s^{C_{\max}} (H_s^C) \quad (14)$$

$$H_s^{C_{\min}} (P_s^C) \leq H_s^C \leq H_s^{C_{\max}} (P_s^C) \quad (15)$$

$$H_t^{H_{\min}} \leq H_t^H \leq H_t^{H_{\max}} \quad (16)$$

式 (13)、(14)、(15)、(16) 中， $P_r^{E_{\min}}$  和  $P_r^{E_{\max}}$  分别为第  $r$  个发电机组的最小和最大输出功率， $P_s^{C_{\min}} (H_s^C)$ 、 $P_s^{C_{\max}} (H_s^C)$ 、 $H_s^{C_{\min}} (P_s^C)$  和  $H_s^{C_{\max}} (P_s^C)$  是定义第  $s$  个热电联产机组可行运行区域的线性不等式， $H_t^{H_{\min}}$  和  $H_t^{H_{\max}}$  分别是第  $t$  个热能发生器单元最小和最大输出。

## 2 改进鲸鱼优化算法

在 WOA 中，个体位置通过系数向量  $\bar{M}$  与当前位置至猎物位置  $P$  之间距离的乘积。其中  $P$  的确定受向量  $\bar{M}$  的影响，可能引起搜索过程中探索与开发阶段的失

衡，影响收敛性能。本文引入动态惯性权重  $\xi(itr)$ ，自适应调节当前最优解对位置更新的影响度。对 WOA 的位置更新公式如下：

$$\bar{P} = \left[ \bar{N} \cdot \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{P} (itr) \right] \quad (17)$$

$$\overline{\text{Pos}^*} (itr+1) = \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{M} \cdot \bar{P} \quad (18)$$

在开发阶段，更新后的方程为：

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \bar{P}^i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) \quad (19)$$

式 (19)，中  $\bar{P}$  表示第  $r$  条鲸鱼与猎物之间的距离，即最优解：

$$\bar{P} = \left| \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (t) - \overline{\text{Pos}} (t) \right| \quad (20)$$

所提出的 DCWOA 考虑了与 WOA 相同的 50% 概率，表达式改为：

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \begin{cases} \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{M} \cdot \bar{P}, & \text{prob} < 0.5 \\ \bar{P}^i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr), & \text{prob} \geq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

探索阶段的数学模型为：

$$\bar{P} = \left| \xi(itr) \cdot \bar{N} \cdot \overline{\text{Pos}_{rand}} - \overline{\text{Pos}} \right| \quad (22)$$

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}_{rand}} - \bar{M} \cdot \bar{P} \quad (23)$$

式 (22)、(23) 中， $\overline{\text{Pos}_{rand}}$  是当前种群中选择的随机位置向量。

为了增强 WOA 的性能，在 DCWOA 中考虑了动态控制收缩因子  $\zeta$ 。动态控制收缩因子  $\zeta$  按指数变化，即：

$$\xi(itr) = \exp(-\lambda \ln \tau_d) \quad (24)$$

式 (24) 中， $\lambda = itr / itr_{\max}$ ， $itr_{\min} \leq itr \leq itr_{\max}$ ； $\tau_d$  是收缩函数最大值与最小值的比值。

## 3 动态控制鲸鱼优化算法在 CHPEED 问题中的应用

本文围绕成本与排放两个冲突的目标展开研究，采用了梯形隶属函数的模糊框架。该模糊框架将多目标问题转化为单一目标进行评价，其关键在于确定各目标的最小与最大边界值，包含以下步骤：首先，将问题视为单目标经济调度问题，最小化燃料成本，由此得到燃料成本目标的下限和排放目标的上限；其次，将问题作为单目标排放调度问题，最小化系统排放，从而获得排放目标的下限和燃料成本目标的上限；最后，求解多目标热电联产经济排放调度 (MO-CHPEED) 问题，寻求折衷解。

为验证 DCWOA 的有效性，将其与 WOA 在热电联产机组经济排放案例中进行测试。案例设定的电、热负荷需求分别为 300 MW 和 150 MWth。表 1 展示了 DCWOA 算法

所得的统计结果。表2给出了由DCWOA单独求解成本与排放单目标问题后所确定的两个冲突目标的边界值。

表1 本文DCWOA获得的个体目标质量解决方案

输出	最优热电联产经济调度	输出	最优热电联产排放调度
P1 (MW)	135.00	P1 (MW)	34.99
P2 (MW)	40.75	P2 (MW)	125.79
P3 (MW)	19.23	P3 (MW)	34.20
P4 (MW)	105.00	P4 (MW)	104.99
H2 (MWth)	73.61	H2 (MWth)	133.86
H3 (MWth)	36.71	H3 (MWth)	16.13
H4 (MWth)	0.00	H4 (MWth)	0.00
H5 (MWth)	39.66	H5 (MWth)	0.00
最低成本(美元/小时)	13 672.79	最小值排放量(千克/小时)	1.17
平均成本(美元/小时)	13 673.58	平均排放量(千克/小时)	1.17
最高成本(美元/小时)	13 706.40	最大排放量(千克/小时)	1.17

表2 最优热电联产经济与排放调度的梯形隶属函数边界限制

输出	最优热电联产经济调度	最优热电联产排放调度
成本(美元/小时)	13 672.52	17 212
排放量(千克/小时)	12.05	1.17

表3展示了WOA与DCWOA算法对多目标热电联产经济排放调度问题所得的发电机最优调度结果。表4对比了DCWOA与其他方法对MO-CHPEED问题所获得的最优折衷解。

表3 WOA与DCWOA在MO-CHPEED中的最优调度

输出	WOA	DCWOA
P 1 (MW)	85.70	85.87
P 2 (MW)	74.70	75.05
P3 (MW)	33.07	34.05
P4 (MW)	105	105
H2 (MWth)	75.91	76.94
H3 (MWth)	32.49	32.75
H4 (MWth)	0	0
H5 (MWth)	41.50	40.30
总功率 (MW)	299.99	299.99
总热量 (MWth)	150	150

表4 DCWOA与其他方法的MO-CHPEED优化结果比较

方法	成本(美元/小时)	排放(千克/小时)	适应度
GWO	15 201.7	5.40	0.5 825
NSGA	15 214.7	6.05	0.5 857
SPEA2	14 997.3	6.26	0.5 760
IDBEA	15 112.5	5.21	0.5 981
BCS	15 142.4	5.32	0.6 127
WOA	15 083.3	5.21	0.6 078
DCWOA	15 121.4	5.12	0.6 133

在表4中,本文提出的DCWOA通过引入动态控制的收缩函数,有效调节了全局探索与局部开发行为,获得了最高的适应度值0.6 133。本文采用了模糊决策框架通过计算每种方法所得最优解的适应度值进行综合评价。DCWOA所获解的适应度显著优于其他对比方法,这表明DCWOA能够更有效地协调成本与排放之间的冲突,为MO-CHPEED问题提供更优的折衷解决方案。

#### 4 结束语

针对热电联产机组的多目标经济排放调度这一复杂的非凸、非线性优化问题,本文提出了一种动态控制鲸鱼优化算法。该问题需同时优化相互冲突的燃料成本与污染物排放目标。所提出的DCWOA算法通过其动态控制机制,有效提升了收敛精度与速度,在求解中展现出卓越的综合性能。实验结果表明,相较于基本WOA及其他对比算法,DCWOA能够更稳定、高效地逼近帕累托前沿,所得非支配解集具有更优的分布性与收敛性,为决策者提供了质量更高的多目标权衡方案。实验与统计分析共同验证了DCWOA在应对此类复杂工程优化问题时的有效性、鲁棒性与实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 薛丰.基于自适应粒子群算法的热电联产系统优化调度[J].自动化与仪器仪表,2025(03):310-312.
- [2] 杨康源,王启鹏,赵亮.与热电联产机组集成的可持续公用事业系统多目标优化的两阶段随机规划[J].清洁生产杂志,2024(413):142-143.
- [3] 戴春雨,马廉洁,蒋涵存,等.基于多种策略改进的鲸鱼优化算法[J].计算机工程与科学,2024,46(09):1635-1647.
- [4] 柴岩,朱玉,任生.多策略协同的改进鲸鱼优化算法[J].计算机工程与科学,2023,45(07):1308-1319.
- [5] 孙传珠.基于改进鲸鱼优化算法的AGV多目标路径规划[J].青岛大学学报(工程技术版),2025,40(02):18.
- [6] 肖超群,于淼.基于改进鲸鱼方法的地源热泵耦合系统优化改造[J].动力系统与控制,2025,14(04):401-411.

# 新能源接入背景下 35 kV 及以下新型智能电网的技术规范和设计策略

王慧超<sup>1</sup>, 李明<sup>2\*</sup>

(1. 桐乡市电力工程有限责任公司, 浙江 嘉兴 314050;  
2. 浙江浙能嘉兴海上风力发电有限公司, 浙江 嘉兴 314050)

**摘要** 分布式新能源在 35 kV 及以下配电网中的集中接入, 使中低压电网运行形态发生明显变化, 电压波动、双向潮流及保护适应性问题逐步显现。依托实际工程场景, 围绕新能源并网条件、电压无功调控、保护配置及智能化支撑要求, 对新型智能电网在中低压层级的技术规范与设计要点进行系统梳理。相关内容聚焦参数约束与工程实施, 以期在新能源背景下配电网安全、稳定运行提供有益参考。

**关键词** 35 kV 及以下配电网; 分布式新能源; 智能电网设计; 电压无功控制; 自适应保护

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.005

## 0 引言

新能源装机规模持续扩大, 35 kV 及以下配电网逐步承担源荷双向调配职责, 运行边界被重塑, 电压控制、保护协调及电能质量压力集中显现。目前中低压网架相对薄弱、控制层级复杂、终端设备差异明显, 伴随新能源出力波动与负荷不确定性叠加, 既有设计方式难以稳定支撑并网运行。依托智能调控与规范化技术约束, 明确新能源接入条件、控制配置及运行边界, 已成为保障新能源有序接入和配电网安全可靠运行的现实需求。

## 1 分布式新能源接入条件下 35 kV 及以下电网的运行特征演变

### 1.1 中低压配电网由单向潮流向多源潮流的转变

在分布式新能源接入前, 35 kV 及以下配电网运行以单向供电为主, 电能自上级电网经变电站、馈线逐级向负荷侧输送, 潮流方向稳定且运行边界清晰, 线路、电气设备及保护配置主要围绕负荷峰值进行校核, 运行方式调整频率较低<sup>[1]</sup>。分布式光伏、分散式风电在台区和馈线层级集中接入后, 局部区域在新能源高出力时段逐步形成反向潮流, 10 kV 馈线和 0.4 kV 台区由单纯受电单元演变为具备电源属性的运行节点, 上级电网开始承担反送功率, 部分设备运行工况超出原有设计假设。

### 1.2 新能源出力特性对电网稳定性的工程影响

分布式新能源出力受气象条件影响显著, 功率变化速率快且波动频繁, 与负荷变化规律不完全匹配, 在中低压电网中易引发电压偏移和快速波动, 尤其在新能源集中接入区域, 出力变化直接作用于馈线末端, 使局部电压稳定性明显减弱。新能源并网后, 系统短路电流水平及分布随运行方式发生变化, 故障电流由多点注入, 原有基于单向潮流配置的过流与零序保护在部分工况下灵敏性和选择性受到影响, 保护整定与运行方式之间的匹配关系更加复杂。

## 2 基于智能调控的中低压电网设计关键技术

### 2.1 电压与无功协同控制的工程实现方式

在新能源接入条件下, 35 kV 及以下电网电压控制宜依托“主变有载调压—10 kV 馈线调压/无功装置—台区末端调节—新能源逆变器无功支撑”形成分层协同, 主变分接头应结合新能源集中接入馈线的日内出力曲线确定调节档位范围、动作死区与最小动作间隔, 并将动作次数约束写入运行策略, 避免在中午高出力阶段出现频繁调档<sup>[2]</sup>。10 kV 馈线在高渗透接入区应优先配置线路调压器或 SVG 等动态无功装置, 容量按“最大出力+最小负荷+末端电压约束”工况校核, 投运位置以电压敏感节点和反向潮流易发区为主, 同时明确调节优先级: 馈线级快速调节用于抑制短时波动, 主变

作者简介: 王慧超 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输变电工程、新能源发输电、智能电网。

\*通信作者: 李明 (1970-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 风力发电、海上风电、海上风电运维。E-mail: 13867378314@163.com

级慢调节用于维持电压基准。新能源逆变器无功控制参数应统一纳入调控侧管理,按并网点分组设置 Volt-VAR 或功率因数曲线并配置斜率、死区与限幅,避免多台逆变器无功“互相拉扯”,必要时叠加储能或可调负荷参与电压支撑,使电压越限治理具备闭环执行能力。

## 2.2 适应新能源特性的保护配置与整定策略

新能源并网后保护配置需以“双向潮流+多点电源注入”为前提重新整定,35 kV 及 10 kV 系统短路电流水平应在新能源全出力、限流模式及不同联络开关状态下分别复核,复核结果应形成分运行方式的定值依据,定值整定表需覆盖典型运行方式切换,避免仅按单一方式给定固定参数。10 kV 馈线宜采用具备方向判据的综合保护或方向过流保护,分段开关与环网柜保护应与主保护形成稳定级差,级差校核应同时考虑反向潮流条件下的灵敏系数、零序电流分布与故障阻抗变化,并将“联络合环/解环、分段投退、新能源大幅上下线”等作为保护配合的必检验证工况。新能源并网点保护应配置电压、频率异常解列及必要的反孤岛功能,其动作时限需与电网侧重合闸和馈线保护保持协调,且定值、逻辑及版本号应纳入统一台账管理;对需要自适应整定的区域,可依托开关状态与电源在线信息进行定值区间切换,并设定切换锁定条件、通信异常降级策略及现场复核流程,使误动风险处于可控范围且运行方式调整具备完整追溯路径。

## 2.3 电能质量控制技术的工程配置要点

电能质量控制应在设计阶段同步落到设备配置与验收判据,新能源集中接入的 35 kV 及以下电网需在并网点、馈线首末端及典型台区设置监测点位,明确采样周期、统计周期与事件录波触发阈值,监测内容应覆盖电压偏差、谐波、电压闪变及不平衡度等指标,形成可用于运行评价和对比分析的基线数据。谐波治理应以“源侧约束+网侧补偿”组合实施,逆变器与充电设施接入时需明确谐波排放指标、无功调节与谐波抑制功能启用条件,当预测或实测指标接近限值时,应配置有源滤波或滤波电容分组优化等措施,并同步开展电容投切引发的谐振风险校核,明确谐振频点和抑制手段,避免治理装置反向放大特定次数谐波<sup>[3]</sup>。电压闪变与快速波动可依托馈线级 SVG 快速支撑、逆变器 Volt-Watt 限功率曲线及储能平滑控制协同抑制,相关控制参数需给出响应时间、斜率限制与限幅边界;低压台区三相不平衡治理应优先采用相序调整、分相接入约束与负荷重分配,必要时配置专用治理装置并在验收中给出不平衡度判据,使电能质量问题在投运初期即可形成闭环固化机制。

## 3 新能源接入下 35 kV 及以下电网的技术规范体系构建

### 3.1 新能源接入容量与并网条件的技术约束

新能源接入容量应以并网点为最小控制单元进行规范化管理,设计阶段需形成覆盖 35 kV 变电站、10 kV 馈线及 0.4 kV 台区的分级容量控制清单,并将容量核定结果作为并网审批和工程设计的直接依据。10 kV 馈线应在规划阶段明确基础接入容量与扩展接入容量两个层级,基础容量以内可直接接入,超过基础容量的接入申请必须同步落实调压、无功补偿或限功率等技术措施,并在设计文件中明确对应的工程配置方案,严禁仅依托运行限发或人工干预方式解决。0.4 kV 台区分布式新能源接入应控制单台区装机比例,并对末端电压、相间负载分布及低压线路压降进行专项校核,校核不满足要求时需优先实施台区治理、负荷重分配或调整接入位置,确保容量控制具备工程可行性。

并网条件应在技术文件中明确设备能力、接口要求和运行约束,新能源并网点必须配置双向计量装置,具备有功、无功、电压及功率质量监测功能,并满足远程数据上传和控制指令接收要求。逆变器应支持功率限额、无功调节和运行状态反馈,其关键参数需在并网协议中统一约定并纳入技术档案管理,任何参数调整必须履行审批和记录流程,避免运行阶段出现配置失控。并网验收阶段应重点核查容量控制落实情况、接口功能完整性和参数一致性,并形成验收记录,确保接入条件在投运后具备可执行性和可监管性。

### 3.2 电压控制与无功配置的统一技术要求

电压控制与无功配置应在新能源接入工程设计阶段统一纳入技术规范进行约束,明确 35 kV 变电站、10 kV 馈线、0.4 kV 台区及新能源侧各层级的调节职责和动作边界,并将相关参数一次性固化,避免运行阶段反复修订。35 kV 及以下变电站主变有载调压装置应结合新能源接入规模、馈线电压敏感性及日内出力变化特征,统一设定分接头调节范围、动作死区和最小动作间隔,相关参数应在设计文件中明确标注并纳入调控策略管理,不得仅依托运行经验确定<sup>[4]</sup>。10 kV 馈线在新能源集中接入区域,应按电压偏移幅度和反向潮流分布情况配置线路调压装置或动态无功补偿装置,其容量配置需覆盖最大出力与最小负荷叠加工况,安装位置优先选择电压波动敏感节点及末端区段,避免调节效果被线路阻抗削弱。

新能源逆变器无功控制应作为电压治理体系的重要组成部分统一管理,按并网点或馈线分组设置无功控制模式、斜率及限幅参数,禁止单台设备独立调整

控制策略或脱离统一调控运行。台区低压侧应结合新能源接入比例、相别分布及负荷结构配置无功补偿及三相不平衡治理装置,防止低压电压问题向中压侧传导并引发联动调节。各级无功与电压控制参数应形成标准参数表并纳入运行管理系统,参数变更需履行审批、记录和回溯流程,使电压调节行为在不同运行方式下保持一致性、可追溯性和长期稳定性。

### 3.3 保护配置与运行方式管理的规范要求

保护配置应以新能源接入后的多运行方式为基本前提进行规范化设计,设计阶段需针对典型运行方式分别给出保护整定区间,并明确定值切换条件、执行逻辑及锁定规则,使保护参数能够随运行方式变化稳定切换。35 kV 及 10 kV 系统短路电流水平应在新能源全出力、限流运行及不同联络方式下分别校核,校核结果应形成整定依据文件,保护定值不得采用单一工况结果直接套用。10 kV 馈线保护应在主保护、分段保护和联络保护之间形成清晰分工,级差设置需同时满足正向与反向潮流条件,并结合新能源集中上下线场景进行验证,避免在运行方式调整后出现保护盲区或越级动作。

新能源并网保护应与电网侧保护构成统一体系,其动作逻辑、电压频率阈值及动作时限应在设计文件中明确,并作为并网验收的重要核查内容统一校验。运行方式管理应建立保护参数复核与变更机制,当新能源容量、接线方式或控制策略发生调整时,必须同步开展保护校核,相关调整应经审批后实施,未经校核不得直接投运。所有保护参数调整过程应形成完整记录并纳入技术档案管理,使保护体系在不同运行状态下始终保持受控,避免依赖现场经验进行临时处置,确保保护配置具备长期稳定性和可追溯性。

### 3.4 智能化支撑条件的配置与管理要求

智能化支撑条件应作为新能源接入工程的基础配置同步建设,并在技术规范中明确配置范围、功能边界及接口要求,新能源集中接入的 35 kV 及以下电网应全部纳入配电自动化系统统一管理<sup>[5]</sup>。监测点位设置应覆盖新能源并网点、10 kV 馈线关键节点及典型 0.4 kV 台区,测量内容应包括电压、电流、有功、无功及必要的电能质量指标,采样周期、数据精度和上传频率需满足电压调控、保护校核和运行分析的综合需求。监测数据应具备连续存储、事件标记和历史追溯能力,并与运行方式切换、设备投退状态形成关联,为运行调整和技术复核提供可靠依据。

控制功能应按业务重要性进行分级配置,电压无功调节、限功率控制及运行方式切换等关键功能需具备通信异常条件下的本地自治能力,自治策略应在设计阶段明确并经调试验证,避免因通信中断导致调控

失效<sup>[6]</sup>。新能源运行数据、控制参数和保护定值应统一纳入信息管理平台,设计、建设和运行阶段使用同一数据源,参数版本变更需具备清晰标识、审批流程和回溯路径。通过规范数据和控制的集中管理,使智能化支撑由分散配置转向体系化运行基础,保障新能源接入后电网调控行为长期稳定可控。

## 4 结束语

在新能源高比例接入背景下,35 kV 及以下电网的功能定位与技术内涵正在发生实质性转变,其运行安全与调控能力不再依赖单一设备性能,而取决于容量边界、电压无功、保护策略、电能质量与智能支撑条件之间的系统协同。依托规范化的接入约束、参数固化的调控配置以及可追溯的运行管理机制,中低压电网能够在多源并存、潮流双向和运行方式频繁切换的条件下保持稳定运行,使新能源接入由阶段性适配转为常态化承载。此类技术体系的形成,不仅限于解决当前并网压力,又在于为配电网持续演进预留清晰的技术接口与扩展空间,从而增强新型智能电网在实际工程中的长期适用性与运行韧性。

## 参考文献:

- [1] 武帅.高比例新能源接入下小水电群-储能联合优化运行研究[D].西安:西安理工大学,2025.
- [2] 郭芮,翟飞元.新型电网架构技术在智能电网建设中的应用研究[J].电力设备管理,2025(09):116-118.
- [3] 牟伟擎,范杰清,刘国梁.新型电力电子器件在智能电网中的应用与优化设计[J].科技创新与应用,2025,15(13):20-23.
- [4] 樊蒙,施新春,徐鹏.南京市新型电力(智能电网)装备集群形成机制与发展模式[J].绿色能源,2023(01):1-4.
- [5] 于洪宇,汪青,温雷,等.面向智能电网终端应用的低成本 Si 基 GaN 功率器件及其上新型工业电源模块研究和产业化[DB/OL].深圳:南方科技大学,2023-06-02.[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyQ\\_CP1TBZXhiOFJPPSGsDnjkw8hJ7vM5l2RnQJbMaQ4MbS8t9OdbMf7Dg1kZxRoqT9tcurNBv5GtRbbFSDq4zU3A-7Qw1AWYZhybu7heN42VfNkZZCx7gA3gwpNIqejncWHmixTZrLzqq94ZQi1EcFPLWIG5xee4WVEoix0n6w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyQ_CP1TBZXhiOFJPPSGsDnjkw8hJ7vM5l2RnQJbMaQ4MbS8t9OdbMf7Dg1kZxRoqT9tcurNBv5GtRbbFSDq4zU3A-7Qw1AWYZhybu7heN42VfNkZZCx7gA3gwpNIqejncWHmixTZrLzqq94ZQi1EcFPLWIG5xee4WVEoix0n6w==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [6] 王智伟,朱清,刘鑫,等.高比例新能源送端电网多源梯级协同调频控制关键技术研究与应用[DB/OL].新疆维吾尔自治区,国网新疆电力有限公司,2022-08-26.[https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQz55CbJzeYhUBuAMySe2rVZVGGJK\\_CVAF73xIRN7OYgxuRP2DfqQP7agwDyj4RAwgdhH\\_k\\_n2LbvlcLmxH9NMO91ksyIYZPnx7chlVNBpOFs9Hr8DP5lNrcnIYeZaQIu2iZrIjd5N6UGaT8du5kTumXgejAoGpVznYkEklYBBg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQz55CbJzeYhUBuAMySe2rVZVGGJK_CVAF73xIRN7OYgxuRP2DfqQP7agwDyj4RAwgdhH_k_n2LbvlcLmxH9NMO91ksyIYZPnx7chlVNBpOFs9Hr8DP5lNrcnIYeZaQIu2iZrIjd5N6UGaT8du5kTumXgejAoGpVznYkEklYBBg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).

# 面向数字孪生平台的软件开发范式研究

张巧莲, 刘洋\*, 刘东, 刘飞雁, 李万珍

(机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710021)

**摘要** 数字孪生是实现物理世界和信息世界深度融合的核心技术, 其应用成效与软件工程方法的发展水平密切相关。当前, 数字孪生平台的搭建已不再局限于简单的技术堆叠, 而是逐步发展成为融合复杂建模、多源数据融合与智能决策支持的综合性系统工程。本文系统归纳了当前主流的软件开发方法, 围绕数据集成与多维建模、仿真推演与智能分析、可视化交互、平台架构与集成部署这四个环节探讨了各技术实现路径及其面临的挑战; 总结了以低代码开发、云一边一端协同以及人工智能融合为代表的典型建设范式, 并针对模型互操作性弱、全生命周期缺乏统一标准及安全隐私保障不足等问题提出相应的改进思路, 以期数字孪生平台的高效建设、持续迭代与规模化落地提供参考。

**关键词** 数字孪生; 软件开发; 低代码开发; 云一边一端协同; 人工智能

**中图分类号**: TP311.52

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.006

## 0 引言

数字孪生是一项新兴的工程技术, 通过创建物理实体的虚拟副本, 实现实体在虚拟空间中的模拟、分析及优化<sup>[1]</sup>。近年来, 在工业4.0、智慧城市等战略推动下, 其应用形态已从早期对静态资产的数字化描述, 逐步发展为能支撑实时监控、预测性维护乃至自主决策的综合性软件平台<sup>[2]</sup>。

在实际构建数字孪生平台的过程中, 工程团队常面临系统复杂性挑战。这既体现在需要集成物联网、建模仿真、数据可视化等多个技术栈, 也反映在必须同时应对多源异构数据融合需求、模型高保真度要求、系统实时响应需求以及跨领域协同机制等多重约束<sup>[3]</sup>。以往高度定制化、依赖大量编码的开发模式, 存在开发成本高、周期长、模块复用率低等问题, 很难适应业务的快速迭代与多样化场景的灵活扩展需求。为了更好地构建数字孪生平台, 越来越多的方案引入云原生与微服务设计理念, 并将机理模型与人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术有机结合, 赋予平台认知和推理能力。此外, 低代码开发、云一边一端协同及生成式AI等新兴技术的加入, 深刻地影响甚至改变了数字孪生的构建方式。

本文从软件工程全链路视角, 对当前主流的开发方法进行梳理。重点关注数据集成与多维建模、仿真推演与智能分析、可视化交互、平台架构与集成部署

这几个关键环节, 总结主流技术路线, 识别共性瓶颈, 并凝练出典型范式, 旨在为平台的高效构建和规模化落地提供工程指引。

## 1 数字孪生平台软件开发的关键方法与技术挑战

### 1.1 数据集成与多维建模

本环节是构建数字孪生虚拟体的基础。当前业界普遍采用基于元数据驱动的配置化数据中间件或总线架构(Kafka、EMQX), 以灵活适配多种工业通信协议(Modbus、MQTT)以及企业信息系统接口。为了更有效地解决数据之间深层的语义异构问题, 越来越多的平台开始采纳本体建模(Ontology Modeling)方法, 通过对特定领域内的核心概念、属性及其相互关系进行形式化描述, 从而提升数据的可理解性、可推理能力以及跨系统互操作性<sup>[4]</sup>。

在几何与行为建模方面, 技术路线正逐渐超越传统手工CAD建模和激光扫描的方式, 转向更自动化的智能途径。近年来, 基于深度学习的自动建模技术已从二维影像或三维点云数据中高效生成高保真度模型, 极大地提升了建模效率, 也为大规模场景的应用提供了更好的可扩展性<sup>[5]</sup>。

尽管技术不断进步, 这一环节依然面临两个突出难题。一是多源数据在采样频率、精度、可靠性上的差异, 使实时清洗、对齐与缺失值填补等预处理工作

**作者简介**: 张巧莲(1996-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 计算机软件开发。

**\*通信作者**: 刘洋(1990-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 数字孪生及人工智能识别。E-mail: 1127328357@qq.com

异常复杂；二是构建一个支持多尺度表达、融合机理模型与数据驱动、且具备持续演化能力的复合建模框架，至今仍是学术界和工程界的共同难题。开发人员不得不在物理精确性、数据泛化能力与计算资源消耗之间反复权衡，不断寻求并维持一种动态平衡。

### 1.2 仿真推演与智能分析

本环节旨在赋予数字孪生体动态演化和智能分析能力，支持未来趋势预测、潜在影响评估以及决策优化。

复杂系统仿真常采用并行仿真或分布式仿真来缓解计算压力。并通过多尺度仿真在精度与效率间寻求平衡<sup>[6]</sup>。通过 FMI、OpenFMB 等标准化接口，模型与仿真引擎解耦，提升了复用性和跨系统集成能力。

智能分析正从早期将 AI 算法独立嵌入业务流程、与物理模型保持相互独立的模式，转向构建模块化 AI 管线，并尝试与物理机理模型深度融合。例如：在故障预测、参数自校准、运行策略寻优等典型场景中，“数据—机理混合驱动”的方法已初步应用，能够在虚拟环境中支持闭环测试与决策验证<sup>[7]</sup>。

然而，高精度模型计算开销大，难以满足在线监测或实时交互的延迟要求；过度简化模型又容易牺牲预测的准确性。目前尚未形成统一的理论框架和成熟工程规范，导致机理模型与数据驱动 AI 模型在融合时难以有效协同，彼此校验也存在障碍。此外，如何客观衡量复杂仿真结果的可信度、如何在资源受限条件下动态调度计算任务，同样是当前工程应用中亟待解决的难题。

### 1.3 可视化交互与前端开发

本环节的核心任务是将多源异构数据和复杂模型转化为用户可直观理解、灵活操作的动态界面。目前三维可视化的主流实现方式有两种。一种是利用专业游戏引擎 (Unity、Unreal Engine) 进行深度定制开发，该方法能确保高保真渲染效果和高度自由的交互体验，但存在开发成本高、专业技术门槛高的问题。另一种是直接调用成熟的数字孪生可视化平台或组件库，这类平台或者组件库通常内置了模型加载、场景管理以及基础交互等通用功能，开发者只需调用 API 接口即可快速嵌入业务逻辑，开发周期明显缩短。

近年来，云渲染作为一种新兴架构逐渐受到关注。该技术将图形渲染等计算密集型任务迁至云端服务器，再以流的方式推送到轻量级终端，为大规模、高精度场景的跨平台、跨设备实时访问提供了切实可行的解决方案<sup>[8]</sup>。当前主流应用普遍采用前后端分离的设计模式，前端开发也逐步向低代码方向发展，该方法通

过图形化配置和声明式编程，即使非专业开发者也能快速搭建交互界面，进一步加速了应用的迭代。

尽管技术在不断地发展，该环节仍然面临一系列深层次的权衡挑战：（1）渲染效果、交互实时性、系统性能与开发成本之间难以兼顾。追求高逼真度的视觉体验往往需要消耗大量计算资源，影响大规模场景下的流畅交互；采用轻量化方案又可能损失关键的视觉细节。（2）不同用户角色（工程师、管理者、操作员）对界面功能复杂度与信息密度的需求存在显著差异。

（3）云渲染模式虽有效缓解了终端算力压力，但其用户体验高度依赖于网络带宽与延迟，同时因涉及公网数据传输，也带来了额外的安全与隐私风险。

### 1.4 平台架构与集成部署

本环节构成平台稳定运行、弹性伸缩扩展与持续演进的重要基础，直接关系到系统应对业务扩展与技术迭代升级的底层支撑能力。

当前主流的架构设计普遍采用“云—边—端”协同的层次化布局<sup>[9]</sup>：云端作为核心枢纽，主要负责全局数据的汇聚存储、模型训练、数据综合分析与跨域协同；边缘端部署在物理实体附近，聚焦处理高实时性数据流，并实现本地化的推理与控制闭环；终端则由各类传感器与执行器构成，承担对物理世界的精准感知和动作反馈。

在软件架构层面，当前云端和边缘侧普遍采用微服务作为主流设计范式。平台功能被拆分为多个松耦合、可独立部署的服务单元，显著增强了系统的灵活性、可维护性以及横向扩展能力<sup>[10]</sup>。在工程实践中，Docker 等容器化技术与 Kubernetes 等容器编排系统的结合已逐步成为工业部署的事实标准，这不仅有效保障了开发、测试和生产环境的一致性，也为运维自动化提供了有力支撑。此外，要实现数字孪生与企业信息技术 (IT) 和运营技术 (OT) 体系的深度融合，一个关键前提是要建立统一的 API 网关与服务化集成框架，将平台的数据查询、模型调用、仿真推演等核心能力以安全、标准化方式开放给上层应用。

尽管相关架构理念日趋成熟，这类分布式平台在构建和长期运维中仍面临挑战：（1）微服务在提升系统灵活性的同时，也带来了新的运维复杂性，即服务发现、链路监控、分布式事务以及跨服务调试等问题。

（2）边缘环境下，网络条件不稳定、计算资源受限，如何高效调度任务、保证数据一致性并维持低延迟响应，仍是亟待突破的技术难点。（3）行业缺乏广泛认可的接口规范，不同厂商提供的组件往往难以做到“即插即用”，易形成数据孤岛和功能壁垒。

## 2 典型建设范式与实践演进

### 2.1 低代码开发与自动化建模

此范式旨在降低软件开发技术门槛，加快应用构建和模型创建速度。通过提供可视化场景编辑器、预置组件库（设备模板、数据看板、逻辑规则节点）以及声明式的规则配置界面，使领域专家能通过拖拽组件和设置参数完成应用快速组装，而无需深入编写底层代码。

与此同时，生成式 AI 技术正在推动建模流程向自动化方向发展。例如：基于扩散模型或神经辐射场（NeRF）等技术，能够从图像、文本或者点云自动生成带纹理的三维模型。这一转变将建模工作从劳动密集型的手工任务升级为智能驱动的生成流程，极大地提升了建模效率与系统的可扩展性。

### 2.2 云一边一端协同架构与实时数据融合

在高实时性要求的场景下，云一边一端协同架构已成为一种重要技术路径。其核心思路是根据实际需求合理分配计算资源，支持本地闭环控制，并对数据实施分层处理。实践中通常以业务目标为导向，在统一架构下对各层功能进行划分：云端侧重于非实时的大数据分析与全局优化；边缘侧部署轻量级孪生体，处理毫秒级响应的控制逻辑以及涉及隐私的数据计算；终端侧更专注于保障数据采集的精度和指令执行的可靠性。三层之间通过 MQTT、DDS 等标准协议及服务网格技术实现协同。

### 2.3 AI 融合与智能增强

通过 AI 技术和数字孪生的深度融合，数字孪生已逐步具备动态认知与优化能力。在实践中，机器学习可用于自动校准仿真参数，强化学习则能在虚拟环境中探索并生成最优控制策略。近期，大语言模型也开始被尝试应用于理解自然语言指令，并在辅助配置仿真场景或解析分析结果方面取得初步进展，这些方法在不同程度上提升了人机交互效率和决策的智能化水平。反过来，数字孪生平台为 AI 提供了一个高保真、可复现且低风险的“实验环境”，使研究人员能够安全地生成带标注的训练数据、验证算法逻辑的有效性。这种相辅相成的关系，正在推动数字孪生从被动反映现实状态，逐步转向主动推理与闭环优化，尤其在工业控制、能源系统等很难在物理世界直接试错的高价值应用场景中效果显著。

## 3 结束语

数字孪生平台的软件开发正经历从代码密集型、单体架构向模型驱动、云原生与智能化的系统性转型。利用低代码开发降低技术门槛，“云一边一端”协同实现算力与数据的层级化治理，深度融合人工智能以

强化仿真、分析与决策能力，数字孪生正从高成本、强定制化的项目形态发展为可复用、可扩展且支持持续迭代的通用平台。

然而，其规模化落地仍面临以下几方面的现实挑战：多源异构模型间缺乏统一的语义表达与互操作框架，导致跨系统集成难度大；覆盖全生命周期的开发过程尚未建立起成熟的标准化体系，制约了模型的可移植性与平台自身的可持续进化；安全与隐私风险渗透在数据采集、传输、处理与交互的各个环节，在边缘计算与云渲染等新场景下尤为突出。为应对这些挑战，当前技术路径已经提供了初步的解决方案，即通过引入本体建模与知识图谱，可以为分散的数据与模型构建统一的语义基础，从而增强系统间的理解与协同能力；借助低代码平台与标准化接口，有望形成贯穿建模、仿真、部署到运维的全生命周期开发方法论；在安全领域，实施云一边一端一体化的分层防护策略（在边缘侧完成敏感数据本地化处理、在云端进行加密存储、通过 API 网关实现访问控制），并结合基于身份与上下文的细粒度权限控制，能够有效降低数据在流动过程中面临的泄露与滥用风险。

未来，推动行业标准建设、共建开源生态以及发展成熟的 AI 原生开发工具链，将成为提升数字孪生平台互操作性、可信度与技术普惠性的关键。软件工程方法的持续革新，将作为核心动力，支撑数字孪生从实现状态映射进一步迈向自主优化与闭环决策，从而为工业制造、智慧城市、能源管理等关键领域的数字化转型构筑坚实而智能的数字化基石。

## 参考文献：

- [1] 陶飞,黄祖广,马昕,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(01):1-18.
- [2] 胡天亮,周帅昌,孟麒,等.面向定制生产的云-边缘协同数字孪生制造平台关键技术研究[J].哈尔滨理工大学学报,2025,30(01):41-50.
- [3] 同[2].
- [4] 同[2].
- [5] 朱庆,张利国,丁雨淋,等.从实景三维建模到数字孪生建模[J].测绘学报,2022,51(06):1040-1049.
- [6] 同[2].
- [7] 同[2].
- [8] 杜莹莹,罗映,彭义兵,等.基于数字孪生的工业机器人三维可视化监控[J].计算机集成制造系统,2023,29(06):2130-2138.
- [9] 同[2].
- [10] 夏元清,王晔,高润泽,等.云网边端协同云控制研究进展及挑战[J].信息与控制,2024,53(03):273-286.

# 智能化技术在矿山电气自动化控制中的应用

王保存, 李 姜, 董敏巍

(山东黄金矿业(莱西)有限公司, 山东 青岛 266600)

**摘 要** 针对矿山生产环境的复杂性与电气设备运行的非线性特征, 探讨了智能化技术在提升电气自动化控制水平中的关键作用。通过分析采掘、运输、供电等核心环节的技术需求, 阐述了自适应控制、多传感器融合及深度学习算法在电气系统中的集成路径, 重点探讨了变频驱动、自主导航与能效优化在实际工况下的逻辑实现, 旨在对提高矿山电气系统的运行精度与响应速度有所裨益。

**关键词** 智能化技术; 矿山电气; 自动化控制; 系统集成

**中图分类号**: TD6

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.007

## 0 引言

矿山深部开采工况的日益复杂对电气自动化系统提出了更高要求, 传统电气控制模式在处理重载启动、多机协作及大惯性负载波动时往往存在反馈延迟或调节偏差。智能化技术的引入, 通过构建高维度的数学模型与非线性控制逻辑, 能够实时解析复杂电信号与物理特征, 这种技术迭代不仅优化了电气设备的动力输出特性, 还实现了控制策略从预设模式向自适应模式的转变, 是现代矿山电气工程发展的核心趋势。

## 1 矿山电气自动化智能化控制需求分析

矿山电气系统运行环境普遍存在强电磁干扰、电缆长距离传输导致的电势降以及大功率非线性负载引起的谐波污染。采掘设备在作业过程中, 电机频繁处于过载或堵转边缘, 传统 PID 调节难以兼顾响应速度与系统稳定性, 智能化控制需求主要体现在对电动机运行状态的精准识别与预测性调节上<sup>[1]</sup>。通过引入模糊逻辑或神经网络模型, 系统能够根据电压波动范围(660 V 至 1 140 V 区间)自动修正补偿参数, 抑制瞬态电流冲击, 同时, 针对主排水及通风系统的电气控制, 需实现基于实时工况参数的闭环变频调节以匹配矿井涌水量与风量的动态变化。这种需求驱动了智能化技术与电气硬件的深度融合, 为复杂电网环境下的设备协同运行提供了算法支撑。

## 2 智能化控制技术在采掘电气系统中的渗透

### 2.1 变频器与逻辑控制器协同控制技术

采煤机电气系统通过可编程逻辑控制器与高性能变频器实现深度通信, 利用高速现场总线完成数据交

换。在处理工作面复杂负载时, 控制系统实时监测电机的输出电流与转矩波动, 通过矢量控制算法动态调整脉冲宽度调制频率, 当截割部遇到高硬度岩层导致转矩瞬时增加时, 智能控制逻辑会迅速降低牵引速度以防止电机烧毁。这种协作模式将原本独立的调速与逻辑判断整合为一体, 实现了对采掘过程电气参数的毫秒级响应, 显著提升了动力传动系统的机械特性。

### 2.2 智能传感网络在工作面刮板机中的应用

刮板输送机的电气驱动系统集成了多种传感器组成的感知网络, 包括应变片式转矩传感器、红外温度传感器及霍尔电流传感器<sup>[2]</sup>。智能化处理单元对收集到的多维信号进行特征提取, 判断链条的张紧程度与物料分布情况。在多电机驱动的情况下, 系统采用功率均衡控制策略, 通过调节各台变频器的滑差补偿值, 确保各驱动点功率偏差控制在 5% 以内。这种基于传感反馈的电气控制方案, 有效规避了链条断裂与电机超载运行的风险, 优化了输送设备的运行逻辑。

### 2.3 采煤机自动纠偏与定位智能控制算法

采煤机的行走控制系统通过引入惯性导航与精密编码器数据, 构建了空间位置坐标模型。电气控制单元结合工作面三维扫描数据, 利用轨迹预测算法对行走机构进行动态修正。当检测到机身偏离预设割煤路线超过 15 cm 时, 智能控制器会自动向液压调高系统和行走电机发送补偿信号, 实现自动调斜与纠偏。该技术将复杂的机械定位转化为精准的电气脉冲控制, 减小了人工操作干预带来的误差, 使设备能够按照预定义的几何曲线完成高精度循环作业。

**作者简介**: 王保存(1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气自动化、PLC 自动控制。

## 2.4 供电系统无功补偿智能动态调节

综采工作面配电系统中,非线性负载产生的无功功率会对电网稳定性造成影响,智能化控制单元通过监测母线电压与电流的相位角,控制静止无功补偿装置的触发角,利用自寻优算法,系统能够在负载剧烈波动时,实时计算所需的容性补偿量,将功率因数稳定在0.95以上。这种动态调节机制有效抑制了电网电压闪变,改善了电能质量,减少了因电压跌落导致的电气设备保护误动作。

## 2.5 掘进机自主导航与液压系统智能联动

掘进机电气控制系统集成了激光测距与姿态感知模块,通过与液压执行机构的智能联动实现自主作业。智能化算法对掘进断面的几何形状进行解析,自动规划切割头路径,电气控制单元根据切割阻力的反馈,调节比例溢流阀的电流值从而精确控制液压油路流量与压力。这种机电液一体化的智能控制模式,使掘进机能够根据岩层硬度自动优化截割频率,降低了刀盘的非正常磨损,实现了掘进过程的自动化闭环操作。

控制单元内部嵌入了空间解析几何模型,利用多轴陀螺仪获取的机身角速度与加速度数据,实时修正切割头的空间矢量位移<sup>[3]</sup>。在硬岩工况下,电气系统通过监测截割电机的反馈转矩,利用模糊控制逻辑实时补偿液压泵的斜盘倾角,确保截割压力始终处于预设的动力学包络线内。系统还通过对位移传感器信号的二阶导数运算,预判截割机构的振动趋势,通过调节电磁比例换向阀的开启度,实现对机械冲击的有效抑制,确保了断面开掘的平整度。

## 3 矿山主提升与运输系统智能化路径

### 3.1 提升机多参数耦合智能调速策略

主井提升机电气系统采用全数字交流变频调速方案,其核心在于多参数耦合的控制算法。系统实时获取提升容器的位置、速度及钢丝绳张力数据,结合加减速曲线进行平滑处理,智能化控制逻辑能够自动识别载荷的变化。在提升初期通过增大低频转矩实现重载启动;在制动阶段,系统根据制动压力与减速度的偏差,动态调节比例阀的电流信号,确保停车位置误差控制在 $\pm 0.02$  m以内。这种精准的速度链控制,极大地提升了大型旋转电气设备的控制柔性。

调速系统通过构建提升容器的动力学观测器,对钢丝绳的弹性伸长量与动态张力进行毫秒级估算。控制逻辑引入了滑模变结构控制算法,通过对变频器输出电流的相位补偿,抵消了由于重载启动引起的电磁转矩脉动。在减速运行段,系统利用能量回馈单元将再生电能反馈至交流电网,并根据制动盘的实时热成

像温度反馈,自动切换电气制动与液压制动的配比关系。这种基于多变量解耦的控制架构,提升了特大型电机在全速度范围内的转速跟随精度与转矩响应速度。

### 3.2 带式输送机节能变频智能群控模式

针对矿山长距离皮带运输系统,智能化群控技术通过检测运煤量实现转速自适应调节。在装载点安装视觉识别传感器或超声波流量计,将物料流信息传输至中心控制单元,控制系统根据全线运载负荷,利用遗传算法优化多级皮带的启动时序与运行频率,当负载率低于30%时,系统自动降低运行频率至35 Hz左右,在维持物料平衡的同时显著降低了空载能耗。这种基于物料流预测的电气调节模式,实现了输送系统能效的最优分配。

群控系统建立了长距离输送带的黏弹性动力学模型,通过对沿线各驱动点电流信号的相干性分析,识别输送带的张力波动传播规律<sup>[4]</sup>。智能化逻辑根据前级供料速度的实时扰动,预先调节后级驱动电机的磁通电流,实现皮带张力的动态平衡,在多机驱动系统中控制单元采用主从同步控制技术,利用以太网总线同步各变频器的载波频率,消除了因速度差引起的胶带异常磨损,系统还集成了电动机运行效率在线分析模块,根据负载变化自动搜索最佳磁场减弱点,提升了电力电子变换器的转换效率。

### 3.3 轨道运输机车自动避障与调度技术

井下轨道运输电气系统集成了超宽带定位与毫米波雷达技术,实现了机车的自动驾驶与智能调度。机车载控单元实时处理感知数据,当探测到前方50 m范围内有障碍物时,自动触发紧急制动逻辑,调度中心通过无线网络下达运行指令,控制系统根据进路闭塞原则自动切换转辙机状态。这种智能化控制方案替代了传统的手动驾驶,通过精确计算制动距离与启动加速度,提高了轨道交通系统的通过能力与电气设备的利用效率。

机车电气控制单元引入了多传感器信息融合算法,将超宽带获取的厘米级位置坐标与雷达探测的相对速度进行滤波处理。在坡道启停过程中系统通过监测牵引电机的电流矢量分量,自动计算所需的防溜坡转矩并精确调节制动缸的电磁阀脉宽,调度控制逻辑利用多目标优化算法。根据巷道内多台机车的实时位姿,动态分配轨道区段占用权限,通过对直流牵引电动机励磁电流的数字化调节,系统能够抑制机车轮对的空转与滑行,在复杂巷道环境下实现了牵引力的最优输出。

### 3.4 提升负荷智能预测与制动系统响应

提升机电气系统利用深度学习模型对历史负荷数据进行训练,建立提升载荷预测机制。在每个提升循

环开始前,控制系统预估电机所需的峰值电流,提前调整直流母线电压,制动环节则结合机械制动与电气制动双重逻辑,根据滑差率自动分配电制动力矩,智能化单元对液压站的比例电磁铁进行高频脉冲信号控制,实现了恒减速制动效果。这种预测性的电气响应机制,缓解了机械结构的冲击负荷,延长了电气制动元件的使用周期。

### 3.5 物料流特征智能识别与装载精度控制

在装载站电气控制中,智能化技术通过激光扫描建模获取煤仓内物料的堆积形态。电气控制单元根据给料机转速与物料体积的映射关系,利用预测控制算法精准锁定闸门关闭时机。在装车过程中动态称重传感器实时反馈电信号至 PLC,系统根据偏差自动修正后续给料频率。这种基于特征识别的控制策略,将装载精度误差降低至 1% 以内,实现了物料转运环节电气控制的数字化与精细化,优化了重载运输系统的初始受力状态。

## 4 矿山供电网络与变电站智能化架构

### 4.1 电力监控系统智能数据采集与转换

矿山变电站采用基于 IEC61850 标准的智能化监控架构,实现了底层电气设备与上层控制平台的数据无缝衔接。智能终端设备对变压器、断路器等一次设备的电流、电压信号进行高采样率转换,并进行本地逻辑判别。通过集成以太网交换机,系统实现了 1 Gbps 的实时数据传输带宽,确保了遥测、遥信数据的同步性。智能化采集逻辑能够滤除电网中的随机噪声,提取基波频率特征,为后续的电能质量分析提供了高保真的原始数据序列。

### 4.2 高压配电系统微机保护智能逻辑实现

变电站高压柜集成了具备逻辑编程能力的微机保护单元,通过小波分析等算法实现故障电流的快速识别<sup>[5]</sup>。针对矿井单相接地故障,智能化逻辑能够根据零序电流的幅值与相位关系,精准判定故障线路并执行跳闸指令,在多级配电网中系统利用时间同步协议实现区域协同保护,自动计算保护定值并进行在线下发。这种智能化的保护逻辑不仅提高了切除故障的灵敏度,还通过逻辑闭锁功能避免了越级跳闸引发的大面积停电事故。

### 4.3 变电站无人值守智能巡检控制逻辑

智能化变电站配置了自动巡检机器人与固定式高清热成像监测装置,其运行由中心控制系统统一驱动。巡检逻辑根据预设路径自动执行,利用图像识别算法实时读取仪表指针读数及设备运行状态,当红外传感器检测到电缆接头温度异常升高时,系统自动联动通风散热装置并切换备用回路。这种基于状态监测的自

动化控制模式,将传统的周期性人工检查转变为实时的电气工况评估,提高了变电站运行状态的透明度与响应速度。

### 4.4 电压能效智能分析与变压器调节

供电系统引入了能效管理智能算法,对变压器损耗进行实时监测。电气控制单元收集各级支路的功率损耗数据,建立变电站能效模型,通过分析变压器负载率与运行效率的关系,系统自动计算有功与无功的最优配比,在负荷低谷期,智能控制逻辑驱动有载调压开关进行档位切换,将供电电压维持在最佳能效区间。这种智能化的调节手段,实现了对电力损耗的深度压减,提升了矿山配电网在不同负荷水平下的运行经济性。

### 4.5 多能源互补微网智能切换控制方法

随着矿山新能源接入,电气系统需实现井下负荷、地面供电与储能单元的智能平衡。微网控制系统采用下垂控制或主从控制逻辑,实现分布式电源与主电网的平滑切换,智能化单元对光伏、风电输出功率进行超短期预测,结合矿山用电负荷曲线自动调整储能装置的充放电状态,当外部电网发生瞬时失压时,控制逻辑在 10 ms 内完成孤岛检测并启动应急供电序列。这种多能源互补的电气控制策略,增强了矿山电网对新能源随机性的消纳能力与系统冗余度。

## 5 结束语

智能化技术在矿山电气自动化领域的应用,标志着控制模式从传统的阈值触发向感知、决策、执行一体化的演进。通过在采掘控制、提升运输及供电网络中集成高精度算法与智能硬件,实现了电气参数的实时优化与多系统协同。这种技术路径有效应对了矿山极端的运行工况,显著提升了电气系统的运行效能与响应精度。未来,随着感知技术与控制逻辑的进一步融合,矿山电气自动化将迈向更深层次的自主运行阶段,为资源的高效提取提供坚实的电气技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 陈小兵. 智能化技术在电气自动化控制中的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(S2):326-328.
- [2] 方辉. 试论智能化技术在矿山电气自动化中的应用分析[J]. 世界有色金属, 2025(09):25-27.
- [3] 董彬. 智能化技术在矿山电气自动化控制中的应用[J]. 世界有色金属, 2025(05):28-30.
- [4] 张晓强. 智能化技术在电气自动化控制中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024,09(22):61-63.
- [5] 杨磊,徐琮凯. 智能化技术在矿山电气自动化控制中的应用[J]. 中国金属通报, 2024(08):83-85.

# 高层建筑电气设备安装调试及 智能化管理模式探析

周德俊

(中国电建成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

**摘要** 高层建筑电气系统是保证建筑安全稳定运行的关键, 高层建筑电气系统安装调试质量以及智能化管理水平直接影响建筑的使用效能和安全。本文以高层建筑电气系统、安装调试、智能化管理的相关理论为基础, 对电气设备安装的核心流程、调试技术要点进行梳理, 分析安装调试过程中出现的常见隐患及防控策略, 构建包含感知层、传输层等多维度的智能化管理模式, 探索技术、模式等各方面的创新途径, 以期为提高高层建筑电气设备安装调试质量、优化智能化管理水平提供参考。

**关键词** 高层建筑; 电气设备; 安装调试; 智能化管理

中图分类号: TU976

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.008

## 0 引言

随着城市化进程的加快, 高层建筑数量不断增加, 其功能多样化、结构复杂化对电气系统提出了更高的要求。电气设备是高层建筑能源供应、安全防护的核心载体, 其安装调试的规范性直接影响到建筑的使用安全, 但是传统的管理模式已经不能满足设备运维的需求。基于此, 本文系统研究高层建筑电气设备安装调试流程和技术, 探索智能化管理模式的构建和创新, 解决安装调试隐患、管理效率低下的问题, 以期为保障高层建筑电气系统安全、高效、节能运行提供有益参考。

## 1 高层建筑电气设备安装调试及智能化管理模式概述

### 1.1 高层建筑电气系统核心理论

高层建筑电气系统的核心理论是以供配电的安全稳定为基本出发点, 结合多学科的知识, 针对高层建筑用电负荷大、可靠性要求高的特点, 涵盖供配电、照明、防雷接地、消防电气以及智能化系统等各方面的协同运作<sup>[1]</sup>。通过科学的设计优化来达到电力合理分配, 保证电气系统与建筑结构、使用功能相匹配, 满足多元化用电需求, 兼顾节能与安全, 为之后的安装调试以及智能化管理提供理论依据, 是高层建筑电气工程顺利开展的基础。

### 1.2 电气设备安装调试相关理论

电气设备安装调试的相关理论包括设备安装工艺学、电气测试技术等内容, 核心是按照标准化的流程, 结合高层建筑施工的特点, 确定设备安装的技术规范、质量标准和安全要求。同时, 使用系统调试方法, 对安装好的设备做空载、负载、联动检测, 排除安装和运行中存在的隐患, 检验设备性能与设计要求的一致性, 保证设备安全稳定运行, 为电气系统正常运转和智能化管理打下了设备基础。

### 1.3 智能化管理相关理论

智能化管理相关理论是以物联网、大数据、人工智能等技术为主, 融合设备全生命周期管理、系统协同管理理论, 针对高层建筑电气设备运维难点展开的<sup>[2]</sup>。核心是创建感知、传输、分析、调控的智能化体系, 依靠终端设备采集运行数据, 依靠网络和管理平台实现实时监测、故障预警、智能调控, 使电气管理由被动运维转向主动预警, 降低运维成本、提高效率, 实现电气系统精细化、高效化管控。

## 2 高层建筑电气设备安装核心流程与实施策略

### 2.1 安装前期筹备与规划策略

安装前期筹备与规划是规避施工隐患、保障安装有序高效推进的关键, 需围绕图纸设计、设备选型、方案编制三大核心, 结合高层建筑结构与用电需求施

作者简介: 周德俊(1990), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工管理。

策。电气施工图纸设计需紧密结合建筑布局、楼层功能及用电负荷,明确系统布局、管线走向与设备位置,重点规避管线与建筑结构冲突、负荷分配不均等隐患,兼顾施工便利性与后期运维可行性。图纸完成后,组织电气、土建、消防等专业人员联合审核,核查规范性与可行性,及时优化设计漏洞,避免返工造成的工期延误与成本浪费。设备选型遵循适配、可靠、节能原则,结合高层建筑负荷大、运行久的特点,选用符合国标优质设备,严格进场管控,核查规格、型号及质量证明,杜绝不合格设备投入使用。施工方案需结合现场与图纸要求,明确安装流程、技术标准、质量控制点及安全注意事项,细化任务分工;做好技术交底,讲解方案要点与操作规范;配备专业施工与管理人员,强化培训,全面提升队伍技术水平与安全意识,为安装工作筑牢基础<sup>[3]</sup>。

## 2.2 关键电气设备安装工艺与流程

关键电气设备安装是高层建筑电气安装的核心,需遵循标准化工艺流程,聚焦供配电、照明动力、防雷接地、智能化终端等核心设备,强化质量与风险管控,确保符合设计与使用要求。在供配电系统中,变压器安装需严控基础平整度,做好固定与绝缘处理,规范接线,保障运行稳定,定期检查设备密封性能,防范受潮故障;配电柜安装需垂直牢固,合理布置内部接线,做好防潮防尘防护,保障配电安全,预留足够检修空间便于后期维护。照明与动力系统需结合楼层功能,合理布置灯具与动力设备,管线敷设遵循“安全、规范、美观”原则,区分强弱电管线,避免干扰,做好固定防护,防止破损老化。防雷接地与消防电气直接关系到建筑安全,防雷接地装置按设计施工,确保接地电阻达标,做好连接防护;消防电气与消防系统协同,规范安装探测器、应急照明等设备,确保接线正确、联动可靠。智能化终端设备按需合理布置,保证安装精准、固定牢固,做好通信接线,确保数据采集传输正常,同时严控操作规范,排查隐患,规避安全风险。

## 2.3 安装过程中的安全注意事项

高层建筑电气安装工序复杂、高空作业多,安全管控是重中之重,需聚焦防漏电、防管线破损、防高空坠落三大核心,强化质量隐患防控与施工协同,确保安全与质量双达标。防漏电需遵循接线规范,选用合格绝缘材料,做好设备与线路绝缘处理,定期检查绝缘性能,避免线路破损、接线错误引发事故;施工人员佩戴合格绝缘防护用品,严禁带电作业与违规操

作,定期开展漏电隐患专项排查。防管线破损需规范敷设,避免挤压碰撞,做好固定防护,穿墙穿楼板处做好密封,区分强弱电敷设路径,定期检查管线外观,及时更换破损管线,防范短路漏电<sup>[4]</sup>。防高空坠落需强化防护,高空作业人员佩戴安全带、安全帽,作业平台验收合格后使用,严禁违规作业,现场设置警示标识、专人监护,划定安全作业区域。同时常态化排查质量隐患,建立台账、明确整改责任时限,加强与土建、装修等环节对接,统筹进度、预留通道,避免交叉干扰,确保电气安装与整体施工同步。

## 3 高层建筑电气设备调试流程、技术要点及优化策略

### 3.1 调试前期准备工作

调试前期准备工作是调试精准高效、规避隐患的基础,要从调试仪器、调试方案、设备预处理三个方面全面推进。调试仪器选型要根据调试内容和设备性能来确定,选用精度、量程适配、性能稳定的仪器,所有的仪器都必须有有效的计量校准证书,符合国家标准。使用前进行全面校准,排查故障、保证数据准确,使用中严格按操作规程进行,做好维护保养工作,防止仪器损坏影响进度。调试方案要结合设备安装、设计、使用需求来确定调试目标、内容、分阶段流程、技术标准、人员分工、安全注意事项,对设备失灵、数据偏差等异常制定应急预案。配置专业调试人员,明确岗位职责,做好技术交底,讲解方案、设备性能和安全要求,保证调试人员掌握调试技能。设备预处理在调试前进行,主要对安装质量、接线规范性、绝缘性能、固定情况等进行检查,清理设备杂物,检查电源、通信连接,排除安装遗留隐患,对智能化终端进行通电测试,保证正常启动,为分阶段调试做好准备。

### 3.2 分阶段调试实施与技术要点

高层建筑电气设备调试按“单体调试、系统联动、智能化调试、专项调试”分阶段进行,各个阶段分工明确、衔接有序,必须严格按照技术规范执行,保证调试质量达标。单体调试为基本环节,重点对变压器、配电柜、灯具、动力设备、智能化终端等各个设备进行单独测试,先空载检验运行参数、排查自身故障,再模拟真实工况做负载测试、验证设备性能与设计要求的一致性,保证单个设备的稳定运行。系统联动调试主要对供配电、消防、照明三个系统进行协同运行能力的测试。供配电系统主要是对设备联动响应和切换性能进行测试,保证供电稳定。消防电气主要是对

探测器、应急照明等设备的联动可靠性进行测试,保证火灾时能够正常启动。照明系统主要是对开关、亮度调节功能进行测试,满足使用需求<sup>[5]</sup>。智能化系统调试主要对数据采集、传输、控制环节进行测试,检验监测调控功能是否正常;防雷接地专项测试接地电阻及防雷性能,保证符合标准,保证电气系统和建筑安全。

### 3.3 调试注意事项与优化策略

电气设备调试需加强安全控制,规范异常处理,优化流程,保证调试效率和精度,满足设计要求,为以后的运行和智能化管理打下基础。安全方面主要防范短路、设备过载,调试前切断相关电源,做好防护,严禁带电调试;调试中控制测试参数,防止超出额定标准,现场设置警示标识、专人监护,严禁无关人员进入。异常处理坚持“及时排查、精准定位、快速整改”的原则,对设备失灵、联动故障、数据偏差等现象立即停止调试、检查原因,分辨安装、接线、设备自身故障,制订整改措施,整改后重新调试,建立异常台账,详细记录有关信息,为以后运维提供参考。从流程、技术、人员三个方面入手,优化调试顺序、衔接工序,使用智能化调试设备、大数据分析,精准定位隐患,加强调试人员培训,提高调试人员的技术和应急能力,调试完成后严格验收,规范整理归档相关资料。

## 4 高层建筑电气设备智能化管理模式的构建

### 4.1 智能化管理模式构建的基础与前提

高层建筑电气设备智能化管理模式构建需要依托设备、技术、管理三个坚实的基础,明确核心的前提条件,保证模式的可行性和实用性、可持续性,为落地优化提供支撑。设备基础是核心,保证电气设备的安装质量符合要求、性能稳定,特别是传感器、控制器等智能终端设备应保证可以准确地采集和传送数据;对陈旧设备进行更新换代,用性能更好的设备来代替不能满足智能化的设备,保证设备与系统的兼容性,不影响管理效果。技术基础是核心,需要将物联网、大数据、人工智能等核心技术整合起来,构建完善的支撑体系,保证技术先进、实用,实现数据实时感知、高效传输、精准分析、智能调控;建立稳定的、安全的加密传输网络,保证数据安全及时,防止丢失、泄露等问题。管理基础是保证,建立完善的管理制度,制定明确的管理目标、职责分工和考核标准,提高管理人员的专业水平,加强智能化水平,选拔专业人才,推进部门之间的协作,确定资金的投入机制,保证系

统的构建以及设备的升级等环节有资金来源,从而保障模式能够顺利地建立起来并进行优化。

### 4.2 高层建筑电气设备智能化管理模式构建

高层建筑电气设备智能化管理模式的建立要以感知、传输、平台、应用四个环节的整体架构为依托,围绕设备全生命周期的管理来构建一个功能完善、高效协同、精细化的控制体系,并且还要考虑实用、扩展、可操作性。架构按照分层联动的原则来运作,各个层次的工作分工明确,衔接紧密。感知层为底层,布置电流电压传感器、温度传感器等终端设备,实时全方位采集设备运行、能耗、隐患的数据,为管理提供精准的支撑。传输层把感知层数据通过有线或者无线加密网络,高效、安全地传输到管理平台,采用容错机制保证数据的安全、完整。平台层属于核心枢纽,大数据分析、人工智能算法融入其中,对海量数据汇总分析,实现设备实时监测、故障预警、数据统计,给管理人员提供决策支持。搭建应用层监测、调控等各个功能模块,实现落地。系统搭建按照需求分析、方案设计、部署调试、验收上线的步骤进行,根据实际的需求来优化设计,保证系统适应性、可用性。

## 5 结束语

高层建筑电气设备安装调试和智能化管理是一个系统性、综合性工程,它贯穿建筑工程的全流程。本文对安装调试主要流程、技术要点、隐患防控方法进行梳理,形成一个多维度的智能化管理方式,并提出技术、模式等方面的创新途径来为实际工作提供参考。安装调试质量是基础,智能化管理是提高方向,两者要同步推进。未来可以进一步加深物联网、AI等技术的融合应用,优化管理体系,不断提高高层建筑电气系统安全、可靠、节能的水平,满足高层建筑高质量发展的需求。

### 参考文献:

- [1] 谢梓华. 智能化变电站电气设备安装及调试方法研究[J]. 光源与照明, 2025(06):181-183.
- [2] 赵宇. 智能化检测与诊断技术在电气设备安装调试中的应用[J]. 家电维修, 2024(11):92-94.
- [3] 殷志浩. 变电智能化设备的安装调试与运行维护分析[J]. 集成电路应用, 2023,40(12):244-245.
- [4] 谢水斌. 智能化变电站电气设备的安装及调试[J]. 光源与照明, 2022(10):158-160.
- [5] 付奎霖. 智能化变电站电气设备安装及调试[J]. 大众用电, 2021,36(09):72-73.

