

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 2 月 第 4 期 (总第 629 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 2 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 6061 铝合金热处理工艺探讨  
..... 梁敬钧, 陆秋子, 凌廷喜, 吴泊良
- 004 垂直轴风电增速箱体加工技术分析  
..... 施国卫, 谢 达
- 007 炉窑烟气余热与轧机废乳液耦合处理技术  
..... 王耀国, 樊振国, 孙朝阳, 苗璐璐
- 010 基于深度信息和神经网络的道路图像分割方法  
..... 虞钉钉
- 013 基于 EPICS 的氦低温冗余控制系统设计开发与测试  
..... 张锦程, 周芷伟, 袁 恺, 张 岳
- 016 一种新型防坠落爬塔辅助装置的研发与综合性能研究  
..... 何 超, 王 鑫, 刘立波, 俞 磊

## 智能科技

- 019 数据为中心的人工智能：数据分析质量优化路径  
..... 杨 硕
- 022 基于机器学习的 DDoS 攻击检测与防护机制研究  
..... 刘俊侠
- 025 DCS 控制系统在数字自动化中的应用分析  
..... 崔 琪
- 028 火力发电厂发电机组集控运行技术应用研究  
..... 丁 锐
- 031 垃圾发电控制系统人机界面设计与优化研究  
..... 任鸿儒
- 034 电力供应链实时调配智能协同模式及优化路径研究  
..... 唐 山, 蒋似俊, 滕中奇, 杨林波
- 037 智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术分析  
..... 胡 蝶, 徐金晖

## 应用技术

- 040 深基坑支护技术的关键挑战与创新解决方案  
..... 李 峰
- 043 高层建筑泵送混凝土施工裂缝控制技术分析  
..... 张伟华

# 目录 Contents

- 046 高大模板工程施工技术在高层建筑中的应用研究..... 卢文静, 李耀军
- 049 免拆模板体系施工技术在节能建筑中的应用分析..... 轩冬冬
- 052 房建工程地下室超长结构跳仓法混凝土施工技术..... 阮仁强
- 055 水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工技术研究..... 蔡卫露
- 058 分体式三箱钢梁高处焊接施工安全防护技术研究与应用..... 任江涛, 彭章勇
- 061 无地面预加固工况的软弱地层中急曲线盾构施工技术研究..... 沈 蔚

## 科创产业

- 064 智慧供热节能减排效果评估研究..... 吴 斌
- 067 输变电设备信息化管理平台构建与优化..... 夏 斌
- 070 大型风机电气控制系统的多变量协同优化方法..... 王滕杰, 李伟群, 王文静, 尹 会
- 073 真空精炼用真空泵节能减排技术应用分析..... 孙 猛, 燕文奇, 黄 萌, 孙朝阳
- 076 建设单位建立及应用工程造价数据库探讨..... 吴嘉昕
- 079 智慧水务推动水利业务协同管理的机制研究..... 类红瑞
- 082 基于差异化场景的冷轧钢卷防锈包装优化研究..... 赵明明

## 技术管理

- 085 电力工程施工安全与智能监控研究..... 臧天雅
- 088 电力继电保护故障及检修技术探讨..... 张春雷
- 091 人工智能在电力工程施工管理中的应用研究..... 腾爱根, 马迎顺
- 094 住宅建筑工程框架剪力墙结构施工技术研究..... 张道亮
- 097 装配式建筑工程项目管理核心问题与优化对策..... 王浩强
- 100 水利工程质量检测中的无损检测技术应用..... 何 庆
- 103 信息化监理技术在水利工程安全管理中的应用研究..... 肖云华

## 科学论坛

- 106 膨胀土边坡的变形特性研究..... 韩晓伟, 张玲玲
- 109 新能源工程机械的动力系统设计与节能效果研究..... 刘旭鹏, 王嘉瑞, 王 坤
- 112 电力工程输电线路设计中的防雷技术研究与优化..... 武雨辰
- 115 基于 GIS 的矿区地质信息集成与测绘管理系统研究..... 秦 启
- 118 基于数字孪生技术的白溪水库流域预演模型研究与应用..... 冯志峰
- 121 岩土工程勘察中地下水位量测误差对基础设计的影响探讨..... 张文龙
- 124 倾斜摄影测量与三维激光扫描融合技术在测量高层建筑物中的应用研究  
..... 姚瑞明, 梁诗文, 徐新慧, 黎 伟, 冯 博

# 6061 铝合金热处理工艺探讨

梁敬钧, 陆秋子, 凌廷喜, 吴泊良\*

(南宁职业技术大学, 广西 南宁 530001)

**摘要** 6061 铝合金是一种可热处理强化铝合金, 凭借其优良的耐腐蚀性、可加工性及中等强度等优点, 在航空、汽车等领域得到广泛应用。本文以 6061 铝合金为研究对象, 主要探讨固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间等热处理工艺参数对材料硬度的影响规律, 旨在为促进 6061 铝合金在对强度性能有更高要求的工程领域的应用提供理论参考。通过多组对比实验的设计, 对试样在不同工艺参数下的硬度值进行系统测试, 建立工艺参数与材料硬度性能的关联性。实验结果显示: 6061 铝合金试样在固溶温度 530 °C、保温时间 60 min、时效温度 170 °C、时效时间 12 h 的工艺条件下, 硬度可达 125 HB, 比退火状态提高 78.6%。

**关键词** 6061 铝合金; 热处理工艺; 硬度

**基金项目:** 搅拌摩擦沉积增材制造铝合金强塑性协同调控 (项目编号: 2024KY16)。

**中图分类号:** TG146.2; TG166.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.001

## 0 引言

铝合金作为轻金属材料的重要代表, 在现代工业领域已成为不可或缺的关键材料, 它具有比强度高、密度小、导电导热性能优异等一系列优势。其中, 6061 铝合金相较于 2000 系和 7000 系高强度铝合金, 其耐腐蚀性和焊接性能更好, 而且成本相对较低, 因此在航空航天、汽车等多个领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。6061 铝合金的强度性能主要取决于其热处理工艺。因此, 系统探讨 6061 铝合金热处理工艺参数与材料硬度及强度性能的关系, 优化热处理工艺方案, 对提升 6061 铝合金的应用价值具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

本文的主要研究内容包括: (1) 设计 6061 铝合金的固溶处理实验, 探讨不同固溶温度 (500 °C、510 °C、520 °C、530 °C、540 °C) 和保温时间 (30 min、45 min、60 min、75 min、90 min) 对材料硬度的影响; (2) 在最优固溶工艺参数的基础上, 设计时效处理实验, 探讨不同时效温度 (150 °C、160 °C、170 °C、180 °C、190 °C) 和时效时间 (6 h、8 h、10 h、12 h、14 h) 对材料硬度的影响; (3) 确定获得 6061 铝合金更高强度性能的最优热处理工艺方案。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

本实验使用工业级 6061 铝合金板材作为实验材料, 其化学成分如表 1 所示。

### 1.2 试样制备

将 6061 铝合金板材切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样, 共制备 50 个试样。为消除试样在切割过程中产生的应力以及原始组织的不均匀性, 对所有试样进行退火处理。退火处理后, 对试样的表面进行打磨、抛光处理, 去除表面氧化皮和加工痕迹, 确保试样表面平整光滑, 以便后续的热处理实验和性能测试。

### 1.3 实验设备与仪器

本实验所用的主要设备有: (1) SX2-12-10 型箱式电阻炉, 用于进行固溶处理和时效处理, 其温度控制精度为 ±1 °C, 能够满足热处理工艺参数的精确控制要求; (2) HB-3000B 型布氏硬度计, 用于测试试样的硬度值, 测试时采用 d2.5 mm 的硬质合金球压头, 试验力 187.5 kgf, 保压 30 s。

### 1.4 实验方案设计

本实验采用控制变量法, 分别探讨固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间对 6061 铝合金硬度的影响。实验分为两个阶段: 第一阶段为固溶处理实验, 第二阶段为时效处理实验。

1. 固溶处理实验方案: 选取固溶温度和固溶保温时间为变量, 固溶冷却方式采用水淬。设计 5 个固溶温度: 500 °C、510 °C、520 °C、530 °C、540 °C; 5 个固溶保温时间: 30 min、45 min、60 min、75 min、90 min。每个工艺参数组合对应 2 个试样, 共进行 5×

**作者简介:** 梁敬钧 (1984-), 男, 本科, 讲师、工程师, 研究方向: 机械制造。

**\*通信作者:** 吴泊良 (1974-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 铝加工。E-mail: 414800963@qq.com

表1 实验材料化学成分(质量分数, %)

元素	Al	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Zn
含量	余量	1.02	0.65	0.28	0.15	0.30	0.10	0.12
标准要求	余量	0.8~1.2	0.4~0.8	≤0.4	0.04~0.35	≤0.7	≤0.15	≤0.25

5×2=50个试样的固溶处理实验。固溶处理后,对每个试样进行硬度测试,取每个工艺参数组合下2个试样的硬度平均值作为该工艺参数下的硬度值,通过分析硬度值的变化规律,确定最优的固溶处理工艺参数。

2. 时效处理实验方案:在第一阶段确定的最优固溶工艺参数基础上,进行时效处理实验。选取时效温度和时效时间为变量,时效冷却方式采用随炉冷却。设计5个时效温度:150℃、160℃、170℃、180℃、190℃;5个时效时间:6h、8h、10h、12h、14h。每个工艺参数组合对应2个试样,共进行5×5×2=50个试样的时效处理实验。时效处理后,对每个试样进行硬度测试,取平均值作为该工艺参数下的硬度值,分析硬度值的变化规律,确定最优的时效处理工艺参数。

### 1.5 性能测试

使用布氏硬度计测试热处理后的试样,每个试样选取5个不同的测试点,避开试样边缘。为了保障测试数据的准确性和可靠性,测试完成后去除最大值和最小值,取剩余3个测试点的平均值作为该试样的最终硬度值。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 固溶处理工艺对6061铝合金硬度的影响

1. 固溶温度对硬度的影响是:在固溶保温时间为60min、水淬冷却的条件下,不同固溶温度对6061铝合金硬度的影响实验结果如表2所示。

表2 不同固溶温度下6061铝合金的硬度值(固溶保温时间60min)

固溶温度(℃)	试样1硬度(HB)	试样2硬度(HB)	平均硬度(HB)
500	65	67	66
510	72	73	72.5
520	78	79	78.5
530	85	86	85.5
540	82	83	82.5

分析表2结果可得,6061铝合金的硬度随固溶温度的升高,呈先上升后逐渐降低的变化特征。当固溶温度从500℃升高到530℃时,平均硬度从66HB逐渐升高至85.5HB,硬度提升幅度为29.5%;当固溶温

度继续升高至540℃时,平均硬度下降至82.5HB,较530℃时降低了3HB。因此,综合考虑硬度性能,6061铝合金的适宜固溶温度为530℃左右。

2. 固溶保温时间对硬度的影响是:在固溶温度为530℃、水淬冷却的条件下,不同固溶保温时间对6061铝合金硬度的影响实验结果如表3所示。

表3 不同固溶保温时间下6061铝合金的硬度值(固溶温度530℃)

固溶保温时间(min)	试样1硬度(HB)	试样2硬度(HB)	平均硬度(HB)
30	78	79	78.5
45	82	83	82.5
60	85	86	85.5
75	86	87	86.5
90	86	85	85.5

分析表3结果可得,6061铝合金的硬度随固溶保温时间的延长,呈先上升后逐渐趋于稳定的变化特征。当保温时间从30min增加到60min时,平均硬度从78.5HB升高至85.5HB,硬度提升幅度为8.9%;当保温时间延长至75min时,平均硬度略微升高至86.5HB,提升幅度仅为1.2%;当保温时间继续延长至90min时,平均硬度又下降至85.5HB。综合考虑硬度性能和生产效率,6061铝合金的适宜固溶保温时间为60min左右。

### 2.2 时效处理工艺对6061铝合金硬度的影响

基于上述固溶处理实验结果,确定最优固溶工艺参数为:固溶温度530℃,保温60min,采用水淬冷却。在此基础上,探讨不同时效温度和时效时间对6061铝合金硬度的影响。

1. 时效温度对硬度的影响:在时效时间为12h、随炉冷却的条件下,不同时效温度对6061铝合金硬度的影响实验结果如表4所示。

分析表4结果可得,6061铝合金的硬度随时效温度的升高,呈现先上升后逐渐降低的变化特征。当时效温度从150℃升高到170℃时,平均硬度从105.5HB升高至125.5HB,硬度提升幅度为18.9%;当时效温度升高到190℃时,平均硬度下降至98.5HB,比170℃时降低了27HB。因此,综合考虑硬度性能,6061铝合金的适宜时效温度为170℃左右。

表 4 不同时效温度下 6061 铝合金的硬度值 (时效时间 12 h, 固溶工艺: 530 °C × 60 min)

时效温度 (°C)	试样 1 硬度 (HB)	试样 2 硬度 (HB)	平均硬度 (HB)
150	105	106	105.5
160	118	119	118.5
170	125	126	125.5
180	112	113	112.5
190	98	99	98.5

2. 时效时间对硬度的影响: 在时效温度为 170 °C、随炉冷却的条件下, 不同时效时间对 6061 铝合金硬度的影响实验结果如表 5 所示。

表 5 不同时效时间下 6061 铝合金的硬度值 (时效温度 170 °C, 固溶工艺: 530 °C × 60 min)

时效时间 (h)	试样 1 硬度 (HB)	试样 2 硬度 (HB)	平均硬度 (HB)
6	95	96	95.5
8	108	109	108.5
10	120	121	120.5
12	125	126	125.5
14	124	125	124.5

分析表 5 结果可得, 6061 铝合金的硬度随时效时间的延长, 呈现先上升后逐渐趋于稳定的变化特征。当时效时间从 6 h 增加到 12 h 时, 平均硬度从 95.5 HB 升高至 125.5 HB, 硬度提升幅度为 31.4%; 当时效时间继续延长至 14 h 时, 平均硬度略微下降至 124.5 HB, 下降幅度仅为 0.8%。综合考虑硬度性能和生产效率, 6061 铝合金的适宜时效时间为 12 h 左右。

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

本文通过系统的实验研究, 探讨了固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间等热处理工艺参数对 6061 铝合金硬度的影响规律, 结合金相组织分析, 建立了工艺参数—金相组织—硬度性能之间的关联, 得出以下主要结论:

1. 固溶处理工艺对 6061 铝合金的硬度有显著影响。在固溶保温时间为 60 min 的条件下, 硬度随固溶温度的升高, 先上升后降低, 530 °C 时硬度达到峰值 (85.5 HB); 在固溶温度为 530 °C 的条件下, 硬度随固溶保温时间的延长, 先上升后趋于稳定, 60 min 时硬度达到较高值 (85.5 HB), 继续延长保温时间对硬

度提升作用不明显。因此, 6061 铝合金的最优固溶工艺参数为: 固溶温度 530 °C, 保温 60 min, 采用水淬冷却。

2. 时效处理工艺对 6061 铝合金的硬度有显著影响。在最优固溶工艺基础上, 时效时间为 12 h 的条件下, 硬度随时效温度的升高, 先上升后降低, 170 °C 时硬度达到峰值 (125.5 HB); 在时效温度为 170 °C 的条件下, 硬度随时效时间的延长, 先上升后逐渐趋于稳定, 12 h 时硬度达到峰值 (125.5 HB), 继续延长时效时间硬度略有下降。因此, 6061 铝合金的最优时效工艺参数为: 时效温度 170 °C, 时效时间 12 h, 冷却方式为随炉冷却。

3. 采用最优热处理工艺参数 (固溶: 530 °C × 60 min, 水淬; 时效: 170 °C × 12 h, 随炉冷却) 处理的 6061 铝合金, 硬度可达 125.5 HB, 较退火态提升 79.3%, 强度性能得到显著提升。

#### 3.2 展望

本研究通过实验探讨了 6061 铝合金热处理工艺与硬度的关系, 确定了最优热处理工艺方案, 但仍存在一些需要进一步深入研究方向:

1. 本研究主要关注了硬度性能, 未来可进一步研究最优热处理工艺对 6061 铝合金抗拉强度、屈服强度、延伸率等其他力学性能的影响, 全面评价材料的综合性能。

2. 本研究采用的是传统的单级固溶和单级时效处理工艺, 未来可探索多级固溶、多级时效等复杂热处理工艺对 6061 铝合金性能的影响, 进一步提升材料的强度性能。

3. 未来可结合数值模拟技术, 对 6061 铝合金的热处理过程进行模拟仿真, 预测材料的组织演变和性能变化, 为热处理工艺的优化提供更高效的方法和手段。

#### 参考文献:

- [1] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与技术开发 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [2] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册 [M]. 3 版. 长沙: 中南大学出版社, 2023.
- [3] 张新明, 李慧中, 陈明安. 6000 系铝合金研究新进展 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(05): 1201-1218.
- [4] 刘满平, 薛周磊, 彭振, 等. 固溶温度对超细晶 6061 铝合金力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2023, 59(05): 657-667.
- [5] 张兵, 赵鸿金, 胡玉军, 等. 时效工艺对 6061 铝合金硬度和强度的影响 [J]. 金属热处理, 2025, 50(08): 63-70.

# 垂直轴风电增速箱体加工技术分析

施国卫<sup>1</sup>, 谢达<sup>2</sup>

(1. 杭州前进齿轮箱集团股份有限公司, 浙江 杭州 311203;

2. 浙江省全省高端智能装备齿轮传动系统重点实验室, 浙江 杭州 311203)

**摘要** 垂直轴风电增速箱组件形状结构不规则, 加工基准与设计基准不能统一, 给箱体加工带来了难题。为解决该加工问题, 通过考虑设计基准与工艺基准的转换方法, 找出镗孔的工艺基准, 根据粗精加工分配加工余量。合理地安排工艺的加工顺序和工艺尺寸数据的换算, 通过计算箱体旋转的角度和主轴的位移量, 确保在大圆弧面上打孔的精度。箱体需在合适的位置加工装夹缺口, 设计必要的工装及刀具。经以上加工方案的实施, 使箱体的加工过程符合常规零件加工的通用方法, 并且箱体的加工精度能达到图纸的要求。该方法表明, 不规则零件加工可以通过基准转换、数据换算等方法实现通用加工。

**关键词** 大型复杂箱体; 组合加工; 基准转换

中图分类号: TM315; TH136

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.002

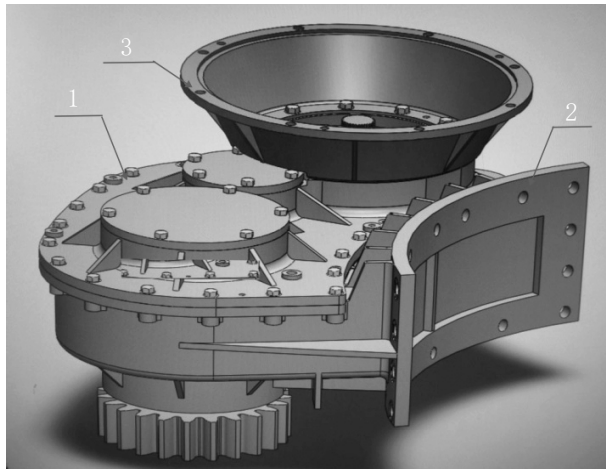
## 0 引言

垂直轴风电增速箱相较目前的水平轴风电增速箱具有安全可靠、低噪声、抗风电能力强、发电效率高等特点, 在风向改变时无需对风是垂直轴风电增速箱的最大优势<sup>[1]</sup>。该风电增速箱采用模块化设计, 有效降低了风电增速箱的维护成本。虽然垂直轴风电增速箱有诸多优点, 但受限于其安装方式, 其箱体组件结构由于是采用模块化设计, 所以设计成扇形模块进行组装, 该设计造成了箱体的设计基准与加工基准不能达到一致。箱体是增速箱的主要部件, 该箱体采用的基准转换加工工艺方案是一种很好的创新思路, 其工艺方法的有效决定了该项目研制的成功与否。

## 1 箱体结构及尺寸精度工艺分析

垂直轴风电增速箱的主要构成为箱盖、箱体、罩壳(见图1), 该箱体因其结构为扇形, 设计的箱体薄壁、形状不规则, 造成装夹难度提升。特别是扇形圆弧面, 很难找出它的中心位置, 这增加了机械加工的难度。由于箱体的设计基准是一个理论的中心位置, 几乎没有一个平面和中心能去做工艺基准<sup>[2]</sup>, 这就需要转变思路, 把基准 $\Phi 1700H7^{(+0.15)}$ 的大圆弧的中心转换到图2 $\Phi 360H7$ 孔的中心, 从该方案着手, 找出最理想的定位孔及起始的基准平面, 利用最简单的芯轴定位和数据处理, 使复杂的箱体加工及装夹<sup>[3]</sup>变得非常方便。

从孔的定位角度来讲, 定位精度获得了提升, 完全能满足箱体设计的要求。



(注: 1-箱盖; 2-箱体; 3-罩壳。)

图1 垂直轴风电增速箱

该箱体部件主要由箱体、箱盖组成, 材料均为QT 350-22AL, 基体厚为12 mm, 未注筋肋厚15 mm, 形状如扇形, 最大圆弧半径为R1790, 最大孔径为 $\Phi 360H7^{(+0.057)}$ , 孔距误差最小为 $\pm 0.026$  mm, 箱体、箱盖自由状态下结合后剖分面应密合, 用0.05 mm塞尺检查, 塞入深度不得超过剖分面的三分之一。箱体、箱盖合箱后边缘应平齐, 误差不大于3 mm。箱体的理论中心为 $\Phi 1700H7^{(+0.15)}$ 圆弧的圆心, 但此圆弧形状如

作者简介: 施国卫(1976-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 机械加工及工艺装备领域。

一个扇形,找到圆心十分困难,因此需要进行基准转换。按工件的形状分析,设定  $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  孔为原点中心进行数据转换处理对镗加工来讲比较方便,利用计算机绘图软件把工件图形绘制好,设定好坐标系原点,逐一查询出每个孔的坐标。该箱体的装夹也是一个问题,扇形的结构给装夹及加工带来了难度,需在非重要部位自行作出压装位置。箱体的组合加工难点在于结合面的精度以及如何合理地借准毛坯,使各个螺孔的位置基本在箱体上各搭子的中心。安装孔分布在大圆弧面上,大圆弧的中心要精确找出是很困难的,所以给加工安装孔工艺带来了难题。如果采用划线来找正加工安装孔,产生误差也很大。因此,必须制定合理的加工方案,使其能精确地作出大圆弧面上的安装孔。所以,该箱体的制造加工方案是该增速箱成功的关键。

## 2 箱体加工的步骤及方法

箱体的加工首先要考虑毛坯的准确性。第一步是要求钳工划出箱体高度方向的加工余量线,特别是粗糙度为 Ra6.3 的大圆弧底面,必须与箱体结合面垂直。加工时找划线基准铣出粗糙度为 Ra6.3 的工艺基准面,考虑装夹问题,分别在工艺基准面的大圆弧反面铣出四个搭压板缺口。第二步以粗糙度为 Ra6.3 的工艺基准面为基准,在缺口处搭四块压板,粗铣箱体结合面,并放 2 mm 余量。第三步进行工艺中心基准转换,以  $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  孔为中心,按绘图软件查询的坐标为依据,去找实物  $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  孔的中心,这一步是相当关键,涉及其余两个大孔的余量均匀及各搭子上螺孔是否能作出。而且也要考虑三个大孔凸台外圆是否同心。如果满足以上条件就可以进行大孔的粗加工。在人工时效前,大孔应放 5~6 mm 余量,各螺孔等到时效回来后再加工。人工时效结束后,以粗糙度为 Ra6.3 的工艺基准面为基准,压紧箱体,铣结合面放 0.5 mm 余量,然后校正  $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  孔,镗各大孔均放 3~

4 mm 余量,各凸台面铣到位。接着在结合面上作螺孔,作孔分为四个步骤:中心钻点孔、作底孔、孔口倒角孔、攻丝。待所有孔加工完毕后,再用进口飞刀盘精加工结合面。为了保证高平面度,须用手工进给,铣削顺序是从左到右、从上到下的步骤进行。

## 3 箱本组合加工技术

待箱体、箱盖半精加工结束后,就进入组合镗工序。首先,让箱体和箱盖自由结合,用 0.05 mm 的塞尺进行检查,如果达不到要求时进行修正。其次,设计制作三个工艺螺栓所示,分别装入结合面上的三孔之中,作用与销子类似,使箱体、箱盖能基本对齐,缩小因螺孔间隙产生的错位,然后安装其余螺栓并拧紧。准备工作结束后把箱体组件固定的镗床台面上,找正  $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  孔,并检查  $\Phi 1700H7\left(\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  大圆弧余量是否均匀,按坐标值先镗出三个定位销孔,并配入销子,开始镗各大孔,用可调镗刀杆,主轴转速至 250 r/min,进给量调整至 40 mm/min,中孔一次镗出,保证了箱体、箱盖孔的同轴度要求,镗孔结束后刮粗糙度 Ra3.2 凸台面,并作端面上的分布螺孔,用内径千分尺分别对孔径进行测量,尽量保证尺寸在“0”位附近。然后作  $\Phi 500j7\left(\begin{smallmatrix} -0.031 \\ -0.032 \end{smallmatrix}\right)$  凸台外圆,圆环的高度尺寸暂不控制,这样的好处是外径千分尺不会因测量部分太短而无法测量,所以等尺寸到位后再铣到图示高度尺寸即可。等一面加工好后调头 180°,校正已镗孔,作  $\Phi 100M7\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0.035 \end{smallmatrix}\right)$ ,并铣大孔的凸台面及作相应的螺孔完成组合加工。

## 4 大圆弧面上安装孔加工

箱体组合加工好后拆箱并做好配对,标记上专用大型夹具<sup>[4]</sup>,夹具采用常用的一面两销形式定位箱体<sup>[5]</sup>。为了方便测量,须用一组二只箱体同时在 5 m 立车上加工  $\Phi 1700H7\left(\begin{smallmatrix} +0.15 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$  大圆弧,等圆弧加工结束后,再

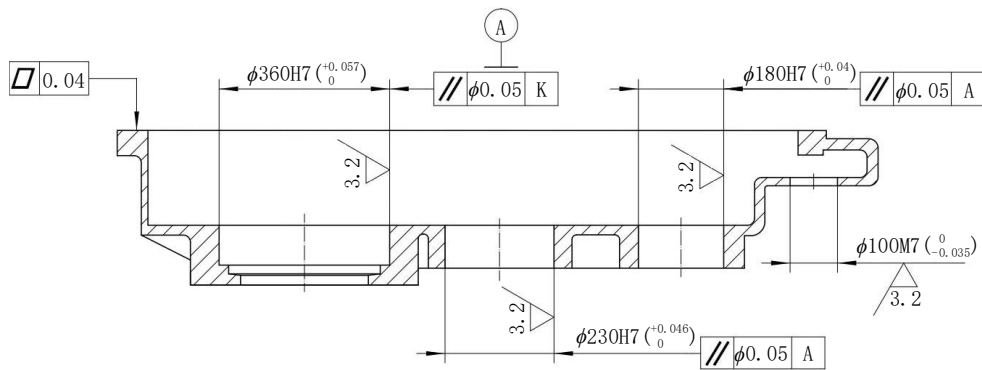


图 2 箱体加工图

进行最后的圆弧面安装孔的加工。采用一般的办法是要找出大圆弧的中心,再分度作孔,该方案在镗床上不可行,最关键的问题是从圆弧的中心到安装孔的距离很长,镗杆达不到要求,且工件也会露出工作台面外。所以必须用中心转移法来解决,换成以 $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$ 孔(基准孔)为中心进行分度,是最快捷的方法。首先设计制造一根芯轴,该芯轴要有大的导向外圆,与定位孔的间隙在 $0.08 \sim 0.10$ ,把芯轴压在镗床台面的中心,找正后压紧,接着把箱体吊平对准芯轴中心后,缓缓地放到工作台面的等高块上。用表找平粗糙度为 $Ra6.3$ 的工艺基准面后压紧,计算出各个安装孔转相应的角度时,主轴与定位中孔(台面中心)的距离,例如:

顺时针回转 $35.16^\circ$ 时,可以计算出镗床主轴向左移动的距离为 $L=1400 \times \sin(35.16^\circ) \approx 806.21$ ,依次类推,即可算出所孔转角时的偏距。安装孔的背面需要背刮,所以需自行设计背刮刀<sup>[6]</sup>。

根据图3所示的角度按基准孔 $\Phi 230H7\left(\begin{smallmatrix} +0.046 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$ 进行基准转换,换算出镗床工作台旋转的角度和镗床主轴与基准孔偏移的距离如表1、表2所示。第一排孔位如表1所示,第二排孔位如表2所示。

## 5 结束语

通过基准转换、数据换算、装夹位置选定、定位工装设计及专用刀具设计等,解决了不规则大型箱体镗加工问题,特别是在工件无法划线、装夹困难的情

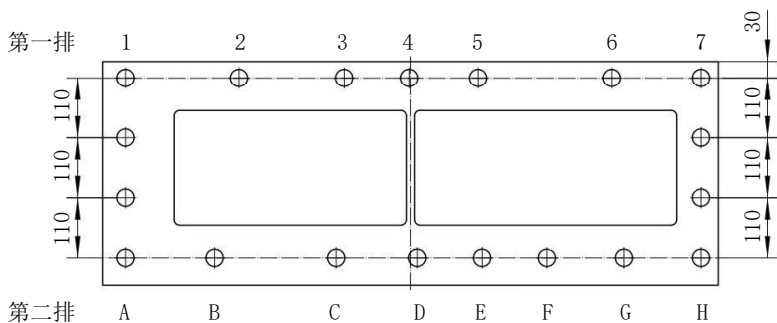


图3 安装孔孔位示意图

表1 第一排孔旋转位移数据表

孔位	1	2	3	4	5	6	7
工作台旋转角度	$35.16^\circ$	$21.16^\circ$	$8.16^\circ$	$0.16^\circ$	$-8.34^\circ$	$-24.84^\circ$	$-35.84^\circ$
与基准孔的偏移量	-806.21	-505.36	-198.71	-3.91	203.07	588.12	819.73

(注:“+”为工作台顺时针旋转,“-”为工作台逆时针旋转。)

表2 第二排孔旋转位移数据表

孔位	A	B	C	D	E	F	G	H
工作台旋转角度	$35.16^\circ$	$24.16^\circ$	$9.16^\circ$	$-0.84^\circ$	$-8.84^\circ$	$-16.84^\circ$	$-26.34^\circ$	$-35.84^\circ$
与基准孔的偏移量	-806.21	-573.00	-222.87	20.52	215.15	405.58	621.18	819.73

(注:“+”为工作台顺时针旋转,“-”为工作台逆时针旋转。)

况下,采用基准转换法、中心转移法,充分利用镗床拉坐标的特点,巧妙地解决了一般在加工中心上都难以做到的大圆弧安装孔加工难题。同时也在此类箱体加工方面积累了宝贵的经验,为以后加工类似箱体提供了参考,也促进了垂直轴风力发电行业的发展。

## 参考文献:

[1] 刘辉,蒋麒麟,李生强,等.H型垂直轴风力发电机设计与数值模拟[J].冶金设备,2024(03):10-17.

[2] 谭健祥,魏森,张观福.一种三维空间角从图纸基准到加工基准的转换方法[J].时代汽车,2021(10):87-88.

[3] 牛森,赵东波,梁宝山.HXD2F型电力机车齿轮箱制造工艺[J].机车车辆工艺,2021(05):14-17.

[4] 谭鹏,童章印,李洪滨.电机壳体工序分析和夹具设计[J].微特电机,2023(10):63-67.

[5] 张博超.减速器箱体加工改进[J].橡塑技术与装备,2025,51(02):28-30.

[6] 章舒,孙星.数控加工刀具参数优化设计及应用研究[J].南方农机,2024,55(23):151-154.

# 炉窑烟气余热与轧机废乳液耦合处理技术

王耀国<sup>1, 2</sup>, 樊振国<sup>1, 2</sup>, 孙朝阳<sup>1, 2</sup>, 苗璐璐<sup>1, 2</sup>

(1. 洛阳职业技术学院, 河南 洛阳 471000;

2. 洛阳职业技术学院建筑节能工程技术研究中心, 河南 洛阳 471000)

**摘要** 针对铝工业生产中高温烟气余热浪费与轧机废乳液处理能耗高的双重挑战, 本研究提出了一种创新的能质耦合协同处理技术。通过自主研发的自清洁式板式换热器高效回收烟气余热, 并以此为热源驱动废乳液的减压蒸发破乳过程。研究表明, 该系统烟气侧余热两级回收率超过 70%, 粉尘净化效率达 96%; 废乳液侧油与 COD 去除率分别超过 90% 与 80%。耦合系统实现综合能耗和处理成本双降, 为铝工业绿色低碳转型提供了高效可行的技术方案。

**关键词** 铝工业; 高温烟气; 废乳液; 余热回收; 减压蒸发

**基金项目:** 2024 年度河南省高等学校重点科研项目“铝工业炉窑高温烟气和轧机废乳液耦合处理技术研究”(项目编号: 24B480011); 河南省科学技术协会 2026 年度科技决策咨询研究项目“绿色低碳目标下河南省能源结构转型与产业协同升级对策研究”(项目编号: SKXJCZX-2026-100B)。

中图分类号: TK115; X758

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.003

## 0 引言

铝加工是我国重要的基础工业, 近些年产能持续增长。然而, 在生产中铝熔炼炉窑排放出的 300 ~ 400 °C 高温烟气, 以及后续轧制工序产生成分复杂、化学稳定性强的废乳液, 给环境带来了严峻的考验。近年来, 在余热回收与废液处理方面取得了诸多进展, 如高效换热器设计<sup>[1]</sup>、MVR 蒸发<sup>[2]</sup>、膜分离<sup>[3]</sup>等技术。熊瑞<sup>[4]</sup>等研发的除尘与换热一体化装置, 实现烟气除尘和换热效率分别 99.98%、70% 以上; 钟晴<sup>[5]</sup>等研制的新型复合凝絮剂, 有效提高了废乳液的絮凝破乳处理能力。然而, 将高温烟气余热直接用于废乳液处理的集成化研究尚显不足。

本研究针对上述问题, 提出并构建铝工业炉窑高温烟气与轧机废乳液的耦合处理技术方法。通过研发关键装备、数值模拟与实验验证等方法, 构建能源回收、污染物脱除、资源循环协同处理模式, 以期为铝工业的节能减排与绿色发展提供创新性解决方案。

## 1 原理与方法

### 1.1 能质耦合理论基础

联合处理的核心在于实现能量品位匹配与物质转化协同。铝熔炼烟气(350 ~ 400 °C)属于中高品位余热资源<sup>[6]</sup>, 其焓值占比高。而废乳液的有效破乳温

度区间(70 ~ 150 °C)正位于该烟气余热的热能品位范围内<sup>[7]</sup>, 构成了理想的热力学梯级利用基础。理论分析表明, 通过优化设计, 耦合系统的焓效率可比传统分置系统提高 25% 以上。能量传递不仅提供了破乳所需热量, 更通过影响废乳液油水界面膜的分子热运动与流变特性, 降低界面膜强度与体系粘度, 从而协同促进油滴的聚并与分离。

### 1.2 研究方法

研究主要包括三大模块: (1) 高温烟气余热回收装备: 重点研发高效抗结垢自动化换热装备, 建立其传热模型并进行数值模拟优化; (2) 轧机废乳液处理工艺: 通过实验研究确定减压蒸发破乳的关键工艺参数及其影响规律; (3) 耦合系统集成与评估: 将前两者有机结合, 构建联合处理系统, 并从能源、环境、经济多维度评估其综合效应。

### 1.3 数值模拟与实验

1. 余热回收数值模拟。利用计算流体力学(CFD)软件, 建立自清洁换热器的三维传热传质模型, 模拟分析烟气温度、流速等参数对余热回收效率及除尘性能的影响。模拟数据及结果如表 1 所示。

2. 废乳液处理实验。废乳液处理实验采用正交试验设计, 考察蒸发温度(70 ~ 90 °C)、系统压力(0.05 ~

作者简介: 王耀国(1986-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 节能环保设备与技术。

表1 进出口烟气温度与余热回收率模拟数据

模拟实验	数据类型	测试点	测试点	测试点	测试点	测试点	...	测试点	测试点	测试点	测试点
		1	2	3	4	5		28	29	30	31
进口实验	进口烟气温度	300	310	320	330	340	...	570	580	590	600
	余热回收率	58.0	58.9	60.1	61.4	62.8	...	88.0	88.3	88.5	88.7
出口实验	出口烟气温度	80	90	100	110	120	...	170	180	190	200
	余热回收率	82	80.1	77.8	75.2	72	...	43.5	34.8	28	25

0.09 MPa)、pH值(2.0、4.0、6.0)和蒸发时间(30 min、60 min、90 min)对油去除率和COD去除率的影响。样品取自实际铝加工厂,采用标准方法分析成分与性能。正交试验结果如表2所示。

表2 正交试验结果分析表

试验号	因素			评价指标		
	温度(°C)	压力(MPa)	pH值	时间(min)	油去除率(%)	COD去除率(%)
1	70	0.05	2.0	30	72.1	65.4
2	70	0.07	4.0	60	76.2	68.3
3	70	0.09	6.0	90	68.4	61.5
4	80	0.05	6.0	60	87.3	79.5
5	80	0.07	2.0	90	90.2	82.1
6	80	0.09	4.0	30	83.6	75.4
7	90	0.05	4.0	90	84.5	76.1
8	90	0.07	6.0	30	79.7	71.6
9	90	0.09	2.0	60	81.3	73.6

## 2 核心装备开发与构建

### 2.1 高效余热回收设备开发

针对铝工业烟气高粉尘、易结垢的特性,研发了“自清洁板式换热器”,结构示意图如图1所示。其创新点在于集成旋转清洗叶片于烟气通道中,叶片转动既可刮除换热板表面积灰,其特殊凹槽设计又能调节烟气流速、延长换热时间。联动控制系统根据换热效率衰减自动启停清洗程序,实现在线不间断自清洁。

通过数值模拟,研究了该换热器的关键性能。模拟结果显示,在0~1 000 °C范围内,其除尘效率均高于95%。模拟实验表明,随着进口烟气温度升高,余热回收率上升,在350~400 °C的典型工况下,回收率可达60%以上;相对应地,出口烟气温度与回收率呈负相关,优化设计可将排烟温度降至120 °C左右,实现高效热量提取。

### 2.2 耦合系统构建

基于上述研究,构建了如图2所示的铝熔保护烟气与轧机废乳液联合处理系统。系统工作流程为:高温烟气进入自清洁板式换热器,将热量传递给纯水/循环水;产生的热水(80~90 °C)通过智能调温设

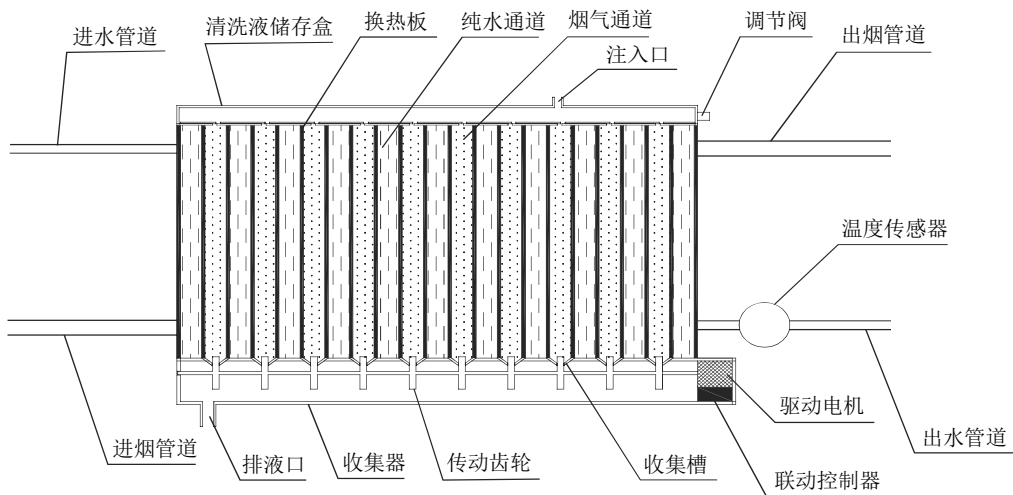


图1 自清洁间壁式换热器外观示意图

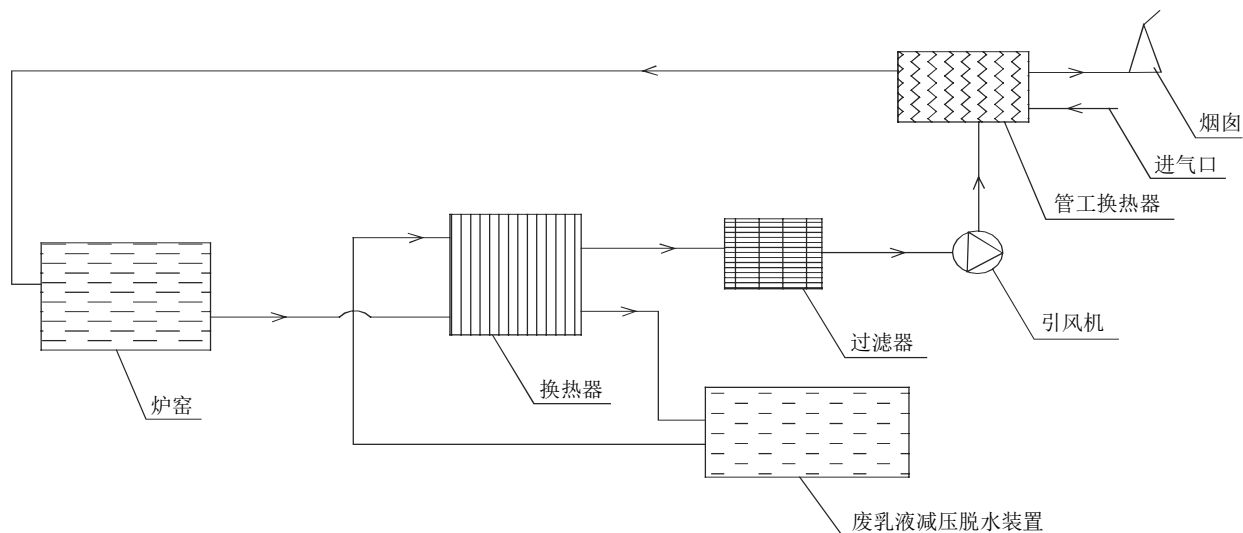


图 2 铝熔保护烟气和轧机废乳液联合处理系统示意图

备作为稳定热媒进入废乳液减压脱水装置；废乳液经预处理后，在减压脱水装置中利用烟气余热进行低温蒸发破乳；破乳后产物进行油、水、固分离；降温净化的烟气最终通过再次气—气热交换，加热的空气送入炉膛进行助燃，换热后烟气由烟囱排放。

该系统实现了能量流与物质流的闭环协同：烟气余热作为废乳液处理的驱动能源，废乳液处理过程则成为烟气余热的稳定热源，二者在温度品位上精准匹配。

### 3 集成处理效果评估

在实际运行参数下，耦合系统表现出优异的综合性能：

1. 烟气侧：对入口 400 °C 烟气，余热回收率稳定在约 72%，排烟温度约 100 °C。烟气粉尘浓度从 450 mg/Nm<sup>3</sup> 降至 18 mg/Nm<sup>3</sup>，去除率 96%。

2. 废乳液侧：油去除率稳定在 89% ~ 92%，COD 去除率在 76% ~ 80%。工艺水回用率约 75%，回用水质达标（COD < 100 mg/L，油 < 5 mg/L）。

3. 系统能效：与传统分设系统相比，联合系统综合能耗降低约 40%，其中蒸汽消耗减少达 68%。系统烟效率达到 68.2%。

4. 经济环境效益：处理每吨废乳液成本下降 40% ~ 50%。资源综合利用率达 80% 以上，实现了危险废物的资源化，并显著降低了碳排放与危废产量。

### 4 结论

本研究验证了烟气余热与废乳液热破乳过程的能质耦合机理，以及烟气余热驱动低温废乳液处理的可行性。自主研发的“自清洁式板式换热器”有效解决

了烟气换热面结垢难题，通过模拟实验确定废乳液减压蒸发破乳的最佳工艺参数，在此条件下实现了 90.2% 的油去除率和 82.1% 的 COD 去除率。耦合技术实现了能源梯级利用与污染物协同资源化，综合能耗降低约 40%，处理成本大幅下降，为铝工业同时解决余热回收与危废处理两大难题提供了一体化解决方案，具有重要的工程应用价值和行业推广前景。

### 参考文献：

- [1] 李逸飞, 刘汉涛, 韩星星, 等. 通道结构对板式换热器换热性能的影响 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(08): 68-75.
- [2] 李元琛. 铝热轧废乳液的蒸发处理方法 [J]. 轻金属, 2023(04): 58-62.
- [3] 马什林. 铝热轧废乳液处理工艺技术探讨 [J]. 有色金属加工, 2023, 52(03): 66-69.
- [4] 熊瑞, 王志, 何京东, 等. 高温含尘烟气深度净化与余热回收一体化技术及装备 [J]. 环境工程, 2023, 41(04): 1-8.
- [5] 钟晴, 刘宏, 李珊, 等. 聚硅氯化铝与新型有机絮凝剂 FP-1 复配处理轧制废乳液 [J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 98-103.
- [6] 蒋一鸣. 加热炉烟气余热回收技术研究与应用 [J]. 节能技术, 2022, 40(02): 175-179.
- [7] 周伟. 废乳液处理的新工艺及零排放探讨 [J]. 工业水处理, 2021, 41(07): 105-108.

# 基于深度信息和神经网络的 道路图像分割方法

虞钉钉

(华院计算技术(上海)股份有限公司, 上海 201203)

**摘要** 道路图像分割是自动驾驶场景中的核心任务之一, 其分割效果对于自动驾驶的安全落地起到非常关键的作用; 而单目道路识别又是道路图像分割中十分重要的子任务。目前, 单目图像的道路识别方法主要以采用编码解码结构的网络模型为主, 其对道路的识别效果存在上限。在此背景下, 本文提出了一种基于深度信息的道路识别方法。实验结果表明, 在采用所提方法以后, 不同模型在道路数据集上的识别效果都得到了提升, 充分反映了所提方法的有效性和鲁棒性。

**关键词** 道路图像分割; 道路识别; 深度信息; 神经网络

中图分类号: TP751

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.004

## 0 引言

随着人工智能技术的飞速发展, 许多计算机领域的难点问题都迎来了新的突破。计算机视觉作为计算机领域的重要分支, 涌现出了很多新的方法。其中, 图像分割作为计算机视觉中的经典问题, 也受到了广泛的关注。图像分割任务本质是一个分类任务, 通过对图像的每个像素点进行分类, 来划分图像中的不同区域。

整体来说, 早期的图像分割技术依赖于规则和数学建模<sup>[1]</sup>, 通常适用于简单场景, 对于复杂场景的任务, 该技术存在一定瓶颈。随着深度学习的发展, 卷积神经网络(Convolutional Neural Network)被用于图像分割任务。深度神经网络通过使用大量精准标注的数据, 在该任务上取得了重大的突破, 并被应用于很多场景中, 比如自动驾驶中的道路、行人等分割、医学影像中的器官分割等。其中, 道路图像分割作为图像分割的子任务, 其相关技术被广泛应用于自动驾驶中, 是一个非常重要且具有应用价值的问题。

本文从道路图像分割任务的概念出发, 首先介绍道路图像分割任务的基础概念; 然后, 提出一种基于深度信息和神经网络的道路图像分割方法; 再在相关的道路数据集上进行实验, 并进行分析; 最后进行相应的总结和展望。

## 1 道路图像分割概述

道路图像分割是自动驾驶的核心任务, 旨在分割图像中的道路、车辆、行人等元素。其中, 道路识别

专注于提取图像中的道路区域。根据对道路区域的分类粒度不同, 该任务可进一步细化。例如: 可将道路分为对向多车道、同向多车道及背景三类; 也可将背景与对向车道合并, 仅区分同向车道。其核心目标通常是准确识别出本车所在的同向可行驶区域。此外, 不同任务对同向车道的处理也存在差异, 部分任务仅分割当前车道, 而不区分同向的其他车道。

具体来说, 本文专注于同向多车道的道路识别任务, 即识别出图像中的同向多车道区域。整个图像的像素点被分为两类: 非同向多车道区域和同向多车道区域。

## 2 基于深度信息的图像分割方法

为提高道路识别精度, 现有研究<sup>[2]</sup>常借助多目道路图像或激光雷达数据辅助。多目图像通过多视角匹配可扩大感知范围并估计深度信息; 激光雷达提供的三维点云数据<sup>[3]</sup>也能有效提升识别准确率。然而, 额外数据的获取往往成本较高。因此, 本文面向仅具备单目道路图像的同向多车道识别任务, 借鉴上述多源数据的应用思路, 提出从单目图像中估计深度信息<sup>[4]</sup>, 并以此为基础, 设计一种融合深度信息的道路图像分割方法, 旨在提升单目场景下的道路识别效果。

### 2.1 深度信息

深度信息是指像素点相对于采集设备的距离信息, 通常采用深度图(Depth Map)来标识。深度图是一张

作者简介: 虞钉钉(1994-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向: 人工智能相关研究。

与原始图像分辨率相同的单通道图像，每个像素点的值表示该位置的深度。深度信息目前被广泛应用于如自动驾驶、机器人导航、增强现实等各个场景中。具体来说，在自动驾驶中，深度信息通常被用于道路识别、障碍物距离估计等；在机器人导航中，深度信息被用于进行避障、获取定位等；在增强现实中，深度信息被用于虚实遮挡处理和虚拟物体位置定位等。

那么，如何来获取深度信息呢？除了采用设备直接采集以外，也有很多基于其他数据的深度信息估计方法，其中有一类就是基于单目图像的深度估计方法。当前主流的单目图像深度估计方法主要采用卷积神经网络或者 transformer 的结构，然后采用编解码结构来作为整体模型的架构。同时，主要采用的训练数据包括带真实深度标签的数据集，以及不带标签的数据集，其中带标签的数据集可以直接进行训练；而不带标签的数据集可以通过多帧视频之间的一致性作为监督信号，也可以采用已经训练好的教师模型预测的结果作为标签进行使用。本文将采用预训练的模型来进行单目深度估计以提供额外的深度信息。

## 2.2 总体框架

本节将重点介绍本文提出方法的整体框架和相关细节。其整体流程如下：首先输入单目道路图像，采用一个预训练的深度估计网络进行深度估计，其中深度估计网络的整体结构可以分为两部分：深度信息的编码器和深度信息的解码器；然后将该深度估计的深度图和单目道路图像进行通道拼接，再输入到一个分割网络，最终输出相应的分割图。需特别注意的是，该整个框架主要包含了深度信息的估计和使用的想法，并不明确深度估计网络和分割网络。深度估计网络可以采用当前主流的深度信息估计方法，本文采用一个使用编解码架构的预训练网络<sup>[5]</sup>，该网络在大量的带标签和不带标签的数据上进行训练，可以十分有效地进行单目图像的深度估计，并且其泛化性能良好，可以在没有训练过的数据集上进行比较精准的深度估计，非常适合本文所研究的场景。类似的，分割网络也可以采用主流的网络方法，并不限制为某个具体网络。对于分割任务来说，大部分分割网络都采用经典的编解码架构，为此，该框架中用该经典架构来表示分割网络。在训练中，为了不破坏深度估计网络的性能，会将整个深度估计网络的参数进行冻结，只训练分割网络中的参数来得到最终的模型，具体的相关介绍可以见下一节。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 实验指标

评价分割模型效果的指标有很多，本文采用比较经典的几个指标：查准率(Precision)、召回率(Recall)和准确率(Accuracy)。在介绍这几个指标前，先介绍一下分割任务中常用的混淆矩阵，其核心是四个指标：真阳(True Positive, TP)、真阴(True Negative, TN)、假阳(False Positive, FP)和假阴(False Negative, FN)。具体来说，真阳表示样本为正类，预测结果也是正类的数量；真阴表示样本为负类，预测结果也是负类的数量；假阳表示样本为负类，但是预测结果为正类的数量；假阴表示样本为正类，但是预测结果为负类的数量。下面分别给出查准率、召回率和准确率的定义和计算公式。查准率是衡量预测为正类的样本中，有多少是真的正类，其计算公式为：

$$\text{查准率} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

召回率是衡量所有为正类的样本，被预测为正类的比例，其计算公式为：

$$\text{召回率} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

准确率是衡量所有类别预测的正确率，其计算公式为：

$$\text{准确率} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

以本次道路识别的实验为例，道路类别就是正类别，非道路类别就是负类别。

### 3.2 数据集和实验设置

实验的数据集采用道路分割中非常经典的KITTI数据集，使用其中的左目图像道路数据集，一共包含带标签的289张训练集以及290张不带标签的测试集。本次实验使用其中带标签的289张训练集。由于该289张图像尺寸大小存在微小差异，比如图像宽度存在375和376不同的尺寸，为此需要先进行预处理。首先筛选出长为1 242、宽为375的202张图像，然后按约为5:1的比例，随机抽取得到168张图像作为本次实验的训练数据，剩下的34张图像作为本次实验的测试数据。

本次实验采用的深度估计网络为论文<sup>[6]</sup>中的small模型，需要注意的是，该模型并没有在KITTI数据集上进行训练，不过其在KITTI数据集上仍能取得不错的深度估计效果。分割网络采用了经典的Unet和SegNet两个不同的模型以验证所提框架的有效性。整体的训练采用的学习率为 $1e-4$ ，并使用参数为0.5、0.999的Adam算法。在整个训练中，冻结深度估计网络的参数，只训练分割网络的参数。另外，在测试中

模型输出的概率超过阈值 0.5 的被认为是正类,反之,则被认为是负类。实验采用的设备其CPU型号为2.90GHz的 Intel(R) Xeon(R) Gold 6226R CPU,其GPU型号为 Nvidia V100 显卡,显存为 32G。

### 3.3 实验结果和分析

本次实验的结果可见图1。图1展示了采用原始的 SegNet、Unet 以及采用了本文所述方法的 SegNet (w/depth) 和 Unet (w/depth) 的查准率、召回率和准确率。从实验结果来说,无论是 SegNet 还是 Unet,在增加深度信息以后,在查准率、召回率和准确率三个指标上都有了提升,这充分说明了本文所提方法的有效性和鲁棒性。具体来说,对于 SegNet 网络来说,其查准率提高

了约 0.4%,召回率提高了约 0.3%,准确率提高了约 0.2%;而对于 Unet 网络来说,其查准率提升了约 0.3%,召回率提升了约 0.7%,准确率提高了约 0.2%。另外,由图1可知,所有模型的准确率都比查准率和召回率高,这是因为数据集中负类也就是非道路类别的像素数据量要远远大于道路类别的像素数据量,因此导致了衡量所有类别正确率的准确率比只衡量正类的几个指标数值要高。其次,所有模型的查准率都比召回率要高,也反映了道路图像识别中要找出所有道路是比较困难的,这也与道路边缘区域的复杂性有关。整体来说,该实验说明了两个方面:(1)采用深度信息以后,模型在查准率、召回率和准确率上都有一定的提高,这

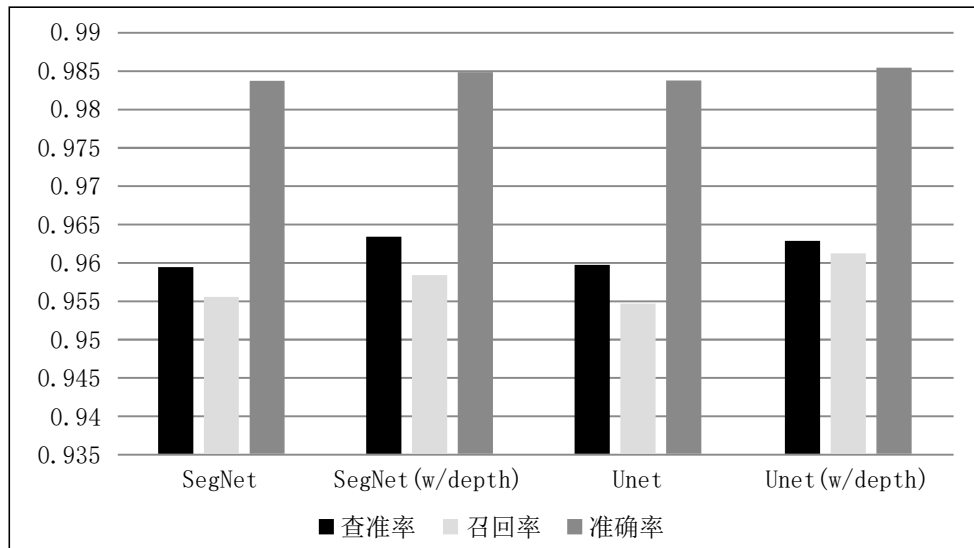


图1 实验对比结果图

表明了本文方法的有效性;(2)不同的模型在采用本文方法后,其结果都有提升,这在一定程度上表明了本文方法的鲁棒性。

## 4 结束语

本文围绕道路识别问题,提出了一种基于深度信息和神经网络的道路图像分割方法。该方法在只使用单目图像的情况下,通过引入额外网络来估计深度信息,并以此来提高整体的道路识别效果。实验结果表明,所提方法确实提高了不同模型在测试集上的查准率、召回率和准确率,展现了所提方法是有效且具有一定鲁棒性的。

## 参考文献:

[1] 张富瑜,王艳.图像分割中数学与深度学习融合建模

方法[J].数学建模及其应用,2025,14(03):1-9.

[2] 王龙飞,严春满.道路场景语义分割综述[J].激光与光电子学进展,2021,58(12):36-58.

[3] 王章宇,陈阳,周彬,等.一种面向非结构化道路的点云语义分割方法[J].北京航空航天大学学报,2025,51(02):457-465.

[4] 赵经阳,余昌黔,桑农.RGB-D语义分割:深度信息的选择使用[J].中国图象图形学报,2022,27(08):2473-2486.

[5] 杨丽鹤,康兵义,黄子龙,等.深度估计一切:释放大规模无标签数据的潜力[C]//IEEE计算机视觉与模式识别会议,2024.

[6] 同[5].

# 基于 EPICS 的氦低温冗余控制系统设计开发与测试

张锦程<sup>1, 2</sup>, 周芷伟<sup>2\*</sup>, 袁 恺<sup>2</sup>, 张 岳<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;  
2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 为满足聚变堆主机关键系统综合研究设施 (CRAFT) 中超导磁体测试对稳定低温环境的迫切需求, 设计并开发了一套基于实验物理与工业控制系统 (EPICS) 的 4.5 K 氦低温控制系统。通过 EPICS 分布式架构实现系统模块化, 并开发出冗余输入输出控制器 (IOC) 以提高系统稳定性。基于 Phoebus 上位机开发实现低温系统全流程监控与操作。经测试, 低温控制系统稳定运行, 满足导体测试平台稳定性需求。

**关键词** 氦低温控制系统; 4.5 K 氦制冷机; 冗余架构; Phoebus

**基金项目:** “十三·五”国家重大科技基础设施项目 (项目编号: 2018-000052-73-01-001228)。

**中图分类号:** TP273+.5; TB651

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.005

## 0 引言

CRAFT 是面向聚变能源未来发展开展综合研究的大科学装置。在 CRAFT 中, 4.5 K 氦低温系统是关键支持设施之一, 其作用是为大尺寸超导线圈进行极低温条件下的试验考核服务<sup>[1]</sup>。由于超导磁体性能测试通常具有周期长、能量密度高的特点, 低温系统的运行稳定性直接关系到实验的成败与设备安全。任何控制层面的瞬态故障或数据丢失, 都可能导致磁体失超甚至设备损坏, 因此对控制系统的可靠性与数据连续性提出了极高的要求。考虑到超导线圈试验时间长以及能量大的特点, 低温系统的可靠性对整个试验的成功与否及安全至关重要。由于任一控制层级出现瞬时故障或者数据缺失都有可能引起磁体失超乃至损毁设备, 故控制系统要求具有很高的可靠性和数据不丢失特性。

EPICS 是一种基于网络的软件系统, 是美国国家实验室和阿贡国家实验室合作开发的一套用于大型科学实验设施 (如粒子加速器、同步辐射光源等) 及工业自动化的开源分布式控制系统框架。在低温控制系统中, 将 PLC 作为仪表与执行设备的核心连接枢纽, 通过以太网与上层的 EPICS 中输入输出控制器 (Input/Output Controller, IOC) 建立稳定数据通道, IOC 在此架构中承担顺序逻辑控制、开环与闭环调节等关键运算, EPICS 高度模块化的结构可提供超导磁体测试平

台的集中监测管理、数据存储与分析、状态监测与故障诊断、自动控制与安全联锁等功能<sup>[2-4]</sup>。但在用于超导磁体测试的具体应用方面, 标准 EPICS 架构还存在标准 IOC 架构容易出现单点失效情况而造成数据丢失的问题。针对以上问题, 本文设计了基于 EPICS 的 4.5 K 氦低温冗余控制系统。设计“PLC 硬冗余+IOC 软冗余”双重容错系统框架, 采用 Heartbeat 和 AutoSave 防止数据不一致情况发生<sup>[5]</sup>。在 Phoebus 中设计并实现全过程监控程序, 提高了 CRAFT 导体测试平台运行的稳定性和自动化程度。

## 1 CRAFT 4.5 K 氦制冷机工艺流程

4.5 K 氦制冷机是中央螺线管模型线圈 (Central Solenoid Model Coil, CSMC) 测试稳定的冷量来源。CSMC 测试氦低温系统其主要包括两台凯撒螺杆压缩机、除油与回收系统、冷箱系统以及 CSMC 分配阀箱, 其中冷箱系统包括液氮预冷、一二级透平、三级透平与真空泵组等, CSMC 分配阀箱通过各支路氦气, 对 CSMC 高低场区超导体进行降温。CSMC 测试导体冷却是包括三个部分的一个完整的过程: 首先是 300 K 至 80K 预冷模式下的冷却, 将高压氦气分为两路, 其中一路经过换热器与液氮交换冷却, 另一路为常温氦气, 两路气体通过调节阀混合, 达到精确温度控制的目的, 并对导体进行预冷后气体返回系统; 随后在 80 K 到 4.5 K 冷

**作者简介:** 张锦程 (2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 大型氦低温控制系统的设计与开发。

**\*通信作者:** 周芷伟 (1982-), 女, 博士研究生, 研究员, 研究方向: 大型氦低温系统自动控制策略、智能故障诊断技术等研究。E-mail: zzw@ipp.ac.cn

却模式下,启动制冷机透平,将主流氦气分流,一部分进透平深度冷却用来制备液氮,另一部分通过旁通阀进氮槽冷却,当氮槽液位达15%及导体温度降到4.5 K时,预冷氦气循环泵,回气经调节阀返回;最后为4.5 K稳态运行模式,当循环泵预冷完成后,液氮杜瓦液位到达60%,待氦气循环泵冷却导体,并使得磁体内流速和温升满足试验需求后即可进入试验状态。总之,CRAFT 氦低温系统的滞后性大、关联性强、非线性明显,在从80 K降温到4.5 K的过程中,不仅要考虑透平转速的变化对J-T 阀开度的影响,还要注意两者之间的相互作用关系,一旦操作中断就容易导致系统压力波动。因此,控制系统设计必须满足全链路的高可用性,确保在数周的实验周期内零故障中断。

## 2 高可用氦低温控制系统架构设计

### 2.1 软硬件协同的总体架构设计

系统采用物理设备层—控制层—服务层的三层分布式架构。

物理设备层采用西门子冗余 PLC 为物理设备平台实现毫秒级的硬实时逻辑控制以及现场信号采集功能。由于氦低温制冷流程中压缩机及透平系统的重要性,所以选用西门子高可靠性的冗余 PLC 核心控制器 S7-400H 系列,其自带 PROFINET 接口组成 MRP 介质冗余环网,支持单 CPU 或者单通信线故障下的无扰动切换功能,保证控制指令的连续性。

控制层处于设备层上方,部署在高可用 Linux 服务器群内。该层部署了基于 EPICS 架构的 IOC,利用 S7 驱动协议同下层 PLC 进行高频度通讯,并将物理 I/O 映射成 EPICS PV 变量。考虑到标准 IOC 的单点失效风险,在软件层面实现软备份功能,在主 IOC 和备 IOC 上分别安装 Linux Heartbeat 软件,检测主 IOC 或备 IOC 是否在线;同时安装 EPICS AutoSave 软件定时对 PID 参数进行备份,当主 IOC 切换到备 IOC 后,备 IOC 可以加载最新备份的数据,完成应用级的软热备。

通信服务层均采用 EPICS Channel Access 协议,满足系统内超 12 000 PV 的点位高并发通信需求,并在控制内网部署通道访问安全网关进行访问控制,实现内外网的数据逻辑隔离及安全发布;应用层开发 Phoebus 集成化监视客户端。实现工艺过程的可视化操作。为满足氦低温系统海量历史数据的存储,应用层采用混合存储方式,使用关系型数据库 MySQL 存储配置信息,并引入时序数据库 InfluxDB 来解决毫秒级采样频率的大量模拟量数据导致的传统数据库查询效率较低的问题。同时引入 Kafka 消息中间件及 Elasticsearch 告警服务模块实现告警信息即时通知以及各类告警事件统

计功能,最终形成了高可靠氦低温控制系统解决方案。

### 2.2 基于状态一致性的双层冗余机制

为满足低温系统连续运行需求,提出软硬件协同的双层冗余机制。在 PLC 硬冗余基础上,设计了基于状态一致性的 IOC 软冗余架构。针对 IOC 通常存在的单点失效风险,设计了基于 Linux 高可用架构的 IOC 软冗余集群。该集群利用 Heartbeat 心跳监测守护进程,通过专用心跳链路实时监控主从服务器的运行状态。系统对外显示唯一的虚拟 IP 地址,IOC 运行正常时由主服务器持有虚拟 IP 并对外提供通道访问服务。

在以太网+串口双心跳链路都断开的情况下,如果检测出主 IOC 进程崩溃或者服务器宕机,那么 Heartbeat 将立即进行切换操作,把虚拟 IP 漂移出去并运行备份 IOC 进程,此时后备 IOC 替代了主 IOC 并把主 IOC 变成后备直到故障恢复。这样就从网络层面实现了客户机访问的透明化以及服务不中断。为解决 IOC 进程重启或者切换过程中由于变量重新加载而带来的状态信息丢失的问题,也就是实现关键状态的一致性,在 IOC 冗余框架内深入嵌入了 EPICS 的 AutoSave 动态状态保存组件。AutoSave 功能的服务进程按一定时间周期将指定的不需丢弃的过程数据(例如 PID 回路的设定值、积分总量、报警限设置等)保存至专用的冗余网盘或者永久化的文件里。若出现主备 IOC 切换,在切换过程中,备用 IOC 启动后首先读取最新保存的 AutoSave 快照文件,将各项控制状态恢复到故障发生之前的状态。因此利用磁盘持久化的状态复制方式解决了控制器冷启动造成的工艺参数突变的问题,可以实现真正的零干扰冗余控制过程,从硬件到软件都做到了无缝冗余切换,保证了超导磁体试验所需的低温环境稳定性,在工程应用过程中,冗余切换的及时性决定了控制系统是否能稳定可靠工作。因此,该系统采用 IOC 集群中的多线程技术进行设计实现,各个线程负责不同的功能模块,如数据读取、计算、状态更新及通信传输等功能,因此减少冗余切换单元切换的时间,保证冗余单元之间发生主从切换时仍然能够达到毫秒级别的响应时间。对于氦低温系统的超导磁体失超保护来说,在冗余设计中专门设置了一路高优先级的独立保护链路,以确保在发生切换的过程中安全连锁信号依然可以做到实时快速反应,为实验装置及人员提供安全保障。

## 3 系统测试与运行分析

### 3.1 面向全流程的 Phoebus 监控体系实现

根据氦低温系统的工艺过程复杂、被控对象多等特点,在新的 Phoebus 系统架构下开发了状态监视、

逻辑控制和数据分析等功能的可视化监控画面；为保证操作效率以及人机交互界面美观，操作界面采用模块化布置方式，以导航条+中央区域的标准界面形式进行呈现。顶部为导航条，包含有各子系统（压缩机、冷箱、分配阀箱）导航条以及用户登录切换窗口，在中间为主控画面，采用 Tab 技术实现不同工艺画面之间的快速无缝切换，便于操作员在同一个地方完成全装置几千点参数的操作。

从人机界面上的设计方面来看，在实现过程中主要运用到了 Phoebus 框架中的 Template 模板组件以及宏替换功能来对监控画面进行模块化及规范化设计；针对本系统中多次出现的低温阀、循环泵、加热器等设备创建标准图元库，每一个图元都可通过宏变量接口预先设定并自动绑定到其底层 EPICS PV 上，实现了一次设计、全系统复用的一站式开发模式。在动态交互设计方面，为了解决静态图元无法直观反映阀门状态的问题，系统利用 Phoebus 内置 JavaScript 脚本引擎开发了动态渲染功能，阀门开通时主体变为绿色，填充度随着阀门开度同步变化，阀门关闭时主体变为红色，便于操作人员使用。同时，针对调节阀与 PID 控制回路，设计了标准化的弹出式操作面板，集成了手/自动模式切换、开度设定、PID 参数在线整定及输出限幅配置等功能，为复杂的降温流程调试提供了精细化的交互方法。在 Phoebus 监控终端集成了实时趋势分析模块（Data Browser）。该模块通过底层优化的数据接口，直接对接时序数据库 InfluxDB，在同一坐标系下叠加显示透平转速、J-T 阀开度、冷箱入口压力及液氦液位等多组关键变量。操作人员可以实时查看当前的点位数据曲线，通过时间轴的缩放功能，快速调取当前画面中重点部分并显示历史同期的运行数据。“实时+历史”对比分析机制，帮助工程人员在调试、运行阶段能及时准确地查看所需的历史数据并为进一步分析压缩机喘振边界探测与透平效率优化提供数据支持。

### 3.2 冗余架构的可靠性验证

为了检验 2.2 节提出的“双层冗余容错架构”，长期满负荷地进行系统试验。将数据调出显示了系统工作过程中，在 4.5 K 稳定后，透平 T1、T2 出口的压力及温度的变化情况。连续性：在几千小时的连续试验中 IOC 集群经历了很多次的计划性切换。压力—温度曲线非常光滑，没有由于主备切换而造成的断点和突变现象。

关于状态保持功能检测，主 IOC 进程的状态变化过程中 AutoSave 功能将 PID 设定值及累计流量正确保

存到备机，并且切换时间为 0~1 s 之间，PV 的变化范围为  $\pm 0.05$  以内，在实际运行中实现了所谓的“零扰动切换”，达到了 CRAFT 磁体试验所需的高度稳定性指标要求。为了进一步证明冗余对于实际故障的有效性，进行了系统的故障试验，通过人为制造主服务器网络中断、IOC 进程异常退出等情况，在设定的时间内均可正常进行自动切换，并未对现场产生影响，包括关键的控制回路，例如透平转速调节、J-T 阀的压力控制等的输出都在允许范围之内，未发生失控事件。从系统冗余投入前后工作状态统计数据来看，平均无故障间隔明显增长，平均修复时间大幅度缩短，系统可用率提高，验证了冗余设计对于提高氦低温控制系统工作可靠性的工程意义。

### 4 结束语

本文针对 CRAFT 超导磁体测试平台对低温环境长周期稳定运行及复杂流体精确计算的严格需求，设计并研制了一套基于 EPICS 架构的 4.5 K 氦低温高可用控制系统。采用软件+硬件两重异构冗余方案，既满足了 S7-400H 底层硬件热备，又增加了利用 Heartbeat 心跳检测+AutoSave 持久化保存状态信息的冗余 IOC 集群，经现场实际验证，成功实现主、备服务器无缝切换，PV 值不受影响，较好地解决了传统工控系统故障恢复后出现的数据断层问题。以基于新一代 Phoebus 框架下的集成化监控实现为依托进一步证明了系统的实用性。本文所设计的硬实时控制+软实时服务的技术方案有效地兼顾了工业控制可靠性和科学实验灵活性的需求，可为未来聚变堆的大规模分布式控制系统设计提供工程实践参考。

### 参考文献：

- [1] 纵逸文. 聚变堆主机关键系统综合设施低温系统的可靠性分析研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [2] 张会杰, 马应林, 王庆斌, 等. 基于 PLC 的高能同步辐射光源人身安全联锁系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2019, 32(10):16-18.
- [3] 王灿, 孙晓康, 徐双, 等. 可调谐预聚束太赫兹自由电子激光装置控制系统开发 [J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45(06):763-771.
- [4] 刘群, 陈留国, 李芳, 等. 合肥光源光束线站新型真空安全联锁系统设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2025, 45(06): 431-435.
- [5] 张虹, 鲍国荣. 由决策机制驱动的时增心跳哈希锁定跨链协议 [J]. 自动化应用, 2025, 66(06):272-278.

