

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 9 月 第 27 期 (总第 652 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 9 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录Contents

科技博览

- 001 基于人工智能的电力信息系统异常数据检测研究
..... 史上乐
- 004 环氧树脂功能复合材料在新能源电力领域中的应用
..... 文 娅, 凌秋霞, 魏 瑗
- 007 基于建筑工程技术的绿色建筑设计与节能策略研究
..... 赵丁册
- 010 高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制研究
..... 郑建勋, 马 芳
- 013 高速公路改扩建新旧路基拼接施工关键技术及沉降控制研究
..... 王 路
- 016 基于探地雷达与超声波耦合技术的市政道路基层病害无损检测方法研究
..... 朱 军

智能科技

- 019 基于需求响应的配电网峰谷负荷转移方法分析
..... 罗 锋
- 022 水电站电气二次系统智能诊断与维护策略研究
..... 伏文涛
- 025 智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用
..... 吴俊熙
- 028 基于大数据分析的电梯运行风险预警与智能监管系统研究
..... 金大明
- 031 人工智能接地系统杂散电流治理智能化应用优化方案研究
..... 汤佳辉, 严晓杰
- 034 基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估与运维优化研究
..... 朱 波, 夏茂钧, 戴 星

应用技术

- 037 建筑工程质量检测中钢筋检测技术分析
..... 张 永

目录Contents

040	排涝泵站深基坑止水帷幕施工技术应用	周 彭, 欧阳飘
043	高层建筑深基坑施工技术风险防控与优化	卢明才
046	路基边坡防护施工技术与稳定性提升路径	谢昌志
049	建筑工程施工钢筋混凝土墙外保温施工技术研究	梁正红
052	高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控关键技术	邓中淋
055	预制箱梁架设精准施工工艺优化策略分析	杨材明
058	已成型大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工技术	李瑞祥, 周克伟

科创产业

061	能源企业安全环保与数字化建设技术分析	平 涛
064	分布式光伏项目全生命周期建设管理研究	叶华林
067	分布式光伏发展对电力营销的影响及应对措施	郑泽文, 陶前程
070	激光增材制造轻合金构件缺陷的超声相控阵定量评价	田康康, 赵 煜, 张家祥
073	液力耦合器在生产水泵系统中的节能应用与优化研究	程 崛
076	厂用电失电下火电厂保安段柴油发电机负荷分级投入应用研究	赵正虎
079	大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的谐波抑制与节能优化研究	申艳聪

技术管理

082	软弱围岩隧道施工安全风险管理分析	庞清华
085	河道整治施工中泥沙与沉积物处理技术探讨	司晓磊, 杨 婧
088	复杂工况下模板支撑体系施工技术及安全管理	章晶如
091	水利水电施工项目管理中的安全风险评估与防控	邹 虎, 吴茂竹
094	智慧城市建设中水利工程信息化管控技术应用探析	王 祥
097	高精度定位技术在海洋工程施工监测中的运用分析	刘 尧, 高 涵
100	机电安装项目施工协调管理分析——以某厂房光学研制中心机电安装项目为例	钱 泉

科学论坛

103	电气自动化控制技术应用研究	周焕挺
106	输变电工程线路施工技术分析	蒋 斌
109	矿山机电设备节能降耗控制技术研究	石连喜, 张圣展
112	节能环保约束下机械产品设计优化探究	韩玉岭, 张鹏飞, 宋晨华, 崔 健, 郑 鑫
115	基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备研发	周国山
118	水力发电机组调速系统性能优化策略分析	胡开成
121	山地分布式光伏支架设计研究及优化应用	王建兵
124	数字化背景下配电网智能化改造思路探析	李瀛澜, 于寒霄

基于人工智能的电力信息系统 异常数据检测研究

史上乐

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要 本文以人工智能技术为支撑, 面向电力信息系统异常数据检测领域展开系统性研究, 立足于电力信息系统异常数据检测场景下的人工智能技术应用体系, 分别梳理不同关键技术的落地应用要点, 包括基于机器学习的电力信息系统基础运行类异常数据检测、基于深度学习的电力信息系统高维时序与设备监测类异常数据检测、基于混合智能检测技术的电力系统信息多源交互场景下复合型异常数据检测等, 在此基础上研判人工智能技术在该领域的未来发展趋势, 以期为后续相关研究提供参考。

关键词 电力信息系统; 异常数据检测; 人工智能技术; 机器学习; 深度学习

中图分类号: TM73; TP393.08; TP18 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.001

0 引言

电力信息系统主要负责电流、电压和功率等关键数据的采集、存储以及传输, 其运行效果会对电网调度、设备运维以及能源优化等产生直接影响。如果电力信息系统中存在异常数据, 将会使调度决策出现失误或者是设备故障漏判, 严重时甚至会引起一系列连锁事故, 对电网安全性造成不良影响。针对异常数据, 传统检测方法主要以人工阈值设定和规则匹配等方式实现, 在自适应能力、检测精度和复杂数据处理中都不存在弊端, 无法和现代电力信息系统实际运维需求相适配。因此, 引入先进的人工智能技术, 为电力信息系统的异常数据检测提供支持具有重要意义。

1 电力信息系统异常数据检测中的人工智能技术体系

1.1 机器学习检测技术

机器学习检测技术的主要算法有三种: 一是支持向量机, 该算法能够在高维特征空间中找到最优分类超平面, 以此来精准划分正常和异常数据, 具有较强抗干扰能力和优异的泛化性能; 二是孤立森林。通过多棵孤立树的合理构建, 随机进行特征选择以及阈值分割, 让偏离正常范围的异常数据被快速孤立出来, 这种算法不需要正态分布假设, 具有更高效率, 和电力系统的实时检测需求相适配; 三是 K 近邻算法, 它是将“物以类聚”作为基本思想, 对被检测数据和样

本集中的数据距离进行计算, 根据近邻样本类别来判断数据是否存在异常, 这种算法对数据分布没有严格要求, 能够对电力数据动态变化做出快速适应, 在短期电力信息系统异常数据检测中非常适用^[1]。

1.2 深度学习检测技术

深度学习检测技术的主要支持技术有三种: 一是长短期记忆网络, 该技术主要利用输入门、遗忘门以及输出门之间的协同作用, 对电力时序数据长短期依赖关系进行记忆, 以此来捕捉电流和电压等时序数据, 明确其趋势异常, 它的时序建模能力和抗噪声干扰能力都比较强, 能有效适配电力信息系统的连续运行模式; 二是自编码器, 该技术主要利用编码器来压缩输入数据, 使其转变成低维特征向量, 再借助解码器对原始数据加以重构, 并根据重构误差来判断数据有无异常, 该技术不需要标注数据就能够实现正常模式的自主学习, 在电力异常数据未标注的检测场景下适用; 三是卷积神经网络, 利用卷积层和池化层对电力数据全局和局部特征进行提取, 以此来精准识别异常特征, 它有着特征提取能力强和高维度数据处理等优势, 在电力设备和多元传感等异常数据监测中都非常适用。

1.3 混合智能检测技术

混合智能检测技术是将机器学习和深度学习优势混合在一起形成的复合型技术体系, 借助多种技术的协同作用, 能够使单一技术局限得到有效弥补, 进一

作者简介: 史上乐 (1994-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 信息技术及数据管理。

步提高异常数据检测精度及其适应性。它的主要优点是能够使检测效率和精度得到全面兼顾,有着更强的自适应能力,可以有效适配电力信息系统不同场景与类型下的数据检测需求^[2]。

2 电力信息系统异常数据检测中的人工智能技术应用要点

2.1 基于机器学习技术的电力信息系统基础运行异常数据检测

在电力信息系统中,基础类运行异常数据有着较低维度,样本分布也比较清晰,与机器学习算法最典型的轻量化检测逻辑相适配^[3]。处理时的主要流程有数据预处理、模型训练、异常识别和结果检验等,基本适配情况如表1所示。

表1 三种机器学习算法在电力信息系统异常数据检测中的基本适配情况

序号	算法类型	异常数据检测类型
1	支持向量机算法	小样本隐蔽运行异常数据检测
2	孤立森林算法	海量实时运行异常数据检测
3	K近邻算法	短期时序运行异常数据检测

支持向量机主要能检测小样本隐藏类异常数据,如设备故障、初级产生的微小电压偏差或者隐性功率波动等。它的主要分析步骤有四个:

1. 剔除原始运行数据中的冗余数据,插值补充缺失数据,滤除其中的高斯噪声,采取以下归一化处理将量纲差异消除,将数据映射到[0.1]区间。

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中, x_{norm} 代表归一化处理后映射到[0.1]区间内的标准化数据; x 为电力信息系统的原始运行数据; $x_{\min}$ 为原始运行数据中的最小值; $x_{\max}$ 为原始运行数据中的最大值。通过求解这个标准化数据,就能够将量纲差异有效消除。

2. 将电流波动幅度、电压偏差数据、有功功率波动等选作核心特征,完成低维度特征向量建立。

3. 将径向基函数选作核函数,采取5折交叉法对惩罚系数以及核函数参数进行校验优化,让分类误差达到最小,以下是核函数公式:

$$K(x_i, y_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - y_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式(2)中, $K(x_i, y_j)$ 为核函数; K 是惩罚系数; (x_i, y_j) 是不同样本特征向量; $\|x_i - y_j\|$ 是向量的欧式距离; σ 是核函数参数。

4. 在模型中输入检测数据,由模型将分类结果输出,如果判定为异常数据,则需要根据电网实际运行规程对具体异常类型加以验证。

孤立森林主要用来检测海量实时异常数据,如传输链路短时干扰导致的随机异常、电网调度端瞬时采集的数据异常等,它的主要检测步骤有四个:

第一,从每个批次实时数据中随机抽出200个~500个作为样本,以此来合理减轻计算负担。

第二,设置随机决策树100棵~200棵,以此来对数据样本实施递归分割处理。

第三,通过以下公式对样本的孤立分数进行计算,分数越高代表数据有着越大的异常概率,并将基础阈值设为0.7,如果超出这个阈值,就直接判定成异常数据。

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E[h(x)]}{C(n)}} \quad (3)$$

式(3)中, $s(x, n)$ 代表样本的孤立分数; $E[h(x)]$ 代表样本路径平均长度; $C(n)$ 代表 n 个样本路径的标准长度。

第四,根据历史实时异常数据,对阈值进行微调处理,以此来降低误报率。

K近邻可以检测短期时序异常数据,比如短时间内的功率间歇性波动或者电流连续超出额定范围等情况,处理时先合理确定最优K值,一般在5~15之间。再对监测数据和样本数据之间的欧式距离进行计算,根据计算机筛选出K个近邻样本,如果异常样本的占比在50%以上,则可以判定为异常数据,并进一步通过KD树来提高计算效率。

2.2 基于深度学习技术的电力信息系统高维时序和设备监测异常数据检测

现代电力信息系统高维复杂类异常数据主要包括持续连续运行异常和设备监测异常这两种。前者属于非线性数据,后者有着多特征耦合以及高维特点^[4]。

具体检测时,长短期记忆网络可以对长时序连续运行异常数据进行检测。先将1h确定为时间窗口,对时序样本进行划分,通过以下Z-score标准化公式将量纲消除:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

式(4)中, z 代表标准化处理后的时序数据; x 代表单一时序数据; μ 代表时序数据平均值; σ 代表时序数据标准差。然后搭建长短期记忆网络模型,使输入层与时间窗口长度对应,隐藏层按1~2层设置,每层神经元数量设置为32个~64个,采用三门结构来记忆时序的依赖关系。之后将均方差用作损失函数,通过Adam优化其对模型进行迭代训练,基本损失函数公式如下:

$$L_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

式(5)中, L_{MSE} 表示损失函数值; n 表示样本总量; y_i 表示原始时序数据; $\hat{y}_i$ 表示模型重构数据。最后将计算出的重构误差和既定动态阈值进行对比, 如发现误差超标, 则可以判定为时序异常数据。

自编码器主要用来对无标注设备的监测异常数据进行检测, 先将高维数据压缩成低维特征, 通过解码器对原始数据进行重构处理, 使其和正常数据的误差小到可以忽略不计, 如果发现重构数据出现激增情况, 激增幅度超过正常误差的 3 倍, 则可以将对应数据判定为异常数据。

通过卷积神经网络可以对多元设备监测异常数据进行检测, 先利用卷积层对局部异常特征进行提取, 通过池化层进行降维处理, 再利用全连接层进行特征整合, 最后将异常概率输出。如果发现输出的异常概率在 0.8 以上, 就可以将相应数据判定为异常数据, 从而实现各类异常数据源头的精准定位。

2.3 基于混合智能检测技术的电力信息系统多源交互和复合型异常数据检测

针对复合型多元交互异常数据, 单一的人工智能算法往往不能让检测效率和精度得到全面兼顾。因此,

表 2 电力信息系统异常数据检测中的人工智能技术基本发展方向汇总

序号	发展方向	适配异常检测	优化要点
1	轻量化边缘智能监测	终端实时采集异常数据、短时传输异常数据等	算法轻量化、模型压缩, 与边缘终端相适配
2	小样本自适应学习	新型未知异常数据、稀有隐性异常数据等	优化迁移学习模型, 降低其对标注样本的依赖性
3	多模态数据协同检测	多源交互复合型异常数据	多源数据特征融合, 进一步提高关联分析能力
4	实时在线迭代优化	突发异常数据、长时序波动异常数据等	动态化模型更新, 使其和系统数据的动态变化相适配

4 结束语

将人工智能技术合理应用到电力信息系统异常数据检测过程中, 能够及时、准确地发现异常情况, 明确异常类型, 为后续数据校准和调节等创造有利条件。因此, 电力企业及相关从业者一定要重视人工智能技术的合理应用, 根据实际情况和检测需求等, 合理引入人工智能算法, 通过机器学习和深度学习算法有机结合的方式, 对信息系统异常数据进行检测, 以此来提高检测效率和精度, 满足电力信息系统的实际运维需求, 促进其智能化发展。

在具体检测过程中, 电力单位需要将混合智能技术作为依托, 通过两种或多种智能技术结合的方式进行协同检测^[5]。将快速初筛和精准复核作为核心检测逻辑, 以此来弥补单一智能检测技术的应用短板。

其中最主流的混合智能检测技术是随机森林和长短期记忆网络协同检测。先通过孤立森林算法快速筛选海量的多元交互数据, 将疑似异常数据子集筛选出来, 这样就能够大幅度降低后续检测中的数据量, 提高精准检测效率。之后再将疑似异常的数据子集输入长短期记忆网络模型中, 利用该模型的时序建模能力, 对数据之间的依赖关系进行深度挖掘, 从而使真实复合型异常以及噪声干扰等情况得到精准区分。最终将误判数据剔除, 实现复合型异常情况的精准定位。

3 电力信息系统异常数据检测中的人工智能技术主要发展趋势

在当今电力系统的分布式、数字化和智能化转型过程中, 电力信息系统的数据体量越来越大, 涉及的异常数据类型也更加丰富且复杂。在该背景下, 人工智能检测技术应该朝着更加轻量化、自适应化、协同化和在线迭代化的方向发展, 各发展方向及其适配的异常数据检测类型如表 2 所示。

参考文献:

- [1] 李天慧, 谢云澄, 车荣花, 等. 基于 DRSN-BiLSTM 的电力信息网络入侵检测模型 [J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(09): 30-37.
- [2] 孙泽锋. AI 在电力信息化系统网络安全防护中的应用研究 [J]. 中国高科技, 2025(12): 104-105, 108.
- [3] 余梦. 人工智能技术在电力营销信息系统中的创新应用研究 [J]. 模型世界, 2025(10): 113-115.
- [4] 杨兆威, 孙玉龙. 人工智能技术在电力营销信息系统中的应用 [J]. 消费电子, 2025(13): 158-160.
- [5] 高瑾. 人工智能技术在电力营销信息系统中的创新应用 [J]. 高科技与产业化, 2024, 30(12): 82-84.

环氧树脂功能复合材料 在新能源电力领域中的应用

文 娅, 凌秋霞*, 魏 瑗

(四川工商学院, 四川 成都 611134)

摘 要 环氧树脂功能复合材料凭借优异的电绝缘性、导热性、力学性能及环境适应性, 被广泛应用于新能源电力中。本文阐释了该类材料的定义, 以及其在风电、光伏、储能等场景中的应用优势, 重点分析了三类典型复合材料的具体应用途径, 如绝缘型复合材料通过纳米改性等策略, 切实提升定子绕组、逆变器隔板及电池模组的绝缘可靠性与耐候性; 导热型复合材料借助氮化硼、碳纳米管等填料构建高效热传导路径, 有效解决了传统树脂散热瓶颈; 可降解型复合材料基于动态共价键或生物基原料设计, 为电力设备的绿色回收与低碳制造提供了可行方案, 旨在为提升电力设备的安全性与环境友好性提供技术参考。

关键词 环氧树脂材料; 新能源电力; 绝缘材料

基金项目: 四川工商学院校级科研项目“面向高压电力应用的环氧树脂材料绿色转型与仿真研究”(项目编号: XJ2026YB012)。

中图分类号: TB33; TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.002

0 引言

在全球能源体系加速向低碳清洁方向转变的趋势下, 光伏、风电以及电化学储能等新型电力技术迎来了高速增长的局面, 而这也对设备中的高性能绝缘材料与其他功能材料提出了更严格的要求。环氧树脂电绝缘性能好、力学强度高、工艺灵活, 已成为新能源电力设备关键部件的首选基体材料。另外, 通过功能填料改性及分子结构设计, 环氧树脂功能复合材料在兼顾绝缘与导热、提升环境适应性等方面也表现良好。本文探究环氧树脂类功能复合材料在新能源电力行业中的实际应用情形以及技术发展走向, 旨在为相关研究提供参考。

1 环氧树脂功能复合材料的定义

环氧树脂功能复合材料是一种以环氧树脂作为连续相基体, 与纤维、颗粒这类增强相, 以及各种功能性填料复合在一起而形成的高性能多相材料。环氧树脂基体在固化后, 会形成三维交联网络结构, 这可以使材料具备良好的力学性能、尺寸稳定性以及耐腐蚀性。如果在其中再加入一些具有特殊光、电、热或磁性能的填料, 即可使其在保留环氧树脂本身优点的同时, 让复合材料拥有导电、导热、绝缘或者特定的介

电性能^[1]。此类材料在新能源电力领域的应用较多, 如高导热绝缘封装材料、非线性电导调控材料, 以及结构-功能一体化的复合材料等。

2 环氧树脂功能复合材料在新能源电力中的应用优势

环氧树脂功能复合材料在新能源电力领域中的应用具有明显优势, 并主要体现在以下五个方面:

一是电绝缘性能好, 且介电特性可灵活调整。环氧树脂固化后会形成三维交联网络, 电阻率极高, 击穿场强大, 绝缘效果极佳。如果在其中加入一些功能性纳米填料, 还可引入深能级陷阱, 抑制电荷迁移和积聚。如此一来, 即便是在高温或强电场条件下, 材料的绝缘可靠性也能得到明显提升。

二是材料可以同时实现高导热和电气绝缘。现如今, 新能源电力设备都在向功率密度高、体积小的方向发展, 并对散热有着较为严格的要求。环氧复合材料通过构建三维导热网络, 或在分子层面做有序设计, 可在保证高绝缘强度的同时, 极大程度地提升导热性能, 有效缓解了因为热电耦合应力引起的沿面放电或局部过热问题。

三是优良的力学性能与结构适应性。经过纤维增

作者简介: 文娅(1996-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气设备、绝缘材料。

***通信作者:** 凌秋霞(1996-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 交通规划、绿色节能。E-mail: 1547616139@qq.com

强或纳米增韧改性后,环氧树脂功能复合材料强度高、模量大,抗冲击韧性好,能够有效承载电力设备在安装与运行过程中承受的机械负荷与电致应力,适用于绝缘拉杆、支撑件等关键受力部件。

四是耐候性和环境适应能力强。脂环族环氧这类特种树脂体系,在电晕老化、湿热环境、高低温循环等复杂工况下,具有明显的抗老化优势。其硬度、憎水性、界面黏结性,均明显优于传统硅橡胶材料。因此,在沿海、高寒或是强风沙等苛刻环境中,环氧树脂功能复合材料也能确保电力装备的长期稳定运行。

五是工艺适应性强。环氧树脂体系黏度可控、固化收缩率低,可采用浇注、浸渍、缠绕及模压等多种成型工艺,能够与纤维增强相、金属嵌件进行有效的一体化集成制造,从而满足新能源电力设备对复杂绝缘结构与封装形态的多样化需求。

3 环氧树脂功能复合材料在新能源电力中的具体应用

3.1 环氧树脂绝缘复合材料的应用

环氧树脂绝缘复合材料这类功能性材料,通常以环氧树脂为主体成分,并借助无机填料掺杂、纤维增强体引入或化学改性等多种手段来制备。从发展历程上看,人工合成高分子材料在电气绝缘领域的应用,可追溯至二十世纪初的酚醛树脂的研发与使用,这一阶段标志着该类材料进入了工程应用的新阶段。

现如今,环氧树脂功能复合材料被广泛应用于各类电力系统中。无论是低压、中压等级的配电网络,还是高压、特高压交流与直流输电工程,这类材料均已成为常见选择。在具体实践中,采用环氧复合材料进行浇注成型,可有效提升电气设备的介电性、耐化学腐蚀性、抗热老化能力以及机械强度等^[2]。这一方面可以极大程度地延长电力装备的实际使用年限,另一方面也能确保系统更安全、更稳定地运行。环氧树脂复合材料凭借其自身良好的综合性能,已被我国的诸多核电站、输电网及发电机组用于关键的绝缘部件。例如:换流站及变电站中的复合横担、穿墙套管、干式变压器以及多种绝缘子等关键部位,均大量应用了此类材料。可以说,环氧树脂绝缘复合材料在电力设备绝缘体系中发挥着重要作用。具体而言,主要表现在以下几个方面:

1. 在大型风电电机中,将纳米氧化铝掺入树脂基体以提升其绝缘等级,已经成为定子绕组防护体系的主流技术方案。相关测试数据显示,相较于传统材料,该材料的介质损耗可降低 40% 左右,击穿场强也可达

到 35 千伏/毫米。为适应海上风电高盐高湿的特殊运行环境,环氧树脂绝缘复合材料所开发的超疏水环氧绝缘涂层表现出良好的性能。其表面水接触角可达 152°,疏水性极强。即使经过长达 5 000 小时的盐雾老化试验,涂层的电气性能衰减仍低于 5%,切实降低了恶劣气候条件下绝缘材料的老化速率,对延长设备服役寿命具有积极作用。

2. 针对水电机组定子线棒,可施加一种由环氧基质构成的抗盐蚀屏蔽层;该屏障凭借紧密的微观结构能够有效截留水汽、氯化物及颗粒物,阻断其对防晕结构及绝缘主体的劣化路径,从而有效延缓设备的全生命周期老化。

3. 在光伏发电系统中,其内部逆变器多采用玻璃纤维补强的环氧基板作为绝缘间隔。此种介质在高湿工况下表现出极低的环境敏感性,能够锁定表面电阻参数不漂移,为设备电气绝缘的可靠性提供了重要保障。

4. 储能系统中的锂离子电池模组,也广泛应用环氧树脂绝缘材料。此类组件是将阻燃与绝缘功能整合于一体,如此可以维持较高体积的电阻率数值,并在电池热失控时,延迟火灾的蔓延速度,保障系统安全。

5. 在提升环氧树脂绝缘性能方面,填料的尺度与类型是较为关键的因素。杨国清等的研究显示,加入 5% 的纳米级 Al₂O₃ 即可有效改善材料的击穿性能;使用 20% 微米级 Al₂O₃ 时,则会使击穿强度降低,但导热率却提升明显,增幅甚至可达 65%。马万里等制备的氮化硼、环氧树脂材料也证实,纳米填料的引入可有效提高复合体系的绝缘特性。

综合来看,应用于电气设备的绝缘材料,除需具备出色的电气绝缘特性外,还应具有对热冲击的热稳定性、抵御化学侵蚀的惰性以及抵抗物理形变的刚性结构。实际上,电力设备能否长期保持高效稳定运行,通常是依赖这些性能间的协同配合。

3.2 环氧树脂导热复合材料的应用

现阶段,随着电力装备不断向紧凑化、小型化的方向发展,设备输出功率也在持续提升,单位体积内发热量明显增加,故而对系统中热源部件的散热能力提出了更高的要求。在此情况下,环氧树脂复合材料作为与其紧密接触的材料,需要同时满足更为严格的热稳定性与导热能力要求^[3]。目前,纳米技术已被广泛采用,研究人员制备出多种纳米复合填料,切实改善了环氧树脂的导热特性。

环氧树脂复合材料的导热性能,主要取决于填料的导热系数及其添加比例,并与填料的尺寸、种类、几何形状等因素紧密相关。通常而言,在填料种类相

同的情况下,使用较大尺寸的填料可在较低填充量下构建出较为高效的声子传输通道,如此即可在有效节约用量的同时,确保其具备较好的导热效果。另外,填料的外形也很关键。例如:球形填料在体系中易均匀分散和排列;并且由于片状填料的比表面积较大,故而更易互相搭接并形成有效的热传导路径;而纤维状填料则可有效降低复合材料内部的界面热阻。

为增强填料与环氧树脂基体的相容性、减少团聚现象,对填料(尤其是纳米粒子)进行表面改性已经成为提升复合材料综合性能的重要途径之一^[4]。多项研究通过不同填料的引入与改性,切实改善了环氧树脂的导热与介电特性。在提升环氧树脂导热性能的研究中,填料形貌调控与表面修饰是两种有效途径。Olifirov等通过调整铝及铝碳复合填料的颗粒尺寸与形状,制得环氧复合材料的热导率最高为23 W/(m·K)。另一策略是采用表面功能化改善界面结合,如Huang等借助聚硅氧烷对氮化硼纳米管进行修饰,并制备相应环氧体系^[5]。研究发现,功能化填料添加30%时,材料介电常数与介电损耗明显下降,导热系数则上升约1360%。

在环氧树脂导热性能优化中,低填充高导热的实现受到关注。一种方法是在环氧基体中同时引入含氧聚合物增容剂与多层石墨烯纳米板,如Yeom等的研究表明,该体系在填料用量较低时即可获得良好的传热性能。另一种方法是通过设计特殊形貌的复合填料也能有效提升导热效果,如CHEN T等采用片状与颗粒混杂的锌铜填料(质量比1:2)填充环氧树脂,材料热导率达到0.5008 W/(m·K),较单一锌粉体系提高约137.9%。除导热性能外,电学响应也是重点研究方向,Shen等系统考察了炭黑与碳纳米管混合填料对环氧复合材料电阻—温度特性的影响规律。

环氧树脂复合材料导热性能的高效提升可通过低填充量实现。例如:中国科学院大学Huang等的研究表明,当氮化硼纳米管添加量为10%时,环氧纳米复合材料的导热系数增加650%,其介电常数与损耗仍维持在较低范围。未来研究重点预计将集中于两方面:一是开发同时具备高绝缘性与优异导热性能的材料;二是设计可随工作温度调节特性的智能热界面材料。此类材料的进展将推动新能源电力设备向更高效率与可靠性的方向发展。

3.3 环氧树脂可降解复合材料的应用

环保要求的提升推动了对可循环环氧树脂复合材料的研究。此类材料的设计关键是在环氧网络中引入可逆化学键,使其能在外部刺激下发生解聚,从而实

现回收与再加工。可逆化学键主要包括可逆共价键(二硫键、酯键、亚胺键)以及非共价相互作用(氢键、金属配位与 $\pi-\pi$ 堆积)。但现实是,基于非共价作用构建的环氧网络往往结构稳定性不足,材料在力学强度方面表现欠佳,并且在受到较大应力时容易出现脆性断裂,进而对其工程应用产生了一定程度的限制。基于可逆共价键构建的聚合物网络具有明显的温度响应特征。在温度低于特定阈值时,分子链段运动受限,材料网络结构能够维持稳定状态。而当温度升高超过该阈值,分子链活动性明显增强,此时可逆共价键可发生交换反应,进而导致网络拓扑出现软化甚至流动现象,从而使材料获得再次成型、重塑以及循环利用的潜力。

以生物质为来源的环氧树脂系统是当前的研究方向之一,相关成果不断涌现。例如:利用香草醛等天然化合物合成的新型环氧胶料,在堆肥环境中可在半年内实现约80%的降解。此外,在光伏组件接线盒等非承力部件中,此类材料在整个使用寿命期间,其机械强度仍能保持在85%以上,实现了较好的环境相容性,为新能源电力设备的绿色化提供了多元化的材料选择。

4 结束语

环氧树脂基复合材料凭借其出色的综合性能,已成为电力系统中的关键材料。无论是传统输配电设备,还是风电、光伏等新能源电力系统,该类材料均具有广泛的应用。随着电力技术的不断进步,对其性能的需求也持续提升。未来,此类材料的研究与应用将更多围绕功能集成化、性能提升以及环境友好性的方向深入推进,从而满足电力系统日益增长的材料需求,并为构建更安全高效的现代电力系统注入新的技术活力。

参考文献:

- [1] 郑天麒.碳纤维改性环氧树脂基复合材料的制备及性能研究[J].功能材料,2022,53(12):12147-12151.
- [2] 许江.氧化石墨烯改性碳纤维/环氧树脂体育复合材料及性能试验[J].塑料助剂,2022(05):6-10,31.
- [3] 谭永松,朱俊荣,陈坤林,等.石墨烯复合环氧树脂涂层的制备及其性能[J].精细化工,2021,38(01):78-82.
- [4] 慎志勇,李利华,李茂,等.液晶改性环氧树脂的制备及其热-力学性能协同提升研究[J].绝缘材料,2026,59(03):148-154.
- [5] 董倩,司英莲,古玺玉,等.臭氧氧化处理提升电气绝缘用环氧树脂直流击穿强度研究[J].绝缘材料,2026,59(03):126-131.

基于建筑工程技术的绿色建筑设计与节能策略研究

赵丁册

(吉林建筑科技学院, 吉林 长春 130114)

摘要 随着全球能源紧缺和环境压力加大, 绿色建筑设计成为建筑工程技术发展的重要方向。基于建筑工程技术的绿色建筑设计不仅注重建筑节能、材料优化和可再生能源应用, 还强调设计与施工全过程的技术衔接。通过合理运用围护结构热工性能优化、能源管理系统、可再生能源配置及建筑能耗控制策略, 可以显著降低建筑运行能耗, 提升室内环境质量, 实现可持续发展目标。本文系统分析了当前绿色建筑设计与节能存在的技术瓶颈, 并提出基于工程技术的优化策略, 以期为建筑工程实践提供参考。

关键词 绿色建筑; 建筑工程技术; 节能设计; 围护结构; 可再生能源

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.003

0 引言

绿色建筑设计是现代建筑工程领域的主流发展趋势, 其核心目标是在建筑的整个生命周期中能最大程度地节约资源并保护环境。随着建筑能耗在城市能源消费中所占比例越来越大, 节能设计和绿色技术的应用成了建筑可持续发展的关键部分。建筑工程技术系统化运用在设计阶段可以改善结构方案、提高围护性能、整合可再生能源, 并且从施工全过程技术衔接角度出发以保证设计意图得以实现。运用技术手段对建筑能耗加以控制, 改善室内环境质量, 削减环境负荷, 为建筑低碳化、可持续发展提供有力支撑。

1 基于建筑工程技术的绿色建筑设计重要性

基于建筑工程技术的绿色建筑设计在现代建筑实践中有着重要的战略地位, 其主要目的是利用系统的技术手段来达到建筑全生命周期的节能、环保效果。绿色建筑设计可以改善建筑结构、围护系统, 使热工性能得到提高, 降低能耗、改善室内环境质量。工程技术介入能够使建筑设计与施工过程无缝对接, 保证节能措施得以在施工期间顺利落实, 防止出现设计和实际应用相脱离造成的资源浪费情况。另外, 绿色建筑设计重视可再生能源与智能能源管理系统融合起来, 改善建筑的能源利用水平, 削减对传统能源的依赖, 助力可持续发展战略的推行。绿色设计借助于工程技术系统的综合应用, 使建筑在达到功能性、舒适性的

基础上实现环境效益, 促使建筑产业朝低碳化、智能化、高性能方向发展, 提高建筑整体质量和社会价值, 给城市可持续发展奠定良好根基。

2 当前绿色建筑设计 with 节能存在的主要问题

2.1 绿色技术应用流于表面形式

绿色建筑设计实践当中存在着明显的形式化问题, 即设计方对于绿色技术的运用缺乏系统性和深度, 大部分都只是停留在概念化、装饰性的层面上, 并没有发挥出有效的能耗优化和环境改善作用。建筑设计中所用的节能材料、绿色设备或者可再生能源系统等, 常常只是被当作附加部分来使用, 并没有和建筑的功能布局、结构体系以及使用需求结合起来, 在实际运行中很难达到预期的效果。技术选择与设计参数没有经过科学分析, 不能对建筑能耗特点进行准确的优化, 绿色技术的作用不能充分发挥出来。而且技术标准及评价指标体系不统一, 很多设计项目仅仅能满足基本规范要求, 缺少对于能耗、环境舒适性以及资源节约的量化控制, 在实际使用中难以取得应有的效果, 造成“表面化”的现象出现^[1]。

2.2 节能设计与工程施工脱节

节能设计和施工过程之间存在着脱节的问题, 造成设计的效果在实际的建筑运营阶段不能完全达到。设计阶段节能方案一般以理论计算、模拟为依据, 施工阶段的执行精度、施工材料质量、施工工艺水平各

作者简介: 赵丁册 (1986-), 男, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 城乡规划。

不相同,不能严格对应设计要求。设计意图在施工过程中被削弱或者偏离,造成建筑围护结构、能源系统、设备安装达不到预期的性能。设计和施工之间缺少协同机制以及信息共享平台,施工人员对于节能目标、技术要求以及重要控制点的认识存在欠缺,进而造成施工过程中节能措施的执行情况不够规范。施工阶段的偏差又造成建筑的实际能耗比设计值高出很多,室内环境的舒适度降低,节能的效果无法量化,从而影响到绿色建筑整体的性能和运行效率。

2.3 围护结构热工性能不达标

围护结构热工性能不符合要求,造成绿色建筑节能效果受限制。建筑外墙、屋顶、门窗和地面等围护结构的热阻、气密性以及保温性能在设计或者施工时没有达到规范及节能标准的要求,造成建筑在运行过程中热损耗大大增加。围护结构的保温材料厚度不够或者导热系数太高,施工接缝处理不好,门窗框密封性能差,容易产生空气渗透、热桥等现象。围护结构性能不好直接造成建筑内部温度不均、室内舒适度降低,并且还会加大空调、供暖、通风系统负担,从而导致建筑能耗控制达不到预期目标。围护结构热工性能评价体系不健全,缺少对不同气候状况、建筑类型精细化指标,从而导致建筑节能潜力不能充分挖掘,降低绿色建筑设计可持续性及其综合价值。

2.4 可再生能源利用率偏低

绿色建筑在可再生能源的使用上还存在着很多的不足。太阳能、风能、地源热能等可再生能源系统配置率低、利用率不高,不能很好地与建筑负荷需求相匹配,造成能源利用效率低。设计时对可再生能源系统的布局不合理,发电或者热能采集的功率不能满足建筑的实际耗电需求,储能和控制系统不能满足要求,造成供能不稳定,利用率低。部分建筑在运行过程中,可再生能源贡献率占总能源消耗比例小于20%,不能大幅度减少传统能源的使用,不能达到绿色建筑节能的目标。由于缺少有效的能源系统监控与智能管理支撑,造成可再生能源的使用过程中出现资源浪费或者运行不稳定的现象,从而制约着整个建筑系统能源优化水平以及可持续发展的潜能^[2]。

3 基于建筑工程技术的绿色建筑设计节能策略

3.1 深化绿色技术一体化集成设计

绿色技术一体化集成设计是提高建筑节能性能、改善环境可持续性的关键方法,它就是以系统的方案来实现建筑全生命周期的能源优化、环境改善。例如:某办公综合体建筑面积约为45万 m^2 ,在设计阶段运用

BIM模型对建筑结构、围护结构、机电设备、可再生能源系统进行协同分析,达到多系统一体化优化的目的。建筑外墙用高性能保温板厚度100 mm,屋顶设隔热层150 mm,窗户用双层低辐射玻璃,总玻璃面积占立面的28%左右,在保证采光的前提下降低热损失。光伏系统总面积为1 200 m^2 ,年发电量约为15万kWh,地源热泵制冷量350 kW,制热量420 kW,智能照明系统可以实现约25%的能耗降低。一体化集成设计使建筑整体能耗比传统的设计下降约28%,室内温度、湿度控制在 $\pm 1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 内,空气流通提高20%左右,各个系统相互配合达到节能的目的。设计时考虑到建筑朝向、窗墙比、遮阳系统以及可再生能源接口位置,在进行模拟分析的基础上探究各种技术组合的协同效果,从而达成建筑功能同节能性能的协调,使得绿色技术在建筑整个生命周期内能够最大程度地取得成效,为施工及运行阶段提供可靠的数据支撑,而且还能为今后的绿色建筑技术整合提供可以复制的经验。

3.2 强化设计施工全过程技术衔接

设计施工全过程技术衔接是保证绿色建筑设计目标顺利实现的重要环节。以某住宅小区为例,总建筑面积约为85 000 m^2 ,建筑层总高度大多为32.3 m,外墙采用高性能保温材料厚度220 mm,窗户为双层低辐射玻璃,总玻璃面积占立面比例为30%。利用BIM模型和施工管理系统的结合,使施工图纸和现场数据可以实时校核,对外墙保温接缝、屋顶隔热层和窗框安装进行准确的控制,偏差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。施工时用智能测量仪器对材料厚度、结构位置、安装精度进行实时监测,保证围护结构的热阻、气密性、隔热性能满足设计要求(见表1)。全过程技术衔接可以避免设计和施工之间的脱节,从而达到节能的目的,提高施工效率和建筑整体质量,给绿色建筑全生命周期节能效果提供技术保证^[3]。

表1 设计施工衔接关键控制指标表

控制部位	设计指标	施工实际	单位
外墙保温层厚度	220	218 ~ 222	mm
窗户气密性	≤ 0.40	0.35 ~ 0.40	$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$
屋顶隔热层厚度	150	148 ~ 152	mm

3.3 提升围护结构热工性能优化水平

围护结构热工性能直接影响建筑能耗高低及室内舒适程度,围护结构热工性能改善属于建筑节能设计的重要部分。以某科研楼为例,总建筑面积约为1 000 m,外墙用复合保温板厚度100 mm,屋顶隔热层

厚度 150 mm, 窗户是双层低辐射玻璃, 总玻璃面积占建筑立面的 2% 左右。通过热工性能模拟分析可知, 外墙平均热阻由 $2.8 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 提高到 $32.5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 屋顶热阻由 $32.6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 提高到 $432.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 窗框气密性由 $0.3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ 提高到 $0.4 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, 冬季热损失减少约 21%, 夏季冷负荷减少约 17%^[4]。根据建筑朝向、遮阳系统和自然通风情况对外墙材料的导热系数、窗墙比、屋顶隔热层厚度等进行系统的改进, 使室内温度变化保持在 $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 减少空调、采暖系统的工作量。经过改进的围护结构不但可以提高建筑运行的节能效果, 还可以改善室内热环境的舒适度, 减少能源系统的运行压力, 给绿色建筑全生命周期节能和性能优化提供可靠的保障。

3.4 推进可再生能源高效利用配置

可再生能源对绿色建筑节能体系具有重要作用, 它可以把传统能源的依赖度降到最低。以某医院综合楼为例, 总建筑面积为 60 000 m^2 , 设计光伏发电系统容量为 500 kWp, 太阳能热水系统集热面积为 100 m^2 , 地源热泵系统制冷能力为 450 kW、制热能力为 520 kW。经由能源负荷剖析以及系统模拟得知, 光伏发电年均利用率为 85%, 可以为建筑供应约 180 000 kWh 的电量, 占建筑总能耗的 15% 左右; 太阳能热水系统年利用率约 78%, 可以满足医院热水需求的 30% 左右; 地源热泵系统全年运行能效比 (COP) 平均为 4.3, 有效地降低了空调、采暖能耗 (见表 2)。采用负荷匹配以及智能控制策略后, 可以使得光伏发电、太阳能热水器、地源热泵三者相互配合, 从而达到最大限度地回收和利用能量的目的, 并且保证能源供应的稳定性以及效率^[5]。

表 2 可再生能源系统配置及利用率表

系统类型	设计容量	年利用率	单位
光伏发电	500	85	kWp/%
太阳能热水	1 200	78	$\text{m}^2/\%$
地源热泵	450/520	4.3	kW/COP

高效可再生能源系统建筑部分满足建筑能源需求, 减少对外部传统的资源依赖, 使建筑物具备更好的节能特性。经由合理的安排以及智能的调节, 全年可再生能源的贡献率达到总能耗的 40% 以上, 运行成本降低约 18%, 从而形成出绿色建筑高效、可持续的能源利用模式, 给建筑整个生命周期节能提供可靠的支撑。

3.5 优化建筑能耗源头控制技术方案

建筑能耗源头控制属于绿色建筑节能策略的一个重要部分, 在改善设计阶段的能耗分区、设备功率、

系统负荷等各方面工作可以有效地减少建筑的能源消耗。以某科研综合体为例, 总建筑面积约为 35 000 m^2 , 用智能建筑管理系统 (BMS) 对空调、照明、通风、热水系统实行集中监控和调节。空调系统负荷设计控制在 10 W/ m^2 以内, 照明功率密度控制在 9 W/ m^2 , 通风系统用变风量 (VAV) 调节来达到局部能耗的最优。系统依靠对设备的启停、运行方式以及温控参数等实行实时数据采集与反馈调节, 从而达到高效运行并减少能耗的目的。建筑整体能耗比传统的方案降低了约 25%, 空调和照明系统运行效率提高了约 22%, 室内温度波动控制在 $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之内, 可以达到舒适的要求并且节能的效果明显^[6]。通过源头控制策略建筑在高峰负荷时的能耗峰值可降低 15% 左右, 达到负荷平衡、能源利用最优化的目的。此方法把建筑的功能分区、设备的选择以及控制的逻辑都纳入节能的前期规划当中, 从而给建筑全生命周期的节能效果提供可靠的保障, 而且也之后绿色建筑能耗管理提供可推广、可复制的技术方案和经验。

4 结束语

在建筑全生命周期中以建筑工程技术为基础进行绿色建筑设计和节能策略的应用, 可以有效地减少建筑的能耗, 提高建筑的室内环境舒适度, 并且可以提高建筑的能源利用率。随着智能控制技术以及可再生能源系统的发展, 绿色建筑设计将越来越高效地达到节能、环保、可持续的目的, 为城市建筑的可持续发展提供更科学、更系统的技术支持。

参考文献:

- [1] 樊何昊. 基于建筑工程技术的绿色建筑设计 with 节能策略研究 [J]. 城市环境设计, 2026(02):203-205.
- [2] 罗益菊. 城市更新背景下低能耗被动式建筑设计技术分析 [J]. 山西建筑, 2026,52(04):24-28.
- [3] 张婷. 绿色建筑工程给水设计中的节水节能技术研究 [J]. 新城建科技, 2025,34(10):34-36.
- [4] 杨显显. 绿色建筑设计技术在房建工程中的应用 [J]. 江苏建材, 2025(03):73-74.
- [5] 寇琦. 建筑设计中的节能环保与绿色建筑技术 [J]. 城市建设, 2026(02):57-59.
- [6] 谢中灿. 基于绿色建筑工程理念的建筑节能设计分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2025,24(22):97-99.

高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制研究

郑建勋, 马 芳

(广州华立科技职业学院城建学院, 广东 广州 527324)

摘 要 高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制是保障地下工程稳定与周边环境安全的核心环节, 直接关系到工程整体质量与施工全过程风险防控。结合地质条件与工程需求构建全周期安全控制机制, 通过支护结构选型适配、施工过程动态调控、监测预警体系完善的协同作用, 实现深基坑施工技术效能与安全保障能力的同步提升。本文聚焦技术优化与安全控制的深度融合, 以期为高层建筑深基坑工程的科学施工提供参考。

关键词 高层建筑; 深基坑支护; 支护结构选型; 安全控制体系

基金项目: 本文系粤职土木建筑和水利教指委2025年度教育教学改革研究与实践项目——一线教学管理人员《AIGC赋能工程类职业教育: 大模型多场景应用规范与实证研究》(项目编号: 3)研究成果。

中图分类号: TU753; TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.004

0 引言

随着城市建设由地面向高空、地下双向发展, 高层建筑成为解决土地资源紧张的重要手段, 深基坑工程作为高层建筑地下结构施工的前序工作, 其支护技术是否科学、安全控制是否有效越来越突出。深基坑支护要对抗土体压力, 控制地层变形, 还要适应复杂的地质情况和众多的周边环境约束, 技术改良和安全控制互相促进, 是工程得以顺利开展的关键保证。本文以高层建筑深基坑施工的特殊性为基础, 对技术优化和安全控制的内在逻辑进行分析, 寻找适合各种工况的支护技术优化方向, 创建起覆盖施工全过程的安全控制体系, 旨在为深基坑工程稳定、安全提供系统的解决办法。

1 高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制要义

1.1 技术优化的核心导向

高层建筑深基坑支护施工技术优化以适配性、协同性、精细化方向, 根据工程地质勘察结果和周边环境特征, 使支护体系同施工需求相契合。技术优化要兼顾支护结构的力学性能和施工可行性, 对支护形式、材料选择、工艺参数进行系统的调整, 增强支护体系对复杂工况的适应能力, 重视施工效率和资源利

用的平衡, 保证技术方案既满足挡土、止水、抗变形的基本要求, 又可以与后续主体结构施工相衔接^[1]。它不是对某一个施工环节的局部改善, 而是一条从设计到施工再到验收的全过程动态调整之路, 每一个阶段都紧紧抓住深基坑支护安全稳定的中心点。设计阶段要根据地质勘察数据来优化支护形式和参数, 保证方案具有力学合理性和安全冗余; 施工阶段按照现场实际情况及时调整工艺细节, 适应地层变化和环境影响; 验收阶段将安全标准作为核心, 对支护质量展开全方位的核查。全流程动态优化模式冲破了各个环节之间的割裂壁垒, 让每一个技术措施都处在闭环的联系当中, 从源头到终端一直保持稳定的防线, 保证支护体系一直符合稳定控制的要求。

1.2 安全控制的本质要求

高层建筑深基坑支护施工安全控制的本质就是建立全方位、多层次的风险防控体系, 按照预防为主、动态管控的原则来实现施工全过程潜在风险的有效规避和及时处置。安全控制要覆盖地质勘察、方案设计、施工实施、监测预警等各个环节, 通过明确各个阶段的安全控制要点、规范操作流程、加强关键工序的管控, 实现从风险预判到应急响应的闭环管理。高层建筑深基坑支护施工安全控制的本质要求, 就是把安全理念深入技术优化的全过程之中, 使支护技术的每一个改

作者简介: 郑建勋 (1981-), 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 建筑工程技术。

进都同步提高安全保障的能力,实现技术升级和安防防控的双促进^[2]。技术优化的每一个环节,即支护结构形式的改变、材料性能的提高、工艺参数的细化等,都要以安全为前提,保证技术改进既可以提高支护体系的力学承载能力和变形控制效果,又可以从源头上减少坍塌、渗漏等安全风险。利用科学的监测手段和管控机制来创建起覆盖施工全过程的风险识别网络,用自动化监测设备对支护结构应力、地层位移、地下水位变化等重要指标实施实时追踪,依靠智能化数据分析技术准确预估风险发展走向,提前发现潜在隐患。在此基础上,明确管控责任、规范处置流程,保证深基坑施工过程中支护结构一直保持稳定状态,避免对周围建筑物、地下管线等环境要素造成不利影响,为施工人员创造安全可靠的作业环境,实现工程安全、环境安全和人员安全的全面保障。

1.3 技术与安全的协同逻辑

高层建筑深基坑支护施工技术优化与安全控制不是孤立存在的,而是有着深层次的协同关系。技术优化给安全控制打下坚实的基础,通过提高支护结构承载力提高、增强变形控制能力,从根本上降低施工安全风险;安全控制给技术优化划出边界和方向,确定技术改进的安全标准和防控要求,保证技术方案在实践中具有可靠的保障^[3]。协同关系要求工程实践当中,安全目标要引领技术优化的方向,每一个技术革新都是为风险防控服务,依靠技术升级不断加强安全控制的效能,把先进的施工技术、智能化监测手段融合到安全管控的全过程之中。采用自动化施工设备规范关键工序操作,减少人为误差对支护结构质量的影响,用高精度传感器和无线传输技术建立实时监测网络,实现支护结构应力变化、地层位移速率、地下水位波动等关键指标的准确检测。借助大数据分析和人工智能算法,对监测数据实施动态解读,及时察觉潜在危险的发展走向,把安全控制从“被动应对”变为“主动预判”。技术赋能下安全管控提高了风险识别的准确度,也缩减了应急响应的时间差,从而形成了技术方案不断改进、安全保障不断提升的良性循环,为高层建筑深基坑施工筑牢了安全防线。

2 高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制

2.1 支护结构选型的优化路径

高层建筑深基坑支护结构选型优化要以地质条件为根基、以安全需求为主导、以工程特性为方向,达成支护形式同工程实际的精准对接。根据高层建筑深

基坑“深、大、近”的特点,需要考虑土体性质、地下水位、基坑深度、周边建筑物和管线分布等各方面因素,合理选择排桩支护、地下连续墙、土钉墙或者复合支护体系。选型时要重视支护结构的功能兼容性,保证挡土、止水的主要功能,同时考虑施工的方便性及经济性,采用多方案比较和数值模拟分析的方法来确定最佳的支护形式^[4]。根据基坑各个区段的受力情况以及环境敏感程度的不同,对支护结构进行差异化选型设计也成了优化的主要部分。深基坑各个区域所受的土体压力、地层稳定状况存在着较大差别,靠近城市主干道、已有建筑物或者地下管线的地段,对于变形控制的要求更加严格,远离这些敏感环境的地段,在保证安全的基础上可以兼顾到经济性。根据该特点需要对基坑进行分区评价,确定各个区域的风险等级和控制标准,对于临近重要构筑物的区域,优先选用地下连续墙、双排桩+内支撑等刚度大、变形控制精度高的支护结构,提高支护体系的抗侧移能力和整体刚度,减小施工对周围构筑物、管线的影响。差异化设计既克服了单一的支护方案的不足,又达到安全保障和资源合理利用的双重目的,在复杂的工况下保证支护体系的整体稳定,给周边环境安全构筑起一道防线。

2.2 施工工艺的精细化优化

施工工艺精细化优化属于提升高层建筑深基坑支护技术效率的关键途径,要对主要工序质量把控及流程调整进行研究。在支护结构施工过程中,通过对钻孔、注浆、混凝土浇筑等主要工序操作标准的改进来提高支护构件施工精度和力学性能。例如:在排桩施工中加强钻孔垂直度控制和混凝土浇筑连续性保证,在地下连续墙施工中改善成槽工艺和接头密封技术,保证支护结构整体性和抗渗性^[5]。同时,根据施工场地条件和工期要求,优化施工组织方案,采用分层分段开挖、限时支护的方式,减少基坑暴露时间,控制地层变形。在施工工艺优化过程中,积极引进先进的施工设备和技术手段,提高施工的精度和效率,是施工工艺和支护技术深度融合的重要保证。采用自动化钻孔设备、智能注浆系统、高精度混凝土浇筑机械等现代化装备代替传统的人工操作,减少人为误差对支护构件尺寸精度、材料配比均匀性的影响,保证排桩、地下连续墙等支护结构施工质量达到设计要求。利用BIM技术、激光扫描监测等数字化手段,把施工全过程做可视化模拟和动态跟踪,准确把握钻孔深度、支护间距、注浆压力等重要参数,从而达到施工工艺和支护技术要求相契合的目的。技术与设备的协同使用,不但可以

大大提升施工效率、缩短工期,而且可以使施工工艺的每一个环节都紧紧围绕支护技术优化目标,从工艺层面筑牢安全防线,为深基坑支护施工安全控制打下了坚实的基础。

2.3 安全控制体系的全周期构建

高层建筑深基坑支护施工安全控制体系的创建要覆盖工程全过程,塑造起事前预防、事中控制、事后处理的完整链条。事前预防阶段,经由详细的地质勘察来确定风险源,制订出相应的安全专项方案,对施工人员展开技术交底和安全培训,供应足够数量的应急物资和设备。事中管控阶段,创建立体化的监测网络,对支护结构变形、土体位移、地下水位等重要指标实施实时监测,依照监测数据动态调节施工参数,加强关键工序的现场监管,及时纠正不规范的操作。事后处置阶段是全周期安全控制体系的重要闭环环节,要制订科学完备、可操作性强的应急预案,给险情处置提供明确的指引。应急预案要依照深基坑施工的风险特性,细化风险等级划分准则,按照支护结构变形速率、土体位移量、渗漏程度等重要指标来确定一般风险、较大风险、重大风险的界定阈值,并且针对各个风险等级制订出相应的分级响应流程,规定不同风险等级所对应的负责单位、处理权限以及操作步骤。当监测数据出现异常、险情迹象显现的时候,就要立刻启动相应的应急响应等级,迅速组织专业的技术人员开展险情评价,准确判定风险产生的原因及发展趋向。根据坍塌隐患、结构失稳、地下水渗漏等不同的险情,采取注浆加固、增设临时支撑、快速回填、止水帷幕补强等应急措施,提高支护结构的承载力,切断风险扩散的途径,控制险情的发展。应急预案要确定应急物资储备清单和调配办法,保证注浆设备、钢材支撑、止水材料等重要物资随时可用,应急队伍可以迅速集结,高效作业。

2.4 技术与安全的融合管控措施

实现高层建筑深基坑支护施工技术优化和安全控制的深度融合,要采取相应的管控措施。方案设计阶段把安全控制要求纳入技术优化指标体系当中,保证技术方案既满足力学性能要求,又符合安全管控标准。在施工实施过程中创建技术交底和安全交底同步展开的机制,使得施工人员既能掌握优化之后的技术要点,又能清楚地知道对应的安全防控举措,借助信息化管理平台把技术参数与监测数据融合起来,达成技术优化效果和安全状况的即时联动剖析,当监测数据出现

异常的时候,立刻发出技术调整指令,依靠支护参数改良、施工工艺改善等手段消除安全隐患。还要加强施工全过程的协同管理,创建起跨专业、全方位的协作机制,保证技术改良与安全把控形成合力。通过创建常态化的沟通协调平台,打通技术、安全、施工等各个专业人员之间的工作衔接壁垒,保证技术人员提出的优化方案能够及时传递到施工队伍当中,安全管理人员的防控要求能够同步融入技术实施过程中。关键工序开始之前,组织多专业联合交底,确定技术参数安全界限和施工操作的合规标准;在施工过程中,提倡各个专业的人员相互配合、实时互动,技术人员在现场实际情况的基础上对方案进行调整和优化时,会同时向安全管理人员咨询,安全管理人员在发现风险隐患的时候也会立即向技术人员汇报,双方一起商量出相应的改进办法。该种协同管理方式冲破了专业割裂的束缚,使技术改良和安全把控互相支撑、动态匹配,从而达成同向发力、协同推进的良好状况,保证深基坑支护施工既达到技术改良目的,又始终掌控住安全底线。

3 结束语

高层建筑深基坑支护施工技术优化及安全控制属于一项系统工程,它涉及高层建筑地下结构施工的顺利推进以及周边环境的安全稳定。本文通过对技术优化和安全控制要义的分析,从支护结构选型、施工工艺改进、全生命周期安全体系建设、技术与安全融合管控等几个方面提出了相应的实施路径,突出技术优化要以适配性和精细化为原则,安全控制要贯穿全过程并与技术创新深度融合。

参考文献:

- [1] 邓达禹.高层建筑深基坑支护施工技术分析[J].工程技术研究,2025,10(18):56-58.
- [2] 田龙.复杂环境下高层建筑深基坑支护、降水与监测施工技术[J].四川水泥,2025(09):27-29,32.
- [3] 刘炼.高层建筑深基坑支护施工技术与质量控制研究[J].新城建科技,2025,34(08):171-173.
- [4] 周中伟.高层建筑深基坑支护施工技术研究[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第三届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集.浙江诸安建设集团有限公司,2025.
- [5] 王猛.高层建筑深基坑支护施工技术研究[J].科技资讯,2025,23(15):109-111.

高速公路改扩建新旧路基拼接施工关键技术及沉降控制研究

王 路

(湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要 为了探究高速公路改扩建工程中新旧路基拼接的差异沉降控制问题,本文以某高速公路改扩建工程为例,选取其中占比达 30% 的拼接段,针对该路段中所含的砂土、粉砂土、黏土、卵砾石土等多种地质情况,从台阶差异化开挖、土工格栅加筋、轻质填料填筑、特殊地基处理等拼接技术入手进行研究,并建立全过程沉降监测体系。根据实践结果可知,采用综合拼接技术的试验组平均沉降量比对照组明显下降,进而得出根据不同的土质条件来设计差异化的台阶尺寸,并采用土工格栅加筋和动态监测控制,可以达到新旧路基协同变形的目的,保证拼接质量。

关键词 高速公路; 新旧路基拼接; 差异沉降; 台阶开挖; 土工格栅

中图分类号: U416.1; U418.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.005

0 引言

随着我国高速公路网不断完善,早期建设的四车道高速公路已经不能满足日益增长的交通需求,改扩建工程逐渐成为公路建设的主要方式。在改扩建工程中,新旧路基拼接施工属于关键技术环节之一,由于旧路基已经完成长时间的固结沉降,新路基在填筑后还会发生较大的自重压缩和次固结沉降,两者之间的差异沉降很容易造成路面出现纵向裂缝、反射裂缝甚至路基失稳等病害,直接危及道路的使用寿命和行车安全。因此,如何有效控制新旧路基的差异沉降,成为改扩建工程急需解决的技术难题。本文以某高速公路改扩建工程为依托,该工程全长 50 km,拼接段长 15 km,地质情况复杂,有典型的工程代表性,通过系统地研究拼接施工关键技术以及沉降控制要点,以期类似工程提供技术借鉴。

1 项目概况

某高速公路改扩建工程总里程为 50 km,新旧路基拼接施工的段落长度达到 15 km,占全线总长的 30%,拼接段落比例高,工程规模大,施工组织和技术难度大。该路段原来为双向四车道高速公路,由于区域交通需求不断增大,原来的道路通行能力已经不能满足日益增加的交通压力,所以需要拓宽成双向八车道。拓宽后单车道标准宽度为 3.75 m,路基宽度也相应增大到 30 m,路面结构层要和新路基相协调衔接。沿线地质条件存

在明显差别,部分路段以砂土、粉砂土为主,土体颗粒大、黏聚力低,边坡稳定性较差;另一部分路段分布有黏土和卵砾石土,土质比较密实,压缩性高。根据不同的土质条件,对新老路基拼接台阶的尺寸做了差异化的处理,砂土、粉砂土路段台阶高度控制在 0.4 m、宽度为 0.6 m;黏土、卵砾石土路段台阶高度为 1.0 m、宽度为 1.5 m。差异化的台阶设计是为了适应不同的土体力学性质,保证新老路基之间协同变形的能力,为后续拼接施工打下基础^[1]。

2 新老路基拼接施工关键技术

2.1 原路基处理与台阶开挖技术

原路基处理及台阶开挖部分,本次工程对不同的地质情况采取了不同的施工方案,砂土、粉砂土路段,由于土体颗粒间黏聚力小、边坡自稳能力差,台阶开挖高度控制在 0.4 m、宽度为 0.6 m,分层逐级开挖,每级台阶开挖后立即压实,防止边坡暴露时间过长造成局部坍塌。对于黏土和卵砾石土路段,土体比较密实、强度较高,台阶设计高度为 1.0 m、宽度为 1.5 m,采用机械开挖和人工修整相结合的方式,保证台阶面平整、线形顺直,台阶面内倾角度控制在 2%~4% 之间,有利于新路基填筑后的排水和压实。施工前对旧路基边坡进行清理,清除表层松散土体和植被,对坡面进行补强压实,用小型压路机配合液压夯机进行夯实,保证旧路基边坡的压实度达到 95% 以上。对局部软弱

作者简介:王路(1986-),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:路桥隧道工程管理。

松散的地段采用换填处理或者注浆加固,消除旧路基边缘可能存在的薄弱部位,为新旧路基有效衔接创造良好的条件^[2]。

2.2 新路基填筑材料与工艺控制

本次工程对于新路基填筑材料的选择和工艺控制都做了严格的把关,根据不同的地质分区选择填筑材料,填筑材料的模量应与旧路基的模量相匹配,保证新旧路基刚度过渡平顺。砂土、粉砂土路段填料以级配良好的砂砾为主,含泥量不大于5%,可掺入水泥或石灰进行改良,提高填料的整体稳定性;黏土、卵砾石土路段采用碎石土为填料,最大粒径不大于层厚的2/3,保证压实效果。在填筑工艺上严格按照分层填筑、分层压实的原则进行,每层填筑厚度不大于30 cm,压实度不小于96%。对拼接缝边缘处,大型压路机无法到达的区域,采用小型振动压路机配合液压夯机进行补强压实,保证拼接部位的压实质量。严格控制填筑速率,每层填筑完成后进行沉降观测,沉降稳定后进行下一层填筑,防止由于填筑速度过快造成不均匀沉降。施工期间创建了填料质量追溯体系,对每一批填料的级配、含水率实施检测,保证填料质量符合设计要求。

2.3 土工合成材料加筋技术

为提高新旧路基整体稳定性及协调差异沉降,在该工程大部分路段均采用土工合成材料加筋技术。根据设计要求及现场情况,在每级台阶上设一层高强双向土工格栅,其极限抗拉强度和延伸率需要满足工程的施工要求。铺设时土工格栅一头锚固在旧路基台阶面上,锚固长度不小于1.5 m,另一头伸入新路基填筑区,延伸宽度按台阶宽度而定,保证新旧路基之间有良好的拉结^[3]。

砂土、粉砂土路段由于土体颗粒细小、界面摩擦系数低,土工格栅铺设间距加密到每两级台阶铺设一层,在格栅表面撒布粗砂以提高界面摩擦;黏土、卵砾石土路段则按每级台阶铺设一层控制。铺设时严格控制格栅张拉应力,用机械张拉后固定于锚固端,保证格栅处于紧绷状态。施工现场施工时土工格栅搭接长度不小于20 cm,搭接处用U型钉或绑扎带固定防止填筑时出现移位,利用土工格栅的加筋作用来约束新路基的侧向变形,提高新旧路基的协同受力能力,大大降低拼接部位的差异沉降风险。

2.4 特殊地基处理技术

本次工程沿线部分路段存在软土地基和松软土层,地基承载力小、压缩性大,如果不加以处理,会对新旧路基沉降控制产生影响。对软土地基路段采用水泥

搅拌桩和预应力管桩相结合的处理方式。对软土层厚度小于8 m的地区,采用水泥搅拌桩进行深层加固,桩径0.5 m、桩间距1.2 m,呈正方形布置,桩体伸入持力层不小于1 m,利用桩体与桩间土共同作用来提高地基承载力和抗剪强度。对于软土层厚度大于8 m的重点路段,采用预应力管桩加桩帽的方式进行处理,桩径0.4 m、桩间距2.5 m,桩顶设钢筋混凝土桩帽,形成桩网结构,控制工后沉降。在松软土过渡段采用强夯置换法,夯击能控制在2 000 kN·m~3 000 kN·m之间,置换深度大于4 m,强夯作用消除浅层松软土体的压缩性,特殊地基处理完成后做了静载试验、动力触探检测,保证处理后的地基承载力满足设计要求。

2.5 新旧路基界面处治技术

新旧路基接触面结合质量,会直接影响到拼接后协同变形的情况。施工时,在台阶开挖完毕、清理坡面之后,先对旧路基侧壁进行凿毛处理,去除风化层及泥皮,露出新鲜的、粗糙的混凝土或者土体界面。然后用高压气枪或者水枪将界面处的杂物吹扫干净,在界面处喷洒水泥净浆或者界面黏结剂,水泥净浆的水灰比控制在0.4~0.5,喷涂厚度为3 mm~5 mm,提高新旧材料间的黏结强度。在每层新路基填筑之前,在台阶面上均匀铺一层厚度为10 cm~15 cm的砂垫层或者级配碎石过渡层,起到缓冲、排水的作用。采用液压夯机局部补强压实的方式,在界面处每填筑两层补夯一次,夯击能控制在1 500 kN·m以下,不扰动旧路基。经过以上综合界面处治措施,可以有效地消除新旧路基之间滑移、脱空隐患,提高整体结构的抗剪能力、耐久性。

2.6 排水与防渗综合控制技术

新旧路基拼接处容易受到雨水的侵蚀,使土体强度下降,沉降不均,因此在施工过程中要建立完善的排水和防渗系统。台阶开挖完成后,在台阶内倾面上设纵向排水盲沟,盲沟为直径10 cm的软式透水管,外包土工布,沟底设碎石反滤层,把渗水引到路基外侧的边沟或者集水井里,每级台阶填筑前,在台阶面上设一道复合土工膜或者两布一膜防渗层,土工膜厚度不小于0.3 mm,搭接宽度不小于30 cm,搭接处采用热熔焊接或者专用胶粘接,防止水分从界面下渗。新路基填筑到一定高度之后,在路堤边坡坡脚处设置截水沟,坡面用三维植被网或者喷播植草防护,减少地表径流对拼接部位的冲刷。施工期间还要对雨季进行台阶开挖作业的雨季施工暂停,已经开挖的台阶要及时覆盖防雨布,保证界面干燥清洁,排水和防渗措施相结合使用,可以有效地减少地下水、降雨给新旧

路基拼接造成的影响,保证长期沉降控制的效果。

3 沉降监测与施工控制要点

3.1 沉降监测方案

该工程新旧路基拼接段长 15 km,为掌握拼接部位沉降变形规律,指导现场施工,建立完善的沉降监测体系,监测断面沿线路方向每 50 m 一个,地质突变段、桥头过渡段、特殊地基处理段加密到 30 m。在新旧路基拼接缝处、新路基边缘、新路基中心各布设沉降观测桩 300 多处,构成全线立体监测网。沉降观测用精密水准仪测量,测量精度为 ± 1 mm。观测频率随施工阶段而定,填筑期每天观测一次,填筑间歇期每三天观测一次,预压期每周观测一次,路面施工期每半个月观测一次。为了解深层土体的沉降情况,在典型断面埋设分层沉降管、测斜管,对不同深度土体的竖向变形、水平位移进行观测^[4]。

3.2 监测数据分析

通过整理、分析本次工程新旧路基拼接处沉降监测数据,得到不同的施工条件下沉降量的对比结果,表 1 为典型观测点的沉降量统计。

表 1 新旧路基拼接处沉降量对比结果

观测点 编号	试验组沉 降量/mm	对照组 1 沉降量/mm	对照组 2 沉降量/mm
1	2.5	6.8	8.2
2	3.4	8.9	7.5
3	3.8	7.2	11.2
4	4.0	6.9	9.4
5	4.2	10.1	9.6
6	3.6	8.4	6.3
平均值	3.6	8.1	8.7

从表 1 数据可知,试验组采用本工程所述综合拼接技术的平均沉降量为 3.6 mm,对照组 1 只采用台阶拼接,不加设土工格栅的平均沉降量为 8.1 mm,对照组 2 没有做特殊地基处理的平均沉降量为 8.7 mm。试验组沉降量明显小于两个对照组,沉降量下降幅度大于 50%。从各个观测点的离散程度来看,试验组各个点的沉降量在 2.5 mm~4.2 mm 之间,数据波动小,沉降控制效果好;而对照组各个点的沉降量波动大,部分点位沉降量超过 10 mm,存在明显的局部差异沉降风险。试验组填筑完成 60 天后沉降趋于稳定,而对照组在相同时间内仍然处在沉降发展期,充分证明台阶差异化设计、土工格栅加筋、特殊地基处理等关键技术对于控制新旧路基差异沉降有良好的效果。

3.3 动态施工控制要点

根据监测数据建立施工过程中动态反馈的控制体系,形成如下施工控制要点。首先,严格控制填筑速率,将填筑速率和沉降速率联系起来控制,根据监测数据统计分析结果可知,单日沉降量大于 5 mm 或者连续三天平均沉降量大于 3 mm 时,停止填筑施工,待沉降稳定后再继续填筑。填筑至路床顶面时设置 3 个~6 个月的预压期,根据沉降曲线收敛情况来确定路面结构层施工时间,保证工后沉降符合设计要求^[5]。其次,对于拼接缝处的差异沉降问题,在每级台阶填筑结束后,用压浆的方法填充新旧路基之间很小的空隙,提高界面结合强度。路面结构层施工前,对拼接缝做加密压实处理,用液压夯机进行补强,消除表层松散区域。最后,建立分级预警制度,将沉降量分为预警值(5 mm)、报警值(8 mm)和极限值(10 mm)三级。当监测数据达到预警值时,加密观测频次并分析原因;达到报警值时,停止周边施工并采取补强措施;达到极限值时,启动应急处理方案,进行注浆加固或者返工处理。以上动态控制措施的执行,有效保证本次工程新旧路基拼接段施工质量及沉降控制情况,达到全过程精细化管理的目的。

4 结束语

本文以某高速公路改扩建工程为研究对象,对新老路基拼接施工技术及沉降控制措施进行系统的分析。工程实践证明,在不同的地质条件下采用不同的台阶尺寸设计,结合土工格栅加筋、填料改良和动态监测控制,可以有效控制新旧路基的差异沉降。试验组的平均沉降量为 3.6 mm,比对照组小很多,拼接质量符合设计要求,研究成果可以给其他类似的高速公路改扩建工程提供技术参考。

参考文献:

- [1] 王林,孙兆云,翁志强,等.软土地区高速公路改扩建路基沉降特性和控制技术[J].市政技术,2025,43(09):92-99.
- [2] 程希.高速公路改扩建路基拼接技术研究及应用[J].工程建设与设计,2025(16):171-173.
- [3] 张锐.高速公路路基加宽设计方法及施工技术[J].交通世界,2025(14):97-99.
- [4] 任翔宇.膨胀土地区公路路基常见病害及改扩建设计研究[J].交通科技与管理,2025,06(04):85-87.
- [5] 韩飞飞.改扩建高速公路拼接位置路面纵缝成因分析及预防措施[J].交通世界,2024(Z2):45-47.