# 配电自动化系统在配网线路故障快速检修中的运用

柴世勇

(国网河南省电力公司信阳供电公司, 河南 信阳 464000)

**摘要** 在配电网自动化系统中综合利用电子技术、信息技术、计算机及网络技术, 可以有效实现配电网系统在线监测和故障快速定位、检修的功能, 有利于保障配电网运行的安全性。本文以配电站自动化系统为研究对象, 重点分析其在配网线路故障快速检修中的技术实现路径与应用成效, 为电力行业推进数字化转型、构建新型电力系统提供实践参考, 助力实现“双碳”目标下的可持续发展。

**关键词** 配电网自动化系统; 配网线路; 故障快速检修

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.009

## 0 引言

随着社会经济的不断发展, 电力需求持续增长, 已成为社会运转的关键支撑。电力系统作为能源核心载体, 其安全稳定运行直接关系到民生保障与经济发展, 亟需构建智能化安全保障体系以应对复杂运行环境挑战。配电网是电力系统的重要组成部分, 承担着将电能从输电网安全、可靠、高效地分配到终端用户的关键任务, 直接关系到电能分配质量, 其运行状态关系到整体供电质量。由于配电网长期暴露于自然环境中, 易受外力破坏及设备老化等因素影响, 导致故障发生率显著增加。此类故障不仅会直接影响居民用电质量, 还会对工业生产和社会经济发展造成连锁损失。在此背景下, 配电自动化系统通过实时监测配电网运行状态, 可精准实现故障定位与隔离, 从而有效保障供电过程的安全性及可靠性。

## 1 配电自动化系统概述

### 1.1 系统组成

配电自动化系统包括主站和子站以及终端设备等部分, 各部分功能相互协作, 可实现配电网智能化运行和维护。整个系统的核心为主站, 负责实时监控和管理整个配电网, 发挥采集和处理数据、故障诊断、远程操控等功能。子站处于主站和终端设备中, 负责数据中转, 同时发挥区域管理功能, 可以降低主站计算和通信压力<sup>[1]</sup>。终端设备包括馈线终端单元和配变终端单元等, 在配电网各节点上安装这些设备, 负责对线路状态信息进行采集, 同时可以操控控制指令,

并且向子站或者主站传输数据。通过分层架构形式, 有利于精细化管理配电自动化系统, 避免出现安全问题, 保障系统运行的可靠性。

### 1.2 关键技术

维持配电自动化系统正常运行需要综合利用各种技术。例如: 综合利用通信技术、计算机技术以及自动控制技术, 有利于提高运行效率。通信技术负责传输数据, 常用的包括光纤通信和无线通信以及电力线载波通信等。通过利用这些通信技术, 不仅可以高效传输数据, 同时具备较强的抗干扰能力, 可以适应电磁环境。计算机技术负责处理和分析主站和子站的数据, 通过挖掘和分析海量数据, 可以精准预测系统故障。此外, 利用自动控制技术可以实时监测配电自动化系统, 同时对运行状态自动调整, 如利用自动重合器和分段开关可以快速隔离故障区域, 及时恢复正常供电。利用各种关键技术, 保障配电自动化系统运行的高效性。

### 1.3 系统功能

配电自动化系统综合发挥实时监测和故障定位以及故障隔离等功能, 有利于进一步提高配电网系统运行效率。发挥实时监测功能, 可以持续性跟踪配电网运行状态, 及时预防异常问题。故障定位主要是利用传感器和监测设备采集的数据, 再利用先进算法精准定位故障位置, 高效地排查故障问题。而发挥故障隔离作用, 综合利用自动开关和重合器等设备, 可以及时隔离故障区域和其他正常区域, 降低故障影响<sup>[2]</sup>。利用远程控制功能, 运维人员可以远程操作设备, 如利用遥控指

作者简介: 柴世勇 (1979-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 配电网运维技术。

令快速恢复非故障区的电力资源。有机结合各种功能，可以保证配电网运行的稳定性，推动智能电网发展。

## 2 配网线路常见故障分析

### 2.1 短路故障

配电网线路中短路故障比较常见，该故障诱因相对复杂，包括线路老化和绝缘层破损以及外力破坏等。在实际运行中，因为环境温度和化学腐蚀以及机械振动等因素的影响，会降低配电网线路的绝缘性能，增加短路故障发生率。出现这一故障问题会直接危害配网运行，电流快速增加，导致设备过载或者烧毁问题，引发停电事故，降低供电可靠性。尤其在城市化发展过程中，会提高配网负荷密度，进一步扩大故障影响范围，影响社会经济活动。

### 2.2 接地故障

接地故障包括单相接地和多相接地等类型，在配电网中比较常见的是单相接地。单相接地的诱因包括线路绝缘老化和雷击过电压以及外界因素的干扰，故障特点为故障电流较小，系统长时间带故障运行，会引发严重的安全事故<sup>[3]</sup>。多相接地故障具有突发性特点，如出现线路断线之后，会导致设备内部短路，造成较大的危害性。针对接地故障的检测工作，主要是利用人工巡检和经验判断方式，不利于保障工作效率，同时会降低检测准确性。不断发展配电网自动化技术，广泛利用故障指示器和智能监控系统，可以实时监测电流和电压等，同时可以通过数据分析精准定位故障发生部位。接地故障会引发系统电压不平衡和设备损坏等，通过及时检测和处理接地故障，有利于保障配网运行的安全性和稳定性。

### 2.3 其他故障

配网线路运行中还存在过载和断线故障等，其中过载故障指的是快速增长用电需求，或者负载分配不合理，长期过载运行将会加剧线路发热问题，引发绝缘老化，甚至会引发火灾故障。断线故障是因为外力破坏或者设备疲劳断裂等因素，无法继续供应故障区域的电力资源，直接影响用户用电体验。此外，因为雷击和污闪等原因引发配电网线路故障，会增加检修运维难度。为了合理应对故障问题，需要利用配电网自动化技术实时监测配网线路，提高问题响应速度，在最大程度上降低故障影响。

## 3 配电网自动化系统在配网线路故障快速检修中的运用

### 3.1 故障快速定位

配电网自动化系统综合利用各种传感器和监测设备以及智能算法等，有利于快速定位配网线路故障。利

用传感器和监测设备实时采集线路运行数据，可以采集线路电流和电压等参数，并且向主站传输采集的数据，进行数据分析处理<sup>[4]</sup>。利用基于重合器的故障定位技术，通过预设重合器工作模式，如果发生线路故障，结合开关动作逻辑精准故障发生位置。例如：某一段开关多次出现重合失败的情况，系统判断该区域存在故障问题，同时发出预警信息。此外，还可以利用GIS定位技术，精准定位故障发生位置，辅助维修人员快速处理问题。但是各种定位技术具有不同的局限性。例如：根据电流变化进行故障定位，线路负载波动等将会影响定位效果，提高误判问题发生率；GIS技术虽然具备较高的精度，但是会增加部署投资，在复杂地形中很难推广。

### 3.2 故障自动隔离

配电网自动化系统综合利用自动开关和重合器等设备可以快速隔离故障区域，缩小故障影响范围。例如：针对单相接地故障，系统可以利用分界开关自动化分闸，及时分离故障线路和正常线路，而非故障区可以正常供电。针对相间短路故障，系统可以结合馈线终端设备自动化上传故障信息，同时可以记录开关刀闸状态和保护动作，确定故障区域之后立即执行隔离操作。在实际工作中，首先主站系统接收、分析终端设备的报警信号。其次根据故障类型，落实针对性的隔离措施，如启动重合器及时恢复供电，同时对故障线路闭锁。最后利用遥控功能，完成开关设备远程操作，从而完成隔离功能。在实际工作中，通过及时、精准定位故障类型和位置，顺利落实隔离操作，避免因为错误操作引发停电事故。

### 3.3 远程控制和恢复供电

配电网自动化系统综合利用通信技术和远程控制模块，有利于实时监控和操作开关设备，可以及时恢复非故障区的供电。在主站系统中，运维人员可以利用人机交互界面对线路运行状态进行查看，远程发送分合闸操作指令。例如：确定故障发生位置并且完成隔离工作之后，系统将会自动关闭开关，重新建立非故障区的供电路径<sup>[5]</sup>。利用远程控制方式，可以快速处理故障，同时可以降低人工操作的负面影响。为了保障远程控制的安全性，需要提高通信网络的稳定性，准确操作控制指令。因此，在配电网自动化系统中可以综合利用冗余通信通道和抗干扰编码技术，及时、全面地传输数据。此外，系统中配置了权限管理机制，操作人员被授权之后才可以执行远程操作指令，进一步保障系统运行的可靠性。

## 4 应用案例分析

### 4.1 案例背景

某市郊 10 kV 配电网的线路总长达到 32.8 km, 覆盖市郊内的平原和丘陵以及山区等地理环境, 该配电网投用之后, 运行时间超过了 10 年, 部分线路出现老化问题, 对供电安全性和可靠性造成影响。结合相关统计数据, 该配网故障发生次数为 249 起, 严重配电事故为 6 起, 平均故障停电时间超过 1.32 小时, 不符合国家规定标准。此外, 该地区负荷特点具有季节性波动特点, 夏季高峰负荷为居民用电因素的影响, 冬季故障发生率相对较低。该配电网故障检修中利用了配电自动化系统, 通过分析系统运用, 可为类似工程的工作开展提供参考。

### 4.2 故障发生和处理过程

该地区利用配电自动化技术建设线路快速故障定位系统, 在某次雷电天气中配网线路出现了单相接地故障, 发生故障之后, 在系统中安装故障显示器, 可以开始检测异常电路信号, 并且利用 GIS 定位技术精准定位故障发生位置<sup>[6]</sup>。系统发出告警信息, 向监控中心传输故障数据, 同时利用无线通信技术向运维人员终端发送故障位置信息。在故障隔离中, 系统综合利用自动开关和重合器设备快速隔离故障区域, 没有进一步扩大故障范围。通过远程控制功能, 运维人员对主站系统进行操作, 可以恢复非故障区的正常供电。上述操作时间仅为 30 min, 对比传统人工排查方式, 显著缩短了停电时间。

此外, 在处理故障过程中, 配电自动化系统可以高效地开展故障定位和隔离以及恢复供电等工作。例如: 利用故障显示器精准定位故障类型, 同时利用数字化处理方式, 向监控中心传输故障信号, 提高后续数据处理水平。此外, 系统远程控制功能, 可以降低运维人员的压力, 同时可以高效处理故障。

### 4.3 案例总结

通过案例分析, 在配电线路故障快速检修中配电自动化系统发挥了重要的作用。首先, 该系统可以利用各种监测设备和技术措施, 快速定位故障, 提高故障排查效率。其次, 利用自动隔离功能, 可以控制故障范围, 缩小了停电面积<sup>[7]</sup>。最后, 利用远程控制技术, 可以高效地处理故障。但是在该案例中也存在不足之处, 在极端天气的影响下, 部分监测设备出现数据处理延迟问题, 对故障处理效率造成严重影响。因此, 需要进一步提高配电自动化系统的故障处理能力, 尤其在同时发生各种故障的情况下, 限制了故障定位功能。

针对上述不足之处, 需要在以下几个方面改进配电自动化系统: (1) 提高监测设备的抗干扰能力, 使

其适应各种恶劣环境, 维持稳定运行。通过优化数据处理算法, 面对复杂的故障, 可以快速、精准处理数据, 避免因数据处理延迟而降低数据处理效率。此外, 完善故障定位功能, 即使同时出现各种故障, 也可以精准定位故障发生的位置。(2) 优化故障定位算法, 充分发挥人工智能技术的优势, 高效处理复杂故障。例如: 可以利用深度学习等算法, 深度挖掘和分析故障特征, 精准、高效地定位故障。同时, 利用大数据技术整合分析历史故障数据, 可为故障处理工作提供参考, 进一步提高故障处理水平<sup>[8]</sup>。(3) 定期培训运维人员, 提高运维人员的操作能力和应急处理能力等。通过定期组织专业技能培训活动, 引导运维人员掌握配电自动化系统的新功能和操作要求等, 快速响应突发故障。同时要落实应急演练和案例分析等措施, 辅助运维人员更好地判断复杂故障场景, 高效处理故障问题, 在最大程度上减少故障处理时间, 保障配电网运行的稳定性。综合利用上述措施, 有利于在故障检修中突出配电自动化系统的优势, 进一步提高配电网运行水平。

## 5 结束语

配电自动化系统通过构建“实时感知—智能决策—精准执行”的闭环管理机制, 显著优化配电网智能化运维水平。一方面, 系统通过动态监测与自适应调控, 提升电网运行效率并降低故障概率; 另一方面, 依托故障快速定位与资源智能调配功能, 有效压缩故障处理周期与运维成本。未来需进一步深化数字孪生、边缘计算等新兴技术在状态监测中的应用, 研发基于深度学习的故障预测模型, 提升异常识别灵敏度, 通过持续优化配电自动化系统性能, 推动电力行业高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 叶俊雄. 基于物联网的 10 kV 智能配电自动化系统的设计与应用 [J]. 自动化应用, 2025, 66(23): 196-200.
- [2] 方鸣. 配电自动化系统在提高供电可靠性中的作用 [J]. 中国品牌与防伪, 2024(11): 144-145.
- [3] 揭晓, 毛同富. 基于配网自动化技术的配电线路故障处理系统设计探析 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(08): 107-109.
- [4] 叶耀, 龚锦霞, 李琛舟, 等. 一种考虑分布式电源的配电自动化系统规划方法 [J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 109-115.
- [5] 许冰, 王满意, 李斌, 等. 配电自动化系统单相接地故障定位分析与改进 [J]. 大众用电, 2022, 37(08): 60-61.
- [6] 王爱玉. 海岛电网配电自动化系统单相接地故障研判 [J]. 农村电工, 2022, 30(06): 37-38.
- [7] 郭大鑫. 基于供电可靠性的配电自动化系统规划方法 [J]. 电气传动自动化, 2022, 44(03): 13-16.
- [8] 黄华. 计及配电自动化系统的高弹性智能配电网扩展规划方法 [J]. 电工技术, 2022(09): 1-5.

# 智能诊断系统在火电集控运行故障预防中的应用剖析

唐明胜

(国家能源集团重庆电力有限公司重庆发电厂, 重庆 400800)

**摘要** 火电集控运行是火电生产的关键环节, 其故障防范关系到机组运行的安全性、能源供给的稳定性以及生产效益。智能诊断系统凭借数据感知、智能分析、精准预警的技术优势, 为火电集控运行故障预防提供新的解决方案。本文从智能诊断系统在火电集控运行故障预防的核心逻辑出发, 对智能诊断系统的应用技术要点进行分析, 总结其应用实践路径, 阐述智能诊断系统提高火电集控故障预防的准确性、保障火电集控运行的稳定性的作用和价值, 以期智能诊断系统在火电集控领域的深入应用提供参考。

**关键词** 智能诊断系统; 火电集控运行; 故障预防

中图分类号: TM61; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.010

## 0 引言

火电集控运行包括锅炉、汽轮机、发电机等多类核心设备, 各设备协同运行要监测大量的参数并且要调节复杂的工况, 故障突发性以及传导性都会对机组的安全造成严重威胁。传统的故障预防模式依靠人工巡检和经验判断, 不能应对集控运行所具有的动态复杂性, 容易造成故障漏判、误判或者预警滞后等问题。智能诊断系统将数据采集、智能算法、可视化技术等先进手段结合起来, 可以实时捕捉到集控运行中出现的异常信号, 经过深度分析来达到早期发现潜在故障并及时预警的目的, 成为火电集控运行故障预防从被动应对到主动防控的重要支撑。

## 1 智能诊断系统适配火电集控运行故障预防的核心逻辑

### 1.1 火电集控运行故障预防的需求导向与智能诊断的适配性

火电集控运行连续性、复杂性决定了故障预防需要满足实时性、精准性、前瞻性三大需求, 即要实时捕捉设备运行状态变化, 精准识别故障隐患类型、位置, 提前预判故障发展趋势并给出防控建议。智能诊断系统通过构建数据采集、信号分析、故障识别、预警推送的闭环流程, 完全符合上述要求: 多维度数据感知能力可以覆盖集控运行全流程参数, 突破传统监测的局限性; 智能算法的深度挖掘功能可以对海量数据进行挖掘, 消除人工判断的主观性; 预警机制的实时响

应特性可以做到故障隐患的早期预警, 为防控措施的实施留出充足的时间。不是仅靠技术功能上的相互补充, 更在于根据火电集控运行中多设备协同故障、隐性故障潜伏期长、故障传导速度快等特点建立起来的有针对性的诊断逻辑, 使故障预防更加符合集控运行实际场景。

### 1.2 智能诊断系统服务火电集控故障预防的核心原理

智能诊断系统服务于火电集控运行故障预防的核心原理, 就是用“状态感知、特征提取、故障匹配、预警决策”的技术逻辑把设备运行状态和故障模式建立起来<sup>[1]</sup>。在状态感知阶段, 系统把锅炉、汽轮机、辅机等重要设备的传感器所采集的温度、压力、振动、电流等各种运行参数作为数据集; 进行数据预处理, 滤波、降噪、归一化等; 提取出与故障有关联的特征参数; 将故障信号和正常信号分离; 故障匹配阶段则采用比对的方法根据已经识别出的故障类型、严重程度以及可能影响的范围给运行人员发送预警信息和控制建议; 预警决策阶段, 把预警信息和控制建议发送到集控平台; 引导运行人员调整运行参数或者停机检修, 从源头上防止故障的发生或者扩大的可能。

## 2 火电集控运行故障预防中智能诊断系统的关键技术应用

### 2.1 数据采集与预处理技术在故障预防中的应用

数据采集与预处理技术是智能诊断系统进行精准故障预防的基础, 其应用核心就是保证数据的全面性、

作者简介: 唐明胜(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 火电集控。

准确性、有效性。火电集控运行场景下数据采集技术采用分布式部署、集中式汇聚的模式，根据不同的设备运行特性选择合适的传感器类型，汽轮机转子监测用振动传感器捕捉振动频率的变化，锅炉燃烧系统用温度传感器实时监测炉膛温度分布，电气系统用电流传感器采集回路电流参数。同时利用工业以太网、无线传感网络等通信技术，完成多设备数据的实时传送以及集中汇聚工作，形成全集控运行的数据源。数据预处理技术针对采集到的数据中存在噪声、缺失值、异常值等问题，利用滑动平均滤波、小波变换降噪等方法来净化数据，通过插值法补充缺失的数据，使用统计分析的方法来剔除异常值，保证数据的质量符合后续诊断的要求。

## 2.2 智能算法模型在故障识别与预警中的应用

智能算法模型是智能诊断系统的关键，在火电集控运行故障预防中，主要应用智能算法模型实现对故障的精准识别和提前预警。由于集控运行故障具有多样性和复杂性，因此系统融合了多种智能算法来构建互补的诊断系统：在隐性故障的识别上使用机器学习算法（支持向量机、随机森林等），通过对正常运行的样本进行训练来建立故障识别模型，可以在正常状态下找到微小的异常变化从而发现隐性故障；对于复杂的协同故障的诊断使用深度学习算法（卷积神经网络、循环神经网络等）来发现多个设备、参数之间的相关性，精确定位故障源头以及传播途径，避免单参数诊断造成的误判；对于故障的发展趋势进行预测，用时间序列分析法对历史运行数据和实时数据进行建模，预测故障的发展速度和可能造成的影响，给运行人员制定分级防控策略提供依据。

## 2.3 可视化与决策支持技术在故障预防中的应用

可视化和决策支持技术是智能诊断系统落地的关键，其主要作用就是把复杂的诊断结果转化成直观易懂的信息，为运行人员的故障防控决策提供有效的支撑。可视化呈现部分用三维建模、动态图表等技术将集控运行设备的结构、运行参数、故障预警信息等内容用可视化的界面来展示，在设备三维模型上实时标注出故障的位置和严重程度；利用动态曲线来展示参数的变化趋势，清楚地反映故障的发展过程；用颜色分级预警（蓝色为正常，黄色为预警，红色为紧急）来明确故障的严重性，提高预警信息的识别度<sup>[2]</sup>。从决策支持角度讲，系统依据故障诊断结果及历史防控案例库，给出相应的防控建议：对轻微异常提供调整运行参数、优化操作流程等在线处理方案；对重大故障，提供停机检修、部件更换等应急处置措施，同时说明具体操作步骤和注意事项。

## 3 智能诊断系统在火电集控运行故障预防中的实践路径

### 3.1 基于智能诊断的故障预防体系构建

建立智能诊断的故障预防体系，这是系统有效运用的前提，主要在于技术、流程、人员三者的有机结合，构成一个技术支撑、流程规范、人员协作为一体的整体结构。从技术支撑角度来说，要依据火电集控运行设备配置、运行特性等因素，合理地设置智能诊断系统硬件（传感器、数据采集器、服务器）、软件（诊断算法、可视化平台），并保证系统覆盖所有关键设备和运行环节；在流程规范方面，制订出智能诊断系统运行管理流程，对数据采集频率、诊断分析周期、预警信息处理时间、故障处理程序等关键环节制定标准，保证故障预防工作进行顺利；就人员协同来说，要加强运行人员、技术人员、维护人员的配合，运行人员负责实时监控预警信息、执行防控措施，技术人员负责系统算法优化和故障深度分析，维护人员按照诊断结果开展设备检修工作，形成分工明确、协同高效的故障预防工作机制。

### 3.2 智能诊断系统与火电集控平台的融合应用

智能诊断系统与火电集控平台的深度融合，是提高故障预防效率的重要途径，其中最为关键的是达到数据互通、功能互补和操作协同的目的。在数据互通方面，通过标准接口开发实现智能诊断系统与集控平台的数据共享，集控平台向诊断系统推送实时运行参数、设备台账、历史故障记录等数据；诊断系统把故障诊断结果、预警信息、防控建议反馈给集控平台；形成数据闭环。在功能互补方面，集控平台的集中监控功能与智能诊断系统的精准诊断功能相融合，集控平台实现全流程运行状态监控，智能诊断系统对监控中发现的问题进行深度分析；故障预防有全面性和针对性。在操作协同方面，把智能诊断系统的预警信息、防控建议嵌入集控平台的操作界面，运行人员在集控平台中可以查看故障详情和处置方案，不需要切换系统；系统支持根据诊断结果自动触发一些防控操作（调整阀门开度、启动备用设备）；故障预防半自动化与自动化，提高响应速度<sup>[3]</sup>。

### 3.3 全流程故障预防的智能诊断实施策略

全流程故障预防的智能诊断实施策略需要覆盖“运行前预判、运行中监控、故障后优化”三个主要环节，形成全周期的故障防控闭环。运行前预判阶段，智能诊断系统根据设备的历史运行数据和检修记录，用算法模型来预测设备运行的风险点，给运行方案的制定提供依据，根据设备的老化趋势来调整运行参数阈值，

提前做好关键部件的备用准备；运行中监控阶段，系统实时采集运行数据，不断进行故障识别与预警，按照不同的预警信息采取相应的处置措施，轻微预警由运行人员在线调整，严重预警启动应急响应流程，保证故障及时受控；故障后优化阶段，系统对故障发生的过程、处置效果进行分析，找出故障发生的深层次原因，改进诊断算法模型和故障防控策略，更新故障模式库，把故障案例纳入培训体系，提高运行人员的故障处置能力，实现故障预防的持续改进。这一全流程实施策略，使智能诊断系统贯穿集控运行的全过程，保证故障预防的连续性、有效性。

#### 4 智能诊断系统赋能火电集控运行故障预防的应用价值

##### 4.1 提升火电集控运行故障预防的精准性

智能诊断系统依靠多维度的数据采集、智能算法分析、精确故障匹配等方式，很好地解决了传统故障预防依靠人工经验而出现的误判、漏判问题，大大提高了故障预防的准确性。系统可以从大量的运行数据中提取出微弱的故障特征信号，准确地识别出隐性故障、协同故障等复杂的故障类型，明确故障的位置、严重程度和发展趋势，使运行人员可以有针对性地采取防控措施，避免盲目操作<sup>[4]</sup>。锅炉燃烧系统故障预防中系统可以对炉膛温度分布、烟气成分等参数的微小变化进行分析，提前发现燃烧不充分、受热面结焦等潜在故障，指导运行人员调节燃料供给与配风比例，从源头上阻止故障发生。精准的故障预防能力可以降低故障率，减少由于误判而造成的不必要的停机，从而提高集控运行的经济性。

##### 4.2 强化火电集控运行的连续性与稳定性

火电集控运行连续性直接关系到能源供应的稳定性，智能诊断系统依靠早期预警、快速处置来阻止故障的发生与扩大，大大提高了集控运行的连续性和稳定性。系统在故障萌芽期就发出预警，给运行人员留出足够的处理时间；大多数情况下可以通过在线调整运行参数、启用备用设备等方式化解故障风险，避免故障升级造成的非计划停机；对于不能在线处理的故障，系统能准确找到故障原因，缩短故障排查和检修时间，减少停机时长。系统能够对设备的运行状况实行监视，并且可以及时发现设备的老化问题以及性能衰减等现象，给维修工人提出预防性检修的指导意见，从而延长了设备使用年限的同时又减少了突发的设备故障率。强化对运行连续性的保障，不仅可以保证能源的稳定供给，而且可以减少由于停机所造成的经济损失，提高火电企业的经济效益。

##### 4.3 推动火电集控运行故障预防的智能化升级

智能诊断系统的应用，打破了传统故障预防技术上的局限，推动火电集控运行故障预防向着智能化、数字化方向发展。传统的故障预防依靠人工巡检和经验判断，效率低、主观性强，不能适应集控运行复杂多变的工况；而智能诊断系统用数据驱动的诊断逻辑来实现故障预防的自动化、精准化、智能化，减少了对人工经验的依赖<sup>[5]</sup>。系统在运行过程中会不断积累故障数据以及处理经验，利用算法的不断迭代改进提高诊断精度和预警能力，形成一个由数据到诊断再到优化的良性循环，促进故障预防技术不断向前发展。智能化升级不但提高了故障预防的技术水平，更推动了火电集控运行管理模式的优化，使火电企业向数字化、智能化转型，为行业高质量发展提供技术支撑。

#### 5 结束语

智能诊断系统凭借数据感知、智能分析、精准预警三大优势，在火电集控运行故障预防中起着不可替代的作用。本文从智能诊断系统适应火电集控运行故障预防的核心逻辑入手，梳理智能诊断系统应用中的关键技术要点和全流程实践路径，明确智能诊断系统在提高故障预防的准确性、加强运行稳定性、推动智能化升级等方面的应用价值，全面阐释了智能诊断系统与火电集控运行故障预防的融合路径。随着人工智能、大数据等技术的持续发展，智能诊断系统在诊断算法优化、多源数据融合、自主决策能力提升等方面将会取得进一步的突破，为火电集控运行故障预防提供更加有力的技术支撑。

#### 参考文献：

- [1] 丁光耀.人工智能下火电厂集控运行在电力系统稳定性中的关键作用[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛:绿色智造·采购革新专题.国能保定发电有限公司,2025.
- [2] 彭博伟,马贝,张江德.火电机组DCS硬件故障分析与治理[J].电力安全技术,2025,27(12):71-74.
- [3] 蔡奇伟.火电厂常见故障处理方法[J].能源新观察,2025(11):50-51.
- [4] 绳大为.基于大数据分析的火电机组主机设备多源故障诊断型构建策略[J].中国科技信息,2025(22):90-92.
- [5] 朱殿军,赵爱娟,朱宇璇,等.基于人工智能AI大模型的火电厂设备故障诊断技术研究[C]//中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网(苏州)城市能源研究院.2025年(第三届)城市电网技术创新会议论文集.秦皇岛发电有限责任公司,河北创绘工程设计有限公司,曙光信息产业股份有限公司,2025.

# 城市轨道交通智慧运维中 低空无人机技术应用探讨

彭朝仿, 廖龙飞, 莫珊珊

(南宁轨道交通运营有限公司, 广西 南宁 530004)

**摘要** 随着城市轨道交通网络规模的发展及“智慧城轨”战略的推进, 传统的依赖站外人工巡检方式面临效率有瓶颈、安全有风险的双重困境。本文重点分析城市轨道交通中人工巡视现状、存在问题, 提出基于智慧运维的一体化无人机智能巡检体系构架, 详细阐述了构建无人机智能巡检体系所需装备、主要功能及各设备间联动功能情况, 以期对城市轨道交通智慧运维中低空无人机技术的应用有所裨益。

**关键词** 城市轨道交通; 低空无人机; 智慧运维; 智能巡检

中图分类号: U12; TP24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.011

## 0 引言

城市轨道交通是现代城市重要的交通大动脉, 想要安全高效地运行需要确保车站外沿线保护区内的整体环境安全。传统人工巡视难以持续满足城市轨道交通线网迅速扩大的安全管理需要, 低空技术和智能识别的无人机巡检技术迅速发展已为智能运维提供新的应用思路。基于此, 本文立足于城市轨道交通智能运维现实需求, 分析传统巡检的缺陷, 提出低空无人机智能巡检系统的构造、功能的要求、系统间的联动以及预期效果等方面可行路径的探讨。

## 1 城轨站外人工巡视现状

根据中国城市轨道交通协会 2025 年发布数据显示: 目前我国城市轨道交通运营线路总长达 11 710 公里, 共有车站 6 680 余座, 由此形成的安全保护区面积规模十分庞大。目前大部分地铁运营单位对地铁安全保护区仍采用人工徒步巡视方式进行日常管理。坚持“四定”原则, 即: 定人(巡查员)、定时(每天某个时间段)、定线(巡查路线)、定责(职责划分)。巡查员负责监督管理站口违停乱放、维护秩序; 保护区内有违章搭建、堆载、搭设、挖掘等妨碍地铁构筑物安全的行为; 防汛、防火等抢险设施是否完好等, 巡查区域范围大, 事项繁杂, 工作任务重。巡查区域范围大, 事项繁杂, 工作任务重。

## 2 传统人工巡视模式的固有缺陷与时效性瓶颈

人工巡检这种方式仍然存在各种局限性, 在现阶段已经无法更好地满足城市轨道交通线网规模持续扩

大的实际需求。而且这种巡检工作方式不利于进一步提高线路的安全管理水平, 特别是精细化和智能化水平, 主要表现在以下四个方面。

### 2.1 效率低, 覆盖范围有限

人工巡检受人力步行速度的限制, 每天能巡视的范围有限。当遇到突发情况(暴雨后的排除隐患), 或需要扩大巡检范围的情况, 存在无法继续响应的问题。人工巡检无法做到 100% 全覆盖。例如: 人员只能巡检地面或者距离地面 2 米的范围内的设施, 对高架桥梁底、隧道顶、边坡陡坡、密布管线区的地方就难以巡检<sup>[1]</sup>。

### 2.2 工作强度大, 环境适应性差

由于巡视员需在线路保护区内露天工作, 劳动强度大, 如寒冷天气时行动不灵活, 影响巡检精度与效率; 环境适应性差在夜间作业时(凌晨 0 点-4 点)疲劳状态工作下这个问题更加突出明显。

### 2.3 主观性强, 易产生疏漏与误判

人工巡检的质量受人员责任心、经验、精神状态影响较大, 漏巡漏检、标准不一致的情况时有发生。不同的巡检人员在同一事物的认知也有偏差, 仅凭经验很难准确观测到设备设施变形量、温度变化情况以及裂缝宽度等参数, 数据录入也容易造成漏记、误记、错别字、定位不准等问题。

### 2.4 数据孤岛, 管理闭环不畅

人工巡检产生的数据多为纸质、分散的电子文档或者专用数据格式, 难以进行有效的数字化汇总、统计、

作者简介: 彭朝仿(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 交通机电设备。

归类和深度分析。巡检的数据仅仅是一个简单问题的记录，用于问题发生后的责任追究。大量的巡检信息数据不能变成有价值的资产数据，并且难以和智慧运维平台融合，实现从“发现问题”到“分析预警”再到“处置反馈”的智能化闭环管理。

### 3 智慧运维模式下的低空无人机巡检体系：硬件构建与设施部署

为打破传统人工巡检的局限性，在智慧运维顶层

表1 轨道交通无人机巡检系统核心硬件参数选型表

硬件类型	核心参数	适用场景	主流产品型号
工业级无人机	续航 $\geq 30$ 分钟，抗风等级 $\geq 6$ 级，有效载荷 $\geq 1$ kg	站场巡视、高架区间检测	大疆 M30T、极飞 P100 Pro
任务载荷	高清摄像头（4K/30帧）+热成像（测温范围 $-20 \sim 50$ ℃）+激光雷达	设备过热监测、三维建模测距	禅思 H20T、Livox Mid-40
自动机场	支持自动起降/充电/数据传输，适应 $-10 \sim 50$ ℃环境	车站屋顶、车辆段无人值守	大疆 Dock 2、云圣智能天枢II
飞行调度平台	支持多机协同、AI智能分析、5G低延迟传输城轨	控制中心集中调度	智慧运维平台（定制化）

#### 3.1 智能无人机机体与任务载荷

智能无人机机体是巡检系统的移动平台，要选择适合城市复杂环境、较强的抗干扰能力的工业级无人机。对于无人机的技术要求包含以下几点：第一，续航时间应不低于30分钟；第二，抗风等级需要不低于6级；第三，最大飞行高度应不大于120米；第四，有效载荷不得低于1kg。

任务载荷是执行感知任务的核心部件，主流任务载荷配置<sup>[3]</sup>包括：

1. 高清变焦光学摄像头，不小于4K分辨率、支持30倍光学变焦，用于日常高清晰拍照和录制视频，识别设施外观异常、异物侵入或违章施工等情况。

2. 热成像（红外）摄像头，测温范围在 $-20 \sim 500$ ℃，具备热像及可见光融合，可以热成像和可见光的相互“透视”，适用于夜巡、电网设备发热情况监测或者火源排查。

3. 特定传感器模块，如激光雷达传感器能够实现地铁结构三维建模以及精准测距、变形监测方面的需求；温湿度传感器采用非接触式测关键设备的微参数。

#### 3.2 自动机场（无人机机巢）

自动机场为无人机无人化、自动化运维的重要基础设施。自动机场要求实现无人值守，设置在车站屋顶、车辆段、控制中心附近等重要位置，需要具备占地面积少、安装简单、抗风能力强等特点。

自动机场主要实现以下功能：一是自动起降，根据任务指令自主起飞，自动归位；二是自动充电或者

设计体系下，引入低空无人机智能巡检系统是一项较好的举措。这是一个整合“端、网、云”的整体化方案<sup>[2]</sup>，通过硬件之间的协同联动和软件上的智能调度，实现自动化的、智能化的安全保护区巡检。

无人机智能巡检系统核心硬件包括智能无人机机体和任务载荷、自动机场（无人机机巢）、低空巡航飞行调度平台三大部分，应结合具体应用场景选择，各模块相应参数见表1。

电池更换，采用快充方式，快速恢复续航；三是实现数据的传输与存储，利用5G网络把无人机采集的信息、图像或视频等，实时传输并存储至调度平台数据库；四是能感知天气信息和飞行安全保障，自动机场中内设气象站，可以感知气象信息，遇到恶劣天气会自动返航和停止任务。

#### 3.3 低空巡航飞行调度平台

低空巡航飞行调度平台是无人机智能巡检系统的核心枢纽设备<sup>[4]</sup>，一般设置于城市轨道交通控制中心，集任务规划和自动飞行、数据集成和通信中继、AI智能分析引擎于一体，是无人机巡检系统实现智能化的核心。

1. 任务规划与自动飞行，能提前在电子地图上预设巡航线与各项参数设定（包括飞行高度、速度、拍照时间间隔等）；支持动态的航线调整，发现异常情况无人机能自动悬停并变焦或者改变飞行路线做重点区域拍摄。

2. 数据集成和通信中继，能实时接收和处理回传的高清视频流、传感器数据和飞行状态。利用5G高速网传输实现实时的数据回传，确保控制中心能够实时掌握现场巡检情况。平台具有多源数据集成的能力，可以将各类采集数据进行融合，为安全管理部门提供数据支撑。

3. AI智能分析引擎是整个调度平台的核心部分，将计算机视觉算法和深度学习模型相融合，实现对巡检视频的实时分析并识别出事前设定好的风险模型。

例如：设施破损、非法入侵或出现烟雾火焰等现象。一旦判定存在异常，立即预警并报送。

#### 4 低空无人机智能巡检系统核心功能、预期效果与多级联动机制

低空无人机智能巡检系统能实现高频次自动巡查、全域无死角覆盖、智能识别主动预警、数据资产化趋势分析等功能，并与既有管理系统深度融合，构筑一体化的立体化智能安全网络体系。

##### 4.1 核心功能与预期效果

1. 高频次自动化巡查：无人机巡检系统可以实现每日多次巡检，理论上相比人工效率提升 8 倍以上。

2. 全域无死角覆盖：无人机能覆盖人高空、边坡、隧道顶部、密集管线区等区域，在三维空间延伸拓展视觉，可以全域无死角覆盖整个防护区<sup>[5]</sup>。

3. 智能识别与主动预警：通过使用 AI 算法引擎分

析，使无人机巡检系统自动发现巡检区域内的安全隐患，自动按照预定程序进行预警。例如：机械违章作业、边坡滑坡、非法焚烧、设施破损、异物入侵、人员聚集等隐患，系统平台按照隐患轻重缓急来生成相应的工单分配给相应责任单位。

4. 数据资产化与趋势分析：所有巡检的工作将形成一系列的数字文件，包含备注地理位置信息的高清图片、视频、传感器数据等内容。该数字文件存储到数据库里进行备份留存，并提供给智能运维平台进行数据追溯、比较以及设备状态变化的趋势分析。同时不断积累相关数据形成可观的、有价值的巡检数据资产。

##### 4.2 与控制中心、车站的联动要求

无人机智能巡检系统要与城市轨道交通已有的系统深度融合，形成有机联动的工作机制，让安全隐患得到及时、快速的处置（见表 2）。

表 2 无人机巡检与城轨现有系统联动流程表

触发条件	联动流程	响应时间
无人机识别到保护区违规施工 / 火灾隐患	1. 推送报警信息 + 现场画面 2. 联动 CCTV 调取周边视频 3. 生成工单派发至现场人员	≤ 30 秒
车站出入口非机动车乱停放 / 人员聚集	1. 车站接收画面预警 2. 工作人员现场处置 3. 无人机二次巡查确认整改效果	≤ 5 分钟
线路异物入侵 / 边坡滑塌前兆	1. 无人机自动悬停跟踪 2. 应急中心启动响应预案 3. 无人机提供实时救援视角	≤ 1 分钟

1. 与控制中心 OCC 的联动：将无人机智能巡检系统作为子系统，集成到轨道交通智慧运维平台或综合监控系统，预警信息可直接推送到调度工作站上，并与视频监控系统（CCTV）联动，可自动触发该处点位（如有）摄像画面多视角确认。

2. 与车站的联动：车站级管控平台可以接收到该车站保护区内无人机的报警以及画面信息，如巡视期间发现秩序类问题，可以实时回传画面信息并快速处理，同时可以远程喊话提醒、指挥疏导。

3. 无人机是形成一整套“空中无人机 + 固定视频 + 人工复核”的一体化巡检方式。无人机用于大规模的巡查、高频次巡查、应急巡查等，发现问题自动生成工单，引导相关人员针对性处置。

#### 5 结束语

将低空无人机技术应用到城市轨道交通智慧运维体系中，可实现低空自主无人化巡检的立体空域安全监控网络，极大地拓展了安全监测的维度与效能，是城市轨道交通安全管理创新性突破的一个重要路径。

低空无人机技术应用能较好地实现从传统人工巡视到机器设备的自动化巡视，打破原有的生产及管理模式，通过数据驱动重塑了安全风险的预警与处置的闭环，优化安全生产管理模式，也是科技为安全生产管理赋能的勇于尝试。

#### 参考文献：

[1] 史龙,孙亮,叶轲,等.低空铁路巡检场景技术研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(05):1-8.  
 [2] 秦勇,张紫城,杨怀志,等.轨道交通基础设施自主无人机智能巡检技术现状与发展趋势[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):1-10.  
 [3] 邓超.无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用研究[J].科海故事博览,2025,10(30):28-30.  
 [4] 李广智,李飞,黄志伟,等.编组站无人机智能巡检调度系统研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):18-23,83.  
 [5] 李浩,牛洪蛟,李夏洋,等.基于无人机协同编队控制的铁路智能巡检方法[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):11-17,70.

# 充电堆数据驱动的电动汽车动力电池 智能安全评估与风险预警

马宁, 李鹏程

(山东德能物联科技有限公司, 山东 济南 250002)

**摘要** 电动汽车产业高速发展, 动力电池安全事故时有发生。充电环节是安全隐患的主要发生场景, 传统安全评估方法采用单一参数开展研判, 响应速度偏慢, 无法适配实际的安全防护需求。针对这一困境, 本文构建覆盖数据采集、预处理、智能评估及分级预警的完整技术体系, 结合实际测试验证的结果优化预警阈值。该技术体系旨在有效提升安全评估的精准度与预警的及时性, 破解传统方法的针对性缺陷, 提升数据利用效率, 为动力电池充电安全防护提供参考。

**关键词** 充电堆; 数据驱动; 电动汽车动力电池; 智能安全评估; 风险预警

中图分类号: U469.7; TP3; TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.012

## 0 引言

电动汽车渗透率持续提升, 动力电池作为其核心部件, 安全性能直接决定车辆运行与充电安全。在充电过程中, 动力电池处于复杂的电、热环境中, 过充、过温、单体一致性衰减等问题易引发热失控, 造成安全事故。现有安全评估方法多基于单一监测参数, 存在评估精度不足、预警滞后等缺陷, 难以适配规模化充电场景的安全需求<sup>[1]</sup>。依托充电堆数据驱动技术和动力电池运行全流程参数, 构建智能安全评估与风险预警体系, 提升动力电池充电安全防护水平, 助力电动汽车产业高质量发展。

## 1 电动汽车动力电池相关理论或技术发展

### 1.1 充电堆数据采集技术

充电堆数据采集技术基于物联网通信协议, 按照标准规范, 可全面采集电池电气参数、设备运行状态及环境信息。采集终端设计要求满足数据传输的实时性与安全性, 支持在线传输、离线存储及断点续传功能。当前技术可实现关键参数每分钟1次的上传频率, 故障数据实时上报, 采集系统整体精度优于1.0%<sup>[2]</sup>。这些高质量数据为后续安全评估提供了可靠基础, 能够满足规模化充电设施的运行监测需求。

### 1.2 动力电池安全评估理论

动力电池安全评估理论构建多维度动态评估体系, 划分电安全、热安全、健康状态三个维度。电安全研

判电压、电流稳定性, 热安全检测温度分布及变化速率, 健康状态考量容量衰减与内阻变化。传统评估依托固定阈值, 无法体现电池老化的非线性特性。数据驱动的评估理论挖掘多源时序数据, 融合机器学习算法动态捕捉参数演变, 提升安全状态评估的精准度与前瞻性。

### 1.3 动力电池风险预警技术

动力电池风险预警技术实现安全隐患的早期识别与分级管控。该技术依托数据传输与分析平台搭建, 比对评估输出与预设阈值, 分析参数时序趋势, 形成“安全—预警—危险”三级预警体系。现行技术方案融合硬件监测与软件分析, 可将典型故障响应时间控制在15 min以内, 维修任务一次成功率超过92%<sup>[3]</sup>。多维度参数融合开展综合分析, 弱化对单一信号的依赖, 提升预警准确率, 为充电现场的安全运维决策提供有效时间窗口与专业技术依据。

## 2 充电堆数据采集与预处理技术

### 2.1 充电堆数据采集体系构建

结合充电堆运行特性与电池安全监测需求, 构建多维度数据采集体系。打通充电堆终端、传输模块与监测平台, 完成数据全流程闭环管理。依照标准规范搭建, 在充电堆输出端、电池接口及环境侧布设传感器, 明确节点布局保障参数采集的全面性。与充电服务平台实现互联, 数据传输环节采取加密认证方式, 契合物联网安全要求, 规避数据泄露与篡改问题。配

作者简介: 马宁(1978-), 男, 专科, 研究方向: 充电堆数据。

备实时数据备份与恢复功能，备份机制契合信息安全标准，为后续数据预处理与安全评估提供稳定可靠的数据支撑。

### 2.2 充电堆采集数据类型与规格

充电堆的采集数据划分为动力电池电气参数、设备运行参数、环境参数三类。数据采集规格恪守相关标准，各类数据的范围、精度与单位均有明确区分，如表 1 所示。

表 1 充电堆多维度数据采集规格表

数据类型	采集范围	采集精度	单位
动力电池单体电压	2.5 ~ 4.5	±0.5% FS	V
充电电流	0 ~ 300	±1% FS	A
动力电池温度	-40 ~ 85	±1	°C
充电堆输出功率	0 ~ 120	±1.5% FS	kW
环境温度	-20 ~ 60	±0.5	°C
动力电池健康状态	30% ~ 100%	±2%	%

适应不同地域与季节场景，为安全评估提供了全面的数据基础。

### 2.3 采集数据预处理方法

为提升数据质量，对采集数据中含有的噪声与缺失值进行预处理。针对电压与电流信号中的高频噪声，应用卡尔曼滤波算法处理，滤波系数设定为 0.05。处理后数据信噪比超过 35 dB。对于缺失数据，依据充电过程参数变化规律，采用线性插值法予以补充。在缺失率低于 5% 的条件下，插值误差控制在 2% 以内。预处理后的所有数据经标准化处理，归一化至 [0, 1] 区间<sup>[5]</sup>，以消除量纲差异。处理过程注重保留原始数据关键特征，避免数据失真。最终预处理后数据完整性高于 99.5%，满足智能安全评估模型的构建要求。

## 3 动力电池智能安全评估模型构建

### 3.1 评估指标体系确立

结合多源采集数据与安全标准，构建覆盖电安全、热安全、健康状态三大类的评估指标体系。电安全维度选取单体电压偏差与充电电流波动系数，分别表征电池包一致性及充电过程稳定性。热安全维度以温度变化率与温度分布均匀性为核心，直接关联热失控风险。健康状态维度选取健康状态 (SOH) 衰减速率和内阻增长率，量化电池老化程度对安全性的影响。层次分析法确定各项指标权重，电压偏差和温度变化率权重最高均为 0.25，内阻增长率权重最低为 0.1<sup>[6]</sup>。指标体系全面且精确地反映出动力电池的综合安全水平。

表 1 数据显示，动力电池单体电压采集范围为 2.5 V 至 4.5 V，精度为 ±0.5% FS。充电电流覆盖 0 A 至 300 A，精度 ±1%FS。电池温度监测范围 -40 °C 至 85 °C，精度 ±1 °C。充电堆输出功率量程 0 kW 至 120 kW，精度 ±1.5%FS。环境温度采集范围 -20 °C 至 60 °C，精度 ±0.5 °C。电池健康状态 (SOH) 估计范围 30% 至 100%，精度 ±2%<sup>[4]</sup>。电气参数精度普遍更高，覆盖电池全工作区间，可监测极端工况。温度参数范围宽泛，

### 3.2 数据驱动评估模型设计

评估模型采用卷积神经网络—长短期记忆网络混合架构。输入层接入预处理后的 6 项指标数据，数据维度为 1×6×100，对应时间步长 100。卷积层设置 3×1 和 5×1 两个卷积核，激活函数采用 ReLU，实现数据局部特征的有效提取。池化层执行最大池化操作，池化尺寸为 2×1，削减参数数量的同时规避过拟合风险。长短期记忆网络层配置 128 个隐藏单元，精准捕捉参数的时序变化规律。输出层采用 Sigmoid 激活函数，将输出结果映射至 0 至 1 区间，数值越趋近 1 电池安全等级越高。模型训练运用自适应矩估计算法，学习率设为 0.001，迭代次数 500，批次大小 32<sup>[7]</sup>，同步采用早停策略防范过拟合问题。

### 3.3 评估模型精度验证

选取 NASA 电池老化数据集与中汽中心 2024 年动力电池测试数据作为验证集。验证集覆盖圆柱电池、短刀电池两类产品，包含不同老化程度与充电工况，用以检验模型通用性。将验证集数据输入完成训练的模型，统计模型的评估精度、召回率及拟合优度（如表 2 所示）。

表 2 分析验证结果可知，模型在 NASA 数据集上精度达 98.7%，召回率为 97.9%，R<sup>2</sup> 得分为 0.9 946。对于中汽中心数据，圆柱电池验证精度为 98.3%，召回率 97.5%，R<sup>2</sup> 得分 0.9 921；短刀电池对应值分别为 98.5%、97.7% 与 0.9 934。综合验证集上，模型精度为 98.5%，

表2 智能安全评估模型在大数据集上的验证结果

验证数据集	评估精度	召回率	R <sup>2</sup> 得分
NASA 电池老化数据集	98.7%	97.9%	0.9 946
中汽中心测试数据集（圆柱电池）	98.3%	97.5%	0.9 921
中汽中心测试数据集（短刀电池）	98.5%	97.7%	0.9 934
综合验证集	98.5%	97.7%	0.9 935

召回率 97.7%，R<sup>2</sup>得分 0.9 935。各项核心指标均保持较高水平，显示模型能够精确辨识电池安全状态。在 NASA 数据集上最优的 R<sup>2</sup> 得分，证实了模型对电池老化过程中安全状态变化的强识别能力，模型适用于不同类型与老化程度的电池安全评估。

## 4 动力电池风险预警机制与验证

### 4.1 分级预警阈值设定

依据模型评估结果与国家标准《电动汽车用动力电池安全要求》（GB 38031-2025），明确设定安全、预警、危险三级预警阈值及对应处置措施。安全等级对应评估值区间 [0.8, 1.0]，表明状态正常，维持常规充电。预警等级对应评估值区间 [0.5, 0.8]，表明参数出现异常波动，系统触发声光预警，并将充电功率限制至额定值的 50%。危险等级对应评估值区间 (0, 0.5)，表明存在热失控风险，系统立即切断充电回路并启动冷却。阈值设定考虑了三元锂与磷酸铁锂电池特性，对三元锂电池的热安全阈值进行针对性收紧，以确保符合“热失控后 2 小时不起火<sup>[8]</sup>、不爆炸”的国标要求，保障预警的准确性与合规性。

### 4.2 预警机制运行流程

预警机制实现采集、评估与反馈的自动化闭环运行。充电堆实时采集多源参数，经预处理后以每 10 秒为周期输入模型计算评估值，并与预设阈值进行比对。若评估值触发预警，系统即刻通过现场屏幕与手机 APP 同步发出预警信息及处置指引。完成处置后，系统再次采集数据进行评估，安全确认后解除预警状态。该机制配备完整的日志记录功能，自动保存预警时间、等级及相关参数变化全过程，为后续安全分析与阈值调整提供数据支撑，确保预警管理流程形成有效闭环。

### 4.3 预警机制实地验证

在某公共充电场站进行了为期 30 天的实地验证。该场站部署 10 台 120 kW 充电堆，已接入国家级监测平台。验证模拟了单体电压异常、温度过高、电流波动过大三类典型安全隐患。结果显示，预警机制平均响应时间为 0.8 秒，其中危险等级预警响应时间不超

过 0.5 秒。预警准确率达到 97.3%，误报率为 1.2%，未发生漏报。针对所有模拟隐患，系统均能准确触发对应等级预警，并在处置后快速恢复安全状态。验证周期内未发生安全事故，证实该预警机制能有效识别充电安全隐患，其处置流程合理。

## 5 结束语

传统动力电池安全评估方法存在评估精度欠缺、预警响应滞后的问题，需构建依托充电堆数据驱动的动力电池安全评估体系。体系整合数据采集、智能评估与分级预警相关功能，是多维度的安全评估指标体系。运用卷积神经网络—长短期记忆网络混合模型开展电池安全状态的动态评估，划定三级预警阈值并完成实地场景的验证工作。该体系可实现动力电池安全状态的精准评估与实时预警，契合现行动力电池安全标准的相关要求。但在极端低温工况下，模型的评估精度出现下滑，后续研究将补充极端工况的训练数据，强化体系的环境适应性，推动相关技术的规模化落地与发展。

## 参考文献：

- [1] 李晓杰, 苏振洋, 丁技峰. 基于数据驱动的汽车动力电池故障预测算法 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(03):293-305.
- [2] 王健俊, 陈豪, 付元承. 基于集成学习与数据驱动的汽车动力电池多维度故障预警 [J]. 汽车安全与节能学报, 2024, 15(03):368-378.
- [3] 郑生文. 大数据下电动汽车动力电池故障诊断技术面临的挑战及其发展 [J]. 自动化应用, 2024, 65(11):130-133.
- [4] 甘兴栋. 基于数据驱动的汽车动力电池故障诊断与预警 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [5] 何淑波, 项薇, 石钟森. 基于机器学习的电动汽车电池系统的风险预警 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(02): 159-165.
- [6] 张杨. 基于数据驱动的汽车动力电池故障诊断方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [7] 张晨佳, 庞松岭, 张璐璐. 电动汽车动力电池安全风险评估研究 [J]. 环境技术, 2023, 41(12):18-23.
- [8] 何淑波. 基于数据驱动的动力电池故障预测和风险预警 [D]. 宁波: 宁波大学, 2023.

# 水利工程中深基坑支护技术分析

赵兴棚

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 深基坑开挖是水利工程中的重要内容, 风险较高, 对技术要求极高。深基坑支护稳定性不足极易造成水利工程发生严重的安全事故, 对整个项目建设效果和安全运营造成不利影响。本文以深基坑支护技术为例, 通过深入分析该技术的基本原理与优势, 总结深基坑支护施工技术要点。结果表明, 在水利工程深基坑支护施工中采用“三轴搅拌桩围封墙+深井降水”复合技术, 能实现围护结构精准设计、降水系统合理布置、监测预警机制建设等, 以构建完善的管理体系, 从而保证水利工程深基坑支护安全性、可靠性达到要求。

**关键词** 水利工程; 深基坑支护技术; 三轴搅拌桩; 深井降水; 基坑监测

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.013

## 0 引言

水利工程施工中深基坑往往设置在滩地、河岸等地带, 其受到软弱土层、地下水位、高承压水、汛期、洪水等多重因素影响造成基坑支护结构损坏。深基坑施工过程中需选择适宜支护方式, 确保深基坑结构具备稳定性, 防止水利工程运行过程中引发流砂、管涌、失稳等事故, 确保项目施工过程中人员与工程安全不受影响。但是对于水利工程而言, 在深基坑施工过程中存在较高风险, 部分工程地质条件为高渗透粉细砂层, 并且赋存承压水, 施工区域紧邻淮河, 且相关主河道防洪安全形势极为严峻。为提升水利工程深基坑支护强度, 确保水利工程项目能稳定开展, 针对深基坑支护技术要点展开研究具有重要的价值。

## 1 深基坑支护技术原理

水利工程中深基坑支护是指在开挖深度大于 5 m 以上的基坑进行施工, 深基坑支护是开挖时为防止基坑周边土体坍塌, 控制地表水及地下水的渗流, 保护周边建筑物、构筑物及各种地下管线安全所采取的一种技术措施。深基坑支护的工作原理是: 采用挡土结构(地下连续墙、排桩、钢板桩等)承受土压力和水压力, 并配合内支撑或锚杆系统平衡受力; 用降水或止水帷幕(高压旋喷桩、三轴搅拌桩)等手段控制地下水, 形成“挡土+止水+支撑”三位一体稳定体系。深基坑支护结构设计要依据土层性质、水文条件、基坑几何尺寸以及邻近环境等条件选择, 保证整个开挖过程基坑的稳定性和开挖后的变形在可接受范围内,

保证基坑内的泵站、闸室、地下厂房等水工结构安全<sup>[1]</sup>。

## 2 深基坑支护技术优势

### 2.1 有效控制基坑变形与周边沉降

水利工程深基坑往往邻近堤防、河道及既有水工构筑物, 对变形非常敏感, 采用刚度较大的支护形式, 可有效限制围护结构侧向位移, 有效控制坑外土体的应力释放和地表沉降。同时通过合理布置支撑层并施加预加轴力可提前调整支护体系受力状态, 避免支护变形累积导致邻近构筑物开裂、渗漏。对于软土地段, 在基坑内及坑底进行坑内加固或坑底被动区加固, 能控制基底的隆起, 确保水利设施的正常运行。

### 2.2 兼具挡土与止水双重功能

水利深基坑通常位于高水位、强透水性的地层, 不能应用传统的支护方法解决其挡土及防渗问题。目前常用的现代支护有地下连续墙、TRD 工法墙和 SMW 工法桩等, 它们都可以通过水泥土或者混凝土形成连续封闭的隔水帷幕来阻断地下水的流向, 从而实现“支护即止水”的一体化作用。这种设计方式能够大大减少钻孔降水工序, 也可以很大程度上降低对周边地层的扰动, 在一定程度上避免出现由于降水而产生的地面沉降、管涌等问题。对于临河靠海等地高水头差地方而言, 可靠的止水是确保基坑干作业条件以及主体结构抗浮的关键。

### 2.3 适应复杂地质与水文条件

水利工程深基坑穿越淤泥、砂层、粉土等地层, 且多层混合, 地下水较丰富, 支护方法可根据现场地

作者简介: 赵兴棚(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程技术。

质情况,运用多种工法组合使用来实现稳定。在软弱土层多用设置多道内支撑加固,对于砂性土层则可以考虑注浆或者采用冻结方法,对于岩土交界处尽量增大嵌固深度,避免滑移;支护体系还可以和降水、回灌结合起来设计,并随基坑支护体系的安装及时调整地下水位。它的高度可调适特点可应用于泵站、船闸、取水口等各种类型的水利构筑物在各地质单元中所需的开挖尺寸要求,能保证施工安全及工期可控。

### 3 深基坑支护关键技术

水利工程深基坑支护项目开展过程中,深基坑支护技术类型多种,研究选择“三轴搅拌桩围封+深井降水+明沟排水”的复合支护技术展开分析,具体实施如下。

#### 3.1 三轴搅拌桩围封墙

围封墙是本工程支护体系的核心,其作用在于延长渗径、阻断渗流,形成一个独立的“干岛”。

##### 3.1.1 结构设计

深基坑支护工程建设阶段,围封墙一般可选三轴水泥土搅拌桩开展作业,其中墙厚设计为600 mm左右,并将墙体直接深入第二层重粉质壤土深度1.0 m以上,从而使其封闭效果合格,并且支撑具备稳定性。墙体中心线和结构物外边线距离为6 m,保证现场有足够操作空间,且渗流路径达到通畅性要求<sup>[2]</sup>。同时,在搅拌桩施工阶段与相邻桩体搭接长度超250 mm,通过桩体咬合实现防渗性整体性提升。该围护墙设计长度达到420 m,通过闭合方式组合形成矩形平面结构,转角位置设置转角桩或调整桩位方式保证其连接达到强度要求。搅拌桩桩顶统一控制在地面以下0.5 m,为后续冠梁施工和现场平整度处理提供基础。同时,搅拌桩施工结束后确保垂直度偏差在1/200以内,桩位偏差不超过20 mm。搅拌桩施工中水泥掺量根据加固土体质量20%控制,保证桩体结构强度满足标准。此外,围封墙上部设置截面尺寸800 mm×600 mm的混凝土压顶梁,确保结构强度达到工程要求。

##### 3.1.2 施工工艺

基坑支护施工作业阶段,围封墙采取一次成型、连续工艺方案。在项目施工前进行搅拌桩工艺验证,确定搅拌桩混凝土水灰比15%,下沉速率0.5~1.0 m/min,提升速度0.5~1.0 m/min。在搅拌桩施工作业阶段检测其垂直度,利用吊线锤保证搅拌桩垂直度偏差在0.5%以下。搅拌桩施工中钻杆下沉到设计深度20 m以上,再开启压力0.4 MPa的灰浆泵进行注浆,并在注浆过程中进行搅拌,从而使搅拌桩强度达到要求。在搅拌

桩机提升环节持续喷出浆液,确保整个桩体长度的水泥土均匀拌和。在相邻搅拌桩施工环节采取搭接方式进行连接,并采取套接一孔的方式保证桩体连接强度达到要求。按照项目施工工艺方案,每根桩体施工时间为45 min,单日成墙长度达30~40 m。

#### 3.2 深井降水与明沟排水

在围封墙形成的封闭区域内,通过主动降水与被动排水相结合的方式,彻底解决地下水问题。

##### 3.2.1 深井疏干

水利工程深基坑支护施工设置疏干井,将其布置在基坑内部,距结构物外线3.5 m处采取环向6口布置方式以达到良好排水效果<sup>[3]</sup>。疏干井设计深度14 m,井底高程0 m,其穿透上部弱透水层直接进入下部砂层内。疏干井每口井成孔直径600 mm,井管使用直径300 mm无砂混凝土滤管,外包60目尼龙滤网。疏干井填充2~4 mm石英砂,使其回填面到地面以下2 m,上部2 m使用黏土封孔。疏干井配置流量20 m<sup>3</sup>/h、扬程30 m的深井泵,确保其运行过程中排水效果达到要求。同时,在深基坑支护施工阶段监测疏干井内水位变化情况,保证在施工作业阶段地下水位始终处于开挖面以下0.5 m。而深井泵在运行过程中设置备用泵,其数量超过总需要量20%。同时,井口高出地面0.3 m,且在周边设置必要围栏以及标识牌。疏干井在基坑内部按环向均匀布设,位置避开主体结构基础区域,成孔采用机械钻进工艺,确保孔壁稳定。井管下放前对滤管进行外观检查,保证无破损、无堵塞,滤网包裹严密并固定牢靠。滤料回填分层进行,避免架桥或局部空洞,回填至设计高度后实施黏土封孔,防止地表水下渗。深井泵安装前进行试运转,确认转向、扬程及出水正常后固定于井内指定深度。泵体通过专用支架或吊索稳固,电缆沿井壁绑扎并引至配电箱<sup>[4]</sup>。井口周边设置防护围栏,高度满足安全要求,并悬挂警示标识。所有疏干井接入统一排水主管线,排向指定沉淀池或市政排水系统。

##### 3.2.2 明沟排水

水利工程深基坑的底部周边设置排水明沟,确定其沟底纵坡0.5%以上,能够实现排水效果的提升。而在深基坑施工四角以及局部低洼位置布置集水坑,能及时收集基坑内的积水,并在基坑底部铺设防渗土工布达到干燥度标准。在基坑布置阶段配置15 m<sup>3</sup>/h、扬程20 m的潜水泵,再使用DN100镀锌钢管将水引出到外部排水系统内。基坑上口外侧3 m设置截水沟,尺寸0.6 m×0.8 m,使用M7.5砂浆砌筑沟底,设置坡度超过0.3%,将地表水径流直接引入排水主渠内。此外,

经过明沟排水系统布置后,在基坑底部周边开挖出一条连续的排水沟,沟体断面大小随基坑底部汇水面积和预期排水强度而定,沟底需保持连续顺直并成稳定的纵坡;集水坑布置于基坑四个角部和局部汇水低点处,其深度、容积等应满足在泵抽结合前临时蓄水需要,若积水较多,则布置多道集水井;基坑底部完全铺设防渗土工布,接头处用搭接或者缝合的办法,达到整体防渗的目的;潜水泵需按照一定的数量设在各集水坑中,并且固定在集水坑内的固定支架上;潜水泵的出水管伸向基坑内壁;穿越坑壁的水管则要套管保护。基坑上口外围布置截水沟,截水沟为浆砌浆砌石结构,沟底沟壁均作防冲刷处理,其走向根据现场地形、地貌沿自然位置发展,其末端与场区主排水系统相连通,这样就能构建完善的地表水和地下水排导体系。

### 3.3 全过程监测与信息化管理

为确保万无一失,工程建立了严密的监测网络,将“被动应对”转变为“主动防控”。

#### 3.3.1 监测内容

深基坑支护施工阶段建设完善监测体系,保证深基坑施工过程中掌握各项技术参数。在深基坑监测阶段,需掌握基坑顶部水平位移、深层土体水平位移、围护结构沉降、周边地表沉降、承压水变化等。在深基坑顶部位移监测过程中,将监测点位布置在围护结构顶面,监测点间距为 15 m。而在仰角、转角、临近建筑物、地下管线等关键位置,将监测点位设置距离缩短到 10 m,并安装高精度全站仪进行监测工作<sup>[5]</sup>。

在水利工程深基坑施工过程中,其深层土体位移使用围护桩外侧预埋 PVC 测斜管方式监测,其埋设深度 25 m,能够贯穿潜在滑动面掌握土体的滑移参数。在深层土体水平位移监测阶段,监测点距离为 2 m,能够及时掌握不同位置土体位移变化特性。而围护结构和周边地表沉降使用同一高程控制网,需将沉降点监测数据直接传输到后台控制系统内,从而构建完善的深基坑监测体系。在深基坑支护施工中,承压水监测极为重要,将承压水监测点设置在基坑外围 10 m 内,井深 18 m,穿透弱透水层进入承压含水层内。承压水监测采用钢弦式或浮子式水位传感器,能够及时掌握承压水位的变动情况。上述监测数据信息传输到后台控制系统,由工作人员及时掌握各项数据信息并了解深基坑支护特性。

#### 3.3.2 监测频率

根据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497-2019)相关规定,结合工程基坑安全等级为一级、开

挖深度超过 12 m 的实际,制定分级动态监测频率。在正式开挖前,完成不少于三次稳定初始值观测,作为后续变形分析基准。基坑开挖深度小于 5 m 阶段,位移及沉降类项目每 2 日监测 1 次;当开挖深度处于 5 m 至 10 m 区间时,监测频率调整为每日 1 次;开挖深度超过 10 m 后,所有位移、沉降及测斜项目均提高至每日 2 次,分别安排在上半日和下半日固定时段进行,以捕捉昼夜温差及施工扰动引起的变形差异。实行 24 小时自动连续监测承压水水位,每隔 1 小时采集 1 次,经无线传输到项目管理平台;当累计变形量达到设计允许值的 70%,启动黄色预警,由监测单位发函告警,提示施工单位加强巡查;累计变形量达到设计允许值的 85%,启动橙色预警,召集项目技术负责人赴现场会诊,研究风险处置措施,并结合项目施工进度安排,动态调整施工工序和方式;累计变形量达到设计允许值 100%,启动红色预警,立即停止施工,启动应急预案,并采取局部回填反压、增加临时支撑、暂停降水或者换序开挖等应急处置措施。当天的数据必须整理分析完毕,异常数据必须 2 小时内复测,切实做到早发现、早预警、早处置,切实推动从“事后应对”向“事前预控”转变。

## 4 结束语

水利工程深基坑支护施工容易发生安全性事故,尤其是在特殊地质条件下极易因为支护施工不规范引发质量与安全事故。根据水利工程深基坑支护施工要求,在现场施工作业阶段构建并完善监测体系,采用三轴搅拌桩、围封墙形成防渗屏障,再利用深井疏干+明沟排水方式及时排出基坑内积水,从而保证基坑结构具备稳定性。同时,水利工程深基坑支护施工需落实各项监控措施,通过建设全过程、高精度自动化监测体系,能及时掌握深基坑施工各项参数,保证水利工程建设运营效果达到良好状态。

## 参考文献:

- [1] 黎子荣.双排桩在水利工程深基坑支护中的应用[J].河南水利与南水北调,2021,50(05):39-41.
- [2] 谭广湘.深基坑支护技术在水利工程中的应用[J].石材,2023(11):124-126.
- [3] 洪振国,潘忠华,陈立松.大型水利工程隧洞进口深基坑支护型式研究[J].灌溉排水学报,2024,43(S1):24-27.
- [4] 龙钢.水利工程永临结合预应力管桩深基坑支护关键技术[J].水上安全,2024(20):130-132.
- [5] 朱宇琦.水利工程中套闸深基坑支护结构分析与技术应用[J].小水电,2023(01):31-35.