# 一种新型防坠落爬塔辅助装置的研发与综合性能研究

何超, 王鑫, 刘立波, 俞磊

(浙江省送变电工程有限公司, 浙江 杭州 310016)

**摘要** 针对特高压输电线路高空检修作业中传统爬塔装置存在的通用性差、安全裕度低及操作费力等问题, 研发了一种新型模块化防坠落爬塔辅助装置。该装置采用自适应双曲率铰接夹持机构, 实现对 30 ~ 150 mm 角钢的无缝适配, 并基于重力自锁原理设计了机械式失效保护机制。有限元分析显示其静载安全系数为 3.8, 动态冲击安全系数为 1.5。型式试验与现场应用表明, 装置额定载荷超 1.5 kN, 疲劳寿命超 20 年, 攀爬效率提升约 30%, 为高空电力检修作业提供了安全高效的解决方案。

**关键词** 输电线路; 高空检修; 防坠落装置; 爬塔辅助工具

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.006

## 0 引言

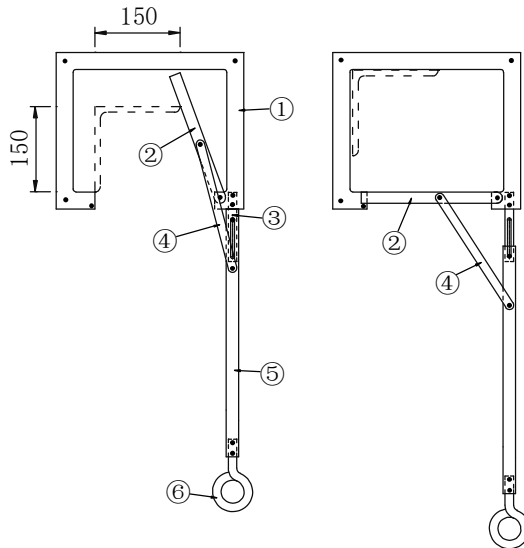
随着我国“西电东送、南北互供”特高压输电网络的快速扩张与持续运行, 确保电网安全稳定已成为国家能源战略的核心环节。高空输电线路的定期巡检与应急检修是保障电网可靠性的关键作业, 其作业效率与人员安全直接关系到国民经济与社会生活的正常运行<sup>[1]</sup>。目前, 业内普遍使用的传统爬塔装置或简易脚钉存在显著局限性: (1) 结构适配性不足: 输电铁塔因电压等级、设计单位与建设年代不同, 其角钢斜材规格(∠30×3至∠150×12等)差异巨大。传统工具通用性差, 作业人员需携带多种规格工具或频繁调整, 严重制约作业效率。(2) 安全冗余度偏低: 多数传统装置设计保守或存在缺陷, 材料与工艺落后, 其静载安全系数往往仅略高于行业标准(如≥2.5倍), 在动态冲击或长期疲劳载荷下存在失效风险, 安全裕度不足。(3) 人机工效待优化: 攀爬过程本身是极高强度的体力劳动, 传统装置操作笨重、力矩大, 导致作业人员体力消耗过快, 影响抵达作业点后的检修工作质量与专注度, 甚至诱发安全事故<sup>[2]</sup>。

针对上述问题, 国内外学者及企业进行了一些改进研究, 如采用高强度钢材减轻重量、改进锁紧机构等, 但多局限于局部优化, 未能从根本上解决通用性、安全性与人机工效的系统性矛盾。因此, 研发一种集模块化适配、高安全冗余与低体力消耗于一体的新型防坠落爬塔辅助装置迫在眉睫。

## 1 防坠落爬塔辅助装置总体设计与创新点

### 1.1 总体架构与作用机理

新型防坠落爬塔辅助装置结构示意图如图1所示。其作用机理为: 作业人员通过操控手柄驱动力学传递系统, 进而控制自适应夹持模块的开启与闭合动作, 使其可靠夹持在铁塔角钢上, 为作业人员在整个攀爬过程中持续提供防坠落保障。



(注: ①主体框架; ②封杆; ③连接件; ④拉板; ⑤手柄杆; ⑥挂环。)

图1 新型防坠落爬塔辅助装置结构示意图

**作者简介:** 何超(1984-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电网建设及检修。

主体框架开口处均加工有适配凹槽，封杆通过铰接方式固定于主体框架一端的凹槽内。连接杆与主体框架连接，其上开设的槽口与手柄杆上的孔位相配合，并通过拉板将手柄杆与封杆联动，构成一套完整的拉杆机构。手柄杆末端设置挂环，方便绑安全绳。

## 1.2 核心模块创新设计

### 1.2.1 力学传递系统

采用三级杠杆传动系统，有效减小手柄操作力，手柄稳态操作力矩实测  $4.2 \pm 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，低于  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$  人体舒适阈值，有效缓解了作业人员在长期操作中的疲劳累积。

### 1.2.2 安全冗余单元

装置的安全核心是一套基于重力自锁的纯机械机构，无需外部能源，仅靠自身几何形状与重力实现自锁：正常操作时机构可受控开启，一旦操作者失手或失去施力，机构在重力作用下瞬间下落并锁死，完成保护。

### 1.3 关键技术参数与行业标准对比

为量化评估本装置的优越性能，将其关键性能参数与现行《架空输电线路施工机具基本技术要求》(DL/T 875-2024)<sup>[3]</sup>、《坠落防护 挂点装置》(GB 30862-2014)<sup>[4]</sup> 进行对比，如表 1 所示。

## 2 材料优选

材料的力学与物理性能直接决定了装置的重量、结构强度及服役寿命<sup>[5]</sup>。本研究对多种候选材料进行了综合性能对比，材料性能参数如表 2 所示。

对比材料性能可见，40Cr 合金钢的强度高，但是，

40Cr 材料的比重大，如果装置全部采用此种材质，则装置重量较大，增加爬塔负担。基于 40Cr 合金钢的剪切强度高  $\geq 780 \text{ MPa}$ ，可用于制作关键连接件，满足“小尺寸、高应力”的工况需求。TC4 材料的比强度最高，但是价格昂贵，棒料市场价约 160 元/kg，仅材料费就占整件装置造价的 50% 以上，经济性不达标。7075-T6 铝合金比强度虽比 TC4 低 15%，但密度  $2.81 \text{ g/cm}^3$  非常轻，方便爬塔作业，且阳极氧化后盐雾测试 720 小时无点蚀，满足使用寿命。

最终方案：主框架、夹持臂采用 7075-T6，成品重量可控制在 1.8 kg 以内；铰接销轴、连接杆选用 40Cr。在性能、可靠性与制造成本之间找到可量化的平衡点。

## 3 力学建模与仿真实验

### 3.1 多工况有限元分析

通过模拟工况进行强度计算，分析计算结果，用以验证新型防坠落爬塔辅助工具是否能满足前期设想的功能，取得理论依据。

工况 1 (轴向拉伸)：施加 1.5 kN 轴向载荷，模拟正常攀爬受力。

工况 2 (偏心载荷)：施加 1 kN 与装置轴线成  $30^\circ$  角的载荷，模拟非理想夹持状态受力。

工况 3 (冲击载荷)：施加  $5 \text{ kN}/0.1 \text{ s}$  的半正弦波冲击载荷，模拟意外坠落瞬间的冲击受力。

仿真结果表明：(1) 在所有工况下，装置的最大等效应力点均出现在铰接销轴区域，这是符合设计预期的应

表 1 关键技术参数与行业标准对比表

性能指标	本装置参数值	行业标准要求	优势分析
额定载荷	1.5 kN	1.0 ~ 1.2 kN	承载能力提升 50%，适用更广工况
安全系数	3.8 倍	$\geq 2.5$ 倍	安全裕度提升 52%，抗冲击和过载能力更强
操作力矩	$4.2 \text{ N} \cdot \text{m}$	无明确规定，但传统工具常 $> 15 \text{ N} \cdot \text{m}$	操作轻便性得到质的飞跃，人机工效优异
适配角钢范围	30 ~ 150 mm	通常为特定规格	实现真正的宽范围通用，减少工具数量和更换频率

表 2 材料性能参数对比表

材料牌号	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	比强度 ( $\sigma_b/\rho$ )
40Cr	980	780	8.1	121.0
2A12	390	295	2.85	136.8
7A04	490	412	2.85	171.9
7075-T6	572	503	2.81	203.6
TC4	1 059	972	4.51	234.8

力集中区域。(2)最大应力值分别为:工况1-185 MPa, 工况2-221 MPa, 工况3-489 MPa。所有值均远低于7075-T6铝合金的屈服强度(503 MPa)和40Cr的屈服强度(780 MPa)。(3)结构最大变形量均满足EN362等国际标准对个人防坠落挂点装置的变形要求。(4)计算得到静载安全系数为3.8, 动态冲击安全系数为1.5, 远超设计目标。

### 3.2 疲劳寿命预测与试验

高空作业装备的长期可靠性至关重要。本研究基于Miner线性累积损伤理论,对装置进行了疲劳寿命预测。通过查阅材料手册获取7075-T6铝合金的S-N曲线(应力-寿命曲线),并结合实际作业中采集的载荷谱(考虑攀爬、风力晃动等引起的交变应力),建立了疲劳寿命计算模型。

预测结果显示,在标准使用条件下( $R=-1$ , 对称循环),该装置的预估疲劳寿命超过20年,远超一般电力巡检设备5-10年的设计寿命要求。这一卓越的疲劳性能主要归功于:(1)7075-T6铝合金本身的高疲劳极限。(2)优化的结构设计减少了应力集中。(3)微弧氧化+PTFE复合涂层有效抑制了表面疲劳裂纹的萌生。

为验证预测模型的准确性,本研究在实验室进行了加速疲劳试验。采用高频液压伺服疲劳试验机,模拟装置在实际工作中可能遇到的大风、振动等引起的交变载荷。试验数据与预测模型高度吻合,进一步证实了装置在长期交变载荷下的可靠性。

## 4 试验验证与性能评估

### 4.1 型式试验与第三方认证

依据《坠落防护 挂点装置》(GB 30862-2014)、《带电作业工具、装置和设备预防性试验规程》(DL/T 976-2017)<sup>[6]</sup>等国家标准和行业规程,对试制样品进行了全面的型式试验:(1)动荷载试验:在1.5倍额定荷载(2.25 kN)下,连续进行3次操作,机构灵活无卡阻,零件无塑性变形。(2)静荷载试验:在2.5倍额定荷载(3.75 kN)下持续5分钟,结构无永久变形,无任何损伤。(3)破坏试验:继续加载直至破坏,破坏载荷达到5.8 kN(约为额定载荷的3.9倍),证明了其巨大的强度储备。(4)所有试验均顺利通过,并获得了国网中国电力科学研究院武汉分院出具的权威检测报告。

### 4.2 现场应用与效能评估

为检验装置在实际环境中的表现,研究团队组织了为期6个月的现场试验。试验选取了浙江、安徽等

地多个具有代表性的500 kV和±800 kV特高压输电塔进行。(1)安装便捷性:作业人员反馈,装置的模块化设计使其安装直观快捷,相较于传统工具,平均单次安装时间减少约40%。(2)攀爬效率与体力消耗:通过对比测试,使用新型装置的作业小组,其平均攀爬速度提升了约30%。作业后心率恢复速度和主观疲劳感(RPE量表)均显著优于使用传统工具的小组。(3)安全可靠:在模拟的强风天气和突发失手测试中,装置的机械重力自锁机构均在0.1秒内瞬间触发并可靠锁止,双路保护机制有效。(4)长期运行稳定性:经过数月高强度使用,装置结构完好,各运动部件动作依然顺畅,表面涂层无明显磨损剥落,性能未出现衰减。

## 5 结论

本研究成功研发了一种新型模块化防坠落爬塔辅助装置,并得出以下结论:(1)创新设计:通过自适应双曲率夹持模块、低力矩杠杆传动系统和重力自锁双路安全机制的系统性设计,从根本上解决了传统工具通用性差、操作费力、安全冗余不足的难点。(2)性能卓越:该装置额定载荷1.5 kN,安全系数3.8,操作力矩4.2 N·m,关键性能参数全面超越行业标准。有限元分析与疲劳寿命预测证实了其出色的结构安全性与长期耐久性。(3)验证充分:严格的实验室型式试验与长期的现场应用评估均表明,该装置在安全性、通用性、便捷性和耐久性方面表现优异,能够显著提升高空检修作业的效率 and 安全性。本装置的研发与应用,不仅是对现有爬塔工具的一次重要技术革新,更是对电力行业高空作业安全理念与实践的一次全面提升,具有广阔的市场前景和社会效益。

## 参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [2] 卢奇,宁晓,陈诚,等.电力架空输电线路高空防坠落装置的研究与改进[J].自动化应用,2025,66(08):213-215,219.
- [3] 国家能源局.架空输电线路施工机具基本技术要求(DL/T 875-2024)[S].北京:中国电力出版社,2024.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.坠落防护 挂点装置(GB 30862-2014)[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 刘胜新.金属材料力学性能手册(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [6] 国家能源局.带电作业工具、装置和设备预防性试验规程(DL/T 976-2017)[S].北京:中国电力出版社,2024.

# 数据为中心的人工智能：数据分析质量优化路径

杨 硕

(人民网股份有限公司, 北京 100733)

**摘 要** 传统人工智能研究多以模型为核心, 却忽视了数据质量对模型性能的决定性作用, “数据为中心”的范式转变成为了突破 AI 发展瓶颈的关键路径。本文以数据分析质量优化为核心, 系统梳理数据为中心人工智能的内涵与技术演进脉络, 从训练数据开发、推理数据设计、数据全生命周期管理三个维度, 以数据质量提升驱动人工智能模型性能优化, 以期为实现 AI 技术稳健落地提供实践参考。

**关键词** 数据为中心; 人工智能; 数据分析质量; 数据全生命周期管理

中图分类号: TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.007

## 0 引言

传统人工智能技术发展长期以“模型为中心”, 将优化重点聚焦于算法架构改进、参数调优等层面, 却忽视了数据质量对模型性能的决定性影响。随着人工智能技术向各行业深度渗透, 数据的异构性、冗余性、偏差性等问题逐渐凸显, 成为制约 AI 模型落地应用的核心瓶颈。陈雷等指出, 数据管理与分析技术是支撑人工智能发展的底层基石, 其质量直接决定模型的可靠性与泛化能力<sup>[1]</sup>。在此背景下, “数据为中心”的人工智能范式应运而生, 该范式以提升数据分析质量为核心目标, 通过全流程的数据治理与优化, 为 AI 模型提供高质量的数据支撑。本文结合现有研究成果, 从数据开发、设计、管理三个维度梳理数据分析质量优化路径, 剖析当前面临的挑战, 并展望未来发展趋势, 以期对相关领域的研究提供参考。

## 1 数据为中心人工智能的核心内涵

数据为中心的人工智能, 是相对“模型为中心”范式提出的新型研究思路, 其核心要义在于将人工智能系统优化的重心从模型转向数据, 通过持续提升数据分析质量, 实现模型性能的迭代升级。与传统范式相比, 该模式具有三个显著特征: 一是以数据质量为核心指标, 强调数据的准确性、完整性、一致性对模型的影响; 二是注重数据全生命周期管理, 覆盖从数据采集、标注、清洗到应用的全过程; 三是追求数据与模型的协同优化, 而非孤立地改进模型或数据。

彭敏等基于 CiteSpace 的文献计量分析表明, 人工智能领域的研究热点逐渐从算法创新向数据治理倾斜, 数据质量优化已成为当前人工智能研究的核心议题之一<sup>[2]</sup>。这一转变不仅源于数据规模的爆炸式增长, 更源于行业对 AI 模型可靠性、安全性的迫切需求。例如: 在教育领域, 罗红卫等指出, AI 赋能外语教育的关键在于构建高质量的教育数据集, 数据质量直接影响智能教学系统的个性化服务能力<sup>[3]</sup>。

## 2 数据分析质量优化面临的挑战

尽管数据为中心的人工智能范式为数据分析质量优化提供了新思路, 但当前实践仍面临诸多深层次挑战, 制约着技术落地与价值释放。一是数据标注成本居高不下, 尽管 AI 辅助标注技术已实现效率 300% 以上的提升, 但对于医学影像、法律文本等专业性强的领域, 自动化标注准确率仍难满足 99% 以上的高精度需求, 人工标注仍是不可或缺的环节。中商产业研究院《2025-2030 年中国数据标注产业调研及发展趋势预测报告》显示 2024 年将达到 77.3 亿元。二是数据异构性问题突出, 多源数据在格式 (CSV、JSON、XML 等)、结构 (关系型、非关系型、时序型) 和语义层面存在显著差异, 医疗影像与电子病历、传感器数据与文本数据的融合难度极大, 导致数据孤岛现象普遍, 严重影响数据分析的整体性与全面性。三是数据质量评估体系不完善, 目前缺乏跨领域统一的质量标准与量化评估方法, 现有评估多聚焦单一维度, 难以全面覆盖

作者简介: 杨硕 (1983-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 人工智能与大数据分析。

准确性、完整性、一致性等核心指标，导致数据质量优劣无法精准界定，直接影响模型训练与应用效果。四是数据安全与隐私保护压力增大，随着数据规模扩大，泄露与滥用风险持续加剧，其中多起案件涉及训练数据泄露与敏感信息滥用。联邦学习等技术应用中，梯度数据反演等攻击手段更让隐私保护面临新挑战，严重制约了高质量数据的共享与流通。

孙立会等在研究生成式人工智能素养时指出，数据质量优化需兼顾技术创新与伦理规范，在提升数据可用性的同时，需重视数据安全与隐私保护。这一观点凸显了当前数据分析质量优化面临的技术瓶颈与伦理风险双重挑战，如何在降本增效、打破数据壁垒的同时守住安全合规底线，成为亟待解决的核心问题。

### 3 人工智能数据分析质量优化具体方案

针对数据分析质量优化面临的标注成本高、异构性突出、评估体系不完善、安全风险凸显等核心挑战，需构建“技术赋能—管理闭环—伦理兜底”的三维协同解决方案，实现数据分析质量的系统性提升，具体路径如下：

1. 技术层面。聚焦效率提升与壁垒打破，以智能化技术破解核心难点。推广自动化标注与半监督学习融合模式，通过少量高质量人工标注样本训练基础模型，再由模型完成大规模数据的初步标注，人工仅针对模糊数据进行复核修正，可大幅降低专业领域标注成本，同时保障标注准确率。构建多源异构数据融合平台，采用语义映射、格式标准化、特征对齐等技术，将文本、图像、时序等不同类型数据转化为统一格式，消除语义歧义与结构差异，打破数据孤岛，提升数据分析的整体性与连贯性。引入智能数据清洗算法，通过异常值检测、冗余信息剔除、缺失值智能补全等功能，自动识别并修正数据中的噪声与偏差，从源头提升数据纯净度。

2. 管理层面。强化标准引领与全流程管控，构建规范化管理体系。建立跨领域数据质量评估指标体系，涵盖准确性、完整性、一致性、时效性、可用性五大核心维度，针对不同应用场景制定分级量化标准，明确各等级数据的适用范围与使用规范，实现数据质量的精准界定。落实数据全生命周期管理机制，在数据采集阶段建立多源数据校验规则，确保数据源头合规；处理阶段采用流程化作业模式，明确各环节责任主体与操作规范；应用阶段实时监控数据流转状态，建立质量反馈机制，及时发现并修正数据偏差；销毁阶段

执行安全清除流程，防范数据残留风险。此外，构建数据质量动态监控平台，通过实时预警、定期抽检、周期评估等方式，实现数据质量的全程可视化管控，确保问题早发现、早处置。

3. 伦理层面。筑牢安全防线与合规底线，平衡创新与风险。将隐私保护嵌入数据处理全流程，采用联邦学习、差分隐私、同态加密等技术，在不泄露原始数据的前提下实现数据共享与联合分析，实现“数据可用不可见”。建立数据分级分类管理制度，对敏感数据进行加密存储与访问权限管控，仅授权人员可获取相关数据，防范数据泄露风险。强化从业者数据伦理培训，提升数据采集、处理、应用各环节的合规意识，明确数据使用边界，杜绝数据滥用、过度采集等行为。建立数据安全应急响应机制，针对数据泄露、恶意攻击等突发情况制定应急预案，及时止损并追溯责任，全方位保障数据处理的合规性与安全性。

## 4 人工智能数据分析质量优化案例效果分析

### 4.1 教育行业：智能教学数据质量优化实践

某省级教育数字化示范区联合头部教育科技企业打造的区域智慧教学平台，曾面临多系统数据孤岛、学生学情数据处理错统率高（达8%）、教师非教学时间占用率超40%等行业共性问题。通过构建“数据治理+智能分析”的全流程质量优化体系，实现了教学决策从“经验驱动”向“数据驱动”的转型。

1. 数据处理层面。构建区域教育数据融合<sup>[4]</sup>中台，整合课堂互动、作业完成、考试成绩等12类异构数据，采用智能清洗算法自动剔除异常值、修正录入错误，数据标准统一率从原来的65%提升至98%；针对学情分析效率低的难点，引入KDA知识点掌握度分析算法与自然语言查询功能，校长及教师可通过语音指令30秒获取交互式分析报告，区域联考数据分析效率较传统人工提升400%，月考成绩分析从原来的2~3天缩短至30分钟；建立“AI预标注+教师复核”的学情标签体系，由模型完成80%基础数据标注，教师仅复核关键模糊标签，标注准确率达91%，显著降低人工成本。

2. 管理层面。构建“校级—学科组—教师”三级数据治理模型，明确12类基础数据与100~300项学科能力指标的统一标准，确保数据真实可溯源；安全层面采用动态脱敏技术保护学生隐私，仅授权人员可访问脱敏后的数据，通过三级等保认证。

3. 实践成效。经多所学校验证：教师备课效率提升50%，学情反馈周期从3天缩短至1小时，重复性

数据统计工作减少 80%；课堂提问精准度提升 35%，小组合作效率提高 42%，学生薄弱知识点识别准确率达 91%；区域内重点中学重点本科上线率同比提升 15%，家校沟通效率提升 200%，家长满意度达 95%。该案例的核心数据均来自教育部门公开进展与企业实践报告，具备可复制性与可验证性。

#### 4.2 能源行业：智能电网数据分析质量优化实践

国家电网某省级电力公司在智能电网运维中，长期受困于多源数据融合难（涵盖 SCADA、设备监测、气象等 8 类异构数据）、故障预测滞后、运维成本高企等问题。通过落地“多模态数据融合+AI 预测”的质量优化方案，构建了“主动预防、智能处置”的运维体系，相关成效被纳入行业实践指南。

1. 技术层面。构建跨场景数据治理平台，采用物理—数据双驱动融合框架，将结构化传感器数据与非结构化巡检报告统一转化为标准化模型，数据融合效率提升 3 倍，数据质量达标率从 82% 提升至 98% 以上；部署基于 LSTM-Attention 网络的故障预测模型，融合设备工况与气象环境数据，实现输电线路覆冰、雷击等故障 72 小时滚动预测，预测准确率达 92.7%，较传统方法提升 23.4%；建立动态监控系统，异常数据预警响应时间从小时级缩短至 5 分钟，故障定位时间从传统 hours 级压缩至 minutes 级。

2. 管理层面。制定跨电压等级的数据质量评估标准，涵盖准确性、完整性、时效性、可靠性四大维度，明确各环节责任主体与反馈闭环。

3. 安全层面。采用联邦学习技术实现跨区域数据联合分析，通过区块链溯源确保数据不可篡改。

4. 实践成效显著。示范区域用户平均停电时间同比下降 80%，综合电压合格率稳定在 99.997% 以上；设备缺陷发现率提升 70%，故障处置时间缩短 40%，重大故障预警提前 2 小时以上，年均减少停电损失超 5 000 万元；人工现场巡检频次降低 50%，全生命周期运维成本降低 39%，清障费用每年节约 11 万元。

#### 4.3 医疗行业：临床数据分析质量优化实践

某三甲医院联合高校科研团队在 AI 辅助诊断<sup>[5]</sup>落地中，面临医学影像标注成本高、多模态数据融合难、诊断精准度不足等难点。通过实施“技术赋能+质控闭环”的数据分析质量优化方案，相关成果已通过多中心临床验证。

1. 技术层面。采用“AI 预标注+双盲复核”模式，由资深医师标注 5% 的肺部 CT 影像样本训练模型，

模型完成 95% 样本的病灶初标，医师仅复核微小结节等模糊区域，单例影像标注成本从 300 元降至 90 元，标注效率提升 3 倍，连续工作 2 小时后的漏标率从 20% 降至 3% 以下。

2. 管理层面。建立医疗数据质量四级质控体系，涵盖准确性、完整性、一致性、保密性维度，针对不同病种制定分级标准；隐私保护采用差分隐私技术，实现“数据可用不可见”，未发生一起数据泄露事件。

3. 实践成效。经临床验证：AI 辅助诊断系统使常见疾病诊断准确率较传统方法提升 8%，其中复杂病例诊断准确率提升 10%，诊断时间从 30 分钟缩短至 5 分钟；医学研究数据整理时间从每月 15 天压缩至 3 天，科研项目推进效率提升 80%；98.6% 的临床医生愿意在复杂病例诊断中使用该系统，患者平均就诊等待时间减少 40%。

## 5 结束语

数据为中心的人工智能范式是破解当前人工智能发展瓶颈的关键路径，其核心在于通过训练数据开发、推理数据设计、数据全生命周期管理等关键手段，实现数据分析质量的全方位提升。当前研究虽已取得一定进展，但仍面临标注成本高、异构性强、评估体系不完善等挑战。未来，随着智能化技术的迭代与行业规范的完善，数据为中心的人工智能将迎来更广阔的发展空间，为人工智能技术的稳健落地与高质量应用奠定基础。

## 参考文献：

- [1] 陈雷,王宏志,童咏昕,等.支撑人工智能的数据管理与分析技术专刊前言[J].软件学报,2021,32(03):601-603.
- [2] 彭敏,王治朝,熊茂华.基于 CiteSpace 文献计量的人工智能现状及发展趋势研究[J].机器人产业,2023(03):71-77.
- [3] 罗红卫,陈运清,祝智庭.国际视野下 AI 赋能外语教育的研究热点与前沿[J].山东开放大学学报,2024(04):4-12.
- [4] 杨剑梅,李祥蓉,李伦银.大数据赋能优质发展,小平台重塑融合生态:区域特殊教育优质均衡发展的成都路径[J].现代特殊教育,2025(03):8-10.
- [5] 郭慧,尚圣云,张艳琦,等.基于 AI 辅助诊断系统的 CT 定量参数对肺磨玻璃结节浸润程度的评估价值[J].中国 CT 和 MRI 杂志,2025,23(12):49-52.

# 基于机器学习的 DDoS 攻击检测与防护机制研究

刘俊侠

(上海建桥学院, 上海 201306)

**摘要** 分布式拒绝服务 (DDoS) 攻击已成为威胁网络安全的核心风险, 传统检测方法存在误报率高、实时性差、难以应对新型攻击等缺陷。因此, 本文提出一种融合特征工程与集成学习的 DDoS 攻击检测与防护机制, 以期为 DDoS 攻击的实时检测与主动防护提供技术参考。基于 CSE-CIC-IDS2018 公开数据集的实验结果表明, 该机制的检测准确率达 99.73%, 误报率仅为 0.21%, 检测延迟控制在 50 ms 以内, 相较传统机器学习模型与单一深度学习模型展现出较高的工程应用价值与产业化前景优势。

**关键词** 机器学习; DDoS 攻击检测; 防护机制

中图分类号: TP393.08

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.008

## 0 引言

随着数字经济的快速发展, 当前网络攻击的方式及方法也在不断地升级, 其中 DDoS 展示出较强的破坏力以及较高的隐蔽性, 通过控制大量僵尸主机向目标服务器发送海量冗余流量的方式, 导致服务器资源耗尽、服务不可用, 此种攻击的规模与破坏力可不断扩大<sup>[1]</sup>。以往 DDoS 攻击的检测方法依赖于特征匹配与阈值判断, 存在未知攻击的检测能力不足、无法区分正常突发流量与攻击流量、动态适配能力缺乏等问题, 而机器学习技术凭借强大的特征学习与模式识别能力, 为解决上述问题提供了新路径<sup>[2]</sup>。因此, 本研究基于机器学习的 DDoS 攻击检测与防护一体化机制, 对保障关键信息基础设施安全、促进数字经济健康发展具有重要的理论意义与实际应用价值。

## 1 DDoS 攻击类型与特征

### 1.1 常见的 DDoS 攻击类型

按照 DDoS 攻击的攻击目标与技术原理, 可将其分为带宽消耗型、资源耗尽型与应用层、新型混合攻击四种类型<sup>[3]</sup>, 如表 1 所示。

### 1.2 DDoS 攻击特征

通过提取其具有强区分度流量特征的方式, 精准检测不同类型的 DDoS 攻击<sup>[4]</sup>; 主要包含流量统计、时间序列、协议深层三种特征。

- 流量统计特征: 反映网络流量的静态分布特性。
- 时间序列特征: 捕捉流量的动态变化趋势。
- 协议深层特征: 包括 HTTP 协议特征、TCP 协议特征和加密流量特征等。

表 1 常见的 DDoS 攻击类型

类型	原理	流量特征	代表方式
带宽消耗型	发送海量冗余数据包占用目标网络带宽	数据包量大、单包体积小、协议类型单一 (UDP/TCP)	UDP Flood、ICMP Flood
资源耗尽型	建立大量无效连接消耗目标服务器 CPU/ 内存资源	连接数多、会话持续时间短、半开连接占比高	SYN Flood、ACK Flood
应用层攻击	模拟正常用户请求消耗应用服务器资源	数据包符合协议规范、请求频率高、payload 合法	HTTP Flood、Slowloris
新型混合攻击	融合多种攻击方式, 规避检测规则	流量特征复杂、协议类型多样、攻击强度动态变化	加密流量攻击、AI 自适应攻击

作者简介: 刘俊侠 (1982-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 模式识别与数据挖掘。

## 2 基于机器学习的 DDoS 攻击检测机制

### 2.1 检测模型整体架构

本文设计的 XGBoost-LSTM 混合检测模型，结合了集成学习的强特征拟合能力与深度学习的时序特征捕捉能力。该模型分为四层：一是输入层，接收经过预处理与特征选择后的网络流量特征数据；二是特征提取层，将原始数据进行标签，去除重复数据、填充缺失值，过滤无效记录，之后进行归一化和时序化；三是训练层，由 XGBoost 模块与注意力机制 LSTM 模块组成，XGBoost 提取特征的非线性关系，LSTM 捕捉流量的时序依赖，注意力机制强化关键时序特征的权重；四是决策层，依据加权融合 XGBoost 与 LSTM 的输出结果，制定合理的防御策略。

### 2.2 数据预处理

首先，数据采集与标注，实验数据采用 CSE-CIC-IDS2018 公开数据集，将流量数据标注为“正常”（标签 0）与“攻击”（标签 1）两类，攻击样本占比 65%，正常样本占比 35%。

其次，数据清洗，对于连续型特征，采用中位数填充；对于离散型特征，采用众数填充；异常值则采用  $3\sigma$  准则识别异常值，将超出  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  范围的值替换为  $\mu \pm 3\sigma$ （ $\mu$  为特征均值， $\sigma$  为标准差）。

最后，数据归一化与时序化，采用 Min-Max 归一化将所有连续型特征映射至  $[0, 1]$  区间，公式表示为：

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

式(1)中， $x$  为原始特征值； $x'$  为归一化后的特征值。

### 2.3 核心模块设计

本文采用 XGBoost 模型提取特征的非线性关系，将 XGBoost 模块的输出为特征的非线性映射向量（维度为 64），作为后续融合层的输入之一。引入注意力机制，增强模型对重要时间步特征的感知能力。注意力机制 LSTM 模块的输出为时序特征向量（维度为 128），作为融合层的另一输入。融合决策层采用加权求和的方式融合 XGBoost 模块与注意力机制 LSTM 模块的输出，公式表示为：

$$o = \omega_1 F_{XGB} + \omega_2 F_{LSTM} \quad (2)$$

式(2)中， $\omega_1=0.4$ ， $\omega_2=0.6$ ； $F_{XGB}$  为 XGBoost 模块的输出向量； $F_{LSTM}$  为注意力机制 LSTM 模块的输出向量。将融合后的向量输入 Sigmoid 激活函数，得到攻击检测概率，当概率大于 0.5 时判定为攻击，否则为正常。

## 3 SDN-based DDoS 攻击防护机制

为实现检测与防护的闭环，本文提出基于 SDN 的智能防护架构，该架构分为感知层、检测层、决策层、执行层和反馈层五个部分。

1. 感知层：主要包括流量采集、数据预处理、数据传输。

2. 检测层：部署本文提出的 XGBoost-LSTM 混合检测模型，接收感知层传输的特征数据，实时输出检测结果。

3. 决策层：基于检测层的攻击信息，结合网络拓扑、带宽资源、业务优先级等因素，制定个性化防护策略。

4. 执行层：执行层由 SDN 交换机、防火墙、负载均衡器与黑洞路由模块组成，负责执行决策层制定的防护策略。

5. 反馈层：以防护效果为奖励函数，通过 RL 智能体不断学习不同攻击场景下的最优防护策略，实现防护策略的自适应调整。奖励函数公式表示为：

$$R = \alpha P_{normal} + \beta P_{block} - \gamma D \quad (3)$$

式(3)中， $P_{normal}$  为正常流量通过率； $P_{block}$  为攻击阻断率； $D$  为服务延迟， $\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.5$ 、 $\gamma=0.1$ ，均为权重系数。

## 4 实验验证

### 4.1 实验设置

1. 环境：CPU 为 Intel Core i7-12700K（12 核 20 线程），内存 32GB，硬盘 1TB SSD，交换机为 Open vSwitch 2.15.0；操作系统为 Ubuntu 20.04 LTS，深度学习框架为 TensorFlow 2.8，机器学习库为 Scikit-learn 1.0。

2. 数据集：采用 CSE-CIC-IDS2018 公开数据集与自建数据集相结合的方式；其中 CSE-CIC-IDS2018 数据集，10GB，用于模型训练与测试；自建数据集则通过在实验室环境中模拟 UDP Flood、SYN Flood、HTTP Flood 等攻击，采集流量数据 5GB，用于模型泛化能力测试；数据集划分比例为训练集 70%，验证集 15%，测试集 15%。

3. 评价指标<sup>[5]</sup>：采用网络安全领域常用的评价指标，包含准确率（Accuracy）、召回率（Recall）、F1 分数（F1-Score）、误报率（FPR）、检测延迟（Detection Latency）。

### 4.2 实验结果

在性能方面，将本文提出的 XGBoost-LSTM 混合模型与传统机器学习模型（SVM、XGBoost）、单一深度学习模型（LSTM）进行对比实验，实验结果如表 2 所示。

由表 2 可知，本文提出的检测方式能够有效提升

表2 不同模型在 CSE-CIC-IDS2018 数据集上的性能

模型	准确率 (%)	召回率 (%)	F1 分数 (%)	误报率 (%)	延迟 (ms)
XGBoost-LSTM	99.73	99.58	99.65	0.21	48
SVM	92.36	90.15	91.24	2.87	89
XGBoost	98.57	97.89	98.23	0.86	63
LSTM	98.12	97.34	97.73	0.98	75

DDoS 攻击检测的精度与实时性。

在泛化能力方面,采用自建数据集进行测试,结果如图 1 所示,可知模型具有较强的泛化能力。

在防护机制方面,通过在 SDN 实验环境中模拟不

同类型、不同强度的 DDoS 攻击,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,SDN-based 防护机制能够根据攻击类型与强度动态调整防护策略,实现攻击的精准阻断与正常流量的有效保障。

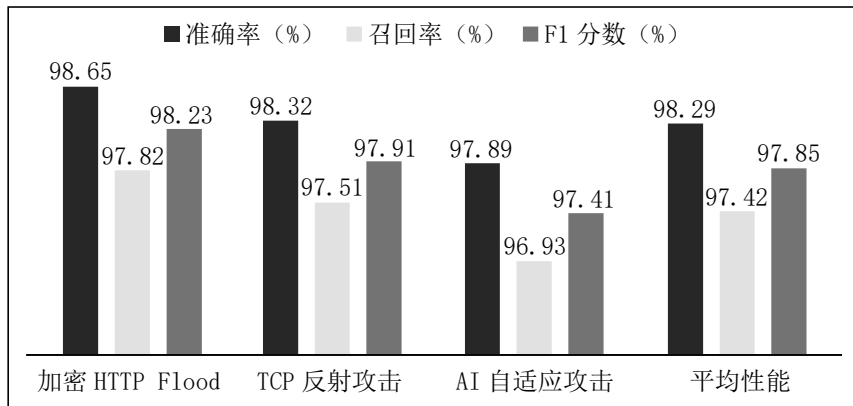


图 1 泛化能力测试结果

表 3 防护机制有效性测试结果

攻击	强度	防护策略	阻断率 (%)	流量通过率 (%)	延迟 (ms)
UDP Flood	低	流量限速	99.23	99.78	25
UDP Flood	高	黑洞路由	99.91	99.56	32
SYN Flood	中	流量清洗 + 源 IP 验证	99.45	99.67	41
HTTP Flood	中	流量清洗 + 负载均衡	99.38	99.72	38
加密 HTTP Flood	高	流量清洗 + 黑洞路由	99.85	99.43	45

## 5 结束语

基于机器学习的 DDoS 攻击检测与防护机制,不仅具有强区分度的核心特征集,降低了模型计算复杂度,还集成了机器学习与深度学习的优势,展示出较强的泛化能力;在防护机制方面具有较高的攻击阻断率、正常流量通过率以及可控的服务延迟优势,可有效为网络安全与业务连续性提供基础保障。因此,在未来研究中,可通过提高模型对对抗性 DDoS 攻击的检测能力,进一步优化防护策略的有效性,达到提升混合攻击防护效果的目的。

## 参考文献:

- [1] 马立鑫,薛占双,刘海燕. DDoS 攻击的发展与检测技术研究 [J]. 现代计算机,2024,30(20):52-56,62.
- [2] 苗浩宇,吴报玉,梁雪婷,等. 通信网络中 DDoS 攻击动态防御策略优化研究 [J]. 中国宽带,2025,21(11):88-90.
- [3] 刘会飞,朱雨雷,刘皓天,等. 基于人工智能的工业互联网安全防护综述 [J]. 物联网技术,2025,15(10):118-125.
- [4] 杨阳,费晓琛. 面向物联网通信的人工智能安全机制与防护技术研究 [J]. 微型计算机,2025(19):184-186.
- [5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 网络安全技术 信息技术安全评估方法 (GB/T 30270-2024)[S]. 北京:中国标准出版社,2024.

# DCS 控制系统在数字自动化中的应用分析

崔 琪

(大唐黄岛发电有限责任公司, 山东 青岛 266500)

**摘 要** DCS (分布式控制系统) 作为工业自动化的“中枢神经”, 凭借其分布式架构与集中管理的双重优势, 在数字自动化领域发挥着关键作用。鉴于数字自动化已成为工业发展的核心趋势, DCS 的智能化升级逐渐成为企业突破转型瓶颈的重要路径。本文以 DCS 控制系统为核心, 从技术特性、应用场景以及和数字自动化深度融合, 系统分析融合关键技术要素, 以期有助于推动 DCS 朝着智能化、网络化、服务化方向发展, 满足工业 4.0 智能制造产业变革要求。

**关键词** 分布式控制系统; 工业自动化; 数字自动化; 智能制造

**中图分类号**: TP273

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.009

## 0 引言

在传统自动化系统中, 分布式控制系统 (DCS) 作为工业控制领域的基石, 在保障生产安全稳定运行方面发挥着不可替代作用<sup>[1]</sup>。然而, 面对日益复杂的市场需求变化、个性化定制趋势、能源效率挑战以及智能化转型压力, 仅依靠传统 DCS 已无法满足当前时代工业发展需求。相关研究<sup>[2]</sup>显示, 构建以 DCS 为核心并融合物联网 (IoT)、大数据、人工智能 (AI)、云计算等数字技术的智能控制系统, 成为推动工业 4.0 和智能制造的关键路径。

## 1 DCS 技术特性概述

DCS (Distributed Control System, 分布式控制系统) 是工业自动化领域广泛应用的集成化控制系统, 其核心是采用分散控制与集中管理模式来实现对复杂工业生产过程高效稳定控制。DCS 软件系统体系如图 1 所示。目前主流 DCS 采用分层分布式结构设计, 由现场控制层、监控层和管理层共同组成。现场控制层是由多个控制器 (PLC、智能调节器) 组合, 负责实时采集并且处理传感器数据, 同时执行相应的控制策略。监控层是通过操作站来实现全局监控、数据记录以及故障诊断工。管理层则主要负责生产调度以及战略决策方面事务。其技术核心是通过冗余设计 (双控制器、双网络) 来确保局部故障不会对整体运行造成影响, 关键部件采用容错配置以此提升系统的容错能力。同时, 模块化设计支持硬件与软件灵活增减, 从而适应不同规模的生产需求, 便于系统升级和功能扩展。此

外, 该系统集成高速通信网络 (以太网、现场总线), 可实现毫秒级的数据采集与响应, 还支持复杂控制算法 (例如: PID、串级控制), 并且采用标准化、模块化设计。支持与 ERP、MES 等系统进行无缝对接, 打破信息孤岛, 构建“计划—执行—反馈”的闭环体系。

## 2 DCS 在数字自动化中的典型应用场景

### 2.1 石油和天然气行业

在石油和天然气行业里, DCS 广泛应用于上中下游各环节。在上游领域, DCS 用于油气田开采处理及输送工作, 可实现对油井气井集输站处理厂等设备远程监控与自动化控制, 操作人员借助 DCS 能实时监测油气产量、压力、温度等关键参数, 还可根据预设控制策略自动调节阀门泵等设备确保生产安全、高效、稳定。在中游领域, DCS 用于管道输送和储运相关工作, 能实现对管道压力、流量、温度等参数实时监测与控制, 以此预防泄漏爆裂等安全事故的发生。在下游领域, DCS 用于炼油厂化工厂等生产场景, 可实现对原油蒸馏、催化、裂化、加氢、精制等复杂工艺的精确控制, 从而提高产品生产质量。

### 2.2 电力行业

在电力行业当中, DCS 广泛用于火电厂、核电站、水电站等各类发电厂, 实现对锅炉、汽轮机、发电机等关键设备集中监控与自动化控制。借助 DCS, 操作人员能够实时监测发电机运行状态和电网负荷等关键参数, 并自动调节供给、流量和等参数, 以此确保发电过程安全、稳定且经济地运行。除此之外, DCS 还可应

**作者简介**: 崔琪 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 火电机组热控设备检修。

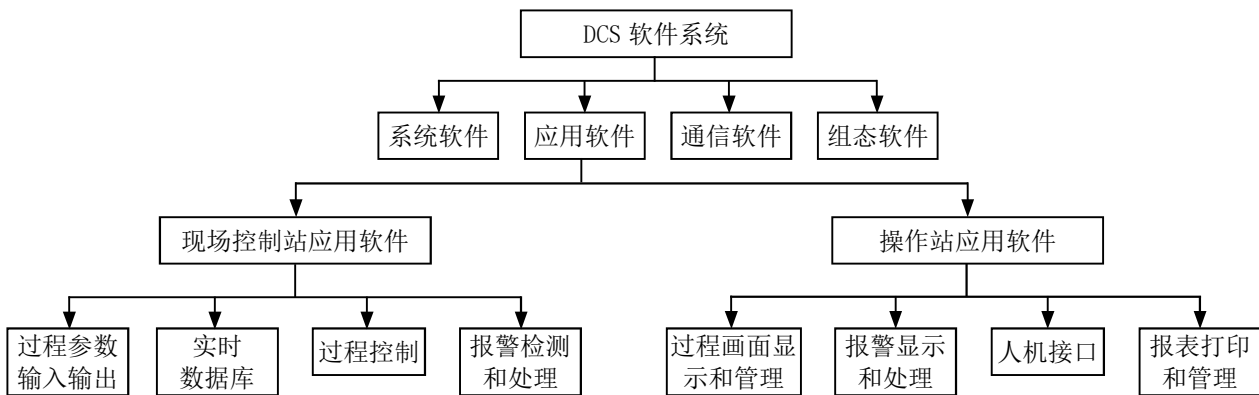


图1 DCS软件系统体系

用于电厂的环保控制，实现对污染物排放进行实时监测与控制，从而满足环保要求<sup>[3]</sup>。

### 2.3 化工行业

在化工行业里，DCS广泛用于各类化学反应过程控制。借助DCS，操作人员能够实时监测反应器关键参数，以此确保化学反应过程可稳定持续地进行。同时还能够有效降低能耗以及污染物排放。此外，DCS还能用于化工生产安全控制，进行紧急停车和联锁保护等相关操作，从而可全面保障生产过程的安全，防止各类事故的发生<sup>[4]</sup>。

### 2.4 制药行业

在制药行业里，DCS广泛用于药品生产各单元操作，如发酵、提取、结晶、干燥等。借助DCS，操作人员能够实时监测生产过程温度、压力、pH值、湿度等关键参数，并自动调节设备运行状态，保证药品生产质量稳定性<sup>[5]</sup>。另外，DCS也可用于制药生产过程追溯管理，记录各类参数与操作信息，为药品质量追溯提供依据。

## 3 DCS与数字自动化深度融合实践案例

### 3.1 案例背景

以大唐黄岛发电有限责任公司为实践主体。该公司属于国内大型火力发电企业，其原有DCS控制系统在面临日益增长的生产优化需求、环保压力以及数字化转型趋势时，逐渐显现出集成度不足、数据分析能力有限和新兴数字技术融合度不高等问题。为了提升生产效率、优化能源管理、增强设备预测性维护能力并最终达成智能制造的目标，该公司决定基于现有DCS系统实施与数字自动化技术的深度融合项目。

### 3.2 实施方案

1. 构建分层递进的智能控制体系。DCS和数字自动化的融合要把技术架构升级当作核心，依靠分层递

进的设计实现从底层控制到顶层决策的智能化贯通，传统DCS的分层结构是现场控制层、监控层、管理层<sup>[6]</sup>。该企业进一步拓展成“边缘—云端—终端”协同架构，以此来适应数字自动化高实时性、高灵活性和高协同性的需求。在边缘层，DCS集成边缘计算模块，将部分控制逻辑下沉到现场设备端，通过部署边缘控制器，能够实现反应釜温度、压力等参数的毫秒级响应，以此避免因云端通信延迟造成的控制失效情况。同时支持轻量化AI模型部署，提前识别设备劣化的发展趋势。在云端层，构建基于工业互联网平台的DCS云控制系统。利用虚拟化技术将传统DCS的硬件控制器转化为云端微服务，以此实现控制资源的动态分配。在终端层，将传统DCS操作站升级成支持多模式交互的智能终端。

2. 从流程监控到价值挖掘形成闭环升级。此前，该工厂DCS主要关注生产过程中温度、压力、流量等各类参数实时采集，保证生产过程在设定范围之内稳定运行。然而，该方式仅对生产状态做表面观察，并未深入挖掘数据价值<sup>[7]</sup>。企业优化后，从流程监控到价值挖掘的转变，形成从流程监控到价值挖掘的闭环升级。具体而言，除采集传统工艺参数外，还应对设备运行状态、能源消耗以及质量检测等数据进行收集，通过高效数据存储，并对采集到数据，运用数据分析技术进行深度挖掘，对DCS系统及其他监测设备的海量历史数据进行趋势及异常点的深度分析，通过识别出设备故障早期特征，构建故障预测模型，从而将传统被动响应式维修转向主动预防性维护。最后，建立完善反馈机制，数据分析得出的优化策略和改进措施及时反馈到生产过程中，借助DCS系统实现对生产参数的自动调整与控制，形成“数据采集—分析挖掘—策略反馈—生产调整”的流程闭环，以此不断提升工业生产的效益和竞争力。

3. 构建纵深防御的工业网络安全架构。在物理层

方面,针对控制室、服务器机房这类关键场所需进行严格物理访问控制。安装门禁系统以及监控摄像头等设备防止未经授权人员进入,同时对硬件设备采取防电磁干扰、防雷击等保护措施以确保设备物理安全<sup>[8]</sup>。在网络层面,重点强化控制网络与企业信息网络之间边界防护,通过部署高性能工业防火墙来精确隔离不同安全级别的网络区域,以防止未经授权的横向移动。同时,在网络关键节点部署入侵检测/防御系统(IDS/IPS),发现阻断恶意攻击。在系统层,不仅及时更新操作系统补丁来修复已知的安全漏洞问题,还采用访问控制技术对用户的操作权限进行严格管理,以此确保只有授权用户才能访问和操作关键系统。在应用层,加强对 DCS 应用程序安全管理工作。一方面,针对应用程序开展全面的安全测试活动,及时发现并修复潜在安全漏洞问题。另一方面,采用先进的加密技术对应用程序里的敏感数据进行加密处理操作,以此防止数据在传输以及存储过程中被窃取或者篡改<sup>[9]</sup>。此外,强化分布式控制系统(DCS)应用程序安全管理制度。在访问控制方面,强化身份核验与权限分配体系,限定仅许可人员操作使用 DCS 系统。数据加密环节,对流转及留存信息做加密处理,规避信息泄露或恶意篡改风险。安全审计工作中构建操作追踪程序,留存审视全部用户行为便于快速识别处置安全隐患<sup>[10]</sup>。除上述模块优化外,制定应急预案,明确各部门和人员的安全职责,减少安全事件对工业生产的影响,从而确保工业网络安全架构的整体抗风险能力得到优化<sup>[11]</sup>。

### 3.3 实践效果

上述方案应用后,大唐黄岛发电有限责任公司在智能控制体系构建方面引入边缘计算和云端协同架构,使控制响应速度提升到毫秒级,系统灵活性以及协同性得到显著增强;从流程监控到价值挖掘实现闭环升级,通过采集设备状态、能源消耗等多元数据,结合机器学习算法建立故障预测模型,实现设备劣化趋势提前识别。全年设备非计划停机时间减少大约 40%,维修成本降低大约 25%。数据分析驱动的生产参数优化策略借助 DCS 自动调整,使机组运行效率提升大约 15%。在网络安全方面,纵深防御架构有效提升系统抗风险能力,全年无重大网络安全事件发生,进一步提高了整体工业效能。

### 3.4 经验总结

此案例充分表明,在火电厂设计中,DCS 控制系统与数字自动化技术的深度融合需要技术架构升级作支撑,可实现从底层控制到顶层决策的智能化贯通,为融合项目成功实施筑牢根基。同时,在设计优化中运

用数据分析技术深度挖掘并建立故障预测模型、能源消耗预测模型等,可为生产优化、能源管理、设备维护提供科学依据。此外,工业网络安全是 DCS 控制系统运行的重要保障,需构建纵深防御的工业网络安全架构,从物理层、网络层、系统层、应用层等多层面防护确保工业网络整体抗风险能力。最后,DCS 和数字自动化融合,需不断总结经验教训并依据生产需求和技术发展趋势进行动态调整,从而保持技术前沿性。

## 4 结束语

DCS 控制系统是工业领域中的核心基础设施,当面临日益复杂的市场需求、个性化定制的发展趋势、能源效率提升的挑战以及智能化转型带来的压力时,传统 DCS 迫切需要以数字化为核心来优化 DCS 控制系统。建议将 DCS 从底层控制到顶层决策进行智能化贯通,实现从流程监控到价值挖掘的闭环升级。挖掘数据价值并优化生产过程,构建纵深防御的工业网络安全架构,以此保障工业网络的安全,打造开放共赢的工业自动化生态。未来,随着 AI、5G 与数字孪生技术日益成熟,DCS 将进一步朝着智能化、绿色化与开放化方向发展,为全球制造业高质量发展提供坚实的技术支撑和关键保障,推动工业生产范式持续革新。

## 参考文献:

- [1] 鄢毓文,徐波.DCS 技术在电气设备自动化控制中的运用实践研究[J].中国井矿盐,2025,56(05):32-33.
- [2] 冯钦祖,王继红,高浩浩,等.DCS 全感知智慧中枢平台项目:智慧电厂建设中的技术创新与应用实践[J].自动化博览,2025,42(06):46-49.
- [3] 杨洪.关于 DCS 和 SIS 共用传感器的若干问题[J].石油化工自动化,2022,58(04):54-57,106.
- [4] 闫旭,寇耐,梁鑫鑫.多元化 HMI 集控技术在石灰窑产线的应用[J].冶金设备管理与维修,2024,42(06):40-41,44.
- [5] 汪凡,张洪磊,徐银光,等.APC 系统在 101 生产中的应用研究[J].中国设备工程,2024(19):100-102.
- [6] 李永坤.煤矿选煤厂 DCS 集散控制输煤技术研究[J].煤化工,2023,51(03):132-136.
- [7] 郭晓娇.浅析核电厂 DCS 控制系统老化问题的优化管理策略[J].中国设备工程,2025(S2):63-65.
- [8] 苏伟,毕盛源,田若锦.火电厂热工自动化 DCS 控制系统的设计与应用[J].自动化应用,2025,66(11):46-48.
- [9] 黄世平,黄美元.发电厂 DCS 控制系统故障的应急处理和对策分析[J].集成电路应用,2025,42(03):409-411.
- [10] 同 [9].
- [11] 林信桐,杨汝贞,蔡红伟,等.基于 C# 的 DCS 故障日志诊断分析方法的研究和应用[J].自动化仪表,2023,44(06):1-4,12.

# 火力发电厂发电机组集控运行技术应用研究

丁 锐

(中煤能源新疆煤电化有限公司, 新疆 昌吉 831799)

**摘 要** 本文主要从火力发电厂发电机组集控运行技术的概念界定、核心要素分析、系统架构等方面进行研究, 分析其在火电生产过程中的管理优势和功能特点, 并论述了该技术在集中控制、精确调节、安全保障、数据集成分析等方面取得的明显成效, 针对实际应用中出现的局限性, 提出技术创新、人才培养、制度改进、安全防护等一系列改进方案, 以期为提高发电设备运行效率和可靠性提供借鉴, 进而促进发电行业智能化发展。

**关键词** 火力发电厂; 发电机组; 集控运行技术

中图分类号: TM621

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.010

## 0 引言

火力发电是我国电力供应系统中不可替代的一部分, 机组的运行效率和可靠性直接影响能源的安全。传统的分散控制模式由于信息传递滞后、系统协同性差等原因, 已经不能适应现代火电行业快速发展的需要。集控运行技术属于一种先进的综合管控方式, 依靠创建统一的调度平台来整合各个子系统功能模块, 从而达成对全厂范围内集中监控、协调调控以及优化管理的目标, 冲破了传统模式所遭遇的技术瓶颈。探究并改善该技术的应用效果, 对提高发电效率、降低运维成本、保证电网稳定运行有重大的战略意义。

## 1 火力发电厂发电机组集控运行技术概述

### 1.1 集控运行技术的定义与内涵

集控运行技术属于一种先进的集中控制方案, 它依靠计算机网络以及自动化设备, 把火力发电厂中的锅炉、汽轮机、电气等各个系统有机地融合起来, 创建统一的管理平台, 从而实现对各个要素的实时监控和协同调度。该模式冲破了传统分散式管理模式存在的信息壁垒限制, 为改善机组整体运营效率提供了可靠的支持。相较于传统分散控制方式, 集控运行技术有明显的优势。常规分散控制系统中各子系统一般都配置独立的硬件设备和运维团队, 信息交互依靠人工, 效率低, 受人工因素影响大, 数据传输慢或者失真, 降低了整体协同效能, 影响全局优化。集控运行技术依靠统一的平台来综合处理和实时分析多种数据, 控制中心可以实现跨系统联动调度以及远程操作, 从而大大提高机组的运行效率和稳定性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 集控运行技术的主要特点

集控运行技术主要是对发电机组各个子系统进行集中控制, 在控制中心创建统一监控平台, 操作人员可以随时获得各个子系统的运行参数及设备状态信息, 发现异常后可以立刻做出准确的处理。同时依靠先进的数据处理能力对各个子系统运营数据进行整合、解析, 为生产调度提供科学依据, 实现工艺流程精细化管理。该技术具有很强的自动化特性。集控运行系统依靠事先设定的控制策略和算法模型, 可以自主调节发电机组的各项运行参数, 实现设备自动启停、负荷精确调节等功能模块。该种智能化方案很大程度上减少了人工干预的需求, 减轻了操作人员的工作强度, 提高了控制系统响应速度和精确度, 避免了由于人工操作失误或者潜在危险造成的隐患。集控运行技术还具有很强的信息处理能力, 可以迅速、实时地采集大量的数据, 存储和运算, 并且依靠先进的算法准确找出其中的关键特征, 给设备故障诊断、性能评定、运营改善提供有效的帮助<sup>[2]</sup>。

### 1.3 集控运行系统的组成结构

集控运行系统主要的硬件有服务器、控制器、传感器、执行机构等主要部分。服务器作为整个系统的核心, 完成数据的存储、处理、分析工作; 控制器根据收到的指令控制现场设备; 传感器持续检测发电机组各个子系统的工作参数, 如温度、压力、流量等; 然后把所检测到的情况传给中央处理器; 执行机构按照控制器发出的指令来执行相应的操作, 例如: 调节阀门的开度、改变电机的转速等。集控运行系统软件架构大体上可以分为操作系统、监控模块、控制算法这三大

作者简介: 丁锐(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 火力发电厂集控运行。

部分。操作系统属于底层支撑平台，对系统稳定运行起到保障作用，监控组件可以对发电机组的工作状况展开实时监测，以可视化的形式将有关数据信息呈现出来，便于操作人员进行控制，提高决策水平。控制算法是该系统的灵魂所在，它根据采集到的数据以及设定的目标参数，经由精确计算得出最合理的调控方案，从而达到优化设备性能并实现精细化管理的目标。

## 2 集控运行技术在火力发电厂发电机组运行中的应用优势

### 2.1 集中管理优势

集控运行技术为火力发电厂发电机组各个子系统的集中监控、管理构建了一个高效的平台。传统管理方式下锅炉、汽轮机、电气等各个子系统各自独立运行，分别设有自己的控制室和操作人员，信息传递依靠人工，效率低，容易出错。集控运行技术依靠先进的计算机网络和通信技术，把各个子系统的运行数据及时传送到中央控制室，操作人员通过统一的监控界面，可以对发电机组各部分的运行情况，如锅炉燃烧状况、汽轮机转速与负荷、电气系统电压与电流等进行全方位的了解。该种集约化管理模式在提高生产效率上优势明显。一方面，通过中央控制系统来统调各个子系统，根据电网负荷变化情况以及机组运行状况，随时调整各个单元参数配置，实现全局性能的最佳分配；另一方面，有利于生产工艺流程的标准化、规范化发展，作业人员依照统一的操作规程来执行，减少人为干预产生的影响，从而大幅度提高生产的稳定性、可靠性水平<sup>[3]</sup>。集中管理模式具有明显的节约成本的优势。一方面，它把各个子系统的控制权集中起来，减少了多余的岗位需求，降低了人力成本；另一方面，统一的监管和运维体系减少了设备重复购买、维修的成本，提高了资产的利用率。在此基础上，该模式为落实节能环保政策提供了有力的支持，通过改进运营策略来达到能耗降低、成本缩减的目的。

### 2.2 精准控制优势

集控运行技术依靠高精度的传感器和先进的控制算法，对发电机组的主要参数进行精准的检测和动态调节。传感器及时获取锅炉温度、压力、汽轮机振动、电气特性等主要指标，并迅速把数据传给控制系统。该系统按照预设模型和智能算法对采集信息进行综合分析处理后，产生出有针对性的控制指令，从而改善设备的运行性能，保证设备一直工作在最佳的工作区内。精确控制技术对提高电力品质有重大的战略意义。尤其是发电环节，电压稳定程度、频率准确性是评价

电能质量好坏的重要指标。集控运行模式依靠改善励磁系统与调速系统之间协同调控的机制，可以对输出功率实施实时动态的调节，保证其一直处在设定的范围内，进而为终端用户提供高质量的供电服务保障<sup>[4]</sup>。精确控制技术对于节能降耗有明显的效果。通过改善锅炉燃烧参数，使燃料和助燃空气的最佳配比得以实现，大大减少了不完全燃烧造成的能量损失；对汽轮机通流部分进行精细管理，有效地减少了蒸汽流动时的内部泄漏，提高了设备的运行效率；对电气系统采取精确控制策略，避免无功功率波动造成的能量损耗，提高电网传输效率。这些措施的共同作用，使火力发电厂总的能耗降低，能源利用的综合效益也随之提高。

### 2.3 安全保障优势

故障预警与应急处置是集控运行技术支持下保证发电机组安全、稳定运行的重点。该系统对发电设备运行过程中产生的实时参数和状态信息进行采集，利用先进的数据挖掘算法以及智能化的诊断模型，对风险隐患进行快速判定并发出报警信号。对汽轮机振动指标进行深入分析，判断转子、轴承的工作状态，从而对事故前期进行有针对性的保养维护，防止故障的发生。集控运行系统具有快速反应、智能处理的功能。一旦发电机组出现故障，该平台就会立即判断出故障的种类以及故障的具体位置，然后自动执行相应的保护措施，比如切断相关设备的供电、改变机组的运行状态等，防止事故的进一步扩大，保证机组的安全稳定运行。另外，该系统还具有实时数据采集的功能，在故障发生时可以对各种参数以及相关内容进行全方位的记录，为之后的深入分析打下坚实的基础，从而加快恢复正常生产的速度。

### 2.4 数据整合与分析优势

集控运行系统可以对发电机组运行过程中产生的大量数据进行整合，将来自不同的子系统、设备的数据统一成标准格式并进行存储，消除了各个数据之间存在的壁垒，实现了各个系统之间的数据交流。经过数据整合，操作人员和其他相关人员可以从宏观、微观等各个角度全方位、一体化地获得发电机组的运行情况。全面有效的数据收集给相关部门作出更加科学的决策提供数据支持。数据分析对提高运营效率、预测设备寿命有明显的作用。采用先进的数据分析工具来剖析发电机组以前运行的数据，找出影响其性能的关键因素，再据此设计出有针对性的改善方案。从各种情况下能耗分布中找到最经济的运行时间段，达到能源最佳利用的效果；根据长时间检测数据建立样本，创建设备服役期评价模型，预测可能发生的故障节点以及设备

剩余使用寿命,给维护检修提供更具体的决策依据,提高发电设备的效用时间,控制管理及改革成本<sup>[5]</sup>。

### 3 火力发电厂发电机组集控运行技术应用优化策略

#### 3.1 技术优化策略

硬件可靠性是集控运行技术稳定性的保障。冗余架构被认为是提高系统可靠性的重要方式,尤其适合于服务器和控制器等核心部件。双机热备或者集群计划的应用最为明显,在主要节点出现故障的时候,备用单元可以立即接手并承担所有的功能需求,保证系统可以持续、顺畅地运行。在此期间要建立有效的计划性巡查制度,对核心部件进行周期性的清扫、校验、校准等工作,并及时更换老化失效的零件。软件稳定性影响到集控运行系统的功能实现。一方面要选择成熟稳定的系统、监控软件,进行严格的软件兼容性测试,防止由于软件冲突造成系统崩溃;另一方面要加强软件更新、升级的管理,在更新前做好充分测试、验证工作,保证软件更新后稳定可靠。优化数据传输、处理算法对于提高信息的实时性、准确性有很重要的作用。通信上采用高效的通信技术方案,创建合理的网络架构,减小通信延迟风险和包丢失概率。光纤技术由于带宽大、衰减少,被看作是取代传统铜缆的优选方案,它明显改善了信号的传递情况。在数据分析方面,采用先进的大数据挖掘工具做动态分析,改良核心运算模型,减小运算负荷,保证整体运作的效率和质量。

#### 3.2 人员培训与管理策略

为运行人员构建专门的培训系统,对提升其岗位胜任力、综合素养有重大意义。课程内容应包含集控系统原理分析、操作规范解释、典型故障诊断和处理等内容,采用理论讲授、实际操作、虚拟仿真实验等形式完成教学目标。同时,提倡员工参加行业技术研讨会、持续教育活动,实现知识更新、技术迭代,促使员工的能力素质得到全方位的改善和职业发展动态地得到优化<sup>[6]</sup>。建立科学的人员考核与激励机制,可以调动运行人员的积极性。建立详细的考核指标体系,对运行人员的工作业绩、技能水平、工作态度等开展考核,依据考核结果实行奖励或者惩罚。对优秀的运行人员进行物质奖励并给予晋升机会,对考核不合格的运行人员进行培训再教育,直到合格为止。

#### 3.3 管理体制创新策略

根据集控运作模式建立现代管理体系,明确各个职能部门的功能定位以及相互协作的方式,打破传统部门之间的壁垒,形成以集控运作为中心的综合协调平台。整合生产调度、设备维护、安全监管等各个职

能模块,明确各部门在集控运行中要承担的职能范围,加强各部门间的横向沟通合作,提高系统整体运作效率和管理水平。采用现代管理理论与方法论,精益生产模式、六西格玛质量管理工具等,改善组织运营效率、优化决策过程。创建精益管理体系,重新构建业务流程,去除无用环节,实现资源的最佳利用;依靠标准化作业程序大幅度提高工作效率;利用六西格玛分析框架,对集控系统潜在的缺陷进行分析,准确找到问题所在,制定科学的对策,大大改善系统整体运行质量。

#### 3.4 安全防护策略

加强网络安全防护对集控运行系统的安全起到很好的保障作用。使用防火墙、入侵检测、加密技术等技术手段来防止外部网络攻击和非法入侵。定期更新、升级网络安全设备,及时修补安全漏洞,加强内部人员网络安全教育,提高安全意识,防止内部人员违规操作引发内部系统安全事件。创建数据备份及应急恢复体系,防止出现信息丢失或者泄露的风险。按要求对集控运行系统核心数据进行全面备份,并将备份数据存放在高安全防护水平、高可靠保障的专用存储设备里。制订周全的恢复计划,在出现异常情况造成数据损坏的时候可以迅速、准确地恢复数据,保证业务连续性不被影响。

### 4 结束语

火力发电厂发电机组集控运行技术具有集中管理、精准控制、安全保障、数据整合与分析等很多优点,在提高发电机组运行效率和可靠性方面起着非常重要的作用。但是要充分发挥发电机组集控运行技术的优势,还需要不断改进技术的应用。通过技术改进来提高硬件的可靠性和软件的稳定性,重视人员培训和管理来提高运行人员的素质,更新管理体制促进部门之间的协调,重视安全防护保障系统安全稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 涂沛亮.火力发电厂发电机组集控运行技术[J].通讯世界,2024,31(04):97-99.
- [2] 曲延东.探讨火力发电厂发电机组集控运行技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(03):143-146.
- [3] 胡正.探析火电厂中发电机组集控运行技术的改善措施[J].技术与市场,2021,28(04):89-90.
- [4] 文发红.火力发电厂发电机组集控运行技术应用研究[J].光源与照明,2022(06):139-141.
- [5] 马海军.火力发电厂发电机组集控运行技术探讨[J].黑龙江科学,2021,12(24):139-140.
- [6] 袁明玉,张岩.火力发电厂发电机组集控运行技术研究[J].电站系统工程,2021,37(03):65-66.

# 垃圾发电控制系统人机界面设计与优化研究

任鸿儒

(太原环晋再生能源有限公司, 山西 太原 030100)

**摘要** 垃圾发电作为融合环保治理与能源回收的绿色产业, 控制系统的运行效能直接关联生产安全、环保达标质量与能源利用效率。人机界面作为操作人员与控制系统交互的核心载体, 是保障垃圾焚烧、热能转换、烟气处理等复杂流程稳定可控的关键环节。本文针对现有垃圾发电人机界面存在的信息呈现杂乱、操作流程繁琐、故障预警滞后等问题, 结合垃圾发电生产工艺特性, 从信息层级优化、操作流程简化、交互反馈强化、故障预警可视化四个维度构建人机界面优化设计方案, 以期为垃圾发电行业的智慧化升级提供技术参考, 进而促进工业控制系统的人机界面优化。通过实际应用测试表明, 优化后的人机界面可显著降低操作人员劳动强度, 将故障响应时间缩短 30% 以上, 有效提升了系统运行稳定性与环保指标达标率。

**关键词** 垃圾发电; 控制系统; 人机界面; 设计优化; 智慧化运营

中图分类号: TM621

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.011

## 0 引言

垃圾发电已成为我国“双碳”目标下重要的环保能源产业, 既实现了生活垃圾的减量化、无害化处理, 又能回收热能转化为电能, 兼具生态与经济双重效益。控制系统作为垃圾发电站的“中枢神经”, 统筹协调焚烧炉运行、余热锅炉换热、烟气净化处理等多环节联动, 而人机界面则是操作人员实现流程监控、参数调节、故障处置的直接窗口。当前多数垃圾发电站的人机界面存在信息过载、关键指标不突出、操作逻辑复杂等问题, 导致操作人员易疲劳、误操作风险增加, 故障响应不及时, 制约了生产效率与环保治理效果。基于此, 本文立足垃圾发电生产工艺实际, 聚焦人机界面的设计与优化, 旨在通过科学的界面设计降低操作难度、提升交互效率, 为垃圾发电控制系统的高效运行提供保障。

## 1 垃圾发电控制系统人机界面的设计需求与核心要素

### 1.1 设计需求分析

垃圾发电生产流程涉及多环节协同, 从垃圾进料、焚烧控制、热能转换到烟气净化、发电并网, 每个环节均需实时监控关键参数, 操作人员需通过人机界面完成参数设定、状态调整、故障处理等一系列操作, 其设计需求集中体现在三个方面。一是实时性需求。在垃圾焚烧过程中, 炉膛温度、压力、氧气浓度这些

参数变化会直接带进焚烧效率与环保指标, 烟气里  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等污染物浓度得实时监测并给出反馈, 人机界面要在 1 秒内同步刷新关键数据, 保证操作人员可以及时掌握系统运行情况, 避免因数据延迟导致参数调控不够及时<sup>[1]</sup>。二是准确性需求。界面呈现的参数数据需精准无误, 操作指令的传达要做到零延迟, 避免因信息失真或者指令偏差带来焚烧不充分、污染物超标排放等问题。尤其在烟气处理模块, 环保指标数据的准确性直接关联到是否符合国家排放标准, 是界面设计必须坚持的核心底线。三是易用性需求。垃圾发电控制系统操作涉及多模块联动, 操作人员需在高强度工作环境下快速完成复杂操作, 界面设计需贴合操作人员的认知习惯与操作逻辑, 简化冗余流程, 降低学习与操作成本, 减少误操作概率, 让操作人员在紧张工作中能高效完成各项操作。

### 1.2 核心设计要素

基于上述需求, 垃圾发电人机界面的核心设计要素包括信息呈现、操作流程、交互反馈与安全防护四大类。信息呈现要素要覆盖生产运行参数、设备状态、环保指标、故障报警等核心内容, 根据重要程度划分层级, 保证关键信息优先展示, 避免信息堆砌造成视觉混乱; 操作流程要素要围绕垃圾发电的工艺逻辑, 设计简洁流畅的操作路径<sup>[2]</sup>。实现参数调节、模式切换、设备启停等功能的便捷触发, 减少跨页面切换的烦躁

作者简介: 任鸿儒 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

步骤；交互反馈要素要针对操作人员的每一项操作给出清晰回应，包括操作成功提示、参数变化动态显示、异常状态预警等，让操作人员实时知晓操作效果；安全防护要素需设置操作权限分级、关键操作两次确认、紧急停机快捷键等功能，防范误操作引发的生产安全风险，为系统稳定运行筑牢防线。

## 2 垃圾发电人机界面的应用现状与突出问题

### 2.1 信息呈现杂乱，关键指标辨识度低

现在多数垃圾发电人机界面缺少科学的信息层级划分，将生产参数、设备状态、环保数据、故障信息等全部堆砌在同一界面，未形成明确的视觉重点。例如：部分界面将炉膛温度、蒸汽压力等关键运行参数与设备运行时长、历史数据统计等次要信息混排，而且采用统一的字体与颜色呈现，导致操作人员要花很多时间查找核心数据，无法快速捕捉关键信息。在烟气处理模块， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、颗粒物等环保指标与其他辅助参数并列显示，无明显视觉区分，操作人员难以快速判断污染物排放是否达标，增加了环保管控的难度，甚至可能因未能及时发现超标趋势导致违规排放。

### 2.2 操作流程烦琐，多模块协同效率低

垃圾发电的部分关键操作需要跨多个模块完成，现有界面的操作流程设计缺乏连贯性，操作人员要在不同页面间反复切换，导致操作步骤冗长、协同效率低下。以焚烧炉启停操作为例，部分界面要求操作人员依次在“焚烧控制”“燃料供给”“通风调节”三个独立页面完成多项操作，而且没有流程指引，不仅增加了操作难度，还容易出现步骤遗漏或顺序错误。另外，部分界面的操作逻辑与操作人员的认知习惯不符，比如将常用的参数调节功能藏在次级菜单里，常用操作要多次点击才能触发，影响了操作便捷性，降低了整体工作效率。

### 2.3 故障预警滞后，预警信息不明确

故障预警是人机界面保障生产安全的重要功能，但现有界面普遍存在预警滞后与信息模糊的问题，部分界面在设备出现异常时，要等待3~5秒才能发出预警提示，错过最佳处置时机，可能导致小故障扩大为生产事故。预警信息多以文字形式简单呈现，没有明确故障位置、影响范围及处置建议，例如仅提示“烟气处理异常”，没有说明是脱硫塔故障还是脱硝系统异常，操作人员要逐一排查才能定位问题，延长了故障处置时间。此外，多个故障同时发生时，预警信息叠加显示，无优先级区分，导致操作人员无法快速判断核心故障，陷入处置混乱。

## 3 垃圾发电控制系统人机界面的优化设计策略

### 3.1 信息呈现优化：层级化分类与可视化展示

依照垃圾发电工艺的特质与信息的重要程度，构建“核心指标—关键参数—辅助信息”三个层级的信息展示结构，让界面信息的排列更有条理<sup>[3]</sup>，符合操作人员的认知习惯。将炉膛温度、蒸汽压力、烟气污染物浓度这些核心指标放在界面顶部一整行，用大号加粗的字体、对比度高的颜色（像红色表示超标数据、绿色表示正常数据、黄色表示临界数据）来突出显示，保证操作人员一眼就能看到关键信息，无需在海量数据中筛选。将设备运行状态、燃料供给量、发电量这些关键参数按照“焚烧系统”“热能转换系统”“烟气处理系统”“发电并网系统”进行分类摆放，采用卡片式的布局方式，每个模块都设置独立的视觉区域，配上不同的底色加以区分，让各个系统的状态能够一目了然。将历史数据统计、设备维护记录这类辅助信息隐藏到次级菜单里，通过点击模块图标来调取，避免主界面信息过多，保持界面整洁有序。

借助多样化的可视化图表来提升数据的可读性，让抽象的数据变得更直观易懂。例如：用折线图动态展示炉膛温度、蒸汽压力的变化走向，清晰呈现参数的波动规律；用柱状图对比不同时间段的污染物排放浓度，方便分析环保指标的变化情况；用环形图展示能源回收效率的占比，直观反映能源利用的效果。在烟气处理模块，设计污染物浓度实时监控仪表盘，仪表盘以国家排放标准为基准线，当数据接近超标阈值时，指针颜色从绿色渐变至黄色，超标时直接变为红色，同时仪表盘边缘闪烁提示，让操作人员快速判断环保指标状态，及时采取调控措施。为进一步强化关键信息的辨识度，对不同类型的参数采用有差异的视觉编码。例如：温度类参数配上温度计图标，压力类参数配上压力表图标，环保指标参数配上环保标识图标，通过图标与数据的结合，降低信息识别的成本。同时，设置信息刷新频率的分级，核心指标每一秒刷新一回，关键参数每两秒刷新一回，辅助信息每五秒刷新一回，在保证信息实时性的同时，减少界面闪烁对操作人员视觉的干扰。

### 3.2 操作流程优化：简化路径与协同联动

围绕垃圾发电的核心操作场景，梳理关键流程并进行简化重构<sup>[4]</sup>，让操作路径更贴合工艺逻辑与操作人员的操作习惯。针对焚烧炉启停、烟气处理模式切换等复杂操作，设计“流程向导”功能，在界面顶部显示操作步骤与进度条，操作人员按向导提示依次完

成操作，步骤完成后自动跳转至下一页，无需手动切换，避免操作遗漏。每个步骤配备简短的操作说明与注意事项，悬浮显示在页面右侧，帮助操作人员准确完成操作，降低学习成本。将常用的参数调节、设备状态查询、故障记录查看等功能设置为快捷图标，置于界面右侧固定工具栏，支持操作人员自定义添加常用功能，实现“一键触发”，减少多级菜单点击。例如：将“紧急停机”“环保指标快速查看”“参数重置”等高频操作设置为快捷键，操作人员无需进入深层菜单即可快速调用，提升操作效率。

建立多模块协同联动机制，优化跨模块操作流程，打破不同系统间的操作壁垒。例如：在调整焚烧炉进料量的时候，界面自动关联显示炉膛温度、氧气浓度的实时变化曲线，操作人员可以在同一个页面完成参数调整与效果观察，不需要在“焚烧控制”与“参数监测”页面之间来回切换，当环保指标快要超标时，界面自动弹出“参数优化建议”窗口，提示操作人员调整脱硫脱硝系统运行参数的具体范围，同时给出“一键优化”选项，操作人员可以直接触发优化指令，不需要手动切换到烟气处理模块逐项调节，提升协同操作的效率。优化操作逻辑的设计，让操作流程更贴近操作人员的认知习惯。例如：将设备启停、模式切换这些关键操作集中布置在界面左侧，参数调节控件靠近对应的数据显示区域，实现“所见即所得”的操作体验，对于关联性强的操作，采用组合式控件设计，比如将烟气处理系统的脱硫、脱硝参数调节控件整合在同一面板，减少操作页面切换的次数，让多参数协同调节更便捷。

### 3.3 交互反馈优化：即时响应与精准提示

加强人机界面交互反馈的运作机制，保证操作人员每一项操作都能获得及时、明确的反馈，提升操作的确定性<sup>[5]</sup>。操作指令发出以后，界面在 0.5 秒内展示“操作执行中”动态标识（比如转动的加载图标），操作顺利完成后弹出绿色勾选确认提示，持续 2 秒后自己消失；操作不成功则显示红色错误信息，并且详细解释失败原因（如“参数超出设定范围，允许调节区间为 800 ~ 1 200 °C”“设备处于锁定状态，请解锁后操作”），帮助操作人员迅速找到问题。对于参数调节这一动作，采用滑块式调节控件搭配数值输入框，支持两种调节方式自由切换，拖动滑块时马上显示当前数值与调整幅度，松开后自动保存并刷新数据，直接呈现调节效果；对于需要精确设定的参数，可以直接在输入框中填入数值，系统自动检查数值有效性，无效数值会被标红提示，防止输入出错。参数调

整过后，相关关联参数的变化趋势借助动态曲线实时展示，让操作人员直接了解参数调整带来的连锁影响。

优化故障预警功能，提升预警的及时性与精准度，为故障处置提供有力支持。建立故障分级预警机制，将故障分为紧急故障（如炉膛熄火、环保指标超标）、重要故障（如设备异常运行）、一般故障（如辅助系统轻微异常），分别采用红色闪烁弹窗、黄色固定提示条、蓝色文字提示三种方式呈现。紧急故障预警自动置顶显示，遮挡部分非核心操作区域，优先提醒操作人员处置；重要故障提示条固定在界面顶部，持续显示至故障解除；一般故障以文字形式在界面右下角滚动显示，不影响主要操作。每个预警信息附带故障位置示意图、影响范围说明及标准化处置流程，让操作人员快速掌握故障关键信息。例如：“脱硫塔循环泵故障”预警弹出时，界面右侧显示循环泵在系统中的位置图标，标注“可能导致 SO<sub>2</sub> 浓度升高，影响环保达标”，并列出了“1. 启动备用泵；2. 检查故障泵运行状态；3. 联系维修人员检修”的标准化处置步骤，步骤前设置勾选框，操作人员完成一项勾选一项，避免处置遗漏。同时，预警信息关联相关操作入口，点击“启动备用泵”即可直接触发操作指令，无需手动查找对应功能模块，缩短故障响应时间。

## 4 结束语

人机界面作为垃圾发电控制系统的核心交互载体，其设计合理性直接影响生产安全、环保治理与能源利用效率。本文针对现有垃圾发电人机界面存在的信息杂乱、流程烦琐、预警滞后、适配性不足等问题，提出优化设计策略，优化后的界面通过科学的信息排布、流畅的操作流程、精准的交互反馈与灵活的场景适配，有效降低了操作人员的劳动强度，提升了操作效率与准确性，缩短了故障响应时间，促进了生产安全与环保达标。

### 参考文献：

- [1] 吕晓娟,李玉娜,梁东义.垃圾焚烧发电自动控制系统的研究与实现[J].内江科技,2022,43(03):69-70,42.
- [2] 郑远强.垃圾分类智能投、收及利用系统:CN201410739048.4[P].2015-03-25.
- [3] 吕奕,张开利,关宏强,等.基于无人机的垃圾捡拾装置设计[J].漫科学(科学教育),2024(04):248-250.
- [4] 王傲寒.垃圾焚烧炉控制系统的设计与实现[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [5] 胡鼎雄.垃圾焚烧炉控制系统纳入DCS一体化的应用[J].中国仪器仪表,2025(05):66-68.