基于探地雷达与超声波耦合技术的市政道路基层病害无损检测方法研究

朱 军

(安徽省建设工程测试研究院有限责任公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 市政道路基层病害无损检测需兼顾全范围、高精度与环境适配性,单一探地雷达或超声波技术存在检测盲区与精度缺陷,难以满足实际检测需求。本文以市政道路基层常见病害检测为研究对象,聚焦裂缝、脱空、松散等病害检测痛点,研究探地雷达与超声波耦合技术的应用方法。优化耦合检测技术参数,规范检测流程,构建数据融合策略,针对不同病害类型与复杂工况制定针对性检测方案,建立检测与治理的联动机制。结果表明,耦合技术可实现深浅层病害全覆盖检测,提升检测精度与效率,有效降低误判、漏判概率,为市政道路基层病害精准识别与科学治理提供技术支撑,助力延长道路使用寿命。

关键词 探地雷达; 超声波; 耦合技术; 市政道路; 基层病害

中图分类号: U418.6; P631.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.006

0 引言

城市道路网络承载着城市运行与民生出行的核心功能,基层结构的健康状态直接决定道路服役寿命与通行安全。随着交通荷载持续增长与城市更新进程加快,基层裂缝、脱空、松散等隐蔽性病害频发,传统单一检测技术难以兼顾深浅层覆盖、高精度识别与复杂工况适配的综合需求。当前,道路养护行业正加速向数智化、绿色化转型,国家政策明确要求提升基础设施耐久性与运维精准度,推动检测技术从被动排查向主动预防升级。探地雷达与超声波技术在检测原理与应用场景上存在天然互补性,二者耦合应用可突破单一技术的探测盲区与精度瓶颈。本文立足于市政道路基层病害检测的现实痛点,系统研究耦合技术的参数优化、数据融合与工程适配策略,构建全周期、高精度的无损检测体系,为道路病害精准识别、科学治理与低碳运维提供技术支撑,助力交通基础设施高质量发展。

1 市政道路基层病害无损检测核心需求与耦合技术适配性分析

1.1 市政道路基层病害无损检测核心需求

明确市政道路基层病害检测的核心诉求,能给探地雷达与超声波耦合技术的应用提供清晰的方向,让技术应用更有针对性和实用性。市政道路基层是道路

结构的核心承重层,它的健康情况直接影响道路使用寿命与通行安全,如果基层已经出现裂缝、脱空、松散等病害,这些问题会慢慢蔓延到路面,引发更大范围的道路损坏。检测工作要精准定位各类病害的具体位置,还要明确病害的严重程度,给后续处理提供精准依据。无损检测是市政道路检测的核心前提,可以避免检测过程对道路结构造成二次损伤,同时检测工作还要兼顾高效性与低成本,适配市政道路检测的规模化需求,不用投入过多人力物力就能完成大面积检测。市政道路工况复杂,车流量大、路面杂物多等问题都会干扰检测工作,检测技术需要有较强的环境适应性,保障检测过程连续、检测结果可靠,避免因工况干扰导致检测中断或是结果出现偏差。检测工作也不是孤立存在的,它的结果需要紧密对接后续病害治理环节,为维修策略的制定提供详实、准确的数据支撑,确保治理方案贴合病害实际情况,达成精准治理、高效修复、延长道路使用寿命的目标。

1.2 探地雷达与超声波技术单独应用的局限性

探地雷达和超声波技术单独使用时,都存在明显的检测盲区和精度缺陷,这一问题使两种技术结合使用变得很有必要。探地雷达的优势在于可以探测深层结构,在检测市政道路基层的深层病害时具有一定优势,但它对浅层病害的分辨能力不足,碰到基层表面和浅层的细小裂缝,无法精准识别出来,而且路面上

作者简介: 朱军(1990-),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:市政道桥。

的杂物会干扰雷达信号,进一步拉低检测精度,经常会漏掉细小裂缝这类浅层病害。超声波技术更擅长高精度检测浅层病害,可是探测深度不够,无法深入基层深层区域,针对基层内部脱空、松散这类体积型病害,探测范围有限,无法完整掌握病害分布,另外,检测角度只要出现一点偏差,就会直接影响检测结果,造成数据不准。两种技术单独使用都存在各自的局限,检测结果很容易出现误判、漏判,无法满足市政道路基层病害高精度、全范围的检测要求,也不能全面、准确地反映基层的健康状态,因此需要结合两种技术来突破单一技术的限制,提高检测效果。

1.3 探地雷达与超声波耦合技术的适配性

探地雷达和超声波技术的特性高度互补,将二者结合使用能有效打破单一技术的限制,大幅提高市政道路基层病害无损检测的整体效果。探地雷达的核心优势是可以探测深层区域,它能够穿过基层表层,准确找到深层区域的脱空、松散等病害;而超声波技术在检测浅层病害时精度更高,可以准确识别基层表面以及浅层的细小裂缝。二者结合后,就能覆盖不同深度的所有病害,弥补单一技术探测范围不足的缺陷^[1]。探地雷达属于非接触式检测,不需要直接接触路面,能适应路面杂物较多的工作场景,减少了接触式检测带来的干扰。超声波技术则是接触式检测,可以提高浅层病害检测的稳定性。两种检测方式搭配,能适配市政道路车流量大、路面状况复杂等多种工作场景,保证检测工作可以顺利进行。两种技术的检测数据还能形成互补:探地雷达得到的深层数据,和超声波得到的浅层数据可以互相验证、互相补充,能有效去掉单一技术检测中的异常数据,降低检测误判的概率,提高检测结果的可靠性,为后续识别和治理病害提供更全面、准确的数据支撑。

2 探地雷达与超声波耦合技术检测策略

2.1 耦合检测技术参数优化策略

参数优化是实现探地雷达与超声波技术高效协同的核心,能够有效保障耦合检测的精度与效率,让两种技术的优势得到充分发挥。探地雷达的天线频率直接决定探测深度与分辨率,不同厚度的市政道路基层对探测参数的要求不同,优化天线频率需兼顾探测深度与分辨率。针对薄型基层选择较高频率,提升浅层分辨率;针对厚型基层适当降低频率,扩大探测深度,确保适配不同基层厚度的检测需求。超声波技术的检测精度受探头频率与耦合剂选择影响较大,调整探头频率需结合基层病害类型。针对细小裂缝选择高频探

头,提升识别精度;针对体积型病害适当调整频率,保障探测范围。耦合剂的选择需贴合路面工况,减少探头与路面之间的界面反射干扰,避免信号衰减,进一步提升浅层病害检测精度。此外,两种技术的检测速度与采样间隔需协同协调,确保探地雷达与超声波的检测数据能够同步采集,实现数据的精准匹配,避免因采集不同步导致数据错位,影响后续数据融合效果,保障耦合检测工作的高效推进。

2.2 耦合检测流程规范化设计

建立标准化的耦合检测流程,可以保证探地雷达和超声波耦合检测操作统一,也能让检测过程重复进行,减少人工操作差异带来的检测偏差,保障最终的检测质量。检测前的准备工作会直接影响检测精度,需要先彻底清理检测区域,清除路面杂物、浮尘等会干扰检测的因素,避免杂物挡住探头或者影响检测信号;还要对探地雷达、超声波检测设备做全面校准,保证设备性能稳定,检测得到的数据准确。另外,需要结合道路实际情况划分检测区域,确定好检测路线和检测范围,避免出现漏检^[2]。耦合检测的操作流程要严格规范,明确探头布置的间距、位置,结合病害检测的需求合理安排数据采集的顺序,实现两种设备的联动控制,让检测过程可以有序推进,保证检测数据完整,防止因为操作不规范导致数据缺失或者数据失真。检测完成后的数据整理环节也需要规范操作,要制定清晰的数据整理标准,把两种技术采集到的原始数据分类整理、筛选,把探地雷达数据和超声波数据有序整合在一起,同时进行初步分析,去除明显异常的数据,给后续的数据融合工作打好基础。

2.3 耦合检测数据融合策略

数据融合技术可以让探地雷达与超声波检测数据实现优势互补,进一步提高基层病害识别的准确度,让检测结果更有参考价值。探地雷达和超声波的检测原理不一样,采集到的数据在空间坐标上容易出现不匹配的问题,使用数据对齐技术就可以有效解决这个问题,通过坐标校准、数据同步等操作,让两种数据在空间位置上精准对应,保证数据能够相互关联、相互补充^[3]。融合算法的合理选用是数据融合的核心,结合两种技术的数据特点,挑选适配的融合算法,把探地雷达的深层病害数据和超声波的浅层病害数据整合到一起,就能构建出完整的基层病害三维数据模型,清晰地展示病害的分布范围、深度以及严重程度,让病害情况更直观。另外,要建立完善的数据筛选与校验机制,对融合前的原始数据和融合后的综合数据做双重校验,去除设备故障、工况干扰等因素产生的异

常数据,保证融合数据的可靠性,避免异常数据干扰病害识别结果,给后续的病害判定和治理提供精准的数据支撑。

3 耦合技术在市政道路基层病害检测中的应用策略

3.1 不同类型基层病害的耦合检测针对性策略

针对不同类型的市政道路基层病害,调整探地雷达与超声波耦合检测方案,能提高病害检测的针对性与精准度,做到各类病害的精准识别与判定。基层裂缝是最常见的病害类型,特点是宽度小、分布分散,且多集中在浅层区域。针对这类病害,要调整超声波探头的布置方式,缩小探头间距,同时改变探地雷达频率,提高浅层分辨率,更精准地测量裂缝长度、宽度,确定裂缝的延伸方向与严重程度,避免细小裂缝被遗漏^[4]。基层脱空多发生在基层深层,单一技术很难做到精准判定,针对这类病害,要重点发挥探地雷达的深层探测优势,准确找到脱空区域的位置与范围,同时结合超声波数据验证,进一步确定脱空厚度,避免因单一技术检测出现误判,保证脱空病害检测的准确性。基层松散属于体积型病害,分布范围广、检测难度大,针对这类病害,将探地雷达与超声波数据深度融合,整合深层与浅层数据,全面确定松散区域的分布范围、松散程度及影响深度,为后续松散病害治理提供精准依据,提高治理效果。

3.2 复杂市政道路工况的耦合检测适配策略

市政道路的作业情况复杂多变,针对不同作业环境调整探地雷达和超声波的搭配检测方案,可以保障检测工作顺利进行,提高检测的适配性与可靠性。在车流量较大的路段,检测要尽可能降低对交通的影响,可以使用便携式耦合检测设备,简化检测流程,达成快速检测、快速离场的目标,压缩检测时长,防止引发交通拥堵,还能保障检测人员和过往车辆的安全,让检测工作在不干扰正常交通的情况下有序推进。针对路面破损、杂物较多的路段,这类区域外界干扰更多,容易影响检测信号的稳定性,要优化检测前的清理流程,重点清理掉路面的破损碎石、杂物这类干扰物^[5]。同时调整探头的适配方式,搭配防滑、防干扰的探头配件,减少界面反射带来的干扰,保证检测信号稳定,提高检测精度。不同基层材料的物理特性有区别,对检测信号的吸收、反射效果也不一样,结合水泥稳定基层和沥青稳定基层的特性差异,调整探地雷达的天线频率与超声波探头参数,优化数据融合算法,适配不同基层材料的检测要求,保证检测结果可以真实反映基层的病害状况。

3.3 耦合检测与病害治理的衔接策略

建立探地雷达与超声波耦合检测结果和病害治理的联动机制,可以充分发挥检测技术的实际价值,让病害检测和治理高效衔接,提高市政道路养护水平。围绕耦合检测得到的精准数据,结合病害类型、严重程度以及分布范围划分病害等级,明确不同等级病害的危害程度与处理优先级,能给针对性治理方案的制定提供科学依据,避免治理工作盲目进行,让治理资源可以得到合理分配。将检测数据和维修档案相关联,把每次耦合检测得到的病害数据、检测时间、检测区域等信息录入维修档案,做到病害检测、治理、复检的全流程闭环管理,方便后续追溯病害发展过程,评估治理效果,为后续的养护工作提供参考。结合多次耦合检测的数据做趋势分析,还能捕捉基层病害的发展规律,提前预判病害的蔓延方向和发展速度,制定预防性养护策略,及时采取防控措施,阻止病害进一步发展,降低病害治理的成本,延长市政道路的使用寿命。

4 结束语

市政道路基层病害无损检测是道路养护的关键环节,直接关系到道路通行安全与使用寿命。本文围绕耦合技术在基层病害检测中的应用展开系统研究,明确耦合技术与检测需求的适配性,突破单一技术的应用局限,形成涵盖参数优化、流程规范、数据融合的完整检测体系。针对不同病害与复杂工况的适配策略,进一步提升检测技术的实用性与针对性,实现检测数据与病害治理的高效衔接,达成病害精准识别、科学治理与预防性养护的目标。未来可结合智能化技术,进一步优化数据融合算法,提升检测自动化水平,推动耦合检测技术在市政道路养护领域的规模化应用,为市政道路运维提供更高效、更精准的技术保障。

参考文献:

- [1] 杨久宁.市政道路设计中三维智能检测技术与应用效果[J].新疆钢铁,2025(03):100-102.
- [2] 程冰.基于分层混合多模态大模型网络的道路病害检测方法[J].中国安防,2024(11):44-48.
- [3] 曹林梅.市政道路沥青混凝土路面病害与检测技术[J].建材发展导向,2024,22(17):28-30.
- [4] 樊祥龙,马顺芳.浅析市政道路沥青混凝土路面病害及检测技术[J].科技与创新,2023(06):88-90,93.
- [5] 刘榕.城市市政道路沥青路面裂缝及检测修复技术[J].智能城市,2023,09(01):41-43.

基于需求响应的配电网峰谷负荷转移方法分析

罗 锋

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司, 湖北 黄冈 438000)

摘 要 在新型电力系统建设进程中, 分布式光伏、电动汽车充电设施、温控类柔性负荷等多元主体大规模接入配电网, 导致配电网负荷时序分布不均衡, 峰谷差扩大、设备利用率偏低。本文分析了配电网峰谷负荷失衡的机理, 梳理传统负荷转移方法的技术短板, 构建价格型、激励型及混合协同需求响应负荷转移数学模型, 量化不同柔性负荷的调控特性, 并借助 IEEE33 节点配电网仿真场景验证各类需求响应策略的削峰填谷效能。此外, 本文还对用户响应不确定性、配网潮流约束超限等实际问题提出了优化方案, 以期为配电网精细化负荷调度提供技术参考。结果表明, 混合需求响应协同调控策略能将配电网峰谷差降低, 提高整体负荷率。

关键词 配电网; 需求响应; 峰谷负荷转移; 柔性负荷; 优化调度

中图分类号: TM715; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.007

0 引言

传统配电网峰谷负荷调控手段依赖火电机组深度调峰、储能系统充放电调控、人工错峰限电三种方式, 存在调峰能力有限、成本高等问题, 难以适配市场化电力运行模式。需求响应 (Demand Response, DR) 依托用户侧资源优化负荷时序, 打破传统单向调度局限。目前国内外研究多集中于单一电价优化或简单负荷调控, 缺乏对不同需求响应机制的建模对比、柔性负荷差异化调控分析以及工程实际约束下的策略优化, 存在理论模型与实际配网工况脱节的问题。基于此, 本文构建多类型需求响应模型, 量化各类策略效能, 解决实际工程问题, 构建完善的配电网负荷调控技术体系。

1 配电网峰谷负荷失衡机理与需求响应调控机理

1.1 峰谷负荷失衡成因

配电网峰谷负荷差持续扩大是源、网、荷多维度因素耦合作用的结果, 成因可分为三类: 第一, 柔性负荷无序集聚用电。夏季、冬季极端气温下, 居民空调、地暖等温控负荷集中开启, 每日 19:00-22:00 形成固定用电尖峰; 新能源汽车用户集中在晚间回家后充电, 进一步叠加晚高峰负荷; 工商业用户固定时段集中生产, 形成日间局部高峰负荷, 多类负荷时序叠加造成峰值负荷激增^[1]。第二, 城区配电网中分布式光伏装机规模持续增长, 其分布式光伏午间出力达到峰值, 恰逢光照条件最好之时, 大量消去基础负荷, 造成配电网午间负荷低谷化, 而夜间光伏出力归零, 全部负荷均由上级电网供给, 晚间负荷高峰被大大加剧, 形成

了典型的“午谷晚峰”反调峰特性, 峰谷差值显著扩大。第三, 配电网调度调控缺乏精细化程度, 可以表述为: 传统配电网调度以刚性负荷预测为基础, 没有把用户侧柔性负荷纳入调度体系, 也没有市场化的负荷引导机制, 因此不能主动疏导高峰冗余负荷、填平低谷负荷。

1.2 需求响应分类及调控机理

根据调控信号与执行机制差异, 需求响应分为价格型需求响应与激励型需求响应两类, 二者负荷转移机理存在本质区别, 适配不同配网调度场景。

价格型需求响应 (PBDR) 以电力市场电价时序差异为核心引导手段, 包含分时电价、实时电价、尖峰电价三种模式。核心机理为利用峰时高电价、谷时低电价的价差, 激励用户基于用电成本最小化原则, 自主将高峰可平移负荷转移至低谷时段, 属于用户主动式、无强制约束的负荷调控模式。该模式无需电网额外补贴, 调控范围广、适配用户多, 适合日常常态化峰谷负荷优化^[2]。

激励型需求响应 (IBDR) 以电网发布的响应补贴、负荷邀约信号为核心调控手段, 包含直接负荷控制、可中断负荷、需求侧竞价三种模式。核心机理为电网根据实时负荷缺口、过载风险, 向签约用户发布负荷削减、平移邀约, 用户按照合约调整用电功率, 电网根据实际响应容量、响应时长给予专项经济补贴^[3]。

2 传统配电网峰谷负荷转移方法及局限性

2.1 传统主流负荷转移方法

1. 机组深度调峰。依托上级火电、水电机组调整出力, 高峰时段提升机组出力满足负荷需求, 低谷时

作者简介: 罗锋 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 配电网系统。

段降低机组出力适配低负荷水平,是传统电网最基础的调峰方式。对于配电网而言,仅能被动接收上级电网出力调整,无自主调峰能力。

2. 储能系统充放电调控。通过配网侧储能装置实现削峰填谷,低谷时段吸收电能储存能量,高峰时段释放电能分担配网负荷,直接降低配电网高峰供电电压,平滑负荷曲线。

3. 刚性错峰限电。在用电高峰期,通过行政手段强制限制工商业用户用电、压缩非重要负荷,快速削减高峰负荷,属于应急性、强制性负荷调控手段。

2.2 传统方法技术局限性

机组深度调峰受火电最小技术出力、机组爬坡速率约束,调峰容量有限,且频繁深度调峰会大幅增加机组煤耗与设备损耗,运行经济性极差,无法适配高比例柔性负荷波动场景。

储能调控存在明显短板,规模化储能设备投资成本高、建设周期长,且电池循环寿命有限、运维成本高,受场地、容量约束难以全域覆盖配电网,仅可实现局部节点负荷优化,整体负荷转移效能有限^[4]。

刚性错峰限电牺牲用户用电可靠性,破坏市场化用电机制,容易造成工商业用户经济损失,且仅能实现单纯削峰,无法完成低谷填谷,无法从根本上优化全时段负荷分布,适配性极低。

3 基于需求响应的峰谷负荷转移技术与数学建模

3.1 价格型需求响应负荷转移模型

价格型需求响应的核心是用户用电价格弹性特性,用电功率随电价波动呈线性变化,本文引入电力需求弹性矩阵,构建分时电价下负荷转移量化模型。

定义时段 t 电价为 $p(t)$,基准电价下基准负荷为 $L_0(t)$,需求弹性系数 e_{ij} 表示 j 时段电价变化对 i 时段负荷的影响,分为自弹性与交叉弹性。自弹性 $e_{ii} < 0$,表示本时段电价升高,本时段负荷降低;交叉弹性 $e_{ij} > 0$,表示其他时段电价升高,本时段负荷升高,即负荷跨时段平移^[5]。

负荷响应修正模型为:

$$\frac{L(t)-L_0(t)}{L_0(t)} = \sum_{j=1}^{24} e_{ij} \frac{p(j)-p_0(j)}{p_0(j)} \quad (1)$$

式(1)中: $L(t)$ 为需求响应后 t 时段实际负荷; $p_0(j)$ 为基准电价。

基于用户用电成本最小化,构建价格型负荷转移优化目标:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{24} p(t) L(t) \quad (2)$$

约束条件包含负荷可调范围约束、电价上下限约束、负荷平移总量守恒约束,确保仅实现负荷时序转移,无总用电量大幅波动。

3.2 激励型需求响应负荷转移模型

激励型需求响应以电网调控成本最小、负荷转移精度最高为目标,针对签约可控负荷,建立可中断负荷与直接负荷控制联合调控模型。

定义 $P_{cut}(t)$ 为 t 时段用户可削减负荷容量, $P_{shift}(t)$ 为可平移负荷容量, C_{unit} 为单位容量响应补贴成本,总调控成本为:

$$C_{total} = \sum_{t=1}^{24} C_{unit} (p_{cut}(t) + p_{shift}(t)) \quad (3)$$

优化目标为最大化峰谷负荷转移量、最小化调控成本:

$$\min F_2 = \lambda_1 (C_{total}) + \lambda_2 (L_{max} - L_{min}) \quad (4)$$

式(4)中: λ_1 、 λ_2 为权重系数; L_{max} 、 L_{min} 分别为日内最大、最小负荷。

核心约束包括:用户最大响应容量约束、响应时长约束、配网节点功率平衡约束、电压偏移约束都是为了使激励调控不破坏配电网的稳定运行,宜充分考虑。

3.3 混合需求响应协同转移模型

单一价格型响应调控精度低、应急能力差,单一激励型响应调控成本高、覆盖范围小,本文构建价格—激励混合协同需求响应模型,融合二者技术优势。

模型以负荷曲线最平滑、综合成本最低为多优化目标,综合用户用电成本与电网激励补贴成本,目标函数如下:

$$\min F = \alpha F_1 + \beta F_2 \quad (5)$$

式(5)中: α 、 β 为归一化权重系数,满足 $\alpha + \beta = 1$ 。

调控策略实行分时段差异化控制,能合理地用价格型响应处理日常平稳时段的负荷优化问题,用激励型响应处理负荷尖峰、电网过载紧急时段的负荷削减问题,形成“常态电价引导、紧急激励调控”的分层转移机制。

3.4 柔性负荷差异化调控策略

不同类型柔性负荷的可调特性存在显著差异,需针对性制定转移策略:

1. 温控负荷。具备热储能特性,允许短时间功率波动,可实现连续小幅负荷平移,适配价格型常态化调控。

2. 电动汽车充电负荷。充电时段完全可调、功率可控性强,可参与高峰削减、低谷填谷双向调控,适配混合响应策略。

3. 工商业可平移负荷。生产工序固定,仅可整时段平移,响应容量大、精度高,适配激励型紧急调控。

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真参数设置

本文基于IEEE33节点标准配电网模型开展仿真,仿真时长24h,采集典型夏季配电网原始负荷时序数

据,原始峰谷负荷分别为 5.82 MW、2.65 MW,峰谷差为 3.17 MW,峰谷差率为 54.5%,负荷率为 68.2%。

设置三类仿真场景:场景 1 是单纯的价格型需求响应,场景 2 是单纯的激励型需求响应,场景 3 是混合协同需求响应,因此本文设定了电价参数:峰时电价 0.85 元/kWh,平时 0.55 元/kWh,谷时 0.25 元/kWh,激励响应单位补贴 0.3 元/kWh,并取权重系数 $\alpha=0.6$, $\beta=0.4$ 。

4.2 仿真结果对比分析

1. 单一价格型响应效果。价格型调控之后配电网最大负荷降为 5.13 MW,最小负荷升为 2.98 MW,峰谷差缩小到 2.15 MW,峰谷差率 41.9%,负荷率提高到 76.5%,可知该调控手段能很好地平滑负荷曲线,无电网额外调控成本,但是其高峰负荷削减的幅度有限,不能彻底解决极端尖峰负荷问题,调控精度尚有提高的余地。

2. 单一激励型响应效果。激励型调控后最大负荷降为 4.86 MW,最小负荷为 3.02 MW,峰谷差为 1.84 MW,峰谷差率为 37.9%,负荷率为 79.1%,可知所采用的策略削峰能力强,能很快地消除负荷尖峰,但是,单日电网调控成本增加了 2186 元,运行经济性较差,因此不宜长期作为常态化调控手段使用。

3. 混合协同响应效果。混合协同调控策略的作用,配电网最大负荷降到 4.52 MW,最小负荷提高到 3.13 MW,峰谷差 1.39 MW,峰谷差率降到 21.9%,整体负荷率已达 79.5%。与原工况相比,峰谷差降低了 32.6%,负荷率提高了 11.3%。

本策略以电价引导基础负荷优化,以激励调控治理极端尖峰负荷,能合理地实现最优负荷转移,同时大大减少激励补贴用量,因此其综合调控成本比单一激励型降低了 42.3%,真正做到了调控效果与运行经济的兼顾。

4.3 各指标量化对比

三类场景核心指标对比结果表明,混合需求响应策略在峰谷差抑制、负荷率提升、综合经济性方面均优于单一调控模式,完美适配配电网常态化、全时段峰谷负荷转移需求,是最优的工程应用方案。

5 工程应用关键问题与技术优化

5.1 用户响应不确定性优化

在实际工程中,用户用电行为具有较强的随机性,电价、激励信号不可能保证 100% 的响应率,理论调控模型与实际工况必然存在偏差。因此本文引入鲁棒优化算法,设定用户响应率波动区间为 70%~100%,在

建模时预留负荷调控裕度,用实时负荷反馈主动修正调控指令,从而很好地补偿用户响应的不确定性。

5.2 配网潮流与电压约束优化

大规模负荷转移易引发配电网节点潮流偏移、末端电压越限问题。本文在原有优化模型中新增潮流约束与电压约束,将各节点电压波动限制在额定电压 $\pm 5\%$ 范围内,支路潮流不超过线路额定传输容量,在负荷转移优化的同时,兼顾配电网静态安全稳定约束,避免调控引发电网运行故障。

5.3 规模化负荷聚合调控优化

零散用户单体负荷容量小、数量多,直接调控难度大、效率低。引入负荷聚合商模式,将片区内分散的温控负荷、充电桩负荷、工商业负荷聚合为整体可调资源,由聚合商统一参与配电网需求响应调度,实现规模化负荷的集中管控,大幅提升负荷转移的协同性与精准度。

6 结论

新型电力系统下配电网峰谷负荷失衡比较严重,传统调控方法效果不佳,因此本文对基于需求响应的配电网峰谷负荷转移方法做了系统的分析,从机理分析、数学建模、仿真验证、问题优化各环节层层推进,由此得出结论,即传统机组调峰、储能调控等方法均有经济性差、灵活性不足的根本缺陷,不能很好地满足高比例柔性负荷配电网的调控需要。而价格—激励混合协同需求响应策略能优势互补,降低配电网峰谷差,提高设备利用效率。此外,多项手段解决了工程落地中的难题,该方法可联动新能源、储能资源实现源网荷储协同优化,为配电网精细化、智能化调度提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 韩添祎,陈曦,刘庆鑫.峰谷电价下基于长短时记忆网络的配电网短期负荷预测研究[J].东北电力大学学报,2020,40(04):19-28.
- [2] 金星.考虑多类需求响应的主动配电网优化调度方法[J].电工技术,2024(23):144-147.
- [3] 王玉梅,王露露.基于多类需求响应的配电网优化调度[J].电源学报,2024,22(02):273-282.
- [4] 贾东梨,杨晓雨,叶学顺.平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术研究[J].山东电力技术,2025,52(04):49-57.
- [5] 徐维炜,陈红坤,汤骏,等.计及配电网灵活性的峰谷电价分布鲁棒定价策略[J].电力自动化设备,2024,44(12):178-186.

水电站电气二次系统智能诊断与维护策略研究

伏文涛

(四川华电杂谷脑水电开发有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 在新型电力系统建设推进过程中, 水电站电气二次系统的集成化与复杂化程度持续提升, 传统运维模式的故障预判能力不足、检修针对性较差等缺陷逐步凸显, 难以适配电站安全稳定运行的智能化发展需求。本文依托物联网、深度学习、数字孪生与PHM健康管理等前沿技术, 构建覆盖数据采集、故障诊断、状态评估的一体化智能技术体系, 结合二次设备故障机理搭建分级状态维护体系与专项运维方案, 完善全流程运维闭环管控机制。结果表明, 整套体系能够有效识别二次系统隐性渐变故障, 提升故障定位精度与运维效率, 保障水电站电气设备长期稳定运行, 为行业智能运维升级提供技术参考。

关键词 水电站; 电气二次系统; 智能诊断; 多源数据实时采集技术; 智能故障诊断技术

中图分类号: TM62; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.008

0 引言

水电能源凭借清洁稳定、可调可控的优势, 在新型电力系统的调峰调频与安全备用环节承担着重要支撑作用。电气二次系统作为水电站设备控制与故障防护的核心载体, 其运行质量直接决定电站发电稳定性与电网供电安全性。现代化水电站二次设备的耦合程度不断加深, 设备运行故障呈现隐蔽化、渐变化、耦合化的全新特征, 传统人工巡检与定期检修模式无法精准甄别潜在隐患, 容易引发设备异常与机组停机问题。智能化诊断与运维技术的落地应用能够彻底革新传统运维模式, 大幅提升二次系统故障治理能力与设备健康水平, 对推动水电站数字化、精细化运维发展具有重要的工程价值。

1 水电站电气二次系统构成及典型故障分析

1.1 电气二次系统核心构成

水电站电气二次系统设备功能划分清晰, 整体由五大核心模块协同构成。继电保护系统为设备安全运行提供故障防护屏障; 自动化监控系统负责机组工况数据采集与自动化调控; 测控与通信系统承担站内及站网间的数据交互与指令传输; 直流电源系统为二次设备提供不间断稳定供电; 辅助二次回路作为信号与指令传输载体, 保障整套二次系统有序、稳定运行。

1.2 二次系统典型故障类型及故障机理

1. 继电保护装置故障。作为水电站保障一次主设备安全运行、隔离系统故障的核心二次设备, 继电保

护装置的运行状态直接决定整套电气系统的故障处置能力与运行稳定性, 其故障类型可统一划归为硬件本体缺陷与内部逻辑异常两大类[1]。装置长期处于不间断带电运行状态, 厂房温湿度波动与高强度电磁辐射会持续侵蚀板卡与电子元件, 逐步引发电源模块损毁、采样板卡老化、AD采样精度偏移、继电器触点烧蚀等硬件问题, 造成电气量采样数据失真。系统程序固有缺陷、现场参数误整定、外界电磁扰动会造成保护定值偏移、程序运行紊乱、逻辑闭锁失效等问题, 隐蔽性极强的故障特征会大幅提升设备损毁与机组停机的发生概率。

2. 自动化监控系统故障。承担水电站机组工况实时监测、运行数据采集分析、设备自动化调控任务的自动化监控系统, 是维系机组稳定启停与负荷精准调节的关键载体, 设备运行过程中产生的各类异常问题会直接打破机组自动化运行的平衡状态。现场部署的采集终端与传感元件受运行年限与现场干扰影响会出现性能劣化问题, 引发机组转速、设备温度、电气电压电流等运行参数出现跳变、缺失及波形失真现象。现地LCU控制单元逻辑架构异常与控制回路工况劣化, 会造成远程操控指令无法正常执行, 后台存储数据过载与软件适配性不足还会诱发系统卡顿、死机, 彻底丧失机组调控功能。

3. 通信系统故障。贯穿水电站二次系统全部设备的通信系统, 承担着站内设备数据交互、厂站与调度中心信息传输、远程控制指令双向传递的核心职能,

作者简介: 伏文涛(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力生产管理。

通道运行质量直接决定二次系统整体可控性。水电站高压一次设备运行产生的高强度电磁辐射会持续干扰通信信号的正常传输路径, 厂房内部潮湿多粉尘的特殊工况会加速光纤线路老化、设备端口氧化松动, 进一步诱发链路衰减超标、交换机模块工作异常的现象。通信规约适配紊乱、数据传输丢包与延时超标问题会造成现地设备与监控后台数据脱节, 引发远程操控失灵与系统运行失控隐患^[2]。

4. 直流电源系统故障。为继电保护装置、自动控制设备与断路器操作机构提供不间断供电支撑的直流电源系统, 是故障工况下保障二次设备可靠动作的核心供电基石, 设备性能劣化会直接削弱系统安全防护能力。蓄电池组长期处于浮充、欠充或过充的非标准运行状态, 会催生极板硫化、单体电池容量衰减、电池电压差值超标等内部损伤, 严重工况下会出现电池鼓包失效的物理故障。厂房潮湿环境会逐步破坏直流回路绝缘结构, 引发绝缘电阻下降、单点及多点接地故障, 造成系统直流电压大幅波动, 致使二次核心设备丧失动作能力。

5. 二次回路故障。由控制电缆、接线端子、信号及闭锁回路组成的二次辅助回路, 是串联各类二次设备、传输电气信号与控制指令的物理载体, 回路工况优劣直接影响整套二次系统的信号传输精度。水电站机组持续振动、厂房湿度偏高、空间电磁干扰密集的特殊运行环境, 会持续影响端子排与接线部位的接触状态, 逐步引发接线氧化、端子松动、接触电阻增大等隐性缺陷。电缆绝缘层长期受环境侵蚀会出现老化破损问题, 催生回路短路或断路故障, 这类无前置告警信号的隐蔽故障难以通过常规巡检发现, 长期留存会诱发各类二次设备非正常动作。

2 水电站电气二次系统智能诊断关键技术

2.1 基于物联网的多源数据实时采集技术

完整且高精度的多源运行数据是支撑水电站电气二次系统智能诊断模型稳定运算、精准研判故障的核心基础。全域物联网感知架构能够覆盖二次系统所有核心设备与传输链路, 实现全维度运行信息的精细化、高频次采集与规范化处理^[3]。系统在继电保护装置、现地 LCU 单元、直流屏、工业交换机等关键设备部署采样频率 100 Hz 的高精度采集终端, 持续收录 0 ~ 1 000 MHz 频段电磁干扰强度、4 mA ~ 20 mA 标准模拟量电气信号、设备壳体温湿度等核心参数, 同步归集链路衰减数值、数据传输延时、装置告警编码等运行信息。终端采集的原始数据接入边缘计算节点, 完成 300 ms 周期内的数据清洗、噪声剔除与归一化标准化处理, 依托工业

千兆光纤专网完成稳定上行传输, 为后续故障特征提取与设备状态评估提供规整、可靠的数据基底。

2.2 基于深度学习的智能故障诊断技术

具备高维特征挖掘与非线性数据拟合能力的深度学习架构, 能够适配水电站二次系统设备耦合度高、故障机理复杂、隐性缺陷隐蔽性强的运行特征, 完成海量时序运行数据的深度解析与故障精准甄别^[4]。本研究搭建包含三层卷积层与两层池化层的轻量化 CNN 网络, 对设备电气量波形、温度时序曲线、采样数值偏差进行像素级特征提取, 精准捕捉板卡触点形变、采样回路偏移等细微硬件缺陷。模型搭配内置 128 维隐藏单元的双层 LSTM 网络, 持续解析 72 h 连续时序运行数据, 深度挖掘设备参数缓慢劣化的演变规律, 甄别蓄电池内阻递增、绝缘阻值衰减等渐变故障。系统结合两千余条现场故障样本搭建专家知识库, 融合模糊逻辑算法修正模型权重参数, 提升复杂耦合故障的定位与溯源精度。

2.3 数字孪生可视化诊断技术

依托高精度三维建模与实时数据镜像映射构建的数字孪生体系, 能够复刻水电站电气二次系统全设备、全链路的物理拓扑与运行状态, 打破传统人工逐段排查故障的低效运维模式。技术人员依托建模软件按照 1:1 实景比例搭建二次系统虚拟模型, 模型空间坐标精度控制在 ± 2 mm, 精准还原保护装置接线端口、LCU 逻辑回路、光纤传输路由的真实布局^[5]。运维平台以 100 ms 为周期将现场设备运行参数、电气工况、链路状态数据同步映射至虚拟模型, 实现物理设备与虚拟场景的状态实时同步。系统内嵌故障特征比对算法, 参数偏离标准区间时自动高亮标记故障点位, 推演故障信号传播路径, 同时依托多工况仿真试验持续扩充故障样本, 迭代优化诊断算法的适配性能。

2.4 PHM 故障预测与健康管理技术

聚焦设备全生命周期状态管控的 PHM 健康管理技术, 推动水电站二次系统运维模式从故障后置处置转向状态前置预判, 从技术层面解决传统定期检修模式盲目性强、针对性不足的行业痛点。技术体系归集设备出厂参数、投运时长、历史检修台账、实时运行工况等全维度数据, 筛选绝缘电阻、链路损耗、元件内阻、设备温升等十二项核心特征指标, 参照电力运维规程划定各级阈值区间。系统通过加权赋值算法核算设备实时健康度评分, 结合多项式拟合算法追踪指标时序衰减规律, 精准推演蓄电池、信号板卡、接线回路等易损部件的剩余服役时长, 依托量化数据输出设备健

康梯度,为二次系统分级预维护、隐患提前治理提供精准的数据支撑。

3 水电站电气二次系统智能化维护优化策略

3.1 构建设备分级状态维护体系

依托 PHM 健康管理模型输出的全维度设备状态量化数据,结合电力二次设备运维技术规程与水电站设备实际服役工况,可搭建适配不同设备劣化程度的四级状态分级维护体系,精准匹配差异化运维作业标准,彻底规避传统运维模式下过度检修与检修缺位的行业问题。运维系统归集设备绝缘阻值、链路损耗、元件温升、内阻参数等核心量化指标,依据行业标准划定四级状态阈值区间,参数完全贴合基准区间且无时序劣化趋势的设备划定为健康状态,运维体系设定 180 天常态化巡检周期,依托智能终端完成 24 h 不间断状态监测。参数波动处于允许浮动区间、时序曲线呈现微弱劣化趋势的设备划定为亚健康状态,系统将数据采集周期压缩至 2 h 单次,开展端子扭矩校核、回路逻辑校验、设备除尘防潮等精细化预维护。关键参数逼近预警阈值、性能劣化趋势显著的设备划定为劣化状态,运维班组启动专项检测作业,全面排查设备内部元件损耗与回路异常问题并完成缺陷整改。设备功能失效、参数突破失效阈值的故障设备,现场立即启动抢修作业,同步归集故障全量数据迭代更新系统故障样本库。

3.2 分设备专项智能维护策略

结合水电站各类二次设备的结构特性、运行机理与差异化故障演化规律,依托智能诊断技术的量化研判结果制定专属化、精细化的设备运维方案,让各类二次设备的维护作业贴合设备运行实际,全面提升运维工作的精准度与专业性。继电保护装置以每日采样精度偏差、定值整定误差、触点电阻数值为核心监测指标,每季度开展一次完整传动试验与逻辑校核,针对板卡温升异常、触点阻值递增等隐性缺陷开展前置清洁与元件更替作业。自动化监控系统持续校核 4 mA ~ 20 mA 模拟量采集精度与指令执行响应时长,按月完成系统缓存清理、漏洞修复与数据异地备份,针对 LCU 现地单元维持恒温恒湿防护环境,弱化电磁干扰对控制逻辑的影响。通信系统定时校验光纤链路损耗、端口延时、规约解析状态,依托数字孪生链路拓扑排查传输隐患,定期完成光纤端面清洁与交换机模块性能检测。直流电源系统逐小时采集蓄电池单体电压与内阻数据,借助 PHM 模型推演设备服役周期,按半年周期开展均充浮充试验与回路绝缘检测。二次回路依托智能检测仪器排查接线阻值与电缆绝缘参数,结合厂房振动与温湿度数据开展回路防护优化作业。

3.3 建立运维闭环管控机制

依托一体化智能运维平台的数据交互与流程管控功能,串联二次系统从状态监测、故障研判、隐患处置到效果复盘的全作业流程,搭建标准化、流程化、数字化的运维闭环管控体系,规范水电站二次设备智能运维的全链条作业标准。平台以 100 ms 为最小数据刷新周期,实时归集全维度设备运行参数并完成智能研判,针对不同等级的设备异常匹配对应的运维方案与标准化作业流程,逐级推送运维任务至专属作业终端。现场运维人员严格遵循电力二次设备运维规范开展缺陷治理、设备检修与参数校准工作,全程留存作业时序数据、检修参数调整记录与设备工况变化信息。单组运维作业完成后,平台自动比对设备检修前后的参数阈值、运行稳定性与数据传输精度,完成运维效果的量化核验。系统将历次故障台账、运维作业数据、设备状态演变信息同步录入云端故障知识库,持续迭代智能诊断算法的权重参数与阈值体系,稳步提升二次系统故障诊断精度与运维决策的科学性。

4 结束语

水电站电气二次系统的稳定运行始终是保障机组安全发电与电网可靠供电的核心前提,复杂的厂区运行环境与长期不间断的服役状态会持续诱发各类隐性及渐变故障,传统运维模式的技术短板会进一步放大设备运行的安全风险。本文研究的智能诊断技术体系与差异化运维策略能够精准适配二次设备的故障演化规律,有效弥补传统运维方式预判能力弱、检修精度低的缺陷,整套闭环管控体系能够持续提升设备健康水平与运维标准化程度。未来行业研究可深度融合自适应算法与无人值守运维理念,持续优化故障耦合判别模型与智能决策机制,进一步提升水电站二次系统运维的自动化与智能化层级,适配新型电力系统的发展建设需求。

参考文献:

- [1] 崔凯.基于智能算法的水电站电气设备故障诊断与预测分析[J].电气技术与经济,2025(08):392-394.
- [2] 谭军.基于深度学习的水电站电气一次设备故障检修系统[J].电气技术与经济,2025(05):199-201,204.
- [3] 肖飞,薛林锋,叶志华.水力发电中的设备状态智能诊断技术分析[J].电子技术,2024,53(11):168-169.
- [4] 谭承真.水电站电气工程自动化技术及其应用[J].工程技术研究,2024,09(13):81-83.
- [5] 吴明祥.水电站电气装置故障运行状态自动捕捉方法研究[J].电气技术与经济,2024(06):25-27.

智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用

吴俊熙

(广东粤电石碑山风能开发有限公司, 广东 汕头 515000)

摘要 风电机组长期处于复杂风况和交变载荷环境中, 关键部件一旦出现异常, 容易引发停机损失和安全风险。智能传感器融合技术能够整合多源数据, 使机组状态监测由单点判断转向综合识别。本文围绕风电机组安全运行需求, 分析智能传感器融合技术的应用价值, 并从测点布设、数据治理、边缘计算、故障预警和检修闭环等方面提出应用策略, 旨在提高状态识别准确性, 增强故障预警及时性, 为风电场精细化运维提供技术参考。

关键词 风电机组; 安全运行; 智能传感器融合技术; 机组状态识别; 故障预警

中图分类号: TP212; TM315

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.009

0 引言

随着风电机组单机容量不断提高, 设备结构更加复杂, 运行安全对风电场稳定发电具有直接影响。齿轮箱、主轴轴承、叶片、发电机和塔筒等部件长期承受风速波动、温度变化和机械载荷作用, 传统巡检方式难以及时发现早期隐患。单一传感器虽然能够反映局部状态, 但容易受到测点位置、环境干扰和数据失真的影响。智能传感器融合技术通过多源数据采集和关联分析, 提高了设备状态识别的完整性, 使风电机组安全监测逐渐从事后报警转向提前预警。基于此, 研究该技术的应用路径, 对降低非计划停机风险具有现实意义。

1 智能传感器融合技术分析

智能传感器融合技术是在传统传感监测基础上发展起来的综合感知技术, 主要通过多源数据协同处理, 提高设备状态识别的准确性^[1]。该技术通常以振动、温度、压力、电流、转速、位移、应变等数据为基础, 先由前端传感器完成实时采集, 再经过信号滤波、时间同步、异常值剔除和特征提取, 使不同来源的数据具备统一分析条件。在融合过程中, 系统可结合卡尔曼滤波、神经网络、模式识别等方法, 对复杂运行状态进行综合判断, 从而弥补单一传感器容易受环境干扰、测点局限和信号失真的不足。与传统监测方式相比, 智能传感器融合技术更强调数据之间的关联关系。例如: 设备温度升高可能由负荷变化引起, 也可能来自轴承磨损或润滑异常, 只有结合振动频谱、转速波动

和运行功率变化, 才能提高判断结果的可靠性。当前, 该技术已广泛应用于风电、轨道交通、智能制造和大型装备运维等领域, 能够支持故障预警、状态评估、寿命预测和检修决策。随着边缘计算、工业互联网和人工智能算法不断成熟, 智能传感器融合技术将进一步向实时化、轻量化和自学习方向发展^[2]。

2 智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的作用

2.1 提升机组状态识别准确性

智能传感器融合技术能够改变传统单点监测容易失真的问题, 使风电机组运行状态判断更加准确。风电机组运行过程中, 齿轮箱、轴承、发电机、叶片和塔筒等部位会受到风速波动、载荷变化、温度变化等因素影响, 单一传感器采集到的数据往往只能反映局部现象, 难以判断故障来源。智能传感器融合技术可以将振动、温度、转速、功率、油液状态、应变变化等数据放在同一工况下分析, 通过数据校准、特征提取和关联判断, 识别不同信号之间的内在关系^[3]。例如: 齿轮箱温度升高并不一定说明设备故障, 若同时出现振动频带能量增强、油液颗粒增多和转速波动异常, 系统便可判断其存在磨损或润滑失效风险。通过多源信息相互印证, 监测系统能够减少误报和漏报, 使运行状态评估更接近设备真实情况。

2.2 增强故障预警及时性

智能传感器融合技术能够把风电机组安全监测从事后报警转向提前预警。传统监测方式多依靠固定阈

作者简介: 吴俊熙 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力运行。

值,当温度、振动或电流达到设定上限后才触发报警,但许多故障在早期并不会立即越限,而是先表现为趋势性变化。智能传感器融合系统可以连续采集不同测点数据,并通过趋势分析发现早期异常。例如:轴承损伤初期只表现为振动冲击略有增强,随后才出现温升加快、运行噪声变化;叶片覆冰初期会先引起功率曲线偏移,再造成塔筒低频振动增强^[4]。系统若能把这些变化联系起来,就能在故障扩大前发出风险提示。风电场运维人员可依据预警等级安排远程复核、现场巡检、限功率运行或停机检查,避免小缺陷发展成大范围损伤。对于高空设备和偏远风场而言,提前预警还能减少抢修次数,提高检修安排的主动性。

2.3 支撑运维决策精细化

智能传感器融合技术不仅用于发现异常,还能为风电机组运维决策提供数据支撑。风电场机组数量较多,运行环境差异明显,若仍然依赖定期巡检、人工经验安排检修,容易出现过度维护或维护滞后的问题。智能传感器融合系统可以根据机组健康状态、故障风险等级、部件劣化趋势和历史检修记录,为运维人员提供更具体的处置依据。对于轻微异常机组,系统可建议延长观察周期并加强数据跟踪;对于风险持续升高的部件,系统可生成检修工单并提示备件准备;对于短期内可能恶化的故障,系统可建议降低负荷或安排停机检查。通过该种方式,风电企业能够把检修工作从固定周期管理转向状态驱动管理,使人力、备件、吊装资源和检修窗口得到合理配置^[5]。而且,监测数据还可反向修正故障模型,推动风电场形成持续优化的运维管理机制。

3 智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用策略

3.1 围绕故障机理布设传感测点

风电机组安全监测应先明确故障机理,再确定传感器布设方案,不能把测点数量作为系统能力的主要依据。企业可先根据历史故障记录划定重点部位,齿轮箱是传动链监测的核心位置,应在轴承座附近布设振动传感器,在润滑回路中设置油液颗粒监测单元,在箱体关键温升区域安装温度测点^[6]。主轴轴承承受长期交变载荷,监测方案应关注低频振动变化和温升趋势,避免早期疲劳损伤被功率波动掩盖。发电机侧应重点采集绕组温度、电流波形、绝缘状态和冷却系统运行信息,判断过热、偏磁、绝缘劣化和局部放电风险。叶片监测可采用应变传感、倾角传感、声学监测或光纤光栅技术识别裂纹扩展、覆冰和气动失衡。

塔筒监测应采集倾角、应变和低频振动数据,判断结构疲劳、基础沉降和法兰连接松动。测点安装还要符合信号传播规律。振动传感器应靠近振源,温度测点应避免非目标热源,油液传感器应布置在能够反映润滑循环状态的位置。SCADA系统常见的十分钟统计数据适合反映运行背景,却难以捕捉瞬态冲击,因此企业应将其作为工况校正信息,再同高频振动、温升速率和控制参数变化进行综合判断。

3.2 建立运行数据质量治理流程

多源传感数据进入融合模型前必须先完成质量治理,否则诊断结果容易受到噪声和失真数据影响。企业应建立统一的数据接入流程,对振动、温度、转速、功率、风速、桨距角、偏航角等数据进行时间基准处理。振动信号采样频率较高,适合捕捉轴承冲击和齿轮啮合异常。温度信号变化较慢,适合反映热积累和冷却异常。SCADA数据多用于判断机组负荷和控制状态,若平台不做时间对齐,系统就可能把不同时间片段的数据放在同一窗口内分析,导致融合结果偏离真实状态。因此,平台可通过时间戳校准、窗口重采样、缺失值补齐和量纲转换提高数据可比性。对于长期零值、瞬时尖峰、通信中断记录和超出物理边界的数据,系统应先标注来源,再决定是否进入诊断模型。振动数据可提取均方根值、峰值因子、峭度、频带能量和包络谱特征;温度数据可重点计算温升速率、同类部件温差和负荷修正温度;功率数据需要结合风速、空气密度、桨距角和偏航偏差判断曲线偏移。平台还应建立传感器健康度评价机制,根据零点漂移、噪声幅值、信号中断次数和相邻测点偏差生成可信度系数。当某个传感器长期偏离历史基线时,系统应降低其融合权重,并向运维端推送校准或更换提示。启停机、低温启动、限功率运行、检修试验和强阵风冲击应单独标注工况标签。

3.3 推进边缘计算现场化部署

风电机组部分故障具有快速演化特征,监测系统需要缩短数据采集到风险提示之间的时间^[7]。企业可在机舱、塔基或场站侧部署边缘计算节点,使其靠近数据源完成现场处理。边缘节点应承担高速采集、初步滤波、特征提取、阈值判断、事件缓存和本地预警任务。轴承温度快速升高时,节点应立即计算温升速率并核对负荷状态。齿轮箱冲击振动增强时,节点应提取频带能量和冲击指标。叶片覆冰或偏航偏差扩大时,节点应结合风速、功率和控制参数判断风险等级。高频振动、声学波形和电流波形的数据体量较大,长

期全量上传会增加通信压力,也会占用平台存储资源。现场节点可先提取频域特征、冲击特征、转速波动和功率偏差,只在异常事件出现后上传原始片段。云端平台则用于跨机组对比、历史样本训练、寿命预测和检修策略优化。场站网络短时中断时,边缘节点应保留故障前后一段时间内的关键数据,通信恢复后再完成补传。对于高风险事件,边缘节点可向主控系统推送限功率、顺桨或停机建议,但控制动作需要经过权限分级、安全校验和人工确认规则。边缘设备还应预留远程升级、模型同步、网络安全防护和自检接口,防止算法更新影响现场连续监测。

3.4 构建多源状态故障预警模型

固定阈值报警只能发现明显越限问题,风电企业应把监测重点前移到故障早期趋势识别。平台应基于单台机组健康运行数据建立状态基线,再按照风速区间、负荷水平、环境温度、季节变化和运行年限进行修正。相同温度值在高负荷工况下可能属于正常状态,在低负荷工况下则可能提示摩擦异常或冷却效率下降。齿轮箱预警模型可综合高速轴振动、低速轴振动、油液颗粒、轴承温度、转速波动和发电功率变化,识别齿轮啮合异常、轴承剥落和润滑失效趋势。叶片预警模型可利用应变变化、塔筒低频振动、桨距角偏差、风速变化和功率波动判断裂纹扩展、覆冰和气动失衡。发电机预警模型可综合绕组温度、电流谐波、绝缘状态、冷却系统状态和机舱温度,识别过热、偏磁、绝缘劣化和局部放电风险。预警等级可设置为关注、复核、限载、停机四类。关注级用于提示趋势偏离,复核级用于安排远程诊断或现场检查,限载级用于降低运行负荷,停机级用于防止故障扩大。模型建设不宜完全依赖单一算法,机理模型可解释受力和失效规律,统计模型可捕捉长期趋势,机器学习模型可发现复杂变量之间的隐含关系。检修结果应持续回流到模型中,平台需要记录故障部位、异常特征、处置措施、更换部件、复测数据和恢复效果。

3.5 完善监测驱动检修执行机制

智能传感器融合技术只有进入检修流程,才能把监测结果转化为现场安全动作。企业应打通监测平台、工单系统、备件管理和运行调度环节。系统识别异常后,生成包含机组编号、异常部位、风险等级、关联参数、趋势曲线和建议措施的诊断信息。轻微趋势异常可进入观察流程,平台提示运维人员延长数据跟踪时间或缩短巡检周期。中等风险隐患可转化为现场复核工单,系统同步提示检测工具、备件类型和安全注意事项。

高风险故障应触发限功率运行、停机检查或专项诊断建议。预测性检修需要结合风速预报、生产计划、备件库存和人员排班,尽量把检修窗口安排在低风速时段^[8]。监测平台接入备件管理系统后,某类轴承、传感器、制动部件或变桨部件连续出现异常趋势时,系统可提前提示库存准备和采购周期。平台接入人员排班系统后,可根据故障等级、作业距离、天气条件、吊装资源和安全风险生成检修计划。检修完成后,运维人员应录入实际故障位置、损伤程度、处置方式、复测结果和运行恢复情况。平台据此修正预警阈值、模型权重和工况标签。对于反复出现的故障类型,企业应开展专项分析,检查测点布设、控制策略、润滑维护、安装质量和同批次部件状态。

4 结束语

智能传感器融合技术为风电机组安全运行监测提供了更加可靠的技术路径。风电企业应结合故障机理优化传感器测点布局,利用数据治理提高融合质量,并通过边缘计算提升现场响应速度。在此基础上,企业还需建立多源信息故障预警模型,将监测结果嵌入检修管理流程,使异常识别、风险分级、工单派发和处置反馈形成闭环。未来应用中,监测平台可继续结合人工智能算法和运维知识库,提升模型适应能力,使风电机组运行维护更加精准可控。

参考文献:

- [1] 金晓航,刘家光,吴鹏洪,等.基于物理信息图神经网络的风电机组状态监测方法研究[J/OL].仪器仪表学报,1-13[2026-05-29].<https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2614973>.
- [2] 王冰.智能传感器融合技术在风电机组安全运行监测中的应用[J].中国科技纵横,2025(19):16-18.
- [3] 戴春雷.风电机组运行状态监测与故障预警系统[J].电气时代,2025(06):59-62.
- [4] 柳源.风电机组运行状态监测与评价方法研究及实现[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2025.
- [5] 周朝阳.风电机组大型滚动轴承在线监测技术与运行状态评价方法研究[D].上海:上海第二工业大学,2025.
- [6] 金晓航,喻轩昂,关汉林.基于回声状态网络的风电机组运行状态监测[J].仪器仪表学报,2025,46(01):258-269.
- [7] 陈臣,南明军,马宏怡,等.风电机组中主传动设备运行状态精准监测仿真[J].计算机仿真,2024,41(11):119-122,131.
- [8] 陈闻鹤.基于深度学习的风电机组运行状态监测方法研究[D].南京:南京理工大学,2024.