# 水利泵站底板钢筋安装施工质量控制

李 浩

(巢湖市机电排灌总站, 安徽 合肥 238000)

**摘 要** 在水利工程建设中, 泵站底板作为关键的基础结构, 承担着水压力、土压力及设备荷载等多重作用, 其稳定性直接影响泵站安全运行与效能。泵站底板钢筋安装施工质量是保障工程稳定性的关键要素。基于此, 本文分析了水利工程泵站底板钢筋工程特点, 通过明确泵站底板钢筋安装施工质量控制目标, 针对泵站底板钢筋安装施工质量控制策略开展研究, 以为保障泵站底板混凝土浇筑施工质量提供参考。

**关键词** 水利泵站; 底板钢筋; 安装精度; 保护层控制; 施工质量

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.014

## 0 引言

水利泵站作为现代社会发展的重要基础设施, 其主要作用是农业灌溉、防洪排涝、水资源调配。水利泵站底板一般为地下或半地下的基础结构部分, 其长期运行过程中受到设备振动、水土压力、不均匀沉降的作用, 对底板结构抗裂性、整体性有极高要求。底板混凝土中钢筋为主要骨架结构, 其对水利泵站底板的耐久性、承载力要求较高。在现代水利泵站建设规模不断扩大的背景下, 其组成结构更加复杂, 底板钢筋存在层数多、体量大、节点密集等特点, 需确保底板钢筋施工精度和质量合格, 进而提升水利泵站运行的可靠性与安全性。

## 1 水利工程泵站底板钢筋工程特点

### 1.1 钢筋配置密集且层数多

水利工程泵站底板钢筋工程建设过程中, 钢筋配置密集且层数多作为主要特点之一。一般情况下, 中小型泵站底板设计厚度为 0.5~1.5 m, 大型泵站底板厚度可达 1.5 m 以上, 其需要抵抗巨大水浮力和弯矩, 上下层双向竖立钢筋采用大直径、小间距设置方式。在泵站底板钢筋工程设计中, 钢筋配置的主筋直径通常为 25~32 mm、间距 100~150 mm, 局部集水坑、电梯井等部位增加附加钢筋网片, 从而构建形成 3~4 层的钢筋网结构。由于水利工程泵站底板钢筋密集度较高、钢筋层数多, 钢筋穿插与绑扎效率低, 极易存在叠压、错位等现象, 需严格执行底板钢筋施工工艺以及质量控制标准<sup>[1]</sup>。

### 1.2 锚固与连接构造复杂

水利泵站底板钢筋需要和扶壁柱、侧墙、进出水道等竖向结构部件稳定连接, 其所选择的锚固形式具备多样化。墙插钢筋伸入底板直锚或弯锚长度符合技术标准, 流道曲面部位钢筋成空间曲线状态, 需按照设计方案进行定制加工。同时, 水利泵站底板的面积较大, 钢筋接头数量较多, 需根据设计方案和工艺要求选择机械或焊接方式连接。

### 1.3 保护层控制要求严格

水利泵站底板长期处于潮湿或地下水侵蚀环境, 这需要保证钢筋混凝土保护层厚度达到运行安全性需求。通常来说, 底板在设计阶段应确保迎水面钢筋保护层厚度超过 50 mm, 背水面则在 40 mm 以上。因为水利泵站底板面积大、厚度大, 混凝土浇筑环节对钢筋产生一定冲击作用, 或者人工踩踏、振捣等引发钢筋发生位移问题。如果底板钢筋保护层厚度不足或强度未能达到要求, 局部结构性能不合格, 其对水利泵站底板的耐久性、可靠性造成不利影响, 也会引发底板渗漏风险。

## 2 水利泵站底板钢筋安装施工质量控制目标

### 2.1 确保钢筋空间定位精准

水利泵站底板钢筋绑扎工程开展阶段, 钢筋空间的定位属于后续钢筋安装的重点工序。因此, 在钢筋空间定位的环节需明确钢筋标高、平面以及相互间距。一般情况下, 按照目前水利泵站底板施工需求, 其主筋与分布筋排距偏差  $\pm 5$  mm 内, 同一截面相邻钢筋中

作者简介: 李浩(1975-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程建设管理。

心距偏差  $\pm 10$  mm 内。而针对集水坑、流道、扶壁柱等异形区域利用 BIM 模型进行精准设计,或采用 1:1 放样方式确定每根钢筋空间坐标,从而使钢筋曲线段平滑过度、锚固端位置准确、穿插顺序合理。底板竖向钢筋采用焊接限位筋或卡具保证其定位精度合格,并由技术人员使用激光水准仪、全站仪检测高程与位置精度,确保钢筋位置符合三维模型定位要求<sup>[2]</sup>。

## 2.2 保障钢筋连接可靠牢固

水利泵站底板钢筋接头需符合《混凝土结构工程施工质量验收规范》的标准,确保钢筋连接强度、延性以及工艺质量满足技术要求。钢筋机械接头不存在损伤、丝扣损坏现象,拧紧力矩使用扭矩扳手测量;焊接接头饱满、均匀,且无夹渣、气孔、咬边等焊接缺陷。钢筋焊接接头采取交错设置方式,确保相同截面钢筋接头数量控制在钢筋总数的 50% 以内,并且钢筋接头尽量避免设置在受力最大截面、梁柱节点、扶壁柱等钢筋交叉密集区域。主筋、箍筋、拉筋、附加钢筋选择双股 22 号镀锌钢丝满绑,采取十字交叉方式保证钢筋连接强度。上述钢筋连接结束后需进行隐蔽工程验收,保证钢筋接头类型、位置、数量、绑扎质量满足设计标准,钢筋结构整体受力达到良好状态。

## 2.3 实现保护层厚度均匀达标

为确保水利泵站底板钢筋能抵抗环境侵蚀影响,即使面对潮湿、地下水环境依然保持结构完整性,需确保泵站底板施工中钢筋保护层厚度达到技术标准。按照目前设计方案,钢筋保护层迎水面厚度应在 50 mm 以上,背水面则在 40 mm 以上,且施工环节选择 C40 及以上高强度混凝土垫块或高强度工程塑料卡,确保绑扎间距在 1 m 以上,各位置钢筋保护层厚度均符合技术标准。而在钢筋保护层厚度控制垫块设置时,施工缝、迎水面、集水坑、后浇带等关键位置,需将垫块的间距缩小到 0.5 m。在底板浇筑前,钢筋保护层作为质量控制主控项目,钢筋保护层厚度偏差不超过净保护层厚度 1/4,自检控制率应为 100%,在底板混凝土浇筑结束后,由施工单位委托自检单位逐一检测各位置钢筋保护层厚度是否合格,应保证所有测点合格率超过 85%,且最大偏差值不大于允许偏差值的 1.5 倍。

## 3 水利泵站底板钢筋安装施工质量控制要点

### 3.1 钢筋加工与预拼装精度控制

水利泵站底板钢筋是主要承载结构部件,其加工需严格对照配料单与结构施工图,应保证钢筋规格、下料长度、弯折角度、数量满足技术标准,任何偏差

禁止投入工程中施工。钢筋加工环节以数控钢筋弯曲机为主,确保其弯钩角度为  $135^\circ$ ,平直段长度超过钢筋直径的 10 倍,从而使底板钢筋锚固强度达到工程要求。而在水利泵站底板中,集水坑、流道、扶壁柱等异形结构部件,需按照 BIM 三维模型以及 1:1 实体样板进行精准控制,确保钢筋加工的曲率尺寸达到要求,保证钢筋空间定位、弯曲半径以及与其他构件的交汇关系符合技术标准。在钢筋加工结束后,需按照水利泵站底板结构部件进行分单元预拼装,从而验证钢筋加工精度是否达到要求。水利泵站底板主筋、分布筋、拉筋、附加钢筋按照设计方案组合形成骨架,并由技术人员逐一检测钢筋间距、排距、层高、交叉点、穿插顺序等,确保钢筋连接强度合格,满足水利泵站的运行可靠运行要求。在钢筋加工且预拼装符合技术要求后,即可组织人员与车辆将钢筋运输到作业现场。钢筋运输环节有可靠的固定装置,防止在运输阶段因为车辆颠簸出现钢筋的损坏或丢失<sup>[3]</sup>。

### 3.2 支撑马凳与支架体系稳定性控制

水利泵站底板施工过程中,支撑马凳与支架结构稳定是关系到后续工程稳定的基础。因此,在施工阶段需做好相关支撑结构的控制。一般来说,支撑马凳选择型钢进行制作,使其能够针对泵站底板上层钢筋网片进行稳固支撑。同时,水利泵站底板厚度是马凳高度设计的依据,确保马凳加工与安装偏差在  $\pm 5$  mm 内,底部焊接  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  钢板作为支座,能增大支撑面积,以防在马凳使用过程中存在压陷或滑移现象。马凳安装环节采取纵横双向布置方式,标准区域间距在 1.5 m 以下;水利泵站底板的集水坑周边、扶壁柱根部、流道转角等荷载集中位置,将马凳安装间距缩小到 1.0 m。而对于水利泵站底板厚度超过 2.0 m 的情况,为确保底板支撑性能达到要求,一般采用两层或多层马凳设置方式,再利用斜向拉杆或剪刀撑方式组合形成整体结构体系,能抵抗侧向扰动与施工荷载。水利泵站底板马凳以及横向联系杆均和下层主筋使用电弧焊连接,应先做钢筋焊接工艺性能试验,其焊接长度超过 50 mm,保证力学传递达到可靠性。马凳安装完成后,质检人员使用水准仪监测马凳顶面高程,铅垂仪校核垂直度,沉降敏感区域进行动态监测,并及时调整垂直度偏差。此外,需要注意的是安装时需保证纵横方向排列整齐,间距均匀,荷载集中区域需增设马凳数量,不得随意加大间距。多层马凳设置时,上下层需对齐,斜向拉杆及剪刀撑安装需到位,连接节点需紧固。横向联系杆与下层主筋焊接需饱满,

无虚焊、漏焊现象，焊接长度需严格控制，不得小于规定标准。施工过程中需避免碰撞马凳，防止其变形、移位，发现问题需及时整改。

### 3.3 复杂节点钢筋穿插与绑扎顺序控制

水利泵站底板进出水流道、扶壁柱等结构复杂部分，其内部钢筋密集度较高，空间定位难度大，需在施工环开始前制定专项穿插方案，确定各环节施工工序和技术标准。在复杂节点钢筋穿插与绑扎施工阶段，需按照先下后上、先主后次、先内后外的原则进行。按照底板钢筋铺设要求，先在底板下层铺设双向受力钢筋，保证其位置与保护层厚度符合技术标准；而后插入扶壁柱或墙体竖向插筋，并和下层钢筋临时点焊固定；插筋定位后再铺设底板上层钢筋网。而在底板的梁柱交汇处，主梁纵筋优先穿越节点核心区，次梁钢筋则在其上方或下方避让通过，防止强行弯折导致应力集中。为避免底板钢筋绑扎引发位移现象，需在关键交叉点布置临时定位卡具或焊接限位支架，使钢筋空间定位达到精准度。钢筋绑扎选用双股22号镀锌铁丝，使用十字交叉方式全面绑扎，并且钢筋绑扎节点采取交替设置方式，确保底板钢筋连接达到稳定性。在上述各部分钢筋绑扎结束后，组织质检人员开展隐蔽工程质量验收，确保钢筋规格、数量、间距、锚固长度、节点构造符合设计标准<sup>[4]</sup>。

### 3.4 保护层垫块选型与布设控制

水利泵站底板钢筋保护层厚度极为重要，这对底板结构抗渗性、耐久性、稳定性有直接影响。水利泵站底板钢筋保护层厚度控制环节，需选择C50混凝土预制垫块或高强度工程塑料卡制作，确保垫块在使用过程中强度与耐久性达到要求，防止在底板运行过程中受到环境因素造成结构损坏。垫块设计需根据钢筋直径定制，确保垫块和钢筋紧密贴合，以免在混凝土浇筑环节造成垫块移位。水利泵站中迎水面抗渗性要求较高，需在现场使用带凹槽专用垫块，将主筋嵌入槽内，从而防止钢筋在振捣或人工踩踏时引发垫块滑动，确保钢筋保护层厚度不受影响。钢筋保护层垫块按照1 m×1 m梅花型布置方式，确保其受力均衡，在后续浇筑以及运行过程中不会出现损坏或移位。水利泵站施工缝、墙根、集水坑、后浇带等关键位置垫块设置时，其间距缩小到0.5 m。水利泵站底板垫块固定主筋上，禁止设置在箍筋、分布筋或模板上，否则将会造成结构移位或损坏。在水利泵站底板钢筋垫块设置结束后，需进行质量检测，尤其对超差点位，及

时进行钢筋位置增补垫块或更换高精度垫块等措施进行调整，确保所有测点达到技术标准<sup>[5]</sup>。

### 3.5 安装过程监测与成品保护控制

水利泵站底板钢筋施工中，通过激光水准仪、全站仪等进行钢筋骨架标高、平面位置复核，确保各位置钢筋网片空间定位达到设计标准。在该环节按照每500 m<sup>2</sup>作为一个监测网络，需在各网格交点位置设置观测标志，定期检测钢筋顶面高程与轴线偏移，确保其偏差控制在设计标准范围内。而水利泵站底板流道曲面钢筋、扶壁柱插筋等关键位置，通过三维坐标进行尺寸校验，并留存影像作为后续质量验收依据。水利泵站底板钢筋骨架成型后，需在作业面搭设人行通道马道，马道支撑设置在底板垫块或预埋件上，禁止人员进入现场踩踏钢筋网片造成变形或移位。水利泵站底板钢筋浇筑阶段组织专人值守，尤其针对混凝土浇筑、振捣、人员走位等引发的钢筋移位，需及时组织施工人员进行校核与调整。

## 4 结束语

水利泵站工程属于大型结构工程，而泵站底板钢筋安装是为后续混凝土浇筑提供平台的及结构位置，若泵站底板钢筋安装质量不达标则影响到混凝土浇筑的密实性与整体工程质量。本文分析了水利泵站底板钢筋安装质量控制要点，通过精准的加工预拼、稳定的支撑体系、科学的穿插顺序、严格的保护层控制及全过程监测，旨在解决密集配筋、复杂节点与大体积作业带来的质量风险，增强水利泵站工程整体质量有积极作用。未来研究中，为切实强化水利泵站工程质量，针对泵站底板钢筋安装还需引入高性能材料，同时可配合使用智能化安装机械设备，以确保水利泵站工程的建设效果得到提高。

## 参考文献：

- [1] 刘育秉. 试论水利工程钢筋质量通病及处理措施[J]. 长江技术经济, 2021, 05(S2): 35-37.
- [2] 黄富民. 水利工程钻孔灌注桩施工监理控制措施[J]. 工程技术研究, 2021, 06(17): 205-206.
- [3] 沈存海, 王凤梅. 小涵闸工程施工技术与质量管理分析[J]. 工程技术研究, 2021, 06(23): 123-126.
- [4] 胡开明. 水利水电工程施工中混凝土施工技术应用[J]. 智能城市, 2021, 07(07): 157-158.
- [5] 何雄, 刘翠华. 基于水利工程中的钢筋混凝土模板施工工艺分析[J]. 四川建材, 2022, 48(04): 117-118, 120.

# 混凝土施工技术与质量控制研究

史如友<sup>1</sup>, 张丽<sup>2\*</sup>

(1. 山东绿建新材料有限公司, 山东 德州 253700;

2. 乐陵市综合检验检测中心, 山东 德州 253600)

**摘要** 混凝土施工质量直接关系到工程结构的安全性和耐久性。本文对混凝土核心施工技术的要点进行系统的阐述, 主要涉及配合比设计和优化、拌和运输和泵送、浇筑振捣、养护温控等施工技术环节。构建以全过程管理为核心的质量控制策略, 包括事前预控、事中过程控制、事后检查及缺陷处理等方面, 强调信息化和标准化建设的重要性, 以期对提高混凝土施工质量系统性和可靠性提供有益参考。

**关键词** 混凝土施工技术; 全过程管理; 质量控制

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.015

## 0 引言

在现代工程建设中, 混凝土是主要施工材料, 它的施工质量直接决定了工程结构的安全性、耐久性, 也影响着项目的经济效益。随着工程规模的不断扩大和技术要求的不断提升, 混凝土施工技术难点和管理挑战也越来越突出。本文围绕混凝土施工核心技术要点展开研究, 从配合比设计到养护温控进行系统的分析, 以技术优化和管理创新为目标, 建立全过程质量控制策略体系, 达到全面提高混凝土施工质量的目的, 为相关工程实践提供理论参考。

## 1 混凝土核心施工技术关键点

### 1.1 混凝土配合比设计与优化技术

混凝土配合比设计作为确定混凝土工作性、力学性能、耐久性的第一个技术环节, 实质上就是以水、水泥、粗细骨料为主要原料, 以满足混凝土强度、耐久性、工作性、经济性多元目标为约束条件, 矿物掺合料和化学外加剂与其他成分准确量化配比。现代高性能混凝土配合比设计已经超越传统强度单一导向而向以性能为本的设计理念转变<sup>[1]</sup>。必须依据工程结构的设计强度等级、所处环境类别(冻融、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀等)确定耐久性指标, 以此作为设计的根本前提。经过科学试配和优化过程确定关键参数: 水胶比作为影响混凝土强度和耐久性的核心参数需要在满足工作性要求的同时尽量取低; 砂率对拌合物和易性及密实度有直接影响, 需要依据骨料级配对其进行

优化筛选; 矿物掺合料(粉煤灰、矿渣粉、硅灰等)的掺入不仅具有经济效益, 更能显著改善混凝土的微观结构, 降低水化热, 促进了抗渗性和长期强度的提高, 但其掺量及组合方式需通过系统的实验进行验证; 外加剂如高效减水剂的使用使制备低水胶比和高流动性混凝土得以实现, 但它与水泥和掺合料之间的相容性须经过严格测试。配合比优化作为一个动态迭代的过程, 需要综合考虑各地原材料波动特点, 利用统计学方法对其进行多轮试配和性能测试, 并最终确定具体生产和建设情况下最为稳定的方案、最为经济的基准配合比及其容许调整范围的确定, 为大规模建设提供可靠的技术基础<sup>[2]</sup>。

### 1.2 混凝土拌和、运输与泵送技术

混凝土由原材料向均质流态体转变的过程是从拌和开始, 通过输送和泵送到达浇筑面, 这一链条上任何一个环节失去控制都会使混凝土性能发生衰变。拌和工序以达到各种成分绝对均匀地分布为中心目的。这就需要使用性能平稳的强制式搅拌设备和严格控制投料顺序及搅拌时间。一般采取先投加一部分水和外加剂, 然后投加骨料和胶凝材料, 最后补加余量的过程来保证外加剂有效地分散和水泥颗粒完全湿润。搅拌时间的长短需视搅拌机的类型, 混凝土坍落度的要求通过实验来决定, 搅拌不充分可造成匀质性变差, 太长可造成拌合物的温度上升和工作性损失<sup>[3]</sup>。运输环节关键是保持混凝土均匀性和工作性, 以防离析及

作者简介: 史如友(1979-), 男, 专科, 研究方向: 建筑材料。

\*通信作者: 张丽(1999-), 女, 本科, 研究方向: 产品质量与安全。E-mail: 1033998416@qq.com

坍落度丢失。对商品混凝土来说,搅拌运输车的运输过程中罐体要低速转动;运输的时间和距离要有严格的限制,特别是在高温或者寒冷的天气需要保温或者隔热。泵送技术在混凝土施工中尤其在高层和超长距离浇筑中至关重要。可泵性要求混凝土既要有充分的流动性,又要有较好的内聚性和保水性,来抵御泵管压力过大时离析和泌水现象。这通常通过优化配合比(级配较好的骨料、适量掺粉煤灰、高性能泵送剂等)来实现。泵送之前需使用相同比例的砂浆或者水泥浆对管道进行润滑;泵送时,要保持连续运行,以防堵管和监测泵压的变化。整个拌、运、泵链条需要紧密连接,构成一个高效“物流”体系,以保证混凝土初凝之前浇筑完毕。

### 1.3 混凝土浇筑与振捣技术

浇筑和振捣作为流态混凝土向密实固态结构转变的关键成型工序,直接决定着其整体性、密实度、外观质量。在浇筑之前需要对模板内部杂物进行全面清理,对钢筋的位置、保护层的厚度、模板严密性和稳定性进行检查,对模板和基层进行全面润湿<sup>[4]</sup>。浇筑时应按分层、分段、连续等原则进行。分层厚度需视振捣器性能和钢筋密度而定,一般不宜大于振捣棒的1.25倍作用长,以防下层混凝土在初凝之前不能完全振捣。浇筑顺序要从远的地方开始并逐步向后进行,以免产生冷缝;在竖向结构(墙、柱等)与水平结构(梁、板)交接处,应在下部结构浇筑后停歇1~2小时,待其初步沉实后再浇筑上部,以减少沉降裂缝。对体积较大的混凝土则需要采取分块、分层、推移式的连续浇筑,这样有利于散热。振捣是排除混凝土内部气泡,将钢筋完全致密地包裹在其中的一种核心方法。应选用合适的插入式或附着式振捣器,遵循“快插慢拔,垂直插入,插点匀速,逐点运动”的原则。振捣时间主要是根据混凝土表面出现浮浆,不再明显沉陷,没有大气泡冒出为标准,欠振造成不致密、过振造成粗骨料沉陷、浆体上浮等离析。对于钢筋密集的地区或者模板的一角,需要辅之以人工插捣的方式,以保证不出现死角。浇筑振捣的全过程都需要专人进行指挥和监视,以保证施工严格按照计划进行。

### 1.4 混凝土养护与温控技术

养护就是为水泥水化反应的进行提供合适的温度和湿度,从而保证混凝土强度的正常进行和预防有害裂缝出现的一项重要后期技术。养护其实质就是对混凝土温度和湿度历程进行调控。保湿养护的目的是防

止表面水分的过早挥发,以免干缩应力引起塑性收缩裂缝和早期收缩裂缝的出现<sup>[5]</sup>。在混凝土终凝后(通常在完成浇筑后的12小时之内)应立即开始养护,方法包括覆盖湿麻袋、草帘并定期洒水,或喷涂养护剂形成保水膜,或采用蓄水养护。养护时间要满足规范要求,通常对使用硅酸盐水泥混凝土养护时间不少于七天;对于含有矿物掺合料或具有抗渗性要求的混凝土,其使用期限不应少于14天。温度控制特别对于大体积混凝土来说非常关键。水泥水化放热可使混凝土内温度剧烈上升,并在其表面上形成巨大温差而产生温度应力,该应力大于混凝土前期抗拉强度后,将诱发深层温度裂缝。温控策略包括“内降外保”:在内部,通过优化配合比(采用低热水泥、粉煤灰/矿渣掺加大量)、预埋冷却水管通水循环、缓凝剂的掺加推迟温峰的出现等,使温升速率和峰值减小;在外部,通过覆盖保温材料(棉被、泡沫板等)减缓表面散热速率,降低内外温差,尤其在降温阶段需严格控制降温速率。现代施工中常采用预埋温度传感器的方式来实时监控混凝土内部温度,以达到信息化温控保证温差和降温速率一直处于安全阈值之内。

## 2 基于全过程管理的混凝土质量控制策略体系

### 2.1 事前预控策略

事前预控作为质量管理基石,核心就是要把质量隐患消灭在建设前,并通过有计划、有步骤地规划和准备,为优质建设创造条件。第一,要建立健全质量管理的组织架构,确定建设单位、监理单位、施工单位、检测单位等各方面的责任,实行质量责任制。第二,以技术预控为重点:需要组织细致的图纸会审和技术交底工作,让参与各方都能确切地了解设计意图和质量要求;编制有针对性和可操作性的具体施工方案,特别是对大体积混凝土、超高泵送、特殊气候条件下的施工困难,需要通过专家论证;对进场的所有原材料(水泥、骨料、外加剂、掺合料等)执行严格的“准入制”,核出厂合格证与检验报告,并按规定进行见证取样复试,确保材料质量源头可控。第三,对搅拌站、泵送设备、振捣工具、测温仪器及其他施工机具等进行全面检验、校准、维修,确保其各项性能保持良好。第四,针对作业人员尤其是关键岗位操作工和质检员开展专项培训和技术考核以加强他们质量意识和技能水平。通过该系列系统化预控措施为混凝土施工建立稳固的工艺、管理、资源基础。

## 2.2 事中过程控制策略

在整个混凝土施工过程中,可动态、实时地监测和控制预控过程,这是保证预控方案准确实施的关键环节。它的控制渗透在配合比的实施、拌和、运输、浇注、振捣、养护的各个子工序中。搅拌站内,要落实开盘鉴定制度、检查配合比的投入情况,对拌合物的坍落度和扩展度进行监测,按指定的频率保留样品。运输和浇筑现场要对现场混凝土坍落度、温度、均匀性等进行抽查,不合格混凝土禁止使用。浇筑时需要旁站监理和施工质检员进行全程监管,保证浇筑顺序、分层厚度、振捣操作严格按照计划进行,同时对试件制作是否真实和具有代表性进行监管。对大体积混凝土或者重要结构部位进行温度监测是过程控制中的关键,保温保湿措施需要根据监测到的数据进行动态调整。在过程控制中也突出工序交接检查的重要性,前道工序不过关,坚决不进后面的工序。此外,还运用现代信息技术(GPS)实时追踪搅拌车位置和运输时间,并通过视频监控关键作业点。结合物联网传感器,将温湿度、坍落度等数据实时上传至管理平台,实现施工过程可视化、数据化管理,大幅提升监控效率和精准度。

## 2.3 事后检验与缺陷处理策略

事后检查是对完成混凝土工程的实体质量进行最后的核实和评定,为质量责任判定奠定基础。检验内容包括实体强度检验(回弹法、超声回弹综合法和钻芯法等方法都是无损或者微损伤的)、外观质量检查(尺寸偏差、平整度、蜂窝、麻面、裂缝)、根据设计要求的专项检测(钢筋保护层的厚度、结构的位置和大小、抗渗性能的好坏)。各项检测都需要依据国家标准中确定的抽样方法,频次及评定标准,检测报告要做到客观、公正、可追溯。对检测出的质量缺陷一定要制定科学的缺陷处理流程。需由技术、质检人员会同监理、设计单位(必要时)对缺陷的性质、范围、成因及对结构安全和使用功能的影响进行评估与鉴定。依据鉴定结果制定了有针对性技术处理方案。对于一般表面缺陷(较小的蜂窝、麻面),可采用高标准砂浆修补;对于影响结构性能的缺陷(深度蜂窝、孔洞、裂缝等超标),则可能需采用高压注浆、置换混凝土(凿去、再灌注高强灌浆料或者细石混凝土)等加固补强措施。一切修补处理都要有记录和再检查后才能接受。

## 2.4 质量控制的信息化与标准化建设

数字化时代下,信息化和标准化是推动混凝土施工质量管理水平不断提高的两个支柱。信息化建设的

目标是建设集数据采集、传输、存储、分析、决策支持为一体的智慧管理平台。平台能够整合搅拌站的生产数据、实验室测试数据、交通 GPS 数据、现场浇筑监控视频、温湿度传感器数据和实体测试数据,将原材料至工程实体全程数据打通。通过大数据分析,追溯质量问题根源,预测质量风险(基于配合比和温度数据对开裂风险进行预测),优化施工参数,实现质量控制的智能化预警与前瞻性决策。技术标准和管理流程的标准化是标准化建设的一部分。一方面,企业要以国标、行标为依据,根据自身工程实际,制定出更加具体、严谨的内部施工工艺标准、操作规程、质量验收企业标准。另一方面,将成功的质量管理流程,如材料验收流程、开盘鉴定流程、旁站监理流程、缺陷处理流程等,固化为标准作业程序(SOP),并且通过信息化平台进行强制实施,降低人为因素干扰及随意性。信息化给标准化带来高效实施手段,标准化给信息化带来科学管理内涵,两者深度结合共同促进混凝土施工质量管理由“经验驱动”到“数据驱动”“流程驱动”现代化模式的转变。

## 3 结束语

混凝土施工技术和质量控制属于系统性项目,需要考虑技术细节和全过程管理。本文通过剖析混凝土关键施工技术,提出事前、事中、事后全链条控制策略,强调标准化和信息化对质量保障的重要性,突出标准化施工流程与信息化管理手段对质量保障的核心作用。未来,在材料科学和智能技术不断发展的背景下,混凝土施工质量管控会越来越精细化和智能化,进而促进工程建设质量不断向着更高的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 陈乾年. 预应力混凝土地坪的应用及施工技术分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(24): 37-39.
- [2] 于凯. 建筑混凝土框架结构施工缝留设及施工关键技术[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(24): 177-179.
- [3] 金超, 孙志英, 莫任正, 等. 钢筋混凝土倾斜框架结构施工技术与质量控制: 以倾斜训练楼工程为例[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(24): 189-191.
- [4] 陈云. 大体积混凝土浇筑施工技术全流程优化与质量控制研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(24): 156-158.
- [5] 李小民, 洪张春. 重力式码头大体积胸墙混凝土施工质量控制技术研究[J]. 港口航道与近海工程, 2025, 62(06): 119-123.

# 钣金结构设计对装配效率的影响研究

刘秀珍

(浙江兴意金属制品有限公司, 浙江 海宁 314422)

**摘要** 钣金结构设计在装配中的影响是不容忽视的,直接关系到装配效率,良好的钣金结构设计可以减少装配流程,节约生产成本,使生产线运行更高效。本文对钣金结构与装配效率的关系进行分析,提出设计优化的方法:简化装配流程、增强零件可替换率以及强化可加工性,以期增强装配过程中协调性、缩减装配时间、提高装配效率提供有益参考。

**关键词** 钣金结构设计; 装配效率; 生产效率; 设计优化; 装配工序

中图分类号: TU318

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.016

## 0 引言

钣金结构在工业领域应用广泛,在机械设备制造行业更是发挥着至关重要的作用。装配工序是产品加工制造过程的重要组成部分,它的效率直接影响加工生产的周期和成本。随着不同生产方式的发展更迭,提升装配效率已经成为当代制造业的一个重要课题。钣金结构的设计对于装配效率的影响经常会被忽略,其实良好的结构设计可以明显增加产品的可装配性和精确度,加快生产进程,减少装配成本。研究钣金结构的设计对装配效率的影响,既可以帮助生产者改进工艺流程,还可以给生产线的精益改善提供实例参考。

## 1 钣金结构设计对装配流程的影响

### 1.1 结构与装配顺序的关系

钣金结构设计的合理与否也影响着装配工艺的安排,在设计阶段,构件的设计外形、连接形式以及装配顺序决定了后期装配工艺的安排。如果在设计阶段能够从便于装配的角度出发并考虑构件之间相互配合的问题,就可以避免很多不必要的重复工作,使装配过程更加顺畅。而要实现装配工艺过程的合理化就需要综合考虑各个零件的大小、公差、固定方法等各方面信息,在装配时尽可能避免不必要的工时、器具、装置重复利用的情况出现,以达到高效装配的目的。

### 1.2 设计优化对装配时间的减少作用

钣金结构设计的改进能显著节省装配时间,在设计环节通过简化结构、减少多余的连接件、减少调节部件的数量,来节约装配环节中所需的调试调节时间<sup>[1]</sup>。改进零件之间的安装方式,采取模块式的设计或预制

装配单元,可使装配更简单明了,减少了对仪器及装置的应用。这些改进措施既提高了产线的工作效率,同时也保证了复杂的生产环境下的灵活应变能力以及需求变化。

### 1.3 零件配合性的提升与装配效率的关联

零件的适配性也是决定钣金构件组装速度的重要因素。合适的适配设计可以减小装配过程中的误差以及调节时间,使产品的装配精度更高。设计时应当保证零件间的相互配合公差合理,使得零件在进行装配时可以准确对接,不会发生偏移或者无法匹配的问题。通过优化配合形式,采取自定位设计,也可以减少人工参与,降低组装过程难度,使得装配工作效率更高,进而提升产品品质和生产效率。

## 2 设计优化对装配工序的简化

### 2.1 简化装配步骤的设计策略

设计改进能通过简化组装工序大幅提升生产效率。简化的方案,降低了零部件数量及复杂程度的同时也降低了组装工人操作的难度,合理的方案设计能够减少不必要的复杂连接结构,多余的零件以及繁杂的组装工艺,在不影响结构强度和使用性能的情况下,减少组装的时间以及难度。采取一些快速组装的连接件(卡扣、插销等),代替传统较为耗时的螺栓或者焊接连接,来简化组装工序环节,设计中要考虑到产品在生产与搬运过程中的便利性,防止过于烦琐的打包与搬运流程出现,才能使得组装环节顺利地进行下去。改进后的方案可以使组装的过程更快捷便捷,也就意味着降低了对技术员操作水平的要求,符合大量生产的效率要求。

作者简介: 刘秀珍(1985-),女,本科,工程师,研究方向:机械制造。

## 2.2 标准化设计对装配效率的影响

标准化设计对提升组装速度有重要影响。标准化部件、组件与连接形式可以在不同系列产品间通用,使组装工作趋于统一化、高效化。统一各零部件尺寸、公差、外形使各零部件制造与组装过程中变异性降低,省去了因不匹配而产生的报废率与返修率<sup>[2]</sup>。在制造中标准化使工人熟悉各种零部件的操作流程,提升了工作效率。标准化设计有利于削减库存量以及零部件购买难度,方便了供应链管理。标准化使产品组装程序更为精确,省去了每次产品制造都需重订的困扰,节省了生产时间,压缩了制作成本。

## 2.3 模块化设计与装配的高效性

模块化设计是一种高度集成化的技术,提高了装配效率。将复杂的钣金结构分解成若干独立的模块,在这些模块间可以方便地拼装组合起来。模块化最大的特点是它可以使得零件及组件的制造、装配同步进行,大大节约了总的生产时间,在装配时工作人员只需将事先装配好的模块拼接起来,从而节省了现场组装的时间和工作量。采用模块化的设计,简化了设计和制造的难度,也增加了规模化生产的弹性,使同样的模块可以用在不同种类和型号的产品上。模块化的设计还可以降低供应链的风险,因为可以对标准模块大量制作存储,以保障后续的装配环节的效率。

## 3 提升钣金结构设计互换性

### 3.1 互换性对装配效率的提升作用

在钣金结构设计的过程中,零件互换性对于提升装配速度至关重要。零件互换性好的设计可以让产品在不同的生产批次或者不同的产线上,零件可以无缝对接,无须再次制作处理,通过设计一致的接口形式,统一的零件规格以及公差,使零件与零件之间减少了个性化差异,在组装过程中也省去了反复调整、测量的过程。工人可以在缺少精密仪器的情况下迅速更换零件,大幅提升了工作效率。并且,互换性设计减少了零配件的库存囤积,改善了仓库保管情况,节省了生产成本。同时,互换性设计也可以大大降低质量缺陷发生的情况,减少由于零件不适配引起的组装故障及返工,保证生产流水线的正常运转。

### 3.2 设计标准化对装配过程的优化

设计标准化对加快装配速度的作用不可小觑。零件、工具、连接等进行了标准化后,整个装配环节变得更为简单了,设计标准化使工艺流程变得相对简单,在装配环节零件与部件之间相互定位和连接变得更为方便准确可靠,也减少了生产过程中专用工装、设备

的需求量,降低了调试生产线的成本<sup>[3]</sup>。标准化之后的零部件可以在不同的产品上进行替换,防止由于不同设计方案引起的装配困难问题的发生,提升了生产的可靠性;设计标准化也大大减少了装配工人的学习强度,工人们很容易掌握标准件的操作及装配过程,该种设计方式对批量生产的产品来说十分有必要,能大幅提升产量,使生产过程更加顺利、规范。

### 3.3 零件公差与装配精度的平衡

零件公差及装配精度是制约装配速度与质量的主要原因。公差过大容易造成各个零件之间的连接松散,从而降低产品装配精度以及装配的安全可靠程度;但是若公差太过严格,则会导致产品的制造成本过高,有可能达不到批量生产的标准。合理有效的公差制定要考虑生产成本、零件通用性以及最后组装精度。在钣金结构的设计过程中,一般都采取合理公差的方法,在保证装配精度的同时不会大幅度地加大生产的难度,适当公差大小的定位销孔及对接尺寸的精度都可以保证所装配的产品不会出现错装漏装的情况,避免由于精度不够导致的错误装配问题,通过精准的公差设定保证零件互相替代性以及整体装配的质量水平,加快装配的速度,减少装配时需要调整或者返工的程序,提升产品的生产效益。

## 4 钣金结构设计与工人操作的协同作用

### 4.1 可操作性设计的优化策略

可操作性设计的完善,是提升装配效率以及降低作业难度的重要环节。设计阶段注意零部件的外形、大小、重心分布以及表面状况等可使装配工作变得方便快捷。针对零部件设计合理的抓握部位或者是安装平面会使工人在装配时有较为轻松的操作感受,避免因操作困难给装配带来的阻碍。设计中可以通过减少零部件数量以及简化连接关系,以此来达到降低装配难易程度以及复杂性的目的。优化装配工具的相互匹配情况,例如采用轻巧方便操作的装配工具,能够提升工人的操作效率。设计上要注重零部件是否易于分辨,在零部件上设置颜色标记、编号等,便于工人分辨并正确安装,减少装错的概率。增加零部件的对称特征以及简单的构造,会使装配重复调整的过程降到最小。完善的可操作性设计不仅可以降低工人对于复杂工艺的依赖,还可以有效地保障产品装配的质量。

### 4.2 操作性对装配效率的提升影响

工人可操作性和装配效率有着紧密联系,优秀的工人的操作性设计可以极大地提升生产线的装配效率,在设计上,结合了工人的操作习惯、体力消耗、视觉

感知等都可以使操作更为便捷<sup>[4]</sup>。在钣金结构设计上做到零件轻重一致,方便抓取和提拿的设计,可以使工人操作更加轻松省力,加快工作速度。零件模块化设计以及预组装结构的应用大大减少了现场工人的操作步骤,节省了一些不必要的操作,降低误操作的风险。科学的空间设计以及优秀的零件互换性,让工人们可以在最短时间内完成装配操作,不用过多调节和检测。标准化的操作方式让工人更快地了解装配任务并且顺利地完成任务,提升了整条生产线的工作效率。最后优化的操作性不仅使一个岗位的工作更有效率,而且在整个制造环节都能产生积极的影响,保持生产线稳定高效地运行。

#### 4.3 人机工程学在钣金设计中的应用

在钣金结构设计上,加入人体工程学理念是非常必要的,特别是对优化工人操作及提高装配效率很有帮助。应用人体工程学可以多方面地改善工作环境舒适性并提升工人的工作效率,在设计时需要考虑工人的视线、手臂摆动范围大小及体力劳动强度,尽可能让工人在操作过程中能处于一种放松、舒适状态来完成操作工作;符合工人视线高度的工作台面、合理的零件摆放形式以及便捷实用的装配工装都可以很大程度上地减轻工人装配过程中的体力负担。合理的人体工程学设计还可以减少工人的弯腰屈伸动作、重复劳动次数,防止因设计不好的操作流程造成的损伤及误操作的情况发生。还有就是准确的作业空间布局,可以使工人在狭小的空间内高效地进行装配工作而不造成额外的干扰。应用人体工程学原理还可以借助适当工具及设备来使工人减缓操作时产生的物理压力,减少工作量,进而提升装配速度。

### 5 优化设计对装配质量的影响

#### 5.1 设计缺陷对装配质量的影响分析

设计疏漏会使得钣金结构产品在制造过程中出现装配质量问题明显恶化的情况。不合理的公差设计、过大的尺寸误差以及错误的连接方式,都会使得其在装配期间出现不符或者松散的问题,从而使得整个结构稳定性遭到破坏,降低了其产品质量特性。缺失准确的定位孔或是较差的表面处理工艺也会增大装配环节出现风险的概率,造成装配时发生空隙以及偏移等问题。设计上的缺陷也会使得在钣金生产环节中出现重复加工或附加工序的现象,增加成本支出。设计中的缺陷还会造成装配时间延长以及返修率增加的情况,提升了废品数量,大大降低产品的最终成型质量和可靠度。科学合理的优化设计和质量管理必不可少,

可避免因这些设计上的疏漏造成装配质量受损。

#### 5.2 设计优化对质量控制的作用

设计改进是对装配质量把控的有效方法之一,精密度的设计公差、简单的零件结构以及统一的零件之间的可互换性,可以保证生产、装配中各个零部件之间匹配紧密,减少由于偏差造成的质量问题<sup>[5]</sup>。设计改进减少了对现场调试及检测的依赖,使得生产的流程更加自动化、规范化。在设计上的每一个细节都可以进行把控,从而降低了生产过程中的次品率及返修率,从而每个部件都可以达到严苛的质量要求,设计的改善也增强了质量反馈渠道,可以在设计之初便预判并且规避可能出现的质量问题,使得装配的过程中更加一致和稳定最终全面提升产品质量。

#### 5.3 钣金结构设计的可持续性 with 装配质量的提升

钣金结构设计的可延续性,既有利于环保节能,又直接影响装配质量与持久性。通过合理选材、精准加工、优化后期维护设计,选用高强度材质减少结构变形,改进表面处理工艺提升部件耐用性与抗腐蚀能力,可延长产品寿命,降低维护频次与成本。这种设计能避免过度加工和资源浪费,兼顾装配质量与成本控制,还可适配不同生产及多变环境需求,提升产品持续使用的可行性与可靠性,进一步强化装配质量的稳定性。

### 6 结束语

钣金结构设计对于装配的作用不可小觑,合理的设计方案能有效地提高装配效率及产品品质。在设计上增强操作性、标准化水平、模块化率及零件匹配度等措施,既降低了装配工位上的复杂程度,又提升了流水线产能。未来钣金结构设计不断改进,必将进一步提升装配精度和降低成本,同时也会对整个工业生产的可持续发展起到重要的推动作用。

#### 参考文献:

- [1] 赵云,张新闻,滕磊,等.某型卡车车门钣金结构设计[J].内燃机与配件,2022(20):47-49.
- [2] 卓培坤.机械钣金结构设计存在的问题及解决措施[J].智慧中国,2021(12):82-83.
- [3] 吕颂,杨博,沈跃,等.基于NX钣金设计的试验工装内外套设计方法研究[J].沈阳化工大学学报,2021,35(02):175-180.
- [4] 孙婷.汽车车门钣金设计研究[J].内燃机与配件,2020(22):110-111.
- [5] 周畅.钣金结构件设计冲裁工艺性问题分析[J].时代汽车,2020(18):139-140.

# 装配式混凝土楼板节点连接方式探析

张澄颢<sup>1</sup>, 崔文潇<sup>2</sup>, 陈子申<sup>1</sup>, 方舰航<sup>1</sup>, 马勇博<sup>1</sup>, 魏光顺<sup>1</sup>

(1. 江苏科技大学苏州理工学院, 江苏 张家港 215600;

2. 江苏科技大学, 江苏 张家港 215600)

**摘 要** 装配式混凝土结构具备施工效率高、能耗低、绿色环保、工业化程度高的优势, 是建筑工业化发展的主要趋势。楼板作为建筑结构中的水平承重构件, 其节点连接的可靠性对结构的整体性、承载能力和抗震性能影响较大, 是装配式混凝土结构应用中的技术难点。本文基于国内装配式混凝土楼板节点连接的研究成果与工程实践, 系统梳理了各类装配式楼板节点连接形式, 包括板间节点连接、楼板与支座节点连接, 详细分析了不同连接形式的构造特点、优势缺点、施工工艺, 探讨了当前节点连接技术存在的问题, 并展望了未来的发展趋势, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 装配式楼板; 节点连接; 湿式连接; 干式连接

**基金项目:** 江苏科技大学苏州理工学院 2025 年大学生创新创业训练计划项目“密拼钢筋桁架叠合楼板接缝传力机制与协同工作机理研究”研究成果。

**中图分类号:** TU756

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.017

## 0 引言

与传统建筑相比, 装配式建筑具有生产效率高、降低能耗、减少环境影响、改善工程质量等优势。此外, 其建筑特点能大幅度规避建筑废弃物的出现, 并能有效降低全寿命周期碳排放。楼板作为建筑的重要构件, 其产业化对装配式混凝土结构推广具有重要意义。与传统现浇楼板相比, 装配式楼板由预制构件现场拼装而成, 节点区域造成结构的不连续性, 从而成为结构的薄弱环节。节点是装配式结构的薄弱环节, 结构的抗震性能和整体性主要取决于节点连接效果。

## 1 装配式楼板节点连接的主要形式及技术特点

装配式楼板节点连接形式可根据有无后浇混凝土工序大致分为湿式连接、干式连接和混合连接。

湿式连接是通过节点内预制构件的钢筋相互连接, 之后在节点区域内浇筑混凝土或灌浆料从而将预制构件连接为一体的方式, 湿式连接形成的结构称为装配整体式混凝土结构。通过合理设计与构造措施, 其结构整体性、抗震性和承载力与现浇混凝土结构差异不大。湿式连接通过现场浇筑混凝土或高性能砂浆、ECC、UHPC 等材料实现预制构件的连接, 在节点内钢筋通过搭接、焊接、机械套筒等方式连接, 依赖材料的粘结与咬合传递内力, 整体性好, 是目前应用最广泛的节点连接形式。

干式连接是借助预制构件中预埋件、预留孔等经螺栓、焊接、预应力等方式将不同预制构件连接为一体的方式, 干式连接形成的结构通常称为全装配式混凝土结构。现场仅需做简单的填缝、灌浆等作业, 基本无湿作业, 建筑工业化程度高, 但对设计精度、构件加工及连接件性能要求较高。

混合连接是融合湿式连接与干式连接核心优势的新型连接形式, 其核心是通过干式连接实现构件快速定位装配, 再通过局部湿作业强化节点整体性, 兼顾施工效率与结构可靠性。该形式通常先采用螺栓、预埋钢板等干式连接件完成预制楼板的快速对接固定, 减少现场湿作业工期, 再在节点关键部位浇筑少量 UHPC 或高性能灌浆料, 增强节点传力性能, 有效弥补干式连接整体性不足的短板。

三种连接形式适用场景各有不同, 湿式连接适用于抗震等级高、对整体性要求较高的建筑, 干式连接适用于低烈度地震区、对装配效率要求较高的建筑, 混合连接则凭借其综合优势, 成为近年来装配式楼板节点连接的主要发展方向之一。

## 2 湿式连接

### 2.1 有叠合层的湿式连接

叠合楼板是目前装配式楼板应用最广泛的形式之一, 其由预制板和后浇叠合层组合而成, 预制板在施

**作者简介:** 张澄颢 (2002-), 男, 本科, 研究方向: 密拼钢筋桁架叠合楼板接缝。

工时作为模板,在施工后与叠合层形成整体,传递结构荷载。节点连接主要针对预制底板之间的拼缝处理,核心是保证拼缝处的整体性和传力可靠性,实现预制底板与现浇层、相邻预制底板之间的协同受力。预制底板侧面可四面出筋,通过后浇带形成整体双向板<sup>[1]</sup>;或采用密拼接缝<sup>[2]</sup>(侧面不出筋),依靠附加钢筋在叠合层中间搭接与桁架钢筋协同传力。后者可大大节省预制构件制作费用以及现场施工用具和工作量,大大降低施工成本,节省工期,但其双向传力机理与设计方法仍是研究重点。

为了提高节点连接传力效率,预制底板在连接处可设计成阶梯式、凹槽式等形式,从而增大新旧混凝土接触面、增大钢筋连接长度、提高节点抗剪性能。使用具有优异的粘结对裂性能的UHPC、ECC、纤维混凝土等材料<sup>[3]</sup>浇筑接缝或后浇带,能显著提升节点的开裂荷载、极限承载力及耐久性。此外还可通过粘贴碳纤维方式增大楼板承载力,降低钢筋用量。

有叠合层的湿式连接作为叠合楼板最核心的节点连接方式,充分利用后浇叠合层的整体性,实现预制底板与节点区域的整体连接,结构可靠性强。该连接方式借助叠合层的现浇特性,仅通过连接预制底板的外伸钢筋、一体式浇筑接缝和叠合层,即可实现节点传力,本质是将节点连接与叠合层施工一体化,简化了施工流程。研究表明,有叠合层的湿式连接可通过优化钢筋连接(梅花形布置、错缝搭接等),有效提升节点的抗剪、抗拉性能,满足不同跨度、不同抗震等级的建筑需求。通过钢筋的粘结锚固与新旧混凝土的界面咬合,将相邻预制底板的内力传递至后浇叠合层,再由叠合层传递至竖向承重结构,实现整体协同受力。该连接形式中预制底板可作为施工模板,降低了模板投入;与干式连接相比,其整体性和抗震性能更强,对预制构件精度要求更低,容错率更高。目前该连接方式广泛应用于住宅、写字楼等中高层装配式建筑中,但仍存在界面粘结性能受施工质量影响较大、底板存在通缝、易开缝等问题,后续研究重点集中在界面处理工艺优化、高性能接缝材料应用及裂缝控制技术,推动其向高效、可靠、经济的方向发展。

## 2.2 无叠合层的湿式连接

该连接方式通过预留后浇带(键槽、缺槽等)连接预制构件,内部钢筋采用焊接、搭接或套筒连接,然后浇筑普通混凝土或高强灌浆料。此类连接可减少大面积叠合现浇层,提升预制率,如“免于现浇叠合的全预制板”体系。

采用高强柔性索环后浇连接预制板时<sup>[4]</sup>,预制板外伸高强柔性索环,在后浇带接缝内,柔性索环相交,并穿入销栓筋,之后采用UHPC或ECC浇筑接缝。

采用预制楼板缝合式对接连接时,钢丝绳依次交错穿过两组穿绳孔,由此将两块预制构件连接在一起,在后浇缝内浇筑并养护混凝土,完成预制楼板的拼接。

配置桁架钢筋叠合后浇带连接预制板时,全预制楼板的板缝处和混凝土后浇带的形状相适应且均设置为台阶状,在全预制楼板台阶处设有桁架钢筋借以提高预留后浇带和预制构件的整体性能。新型板的一侧采用台阶式,上台阶内收,下台阶外伸,为了减少板底弯起钢筋的弯起角度,踏面与踢面相交处做成坡面,两块预制板拼接后,之间形成倒台阶状的后浇带。

采用U型筋和钢棒连接时<sup>[5]</sup>,在板端预留开口或缺口,通过错位放置U型钢筋形成孔道后穿入圆钢棒并灌浆,或通过预埋钢板焊接圆钢棒,实现可靠连接。

采用装配式错缝相扣型连接时<sup>[6]</sup>,由带有凹凸相间网格状齿槽的预制构件通过错缝倒扣而形成装配式楼板,该楼板的上下构件通过齿槽来进行配合,构件中配置受力钢筋和分布钢筋,并在节点处现浇混凝土加强节点以形成完整的楼盖体系,从而增强其整体受力性能。

上述各类连接均属于无叠合层的湿式连接,其核心特征是无须设置大面积后浇叠合层,仅通过节点局部后浇混凝土或灌浆料,结合钢筋连接实现预制板协同受力,核心目标是提升预制率、缩短施工工期。通过局部后浇带构造保证节点整体性,传力核心依赖钢筋的可靠连接与后浇材料的粘结咬合,兼具湿式连接的整体性优势与全预制构件的高效装配特点。与有叠合层的湿式连接相比,其大幅减少了现场现浇工作量,对预制构件成型精度要求更高,适用于对预制率要求高、工期紧张的项目。该类连接后续研究重点集中在优化局部后浇构造、提升节点抗裂性能,进一步平衡预制率与结构可靠性,完善其设计计算方法与施工验收标准。

## 3 干式连接

预制装配式楼盖焊接式板缝连接节点,以预制企口平板和挑耳梁作为基本构件,梁一板之间和板一板之间采用分离式预埋机械连接件加以连接。

基于螺栓连接的装配式混凝土结构体系<sup>[7-8]</sup>,预制构件内预埋的型钢为节点搭接待件,拼装就位后将螺栓穿过预留孔洞进行连接。

干式耗能连接节点采用螺栓连接,考虑了螺栓孔与螺栓杆的间隙便于安装,同时为摩擦耗能提供了有利条件。在预制楼板拼缝处,两侧预制板预埋开孔钢板,与预制板连接的拼缝节点板两侧开孔,一侧为圆孔,另一侧为扁孔,限制了摩擦的滑动范围,当节点与预埋钢板相对滑动位移超过扁螺栓孔的大小时,螺杆被限制,摩擦耗能与金属耗能相结合形成摩擦与金属滞回双重耗能机制。

预应力筋连接中将不同预制板内预留贯穿孔洞内穿入预应力筋,在构件外侧张拉锚固,无需后浇混凝土。

上述几种连接均属于干式连接,焊接式、螺栓式可实现便捷拼装与可靠传力,干式耗能连接强化了结构抗震耗能能力,预应力筋连接则提升了结构整体性。干式连接对构件加工精度和连接件性能要求严格,适配低烈度地震区、工期紧张的工业与民用建筑,该类连接后续研究重点集中在结构整体性和抗震性提升上。

#### 4 混合连接

近年来,国内外学者围绕装配式楼板节点混合连接技术开展了大量试验研究与工程实践,在构造创新方面,突破传统“干式定位+局部后浇”的基础模式,研发出预应力—后浇混合连接、型钢预埋—灌浆混合连接等新型构造形式,其中预应力—后浇混合连接借鉴预应力筋连接的高效传力优势,在干式螺栓定位后,通过张拉预应力筋施加预紧力,再浇筑少量 UHPC 完成节点封锚,既提升了节点的抗裂性能,又增强了结构整体性,相关试验表明,该形式节点的极限承载力较传统混合连接提升 30% 以上。型钢预埋—灌浆混合连接则通过在预制楼板端部预埋型钢连接件,现场螺栓对接后,在型钢间隙浇筑高强灌浆料,依托型钢与灌浆料的协同作用传递内力,解决了传统混合连接传力不均的问题,适配大跨度装配式楼板的连接需求。

在材料适配与施工优化方面,近几年研究重点聚焦于高效节能材料与混合连接的协同应用,广泛采用 UHPC、ECC 等高性能材料作为局部材料,利用其优异的粘结强度、抗裂性和耐久性,大幅提升节点的服役寿命,同时减少湿作业量,进一步缩短施工工期。结合灌浆套筒连接技术的优化,研发出模块化混合连接构件,将干式连接件与后浇预留槽一体化预制,现场仅需完成拼装、灌浆两道核心工序,装配效率较传统混合连接提升 40%。针对混合连接施工质量难以控制的痛点,通过在连接件、灌浆区域预埋传感器,实时监测螺栓预紧力、灌浆饱满度,有效规避了灌浆不密实、螺栓

松动等质量隐患,为节点可靠性提供了技术保障。

目前,混合连接技术仍存在部分亟待解决的共性问题:高烈度地震区节点的耗能性能有待进一步提升,不同连接形式的标准化设计体系尚未完善,模块化构件的生产成本较高,且节点的抗火、抗腐蚀性研究较为薄弱。后续研究将重点围绕抗震耗能优化、标准化设计、成本控制三个方向展开,通过增设耗能钢板、优化预应力施加方式,提升节点的抗震耗能能力;建立不同跨度、不同抗震等级的混合连接标准化构造体系,推动技术规范应用;优化模块化构件生产工艺,降低制造成本。

#### 5 结束语

当前,装配式混凝土楼板节点连接形式正朝着预制率更高、施工效率更高、整体性能更好及综合效益更佳的方向发展。选择合适的连接方式需综合考虑结构体系、抗震要求、施工条件、成本与工期等多方面因素。可通过应用高性能材料(UHPC、ECC等)缩小后浇区域、提升节点性能;发展标准化、系列化的干式连接件,并探索便于自动化安装的智能连接技术;开发兼具高效传力与耗能能力的节点,提升楼盖的抗震韧性;针对密拼接缝、干式连接等复杂传力机制,发展更精确的计算模型与设计方法。通过解决装配式楼板推广应用中的难点问题,提升装配式楼板节点连接的可靠性、经济性和适用性,为我国建筑工业化的高质量发展提供有力支撑。

#### 参考文献:

- [1] 聂建国,姜越鑫,聂鑫,等.叠合板中桁架钢筋对预制板受力性能的影响[J].建筑结构学报,2021,42(01):151-158.
- [2] 程志军,马智周,胡杰,等.密拼钢筋桁架混凝土叠合双向板堆载试验研究[J].建筑结构,2021,51(23):111-119.
- [3] 任潇斌.UHPC后浇新型装配式楼板设计及其抗力性能研究[D].宜昌:三峡大学,2022.
- [4] 安豪.基于高强柔性索环后浇连接的预制装配式板受弯性能研究[D].郑州:河南工业大学,2025.
- [5] 张骄.新型预制板装配节点的受力性能研究[D].镇江:江苏大学,2023.
- [6] 李亚宁.装配式错缝相扣型楼板力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [7] 王合辉.基于型钢连接的全装配式混凝土楼板设计及研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [8] 冯身强,魏英杰,王虎.螺栓连接装配式混凝土建筑在农房建设中的应用[J].四川建筑,2021,41(S1):123-126.

# 市政道路施工对既有给排水管网的保护技术应用

张涛<sup>1</sup>, 杜昌富<sup>2</sup>

(1. 邹城市城投惠民置业有限公司, 山东 邹城 273500;

2. 山东浩淼智能科技有限公司, 山东 济宁 272000)

**摘要** 本文聚焦市政道路施工对既有给排水管网的保护技术, 结合山东某公路、某二线城市老城区等典型案例, 从精准探测定位、非开挖修复、开挖防护、实时监测预警及全周期管理等方面, 系统阐述保护技术的创新应用与实施效果。通过数据对比分析, 验证技术措施在降低管线损坏率、缩短施工周期、减少交通影响等方面的显著优势, 以为市政道路施工中的给排水管网保护提供参考。

**关键词** 市政道路施工; 给排水管网; 保护技术; 非开挖修复; 实时监测

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.018

## 0 引言

随着我国城市化进程的持续加速, 城市市政道路工程建设规模与频次显著提升, 由此引发的施工活动与地下管线保护之间的矛盾日益凸显。据权威统计数据, 我国每年因施工导致的地下管线破坏事故超万起, 其中给排水管线损坏占比达40%, 直接经济损失累计突破100亿元。给排水管网能不能安全运行直接关系到居民平时用水、排水顺不顺畅, 以及城市防洪排涝的能力强不强。传统的开挖修复管网方式问题不少。施工周期长, 对交通的影响也很大, 施工的时候道路经常被堵得水泄不通; 而且对环境的破坏非常严重, 开挖的地方尘土飞扬, 影响周边环境。

## 1 精准探测与定位技术

### 1.1 多技术融合探测

在市政道路施工中, 给排水管线的精准探测是保护的前提。传统探测方法依赖竣工图纸, 但因管线迁移、图纸误差等因素, 实际位置与图纸偏差可达30%以上。为解决这一问题, 山东某公路供水管网改造项目采用“地质雷达+管道CCTV检测+人工探坑”多技术融合探测方法(见表1)。

地质雷达通过发射高频电磁波, 根据反射信号分析地下管线位置, 适用于非金属管线探测; 管道CCTV检测通过高清摄像头进入管道内部, 识别裂缝、变形等缺陷, 同时校准管线走向; 人工探坑则用于验证探

测结果, 确保数据准确性。多技术融合使管线定位误差从±30 cm降至±5 cm, 为后续保护措施提供精准依据。

表1 山东某公路管线探测技术参数对比

技术类型	探测深度(m)	定位精度(cm)	适用管径(mm)	探测效率(m/天)
地质雷达	0.5~10	±5	≥150	300~500
管道CCTV检测	—	—	≥150	100~200
人工探坑	0~3	±10	全管径	50~100

### 1.2 三维建模技术

在某二线城市老城区供水管网修复项目中, 采用BIM(建筑信息模型)技术建立三维管线模型。通过将探测数据导入BIM平台, 生成包含管线位置、埋深、材质、管径等信息的三维模型, 实现管线可视化管理。在施工前, 通过模型模拟施工过程, 提前识别管线冲突点, 优化施工方案, 避免因管线交叉导致的施工中断。据统计, BIM技术应用使施工方案调整次数减少60%, 施工效率提升30%。

## 2 非开挖修复技术

### 2.1 原位固化法(CIPP), 快速修复老旧管线

原位固化法(CIPP)是一种非常实用的管道修复技术。它的操作过程并不复杂, 先把浸满热固性树脂的内衬软管拉进需要修复的管道里, 然后用热水或者紫外线对软管进行加热, 让树脂固化。固化之后, 就

作者简介: 张涛(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 市政工程。

会在原管道内部形成一层新的内衬, 这层新内衬和原管道紧密贴合, 就像给管道穿上了一层坚固的新衣。这种技术适用范围挺广, 管径在 100 ~ 1 600 mm 的排水、给水管道都能用它来修复。在山东某公路供水管网改造项目里就采用了 UV-CIPP 技术对 3 km 长的 DN700 铸铁给水管进行修复。对比传统热水固化法和 UV-CIPP 法的施工参数, 传统热水固化法固化时间比较长, 需要 8 ~ 12 小时, 而 UV-CIPP 法采用紫外线灯车快速固化树脂, 固化时间缩短到了 0.5 ~ 2 小时。施工周期方面, 传统方法要 7 ~ 10 天, UV-CIPP 法只需 1 ~ 3 天。在交通影响上, 传统方法需要封闭 2 个车道, UV-CIPP 法只需临时占用 1 个车道。而且修复后管道的寿命也有差异, 传统方法修复后能用 30 ~ 50 年, UV-CIPP 法修复后寿命能达到 50 年以上。UV-CIPP 法优势明显, 固化时间大幅缩短, 施工周期也大大减少, 对交通的影响降到了最低<sup>[1]</sup>。修复后的管道内壁十分光滑, 水流阻力降低了 20%, 供水效率提升了 15%, 能更好地满足城市用水需求(见表 2)。

表 2 UV-CIPP 技术施工参数对比

参数类型	传统热水固化法	UV-CIPP 法
固化时间 (h)	8 ~ 12	0.5 ~ 2
施工周期 (天)	7 ~ 10	1 ~ 3
交通影响范围	2 车道封闭	1 车道临时占用
修复后寿命 (年)	30 ~ 50	50+

## 2.2 碎管法 (Pipe Bursting)

碎管法也是一种常用的非开挖修复技术, 它主要适用于管径 50 ~ 1 000 mm 的给水、燃气管道更新。碎管法的操作原理是利用液压设备把旧管道破碎, 在破碎的同时拉入新管道, 这样就完成了管道的更新。在某城市新区雨污分流工程中, 就采用了碎管法对 200 m 长的 DN800 混凝土排水管进行更换, 新管选用了 HDPE 波纹管。接着将碎管法和传统开挖更换法的施工参数进行对比。传统开挖更换法开挖面积大, 需要 500 m<sup>2</sup>, 而碎管法只需 50 m<sup>2</sup>。施工周期上, 传统方法要 15 天, 碎管法只需 5 天。在废弃物产生量方面, 传统方法会产生 100 吨废弃物, 碎管法只有 10 吨, 减少了 90%。成本上, 传统方法需要 80 万元, 碎管法只需 50 万元, 降低了 37.5% (见表 3)。碎管法不用大面积开挖, 减

表 3 碎管法施工参数对比

参数类型	开挖更换法	碎管法
开挖面积 (m <sup>2</sup> )	500	50
施工周期 (天)	15	5
废弃物产生量 (t)	100	10
成本 (万元)	80	50

少了对地面和交通的影响。新换的 HDPE 波纹管抗腐蚀性强, 使用寿命能达到 50 年以上, 有效解决了混凝土管容易老化、渗漏等问题, 让管道运行更加稳定可靠。

## 3 开挖防护技术

### 3.1 钢板桩支护, 防止土体坍塌

在一些管线埋深比较大的地方, 比如埋深超过 2 m, 或者地质条件不好, 像软土、砂土这类土质, 开挖的时候就容易发生土体坍塌的情况。土体一坍塌, 那管线就危险, 很可能被挤压破坏, 影响正常供水、供气等。在山东某公路项目就遇到了深埋管线开挖的问题, 他们采用了钢板桩支护技术。钢板桩支护简单来说就是先根据管底的深度来确定钢板桩的长度, 一般来说, 钢板桩要比管底再长出 1 m, 然后把这些钢板桩打进土里, 形成一个封闭的支护结构, 就像给土体穿上了一层坚固的防护衣。施工的时候, 有专门的监测人员对土体的侧向位移和地表沉降情况进行监测。从监测数据来看, 效果非常明显。没采用钢板桩支护时, 土体侧向位移能达到 50 mm, 地表沉降也有 30 mm, 这很容易导致管线受损。而用了钢板桩支护之后, 土体侧向位移降到了 10 mm, 地表沉降也降到了 5 mm, 大大降低了土体坍塌对管线的挤压破坏风险, 让管线在开挖过程中能安全埋在地下<sup>[2]</sup>。

### 3.2 哈夫节快速修补, 减少停水时间

在管线使用过程中, 难免会出现局部破损的情况。要是按照传统的方法, 比如焊接法来修补, 往往需要停水或者降压, 这不仅会影响周边居民的正常用水, 还会造成一定的经济损失。哈夫节由两个半圆形的钢制外壳组成, 里面还衬有橡胶密封圈。修补时只需要把这两个半圆形外壳套在管线破损的地方, 然后用螺栓紧紧固定住, 就能快速实现密封, 整个过程不需要停水或者降压。在某城市供水管道抢修工程中充分体现了哈夫节快速修补的优势。一根 DN300 的铸铁管出现了穿孔, 如果采用传统焊接法修补, 需要 2 个小时, 而且停水范围会波及周边 500 户居民。而采用哈夫节修补只用 20 分钟就能完成, 停水范围也缩小到了周边 50 户居民。这样一来, 不仅大大缩短了修补时间, 减少了停水对居民生活的影响, 还减少了经济损失, 据估算, 大概能减少 10 万元左右<sup>[3]</sup>。

## 4 实时监测与预警技术

### 4.1 传感器网络

在市政道路施工中, 通过部署压力传感器、位移传感器、应变传感器等, 构建管线实时监测网络(见

表4)。传感器数据通过无线传输至监控平台,实时显示管线状态,超限自动报警。

表4 管线监测传感器参数对比

传感器类型	监测参数	精度	采样频率 (Hz)	传输距离 (m)
压力传感器	管内压力	±0.5% FS	1	500
位移传感器	土体沉降	±0.1 mm	10	300
应变传感器	管线应变	±1 μ ε	100	200

在山东某公路项目中,沿管线布置20个压力传感器和10个位移传感器,施工期间共触发3次预警,其中2次因机械碾压导致土体沉降超限,1次因管道接口松动导致压力波动,均及时采取加固措施,避免管线损坏<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 AI 算法分析, 预判泄漏风险

在城市地下管线的运维管理中,及时察觉管线泄漏问题十分关键。一旦泄漏没被及时发现,不仅会造成资源浪费,还可能污染环境,影响城市正常运转。现在,AI算法分析为预判管线泄漏风险提供了新办法。具体来说,是结合历史监测数据,运用机器学习算法,像LSTM神经网络这类来建立管线泄漏预测模型。历史监测数据里面包含了管线在不同时间、不同工况下的各种信息,比如压力、流量、位移等参数。这些参数能反映出管线的运行状态。LSTM神经网络会对这些历史数据进行深度学习和分析,找出参数变化与管线泄漏之间的潜在规律。然后,根据实时监测到的压力、流量、位移等参数的变化趋势,模型就能预判出管线是否存在泄漏风险。一旦模型判断有泄漏风险,就会提前通知维护人员去检查<sup>[5]</sup>。

### 5 全周期管理技术

#### 5.1 规划协同, 减少管线冲突

在城市建设初期,规划工作是重中之重。过去管线规划常常和城市道路、地块开发规划分开进行,这导致不同管线之间容易出现冲突,比如电力管线和排水管线交叉,燃气和给水管线距离过近等,给后续施工和维护带来很大麻烦。现在我们推动“管线综合规划”与城市道路、地块开发规划同步编制。在规划过程中,明确“平面避让、竖向分层”的原则。不同的管线也有自己的位置。一般来说电力管线在上面,排水管线在下面,燃气与给水管线水平净距要大于等于0.5米。这样的布局能有效避免管线之间的相互干扰。在某城市新区规划中,就充分运用了规划协同的理念。通过提前规划,减少了管线交叉点60%。这意味着在后续施工过程中,需要处理复杂交叉情况的地方将大大减少<sup>[6]</sup>。

#### 5.2 施工管控, 严格执行“三探一验”

施工过程是管线建设的关键环节,也是最容易出现问题的阶段。为了确保管线在施工过程中不受损坏,需严格执行“三探一验”制度。施工前探测是第一步。利用地质雷达、管道CCTV检测等先进技术,就像给地下管线做了一次“CT扫描”,能够精准定位管线的位置、走向和埋深。这样施工人员在施工前就对地下情况了如指掌,避免了盲目施工;开挖前探坑是第二步。在管线疑似位置开挖探坑,验证施工前探测的结果是否准确。有时地质情况复杂,探测结果可能会有一定误差,通过开挖探坑可确保万无一失;施工中探查是第三步<sup>[7]</sup>。在施工过程中,采用人工开挖或低扰动工法,比如液压破碎锤,避免机械直接碾压管线,需要小心翼翼地操作,防止对管线造成损伤;验收后存档是最后一步。施工完成后,将管线变更信息更新至竣工图纸,并纳入城市地下管线GIS系统,方便后续的查询和管理。

### 6 结束语

在市政道路施工过程中,保护好现有的给排水管网是一个系统工程。在探测定位管线的位置、修复技术、开挖的时候,防护方式、施工时实时监测以及整个施工过程的全周期管理都需要协同推进。通过分析实际工程案例发现,把多种探测技术融合起来找管线位置、用非开挖的方式修复管线、用钢板桩支护开挖区域、施工时实时监测预警,再加上全周期管理这些技术一起用,效果更佳。应用这些技术之后,管线损坏率从原来的40%降到了5%以下,施工周期也缩短了50%以上,能缩短施工周期,减少对人们出行的影响,对交通的影响范围也降低了60%。

#### 参考文献:

- [1] 邓亚玲,张维华.市政给排水管道安装施工技术要点与应用研究[J].美食,2025(18):19-20.
- [2] 彭维康.市政道路给排水管道中顶管技术工艺与应用浅析[J].科技视界,2023(07):41-44.
- [3] 孙志文.市政给排水管道施工中数字化信息技术运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):187-189.
- [4] 张靠.城区市政给排水管网设计及施工要点分析[J].水上安全,2024(22):19-21.
- [5] 张维华,邓亚玲.市政管网给排水管道系统工程施工技术[J].美食,2025(18):15-16.
- [6] 王立博,康宏磊.市政给排水管网超大直径钢顶管施工技术[J].城镇建设,2025(07):49-51.
- [7] 窦佳星.市政管网给排水管道系统工程科学施工技术研究[J].漫科学(科技应用),2025(01):7-9.