# 电力供应链实时调配智能协同模式及优化路径研究

唐山<sup>1</sup>, 蒋似俊<sup>2\*</sup>, 滕中奇<sup>3</sup>, 杨林波<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司物资公司, 四川 成都 610052;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610095;

3. 国网信产四川中电启明星信息技术有限公司, 四川 成都 610213)

**摘要** 电力供应链实时调配存在需求波动厉害、协同效率低下、应急反应滞后等突出难题, 本研究基于物联网感知、大数据分析以及人工智能决策的智能协同调配模式, 拟定供需动态匹配模型与多目标优化决策模型, 提出技术赋能、流程重构、机制创新三个维度的优化路径, 以期为新型电力系统建设提供理论参考。研究表明, 智能协同模式能明显缩短响应时段、降低库存成本、增强供应链的抗干扰能力。

**关键词** 电力供应链; 智能协同; 实时调配; 多主体决策

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.012

## 0 引言

新型电力系统建设把高效、韧性与低碳目标作为聚焦点, 面对能源结构调整与负荷波动加剧的实际困境, 其对供应链调配的精确性、时间效率和协同合作提出了更高要求, 传统模式面临信息孤岛、决策迟缓及协同能力欠缺等局限, 已难以匹配当前发展需求。智能协同调配凭借感知层、网络层、平台层及应用层的融合协同, 利用数字技术实现物流流、信息流及资金流的高效整合与动态协同。本文针对理论框架、模型构建、优化路径以及应用实践四个层面开展系统研究, 旨在探索电力供应链数字化转型的创新模式与可操作实施路径, 为新型电力系统安全稳定运行提供参考。

## 1 电力供应链智能协同调配的理论及技术框架

### 1.1 供应链协同理论与实时调配机制

电力供应链协同理论以资源整合与信息共享为核心, 强调供应商、物流商、电力企业及终端用户的动态联动, 通过打破各主体间的协作壁垒, 实现供应链各环节的高效衔接与价值共创。传统调配模式因信息传递时滞、决策链条冗长及数据孤岛问题, 导致响应周期延长, 难以适配新型电力系统下负荷波动加剧与应急保障常态化的现实需求。实时调配机制通过构建物流流与信息流及资金流三维协同体系, 依托物联网

终端采集多源数据, 经边缘计算预处理后上传云端决策平台, 系统按预设规则触发自动调配指令使物资配置从被动响应转向主动预测, 显著缩短全流程时长<sup>[1]</sup>。

### 1.2 智能协同的关键技术体系

智能协同调配依赖物联网感知、大数据分析及人工智能决策三大技术的深度融合。物联网通过 RFID 标签、GPS 定位器等设备实现物资全生命周期追踪, 感知层数据经 5G 网络传输至边缘计算节点完成预处理。大数据分析运用时间序列模型预测负荷需求, 借助算法挖掘供需匹配关系。人工智能决策层构建路径优化与库存控制策略, 系统依据实时数据动态调整配送方案。三大技术协同打破数据壁垒, 实现跨环节数据实时互通, 推动供应链从经验驱动转向数据驱动, 决策精度与响应效率双重提升, 运营成本大幅下降, 为电力企业数字化转型提供稳定且高效的核心技术支撑。

### 1.3 四层技术架构设计

电力供应链智能调配平台采用感知层、网络层、平台层及应用层的四层架构, 感知层部署车载终端、仓储传感器等物联网设备, 实时采集物资状态与运输过程, 分钟级采集频率满足动态调配需求, 网络层构建专用通信通道, 借助边缘计算在数据源端完成预处理, 既降低云端压力又提升响应速度。平台层建立统

**作者简介:** 唐山(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 供应链运营、数智化转型、风险防控等。

**\*通信作者:** 蒋似俊(1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 采购与供应链标准化、数智化、需求计划等。E-mail: jiangsj1419@sc.sgcc.com.cn

一数据中台整合多系统异构数据并经清洗标准化形成数据资产，应用层开发智能调度、可视化监控等核心业务模块，支持多角色协同操作，该架构通过分层解耦实现灵活扩展，模块化设计便于功能迭代，同时具备高兼容性与安全防护能力，故而能确保平台长期稳定运行（见图 1）<sup>[2]</sup>。

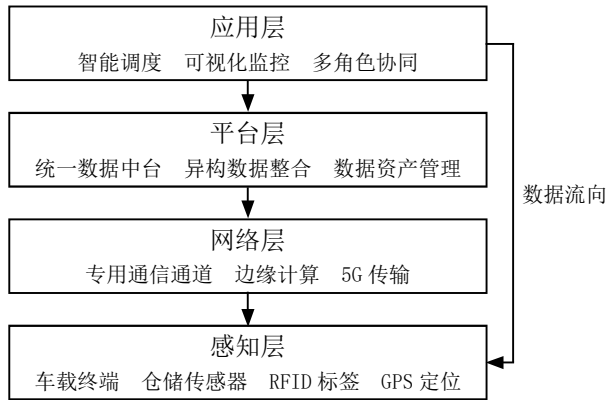


图 1 电力供应链智能调配四层技术架构

## 2 基于多主体协同的实时调配模型构建

### 2.1 供需动态匹配与预测模型

供需动态匹配模型通过时间序列分解与机器学习算法预测物资需求，实现库存水平与配送计划的精准控制。模型采用 SARIMA 模型捕捉电力负荷的季节性波动特征，利用 LSTM 神经网络学习历史消耗数据中的非线性规律，预测精度较传统方法提升 18%，需求预测公式表示为：

$$D_{t+h} = f(L_t, W_t, H_t, S_{t-1:t-k}) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式 (1) 中， $D_{t+h}$  体现了未来  $h$  期的需求量， $L_t$  为当前负荷水平， $W_t$  为天气因素， $H_t$  为历史同期的数据， $S_{t-1:t-k}$  为前面  $k$  期库存的状态， $\varepsilon_t$  为随机误差项，系统根据预测得出的结果生成物资需求清单，与供应商库存数据库实时比对，触发自动补货流程。动态匹配机制设置了安全库存阈值以及最大库存上限，当预测的需求量超出安全库存时，启动应急采购程序以维持供应连续性，如表 1 呈现的预测模型性能对比，说明了该方法的有效性<sup>[3]</sup>。

表 1 不同预测模型性能对比

预测方法	平均绝对误差 MAE	均方根误差 RMSE	预测准确率	响应时间
传统经验法	245.6	312.8	76.3%	2 小时
ARIMA 模型	187.3	241.5	82.7%	45 分钟
LSTM 神经网络	156.2	198.6	89.1%	15 分钟
集成预测模型	142.8	179.4	91.5%	12 分钟

### 2.2 多目标优化决策模型

多目标优化决策模型全面考量成本最小、时效最大、风险最低这三个维度，构建帕累托最优解集合为管理者决策提供支撑，模型目标函数设置成运输成本  $C$ 、配送时间  $T$  以及缺货风险  $R$  的加权组合，约束条件涉及车辆载重的限定、道路通行能力以及仓储容量上限等实际要素，优化问题写成：

$$\begin{aligned} \min Z &= \alpha C + \beta T + \gamma R \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n q_i x_{ij} &\leq Q_j \\ t_{ij} &\leq T_{\max} \\ I_i &\geq I_{\min} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为权重系数， $q_i$  为物资  $i$  的派送数量， $x_{ij}$  为车辆  $j$  的装载决策变量， $Q_j$  为车辆的承载重量， $t_{ij}$  为运输时间， $I_i$  为库存水平。系统采用经改进的粒子群算法求解该非线性规划问题，通过自适应惯性权重与动态邻域拓扑提高搜索成效，在 1000 次迭代的范围内收敛至近似最优解，决策结果借助可视化方式呈现，管理者根据实际情形调整权重系数，系统实时更新调配方案，实现人机协同决策（见图 2）<sup>[4]</sup>。

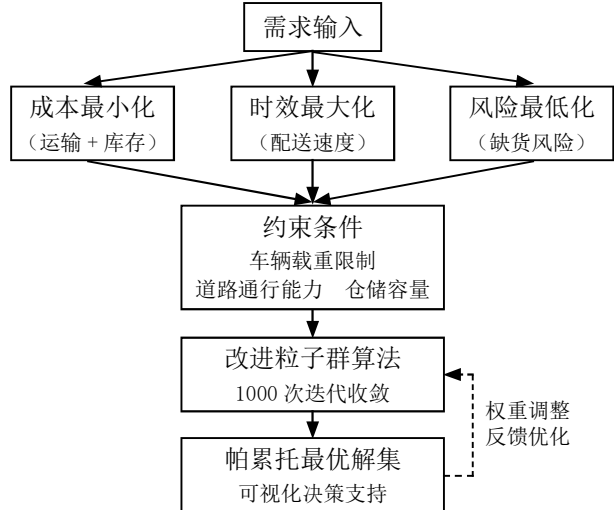


图 2 多目标优化决策流程

### 2.3 分布式协同决策机制

分布式协同决策机制打破传统集中式决策瓶颈，通过多主体协商实现资源优化配置，该机制将供应链各节点设为自主决策单元，各单元维护本地信息并交换必要数据，借助一致性算法达成全局协调，供应商、物流商及电力企业分别依据自身状态提供供货，运力方案及需求优先级。系统运用区块链记录各方承诺与执行情况，智能合约自动触发违约惩罚，确保协同透明可信，分布式决策大幅降低中心节点计算负载，应急场景下区域供电局可独立调配本地资源，跨区域协

同通过信息共享接口实现,决策响应速度提升至秒级,如表2所示的协同效率提升数据验证了该机制的实用价值。

表2 分布式协同决策效率提升

协同指标	集中式决策	分布式协同决策	提升幅度
决策响应时间	48分钟	3.5分钟	92.7%
跨区域调配成功率	73.2%	94.8%	29.5%
系统并发处理能力	120单/分钟	850单/分钟	608.3%
应急物资到位时长	38小时	18小时	52.6%

### 3 电力供应链智能调配的优化实施路径

#### 3.1 技术赋能与平台建设路径

技术赋能路径以自主可控平台建设为核心,通过国产化软硬件适配构建安全可靠的数字基础,平台采用微服务架构,各业务模块独立部署并经API网关调用,支持弹性扩容应对业务高峰,数据层引入国产分布式数据库,以主从复制与数据分片保障高可用性,异地多活灾备系统确保业务连续。平台集成GIS地图服务打造智能调度引擎,结合实时路况与车辆位置等自动规划最优路线并考虑多仓协同与车辆拼载,使车辆满载率从77%提升至97%,同时推进承运商数字化改造,提供终端设备与操作培训以降低转型阻力<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 业务流程重构与标准化路径

业务流程重构以线上化、标准化、自动化为导向,消除传统模式中的人工环节与信息断点,平台建立统一运单管理系统,物资需求由采购系统自动生成运单并推送至物流模块,承运商通过移动端接单后系统锁定运力资源,运输过程中车载终端实时上传位置信息,收货方扫码确认后自动触发运费结算流程。流程标准化涵盖运单格式、交接凭证及异常处理等全环节,制定统一数据接口规范便于异构系统对接,建立运输服务质量评价体系对承运商准时率、货损率与服务响应速度进行量化考核,自动化核算系统根据运输距离、货物重量及车辆类型等参数自动计算运费,避免人工核算误差并缩短结算周期,流程重构使运单处理效率提升60%,运费核算准确率达到99.8%,电力物资运单实现100%线上管控,为供应链精益化管理提供流程保障。

#### 3.3 协同机制创新与风险防控路径

协同机制创新通过利益共享与风险共担机制激励供应链各方深度参与,平台建立供应商分级管理体系,依据交付及时率与质量合格率等指标划分优先级,优质供应商享有订单优先分配权与账期优惠,同时构建

物流服务商联盟,成员共享运力与仓储资源,应急场景下跨区域调度车辆并按实际运输量收益分成。系统构建多层预警机制监测库存水平与物流时效等风险因素,指标超限即推送预警并启动备选方案。平台设定24小时应急值班制度与跨部门协调通道,自然灾害期间联动供电局开通绿色通道故而供应链韧性显著增强,应急物资配送成功率从传统模式的73%提升至95%以上。

### 4 应用实践与效果评估

南方电网赫兹运力平台的实践充分验证了电力供应链实时调配智能协同模式的应用价值,该平台自2021年上线后接入超2300家供应商,近2000家承运商及1.9万余台注册车辆,累计处理运单超400万单,深圳供电局应用后,2024年运单准时配送率达98%,车辆满载率提升至97%,平均运输距离缩短12%,燃油成本与碳排放量显著降低,应急场景中如2024年抗台风“摩羯”行动,物资运输时长压缩50%,异常问题解决时长大幅缩短。平台运营数据显示南方电网配送及时率,闭环率分别提升至98%、99%,物资周转率提高25%,库存持有成本降低18%,人工成本本年减少约600万元,成为电力物流数字化转型标杆,为新型电力系统建设提供了切实可行的实践支撑。

### 5 结束语

本文构建了电力供应链实时调配智能协同模式的理论框架与技术体系,建立了供需匹配与多目标优化模型,提出了技术赋能、流程重构及机制创新的三维优化路径,研究成果为电力企业供应链数字化转型提供了系统方案。未来应深化区块链与数字孪生等先进技术应用,探索跨区域、跨企业协同新范式,完善风险预警与应急响应机制,推动电力供应链向智能化、精益化及韧性化方向发展,为能源安全稳定供应提供坚实保障。

### 参考文献:

- [1] 赵劲志,李敏,马馨兰,等.基于物联网的电力物资供应链智能调配算法[J].自动化与仪器仪表,2023(11):312-315.
- [2] 姚拓中.基于粒子群优化和改进蚁群算法的电力供应链博弈分析[J].浙江电力,2022,41(09):80-85.
- [3] 傅涛,吴锋,杨乘浩.智能技术在供应链实时监控和物资调度中的应用[J].集成电路应用,2024,41(10):218-219.
- [4] 雷琳圆.新型电力系统下配网物资招投标全流程优化与智能协同管理研究[J].中国集体经济,2025(27):69-72.
- [5] 刘弘.基于招投标管理的路桥施工项目物资采购流程优化分析[J].现代工程科技,2025,04(05):177-180.

# 智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术分析

胡蝶, 徐金晖

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司, 湖北 黄冈 438000)

**摘要** 随着电力系统向智能化、数字化方向深度转型, 智能变电站已成为现代电力网络的核心组成部分, 其继电保护系统的可靠性直接决定了电力系统的安全稳定运行。二次回路作为继电保护系统的“神经网络”, 负责信号传输、指令执行等关键功能, 其故障易导致保护装置误动、拒动, 引发大面积停电等严重事故。本文基于智能变电站二次回路的数字化、网络化特性, 深入分析二次回路常见故障类型及成因, 系统探讨当前主流故障诊断技术, 包括传统诊断技术的优化应用与新型智能诊断技术的创新发展, 并结合实际应用场景对各类技术的优势与局限性进行对比研究, 针对现有诊断技术存在的不足, 提出未来技术发展方向, 以期提升智能变电站继电保护二次回路故障诊断的准确性、及时性和智能化水平提供参考。

**关键词** 智能变电站; 继电保护; 二次回路; 故障诊断; 数字化技术

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.013

## 0 引言

电力系统进行智能化转型之际, 智能变电站所具备的信息交互便捷、运行效率高、运维成本低等优势已成为电网建设主体。继电保护系统是保障设备安全、阻止故障蔓延的核心屏障, 二次回路成为其与一次设备的连接桥梁, 承担信号采集、指令传输等关键职责。与传统二次回路相比, 智能变电站二次回路通过光纤通信实现数字化传送, 但结构愈发复杂, 包含电子元件以及通信协议等多个方面, 故障更具隐蔽多元性, 诊断难度明显增大。二次回路故障引发继电保护异常事件屡有发生, 如光纤接头松动造成主变误跳闸、绝缘破损引起接地故障等, 极大地危害电网安全<sup>[1]</sup>。深入剖析二次回路故障诊断技术, 构建高效精准诊断体系, 对增强继电保护可靠性、保证电网稳定运行意义重大。本文以故障类型分析为切入点, 归纳主流诊断技术, 研究其应用状况与发展趋势, 为相关研究与工程实践提供借鉴。

## 1 智能变电站继电保护二次回路概述及常见故障类型

### 1.1 二次回路结构与特性

智能变电站继电保护二次回路以 IEC 61850 标准作为核心, 实现设备间的互通互联和信息共享, 其结

构主要由采样回路、控制回路、通信回路这三个模块构成。采样回路通过合并单元将一次设备模拟量信号变为数字量信号, 传递到保护装置; 控制回路履行接收保护装置跳闸、合闸指令的任务, 驱动一个设备实施相应行动; 通信回路采用的是光纤以太网, 实现合并单元、保护装置、智能终端等设备的数字化通信互通<sup>[2]</sup>。与传统二次回路相比, 智能变电站二次回路呈现以下特性: (1) 信号数字化, 避免模拟信号在传输期间出现衰减与干扰。(2) 连接实现网络化, 削减了电缆用量, 简化了线路敷设难度。(3) 功能综合化, 多种保护功能通过同一套二次回路达成, 增强了系统的灵活性。数字化、网络化的特点使二次回路故障不再只局限于传统的线路短路、接地之类的硬件故障, 增加了通信协议异常、软件缺陷、数据传输延迟等软件与通信方面的故障, 进一步加大了故障诊断难度。

### 1.2 常见故障类型及成因

参照运行实际, 智能变电站二次回路常见故障可归为四类: (1) 硬件回路故障, 包含线路与元件故障。线路故障主要为电缆绝缘破损、光纤接头污染松动、线路断路, 其中光纤接头故障高发, 由施工不规范、运维不当、环境湿度过大导致; 元件故障涉及合并单元、智能终端等损坏, 成因包括设备质量缺陷、长期过载运行及电磁干扰。(2) 通信故障, 因二次回路高度依

作者简介: 胡蝶 (1994-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 继电保护 / 电气工程及其自动化。

赖数字化通信成为主要故障类型,包含协议不兼容、报文丢失延迟、网络拥堵。协议不兼容源于不同厂家设备对 IEC 61850 标准落实差异,报文问题由光纤链路、交换机故障及传输距离过长引发;网络拥堵多见于倒闸操作等数据高峰场景。(3)软件故障,涉及保护装置、合并单元等软件系统,表现为程序漏洞、配置错误、数据异常。程序漏洞易致保护误动,配置错误多由人工操作失误引发,数据异常会使保护装置无法精准识别故障。(4)电磁干扰故障,变电站内高压设备等干扰源强度超阈值时,会导致合并单元采样失真、光纤通信报文传输异常等设备异常,成因与电磁环境复杂、设备抗干扰设计不足相关<sup>[3]</sup>。

## 2 智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术

### 2.1 传统故障诊断技术的优化应用

传统二次回路故障诊断技术主要凭借人工经验与常规检测工具,在智能变电站情景里,与数字化技术相结合,提升了诊断效率与准确性,发挥了重要功效。

#### 2.1.1 万用表与示波器检测技术

万用表能对二次回路电缆的通断、绝缘电阻进行检测,以及设备电源的电压与电流等参量,检查线路是否短路、接地以及电源有无故障等问题,在智能变电站中,万用表常同数字化监测数据联合运用,对实测参数同后台监控系统显示参数做对比,迅速锁定故障位置。示波器可用来检测合并单元输出的数字信号波形以及通信报文波形,检测信号有无失真、延迟等状况,为通信故障与采样故障的诊断提供依据,该技术操作简单、成本低廉,适用于初步排查故障,对复杂故障的诊断准确度不高。

#### 2.1.2 绝缘电阻测试技术

绝缘电阻测验是诊断二次回路绝缘故障的惯用方法,借助摇表等设备测定二次回路线路对地、线路间绝缘电阻值,若电阻值达不到规定阈值,那就说明有绝缘破损之类的故障,针对智能变电站二次回路数字化的特性,目前研发出了智能绝缘电阻测试仪,可以完成测试数据的数字化记录与远程传递,有利于二次检修人员对测试结果做分析对比,同时防止了传统测试方式中人工读数的差错。

#### 2.1.3 信号注入测试技术

该技术给二次回路添加模拟信号,观测保护装置、智能终端等设备的响应情形,检测回路状况是否正常,在智能变电站中,信号注入测试技术由传统模拟信号注入进阶为数字信号注入,运用专门的数字信号发生器,向合并单元或保护装置输入符合 IEC 61850 标准的数字报文,模拟多样故障状态中的信号,然后验证

二次回路信号传输链路及设备功能正常与否,对比传统模拟信号注入,数字信号注入更契合智能变电站的信号传输特征,诊断结论更精准<sup>[4]</sup>。

### 2.2 新型智能诊断技术

伴随人工智能、大数据、物联网等技术成长,智能变电站二次回路故障诊断采用一批新型智能诊断技术,大幅提高了诊断智能化水平。

#### 2.2.1 依托故障树及专家系统的诊断技术

故障树诊断技术凭借构建二次回路故障树,把顶事件(如保护装置误动)拆解成中间事件(如通信故障、采样故障)与底事件(如光纤接头松动、合并单元故障),运用逻辑推理判定故障缘由,专家系统会把二次检修人员的诊断经验变为规则库,结合二次回路实时运行的相关数据,经由推理机实现规则库匹配,完成故障的自动诊断。在智能变电站中,故障树与专家系统相融合,可以实现复杂故障的分层诊断,若保护装置产生拒动状况时,系统先借故障树确定可能故障模块,然后借助专家系统进一步查找具体故障点,此技术具备诊断逻辑清楚、可解释性较强的优点,构建规则库要靠专家经验,针对新型故障的适应性欠佳。

#### 2.2.2 基于机器学习的诊断技术

机器学习技术根据大量二次回路故障数据进行学习,构建出故障诊断模型,实现故障自动识别及定位。一般算法包括支持向量机、神经网络、随机森林等,对二次回路的电流、电压信号、通信报文特征、设备运行状态等相关数据进行采集,实施神经网络模型训练操作,训练好的模型可凭借实时监测数据判断是否有故障,还要展示故障类型以及故障位置。相较于传统诊断技术而言,机器学习技术拥有更强的自适应及泛化本领,可切实诊断隐蔽性故障及新型故障,但该技术对故障数据的数量及质量要求颇高,应构建完备的故障数据库,而且模型训练进程复杂,运维成本不低。

#### 2.2.3 基于大数据分析的诊断技术

智能变电站工作过程中会形成大量二次回路相关数据,涉及设备状态数据、通信报文数据、运维记录数据等各类数据,借助大数据分析的诊断技术整合、清洗、分析这些数据,找寻数据背后的关联规律,做到对故障的预判与诊断,经由剖析历史故障数据与设备运行参数间的关联关系,构建故障预警模式。在变电站运行维护时接收告警信号,再由二次检修人员前往现场或者远程判断故障,后续进行排查隐患以及处理缺陷相关工作;研究通信报文的时序数据,发现报文传输异常规律,查找通信回路里的潜在故障,该技术可提前察觉故障,减少故障发生频次,然而需有强大的数据存储与计算能力,数据安全和隐私保护问题应重点留意。

### 2.2.4 凭借物联网的在线监测及诊断技术

把物联网传感器装在二次回路关键节点,如温度传感器、振动传感器、绝缘传感器等,实时采集回路的温度、振动、绝缘状况等参数,通过无线通信网络把数据传至后台诊断系统,实时数据由后台系统实时分析,参数出现异常状况时,即刻发出报警讯息,并且结合别的监测数据找到故障点。该技术实现了故障在线实时监测诊断,改进了传统离线诊断的滞后情形,能极大地缩减故障排查时长。在光纤接头处安置温度传感器,可实时监测接头温度的变动,温度出现异常升高时,及时找出接头松动以及接触不良等故障。该技术要在变电站大量安设传感器,起始投资成本偏高,而传感器稳定性与可靠性直接决定了诊断结果。

## 3 故障诊断技术应用对比与优化建议

### 3.1 各类诊断技术应用对比

多种故障诊断技术在适用场景、诊断精度、成本投入等方面存在差异情况,具体对比情形如下:传统优化诊断技术(如万用表、示波器检测等)可用于故障初步排查及简单故障诊断,花销少、操作易,只是诊断精度不高、依靠人工经验;基于故障树与专家系统的诊断技术可分层诊断复杂故障,解释性较为显著,只是针对新型故障的适应力弱;基于机器学习的诊断技术可用于隐蔽性故障与新型故障的诊断,适应能力颇为强,但数据需求高、运维花费大;运用大数据分析的诊断技术适合故障预判及趋势分析,能实现预先警示,但要有强大的计算力量;物联网下的在线诊断技术适合实时故障监测与诊断,响应速度迅猛,可初期投入高。

在实际运用中,应参照智能变电站的规模、运行状态、故障特征等因素,选取合适的诊断技术组合,小型智能变电站可运用传统优化诊断技术与专家系统相结合的方法,保障诊断效果的同时降低成本;大型智能变电站可建立“物联网在线监测以及大数据分析和机器学习”的综合诊断架构,做到故障的实时监测、提前预报与精准判定<sup>[5]</sup>。

### 3.2 技术优化建议

为进一步提高智能变电站二次回路故障诊断技术应用效果,提出下列优化意见。

#### 3.2.1 加强多技术融合应用

将传统诊断技术和新型智能诊断技术有机整合,通过物联网传感器采集的实时数据给机器学习模型提供支撑,借助故障树分析对大数据分析方向进行优化,做到优势互补,提高诊断的精度及效率。

#### 3.2.2 建立完善的故障数据库

归整各厂家、各类智能变电站的二次回路故障数据,涵盖故障类别、故障特点、诊断流程、处理成效等,为机器学习、大数据分析等技术供应高质量数据支撑,同时促进故障数据的分享与沟通,提升行业整体诊断质量。

#### 3.2.3 提升设备标准化水平

针对现在不同厂家设备通信协议不契合、数据格式不统一等情况,进一步完备智能变电站二次回路相关标准,规范设备接口、通信协议及数据格式,降低故障诊断困难度,助力诊断技术通用化运用。

#### 3.2.4 提高二次检修人员素养

伴随诊断技术智能化进步,加大二次检修人员技术培训力度,对二次检修人员的专业技能设定更高要求,定期开展技术训练,提高二次检修人员对新型诊断设备、软件系统操作的水平,以及对复杂故障的分析判断水平。

## 4 结束语

智能变电站继电保护二次回路故障诊断对保障电力系统安全稳定运行至关重要。本文分析了智能变电站二次回路的结构特性及常见故障种类,系统剖析了传统优化诊断技术与新型智能诊断技术的应用态势。传统诊断技术在排查简单故障时作用无可替代,新型智能诊断技术大幅提高了故障诊断的智能化以及精准化水平,只是各类技术皆存在一定的制约。智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术未来会朝多技术融合、全生命周期监测、智能化决策方向发展,通过增强传统技术与新型技术的融合应用,构建健全的故障数据库及标准化体制,增强二次检修人员的专业水平,可使故障诊断的准确性与及时性进一步提升,缩减故障引发的损失。伴随 5G、边缘计算等技术的加入,故障诊断系统的实时性、可靠性能进一步增强,为智能变电站安全高效运行提供有力保障。

## 参考文献:

- [1] 蔡乙立,常莎.电网继电保护二次回路故障排查与处理方法研究[J].电工技术,2025(15):150-152.
- [2] 张庆余,陈文文.变电站继电保护二次回路检修技术研究[J].电气技术与经济,2025(07):184-186.
- [3] 郑健,王颜林.变电站二次回路及继电保护调试技术分析[J].电气技术与经济,2025(07):332-334.
- [4] 陈文文,孟晓东.变电站继电保护二次回路缺陷识别技术研究[J].电气技术与经济,2025(07):347-349.
- [5] 周杰,王祥.110kV智慧变电站二次回路故障定位技术[J].办公自动化,2025,30(14):16-18.

# 深基坑支护技术的关键挑战与创新解决方案

李 峰

(泗阳县住房和城乡建设局, 江苏 宿迁 223799)

**摘 要** 随着城市化向立体空间深化, 深基坑工程面临规模增大、环境复杂的严峻挑战。本文系统剖析了深基坑支护工程面临的四大核心挑战: 复杂的地质水文条件、严格的周边环境保护要求、工程的动态时空效应以及传统技术的局限性。构建了面向未来的三维创新解决方案体系, 包括“硬核”技术创新、“智慧”赋能系统与“绿色”可持续理念。通过沿海软土区临近地铁超深基坑和城市历史区狭长基坑两个典型案例, 验证了该综合体系的有效性, 以期对相关人士提供借鉴。

**关键词** 深基坑工程; 支护技术; 数字孪生; 智能感知; 绿色施工

**中图分类号**: TU753

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.014

## 0 引言

我国城市化逐渐从平面扩张转向立体深化, 地下空间开发成为必然选择。深基坑工程作为地下建设的先导与基础, 其规模、深度与环境复杂性持续升级, 已成为影响工程安全、工期、成本及周边环境的决定性环节。研究其核心挑战与创新解决方案, 对保障重大工程安全、推动行业技术升级、践行城市可持续发展具有紧迫的现实意义与重要的科学价值<sup>[1-2]</sup>。

在国际上, 研究侧重于精细化数值模拟、智能感知与风险预警。国内则在复杂条件下新型工法(如TRD、装配式支撑)的工程应用方面成果显著。然而, 现有研究多聚焦单一技术或局部问题, 缺乏对“地质—环境—施工—管理”系统性挑战的整合剖析, 以及“硬技术—智能化—绿色化”协同创新体系的构建, 这正是本文拟深入探讨的切入点<sup>[3-4]</sup>。

本文首先系统剖析深基坑工程面临的四大核心挑战; 其次, 从“硬核创新、智慧赋能、绿色理念”三个维度构建综合解决方案体系; 再次, 通过典型案例验证方案的有效性; 最后, 总结结论并展望未来。技术路线遵循“问题识别→理论构建→实证分析→总结展望”的逻辑闭环, 旨在为工程实践提供系统参考。

## 1 深基坑支护工程面临的核心挑战深度剖析

### 1.1 挑战一: 复杂性与不确定性极高的工程地质与水文地质条件

城市地质条件的复杂性与不确定性是深基坑工程面临的首要物理挑战。工程常穿越软土、深厚填土、

砂层等不良地层, 其强度低、压缩性高, 易引发支护结构位移过大甚至整体失稳。同时, 高承压水头、丰富的地下径流构成严峻的渗流与突涌风险, 降水不当极易导致基坑管涌、流砂乃至周边地面沉降与建(构)筑物开裂。此外, 岩溶、孤石、断裂带等不良地质体的存在, 使得勘探难以完全揭示, 给支护设计与施工带来极大的不确定性与潜在风险。

### 1.2 挑战二: 极度敏感与约束严格的周边环境保护要求

现代深基坑工程多位于建成区核心, 周边环境约束日益严苛, 控制要求从“保证自身安全”升级为“微扰动保护”。基坑紧邻运营地铁隧道、历史保护建筑、重要市政管线等生命线工程, 其允许变形值常以毫米计, 对支护体系的刚度和变形协调能力提出极限要求。狭窄的施工场地限制了大型设备作业与土方运输, 对施工组织与工艺选择构成严峻考验。环境保护已从技术问题上升为社会责任, 任何失误都可能造成巨大的经济损失与社会影响<sup>[5]</sup>。

### 1.3 挑战三: 基坑工程自身的动态时空效应

深基坑是一个典型的动态时变系统, 其力学行为表现出显著的时空效应。土体具有流变性, 基坑暴露时间越长, 土体蠕变导致的变形累积越显著。开挖顺序、支撑安装时机与预加力大小等施工工序直接影响着支护结构与土体的应力路径和重分布过程, 不当的施工步序可能诱发局部应力集中与过大变形。这种“过程决定结果”的特性, 使得设计必须与施工紧密结合, 对施工的精细化、信息化管控能力提出了极高要求。

**作者简介**: 李峰(1970-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 科技管理。

#### 1.4 挑战四：传统技术与管理模式局限性

面对上述新挑战，部分传统支护技术与管理模式已显露出局限性。例如：某些支护形式（如部分土钉墙、钢板桩）在超深、复杂地层中可能刚度不足或止水效果欠佳；依赖人工经验的粗放式施工管理，难以实现对复杂动态过程的精确控制与风险预判；资源消耗大、产生大量建筑垃圾的传统工艺，也与绿色低碳的发展理念相悖。因此，推动支护技术体系、施工工艺与项目管理模式的全面创新与升级，已成为行业发展的必然选择。

### 2 面向未来发展的创新解决方案体系

#### 2.1 解决方案一：支护结构体系与施工工艺的“硬核”创新

为应对复杂地质与严苛环境，支护结构与施工工艺逐渐向高强、高效、高精度方向进行“硬核”创新。在结构体系上，等厚度水泥土搅拌墙（TRD）工艺通过横向切割搅拌，可形成连续、均质、高强度的地下连续墙，有效解决深厚砂层、复杂夹层中的成墙与止水难题；装配式钢支撑系统凭借其标准化、快拆装、可施加高预应力的特点，能精确控制基坑变形，尤其适用于对位移敏感的核心城区。在工艺创新上，旋挖、铣槽等机械实现了坚硬地层的高效、低扰动成槽；超高压喷射注浆（RJP）等工艺则能在地下形成大直径、高强度的加固桩体，用于抢险加固与地基处理。这些“硬核”技术，共同构成了保障工程本体安全与效能的物理基石。

#### 2.2 解决方案二：基于数字孪生与智能感知的“智慧”赋能

针对工程的动态性与不确定性，以数字孪生与智能感知为核心的“智慧”技术正深度赋能基坑工程全流程。首先，通过物联网（IoT）技术，布设智能传感器网络，对支护结构内力、深层土体位移、地下水位、周边建筑物沉降等关键参数进行全天候、自动化、高频率的实时感知与传输。其次，基于 BIM/GIS 与监测数据，构建与物理基坑同步映射、虚实交互的数字孪生模型。该模型不仅能直观展示三维状态，更能通过内置的力学分析算法，实时反演土体参数、预测未来变形趋势，并对超出预警阈值的情况进行智能预警与风险溯源，实现了从“被动应对”到“主动预测、精准调控”的管理范式变革，是应对时空效应、保障环境安全的核心神经中枢。

#### 2.3 解决方案三：贯穿全生命周期的“绿色”可持续理念

为响应双碳目标与可持续发展要求，“绿色”理念必须贯穿于基坑工程的设计、施工、运维乃至拆除

的全生命周期。在设计阶段，优先选用可回收、可重复利用的支护材料（如可回收锚索、钢支撑），并优化方案以减少土方开挖量与混凝土用量。在施工阶段，推广低噪声、低振动、少排浆的静力施工工艺（如静压植桩），应用智能化降水与回灌一体化系统以保护地下水资源，并对建筑渣土进行现场资源化处理和再利用。在基坑服役期后，注重支护结构的拆除与场地生态恢复。这一理念将工程活动对资源环境的负面影响降至最低，推动基坑工程从传统的“消耗型”向未来的“环境友好与资源循环型”转型升级，实现了经济效益、社会效益与环境效益的统一。

### 3 案例分析

#### 3.1 案例一：沿海软土地区临近运营地铁的超深基坑项目

1. 项目概况：该项目位于沿海软土地区，基坑开挖深度达 28 m，一侧紧贴正在运营的城市地铁隧道，隧道结构允许变形控制值极为严格（ $\leq 10$  mm）。

2. 核心挑战：软土的高压缩性与低承载力、高地下水位的渗流风险，以及对邻近地铁隧道近乎“零扰动”的严格保护要求。

3. 创新解决方案应用：（1）“硬核”创新：采用“地下连续墙（厚 1.2 m）+ 四道装配式预应力钢支撑”作为支护体系。地下连续墙兼作止水帷幕，其高刚度为控制变形奠定基础；装配式钢支撑可实现快速安装与精准施加预应力，主动控制围护墙变形。坑内采用“钻孔灌注桩 + 三轴搅拌桩”进行地基加固，提高坑底土体稳定性。（2）“智慧”赋能：沿地铁隧道及基坑周边布设自动化监测网络，实时采集隧道收敛、沉降、支护结构变形与内力数据。数据实时传输至基于 BIM 的数字孪生平台，平台结合地质与施工参数进行动态反演与预测分析。当预测变形接近预警值时，系统自动报警，并指导施工方动态调整钢支撑的预应力值，实现“感知—预警—调控”的闭环管理。（3）“绿色”理念：采用可重复使用的装配式钢支撑，大幅减少混凝土消耗和建筑垃圾。对基坑降水进行精细化控制与回灌，最大限度减少地下水抽排对周边环境的影响。

（4）实施效果：项目全程地铁隧道实际最大变形控制在 7 mm 以内，远低于控制标准，确保了地铁的安全运营，验证了“硬核技术 + 智慧管控”体系在极端敏感环境下的卓越效能。

#### 3.2 案例二：城市历史风貌保护区内的狭长型深基坑项目

项目概况：项目位于城市核心历史风貌保护区，需在密集的里弄建筑群中开挖一个长约 150 m、宽仅

20 m、深 15 m 的狭长型基坑，周边多为砖木结构的百年历史建筑，对振动、沉降极度敏感。

**核心挑战：**施工场地极度狭窄、大型设备进场困难，历史建筑基础脆弱且对差异沉降容忍度极低，施工噪声与振动控制要求严格。

**创新解决方案应用：**（1）“硬核”创新：创新性地采用“静压植入式钢管桩+预应力锚索”的组合支护方案。静压植入工艺无振动、低噪声，完美契合保护区要求；钢管桩可兼作微型钢管桩基础，为后续基础施工提供便利。针对狭长基坑的“长边效应”，在长边中部增设了高强度对撑，有效控制了中部的最大位移。（2）“智慧”赋能：对每一栋临近历史建筑的关键结构部位（墙角、门窗过梁）布设高精度无线倾角计与裂缝计。监测数据与三维激光扫描获得的建筑点云模型结合，在数字孪生平台上直观展示建筑的毫米级形变与历史裂缝的发育情况。通过大数据分析，建立了施工活动（如土方开挖、锚索张拉）与建筑响应的关联模型，指导施工步序优化。（3）“绿色”理念：全程采用电驱动静压设备，实现施工现场的零排

放。开挖土方经筛分后，部分用于现场基坑肥槽回填，部分外运至指定场所进行资源化利用。支护用钢管桩在项目后期大部分可回收。（4）实施效果：在极其受限的场地内，成功完成了基坑开挖，周边历史建筑的最大沉降被控制在 5 mm 以内，未出现新增结构性裂缝，完美实现了工程建设与历史保护的平衡，展现了精细化、低影响施工技术的强大适应性。

通过案例对比分析表明（见表 1），未来深基坑工程需深度融合“硬核技术创新”（物理保障）、“智慧系统赋能”（决策大脑）与“绿色理念贯穿”（价值导向），以应对复杂挑战，实现安全、智能、可持续发展。

## 4 结论与展望

### 4.1 主要结论

深基坑工程的核心矛盾已从确保结构强度安全转向“变形控制”与“环境干扰最小化”。单一技术创新不足以应对综合挑战，必须构建“硬核技术创新”“智慧系统赋能”与“绿色理念贯穿”的三维协同体系。技术选择需高度场景化，如沿海项目侧重高刚度支护

表 1 案例对比分析表

对比维度	案例一	案例二	核心启示
核心矛盾	软土地质与地铁保护叠加	空间限制与建筑脆弱性	核心矛盾已转向“变形控制”与“环境干扰最小化”
技术侧重	高刚度体系（连续墙+钢支撑）	低扰动工艺（静压植入）	技术选择须与具体“地质-环境”约束精准匹配
智慧应用	对线性基础设施的预测性全局控制	对点状保护对象的精细化监测分析	智能感知与数字孪生是实现精细化管理的必备工具
绿色体现	材料可回收、水资源保护	施工零排放、资源原地利用	绿色理念需在项目策划阶段进行系统性设计

与全局变形控制，历史区项目侧重低扰动工艺与精细化监测。智能化与数字化是实现从经验驱动到数据驱动管理范式变革的必然路径，是对抗工程不确定性的有效手段。

### 4.2 未来展望

（1）技术融合：推动新材料、新工艺与智能化技术深度融合，研发兼具高强、轻质、可回收特性的新型支护构件，探索支护结构“本体智能化”。（2）智能决策：发展基于 AI 的智能决策支持系统，利用海量数据训练模型，实现方案智能优选、风险自动识别与自适应调控。（3）绿色低碳：建立全生命周期碳足迹核算标准，研发低能耗、高资源利用率工艺，推动支护结构模块化设计与循环利用。

### 参考文献：

- [1] 何书龙,黄绪龙.高层建筑施工中深基坑支护技术研究[J].新城建科技,2025,34(03):167-169.
- [2] 刘艳,宗允建.深基坑支护技术在建筑施工中的应用与创新探索[J].新城建科技,2025,34(01):159-161.
- [3] 杨斌.深基坑支护结构施工技术及其变形控制研究[J].砖瓦,2025(12):154-156,160.
- [4] 万小现.土体施工中的深基坑支护施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):122-124.
- [5] 杨明.高层建筑深基坑支护结构选型及变形监测技术研究[J].城市建设,2025(25):77-79.

# 高层建筑泵送混凝土施工裂缝控制技术分析

张伟华

(安徽笃行建设有限公司, 安徽 合肥 230001)

**摘要** 在高层建筑泵送混凝土施工操作阶段, 实现对裂缝的控制是保证结构安全及耐久性的关键技术环节。本文从材料、施工、环境及工程管理四个角度展开, 综合分析泵送混凝土裂缝的根源及控制技术要点, 提出对混凝土配合比设计加以优化、添加纤维类材料、改进施工的工艺规程、强化养护管理内容以及采取环境调控措施, 旨在有效减少裂缝的产生, 为提升工程管理科学性及精细程度提供有益参考。

**关键词** 高层建筑; 泵送混凝土; 施工裂缝; 预冷措施; 温度监控

中图分类号: TU755.7; TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.015

## 0 引言

随着建筑行业的快速发展, 泵送混凝土技术在现代高层建筑施工中得到了广泛应用, 在提升施工效率、施工质量方面起到了积极的促进作用。但高层建筑泵送混凝土施工技术应用时, 混凝土通常被设计为高流动性、高可塑性, 这导致在泵送过程中产生高水化热、高收缩变形等一系列问题, 对高层建筑施工质量产生不利影响。同时, 从高层建筑的特点来看, 由于高层建筑结构体量大、约束强、暴露面积广, 混凝土在硬化过程中极易产生温度应力、收缩应力等, 引发裂缝问题。对此, 在高层建筑施工过程中, 应注重对泵送混凝土施工裂缝做好针对性预防及控制, 以保证高层建筑混凝土施工质量, 更好地满足高层建筑实际需要。

## 1 高层建筑泵送混凝土裂缝类型及成因分析

### 1.1 高层建筑泵送混凝土裂缝类型概述

高层建筑泵送混凝土裂缝主要包括塑性收缩裂缝、温度裂缝、干燥收缩裂缝、沉缩裂缝等类型<sup>[1]</sup>。关于混凝土主要裂缝类型、特征如表 1 所示。

表 1 高层建筑泵送混凝土裂缝类型统计表

裂缝类型	发生阶段	典型特征	危害程度
塑性收缩裂缝	浇筑后至终凝前	不规则网状, 浅表裂缝	中等
温度裂缝	升温及降温期	深层裂缝, 方向性强	严重
干燥收缩裂缝	硬化后	表面细密龟裂	中等
沉缩裂缝	浇筑后至初凝前	沿钢筋或是变截面分布	中等至严重

作者简介: 张伟华 (1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 建筑工程施工。

### 1.2 混凝土裂缝成因分析

高层建筑泵送混凝土裂缝包括多种类型, 每种类型的成因存在一定的差异性。从高层建筑泵送混凝土裂缝成因来看, 具体内容如下:

1. 塑性收缩裂缝。该类型裂缝的产生主要是由于高温、大风、低温环境的影响, 混凝土表面失水速率大于泌水速率, 从而导致毛细管负压, 引发塑性收缩问题。

2. 温度裂缝的产生主要是由于混凝土水泥水化会产生大量的热量, 这导致混凝土内部温度急剧升高, 可达 60 ~ 70 °C。但混凝土表面的散热速度快, 形成内外温差, 进而引发温度应力问题。当拉应力超过混凝土早期的抗拉强度时, 混凝土表面会产生裂缝<sup>[2]</sup>。

3. 干燥收缩裂缝。这一类型裂缝的产生主要是由于混凝土内部未水化的水分逐渐蒸发, 引起毛细孔收缩问题。泵送混凝土中的胶凝材料较多, 用水量大, 这导致干燥收缩值显著。

4. 沉缩裂缝。从沉缩裂缝问题产生的原因来看, 主要由于骨料下沉、水分上浮导致。混凝土骨料和水分受到钢筋或预埋件的阻挡, 或是由于模板移动, 会产生基础沉降, 进而引发收缩裂缝问题。

## 2 高层泵送混凝土裂缝控制技术分析

### 2.1 原材料及配合比优化分析

针对混凝土裂缝控制工作,应注重从源头入手,对原材料及配合比做好针对性的控制,有效地减少裂缝问题的产生。在原材料及配合比控制时,具体可从以下几个方面入手:

1. 水泥选择。选择水泥时,应优先选择中低热水泥、粉煤灰硅酸盐水泥等,对水泥的细度及C3A含量有效控制,以降低水化热和收缩<sup>[3]</sup>。

2. 掺合料应用。高层建筑混凝土施工会使用掺合料,多以优质I级粉煤灰、矿粉及硅灰为主。其中,粉煤灰可以改善混凝土和易性、降低水化热。矿粉的应用,有助于提升混凝土后期的强度及耐久性。硅灰的应用,则可以增强混凝土早期强度及密实度。

3. 骨料控制。选择骨料时,应注重采用级配良好的中粗砂,降低砂率。粗骨料选用时,注重采取连续级配的碎石,最大粒径应符合泵管直径的要求,保证骨料体积稳定性。

4. 外加剂选择。外加剂选择及应用时,应采用高性能减水剂,并在确保混凝土性能的同时,减少用水量。

5. 配合比优化。混凝土配合比优化时,注重遵循低水胶比、低水泥用量、低用水量、高掺合料、高工作性能的原则,保证配合比的科学性、合理性。

### 2.2 施工过程的精细化管理

高层建筑泵送混凝土施工裂缝的控制,应注重对施工过程进行针对性把控,以减少混凝土裂缝问题的产生,确保施工质量。施工过程的精细化管理应围绕以下几个方面展开:

1. 科学地设计浇筑方案。浇筑施工时,遵循“分层浇筑,循序渐进”或“分段分层”的原则,保证浇筑的科学性、合理性。浇筑施工时,需要对浇筑层厚度做好控制,浇筑层厚度 $\leq 500$  mm;对浇筑间歇时间进行控制,在下层初凝前完成上层的浇筑施工,有效地防控冷缝问题的产生<sup>[4]</sup>。

2. 针对性选择振捣工艺。高层浇筑泵送混凝土施工过程中,采用高频插入式振捣器,采取快插慢拔的施工方式,有效地避免过振或漏振的问题。在振捣时,针对钢筋密集的区域,应注重采用小型振捣棒,减少对钢筋的损伤,保证施工质量。

3. 二次抹压施工。混凝土初凝之前和终凝之前,需要对表面至少开展2次抹压施工,尤其是在初凝之前的抹压,有助于闭合塑性收缩裂缝。

4. 模板体系。模板体系的应用,应确保模板具有

足够的强度、刚度及稳定性。在这一过程中,在施工时需要严格控制拆模的时间,尤其是竖向构件的处理,不宜过早拆模。在对悬挂构件进行处理时,需要保证下层支撑强度达到100%后方可拆除。

### 2.3 养护及温度控制分析

高层建筑泵送混凝土施工裂缝控制,应注重对后期的养护工作予以高度重视,以降低混凝土裂缝问题的产生。在混凝土养护的同时,还需要对混凝土温度予以监控,确保混凝土施工质量。关于养护及温度控制工作的开展,具体可从以下几个方面入手:

1. 建立完善的养护制度。混凝土养护时,浇筑完毕后立即覆盖塑料膜保水,并在终凝之后切换为湿养护的方式,或使用养护剂。养护时间 $\geq 14$ 天,并在针对抗渗混凝土或有特殊要求混凝土养护时,应适当地延长养护时间。

2. 优化温度控制工作。温度控制过程中,布设测温点,在混凝土的内部、表面、底部等布置测温传感器,对混凝土温度严格监控。从控温指标来看,混凝土内外温差应 $\leq 25$  °C,降温速率 $\leq 2$  °C/d,表面与环境温差 $\leq 20$  °C<sup>[5]</sup>。温度控制时,内部采取冷却水管循环降温的方式,表面覆盖保温层,有效地降低内外温差。

3. 风速与温度控制。针对风速大、温度低的环境施工时,需要设置临时挡风棚,并通过喷雾增加环境湿度。

### 2.4 现代监测与信息技术应用

混凝土泵送裂缝控制时,除了应用传统的控制手段外,还应注重加强技术赋能,借助现代物联网技术,实现对混凝土内部温度、应变、环境温湿度情况的实时监测分析。例如:借助BIM技术应用,开展施工模拟工作,预测温度场和应力场,优化浇筑方案和养护措施。在监测时,将获取的数据信息及时反馈至管理平台,对裂缝风险做好预警及动态控制。

## 3 高层建筑泵送混凝土裂缝控制案例分析

### 3.1 工程概况

某地区标志性建筑,地上为58层,地下为4层,该建筑结构总高度为260 m。从该建筑的结构设计来看,核心筒为剪力墙结构,墙壁厚度在600~1 200 mm,属于大体积混凝土建筑结构。该建筑混凝土强度设计等级为C60,施工时采取一泵到顶的泵送工艺。在施工时,选择在夏季施工,环境温度较高。

### 3.2 裂缝控制措施

#### 3.2.1 配合比优化

在配合比优化时,注重对粉煤灰、矿粉进行使用,

并掺入聚丙烯纤维 ( $0.9 \text{ kg/m}^3$ ), 对早期塑性裂缝做好控制。

### 3.2.2 预冷措施

预冷处理时, 对项目建设的骨料进行喷淋降温, 并采用冷水拌和, 保证混凝土出机温度  $\leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 3.2.3 施工过程控制

混凝土浇筑施工时, 采取分层浇筑施工的方式, 每层厚度控制在  $500 \text{ mm}$ , 浇筑间隔时间在 2 小时内。同时, 配备充足的振捣人员, 并实行分区负责制, 保证振捣工作顺利开展<sup>[6]</sup>。在混凝土初凝之前完成 2 次抹面, 抹面后立即覆盖塑料薄膜。

### 3.2.4 温度监控及养护

温度监控及养护过程中, 具体工作如下:

1. 在代表性墙体内预埋测温线, 包括监测中心、表面、脚部温度, 并搜集监测温度数据信息, 评估浇筑质量。

2. 浇筑后的第 3 天, 墙体中心温度的峰值达到  $68.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 表面温度为  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ , 内外温差为  $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 符合要求。

3. 墙体模板采用木模施工, 并在其两侧设置双层阻燃棉毡保温。在拆除后, 注重喷洒养护剂, 并设置喷淋系统持续保湿养护, 养护时间为 14 天。

### 3.3 案例总结

结合本次案例研究工作开展来看, 在高温季节开展高层建筑泵送混凝土施工裂缝控制时, 应注重从全面视角入手, 对施工裂缝产生原因进行针对性把控, 并采取有效的措施控制混凝土裂缝出现, 以确保工程项目的施工质量及结构安全。在本次案例研究中, 通过优化配合比, 从源头上控制施工裂缝。之后, 在施工开展时, 注重采取精细化施工, 减少裂缝产生。在后期保温保湿养护中, 做好监测分析, 强化施工裂缝的有效控制, 提升高层建筑泵送混凝土施工裂缝的产生, 满足工程项目建设实际需要<sup>[7]</sup>。

## 4 结论

高层建筑泵送混凝土裂缝控制工作的开展应注重从全面视角入手, 对混凝土裂缝问题产生的原因进行把控, 并结合材料学、结构力学、施工技术学等多学科知识内容, 对混凝土施工裂缝做好控制, 提升混凝土施工质量。在施工裂缝控制时, 从设计、原材料、配合比、施工养护、立体化综合控制体系建设等方面入手, 提升高层建筑施工质量。结合本文研究工作开展, 得到如下结论:

1. 源头优化是泵送混凝土施工裂缝控制的关键。

在高层建筑项目施工时, 应注重采用低热水泥、大掺量优质掺合料、高性能减水剂及功能性外加剂, 设计低收缩、高抗裂的泵送混凝土配合比, 以减少裂缝产生。

2. 强化过程管理及控制工作。高层建筑泵送混凝土施工裂缝控制过程中, 应对浇筑、振捣、挤压工艺进行严格的控制, 以保证混凝土均匀密实, 有效地消除早期塑性缺陷, 保证项目施工的质量。

3. 高度重视混凝土后期养护工作。高层建筑泵送混凝土施工裂缝的控制, 需要对后期养护问题予以高度重视, 注重加强温度控制、保温、保湿养护工作等, 有效地释放温度应力、补偿收缩、防止裂缝, 提升高层建筑质量。

高层建筑泵送混凝土施工裂缝的控制, 在未来应进一步加强技术赋能, 优化施工技术手段等, 提升高层建筑施工质量。随着建筑材料学的发展, 如自修复混凝土、超高性能混凝土的应用, 有助于提升混凝土的整体性能水平, 对混凝土施工裂缝进一步控制。此外, 随着 AI 技术、BIM 技术与建筑行业的深度融合, 泵送混凝土裂缝控制将朝着自动化、智能化方向发展, 进一步提升混凝土施工质量。

因此, 在推进高层建筑泵送混凝土裂缝控制时, 应强化技术创新应用, 对混凝土裂缝问题进行全面、深入的思考, 提升混凝土裂缝控制的效果及质量。同时, 加强对新理念、新技术的研究及应用, 助力高层建筑施工高效、高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 郭炎. 高层建筑大体积混凝土施工中裂缝控制技术分析 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(03): 155-157.
- [2] 刘芳, 肖航. 超高层泵送混凝土的施工和裂缝的防治 [J]. 居舍, 2021(29): 25-26.
- [3] 许平. 超高层泵送混凝土的施工及裂缝的防治 [J]. 中国住宅设施, 2021(11): 49-50.
- [4] 张建荣. 固海灌区现浇混凝土渠道跳仓补仓法施工裂缝控制技术分析 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(22): 56-58.
- [5] 吴华养. 高层建筑施工中混凝土裂缝成因与控制技术研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(30): 95-97.
- [6] 王志刚. 预应力混凝土在市政桥梁工程施工中的裂缝控制技术研究 [J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(05): 166-168.
- [7] 张骏首, 商和松, 李建锋, 等. 建筑工程中大体积混凝土施工裂缝控制技术 [J]. 水泥, 2025(09): 155-157.

# 高大模板工程施工技术在高层建筑中的应用研究

卢文静<sup>1</sup>, 李耀军<sup>2</sup>

(1. 汉江集团丹江口地产有限责任公司, 湖北 武汉 430040;

2. 汉江水利水电(集团)有限责任公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要** 为解决高层建筑中高大模板工程施工难题, 本文以某高层建筑工程为例, 探讨了高大模板施工技术在高层建筑中的应用。首先, 结合具体工程成功实践, 介绍了案例工程基本情况和结构特点; 其次, 分析了高空作业安全风险、模板体系稳定性控制和技术管理难点等高大模板工程的施工重难点; 再次, 详细说明了模板体系选型设计、安装与拆除工艺、混凝土浇筑技术及测量监控技术等施工技术要点; 最后, 总结材料验收标准、过程控制要点和成品保护措施等质量控制措施与工程应用效果。研究表明, 高大模板技术不仅能有效提高超高层建筑施工效率、质量、安全, 还具有显著的经济效益和社会效益。

**关键词** 高层建筑; 高大模板工程施工技术; 材料质量; 过程质量; 成品保护

中图分类号: TU755.2; TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.016

## 0 引言

传统模板施工工艺因利用率低、施工效率不高, 难以满足对超高层综合建筑的模板跨度大、模板样式多的需求。高大模板作为新型模板施工技术, 能够有效满足超高层综合建筑对模板跨度大、模板样式多、自动化程度高等要求, 符合现代高层、超高层建筑的需要。超高层建筑大多建筑结构复杂, 功能齐全, 采用常规模板施工难以满足工程的效率、质量及稳定性要求, 特别是工程部位混凝土体量大、空间跨度大、荷载大的区域, 必须有足够的强度、刚度和足够稳定的模板支撑体系, 才能保证施工安全和工程质量符合相关要求。

## 1 工程概况

### 1.1 项目背景

本文以中国电建西部科创中心建设项目为例, 该项目是集办公、科研、商业于一体的超高层综合建筑群。项目总建筑面积约 25 万 m<sup>2</sup>, 包括一栋主体塔楼和四栋附楼组成。其中, 主体塔楼建筑高度 350 m, 地下 4 层, 地上 78 层; 附楼高度 98 m, 地下 2 层, 地上 22 层。工程结构形式为框架一核心筒结构, 设计使用年限 50 年, 抗震设防烈度 7 度。

### 1.2 工程结构特点

案例工程结构设计复杂, 具有高度大、跨度大、荷载重、悬挑结构多等特点。主体塔楼高度大, 标准层高 4.2 m, 最大层高 12 m; 建筑跨度大, 最大净跨达 19.6 m; 荷载重, 部分区域施工荷载达到 30 kN/m<sup>2</sup>; 悬挑结构多, 最大悬挑长度 8.5 m。这些特点增加了高大模板施工难度, 需要采用承重能力大、稳定性好的高大模板支撑系统。本项目使用高大模板技术的部位如下:

(1) 主体塔楼核心筒墙体, 厚度 800 ~ 1 200 mm, 高度 4.2 m; (2) 转换层大梁, 截面尺寸 1 200 mm × 2 200 mm, 跨度 19.6 m; (3) 共享空间中庭顶板, 厚度 180 mm, 支撑高度 18 m; (4) 附楼报告厅屋盖, 板厚 150 mm, 跨度 24 m (如表 1 所示)。这些部位支撑高度高、荷载大、跨度大, 是危险性较大的分部分项工程, 需编制专项施工方案, 组织专家进行论证。

表 1 高大模板应用部位及参数示例

应用部位	模板高度 (m)	跨度 (m)	荷载 (kN/m <sup>2</sup> )	模板类型
核心筒墙体	4.2	6.8	25	钢框胶合板
转换层大梁	9.8	19.6	30	铝合金模板
中庭顶板	18	12.5	18	盘扣支架 + 木模
报告厅屋盖	15.5	24	22	钢立柱 + 复合板

作者简介: 卢文静 (1989-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水利工程管理。

## 2 高层建筑中高大模板工程施工重难点分析

### 2.1 高空作业安全风险

施工主塔楼最高作业面标高 350 m, 高空风荷载大、作业环境复杂, 模板支撑架安装、拆除过程中人员、物料坠落隐患大, 高空作业对塔吊协同、人员心理要求高。针对高空作业安全难题, 选用整体提升脚手架结合高大模板的施工方 案, 利用主塔楼周边整体电动提升式脚手架为高大模板作业施工构建安全架体平台, 做好高空施工风力监测, 风力在六级以上时停止高空模板作业。

### 2.2 模板体系稳定性控制

支撑高、荷载重, 模板支撑体系容易失稳导致坍塌事故。本工程中庭顶板支撑高度最高 18 m, 转换层大梁荷载 30 kN/m<sup>2</sup>, 对支撑体系稳定性要求极高。项目应用数字技术对盘扣式脚手架支撑体系建模进行三维受力分析、优化设计, 保证支撑结构稳定。施工中应用全站仪精确控制轴线定位控制, 应用激光水准仪对支撑体系实时监控支撑竖向位移, 从“毫米”上控制, 严把施工过程质量, 杜绝施工安全风险。

### 2.3 技术管理难点

高大模板施工技术管理的难点主要有以下三点:

(1) 高大模板工程专项方案编写难度大, 需结合结构要求、材料种类、施工作业方式等因素进行编写; (2) 高大模板施工工程多为交叉施工, 模板工程需要与钢筋、混凝土、机电安装等多工种密切合作; (3) 施工质量要求高, 模板安装精度要求高, 其直接影响着混凝土的成型质量。对于项目施工中存在的这些难点, 项目部通过 BIM 技术, 构建全生命周期的数字化协同管理平台, 对项目涉及的设计、施工、运维全过程进行智慧管理, 以施工前的 BIM 三维模型建立及三维建模方案优化为例, 项目通过 BIM 技术, 共识别结构碰撞 37 处、机电管线碰撞 287 处, 有效地避免了施工阶段设计变更和返工<sup>[1]</sup>。

## 3 高层建筑中高大模板工程施工技术要点

### 3.1 模板体系选型与设计

根据各部位特点, 选用不同的模板体系: 核心筒墙体采用大型钢框胶合板模板, 单块模板尺寸为 3 m×4.2 m, 减少拼缝数量; 转换层大梁采用铝合金模板体系, 一次性投入虽高, 但重复使用次数多, 长期经济效益好; 中庭顶板及报告厅的屋盖采用“承插型盘扣式钢管支架+木胶合板模板”, 综合经济性和安全性。模板设计上进行了详细荷载计算和结构验算。综合考虑混凝土侧压力、施工荷载、风荷载等影响因素, 对模板面板、肋梁、支撑系统进行了强度、刚度和稳定验算, 对于支撑高度 > 8 m、跨度 > 18 m 的部位,

还进行了专家论证, 确保设计安全可靠<sup>[2]</sup>。

### 3.2 模板安装与拆除

高大模板施工中模板安装遵循测量放线, 再按先竖向结构, 后水平结构的顺序安装, 核心筒墙体大模板安装采用“整体提升、分块就位”的安装方式, 将整体电动升降脚手架和结构面布置立柱, 搁置横梁, 再利用手拉葫芦提升大模板, 这样安装效率高, 可不占用塔吊的施工时间, 加快了施工进度。模板拆除的关键是模板拆除时机的确定, 竖向结构模板强度应达到 1.2 MPa 以上, 水平结构模板拆除强度按混凝土强度等级, 当小于 8 m 跨度时强度应达到设计强度的 75% 以上, 大于 8 m 跨度时强度应达到设计强度的 100%, 拆模作业中, 模板拆模应遵循“后支先拆、先支后拆”的原则, 禁止野蛮拆除模板和面积撬动模板, 对于高空拆模的模板不得随意抛下, 可利用垂直运输设备或滑轮组将拆模板运到地面。

### 3.3 混凝土浇筑

大体积混凝土结构浇筑宜采取分区域、分层、连续浇筑方式, 控制浇筑速度与下落高度, 避免高大模板体系受冲击。对于结构高度超过 2 m 的结构, 应采用串筒、溜槽等工具浇筑混凝土, 防止混凝土离析; 对转换层大梁等大体积混凝土结构, 采取分层浇筑方式, 每层厚度不超过 500 mm, 并在底板上预埋 3 层冷却水管, 在冷却水管上下侧布置, 形成横隔 1.5 m×1.5 m 的立体格栅状方式, 这种做法加快了内部混凝土散热效率, 可以有效降低内外温差, 大幅度降低开裂的风险性, 进而保证结构的可靠性及耐久性。

### 3.4 测量与监控

模板施工阶段, 加强测量监控是确保质量和安全的关键。应用测量监控技术: (1) 浇筑模板之前进行全站仪测量监控轴线测量定位控制; (2) 混凝土浇筑过程运用激光水准仪及时监控支撑体系竖向变形; (3) 采用传感器进行大模支撑体系的应力和变形监测, 数据实时发送至监控中心, 控制监测点选择受力最大和最不利及代表性位置布置, 如大梁中部、大梁悬挑端等; 监测频率在混凝土浇筑期间控制在 30 min/次 (如表 2 所示), 及时发现和处理各种异常情况; 监测预警值取设计值 80%, 报警值取设计值的 90%, 超过报警值立即启动应急预案<sup>[3]</sup>。

## 4 高层建筑中高大模板工程施工质量控制措施

### 4.1 材料质量控制

进料前对模板、配件等进行质量检查, 查验产品质量合格证、检测报告等质量证明文件; 进场时对其外观、尺寸进行抽查; 进场后按材料抽检规定进行质

表2 高大模板施工监测项目及控制标准

监测项目	监测方法	监测频率	预警值	控制值
立杆沉降	水准仪	浇筑时, 每30 min测1次	5 mm	8 mm
立杆倾斜	全站仪	浇筑时, 每1 h测1次	8%	10%
支撑应力	传感器	实时监测	设计80%	设计90%
模板变形	测微计	浇筑时, 每1 h测1次	3 mm	5 mm

量抽检。钢模板要求板面平整度偏差 $\leq 3$  mm/2 m, 厚度允许偏差为 $\pm 0.5$  mm; 木胶合板板面平整度偏差 $\leq 2.0$  mm, 厚度不小于15 mm, 含水率 $\leq 12\% \sim 15\%$ 。支撑材料: 采用承插型盘扣式钢管支架, 钢管外径不低于48 mm, 壁厚不小于3.2 mm, 材质符合现行国家标准规定要求。对拉螺栓是高大模板体系重要的受力件, 该项目选用直径不小于14 mm的对拉高强度螺栓, 配套塑料管, 管径选用25 mm。螺栓安装前应做好润滑处理, 便于拆除, 提高周转率, 周转率不小于5次。

#### 4.2 过程质量控制

做好“三检制”, 即班组自检、班组之间互检、专职质检员检查的工作。“三检”的前提是每道工序完成之后均要经过检查, 合格后才能开始进行下一道工序。模板安装成型后, 对模板位置、标高、截面尺寸、垂直度、平整度等指标进行组织各部门联合验收, 模板安装质量验收标准为轴线位置偏差不大于5 mm, 截面尺寸允许偏差 $+2$  mm $\sim -5$  mm, 垂直度偏差不大于3 mm, 相邻两板表面高低差不大于1 mm。检查验收中发现超过允许偏差的部位进行调整、返工, 直到符合要求。混凝土浇筑过程中安排木工看模, 密切注意模板体系变形和位移变化情况, 当发现胀模、漏浆等情况时, 要及时进行处理并予以记录, 作为下一步改进的依据<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 成品保护

模板拆除后对表面混凝土清理干净, 涂刷脱模剂, 分类码放; 拆模后混凝土形成结构采取保护, 杜绝磕碰损伤。混凝土表面出现气泡、麻面等小缺陷点使用专门的修补料修补, 达到表面平整、色泽均匀等要求。对过水面混凝土使用塑料薄膜控制混凝土面水分蒸发、土工布保持表面湿润、保温被降低内外温差、铺木板防止面层磨损等多种方式进行全方位保护。

### 5 高大模板工程施工技术在高层建筑中的应用效果分析

案例工程综合效益良好: (1) 高大模板技术效益显著。大幅提高施工效率, 核心筒墙体施工速度达到3天一层, 较传统方法缩短工期30%以上; 混凝土成型质量好, 表面平整光滑, 达到了清水混凝土效果, 减少了抹灰工序; 提高施工安全, 施工过程中无安全事故, 并将支撑体系变形控制在设计允许范围内。(2) 综合

效益显著。虽然高大模板系统一次性投入较大, 但材料周转率高, 铝合金模板重复使用次数达200次以上, 钢模板达100次以上, 降低了单次使用成本, 减少了抹灰工程量, 节约了材料和人工费用, 缩短了工期, 降低了管理成本。(3) 高大模板施工技术应用社会效益显著。节能环保, 采用钢、铝等可循环利用材料, 减少了木材消耗, 符合绿色施工要求; 提升超高层建筑施工技术水平, 为类似项目提供了实践经验; 作为城市地标性建筑, 提升城市形象<sup>[5]</sup>。

### 6 结论

高大模板施工技术在超高层建筑施工中的应用发挥了重要作用, 进一步加强技术创新和质量控制, 可以促进我国建筑行业整体施工技术水平的提升。本文结合案例工程得出以下结论: (1) 高大模板施工技术是超高层建筑施工中的关键技术之一, 对保证工程质量、安全和进度具有重要作用。本工程采用的钢框胶合板模板、铝合金模板和盘扣式支架组合体系, 充分发挥了各种材料的性能优势, 取得了良好的综合效益。

(2) 数字化技术在高大模板施工中的应用极大地提高了施工管理水平。BIM技术、三维建模、自动化监测等技术的使用, 实现了施工过程的精细化管理和智能化控制, 为高大模板安全施工提供了有力保障。(3) 严格的质量控制体系是高大模板施工成功的重要保证。从材料验收、过程控制到成品保护, 建立全过程质量管理体系, 确保每个环节都处于受控状态, 最终实现了工程质量的预期目标。

### 参考文献:

- [1] 林榜. 高层建筑工程中悬挑高大模板支撑系统设计与施工[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(15): 1-3.
- [2] 杨琳琳, 柳舒展, 李琳. 高大模板工程施工技术在高层建筑中的应用分析[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(06): 43-45.
- [3] 卢杰. 高大模板建筑工程施工技术与质量控制关键点探讨[J]. 居业, 2024(12): 182-184.
- [4] 孙明海, 李治山, 杨启航. 建筑工程高大模板施工技术运用的相关研究与分析[J]. 工程建设与设计, 2024(19): 217-219.
- [5] 冯均才. 超高层综合建筑高大模板施工技术探讨[J]. 中国建筑金属结构, 2023(02): 39-41.