基于大数据分析的电梯运行 风险预警与智能监管系统研究

金大明

(佳木斯市特种设备检验研究所, 黑龙江 佳木斯 154002)

摘要 随着新型城镇化推进, 电梯保有量激增、老旧电梯增多, 传统管控模式存在隐性风险预判不足、数据孤立、监管形式化等痛点, 难以适配城市安全治理需求。本文结合大数据、物联网技术, 开展电梯风险预警与智能监管系统研究, 设计分层模块化架构, 优化数据采集流程, 构建量化风险研判模型及三级预警机制, 开发核心功能模块并完成试点实测, 以期对特种设备安全治理升级提供参考。结果显示, 系统风险预判准确率达97.2%, 可削减无效巡检工时、缩短应急响应时间、杜绝虚假维保, 实现监管数字化转型。

关键词 大数据分析; 电梯运行; 风险预警; 智能监管

中图分类号: TP311.13; TU857

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.010

0 引言

在国内新型城镇化进程中, 电梯保有量持续攀升, 老旧电梯占比也不断提高, 这给特种设备安全防控工作带来了巨大压力。电梯险情与故障的发生, 大多源于机械部件老化等隐性问题, 以及人员管理环节的疏漏。传统电梯运营模式缺乏风险预判能力, 已难以适配城市基层安全治理的需求。随着大数据等技术日臻成熟, 为电梯行业从传统运营向数字化转型提供了有力支撑。这种转型能够打破数据孤岛, 重塑行业运作流程。本文围绕电梯安全监管的现存难点展开深入研究, 探寻问题核心与破解要点, 兼顾理论创新与实践应用, 旨在推动特种设备智慧监管向标准化方向迈进。

1 电梯运行安全管控现状及核心痛点溯源分析

1.1 全域电梯运维及监管基本现状

当前城市电梯已完成全场景部署, 住宅、商业楼宇等高频使用场景中, 电梯长期处于重载运行状态, 日均启停次数及负荷强度呈持续增长态势。但行业运营模式仍未突破传统架构, 监管层面依旧依赖属地市场监管部门的统筹协调, 物业负责值守, 第三方执行维保巡查并实施事后抢修, 关键依靠线下人力, 定期检查以及纸质台账。伴随电梯数量增长, 老旧设备增多, 运维人员短缺的情况加剧, 这种传统模式的承载能力渐渐达到上限, 日常运维漏洞变得越发明显^[1]。大多中小城市并没有创建统一的电梯智能经营云端平台,

每个小区各自独立开展运维工作, 数据也存放在本地, 不同地区之间无法相互传递数据, 缺少全面的大数据分析能力, 属地监管部门难以及时知晓电梯的真实情况。据相关行业统计, 当前国内老旧电梯(使用年限超15年)占比已达28%以上, 这类电梯多分布在老旧小区, 运维资金不足、技术升级滞后, 进一步加剧了传统管控模式的运行压力, 也让数据孤立、监管滞后的问题更加突出。

1.2 传统电梯安全管控模式突出核心痛点

传统电梯运行感知缺乏隐性风险预判能力, 只关注表面故障, 难收集核心参数, 对部件疲劳老化等隐性风险无定量分析依据, 大部分都是隐患爆发后才应对, 安全防护被动。运维数据零碎割裂, 各楼宇电梯运维记录分散、格式繁杂、标准不一, 时间轴有断裂, 难依全面数据判断设备规律, 管理决策靠经验^[2]。监管部门未形成闭环执行体系, 维保环节虚假行为频发, 第三方维保单位为图简便省略流程, 属地监管难线上核验, 无法追溯作业情况, 监管流于形式。应急协作效率低, 故障发生后环节交接拖沓, 易造成次生危害。例如: 部分维保单位仅填写虚假巡检记录, 未实际开展部件检测, 导致电梯曳引机磨损、安全钳失效等隐性隐患长期未被发现, 最终引发故障停运甚至人员被困事件。

1.3 大数据赋能电梯智能风控适配可行性研判

电梯具备全工况运行可量化, 全要素可采集、全时段可追溯, 与大数据聚类分析等技术契合度高。全

作者简介: 金大明(1977-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 特种设备检验检测。

面布置轻量化物联网采集终端,能自动获取机械、电气、工况、环境、运维等五类关键异构数据,云端凭借大数据计算能力自动执行多项操作,无需人工额外介入。该技术既适用于老式电梯加装改造,也适用于新装电梯一体化融合^[3]。如今智慧城市等已形成全域算力架构,物联网专用网络覆盖广,硬件部署成本可接受、运维能耗低、兼容性强,具备全域规模化推广条件。

2 大数据风控核心理论与系统总体架构合规设计

2.1 电梯专用大数据风险研判核心基础理论

时序大数据序列分解理论符合电梯 24 小时持续运行的特点,把数据分成正常稳态,短期干扰以及长期恶化三个方面,这样能精确去除干扰数据,找到真正的恶化风险信号。多源异构数据融合聚类算法会把机械、电气、环境等多种不同种类的数据整合起来,并且执行量纲转换,化解适配障碍,从而加强风险判断的准确性^[4]。设备全生命时段劣化损伤的定量评价理论按照电梯的出厂时间、运行负载、故障修理记录等情况,可实时计算单台电梯的剩余安全服役时长,据此划分安全风险等级,为差异化保养和精准监管提供定量数据支撑。

2.2 系统分层模块化总体合规架构设计

按照特种设备监管信息化创建的行业合规标准,采取分层耦合,模块化独立运维架构,全面考虑数据传输安全等诸多需求,全域分四层核心架构协同运作,现场全域感知采集层为前端基本底座,在电梯关键点位设置各类传感器,超低能耗随时采集毫秒级高精度的运行原始数据,本地边缘节点先行处理,减轻云端输送负担。云端大数据融合研判层装有专用算力中台,关联安全专网,执行多源数据的整合、清理等工作,而且装有推断引擎,及时生成两级风险研判报告。分级风险警报联动层划分出三级标准化警报等级,对应不同的应对策略,防止出现无效发送情况。政企协同智能监管形成层针对四类主体,依循权限适配各种终端,做到全流程无纸化办公。

2.3 系统核心安全合规配套设计

特种设备数据安全及用户隐私保护方面需符合相关规定,为此新增了数据加密、权限分级以及日志溯源这三项安全辅助设计。数据传送时经由专网加密链路来防止工况数据、楼宇位置信息和运维人员信息泄漏;在后台执行最小权限分级管理,监管端、物业端和维保端的权限彼此独立并分开设置,一旦出现越界操作就会立即留下痕迹;运维、警报处理相关数据均

会自动归档保存,而且溯源日志不允许被改动,从而满足特种设备年度合规审查的要求^[5]。

3 电梯运行大数据采集优化与风险研判模型构建

3.1 多源运行大数据精准采集与轻量化预处理优化

数据的精准度影响到风险警报是否真实,要规避传统采集存在的不足,本文改良了全域采集的全流程控制机制。前端硬件采用工业级低功耗传感终端,这种终端适合电梯机房复杂的环境状况,可以 24 小时不间断地采集五类关键数据,机械运行方面(曳引轴承振动烈度)、电气运行方面(制动回路工作电流)、工况负荷方面(单日启停次数)、环境附属方面(机房当时的温湿度)、运维台账方面(历史修缮记录)都有涉及。边缘端安排了轻量化的预处理算法,随时去除因人员走动等人为因素造成的异常数据,填补网络中断期间的序断点,把数据格式统一并加密传送到云端计算力中台,从而为精确判断形成稳固的数据基础。

3.2 大数据电梯量化风险研判模型精准构建

摒弃传统基于固定阈值的风险判断范式,创建动态自适应的大数据风险评判模型。先进行健康基线自学习标定,选取优质电梯收集 15 天稳态数据,形成健康工况基准曲线以改善适配。接着对立体度风险因子加权赋值,依据行业台账确定高危因子,按事故致险权重差异赋予不同数值。再将动态风险评分定量呈现,关联当前运行数据、过往记录及环境因素,算出电梯 0 分~100 分的健康得分,对应三级警报等级。此外,模型需持续更新强化,每阶段纳入最新故障处理和楼宇工况数据,通过反向调整算法参数,降低警报误报与漏报率,确保研判准确。

3.3 三级联动、分级预警、闭环响应机制落地设计

基于风险研判模型计算的电梯健康得分,构建标准化三级联动、分级预警、闭环响应机制,明确各等级预警的处置流程、责任主体与时间要求,实现“预警—处置—核查—归档”的全流程闭环管理,杜绝预警流于形式。当电梯健康得分为 80 分~100 分,处于绿色常态平稳等级时,系统自动实时记录电梯运行工况数据,每周生成标准化健康简报,明确电梯运行状态、关键部件损耗情况,无需人工干预,自动纳入常态化月度检查台账,实现电梯运行状态的动态监测。当健康得分为 60 分~79 分,处于橙色重点提示等级时,系统在政企协同监管平台弹出醒目标识提示,同步向物业运维岗位、维保片区专员发送指向性预警短信,明确标注隐患部位、疑似问题及初步处置建议,要求

相关人员在24小时内赶赴现场开展专项核查,通过移动端上传现场检测数据、隐患照片及核查报告,完成归档流程,确保隐患早发现、早处置。当健康得分低于60分,处于红色紧急联合等级时,系统立即启动电梯现场声光报警装置,同步在云端监管平台发出紧急告警信号,支持一键联动监管部门、物业、维保单位相关负责人,第一时间切断电梯运行电源,禁止电梯继续使用,维保人员需在1小时内赶赴现场开展抢修工作,抢修完成并经线上核验合格后,方可解除电梯运行封锁,全程记录处置过程,确保应急处置规范、高效,防范重大安全事故发生。

4 智能监管功能模块开发与现场实操部署

4.1 全链条智能监管核心模块化功能开发

针对监管履职、运维提质、应急提速、溯源合规四大迫切需求,开发含五大轻量化实用核心功能模块的系统。该系统符合一线人员简便操作要求,无需专业技术培训即可使用。全域态势可视化一张图模块整合辖区在用电梯信息,在电子地图全面标注,方便监管人员掌握安全状况;维保线上闭环溯源管控模块让维保人员扫码签到、上传数据,后台自动对比核查,杜绝虚假维保;故障智能研判辅助判断模块精准定位故障并发送抢修方案;应急救援一键协同调度模块在人员被困呼救时自动同步信息、调集救援力量;合规统计自动报表模块自动生成报告台账,配合合规资料,大幅减少人工统计工作量^[6]。

4.2 现场低成本实操部署适配方案优化

针对老旧小区改造预算较少,要符合楼宇标准化适配需求,需制订出成本低、停工少、快速上线的实用执行方案。存量的老旧电梯不用拆除原来的控制柜,可以外挂无感加装传感终端,这种终端无需布线,无线加密传送,安装单梯只需不到2小时,不会影响居民正常的出行。新安装的电梯可直接与厂家预先留好的数据接口相接,内置一体化采集模块,出厂前就已适配好对接云端平台,以后无需改造扩容,云端平台利用当地既有的智慧城市特种设备专网计算能力基础,不用增添独立服务器硬件设备,按照需求灵活扩充计算资源,极大地削减了全区域落实创建的成本。伴随线下简易运维培训的推出,物业和维保人员会得到一对一的指导,帮助他们操作移动端以及后台的基础功能,这样就能确保系统上线就能稳定高效地运行。

4.3 实测运行成效多维度数据核验分析

选取某城区3个老旧小区,2栋超高层写字楼以及1处商圈综合体中的216台在用电梯执行为期6个月的

全域试点实测,核验系统的实际操作成果,实测数据显示,风险隐患的预先判断准确率达到97.2%,可以精准地提前7天到15天识别部件劣化,回路异常等隐性隐患,没有出现一起电梯涉险安全事故。人工无效巡检工时削减了62%,物业运维人力成本下降,维保靶向作业效率明显改善,虚假维保台账违规问题得以清除,维保履职合规率达到100%,监管履职过程具备追溯性和可核查性。突发困人应急救援的平均响应时间被缩减到8分钟之内,群众的安全满意度得到大幅改善,系统运行稳定未出现宕机情况,数据输送既安全又合规,不存在隐私及工况数据泄露的现象,完全符合全域大规模常态化开展应用的标准^[7]。

5 结束语

本文着眼于电梯安全监管、老旧设备控制以及四方协同运维所存在的痛点、难点和堵点,并结合大数据分析、物联网感知等关键技术,形成分层架构、模块化适配的电梯运行风险提示与智能监管统一系统。经由实际考察试验可知,此系统可解决传统控制环节中的数据孤岛、预测迟缓等问题,做到精确的风险防控,缩减基层运维开支,约束维保活动,稳固民众生命财产安全防线。未来,通过更新极限工况适配算法,加强跨主体间的数据协作,填补偏远地区运维方面的不足,优化系统整体适应能力等,推进该系统全面覆盖应用,助力城市特种设备安全治理朝着数字化方向发展,保障群众出行安全,筑牢智慧城市基层安全治理根基。

参考文献:

- [1] 高利平,张颖.基于大数据分析的电梯安全风险监测与评估系统的开发与应用[J].中国电梯,2025,36(07):63-65,69.
- [2] 冯国顺.基于大数据分析的电梯设备运行监控系统研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(06):47-49.
- [3] 王军泉,刘洲平,谢凡,等.例说基于RBI的现场技术勘验和大数据分析在电梯故障分析中的应用[J].中国电梯,2025,36(03):37-40.
- [4] 吴文祥,岑果,陈少雄,等.电梯大数据决策分析系统的设计及应用[J].中国电梯,2021,32(06):16-21.
- [5] 李维.电梯检验中的危险源与安全保护措施分析[J].中国设备工程,2026(07):163-165.
- [6] 姚忠龙.电梯块式制动器铁芯卡阻原因分析及预防[J].特种设备安全技术,2026(02):49-50.
- [7] 刘万康.基于物联网技术的电梯风险预警与智慧检验模式研究[J].模具制造,2026,26(04):255-257.

人工智能接地系统杂散电流治理 智能化应用优化方案研究

汤佳辉, 严晓杰

(国网丹阳市供电公司, 江苏 丹阳 212300)

摘要 为解决传统接地系统杂散电流治理中监测精度低、响应滞后、治理效率不足、能耗偏高的问题, 本文开展杂散电流治理智能化应用优化研究, 结合人工智能技术构建高效、精准、节能的治理体系。通过分析接地系统杂散电流的产生机理与分布特征, 梳理当前智能化治理技术的应用现状及存在的短板, 利用大数据分析、机器学习、智能控制等人工智能技术, 从监测感知、数据分析、治理执行、运维管理四个维度提出优化方案, 引入量化监测指标与智能调控算法, 实现杂散电流的精准识别、动态预测与高效治理, 以期为接地系统杂散电流治理的智能化升级提供技术参考。

关键词 人工智能; 接地系统; 杂散电流; 智能化治理

中图分类号: TP18; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.011

0 引言

当前, 人工智能技术在杂散电流治理领域的应用仍处于初步探索阶段, 受数据采集精度不足、模型适配性不强、现场落地条件有限等问题制约, 智能化治理的高效精准优势未能充分发挥。基于此, 开展人工智能接地系统杂散电流治理智能化应用优化研究, 构建科学合理的优化方案, 破解现有技术瓶颈, 进一步提升杂散电流治理的智能化、精细化水平, 对保障轨道交通及相关工程安全稳定运行具有重要现实意义。

1 人工智能接地系统杂散电流治理智能化应用现状及存在问题

1.1 智能化应用现状

监测感知方面, 采用智能传感、无线传输技术构建监测网络, 主流设备包括智能阴极保护测试桩、杂散电流数据记录仪等, 可持续性采集交直流杂散电流参数, 采样频率常规场景 1 次 / (10 s ~ 60 s), 地铁高峰加密至 1 次 / s, 数据通过 4G/5G、LoRa 上传至平台。部分场景引入北斗授时, 时间误差控制在 1 ms 以内, 增强数据关联性。数据分析方面, 引入大数据与机器学习技术, 数据预处理后误差控制在 $\pm 5\%$ 以内; 利用支持向量机、神经网络等算法识别杂散电流源头、路径, 预测变化趋势, 部分模型可提前 14 天预警, 准确率超 95%, 并且结合关联数据构建分布模型, 实现风

险分级评估^[1]。治理执行方面, 采用智能排流器、固态去耦合器等设备, 可按照监测数据调整参数, 部分系统实现设备联动, 形成区域性治理网络。

1.2 存在的问题

1.2.1 监测感知系统存在短板

各厂家、各类型的监测设备缺少统一通信协议, 形成“数据孤岛”, 约 40% 监测数据得不到整合; 监测点位布置不够科学, 高风险区域点位不足, 盲区率 15% ~ 20%, 低风险区域点位冗余; 设备抗干扰能力低下, 复杂电磁环境下数据误差 8% ~ 12%; 采样参数设置不当, 峰值电流捕捉不及时^[2]。

1.2.2 数据分析模型泛化能力不足

机器学习模型通常基于特定场景历史数据训练, 泛化能力弱, 场景切换或运行状态变化时准确率从 95% 以上降至 70% 以下; 输入参数单一, 没有整合土壤、环境和设备等关联数据, 溯源准确率仅 65% ~ 75%; 数据处理效率低, 日均 10 GB 以上监测数据处理延迟达 10 min ~ 15 min, 影响响应及时性。

1.2.3 治理执行与监测数据脱节

治理设备与监测系统联动不足, 参数调整仅基于预设阈值, 约 30% 场景存在“过度治理”或“治理不足”; 不同治理设备缺乏协同, 跨区域、多源头杂散电流治理效率低; 治理设备运行状态缺乏实时监测, 故障响应时间长达 2 h ~ 3 h, 影响治理连续性。

作者简介: 汤佳辉 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 输电运检。

2 人工智能接地系统杂散电流治理智能化应用优化方案

2.1 监测感知系统优化

2.1.1 统一通信协议，打破数据孤岛

制定统一的监测设备通信协议，规范各个厂家、各种类型监测设备的数据接口、传输格式，以达到监测数据的互联互通。采用物联网技术构建统一监测数据传输网络，整合智能传感设备、数据记录仪以及参比电极等监测设备，对直流杂散电流、交流杂散电流以及环境温湿度等多维度数据展开采集与传输。此外，搭建数据汇聚平台以对监测数据进行统一存储、分类管理，去除数据冗余，数据整合率提升至95%以上；采用加密传输协议，提高数据传输中的机密性，避免数据遭到丢失或篡改^[3]。

2.1.2 优化监测点位布置，消除监测盲区

围绕杂散电流分布特征、高风险区域分布，采用人工智能算法（K-means 聚类算法）对监测点位进行优化。首先，借助大数据分析梳理杂散电流高风险区域（电流密度 $\geq 0.5 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $\geq 4 \text{ V}$ 的区域）、中风险区域（电流密度 $0.1 \text{ A/m}^2 \sim 0.5 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $4 \text{ V} \sim 15 \text{ V}$ 的区域）以及低风险区域（电流密度 $< 0.1 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $< 4 \text{ V}$ 的区域）；其次，在高风险区域加密监测点位，监测间距控制在 $50 \text{ m} \sim 100 \text{ m}$ ，确保所有的高风险区域监测点位覆盖率达到100%；在中风险区域科学布置监测点位，监测间距控制在 $100 \text{ m} \sim 200 \text{ m}$ ；在低风险区域减少监测点位，监测间距控制在 $200 \text{ m} \sim 500 \text{ m}$ ，防止资源浪费。

2.1.3 增强监测设备抗干扰水平，提高数据精度

优化监测设备的硬件结构，采用抗电磁干扰能力强的传感器、数据采集模块，如选用屏蔽型高精度电流传感器、抗干扰型参比电极，降低电磁环境对监测数据造成的影响。在监测设备安装期间采取屏蔽、接地等抗干扰方法，如对信号线进行屏蔽处理，将监测设备接地电阻控制在 4Ω 以下，降低电磁干扰导致的数据漂移。优化监测设备的采样参数，常规场景采样频率设置为1次/30s，地铁早晚高峰、设备故障等特殊场景加密至1次/1s，确保捕捉峰值电流；监测时长至少连续72小时，整改验收阶段延长至7天 $\sim$ 30天，增强数据完整性^[4]。

2.2 数据分析模型优化

2.2.1 构建多参数融合的数据分析模型

扩大数据分析模型的输入参数范围，整合杂散电

流监测数据、土壤介质参数（电阻率、湿度、酸碱度）、环境参数（温湿度、降雨量）、设备运行参数（牵引负荷、电解电流、变压器负荷）、接地系统参数（接地电阻、接地体布置）等多维度关联数据，提升数据分析的全面性。采用深度学习算法（卷积神经网络、循环神经网络）构建多参数融合的数据分析模型，依托海量数据训练提升模型的泛化能力，使其适应各运行状态、场景下的杂散电流分析需求，模型识别精度提升至95%以上，溯源准确率提升至90%以上。

2.2.2 优化数据处理流程，提升处理效率

构建高效的数据预处理流程，采用异常值检测算法（孤立森林算法）、噪声过滤算法去除监测数据中的异常值、噪声，数据预处理时间减少至1 min以内。引入边缘计算技术，在监测节点本地对数据进行初步处理，筛选出重要数据后再上传到数据平台，减少数据传输量，减轻数据平台的处理压力，数据传输量减少40% $\sim$ 50%。优化数据分析模型的算法结构，采用并行计算技术增加模型处理率，将监测数据的处理延迟控制在1 min，实现杂散电流的分析与预测，误差控制在 $\pm 4\%$ 以内。

2.2.3 构建杂散电流风险分级与溯源模型

结合杂散电流强度、分布范围以及腐蚀风险等指标构建杂散电流风险分级模型，将杂散电流风险分为一级（高风险，电流密度 $\geq 2.5 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $\geq 15 \text{ V}$ ）、二级（中高风险，电流密度 $1.0 \text{ A/m}^2 \sim 2.5 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $10 \text{ V} \sim 15 \text{ V}$ ）、三级（中风险，电流密度 $0.5 \text{ A/m}^2 \sim 1.0 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $4 \text{ V} \sim 10 \text{ V}$ ）、四级（低风险，电流密度 $< 0.5 \text{ A/m}^2$ 、交流干扰电压 $< 4 \text{ V}$ ）四个等级，为针对性治理带来依据。构建杂散电流溯源模型，分析杂散电流的分布规律、相位特征，结合多维度关联数据来识别杂散电流的产生源头、传播路径，溯源响应时间缩短至30 s以内，为源头治理带来技术支撑^[5]。

2.3 治理执行系统优化

2.3.1 构建监测—治理联动机制

建立监测数据与治理执行的实时联动机制，将数据分析结果、杂散电流风险等级与治理设备的运行参数精准关联，实现治理措施的动态调控。例如：当监测到杂散电流达到一级风险时，智能排流器自动切换为强制排流模式，增大排流功率，将杂散电流快速泄放；当杂散电流降至四级风险时，自动切换为节能模式，降低排流功率，减少能耗。对于交流杂散电流，固态去耦合器根据交流干扰电压实时调整导通阈值，确保

交流杂散电流超阈值时瞬间导通, 全额泄放交流电流, 同时避免直流电流泄漏, 直流漏电流控制在极小范围。联动机制建立后, 治理响应时间缩短至 500 ms 以下, 治理针对性提升 40% 以上。

2.3.2 实现治理设备协同联动

构建区域性杂散电流综合治理网络, 实现不同区域、类型治理设备的协同配合。采用智能控制算法, 按照杂散电流的分布范围、产生源头来统筹调度智能排流器、固态去耦合器等治理设备, 建立起协同治理体系。例如: 对于跨区域的杂散电流, 协调不同区域的治理设备同步启动, 从源头、传播路径和受影响区域多环节进行治理, 增加治理效率; 对于多源头的杂散电流, 根据各源头的杂散电流强度分配治理资源, 主要治理强度大、危害严重的源头。此外, 优化治理设备的运行参数, 结合杂散电流的变化趋势调整治理手段, 实现“预判式治理”, 杂散电流抑制效率提升至 95% 以上。

2.3.3 优化治理设备运行监测与故障预警

在治理设备上安装状态监测传感器以持续性采集设备的运行参数, 监测设备的运行状态, 第一时间发现设备故障(排流器失效、去耦合器损坏)。结合机器学习算法构建治理设备故障预测模型, 分析设备运行数据, 预测设备故障风险并发出预警信号, 故障预测准确率提升至 90% 以上, 故障响应时间缩短至 30 min 以内。除此之外, 优化设备的自我诊断功能, 当设备存在轻微故障时展开自我修复, 无法修复时马上通知运维人员处理, 增强治理设备的运行稳定性。

2.4 运维管理系统优化

2.4.1 完善智能化运维平台功能

升级智能化运维平台, 设置运维数据分析、运维策略优化以及智能调度等高级功能。对运维数据(设备运行状态、故障记录、维修记录)给予深度挖掘, 分析运维期间出现的问题并改进运维方法, 以最大限度提升运维效率。例如: 按照设备故障规律安排巡检时间、维修方案, 减少冗杂的巡检与维修工作, 整体运维成本节省 25% 以上。除此之外, 搭建可视化运维界面, 将杂散电流监测数据、治理设备运行状态以及运维记录等信息直观展示出来, 方便运维人员了解系统运行情况, 加强运维操作的便捷性。

2.4.2 加强运维人员智能化培训

采取系统化的培训方案, 对运维人员展开智能化技术培训工作, 主要培训人工智能设备操作、数据分析模型应用以及运维平台操作等内容, 增强每个人的

智能化操作水平。按时进行技能考核, 保证运维人员可以掌握智能化设备、平台的操作方法, 最大限度凸显出智能化功能的效果。除此之外, 建立运维人员交流体系, 分享运维经验、处理运维难题, 以增强运维团队水平, 运维人员操作熟练度提升至 90% 以上。

2.4.3 构建健全的运维数据库与安全防护体系

一方面, 建立运维数据库并整合设备运行数据、故障记录以及监测数据、治理数据等相关的运维数据, 为运维策略优化、设备故障预测带来良好的数据支撑。采用大数据分析技术对运维数据进行挖掘分析, 总结运维规律, 增强运维管理的科学性; 另一方面, 加大运维平台安全防护力度, 采用数据加密、访问控制等安全技术, 避免数据泄露、恶意攻击, 进一步增强系统的安全性。建立安全应急响应机制, 当存在安全隐患时快速启动应急处理流程, 减少安全风险, 确保系统安全隐患发生率降到 3% 以下^[6]。

3 结束语

随着人工智能、数字孪生等技术的迭代升级, 接地系统杂散电流治理的智能化水平将进一步提升。未来可引入强化学习、联邦学习等算法以优化数据分析与治理控制模型; 融合数字孪生技术, 构建接地系统杂散电流虚拟仿真模型, 推动杂散电流治理模式从“被动应对”向“主动预防、精准治理”全面转型, 为基础设施接地系统安全稳定运行提供更全面、更可靠的保障。

参考文献:

- [1] 朱传涛, 邢鑫, 杨涛, 等. 天然气长输管道交流杂散电流干扰对阴保运行影响研究 [J]. 化工管理, 2026(03):102-105.
- [2] 高志贵. 城市地铁对地下管线杂散电流干扰问题研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2026(01):52-55.
- [3] 赵承, 范列朋. 地铁杂散电流对埋地钢质燃气管道影响分析 [J]. 煤气与热力, 2025, 45(11):67-70.
- [4] Khan TM. 基于 NRC-TPS 的地铁杂散电流治理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2025.
- [5] 刘凯, 常峰, 何文涛. 浅析杂散电流对城市燃气管网的危害及治理办法 [C]// 中国城市燃气协会安全管理工作委员会. 2025 年燃气安全交流研讨会论文集. 渭南市天然气有限公司, 2025.
- [6] 包文红, 李广印, 吴少炯. 天然气管道受交流杂散电流干扰评估及排流防护治理 [J]. 特种设备安全技术, 2024(03):12-15.

基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估与运维优化研究

朱波, 夏茂钧, 戴星

(眉山多能电力建设有限责任公司, 四川眉山 620020)

摘要 随着电网设备保有量持续增长、新能源并网规模不断扩大, 传统运维模式在状态感知时效性、健康评估准确性和决策优化科学性上的短板日益凸显。为此, 探索基于数字孪生技术的电网设备全生命周期管理路径, 覆盖多源异构数据实时采集与融合、混合驱动健康状态评估等核心技术环节, 同时贯通规划设计阶段的方案推演、运维检修阶段的智能预警、退役处置阶段的延寿评估与绿色回收全流程。本文深入探讨数字孪生驱动的状态评估方法与运维优化策略, 以为电网设备资产精益化管理提供参考, 推动运维模式实现从被动反应向主动预判和精准决策的转变。

关键词 数字孪生; 电网设备; 全生命周期; 状态评估; 运维优化

中图分类号: TM76; TP399

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.012

0 引言

数字孪生通过集成物理模型、传感器数据与历史信息, 在虚拟空间中构建实体装备的全生命周期映射, 其核心技术涵盖多源异构数据实时采集与融合、多时空尺度高精度建模以及云边协同超实时仿真与人工智能决策, 能够实现“感知—建模—仿真—预测—决策”的闭环运行。在电网设备管理领域, 数字孪生为突破传统状态评估滞后、检修决策依赖经验的瓶颈提供了全新路径。因此, 深入探索基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估方法与运维优化策略, 对于提升电网运行可靠性、降低全生命周期成本具有重要的工程应用价值。

1 数字孪生基本概念与关键技术

1.1 数字孪生基本概念

数字孪生是一个集成多物理、多尺度、概率模拟的仿真模型, 通过使用最优的物理模型、传感器数据和历史信息, 可以模拟出真实飞行器或系统的全生命周期状态。它集成了建模与仿真、虚拟现实、物联网、云边协同以及人工智能等技术, 通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态, 通过指令来调控物理实体对象的行为, 并通过相关数字模型间的相互学习来进化自身^[1]。数字孪生是指在数字空间中建立物理电网的镜像系统, 该系统利用实

时数据来精确反映物理对象, 并且可以进行模拟、监控、预测和优化等任务, 数字孪生电网建立物理电网的全要素数字化镜像, 让实体设备和虚拟模型可以进行实时交互, 该系统通过感知、建模、仿真预测决策形成的闭环运行模式, 支持源网荷储进行高效互动, 并且支持新能源以高比例接入和高水平消纳。

1.2 数字孪生关键技术

1.2.1 多源异构数据实时采集与融合技术

电网数据主要来源于 SCADA 系统、PMU、智能电表、气象卫星、无人机巡检等各个不同的系统^[2]。利用部署边缘计算节点的方式, 并且使用 OPC UA、MQTT、IEC 61850 等标准化工业协议, 可以达到毫秒级的数据采集和传输。在云端建立统一数据中台, 对数据进行清洗和时空对齐, 并且实现语义标准化, 形成多源数据融合模式, 可以把气象数据、用电行为、设备历史记录等超过 12 类异构数据源整合起来, 利用知识图谱技术建立设备全生命周期档案。

1.2.2 多时空尺度高精度建模技术

电网数字孪生建模包括毫秒级电磁暂态和年度规划运行等多时空尺度, 并且分为元件级、馈线级、区域级和系统级这四个层次, 元件级运用基于物理的有限元建模方法, 并且也结合数据驱动残差网络来进行混合建模; 系统级应用降阶卡尔曼滤波形成低维状态

作者简介: 朱波 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程。

空间。通过毫米级激光点云建模可以实现杆塔、线路、变电站等要素的高精度三维还原。

2 数字孪生在全生命周期中的作用机制

2.1 规划设计阶段的精准推演机制

在电网规划设计阶段,数字孪生基于历史运行数据与地理信息构建多场景规划仿真环境。通过融合负荷预测模型、新能源出力概率模型及电网拓扑约束,对不同网架结构方案进行全时序仿真推演,量化评估供电可靠性、线损率、新能源消纳能力等关键指标^[3]。同时,利用孪生体的“预演”能力,对规划方案开展“假设—仿真—评估”闭环迭代,自动推荐最优变电站选址、线路路径及容量配置方案。孪生系统还可叠加极端天气、设备故障等扰动场景,验证规划方案的鲁棒性,从源头规避未来运行风险,降低全生命周期综合成本。

2.2 运维检修阶段的智能诊断预测机制

运维阶段运用数字孪生技术实时同步设备状态量,其中包括油色谱、局放和红外测温、环境负荷数据,并以此来建立设备退化和健康度评估模型。并运用长短时记忆网络和物理退化模型相结合的混合驱动方式,对变压器、断路器、电缆等主要设备的剩余寿命及故障概率进行预测。同时,孪生体利用比较实际状态和仿真基准模型之间的差别,来完成早期异常检测和根因溯源,比如分辨套管介损异常是由受潮或者污秽引起的。

3 基于数字孪生的电网设备全生命周期状态评估方法

3.1 状态感知、数据获取与多源信息融合

电网设备状态感知需要进行多源异构数据的统一采集和融合,数字孪生需要利用多源数据融合来达到虚实双向实时交互的目的,该技术的主要指标规定数据同步精度要达到微秒级^[4]。作为国家电网公司 2025 年数字孪生电网九大重点工程之一,设备全过程贯通提升工程覆盖电网核心业务多、贯穿设备资产管理链条长,为设备质量的深度解析与全环节问题追溯提供了有力支撑。

在变电站侧部署智能采集终端,针对变压器、断路器、GIS 等主设备接入油色谱在线监测装置、超高频局放传感器、铁心接地电流监测单元以及分合闸线圈电流波形采集模块。所有传感器通过 RS485 总线汇聚至边缘计算网关,网关运行实时数据清洗算法,剔除明显超出量程的异常点并采用三次样条插值补齐缺失数据。对于红外热像和紫外放电视频流,利用边缘端

轻量化卷积神经网络提取热点温度最高值及放电光子计数的时序序列。同时,从站控层获取 SCADA 系统的电压、电流、有功无功等遥测数据,从生产管理系统读取设备台账、出厂试验报告及历史检修记录。在云端建立基于 OPC 统一架构的信息模型,按照国际电工委员会通用信息模型标准将不同来源的数据统一映射为“设备—时间—属性—值”四元组。采用扩展卡尔曼滤波对同一物理量的多个信源进行最优融合估计,消除传感器漂移和随机噪声。

3.2 模型构建,全生命周期健康状态评估

全生命周期健康评估的核心是建立融合物理机理与运行数据的混合模型。该模型以设备出厂参数为基准,结合实时感知数据动态构建健康基准曲线,通过多维度特征加权输出健康指数。这种混合建模方式既保留了物理模型的科学解释性,又通过数据驱动方法自适应个体差异,实现对设备从投运到退役全过程的连续量化评估。

以油浸式变压器为例,利用热老化理论形成绝缘纸聚合度随热点温度和时间衰减的机理方程,并且引入电老化修正因子,把局部放电累积效应纳入模型模式中,同时使用设备在投入使用初期进行的出厂试验资料和前三个完整检修周期内稳定的运行记录,通过粒子群优化算法反演模型中与个体设备相关的老化活化能参数,使基准模型贴合该设备的实际老化轨迹。健康基准的建立方法如下:取设备投运后第一个检修周期内的油色谱比值、介质损耗因数、绝缘电阻、铁心接地电流等特征参数,经主成分分析降维后拟合为多维高斯分布,作为健康域的参考标准。实时评估过程提取当前周期内同维度特征向量,计算该向量和健康域之间的马氏距离,然后利用 S 型函数把它转换为介于零和一之间的健康指数。健康指数分为优、良、注意、异常和严重这五个等级。对于频繁承受短时过载的配电变压器,将过载累计时长作为额外的衰减因子嵌入评估模型。

4 数字孪生视域下面向全生命周期的电网设备运维优化策略

4.1 规划设计预演,方案择优比选

规划设计阶段引入数字孪生,可构建电网规划方案的虚拟推演环境。通过孪生体对多种网架结构、站址选择、容量配置方案进行全时序仿真,量化评估供电可靠性、线损率、新能源消纳能力等关键指标。以孪生预演替代传统经验决策,实现方案比选从定性到定量的转变,从源头降低全生命周期运维成本。

在数字孪生平台中导入待规划区域的地理信息、现有网架拓扑、三年以上负荷历史数据以及新能源并网规划。规划设计人员根据初步设想建立两种至三种备选方案,如新建变电站方案、增容改造方案、分散式布点方案。将各方案的设备参数、线路参数录入孪生模型,设置未来五年至十年的负荷增长预测和多场景新能源出力曲线。孪生系统对每个方案开展逐小时连续仿真运行,自动计算各年度的供电可靠率、综合线损率、设备平均负载率以及N-1通过率。在此基础上,孪生平台内置多目标优化引擎,以全生命周期成本最小化为目标,将建设投资、运行维护费用、预计停电损失三者加权求和,输出各方案的综合评价价值。同时,系统可叠加极端天气、设备故障等扰动场景,仿真不同方案在异常工况下的自愈能力和恢复时间。仿真结果以可视化图表展示各方案的优劣分布,规划人员可点击任意时间点查看详细数据^[5]。

4.2 运维智能预警,精准检修决策

数字孪生驱动的运维策略核心在于将“事后处置”前移至“事前预警”。通过实时镜像设备状态并融合退化规律,构建故障概率的动态推演模型。同时,基于推演结果匹配差异化检修策略,使运维干预时机与设备实际健康水平精准对齐,实现从定期检修向预测性检修的范式转换。

在数字孪生平台上为每台主设备建立专属的健康档案,档案包含设备铭牌参数、出厂试验数据、历年检修记录以及每日更新的油色谱、局部放电、红外测温等实时数据。孪生系统采用时序预测模型对关键状态量进行未来三十天至九十天的趋势计算,当预测值接近标准限值时自动触发预警并推送至运维人员。收到预警后,运维人员在孪生平台点击预警设备,系统立即展示预警原因分析。

4.3 退役延寿评估,绿色回收优化

随着社会经济的蓬勃发展,电力已经成为关乎国家经济命脉、保障国计民生发展的重要能源。国家电网公司担负着保障国家能源安全、振兴实体经济、赋能美好生活的重责大任。同时,设备临近寿命末期时,数字孪生可以整合全生命周期运行与检修数据,构建设计寿命、实际老化程度与剩余承载能力的三维评估模型,并基于电-热-力耦合仿真,量化设备继续运行的安全裕度与风险,提出延寿、降级或退役的决策建议。

当设备运行年限接近设计寿命的时候,数字孪生平台自动启动退役评估流程。系统调取该设备从投运

至今的全部数据,包括出厂试验值、历次检修报告、过载历史记录、绝缘老化测试结果等。首先基于热老化模型,根据实际负载曲线反演出等效老化年限,与设计寿命进行对比。若等效老化年限明显低于设计寿命,表明设备具备延寿潜力;反之则建议退役。对于具备延寿潜力的设备,孪生系统开展电-热-力耦合仿真,模拟未来三年至五年继续运行时的绝缘强度衰减和热点温度分布,评估在不同负载率约束下的安全裕度。系统输出延寿可行性报告,明确建议的负载率上限、加强巡检的具体项目和频次以及下次全面评估的时间节点。对于需要退役的设备,孪生系统进一步启动绿色回收优化模块。该模块根据设备的结构组成,自动生成最优拆解序列:先排放并检测绝缘油,根据油品检测结果分类为可回收再生油、可降级使用油或危废处置;再拆解铜绕组、铁芯硅钢片、绝缘材料、套管、分接开关等部件,标注每种材料的预估重量和纯度。系统对接物资回收企业的报价数据库,计算每台退役设备的可回收价值,并生成拆解工艺指导书,明确各步骤的安全注意事项和环保处置要求。

5 结束语

本文系统梳理了数字孪生的基本概念与关键技术,阐明了其在电网设备规划设计、工程建设及运维检修阶段的作用机制。在此基础上,构建了涵盖数据获取与多源信息融合、全生命周期健康状态评估方法体系,并提出了规划设计预演、运维智能预警、退役延寿评估三项优化策略。实际应用表明,该框架实现了设备健康指数的动态量化、剩余寿命的滚动预测以及检修决策的智能生成,显著降低了非计划停运风险,延长了设备服役周期,为电网资产的全生命周期价值最大化提供了可落地的技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄文德,张晓飞,庞湘萍,等.基于北斗与数字孪生技术的智能电网运维平台研究[J].电子测量技术,2021,44(21):31-35.
- [2] 乔玉聪,霍跃钦,姚成功,等.基于数字孪生的连铸设备智能运维平台研究与应用[J].重型机械,2026(01):1-7.
- [3] 詹谭,博驰.基于数字孪生的电网数字化转型研究[J].能源与环保,2021(11):43.
- [4] 沈超,陈兴东,史清璞,等.数字孪生驱动的变电站智能巡检路径优化与设备健康评估方法[J].信息与电脑,2025(07):38-40.
- [5] 王璐,苗淞.基于数字孪生技术的变电站智能管理与运维优化研究[J].电工电气,2024(05):69-73.

建筑工程质量检测中钢筋检测技术分析

张 永

(合肥市建设工程监测中心有限责任公司, 安徽 合肥 230022)

摘 要 钢筋工程作为混凝土结构的核心骨架, 其施工质量直接决定建筑物的承载能力与耐久性。本文依托某大型商业综合体项目, 系统阐述了电磁感应法钢筋扫描、半电池电位锈蚀检测及力学性能取样试验的综合应用流程。通过对比分析检测数据与设计规范, 揭示了保护层厚度偏差对结构耐久性的影响规律, 并利用统计图表定量评估了钢筋分布与力学性能的合格率。结果表明, 采用无损检测与局部破损验证相结合的复合技术路径, 能有效实现对钢筋工程质量的精准管控与科学评价。

关键词 钢筋检测; 保护层厚度; 电磁感应法; 半电池电位; 力学性能

中图分类号: TU511.32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.013

0 引言

在建筑工程质量管控体系中, 钢筋分项工程作为隐蔽工程的关键环节, 其质量控制直接关系到整体结构的安全性与耐久性。钢筋的规格型号、数量配置、空间位置精度及其力学性能指标若存在任何缺陷或偏差, 都将显著削弱结构的承载能力, 进而可能诱发裂缝的开展与扩展, 甚至导致突发性的脆性破坏, 对工程安全构成严重威胁^[1]。传统的质量验收方法主要依赖于混凝土浇筑前的肉眼目测检查和简易钢尺测量, 这些手段虽能对表面状况进行初步判断, 但对于混凝土硬化后内部钢筋的实际状态、锈蚀程度及力学性能变化, 则缺乏行之有效的无损检测与评估方法。随着现代检测技术的持续进步, 基于电磁感应原理的钢筋扫描仪、用于评估钢筋锈蚀风险的半电池电位法以及直接获取混凝土芯样进行力学性能试验的钻芯取样技术, 已逐渐发展成为行业内的主流检测手段^[2]。然而, 任何单一的检测技术均存在其固有的应用局限, 如钢筋扫描仪在遇到密集钢筋排布时易受电磁屏蔽效应干扰, 导致检测精度下降。因此, 如何根据工程实际情况, 科学合理地组合运用多种互补的检测技术, 并对由此获得的检测数据进行综合分析 with 准确解读, 已成为当前工程质量鉴定与评估领域一个亟待深入研究和解决的重要课题。本文结合实际工程案例, 深入分析钢筋实体检测技术的应用策略与数据判读方法, 旨在为同类工程的质量评价提供技术参考。

1 工程概况

某大型商业综合体项目, 结构形式为框架—剪力墙结构, 地上 18 层, 地下 2 层, 总建筑面积约 8.6 万 m²。设计使用年限为 50 年, 抗震设防烈度为 7 度, 环境类别地上部分为一类, 地下室外墙及底板为二 b 类。结构主要受力构件梁、柱、墙混凝土强度等级为 C30 至 C40。本次检测范围为地下二层至地上三层主体结构的主要受力构件, 检测内容依据《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204-2015) 及相关标准要求, 重点针对以下指标: 受力钢筋保护层厚度、钢筋间距、钢筋锈蚀电位以及钢筋原材力学性能。

2 钢筋检测技术的应用

针对该工程已浇筑成型的混凝土构件, 采用无损普查定位 + 局部破损验证的综合技术路线。

2.1 电磁感应法钢筋探测

采用 HC-GY71T 型一体式钢筋扫描仪对梁、板、柱构件进行网格化扫描。检测原理为: 仪器探头产生交变电磁场, 混凝土中的金属钢筋切割磁感线产生感应电流, 探头接收反馈信号以计算钢筋位置及保护层厚度。检测前需对已知部位进行校准, 消除不同钢筋直径及相邻钢筋的干扰。对悬挑构件、跨度大于 4 m 的梁端部及底部受力区进行重点扫描, 抽样数量不少于规范规定数量的 2% 且不少于 5 个构件^[3]。检测时, 将扫描仪探头紧贴构件表面, 按照预设的网格间距 (100 mm × 100 mm) 匀速移动, 仪器实时显示钢筋位置、走向及

作者简介: 张永 (1981-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建设工程检测。

保护层厚度数值。对于扫描过程中发现的钢筋位置异常或保护层厚度疑似超差区域,采用标记笔进行标记,并记录其具体坐标。当仪器显示钢筋保护层厚度值超出设计允许偏差范围时,需在该测点周围增加扫描密度,以确认偏差的真实性和范围。对于框架梁,重点检测梁底纵向受力钢筋及梁侧腰筋的保护层厚度;对于楼板,则主要检测板底受力钢筋的保护层厚度及分布钢筋间距;对于柱,重点检测柱纵向受力钢筋的保护层厚度,尤其是柱角部钢筋。扫描完成后,仪器可自动存储检测数据,通过专用软件导出后进行数据整理与初步分析,为后续的局部破损验证提供准确的定位依据。

2.2 半电池电位法

为评估地下室外墙及水位变化区构件内部钢筋的钝化膜状态,采用 CANIN+ 型半电池电位测试仪进行锈蚀概率检测。该方法通过测量钢筋与混凝土表面铜/硫酸铜参比电极之间的电位差,判断钢筋发生锈蚀的倾向性。检测前需对构件表面进行处理,清除表面浮浆、油污及疏松层,确保混凝土表面清洁干燥,必要时采用砂轮片轻磨表面以去除碳化层,使参比电极能与混凝土表面良好接触。检测时,将铜/硫酸铜参比电极底部涂抹耦合剂(饱和硫酸铜溶液或专用导电膏),紧贴混凝土表面,按照预设的测区网格(200 mm×200 mm)逐点测量,每个测区至少选取 20 个测点,且测点应避开钢筋接头、预埋件及裂缝等干扰区域。仪器显示的电位值以毫伏(mV)为单位,依据《混凝土结构现场检测技术标准》(GB/T 50784-2013)规定的混凝土中钢筋半电池电位检测方法,结合行业通用判定准则:当电位值大于 -200 mV 时,钢筋锈蚀概率小于 10%;电位值在 -200 mV ~ -350 mV 之间时,锈蚀概率为 10% ~ 90%;电位值小于 -350 mV 时,锈蚀概率大于 90%。对于电位值处于临界区间(-200 mV ~ -350 mV)的区域,需加密测点并结合混凝土碳化深度检测结果综合判断。在检测过程中,同步记录各测点的电位值、对应的构件位置及环境温度、湿度等参数,检测完成后利用仪器自带软件生成电位分布图,直观显示钢筋锈蚀电位的分布特征,为评估构件耐久性提供依据。

2.3 力学性能试验与化学成分分析

在非受力关键部位钻取混凝土芯样取出内部钢筋,或同条件预留试件中截取钢筋试样,进行拉伸、冷弯及重量偏差试验。主要设备为 WAW-1000D 微机控制电液伺服万能试验机。拉伸试验时,按照《金属材料拉伸试

验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2021)要求,将钢筋试样装夹于试验机夹头,设定加载速率,记录屈服强度、抗拉强度及断后伸长率等指标;冷弯试验则依据《金属材料 弯曲试验方法》(GB/T 232-2024),选用规定直径的弯心,在万能试验机上对钢筋进行 180° 弯曲,检查弯曲处是否出现裂纹或断裂^[4]。重量偏差试验需截取不少于 500 mm 的钢筋试样,用精度不低于 0.1 g 的天平称重,按公式(实际重量-理论重量)/理论重量×100% 计算偏差值。化学成分分析采用直读光谱仪,从钢筋试样上取样制成光谱分析试块,测定碳、硅、锰、磷、硫等主要元素含量,确保其符合《钢筋混凝土用钢 第 1 部分:热轧光圆钢筋》(GB/T 1499.1-2024)或《钢筋混凝土用钢 第 2 部分:热轧带肋钢筋》(GB/T 1499.2-2024)的标准要求^[5]。试验过程中同步记录试样编号、规格、试验环境温度及设备运行参数,对异常数据进行复核验证。

3 检测结果分析

本次共检测构件 86 个,取得有效保护层数据点 512 个,锈蚀电位测区 24 个,力学性能试件 6 组。

3.1 钢筋保护层厚度检测结果统计

对框架梁及楼板底部受力筋保护层厚度进行统计,梁底保护层均值 27.8 mm 略高于设计值 25 mm。结合直方图分析,数据呈右偏态分布,峰值集中在 28 mm ~ 32 mm 区间。这是由于施工中梁底垫块受压变形及模板下沉导致实际保护层增厚,虽对钢筋握裹力略有影响,但增大了碳化距离,对抗碳化耐久性有利。楼板构件合格点率最低 85.4%,且标准差较大 3.8 mm。检测发现部分板底负弯矩筋保护层偏大,导致截面有效计算高度 h_0 减小,经复核,最大偏差处截面承载力降低约 6.2%,虽未超限但已接近预警值;局部板底保护层偏薄至 8 mm,存在诱发顺筋锈胀裂缝的风险,已责令打磨环氧砂浆修补。

3.2 钢筋锈蚀电位与力学性能关联分析

针对地下室外墙环境类别二 b 类检测的半电池电位数据整理如表 1 所示,典型测区电位分布雷达图示意如图 1 所示。

由表 1 及图 1 的数据分析可见,测区 WQ-02 及 WQ-04 均存在明显的局部电位负向偏移现象,其最负电位值已达到 -310 mV。依据 ASTM C876 标准中的相关判定准则,该电位特征明确指示该区域钢筋已处于中等锈蚀风险等级。经过现场实地核查确认,该区域恰好位于

表 1 地下室外墙钢筋半电池电位检测评判表

测区编号	环境湿度	电位范围 (mV, vsCSE)	90% 概率锈蚀判据	评定结论
WQ-01	65.0%	-125 ~ -198	> -200 mV	低锈蚀风险, 钝化膜完好
WQ-02	68.0%	-180 ~ -265	-200 mV ~ -350 mV	中等锈蚀风险, 活性不确定
WQ-03	70.0%	-95 ~ -150	> -200 mV	低锈蚀风险
WQ-04	66.0%	-210 ~ -310	-200 mV ~ -350 mV	中等锈蚀风险, 建议检查氯盐

混凝土结构中的施工缝位置, 并且长期处于地下水位变动影响区。基于此, 初步技术判断认为, 导致钢筋钝化膜开始活化、锈蚀风险上升的主要原因, 很可能与施工缝部位处理工艺不当以及存在轻微的氯离子渗透作用有关。因此, 为有效控制锈蚀发展, 建议立即对该区域采取预防性维护措施, 具体方案为涂刷专用的渗透型迁移阻锈剂。

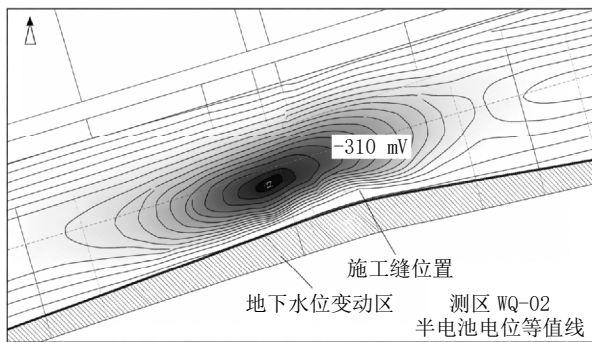


图 1 测区 WQ-02 半电池电位等值线分布示意图

3.3 钢筋力学性能与重量偏差试验结果

在现场对同批次生产的 $\Phi 20\text{mm}$ HRB400E 热轧带肋钢筋中随机抽取样品进行了详细的力学及工艺性能试验, 所获得的各项数据结果具体呈现如下: 试样的屈服强度 R_{eL} 测定平均值为 465 MPa, 明显高于国家标准规定的 400 MPa 最低要求; 抗拉强度 R_m 的平均测试值达到 620 MPa, 同样显著超越了标准中 540 MPa 的基准线; 计算得出的强屈比 R_m/R_{eL} 平均为 1.33, 该指标满足且优于标准中不低于 1.25 的抗震设计规定; 在最大力下的总延伸率 A_{gt} 平均结果为 11.5%, 高于标准要求的 9.0% 最小值; 此外, 该批钢筋的重量偏差实测为 -3.5%, 处于规范允许的 $\pm 5.0\%$ 范围之内。综合以上检测数据, 该批次钢筋的所有力学性能指标和工艺性能均完全符合《钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋》(GB/T 1499.2-2024) 中的相关技术规定, 表明其钢材质量性能稳定可靠, 并具备良好的塑性变形能力储备。

4 结论

通过对该商业综合体项目的钢筋工程实体检测与数据分析, 得出以下结论:

第一, 技术适用性。电磁感应法在常规配筋率构件中具有较高的定位精度和检测效率, 能够有效发现保护层厚度偏差; 对于结构复杂区域, 结合半电池电位法可弥补外观无损检测在内部化学状态评估上的盲区。

第二, 检测数据表明, 楼板负弯矩筋及梁底筋保护层控制是施工薄弱环节。保护层偏大对结构承载力削减效应不容忽视, 须通过严格的垫块布置与过程验收予以控制; 保护层偏薄则需在后期使用中加强裂缝监测。

第三, 数据预警价值。半电池电位图中出现的局部电位负异常区, 为工程耐久性维护提供了早期预警。建议在工程竣工验收资料中附带具有代表性的无损检测电位分布图, 作为后期结构健康监测的基准档案。

综上, 该工程钢筋原材力学性能合格, 主体结构钢筋空间位置基本符合设计要求。针对发现的保护层偏差超标点及电位异常区, 经设计复核及局部修补处理后, 不影响结构整体安全使用功能。

参考文献:

- [1] 李凯奇. 水利工程现场原材料试验检测探究 [J]. 中华建设, 2025(01):147-149.
- [2] 李国栋. 建筑工程钢筋检测技术与应用 [J]. 散装水泥, 2024(01):33-35.
- [3] 苏晓刚. 地铁施工工地试验检测与工程质量分析 [J]. 低碳世界, 2023(10):160-162.
- [4] 关丽霞. 建筑工程钢筋原材料检测内容及质量控制措施 [J]. 房地产世界, 2023(16):166-168.
- [5] 李浩. 桥梁钢筋工厂化配送中心技术应用探讨 [J]. 广东交通职业技术学院学报, 2022(04):78-81.

排涝泵站深基坑止水帷幕施工技术应用

周 彭¹, 欧阳飘²

(1. 中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司, 湖北 宜昌 443000;

2. 瑞金市水利局, 江西 瑞金 342500)

摘 要 城市防洪排涝体系是保障城市运行安全的重要基础设施, 排涝泵站作为其中的关键功能性枢纽, 其深基坑施工往往面临高地下水水位、深厚软土层分布复杂、周边建构筑物及管线环境敏感等多重不利因素制约。本文立足于当前排涝泵站工程深基坑施工的实际场景, 系统梳理工程自身特性与区域气候水文条件, 通过多维度对比不同止水帷幕施工技术的适用场景与技术经济优劣, 筛选适配性最优的施工工艺, 以此全面提升排涝泵站深基坑工程的施工安全与质量管控水平。在排涝泵站深基坑止水帷幕的全流程施工中, 需从前期水文地质精准勘察、高精度测量放线、标准化成桩工艺管控、连续成墙质量控制、特殊节点补强加固等核心工序入手, 明确各环节的技术执行要点与质量验收标准, 以期同类排涝泵站工程的建设及后续长期安全运营提供可参考的技术实践依据。

关键词 排涝泵站; 深基坑; 止水帷幕; 三轴搅拌桩

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.014

0 引言

在我国现代化城市建设高质量推进的背景下, 城区建筑密度持续提升、人口规模不断扩大, 大量新建排涝泵站不得不选址于人口密集区或河湖水系发达的滨水地带。在排涝泵站的全流程建设中, 深基坑开挖是决定后续主体结构施工安全的核心环节, 这类工程普遍面临开挖深度大、地下水位高、软土层分布复杂等多重技术挑战, 对基坑围护体系的止水密闭性提出了远高于普通建筑基坑的严苛要求。一旦基坑止水结构出现破损、渗漏等性能缺陷, 不仅极易直接引发坑内涌水、涌砂、边坡失稳坍塌等施工险情, 还会进一步扰动周边土体应力场, 诱发邻近建筑物开裂、市政管线错位、地面不均匀沉降等次生环境风险^[1]。因此, 系统研究适配排涝泵站工况的科学止水帷幕施工技术, 全链条落实施工过程中的质量管控措施, 是保障排涝泵站工程建设质量与长期运行安全的核心前提。

1 排涝泵站深基坑工程特点

在排涝泵站深基坑施工中, 其具备较高的特殊性与复杂性。第一, 排涝泵站深基坑地质条件复杂。由于排涝泵站建设在临河或低洼地带, 地下水极为丰富, 这导致深基坑施工面临的水环境较为复杂。再加上淤泥质土、粉细砂等高深土层影响, 对止水帷幕结构抗渗性、连续性等方面提出更高要求。第二, 开挖深度大、空间受限。在排涝泵站施工环节, 为保证水泵扬程达

到要求, 基坑开挖深度一般在 10 m 以上甚至更深。同时, 在排涝泵站建设中, 其周边区域紧邻民用建筑、道路、既有管线, 这促使现场施工作业空间狭小, 大型设备无法进入现场, 需优化工艺方案才能提高施工效率。第三, 环境敏感性强。排涝泵站通常建设在城区地带, 其施工环节受到噪声、振动、泥浆排放等多重限制, 如果没有采取有效控制措施, 会造成周边地面沉降, 建筑物安全也无法保障。第四, 工期要求紧张。排涝泵站一般是在汛期前投入使用, 导致现场施工周期较短, 这对现场施工组织和工程质量有极高要求。

2 止水帷幕技术选型

排涝泵站面对特殊条件, 在基坑止水帷幕施工时, 需结合现场地质条件、开挖深度、经济性、环境影响等确定适宜方案。目前止水帷幕施工中, 常见的工艺方案为高压旋喷桩、深层搅拌桩、地下连续墙等。高压旋喷桩应用到深基坑中, 能快速提高止水效果, 特别是针对复杂条件, 采取异形桩体设计方式, 能满足多样化施工需求, 但施工速度慢、成本高, 且施工环节形成大量废浆。深层搅拌桩以三轴搅拌桩为主, 其在施工阶段能提高搭建效果, 且成墙连续性良好, 降低对周边环境的影响, 且施工速度快, 一般在地下水丰富的基坑中应用普遍。深层搅拌桩一般选用三根钻头同时切削土体, 然后注入水泥浆, 从而搭接形成墙体结构, 能有效阻隔地下水渗流。地下连续墙止水性能优越、

作者简介: 周彭 (1982-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水利施工技术、软基处理。

刚度大,但施工环节所需设备体型大、成本高,一般在变形要求严、超深基坑中广泛使用^[2]。

3 排涝泵站深基坑止水帷幕关键施工技术要点

3.1 施工前准备与现场勘察

排涝泵站深基坑施工前,需组织技术人员做好现场准备与勘察工作,这是提高止水帷幕施工效果的关键。在现场地质勘察环节,以先进技术手段作为基础,复核岩土工程勘察报告,精准检测含水层分布、渗透系数、承压水头、不透水层埋深等,落实现场补充勘测作业,以确保地质勘查符合现场实际情况。同时,对排涝泵站周边自然环境展开调查,掌握既有建筑物、地下管线、道路分布情况,作出风险精准评估,以便制定适宜专项保护方案。在现场调查结束后,需落实施工组织设计工作,明确工艺流程和组织方案,再由专家充分论证,确保现场施工作业有序开展。现场施工准备需做好场地平整工作,在施工作业位置铺设钢板、路基箱等,以满足重型桩机行走需求。此外,现场建设临时排水沟与泥浆池,使现场泥浆循环系统能达到通畅性^[3]。

3.2 测量放线与点位布设

排涝泵站深基坑需落实测量放线工作,进而指导止水帷幕后续施工,以提高止水帷幕垂直度与连续性。在止水帷幕测量放线时,以设计方案为基础,采用全站仪精准标注止水帷幕中心线,确定基坑开挖边线,防止因为开挖控制不足导致严重安全事故。三轴搅拌桩根据设计方案确定桩径、搭接宽度,按照设计方案精准计算各桩位坐标,从而使桩位测量精准性达到要求,使各结构部件连接具备紧密性。对于深基坑施工的接头、转角、应力集中等位置,极易造成施工效果不合格,需采取加密桩位或选用加强措施,以增强基坑止水帷幕施工效果。在现场测量放线完成后,需进行各项参数复核检测,再将钻机移动到规定位置。而在桩机移动到位后,通过经纬仪、吊线锤双向校正钻机垂直度,确保钻机垂直度偏差 1/250 以内^[4]。

3.3 止水帷幕成桩

在排涝泵站深基坑止水帷幕施工中,成桩为核心环节。三轴搅拌桩在施工阶段,其工艺方案为“两搅两喷”或“三搅两喷”,从而使水泥浆与土体充分搅拌均匀。在搅拌设备开启作业前,先使用注浆泵送水,使浆液到达喷浆口后,再进行钻进下沉作业,禁止先钻进后喷浆,否则将会造成堵管风险。而在桩体下沉阶段,需对沉入速度进行监测,通常下沉速度为 1 m/min 以内、提升速度 2 m/min 以内。水泥浆在制作阶段,需按照设计方案严格控制配合比参数,通常水灰比为 1.5~2.0。在水泥浆注入土体过程中,选用高

速搅拌设备持续搅拌 3 min 以内,且做好过滤处理,以防水泥浆配制不当引发堵管风险。现场施工阶段监测注浆压力、流量、钻机扭矩,若未能符合方案标准,则及时停止施工。在每根桩体施工结束后,对设备以及管道全面清洗,以防残留浆液造成堵管风险^[5]。

3.4 成墙施工工艺

在深基坑止水帷幕成墙施工中,需保证成墙具备连续性,这样才能保证成墙结构防水效果达到要求。三轴搅拌桩采用套接一孔的方式进行连续墙施工,按施工要求落实时间间隔,使前后结构凝结时间达到要求,以提高墙体结构搭接效果。如果相邻桩体施工间隔时间较长,先前施工的混凝土结构硬化完成,这导致新旧混凝土连接效果较差引发冷缝问题,进而影响连续墙止水帷幕效果。根据三轴搅拌桩施工要求,选择适宜施工机组,落实现场施工组织工作,以防施工作业存在中断影响连续墙紧密性。若深基坑为超深基坑类型,需选择分级变径或组合型桩墙结构形式,上部使用大直径桩,下部嵌入不透水层。施工前需对三轴搅拌桩机组进行全面调试,检查搅拌叶片磨损情况、注浆系统密封性,确保机组运行稳定。注浆材料选用符合设计标准的水泥浆,严格控制水灰比,搅拌均匀后静置一段时间,去除浆液中的杂质和气泡。成墙施工时,控制搅拌桩下沉和提升速度,保持匀速作业,确保浆液与土体充分混合,提升墙体密实度。施工过程中安排专人全程监测,记录桩体深度、注浆量、施工时间等参数,及时调整施工节奏。针对施工中可能出现的冷缝隐患,提前准备应急处理方案,对已出现的冷缝进行注浆加固处理,确保墙体整体止水性能不受影响。

3.5 节点处止水加固施工

在排涝泵站深基坑止水帷幕施工中,节点止水加固施工尤为重要。这一部位施工若未能达到工程要求,必然给整个深基坑止水帷幕效果造成不利影响。在节点处止水加固施工阶段,需考虑到地质复杂条件以及地下水水位变动,分析其潜在裂缝发生因素,并选用加密桩或高压旋喷桩补强方式,确保各位置达到圆弧过渡要求,从而分散应力,以增强止水帷幕结构的强度。止水帷幕和围护桩空隙需采取封堵措施,一般采用高压旋喷桩方式充填作业,确保各结构位置连接具备紧密性。针对施工缝或分段施工连接位置,一般在接缝位置增加一排止水桩或进行注浆加固,其搭接长度应超过 500 mm。

4 工程案例——东升排涝泵站深基坑止水帷幕施工

4.1 工程概况

东升排涝站位于瑞金市城东区,选址定于瑞金宾馆下游侧空地,紧邻兴华路。该区域地形由北向南、

由东向西倾斜,最低点位于瑞金宾馆附近,符合城市排水规划中管网水流汇集走向。站址周边地形平缓,变化不大,用地性质规划为公园用地,符合城市建设要求。拟建排涝泵站基坑开挖深度约9.5 m,周长240 m。场区地层主要由杂填土、粉质黏土、淤泥质土及中粗砂组成,地下水位埋深约1.0 m,与附近河流有水力联系,补给充沛。基坑东侧距现有民房最近处仅8 m,南侧紧邻市政道路,对环境变形控制要求严格。鉴于高水位及敏感环境,项目决定采用SMW工法桩(型钢水泥土搅拌桩)作为支护与止水一体化结构,其中水泥土搅拌桩承担主要止水功能。

4.2 止水帷幕技术方案选定

通过对东升排涝泵站的现场环境与地质条件综合分析,技术团队结合现场勘察结果进行多方案比选。由于该项目存在基坑深、水位高特性,且地质条件以含砂层为主,若选择单纯高压旋喷桩方式,其工期延长、成本升高,而地下连续墙则场地受限、成本高。经过技术人员综合分析,最终采用 $\phi 850@600$ 三轴水泥土搅拌桩内插H型钢的SMW工法,结合现场实际情况进行方案调整。在本次施工方案中,利用三轴搅拌桩形成止水帷幕,能有效阻隔地下水径流作用;H型钢确保止水帷幕有较高承载力,面对土体压力依然能保持连续墙结构稳定性。水泥土强度设计为1.2 MPa,渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s。止水帷幕设计需穿透粉砂层,进入相对不透水层的粉质黏土深度2.0 m,总桩长18 m。该方式能满足现场地质条件和深基坑施工要求,有效降低污染与噪声,形成多重防护体系。施工流程严格遵循标准化作业程序。首先进行场地硬化与沟槽开挖,清除地下障碍物,导向沟尺寸定为宽1.2 m、深1.5 m。随后桩机就位,调整垂直度,启动三轴钻机下沉喷浆,采用“两搅两喷”工艺,下沉速度0.8 m/min,提升速度1.5 m/min,水泥掺量20%。在成桩过程中,实时监测浆液流量与压力,确保每延米注浆量达标。第一幅桩施工完成后,立即移动桩机进行第二幅施工,严格执行套接一孔工艺,搭接时间控制在24小时内。H型钢在工厂预先除锈涂刷减摩剂,待水泥土初凝前插入,利用自重与辅助振动锤下放至设计标高,确保定位准确。施工期间,设立专职质检员全程旁站,记录每根桩的施工参数。完工后,对桩顶进行清理,浇筑钢筋混凝土冠梁,将型钢与搅拌桩连成整体,形成完整的支护止水结构。

4.3 施工监测

为检验本次施工效果是否达到要求,由技术人员对现场施工效果全面监测。在现场施工环节,基坑内部

设置12个观测井,监测水位8个,测斜管监测深层土体位移,周边建筑物则设置20个点位监测沉降量。通过对监测数据分析,基坑开挖到底部标高部位时,坑外最大水位下降只有0.3 m,远远未达到警戒值1.0 m,这说明止水帷幕效果处于良好状态。通过对这些数据的分析,围护结构最大水平位移18 mm,位于基坑中部,未超过30 mm的规定限值;周边建筑最大沉降量12 mm,道路沉降量15 mm,均处于可控范围,未发生裂缝问题。

4.4 工程总结

东升排涝泵站深基坑施工总工期为4个月,止水帷幕保证深基坑结构稳定性。从本次实践经验分析,选择 $\phi 850$ 三轴搅拌桩作为止水帷幕,尤其应对敏感环境与富水砂层,能提高深基坑止水效果。而在现场施工环节落实工艺方案控制措施,使深基坑构建封闭止水体系,其能有效阻隔地下水位侵扰影响,确保深基坑处于干燥环境。SMW工法应用后能有效节约项目建设工期,减少泥浆排放,遵循绿色环保理念。从现场施工监测数据分析发现,本次项目施工阶段作业现场环境影响较小,确保施工效果合格,且环境危害降到最低。

5 结束语

排涝泵站作为现代城市防洪排涝的重要设施,其深基坑止水帷幕关系到排涝泵站运行可靠性。本文选择东升排涝泵站作为案例,深入探讨深基坑止水帷幕施工策略,通过优化工艺方案,保证深基坑止水帷幕效果达到要求,以满足现代排涝泵站建设和运维需求。而在排涝泵站深基坑止水帷幕施工阶段,需优化改进工艺方案,采取精细化控制措施,使每个环节施工效果达到工程要求,进而提高排涝泵站深基坑止水帷幕建设效果,满足现代防洪排涝设施运营需求,为城市建设和发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 郜长江,张松.高压旋喷桩止水帷幕的施工应用与质量控制[J].居舍,2024(20):30-33.
- [2] 徐晓龙.超深地连墙止水帷幕施工分析[J].安徽建筑,2024,31(08):124-126.
- [3] 佟保强.黏土咬合桩止水帷幕在临江车站的应用[J].低碳世界,2024,14(12):130-132.
- [4] 晏姝.深基坑悬挂式止水帷幕地下水控制研究[J].土工基础,2025,39(03):455-458,463.
- [5] 郑晓建,卫昌林,刘向群,等.深基坑止水帷幕TRD工法及其施工质量控制研究[J].工程技术研究,2025,10(13):143-145.