# 纤维增强混凝土施工技术 在建筑工程中的应用要点研究

刘春娣

(安徽中陆建设工程有限公司, 安徽 合肥 230051)

**摘 要** 在建筑工程中, 纤维增强混凝土施工技术的应用具有重要优势, 不仅可以改善混凝土的性能和力学性能, 还能降低建筑施工成本, 有效提高绿色环保效益。基于此, 本文以纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中的价值作为切入点, 简要论述纤维增强混凝土的常见类型, 并以 A 建筑工程为例, 分析纤维增强混凝土的配制、纤维增强混凝土的运输、纤维增强混凝土的浇筑、纤维增强混凝土的养护等应用要点, 以期为纤维增强混凝土施工提供参考。

**关键词** 纤维增强混凝土; 建筑工程; 浇筑施工; 养护

**中图分类号:** TU755

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.019

## 0 引言

纤维增强混凝土指的是在传统混凝土中掺入钢筋、合成纤维、碳纤维后形成的材料, 不仅可以提高其抗裂性能和韧性, 还能延长其使用寿命, 在建筑工程中具有重要的应用价值。混凝土作为建筑工程中的主要材料, 会因温度变化、施工技术、荷载作用等因素造成裂缝问题, 严重影响建筑工程质量。因此, 施工人员应对纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中的应用要点加以探究, 以提高技术应用效果, 满足建筑工程质量要求。

## 1 纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中的价值

### 1.1 有助于改善混凝土的性能

在建筑工程中应用纤维增强混凝土施工技术具有重要价值, 有助于改善混凝土的性能。在混凝土材料中添加纤维材料能够有效形成支撑网络, 可以避免混凝土材料出现收缩和干缩裂缝问题。当加入  $0.5 \text{ kg/m}^3$  的聚丙烯纤维时, 可提高混凝土材料抗裂能力 70%。与此同时, 加入纤维材料还能提高混凝土的韧性与延展性, 可以在地震环境下确保建筑工程的稳定性。除此之外, 加入钢纤维材料能够使混凝土材料的抗冲击强度提高 2~9 倍, 使其抗弯强度提升 50%~100%, 进而有效提升混凝土材料的力学性能<sup>[1]</sup>。

### 1.2 有助于降低建筑施工成本

对建筑工程而言, 纤维增强混凝土施工技术的应用具有重要意义, 有助于降低建筑施工成本。通过使

用纤维增强混凝土能够对早期裂缝加以控制, 无需后续人工修复裂缝, 有效节约后期修复材料成本。纤维材料的添加能够替代次级钢筋, 从而减少钢筋材料的使用量, 降低成本达 30%~50%。使用纤维增强混凝土施工技术还能提高施工效率, 无需进行钢筋绑扎操作, 节省后浇带施工时间, 可提前 3 d 完工, 有效降低建筑工程施工的时间成本, 从而为施工单位带来更大的经济利润空间。

### 1.3 有助于提高绿色环保效益

在建筑工程施工中, 纤维增强混凝土施工技术的运用有助于提高绿色环保效益。通过对纤维增强混凝土材料的使用能够降低钢筋使用量, 减少对资源的消耗, 降低碳排放量。同时, 利用纤维增强混凝土还能提高建筑物的抗冻、抗渗、抗腐蚀等性能水平, 从而提高建筑工程的耐久性, 将其使用寿命延长至 50~100 年, 避免建筑物重建所造成的资源浪费。此外, 通过对天然纤维材料的使用能够打造绿色可再生的复合材料, 能够降低建筑物全生命周期的碳排放量, 实现绿色施工目标。

## 2 纤维增强混凝土的常见类型

### 2.1 碳纤维增强混凝土

碳纤维材料具有密度小、耐腐蚀、耐高温、抗疲劳等特点, 将其加入至混凝土材料中, 可以有效提高混凝土的多方面性能(抗拉强度、抗折强度、韧性、导电性、导热性等), 可用于生产智能混凝土。碳纤

**作者简介:** 刘春娣(1990-), 女, 本科, 研究方向: 建筑工程。

纤维增强混凝土可应用于桥梁主梁、建筑物核心筒等结构,从而可以为建筑结构提供支撑,有效改善混凝土材料性能,确保建筑结构的稳定性<sup>[2]</sup>。

## 2.2 钢纤维增强混凝土

钢纤维增强混凝土指的是将钢纤维材料加入混凝土中所形成的全新建筑材料,其中,钢纤维是由钢质材料加工所打造的短纤维,其长度在10~60 mm之间,直径在0.3~0.8 mm之间,需要将其长径比把控在25~60。钢纤维材料的添加能够提高混凝土材料的抗拉强度、抗折强度、抗冲击强度、抗裂性以及耐磨性。钢纤维增强混凝土主要应用于对混凝土强度和耐磨性要求较高的建筑工程中,如高速公路路面、建筑结构的补强加固层、桥梁桥面、厂房地面等场景。

## 2.3 聚丙烯纤维增强混凝土

聚丙烯纤维增强混凝土作为纤维增强混凝土材料中的一种,主要是将聚丙烯纤维与混凝土进行混合配制。聚丙烯纤维属于合成纤维材料,需要经过纺丝、切断、亲水处理等环节进行加工,具有质量轻、耐腐蚀性能好、分散性强等优势,可以与混凝土材料进行有效结合,均匀分散在混凝土中,进而打造三维乱向支撑体系,有效提高混凝土的抗裂与抗渗性能。聚丙烯纤维增强混凝土可应用于屋面防水层、墙体、水箱等结构,有效提高建筑结构的使用寿命。

## 2.4 玻璃纤维增强混凝土

玻璃纤维增强混凝土指的是将玻璃纤维材料加入混凝土中所形成的建筑材料,玻璃纤维可以分成两种类型,分别是中碱玻璃纤维和耐碱玻璃纤维,能够抵抗碱性入侵,提高混凝土材料的耐腐蚀性能和防火性能。玻璃纤维增强混凝土在建筑工程中的应用范围较广,主要包括内隔墙板、阳台栏板、建筑外立面装饰等非承重和装饰结构。玻璃纤维增强混凝土可以减轻材料自重,避免带来过大荷载压力,是建筑工程中的重要材料。

# 3 纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中的应用要点

## 3.1 工程概况

A建筑工程为商业与住宅综合体建设项目,该工程占地面积为27万m<sup>2</sup>,其中包括1栋商业中心楼与5栋住宅楼,商业中心高度为70 m,住宅楼高度为120 m。该建筑工程施工区域地质情况十分特殊,第一层为人工填土,其厚度为2 m,土质较为松散,需要做好加固操作。第二层为粉质黏土,厚度为8 m,其限速为20 kN/m<sup>2</sup>,

其液速为5 020 kN/m<sup>2</sup>。当其土壤干燥后,易造成结构开裂问题。第三层为砂层,该层深度为15 m,液态塑性指数为0.3,具有较高的渗透性。基岩处于20 m深度位置处。基于以上分析情况,可运用纤维增强混凝土材料进行施工,有效确保建筑结构的稳定性。

## 3.2 纤维增强混凝土的配制

在建筑工程开展过程中,纤维增强混凝土的配制环节十分关键,对建筑结构的稳定性起到决定性作用。因该施工区域地质情况较为特殊,可选择P·042.5R型普通硅酸盐水泥作为原材料,可以提高抗侵蚀能力,并在短时间范围内提高混凝土强度。在选择细骨料时,可将河砂作为基本材料,要求其含泥量不超过1%,表观密度为2 650 kg/m<sup>3</sup>。在选择粗骨料时,可将碎石作为基本材料,要求其粒径控制在5~20 mm,压碎值不超过12%,表观密度为2 700 kg/m<sup>3</sup>。设计人员可按照《混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)要求进行配比设计,要求水泥、河砂、碎石以及水的配比为1:2.2:2.8:0.35。通过对该配合比的设计能够有效提高混凝土的力学性能,其抗压强度与抗折强度分别为45 MPa、6.5 MPa,与传统混凝土材料相比,分别提升了15%与20%<sup>[3]</sup>。

在确定配比和参数后,可进行聚丙烯纤维增强混凝土的搅拌工作,施工人员可通过双卧轴强制式混凝土搅拌机进行材料的拌合。在搅拌处理过程中,分别向搅拌机中加入水泥、细骨料、粗骨料等材料,并将搅拌速度设定为320 r/min,搅拌时间为2 min,使水泥材料与粗细骨料之间进行充分混合。在此基础上,加入适量的聚丙烯纤维材料,并将搅拌速度设定为600 r/min,搅拌时间设定为1 min,使聚丙烯纤维与混凝土材料混合均匀。施工人员可向搅拌机中加入水,再次搅拌3~4 min,并将搅拌速度设置为1 000 r/min,确保混合均匀。在聚丙烯纤维增强混凝土配制结束后,施工人员可运用超声波检测技术与显微扫描电镜分析技术对其分散效果加以检测,要求不低于90%,且无纤维团聚现象,即为合格<sup>[4]</sup>。

## 3.3 纤维增强混凝土的运输

在对聚丙烯纤维增强混凝土材料进行运输时,应对其进行质量把控,以免影响材料质量。其一,合理选择运输设备。管理者应使用混凝土搅拌运输车进行材料的运输,提前对车厢中的杂质进行清理,并确保车厢容量与搅拌设备容量相匹配,一般为12 m<sup>3</sup>。同时,要求车厢容量与浇筑速度进行匹配,从而为连续浇筑施工奠定基础。其二,运输速度与时间的控制。在运输途中,应将车辆的行驶速度保持在30 km/h范围内,

并禁止出现急刹车行为, 以免造成聚丙烯纤维增强混凝土离析问题。为了能够避免聚丙烯纤维增强混凝土材料质量下降, 应将运输时间进行控制, 在夏季高温天气中, 应保证运输时间控制在 1 h 以内。在冬季寒冷天气中, 须控制运输时间低于 2.5 h, 以免出现坍落度损失过大问题或混凝土凝结成块。此外, 在夏季覆盖篷布, 冬季覆盖保温棉, 以免混凝土材料质量受温度影响。

### 3.4 纤维增强混凝土的浇筑

在聚丙烯纤维增强混凝土的浇筑过程中, 施工人员应根据相关步骤进行作业。其一, 浇筑前。施工人员应进行模板的搭建, 确保模板表面整洁, 保证拼缝紧密, 避免出现漏浆问题, 并在模板上涂抹油性脱模剂, 要求其涂抹厚度为 0.2 mm, 以免聚丙烯纤维材料附着于模板表面。对墙体与柱子等建筑垂直结构来说, 施工人员可提前进行溜槽的安装, 方便聚丙烯纤维增强混凝土梳理流入模板之中, 以免因落差较大造成离析问题。施工单位可为浇筑施工选择混凝土输送泵, 要求其最大泵送压力为 22 MPa, 水平输送距离为 1 000 m, 垂直输送距离为 300 m, 可以满足 A 建筑工程的浇筑施工要求。此外, 施工人员可在聚丙烯纤维增强混凝土中设置温度传感器和湿度传感器, 以便进行温度和湿度的监测, 确保其在正常范围内, 以免影响浇筑效果; 其二, 浇筑中。在聚丙烯纤维增强混凝土浇筑施工过程中, 施工人员可利用跳仓浇筑法进行作业。施工人员可将施工现场划分为 10 个仓, 确保每一个仓的占地面积为 157 m<sup>2</sup>, 先浇筑 1、3、5、7、9 仓, 当其达到初凝时间后可浇筑 2、4、6、8、10 仓, 采用此种方式进行浇筑施工可以确保温度应力的均匀分布, 避免出现裂缝问题。在完成一个仓的浇筑任务后, 施工人员可对其进行振捣操作。对平面结构而言, 要求振捣频率为 50 Hz, 振动幅度为 1.5 mm, 振动速度为 1 200 次/min, 振动时长为 20~30 s, 当混凝土表面不再出现下沉和冒泡现象, 可完成振捣任务。对竖向结构而言, 要求振捣频率为 50 Hz, 振动幅度为 9 mm, 振动速度为 2 000 次/min, 振动时长为 15~20 s, 并保证插入深度控制在震动棒长度的四分之三范围内, 以免对下层混凝土造成破坏<sup>[5]</sup>。

### 3.5 纤维增强混凝土的养护

在聚丙烯纤维增强混凝土浇筑施工结束后, 为了提高其强度, 养护人员应做好养护工作。养护人员可在聚丙烯纤维增强混凝土表面上覆盖一层聚乙烯膜, 要求其厚度为 2 mm, 能够避免水分快速蒸发, 确保混凝土

内部具有一定的湿度, 可以促进水泥发生水化反应, 便于混凝土强度的提升。对非暴露面区域, 养护人员可定期对其进行喷水处理, 要求每次喷水量为 0.15 L/m<sup>3</sup>, 每次喷水间隔 4 h, 当养护 7 d 时, 应保证混凝土强度达到设计强度的 70%。在聚丙烯纤维增强混凝土养护过程中, 养护人员应定期对其强度情况进行检测。应抽取 1 组 150 mm×150 mm×150 mm 的试块进行相同条件下养护, 当养护时间达到 28 d 时, 可对试块开展抗压试验操作, 试验结果表明, 聚丙烯纤维增强混凝土的抗压强度为 45 MPa, 抗折强度为 6.5 MPa, 均满足质量要求。为了评估聚丙烯纤维增强混凝土的耐久性, 养护人员可开展氯离子渗透性测试和冻融循环试验, 发现氯离子渗透系数不超过 1 000 μA。当冻融循环次数超过 300 时, 混凝土强度损失率低于 5%, 由此可见, 聚丙烯纤维增强混凝土的耐久性满足设计要求。此外, 通过水压试验发现试块未出现渗水问题, 说明其抗渗性能良好。

## 4 结束语

纤维增强混凝土施工技术在建筑工程中具有重要的应用意义, 不但可以提高混凝土材料的强度, 还能提升其耐久性, 有效确保建筑物的稳定性。常见的纤维增强混凝土种类十分丰富, 如碳纤维增强混凝土、钢纤维增强混凝土、聚丙烯纤维增强混凝土、玻璃纤维增强混凝土。在实际施工过程中, 施工人员应对建筑工程的基本情况有所了解, 并进行纤维增强混凝土的配制与运输。在做好现场施工准备工作后, 施工人员可通过浇筑、振捣、养护等环节进行施工, 有效提高纤维增强混凝土施工效果。

## 参考文献:

- [1] 覃柏钧, 蒋寅豪, 梁龙群. 大型地下洞库高延展复合纤维混凝土喷射施工技术探析 [J]. 人民黄河, 2025, 47(S2): 129-131.
- [2] 刘惠龙. 建筑工程碳纤维布加固钢筋混凝土施工技术研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(09): 91-93.
- [3] 杨立. 波浪形纤维混凝土滑模摊铺施工应用与抗裂测试 [J]. 混凝土, 2024(08): 168-171.
- [4] 张鹏. 公共建筑工程碳纤维布加固混凝土结构施工技术 [J]. 居舍, 2023(20): 65-67.
- [5] 陈越. 纤维混凝土在混凝土面层抗裂施工中的应用: 以陈埭民族中学体育场看台施工为例 [J]. 福建建材, 2020(07): 48-50.

# 岩土工程中地下排水系统对边坡稳定性的控制效应研究

徐丽霞<sup>1</sup>, 邵坚强<sup>2</sup>

(1. 青岛蓝豆建筑工程有限公司, 山东 青岛 266404;

2. 青岛启核建筑工程有限公司, 山东 青岛 266700)

**摘要** 地下排水系统作为提升边坡稳定性的重要手段, 其核心原理在于疏干地下水改善坡体应力状态和改变渗流状态。该系统通过降低孔隙水压力、改善渗流场、改善岩土体渗透性及防止时态变形等多重作用, 实现渗流状态调控与岩土体性质改良。结合水平排水孔、地下廊道及地表地下结合等典型工程实践, 证实了该类系统在消除水质隐患方面的显著成效。针对复杂的水文地质情况, 构建科学、合理、有效的排水系统, 对于实现岩土工程长期的安全目标具有重要的意义。

**关键词** 岩土工程; 地下排水系统; 边坡稳定性; 控制效应

中图分类号: TU46

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.020

## 0 引言

边坡失稳往往因地下水作用加强而严重影响工程项目的安全性, 同时对人民群众的生命财产造成巨大危害, 所以进行排水防治刻不容缓。地下排水工程通过积极干预坡体内地下水状况, 作为治理这类地质灾害的主要手段之一, 从原理研究到工程部署运用, 地下排水系统通过水力学、土力学及流变学等方面共同作用控制坡体稳定性。探明地下排水系统的结构特点与稳定提升的作用机理, 对丰富岩土工程的设计方法, 拟定有效的防灾抗灾措施, 推动相应工程技术不断发展具有重要作用。

## 1 地下排水系统控制边坡稳定性的理论基础

地下排水系统控制边坡稳定性原理的核心是通过变动边坡内部的地下水渗流场以减少致灾动力, 提高坡体抗滑力。而地下水在岩土体内形成的静水压力、动水压力是诱发边坡失稳的主要外力, 地下水长期浸润又会软化滑带土, 显著降低岩土体的抗剪强度指标。地下排水系统通过水平排水孔、排水盲沟、竖井等方式强制改变地下水流动路线, 迫使原来积聚在滑面附近的渗流向排水设施集中汇集并引出, 从而导致坡体内地下水位线大大降低, 在此过程中, 随着水位下降, 作用在潜在滑面上的孔隙水压力、浮托力大大减小, 渗流对坡体的推压作用降低, 一部分饱和土区又可转变

为非饱和土区, 基质吸力得以恢复, 土体的有效应力增加, 有效应力的加大直接转化成土体抗剪强度的提高, 使边坡抵抗剪切破坏的能力大大加强, 此外, 排水过程还可避免土体由于长期处于饱水状态发生物理化学性质变差, 保持土体结构的整体性, 所以从“水—土”的相互作用关系上, 地下排水系统实现了从减少下滑力、增大抗滑力两个方面对边坡稳定性的双控作用<sup>[1]</sup>。

## 2 典型地下排水系统类型及特点

### 2.1 水平排水孔技术

水平排水孔是边坡治理最为常用的措施之一, 其主要优点为可以直接布置到坡体内深部的含水层段, 在对坡体扰动很小的情况下进行有效排水。实际施工过程中, 一般采用钻机沿相应部位钻设具有一定倾角的平孔, 孔内安放透水管外包裹土工布滤层, 这样相当于在坡体内部置入了若干个“毛细血管”, 可将坡体内的深层地下水引出坡外。因此针对地下水埋藏深度较大, 含水层渗透性较好的岩石或土层边坡而言是比较适宜的一种排水措施。水平排水孔具有施工方便、投资相对较少及见效较快等优点, 可根据现场出水量大小因地制宜地确定孔数、孔距以及孔长, 构成疏密程度不同的排水系统; 但是施工时需注意精准控制仰角角度、防止汇水, 还需在运行使用中避免因砂石土的流失造成管壁堵塞等问题的发生, 需要结合定期清

作者简介: 徐丽霞(1990-), 女, 专科, 研究方向: 岩土工程。

理来确保其长期的排水功能，以达到稳定有效地降低地下水位及孔隙水压力的效果。

## 2.2 地下排水廊道（隧洞）与竖井组合系统

地下排水廊道体系是大断面、强能力深部排水方案的一种，一般是由布置在边坡滑面以下的排水隧洞和与其联通的若干竖直方向排水井群组成。排水廊道体系在大型水利水电工程、矿区以及巨型滑坡治理中显示出极为显著的管控效果，其排水原理就是在稳定的岩层之中挖掘出一条主隧洞作为汇水导槽，然后向下布置一系列的竖井贯穿整个滑带，将上覆岩土体中的水分汇聚到底部的排水隧洞排出。与地表排水或小型钻孔不同的是，排水廊道能够绕过滑面的困扰，不会因为整体坡体缓慢蠕动而遭到破坏，具有非常高的耐久性，具有较强的防灾能力，既可以大量抽排降低坡体地下水位，又可以通过廊道开展地质巡查、深部位移观测等任务，兼具侦查与治理的功能。虽然工程量巨大，施工时间长，地质勘测要求高，但是对于处理那些水量丰富、滑体厚实或者排水可靠性要求非常高的复杂边坡而言，这无疑是在维护工程项目安全的最有力的武器之一<sup>[2]</sup>。

## 2.3 地表与地下结合的截排水骨料系统

地表截排水与地下盲管结合的骨料排水系统主要着眼于对补给来源加以控制，并引导浅层土壤水，目的是建立一道阻止雨水下渗的整体屏障，该排水系统一般将坡面顶端布置成截水沟拦截地表径流，而将坡体内部分布填理由碎石或者卵石组成的盲沟，以疏松骨料的大空隙率为通道建立起一种渗透系数极大的透水层，在易产生浅层滑移或受降雨下渗影响较大的土质边坡当中可及时地下下渗排除地表入渗雨水，避免坡体内蓄积渗透水形成浸润线。该种排水方式结构特征在于一般是在粗骨料外包裹一层无纺土工布使得水流顺利通过的同时又起到拦截土粒的作用，从而杜绝了因为管涌造成整体结构骨架的破坏。此种排水方式施工方法简单且明了，可以有效地减少坡体浅层区内的饱和程度，解决因降雨频繁导致的土体湿软的问题，经常和其他深层防护措施联合应用，作为边坡综合防水系统的最底层基础，从根本上消除降雨造成的边坡不稳定因素。

## 3 岩土工程中地下排水系统对边坡稳定性的控制效应

### 3.1 降低地下水位与孔隙水压力的力学效应

地下排水系统对于边坡稳定最基本的作用，就是以物理抽排的方式强行改变坡体内地下水的渗流场、

从而大幅度地降低了滑带附近区域内的地下水头高度及其孔隙水压力。在绝大部分边坡失稳实例之中，地下水既是最先触发边坡变形的因素，同时也是造成边坡抗滑能力损失殆尽的根本原因。当其内部水位较高时，孔隙水会在整个岩土骨架中造成极大的孔隙水压力，这部分压力会直接与作用于滑移面处的法向有效应力相互抵消掉。根据经典的太沙基有效应力原理可知，土壤的抗剪强度是与其所受到的有效应力大小成比例关系的。孔隙水压力越大，则有效应力就越小，意味着边坡抵抗发生剪切破坏的能力就会受到极大的减弱，如同在本来紧紧接触在一起的两块物体之间挤进大量高压稀薄润滑油一样，它们会变得非常容易脱落。

排水设施（包括水平排水孔、排水涵洞等）的作用在于给储存在边坡内部的地下水提供一条低能量位差的排放路径，破坏原有的静态水压均衡状态。随着地下水持续流出浸润线也明显降低原本淹没在滑床的自由水面逐渐变窄甚至消失，孔隙水压力迅速下降这一过程也不是单纯的直线下降，是随着排水时间的增长有效应力逐渐在滑动面上聚集与回复，使得有效应力增大，颗粒之间的啮合力加强，摩擦阻力相应增大，在宏观层面就实现了边坡安全系数的显著提高。这一作用机理对于雨后的排水尤为重要，它可以及时地消除瞬时饱和导致的过量孔隙水压力，避免边坡在降水结束后的几小时或几天内发生延时性失稳，从根本上稳定了其受力平衡结构。

### 3.2 削弱动水力与优化渗流场的水力学效应

地下排水系统对治理边坡稳定问题也有改善渗流场结构、显著降低有害动水力的重要水力学效果。在天然状态尤其是遇到暴雨天气或水库水位发生剧烈升降的情况下，边坡内部常产生较为复杂的不稳定渗流场，在地下水流经土颗粒之间的孔隙时就会对骨架产生一个渗透力（即动水压力），这个渗透力的方向是顺着渗流的方向并且它的强度也随水力梯度的增大而提高，如果水力梯度过大，这个渗透力就会转化成很大的推力，推动土体向临空面推移，并且会造成渗透破坏以及管涌的情况出现，冲刷掉边坡底部，造成边坡整体失稳<sup>[3]</sup>。

排水工程的作用，其实就是对边坡原有渗流场进行了一个人为调整的过程。在坡面上布置合理的排水体系后，原先向坡脚或者深部滑移面排泄的地下水，就会被有组织地拦截、导向至排水口处排出，在此过程中渗径大缩短，水力梯度得到了有力的削减，如此一来，渗流场内的等势面形状就变得更加平顺了，原来那些

高水力梯度的风险地带也消失了或是迁移到了更安全的位置,如坡脚设排水沟,就可以显著地消减出逸比降,减少流土的发生风险;坡体内设排水廊道就可以把原来往坡体表面排泄的降水汇集起来排出,不至于使坡面遭受长期的冲蚀而崩坏。经过处理之后的新渗流场就不会再出现强大向坡外地应力,而是会将因为降雨入渗导致增加的富余水头势能从排水系统中释放出来,也就不会再有渗流作用对边坡稳定性的不断侵害了,在暴雨条件下也能做到边坡动态水力稳定<sup>[4]</sup>。

### 3.3 改良岩土体物理力学性质的软化效应

地下排水工程对边坡稳定的影响在于对岩土体材料自身物理力学特征方面的远期优化,具体而言就是改善由于地下水浸润引起的岩土体材料破坏及软化问题。岩土材料中尤其是对于粘土、泥岩、页岩等强风化带的材料均有明显的亲水特性,在其长期饱水或者高含水量的情况下,水分既会充填于颗粒间的空隙,也会充填于矿物晶体结构内部,甚至会冲刷掉颗粒之间的胶结物,从而使得土体结构趋于疏松,骨架崩溃,在宏观上的表现就是粘聚力与内摩擦角出现大幅下降,这称之为“软化”。

排水工程通过连续无休的抽排影响,能够显著地减少坡体特别是滑动带土体的含水量,岩土体将由原先的饱水状态转变为非饱和或弱饱水状态,在排水过程中及完成之后伴随着水分的渗出与蒸发,局部区域的非饱和土的基质吸力得到恢复,这部分吸力在土体内起到一种特殊“粘聚力”的功效,提升了土体的抗剪性能,最关键的是干燥条件阻止了水-岩反应体系进行,从而避免了矿物的水化分解以及崩碎,保持了土体结构的稳固。针对具有膨胀性矿物成分的边坡,排水还可以阻止因吸水膨胀带来的庞大胀缩力,阻止了裂隙的发展贯通。可以说排水工程排走的不仅仅是“水”,更是起到了固表护根的作用,排水工程通过对岩土体物理力学参数指标的维持达到了切除斜坡体自身抗剪性能随时间衰退这一病灶的效果,为边坡的安全稳定奠定了物质基础<sup>[5]</sup>。

### 3.4 控制滑体变形与抑制蠕变的时效效应

地下排水设施对防治边坡延时变形及遏制长期蠕变有着不可忽视的作用,在处理含有较强流变性质的软岩层或淤泥质土体边坡问题上显得至关重要。岩石、土体属于典型粘弹性材料,在受到恒重应力条件下会发生随时间延长而逐渐发展的细小形变,称为蠕变,而地下水正是导致该情况发生的重要原因之一,水作为润滑

剂可大大降低各颗粒之间的相互摩擦力,同时长期应力作用会促使岩土骨架发生变化重新排序组合,从而使整个边坡呈现出持续的移动直至加速失稳的趋势<sup>[6]</sup>。

而良好的地表排水措施,则在很大程度上切断了地表雨雪径流渗入滑坡的通道,使滑坡内部保持干燥,从而减少了滑坡发生滑动的可能性。另外,对于某些滑坡来说,其地下水补给水源主要来自大气降水,在降雨量大的年份,地下水补给充沛,往往会导致滑坡变形加剧,甚至出现滑动破坏;而在干旱少雨的年份,地下水缺乏补给,滑坡变形较轻,有时甚至是稳定的。如果能够采取有效的地表排水措施,阻断地表雨水向滑坡体内渗透,就相当于削弱了滑坡体地下水的主要补给源,使地下水位持续下降,也就相应降低了滑坡发生的概率。因此,地表排水系统对于削减滑坡失稳变形具有重要的作用。

## 4 结束语

地下排水体系对边坡的整体稳定起到了良好的加固作用。它通过降低地下水位,改善水流状态,增强土壤结构,以及控制变形来达到整体加固的效果。各种地下排水设施的布置均有自身的特点,在实际的应用当中根据地形进行相应的搭配使用,可以很大程度上提高地质工程抵御不良环境的能力。随着科学技术的发展,新型材料的应用,以及新型检测仪器的研发,地下排水的设计可以更准确、更高效,继续探究地下水排水深层的作用机制,完善相关工程技术的应用,必定会为地质灾害防护带来更加有力的支持,促进地质工程的安全治理发展到一个新的高度。

## 参考文献:

- [1] 孙明星. 岩土工程设计中地下水对边坡稳定性的影响研究[J]. 门窗, 2024(14):112-114.
- [2] 陈泽虎, 陈先岳, 王越, 等. 岩土工程中地下水位对边坡稳定性的影响分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(03):198-201.
- [3] 朱学亮, 邵帅, 党康宁, 等. 考虑初始结构性的三维黄土边坡地震稳定性分析[J]. 工程力学, 2025(42):1-12.
- [4] 王东亮, 刘静. 研究岩土工程边坡稳定性影响因素及防护措施[J]. 读报参考, 2025(08):175-176.
- [5] 刘兴起. 地下水位变化对岩土工程边坡稳定性的影响分析[J]. 建筑与施工, 2024(20):34-35.
- [6] 罗廷勇. 建筑基坑岩土工程边坡稳定性评价方法创新设计与应用[J]. 城市建设, 2025(11):72-74.

# 集散系统在电厂汽机锅炉中的应用

刘杏杏

(山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要** 电厂汽机锅炉运行的稳定、安全与经济直接关系到电力供应的可靠性。传统控制方式调节精度不高, 操作难度较大, 故障排查烦琐, 难以适配现代电厂大容量、高参数机组需求。集散系统融合计算机技术、自动化控制技术与通信技术, 集中管理与分散控制的结合是其核心优势, 现已逐步替代传统控制模式, 支撑电厂汽机锅炉的运行控制。研究表明, 集散系统依靠分层分布式架构, 把控制功能分散到各现场控制单元, 可实现中央集中监控管理, 精准采集运行参数, 实时完成调节、预警与保护操作。

**关键词** 集散系统; 电厂汽机锅炉; 锅炉燃烧; 锅炉给水; 过热蒸汽温度

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.021

## 0 引言

电力行业是国民经济的基础产业, 生产效率与运行安全直接影响工业生产与民生保障。我国电力工业稳步发展, 大容量、高参数火电机组应用渐广, 对汽机锅炉控制的自动化、精度与可靠性要求更高。汽机与锅炉是电厂发电核心设备, 运行状态相互关联影响, 汽机将蒸汽热能转化为机械能带动发电, 锅炉承担燃料燃烧、蒸汽产生任务, 两者协同稳定是高效发电的前提。

## 1 集散系统的工作原理

### 1.1 数据采集环节

现场检测设备包含各类传感器、变送器, 会实时捕捉汽机锅炉运行时的各类参数, 温度、压力、流量、液位及设备运行状态均在其中, 随后将这些物理参数转换成标准电信号, 如 4 ~ 20 mA 模拟信号、开关量信号都属于这类信号, 再通过 I/O 卡件传递给控制站<sup>[1]</sup>。控制站会对采集到的信号做滤波、放大、转换等处理, 剔除干扰信号, 保障数据的准确与可靠, 将处理好的数据发送至通信网络, 供操作站、工程师站查看使用。

### 1.2 逻辑处理环节

控制站依据工程师站下装的控制逻辑与参数设置, 对收集到的运行参数展开分析判断, 执行对应的控制算法, PID 控制算法是常用种类, 进而计算出适配的控制指令。控制逻辑的设计是集散系统应用的核心, 需结合汽机锅炉的运行工艺与控制需求, 搭建复杂的连锁保护逻辑与调节逻辑, 保障机组正常工况下稳定运行, 异常工况下及时启动保护动作。

### 1.3 控制输出环节

控制站将计算出的控制指令, 通过 AO 卡件、DO 卡件传递给现场执行设备, 调节阀、变频器、开关阀均属于这类设备, 驱动这些设备完成对应动作, 实现对汽机锅炉运行参数的调节与控制, 保障各项参数维持在合理范围。

### 1.4 集中监控环节

操作站通过通信网络实时接收控制站传输的运行数据, 将其以数字、曲线、图形等形式直观呈现在监控界面, 操作人员可通过操作站掌握汽机锅炉运行状态, 查看参数变化趋势与报警信息, 必要时可手动干预调整。工程师站也能通过通信网络监控系统运行, 完成系统维护、调试与故障排查工作。

## 2 电厂汽机锅炉的运行特点

汽机锅炉运行的复杂性, 源于自身结构的复杂与运行工艺的烦琐, 涉及燃料燃烧、热量传递、能量转化等多个物理化学过程, 受多种因素影响, 这些因素的细微变动会造成参数波动, 加大控制难度。运行的连续性是电厂生产的核心要求, 汽机锅炉启动后需长时间连续运转, 尽量减少停机, 否则会造成不小经济损失。控制系统需具备较高可靠性与稳定性, 避免故障引发停机, 且汽机锅炉启停烦琐、耗时长, 对控制精度要求更高。

运行的关联性体现在汽机与锅炉运行状态的相互影响、相互制约, 锅炉产生的蒸汽参数决定汽机运行状态, 汽机负荷变化也会反向影响锅炉燃烧调整与蒸汽供

作者简介: 刘杏杏 (1999-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 能源与动力工程。

应，两者运行需相互匹配。运行的敏感性表现为汽机锅炉运行参数对外部干扰反应明显，微小波动就可能影响机组安全与效率，控制系统需具备较高调节精度与快速响应能力，及时抑制参数波动，保障机组稳定运行。

### 3 集散系统在电厂汽机中的具体应用

#### 3.1 汽机启动与停止控制中的应用

汽机启动与停止的动态过程，复杂程度较高，控制精度的把控、操作规范的执行，直接关联汽机部件的完好程度，也决定运行过程的安全等级。启动阶段的核心，是转速、温度、压力等关键参数的逐步提升，停止阶段则是各类参数的缓慢回落，两者都必须遵循循序渐进的原则，不能出现任何突变，否则容易造成汽机部件的损坏，增加设备的损耗成本。工程师借助工程师站，结合汽机自身的型号规格、参数标准以及现场实际运行工艺，编写适配性强的启动与停止控制逻辑，明确各运行阶段的参数设定值、升温升压的合理速率，细化所有关键内容后，将控制逻辑下装至控制站，确保每一条控制指令都能准确传输、有效执行<sup>[2]</sup>。

操作人员在操作站发出启动指令后，控制站便按照预设控制逻辑，自动调控调速汽门、抽汽阀等相关设备的动作，缓慢提升汽机转速，同时实时捕捉缸体温度、轴向位移、振动等关键参数，根据参数细微变化灵活调整控制指令，保障转速提升平稳有序。整个启动过程中，集散系统持续处于实时监控状态，参数一旦偏离预设范围，会立即发出报警信号，自动调整控制策略，提前防范设备损坏。停止过程的控制逻辑与启动阶段大致相近，但控制侧重点不同，控制站按预设程序，自动控制各类设备逐步降低转速，直至汽机平稳停机，同步完成辅助设备的停运操作，保障停机过程规范且安全。

#### 3.2 汽机转速与负荷控制中的应用

汽机运行控制的核心是转速控制与负荷控制，控制效果直接决定电厂发电的整体质量和发电效率。转速稳定是电能频率合格的核心保障，转速若出现较大波动，电能频率就会偏离标准范围，影响各类用电设备的正常运行；负荷调节的合理性，不仅关系电厂自身的发电效率，还会对电网运行的稳定性造成直接影响，调节不当极易引发电网波动。集散系统应用于转速与负荷控制后，引入PID控制算法，通过算法的精准运算，实现转速与负荷的精准调节，汽机运行的稳定性与经济性大幅提升，不必要的能耗损失被有效降低。控制站承担参数采集与指令执行的核心任务，实时捕捉汽机转速、负荷、主蒸汽压力等关键参数，将

实际转速与额定转速精准比对，算出两者偏差后，通过PID算法运算出合适的控制指令，传输至调速汽门，通过调整汽门开度，使转速恢复至额定标准。电网负荷变化时，调度中心发出调整指令，操作人员在操作站接收指令后，设置新的负荷设定值，控制站立即捕捉设定值变化，比对实际负荷与新设定值的偏差，灵活调整调速汽门开度与抽汽阀动作，实现负荷精准调节。

#### 3.3 汽机参数监测与连锁保护中的应用

温度、压力、位移、振动等各类关键参数的稳定，是汽机安全运行的核心前提，任何一项参数出现异常，若发现不及时、处理不到位，都有可能造成汽机部件损坏，严重时还会引发重大安全事故，带来巨大的经济损失与安全隐患。集散系统的应用，可以解决传统监测与保护模式的弊端，实现各类参数的实时监测、故障提前预警与自动保护，大幅提升汽机运行安全性，降低安全事故发生率。控制站通过现场各类检测设备，实时捕捉汽机运行中的各类参数，汽机缸体温度、主蒸汽温度与压力、凝结水参数、轴向与径向位移、振动、润滑油温与油压等，均在实时监测范围之内。采集到的参数，会实时传输至操作站，以数字、曲线等直观形式显示，操作人员能实时查看参数变化，及时掌握汽机运行状态，发现异常可快速干预<sup>[3]</sup>。

集散系统会提前预设各类参数的报警阈值与保护阈值，阈值设定结合汽机运行标准与实际工况，保证合理性与科学性。参数超过报警阈值时，操作站会发出声音与灯光双重报警，记录报警时间、参数与类型，为故障排查提供参考；超过保护阈值时，控制站无需人工干预，立即执行连锁保护动作，快速切断故障源头，最大限度降低损失。系统还具备参数趋势分析功能，能实时记录参数变化趋势，形成完整的趋势曲线，工程师通过分析曲线，可掌握参数变化规律，预判潜在故障隐患，提前采取处理措施，实现预防性维护，减少故障发生率，延长汽机使用寿命。

### 4 集散系统在电厂锅炉中的具体应用

#### 4.1 锅炉燃烧控制中的应用

燃烧控制作为锅炉运行控制的核心，其效果直接影响锅炉燃烧效率、蒸汽参数稳定性与环保排放指标，对锅炉运行的经济性、安全性与环保性，都有着不可忽视的影响。锅炉燃烧控制的核心目标，是让燃料充分燃烧、减少浪费，合理调节风煤比，使炉膛温度、烟气含氧量等关键参数稳定在预设范围内，减少污染物排放、兼顾环保要求，保证蒸汽产量与参数能满足汽机运行需求，实现两者协同运行。

集散系统应用后,实现燃烧过程的全自动化控制,通过精准调节风煤比,提升燃烧效率,减少燃料浪费与污染物排放。控制站实时捕捉炉膛温度、烟气含氧量、燃料供应量、送风量、引风量等与燃烧相关的参数,结合燃料品质与汽机负荷需求,通过内置算法自动算出合适的风煤比,再控制给煤机、送风机等设备动作,精准调节燃料供应量与送风量,保证燃料充分燃烧。系统采用双闭环控制策略,内环控制烟气含氧量,外环控制炉膛温度,内环通过调节送风量,将烟气含氧量控制在 3%~5% 的合理范围,保证燃料充分燃烧;外环通过调节燃料供应量,稳定炉膛温度,保证蒸汽参数合格。

#### 4.2 锅炉给水与汽包水位控制中的应用

给水控制与汽包水位控制,是锅炉运行控制中最关键的环节之一,控制效果直接影响锅炉安全运行与蒸汽参数稳定,也关系锅炉使用寿命与运行经济性。汽包水位过高会导致蒸汽带水,影响蒸汽品质、汽机运行效率与部件完好,严重时会导致锅炉满水跳闸、中断发电;水位过低则会造成锅炉缺水,损坏汽包与水冷壁等关键部件,严重时会导致锅炉爆炸事故。集散系统应用后,引入三冲量控制策略,以汽包水位、给水流量、蒸汽流量三个关键参数为核心,实现汽包水位的精准控制,大幅提升锅炉运行安全性,减少水位异常带来的隐患。控制站实时捕捉这三个关键参数,将实际汽包水位与预设水位精准比对,算出水位偏差,结合给水流量与蒸汽流量的偏差,通过 PID 算法算出合适的控制指令,传输至给水调节阀,通过调整阀门开度,精准调节给水流量,将水位稳定在合理区间<sup>[4]</sup>。

三冲量控制策略的优势在于能有效补偿蒸汽流量变化对水位的影响,避免蒸汽流量突变导致水位大幅波动:蒸汽流量突然增加时,水位会暂时下降,控制站提前增加给水流量,防止锅炉缺水;蒸汽流量突然减少时,水位会暂时上升,控制站提前减少给水流量,防止锅炉满水。控制站实时监测给水压力、温度等参数,根据变化调整控制指令,保证给水系统稳定运行;运行给水泵出现故障、给水参数下降时,系统及时报警,自动启动备用给水泵,保证给水连续,避免给水中断导致锅炉缺水跳闸,记录给水系统运行参数与故障信息,为故障排查与维护提供数据支撑。

一般情况下,集散系统采用的编程语言倾向于面向功能模块的汇编语言,编程语句通常由操作码和操作数组成。操作码主要是与、或、非等逻辑运算符,或者是加减等数字运算符;操作数涉及相应模块寄存器内的数据存储器地址。针对电厂汽机锅炉系统的特

点,程序结构主要分为初始化区、慢循环区和快循环区,初始化区负责存储模块功能实现运行过程中常用的参数以及固定参数;慢循环区处理普通数据监测及比对;快循环区处理高优先度的数据或信号处理。

#### 4.3 锅炉过热蒸汽温度控制中的应用

过热蒸汽温度是锅炉运行的重要参数,温度过高会导致汽机高压缸部件过热损坏,缩短设备使用寿命,增加维修成本,影响运行安全;温度过低则会降低蒸汽焓值,影响发电效率,增加能源消耗,还会加剧汽轮机末级叶片磨损,增加故障发生率。集散系统可实现过热蒸汽温度的精准调节,将温度稳定在预设范围内,提升机组运行效率与安全性。温度控制的核心是通过调节喷水减温器的喷水量改变过热蒸汽温度,控制站实时捕捉过热蒸汽温度、喷水流量等参数,比对实际温度与预设温度,算出偏差后,通过 PID 算法算出控制指令,传输至喷水调节阀,调整喷水量,让温度快速恢复至预设范围。为提升控制精度,系统采用分段控制策略,结合过热器结构,将其分为低温段、中温段与高温段,每段设置独立喷水减温器,控制站分别监测、调节每段温度,灵活调整喷水量,保证过热器出口蒸汽温度均匀稳定<sup>[5]</sup>。

## 5 结束语

我国电力工业的发展持续加快,大容量、高参数火电机组的应用范围也不断拓展,对汽机锅炉运行控制的自动化水平、运行可靠性以及运行经济性都提出了更高的要求。集散系统属于现代工业自动化控制领域的核心技术,集中管理与分散控制的有机结合是其核心优势,在电厂汽机锅炉运行中的应用十分广泛,能有效解决传统控制模式的诸多弊端,大幅提升汽机锅炉的运行稳定性、控制精度和发电效率,基本能契合电力工业发展带来的各类控制需求。

### 参考文献:

- [1] 谢又成,周育才,任萍,等.集散控制系统实验室的建设[J].实验室研究与探索,2007(05):119-121.
- [2] 舒采军,苏伟宪.GKS-9000分散控制系统在中小型火力发电厂中的应用[J].广东电力,2005(11):61-64.
- [3] 马骏,牛原渊.基于数字技术的火电厂锅炉节能降耗[J].数字技术与应用,2025,43(03):117-119.
- [4] 徐江.智能控制系统在电厂热工自动化中的应用[J].信息与电脑,2025,37(15):25-27.
- [5] 何宇峰.多目标优化在发电厂锅炉燃烧控制系统中的应用研究[J].电力设备管理,2025(23):119-121.

# 工业热电偶测温计量误差的成因与校准对策

王小栋, 刘志杰, 张海鹏

(山东寿光检测集团有限公司, 山东 寿光 262700)

**摘要** 热电偶作为工业生产中温度测量的核心传感器, 其计量准确性直接决定工艺控制精度、产品质量稳定性及生产安全水平。在复杂工况下, 热电偶测温容易受到多种因素的影响而产生计量误差, 严重时脱离工艺允许的范围, 造成生产隐患。本文分析了工业热电偶测温计量误差得分类及产生误差的主要原因, 从技术、管理两个方面提出相应的防控措施, 从实际应用环节证明这些对策的可行性和有效性, 以期为提高工业场景下的热电偶测温精度提供技术参考, 进而促进精准、稳定的测温计量体系的建立。

**关键词** 工业热电偶; 测温计量; 误差成因; 精度校准

中图分类号: TK3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.022

## 0 引言

在石油化工、冶金锻造、电力能源等现代工业领域, 温度参数的精确测量可以实现生产过程闭环控制、提高节能降耗水平、保证产品质量。热电偶由于结构简单、测温范围广、响应速度快、适应恶劣环境等特点, 在工业测温场景中使用最为广泛。其工作原理是利用热电效应, 通过对热电极两端的热电势差进行测量来实现对被测介质温度的换算, 在实际的应用过程中, 由于热电偶自身的性能、安装位置、环境干扰、操作规范等因素的影响, 不可避免地会存在计量误差。随着工业生产向着高精尖、智能化方向发展, 对温度测量的精度要求越来越高, 误差控制成为工业测温领域的重要课题。明确误差种类及原因, 创建一套行之有效的防控对策系统, 对于减小误差的影响、提高计量的可靠性具有重大的实践意义。

## 1 工业热电偶测温计量误差的主要类型

### 1.1 系统误差

系统误差是由于测量系统本身固有的缺陷或者固定的、不变的影响因素所引起的误差, 它的数值大小和方向都是确定的, 并且有一定的规律性。可以通过技术手段修正或补偿。工业热电偶测温中系统误差主要是由热电偶分度特性偏差、冷端补偿机制失灵、测量仪表精度不够、补偿导线和热电偶型号不匹配等引起的误差, 此类误差不会因测量次数增加而减小, 如果不提前进行校准修正, 将会一直影响测量结果的准确性, 使整个测温体系出现系统性偏差, 不能用统计

的方法来消除, 只能通过改进测量系统、完善补偿机制等方式加以控制<sup>[1]</sup>。

### 1.2 随机误差

随机误差是由于测量过程中不能预知的偶然因素而产生的误差, 它的数值大小和方向, 无固定的规律性, 具有随机波动的特点, 符合统计分布规律, 可以通过多次测量、用统计方法减弱影响。在工业场景下, 环境温度微小的变化、被测介质流动状态的改变、电磁信号瞬间的干扰、接线端子的接触电阻变化等都会造成热电偶测温产生随机误差。此种误差在单次出现的时没有规律性, 但是多次测量之后则会呈正态分布, 总体均值趋于零, 可以采用改善测量环境、提高信号的抗干扰能力、用多次测量取平均值等方法来减小它的影响。

### 1.3 粗大误差

粗大误差又叫异常误差, 是由于测量过程中突然发生故障、操作失误或者异常工况所引起的超出正常误差范围的极大误差, 它的数值明显偏离真实的量值, 属于不合理的误差, 需要被剔除。工业热电偶测温中出现的粗大误差大多是由热电偶丝断了、保护管破了、接线极性接错了、仪表故障跳变、操作时测温点选错了等原因造成的, 这类误差和正常的测量误差差别很大, 会严重影响到测量的结果, 如果不能及时发现并剔除掉, 则会对工艺判断以及生产决策产生误导。粗大误差可以经过建立异常监测系统、规范操作流程、定期对设备进行检查等方式加以控制或者防止<sup>[2]</sup>。

作者简介: 王小栋 (1994), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 质量工程。

## 2 工业热电偶测温计量误差的成因分析

### 2.1 热电极材料特性变异

热电极是热电偶的主要部分，它的材料均匀性、化学稳定性决定了热电势转换的准确性，材料特性变异是产生误差的根本内在原因。热电偶热电极要具有稳定的好热电性，在高温、腐蚀、氧化等恶劣的工业环境下，热电很容易发生成分和结构的变化，比如铂铑热电偶的铑元素挥发、镍铬热电偶的择优氧化，使热电势与温度的对应关系偏离分度表的标准。同时热电极生产过程中成分偏析、晶粒长大不均匀、使用过程中应力积累、机械磨损都会产生不均匀的电势，叠加到总的热电势上就形成附加误差，而且这种误差随着使用时间的增长而不断累积，从而影响测温的准确性<sup>[3]</sup>。

### 2.2 冷端补偿系统失效

热电偶热电势的测量是以冷端温度保持在 0℃ 为前提条件，但是在实际的工业场合下冷端经常处于外界环境之中，温度变化很大，需要通过补偿系统来修正误差，补偿系统失灵属于引起系统误差的主要外部因素之一。补偿导线型号不对、正负极接反会造成补偿信号失真，既不能抵消冷端温度变化的影响，反而会放大误差；电子冷端补偿模块精度不够、环境温度超过其工作范围，都会使补偿值偏离实际值，如 K 型热电偶每 1℃ 冷端温度波动则会引起约 2.5℃ 的温度误差；补偿导线和热电偶连接处温度不一致、接头氧化生锈增大接触电阻，也会加大冷端补偿偏差，造成最终测温结果出现偏差。

### 2.3 安装与换热工况不当

安装方式和换热工况会影响热电偶同被测介质的热交换效率，造成测温端温度与介质真实温度产生偏差，这是工业场景里常见的误差来源。插入深度不够属于典型的故障，当金属保护管热电偶插入深度小于保护管直径的 15 倍到 20 倍、陶瓷保护管小于 10 到 15 倍时，测温端受到管壁温度和环境温度的影响，不能有效地接触被测介质的核心部分，造成示值滞后及偏差。同时测温点选取不当，例如靠近加热元件、炉门或者介质流动死角，会使测量结果不能真实地反映出整个介质的温度；安装角度不正确、保护管表面积灰结垢，会阻碍热传递，增大热阻，使测温响应变慢，在高温工况下还会因热辐射换热加剧而产生误差。

### 2.4 环境与系统干扰影响

工业环境中复杂的因素很容易给热电偶测温系统带来各种各样的干扰，使信号的传递、转换存在附加误差，从而影响测量的结果。强电磁干扰为最主要的

干扰源，工业现场的变频器、大功率电机、变压器等设备会发出较强的电磁场，影响热电偶回路中热电势信号的传递，使仪表读数出现跳跃、失真。另外潮湿的环境会减小热电偶绝缘电阻，在绝缘层老化或者破损的情况下会引起回路短路或者漏电，造成热电势损耗；高温条件下保护管腐蚀、破损，使热电极直接暴露在腐蚀介质中，加快材料特性的变化；环境温度梯度大时，会产生附加的热电势，扩大误差范围。

## 3 工业热电偶测温计量误差的防控对策

### 3.1 热电极全生命周期管控

对热电极材料特性变化造成的误差，要建立全生命周期管控体系，在选型、使用、维护等各个环节保证热电极热电特性稳定。选型阶段要根据工况参数来选择合适的电极材料，高温腐蚀性工况采用铂铑合金等贵金属电极，配以耐腐蚀保护管，常温工况用镍铬—镍硅热电偶，保证精度和降低成本。使用时要注意热电极的工作温度在规定的范围内，不能超过额定值而造成材料挥发、晶粒变粗，定期对热电极进行退火处理，消除应力积累，改善组织结构的均匀性，减小不均匀电势的影响。同时建立热电极使用台账，记录安装时间、工况参数、维护情况，为以后校准和更换提供依据<sup>[4]</sup>。

### 3.2 智能冷端补偿技术优化

改善冷端补偿系统来减少系统误差的一种主要方法，即根据工作需要选择合适的方式，提高补偿的精度和稳定性。低温常温工况用专用补偿导线，严格保证补偿导线的分度号、温度范围与热电偶相匹配，使补偿导线和热电偶连接处的温度保持一致，温差不超过 5℃，防止靠近热源或者冷源。高精度测温场合使用电子冷端补偿模块，再配合 Pt100 温度传感器实时测量环境温度，用微处理器自动计算补偿值，对热电势信号进行补偿，提高补偿精度到  $\pm 0.1$ ℃。另外，建立补偿系统定期校准制度，及时发现并纠正补偿导线接反、接头氧化、模块故障等现象，保证补偿系统的正常工作。

以石油化工常减压装置测温为例，该场景冷端区域受装置散热、环境气流影响，温度波动范围可达 15~40℃，传统的补偿方法不能达到  $\pm 0.5$ ℃ 的测量精度。为此用带有智能补偿模块的数显仪表代替传统的补偿方式，该模块内有进口 Pt100 传感器，每 0.1 s 采集一次冷端温度数据，利用嵌入式的算法快速匹配 K 型热电偶分度表，自动完成热电势修正和温度转换。同时用液压压接工艺处理补偿导线接头，涂抹导电膏降低接触电阻到 5 mΩ 以下，外层包裹耐高温保温棉和

防水缠带,保证接头温度稳定、不被潮湿氧化。经过实际运行检验,与传统的补偿方法相比,冷端补偿误差变小了,测温示值的稳定性明显提高了,有效地解决了由于环境温度变化造成测温不准的问题,给常减压装置分馏效率的提高提供准确的温度数据支持。

### 3.3 安装结构与换热工况改进

通过规范安装流程、优化换热结构来减小安装和换热工况不当时产生的误差,保证测温端同被测介质充分高效地进行热量交换。安装时严格按照插入深度的标准,金属保护管热电偶插入深度不小于保护管直径的15倍,陶瓷保护管不小于10倍,保证测温端处在介质的核心流动区域,远离管壁、炉门和加热元件。高温工况下在热电偶保护管外面加上金属遮热罩,表面抛光处理来降低发射率,减小与环境的辐射换热,通过对流换热系数修正辐射误差,提高高温测温精度。定时清除保护管表面的结垢、积灰,防止热阻增大引起响应迟滞。

例如:在电力锅炉烟道测温场景中,原有热电偶插入深度仅80 mm,保护管直径10 mm,未达到标准插入深度要求,且无遮热措施,造成测温误差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,示值滞后时间为30 s,不能准确地反映出烟道内实际的温度。为此对安装结构进行优化,把热电偶的插入深度调到150 mm,完全符合保护管直径是热电偶直径的15倍的要求,保证测温端深入到烟道介质的核心部位。另外在保护管上加装弧形不锈钢遮热罩,遮热罩和保护管的距离控制在50 mm左右,构成空气隔热层,隔绝烟道外壁的辐射及环境温度的影响。经过改造之后,用标准热电偶和实际温度传感器进行对比试验可知,烟道介质温度测量误差由原来的 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到现在的 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,示值滞后时间也缩短到10秒以内,提高了测温精度,并且给锅炉燃烧调整、能耗优化提供实时准确的温度数据。

### 3.4 多维度干扰抑制体系构建

针对环境与系统干扰,构建电磁、绝缘、环境多维度干扰抑制体系,保障热电势信号传输与转换稳定。电磁干扰抑制采用热电偶信号电缆穿金属屏蔽管敷设的方式,屏蔽管一端接地,接地电阻不大于 $4\text{ }\Omega$ ,远离动力电缆和变频器、电机等强电磁源,电缆长度不超过100 m,超过100 m的段落加装信号放大模块,保证信号不衰减、无干扰。绝缘防护,每个月用兆欧表测热电偶的绝缘电阻,常温时保证绝缘电阻不小于 $100\text{ M}\Omega$ ,高温时不小于 $10\text{ M}\Omega$ ,潮湿环境使用密封式接线盒,防止绝缘层受潮老化。同时改善环境条件,防止测温

区域温度梯度太大,减小附加热电势的产生<sup>[5]</sup>。

以化工反应釜测温为例,该场景反应釜搅拌电机、加热装置产生强电磁干扰,且釜体周边湿度较高,造成热电偶测温信号经常变化,误差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,严重影响了反应工艺的控制。经过建立多维干扰抑制体系的优化之后,对原来的热电偶信号电缆进行更换,用双屏蔽聚四氟乙烯护套电缆代替它,在反应釜侧壁上穿 $\phi 20\text{ mm}$ 镀锌金属管,与搅拌机电缆保持2 m距离,金属管在釜体接地端处只接一点地线。接线盒用IP67防水密封型,内部装有工业级防潮硅胶,每半个月拆机检查硅胶并更换。同时在信号输入端加装高频电磁滤波模块,对50 kHz以上的高频干扰信号进行过滤,保证热电势信号纯净地传递出去。经过实际使用证明,干扰引起的数值跳变现象完全消失,有效地保证了反应釜内化学反应的精确温度控制,提高了产品的合格率和工艺稳定性。

## 4 结束语

工业热电偶测温计量误差的产生是材料、补偿、安装、干扰等多因素综合作用的结果,误差防控需立足全流程、多维度构建系统性解决方案。依靠对热电极整个生命周期的控制来保证材料特性稳定,采用智能冷端补偿技术来减小系统的误差,改善安装结构以提高换热效率,从多个角度上抑制外界干扰,可以有效地把测温误差控制在工艺允许范围内,提高计量的可靠性。随着工业智能化的发展,未来要进一步地融合边缘计算、物联网等技术来达到实现误差实时检测、智能修正和预测性维护的目的,从而形成一个以精准感知为基础、以智能预警为途径、以自主优化为核心特征的测温计量体系,为高端工业生产提供更加坚固的温度计量支撑,并促进工艺革新与产品质量提升。

## 参考文献:

- [1] 蔡诚.新型耐磨防护PVD测温涂层设计与应用[D].广州:广东工业大学,2024.
- [2] 刘智慧.热电偶合金成分解析及溅射薄膜生长表面温度测量研究[D].大连:大连交通大学,2023.
- [3] 鄂明锋.基于新型引线连接技术的薄膜热电偶表面温度传感器研究[D].大连:大连交通大学,2023.
- [4] 杜冠廷.热电偶测量表面温升的误差和优化研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [5] 冀晓明.基于热电能采集的无线传感测温系统研究[D].保定:华北电力大学,2020.

# 基于膜分离技术的化工废水资源化利用研究

张 敏

(山东大斯夫材料科技有限公司, 山东 德州 253000)

**摘 要** 针对染料中间体含盐废水高盐、高毒、难降解且传统处理技术难以兼顾高效脱盐与有机物矿化的问题, 本文提出电渗析耦合三维电极 (ED-3DE) 膜分离技术。通过构建“脱盐—降解”自增强协同机制、优化关键运行参数 (电流密度、粒子电极投加量、pH、流速)、集成智能监测与控制, 并开展中试工程验证。结果表明: 该技术在无需调节原水 pH (1.2) 条件下, COD 去除率达 92.3%, H- 酸降解率超 98.5%, 盐回收率超 95%, 回收 NaCl 纯度达 98.5%, 吨水能耗仅 3.2 kW·h, 实现了污染物深度削减与盐资源高值循环的协同目标, 为染料中间体行业废水资源化提供了高效、低碳的技术路径。

**关键词** 膜分离技术; 电渗析; 染料中间体; 含盐废水; 资源化利用

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.023

## 0 引言

染料中间体生产过程中广泛使用无机酸与盐类, 所产生的废水具有高盐 (5%~20%)、强酸性 (pH 0.5~2.0)、高 COD (15 000~160 000 mg/L) 及富含萘系化合物和芳香胺等难降解、高毒性有机物的典型特征<sup>[1]</sup>, 若未经有效处理直接排放, 极易引发土壤盐渍化与地下水污染, 严重威胁生态环境与公共健康; 当前主流处理技术如物理化学法能耗高且资源回收率低, 生物法受高盐抑制效率不足 60%<sup>[2]</sup>, 而传统膜分离技术虽可脱盐却难以降解有机污染物, 整体难以兼顾高效处理与资源化目标<sup>[3]</sup>。

为突破上述瓶颈, 电渗析 (ED) 与三维电极 (3DE) 耦合形成的 ED-3DE 技术应运而生: 前者依托离子交换膜与电场驱动实现高效脱盐与盐分回收, 后者通过填充粒子电极构建微电解体系, 原位生成 OH、Cl 等强氧化性物质以深度矿化有机污染物<sup>[4]</sup>, 二者协同不仅缓解了电渗析中的浓度极化、降低能耗 30% 以上, 还借助迁移的 Cl<sup>-</sup> 强化高级氧化, 形成“脱盐—降解”自增强循环<sup>[5]</sup>, 从而同步实现污染物削减与资源回用, 契合“减污降碳、循环利用”的绿色发展理念。

在此基础上, 融合信息技术进一步提升了系统运行效能, 通过多源传感器实时监测水质、膜状态与能耗, 结合机器学习建模与数字孪生仿真, 实现工艺参数动态优化与远程智能调控, 有效应对膜污染、电极失活及进水波动等工程挑战, 为 ED-3DE 技术的稳定、高效与规模化应用提供坚实的支撑。

作者简介: 张敏 (1984-), 女, 本科, 研究方向: 化学工程与工艺。

## 1 ED-3DE 膜分离技术的核心原理与系统构建

### 1.1 技术原理: 电渗析脱盐与三维电极催化降解的耦合机制

ED-3DE 技术基于电渗析 (ED) 与三维电极 (3DE) 的协同作用: 在直流电场驱动下, 废水中的 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 等阳离子和 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等阴离子分别通过高选择性全氟磺酸型阳膜 (CEM) 与季铵型阴膜 (AEM) 定向迁移至浓缩室, 实现稀释室高效脱盐; 与此同时, 填充于稀释室的 Fe-N 掺杂生物炭粒子电极在电场极化下形成大量微电解单元, 其表面阳极区生成 OH、Cl 等强氧化性自由基, 阴极区原位产生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 共同攻击芳香环与磺酸基等难降解结构, 将 H- 酸、乙烯砜等有机物逐步矿化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O。该过程不仅通过离子迁移维持体系导电性、缓解浓度极化、降低槽电压 30% 以上, 还利用迁移的 Cl<sup>-</sup> 转化为活性氯强化氧化, 构建起“脱盐促进降解、降解反哺脱盐”的自增强循环<sup>[6]</sup>。

### 1.2 系统构建: 模块化反应器与关键组件集成

ED-3DE 系统采用 50 L 板框式反应器, 内置 10 对 CMX/AMX 离子交换膜 (单膜面积 0.05 m<sup>2</sup>, 厚度 0.15 mm, 离子迁移数 > 0.95), 阳极为 Ti/RuO<sub>2</sub> 涂层电极, 阴极为不锈钢电极, 稀释室填充 8 cm 高的 Fe-N 掺杂稻壳生物炭粒子 (粒径 2~5 mm, 比表面积 1 200 m<sup>2</sup>/g, 电导率 15 S/m); 配套高压泵 (0.5~5 m<sup>3</sup>/h)、可调直流电源 (0~50 V/50 A) 及 5 μm 精密过滤器。工艺流程为: 废水经格栅与精密过滤预处理后进入稀释

室，在电场作用下同步完成脱盐与有机物降解，产水达标回用，浓缩液则经蒸发结晶回收高纯 NaCl 与 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，实现污染物削减与资源化双重目标。

## 2 实验设计与数据分析

### 2.1 实验材料与检测方法

实验废水取自某染料中间体企业 H-酸生产车间，初始水质特征为：COD 18 500 mg/L、NaCl 185 g/L、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 12 g/L、pH 1.2、色度 5 000 倍，主要含 H-酸（1-氨基-8-羟基萘-3,6-二磺酸）及 T-酸等萘系难降解有机物；各项指标检测方法如下：COD 采用重铬酸钾滴定法（HJ 828-2017），盐浓度通过 DDS-307 型电导率仪测定，盐纯度由 ICS-600 离子色谱仪分析，有机污染物浓度使用 Agilent 1260 高效液相色谱（HPLC）定量，膜污染程度结合 ZEISS Sigma 300 扫描电镜（SEM）与 CHI 660E 电化学阻抗谱（EIS）表征，粒子电极催化活性则通过 Bruker A300 电子顺磁共振（EPR）检测自由基信号进行评估。

### 2.2 实验设计与参数优化

为确定 ED-3DE 系统处理该类废水的最佳运行条件，采用单因素实验法系统考察电流密度、粒子电极投加量、pH 值及废水流速对 COD 去除率、脱盐效率与单位能耗的影响，各因素设置五水平梯度，具体如下表 1 所示。

表 1 单因素实验因素水平表

水平	电流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	粒子电极投 加量 (g/L)	pH 值	废水流速 (m/h)
1	10	20	1.0	0.5
2	20	40	3.0	1.0
3	30	60	5.0	1.5
4	40	80	7.0	2.0
5	50	100	9.0	2.5

### 2.3 实验结果与数据分析

#### 2.3.1 电流密度的影响

随着电流密度由 10 mA/cm<sup>2</sup> 增至 30 mA/cm<sup>2</sup>，COD 与盐去除率分别从 68.2% 和 75.6% 显著提升至 92.3% 和 95.8%，归因于增强的离子迁移速率及粒子电极表面活性自由基（OH、Cl）生成效率；然而继续提高电流密度至 50 mA/cm<sup>2</sup> 虽未明显改善去除效果，却使能耗由 3.2 kW·h/m<sup>3</sup> 激增至 6.8 kW·h/m<sup>3</sup>，主要源于析氯、析氧等副反应加剧，故确定 30 mA/cm<sup>2</sup> 为最优电流密度。

#### 2.3.2 粒子电极投加量的影响

粒子电极投加量从 20 g/L 增至 60 g/L 时，COD 去除率由 72.5% 升至 92.3%，得益于更多催化位点与微电

解界面的形成，强化了有机物氧化降解；但投加量超过 60 g/L 后去除率趋于稳定，同时床层阻力增大导致系统压降与能耗上升，综合考虑处理效能与运行成本，60 g/L 为最佳投加量。

#### 2.3.3 pH 值的影响

在 pH 为 1.0~3.0 的强酸性条件下，COD 去除率稳定高于 90%，因低 pH 有利于 Cl<sup>-</sup> 活化生成 Cl 并抑制 OH 猝灭；而当 pH 升至 9.0 时，去除率骤降至 65.8%，系 OH<sup>-</sup> 与活性自由基发生猝灭反应所致；鉴于原水 pH 为 1.2 且无需额外调酸，直接采用原水条件即可实现高效降解。

#### 2.3.4 废水流速的影响

废水流速由 0.5 m/h 增至 1.5 m/h 时，COD 与盐去除率分别从 85.6% 和 90.2% 提升至 92.3% 和 95.8%，表明适度提高流速可强化传质、缩短浓差极化边界层；但流速超过 1.5 m/h 后处理效率不再显著提升，反而因停留时间缩短与泵功增加导致能耗上升，因此 1.5 m/h 为最优流速。

### 2.4 最优工艺条件下的处理效果

在电流密度 30 mA/cm<sup>2</sup>、粒子电极投加量 60 g/L、原水 pH=1.2 及废水流速 1.5 m/h 的最优条件下，ED-3DE 系统对高盐染料中间体废水实现高效协同处理：COD 从 18 500 mg/L 降至 1 425 mg/L（去除率 92.3%），H-酸由 3 200 mg/L 降至 48 mg/L（去除率 98.5%），色度削减 98.4%，出水水质满足《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）一级要求；同时 NaCl 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 去除率均达 95.0%，浓缩液中 NaCl 浓度提升至 250 g/L，经结晶回收的工业盐纯度达 98.5%，符合《工业盐》（GB/T 5462-2015）标准，可直接回用于生产，系统单位能耗仅为 3.2 kW·h/m<sup>3</sup>，充分体现了污染物深度削减与盐资源高值循环的双重优势。

为进一步验证系统对复杂水质的适配性，额外开展了进水 COD 波动实验：当废水 COD 在 15 000~22 000 mg/L 范围内波动时，通过智能控制系统动态调整电流密度（25~35 mA/cm<sup>2</sup>）与粒子电极投加量（50~70 g/L），COD 去除率始终稳定在 90% 以上，盐回收率维持 94%~96%，表明该技术具备较强的水质抗冲击能力。此外，对回收盐的应用验证显示，其用于染料中间体合成反应时，产品收率与纯度均与商业工业盐持平，未出现明显杂质累积影响，进一步证实了资源回收的实用性与可靠性。

针对工业运行中常见的膜污染问题，通过 SEM 与 EIS 表征发现，系统连续运行 30 天后，离子交换膜表面污染层厚度仅为 5~8 μm，膜电阻增长幅度低于

12%，远低于传统电渗析系统的 25%~30%。这得益于 Fe-N 掺杂粒子电极的微电解氧化作用，可原位降解膜表面吸附的有机污染物，同时水流扰动减少了无机盐

沉淀附着，显著延长了膜组件的清洗周期，从传统工艺的 7~10 天延长至 30 天以上，进一步降低了运营成本与劳动强度（见表 2）。

表 2 最优工艺条件下的处理效果

项目	COD (mg/L)	NaCl (g/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (g/L)	色度 (倍)	H-酸 (mg/L)	盐纯度 (%)	能耗 (kW·h/m <sup>3</sup> )
进水浓度	18 500	85	12	5 000	3 200	—	—
出水浓度	1 425	4.25	0.6	80	48	—	—
去除率 / 回收率	92.3%	95.0%	95.0%	98.4%	98.5%	98.5%	—
备注	符合《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 一级标准	浓缩液中 NaCl 浓度达 250 g/L	—	—	降解产物为小分子有机酸	符合《工业盐》(GB/T 5462-2015) 标准	3.2

### 3 实践应用案例

#### 3.1 项目背景与技术升级动因

某染料中间体企业日排 150 m<sup>3</sup> 高盐废水（水质与实验废水一致，含 COD 约 18 500 mg/L、NaCl 185 g/L、pH 1.2），原采用“蒸发结晶+高级氧化”工艺，存在盐回收率低（仅 70%）、COD 去除率不足 80% 及能耗高达 8 kWh/m<sup>3</sup> 等问题；为实现稳定达标与资源化目标，于 2024 年 3 月引入 ED-3DE 膜分离技术完成系统改造，投运至今运行稳定、效果显著。

#### 3.2 工程设计与系统配置

工程设计处理规模 150 m<sup>3</sup>/d，配置 6 台板框式 ED-3DE 反应器（5 用 1 备，单台有效容积 50 L），总膜面积 30 m<sup>2</sup>，采用 CMX/AMX 离子交换膜及 450 kg Fe-N 掺杂稻壳生物炭粒子电极；系统在电流密度 30 mA/cm<sup>2</sup>、流速 1.5 m/h、原水 pH=1.2 条件下运行，并集成格栅—精密过滤预处理、蒸发结晶及智能控制模块，实现全流程自动化与高效协同。

#### 3.3 运行成效与综合效益

连续 180 天运行数据显示，出水平均 COD 为 1 380 mg/L（去除率 92.5%），盐去除率达 95.2%，浓缩液 NaCl 浓度稳定于 240~260 g/L，色度降至 75 倍，H-酸浓度低于 50 mg/L，全面满足《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）一级排放标准；每日回收 98.5% 纯度 NaCl 约 11.6 t，全部回用于生产，年节省原料成本 460 万元，同时日回用处理水 45 m<sup>3</sup>，年节水 1.6 万 m<sup>3</sup>，水资源利用率提升 30%；系统吨水能耗 3.3 kW·h，较原工艺降低 58.75%，吨水运行成本降至 4.0 元（年总成本 180 万元），年节约运维支出 126 万元，兼具环境效益与经济优势。

### 4 结束语

本研究围绕染料中间体高盐废水的资源化难题，系统开发并验证了 ED-3DE 膜分离技术。理论与实验表明，Fe-N 掺杂生物炭粒子电极与电渗析的耦合不仅有效缓解浓度极化、降低能耗 30% 以上，还通过原位生成 OH、Cl 等活性物种实现难降解有机物的高效矿化，形成脱盐与降解互促的自增强循环。通过单因素实验确定最优工艺条件为：电流密度 30 mA/cm<sup>2</sup>、粒子电极投加量 60 g/L、原水 pH=1.2、流速 1.5 m/h。在此条件下，COD、H-酸和色度去除率分别达 92.3%、98.5% 和 98.4%，盐回收率超 95%，回收工业盐符合国家标准。150 m<sup>3</sup>/d 工程应用连续运行 180 天，出水稳定达标，年节水 1.6 万 m<sup>3</sup>、节支 126 万元，验证了该技术在处理效能、资源回用与经济可行性方面的综合优势，具备良好的产业化推广前景。

### 参考文献：

- [1] 张莉,樊文豪,高帆,等.膜分离技术在工业废水资源化利用中的研究进展[J].化工管理,2021(17):35-37.
- [2] 杨赛国.基于电化学中电场及电控膜分离技术处理含油废水的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [3] 赵惠娟,刘士清.化工行业水污染治理中膜分离技术效果分析[J].化工管理,2025(25):79-82.
- [4] 许洁.膜分离技术在化工废水回用中的应用[J].化工管理,2025(18):79-81.
- [5] 周胜,吴勇.膜分离技术在化工废水处理中的研究与应用[J].炼油与化工,2023,34(04):10-14.
- [6] 张嘉龙.基于膜分离技术的化工废水净化分析[J].山西化工,2025,45(04):294-296.