# 免拆模板体系施工技术 在节能建筑中的应用分析

轩冬冬

(安徽丰临观泰建设工程有限公司, 安徽 合肥 230001)

**摘 要** 新的社会经济发展形势下, 建筑行业应注重凸显经济效益、环境效益、社会效益的结合, 推进建筑行业长远发展及进步。在此背景下, 节能建筑得到了快速发展, 在节能建筑施工过程中, 应注重对新理念、新技术、新模式进行有效的应用, 以实现建筑节能发展目标。本文就免拆模板体系施工技术在节能建筑中的应用问题进行分析, 以期充分发挥该技术的应用优势提供参考, 进而带动建筑节能长远发展及进步。

**关键词** 建筑行业; 免拆模板体系; 模板安装; 混凝土浇筑; 节能建筑

中图分类号: TU755.2

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.017

## 0 引言

在建筑节能发展背景下, 从模板施工技术的应用现状来看, 传统模板施工技术存在着材料损耗大、施工工序烦琐、保温性能不佳等一系列问题, 无法满足建筑行业发展的现实需要。针对这一情况, 对传统模板施工技术进行创新优化, 建立免拆模板体系, 有助于实现建筑节能发展目标。免拆模板施工体系构建及应用过程中, 采取“模板+保温+维护”的模式, 实现多功能集成发展目标, 对于推动建筑节能、高效发展具有十分重要的意义。因此, 在建筑施工过程中, 应对免拆模板体系施工技术的应用问题予以高度重视, 简化模板施工流程, 降低建筑能耗, 实现建筑长期节能目标。

## 1 免拆模板体系的核心类型及节能特性分析

### 1.1 保温型免拆模板

保温型免拆模板在节能建筑领域应用最为广泛, 其主要以挤塑聚苯板、石墨聚苯板、聚氨酯板等保温材料为核心, 并采取复合水泥砂浆抹面、网格布或镀锌钢板作为防护层。从该类型的免拆模板节能特性来看, 其具备混凝土浇筑成型及外墙保温双重功能, 有助于避免传统施工中“浇筑模板拆除+二次保温施工”的工序分离问题, 从源头上减少热板的产生, 确保围护结构具有良好的保温性能<sup>[1]</sup>。

### 1.2 结构—保温一体化免拆模板

从该类型的模板来看, 钢筋桁架混凝土复合板是其中的典型代表, 其主要由钢筋桁架、底模和保温芯

材等组成, 在混凝土浇筑施工后形成叠合楼板或是墙板。该类型目标应用时, 其实现结构承载与保温隔热一体化发展目标, 有助于减少材料的冗余, 并且该结构的接缝位置采取了密封处理, 有助于降低空气渗透导致的热损失, 在高节能标准的装配式建筑中得到广泛应用<sup>[2]</sup>。

### 1.3 绿色建材类免拆模板

绿色建材类免拆模板主要由绿色建筑材料建筑构成, 如秸秆纤维板、粉煤灰复合板等, 这些模板的材料以节能环保型材料为主, 具备可再生、低耗能的生产特性, 在促进节能建筑发展领域扮演着重要角色。绿色建材类免拆模板应用过程中, 原材料来自工业固废或再生资源, 有助于降低建筑施工的碳排放。同时, 该类型模板具备良好的透气性能, 可以对室内温度进行调节, 间接地降低空调的消耗。

## 2 免拆模板体系在节能建筑中的应用要点分析

### 2.1 做好施工前准备工作

免拆模板体系在节能建筑中的应用, 需要围绕材料选型、基层处理问题予以高度重视, 做好前期准备工作, 以保证项目施工的顺利开展。在材料选型工作开展时, 应注重根据建筑节能设计标准, 对模板的芯材厚度针对性选择, 保证材料适配性, 符合地区的实际情况<sup>[3]</sup>。同时, 针对模板材料的控制, 还需要对模板的抗压强度、粘结强度等性能展开评估分析, 保证其性能符合建设需要, 避免模板在浇筑施工时出现变

作者简介: 轩冬冬(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

形问题,影响到节能建筑的质量。在选材后,需要做好基层处理,为后续施工打下良好的基础。基层处理工作开展时,主要针对施工墙体或楼板基层情况,对其中存在的杂物、浮灰等做好处理,并保证基层的平整干燥。在开展外墙施工时,则需要提前做好弹线定位,并标记好模板的拼接缝、锚固点的位置,为后续施工提供指引,确保节能建筑施工效率及质量。

## 2.2 模板安装与固定施工要点

在免拆模板体系施工过程中,需要对模板安装及固定问题予以高度重视。这一过程中,主要从拼接模板、钢筋绑扎及管线预埋等方面入手,确保施工质量。在开展模板拼接及锚固时,免拆模板采用企口式的拼接方式,并在接缝位置填充保温密封胶,有效地防止冷热桥。在开展免拆模板固定施工时,应用塑料膨胀锚栓将模板固定在基层或钢筋骨架上,锚栓间隔控制在400~600 mm,对保温层起到保护作用。模板固定施工时,需要对钢筋绑扎及管线预埋问题予以高度重视。免拆模板内侧进行钢筋骨架绑扎时,需要对钢筋与模板之间的保护层厚度做好控制,避免钢筋损坏保温层。水电管线预埋施工时,需要将其预埋在预留槽内,并严禁后期开槽施工<sup>[4]</sup>。通过对拼接与锚固、钢筋绑扎与管线预埋做好针对性处理,保证免拆模板体系施工的质量,更好地满足节能建筑建设需求。

## 2.3 混凝土浇筑及养护

混凝土浇筑与养护是节能建筑施工的重要一环,主要从浇筑控制、养护管理两个方面入手。浇筑控制时,需要把握免拆模板体系应用的情况,采用分层浇筑施工方式,每层厚度控制 $\leq 500$  mm,并且在振捣施工时,应避免振捣棒直接冲击模板,有效地防止模板出现损坏或是保温芯材脱落。在养护管理时,则采取覆盖保湿养护方法,养护周期 $\geq 7$ 天。在养护期间,施工人员需要对模板与混凝土的粘结情况进行观察,有效地控制空鼓、开裂问题。通过做好混凝土浇筑及养护,保证节能建筑的质量。

## 2.4 节点节能强化处理

节点节能强化处理是免拆模板体系施工中的重要一环,需要对这一工作予以高度重视。节点节能强化处理主要针对门窗洞口、阴阳角、勒脚、女儿墙等部位做好处置,采取专项处理的方法。其中,在门窗洞口处理时,模板需要延伸至洞口内侧100~150 mm,并注重在窗框之间填充聚氨酯发泡胶密封<sup>[5]</sup>。在阴阳角位置处理时,则注重利用L型专用模板,有效地控制拼接缝外露的问题。在外墙勒脚处理时,则需要增

设防潮层,避免地下水渗透破坏保温层。通过强化节点节能处理,保证免拆模板体系的应用效果,进一步提升节能建筑的整体性能水平。

## 3 免拆模板施工体系在节能建筑中的应用案例分析

### 3.1 案例概况

某城市老市区保障性租赁住房项目是重点民生工程,其总建筑面积为6.3万平方米,主要包括了13栋多层住宅楼及相关配套设施,服务于搬迁居民及新市民群体。该项目地处严寒地区,冬季最低气温可达到 $-30$  °C,夏季最高气温可达到 $33$  °C。在该保障性租赁住房项目建设时,建筑节能面临着冬季保温和夏季隔热的双重挑战。在该类型项目建设施工过程中,传统的保障性住房项目采取“现浇结构+外贴保温层”的施工模式,存在以下问题:(1)保温层与结构层的粘接效果不佳,后期容易出现脱落、开裂等问题。(2)施工工序烦琐,模板拆除与保温铺贴间隔时间长,并且受到当地气候因素的影响,会导致工期延长。(3)该类型保障性住房项目的维护成本较高,传统保温层的使用年限在8~10年,远远超过了保障性住房的使用周期。

针对上述问题,在开展项目施工建设时,注重采用“免拆模板体系施工技术”,有效地解决该类型项目施工建设中存在的问题,确保项目建设质量,以更好地满足实际需要。

### 3.2 免拆模板体系的选项及技术参数分析

针对该项目所在地区的气候特点以及相关节能标准需要,项目采用了“外墙免拆保温模板+自保温砌块填充墙”的一体化施工方案,关于核心技术参数如下:

1. 免拆保温模板。免拆保温模板选择及应用时,以阻燃型石墨聚苯板为芯材,并且该体系中两侧位置选用复合纤维强度水泥砂浆防护层,芯材厚度设置为80 mm,整体的板材厚度控制在100 mm,保温性能预计达到 $0.034$  W/( $m^2 \cdot K$ ),抗压强度 $\geq 0.35$  MPa。板材的燃烧性能为A级,锚固件施工处理时,采用防腐金属螺杆,单个的抗拉承载力 $\geq 0.5$  kN。

2. 自保温砌块。在自保温砌块选择及应用时,注重对粉煤灰、矿渣等工业固废原料进行应用,通过泡成型工艺制成。自保温砌块的尺寸为 $600 \times 240 \times 200$  mm,抗压强度设计为MU5.0,保温系数为 $0.07$  W/( $m^2 \cdot K$ ),单块砌块的消纳固废约为8.5 kg。

3. 系统集成设计。从系统集成设计层面来看,外墙主体结构采用了“现浇混凝土+免拆模板一体化”的浇筑施工方式。其中,针对门窗洞口、阴阳角等位置,采用L型专用模板,并在接缝处位置填充聚氨酯密封胶。

内墙及分隔墙采用自保温砌块砌筑,与外墙免拆模板形成连续保温体系,有效地消除热桥效应<sup>[6]</sup>。

### 3.3 关键施工工艺及质量控制措施分析

1. 施工准备阶段。在模板进场之前,需要对模板做好检查评估工作,模板的尺寸偏差控制在 $\pm 2$  mm 范围内,板面的平整度 $\leq 2$  mm,模板不存在缺棱掉角、裂纹等缺陷问题。同时,在施工现场内设置专用堆放区,并做好防雨防晒措施,板材平放码垛控制在 $\leq 20$ 层。同时,借助于 BIM 技术应用,优化模板排版,绘制详细的排版图,为建筑施工提供参考及指引。

2. 模板安装及固定。模板安装及固定施工时,首先做好基层处理工作。针对施工现场情况,对现浇结构基层浮灰、杂物进行处理,弹线标记模板锚固点位置,锚栓间距按照 $400 \times 500$  mm 网格方式布置。其次,在拼接及锚固处理时,模板采用企口式拼接的方式,竖向接缝错缝搭接 $\geq 300$  mm,接缝处位置填充保温密封胶,通过专用的锚固件将模板固定在钢筋骨架上,锚固件穿透模板与混凝土浇筑为一体,形成无空腔连接结构<sup>[7]</sup>。最后,做好节点强化施工处理。节点强化时,门窗洞口处模板延伸至内侧 150 mm,与窗框预留间隙采用发泡胶进行密封。阴阳角位置处理时,采用一体化 L 型模板,并注重避免拼接缝外露问题。在勒脚处理时,增设 20 mm 厚的防水砂浆防潮层,有效地防控地下水侵蚀问题。

3. 混凝土浇筑与养护。在混凝土浇筑及养护施工时,注重采取分层浇筑工艺,每层厚度控制在 400 mm,振捣工作开展时,采用插入式振捣棒,避免振捣棒冲击模板。在浇筑完成之后,需要做好保湿养护工作,养护周期在 10 天左右。在养护期间,注重对沪宁图浇筑情况进行监测,确保模板不存在空鼓、脱层等问题。模板支撑系统拆除时,需要确保混凝土强度达到预期的要求,其中外墙侧模支撑拆除强度 $\geq 75\%$ 设计强度,楼板支撑拆除强度 $\geq 100\%$ 设计强度。

4. 后续工序链接。免拆模板体系施工技术的应用,注重对外侧采取抹面及饰面层施工,省去传统保温层挂网抹灰工序。自保温砌块砌筑采用可调施浆工具,灰缝厚度误差控制在 $\leq \pm 1$  mm,饱满度达到 95% 以上。在砌筑施工完成后,注重采用超声波探伤技术检测空鼓情况,解决质量隐患问题。

### 3.4 施工效果分析

结合本次案例研究开展工作,各项免拆模板体系施工技术融入节能建筑中取得了良好的效果,具体表现在以下几个方面:

1. 节能性能得到显著提升。在项目竣工后,通过开展检测发现,该项目外墙平均传热系数为 $0.45$  W/( $m^2 \cdot K$ ),远低于传统工艺数值,热桥损失降低约 45%。

2. 施工效率及成本得到优化。免拆模板体系应用于节能建筑施工中,大幅度缩短了项目建设工期,其中单栋楼施工工期缩短至 20 天,项目整体工期提前 15% 完成。从成本效益来看,人工成本减少约 17%,木模板损失降低至 3%,综合成本降低 10%。

3. 绿色环保效益突出。本次项目施工建设过程中使用的保温砌块消纳工业固废 1.18 万吨,减少固废填埋占地,免拆模板使用,减少木模板使用量,具有良好的环保性。此外,从项目施工的情况来看,施工阶段减少建筑垃圾约为 64 万吨,每立方米减少碳排放约为 3.5 kg,项目累计减少碳排放量约为 43 吨。

4. 工程质量大幅度提升。在该项目施工建设过程中,采取一体化的施工方式,有效地提升了工程项目建设质量。在施工过程中,保温层与结构层结合牢固,不存在脱落的风险,延长了使用寿命。

## 4 结束语

在节能建筑施工建设过程中,应注重对免拆模板体系施工技术进行有效应用,发挥该技术的应用优势,针对性提升节能建筑施工效果。本研究通过科学地设计免拆模板体系,从施工准备、材料选择、施工控制等方面入手,提升项目建设质量,显著提升节能效果,降低施工成本,确保项目实现绿色环保发展目标。因此,在节能建筑施工建设过程中,应进一步加强免拆模板体系的应用,为节能建筑发展提供强有力的支持,提升项目建设水平及质量。

## 参考文献:

- [1] 唐博. 新型节能建筑免拆模板复合墙体施工技术[J]. 建筑与预算, 2025(04):70-72.
- [2] 李巧丽, 张中梁, 丁明. 土建施工中外围护系统节能设计技术研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(08):21-24.
- [3] 林振峰. 免拆模板墙体技术发展现状与趋势[J]. 居舍, 2023(02):155-158, 176.
- [4] 刘凯. 新型节能建筑免拆模板复合墙体施工技术[J]. 居舍, 2022(02):82-84.
- [5] 刘亚臣. 新型节能建筑免拆模板复合墙体施工技术[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(23):60-62.
- [6] 张祚维. 关于新型节能建筑免拆模板复合墙体施工工艺的探讨[J]. 科学技术创新, 2020(06):102-103.
- [7] 冷琦. 关于新型节能建筑免拆模板复合墙体施工工艺的探讨[J]. 中国房地产业, 2020(13):179.

# 房建工程地下室超长结构 跳仓法混凝土施工技术

阮仁强

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

**摘 要** 本研究主要探讨房建工程地下室超长结构跳仓法混凝土施工技术, 首先阐述其核心原理与技术优势。跳仓法以“抗放兼施、先放后抗”为核心原理, 通过分仓浇筑释放混凝土早期收缩应力并强化后期抗裂能力, 可有效替代传统后浇带工艺, 且具有缩短工期、降低渗漏风险、节省成本等优势; 其次从仓块划分与施工顺序、混凝土配合比优化、浇筑与振捣、养护与温度控制等技术介绍跳仓法, 并从施工质量控制(原材料、施工过程、成品保护)说明施工质量控制要点; 最后介绍质量验收标准及依据、验收方法及流程, 以期地下室超长结构跳仓法施工提供参考。

**关键词** 房建工程; 超长结构; 跳仓法施工技术; 混凝土

中图分类号: TU755.691

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.018

## 0 引言

建筑工程领域地下室超长结构施工的混凝土裂缝控制是当前的核心技术难题, 传统后浇带技术虽能在一定程度上缓解这个问题, 但是工序繁杂、周期长、渗漏缺陷多等不足还需改善。跳仓法是一种新型的混凝土施工工艺, 在应对此类工程裂缝防治上优势明显, 它渐渐成了地下空间开发方面的主流解决方案之一。通过合理划分施工单元和改善作业流程, 不仅冲破了现有技术瓶颈, 而且很大程度上提高了工作效率和工程质量水平。本文首先阐述跳仓法的基本原理及其关键技术要点, 再以实例为例, 探究质量管控手段和验收准则等, 以期对相关领域提供理论参考。

## 1 跳仓法施工技术原理与特点

### 1.1 跳仓法基本原理

跳仓法施工技术本质特征就是分段交替加载、逐步卸载的设计理念, 其理论依据来自对混凝土材料性能和应力应变关系的研究, 目的是实现工程质量的有效提高。

“抗放结合”设计理念要兼顾混凝土因温差、收缩等引起早期应力释放的需求, 也要考虑后期强度增长后抵抗残余应力的能力, “放”的策略大多针对新拌混凝土初凝之前, 其力学性能还未定型的时候, 材料刚度低, 容易受外界环境变化影响而出现开裂情况, “放”的措施意在赋予一定形变余地, 分散局部集中应力, 从而避免初始裂缝的产生, 随着养护时间推移,

混凝土慢慢硬化, 增强自身承载力, “抗”的功能也就随之表现出来, 依靠内部固有的机械强度来平衡并抵消潜在内应力, 保证结构的整体稳定性和耐久性。

“先放后抗”具体体现为跳仓法在施工顺序和应力控制上的智慧, 施工时将较长的地下室结构分成许多个仓块, 按照一定的顺序间隔浇筑, 最初浇筑的仓块混凝土可以自由变化, 释放大部分的温度应力和收缩应力, 这就是“先放”, 等到旁边仓块浇筑时, 最先浇筑的仓块混凝土已经达到了一定的强度, 这时两个仓块互相起作用, 抵抗后面产生的应力, 这就是“后抗”, 通过这种方式, 跳仓法很好地控制了混凝土裂缝的产生, 提高了结构的耐久性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 跳仓法施工特点

跳仓法施工技术建筑地下室超长结构工程中具有许多明显的优势, 它主要表现为取消了传统的后浇带施工模式, 降低了模板支撑和钢筋连接的工作量, 也避开了施工缝的处理难题, 当把仓格合理地划分开并且科学规划好作业流程之后, 现场的操作程序变得较为简单, 整体的施工效率自然就提升了。

跳仓法具有工期缩短、施工效率提高的明显效果, 打破了传统模式下后浇带强度达到标准后才能继续施工的固有约束, 各个区块可以持续、有序地进行混凝土浇筑工作, 大大减少了工序间的等待时间, 加快了整体工程进度。

作者简介: 阮仁强(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 房建施工技术。

该技术可以提高工程质量,又可以减少渗漏。后浇带是地下室防水工程中容易出现漏水隐患的地方,使用跳仓法施工时,整体连续浇筑,应力分布控制较好,施工缝数量减少,渗漏可能性降低,地下结构整体稳定性增强。

跳仓法施工模式的经济效益非常明显,最大的优点就是节约成本,这种方法很大程度上减少了模板、钢筋等建筑材料的使用,人工费用和现场管理成本也降低了很多,作业效率和工期得到提高,整个工程造价可以得到精准控制并达到合理优化的目的。

## 2 跳仓法施工关键技术

### 2.1 仓块划分与施工顺序

仓块划分属于跳仓法施工的关键部分,其科学性会直接影响到工程质量和施工效果,合理划分应遵循如下基本原则:第一,尺寸适中原则,单个仓块长度最好控制在 30 米到 40 米之间,过长时,混凝土内部温差和收缩应力会增加,从而产生裂缝,而尺寸过小则会使施工缝数量增多,影响进度,降低结构稳定性,第二,几何规整原则,优先采用矩形或者接近矩形的布局方案,避免形状复杂造成振捣不均。第三,实际可行原则,要联系现场实际,考虑设备配置、作业空间、人员操作需求等因素,保证仓块设置符合施工流程,有利于质量控制<sup>[2]</sup>。

分区分块详细划分时要全面考虑地下室平面布局特点、尺寸参数和后浇带初步布设方案,制定初步规划,根据受力性能特点,对柱网密集区、转角部位等适当调整,保证仓格分区既符合应力均衡要求,又保证整体结构安全稳定。

合理的施工顺序、施工间隔时间对于跳仓法施工的成功起决定性的作用。施工顺序一般采用“跳仓浇筑”,即先浇筑第一块仓,待其混凝土强度达到一定要求后再浇筑与它相邻的第二块仓,以此类推,采用跳跃式的施工顺序,防止相邻仓混凝土浇筑时间过近而产生应力叠加现象。

间隔时间如何确定,需要考虑混凝土早期强度发展、温度场变化和材料属性等因素,一般首仓混凝土浇筑完毕后留出 7 天至 10 天时间再做临近工序,这段时间内首批次混凝土由于自然养护完成主要体积收缩和温变效应,应力状态部分释放,使相邻结构在后续阶段因相互作用开裂概率大幅降低,实际操作要结合现场环境条件(气温波动范围)和原材料配比设计等因素动态调整具体时长。

### 2.2 混凝土配合比优化

混凝土材料特性在裂缝控制中起着重要的作用,水泥掺量过高会加快水化反应,内部温升急剧上升并

形成高温应力环境,从而增大开裂的风险,骨料的粒径分布、级配情况和含泥量都会对收缩行为和力学性能产生很大影响,粗细颗粒搭配得当、级配良好的骨料可以抑制干缩变形,提高抗拉强度,如果粗颗粒含量过高或者砂石中有较多杂质,则会减小早期强度增长速度并加快劣化进程,外加剂的选择也要小心斟酌,适量添加高效减水剂可以改善拌合物流变性质以减小塑性收缩效应,复合膨胀型添加剂在凝结硬化时期可以提供微小补偿胀力,抵消干燥引起的体积损失,从而减少表面细微裂缝出现的概率<sup>[3]</sup>。

根据对混凝土材料本身的剖析,对混凝土配合比进行改良:首先合理选用水泥品种和用量,以低热或中热水泥为首选,在水泥用量上实行减少。其后还要改善骨料级配情况,选择粗骨料和细骨料,重视粗骨料粒径大小,保证级配优良,选择好细骨料的细度,约束骨料自身含泥情况,合理添加外加剂,根据工程需要和混凝土性能要求选择合适的减水剂、膨胀剂等多种类,决定最佳添加比例,科学调整混凝土配合比,从各个方面提高抗裂性,降低混凝土水化热、收缩情况和温度应力。

### 2.3 混凝土浇筑与振捣

浇筑前做好准备工作,检查模板的尺寸、位置、支撑是否牢固,模板拼接要严密,防止漏浆,模板内要清理干净,杂物、积水都要清理掉,钢筋做隐蔽工程验收,检查钢筋的品种、规格、数量、间距是否符合设计要求,钢筋的绑扎和焊接要牢固,准备好浇筑用的机械设备和工具,混凝土输送泵、振捣棒等,这些工具要性能良好。

混凝土施工时,振捣工序是关键所在,使用插入式振动器时,布设间距不能大于作用半径的 1.5 倍,且要遵循“快速插拔”的操作准则,单次振捣时间应控制在 20 ~ 30 秒之间,直到表面无明显下沉、气泡冒出、泛浆均匀为止,不得过度振捣造成离析,也不得因漏振而产生局部空洞,连续浇筑多层混凝土时,振捣棒必须伸入下层 5 ~ 10 厘米处,消除上下层之间的界面缝隙,提高整体结构的整体性、稳定性。

### 2.4 混凝土养护与温度控制

科学合理的养护制度对于混凝土强度增长、裂缝控制来说十分重要。混凝土浇筑完成后及时养护,保湿保温养护,采用覆盖塑料薄膜和保温材料的方式,塑料薄膜可以减少混凝土表面水分蒸发,保温材料可以保持混凝土内部温度,减少温度变化,养护时间不少于 14 天,重要部位或特殊要求的混凝土养护时间适当延长。养护过程中要经常检查养护情况,混凝土表面始终保持湿润<sup>[4]</sup>。

混凝土浇筑施工时,要全方位监测内部和表面温度的变化情况,合理布置测温设备在仓室范围内,准确掌握并深入分析其中的热传导规律,根据采集到的数据信息,及时制定相应的调节策略,如果核心部位温度超标,可以采用降低入模初始温度、改善外部风冷环境或者增加循环冷却系统等方式达到降温的效果;如果内外部温差较大,就需要加强保温养护的工作力度,减缓热量流失的速度,保证内外部温差始终控制在25℃以内,避免因温差应力造成微观裂缝现象。

### 3 跳仓法施工质量控制与验收

#### 3.1 施工质量控制要点

跳仓法施工质量控制的关键要素是原材料品质,这会决定整个工程质量的好坏,水泥材料必须核查其品种、强度等级、生产日期等参数是否符合设计要求和行业标准,还要通过安定性检测、凝结时间试验将不合格产品剔除,骨料处理时要重点检查粗细骨料的粒径分布、级配特征、含泥量指标,保证各项参数达标,否则会影响混凝土的流动性,削弱抗裂性能,外加剂的选择应根据工程特性与功能需求来定,优先选择稳定性好、适应性强的产品,并且要准确计量掺合比例,避免出现潜在风险,全部进场的原材料都要经检验合格后才能使用。

施工环节处于工程质量管理的关键位置,仓块划分阶段规范执行非常重要,在尺寸规格、几何形态、工序安排上一定要严格按照科学理论和技术标准执行,合理分配区域布局并细致设定时间间隔,避免不合理分区引起的应力集中或者交叉作业干扰,密切关注流动性调节和分层厚度情况,不能让混凝土离析之类的情况发生,振捣期间务必做好均匀密实的工作,杜绝漏震或者过分振动现象,保证材料整体质量和致密程度达到标准,对坍落度进行实时监测,保持一定范围内的稳定数值,则工艺水平提高、产品质量一致性提升就可以取得,至于养护期,也要积极依照相关规定执行,使结构表面长期保持湿润状态,调节好温湿度,从而保证后期强度稳步发展<sup>[5]</sup>。

成品保护是跳仓法施工中极为关键的质量控制环节,当混凝土还未达到设计强度的时候,严禁人员和机械设备在其表面行走或者堆载之类的行为,以免引发表面层受损、结构出现瑕疵之类的情况,在那些容易受到冲击影响的角落和隐藏之处,设置隔离围挡并贴上警示标识,进一步加强现场作业人员的安全观念和责任感,等到后面的工作包含交叉操作的时候,务必采取全封闭防护手段,防范外部因素造成材料被弄脏或者品质变差之类的潜在危险。

#### 3.2 质量验收标准与方法

跳仓法施工质量验收应全面按照国家现行规范、行业技术标准、设计文件具体要求进行,混凝土强度应达到设计规定的等级,按照混凝土强度检验评定标准进行检测,外观质量应达到表面平整无裂纹、无蜂窝麻面等标准,参照相关建筑装饰工程质量验收规定,结构尺寸偏差也应控制在设计允许范围内,按照相应的测量规程执行。

质量验收一般按照分项工程、分部工程的顺序进行,先对原材料进行验收,检查原材料的质量证明文件、检验报告等材料,并进行抽样复验;施工期间对每个仓块的混凝土浇筑、振捣、养护等环节进行实时检查和记录,保证施工过程符合质量控制要求;施工完成后首先进行外观质量检查,通过目测、尺量等方式查看混凝土表面有无裂缝、蜂窝、麻面等缺陷,结构尺寸偏差是否在允许范围内;然后进行混凝土强度检测,采用回弹法、钻芯法等无损或微破损检测方法,对混凝土强度进行抽样检测;最后根据各项检查结果,参照质量验收标准和根据,进行综合评定,判断跳仓法施工质量是否合格。

### 4 结束语

跳仓法在房建工程地下室超长结构施工中具有明显的优势,通过科学合理的应用,在简化施工工序、缩短工期、减少渗漏、降低成本等方面都取得了很好的效果。跳仓法施工技术的关键技术包含仓块划分、混凝土配合比、浇筑振捣、养护温度等多方面,每个方面都会对施工技术产生重要影响,每一个部分精准把控都会对整个施工质量产生决定性影响。在跳仓法施工技术要点、严格的质量控制和规范的验收标准与方法共同保障下,工程质量必将得到强有力的提升。在实际应用中,把握住跳仓法质量控制要点,严格控制实际工程验收,可提高地下室超长结构工程质量。

#### 参考文献:

- [1] 邢承喜,付冬冬,蔡云贺,等.浅论地下室超长结构跳仓法施工在工程中的应用[J].建筑工程技术与设计,2020(28):3225-3226.
- [2] 王子国.“跳仓法”施工在地下室超长混凝土结构工程实践中的应用[J].装饰装修天地,2020(07):344-345.
- [3] 黄丹阳,方江华,郑巍,等.跳仓法在超长混凝土结构施工中的关键技术问题研究[J].工程建设,2025,57(01):49-56.
- [4] 王俊民.超长混凝土结构跳仓法施工关键技术研究[J].建筑技术,2025,56(20):2529-2533.
- [5] 余育杰,肖晨阳,苏秋阳,等.超大面积不同层数地下室结构跳仓法施工技术应用[J].城市建筑,2025,22(S1):104-107.

# 水利工程混凝土镀锌钢板止水带 安装施工技术研究

蔡卫露

(安徽圣合建设工程有限公司, 安徽 合肥 231622)

**摘要** 水利工程作为我国重要的基础设施, 其混凝土结构的抗渗止水性能对工程质量以及使用寿命具有直接影响。镀锌钢板止水带具备耐腐蚀、强度高、寿命长的特点, 在大坝、输水隧洞、水闸等止水部位得到广泛应用。然而, 在实际施工的过程中, 受焊接工艺、节点处理不当、安装工艺不规范等因素的影响, 容易导致止水带失效, 降低水利工程防渗性能。本文主要结合具体的工程案例, 阐述了水利工程混凝土镀锌钢板止水带的安装施工优势, 分析了水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工技术, 并探究了水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工质量管控策略, 以期为止水带安装施工提供有价值的参考。

**关键词** 水利工程; 混凝土; 镀锌钢板止水带; 安装施工

中图分类号: TV547

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.019

## 0 引言

现阶段, 我国水利工程朝着大型化、复杂化方向发展, 对混凝土结构防渗止水性能提出更高的要求。以往所采取的橡胶止水带、塑料止水带, 长期受到高水压的水流冲刷以及环境腐蚀, 极易出现材料老化、变形的情况, 难以满足水利工程长期稳定运行需求。为了有效改变这一现象, 提倡采取镀锌钢板止水带的金属材质, 将其作为水利工程止水系统的核心构件, 提高水利工程的止水效果。由此可见, 对水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工技术进行探究具有重要的现实意义。

## 1 工程概况

本工程通过水库间的水资源调配与补充, 可以优化供水保障体系, 满足当地生态用水需求。工程年需水量 10 220 万  $m^3$ , 日最大调水规模 40 万  $m^3$ , 最大调水流量 4.63  $m^3/s$ , 泵站采用双吸离心泵。该地区地势平坦、地形辽阔, 地面高程在 18.5 ~ 26.0 m。依据工程施工要求, 将混凝土结构标高设计为 300 mm, 纵向设置施工缝, 并安装 3 mm 厚的镀锌钢板止水带, 止水带沿着混凝土结构全断面布置, 嵌入混凝土深度 > 150 mm。

## 2 水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工优势

### 2.1 有利于提高工程抗渗性能

镀锌钢板止水带在工程施工现场进行焊接处理, 接头处的焊缝相对较为紧密, 可以有效抵抗水利工程

高水压渗透作用, 避免传统橡胶止水带在搭接时出现老化、脱落的风险, 整体焊接接头的抗渗稳定性更佳。此外, 钢板本身具有一定的强度, 将其安装在水利工程的施工缝位置处, 不会因振捣压力、结构沉降等出现位移、变形的情况, 使止水带与混凝土紧密贴合, 保证止水效果, 避免止水失效。

### 2.2 有利于增强抗腐蚀性能

镀锌钢板止水带表面经过热浸镀锌工艺处理, 可以形成一层均匀性、致密性的锌层保护膜, 其可以有效隔绝水、氧气、土壤中的盐碱土、化学物质等腐蚀介质。同时, 镀锌钢板止水带中具备牺牲阳极的阴极保护作用, 在锌层因外力破损后, 锌会提前发生氧化反应, 延缓钢板的腐蚀进程<sup>[1]</sup>。

### 2.3 有利于适配水利复杂环境

镀锌钢板止水带可以依据工程需求对镀锌钢板进行裁剪、弯曲、拼接等, 轻松适配不同宽度、深度的伸缩缝与沉降缝, 尤其是在不规则缝体的止水施工中, 镀锌钢板止水带的灵活度远超预制橡胶止水带。镀锌钢板止水带在施工时, 经钢筋支架、螺栓固定等进行精准定位与安装, 不易移位, 浇筑时的钢板与混凝土进行有效黏结, 可以形成整体受力结构, 避免渗漏的情况出现。

### 2.4 有利于强化结构稳定性

镀锌钢板止水带与钢筋、混凝土形成整体受力体系, 不仅具有止水作用, 同时还可以避免结构变形导

作者简介: 蔡卫露 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

致裂缝扩展。同时,水利工程水流速度快、镀锌钢板表面坚硬,可以有效抵抗水流冲刷、泥沙磨损。此外,镀锌钢板止水带因其结构稳定,减少止水带的更换周期,降低后期维护成本<sup>[2]</sup>。

### 2.5 有利于满足绿色施工要求

镀锌钢板属于金属材料,不会像胶止水带一样释放有害物质,尤其使用在对水质要求高的水利工程中,与绿色施工环保标准相符。同时,镀锌钢板材料本身具有较高的回收利用率,在工程报废后,针对拆除的止水带,可以用专业回收渠道对钢板进行重新熔炼加工,减少建筑垃圾的产生,符合水利工程低碳环保的发展理念。

## 3 水利工程混凝土镀锌钢板止水带施工技术

### 3.1 钢板制作技术

该工程使用的镀锌钢板止水带为Q235薄钢板,在钢板表面处用细砂纸进行打磨处理,然后将钢板放在无水乙醇、丙醇(浓度:50%)溶液中,借助超声波将表面的油渍清洗干净。清洗干燥后,依照设计图纸,将冷轧板作为木材,使用等离子切割机,对钢板进行切割处理,在钢板表面精准标记止水带的长度、宽度及弯折角度,每段钢板的尺寸误差 $< 1$  mm。在止水带的弯折位置处,采取液压弯折机来逐步成型,避免单次大角度的弯折使镀锌钢板出现开裂的情况<sup>[3]</sup>。针对已经成型的镀锌钢板需要进行平整度检测,在使用靠尺测量的过程中,钢筋表面与靠尺的缝隙 $< 0.5$  mm,针对局部凸起的位置,用橡胶锤敲打矫正,在敲击的过程中,应注意动作的轻柔性,避免破坏镀锌层。最后,钢板制作完成后,抽取了一定量的钢板进行检测,确保制作钢板后的性能符合实际施工需求。

### 3.2 镀层处理技术

镀锌钢板止水带在施工的过程中,若采取纯镀锌施工工艺,在钢板受损后,整体修复难度较大。针对这一情况,在处理镀层的过程中,向其中添加纳米进行改进,对微观结构进行调控,使镀层更具有致密性、均匀性,降低孔隙与裂缝风险。本工程在利用纳米对镀层进行改性时,向2% HCH中放入制作钢板,进行5分钟左右的浸泡,将表面氧化物去除干净,形成盐膜,防止镀锌前出现氧化反应。之后,将纳米氧化锌颗粒加入至镀液中,借助超声波装置,对功率进行调控,使其维持在谐波状态,完成纳米改性镀锌工作。在纳米改性镀锌工艺完成后,用扫描电镜观察其中的微观结构,可发现在锌晶粒之间,纳米氧化锌颗粒呈均匀分布状态,可有效填充镀层孔隙,降低腐蚀介质的渗透路径。

### 3.3 防腐检验技术

钢板镀锌处理后,该工程对其防腐效果进行检验,具体将其放置在0.5 mol/L的硫酸镁溶液中,模拟水

利工程的硫酸盐腐蚀环境,之后施加5 mV的正弦扰动电压幅值,在这一过程中,需要对频率以及试验温度进行管控,其中频率值在100 kHz~0.01 Hz,温度值在20℃,获取不同镀层电化学阻抗谱。对阻抗谱进行分析,发现经纳米改性的镀锌钢板相较于纯锌镀层钢板,电荷 $R_t$ 传递电阻值以及腐蚀反应阻力得到显著增加,可在一定程度上延缓镀层腐蚀速度,提高镀层的耐腐蚀性。通过这一技术的检验,有效验证该工程使用镀层处理技术的可靠性,为后续止水带安装后的长期抗腐蚀性提供有效支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.4 预埋定位控制技术

该工程在安装镀锌钢板止水带的过程中,考虑到以往由工作人员依靠经验定位存在误差,所以为了保证定位的精准性,每隔2米在止水带的U型槽中放置MEMS传感器,通过无线传输模块实时监控定位情况,同步更新数据频率与现场施工管理系统,自动生成止水带的三维坐标曲线。在检测到止水带水平出现偏移、垂直度偏差,立即触发声光报警。同时,在止水带上部开展螺栓固定、衬板定位处理,以免在浇筑混凝土的过程中出现移位的情况。

### 3.5 止水带安装

首先,该工程在进行止水带安装的过程中,要先在安装前对基面进行清理,除掉缝内一定深度的衬垫板,并用高压水枪在混凝土施工缝、沉降缝的基面予以反复冲洗,清除缝内残留的砂石、水泥、油污,确保缝内混凝土表面的干净、整洁。之后,用钢丝刷在基面处进行拉毛处理,使基面粗糙系数 $\geq 0.5$ ,强化止水带与混凝土粘结力<sup>[5]</sup>。针对基面存在蜂窝、麻面缺陷等问题,借助聚合物水泥砂浆进行修复,保证基面平整度。

其次,基面处理完成后,施工人员依照预埋定位的坐标,将镀锌钢板止水带吊运至相对应的安装位置。在正常安装的过程中,将U型槽开口朝向迎水面,保证止水带的垂直度。将规格为350 mm×150 mm的闭口钢筋向止水带中添加,并将止水带底部与基面预设定位钢筋进行点焊,点焊间距在300 mm,焊点直径 $\leq 5$  mm,在焊接的过程中不可损坏镀锌层。止水带搭接处采取双面焊接工艺,焊接电流、焊接速度分别为80~100 A、10~15 cm/min,保证焊缝饱满无夹渣、气孔。焊接完成后,利用角磨机对焊缝表面进行打磨,确保其平整度。在止水带绕过柱子时,应避免止水带与柱箍筋交错,可以直接将柱箍筋剪断,对止水带闭口钢筋与柱箍筋进行焊接。异型结构安装的过程中,依据施工图纸、结构尺寸,借助角磨机与激光切割技术进行异型加工,确保切口光滑无毛刺。之后,再利用数控折

弯机对镀锌钢板进行分步弯折,弯折时为了保证稳定性,该工程用两根钢筋在焊接两端进行加固处理,直至全部钢板加固定型。弯折后用样本对比弧度偏差,保证偏差值 $< 1\text{ mm}$ 。

再次,在止水带与混凝土模板的衔接过程中,将橡胶密封胶条嵌入止水带与模板缝隙中,密封条的压缩量控制在 $30\% \sim 40\%$ ,以免混凝土在浇注的过程中出现浆液渗漏的情况。同时,在止水带两侧设置定位钢筋支架,定位钢筋支架用镀锌钢丝进行绑扎,避免生锈污染止水带。

最后,在浇筑混凝土之前,施工人员全面检查了止水带的安装质量,用全站仪复核止水带的中心线偏差,保证偏差值 $\leq 5\text{ mm}$ ,用 $2\text{ m}$ 靠尺检测止水带的垂直度。焊缝处也进行了渗透检测,在检查合格后开展混凝土浇筑作业。整个作业过程中,振捣棒与止水带距离 $> 300\text{ mm}$ ,避免振捣棒直接接触止水带而出现移位或变形的情况,发挥最佳的止水效果。

### 3.6 混凝土浇筑配合技术

该工程在镀锌钢板止水带安装后,对混凝土进行浇筑处理。选择的混凝土材料为低水化热的硅酸盐水泥,初凝时间在 $45\text{ min}$ 以上,砂石含泥量不足 $3\%$ ,云母不足 $2\%$ ,卵石与碎石粒径不足 $0.5\text{ mm}$ 。依照相应配比混合原料后进行分层浇筑,首层浇筑的混凝土应覆盖钢板高度的一半,采取连续浇筑的方法,必须中断的情况下,应缩短中断的间隔时长,在前层混凝土未初凝的情况下对次层混凝土进行浇筑。新老混凝土接合位置处,进行二次振捣,振捣棒远离止水带,通过充分振捣,使钢板与混凝土紧密结合,无空隙产生。

## 4 水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工质量控制措施

### 4.1 做好前期准备工作

在前期准备工作中,需要对工程材料进行检验,确保止水钢板的材质符合标准,具体应该对屈服强度、抗拉强度、延伸率、碳含量控制等进行检查,同时,还要检查焊接材料中焊条出厂合格证以及性能,在质量达标后才可投入工程施工中。此外,还可以开展技术准备,施工需要完成三级交底工作,项目总工向施工人员开展方案交底、工艺交底、操作交底等,并绘制详细节点大样图,于止水钢板处标注穿墙管、变形缝等部位构造处理技巧。前期准备工作还需确认作业条件,施工缝表面进行凿毛处理,将浮浆、杂物清理干净,露出新鲜的混凝土面,止水钢板安装应清除油污、锈蚀。

### 4.2 强化施工流程的监控

在监控施工流程的过程中,需要构建“分段跟踪+实时反馈”动态管控机制,在钢板制作的过程中,安

排质检员对等离子切割的钢板尺寸进行复核,借助数显卡尺测量钢板厚度、宽度、弯折角度。同时,还要搭建远程监控系统,施工的过程中,在焊接作业区、预埋定位区、混凝土浇筑区等关键工位处安装高清摄像头,实时将监测到的施工画面传输至监控中心,管理人员通过后台系统远程监控焊接电流稳定性、定位钢筋绑扎间距等细节。针对镀层处理环节,可以在镀锌钢板表面粘贴传感器探头,自动读取不同区域的锌层厚度值,若监测到局部厚度不符合设计要求,应该触发预警并标记异常位置,以便进行后期工艺参数的调整。

### 4.3 完善后期质量验收

在验收的过程中应依照验收标准对止水带安装质量进行多维度检测,采用全站仪逐段测量止水带中心线与设计轴线的偏差值。借助超声波探测仪在焊缝区域处进行扫描,检验其是否存在未焊透、气孔、夹渣等缺陷,保障焊接的合格率。同时,还要抽检钢板规格、材质是否符合设计要求,确保抽检合格率达到 $100\%$ 。在对偏差值进行检验时,应保证位置偏差 $\leq 5\text{ mm}$ ,垂直度偏差值 $\leq 1\text{ mm/m}$ 。在后期质量检验的过程中可以采取目测与工具检查相结合方法,通过多种方法联合检测,提高检验质量。在验收合格后,对止水带以及周边混凝土进行养护处理,通过养护来延长使用寿命。

## 5 结束语

水利工程混凝土镀锌钢板止水带不仅有利于提高工程抗渗性能以及抗腐蚀性能,同时可以适配水利工程复杂环境,强化结构稳定性,满足绿色施工需求。为了充分发挥水利工程混凝土镀锌钢板止水带的应用价值,应明确钢板制作、镀锌处理、防腐检验、预埋定位控制、止水带安装、混凝土浇筑配合技术等,并采取做好前期准备工作、强化施工流程的监控、完善后期质量验收等策略,提高水利工程混凝土镀锌钢板止水带安装施工水平。

### 参考文献:

- [1] 张耀华.型钢混凝土柱节点处止水方式改进施工技术应用[J].工程质量,2025,43(08):107-110.
- [2] 张锡乾.液体止水带在桥梁伸缩缝养护中的应用[J].山西建筑,2025,51(15):162-165.
- [3] 汪凯.隧道止水带性能退化规律及寿命预测研究[J].施工技术(中英文),2025,54(13):120-124.
- [4] 陈一尤,王彦东,高衡.钢壳沉管隧道受限空间 OMEGA 止水带施工技术及应用[J].中国港湾建设,2024,44(07):82-86.
- [5] 项海玲,周丽.混凝土橡胶止水带紧固式安装施工技术及应用[J].水利建设与管理,2021,41(06):69-74.

# 分体式三箱钢梁高处焊接施工安全防护技术研究与应用

任江涛, 彭章勇

(中铁宝桥扬州有限公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要** 钢结构桥梁高处焊接施工是桥梁建设中的关键环节, 焊接作业受结构特性、外部条件及动态荷载等多重因素影响, 存在诸多技术和安全管理难点。本文针对分体式三箱槽形钢梁高处焊接施工安全防护技术, 在模块化安全通道、规范化固定施工平台、自行式高空作业平台的设计与创新应用方面进行了深入探索和实践, 以期有效提升施工效率与安全性、确保工程顺利实施提供有益参考。

**关键词** 安全防护技术; 模块化安全通道; 固定施工平台; 自行走施工平台

中图分类号: U445.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.020

## 0 引言

钢结构桥梁高处焊接施工因作业环境特殊、结构形式复杂及外部干扰多, 安全风险显著高于地面施工, 安全防护技术已成为高处施工项目顺利开展的核心支撑。近年来, 针对模块化、可移动、自适应的专用施工平台的相关研究越发丰富, 逐步具备成为技术主流的趋势。本文基于宁扬长江大桥引桥钢混组合梁结构特点, 围绕分体式三箱槽形钢梁高处焊接施工过程中的安全通道设置、施工平台的安全防护和应用展开了一系列探索。

## 1 工程概况

宁扬长江大桥引桥采用一联多跨全焊接钢混组合梁, 钢梁采取分体式三箱结构, 由开口槽型主梁、横梁组成; 桥位采取单个主梁、横梁散件安装方式, 吊装调整到位后进行高处焊接作业, 包括钢主梁之间、横梁与主梁之间工地焊缝的匹配、焊接工作, 环口焊缝处的嵌补段的组装、焊接作业。

钢主梁之间间隔 15 m 设置工型横梁连接, 中间为镂空, 主梁横截面为顶面开口的倒梯形设计, 顶板宽度仅 600 mm 或 800 mm; 桥址桥墩最高 50 m, 桥位施工为临边、悬空的特级高空作业, 安全风险大。

## 2 安全通道设置与应用

### 2.1 上桥通道

在桥墩旁设置梯笼式安全爬梯作为地面行走至桥面板上的通道, 梯笼式安全爬梯设置的地面要经过处

理并进行硬化, 与桥墩通过连墙件连接保持稳定性, 进入口悬挂醒目的使用安全提示。

### 2.2 桥面安全通道设置

项目实施过程中, 在钢主梁顶面上设置模块化安全通道用于纵向通行, 利用端横梁、中横梁顶面设置横向通道, 在钢主梁镂空面布设防坠网, 形成安全的通道体系。

#### 2.2.1 模块化安全通道

单幅桥在靠近道路中心线处的钢主梁顶面上设置纵向通道用于通行, 综合考虑钢梁结构特点, 安全通道<sup>[1]</sup>按以下要求设置:

1. 槽型钢梁内每隔 5 m 一道横隔板, 安全通道以隔板为支撑, 设置在隔板顶部。

2. 纵向安全通道采取模块化设置, 分为平面走台和护栏两个模块, 两者采取栓接, 运输时拆除护栏便于长途运输; 按 12 m 的长度制作, 减少吊装次数。

3. 平面走台使用 [14a 槽钢做纵梁, 角钢做横撑, 400×50 钢跳板做踏面, 在纵梁上设置吊装吊耳。护栏高 1.2 m, 由立柱和两道横杆组成, 立柱间距不大于 2 m, 护栏与走台采用螺栓栓<sup>[2]</sup>。

4. 安全通道之间采取双向开槽的卡板, 卡住相邻两个槽钢翼缘板, 连接固定在一起。

#### 2.2.2 可拆卸式临边护栏应用

在端横梁、中横梁以及附近的钢梁顶面上设置横向施工通道, 用于主梁之间相互通行。临边护栏使用可拆卸式立柱<sup>[3]</sup>, 高度 1.2 m, 采用钢管做立柱, 立柱下

作者简介: 任江涛 (1984-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 钢结构桥梁制造。

部设槽型卡固结构，与钢梁顶板使用螺栓拧紧固定；设置 2 道  $\phi 8$  的无油钢丝绳横杆，间距不大于 600 mm，钢丝绳穿过套管，端头使用绳卡固定，并使用紧绳器将钢丝绳拉紧。

### 3 固定施工平台应用

#### 3.1 规范化施工平台应用

钢主梁之间的环缝设置在端支点和中支点处，同时该处还有端横梁、中横梁与主梁的焊接连接；支点处盖梁较宽，可以作为辅助平台。设置两种规范化施工平台用于辅助作业，一是在两主梁之间，设计一个半包围的简支施工平台，该平台固定在两主梁之间；另一种是在边主梁外侧设置全包围的悬挑施工平台<sup>[4]</sup>。

简支施工平台用 [10 槽钢做横梁，采用 L50 角钢作为竖向吊杆和底部承力外框形成框架系统，横梁固定在两相邻主梁的顶板上，平台底部使用 4 mm 花纹钢板做底板，设置挡脚板。平台框架两侧设置旋转防护门，防护门采用 L30 角钢和  $\phi 10$  圆钢制作，防护门打开后用于防护主梁斜腹板三角区域。

悬挑施工平台用 [12.6 槽钢做横梁，悬挑固定在顶板；L70X5 角钢做吊杆，焊接在横梁上；顶部用钢管设置三面包围的临边护栏。

#### 3.2 集成施工平台应用

普通横梁与主梁焊接位置为高空悬空作业，在该处设置集全包围安全防护、设备存放、施工于一体的集成施工平台（见图 1）；转移时，将平台和设备一起吊走，减少吊机的使用。

平台分为平面走台和下部施工平台，走台长度 9 850 mm，宽度 2 290 mm，横跨 3 道钢主梁和横梁，与

纵向安全通道相邻，方便通行；平台采用槽钢、角钢、花纹钢板制作，周围设置安全护栏；平台顶面开设 4 个进入施工笼的通道口。

施工平台固定在走台下，分为固定吊架和活动施工笼两部分，采用角钢、圆钢、花纹钢板制作。为适应倒梯形钢梁上窄下宽的特点，施工时，将活动施工笼推出去，平台移位和安装时，将活动施工笼收回到固定施工平台内。

### 4 自行式高空作业平台研究及应用

#### 4.1 自行式高空作业平台设计

钢梁桥位焊接时，一般采用固定挂架的施工平台，数量多，安装和拆卸作业工作量大，占用较多的吊机资源，影响钢梁架设施工效率。优化设计了一种可在钢梁顶板面自行走的施工平台（见图 2）<sup>[5]</sup>，由 1 个主桁架、2 个副桁架、4 个翻转平台及各自配套的卷扬机构、2 个端部吊笼、大车行走机构、电控系统等组成。该平台可同时满足横梁与主梁之间、主梁与主梁之间对接缝焊接工作，针对倒梯形钢梁上口小、下口大的特点，焊接时将平台降低到作业区域，翻转变宽，同时具备纵向滑移功能，方便靠近焊接部位。平台行走具备自动居中、自动监测纠偏能力，有效兼顾了平台在行走模式与作业模式下的不同功能需求。

自行走施工平台钢结构部分使用方钢管、钢管、花纹钢板等焊接组成，平台横桥向尺寸 16.65 m，顺桥向 3.25 m，最大高度 5.62 m。平台性能参数见表 1。

采用有限元分析软件 SAP2000 v21 对自行走施工平台的主副桁架、翻转平台、端平台进行结构整体分析，不满足规范要求的进行适当调整改进。

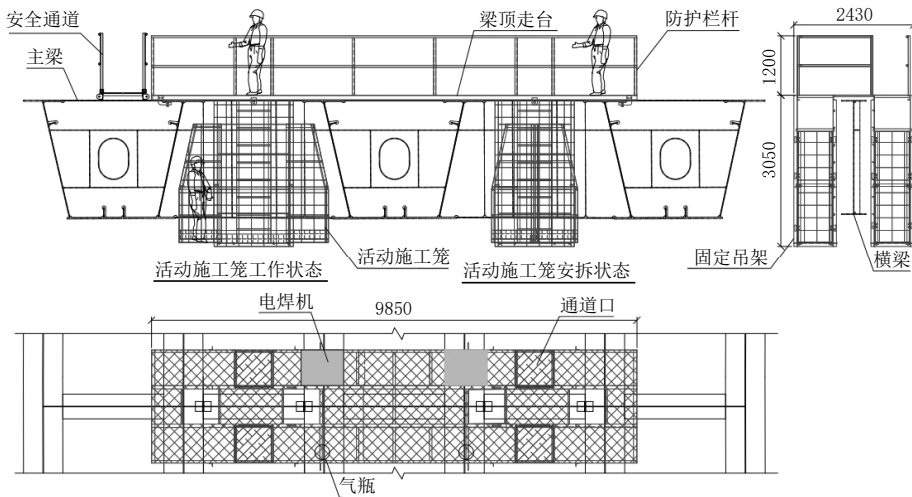


图 1 集成施工平台

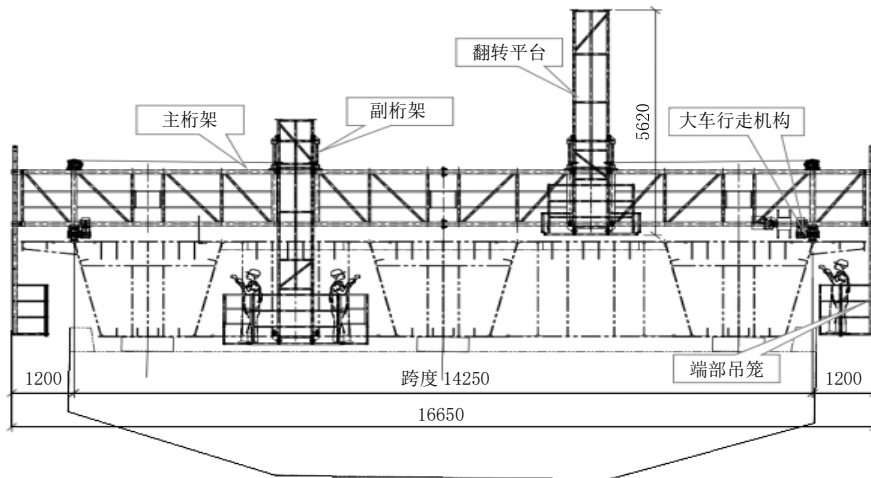


图2 自行走施工平台

表1 平台性能参数表

项目	规格参数	备注
主桁架内宽、轮距	1 200 mm (内宽)、轮距 (2.5 m)	方管焊接结构
电动翻转平台数量	4	
翻转平台有效载荷	180 kg/个	
平台有效升降净高度	不小于 3.1 m	
平台升降速度	8 m/min	各自独立升降
整车行走速度	1.2 ~ 12 m/min	变频控制
其他载荷	4台 CO <sub>2</sub> 焊机, 2×3 个气瓶	
主、副桁架结构材质	Q355B	
行走供电方式	电缆卷筒	

#### 4.2 应用效果分析

1. 相比固定施工平台, 自行式高空作业平台可以自行转换工作面, 不需依靠起重机在工作面之间转移, 使用方便, 不需要频繁地安装和拆卸, 有效降低了现场工作量, 同时减少了吊装作业风险。

2. 自行式高空作业平台成本高, 适用于线路长、体量大的项目。

3. 设计使用的自行式高空作业平台采取电缆卷筒供电行走, 不方便使用, 可以改进为电池供电。

#### 5 结束语

本文围绕分体式三箱槽形钢梁高处焊接施工的安全防护问题进行了深入研究与实践。模块化安全通道使用方便, 规范化、集成固定施工平台全包围防护安全可靠; 自行式高空作业平台可以不需依靠起重机在工作面之间转移, 降低安拆、吊装风险, 可以减少固定施工平台的投入数, 同时功能多样化、使用灵活。

各项安全技术和工装的使用, 为作业人员提供了安全技术保障, 取得了良好的使用效果, 有效推动了高处焊接作业的顺利实施, 可供类似钢桥高处作业参考。

#### 参考文献:

- [1] 惠思楠, 彭章勇, 魏斌, 等. 一种开口钢梁用安全通道: CN202320888046.6[P].2023-09-22.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程施工安全技术规范(JTG F90-2015)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [3] 张国江, 任小霞. 关于钢桥梁安装过程中高空安全防护方面的探究[J]. 建筑安全, 2021(11):22-26.
- [4] 易鲁, 姜业成. 沌口大桥大挑臂帽梁二次张拉移动式作业平台设计与应用[J]. 交通工程建设, 2019(02):8-11.
- [5] 娄松, 王文武. 轻型装配式桥梁维修吊挂平台研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(03):14-20.

# 无地面预加固工况的软弱地层中急曲线盾构施工技术研究

沈 蔚

(上海城投水务项目管理有限公司, 上海 201100)

**摘 要** 针对城市地下管网建设中为避让既有设施而形成的急曲线线形施工难题, 以上海桃浦雨水调蓄工程为背景, 系统研究了无地面预加固工况的软弱地层中急曲线盾构施工关键技术。通过研发专用盾构装备、创新管片结构设计以及优化沉降控制工艺, 形成了一套完整的急曲线盾构施工技术体系。研究表明: 采用针对性研发的球型铰接系统和仿形刀超挖技术的专用盾构机可满足急曲线施工 ( $R=150\text{ m}/R=190\text{ m}$ ) 要求; 采用小环宽、大楔形量的复合管片结构能有效适应急曲线线形; 创新引用克泥效工艺与围岩注浆相结合的综合控制措施可将地表沉降控制在  $1\text{ cm}$  以内。该技术成功解决了软弱地层无预加固条件下急曲线施工的技术难题, 可为类似工程提供参考。

**关键词** 软弱地层; 急曲线盾构; 球铰接系统; 复合管片; 沉降控制

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.021

## 0 引言

根据《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446-2017), 急曲线盾构段是指平面曲线半径小于  $300\text{ m}$ , 或平面曲线半径小于  $40$  倍盾构直径的特殊地段<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 60 年代起, 日本、法国等国家在急曲线盾构技术领域取得了显著进展。例如: 日本在排水隧道中实现了  $R=8\text{ m}$  的特急曲线施工, 展现了其在微型盾构与精准控制方面的技术领先性<sup>[2]</sup>。此外, 法国 Ru de Marivel 工程 ( $R=90\text{ m}$ )、新加坡电力隧道 ( $R=100\text{ m}$ ) 等项目的成功实施也为急曲线技术积累了丰富的经验。近年来, 国内急曲线盾构技术逐步发展。上海桃浦雨水调蓄工程在软弱淤泥质土中成功完成了  $R=115$  的急曲线掘进, 为类似地质条件下的施工提供了宝贵案例<sup>[3]</sup>。此外, 乌鲁木齐电缆隧道 ( $R=80\text{ m}$ )、长沙万家丽电力隧道 ( $R=150\text{ m}$ ) 等项目的顺利实施, 也标志着我国在该领域取得了重要突破。然而, 现有成功案例多集中于较硬土层或经过预加固处理的软土地层, 在无地面预加固的软弱地层中实施急曲线盾构施工尚无先例。

随着城市地下空间开发日益密集, 新建地下管网常为避让既有建(构)筑物和地下基础设施, 不得已设计为复杂的急曲线线形。尤其在软弱土层中, 传统的盾构施工技术需克服侧向反力不足、轴线控制困难及地层扰动控制等难点。本文基于上海桃浦雨水调蓄工程的实践, 系统研究了无预加固软弱地层中急曲线盾构

施工的关键技术, 形成了一套完整且可行的施工工法。

## 1 工程概况

### 1.1 工程急曲线概况

上海市桃浦雨水调蓄工程 DG14 ~ DG11 隧道区间全长  $1\ 332.6\text{ m}$ , 隧道外径  $5\ 200\text{ mm}$ , 内径  $4\ 500\text{ mm}$ , 管片厚度  $350\text{ mm}$ , 环宽  $1\ 200\text{ mm}$ , 采用  $\text{Ø}5400\text{ mm}$  土压平衡盾构机施工。由于 DG13# 井及 DG12# 井周边管线密集且存在既有建筑, 周边道路交通繁忙, 实施难度极大, 经技术经济比较, 决定取消该井位, 将原设计三段 DG14 ~ DG13、DG13 ~ DG12、DG12 ~ DG11 盾构区间整合为一段 DG14 ~ DG11 盾构区间, 在原井位区域形成一段“S”型急曲线盾构隧道, 转弯半径  $R=150\text{ m}$  和  $R=190\text{ m}$ , 总长度  $354\text{ m}$ 。具体分段为:  $R150$  段长度  $153\text{ m}$ 、中间直线段长度  $25\text{ m}$ 、 $R190$  段长度  $176\text{ m}$ ; 其中急曲线段 ( $R150$  与  $R190$ ) 采用复合管片, 中间直线段采用常规混凝土管片。这一优化既解决了中心城区落井困难问题, 又显著降低了对周边环境的影响, 减少了社会维稳压力。

### 1.2 工程地质情况

工程场地属于典型的滨海平原相地质环境, 隧道主要穿越④1 灰色淤泥质粘土、⑤1 灰色粘土。这些土层具有强度低、渗透性差、含水量高、压缩性高、灵敏度高工程特性, 并表现出明显地触变性和流变

作者简介: 沈蔚 (1979-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理和工程造价。

性。④ 1 灰色淤泥质粘土：标准贯入 N 击为 1.4，无侧限抗压强度 38 kPa，地基承载力特征值 55 kPa。⑤ 1 灰色粘土软弱土层：标准贯入 N 击为 3.7，无侧限抗压强度 70 kPa，地基承载力特征值 70 kPa。

此类土层为典型的软弱淤泥质地层，且急曲线区间位于市属河道及交通繁忙的道路下方，地面预加固措施极难实施。故而在无预土体加固情况下的急曲线盾构施工带来了三大主要挑战：（1）土体自稳性极差，对开挖面压力控制精度要求极高；（2）地层侧向承载力低，急曲线段盾构转向所需的反力难以保证；（3）土体扰动极为敏感，施工不当易导致过大沉降。针对无地面预加固工况下的软弱淤泥地层急曲线施工，通过在设备、设计与施工三个方面进行联合技术攻关。

## 2 盾构机针对性设计

### 2.1 刀盘与超挖系统

为使盾构机在软弱地层中具有更好的稳定性和适应性，采用高开口率刀盘设计（开口率 48%）及双仿形刀配置。该设计不仅能防止黏土附着，显著提升渣土摄入效率，还能实现精准超挖。此设计理念与日本清濑市雨水干线工程中为硬度砾石与粘土夹层而采用 65% 高开口率的策略不谋而合<sup>[4]</sup>。在刀具系统方面，优化了原有 16 把刀的布局，新增 15 把贝壳刀，进一步提升刀盘清障与切削能力。此外，配置了一备一用双仿形刀系统，最大超挖量达 50 mm，该双套冗余设计显著提高了系统可靠性，有效避免因仿形刀失效导致的施工中断。

### 2.2 盾体铰接系统

该设计创新性地引入了前盾与尾盾两节式盾体结构，并采用先进的球铰技术。通过将铰接油缸作用力分布于中心转轴两侧，主机可实现更小半径的转弯能力，具备转弯灵活、姿态控制精准、转弯半径小等显著优势，最大可满足 R80 m 急曲线施工需求。在推进过程中，通过油缸推力分区控制，可将推力降至常规值的 80%，同时推进速度可控制在 15 ~ 20 mm/min，确保了精准、平稳的转向效果。

### 2.3 螺旋输送机与出渣系统

螺旋输送机前端支承同样采用球铰设计，有效解决急转弯时的空间干涉问题。皮带机支架设置调节杆进行调向，通过灵活调节托辊位置以适应弯曲段的渣土输送需求。

## 3 管片结构优化设计

### 3.1 急曲线段管片选型设计

急曲线段采用环宽 1 000 mm、单面楔形量 26 mm 的“混凝土—圆弧端面钢环板”复合管片结构，并应

用通用双面楔形衬砌环设计。该设计通过减小轴线环宽与增大楔形量相结合，实现了对小半径曲线的线路精准拟合。其技术优势主要体现在以下方面：（1）管片环具有良好的转向灵活性，能够有效契合急曲线施工的线形要求；（2）圆弧端面设置的钢环板显著增强了管片的结构强度，在急转弯受力过程中有效防止了边角压损；（3）相较于全钢管片方案，该复合结构在满足同等力学性能的前提下，实现了约 56% 的成本节约。

### 3.2 管片拼装质量控制

采用了管片真圆度自动测量系统，对管片拼装状态进行实时监测。通过传感器连续测量管片拼装的关键参数，严格控制管片接缝的压缩量，确保了密封材料达到预期的止水效果。实践表明，管片拼装前后的隧道形状测量对成环精度的提高极为有效，通过自动测量获取的管片拼装状态数据，能够及时反馈并应用于盾构机掘进管理及后续管片的拼装管理调整中。

### 3.3 管片拼装工艺优化与质量控制

通过优化拼装流程，采用“先下后上、左右交错、封顶块纵向插入”的顺序，有效降低了拼装过程中的不均匀受力。拼装时严格控制盾构推进油缸的收回顺序与压力，避免对已拼装管片产生过大偏压。同时，为应对软弱地层管片易发生位移的特点，在每环管片拼装完成后立即采用临时限位装置进行径向约束，直至注浆体达到一定强度。这一系列精细化拼装措施，确保了管片环间错台控制在 3 mm 以内，接缝张开量小于 1 mm，满足了急曲线隧道对管片成环质量的高标准要求。

## 4 沉降及轴线位移控制技术

### 4.1 克泥效工艺应用

通过定制的专用台车（长 5.3 m，宽 0.7 m）实施克泥效注浆。该工法的应用符合《特殊地段盾构施工技术规范》（T/DGGC 017-2022）中关于在变形控制严格地段应采取有效措施及时填充盾尾间隙的规定<sup>[5]</sup>。

经多次配比试验，确定最佳配比为克泥效粉：水：水玻璃=420:839:50（质量比），R150 段注浆量为 1.28 m<sup>3</sup>/m，R190 段为 1.2 m<sup>3</sup>/m，按超挖理论间隙 200% 填充，有效控制盾尾空隙处的土体应力释放及地面沉降。

### 4.2 围岩注浆加固

盾构脱离 10 环后进行围岩注浆，《软硬不均与极软地层盾构处理技术》一书指出，在极软地层中，双液浆能快速凝固，有效抑制管片上浮和地层后期沉降<sup>[6]</sup>。本工程采用 P.042.5 普通硅酸盐水泥与水玻璃双液浆，水灰比 1:1，水泥浆与水玻璃注入比 1:1。每环布置 6 个孔，每孔注浆量约 3 m<sup>3</sup>，注浆范围覆盖隧道外侧 3 m

区域,注浆压力根据地层深度分级控制。参考相关软土地层盾构隧道无沉降施工技术,通过信息化监测数据及时调整盾构掘进参数,并依据计算沉降值预留隆起量,通过注浆措施维持隆起量以抵消后续的滞后固结沉降。

#### 4.3 囊袋注浆技术

在围岩注浆同时,辅以囊袋注浆,进一步加强隧道稳固性。注浆点布置在隧道上方和下方各两个孔,单孔注浆量约为  $0.07 \text{ m}^3$ 。注浆后形成的囊袋直径约为  $70 \sim 80 \text{ cm}$ ,厚度为  $8 \sim 12 \text{ cm}$ 。该技术有效弥补了传统注浆的不足,在软弱地层中形成了局部的微型固定桩,增强隧道结构的整体稳定性,抵抗盾构急转弯时的侧向反力。在急曲线掘进期间,隧道最大水平位移始终保持控制在  $1 \text{ cm}$  以内。

#### 4.4 信息化施工与动态调控体系

为了精确掌控急曲线施工全过程,本项目搭建了基于数据的智能化施工管控平台。平台集成了地质预报、盾构姿态、注浆与土仓压力、地表沉降、管片内力等多源监测信息,依托算法模型实现实时分析、动态预警。例如:平台能根据历史掘进数据和实时地质条件,自动推荐较优掘进参数;一旦监测到沉降速率异常,系统即时提示调整克泥效注浆量或推进速度。同时,结合 BIM 技术,实现了施工进度与地质模型的三维可视化,支持对急曲线段施工的直观监测与模拟推演。该平台的应用,既提高了施工决策的科学性与时效性,也为后续同类工程沉淀了可复用的数字资产。

### 5 工程监测与效果评价

#### 5.1 隧道轴线控制精度

隧道轴线采用自动导向系统、盾尾空隙测量系统与管片真圆度监测系统,实现了对掘进过程的精准控制。在此基础上,通过增加隧道内测量迁站频次、加密隧道控制点复测等措施,进一步提升了轴线控制精度。在急曲线掘进期间,将隧道最大轴线偏差成功控制在  $4 \text{ cm}$  以内。

#### 5.2 地层沉降监测结果

通过监测数据显示,隧道沿线地表最大沉降量被控制在  $1 \text{ cm}$  以内,达到了毫米级微扰动施工的控制标准,这得益于克泥效工艺、精准的土压平衡控制以及合理的注浆参数等综合技术的应用,最大限度地减少了施工对周边土体扰动。

#### 5.3 管片受力监测分析

传感器监测数据显示,管片连接螺栓承受地最大轴力为  $100 \text{ kN}$ ,管片承受的最大土压力为  $0.32 \text{ MPa}$ 。

所有监测数据均符合设计及相关规范要求,表明管片结构在整个顶进及转弯阶段均处于安全受控状态。

### 6 结论

1. 针对软弱地层急曲线施工中的设备适应性难题,通过研发采用球型铰接系统、仿形刀超挖等创新技术的专用盾构装备,实现了技术突破。高开口率刀盘与针对性刀具系统的应用,进一步提升了设备在恶劣地层中的性能与耐久性。

2. 在管片结构设计方面,创新采用了小环宽、大楔形量复合管片,兼顾了急曲线拟合精度与经济性要求。基于盾构隧道管片与线路的几何关系,优化了通用楔形环管片的楔形量与环宽参数选取方法。

3. 在无地面预加固工况的急曲线施工过程控制方面,构建了涵盖克泥效工艺与围岩注浆等综合措施的微扰动控制技术体系,实现了毫米级沉降控制。该体系借鉴软土地层无沉降施工技术,结合理论计算与试验段数据分析,科学制定了全过程控制隆沉的施工方案。

4. 为实现施工过程的精细化管控,建立了贯穿全程的信息化监控系统。依托盾构管控中心,对推力、姿态、注浆量等关键参数进行集中监控,并实时动态调整施工工艺,有力保障了急曲线施工的安全与精度。

该工程实践表明,在无地面预加固工况的软弱地层中实施急曲线盾构施工,技术上可行、经济上合理。所形成的关键技术体系,为国内外类似地质条件下的隧道工程建设提供了重要的技术借鉴与成功范例。未来的研究可进一步结合数值模拟与模拟试验,深入分析急曲线掘进对周围土体的扰动机理,实现更精准的预测与控制。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构法隧道施工及验收规范(GB 50446-2017)[S].2017-07-01.
- [2] 陈仙宇,李杰.浅覆土软弱地层盾构近距离上跨地铁运营隧道施工控制技术研究[J].福建建设科技,2025(01):74-77.
- [3] 罗云峰,李吉勇,刘桂荣.淤泥质软土地层急曲线盾构隧道施工关键技术研究及应用[J].建筑施工,2024,46(08):1207-1211.
- [4] 同[2].
- [5] 北京盾构工程协会.特殊地段盾构施工技术规范(T/DGGC 017-2022)[S].2022-09-17.
- [6] 陈馈,王旭阳,李宏安.软硬不均与极软地层盾构处理技术[M].上海:上海科学技术出版社,2019.