高层建筑深基坑施工技术风险防控与优化

卢明才

(六安市住建局开发区分局, 安徽 六安 237000)

摘要 当前国内城市高层建筑数量持续攀升、单体建设规模逐步扩大, 该场景下的深基坑工程普遍具备开挖深度大、空间跨度广的特征, 同时还面临周边环境要素复杂多样、场地地质条件离散性强等现实约束, 整体施工难度大、安全风险等级高, 是高层建筑工程中挑战性极强的关键分部工程。高层建筑深基坑的施工质量, 对建筑本体基础稳定性、主体结构施工安全, 以及周边既有建筑物、地下管线的运行保护均起到决定性作用。本文围绕高层建筑深基坑核心施工技术与工艺管控要点展开系统性分析, 结合土方开挖、支护结构施工、降水作业、内支撑拆除等全工序环节的具体风险因子逐一拆解, 深度剖析风险诱因, 在此基础上形成科学精准的分级防控措施, 以期为实现深基坑工程安全、高效、标准化施工提供理论参考。

关键词 高层建筑; 深基坑施工; 基坑开挖; 基坑支护; 降水排水技术

中图分类号 TU753; TU974

文献标志码 A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.015

0 引言

伴随新型城镇化进程的持续深化, 城市土地资源供需矛盾持续凸显, 高层与超高层建筑逐步成为城市开发建设的主流发展趋势。为了满足建筑物基础承重要求、地下室使用要求和人防建设需要, 高层建筑物基坑开挖的深度逐渐增加。相比一般的建筑基坑来说, 高层建筑物深基坑工程施工受到复杂地质条件、地下水影响较大、施工空间较小以及周围环境比较敏感等问题, 极易发生基坑坍塌、边坡滑移、墙体变形及地面沉降等安全事故, 进而造成人员伤亡、经济损失。在高层建筑土建工程施工中, 深基坑是基础性的工程环节, 其技术规范和施工中的有效风险控制能够保障整个工程的质量以及安全。而在当前的施工过程中存在的粗放式传统模式、不当选择支护形式、缺乏动态监测以及不规范施工程序等情况, 导致了深基坑施工存在较大的安全问题。通过调查研究得知, 在最近几年出现的深基坑事故中, 开挖方式不够科学、支护缺陷以及降水控制等问题造成的问题占据了 60% 以上的比例, 所以对其中的核心技术进行研究, 并准确分析其风险因素, 完善相应的风险防范体系并优化工艺, 对高层建筑中安全性以及稳定性等具有重要的价值和意义。

1 高层建筑深基坑主要施工技术

1.1 基坑开挖

基坑的分层、分段、对称、均衡和限时开挖是深基坑施工的基本要求。高层建筑深基坑工程应避免一次

超挖, 无序地进行土方工程施工, 一般采用分层开挖的方法进行土方工程施工。按照深基坑的深度及土质情况和所采取的支护方法决定分层开挖的厚度^[1]。一般情况下在软土地基上开挖, 其分层开挖不宜超过 1.5 m; 而在坚硬的土层中可放宽到 2 m~3 m。对于宽大跨度基坑则宜采用分区开挖, 逐段成型的开挖方式, 有利于释放土体应力, 避免局部应力集中造成边坡失稳等。

1.2 基坑支护

支护体系是保证基坑土体稳定、抵抗土压力与水压力的主要结构形式, 也是深基坑工程技术的核心内容。目前, 在高层建筑基础中常用的深基坑支护技术有: 地下连续墙支护技术适用于特深、富水地层以及周围环境较复杂的深基坑工程, 具有刚度大、防渗性能好、变形小等特点。钻孔灌注桩排桩支护技术往往与锚杆或锚索相结合用于大部分的常规地质条件下的高层建筑物的基坑工程中, 具有经济可靠的特点。土钉墙支护技术主要适用于浅、中深的基坑开挖和均匀土质的地层, 施工方便、造价较低。内支撑支护包括钢支撑与钢筋混凝土支撑, 较多应用于软土地基及高应力状态下的基坑工程, 可以有效地控制支护结构的位移变形^[2]。实际工程应用过程中大多采取组合式的支护结构, 如排桩+锚索、地下连续墙+内支撑等复合式支护形式, 以便适应较为复杂的施工工况。

1.3 降水排水技术

地下水是导致基坑滑移、坍塌、管涌及流沙病害的主要因素, 降水排水法是基坑防水防渗漏的重要措

作者简介: 卢明才 (1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

施。常用的高层建筑基坑降水方法主要有深井点降水法、轻型井点降水法以及集水明排法。在富水地层和深基坑条件下优先采用深井点降水方法降低地下水位疏干基坑内土体,增强土体固结强度,而对于地下水含量低、渗透系数小的地层中采用轻型井点降水即可满足施工要求,在基坑开挖过程中的临时积水用集水明排的方法及时排除。降水过程中对降水的速度和降水深度都要进行控制,避免由于过度降水造成的地面不均匀沉降现象。

1.4 支撑和换撑技术

支撑体系能够有效控制支护结构的变形,抵抗侧向土压力,对深基坑施工安全至关重要。在高层建筑深基坑工程中多采用分层支护、随挖随撑的施工方法,在土方开挖到支撑的标高后,在规定的时间内完成支撑架设,防止支护结构长期无支撑暴露。主体地下结构施工过程中,按“先换后拆、分段替换”的原则进行换撑施工,设置临时换撑构件并传递相应的结构力,保证支撑体系平顺过渡,避免应力变化造成基坑变形失稳^[3]。

2 高层建筑深基坑施工关键技术风险分析

2.1 基坑开挖技术风险

挖土不规范作业是造成基坑失稳的主要原因。超挖、快挖,没有遵循分层开挖原则,一次挖掘深度较大或局部超挖较多,使应力释放集中而迅速导致边坡上的土体失衡滑移,引发流沙、坍塌。挖土不对称不平衡,局部过挖致使支护结构上的受力不平衡,出现偏心载荷,产生墙后倾斜和变形过大的现象。基底扰动,由于挖土过程中的机械碾压,人为的扰动破坏了原状土结构的地基承载力减弱,从而容易发生基础沉降,特别是对于高层建筑基础结构的后期不均匀下沉。由于土体长时间暴露于空气中被雨水浸蚀、风化,强度减弱很多,加剧其边坡失稳可能性增大等现象的发生。

2.2 支护结构施工技术风险

基坑的支护体系是其承载的核心部分,一旦其施工过程的质量存在问题,就可能会引发结构性的安全问题。支护结构的选择存在不合理的地方,对于软土基础选择使用土钉墙等较轻型的支护结构。超深的基坑仅采用单一的排桩支护方式,这样会导致其支护的强度以及刚度都不足,无法承受巨大的侧向土压力,最终可能会导致支护结构失去稳定^[4]。在施工工艺上存在问题,如在进行钻孔灌注桩时会出现成孔偏差、钢筋笼偏移以及混凝土质量不佳的现象,地下连续墙施工中出现槽壁塌陷与接缝渗水等问题,以及在锚索施工中张拉的预应力不够,锚固长度也严重不足等,这些问题都会造成整体的支护系统稳定性大幅降低。

在施工过程中,支护结构的建立时间滞后,这表现在基坑中的土方挖掘工作结束后才开始进行相关的支护结构施工作业,因此基坑周边土体长时间处于裸露状态并出现了累积变形的问题,进而诱发基坑边坡的位移超出预期值。

2.3 降水施工技术风险

降水施工中的技术风险主要体现在渗漏和沉降两个方面。一是降水方案设计不当,井点间距设置较大,降水深度不足,地下水未能疏干,造成基坑内的渗漏水、软土等,导致管涌流沙以及边坡塌方事故的发生。支护结构的接缝处防水施工质量缺陷而发生渗漏水甚至涌水现象并冲刷掏空基坑土体,使支护结构的土层被掏空出现支护悬空失稳^[5]。二是过量或快速降水引起基坑周围的地下水位剧烈下降,使该地区的有效应力增加,导致地面、道路及已有建筑发生不均匀沉降破坏墙体、管线等地基事故。

3 高层建筑深基坑施工技术风险防控措施

3.1 规范基坑开挖施工,严格限制土体变形

严格按照分层、分段、对称开挖要求,按地质勘察及专项施工方案确定的分层厚度划分不同土质、不同区域分层开挖厚度。软土、富水土层严格控制单层厚度,禁止超挖和抢挖。采用“开挖—支护—成型”的顺序流水作业,缩短土体外露时间,开挖一段24 h内完成支护。合理安排开挖顺序,采取先远后近、先浅后深的原则,对称均衡开挖确保结构受力均匀。同时注意基底保护,机械开挖应预留20 cm~30 cm人工清理,并防止扰动原状土;及时封闭基底,做好排水措施以防雨水渗入基底土体。

3.2 优化支护施工工艺,确保结构承载稳定

支护体系类型选择时综合考虑基坑深度、地质情况、周围环境正确选型,软土地层深大基坑采用“地下连续墙+内支撑”体系;通常情况下使用“排桩+锚索”形式。严格控制支护方案合理性。施工中进行全过程技术控制。在钻孔灌注支护结构中严格控制其垂直度、孔底沉渣等,确保混凝土浇注质量。地下连续墙槽壁加固,高模数泥浆防止坍塌,并严格控制墙体接缝防水质量。锚索、锚杆工程严格保证其锚固深度和注浆压力及张拉预应力。对临近建筑物段采取加密锚索等措施、优化支护参数加强局部支护刚度、严控变形。

3.3 精细化降水,防止水文地质灾害

结合详细的水文地质勘察资料,精心设计降水方案,准确确定井点数量、间距、降水深度及速度,有效地疏干地下水并避免过大的降水。在富水地层基坑提前进行超前降水,将地下水位提前降下,使土方开

挖及支护施工在较为干燥的条件下进行。加强对支护结构防水防渗的管理,在支护结构接缝处和墙缺陷处注浆堵漏、加强防水处理,并防止地下水的渗漏通道。在降水过程中监测地下水位情况及周围地面沉降值变化,及时调整降水方案,并根据实际情况控制其下降速度,如沉降超标时应减缓降水速度,必要时增设回灌井以平衡地下水,控制次生沉降发生。

4 高层建筑深基坑施工技术优化策略

4.1 改进工艺:精细的流水作业

摒弃传统的粗放型施工模式,合理调整深基坑工程的整体施工流程,形成“勘察—设计—开挖—支护—降水—换撑”的一体化流水线式作业。针对基坑的不同区域以及不同土层的差异性,采用针对性的施工工艺,在软土地质区减少分层开挖厚度,增加支撑密度,硬质地层则提升开挖效率,实现因地制宜。此外,对特殊工况下的施工工艺进行改良,针对雨季施工提前对基坑周边进行截流、疏导措施,防止基坑边坡雨水浸湿破坏并采取防雨设施覆盖,同时严禁在大风暴雨等恶劣天气进行基坑施工作业,若因抢修必须施工作业,需在确保基坑稳定安全的条件下方可施工且复工前做好各项安全隐患排查。

4.2 监测系统完善:构建动态智能监测系统

人工监控数据滞后,监控次数少,精度较低,难以满足超深基坑的风险控制需要。改善监测体系,引入智能实时监测仪器对支护结构水平位移,竖向沉降以及支撑轴力,土体侧向位移及周边建构筑物变形等进行 24 小时实时监测。采用分级预警制度,并通过设定阈值,在临近预警临界时自动报警提示及时反馈到施工危险源的消除上,利用大数据对数据的变化趋势进行规律性分析,对基坑变化进行预测判断并及时修正施工方案,实现事后控制与事前控制相结合,并进行动态化管理,从而避免风险控制失效。

4.3 组合式智能支护技术推广

单一的支护形式适应性差,不能满足复杂地质及恶劣环境要求。改进支护设计思路,大力提倡差异化和组合式支护结构形式,按基坑不同部位、不同的受力、环境特点分别设定相应的支护参数,做到强区段强、弱区段简,从而保证安全并减少成本。同时,在基坑工程中采用伺服钢支撑自动控制技术,能够随基坑受力、变形情况实时自动调整其轴力大小,使结构变形得到精确控制,较常规固定轴力支撑体系更能有效控制稳定性,提高整体施工质量。并且对基坑支护结构与主体地下结构进行综合优化考虑,做到无缝连接、后期拆撑无风险。

4.4 加强技术管理,完善技术措施

深基坑工程要建立健全施工措施管理制度,认真做好图纸会审、技术交底及施工方案论证等工作,并组织相关专家对深基坑危大工程技术方案进行专项论证,确保深基坑施工技术方案科学合理。强化施工人员培训教育,主要培训深基坑工程施工技术规范标准、危险源以及应急处理等内容,使作业人员可以做到标准化施工。加强施工机械进场验收、检查和保养制度,保证机械挖土设备、支护设备及监测设备的正常使用性能。严格复核检查,建立健全整个施工过程的技术复核制度,针对支撑参数、开挖深度、降水深度、支点轴力等技术性参数必须逐一进行复核,防止人为性的技术错误。

5 结束语

高层建筑深基坑施工是一个系统化工程,具有高风险性和复杂性。本文对深基坑的开挖、支护和降水以及支撑换撑等主要工序的技术要点及技术风险进行详细的分析,并针对其超挖快挖问题、不合理的支护类型选取问题、降水不善以及不当拆除支撑等方面的技术风险成因及危害展开详细的研究,并提出规范化的深基坑施工技术风险管理措施及优化方法。研究表明,实施分层对称开挖、组合式支护结构、动态监测智能化及流程管理标准化等相关综合技术,有助于降低并控制深基坑施工中的风险发生率,确保安全高效的深基坑施工。随着 BIM 技术、物联网及人工智能等数字化技术在高层建筑中应用的日益广泛,在未来的深基坑建设中,也会进一步发展智能化及精细化的施工工艺,使高层建筑基础工程达到标准化水平,并能有效确保城市高层建筑的安全性及高效建设。

参考文献:

- [1] 郭红建. 高层建筑施工中深基坑支护技术的应用与优化研究[J]. 建设机械技术与管理, 2026, 39(02): 130-131, 137.
- [2] 张振欣. 高层住宅建筑深基坑土方开挖施工技术研究[J]. 居舍, 2026(11): 29-32.
- [3] 王鹏飞. 深基坑支护施工技术在高层建筑工程中的应用[J]. 散装水泥, 2026(03): 41-43.
- [4] 吴华君. 深基坑支护施工技术在高层建筑施工中的应用研究[J]. 现代工程科技, 2026, 05(03): 29-32.
- [5] 钱锋, 朱绪伟. 高层商业办公楼建筑深基坑支护施工技术研究[C]//《施工技术》杂志社. 2025 年全国工程施工技术交流会论文集(中册). 中交上海航道局有限公司, 2025.

路基边坡防护施工技术与稳定性提升路径

谢昌志

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 路基边坡是公路工程的重要组成部分, 其稳定性直接关系到公路的运营安全与使用寿命。受地质条件、气候环境和施工扰动等因素影响, 路基边坡易发生滑坡、崩塌等病害, 不仅会中断交通, 还可能造成人员伤亡和财产损失。传统边坡防护技术多侧重工程结构加固, 对生态环境保护重视不足, 且存在长期稳定性差的问题。本文系统分析路基边坡失稳的机理与影响因素, 梳理各类防护施工技术的适用条件与要点, 从设计、施工、监测等多个维度提出稳定性提升路径, 以期为促进公路路基边坡工程建设提供参考。

关键词 路基边坡; 工程防护技术; 生态防护技术; 复合防护技术; 排水系统

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.016

0 引言

随着我国公路建设向山区和复杂地质区域延伸, 路基边坡的高度和坡度不断增加, 边坡稳定性问题日益突出。据统计, 我国公路边坡失稳事故占公路工程地质灾害总数的 60% 以上, 每年用于边坡病害整治的费用超过百亿元^[1]。传统边坡防护多采用浆砌片石、喷射混凝土等刚性防护方式, 虽然短期防护效果较好, 但破坏了自然生态环境, 且随着时间推移易出现开裂、脱落等问题。山区公路边坡多处于地形陡峭、岩土破碎区域, 加之强降雨、冻融循环等自然作用叠加, 边坡病害呈现多发性、反复性特征, 不仅提升公路养护成本, 还会对沿线生态环境造成持续性破坏, 推动边坡防护技术迭代与稳定性管控升级, 已成为山区公路建设与运维阶段的重要管控内容。因此, 研究路基边坡防护施工技术与稳定性提升路径, 对保障公路运营安全、实现工程建设与生态环境协调发展具有重要的现实意义。

1 路基边坡失稳机理与主要影响因素

1.1 边坡失稳的形成机理

路基边坡失稳是土体或岩体在重力作用下沿软弱结构面发生剪切破坏的过程。根据破坏形式的不同, 可分为滑动、崩塌和泥石流三种主要类型。滑动是最常见的失稳形式, 边坡土体在水的作用下强度降低, 沿圆弧状或平面状滑动面发生整体下滑。崩塌多发生在岩质边坡或高陡土质边坡, 岩体或土体突然脱离母体, 向下倾倒、翻滚。泥石流则是在暴雨作用下, 松

散土体与水混合形成的流体, 沿沟谷快速流动, 具有极强的破坏力^[2]。

边坡失稳的本质是边坡内部的剪应力超过了岩土体的抗剪强度。当边坡开挖后, 原有应力平衡被打破, 坡体内部产生应力重分布, 在坡脚处形成应力集中区。如果岩土体的抗剪强度不足以抵抗剪应力, 就会产生剪切变形, 随着变形的不断发展, 最终形成贯通的滑动面, 导致边坡失稳。水的作用是加速边坡失稳的重要因素, 雨水渗入会增加土体重量, 降低土体强度, 同时产生孔隙水压力, 进一步降低有效应力。冻融循环、干湿交替会持续弱化岩土体结构联结, 使土体孔隙扩大、岩体裂隙扩张, 逐步削弱边坡自身承载能力, 这类渐进式损伤在季节性温差较大的山区尤为明显, 也是边坡长期稳定性衰减的重要诱因。

1.2 影响边坡稳定性的主要因素

地质条件是决定边坡稳定性的内在因素。岩土体的性质直接影响其抗剪强度, 坚硬岩石的抗剪强度高, 边坡稳定性好; 软弱土体和破碎岩体的抗剪强度低, 易发生失稳。地质构造如断层、节理、裂隙等, 是边坡的潜在滑动面, 其产状和发育程度对边坡稳定性有决定性影响。地下水的存在会降低岩土体强度, 产生动水压力和静水压力, 是诱发边坡失稳的最主要外部因素。

工程因素和气候因素也会对边坡稳定性产生重要影响。路基开挖会改变边坡的原有形态, 增加坡高和坡度, 破坏应力平衡。施工过程中的爆破、碾压等作业, 会产生振动, 使岩土体产生裂隙, 降低其强度。暴雨、

作者简介: 谢昌志 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

洪水、地震等自然灾害,会直接诱发边坡失稳。植被覆盖度作为易被忽视的关键因素,直接影响边坡水土保持能力,原生植被破坏后,坡面缺乏根系固持与茎叶挡护,雨水冲刷与入渗速度大幅加快,边坡失稳概率随之显著上升,这也是生态防护理念逐步融入边坡工程的重要原因。

2 路基边坡常用防护施工技术

2.1 工程防护技术

工程防护技术主要依靠结构物的强度来抵抗边坡变形,适用于地质条件差、坡度陡、稳定性要求高的边坡。挡土墙是最常用的工程防护形式,通过自身重量抵抗土压力,防止边坡滑动。重力式挡土墙结构简单、施工方便,适用于高度小于 8 m 的边坡;悬臂式和扶壁式挡土墙采用钢筋混凝土结构,适用于高度较大的边坡^[3]。

锚杆框架防护适用于岩质边坡和破碎土质边坡,通过锚杆将边坡深部稳定岩体与表层框架连接,形成整体受力体系。锚杆采用螺纹钢筋,长度根据滑动面深度确定,一般为 6 m ~ 12 m。框架采用钢筋混凝土浇筑,网格尺寸为 2 m ~ 3 m,框架内可植草绿化。喷射混凝土防护适用于易风化的岩质边坡,通过高压将混凝土喷射到边坡表面,形成封闭层,防止岩体风化剥落。喷射混凝土厚度一般为 5 cm ~ 15 cm,可配合锚杆和钢筋网使用,提高防护效果。抗滑桩防护适用于深层滑动的边坡工程,通过在边坡坡脚或滑动面位置设置钢筋混凝土抗滑桩,阻断滑动面延伸,配合连系梁形成整体抗滑体系,在高陡填方与深挖路堑边坡中应用效果突出,可有效遏制边坡深层滑移变形。

2.2 生态防护技术

生态防护技术利用植物的根系固土作用和茎叶覆盖作用,达到防护边坡和恢复生态的目的。植草护坡是最简单的生态防护方式,适用于坡度小于 1:1.5、高度小于 6 m 的土质边坡。可采用撒播、喷播或铺草皮的方式进行施工,选择根系发达、耐旱耐贫瘠的草种,如狗牙根、黑麦草等。

灌木护坡适用于坡度较缓的边坡,灌木根系较深,固土效果更好,且能形成多层次的植被群落。可采用穴植或沟植的方式,株行距为 1 m ~ 2 m,选择紫穗槐、荆条等乡土灌木品种。客土喷播技术适用于岩石边坡和贫瘠土质边坡,将含有草种、肥料、保水剂、黏合剂的客土混合物喷射到边坡表面,形成适合植物生长的土壤层。该技术能在短时间内实现边坡绿化,且防护效果持久。

2.3 复合防护技术

复合防护技术结合了工程防护和生态防护的优势,既保证了边坡的稳定性,又实现了生态恢复。锚杆框架植草防护是最常用的复合防护形式,在锚杆框架的网格内种植草灌,既利用锚杆框架的结构强度保证边坡稳定,又通过植物根系进一步加固表层土体,同时美化环境^[4]。

土工格栅加筋土防护适用于填方边坡,就是在土体中分层铺设土工格栅,提高土体整体强度、稳定性。土工格栅与土体之间摩擦力、咬合力可以分散土体应力,减小土体变形。加筋土边坡坡度可达 1:0.5,比普通填方边坡占地少很多。生态袋防护适合于填方边坡、挖方边坡,将装有种植土的生态袋堆叠在边坡表面,形成柔性防护结构。生态袋具有较好的透水性、透气性,植物可以从袋中生长出来,实现边坡绿化。

2.4 新型防护技术

随着材料科学、工程技术的发展,一些新的边坡防护技术被采用。三维植被网防护是土工合成材料和植物相结合的防护技术,三维网有三维立体结构,可以很好地固定土壤,防止水土流失。植物根系穿入网孔生长,与三维网一起构成一个整体,提高边坡的稳定。生态混凝土防护采用多孔混凝土作为基材,内部孔隙可填充种植土和草种,植物可在混凝土中生长。生态混凝土具有一定的强度,能抵抗雨水冲刷,同时具有良好的透水性和透气性,适合植物生长。该技术适用于城市道路边坡和景区道路边坡,兼具防护和景观功能。纤维加筋生态防护技术将植物纤维、合成纤维掺入坡面固化材料中,提升表层土体抗拉强度与抗冲刷能力,同时不影响植物生长,适配南方多雨地区边坡防护需求;柔性防护网技术以钢丝绳网为主体,覆盖在岩质边坡表面,可有效拦截落石、减缓风化侵蚀,安装便捷且对边坡原貌扰动较小,在山区岩质高边坡中应用愈发广泛。

3 路基边坡稳定性提升路径

3.1 优化边坡设计方案

合理的设计是保证边坡稳定性的前提。设计前应进行详细的工程地质勘察,查明边坡的地层分布、岩土性质、地质构造和地下水情况,根据地质条件确定合理的边坡形式和坡率。对于土质边坡,坡率一般不宜大于 1:1;对于岩质边坡,可根据岩体完整性适当提高坡率,但不宜大于 1:0.3。

边坡高度不宜过大,边坡高度大于 20 m 时应设分级平台,平台宽度不小于 2 m,每级边坡高度不大于 15 m。分级平台可以减小边坡坡度,还可以拦截上部

边坡的雨水和落石,提高边坡整体稳定性。同时还要根据边坡重要性、地质条件来选择防护形式。稳定性差的边坡先用工程防护或者复合防护,稳定性好的边坡用生态防护。

3.2 加强施工过程质量控制

施工质量影响边坡稳定性。路基开挖应自上而下分层进行,分层防护,不得掏底开挖。开挖时尽量减少对边坡土体的扰动,防止破坏原有的植被和地质结构。对软弱土层、破碎岩层采用短开挖、快支护的方法,防止边坡坍塌。

防护工程施工要按设计要求进行。挡土墙基础应设在稳定的地基上,基础埋深不小于1 m。锚杆施工时钻孔深度、角度应满足设计要求,锚杆注浆饱满,确保锚杆与岩体有良好的黏结力。喷射混凝土施工时,应控制喷射压力和喷射距离,保证混凝土厚度均匀、密实。生态防护施工中选草种、灌木,保证种植土质量,提高植物成活率。施工阶段要同步做好坡面临时防护,开挖后及时覆盖防尘布、防水膜,防止裸露坡面长期受雨水冲刷和阳光暴晒,雨季施工时要提前布设临时排水槽,减少雨水入渗对坡体的软化影响,保证边坡施工期间的临时稳定^[5]。

3.3 完善边坡排水系统

水是引起边坡失稳的主要因素,完善的排水系统可以有效地减小地下水对边坡的影响。边坡排水系统由地表排水和地下排水两部分组成。地表排水主要采用截水沟、排水沟、急流槽等设施将边坡范围内雨水迅速排出,防止雨水渗入边坡土体。截水沟设于边坡坡顶外5 m处,排水沟设于边坡平台及坡脚处,急流槽设于坡度较陡处。

地下排水主要用于降低地下水位,排除边坡内部的地下水。常用的地下排水设施有渗沟、盲沟和排水孔。渗沟适用于拦截浅层地下水,采用透水性材料填充,外包土工布防止泥沙堵塞。盲沟适用于排除深层地下水,采用穿孔塑料管作为排水通道。排水孔适用于岩质边坡,通过钻孔将边坡内部的地下水排出,降低孔隙水压力。排水系统施工需注重衔接顺畅,截水沟、排水沟的转弯处采用圆弧过渡,沟底设置合理纵坡,防止积水淤积渗漏;对于地下水丰富的边坡,可组合采用渗沟与排水孔联合排水方式,提升地下水疏导效率,从水文条件层面削弱边坡失稳的诱发条件。

3.4 建立长期监测与预警体系

边坡失稳是一个渐进的过程,通过长期监测可以及时发现边坡变形迹象,提前采取措施,防止事故发生。监测内容主要包括边坡表面位移、深部位移、地下水

位和降雨量等。表面位移监测采用全站仪或GPS,监测点布置在边坡顶部和平台处,每20 m~50 m设置一个监测点。深部位移监测采用测斜仪,在边坡内部埋设测斜管,监测不同深度的土体位移。

建立边坡预警体系,根据监测数据设定不同等级的预警阈值。当边坡位移速率超过预警阈值时,及时发出预警信号,组织人员撤离,并采取应急加固措施。同时,利用物联网和大数据技术,实现边坡监测数据的实时传输和分析,提高预警的准确性和及时性。对于重要的高陡边坡,可安装视频监控系统,实时观察边坡的变化情况。监测设备安装后需定期校准维护,避免因设备故障、数据漂移导致预警失效,运维阶段可结合公路巡检工作,开展人工复核监测,形成自动化监测与人工巡检互补的管控模式,进一步提升边坡风险识别的全面性。

4 结束语

本文系统分析了路基边坡失稳的机理与影响因素,详细介绍了工程防护、生态防护、复合防护和新型防护等各类施工技术的适用条件与要点,从设计优化、施工控制、排水系统完善和监测预警体系建立四个方面提出了边坡稳定性提升路径。路基边坡防护是一项系统性工程,需要兼顾工程安全与生态保护,采用综合防护措施,实现边坡的长期稳定。在“双碳”目标与生态公路建设导向下,路基边坡防护需进一步强化绿色化、智能化融合,推广低影响施工工艺与可降解防护材料,推动边坡防护从被动加固向主动预防、从单一结构防护向生态结构协同防护转变,持续提升公路边坡全生命周期稳定性。未来,随着智能化技术和新材料的不断发展,路基边坡防护将向智能化、绿色化方向发展。应进一步加强边坡失稳机理的研究,开发新型环保防护材料和智能监测设备,建立基于大数据的边坡稳定性预测模型,不断提高路基边坡防护技术水平。

参考文献:

- [1] 项崇松,解金.山区公路路基边坡防护工程设计与施工技术研究[J].运输经理世界,2026(02):51-53.
- [2] 刘永仁,申铁军.路基边坡防护工程常见类型与施工注意事项[J].交通建设与管理,2025(05):139-141.
- [3] 程启根,费桢堃.高速公路路基边坡防护施工技术研究[J].时代汽车,2026(10):121-123.
- [4] 杨倩.路基边坡生态防护技术的应用[J].汽车画刊,2024(12):120-122.
- [5] 陈信源.市政道路路基边坡防护施工技术设计[J].中国建筑金属结构,2025,24(19):57-59.

建筑工程施工钢筋混凝土 墙外保温施工技术研究

梁正红

(甘肃省工程设计研究院有限责任公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要 在建筑行业绿色低碳转型发展背景下, 外墙保温是提升建筑围护结构热工性能、降低建筑能耗、优化室内居住环境的关键技术。本文分析墙外保温施工技术应用特点, 从基层处理、保温层铺设固定、防护层施工、特殊节点处理等核心工序入手, 细化各环节工艺要点与技术控制标准, 围绕构造体系管控、过程质量检测、抗裂防渗优化三大维度, 提出专业化施工控制策略, 旨在为规范现场施工流程、提升外墙保温体系整体稳定性与耐久性提供参考。

关键词 建筑工程; 墙外保温; 基层处理; 保温层铺设; 防护层施工

中图分类号: TU761.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.017

0 引言

当前, 绿色节能、低碳减排已成为建筑行业高质量发展的核心导向, 外墙保温作为建筑节能改造与新建工程的重要组成部分, 能够有效削弱室外温度传导、缩减建筑采暖与制冷能耗, 契合建筑绿色化发展需求。墙外保温施工可在混凝土外墙外侧构建连续保温防护体系, 弥补墙体节能短板。然而, 钢筋混凝土墙外保温属于综合性系统施工技术, 工序衔接复杂、构造要求严格, 现场极易因工艺管控不到位、节点处理不合理引发保温层空鼓开裂、渗水脱落等质量问题。为此, 立足于工程实际, 深入探究钢筋混凝土墙外保温关键施工工艺, 建立全流程技术管控体系, 对提升建筑节能施工质量、推动建筑行业绿色可持续发展具有重要的现实意义。

1 建筑工程钢筋混凝土墙外保温施工特点

1.1 关联性强

从现场施工角度来看, 钢筋混凝土墙外保温施工活动并非孤立存在, 和其他工序环节保持紧密联系, 包括主体结构施工、孔洞预留、门窗安装、墙体饰面施工等, 各道工序环节相互影响, 如果不能从全局角度出发来制定施工方案, 极易引发施工冲突。例如: 未能核实主体结构成型质量和门窗洞口预留情况的前提下, 提前开展墙外保温施工作业, 后续因结构病害缺陷、洞口预留位置/尺寸有误, 需要破坏墙外保温

施工成果进行返工整改, 产生额外工程量, 伴随出现造价增加、工期延误等一系列连锁问题。

1.2 操作精度要求严格

建筑围护结构保温效果和墙外保温施工精度成正比, 任意工序环节出现错误操作行为, 或是其他原因导致施工误差超标, 都会明显削弱墙体保温效果和围护体系整体热工性能。因此, 现场施工期间, 对墙外保温施工精度提出严格要求, 这也是施工难度系数远超其他工序的核心原因。例如: 在基层处理环节, 严格遵循《建筑装饰装修工程质量验收标准》(GB 50210) 相关要求, 控制基层平整度误差小于 5 mm、垂直度误差小于 3 mm/2 m, 基层表面需干净密实, 无浮灰、油污、空鼓及破损缺陷。在保温板粘贴施工环节, 要求保温板与基层紧密贴合, 黏结面积满足对应工艺规范要求, 板材拼接缝隙宽度控制在 2 mm 以内, 多点抽检排查空鼓、开裂等质量缺陷^[1]。

1.3 受现场环境影响

钢筋混凝土墙外施工受到温度、空气湿度、风速等环境条件的影响, 如果强风、大雾等恶劣天气下继续作业, 无法保证施工质量, 还可能出现高处坠落等安全事故。以温度因素为例, 墙外保温施工理想温度为 5℃~35℃, 需要合理选择作业时间, 低温环境下会延长抹面/粘贴砂浆凝结时间和降低黏结强度, 极端情况下出现砂浆冻结现象, 高温环境下则会导致

作者简介: 梁正红 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

砂浆水分快速蒸发,伴随出现砂浆干裂、起砂等问题,同样会削弱保温层黏结效果。

2 建筑工程施工钢筋混凝土墙外保温施工关键技术

2.1 基层处理

基层处理作为钢筋混凝土墙外保温施工过程的初始环节,基层状态直接影响保温层铺贴效果,必须保持平整、洁净与完好状态,具体技术要点如下。第一,基层清理。现场准备钢丝刷、铲刀、砂轮等工器具,逐一清理基层表面附着的全部杂质,包括残留浮浆、粉尘、松散部分和凸起物。使用清水冲洗墙体表面,等待基层表面恢复干燥状态,以含水率低于10%为合格标准,也可选择使用压缩空气吹扫基层表面,省略自然风干过程。第二,基层找平。针对钢筋混凝土墙体构件,以基层平整度误差小于5 mm、垂直度误差小于3 mm/m为合格标准,使用2 m靠尺和塞尺全面检查基层尺寸,标记误差超标,误差不足5 mm时,使用聚合物水泥砂浆一次性完成找平作业;误差超过5 mm时,则使用水泥砂浆分层进行找平处理,单层找平厚度限制在10 mm内,并在找平后洒水养护7 d以上时间,直至找平层抗压强度超过1.5 MPa^[2]。第三,基层修补。采取目视检查、超声波检测两项技术,精准标记基层所有缺陷部位,按照缺陷性质与受损程度来选择专项修补方法。以孔洞病害为例,以孔洞直径作为划分标准,孔洞直径不足50 mm时,仅需清理孔洞内部杂质和松散颗粒,完整充填水泥砂浆并等待固化成型即可;孔洞直径超过50 mm时,则在孔洞内部吹扫完成后,需植入钢筋,和墙体原有受力钢筋相互连接,继续在孔洞内部分层填补水泥砂浆。第四,界面强化。额外在基层上均匀涂刷一层界面处理剂,进一步增加黏结强度,避免保温层脱落,施工现场临时稀释、搅拌界面剂,持续搅拌至均匀混合状态后静置5 min,即可在基层表面上完整涂刷界面剂,禁止存在漏涂部位,所有部位涂刷厚度保持一致,等待界面剂恢复表干状态,常温环境下的静置表干时间约为2 h~4 h。

2.2 保温层铺设固定

墙外保温层直接承受风荷载与环境侵蚀,极易出现粘贴失效和保温层脱落问题,为延长保温体系实际使用寿命,需要组合采取砂浆粘贴、锚栓固定两种方法,技术要点如下。第一,砂浆制备。必须使用聚合物水泥砂浆,施工现场临时搅拌砂浆,按照产品说明书确定搅拌时间、搅拌顺序和原材料用量比例,使用电子天平精准称量,原材料用量误差必须控制在±1%以内。使用电动搅拌器持续搅拌,搅拌时间超过5 min,搅拌后静

置3 min~5 min即可投入使用,分批次制备黏结砂浆,各批次砂浆存放时间不得超过2 h。第二,保温板粘贴。按照设计图纸把保温板裁剪为特定形状、尺寸,保温板背面完整涂刷粘贴砂浆,或是单块保温板背面涂刷2~3条黏结砂浆条,砂浆条直径为50 mm~80 mm、间距为100 mm~150 mm,按照从下到上顺序在基层上粘贴固定保温板,向下轻压保温板,按压时间超过30 s,确保基层和保温板保持紧密贴合状态,尽量消除空鼓部位。同时,各块保温板铺贴就位后,都需要测量调整平整度、垂直度和拼接缝,以平整度误差小于2 mm、垂直度误差小于3 mm/m、拼接缝宽度小于2 mm为合格标准,并在拼接缝处填补专用填缝材料,禁止使用普通水泥砂浆^[3]。第三,锚栓固定。提前准备不锈钢材质或是镀锌钢材的锚栓,基于保温层厚度确定锚栓长度,锚栓直径超过8 mm。保温层上按照梅花形均匀布设各处锚孔,锚孔间距保持在0.4 m~0.6 m,并在阴阳角、门窗洞口周边等特殊位置加密布设锚孔,锚孔间距缩小至0.3 m~0.4 m。保温层粘贴固定24 h后,即可钻设锚孔,孔径值略大于锚栓直径,再用锤子把锚栓敲入孔内,保持锚栓顶部和周边保温板气胀状态,最终在保温层表面紧贴安装锚栓圆盘。

2.3 防护层施工

保温板自身防护能力与环境适应性较差,如果长期暴露在室外环境,必将出现老化加快现象,提前失效。为解决这一问题,必须在保温层外部施作防护层,既能保护保温层免遭破坏,还能进一步强化墙体抗裂性能和防水性能,外部防护层具体由抹面砂浆、抗裂网格布组成,工艺要点如下。第一,抹面砂浆。必须使用专用抗裂抹面砂浆,抗压强度超过3 MPa,黏结强度超过0.6 MPa,现场临时制备砂浆,保持100 mm~120 mm稠度,禁止使用普通水泥砂浆。砂浆搅拌成型后,在保温层上分层涂抹,分为底层砂浆和面层砂浆,直接涂刷底层抹面砂浆,涂抹厚度控制在2 mm~3 mm,目视检查是否存在漏涂部位并进行补涂处理,间隔15 min~20 min等待底层砂浆初凝,即可铺设网格布。各层网格布铺设就位并嵌入底层砂浆内部后,继续涂刷面层砂浆,涂抹厚度同样为2 mm~3 mm,完整覆盖网格布,禁止存在外露部位,最终使用铁抹子把砂浆表面抹平压光。第二,抗裂网格布。推荐使用耐碱玻璃纤维网格布,到场后全面检查力学性能是否合格,以单位面积质量超过160 g/m²、耐碱拉伸断裂强度超过750 N/50 mm、厚度超过0.16 mm为合格标准,并把网格布裁剪为特定尺寸,保持裁剪边缘平整状态。底层抹面砂浆初凝后,即可在砂浆表面铺贴网格布,使用抹子把网格布压入

砂浆内部,相邻各幅网格布搭接处理,搭接宽度超过 100 mm,继续在网格布表面涂刷面层砂浆^[4]。外墙大面部位的抗裂网格布铺贴层数为 1 层,阴阳角部位网格布铺贴层数为 2 层。

2.4 节点处理

建筑外墙结构上分布多处特殊节点部位,包括门窗洞口、阴阳角、屋面外墙交接处和管线穿墙洞口,成为保温体系薄弱环节,常规工艺做法并不适应节点复杂构造形式,极易出现保温不严密、变形开裂和渗水病害。因此,必须主动结合特殊节点构造形式,量身定制保温施工方案,以门窗洞口处理方法为例,按照门窗洞口尺寸来确定保温板形状,整板切割保温板,保温层紧密贴合门窗框,缝隙宽度保持在 5 mm~10 mm,缝内连续充填密封胶,并把抗裂网格布宽度增加至 200 mm 以上,抹面砂浆厚度增加 1 mm~2 mm。同时,为解决雨水侵蚀问题,门窗洞口上方额外涂刷水泥砂浆制作滴水线,滴水线宽度为 100 mm~150 mm,厚度为 10 mm~15 mm,引导雨水向下流淌,不会渗入保温层。

3 建筑工程施工钢筋混凝土墙外保温施工控制策略

3.1 构造体系标准化管控

外墙外保温整体构造稳定性直接决定节能效果与服役年限,需严格依据节能设计文件及现行国标要求,对多层构造体系实施标准化管控。严格规范基层界面处理、保温板材铺贴、黏结固定、锚固件增设、耐碱网格布压埋、抹面防护等分层构造做法,明确各构造层厚度、施工工艺与成型标准,杜绝随意简化构造层次、缩减材料用量、省略关键工序等不规范施工行为。黏结与机械固定复合体系需按设计要求控制黏结布局与锚固件布设密度,兼顾保温层受力均匀性与抗拔承载力;不同材质交接部位、变形缝位置严格落实柔性收口与抗裂构造措施,利用柔性密封材料、伸缩构造消解温度应力与结构变形,有效规避保温层开裂、空鼓、脱层、渗水等共性质量病害,保障外墙保温构造体系的整体性与耐久性。

3.2 现场质量检测

建立全过程动态检测与分层验收管控模式,将质量管控贯穿外墙保温施工全流程。施工阶段采用 2 m 靠尺、塞尺、水平仪等检测器具,常态化抽检基层、保温层、防护层的平整度、垂直度及拼接缝隙偏差,严格把控各项尺寸偏差指标;对黏结强度、锚固件抗拔力、抹面层密实度等关键指标开展现场抽样复检,检测数据需满足节能验收规范要求^[5]。实行分层分段

验收制度,基层处理验收合格后方可开展保温板铺贴,保温层固定验收通过后进行抹面防护施工,关键隐蔽部位留存影像资料与验收记录。依托过程检测数据及时纠偏施工偏差,对检测不合格部位制定整改方案并返工复检,以过程管控强化成品质量,确保外墙外保温工程整体施工质量符合节能验收标准与设计要求。

3.3 抗裂防渗控制

钢筋混凝土外墙受温度变化、结构收缩、外界荷载等多重因素影响,易产生变形应力,进而引发保温体系开裂、雨水渗透等问题,需强化抗裂、防渗一体化技术管控。优化砂浆配合比与施工养护工艺,控制抹面砂浆收缩变形,通过耐碱网格布满铺、加强层增设等方式提升防护层抗拉抗裂性能;针对外墙门窗洞口、穿墙管线、挑檐、阴阳角等易渗水节点,优化防水收口构造,采用密封胶嵌缝、防水加强层附加设置等工艺,阻断雨水渗透路径。同步控制保温板材排版方式与拼接工艺,错缝铺贴、严控板缝宽度,减少应力集中点位,弱化温度变形对保温体系的破坏作用,通过构造优化与工艺管控双重手段,提升外墙外保温系统的抗变形、抗开裂、抗渗漏综合性能。

4 结束语

在建筑行业绿色转型浪潮下,墙外保温施工技术逐渐成为建筑施工体系核心内容,墙体保温效果决定着建筑绿色等级。施工人员需提高对钢筋混凝土墙外保温施工技术的关注度,完整掌握工艺做法,精细化把控现场作业过程。同时,从构造体系标准化管控、全过程质量检测、抗裂防渗协同优化层面,构建科学完善的施工技术控制体系,有效解决外墙保温施工常见结构性缺陷与功能性问题,为建筑行业绿色低碳发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张翔.建筑工程施工钢筋砼墙外保温施工技术探究[J].科技创新与应用,2026,16(01):193-196.
- [2] 陈楠楠.浅谈建筑工程施工钢筋砼墙外保温施工技术[J].城市建设,2025(14):98-100.
- [3] 赵一丹.建筑工程施工中的钢筋砼墙外保温施工技术研究[J].科技资讯,2026,24(03):143-145.
- [4] 陈楠楠.浅谈建筑工程施工钢筋砼墙外保温施工技术[J].城市建设,2025(14):98-100.
- [5] 冯浩.外墙外保温施工技术在建筑工程节能改造中的应用[J].建材发展导向,2025,23(10):136-138.

高原隧道二次衬砌混凝土 施工质量管控关键技术

邓中淋

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘要 高原地区低温低氧、昼夜温差大、冻融循环频繁的特殊环境,导致二次衬砌混凝土易出现强度增长缓慢、冻胀开裂、抗渗性不足等质量问题,直接影响隧道结构的长期耐久性。本文立足于高原隧道二次衬砌施工的质量要求,系统分析原材料性能、拌合运输、浇筑振捣、养护拆模等环节对混凝土质量的影响规律,从配合比优化、保温运输、精细化施工、全周期养护四个维度提出针对性管控技术。结合川藏铁路某海拔4 200 m隧道工程实践,验证了该技术体系的应用效果,混凝土强度合格率达100%,有害裂缝发生率降低82%,旨在为同类高原隧道工程提供技术参考。

关键词 高原隧道; 二次衬砌; 混凝土施工; 原材料性能; 低温养护

中图分类号: U457.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.018

0 引言

随着我国西部交通基础设施建设的深入推进,川藏、青藏等区域的隧道工程数量持续增加,多数隧道位于海拔3 000 m以上的高原地带^[1]。二次衬砌作为隧道结构的永久支护体系,承担着承受围岩压力、防水抗渗、保障运营安全的重要作用。高原极端气候条件下,混凝土凝结硬化过程受低温、低气压、强紫外线等因素干扰显著,传统施工工艺难以满足耐久性要求。因此,深入研究高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控关键技术,对保障高原交通工程结构安全、延长工程使用寿命具有重要的工程实践意义。

1 高原隧道二次衬砌施工的质量要求

高原隧道二次衬砌混凝土需同时满足力学性能、耐久性与外观质量要求。力学性能方面,设计强度等级多为C30~C40,要求混凝土早期强度增长快,能够尽早承受围岩荷载,一般规定3 d强度不低于设计强度的50%,7 d强度不低于设计强度的75%。耐久性是高原隧道衬砌的关键指标,抗冻等级不应低于F200,高海拔富水地段需达到F300;抗渗等级不低于P8,地下水发育地段提高至P10;同时需具备良好的抗碳化、抗氯离子渗透性能,满足100年设计使用年限要求。外观质量方面,要求混凝土表面平整光滑,无蜂窝、麻面、露筋等缺陷,裂缝宽度不得超过0.2 mm,且不

得出现贯通性裂缝。施工缝、变形缝处需处理严密,防止地下水渗漏,确保隧道运营期间的防水效果^[2]。

2 影响高原隧道二次衬砌混凝土质量的关键因素

2.1 原材料性能与配合比设计

原材料的质量是影响混凝土性能的重要因素。水泥应该选用水化热适宜、早期强度高的普通硅酸盐水泥,不能用早强过高容易产生温度裂缝的水泥。骨料为质量上乘的碎石、河砂,级配佳,质地坚实,含泥量小于1%。外加剂要选择适合低温条件的引气减水剂和防冻剂,引气剂可以引入均匀的小气泡来提高混凝土的抗冻性;减水剂可以降低水胶比,从而改善混凝土的工作性能。

水胶比过大容易造成混凝土内部孔隙增多,抗冻、抗渗能力减弱;水胶比过小又会使混凝土的流动度变差,给施工带来困难。掺合料的种类和掺量也会对混凝土性能产生影响,适量掺入粉煤灰可以改善混凝土的工作性、降低水化热,但是过多掺入会使得早期强度发展慢,不利于低温环境下的施工。

2.2 混凝土拌合与运输过程

低温环境下,混凝土拌合时原材料温度过低,会导致混凝土出机温度不足,凝结时间延长,甚至出现早期受冻现象。若拌合站未采取保温措施,拌合用水与骨料温度低于5℃,混凝土出机温度将难以满足施

作者简介: 邓中淋(1992-),男,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁工程。

工要求。在运输过程中，混凝土热量散失过快，到场温度低于 5℃ 时，会严重影响混凝土的浇筑质量与后期强度发展。

2.3 浇筑与振捣施工工艺

浇筑温度太低，会导致混凝土凝结硬化速度变慢、早期强度不足；而浇筑温度过高又会使混凝土内外面温差增大，从而出现温度裂缝。分层浇筑厚度较大时，下层混凝土初凝后才进行上层的浇筑，这样容易产生施工冷缝，破坏结构整体性和防水性。

振捣不够会导致混凝土内产生蜂窝、孔洞，从而降低强度和抗渗性，振捣过度会使得混凝土出现离析现象，造成骨料下沉、水泥浆上浮，影响表面的质量。施工缝处理不当，比如凿毛不到位、清理不干净等都会使新老混凝土之间黏结不良而产生渗漏^[3]。

2.4 养护与拆模环节

养护是高原隧道二次衬砌混凝土施工中最重要的一环，在低温环境下，如果养护不及时、不恰当，就会造成混凝土早期受冻、干缩开裂等问题。养护温度不足会造成混凝土强度增长缓慢，甚至停滞不前；养护湿度不够会造成混凝土表面水分迅速蒸发，从而引

发干缩裂缝。养护时间不够也会使混凝土后期强度、耐久性受到影响。

3 高原隧道二次衬砌混凝土施工质 量 管 控 关 键 技 术

3.1 低温适配型混凝土配合比优化技术

按照高原低温环境的特点来设计低水胶比、适量掺合料、复合外加剂的配合比，提高混凝土的各种性能。把水胶比控制在 0.40～0.45 之间可以减少混凝土中的孔隙率，这样可以提高混凝土的密实度和抗冻性。其次，在其中加入 20%～30% 的Ⅰ级粉煤灰来代替一部分水泥，降低水化热，提高混凝土的工作性和长久耐久性。加入 1.0%～1.5% 的聚羧酸系引气减水剂以及 2%～3% 的复合防冻剂，引气剂可以引入 3%～5% 左右的均匀微小气泡来提升混凝土的抗冻融性能；减水剂能够减少用水量从而提高混凝土早期强度；而防冻剂则能降低混凝土的冰点以避免其在初期时遭到冻结^[4]。

不同海拔地区的配合比参数需根据环境温度进行调整，具体设计参数如表 1 所示。配合比确定后，需进行现场试拌，验证混凝土的坍落度、凝结时间、强度等性能指标，满足要求后方可用于工程施工。

表 1 高原隧道二次衬砌混凝土配合比设计参数

海拔范围 (m)	水泥用量 (kg/m ³)	粉煤灰掺量 (kg/m ³)	水胶 比	引气减水 剂掺量 (%)	坍落度 (mm)	3 d 强度 (MPa)	28 d 强度 (MPa)	抗冻 等级	抗渗 等级
3 000～4 000	320	80	0.42	1.2	140～160	18	35	F300	P10
4 000～5 000	340	70	0.40	1.4	120～140	20	36	F350	P10
> 5 000	360	60	0.38	1.6	100～120	22	38	F400	P12

3.2 混凝土拌合运输保温技术

为保证混凝土出机温度与到场温度满足要求，需对拌合与运输全过程采取保温措施。拌合站采用封闭式保温棚，内部设置供暖系统，保持棚内温度不低于 10℃。原材料预热优先采用热水拌合，水温控制在 60℃～80℃，骨料采用蒸汽预热至 10℃～20℃，严禁直接加热水泥，防止水泥假凝。混凝土出机温度控制在 15℃～20℃，确保到场温度不低于 10℃。

混凝土运输罐车加装加厚保温层，保温层厚度不小于 5 cm，运输过程中罐体保持低速转动，防止混凝土离析。合理规划运输路线，缩短运输时间，单程运输时间控制在 1 h 以内。到场后需检测混凝土的坍落度与温度，不符合要求的混凝土不得用于浇筑。

3.3 精细化浇筑与振捣施工技术

在浇筑混凝土之前要对模板、钢筋以及预埋件的位置和尺寸进行复核，并把模板内积存的杂物及积水清

理干净，同时应对模板进行预热，避免混凝土与冷模板相接触而造成表面冻结。浇筑温度保持在 5℃～15℃ 之间，采取分层浇筑、分层振捣的方法，每层厚度不超过 40 cm，上面一层混凝土的浇筑应当在下面一层混凝土初凝前完成。

振捣用插入式振捣棒，振捣棒移动间距不应大于其作用半径的 1.5 倍，插入下层混凝土 5 cm～10 cm，快插慢拔，振捣时间为混凝土表面泛浆、不再下沉、无气泡冒出为止，一般为 20 s～30 s。不得出现漏振、过振的情况，避免出现蜂窝、麻面、离析的现象。施工缝处要凿毛，清除表面浮浆及松动骨料，在浇筑之前先铺上一层与混凝土相同配合比的水泥砂浆，厚度在 2 cm～3 cm 之间，使新旧混凝土紧密结合。

3.4 全周期保温保湿养护技术

对高原低温环境采取“保温加保湿”的全周期养护办法，依照各个海拔地区环境温度的不同来确定不

同的养护参数（见表 2）。混凝土浇筑完之后立即对衬砌表面涂刷土工布和保温被以保证表面干燥、防止水分散失。对于海拔 4 000 m 以上的极寒地区，采用电热毯加保温被的养护方法，电热毯功率控制在 $100\text{ W/m}^2 \sim 150\text{ W/m}^2$ ，保证混凝土表面温度不小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5]。

养护时间不少于 28 d，养护期间专人定时观测温度、湿度，及时补充水分，调节电热毯温度。拆模时混凝土强度应大于设计强度的 75%，混凝土表面与环境温差不大于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，防止温差大造成裂缝。拆模后继续对衬砌表面进行喷涂养护剂并覆盖保温被养护 14 d，提高混凝土耐久性。

表 2 不同海拔地区二次衬砌混凝土养护参数

海拔范围（m）	养护方式	养护温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）	养护时间（d）	拆模强度（MPa）	拆模后养护时间（d）
3 000 ~ 4 000	保温被 + 土工布保湿养护	≥ 5	28	22.5	14
4 000 ~ 5 000	电热毯 + 保温被养护	≥ 8	35	25.0	21
> 5 000	蒸汽养护 + 保温被覆盖	≥ 10	42	28.0	28

4.2 质量管控技术应用

施工过程中全面应用本文提出的质量管控技术体系。配合比方面，采用表 1 中 4 000 m ~ 5 000 m 海拔对应的参数，掺入 20% 粉煤灰、1.4% 引气减水剂与 2.5% 复合防冻剂，经试拌验证，混凝土出机温度 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，到场温度 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，坍落度 130 mm，3d 强度 21 MPa，28 d 强度 37 MPa，满足设计要求。

拌合运输环节，拌合站搭建封闭式保温棚，采用热水与蒸汽预热原材料，运输罐车加装 5 cm 厚保温层，单程运输时间控制在 45 min 以内。浇筑振捣环节，采用分层浇筑，分层厚度 35 cm，振捣棒严格按照规范操作，施工缝处彻底凿毛并铺水泥砂浆。养护环节，采用电热毯 + 保温被的养护方式，保持混凝土表面温度 $8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，养护时间 35 d，拆模强度达到 26 MPa。

4.3 应用效果

隧道二次衬砌施工完成之后，对混凝土的质量进行全面检查。一共抽取了 240 个混凝土试件，其中合格的有 240 个，合格率是 100%，平均强度达到 38.2 MPa。用超声波来检测混凝土的密实情况，没有发现蜂窝、孔洞等缺陷。外观质量检查表明，混凝土表面平滑光洁，没有蜂窝、麻面、露筋的现象，共发现了 12 条表面裂缝，最大的宽度为 0.15 mm，都是无害裂缝，比传统的施工工艺有害裂缝的发生率降低了 82%。抗冻抗渗性能试验的结果显示，该混凝土的抗冻标号为 F300，抗渗标号为 P10，符合设计的要求。隧道开通一年来没有出现渗水、裂缝等问题。

4 工程应用实例

4.1 工程概况

川藏铁路某隧道位于西藏自治区昌都市，全长 12.6 km，最大埋深 1 280 m，隧道进口海拔 4 200 m，出口海拔 4 050 m，属于典型的高原高寒隧道。该区域年平均气温 $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，极端最低气温 $-32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年冻融循环次数 280 次，地下水发育，对二次衬砌混凝土的抗冻、抗渗性能要求极高。隧道二次衬砌设计强度等级为 C30，抗冻等级 F300，抗渗等级 P10，采用整体式衬砌台车施工。

5 结束语

本文针对高原隧道二次衬砌混凝土施工的特殊环境，系统分析了影响混凝土质量的关键因素，构建了涵盖配合比优化、拌合运输保温、精细化浇筑振捣、全周期养护的质量管控技术体系。工程实践表明，该技术体系可有效解决高原低温环境下混凝土强度增长缓慢、易开裂、耐久性不足等问题，显著提升二次衬砌施工质量。未来可结合物联网与智能化技术，开发混凝土温度、湿度实时监测系统与智能养护设备，实现施工过程的动态管控，进一步提高高原隧道二次衬砌混凝土施工质量管控的智能化水平。

参考文献：

[1] 唐协, 林国进, 张航. 公路隧道机械钻爆法施工适应对策 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62(03): 217-228.
[2] 陈生金, 彭涛, 刘有梦, 等. 不良地质区域内隧道围岩失稳及支护处理方法 [J]. 青海交通科技, 2024, 36(02): 147-152.
[3] 王斌, 杨延栋, 周建军, 等. 高地应力软岩地层敞开式 TBM 法隧洞围岩变形控制技术: 以香炉山隧洞为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(02): 341-348.
[4] 袁铁. 高地应力水平岩层隧道初期支护适应性研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(09): 55-59, 66.
[5] 姜有存. 老营庄公路隧道保温防冻施工技术研究 [J]. 青海交通科技, 2023, 35(02): 118-122.

预制箱梁架设精准施工工艺优化策略分析

杨材明

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 德阳 618000)

摘 要 预制箱梁架设作为桥梁工程施工的关键环节, 其施工精度直接影响桥梁整体线形与结构安全。传统架设工艺普遍存在定位偏差大、落梁精度低、施工效率不高等问题, 难以满足现代桥梁工程高标准要求。本文结合实际工程案例, 从前期准备、过程控制、质量安全管控三个维度, 系统提出预制箱梁架设精准施工工艺优化实操方案。通过引入信息化监测技术与精细化管理手段, 有效提升箱梁架设精度与施工效率, 以期为同类工程提供有益参考。

关键词 预制箱梁; 架设施工; 架桥机定位; 箱梁起吊; 箱梁落梁

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.019

0 引言

随着我国交通基础设施建设的快速发展, 预制箱梁因具有结构性能稳定、施工速度快、质量易于控制等优点, 在高速公路、铁路桥梁工程中得到广泛应用。预制箱梁架设施工涉及多道工序, 任何一个环节出现偏差都可能导致桥梁线形不符合设计要求, 甚至引发安全事故^[1]。传统施工工艺依赖人工经验判断, 难以实现毫米级精度控制, 且施工过程中存在较多不确定因素。因此, 优化预制箱梁架设精准施工工艺, 对提升桥梁工程施工质量与安全水平具有重要意义。

1 预制箱梁架设施工前期准备工作优化

1.1 梁场与架桥机选型匹配优化

梁场选址和布置关系到预制箱梁的生产效率和运输方便程度, 架桥机选型决定箱梁架设能力及精度。梁场规划时要结合桥梁线路走向、箱梁数量及重量、运输距离等条件来确定梁场的位置和规模。梁场应设在地势平坦、交通方便的地方, 与桥梁线路保持直线连接, 不得有箱梁运输时急转弯、陡坡等现象^[2]。

架桥机选型要依据箱梁跨度、重量、架设高度和桥梁结构形式来综合考虑。跨度为 30 m、重约 120 t 的预制箱梁可以采用双导梁架桥机, 大跨度、大重量的预制箱梁应采用步履式架桥机。架桥机额定起重量应大于箱梁最大重量的 1.25 倍, 保证施工安全。架桥机应装有很高精度的定位系统和调平系统, 给精准架设提供设备支持。

梁场和架桥机匹配时, 梁场提梁机、运梁车和架

桥机的工作参数要互相配合。提梁机的起升高度要符合箱梁装车的要求, 运梁车的承载能力要和箱梁重量相匹配, 运梁车的行驶速度要和架桥机的架设速度相适应, 防止出现窝工的情况。

1.2 预制箱梁出厂验收与运输管控优化

预制箱梁出厂验收是保证箱梁架设质量的第一道防线, 必须严格按照设计要求和有关规范执行。验收内容主要是箱梁的几何尺寸、外观质量、混凝土强度、预应力张拉情况等。箱梁几何尺寸验收尤其重要, 主要检查箱梁长度、宽度、高度、梁端垂直度、支座预埋板位置及平整度。

从表 1 可知, 预制箱梁几何尺寸的允许偏差必须满足规范的要求。对超过允许偏差的箱梁应及时处理, 处理合格后方可出厂。同时要建立预制箱梁出厂验收台账, 对每片箱梁的验收情况进行详细记载, 可以追溯。

表 1 预制箱梁几何尺寸允许偏差

检查项目	允许偏差 (mm)	检查方法
梁长	+10, -5	用钢尺量测梁两端及中部
梁宽	±10	用钢尺量测梁两端及中部
梁高	+10, -5	用钢尺量测梁两端及跨中
梁端垂直度	≤ 5	用吊线和钢尺量测
支座预埋板位置	±5	用钢尺量测纵横两个方向
支座预埋板平整度	≤ 2	用 2 m 靠尺和塞尺量测

作者简介: 杨材明 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

2 预制箱梁架设过程精准控制工艺优化

2.1 架桥机定位与调平工艺优化

架桥机定位与调平是预制箱梁架设的首要工序，其精度直接影响后续箱梁的架设质量。传统架桥机定位主要依靠人工测量，不仅效率低，而且精度难以保证。优化后的架桥机定位工艺采用全站仪与 GPS 定位系统相结合的方式，可实现架桥机的快速精准定位^[3]。

在桥梁墩台上设置永久性测量控制点，控制点的坐标应经过严格复核。然后，利用全站仪测量架桥机前支腿、中支腿和后支腿的位置，通过调整架桥机的行走机构，将架桥机调整到设计位置。架桥机的纵向定位偏差应控制在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内，横向定位偏差应控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。

架桥机调平应采用液压调平系统，通过调整各支腿的高度，使架桥机主梁保持水平。调平过程中，应在架桥机主梁的两端及中部设置水准点，用水准仪实时监测主梁的水平度。架桥机主梁的纵向水平度应控制在 $1/1\ 000$ 以内，横向水平度应控制在 $1/500$ 以内。调平完成后，应将各支腿的液压锁锁定，防止架桥机在架设过程中发生倾斜。

2.2 箱梁起吊与横移精准控制优化

箱梁起吊、横移是预制箱梁架设过程中最容易发生安全事故的工序，也是影响架设精度的关键工序。优化后的箱梁起吊工艺采用四点起吊法，起吊点应在箱梁设计吊点处，不得随意改变吊点位置。起吊前要检查钢丝绳、吊钩、滑轮等起重设备的完好情况，保证起重设备安全可靠。

起吊时同时启动四个起吊千斤顶，使箱梁平稳上升。箱梁上升时应保证箱梁水平，箱梁两端高差不应大于 20 mm 。当箱梁上升到盖梁顶面以上约 50 cm 时，停止起吊，检查箱梁的稳定性及起重设备运行情况，确认无误后，方可进行横移作业^[4]。

箱梁横移用电动葫芦牵引，横移速度不大于 0.5 m/min 。横移时应在箱梁两端设专人监护，防止箱梁与架桥机、其他物体相撞。同时利用全站仪对箱梁横向位置进行实时监测，及时调整横移速度和方向，保证箱梁横移到设计位置上方。箱梁横移的横向偏差不得大于 $\pm 5\text{ mm}$ 。

2.3 箱梁落梁与对位工艺优化

箱梁落梁和对位属于预制箱梁架设精度控制的关键环节，直接影响到箱梁最终的位置及标高。传统的落梁工艺大多依靠人工观察和指挥来完成，容易造成对位偏差大、落梁不平稳等状况。经过改进的落梁、对位工艺采用信息化监测技术与人工辅助相结合的方法，可以保证箱梁的精确落梁和对位。

落梁前应在盖梁上标出箱梁的中心线和支座中心线，在箱梁两端标出箱梁的中心线。落梁时缓慢下降四个起吊千斤顶，使箱梁平稳下落。当箱梁距离支座顶面约 10 cm 时，停止落梁，用全站仪测量箱梁中心线与支座中心线的偏差，通过微调架桥机横移机构和起吊千斤顶，使箱梁调整到设计位置。

如表 2 所示，预制箱梁架设允许偏差应严格控制在规定要求范围内。对位完成后，继续缓慢落梁，使箱梁平稳落在支座上。落梁完成后，应立即检查箱梁的标高、中心线位置以及支座的受力情况，确认无误后，方可解除起吊钢丝绳。

表 2 预制箱梁架设允许偏差

检查项目	允许偏差 (mm)	检查方法
箱梁中心线位置	± 5	用全站仪量测
箱梁顶面标高	± 5	用水准仪量测
相邻箱梁顶面高差	≤ 3	用水准仪量测
支座中心偏位	≤ 3	用钢尺量测
支座倾斜度	$\leq 1/1\ 500$	用水平尺量测

2.4 临时支座安装与标高调整优化

对于连续梁桥，在预制箱梁架设时需要设置临时支座，待箱梁体系转换完成后，再拆除临时支座。临时支座安装质量及标高精度对箱梁线形、体系转换起着决定性的作用。改进后的临时支座安装工艺采用预制混凝土临时支座，强度高、稳定性好、拆除方便。

临时支座的尺寸应根据箱梁重量和支座反力来设计，临时支座的抗压强度应大于箱梁最大支座反力的 1.5 倍。临时支座安装前，在盖梁上标出临时支座位置，用水泥砂浆将盖梁顶面找平。临时支座安装时，要保证临时支座的中心线与设计位置一致，临时支座的顶面标高要按照设计标高精确调整。

临时支座标高调整应使用钢板垫片，垫片厚度根据实际情况加工，垫片数量不宜超过 3 层。调整后应将垫片和临时支座焊接牢固，防止垫片在箱梁架设过程中移动。临时支座顶面标高偏差不得超过 $\pm 2\text{ mm}$ ，同一墩台上临时支座顶面高差不得大于 2 mm 。

3 预制箱梁架设质量通病防治与安全管控优化

3.1 常见质量通病成因与防治措施

预制箱梁架设过程中常见的质量通病有箱梁定位偏差大、支座脱空、箱梁顶面线形不顺、梁端裂缝等。质量通病不仅会影响桥梁外观质量，还会降低桥梁结构安全性和使用寿命。

箱梁定位偏差大，主要是由架桥机定位不准、落

梁对位不到位、测量误差大等原因造成的。防治措施有使用高精度测量仪器和定位系统来提高架桥机的定位精度,加强落梁对位过程的监测和控制,保证箱梁对位准确,定期对测量仪器进行校验,减小测量误差^[5]。

支座脱空主要是由支座预埋板不平整、临时支座标高不一致、落梁不平稳等造成的。防治措施有如下几项:严格控制支座预埋板的平整度,对不平整的预埋板进行打磨处理;准确调整临时支座的标高,保证同一墩台上临时支座顶面高差不大于 2 mm;落梁时要保持箱梁平稳,防止箱梁倾斜。

箱梁顶面线形不顺主要是由箱梁预制误差大、临时支座标高调整不准确、箱梁架设顺序不合理等原因造成的。防治措施有三个:一是加强预制箱梁质量控制,严格控制箱梁几何尺寸;二是准确调节临时支座的标高,保证箱梁顶面标高符合设计要求;三是合理安排箱梁架设顺序,从一端到另一端依次架设。

梁端裂缝主要是由箱梁起吊和落梁时受力不均、运输过程中颠簸过大、梁端混凝土强度不够等原因引起的。防治措施有:采用四点起吊法,保证箱梁起吊、落梁时受力均匀,加强箱梁运输过程中的控制,防止箱梁剧烈颠簸,严格控制箱梁混凝土强度,待混凝土强度达到设计强度的 100% 后方可进行起吊、运输。

3.2 架设过程安全风险识别与管控

预制箱梁架设属于高空作业和起重作业,存在较大安全风险。常见安全风险有架桥机倾覆、箱梁坠落、高处坠落等。为了保证施工安全,必须对架设过程中存在的安全风险进行全方位的识别,并采取相应的控制措施。

架桥机倾覆主要是由架桥机基础不牢固、支腿受力不均、架桥机超载、大风天气作业等原因造成的。管控措施有:架桥机安装前对基础进行处理,保证基础有足够的承载能力;架桥机调平时使各支腿受力均匀;严禁架桥机超载作业;当风力大于 6 级时应停止架桥作业并固定好架桥机。

高处坠落是由作业人员没有系好安全带、作业平台防护不严、上下通道不牢固等原因造成的。管控措施为作业人员进入施工现场必须戴安全帽,高空作业时必须系安全带;作业平台应设防护栏杆和挡脚板,防护栏杆高度不应小于 1.2 m;上下通道应使用钢梯,设扶手,保证通道牢固可靠。

3.3 施工过程信息化监测系统应用

随着信息技术的迅猛发展,信息化监测系统在桥梁工程施工中被越来越多地使用。预制箱梁架设施工

中引入信息化监测系统,可以对施工过程进行实时监测和控制,从而提高施工精度和安全水平。

信息化监测系统是由传感器、数据采集器、数据传输设备、数据处理中心和显示终端等组成的系统。在架桥机、箱梁、临时支座等重要位置设置传感器,可以实时采集架桥机的位置、水平度、应力、箱梁的位置、标高、变形、临时支座的压力等数据。数据经数据传输设备及时传送到数据处理中心,之后再经由处理过程在显示终端上清晰呈现出来。

施工管理人员可以借助显示终端随时了解施工状况,发现施工过程中出现的问题并及时采取相应的措施加以解决。信息化监测系统可以对施工数据进行存储和分析,给以后的施工提供数据支持和经验借鉴。通过对箱梁架设过程中变形数据的分析可以对箱梁的预制参数、架设工艺进行优化,从而提高箱梁架设质量。

4 结束语

本文从前期准备、过程控制、质量安全管控三个方面系统地提出了预制箱梁架设精准施工工艺优化实操方案。通过优化梁场与架桥机选型匹配、预制箱梁出厂验收与运输管控、架桥机定位与调平、箱梁起吊与横移、箱梁落梁与对位、临时支座安装与标高调整等工序,有效提升了预制箱梁架设的精度与效率。同时,通过采取有效的质量通病防治措施、安全风险管控措施、施工人员技能培训与考核体系以及信息化监测系统应用,保障了预制箱梁架设施工的质量与安全。未来,随着建筑工业化与信息化的深度融合,预制箱梁架设施工将朝着更加智能化、自动化的方向发展。可进一步研究基于人工智能的预制箱梁架设自动控制系统,实现箱梁架设的无人化作业,进一步提高施工效率与精度,降低施工安全风险。

参考文献:

- [1] 史杰,田梦康.步履式架桥机在上跨营业线箱梁架设施工中的应用[J].价值工程,2025,44(34):108-110.
- [2] 吴仍武.预制箱梁钢筋工程智能优化技术与实践[J].智能城市,2025,11(11):144-148.
- [3] 宋敬杰.预应力混凝土箱梁预制施工技术[J].交通世界(建养·机械),2013(06):290-291.
- [4] 汪军辉.特定条件下的市政桥梁混凝土箱梁施工方法[J].水泥,2025(09):98-100.
- [5] 陈观友.预制拼装技术在桥梁施工中的应用研究[J].现代工程科技,2025,04(23):33-36.