# 高精度测绘技术在城市规划中的应用与创新

赵瑞雄, 莫洪阳

(广西壮族自治区国土测绘院, 广西 南宁 530023)

**摘要** 随着城市化进程的持续推进, 高精度测绘技术已被确立为城市规划领域的重点支持方向。本文系统探讨了高精度测绘技术在城市规划中的应用路径与创新模式, 重点分析了三维数字城市模型的构建机制、地下管线管理的应用场景, 并深入研究了多源数据融合与人工智能辅助决策的创新方法。高精度测绘技术通过提升数据精准度与规划科学性, 有效推动城市规划向智能化、精细化方向发展, 为城市可持续发展提供了坚实的技术支撑与决策依据。

**关键词** 高精度测绘技术; 城市规划; 三维数字城市

中图分类号: TU984; P21

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.024

## 0 引言

城市规模的不断扩张和职能的日趋繁杂, 常规规划方法已无法适应精细化、科学化的管理要求。高精度测绘技术以其高分辨率、高精度及高效率的优势, 为城市规划创造了新的机遇。该技术通过采集海量空间数据, 全面介入规划流程, 有效促进城市空间布局的优化与智能化, 为城市高质量发展提供了关键支撑, 对助力城市高质量发展意义重大。

## 1 高精度测绘技术概述

随着物联网及大数据等技术的不断发展, 高精度测绘正向着实时化、智能化和动态化演变, 对数据的采集、分析和应用能力也越来越高, 在城市规划、灾害监测和自然资源管理中扮演着越来越重要的角色。高精度测绘技术综合了卫星遥感、全球导航卫星系统(GNSS)、激光雷达(LiDAR)和倾斜摄影测量等先进技术, 旨在获得高精度的地理空间信息。通过多源数据的协同采集及处理, 本技术能够实现地形地貌、地物特征亚米级乃至厘米级精确测绘, 打破传统测绘空间分辨率及测量精度的局限。从技术组成来看, 卫星遥感可以提供大面积和周期性空间观测数据; GNSS能够实现高精度的定位和时间同步; LiDAR通过激光脉冲渗透植被, 快速获得三维点云的数据; 倾斜摄影测量技术是通过从多个视角收集影像, 从而构建出高度精确的实景三维模型。这些技术交叉应用不仅显著提高了数据获取效率, 而且实现测绘成果由二维平面向多维空间的过渡, 从而为城市规划提供了更加丰富和精确的基础信息<sup>[1]</sup>。

## 2 高精度测绘技术在城市规划中的应用

### 2.1 三维数字城市模型构建

在初步的规划阶段使用高分辨率的卫星遥感技术, 能够以0.3米的分辨率捕获城市的宏观图像, 从而迅速解城市的总体布局和地形特征。同时, 运用无人机倾斜摄影技术, 搭载五镜头相机, 从垂直、前、后、左、右五个角度对规划区域进行拍摄, 获取精度达5~10厘米的影像数据, 全面采集地物的纹理和空间信息。另外, 采用地面激光扫描技术以车载和背包两种形式对城市街道和建筑物进行了近距离扫描以获得毫米级高精度点云数据并准确记录了建筑物表面凹凸和装饰细节。采用多源数据融合处理的方法, 利用专业三维建模软件实现了卫星遥感影像, 无人机倾斜摄影数据与地面激光扫描点云的数据融合, 构造了包括地形、建筑、道路、水系在内的全要素三维数字模型。模型既真实地还原城市现状又具有高可交互性与分析功能<sup>[2]</sup>。

规划团队在此模型的基础上进行了不同功能区的布局仿真分析。例如: 在商业中心区位选择规划中, 将周围交通流量, 人口分布及地形地貌等信息以模型的形式直观地展现出来, 并结合大数据分析技术对不同区位选择方案中人流量和车流量的变化规律进行仿真, 准确地评价最佳区位。最后选定的商业中心位置使得其可达性增加了30%, 同时周围的配套设施布局也变得更为合理, 从而有效推动城市副中心规划的科学性和前瞻性。

### 2.2 地下管线精确定位与管理

着手老旧城区改造工程期间, 鉴于地下管线的复杂性以及数据匮乏, 采用高精度测绘手段对地下管线

作者简介: 赵瑞雄(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 测绘工程。

实施了调查及治理,先使用工作频率在 1 MHz ~ 1 GHz 的探地雷达,基于地下介质高频电磁波传播特征探测地下管线,不同介质里,电磁波与界面相碰时会产生反射,就反射波的时间而言,对强度信息开展分析可判断管线位置、方位与埋深。同时借助 GNSS 定位技术,达成了复杂城市环境里老旧小区地下管线分米级定位精度的综合检测。为获得更缜密的管线周边环境信息,本文提及三维激光扫描技术凭借毫米级精度得到管线周围环境三维信息,将探地雷达的探测数据、GNSS 定位信息和三维激光扫描数据融合在一起,成功搭建起可动态更新的地下管道数据库。例如:在一处老旧小区改造期间,依靠该技术的协助完成地下管线定位,从而杜绝施工期间损坏管线的现象出现,基于测绘数据对管线布局做优化,添加地下综合管廊搭建,对气管线实施统一规划管理,该小区地下管线的事故率降低了 80%,而管线维护效率增进了 50%,极大地增进了地下管线管理的效率与安全性能。

### 2.3 智能交通系统规划与优化

在智能交通系统的建设过程中采用卫星定位、惯性导航和地面移动测量等综合技术,以构建一个全域的高精度交通地图。该方法利用卫星定位系统获得道路绝对位置信息、惯性导航系统提供卫星信号遮挡区域内连续位置与姿态信息、地面移动测量车携带激光雷达等、高清相机和其他装置,精细化扫描路面,得到路面曲率、坡度、车道线方位、交通标志及信号灯方位,最终使定位精度达到亚米级水平,某些自动驾驶区域的地图精度甚至达到厘米级水平。结合车联网技术对实时交通流量数据和高精度地图进行整合以达到优化智能交通信号的目的。例如:深南大道这类繁忙路段通过设置于该路段的地磁传感器和视频监控设备实时获取车辆运行轨迹数据并将其传送到智能交通系统中。该系统根据高精度测绘得到的道路信息及实时车流量数据采用智能算法动态调节信号灯配时,准确地把绿灯时长调节到秒级。在一段时间的行驶后,路口的通行效率增加了 20% ~ 30%,而车辆的平均等候时间也缩短了 15 ~ 20 秒。同时根据高精度测绘得到的道路坡度和曲率数据对智能公交专用道进行了合理的规划。规划时充分考虑公交车辆运行特点及安全需要,保证公交专用道坡度平坦及转弯半径的合理性,从而保证了公交车辆运行的安全性和效率。

### 2.4 城市微气候分析与调控

高精度测绘技术对城市微气候的优化起到了至关重要的支撑作用。首先对地形进行厘米级精度测绘,

准确地得到地形起伏变化、高程数据和其他信息。同时实现了建筑精细化建模,既精确地记录了建筑外形轮廓又精确地建模了建筑外立面材质和门窗位置细节,体现建筑在微气候中的作用。利用包括风速、风向、温度和湿度在内的气象监测数据,采用计算流体力学(CFD)模型来模拟微气候的变化。例如:在雄安启动区的规划中,根据模拟结果对建筑布局和绿地规划进行优化,并创建通风廊道。通过对建筑物间距、朝向及高度进行调节,使其形成利于空气流通通道,同时合理布局公园、绿地等开敞空间以提高城市绿化面积。根据实际的监测数据,启动区的核心区域在夏天的高温时段,平均温度下降了 1 ~ 2 °C,而相对湿度增加了 5% ~ 10%,这有效地缓解了热岛效应。同时通风条件好还有利于污染物扩散和空气质量提高。另外,微气候改善也促进了居民舒适度的提高,并吸引更多的人才与企业进驻。

## 3 高精度测绘技术在城市规划中的创新举措

### 3.1 多源数据融合的动态监测

多源数据聚合动态监测,为高精度测绘技术在城市规划领域应用的重大创新范例,在实际应用操作阶段,该技术把卫星遥感资料、航空摄影测量的数据、地面物联网传感器信息和地理信息系统的相关数据融合在一起<sup>[3]</sup>,基于卫星遥感数据拥有周期性及广泛的监测手段,就如高分二号卫星,能获取 0.8 米分辨率的图像,以此在宏观范畴控制城市的整体空间变迁;航空摄影测量技术展现出更高的精准程度,某些无人机拍摄能实现 5 厘米的分辨率,从而采集城市的细节片段。地面上的物联网传感器装置,像安装于道路、桥梁及建筑物的位移与震动传感器,可实时采集有关结构健康的数据。例如:宿迁市在城市生命线安全工程建设实施阶段,针对燃气爆炸、供水管道破裂、城市积水和桥梁塌落等风险情形,归集了 131 个核心监测监管需求。设立全市统一规格的物联感知平台及视频中台,搭建先进的城市物联感知模式,实现约 90 类 1 300 万条数据上报,促成 18 类约 40 万条数据的共享,运用时空数据挖掘与多源数据融合技术对燃气进行了全面分析,排水等市政基础建设的相关数据,在燃气管线监测进程里,采用管线位置高精度的测绘数据,把周边环境影像数据和燃气压力传感器数据整合好,进而实现对燃气管线泄漏风险的动态评估。

### 3.2 人工智能辅助规划决策

采用机器学习以及深度学习的人工智能算法处理大量测绘数据,对城市人口分布与经济发展数据展开

深度剖析，譬如依托高精度地图对道路进行分析（建筑物分布数据以及交通流量监测数据等），人工智能模型能预察不同地区未来交通需求的变化情形，由此为交通设施规划给出准确的支撑。其数据处理速率比传统人工分析快出几倍，可在较短的时间里处理好TB级数据量，极大增强了规划及决策效率，在推进国土空间规划智能应用场景构建时，重庆顺利把人工智能与地理信息系统融合在一起，地图影像可对城市里的建筑物，自动对水域及其他要素做分类识别，支持国土空间规划的实施。规划师借助这一技术能迅速获取城市现状的精准信息，当编制新区规划或旧城改造方案时，采用人工智能模型模拟城市在各种规划方案下的发展趋势，诸如人口增长走向与土地利用的变化情形，经由对几种模拟结果开展比较分析，规划师可通过更科学的途径筛选出最优规划方案，有效避开传统规划决策可能存有的主观偏差，使城市规划更契合实际发展情势，加强规划的前瞻眼光与科学性<sup>[4]</sup>。

### 3.3 虚拟现实技术的规划展示

通过对高精度测绘得到的城市三维模型和VR技术进行整合，创建一个高度真实的虚拟城市环境。使用者可沉浸在规划方案的城市空间之中，比如在虚拟环境下徜徉在规划商业街上，体验街道尺度，建筑风格和周围景观氛围等。该展示方式突破了传统二维图纸或者静态三维模型展示的限制，给决策者，公众一个更加直观和综合的体验。VR设备刷新率一般都能达到90Hz或更高，与高分辨率显示屏结合在一起，能呈现精致流畅的虚拟场景使用户得到接近于现实的感觉。例如：对某市滨水区域进行规划展示时，采用高精度测绘搭建了包括地形、水系、既有建筑和规划建设等三维模型，然后借助VR技术进行展示。在演示时，市民可自由切换各个时间点，观察规划方案中昼夜和四季不同结果，也可实时调节观察视角，对规划细节进行地面和空中多角度考察。这种身临其境的感受使大众对规划意图有了更加深刻的认识，并主动参与规划反馈。规划团队依据公众反馈信息优化和调整规划方案，使得最终规划成果更加贴近公众需求并推动城市规划民主化进程<sup>[5]</sup>。

### 3.4 区块链技术保障数据安全

区块链具有分布式账本和加密算法的特点，保证了测绘数据和相关规划数据具有完整性，不可篡改和可追溯。数据采集阶段将测绘数据实时记录并加密存储于区块链节点中，每一个数据块均含有上一个数据

块哈希值构成链式结构，数据输入后不能恶意篡改。比如在城市地下管线测绘资料存储方面，采用区块链技术之后，每次管线位置、性质等资料更新均有完整的记录和无法变更，确保资料的真实性和权威性。在数据的共享和流通过程中，区块链技术构建了一个既安全又可靠的共享策略。不同的参与主体，如规划部门、测绘单位和建设企业都可以通过区块链网络实现数据安全共享，而不必担心数据泄露或者非法篡改。例如：某市新区规划项目中涉及多部门、多企业数据交互问题。通过建立区块链数据共享平台将各参与方上传的高精度测绘数据、规划设计方案等加密存储在区块链中。项目审批时，有关部门可以安全准确地获得授权范围内所需要的数据，并将审批流程的每个步骤操作都记录到区块链，实现了数据全流程透明化和可追溯化，为城市规划项目顺利开展提供了扎实的数据安全保障，切实提高了城市规划管理效率和信誉。

## 4 结束语

高精度测绘技术通过其高分辨率、高精度与高效率的特性，为城市规划提供了全新的技术范式。将高精度测绘技术运用到城市规划当中并进行革新，通过采集海量空间数据，深度介入规划全流程，显著提高了城市规划效率和质量，也为我国城市有序发展打下了坚实的基础。未来，随着5G、物联网、大数据等先进技术的持续突破，高精度测绘技术将与之深度结合，对城市规划起到更加有力的促进作用，有利于城市治理现代化和可持续发展目标的达成。

## 参考文献：

- [1] 林念祥.绿色测绘技术在城市规划与建设中的应用研究[J].中国设备工程,2024(24):254-256.
- [2] 肖雄军,邓杰.城市工程测绘技术在智慧城市规划中的应用研究[J].科技创新与应用,2024,14(30):193-196.
- [3] 蔡寿良.城市规划中的基础地理信息测绘技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024(27):145-147.
- [4] 黄铭,覃现,李奇,等.新型基础测绘技术的研究与应用[J].测绘通报,2024(S2):46-49.
- [5] 韩雨兴.三维测绘技术在城市规划中的应用研究[J].房地产世界,2024(17):149-151.

# 城市道路交通分析与交通工程设计技术要点

杜宁

(山东晟达新材料有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘要** 城镇化加速与机动车数量增长, 导致交通拥堵、效率低下及安全隐患等问题凸显, 制约城市发展与居民出行。针对上述问题, 本文结合道路交通运行现状, 通过调研与数据分析, 研究交通流特性、路网结构和潜在风险。提炼交通工程关键设计要点, 构建分析、设计、预警与适配的一体化技术体系, 旨在优化路网布局与交通设施配置, 提升道路通行效率并降低事故风险, 为城市道路交通工程建设提供技术参考。

**关键词** 城市道路交通分析; 交通工程设计; 交通风险预警; 路网优化设计技术; 交叉口设计技术

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.025

## 0 引言

在新型城镇化进程中, 城市人口与机动车数量持续增加, 交通供需矛盾日趋突出。部分城市现存路网结构不够合理, 交通设施配置相对滞后, 工程设计与实际运行需求存在脱节。这导致交通拥堵常态化、安全事故多发, 增加了出行成本并制约城市发展<sup>[1]</sup>。针对上述情况, 基于交通工程学科理论, 结合城市道路运行现状开展系统性分析, 旨在优化设计技术路径并完善风险预警措施。实践证明, 经优化的设计技术能有效缓解交通困境, 提升工程建设质量与运行效率, 促进交通系统高质量发展。

## 1 城市道路交通相关理论基础

### 1.1 城市道路交通分析理论

城市道路交通分析理论聚焦交通流特性, 以交通工程学、运筹学为基础。其通过对流量、速度与密度三项核心指标的持续监测与定量分析, 揭示交通运行规律。分析过程遵循动态性原则, 充分考虑高峰与平峰、工作日与节假日间的交通差异。依据《城市道路交通规划设计规范》(GB 50220-2018), 设计速度标准为主干道 60 km/h 至 80 km/h, 次干道 40 km/h 至 60 km/h, 支路 20 km/h 至 30 km/h。交通流密度临界值设定为 22 pcu/(km·ln) 至 30 pcu/(km·ln)<sup>[2]</sup>。该理论分析方法为工程设计提供科学依据。

### 1.2 交通工程设计理论

交通工程设计理论以“安全、高效、便捷、绿色”为原则, 涵盖路网布局、交叉口优化与设施配置等方面。其核心目标是实现交通供给与出行需求的动态平衡。

设计过程综合考虑工程可行性、经济性与环境适应性, 严格遵循国家规范, 并与城市总体规划相协调。该理论强调“因地制宜”, 针对不同规模与功能定位的城市采取差异化设计策略<sup>[3]</sup>。大城市侧重于路网加密与快速通道建设, 中小城市则聚焦于路网优化与设施完善, 确保设计方案契合城市实际发展需求。

### 1.3 交通风险预警理论

交通风险预警理论以风险识别、量化、评估与管控为核心逻辑。其通过构建预警指标体系, 对道路运行风险进行实时监测与提前预判。该理论结合实时交通数据与历史事故信息, 识别拥堵、事故等风险的诱发因素, 并建立量化评估模型以确定风险等级与预警阈值。预警理论与工程设计深度融合, 追求“设计防风险、预警控风险”的双重目标<sup>[4]</sup>。在设计阶段规避高风险点位, 在运行阶段实施实时预警, 旨在系统性提升道路运行安全性。

## 2 城市道路交通现状分析与问题诊断

### 2.1 城市道路交通流量特征分析

选取我国东部某常住人口 120 万、建成区面积 150 km<sup>2</sup> 的地级市作为调研对象, 通过线圈与视频检测设备对其主干道、次干道及支路共计 30 个监测点进行持续 72 小时监测。监测数据结合官方统计资料进行整理, 形成不同等级道路的交通流量分析结果。

由表 1 分析数据可知, 主干道高峰小时交通量为 2 800 pcu/h 至 3 500 pcu/h, 已接近规范饱和流量 3 600 pcu/h。次干道高峰小时流量为 1 500 pcu/h 至 2 200 pcu/h, 支路为 600 pcu/h 至 1 000 pcu/h。日

作者简介: 杜宁 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程。

平均交通量主干道达 32 000 pcu/d 至 45 000 pcu/d, 次干道为 18 000~28 000 pcu/d, 支路为 7 000 pcu/d 至 12 000 pcu/d。主干道高峰时段部分路段拥堵指数

超过 1.2, 处于严重拥堵状态。交通流量呈现显著等级与时段差异, 早晚高峰流量占日平均流量的 28% 至 32%, 节假日流量较工作日增长 35% 至 50%。

表 1 城市不同等级道路时段交通流量统计表

指标	主干道	次干道	支路
监测点位数量 (个)	10	12	8
高峰小时交通量 (pcu/h)	2 800 ~ 3 500	1 500 ~ 2 200	600 ~ 1 000
平峰小时交通量 (pcu/h)	1 600 ~ 2 200	800 ~ 1 300	300 ~ 500
日平均交通量 (pcu/d)	32 000 ~ 45 000	18 000 ~ 28 000	7 000 ~ 12 000

### 2.2 路网结构现状诊断

基于规划方案与实地调研对路网结构进行系统性诊断。数据显示, 现状路网密度为 5.8 km/km<sup>2</sup>, 低于《城市道路交通规划设计规范》(GB 50220-2018) 中大城市应达到 7.0 km/km<sup>2</sup> 的要求。密度分布不均衡, 老城区为 7.2 km/km<sup>2</sup>, 新城区仅为 4.3 km/km<sup>2</sup>。路网级配不合理, 主干道、次干道与支路的比例为 1:1.8:2.3, 与规范建议的 1:2:3 存在明显差距, 支路系统薄弱导致路网“微循环”功能不足。交叉口衔接存在缺陷, 部分节点缺乏过渡设施, 信号控制不佳, 致使平均延误时间达 82 s, 超出规范 60 s 的限值<sup>[5]</sup>。新老城区间连接通道不足, 仅有 2 条主干道相连, 高峰时段通行延误超过 15 min。

## 3 城市道路交通工程设计核心技术要点

### 3.1 路网优化设计技术

针对路网结构存在的不足, 结合了总体规划与交通流量特征实施优化。新城区路网密度规划提升至 7.5 km/km<sup>2</sup>, 老城区通过改造与拓宽保持密度在 7.2 km/km<sup>2</sup> 以上, 确保整体路网密度达到 7.0 km/km<sup>2</sup> 的规范要求。路网级配比例优化为 1:2.1:3.2, 重点加强支路系统建设, 新增支路 28 条并拓宽改造 15 条, 以完善“微循环”功能。在衔接设计方面, 在主干道与次干道、支路连接处设置减速带与警示标志<sup>[6]</sup>。同时, 新增 1 条连接新老城区的快速通道, 并拓宽改造 1 条现有衔接主干道。快速通道设计速度为 80 km/h, 采用双向 6 车道沥青混凝土路面, 设计年限为 15 年, 以提升跨区域连通性。

### 3.2 交叉口设计技术

交叉口是影响通行效率与安全的关键节点。依据交通流量特征与风险分析, 对不同类型交叉口实施差异化设计方案, 重点优化平面交叉口布局与信号控制参数如表 2 所示。

表 2 数据显示, 主干道一次干道交叉口高峰小时交通量为 3 200 pcu/h 至 3 500 pcu/h, 设计为双向 8~10 车道, 信号周期 120 秒至 150 秒, 采取设置专用转向车道与行人过街天桥等优化措施。主干道一次干道交叉口高峰小时流量为 2 000 pcu/h 至 2 800 pcu/h, 采用双向 6~8 车道, 信号周期 90 秒至 120 秒, 优化措施包括优化配时与设置减速带。次干道一支路交叉口高峰流量为 800 pcu/h 至 1 500 pcu/h, 设计为双向 4~6 车道, 信号周期 60 秒至 90 秒, 主要措施为设置让行标志与简化交叉口形式。设计通过“绿波带”控制, 将延误时间控制在 60 秒以内, 并依据规范确保各等级交叉口的转弯半径要求。

### 3.3 交通设施配套设计技术

交通设施配套设计包括安全、管理与公交设施优化。在安全方面, 完善护栏、标志、标线及照明系统, 照明覆盖率提高至 98% 以上, 采用 LED 设备确保夜间亮度不低于 20 lx。在事故多发路段增设警示标志与反光标线, 并设置防撞等级为 A 级、高度不低于 1.1 m 的护栏。在管理方面, 应用智能信号配时系统, 依据实时流量动态调整信号周期, 并在主干道等重点路段部署监控与测速设备。在公交方面, 优化站点布局, 新增站点 32 个, 改造 18 个, 站点覆盖率提升至 90% 以上, 站

表 2 城市不同等级交叉口优化设计参数表

指标	主干道—主干道	主干道一次干道	次干道一支路
高峰小时交通量 (pcu/h)	3 200 ~ 3 500	2 000 ~ 2 800	800 ~ 1 500
设计车道数 (双向)	8 ~ 10	6 ~ 8	4 ~ 6
信号配时周期 (s)	120 ~ 150	90 ~ 120	60 ~ 90
优化措施	设置专用转向车道、行人过街天桥	优化信号配时、设置减速带	设置让行标志、简化交叉口形式

点间距控制在 500 m 至 800 m。设置宽度不小于 3.5 m 的公交专用道<sup>[7]</sup>，以提升运行效率，引导绿色出行。

#### 4 交通风险预警体系设计与构建适配

##### 4.1 风险预警指标选取与量化

结合道路风险识别结果，选取交通流量、通行速度、交叉口延误、事故发生率及设施完好率等核心指标，构建预警指标体系。各指标依据规范标准与历史数据，明确了量化单位、安全阈值、预警阈值及对应的风险等级，如表 3 所示。

表 3 城市道路交通风险预警指标量化标准表

预警指标	量化单位	安全阈值	预警阈值	风险等级
高峰小时交通量	pcu/h	< 2 800	≥ 2 800	中高风险
通行速度	km/h	≥ 40	< 30	高风险
交叉口延误	s	< 60	≥ 80	中高风险
事故发生率	起 / km · 年	< 2.5	≥ 4.0	高风险
设施完好率	%	≥ 95	< 85	中风险

##### 4.2 预警模型构建与验证

采用层次分析法与模糊综合评价法构建预警模型，实现对交通风险的量化评估与等级划分。通过层次分析法确定各预警指标的权重：交通流量为 0.28，事故发生率为 0.25，通行速度为 0.20，交叉口延误为 0.17，设施完好率为 0.10。采用调研城市近一年的交通运行与事故数据对模型进行验证，选取 30 个监测点的实时数据输入模型，将评估结果与实际风险状况对比。验证结果显示，模型总体准确率达 92.3%，其中高风险点位预警准确率为 95.7%，中风险点位为 90.1%，低风险点位为 88.6%<sup>[8]</sup>。该模型能够准确识别风险等级，具备良好的实用性。

##### 4.3 设计与预警体系协同适配

将风险预警结果融入交通工程设计全过程，形成“设计防风险、预警控风险、优化降风险”的闭环管理模式。在设计阶段，依据预警模型识别的高风险点位优化方案，如在事故高发交叉口增设安全设施，在交通流量饱和路段拓宽车道。在运维阶段，通过预警体系实时监测状态并反馈问题，如依据预警数据调整信号配时，或优化支路设计以提升分流能力。同时，将设计参数纳入预警模型，动态更新预警指标阈值与权重，确保模型与设计方案同步适配。该协同机制有效提升了城市道路交通运行的安全性与通行效率。

#### 5 结束语

针对城市交通拥堵、路网缺陷及安全隐患等问题，本研究通过系统性分析明确了交通运行特征，识别了结构短板与风险分布，提炼了工程设计核心要素，并

表 3 数据显示，高峰小时交通量安全阈值为低于 2 800 pcu/h，预警阈值为大于等于 2 800 pcu/h，对应中高风险。通行速度安全阈值为不低于 40 km/h，预警阈值为低于 30 km/h，属高风险。交叉口延误安全阈值为小于 60 s，预警阈值为大于等于 80 s，对应中高风险。事故发生率安全阈值为小于 2.5 起 / (km · 年)，预警阈值为大于等于 4.0 起 / (km · 年)，属高风险。设施完好率安全阈值为大于等于 95%，预警阈值为低于 85%，对应中风险。

构建了交通风险预警体系。体系实现了设计与预警的协同适配，形成了一套可实施的技术方案。应用该体系可有效缓解城市交通困境，工程实践价值明显。同时，研究也发现预警模型响应速度有待提高，对极端天气等复杂工况的预警覆盖尚不充分。后续工作将重点优化模型效率，纳入极端天气与施工干扰等实际因素，进一步完善预警指标，深化设计预警联动机制，以提升技术体系的实用性与科学性，为城市交通的持续发展提供坚实的支撑。

#### 参考文献：

- [1] 徐丽萍.城市道路交通分析与交通工程设计技术要点分析[J].时代汽车,2025(12):190-192.
- [2] 高宇轩.城市道路交通分析与交通工程设计技术研究[J].工程建设与设计,2024(17):88-90.
- [3] 李巧连,张翔.城市道路交通分析与交通工程设计技术要点分析[J].黑龙江交通科技,2023,46(05):55-57.
- [4] 张杨.道路交通分析与交通工程设计技术要点[J].大众标准化,2022(18):152-154.
- [5] 徐明龙.城市道路交通分析与交通工程设计技术研究[J].运输经理世界,2022(14):53-55.
- [6] 马卫东.城市道路交通分析与交通工程设计技术问题研究[J].青海交通科技,2022,34(02):31-35.
- [7] 李小鹏.道路交通分析与交通工程设计技术要点[J].科技创新与应用,2022,12(08):72-74.
- [8] 戴韬.基于城市道路交通工程设计技术方法分析[J].黑龙江交通科技,2021,44(07):219-220.

# 基于大数据的铸造生产能耗智能监控与节能优化

刘洪山, 刘文阔

(山东山诚机械科技股份有限公司, 山东 济南 250200)

**摘要** 铸造行业作为高能耗传统制造业, 能耗管控水平直接影响企业生产成本与行业绿色转型。当前铸造生产能耗监控存在数据碎片化、管控滞后、优化缺乏精准支撑等问题, 制约节能降耗成效。本研究结合大数据技术海量数据处理与分析优势, 构建铸造生产能耗智能监控与节能优化体系, 旨在实现能耗数据实时采集、精准分析、异常预警及优化策略动态输出。通过实际应用验证, 该体系可有效提升能耗监控精度, 降低生产能耗, 为铸造行业绿色低碳发展提供技术支持, 具有重要的工程应用价值与推广前景。

**关键词** 大数据; 铸造生产; 能耗监控; 节能优化; 智能管控

中图分类号: TP3; TG2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.026

## 0 引言

铸造生产涵盖熔化、造型、浇注、清理等多道工序, 工序关联性强、能耗环节复杂, 电能、焦炭、柴油等能源消耗占企业生产成本比重较高。当前我国铸造行业仍存在能耗管控粗放、数据采集不全面、优化措施缺乏科学性等问题, 不仅增加企业生产成本, 还与绿色制造业发展要求存在差距。大数据技术可实现多源能耗数据的整合与深度挖掘, 打破传统监控模式的局限<sup>[1]</sup>。开展基于大数据的铸造生产能耗智能监控与节能优化研究, 破解能耗管控难点, 推动铸造行业节能降耗、提质增效, 助力制造业绿色转型, 符合国家产业升级与双碳战略要求。

## 1 铸造生产能耗相关理论及技术发展

### 1.1 铸造生产能耗理论基础

铸造生产能耗涵盖熔化、造型等核心工序的能源消耗, 其消耗水平受原材料特性、设备参数、工艺规程及环境因素综合影响, 表现出非线性、波动性与强关联性。铸造生产能耗理论以能量守恒定律为基础, 结合工艺机理, 解析工序内能量的输入、转化与损失路径, 识别关键能耗节点。不同工艺能耗差异显著, 如砂型铸造能耗普遍高于精密铸造, 电弧炉熔化能耗通常大于中频感应炉。该理论基础为设定能耗监控指标与明确优化路径提供了根本依据。

### 1.2 大数据技术核心理论

大数据技术围绕数据生命周期构建, 包含采集、存储、处理与挖掘四个关键环节, 具有数据体量巨大、增长迅速、类型多样及价值密度低的特点。数据采集技术能够实时获取设备传感器、生产系统及能源计量仪表的多源异构数据。分布式存储架构保障了TB至PB级数据的安全存放与高效访问。数据处理通过清洗、转换与集成提升数据质量。数据挖掘运用机器学习等算法, 从海量数据中发现隐含关联与模式<sup>[2]</sup>, 其核心目标是将原始数据资源转化为支持决策的有效信息, 为能耗分析提供支撑。

### 1.3 智能监控技术发展现状

智能监控技术集成传感器、物联网及数据传输智能分析, 实现生产过程实时监测和异常诊断预警。铸造领域传统监控依赖人工巡检单点计量, 存在实时性差、数据不准、响应延迟等问题。当前技术正向一体化精准化智能化演进, 借助无线传感器网络边缘计算相结合方式, 实现能耗数据实时采集、远程监控、现场智能分析<sup>[3]</sup>, 这种模式传输延迟降低, 异常波动捕捉能力提升, 能耗监控被动处置转向主动管理推动。

## 2 基于大数据的铸造生产能耗智能监控体系构建

### 2.1 监控体系总体架构设计

结合铸造工艺特点大数据技术, 构建四层架构能耗智能监控体系, 体系包含数据采集层、数据传输层、

作者简介: 刘洪山(1967-), 男, 专科, 研究方向: 铸造智能生产。

数据处理层、监控应用层，数据采集层全面捕捉能耗数据构成体系基础，数据传输层保障数据高效安全流动，数据处理层完成数据提纯价值挖掘，监控应用层向用户提供可视化监控异常预警等功能。体系采用模块化可扩展性设计，能够根据企业生产规模工艺类型灵活调整，适配砂型铸造、精密铸造等多种模式，传统监控系统兼容性、扩展性不足问题得到有效解决。

### 2.2 多源能耗数据采集系统设计

数据采集系统围绕铸造能耗关键环节，建立了多源数据采集网络。网络采集对象涵盖三类数据：能源

消耗数据，如电能、焦炭、柴油的瞬时与累计消耗；设备运行数据，包括中频感应炉、造型机等设备的核心运行参数；工艺参数数据，如熔化温度与砂型含水率。系统采用智能传感器、电表、流量计等设备。采样频率固定为 1 次 / 分钟，采集精度满足电能 ±0.5 级、温度 ±1 °C、流量 ±0.2% 的要求。系统兼容有线与无线传输，无线传输采用 Long Range 技术，有效传输距离 1 000 m，传输延迟不大于 500 ms<sup>[4]</sup>。采集系统的核心采集参数与精度指标如表 1 所示。

表 1 系统展示了数据采集系统的三类数据、采集参

表 1 多源能耗数据采集系统核心参数表

采集类别	采集参数	采集设备	采集精度
能源消耗数据	电能、焦炭、柴油消耗	智能电表、流量计	±0.5 级、±0.2%
设备运行数据	功率、温度、转速	智能传感器	±1 °C、±0.3%
工艺参数数据	熔化温度、砂型含水率	温度传感器、湿度传感器	±1 °C、±0.5%

数、设备与精度。能源消耗数据通过智能电表和流量计采集电能、焦炭及柴油消耗量，精度分别达到 ±0.5 级与 ±0.2%。设备运行数据由智能传感器获取功率、温度、转速等参数，温度采集精度为 ±1 °C，其他参数精度为 ±0.3%。工艺参数数据使用温度与湿度传感器监测熔化温度及砂型含水率，精度分别为 ±1 °C 与 ±0.5%。表格内容明确了系统对不同类型数据的采集方式与质量要求，为后续分析与优化提供了准确的数据基础。

### 2.3 大数据处理与监控模块开发

数据处理模块融合边缘计算与云计算进行协同工作。边缘计算节点部署于车间现场，对原始数据执行清洗、去噪与格式转换，数据清洗准确率不低于 99.5%。处理后的数据被上传至云计算平台。该平台采用 Hadoop 分布式存储架构，存储容量可扩展至 PB 级。数据挖掘使用随机森林算法构建关联分析模型，模型拟合度达到或超过 0.92，以揭示设备参数、工艺参数与能耗间的内在联系。监控模块采用 B/S 架构，集成数据可视化、异常预警及数据查询功能，支持电脑与手机终端访问。系统异常预警响应时间小于等于 30 秒，预警准确率不低于 98%<sup>[5]</sup>，从而实现了对能耗的全方位智能监控。

## 3 铸造生产能耗节能优化模型构建与实现

### 3.1 能耗优化目标与约束条件确定

能耗优化以降低铸造生产总能耗、提升能源利用效率为核心目标，同时兼顾产品质量、生产效率，确保优化策略具有实际可操作性。优化目标量化为：在保证铸件合格率 ≥ 99%、生产效率不降低的前提下，将铸造

生产总能耗降低 8% 以上，核心工序熔化能耗降低 10% 以上。约束条件基于铸造生产工艺要求、设备运行极限与安全生产标准确定，包括设备运行参数约束（中频感应炉功率 300 ~ 500 kW、熔化温度 1 450 ~ 1 550 °C）、工艺参数约束（砂型含水率 3% ~ 5%、浇注温度 1 380 ~ 1 480 °C）、能源供应约束（各类能源供应稳定，波动幅度 ≤ 5%）。约束条件的设定既避免过度优化导致产品质量下降<sup>[6]</sup>，又确保优化策略符合企业实际生产能力，具备可实施性。

### 3.2 基于大数据的能耗优化模型构建

融合铸造能耗特性与数据挖掘结论，建立了多目标能耗优化模型。该模型以处理后的设备运行参数、工艺参数及能源消耗参数为输入，输出优化后的设备参数、工艺调整方案与预期节能值。模型中引入了能耗损耗系数，用以量化各环节损耗，重点关注熔化电耗与造型焦耗。模型求解采用改进粒子群算法，通过动态调整惯性权重和学习因子，有效规避局部最优解问题。算法收敛速度提升超过 20%，求解精度提升超过 15%。为验证模型效果，选取某企业连续 3 个月生产数据进行对比分析，具体数据如表 2 所示。

表 2 展示了应用优化模型后各工序的单位产品能耗变化。熔化工序能耗由 580 kW·h/t 降至 515 kW·h/t，降幅达 11.2%。造型工序能耗从 120 kW·h/t 降至 110 kW·h/t，降低 8.3%。浇注工序能耗从 65 kW·h/t 降至 60 kW·h/t，降低 7.7%。清理工序能耗从 45 kW·h/t 降至 42 kW·h/t，降低 6.7%。经过综合优化，生产总工序能耗由 810 kW·h/t 降至 727 kW·h/t，整体能耗降低率达到 10.2%。数据证明，优化模型对能耗较高的

表2 关键工序优化前后能耗对比表

生产工序	优化前能耗 (kW·h/t)	优化后能耗 (kW·h/t)	能耗降低率 (%)
熔化工序	580	515	11.2
造型工序	120	110	8.3
浇注工序	65	60	7.7
清理工序	45	42	6.7
总工序	810	727	10.2

熔化工序改进效果最为显著，同时实现了全流程能耗的普遍降低。

### 3.3 优化模型验证与参数调整

在中型灰铸铁件生产企业的模型验证中，采用中频感应炉与砂型造型工艺，日均产量 50 t。为期三个月的验证期内，实时采集多源数据进行分析。优化后，生产单吨铸件的综合能耗显著下降，能耗降低率达到 10.2%，预计月均节约能源费用 8.6 万元。铸件合格率得到提升，生产效率保持稳定。设备故障率下降，运行稳定性改善。针对验证中的局部能耗波动，结合数据挖掘结果对模型参数进行了校准，包括调整惯性权重范围与修正工艺参数约束阈值<sup>[7]</sup>。参数调整后，模型预警准确率提高，能耗优化的稳定性进一步增强。

## 4 铸造生产能耗智能监控与节能优化系统应用效果

### 4.1 系统应用架构与实施流程

基于试点企业条件，搭建了铸造能耗智能监控与优化系统。系统以四层架构为框架，集成了企业现有的生产管理与能源计量系统。实施过程分为四个有序步骤。第一步，部署设备并完成数据对接，安装智能传感器及采集终端，实现与原有设备和系统的联通。第二步，调试系统并校准模型，确保数据采集精度与模型参数准确，保障运行稳定。第三步，进行为期一个月的试运行，持续监测系统状态并处理问题以优化性能。第四步，系统转入正式运行，全面投入使用，同时建立常态化能耗监控、优化及定期数据复盘与调整的闭环管理机制。

### 4.2 系统应用效果量化分析

系统正式运行 3 个月后，对应用效果进行量化评估。评估涵盖能耗、质量、经济及设备四类核心指标。能耗指标显示，生产总能耗降低 10.2%，熔化工序能耗降低 11.2%，造型工序能耗降低 8.3%。单位产品能耗从 810 kW·h/t 降至 727 kW·h/t<sup>[8]</sup>，其节能率超过行业平均水平约 6%。质量指标方面，铸件合格率从 99.1% 提升至 99.5%，废品率相应从 0.9% 降至 0.5%。经济指标统计显示，月均节约电能 12.9 万 kW·h，节省焦炭

15 t、柴油 8 t，折算月均节约能源费用 8.6 万元，年节约费用约 103.2 万元，投资回报周期约为 18 个月。设备指标改善表现为，设备运行效率从 82% 提升至 88%，故障率从 3.2% 下降至 1.8%，月度维护成本平均减少 1.2 万元。系统应用展现出显著的综合效益。

## 5 结束语

本研究针对铸造能耗管理粗放问题，完成了智能监控与节能优化探索。工作构建了包含四层架构的监控体系与多目标能耗优化模型。试点应用验证了体系的科学有效。研究突破了多源数据整合、异常识别与精准优化等关键技术，实现了能耗的实时监控、预警与动态调控。实践表明，成果有助于降低总能耗，提升设备稳定性与产品质量，助力企业降本增效。当前模型对复杂工况的适应性存在局限。后续将通过融合深度学习技术改进模型，扩大试点范围并完善系统功能，以推动成果在铸造行业的广泛应用，促进其绿色低碳发展。

## 参考文献:

- [1] 宰红斌, 蒋涛, 李海峰, 等. 铸造车间双目协同云平台智能监控应用探究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(09): 1307-1308.
- [2] 刘旭东, 乃晓文, 马娅玲. 铸造产品的智能制造软件平台 [J]. 现代铸铁, 2022, 42(05): 58-62.
- [3] 吕婷. 基于无线传感网络的铸造车间监控系统研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报 (自然科学版), 2020, 36(06): 34-38, 49.
- [4] 马一波, 艾立明, 杨林, 等. 铸造企业实现节能降耗的管理方法 [J]. 铸造设备与工艺, 2024(01): 47-50.
- [5] 侯守伟. 自动化物流信息管理系统在数字化铸造车间的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(03): 436-437.
- [6] 王啸龙. 基于镂空砂型的铸件凝固监测与控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [7] 裴小龙. 数据驱动调压铸造工艺智能设计及优化 [D]. 太原: 中北大学, 2025.
- [8] 黄力彦, 陈玲, 杨会军. 河北省铸造行业节能降碳研究 [J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(03): 121-123.

# 工程造价指数编制方法改进及其 在市场预测中的应用

张亚卓

(安徽安天利信工程管理股份有限公司, 安徽 合肥 230061)

**摘要** 为解决工程造价指数编制中数据覆盖不全、模型适配不足、权重与实际造价脱节的问题, 同时提升其市场预测中的实用性, 对工程造价指数编制方法改进及在市场预测中的应用展开研究。本研究提出递进式改进路径, 包括构建多源数据融合的采集体系、优化动态计算模型、重构科学权重体系, 同时配套建立行业数据标准体系、搭建数字化平台、形成多方参与联动机制, 系统解决传统编制方法的缺陷, 提升指数对医疗、住宅等不同工程类型的适配性与市场预测精度, 以期为建筑行业造价管控、市场分析及投资决策相关人员提供参考。

**关键词** 工程造价指数; 数据融合; 动态模型; 市场预测; 医疗工程

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.027

## 0 引言

伴随建筑业数字化转型与“智能建造”政策深化, 传统工程造价指数编制的滞后性矛盾愈发凸显。2025 年住建部数据显示, 全国 32% 的医疗基建项目因指数失真导致预算偏差超 15%。以临湖社区卫生服务中心扩建为例, 其智能化设备占比 28% 的造价特征, 暴露出现行指数对细分领域的适配盲区。面对装配式建筑(预制构件成本占比超 40%)、绿色建材(光伏组件应用激增)等新趋势, 亟待构建更灵敏的指数体系。本文立足于数据融合、动态建模与场景适配, 探索指数编制的迭代路径, 为医疗、住宅等工程的精准造价管控提供新范式。

## 1 工程造价指数编制的现存问题剖析

### 1.1 数据采集环节的底层缺陷

数据采集作为工程造价指数编制的源头环节, 其质量直接决定指数能否反映真实造价变动趋势。当前数据采集存在的底层缺陷首先体现在覆盖维度不全, 现有体系多聚焦钢材、水泥等主材价格数据, 却忽略辅材、人工成本及机械租赁费用的动态变化。在现代工程中, 辅材与人工成本合计占比已达 30%~40%, 这些数据的缺失直接导致指数无法完整呈现造价构成的变动规律。其次是数据时效性滞后, 传统季度或年度的更新周期, 难以匹配建材价格受供应链波动、政策调控影响产生的月度甚至周度波动, 当指数发布时, 数据已无法反映当前市场真实价格水平。

### 1.2 计算模型的适配性局限

当前工程造价指数采用的计算模型多为固化框架, 难以适配不同工程场景与动态风险因素, 直接削弱指数对造价变动规律的解释力。模型适配性不足首先表现为场景化区分缺失, 现有模型多采用统一计算逻辑, 未考虑住宅、市政、医疗等不同工程类型的造价构成差异。例如: 医疗工程中消防系统、智能化设备的造价占比可达 25%, 而住宅工程侧重装修与主体结构, 统一模型下的权重分配无法匹配各类工程的核心成本驱动因素。其次是动态风险因子未嵌入, 模型未将政策调控、公共卫生事件、供应链中断等短期冲击因素量化为修正系数, 当此类事件发生时, 指数无法及时反映材料涨价、工期延误对造价的传导影响, 导致指数与实际造价偏离。

### 1.3 权重设定与实际造价的脱节

工程造价指数的权重设定直接关联指数与实际造价的贴合度, 当前权重分配因滞后于工程行业发展趋势, 与现代工程造价实际构成存在显著脱节。这种脱节首先体现在权重更新周期过长, 现有体系多采用 3~5 年的更新频率, 未能跟进装配式建筑、绿色建材(光伏组件)、智能化技术等新技术带来的造价占比变化——装配式建筑中预制构件成本占比已超 40%, 远高于传统现浇结构, 而旧权重仍沿用传统结构的材料占比, 导致指数无法反映新型建造方式的造价特征<sup>[1]</sup>。

作者简介: 张亚卓(1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

其次是造价构成匹配不足，权重分配长期偏向材料成本，忽略人工成本与技术服务费用的占比提升：随着建筑工人技能要求提高，技术工种薪资年均涨幅达8%~10%，人工成本占比从传统的20%升至30%以上；同时，工程咨询、技术研发等服务费用在现代工程中的占比逐步增加，旧权重对这些要素的低估，进一步拉大指数与实际造价的差距。

## 2 工程造价指数编制方法的递进式改进

### 2.1 基础层：多源数据融合的采集体系构建

多源数据融合的采集体系是工程造价指数编制改进的底层支撑，核心在于打破数据孤岛、补充核验维度、强化质量管控，从源头提升指数数据源的完整性与真实性。构建这一体系需先打通跨主体数据链路，整合住建部门的政策监管数据、建材供应商的实时报价数据、施工企业的实际消耗数据、咨询机构的审计核验数据，覆盖材料、人工、机械、技术服务等全造价构成维度，解决传统采集仅侧重主材数据的局限。在此基础上，引入现场踏勘数据与物联网监测数据作为补充，通过实地查验工程实体材质、规格与图纸的匹配度，结合设备传感器记录的机械使用率、材料消耗量等动态信息，修正企业自主报送数据可能存在的偏差。同时，建立“源头核验—交叉比对—异常剔除”的三级质量管控机制，对采集数据先核查报送主体资质与数据生成依据，再通过不同来源数据的交叉验证识别矛盾点，最后利用统计学方法剔除极端值与异常数据，确保进入指数编制环节的数据能真实反映工程造价变动基础。

### 2.2 核心层：动态计算模型的优化设计

动态计算模型的优化需围绕“适配场景、响应风险、修正区域”三个方向调整，解决传统模型固化导致的适用性不足问题。首先，进行场景化模型拆分，针对住宅、市政、医疗等不同工程类型的造价构成差异，设计差异化计算子模型。例如：医疗工程子模型会提升消防系统、智能化设备的造价权重占比，住宅工程子模型则侧重主体结构与装修成本的核算，让模型能精准匹配各类工程的核心成本驱动因素<sup>[2]</sup>。其次，嵌入动态风险因子，将政策调控、供应链波动、公共卫生事件等短期影响因素量化为可调整的修正系数，当此类事件发生时，通过系数调整实时反映其对材料价格、人工成本的传导影响，避免指数与实际造价出现短期脱节。

### 2.3 关键层：科学权重体系的重构

科学权重体系的重构需紧扣工程造价行业发展趋势，从更新周期、构成匹配、阶段区分三个维度调整，让权重能精准反映当前工程的实际造价结构。首先，

缩短权重更新周期，将传统3~5年的更新频率调整为半年至一年，及时跟进装配式建筑、绿色建材、BIM技术等新技术应用带来的造价占比变化，例如：装配式建筑中预制构件成本占比提升后，相应调高其权重以匹配实际工程构成。其次，优化造价构成匹配度，针对现代工程中人工成本（尤其是技术工种薪资）与技术服务费用占比持续上升的趋势，降低传统主材的权重占比，同步提升人工与技术服务的权重，避免权重分配与实际造价结构脱节。

## 3 改进后指数在市场预测中的分层应用

### 3.1 微观层：建材价格与分项工程成本预测

改进后工程造价指数凭借多源数据融合与细分维度设计，能精准支撑建材价格与分项工程成本的预测。其核心价值在于通过拆分至具体材料品类的分项指数，捕捉不同建材的价格变动规律。例如：针对钢材、石材、智能化设备等细分品类，指数可实时反映其受供应链、政策调控影响的价格波动趋势，帮助市场主体识别价格涨跌拐点，提前规划采购周期以降低成本<sup>[3]</sup>。对于分项工程成本，指数依托场景化子模型，能匹配不同工程类型的核心分项需求，比如医疗工程中消防系统、智能化工程的成本预测，通过指数中对应分项的权重占比与价格变动数据，可预判特定分项的成本调整幅度，避免因材料或人工价格波动导致的成本失控。

### 3.2 中观层：工程全周期成本控制

改进后指数通过动态数据与阶段化权重设计，为工程从立项到竣工的全周期成本控制提供前瞻性支撑。在预算编制阶段，指数反映的当前工程造价构成与变动趋势，可修正传统预算编制中因数据滞后或构成误判导致的偏差，确保预算金额与实际市场情况贴合，减少后期因预算不足引发的工程调整。进入施工阶段，指数可作为成本偏差的参照标准，通过对比项目实际造价与指数的偏离度，及时识别成本超支风险。例如：当指数中某类材料价格涨幅超出预期时，可快速定位项目中该材料的消耗环节，提前调整采购方案或优化施工工艺。对于工程变更带来的造价变动，指数中的动态风险因子与阶段化权重能精准测算变更影响，结合变更内容对应的材料、人工占比，量化变更对总造价的调整幅度，避免变更导致的成本失控，同时为变更后的造价审核提供客观依据，确保全周期成本管控的连贯性与准确性。

### 3.3 宏观层：建筑市场供需与投资趋势研判

改进后指数通过整体变动规律与细分维度数据，可有效研判建筑市场的供需平衡状态与行业投资方向。

从市场热度判断来看,指数整体涨幅能直观反映建筑行业的投资活跃度。当指数持续高企时,通常预示市场对建筑工程的需求旺盛,建材与人工资源紧张;若指数趋于平稳或下降,则可能反映市场需求放缓,投资热度回落<sup>[4]</sup>。在细分领域供需分析上,指数的工程类型子模型可提供不同领域的造价变动数据,通过对比各领域指数涨幅,识别供需缺口较大的领域,例如某一时期医疗基建指数涨幅显著,可能意味着该领域建设需求增加,市场供给存在缺口。对于投资方向,指数可跟踪新技术、新业态的造价占比变化,如装配式建筑、绿色建材、智能化技术在指数中的权重提升,可提示这些领域已成为行业发展趋势,为投资主体提供明确的投资指引,推动资源向高附加值、符合政策导向的领域集中,优化建筑行业的投资结构。

## 4 改进方法落地的保障机制构建

### 4.1 制度保障:行业数据标准体系建立

行业数据标准体系是改进后工程造价指数编制方法落地的基础框架,核心通过统一数据口径、规范编制流程、界定应用场景,解决数据不互通、编制不统一、应用无依据的问题。数据口径统一需明确工程造价相关数据的定义与统计标准。例如:对“人工成本”需细化至不同技能等级工种的薪资构成,对“材料价格”需明确包含运输、仓储等附加费用的计算范围,确保住建、施工、咨询等不同主体报送的数据具备可比对、可整合的基础。编制流程规范要确定指数从数据采集、模型计算到权重更新的全环节操作标准,如规定数据采集的频次、动态模型中风险因子的量化方法、权重调整的触发条件,保证不同地区、不同机构编制的指数具备一致性。

### 4.2 技术保障:数字化平台搭建

数字化平台是支撑改进后指数编制与应用的技术载体,通过整合数据资源、优化计算效率、简化应用操作,提升指数编制的时效性与便捷性。数据整合平台需实现跨主体数据的实时对接与自动清洗,例如打通建材商报价系统与施工企业采购系统的数据接口,自动抓取实时交易数据,同时通过预设算法识别异常值并标记待核验,减少人工处理成本<sup>[5]</sup>。动态计算模块需嵌入场景化子模型与风险因子修正功能,用户可根据工程类型选择对应子模型,系统自动调用匹配的权重与计算逻辑,当出现政策调整、供应链波动等情况时,用户输入相关参数即可触发风险因子系数更新,快速生成调整后的指数结果。

### 4.3 协同保障:多方参与的联动机制

多方参与的联动机制通过整合行业内不同主体的资源与能力,确保改进方法在实践中持续优化并逐步推广。协同工作组需联合住建部门、施工企业、咨询机构、科研单位等主体,例如住建部门负责政策引导与标准监督,施工企业提供实际工程数据与应用反馈,科研单位负责模型算法的迭代优化,形成“政策引导—实践反馈—技术优化”的闭环协作模式,解决单一主体推进中资源不足、视角局限的问题。反馈机制需建立定期收集与响应意见的渠道,例如每季度组织指数应用方召开座谈会,收集实际使用中遇到的问题,并在1个月内给出调整方案,确保改进方法能贴合行业实际需求。行业推广需通过政策引导与案例示范相结合的方式,例如将改进后指数纳入政府投资项目造价审核的参考依据,选取典型工程开展试点应用,总结可复制的经验后在全行业推广,逐步替代传统编制方法,实现改进方法的全面落地。

## 5 结束语

工程造价指数编制的递进式改进,不仅针对性回应了传统方法在数据、模型、权重层面的核心难点,更通过微观到宏观的分层设计,让指数能有效支撑建材价格预判、工程全周期成本控制及建筑市场供需研判,为实际工程管理提供更精准的工具,也印证了此类改进对细分工程类型的适配价值。三类保障机制的构建,进一步打通了改进方法从理论到实践的落地路径,避免技术方案停留在纸面。未来,随着建筑行业装配式、智能化技术深化,这一改进体系可持续迭代,推动造价管理从被动核算转向主动预判,减少因数据滞后、模型固化导致的成本偏差,为建筑市场稳定运行与行业高质量发展提供更坚实的支撑。

## 参考文献:

- [1] 蒋慧杰,左芯,孙春玲.基于享乐价格模型的住宅工程造价指数编制方法研究[J].建筑经济,2025,46(09):70-74.
- [2] 周静.公路工程造价指数体系编制要点研究[J].工程建设与设计,2025(05):263-265.
- [3] 刘林.建筑安装工程估价指数编制方法的探讨[J].价值工程,2022,41(01):1-3.
- [4] 牛芄.高速公路造价指数模型应用研究[J].工程技术研究,2025,10(05):170-172.
- [5] 李慎.高速公路工程造价指标及指数研究[J].交通科技与管理,2024,05(20):176-178.

# 市政工程中海绵城市技术运用分析

张敦国

(乐陵市城市管理综合服务中心, 山东 乐陵 253600)

**摘要** 海绵城市是现代城市水系统治理的先进范式, 模拟自然的水文循环机制重新构建城市的雨水管理逻辑, 实现内涝防控等各方面的协同。本文以市政工程为依托, 阐述海绵城市的内涵及技术体系结构, 梳理海绵城市建设在重要市政场景下的集成应用途径, 探究智能化融合、雨水花园复合型、模型与实操相结合这三方面的发展趋势。结果表明, 海绵城市技术由单一的设施应用转变为系统的工程整合, 市政基础设施与之深度融合加强了城市的水安全韧性, 促使城市的发展模式转型, 为新型城镇化高质量发展提供支持。在“双碳”目标和生态文明建设的推动下, 海绵城市技术成为市政工程绿色化转型的核心引擎, 其系统价值以及实践途径需要得到更深入的了解和推广。

**关键词** 海绵城市; 市政工程; 雨水管理; 生态基础设施; 系统韧性

**中图分类号**: TU99

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.028

## 0 引言

全球气候变暖和快速的城市化进程叠加在一起之后, 传统的以“快速排除”为特征的灰色排水体系就暴露出了内涝频发、水体污染、资源浪费以及生态割裂等一系列系统性的不足。海绵城市理念应运而生, 其本质在于对城市水循环过程进行生态化改造, 依靠自然和人工结合的方式, 使城市具有海绵一样的吸水、蓄水、渗水、净水、释水的能力。在生态文明建设以及新型城镇化战略不断推进的过程中, 海绵城市已经由理念推广进入大规模工程实践当中, 市政工程作为城市运行的骨架载体, 是技术落地的主要场所。市政设施规划、建设及运维过程完全融入海绵技术逻辑, 不但是单个工程的效果问题, 更关系到城市水系统的整体韧性和可持续发展。

## 1 海绵城市的概念解析

### 1.1 内涵

海绵城市理念实际上就是新一代城市的雨洪管理概念, 是指城市在面对各种恶劣环境以及雨水灾害时, 能够像海绵一样, 具有吸水、渗水、蓄水以及净水等作用<sup>[1]</sup>。海绵城市不是孤立的技术堆砌, 而是植根于生态学和系统工程学的城市发展理念, 它的本质在于抛弃人水对立的传统工程思想, 转而遵循自然水文规律、追求人水和谐的系统治理方式。该理念以“渗、滞、

蓄、净、用、排”六个字为行动纲领, 在降雨过程中实现雨水的就地消纳和资源化转化, 而不是简单地外排。其深层内涵在于三个方面的内容, 在功能上解决内涝防治、径流污染控制、水资源短缺和水生态退化等问题, 在空间上打破地块界限, 构建起涵盖建筑小区、道路广场、绿地水系的全域协同网络, 在时间上兼顾短期降雨应对和长期生态修复, 形成动态适应的弹性系统。

### 1.2 技术体系构成

海绵城市技术体系按照雨水径流产生和迁移的自然顺序, 构建起源头减排、过程控制和末端治理三者并列的有机整体, 三者互相配合、相互补充, 构成闭环式的水文调节链。源头减排作为系统的基石, 以绿色屋顶截留屋面雨水、透水铺装促进地表下渗、生物滞留设施实现污染物初步净化等方式, 在径流形成源头就削减流量峰值和污染负荷, 有效地减轻了后续系统的压力, 并提高了土壤入渗能力。过程控制环节在接收到源头处理后的径流后, 依靠优化设计的生态沟渠、调蓄池、雨水湿地等设施, 在输送过程中实现流量调节、峰值延缓和水质改善, 保证径流有序、安全地转移, 不给自然水体带来水力、水质的冲击, 并为雨水资源化利用创造条件。末端治理是系统的安全阀和生态净化终端, 采用人工湿地、生态塘、河岸缓冲带等近自然系统, 对经过前序环节处理后的雨水进行

**作者简介**: 张敦国 (1970-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 市政工程。

深度净化和生态涵养,从而提高水质达标率,使雨水回灌地下水或者安全排放,达到水环境质量整体改善以及水生态系统功能恢复的目的<sup>[2]</sup>。

## 2 市政工程中海绵城市技术运用关键场景

### 2.1 道路与交通设施

市政道路属于城市线性空间的骨架,也是径流的重要产汇区。市政道路海绵化改造是提高城市整体排水韧性、改善城市水环境的关键突破口和形象窗口。技术的应用在于把传统的硬化路面系统转变为具有雨水管理、生态服务和人文关怀功能的复合型生态廊道,透水沥青或者透水混凝土铺装技术根据交通荷载以及使用要求选择合适的型号,在人行道、非机动车道以及低交通量车行道上大面积使用,多孔骨架结构可以大幅度提高雨水下渗速度,有效地减小地表径流峰值并补给浅层地下水,改善城市“热岛效应”;道路两旁布置的生态植草沟、生物滞留带、下凹式绿化带,不仅起着径流汇集、传输、初滤的作用,而且依靠植物根系吸附、填料层过滤、微生物分解等方式共同去除悬浮物、氮磷等污染物,还软化了硬质景观边界,提升了街道微气候的舒适度和生物栖息的价值<sup>[3]</sup>。

在交叉口、立交桥区、下穿通道等历史易涝节点处,嵌入式调蓄模块或者地下蓄渗设施可以暂时存储过多的雨水,经过智能控制缓慢地放到市政管网里去,或者净化之后再用来冲洗道路、浇灌绿化,达到削峰错峰和资源循环利用的目的。该类技术集成大大加强了道路系统对短时强降雨的抗灾能力,还由于减少了路面径流污染物排放量、降低了行车噪声、提高了行人的体验感和街道的美学价值等诸多方面的成效,促使交通基础设施由原来的单一功能转变为安全、生态、低碳、宜居的复合型空间,体现的是市政工程同自然环境相和谐、功能与美学并重的现代治理理念。

### 2.2 城市绿地与公园

城市绿地和公园由于具有广阔的面积、良好的渗透性和生态本底,天然成为海绵城市建设的中心载体和效能放大器,也是实现蓝绿空间融合的重要节点。技术使用重视对原有的地形、水文脉络和植被格局的尊重、优化和激活,把绿地系统整体设计成多功能的雨水滞蓄、净化和资源化单元,用科学布置雨水花园、渗透塘、湿塘、生态洼地等设施群的方式,主动接纳周边硬质区域流入的雨水径流,依靠土壤渗透、植物蒸腾吸收、微生物降解等自然过程来达到水量调蓄和水质净化的目的;蓄存雨水在非降雨期经过简单的处

理再用来浇灌绿地,形成内部循环,明显降低市政用水量和维护费用。

尤为关键的是,这些设施与景观设计、游憩功能深度耦合,将调蓄池打造成一个亲水景观湖来增大空间的吸引力,植草沟融入休闲步道系统以提高可达性和体验度,在保证核心生态功能高效运行的同时,还能提升公众游憩体验、环境教育价值和社区归属感,同时实现乡土植物应用、昆虫鸟类栖息地营造等生物多样性保护目标。市政工程在该场景中的实践,体现的是海绵技术由工程设施向生态空间、社会空间、文化空间三者融合的深刻转变,使得绿地公园不再只是单纯的绿化和休闲场所,而是集雨水管理、生态修复、气候调节、科普教育、社区凝聚为一体的复合型城市绿色基础设施网络,对国土空间规划中蓝绿空间协同治理以及城市人居环境品质系统的改善起到重要的作用。

### 2.3 排水系统优化

海绵理念下市政排水系统的优化,关键在于打破灰色设施和绿色设施的二元割裂,构建以灰绿融合、智慧协同、弹性适应为特点的现代化排水新体系。在科学评价的基础上,保留并优化必需的管渠系统以保证基本排水能力,同时战略性增加分布式调蓄池、地下储水模块、生态滤池等绿色节点,对系统进行功能扩容、韧性加固和生态赋能;智能截流装置根据实时水质传感器的数据以及预设的阈值,准确地将高污染浓度的初期雨水送往污水处理厂进行深度处理,而中后期较清洁的雨水则被送到调蓄设施错峰排放或者资源化利用,大大降低合流制溢流对受纳水体造成的冲击<sup>[4]</sup>。

此外,依靠高精度水力模型、物联网感知网络和云计算平台,构建排水系统的数字孪生体,可实现管网运行状况实时可视化、分钟级降雨预测和设施群动态联调联控,比如提前预降水位以腾出调蓄库容,在暴雨来临之前对泵站启停进行智能控制,在降雨过程中根据实际情况合理调节闸门开度等。这样一种优化既提高了排水系统的蓄排结合、绿灰协同的综合抗灾能力,又通过雨水资源化利用来降低城市供水压力和碳排放,促使排水功能由单一防涝安全转向水安全、水环境、水资源、水生态“四水共治”和低碳运维的系统性提升,为城市水系统智慧化、精细化、可持续化管理打下坚实的技术基础。

### 2.4 建筑与小区改造

建筑和小区作为城市最小的治理单元和居民的基本生活空间,其海绵化改造是理念落实的微观基础、公众感知的重要窗口、社区治理的新载体。技术的应

用以建筑本体和周边微环境的精细化协同和功能复合为出发点,绿色屋顶系统通过植被层、蓄排水板、过滤介质、防水层等科学构造来有效地截留屋面雨水30%~50%,大大降低建筑夏季空调负荷和热岛效应,延长屋面使用寿命;小区内庭院、停车场、活动场所普遍使用透水铺装及嵌草砖,重新塑造地表的渗透性,加快雨水下渗到地下水中的速度,减缓局部积水以及热环境的问题;结合建筑雨水立管断接技术,把屋面雨水经过消能处理之后输送到周边的雨水花园、植草沟或者地下蓄水模块里去,经过自然净化之后作为绿化浇灌、道路冲洗、景观补水之用,极大地提高非传统水源利用率和社区水资源自给程度。

在老旧小区综合改造和城市更新行动当中,以低成本、易维护的渗透井、生态树池、下凹绿地等设施进行改造,不仅可以系统地改善排水微循环条件,并且可以优化社区微环境、提高景观品质与居民生活舒适度,从而增进公众的获得感以及参与感。市政工程在该领域深化实践,体现出海绵技术由宏观规划走向社区治理、公众参与、文化培育的过程,强调设施功能同日常生活场景、社区文化认同的有机融合,使海绵理念内化为社区可持续发展的基因和居民的绿色生活方式,给构建安全、绿色、健康、宜居的韧性社区和完整的社区提供可以复制、可以推广的实践范式。

### 3 市政工程中海绵城市技术运用未来发展趋势

#### 3.1 智能化与数字化深度融合

未来的海绵城市先进技术将被融入智慧城市数字底座,依靠物联网、大数据、人工智能、数字孪生等技术,创建一个智能的水系统管理中心。高密度的雨量计、水位计等设备构成感知网络,实时采集数据。结合水文模型和气象预报,系统可以进行径流预测和设施模拟,给出调度方案,如调节调蓄池水位等。数字孪生平台创建虚拟映射,可以做规划预演、情景推演和决策优化,把原来的被动应对变为现在的主动预测。

#### 3.2 多目标协同与系统集成强化

海绵城市技术的发展会冲破单一的雨水管理目的,深入到城市碳中和、生物多样性保护、人居环境改善等国家战略当中去,走向多目标共同治理的新时代。技术选择和空间布局要综合考虑径流控制、污染削减等各方面的效益,推进设施功能复合化和空间集约化,比如结合雨水湿地和城市公园,在道路绿化带上布置相关的模块。加强海绵设施同市政管网等各方面的联系,创建起全链条闭环和多尺度联动的协同治理体系<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 韧性提升与气候变化适应

面对气候变化所造成的暴雨强度增大、干旱频率增加等不确定因素,海绵城市技术会强调气候韧性的导向,重视提高系统对极端事件的抵抗能力和恢复能力。技术的发展会使设施设计标准和冗余度提高,研究开发新的材料、模块化的可扩展调蓄结构,形成以风险评价为基础的适应性管理方式,将实际情况作为基础来确定设施运行阈值,并制定相应的应急预案。同时把海绵城市建设同流域综合治理、生态修复工程紧密地结合在一起,在区域尺度上加强水循环的稳定性,比如恢复河漫滩、建设生态廊道来提高流域的蓄滞能力。

### 4 结束语

海绵城市技术在市政工程中的系统化、规模化应用,改变了城市和水的关系,体现了基础设施建设哲学由征服自然转向顺应、利用、修复自然的发展方向。通过对概念内涵的把握、技术体系的构建、关键场景的嵌入、未来趋势的布局来体现海绵城市的综合价值在于提高城市水安全韧性、改善生态环境、实现水资源循环利用、增进社会福祉、推进绿色低碳发展。未来,市政工程领域要推进跨学科技术创新,健全全生命周期标准规范及跨部门协同治理机制,促使海绵理念由示范项目向全域普及、由工程建设拓展到智慧运维和公众共治。只有把生态智慧、系统思维和人文关怀融入城市规划、建设和治理当中,才能创建起人水和谐、安全韧性现代化的城市空间,给全球城市的可持续发展提供实践范例,助力美丽中国与人类命运共同体的建设。

#### 参考文献:

- [1] 王飞.海绵城市理念在市政给排水设计中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023(18):202-204.
- [2] 胡晓惠,刘艳涛,史成波,等.海绵城市理念在市政道路给排水设计中的应用[J].中国住宅设施,2023(05):103-105.
- [3] 林朝华.海绵城市理念下的市政路桥设计研究[J].江西建材,2023(04):126-127,132.
- [4] 黄兴勇.海绵城市理念在市政工程中的应用[J].江西建材,2023(01):351-352.
- [5] 李晓晓.海绵城市理念在市政给排水设计中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2023(03):125-127.