# 智慧供热节能减排效果评估研究

吴 斌

(陕西首创天成工程技术有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要** 在双碳目标导向下, 建筑领域碳排放管控构成绿色发展核心任务。集中供热作为建筑运行阶段主要碳排放源, 其节能减排潜力亟待挖掘释放。智慧供热整合信息技术、物联网、大数据等技术, 通过系统智能化调控、清洁能源融合及用户侧精准管理, 实现供热系统高效运行状态。基于碳排放因子法、实地调研与数据监测手段, 对智慧供热节能减排成效开展量化评估, 结果显示: 节能率达16.0%、节电率10.2%, 年减排二氧化碳0.84万吨, 大幅降低了燃煤消费引发的碳排放与颗粒物污染。智慧供热在提升能源利用效率、减少环境污染的同时, 也推动了供热行业技术创新与模式转型, 为建筑领域碳达峰、碳中和目标落地提供重要支撑, 具有实践价值与推广前景。

**关键词** 智慧供热; 节能减排; 评估体系; 集中供热; 碳减排

中图分类号: TU995

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.022

## 0 引言

在双碳目标引领下, 建筑领域碳排放治理已成为高质量发展核心议题。集中供热作为建筑运行阶段碳排放的主要贡献主体, 其低碳转型进程直接关系到生态环境改善与能源安全保障。智慧供热突破传统供热模式桎梏, 依托信息技术与低碳技术的深度融合, 实现热源、热网、用户端的智能化调控与协同优化, 为节能减排注入全新动能。科学评估智慧供热的节能减排成效, 是验证技术可行性、优化推广策略、完善政策支持的关键前提, 可为行业转型提供数据支撑, 亦能为同类低碳技术应用提供参考范式。立足这一现实需求, 聚焦智慧供热运行特性与减排逻辑, 通过量化指标与系统分析开展成效评估, 已成为推动供热行业高效低碳发展的重要研究方向。

## 1 智慧供热节能减排评估的现实困境

### 1.1 评估标准与指标体系异构性突出

智慧供热行业尚未形成统一的节能减排评估标准体系, 技术标准、管理规范与服务准则的缺失导致评估工作缺乏统一遵循。不同主体采用的评估指标存在显著差异, 部分评估侧重单位面积能耗降幅、节煤量等能源消耗指标, 部分聚焦二氧化碳、污染物排放削减量等环境指标, 还有的仅关注节电率、运行成本降低幅度等单一维度, 缺乏涵盖能源利用效率、污染物减排、系统运行稳定性、用户侧响应效果的综合指标框架。同时, 核心指标的定义与计算口径不统一, 如节能率

的测算既存在“基于设计能耗”与“基于实际运行能耗”的差异, 碳减排量计算中碳排放因子的选取也缺乏统一规范, 导致不同区域、不同项目的评估结果不具备横向可比性, 无法形成行业通用的成效判定依据。

### 1.2 数据采集与质量管控存在显著短板

智慧供热节能减排评估体系的构建与落地, 迫切需要全链条全流程的数据作为支撑。当前数据采集与管控环节却存在诸多现实瓶颈, 直接制约评估工作的全面性与准确性。数据来源呈现高度分散特征, 热源端、热网端及用户端的数据由各类独立设备分别采集, 缺少统一规划与管理。物联网终端与传感器采用的技术标准各不相同, 设备兼容性不佳、接口异构问题显著, 多源数据难以高效整合与互联互通<sup>[1]</sup>。数据质量管控体系尚未健全, 部分区域仍在投用的老旧供热设备技术落后、监测精度不足, 极易造成关键数据失真。数据传输过程中, 受网络信号波动、带宽限制等因素影响, 数据延迟、丢包等现象频繁出现, 进一步削弱数据的实时性与可靠性。行业内部未建立有效的数据共享与协同机制, 不同企业、系统之间形成明显“数据孤岛”, 评估工作无法获取连续、完整的全流程数据, 直接影响最终评估结论的科学性与准确性, 也限制智慧供热系统在节能减排领域的实际应用成效。

### 1.3 评估方法与应用场景适配性不足

智慧供热节能减排评估方法现存显著技术适配短板, 难以充分匹配现实中多样供热场景与技术实施路

作者简介: 吴斌(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 供热、锅炉、暖通工程。

径。当前多数评估依托碳排放因子法、能耗对比法等单一核算模型，这类模型未能全面覆盖智慧供热系统从设计、建设、运行至维护的全生命周期流程。现有评估手段常忽视不同热源类型、供热规模及建筑热工特性等关键场景差异，使得构建的评估模型在实际应用中针对性与适用性不足。面对多能互补集成系统、人工智能动态调控等新兴技术模式，现有评估方法的局限更为突出。既无法有效量化多元能源与技术间的协同减排效应，也难以精准区分并剥离智慧供热技术与其他节能管理措施的各自贡献占比，进而影响评估结果的科学性与可信度<sup>[2]</sup>。当前评估体系普遍缺失灵活自适应的动态调整机制，无法及时响应并融合持续迭代的技术创新与运行数据，导致部分新型智慧供热技术的实际节能减排效果难以被客观精准测算与验证。

## 2 智慧供热节能减排评估体系构建

### 2.1 评估体系构建核心原则

评估体系以系统性、科学性、实操性、动态性为核心导向。系统性原则覆盖智慧供热全链条，兼顾热源端、热网端、用户端，整合能源消耗、污染物排放、系统运行、用户响应等多维度要素，规避单一维度评估的片面性。科学性原则锚定指标定义、计算口径与评估方法的标准化，参考《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2020）及《工业企业温室气体排放核算和报告通则》（GB/T 32150-2015）等国家标准，统一节能率、碳减排量等核心指标测算逻辑，保障评估结果横向可比。实操性原则聚焦数据可获取性与方法易用性，选取指标与现有智慧供热监测平台采集能力匹配，评估方法避免过度复杂模型，便于落地应用。动态性原则预留新型技术评估接口，定期更新碳排放因子、能耗基准值等关键参数，适配技术迭代与场景拓展需求。

### 2.2 多维度指标体系设计

指标体系采用“一级维度—二级核心指标—三级计算标准”层级结构，设 4 个一级维度、12 项核心指标。能源利用效率维度包含单位面积能耗降幅、综合能效提升率、节电率，其中单位面积能耗降幅以改造前实际运行能耗为基准，计算公式为（改造前单位面积能耗—改造后单位面积能耗）/ 改造前单位面积能耗 × 100%，综合能效提升率统筹热源、管网、终端效率协同提升效果。污染物减排维度涵盖二氧化碳减排量、污染物排放削减率，前者采用“能源消耗量 × 碳排放因子 × 节能率”的碳排放因子法计算，后者聚焦颗粒物、二氧化硫等关键污染物降幅<sup>[3]</sup>。

系统运行优化维度主要包括管网传输损耗率、供

热平衡度以及故障预警准确率，这三个方面分别反映了热网运行效率、用户室温达标水平以及整体系统的稳定性和可靠性。通过降低管网传输损耗率，可以提升热网的能量传输效率；提高供热平衡度有助于保障不同区域用户的室温需求得到均衡满足；而优化故障预警准确率则能够提前发现并处理潜在问题，从而增强系统的持续稳定运行能力。用户侧响应维度则涵盖用户温控参与率、按需用热比例以及用户满意度，这些指标体现了供热系统在引导用户合理用热、提升能源利用效率方面的作用，同时也反映了供热服务的质量改善和用户实际体验的提升。

### 2.3 评估方法融合与场景适配

构建“基础核算+精准校验+场景细分”的多元评估方法体系。基础核算采用碳排放因子法与能耗对比法结合，优先选用区域本地化碳排放因子，缺乏时参考国家通用因子；能耗对比法通过改造前后同期数据纵向对比，排除气象、用热需求等外部干扰。精准校验引入数据监测法与全生命周期评估法（LCA），依托智慧供热平台实时追踪热源能耗、管网损耗等数据，LCA 覆盖系统建设、运行、维护全阶段，避免仅关注运行阶段的片面性。场景适配方面，针对热电联产、清洁能源互补等不同热源类型，以及集中供热、分布式供热等不同规模场景，制定差异化指标权重与方法参数，采用差分模型剥离智慧供热技术与其他节能措施的减排贡献度，提升评估针对性。

### 2.4 数据采集与质量保障机制

建立“统一标准—全链采集—分级管控”的数据支撑体系。数据采集标准统一物联网终端、传感器、热量表等设备的技术参数与数据接口，明确能耗、温度、流量等数据的采集频率（热源端每 15 分钟一次，用户端每小时一次）与传输格式，保障数据兼容性<sup>[4]</sup>。全链采集依托智慧供热云平台，整合热源、热网、用户端数据，通过边缘计算实现实时上传与初步处理，打破“数据孤岛”。质量管控实施三级校验：设备自检剔除异常数据，数据一致性算法修正偏差，人工复核确认关键数据；同时建立数据溯源机制，记录采集、传输、处理全流程信息，确保评估数据可追溯、可核查。

## 3 基于评估体系的智慧供热节能减排成效实证验证

### 3.1 实证案例概况

选取某城市片区集中供热智慧化改造项目作为实证对象，该项目供热范围涵盖居民住宅与小型公共建筑，总供热面积 180 万平方米，热源为热电联产，改造前采用传统人工调控模式，存在热耗偏高、管网冷

热不均、故障响应滞后等问题。项目于2023年完成智慧化升级，搭建覆盖“源—网—站—户”的全链条智慧供热管理平台，整合AI负荷预测、数字孪生管网仿真、分户智能调控等技术，同步完成45座换热站无人值守改造及末端智能阀门加装，配套建立全流程数据采集与质量管控体系，数据采集频率热源端每15分钟1次、用户端每小时1次，符合评估体系数据支撑要求。

### 3.2 实证测算与结果分析

依据构建的多维度评估体系，采用“碳排放因子法+能耗对比法+数据监测法”的融合评估方法，选取区域本地化燃煤碳排放因子 $2.49 \text{ tCO}_2/\text{tce}$ ，对项目改造前后2022-2023年采暖季与2023-2024年采暖季

的运行数据进行纵向对比，剥离气象、用热需求等外部干扰因素，核心指标测算结果如表1所示。

数据显示，项目改造后能源利用效率显著提升，单位面积能耗降幅达16.0%，超出行业平均节能率15%的基准线，综合能效提升率15.3%，印证了智慧调控对热源、管网、终端效率的协同优化作用；污染物减排成效突出，通过碳排放因子法测算，年减排二氧化碳0.84万吨，颗粒物排放削减率62.5%，实现环境效益与节能效益协同；系统运行稳定性大幅增强，管网传输损耗率从12.3%降至6.8%，故障预警准确率提升至95.7%，有效降低运维成本；用户侧响应效果显著，用户温控参与率提升至68.3%，用户满意度达94.2%，实

表1 智慧供热改造前后节能减排核心数据对比

一级维度	核心指标	改造前数值	改造后数值	变化幅度
能源利用效率	单位面积能耗 ( $\text{kgce}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$ )	22.5	18.9	下降16.0%
	二氧化碳减排量 (万吨)	—	—	0.84
污染物减排	颗粒物排放削减量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	0.08	0.03	下降62.5%
	管网传输损耗率	12.3%	6.8%	下降44.7%
系统运行优化	故障预警准确率	65.2%	95.7%	提升30.5%
	用户温控参与率	12.1%	68.3%	提升56.2%
用户侧响应	用户满意度	78.5%	94.2%	提升15.7%

现从“粗放供热”向“按需用热”的转型。

### 3.3 成效验证结论

实证结果表明，构建的智慧供热节能减排评估体系具备良好的科学性与实操性，其指标选取、计算口径及评估方法能够精准量化智慧供热技术的减排成效。该180万平方米级项目的实践验证，进一步佐证了智慧供热可实现15%以上的节能率及10%以上的节电率，显著降低碳排放强度，同时提升系统运行效率与用户服务质量。评估体系对不同维度成效的差异化测算，为剥离智慧供热与其他节能措施的贡献度提供了有效路径，可为同类中大型集中供热项目的智慧化转型与成效评估提供参考范式<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

智慧供热作为供热行业低碳转型的核心路径，其节能减排效果的科学评估是技术推广与政策落地的关键支撑。本文针对当前评估存在的指标不统一、方法适配性不足等困境，构建了涵盖节能率、节电率、碳减排量等核心指标，融合数据监测与碳排放因子法的评估体系，并通过实证分析验证了其可行性。结果表明，智慧供热可通过全流程优化与技术赋能实现显著减排，

为建筑领域“双碳”目标达成提供有效助力。未来，需进一步完善评估标准、扩大实证范围，推动智慧供热技术与评估体系深度融合，为行业绿色高质量发展提供更坚实的理论与实践支撑。

### 参考文献：

- [1] 周璐,房帅.智慧供热技术在城市供热管理中的应用与挑战[J].内蒙古科技与经济,2025(18):147-151.
- [2] 齐雪.探究智慧供热助力城市节能减排[J].大众标准化,2024(11):155-157.
- [3] 关宝良,梁辰,乔梁,等.“双碳”背景下智慧供热发展与探讨[J].河南科技,2022,41(10):96-100.
- [4] 郭春梅,李家璇,贺中禄,等.智慧供热对集中供热节能减排影响的调研与分析[J].资源节约与环保,2023(07):1-4.
- [5] 陈爽.智慧供热助力城市节能减排[J].资源节约与环保,2021(07):5-6.

# 输变电设备信息化管理平台构建与优化

夏 斌

(信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司无锡分公司, 江苏 无锡 214063)

**摘 要** 输变电设备作为电力系统稳定运行的核心载体, 其管理水平会对电网供电的可靠性造成直接影响。信息化管理平台能够为输变电设备的管理工作提供高效支撑, 但是当前该平台在应用过程中存在一系列问题。基于此, 本文对平台的核心价值以及行业现状进行了明确界定, 深入剖析了管理以及平台应用所面临的瓶颈, 进而提出涵盖目标定位、架构设计、数据构建、数据采集等内容的构建策略, 并从功能、数据等不同的维度提出了优化路径, 以期为提升输变电设备的管理效能提供方案参考。

**关键词** 输变电设备; 信息化管理平台; 运维检修

**中图分类号**: TM73; TM76

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.023

## 0 引言

伴随电力系统朝着智能化以及规模化的方向发展, 输变电设备的数量大幅增加, 并且技术复杂程度显著提升, 以传统人工为主要方式的管理模式已经难以与现代电网的管理需求相匹配。输变电设备分布范围广泛, 运行环境复杂, 其一旦发生故障, 极有可能导致大面积停电。所以, 具备高效性的设备管理是确保电网安全的重要因素。目前, 部分电力企业的平台建设依然处于起始阶段, 存在着数据联动不够充分、与业务相互脱离等状况。鉴于此情况, 探究研究平台的构建手段以及优化路径, 对于促进输变电设备管理的提升、确保电网的平稳运行, 具备突出的现实价值。

## 1 输变电设备信息化管理平台的基础认知

### 1.1 输变电设备的管理特征与信息化需求

从管理范畴看, 输变电设备包含了像变压器、断路器以及输电线路等多种类别, 且分布于诸如城市、山区这些不同区域中。传统的依靠人工进行巡检并且采用纸质记录的方式, 很难达成对设备信息的集中性管控。管理的链条贯穿于设备从采购开始, 历经安装调试、运行监测、运维检修直至退役报废的整个生命周期, 各个环节所产生的数据分散在不同的部门之内, 需要借助信息化的相关手段达成数据的串联。

### 1.2 信息化管理平台对输变电设备管理的核心价值

在效率增进层面, 平台借助流程的数字化手段来取代人工的操作行为, 例如: 能够在网络上生成巡检

的任务, 还可以自动整合设备的数据。与此同时, 达成了各个部门数据的即时共享, 防止了重复录入数据以及信息延迟。在安全保障领域, 平台对设备运行的监测数据进行整合, 通过设定阈值来发出预警并且开展趋势方面的分析, 得以预先识别出像绝缘老化、温度异常这类具有潜在性的故障, 这为运维检修工作提供了精确的依据, 从而降低了设备发生故障的概率, 减少了非计划性停电的时间<sup>[1]</sup>。

### 1.3 输变电设备信息化管理的行业发展现状

在电力行业中, 大规模的电力集团借助其在资金以及技术的显著优势, 已然构建起能够覆盖省级范围乃至更广泛的区域级的信息化管理平台。该平台巧妙地融合了物联网、大数据等先进技术, 达成了对设备的智能化监测以及精细化管理。在此过程中, 部分前瞻性企业还引入了诸如无人机巡检设备、在线监测装置这类先进的设备, 以此大幅提升了数据采集的自动化程度。与之对比的是, 中小型电力企业由于受到资源条件的诸多限制, 其信息化平台的建设进度相对迟缓, 其中部分企业目前仍然依赖简单的数据库系统或者单机版管理软件。

## 2 输变电设备管理及平台应用的现存问题

### 2.1 设备信息碎片化, 数据共享与联动不足

输变电设备管理如今面临的显著难题是设备信息碎片化, 这种状况直接造成了数据共享以及联动方面的欠缺。在传统的管理模式中, 物资部门留存着设备

**作者简介**: 夏斌(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

采购的数据，运维部门负责记录运行数据，而检修数据则分散于各个检修班组。各个部门运用相互独立的信息记录形式。由于缺乏数据共享机制，各部门依据自身的需求来维护数据，没有构建起统一的数据更新与共享流程。如此，运维部门无法在第一时间获取到设备最新的采购信息，物资部门也很难掌握设备的运行情况，数据之间的联动性不佳，这对管理决策的科学性以及及时性都产生了影响<sup>[2]</sup>。

## 2.2 平台功能单一，难以支撑全流程管理需求

平台功能单一，难以对输变电设备全流程管理的需求起到支撑作用，成为限制平台应用价值得以充分发挥的关键阻碍因素。当下，大多数已有的平台主要侧重于数据存储功能，仅能够达成设备基础信息的录入、查询以及简单的统计工作，在对设备全生命周期各个环节的支撑功能方面存在缺失。在设备采购阶段，无法让供应商管理以及采购流程实现线上化；在运行阶段，缺少多维度数据的综合分析功能以及故障预警功能；在检修阶段，无法实现检修计划的智能生成以及对检修过程的跟踪。

## 2.3 数据采集方式落后，信息实时性与准确性欠缺

由于数据采集方式落后，使得设备信息在实时性以及准确性方面有所欠缺，进而对平台数据质量以及应用效果产生影响。当下，部分电力企业依旧主要依靠人工巡检采集数据，巡检人员借助纸质记录或者通过手机 APP 手动录入设备参数。这种方式不仅效率低下，而且易因为人为失误而造成数据出现错误，比如遗漏记录设备温度、错误填写绝缘电阻值等情况时有发生。即便有些企业采用了自动化采集设备，不过依然存在覆盖范围不够全面的问题，仅在关键的设备上安装了在线监测装置，而大量中小型设备仍然要依靠人工采集，无法达成对设备状态的全面感知<sup>[3]</sup>。

## 2.4 平台与业务流程脱节，运维检修协同效率低

平台和业务流程相互脱节，造成了运维检修协同效率较低，难以全面展现出信息化管理的优势。当下，现有的平台大多是“技术驱动型”，在建设过程中没有充分地与电力企业的实际业务流程进行融合，进而致使平台的功能和实际工作中的需求存在不相符的情况。例如，平台所生成的巡检任务和运维班组的工作范围并不契合，又或者检修流程在线上的审批环节和线下的管理流程产生冲突。在平台中，各个业务环节之间缺乏具备效力的协同，当巡检工作开展过程中被发现设备有故障之后，需要人工操作把相关信息传输到检

修部门，而不能借助平台自动开启检修任务分配、备件调配这类流程，这样的情况使得检修响应时长增加。

## 3 输变电设备信息化管理平台的构建策略

### 3.1 明确平台构建目标与核心功能定位

平台的构建应以达成“数据融合、流程贯通、智能决策”等目标为导向，进而达成输变电设备在整个生命周期内的信息化管理，让管理的效率以及设备运行的可靠程度提升。在此基础上，核心功能的定位应涵盖四个重要模块。基础数据管理模块承担着对设备全生命周期数据进行集中存放与统一管控的职责，达成设备信息的标准化录入以及快速查找；运行监测模块持续且实时地收集设备运行的各项参数，实现对异常数据的提前警示以及设备状态的评估；运维检修管理模块为巡检计划的制定、故障的报修、检修流程的追踪等整个流程的管理提供支持；决策分析模块借助数据的挖掘以及模型构建，为设备的更新改造、运维资源的分配提供智能化建议，以此保证平台的功能能够与管理的需求高度匹配。

### 3.2 设计“数据层—功能层—应用层”的平台架构

数据层作为平台的根基，承担着整合各种数据资源的任务，这些数据资源包含了设备的基础数据、运行监测数据以及运维检修数据等。它借助数据仓库技术达成数据的集中式存储，运用标准化的数据格式以及接口的规范，以此保障数据具备一致性以及兼容性。功能层作为平台的核心支撑要素，以数据层所提供的数据资源为基础，达成数据处理、流程管控、智能分析等关键功能。它通过微服务架构把各个功能模块进行解耦操作，从而有利于功能的升级以及扩展。针对不同的用户群体，像运维方面的人员、管理领域的人员、决策层面的人员，应用层会提供具备个性化特征的应用界面以及功能入口，通过这些界面和入口，能够达成数据可视化呈现、业务流程执行、决策报告制作等特定应用，进而满足不同角色的使用需求<sup>[4]</sup>。

### 3.3 构建全生命周期设备信息数据库

数据库应包含设备自采购直至退役这一整个流程的数据。在采购阶段，要记录诸如设备型号、供应商信息、采购合同、验收报告等方面的数据；在安装调试阶段，需录入像安装位置、调试参数、验收结论等信息；在运行阶段，要实时存储设备运行时的电压、电流、温度等进行监测得到的数据，以及定期开展巡检形成的记录；在运维检修阶段，要记录故障信息、检修方案、备件进行更换情况、检修效果作出的评估

等方面的内容;退役报废阶段,要归档设备的使用时长、退役的具体原因、处置达成的结果等数据。

#### 3.4 集成多元数据采集技术实现信息实时获取

针对不同类型的设备以及多样化的运行环境,运用差异化采集方式处理。对于像主变压器、GIS 设备这类关键设备而言,会安装上在线监测装置,借助传感器对运行数据进行实时采集,而后通过 5G 或者工业以太网将数据传输到平台;对于输电线路,采用无人机巡检,同时结合高清摄像头、红外热像仪等设备,达成线路缺陷的自动识别以及数据的实时上传;对于处于偏远区域的设备,则采用卫星通信技术确保数据的传输。

### 4 输变电设备信息化管理平台的优化路径

#### 4.1 功能优化:拓展运维检修智能辅助模块

在智能巡检领域,研发出巡检路径的优化功能,该功能会把设备的位置情况与运行状态相结合,自动规划出最合适的巡检路线。同时,还配备了巡检任务的提醒功能以及到岗打卡功能,以此保证巡检工作能够依照规范进行执行。另外,引入了图像识别技术,针对无人机所拍摄的线路图像以及设备外观照片进行自动分析,识别出设备存在的缺陷并且对其进行分类预警。在故障处理范畴,构建起故障诊断的专家系统,此系统以设备故障案例和运行数据作为基础,借助机器学习算法自动判定故障的类型、产生原因以及对应的处理方案,从而为检修人员给予精准的指导。

#### 4.2 数据优化:建立数据清洗与质量管控机制

构建数据清洗规则库,针对不同类型的数据拟定有差异的清洗标准。例如:针对运行监测类数据,运用异常值检测算法把超出合理区间的数据予以剔除;针对人工录入类数据,开展格式校验以及逻辑验证工作,防止出现重复数据与错误数据的情况。定时开展数据清洗相关工作,借助自动化工具和人工审核相互结合的办法,提高数据清洗的效率与质量。搭建全流程的数据质量管控体系,在数据采集这一阶段,明确各个数据源的数据质量要求以及责任主体;在数据存储阶段,采用数据校验技术保障数据的完整性<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 流程优化:实现平台与业务流程深度融合

流程优化的核心要点在于促使平台和输变电设备管理业务流程达成深度融合,从而摆脱“平台与业务相互脱节”的不利局面。要开展全方位的业务流程梳理工作,对设备采购、运行监测以及运维检修等流程进行细致梳理。在运维检修流程里,达成从巡检时察

觉到故障、平台自动生成报修单据、检修任务进行分派、记录检修的整个过程直至完成检修验收的全流程线上操作模式,各个环节的数据会自动同步传输至平台,有关人员能够借助平台实时掌握流程的进展。

#### 4.4 体验优化:打造便捷高效的用户操作界面

运用简约且直观的设计样式,对操作流程予以简化,削减那些不必要的操作环节。例如,为常用功能设定便捷的入口,达成一键式访问;供巡检人员使用的移动端界面,着重凸显数据录入以及故障上报的功能,操作按钮的设计明晰,利于户外工作开展。达成个性化的界面定制,依照不同用户角色的工作要求,默认呈现常用的功能模块与数据资讯,例如,管理人员的界面主要展示设备运行的总体状况、运维效率统计等数据,检修人员的界面则专注于检修任务与故障详情。

### 5 结束语

输变电设备的信息化管理平台作为提升电网设备管理水准的关键工具,它的构建以及优化对于确保电力系统的稳定运行具有重大价值。目前,输变电设备管理以及平台应用方面存在着如数据呈现碎片化状态、功能单一、数据质量不到位、与业务相脱离等状况,这些情况对管理效能的提升起到了限制作用。借助明确平台的目标和定位、设计具备三层结构的架构、构建覆盖全生命周期的数据库、集成多种采集技术等构建策略,能够构建起基础稳固的信息化管理平台。对平台开展优化工作,从功能、数据、流程以及体验这四个维度着手,可进一步增强平台的实用性以及智能化的整体水平。

#### 参考文献:

- [1] 尚丹,包讯泽.输变电技术在智能电网中的应用探究[J].模具制造,2024,24(05):216-218.
- [2] 张兆娴.大数据背景下输变电工程造价控制指标深化研究[J].价值工程,2024,43(01):163-165.
- [3] 张乐,王芳,张慧翔,等.输变电工程 EIM 全生命周期信息化框架研究[J].能源与环保,2022,44(03):224-230.
- [4] 李湛蓉,丁磊,李红燕,等.基于人脸识别技术的输变电工程现场人员实名制管控研究与实践[J].项目管理技术,2021,19(12):128-132.
- [5] 厉理.基于电网输变电工程的关键节点管理审计创新[J].中国内部审计,2020(11):13-17.

# 大型风机电气控制系统的多变量协同优化方法

王滕杰<sup>1</sup>, 李伟群<sup>2</sup>, 王文静<sup>3</sup>, 尹会<sup>4</sup>

- (1. 山东前程似锦人力资源有限公司, 山东 泰安 271021;
2. 山东凯锡永成建设工程有限公司, 山东 青岛 266200;
3. 潍坊和生工程建设有限公司, 山东 潍坊 261071;
4. 山东千盛电力设备工程有限公司, 山东 临沂 273300)

**摘要** 大型风力发电机组在运行过程中面临气动转矩波动、塔架振动以及电网电压扰动等多重变量耦合的影响, 传统的单回路控制策略难以满足系统对于动态响应性能的高标准要求。针对风机全工况运行下的非线性与强耦合特征, 通过分析电气控制系统的多变量交互机理, 构建基于状态空间解耦的协同控制架构成为提升机组运行稳定性的关键。该方法通过引入前馈补偿与交叉解耦网络, 消除转速环与功率环之间的动态干涉, 同时在变流器侧采用基于磁链定向的矢量控制策略, 实现有功功率与无功功率的独立调节。电气控制系统的协同优化能够有效抑制传动链扭振, 提升机组对风能的捕获效率及电能质量, 为大型机组在复杂工况下的稳定运行提供技术参考。

**关键词** 大型风力发电机组; 电气控制系统; 多变量解耦; 协同优化控制

中图分类号: TM722

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.024

## 0 引言

随着风力发电单机容量向兆瓦级以上规模持续演进, 机组的叶轮直径与塔架高度不断增加, 导致电气控制系统的被控对象呈现出更加显著的高阶非线性与时变特性。在实际运行环境中, 随机变化的风速不仅会引起气动转矩的剧烈波动, 还会通过传动链引发机械与电气系统之间的振荡耦合。常规的比例积分控制策略在处理此类多输入多输出系统时, 往往因参数固定而无法适应大范围的工况变化, 导致控制精度下降甚至引发系统失稳, 实现电气控制系统的多变量协同优化, 核心在于打破各控制回路间的强耦合效应, 通过构建多目标的各种变量协调机制, 使发电机转矩、桨距角及变流器电流等关键参量在动态调节过程中保持最佳匹配, 这不仅关系到机组的瞬态响应能力, 更是决定电能输出品质的核心要素。

## 1 大型风机电气控制多变量耦合特性分析

大型风机电气控制系统是一个典型的多变量强耦合系统, 其核心复杂性源于气动能量捕获、机械传动链传递与电气能量转换三个环节的深度交织, 在额定风速以上区域, 变桨控制系统调节叶片角度以限制吸收功率, 而转矩控制系统则需维持发电机转速恒定, 两者在控制目标上存在由于风速快速变化引起的动态

冲突。当风速发生阶跃时, 气动转矩的突变会直接作用于传动链, 导致发电机转子速度波动, 此时若转矩环响应过快, 会加剧塔架的前后振动; 若响应过慢, 则无法有效抑制转速超调, 全功率变流器的直流母线电压稳定性也受网侧与机侧功率流动的双重影响, 有功电流的剧烈变化会通过磁路耦合影响无功电流的控制精度, 造成定子电压的不稳定, 这种多物理场的变量交互特性, 要求控制策略必须具备全局视角, 不能仅局限于单一回路的参数整定<sup>[1]</sup>。

## 2 变桨与转矩系统的动态解耦策略

### 2.1 变桨距角的独立变增益调节

针对叶片气动特性随桨距角非线性变化的特点, 构建基于工况点的变增益控制模型是解决非线性问题的有效途径。在低风速阶段, 桨距角保持在精细的最佳位置以最大化捕获风能, 控制增益需设置为较小值以避免执行机构频繁动作造成的机械磨损; 进入高风速区域后, 气动灵敏度显著增加, 控制系统需依据当前风速与转速的偏差实时调整比例积分系数, 通过引入叶片方位角信号作为前馈变量, 可以抵消因风切变和塔影效应引起的周期性气动载荷波动, 这种变增益策略能够确保变桨系统在不同风速段均能保持一致的阻尼特性, 防止因控制刚度不匹配导致的系统发散, 实现对风轮转速的平稳约束。

作者简介: 王滕杰(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

## 2.2 发电机电磁转矩的动态响应优化

发电机电磁转矩的控制不仅承担着调节转速的任务还需兼顾传动链的柔性阻尼,在电气控制回路中引入带通滤波器提取传动链的扭振频率分量,将其反相叠加至转矩给定信号中,形成有源阻尼控制回路。该方法利用发电机转矩响应速度远快于机械响应速度的特性,相当于在传动链中增加了一个虚拟的电气阻尼器,有效吸收机械振荡能量,在转矩给定值的计算过程中,需综合考虑发电机定子电流的热限值与变流器的最大过载能力,设置动态限幅环节,通过优化转矩上升率的斜率限制,可以平滑电磁转矩的阶跃冲击,减少齿轮箱齿面受到的瞬时应力,从而在保证功率输出平稳性的同时兼顾机械部件的疲劳寿命<sup>[2]</sup>。

## 2.3 气动与电气负载的功率平衡调节

功率平衡控制的核心在于协调气动输入功率与电气输出功率之间的动态关系,防止发电机转子出现超速或失速现象,建立基于功率偏差的前馈控制通道,当检测到气动功率发生大幅度突变时,直接修正电气功率给定值,而非等待转速偏差出现后再进行调节。这种前馈机制显著降低了系统的相位滞后,在电网电压跌落等瞬态工况下,电气负载能力瞬间下降,控制系统需迅速启动卸荷电路消耗多余能量,并同步强制变桨系统快速收桨以切断气动能量输入,通过这种气动与电气的快速联动机制,能够将转子转速维持在安全阈值之内,确保机组在极端外部扰动下不发生飞车事故,维持能量流动的动态平衡<sup>[3]</sup>。

## 2.4 过渡区域的平滑切换控制逻辑

在额定风速附近的过渡区域,机组频繁在最大功率跟踪模式与恒功率运行模式之间切换,极易引发控制震荡,设计基于模糊逻辑的平滑切换器,设定转速与功率的滞后环宽,避免控制模式的反复跳变。在切换过程中采用加权平均算法对转矩给定值与桨距角给定值进行插值运算,使两个控制回路在交接时刻实现无扰动过渡,控制系统需实时监测风速变化的趋势( $dv/dt$ ),预判工况切换点,提前调整变流器的励磁电流,使发电机电磁状态预先适应即将到来的工况变化,这种平滑切换逻辑有效消除了模式转换瞬间的转矩脉动,保证了并网功率的连续性,减少了对电网的冲击<sup>[4]</sup>。

## 3 变换器网侧与机侧的协同控制技术

### 3.1 机侧变换器的矢量控制电流环设计

机侧变换器的控制性能直接决定了发电机的电磁转矩品质,采用基于定子磁链定向的矢量控制技术是

实现转矩与磁通解耦的关键,通过坐标变换将三相静止坐标系下的交流电流转换为同步旋转坐标系下的直流量,实现对励磁电流分量与转矩电流分量的独立控制。在电流内环设计中引入定子电压前馈解耦项,消除 d 轴与 q 轴电流之间的交叉耦合电动势影响,显著提升电流环的动态跟踪带宽,针对发电机参数随温度变化引起的失配问题,在控制算法中集成参数在线辨识模块,实时修正控制器参数,高频次的电流采样与更新保证了输出电流波形的正弦度,有效抑制了定子绕组中的低次谐波含量,降低了电机的附加损耗与温升。

### 3.2 网侧变换器的直流母线电压稳定控制

直流母线电压的稳定性是维持机侧与网侧功率传输平衡的枢纽,网侧变换器需承担维持母线电压恒定的任务,电压外环采用非线性抗扰控制器,将负载功率波动视为外部扰动进行观测与补偿,提高母线电压对功率突变的抗干扰能力<sup>[5]</sup>。电流内环采用电网电压矢量定向,实现有功电流与无功电流的解耦控制,针对电网电压背景谐波的影响,在电流反馈通道中串联谐振控制器,针对特定次谐波频率进行高增益调节,确保并网电流的总谐波畸变率满足并网标准,通过精确控制网侧变换器的开关频率与死区补偿,减少开关损耗,提升整个交流系统的能量转换效率,确保能量从发电机侧向电网侧的高效传输<sup>[6]</sup>。

### 3.3 锁相环在电压跌落时的频率跟踪

电网电压在发生跌落或不平衡故障时,准确获取电网相位角是保证变流器不脱网运行的前提,传统过零检测法在电压畸变时极易失效,需采用基于双二阶广义积分器的锁相环技术。该技术能够从畸变的电网电压中分离出正序基波分量,滤除负序及谐波干扰,在电网电压幅值跌落至 20% 甚至更低时仍能锁定相位,锁相环的输出相位直接参与网侧电流的坐标变换,确保并网电流始终与电网电压保持预定的相位关系,在频率发生漂移时,锁相环需具备快速的频率跟踪能力,调整内部振荡器频率与电网同步,防止因相位失步导致的变流器过流保护误动作,维持电气连接的可靠性。

### 3.4 无功功率支撑与电压穿越控制

当检测到并网点电压发生深度跌落时,系统的首要任务由功率输出转变为电网支撑,控制系统需立即激活低电压穿越(LVRT)逻辑,在此阶段,网侧变换器必须依据并网导则中的 K 系数,根据电压跌落的幅值计算无功电流指令,强制注入感性或容性无功电流以支撑并网点电压,同时对有功电流进行快速限幅。由于

网侧输出功率受限而发电机侧输入功率未能瞬间降低，直流母线电压将面临急剧升高的风险，此时协同控制策略需立即触发直流侧卸荷电路（Chopper），通过制动电阻以脉宽调制方式消耗多余能量，钳制母线电压在安全阈值内，防止过压击穿变流器电容，对于全功率变流机组，机侧变流器还需配合增加发电机转矩的阻尼分量，利用转子巨大的转动惯量吸收部分暂态能量，通过电、机、热三种能量耗散途径的协同配合，确保在故障持续期间机组不脱网、不超速[8]。

在故障清除后的电压恢复阶段，控制策略的重点转向有功功率的平滑恢复与机械载荷的抑制，若电压恢复瞬间有功功率以阶跃方式回升，将对电网造成二次冲击并引发传动链的剧烈扭振。因此协同优化系统需设定有功功率恢复的线性斜率（Ramp Rate），使输出功率跟随电网电压的恢复进程缓慢爬升，在此过程中机侧变流器需动态调整转矩给定值，避免因电磁转矩突变导致齿轮箱齿面发生反向敲击。

#### 4 多模态下的全工况自适应调节

##### 4.1 额定风速以下的转速追踪策略

在低于额定风速的运行区域，控制目标是追踪叶尖速比的最佳值以获得最大风能利用系数，采用基于转速反馈的最优转矩控制法，将发电机电磁转矩设定为转速的二次方函数。为克服大惯量转子导致的转速跟踪滞后，在转矩给定中叠加转速变化率的微分项，提高系统对风速波动的动态响应速度，同时，考虑到低风速下机械损耗占比增大的特点，控制系统需对转矩给定曲线进行修正，扣除传动链的空载损耗转矩，通过实时计算气动转矩观测值，对最优转矩曲线系数进行自适应调整，确保在叶片表面污染或结冰导致气动特性改变时，系统仍能搜寻到当前状态下的最大功率点，实现能量捕获效率的最优化。

##### 4.2 恒功率区的多变量协调动作

进入恒功率运行区后，变桨机构与变流器需协同动作以维持输出功率的恒定，控制系统采用多变量解耦算法，将转速偏差信号送入变桨控制器，将功率偏差信号送入转矩控制器。为防止两个回路间的相互干扰，在控制器内部设置交叉解耦项，当变桨动作引起转速变化时，通过前馈通道调整转矩给定值进行补偿，在应对阵风扰动时，变桨速率需受到严格限制以防止桨叶载荷过大，此时允许功率短时小幅波动，利用发电机转子的动能来缓冲能量冲击，这种协调机制在保证发电机电气参数不超标的前提下，最大程度地平滑了机械载荷，体现了电气控制与机械保护之间的深度融合<sup>[7]</sup>。

##### 4.3 暂态扰动下的电气参数阻尼注入

电网短路或重合闸操作会引发机组电气参数的剧烈暂态振荡，单纯的PID调节难以抑制这种高频扰动，在控制环路中引入状态观测器，实时重构发电机内部的磁链与电流状态变量，利用状态反馈极点配置方法增加系统的电气阻尼。针对变流器直流母线电压的二次纹波振荡，在电压环中注入反相的纹波补偿信号，抑制纹波电压对电流环的调制作用，通过监测定子电压与电流的瞬时相位差，动态调整功率因数角，增强系统在弱电网环境下的暂态稳定性，这种基于状态反馈的阻尼注入技术，无需增加额外的硬件成本，仅通过算法层面的优化即可显著提升电气系统对外部强扰动的抵抗能力。

#### 5 结束语

大型风机电气控制系统的多变量协同优化是解决机组在复杂工况下稳定运行难题的核心手段，通过深入分析气动、机械与电气子系统间的耦合机理，采用变桨与转矩的动态解耦、变流器的矢量控制以及全工况的自适应调节策略，有效克服了传统控制方法的局限性。协同优化方法不仅实现了有功与无功功率的独立精准调节，还通过有源阻尼技术抑制了机械振动，提升了机组对电网故障的穿越能力与耐受度，这种基于模型解耦与状态反馈的控制架构，在保证能量转换效率的同时，显著降低了系统的机械载荷与电气应力，为风力发电设备的长周期可靠运行提供了坚实的理论与技术基础，符合风电技术向精细化、高效化发展的客观规律。

#### 参考文献：

- [1] 冯景文. 风力发电技术及新型风机电控系统应用研究[J]. 电力设备管理, 2025(08):140-142.
- [2] 王晓兰, 李朝辉. 双馈风机宽频受迫扭振抑制的模型参考自适应控制方法[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(09):37-49.
- [3] 顾明月. 风力发电技术及新型风机电控系统研究[J]. 光源与照明, 2024(02):186-188.
- [4] 才天昊, 刘刚, 赵欣欢, 等. 移动风机加装雨滴传感器在粮食储藏通风作业中的应用[J]. 粮油仓储科技通讯, 2023, 39(06):53-55, 65.
- [5] 郝天敏. 风机发电场中的电气智能化监控与管理技术研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(S1):81-83, 86.
- [6] 何飞, 卢伟. 除尘设备风机星三角启动故障分析研究[J]. 设备管理与维修, 2023(15):15-16.
- [7] 王小军. 电气控制设备如何优化风机配置[J]. 电气传动自动化, 2020, 42(02):62-64.

# 真空精炼用真空泵节能减排技术应用分析

孙 猛, 燕文奇, 黄 萌, 孙朝阳

(山东博科真空科技有限公司, 山东 淄博 255000)

**摘 要** 真空精炼在钢铁生产过程中至关重要, 其中核心设备真空泵能量消耗较大。本文对真空泵节能减排技术的应用进行了系统分析。首先, 对传统蒸汽喷射泵进行节能改造分析, 主要是核心部件的优化和运行策略调整; 其次, 讨论新型节能技术在混合系统、全干式机械泵、热驱动技术等方面的运用; 最后, 对系统集成和智能控制技术进行探讨, 包括抽气曲线优化、自适应控制、能源回收等, 旨在对减少真空精炼过程中的能耗和排放有所裨益, 进而为冶金工业实现绿色转型提供参考。

**关键词** 钢铁生产; 真空精炼; 真空泵; 节能减排

**中图分类号**: TF341.7; TF769

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.025

## 0 引言

真空精炼技术在提高钢材的洁净度方面起到关键作用, 但需要注意的是, 真空泵系统的能耗大约占到整个工序能耗的 30% ~ 50%, 这也是冶金工业在能耗和减排方面的主要关注点。传统的蒸汽喷射泵存在着效率低下、蒸汽消耗高等问题, 正面临着节能和环保的严峻压力。在实现“双碳”的今天, 高效节能真空泵技术的研发和应用已势在必行<sup>[1]</sup>。本文旨在通过对真空泵节能技术最新研究进展的梳理, 总结归纳出传统系统改造、新型泵技术应用、系统智能控制三个层次的研究现状, 为产业节能减排和促进真空精炼工艺绿色、可持续发展提供技术借鉴。

## 1 传统蒸汽喷射泵系统的节能改造技术

### 1.1 核心部件优化设计

蒸汽喷射泵核心部件进行优化设计, 是促进泵高效运行的根本。蒸汽喷射泵由喷嘴、吸入室、混合室(喉管)、扩压器等关键零件组成, 泵内流动为伴有激波现象的复杂三维可压缩湍流。传统设计往往是建立在一维简化理论和经验公式之上, 偏离实际流动状态, 造成效率损失。在最近的几年中, 计算流体动力学(CFD)的数值模拟技术得到广泛的应用, 为更深入地理解喷射泵内部的复杂流场和揭示其能量损失的原因提供有力的工具<sup>[2]</sup>。利用 CFD 模拟可准确地分析拉瓦尔喷嘴中工作蒸汽的扩张和加速过程、吸入室中被抽气体的运动状态、混合室中二者的强掺混和动量交换、扩压器中压力的回升过程等。基于此, 研究者能够对喷嘴的型线(收缩段和扩张段的曲线)、喉部直径、混合室

的形状与长度、扩压器的扩张角等关键几何参数进行精细化重构与优化。如优化喷嘴型线可降低激波强度和流动分离的程度, 使得蒸汽膨胀更加趋近于等熵过程; 调节混合室长度和直径比的目的是寻求使两股流体完全混合并具有最小摩擦损失的优化配比; 对扩压器的型线进行优化可以更流畅地将动能转换为压力能, 从而避免边界层的分离。这些基于流场精细解析的优化设计, 能够有效提升喷射泵的引射系数(工作流体单位质量所能引射出被抽气体的质量), 从而降低工作蒸汽消耗, 达到同样抽气任务下源头节能的目的<sup>[3]</sup>。

### 1.2 系统运行策略优化

蒸汽喷射泵系统通常由多级泵(例如: 增压泵、中间泵、主泵等)与级间冷凝器串联构成, 其运行能耗不仅取决于单泵效率, 更与整个系统的匹配与运行方式密切相关。传统的运行策略往往较为粗放, 例如: 在整个精炼周期内, 无论真空度要求如何变化, 均以固定参数(例如: 蒸汽压力、阀门的开度等)运行, 造成大量能源在低负荷时段被浪费。运行策略优化最核心的思想就是要让系统运行状态与真空冶金工艺实际要求实时相匹配。第一, 蒸汽供给参数优化问题。工作蒸汽压力、过热度等因素对喷射泵性能有明显影响。稳定且适中的蒸汽压力(避免因压力过大造成过度膨胀损失)以及保证足够的过热度(避免喷嘴内部凝结而影响流动的稳定性)是高效运行的前提。通过设置准确的压力和温度调控装置以及与抽气负荷建立联动关系可以避免无效的能源供应<sup>[4]</sup>。第二, 对冷凝器操作进行优化。级间冷凝器(大多为表面式或者混合式结构)的作用是冷凝前一级排出的可凝蒸汽(主

**作者简介**: 孙猛(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 真空获得设备及真空应用设备的设计开发。

要是水蒸气)，从而大幅减少后一级泵需要处理的非凝性气体负荷。保证凝汽器冷却水流量，温度在最佳运行条件下并提高冷凝效率是减轻后续泵组负荷和降低蒸汽总耗等关键所在。如一些研究采用增加或者优化“前置冷凝罐”的方法，使气体在进入主喷射泵系统之前预冷、冷凝和节能效果显著。

## 2 新型节能真空泵技术的应用进展

### 2.1 “水环泵+蒸汽喷射泵”混合系统

目前，在钢铁产业中，“水环真空泵+蒸汽喷射泵”的混合系统被认为是应用最广且技术相对完善的节能改进策略。这一技术路线的核心思路是利用两种泵型各自的优点来达到工况互补和能效提升的目的。水环真空泵作为一种容积式机械泵，在中低真空范围（如由大气压抽升至数千帕）内具有较高的抽气效率和相对较低的运行能耗（主要消耗电能），并且对于含可凝性蒸汽多，粉尘少的气体介质具有良好的耐受性。而蒸汽喷射泵在高真空及极高真空范围（如由几百帕抽到几十帕之内）仍具有其独特优势，且结构简单可靠<sup>[5]</sup>。混合系统通常将水环泵作为前级泵（或称预抽泵），负责在精炼初期快速建立初步真空，并承担处理大量水蒸气的任务；蒸汽喷射泵则作为后级泵（或称维持泵），在达到一定真空度后启动，负责将真空度提升并维持在工艺要求的极高值。这种配置带来多方面的节能效益：其一，它大幅减少蒸汽喷射泵在较高压力段（其效率最低的区间）的工作负荷，从而显著降低高压蒸汽的总消耗量。其二，水环泵的电能消耗通常低于所替代的蒸汽喷射泵的等效蒸汽能耗，实现能源种类的优化（蒸汽的一部分可以被电能所代替，电厂的发电效率一般比小型锅炉的产汽效率高）<sup>[6]</sup>。

### 2.2 全干式机械真空泵系统

全干式机械真空泵系统作为真空技术领域革命性的进展，它代表着真空获取装备开发的前沿阵地，它已经成熟地运用于半导体和化工中，近几年开始扩展到冶金真空精炼的重工况领域。所谓“干式”，是指泵腔内被抽气体在压缩和排放过程中，完全不被任何工作液体（如油、水）污染或接触，泵腔内部无密封液或润滑油，由此完全消除油蒸气或者水蒸气造成的真空环境污染，同时不需要繁杂的油水处理系统。用于冶金领域干式泵有螺杆式真空泵，罗茨真空泵（爪式泵）及其组合机组<sup>[7]</sup>。其中，多级干式螺杆真空泵因其强大的抽气能力、宽广的工作压力范围、优异的粉尘耐受性（采用螺杆间隙和涂层技术来完成）以及良好的等温压缩特性，成为该领域最具潜力的选项。它的节能效果非常显著：第一，它具有高机械效率，可以将电能直接转换为抽气功，不会有蒸汽喷射泵的二次能量

转换损失（热能→动能→压力能），也不会有水环泵内液体搅动时的能量损失。第二，不需要耗用价格昂贵的高压蒸汽、运行成本与电价直接挂钩、在大部分地区有成本优势<sup>[8]</sup>。第三，干式泵一般以变频驱动为主，能够极为灵活地根据实时抽气负荷进行转速调节，做到准确按需供能，低负荷时段的节能作用尤为明显。

### 2.3 新型热驱动与余热利用泵技术

面向更深层面的节能降碳研究人员正在探索以新型热力学循环为基础或者以工业余热为动力直接驱动真空泵的技术。这类技术旨在将真空精炼工序自身或钢铁厂内广泛存在的低品位余热（如烟道气废热、冷却水废热、产品显热）转化为抽真空的动力，实现能源的梯级利用和“零碳”或低碳真空获得。例如：某些研究提出一种基于吸收式或吸附式制冷循环原理的“热驱动真空泵”。其基本思路是利用低品位热源（例如80~150℃热水或者低压蒸汽）驱动制冷循环，产生低温冷剂，用于冷凝被抽气体中的可凝组分（主要是水蒸气），从而通过相变产生并维持真空。该技术实质上属于“冷凝泵”，尤其适合在被抽气体水蒸气分压较大的情况下使用，如在真空精炼初、中期使用。它最大的优点在于可直接利用工业余热而不耗或少耗高品质的电能和高压蒸汽<sup>[9]</sup>。另一种可能的解决方案是对传统蒸汽喷射泵的驱动源进行改良，如研发使用高温热水或其他低质量蒸汽作为工作介质的喷射泵，尽管这种泵的引射性能可能稍微不如高压过热蒸汽，但是如果废热能够得到有效的利用，它的综合能源利用效率以及经济性都会是十分可观的。

## 3 系统集成与智能控制节能技术

### 3.1 基于真空冶金工艺特性的抽气曲线优化设计

真空精炼并非一个在恒定真空度下进行的过程，其工艺周期内，气体产生量、气体成分（可凝性气体和非凝性气体的配比）、对真空度的要求是动态变化的。如RH处理脱碳期生成大量CO气体为非凝性气体、生成速率较快、要求抽速较大；在气体脱除的后阶段，主要任务是处理钢液中释放的H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>等微量气体和少量的CO，尽管这些气体体积较小，但对真空度的极限要求非常高。传统的真空泵系统设计往往基于最苛刻工况（最大气体负荷及最低极限真空）进行选型配置，导致系统在大部分时间内处于低效运行状态。基于冶金工艺特性的抽气曲线优化设计，旨在精确获取或预测一个处理周期内不同阶段的气体负荷谱（气体种类、分压、总流量与时间关系曲线）。进而基于该动态负荷谱反推真空泵系统各阶抽速和极限能力最优需求曲线。基于此需求曲线，进行泵组配置（例如：决定蒸汽喷射泵级数、大小，决定机械泵型号、组合及变频

范围等), 并设计相应的管路与阀门系统, 使得系统的能力曲线与工艺需求曲线尽量接近, 以免能力过剩。该“量体裁衣”设计方法从根本上避免冗余配置设备, 保证系统全周期综合运行能效达到最佳<sup>[10]</sup>。

### 3.2 智能预测与自适应控制系统

将智能预测和自适应控制技术引入到优化后的硬件系统中是动态精细化节能最核心的方法。该系统以先进的传感器网络(对真空度、气体成分、流量、温度、压力、蒸汽/电力消耗进行实时监控)为基础, 以冶金工艺模型和真空泵系统性能模型为内核, 以大数据分析和人工智能算法为驱动。第一, 该系统能根据钢水初始条件、处理对象、历史数据等实时预测和动态修正当前炉次处理过程中气体析出行为, 并提前预测抽气负荷变化趋势。第二, 自适应控制系统可依据预测负荷及当前实时监测数据对整个真空系统进行动态调节。对混合系统或者机械泵系统来说, 具体指的是自动开启和停止不同等级的水泵; 精细调整蒸汽喷射泵进口蒸汽压力和阀门开度; 对水环泵补充水温度和循环量进行准确控制; 对于变频驱动干式机械泵或者罗茨泵进行转速设定值实时优化。其目标是在任何时刻, 都以最小的能源消耗(最低的蒸汽流量或电机功率), 满足工艺对真空度(或抽速)的要求。另外, 该系统可以通过机器学习、运行数据的持续积累、控制策略的自我优化以及故障预警和能效诊断等功能, 实现由“自动化”向“智能化”的转变。

### 3.3 能源回收与循环利用系统

真空泵系统耗能大, 但排出工质中还带有相当余能。回收和循环利用这些余能在闭环节能中至关重要。对于蒸汽喷射泵系统, 其排出的混合气体(工作蒸汽和被抽气体)通常进入后冷却器, 蒸汽冷凝放热, 热量被冷却水带走。这部分低品位热能(温度通常在 40~80℃)可以通过高效换热器加以回收, 用于预热锅炉给水、厂区采暖或生活热水等, 提高全厂能源利用率。对水环泵系统来说, 它的工作液是在泵体中加热的, 用换热的方法来回收这一部分热也是有一定实用价值的。对干式机械泵来说, 它从压缩气体中得到的热可由泵壳冷却系统循环利用。更进一步的系统集成考虑, 是将真空泵的排气(以 CO 气体为主的 RH 处理过程)引入厂区的燃气管网或进行回收利用, 实现碳资源的循环。能源回收系统设计和经济性需综合考虑钢铁企业整体能源平衡情况综合评价和优化。

## 4 结束语

真空精炼中真空泵节能减排技术由单一设备改造向系统集成和智能管控深度革新转变。优化传统蒸汽喷射泵, 采用新型混合和干式泵, 并根据工艺特性制

定智能控制策略共同组成目前节能的主要途径。这些技术能明显提高能效并减少蒸汽消耗和碳排放。未来, 进一步结合大数据、人工智能技术实现更加精准的能源管理和余热深度回收将成为不断降低真空精炼环境负荷、助推钢铁工业高企和谐发展的重点方向。

### 参考文献:

- [1] 张成彦, 刘旺, 叶鹏, 等. 双螺杆真空泵等间隙啮合转子的构建与数值模拟 [J/OL]. 真空科学与技术学报, 1-11 [2026-01-13] [2026-01-14]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x\\_2o8EE00GeAZOM1bMz9BZ8Q1QGdgyvtE5J5Wpz0IMRIf7vKm0lvnzzI\\_MzMnr9vIsB7iNtBNYZgxji\\_IDNEkyDv9nl6BAfnpKblevPGz9L5HJJKh3xEglGU6uYOnV1En\\_iiQsXwYwkmxAU\\_tzUw41GapHpWPCm6UySSN4KpxwQWX2iw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8EE00GeAZOM1bMz9BZ8Q1QGdgyvtE5J5Wpz0IMRIf7vKm0lvnzzI_MzMnr9vIsB7iNtBNYZgxji_IDNEkyDv9nl6BAfnpKblevPGz9L5HJJKh3xEglGU6uYOnV1En_iiQsXwYwkmxAU_tzUw41GapHpWPCm6UySSN4KpxwQWX2iw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [2] 张莉, 项挺, 钟云会, 等. 罗茨真空泵排气脉动研究 [J/OL]. 真空科学与技术学报, 1-11 [2026-01-08] [2026-01-14]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x\\_2o8HYb8fTONrwlomiMSmzeYsP6CdEnUJyjiDMcZQG4zgpTd82GWnYhh9tgh7Jobdk2Ew3PTyTXSkpwQpiesH5ORUjtUPSJhGuKrCBSq\\_M8jWD9XxNnUZ8kTu9vyYylsR-g0bg45\\_ZkQZ9CWk58I74sRvnXZrcVFRk\\_9nkCC1a2IVQlg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8HYb8fTONrwlomiMSmzeYsP6CdEnUJyjiDMcZQG4zgpTd82GWnYhh9tgh7Jobdk2Ew3PTyTXSkpwQpiesH5ORUjtUPSJhGuKrCBSq_M8jWD9XxNnUZ8kTu9vyYylsR-g0bg45_ZkQZ9CWk58I74sRvnXZrcVFRk_9nkCC1a2IVQlg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [3] 胡园青, 肖伟云, 吴顺. 前置冷凝罐在大型煤电真空泵系统中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(36): 169-172, 176.
- [4] 陈泽烽, 张人会, 郭广强, 等. 液环真空泵内多相流空化机理 [J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(12): 1222-1227.
- [5] 邵振鹏. 基于 Minitab 计算的电动真空泵加速寿命试验方法设计 [J]. 液压气动与密封, 2025, 45(12): 119-123.
- [6] 张世伟, 张志军, 孙坤. 干式螺杆真空泵节能运行的新进展 [J]. 真空, 2026, 63(01): 40-45.
- [7] 任彦蓉, 吴俊翔, 殷婕, 等. 通过在旋转蒸发仪真空泵后加装冷阱实现低沸点有机溶剂的完全回收 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11): 35-38.
- [8] 王吉欣, 胡宸琪. 新能源汽车电动真空泵助力制动系统故障诊断方法 [J]. 真空, 2025, 62(06): 62-69.
- [9] 张人会, 左思宇, 陈学炳, 等. 基于数据同化的液环真空泵内部流动分析 [J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1-7 [2025-11-20] [2026-01-14]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x\\_2o8EwKvIftQxrST1VxxwFGPFUyVbqQhIEJPhtd6uPX84A4fo8XBzEENIHMOhjbfltcVZ9AtQiRwhkiHmYTdym3Tf68h79ecrmx1RC4ycGjxS7u34Mfuru-figAP6pFvxmxr9V2I6NAjlcXCpCejl7jw9kaZF0JIW OsmvbGrbb-EuQw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8EwKvIftQxrST1VxxwFGPFUyVbqQhIEJPhtd6uPX84A4fo8XBzEENIHMOhjbfltcVZ9AtQiRwhkiHmYTdym3Tf68h79ecrmx1RC4ycGjxS7u34Mfuru-figAP6pFvxmxr9V2I6NAjlcXCpCejl7jw9kaZF0JIW OsmvbGrbb-EuQw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [10] 张欣. 博亚精密机械: 国产干式真空泵的突围之路 [J]. 现代制造, 2025(11): 18-19.

# 建设单位建立及应用工程造价数据库探讨

吴嘉昕

(东南大学, 江苏 南京 210096)

**摘要** 工程造价数据是项目管理中的重要成果,也是工程建设实物的经济化表现。建设单位建立及应用工程造价数据库有着天然的优势。基于此,本文从工程造价数据库的作用、建设单位建立工程造价数据库的必要性和建立方法、建设单位的应用方式、建设单位面临的困难及对策等方面进行探讨,以期相关人员提供参考。

**关键词** 工程造价; 数据库; 模块设计

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.026

## 0 引言

2020年7月,住建部印发工程造价改革工作方案,明确提出加强工程造价数据积累。现如今,数据在各行各业发展中的作用越来越明显,应用越来越广泛,但是工程领域的造价数据能力发展却相对迟缓,工程造价数据的收集、应用体系尚不够完善。各政府机构、建设单位、施工单位、咨询单位等工程建设参与方,虽已使用信息化手段进行日常生产建设,但面临工程造价问题时,更多的是依靠定额组价、个人经验、市场询价、人工对比过往数据等方式,未能有效挖掘数据的潜在价值,工程造价数据对于管理能力的提升不明显。本文主要从建设单位的角度出发,从工程造价数据库的建立必要性、建立方法、应用方式、困难及对策等方面进行探讨,为建设单位更好地建立和应用工程造价数据库提供借鉴及思路。

## 1 工程造价数据库的定义及作用

工程造价可以理解为工程的建设价格,涵盖了整个项目生命周期中的设计、施工、材料采购、设备安装、竣工验收等各个阶段的建设费用,主要由建筑安装工程费、设备及工器具购置费、工程建设其他费、预备费以及建设期贷款利息等组成。数据库是指按照数据结构来组织、存储和管理数据的仓库,是一种长期存储在计算机内的、有组织的、可共享的、统一管理的大量数据的集合。

工程造价数据库按照上述定义就可以理解为专门用于存储及管理工程项目造价相关数据的数据集合,工程造价数据库可以从价格形成的角度全面呈现一个工程项目的构成。一般而言,一个工程项目所形成的的重要资料主要有技术和经济两个方面,技术资料主要

包括设计、施工、进度、质量、安全等工作,经济资料主要包括工程造价涉及的概算、预算、合同、结算等事项。目前,工程造价数据库的数据信息主要是经济资料,技术资料的呈现相对粗放,经济资料普遍缺乏与技术资料的联动。同时,由于工程造价数据收集的标准未有效统一,叠加工程项目单一性特点,项目间信息孤岛现象更为突出,数据库所应具备的成本预测及控制功能难以有效发挥。

## 2 建设单位建立工程造价数据库的必要性

建设单位对于工程造价的管理贯彻于工程建设的前期决策、工程设计、招标采购、合同执行、竣工结算等各个阶段,每个阶段中工程造价的重要性都不言而喻,而恰恰是这么重要的工作,却往往是更多依靠个人经验,具有较多的主观因素,数据的调取及应用更多集中在个人行为,数据的准确性、匹配性难以保证。由于工程项目建设的时间较长,当前工程数据的呈现方式多以静态方式呈现,更多政策、市场等变化对于工程造价的影响难以及时体现,导致经常出现预算大幅超概算、结算大幅超预算等的情况,工程造价对于成本控制的作用更多停留在了计算的层面,未能上升到预测的层面,控制更多是核算型控制,工程造价管控的前置延伸不够充分。同时,受限于工程造价数据碎片化明显、利用率较低、积累较滞后、信息化水平低<sup>[1]</sup>等管理现状,工程造价数据的数据分析、经验积累、成果运用都发展缓慢。

建设单位建立工程造价数据库,在决策阶段,有利于建设单位通过分析历史项目的造价数据,结合市场预测,考虑不同项目类型的特点,形成各种方案的经济数据对比,从而对建设单位的投资决策提供支持,形成较为准确的目标成本要求及对应的主要技术标准;

作者简介: 吴嘉昕(1988-),男,本科,高级工程师,研究方向: 工程项目管理、工程造价。

在工程设计阶段,有利于建设单位直接从工程造价数据库中调取数据并制定设计限额,避免盲目抬高设计标准导致投资费用超支的情况;在招标采购阶段,有利于建设单位根据过往类似项目造价管理方式,制定更为合理的合约规划,设定更为符合市场水平的招标限价,同时能够结合过往项目在后续合同执行、竣工结算阶段出现的界面范围不清、材料调价方式不明、签证变更过多等情况,在招采阶段提前制定相关措施;在合同执行阶段,有利于建设单位参照类似项目的开发节奏,按照合同条款,制定更为准确清晰的资金计划,从而降低资金成本;在竣工结算阶段,有利于建设单位通过对比过往数据,发现异常数据,较大程度降低人为操作增加结算额的风险,同时通过造价数据分析,多维度评估投资建设的经济成果。

### 3 工程造价数据库的功能与模块设计

建设单位建立工程造价数据库,需要具备数据录入、收集、归类、调取、对比等基本功能,在此基础上考虑建立相关的具体模块,模块的构建思路如下。

#### 3.1 规则模块与数据标准的制定

规则模块需要制定工程造价数据库的各种标准,主要涉及业态划分标准、项目信息标准、科目划分标准<sup>[2]</sup>、计算规则标准等。

业态划分标准主要解决项目的具体工程类型分类,如按工程项目行业分类为道路、电力、能源、通信、建筑等;按国家 2024 年清单规范可分为房屋建筑与装饰、通用安装、市政等 9 类专业工程;按建筑物的使用情况分类为民用建筑、工业建筑等。

项目信息标准主要解决项目的具体信息录入标准,包括常规信息,如建设地点、建设时间、主要参建单位、项目定位等;规划指标,如占地面积、建筑面积、容积率、建筑密度等;方案总平,如楼栋数、建筑高度、层高、可售面积、景观面积等。

科目划分标准主要解决项目的各个测算科目划分标准,明确科目对应的测算内容,以房建工程为例,通常可按土地款、开发前期费、主体建安费、基础设施费、公共配套设施费、开发间接费、期间费用、税金等作为一级科目,下面再具体设定二级、三级等科目。

计算规则标准主要解决数据生产、录入、使用中的计算方式、规则标准,确定总价型指标、单价型指标、基础数据、消耗量等的计算办法,规范项目清单的定额组价方式,厘清各种项目信息与数据间的计算关系。

#### 3.2 信息库与数据收集模块的搭建

数据模块的功能是收集、汇总、沉淀、查询各类工程造价数据,提供及时的数据信息支撑,满足各类

工程造价数据的查询需求,主要涉及计价文件信息库、材料设备价格信息库、综合单价数据库<sup>[3]</sup>、项目基本信息库、工程经济指标库等。

计价文件信息库包含造价相关的政策文件、清单规范、计价定额等;材料设备价格信息库包含政府信息价、过往采购价、市场报价等;综合单价数据库包含具体清单或子目的价格等;项目基本信息库包含项目的静态和动态信息,静态信息为项目指标等常规信息,动态信息为建设状态等变化信息;工程经济指标库包含项目整体指标、项目动态成本、项目资金投入状况等。

#### 3.3 操作流程及权限模块的设定

操作模块需要建立工程造价数据信息新建、维护的具体流程,设置各种人员角色并管理其数据操作权限。

具体流程涉及数据的录入、更新、生产、调取等操作,主要需要制定数据标准化表单、审批流程线。标准化表单包含项目各阶段应填写的各类信息表,用于确保数据信息按照规则模块规范记录;审批流程线包含各类数据操作所需的必要审批程序及权责分配,提高数据录入和更新的准确性、严谨性,规范数据调取动作。操作权限通过设定系统人员角色,分别赋予不同操作权限,在便于各层级人员利用数据的同时,防范数据外泄,保证数据的信息安全。

#### 3.4 数据分析及表单创建模块的开发

分析模块是在各办公人员自身权限的范围内,借助库内已有数据,提供进一步数据分析,支持项目决策、价格对比、趋势预测等工作,同时完善的分析模块,应在系统提供的常规分析功能的基础上,允许用户根据自身需求,自主创建相关分析表单,满足个性化管理需求。

### 4 工程造价数据库的应用场景

建设单位应用工程造价数据库,主要涉及决策、管理、评价、监督、预测、既有补录等具体应用职能,根据职能情况,设置不同的应用场景,应用场景的设置思考如下。

#### 4.1 决策场景:项目立项与投资评估

项目决策场景需要解决项目做不做的的问题,编制项目预期收益、投产时间等目标,在此场景下,工程造价数据库提供用于决策的各类主要经济数据,牵头此事项的职能部门通常为投资部门。

首先投资部门在数据库系统中创建意向投资项目,填入项目具体信息,数据库推荐类似项目,列出相似度比例并排序,提供过往项目的主要经济数据、建设周期、风险事项等;然后投资部门结合数据库相关信

息开展立项审批工作,如果立项未通过或未成功获取,投资部门在系统中中止意向投资项目,填写中止原因后完成数据沉淀,如果立项通过并成功获取,投资部门在系统中将意向投资项目转为正式投资项目,填入决策指标要求及已确定的项目获取信息,比如房地产项目,应填入土地面积、土地出让金、规划条件等;最后,投资部门完成立项决策程序并提交数据库系统,由后续的项目管理部门执行<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 管理场景:项目建设及成本控制

项目管理场景是相对比较复杂的场景,有很多具体的管理环节,比如制定实施目标、规划合约方案、细化招标采购、落实合同管理、监控动态成本、开展工程结算等,项目管理场景牵头部门通常是项目管理团队,在管理流程体系中涉及工程部、成本部、财务部等多个职能部门。

项目管理团队,在工程造价数据库中选择具体项目,根据项目条件,结合市场,调用数据库中的基础沉淀数据和最新市场价格信息,计算消耗量指标、成本科目金额,制定项目实施方案,编制实施目标并填入系统进行审批,系统自动分析实施目标是否满足立项决策指标要求,各职能部门根据自身职能审核具体内容,实施目标应包含建设计划、成本目标、收支计划等。

在实施目标审批通过后,依据实施目标,开展合约规划,项目管理团队调取系统模板、结合系统推荐类似项目合约规划方式,细化合约实施方式;在招投标阶段,项目管理团队根据数据库规则和信息,明确各个具体采购项目的采购范围、清单数量及特征,编制各清单预算价构成,制定采购限价;合同管理阶段,项目管理团队需要在数据库中及时录入建设进度、价款支付、签证变更等情况,方便系统对项目实现整体呈现,动态成本的及时跟踪;工程结算阶段,项目管理团队按照前期招投标阶段形成的采购清单,填写各项清单结算工程量及金额,形成每个合同整体结算价,系统自动分析并处理消耗指标异常情况,报送建设单位履行结算审批程序后,自动完成工程造价数据沉淀。

#### 4.3 辅助场景:评价、监督、预测等应用

辅助场景主要解决项目评价、监督、预测、既有补录等应用需求。项目评价、监督、预测更多是应用工程造价数据库自身的分析能力,让建设单位的经营团队、项目的管理团队均可以根据自身需求,动态查看项目对比立项决策、实施目标、类似项目中的工程造价信息情况,从而便于经营及管理判断,监督提醒异常情况。同时数据库可以结合市场情况,通过系统

预测,提前揭示项目存在的风险点,并辅助判断项目成本目标的正负偏离与市场情况的关联度,便于建设单位的经营团队评估项目管理团队的实际管理能力。既有补录主要是挖掘工程造价数据库建立之前的沉淀项目数据,通过专职数据管理人员参照新建项目的决策、管理场景将过往项目信息补充到数据库系统中。

### 5 建立及应用造价数据库的困难及对策

建设单位建立及应用工程造价数据库还面临一定的困难,比如造价相关的政策文件较多,文件之间存在冲突;市场的基础价格信息变化较快,难以实现实时的更新;建设规范及标准的新增、更新及完善,对过往的建设周期、基础含量数据的直接应用有一定影响,需要进一步换算调整;原统计数据口径由于统计习惯不同而存在差异,例如:财务、成本部门的数据,同一事项的归集方式就可能存在不一致;数据库建立初期,由于沉淀数据量不足,部分功能事项难以有效开展。面对这些困难,建设单位应基于自身工作实际,稳步推进工程造价数据库的建立工作,对于信息较多、更新较快的政策文件、价格信息等数据进行甄别,选择其中主要文件及信息,初期以结构搭建为主,避免过分追求细节的精度;对于由于前后标准、统计口径等原因造成的数据差异,应总结既有项目数据经验,逐步分析迭代现有数据,统一数据使用标准<sup>[5]</sup>。

### 6 结束语

建设单位建立及应用工程造价数据库是建设单位管理信息化的必要途径。通过制定统一的工程造价数据规则,广泛收集项目建设的各类造价数据,设定各人员操作职责,加以信息化的分析能力,可以全面提高建设单位在决策阶段、管理阶段、项目后评估等实际应用场景能力,切实发挥工程造价数据的指导和借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 田志超.大数据时代工程造价数据库构建及其应用思考[J].工程造价管理,2023(05):6-11.
- [2] 康元鸣.上海市造价信息数据系统的现状和未来发展分析[J].上海建设科技,2022(02):51-53.
- [3] 魏晓民.房地产动态成本管理中工程造价数据库的设计和运用探究[J].房地产世界,2021(13):55-57.
- [4] 王琼.人工智能工程造价信息管理平台构建研究[J].建筑经济,2020,41(10):69-72.
- [5] 房光玉,刘寨民.应用大数据构建工程造价数据库[J].工程造价管理,2020(04):82-87.