已成型大跨度现浇预应力箱梁 单侧拼宽施工技术

李瑞祥，周克伟

(中国水利水电第十一工程局有限公司，河南 郑州 450001)

摘 要 本文聚焦大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工关键技术，系统梳理其在高速公路改扩建类桥梁工程中的适配应用场景与技术优势，重点围绕施工进度精准管控、全周期成本优化、工程质量闭环管理三个核心维度展开深度分析。依托某高速改扩建项目的实体工程实践验证，相较于传统双侧拼宽工艺，采用该单侧拼宽技术可有效压缩关键线路施工工期，降低现场临时工程投入与综合工程成本，同时大幅提升箱梁线形控制与拼接施工精度。进一步拆解了单侧拼宽施工的核心技术要素，针对大跨度支架体系设计、预应力张拉全过程精度控制、新旧梁体刚性连接等核心技术难点展开针对性剖析。通过针对性的工艺创新与参数优化，旨在对实现现场施工效率与拼宽后整体结构稳定性的双重显著提升有所裨益。

关键词 单侧拼宽施工；现浇预应力箱梁；预应力控制；智能化施工

中图分类号：U445.57

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.020

0 引言

城市化进程持续推进，大跨度桥梁建设需求不断攀升，大跨度、高承载力、高精度要求的桥梁工程中，现浇预应力箱梁技术已逐步成为主流施工方式。传统施工方法在工期把控与成本控制上面临较大压力，施工空间受限、交通流量密集的区域，施工难度更为突出。与普通现浇箱梁施工相比，已成型箱梁单侧拼宽施工面临诸多特殊难点，如新旧结构连接的精准度、支架偏载、预应力协调及拼宽段沉降控制等，都对施工技术提出了更高要求。为优化施工流程、降低环境影响，单侧拼宽施工技术逐步应用于实践。本文聚焦该技术的优势与面临的挑战，分析其在现代桥梁建设中的实际应用成效，并对技术未来智能化、自动化发展趋势进行展望。

1 已成型大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工技术概述

1.1 大跨度现浇预应力箱梁的基本特点

大跨度现浇预应力箱梁具有突出的工程应用优势，承载能力强、刚度充足、跨越性能优越，能够有效减少墩台布设数量，进而控制工程投入成本。通过合理应用预应力筋，可以在大跨度条件下有效抑制梁体变

形，强化结构抗弯效能，将梁体应力集中于预设部位，降低混凝土拉伸应力，提升整体结构的稳定性与抗震能力。现浇施工方式具备良好灵活性，可依据工程实际需求灵活调整箱梁尺寸与形态，适配不同项目的个性化设计要求。在“已成型箱梁单侧拼宽”施工中，该施工方式不仅保持了上述优点，还要求在拼宽段与原有梁体结构的衔接上实现更高精度，解决新旧结构连接的稳定性问题，这一精度控制尤为关键，影响着结构的整体性与耐久性。

1.2 单侧拼宽施工的应用场景

单侧拼宽施工技术广泛应用于桥梁改扩建设计以及狭小作业空间中的新建桥梁工程，尤其适用于交通流量密集、施工场地受限的区域^[1]。其核心优势在于通过单侧扩展梁体结构，减少施工过程中的障碍，大幅压缩施工周期。尤其在已成型箱梁单侧拼宽中，通过单侧扩展梁体，既能在保障结构强度与施工安全的前提下最大限度减少现有结构的拆除与占用面积，还能有效降低对周围环境的扰动。在跨越主要交通线路或城市主干道时，施工对交通通行的干扰降到最低。拼宽段梁体采用现浇工艺一次性浇筑成型，规避了传统拼接工艺可能导致的结构不连续问题，保障了梁体结构的整体性与稳定性。

作者简介：李瑞祥（1991-），男，本科，高级工程师，研究方向：施工技术管理。

1.3 施工技术的关键要素与创新点

在施工过程中, 支架系统需要承担巨大的施工荷载, 因此, 合理选择支架类型, 确保支撑效能非常重要。尤其是在高度较大或跨度较宽的情况下, 支架设计的精准度要求更为严格。此外, 模板与钢筋布置的精准度也是保障拼宽后梁体具备优良结构性能的关键。为此, 创新的可调支架和高精度测量设备应用, 可以有效控制支架与模板的安装误差, 确保施工精度达标。在已成型箱梁单侧拼宽施工中, 如何协调拼宽段与现有梁体的预应力筋张拉, 精确控制预应力力值, 确保拼宽段梁体的稳定性与结构一致性, 是技术创新的重点。技术革新还体现在预应力施工领域, 借助更精细化的张拉作业技术与精准的力值控制系统, 有效降低误差, 提升施工质量。

2 已成型大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工方法与工艺

2.1 单侧拼宽施工流程与步骤

单侧拼宽施工从地基处理环节启动, 常规采用钻孔灌注桩技术对地基进行加固, 确保地基承载力符合设计标准, 某高速公路项目中, 地基加固后承载力均值达 250 kPa。为了确保施工过程中结构的稳定性, 预压材料采用混凝土预制块, 布置在箱梁墩顶横梁及纵向腹板位置。为防止加载对箱梁底板板的破坏, 在底板上铺一层旧木板作垫层, 加载顺序从跨中向两边对称进行, 先加载腹板, 再加载顶板, 加载分四级进行, 按照加载重量约 30%、60%、100%、110% 加载, 加载应按照对称、分层、分级的原则进行, 严禁集中加载^[2]。待混凝土强度满足设计要求, 即可开展预应力张拉作业。张拉作业借助液压千斤顶精准控制张拉力, 确保预应力筋均匀张拉, 避免产生不均匀应力。张拉结束后进行管道压浆与封锚处理, 保障预应力筋与混凝土间的良好黏结效果, 后续拆除模板与支架, 推进桥梁后期养护工作。

2.2 施工过程中的预应力控制

在单侧拼宽施工中, 预应力控制是保障桥梁结构稳定的核心内容, 涵盖了预应力施工、预应力筋布设、张拉及压浆等多个工序。预应力筋布设必须依据设计方案完成精准计算, 保证各预应力筋定位准确。张拉阶段借助液压千斤顶完成作业, 张拉力实施严格管控, 防止力值偏差引发梁体变形, 实际张拉多遵循先腹板预应力筋、后顶板与底板预应力筋的顺序, 保障结构

受力均匀。张拉过程中采用的控制公式如下:

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} \quad (1)$$

式(1)中, ΔL 为伸长量, F 为张拉力, L 为预应力筋长度, A 为横截面积, E 为弹性模量。实际施工中, 张拉力误差需控制在 $\pm 3\%$ 范围内, 保障张拉力分布均匀, 最大误差不得超过 5 kN。张拉作业完成后, 进行管道压浆处理, 确保预应力筋与混凝土之间的黏结效能。压浆前必须彻底清理管道内部的杂物与积水, 确保浆料均匀填充管道且达到设计强度标准。管道压浆完成后, 进行封锚作业, 采用无收缩混凝土和聚氨酯防水涂料完成密封处理, 以确保预应力系统的稳定性和可靠性。

2.3 施工中的质量保证与技术管理

施工前期, 所有原材料需经过严格检验, 确保符合设计规范要求。混凝土选用 C50 标号, 坍落度控制在 10 cm ~ 15 cm, 保障浇筑所需的流动性与密实性, 施工过程中启用数字化监控系统, 实时跟踪施工质量, 保障混凝土浇筑、钢筋绑扎及模板安装精度均达到设计标准。在预应力施工阶段, 依托智能张拉设备与传感器实时监测张拉力, 确保预应力筋的均匀张拉, 杜绝不均匀应力产生。

3 已成型大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工中的技术难点与解决方案

3.1 技术难点: 结构稳定性与荷载分配

在单侧拼宽施工中, 偏载与沉降差是主要的技术难点, 大跨度现浇箱梁施工伴随较大施工荷载, 拼宽阶段支架与模板体系需同时承担梁体混凝土自重及施工操作产生的附加荷载。支架稳定性直接决定施工安全, 支架出现沉降或变形会造成梁体结构不均, 进而影响整体施工质量^[3]。尤其是单侧拼宽施工涉及新旧结构连接的精度问题, 若拼宽段的沉降控制不当, 将导致新旧梁体接合不严密, 进而影响结构的稳定性与耐久性。为此, 施工过程中需要精确计算荷载分布, 合理配置支架, 防止不均匀荷载引发的沉降差, 确保新旧梁体连接的稳定性。支架预压荷载一般按设计荷载的 1.1 倍设置, 预压完成后沉降量控制在 1.5 cm 以内, 有效保障支架体系的稳定性。荷载分布可以通过以下公式计算:

$$\sigma = \frac{M}{I} \quad (2)$$

式(2)中, σ 为梁体的应力, M 为弯矩, I 为截面惯性矩。这个公式帮助设计人员计算荷载在不同支

撑点的分布情况,从而设计合理的支架和梁体加固方案,保证梁体的稳定性和安全性。

3.2 新旧梁体连接:精度与协调性问题的应对

拼宽段梁体与已成型梁体的连接需要精确对接,任何误差都可能导致结构不连续,影响梁体整体性。特别是在拼宽施工过程中,张拉应力的协调至关重要,若拼宽段的预应力筋与已成型梁体的预应力筋张拉不协调,会导致应力分布不均,进而引发局部裂缝或结构损伤。为解决这一问题,施工中采用液压千斤顶精准控制张拉力,确保新旧梁体的张拉应力分布均匀。此外,精密测量设备在连接处的实时监测是确保施工精度的另一关键措施。

3.3 张拉力控制:保证均匀张拉与应力分布

拼宽段施工时,预应力筋张拉力的均匀分布至关重要,任何不均匀的张拉力都会导致局部应力集中,严重时会引起梁体开裂或结构损伤。在施工过程中,采用液压千斤顶精确控制张拉力,以确保每根预应力筋张拉时的力值均匀。根据施工设计,张拉顺序通常为先张拉腹板预应力筋,再张拉顶板与底板,确保不同部位的预应力筋受力均匀。在张拉过程中,张拉力误差必须严格控制在 $\pm 3\%$ 范围内,最大误差不得超过5 kN,避免因应力分布不均造成梁体变形或开裂^[4-5]。

4 已成型大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工效果与优化建议

4.1 施工效果评估:时间与成本效益分析

单侧拼宽施工方法在压缩施工工期与控制工程成本方面具备突出优势。以G60沪昆高速公路建设项目为例,跨越山区的大跨度桥梁,项目原定工期24个月,实际工期为21.6个月,通过采用单侧拼宽施工技术,施工周期比传统施工方式缩短了10%。在混凝土浇筑环节,工期减少了约15%,支架搭设的时间缩短了12%。这些时间节省的效果直接归因于该技术提高的施工效率和减少的资源浪费。施工成本方面,项目总成本相比传统施工方法节省了8%,材料浪费减少了6%。这一节省成本的原因主要是通过合理规划材料使用、减少资源浪费,以及提高施工过程中的机械利用率。钢筋和混凝土的使用量经过精细计算和管理,实现了资源的最大化利用,成本效益相关计算公式如下:

$$C = \frac{T \times P}{S} \quad (3)$$

式(3)中, C 为成本效益比, T 为施工工期, P 为单位工程成本, S 为施工规模。在实际项目中,采用

该施工方法后,工期和成本均得到了有效控制和优化,且节省的工期和成本数据也表明该技术的优势。

4.2 优化建议:材料与设备的选择

在实际施工中,混凝土强度严格控制在C50,并且在养护过程中注重保障其耐久性与抗裂性能。钢筋的选择同样关键,施工中常采用HRB400级钢筋,其抗弯、抗剪和抗拉性能优异,能够有效保障梁体的稳定性。在设备方面,采用高精度液压千斤顶和智能张拉系统,能够有效提升张拉精度,避免传统方法中张拉力不均导致的质量问题。智能张拉系统能够实时监控张拉力,确保每根预应力筋均匀张拉,避免不均匀张拉造成的梁体裂缝。引入BIM技术后,施工单位可实时监控施工进度,优化设备配置方案,避免因设备配置不合理导致的施工滞后问题。

5 结束语

本文分析了大跨度现浇预应力箱梁单侧拼宽施工技术在桥梁施工中的应用效果,强调了该技术在提升施工效率、节约成本和确保结构稳定性方面的显著优势。通过某高速公路项目的案例,验证了单侧拼宽施工技术能够有效减少施工时间和资源浪费,降低总体施工成本,并提升施工质量。在施工过程中,采用了高精度的液压千斤顶和智能张拉系统,以及BIM技术,大大提高了施工精度和效率。未来,随着智能化和自动化设备的普及,施工将更加精细化,施工管理将得到进一步优化,推动桥梁施工技术向更高效、安全、环保的方向发展。

参考文献:

- [1] 陈鑫.高速铁路大跨度64m现浇预应力简支箱梁施工技术[J].安徽建筑,2021,28(05):137-140.
- [2] 翟晓冬.公路桥梁现浇箱梁施工关键技术[J].石河子科技,2025(02):44-45.
- [3] 舒军.桥梁工程中支架现浇箱梁施工技术的应用[J].中国房地产业,2025(34):198-201.
- [4] 杨建华.高速公路预应力混凝土现浇连续箱梁施工技术[J].工程机械与维修,2023(05):204-206.
- [5] 王秋宏.桥梁施工中现浇箱梁施工关键技术研究[J].交通科技与管理,2025,06(10):114-116.

能源企业安全环保与数字化建设技术分析

平 涛

(中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516082)

摘 要 安全环保管理工作是保障炼油安全稳定运行的关键,也是新时代能源企业低碳绿色发展的基本目标。基于信息技术的应用实现炼油安全环保管理工作数字化建设,以数字赋能提升企业安全环保管理工作水平,对于实现炼油安全环保管理目标意义重大。能源企业安全环保管理数字化建设能够实现对企业安全环保管理环境的远程控制,提升安全环保管理工作效率。在建设过程中,一是要打通全链路数据、加设数据网关,进行异构数据源整合,通过数据采集和存储构建完善的数据库;二是要实现数据代码构建对元数据增强分析,应用新型数仓工具实现对数据的计算与分析;三是建立数据开发平台实现业务数据化向数据业务化的转变,以数据赋能业务发展,满足企业安全环保管理的数字化建设目标。

关键词 能源企业; 安全环保管理; 数字化建设; 数据库

中图分类号: TE4; F426.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.021

0 引言

在企业发展过程中实现数字化建设是时代发展的新趋势,通过数字化建设有利于提升管理效率,实现企业各项业务的标准化,同时数字化体系的融入也有效节约了人力成本,在促进企业稳定可持续发展方面发挥了重要价值。进入 21 世纪以后,我国各大能源企业大力引进数字化建设设备,在生产数字化建设水平方面得到显著提升,而安全环保管理作为新时代能源企业建设的主要内容,也需要进一步融入信息技术,实现数字赋能全面提升管理水平^[1]。本文对能源企业安全环保管理下的数字化建设意义进行分析,并从技术层面探索数字化建设的策略,旨在丰富企业安全环保管理数字化建设的相关理论,从实践层面为现阶段的安全环保管理工作转型升级提供借鉴,在全面促进我国能源企业安全环保管理智能化建设方面体现出现实意义。

1 能源企业安全环保管理数字化建设意义分析

1.1 实现管理环境的远程监控

在企业开展安全环保管理工作的过程中,所涉及的领域非常广泛,囊括与石油炼制、储存、运输等工作相关的各项程序和细节内容。任何一个环节的安全环保管理工作不到位,都会影响到整个石油炼制系统的生产稳定性,部分细微环节的安管理工作缺失可能会直接导致企业产生大的安全问题。因此,安全环

保管理工作涉及开采的设备、人员、物资以及施工生产与管理环节,面对庞大的工作量,通过信息化技术的融入实现数字化建设目标,能够基于数据网的建设实现对安全环保管理环境的远程监控^[2]。即能在信息化建设时借助数控设备针对重要环节的安全环保管理细节进行实时监控,准确把握相关环节的性能和状态,并实时做好数据记录与储存,使管理者能够实时掌控被管理对象的基本状态。通过这种远程监控有效节约了人力、物力、财力成本,提高了管理效率和水平,也使得各项安全环保管理工作更加细致入微,更加实时高效,有效降低了企业安全环保风险事件的发生率。

1.2 使安全环保工作得以高效实施

在企业安全环保管理工作中进行数字化系统建设,通过该数字化系统将安全环保工作相关的内容纳入数字化管理领域,使各项工作在开展的过程中基于数字结果作为信息指导。这种数字化信息来源于现场对各项安全环保管理工作的数据采集,通过准确的数据分析和应用使安全环保管理工作得到高效准确实施。通过数据的不断采集分析、存储与应用,基于相关数据的变化情况,结合安全环保管理工作中存在的风险进行有效预测,实现事先管控和预防,可以使安全环保工作效率得到显著提升,使石油炼制生产过程中的各环节、各领域始终处于安全环保状态^[3]。例如:对于同一台设备在进行安全监管的过程中,通过数字化建

作者简介: 平涛(1972-),男,本科,工程师,研究方向:现场安全管理。

设平台实时对相应设备进行数据采集和视频监控,既能够实时反映相应设备的基本状态,也能够准确了解设备的运行过程和安全稳定性,通过数据分析能够准确掌握相关设备是否存在安全隐患,是否存在异常的状态,对于不正常的情况可及时进行检查,有效实现对安全问题的预防。例如:在油气运输的过程中,如果传输管线出现了泄漏问题,则可以通过泄漏报警电子定位设备,及时查看相应的报警位置,帮助管理人员及时、精准地进行管道修复和安全控制。因此,通过数字化系统的应用有效提升了能源企业安全环保管理工作的实施效率。

2 能源企业数字化建设核心技术体系

2.1 数字化基础架构技术

数字化架构技术作为能源企业数字化发展的“地基”,负责构建贯穿整个生产过程的感知、传输、存储和管理网络,并为上层的应用提供了稳定、高效和安全的资料和算力支持,这是确保数字化体系能够顺利工作的必备条件。工业互联网平台肩负着设备互联、数据汇聚、应用开发及协同管控等功能,需要根据工业级标准来建立能够实现厂区内生产装置、公用工程、仓储物流、环保设施和其他各种设备互联互通的技术,通过建设统一工业互联网平台,突破传统各部门和各设备之间信息孤岛,实现生产数据、设备数据和管理数据集中汇聚和统一调度。数据采集和传输技术是实现数据“源头活水”至关重要的手段,企业需要建立一个覆盖整个生产流程的物联网和传感器网络,并根据炼油工艺的高温、高压和高腐蚀等特点选择工业级耐高温、耐腐蚀和抗干扰性强的传感器来实现原油加工、催化裂化和加氢精制等核心工艺参数、设备运行状态、安全环保指标的实时准确采集。从传输层面上看,利用5G和工业以太网多种通信技术集成,构建了有线和无线相结合的冗余传输网络以保证复杂工业环境下数据的平稳实时传输,从而为后续数据的处理和利用提供了优质的基础数据。通过分布式存储架构结合关系型数据库和非关系型数据库等优势实现了不同种类数据分类存储和高效管理,并构建了一个完整的数据治理体系来保证数据准确、完整和安全。例如:设备设施完整性管理系统、生产作业受控系统、问题及隐患管理系统和人员定位系统等各个系统在生产和安全环保管理中得到充分应用。

2.2 核心数字化应用技术

核心数字化应用技术以先进技术手段,对生产运行进行智能化优化、精准化管控和全流程追溯,直接

赋能企业提升生产效率、减少安全风险、提高环保水平,人工智能和机器学习技术主要用于数字化建设,包括生产优化、设备故障预警和质量预测,通过研究和建模海量生产数据,建立工艺参数优化模型来精确控制原油蒸馏和催化裂化等核心工艺,提高产品收率和质量稳定性,并基于设备运行数据建立故障预警模型,可以对设备可能出现的故障风险进行早期识别,达到预测性维护的目的,减少非计划停机损失,并运用机器学习技术分析产品质量数据,以实现产品质量的前期预测和偏差校正,从而提高生产管控精度。大数据分析技术对企业海量数据进行深度挖掘和价值转化,结合生产、设备、安全和环保多维度数据进行综合分析,发现数据背后存在的关联规律和潜在价值并为企业管理层提供数据驱动决策支持,帮助企业在战略决策中做出科学合理的选择。数字孪生和三维建模技术通过搭建物理工厂1:1数字孪生模型,融合生产工艺、设备台账和实时运行数据,实现了生产过程全景可视化监测,并结合实时数据和数字孪生模型能够快速定位和排查生产异常,提高生产管控效率和精准度。随着环保监管越来越严格,区块链和溯源技术表现出中心化、不可篡改和全程可追溯等特征,能够实时地把污水排放指标、废气排放数据和固废处理记录等环保数据进行上链存证,保证环保数据真实性和不可篡改性,有效地应对了环保监管检查工作,实现了整个产业链追溯和管控,增强了企业的供应链管理透明度和可靠性。

3 企业安全环保管理数字化建设技术具体应用分析

在进行企业安全环保管理数字化建设的过程中,需要充分结合厂区安全环保管理各项工作内容和系统,建立统一的数字化管理体系,进而将所有的安全环保管理工作纳入该数字化体系中,分条分线进行系统化管理,才能够充分体现出数字化建设的基本意义,促进安全环保管理工作效率和质量的提升。在统一的数字化管理体系建设过程中,应从数据采集与存储、数据计算与分析、数据管理与服务方面逐步实施,实现数字化系统的有效应用。

3.1 数字采集与存储

建立企业安全环保管理工作数字化系统,要基于主体域的管理模式,建立统一的数据管理中心,然后针对各层级各领域分别进行数据的采集、存储与应用,构建完善的数据信息模型,实现数字信息的多层次应用,全面提升数字化应用水平,实现数字赋能安全环保管理目标。而在这一目标实现的过程中,其基础工

作就是进行有效的数据采集和存储,有效的数据采集应能够结合企业安全环保管理工作的内部数据与外部数据、结构化数据与非结构化数据、历史数据与现实数据等多种类型进行全面采集和存储,实现安全环保管理工作的数字化转型。在实施的过程中可以结合全链路数据开通、加设数据网关、对异构数据源进行整合等操作建立完善的数据库^[4]。基于企业安全环保管理工作的实际情况,可以按照以下 5 个职能分别进行数据库建设,即按照安全环保管理工作的管理域、过程域、治理域、技术域、价值域分别进行数据采集与存储,使所建成的数据库在各项数据方面能够满足安全环保管理工作的各项实际要求。

3.2 数据计算与分析

完成数据采集与存储,构建相应的数据库系统之后,针对相应的数据进行计算和分析,发挥所采集和存储数据的有效作用,实现对安全环保管理工作的数字化信息指导,建设安全环保管理工作的智能化管理体系。在数据计算与分析的过程中需要充分结合所建立的数据库和云计算,实现对数据的高速运算和处理能力。然后结合安全环保管理工作各个层次的数据计算结果和管理工作要求,实现可视化的数据分析。在进行数据化分析的过程中,需要基于元数据构建相应的安全环保管理指标体系,针对各项安全环保管理数据进行系统控制。同时,在进行数据处理时要基于数据质量、数据地图、数仓设计等基本应用场景进行数据信息优化和筛选^[5]。并通过代码构建实现数据信息的实时化、云端化、自动化、智能化增强处理,强化数据产品建设,实现数据处理效率和质量的提升。在具体实施的过程中可以充分借鉴成熟的新型数仓工具发挥数据分析和处理作用,如可以采用 Hive 和 MPPDB 等大数据领域所应用到的数仓工具,替代传统数据库中的 Oracle、Mysql,进行关系型数据库的处理,增大数据处理规模,实现数据高效计算目标。

3.3 数据管理与服务

能源企业安全环保管理工作的数字化建设,最终目标体现在数据的管理和服务方面。如何有效发挥数字化信息的作用对企业安全环保管理工作提供相应的管理指导和服务,是数字化建设的基本目标。在进行数据管理和服务的过程中需要基于对现有数据计算与分析的基本结果,实现对数据的应用。这就需要建立数据开发应用团队,通过开发应用团队不仅要对现有的数据进行有效的管理,更要基于现有的数据为安全环保管理各项工作提供数据服务,由数据管理中心向

数据服务中心转变,全面实现数据信息在管理工作中的应用价值,体现出数字化的核心内涵。通过开发应用团队对大量的业务数据进行汇集,实现所采集和处理后数据的业务化发展,即业务数据化^[6]。而在对数据进行应用的过程中则基于安全环保管理工作的需求情况,进行业务数据的不断调整和优化,在全域数据仓库模式下进行数据图谱萃取,进而实现数据业务化,实现安全环保管理工作效率的提升,体现出数据的服务性功能。

4 结束语

结合信息化技术的应用,在进行能源企业安全环保管理的过程中开展数字化建设,实现企业安全环保管理工作的万物互联、远程控制以及智能化监控,对于全面降低厂区风险事件发生率,实现绿色发展目标具有非常重要的现实意义。本文通过总结认为在能源企业安全环保管理工作中实现数字化建设,能够实现对安全环保管理环境的远程控制,有效提升安全环保管理工作效率。在具体实施的过程中,一是要打通全链路数据,加设数据网关,对异构数据源进行整合,通过数据采集和存储构建完善的数据库。二是要搭建数据研发与应用桥梁,基于数据代码构建对元数据进行处理和增强分析,应用新型数仓工具实现对数据的计算与分析。三是建立数据开发平台,针对数据组织结构进行优化,实现业务数据化向数据业务化的转变,以数据赋能业务发展,在进行数据高效管理与服务的过程中实现安全环保管理工作水平的提升。

参考文献:

- [1] 谢兴华,魏可.境外油田安全管理数字化建设研究[J].项目管理技术,2023,21(05):132-136.
- [2] 张保艳,贺金龙,王萌萌,等.数字化油田建设效果与应用前景分析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(06):63-65.
- [3] 杨璐.计算机在油田数字化建设中的应用探究[J].中国设备工程,2023(01):205-207.
- [4] 毕博,王杨,吴泓润.油田数字化建设中集油配注系统分布式自控系统的设计[J].中国管理信息化,2022,25(09):104-106.
- [5] 任健.数据采集监控技术在油田数字化建设中的应用[J].化工管理,2021(15):161-162.
- [6] 景晓琴,范劲松.浅谈低渗油田安全环保管理中的数字化建设[J].中国管理信息化,2018,21(24):82-83.

分布式光伏项目全生命周期建设管理研究

叶华林

(中国华电集团有限公司福建分公司, 福建 福州 350001)

摘要 为解决分布式光伏项目建设阶段衔接不紧、施工控制粗放、并网移交断点和运维反馈不足等问题, 本文立足于全生命周期管理视角, 结合项目前期决策、方案设计、采购施工、并网验收和运行评价等环节展开分析。研究认为, 项目管理需围绕屋面条件识别、收益测算校核、设备材料准入、关键工序控制、技术资料闭合和运行数据反馈形成连续链条, 并将质量、安全、进度和效益控制嵌入各阶段管理过程。结果表明, 该管理路径能够减少前后环节脱节, 强化建设过程可控性, 增强项目投运后的运行稳定性和收益保障能力。

关键词 分布式光伏; 全生命周期; 建设管理; 并网验收; 运维评价

中图分类号: TM615; TU712.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.022

0 引言

随着“双碳”行动方案的实施, 我国分布式光伏行业发展十分迅速。官方最新数据显示, 2025年我国分布式光伏行业新增装机容量为153 GW, 同比增长21%, 占光伏整体新增容量的48%^[1]。与集中式电站相比, 分布式光伏更多依附既有屋面和用电场景, 屋面荷载、遮挡条件、接入容量、施工扰动和运维响应都会影响项目质量。部分项目前期测算粗略、施工管控松散、资料闭合不足, 容易造成发电收益偏离预期, 全生命周期管理已成为保障项目稳定运行的重要支撑。

1 分布式光伏项目前期决策与方案设计管理

1.1 项目建设条件识别

分布式光伏项目前期建设条件识别, 核心在于把屋面资源、建筑安全、用电消纳和电网接入放入同一判断链条, 避免仅凭屋顶面积和装机意愿决策, 现场评估需核查屋面类型、防水状态、可利用面积、遮挡情况和新增荷载, 并同步关注检修通道、消防间距与排水组织。工商业场景还需核对日负荷曲线、自用电比例、配电容量和接入点位置; 涉及租赁屋顶或多产权建筑时, 应提前明确使用权、合同期限、收益分配和维修责任, 防止条件遗漏向设计、施工及投运阶段传导。

1.2 投资收益与发电能力测算

投资收益与发电能力测算需要以真实场景数据为基础, 将装机容量、年辐照水平、系统效率、企业负荷曲线、电价结构和运维成本纳入同一核算口径, 避

免以理论满发小时简单推算收益。在测算过程中, 装机容量结合可利用屋面面积、组件排布间距和遮挡损耗确定, 年发电量则需考虑组件衰减、逆变器效率、线路损耗和清洗维护条件; 工商业项目还需区分发自用电量与余电上网电量, 自用比例越高, 项目收益通常越稳定, 年发电收益可按式(1)估算:

$$R = E_s \times P_s + E_g \times P_g - C_o \quad (1)$$

式(1)中, R 表示年发电收益, E_s 表示发自用电量, P_s 表示企业用电单价, E_g 表示余电上网电量, P_g 表示上网电价, C_o 表示年运维成本。收益测算完成后, 还需结合组件采购、逆变器配置、支架安装、并网接入和后期检修费用核算静态投资回收期, 并对电价波动、消纳比例变化、设备衰减等因素开展敏感性校核。

1.3 设计方案优化与接入条件预控

设计方案优化需要在建设条件识别和收益测算基础上展开, 重点校核组件排布、逆变器配置、支架形式、电缆路径和接入点位置之间的匹配关系, 避免单纯追求装机容量而压缩检修通道、增加遮挡损耗或放大屋面荷载风险^[2]。方案比选时, 组件倾角、阵列间距、逆变器容量配比和直流侧线路长度需结合屋面形态、企业配电系统和后期运维需求综合确定, 防雷接地、消防通道、排水组织及屋面防水节点也需提前纳入图纸审查。接入条件预控则应围绕配电容量、计量方式、保护配置和并网接入点开展技术校核, 提前对接电网接入要求和业主用电边界, 使设计成果能够支撑后续采购、施工与调试工作衔接。

作者简介: 叶华林(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源开发建设管理。

2 分布式光伏项目采购与施工建设管理

2.1 设备材料采购与质量准入

设备材料采购是分布式光伏项目建设质量前移控制的重要环节，需围绕组件、逆变器、支架、电缆和配电箱等关键材料建立准入清单，将产品认证、检测报告、质保条件、技术参数和现场适配性纳入审核。光伏组件重点核查功率等级、衰减指标和质保文件，逆变器需结合装机容量、并网方式和安装环境校核容量配置、防护等级与转换效率，室外安装设备防护等级通常不低于 IP65。设备到场后，施工单位联合监理复核型号、规格、外观和随货资料，对组件隐裂、支架镀锌层破损、电缆护套损伤等问题及时登记处理，形成采购、验收、入库、领用和安装位置之间的追溯链条。

2.2 现场施工组织与进度协调

现场施工组织需结合既有建筑条件和项目建设节奏展开，将作业面划分、材料转运、班组进场和停送电配合纳入统一调度，避免施工安排脱离业主生产秩序和屋面承载条件^[3]。工商业屋顶项目常见通道狭窄、设备密集和生产区不停运等情况，施工前需完成作业边界、吊装路线、临边防护和材料堆放区域确认，组件、支架上屋面后按区域分散堆放。进度协调可围绕支架安装、组件铺设、电缆敷设、设备接线和系统调试设置节点计划，并结合天气变化、停电窗口和电网验收要求动态调整施工节奏。

2.3 关键工序质量控制与施工风险防范

关键工序质量控制需承接设备准入和现场组织成果，将支架安装、组件铺设、电缆敷设、防雷接地和屋面防水纳入连续检查链条，防止施工风险在隐蔽部位累积。现场复核重点放在支架固定强度、组件排布间距、电缆编号与绝缘保护、防雷接地连续性及屋面防水保护等内容，接地电阻通常按设计或规范允许范围控制。施工单位自检、监理复检和隐蔽验收需贯穿关键节点，对组件破损、支架松动、电缆损伤和接地连接异常等问题建立整改清单，并结合“发现—记录—整改—复核—销项”流程形成闭环，关键工序质量与风险防控框架（如图 1 所示）。

3 分布式光伏项目并网验收与运行移交管理

3.1 系统调试与并网检测

关键工序完成并经现场复核后，项目进入系统调试与并网检测阶段，管理重点由施工过程控制转向电气性能校验和并网条件确认。调试前需核对组件串接关系、汇流线路、逆变器参数、计量装置和保护配置，防止接线错误、极性反接、通信异常等问题进入并网环节；绝缘电阻、接地电阻和保护装置动作情况宜作为检测重点，其中接地电阻通常按设计要求和现场接地系统条件复核，检测记录需与设备编号、回路位置对应^[4]。逆变器试运行，应观察电压、电流、功率因数、告警信息和发电曲线变化，对异常波动及时停

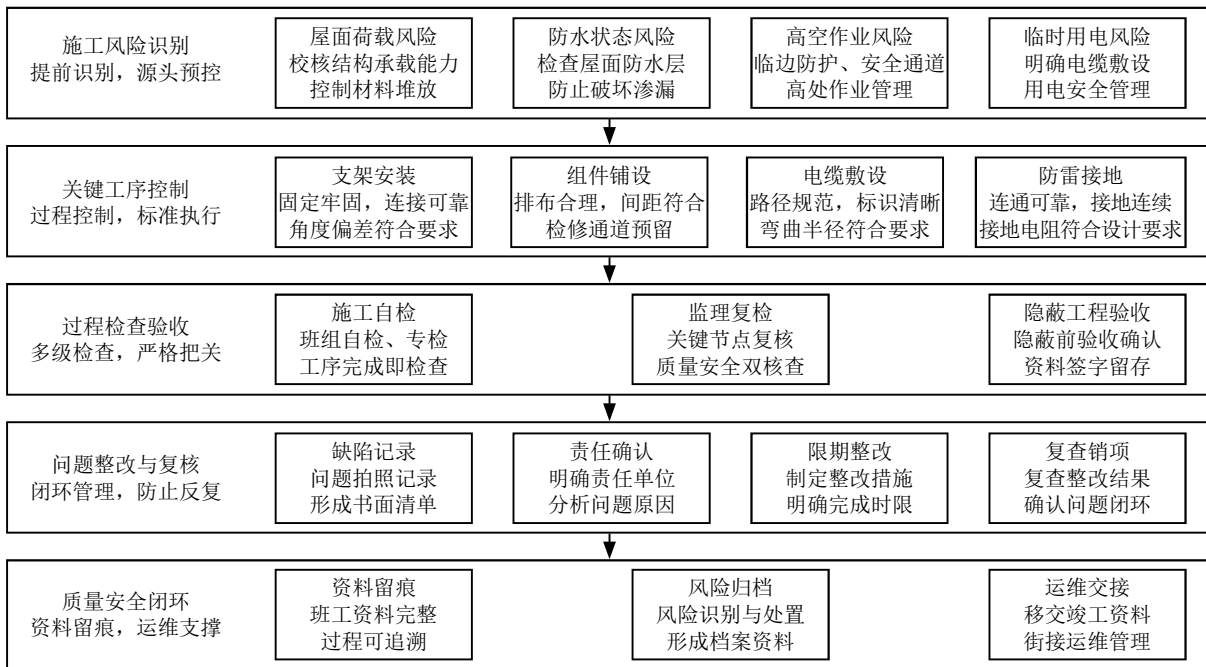


图 1 分布式光伏项目关键工序质量与风险防控流程

机排查，并将整改结果纳入复测记录，确保并网检测结果能够支撑后续竣工验收和运行移交。

3.2 竣工验收组织与技术资料闭合

系统调试与并网检测完成后，竣工验收需同步核查工程实体、检测结果、整改记录和资料链条，避免项目进入运行阶段后出现依据缺失^[5]。验收组织可围绕组件阵列、逆变器、配电柜、防雷接地、计量装置和通信系统展开复核，绝缘电阻、接地电阻、保护动作记录等检测资料需与现场回路编号保持一致，隐蔽工程验收记录、设计变更单、设备合格证、质保文件和竣工图也应同步归集。对验收中发现的接线标识不清、资料缺页、设备编号不一致、整改影像缺失等问题，宜建立问题清单并限定复核节点，待实体质量和技术资料形成闭合后，再进入运行移交环节。

3.3 运行移交与责任界面确认

竣工验收和技术资料闭合后，运行移交需把设备状态、资料成果和责任边界同步转入运维体系，避免建设阶段遗留问题在投运后形成管理断点。移交内容包括主要设备、备品备件、质保文件、竣工图、调试记录、检测报告、隐蔽验收资料和整改闭合清单；涉及屋面维修、防水保护、设备质保、故障响应和停送电配合等事项，需在建设单位、施工单位、业主单位和运维单位之间明确责任界面。运行前交底围绕设备启停、告警识别、日常巡检、安全隔离和应急处置展开，为后续运行监测、故障处理和效益评价提供连续依据。

4 分布式光伏项目运维管理与效益评价优化

4.1 运行监测与日常维护

运行移交完成后，运维管理需依托监测平台和现场巡检共同掌握系统状态，重点关注发电量、逆变器运行参数、组件温度、功率因数和告警信息，避免运行异常长期隐藏在发电波动之中^[6]。日常维护需结合历史发电曲线、天气条件和负荷变化判断系统效率，单日发电量较同等辐照条件下预测值偏差超过10%时，通常需核查组件积灰、局部遮挡、逆变器限发、通信中断和线路接触不良等因素。现场巡检围绕组件破损、热斑痕迹、电缆接头、汇流设备和屋面排水情况展开，清洗维护结合积灰程度、降雨频次和安全作业条件安排，形成远程监测与现场核验的连续衔接。

4.2 故障响应与运行安全管控

故障响应需承接运行监测结果，将告警识别、等级判断、现场处置和复核销项纳入统一流程，避免故障停留在平台提示层面。运维人员接到逆变器停机、组串电流异常、通信中断、接地告警或发电量突降等

信息后，先结合监测数据判断影响范围，再安排现场排查，常规故障响应时间可控制在24小时内，涉及电气安全、屋面渗漏或大面积停发的故障则需形成专项处置单。在现场处理过程中，同步落实停电确认、作业隔离和安全防护，重点核查组件热斑、电缆老化、接头松动、保护装置动作和接地连接状态；故障消除后，需对发电曲线、告警记录和维修影像进行复核归档，形成原因分析、整改措施和后续观察要求。

4.3 发电效益评价与管理优化

发电效益评价需承接运行监测和故障处置结果，将实际发电量、系统效率、故障停机时长、自发自用比例、余电上网电量和运维成本纳入同一评价口径，避免仅以累计发电量判断项目运行状态。月度或季度评价中，实际发电量持续低于预测值时，需结合组件衰减、遮挡变化、逆变器效率、清洗周期和线路损耗查找偏差来源；收益偏离测算结果时，还需复核电价结构、企业负荷变化和余电消纳比例，判断偏差来自运行管理还是前期测算口径，评价结果可反向修正清洗计划、巡检频次、备件配置和后续同类项目测算依据。

5 结束语

分布式光伏项目的建设成效，取决于前期判断、过程控制、交付衔接和运行反馈能否形成连续管理链条。面对屋面条件复杂、参与主体多元、并网要求严格和收益周期较长等特点，项目管理需要从单点控制转向全过程协同，把建设条件核查、方案适配、材料准入、工序管控、验收移交和运维评价纳入同一责任体系。以技术参数校核支撑管理判断，以运行数据反馈修正建设经验，能够增强项目质量稳定性、运行安全性和收益可预期性，也为分布式光伏在工商业场景中的规范开发与长期利用提供更稳固的管理基础。

参考文献:

- [1] 章哲玮.分布式光伏发电建设项目全过程风险管理分析[J]. 中华建设, 2024(07):71-73.
- [2] 陈斌.分布式光伏发电项目建设全过程管理优化研究[J]. 电气应用, 2025,44(12):80-85.
- [3] 王慧萍.分布式光伏发电项目的建设期投资成本控制与评价研究[J]. 太阳能, 2025(11):5-15.
- [4] 邓文忠.分布式光伏发电项目建设中的安全管理问题的思考与探讨[J]. 中国住宅设施, 2025(09):102-104.
- [5] 杨蕾.分布式光伏发电建设项目全过程管理策略[J]. 中国科技纵横, 2025(09):105-107.
- [6] 李珂, 刘芳, 张庆.小程序技术在分布式光伏项目全生命周期中的应用[J]. 四川建筑, 2025,45(S1):127-129.

分布式光伏发展对电力营销的影响及应对措施

郑泽文，陶前程

(国网浙江省电力有限公司杭州供电公司，浙江 杭州 310016)

摘 要 在“双碳”目标全面推进与能源结构转型背景下，分布式光伏凭借布局灵活、就近消纳、清洁低碳等优势实现规模化普及，彻底改变传统电网单向供电格局。本文分析了当前分布式光伏快速发展对传统电力营销在客户结构、电价机制、供电业务、市场收益及电网运维服务等方面带来的双向影响，梳理电力企业营销工作现存痛点与发展阻碍，从营销模式革新、电价体系优化、客户服务升级、市场业务拓展、电网协同管控等维度提出针对性应对策略，以期对助力供电企业顺应新能源发展趋势有所裨益，进而推动电力行业绿色低碳高质量发展。

关键词 分布式光伏；电力营销；能源转型；市场应对

中图分类号: TM615; F426.61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.023

0 引言

随着我国清洁能源产业政策持续落地、光伏组件造价持续下行，居民屋顶光伏、工商业房屋顶光伏、园区分布式光伏等项目建设规模逐年扩大，分布式光伏已成为基层电力市场最主要的分布式新能源发电形式。在此行业变革形势下，深入探究分布式光伏对电力营销产生的实际影响，精准研判市场发展趋势，制定科学合理的营销调整方案，既是供电企业转型升级的必然要求，也是完善区域电力市场体系、保障电力供需平衡、落实绿色能源发展战略的重要举措。

1 分布式光伏行业发展现状概述

1.1 分布式光伏基本概念

分布式光伏是指依托建筑屋顶、闲置空地等就近场地建设，以就地发电、就近消纳为核心运行模式的小型光伏发电系统，区别于集中式大型地面光伏电站，具有建设周期短、投资门槛低、适配场景广、适配城乡各类用电主体等特点，主要分为户用分布式光伏与工商业分布式光伏两大类型，是分布式发电中可再生能源发电的核心形式。

1.2 国内分布式光伏发展整体态势

现阶段国内分布式光伏市场呈现全民参与、全域覆盖的发展态势，国家层面出台光伏补贴、并网简化、税收减免等扶持政策，极大降低市场投资门槛。城镇居民、小微企业、工业园区纷纷布局光伏电站，自发自用降低用电成本成为主流需求。同时，光伏并网技术不断成熟，智能计量装置、双向电表全面普及，配合电厂

侧集中式电力稳定支撑，为分布式光伏电力并网交易提供技术支撑，也让电力市场交易形式更加多元化^[1]。

1.3 分布式光伏主要运营模式

当前主流运营模式包含三种：其一为自发自用，余电上网，用户优先使用自身光伏发电量，剩余电量并入公共电网售卖获利；其二为全额上网，光伏系统全部发电量输送至电网，用户统一向电网购电；其三为自发自用，零余电上网，实现用户内部电力自给自足，脱离电网购电需求。不同运营模式直接改变用户用电行为，与电厂出力特性相互影响，间接影响电力营销业务开展，且需配套双向多点计量系统实现精准核算。

2 分布式光伏发展对电力营销带来的双重影响

2.1 积极正向影响

2.1.1 拓宽电力营销新型业务赛道

分布式光伏项目从前期勘测、并网申请、线路改造，到后期运维检修、电量核算、故障排查，衍生出大量配套电力服务业务。供电企业可依托自身电网资源、技术优势与线下服务网点，拓展光伏并网代办、电站运维、电力能效管理、储能配套对接等增值营销业务，同时可承接电厂辅助服务、电力电量交易代理等营销延伸业务，打破单一售电盈利模式，丰富电力营销业务品类，培育全新利润增长点。同时可新增电能质量调节与补偿服务，应对分布式光伏接入带来的电压波动、谐波等问题，拓展服务边界^[2]。

2.1.2 优化电力市场客户资源结构

分布式光伏普及促使电力用户分化为普通用电客

作者简介: 郑泽文 (1993-)，男，硕士研究生，工程师，研究方向：新能源管理。

户、光伏产销客户、新能源合作客户等不同群体，倒逼供电企业细化客户分层管理，精准划分客户用电需求、消费能力与合作意向。同时，新能源市场发展吸引大量新型市场主体入驻电力行业，包括各类发电企业、售电公司、能源服务商，进一步扩充电力市场客户体量，为电力营销长效发展积累优质客源，推动营销从传统容量费率、用电性质分类向用户参与度、分布式发电类型、电厂合作模式等多维度精细化分类转型。

2.1.3 助力电力营销践行绿色发展理念

依托分布式光伏清洁能源属性，联动电厂绿色电力资源，供电企业可打造绿色用电、低碳供电营销品牌，推出绿电认购、低碳用电套餐等新型营销产品，契合当下市场绿色消费主流趋势，提升企业社会形象与市场口碑，推动电力营销从传统能源营销向绿色低碳能源营销转型。

2.2 消极负面影响

2.2.1 传统售电业务营收大幅缩减

大量工商业企业、居民用户安装分布式光伏后，自主发电量可满足日常生活用电需求，直接减少向电网购电的用电量。同时，电厂市场化交易让利、中长期合同价格下行，电网企业核心盈利业务为工商业用电、居民生活用电售电收益，用户购电量持续下滑，直接造成电力营销基础营收下降。

2.2.2 原有电价营销机制适配性不足

传统电力电价分为居民阶梯电价、工商业分时电价、一般工商业电价等固定定价模式，未结合分布式光伏余电上网、双向用电特性制定差异化电价政策。光伏用户自发自用与余电上网电量核算标准不统一，上网电价波动较大，极易引发用户用电纠纷，原有电价营销体系难以适配新能源电力交易需求^[3]。

2.2.3 电网运维与营销服务压力激增

分布式光伏多点分散并网，易造成区域电网电压波动增加5%~15%、谐波含量增加2%~8%、功率因数下降0.02~0.05，同时潮流反向流动频次增多，增加电网检修、线路维护、电能质量治理成本。同时，光伏用户并网咨询、电量对账、故障报修、政策咨询等业务量暴涨，原有线下营销服务流程繁杂、响应效率偏低，难以满足光伏用户多元化服务需求，营销服务短板逐步凸显。

2.2.4 电力市场竞争格局日趋激烈

分布式光伏市场开放后，社会资本、新能源企业、光伏运维公司纷纷入局电力市场，涉足电力售电、能效管理、光伏配套服务等领域，分流大量优质工商业电力客户。供电企业长期处于垄断经营状态，市场化

营销经验不足，面对多元化市场竞争，传统营销手段竞争力薄弱，市场份额面临被挤压风险。

3 分布式光伏背景下电力营销现存突出问题

3.1 营销经营理念滞后固化

多数基层供电企业依旧沿用传统“重供电、轻服务，重售电、轻创新”的老旧营销理念，未充分认知新能源变革与电厂市场化带来的市场变化，缺乏主动布局光伏配套营销业务的意识，依旧依赖固定电量收益，未结合分布式光伏发展趋势调整营销战略规划。

3.2 数字化电力营销建设进度缓慢

目前，电力营销线上业务仅覆盖基础缴费、账单查询等基础功能，缺少光伏电量线上核算、并网流程线上办理、余电交易线上对接、用电能效智能分析等数字化服务模块，智慧营销体系建设不完善，无法实现光伏用户全流程线上营销服务。

3.3 专业复合型营销人才储备不足

电力营销工作人员大多精通传统供电业务，缺乏分布式光伏原理、并网政策、新能源市场运营、电能质量治理等专业知识，以及市场化客户谈判、负荷聚合、需求响应操作能力，难以精准对接光伏用户各类需求，无法高效开展新能源相关电力营销业务。

3.4 光伏配套电力营销监管体系不完善

针对分布式光伏并网后的电量计量、电费结算、违规并网管控、私自改造光伏线路等行为，缺乏完善的营销监管机制，部分用户存在电量偷漏核算、违规并网用电等问题，既扰乱电力市场秩序，也增加电力营销管理风险。

4 适配分布式光伏发展的电力营销应对优化措施

4.1 转变营销发展理念

供电企业主动摒弃传统垄断营销思维，立足于能源转型大局，将分布式光伏融合发展与电厂协同运营纳入电力营销整体规划。深度研判当下能源市场变革趋势，精准把握行业发展全新机遇。明确“稳住基础售电业务、拓展新能源增值业务、深耕绿色电力市场、强化电厂协同营销”四大营销发展方向，主动顺应产销一体化用电趋势，从单一电力供应商转型为综合能源服务服务商，以源网荷储协调优化为核心导向重构营销体系，全力推动企业电力营销工作朝着绿色化、多元化方向稳步前行^[4]。

4.2 优化电价营销体系

结合区域分布式光伏的发展实际，联动电厂上网电价与市场化交易价格，进一步完善双向电价核算制

度,细化居民、工商业光伏用户的自发自用电价、余电上网电价标准,统一电量计量与电费结算规则,避免出现用电纠纷,切实保障各类光伏用户的合法权益,营造公平规范的电力营商环境。将传统峰平谷三段式电价向精细多时段电价过渡,匹配光伏出力与负荷波动特征,尤其适配中午发电高峰、傍晚负荷陡增的系统状态;设计多场景电价,结合天气、季节与突发事件动态调整,依托智能计量与大数据分析提升电价引导效果,平衡区域电网电力供需,助力区域光伏产业与电力市场协同良性发展。

4.3 拓展多元化增值营销业务

光伏全流程代办业务,为意向用户提供光伏项目备案、电网并网审批、现场勘测、双向电表安装等一站式代办营销服务;电站运维托管业务,推出分布式光伏日常巡检、组件清洗、故障维修、发电量监测等托管服务,同步提供电能质量调节与补偿服务;综合能源配套业务,联动储能设备、充电桩、节能改造项目,推出“光伏+储能+用电节能”一体化营销套餐,平抑分布式发电波动;电厂协同营销业务,代理电厂电力销售、开展绿电打包交易、提供电厂辅助服务对接,同步开展电厂直购电代理、光伏+火电保供组合套餐业务;绿电定制营销业务,面向大型企业、商超园区推出定制化绿色电力供应服务,提升高端电力市场占有率。

4.4 升级智慧数字化营销服务体系

搭建一体化电力智慧营销平台,整合光伏并网申请、电量实时查询、余电交易结算、线上报修、政策推送等功能,实现光伏用户业务全流程线上办理,大幅缩减业务办理时长,提升用户办事便捷度。依托大数据、人工智能技术构建精准负荷预测模型,融合天气、季节、用户行为与分布式发电出力数据,降低预测偏差;整合智能电表、分布式能源监控、电能质量监测等多源数据,实现清洗、归一化与关联分析,形成用户用能全景视图,精准推送用电方案与营销服务,全面推动电力营销服务朝着智能化、高效化方向全面升级^[5]。

4.5 强化人才队伍建设

定期组织营销人员开展分布式光伏原理、并网政策、新能源市场规则、客户营销技巧、负荷聚合、需求响应等专项培训,打造兼具传统电力业务能力与新能源专业素养的复合型营销团队。同时,吸纳新能源行业专业人才,优化营销团队人员结构,全面提升市场开拓与客户服务能力。

4.6 健全市场监管机制

联合电力监管部门完善分布式光伏并网准入标准与《分布式电源并网技术要求》配套细则,强化光伏

电站并网前资质审核、并网后日常巡查力度。依托双向多点智能计量设备,将采集频率提升至15分钟甚至5分钟一级,实时监控光伏用户发电量、用电量、上网电量,严厉查处违规并网、私自改装线路、恶意规避电费等违规行为,维护公平稳定的电力营销市场环境。

4.7 深化政企协同合作

积极对接地方政府清洁能源发展规划,参与区域分布式光伏集中连片建设项目,承接园区、乡村集体光伏项目配套电力服务。加强与各类电厂合作,构建厂网一体营销体系,依托政府政策扶持优势,优先获取本地光伏项目配套营销服务资源;配合推进配电网自动化与智能化改造,构建配电网状态实时监测与分布式能源协调控制机制,实现营销与配网运行数据共享,稳固本地电力市场主导地位,与发电集团建立长期绿电购销与营销联合推广机制,实现政企携手推动光伏产业与电力营销协同发展。

5 结束语

分布式光伏行业发展势头十分迅猛,是国内能源结构低碳化调整进程中的核心发展方向。这类新型分布式发电模式,正在逐步打破传统电力系统单向输送的运行格局,推动电网运行向源网荷储互动的双向协同形态深度转变。当前国家能源局已明确要求分布式光伏全面实现“可观、可测、可调、可控”的“四可”涉网性能,为双向化运行提供了政策与技术支撑。未来,供电企业应当立足自身电网资源优势深耕综合能源服务市场,将常规售电业务与分布式光伏运营、虚拟电厂聚合、绿电交易等新能源业务深度融合,持续升级数字化供电服务能力,稳固市场竞争优势,最终助力国内电力产业稳步迈向清洁低碳、智能高效的新型电力系统发展目标。

参考文献:

- [1] 付涛. 低压分布式光伏对营销线损管理影响探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛: 实践路径探索与案例分享专题论文集(第一册). 国网河北省电力有限公司深圳市供电公司, 2026.
- [2] 廖涛, 赵志磊, 王海军, 等. 分布式光伏用户相关问题分析及建议[J]. 大众用电, 2024, 39(10): 15-16.
- [3] 廖涛, 张建飞, 郑建华, 等. 分布式光伏用户降低力调电费的原理及措施[J]. 大众用电, 2023, 38(09): 16-17.
- [4] 雍文, 王江辉, 张帆, 等. 基于电力营销系统的分布式光伏支付结算服务的应用[J]. 电工电气, 2023(09): 61-68.
- [5] 朱如雷. 分布式光伏并网发电系统接入配电网电能质量分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(02): 310-311.

激光增材制造轻合金构件缺陷的 超声相控阵定量评价

田康康, 赵 煜, 张家祥

(河南机电职业学院, 河南 新郑 451191)

摘 要 在激光增材制造轻合金构件中, 气孔、未熔合及裂纹等缺陷严重制约其力学性能与服役可靠性。超声相控阵凭借电子扫查、多角度成像及全聚焦技术优势, 已成为增材制造质量评价的重要手段。本文围绕缺陷典型特征, 分析超声相控阵检测的适配策略, 深入探讨缺陷定位、尺寸定量及类型识别的关键技术环节, 梳理工程应用瓶颈, 并对高频检测、多模态融合及智能化定量趋势进行展望, 以期相关人员提供参考。

关键词 激光增材制造; 轻合金; 超声相控阵; 缺陷定量; 无损评价

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.024

0 引言

激光选区熔化 (SLM) 这类增材制造技术是通过逐层熔化粉末来实现轻合金复杂构件近净成形的, 在航空航天支架、汽车轻量化结构以及精密模具等领域有着广泛的应用。AlSi10Mg、Ti-6Al-4V 等轻合金由于具备高比强度和良好耐蚀性而成为首选材料, 不过工艺本身固有的快速熔化与凝固特征使得气孔、未熔合以及裂纹等缺陷难以避免, 这严重削弱了构件的静载强度与疲劳寿命, 甚至会成为灾难性失效的诱因^[1]。

超声相控阵是通过多阵元探头的电子延时控制来实现声束偏转与动态聚焦的, 配合扇形扫查 (S-scan)、全聚焦成像 (TFM) 等模式, 能够直观呈现缺陷的空间位置与形态, 显著提升检测效率。增材制造轻合金的粗晶组织、声学各向异性以及高表面粗糙度, 让常规方法在检出灵敏度与定量精度方面面临新的挑战^[2]。如何建立可靠的超声相控阵定量评价体系, 把“检得出”提升为“定得准”, 是当前制造检测领域的核心议题。

1 激光增材制造轻合金的典型缺陷特征

1.1 气孔、未熔合与裂纹的形成机理

气孔的产生主要是源于熔池动力学不稳定和气体析出情况, 激光和粉末相互作用会形成匙孔, 当能量密度过高或者扫描速度过快时匙孔会坍塌, 蒸汽泡滞留凝固前沿而形成气孔, 此外粉末吸附水分或者保护气氛杂质在熔池中析出, 凝固之后会形成弥散球形气孔, 这类缺陷的内壁较为光滑, 对静载的影响有限, 却是疲劳裂纹稳定萌生源^[3]。

未熔合是能量输入不足所导致的层间冶金结合不良状况, 当激光功率偏低、扫描间距过大或者层厚设置不当时, 当前熔池无法充分重熔下层表面, 进而形成扁平状或长条状的层间缺陷, 其本质为面状不连续且充当宏观裂纹角色, 应力集中系数高对构件力学性能危害最为严重。

裂纹归因于极端热梯度和残余应力的耦合作用, 轻合金热导率高、激光反射率大使得熔池附近温度梯度陡峭, 热收缩受约束后形成高残余拉应力, AlSi10Mg 凝固末期晶界处形成的低熔点 Al-Si 共晶液膜在拉应力下极易产生沿晶热裂纹, Ti-6Al-4V 则因工艺窗口狭窄冷却过快时易形成凝固裂纹, 裂纹尖端尖锐、走向不规则直接威胁结构完整性。

1.2 缺陷分布规律与超声响应关联

增材制造缺陷分布呈现和工艺坐标强相关的空间规律, 气孔一般沿建造方向存在下密上疏的密度梯度, 未熔合严格依附层间界面且延展方向多与建造方向垂直, 裂纹常萌生于悬垂支撑界面或薄壁转角等应力集中区并可沿晶界贯穿多层 (见表 1)。

上述规律直接决定超声响应特征, 气孔近似各向同性散射体在扇形扫查图像中表现为幅值均匀的点状特征, 未熔合具有显著镜面反射特性, 仅当声束接近垂直于其平面法向时回波最强, 偏离后信号急剧衰减, 这种角度选择性是识别未熔合的关键依据。裂纹尖端曲率极小, 除镜面反射外还产生明显衍射波, 在全聚焦图像中常表现为双曲线弧或尖端亮斑^[4]。

作者简介: 田康康 (1988-), 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 智能制造。

此外，增材制造轻合金的柱状晶外延生长组织导致声波传播速度各向存在差异，引起缺陷定位的系统偏移，晶界散射使本底噪声显著高于锻件，压缩了微缺陷

识别空间，原始成形表面粗糙度通常在 $Ra\ 8\ \mu m \sim 20\ \mu m$ 范围，远高于机加工表面不规则轮廓，造成耦合剂层波动与界面杂波，严重干扰近表面缺陷识别。

表 1 激光增材制造轻合金典型缺陷及其超声响应特征

缺陷类型	主要形成机理	典型形态特征	常见分布规律	超声响应特点	检出难点
气孔	匙孔坍塌、保护气氛残留、粉末吸氢析气	球形或类球形，内壁光滑	随机分布，建造方向存在密度梯度	近似全向性散射，回波幅值稳定，角度依赖性弱	微气孔信噪比低，密集气孔回波重叠
未熔合	能量密度不足、层厚过大、扫描间距不当	扁平状、长条状或不规则面状	多沿层间分布，延展方向垂直于建造方向	强镜面反射，角度选择性显著，仅在特定入射角回波最强	取向不利时声束几乎无反射，层间位置易与表面盲区重叠
裂纹	热应力集中、低熔点共晶液膜、凝固收缩	不规则走向，尖端尖锐	沿晶界或应力集中区萌生，可贯穿多层	尖端衍射波明显，图像边缘锐利	闭合裂纹或氧化填充裂纹反射系数低，粗晶噪声干扰大

2 超声相控阵检测原理与增材构件适配性

2.1 相控阵声场调控机制

超声相控阵依靠控制多阵元探头激发延时达成声束偏转与聚焦，不依靠机械移动就能在扇形区域内完成多角度投射。S-scan 在一次脉冲当中采集多角度回波，能够快速构建出截面视图，适合用来发现取向未知的缺陷，TFM 采用全矩阵采集以及逐像素相干叠加的方式，实现全区域动态聚焦，克服了常规相控阵在聚焦区外分辨率下降的问题，对于随机分布且尺寸大小不一的缺陷群具备更高成像精度^[5]。不过 TFM 分辨力是由阵元间距、波长以及声速共同决定的，轻合金波长比较长，若要分辨微小缺陷就需要优化阵元排布，在工程应用中需要在分辨力与效率之间取得平衡。

2.2 针对增材制造构件的检测适配策略

频率选择是首要考量。增材制造轻合金柱状晶粗大且取向一致，高频超声波晶界散射衰减严重。对 $10\ mm \sim 50\ mm$ 厚度范围的 AlSi10Mg 或钛合金构件，通常选用 $5\ MHz \sim 10\ MHz$ 探头作为折中，必要时对近表面辅以高频局部复验。

耦合方式需适应原始表面状态。水浸耦合通过稳定水层规避粗糙度影响，但需要配套扫查机构；局部研磨将检测区域粗糙度控制在可接受范围，现场适应性更强。近表面盲区抑制可采用双晶阵列（TRL）一发一收模式避开始波干扰，或借助水浸聚焦将焦点设置在表层以下 $1\ mm \sim 2\ mm$ 区域。尤为关键的是，增材构件声速各向异性显著，必须在检测前采用同工艺参考试块分别测定平行与垂直建造方向的纵波声速并输入系统，否则深度定位误差可达数毫米，定量评价失去意义。

3 缺陷定量评价的关键技术环节

3.1 缺陷定位与尺寸定量方法

定位精度在很大程度上高度依赖声速标定，增材制造轻合金柱状晶取向排列致使声波沿建造方向与垂直方向声速差异能达到百分之几，要是直接套用锻件声速参数，深度定位就会产生系统性偏差并且会随深度不断累积。在尺寸定量方面，传统 $-6\ dB$ 法假定缺陷为理想平面反射体，对于边缘参差不齐的未熔合缺陷存在显著局限性，定量结果可能偏离实际尺寸百分之三十以上。TFM 通过全域动态聚焦来改善声束均匀性，配合阈值分割或边缘提取算法能够更精确地描绘缺陷轮廓，然而当缺陷尺寸接近或小于波长时，衍射效应会使边界变得模糊，定量结果反映的是声学等效尺寸而非几何真实尺寸，需要在报告中对其予以区分。

3.2 基于成像特征的缺陷类型识别

综合 A 扫、B 扫、C 扫、S 扫以及 TFM 多视图信息之后不同缺陷图像特征逐渐显现，气孔在 C 扫上表现为孤立圆形斑点且边界清晰，S 扫中回波随角度变化平缓，未熔合呈现强角度选择性在扇形图像中表现为随角度出现或消失的线段状特征，裂纹图像边缘锐利 TFM 模式下尖端常伴有衍射双曲线亮纹。

图像后处理对于提升识别度来说至关重要，针对高背景噪声小波变换时频域去噪可在保留缺陷边缘同时抑制晶界散射噪声，背景均衡算法可补偿声束扩散与材料衰减造成的亮度不均。在智能化方向，研究者尝试从相控阵图像中提取纹理特征、灰度共生矩阵等参量，结合支持向量机或卷积神经网络实现自动分类，不过目前工程化应用仍受制于标注数据集稀缺，缺陷

真实三维形态验证需借助金相切片或显微CT,获取成本高且周期长,模型泛化能力尚待提升。

3.3 定量精度控制与标定

定量可信度高低取决于全链路精度控制情况,系统标定不能单纯依赖通用标准试块,不同设备的激光光斑、扫描策略以及热历史会致使同牌号合金声学性能存在设备依赖性。应采用与待检构件同批次粉末、同台设备、同工艺参数制作参考试块,并且加工平底孔、横通孔或者线切割槽作为人工缺陷,以此制作距离一波幅曲线(DAC)来建立灵敏度基准。

增益补偿的作用是抵消材料衰减和表面耦合差异,利用试块底面多次回波或者已知人工缺陷幅值反馈能够实现分段增益补偿,从而让相同当量缺陷在不同深度、不同表面状态下呈现可比回波幅值。在聚焦法则优化方面,对于厚度变化大的构件要采用分段聚焦策略,在浅、中、深区域分别设置最优聚焦点,以此缓解近场盲区与远场扩散的矛盾。在上述措施协同作用之下,实验室条件下毫米级缺陷长度定量误差可控制在 $\pm 1\text{ mm}$ 至 $\pm 2\text{ mm}$ 范围,深度误差大约为 $\pm 0.5\text{ mm}$,基本能够满足工程质量分级需求。

4 缺陷定量评价的现存瓶颈与发展趋势

4.1 工程应用中的主要瓶颈

微缺陷检出极限是当前面临的首要瓶颈问题,亚表面微气孔以及宽度不足五十微米的层间未熔合情况,其回波能量常常会淹没在晶界散射噪声与电子噪声基底当中,即便采用高增益也会面临信噪比不足的困境,这类缺陷在疲劳载荷作用下是早期裂纹的萌生源,航空级构件对此种情况尤为敏感,而现有检测能力还难以做到全面覆盖。

表面状态制约同样突出。原始表面粗糙度不仅导致耦合不稳,更直接产生界面杂波与表面波转换效应,使近表面区域有效检测困难。若机加工打磨改善耦合,又可能破坏尺寸精度甚至去除表层临界缺陷,形成“检前破坏”。

标准体系缺失是存在的深层瓶颈,现行超声检测标准以锻造、铸造或焊接件作为对象,其验收等级并不适用于增材制造缺陷的形态特征与分布规律。微气孔允许量、未熔合允许尺寸与载荷方向的关联等问题缺乏标准依据,检测结果难以直接转化为合格判定,这阻碍了检测技术在生产线上的闭环应用。

4.2 技术发展方向

高频与超高频相控阵是提升微缺陷分辨力的直接有效路径,采用二十兆赫兹以上高频探头配合水浸聚

焦,能将分辨率推进至亚毫米甚至微米量级,有望实现亚表面微气孔早期捕捉,但需通过自适应滤波与信号累积改善远场信噪比。

激光超声与相控阵接收融合为在线检测提供全新思路,激光脉冲在表面激发宽带超声无需耦合介质,从根本上消除表面粗糙度制约,且可适应高温成形环境进行在线监测,将激光激发与相控阵接收结合,既能保持成像优势又突破耦合限制,特别适合逐层质量监控的闭环控制。

智能化定量评价是当下重要的发展趋势,基于深度学习的端到端方法可从原始阵列数据中直接学习缺陷边界与类型特征,减少对传统物理模型的依赖,随着数字化制造发展,工艺仿真预测的缺陷分布概率与超声实测结果可进行数据融合,利用数字孪生框架缩小搜索空间,提升定量效率与置信度。

标准建设层面建立增材制造轻合金专用超声相控阵检测标准迫在眉睫,该标准应涵盖参考试块制备规范、各向异性声速标定程序、缺陷定量误差容限及面向不同服役工况的验收等级,形成从粉末到构件的全流程无损评价规范体系。

5 结束语

激光增材制造轻合金构件质量控制需依靠超声相控阵技术不断精进,从工艺缺陷声学机理解析到检测参数系统适配,再到定量评价链路精度控制,每一个环节的突破都直接关系到构件工程化可靠应用。未来,高频检测手段、激光超声融合技术、智能化定量算法与专用标准体系协同发展,会为轻合金增材制造产业构建起坚实的质量屏障,让该技术在高端装备领域规模化落地更稳健可信。

参考文献:

- [1] 江奕良,孟宪凯,姚喆赫,等.钛合金激光复合增材制造技术研究现状[J].激光与光电子学进展,2026,63(01):82-97.
- [2] 黄西娜,王登,周旌旗,等.机器学习在增材制造轻合金疲劳寿命预测中的应用[J].中国有色金属学报,2025,35(05):1549-1564.
- [3] 梁文杰,董强胜,章晓波.增材制造铝合金组织结构与性能研究进展[J].材料导报,2025,39(19):207-221.
- [4] 马志远,崔振,康达,等.3D打印镍基合金亚毫米级缺陷多分辨低频超声C扫描定量检测[J].机械工程学报,2025,61(04):24-31.
- [5] 任国鑫,崔泽琴,丁正祥,等.殷瓦合金激光增材制造研究进展[J].机械工程学报,2024,60(11):259-272.