# 水利工程运行期沉降观测与安全评估

陈炳东

(安徽省六安市淠史杭灌区管理总局史河总干渠管理局, 安徽 六安 237005)

**摘要** 水利工程长期运行受荷载、材料老化、水文地质条件演变等因素影响, 易产生不均匀沉降, 威胁结构安全与功能完整。沉降观测是运行期安全监测的主要手段, 技术体系、数据处理方法以及评价指标的科学性会影响工程风险预警和处置的效果。本文论述了水利工程运行期沉降观测技术体系, 即观测目标、观测方法选型及布点原则; 分析了数据采集、传输、修正及趋势建模等关键技术路径; 构建了以结构安全、功能完整、环境适应性为多维指标的评价体系; 提出了沉降异常分级响应、动态调控、应急加固、长期维护四种处置方案。全文突出技术集成、系统协同, 以期水利工程全生命周期安全管理提供参考。

**关键词** 水利工程运行期; 沉降观测; 安全评估; 数据处理; 异常处置

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.029

## 0 引言

水利工程是国家基础设施的重要组成部分, 其安全稳定运行关系到防洪、供水等各项功能的实现。工程运行之后, 由于土体固结、基础蠕变等原因, 结构物会存在沉降现象, 在软基等区域不均匀沉降会引发各种问题。因此, 建立沉降观测体系并进行安全评估是水利工程运行管理的重要环节。当前新技术融合应用使沉降监测向智能化发展, 但将海量观测数据转化为安全判断并制定应对策略仍是工程实践待深入研究的课题。

## 1 水利工程运行期沉降观测技术体系

### 1.1 观测目标与核心指标

水利工程运行期沉降观测的主要目的在于动态掌握结构物及其地基变形状态, 为安全评价和决策提供量化依据。观测内容为绝对沉降量, 更关注差异沉降、沉降速率、沉降梯度等指标。差异沉降体现相邻部位或者不同结构单元的相对位移, 是判断结构协调性及裂缝风险的主要参数; 沉降速率体现变形的活跃程度,

短期内突增预示地质条件突变或者结构损伤; 沉降梯度评价局部倾斜程度, 对高耸或者敏感结构尤其重要; 长期沉降趋势经由时间序列分析显示固结完成情况和残余变形潜力。这些指标构成为沉降安全判断的多维坐标系, 根据工程类型、地质条件、设计允许值来设定阈值, 保证观测结果有工程意义和预警价值<sup>[1]</sup>。

### 1.2 观测方法与设备选型

现代水利工程沉降观测形成多层次、多源融合的技术体系, 主要有精密水准测量、静力水准仪、GNSS/GNSS-RTK、光纤光栅传感器、合成孔径雷达干涉(InSAR)和自动化沉降板等(见表1)。精密水准测量是基准控制网和关键断面高精度测量的手段, 其长期稳定性已通过验证; 静力水准仪利用连通液原理实现毫米级甚至亚毫米级连续监测, 适合于廊道等受限空间; GNSS技术具有全天候、广覆盖的优势, 可以对线性工程全域位移进行监测, 结合北斗三号可以实现厘米级实时定位; 光纤光栅传感器嵌入结构内部, 可以同时获得应变和温度信息, 实现沉降和应力耦合分析; InSAR利

表1 水利工程常用沉降观测方法性能对比

观测方法	典型精度	适用场景	主要局限
精密水准测量	$\pm 0.3 \text{ mm/km}$	基准网、关键断面	人工操作、效率低、受天气影响
静力水准仪	$\pm 0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$	廊道、厂房、隧道	需液路连通、维护复杂
GNSS/GNSS-RTK	$\pm 5 \sim 10 \text{ mm}$ (平面) $\pm 10 \sim 20 \text{ mm}$ (高程)	大坝、堤防、边坡	高程精度较低、需视空条件
光纤光栅传感器	$\pm 1 \mu \varepsilon$ (应变) 对应沉降 $\approx 0.1 \text{ mm}$	结构内部、嵌入式监测	安装复杂、成本高
InSAR	$\pm 2 \sim 5 \text{ mm/年}$	大范围地表形变	时间分辨率低、受植被/湿度影响

作者简介: 陈炳东(1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

用卫星遥感数据反演地表形变场,适用于大范围、无人区或者难布设地面设备区域。设备选型要兼顾精度要求、环境适应性、维护成本和数据融合能力,优先选用具有自动采集、远程传输和自诊断功能的智能传感器,建立空、天、地一体化监测网络<sup>[2]</sup>。

### 1.3 观测点布设基本原则

观测点科学布设是保证沉降数据有代表性、有效性的前提。布设要遵循重点突出、系统覆盖、动态调整这三个准则。重点突出是指在坝踵、坝趾、闸墩基础、穿堤建筑物接口、软硬土层交界处等结构关键部位加密布点,捕捉高风险区域变形特征;系统覆盖是指沿工程轴线、横断面和典型地质单元形成网格化监测网络,保证空间连续性、可比性;动态调整是根据初期观测结果和工程运行状态,对沉降异常区或者新增隐患点进行补充布设。观测点要具有良好的稳定性、可复测性,不能设置在容易受到冲刷、冻胀或者人为干扰的地方。大型水利工程应设置基准点、工作基点和观测点三级控制体系,基准点应设在稳定岩基或深层不动体上,工作基点用于日常联测,观测点直接反映结构变形。合理的布点方案可以提高监测效率,也可以给后续的数据插值、模型反演、风险分区提供空间支撑。

## 2 沉降观测数据管理与分析方法

### 2.1 数据采集与传输规范

沉降观测数据质量的好坏首先取决于采集和传输过程是否标准化、可靠。现代自动化监测系统一般采用传感器、采集器、通信模块、数据中心四个层次的结构。传感器按照预设频率(1次/小时、1次/天)输出原始信号,采集器进行模数转换、时间戳标记和初步滤波,通信模块通过4G/5G、LoRa、NB-IoT或者光纤网络把数据实时上传到云平台,数据中心对数据进行存储、校验和分发。为了保证数据的一致性,需要统一时间基准(一般采用UTC或者北斗授时)、坐标系(一般采用CGCS2000)、单位制。还需建立数据完整性检查机制,对于缺失、跳变或者超限值的进行自动报警,并支持断点续传以及冗余备份。人工观测数据要严格按外业记录规范执行,用电子手簿录入,防止转录误差。所有数据均应附有元信息,即设备ID、观测时间、环境温湿度、操作人员等,以便日后溯源以及质量评定<sup>[3]</sup>。

### 2.2 数据处理与修正技术

原始观测数据会受到系统误差和随机噪声的干扰,只有经过严格处理后才能用作分析。主要修正内容有

仪器零漂校正、温度漂移补偿、大气折射改正(GNSS高程)、潮汐负荷影响剔除(近海工程)、多路径效应抑制。对于静力水准系统还需做液体密度变化修正和管路气泡检测;InSAR数据还需做大气相位滤波和地形相位去除。数据清洗阶段使用滑动平均、小波去噪、卡尔曼滤波等算法可以抑制高频噪声,保留真实的变形信号。另外不同来源的数据需要时空配准、坐标转换,例如把GNSS三维位移投影到垂直方向,或者把光纤应变反演成等效沉降量。高质量的数据处理是趋势分析的前提,也是多源数据融合的基础,直接影响后面安全评估的准确性。

### 2.3 沉降趋势分析模型

沉降趋势分析是通过时序数据提取变形规律,预测未来状态,识别异常模式。常用的模型有时间序列分析(ARIMA、SARIMA)、机器学习方法(LSTM、GRU神经网络)、物理机制模型(Terzaghi固结理论、Biot多孔介质模型)。时间序列模型适合于平稳或者季节性沉降过程,可以拟合历史趋势并做短期预测;深度学习模型能有效地捕捉非线性、非平稳变形特征,在存在突变或者加速阶段时表现较好;物理模型虽然需要较多的参数,但是可以揭示沉降机理,适合于机理明确的土石坝或者软基工程。近些年来,融合模型(物理信息神经网络PINN)成为研究热点,把物理约束嵌入到神经网络当中,既能做到数据驱动,又能保持机理可解释性。

## 3 水利工程安全评估指标体系

### 3.1 结构安全性评估标准

结构安全性评价主要是沉降对工程承载能力、稳定性的直接影响。核心判据有沉降量是否超过设计允许值(《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247-2018)中对坝顶沉降的限值)、差异沉降是否造成结构开裂或者接缝失效、沉降速率是否呈加速趋势( $d^2s/dt^2 > 0$ )。对混凝土结构,还需评价沉降造成的附加应力是否大于材料的抗拉强度;对土石坝,还需结合沉降和渗流数据来判断是否引起内部侵蚀或者渗透破坏。评价标准应分等级来设定,正常态沉降稳定、速率小于0.1 mm/月,预警态沉降速率突变或接近阈值,危险态沉降超限或伴有裂缝、渗漏。除此之外,还需要使用可靠性指标(失效概率)或者安全系数折减法,把沉降效应加到整体稳定分析框架里去,从“是否超限”转变成“风险有多大”<sup>[4]</sup>。

### 3.2 功能完整性评估要点

功能完整性评价主要看沉降对工程运行效能的影响。水闸由于不均匀沉降造成闸门卡阻或者止水失效,

泵站基础倾斜造成机组振动超标,输水渠道沉降造成坡降改变或者接口错位,堤防沉降降低防洪高程。评价要联系运行参数(启闭力、振动频谱、流量损失)和沉降数据来加以联系。关键之处在于创建起“沉降—功能退化”的对应关系,比如用有限元模拟算出各种沉降状况下闸室变形和止水压缩量,或者用实测数据来拟合沉降和渗漏量的经验公式。评价结果要变成可操作的运维建议,也在于改变闸门启闭程序、加强止水检修或者改善调度方案避开高风险工况。

### 3.3 环境影响评估维度

沉降不但影响工程本身,还会对周边环境造成连锁反应。评估维度包括邻近建筑物(居民房、桥梁)基础扰动、地下管线(供水、燃气)拉伸或剪切风险、地表水系(河道、湖泊)连通性改变、生态湿地水文格局干扰。尤其在城市水利工程或者生态敏感区,需要用影响半径法或者数值模拟(FLAC3D、PLAXIS)来预测沉降扩散范围和强度。环境影响评价要融入工程的全过程管理当中,它是沉降控制目标确定的重要参照。穿越生态保护区的引水渠工程,即使结构沉降未超限,预测会致使湿地干涸的,也必须采取地基加固或者补偿性补水的措施。

## 4 水利工程运行期沉降异常应对与处置策略

### 4.1 分级响应机制

针对沉降异常要创建起“监测—预警—响应”三级联动机制。一级响应为正常波动,仅做数据复核和趋势跟踪;二级响应是沉降速率或者差异沉降接近预警值的时触发,进行专项巡查、加密观测、初步分析原因;三级响应是在超限或者伴随结构损伤时启动的,立即组织专家会诊、限制运行工况(降低库水位、暂停闸门操作),启动应急预案。响应级别要和工程的重要程度、失事后果和社会影响相适应,保证资源的精准投放<sup>[5]</sup>。该机制要嵌入智慧水利平台当中,实现自动识别并推送流程,从而缩减决策链条。

### 4.2 动态调控措施

动态调控在于通过运行参数的调整来减缓沉降的发展。例如在土石坝运行中控制库水位升降速率,防止水位突然下降造成上游坝坡失稳或者下游渗压突增,在软基堤防中采用分期加载、间歇蓄水的方式给地基充分的固结时间,在泵站群调度中均衡各机组的运行时长,减少局部基础反复荷载。此类措施成本低、见效快,但是需要根据沉降—荷载响应模型进行仿真优化,防止调控不当引起新的问题。动态调控要同时监测数据闭环联动,创建起“感知—分析—决策—执行—反馈”的智能调控回路。

### 4.3 应急加固技术

当沉降已经影响到结构安全的时,就要采取快速加固。常用的有微型桩或注浆桩托换基础提高承载力、高压旋喷桩或深层搅拌桩形成止水帷幕控制渗流侵蚀、碳纤维布或钢板粘贴修复裂缝恢复结构整体性、土工格栅加筋或反压平台稳定边坡。应急加固要快、准、稳三个字,快指施工周期短,预制微型桩可在 72 小时内完成,准指针对成因精准施策,渗流导致的管涌要优先封堵而不是单纯压重,稳指加固后持续监测验证效果。技术选型要考虑到现场情况、材料是否可以获取、后期维护是否方便。

### 4.4 长期维护与适应性管理

沉降治理不是一劳永逸的,应该纳入长期的维护体系。一方面定期更新沉降观测网,淘汰老化的仪器设备,补充新型传感器;另一方面根据多年来的观测数据修订安全阈值和评估模型,使标准不断动态发展。更重要的是推行适应性管理理念,即承认不确定性,用监测、学习、调整的循环来不断改善应对能力。建立沉降数字孪生模型,模拟不同气候情景(极端降雨、干旱)下长期变形,提前做好防护措施;设立沉降风险管理基金,保证应急资源储备。长期维护不但是技术行为,更是制度安排,要明确责任主体、资金渠道和考核机制,保证沉降防控的可持续。

## 5 结束语

水利工程运行期沉降观测及安全评价属于系统且技术密集型工作,涉及多学科交叉和多技术融合。随着智能传感等先进技术的发展,沉降监测正处在高精度、强智能、广覆盖的新阶段。但是技术进步要同管理机制、标准体系、工程实践深度融合,才能转化为风险防控能力。未来要推动观测数据标准化、评估模型通用化、处置策略智能化,创建现代化沉降安全管理体系,保证水利工程长久安全运行。

### 参考文献:

- [1] 简学兴. 水利工程中软土地基处理技术与要点管理[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(32):190-192.
- [2] 王常生. 水利工程软基处理问题研究[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(22):199-201.
- [3] 康健. 水利工程运行管理强化提升问题研究及对策建议[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(S1):346-349.
- [4] 陈祥梅,王萍. 水利工程运行与管理中的安全风险评估与控制[J]. 水上安全,2023(14):172-174.
- [5] 韩国源. 浅谈安全管理在水利工程运行过程中的重要性[J]. 水上安全,2023(09):130-132.

# 建筑工程房产测绘技术应用与质量控制研究

高春娥

(廊坊市达宏人力资源有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要** 建筑工程房产测绘贯穿房产开发、交易与日常管理的全部环节,是房产相关工作中不可或缺的基础性内容。测绘成果的精准程度直接关系到房产产权人自身的合法权益,也会影响建筑工程的施工质量和后续房产管理的规范程度。本文结合当前房产测绘的实际工作,梳理常用测绘技术的应用细节,探索可行的质量控制方法,旨在为提升测绘成果的精度提供技术参考,助力测绘行业规范发展。

**关键词** 建筑工程;房产测绘;GPS定位技术;全站仪测绘技术;测绘精度

中图分类号:TB2;F293.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.030

## 0 引言

建筑工程房产测绘包含地形、平面控制、要素测量及面积测算等环节,是衔接建筑施工与房产管理的重要纽带。测绘质量直接影响房产产权登记的准确性和交易的公正性,对工程施工布局与竣工验收也具有重要影响。当前建筑行业稳步发展,带动房产测绘需求增加,新型测绘技术的应用,对技术规范和质量管控提出更高要求,研究测绘技术应用要点、强化质量控制,对提升测绘水平、保障房产行业健康发展意义重大。

## 1 建筑工程房产测绘的工作原则

### 1.1 合法性

房产测绘工作开展当中,工作人员每一项测绘相关的操作,都必须严格遵照《中华人民共和国测绘法》《房产测量规范》等相关的法律法规与技术标准。工作人员应按照法定的测绘流程、明确的技术要求去推进各项工作,确保自身的测绘行为合法合规,出具的每一份测绘成果都拥有合法的效力。工作中不能有违规操作、弄虚作假的行为,严禁篡改测绘相关的数据和成果资料。

### 1.2 精准性

测绘精度关系着房产产权人的合法权益,也会影响到房产交易的公正与否,所以在整个测绘工作中,工作人员都要严格控制可能出现的测绘误差,确保采集、整理的测绘数据真实准确。从测绘仪器的提前校准、测绘技术的合理选择,到具体操作的规范执行、最终数据的严格审核,每一个环节都要严格把控,将测绘误差控制在相关规范允许的范围以内。

### 1.3 现势性

现阶段,我国城镇化发展速度持续加快,“数字城市”伴生“数字房产”理念的产生,房产测绘现势性的特征也开始明显。房产测绘不再局限于测量房屋的面积,也向建设工程等其他领域展开。同时,也能为城市的大比例尺地形图的定期更新、“数字城市”建设提供基础服务,给予测绘作业高效完成中的数据支撑。

## 2 建筑工程房产测绘常用技术及应用要点

### 2.1 GPS定位技术

当前房产测绘领域里,GPS定位技术是应用较普遍的新型测绘技术,定位精度高、易操作、外界环境干扰小。实际开展测绘工作时,GPS定位技术主要用在房产平面控制测量、房产界址测量这两个关键环节,可以较好地解决传统测绘技术在复杂环境下定位难、精度达不到规定标准等实际问题。

房产平面控制测量环节,GPS定位技术的应用可简化整个控制测量的流程,降低工作人员的测量难度。以往开展平面控制测量,大多采用导线测量、三角测量这类传统方法,受测区地形的起伏、周边树木或建筑物遮挡等各种因素的影响很大,测量的流程十分繁琐,工作效率也得不到提升,最终测量出来的精度也很难得到有效保障。GPS定位技术不采用布设复杂的控制网,工作人员只需在测区范围内,合理布设一定数量的GPS控制点,再通过GPS接收机接收卫星信号,经过简单的数据整理和处理,就能得到精准的控制点坐标,定位精度可以达到厘米级,完全满足房产测绘对控制基准的高精度要求<sup>[1]</sup>。

工作人员使用这项技术时,一定要结合测区的实

作者简介:高春娥(1987-),女,本科,研究方向:工程测量与不动产测绘。

际地形、周边的环境条件,合理布设 GPS 控制点。控制点的位置,需要选在视野开阔、没有明显遮挡物的地方,而且必须远离高压线路、变电站这些容易产生信号干扰的区域,这样才能确保卫星信号接收的稳定性,减少信号干扰带来的测量误差。工作人员还要提前对 GPS 接收机进行校准,仔细检查仪器的运行状态,确保仪器设备能正常工作,最大限度减少仪器本身的误差对测绘成果的影响。数据采集完成后,还要对采集到的 GPS 数据进行严格处理和审核,将异常的数据全部剔除,确保控制点坐标的准确性,为后续各项测绘工作的顺利开展打好基础。

房产界址测量环节, GPS 定位技术能快速且精准地测定出房产界址点的具体坐标,清晰界定房产的权属范围,有效避免因界址模糊引发的各类纠纷。对于地形复杂、界址点分布又比较分散的测区, GPS 定位技术的优势能充分发挥出来,不需要工作人员在现场布设大量测站,就可以顺利完成所有界址点的精准定位,大幅提升测绘工作的效率,节省人力和时间成本。

## 2.2 全站仪测绘技术

全站仪测绘技术有效整合了测角、测距、测高差这三种功能,经过多年的发展和完善,操作流程越来越规范,测量精度也在不断提升,在当前的房产测绘工作中占据着重要的位置。该技术尤其适合用在房屋密集、地形复杂,且 GPS 信号容易被遮挡的测区,常被应用在房产要素测量、房产面积测算等核心环节,弥补 GPS 定位技术在遮挡区域的应用短板。

房产要素测量环节,全站仪测绘技术能精准测定出房屋的具体位置、建筑层数、结构类型、权属界址等相关要素,为房产面积测算和产权登记工作提供精准可靠的数据支撑。工作人员操作全站仪时,会对房屋的各个特征点进行精准观测,实时记录下观测到的角度、距离、高差等相关数据,再经过简单的数据处理,就能获得房屋特征点的坐标,进而绘制出房产平面图,清晰直观地呈现出房屋的实际布局和各项要素信息,为后续工作提供支持。

工作人员应用全站仪测绘技术的过程中,要提前对全站仪进行全面校准,仔细检查仪器的测角精度和测距精度,确保仪器设备能正常运行,避免因仪器本身的误差影响最终的测绘成果。观测时,要严格按照仪器操作规范进行,根据实际情况适时调整全站仪的角度和高度,确保观测视线清晰、没有遮挡,最大限度减少观测过程中产生的误差。房屋密集的区域,要合理选择测站位置,确保能观测到房屋的所有特征点,避免漏测、错测。同时,要对观测数据进行实时记录和核对,发现异常数据及时重新观测,确保观测数据的准确可靠。

房产面积测算环节,全站仪测绘技术能精准测定出房屋各边的边长、各内角的角度等关键数据,为面积测算提供可靠依据。工作人员通过全站仪测定房屋各边长度、各内角角度,再结合房屋的实际结构类型,严格按照相关规范要求,准确计算出房屋的建筑面积、套内建筑面积、共有建筑面积等数据,确保面积测算结果的准确性,为房产交易和产权登记工作提供有力支撑<sup>[2]</sup>。

## 2.3 无人机测绘技术

无人机测绘技术是近年来快速发展的新型测绘技术,机动灵活、测绘范围广、工作效率高,而且投入成本相对较低,如今已逐渐应用到建筑工程房产测绘领域。这种技术适合大型住宅小区、工业园区等大范围房产测绘项目,能有效解决传统测绘技术在大范围测区测绘效率低、投入成本高的实际问题。

大范围房产平面控制测量环节,无人机测绘技术能快速完成测区航拍工作,获取测区清晰的高清影像资料,为控制测量提供可靠支撑。工作人员操作无人机对整个测区全面航拍,获取完整的高清影像,再通过专业影像处理软件对影像资料进行细致处理,提取测区的地形、地物等信息,之后合理布设 GPS 控制点,精准测定控制点坐标,为后续测绘工作打好基础。和传统控制测量方法相比,无人机测绘技术能大幅缩短测绘时间、提升效率,适合地形复杂、范围较大的测区,能有效减少工作人员的工作量。

房产要素测量环节,无人机测绘技术能快速获取房屋的整体布局、权属界址等信息,辅助工作人员顺利完成要素测量。对于范围大、房屋密集的测区,工作人员通过无人机航拍获取高清影像,再结合全站仪、GPS 定位技术,能快速精准地测定房屋的位置、建筑层数、结构类型等要素,避免漏测、错测,进一步提升测绘效率和精度。

工作人员应用无人机测绘技术时,需要结合测区实际情况,合理选择无人机型号和飞行参数,确保航拍影像的清晰度和分辨率,能满足后续测绘需求。提前勘察测区周边环境,避开高压线路、机场等禁飞区域,制定合理飞行路线,确保无人机飞行安全。航拍完成后,还要对获取的影像资料进行严格处理和审核,剔除不合格影像,确保影像资料的准确可靠,为后续测绘工作提供有力支撑。

## 3 建筑工程房产测绘质量控制的有效措施

### 3.1 强化测绘人员队伍建设,提升专业素养与责任意识

房产测绘工作的核心执行主体是测绘人员,他们自身拥有的专业素养和责任意识,关系到最终测绘成

果的质量好坏。想要做好房产测绘质量控制工作,强化测绘人员队伍的建设、着力提升工作人员的专业能力与责任意识,是最基础的前提。

测绘单位要建立起完善的人员培训体系,定期组织内部的测绘工作人员,开展系统性的专业培训。培训的内容全面覆盖房产测绘相关的法律法规、行业技术标准,以及常用测绘技术的实际应用细节、测绘数据处理的具体操作方法这些核心内容。加大对新型测绘技术的培训投入,重点提升工作人员对GPS定位技术、无人机测绘技术、数字化测绘技术等新型技术的实操能力,确保每一位工作人员,都能熟练掌握各类测绘技术的操作流程和行业规范,避免因操作不熟练,引发各类影响质量的隐患<sup>[3]</sup>。

除此之外,测绘单位还要加强对测绘工作人员的职业道德培育和责任意识引导,帮助工作人员牢固树立“质量第一”的工作理念,强化他们自身的工作责任心和职业使命感。工作人员开展各项测绘作业时,都要严格依据行业规范来进行,杜绝敷衍履职、违规操作、弄虚作假这些影响测绘成果质量的不良行为。建立完善的人员考核机制,将测绘成果的质量、工作人员的履职态度、操作规范程度等指标,都纳入考核的范围。对考核优秀的工作人员,给予表彰和奖励;对考核不合格人员,安排专项再培训、再考核,合格之后才能上岗;对严重违规操作、造成重大质量事故的工作人员,要依法追究他们的相应责任,充分调动工作人员的履职积极性和主动性。

### 3.2 加强测绘仪器设备管理,保障仪器精度与正常运行

测绘仪器设备是开展房产测绘工作必不可少的技术工具,仪器设备的精度指标和运行状态,直接影响着测绘成果的准确性。做好房产测绘质量控制工作,加强测绘仪器设备的规范化管理、保障仪器设备的精度达标和正常运行,是重要的支撑。在日常管理过程中,必须严格落实各项管控要求。测绘单位要加大对测绘仪器设备的投入,结合自身实际的作业需求,及时更新技术落后、精度不足的测绘仪器设备,引进精度高、性能稳定的新型测绘仪器设备,确保这些仪器设备,能够满足房产测绘工作对高精度的要求<sup>[4]</sup>。

建立规范的仪器设备校准制度,定期对各类测绘仪器设备开展校准工作,校准周期要严格遵循仪器设备的使用说明和行业规范要求,常规情况下,每年至少开展一次全面校准。对于使用频次比较高、精度要求严格的仪器设备,要适当缩短校准周期。校准工作要委托有相应资质的专业机构来开展,确保校准结果的准确性,经过校准合格的仪器设备,才能投入作业

使用;对校准不合格的仪器,应及时开展维修处理,维修后仍然达不到校准标准的,需要按规定报废,严禁投入作业,避免仪器误差对测绘成果质量造成影响。

### 3.3 规范测绘技术应用,优化技术选择与操作流程

房产测绘工作正式开展之前,工作人员需要深入测绘区现场,开展实地勘察工作,全面掌握测区的地形条件、周边环境、房屋分布情况等实际信息,结合测绘项目的具体需求和行业规范要求,合理选择合适的测绘技术和作业方法。比如,大范围、地形开阔的测区,优先选用GPS定位技术和无人机测绘技术,提升测绘作业的效率;房屋密集、GPS信号容易被遮挡的测区,选用全站仪测绘技术,保障测绘的精度;测绘成果处理的环节,采用数字化测绘技术,提升数据处理的效率和精度。

建立完善的技术操作规范体系,明确各类测绘技术的操作流程、注意事项和质量要求,工作人员开展测绘作业时,需严格按照操作规范来执行,确保技术应用的规范性。房产平面控制测量环节,合理布设控制点,确保控制点的精度达标、分布合理,对控制点的坐标开展严格审核;房产要素测量环节,全面、精准采集房屋的各类要素信息,避免漏测、错测的问题,对观测的数据进行实时记录和核对;房产面积测算环节,严格遵循行业规范要求,结合房屋的实际结构和使用用途,精准测算房屋面积,避免出现面积测算的偏差<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

建筑工程房产测绘工作是支撑房地产行业健康有序发展的重要基础性内容。这项工作的成果质量关系到房产产权人自身的合法权益,也会对建筑工程的施工质量产生影响,同时与后续房产管理工作的规范化推进密切相关。当前各类新型测绘技术的推广应用,为房产测绘工作注入新的活力,有效提升了测绘的效率与精度,也对测绘技术的规范应用、质量管控工作提出了更高的标准与要求。

### 参考文献:

- [1] 褚福侠,杨启超,赵新童.房产测绘中房屋面积测绘问题分析[J].科技创新与应用,2022,12(25):193-196.
- [2] 陈克均.房产测绘技术与测绘质量控制研究[J].住宅产业,2021(12):100-102.
- [3] 刘李.房产测绘的特点及技术应用[J].中国住宅设施,2021(10):5-6.
- [4] 侯嘉臣.建设工程中的房产测绘技术要点分析[J].住宅产业,2024(02):91-93.
- [5] 邓倚娜.房产测绘技术与质量控制策略研究[J].工程建设与设计,2024(04):250-252.

# 建筑工程监理安全管控问题与优化对策探析

丁佳彬

(浙江双圆建设管理有限公司, 浙江 金华 321000)

**摘要** 建筑工程监理作为安全生产的关键监督主体, 对防范施工风险、保障工程安全具有不可替代的作用。本文以当前建筑行业的安全控制需要为出发点, 先确定监理安全管控的中心地位以及实行状况, 再剖析当前工作中存在的人力资源能力、责任落实、信息化运用和协同机制这四个主要问题, 提出相应的改进策略, 并对行业的发展趋势进行探讨, 以期为提高建筑工程监理安全管控水平、推进行业安全管理转型提供参考。

**关键词** 建筑工程监理; 安全管控; 智慧监管; 协同机制; 隐患闭环

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.031

## 0 引言

随着建筑行业的规模化、复杂化、智能化发展, 深基坑、高支模、起重吊装等危大工程所占比例越来越高, 安全管控的难度也越来越大。监理单位作为建设工程各参与方的监督管理者, 依照法律法规的规定来履行安全监督职责, 是防止安全事故发生的关键部门。目前行业内安全监理体系逐步完善, 在实际履职中仍然存在着很多制约管控效能的难题, 部分项目由于监理管控失灵导致发生安全事故, 造成人员伤亡和财产损失。在此背景下, 整理监理安全控制核心责任及现状, 准确发现主要问题, 探究符合行业需要的改进途径, 促使从被动整改转向主动防控, 对于推进建筑工程安全生产形势持续稳定好转具有重要的现实意义。

## 1 建筑工程监理安全管控的核心职责与现状

### 1.1 监理安全管控的核心定位

监理安全管控的核心定位依据的是法律法规对监督责任的界定, 不是施工单位的主体责任, 核心职责是围绕查错、纠偏、报告来形成闭环管理。在施工的全过程之中, 监理工程师审查施工单位的安全资质、专项方案以及人员设备是否符合要求, 主要审查危大工程专项方案; 事中现场巡查、旁站监督, 检查施工与安全规范的契合程度, 防止违规行为发生, 发现安全隐患及时整改, 对于施工单位拒不整改或者冒险作业的, 有权下达停工令并上报。该种定位明确履职边界, 加强安全监管中心的地位, 保证安全管控落到实处<sup>[1]</sup>。

### 1.2 当前安全管控的普遍实施情况

目前, 建筑工程监理安全控制已形成基础工作体系, 多数项目按照规范配备专职人员, 建立巡查、例会、评估等制度, 对危大工程重点旁站。行业监管越来越严格, 监理资料的管理也更加规范, 在部分项目中使用了智慧工地设备。但是行业管控效能不平衡, 大型和重点项目资源充足、监管严格, 管控措施得到落实; 中小型项目由于成本、人员原因, 存在监理履职形式化、隐患排查不深入、整改不到位的问题, 智慧化管控大多停留在表面, 未能形成系统的防控能力。

## 2 建筑工程监理安全管控中的突出问题

### 2.1 监理人员专业能力与管控需求不匹配

监理人员的专业素养是控制工程质量的关键, 但是目前行业内部分监理人员的能力不能满足复杂工程的管控要求。一方面, 部分监理人员缺乏系统安全专业培训, 对于危大工程的施工工艺、安全规范更新的内容掌握得不够, 不能及时发现高支模立杆间距过大、脚手架连墙件缺失等隐蔽性的安全隐患; 另一方面, 老龄化和人才流失现象突出, 年轻的监理人员缺少实践经验, 无法应对复杂的工况下出现的突发的安全风险, 而资深人员由于薪酬待遇、职业发展的原因而离职, 造成团队的整体专业能力下降<sup>[2]</sup>。

### 2.2 安全责任落实不到位, 整改闭环机制缺失

未能形成有效的责任体系, 整改闭环失灵属于监理安全控制的主要弊端。部分监理单位未能建立明晰的岗位责任清单, 总监理工程师和专职监理人员权责

作者简介: 丁佳彬 (1991-), 本科, 工程师, 研究方向: 建筑监理安全管理。

不清,造成出现问题之后互相推诿。在隐患整改过程中,部分监理只下达口头整改通知或者书面文件,并没有对整改的过程和结果进行跟踪监督,对于施工单位拖延整改、虚假整改的情况缺少有效的约束手段,造成发现隐患一下达通知一整改无效的恶性循环。

### 2.3 信息化管控水平滞后,传统手段效能不足

目前,大多数项目还采用人工巡查和纸质记录的传统管控方式,信息化的运用较少,造成管控效率低、覆盖范围小。人工巡查由于时间和精力限制,不能达到施工现场24小时全覆盖的效果,在高处作业、有限空间作业等高危环节的实时监控上存在盲区,而且隐患信息传递滞后,不能及时同步到建设、施工等相关方。虽然部分项目设置了监控摄像头、人员定位等设备,但是还未实现数据的互联互通,只起着事后追查的作用,并不能依靠AI分析、数据预警等功能来主动防控。

### 2.4 多方协同机制不健全,管控合力不足

建筑工程安全控制需要建设、施工、监理、设计等方面的共同努力,但是目前各方的协同机制存在着明显的不足。监理单位与施工单位有利益上的矛盾,施工单位为了赶进度而常规地避开监理的监督,对监理提出的安全隐患整改要求采取消极的态度,监理缺乏有效的约束手段来促使施工单位执行整改。监理和设计单位沟通不畅,设计变更未及时同步给监理,造成施工单位按照变更施工之后,监理由于信息滞后不能准确核查是否符合安全规范。此外,施工单位有时会过度干涉监理的工作,甚至要求监理降低安全标准来加快施工进度,进而破坏监理工作独立性和权威性,造成管控合力不能形成。

## 3 建筑工程监理安全管控问题优化有效对策

### 3.1 构建分层培训体系,强化人员能力建设

对于人员能力不足的问题要实行分级分类的培训与考核制度,加强监理安全控制人才队伍建设。监理单位要按照岗位需求来制定出年度的培训计划,分为新入职人员和资深监理,进行有针对性的培训,新入职人员主要加强安全规范、施工工艺等内容的培训,资深人员着重危大工程管理、智慧设备操作等内容的学习,同时分析典型的事故案例来提高隐患识别能力。建立培训考核和绩效相挂钩的制度,对考核不合格者停止其履职资格,以此来促使人员自觉提高自身专业水平。此外,完善薪酬体系和职业发展通道,招揽到高素质安全专业人才,从而解决人才流失的问题<sup>[3]</sup>。

以危大工程专项培训为例,监理单位可以会同行

业协会举办深基坑、高支模等专项培训,聘请第三方专家现场示范隐患排查要点,组织监理人员参加模拟旁站监督,经过实操训练来提高对于模板支撑体系立杆垫板缺失、剪刀撑设置不规范等隐患识别的准确性。培训结束后进行专项考核,考核合格才能参加相应危大工程的监理工作,保证每一个履职人员都有相应的专业能力,从源头上提高管控质量。

### 3.2 完善责任体系,健全隐患闭环管控机制

强化责任落实要明确权责划分和闭环管理流程,保证监理安全管控各个环节有章可循、有据可查。监理单位要制定出详细的岗位责任清单,明确总监理工程师、专职监理人员各自的职责规定,并且把管控责任落实到人,实行“谁巡查、谁负责,谁签字、谁担责”的责任追究制。规范隐患整改流程,对巡查中发现的隐患进行分类登记造册,并下发书面整改通知书,规定整改时限及要求,安排专人跟进整改情况,在整改完毕后逐一核验验收,验收合格方能闭环,对不执行整改要求的施工单位,下达停工令并及时报建设单位和监管部门,依法行使监督权。

在脚手架工程监理中,监理人员巡查到连墙件缺少、防护网破损等隐患之后,及时填入隐患整改台账,确定整改责任人和整改期限,每天追踪整改进度,整改完毕后对连墙件的连接可靠性、防护网的阻燃等级等进行现场检查,保证隐患彻底消除。同时对资料进行规范化管理,要求所有的巡查记录、整改通知书、验收文件等都必须是现场人员当面签字,并且及时归档,严禁代签、补签行为,保证隐患从发现到闭环全过程可以追溯,加强责任约束。

### 3.3 推动智慧化赋能,提升管控精准度与效率

运用AI、物联网、BIM等技术对施工进行升级,达到用智能代替人工的目的,解决传统方式所存在的问题。监理单位应推广使用AI+智慧监管系统,用已有的监控摄像头布置出智能算法来对未戴安全帽、违章高空作业的行为进行15秒的预警并及时干涉,在保证设备正常运行的基础上实时采集深基坑边坡变形、塔吊垂直度变化等数据,达到风险事前预测的目的。创建云端协同平台,集成隐患排查、整改验收、人员设备等各方面的数据,使建设、施工、监理各方可以实时共享信息,提高信息传递速度。利用移动APP来对巡查进行记录,从而达到隐患信息即时上报、整改情况随时更新的目的,提高管理的便利性<sup>[4]</sup>。

以AI智能监管系统应用为例,利用已经部署的监控设备实施物体打击、高处坠落等安全领域的事物检

测,不需要新增额外的硬件投入,极大地减少了该项技术应用的成本。系统可以 24 小时不间断巡查,在巡查中一旦发现违规行为就自动发出报警信息并推送至监理人员手机端,监理人员立刻到达现场进行制止,并将违规行为、整改状况全部录入隐患治理趋势图里,给以后改进控制供给数据支持。使用该种模式之后,单个项目每天的安全隐患发现量会大幅度下降,监理人员无需重复巡查,可将更多的精力投入隐患整改、风险控制的工作当中。

### 3.4 搭建多方协同平台,凝聚管控合力

建立常态化的协同机制,保证监理单位独立履职,形成多方联动的管控格局。建立建设单位、施工单位、监理单位、设计单位四方参加的安全联席会议制度,经常性地沟通交流安全风险信息,共享安全隐患的信息,一起商量并实施整改方案以及防控措施,处理好协作过程中的问题。搭建信息化协同平台,设计变更、施工方案调整等信息及时同步到各方,监理单位可以依据更新的信息来开展监督核查,防止由于信息不对称而造成的管控漏洞。建设单位要尊重监理单位的独立性,不能干涉监理依法履行的安全监督职责,为监理履职创造必要的条件。

以设计变更协同管理为例,由设计单位提出变更文件之后,通过协同平台直接向建设、施工、监理三方发送,监理单位对变更内容进行审核,并对变更后的施工方案是否符合规范作出判断,主要看变更后是否会增加安全风险,如果发现变更会引发高支模荷载超标的隐患,则及时在平台上反馈给设计单位,三方一起修改变更方案。同时,监理单位把变更后的施工监督要点传达到施工单位,规定安全管控的标准,形成设计、监理、施工三者共同控制的链条,保证变更环节的安全可控。

## 4 建筑工程监理安全管控的发展趋势

### 4.1 智能化管控常态化升级

未来 AI、大数据等新技术会和监理安全管控深度融合,在智能管控上不会只是在某个单个隐患的识别上,而是在全过程中控制风险。AI 算法的准确率会不断提高,对于复杂工况下的误判、漏判等问题也会得到解决,从而达到对更多的安全风险进行自动识别和预警的目的;BIM 技术和施工现场数据实时联动,创建数字化孪生模型,实现施工过程可视化监管及风险模拟预判,促使监理的安全管理由被动应对转变为主动防范<sup>[5]</sup>。

### 4.2 标准化与规范化体系完善

随着行业的监管越来越严格,监理的安全控制标准化体系也会不断完善,专项方案审查、隐患排查、整改闭环等各个阶段都会形成统一的操作规范和考核标准。行业将更加明确监理的安全责任边界,对不同的工程、不同的危险性较大的分部分项工程制定出相应的监理履职要求,防止责任界定不清和履职流于表面。信用评价体系同监理安全履职紧密关联,对履职到位、成效明显者予以奖励,对失职渎职者实行惩罚,促使整个行业朝着规范化方向发展。

### 4.3 专业化监理服务转型

在复杂工程工况和管控要求越来越高的情况下,监理单位将朝着专业化方向发展,以危大工程监理、智慧化监管等为发展方向,培养出一支专业能力强的监理队伍。第三方专业的机构将会更多地参与到监理的监管当中去,给项目公司提供专项的安全评估、技术咨询等服务来弥补监理单位对于某些领域的能力不足。监理人员专业化分工会更细,形成对各个施工环节、具有专项能力的专家队伍,提高整个过程控制的专业性及准确性。

## 5 结束语

建筑工程监理安全控制是一项系统工程,关乎施工人员的生命财产安全,更影响着行业的健康发展。目前,行业存在人员能力不足、责任落实不到位、信息化滞后、协同不畅等问题,影响管控效率。通过建立分层培训体系、健全闭环管控机制、推进智慧化赋能、创建多方联动平台等措施,可提高控制的精度和效果。随着智能化的发展以及标准化的推行,监理的安全控制由依赖人工转向利用先进的、高效的、精准的现代化技术,给建筑安全生产筑起坚固防线。监理单位应主动顺应行业发展潮流,强化自身能力建设,严格依法履行监理职责,通过与各方主体协同协作,共同推动建筑安全管理水平迈上新台阶。

### 参考文献:

- [1] 朱跃龙.住宅建筑施工安全事故预防与工程监理对策研究[J].居舍,2025(11):165-168.
- [2] 黄文平.建筑工程监理中的安全管理分析[J].房地产世界,2024(20):104-106.
- [3] 张赛寿.工程监理在建筑施工质量管理中的作用研究[J].江西建材,2024(09):324-326.
- [4] 黄华欣.工程监理对建筑工程高支模施工质量安全控制研究[J].建筑与预算,2022(07):25-27.
- [5] 李安鹏.房建工程安全控制中工程监理的意义分析[J].住宅与房地产,2020(04):120-121.

# 水利工程施工项目风险管理与控制策略研究

傅俊波, 胡江武, 章春雷

(浙江东洲建设咨询有限公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要** 水利工程在实施过程中常常受到自然条件干扰、工序交叉错位与多方协作冲突等因素的共同影响, 风险因素呈现出隐蔽性、传导性与叠加性共存的特征。若缺乏系统性的识别与应对策略, 极易导致质量波动、进度滞后甚至安全事故的发生。为增强风险可控程度, 工程管理需依托风险预警制度、任务调度机制与过程监管路径构建系统化的防控支撑体系。本文围绕风险特征与控制实践展开梳理, 明确风险链条中的关键节点, 旨在推动形成“识别—分级—响应—闭环”的管控逻辑, 为促进水利工程建设目标的有序推进提供借鉴。

**关键词** 水利工程; 风险特征; 分级预警; 调度管理; 过程控制

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.032

## 0 引言

在实际施工场景中, 水利工程常处于地质条件复杂、水文环境多变与管理链条延伸的状态之中。多种风险因素往往在空间上交叉、在时间上叠加, 导致单一风险事件具有蔓延性与持续性。在部分项目中, 管理流程存在盲区, 响应机制滞后, 使局部问题易扩散为系统性障碍。工程的安全性与稳定性不仅限于方案设计的合理性, 更在于执行过程中的风险感知能力与现场应变能力是否协同匹配。在风险难以彻底消除的前提下, 唯有构建动态、结构化的防控机制, 方可保障施工各阶段的稳步运行。

## 1 水利工程施工项目的风险特征分析

### 1.1 风险类型的多样性与交织性

水利项目的风险既来源于自然环境中的不确定扰动, 又嵌套于建设组织结构内部的运行错配中<sup>[1]</sup>。在施工过程中, 山体结构松动、边坡滑移、水位波动等自然条件改变常打破原有施工节奏, 混凝土浇筑中断、基坑支护失衡、施工便道冲毁等现象频发, 物料转运、设备运转与作业安全随之失控。与此同时, 测绘成果滞后、地基处理方案变更、导流设计调整等技术因素常常引发任务计划错位与资源重配压力。工程任务以流水方式推进, 节点间若缺乏联动机制, 就极易造成反馈延迟与现场协调断层。

### 1.2 风险演化的阶段性与传导性

水利工程具有明确的阶段划分, 风险并非静态存在, 而是在不同阶段中以不同方式显现, 并借助项目

链条向后传导。前期阶段中的勘察精度不足、地层判读偏差或水文测算失衡等技术环节失真, 常在后续基坑开挖、围堰施工或大体积混凝土施工中演化为结构失稳、裂缝扩展或冷接隐患。进入中后期后, 结构节点未封闭、隐蔽工程记录缺失等问题在竣工阶段反复暴露, 形成验收返工与责任争议, 干扰交工计划。部分项目中因未建立动态参数校核机制, 致使施工过程中早期设计无法根据实测情况快速修订, 风险沿“数据滞后—方案失准—操作失控”的路径持续扩散, 最终在收尾阶段形成安全与质量双重压力。

## 2 水利工程施工项目风险管理与控制的支撑机制

### 2.1 智能监测与分级预警的制度设计

分级联动体系的设计思路主要是建立“数据采集—数据分析判断级别—指令下发执行”的包含式的逻辑闭环, 在围堰、基坑、导流等敏感地带配置应变、位移、液位等指标报警点, 系统接收到报警数据后即可启动分级响应流程, 现场值班人员能够根据报警级别自动弹出工区、调度和技术岗三种响应措施, 此类体系突出系统可识别、响应有渠道, 记录可追溯的特点, 使现场管理具有连贯性和完整性, 而不是依靠主观臆断来保持报警效果。

### 2.2 项目组织与调度体系建设机制

多作业面交叉情况下, 管理体系不再是纵向指挥命令架构, 而是基于水平互动结构, 在空间和时间节点之间形成平行调度网络。施工企业固定任务节点库, 针对每一个细项任务设置责任人编码及进度安排, 同

作者简介: 傅俊波 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程施工、建设管理。

时通过协作系统将进度记录、资源对接、风险提示实时返回。调度系统也不再依靠单线通报的方式进行,而是以节点闭合状况作为启动条件,进而实施资源重分配或者人员抽调,形成任务推进与反馈双向流通渠道,杜绝了节奏失控以及流程紊乱<sup>[2]</sup>。

### 2.3 高风险工艺的评审与合同约束制度

结构复杂、参数敏感的环节通常内置一些特殊的审查点,其用意不是为了进行流程审批,而是建立一种横向比较的机制以及实行闭合逻辑。施工前对不同的可选施工方案路线从安全保障、材料适配、现场可行性三个层面做比较评估,经过评审结论确定主选方案之后,在合同框架中设立“工艺参数锁定—中途调整机制—偏差问责路径”,一旦出现工艺变更即匹配前期备案和预期偏差范围来判断是否纳入责任认定或者履约考核范畴,以合同作为杠杆形成跨主体的技术实施闭环。

### 2.4 全过程质量控制与人才培养机制

质量管控不是竣工验收制,而是在整个施工过程以内控复核、技能映射、行为记录三要素一体构建闭环逻辑。质量检查制度一般有工序自控检查、节点互验以及系统抽查三个等级,作业人员资格及操作行为同时记录,并建立经验与风险相关联的知识库。培训体系不是集中授课式,而是通过具体工作来推动,通过对任务进行仿真训练、环节嵌入、实时跟踪的方式生成技能模型,并将结果与人员权限对接,使得工艺规程与团队结构相互匹配。

## 3 水利工程施工项目风险管理与控制策略

### 3.1 智能监测与预警技术路径设计

智能监测体系的构建通常以工程结构受力特征与水文变化规律为基础展开,其技术核心在于监测对象的精准分解与参数体系的分层设置。围绕围堰、深基坑、边坡与导流建筑物等关键结构部位,监测内容往往涵盖应力变化、渗压分布、结构位移与变形速率等指标,并按照静态控制参数与动态响应参数进行区分布设。传感设备在运行过程中以固定采样频率生成连续数据流,并同步记录环境扰动与施工工序节点,为后续判断提供完整的时序参照。预警判断环节依托参数模型与阈值体系协同运行,而非简单依靠单一指标触发。系统在接收监测数据后,会将实时值与设计计算值、历史均值及阶段修正系数进行多重比对,以区分施工扰动引起的正常波动与结构状态变化导致的异常趋势。对于进入控制区间的数

据,平台通常采用分段阈值方

式进行分级识别,并结合结构安全储备系数生成响应等级,使预警判断兼具灵敏度与稳定性,避免频繁误报干扰现场节奏。预警信号的执行路径强调与施工控制系统的直接联动。不同等级的预警信息在生成后,会自动关联对应的作业区段、设备运行参数与施工工序状态,并在调度系统中生成约束指令,比如限制开挖深度、调整混凝土浇筑节奏或暂停特定机械运行。现场管理人员在接收到系统指令后,往往依托移动终端完成复核确认,并将现场状态反馈回监测平台,使技术判断与人工核查形成双重校验结构<sup>[3]</sup>。在持续运行过程中,监测与预警系统还承担着参数修正与模型校准功能。系统会对历次预警触发时的监测数据、处置措施与后续结构响应进行关联分析,并据此修订阈值设定与判断权重,使预警模型逐步贴合实际工况。

### 3.2 精细化进度与资源调度平台搭建

进度调度平台的构建通常以工序逻辑建模为起点,系统需先完成作业结构拆解与任务路径编码,将不同作业段按施工阶段、作业面空间位置与资源配套需求进行分类整合。节点数据库以“任务编号—时间窗—资源绑定”三维结构生成执行单元,借助可视化进度图嵌套到平台首页,实现对施工任务的动态联动控制,此类编码结构不仅划分工序间前后关系,还嵌入关键路径偏差容差带,以增强平台对滞后节点的识别能力。数据调度引擎依托滚动更新算法展开,在获取现场反馈参数后对计划模型进行动态修正。进度调整通常结合 BIM 进度模拟模块,将图形化模型与任务路径进行联动,使节点更新动作在工程场景中即时呈现。物资信息、设备运行状态与劳务工效参数均以数据库形式挂载于任务节点之下,任何一类资源参数波动均可反向驱动任务节奏修订,如当施工电梯运行频率下降超过设定阈值时,平台可自动将垂直运输任务标记为延迟风险,并同步调整楼层钢筋吊装任务时间窗,生成多路径响应策略供调度端决策选择。

平台操作侧强调作业数据与现场状态的双向闭环联动。作业负责人可依托移动终端上传工序完成状态、资源消耗情况与异常点标记,系统将对节点状态更新为“待校核”并暂缓后续任务联动。在后台审核人员完成状态确认与材料核销之后,任务状态进入“闭合”状态,下一节点方可进入资源释放与任务派单流程。此类任务闭环逻辑确保平台调度节奏与现场施工同步,不再依赖手动拉动式信息传递,显著压缩时间响应链条。为增强系统适配性与学习能力,平台常搭载任务

历史轨迹分析模块,将已完成节点的工效数据、资源耗用与偏差统计结果进行回溯分析,并在调度参数设定中形成优化建议。

### 3.3 高风险工艺的比选优化机制

工艺比选流程通常以工法结构分解为基础,结合地质参数、施工环境与材料性能生成多维工艺数据库,再依托计算模型生成技术路径矩阵。在复杂水工结构中,围堰闭合、深层灌浆、高压注水试验、大体积混凝土浇筑等关键环节需预设多个可行工艺方案,并对各方案在强度增长速率、温控能力、应力分布与施工时长等维度进行数据建模。建模过程不采用静态分析法,而是结合历史案例仿真曲线、实测参数修正模型与风险权重分布函数构建路径效应指标,以形成“工程量—稳定性—资源需求”三元对比基面。在平台内部执行比选时,系统将预设工艺路径与实际工况参数进行动态适配计算。高填方区常挂接土体湿密度—压实能曲线进行工艺结构回算,地下结构段多依赖静水压模拟与衬砌刚度模型评估混凝土厚度与模板选择,灌浆工序则引入孔网连通性评价与注浆压力调整预测模块<sup>[4]</sup>。在比选界面中,每一工艺路径都形成独立逻辑链,系统按目标优选条件进行权重排序,并输出结构刚度值、围压响应延迟、循环施工时间与资源占用幅度等结果对照表供工程技术团队评估决策。

技术路径一经锁定,平台将在合同接口系统中自动生成“参数锁定表”,包括关键工艺指标、允许变更区间与执行节点的责任清单。为防止过程偏差干扰执行一致性,系统同时建立数据比对通道,将施工过程中参数采集曲线与比选模型基线进行滑动对照。当曲线偏离超过允许容差,平台会自动弹出工艺状态预警,并联动责任人确认是否执行调整或保持当前状态,此类反馈机制保证比选路径不止于理论方案,更在于实操阶段具备持续约束力与数据闭环能力。平台还具备工艺复盘功能,在工程收尾阶段,将路径选择逻辑、执行成本、周期浮动与偏差控制情况生成工艺绩效包,存入工程技术档案库,并按结构类型、设计边界与干扰级别标记索引<sup>[5]</sup>。

### 3.4 信息化联动的全过程质量管控体系

水利工程施工中,质量控制至关重要,安全性、稳定性和后续运用效益的发挥均直接受制于某因素。质量监管的核心职责是确保工程项目在规划、施工及竣工验收各阶段,所有阶段均满足预设品质标准<sup>[6]</sup>。全过程质量控制路径通常以工序信息节点为基本单元,将作业过程结构化编码后嵌入信息平台进行动态追踪。

在任务下达阶段,系统依据结构部位、工艺类型与作业风险等级设定控制指标组,每一控制点匹配材料来源批次、人员资质编号与设备运行参数,并同步生成质量巡检清单。质量反馈机制依托移动终端与可穿戴采集设备完成数据回流,作业人员在节点完成后同步上传图片、材料标签与参数读取值,系统自动比对预设标准区间进行偏差判断。若发现局部指标波动超限,平台会以“提醒—复核—冻结”逻辑启动限定控制程序,对关联任务延迟派单,并将异常标记同步至调度系统与驻场技术组,促使多源联动介入核查。

平台内部设有质量追溯逻辑链条,以“数据闭环”为基本机制,自动将每一任务的施工参数、过程记录与验收数据打包归档,并按结构部位与施工时间双标签建立多维索引。在竣工阶段,系统可快速调取结构单元的全过程质量履历,包含混凝土龄期曲线、钢筋定位图像、材料出库记录与现场人员操作轨迹,实现部位级质量证据自动整合,便于工程验收与审计复查。

## 4 结束语

在工程系统复杂度持续增强的动态演进中,水利施工项目的风险管控应逐步转向数据驱动与系统响应并联的结构化路径。多维信息平台、技术模型与组织机制的耦合,不再局限于执行辅助功能,更承担着识别、判断与纠偏的主动控制角色。风险管理的关键在于打通识别端、执行端与反馈端之间的逻辑链条,使工序响应具备高频识别能力、低延迟联动模式与参数化修正通道,进而增强项目系统对不确定因素的响应强度与结构稳定性。

## 参考文献:

- [1] 宋悦豪,朱倚麟,姚豫.水利工程项目管理中的风险识别与控制策略研究[J].水上安全,2025(04):10-12.
- [2] 朱琛.水利工程施工管理的质量控制措施探究[J].工程与建设,2022,36(02):571-573.
- [3] 陈伟.水利工程施工管理影响因素及应对策略[J].城市建设理论研究(电子版),2023(10):146-148.
- [4] 李根.水利工程施工管理特点及质量控制策略的探讨[J].冶金管理,2021(07):106-107.
- [5] 阮志毅.分析水利施工管理中存在的安全风险及改进措施[J].城市建设理论研究(电子版),2023(33):41-43.
- [6] 李攀.水利工程施工中的质量控制与安全隐患管理分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(26):205-207.