# 智慧水务推动水利业务协同管理的机制研究

类红瑞

(苏州市吴江区水务局, 江苏 苏州 215000)

**摘要** 智慧水务作为水利现代化的重要支撑, 为优化水利业务协同管理提供了创新路径。本文以吴江智慧水务系统建设实践为依托, 从数据整合、平台建设、标准规范三大基础条件出发, 探析跨科室流程联动、层级联动、跨部门协作、数据驱动精准协同四大核心机制, 结合责任分工、流程规范、运维支撑、考核激励四项落地保障, 系统揭示智慧水务推动水利业务协同的内在逻辑与实践路径, 以期为基层水利打破协同壁垒、提升治理效能提供实践参考, 助力水利治理体系和治理能力现代化。

**关键词** 智慧水务; 水利业务; 协同管理; 跨科室流程联动; 层级联动

中图分类号: TV213

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.027

## 0 引言

在“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水方针指引下, 水利改革发展聚焦“补短板、强监管”总基调, 水利业务协同已成为提升治理效能的关键。随着云计算、大数据等新技术与水利行业深度融合, 智慧水务应运而生, 成为打破业务壁垒、实现协同共治的重要载体。吴江水利水务工作作为长三角生态绿色一体化发展示范区的重要组成部分, 涵盖防汛防旱、水资源管理、河湖保护等多元领域, 其智慧水务系统建设不仅衔接“智水苏州”“智慧吴江”等规划要求, 更承载着区域水利协同治理的实践探索, 为推动水利业务从分散管理向协同高效转型提供了坚实的实践场景与技术支持。

## 1 智慧水务支撑水利业务协同的基础条件

### 1.1 协同导向的数据整合支撑

吴江智慧水务系统以统一数据资源池建设为核心推进数据整合, 全面纳入吴江水利遥测系统、吴江区取水总量监测信息系统等 5 类已建系统数据, 通过“全量复制”“临时视图适配”“人工校核导入”三种方式, 实现不同结构数据的统一入库。在横向数据共享方面, 通过数据交换平台对接气象局的雨量监测与预报数据、环保局的水质及排污口数据、规划局的项目底图数据等, 明确共享频次与传输格式。纵向则依托水利专网, 打通与江苏省水利厅的空间数据通道、苏州市水务局的业务数据接口, 同步太浦河管理所 72 个闸门的实时监测数据及太湖堤闸管理所的运行数据。同时开展全区水

域基础数据调查, 完成河道、水利工程等空间数据的矢量化与属性补全, 构建涵盖基础数据、实时监测数据、业务数据的综合数据库, 为跨场景协同筑牢数据基础。

### 1.2 统一化协同操作平台建设

系统构建了“统一门户+多终端适配”的协同操作载体, 实现水务局内部科室、下属单位、乡镇水利站的单点登录, 权限按科室职能、岗位层级精准配置, 确保数据访问安全与业务办理高效, 用户无需重复注册即可访问对应权限的功能模块。操作界面采用极简设计, 常用功能一键直达, 大幅降低基层人员学习成本。在监测网整合方面, 新增 30 个内涝积水监测站、65 个排水管网液位监测站、20 个流量监测站及 30 个视频监控站, 与原有 669 个闸泵视频监控站点整合形成统一监测网络, 所有站点数据实时接入并动态更新, 异常数据自动推送预警信息, 实现关键指标跨部门共享。移动工作平台搭载信息查询、移动巡查、事项通知等功能, 支持离线填报与在线同步, 具备定位打卡、图文上传等实用功能, 解决野外无网络环境下的巡河数据记录难题, 助力汛情信息快速填报与任务接收反馈。“一张图”平台整合 160 张专题图层, 涵盖水灾害防御、水资源保障、河长制等核心业务场景, 通过可视化界面直观呈现监测数据、工程信息与业务流程, 支持多维度数据钻取分析, 为防汛调度、资源配置等跨层级协同提供即时决策依据<sup>[1]</sup>。

### 1.3 协同适配的标准规范体系

系统严格遵循多项国家及行业标准, 数据库建设参照《水利空间要素数据字典》(SL 729-2016)《实时

作者简介: 类红瑞 (1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 计算机与网络。

雨水情数据库表结构与标识符》(SL 323-2011)等规范,确保数据格式统一。数据交换方面,采用XML格式与Web服务接口,明确横纵向数据共享的字段定义、传输协议与更新频率,制定《水利数据收集整编表》规范数据录入流程。业务流程规范明确汛情上报、项目审批、数据更新等协同事项的操作步骤、办理时限与责任主体,数据更新实行“科室牵头、乡镇配合”的责任制,按年更新基础数据、按季校核业务数据、实时同步监测数据。安全规范方面,达到二级等保要求,部署防火墙、日志审计、权限管控等措施,对不同层级用户设置数据访问权限,保障协同过程中数据传输与存储的安全性。

## 2 智慧水务推动水利业务协同的核心机制

### 2.1 跨科室业务流程联动机制

系统以业务需求为核心重构跨科室协同流程,明确防汛办、工管处、水资源办等部门的协同节点与数据流转路径。防汛期间,汛前检查隐患工程信息、防汛应急工程项目进度通过平台自动共享,气象数据、台风路径信息同步至相关科室;汛中水位、雨量、流量等监测数据实时流转,无需人工二次填报,工作人员通过系统快速填写关键数据即可生成汛情简报,文件管理模块实现汛期各类文件的分类归档与快速查询<sup>[2]</sup>。日常工作中,出差填报模块支持工作人员在线填写出差时间段、地点、事由等信息,上传签批文件,系统自动流转至相关科室审核统计;水资源管理中,取水许可审批数据与排水监管数据跨科室互通,形成全流程业务联动,确保各环节衔接有序。

### 2.2 区—乡镇—管理所层级联动机制

系统构建“数据向上汇聚、任务向下传达、反馈双向闭环”的层级联动模式。乡镇水利站通过平台实时上传巡河数据、汛情信息、工程巡查情况,其中巡河数据需标注GPS定位、问题类别(垃圾漂浮、违章建筑、水质异常等)及现场照片,汛情信息涵盖雨量、水位、闸泵运行状态等关键指标,确保数据详实可追溯。区级平台对乡镇数据进行汇总分析,通过一张图直观展示各乡镇圩区、水利工程运行状态;下达防汛备汛、河湖巡查等任务时,以系统工单+短信提醒的形式精准推送至乡镇及管理所责任人,同步明确完成时限与量化标准(如巡河频次、隐患整改时限)。乡镇可通过平台上报个性化需求,基于统一框架进行功能拓展,例如部分乡镇新增圩区闸泵运行数据上报模块,各镇街道河长办通过平台填报巡河工作报表(一月一报)和一事一办报表,接收区级下发的通知文件,实现层级间协同的统一性与灵活性平衡。

### 2.3 跨部门联合协作机制

在横向层面,系统通过数据共享交换平台与多部门建立标准化协作通道:对接气象局获取实时雨量监测数据(按小时推送)与精细化降雨预报(未来1~3小时网格预报),对接环保局获取行政区界面水质监测数据、排污口基本信息及重点污染源排污时段数据(按日更新),对接交通局、公安局获取易涝点视频(实时调取),对接规划局、发改委获取规划项目红线图与多规合一地图(季度更新)。在纵向层面,严格遵循省级统一数据标准与接口规范,通过水利专网与江苏省水利厅、苏州市水务局实现数据互通,共享空间数据(河道、堤防矢量图)、基础数据(水利工程台账)及业务数据(取水许可审批结果),接收上级下达的监管任务(如水资源专项检查)与技术指导文件,同步吴江水利水务工作动态(如汛情处置情况)。在水污染事件处置、防汛抗旱联合决策等场景中,多部门数据按预设规则自动关联,形成处置台账,无需线下传递纸质材料,简化协作流程<sup>[3]</sup>。

### 2.4 数据驱动的精准协同机制

系统依托“一张网”实时监测能力与“一张图”可视化功能,构建数据驱动的协同模式。30个内涝积水监测站、65个排水管网液位监测站及20个流量监测站的实时数据,通过平台自动分析研判,当监测数据超标时,系统触发预警流程,通过短信、微信推送信息至相关责任人。水资源管理中,基于取用水户实时取水量、地下水水位、水功能区水质等数据,进行趋势分析与供需平衡测算,为跨区域水资源调配提供数据支撑。水灾害防御中,整合水位、雨量、视频、内涝等数据,在一张图形成专题展示,支持出险点周边缓冲分析、叠加分析,为协同决策提供精准的数据支撑,确保协同行动靶向性。

## 3 智慧水务下水利业务协同管理的落地保障

### 3.1 协同管理责任分工机制

吴江智慧水务系统以项目法人制为核心建立协同管理组织架构,由区水务局组建项目法人,统筹协调协同管理各项工作,明确信息中心为协同管理牵头部门,负责统一平台运维、跨部门/层级协同对接,定期组织召开协同工作推进会,协调解决横纵向协同中的堵点问题。各业务科室按职责划分协同责任:防汛办牵头汛情协同,工管处负责工程运行协同,水资源办统筹数据共享协同,河道处主导河湖保护协同<sup>[4]</sup>。乡镇水利站及下属管理所均明确1名专职人员,负责

本辖区协同事项对接、数据上报与任务落实。数据更新责任落实到具体科室和个人,基础数据由各业务科室指定专人维护,监测数据由采集站点责任单位实时同步,跨科室相关的数据更新需经双方科室负责人交叉审核,确保数据一致性后再入库,形成“区级统筹、科室牵头、基层落实、专人负责”的责任闭环,确保协同管理各项工作落地到人。

### 3.2 协同流程规范化制度

系统围绕水灾害防御、水资源保障、工程管理等核心业务,制定了详细的协同流程规范。汛情上报流程明确:乡镇水利站在监测到汛情后 1 小时内通过平台上报,需附监测数据截图与现场照片,区级防汛办 2 小时内完成数据汇总、校验与跨科室推送;数据共享流程规定:横向部门非涉密数据每日凌晨自动同步一次,纵向数据每周五进行集中校验,涉及取水户商业信息、敏感水质数据等共享需经分管领导审批备案。数据更新维护实行制度化:基础数据每年 12 月底前完成年度更新,需结合实地核查结果修正,业务数据每季度末进行校核修正,监测数据实时同步,所有更新数据需提交科室负责人与信息中心双重审核,审核通过方可入库。协同任务办理设置超时提醒功能,通过系统弹窗+短信双重通知,例如出差填报需在出差前 3 个工作日提交,项目协同审批按“受理—审核—批复”三级流程推进,总时限不超过 5 个工作日,通过明确操作步骤、办理时限与责任主体,规范协同流程的每一个环节。

### 3.3 平台稳定运行运维支撑

系统依托运维管理平台实现全流程运维监控,实时监测服务器 CPU 使用率、内存占用率、网络带宽占用率、监测站点在线率、数据传输到报率、缺测数据情况,每小时生成一次运行状态分析报表,发现故障即时通过系统告警与短信通知运维人员。安全防护方面,按二级等保要求部署下一代防火墙、日志审计、网闸等设备,对网络边界进行安全加固,对服务器和数据库按角色设置分级访问权限,每月开展一次安全漏洞扫描,每季度进行一次全面日志审计与安全演练。建立专业运维团队,配备 3 名技术人员负责平台日常运维,明确运维职责包括设备定期检修、数据质量维护、故障快速排查等,运维资金纳入年度财政预算,专项保障硬件维修更换、软件版本升级、通信专线续约、安全设备运维等支出<sup>[5]</sup>。同时制定应急运维预案,针对服务器宕机、数据传输中断、网络攻击等突发情况,明确分级处置流程与时限,例如:一般故障 2 小时内

响应修复,重大故障 4 小时内启动备用方案,确保平台稳定运行。

### 3.4 协同成效量化考核机制

系统建立多维度协同成效量化指标体系,核心指标包括数据上报及时率(要求 $\geq 95\%$ )、数据共享准确率(要求 $\geq 98\%$ )、流程衔接效率(跨科室协同任务办理时限 $\leq 24$ 小时)、任务落实完成率(要求 $\geq 90\%$ ),另增设协同问题整改率、跨部门协作满意度等辅助指标。考核采用“月度统计、季度考核、年度汇总”的方式,由信息中心牵头,联合办公室通过系统自动统计与人工核查相结合的方式,对各科室、乡镇的协同成效进行量化评分。考核结果与各科室、乡镇的年度工作评价直接挂钩,作为评优评先、运维资金倾斜的重要依据,考核排名末位的需提交整改报告并限期优化。同时建立常态化培训机制,每年开展 2 次集中培训,内容涵盖平台操作规范、协同流程要求、数据上报标准等,配套线上学习课程与线下实操演练,针对新入职人员开展专项培训与考核,未通过考核不得参与协同操作,确保工作人员熟练掌握协同操作技能,通过“量化考核+常态化培训”,保障协同机制有效落地。

## 4 结束语

智慧水务通过数据整合、平台建设、标准规范构建了协同基础,依托跨科室流程联动、层级联动、跨部门协作、数据驱动建立了核心机制,以责任分工、流程规范、运维支撑、考核激励提供了落地保障,形成了完整的协同管理体系。吴江智慧水务的实践表明,智慧水务能够有效打破水利业务协同的壁垒,提升治理效能。未来,应进一步优化协同机制,强化数据挖掘与智能应用,让智慧水务在水利治理中发挥更大作用,为水利现代化提供坚实的支撑。

### 参考文献:

- [1] 胡明昭.智慧水务系统在城市供水管理中的创新应用与实践[J].水上安全,2025(09):16-18.
- [2] 刘奕呈.智慧水务建设现状及发展趋势[J].合作经济与科技,2025(09):135-137.
- [3] 侯立安.数字化与智能化赋能智慧水务创新发展[J].中国科技产业,2024(06):1-3.
- [4] 曲士民,孙国栋,姜联玉,等.智慧水务信息化系统应用与分析研究[J].中国设备工程,2023(S1):53-55.
- [5] 于俊高,张书霖,张瑞雪.浅谈智慧水务一体化平台建设思路[J].智能建筑,2021(10):32-34.

# 基于差异化场景的冷轧钢卷防锈包装优化研究

赵明明

(北京首融汇科技发展有限公司, 北京 100043)

**摘要** 本研究以某大型钢厂所使用的普冷板专用防锈纸为研究对象, 建立动态接触湿热试验、交变夹具湿热试验以及钢卷模拟封存试验的三级评价体系, 旨在为差异化场景下的冷轧钢卷的防锈包装优化提供参考。研究结果表明, 在差异化场景下, 冷轧钢卷防锈包装的防锈效果显著。选择新型防锈材料, 运用自动化包装设备, 加大对员工的培训力度, 可以进一步降低包装成本, 满足环保要求, 值得广泛应用。

**关键词** 差异化场景; 冷轧钢卷; 防锈; 包装

中图分类号: TG335.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.028

## 0 引言

冷轧钢卷是一种重要的金属材料, 在工业生产和建筑方面有着广泛的应用。为保证冷轧钢卷在出口海运以及长期储存和运输期间不会出现锈蚀现象, 一般会用气相防锈纸加上塑料膜来进行双层包装, 这种方式在某种程度上可以防止锈蚀, 不过在实际应用当中也暴露出一系列的问题, 包含包装费用高、效率低且人力资源消耗大等。传统单一化包装方案已无法满足复杂环境下的防护需求。在沿海高盐雾、工业酸雨区、高温高湿等典型腐蚀环境中, 钢材的锈蚀速率可达普通大气环境的 5 ~ 8 倍。

## 1 冷轧钢卷的内包装形式

冷轧钢卷的内包装按照是否有塑料膜来区分, 主要分为三种形式:

筒包是基础形式, 适用于运输距离短和运输环节少的卷材, 一般只用气相防锈纸进行包裹, 这种包装适合对表面质量没有太高要求的产品, 成本低, 操作简单, 不过在高湿度或者长时间存放的情况下, 它的防锈效果可能不太理想。

普包是在筒包的基础上增加保护措施, 但不包括塑料膜, 适用于运输距离短和运输环节少、对表面质量有一定要求的卷材。一般是在气相防锈纸外面再包裹一层保护纸或者防潮纸, 目的是为进一步加强防锈效果以及防潮性能, 适合一般环境下的储存与运输。普包的成本比较适中<sup>[1]</sup>。

精包是最高等级的包装方法, 适用于运输距离长或运输环节多、对表面质量有较高要求的卷材, 它把

气相防锈纸外面再包上一层塑料膜或缠绕膜, 明显加强防锈效果, 在储运过程中, 塑料膜能更好地阻止外界水分过多渗透进来引发锈蚀, 这种包装方式适合对外观质量要求特别严格的商品, 如汽车外板和出口产品, 精包可以提供最好的防锈保护。此外, 精包成本比较高, 但能够有效地削减由于锈蚀造成的商品损坏和经济损失, 对于高附加值产品来说是非常必要的。

在实际运用当中, 选择哪一种包装方式取决于产品的最终用途、储存和运输状况以及成本预算, 对于一般工业用途的冷轧钢卷, 筒包或者普包也许就足够了, 可是对于那些要在恶劣环境里长久储存或者运送的高价值产品而言, 精包则更为适宜, 通过合理挑选内包装方式, 能够很好地保护冷轧钢卷, 延长它的使用寿命, 而且还能符合不同客户的诉求。

## 2 冷轧钢卷包装中存在的问题

### 2.1 包装成本高

包装成本高主要表现在材料成本与人工成本两个方面, 气相防锈纸以及塑料膜价格偏高, 而且质量上乘的防锈纸, 它的成本占据包装材料成本的大半部分, 因为包装过程需精确操作, 才能保证防锈纸与塑料膜紧紧贴合钢卷表面, 这就要求有专门的操作人员进行操作, 这样就加大了人工成本。在大批量生产时, 这些成本的累积效果十分明显, 给企业带来不小的经济压力。

### 2.2 包装效率低下

包装效率低下的问题主要是由于包装过程过于烦琐且对操作精准度的要求较高。在进行包装时, 首先

作者简介: 赵明明 (1993-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 腐蚀与防护新材料。

需要将气相防锈纸包裹于钢卷之上,之后再利用塑料膜进行二次包装,在此期间,既包含操作步骤的繁杂,又存在对于操作者自身技能水平与经验的高要求,若想要保证包装质量,那么就难免会使得包装速度相对较慢,进而影响到生产效率。在生产高峰期,包装这一环节成为整个生产流程中的瓶颈,从而制约着企业生产能力的发挥。

### 2.3 人力资源消耗大

由于包装的过程比较复杂,而且对操作的精度要求比较高,所以企业需要招聘很多的操作人员进行包装工作,这样不仅增加了企业的成本,而且也会造成人力资源管理问题<sup>[2]</sup>。

## 3 冷轧钢卷防锈包装优化

### 3.1 冷轧钢卷防锈包装材料试验检测

某大型钢厂现用普冷板专用防锈纸作为冷轧钢卷主要防锈材料,该纸以 80 g/m<sup>2</sup> 中性牛皮纸为基材,双面涂布 VCI 气相缓蚀剂,含氮有机酸盐与低分子胺复配,能在密闭空间内持续释放防锈气体,快速吸附于金属表面形成单分子保护膜,隔绝水分与氧气。实测封存 180 天,钢卷锈蚀面积 < 0.2%,符合《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2025 标准);纸强度 ≥ 45 N,延伸率 ≥ 6%,满足高速自动缠绕机 ≤ 40 m/min 线速,破损率 < 1‰; pH7.0 ± 0.5,无腐蚀,与塑料膜复合后焊接密封,可承受海运 90 天、温湿度交变循环 12 次,盐雾试验 72 h 无锈;单吨钢卷耗纸仅 2.1 kg,成本占包装费比例 < 3%,且可回收制浆,环保指标达欧盟 REACH 要求,是钢厂出口冷轧产品首选防锈方案。

### 3.2 试验分析

冷轧钢卷从下线到最终用户往往经历海运、仓储、内陆运输等长达数月的复杂环境,其中高温高湿、盐雾、温差交变是诱发锈蚀的主要因素。为验证防锈纸—塑料膜复合包装的实际保护能力,实验室依据《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2008)、《钢铁用缓蚀剂处理过的纸》(JIS Z 1535:2014)、《湿度箱中金属防腐剂防锈性能的标准测试方法》(ASTM D1748)等标准,建立动态接触湿热试验、交变夹具湿热试验和钢卷模拟封存试验三级评价体系。

#### 3.2.1 建立动态接触湿热试验

动态接触湿热试验采用 Φ50 mm × 100 mm 冷轧试片,表面粗糙度 Ra=0.8 μm,经脱脂清洗后用 VCI 防锈纸包裹,置于温度 60 °C、相对湿度 95% 的恒温恒湿箱内,试片与纸面保持 0.5 N 恒定压力并以 2 Hz 频

率往复滑动 10 mm,模拟海运颠簸中纸—钢微动摩擦状态,连续运行 720 h 后取出,用数码相机记录锈斑面积,经图像分析软件计算锈蚀率,合格指标为锈蚀面积 < 0.2%;同时测定缓蚀剂迁移量,采用紫外分光光度法在 λ=308 nm 处测定气相缓蚀剂含量,要求纸面 VCI 残留量 ≥ 80%,确保长期挥发保护。

#### 3.2.2 交变夹具湿热试验

交变夹具湿热试验旨在考核包装材料在温度骤变时的适应性,将试片与防锈纸、塑料膜按实际包装顺序叠放于不锈钢夹具,夹具扭矩 1.5 N·m,先进行 8 h 60 °C / 95% RH 高温高湿阶段,随后在 30 min 内切换至 -20 °C 低温并保持 8 h,如此循环 12 次,总试验时间 192 h,每周周期结束立即观察试片边缘及表面是否出现锈蚀、水渍或白锈,并用电子天平称量试片质量损失,质量损失 ≤ 0.1 mg/cm<sup>2</sup> 视为合格;同时测定塑料膜水蒸气透过率,采用红外传感器法在 38 °C / 90% RH 条件下测试,要求 WVTR ≤ 0.5 g/(m<sup>2</sup>·24 h),以保证外层阻隔性能<sup>[3]</sup>。剖面金相分析表明,复合膜内层相对湿度的峰值为 58%,远低于钢卷锈蚀的临界湿度 65%,而且湿度指示卡也没有变蓝,进一步证实了包装材料在极端温湿度条件下的可靠性。

#### 3.2.3 钢卷模拟封存试验

钢卷模拟封存试验为 1:1 实物级验证,取外径 1 600 mm、内径 610 mm、板厚 0.8 mm 的普冷卷,表面经脱脂、吹干后称重记录初始质量,称重精度 0.01 kg,使用 2.1 kg VCI 防锈纸双层缠绕,搭接宽度 ≥ 150 mm,外层覆 120 μmPE-C 复合膜,膜内放置湿度指示卡,边缘采用热风焊接密封,整卷置于露天堆场平台,上方仅设遮雨棚,经历 90 天自然封存,其间每日记录环境温度、降雨量、风速,封存结束后拆开包装,目测钢卷外圈、端部及内圈锈蚀情况,按 GB/T 8923.1 评定锈蚀等级,要求 A 级面积 ≥ 95%,B 级面积 ≤ 5%,无 C 级锈;同时测定膜内相对湿度,要求 RH ≤ 60%,湿度指示卡不变色;再次称重钢卷,质量损失 ≤ 0.05 kg 视为合格;对拆下的防锈纸进行拉伸性能测试,拉伸强度保持率 ≥ 80%,延伸率保持率 ≥ 70%,确保包装完整性。一旦存在锈蚀等级未达标,膜内湿度过高、质量损失过多或者防锈纸性能下降等不良现象,需立即追溯试验全过程,检查 VCI 防锈纸的缠绕密封状况,优化包装材料规格后再重新执行验证。

## 4 结果与讨论

### 4.1 动态接触湿热试验

在高温高湿环境所引发的加速腐蚀环境下,目前钢铁行业广泛采用单层纸张和双层复合膜包装方式,

对普冷板具有很好的防锈性能,其防锈效果能够稳定保持在半年以上,完全满足冷轧钢卷对于防锈包装的严格要求。普通PE膜+中性衬纸对照组在经过720 h、60℃、95%RH、2 Hz 往复摩擦的极限工况之后,锈蚀面积达到了12.4%,且其表面上出现了较为明显的黄褐色锈斑,而锈点沿着摩擦轨迹呈现线状分布的特性,这是因为微动效应破坏了最初的吸水层并不断地供氧,加速电化学腐蚀。采用VCI防锈纸—塑料膜复合方案的实验组却仅仅只有0.08%的锈蚀率,并且锈点大小仅有小于0.2 mm,完全符合《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2018)中 $\leq 0.2\%$ 的A级要求,从而证明了VCI缓释体系在高温高湿度的动态条件之下仍然有着良好的效果。用UV分光光度计测量得知,在经过此次试验后,防锈纸当中残余下来的气相缓蚀剂的含量仍达到了82.3%,转移损耗不到18%的程度,这是由于VCI分子在纸纤维微孔当中形成了第二次的吸附储存,可以在长时间的海上运输过程中不断缓慢地散发出来,并且保证一定的保护浓度:纸面上pH值从7.0微升到了7.2,并没有观察到纸面的酸化现象,能够有效地保证钢卷表面的钝化层不被破坏。电子探针面扫描结果显示,缓蚀剂在金属上形成6 nm厚的含氮有机吸附层,均匀分布于晶界和划痕边缘,阻挡Cl<sup>-</sup> 侵蚀通道, I<sub>corr</sub>d 由 0.82  $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  降至 0.05  $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。从以上几个方面可知,在动态接触湿热条件下,复合防锈纸仍然具有良好的气相防护效果,可以作为后续两级试验的基础<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 交变夹具湿热试验

在高湿度且温差变化频繁的加速腐蚀环境下,钢铁企业的普冷板包装方案具备良好的防锈效果,不论是单层纸质材料包裹还是纸膜双层复合封装,都能达到很好的保护效果,其中纸膜双层复合封装的防锈周期最高可达17天,完全符合冷轧钢卷常规包装的要求。12期-20℃×8 h↔60℃×95%RH×8 h 剧烈温变后对照组试片边缘热胀冷缩应力翘曲局部膜层开裂锈蚀面积2.1%,质量损失0.18  $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; VCI复合方案试片表面无肉眼锈蚀边缘完整质量损失仅0.03  $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  < 0.1  $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  合格线,说明防锈纸柔韧与缓释特性在温差应力下未退化;剖面金相显示复合膜内层相对湿度峰仅58% < 钢卷锈蚀临界65%湿度指示卡不变蓝,外层PE-C膜水蒸气透过率实测0.38  $\text{g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$  < 0.5  $\text{g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$  表明阻隔层与VCI复合内层形成“湿度双保险”机制<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 钢卷模拟封存实验

利用小型实物钢卷加速腐蚀试验来评定封存效果,所得到的数据比较接近真实的存储环境,具有较强的代

表性。从统计数据来看,在高温高湿这种极端腐蚀条件下,单层纸张和双层纸膜复合包装都对普冷板有着良好的防锈性能,能在30天内达到无锈蚀的状态,完全符合冷轧钢卷对于防锈包装的严格要求<sup>[6]</sup>。90天自然露天封存结束后,对照钢卷(仅PE膜)外圈大面积出现黄褐色锈层,锈蚀等级为C级面积8%、B级面积25%,最大小面积锈斑30 mm,边缘处因雨水侵入产生带状水锈,而VCI组复合钢卷外圈A级面积97.2%、B级面积2.8%,且未发现C级锈,锈点直径全部<1 mm,满足A级 $\geq 95\%$ 出口锈蚀指标,VCI腐蚀钢卷拆卷称重后质量减少0.21 kg,是由于钢卷吸氧产生腐蚀锈化物所致,VCI组减重仅为0.02 kg,属于误差范围,说明金属基体腐蚀程度不高。膜内湿度曲线图中,VCI组相对湿度恒小于58%,对照组湿度受昼夜因素影响波动较大(75%~95%),超过锈蚀临界时间占比接近60%,形象地体现了湿度对防锈的关键性<sup>[7]</sup>。

### 5 结束语

冷轧钢卷采用气相防锈纸和塑料膜的双层包装,虽然可以防止锈蚀,但是存在包装成本高、效率低、人力资源不足等问题,企业要采取有效措施,提高包装效率,降低包装成本,同时满足环保要求,从而提高企业的竞争力。为此,可以采用新的防锈材料,这类防锈材料表现出更好的防锈效果且价格更低廉,还可以引入自动化包装机器,这样能提升包装效率并保证包装的质量,从而降低对人力依赖程度,而且企业可以加强对员工的培训以及管理效能,以此提升员工操作水平与工作效率。在环保层面,可选用可回收利用或是能够被生物分解的包装材料来减小对环境带来的影响。

### 参考文献:

- [1] 胡艳艳,朱映玉.冷轧退火卷表面锈蚀原因分析及措施[J].热处理技术与装备,2024,45(03):54-57,61.
- [2] 张宝平,赵艳亮,孙敏.低涂油冷轧板应用及锈蚀问题解决方案探讨[J].宝钢技术,2022(05):22-28.
- [3] 王子标.钢卷包装机组的现状和发展[J].冶金设备,2022(03):107-111.
- [4] 刘宇,孙慧聪,漆启松,等.镀铝硅热成型钢卷运输黑斑问题研究分析[J].冶金管理,2022(09):61-63.
- [5] 张志东,邓象贤.冷轧薄板涂装生产线静电喷涂防锈油典型应用案例[J].石油商技,2021,39(03):18-20.
- [6] 张跃强.热镀锌汽车板卷渗油的原因分析及改善[J].河北冶金,2021(01):63-67.
- [7] 马耿魏,唐艳秋.冷轧钢卷防锈包装方式简化研究[J].金属材料与冶金工程,2022,50(05):50-54.

# 电力工程施工安全与智能监控研究

臧天雅

(湖南湘中输变电建设有限公司, 湖南 娄底 417000)

**摘要** 电力工程施工涉及高空作业、带电操作、起重吊装等高危环节, 传统安全管理存在监控效率低、预警滞后等不足, 亟需引入智能化手段提升管理水平。通过构建基于物联网感知、AI 图像识别、多源数据融合的智能监控体系, 实现对施工现场人员行为、设备状态、环境参数的实时采集与智能分析。工程应用结果表明, 该体系可使人身伤害事故率下降 67.2%, 隐患发现效率提升至原来的 3.4 倍, 预警响应时间缩短 92.9%。智能监控技术与施工安全管理的深度融合, 能够有效弥补传统模式的技术短板, 为电力基础设施建设安全提供有力支撑。

**关键词** 电力工程; 施工安全; 智能监控; 物联网; 风险预警

中图分类号: TP277; TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.029

## 0 引言

电力工程作为国民经济发展的重要基础设施, 其施工过程涉及高空作业、带电操作、大型设备吊装等高危环节, 安全风险突出, 传统安全管理模式主要依赖人工巡检与事后处理, 存在监控盲区多、响应速度慢、预警能力弱等问题。近年来, 随着物联网 (IoT, Internet of Things)、人工智能 (AI, Artificial Intelligence)、云计算等技术的快速发展, 智能监控技术在工程施工领域得到广泛应用, 将先进的智能监控技术引入电力工程施工安全管理, 实现对施工现场人员、设备、环境的实时感知以及智能分析, 对于预防安全事故, 保障施工人员生命安全具有重要的理论价值与现实意义。

## 1 电力工程施工安全关键技术

### 1.1 高空作业与临边防护技术

在电力工程施工中, 输电线路架设、铁塔组立、变电站设备安装等作业普遍在高空环境下进行, 高空坠落事故是导致人员伤亡的首要因素, 针对这一问题, 高空作业安全防护技术的核心在于构建“人一机一环境”三位一体的立体防护体系。

在个人防护装备方面, 采用智能安全带与自锁式防坠器相结合的方式, 当作业人员发生意外坠落时, 防坠器能够在 0.3 秒内自动锁止, 有效限制坠落距离。在临边防护方面, 针对塔上作业平台、脚手架边缘等危险区域, 采用装配式防护栏杆与安全网组合防护, 防护栏杆高度不低于 1.2 米, 并设置踢脚板防止工具坠落伤人。

突破性地提出基于风险等级的动态防护策略, 根据作业高度、气象条件、人员技能等因素综合评估作业风险等级, 动态调整防护措施强度, 建立高空作业风险综合评估模型, 其风险指数计算公式如下, 表示为式 (1)。

$$R = \alpha H + \beta W + \gamma S \quad (1)$$

式 (1) 中,  $R$  为综合风险指数,  $H$  为作业高度因子,  $W$  为气象条件因子,  $S$  为人员技能因子,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别为各因子权重系数, 通过层次分析法 (AHP, Analytic Hierarchy Process) 确定, 取值范围为 0 至 1, 且  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

该模型的核心作用在于将定性的安全评估转化为定量指标, 为现场安全管理决策提供科学依据, 实现从经验管理向数据驱动管理的转变。

### 1.2 带电作业安全控制技术

带电作业为电力工程施工与运维中的特殊作业样式, 作业人员需在不停电状态中开展设备检修以及线路维护事宜, 电弧烧伤等极具威胁的风险, 带电作业安全控制技术的核心之处是创建可靠的电气绝缘屏障与安全距离保障模式。

在绝缘防护相关事宜上, 选用复合绝缘材料制成的绝缘服、绝缘靴这类个人防护器材, 其绝缘等级应达到相应电压等级的要求, 对于 110 kV 及以上电压等级下的带电作业操作, 绝缘工具泄漏电流不可超出规定的限定数值, 就安全距离控制而言, 严格依照最小安全距离既定要求执行, 实施 220 kV 线路带电作业的时段, 人体与带电体之间的最小距离不少于 1.8 米。

作者简介: 臧天雅 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程技术。

### 1.3 起重吊装作业安全技术

电力工程施工开展阶段，断路器等大型设备安装以及输电铁塔构件组立都涉及起重吊装作业，在吊装作业中存在起重机倾覆的情形，诸如碰撞挤压的风险，起重吊装安全技术的核心内容为保证起重设备的稳定与吊装过程的可控。

就起重机稳定性问题而言，作业开始前需进行地基承载力验算，使支腿支撑面积与地基承载力满足相关要求，在实施吊装作业期间，借助力矩限制器实时监控起重机的实际工作力矩，若力矩达到额定值的90%就发出预警，若超过额定值，会自动切断起升机构的动力，在吊具安全相关范畴，钢丝绳的安全系数不低于6，吊环这类索具要定期开展探伤检测。

突破性地给出智能吊装监控方案，在起重机的关键部位安置倾角传感器，负载传感器与风速仪设备，构建多参数融合的吊装安全监测体系，此系统可实时算出起重机的稳定性裕度，与风载荷预测模型相结合，预先发觉吊装作业的潜在风险，为吊装指挥进行决策提供技术后盾。

## 2 施工现场智能监控技术体系

### 2.1 物联网感知与数据采集技术

物联网感知技术是智能监控体系的基础支撑，其关键作用是实现施工现场物理世界和信息世界的有效贯通，为上层的智能分析提供全面、实时的数据支撑。

就传感器部署而言，构建囊括人员、设备及环境三大要素组成的感知网络。就人员感知层面，为施工人员分发集成定位芯片装置，带有生命体征传感器的智能安全帽，及时采集位置，如体温这类的数据<sup>[1]</sup>。在设备状态察觉层面，在起重机械上面，给施工车辆等关键设备安装运行状态监测传感器，采集设备工作时的工况参数。在环境感知层面，摆放温湿度监测探头，如有毒有害气体浓度的环境监测传感器。

数据传输采用“边缘到云端”协同架构，现场边缘网关对传感器数据进行预处理，接着完成协议转换后，采用5G或工业以太网的方式上传到云端平台，开拓性地提出基于时序数据特征的自适应采样途径，在保障数据完整状态的情形下，依据参数的变化速度动态调整采样频率，有效减轻网络传输负荷与存储成本压力，实现感知资源的合理配置。详见图1。

### 2.2 视频监控与AI图像识别技术

视频监控是施工现场安全管理的重要手段，而运用AI图像识别技术使视频监控从被动记录过渡到主动识别，其核心用途是自动发现安全隐患然后实时报警，大幅增进监控效益。

就视频采集而言，采用高清网络摄像机去覆盖施工现场关键区域，含有作业的区块、物资堆放处、设备运行区块、人员走动通道等，鉴于电力施工现场光照条件复杂这一情形，采用具有宽动态范围(WDR)作用的摄像装备，保证强光与阴影区域都可以清晰成像。

从图像识别算法角度，依靠深度学习框架开发电力施工场景专属的目标检测模型，实现对安全帽佩戴的检测、检查反光背心穿戴检测、危险区域闯入检测、违规行为辨认等功能，别出心裁地构建电力施工场景专用数据集，含有超过10万张已标注的图像，含有变电站，如配电工程的典型场景，模型的识别精准度达到95%以上，此专用数据集与模型的构建弥补了电力施工领域AI监控的空白，具备重要的应用推广价值。

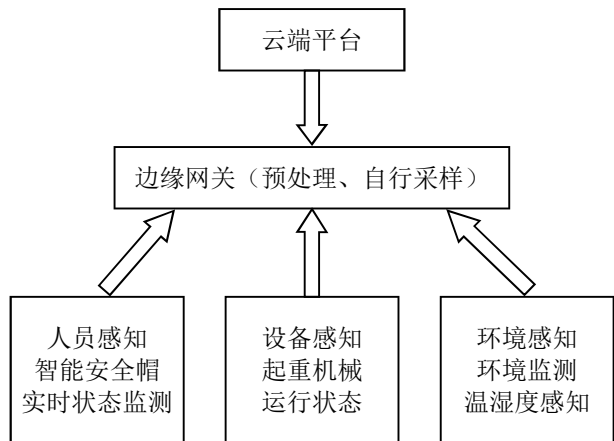


图1 物联网感知与数据采集架构

### 2.3 人员定位与行为智能分析技术

人员定位技术能实时把握施工人员的空间分布状态，行为分析技术可辨别人员的动作状态与行为模式，二者结合的核心功效是实现对人员安全状态精准感知以及对异常行为及时预警。

在定位技术筛选方面，室外开阔的空间采用北斗/GPS(Global Positioning System)来进行卫星定位，定位精度超出1米精度，室内连同遮挡区域采用UWB(Ultra Wide Band, 超宽带)定位技术，定位精度能实现厘米级水平，借助融合算法实现室内外定位的无间隙切换，保障人员轨迹的连续跟踪。

在行为分析方面，基于定位数据与视频数据的融合，开发人员行为智能分析算法，建立行为风险评估模型，综合考虑人员停留时间、移动速度、所处区域危险等级等因素，其行为风险度计算表示为公式(2)。

$$D = \frac{T \times L}{V + \varepsilon} \quad (2)$$

式(2)中， $D$ 为行为风险度， $T$ 为危险区域停留时间， $L$ 为区域危险等级系数， $V$ 为人员移动速度， $\varepsilon$ 为修正常数，防止分母为零，通常取0.1。

## 2.4 风险预警与应急响应平台技术

风险预警与应急响应平台是智能监控体系的中枢，其核心作用是聚合多源数据，解析潜在风险，公布预警资讯，配置应急资源，实现安全管理的全闭环控制。

平台采用微服务架构实施设计，含有数据接入层、数据处理区块、业务应用范畴与展示交互范畴。数据接入层承担着对接各类传感器的工作，视频设备连同业务体系<sup>[2]</sup>。数据处理层凭借大数据技术实现对海量数据的存储，去除杂质再分析、业务应用层把风险评估纳入封装范畴、应急指挥等核心相关功能。展示交互层凭借数字孪生技术构建施工现场的三维可视化模型，直接呈现安全情形。

## 3 智能监控应用效果分析

### 3.1 典型电力工程应用案例

选择某 500 kV 变电站新建项目与某特高压输电线路项目作为智能监控技术应用的验证事例，系统开始到完成部署的周期分别是 18 个月与 24 个月。

500 kV 变电站工程配置了齐全的智能监控体系，安排了 152 个环境监测点位，48 处高清视频监控点，全员范围实现定位终端覆盖，系统工作期间，累计识别出的安全隐患达 387 项，其中高空作业防护方面缺失的有 127 项，违规闯入危险区域 89 起，设备异常状态的预警数量为 171 项<sup>[3]</sup>。AI 图像识别系统日均所处理的视频帧数超出 200 万帧，安全帽佩戴检测的判定精准度达 96.3%。

特高压输电线路工程针对施工点分布得比较分散，地形凸显复杂的特质，采用“4G/5G 与北斗结合”的移动监控方案，在 126 基铁塔施工现场投放便携式监控设备，实现远程可视化掌控，系统成功对大风进行预警，雷电等糟糕天气 23 次，及时安排人员撤离，杜绝了潜在的安全事故发生。

### 3.2 安全管理效能综合评估

为科学评估智能监控技术在电力工程施工安全管理上的提升效果，制定包含事故控制、以管理效率等三个维度构建的综合评估指标体系，采集智能监控技术应用前后各 12 个月的安全管理数据，完成对比剖析。

在事故驾驭方面，统计出现的人身伤害事故、设备损毁事故、环境污染事故的出现频次与危害程度，隐患整治维度，统计实际发现的隐患数量，隐患排除整改闭环率，整改周期的平均值<sup>[4]</sup>。在管理成效方面，算出巡检的人工工时数量，预警反馈时长，资讯传递效率。

对比分析后得出，运用智能监控技术，安全效益

实现显著提升，人身伤害事故发生率出现 67.2% 的下降，隐患发现数量达到原来的 3.4 倍之多，平均整改所需周期缩短了 58.6%，巡检所需的人工工时降低了 45.3%。

智能监控技术在提高发现隐患能力上的效果极为突出，这是因为 AI 图像识别以及多源数据融合分析技术的采用，实现了对施工现场的全天无停歇、无盲区监控<sup>[5]</sup>。预警响应时间的极大缩短验证了风险预警平台实时与有效的属性，为预防事故争得了宝贵时间。

### 3.3 存在问题与优化方向

即便智能监控技术在电力工程施工安全管理中展现出突出成效，但在实际应用中依然存在若干问题需要去处理。在设备适应特性方面，现有的传感器及监控设备在极端环境条件下的稳定性尚待提高，如强电磁干扰这类环境因素会对设备正常运行造成影响，引起数据采集出现中断与失真状况，未来需研发适应电力施工特定环境的专用监测设备，加强系统对环境的适应能力。

就算法准确性而言，AI 图像识别面对复杂的光照条件、遮挡场景下，识别准确率还有进一步提升的空间。就电力施工中的特种作业行为而言，如带电作业规范性的评定，存在吊装指挥手势识别等情形，需进一步扩大训练数据的集合，优化算法模型。

## 4 结束语

以物联网的感知为依托，人工智能图像辨认，采用风险预警等技术构建的智能监控体系，切实攻克了电力工程施工安全管理中隐患难发现、回应速度慢的问题，工程验证说明，人身伤害事故率降低至 67.2%，隐患发现效率增长至 3.4 倍。随着边缘计算与数字孪生技术的深度融合，智能监控将朝着预测能力变强、决策支持更精准的方向发展，助推施工安全管理实现主动预防的转变。

## 参考文献：

- [1] 余秋里. 基于物联网的电力工程施工安全监管平台研究 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(24): 101-103.
- [2] 胡悦涛. 基于深度学习的电力工程施工现场安全风险自动识别方法 [J]. 信息与电脑, 2025, 37(24): 77-79.
- [3] 王勇. 10 kV 电力工程施工安全管理及现场质量控制措施 [J]. 大众标准化, 2025(22): 22-24.
- [4] 刘思蓉, 孙文强, 沈金林. 配电网电力工程技术及施工安全措施研究 [J]. 品牌与标准化, 2025(06): 196-198.
- [5] 刘旭. 智能化技术在电力工程施工现场安全管控中的应用 [J]. 电气技术与经济, 2025(10): 112-114.

# 电力继电保护故障及检修技术探讨

张春雷

(内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电公司, 内蒙古 包头 014000)

**摘要** 本文以电力继电保护为研究对象, 对其在电力系统中的重要作用进行了探讨, 对电力设备继电保护中常见的短路故障、电流互感器故障、隐性故障等问题进行了详细的分析, 并对直接观察法、短接法、排除法、替换法、对照法等故障检测方法进行了阐述, 提出相应的维修处理措施及预防对策, 以期为保障电力系统稳定运行提供参考, 进而提高电力继电保护工作水平。

**关键词** 电力继电保护; 短路; 电流互感器; 直接观察检修法; 短接检修法

中图分类号: TM77

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.030

## 0 引言

电力是现代社会经济繁荣、科技进步的主要动力, 电力持续、稳定的供应是国家发展、社会进步的基础, 不能忽视。电力系统是电力传输、分配的基础设施, 它的效能、稳定性与社会经济活动能否平稳运行、人们的生活秩序能否保持息息相关。继电保护装置是电力系统的一道“生命防线”, 当它检测到电力系统出现故障或者非正常运行状况的时候, 可以及时、准确地将故障区域与正常部分隔离开来, 有效地阻止故障的蔓延, 保证电力系统平稳、安全地运行。但是由于电力系统运行环境的复杂性以及各种影响因素的存在, 继电保护装置不可避免地会出现故障。一旦继电保护装置出现故障, 它所应该起到的安全防护作用就无法正常发挥, 对电力系统安全造成严重威胁。因此, 对电力继电保护故障及维修技术进行进一步的研究, 对提高电力系统的安全性和可靠性具有非常重要的实际意义。

## 1 电力继电保护的重要作用

### 1.1 保障电力系统安全稳定运行

随着国家基础设施建设步伐的加快, 社会各领域对电力的需求量越来越大, 一方面体现了电力作为基础能源的重要地位, 另一方面也对电力供应质量、稳定性提出了更高的要求。保证电力供应的第一要务是保证供电的稳定、可靠, 这是目前社会各个领域对电力系统最基本的要求。为了保证该任务的顺利完成, 在电力系统中设置了继电保护装置, 以提高整个电力系统的安全性。但是继电保护装置的潜在故障问题不

能忽视, 它的稳定性、可靠性一直是工程技术领域所关注的核心问题之一。电力系统稳定运行会因为设备老化、自然灾害侵袭、人为操作不当等众多内外部因素的干扰而受到影响, 进而产生故障。继电保护装置可以实时监测电力系统运行情况, 当检测到异常时能迅速作出反应, 将故障部分隔离, 避免故障的扩大和恶化, 最小化对未受影响的设备的影响, 保证整个电力系统能够安全、稳定、连续地工作。

### 1.2 提高电力系统的供电可靠性

供电可靠性是反映电力系统好坏的一个重要指标。继电保护装置的合理配置及正常运行, 可以缩短停电时间、停电范围, 提高电力系统供电可靠性。快速切除故障的继电保护装置可以减少用户的停电时间, 降低停电给用户生产生活带来的影响。继电保护装置还可以实现电力系统自动重合闸功能, 故障消除之后可以自动恢复供电, 从而提高供电的连续性。在一些重要的工业用户、城市配电网中, 继电保护装置的可靠动作对保证生产的正常进行、居民的生活用电起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。

### 1.3 反映电力系统运行状态

继电保护装置不仅可以检测、切除故障, 而且可以反映电力系统运行状态。对继电保护装置采集到的数据加以分析并加以处理, 能够掌握电力系统电压、电流、功率等参数的变动状况, 及时发现电力系统存在的隐患, 为电力系统的运行调度及维护管理提供关键支撑。通过对继电保护装置记录的故障信息及运行数据进行分析, 可以找到电力系统薄弱环节, 有针对性

作者简介: 张春雷(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电力系统继电保护。

地对设备进行检修改造,提高电力系统整体运行水平。

## 2 电力继电保护中的常见故障分析

### 2.1 电力继电保护装置的短路故障

短路故障在电力继电保护装置中比较常见。短路故障一般是由继电保护装置内部线路绝缘损坏、元件老化或者受到外力破坏等原因造成的。当发生短路故障的时候,短路电流会急剧增大,会对继电保护装置的元件造成损坏,影响其正常工作。继电保护装置中的印刷电路板由于短路电流产生的热量而烧毁,造成装置不能正常工作。短路故障还会引起继电保护装置的误动作,即在电力系统正常运行时,由于短路故障产生的干扰信号,使继电保护装置误判为故障而动作,切断正常运行的设备,造成不必要的停电损失。

### 2.2 电流互感器故障

电流互感器在电力系统继电保护设备中起着关键的作用,它的作用是把主电路中的高电流准确地缩放到低电流的信号,然后继电保护系统用这个低电流的信号来检测和执行保护动作,保证电网的安全稳定运行。电流互感器的异常情况会对继电保护系统的正常工作造成严重影响。常见的电流互感器问题有二次电路断路、磁通饱和。当二次回路出现断路时,会造成电流互感器二次侧没有电流流通,继电保护系统接收不到准确的电流信息,从而会对保护系统的性能产生直接的影响,可能导致保护系统不能有效地执行预定的保护功能。电流保护系统中,如果电流互感器二次回路发生开路,会导致保护装置不能正确获取故障电流信息,从而不能及时响应,进而对故障的识别和隔离造成不利影响,甚至使故障范围扩大。当电力系统发生短路故障,造成电流明显增大的时候,电流互感器可能会出现铁芯饱和的现象,这时二次侧电流会出现非线性畸变,不能准确地反映出一次侧电流的变化,从而影响继电保护系统的响应精度和效果<sup>[2]</sup>。

### 2.3 隐性故障问题

隐性故障是指电力系统在正常运行中不容易察觉,但是当发生故障或者非正常状态时,会潜在地干扰继电保护装置正确执行任务的未知缺陷。隐性故障有隐蔽性高、难以检测等特点,会严重影响电力系统稳定运行。隐性故障发生机理多样,牵涉面广,既有继电保护设备设计思想、制造工艺、安装细节、调试过程等各方面的因素,又有电力系统具体运行条件、操作方式等各方面的因素。继电保护系统的软件代码存在设计缺陷,在常规操作中一般不会造成影响,但在某些故障情况下,这些缺陷会造成保护设备出现错误动

作或者完全失效。继电保护设备组件的退化、接触点不稳定的状态如果不能被及时发现,就会慢慢发展成潜在的技术问题。

## 3 电力继电保护故障的检修方法

### 3.1 直接观察检修法

直接观察检修法是最直观、最简单的故障检测方法。检修人员通过观察继电保护装置的外观、指示灯、显示屏信息等来判断继电保护装置是否发生故障。观察继电保护装置面板上的指示灯,如果某个指示灯异常闪烁或者不亮,那么说明该指示灯对应的电路或者元件存在问题。检修人员还可以观察装置外观有无烧焦、变形、破损等现象,闻有无异味等,直观的信息也可以给故障判断提供重要线索。根据装置显示屏信息可以了解装置的运行参数、故障报警信息等,缩小故障范围<sup>[3]</sup>。

### 3.2 短接检修法

短接检修法是继电保护装置故障排查中常用的实用方法,核心操作是用绝缘良好的短接线,将装置内可能发生故障的回路或元件进行临时性的短接,通过观察并对比短接前后装置工作状态的变化来判断故障的具体位置。此方法适合于初步怀疑某段回路或者某元件存在开路、接触不良类故障的时候使用,操作简便、反应直接、定位迅速,适合现场应急检修和快速诊断。该方法的基本原理是,当系统中某一个环节由于短路或者接触电阻过大,造成信号不能正常传输的时候,用短接线直接跨越该环节,可以暂时恢复电气连通性。如果短接后装置功能恢复正常,则可判定被短接部分存在故障;若状态没有改善,则需要进一步排查其他环节。在继电保护装置中,若怀疑某中间继电器的触点由于氧化、松动或者机械卡滞而造成接触不良时,可以使用短接线将该对触点两端可靠地短接。短接之后如果保护动作恢复正常,说明故障点在该触点;如果问题依然存在,则需要继续检查与该触点相关联的线圈回路、接线端子或者后续逻辑电路。短接检修法不仅可以检测继电器触点,也可以检测控制回路中接线点、转换开关、压板、微型断路器通断状态。实际操作时,一般从简到繁、从外到内进行短接,先短接容易操作、故障概率大的部分,再逐渐缩小排查范围。该方法可以在没有专业测量仪器或者时间紧张的情况下,迅速找到开路类故障,提高检修效率。

### 3.3 排除法

排除法属于一种依靠逻辑推理的故障检测手段。当继电保护装置出现故障的时候,检修人员可以依据

装置的工作原理和故障现象,将可能的故障原因一一列出,再逐个排除不可能的故障原因,最后确定故障位置。当继电保护装置发生误动作故障时,检修人员可以先检查装置的电源是否正常,如果电源正常,再检查装置的采样回路、逻辑回路、出口回路等,逐步排查出造成误动作的具体原因。排除法虽然比较烦琐,但是可以对故障的原因进行全面、系统的分析,适合于复杂故障的检测。

### 3.4 替换检修法

替换检修法是用正常工作的元件或者回路替换继电保护装置中怀疑有故障的元件或者回路,通过观察替换后装置的工作状态是否正常来判断故障位置。此方法适合于故障元件或者回路比较明确,并且有备用元件或者回路的场合。当怀疑继电保护装置中某个插件板存在故障时,用同型号的正常插件板替换,替换后如果装置恢复正常工作,说明原插件板存在故障。替换检修法可以快速准确地找到故障元件,但是要注意替换元件的型号、规格等参数要和原元件一致,防止由于元件不匹配而引起新的问题<sup>[4]</sup>。

### 3.5 对照检修法

对照检修法是将继电保护装置正常运行时的参数、接线方式等与故障时的参数、接线方式进行比较分析,找出差异之处,从而确定故障位置。该方法适合于对继电保护装置比较熟悉,并且有正常运行数据可以参考的情况。检修人员可以查阅继电保护装置的历史运行记录,得到装置正常运行时的各项参数,再将故障时的参数与之比较,如果某个参数出现异常变化,则说明该参数所涉及的回路或者元件存在故障。对照检修法可以使得检修人员迅速找到故障的异常之处,从而加快故障检测的速度。

## 4 电力继电保护装置故障的预防对策

### 4.1 强化对继电保护故障排查工作的重视度

电力企业及相关运维部门必须从根本上认识到,继电保护装置是保障电力系统安全稳定运行的“第一道防线”和核心中枢,它的可靠性直接关系到电网的整体安全、供电质量以及重大设备资产。因此必须把继电保护故障排查工作提高到战略管理的高度,给它赋予与主设备运维同等重要的地位。因此,需要建立覆盖全流程的故障排查管理制度体系,明确运维、检修、调度、技术监督等各部门之间职责界限和协同方式,使故障处理形成发现、分析、处置、反馈的闭环。同时把故障排查及时性、准确率、复现预防措施作为关键绩效考核指标,依靠有效的监督和考核机制来落

实责任。另外,要加强对继电保护装置的日常巡检工作,及时发现装置存在的潜在问题,做到早发现、早处理,防止故障的扩大和恶化。

### 4.2 主动进行技术革新

随着电力系统朝着高电压、大容量、高度智能化的方向不断发展,继电保护装置在可靠性、响应速度、故障辨识精度等各方面所要面临的挑战也越来越大,其功能需要进一步扩展来满足复杂电网环境下动态监测、自适应保护的需求。电力企业要主动推进技术创新,系统性地引进并融合先进的继电保护技术以及智能化设备,全面提高继电保护装置的自适应能力、运行可靠性、数字化水平,从而创建起更加安全、高效、具有前瞻性的电力系统防护体系。相比传统的电磁型保护装置,使用微机保护装置可以大大提高继电保护系统的响应速度和动作精度,它所具有的数字化处理能力、多维度故障诊断功能、模块化维护特性,既提高了系统运行的可靠性、灵活性,又满足了现代智能电网对保护控制装置在实时性、集成度、可扩展性等各方面的要求<sup>[5]</sup>。

## 5 结束语

电力继电保护机制是保证电力系统安全稳定运行的重要因素,如果发生故障或者失效,将会给整个电力系统的正常运行造成严重的负面影响。采用高效的故障监测和修复策略以及预防性维护措施,对提高电力继电器保护设备的可靠性、稳定性十分重要,从而保证电力系统安全稳定运行,为社会经济持续发展和民众日常生活提供可靠电力供应。在电力系统发展的过程中,持续研究和改进电力继电保护技术是非常重要的,可以适应电力网络结构和需求的变化,保证电力供应的安全性、可靠性不断提高。

### 参考文献:

- [1] 王晨星,李珂明,魏倩.电力系统继电保护故障检测与维修技术研究[A].第八届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集[C].广西网络安全和信息化联合会,2025.
- [2] 李曼,薛涵拓.电力继电保护故障的检测与维修技术研究[J].科技资讯,2025,23(02):88-90.
- [3] 白湘玮,李万岭,张万月.电力继电保护故障的检测与维修技术研究[J].电力设备管理,2024(19):22-24.
- [4] 王馨瑶,史宇.电力继电保护的故障分析与维修技术研究[J].张江科技评论,2024(06):89-91.
- [5] 莫久伟.火力发电厂电力继电保护故障的检测与维修技术研究[J].中国高科技,2023(22):19-21.

# 人工智能在电力工程施工管理中的应用研究

腾爱根, 马迎顺

(山东坤厚电力科技有限公司, 山东 德州 253300)

**摘要** 电力工程项目的规模和难度不断提升, 传统的项目管理方式已不能满足项目管理的要求。本文研究了人工智能技术在电力工程项目管理中的应用, 包括进度管控、成本控制、质量保障等方面, 以期提升项目管理的效率和质量提供借鉴。研究结果表明, 人工智能技术能够通过智能化的分析与决策机制, 显著提升项目管理效率, 因此其具体应用具有重要的研究价值, 对电力工程行业的持续发展产生积极的推动作用。

**关键词** 人工智能; 电力工程; 施工管理

**中图分类号**: TP18; TU712

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.031

## 0 引言

传统的电力工程施工管理长期依赖于人工经验, 这种模式往往造成管理效率不高、决策能力有限的问题。随着电力工程领域不断发展, 借助新兴技术来提升项目管理水平已成为迫切需求, 人工智能技术以其强大的数据采集能力、自主学习机制与自动化决策优势, 能够在项目全流程中实现应用, 从而显著优化风险管理、资源配置等关键环节的运行逻辑。本文从工程实践出发, 结合国内外现状, 深入探讨了人工智能技术在电力工程施工管理中的实际应用价值, 并围绕风险防控、质量保障、自主决策支持以及信息平台建设等方向, 系统提出了推动人工智能技术在电力项目全周期落地实施的具体路径与策略。

## 1 人工智能在电力工程施工管理中的应用价值

传统的手工设计方法通常耗时费力且容易产生误差, 人工智能技术拥有强大的数据处理能力, 能够代替手工处理大量建筑信息, 从而显著压缩设计与施工周期, 加快工程整体进度。此外, 人工智能技术还可结合历史数据与施工经验, 对施工方案进行自动优化, 进而进一步提升施工效率。在建筑工程中, 资源和人员的管理配置是非常重要的, 需要提前根据电力工程的规模和复杂程度制定好施工计划, 提前采购所需要的材料和设备, 并进行物料分配和人员安排, 从而使资源得到充分利用, 优化企业用工成本, 使经济效益得到提高。人工智能技术还可以应用到施工现场中, 可以对施工现场的环境、人员行为等进行监控和预警, 通过深度学习反复训练, 精准判断潜在的安全风险, 能够显著减少安全事故的发生概率。在电力工程的各个环

节, 都可以利用人工智能技术分析流程的逻辑关系, 进行流程优化, 提高施工和管理效率, 节约人力成本。

## 2 人工智能技术在电力工程项目管理中的应用现状

### 2.1 国外应用现状

人工智能技术目前在国外的电力工程项目管理中已实现广泛应用。在美国和德国, 人工智能技术的发展已趋于成熟并已实现商业化。在美国智能电网系统中, 人工智能技术已实现了电力资源的自动分配、电力负荷的均衡, 有效提高了电力的运行效率。在德国电网系统中, 人工智能技术可以通过对历史故障数据的学习, 进行故障预测与诊断, 提前预测约 80% 以上的故障, 通过这项功能, 可以有效减少故障维修成本, 避免故障的进一步升级。

### 2.2 国内应用现状

国内电力行业的人工智能应用呈现出了政策驱动、全链条渗透、大模型引领的特点, 人工智能技术在电力工程的设计优化、进度管控、安全监测、成本控制和运维决策等核心环节发挥关键作用, 已成为推动我国电力工程行业发展的强大驱动力<sup>[1]</sup>。在电力工程项目的安全管理方面, 我国引入了人工智能技术对施工现场进行实时监测, 有效保障了施工人员的安全。在电网运维方面, 多数大型电网公司已建设了智能故障诊断系统, 能够精准定位故障点, 节省了电力故障排查时间。在电力调度方面, 我国的部分地区利用人工智能技术优化了电网负荷, 使电力调配更加均衡。在设计优化方面, 人工智能可以结合大量的设计方案数据在短时间内生成最符合实际需求的设计方案, 以供设计人员参考, 同时也提高了设计的科学性和专业性。

**作者简介**: 腾爱根 (1985-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

在运维方面,智能客服已被应用在各类系统中,提高了售后服务水平,为人们带来了良好的用电体验。

### 3 人工智能技术在电力工程项目管理中的具体应用

#### 3.1 施工风险智能预测与主动防控

人工智能技术具有风险智能预防和主动防控的功能,通过大量历史数据的挖掘和算法建立,可以构建信息风险识别和预测模型,并且系统可以通过机器学习建立各类风险因子和故障之间的关联,包括地质突变、极端天气、设计故障等,这些风险因子可以被人工智能技术进行深度学习,建立起逻辑关联和记忆网络,通过各类传感器的实时检测,人工智能系统捕捉到数据之后就可以根据记忆网络和算法对相关数据进行识别和推演,以识别是否会发生故障。深度学习可以有效处理时序特征的检测数据,因此对于边坡位移、结构应力超限或有害气体浓度超标等风险可以实现更早的预测,同时还可以根据逻辑关联建立起数据映射知识库,还能够根据实时学习对知识库进行动态更新。基于风险知识库的系统能够为管理人员提供强大的智能化支持,通过整合历史事故数据、行业安全规范、实时监测信息及专家经验,实现对施工现场各类潜在风险源的自动识别与动态评估。在此基础上,系统还可以进一步模拟不同风险因素可能触发的连锁反应,推演其影响扩散的路径与后果严重性,从而将传统依赖事后响应的被动防御模式转变为以预测预警为核心的主动防控体系<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 资源要素动态调度优化

电力工程建设需要同时调配各类资源,如人力、机械设备、能源资源等,这些资源的协调与项目整体的成本和施工进度有着很大的关联,传统的资源调配需要耗费大量时间来进行规划,但人工智能技术可以通过多维度的分析实现问题分解,为解决复杂的调配问题提供了新途径。人工智能技术能够借助强化学习算法,在模拟环境中对吊装设备、土方机械等关键施工机械的调度与协同方案进行反复的试错、评估与策略调整。通过对大量历史操作数据与实时工况信息的学习,逐步优化决策模型,最终形成在特定施工场景下的最优设备选型、路径规划与任务分配方案,显著减少了现场设备在实际使用中因调度不当而产生的等待或重复移动现象,不仅提升了设备综合作业效率,也直接降低了因闲置、空转或非必要调度所产生的成本,实现了设备使用成本的整体优化。同时,遗传算法、粒子群算法等智能算法可以满足在保持工期、场地、安全等多重约束条件的前提下进行人员、物理等的灵

活调整优化,找出最优或最接近优的方案,实现更好的人员弹性配置和物料的精准送达。当人工智能系统的物联网模块感知到进度发生偏差或者环境发生变化时,可以触发系统全局重新进行资源调配,构建了一个感知、分析、决策、执行一体化的闭环,以最大限度地提升资源利用效能,减少人员与设备的闲置时间,控制额外成本支出,进而实现施工全过程资源利用率与项目经济效益的显著提高,并提高系统整体的稳定性,保证了面对内部波动与外部干扰时,系统能够保持稳定、高效运行的能力,从而使大型电力工程这类复杂系统能够更平稳、更经济地运行。该技术在有效应对天气与地质等外部条件带来的挑战方面表现突出,能够持续适应复杂多变的地质环境与气候条件,从而为特高压输电工程、核电站等重要电力基础设施建设项目全周期任务的顺利推进提供坚实的保障,发挥关键支撑作用。

#### 3.3 施工质量智能监控与闭环管理

人工智能技术赋能了电力工程施工的质量智能监控与闭环管理,可以实现不间断且多维度的智能感知与诊断,其核心技术是计算机视觉技术,通过在隐蔽的基础建筑、高耸杆塔组立、超高压线路架设、精密电气设备的安装等关键工序旁部署智能高清摄像头,并内置人工智能算法模型,可以实现实时目标检测和像素级别的图像分割,从而判断工艺流程是否合规以及是否有细小的缺陷,这些实时的视觉数据可以与预设的建筑信息模型或数字图纸进行自动化空间匹配对比,从而完成精准的偏差诊断和质量监控<sup>[3]</sup>。对电力工程的施工日志、巡检记录等相关材料也可以利用人工智能自然语言处理技术进行文本分析和深度学习,从而获取典型案例和失效模式,强化风险诊断能力,借助智能分析引擎,系统能够对收集的各类施工数据、监测信息与模型输出结果进行自动化整合、处理与深度解析,继而自主生成结构完整、内容详实的诊断报告及相关文档材料,不仅可以显著减少人工整理资料所耗费的时间与精力,更高效替代了以往依赖人力进行的重复性工作<sup>[4]</sup>。

#### 3.4 施工进度智能推演与自主决策优化

电力工程进度管理面对的是进度管控繁杂、多因耦合、变化不定的问题,以人工智能为动力的人机协同能够从多维度、多时序、多场景下综合考虑关键面因素,并用数字孪生驱动下的智能推演模型和决策中枢来应对建设期间进度各方多任务间的干扰性变化。电力工程进度的管理难题突出,其原因是多方面的,

项目进度管控因素较多,且根据实际情况来看,多种因素相互关联,也可能会随时发生变化。人工智能技术可以从不同维度、场景、时序等因素上综合考虑,实现人机协同,同时可以利用数字孪生等核心技术进行智能推演,模拟建设期间可能发生的各类问题,具体来说就是把工程整体目标按照一定的逻辑进行分解,结合现有的机械设备、人员情况、材料情况、气候情况等,进行模拟调配,并按照工程实际情况进行推演,结合深度学习和贝叶斯网络的概率推理,模型可以通过蒙特卡洛采样模拟多种可能发生的偏差场景,计算出典型的风险场景下的项目工期延误概率,并分析各类关键因素对偏差产生的影响度,在此基础上,运用优化算法同步对项目各个环节的资源进行动态调配,重构逻辑拓扑方案,生成效益和效率最大化的最优解方案,最后再通过评估模型对各个方案进行综合评定,这些流程通过人工智能技术自动获取并整合信息,实现了动态、精准、高效的经济化管控<sup>[5]</sup>。

### 3.5 BIM 构建信息管理平台

BIM 构建信息管理平台可以构建项目模型信息,对项目的管理提供基础的数据支撑,通过各类信息的收集和处理,可以进行深度学习,根据相关标准和规定分类整理信息,以供随时调取和使用数据。系统可以结合电力工程施工信息来对项目材料、质量、安全和成本等数据进行管控,并根据项目实际消耗进行动态匹配,生成材料供求表,帮助管理人员及时采购和清理库存。另外,根据工程的深化模型,可以对电力工程施工的进度计划和实际进度进行分析,分析影响工程施工的因素,提高整体项目进度的管控能力,确保项目的顺利完工。检测方案涵盖了信息预处理与模型验证两大核心环节。在模型构建阶段,系统可依据施工图纸与实时采集的现场数据,全面、动态地掌握项目的整体状况与进展细节。如果需要进一步探究模型可能潜藏的风险点并识别关键风险因素,可以对模型进行精细化分解与层级化处理,通过构建各风险因素间的关联网络与影响传导模型,深入分析其相互作用机制与演化路径,并在此基础上提出具有针对性的预警策略与解决方案,从而实现了对施工过程中复杂风险的早识别、早评估与早干预<sup>[6]</sup>。

### 3.6 环境监测及安全生产

电力工程施工的安全生产与施工现场环境的温度、湿度、风速等有很大的关联,通过人工智能技术可以实现环境的监测和危险预警,具体实现方式为在施工现场安装各类监测传感器并连接到人工智能管理平台,

从而收集环境数据,进行自动分析,还可以通过在摄像头中融入 AI 算法进行边缘分析和计算,更快更精准地捕获图像,实时进行分析和识别,发现违规行为或危险隐患可以对该区域发送预警。在变更管理和安全管理工作方面,人工智能可以通过现有的管控程序建立审批流程,与其他信息系统和设备控制系统进行相互关联,分析各系统之间的逻辑关系,对相关申请进行审批,建立安全生产管理机制,提高电力工程安全施工管理效率。人工智能系统的预警信息推送模块能够通过整合数据采集与应用接口,实现预警信息的自动化发送与高效分发,从而助力管理人员及时、全面地掌握施工现场动态与风险状况,提升整体响应速度与决策效率<sup>[7]</sup>。

## 4 结束语

人工智能目前已与电力工程施工的管理环节深度融合,成为驱动管理方式向智能化转型的核心动力。人工智能技术在电力工程施工项目管理中的应用不仅可以提高工程的效率与质量,还可以推动整个行业实现结构优化和可持续发展,在电力工程项目中有着广泛的应用和广阔的前景,但人工智能技术还需要继续发展和研究,在技术研发与创新、专业人才的培养和应用模式的完善上需要持续投入。未来,随着人工智能技术与电力工程管理的深度融合,构建完善的技术标准体系与安全保障机制已成为推动发展的核心议题。同时亟需培育兼具多学科背景的复合型人才,以充分释放人工智能在电力工程项目管理中的潜力,进而引领电力行业朝着更高质量、更可持续的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 李建凤.生成式人工智能在建筑工程技术教育教学场景的机遇与挑战分析[J].消费电子,2024(03):71-73.
- [2] 章家义,龚圣辉,聂堃.基于人工智能的电力工程施工数据融合研究[J].科技创新与应用,2024,14(17):102-105.
- [3] 喻飞.电力工程企业数字化管理应用实践探讨[J].数字化用户,2024(31):103-104.
- [4] 黄建章.基于人工智能技术的电力工程施工信息管理工作[J].中国住宅设施,2023(09):145-147.
- [5] 李淮海,孙向东,杨俊,等.基于人工智能技术的电力工程施工信息管理工作[J].电气自动化,2022,44(04):80-83.
- [6] 乔小旭,侯爱国.人工智能技术在电力工程项目管理中的应用研究[J].自动化应用,2025,66(S1):231-233,237.
- [7] 王艳明.探讨人工智能在建筑工程施工管理中的应用[J].建设机械技术与管理,2024,37(05):154-156.