液力耦合器在生产水泵系统中的 节能应用与优化研究

程 崛

(中国石油化工股份有限公司安庆分公司, 安徽 安庆 246001)

摘 要 在工业生产领域, 水泵系统应用占比高、耗能总量大, 然而传统流量调控手段存在明显能源损耗, 导致系统整体运行能效偏低, 开展针对性节能改造已成为行业刚需。本研究聚焦液力耦合器在水泵系统中的节能应用, 分析设备传动特性与水泵负载的适配关系, 提炼核心节能机制, 结合工程实际制定优化方案, 通过现场实测试验验证应用效果, 以为工业水泵系统节能改造提供技术参考。

关键词 液力耦合器; 生产水泵系统; 充液率; 设备参数匹配; 冷却系统

中图分类号: TH137.331

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.025

0 引言

水泵系统贯穿各类工业生产流程, 传统节流调节不仅加剧电能浪费, 还会加快设备构件磨损, 增加日常运维成本, 阻碍生产环节绿色高效推进。当前工业领域节能降耗政策持续推进, 挖掘水泵系统节能空间、优化运行调控模式成为重要研究方向。液力耦合器具备柔性传动、无级调速优势, 与水泵负载特性高度契合, 深入研究其应用与优化路径, 能够弥补现有系统运行短板, 完善节能改造实操方案, 推动工业通用设备能效提档, 助力工业领域低碳发展。

1 液力耦合器工作原理及水泵系统适配特性

1.1 液力耦合器核心传动特性

液力耦合器属于液体介质柔性传动设备, 核心构件涵盖泵轮、涡轮、密闭工作腔及勺管调节组件, 泵轮与驱动电机同轴固连, 涡轮与水泵负载同轴对接, 二者合围形成环形密闭工作腔, 腔内充填液压油完成能量传递。电机通电运行后, 同步带动泵轮旋转, 泵轮叶片搅动腔内工作液, 将机械能转化为液体动能与压力能, 高速液流冲击涡轮叶片, 推动涡轮同步旋转, 再将液体能量转化为机械能, 最终驱动水泵负载运转。液力耦合器转速调节依托工作腔充液率调整实现, 通过勺管机构调控腔内液体充注量, 改变泵轮与涡轮间液体动量矩传递效率, 进而调控涡轮输出转速。充液率升高, 泵轮涡轮能量传递强度提升, 涡轮转速趋近泵轮转速; 充液率降低, 能量传递转差率增大, 涡轮输出转速同步下调。

1.2 水泵系统负载特性

工业生产用离心泵、轴流泵等叶片式水泵, 归属典型平方转矩负载, 运行规律严格遵循叶片泵相似定律。水泵流量与转速呈正比, 扬程与转速平方呈正比, 轴功率与转速三次方呈正比, 转速下调时, 轴功率呈三次方速率快速衰减, 这一特性为水泵转速调节节能提供核心理论支撑。工业水泵系统设计选型, 均以生产最大工况需求为基准, 同步预留 10%~30% 性能余量, 保障极端工况供水稳定性。此类设计导致水泵实际运行阶段, 多数时间处于非额定工况, 需依据生产需求实时调控供水流量与压力^[1]。传统流量调控采用阀门节流模式, 通过关小水泵出口阀门, 增加管路系统阻力, 改变管路特性曲线实现流量调控。

2 生产水泵系统能耗现状及液力耦合器节能机理

2.1 生产水泵系统能耗痛点

水泵系统为工业生产领域应用范围最广的通用机械设备, 耗电量占工业总耗电量 20% 以上, 是工业节能改造核心攻坚对象。国内多数工业企业水泵系统仍沿用传统阀门节流调控模式, 系统运行效率偏低, 能源浪费问题突出。行业统计数据 displays, 国内工业水泵系统平均运行效率不足 60%, 远低于国际 80% 的先进运行标准, 节能改造空间极大。

2.2 液力耦合器核心节能机理

液力耦合器应用于水泵系统的节能效益, 核心源于转速调节替代节流调控, 消除节流损耗, 同时依托柔性传动实现多维度能耗优化。转速调控替代节流调控,

作者简介: 程崛 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 设备管理。

根除管路节流损耗。液力耦合器通过转速调整实现流量调控，水泵出口阀门保持全开，管路阻力系数恒定，无额外节流损耗。依据水泵相似定律，水泵流量降至额定流量 50% 时，转速调控模式下水泵轴功率仅为额定功率 12.5%，节流调控模式下轴功率仍超额定功率 60%，节能效果突出^[2]。柔性启动弱化冲击能耗，提升电机运行效率。液力耦合器可实现电机空载启动，电机启动完成后，逐步提升工作腔充液率，缓慢带动水泵负载升速，启停过程平稳无冲击，电机启动电流控制在额定电流 2 倍以内，大幅压缩启动阶段电能损耗，同时规避大电流对电机绕组的冲击，延长电机使用寿命。

3 液力耦合器水泵系统节能应用实测分析

以某化工企业生产供水系统单台水泵为研究载体，实施改造与实测分析，验证液力耦合器节能实效。该水泵型号为 14SA-10，额定流量 1 080 m³/h，额定扬程 48 m，配套三相异步电机额定功率 200 kW，额定转速 1 480 r/min。系统原采用出口阀门节流调控，长期处于非额定工况，能耗浪费严重。对系统加装限矩型液力耦合器完成改造，搭建专项测试平台，连续 72 h 稳定监测不同流量工况下，节流调控与液力耦合器转速调控的运行参数，获取精准能耗数据，测试结果见表 1。

表 1 不同流量工况下水泵系统运行能耗参数对比

工况流量占比 /%	额定转速下水泵轴功率 /kW	节流调节水泵轴功率 /kW	液力耦合器调节水泵轴功率 /kW	系统节电率 /%
100	198.00	198.00	196.50	0.76
90	144.34	158.60	118.20	25.47
80	101.59	142.80	76.80	44.96
70	70.06	127.10	49.80	60.82
60	46.65	111.30	30.20	72.87
50	30.62	95.60	17.80	81.38

实测数据显示，额定流量工况下，液力耦合器调控与节流调控能耗基本持平，节电率偏低。主要原因在于额定工况下液力耦合器转差率极低，传动效率接近 99%，无额外传动损耗，且水泵出口阀门全开，无节流损失，两种调控模式能耗差值极小。伴随工况流量降低，液力耦合器调控节电率快速攀升，流量降至额定流量 50% 时，系统节电率达 81.38%，节能效果极为显著。实测结果与水泵相似定律理论计算高度契合，充分证实液力耦合器在水泵变工况运行中的节能优势^[3]。

4 液力耦合器水泵系统优化策略

4.1 充液率优化匹配

充液率是决定液力耦合器传动效率与转速调节范围的核心参数，充液率匹配精度直接决定系统节能水

平。为明确充液率对设备运行性能的影响，对改造后液力耦合器开展不同充液率下的性能测试，采集稳定运行状态下各项参数，测试结果见表 2。

表 2 液力耦合器不同充液率下的运行性能参数

充液率 /%	泵轮转速 / r·min ⁻¹	涡轮转速 / r·min ⁻¹	转差率 /%	传动效率 /%	系统总效率 /%
20	2 900	870	70.00	28.20	22.10
30	2 900	1 450	50.00	48.50	41.30
40	2 900	1 885	35.00	63.20	57.40
50	2 900	2 175	25.00	74.30	69.20
60	2 900	2 465	15.00	84.60	79.10
70	2 900	2 697	7.00	92.40	87.30
80	2 900	2 813	3.00	96.20	91.50

测试数据表明，充液率最优匹配区间为 50%～80%，该区间内液力耦合器传动效率超 74%，系统总效率超 69%，可兼顾转速调节范围与传动效率，实现节能效益最大化。实际运行阶段，需依据生产工况流量需求，在最优充液率区间内精准调控，严禁充液率低于 50% 运行。充液率低于 50% 时，液力耦合器转差率突破 25%，传动效率快速下滑，转差功率转化热量激增，不仅压缩系统节能空间，还会引发工作液温度骤升，出现汽化、黏度下降问题，干扰设备稳定运行^[4]。

4.2 设备参数匹配优化

液力耦合器与电机、水泵的参数匹配度，直接决定系统运行稳定性与节能效果。设备选型阶段，液力耦合器额定传递功率需与电机水泵额定功率精准适配，取值控制在电机额定功率 1.05 倍～1.1 倍，既避免功率冗余造成的能耗浪费，又保障极端工况下能量传递能力充足。针对水泵平方转矩负载特性，需选用专用限矩型液力耦合器，泵轮与涡轮叶片倾角控制在 30°～45°，提升低转速工况传动效率，减少能量传递过程中的冲击与回流损耗。同步开展水泵叶轮参数优化，依据生产系统实际最大工况需求，对水泵叶轮实施切削改造，消除选型余量过大引发的无效能耗，使水泵额定工况与生产最大需求工况完全契合，确保水泵多数运行时段处于自身高效率区间，进一步提高系统整体节能水平。

4.3 冷却系统结构优化

在液力耦合器运行过程中，转差功率全部转化为热量，提高工作液温度，工作液温度直接影响介质黏度与传动性能，进而决定系统传动效率与运行稳定性。实施冷却系统优化改造，采用强制水冷系统替换原有自然冷却系统，在液力耦合器工作油路加装板式换热

器,以循环冷却水作为冷却介质,同步加装温度传感器与流量调节阀,依据工作液实时温度自动调节冷却水流量,将工作液温度稳定控制在 40℃~70℃最优区间。优化后冷却系统,可覆盖全工况实现稳定散热,杜绝工作液高温汽化、黏度下降问题,保障液力耦合器低转速工况下维持稳定传动效率,强化系统节能效果与运行稳定性。

4.4 运行控制策略优化

传统人工调节模式存在调控滞后、精度偏低的缺陷,无法匹配生产工况实时变化实现水泵转速精准调控,导致系统长期偏离最优工况运行,弱化节能效果。针对该问题,推行基于工况需求的闭环自动控制策略,在供水管网关键节点加装压力传感器与流量传感器,实时采集管网运行参数,将采集数据与生产设定值对比,通过 PLC 控制器运算处理后,输出控制信号至液力耦合器勺管执行机构,自动调控工作腔充液率,完成水泵转速精准闭环调节。同时,闭环控制系统可实现多台水泵协同运行管控,依据管网总需求,自动调控水泵运行台数与单台转速,达成多泵系统整体节能优化目标。

5 优化方案运行效果及经济性验证

将上述优化方案全面应用于该化工企业循环冷却水泵系统,完成整体改造后,开展为期 12 个月的连续运行监测,记录系统优化前后月耗电量,核算节电量与节电收益,电费单价按 0.65 元/kWh 计算,全年运行数据见表 3。

全年运行监测数据核算,优化后水泵系统全年累计耗电量 250 003 kWh,较优化前 513 740 kWh,全年累计节电量 263 737 kWh,综合节电率达 51.34%,全年累计节电收益 171 429.05 元,改造投入成本可在 10 个月内全部回收,经济效益突出。除核心节能效益外,优化后系统运行优势显著^[5]。电机启动电流由原有额定电流 6 倍~7 倍,降至 1.5 倍~2 倍,大幅弱化启动冲击对电网及设备的影响。电机与水泵轴承密封件磨损量大幅减少,设备平均无故障运行时间由 1 800 h 提升至 4 500 h,全年运维成本降低 62%。同时,系统流量与压力调节精度大幅提升,可精准适配生产工况动态变化,强化整体生产系统运行稳定性,具有大范围推广应用价值。

6 结束语

本研究理清液力耦合器在生产水泵系统中的应用原理与节能核心优势,通过充液率匹配、设备参数适配、冷却结构升级、控制策略优化四项措施,解决实际运行

表 3 优化前后水泵系统全年运行参数对比

运行月份	优化前月耗电量 /kWh	优化后月耗电量 /kWh	月节电量 /kWh	月节电收益 / 元
1	45 200	22 148	23 052	14 983.80
2	40 680	19 526	21 154	13 750.10
3	42 360	20 756	21 604	14 042.60
4	39 800	18 706	21 094	13 711.10
5	38 600	17 756	20 844	13 548.60
6	41 200	19 364	21 836	14 193.40
7	46 800	23 868	22 932	14 905.80
8	47 500	24 225	23 275	15 128.75
9	43 200	21 168	22 032	14 320.80
10	42 800	20 972	21 828	14 188.20
11	41 000	19 680	21 320	13 858.00
12	44 600	21 854	22 746	14 784.90

中的各类技术问题,全面提升系统整体能效与长期运行稳定性。研究成果经工程实体验证,具备较强经济性与落地实用性,可适配多数工业水泵系统节能改造场景。未来可结合智能调控技术进一步优化升级,持续释放节能潜力,也为同类工业流体输送设备节能优化提供可复制的实践经验。

参考文献:

- [1] 王东旭,刘剑,庞开宇,等.高压变频器在燕山湖发电公司 2 号机给水泵组改造上的应用分析[J].变频器世界,2023,26(04):91-97.
- [2] 李永强.永磁耦合器在矿用破碎机系统中的技改实践[J].中国设备工程,2024(19):140-141.
- [3] 马云生,姚海嘉,刘丽敏.高压变频器在火电厂电动给水泵节能改造中的应用[J].变频器世界,2025,28(10):96-100.
- [4] 黄思林,唐昊,王善同,等.330MW 机组电动给水泵变频改造及电液并存调速控制策略研究[J].广东电力,2023,36(02):143-150.
- [5] 张赛.永磁调速器的研究进展及结构分析[J].煤矿机械,2025,46(09):142-144.

厂用电失电下火电厂保安段柴油发电机 负荷分级投入应用研究

赵正虎

(冀建投寿阳热电有限责任公司, 山西 晋中 045400)

摘 要 火电厂厂用电全失时, 保安段电源是保障机组安全停运的核心应急电源, 柴油发电机作为保安段备用核心设备, 厂用电全失时其稳定带载投入直接决定应急供电可靠性。冀建投寿阳热电有限责任公司调试阶段开展保安段电源切换试验时, 柴油发电机启动后一次性全负荷投入存在启动冲击电流大、机端电压骤降、过载跳闸、部分设备启动失败等问题, 工程技术与电气调试人员提出一套分级、分时、分类的负荷投入控制方案, 进一步优化柴油发电机带载策略, 最终柴油发电机带载成功。该分级投入方案可有效降低保安段负荷同时启动对柴油发电机组造成的冲击, 提升机组设备安全保障能力, 旨在为同类型火电厂保安电源系统优化改造提供技术参考。

关键词 火电厂; 厂用电失电; 柴油发电机; 负荷分级; 分级投入

中图分类号: TM621; TM762.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.026

0 引言

火电厂厂用电系统是机组持续稳定运行的基础, 当电网故障、设备故障、线路跳闸等极端工况引发厂用电失电时, 机组各类辅机失去供电, 保安段电源及时切至柴油发电机接带^[1], 保证重要主辅机交流润滑油泵、DCS 系统控制电源、盘车电源等一系列重要设备重新启动成功, 保证机组安全停运, 否则将导致汽轮机、锅炉、发电机等核心主设备失去保障, 可能出现断轴烧瓦、锅炉汽水系统超压、发电机过热等严重安全事故, 甚至引起人身安全事故与重大经济损失。柴油发电机作为火电厂保安段专属应急电源, 具备独立供电、不受电网故障影响、快速自启动的优势, 是厂用电失电后机组安全停运的最后一道保障^[2]。目前, 多数传统火电厂柴油发电机控制逻辑采用失电后一次性投入全部保安负荷的运行方式, 未考虑负荷启动特性差异与发电机额定承载极限。保安段负荷同步启动时瞬间电流达到 6 倍~8 倍额定电流, 较大的电流冲击造成柴油发电机机端电压下降, 频繁出现重载启动失败、发电机过载停机、部分保安段辅机无法正常投运等问题, 大幅降低应急供电可靠性^[3]。为解决上述问题, 本文结合冀建投寿阳热电有限责任公司电气调试阶段实例, 通过建立负荷分级投入体系, 优化时序控制逻辑, 通过差异化分时投入策略规避集中负荷冲击, 保障厂用

电失电后保安系统稳定运行, 实现机组安全有序停运。

1 厂用电失电工况与保安段负荷特性分析

1.1 厂用电失电工况分类

火电厂厂用电失电主要分为部分失电与全失电两类工况。部分失电为单段厂用母线故障跳闸, 其余厂用电母线正常供电, 保安段可通过主/备电源切换供电, 柴油发电机无需启动; 厂用电全失工况为所有厂用工作电源、备用电源全部失效, 必须依靠柴油发电机独立带载保安段全部负荷, 保障机组停机关键设备运行^[4], 也是本文重点研究的应用场景。厂用电全失电后, 机组处于无外部供电的被动停运状态, 所有辅机瞬时停运, 汽轮机轴系冷却、润滑、密封、消防等关键系统失去动力、锅炉水动力循环失效、发电机失去冷源、控制系统失电, 必须在短时间内恢复供电, 否则将引发不可逆的设备损坏。

1.2 保安段负荷构成与特性

火电厂保安段负荷按运行特性可分为静态负荷与动态旋转负荷两类, 两类负荷启动特性、冲击电流、运行功耗差异极大, 是负荷分级的核心依据。静态负荷以照明、控制电源、仪表电源、直流系统充电柜、UPS 电源等为主, 特点为功耗稳定、运行可靠; 动态旋转负荷以各类油泵、水泵、风机辅机为主, 是分级分

作者简介: 赵正虎 (1986-), 本科, 工程师, 研究方向: 保安段电源切换与控制。

时投入对象, 包含重要交流润滑油泵、顶轴油泵、空预器辅电机等, 启动瞬间冲击电流可达额定电流 6 倍~8 倍, 是造成柴油发电机工况波动的主要诱因。

1.3 传统投入方式弊端

传统控制逻辑中, 柴油发电机自启动成功、电压频率稳定后, 一次性投入所有保安负荷, 存在诸多技术缺陷。一是瞬时负荷超限, 多台旋转辅机同步启动, 冲击负荷叠加, 超出柴油发电机瞬时承载能力, 导致柴油发电机机端电压跌落、频率波动超限, 触发保护装置误动跳闸; 二是关键设备供电可靠性不足, 集中冲击下部分核心安全辅机启动失败, 直接威胁机组安全; 三是柴油发电机长期承受冲击载荷, 加速机组机械磨损与电气老化, 缩短设备使用寿命, 增加运维成本^[5]。

2 电气调试阶段柴油发电机联启面临的问题

2.1 保安段电源及柴油发电机现状及切换逻辑

冀建投寿阳热电有限责任公司共 2 台机组, 每台机组设有保安 A 段和 B 段两段母线, A 段工作电源由汽机 PC A 段(主电源)和锅炉 PC B 段(辅电源)供电, B 段工作电源由锅炉 PC A 段(主电源)和汽机 PC B 段(辅电源)供电, 柴油发电机同时作为保安 A 段和 B 段的应急备用电源。

当事故保安 A(B) 段主电源失电后, 若辅电源正常, 则发出信号, 双电源自动转换开关(简称“ATS”)无延时自动切换到辅电源接带, 向保安 A 段(保安 B 段)供电; 若保安段电压仍异常, 则无延时启动柴油发电机组, 待转速和电压达到额定值后, 柴油发电机出口开关自动合上, 失电保安段无扰动转换开关(简称“CTTS”)自动切换到柴油机侧带, 向失电的保安段供电。柴油发电机具有三次自启动功能, 连续三次启动失败则发出失败信号, 并闭锁自启动回路。

当保安段任一路工作电源恢复后, CTTS 装置延时自动切换至保安段工作电源供电, 经值班人员确认保安段带电正常后手动停运柴油发电机组。

2.2 模拟厂用电全失保安段供电电源切至柴油发电机时遭遇问题

柴油发电机额定功率 850 kW, 额定电压 400 V, 额定电流 1 500 A 左右, 过电流保护定值为 1.25I_e。保安 A 段和 B 段的额定总容量为 1 200 kVA, 考虑到大部分设备正常运行时未到达额定功率状态, 机组满负荷时该母线运行电流可达额定电流值 70% 左右, 因此保安段正常运行最大容量约为 840 kVA。保安段负荷包括静态负荷和动态旋转负荷, 其中静态负荷主要包括

UPS 装置、110/220 V 直流系统充电柜、DCS 装置、仪表电源柜、电梯电源、七氟丙烷气体控制盘等, 动态旋转负荷包括风机油泵、汽轮机交流润滑油泵、盘车电源等。

模拟厂用电全失时, 柴油发电机启动后发电机 10 s 内完成启动建压, 保安段负荷全部投入重新启动, 柴油发电机立即跳闸。经分析, 柴油发电机跳闸原因为保安段负荷全部重新启动时冲击电流过大, 超过柴油发电机过电流保护定值。

3 保安段负荷分级应用概况

3.1 保安段负荷分级行标

依据《火力发电厂厂用电设计技术规程》, 结合设备安全优先级、启动冲击特性、失电后风险等级, 遵循“核心优先、动静分离、分时错峰、逐级加载”的原则, 将保安段负荷划分为三个等级, 匹配差异化投入时序与控制逻辑, 实现负荷精准管控。

1. 一级核心安全负荷(优先瞬时投入)。一级负荷为机组安全停运不可或缺的核心设备, 失电后短时间内即可引发重大设备损坏, 无供电容错空间, 需在柴油发电机电压频率稳定后瞬时投入。主要包含: 汽轮机交流润滑油系统、机组保安固定控制负荷、关键仪表与监测电源、消防应急核心电源。

2. 二级辅助保障负荷(短时延时投入)。二级负荷为机组辅助安全保障设备, 对机组核心安全起支撑作用, 可短暂失电, 待一级负荷运行稳定、柴油发电机工况平稳后延时投入。主要包含: 空预器辅电机、机组各类风机润滑油泵等。

3. 三级运维负荷(长时延时投入)。三级负荷为机组运维辅助设备, 不直接影响机组核心设备安全, 失电后不会引发即时安全事故, 可在一、二级负荷全部稳定运行、柴油发电机满负荷适配工况后投入。主要包含: 保安段常规照明、辅助通风系统、非关键检修电源、附属运维设备等。

3.2 控制逻辑调整

鉴于保安段负荷全部投入运行导致柴油发电机过电流保护动作, 经过多次摸索与试验, 所有静态负荷无延时启动, 旋转动态负荷根据额定电流、供电紧迫性、容错性差异, 一级核心负荷无延时 0.2 s 投入, 快速搭建安全屏障; 二级辅助负荷延时 2 s 后投入, 避开一级负荷微小启动波动; 三级运维负荷延时 4 s 后投入, 此时柴油发电机已处于平稳运行状态, 具备充足冗余承载力, 具体启动安排如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 一级核心安全负荷（第一批启动，延时 0.2 s）

设备名称		额定功 率(kW)	额定电 流 (A)
保安 A 段 负荷	1# 机给水泵汽轮机 1# 交流润滑油泵	30	60
	1# 机电泵组液力耦合器 启动油泵	11	22
	1# 炉 1# 一次风机 1# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 炉 1# 二次风机 1# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 炉 2# 一次风机 1# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 炉 2# 二次风机 1# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 机给水泵汽轮机 2# 交流润滑油泵	30	60
	1# 汽轮机交流润滑油泵	45	90
	1# 炉 1# 一次风机 2# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 炉 1# 二次风机 2# 油泵电机	1.1	2.75
保安 B 段 负荷	1# 炉 2# 一次风机 2# 油泵电机	1.1	2.75
	1# 炉 2# 二次风机 2# 油泵电机	1.1	2.75
	负荷总计	124.4	254

表 2 二级辅助保障负荷（第二批启动，延时 2 s）

设备名称		额定功 率(kW)	额定电 流 (A)
保安 A 段负荷	1# 炉 1# 引风机 1# 油泵电机	11	22
	1# 炉 2# 引风机 1# 油泵电机	11	22
保安 B 段负荷	1# 炉 1# 引风机 2# 油泵电机	11	22
	1# 炉 2# 引风机 2# 油泵电机	11	22
负荷总计		44	88

表 3 三级运维负荷（第三批启动，延时 4 s）

设备名称	额定功率 (kW)	额定电流 (A)
1# 机 1# 顶轴油泵 (1# 机 2# 顶轴油泵)	55	110
负荷总计	110	220

4 保安段负荷分级应用效果分析

4.1 应用效果对比分析

方案执行前后运行数据对比显示，分级投入方案优势显著。一是设备启动成功率 100%，保安段负荷均可正常启动运行，彻底解决重载部分设备启动失败问题

二是柴油发电机无瞬时冲击过载现象，柴油发电机启动带载过程中最大电流 1 120 A 左右，低于额定电流；三是故障容错能力提升，即使单台次级负荷故障跳闸可迅速重启，不会影响核心负荷供电，机组安全停运保障能力全面升级。

4.2 运维效益分析

该分级投入方案改造成本低、工程量小，无需更换原有柴油发电机与负荷设备开关，仅通过优化控制逻辑与延时参数即可实现功能升级。长期运行可有效降低柴油发电机机械磨损与电气老化速率，减少设备故障停机次数，降低机组检修运维成本，同时彻底规避厂用电失电引发的重大设备损坏风险，减少故障经济损失，具备极高的安全效益与经济效益。

5 结束语

厂用电失电工况下，柴油发电机负荷投入方式直接决定火电厂机组安全停运的可靠性。传统一次性全负荷投入模式存在冲击大、工况不稳定、故障率高的突出问题，无法满足极端故障工况下的安全保障需求。本文提出的基于负荷重要等级与启动特性的分级分时投入方案，通过核心负荷优先投入、辅助负荷与次要负荷延时投入的控制逻辑，有效解决了集中负荷冲击难题，稳定了柴油发电机运行工况，大幅提升了保安电源系统供电可靠性。工程实践证明，该方案改造简单、安全性高、适用性强，可有效规避机组设备损坏风险，降低运维成本，适配各类常规火电厂保安段电源系统改造需求，为火电厂应急保安电源系统的安全、稳定、高效运行提供坚实的技术支撑，具备广泛的工程推广价值。

参考文献：

[1] 国家能源局. 火力发电厂厂用电设计技术规程 [S]. 北京：中国计划出版社,2015.
[2] 王立平,赵明远,张鹏伟,等. 大型火电厂保安柴油发电机组的调试措施 [J]. 设备管理与维修,2023(23):121-123.
[3] 谢明威,黄慕清. 柴油发电机与保安段电源切换的逻辑分析 [J]. 电工技术 ,2023(S1):161-162,165.
[4] 王小平,杜嘉桐. 某 680MW 火力发电厂交流保安段母线电源备自投切换试验探讨 [J]. 电力设备管理 ,2024(19): 82-84.
[5] 吕蒙,朱小敏,张鹏,等. 保安段电源切换故障分析及控制策略 [J]. 电站系统工程 ,2024,40(02):53-56.

大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的谐波抑制与节能优化研究

申艳聪

(湖南科美达电气股份有限公司, 湖南 岳阳 414000)

摘要 连铸是钢铁生产核心工序, 电磁搅拌直接影响铸坯结晶质量与生产效率, 大功率变频器作为系统核心驱动单元, 其运行稳定性与能效水平直接关系到生产全局。工业现场中连铸电磁搅拌系统配套大功率变频器易产生谐波, 造成电网污染、设备老化以及额外能耗, 难以满足钢铁行业绿色低碳发展要求。本文围绕谐波抑制与节能协同优化开展研究, 剖析谐波产生机理、分布特征, 梳理现有治理手段短板, 研究适配连铸工况的谐波抑制方案, 构建兼顾设备性能与能耗水平的综合优化策略, 实现谐波治理与能效提升同步落地。

关键词 大功率变频器; 连铸电磁搅拌系统; 谐波抑制; 节能优化; 运行稳定性

中图分类号: TN773; TF777

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.027

0 引言

钢铁工业是国民经济重要支柱产业, 连铸是钢铁生产关键工序, 电磁搅拌技术直接决定铸坯内部组织与成品品质。随着钢铁企业向绿色低碳、高效生产方向转型, 大功率变频器广泛应用于连铸电磁搅拌系统, 电力电子器件非线性工作带来的谐波问题日渐凸显。谐波会劣化电网电能质量, 加剧电气设备发热老化, 干扰搅拌控制精度, 诱发铸坯质量缺陷, 还会带来额外能源损耗。传统谐波治理手段多侧重改善电能质量, 较少兼顾系统节能需求, 难以适配连铸现场负载动态波动、连续生产的复杂工况。

1 连铸电磁搅拌系统相关理论与技术基础

1.1 连铸电磁搅拌系统工作原理

连铸电磁搅拌系统由电磁搅拌器、大功率变频器、控制系统及检测装置构成, 核心是通过电磁感应驱动钢液运动, 改善铸坯结晶质量^[1]。电磁搅拌器按安装位置分为结晶器搅拌、二冷区搅拌、末端搅拌等, 工作时需精准调节磁场强度与搅拌速度。控制系统采集工艺参数向变频器发指令, 变频器将工频交流电转换为适配交流电, 控制搅拌速度与强度。该系统需适配连铸参数动态变化, 变频器与搅拌装置的联动协调性直接影响铸坯质量与设备运行状态。

1.2 大功率变频器工作特性

大功率变频器基于电力电子变换技术实现能量转换与调速控制, 由整流、滤波、逆变及控制单元构成。

整流单元将工频交流电转为直流电, 滤波单元做平滑处理, 逆变单元将直流电转为可控交流电, 控制单元调节逆变单元工作。连铸工况下其运行特性独特: 输出参数动态性强, 需适配参数变化; 运行连续性要求高, 需长时间稳定运行; 受高温强磁场干扰, 自身运行还会产生谐波^[2]。

1.3 谐波产生机理与危害

谐波是频率为基波频率整数倍的周期性电量分量, 对电力系统与用电设备有显著影响。大功率变频器运行中, 功率开关器件 (IGBT) 的非线性通断特性会产生谐波; 变频器整流、逆变环节的电流电压波形畸变, 会进一步引入谐波干扰, 其中整数次谐波影响尤为突出。谐波危害主要有: 加剧电气设备附加损耗与发热, 降低设备效率、缩短使用寿命; 干扰控制系统正常工作, 降低控制精度, 影响铸坯结晶质量与产品性能; 污染电网电能质量, 影响同一电网内其他敏感设备稳定运行。

1.4 节能优化核心理论

工业设备节能原则是在保障性能满足需求的前提下降低能耗, 针对大功率变频器驱动系统, 节能围绕能量损耗分析与运行状态优化开展, 核心理论包括负载匹配、调速节能与控制优化理论。负载匹配理论强调设备输出与负载需求精准匹配, 连铸系统可调节变频器参数适配搅拌需求以降低能耗^[3]。调速节能理论指出, 电机转速与能耗呈非线性关系, 优化调速方式、避免电机在低效转速区间运行可提升能效。控制优化

作者简介: 申艳聪 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电磁冶金及大功率电源。

理论通过改进控制算法,提升变频器控制精度与响应速度,减少参数波动带来的能量损耗,实现能耗与运行性能的动态平衡。这些理论为该系统的功率变频器节能优化提供支撑。

2 大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的谐波问题分析

2.1 谐波分布特征

大功率变频器在连铸电磁搅拌系统产生的谐波,分布与变频器拓扑、控制方式及系统工况相关。频率分布上,整流环节产生5次、7次等低次整数谐波,幅值大、影响突出;逆变环节产生几十次至几百次高次谐波,幅值小但易干扰控制系统。谐波幅值变化与工况关联明显,连铸拉速、钢液温度变化改变搅拌负载,变频器输出功率与频率调整后,谐波幅值相应波动。负载在额定区间时幅值稳定,负载较轻或大幅波动时幅值上升、污染加剧。变频器参数设置也影响谐波分布与幅值,设置不当会增加高次谐波幅值、加剧波形畸变。

2.2 谐波对系统运行的影响机制

谐波对连铸电磁搅拌系统的影响涉及设备、控制、工艺多个层面。设备层面:谐波电流增加系统额外损耗,导致电机、变压器等核心设备运行温度异常升高,加速绝缘材料老化,降低绝缘性能,缩短设备使用寿命,提升故障概率;谐波还会引起电机电磁转矩脉动,加剧振动,产生噪声,影响设备稳定运行和工作环境,间接干扰控制精度,影响连铸工艺稳定性和铸坯质量。控制层面:谐波干扰使检测信号失真,输出参数波动,影响钢液搅拌效果,增加铸坯缺陷风险。工艺层面:谐波引发设备故障会中断连铸生产,造成生产损失,增加能耗与成本,还会影响周边设备,干扰生产秩序。

2.3 现有谐波抑制方案的局限性

当前工业谐波抑制方案在连铸电磁搅拌系统适配性不足。无源滤波方案成本低、结构简单,但滤波特性固定,无法适应工况变化,滤波精度有限,易谐振,在大功率场景效果不佳。

有源滤波方案能精准抑制谐波、响应快,但运行成本高,对环境要求严苛,在连铸现场稳定性难保障。混合滤波方案结合二者优势,但结构复杂、控制难,协同控制精度不足,易出现滤波效果问题。

此外,现有方案多针对单一频率或特定工况,缺乏全工况适配性,难以在不同情况下保持理想效果,且未充分考虑与节能协同,可能增加能耗,无法实现双重目标。

3 连铸电磁搅拌系统中大功率变频器的谐波抑制技术

3.1 谐波抑制技术方案设计原则

结合连铸电磁搅拌系统运行特性与工业需求,谐波抑制技术方案设计遵循三大原则。一是适配性原则,方案要适配连铸工况运行环境及变频器运行需求,确保不同工艺参数下稳定滤波。二是可靠性原则,连铸工艺要求连续,谐波抑制装置需长时间稳定运行、故障率低,有故障自诊断与应急处理能力,避免影响生产。三是经济性原则,方案在保障滤波效果时,合理控制成本,兼顾与节能优化协同,提升滤波效果与能效。

3.2 针对性谐波抑制技术路径

基于设计原则和系统谐波分布特征,提出三类谐波抑制技术路径。一是优化变频器拓扑结构,改进整流、逆变单元设计,如采用多重化整流技术减少低次谐波,逆变单元用优化PWM控制策略抑制高次谐波。二是采用混合滤波技术,结合无源与有源滤波优势构建装置,无源滤波单元抑制低次谐波,有源滤波单元针对高次及动态谐波精准补偿,设计参数使二者协同工作。三是改进谐波抑制控制算法,用自适应算法实时监测调整滤波参数,结合工艺参数建立预测模型,实现前瞻性补偿^[4]。

3.3 谐波抑制方案的可行性验证思路

为验证方案可行性与有效性,采用理论推导与仿真模拟相结合的方式。先理论推导,建立谐波数学模型,分析技术路径抑制效果,明确理论可行性;再构建仿真模型,模拟系统运行工况,植入方案,获取波形分析谐波变化,对比污染程度验证滤波效果,分析对系统稳定性和设备损耗的影响,评估适配性与可靠性,为工业应用提供理论支撑。

4 大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的节能优化策略

4.1 节能优化目标与约束条件

大功率变频器在连铸电磁搅拌系统中的节能优化核心目标是保障铸坯质量与系统稳定,降低能耗,提升效率,实现降本增效与绿色生产,确保关键性能指标满足工艺要求。

节能优化需兼顾三项约束:一是工艺约束,优化策略不得影响铸坯结晶质量,满足工艺参数要求,避免搅拌不足引发缺陷;二是设备约束,避免设备过载,保证运行参数安全,延长设备寿命;三是稳定性约束,适配负载动态变化,保证系统不同工况下稳定运行,避免故障。

4.2 基于运行参数的节能优化策略

核心是实时调节变频器输出参数，精准匹配负载与功率，降低无效能耗。结合负载特性建立参数优化模型，以工艺参数为输入，计算最优输出参数。

根据拉速、温度计算钢坯坯壳厚度，调整输出电压和频率，在保证搅拌效果的前提下减少坯壳涡流损耗；根据安装位置及搅拌钢种采用差异化调整策略，自适应调整参数模型，避免能耗增加；优化启停控制，采用软启动技术，减少电流冲击与能耗。

4.3 基于控制算法的节能优化改进

改进变频器控制算法，提升控制精度与能效，实现节能目标：采用改进型矢量控制算法替代传统 scalar 控制，精准控制磁场强度与推力，减少额外损耗，提升电机效率；引入自适应控制机制，实时识别负载与参数变化，动态调整控制参数，避免能耗增加。

探索模糊控制与 PID 控制结合的复合算法，优化 PID 参数调整能力，减少超调量与调节时间，稳定输出，降低能耗；调整开关频率，减少功率器件开关损耗，提升变频器能效。

4.4 节能优化策略的协同性分析

谐波抑制与节能优化存在协同关系，需协同分析保证优化策略整体性与有效性。谐波抑制可减少损耗、提升能效，为节能优化奠定基础；节能优化中的参数调整可能影响谐波，应避免单一优化加剧谐波污染。

实施时建立协同优化模型，以谐波含量和能耗指标为双重目标，运用多目标优化算法平衡二者关系，同步实现谐波抑制与节能目标，如优化变频器调制频率时需兼顾二者选择最优参数^[6]。同时实时监测谐波与能耗数据，动态调整策略，维持协同平衡，防止单一优化影响系统整体性能。

5 谐波抑制与节能优化方案的综合适配性分析

5.1 方案适配性评估维度

建立多维度评估体系，评判整套方案工业适配水平，主要包含四个维度。技术适配性：评估方案对连铸复杂工况适应能力，考察和现场现有设备、控制系统的兼容集成能力。运行稳定性：评估改造之后系统长期运行表现，统计参数波动、故障发生情况，验证对连续生产的保障能力。经济成本：核算装置全生命周期成本，对比节能降损、谐波治理综合收益，分析投资回报水平。工业应用潜力：评估装置操作难度、维护工作量，考察在不同类型连铸电磁搅拌系统的推广能力，判断实际应用价值。

5.2 综合优化效果分析

结合理论与仿真结果对优化效果进行研判。谐波治理层面，该方案可以有效压低低次谐波幅值，抑制高次谐波，将波形畸变率控制在合理区间，削弱谐波带来的各类负面影响，减少设备发热损耗，降低故障发生概率。节能层面，运行参数优化与算法改进能够降低变频器和搅拌系统整体能耗，削减谐波损耗与无效输出损耗，完成性能与能耗协同优化。

5.3 方案优化与完善方向

针对方案尚存不足提出改进方向。技术层面，极端工况下方案适配能力仍可进一步提升，优化滤波参数与控制算法，增强复杂扰动工况适应能力；融合物联网、大数据技术，搭建谐波能耗在线监测预警体系，提升系统智能化水平。经济层面，优化滤波装置结构，选用高性价比元器件，压缩改造成本，提升方案推广价值。应用层面，推动方案和连铸工艺深度融合，针对不同企业设备、工艺现状提供定制化方案；开展小规模工业试验，积累现场实测数据，校验方案可靠性，为大规模工程应用打下基础。

6 结束语

结合连铸行业发展趋势，未来可以从四个方向继续深化研究：第一，开展现场工业试验，搭建实体试验平台，依托生产线实测数据校验方案实际效果，迭代优化控制逻辑；第二，扩大研究边界，把谐波抑制与节能优化拓展至整条连铸生产线，构建全流程治理与优化体系；第三，推进人工智能技术落地，搭建智能预测控制模型，实现系统自适应调节；第四，探索宽禁带半导体等新型器件在大功率变频器当中的应用，同步提升谐波抑制能力与能效水平。相关研究成果可为连铸行业技术进步提供支撑，助力钢铁工业高质量发展。

参考文献：

- [1] 陈齐峰. 基于谐波抑制技术的变压器电能质量优化方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(09):398-401.
- [2] 韩霄. 基于谐波提取的永磁同步电机谐波抑制与优化运行研究 [D]. 燕山: 燕山大学, 2025.
- [3] 张建民, 袁佑新, 刘涛. 变频器电力谐波的治理 [J]. 纺织器材, 2023, 50(S1):26-29, 57.
- [4] 陆雨琦. 电气试验中变频电源谐波抑制技术研究及其效果评估 [J]. 流体测量与控制, 2025, 06(05):46-48, 56.
- [5] 卜锦峰, 赵金星, 蒋冬. 复矢量电流调节器抑制高速永磁电机高次谐波 [J]. 计算机仿真, 2024, 41(06):354-358.

软弱围岩隧道施工安全风险管理的分析

庞清华

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 为提高施工安全管理水平, 本研究系统分析了软弱围岩的工程特性及其对隧道施工安全的影响机制, 并在此基础上采用风险识别分析与分级管控相结合的方法, 评估软弱围岩隧道施工中主要安全风险, 并围绕地质预判、支护动态优化、施工监测预警及应急管理等方面, 提出针对性的安全风险管理要点。结果表明, 建立动态化、信息化的风险管理体系, 能够降低施工安全事故发生概率, 提高软弱围岩隧道施工的安全性。

关键词 软弱围岩; 隧道施工; 安全风险管理

中图分类号: U455.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.028

0 引言

软弱围岩隧道因其结构松散、稳定性差、变形大, 在施工过程中容易引发坍塌、突水突泥等安全事故, 施工安全风险显著高于一般围岩条件。随着交通基础设施建设规模的不断扩大, 软弱围岩隧道工程数量持续增加, 其安全风险管理问题日益突出。因此, 如何在复杂地质条件下有效识别、控制施工风险, 已成为隧道工程建设中的关键技术难题。

1 软弱围岩隧道施工安全风险管理的要点

针对软弱围岩隧道施工中地质条件复杂、安全风险高的特点, 必须建立科学、系统的风险管理体系。施工单位可基于“预判—控制—监测—应急”的核心主线, 形成贯穿施工全过程的风险闭环管理机制^[1]。

1.1 地质预判先行, 精准探明围岩性状

在软弱围岩隧道施工中, 施工单位的首要任务是在开挖前建立系统的地质预判体系, 其核心依据是中华人民共和国行业标准《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660-2020)与《公路工程地质勘察规范》(JTG C20-2011)中确立的“动态设计、信息化施工”原则。地质预判是贯穿工程始终的主动探测与动态反馈过程^[2]。施工单位需基于勘察资料, 建立“宏观预判→超前探测→实时验证”三级递进预判机制, 以精准识别掌子面前方至少1倍洞径至3倍洞径内的地质风险^[3]。

1.1.1 建立分级地质预判框架

施工单位需依据设计阶段的地质纵断面图、区域地质构造分析和《公路水运工程施工安全风险评估指

南第1部分: 总体要求》(JT/T 1375.1-2022), 将隧道划分为不同风险等级区段, 旨在指导后续差异化、预案资源配置(如表1所示)。

1.1.2 实施多源数据融合分析

预判的关键在于分析探测数据。超前水平钻探获取的岩芯, 其单轴饱和抗压强度(R_c)与岩体完整性系数(K_v)是评价围岩稳定性的核心指标。依据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1-2018), 可计算岩体基本质量指标(BQ):

$$BQ=100+3R_c+250K_v \quad (1)$$

式(1)中, 当 $R_c > 90K_v+30$ 或 $K_v > 0.04R_c+0.4$ 时, 需按规范进行限制性取值。同时, 要实时记录钻探过程中的钻进速率、冲洗液颜色等异常现象, 并结合TSP解译的波速、波幅异常区, 建立地质—物探异常关联模型, 精准圈定软弱夹层、富水区及破碎带的空间位置^[4]。

1.1.3 实现掌子面地质动态反馈

施工单位需配备数字地质编录系统, 对每一循环开挖揭露的掌子面进行高清摄影、岩体结构面数字测量, 并利用图像识别技术, 对比岩性、节理产状、渗水点与超前预报结果。此过程形成的“预报—揭露—修正”闭环, 可不断优化后续区段的预报参数。

1.1.4 严格遵循预警联动管理流程

地质预判的最终目的是指导施工决策。当超前钻探揭示前方存在高压富水、极其破碎的V、VI级围岩时, 施工单位要立即启动《隧道施工安全风险预警与应急处置预案》。预报成果要以书面形式及时报送监理、设计与建设单位, 并共同会商, 确定是否调整开挖工法、

作者简介: 庞清华(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

表 1 软弱围岩隧道施工地质风险分级预判框架

风险等级	风险等级判定内涵	分级依据	典型地质特征	预报原则	主要技术手段
IV 级风险 (重大风险)	事故一旦发生，可能造成群死群伤或特别重大经济损失，且发生可能性高	1. 设计或施工揭示为极不稳定软弱围岩，连续长度较大；2. 预报或揭露存在大型断层破碎带、富水溶腔、暗河等；3. 可能引发大规模坍塌、突水突泥、整体失稳	1. 地表存在大型塌陷坑、显著沉降；2. 高地应力区可能发生大变形或岩爆	综合预报、钻探为主，长短结合，全过程跟踪	TSP/TGP 长距离探测 + 超前水平钻 + 地质雷达 + 孔内成像 + 水文监测
III 级风险 (较大风险)	事故可能造成 1 人以上死亡或较大经济损失，需重点控制	1. 存在高风险软弱围岩区段；2. 可能发生突水、突泥、局部坍塌；3. 浅埋、偏压或下穿重要建筑物	1. 中等规模断层、节理密集带；2. 富水软弱夹层或不良好地质组合	中短距离预报，物探与钻探结合，重点验证	TSP/TGP 中距离探测 + 超前水平钻 + 地质雷达 + 加深炮孔
II 级风险 (一般大风险)	事故可能造成人员伤亡或一般经济损失	1. 地质条件基本明确，但存在不确定性；2. 围岩破碎、节理发育，局部渗水	1. 局部软弱、破碎；2. 稳定性受施工扰动影响明显	短距离预报为主，必要时钻探验证	地质雷达 + 单孔超前钻探 + 加深炮孔系统观察
I 级风险 (低风险)	事故后果较轻，风险可接受	1. 围岩条件良好，结构完整；2. 无明显不良地质影响	地质条件简单、均一	常规预报、宏观判断	地质素描、掌子面观察、加深炮孔，必要时快速地质雷达扫描

加强支护参数等措施，以保证预判信息能直接、迅速地转化为具体施工指令，真正实现“岩变我变”的主动控制。

借助上述地质预判体系，施工单位可将未知的地质风险转化为可识别、可量化的工程问题，为后续支护、开挖与监测工作的精准实施奠定不可替代的科学基础。

1.2 支护动态优化，匹配围岩形变速率

支护动态优化的本质是使支护结构的强度、刚度与施作时机，能够主动适应围岩在开挖扰动后的应力重分布与时效变形特征，从而将变形控制在安全、可控范围内，防止出现失稳坍塌。

1.2.1 建立基于变形速率的支护响应分级体系

施工单位要依据全断面收敛、拱顶下沉等关键监

测数据，建立支护响应分级调控机制：该分级体系能够保证支护响应与围岩变形在时间与强度上的精确匹配，实现从“被动承受”到“主动控制”的转变（见表 2）。

1.2.2 推行差异化的支护强化技术

针对软弱围岩变形速率快、自稳时间短的特点，支护优化要采取差异化、组合化的技术策略。时机差异化：强调支护的“及时性”与“紧跟性”。对于变形速率高的区段，要坚持“短进尺、快封闭、紧支护”，压缩初喷混凝土、架立钢拱架等工序的间隔时间，采用“一掘一支护”的微台阶工法，尽早形成封闭受力环。刚度组合化：采用“刚柔并济、多层叠加”的组合支护体系。例如：在初喷混凝土层中掺加钢纤维以提高其抗裂与韧性。空间协同化：注重支护结构在三维空

表 2 软弱围岩隧道施工支护动态响应分级调控阈值表

变形速率等级	日变形速率 (mm/d)	累计变形量 (mm)	核心响应措施
I 级（正常控制）	< 2	200 ~ 300	按原设计支护参数施工，加强观测
II 级（重点关注）	2 ~ 5	300 ~ 500	缩短开挖进尺至 1 榀 / 循环；加密锁脚锚杆；喷射混凝土初支及时封闭
III 级（主动干预）	5 ~ 10	500 ~ 1 000	立即暂停开挖，实施径向注浆；提高钢架规格；评估调整预留变形量
IV 级（紧急加强）	> 10	> 1 000	全断面暂停施工，采取超前注浆、增设大刚度临时支撑等强力预加固措施；启动变形异常应急程序

间上的整体性,增设临时仰拱,将开挖断面尽快转化为稳定的闭合结构,并借助系统锚杆与超前小导管的结合,在隧道周边形成纵深加固的“承载拱”,有效控制围岩的松弛范围。

借助这一动态优化实践,施工单位可将支护从静态的“设计图纸”转化为动态的“安全屏障”,保证软弱围岩隧道施工安全。

1.3 监测数据驱动,预警分级实时响应

软弱围岩隧道施工的监测体系,其核心是建立以数据为驱动、以预警为核心的风险感知与决策支持系统,其核心目标是利用自动化的监测手段,实时捕捉围岩与支护体系的力学行为演变,依据科学阈值精准识别控制风险^[5]。

1.3.1 建立多元融合的自动化监测网络

监测的有效性首先依赖于覆盖全面、响应迅速的感知层。施工单位需建立“地表—洞内—支护体”三位一体的自动化监测体系。地表监测:针对浅埋段的建筑物,布设静力水准仪与GNSS自动监测站,实时监测地表沉降与水平位移。洞内收敛与沉降监测:在隧道洞内关键断面布设自动全站仪,实现拱顶下沉、水平收敛等净空位移的无人化、高频次自动采集。监测断面布设密度要依据围岩级别动态调整。支护结构内力监测:在初期支护钢拱架内缘、外缘关键部位焊接表面应变计,在锚杆杆体安装钢筋计,在二次衬砌内埋设混凝土应变计与土压力盒,直接监测支护结构的内力、轴力与接触压力变化。

1.3.2 建立数据驱动的智能预警响应机制

原始数据要经过处理、分析与判识转化为决策信息,并建立“监测—预警—响应”智能闭环流程。预警一旦触发,需要执行标准化的应急响应动作。蓝色预警(注意):现场技术员加强巡视,监测频率提高至2次/天,数据每日分析报告。黄色预警(预警):项目技术负责人组织现场会商,分析原因,调整施工参数,监测频率提高至4次/天。橙色预警(报警):项目经理立即到位,启动应急预案,必要时暂停掌子面开挖,采取加固措施,监测频率提高至1次/2小时,并报告监理。红色预警(控制):全面停止施工,撤离危险区人员,成立应急指挥部,采取强力工程措施控制变形,同时进行不间断实时监测。

借助这一监测预警体系,施工单位能够实现对软弱围岩隧道施工安全风险的“全天候、数字化、可追溯”精准管控。

1.4 应急实战演练,强化灾变处置能力

应急管理是软弱围岩隧道施工安全风险管控的最后一道防线,其实效性直接决定了灾变后果的严重程度。施工单位要严格遵循《生产安全事故应急预案管理办法》(应急管理部令第2号),建立“基于情景、聚焦实战、动态优化”的应急能力建设体系,保证在突发塌方、涌水、变形失稳等险情时,能够实现快速、科学的应急处置。

施工单位需要依据隧道不同施工阶段及主要风险类型,编制针对性的《专项应急处置情景脚本》。脚本要明确灾变征兆、预警信号等。接着,施工单位每季度至少组织一次综合性实战演练,由项目部应急指挥部在不预先通知的情况下,随机触发模拟险情。演练需完整覆盖施工全链条。最后,要建立“演练—评估—修订”的闭环提高机制。每次演练后,施工单位要立即组织复盘评估会,依据演练记录与评估表,对标《生产经营单位生产安全事故应急预案评估指南》的要求,查找预案缺陷、协调漏洞与操作短板。评估结论要在一周内形成正式的《应急预案修订建议书》,并完成对预案文本、资源配置与培训方案的迭代更新。

借助这一应急实战锤炼,能够将应急响应能力固化为项目组织的核心韧性,保证施工单位在真实的灾变面前能够迅速启动、高效执行,最大限度降低伤亡损失。

2 结束语

软弱围岩隧道施工安全风险管理是工程建设顺利推进的技术保证,体现着现代隧道工程安全理念。未来,施工单位要更加注重风险管理的前瞻性,依托精细化勘察成果,推动施工风险识别、动态评估与过程控制的深度融合,并加强多专业协同管理,提高风险应对的科学性,从而推动隧道工程向安全高质量方向发展。

参考文献:

- [1] 毛立厦.软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管控[J].科技创新与生产力,2025,46(10):81-84.
- [2] 刘亚枫.软弱围岩隧道施工安全风险管控研究[J].现代工程科技,2025,04(05):165-168.
- [3] 刘宁.软弱围岩隧道施工安全风险管控分析[J].工程技术研究,2025,10(08):150-152.
- [4] 吕宏宇,李琳.隧道施工安全风险评估及防控措施研究:以晋阳高速牛王山隧道工程为例[J].工程技术研究,2025,10(07):146-148,191.
- [5] 方义清.软弱围岩隧道施工安全风险管控分析[J].工程建设与设计,2022(04):206-209.

河道整治施工中泥沙与沉积物处理技术探讨

司晓磊¹, 杨 婧²

(1. 山东黄河水务局山东黄河服务中心, 山东 济南 250013;

2. 山东黄河勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要 河道整治属于保证水域正常功能、维持水生态系统健康稳定的基本性工程, 在整个施工期间, 对于泥沙及沉积物实施科学处理并加以全面控制, 直接关系到工程建设成果是否优良、生态保护成效能否达到预期目标。本文首先阐述基本技术原则, 其次对物理处理技术、化学处理技术和生态化处理技术的应用逻辑、适用场景条件和具体实施操作要点进行梳理, 最后选择适配技术, 旨在达到泥沙及沉积物处置和资源化利用的目的, 推进河道整治工作实现工程建设效益、生态效益和社会综合效益三者之间的协调统一, 为持续改善水域环境质量、创建长效治理机制提供有益参考。

关键词 河道整治; 沉积物处置; 生态效益

中图分类号: TV851

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.029

0 引言

河道是维系区域水循环系统的重要线性生态廊道, 具有行洪排涝、水资源调配、生态涵养、景观营造等多种功能, 在城乡可持续发展和生态环境保护中起着不可替代的战略性支撑作用。河道综合治理施工过程中, 泥沙不断淤积、底泥沉积物的科学处理, 是工程规划、建设实施、后期运维等各个环节中不可缺少的重要部分, 其效果的好坏会直接影响到环境保护质量、河道长期运行功能稳定性和维护成本。河道整治工程要将河道整治的各个部分清除、处理、稳定化、再生利用等全过程进行一体化的协同推进, 才能达到河道整治工程综合效益和长期稳定运行的目的。近年来, 由于流域来沙发生改变以及人类活动的干扰, 一些河段泥沙淤积状况变得愈加严重, 河床不断上升, 过流能力减弱, 底泥里的污染物累积情况愈发明显, 这些都会对河道的行洪安全以及水生态健康造成直接的影响。因此, 在工程实际中科学选择、灵活使用泥沙和沉积物处理技术, 成为河道整治施工组织和质量控制的重要环节。基于此, 本文对三种处理技术的应用情况进行分析, 以期同类工程提供借鉴。

1 河道整治施工中泥沙与沉积物处理技术原则

1.1 生态保护性原则

在治理河道泥沙和沉积物的全过程、全方位工作中, 生态保护的根本性原则是最根本的指导思想和

行动纲领, 必须贯穿于从前期科学规划和方案设计、中期现场精细化施工组织到后期沉积物最终安全处置和生态修复的每一个具体阶段和操作环节中。该原则要求在所有的实际施工和处理过程中, 应采取最谨慎、最精细、最环保的操作理念和技术手段, 尽量减少和消除对天然水体原有水质状况、河床底部多种生物群落及其生存环境、河道两岸坡地自然植被系统和生态景观所产生的各种人为干扰和负面影响, 从源头上牢牢守住水生态环境安全底线和脆弱平衡, 保证水生态环境整体健康状态和长期可持续发展能力^[1]。展开来说, 在进行具体的清淤或者处理作业的时候, 必须严格防范并绝对禁止使用大范围、高强度的机械搅动方式扰动底泥, 使底泥中长期封存和积累的重金属、营养盐等污染物大量、集中地释放到上覆水体中, 引起水质急剧恶化; 同时必须对施工全过程产生的粉尘扬散、泥浆溢流、设备冲洗废水等二次污染源实行全过程的严密监控和高效管理, 采用围挡、覆盖、沉淀、回收等措施, 防止这些污染物对作业区域周边乃至更广范围内的表层土壤结构、肥力、浅层地下水环境产生叠加性的新污染和生态破坏。对经过系统监测已经确定含有超标重金属、持久性有机污染物或者其他有害物质的沉积物, 必须采取更加严格、等级更高的专项处置和管理方案, 即全程管道密闭式输送、进入专用场地进行封闭化稳定化处理, 配合高标准、多重屏障的防渗衬垫和防护隔离措施, 从根本上阻断污染物

作者简介: 司晓磊 (1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 基建工程项目建设与管理。

随地表径流、地下水渗滤或者大气扩散等途径向周边环境 and 生态系统迁移、扩散的所有潜在风险路径。在安全、高效地完成河道疏浚清淤和内源污染治理这一主要工程任务的同时,还要能真实、有效地维护、恢复和促进河道自身以及相关生态系统结构完整、功能稳定、长期良性循环和自然演替的能力。

1.2 施工适配性原则

在处理河道内泥沙和沉积物的时候,要考虑到具体河道水文情况、地形地貌实际情况、淤积状况具体表现、现场施工环境复杂程度等各方面因素,经过全面分析和慎重考虑,选择与之相匹配、切实可行的技术方案和作业方法。不同的河段由于地质构造、流域特点等的不同,水流速度、流量变化、水位季节性变化等水文条件也存在着较大的差别,沉积物的粒径分布、密度大小、矿物组成和黏性等物理化学性质也不尽相同。因此所用的处理工艺应该具有很强的适应性和灵活性,不能固守一种模式,而应该根据不同的河段实际情况动态地、有目的地进行调整和精细化的优化^[2]。必须杜绝盲目套用固定模式或者采取“一刀切”简单化的方式,才能从根本上保证整个施工过程具有良好的可操作性、保持连续性、保证工程整体安全可靠。同时,该原则要求在作业全过程(前期准备、中间过程、最后结束)中,把作业效率水平、所用机械设备的适用性、现场施工管理的协调性、流畅性等各方面综合考虑进去,保证从最初的清淤挖掘、中间的泥沙输送转运、最后的处置或者资源化利用等每一个环节都能无缝对接、高效运转。这是提高单点作业效率的要求,也是为了达到河道综合整治工程对整体施工进度控制和施工质量标准的高要求。该原则最终的目的是使施工安全控制和高效处置推进两者之间达到协同、统一。在保证施工人员、机械设备、周边生态环境安全的基础上,根据科学规划、精细管理的原则,最大限度地提高河道泥沙资源化利用(填筑、建材)、无害化处理(安全堆放、覆土绿化)的综合效益,实现工程效益、环境效益和社会效益的共赢。

2 河道整治施工中泥沙与沉积物处理技术

2.1 物理处理技术

物理处理技术是河道泥沙、沉积物处理过程中不可缺少的基础性方法,它利用各种类型的专门工程机械设备以及相关的物理作用力和效应,对泥沙实施系统的、连续的清除、输送、脱水、固液分离等一系列的标准操作。由于该技术原理简单、适应性强,因此具有很强的实用性,在具体的操作过程中,具有操作

简便、易于大规模推广等特点^[3]。在实际工程应用中,使用先进的疏浚设备,如精准控制型绞吸式或者耙吸式挖泥船,可以有效地清除河道底部厚厚的泥沙层,操作人员按照事先设定好的参数,对清挖的深度、平面范围、边坡形态进行精确的控制,在最大程度上减小了对河床原有底泥结构的物理扰动,有效地抑制了由于挖掘作业引起的悬浮颗粒物扩散,保持了河道水体的即时清澈度。清理出的高含水率泥沙混合物先经过预先铺设的封闭式管道系统进行压力输送,或者用专门的渣土运输车辆等机械设备将泥沙混合物运到事先规划好的集中处理场地。到达处理场地之后,按照泥沙性质及现场情况,挑选机械压滤脱水、高速离心脱水或者大面积场区自然晾晒干化这些物理脱水方法,其主要目的是大幅度削减泥沙物料的含水率,把泥沙物料由流塑状态转变成半固态或者固态,给泥沙物料后续的临时性安全堆放、长距离经济转运以及资源化综合利用(制砖、填筑材料等)营造出有利的环境并给予极大的方便。清挖、脱水等整个处理过程都是依靠物理作用,没有加入任何化学絮凝剂或者改性药剂,从根本上消除了引入外源化学品造成河道水体二次化学污染的风险,可以快速清除河道内的淤积物,及时恢复河道原有的设计过水能力和标准行洪断面,对保证行洪安全、改善水动力条件有直接的作用。由于其具有环境友好性、处理效率高、技术成熟可靠等优点,所以已经成为各种河道综合整治工程、水生态系统修复项目和大规模清淤疏浚工程中一项被广泛使用的技术。

2.2 化学处理技术

化学处理技术属于一种高效而且前沿的环境工程专业手段,它所针对的是粘附性很强、污染物含量较高并且用传统的物理或者机械方式很难达到有效水分脱除效果的复杂沉积物体系。采用科学投加经过严格筛选和验证的、符合环保要求的专用化学药剂,该技术可以从根本上改变沉积物的物理化学结构和特性,大大提高整体处理工艺的效能和稳定性,从而大幅度提高处置全过程的运行效率,最终得到脱水后的坚实泥饼或者固化块等状态稳定、安全性高的最终产品。在实际工程应用中,专业工程师首先要对目标沉积物做全面细致的分析和评价,根据目标沉积物的具体物理化学组成、污染物种类、污染特征来准确选择和配制不同的药剂系列和配方。药剂筛选、配方设计、使用过程要按照国家生态环境保护相关法律法规、行业技术标准、最佳实践规范来进行,保证环境的合规性、技术的可靠性。工程师要依据实验室小规模试验以及

中试阶段的验证数据,准确算出药剂最佳投加量并制订出科学合理的投加工艺流程,比如用多点均匀投加、分段分批投加或者和沉积物做高强度均质混合等方法。这些精细化、系统化的控制手段,目的在于使药剂和沉积物充分接触、混合,达到预期的化学反应过程,最大程度地提高处理效果,从源头上防止由于药剂投加过多、反应不完全或者产生有害副产物而引起的二次污染问题。化学处理技术需同筛分、离心脱水、压滤等物理机械预处理技术结合起来,形成一套高效的协同组合处理工艺系统。物理化学联用或者多技术集成方式,可以针对高难度、高污染、高含水率沉积物的复杂性,发挥出各自技术的优势,达到优势互补、协同增效的目的,解决这类特殊废物在脱水减量、稳定化、无害化处理过程中的技术难题。最终,该技术全面使用以后,可以对处理工程项目的技术可行性、处理质量保证、运行经济性、长期环境安全性和综合生态友好性等各个方面起到明显的改善作用,从而为解决复杂环境治理问题提供一种可靠的、高效的、可持续的工程化解决方案^[4]。

2.3 生态处理技术

生态处理技术在现代河道治理和生态修复工程中得到系统的应用,该技术体系把现代生态修复的核心理念和科学方法结合起来,既重视对河道内泥沙、沉积物的合理、安全处置,又把这种处置过程同整个河道的生态系统重建、生态功能恢复和长期稳定维护紧密联系起来,在环境治理和生态修复两个目标上实现了同步推进、相互促进的协同增效效果。该技术在实际清淤作业中坚持保护原有河道底栖环境、最小化干扰的原则,依靠细致的调查和评价,有选择地、分区域地进行疏浚,在清除大量淤积物的同时,有意保留那些对于保持生态系统健康起着重要作用的生物栖息地、底质结构以及必要的沉积层,坚决不采用会致使生态基底被彻底破坏、无法恢复的破坏性作业手段。对于清挖出来的、经过系统检测确定为未受污染的泥沙和沉积物,大力提倡和推行就地资源化、循环利用的策略,将其用作河岸边坡绿化工程的种植土层、人工生态湿地构建时的填充基质、局部微地形塑造与景观营造的天然材料等,从而大大减少废弃物外运处置所造成的环境压力和运输成本,实现土方资源的节约和高效再利用,体现循环经济原则^[5]。对受到不同程度污染的沉积物,首先选用环境友好、生态化的处理方法,即利用特定功能微生物的生物降解能力、高效吸附和富集污染物的水生植物或湿生植物的提取净化

作用等自然过程,采用原位修复或者异位处理等多种工程技术相结合的方式,对污染物进行靶向削减和毒性降低,使污染物达到可以利用的状态。同时,在河道治理区域开展系统性的生态营造和修复工程,根据当地的生境条件选择合适的水生、湿生和滨水植物,因地制宜地用植物、天然石材、可降解生态材料等建造多孔透水、利于生物附着的生态护坡、浅滩或潜坝等结构。这些植被在生长过程中会形成发达的根系网络,能够很好地固结岸坡土壤,提高岸坡的抗冲刷能力,防止水土流失,起到长期、稳定的水质净化作用。另外,该种生态结构还可以自然减缓局部水流速度,改善水动力条件,使水体中悬浮颗粒物得到沉降,从机理上有利于抑制河道再次淤积的趋势。

3 结束语

河道整治施工过程中泥沙和沉积物处理属于工程技术与生态保护相结合的综合工作,必须坚持生态保护、施工适配两个基本原则,才能科学地进行处置作业。物理处理、化学处理、生态处理三种技术各具优势,根据河道实际情况灵活使用、互相配合,达到安全处置、高效治理、生态友好的目的。随着水利工程生态化的发展,泥沙及沉积物的处理越来越注重绿色低碳、资源循环、长效运维,不断改进技术工艺、加强施工控制,可提高河道整治质量,保护水域生态环境,发挥河道综合功能,促进生态水利建设高质量发展。同时,还要加快智能化监测和信息化管理手段在清淤疏浚施工中的应用,根据实时水位、流量、淤积监测数据来动态调整施工调度;重视培育泥沙沉积物资源化利用产业链,促使处理产物由“无害处置”变为“循环利用”。未来还要在技术经济评价、环境效益核算等各方面做进一步的研究,给河道整治工程高质量发展提供科学、系统的技术支持。

参考文献:

- [1] 李华福,程琳.基于生态环境保护的河道整治工程研究[J].皮革制作与环保科技,2025,06(09):117-119.
- [2] 张盼.浅谈中小河道清淤疏浚施工工艺[J].科技与创新,2025(06):142-143,151.
- [3] 孔瀚彬.河道整治中水污染治理研究[J].价值工程,2025,44(19):123-125.
- [4] 林立婷.闽江河口湿地生态修复对区域生态效益影响评估[J].生态与资源,2025(12):85-87.
- [5] 孙赞盈,刘彦晖,尚红霞,等.黄河水库河道泥沙跨年接续调节技术实践[J].人民黄河,2023,45(11):34-38.