# 配水厂配套管网工程安全管理 精细化措施探析

张传峰

(阜阳市供水有限公司, 安徽 阜阳 236000)

**摘要** 为解决配水厂配套管网工程施工线路长、隐蔽工序多、周边环境复杂带来的安全管控难题, 本文以该类工程安全管理精细化实践为研究对象, 对安全管理精细化落地路径展开探析。从基础保障、全流程管控、风险应急、技术赋能四大维度, 提出完善制度体系、强化人才建设、分解安全责任, 细化施工各阶段管控, 精准开展风险识别与隐患治理、优化应急管理, 依托智能监测、信息化平台及 BIM 技术赋能的综合措施, 旨在构建全方位精细化安全管理模式, 为有效规避施工风险、提升管控效能提供借鉴。

**关键词** 配水厂配套管网工程; 安全管理精细化; 全流程管控; 安全风险防控; 智能化监测技术

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.033

## 0 引言

城市化进程持续推进, 配水厂配套管网作为城市供水保障的“毛细血管”, 工程质量与施工安全直接关系到城市运行韧性。此类工程普遍存在施工线路长、隐蔽工序密集、周边环境复杂等特征, 传统粗放式安全管理已难以适配新形势下的管控需求, 风险防控漏洞与管控效能不足问题日益凸显。推进安全管理精细化, 成为破解管控难题、筑牢工程安全防线的关键路径。立足于工程实际, 从基础保障、流程管控、风险应急、技术赋能等维度构建全方位管理体系, 可精准规避施工风险, 提升安全管控质效, 为城市供水管网长效稳定运行提供坚实的支撑。

## 1 安全管理精细化的基础保障体系

### 1.1 精细化安全管理制度体系构建

完善的制度体系是安全管理精细化落地的核心依据, 为全流程管控提供明确规范支撑。针对配水厂配套管网工程施工特性, 需细化各岗位安全操作规范与流程标准。聚焦沟槽开挖、管道敷设、接口密封等核心环节, 明确操作步骤、质量阈值与安全禁忌, 避免通用制度与工程实际脱节。建立制度动态更新机制, 结合工程进度节点与现场工况变化实时调整, 如穿越市政道路、河道等特殊区段时, 补充针对性管控条款。强化制度执行考核, 将合规情况与岗位绩效直接挂钩, 明确考核指标与评分标准, 定期开展制度落实专项检

查, 对违规行为严肃追责问责, 形成“制定—执行—督查—整改—优化”的完整闭环, 确保制度并非停留在纸面, 真正转化为安全管控的实际效能。

### 1.2 精细化安全管理人才队伍建设

高水平的专业人才是推动安全精细化管理得以落实的核心力量, 需要加强专业能力和职业素养提高, 建设能够匹配管网工程安全管控需要的人才队伍。实施分层分类的安全训练, 着重对管理人员安全管控思路、风险预判水平与制度协调能力的培养; 对于施工人员则集中在实际操作规范、风险辨别技能与紧急情况处理办法; 对于特种作业人员要提升设备操作熟练程度、安全防护关键点, 加强违规操作后果的警示教育, 避免训练内容过于单一<sup>[1]</sup>。设立严格的岗位准入标准, 特种作业人员必须持有有效证件才能上岗, 上岗之前进行实际操作考核与安全认知测验, 不达标的人员不能参加作业。健全人才激励办法, 将安全精细化落实效果作为评优评先、升职加薪的关键参考, 激励员工主动发现管控薄弱环节、给出改进意见, 形成主动落实安全精细化要求的积极环境, 巩固人才保障基础。

### 1.3 安全责任精细化分解与落实

明确分级责任体系, 让安全责任能够一层一层传递下去, 覆盖到每一个员工, 防止出现责任空白和互相推诿的情况。严格遵循“一岗双责”原则, 从项目

作者简介: 张传峰 (1973-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政公用工程。

经理到一线作业人员的各个岗位安全职责都细化开来,清楚划分不同岗位的责任范围、工作标准以及追责的边界,避免因责任不清晰造成管理上的缺失。建立完整的责任追溯链条,对施工各个环节里的安全操作、检查记录、隐患整改等情形做到全程留痕,一旦发生安全问题,就能准确找到责任主体、追溯责任环节,保证问题能够查得清、追得明、问得了责。把责任落实情况放进常态化督查内容里,定期组织责任落实专项核查,重点查看责任分工有没有明确、履职记录是否齐全、问题处置是否及时,对责任落实不到位的岗位和个人加强刚性约束,借助督查推动责任真正落地,形成全员守责、尽责的安全管理局面。

## 2 施工全流程安全精细化管控

### 2.1 施工前期准备阶段精细化管控

精准做好前期筹备工作,从源头规避安全风险,筑牢施工安全基础。开展全面细致的现场勘察,重点核查地质条件、地下管线分布、周边建筑物位置及市政设施运行情况,精准排查软土地基、地下管线交叉、临近易燃易爆设施等隐蔽风险点,形成详细的勘察报告并标注风险等级。结合勘察结果优化施工组织设计,将安全精细化管控要点融入方案编制,明确各阶段安全管控重点、资源配置与防控措施,避免方案与实际工况脱节<sup>[2]</sup>。强化安全技术交底工作,摒弃笼统化交底模式,针对不同工序、不同岗位开展针对性交底,清晰告知作业人员风险点位置、防控方法与应急处置路径,确保全员精准掌握管控要求。

### 2.2 关键施工工序安全精细化管控

重点关注高风险工序,展开精准管理,规范操作流程,降低工序安全隐患,保证工程建造核心环节不出问题。对于沟槽开挖、管道安装、回填压实这类高安全隐患的工序,要专门制定管控流程。沟槽开挖需严格把握好坡度以及支护强度,按照地质情况来调整开挖深度与进度,避免塌方危险;管道安装要管好接口密封质量以及安装精度,做好防腐处理,不让渗漏隐患出现;回填压实需要一层一层进行,控制好压实程度,防止管道因为受力不均而变形,把工序验收制度执行到位,上一道工序做完之后,由专人按照安全标准逐项检查,安全指标不通过绝对不允许进入下一道工序。面对穿越河道、市政主干道、复杂地质区段等特殊情况,要编写专门的安全管理方案,配备专门的设备和防护人员,加强现场管控强度,确保在复杂条件下施工也能安全平稳地进行。

### 2.3 施工材料与设备安全精细化管控

对材料设备的质量与使用安全进行严格把控,从硬件角度为工程的安全稳定打下基础,为管网工程长期平稳运行做好铺垫,制定材料进场检验的细致流程。针对管材、管件、防腐材料等主要材料,查验生产厂家相关资质、产品合格证明以及检测报告,同时安排抽样复测,着重检查材料强度、密封性能、防腐能力等核心指标,防止不合格材料进入现场。明确施工设备进场验收、日常检查与维护保养的要求,设备进场时核对设备型号、性能数据与安全状况,不符合要求的设备不允许进入<sup>[3]</sup>。日常作业前执行设备点检,作业后及时清理保养,定期组织专门检修,重点查看挖掘机、起重机、管道铺设设备等关键设备的机械运转、制动装置与安全保护部件,保证设备一直处于正常运行状态。

## 3 安全风险防控与应急管理精细化

### 3.1 安全风险精细化识别与评估

全面排查各类风险,精准评估风险等级,为针对性防控提供科学依据,实现风险前置管控。建立全周期风险排查机制,覆盖施工准备、工序实施、竣工验收等各阶段,延伸至材料采购、设备租赁、人员调配等各环节,确保风险排查无死角。采用定性与定量结合的科学方法评估风险,定性分析风险发生的可能性,定量测算风险影响范围、危害程度与经济损失,精准划分重大风险、较大风险、一般风险三个等级。分类梳理风险点,按地质风险、设备风险、操作风险、环境风险等类型建立动态风险台账,详细记录风险位置、特征、管控责任人与防控措施,实时更新风险状态。

### 3.2 安全隐患精细化排查与治理

把隐患闭环管理做到位,实现“早发现早处理”,避免造成严重的安全事故。进行经常性的、网格化的隐患排查工作,按照施工区域来划分网格,给每个网格定好排查责任人和排查次数,每天做现场排查,每周做专项排查,每个月做全面排查,保证隐患能够及时发现与处理。确定隐患治理的责任、时间和标准,对于排查找到的隐患,准确认定治理责任主体,依据隐患级别设定治理时间,准备具体的治理方案和整改标准,实行销号管理,隐患整改做完并且验收通过以后才能销号,不达标坚决不销号。加强隐患复查核验,隐患整改过程中跟进检查整改进展,整改结束后组织专项复查,检查整改质量有没有达标、防控措施有没有到位,防止隐患再次出现,对多次出现的隐患深入寻找原因,改进管控流程,从根源上避免同样隐患再一次发生<sup>[4]</sup>。

### 3.3 应急管理精细化建设

完善应急体系,提升应急处置精准程度,减少安全事故带来的损失,筑牢安全管理最后一道防线。结合配水厂配套管网工程特点,制定针对性应急预案,覆盖坍塌、渗漏、触电、火灾等常见安全事故类型,明确应急组织机构、职责分工、处置流程与救援办法,避免应急预案停留在表面。定期开展精细化应急演练,根据不同事故类型设计演练场景,模拟真实事故发生后的处置流程,检验应急预案可行性与应急队伍实战水平,演练后及时总结不足之处,优化应急处置流程与人员调配安排。规范应急物资储备与管理,按应急预案要求储备抢险救援设备、防护用品、应急药品等物资,明确物资储备数量、存放位置与管理责任人,定期检查物资完好性与有效性,及时补充更换过期、损坏物资,确保应急状态下物资能够快速调配使用。

## 4 安全管理精细化的技术赋能措施

### 4.1 智能化监测技术在安全管理中的应用

依托智能化技术实现安全实时监测,提升管控的精准性与时效性,破解传统人工监测效率低、误差大的难题。在沟槽开挖区域、管道敷设路段铺设传感器与物联网设备,实时采集沟槽沉降、边坡位移、管道压力、土壤含水率等关键指标,数据同步传输至管控平台,实现监测数据实时可视化。搭建实时监测预警平台,设定各指标安全阈值,当数据超出阈值时,平台自动触发预警,通过短信、平台消息等方式推送异常信息至相关责任人,确保异常情况可及时响应<sup>[5]</sup>。实现监测数据自动分析,平台通过算法对海量监测数据进行挖掘,预判风险发展趋势,为安全决策提供数据支撑,帮助管理人员提前采取防控措施。

### 4.2 信息化管理平台助力安全精细化管控

借助信息化方式整合管理资源,使安全管理整个流程能够追溯、可以管控,提高安全管理效率和规范化程度。建立一体化的安全管理信息化平台,把隐患排查、责任到位、安全培训、设备维护等不同类别的数据都纳入其中,打破信息各自为政的局面,实现数据集中管理和互相分享。对施工过程中的安全资料进行数字化归档,把安全技术交底记录、隐患整改报告、设备检修记录、培训考核结果这些材料全部用电子形式保存下来,归档流程规范且能够追溯,方便后面查询和核对,取代纸质档案,减少管理开支。依靠平台展开远程督查,管理人员借助平台实时查看施工现场状况、隐患整改进展、制度执行情况,不用到现场盯守就能做到精准管控,提高督查效率,平台自动产生

安全管理数据分析报表,直接展示管控薄弱环节,为管理优化提供数据支持,推动安全管理朝智能化、精准化方向转变。

### 4.3 BIM 技术在安全精细化管理中的实践

借助BIM技术来改进施工安排,加强过程中的管理,为管网工程安全精细化管理提供技术上的帮助。通过利用BIM技术建立三维可视化的模型,重现施工场地、地下管线、周围环境以及工程结构,模仿施工的完整流程,提前找出管道与地下管线相撞、施工空间不够、支护结构冲突等安全问题,优化施工安排和工序之间的配合,从工程建设伊始就减少潜在的危险。依靠BIM模型进行安全技术方面的交底,将抽象的管控规定、风险位置转成容易观察掌握的三维画面,协助作业人员更快地领会交底的内容,准确知道风险点在哪里以及如何防范,从而提高技术交底的实际效果。借助模型随时对照施工进展和安全管控规定,将现场施工的数据与模型数据一起更新,动态地检查工序是否符合要求以及安全指标有没有达到标准,一旦发现有不一致的地方,及时提醒并改正,做到施工过程安全精细化的动态管理,确保工程施工的安全和质量。

## 5 结束语

配水厂配套管网工程安全管理精细化是保障工程质量与施工安全的核心抓手,更是行业高质量发展的必然要求。其落地需兼顾制度刚性、流程规范与技术创新,通过全员参与、全周期管控、全维度赋能,打通安全管理“最后一公里”。本文提出的实践措施已在实际管控中展现出较强可行性,能针对性破解传统管理中的粗放化、碎片化问题。未来需持续优化管理体系,结合工程实际迭代技术应用,推动精细化管理从“落地执行”向“提质增效”升级,筑牢配水厂配套管网工程安全防线,为城市供水保障奠定坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] 龚煜,戎泽华,陈嘉兴.浅谈市政污水管网施工质量及安全管理[J].四川水利,2024,45(S1):49-51.
- [2] 合肥市城乡建设局.风险看得见、城市更安全城市生命线工程安全监测成效显著[J].城乡建设,2022(07):57-59.
- [3] 郑苗苗.市政水环境施工安全管理[J].石油工程建设,2022,44(03):132-134.
- [4] 林忠成,李久春,张道清.市政管网工程建设安全信息管理应用探究[J].清洗世界,2020,36(10):94-95.
- [5] 孔丹丹.浅谈天然气长输管网安全运营中存在的问题及对策措施[J].石化技术,2023,30(12):109-111,100.

# 工程建设电力设备安装与土建施工 协同作业机制探讨

占德坤

(安徽准能瑞腾能源科技有限公司, 安徽 芜湖 241000)

**摘要** 在工程建设中, 电力设备安装与土建施工协同不畅易引发工期延误、质量隐患及资源浪费等问题, 在分布式光伏发电工程中表现尤为突出。本文以奇瑞、瑞腾 7MWp 车棚分布式光伏发电项目为具体研究对象, 聚焦电力设备安装与土建施工协同作业中的进度失衡、技术标准衔接不畅、资源配置不足等核心难点。结合项目施工实际场景剖析问题成因, 针对性构建统一协同管理目标、规范技术标准、梳理作业流程的协同基础, 提出进度联动管控、技术协同对接、资源优化配置的核心策略, 以期提升电力工程协同施工效率、保障工程质量、控制施工成本提供实践参考, 助力同类电力工程实现高效协同作业。

**关键词** 电力设备安装; 土建施工; 协同作业; 分布式光伏

**中图分类号:** TU85

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.034

## 0 引言

当前, 电力工程向规模化、精细化、绿色化加速转型, 分布式光伏发电等新型电力项目快速推进, 对施工协同性提出更高要求。电力设备安装与土建施工作为工程建设核心环节, 二者协同质量直接决定工程工期、质量与成本。在实践中, 二者协同不畅引发的进度脱节、技术冲突、资源浪费等问题, 仍制约新型电力工程高效推进。奇瑞、瑞腾 7MWp 车棚分布式光伏发电项目施工实践显示, 破解协同难点、完善协同机制, 是推动工程提质增效、实现绿色低碳发展目标的关键。本文结合该项目实践, 剖析协同作业核心问题, 探索科学协同路径, 为同类电力工程高效推进提供实践参考。

## 1 工程建设中电力设备安装与土建施工协同核心难点

### 1.1 施工进度协同失衡

电力设备安装与土建施工进度衔接不畅, 导致工期延误、资源浪费。例如: 2023 年奇瑞、瑞腾三奇瑞、瑞腾 7MWp 车棚分布式光伏发电项目, 该项目合同工期 120 日历天, 实际从 4 月 29 日开工至 8 月 23 日竣工, 虽按期完工, 但施工过程中多次出现进度衔接问题。土建施工中停车场车棚基础施工节点滞后 3 天, 直接影响光伏组件支架进场安装时效, 导致设备进场后闲置等待, 增加设备保管成本。同时, 部分高压并网设

备采购进度脱节, 比计划进场时间延迟 5 天, 使得对应区域土建施工完成后处于闲置状态, 施工人员与机械设备利用率下降。

### 1.2 技术标准衔接不畅

电力设备装设与土建施工的技术规范、参数要求未形成统一标准, 易引发施工衔接冲突, 还会埋下质量隐患, 这也是光伏类电力工程协同施工中频发的共性问题。此前奇瑞、瑞腾 7MWp 车棚分布式光伏发电项目推进过程中, 就曾出现多处技术衔接偏差的情况: 土建施工阶段, 三发库停车场 10 kV 高压并网接入设备基础的预留槽钢尺寸, 与设备实际装设要求不匹配, 槽钢预留尺寸偏差超出规范, 导致高压柜并柜间隙不符合相关规定, 并柜铜牌无法顺利安装, 最终不得不开展二次凿孔整改, 既额外增加了施工成本, 也造成了施工进度的延误<sup>[1]</sup>。同时, 设备装设的精度要求与土建施工的误差控制标准存在差异, 钢结构光伏支架基础制作的水平误差管控标准本就严于普通建筑施工, 而土建施工初期按常规建筑误差标准把控, 导致部分支架基础因误差不符合要求, 需要重新进行找平处理。

### 1.3 资源配置协同不足

人力、物力、场地资源分配不合理, 造成资源闲置或者短缺的情况, 对电力工程协同施工的效率与效益产生严重干扰。奇瑞、瑞腾 7MWp 车棚分布式光伏项目在施工开始阶段, 场地资源配置缺少统筹安排, 光

**作者简介:** 占德坤 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

伏组件、逆变器这些设备堆放区域与车棚土建作业区域相互重叠,占用的面积大概有 5 000 m<sup>2</sup>,不仅使土建施工不能正常进行,还加大了设备碰撞损坏的可能性,其中有 1 台逆变器因为场地拥挤在搬运过程中出现轻微损坏,带来额外的维修开支。专业施工人员调配不同步的问题非常明显,土建施工高峰期投入施工人员 32 人,而设备安装人员只配备了 8 人,造成土建施工完成后设备安装进度落后;到了后期设备安装高峰期,安装人员增加到 25 人,土建施工人员只剩下 5 人,出现单一工序人员冗余与交叉工序人员不足同时存在的状况,机械设备共享机制没有建立起来,土建施工配备的起重机与设备安装所需要的起重机没能实现共享,双方各自去租赁设备,导致设备利用率达不到 40%,重复投入的租赁费用大约 12 万元,形成资源浪费。

## 2 电力设备安装与土建施工协同作业基础构建

### 2.1 统一协同管理目标

明确电力设备安装与土建施工双方的共同目标,才能实现工期、质量、安全、成本的协同管控,为协同作业奠定基础,这一目标在分布式光伏等电力工程中需结合项目实际精准锚定。结合奇瑞、瑞腾 7MW<sub>p</sub> 车棚分布式光伏发电项目 120 日历天的合同工期要求,需将总工期拆解为土建施工 60 天、设备安装 45 天、交叉作业 15 天的节点目标,明确土建施工需在 6 月 27 日前完成所有车棚基础制作与钢结构施工,设备安装团队需在 7 月 30 日前完成所有光伏组件与并网设备安装,确保双方施工进度同步衔接<sup>[2]</sup>。在质量管控层面,需统一双方的质量验收标准,针对土建施工与设备安装各环节制定明确的质量达标要求。土建施工中,保障基础浇筑强度达到规范标准,预留孔洞尺寸把控精准,误差控制在允许范围内;设备安装阶段,严控光伏组件安装倾角精度,确保高压并网设备绝缘电阻符合专业标准,全方位保障工程质量满足分布式光伏项目的并网规范。在安全管理方面,同步落实要求,明确交叉作业时需设置安全隔离带,高空作业人员必须佩戴安全防护用品,杜绝高空坠落、设备触电等安全隐患。

### 2.2 规范协同技术标准

将电力设备安装与土建施工的技术规范加以整合,建立统一的技术衔接标准,能够有效避开技术上的冲突,为协同作业提供技术支撑,这同样是处理光伏项目技术衔接问题的核心。针对奇瑞、瑞腾 7MW<sub>p</sub> 车棚分布式光伏发电项目的施工特点,由建设单位带头,组织施工、设计、监理单位一起制定专项施工技术细则,明确土建预留、预埋技术参数与设备安装要求的衔接

标准,钢结构光伏车棚基础的预埋件需严格把控位置偏差,预留孔洞则精准控制中心位置与孔径偏差,使预埋件和预留孔洞的施工精度均契合设备后续安装的适配要求<sup>[3]</sup>。结合土建施工的实际实施可行性与设备安装的精度标准,统一划定全流程施工误差管控范围,对光伏车棚基础浇筑的水平误差允许值做适配性调整,在降低土建施工实操难度的同时,保障误差标准能够满足光伏组件安装的精度要求。高压并网设备基础的垂直度误差控制在 1%以内,确保设备安装的稳定性,规范技术交底流程,施工前组织双方技术人员开展专项交底会议,借助施工图纸详细说明技术要求,同时发放技术交底手册,确保双方技术人员准确掌握协同施工技术标准,避免因理解偏差带来技术冲突,从源头减少质量隐患。

### 2.3 梳理协同作业流程

做好电力设备安装与土建施工的工序衔接工作,明确各个阶段协同要点,形成顺畅的作业流程,提高协同作业效率。这一流程需结合电力工程的施工特点仔细梳理。结合奇瑞、瑞腾 7MW<sub>p</sub> 车棚分布式光伏发电项目的施工内容,全盘梳理关键协同工序,厘清土建施工和设备安装的先后顺序与交叉时段,确定先完成车棚基础浇筑和钢结构施工,再开展光伏组件支架安装工作,最后进行组件铺设和并网设备安装。交叉作业主要放在基础施工、钢结构施工和支架安装衔接段,把交叉作业时段划成 15 天,确定每天的作业时段,避免工序冲突。把多边作业边界划出来,明确土建施工团队负责车棚基础浇筑、设备基础的预留孔洞和预埋件施工。钢结构施工团队负责车棚的钢结构立柱组立、檩条安装等结构件施工。设备安装团队负责光伏组件、导水槽、逆变器、并网设备的采购、进场、安装和调试,将各工序的责任主体和完成时限规划清晰,基础浇筑要在 6 月 27 日前完成,钢结构安装要在 7 月 12 日前完成,组件铺设要在 7 月 25 日前完成。

## 3 电力设备安装与土建施工协同作业核心策略

### 3.1 进度协同管控策略

建立电力设备安装与土建施工的进度联动管控机制,才能实现双方施工进度同步推进、动态适配,确保工程按期完成。这一机制需结合项目实际细化落实。结合奇瑞、瑞腾分布式光伏项目的工期要求,由协同管理团队牵头,联合各方施工负责人制定详细的协同进度计划,明确土建施工、钢结构安装与设备安装的关键节点及衔接要求,细化到每日施工任务,其中基础浇筑按区域划分,每日完成不少于 20 个基础浇筑,

设备采购需在5月20日前完成所有设备招标,6月10日前完成所有设备进场验收<sup>[4]</sup>。建立进度动态监测机制,安排专职人员每日跟踪双方施工进度,采用信息化手段记录施工数据,每日下班前汇总施工进度情况,对比协同进度计划排查偏差,确保偏差及时发现。建立进度调整联动机制,针对排查出的进度偏差,协同各方施工负责人制定补救措施,若土建施工节点滞后,及时增加施工人员与机械设备,延长有效施工时间;若设备进场进度滞后,协调供应商加快供货速度,同时调整土建施工工序,优先推进无设备依赖的施工内容,确保总工期不变。该策略在奇瑞、瑞腾7MWp车棚分布式光伏发电项目中应用后,有效解决了前期进度衔接不畅的问题,确保项目按期竣工。

### 3.2 技术协同衔接策略

加强电力设备安装与土建施工的技术协同对接,可破解技术标准不统一、衔接不顺畅的问题,保证工程质量。这一策略需要贯穿施工整个过程,针对光伏项目技术衔接的重点和难点,成立由建设、施工、设计单位技术人员组成的技术协同小组,明确小组职责,负责多边技术对接、问题排查与解决方案制定,小组每周召开1次技术对接会议,及时解决施工过程中的技术问题。推行图纸会审协同机制,施工前组织技术协同小组、土建施工团队、钢结构施工团队及设备安装团队开展图纸会审,重点排查土建图纸跟安装图纸的矛盾点,结合奇瑞、瑞腾7MWp车棚分布式光伏发电项目实际,提前排查出基础预留孔洞尺寸、预埋件位置等6处矛盾点,及时优化图纸设计,避免施工中出現技术冲突<sup>[5]</sup>。建立技术变更同步机制,施工过程中如果出现技术变更,技术协同小组需要在2小时内将变更内容、变更要求传递给相关施工团队,明确变更后的施工标准与完成时间,同时做好变更记录,保证各方同步落实变更要求,针对技术交底不充分的问题,技术协同小组定期开展技术培训,提升各方施工人员的技术水平,保证技术标准落地执行<sup>[6]</sup>。

### 3.3 资源协同配置策略

优化电力设备安装与土建施工的资源分配方式,才能做到人力、物力、场地这些资源的高效共享、合理使用,降低施工成本,提高施工效率。场地资源配置方面,结合奇瑞、瑞腾7MWp车棚分布式光伏发电项目的施工区域分布,统一规划施工场地,划分出土建施工专门区域、钢结构组装区域及设备安装专门区域还有共享作业区域,设备堆放区域划在施工场地西侧,占地2 000 m<sup>2</sup>,与土建施工区域保持5 m安全距离,

防止场地冲突<sup>[7]</sup>;共享作业区域主要用在交叉作业时候的设备临时堆放和人员操作,明确使用时段与责任主体。专业人员调配方面,建立专业人员协同调配机制,由协同管理团队根据施工节点需要,灵活调动各方施工人员,土建施工高峰期,调出5名设备安装人员帮忙土建施工,设备安装高峰期,调出8名土建施工人员帮忙设备搬运,做到人员合理配置,防止冗余和短缺。机械设备共享方面,搭建机械设备共享平台,明确土建施工配备的起重机、混凝土搅拌机这些设备与设备安装所需设备的共享时段、使用流程和责任划分,使设备利用率提升到75%以上,减少重复租赁成本大概8万元,实现资源高效利用<sup>[8]</sup>。

## 4 结束语

工程建设中电力设备安装与土建施工的协同作业,是保障电力工程高效推进、提质控本的关键环节,二者的协同质量直接关系到工程整体效益与长期安全稳定运行。分布式光伏发电等电力工程的施工实践表明,进度、技术、资源层面的协同难点,需依托系统性的机制构建与策略落地才能有效破解。本文结合具体项目实践,剖析协同核心问题,构建协同基础并提出针对性管控策略,所总结的实践经验与方法,可有效规避工序衔接断层、技术冲突、资源浪费等问题,为同类电力工程协同施工提供借鉴。未来,可结合智能化施工技术的发展,进一步优化协同管控模式,细化协同流程,推动电力设备安装与土建施工协同作业向精细化、高效化、智能化升级,助力电力工程建设高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 李悦. 电力设备安装中的施工配合技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(05):198-200.
- [2] 童炳辉. 电力设备安装中的施工配合技术研究[J]. 新型工业化, 2022,12(08):22-25.
- [3] 宋冬. 提升电力工程土建施工技术的策略分析[J]. 科技资讯, 2024,22(03):65-67.
- [4] 初云祥, 陈永君, 周晓通. 土建施工和电力工程安装配合施工技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(14):209-211.
- [5] 耿艳丽. 土建施工管理在电力建设中的策略研究[J]. 居舍, 2021(36):160-162.
- [6] 魏泽林. 电力安装工程质量存在的问题与系统控制对策[J]. 电工技术, 2022(18):206-209.
- [7] 冷玉冰. 关于电力设备安装运行维护的分析和探讨[J]. 决策探索(中), 2019(02):52.
- [8] 许少冬. 探究如何加强电力设备招标采购管理工作[J]. 市场瞭望, 2024(05):132-134.

# 市政路桥工程监理工作中对沥青路面压实度管控要点的探究

王庆楼

(安徽南巽建设项目管理投资有限公司, 安徽 合肥 230041)

**摘要** 市政路桥工程是城市基础设施建设的核心部分, 常用道路铺设材料包含沥青路面, 其较多运用在高速公路、城市主干道等工程中。控制沥青路面压实度, 对路面使用性能和耐久性作用重大。压实度对路面平整度、承载能力及长期抗压性有直接影响, 还会对交通安全、道路质量和使用寿命造成显著影响, 因此市政路桥项目监理工作要严控沥青路面压实度, 保障其符合设计标准和施工要求, 筑牢工程质量守护交通安全。本文首先分析市政路桥项目监理对沥青路面压实度进行管控的意义, 其次对市政路桥工程中沥青路面压实度的影响因素进行分析, 最后提出市政路桥工程监理工作中对沥青路面压实度的管控要点, 以期为相关人员提供参考。

**关键词** 市政路桥工程; 沥青路面; 压实度

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.035

## 0 引言

市政路桥是城市交通的关键基础设施, 其路面质量直接关系到城市交通的畅通与安全。沥青路面因其行车舒适性好、抗滑性能好等优点, 被广泛应用于市政路桥建设中。压实度作为衡量沥青路面质量的核心指标, 直接影响路面的强度、稳定性和耐久性。

## 1 市政路桥项目监理对沥青路面压实度进行管控的意义

### 1.1 确保交通安全

沥青路面压实度不足或分布不均, 会引发路面出现裂缝、沉陷、起皮等问题, 进而破坏路面平整度和强度, 这类问题持续出现, 会影响乘车舒适体验, 还可能造成重大交通安全隐患, 压实程度不足的路面易出现不规则沉陷或凸起, 尤其经雨水侵蚀或气温变化影响, 路面出现裂缝、坑洞会大幅提升交通事故发生概率。针对高速公路或城市主干道, 车流量大且行车速度快, 路面压实质量差, 车辆驶过或诱发打滑、失控等事故, 尤其遇雨雪天气, 车轮无法和路面实现有效接触, 很容易出现交通意外。沥青路面压实度不够会削弱路面承载能力, 不断堆积的交通荷载会令未压实路面发生沉降或塑性变形, 进而干扰行车的稳定性和安全性。尤其像交叉口、桥梁这类交通流量大的区域, 沥青路面未做足压实作业, 易因变形引发车辆制动迟

缓或侧滑, 进而酿成严重的交通事故。市政路桥工程监理人员要从施工源头抓起, 严格管控沥青路面压实度, 保障路面完工后达到规定质量标准, 满足日常出行的安全需求<sup>[1]</sup>。

### 1.2 保障道路质量

沥青路面施工阶段, 压实度不达标, 路面结构达不到设计强度, 常出现裂缝、沉降或变形等问题, 这会干扰路面平整度, 还会让路面承载能力下滑, 进而拉低道路的整体质量。压实度不合格的路面受长期交通荷载作用, 出现塑性变形或疲劳裂缝, 引发路面长出坑洞或裂纹, 干扰车辆行驶的舒适感与安全系数, 甚至会降低路面使用时长。沥青路面的压实度直接关联其抗渗透性能, 压实度不合格的路面易留积水, 水分渗入路面结构层, 逐渐破坏沥青层, 加快路面病害恶化速度, 尤其在潮湿环境中, 路面攥住水会引发沥青层剥离脱落, 加快路面老化速度, 最终拉低整条道路系统的使用品质。沥青路面质量好与路面耐久性联系紧密, 压实度偏低的路面, 沥青混合料易出现松散情况, 造成路面结构层失稳, 进而改变它的抗裂、抗压、抗疲劳等性能, 唯有通过科学的监理措施, 落实沥青路面施工的压实度达标要求, 才能保障路面结构的整体性和稳定性, 保障道路长期使用不出现质量问题, 延长道路服役年限<sup>[2]</sup>。

**作者简介:** 王庆楼 (1974-), 男, 本科, 高级工程师, 总监理工程师, 研究方向: 市政工程监理。

### 1.3 延长道路使用寿命

未达到压实度标准的沥青路面,易受外界因素影响发生早期损坏,使道路修复周期变短,由此增加养护和维修开支,尤其经长期交通荷载作用,路面压实质量未达到规定标准,多产生裂缝、沉陷和松散状况,引发路面逐步老化,甚至出现严重病害,极大地缩减道路服役时长。沥青路面压实度与抗疲劳性、抗裂性、抗水侵蚀性关联紧密,合格的压实度能切实加大沥青层密实度,减少雨水、阳光等自然因素对路面表层的侵蚀,降低水分渗入路面结构层的概率,渗水会加速路面材料劣化,尤其针对寒冷地区,冻融循环破坏路面结构的情况尤其突出。保证沥青路面压实度达标,可显著提升它抵御水侵蚀的能力,放慢材料老化速度,以此提升道路使用时长,路面未压实到位,局部易产生沉降和塑性变形,造成车道路面凹凸,产生坑洞或波浪状畸变,进一步加重路面损坏,压实度高的路面可均匀分摊荷载,降低局部应力集中程度,切实减少车轮碾磨路面的损耗,维持路面平整,降低病害生成概率,明显提升道路使用时长。

## 2 市政路桥工程中沥青路面压实度的影响因素

### 2.1 材料因素

施工工艺、操作方式都会对沥青路面压实度造成直接影响,还受到原材料质量和配比影响,混合料沥青含量偏高或偏低,都可能引发压实困难或压实不均,进而拖累路面的质量和性能,沥青占比过高会让沥青混合料黏度超标,施工过程达不到足够压实度,沥青含量偏低,混合料抗裂性能易下降,降低路面整体强度。矿料的粒径、级配、颗粒形状等因素共同决定混合料的密实性,矿料粒径分布不合理,颗粒孔隙偏大,无法提升混合料密实度,压实操易出现不均现象,引发路面产生裂缝或沉陷等质量缺陷。矿料的抗磨损性、抗压性是影响沥青路面长期稳定性的关键因素。矿料质量不达标,抗压强度欠缺,会让沥青层与基层的结合力降低,进一步干扰压实度达标。沥青的粘度、软化点、延展性等特性直接决定施工阶段的压实效果,沥青黏度过高会造成混合料硬度偏大,还容易造成结构分布不均,但黏度偏低会让沥青高温时流动性过强,无法保证压实后的密实度,易出现初期变形<sup>[3]</sup>。

### 2.2 施工环境因素

施工环境的温度、湿度、风速等条件对沥青混合料的铺设与压实过程有直接影响,最终拉低路面品质,沥青混合料温度偏低,沥青材料流动性、黏性降低,带来压实困扰,压实度难以达到设计要求;温度过高,

沥青混合料黏度偏低或沥青过度流动、压实操作易引发离析现象,造成沥青分布失衡,降低路面综合性能。施工环境温度需契合沥青施工要求,温度过高或过低,都会干扰沥青压实效果。湿度同样是不可忽视的因素,尤其遇到多雨或潮湿的天气,沥青混合料含水量或有上升,进而削弱它的黏结性能,水分过多会削弱沥青和矿料的粘结力,引发沥青混合料密实性下降,压实度无法达标,甚至引发沥青层表面出现水泡或脱落。尤其在湿润环境,水易侵蚀沥青材料,使其表面光滑度下降,进一步破坏压实过程的均匀性和密实度。在施工环境中,风速是关键影响因素,风速达到较高水平时,沥青表面有提前冷却的可能,造成沥青混合料黏结性下滑,干扰压实作业,尤其高温施工阶段,风速过高会造成沥青表面急剧降温,使混合料温度偏低,进而干扰压实效果。

### 2.3 施工工艺因素

施工工艺的设计和和实施直接决定沥青混合料铺设、压实等环节的质量,影响路面平整性、承载力和耐久性。压路机的类型、重量、振动频率、滚压次数等参数若未匹配路面材料、施工要求,可能引发压实不达标或是压实过量,进而拉低路面质量。尤其针对不同路面厚度或不同地质条件,施工设备未按实际情况调整,可能引发局部区域压实不足,造成压实不均,降低路面整体质量。沥青混合料的摊铺厚度、摊铺温度、摊铺速度未控制在合理区间,都会给后续压实工序造成负面效果,铺设时摊铺厚度出现不均,易引发部分区域沥青层过薄,无法达到要求的压实度;摊铺温度偏低时,沥青混合料流动性能欠缺,推进难度升高;摊铺速度太快,易造成铺设不均,留下坑洼不平的表面,进一步削弱压实效果,沥青混合料摊铺后需在最佳温度区间完成压实操作,若压实工作推迟实施,沥青混合料温度下降,使混合料黏性与流动性降低,压实效果受干扰,尤其在高温天气时段,沥青冷却速度偏高,没有及时压实的部位易出现松散,造成路面缺陷<sup>[4]</sup>。

## 3 市政路桥工程监理工作中沥青路面压实度管控要点

### 3.1 施工前的材料与设备检查

监理人员需严格把控材料质量和施工设备性能,保障所有施工材料和设备达标,才能给后续施工顺利开展筑牢坚实基础。施工前需细致检查沥青混合料配比、沥青种类及矿料质量等,沥青质量需契合国家或地方相关标准,沥青的粘度、软化点等性能指标应契合设计要求,保障它在施工环节中具备优秀的流动性

和黏结性。检查矿料的粒径、级配等是否契合设计要求，重点关注矿料的抗压强度和抗磨损性对路面耐久性和强度的影响。监理人员须确认所有材料投入使用前都通过合格检验，施工禁用不合格材料，这对后续实现沥青路面压实度目标极为关键，施工作业用到的压路机、摊铺机等设备必须接受严格的性能试验，保证功能正常发挥，也适配具体施工环境。压路机的振动频率、滚筒压力、重量等参数必须符合规定，做到对沥青混合料的有效压实，需提前核查压路机操作性能与驾驶员操作技能，使设备使用契合最优施工要求，需同步检查摊铺机的摊铺宽度、厚度控制精度和温度控制等性能，防止摊铺时出现厚度不均或温度不达标情况，干扰后续压实效果。需预判评估施工现场环境因素，这些因素不直接对应材料或设备检查内容，但气温、湿度等环境条件同样会影响材料施工性能，监理人员要结合天气预报，按需调整施工计划，极端气候下禁止施工，尤其在低温或高湿环境中，沥青的施工性能明显变差。

### 3.2 质量控制标准的应用与执行

监理人员必须严格按照相关标准和规范进行质量控制，保证沥青路面施工各环节均符合技术要求，保障最终路面的质量和性能。标准对沥青路面的压实度、温度、材料配比、施工工艺等作出明确规定，监理人员要熟悉且精准落实这些标准，保障施工所有步骤全合规。检测压实度需按标准使用专用仪器，采用核子密度仪或砂瓶法开展测量，依据标准划定合格压实度区间，监理人员需按这些标准实施实时监测并完成记录，保证压实度达标，防止出现不合格区域。推行质量控制标准，绝非仅局限于监督施工过程，还包含施工前、中、后各阶段的质量检查。监理人员要对所有施工材料验收，保障沥青混合料、矿料等符合标准规定的质量要求。开展施工阶段，监理人员要实时跟踪施工设备运作状态、施工方法、施工进度等内容，保证施工工艺规范落实；监理人员需对压实度抽检，确认施工质量达标，保证每层沥青路面达到设计压实度要求，并依据质量控制标准编制详细的质量控制计划，对施工单位实施有效监督和指导，确定压实度的检测频次、抽样方法及标准执行要求，保障各环节质量检查都有凭有据，落实到具体施工人员和施工设备<sup>[5]</sup>。

### 3.3 施工过程中的质量跟踪与反馈

做好质量跟踪并及时反馈，能帮助监理人员在施工过程中排查并处理问题，还能保障施工质量全程符合设计和规范要求，保障最终路面的质量和使用年限。

质量跟踪和反馈涉及多个方面，包括施工工艺执行、设备使用状况、材料质量管控、现场环境检测等。沥青路面压实工序需在合适时间、合适温度下实施，温度和时间的把控是决定压实度的核心要素，监理人员要定期抽检沥青混合料温度，保证它始终保持最佳施工温度，温度降得过低，混合料黏性下降，压实效果大幅下降；若温度过高，沥青流动性偏大，压实效果或存在不均现象。除温度控制外，监理人员还需监管施工设备的运行状态，维持压路机、摊铺机等设备正常工作，按照施工进度及时调整设备使用方案。监理人员实施质量跟踪，须不间断收集施工现场的数据，突出压实度检测数据，发现压实度未达标准，监理人员应及时反馈给施工单位，要求其调整施工工艺或优化施工方法<sup>[6]</sup>。借助核子密度仪等工具检测，查出某一段路面压实度未达标，须提前通知施工人员执行 2 次压实，遏制问题进一步蔓延，监理人员还需留意施工过程中可能出现的其他质量问题，针对沥青混合料离析、摊铺不均等问题进行预警和反馈，全程把控施工质量。

## 4 结束语

市政路桥工程中的沥青路面压实度管控是保障道路质量、延长使用年限、维护交通安全的核心环节。需对材料、环境和施工工艺等因素进行全面管控，监理人员要严格落实沥青路面施工全流程的各项质量标准，施工前检查材料和设备、落实并执行质量控制标准，以及施工阶段的质量跟踪和反馈，构建一套体系化的质量保障体系，有效规避压实度不足或不均引发的质量问题。监理人员还要全程留意施工过程中可能出现的变动，第一时间反馈给施工单位，实施有效的纠偏措施，保证施工质量全程契合设计要求和行业标准。

## 参考文献:

- [1] 付明. 试论市政路桥施工监理的相关问题[J]. 中国房地产业, 2021(11):187.
- [2] 刘经平. 质量控制与市政路桥监理对策[J]. 中国房地产业, 2021(11):196.
- [3] 张勇. 市政路桥中的监理工作技术难点刍议[J]. 中国房地产业, 2021(11):198.
- [4] 许涛. 试论市政路桥钻孔灌注桩及工程监理[J]. 中国房地产业, 2021(11):199.
- [5] 廖厚祥. 如何加强城镇市政路桥工程施工质量管理[J]. 居舍, 2020(14):168,17.
- [6] 李云鹏. 沥青市政道路施工监理质量控制的关键环节研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(19):179-181.

# 绿色建筑技术在暖通设计中的应用研究

周忆宁, 王嘉迪

(东营市东营区油城热力有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要** 在政府部门大力倡导节能减排、出台相关政策措施的背景下, 本文探讨绿色建筑技术在暖通设计中的应用路径。通过分析绿色建筑技术在暖通设计中存在的问题, 研究绿色建筑技术在暖通设计中的应用策略, 指出绿色建筑已成为行业发展的主要趋势, 科学应用暖通空调技术能够有效实现建筑整体的节能减排目标, 以期为建筑行业实现节能减排与环境保护目标提供参考。结果表明, 将绿色建筑技术融入暖通设计是推动行业可持续发展的关键举措, 对促进建筑行业绿色转型具有重要的实践意义。

**关键词** 绿色建筑技术; 暖通设计; 冰蓄冷技术; 地源热泵空调技术; 太阳辐射暖通节能技术

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.036

## 0 引言

在暖通设计工作中, 应当大力推广绿色建筑技术的全面应用和融合。首先, 随着我国经济的不断发展, 人们的生活质量水平不断提升, 暖通空调设备在各种类型建筑中的应用率以及使用规模呈现出不断增长的态势, 安装数量不断上升。在此背景下, 社会各界对于暖通空调系统的节能性更加关注, 而在暖通空调设计环节, 引进绿色节能技术能够提升系统的整体节能效果。其次, 在暖通空调设计环节, 加强节能技术的应用不仅可以降低建筑能耗, 避免一些不必要的资源浪费, 同时还能够做好对生态环境的保护工作, 具有重要的社会价值。有效发挥暖通空调技术的专业优势, 对于绿色建筑的不完善以及长远发展有着非常重要的实践价值。

## 1 绿色建筑技术的应用原则

### 1.1 绿色环保原则

在工程建设环节, 应当优先选择绿色环保且能够循环再生的功能材料, 来替代传统的不可再生能源, 以此加强对绿色建筑设计理念在建筑工程领域的应用认知<sup>[1]</sup>。在选择暖通空调系统制冷剂的过程中, 应当将材料的环保和安全性能作为重要的选择依据, 禁止使用氯氟类等会破坏臭氧层的制冷剂, 以防止暖通空调设备在实际运行过程中释放有害气体, 影响人们的身体健康, 同时对生态环境造成破坏。与此同时, 在节能建筑的设计阶段, 还应当考虑到所使用的建筑材料是否方便获得以及在供应方面的便捷性问题。对于

那些有着较高开采难度且运输工作复杂, 并且物流成本较高的特殊材料, 要选择能够在性能上几乎相同, 但是更方便获取的替代性材料, 从而避免由于长距离运输和物流过程中对社会环境所造成的二次污染以及不必要的资源浪费。除此之外, 在建筑工程项目的暖通设计工作阶段, 还应当根据项目的具体需求以及技术规范要求, 合理地配置静压箱和消声箱体等降噪装置, 以此对空调等大型的机电设备在实际运行过程中所产生的机械噪声和振动干扰进行控制。针对必须消耗能源的选择时, 应当优先考虑和应用在社会环境中所包含的可再生能源作为重要的能源来源, 如选择太阳能、地热能等清洁能源形式。通过遵循以上工作原则来做好暖通空调系统的优化与设计, 有效减少空调系统对于大气环境所造成的污染与排放, 同时还能够提高建筑的绿色性能指标, 使其能够达到绿色建筑评价标准的工作要求。

### 1.2 可循环再利用原则

在建筑暖通系统的整体设计过程中, 应当不断强化能源供应的稳定性与可靠保障能力, 同时最大限度地减少对自然生态环境造成的负面影响和污染排放<sup>[2]</sup>。例如: 在暖通设计的初期规划阶段, 就应当将系统中各个功能部位的独立性作为核心设计原则和技术关键, 如此一来, 一旦暖通系统中的某个部位或关键构件在长期运行过程中出现老化、磨损或突发性故障等问题时, 工程维护人员便可采用更换方式进行快速处理, 而对于那些被替换下来的老旧构件, 仍可对其进行专业的维修、检测和保养, 使其恢复性能后作为备件在

作者简介: 周忆宁(1997-), 男, 本科, 研究方向: 供热通风及空调工程。

后续运维周期中循环使用。上文所述的拆卸式设计理念,不仅能够显著提升建筑暖通系统在遇到故障问题时的应急响应速度和高效处理能力,还能有效延长设备整体使用寿命。此外,在材料选用层面,应在设计阶段就积极探索并采用多种可再生、可循环使用的绿色环保建材,以替代传统的高能耗、不可再生材料,从而从源头上有效降低建筑全生命周期对能源资源的消耗强度,实现可持续发展的目标。

### 1.3 设备节能运行原则

在建筑物的整体结构体系中,暖通空调系统是能源消耗水平较高的组成部分,无论是该系统所承担的室内制冷与制热调节功能,还是通风换气与采暖保温功能,在实际运行过程中均会产生较大的能源消耗量<sup>[3]</sup>。鉴于此,在进行暖通专业的深化设计工作时,应当将保障设备的节能高效运行作为首要准则和根本原则,同时加大对社会市场中各类清洁能源的开发利用力度,包括潮汐能、太阳能、风能、地热能等多种可再生资源形式,通过对上述低碳环保能源的科学整合与优化配置,切实降低建筑暖通系统设计对传统不可再生能源的依赖程度与消耗总量。与此同时,在暖通系统的设计实践中还可以充分引入现代计算机信息技术与智能化控制技术,借助专业分析程序对建筑暖通设计各个阶段的能源消耗状况进行动态模拟与量化评估,精准识别和掌握暖通系统能耗峰值出现的关键阶段与主要环节,并据此采取针对性强、成效显著的优化改进措施,对高能耗部分进行系统性的节能降耗改造。当前阶段,在我国建筑科学研究领域中应用较为成熟且效果显著的节能设计技术主要包括自然通风技术与变频调速技术,这些先进技术可以协同配套的自控程序,对暖通系统在运行过程中的工作模式与负荷状态进行智能化综合调控,有效避免暖通设备在长期运行中持续处于高负荷、高能耗的工作状态,从而确保采暖设备的运行功率能够根据室内外温度的实时变化进行自适应调节与优化匹配,最终实现对设备整体能耗的有效节约与合理控制。

## 2 绿色建筑技术在暖通设计中存在的问题

### 2.1 能源保护理念普及度较低

在当前的暖通空调设计实践中,尽管已经有部分设计人员和社会公众对这一技术领域形成了一定的基础性认识,然而其认知的深度与广度仍然相对有限,普遍停留在较为表层的理解水平。大多数使用者习惯性地认为,空调系统的制冷温度应当设置得尽可能低,而供热温度则需要调高数值,并将能否提供这种温度

调节能力作为评判空调系统品质好坏与舒适度高低的标准。然而,从科学的角度来说,人体机能的正常运转需要在四季更替的过程中逐步适应外界自然环境的温湿度变化,从而保持身体对外界气候感知的敏锐度和自身调节能力的活跃性,这样才能有效维持身体各项生理指标的健康平衡。一旦室内外温差过大或温度突变过于剧烈,反而会对人体造成不可忽视的健康损害。与此同时,能源消耗总量与设备的制冷制热功率输出强度成正比,一旦启动暖通设备并将其设定在极端工况下运行,将会导致大量电力能源的消耗,这种做法在本质上与绿色建筑所倡导的低能耗、低排放暖通设计核心理念是相互矛盾的。

### 2.2 设计方案难以确定

为确保建筑工程的质量水准,绿色建筑设计师往往会积极运用技术创新手段来满足使用者的多元需求。然而,任何技术方案都难以做到尽善尽美,都会存在其特有的长处与短板。伴随现代科技的不断发展,社会认知理念也随之不断更新,公众对绿色技术的视角正经历着深刻的转型。尽管如此,现阶段我国在该领域仍面临一个突出短板:设计方案之间缺乏必要的协调统一,相关的技术标准体系也需进一步的健全与规范。

### 2.3 对于施工管理有所忽视

在常规的工程项目实施过程中,施工单位为了实现经济效益的最大化、追求更高的利润空间,普遍倾向于采用压缩施工周期的方式来达成成本控制的目标。与此同时,在暖通系统的设计环节,这些企业往往投入的精力较为有限,倾向于以最短的时间完成图纸绘制工作,导致设计深度不足。此外,从业人员整体素质也存在明显短板:暖通施工人员普遍缺乏系统化、高质量的专业培训,新入职员工在学历层次与专业背景方面参差不齐,具备扎实理论功底与丰富实践经验的高水平技术人才尤为稀缺。这种人才结构性的缺陷使得当施工现场或设计文件出现问题时,团队难以及时提出科学有效的应对策略,从而为建筑物的长期安全运行埋下了不容忽视的隐患。

## 3 绿色建筑技术在暖通设计中的应用要点

### 3.1 冰蓄冷技术

冰蓄冷技术能够实现对空调系统电力资源的优化配置与科学调度,从而显著降低电力能源的总体消耗水平<sup>[4]</sup>。此外,该技术能够充分利用夜间电网负荷低谷时段的电力资源进行制冷作业,并将产生的冷量以冰的形式储存于专用蓄冷装置中,等到用电高峰时段

到来时,再将储存的冷量释放出来承担空调制冷负荷。在这一过程中,设计人员必须深入分析不同建筑类型、使用功能及气候条件等具体应用环境因素,据此对冰蓄冷系统展开针对性、高效化的优化设计,只有这样才能确保系统设计方案具备良好的环境适应性与实际运行效能。

### 3.2 地源热泵空调技术

地源热泵空调系统的整体架构主要由三大部分构成:室外地源换热系统、地源热泵主机系统以及室内空调末端系统<sup>[5]</sup>。其运行机制在于通过热泵机组将采集到的热源有效输送至热能转换装置,经过一系列能量转化与提升处理流程后,最终将其输送至室内末端设备以满足供热或供冷需求。针对当前现代建筑的实际应用场景,当建筑内部温度偏高时,地源热泵技术能够启动,将建筑物内蓄积的多余热量向地下土壤层进行释放;而当建筑内部温度偏低时,系统则切换为蓄能模式,主动从土壤环境中吸收储存的热能,从而实现建筑物内部温度的有效提升。此外,地源热泵技术在建筑领域的应用具有显著的生态友好特征,整个运行过程不产生任何废弃物排放,也不依赖物质燃烧获取能量,是一种相对成熟且环保节能的先进技术方

### 3.3 太阳辐射暖通节能技术

在当前我国绿色建筑能源体系构建中,太阳能凭借其独特的优势已成为最适宜的可再生能源选择之一。这种取之不尽、用之不竭的清洁能源,不仅能够持续稳定地为绿色建筑运行提供可靠的动力保障,还能为暖通空调系统的长期运转注入源源不断的能量支持<sup>[6]</sup>。开展暖通工程设计工作时,设计人员应当充分考量项目实际需求,科学合理地甄选适用的可再生能源类型。在具体实施过程中,应优先考虑将太阳能或光热能作为主导能源形式加以运用,并借助先进的现代化技术装备,高效完成太阳能向热能转换的全过程。从资源可再生性与节能减排的双重维度来看,太阳能无疑是一种集绿色低碳与热能供应于一体的理想型环保能源,其应用不仅能够有效达成建筑物的保温隔热目标,更在控制有害物质排放方面发挥着关键作用。

### 3.4 科学选择低耗能的节能环保材料

在选择节能环保材料的过程中,必须紧密结合暖通工程的设计规范与技术要求,对材料的各项性能指标展开系统性质量评估,这一环节在绿色建筑设计理念中是非常重要的<sup>[7]</sup>。在具体的工程实践过程中,绿

色建材的选用并非可以忽略经济性考量而一味追求环保效益,设计人员必须综合考虑材料采购成本、运输费用、施工安装成本以及后期维护费用等各项经济支出,在预算可控的前提下,挑选与设计方案最适合、综合性价比最好的建筑材料。与此同时,为有效降低材料运输环节所产生的费用支出与资源损耗,应当充分结合项目所在地的地域特征,在当地进行材料选择,同时必须对建筑施工全过程实施严格的环境监管,最大限度减少对周边生态环境的破坏,确保区域经济的可持续发展不受影响。在环保材料的选择环节,可参照国家及行业颁布的环保材料分级认证标准,作为评估绿色设计质量水平的依据,从而有效减少对大气环境的污染排放及其引发的负面生态效应。

## 4 结束语

暖通空调系统的节能优化设计作为绿色建筑技术体系的重要组成部分,有效转变了传统建筑施工前期普遍存在的高能耗、高污染的重型施工模式。然而,在具体的工程实践与建设施工环节,仍然存在诸多问题,不仅制约了暖通空调系统运行品质的全面提升,也在很大程度上削弱了系统的节能效益与环境效益。为此,必须严格遵循国家及行业相关技术规范与标准规程进行规范化作业,在追求节能减排目标的同时,保障建筑使用者对室内环境舒适度与健康性的基本居住需求,从而为我国绿色建筑与节能减排事业的可持续发展注入强劲动力。

## 参考文献:

- [1] 狄海燕,连大旗,刘方舟,等.绿色建筑技术在某中央厨房暖通空调设计中的应用[J].制冷,2025,44(03):14-19.
- [2] 姚砺强.绿色建筑暖通空调设计中节能技术的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(13):205-207.
- [3] 曹洪栋.绿色建筑暖通空调设计技术[J].上海轻工业,2024(04):173-175.
- [4] 公维磊,黄澳.暖通工程中绿色建筑设计 with 能源节约技术的应用分析[J].房地产世界,2024(14):137-139.
- [5] 张涛,张培培.暖通空调技术在绿色建筑中的应用[J].住宅与房地产,2024(06):151-153.
- [6] 赵亮.基于BIM技术的绿色建筑暖通工程规划设计[J].信息与电脑(理论版),2023,35(13):49-51.
- [7] 董懂.绿色建筑技术在暖通设计中的应用分析[J].中国设备工程,2023(10):256-258.

# 生态护坡技术在黄河堤防工程中的应用实践研究

毕华威, 巩汝涛

(东平湖管理局东平管理局, 山东 泰安 271500)

**摘要** 本文聚焦黄河堤防生态护坡的关键技术与工程实践研究, 阐述了黄河堤防生态护坡的理论基础, 涵盖基本理论框架、黄河堤防独特生态环境特征对应的护坡需求; 深入分析了生态护坡的关键技术, 包括植被修复、生态材料、结构设计以及生态系统协同治理理论; 详细论述了黄河堤防生态护坡的工程实践, 并对其进行了理论验证, 分析传统护坡技术局限性, 明确设计原则与方法, 提出生态风险控制措施。本文旨在为黄河堤防生态护坡工程提供实践参考, 进而推动黄河堤防生态保护与可持续发展。

**关键词** 黄河堤防; 生态护坡; 植被修复; 生态材料; 生态系统协同治理

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.037

## 0 引言

黄河作为中华民族的母亲河, 其大堤的稳固与否直接关系到沿岸人民的生命财产安全以及整个生态系统的稳定。随着对生态环境保护意识的提高, 传统的护坡方式已难以满足现代黄河堤防建设与保护的需求。生态护坡技术作为一种兼顾工程防护与生态功能的新技术, 逐渐成为黄河堤防建设与保护的研究热点。通过深入研究黄河堤防生态护坡的关键技术并开展工程实践, 不仅能够提高大堤的稳定性, 还能改善大堤周边的生态环境, 实现生态与工程的和谐统一。

## 1 黄河堤防生态护坡的理论基础

### 1.1 生态护坡基本理论与技术框架

生态护坡是一种融合生态学、工程学等多学科理念的护坡方式, 其基本理论强调生态系统的自我修复和维持能力。在生态护坡系统中植物发挥着关键作用, 植物根系能够深入土壤起到加筋加固的作用, 增强土壤的抗剪强度减少坡体滑坡的风险。植物的蒸腾作用可以调节土壤湿度, 改善土壤结构<sup>[1]</sup>。

在技术框架方面, 生态护坡涵盖了从坡面处理到植物选择的多个环节, 首先要对坡面进行清理和平整, 去除杂物和松散土壤, 为后续的施工创造良好的条件。然后, 根据不同的坡面条件和生态要求选择合适的植被种类。除了植物, 一些辅助工程技术也被应用, 如设置排水系统防止坡面积水对坡体造成破坏。一些新型的

生态护坡技术还融合了生物工程技术, 如利用微生物制剂改善土壤性质, 提高土壤肥力, 促进植物生长<sup>[2]</sup>。

### 1.2 黄河堤防的生态环境特征与护坡需求

黄河堤防的生态环境具有独特性, 黄河流域的土壤类型多样, 部分地区土壤肥力较低, 保水保肥能力差, 而且黄河水的含沙量较大, 泥沙的淤积和冲刷对大堤的稳定性有着直接影响<sup>[3]</sup>。从气候角度看, 黄河流域气候干旱与半干旱区域较多, 降水集中在夏季, 暴雨等极端天气时有发生, 这对大堤的护坡工程提出了挑战。

在这样的环境下(如图 1 所示), 黄河堤防的护坡需求十分迫切。一方面, 大堤需要承受河水长期的冲刷和水压力的作用, 护坡结构必须具备足够的强度和稳定性<sup>[4]</sup>。另一方面, 黄河堤防周边的生态环境较为脆弱, 护坡工程不能破坏原有的生态平衡, 而应有助于改善生态环境<sup>[5]</sup>。例如: 通过植被恢复增加生物多样性, 改善局部小气候防止土壤侵蚀等。护坡工程还需要考虑到黄河水的季节性变化, 确保在不同水位情况下都能有效保护大堤。

## 2 黄河堤防生态护坡的关键技术分析

### 2.1 植被修复与土壤稳定技术

植被修复是黄河堤防生态护坡的核心技术之一, 在植被选择方面需要充分考虑黄河堤防的生态环境特点。对于土壤肥力较低的区域可以选择耐瘠薄的草本植物, 如狗牙根等, 这些植物的根系发达, 能够在贫

作者简介: 毕华威(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程管理。

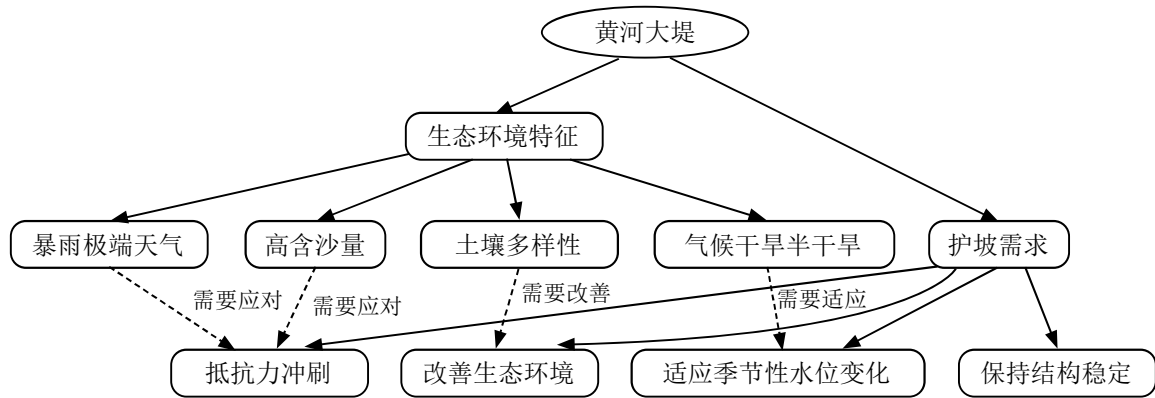


图1 黄河堤防的生态环境特征与护坡需求之间的关系

瘠的土壤中生长良好，并且具有较好的固土能力。对于一些坡面较为陡峭的区域可以搭配种植灌木，如紫穗槐，其根系的锚固作用可以有效防止土壤流失。

除了植物种类的选择，植被的种植方式也很关键，可以采用直播、扦插等方式。由于黄河堤防部分区域灌溉条件有限，可以采用雨水收集和节水灌溉技术，如滴灌、微喷灌等，保证植物的水分需求。土壤稳定技术与植被修复密切相关，通过植被根系的固土作用是土壤稳定的重要手段，但同时也可以辅助一些工程措施。例如：在坡面上设置土工格栅，土工格栅可以将土壤颗粒有效地连接在一起，增加土壤的整体性。在一些容易发生崩塌的区域，可以采用坡面加固结构，如砌石护坡与植被相结合的方式。砌石可以提供即时的稳定性，而植被则逐渐发挥长期的护坡作用。

## 2.2 生态材料与结构设计

生态材料在黄河堤防生态护坡中有着广泛的应用，其中，生物基材料是一种具有重要意义的生态材料。例如：利用植物纤维如秸秆等制成的复合材料，这些材料具有良好的生物降解性，在护坡过程中随着时间的推移逐渐分解，不仅不会对环境造成污染，而且分解后的物质还能为土壤提供养分。

在生态护坡的结构设计方面，需要综合考虑多方面因素。首先是坡面的几何形状，对于不同坡度的坡面应采用不同的结构设计。缓坡可以采用简单的植被覆盖与简单的加固结构如木桩围栏等。而对于陡坡则需要更复杂的结构，如阶梯式护坡。阶梯式护坡可以减缓坡面水流速度，增加土壤的稳定性；在阶梯上设置种植槽，种植适宜的植物既能美化坡面，又能起到护坡作用。

生态护坡结构还需要考虑到黄河水的冲刷作用，在靠近河水的区域可以设置防冲刷护坡，采用大块石或混凝土块进行铺设。护坦的结构设计要保证其在河

水冲刷下的稳定性，同时还要考虑到生态因素，如在护坦的间隙中种植一些水生植物，既可以防止护坦之间的缝隙被泥沙堵塞，又能增加生态多样性。

## 2.3 生态系统协同治理理论

黄河堤防生态护坡中的生态系统协同治理理论强调多要素的协同作用，植物、动物、微生物等生物要素以及土壤、水等非生物要素之间相互关联、相互影响。在植物群落方面，不同植物之间存在着共生、互惠等关系。例如：一些豆科植物与根瘤菌共生，根瘤菌能够固定空气中的氮提高土壤肥力，从而有利于其他植物的生长。在动物方面，一些昆虫和鸟类可以参与植物的授粉和种子传播过程。

微生物在生态系统中也扮演着重要角色，一些微生物还具有固氮、解磷等特殊功能，对改善土壤性质有着积极意义。在黄河堤防生态护坡中，通过合理的措施促进微生物的繁殖和活动，可以提高土壤的肥力和结构稳定性。非生物要素之间同样存在协同关系，土壤的物理性质如质地、孔隙度等与水分的保持和渗透密切相关。良好的土壤结构能够提高水分的利用效率减少径流，而水的存在又影响着植物的生长和土壤微生物的活动。在生态护坡实践中，需要协调这些非生物要素之间的关系，如通过合理的坡面排水设计，既保证雨水能够及时排出，又不会因为排水过快而导致土壤失水过多影响植被生长。

## 3 黄河堤防生态护坡的工程实践与理论验证

### 3.1 传统护坡技术的局限性分析

传统的黄河堤防护坡技术主要以硬质材料护坡为主，如砌石护坡和混凝土护坡。这些护坡技术在一定程度上能够抵御河水的冲刷，保证大堤的稳定性。然而，它们存在着诸多局限性。从生态环境角度来看，硬质护坡破坏了原本的生态环境，使得坡面的植被无法生

长,生物多样性降低。例如:砌石护坡将坡面完全封闭,阻碍了土壤与外界的交换,导致土壤肥力难以恢复。

在景观方面,传统硬质护坡缺乏美感,与周边的自然景观不协调,黄河堤防周边往往是自然生态区域,硬质的护坡结构与绿色的植被、蓝色的河水形成鲜明对比,影响整体的景观效果。此外,传统护坡技术在应对极端气候事件方面也存在不足,如在暴雨天气时,硬质护坡表面的水流速度较快容易形成径流冲刷,导致护坡结构的局部破坏。

从护坡的长期稳定性来看,传统护坡技术虽然能够提供即时的支撑,但随着时间的推移,由于缺乏植被的固土作用,在水流的长期冲刷和土壤自身重力等因素的影响下,可能会出现护坡结构的变形和损坏。而且硬质护坡的维修成本较高,一旦出现损坏需要投入大量的人力、物力进行修复。

### 3.2 生态护坡的设计原则与方法

首先,生态适应性原则。要根据黄河堤防的地理位置、气候条件、土壤类型等选择合适的植物和护坡技术。例如:在干旱地区,要优先选择耐旱植物;在土壤肥力低的区域选择具有固氮能力的植物。其次,协调性原则。生态护坡设计要与周边环境相协调,无论是景观上还是生态功能上。在景观方面要使护坡与黄河堤防的整体风貌相匹配,在生态功能上要与周边生态系统形成互补。

在方法上,多采用综合性的设计方法,将植被护坡、工程护坡相结合。例如:在坡面上先进行植被种植,然后在局部不稳定区域采用工程加固措施,如在坡脚设置挡土墙。同时,在坡面上设置生态槽、鱼巢等结构,增加生物多样性。在设计过程中还可以利用现代信息技术,如地理信息系统(GIS)对坡面地形、土壤类型等进行分析,制定更科学合理的设计方案。生态护坡设计要遵循可持续发展的原则,选择环保、可再生的材料,确保护坡工程的长期稳定性和生态效益的持续性。例如:优先使用可降解的生态材料,在护坡结构设计中考虑后期的维护和更新,尽量减少对环境的负面影响。

### 3.3 工程实施中的生态风险控制

在黄河堤防生态护坡工程实施过程中存在多种生态风险,首先是外来物种入侵风险。在植被选择时如果引入了不适当的外来植物物种,可能会对本地生态系统造成破坏。这些外来物种可能会抢占本地植物的生存空间,与本地植物竞争养分、水分等资源。因此,在植被选择前要进行充分的风险评估,优先选择本地物种,对于必须引入的外来物种要进行严格的隔离和

监测。施工过程中的生态风险也不容忽视,施工活动可能会破坏原有的土壤结构和植被,如果不加以控制会导致土壤侵蚀加剧。在施工过程中要采取有效的防护措施,如在施工区域周围设置临时围挡,减少人为因素对周边生态环境的干扰。同时合理安排施工顺序,先进行土壤改良等有利于植被生长的基础工作,再进行植被种植。

生态护坡工程建成后,还面临着自然灾害对生态系统的破坏风险,如洪水、地震等可能会破坏护坡结构影响植被生长。因此,在工程规划时要考虑到这些自然灾害的应对措施。例如:设置一定宽度的缓冲带,缓冲洪水对护坡的冲击;对护坡结构进行抗震设计,确保在地震等自然灾害发生时护坡和植被的基本稳定。

## 4 结束语

黄河堤防生态护坡的关键技术研究及其工程实践是一个复杂的系统工程。通过对生态护坡的理论基础分析,明确了生态护坡的基本理论框架和黄河堤防特殊的生态环境特征下护坡需求的特殊性。在关键技术分析中,深入探讨了植被修复与土壤稳定技术、生态材料与结构设计以及生态系统协同治理理论,这些技术相互关联、相互影响,共同构成了黄河堤防生态护坡的技术体系。在工程实践与理论验证部分,通过对传统护坡技术局限性的分析,凸显了生态护坡的必要性。随着科技的不断进步,新的生态材料和植被品种将不断涌现,为生态护坡提供更多的选择,同时随着对生态系统认识的不断深入,生态系统协同治理理论将更加完善。在工程实践方面,应更加注重生态效益与工程效益的平衡,实现黄河堤防的生态保护与可持续发展的双重目标。此外,还应加强国际间的交流与合作,推动黄河堤防生态护坡技术走向更高的水平。

## 参考文献:

- [1] 杜娟,李秉哲.黄河堤防生态护坡技术应用研究[J].工程技术研究,2025,10(04):220-222.
- [2] 孔祥磊,张维波.黄河防洪工程中迎水面生态护坡结构设计及应用效果分析[J].中国防汛抗旱,2025,35(11):75-78.
- [3] 假冬冬,陈萌,李锐,等.黄河下游多因素耦合作用生态护坡破坏机制研究进展[J].水科学进展,2024,35(05):853-864.
- [4] 张旭.黄河下游堤防生态护坡措施试验与效果评价[D].济南:济南大学,2022.
- [5] 金钊,余欣,李振洪,等.黄河全流域科学考察的几点认识和思考[J].中国水利,2024(23):6,7-11.