# 住宅建筑工程框架剪力墙结构施工技术研究

张道亮

(安徽丰临观泰建设工程有限公司, 安徽 合肥 230001)

**摘要** 城市化进程的加快,使得城市人口密度不断攀升。这对于建筑工程行业而言,既是机遇也是挑战。一方面,大众对住宅建筑的需求量逐渐增多;另一方面,该领域对于住宅建筑的质量也提出了更严格的要求。对比传统建筑结构来看,框架剪力墙结构具有较强的抗侧移能力与空间灵活性,逐渐成为住宅建筑工程中的主要类型,但在该类结构施工中仍存在诸多技术难点。本文介绍了框架剪力墙结构,并结合案例深入探究结构施工技术的操作流程与实施要点,以期对相关领域的工作人员提供参考。

**关键词** 住宅建筑工程; 框架剪力墙; 地下结构; 地上结构; 抗侧移

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.032

## 0 引言

为有效破解住宅建筑增多、土地资源紧张之间的矛盾,高层建筑逐渐成为城市住宅建筑中的主流。相比于常规建筑,高层建筑的安全性与稳定性更加重要,直接关系到居民的生命财产安全。在该类住宅建筑工程中,采取框架剪力墙结构施工方案具有较高的必要性,是提高建筑质量及综合性能的关键举措。但该类结构施工工艺复杂,且施工环节烦琐,需要施工人员把握相应的技术要点。

## 1 框架剪力墙施工流程

在框架剪力墙结构施工中,施工人员需要落实先地下后地上、先主体后维护的思路制定施工方案。同时,需要充分考虑施工要求以及现场情况,梳理施工流程。在此过程中,需要深入贯彻经济性、安全性、便捷性原则,贴合结构的受力特点,精准划分施工阶段。

## 2 住宅建筑工程框架剪力墙结构施工技术的应用

### 2.1 工程概况

案例工程为某市住宅建筑,总面积约 50 000 m<sup>2</sup>。建筑总层数共计 32 层,其中 30 层为地面建筑,2 层为地下建筑,用于设备存储与停车。建筑整体结构为框架剪力墙结构,抗震设防烈度为 8 度。在施工过程中,优先选用框架剪力墙结构施工技术,施工材料为桩长 20~25 m、桩径为 400 mm 的桩基。此外,施工期间,主要选择预制构件与现场浇筑相结合的施工方案。其中框架柱施工、剪力墙施工以及楼板施工中,主要选择强度为 C30 的混凝土材料以及 HRB400 级的钢筋材料。

## 2.2 技术应用

### 2.2.1 施工准备

首先,要进行测量放线。以设计图纸为参考依据,辅以经纬仪、全站仪、水准仪等设备,精准测量并标记建筑的轴线标高以及构件定位线。工程人员需要对施工现场进行平整处理,确保表面不存在障碍物,而后构建平面控制网、高程控制网。前者多以当地规划部门提供的基准点为参考,布设为矩形网;后者多以水准测量为参考,布设于现场固定构筑物上。案例工程中,选用 TOPCONGPT-7500 全站仪,该设备精度较高,可精准控制偏差,处在 ±0.2 cm;测量基坑标高时,优先选用 SOKKIASDL 水准仪。完成测量放线作业后,需安排专人进行复核,形成测量记录方案。若在此环节察觉测量偏差,需及时修正,确保构件定位准确,避免引发结构受力失衡风险。

其次,要进行材料验收。在钢筋材料入场前,着重检查其检验报告与生产厂家提供的质量合格证明,按照规定随机抽取样品送交第三方检测机构进行质检,着重检查其屈服强度、伸长率、抗拉强度<sup>[1]</sup>;在混凝土材料入场前,着重检查其坍落度检测报告及配合比通知单,规避施工过程中使用质量不达标的混凝土材料;在预制构件入场前,需先检验其外观质量、尺寸偏差以及预留孔洞位置。经过检验后,选取样品进行性能检测,对不符合要求的预制构件,及时联系厂家处理。

最后,要全面推进机械设备的安装与调试作业。框架剪力墙结构施工中会应用到诸多机械设备,如塔机、混凝土泵、钢筋切断机、弯曲机、电焊机、振捣

作者简介:张道亮(1981-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程。

设备等。在各类机械设备进场后, 工程人员需安排专业技术人员展开逐一的安装与调试, 确保其性能稳定。完成塔吊安装作业后, 还需进行空载试验与负载试验, 确保其起升、变幅、回转等功能正常, 最大起重力矩达  $800 \text{ kN} \cdot \text{m}$ , 满足施工需要; 针对混凝土泵, 在调试环节需着重检查其泵管连接状态与泵送压力。案例工程中优先选用 HBT80-16-110S 输送泵。该型号输送泵输送压力可达  $16 \text{ MPa}$ , 理论输送量可达  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ , 充分满足案例工程施工需要; 针对钢筋加工机械设备, 需将调试重点集中在刀具、模具的精度, 确保加工后的钢筋材料尺寸满足设计要求。整体设备安装调试作业结束后, 建立设备运行台账, 以支持设备维护保养工作的常态化开展。

### 2.2.2 基础施工

在框架剪力墙结构的基础施工环节共包括三大要点。只有做好以下三个环节施工任务, 才可切实提高整体工程的稳定性与安全性。

一是桩基施工。施工人员可采用钻孔灌注桩施工工艺, 历经桩位放线、钻孔、清孔、钢筋笼制作安装与混凝土浇筑步骤, 夯实结构根基。在桩位放线环节, 以测量控制网为参考, 明确标记各桩位的中心位置, 而后利用白灰材料进行标识。进行钻孔作业前, 需先判断项目所处领域的地质条件, 而后合理选择钻机类型。例如: 案例工程中优先选用 SR280R 型旋挖钻机。钻孔期间, 需着重控制钻孔速度与泥浆比重。同样, 泥浆比重设计中需要以地质层实际情况为参考进行调整, 确保孔壁稳定, 避免出现塌孔现象。钻进作业达到设计要求后, 采取正循环冲洗法进行清孔处理, 确保孔底沉渣厚度低于  $5 \text{ cm}$ 。在钢筋笼制作环节, 优先选择工厂预制+现场拼接工艺。针对钢筋笼材料的钢筋规格、数量、间距, 需以设计图纸为参考。完成制作任务后, 还需进行全面的外观检查与尺寸复核。材料质量达标后, 利用塔吊以吊放形式将其放入孔洞中。为避免钢筋笼与孔壁发生碰撞, 需保证其处在孔洞中央。在混凝土浇筑环节, 优先选择导管法水下浇筑, 以连续进行的方式规避断桩现象, 精准控制浇筑速度与导管埋深, 并在作业结束后及时进行混凝土体养护作业<sup>[2]</sup>。

二是承台施工。首先, 工程人员需要以承台设计标高及尺寸为参考, 进行基坑开挖作业。为规避基坑坍塌, 还需做好基坑支护, 精准控制开挖深度及坡度。而后需清理基坑底部地基, 确保表面不存在杂物浮土后, 利用夯实机进行夯实作业, 提高地基承载力。进入模板安装环节, 优先选择覆膜胶合板与钢管材料,

建立支撑体系。针对模板拼接处需严密处理, 避免在后续浇筑作业中出现漏浆问题。绑扎钢筋时, 需严格按照设计图纸进行钢筋布设, 牢固连接承台钢筋与桩基钢筋。针对钢筋保护层厚度, 也需要以规范要求为参考。完成绑扎作业后, 进行隐蔽工程验收。混凝土浇筑环节, 优先选用等级为 C30 的混凝土材料, 辅以分层浇筑作业与插入式振捣器振捣, 切实提高混凝土密实度。

三是地梁施工。该施工环节与承台施工紧密衔接, 主要作用在于将各承台连接成有机整体, 切实提高基础结构的整体性与稳定性<sup>[3]</sup>。在模板安装环节, 采用与承台相同的模板体系。针对地梁截面尺寸设计为  $400 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。针对钢筋材料的规格、锚固长度及间距, 需以设计要求为参考。地梁施工作业结束后, 需进行全面的基础施工质量验收, 验收合格后进入下一施工阶段。

### 2.2.3 地下结构施工

地下结构施工作为框架剪力墙结构施工的关键环节, 应受到工程人员的高度关注。在地下结构施工中, 为保证地下空间使用功能及结构安全, 工程人员需着重开展三个环节的工作。

一是地下剪力墙施工。在该环节模板安装作业中, 工程人员优先选择大钢模体系, 并在安装模板前加设定位筋, 确保其位置准确。针对模板拼接缝位置, 可采取密封胶条处理, 以防止出现漏浆现象。绑扎钢筋时, 需严格按照图纸规定进行操作, 确保水平钢筋与竖向钢筋的间距、搭接符合规范。必要时可加设拉筋, 以增强骨架整体性。混凝土浇筑环节, 优先选用分层浇筑工艺, 并将每层厚度控制在  $500 \text{ mm}$  范围内。为避免触碰模板钢筋, 采用插入式振捣机进行振捣处理。浇筑作业结束后, 需及时拆除模板, 并进行混凝土修补作业, 于其表面覆盖土工布进行洒水养护。

二是地下框架柱施工。该环节作业流程与剪力墙施工一致, 但在模板作业中优先选用铝合金模板, 并严格控制其垂直度与截面尺寸, 确保支撑体系牢固。在框架柱核心区域, 采用  $\phi 10$  的钢筋材料, 将其间距控制在  $100 \text{ mm}$  范围内。施工过程中严控钢筋绑扎质量, 并确保保护层厚度均匀。并及时养护, 保证柱体混凝土浇筑质量, 避免存在麻面或蜂窝问题。

三是地下顶板施工。优先采用抗渗能力较强的 C35 混凝土, 配筋材料选用  $\phi 18$  钢筋, 以双层布设的方式, 提高整体结构稳定性。模板施工环节, 选择覆膜胶合板材料, 将其平整严密铺设。支撑体系选择满堂钢管脚手架, 经荷载计算, 确定立杆间距与横杆步距。按照图纸规定布设钢筋、底筋、面筋以及支座负筋, 确

保其间距、搭接及保护层厚度合规。必要时可在面筋位置设置钢筋马凳,以实现稳定固定目标。混凝土浇筑环节选择分层浇筑法,由一端向另一端连续浇筑,并在振捣作业结束后及时收光,以减少施工缝,提高整体结构强度<sup>[4]</sup>。

#### 2.2.4 地上结构施工

地上结构施工决定了整体建筑的结构性能。在该环节,工程人员需把握三大施工要点。

一是框架柱及剪力墙施工。该环节施工作业与地下结构相近,但需对其加以优化,以适配地面施工特点。例如:在框架柱施工作业中需使用经纬仪设备,精准控制结构标高与垂直度。在布筋施工中,优先选用电渣压力焊工艺,并以接头错开的形式进行布置,以提高结构稳定性。在剪力墙施工作业中,需着重处理其与框架柱之间的连接节点,采用铝合金模板进行支护。整体支撑体系需兼顾楼层及施工荷载保障稳定。此外,还需辅助使用爬架系统,以QTG80型塔机辅助进行材料吊装,以切实提高施工效率。

二是楼板施工。该环节作业中,优先选择现浇与预制结合的施工工艺。在底模支架处,按照方案进行搭设,确保其刚度满足施工要求。在楼板施工中,选择厚度为15 cm、坍落度为18 cm的混凝土材料,以输送泵稳定输送并浇筑。此外,选择两层振捣法进行振捣作业,先使用插入式振捣器进行均匀振捣,而后利用平板振捣器对混凝土表面进行平整处理,以提高混凝土密实度。针对楼板施工环节的拆模时间,需要以混凝土强度为参考标准。当其达到75%设计强度后,方可进行拆模作业<sup>[5]</sup>。

三是预制构件安装。该环节作业开展之前,工程人员需进行全面的质量检验,确保构件表面无裂缝且预埋件满足设计要求。而后利用精光定位仪,对各构件的位置进行精准定位并利用塔吊设备进行起吊移动。构件就位后对其进行临时固定,并在浇筑节点处进行现浇混凝土操作,确保构件与主体结构能够牢固连接。针对构件拼缝处,可采用高强度灌浆料进行填充处理,以提高结构整体性能。

#### 2.2.5 竣工处理验收

整体框架剪力墙结构施工作业结束后,工程人员需着重处理后浇带以及施工缝。案例工程中,后浇带主要设置于地下室底板及楼板位置,主要作用在于控制混凝土收缩变形引发的裂缝问题。

在进行后浇带施工作业前,优先选用钢筋网材料与木模板材料进行组合封闭,并在其内部预埋止水钢板,以提高接缝位置的防水性能。在混凝土浇筑环节,

优先选用微膨胀性混凝土。对比常规混凝土,该类混凝土补偿收缩率为0.2%,更贴近施工要求,有效规避裂缝产生。后浇带施工作业结束后,选用结晶型防水剂进行全面涂刷,以提高结构抗震能力。

在进行施工缝处理任务前,需对其表面进行凿毛处理并进行清洗作业,以保证表面无浮浆。当其自然干燥后涂刷界面剂,使得新旧混凝土能够有效结合。而后于施工缝处使用 $\phi 16$ 的钢筋进行加固,将其搭接长度控制在35倍钢筋直径以上。为避免出现蜂窝冷缝现象,需严控振捣时间。

在竣工阶段,需展开全面的质量验收工作,着重检查框架剪力墙结构的外观、尺寸、强度。在外观检查环节,以混凝土平整度、裂缝控制及施工缝质量是关键指标,确保垂直度偏差低于0.3 cm,模板平整度偏差低于0.3 cm,且施工缝处处理平顺,不存在明显接缝;在尺寸检查环节,优先选用全站仪设备,精准控制轴线偏差与标高偏差,确保前者低于0.2 cm,后者低于0.5 cm;在强度检测环节,优先选择超声波检测法,该方法不会对混凝土结构造成外观损坏。在该环节,设定混凝土强度 $\geq 30$  MPa、钢筋保护层偏差低于 $\pm 0.3$  cm的指标,以确保施工作业质量达标,切实提高整体结构综合质量,维护工程经济效益。

### 3 结束语

框架剪力墙结构因具有较强的抗震性能与灵活的空间划分优势,目前已成为住宅建筑的主流结构形式。结合文本分析来看,在框架剪力墙结构施工中涉及诸多实施要点,工程人员需做好充分的准备工作,保证测量放线、材料进场、设备安装调试等环节的施工质量。在此基础上,精准推进基础施工任务、地下结构施工任务、地上结构施工任务,也要做好后浇带及施工缝的处理,并在施工任务完全结束后进行全面的质量验收,有效规避施工隐患,促进工程综合效益稳步提升。

#### 参考文献:

- [1] 张艳丽. 建筑工程框架剪力墙结构主体工程施工技术的优化措施[J]. 中国建筑装饰装修,2023(09):143-145.
- [2] 丁晖. 试论房屋建筑工程框架剪力墙结构施工技术的要点[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊),2025(02):60-61.
- [3] 马楚楚. 建筑工程框架剪力墙结构主体工程施工技术的优化[J]. 工程建设与设计,2025(08):153-155.
- [4] 金巍. 建筑工程框架剪力墙结构主体工程施工技术研究[J]. 现代工程科技,2025,04(12):53-56.
- [5] 王佳琪. 住宅建筑工程框架剪力墙结构施工技术的应用[J]. 中华民居,2025,18(01):119-120.

# 装配式建筑工程项目管理 核心问题与优化对策

王浩强

(长淮信达地产有限公司, 安徽 淮南 232000)

**摘要** 装配式建筑作为建筑工业化转型的核心方向, 凭借高效环保、质量可控的优势成为建筑业高质量发展的重要支撑。武汉市作为中部地区装配式建筑发展标杆城市, 已形成规模化推广格局, 但在工程项目管理实践中仍面临质量管控薄弱、协同机制不健全、政策执行缺位等问题。基于此, 本文结合武汉市装配式建筑示范项目实践与最新行业动态, 系统剖析上述问题的表现形式与根源, 从质量管控体系构建、协同机制优化、政策监管强化提出针对性对策, 以期为促进装配式建筑行业规范化发展提供实践参考。

**关键词** 装配式建筑; 工程项目管理; 质量管控; 协同机制

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.033

## 0 引言

在“双碳”目标与新型建筑工业化战略的双重驱动下, 装配式建筑已成为推动建筑业绿色转型、提质增效的核心路径。国家层面连续出台《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》《2024-2025 年节能降碳行动方案》等政策, 明确要求扩大装配式建筑应用规模, 提升项目管理水平<sup>[1]</sup>。武汉市作为中部地区交通枢纽与建筑产业集聚中心, 积极响应国家战略, 2024 年武汉市第二批装配式建筑示范项目一个批次就达超 22 个<sup>[2]</sup>。然而, 随着装配式建筑规模化推广, 其工程项目管理的复杂性与系统性短板逐渐凸显。结合武汉市自然资源和城乡建设局 2024 年专项检查结果, 全市装配式建筑项目在质量管控、协同配合、政策落地等方面仍存在问题<sup>[3]</sup>, 部分项目因管理不当引发质量缺陷与效率损失, 制约了装配式建筑优势的释放。结合装配式建筑在其前期管理过程中具有独特性的特点<sup>[4]</sup>。本文基于装配式建筑工程项目管理的全流程视角, 结合武汉市部分项目实践案例, 深入剖析问题, 提出对策, 为该行业相关人员提供借鉴。

## 1 装配式建筑工程项目管理核心问题分析

### 1.1 质量管控体系薄弱, 安全隐患凸显

质量是装配式建筑工程的核心, 其质量管控贯穿构件生产、运输、安装、验收全流程, 任一环节的疏漏都可能引发安全风险。从实践案例来看, 质量管控问题主要集中在三个维度。

#### 1.1.1 施工环节质量缺陷频发

节点连接质量不达标是最突出的隐患。套筒灌浆作为装配式结构连接的核心工序, 其施工质量直接决定了结构整体性。灌浆套筒存在的“偏位”“倾斜”, 预埋钢筋安装精度偏差等问题, 若未及时整改将严重影响结构稳定性。叠合板后浇段施工缺陷同样不容忽视, 模板拼接渗漏引发漏浆烂根, 后期维修成本较正常施工增加。

#### 1.1.2 过程监管机制缺位

监理单位履职不到位问题突出, 部分项目灌浆施工阶段未执行旁站监理制度, 未留存灌浆过程影像资料, 违反装配式建筑施工管理强制性要求。施工单位技术交底不足也加剧了质量风险, 部分项目未对作业人员开展套筒灌浆专项培训, 导致灌浆料振捣不充分, 出现离析、空洞等问题。

#### 1.1.3 构件质量溯源体系缺失

部分预制构件生产环节的质量管控存在短板。构件生产中的振捣、养护周期等关键工艺数据, 多采用人工纸质记录或简易电子表格存档, 存在数据篡改、丢失风险。构件从工厂到现场的运输车辆、运输路线、到场验收数据未纳入追溯范围。溯源信息未实现闭环关联, 构件的生产编号、安装位置、验收人员等信息未形成一一对应, 这也违反了《装配式混凝土结构工程施工与质量验收规程》中关于“装配式结构施工质量验收时提出应增加提交的主要文件和记录, 是保证工程

作者简介: 王浩强 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土建工程管理。

质量实现可追溯的基本要求”质量追溯的相关要求<sup>[5]</sup>。

## 1.2 协同管理机制不健全，环节衔接不畅

装配式建筑工程项目涉及设计、生产、施工、监理、构件厂等多个参建方，需实现全流程高效协同。但当前行业普遍存在“环节脱节、信息不对称”问题，结合武汉市案例，协同管理的短板主要表现为以下三个方面。

### 1.2.1 设计—生产—施工严重脱节

设计与生产、施工环节的协同缺失是核心难点。部分设计单位缺乏装配式设计经验，未征求构件厂生产意见，也未采用《湖北省装配式预制混凝土建筑标准化构件库》通用构件，导致项目预制构件类型多，非标构件多，生产效率降低，安装时出现尺寸不匹配问题。在结构选型环节也存在不合理现象，不同选型方案对项目质量与效率影响显著，襄阳已有相关项目案例对此展开过对比分析<sup>[6]</sup>。设计变更频繁且传递不及时进一步加剧矛盾，发生设计变更未同步至生产企业，导致有构件报废，严重影响项目推进效率。

### 1.2.2 技术应用深度不足，流于形式

BIM技术作为装配式建筑协同管理的核心工具，在行业内的应用仍停留在初级阶段<sup>[7]</sup>。部分项目仅将BIM技术用于三维建模，未实现多专业碰撞检查与施工模拟。一些项目因未开展BIM施工模拟，预制构件进场后发现与管线冲突，延误工期。此外，个别项目为满足政策要求，在设计阶段通过优化计算方式达到装配率标准，但实际施工中未落实到位，违背了装配式建筑发展初衷，这一问题在行业核查中也有发现。

### 1.2.3 参建各方职责不清

某项目因构件安装过程中产生问题，导致项目停滞，在分析责任的时候，设计单位认为“按图设计”，构件厂坚持“按图生产”，施工单位强调“按件安装”，责任没法明确。图审机构专业能力不足也容易引起监管上的漏洞，武汉市专项检查发现，个别项目按装配式建筑要求设计，但图审合格书中标注为非装配式建筑，导致后续施工阶段缺乏针对性监管<sup>[8]</sup>。

## 1.3 政策执行与监管存在漏洞，标准落地不到位

完善的政策体系可以保障装配式建筑规范发展，但是在政策执行层面还存在一些问题。主要问题有以下两点。

### 1.3.1 监管环节前后无对照

规划审批与施工监管前后无对照标注，一些项目未在规划许可证中明确装配式建筑要求，有的未标注装配率指标，导致施工阶段监管无法落实检查。装配

率变更审批流程不严格，个别项目调整装配率没有按相关规定办理专家论证与审批手续，存在擅自降低标准的嫌疑。

### 1.3.2 标准规范落地不到位

设计专篇深度不足，有一些设计专篇未明确构件连接节点详图等内容，不符合《装配式建筑评价标准》要求，致使施工无据可依。施工单位未制定专项施工方案现象比较突出，未编制套筒灌浆、构件吊装专项方案，仅凭经验施工，质量、安全风险加大。另外，有的企业对新标准规范应用不及时，对《湖北省装配式混凝土结构住宅主要构件尺寸指南》等新规不熟，致使施工与标准脱节。

## 2 装配式建筑工程项目管理优化对策

### 2.1 构建全流程管控体系，筑牢质量安全底线

针对质量管控薄弱问题，需要以全建设周期为核心，结合技术手段与管理手段实施，形成“生产—施工—验收—追溯”全过程管理体系。

#### 2.1.1 强化施工过程精细化管控

推行样板引路制度，要求装配式建筑项目在关键节点施工前样板引路，经参建各方验收合格后才能大面积施工。建立灌浆施工全过程监管体系，监理单位全程旁站，采用数字设备实时监控。严格构件进场验收标准，落实“三查三验”制度，查验产品合格证、检验报告及实体质量，对尺寸偏差、强度等关键指标抽样复检，不合格构件不能进场。

#### 2.1.2 建立全建设周期质量追溯体系和第三方检测机制

着力推广数字化追溯技术实施，要求生产企业在构件生产时嵌入芯片或张贴唯一二维码，记录原材料信息、生产参数、出厂检验数据等内容，实现生产数据可追溯。整合BIM模型与生产数据，施工阶段通过扫码就能调取构件的全部信息，便于质量核查与责任追溯。对出具虚假检验报告的企业加大处罚力度。建立第三方检测机制，要求装配式建筑项目必须委托具有相应资质的第三方机构开展专项检测，对检测不规范的机构列入黑名单。

### 2.2 完善协同机制，提升全过程效率

协同管理是破解装配式建筑多环节衔接难题的关键，可以通过创新模式、明确责任，深化技术手段推进。

#### 2.2.1 推广设计—生产—施工一体化模式

大力推行工程总承包或设计—生产—施工一体化模式，由总承包单位统筹设计施工全过程，在设计阶段即纳入生产、施工单位意见，实现无缝衔接<sup>[9]</sup>。要求设计阶段开展施工可行性审查，设计单位必须选用

标准化构件库中的通用构件,减少非标构件占比,新建项目标准构件占比不能低于 70%。建立常态化沟通机制,定期召开参建各方会议,及时解决衔接问题,有效减少矛盾。

### 2.2.2 深化 BIM 技术全流程集成应用

推动 BIM 技术从“建模”向“协同管理”转型,要求装配式建筑项目全面采用 BIM 技术开展多专业协同设计,提前消除管线冲突、构件干涉等问题,开展虚拟施工模拟,优化构件吊装顺序、节点施工方案,降低施工风险。落实 BIM 审查体系,将装配率计算、构件连接节点等纳入 BIM 审查范围,确保设计与施工一致。在《武汉市装配式建筑装配率计算细则》中利用 BIM 技术也有专门的创新鼓励加分政策<sup>[10]</sup>。

### 2.2.3 明确参建方责任边界

构建清晰的责任划分体系,建设单位作为项目总牵头方,要履行统筹协调职责,不得擅自变更审查合格的设计文件,对因协调不力产生的工期延误和质量问题承担首要责任。设计单位需提供详细的专项设计,明确构件连接方式、质量保障措施等核心内容,对装配率设计指标真实性负责。施工单位应编制灌浆套筒、构件吊装等专项施工方案,加强技术交底和人员培训,关键岗位人员必须持证上岗。监理单位需编制装配式专项监理细则,对关键工序全程旁站,留存完整影像资料。图审机构应按相关文件、规范要求专项进行装配式审查,杜绝误判、漏判现象。

## 2.3 强化政策执行与监管,规范行业发展

政策的生命力在于执行,需通过健全监管链条、严格标准落地、加强宣贯培训,确保装配式建筑政策要求落到实处。

### 2.3.1 健全监管流程

构建前后有对照的监管体系,规划部门在核发《建设工程规划许可证》时,需明确装配式装配率指标。住建部门加强施工过程核查,采用专项检查的方式,重点核查装配式工艺落实、装配率达标等问题,对违规变更装配工艺、降低装配标准的项目责令整改,并依法处罚。严格装配率调整审批流程,确需调整的必须经专家论证并报相关部门审批,变更后装配率不得低于相关标准要求。

### 2.3.2 加强政策宣贯与人才培养

建立常态化培训机制,定期组织行业相关企业人员,学习政策文件和标准规范,提升专业技术水平。依托本地高校与龙头企业,建立装配式建筑人才实训基地,开设设计、生产、施工管理等专项课程,培养

专业化的技术骨干和管理人才。鼓励企业开展技术创新与交流合作,推广示范项目成功经验,提升行业整体管理水平。

## 3 结束语

装配式建筑工程项目管理是一项系统性工程,涉及多个建设主体、多项环节的配合,管理水平直接影响着行业的发展质量。目前装配式建筑行业虽然已经步入规模化推广阶段,但仍然面临质量管控薄弱、协同机制不健全、政策执行不到位等问题,这些问题在武汉市的项目实践中均有典型体现。要解决上述问题,需坚持问题导向与系统思维,构建全生命周期闭环管理体系;推广一体化建造模式与 BIM 技术深度应用;健全监管流程。武汉市作为中部地区装配式建筑发展标杆,其过程中的经验与教训,为行业提供了宝贵借鉴。未来,随着智能建造技术的不断提高、政策的不断完善、人才队伍的持续壮大,能力逐步提升,装配式建筑工程项目管理将会实现工业化、数字化、绿色化转型。通过全行业共同努力,充分释放装配式建筑高效环保、质量可控的优势,为建筑业高质量发展和“双碳”目标实现提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部,教育部,科学技术部,等.关于加快新型建筑工业化发展的若干意见(建标规[2020]8号)[Z].2020-08-28.
- [2] 武汉市建筑产业现代化推进工作领导小组办公室.关于公布武汉市2024年度第二批装配式建筑示范项目的通知[Z].2024-12-10.
- [3] 武汉市自然资源和城乡建设局.市自然资源和城乡建设局关于2024年装配式建筑专项检查情况的通报[Z].2025-01-09.
- [4] 曹洁.装配式建筑工程管理影响因素与对策[J].中国住宅设施,2024(01):10-12.
- [5] 湖北省住房和城乡建设厅.装配式混凝土结构工程施工与质量验收规程(DB42/T 1225-2016)[S].2016-11-16.
- [6] 何襄宜,樊旋,石欢吉,等.装配式建筑结构选型方案对比分析:以武汉某大学培养模式改革襄阳示范区项目为例[J].土木工程,2024,13(10):1836-1842.
- [7] 王晓刚,韩雪莹,刘昭,等.装配式建筑设计-生产-施工协同度评价研究[J].铁道标准设计,2023,67(10):208-213.
- [8] 同[3].
- [9] 同[7].
- [10] 武汉市城乡建设局.武汉市装配式建筑装配率计算细则(2023)[Z].2023-01-01.

# 水利工程质量检测中的无损检测技术应用

何庆

(四川南充水利电力建筑勘察设计研究院, 四川南充 637000)

**摘要** 为提升水利工程质量检测的科学性, 本文围绕无损检测技术在水利工程中的应用展开系统研究, 分析了超声波检测、地质雷达检测与回弹法的技术原理与特点, 并探讨其在水利工程结构、探测内部隐患以及检测表层强度中的应用方法。研究表明, 无损检测技术能在不破坏工程实体的前提下, 准确识别结构内部缺陷, 提升工程实体质量评估精准度, 在水利工程质量检测中具有重要的工程价值, 可为工程运行管理提供可靠的技术支撑。

**关键词** 水利工程; 质量检测; 无损检测技术

中图分类号: TV512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.034

## 0 引言

水利工程是当前我国国民经济和社会发展过程中的重要基础建设, 但由于水利工程应用年限较为久远, 在应用过程中无法保障周边环境, 从而导致我国部分水利工程在应用过程中长期受到洪水侵扰与河床底部沙土增厚等因素影响, 进而改变水利工程抗压性能。在此背景下, 探讨无损检测技术在水利工程质量检测中的应用, 对于提升工程安全保障能力具有重要的现实意义。

## 1 无损检测技术分类及特点

### 1.1 超声波检测

超声波检测是借助固体介质中超声波的传播速度、衰减与反射特性变化, 来识别结构内部缺陷的无损检测技术, 广泛应用于水利工程领域。检测人员在使用该检测技术时需要布置超声波发射与接收探头, 记录超声波传播时间、波幅衰减以及能量分布变化, 才能获取水利工程中的构件内部声学信息, 判断工程完整性<sup>[1]</sup>。这种超声波检测具有非破坏性强、检测速度快与精度高等特点, 能在不损伤水利工程结构实体的情况下识别其内部缺陷, 有利于检测厚度较大的混凝土构件情况。同时, 检测人员还能分析超声波的波速, 以推算混凝土强度、弹性模量等参数, 为评估工程质量提供可靠依据。除此之外, 超声波检测能够良好适应金属、岩石等多种介质, 是水利工程质量验收中使用频率最高的无损检测方法。

### 1.2 地质雷达检测

地质雷达检测是利用高频电磁波在介质中的传播、反射与衰减特性, 获取建筑内部结构信息的无损检测

技术, 常用于堤坝、护坡及混凝土构件内部结构等方面的探测, 能够有效识别水利工程中的渗流通道、空洞等隐蔽缺陷。同时, 该技术具有穿透能力强、成像直观及对材料损伤小等特点<sup>[2]</sup>。检测人员依据该技术采集的雷达数据, 能够生成二维或三维剖面图, 系统分析介质内部的反射波形强弱、连续性以及相位变化, 判断介质结构内部情况, 适用于大面积、长距离的工程实体扫描, 广泛应用于水利工程运行管理。由于地质雷达对电磁性质差异敏感, 可在无损条件下快速呈现内部材料变化, 是当前评估水利工程内部结构安全状况的主要手段。

### 1.3 回弹法

回弹法是依据混凝土表面硬度与抗压强度的相关关系, 推定结构表层强度的无损检测技术。在水利工程质量检测中, 回弹法主要借助回弹仪对混凝土表面施加弹击, 记录弹击后指针的回弹值, 结合强度换算曲线推定混凝土抗压强度, 广泛应用于评估水利工程中大坝表面、闸墩等混凝土构件的质量, 适合大面积、多测点的强度检测工作。同时, 回弹法具有操作简单、检测速度快以及成本低等特点, 无需破坏结构实体即可评估混凝土强度。在实际测试中, 检测人员要清理测区表面, 进行多次弹击取平均值, 以提高回弹值的稳定性。在此基础上, 检测人员还要根据混凝土碳化深度以及环境条件修正回弹值, 进一步提高换算结果的可靠性。

## 2 水利工程质量检测中应用无损检测技术的意义

### 2.1 精准评估工程实体质量

在长期水流作用下, 水利工程中的大量构件内部可能出现裂缝、空洞等隐蔽损伤, 难以依靠外观观察

作者简介: 何庆(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程试验检测。

获得工程的真实状况。检测人员利用超声波、地质雷达等无损检测技术,能够在不破坏工程结构的基础上,捕捉其内部情况,形成反映水利工程结构完整性的量化数据,为细化评估工程实体质量提供可靠依据<sup>[3]</sup>。同时,这些无损检测技术有助于以剖面图或结构影像的形式呈现水利工程的复杂结构信息,为判断异常区域创造条件。由此,工程实体质量评估将不再依赖局部抽样,有利于推动水利工程安全管理的科学化进程。

## 2.2 保障水利工程运行安全

从水利工程外观上难以明显看出长期水流冲刷与环境湿度影响造成的问题,而检测人员使用无损检测技术能够及时识别这些隐蔽损伤,为后续维护提供科学依据。同时,检测人员还能利用无损检测技术追踪水利工程运行周期内的状态,对比不同时期的检测结果,掌握其结构变化趋势,判断已存在的隐患区域是否会出现扩大迹象,为水利工程管理提供直观依据<sup>[4]</sup>。同时,无损检测技术的多技术联合应用有助于进一步提升预警水利工程隐患的能力,大幅提高潜在风险识别精度,稳定水利工程运行状态,为其持续发挥防洪、供水等功能提供坚实的支撑。

## 2.3 提高检测效率并降低维护成本

传统破损性检测方法需要取样、切割或钻孔,既存在耗时长的缺点,还会对水利工程局部造成不必要的损伤。而无损检测技术主要是借助声波、电磁波等物理量的响应特性,测定大面积构件,能够显著缩短工程的检测周期,提升检测工作的覆盖度。同时,这种无损检测技术还能及早发现水利工程中可能存在的内部缺陷、渗流隐患,并促使管理人员在隐患扩展前进行修补,进而降低工程维护成本<sup>[5]</sup>。在工程运行管理中,基于无损检测技术的周期性检测也能形成结构状态档案,帮助技术人员分析工程材料性能衰减趋势,减少不必要的重复维修。

## 3 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用

### 3.1 超声波检测技术在水利工程结构质量中的应用

1. 检测裂缝缺陷。受温度变化、水流冲刷等因素长期影响,水利工程的混凝土结构会在长期运行过程中产生不同程度的裂缝。而检测人员合理布置超声波发射探头与接收探头,能够借助超声波检测技术不断分析超声波在水利工程混凝土结构中的传播速度、反射波形与衰减特征,进而判断水利工程混凝土结构中可能存在的裂缝位置、深度以及开口宽度,识别裂缝走向。

2. 金属强度与均匀性检测。超声波检测技术的基本原理是金属内部越密实、强度越高,声波传播速度越快。在实际操作中,检测人员可以使用超声波透射法、直接法或绕射法测量声速,首先建立声速与水利工程金属结构抗压强度经验曲线,推算该金属的强度等级,并在检测前,采用砂轮打磨测试面平整,保证发射探头与金属结构表面的耦合良好,减少信号损耗。其次,检测人员还要在水利工程的坝体表面布设相应测线,使用数字超声仪采集并分析水利工程上的各点声时、波幅等参数。最后,检测人员便能根据该技术显示的声速异常降低情况判断水工工程中具体部位的金属结构劣化情况。

3. 钢筋位置与保护层厚度检测。当超声波技术的声波遇到水利工程内部钢筋时会产生强回波信号,所以检测人员在实际检测中需要先清理水利工程探测区域,保证探头紧密贴合工程表面。随后在构件表面沿垂直于钢筋方向布设检测线,使用单侧反射法或双侧穿透法进行测试,计算超声波反射返回时间,得出钢筋深度,确定保护层厚度。在复杂构件中,技术人员还能结合 B 扫描或 C 扫描技术,获取钢筋空间布置图,判断水利工程中的保护层情况与钢筋是否存在锈蚀征兆。

### 3.2 地质雷达技术在探测水利工程内部隐患中的应用

1. 堤坝与坝体内部结构探测。在检测水利工程的堤坝与坝体时,检测人员可以先根据坝体结构布置测线:沿坝顶布设主测线,坝坡沿坡线方向布设辅助测线,测线间距在 1~3 m,以形成连续覆盖。扫描时则使用 100~200 MHz 的中频天线,以提升检测的穿透深度与分辨率,并在扫描过程中保证天线紧密接触地表,以 0.1~0.5 m 的步距连续采样。之后,检测人员要移除采集数据的背景,并进行增益补偿,校正数据波速,生成雷达剖面图,进而观察水利工程的反射界面连续性、弯曲程度,判断该坝体的分层情况。若数据中的反射界面显现“阶梯状中断”情况,便可初步判定为存在夹层。

2. 渗流通道与潜在管涌路径探测方法。在使用地质雷达技术明确水利工程中的渗流情况时,检测人员要先在水利工程的下游坡面或坝基附近布设间距小于 1 m 的密集测线,使用网格化布设形成二维扫描区域,且使用 200~400 MHz 的高频天线,提高含水识别能力。在雷达扫描过程中,检测人员还要保持恒定步距,记录实际地表高程,以便后续展平处理数据。采集到数据后,检测人员及时分析反射波的振幅衰减、旅行时

间延长以及界面弯曲等特征,识别水利工程中的高含水区,实现精确定位隐患。

3. 防渗墙及混凝土结构完整性检测。在使用地质雷达技术检测水利工程防渗墙时,检测人员要注意采用400~900 MHz高频天线,才能有效提升识别水利工程墙体内部细节的能力。同时,在检测前,检测人员还要沿水利工程的防渗墙两侧布设连续测线,保证测线平行于墙体轴线,步距保持0.05~0.1 m,确保反射信息密集。扫描时贴地平稳移动天线,避免“假反射信号”。数据处理阶段,检测人员要剔除具有“平直、连续的反射带”特点的正常墙体反射图像,保留出现“强反射点团”“反射带中断”或“局部振幅异常增强”的空洞,不密实区,增加直观性。

4. 埋设管线与金属构件定位探测。地质雷达技术探测水利工程内部的金属构件情况主要是依据其强烈的反射特征。检测人员需要在检测过程中使用200~400 MHz的中高频天线,沿推测管线方向布设间距在0.5~1 m的平行测线,并在扫描时以均匀速度移动天线,记录连续反射图像。为提高整体定位精度,检测人员还会在检测后的多个测线上提取反射位置,利用三角测量法确定管线横向位置。在雷达图像中,这种金属管线会呈现典型的“抛物线形高反射曲线”,能够依据图形中的抛物线顶点位置确定构件埋深。若水利工程中存在部分金属构件接近其他金属物体,检测人员则要采用正交测线(垂直于原测线方向)进行补测,避免出现误判情况。

### 3.3 回弹法在检测水工建筑物表面强度中的应用

1. 划分测区与获取构件表层代表性。在检测水工建筑物表面强度过程中,检测人员需要先依据构件结构类型(如闸墩、坝面、护坡板)、受力特点及表面环境,划分检测区域为多个相对独立测区,并保证每个测区存在10个以上按照纵横方向均匀分布的测试点,才能保证检测结果具有相对充足的工程代表性。在水利工程中受水流冲刷明显且表面风化明显的区域中,检测人员还要针对该工程的构件受力与环境差异,调整测区划分,保证最终测得的回弹数能反映水利工程的表层实体质量。

2. 表面预处理与精确控制单点弹击。在水利工程检测中,回弹检测法对其表面状态极为敏感,因此检测人员要在正式测试前使用钢丝刷、砂轮除去测试点的污物,保证测试表面坚实、致密,形成严格表面预处理。在单点弹击过程中,检测人员还要保证回弹仪垂直于混凝土表面,连续弹击每个测试点9~16次,

并逐渐加压至触发机构动作,避免人为影响造成读数偏差。之后,剔除偏离明显的极端值,求平均值,确保每个回弹值具有可信度。

3. 测定碳化深度与强度换算修正。由于水利工程混凝土表层碳化会影响回弹值,因此检测人员要在每个测区选择相应的典型点,喷洒酚酞指示剂观察该区域的颜色变化,明确水利工程混凝土表层碳化深度。之后,检测人员要根据工程规范,碳化修正实测回弹值,并结合具体的混凝土标号、龄期及回弹—强度相关曲线,计算具体抗压强度,量化评估表层混凝土强度。

4. 强度分布分析方法。在获取水利工程全部测区回弹强度后,技术人员要分析不同部位的强度数据分布,识别水利工程表层存在的混凝土强弱差异,进一步绘制水利工程混凝土强度分布图、等值线图,分析水利工程不同区域的强度变化趋势,明确需要重点养护的水利工程薄弱区。在重要水工建筑物中,部分检测人员还能结合回弹结果与超声法、钻芯法进行交叉验证,进一步提升水利工程质量的评估精度,辅助相应人员从整体上掌握结构表层性能状况。

## 4 结束语

在水利工程质量检测中的无损检测技术为工程运行维护提供了更加科学、可靠的技术手段。随着检测设备的智能化、数据处理技术的提升,无损检测在水利工程领域的应用潜力将进一步扩大。基于此,应加快推进建设检测技术标准体系,实现快速判断检测结果,并结合物联网监测技术建立工程状态数据库,开展长期跟踪,形成完整的健康监测体系,为精细化管理水利工程提供支撑。未来,无损检测技术将在工程质量管理中发挥更加关键的作用,为水利工程的可持续发展提供坚实的保障。

## 参考文献:

- [1] 邓小龙. 渗流监测技术在水利工程施工质量检测中的应用[J]. 中国水运, 2025(16):112-114.
- [2] 程红娟. 弹性波测试技术在水利工程岩体质量检测中的应用与优化[J]. 地下水, 2025,47(05):158-160.
- [3] 曹敏, 林秀松. 无损检测技术在水利工程混凝土结构质量检测中的应用[J]. 水利技术监督, 2025(09):30-32,148.
- [4] 王林. 无损检测技术在水利工程质量检测中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2025,04(03):153-156.
- [5] 高振慧. 声音识别技术在水利工程质量检测中的应用[J]. 电声技术, 2024,48(12):194-196.

# 信息化监理技术在水利工程安全管理中的应用研究

肖云华

(江苏国兴建设管理有限公司, 江苏 泰州 225400)

**摘要** 由于水利工程的规模越来越大, 技术越来越复杂, 传统的监理方式已经无法满足现代化安全管理精细化、实时化的要求。信息化监理技术把大数据、云计算、物联网、人工智能等先进信息技术与水利工程安全管理的各个方面融合在一起, 从而实现水利工程安全管理的全面创新。本文从信息化监理技术的定义与内涵、核心要素、流程重构入手, 对信息化监理技术在水利工程安全管理中发挥的作用进行系统的阐述, 对技术应用的实施路径进行深入的分析, 以期为提高水利工程的安全管理智能化水平、增强工程安全保障能力提供借鉴。

**关键词** 信息化监理技术; 水利工程; 安全管理; 数字孪生; 智能研判

中图分类号: TV523

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.035

## 0 引言

水利工程是国民经济核心基础设施, 水利工程安全运行关系到人民生命财产安全、区域经济发展、生态环境的稳定。当前我国水利工程建设的大型化、跨区域、复杂化趋势越来越明显, 传统的水利工程监理模式主要依靠人工巡视、纸质记录、经验判断, 数据传递滞后、风险预测不充分、协同效率低等问题比较突出, 无法满足工程全周期安全施工管理的需求。信息技术迅速发展, 信息化监理技术随之出现, 给水利工程的安全管理提供新的技术支持和管理模式。该项技术创建智能化监管体系, 可以对工程安全要素实施实时感知、数据融合、智能分析和精准控制, 促使安全管理朝着“事前预防、事中控制”的方向转变。对在水利工程安全监管中的应用情况做详细的研究, 对提高监理效率、保证工程质量、推动水利行业发展具有重大意义。

## 1 信息化监理技术概述

### 1.1 信息化监理技术的定义与内涵

信息化监理技术是在水利工程全生命周期管理中, 以工程安全为根本, 把现代信息技术同传统工程监理理论结合起来, 在工程建设及运行过程中, 对涉及工程安全的各类信息实施实时采集、传输、处理并加以应用的技术体系, 目的在于对工程的核心要素实施智

能化、精细化的监督管理<sup>[1]</sup>。核心含义主要涵盖平台化建设、智能化处理、现代化监控、科学化决策四方面内容, 平台化建设成为信息管理中枢, 可进行信息共享、协同, 智能化处理采用算法模型, 挖掘数据, 提取安全要素、风险特征, 现代化监控依靠非接触式设备、远程传输技术, 进行全域实时覆盖, 科学化决策依靠数据来形成风险处置方案、管理策略, 使监理工作由传统的经验依赖变为数据驱动。

### 1.2 信息化监理技术的核心要素

信息化监理技术的有效运转需要技术支撑、数据资源、管理机制这三个主要要素互相配合。技术支撑体系属于基础保障, 全链条技术架构, 感知层用高精度传感器等设备获取工程结构、水文环境等各方面的数据, 传输层依靠 5G 等技术建立通信网络, 保证数据实时、稳定地传输, 平台层用云计算等技术实现数据的存储、加工和调度, 应用层借助数字孪生建模等技术为用户提供可视化监控等服务。数据资源为根本驱动力, 工程设计、施工过程等各种数据类型的数据, 按照统一的数据标准进行融合, 形成工程安全数据链条。管理机制主要是多主体合作、数据安全保障、数据共享、技术应用等方面的一系列制度和规范, 并且把所有主体之间的权责明确化, 通过建立分级授权的数据共享模式和制定具体技术应用等标准规范来实现技术的有序有效。

作者简介: 肖云华 (1972-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

## 2 信息化监理技术在水利工程安全管理中的功能体现

### 2.1 实时监测预警功能

实时监测预警属于信息化监理技术在水利工程安全管理中最基本的功能。依靠建立全域覆盖智能感知网络,达成对工程关键安全要素精确监测和风险早期警报。利用部署在工程结构的关键部位、水文沿线以及施工区域等处所的传感器来实时采集坝体沉降、渗流量等主要参数,结合气象环境数据,经边缘计算节点预处理之后,剔除掉异常的数据并提取出关键的特征之后传送到云端平台进行深度的分析。平台根据预设阈值以及算法对数据进行研判,参数接近或者超出阈值的时候就发出多级预警,采用各种形式通知责任人,并生成初步的处理意见,提供数据支持。打破以往的人工监测方式,从以前的定点定时监测变为现在全域实时监测,提高了风险识别的及时性和准确性,争取到了隐患早发现、早处理的宝贵时间<sup>[2]</sup>。

### 2.2 协同管控赋能功能

协同管控功能成为信息化监理技术提升水利工程安全管理效率的动力。通过建立统一的云端平台以及多主体交互系统来打破各方面的信息壁垒,从而达到全过程高效协同、闭环管控的目的。该功能以通信网络、数据体系为依托,依靠云端平台构建起信息交互的中枢,按照分级授权来确定各方的职责,使各方按照自己的需求获取工程安全信息。并且有实时交互功能,可以完成在线协同作业,取代线下的低效方式,达到信息实时准确地传递。可以在复杂的管理情况下,协调各个段的配合,共同处理安全隐患,合理调配资源提高应急响应效率。使用移动终端以及5G技术,能够达到现场人员的即时反馈与远程调度的目的,构建起一个立体化的协同管理局面,改善传统管理模式,优化协同效果和响应速度,解决传统模式存在的问题。

### 2.3 全周期追溯功能

全周期追溯功能依靠创建完整的数字化数据链,达成水利工程安全管理全过程信息的可追溯、可核实,为责任认定与管理优化提供强有力的数据支撑。该功能依靠统一的信息管理平台,将工程从设计、施工到运行维护各阶段所有的安全相关数据整合在一起,包括设计图纸、材料检验报告、施工记录、监理日志、监测数据、隐患处置记录等,经过数据标准化处理和关联建模,建立“数据—事件—责任”的对应关系。工程出现安全问题时,可以借助平台快速追溯问题产生的全过程信息,精确定位问题产生的原因及责任人;

通过统计分析追溯数据可以发现工程安全管理中普遍存在的问题以及薄弱环节,从而给优化监理策略、改善管理流程提供数据支持。该功能所形成的数字化档案可以满足工程竣工验收、审计检查、后期维护等所有数据需求,保证工程安全管理水平的连续性和规范性<sup>[3]</sup>。

## 3 信息化监理技术在水利工程安全管理中的实施路径

### 3.1 基于数字孪生的可视化监理平台构建

基于数字孪生的可视化监理平台是信息化监理技术应用的主要载体,利用BIM、GIS、实时监测等技术来构建与物理工程精准映射的数字孪生体,从而达到工程安全管理的可视化、透明化控制。在实施时,首先要用BIM技术进行工程三维数字化建模,包含工程结构、管网线路、设备设施等全部要素,再加入GIS地理空间信息,完成工程周边地形地貌、水文环境的一体化呈现;然后,创建数字孪生体与物理工程的实时数据映射机制,把感知网络采集的结构状态、施工工况、环境参数等实时数据接入平台,依靠数据驱动使数字孪生体动态更新,准确地复制出物理工程的运行状态;在此基础上开发可视化管控功能模块,即工程全域三维漫游、关键部位状态实时展示、施工进度动态跟踪、风险区域可视化标注等,使管理人员通过平台可以直观了解工程安全全貌;同时集成模拟仿真功能,可以对极端天气、施工偏差等场景进行模拟分析,预估可能会出现的安全风险,给优化监理决策提供支持<sup>[4]</sup>。

### 3.2 多源感知网络的精准部署与数据融合

多源感知网络精准部署和数据融合是信息化监理技术有效运转的基础,要结合工程类型、结构特点、安全控制重点来创建全域覆盖、精准高效的感知体系,并且把多种类型的数据融合起来。在感知网络部署上按照“关键部位全覆盖、风险区域高精度”的原则,在大坝、堤防、隧洞等核心结构上布设沉降、位移、应力、渗流等高精度传感器,实现结构安全状态的实时监测,在施工区布设视频监控、人员定位、设备监控等设备,实现对施工人员操作规范、设备运行状态、施工工序合规性的动态监管,在水文沿线及周边区域布设水位、流量、降水、风速等环境传感器,实现外部环境影响的实时感知,搭配无人机巡检技术,对大范围、高难度区域开展周期性巡查,弥补固定传感器的覆盖不足。数据融合时先创建统一的数据标准体系,规范不同类型传感器的数据格式、采集频率、精度要求,保证数据兼容,再创建边缘计算和云端协同的处理架构,边缘节点对实时采集的数据进行清洗、降噪、格式转换

等预处理,减轻数据传输的压力,云端平台用大数据融合算法,将结构数据、施工数据、环境数据融合起来,提取出反映工程安全状态的关键特征,给后面的风险研判提供高质量的数据支持。

### 3.3 AI 驱动的风险智能研判与预警机制构建

创建以 AI 为驱动的风险智能研判和预警系统,是提升信息化监理技术核心作用的有效方式,利用机器学习、深度学习等人工智能算法实现工程安全风险的精准识别、趋势预测、分等级预警。实施时,先做工程安全风险特征提取,根据水利工程常见安全隐患种类(坝体裂缝、堤防渗漏、边坡失稳等),找出各种风险的表征参数及其变化规律,创建风险特征数据库;接着,依靠历史监测数据、隐患处置记录、工程设计参数等数据资源,训练构建多维度风险研判模型,包含风险识别模型、趋势预测模型以及等级评估模型,其中风险识别模型可以比较实时数据和正常阈值,准确找到异常工况,趋势预测模型根据时序数据变化规律,预估风险发展趋向,等级评估模型融合风险影响范围、危害程度等指标,对风险等级做出精确划分。在此基础之上,根据风险等级设定不同的预警阈值和响应程序,对低等级风险直接发送预警信息给现场监理人员,对中等风险发布现场核查命令并限时回复,对于高等级风险启动应急处理程序并同时通知相关责任单位。并且要建立模型动态优化机制,使用越来越多的数据去优化模型参数,从而改善风险研判的准确性以及适应性。如洞庭湖堤防加固工程使用该机制对防渗墙施工的关键参数进行实时监测,实现异常预警,有效杜绝偷工减料现象,保证施工质量和安全。

### 3.4 云端协同的监理流程数字化管理体系搭建

云端协同的监理流程数字化管理系统的创建是提高监理工作效率的重要保证,借助云端管理平台,达成工程参与者各方的协同工作以及监理流程的完全数字化管控。第一,确定平台核心功能模块,包含合同管理、图纸审核、进度控制、质量监督、安全管理、资料归档等全部监理业务的全流程线上办理,包含监理规划编制、监理日志录入、整改指令下达、验收结果审核等业务的线上办理;第二,建立多主体协同机制,给建设单位、监理单位、施工单位、设计单位等参建方分配不同的平台权限,实现信息实时共享、高效交互,施工单位通过平台提交施工方案、进度报表、隐患整改报告等资料,监理单位在线审核并反馈意见,建设单位随时掌握工程进展和安全状况,克服了传统线下沟通滞后、信息不对称的缺点<sup>[5]</sup>。

### 3.5 技术应用保障体系的协同构建

技术应用保障体系的协同创建是信息化监理技术长期稳定地落地并能够持续运转的关键支撑,主要从标准规范、人才培育、安全防护三个方面创建起一个协同的保障体系。就标准规范而言,依据水利工程的特性以及信息化技术应用的需求,制订完善的技术标准和管理规范,包含感知设备部署标准、数据采集与传输标准、平台建设技术规范、风险研判指标体系、监理流程数字化规范等,明晰各个环节的技术要求和操作准则,保证技术应用的一致性、规范性,推进行业层面标准的协同衔接,达成与已有的水利工程管理标准、信息技术标准的兼容匹配。在人才培养方面创建起“技术+管理”的复合型人才培养体系,一方面加大对已有的监理人员进行信息化技术培训的力度,提升其感知设备的操作水平、平台应用的能力、数据解读的水平、风险研判的水平;另一方面引进信息技术领域的专家人才,充实监理队伍的技术力量,形成相互补充、协作共进的人才结构;并搭建起常态化的培训体系,采用案例教学、实操训练、行业交流等形式不断改善团队技术水平。

## 4 结束语

信息化监理技术在水利工程安全管理领域的应用,意味着传统的工程监理开始转向智能化与数字化范式的大变革。依靠技术融合创新构建的实时感知、智能研判、协同管控体系,冲破了传统管理模式时空覆盖、风险预判、资源整合方面的限制,也带动了安全管理模式由被动应对转为积极防范。信息化监理会随着技术更新和生态完善不断赋能水利工程全生命周期的安全管控,给智慧水利体系人、机、物深度融合提供关键支持,促进行业的高质量发展和国家水安全战略的深入实施。

### 参考文献:

- [1] 汤磊,徐晖.基于信息化技术的水利工程施工质量安全管理方法[J].大众标准化,2025(03):170-172.
- [2] 汤荣昌.水利水电工程监理的重点及意义分析[J].中国高新科技,2024(16):91-92,95.
- [3] 王磊.水利工程施工监理工作中技术创新与现代化手段的应用研究[J].水上安全,2024(03):178-180.
- [4] 张玉萍.水利工程施工监理技术的创新与发展[J].水上安全,2023(12):151-153.
- [5] 王烁然.水利工程施工监理质量和进度控制对策研究[J].工程建设与设计,2023(04):235-237.

# 膨胀土边坡的变形特性研究

韩晓伟<sup>1</sup>, 张玲玲<sup>2</sup>

(1. 广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004;

2. 柳州维兴建筑工程有限公司, 广西 柳州 545004)

**摘要** 关于膨胀土边坡的研究虽然已取得显著进展, 但该问题仍被视为工程地质领域的核心挑战。膨胀土因其独特的吸水膨胀-失水收缩特性, 成为导致边坡失稳的关键因素。然而, 现有研究对膨胀土胀缩特性与边坡稳定性之间的定量关系尚缺乏系统性阐释。本研究通过工程监测与现场勘察相结合的方法, 系统分析不同压力条件及水文环境下膨胀土对边坡的破坏机制, 揭示边坡破坏层的分布规律, 并量化研究膨胀土边坡的变形特性。针对复杂地形条件下的膨胀土边坡, 本研究采用反演分析法对复活边坡进行二次治理, 为膨胀土边坡破坏机理研究提供理论参考。

**关键词** 膨胀土; 复活边坡; 反演法

**基金项目:** 2022年度广西生态工程职业技术学院校级课题“西南地区巨型滑坡治理过程中相关参数选择机制研究”(项目编号: 2022ZRKX07); 2023年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“基于FLAC3D的膨胀岩土复合边坡稳定性分析及支护参数研究”(项目编号: 2023KY1261)。

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.036

## 0 引言

膨胀土因为其显著的胀缩性和裂隙性等特点, 在含水量变化的时候会产生变形, 对于边坡工程极易引发破坏造成失稳, 因此研究膨胀土的胀缩性机理一直是岩土工程领域的重要课题。普遍认为水的渗透不会降低土的吸力和抗剪强度, 而是会引发裂隙在岩土体中产生扩散, 进而降低整体的强度。在微观层面上, 膨胀土变形机理的研究有很多。例如: 李国维<sup>[1]</sup>等结合宏观和微观试验揭示了红层泥岩填料在膨胀过程中的颗粒重排列和裂隙的发展规律。胡江<sup>[2]</sup>等(2024)通过多源监测数据融合, 揭示了深挖方膨胀土边坡在空间上的差异性变形以及时间上的“阶梯式”累积变形规律。变形预测是边坡治理的重要课题之一, 各界对于多场的耦合数字模拟分析也日趋成熟。本文从实际工程出发, 结合监测数据, 从宏观上研究膨胀土边坡二次复活的原因以及参数取值的变化。

## 1 研究区域地质条件及滑坡原因分析

研究坡体全长900 m东向西倾斜, 坡面轴向长度约30~76 m, 面积约4 000 m<sup>2</sup>, 潜在滑体约40万m<sup>3</sup>, 变形体主滑方向298°。该边坡上出现多道大至平行的横向拉裂缝并有错落, 坡脚前缘一带地面鼓胀隆起并

有剪出现象, 坡面上的格构大部分剪断破坏。该滑坡是多种因素共同作用的结果, 与地层岩性、地形地貌、人类工程活动、降雨等因素有密切的联系。(1) 滑体的主要成分为泥岩, 由于泥岩具有膨胀性, 遇水膨胀软化, 强度急剧降低, 加之其岩层内存在软弱结构面, 为滑坡的形成提供了物质基础。(2) 人类工程活动是滑坡形成的另一个主要因素, 在修建建筑及道路时, 需进行削坡平整场地, 改变了原有的地形地貌, 使坡高增加, 坡度变陡, 使泥岩暴露于坡上, 减小了坡体下部支撑力, 为滑坡的形成创造了条件。(3) 水是诱发滑坡发生的关键因素之一。根据地质详勘报告及现场实地调查, 该坡体的水来源有以下两个方面: 一是坡面水, 主要补给来源为雨水及坡面植被日常养护水; 二是坡体内地下水, 根据场地勘查资料, 坡体上部含有一层砂卵石层, 该层为透水层, 受地表水补给作用, 该层底部含有少量地下水。此外, 根据勘查资料, 场地南侧部分地段泥岩中含有砂质夹层, 不连续, 以透镜体形式揭露, 为相对含水层。以上两层为坡面渗水的补给源。膨胀土在含水量变化的时候会产生变形, 对于边坡工程极易引发破坏造成失稳<sup>[3]</sup>。综上所述多重原因共同引起了边坡的滑坡, 主要是三个因素: 膨胀土、地下水、人类活动。

**作者简介:** 韩晓伟(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

## 2 岩土参数取值

从勘察结果来看该边坡地层分为四层，从上到下依次是杂填土、粉质粘土、圆砾、全风化强风化粉砂质泥岩。边坡在经过第一次开挖后进行了支护，经历一场暴雨后滑坡复活，最大滑移距离 2 m，认为滑坡原因是活动开挖边坡，第一次支护计算不准确，造成了第二次的边坡滑坡。根据钻孔发现，滑坡滑动带主要分布于第三层全风化粉砂质泥岩层，有中等膨胀性。

### 2.1 室内直剪试验

本次详细勘察在探井及钻孔内取粉质粘土原状土样 2 组（6 件）、全风化泥岩原状土样 2 组（6 件）、全风化粉砂质泥岩原状土样 2 组（6 件）、强风化泥岩原状土样 2 组（6 件）、强风化粉砂质泥岩原状土样 2 组（6 件）、中风化泥岩原状土样 2 组（6 件），进行室内饱和直剪试验，本次膨胀性泥岩的室内饱和直剪试验是在土体饱和、体积完全膨胀的状态下进行的，是模拟该边坡的最不利工况下的强度指标（见表 1）。

表 1 室内饱和直剪试验抗剪强度成果表

土层	C (kPa)	$\Phi$ (°)
填土	20.2	13.6
粉质粘土	18.2	13.1
全风化泥岩	10.9	4.1
强风化泥岩	13.6	4.7
中风化泥岩	15.7	5.7

### 2.2 现场大剪试验

本次勘察在不同土层内进行了 10 组现场大剪试验，均在饱和状态下进行。其中粉质粘土与圆砾层的现场大剪试验值与实际可能到达的最不利状态较为接近。膨胀性泥岩的现场大剪试验虽然亦在饱和状态下进行，但试件的体积并没有得到完全的膨胀，与实际可能到达的最不利状态较有所偏差，即还未达到该边坡可能出现的最大不利工况（见表 2）。

表 2 现场大剪试验抗剪强度成果表

土层	C (kPa)	$\Phi$ (°)
填土	22.0	14.1
粉质粘土	18.8	13.6
圆砾	13.6	22.8
全风化泥岩	18.4	16.7
强风化泥岩	20.6	17.2
中风化泥岩	23.8	18.4

## 2.3 反演计算

为了了解边坡浅层稳定性与滑带土的抗剪强度的关系，本次计算根据已发生的 4# 滑坡情况，进行反演分析。

对 C、 $\phi$  值进行反演计算，反演公式为：

$$C = \frac{K_s \sum W_i \sin \alpha_i - \tan \phi \sum W_i \cos \alpha_i}{L} \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{K_s \sum W_i \sin \alpha_i - CL}{\sum W_i \cos \alpha_i}\right) \quad (2)$$

根据现场的情况看，由于边坡已经发生了大规模的滑移现象，边坡已经处于不稳定状态，滑坡的稳定系数取 0.95。对滑坡滑带土抗剪强度 C、 $\phi$  值进行反算，求得滑带土的饱和状态下 C 值为 12.6 kPa， $\phi$  值为 9.7°。

## 3 边坡发展趋势及危险性分析

通过实验室直剪试验、现场大剪试验以及反演法推算的岩土体参数，对边坡的稳定性分析进行计算发现边坡的破坏与地下水的活动成正相关性。滑坡形成过程是岩土体在膨胀性、软弱结构面软化作用、人类工程活动和地表水入渗等共同作用下使土体结构发生变化及强度降低结果，在集中持续降雨等外部因素的诱发下，边坡土体沿软弱结构面处产生滑移。裂隙的存在极大地改变了土体的渗透性和应力分布特征<sup>[4]</sup>。对边坡的稳定性分析采用不平衡推力法进行计算。

滑坡剩余下滑推力按《滑坡防治工程勘察规范》（DB/T 0218-2006）附录 E 中的公式 E.10 计算。计算公式为：

$$P_i = P_{i-1} \times \psi + K_s \times T_i - R_i \quad (3)$$

式（3）中： $P_i$ 、 $P_{i-1}$  分别为第 i 块、第 i+1 块滑坡的剩余下滑力（kN/m）； $K_s$  为滑坡推力计算的安全系数，工况 I 取 1.30，工况 III 取 1.10； $T_i$  为作用于第 i 块滑动面上的下滑力（kN/m）； $R_i$  为作用于第 i 块滑动面上的抗滑力（kN/m）。

滑坡剩余下滑推力计算，在土自重、土自重 + 暴雨工况进行。刘伟等<sup>[5]</sup>的研究在强震区的胀缩劣化效应，这预示着将更多灾害因素纳入数值模型的耦合分析中将是未来的重要方向。

边坡圆砾层以下部分大气急剧影响深度内潜在滑动面稳定性计算采用折线动法；边坡圆砾层以上部分粉质粘土层采用圆弧滑动法自动搜索最不利破裂面，应用理正岩土计算软件该层在工况 III 下计算稳定系数、推力计算成果见表 3。

通过对整个边坡的不平衡推力的对比计算，发现

表3 边坡稳定性计算成果

计算剖面	工况III 圆砾层以下大气急剧影响深度内			工况III 圆砾层以上的粉质粘土层		
	稳定系数 F	稳定性评价	滑坡推力	稳定系数 F	稳定性评价	滑坡推力
1	0.841	不稳定	241.14	—	—	—
2	1.012	欠稳定	57.63	—	—	—
3	0.907	不稳定	183.66	—	—	—
4	0.839	不稳定	309.81	—	—	—
5	0.926	不稳定	196.75	1.485	稳定	—
6	0.890	不稳定	231.38	1.735	稳定	—
7	0.851	不稳定	258.89	—	—	—
8	1.021	欠稳定	44.26	—	—	—
9	0.919	不稳定	172.45	—	—	—
10	0.971	不稳定	96.93	1.887	稳定	—
11	1.000	欠稳定	72.04	—	—	—
12	1.147	基本稳定	-20.38	—	—	—
13	1.018	欠稳定	36.30	—	—	—
14	1.562	稳定	-74.78	—	—	—
15	1.164	稳定	-21.15	—	—	—
16	1.193	稳定	-30.71	—	—	—
17	3.470	稳定	-84.14	—	—	—

该边坡破坏的两点规律：（1）我们考虑在暴雨工况下的计算边坡破坏与实际情况以及监测数据完全吻合，侧面印证了我们边坡参数取值的准确性；（2）边坡的稳定性与第三层圆砾层的透水性息息相关，为下层膨胀性泥岩提供了诱发因素水的便利条件。

#### 4 结论

膨胀土边坡的稳定性基本上都发生在膨胀土岩层，膨胀土层在吸水膨胀后，其强度急剧降低。膨胀土边坡的治理主要在于水的治理，治理地下水以堵和截为主，堵一般采用注浆的方式，但注浆存在使膨胀土再次膨胀的风险。经过试验发现，超过一定的压力后膨胀土的膨胀性就会大大削弱，因此保证覆盖层的厚度可以有效减小膨胀土对于边坡稳定性的影响。因此，对于膨胀土边坡的治理建议：（1）根据膨胀土边坡的变形特性和大量的数据显示，边坡的滑动土层一般为膨胀土层，膨胀土吸收后膨胀，强度急剧降低约 50%，膨胀土层作为重点治理土层；（2）膨胀土的治理首先要避免

扰动，研究表明，在覆盖层厚度足够的情况下膨胀土膨胀性消失，因此保证膨胀土层的上覆土压力至关重要。

#### 参考文献：

- [1] 李国维, 巩齐齐, 李涛, 等. 崩解性砂软岩改良弱膨胀土性状实验研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(01): 34-43.
- [2] 胡江, 李星. 深挖方膨胀土边坡时空变形特征分析 [J]. 岩土力学, 2024, 45(10): 3071-3080.
- [3] 赵勇, 张锐, 邢学敏, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的膨胀土边坡变形失稳特征 [J]. 公路交通科技, 2024, 41(08): 22-30.
- [4] 张妤涵, 胡江, 李星. 多源数据驱动的膨胀土渠道边坡变形及影响因素分析方法 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-16 [2026-01-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250428.1107.003>.
- [5] 刘伟, 孙欣然, 何乃武. 强震区胀缩劣化效应致膨胀土边坡失稳力学特性分析 [J]. 工程地质学报, 2025, 33(03): 1058-1070.

# 新能源工程机械的动力系统设计及节能效果研究

刘旭鹏, 王嘉瑞, 王 坤

(烟台港股份有限公司联通国际件杂货码头分公司, 山东 烟台 264000)

**摘 要** 新能源工程机械的动力系统和传统机型存在明显差异, 其构造选择、部件匹配的方面需考虑到新能源工程动力系统特殊性确定。本文主要从新能源工程机械实际情况出发, 分析纯电动、混合动力、增程式三种主流方案结构特点, 明确工程机械中电机选型、电池布置、能量回收回路以及控制策略的设计要点。同时, 本文选择某典型工况下一台 3 t 级电动装载机进行实测, 记录设备运行时能耗参数, 并且将其和同规格柴油机型对比, 进而统计目前不同作业阶段新能源工程机械的能量回收量。测试结果表明, 在合理配置的基础上, 电驱动系统在多种工况条件下能耗均低于柴油机, 特别是在频繁启停、带坡场景下能源节约方面更具优势。

**关键词** 新能源工程机械; 动力系统; 能量回收; 能耗对比

**中图分类号**: TM61; TH16

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.037

## 0 引言

随着我国“双碳”目标不断落实到位, 工程机械电动化转型速度日益加快。新能源工程机械在矿山、港口、市政等封闭或低排放领域中得到逐步应用, 其动力系统不再依赖内燃机, 而是采用电机、电池、电控等新型部件。所以, 新能源工程机械系统架构与控制逻辑发生巨大改变。目前新能源工程机械市场中出现多种技术路线, 主要为纯电驱动、油电混合、增程发电等。不同类型的新能源工程机械使用在不同作业强度与续航需求的场景下, 为提高新能源工程机械的产品竞争力, 需深入分析这类型工程机械的特点, 选择适宜的动力系统集成设计方式, 并且测量其节能效果以便获取最佳设计方案。

## 1 新能源工程机械动力系统构型

### 1.1 纯电动系统

纯电动工程机械的动力来源为车载电池组, 其通过电机、控制器将电能传输给驱动电机, 并且带动液压泵或行走机构持续运转。该类型工程机械取消发动机、油箱、排气管等传统内燃机组件, 并且运行时不产生任何尾气排放, 尤其在封闭或环保要求的区域下应用价值高。而纯电动工程机械一般在固定场地内充电, 可根据实际需求选择慢速交流电充电或快速直流电充电方式。然而纯电动的新能源工程机械受到电池

容量限制, 其一般应用在工作节奏稳定、作业时间规律、有可靠补能条件场合下, 一般在港口内部转运、市政短途等场景中应用。

### 1.2 混合动力系统

新能源工程机械中混合动力系统同时拥有柴油发动机和动力电池组, 这两种能源都能给机械设备提供足够驱动力, 以保持正常运行。在柴油发动机与动力电池组采用并联式结构设计, 发动机直接驱动工作装置或行走系统, 也可以带动发电机给电池充电。而电池则用于补充瞬时高功率需求, 如机械启动、加速、重载挖掘时, 也可以在制动或下放工况下回收部分能量达到节能效果。该设备中布置离合器、分动箱等机械连接部件, 并且配置专用控制单元协调油电输出。混合动力工程机械保留燃油加注的便利性, 且不需要外部充电设施, 尤其在连续作业时间长、强度高、作业地点偏僻的水利、矿山等工矿条件下应用价值高<sup>[1]</sup>。

### 1.3 增程式与插电式结构差异

新能源工程机械中增程式是重要类型, 其行驶与作业完全由电机完成。而在电池电量不足时, 由柴油发动机完成发电, 且发动机不参与机械传动。该类型设备发动机保持稳定转速运行, 能够满足电池充电或直接向电机供电需求, 进而能够延长新能源工程机械的运行时间。插电式混合动力与增程式有明显差异,

**作者简介**: 刘旭鹏 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程技术。

其主要利用外接电源给电池充电,也允许发动机直接驱动设备运行,从而形成油电并联输出方式。上述两种类型在能量传递路径上有明显差别,增程式为燃料先转变为电能再驱动,插电式则允许燃料和电能分别或共同驱动。因此,增程式系统各部分保持独立,其控制逻辑清晰;插电式由于存在机械连接,在动力响应复杂工况下有一定的不同。

## 2 动力系统设计要点

### 2.1 电机选型与扭矩—转速特性匹配

新能源工程机械动力系统设计,电机选型需综合分析机械的整机最大牵引力、最高行驶速度、作业循环的功率需求等因素。新能源工程机械中永磁同步电机特点是功率密度高、效率区间宽,需要在设计环节绘制整机负载谱,能够提取典型工况下扭矩与转速组合以实现电机特性曲线精准匹配。而电机峰值扭矩满足新能源工程机械在启动、爬坡、重载挖掘作业需求,额定功率需要覆盖持续作业的功率区间。电机的转速范围应考虑到新能源工程机械高速行驶以及低速大扭矩输出需求,一般利用两档变速箱扩展调速区间。而新能源工程机械的冷却系统根据连续工作温升设计,其选择液冷方式维持绕组温度低于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,该设备电机控制器IGBT模块电流等级峰值为电流1.2倍冗余配置,能够保证设备在运行时具备较高过载能力。如果新能源工程机械电机安装靠近驱动桥或液压泵,能够减少传动损失,并保证电机防水、防尘等级超过IP67<sup>[2]</sup>。

### 2.2 电池容量与快充能力设计

新能源工程机械动力系统设计时考虑到电池总容量,其按照机械单班次作业所需电量分析,并且具备一定的安全余量。根据新能源工程机械设计要求,统计典型工况下整机平均功率乘以作业时间得出基础用电量,再增加20%余量以应对低温条件下容量衰减以及长期使用循环老化。而工程机械中电池包由多个模组串并联方式,其系统电压平台一般为 $600\sim 800\text{ V}$ ,能够减少机械运行时电流传输的能源损耗。而新能源工程机械的电芯使用磷酸铁锂材料制作,其满足安全性与使用寿命要求。新能源工程机械的电池热管理采用液冷方式,需要将液冷板安装在电池模组间,保证电池包内部温度在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。同时,新能源工程机械电池快充接口支持 $120\text{ kW}$ 以上直流充电功率,30 min内可将电量充至80%。

### 2.3 制动/下放工况能量回收回路设计

新能源工程机械在车辆制动或工作装置下放过程中,其设备驱动电机切换为发电机模式,能够将设备

动能或重物势能转变为电能回馈到动力电池中。该能量回收系统能够实现节能效益提升,其设计时回路包含电机控制器内双向逆变模块、直流母线支撑电容以及电池侧DC/DC变换器。而在能量回收回路设计时,考虑到控制逻辑以及硬件承受力。在机械设备下放重物时,其液压系统利用电比例阀调节节流压力,确保设备的部分势能不被溢流阀消耗,而是驱动电机旋转发电;此时形成的交流电经过逆变器整流为直流后送入电池内。在新能源工程机械行车制动时,电机制动力和机械摩擦制动力按照规定比例协同作用保证减速度平稳,能够防止给新能源工程机械造成过大冲击。在机械设备运行时回收电流受到严格限制,其回收电流禁止超过电池允许的最大充电电流,一般设定为1C倍率<sup>[3]</sup>。能量回收回路设计还需兼顾不同工况的动态适配性,增设工况识别传感器与智能控制单元,实时监测设备负载、运行速度及电池SOC(State of Charge)状态。当电池接近满电状态时,自动切换回收策略,通过弱化能量回收强度或切换至电阻耗能模式,避免电池过充损坏。同时,回路需配置过压、过流保护模块,在回收电压突变或电流异常时快速切断回路,保障电机控制器、电池等核心部件安全<sup>[4]</sup>。

### 2.4 多源能量管理控制策略

新能源工程机械动力系统若采用混合动力或增程式设计,其能量管理系统的作用是协调发动机、电池以及电机之间的功率分配。新能源工程机械能量管理控制策略分为规则性、优化性两种,如下:规则型策略保证能量管理控制有明确的边界,如电池荷电状态低于30%时启动发动机、高于80%时则停止发动机;同时,规定不同工况下功率分配比例,以使系统按照预设逻辑工作。优化型策略则能减少新能源工程机械燃油消耗或等效能耗,其采用动态规则或等效燃油消耗最小计算方法在线计算当前情况下最优功率分配方案。新能源工程机械运行中整车控制器获取油门开度、车速、液压系统、负载、压力等信号,将其作为能量管理控制策略制定依据<sup>[5]</sup>。此外,新能源工程机械为保护电池达到良好状态,一般将设备充放电深度设定为20%~80%区间。

## 3 节能效果测试与对比分析

### 3.1 测试工况设定

新能源工程机械动力系统在节能测试环节,其测试工况如下:城市道路循环、挖掘—装载循环、坡道运输循环。城市道路循环需要模拟市政清扫车的运行状态,主要掌握设备起步、匀速行驶、制动、怠速等

工况,测试总时长为 30 min<sup>[6]</sup>。挖掘—装载循环需参照 ISO 9248 标准制定,主要测定新能源工程机械空载行驶、挖掘、回转、卸料、返回的 5 个连续动作,并且测试完整循环 10 次。坡道运输循环则在坡道 5% 条件下测试,包含上坡满载运行、下坡空载滑行以及平路转向等。上述测试工作在同一试验场地下完成,测试时环境温度 20 ~ 25 °C。测试前设备充分预热,达到正常工作状态。而在测试环节每种工况独立进行三次完整测试,取三次测试结果的平均值作为该工况最终数据。本次测试选择一台额定载重 3 t 的纯电动轮式装载机进行,对照机型为同吨位传统柴油动力装载机,确保两者在整机质量、工作装置、液压系统等参数保持一致<sup>[7]</sup>。

### 3.2 能耗数据采集方法

本次测试中柴油机型能耗使用高精度燃油流量计测量,其输出单位为 L/h。新能源机型能耗由电池管理系统实时记录充放电电量,其单位为 kW·h。本次测试中整机高压直流回路安装高精度功率分析仪,其采样频率达到 10 kHz,能够及时获取设备运行中电压、电流、瞬时功率数据,并形成时间序列曲线。而测试中设备的空调、照明等辅助系统能耗利用独立电能表计量,并将其能源消耗计入总能耗数据中<sup>[8]</sup>。在本次测试前动力电池制造商按照标准流程充电,起始荷电状态为 95%。在测试结束后及时进行补电,使电池恢复到相同荷电状态;工程机械的电量消耗以补充电量扣除充电效率损失后计算得出,并且充电效率根据实际测量参数值修正。同时,本项目测量中采集 GPS 车速、油门踏板开度、液压系统工作压力等辅助信号,并且采样频率超过 100 Hz,能够精准识别设备作业时能耗变化情况。上述测量设备由第三方计量机构校准,并且保证系统整体测量不准确度小于 1.5%。

## 4 新能源工程机械动力系统电耗分析

### 4.1 与同吨位柴油机型在相同工况下的能耗对比

在城市道路循环中,纯电装载机的平均能耗为 28 kW·h/h,折合等效油耗 6.2 L/100 km;同吨位柴油机型实测油耗为 9.8 L/100 km,等效能耗降低 37%。挖掘—装载循环中,电驱动整机完成 10 次标准循环总耗电 42 kW·h,柴油机型消耗燃油 12.5 L,按燃料低位热值折算,电能等效节约 29%。在坡道运输循环中,因下坡滑行与制动能量回收,纯电机型平均能耗为 21 kW·h/h,柴油机型油耗为 11.3 L/100 km,等效节能达 45%。综合三种工况加权计算,新能源机型平均等效能耗降低 34%。电机在宽转速范围内效率保持在 85% 以上,内燃机在部分负荷工况效率低于 30%。电驱动系统取消液力

变矩器、传动轴等机械传动环节,减少功率传递损失。柴油机型存在怠速燃油消耗,电驱动在停机状态下无能量输入。

### 4.2 能量回收贡献率与系统综合效率计算

坡道运输循环中,下坡滑行与制动阶段共回收电能 9.6 kW·h,占该工况总消耗电量 21.0 kW·h 的 45.7%。挖掘—装载循环中,动臂下放势能回收与回转制动再生共回收 4.1 kW·h,占总耗电 42.0 kW·h 的 9.8%。城市道路循环因频繁启停,制动能量回收总量为 7.3 kW·h,占总耗电 28.0 kW·h 的 26.1%。能量回收贡献率定义为回收电量与总耗电量的比值。系统综合效率为整机输出有用功与总能量输入之比。有用功通过液压系统压力与流量积分、行走阻力与位移乘积计算得出。纯电系统在挖掘工况综合效率为 58%,坡道工况达 67%;柴油机型系统对应工况综合效率为 32% 至 38%。电池充放电循环效率为 92%,电机及逆变器整体效率为 96%,电能传输链路损耗可控。

## 5 结束语

新能源工程机械动力系统设计从电机、电池、能量回收与控制策略进行,并结合设计方案和运行工况制定合理的节能方案。本次测量结果显示,典型工况下确定适宜设计方案,使电驱动系统实现 30% 以上等效能耗降低。此外,还从电池能量密度、快充速度、低温性能方面优化能量管理系统,从而实现新能源工程机械节能效果的提高,为现代工程机械领域的发展做出贡献。

## 参考文献:

- [1] 李金凤,张学敏,宋正河,等.基于 TRIZ 理论的分式混合动力拖拉机动力系统设计及验证[J].吉林大学学报(工学版),2025,55(01):366-381.
- [2] 丁旭,孙科,段小维.某动力装置领先试飞液压负载系统设计[J].科技创新与应用,2019(01):88-89.
- [3] 沈登武.工程机械产品设计中的节能与环保分析[J].南方农机,2019,50(22):139.
- [4] 闫利明,李让,王富宏.工程机械液压系统动力匹配与其控制技术探讨[J].科技风,2020(05):169.
- [5] 朱姗.节能减排在机械设计中的应用[J].科技资讯,2022,20(02):60-62.
- [6] 宋泓炎,彭一雯,张玉飞,等.一种汽车后桥辅助动力系统设计及有限元分析[J].农机使用与维修,2022(04):26-28.
- [7] 董丽娟,朱哲煜.基于混合动力液压挖掘机系统优化设计的研究[J].内燃机与配件,2021(01):55-56.
- [8] 张丽艳,臧国航.新能源农业机械的研发及对可持续农业的影响[J].中国农机装备,2025(04):127-129.