复杂工况下模板支撑体系 施工技术及安全管理

章晶如

(铜陵有色金属集团铜冠建筑安装股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要 随着建筑规模的不断扩大与结构形式的日趋复杂, 模板支撑体系作为混凝土结构施工中的关键临时承载系统, 其安全性与稳定性直接决定了工程的质量与施工安全。本文针对复杂工况下模板支撑体系面临的普遍性技术挑战, 如高大空间结构、超重荷载构件、受限施工环境及复杂地基条件等, 系统性地探讨了相应的施工技术对策。从支撑体系的选型原则、关键构造加强措施以及全过程安全管理框架的建立等方面进行了深入分析, 重点论述了从方案编制、过程监控到监测预警的动态管理路径, 旨在为同类复杂条件下的模板支撑工程施工提供技术参考与安全管理思路。

关键词 复杂工况; 模板支撑体系; 高大空间组合支撑体系技术; 安全管理; 高支模

中图分类号: TU755.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.030

0 引言

随着城市化进程的深入, 建筑工程的功能需求和美学追求不断提升, 导致建筑结构呈现出超高、大跨、重载以及异形化的发展趋势。这种复杂性直接投射到施工过程中, 使得作为混凝土结构成型载体的模板支撑体系面临着前所未有的严峻工况^[1]。无论是超高空间(高支模)的架体稳定性问题, 还是超重构件的局部承压风险, 抑或是受限空间内的支模难题, 以及复杂地基可能引发的不均匀沉降, 都对支撑体系的设计、施工与管理提出了极高的要求。传统的、基于理想化静力假设的模板支撑设计方法, 在面对施工过程中荷载的动态分布、结构体系的非线性变形以及环境因素的随机干扰时, 往往显得力不从心^[2]。安全事故的偶发, 暴露出从技术方案到现场执行, 从材料管控到监测预警等环节可能存在的系统性风险。因此, 深入研究复杂工况下模板支撑体系的针对性施工技术与全过程动态安全管理策略, 对于提升建筑工程的整体技术水平、保障人民生命财产安全具有至关重要的意义。

1 复杂工况下模板支撑体系面临的技术挑战

复杂工况对模板支撑体系的挑战主要体现在以下几个方面。(1) 高大空间结构支撑挑战: 当建筑层高超过 8 m 或跨度超过 18 m 时, 即形成高支模区域。此类工况下, 架体的长细比增大, 整体稳定性成为核心

问题。立杆的稳定性计算、水平约束的不足以及风荷载等水平作用的影响, 极易引发架体整体失稳坍塌^[3]。

(2) 超重荷载构件支撑挑战: 大截面梁、厚板等超重构件的出现, 导致支撑体系需承受极高的竖向荷载。荷载的局部集中效应显著, 要求支撑立杆具有极高的承载能力, 且必须确保荷载能够通过有效的传递路径扩散至地基, 任何节点的薄弱都可能导致局部压溃, 进而引发连锁反应。(3) 受限空间作业挑战: 地下室肥槽、核心筒内等空间狭窄区域, 常规的钢管架体难以搭设或无法形成完整的拉结体系。单侧支模、悬挑支撑等特殊工艺的引入, 改变了传统的传力路径, 对支撑节点的设计与施工精度提出了更高要求。(4) 复杂地基条件影响: 当支撑体系搭设于回填土、软弱土层或地质差异较大的基础上时, 地基的不均匀沉降将成为最大的安全隐患。这种沉降可能导致架体产生附加应力、杆件变形甚至节点破坏, 严重削弱整个支撑系统的承载能力与稳定性。

2 基于复杂工况的模板支撑体系施工技术分析

2.1 高大空间组合支撑体系技术

对于高大空间结构而言, 采用单一的满堂脚手架支撑方案往往因其用钢量巨大、整体稳定性难以充分保证而并非最经济合理的选择。在工程实践中, 更优的做法是采用一种组合式支撑体系, 以有效提升整个

作者简介: 章晶如(1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

系统的安全性与经济性。该体系的核心设计思路在于,通过下部基础支撑与上部荷载转换结构的协同工作,实现受力性能的优化。具体而言,下部可选用具有自锁功能和可靠斜杆加强体系的承插型盘扣式钢管支架,其立杆间距通常可按 900 mm×900 mm 或 600 mm×900 mm 进行布置,水平步距宜严格控制在 1.5 m 以内,借此发挥该体系自身良好的整体稳定性,构建一个坚实的底部承载平台。为进一步降低高支模架体的重心并减轻其自重,可在架体中部或顶部设置一道由型钢构成的主次梁转换平台。这一平台能够将上部结构施工过程中产生的各类荷载更均匀地分散传递至下部支撑架体,有效避免荷载过度集中于高耸立杆的顶端区域,从而显著增强整个支撑系统的空间刚度与整体抗侧移能力,确保施工安全与结构稳定。

2.2 超重梁局部加强支撑技术

针对线荷载超过 20 kN/m 甚至 30 kN/m 的超重梁,必须突破常规的满堂布置思维,对梁底进行专项设计与独立加强。首先,需通过精确的结构力学计算,确定梁底立杆的实际轴力,并据此对立杆进行单独加密布置。例如:可采用规格不小于 48.3×3.6 的高强度盘扣式钢管,将梁底立杆间距压缩至 300 mm×600 mm 甚至更密。其次,为保证荷载均匀传递,应在梁底设置通长的双拼工字钢或槽钢作为托梁,将梁荷载均匀分配至下部加密立杆,避免局部应力集中。最后,必须将梁底加密区域的立杆与板下普通区域的立杆通过纵横水平杆和竖向剪刀撑进行可靠连接,使整个支撑系统形成整体空间受力体系,防止加密区因刚度突变而成为薄弱环节。对于节点复杂的梁柱核心区,可采用定制钢模替代传统木模,以抵抗巨大侧压力,确保成型质量。同时,为进一步提升超重梁支撑体系的稳定性,还需对梁底立杆的基础进行强化处理。通常会在立杆底部设置厚度不小于 10 mm 的钢板作为垫板,垫板下铺设不小于 150 mm 厚的 C20 混凝土垫层,垫层宽度不小于 300 mm,以有效扩散立杆传递的集中荷载,避免地基沉降。对于存在高压缩性土层的地基,还需在垫层下增设砂石褥垫层或灰土挤密桩等处理措施,确保地基承载力满足设计要求。此外,在立杆顶部设置可调节顶托时,顶托螺杆伸出长度不应超过 300 mm,且螺杆外径与立杆内径的间隙需控制在 3 mm 以内,顶托底部应设置 50 mm×100 mm 的木方或型钢,以增大与托梁的接触面积,防止顶托因局部受压过大而失稳。在施工过程中,还需对立杆垂直度进行严格控制,偏差不得大于 1/500 立杆高度,且全高偏差不超过 10 mm,

确保支撑体系在荷载作用下保持稳定的受力状态。

2.3 受限空间单侧支模技术

在无法进行双侧支模的受限空间如地下室外墙,单侧支模技术是有效的解决方案。该技术的核心是构建一个稳定的三角受力体系。通过预埋在基础底板或地梁中的地脚螺栓作为拉结点,利用一组可调斜撑杆将混凝土浇筑时产生的巨大侧压力传递至已施工完成的底板结构上。施工中需严格控制斜撑杆的安装角度通常控制在 45°~60° 之间,确保撑杆与模板主背楞、地脚螺栓的连接牢固可靠。同时,对模板体系本身应进行加强设计,提高其抗弯刚度,以应对单侧受力产生的变形趋势。为保证模板拼缝严密,防止混凝土浇筑时出现漏浆现象,模板面板宜采用 18 mm 厚多层板,板缝处粘贴双面胶条,并在模板内侧设置通长木方作为次背楞,间距控制在 200 mm~250 mm,主背楞则采用双拼 $\Phi 48$ mm×3.5 mm 钢管,间距不大于 600 mm。斜撑杆与主背楞的连接节点应采用双扣件固定,且扣件拧紧扭矩需达到 40 N·m~65 N·m,斜撑杆底部与地脚螺栓的连接应设置厚度不小于 10 mm 的钢垫板,垫板尺寸不小于 100 mm×100 mm,以避免螺栓因局部受力过大而陷入混凝土。此外,为进一步增强体系稳定性,可在模板顶部及中部设置水平拉杆,水平拉杆与斜撑杆形成空间网格结构,水平拉杆的间距不宜大于 1.5 m,且每道水平拉杆均应与两侧已施工结构或可靠支撑点连接。在混凝土浇筑前,需对单侧支模体系进行全面检查,重点检查斜撑角度、扣件拧紧度、模板垂直度及标高,模板垂直度偏差应控制在 3 mm/m 以内,且全高偏差不超过 15 mm,确保在混凝土侧压力作用下模板体系不发生失稳或过大变形。

2.4 复杂地基基础处理技术

当支撑体系搭设于不良地基上时,基础处理是保证整体安全的首要前提。常规技术措施包括:对回填土地基进行强夯或压实处理,提高其密实度和承载力;浇筑厚度不小于 150 mm 的 C20 以上混凝土垫层,形成扩散应力的刚性工作面;在垫层与立杆底座之间铺设通长垫板(槽钢或厚度不小于 50 mm、宽度不小于 200 mm 的木垫板),进一步分散立杆底部集中力。同时,必须设置完善的排水系统,防止雨水或施工用水浸泡地基,导致土体软化。此外,应在关键位置布设沉降观测点,对地基及架体进行全过程变形监测。对于特殊地质条件,如存在淤泥质土、液化土层或溶洞等复杂地基时,需采取针对性处理措施。对于淤泥质土地基,可采用深层搅拌桩、高压旋喷桩等方法形成复合地基,

通过水泥土与原状土的共同作用提高地基承载力；若地基土存在液化风险，则需采用振冲碎石桩或挤密砂桩等方式改善土的排水性能，消除液化隐患。对于溶洞发育区，应先进行地质雷达探测，明确溶洞分布范围及大小，小尺寸溶洞可采用灌浆填充处理，大尺寸溶洞则需采用钢筋混凝土盖板跨越或桩基穿越等方案，确保支撑体系传力路径安全可靠。在地基处理完成后，还需进行承载力检测，静载试验结果应满足支撑体系设计荷载要求，且地基变形量需控制在允许范围内，为模板支撑体系提供坚实的基础保障。

3 模板支撑体系施工安全管理措施分析

3.1 方案管理与技术交底

严格遵循危大工程管理规定，对于超过一定规模的模板支撑工程，必须单独编制专项施工方案，并组织专家论证。方案内容应包含但不限于：工程概况、编制依据、施工计划、施工工艺技术含计算书、施工图、施工安全保证措施、应急预案、监测监控措施等。方案实施前，必须进行多层次、全方位的技术交底^[4]。交底不应流于形式，应利用BIM技术进行三维可视化交底，将复杂的节点构造、搭设顺序、关键参数（立杆间距、步距、自由端长度）直观地呈现给一线作业人员，确保其对技术要求有清晰准确的理解。

3.2 材料验收与过程控制

材料的质量是支撑体系安全的基础。所有进场的钢管、扣件、顶托、型钢等必须严格执行进场验收制度，查验产品质量合格证明文件，并进行外观质量检查，严禁使用裂缝、锈蚀、变形严重的材料。关键受力构件应抽样进行力学性能复验。施工过程控制应推行“样板引路”制度，选取有代表性的区域先行搭设样板架体，经各方联合验收合格后方可全面展开。搭设过程中，应重点把控立杆的垂直度、水平杆的步距、扣件的紧固扭矩、顶托的外露长度不得超过300 mm以及剪刀撑的连续设置。每搭设完成一个楼层高度，应组织一次阶段性验收，发现问题及时整改。

3.3 监测预警与应急管理

建立完善的监测预警系统是实现动态管理的关键。监测方案应针对不同的工况特点，明确监测项目如架体沉降、立杆倾斜、模板位移、地基沉降等、监测点布设位置、监测频率以及预警值。预警值的设定应以规范要求为基础，结合施工工况和结构分析综合确定，通常包含累计变形量和变形速率两项指标。在混凝土浇筑这一最危险阶段，应实施连续不间断监测。当监

测数据接近或超过预警值时，必须立即停止施工，迅速撤离现场作业人员，并启动应急预案，组织专家和技术人员分析原因，制定加固处理措施，消除隐患后方可恢复施工^[6]。

3.4 混凝土浇筑顺序管理

科学的混凝土浇筑顺序是保证支撑体系受力均衡、避免动载冲击的关键。对于超重梁板结构，必须严格执行“分层浇筑、对称浇筑”的原则，严禁集中堆载。应先浇筑竖向结构如柱、墙，待其达到一定强度后，再浇筑水平结构梁、板，利用已建成的竖向结构承担部分水平推力。对于高大空间区域，宜从中间向四周扩展对称浇筑，避免单侧浇筑产生的侧向压力导致架体失稳。在浇筑过程中，需严格控制布料速度和每层浇筑厚度，并安排专人全程巡视，密切观察架体及模板状态，一旦发现异常，立即停止作业。

4 结论

复杂工况下模板支撑体系的施工技术与安全管理是系统性工程。本文研究得出以下结论：一是技术措施需有针对性，针对高大空间、超重构件等不同复杂工况，摒弃单一思维模式，采取“组合支撑体系”等差异化技术方案，解决承载力与稳定性问题；二是全过程控制要精细，安全管理需形成从方案论证到应急响应的完整闭环，注重监测数据实时性与指导性，结合静态验收标准与动态施工过程，有效预控风险；三是结构整体性理念是核心，复杂工况下支撑体系应视为完整空间结构，通过扫地杆等形式形成稳定系统，防范局部破坏引发整体坍塌；四是信息化技术应用是趋势，引入智能监测技术，对架体关键指标实时定量监控，弥补人工检查局限，结合传统力学理论与实时数据流分析，实现更高层次的安全管控。

参考文献：

- [1] 陈英烈. 建筑工程高大模板扣件式钢管支撑体系施工技术[J]. 科学技术创新, 2024(08):147-150.
- [2] 刘俊雄, 张新南. 建筑工程高模板支撑体系的施工技术要点及应用实践[J]. 陶瓷, 2024(04):195-197.
- [3] 苏文博. 高大模板支撑体系在大型公共建筑施工中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(05):81-83.
- [4] 韩彬彬. 高大模板支撑体系施工技术与质量控制安全管理研究[J]. 建筑与装饰, 2024(07):51-53.
- [5] 屈建军. 高大模板支撑体系工程关键安全技术控制[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(01):187-189.

水利水电施工项目管理中的安全风险评估与防控

邹 虎, 吴茂竹

(湖北浩川水利水电工程有限公司, 湖北 武汉 430200)

摘 要 针对大型水枢纽建设中地质环境极端、交叉工序密集导致隐患难以精准预警的问题, 开展施工全周期风险量化评估与主动防御体系研究。采用工作分解结构与风险分解结构(WBS-RBS)耦合矩阵剥离底层危险源, 融合改进的作业条件危险性评价法(LEC), 对深部围岩失稳、大型起重干涉等核心致灾因子进行动态量化分级。依托测算底座, 提出部署深部物联传感矩阵、实施 AI 视觉边缘计算防碰联锁, 以及结合沉浸式体感与射频识别的违章刚性约束三大防控策略。结果表明, 将安全防线由人工经验巡查前置为底层物理数据干预, 可精准斩断复合型灾变链路。本文构建的“动态评估+智能硬管控”闭环机制, 从根本上重塑了复杂工况下的风险抗御模型, 以为同类工程的安全管理提供参考。

关键词 水利水电施工; 安全风险评估; 深部物联传感矩阵; 交叉工序动态管控; 沉浸式体感培训

中图分类号: TV512

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.031

0 引言

水利水电施工项目因其复杂性与高风险性, 对安全管理提出了极高要求。随着工程建设规模不断扩大, 施工环境日益复杂, 安全风险评估与防控成为项目管理的核心问题。为此, 本文打破常规安全排查的表层局限, 旨在构建一套融合多维量化评估与智能物理干预的风险防控体系。借助空间传感矩阵、底层机电联锁技术的引入, 重新建立起隐患识别与阻断的底层逻辑, 以期为实现现场危险源从被动事后应对转变为主主动超前防御的实质性跨越提供参考, 进而为现代大型水利枢纽的高效推进、“零事故”目标给予坚实的理论支持、可复制的实践范式。

1 水利水电施工安全风险的特点与分类

1.1 水利水电施工安全风险的特点

1.1.1 风险因素的复杂性与多样性

水利水电工程的安全风险有着明显的复杂性与多样性, 原因是自然条件和施工作业紧密结合。一方面, 工程所在地区不断变化的水文气象、软弱围岩等不好的地质状况, 构成了具有隐蔽性的基础风险源^[1]。另一方面, 高边坡开挖、深长隧洞爆破、大型机械立体交叉作业等复杂的工序, 直接产生了多个维度的技术隐患。

这种自然环境的不确定性和高难度施工工艺相互交错, 使得现场风险因素不仅类型复杂, 而且致险机制相互嵌套, 实际上增加了隐患精准识别和过程管控的难度。

1.1.2 风险演变的动态性与突发性

水利水电工程建设周期比较长, 而且工序更替频繁, 其安全风险有着明显的演变特征。伴随导截流、洞室开挖等节点逐步推进, 作业环境、结构受力持续发生变化, 危险源也随之出现时空转移。另外, 受到深部地质应力释放或者气象突变的影响, 岩爆、突水、高边坡失稳等险情隐蔽性很强, 预警窗口非常短, 具有很强的突发性。这种风险要素的动态流转和灾变瞬发相互叠加, 对现场管控提出了很高的要求。

1.1.3 事故后果的严重性与广泛性

水利水电工程常常涉及大量水体的调控、高势能的施工作业, 其安全事故所带来的后果具有灾难性、空间延展的特性。若出现围堰溃决、大规模滑坡或者地下洞室群整体坍塌等这类极端险情, 瞬间释放出来的破坏力不但会造成现场人员伤亡、核心设施损毁, 还很容易引发复杂的链式次生灾害^[2]。这种破坏效应通常会突破施工区的边界, 顺着流域朝下游快速蔓延, 进而引发次生洪涝、地质环境恶化, 给区域公共安全、生态系统带来深远且无法挽回的冲击。

作者简介: 邹虎(1976-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 水利水电施工及工程管理。

1.2 水利水电施工安全风险分类

基于系统工程理论,水利水电施工安全风险可解构为自然环境致灾、技术工艺衍生与组织行为偏差三大维度。自然环境风险源自工程区域复杂的边界条件,主要涵盖超标洪水等极端水文气象灾害,以及深部岩爆、软弱围岩变形等隐蔽性地质突变。技术工艺风险伴随高危作业流转而生,集中体现于高陡边坡失稳、长大隧洞群爆破失控,以及特种重型机械在有限空间内的交叉运行干涉。组织行为风险则归因于管理体系失效与个体违章操作,核心涉及现场隐患排查机制断层、多工作面协同指令冲突以及一线人员的盲目施救。这三类风险在施工现场时空维度上深度耦合,共同构成了贯穿项目建设全周期的复合型危险源体系。

2 水利水电施工项目管理中的安全风险评估

在安全风险评估环节,存在评估精度不足的问题。施工项目涉及众多复杂的因素,包括自然环境、施工工艺、设备运行等,而现有的风险评估方法往往难以全面覆盖这些因素。

2.1 评估的重要性

安全风险评估在水利水电施工项目管理当中,是从被动应对转变为主动防御的重要节点。水利工程存在复杂地质条件、多维交叉作业环境,传统经验型管理在隐患识别方面容易出现盲区。系统的风险评估流程可引入定量或者半定量测算模型,对施工全周期里潜在致灾要素深入剖析并剥离出来^[3]。这个过程给管理层输出清晰的风险分级图谱,让现场资金、技术、监管资源能精准投入高危工序和薄弱环节。科学评估结论是制定针对性防范策略和应急预案的底层逻辑,作为阻断危险源转化为现实灾变的核心屏障,从根本上决定了整个工程安全管控模式的运行效能。

2.2 评估流程与方法

在危险源甄别阶段,通常采用工程工作分解结构(WBS)与现场勘查相融合的路径,将庞杂的枢纽标段拆解至微观单项工序。在此基础上,辅助运用安全检查表法(SCL),对照国家强制性规范与行业标准,对深长隧洞、高陡边坡等关键节点的物态缺陷、环境干扰及人员违章迹象进行逐项对照筛查,从而建立全要素的静态风险基础清单。

进入深度量化评估环节后,需根据施工作业特征匹配适用的测算模型。针对动态交叉频繁的现场工序,普遍引入作业条件危险性评价法(LEC),通过对事故发生的可能性(L)、人员暴露于危险环境的频次(E)

以及潜在后果严重度(C)进行严密的经验赋值与乘积推演,半定量地输出底层工序的危险等级得分^[4]。面对受多重自然条件制约的系统级复杂隐患,则常叠加使用风险矩阵法(Risk Matrix),将致灾发生的概率与潜在损失当量置于二维网格坐标系中进行空间比对,从而科学划定重大、较大、一般与低风险的绝对边界。这种复合型评估链路有效对冲了单一经验判断的盲区,为后续针对性调配防范资源打下了坚实的数据基础。

3 水利水电施工项目管理中的安全风险防控策略与措施

3.1 部署深部物联传感矩阵,超前预警地质突变

面对水利水电工程极端复杂的地质环境,传统的表面变形监测已难以满足高应力、大埋深工况下的防灾需求。项目管控必须将防御阵线向围岩深部延伸,依托物联网架构铺设高精度的立体传感矩阵。这种技术路径通过在岩体内部植入多维度的感知触角,能够全天候捕捉应力重分布、孔隙水压波动及微观破裂等先兆信息。海量的底层物理数据经由网络实时穿透地层,直接映射至工程控制中枢,从而将隐蔽且不可测的地质演化过程转化为可视化的预警指标。这种超前介入的机制彻底改变了以往被动应对的局面,从根本上阻断了深部地质缺陷向工程灾变转化的路径。

以某大型抽水蓄能电站深埋地下洞室群的开挖作业为例,该枢纽工程地处高地应力花岗岩地带,深部围岩完整性差且频发脆性剥落。为防范强岩爆及突水突泥风险,项目部在常规地表巡测的基础上,前置部署了微震监测阵列与分布式光纤传感网。技术团队利用超前地质探孔及辅助导洞,在主开挖面外围网格化埋设了数十个高灵敏度低频检波器与智能渗压计,构建起一个包络式的深部监听网络。在引水下斜井推进至一条隐伏断层破碎带前夕,物联中枢连续捕获到微震事件的密集爆发,且能量释放曲线呈现出陡峭的阶跃式上升,同时局部光纤应变数据亦突破了预设的安全阈值^[5]。控制中心的算法模型迅速锁定异常区域,并研判出强岩爆的极高发生概率。现场指挥部接到系统自动触发的红色指令后,果断叫停该掌子面的掘进作业,紧急回撤所有大型台车与施工作业人员。仅数小时后,预警区域的顶拱便发生了剧烈的岩爆及大面积塌方。由于传感矩阵精准捕捉到了岩体失稳前的微观物理量畸变,项目不仅实现了人员的零伤亡避险,更为后续针对性补强长锚索支护体系赢得了宝贵的决策时间。

3.2 实施交叉工序动态管控, 智能干预设备险情

水利水电施工现场常呈现高度集中的立体空间特征, 多工种与重型设备穿插频繁, 静态排班计划难以应对瞬息万变的工序干涉风险。项目管理需建立基于时空维度的动态管控机制, 将安全防线由“人工盯防”向“底层物理干预”转移。通过在核心机械加装环境感知终端与边缘计算模块, 构建毫秒级响应的控制中枢。当设备运行轨迹与周边环境发生高危重叠时, 系统直接绕开人工判断, 瞬时切断动力回路。这种伴随式硬管控制剥离了视觉盲区与反应延迟的不确定性, 从根源上截断了险情演化链路。

以某巨型高拱坝主体的混凝土连续浇筑作业为例, 该作业区重型起重集群密集交织, 上方有跨度超千米的大型缆机运送混凝土料罐, 下方仓面内多台塔机同步进行钢筋与模板吊装, 立体交叉干涉频次极高。常规的对讲机调度极易因操作员疲劳或视线受阻产生指令盲区。为此, 项目部引入基于 UWB 厘米级定位与机电互锁的智能避撞系统。所有重型设备的起重臂、吊钩及料罐均挂载了动态坐标回传基站。在一次夜间仓面浇筑工序中, 一台塔机在调运大型钢结构时, 其主臂回转轨迹无意间侵入了正高速下降的缆机料罐包络线。由于夜间照明存在局部阴影, 双方操作手均未察觉空间冲突。此时, 智能中枢的防碰算法瞬间解算出碰撞交点, 在预计刚蹭前三秒直接越权接管设备控制。塔机回转电机被强制断电锁死, 缆机卷扬系统同步触发急停制动。伴随现场声光警报, 满载料罐最终悬停在距塔机臂架仅 2 米处。整个干预过程完全排除人为反应延迟, 依靠纯粹的机械联锁化解了一起可能导致塔身折断及群死群伤的重大险情, 真正兑现了工序交叉阶段的主动式安全防御。

3.3 创新沉浸式体感培训, 刚性约束违章行为

施工防线常因一线人员的习惯性违章而局部失效, 单纯依靠纸面交底难以触及个体的防范底线。项目管控需引入沉浸式体感交互技术重构培育逻辑。借助力反馈设备与虚拟现实的融合, 将抽象规章转化为直击感官的失重与撞击体验, 强制唤醒作业群体的风险敬畏本能。同步管理端需将违章记录与智能门禁实行底层权限捆绑。利用系统的物理隔离彻底消除试错空间, 使安全规范从被动遵循转化为不可逾越的刚性约束。

以某大型水利枢纽调压井群施工为例, 该区域涉及多处百米级深竖井与高支模作业, 高处坠落风险极高。由于劳务人员流动频繁, 常规说教收效甚微。项

目部搭建了集成六自由度动感平台的体感实训舱, 新进场工人必须穿戴气动反馈背心进入复刻的竖井作业场景。系统预设了未挂靠双保安全带的触发机制, 工人在虚拟空间失足时, 平台会瞬间模拟剧烈失重下坠, 气动背心同步输出胸部勒紧与背部重击的体感反馈。这种逼真的冲击感, 从潜意识层面瓦解了作业人员的侥幸心理。配套体感教育, 项目部在竖井通道口加装了基于 RFID 与视觉识别的硬隔离闸机, 所有全身式安全带均植入有源感应芯片。工人进入高危作业面时, 闸机探头会即时扫描防护装备穿戴完整性及后台资质有效状态。一次夜班作业中, 某支模工人试图未系安全带进入平台, 识别系统当即物理锁死道闸并亮起红灯报警, 违章画面同步直传总控室。这种不留人情余地的机械干预, 彻底切断了人为违规的操作链路。

4 结束语

本文重构了水利水电施工安全管理的底层逻辑。研究发现, 复杂枢纽的安全风险本质上是地质演化、机械运转与人员行为在时空维度上的深度耦合。基于此规律抽象出的“全要素识别—多维度量化”评估模型, 是突破传统经验盲区、实现防范资源精准前置的科学核心。实践论证表明, 将管控策略由表层规章约束转向底层物理干预具有决定性的应用价值: 深部物联传感矩阵能有效洞察地质微观形变, AI 边缘计算直接截断了高危设备的干涉空间, 体感交互与门禁物联则彻底封堵了人员试错的可能, 三者协同闭环了灾害的演化链路。本项研究不仅丰富了大型工程安全动力学的理论框架, 更输出了贴合施工一线的智慧管控范式。未来, 需进一步聚焦数字孪生底座与多模态大模型在施工场域的深度融合, 探索灾害自主决策预演与全域无人化监管体系。

参考文献:

- [1] 朱楚洵. 施工项目管理中的风险评估与控制策略[J]. 砖瓦世界, 2025(20):184-186.
- [2] 廖禄武. 建筑施工安全管理中的风险评估与防控[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(19):37-39.
- [3] 蔡喆. 水利工程项目管理中的风险评估与控制[J]. 中国图片(中英文), 2024(22):68-69.
- [4] 吴恩义. 水利工程项目管理中的风险评估与应对策略研究[J]. 水上安全, 2024(01):155-157.
- [5] 甄楠楠. 水利工程施工中安全风险评估与控制策略分析[J]. 城镇建设, 2025(13):208-210.

智慧城市建设中水利工程信息化管控技术应用探析

王 祥

(枣阳市罗桥水库服务中心, 湖北 枣阳 441200)

摘 要 智慧城市建设和推动了水利工程信息化管控从单点监测向全链条协同管理的转型升级。但在水库除险加固等复杂场景中, 如何实现建管运维一体化仍面临诸多挑战。基于此, 本文以马鞍山水库为对象, 分析面向建管到运维一体化的信息化管控技术路线与落地要点, 旨在为工程建设期到运行期的连续管理与跨部门协同提供可量化的评价框架和可执行的运维保障路径, 同时为类似水库除险加固工程的数字化转型提供参考。

关键词 智慧水利; 数字孪生; 多源感知; 融合通信; 效能评估

中图分类号: TV512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.032

0 引言

马鞍山水库除险加固工程在不停库或限库运行背景下实施, 围堰、基坑开挖、混凝土与金属结构安装等多工序交叉推进, 在复杂地形与多工况并存的水库场景下, 如何将感知、通信、平台与运维有机整合, 仍缺乏可借鉴的工程范例。本文依托马鞍山水库除险加固项目对其信息化管控技术进行探讨具有重要研究意义。

1 工程概况

马鞍山水库位于汉水流域滚河水系沙河支流, 坝址坐落在枣阳市鹿头镇小王庄村, 水库控制流域面积 36.0 km^2 , 总库容 $1\,725 \text{ 万 m}^3$, 调洪库容 640 万 m^3 , 是一座以灌溉、防洪为主, 兼顾养殖等综合效益的中型水利工程。工程中补强信息化短板, 提高水库管理水平成为本次除险加固工程的重点之一。本次水库(水工大坝)除险加固项目的信息化工程建设, 以构建“感知层—通信层—平台层—应用层—运维层”五层全链路信息化管控技术体系为核心目标, 可为后续该场景下的核心技术体系搭建、效能量化评估与全周期运维保障研究明确清晰的工程应用边界与现实问题背景。

2 智慧城市水利工程信息化管控的核心技术体系构建

2.1 多源感知技术的精准适配与部署

马鞍山水库除险加固工程在不停库或限库运行条件下组织施工时, 渗流通道演化、坝体差异变形以及闸门启闭工况失稳等风险更容易在短时间内叠加显化,

因此多源感知的部署需要将工程实体、施工过程以及环境水文作为同一风险链条来开展协同观测, 并将点位布设从经验驱动转向指标驱动。针对坝体、坝基以及防渗墙等关键实体, 将渗压计与渗流量监测作为渗流场的直接表征, 其中渗压计需在上游铺盖、坝踵、坝趾以及廊道邻近部位进行加密设置, 以捕捉水位波动下的渗压响应; 渗流量宜在导排系统、集水井以及下游坡脚出逸点形成连续观测链, 避免仅依靠单点读数造成的误判。

与渗流风险并行的变形风险更依赖时空一致性, GNSS 用于坝顶与关键控制点的平面位移连续采集, 测斜仪与倾角计则布设在坝肩接触带、深厚覆盖层以及高边坡支护段, 将深层侧向位移与表层变形关联起来, 以支撑对滑移趋势与差异沉降的判读; 对可能出现局部拉裂或应力重分配的加固段, 可将应变计布设在新老结构结合部位与受力集中区, 形成对裂缝孕育阶段的间接感知。

环境与水文侧的雨量站、水位计以及下游水位监测共同提供调度与施工窗口判断依据, 同时将视频 AI 巡检作为现场风险的补充感知手段, 使人员闯入、劳动防护穿戴以及临水作业行为可被持续识别并形成事件化记录。为保证数据可用性, 设备在进场阶段需完成计量校准并建立漂移修正参数, 运行阶段结合阈值检核、相邻点相关性检验以及缺测插补策略去处理异常数据; 面向平台汇聚时, 将统一时间戳、统一坐标基准以及元数据要素作为标准化入口, 并同步建立设

作者简介: 王祥(1973-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

备台账, 台账字段覆盖型号、量程、安装高程、维护周期以及责任单位, 从而支撑后续的追溯与运维闭环^[1]。

2.2 融合通信网络的搭建与优化

马鞍山水库除险加固工程的通信组织需要同时面对点位沿坝线与库岸离散分布、山体与建筑物遮挡引起的链路衰减, 以及小包遥测数据与大带宽视频流并存的业务形态, 因此网络架构更适宜将有线稳定性、无线覆盖性以及专网公网的资源弹性进行融合, 以现场可连续施工与汛期高水位波动为现实约束, 将分层汇聚与分域隔离当作主导思路。现场接入层侧重将传感端的接入复杂度压缩到可控范围, 近距离监测点位以 RS485 与工业以太网承载渗压、渗流量以及闸门工况等低时延采集, 分散且供电条件受限的点位则选用 LoRa 与 NB-IoT 完成低功耗遥测回传, 视频监控与视频 AI 终端依靠 4G 与 5G 承担上行带宽需求, 并将编码参数与工点风险等级绑定以降低无效占网^[2]。

边缘汇聚层以边缘网关作为统一入口, 将 Modbus、IEC 相关工业协议以及视频流协议进行转换并开展时间戳对齐, 同时在网关侧配置缓存队列与断点续传机制, 使基坑开挖与围堰区域出现短时失联时仍可维持数据链条连续性。回传层面面向库区到城域资源的衔接, 将 VPN 隧道与政务专线共同作为上送通道, 并将双链路冗余与心跳检测写入路由策略以降低单点中断概率; 中心层部署在云平台或数据中心时, 将接入网段与业务网段进行分区隔离, 并以最小权限原则开展账户与接口授权。进一步观察发现, 调度研判依赖的渗压与位移数据对时延与完整性更敏感, 因此需在网络侧引入业务优先级与 QoS 队列, 将关键监测帧置于高优先级转发通道, 视频则以分级编码与按需拉流方式控制峰值带宽^[3]。

2.3 数字孪生智慧管理平台的开发与应用

结合马鞍山水库库区地形起伏大、监测点位沿坝线与岸坡离散分布的现实情境, 平台总体架构按数据层、模型层、业务层以及应用层展开, 其中数据层将渗压、渗流量、GNSS 位移、测斜以及闸门工况等感知数据与 BIM 模型、库区 DEM 地形、水文调度数据、施工日志与质检资料进行汇聚, 并在入湖前完成统一时间戳、坐标基准以及元数据校验; 模型层以工程对象模型作为统一承载, 将大坝、防渗墙、溢洪道、放水设施以及导排系统映射为可计算实体, 同时将工况模型与风险模型嵌入对象属性, 用于表达水位波动引起的渗压响应、差异变形累积以及闸门启闭异常等状态演化; 业务层将进度、质量、安全、成本以及合同资

料挂接到对象与工点编码, 实现从部位到批次、从人员到设备的关联检索; 应用层以三维场景驾驶舱为入口, 在同一屏面内将位置、状态、告警以及处置联动呈现, 移动端则将巡检、签证、隐蔽验收与影像留痕融入作业流转, 减少纸质资料回填造成的信息滞后^[4]。

数字孪生建模范围覆盖坝体与两岸边坡三维场景, 叠加监测点位的空间标注与时序曲线联动, 使管理人员能够从具体构筑物部位直接定位到对应的监测点、施工工序与质量记录, 并将告警信息回溯到同一部位的历史处置与复核结论。预警与处置闭环在平台内以阈值预警、趋势预警以及多指标联合预警共同驱动, 告警触发后按分级规则形成派单任务, 并将现场复核记录、处置措施、复测结果以及复盘结论写入归档链条, 从而为汛期快速研判与责任追溯提供依据。结合智慧城市协同需求, 平台预留标准化数据共享接口, 将库水位、渗压异常、闸门工况以及视频事件推送至城市防汛与应急平台, 实现跨部门的态势共享与联合调度^[5]。面向马鞍山水库的典型应用, 平台将汛期水库水位与坝踵渗压过程线进行联动展示并输出分级预警, 将关键工序的材料批次、工序参数与验收结论串联成质量追溯链, 将视频 AI 识别的临水作业与穿戴事件关联到工点与班组, 并将设备台账、校准记录以及维保计划纳入闭环管理, 以支撑施工期与运维期的连续衔接, 平台技术架构见图 1。

3 智慧城市水利工程信息化管控的运维保障

运维体系需要将组织与制度作为牵引, 由业主单位牵头形成平台管理员、网络与安全管理、监测专业负责人以及现场运维班组的角色边界, 同时将值守与巡检制度写入工作日历, 使边缘网关在线、传感设备供电、防雷接地以及视频视场遮挡等问题能够被周期性发现; 与此相配套的应急响应 SOP 需覆盖通信中断、关键监测点位离线、闸门工况异常以及平台服务降级等情境, 将告警确认、现场复核、临时旁路采集以及应急会商触发条件固化为流程节点, 从而将响应从个人经验转为制度驱动。

从资产与配置管理角度来看, 平台侧要将设备台账扩展为寿命周期台账, 使传感器量程、安装高程、校准系数、固件版本以及维护周期能够与具体工点编码建立绑定关系, 并将备品备件清单与关键设备分级策略纳入采购与仓储管理, 避免汛期窗口期内因配件缺失造成长时间缺测; 网络与边缘侧的配置则需开展基线管理, 将路由策略、VPN 证书、QoS 规则以及网关协议映射关系沉淀为可追溯版本, 发生调整时同步生

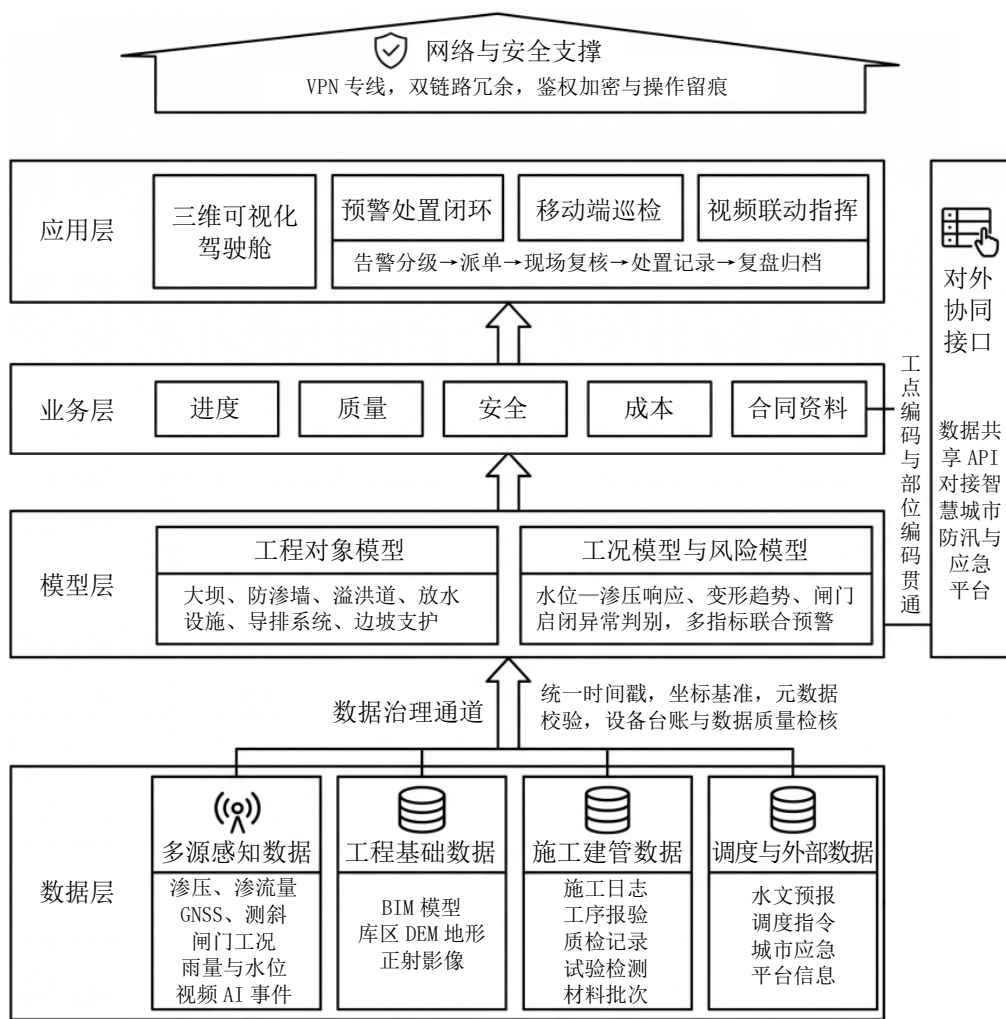


图 1 数字孪生水利工程信息化管控平台总体架构图

成变更记录与回退方案，以降低多承包方协作背景下的误操作风险。

安全保障层面需将漏洞管理与补丁策略纳入例行运维，将传输加密、证书更新、日志审计以及最小权限授权落实到政务云与水利专网的合规要求，同时开展灾备与容灾演练，使数据库备份、对象模型快照以及关键服务的故障切换具备可操作脚本。运维绩效评价宜以系统可用性、MTBF、MTTR、告警处理时限以及工单逾期率作为核心约束，将指标与运维合同及考核挂钩，使运维资源投入与风险水平形成匹配关系。

4 结束语

围绕马鞍山水库除险加固工程的高风险、强扰动与多专业协同特征，本文形成了面向建管到运维一体化的信息化管控框架与可实施路径，可为水库除险加固工程的信息化管控从建设期平滑过渡到运行期提供

方法支撑，同时为智慧城市水利场景的规模化复制与持续运维奠定基础。

参考文献：

- [1] 麻芳. 智慧城市排水防涝系统改造优化创新研究 [J]. 新城建科技, 2025, 34(01): 88-90.
- [2] 雷文云, 郭艳芳. 智慧城市背景下水利水电工程施工中新技术应用与实践探索 [J]. 智慧中国, 2025(04): 114-115.
- [3] 崔益峰. 数字孪生打造“智慧大脑”赋能城市治理的路径探析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(S2): 102-104.
- [4] 廖鋆禾. 智慧城市框架下基于物联网技术的地下管网改造与运维探索 [J]. 广东轻工职业技术大学学报, 2025, 24(06): 20-24.
- [5] 董浩安. 基于数字孪生的城市排水防涝系统设计与实现 [D]. 郑州: 郑州大学, 2025.

高精度定位技术在海洋工程施工监测中的运用分析

刘 尧, 高 涵

(天津水运工程研究院有限公司, 天津 300456)

摘 要 本文系统开展高精度定位技术在海洋工程施工监测领域的应用研究, 针对不同海洋施工作业场景适配对应高精度定位技术方案, 可显著提升监测数据的时空精准度, 为海洋工程整体施工质量与作业安全提供核心技术支撑。当前该技术的工程落地仍面临多重现实挑战, 为充分释放高精度定位技术的应用优势, 需通过技术融合和设备优化等多维度举措, 全面提升技术在海洋复杂工况下的环境适用性与长期运行可靠性, 为保障海洋工程施工全周期的质量安全管理提供技术参考。

关键词 高精度定位技术; 海洋工程; 施工监测; 仿真模型; 数值模拟参数

中图分类号: P229.5; P75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.033

0 引言

高精度定位技术有利于提高海洋工程施工监测水平, 切实保障施工质量和安全性。利用高精度定位技术精准的定位能力, 有利于满足施工要求, 同时可以检测工程结构的变形问题, 引导施工单位快速处理安全隐患。此外, 结合高精度定位技术和其他传感器技术, 完善监测系统, 获取完整、可靠的监测数据。因此, 研究高精度定位技术在海洋工程施工监测中的运用具有重要的意义, 有利于推动海洋工程的可持续发展。

1 高精度定位技术在海洋工程施工监测中的应用场景

1.1 海上平台和施工监测

1.1.1 精准定位平台位置

通过精准定位海上平台, 在满足设计要求的同时有利于提高施工安全性。利用高精度定位技术, 基于北斗卫星导航系统和全球导航卫星系统, 有利于精准定位海上平台的位置。利用实时动态定位和精密单点定位技术, 有利于精准测量海上平台位置。例如: 在深水动力定位石油钻井平台中, 利用北斗卫星导航系统和精密单点定位技术, 有利于提供精准的位置信息, 适应复杂的海洋环境^[1]。此外, 综合利用各种定位技术, 同时利用 GPS 和北斗卫星导航系统等, 有利于提高定位工作的抗干扰能力。利用多系统融合方法, 有利于适应各种恶劣的天气, 为海上平台定位奠定技术基础。

在实际工作中, 高精度卫星钟差和星历误差改正值关系到海上平台定位精度, 通过合理北斗卫星的短报文功能远程传输改正值, 顺利建设远海地区常规地基, 落实差分传输工作。利用北斗卫星的通信功能, 有利于提高定位精度, 同时可以远距离定位监控海上平台。此外, 基于广播星历的高精度单点定位方法, 有利于实现远洋测量工作, 该方法利用拓展卡尔曼滤波处理数据, 同时利用载波相位观测量提高定位精度。

1.1.2 平台结构变形监测

海上平台运行中存在各种影响结果, 因此平台结构很容易出现变形或者损坏问题, 因此施工单位要实时监测海上平台的结构变形^[2]。利用高精度定位技术监测平台结构变形, 如利用 GNSS/声学定位技术构建海洋大地基的基准网, 不仅有利于精准定位海上平台的位置, 而且可以监测平台微小变形, 及时处理施工中的安全隐患。

在实际工作中综合利用高精度定位技术和传感器技术, 有利于提高监测精准性。例如: 综合利用 GNSS 技术和惯性导航系统, 有利于精准监测结构变形问题。此外, 利用北斗卫星的通信作用, 有利于向岸基管理平台实时传输监测数据, 提高远程监控和预警水平。在实际工作中利用北斗卫星通信集成传输方法, 有利于高效交互施工船和基岸管理者的信息, 提高施工管理的信息化, 切实保障施工质量。

作者简介: 刘尧 (1997-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 海洋测绘。

1.2 海底管道铺设监测

1.2.1 管道路径精准控制

在海洋工程中,海底管道铺设发挥了重要的作用,为了保障工程质量和安全性,要精准控制管道路径。在管道铺设中利用高精度定位技术,施工单位可以根据预定路径铺设管道,规避路径偏差问题。例如:利用GNSS/声学定位技术,根据多基站精密星历预报卫星定位差分,同时优化数据链,有利于精准控制管道铺设路径^[3]。此外,利用北斗卫星通信功能,向施工船传输差分信息数据链,有利于提高施工船施工管控的精准性。利用这一方法可以精准铺设管道,同时有利于保障施工效率。

在实际施工中,施工单位要利用高精度定位设备和数据处理技术,精准地控制海底管道路径。例如:利用2 m直径的GNSS浮标对观测数据进行采集,同时利用精密单点定位和动态相对定位方法计算数据,提高海面高测量结果的精准性^[4]。利用这一方法,有利于高精度定位海底管道铺设。此外,利用广播星历的实时高精度单点定位方法,通过拓展卡尔曼滤波处理数据,并利用载波相位观测量,提高定位精度,满足海洋测量需求。

1.2.2 管道沉降和位移监测

管道运行过程中因为各种因素的影响,很容易引发沉降和位移等问题,如果没有及时处理这些问题,将会引发严重的安全事故。利用高精度定位技术有利于提供高时空分辨率的观测数据,精准监测海底管道沉降和位移。例如:利用GNSS浮标技术采集数据,并利用精密单点定位和事后处理动态相对定位方法计算数据,提高海面测量结果的精准性。

在实际工作中,要利用多传感器融合技术监测海底管道沉降和位移,保证监测结果的精准性。例如:结合GNSS技术和声呐技术,有利于适应复杂的海洋环境,精准监测沉降和位移。此外,利用北斗卫星通信,向岸基管理平台实时传输监测数据,发挥远程监控和预警功能;利用北斗卫星的短报文功能播发精密单点定位误差改正数据,在保证精准定位的同时,有利于远距离监测海底管道。因此,利用高精度定位技术,有利于监测海底管道沉降和位移,保障海洋工程运行的安全性。

2 基于高精度定位技术的施工模拟分析确定

2.1 仿真模型构建

建立海洋工程仿真模型,需要保证模型的真实性和全面性。技术人员要综合考虑海洋环境各种影响因

素,如海洋地质和水位条件等,同时结合海洋工程打桩和吊装等工艺流程。模型根据流体力学原理设定船舶运动参数,船舶阻力公式为:

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d \quad (1)$$

式(1)中, ρ 代表海水密度, v 代表船舶速度, S 代表船舶湿表面积, C_d 代表阻力系数。技术人员要结合设备类型和动力系统确定该设备运动参数^[5]。同时,结合材料力学和结构力学确定结构受力参数,综合考虑自重和风载等。

2.2 数值模拟参数设定

在高精度定位相关参数中,定位精度 δ 直接影响了施工精度,定位更新频率对实时性起到直接影响。定位精度误差传播公式为:

$$\Delta x = \delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2 \quad (2)$$

式(2)中, δ_x^2 、 δ_y^2 、 δ_z^2 分别代表三维方向的定位误差,提高更新频率,有利于保证数据的实时性,但是系统负担会由此增加。

针对其他施工参数,技术人员要结合施工进度和设备性能设定施工速度,确定材料性能参数的过程中要结合混凝土强度和钢材屈服强度等标准。

2.3 技术阶段划分

在海洋工程施工中,在基础施工阶段利用高精度定位技术保证桩位的精准性,对定位精度提出较高的要求,有利于稳固基础结构,控制定位误差在 ± 0.02 m范围内。在结构安装中,提高结构件位置的精准性,提高定位更新频率在2 Hz左右,有利于精准安装结构^[6]。在管线铺设施工中,施工单位要对管线位置实时监测,避免干扰其他结构,保证定位精度在0.005 m范围内。

2.4 数值模拟分析

表1为不同定位精度和更新频率的数值模拟结果。

表1 不同定位参数组合下的施工模拟结果

定位精度 δ (m)	更新频率 f (Hz)	施工精度 偏差 Δ (m)	施工效率 提升率 η (%)	安全事故风 险降低率 λ (%)
0.01	1	0.03	10	15
0.01	2	0.02	15	20
0.005	1	0.015	12	18
0.005	2	0.01	18	25

结合模拟结果,发现提高定位精度和更新频率,有利于控制施工精度,并提高施工效率和安全性。结合模拟分析结果,提高施工方案的科学性,在结构安装和管线铺设中利用更加精准和更新频率更高的定位

参数,在保证施工质量的同时,有利于规避施工安全问题。

3 高精度定位技术在海洋工程施工监测中的运用建议

3.1 技术融合

3.1.1 多传感器融合

在海洋工程施工监测中综合利用高精度定位技术和声学定位以及惯性导航等技术,有利于提高定位精度。融合多传感器,将不同传感器的优势充分发挥出来,弥补单一传感器的不足。例如:在水下环境中声学定位技术发挥重要的作用,但是逐渐增加深度之后将会影响其精度。虽然惯性导航系统的位置信息具有连续性特点,但是很容易出现误差积累问题^[7]。因此,综合利用北斗卫星导航系统和传感器,突出定位及体系的层次化和精准性。在深海作业中,综合利用 GNSS 和声学定位技术传递陆海时空基准,同时利用惯性测量单元,有利于实时校正误差问题,保证定位精度达到厘米级甚至毫米级。此外,在多传感器应用中,利用数据融合算法对定位结果合理优化,如利用卡尔曼滤波方法,可以控制噪声的影响,提高整体系统的灵活性。总之,做好技术融合,不仅有利于监测海上平台施工,同时,也为海底管道铺设等工作提供辅助作用。

3.1.2 多系统融合

利用北斗卫星导航系统和其他全球导航卫星系统,有利于提高定位系统的稳定性和抗干扰能力。通过多系统融合,可以将不同系统的优势充分发挥出来,为海洋工程施工提供精准的位置服务。此外,多系统融合可以改善定位几何结构,提供定位精准性。尤其在远海区域很难部署常规地基增强设施,利用多系统融合技术有利于提高定位服务水平,有利于更好地监测海洋工程施工。

3.2 设备优化

3.2.1 抗干扰设备研发

海洋环境中面临着各种影响因素,为优化定位性能,要推广利用抗干扰设备。首先,针对各种极端天气,技术人员要综合利用各种硬件完善改进方案。例如:利用高性能天线材料和防护涂层,有利于增强电磁波信号。同时,优化设计接收机内部电路,提高噪声抵抗能力,适应各种恶劣天气,提高定位精准性。其次,结合海水介质的影响,选用新型信号处理算法,如利用隐嵌信噪比定位技术,结合信号强度变化对海水介质的影响进行分析,优化误差补偿效果。最后,要发

挥 5G 通信技术的作用,远程传输差分信息数据链,优化定位系统使用性能。

3.2.2 提高设备稳定性和可靠性

海洋环境十分复杂,因此需提高高精度定位设备的稳定性和可靠性,有利于提高施工监测水平。技术人员要合理选用设备材料,并提高结构设计的科学性。在材料选择中,保证所选的材料具备耐腐蚀性和耐高温以及抗老化的特点,提高设备耐久性,适应各种复杂的海洋环境^[8]。例如:钛合金材料的机械性能更好,而且具备化学稳定性,适用于制造定位设备的外壳。同时,在结构设计中,利用模块化和密封化理念,有利于降低海水侵蚀问题的发生率。此外,为了应对海洋环境的振动和冲击,技术人员要完善智能减震系统,结合设备运行状态对减震系数合理调整,降低外部环境的干扰。

4 结束语

在海洋工程施工监测中应用高精度定位技术,通过融合数值仿真模拟与现场实测数据验证,工程实践表明该技术应用成效显著。该技术可将海上风电、平台安装等场景的结构就位偏差控制在厘米级精度范围内,在保障施工窗口期作业效率的同时,大幅降低船舶与大型施工设备的待机闲置率。当前该技术虽已形成成熟的工程应用体系,但仍存在复杂海况下信号稳定性不足、水下定位精度衰减等短板,后续技术迭代中需重点突破多源传感器融合算法,提升极端海洋环境下的技术适应性,为海洋工程高质量发展提供核心支撑。

参考文献:

- [1] 陶华.基于北斗卫星导航系统的海洋工程导航技术研究[J].水道港口,2025,46(06):933-941.
- [2] 顾波军,王稼逸,付雨芳.我国海洋工程装备技术测度、时空演化与赶超对策研究[J].浙江海洋大学学报(人文科学版),2025,42(06):1-12.
- [3] 郑齐清,朱海瑞.海洋工程船动力定位系统故障模式与影响分析[J].船舶职业教育,2025,13(04):52-55.
- [4] 李宇健.海洋工程结构无损检测技术的创新与应用研究[J].中国设备工程,2025(09):145-147.
- [5] 隋浩辰.动力定位系统在海洋工程船舶上的应用[J].船舶物资与市场,2024,32(07):71-73.
- [6] 刘林.浅谈国内海洋工程勘察装备短板与发展展望[J].内江科技,2024,45(05):78-79.
- [7] 杨光.海洋工程岩土工程勘察钻探施工及其影响因素探究[J].价值工程,2024,43(13):30-32.
- [8] 蒋昌太,姚煜.水声定位系统在海洋工程中的应用[J].电声技术,2023,47(04):34-37.