# 复杂地质条件下矿山建设工程 风险防控机制研究

柯洪异<sup>1</sup>, 徐付强<sup>2</sup>, 李军伟<sup>3</sup>, 王辉<sup>3</sup>, 雷晓强<sup>4</sup>

1. 开平市立途矿业有限公司, 广东 开平 529300;
2. 青岛国道通设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 青岛尚裕盛工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;
4. 安徽中掘建设工程有限公司, 安徽 淮北 235000)

**摘要** 矿山建设工程面临着极深部地层高地应力、复杂水文地质条件及瓦斯赋存等多重技术挑战, 工程风险控制是保障矿井建设顺利推进的核心。针对深部矿井建设中面临的围岩变形失稳、瓦斯涌出异常及地下水渗透等工程技术难题, 探究与之相适应的工程技术对策尤为关键。通过对井下巷道掘进支护工艺、通风瓦斯抽采系统布局以及水害防治工程技术的深入剖析, 揭示了不同地质环境下工程技术参数的选择依据与执行标准, 旨在通过优化工程技术手段, 构建科学的风险防御技术体系, 提升矿井建设过程中的工程稳定性与作业环境可靠性, 为复杂地质条件下的矿山建设提供工程实践参考。

**关键词** 风险控制; 工程技术; 围岩稳定性; 瓦斯治理  
**中图分类号**: TD7 **文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.038

## 0 引言

随着浅部矿产资源的日益枯竭, 矿山建设工程逐渐向深部地层延伸, 地质环境的复杂性呈现指数级增长, 深部地层的高地应力、高地温及高岩溶水压等特征, 显著增加了井下工程作业的技术难度与风险系数。在矿井开拓延伸及巷道掘进过程中, 单一的传统工程技术已难以满足复杂多变的施工需求, 工程结构的失稳与作业环境的恶化成为制约矿井建设进度的主要瓶颈。面对严峻的工程技术挑战, 必须深入剖析矿山建设中的关键风险源, 依托先进的工程力学理论与施工工艺, 制定针对性的技术应对方案, 通过对支护、通风、排水等关键工程环节的技术革新与参数优化, 实现对工程风险的源头控制与过程消除, 确保矿山建设工程在复杂地质环境下的有序推进与结构稳定。

## 1 矿山建设地质环境与工程风险因素解析

矿山建设工程深处于地壳内部, 其作业环境受地质构造运动影响显著, 岩体结构的完整性直接决定了井下工程的稳定性。在深部开采区域, 原岩应力场分布极不均匀, 构造应力与自重应力的叠加效应, 使得围岩处于高强度的挤压状态, 当井下巷道开挖破坏了原有的应力平衡后, 围岩内部积聚的弹性势能瞬间释放,

极易诱发岩爆、底鼓及片帮等动力现象, 断层破碎带、陷落柱等不良地质构造的存在, 进一步削弱了岩体的自承载能力, 使得支护结构承受非对称载荷, 增加了工程支护失效的风险。伴随深度的增加, 煤层瓦斯赋存压力增大, 吸附态瓦斯向游离态转化的速率加快, 作业空间的瓦斯浓度控制难度加大, 地下含水层的静水压力随深度增加而升高, 岩溶裂隙水的突发性涌出对井下排水系统构成了严峻考验, 这些地质与环境因素相互交织, 构成了矿山建设中错综复杂的工程风险体系, 要求施工技术必须具备极高的适应性与抗灾变能力<sup>[1]</sup>。

## 2 巷道掘进与支护工程技术对策

### 2.1 光面爆破技术参数优化与应用

在岩石巷道掘进作业中光面爆破技术通过精确控制周边眼的装药结构与起爆时序, 旨在减少爆破冲击波对围岩的扰动破坏, 施工中需根据岩石的普氏硬度系数及节理发育程度, 动态调整周边眼的间距与抵抗线比值, 通常将不偶合系数控制在合理区间以确保保护壁效果, 采用空气间隔装药或导爆索传爆工艺, 降低爆炸峰值压力, 使裂缝沿炮眼连线平整贯通, 避免由于超挖或欠挖造成的围岩应力集中。起爆网路设计中严格执行毫秒延期干扰降震爆破方案, 利用微差挤压原理,

**作者简介**: 柯洪异 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。

为岩石破碎创造自由面,同时削弱地震波的叠加效应,爆破后巷道轮廓线的平整度直接影响后续支护结构的贴合程度,通过激光断面仪对成型断面进行实时扫描监测,反向修正钻孔角度与深度参数,实现对掘进断面的精细化控制,维持围岩自身的承载拱结构稳定。

## 2.2 高预应力锚网喷联合支护机制

面对深部高应力软岩巷道的大变形特征,传统被动支护方式难以有效遏制围岩的流变特性,高预应力锚网喷联合支护技术成为控制围岩变形的关键手段。该技术体系的核心在于通过高强螺纹钢锚杆施加高预紧力,通过托盘与钢带将预应力扩散至围岩深部,形成具有一定厚度的预应力压缩带,金属菱形网与钢筋梯子梁的配合使用,增强了护表构件的抗剪切能力,防止破碎岩块的剥落。喷射混凝土层作为柔性封闭结构,不仅填补了岩体裂隙阻隔了风化作用,还与锚杆体系形成了协同承载结构。在施工过程中,需严格校核锚杆的锚固力与预紧扭矩,确保锚索的主动张拉力达到设计吨位,利用深孔锚索将浅部不稳定岩层悬吊于深部稳定岩体之上,构建深浅部协调变形的复合支护体系,有效限制巷道顶板的离层与两帮的移近<sup>[2]</sup>。

## 2.3 松软破碎围岩注浆加固工艺

针对断层破碎带及节理裂隙发育区域,围岩自稳能力极差,单纯依靠外部支护难以维持巷道稳定,需采用化学注浆或水泥注浆工艺改善岩体力学性质,注浆工程需依据岩体裂隙张开度及渗透系数,选择匹配的浆液材料与注浆压力。对于微细裂隙,选用高渗透性的超细水泥或聚氨酯类化学浆液,利用液压泵将浆液压入岩体深部,浆液凝固后将破碎岩块胶结成整体,显著提高岩体的粘聚力与内摩擦角,注浆孔的布置需呈放射状发散,确保浆液扩散半径覆盖整个松动圈,采用分序注浆与后退式注浆工艺,防止浆液沿裂隙跑漏,保证注浆饱满度,加固后的岩体形成了具有一定承载能力的人工假顶或加固拱,为后续的锚杆施工提供了可靠的着力基础,实现了由围岩改性到结构强化的工程技术路径。

# 3 矿井通风与瓦斯控制工程体系

## 3.1 矿井通风网络解算与风量分配

矿井通风系统是维持井下大气环境各项指标处于受控状态的动力基础。复杂的通风网络要求精确的节点风压解算与风量按需分配,利用计算机网络模拟技术对全矿井通风阻力分布进行动态分析,识别高阻力区段与风流不稳定分支,通过优化通风构筑物位置与调节风窗的开口面积,降低矿井总风阻,主通风机的工况点需匹配矿井通风阻力特性曲线,确保风机运

行在高效区。在多水平、多翼开采布局下,实施分区通风策略,各采区建立独立的进回风系统,减少角联风路的产生,消除风流反向与循环风的工程隐患,针对掘进工作面长距离供风需求,选用大功率对旋式轴流局部通风机,配合大直径阻燃抗静电风筒,降低沿程风阻,确保迎头风量满足稀释瓦斯与粉尘的工程标准,维持风流场的稳定流动。

## 3.2 本煤层瓦斯顺层钻孔预抽技术

对于高瓦斯及突出煤层,在回采作业前必须实施本煤层瓦斯预抽工程,通过降低煤体瓦斯含量与瓦斯压力,消除突出的动力势能,顺层钻孔施工需沿煤层倾向布置,严格控制钻孔轨迹,防止钻孔穿层进入顶底板岩层导致抽采失效,采用大功率履带式液压钻机,配备高强度螺旋钻杆与 PDC 复合片钻头,提高成孔效率与深度。钻孔施工完成后,立即进行封孔作业,应用聚氨酯—膨胀水泥“两堵一注”带压封孔工艺,消除钻孔周边的漏气通道,提高抽采负压在煤体深部的传递效率,抽采管网系统需加装流量计与浓度传感器,实时监测单孔及支管的抽采参数,对于抽采浓度衰减过快的区域,及时补打钻孔或实施水力割缝增透措施,通过增大煤体暴露面积,强化瓦斯解吸流动,确保评价单元内的残余瓦斯含量降至临界值以下<sup>[3]</sup>。

## 3.3 采空区高位裂隙钻孔与埋管抽放

回采工作面推进过程中,上覆岩层垮落形成采空区,其中的卸压瓦斯往往向回风隅角积聚,高位裂隙钻孔技术利用岩层移动形成的“0”形圈裂隙带作为瓦斯流动通道进行拦截抽采,钻场布置在回风巷顶板岩层中,钻孔终孔位置需精确落在冒落带上部的裂隙发育区,避开垮落带的漏风区与弯曲下沉带的闭合区。通过调节抽采负压,控制裂隙带内的气体流向,将高浓度的卸压瓦斯直接抽排至地面利用系统,对于回风巷上隅角,铺设大直径骨架风筒或专用埋管,随工作面推进埋入采空区,利用负压源持续抽吸积聚瓦斯,该系统需配合束管监测系统,实时分析采空区气体成分变化,防止因过度抽采导致采空区遗煤自燃氧化,实现瓦斯治理与防灭火工程的动态平衡。

## 3.4 综合防尘喷雾与空气净化系统

矿井建设过程中的破岩、运输及转载环节产生大量矿尘,综合防尘工程通过湿式作业与喷雾降尘手段全方位捕获悬浮颗粒,掘进机与采煤机必须配备内外喷雾装置,内喷雾压力需足以克服截割阻力并冷却截齿,外喷雾形成水幕覆盖尘源扩散路径,在各转载点、溜煤眼及破碎机处安装自动感应喷雾装置,利用红外传感器探测物料流动,实现尘源同步喷雾。进回风巷道每隔一定距离设置全断面水幕,利用高压微雾喷嘴产生微米

级水雾,增加水滴与粉尘颗粒的碰撞概率与捕捉效率,对于呼吸性粉尘浓度较高的区域,增设风水联动除尘风机或干式除尘器,通过滤筒过滤或离心分离原理净化风流,管路系统中添加润湿剂降低水的表面张力,提高粉尘的润湿性能,从源头抑制粉尘的产生与飞扬<sup>[4]</sup>。

## 4 地下水害防治与防灭火工程策略

### 4.1 承压含水层地面区域注浆改造

针对底板承压含水层威胁严重的矿区,采用地面区域治理工程对含水层进行预先改造是消除水害隐患的根本措施,利用定向钻进技术,在地面施工主孔并分支多个水平羽状孔,精确控制钻孔轨迹沿含水层层位延伸。选用高标号水泥浆或粘土水泥浆作为骨料,通过高压注浆泵将浆液压入岩溶裂隙与孔隙中,浆液扩散凝固后充填导水通道,置换出原本赋存的承压水,将强含水层改造为弱含水层或隔水层,注浆过程中需实时监测泵压与流量变化,依据P-Q曲线判断浆液扩散状态,直至达到设计终压,该工程措施在矿井建设前期实施,能够大面积封堵地下水补给通道,显著降低井下开采时的底板突水系数,为巷道掘进创造干燥的施工环境,从源头上阻断了高压水体对井下工程的侵入路径。

### 4.2 井下超前探放水钻探工艺实施

井下巷道掘进必须严格执行“有掘必探”的工程准则,利用专用探水钻机实施超前钻探作业,探水钻孔布置呈扇形结构,控制巷道前方及侧帮的一定范围,确保探查无盲区,钻进过程中需密切观察孔内返水颜色、水量变化及钻机运转声音,一旦发现顶钻、卡钻或涌水异常,必须立即停止钻进,固定钻杆并关闭孔口防喷装置。对于探明的积水区域,必须下套管安装高压闸阀,连接排水管路进行有控放水,放水过程中定时观测水压与流量衰减曲线,直至水量疏干,钻探施工需保留足够的超前距与帮距,严禁在未探明水文地质情况的区域盲目掘进,通过物探手段如瞬变电磁法或直流电法先行圈定异常区,钻探手段验证并消除隐患,构建起物探先行、钻探验证的综合探放水工程体系<sup>[5]</sup>。

### 4.3 矿井排水系统能力核定与优化

矿井排水系统是抵御突发涌水的最后一道防线,其工程能力必须留有充足的富余系数,主排水泵房需配备工作泵、备用泵与检修泵,其总排水能力应能在20小时内排出矿井24小时的最大涌水量,排水管路铺设双回路,当一条管路检修或故障时,另一条管路仍能承担全部排水负荷。随着矿井延深,需及时进行水泵扬程与管路阻力的校验,必要时增设中转水仓或更换高扬程多级离心泵,泵房吸水井与水仓连接处需设置滤网装置,防止杂物进入泵体损坏叶轮,建立自动化的水位监测与水泵联动控制系统,根据水仓水位自动调节开

启水泵台数,实现错峰填谷运行,定期进行联合排水试验,实测水泵工况点效率及管路排水能力,确保在突水工况下系统能迅速响应,维持井下水位的可控性。

### 4.4 采空区自然发火束管监测与注氮

针对易自燃煤层的采空区防灭火工程,建立束管监测系统是早期发现氧化升温征兆的关键,束管采样头预埋于采空区散热带与氧化带交界处,通过真空泵将气体样本抽取至地面色谱分析仪,分析一氧化碳、乙烯、乙炔等标志性气体的浓度变化趋势,一旦发现气体浓度异常或呈现持续上升趋势,立即启动注氮防灭火系统。利用地面制氮机组生产高纯度氮气,通过专用管路输送至井下,经由预埋的注氮管路向采空区氧化带连续注入。氮气作为惰性气体,能有效降低采空区氧气浓度,抑制煤炭氧化反应速率并切断燃烧所需的氧气供给,对于高温点,可配合实施灌注黄泥浆或三相泡沫技术,利用浆液的包裹性与吸热性覆盖高温煤体,阻隔漏风通道,实现降温与窒息的双重灭火效能。

## 5 结束语

矿山建设工程是一项集地质勘探、岩土工程、流体力学及环境控制于一体的复杂系统工程。面对深部地层的高应力、高瓦斯及高水压等极端工况,单纯依赖经验式的施工模式已无法适应现代矿井的建设需求,必须确立以地质探测为先导、以支护力学与流体控制技术为核心的工程技术体系。通过光面爆破、联合支护、分区通风、瓦斯抽采及综合防治水等工程措施的有机结合与精准执行,能够有效化解地质环境带来的工程风险。各类工程技术的实施需依据现场监测数据进行动态调整,确保技术参数与岩体响应特征相匹配。只有不断革新工程工艺,强化技术参数的执行刚性,构建全方位、多层次的工程技术防御网络,才能确保矿山建设工程在复杂多变的地质环境中保持结构的稳固性与系统的可靠性,实现工程建设目标的顺利达成。

## 参考文献:

- [1] 苗永春,杨波,周航宇,等.基于AHP的煤矿企业“安全管理文化”建设与评估[J].中国安全生产科学技术,2025,21(S1):51-57.
- [2] 金传芳.金属非金属矿山安全生产管理标准化建设探究[J].冶金管理,2025(07):93-96.
- [3] 刘同原,刘建宇.煤矿安全管理智能化建设及发展研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(11):112-114.
- [4] 刘玉喜.矿山电气安全管理与技术探讨[J].中国金属通报,2025(02):181-183.
- [5] 胡言钊.露天矿山安全标准化建设与评价研究[J].中国金属通报,2023(06):192-194.

# 富水砂层地质条件下地铁盾构隧道掘进参数优化研究

姜 宝, 屈德镇, 朱 超

(青岛地铁集团有限公司第三建设分公司, 山东 青岛 266100)

**摘 要** 本文聚焦富水砂层地铁盾构隧道工程, 针对其渗透能力强、稳定性能差造成的喷涌、地表沉降及刀具磨损等施工难题进行掘进参数优化研究。通过分析土压平衡机理及参数耦合关系, 依托青岛地铁 5 号线工程实例, 聚焦土仓压力、渣土改良、注浆工艺及姿态控制等关键参数进行协同优化, 提出动态调控措施, 旨在有效稳固开挖面、抑制地层变形、提升掘进效率, 为相同地质条件下盾构安全高效施工提供借鉴。

**关键词** 富水砂层; 盾构隧道; 掘进参数优化; 土压平衡; 地表沉降控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.039

## 0 引言

城市轨道交通不断延伸进复杂地质区域, 富水砂层是盾构隧道建设的主要挑战, 这类地层自稳能力弱, 地下水含量高, 易造成开挖面失稳、螺旋机喷涌、地表过量沉降, 对施工安全和工程进度构成严重威胁。已有的研究多数针对单一参数做分析, 没有针对富水砂层多参数耦合影响做系统性优化。本文以研究富水砂层地质地铁盾构隧道掘进参数优化问题为目标, 在深入探究土压平衡原理以及各因素相互影响作用的基础上, 针对青岛地铁 5 号线工程中遇到的问题进行具体分析, 提出相应的动态调整措施, 旨在解决富水砂层施工过程中面临的技术性难题, 保证开挖面稳定、减少地层扰动、加快掘进进度, 同时对类似地质条件下盾构的安全快速施工具有理论指导意义以及实际应用参考价值。

## 1 富水砂层地质与盾构施工特点

### 1.1 富水砂层地质特征

富水砂层是典型的不良地质, 在我国沿海、沿江及冲积平原地带多有分布。地质特点集中表现为: 地层结构松散、颗粒间粘结力弱、透水性能强、含水量高, 这类地层成分以细砂、中砂及粉砂为主, 不论是静水还是动水环境, 都极易出现流动与渗透。从水文地质层面考察, 富水砂层常和地表水体或深层地下水系相接, 形成高渗透性含水层, 季节性降水及潮汐作用显著影响水位, 动水压力偏高, 易产生渗透路径, 给地下工程施工造成严重威胁<sup>[1]</sup>。

### 1.2 盾构在富水砂层中的施工难点

富水砂层渗透效率高, 地下水含量多, 盾构掘进阶段易出现螺旋输送机喷涌现象, 大量水砂混合物自出土口失控喷出, 难以稳住土仓压力, 开挖面坍塌, 甚至引发地面坍塌。刀盘切削砂土阶段, 高温高压环境里, 细颗粒容易黏附刀盘面板和土仓内壁, 结成致密“泥饼”, 强力阻止渣土进入土仓, 影响掘进效率, 加重刀具磨损。富水砂层易流动, 同步注浆浆液易被地下水稀释冲散, 无法有效填充盾尾空隙, 引发管片后方空洞, 导致管片不均匀上浮、错台及渗漏水, 还会加大地表沉降管控难度。砂层对刀具的磨损作用较强, 尤其在存有石英颗粒的砂层中, 刀具磨损速率大幅升高, 多次开仓换刀会加大施工风险, 还严重影响工期、增加成本。

## 2 盾构掘进参数理论分析

### 2.1 土压平衡机理

土压平衡盾构掘进的核心逻辑是构建并动态维持掘进面水土压力的平衡, 以最低地层扰动完成隧道开挖。相关方法的理论依据是管控盾构密封土仓内的渣土压力, 让它抵消开挖面前方的静止水土压力, 稳定掌子面围岩, 防范地层失稳、塌陷或过量变形。盾构向前推进阶段, 刀盘切削形成的渣土进入土仓, 调控螺旋输送机排土速率与盾构千斤顶推进速度, 能管控土仓内渣土的充满程度和密实度, 进而生成并维持所需土压力。富水砂层渗透性好、自稳能力差, 开挖面易发生失稳, 设定土仓压力时要精准考虑地下水压力、

作者简介: 姜宝 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地铁土建施工。

土体侧向压力及地表超载,借助添加泡沫、膨润土等改良剂,增强仓内渣土的流塑性、止水性与压力传递效率,使土压传感器精准反映实际压力状况。守住这套动态平衡,是控制地表沉降、防止喷涌、保障掘进顺畅的核心理论前提。

## 2.2 掘进参数系统构成

盾构掘进是多参数协同调控实现的复杂系统工程,施工控制的直接变量就是主要掘进参数系统。土仓压力为保障开挖面稳定的核心参数,设定值一般在静止土压力和被动土压力之间,需依据地层条件、埋深及监测数据做动态微调。推进速度与总推力是相互关联的动力参数,推进快慢直接影响施工效率。总推力要克服刀盘正面阻力、盾壳与地层的摩擦阻力等,分布情况和形体大小直接关联盾构姿态和管片受力状态。刀盘转速与扭矩直接反映刀盘破碎地层的做功状态,转速作用切削效率,扭矩直接反映地层抗剪强度与刀盘负载,二者要和推力、速度契合,防止刀具异常磨损或设备过载。螺旋输送机转速和出土量是控制排土、维持土压平衡的核心执行参数,需保证排土速率和开挖体积一致,杜绝超挖或欠挖。同步注浆的压力、流量和浆液性能,以及二次注浆的时机和注入量,都属于注浆参数,一致目标是及时、紧密填充盾尾建筑空隙,控制地层变形,搭建隧道防水屏障。这些参数共同搭建完整的施工控制闭环<sup>[2]</sup>。

## 2.3 参数间的耦合关系分析

盾构掘进的各项参数彼此依存,而且伴随强烈非线性耦合和动态相互作用,共同影响掘进过程的稳定性、效率和安全性。提升推进速度一般要对应加大总推力和刀盘扭矩,但同时可能受渣土进入土仓的速率变化干扰土仓压力稳定。若此时螺旋输送机排土速率未实现同步协调,就容易造成土仓压力波动,最终造成开挖面失衡。刀盘转速与扭矩的关系受地层特性限制,面对坚硬或软硬不均地层,高转速搭配低贯入度(即单位转速下的推进量)能保护刀具,但可能削减掘进效率。注浆参数与掘进参数存在紧密的时空耦合,同步注浆的压力、流量应契合推进速度,若注浆滞后或量少,盾尾空隙没法及时填充,易造成地层沉降与管片上浮;但注浆压力偏高,还可能破坏盾尾密封,或是搅乱周边土体。像富水砂层一样的敏感地层里,土仓压力、渣土改良效果、出土量控制与注浆效果的耦合关系复杂度更高,任何参数出现失调都可能被极速放大,招致喷涌、沉降超标等连锁反应,要把掘进参数系统当作整体看待,依靠理论分析、实时监测和

智能反馈,实现多参数协同优化和动态平衡控制。

## 3 富水砂层地质条件下地铁盾构隧道掘进参数优化策略

### 3.1 土仓压力优化控制

优化控制土仓压力是富水砂层盾构施工成功的关键前提。构建一套精准、动态的压力设定和调控系统,压力设定不能直接采用静止土压力或水土压力之和,需要凭借精细化的地层解析和三维渗流场分析。在富水砂层内部,因为地下水活性高且存在压力梯度,计算理论土压力值时,要全面纳入动水压力效应及土体有效应力原理。优化控制依照“微压力波动、预判性调整”的标准,设定值一般落在围绕理论计算值的合理区间,并比静水压力稍高,抵消潜在渗流力,更核心的是动态调整策略,这依托一套完整的“监测—反馈—决策”闭环系统,盾构司机要实时紧盯土压传感器数据、螺旋机扭矩、出土状态及地表监测信息。监测数据显示地表出现微量隆起趋势,说明土压设定或许偏高,可适度降低推进速度或小幅扩大螺旋机开口率,慢慢释放压力;沉降速率出现加快趋势,应及时提升推力或临时关闭部分螺旋机闸门,快速回补舱压并稍作提升,穿越重要构建筑物、管线阶段,还得引入更保守的“压力舱”概念,预先注入高粘度泥浆构建压力缓冲层,顺畅过渡压力且精确维持,最大限度减少地层扰动。

### 3.2 推进系统参数匹配优化

推进系统参数匹配优化工作,核心目标是协调推力、推进速度和刀盘驱动参数,实现高效破岩与排土同步进行,维持盾构姿态平稳,防护关键部件。在富水砂层内部,优化匹配的核心是破解地层低承载力与高流动性的冲突,推力与推进速度需按“稳速匀推”原则匹配。过大推力加过高速度,极易造成刀盘前方砂土遭猛烈挤压,产生超孔隙水压力,甚至造成局部液化、扰动波及范围扩大;推力过小易造成盾构“叩头”或姿态失控现象,优化策略一般把推进速度控制在20~40 mm/min的平缓区间,靠分区油压调节实现,保持总推力方向稳定,再均匀施加。刀盘转速和扭矩的匹配,需聚焦渣土改良和切削效率的平衡,对比硬岩掘进,面对砂层作业,可把刀盘转速适度提高到1.8~2.5 rpm,但需搭配高效的泡沫或膨润土注入,使切削后的砂土迅速转化为流塑状,进而降低切削转矩,杜绝刀盘结存泥饼。扭矩值可充当地层变化的“晴雨表”,数值异常上涨一般说明渣土改良失效或遭遇障碍物,必须及时调整,优化整套推进系统,核心做

法是把推力、速度、转速、扭矩归为联动统一单元，建立两者间的经验函数关联，依托司机经验和智能控制系统，实现掘进过程“柔顺”和“高效”的兼顾<sup>[3]</sup>。

### 3.3 渣土改良技术应用

渣土改良扮演富水砂层盾构掘进的“润滑剂”与“稳定剂”角色，优化该技术应用，直接关乎喷涌防治、刀具保护和掘进效率。优化应用的关键，是凭借砂层粒径分布、含水率及渗透系数的实时反馈，动态调整泡沫与膨润土两大改良系统的参数。泡沫系统优化的核心是精准把控发泡率、注入比率与注入点。聚焦富水细砂层，采用中等程度发泡率（约 8~15 倍）的泡沫，气泡结构应均匀稳定，可有效隔绝砂粒、减小内摩擦角，也不会因密度过高阻碍排土，注入比率要结合掘进速度和出土量动态计算，每立方米渣土注入泡沫溶液量为 50~100 升，优先经刀盘面板注入口、土仓隔板注入口注入，使泡沫和新鲜渣土充分预混。用膨润土浆液做备用和强化手段，泡沫改良效果差、地层水压特别高或出现轻微喷涌迹象时启动，优化重点为浆液粘度和注入时机，一般用钠基膨润土调配中高粘度浆液，由螺旋机注入口或土仓壁注入口泵入，要把砂粒间的孔隙堵住，形成挡水的“泥膜”效用。两种改良剂不会孤立施用，最优对策常为“泡沫为主，膨润土为辅”的复合改良模式，依靠传感器检测土仓内渣土的摩擦系数、温度及流动性指标，采用自动调节或人工干预调整两种介质的注入比例与参数，直到渣土达到理想的“流塑状”工作状态，彻底消除喷涌风险，为平稳掘进配齐物质支撑。

### 3.4 同步注浆与二次注浆参数优化

调整注浆参数至最优状态，是控制地层长期变形、保障隧道结构稳定和防水的最后一道核心工序。在富水砂层内部，地下水极易稀释、冲刷浆液，优化工作需围绕“早强、速凝、抗分散”和“及时、足量、精准补偿”两大核心落实。同步注浆优化第一步是革新浆液配比，传统单液水泥砂浆凝固时间久、收缩程度大，动水砂层效果不好，优化路径为采用惰性浆液（以粉煤灰、膨润土为主要成分）或快凝型双液浆体系，针对富水砂层，建议采用瞬凝型双液浆，调整双液比例，能把初凝时间限定在数十秒内，赶在地下水冲散浆液前快速凝结，做出有效防水固结体<sup>[4]</sup>。

### 3.5 掘进姿态控制与纠偏策略

软流态的富水砂层里，盾构机就像在“豆腐”里行进，优化姿态控制与纠偏策略，要恪守“预防为主、微调勤纠、多源感知”的柔性控制理念。优化姿

态控制的第一步是设定合理的“目标姿态走廊”。由于砂层中管片易受注浆力不均或水浮力作用产生上浮，盾构机掘进阶段需主动将姿态控制在设计轴线下 10~30 mm 区间内，预留空间应对管片后期上浮风险。推进阶段维持姿态，依托精准操控分区油缸的推力差达成，优化策略执行准则，杜绝用单组油缸开展生硬的“扳舵”式纠偏，转而采用多组油缸推力的线性组合，生成平稳的纠偏合成力矩，引导盾构机循平缓曲线回归设计轴线，单次纠偏量每环不超 2~3 mm，降低对周围砂体的剪切干扰。纠偏决策需采用多元依据，除采用导向系统提供的盾构机自身姿态数据外，还需综合考虑盾尾间隙的实时测量值、管片选型的匹配度。另外，更关键的是地层阻力反馈。察觉盾构机有朝某一侧偏转的苗头时，第一步核查该侧盾尾间隙是否过小、该区域地层是否突然变软或存在空洞，不直接开展生硬校正。调整该侧土仓压力或注浆参数，优化地层约束条件，是比直接调整油缸效果更好的“地质纠偏”手段。紧密结合机械控制和地层响应的智能型自适应纠偏策略，是实现富水砂层中长距离、高精度隧道掘进的关键<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

通过系统梳理富水砂层地质特性和盾构施工的相互作用机制，打造以土压平衡为核心，多参数协同调控的掘进优化体系。经工程实际应用检验证明，优化后的动态压力控制、复合渣土改良和精准注浆工艺可有效强化开挖面稳定性，切实控制喷涌和地表沉降。研究成果对开发出针对富水砂层的整套施工控制技术，具有很高工程实用价值，后续研究可进一步结合智能预测算法，实时自适应优化掘进参数。

## 参考文献：

- [1] 李杨帆.富水砂层地质条件下公路路基沉降处理技术研究[J].交通科技与管理,2025(08):56-58.
- [2] 刘宇.富水砂层地质盾构掘进技术与成本分析研究[J].工程机械与维修,2024(05):16-18.
- [3] 黄光钰.富水砂层区域内隧道开挖变形规律分析[J].企业科技与发展,2025(03):109-113.
- [4] 何先虎.深厚富水砂层地质条件下的盾构始发关键技术研究[J].工程技术研究,2024,09(08):41-44.
- [5] 娄寅,徐银波,李逸凡.富水含砂层矿山法地铁车站密贴下穿变形特性与施工参数研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(11):117-123.

# 应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖局限与对策

韩艳艳

(河北省应急救援和训练中心, 河北 石家庄 050200)

**摘要** 山区灾害现场地形复杂、环境恶劣, 应急通信装备的信号覆盖易受多重因素制约, 难以满足灾害救援过程中信息传递的及时性与稳定性需求, 成为影响救援效率、威胁被困人员生命安全的关键瓶颈。针对这一核心问题, 结合山区灾害现场的实际场景特征, 剖析信号覆盖局限的具体表现与深层成因, 探索科学合理、切实可行的优化对策, 破解山区灾害现场应急通信“通不了、通不好”的难题, 以期为提升山区灾害应急救援通信保障能力提供有益参考。

**关键词** 应急通信装备; 山区灾害现场; 信号覆盖; 覆盖局限; 覆盖效能

中图分类号: TN91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.040

## 0 引言

山区地质结构特殊、气象条件多变, 地震、滑坡、泥石流等灾害频发, 一旦发生极易造成交通中断、电力瘫痪, 通信设施也会遭到严重损毁或破坏。应急通信作为灾害救援的“生命线”, 承担着传递救援指令、反馈现场情况、衔接救助资源的重要职能, 而信号覆盖的稳定性与全面性直接决定应急通信效能的发挥。山区灾害现场的高山阻隔、植被遮挡、地形起伏等客观条件, 给应急通信装备的信号传输带来诸多阻碍, 导致部分救援区域出现信号盲区、信号微弱或信号中断等问题, 严重影响救援工作的有序推进。明确应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖局限, 探寻针对性解决路径, 对强化灾害应急救援保障能力、减少人员伤亡和财产损失具有重要意义。

## 1 山区灾害现场应急通信装备信号覆盖的核心特征

山区灾害现场多为高山、峡谷、沟壑相间的地形, 高低起伏的山体形成天然屏障, 应急通信装备发射的信号在传输中易被阻挡、反射或折射, 大幅缩短传播距离, 难以实现大范围覆盖。与平原地区信号传输的顺畅性不同, 山区地形的不规则性使信号覆盖呈现碎片化, 低洼峡谷、山体背阴处极易形成固定信号盲区, 简单调整装备位置无法改善。灾害发生后, 崩塌的岩土、损毁的植被会进一步改变局部地形, 加剧信号传输阻碍, 影响信号覆盖稳定性, 无法形成持续连贯的覆盖

网络。同时, 灾害常伴随暴雨、暴雪、强风等恶劣气象, 会干扰信号传输, 暴雨浓雾加速信号衰减, 强风可能导致应急基站、天线移位倾斜, 造成信号偏移或中断, 现场粉尘、水汽也会削弱信号发射效率, 且受次生灾害影响持续存在不确定性<sup>[1]</sup>。山区灾害救援具有紧迫性和突发性, 应急通信覆盖需短时高效, 快速部署调试装备、优先覆盖关键点位, 并随搜救进度灵活调整, 保障救援指令与现场信息实时传递。

## 2 应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖主要局限

### 2.1 地形阻隔导致信号覆盖盲区广泛存在

山区灾害现场的高山、峡谷、深沟等地形, 对各类应急通信装备的信号传输均形成强烈阻碍。无论是卫星通信装备、短波通信装备, 还是应急基站, 其信号在传输过程中都会因山体遮挡而无法到达部分区域, 形成大面积信号盲区。这些盲区多分布在山体背坡、峡谷底部、低洼地带等地形复杂区域, 而这些区域往往是灾害发生后被困人员易被困、救援难度较大的区域, 信号盲区的存在使得救援人员无法及时获取被困人员的求救信息, 也无法向被困人员传递救援指令, 严重延误救援时机。山体的多重阻隔会导致信号出现多径传播现象, 信号叠加后易产生干扰, 即使部分区域有信号覆盖, 也会出现信号杂乱、不稳定的问题, 无法满足应急通信的基本需求。

作者简介: 韩艳艳 (1983-), 女, 本科, 注册安全工程师, 研究方向: 应急装备与应用工程。

## 2.2 环境干扰造成信号传输质量大幅下降

山区灾害现场的恶劣环境不仅会阻碍信号传输,还会严重干扰信号质量,导致应急通信装备的信号出现微弱、卡顿、中断等问题。灾害发生后伴随的暴雨、暴雪等气象条件,会使空气湿度大幅增加,信号在传输过程中会被水汽吸收,导致信号衰减加剧,信号强度无法达到通信标准,出现通话断音、数据传输失败等情况。同时,山区植被覆盖率较高,灾害发生后未损毁的植被、倒伏的树木会对信号形成遮挡,尤其是密集的林木会对信号进行多次反射和吸收,进一步削弱信号强度,使得应急通信装备的有效覆盖范围大幅缩小<sup>[2]</sup>。灾害现场的电磁环境复杂,损毁的电力设施、其他电子设备会产生杂波干扰,影响应急通信信号的纯净度,导致信号传输质量下降,无法实现清晰、稳定的信息传递。

## 2.3 装备适配性不足加剧信号覆盖困境

现有应急通信装备多是基于平原或常规场景设计研发,对山区灾害现场的复杂地形和恶劣环境适配性不足,进一步加剧了信号覆盖的局限。部分应急通信装备体积庞大、重量较重,山区灾害现场交通中断,装备难以快速运输到指定位置,无法及时部署实现信号覆盖;部分装备的信号发射功率不足,难以穿透山区的山体和密集植被,无法实现远距离、大范围的信号传输。同时,部分应急通信装备对环境适应性较差,在高温、低温、高湿度、强风等恶劣条件下,易出现故障停机、性能下降等问题,无法持续稳定发射信号,导致信号覆盖出现间断性中断,无法满足救援过程中持续通信的需求,进一步制约应急救援工作的推进。

## 3 应急通信装备在山区灾害现场信号覆盖局限的成因剖析

### 3.1 地形条件的先天性制约是核心成因

山区与生俱来的地形特征是导致应急通信装备信号覆盖局限的核心因素,这种制约具有先天性、难以规避的特点。山区山体高大、地形起伏剧烈,应急通信信号的直线传输特性使得信号无法绕过山体实现覆盖,只能在视线范围内传播,而山区复杂的地形结构导致视线传输路径被大量阻断,信号覆盖范围自然受到限制。山区峡谷、沟壑等地形会形成“信号陷阱”,信号进入后易被多次反射、折射,最终被消耗殆尽,无法实现有效覆盖<sup>[3]</sup>。这种地形上的先天性制约,无论采用何种应急通信装备,都难以完全消除,只能通过针对性措施进行缓解,这也是山区灾害现场应急通信信号覆盖始终面临的核心难题。

## 3.2 灾害场景的复杂性加剧覆盖难度

山区灾害现场的场景复杂性,进一步加剧了应急通信装备信号覆盖的局限,这种复杂性体现在灾害破坏的突发性和次生灾害的持续性上。山区灾害发生往往具有突发性,瞬间造成通信设施损毁,原本的通信网络彻底瘫痪,只能依靠应急通信装备搭建临时通信链路,而临时搭建的通信链路本身稳定性较差,易受现场环境影响。同时,灾害发生后易引发滑坡、泥石流、余震等次生灾害,这些次生灾害会持续破坏现场环境,损毁临时部署的应急通信装备,或改变地形、气象条件,导致信号覆盖范围不断变化、信号传输持续受到干扰,使得信号覆盖的难度进一步加大,无法形成稳定的覆盖网络。

## 3.3 装备部署与保障体系不完善

应急通信装备的部署合理性和保障体系的完善程度,直接影响信号覆盖效果,而当前在山区灾害现场,这两方面的不足进一步加剧了信号覆盖局限。装备部署过程中,缺乏对山区灾害现场地形、环境的精准研判,往往采用常规部署方式,未根据现场实际情况优化装备位置、调整发射角度,导致装备效能无法充分发挥,部分关键区域无法实现有效覆盖。同时,应急通信装备的保障体系不完善,现场缺乏专业的装备调试、维护人员,装备出现故障后无法及时修复,导致信号覆盖出现中断;装备所需的电力、耗材等保障物资供应不及时,也会影响装备的持续运行,无法实现长时间、稳定的信号覆盖,进一步凸显信号覆盖的局限。

## 4 破解山区灾害现场应急通信装备信号覆盖局限的优化对策

### 4.1 优化装备部署策略,适配山区地形特征

结合山区灾害现场的地形特点,制定科学合理的应急通信装备部署策略,最大限度规避地形对信号覆盖的制约。针对高山阻隔问题,采用“高点部署、分层覆盖”的方式,将应急基站、信号中继设备部署在高山山顶等制高点,利用高点优势扩大信号覆盖范围,同时在峡谷、低洼等信号盲区增设小型中继设备,实现信号接力传输,填补覆盖空白。针对地形碎片化特征,根据救援需求划分重点覆盖区域,优先在救援指挥部、被困人员集中区域、救援通道等关键点位部署高性能应急通信装备,确保核心区域信号稳定覆盖,同时灵活调整装备位置和发射角度,适配地形变化,提升信号覆盖的全面性和稳定性。

### 4.2 强化装备技术升级,提升抗干扰能力

聚焦山区灾害现场的环境干扰问题,加大应急通信装备技术升级力度,提升装备的抗干扰、抗恶劣环

境能力。研发适配山区场景的小型化、高功率应急通信装备,提升装备信号发射功率和穿透能力,能够有效穿透山体、植被实现信号传输,减少信号衰减。优化装备的抗环境干扰性能,提升装备在暴雨、暴雪、强风等恶劣气象条件下的稳定性,采用防水、防尘、抗风设计,防止环境因素对装备部件造成损坏,确保装备能够持续稳定运行<sup>[4]</sup>。同时,引入先进的信号抗干扰技术,过滤现场电磁杂波干扰,提升信号传输的纯净度和稳定性,避免信号卡顿、中断等问题,保障信息传递的顺畅性。

#### 4.3 完善装备保障体系,强化支撑能力

构建完善的应急通信装备保障体系,为山区灾害现场信号覆盖提供有力支撑,破解装备部署、运行过程中的各类难题。组建专业的应急通信保障团队,配备专业的装备调试、维护人员,灾害发生后同步赶赴现场,快速完成装备部署、信号调试工作,及时处理装备运行过程中出现的故障,确保装备持续稳定发挥效能。建立应急保障物资储备机制,提前储备应急通信装备、电力设备、耗材等物资,确保灾害发生后能够快速调配、及时补给,解决装备运行的物资需求。同时,建立装备部署研判机制,提前掌握山区地形、气象等信息,制定针对性部署方案,提升装备部署的效率和合理性。

### 5 山区灾害现场应急通信装备信号覆盖的实践路径完善

#### 5.1 构建多装备协同覆盖机制,提升覆盖效能

单一类型的应急通信装备难以应对山区灾害现场复杂的信号覆盖需求,需构建多装备协同覆盖机制,整合各类应急通信装备的优势,实现优势互补、协同发力。结合山区灾害现场的实际情况,整合卫星通信装备、短波通信装备、应急基站、中继设备等各类装备,形成“卫星+短波+地面”的多元协同通信网络,卫星通信装备负责远距离信号传输,短波通信装备负责复杂地形下的应急通信,地面应急基站和中继设备负责近距离信号覆盖和盲区填补,全方位提升信号覆盖的全面性和稳定性,确保不同救援场景、不同区域都能实现有效通信。

#### 5.2 加强场景化演练,提升快速响应能力

山区灾害现场应急通信装备的信号覆盖效果,离不开快速、高效的部署和操作能力,需加强场景化演练,提升应急通信团队的快速响应和实战能力。结合山区灾害的特点,模拟不同灾害场景、不同地形条件下的应急通信部署场景,组织应急通信团队开展演练,重点演练装备运输、快速部署、信号调试、故障排查等环节,提

升团队对复杂场景的适应能力和操作熟练度<sup>[5]</sup>。通过常态化场景化演练,优化装备部署流程、完善保障方案,确保灾害发生后能够快速响应、高效部署,在最短时间内实现重点区域信号覆盖,为救援工作提供及时支撑。

#### 5.3 推动区域联动保障,强化资源共享能力

山区灾害救援往往涉及多个区域、多个部门,需推动区域联动保障,强化应急通信资源共享,破解单一区域、单一部门资源不足的问题,提升信号覆盖保障能力。建立跨区域应急通信资源共享机制,整合不同区域的应急通信装备、技术人员、保障物资等资源,一旦某一区域发生山区灾害,可快速调配周边区域的优质资源,支援现场应急通信保障工作,提升信号覆盖的效率和质量。加强与相关部门的联动协作,协同电力、交通、气象等部门,提前掌握灾害预警、地形变化、气象条件等信息,为应急通信装备部署、信号优化提供支撑,同时保障装备运输、物资补给通道的畅通,确保应急通信保障工作有序推进。

### 6 结束语

本文聚焦应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖局限与对策,明确山区灾害现场应急通信装备信号覆盖的核心特征与主要局限,剖析地形制约、环境干扰、装备适配不足等相关成因,提出针对性的优化对策与实践路径,破解山区灾害现场应急通信信号覆盖难题。应急通信装备的信号覆盖效能直接关系到山区灾害救援工作的推进成效,以及受困人员生命安全与财产损失。通过优化装备部署、强化技术升级、完善保障体系、构建协同机制,能够有效提升应急通信装备在山区灾害现场的信号覆盖质量,强化应急通信保障能力。未来需持续聚焦山区灾害现场的实际需求,不断完善相关路径,推动应急通信装备更好地适配山区灾害场景,为山区灾害应急救援工作提供更坚实的通信支撑。

### 参考文献:

- [1] 王伟,许勇,陈晔,等.关于应急通信能力提升策略研究[J].电信工程技术与标准化,2025,38(11):54-58.
- [2] 任萌,郜凤国,张丽,等.面向空地互补保障的应急通信装备配置研究[J].电信工程技术与标准化,2025,38(11):44-48.
- [3] 巫江.高原寒区应急通信装备的使用与维护保养研究[J].中国设备工程,2025(13):73-75.
- [4] 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.
- [5] 钮蕊蓉.受限空间下应急智能通信装备前端天线的研究[D].廊坊:华北科技学院,2025.

# 高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化及产品力学性能调控研究

岳鹏飞

(中石化英力士(天津)石化有限公司, 天津 300450)

**摘要** 高密度聚乙烯是应用最广的一种通用塑料, 其力学性能决定产品的市场竞争力。聚合工艺参数是决定产品性能的关键因素, 但是在生产中普遍存在工艺参数波动大、性能调控精准度不够等问题。本文系统地分析了高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化的重要意义, 对高密度聚乙烯树脂聚合工艺中存在参数波动引起性能不稳定、力学性能和加工性能难以平衡、传统优化方法效率低等主要问题进行了详细的分析。在此基础上, 从关键工艺参数系统化调控与优化、力学性能需求下的配方设计方法、数据驱动的工艺参数智能优化技术等方面出发, 提出相应的优化策略, 以期为高密度聚乙烯树脂的工业化生产提供参考, 进而推动产品质量提高和产业升级。

**关键词** 高密度聚乙烯; 聚合工艺; 参数优化; 力学性能; 智能调控

中图分类号: TQ32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.041

## 0 引言

高密度聚乙烯树脂属于五种通用塑料之一, 被广泛地运用在包装、建材、汽车、电子等领域之中, 产品质量以及性能稳定性对下游产业的发展产生直接影响。聚合工艺参数是决定树脂分子结构、产品质量以及产品性能的重要因素, 合适的工艺参数可以有效提高产品的质量, 降低生产成本, 满足各种不同的市场需求。但是目前生产过程中还存在着工艺参数波动大、性能调控难度高、优化效率低等问题。因此, 研究高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数的优化和力学性能的调节, 对于聚烯烃工业的高质量发展起到了重要的推动作用。

## 1 高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化的意义

### 1.1 提升产品质量稳定性与一致性

聚合工艺参数控制得当才能保证高密度聚乙烯产品质量的稳定。反应温度、压力、催化剂浓度等关键参数稍有波动就会引起聚合物分子量分布、结晶度等结构参数的变化, 从而影响到产品的力学性能表现。对工艺参数进行系统的优化可以精确地调控聚合反应, 使每一批次产品的分子结构参数都在合理的范围内, 从而提高产品性能的一致性、稳定性, 减少不合格品率, 满足下游客户对产品质量稳定性的严格要求<sup>[1]</sup>。

### 1.2 降低生产成本与能源消耗

改变工艺参数可以大幅度地提高生产效率和资源利用率。调节反应温度、停留时间等参数来提高单位

时间内的产量, 缩短生产周期。同时, 调节催化剂的用量和氢气的浓度等参数可以提高催化效率、原料转化率、降低原料的浪费。另外, 采用温度控制精量化、反应条件改善可以减少加热、冷却过程消耗的能量, 减轻公用工程负荷。这些改进不但可以降低单位产品的生产成本, 而且也有利于实现节能减排的目标, 提高企业的经济效益和环境效益<sup>[2]</sup>。

### 1.3 满足不同应用领域的性能需求

不同的应用领域对于高密度聚乙烯的性能要求有很大的不同。包装薄膜需要有很好的韧性和抗冲击性能, 管材需要有高的刚性和耐环境应力开裂性能, 注塑制品需要有良好的加工流动性和尺寸稳定性。通过系统的优化聚合工艺参数来调节树脂的分子量、分子量分布、支化度等结构参数, 从而达到产品力学性能定向设计。根据客户不同的要求进行定制可以满足客户的个性化需要, 扩大产品适用的对象范围, 提高企业市场竞争力, 使企业的盈利能力得到提升<sup>[3]</sup>。

## 2 高密度聚乙烯树脂聚合工艺中存在的问题

### 2.1 工艺参数波动导致产品性能不稳定

目前高密度聚乙烯的生产工艺参数变化较大, 从而影响到产品的质量。反应器内温度分布不均匀, 局部过热或者过冷的现象时有发生, 造成聚合反应速率不一致, 出现分子量分布宽化。催化剂进料系统计量

作者简介: 岳鹏飞(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高分子材料。

精度不够,造成催化剂浓度在不同时间段出现偏差,影响聚合活性,使产品的熔体流动速率稳定性变差。压力控制系统的响应滞后,在负荷变化时不能迅速调节,造成反应条件偏离最佳状态。氢气的浓度检测和调节精度不高,分子量不能调整到很精确。原料中杂质含量的波动也会影响催化剂的活性,从而影响聚合反应的稳定性。另外,不同的操作人员对于工艺参数以及调控习惯存在着差异,没有统一的操作规范,加大了参数的波动问题。综合以上因素造成产品密度、熔体指数、拉伸强度、冲击韧性等关键性能指标出现大的波动,给下游加工企业带来困扰,也阻碍了产品高端应用的发展<sup>[4]</sup>。

## 2.2 力学性能与加工性能难以平衡

高密度聚乙烯的力学性能与加工性能一般存在相互制约的关系,在实际生产中很难找到两者的最佳平衡。提高树脂的分子量能够明显改善拉伸强度、抗冲击性、耐环境应力开裂性等力学性能,但是也会导致熔体粘度增大、流动性变差,给注塑、吹塑等加工过程带来不便,增加加工能耗,降低生产效率。采用宽分子量分布设计可以提高加工流动性,但是会牺牲一些力学性能,冲击韧性可能会大幅度降低。调节氢气浓度以控制分子量时,很难准确找到平衡点,要么力学性能达不到要求,要么加工性能不好。催化剂体系的选择也存在两难,高活性催化剂能提高生产效率,但是可能会造成分子量分布较宽,影响某些力学性能的均匀性。共聚单体可以提高材料的韧性和加工性,但是过多地加入会降低材料的结晶度和刚性。企业通常会根据主要应用领域的要求侧重于某一方面的性能,很难开发出力学性能和加工性能兼优的产品牌号,从而影响产品应用范围以及市场竞争力<sup>[5]</sup>。

## 2.3 传统工艺参数优化方法效率低下

传统的工艺参数优化主要依靠经验摸索、单因素试验,存在着周期长、成本高、效率低等许多问题。操作人员一般依靠以往的生产经验以及工艺知识去调整参数,这样主观性很强,缺乏系统性、科学性,很难找到最佳的工艺条件。单因素试验法虽然可以研究某一个参数对产品性能的影响规律,但是忽略了参数之间的交互作用,不能反映工艺系统的复杂性,所得结论片面,难以推广。正交试验等统计方法虽然有所改进,但是试验次数还是较多,耗费大量时间、原料。更重要的是,传统的方法很难建立工艺参数和产品性能之间的定量关系模型,不能对参数进行准确的预测和优化。传统的方法对多目标优化问题就显得力

不从心了,不能很好地找到不同性能指标间的最佳平衡。生产中的参数调整大多为试错式,要经过多次调试才能满足要求,既浪费资源又产生大量的不合格品。市场对产品的性能要求越来越高,产品牌号越来越多,传统的优化方法已不能满足快速开发新产品、精确调节性能的需求,亟须采用更加高效、智能的优化技术。

## 3 高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化策略

### 3.1 关键工艺参数的系统化调控与优化

创建关键工艺参数的系统性调节体系,是达到产品性能精准控制的前提。首先要识别影响产品力学性能的主要参数,即反应温度、反应压力、催化剂浓度、氢气浓度、共聚单体含量等,通过敏感性分析来确定各个参数的影响程度以及调控的优先顺序。温度应该用多点检测、分段控制的方法来使反应器内温度分布均匀,防止局部出现温度异常。压力控制要升级控制系统精度,达到快速响应、精确稳定的效果。催化剂进料系统应配高精度计量装置,保证浓度稳定,还要建立活性在线监测系统。氢气浓度需要在线检测和自动调节,用流量控制来调节分子量。共聚单体的加入要使用质量流量计来准确计量,根据目标性能的要求动态调整共聚单体的比例,建立原料预处理系统,严格控制原料中水分、氧气等杂质的含量,减少对催化剂活性和聚合反应的影响。

在温度优化的实际操作中,在反应器的不同高度和径向位置上布置若干个温度传感器,随时观测温度分布。当反应器某处温度过高的时候,就立刻调整夹套冷却介质的流量分配,加大该区域的冷却强度。同时优化加热介质的进料方式,用分段加热法将反应器分为预热区、反应区和稳定区等几个温度控制段,每个区域分别控制加热量。通过调节控制算法的参数来减小温度波动的幅度。对氢气控制来说,安装在线氢气浓度分析仪,依据目标分子量调节氢气进料流量,配合质量流量控制器达到精准计量。经过不断的参数调整后,产品熔体指数的批次间差异大大减少,拉伸强度波动范围也大大缩小,产品的性能稳定性明显提高,为以后的大规模稳定生产打下了良好的基础。

### 3.2 基于力学性能需求的配方设计方法

根据不同的应用领域对性能的不同要求来建立科学的配方设计方法,是实现产品差异化的关键。首先要对目标应用对力学性能的具体要求做深入的分析,确定出拉伸强度、断裂伸长率、冲击韧性、刚性模量等指标目标值的范围。以分子设计理论为指导进行配

方优化,得到分子结构参数与宏观力学性能的构效关系。高强度、高刚性的应用应该使用分子量高、结晶度高的配方,严格控制氢气浓度获得理想分子量,优化温度和压力提高结晶度。对于需要优异的韧性的产品可以采用双峰或多峰分子量分布设计,通过串联反应器或者多活性位催化剂来实现。对于加工性能要求高的应用,应当适当扩大分子量分布,加入长链支化结构,通过调节共聚单体的种类来调节流变性。催化剂体系的选择要根据性能需求匹配合适的催化剂类型,配方设计时还要考虑加工助剂、抗氧剂等添加剂的协同作用,通过复配优化提高产品的综合性能。

开发高韧性管材专用料时,首先要确定产品应达到较高的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度等性能目标。双峰分子量分布方案,在第一反应器里控制低氢气浓度产生高分子量组分,主要贡献韧性和强度。在第二反应器中提高氢气的浓度来生成低分子量的组分,提高加工流动性。改变催化剂体系,选用适合宽分子量分布的催化剂类型,加入少量共聚单体来提高韧性。中试验证后,对第一反应器、第二反应器的温度进行调节,对各个反应器的氢气浓度进行精确控制。通过系统的配方设计、工艺调整,最终产品的拉伸强度、断裂伸长率、冲击强度等各项指标均达到或者超过目标要求,熔体指数控制在合理范围内,既满足了力学性能要求,又保证了良好的加工性能,成功实现了高性能产品的定向开发。

### 3.3 数据驱动的工艺参数智能优化技术

使用数据驱动的智能优化技术能提升优化的效率和精度。首先要建立完善的数据采集系统,实时采集温度、压力、流量、浓度等工艺参数和密度、熔体指数、力学性能等质量指标,形成包含工艺与性能数据资源库。数据预处理阶段进行清洗、异常值剔除、缺失值填补,保证数据质量。利用机器学习算法来建立工艺参数和产品性能之间的预测模型,经过训练验证后提高预测的精度。利用多目标优化算法,在满足多个性能约束的情况下得到最优的参数组合。创建在线优化系统,将预测模型嵌入控制系统中,根据实时数据动态调整参数,从而达到闭环优化的目的。采用数字孪生技术创建出虚拟仿真模型,利用虚拟环境来进行参数的调整和新产品的研发。采用深度学习的方法挖掘出工艺参数波动和产品质量波动的内在关系,建立故障诊断预警系统,及时发现参数偏差、及时纠正,防止不合格品产生。

实施智能优化项目时,先建立以温度、压力、催

化剂浓度、氢气浓度等共计几十个工艺参数,以及密度、熔指、拉伸强度、冲击强度等性能指标为大数据集,收集大量的生产历史数据。数据清洗之后去除明显异常的数据,用合适的方法处理缺失值。使用神经网络算法建立预测模型,把数据分为训练集和测试集,反复训练、优化网络结构,建立可靠的预测模型。用遗传算法做多目标优化,设定力学性能和加工性能等多目标约束条件,在多维参数空间里寻找最优解。将优化模型投入生产控制系统,根据当下的生产状况和所需性能要求,系统自动得出合适的工艺参数值建议,操作者依据这一建议来做出相应调整。同时建立数字孪生模型,在虚拟环境中模拟不同的参数组合聚合过程以及产品的性能,新产品开发时先在虚拟平台做大量的实验来筛选出比较好的方案,然后再进行实际的生产验证,大幅缩短了开发周期,降低了试验成本,提高了工艺参数优化的效率和科学性。

## 4 结束语

高密度聚乙烯树脂的聚合工艺参数优化和产品力学性能调节是一项系统工程,提高产品质量、降低成本、满足市场多样化需要有重要的意义。针对目前生产中存在的参数波动大、性能平衡难、优化效率低等问题,企业要从关键参数的系统化调控、基于性能需求的配方设计、数据驱动的智能优化等方面入手,创建科学完善的工艺优化体系。用先进的控制技术、优化算法、智能化工具等手段对聚合过程实现精确控制,从而达到产品性能定向设计的目的。在新的科技革命和产业变革的大背景下,聚烯烃生产企业应抓住数字化、智能化转型的机遇,加强产学研合作,持续推进工艺技术创新,为高密度聚乙烯产业的高质量发展做出贡献。

## 参考文献:

- [1] 周祚东. Ti系小中空高密度聚乙烯树脂开发及应用[J]. 炼油与化工, 2023, 34(02): 70-72.
- [2] 雷佳伟, 刘旭东, 郑昌, 等. InnoveneS 装置大中空高密度聚乙烯树脂性能[J]. 石油化工, 2025, 54(09): 1330-1335.
- [3] 张黎明. 高密度聚乙烯树脂在管材挤出的应用研究[J]. 山西化工, 2024, 44(01): 182-183.
- [4] 雷佳伟, 邓起焱, 张祖平, 等. IBC 桶专用高密度聚乙烯树脂性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(07): 59-62.
- [5] 郑文明. 高密度聚乙烯树脂拉伸屈服应力测量不确定度评价[J]. 石化技术, 2021, 28(05): 13-15.

# 软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道的变形控制技术及其参数优化

张纯肖, 李恒, 王广栋

(济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要** 本文通过理论分析数值模拟与工程实测相结合的方法, 明确软土卸荷扰动注浆加固等关键影响因素, 提出“地层预处理—精细化顶进—动态监测”三位一体变形控制技术体系, 优化确定注浆压力顶进速度等核心施工参数。工程实例验证表明, 优化后的技术方案可将地铁盾构隧道竖向变形控制在 2 mm 以内, 水平变形控制在 1.5 mm 以内, 满足地铁运营安全要求。

**关键词** 软土地区; 箱涵; 盾构隧道; 近距离上跨; 变形控制

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.042

## 0 引言

软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道施工易因地层卸荷与顶进扰动引发隧道变形, 直接威胁地铁运营安全。近年来, 城市地下空间开发提速, 此类工程日益增多, 现有施工技术难以兼顾施工效率与变形控制要求。本文依托软土地区相关工程实践, 通过理论分析、数值模拟与现场实测相结合的方法, 探究箱涵上跨隧道施工的变形影响因素, 构建地层预处理、精细化顶进、动态监测三位一体的变形控制技术体系, 优化注浆压力、顶进速度等关键施工参数, 最终形成一套安全高效的施工技术方案, 为类似工程提供技术参考。

## 1 工程地质特征与变形影响因素

### 1.1 软土地区工程地质特性

软土地区普遍分布的粉质黏土淤泥质土等软土, 具有天然含水率高孔隙比大压缩性强抗剪强度低渗透性差的特点, 在箱涵施工扰动下易产生显著的弹塑性变形, 进而传递至下方地铁盾构隧道引发结构位移<sup>[1]</sup>。依托黄石市兴富一级公路软基路段及北京芙蓉路匝道工程地质勘察资料, 软土主要物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 软土主要物理力学性质指标

土类	天然含水率(%)	孔隙比	压缩模量(MPa)	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	渗透系数(cm/s)
粉质黏土	32.5~38.6	1.02~1.18	3.2~3.8	15~18	10~12	$1.2 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$
淤泥质土	39.2~45.8	1.15~1.35	2.3~2.9	12~15	8~10	$5.6 \times 10^{-7} \sim 3.2 \times 10^{-6}$

由表 1 可知, 软土天然含水率介于 32.5%~45.8%, 孔隙比 1.02~1.35, 压缩模量仅 2.3~3.8 MPa, 抗剪强度指标黏聚力 12~18 kPa 内摩擦角 8°~12°, 显著低于普通黏性土, 施工过程中地层稳定性控制难度极大。

### 1.2 变形核心影响因素

箱涵近距离上跨施工对地铁盾构隧道的变形影响具有多因素耦合特征, 通过 FLAC3D 数值模拟与工程案例统计分析, 明确核心影响因素包括四个方面<sup>[2]</sup>。一是地层卸荷效应, 箱涵基坑开挖过程中, 软土应力释放产生回弹隆起, 带动隧道上浮, 北京芙蓉路匝道工程中未采取配重措施时, 隧道最大上浮量达 3.2 mm, 超出安全控制阈值; 二是顶进扰动作用, 顶进过程中箱涵与土体的摩擦挤压易引发周边土体位移, 尤其软土抗扰动能力差, 不当顶进速度会加剧变形; 三是注浆加固质量, 软土注浆效果直接决定地层承载力提升程度, 注浆压力不足或浆液配比不合理会导致加固失效, 黄石某工程因注浆压力偏低, 加固后土体抗压强度仅提升 15%; 四是空间距离效应, 箱涵与隧道净距越小影响越显著, 净距从 4.5 m 减小至 3.0 m 时, 隧道变形量增幅达 68%。

作者简介: 张纯肖(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路机场与桥隧工程。

## 2 变形控制核心技术体系

### 2.1 地层预处理加固技术

1. 注浆加固技术。针对软土地层承载力不足的问题,采用劈裂注浆与渗透注浆相结合的复合注浆工艺对箱涵基底及隧道周边地层进行预处理<sup>[3]</sup>。结合软黏土层注浆试验数据,确定浆液选用水泥粉煤灰复合浆液,水泥掺入比 2.5%,水灰比 0.8,注浆压力控制在 0.8 MPa,单孔扩散半径 1.3 m,孔距按 1.5 m 梅花形布置,孔深穿透软土层 0.5 m。注浆过程采用分段注浆工艺,每段注浆长度 1.0 m,注浆完成后静置 24 h 确保浆液充分固化<sup>[4]</sup>。加固后软土无侧限抗压强度提升至 0.35 MPa 以上,黏聚力提升至 28 kPa,有效增强地层稳定性。

2. 管幕—抗拔桩联合加固。对于净距小于 4 m 的近距离跨越段,采用管幕—抗拔桩门式结构进行加强加固。管幕选用  $\Phi 800$  mm 无缝钢管,沿箱涵两侧边缘布置,钢管间距 1.2 m,两端嵌入稳定岩层,形成门式支撑框架,抗拔桩采用  $\Phi 600$  mm 钻孔灌注桩,桩长 15 m,桩间距 2.5 m,布置于管幕外侧,抵抗地层隆起产生的上拔力<sup>[5]</sup>。

### 2.2 精细化顶进控制技术

1. 减阻优化设计。箱涵顶进过程中的摩擦阻力是引发地层扰动的重要因素,基于交通运输工程学报的箱涵顶进模拟试验数据,采用石蜡机油混合物作为减阻材料,涂抹于箱涵底板及侧墙,厚度 3 mm,配合滑石粉使用,可使混凝土与土体的摩擦系数从 0.31 降至 0.12,减阻率达 61%<sup>[6]</sup>。同时在箱涵前端设置锥形导向结构,减少顶进过程中的土体挤压扰动,导向锥角控制为  $15^\circ$ ,有效降低顶进阻力。

2. 顶进参数控制。顶进采用分级加载匀速推进模式,顶进力通过公式  $F = \mu G + F_0$  计算确定,其中  $\mu$  为摩擦系数, $G$  为箱涵自重及配重总和, $F_0$  为初始启动阻力。顶进初期采用 0.5 倍设计顶力分级加载,每级加载稳定 10 min 后再进行下一级加载,启动完成后采用匀速顶进,顶进速度控制在 5 cm/h。顶进过程中实时监测箱涵姿态,偏差控制在  $\pm 10$  mm 以内,若出现姿态偏移,采用单侧微调顶力的方式进行纠偏,单次纠偏量不超过 2 mm,避免过度纠偏引发地层扰动。

3. 动态配重平衡。采用可调节配重技术平衡基坑开挖卸荷效应,配重材料选用钢锭,加载量按开挖卸土量的 61.8% 控制。顶进过程中根据监测数据实时调整配重分布,在隧道上浮量较大区域增加局部配重,上浮量超过 1.5 mm 时,追加 10% 的配重荷载,形成动态平衡体系。

### 2.3 全周期动态监测技术

1. 监测体系布设。建立覆盖施工全过程的动态监测体系,监测项目包括隧道竖向位移水平位移管片应力箱涵姿态及地表沉降。监测点按以下原则布设:隧道内沿顶进方向每 2 m 布设 1 个竖向位移监测点,每 5 m 布设 1 个水平位移监测点;管片应力监测采用应变片,粘贴于管片内侧拱顶拱腰及拱底位置;箱涵姿态监测采用激光定位仪,实时监测轴线偏差及高程变化;地表沉降监测点沿施工影响范围布设,监测范围为箱涵两侧各 20 m,监测点间距 3 m。

2. 监测频率与预警控制。监测频率根据施工阶段动态调整,基坑开挖及顶进作业期间每 1 h 监测 1 次,顶进完成后每 4 h 监测 1 次,稳定后改为每天监测 1 次,监测周期不少于 30 天。设定两级预警值,警戒值为隧道竖向位移 1.5 mm 水平位移 1.0 mm,报警值为竖向位移 2.0 mm 水平位移 1.5 mm。监测数据实时传输至监控中心,采用数据分析平台进行趋势预测,当监测数据达到警戒值时,立即停止施工,分析原因并采取加固措施后再恢复施工。

## 3 施工参数优化试验研究

### 3.1 正交试验设计

选取注浆压力 A 顶进速度 B 配重加载量 C 三个关键施工参数作为优化变量,每个变量设置 3 个水平,采用  $L_9(3^3)$  正交试验方案,以隧道最大竖向变形量为评价指标,优化确定最优参数组合。试验因素水平如表 2 所示,正交试验结果如表 3 所示。

表 2 试验因素水平

水平	注浆压力 A (MPa)	顶进速度 B (cm/h)	配重加载量 C (%)
1	0.6	3	50
2	0.8	5	61.8
3	1.0	7	70

### 3.2 参数优化结果

极差分析表明,各参数对隧道变形的影响次序为注浆压力 > 顶进速度 > 配重加载量,最优参数组合为注浆压力 0.8 MPa,顶进速度 5 cm/h,配重加载量 61.8%。在此参数组合下,隧道最大竖向变形量仅 0.6 mm,满足地铁运营安全控制要求。验证试验表明,该优化参数具有良好的稳定性,在不同软土厚度条件下均能有效控制隧道变形,变形量波动范围不超过  $\pm 0.2$  mm。

表3 正交试验结果

试验号	A	B	C	隧道最大竖向 变形量/mm
1	1	1	1	1.8
2	1	2	2	1.3
3	1	3	3	1.6
4	2	1	2	0.8
5	2	2	3	0.6
6	2	3	1	0.9
7	3	1	3	1.1
8	3	2	1	1.0
9	3	3	2	0.9
K1	4.7	3.7	3.7	—
K2	2.3	2.9	3.0	—
K3	3.0	3.4	3.3	—
极差 R	2.4	0.8	0.7	—
影响次序	A > B > C	—	—	—
最优水平	A2	B2	C2	—

## 4 工程实例验证

### 4.1 工程概况

以北京芙蓉路匝道箱涵上穿地铁6号线盾构隧道工程为实例,该工程箱涵全长40 m,宽度20 m,高度5.2 m,采用C35钢筋混凝土浇筑,总重约8 500 kN。箱涵与地铁隧道净距4.1 m,穿越段地层为淤泥质土,天然含水率42.3%,孔隙比1.28,压缩模量2.6 MPa。地铁隧道为Φ6 000 mm盾构隧道,管片厚度300 mm,采用C50混凝土浇筑,运营速度80 km/h,隧道变形控制阈值为竖向位移≤2 mm,水平位移≤1.5 mm。

### 4.2 施工方案实施

该工程采用本文提出的变形控制技术体系,地层预处理采用复合注浆加固,注浆参数为压力0.8 MPa,水泥掺入比2.5%,孔距1.5 m;顶进采用石蜡机油混合物减阻,顶进速度5 cm/h,顶进力控制为1 200 kN;设置管幕一抗拔桩联合加固体系,管幕Φ800 mm,抗拔桩长15 m;监测体系按本文方案布设,监测频率1 h/次。

### 4.3 监测结果分析

施工全过程监测数据如表4所示,顶进施工期间隧道最大竖向位移为1.2 mm,水平位移为0.8 mm,均未达到预警值;顶进完成后30天内,隧道累计竖向位移1.5 mm,水平位移1.0 mm,变形趋于稳定,无明显

回弹现象。箱涵姿态偏差控制在±8 mm以内,满足设计要求。工程实施过程中地铁正常运营,未出现任何安全事故,验证了本文提出的变形控制技术优化参数的有效性和可靠性。

表4 施工全过程监测数据

监测阶段	监测时间	隧道竖向 位移/mm	隧道水 平位移/mm	箱涵轴 线偏差/mm	箱涵高 程偏差/mm
基坑开挖	第1天	0.5	0.3	—	—
顶进初期	第3天	0.8	0.5	+3	-2
顶进中期	第5天	1.2	0.8	+5	-3
顶进完成	第7天	1.3	0.9	+4	-2
稳定期	第37天	1.5	1.0	+3	-1

## 5 结论

1. 软土地区箱涵近距离上跨地铁盾构隧道的变形主要受地层卸荷顶进扰动注浆加固质量和空间距离控制,其中注浆压力对变形影响最为显著,其次为顶进速度和配重加载量。

2. 提出的“地层预处理—精细化顶进—动态监测”三位一体变形控制技术体系,通过复合注浆管幕—抗拔桩联合加固减阻优化和动态配重等关键技术的协同作用,可有效控制隧道变形,确保施工安全。

3. 优化确定的核心施工参数为注浆压力0.8 MPa,水泥掺入比2.5%,顶进速度5 cm/h,配重加载量61.8%,该参数组合可将隧道最大竖向变形控制在0.6 mm以内,适用于软土地区净距3~5 m的箱涵上跨地铁盾构隧道工程。

4. 北京芙蓉路匝道工程实例验证表明,所提出的变形控制技术优化参数具有良好的工程适用性,可保障地铁运营安全,为类似工程提供技术借鉴。

## 参考文献:

- [1] 陈永武.复杂地层地铁盾构近距离下穿市政隧道变形控制技术[J].现代城市轨道交通,2024(09):105-112.
- [2] 何永洪.成都地铁9号线盾构下穿高铁隧道变形控制技术[J].隧道建设(中英文),2024,44(z1):396-407.
- [3] 马灿.大直径盾构下穿地铁隧道施工变形控制技术分析[J].江西建材,2023(05):339-341.
- [4] 孟源海.地裂缝地铁区间盾构隧道变形控制技术[J].工程技术研究,2024,09(14):76-78.
- [5] 严冬.软流塑地层盾构隧道近接下穿运营线路的变形影响及控制技术[J].路基工程,2024(03):173-180.
- [6] 张海超.大直径盾构下穿运营地铁隧道施工变形控制技术[J].现代隧道技术,2022,59(z1):934-940.