# 电力工程输电线路设计中的 防雷技术与优化

武雨辰

(山东锐邦电力设计有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要** 本文针对输电线路防雷技术展开研究, 系统分析了雷电危害机理、防雷基本原理及现有措施, 并提出了多维度优化策略, 以期复杂环境下的输电线路防雷设计提供参考。研究表明, 直击雷与感应雷是导致线路故障的主要原因, 其产生的过电压幅值可达数百千伏, 而接地电阻超过  $15\ \Omega$  (110 kV 线路) 或  $10\ \Omega$  (500 kV 线路) 时, 反击风险显著增加。在防雷措施优化方面, 提出接地装置应采用深井接地或纳米碳降阻材料 (降阻率  $\geq 60\%$ ), 避雷器选型需满足  $8/20\ \mu\text{s}$  波形下 20 kA 放电电流及 800 A 方波通流容量要求, 并建议山区线路避雷器布置间距  $\leq 500\ \text{m}$ 。综合应用避雷线 (保护角  $\leq 30^\circ$ )、智能避雷器 (响应时间  $\leq 100\ \text{ms}$ ) 及加强绝缘 (复合绝缘子耐压 550 kV/m) 等组合措施, 可使 500 kV 线路雷击跳闸率降低 75% 以上。

**关键词** 输电线路; 防雷技术; 接地装置; 避雷器; 绝缘配合

中图分类号: TM863

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.038

## 0 引言

输电线路是电力系统的重要部分, 其能否安全稳定运行直接关系到供电的可靠性。然而雷电作为一种常见的自然灾害, 对输电线路威胁巨大, 可能会让线路跳闸、设备损坏, 甚至造成大面积停电<sup>[1]</sup>。据国家电网 2025 年统计数据, 我国每年因雷击造成的输电线路跳闸事故约 2 300 起, 直接经济损失超 8 亿元。国际大电网会议 (CIGRE) 报告指出, 雷击故障在 110 kV 及以上线路故障中占比高达 40% ~ 70%。因此, 深入研究输电线路的防雷技术, 找到更有效的防护办法, 对保障电力系统的安全至关重要。

## 1 输电线路防雷技术分析

### 1.1 雷电对输电线路的危害

雷电是自然界中常见的强放电现象, 对输电线路的安全运行威胁巨大。雷电击中输电线路会产生极高的过电压, 可能直接把绝缘子或者导线击穿让线路跳闸, 甚至损坏设备。就算线路没有直接被雷击, 雷电感应电压也会产生并影响电力系统的稳定。雷电的危害不仅是即时的破坏本身, 还可能让绝缘材料老化加剧, 增加后续的维护成本。对于高压输电线路, 雷电事故可能导致大面积停电, 影响社会生产和群众的正常生活。具体来说, 直击雷和感应雷是让线路出故障

的主要原因。根据雷电过电压计算公式:

$$U=IR+L\frac{di}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $U$  为过电压峰值 (kV),  $I$  为雷电流幅值 (kA),  $R$  为冲击接地电阻 ( $\Omega$ ),  $L$  为导体电感 ( $\mu\text{H}/\text{m}$ ),  $di/dt$  为雷电流波前陡度 ( $\text{kA}/\mu\text{s}$ )。由此可见, 直击雷能量大、破坏力强, 如直接击中杆塔或者导线会产生很高的雷电流, 可引起绝缘子串闪络或者让线路短路跳闸。感应雷虽然电压幅值相对低一些, 但是出现的次数更多, 它通过电磁感应在输电线路产生过电压也可能把一些绝缘比较弱的设备击穿。而且雷电冲击波的传播特点会让过电压沿着线路扩散, 影响变电站等重要设备的安全。所以研究雷电对输电线路的影响, 是优化防雷技术的基础。

### 1.2 输电线路防雷的基本原理

输电线路防雷的主要目的是降低被雷击的可能性, 减少雷击造成的损失。防雷的基本原理可以概括成“疏导”和“限制”。疏导就是通过合理设计接地装置和避雷设施, 把雷电电流引到大地里去, 不让它在输电设备上积累 too 高的电压。限制则是用避雷器、绝缘配合等方法, 把雷电过电压的幅值控制住, 让它不超过设备能够承受的范围。根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620-2025) 标准要求, 110 kV 线路杆塔接地电阻应  $\leq 15\ \Omega$ , 500 kV 线路应  $\leq 10\ \Omega$ ,

作者简介: 武雨辰 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程工程技术。

这是确保雷电流有效泄放的关键参数。诚然，防雷技术不是只靠一种方法就能一劳永逸的，要结合线路的结构、地理环境等因素采取综合的防护措施。

### 1.3 常见防雷措施及其应用

在实际的工程中，输电线路的防雷方法众多，主要有避雷线、避雷器、接地装置或改善绝缘配置等。避雷线是最常用的防雷手段，工程实践表明，当保护角 $\leq 30^\circ$ 时避雷线屏蔽失效概率可控制在 5% 以下；复合外套避雷器的 8/20  $\mu\text{s}$  标称放电电流需达 20 kA 以上才能满足 500 kV 线路防护需求。避雷器主要是用来限制雷电过电压的，通常安装在变电站或者一些关键的节点，保证过电压不会对设备造成损害。接地装置则能有效降低雷电流泄放时的电阻，减少反击的风险<sup>[2]</sup>。适当增加绝缘子串的长度，或者用防污闪绝缘子，也能提高线路的防雷能力。具体采取哪些措施要根据工程的实际需求来组合，这样才能达到最好的防雷效果。

## 2 输电线路防雷技术的关键问题分析

### 2.1 接地电阻对防雷效果的影响

接地电阻是衡量输电线路防雷性能的一个重要指标，它直接影响着雷电流能不能顺利地泄放到大地中去。当雷电击中输电线路或者避雷线的时候，雷电流通过接地装置快速地导入大地。若接地电阻太大，雷电流就没办法有效地泄放，会在接地极附近形成很高的电位，这就就会出现“反击”现象<sup>[3]</sup>，也就是说，这个高电位会反过来把绝缘子或者设备击穿，让线路出故障。所以降低接地电阻是提高防雷效果的一个关键办法。

在实际的工程中，接地电阻的大小会受到很多因素的影响，如土壤电阻率、接地体材料、接地网结构等。土壤电阻率是决定接地电阻大小的主要因素，根据《交流电气装置的接地设计规范》(GB/T 50065-2025)规定，当土壤电阻率 $> 2\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 时，需采用深井接地（深度 $\geq 15\ \text{m}$ ）或添加石墨基降阻剂（降阻率 $\geq 60\%$ ）等特殊措施。不同地方的土壤导电性能差别巨大。如岩石地区或者干燥的沙地，土壤的电阻率就比较高；而湿润的黏土地区，土壤的电阻率就比较低。为了降低接地电阻，一般要采取一些措施，如把接地极埋得深一些、扩大接地网的面积，或者使用降阻剂等。在选择接地体材料时，铜质接地体的导电性能比钢材好但成本相对较高，需根据工程实际情况来选择。

### 2.2 绝缘配合与防雷保护的关系

绝缘配合指的是输电线路的绝缘强度和系统过电压之间的匹配关系。合理的绝缘配合能有效提高线路的防雷能力。在防雷设计中，绝缘配合的主要目的是让绝缘子、空气间隙等绝缘介质能够承受住雷电过电

压，不会发生闪络现象。例如：绝缘强度不够，雷电过电压可能会把绝缘击穿，引发短路故障；但过度提高绝缘强度又会增加建设成本，甚至影响线路的其他性能。输电线路的绝缘配合涉及很多方面，比如绝缘子串的长度、类型，还有导线和杆塔之间空气间隙的设计。绝缘子串的长度直接影响它的耐压能力，绝缘子串越长，能承受的过电压就越高，不过也会让杆塔承受更大的机械负荷。不同类型的绝缘子（如瓷绝缘子、玻璃绝缘子、复合绝缘子）的防雷性能不同<sup>[4]</sup>，复合绝缘子因为憎水性好，抗污闪能力强，在雷电多的地区更有优势。试验数据表明，复合绝缘子雷电冲击耐受电压可达 550 kV/m（标准雷电波 1.2/50  $\mu\text{s}$ ），比同长度瓷绝缘子提高 15%~20%。另外，导线和杆塔之间的空气间隙也应设计合理，以保证在雷电过电压的情况下不会发生闪络。在正常运行时绝缘子要承受工频电压，而在被雷击的时候就要承受瞬间的高电压。所以绝缘配合既要满足雷电冲击时的耐压要求，又要考虑长期运行中的电气性能和机械强度。

### 2.3 地形与气象条件对防雷设计的影响

输电线路的防雷设计应重点考虑实际环境，地形和气象条件对防雷措施的选择和效果影响很大。山区、丘陵这些区域因为地形起伏大，雷电活动通常更频繁，且雷击点分布得也不均匀。山顶或者地势高的地方的输电线路更容易被直击雷击中，而山谷地区可能因为地形的屏蔽作用，雷电感应电压会增强。所以，在山区架设输电线路时，要特别注意避雷线的安装高度和覆盖范围，必要的时候可以增加避雷线的数量或者采用双避雷线的设计提高拦截雷电的可能性<sup>[5]</sup>。

气象条件也给防雷设计带来了挑战。在雷暴多的地区（如热带或者亚热带），输电线路需要更高的防雷标准；而在干旱地区，因为土壤电阻率高，对接地装置的设计要求就更严格。另外，强风、冰雪等气象因素也会间接影响防雷效果。比如强风可能会让导线晃动，当风速超过 30 m/s 时，导线风偏角可能超过设计值（通常控制在  $55^\circ$  以内），需校核动态空气间隙是否满足操作过电压要求的 2.5 m/100 kV 标准<sup>[6]</sup>；冰雪覆盖会降低绝缘子的绝缘性能，让它在被雷击时更容易闪络。所以，防雷设计要结合当地的气象数据，采取有针对性的措施，比如提高绝缘子防冰闪的能力或优化导线的布置方式。

## 3 输电线路防雷技术的优化策略

### 3.1 接地装置的优化设计

接地装置作为防雷系统的重要组成部分，其性能直接影响着整个输电线路的防雷效果。在实际工程应

用中,接地装置的优化需要从多个维度进行考量。首先需要考虑的是土壤特性的影响,不同地区的土壤电阻率差异较大,这就要求在接地装置设计时进行详细的土壤勘测。对于高电阻率地区,可以采用深井接地或爆破接地等特殊工艺来降低接地电阻。同时,接地体的材料选择也至关重要,铜包钢接地体因其良好的导电性和抗腐蚀性,在重要输电线路中得到广泛应用,直径14 mm的铜包钢接地体在 $\rho=100 \Omega \cdot \text{m}$ 土壤中,单根垂直接地极的工频接地电阻可控制在28  $\Omega$ 以下,满足110 kV线路要求。

在布置方式上,传统的辐射状接地网虽然结构简单,但在某些特殊地形条件下可能效果不佳。此时可以考虑采用网状接地或立体接地等新型布置方式。值得注意的是,接地装置的优化不仅要考虑降低接地电阻,还要兼顾经济性和施工便利性<sup>[7]</sup>。例如:在山区等施工困难区域,可以采用模块化接地装置,既保证了施工质量,又提高了施工效率。随着新材料技术的发展,一些新型降阻材料如导电混凝土、纳米碳材料等也开始在接地工程中得到应用,为接地装置的优化提供了更多可能性。

### 3.2 避雷器选型与布置优化

在选型方面需要综合考虑线路电压等级、绝缘配合要求以及当地雷电活动特点等因素。目前常用的氧化锌避雷器因其优异的非线性特性和快速响应能力,已经成为输电线路防雷的首选设备<sup>[8]</sup>。但在实际应用中,还需要特别注意避雷器的持续运行电压、标称放电电流等关键参数的选择,确保其能够适应线路运行的各种工况。对于500 kV线路,避雷器8/20  $\mu\text{s}$ 波形下的标称放电电流应 $\geq 20 \text{ kA}$ ,2 ms方波通流容量需达800 A以上。需要注意的是,传统的布置方式往往只在变电站进出线端安装避雷器,这种布置对线路中段的保护效果有限。现代优化方案提倡采用“重点防护+均匀布置”的策略,即在雷电多发区段、重要跨越点等关键位置增加避雷器密度,同时在整条线路上保持合理的间隔布置。这种布置方式既能保证重点区域的防护效果,又能兼顾整体线路的防雷需求。近年来,智能电网技术发展迅速,带有监测功能的智能避雷器开始得到应用,可以实时监测避雷器工作状态,为防雷系统的维护提供重要依据。

### 3.3 综合防雷措施的应用与改进

如今,现代输电线路的防雷工作已成为一个系统工程,需要多种防雷措施相互配合。在实际的工程中,如果只采用某一种防雷措施,通常很难达到理想的防

护效果,所以必须采用综合防雷的策略。关键在于要根据输电线路的具体情况,把避雷线、避雷器、接地装置等多种防雷手段合理地组合起来,形成一个多层次的防护体系。例如:在雷电活动特别厉害的地区,可以采用“避雷线+避雷器+加强绝缘”这样的组合方案,运行数据表明,该组合方案可将500 kV线路雷击跳闸率从1.2次/(百公里·年)降至0.3次/(百公里·年)以下,综合防护效率提升75%<sup>[9]</sup>。

防雷措施的改进主要有两个方向。一方面是让防护手段更智能化,通过安装雷电监测系统、智能避雷器等设备,可实现 $\pm 5\%$ 的泄漏电流监测精度,并能通过IED装置以 $\leq 100 \text{ ms}$ 的响应速度触发保护动作,能够实时监测雷电活动,还能对防护设备进行智能调控。另一方面是让防护方案更个性化,利用大数据分析和数值模拟技术,针对不同线路的特点制定专门的防雷方案。

## 4 结束语

本文明确了接地电阻、绝缘配合以及地形气象等因素对防雷效果有着非常重要的影响。随着新材料、新技术的不断出现,未来输电线路的防雷技术会朝着更智能、更高效的方向发展。未来,防雷技术的完善还需要在实际应用中不断地探索和创新,这样才能适应电力系统发展的新要求。

## 参考文献:

- [1] 张小玉,王宇墨.电网防雷技术在架空输电线路设计中的应用[J].光源与照明,2025(09):206-208.
- [2] 叶尔达那·哈德勒,阿尔恒·切尔子扎提,夏丽达·木那提别克,等.输电线路施工技术在电力工程中的应用研究[J].光源与照明,2024(10):171-173.
- [3] 薛苗苗,许雪明,段俊秀.电力工程输电线路设计中的防雷技术与改进措施[J].微型计算机,2025(09):106-108.
- [4] 刘宝涛.电力工程10kV配电线路的施工技术研究[J].前卫,2023(28):171-173.
- [5] 魏家干.电力工程中常见设备安装的安全技术措施[J].电力系统装备,2022(12):59-62.
- [6] 吴学浩,张磊,叶赞,等.电力线路故障定位技术在防雷系统中的应用研究[J].电气技术与经济,2025(11):71-73.
- [7] 张琦.发电厂电力设备防雷接地装置安装技术研究[J].电气技术与经济,2025(04):96-98.
- [8] 林晶.电力设备防雷接地系统腐蚀机理及防护技术创新[J].电力系统装备,2025(09):119-121.
- [9] 姚涛.电力通信线路施工中防雷防护技术分析[J].行车指南,2023(10):104-105.

# 基于 GIS 的矿区地质信息集成与 测绘管理系统研究

秦 启

(晴隆县能源局, 贵州 黔西南 561400)

**摘 要** 矿区的地质以及测绘数据的多异性和多源型给综合管理、深度使用带来了诸多挑战。本文主要研究地理信息系统在矿区的专业化应用, 系统地研究建立矿区地质信息集成与测绘管理系统的必要性和技术途径。通过对目前矿区地质和测绘数据在集成、管理、分析、服务等方面存在的主要问题进行分析, 提出了基于统一数据模型的多源融合、三维动态建模与管理、智能分析模型集成、协同服务等主要策略, 旨在为矿山数字化、智能化转型提供统一、高效、智能的空间信息管理平台。

**关键词** 地理信息系统; 矿区地质; 信息集成; 测绘管理; 三维地质模型

中图分类号: TD17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.039

## 0 引言

矿产资源高效、安全、绿色开发需要对矿区地质条件及空间信息有准确的把握, 并且进行科学的管理。传统的地质图件、测绘成果、勘探资料大多是以分散的、静态的方式存在, 不能满足现代矿山精细化、动态化管理的要求。地理信息系统依靠强大的空间数据管理、分析和可视化能力, 为破解矿区信息孤岛、实现多源信息深度融合、协同应用提供了理想的框架。

## 1 矿区地质信息集成与测绘管理的内涵与 GIS 支撑

### 1.1 矿区地质信息的多元异构特征分析

矿区地质信息属于综合性数据集合, 它的多元异构特征比较明显且繁杂。多元性包括基础地理地形、区域地质构造等许多专业领域, 也包括各个领域数据所具有的特有的专业内涵和用途。异构性上数据格式有图形、表格、文本、点云等, 精度、比例尺参差不齐, 影响数据适用范围, 时空基准不同, 数据不能直接融合。这些数据在勘查、设计等不同阶段产生, 由不同的部门用不同的软件生成, 虽然彼此之间有联系但是各自独立。只有对多元异构特征有深刻的认识, 才能准确把握数据的特点, 为之后设计出科学有效的集成管理系统, 实现数据高效整合和利用打下基础。

### 1.2 现代矿山对测绘管理的动态化与精细化需求

现代矿山的动态化要求, 核心是对时空连续变化的准确感知和快速反应。随着开采活动向深部、复杂

地质条件的区域推进, 岩层应力、地表形变、边坡位移等都处在不断变化之中, 传统的周期性或者阶段性测绘已经存在明显的滞后性。动态化测绘管理要建立空天地井一体化的实时监测网, 采用 GNSS、三维激光扫描、InSAR、微震监测等多方面的传感技术, 达到毫米级或者更高的精度连续数据采集的目的。创建时空数据模型和预警体系, 可以自动识别出异常变形的趋势, 给边坡稳定评价、采空区处理、防灾减灾提供及时的决策支持, 把测绘管理由“静态记录”转变成“动态感知和智能预警”。

将测绘数据转变成覆盖矿山规划、生产、运营和复垦全过程的精确“数字底图”, 从而达到对生产流程精确控制、资源科学调配的目的。

### 1.3 GIS 作为集成管理核心平台的技术优势

GIS 的主要优势是具有很强的多源异构数据整合能力。矿山的数据来源众多, 有地质勘探数据、地形图、遥感影像、监测传感器数据、设计图纸和各种业务报表等, 格式和标准各不相同。GIS 使用统一的空间参考基准和灵活的地理数据库模式, 可以很好地把多个时相、多种尺度、各种类型的多源数据进行集成, 建立起逻辑上的联系, 从而彻底打破“信息孤岛”, 形成一个完整的“矿山地理信息全景图”。一体化管理保证了数据的一致性和权威性, 也为后面深度分析和应用打下了良好的基础<sup>[1]</sup>。

作者简介: 秦启 (1991-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质测绘。

GIS空间分析、可视化和决策支持功能能把它的价值由原来的对数据的管理提高到了对知识的发现层面。它自带的缓冲区分析、叠加分析、网格分析、三维建模以及专业的地质统计分析工具,可以直接用于矿体储量计算、开采沉陷预测、地下水渗流模拟、地质灾害危险性分区等专业领域,把原始的数据转换成有指导意义的空间规律和决策的知识。另外,GIS卓越的可视化能力可以把复杂的、抽象的地质构造、矿层分布、应力场等信息用二维、三维或者动态的地图形式直观地展示出来,大大提高了信息的沟通效率 and 管理的直观性,是矿山数字化、智能化建设中必不可少的空间信息基础设施和决策中心。

## 2 矿区地质与测绘信息管理面临的主要问题

### 2.1 多源异构数据的集成融合难题

目前矿区地质和测绘信息管理中多源、多尺度等数据不能融合。不同部门产生的各种数据由于各自的数据标准、存储格式、坐标系统的独立性,只能实现文件层面的叠加,不能进行语义级的集成与关联查询<sup>[2]</sup>。钻孔相关数据分散在不同的系统中,关联分析和三维重构比较困难。数据格式的转换会损失信息,而坐标配准会有误差。低层次的集成使得大量的数据不能够协同,综合应用价值受限,数据资产效能不能充分发挥。由此产生矿区数据管理混乱的现象,无法给后续分析决策提供可靠的依据,影响矿区的整体规划与发展,急需解决数据集成融合的问题。

### 2.2 三维地质建模与动态更新的技术瓶颈

高精度三维地质模型的创建是实现矿区地下空间透明化的关键,但是也存在技术瓶颈。建模依赖于地质工程师的经验,由于地下信息的不完备性和解译的多解性,不同的人建立的模型相差较大,客观性、可重复性差。离散数据插值外推成三维体模型,算法及参数决定结果,无最优实践。模型动态更新更麻烦,矿山生产不断改变地质环境,新数据要及时加入模型,但是大多数建模软件侧重静态构建,缺少高效智能的更新机制,更新常常需要推倒重来或者复杂的手工编辑,耗时费力,模型版本滞后,不能真实反映地质认识,削弱了指导生产决策的实时性和可靠性<sup>[3]</sup>。

### 2.3 专业分析功能孤立与决策支持不足

现有的矿区信息管理系统或者专业的软件,分析功能是孤立的,缺乏决策支持。地质储量估算、边坡稳定性分析等专业功能模块由不同的软件来实现,由于数据接口不通畅、数据格式不相容等问题而造成。对开采方案进行综合分析,即对边坡、地下水系统的

影响进行评估,在多软件间烦琐操作,过程长容易出错,造成决策支持碎片化,管理者很难得到多维度关联的结论。系统多起到“数据仓库”和“图形浏览器”的作用,缺少把多源数据经由分析模型链转变成决策知识的能力,不能直接支撑生产规划、安全预警和资源评价,智能决策支持水平有待提高,以满足矿区复杂决策的需求。

### 2.4 信息共享与协同服务机制缺失

矿山企业各部业务互相关联,但是信息共享、协同服务没有得到实现。各部门因为业务习惯、数据安全或者软件限制等原因而形成“数据烟囱”,造成有价值的信息不能流通。缺少协同服务机制,没有统一的平台来支持跨部门、跨专业的协同工作。采矿设计人员利用最新的地质模型、测绘数据优化设计,方案调整后反馈给测量、安全部门,目前大多依靠会议、邮件、文件等方式传递,效率低且容易产生版本混乱。没有集中的数据、支持在线协同标注、设计会审、任务流转、信息推送的一体化平台,造成业务链条衔接不畅,信息传递滞后失真,制约矿山整体运营效率和管理水平的提高。

## 3 基于GIS的集成管理系统构建策略

### 3.1 构建统一时空基准的多源数据融合模型

破解数据集成难题的根本办法是建立一个以统一时空基准为依据、具有很强的语义关联能力的多源数据融合核心模型。该模型首先要确定全矿区统一、高精度的空间坐标基准和时间基准,作为所有空间数据接入的基准框架。在此基础上,设计出一个面向矿区的专业数据模型,该模型要抽象出钻孔、地层、构造、矿体、采空区、监测点等核心实体对象,明确定义几何特征、属性结构、对象间空间关系和逻辑关系<sup>[4]</sup>。使用GIS的空间数据库引擎来建立一个集中的、逻辑统一的矿区空间数据库,所有来源的数据都按照制定的数据接口规范和ETL流程转换并映射到这个统一模型里。对于半结构化或者非结构化的数据,比如地质描述文本、勘探报告等,应该使用元数据标准化以及关键信息提取的技术来建立它和空间实体对象的关联索引。更重要的是,要建立数据血缘追溯和版本控制机制,对数据的来源、处理过程以及更新历史进行记录,从而保证数据可以被信任,并且相互之间不存在矛盾。

### 3.2 发展耦合地质认知与数据驱动的动态建模方法

为了冲破三维地质建模的瓶颈,要创建一种把地质专家认知与数据驱动算法融合起来的、可以动态更新的智能建模方法体系。该方法的核心是创建一个“人

机协同”的建模环境。建模之初系统给出了诸多依靠机器学习的插值算法,例如克里金法、径向基函数法、随机模拟等,可以迅速由离散的钻孔数据创建起初始的三维属性模型。关键之处在于系统要提供强大的、灵活的三维交互编辑工具,使地质工程师能够根据自己的专业知识以及新的揭露信息,对自动生成的模型进行可视化审查、解释性修改和不确定性标注,把人的认知直接嵌入模型当中。为了实现动态更新,系统要具备增量建模的机制。当新钻孔或者巷道编录数据输入的时候,系统可以自动识别影响区域,按照预先设定的规则或者人工干预来完成局部智能的更新和整体一致性的调整,而不会做全模型的重建。

### 3.3 集成专业分析模型构建智能决策支持链条

矿区智能化是产业安全、高效发展的核心,而复杂地质条件下巷道掘进作为智能开采的关键环节,以实现煤矿地质特征的透明化解析,成为破解智能开采“地质透明化”瓶颈的核心需求<sup>[5]</sup>。首先,整理出矿山核心的业务,即资源评估、开采设计、安全预警、环境保护等环节,从中发现哪些是关键步骤,以及需要什么样的模型。其次,利用 GIS 提供的脚本开发环境或者模型构建器工具,将地质统计学储量估算模型、边坡稳定性极限平衡模型、数值分析模型、开采沉陷预计模型、地下水数值模拟模型等封装成可调用的标准化服务组件。接着,以 workflow 引擎技术为基础,把分散的分析模型组件按照业务逻辑进行可视化编排和串联,形成储量动态估算、边坡稳定性综合评价、开采对地下水影响评估等自动化或者半自动化的分析流水线。当用户触发某项分析任务的时候,系统可以自动地从数据中心获取需要的数据,驱动相关的模型一个接一个地运行,最后再把各个阶段的中间结果和最终结论一起综合地用可视化的方式展示出来,形成一份报告。该模式把复杂的分析过程标准化、自动化,管理者可以跳过软件障碍,直接得到基于多模型融合的深度决策支持信息。

### 3.4 构建云端协同平台与全生命周期信息服务框架

为了建立高效的共享、协同机制,以云 GIS 技术为基础创建起矿区多部门、多角色的云端协同工作平台和全生命周期信息服务系统。平台采用浏览器、服务器等途径,使用用户不需要安装客户端软件,只需要通过网络就可以进入相同的系统界面。创建一套严格的基于角色、数据的权限控制系统,保证数据的安全性、可控性,同时达到资源共享的目的。平台要提供在线地图标注、三维场景协同浏览、设计图纸在线

会审、任务工单发布流转、实时消息通知等协同工具,促使地质、测量、采矿、安全等各个部门在同一个空间场景里展开业务协作和交流。信息服务上要创建起从数据、信息到知识、决策的全生命周期服务架构。提供原始数据查询下载的同时还应该提供专题地图服务、三维场景服务、空间分析服务和移动端野外数据采集、巡检服务等。把系统能力以服务的形式发布出去,可以方便地同其它生产管理系统进行集成,达到数据和业务双向流动的目的。云端协同平台将会彻底改变传统的做事方式,冲破部门壁垒,达到实时数据共享、在线业务协作、连续知识积累的全新矿山数字运行的新环境,从而提升整个矿产生产系统信息化管理与决策能力<sup>[6]</sup>。

## 4 结束语

创建以 GIS 为基础的矿区地质信息集成和测绘管理平台,是面对矿山数据成爆炸性增长,管理要求越来越高的一种必然选择。本文针对目前矿区信息管理数据集成、三维建模、分析应用、协同共享存在的主要问题,提出建立统一数据融合模型、发展动态建模方法、集成智能分析链条、构建云端协同平台等主要策略。该系统成功实施之后,能很好地整合矿山全生命周期的空间信息资产,使地质认知透明化、管理决策科学化、业务协同高效化,为矿山安全生产、资源高效利用和绿色可持续发展提供坚实可靠的空间信息基础设施和智慧大脑,有力推动传统矿业向数字化、智能化矿山转型升级。

## 参考文献:

- [1] 陈麒玉,荀磊,崔哲思,等.三维地质建模技术的最新进展和发展趋势[J].地质科技通报,2025,44(03):373-387.
- [2] 张建龙,朱焕春,葛隆发,等.三维地质建模与数据交互技术发展现状分析[J].水电与抽水蓄能,2022,08(05):14-22.
- [3] 王洋,赵雅诗,王锐柯,等.三维地质建模技术的发展现状[J].化工设计通讯,2019,45(08):243-244.
- [4] 张文彪,段太忠,刘彦锋,等.定量地质建模技术应用现状与发展趋势[J].地质科技情报,2019,38(03):264-275.
- [5] 马斌,杨辉,安又新,等.复杂地质条件下煤矿井下高精度三维地质建模方法研究[J].工矿自动化,2025,51(S2):315-318.
- [6] 向中林.矿区三维地质建模方法研究及深部综合信息找矿预测[D].焦作:河南理工大学,2019.

# 基于数字孪生技术的白溪水库流域预演模型研究与应用

冯志峰

(宁波城市职业技术学院, 浙江 宁波 315000)

**摘要** 本研究针对白溪水库防洪—供水—生态多目标调度需求, 构建基于数字孪生的“正—反向”双核预演模型。融合 UAV、BIM、GIS 与多源实时监测数据, 实现流域与工程尺度的高精度虚实映射。正向机理模型用于推演水库运行风险态势, 反向以 NSGA-II 多目标优化算法生成调度序列, 并引入智能代理模型显著提升在线预演与寻优计算效率。实证结果表明, 该模型可有效降低洪峰水位、减少下游淹没风险, 同时提高供水保障水平与生态基流达标能力, 为复杂水情下水库智慧调度提供参考。

**关键词** 数字孪生; 水库调度; 多目标优化; 智能代理模型

**基金项目:** 2025 年浙江省教育厅一般科研项目“基于数字孪生技术的水库流域预演模型应用研究——以白溪水库为例”(项目编号: ZZT25135)。

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.040

## 0 引言

新时代, 水利高质量发展在宏观上已经把水安全纳入了国家安全的重要范畴。《国家水网建设规划纲要》(2023)明确提出, 需加快构建智慧水网体系, 运用数字孪生技术进行物理流域精准的数字化映射, 实施物理流域全要素数字化映射和物理流域智能模拟<sup>[1]</sup>。白溪水库是浙江省最大的国家大(II)型水利工程和重要核心水源地, 承担着城市供水、防洪削峰和下游生态保障等多重任务。供水安全、防洪风险控制与生态基流约束之间存在显著的多目标竞争关系, 传统以人工经验或单一物理模型为主的调度方式在预见性、方案优选效率和应急响应能力方面存在不足。基于此, 本文引入具备“正向形势推演—反向策略优化”能力的数字孪生预演系统, 以提升复杂水情下的调度决策水平。

针对水库调度的数字化研究, 国内外学者已开展了大量探索。早期的研究多为水文物理过程的模拟, 这类模型参数多, 计算量大, 很难达到在线预演的实时性要求<sup>[2]</sup>。随着物联网、人工智能等技术的快速发展, 数据驱动为核心的数字孪生的思想被应用到水利中来, 数字孪生需要物理机理模型和实时监测数据的高度耦合, 高保真地还原到三维视觉<sup>[3]</sup>。尽管研究成果丰富,

但仍存在两大瓶颈: 一是“看重视觉, 轻视逻辑”。当前大多数孪生平台更关注三维底座的视觉展示, 缺乏调度决策的逻辑; 二是“重模仿轻搜索”。当前大多数预演模型只能通过正向的模拟出给定方案的运行结果, 很难找到某个既定的目标值对应的最优方案。因此, 团队希望能够借助智能优化算法与代理模型技术, 通过开发一套以库容率为控制目标参数的双核驱动预演方案来解决以上问题。

## 1 多源异构数据采集与时空关联

构建白溪水库数字孪生场景的首要任务是实现全要素的数据数字化映射。本研究采用“空—地—水”一体化的采集手段<sup>[4]</sup>, 重点解决多源异构数据在空间尺度与时间基准上的统一问题。

第一步, 利用无人机倾斜摄影技术对白溪水库流域进行全覆盖测绘, 获取高分辨率 DSM 与 DOM 数据, 结合激光雷达扫描与 BIM 建模技术, 对大坝、溢洪道、取水口及闸门等关键水工建筑物进行 L3 级精细化建模, 确实现水库流域几何形态与物理属性的真实还原<sup>[5]</sup>。

第二步, 时空关联, 通过坐标变换实现地理空间坐标与 BIM 工程坐标的统一, 将水文站、雨量站及闸门开度等现场感知设备采集的动态数据按时序接入模型, 并结合历史径流实测资料进行时标对齐与动态挂

作者简介: 冯志峰(1992-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 计算机人工智能。

接, 构建以空间基底和时间序列为核心的数据体系, 为预演模型“正向模拟”提供可靠的初始条件和基准状态。

## 2 基于神经网络的数据融合逻辑

在多源数据集成中如何将 BIM 构件与 GIS 联系起来, 实现海量监测数据的驱动是本项目拟突破的技术难点之一<sup>[6]</sup>。为了实现 BIM 构件和 GIS 数据进行语义关联, 并做到全要素整体统一, 本文提出一种基于神经网络的数据融合逻辑, 形成语义上的整体语义拓扑网络。

基于“数据融合—智能关联—动态集成”的技术路线, 团队通过 GNN 自动识别出 BIM 模型, 并与 GIS 空间中的地理位号进行智能关联。系统接入 Apache Flink 数据驱动引擎来读取从实时监测流进入系统的业务数据并实时运算, 最后将倾斜摄影和 DEM 高度精准叠合、BIM 模型和地形高精度关联, 在白溪水库流域构建了一个高精度、可交互、虚实映射的三维数字孪生的基础场景, 为预演模型构建了高精度空间基底<sup>[7]</sup>。

## 3 “正一反向”双核预演架构及关键技术研究

### 3.1 双核驱动的总架构设计

项目团队遵循 CMMI4 级标准, 采用基于模型的系统工程 (MBSE) 方法论, 并运用面向服务的架构 (SOA) 与分层设计原则, 来构建一个分层解耦的预演代理模型。系统架构分为输入层、处理层与输出层:

1. 输入层: 集成多源监测数据、降雨径流预报、需水预报等信息。

2. 处理层: 是核心功能层, 首先依靠数字孪生平台来实现数据和模型的驱动与融合, 然后耦合水文学动力模拟引擎和 NSGA-II 智能优化算法, 分别实现水资源系统状态的“正向”推演和调度规则的“反向”寻优。

3. 输出层: 可视化输出演过程数据与优化结果。

通过以上三层架构使得预演模型具有形势研判、正向预演、反向优化于一体的综合功能。

### 3.2 正向模拟: 物理机理驱动的形势研判

预演系统的基础是物理机理驱动的心事研判正向模拟引擎。团队把分布式水文模型、一维、二维和三维水动力模型耦合起来, 构建出动态全流程链路, 并应用到白溪水库正向推演仿真中, 主要分为以下三个步骤:

第一步, 利用改进的产汇流算法, 根据预报降雨数据计算入库流量过程。

第二步, 利用基于水量平衡方程:

$$I(t) - Q(t) = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $I$  为入库流量,  $Q$  为下泄流量,  $V$  为库容, 结合水库水位—库容曲线, 实时推算水库水位的动态变动。

第三步, 系统根据预演水位自动检测汛限水位、弘高水位, 当推演结果超阈值的时候, 预演模型立即在数字孪生场景中发出可视化预警。经过高频循环迭代之后, 正向模拟就可以实时输出白溪水库未来 24 ~ 72 小时的水位变化趋势以及危险清单, 提前给防汛抢险留出决策时间窗口。

### 3.3 反向优化: 基于智能算法的决策寻优

反向引擎是从给定的管理目标出发, 自动求出最优的闸门调度序列。白溪水库在供水、防洪、生态三方竞争的时候尤其重要。团队把多目标遗传算法 (NSGA-II) 当作核心的优化算子。建立一个多目标函数集:

$$F(x) = [\min(f_{risk}), \max(f_{supply}), \min(f_{eco})] \quad (2)$$

式 (2) 中,  $f_{disk}$  代表库区的防洪风险, 以最高库水位与设计水位的差值最小化为目标,  $f_{supply}$  代表水库的供水效益, 以满足下游城市用水缺额最小化为目标,  $f_{eco}$  代表库区上下游区域的生态约束, 确保下泄基流不低于生态红线。

通过对  $F(x)$  结果不断迭代, 可以得到某一种特定情况下所获得的最优解及相应的权重参数, 数字孪生平台根据权重匹配出相应的实施方案, 原先的“方案模拟”变成了现在的“方案优选”。

## 4 白溪水库实证应用分析

本研究以白溪水库 2021 年到 2024 年的实测运行脱敏数据为基础, 构建数字孪生虚拟仿真预演平台, 平台实验环境采用分布式计算机集群构建, 为了检验系统在极端天气条件下决策支持的能力, 模拟强降雨工况, 设置连续 24 小时累计降雨量为 350 mm (特大暴雨等级), 在此基础上进行正向推演和反向寻优的联动分析, 分析结果如下。

### 4.1 正向推演风险预警分析

在维持原有的常态化调度模式, 启动正向模拟引擎进行不间断的水库运行状态推演。经过推演发现, 当系统推演到 T+18 h 时, 预演模型就触发高风险预警信号, 提示库区水位已超出汛限水位 1.5 m, 泄洪闸门过流已经接近饱和和设计状态, 数字孪生可视化界面也显示大坝下游河道冲刷淹没状况。表 1 给出了常规调度方案下不同推演时间步长对应的水位演化与风险等级评估结果。

表1 库区水位演化与风险等级评估结果

预演时间步长	推演水位(m)	风险等级	预期影响描述
T+6 h	165.2	安全	库容充足, 运行正常
T+12 h	168.5	蓝色预警	接近汛限水位, 需加强监测
T+18 h	171.3	红色预警	超过汛限, 下游河道面临漫溢风险
T+24 h	172.5	极高风险	大坝安全系数进入临界区间

常规调度方案在没有策略优化的情况下, 不能很好地应对极端天气带来的极端来水过程, 从而造成库区管理存在明显的安全风险累积趋势。

#### 4.2 反向寻优调度方案生成

根据正向推演时出现的风险问题来开启预演模型中的反向优化引擎。将大坝安全保障和下游淹没风险最小化作为约束条件, 用NSGA-II多目标遗传算法迭代寻优闸门开启序列。算法经过500次迭代优化得到当前约束条件下最优解。从实验对比结果看, 在优化方案中提前4小时进行小流量预泄可以有效削减洪峰叠加的影响, 使水库水位最高点下降0.7 m, 下游河道淹没面积缩小约22%。该结果证明了防洪调度场景下“正向风险识别—反向策略修正”联动机制的有效性。

#### 4.3 多目标约束下的供水与生态调度实验

白溪水库作为区域核心水源地, 在运行调度时既要确保防洪安全, 又要实现城市供水安全保障及下游生态基流维持。为此, 团队进一步构建了连续30天无有效降雨的极端干旱工况, 对不同调度策略下预演模型的综合性能进行了对比分析。在反向寻优过程中, 团队选择将“城市供水缺口最小化”和“生态基流达标约束”两项条件同时引入NSGA-II, 将传统人工经验调度方案和本文提出的双核预演模型生成方案进行了比较, 并得到了表2所示的结果。

表2 传统调度方案与数字孪生优化方案结果对比表

指标名称	传统经验调度方案	本文优化调度方案	性能提升幅值
供水保证率(%)	92.5	98.2	+5.7%
生态基流达标天数(d)	21	29	+38%
方案计算耗时(s)	240(人工+物理模型)	1.2(预演代理模型)	+200%
决策精度(\$R^2\$)	0.88	0.97	+10.2%

由表2可知, 基于智能代理模型的优化方案在计算效率方面存在显著优势, 单次预演方案生成时间缩短至1.2 s。同时双核预演模型生成的方案在显著提升供水保障水平的同时, 有效延长了库区生态基流维持时间, 实现了社会效益与生态效益之间的帕累托最优平衡。

#### 5 结束语

以白溪水库为案例对象, 团队构建了一个基于数字孪生技术的“正一反向”双核预演模型体系, 结合白溪水库仿真实验证明: 该方法在典型的洪灾、旱灾等场景中能降低洪峰水位、增加供水保证率、延长生态基流维持时间等效水深历时曲线时长, 有良好的应用前景, 但在运用过程中仍然存在一定的局限性: 一是当前所建立的预演体系主要是以确定性水位预报为基础进行事前预演, 并没有考虑气象预测误差及对调度的影响; 二是当前的反向优化是以人为经验主观设置好目标权重的形式进行, 调度规则难以实现自适应地更新变化。后续研究可以在引入不确定分析以及自学习优化方法的基础上, 提高模型面对复杂水情的能力, 并且可以将预演框架推广应用到多库联调、流域级协同调度等具体应用中, 最后为智慧水利的实际运行提供通用技术手段支持。

#### 参考文献:

- [1] 李云玲, 姜大川, 赵钟楠, 等. 推进中国式现代化的水安全保障总体态势与战略研究[J]. 中国水利, 2025(23):22-27.
- [2] 朱思鹏, 刘怀远, 覃晖, 等. 基于水动力学模型和代理模型的水库动库容精细化计算[J]. 水电能源科学, 2024, 42(09):176-178, 175.
- [3] 魏振, 杨冰. 基于数字孪生技术的智慧水利流域系统体系构建[C]// 河海大学, 浙江水利水电学院, 河北工程大学, 浙江省水利学会. 2024(第三届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集. 黄河水利委员山东水文水资源局, 2024.
- [4] 李磊, 李家欢, 王旭, 等. 数字孪生流域水流网络建设关键技术研究[J]. 水文, 2023, 43(05):6-11.
- [5] 杨玉柱, 赵冉, 杨楠. 空天地一体化融合数字孪生赋能山东水利安澜[J]. 中国信息化, 2022(11):109-110.
- [6] 周统. 基于水信息学模型的城市原水系统智能调度理论及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [7] 孙依. 环境变化情景下新立城水库流域水文响应及演化分析[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

# 岩土工程勘察中地下水位量测误差对基础设计的影响探讨

张文龙

(宁夏宏源建科检测有限公司, 宁夏 银川 750004)

**摘要** 在岩土工程勘察中, 地下水位量测误差对基础设计起着关键作用, 尤其是在基础承载能力、稳定性与抗震性能的评估环节, 它与土体的湿陷性、抗剪强度以及土壤的变形特性有直接联系, 因此其精准测定对于设计有着关键的影响, 量测的误差可能会导致设计参数有偏差, 进而影响基础的安全性。在实际工程开展时, 误差出现的原因包括量测仪器的精度、测量方式的选择、施工环境的变化等。提高测量技术的精度、采用更科学的测量方式以及加强误差控制, 可有效减少误差对基础设计造成的影响。本文提出了改进地下水位量测误差的方法, 以期对岩土工程勘察提供更准确的基础设计参考。

**关键词** 地下水位; 量测误差; 基础设计; 岩土工程; 测量技术

中图分类号: TU195

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.041

## 0 引言

地下水位对岩土工程基础设计有着关键影响, 这种变化对土壤力学性质及地基承载力有直接影响。随着城市规模持续扩大, 地下水的动态变动愈发复杂, 准确测定地下水位极为关键。在进行实际勘察时, 多种因素常常干扰地下水位的测量, 如测量仪器的精度、环境的变化以及操作的方法等。这些因素会引发量测差错, 进而对基础设计的安全性与稳定性造成影响。如何精准测量地下水位的数值并减少误差对设计产生的消极影响, 是当前岩土工程勘察中的一个重要课题。解决这个问题, 有助于提高基础设计的精度, 对工程的长期稳定与安全意义重大。

## 1 地下水位量测误差的来源分析

地下水位量测误差有很多来源, 还跟勘察环节中的多个因素密切相连, 测量仪器的精度与性能直接关系到地下水位量测的精准度, 在实际操作过程中, 常见的仪器有水位计、传感器以及浮标等。然而, 每种仪器在不同的工作环境下可能会呈现出不同程度的误差。尤其是在高温、低温以及湿度较大等环境条件下, 仪器性能可能会受到影响, 导致量测结果不稳定。仪器使用了多少年、保养得好不好, 都直接关系到它的测量精度。过度磨损、未及时校准的仪器, 易出现较大误差<sup>[1]</sup>。

测量的方式自身也可能引发误差, 手工测量和自

动监测是测量地下水位常用的两种方法。手工测量易受操作人员技术水平的影响, 传感器的选择和设置会对自动检测系统的精度产生影响。在对动态水位进行测量时, 若水位变动较为迅速, 测量工具反应迟缓或无法实时更新数据, 会导致结果产生偏差。选择测量点也是关键因素之一, 地质环境不稳定时, 测量地下水位的点位可能会对结果的准确性产生影响。地下水位一般会受周围土层与地质状况的影响, 若勘察点位选取不当、监测范围不够宽泛, 就无法获取反映真实情况的数据。

除了仪器及方法方面的限制之外, 环境因素显著影响着地下水位的测量工作, 旱季与雨季转换的期间, 地下水位的波动变化较明显, 若勘察人员未能于恰当的时段实施测量, 抑或是没有把水位随季节的变动考虑进去, 皆会引发测量误差。施工期间出现的扰动, 如地基开挖以及地下水排放等情况, 也可能对测量数据造成影响。这些因素一同作用, 会导致地下水位量测出现误差。在实际进行勘察时, 控制这些误差源头, 对提高量测精度意义重大。

## 2 量测误差对基础设计安全性的影响

地下水位量测误差对基础设计安全的影响要引起关注, 基础设计需要依靠地下水位的精确数据, 尤其是在评定地基的承载能力、沉降特性以及抗震性能时,

作者简介: 张文龙 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地基检测、工程勘察。

关键参数之一是地下水位的变动,若地下水位测定出现偏差,这些设计参数可能会产生偏差,最终影响整体设计的可靠性与安全性。计算地基承载力的时候,地下水位会直接影响到土壤的有效应力与抗剪强度,地下水位偏高时,土体里面的孔隙水压力变高了,造成有效应力减小,使土壤的承载能力下降,要是测量误差把地下水位估低了,设计师也许会误以为土壤承载力高,接着设计出承载能力不达标的基础,让结构出现沉降过大甚至失稳的风险加大。

地下水位直接对地基沉降量产生影响,地下水位偏高的地方,土体的膨胀性、湿陷性较强,也会导致基础出现不均匀沉降<sup>[2]</sup>。若测量误差使得无法精准预估地下水位的季节性起伏或长期变动,基础沉降量或许会被估低,导致后期沉降程度过大,影响到结构稳定性以及使用功能。抗震设计同样依靠准确的地下水位数据,当地震来袭之际,地下水位的改变有可能引发土壤的液化状况,尤其在饱和砂土区域,若量测误差高估了地下水位,设计师可能没有全面考虑液化风险,导致抗震设计不完善,使建筑物在地震中的破坏风险升高。地下水位量测的误差对土壤力学特性有影响,对基础的长期稳定、安全产生严重的不良影响,精准测定地下水位是确保基础设计安稳、优化设计方案以及预防潜在隐患的根基。

### 3 提高地下水位量测精度的技术途径

提升地下水位测量精度的关键是改进测量方法与技术措施的融合,降低外部因素对测量结果的干扰,增强测量设备的稳定性和可靠性。从技术角度讲,高精度水位传感器与自动化监测系统的应用,是提高测量精度的重要途径。现代的水位计与压力传感器能实时、连续监测地下水位变化,且具备较高的测量精度。这些设备可借助数据传输系统将监测数据及时传送到数据处理平台,实现无人值班、远程监控,进而减少人工操作造成的误差。借助遥感技术间接测量地下水位,也是提升测量精度的有效方法。利用卫星影像、地面雷达等装置,可以获得较大范围的地下水位变化数据。尤其针对大规模的勘察任务,遥感方式可以有效地补充传统测量方式的不足。分析不同阶段的遥感数据,能对地下水位进行动态监测,发现地下水位的波动趋势,为后续设计提供精准依据。

测量环境可能会对水位数据造成影响,改进测量点的选取与设定同样关键。在地质条件复杂的区域,一个测量点的水位数值可能不能如实反映整个区域的地下水位变动情况。设置多个测量点,并依据地质情

况合理安排监测深度,能提高测量的代表性,减少局部异常造成的误差。为防止季节性变化和环境干扰影响测量结果,布置监测系统时应考虑季节性波动和气候变化的影响,选择稳定的测量环境布置测点<sup>[3]</sup>。准确的测量结果不仅依靠硬件设施,还需要精确的误差校正技术。利用数学模型和统计方法对测量数据进行处理,可以有效消除因仪器特性或外部环境因素产生的部分系统性误差。采用误差分析技术对测量数据开展回归分析,纠正因仪器老化、环境变动或人为因素引起的误差,进一步提高测量的精度。随着技术的发展,基于大数据分析的地下水位测量误差修正方法逐渐得到应用。利用数据挖掘和机器学习技术,可通过历史测量数据自动识别误差源并进行修正。

智能化水位监测系统结合人工智能技术,逐步成为提高地下水位测量精度的发展方向。依靠深度学习和模式识别算法,智能系统可自动找出测量数据里的异常值,并去除误差,保证测量数据质量。智能系统能依据实时变动的环境状况,自动调整测量方法,进而进一步提升测量精度与可靠性,增强地下水位测量精度的技术路径并非仅涉及硬件设备的改进,仍需要借助测量方法的创新、数据处理技术的优化以及新兴技术的融合,通过多种方法的协同运作,能切实提高地下水位量测的精准度,向岩土工程勘察提供更稳固的基础数据支持。

### 4 地下水位量测误差的控制与修正方法

控制并修正地下水位量测误差,是提高勘察精度、保证基础设计安全性的关键一步。有效的控制及修正措施能减轻因测量误差造成的不利后果,还能在测量环节确保数据真实准确。在实际工程中,地下水位量测误差的成因复杂,对这些误差源进行管控至关重要。为了降低测量时出现的系统性误差,需通过严格的仪器校准保证测量设备的准确性,对于长时间运行的设备,由于仪器逐渐老化,其测量的准确性可能会逐渐降低。定期对测量仪器进行检定与校准,能有效降低因设备故障引起的误差。在不同环境条件下进行测量,设备的合理选择至关重要。尤其在高温、低温以及高湿等极端条件下工作时,要选择适应性强、精度高的水位传感器。仪器的安装和使用应严格遵循技术规范,确保设备在稳定状态下进行测量,以此降低人为操作失误造成的偏差。

合理选定测量点及监测深度,测量点的设置应充分考虑地质条件、地下水流动以及区域水文特征等方面。为防止个别测点数据出现偏差,对在不同地质层

以及水位变化明显的区域,应布置多个监测点,进行综合数据分析。选择合适的监测深度,是把控误差的重要环节。对深层地下水位做测量的时候,若选择的深度错误,可能会导致测量数据不能正确反映地下水状态,最终影响设计数据的可靠性。在实际开展勘察工作期间,不仅应提高设备的精度并改进测量方法,还要采用数据修正技术来处理误差<sup>[4]</sup>。通过创建数学模型,可以针对测量数据进行误差的修正,把环境因素和仪器不稳定引起的偏差消除掉,一般的修正方法涵盖回归分析、最小二乘法等,这些方法可以在数据处理环节将偏差调整至最佳状态,对多个测量点数据展开分析,可以明确误差的分布规律,继而借助数学模型修正这些误差,让最终数据愈发准确可靠。

针对地下水位测量呈现的季节性变化,修正方式可动态调整监测周期及频率。鉴于地下水位在不同季节可能有明显起伏,采用不同时段测量数据的加权平均值,能有效消除季节性变化产生的影响,减少单一时间点测量数据的偏差。随着数据量的增加和分析手段的进步,地下水位监测逐步采用基于大数据技术的误差修正方法。利用数据挖掘和人工智能技术,可对历史数据进行深度分析,自动发现数据中的异常值并进行纠正,进一步提高测量精度。通过严格的仪器校准、合理的测量点安排以及先进的数学模型和智能算法对误差进行修正,可有效控制地下水位测量误差。依靠这些技术方法,可保证勘察数据可靠,为设计提供更准确的依据,降低因测量误差造成的工程风险。

## 5 误差控制对基础设计优化的意义

有效控制地下水位测量误差对基础设计优化意义重大。对误差加以控制可提升量测数据精准度,使其更贴合实际的土壤和地下水情形,以此增强结构的安全性与长期的稳固性。地下水位数据精准与否,关乎土体分析、地基承载力评估以及基础设计决策能否顺利进行。若量测误差未能有效把控,可能引发错误的设计参数,进而影响到基础的承重能力、沉降情形以及抗震性能等关键指标。基础设计时算地基承载力,需结合地下水位数据,地下水位偏高的地方,土体有效应力会降低,造成地基承载力降低。若量测误差未能有效管控,或许会对地下水位估计不足,进而对地基承载力做出错误评估,设计所得的基础也许不足以承担建筑物的重量,进而引发基础沉降过大或地基失稳等问题。只有严格把控地下水位测量误差,才能让地基承载力评估更精准,防止设计时出现承载力过低的情况。

地下水位的精准测量对基础沉降分析至关重要,土壤的湿陷性、膨胀性及其变形特性会被地下水位波动直接影响,若量测误差不能如实体现水位变化,会造成土壤变形特性预测出错<sup>[5]</sup>。错误预测会让设计方案的沉降量估得过低,致使地基出现不均匀的沉降,沉降状况会影响建筑功能,还可能引发结构的损毁,对长期使用的安全性有影响,需明确地下水位数据,基础设计可依据实际状况调整方案,保障沉降处在合理范围内。

地下水位数据对地震设计意义重大,受到地震影响时,地下水位的变动会引发土壤液化,尤其于砂土呈饱和状态的地区,会使基础变得不稳定且结构受损,把地下水位量测的误差控制好,可以更精准地察觉潜在的液化风险,以及在设计当中采用相应的防范手段。精准的地下水位数据能给抗震设计带来有力支持,提高房屋结构的抗震能力,把控地下水位量测误差,关乎单一设计参数的精确性。对基础设计整体的优化以及工程的安全保障,有效的误差管控为设计提供了可靠支撑,进而为基础的稳定、沉降管控和抗震性提供保障,降低了工程中的潜在风险,增强了基础设计的可靠性与安全性。

## 6 结束语

精确控制地下水位量测误差对基础设计的优化意义重大。准确的地下水位数值可为土体力学分析、地基承载能力评估、沉降控制及抗震设计等方面提供可靠支撑,从而显著提升基础工程的安全性与稳定性。采用高精度测量仪器、合理规划测量点以及应用误差修正技术,可有效降低测量误差对设计参数的影响,以此增强基础设计的安全性与可靠性。地下水位量测精准度进一步提高,对岩土工程勘察质量的提升有帮助,为工程项目的顺利开展提供坚实的支撑。

## 参考文献:

- [1] 池跃民. 地下水位对灌区渠道管井结合排水措施影响研究 [J]. 水利科技与经济, 2025, 31(12): 71-75.
- [2] 卢余. 岩土工程监测技术在基础设施健康评估中的作用 [J]. 建筑机械, 2025(12): 72-76.
- [3] 裴灵, 刘鸿燕. 岩土工程中水文条件变化对边坡稳定性的影响 [J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(10): 110-112.
- [4] 刘强. 水文地质对岩土工程勘察的影响及应对策略 [J]. 工程建设与设计, 2025(04): 31-33.
- [5] 郭健, 薛文超, 王婷, 等. 二值量测误差 FIR 系统参数迭代辨识 [J]. 控制理论与应用, 2024, 41(07): 1197-1206.

# 倾斜摄影测量与三维激光扫描融合技术在测量高层建筑物中的应用研究

姚瑞明<sup>1</sup>, 梁诗文<sup>2</sup>, 徐新慧<sup>2</sup>, 黎伟<sup>2</sup>, 冯博<sup>2\*</sup>

(1. 湖北楚鹏测绘科技有限责任公司, 湖北 孝感 432100;

2. 湖北省地质局第六地质大队, 湖北 孝感 432100)

**摘要** 本研究以倾斜摄影测量技术与三维激光扫描技术为基础, 分别完成两种建筑物实景三维重建, 通过分析两种模型的精度与纹理结构, 明确其适用场景: 无人机倾斜摄影测量在建筑物顶部数据采集及建模中表现优异, 三维激光扫描技术则更适用于房屋主体的精准数据获取与建模。为实现优势互补, 借助软件对两类数据进行融合, 构建融合点云的三维模型。研究表明, 融合后的三维模型在精度控制与纹理结构呈现方面均得到显著改善, 为城区高层建筑物提供了更优的建模方案。

**关键词** 倾斜摄影测量; 三维激光扫描; 三维点云融合; 融合建模

中图分类号: TU198; P258

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.042

## 0 引言

在高层建筑测量与可视化展示领域, 倾斜摄影测量与三维激光扫描技术是当前应用最广泛的三维重建技术, 但二者在三维建模的特定场景下仍存在技术局限, 制约了其在建筑领域的深度推广。为突破单一技术瓶颈, 推动三维重建技术走向成熟, 实现建筑物精细化点云融合三维建模, 本文结合工程实例开展针对性研究。首先, 采用大疆 M3E 无人机搭载智能摆动拍摄模式, 对辽宁工程技术大学博文楼开展倾斜摄影作业, 采集影像数据与 POS 数据, 基于大势智慧重建大师软件完成空三解算后进行三维建模; 其次, 通过欧思徕 R8 三维激光扫描仪对博文楼进行整体扫描, 利用 OminSLAM Modeler 软件完成点云数据处理与建模; 随后, 对比两种单一技术的建模效果, 明确不同技术的适用场景与优劣特征; 最后, 将激光点云文件与无人机空三点云数据进行融合建模, 生成精细化三维模型并开展精度分析, 最终得出相关研究结论。

## 1 融合建模相关理论方法

### 1.1 三维点云

点云是现实世界中物体表面三维坐标数字化后的一种表达方式, 主要包括激光扫描点云和影像密集匹配点云两类<sup>[1-3]</sup>。其中, 激光扫描点云可以通过机载、

地面、车载、手持等方式获取, 它们均具备回波强度、回波次数等信息, 可以方便地对建筑物、植被、地面等进行准确分类<sup>[4]</sup>。影像密集匹配点云是通过倾斜摄影基于影像空间相对关系形成的具有空间准确位置的同名点点云, 最后将密集点云三角网格化和纹理化生成三维网格模型<sup>[5]</sup>。

### 1.2 点云融合

点云融合是指将来自不同数据源、不同视角、不同时间或不同传感器获取的离散三维点云数据, 通过配准、裁剪等处理技术, 整合为一套完整、一致、高精度的三维点云数据集的过程<sup>[6]</sup>。

## 2 工程实例分析

### 2.1 建筑概况

辽宁工程技术大学博文楼始建于 2010 年, 采用钢筋混凝土框架结构形式, 建筑整体呈左右对称布局, 层数为 9 层, 属于典型的高层建筑。

### 2.2 基于融合建模技术的技术流程

本文利用倾斜摄影测量技术和三维激光扫描技术, 分别对学校综合楼进行三维重建, 通过对两种方法生成的三维模型进行对比分析, 分析了单一的建模方式在建筑建模中的优势与缺陷, 将两种建模方式的优点结合进行点云的融合建模, 具体流程如图 1 所示。

作者简介: 姚瑞明 (1999-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 摄影测量与遥感。

\*通信作者: 冯博 (1987-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 摄影测量与遥感。E-mail: 117695893@qq.com

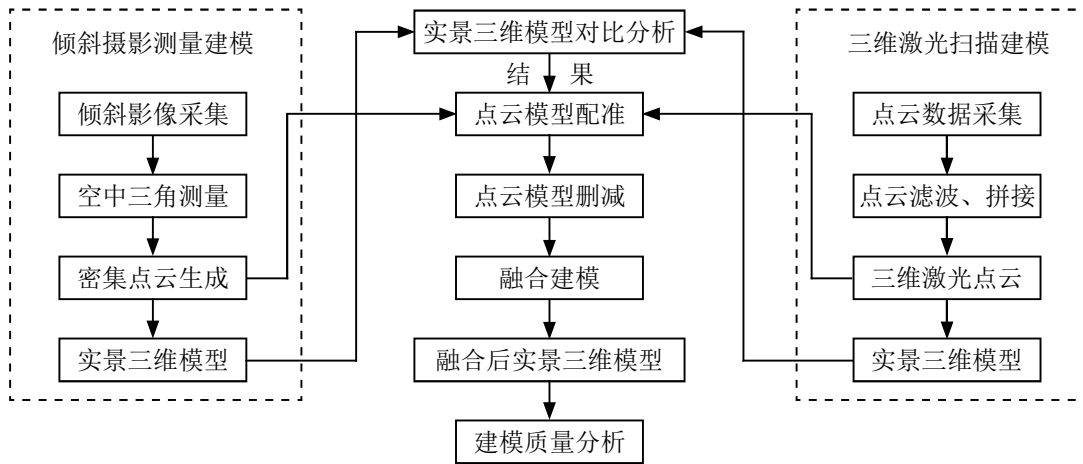


图 1 技术流程

### 2.3 倾斜摄影测量的建筑建模

#### 2.3.1 建筑倾斜影像采集

对博文楼及周边测区进行实地踏勘，确认博文楼为测区最高建筑，无高层遮挡；周边广场区域开阔平整，无障碍物干扰，满足无人机起降作业条件，为后续航摄影工作奠定基础。在博文楼四角布设 4 个像控点，采用地面 L 型油漆标记，以标记外拐角处作为核心控制点<sup>[7]</sup>。使用华测 RTK 对所有像控点进行坐标采集，获取高精度三维坐标数据，为后续三维建模的坐标系转换与精度校正提供基础数据支撑。选用大疆 M3E 无人机作为航摄平台，结合测区地形特征设计最优飞行航线，设置航向重叠度 85%、旁向重叠度 80%，确保影像拼接与三维重建的连续性和精度。本次作业单架次完成全测区影像采集，所获航摄影像画质清晰，无阴影遮挡、无明显畸变，满足后续三维建模的数据质量要求。

#### 2.3.2 倾斜影像建模处理

使用大势智慧的重建大师软件进行实景三维模型生产，先对大疆 M3E 获取的航片数据进行一对一整理，确保每张航片数据可以使用，随后将整理后的影像数据导入重建大师中。读取照片位置信息并设置镜头参数，然后设置空三参数后开展第一次空中三角测量。导入图像控制点文件，在每个像控点的 3~5 张清晰且多角度的影像上完成控制点刺点。基于刺点结果进行第二次空三优化，保障建模基础精度。最后通过瓦片分化、范围与几何约束等操作，生成测区三维模型<sup>[8]</sup>。

### 2.4 基于三维激光扫描的建筑建模

#### 2.4.1 建筑三维点云数据获取

前期踏勘与控制点布设在倾斜影像数据时已经完成，使用欧思徕 R8 进行现场扫描，展开背负架并安装完成，按既定规划的路线进行数据采集。首先开机新

建工程，输入工程名称。再进行扫描设置，开启 RTK 定位，模式为户外模式，其他设置选择默认。进行测站相关参数设置，建站完成后，开始后视检查，后视查看误差无误后，开始扫描。

#### 2.4.2 三维点云建模处理

三维点云建模使用 OminSLAM Modeler 软件进行，数据导入与预处理阶段，首先通过导入功能加载 R8 设备采集的 SLAM 点云数据，随后开展数据检查，查看点云完整性、密度分布及是否存在数据缺失或异常值；而后进行预处理操作，采用统计滤波去除离群点，通过体素格网下采样实现数据精简并保留模型特征，同时应用 RTK 数据完成坐标转换与地理配准，赋予点云真实世界坐标；三维模型生成核心环节中，首先采用泊松重建算法将点云转换为三角网格，并自动填充数据空洞以生成连续表面。

### 2.5 建筑多源点云融合建模

#### 2.5.1 三维模型对比分析结果

本次研究分别采用三维激光扫描与倾斜摄影测量技术构建综合楼三维模型，两种技术的建模效果呈现显著差异。

由于无人机航摄的视角优势，倾斜摄影能够有效覆盖建筑物顶部区域，且在高程一致、无遮挡的场景下建模表现优异，因此综合楼顶部建模结构完整、纹理清晰，充分还原了顶部真实形态。但该技术存在明显的数据采集局限性：一方面，航摄过程中存在部分摄影盲区；另一方面，由于综合楼高度较高，导致建筑物上部与下部的影像分辨率差值过大，最终造成模型下部区域出现结构变形、数据缺失及纹理失真等问题，严重影响了整体建模效果<sup>[9-11]</sup>。

在三维激光点云模型方面，建模结果显示建筑物

顶部点云数据存在明显稀疏问题,且出现大面积数据丢失现象,直接影响了综合楼整体模型的完整性与精度。经分析,该问题的核心成因在于数据采集阶段:三维激光扫描仪的架设高度与综合楼顶部存在较大高程差,加之激光束无法穿透建筑物墙面,导致扫描光线难以覆盖顶部区域,最终无法实现顶部数据的全面采集,进而造成模型顶部出现大片数据缺失。倾斜摄影测量模型则呈现出“顶部优、底部弱”的特点<sup>[12-14]</sup>。

### 2.5.2 融合建模

通过二者的对比结果,本次融合建模以倾斜摄影测量生成的密集点云作为主体,添加三维激光扫描仪处理后的稀疏点云进行。融合过程为:使用重建大师软件中无人机倾斜摄影空三工程,在工程中导入欧思徕R8采集处理后的三维点云文件,点云文件与倾斜摄影点云一起空三计算,最后对融合的点云三维重建,最终形成辽宁工程技术大学博文楼的融合点云建模的实景三维模型。通过融合建模技术生产的融合建模模型不仅良好地再现了建筑,而且真实地保存了建筑物的尺寸和建筑细节。

### 2.5.3 建模质量分析

本文从纹理结构与模型精度两大维度开展三维模型质量评价工作<sup>[15]</sup>。多源点云融合建模依托前期倾斜摄影测量与三维激光扫描获取的建模数据,点云配准精度表现良好,建模效果可视化效果突出。但模型几何精度尚未明确验证。为此,选取综合楼台阶宽度、柱间距离及楼体高度3项关键指标作为真值:楼体高度通过全站仪测量两点坐标后,依据Z值差值计算得出;台阶宽度与柱间距离采用皮尺实地测量获取。随后在多源点云融合模型中量测获取对应指标的距离与高度数据,结合实地测量真值,构建实地测量值与融合建模获取值的对比关系(见表1)。

表1 实地测量值与融合建模获取值

计算位置	实地测量值	融合建模获取值	倾斜摄影模型获取值	三维激光扫描建模获取值
台阶宽度	18.7 000	18.7 221	18.8 454	18.7 554
柱间宽度	10.1 000	9.9 745	9.9 488	10.1 378
楼体高度	37.7 455	37.7 783	37.9 336	37.5 864

## 3 结束语

本文利用倾斜摄影测量技术和三维激光扫描技术,分别对学校综合楼进行三维重建,通过对三维模型的分析,总结了单一的建模方式在建筑建模中的优势与

缺陷。结合两种建模技术优势的融合方案,运用点云融合,将倾斜摄影测量点云模型与三维激光扫描点云模型配准,继而完成精细化的建筑三维模型。通过多源点云融合建模,建筑物的三维模型质量取得了极大的提升。在模型精度上,建筑融合模型位置和几何精度均优于倾斜摄影测量模型和三维激光扫描模型,模型精度是可靠的。在纹理结构上,建筑融合建模模型结构完整,细节无模糊、失真情况,进而得知点云融合建模具有一定的可行性和适用性。

## 参考文献:

- [1] 梅瑞珠.基于多源数据融合的城市三维模型构建研究[J].智能城市,2025(11):109-112.
- [2] 姜皓然,许章平,相涛.多源数据融合的城市三维实景建模[J].测绘通报,2025(S1):124-127,173.
- [3] 张鹏飞,陈举平,朱焕廉.基于多源数据融合的实景三维建模研究[J].城市勘测,2025(03):173-176.
- [4] 陆士好,符甄,孟映旭.基于多源数据的精细化实景三维模型构建[J].经纬天地,2025(03):65-69.
- [5] 徐郡彬,宋建平,黄小林,等.利用激光与影像融合优化区域古建筑模型的方法[J].科学技术与工程,2025,25(01):37-43.
- [6] 曾录录,张丽.融合倾斜影像和激光点云的宿迁学院建筑物数字化保存[J].科技创新与应用,2022,12(30):37-40.
- [7] 马力,王德盛,张弛,等.倾斜摄影与激光点云融合建模在城中村精细化测绘的探索应用[J].测绘通报,2024(S2):156-159.
- [8] 何跃,张少斐.基于点云融合算法的无人机三维建模测量研究[J].微型电脑应用,2024,40(06):172-175.
- [9] 吴献文,张鹏,曾琳.基于消费级无人机倾斜影像的三维测图技术探讨[J].测绘通报,2019(07):92-95.
- [10] 张宇晖.倾斜摄影测量联合激光扫描仪在城市实景三维建模中的应用研究[J].仪器仪表用户,2025,32(08):62-64.
- [11] 朱旺煌,刘荣,龚循强,等.基于倾斜摄影测量点云的建筑物单体提取[J].科学技术与工程,2024,24(30):12843-12852.
- [12] 展鹏.三维激光扫描技术在建筑立面测绘中的应用研究[D].赣州:江西理工大学,2019.
- [13] 王越,何伟,李华,等.融合空-地LiDAR和倾斜摄影的高层建筑物三维建模[J].地理空间信息,2023,21(06):49-52.
- [14] 杨红军,郭威,孙进冬,等.无人机倾斜摄影辅助三维激光扫描技术在厂房改造中的应用研究[J].城市勘测,2022(01):122-126.
- [15] 刘宝华,王智,宋云记.三维激光点云和无人机倾斜模型的融合应用[J].测绘通报,2021(06):159-165.