机电安装项目施工协调管理分析

——以某厂房光学研制中心机电安装项目为例

钱 泉

(上海剑创信息技术(集团)有限公司, 上海 201802)

摘 要 本文以某厂房光学研制中心机电安装项目为具体案例,探讨了机电安装工程施工中协调管理遇到的问题,系统分析了该项目在实施过程中面临的三项核心挑战:新旧系统的深度集成与对接矛盾、超静音与高洁净环境的协同控制难题,以及突发性重大设计缺陷。针对这些难点,本文详细阐述了所采取的一体化自控架构建立、多学科融合的工艺优化以及极限条件下的原位紧凑化改造等系统性协调管理措施。通过案例分析表明,通过前瞻性的风险识别与创新性的技术管理应对,能够有效保障复杂机电安装工程的质量、安全与进度。

关键词 机电安装; 项目施工; 协调管理

中图分类号: TU758; TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.034

0 引言

机电安装工程作为现代工业设施建设的核心环节,其过程涉及多专业交叉、高技术集成与复杂界面协同,这使得系统性施工协调管理至关重要^[1]。传统的管理模式在应对新旧系统兼容、极端物理环境协同控制及突发性重大设计变更等多维度、复合型界面冲突时,往往力不从心^[2]。某厂房光学研制中心项目在建设中面临的系统深度集成、静音与洁净环境矛盾及配电容量缺陷等挑战,正是此类复杂协调管理难题的集中体现。因此,深入剖析该案例中的协调管理策略与成效,对于构建适应高端制造领域需求的机电安装项目管理体系统具有显著的参考价值。

1 机电安装项目施工协调管理的重要性

机电安装项目施工协调管理的重要性,根植于此类工程的多专业、多系统、多界面高度集成的复杂性特质。其核心价值在于,通过建立系统性的协同机制,有效化解不同专业队伍、各类子系统及建设各阶段之间必然产生的作业冲突、技术矛盾与信息壁垒^[3]。协调管理贯穿于从设计交底、管线综合排布、设备安装调试到联合试运行的全过程,旨在确保土建、电气、暖通、自控等专业在空间、时间与工艺逻辑上无缝衔接。缺乏有效的协调,将直接导致现场返工、工期延误、成本超支乃至系统功能无法实现。因此,协调管理并非辅助性职能,而是保障机电安装工程整体目标达成

的关键性中枢管理活动,其水平直接决定了项目的资源配置效率、技术实现质量与最终交付成果的可靠性。其流程见图1。

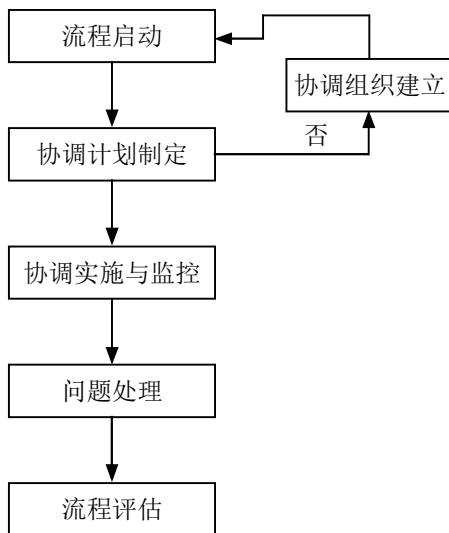


图1 机电安装项目风险管理体系响应流程

2 机电安装项目施工协调管理的难点

2.1 工程概况

某厂房光学研制中心机电安装项目,总建筑面积9 020.96平方米,机电安装工程投资约4 000万元人民币。该项目旨在建设服务于高端光学产品研发与生产的关键基础设施,核心目标为建成一个符合严格洁

作者简介:钱泉(1983-),女,本科,高级工程师,研究方向:机电安装。

净环境标准、具备高度自动化且运行稳定并能满足特殊管理需求的现代化研发平台。

2.2 新旧系统对接

该技术难题的核心在于,新建的该厂房 FMCS 系统与原厂区 FMCS 系统对接、特种气体/化学品系统、高标准洁净室系统等多个独立的专业子系统,深度整合为一个能协调运行的统一体。然而,更大的挑战在于,这个全新构建的集成体系还必须与厂区内已有的动力、配电、自控等旧有基础设施实现安全、稳定、无缝的数据交互与业务逻辑联动。其中存在的潜在风险包括:新旧系统间可能因通信协议不兼容而导致数据无法互通或指令错误;在物理层面,新建的各类管线与厂区原有密集、复杂的管线廊道之间可能存在大量的空间冲突。此外,任何对接环节的疏忽都可能产生监控盲区或系统运行紊乱,直接影响整个研制中心的环境可靠性与生产安全。

2.3 超静音环境与洁净环境的协同控制

超静音隔音室的设计目标中,极高的空气声隔声与撞击声隔声标准,与洁净环境所要求的严格洁净度、特定温湿度及均匀稳定的气流组织之间,存在着物理原理上的内在矛盾。为实现卓越的隔声性能,隔音室必须采用高面密度、高密闭性的围护结构,但这会严重阻碍洁净室赖以维持洁净度的垂直层流或单向流送风,导致送风阻力剧增、气流分布不均,甚至可能因静压失衡而产生涡流与死角。同时,为满足隔声而增设的厚重墙体与多层构造,极大地增加了室内温度与湿度控制的能耗与精度保持难度,空调系统需更大功率运行,而其设备本身产生的振动与噪声又可能反向传导,破坏静音环境。此外,洁净室所需的专用高效送风末端及其维护结构,如何在保证过滤效率与密封性的同时,不成为声桥或振动传递路径,避免削弱整体隔声量,是材料选择与节点构造上的巨大挑战。

2.4 突发重大设计缺陷

项目在实施后期突遇了涉及电气系统核心架构的颠覆性设计缺陷。具体表现为,为关键工艺设备供电的高配间,其内部预设的抽屉柜数量与单元容量,经复核被证实存在严重不足。这种不足并非简单的局部调整即可弥补,而是意味着整个配电系统的冗余度与扩展性在源头设计上就存在根本性误判,无法承载光学研制工艺未来所需的基本电力负荷。此问题直接触发了三重严峻风险。首先,是供电可靠性的即刻威胁。抽屉柜是分配电力的末端关键设备,其容量不足将导致工艺设备无法按计划接入或满负荷运行,使得整个

研制中心的核心功能面临瘫痪可能。其次,引发了连锁性的工程冲突。高配间通常空间局促、管线密布,且与建筑结构、暖通、消防等强相关。若要增容,传统思路必然涉及土建墙体的破拆扩建,这将剧烈扰动已施工完成的周边所有专业系统,引发难以预估的界面冲突、成本激增与工期失控。最后,暴露了前期需求管理与专业协同的深层漏洞。此类基础性、关键容量的设计失误,反映出电气设计与工艺设备需求之间可能存在严重的对接断层或信息传递失真,属于项目前端把控的根本性失误。因此,该缺陷已超越一般技术优化范畴,演变成为一个可能颠覆项目既有进度、成本与最终功能的重大危机。

3 机电安装项目施工协调管理措施

3.1 建立一体化自控架构

针对多系统融合和互联的问题,提出了技术和管理上的整体方案:以 FMCS 为管理中心及指挥中心,实现系统之间的互联互通,打破信息壁垒的整体构想^[4]。具体到技术层面,首先进行了专项的研究,通过对工厂原有自动控制、能源等系统进行逆向解析以及兼容测试,明确老系统数据格式、通信速率、安全边界等内容,并基于试验结果形成了详细的数据接入方案、逻辑交互方案等一系列规划方案,这项计划不仅仅描述了数据流动的路径,而且特别强调包括物理分离和逻辑防火墙在内的一系列双重的安全策略,保证新旧系统之间的数据传递安全性和网络安全性,防止由于协议的不一致或者未经授权的访问而引发的风险。

在物理搭接、空间排布方面充分利用 BIM 技术建立各专业精细度较高的三维综合模型,并基于此模型实现新安装各类管线与厂区内既有密集管道廊架的全面、整体空间干涉检查及管线综合排布^[5]。

为确保上述规定的严格执行以及可复用性工程化的产品资源,有必要对这些技术路径、接口规范、建造流程及试验程序进行全面归纳,并根据工厂设施条件和实装环境进行建设改造工作,解决类似的复杂系统集成关键问题。通过该自顶向下涉及架构设计—技术验证—安全保障—标准落地的完整闭环方法,能够构建强大技术体系与管理机制,来支撑多样、独立系统深度融合和长期运行。

3.2 优化材料配比与施工工艺

在围护结构方面,利用数学和仿真技术来构建一种多层次的系统,该系统包含各种具有不同密度的吸音材质、隔音板以及空气空间。每个部分都是为专门处理特定的频率范围内的声音而设计的,并且都在结

构中进行了精确的设计以防止产生任何形式的声音连接,确保整个系统的声音隔离。在墙内设计一个综合管井,既能够提供高效的通风,又不会影响到它的声学屏障功能和通风功能。

对所有穿越声屏障隔墙的管线、穿墙孔洞及检修门采用柔性连接的方式,均设置具有多道弹簧密封圈的专用法兰,其柔性密封垫可以吸收机器运行中的微小振动而不会形成固体传声通道,同时又能确保长期使用下的气密性及防尘性。这一方案不是一蹴而就完成的,在经历多轮次包括声学、空调、无尘室设计以及建筑工法领域的专家参与讨论的基础上,建立1:1实际样板间并针对不同材料组合、构造节点、整体性能进行了全面的实验验证,实现了由理论到可信产品的跨越,攻克了静音洁净一体化控制关键技术。

3.3 原位紧凑化改造扩容

面对高配间抽屉柜容量严重不足的突发性设计疏漏,项目团队启动了一套高度集成的应急响应与精密作业流程。通过与厂务沟通,确认原高配间是否有备用的可升级替换的抽屉柜,以及其他高配间是否有备用的可升级替换的抽屉两个问题后,通过抽屉柜替换,以及改电力电缆路由的方式解决高配间抽屉柜数量及功率不满足问题,从而满足项目需求。在技术决策层面,团队在四十八小时内密集组织了电气设计专家、资深配电设备供应商及一线施工负责人进行多轮紧急论证。基于对现场空间尺寸、原有柜体结构、母线排布走向及未来负荷需求的精确复核,共同敲定了采用模块化、高功率密度新型抽屉柜单元对原有柜体进行一对一替换与增补的技术路线。该方案要求新设备在保持相同外部安装尺寸的前提下,内部单元布置与电气性能必须实现显著提升,并确保与上下游母线及保护装置的完全兼容,这涉及设备选型、接口改制与保护定值重新整定等一系列连锁技术决策。

4 工程效果

在应对超静音与高洁净度这类存在内在张力的复合性技术指标时,项目实践表明,单纯依赖常规设计或单一专业无法破题。技术负责人的深度介入与系统性创新是根本。这要求从材料物性、结构力学、气流组织及施工工艺等多个维度进行一体化设计与验证。通过组织跨学科专家研讨,借助模拟计算进行前瞻性分析,并严格执行样板引路与性能测试,是确保创新方案(复合隔声墙体与微孔板消声末端结合)从理论构想转化为达标实体的关键路径。这种基于多维度整合与实证的技术攻关模式,是解决尖端领域矛盾性需求的有效方法论。

面对突发性重大设计缺陷所带来的颠覆性风险,应急响应机制的有效性直接决定了项目基线。相关经验揭示,快速决策能力与精密调度能力构成了应急处理的二元核心。快速决策体现在有限时间内完成多方案比选,并果断确定最优替代路径(原位紧凑化改造),其基础在于对技术可行性与资源可获得性的精准预判。精密调度则体现在将解决方案分解为以分钟为计量单位的、环环相扣的作业链,并在一个极短的、不可延时的计划窗口内(4小时停电期)一次性精准执行。这种将危机转化为一次受控的高强度协同作业能力,是化解重大突发风险、实现工期零冲击的核心素养。

在多专业深度交叉、与既有系统需无缝对接的复杂施工环境中,建立前瞻性的协同机制与动态的精细化管控体系是保障精准交付的基础。通过应用建筑信息模型技术,在设计阶段即系统性解决管线综合冲突,是从源头上规避现场返工、提升协同效率的前置性措施。而在执行阶段,尤其面对突发干预时,建立以分钟为单位倒排的调度计划并对接所有相关方,则构成了事中动态管控的坚实保障。项目实践证明,将系统性的前端协同与精准的末端调度相结合,是驾驭高端机电工程复杂性、实现多目标均衡达成的必由之路。

5 结束语

本案例研究表明,复杂机电安装工程的质量、安全与进度目标,高度依赖于系统性的施工协调管理。通过建立一体化自控架构化解了多系统集成风险,通过多学科工艺协同实现了超静音与高洁净的共生目标,并通过应急性的原位改造解决了重大设计缺陷。这些实践凸显了协调管理必须从被动应对转向主动设计,并深度嵌入技术决策与现场执行全流程,是项目成功的核心保障,为同类工程提供了从风险识别、技术协同到组织联动的系统性方法论参考。

参考文献:

- [1] 唐甜甜.机电安装项目施工安全风险管理探究[J].砖瓦,2020(07):126-127.
- [2] 张亚魁.机电安装工程项目施工安全风险管理研究[J].工程技术研究,2020,05(20):154-155.
- [3] 朱必俊.机电安装工程项目的施工风险管理[J].电子技术,2023,52(01):204-205.
- [4] 陈石峰.机电安装工程项目施工安全风险管理探究[J].电气技术与经济,2024(04):262-264,284.
- [5] 朱敏.机电安装项目施工安全风险管理[J].中国建筑装饰装修,2021(03):114-115.

电气自动化控制技术应用研究

周焕挺

(绍兴大明电力设计院有限公司诸暨分公司, 浙江 诸暨 311800)

摘要 电气自动化控制技术是现代工业与智能制造体系的核心支撑, 其应用深度与覆盖广度直接决定工业生产效能、能源消耗水平以及系统整体智能化程度。本文立足于技术落地实践场景, 从工业生产、能源系统、智能建筑三大典型领域切入, 对电气自动化控制技术的应用路径与融合模式展开系统性分析, 重点研究可编程逻辑控制器 (PLC)、分布式控制系统 (DCS)、数据采集与监视控制系统 (SCADA)、AIoT 技术的协同运行机制, 深入探究该类控制技术在流程优化、能耗动态调节、全链路智能管理层面的实际应用价值, 以期对相关领域的技术迭代与应用拓展提供参考。

关键词 电气自动化控制技术; 能源系统; 智能建筑; 协同控制

中图分类号: TM921.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.035

0 引言

在工业数字化、智能化转型的推动下, 电气自动化控制技术已经突破了传统的控制界限, 变成了一种包含感知、决策、执行等各方面综合性的技术体系。从工业生产线精准控制、能源系统高效运行、智能建筑智慧管理, 用硬件设备和软件算法相结合的方式实现了对各种电气系统的自动化、智能化管理。它的主要价值不仅仅是代替人工工作来减轻劳动强度, 也在实时监测、动态调节、协同联动的基础上提高了系统的稳定性、准确性、经济性。

1 电气自动化控制技术在工业生产中的应用

1.1 工业生产的核心控制体系构建

电气自动化控制技术依靠 PLC、DCS 和 SCADA 三者之间的协作来创建起工业生产多层控制结构。PLC 是现场级控制的核心, 具有很高的可靠性以及快速响应的能力, 可以直接和传感器、执行器等终端设备相连, 完成逻辑运算、顺序控制等确定性的任务, 如机械手臂动作的精确控制、反应釜参数的实时调节等; DCS 承担车间级的集中管理功能, 采用“分散控制、集中监视”的方式, 协调各个 PLC 单元的运行, 实现生产流程的全面优化和平稳衔接, 特别适合于化工、冶金等连续流程工业; SCADA 系统可以打破地理上的限制, 对分布在不同区域的生产设施进行数据采集和远程调度, 形成从设备级到企业级的全流程管控网络, 保证生产过程全局可视、可控。

1.2 生产线的自动化协同控制实践

生产线使用电气自动化控制技术, 采用模块化集成和协议兼容的方式实现各个设备、各个工序之间的联动。将 PLC 同数控加工设备、输送机械、检测仪器等紧密融合, 创建起柔性生产控制平台, 可以依照生产任务的变化来改变设备的运行参数和工序衔接的逻辑, 从而达成多品种、小批量的生产目的。同时, 利用工业通信网络把各个生产单元的控制节点连接起来, 使生产数据可以实时共享并且指令同步, 即原材料预处理、部件加工、组装检测等工段的自动化流转, 依靠控制算法的优化调度来缩减工序等待时间, 从而提高生产线整体运行速度。

1.3 生产质量的自动化闭环控制

电气自动化控制技术创建起全流程质量监控体系之后, 就完成了生产质量的自动化闭环控制。在生产过程中, 各种传感器对产品的尺寸、性能参数等各个方面的数据进行采集, 并将采集到的数据传送到控制器上, 由控制器对数据进行分析处理, 根据预设的控制逻辑来判断产品是否符合标准。当检测出质量偏差的时候, 控制系统会自动调节生产设备的运行参数, 比如焊接电流、切割速度等, 从而及时纠正偏差; 对于不合格的产品, 系统会通过执行器触发分拣机制, 把不合格的产品从生产线上分离出去, 防止不合格的产品流入下一道工序。

作者简介: 周焕挺 (1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程线路设计。

2 电气自动化控制在能源系统中的应用

2.1 电力系统的自动化调度与管控

电气自动化控制技术给电力系统安全稳定运行提供主要支持,它涉及发电、输电、配电的全过程。在发电环节,利用分布式控制系统(DCS)对发电机组的运行参数进行精确控制,使燃料供应、燃烧效率和发电功率达到动态匹配的目的,保证发电过程高效稳定。DCS可以将机组保护、顺序控制、模拟量调节等整合起来,提高机组的反应速度和运行可靠性。输电环节中数据采集和监控系统(SCADA)可以对输电线路电压、电流、功率、设备状态等重要参数进行实时监测,利用智能故障诊断算法快速找出线路异常以及潜在风险,再通过自动重合闸、负荷转移、无功补偿等控制手段保证输电网络畅通、电能质量良好。另外,基于广域测量系统(WAMS)的同步相量测量技术也大大提高了电网的动态监测和稳定评价能力。配电环节依靠智能终端(FTU、DTU)和高速通信网络,创建起灵活可靠的配电网自动化系统,可以迅速找到故障点并加以隔离,使非故障区域自动恢复供电,从而大大缩减停电时长,改善配电系统供电可靠性和电能质量。

2.2 新能源发电的协同控制与整合

新能源发电依靠电气自动化控制技术很好地解决了新能源的波动性、间歇性造成的整合问题。根据太阳能、风能等可再生能源发电的特点,将可编程逻辑控制器(PLC)和各种环境传感器配合使用,对光照强度、风速、温度等环境参数进行实时采集,根据采集到的数据动态调节光伏板倾角、方位角、风机桨距角、转速等运行状态,最大限度地捕捉可再生能源。利用先进的储能控制系统(BMS、PCS)和新能源发电设备智能联动,把发电高峰期多余的电能储存在电池、超级电容或者抽水蓄能等储能装置里,在发电量不够或者负荷高峰的时候按照需要释放出来,使电能得以时空平移和削峰填谷,平滑新能源出力曲线。另外,利用统一的场站级或者集控中心级能量管理平台,使新能源发电系统同传统电网可以实现无缝对接并达成协调运行。该平台使用高精度功率预测算法(气象数据和历史出力相结合)和柔性潮流控制技术,提前协调新能源发电和电网负荷的匹配程度,具备低电压穿越、频率支撑等电网友好型控制功能,可以很好地避免新能源大规模、高比例并网给电网稳定性和电能质量带来的影响,为可再生能源的大规模、安全化应用打下了坚实的技术基础。

2.3 能源消费的智能化调控与优化

电气自动化控制技术依靠创建广而深的能源消费监测和调节系统,从而实现能源利用的智能化改善^[1]。在工业生产、商业建筑、园区和家庭等各个能源消费场景中部署智能传感器网络,对空调、照明、电机、生产线等各个用能设备的能耗数据进行实时采集,再将采集到的数据上传到云端或者本地能源管理平台,然后利用人工智能物联网(AIoT)技术对数据进行大数据分析、能效评价和用能模式识别。根据分析结果,智能控制系统可以自动或者半自动地改变设备的运行策略,即对空调系统温度和湿度的设定以及启停的时间进行调整,对照明系统的亮度和开关的时间进行调节,对生产设备的运行负荷和工艺需求进行匹配等,在保证舒适度和生产需要的基础上达到精细化节能的效果。参与电网需求响应(DR)项目的时候,能源管理系统可以同电网调度中心展开信息交流。当电网处在负荷高峰或者供应紧张的时候,控制系统依照预先设定的策略来自动削减或者转移非核心、可中断设备的能耗,或者启用在岸储能设备,优先保证关键负荷的供电,进而助力电网保持平衡,实现能源消费侧和电网运行侧的协同改善^[2]。

3 电气自动化控制在智能建筑中的应用

3.1 建筑机电设备的集中管控

电气自动化控制技术用楼宇自控系统(BAS)对智能建筑的机电设备实施了集中化、自动化控制。该系统把空调、通风、给排水、电梯等各个方面的机电设备的控制模块整合在一起,采用云、边、端三级架构来达到全域协同的目的,即终端层的智能传感器实时采集设备运行数据和环境参数,边缘计算层对数据进行预处理和实时决策,云端管理平台对全局进行监控和策略优化。根据预先设定的控制逻辑以及AI算法,自动调节设备的运行状态,根据室内人员密度改变新风量、根据室外温度调节空调运行参数,达到设备按需运行的目的,从而减少建筑的能耗。系统具有设备自诊断功能,可以对设备的运行状况进行实时监测,并且能及时发出预警信息,对可能出现的故障做出预知性的判断,从而给建筑机电系统的维护工作赋予准确的参照标准,保证整个系统的稳定运转^[3]。

3.2 建筑环境与安全的智能调控

建筑环境与安全控制中,电气自动化控制系统是全方位的智能安全保障系统。利用温湿度传感器、空气质量传感器等感知设备,对室内环境质量进行实时

监测,自动启动通风、净化等设备,营造出舒适的、健康的室内环境;照明系统采用人体感应传感器和光照传感器相结合的方式,人来灯亮、人走灯灭,根据自然光照强度调节照明亮度,达到舒适和节能的目的。在安全防护上,电气自动化控制技术把火灾报警系统、视频监控系统、门禁系统等有机融合起来,当检测到火灾、非法入侵等异常情况的时候,系统就会自动触发报警机制,并且联动相关的设备执行应急措施,比如开启排烟系统、关闭防火门、切断非必要的电源等,从而最大限度地保证建筑内人员和财产的安全^[4]。

3.3 建筑全生命周期的智能化管理

电气自动化控制技术在智能建筑设计、施工、运营的全过程中起着关键的作用,从而达到建筑的智能化管理。在设计阶段,利用 BIM 技术和能耗模拟算法,对电气自动化控制方案进行仿真优化,确定设备的布置和控制方式,提高建筑的能源利用率。在施工阶段,采用预制调试技术和模块化安装的方式,简化了控制设备的安装和调试过程,加快了施工进度。在运营阶段,利用数字孪生技术建立建筑虚拟模型,可以对设备运行状态进行可视化监控和模拟分析,使用机器学习算法预测设备运行趋势,从而优化运维策略,在建筑改造或者拆除时,利用智能标签以及控制网络,对设备元件实施精准的溯源并加以回收利用,从而提升资源利用率。全生命周期的智能化管理使智能建筑朝着高效、低碳、可持续的方向发展^[5]。

4 电气自动化控制技术的融合应用与发展展望

4.1 多技术融合的应用创新

电气自动化控制技术同人工智能、物联网、数字孪生等新兴技术融合之后产生了新的应用形式和创新成果。AI 算法加入后使控制系统具备了自主学习、自主决策的能力,可以利用历史运行数据来改进控制策略,例如用深度学习模型预测出设备的最佳运行参数,从而提高系统的智能化水平,物联网技术冲破了设备之间的信息隔阂,达成跨系统、跨领域的设备互通和数据共享,创建全域协同的控制网络。数字孪生技术经由创建物理系统的虚拟映射,实现控制过程的可视化模拟和预先预估,给控制策略的改良提供精确支撑^[6]。

4.2 应用领域的拓展与深化

随着技术的不断发展,电气自动化控制技术的应用范围也从传统的工业、能源、建筑等各个领域向更多的新兴领域扩展^[7]。智能制造同工业机器人、无人

车间等技术融合起来,实现生产过程的全自动化和智能化。在交通运输方面,用在轨道交通信号控制、电动汽车充电调度等领域来提高交通系统的运行效率和安全性能。在农业方面,用温室环境自动控制、灌溉系统智能调节等方式推进农业生产的现代化转型。同时,在已有应用领域中,技术的应用越来越深入,由单个设备的控制转向了系统级别的优化,由局部控制转向了全域协同的发展方向,给各个行业的高质量发展提供源源不断的动力。

5 结束语

电气自动化控制技术是现代科技发展的重大成果,已经深入工业生产、能源系统、智能建筑等各个重要领域,并且成为推动行业智能化、高效化、低碳化发展的主要力量^[8]。依靠 PLC、DCS、SCADA 等主要控制设备同 AIoT、数字孪生等新技术融合,达成对各种电气系统实施精确管理、协同改善并做出智能决定的目的,在改善生产效能、守护体系稳固以及削减能源耗费方面展现出重要价值。随着技术融合不断加深和应用领域不断扩大,电气自动化控制技术会向着更加智能、更加高效、更加集成的方向发展,给社会经济可持续发展提供更强的技术支持。实践应用时要继续加强技术创新和场景适配,推进控制技术同行业需求深度融合,充分发挥其应用价值,助力各个领域高质量发展。

参考文献:

- [1] 吴霜.电气自动化控制在工厂的应用与发展研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(11):135-137.
- [2] 姜冰,庄福新.基于 PLC 控制技术的汽车电气自动化设备系统研究[J].汽车知识,2025,25(12):83-85.
- [3] 黄源.PLC 控制的水利电气自动化系统集成方案研究[J].水上安全,2025(20):37-39.
- [4] 胡涛.浅析 PLC 在有色冶金工厂电气自动化控制中应用[J].世界有色金属,2025(20):48-50.
- [5] 范子毅,吴海波.PLC 控制技术在汽车电气自动化设备系统中的应用[J].汽车测试报告,2025(15):37-39.
- [6] 田志平.煤矿井下带式输送机 PLC 集控系统研究[J].山东煤炭科技,2024,42(01):90-93,99.
- [7] 李斌,郭自强,高鹏.改进北方苍鹰算法在光伏阵列中应用研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(07):131-139.
- [8] 丁锦,姜文刚.基于拉丁超立方算法的永磁同步电机设计优化[J].电机与控制应用,2023,50(08):66-72.

输变电工程线路施工技术分析

蒋 斌

(四川省明远电力集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 输变电工程线路施工是电力能源网络建设的关键环节, 施工质量、工艺水平直接决定电网运行稳定性与供电可靠性。受野外复杂地形、气候条件、交叉跨越环境等因素影响, 线路施工工序繁杂、技术控制点多, 对现场工艺管控与标准化作业提出极高要求。本文立足于输变电线路施工现场实际, 围绕线路基础施工、杆塔组立、架线施工、竣工验收全流程关键工艺展开剖析, 梳理现阶段施工中常见工艺短板与现场实操难点, 从工序标准化管控、现场工艺优化、安全技术落地、质量全过程把控等角度提出实操性改进方案, 以为同类输变电工程线路现场施工、工艺提质增效提供技术参考。

关键词 输变电工程; 线路施工; 杆塔组立; 架线工艺; 杆塔构件组装

中图分类号: TM721; TM752

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.036

0 引言

山地、丘陵、城乡结合地带等多样施工场地, 给线路基础浇筑、杆塔安装、导线架设等作业带来诸多现场难题。传统粗放式施工模式易出现工艺不规范、工序衔接混乱、隐蔽工程管控缺失等问题。为提升输变电线路施工标准化与精细化水平, 有必要结合现场施工流程, 对核心施工技术、实操要点及优化措施展开系统分析, 保障工程施工质量与建设效率。

1 输变电工程线路前期筹备与基础施工关键技术

1.1 线路施工现场勘察与路径选址把控

输变电线路施工前现场勘察是保障后续施工顺利推进的前置核心工序, 需实地摸排沿线地形地貌、地质构造、植被分布及建筑物、公路、通信线路交叉跨越情况。现场作业人员需采用专业测绘仪器精准采集坐标数据、高程数据, 标注不良地质地段、滑坡隐患点及生态敏感区域位置。结合线路输送容量、电压等级合理优化走线方案, 尽量避开地质灾害易发区与人口密集建筑区, 减少后续施工拆迁工程量与后期运维隐患。勘察过程中同步记录沿线气象规律、季风风向、最大覆冰厚度等参数, 为杆塔基础选型、导线型号选配、施工工期排布提供真实现场依据。严格遵循现场实测、数据留存、方案比对的工作流程, 杜绝仅凭图纸盲目定线, 从源头规避路径选址不合理引发的施工返工与运行安全隐患, 为后续各道施工工序奠定扎实的前期基础。

1.2 线路基础开挖与基坑支护施工工艺

线路杆塔基础开挖需依据地质类别选用人工开挖、机械开挖或爆破开挖方式, 软土、流沙地层需控制开挖坡度, 防止坑壁坍塌^[1]。基坑开挖过程中实时监测坑壁土体稳定性, 遇松散土层及时设置挡板支护、锚杆加固等防护措施, 把控基坑开挖深度、底面尺寸、中心偏移量等关键参数, 杜绝超挖、欠挖现象出现。开挖产生的弃土按指定区域有序堆放, 避免占用施工通道与破坏周边自然环境。基坑成型后及时清理坑底杂物、浮土, 保持基底土层原状结构不受扰动, 若遇地下水渗出采用集水井抽水引流, 保证基底干燥整洁。严格按照施工图纸核对基坑位置与几何尺寸, 做好隐蔽工程影像留存与现场记录, 验收合格后方可进入后续混凝土浇筑工序, 以此保障杆塔基础整体承载性能与沉降控制效果。

1.3 杆塔基础混凝土浇筑与养护作业

基础混凝土浇筑需严格把控原材料配比、骨料粒径、水灰比指标, 现场采用集中搅拌或商混配送模式, 保证混凝土和易性与密实度达标。浇筑过程采用分层下料、分层振捣方式, 振捣棒均匀排布、缓慢插拔, 避免出现漏振、过振引发蜂窝麻面、空洞等质量缺陷。控制浇筑连续作业, 中途不得随意停顿, 防止基础产生施工冷缝影响整体结构强度。浇筑完成后及时做好顶面抹平、收浆压光, 按规范预留基础预埋地脚螺栓, 精准控制螺栓间距、垂直度与外露高度。浇筑结束后依据现场气温条件适时开展洒水养护、覆盖保湿养护,

作者简介: 蒋斌(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输变电管理。

养护周期严格遵守工艺标准,避免阳光直射、低温冻害造成混凝土开裂。全过程落实旁站监督与试件留样检测,以标准化浇筑与养护工艺保障基础结构强度和长期稳定性。

1.4 前期施工物料进场检验与现场布设

施工物料与设备进场是把控线路施工质量的重要关口,钢筋、水泥、砂石、杆塔构件、导线金具等物资进场时,需逐一核出厂合格证、检测报告、规格型号,对关键材料进行抽样复检,不合格物资一律禁止投入现场使用。现场合理规划施工临时道路、材料堆放区、机械停放区与办公生活区,做到分区明确、通道畅通,满足物料转运与机械作业空间需求。水泥、钢筋等易受潮锈蚀物资采取垫高堆放、防雨遮盖措施,导线、绝缘子、金具分类存放妥善防护,防止磕碰损坏与风化老化。大型施工机械进场后完成调试检修与安全检测,确保机械工况满足施工负荷要求。同步布设现场安全防护设施、警示标识,规范临时用电线路排布,从物料质量、现场布局、设备工况多维度做好前期筹备,为线路连续有序施工创造良好现场条件^[2]。

2 输变电工程线路杆塔组立与架线施工核心工艺

2.1 杆塔构件组装与地面拼接施工要点

杆塔进场后按照编号有序摆放,严格依照组装图纸开展地面分片、分段拼接作业,核对构件规格、孔位尺寸、连接螺栓匹配度,杜绝错装、漏装问题发生。组装过程把控构件拼接平整度、整体垂直度,调整塔身节段间隙与拼接错位量,保证构件受力传递均匀顺畅。螺栓安装遵循由内向外、由下至上的紧固顺序,分次对称拧紧,严格控制扭矩标准,防止单侧过紧造成构件变形损伤。铁塔角钢、连接件表面镀锌层若出现轻微破损,及时采用专用防腐涂料修补,避免后期运行中发生锈蚀老化。地面组装完成后全面检查塔身结构尺寸、对角线偏差、构件连接牢固度,做好组装质量自检与互检记录。采用地面整体组装再行起立的作业模式,大幅减少高空作业频次,降低安全风险同时提升杆塔组立整体精度与施工效率,适配野外线路施工的现场作业条件。

2.2 输电杆塔整体起立与就位安装技术

杆塔组立常用抱杆起立、吊车整体吊装等施工方式,需结合场地空间、杆塔重量合理选定作业方案,提前划定施工警戒区域,禁止无关人员进入作业半径范围^[3]。吊装作业前校核吊点位置、钢丝绳受力角度,严格把控吊装重量与机械额定负荷匹配关系,设置临时拉线控制杆塔起立姿态,避免起立过程出现倾斜、扭转。

杆塔起吊至基础上方后缓慢调整位置,精准对位地脚螺栓,平稳落位就位,实时校正塔身中心偏移与垂直度参数。就位后及时紧固基础地脚螺母,加装临时拉线进行稳固支撑,待整体结构受力稳定后再摘除吊装设备。山地狭窄场地作业时优化吊装站位与拉线布置,规避山体遮挡、地形受限带来的施工难题。全过程落实专人指挥、专人监护,规范高空作业操作流程,以精细化吊装就位工艺保障杆塔安装位置精准、结构稳固可靠。

2.3 输电线路导线展放与张力架线工艺

导线架线施工采用张力展放模式,避免导线地面拖拽造成磨损、刮伤,设置牵引场与张力场合理排布施工机具,把控牵引机、张力机运行速度平稳可控。展放过程实时监控导线张力数值,根据跨越公路、铁路、通信线路等工况调整张力参数,做好交叉跨越隔离防护措施,搭设安全防护架防止导线坠落引发安全事故。导线展放完成后及时进行弧垂观测与调整,采用经纬仪、全站仪多点观测,结合气温、档距修正弧垂数值,保证全线弧垂均匀一致,满足电气安全距离与运行受力要求。耐张段导线压接采用液压接续工艺,严格把控压接顺序、压接尺寸与外观质量,压接后检测接续管弯曲度、外观损伤,做好编号记录。张力架线全程保持匀速作业,减少导线振动与额外应力,提升线路架线工艺质量,保障后期输电运行安全稳定。

2.4 线路附件安装与绝缘匹配布设施工

架线完成后开展绝缘子串、防震锤、间隔棒、接地线等附件安装作业,高空作业人员严格遵循安全操作规范,按标准间距精准定位附件安装位置。绝缘子安装前逐片检查瓷瓶、玻璃绝缘子外观,排查裂纹、破损、污渍缺陷,清洁表面杂物保证绝缘性能达标,安装过程保持串体垂直规整,杜绝歪斜受力^[4]。防震锤依照设计距离精准排布,安装夹持牢固防止后期导线微风振动造成疲劳损伤;分裂导线按规范装设间隔棒,控制线间距离均匀稳定,抑制导线次档距振荡。线路接地装置严格依照图纸敷设接地体,把控埋深、敷设长度与焊接质量,焊接部位做好防腐处理,降低接地电阻满足防雷接地技术标准。附件安装完成后逐档核查安装位置、数量、牢固程度,统一工艺标准,完善线路绝缘防护、防雷防护与运行减振能力,夯实线路长期运行基础。

3 输变电线路施工质量管控与现场安全技术保障

3.1 施工现场工序衔接与标准化作业管控

输变电线路施工工序交叉多、流水性强,需合理排布基础、组塔、架线、附件安装各工序施工时序,

做好前后工序衔接交接,避免工序冲突造成工期延误与质量隐患^[5]。推行标准化作业指导书落地,每道工序严格按照工艺流程、操作标准开展现场作业,统一施工手法、参数标准与验收尺度。落实班组自检、工序互检、项目部专检三级检查制度,上一道工序验收不合格严禁进入下一道施工环节,重点强化基坑、基础浇筑、隐蔽工程等关键节点全过程管控。根据野外气候特点灵活调整施工计划,雨天、大风、严寒等恶劣天气暂停高危及混凝土浇筑作业,规避气候因素对施工质量的不利影响。细化现场施工分工,明确各岗位技术职责与质量责任,以工序标准化、管控流程化的方式,全面规范现场作业行为,稳定整体施工工艺水平。

3.2 施工全过程质量隐患排查与缺陷整改

线路施工全过程坚持隐患前置排查理念,围绕基础尺寸、混凝土强度、杆塔垂直度、导线弧垂、附件安装等关键点位开展常态化质量巡查^[6]。针对施工中易出现的基坑超挖、螺栓紧固不到位、弧垂偏差超标、接地体敷设不规范等常见缺陷,建立隐患台账逐项登记、分类梳理、限期整改。安排技术人员现场跟班作业,实时指导实操工艺,及时纠正不规范操作习惯,把质量问题消除在施工初期阶段。对已完成施工段落开展复测复核,核对杆塔位置、档距、高程、电气安全距离等核心数据,发现偏差及时微调校正。缺陷整改完成后实行复查销号制度,留存影像资料与整改记录,形成排查—整改—复查—归档的闭环管理模式。通过常态化隐患排查与精准整改,从施工过程中严控各类质量缺陷,提升工程整体建设品质。

3.3 野外施工安全防护与高空作业技术措施

输变电线路多地处野外山地、丘陵地带,施工环境复杂、高空作业占比高,必须落实全方位安全防护措施^[7]。高空作业人员严格佩戴安全防护用具,遵循登高作业规范,严禁违规攀爬、无防护作业,杆塔作业设置安全防护绳与作业平台,杜绝高空坠落风险。吊装、组塔作业划定专属危险作业区,设置围挡与警示标识,专人值守禁止无关人员闯入。临时用电严格执行三级配电、两级保护规范,线路架空布设、接地可靠,杜绝漏电、短路安全隐患。山地施工排查边坡滑坡、落石隐患,合理规划施工行走路径,避开危险崖壁与松散土体区域。定期开展现场安全技术交底与班前安全教育,针对当日施工内容明确风险点与防控措施,强化作业人员安全操作意识。以完善的防护措施、规范的现场管控,有效防范高空、吊装、用电等各类施工安全事故。

3.4 工程竣工复测、资料整理与验收移交

线路主体施工完成后开展全线竣工复测工作,对杆塔位置、基础沉降、塔身垂直度、导线弧垂、交叉跨越距离、接地电阻等关键指标进行全面复测校验,各项参数必须符合设计规范与行业标准。同步整理全过程施工资料,包含现场勘察记录、隐蔽工程验收记录、材料检测报告、工序验收台账、缺陷整改记录、影像资料等,做到资料完整、数据真实、归档规范。严格按照工程验收标准开展分项、分部及整体竣工验收,验收小组现场核查实体质量与内业资料,对验收提出的问题制定整改方案,限时完成闭环整改^[8]。整改全部合格后完成工程移交手续,同步梳理线路施工工艺亮点与现场实操经验,形成标准化施工经验留存,为后续同类输变电线路工程施工提供工艺借鉴与技术支撑,保障工程顺利投运及后期运维管理有序开展。

4 结束语

规范线路基础浇筑、杆塔吊装、张力架线、附件安装等核心工艺,落实工序标准化作业与全过程质量隐患排查,能够有效规避施工缺陷,提升线路建设品质。同时,强化野外高空作业安全防护、工序衔接管控与竣工复测归档,可全面保障工程施工安全与建设成效。持续优化现场施工工艺、细化过程管控标准,能够不断提升输变电线路施工专业化水平,为电力网架安全稳定运行提供坚实的工程保障。

参考文献:

- [1] 贾瑞波.输变电工程线路施工技术分析[J].电力设备管理,2024(23):225-227.
- [2] 郑旭红.220 kV 输变电工程线路施工技术分析[J].科技创新与应用,2024,14(14):168-171.
- [3] 张国龙.输变电工程线路施工技术分析[J].光源与照明,2024(02):156-158.
- [4] 吴雷.220kV 输变电工程中的线路施工技术分析[J].集成电路应用,2022,39(08):292-294.
- [5] 杨静东.输变电工程线路的施工技术分析[J].电子技术,2021,50(03):78-79.
- [6] 王臻,史晟玮.输变电工程线路施工技术研究[J].仪器仪表标准化与计量,2025(05):26-28.
- [7] 周理聪.输变电工程线路施工技术分析[J].电力系统装备,2024(02):97-98,147.
- [8] 王亚茹.输变电工程线路施工技术应用研究[J].中国设备工程,2023(04):193-195.

矿山机电设备节能降耗控制技术研究

石连喜, 张圣展

(山东鲁泰控股集团有限公司鹿洼煤矿, 山东 济宁 272350)

摘要 矿山现场各类机电设施整体能耗基数大, 空转、空载等闲置运行造成的无效能源损耗问题尤为突出, 现有传统能源管控体系存在覆盖不全、响应滞后等明显短板, 直接制约矿区低碳高质量发展进程。本文全面梳理矿山机电设备实际耗能特征与现存管控痛点, 融合机电装备技术升级、负荷智能动态调配、运维策略精细化调整、富余余能梯级回收利用及内部能效管理机制革新等多维度举措, 构建覆盖全设备、全用能链路的全域节能管控体系, 通过该系列可落地的实操方案系统性优化矿区现场用能结构。经落地验证, 矿区生产用能实际利用率得到显著提升, 生产综合能耗与日常运营开支实现合理压降, 旨在为同类矿山机电用能优化与常态化能效管控提供参考, 助力采掘行业稳步推进低碳转型发展。

关键词 矿山机电设备; 节能降耗; 节能控制技术; 变频节能; 能源回收利用技术

中图分类号: TD607

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.037

0 引言

低碳发展已成为矿业提质发展主流方向, 机电设施作为矿区生产主要耗能源头, 实际运转效能深刻影响经营开支与长远发展潜力。业内多数机电设施存在负载调配不均、设施老化滞后、配套技术欠缺及监管机制缺位等现状, 行业节能提质诉求愈发迫切。结合矿区现场作业实况统筹节能相关技术, 从设施更新、智能调度、日常管护及余热回收层面搭建整体方案, 助力行业优化用能格局并积累实践经验。以矿山机电设备节能降耗技术为对象开展探究, 在分析带式输送机变频节能改造必要性的基础上, 对带式输送机自动节能控制系统设计展开分析, 并对其工程实践应用效果进行探讨, 希望能够为其他矿井相似工程的开展提供借鉴^[1]。

1 矿山机电设备能耗特性与节能降耗核心诉求

1.1 矿山机电设备类型及能耗分布特征

矿区机电设施贯通采掘输送通风排水供电提升各类核心作业环节, 各类设施运转模式与承载状态存有不同差异, 整体用能格局呈现聚集起伏且资源耗损偏大的实际状态。输送设施长期保持不间断作业状态, 物料流转起伏改变运转状态造成空转低载现象频发, 电力资源实际利用水准始终偏低, 通风排水设施按极限工况完成选型布设, 日常运转难以贴合现场实际需求, 多余能源消耗占比居高不下, 采掘提升设施随作

业节奏间断启停, 工况切换阶段极易形成额外能源损耗, 各类设施未能贴合现场工况灵活调整, 用能布局脱离实际作业需求也成为节能管控关键所在。

1.2 机电设备能耗与生产效率的关联机制

矿区机电设施用能情况和作业产出效率存在紧密联动关系, 设施实际运转状态决定产能输出与资源消耗的契合程度。设施承载状态贴合现场作业需求之时, 投入能源均可转化为实际产出, 单位产出耗费资源维持平稳状态, 作业效率与资源利用水准同步向好^[2]。设施长期偏离标准承载区间便会造成资源无端耗费, 无法形成有效产出, 还会拖慢整体作业进度, 运转参数偏离现场环境还会加快部件老化, 增加故障频次, 压缩设施正常作业时长, 合理调配设施运转状态调整承载区间, 缩减多余资源耗费, 可平衡作业效率与节能成效, 构筑平稳协调作业运行模式。

1.3 节能降耗的行业政策要求与经济价值

煤炭产业推进低碳转型与优质发展进程中, 能源管控优化已成为主流发展趋势, 各类行业准则围绕用能提质洁净生产构建完整规范体系, 督促矿区经营主体调整机电设施用能结构, 普及新式节能手段并理顺能源管控模式, 推动现场作业用能标准贴合行业划定范围。相关规制严格落实高耗设备更替工作, 落实新式节能手段布设并搭建实时用能监测模式, 推动矿区完成机电系统整体优化, 搭建长久稳定的用能管控模

作者简介: 石连喜 (1982-), 男, 本科, 高级技师, 研究方向: 煤炭工程、矿山机电与运输。

式。生产运营开支当中,机电设施用能占据较大份额,合理推行用能优化手段能够缩减电力开支与设施养护花销,延缓设施使用年限,减少停工频次,稳固现场作业节奏,压缩整体经营开销,稳固行业市场竞争实力,为企业长久平稳经营筑牢经济根基。

1.4 矿山复杂工况对节能技术的特殊要求

井下开采场地地质环境多变,作业承载状态起伏明显,有限的作业空间也对各类节能应用手段提出更高适配标准。相关节能手段需要顺应物料输送不均荷载实时变动的现场状态,依托灵活调整模式贴合现场运转节奏,保障优化效果稳定发挥。井下设施多保持持续运转状态,各类节能调控方式要保障基础作业流程平稳推进,不可扰乱现场生产秩序与整体作业进度。现场作业易出现空转低载等多种运转状态,相关技术可精准判别荷载变动,完成精准供能调控,井下作业环境还对设施防护性能有着硬性标准,节能调控装置需适配恶劣作业环境,保持运行平稳,贴合原有设施运转架构,缩减改造成本,契合矿区现场多重实际应用条件。

2 现阶段矿山机电设备节能降耗的具体制约因素

2.1 老旧设备能效低下与更新换代滞后

矿区现场存留大批使用年限偏久的机电设施,早年设计思路与制作工艺存在局限,整体运转效能达不到现行行业规范,用能基数偏大且能量转化效率偏弱。老旧设施传动结构与调控组件缺少节能化构思,运转期间各类能量损耗不断增加,长期使用带来的构件老化还会弱化整体运行性能^[3]。企业受资金调配生产排布以及改造时长等条件束缚,设施换新推进速度偏缓,高耗设施清理替换进度缓慢。老旧机型无法对接新式节能调控手段,简易整改也不能彻底改善用能现状,长期维持高耗运转状态,也给矿区整体用能优化工作带来不小阻碍。

2.2 设备运行负荷不均衡与空载损耗严重

矿区机电设施大多依照作业峰值荷载完成定型制作,实际开采进度与产出体量随时产生变动,设施承载状态始终处于浮动变化之中,很难长期维持高效运转区间。各类基础作业设施依照最大作业能力配置构件,产能偏低或是间歇作业阶段极易出现荷载失衡,长时间低负载运转拉低能源实际利用率。诸多井下核心作业设施缺少灵活调荷功能,固定模式持续运转难以贴合现场生产节奏,空转作业情形十分普遍。传统人工管控模式反应速度偏慢,不能精准把控设施启停与功率调配,额外消耗不断增多,增加用电开支的同时也缩短设施正常使用年限。

2.3 节能控制技术适配性差与应用不规范

各类节能调控手段落地矿区现场时常出现适配不足以及实操流程杂乱的情况,直接阻碍节能成效正常发挥。多数相关技术依托普通工业场景研发打造,没有结合井下多粉尘强震动等特殊环境做出调整,和原有设施运转模式难以相融,调控反应迟缓问题时常出现。不少节能整改只针对单一设施开展,缺少全域统筹规划,无法实现整体用能优化,现场实操没有统一执行标准,参数调配仅凭一线人员经验判断。新型调控装置和原有电路防护组件衔接存在疏漏,极易扰乱正常运转秩序,相关实操指导与后期调试工作落实到位,优质节能技术难以长久发挥实际作用。

2.4 运维管理体系不完善与节能监管缺失

矿区机电设施日常管护工作多侧重安全运转与故障检修,针对用能管控的专属管理制度尚未完备,用能监督层面存在诸多疏漏。传统管护模式未将用能标准归入日常巡查与工作考评范畴,设施运转状态及用能实况缺少常态化监测研判,低效运转造成的资源损耗难以及时排查梳理。内部节能职责划分较为模糊,一线作业流程和用能管控标准相互脱节,在岗人员难以树立主动控耗意识。各类用能统计方式存在漏洞,核心设施耗能数据收集不够完备,高耗点位无法精准确定,完整的管控考评模式尚未成型,各类优化举措难以落地落实,也无法搭建起循序渐进的用能优化管理体系。

2.5 能源回收利用技术不足与资源浪费突出

机电设施日常运转期间会产生大量可二次利用能量,相关应用手段欠缺且整体布局不够合理,能量二次复用整体水准偏低,现场资源损耗问题较为突出。设施调速制动以及工况切换阶段生成的各类能量无法完成收集转化,大多以热能形式直接消散,优质能源出现大量流失。通风排水等作业系统产生的各类富余能量缺少成熟收集设备,难以转化为生产可用动能与电力资源。现有生产架构未统筹规划余能利用布局,回收装置和主体设备配合度不足,能量转化效率难以提升,相关实用技术落地进度缓慢,投入回报比例达不到预期,企业推行意愿偏弱,闲置可利用能量持续增多,也阻碍低碳生产模式稳步搭建。

3 矿山机电设备全流程节能降耗控制技术对策

3.1 高效节能型机电设备选型与升级改造

立足于矿区长期生产需求梳理用能优化方向,设备采购环节严守能效评定标准,优选适配井下环境、

能耗更低的实用机型,优化动力构件与控制架构核心配置,从源头削减设备本身能耗。对在用老旧设备划分整改优先级,优先改造高耗高频运转设备,更换低效电机与传统传动结构,搭配低损耗配件减少机械运转带来的能量流失。设备升级过程兼顾新旧设施兼容性能,确保新装部件顺畅对接原有供电及安全防护系统。同步整理设备运行参数与检修台账,建立完备使用资料,为后续设备更新优化提供可靠依据,依托合理选型与定向改造筑牢硬件根基,切实稳步提升各类机电设备实际运行能效。

3.2 智能负荷调控与变频节能技术应用

动态荷载调配搭配变频调控手段,可有效化解矿区设备荷载波动大、空转耗能偏高的实际问题,让设备输出功率贴合现场实际生产需求。依托变频调控搭建智能管控平台,实时采集设备荷载体量、运转速率及物料输送状态,自主调整运转频率与动力转速,摒弃固定运转模式带来的资源损耗。针对持续性运转输送设备搭建联动管控体系,依据实际承载量调配作业设备数量,依照荷载轻重切换运行模式,削减各类无效能源消耗^[4]。结合现场作业环境划定启停界限与调控区间,提升系统反应速度与调控精准度,规避频繁启停损伤设备。

3.3 设备运维优化与能效监测预警系统构建

将用能管控理念融入设备全周期管护流程,依托精细化管护模式推进日常节能工作有序开展。制定统一规范的巡查养护检修流程,重点把控动力部件温度、传动运转效率以及电路运行状态等关键内容,及时处理构件老化、润滑不足等引发耗能上涨的各类问题。搭建覆盖主流耗能设备的线上监测预警平台,实时收集电路运行数据与整体耗能情况,完成全程追踪统计与异常情况提示^[5]。平台可完成耗能数据整理比对与走势预判,精准锁定高耗能点位与低效运转时段,为调整管控方式提供数据依据。划定多层次异常判定标准,设备耗能偏离合理区间即可自动推送提示信息,便于管护人员及时处置,依托监测研判调整优化形成完整管理流程,持续稳步改善设备整体运转效能。

3.4 余能回收利用技术研发与工程化应用

深挖设备运转过程中散失的各类富余能量,借助能量回收转化手段拓宽矿区节能发展空间。设备调速制动以及工况切换期间产生的富余电力,借助回馈装置完成统一收集并入供电线路,供给周边作业设备正常使用,减少电力资源流失。收集通风排水作业流程

中产生的富余压力能,依托专用转化装置转为可用动力与电力资源,完成能量循环二次利用。理顺回收装置与主体设备协同运转逻辑,保障能量收集流程不干扰正常生产秩序,提升能量转化效率与输出平稳性。贴合并下复杂作业环境改良回收设备构造,简化布设流程与后期管护流程,压缩现场落地应用成本。

3.5 节能管理体系完善与标准化管控实施

搭建完备的内部管控机制落实统一规范管理举措,为各类节能技术落地推行以及长期能效优化筑牢制度根基。搭建多层次节能管理组织架构,清晰划定各岗位管控职责与考评细则,将耗能管控指标纳入日常经营考评范畴,调动全体人员参与节能管控工作。制定设备启停调控、日常操作养护检修全套执行准则,规整现场作业操作方式,杜绝人为操作不当引发的资源损耗。搭建分级分类耗能统计核算体系,细化不同区域不同时段设备耗能统计工作,精准梳理各类用能数据。定期开展能效对标研判工作,比对整改前后耗能变化及时调整优化管控方案,常态化组织一线人员开展专业技能学习,依托系统化管理制度与规范化执行流程,为矿区机电设施节能管控工作筑牢长效运行保障。

4 结束语

矿区机电设施节能优化是产业低碳转型与效益提升的重要途径,设施更新迟缓、荷载调配不均、技术贴合度不足及管控机制疏漏等现状,均阻碍整体用能效率提升。依托新型设备升级、变频智能调控、日常运维监测、富余能源回收及规范化管控举措,让设备耗能贴合实际生产状态,从多重层面缩减无用能耗。搭建适配井下作业环境的节能运行架构,稳步强化机电系统运行平稳性与资源利用水平,助力矿区达成安全高效与低碳发展的整体发展目标。

参考文献:

- [1] 李卓睿. 矿山机电设备数字化自动运维平台的构建与实践[J]. 信息与电脑, 2026, 38(06): 162-164.
- [2] 王浩. 矿山机电设备自动化调试技术探讨[J]. 应用能源技术, 2025(12): 4-6.
- [3] 刘立虎. 矿山机电设备自动化调试技术探讨[J]. 中国金属通报, 2025(11): 120-122.
- [4] 李美璐. 变频调速系统在矿山机电设备节能中的应用[J]. 能源与节能, 2025(09): 82-84, 344.
- [5] 崔亮, 孙英文, 李欣庭. 矿山机电设备的节能减排技术研究[J]. 世界有色金属, 2025(08): 232-234.

节能环保约束下机械产品设计优化探究

韩玉岭¹, 张鹏飞², 宋晨华³, 崔健⁴, 郑鑫⁵

(1. 北京源通电力科技有限公司山东分公司, 山东 济南 250002;

2. 烟台富耐克换热器有限公司, 山东 烟台 265215;

3. 潍坊奥司特工贸有限公司, 山东 潍坊 262100;

4. 青岛前湾联合集装箱码头有限公司, 山东 青岛 266000;

5. 青岛得顺电子机械有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 机械产品作为工业生产与装备制造核心载体, 其节能环保性能与设计优化水平直接决定能源利用效率、污染物排放控制及全生命周期绿色发展能力。当前, 该领域存在结构设计冗余、能效匹配不足、材料选型粗放、绿色工艺缺失等问题。为摆脱困境, 需构建“结构轻量化—材料绿色化—能效高效化—工艺低碳化”一体化体系, 通过拓扑优化、节能驱动、循环选材、智能管控及全流程协同等策略, 实现环保约束与产品性能的协同提升, 推动机械装备行业低碳转型与高质量发展。

关键词 节能环保; 机械产品设计; 绿色制造; 轻量化设计

中图分类号: TH122

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.038

0 引言

工业绿色转型持续推进, 机械产品作为装备制造与生产运行的关键基础, 其节能水平与环保性能直接影响行业“双碳”目标实现。而设计优化与节能环保约束的协同适配, 是机械产品研发制造的重点环节, 二者融合效能决定产品能耗水平、环境友好性及市场竞争力。目前, 在机械产品设计过程中存在结构冗余、能耗偏高、材料不可降解、生产排放超标等问题。传统设计模式下重性能轻环保、重成本轻绿色、重功能轻生命周期等短板逐渐显现, 制约行业低碳化、集约化发展^[1]。基于此, 探究节能环保约束下机械产品设计优化路径, 创建科学高效的绿色设计体系, 对于提升能源利用效率、推动装备制造业提质降碳有着重要的理论和实际价值。

1 节能环保约束下机械产品设计优化的必要性

1.1 落实“双碳”战略要求, 筑牢绿色制造根基

机械产品作为工业能耗与排放的重要来源, 其设计阶段的绿色化水平直接决定全生命周期环境影响。设计优化的核心价值在于通过源头结构与参数规划, 规避高能耗、高排放、高耗材的冗余设计, 确保产品全流程符合环保标准; 节能环保约束则为设计全过程提供刚性底线, 使材料选用、结构布局、动力匹配等

要素符合低碳与清洁要求^[2]。二者协同发力, 既能避免因设计缺陷导致的能耗浪费与污染排放, 又能保障产品合规入市, 推动制造体系绿色化与低碳化, 为工业生态安全筑牢基础。在绿色转型加速背景下, 机械产品的环保合规性直接影响产业可持续发展, 设计与节能的精细化管控成为实现低碳制造的关键前提。

1.2 提升能源利用效率, 降低全生命周期成本

机械产品设计涉及结构、材料、动力、工艺等要素繁多, 粗放式设计易引发能耗过高、耗材浪费、运维成本偏高并存的矛盾, 进而推高全生命周期成本。科学的设计优化体系能够基于节能环保目标动态调整结构参数与动力方案, 实现结构轻量化与载荷需求精准匹配、动力系统与运行工况同频适配、材料选用与环保要求动态平衡。而节能环保约束通过明确能耗限值、排放指标、回收要求, 可减少因高能耗设计产生的电费、运维、报废处理等额外费用。二者有机融合, 能够最大化提升能源与资源利用效率, 减少无效投入, 实现产品成本与环境成本的双重管控, 为企业提升市场竞争力提供核心支撑, 符合装备制造领域绿色增效的发展导向。

1.3 严格遵循环保标准, 提升行业竞争能力

机械产品多面向工业生产、工程装备、交通运输等场景, 使用过程中会受到能耗标准、排放法规、环

作者简介: 韩玉岭(1999-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计。

保认证、回收政策等外部约束^[3]，复杂工况与多元标准大大增加了设计难度。设计优化的动态调整机制可以对各类环保新规做出快速响应，通过改进结构、更换材料、优化动力来降低环保合规风险；节能环保约束的刚性要求能够根据行业标准变化，及时升级设计指标，保证产品持续符合市场准入条件。同时，二者推进也能倒逼企业建立绿色设计、绿色制造、绿色回收的全链条管理机制，明晰各环节环保责任边界，提高设计与生产协同效率，不仅可以化解研发制造中的环保风险，而且能促使设计体系规范化升级，提高企业应对严格标准与国际竞争的能力^[4]。

2 节能环保约束下机械产品设计优化现存困境分析

2.1 设计理念偏传统，绿色化融入不足

机械产品设计体系具有显著工程导向性，而当前部分企业设计仍以性能与成本为核心，未能充分融入节能环保理念。设计方案制定阶段对能耗、排放、回收、碳足迹等因素研判不够全面，导致传统结构与绿色需求存在偏差。同时，设计优化体系缺乏环保导向迭代机制，面对新环保标准、低碳技术、节能材料等情况时，无法及时升级结构与参数，进而引发产品能耗超标、环保不达标。此外，环保责任划分模糊，设计、工艺、制造环节存在权责脱节现象，导致节能环保要求难以有效落地，进一步加剧产品环保合规风险。

2.2 结构与能效匹配失衡，节能潜力未释放

结构设计与能效提升协同性不足是当前机械产品设计的突出问题。在结构设计方面，存在拓扑优化不足、冗余构件多、载荷匹配不合理等问题，既增加材料消耗与自重，又提升运行能耗。动力系统设计中，对电机、液压、传动等核心部件能耗特性预判不够精准，功率匹配与运行工况衔接不畅，易引发能效偏低、能耗浪费，影响产品节能水平。材料选用缺乏全生命周期考量，高强度、轻量化、可回收绿色材料应用不足，存在高耗材、难降解、高排放材料使用偏多情况，导致环保性能偏低，无法为节能目标提供有力支撑，同时增加产品全生命周期成本。

2.3 协同设计机制缺失，全流程管控薄弱

机械产品绿色设计涉及设计、工艺、制造、回收、运维等多方主体，需与环保标准、材料供应、检测认证密切协作，但当前缺乏完善的协同优化机制。与环保部门、认证机构的沟通对接存在滞后性，节能认证、环保检测、绿色标识等流程繁杂，延误产品上市周期。在多专业协同设计场景中，缺乏有效协调管理措施，结构、电控、工艺模块衔接不合理，易产生设计冲突，

影响节能效果。同时，对全生命周期环保管控能力不足，面对材料升级、能耗新规、回收要求等变化时，未能制定完善优化方案，导致产品环保性能不足。此外，各环节信息传递不顺畅，缺乏高效数字化设计平台，使得设计优化与节能环保约束调整决策滞后，难以快速响应各类环保需求^[5]。

3 节能环保约束下机械产品设计优化策略

3.1 绿色理念引领设计优化，低碳导向统筹结构与能效

在机械产品绿色转型、节能降碳的核心导向下，企业需以绿色设计为核心抓手，推动设计优化与节能环保约束从分散应对向协同联动转型。优化设计路径，应立足产品全生命周期，打破传统模式中性能设计与环保要求脱节的局限，构建结构优化与节能适配深度融合的设计体系，切实筑牢产品绿色化基础。

企业可搭建“结构轻量化—材料绿色化—能效高效化—管控数字化”四阶设计路径，以环保指标拆解为核心牵引，贯穿结构设计、材料选型、动力匹配、工艺优化等全环节，实现节能水平与产品性能同步提升。企业需建立设计参数与环保指标联动适配机制，将优化目标拆解为结构降重、节能降耗、绿色选材、低碳工艺等具体任务，由研发设计团队牵头推进核心举措落地。例如：在工程机械装备设计中，企业可组建专项设计小组，主导结构拓扑优化与轻量化设计，结合载荷条件与运行工况理顺受力布局。且企业可同步统筹材料、动力、电控等核心要素，兼顾节能目标与运行稳定性，避免出现结构冗余、能耗偏高问题，将设计责任细化到各专业模块与设计人员。

此外，企业需推动设计标准与节能环保体系深度融合，将绿色设计与优化流程纳入产品研发管理制度。在设计过程中，由技术专家组联合工艺制造人员梳理高能耗、高耗材、高排放等痛点，结合机械产品工况复杂、运行能耗大等特点，制定差异化优化方案，形成“方案设计—仿真优化—样机验证—迭代升级”闭环推进机制。为强化优化效能，企业可搭建数字化设计仿真平台，由技术骨干牵头整合结构优化、能效分析、环保评估等功能模块，实现设计参数与能耗指标实时联动，形成标准化设计规范，精准调整结构方案与节能配置，有效规避环保合规风险，全面提升机械产品设计绿色性与高效性。

3.2 锚定节能指标优化结构，按需选材提升环保性能

精准的结构优化与科学的绿色选材，是企业破解机械产品高能耗、高排放、高耗材行业痛点的核心路

径。企业作为产品设计研发主体,需兼顾运行性能与节能环保,破解结构冗余、能效偏低、材料粗放难题,搭建“结构优化—节能驱动—绿色选材—低碳制造”一体化设计体系,筑牢机械产品绿色发展基础。

企业可结合机械产品运行工况,针对性规划结构方案与节能动力配置,整合轻量化材料、高效电控、低碳工艺等核心要素,搭配精细化设计管理模式,兼顾运行效率与环保规范。企业需采用分层设计思路,先完成产品全流程结构拆解,明确各部件受力标准与衔接要求,再结合运行工况与节能目标,统筹优化结构布局、动力选型及材料配置,避免结构冗余与能耗浪费,为节能环保目标提供支撑。

依托设计优化与节能环保协同机理,结合机械产品使用特点,企业可预设多组结构方案与材料组合,覆盖不同载荷强度、能耗水平及环保要求。企业可采用动态优化策略,综合考量运行性能、节能效率及环保安全要求,灵活调整结构参数与材料配比,同步优化设计流程,减少冗余能耗,提升产品整体绿色水平。

而对于重载、连续运行等复杂工况,企业需升级结构与节能设计方案,加强多专业模块协同设计管理,并合理布局动力与传动系统,减少能耗损耗。设计过程以节能达标、环保合规、性能可靠为根本,依靠加强仿真验证、优化衔接结构、动态调整设计方案。以规避高能耗、高排放、高耗材风险,保证设计优化与节能环保约束精准匹配。

3.3 全流程压实设计责任,全域整合绿色资源要素

企业推进机械产品研发设计时,设计优化刚性落地与节能环保精准适配,是保证产品合规入市、提高绿色性能与效益的重要支撑。机械产品受能耗标准、排放限值、环保认证、回收政策等因素影响,能耗超标、环保不合规风险较大,企业应从产品全生命周期出发,从多方面压实设计责任,并整合绿色资源实现精准投放,破解设计瓶颈,筑牢产品绿色推进基础。

企业需以责任分层管控为切入点,搭建全流程绿色设计体系,破解责任虚化、管控脱节难题。构建“项目总控—模块分管—设计执行”三级责任架构,明确各层级岗位职责与环保指标要求,将总环保目标拆解为部件节能、材料绿色、工艺低碳等具体指标,细化到每日设计任务,签订责任状压实到人。同时,建立动态优化机制,依托数字化设计平台实时跟踪仿真数据,对比环保指标排查优化短板,针对薄弱环节制定专项改进方案。例如:针对动力部件能耗偏高,及时优化电控策略、选用高效电机,避免单一模块缺陷影响整体环保性能。

绿色资源整合直接影响设计优化成效,企业需开展全域绿色资源梳理,实现供需精准匹配。在人力资源方面,结合设计需求,配备具备绿色设计、节能优化经验的研发团队,按专业模块划分设计小组,避免人力冗余或能力不足,同时建立绿色技术人才库,应对突发设计优化需求。在材料资源管理方面,提前摸排轻量化、可回收、低排放绿色材料性能与供应周期,结合设计进度制定分级选用与验证计划,如针对工程机械产品,优先选用高强钢、工程塑料、复合材料等轻量化材料,降低自重与能耗,同步搭建材料环保性能动态评估机制,规避高污染、难降解材料使用问题。

同时,企业需强化多维度协同,联动优化设计与环保策略。加强与环保、认证、检测等相关单位沟通对接,提前办理节能认证、环保检测、绿色标识等相关手续,优化设计验证与上市流程,减少外部因素对研发进度干扰。针对多专业协同设计环节,合理调配设计资源与仿真工具,如统筹安排结构优化、能效仿真、环保评估时序,避免设计冲突与资源浪费。

4 结束语

节能环保约束下机械产品设计优化是保障产品绿色性能、控制全生命周期成本、应对行业标准升级的核心环节。当前机械产品设计存在理念滞后、结构能效失衡、协同不足等问题,需通过绿色理念引领、结构轻量化优化、节能驱动、绿色选材及全流程协同等策略破解。构建设计优化与节能环保约束协同联动的一体化管理体系,可有效提升产品绿色性能与能源利用效率,为装备制造业低碳转型与高质量发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 王蒙,高琦,朱春秋,等.价值驱动的机械产品设计过程建模与评估[J].机械设计与制造,2025(12):366-371.
- [2] 王成龙.深度学习驱动的三维机械产品设计优化方法研究[J].中国机械,2026(03):34-37.
- [3] 范建波,陈景铨,吴东梅,等.某空调产品机械强度设计及仿真分析[J].环境技术,2026,44(01):98-103.
- [4] 吴剑增,朱江,张金亮,等.风电液压偏航制动相关标准和产品设计优化[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(04):114-116.
- [5] 丁宏钰,胡晓龙,印四华,等.基于人形机器人产品的机械设计基础课程教学改革与探索[J].时代汽车,2025(23):50-53.

基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备研发

周国山

(苏州新材料研究所有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要 超导薄膜隔离层设备是超导产品生产工艺流程中的核心关键装备,当前国内该类装备长期高度依赖进口,不仅采购与运维成本居高不下,还存在技术适配性差、工艺迭代受限等突出短板。为破解这一“卡脖子”困境,本研究启动超导薄膜隔离层装备国产化研发项目,完全立足于国产化超导工艺产线的实际落地应用需求,重点从整机结构优化设计与全流程控制功能设计两大核心维度,对原有进口设备的柔性走带系统、高精度加热器系统、靶材恒温冷却系统等核心单元进行针对性国产化改造,最终成功自主研发出完全适配国产产线的超导薄膜隔离层装备,可充分满足反应溅射工艺(Reactive Sputtering, RS)对设备运行效率、成膜均匀性、长期运行稳定性等多项核心技术指标的严格要求,相关研发实践经验旨在为同领域技术人员提供参考。

关键词 超导薄膜隔离层; RS 工艺; 走带系统; 靶材中毒

中图分类号: TB43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.039

0 引言

RS 工艺(Reactive Sputtering)即反应溅射工艺,在使用氩气轰击靶材时引入活性气体,活性气体会与溅射出来的靶材物质进行反应,在基板上沉积形成化合物薄膜。基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备凭借材料沉积效率高、成膜质量佳等优势,在第二代高温超导带材加工领域得到广泛应用。但因目前国内尚不具备此类设备的完整自主研发能力,进口设备难以完全适配国内超导带材的个性化生产需求,而且设备维护也存在诸多不便,这导致基于 RS 工艺的超导产品生产技术水平提升受到很大限制。在此背景下,本文结合实际研发项目,深入探索基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备创新设计技术,以期打破国外技术壁垒,为推动我国超导产业高质量发展提供助力。

1 项目概况

所述隔离层 RS 国产化真空设备研发项目,主要基于现有设备技术痛点问题进行深化改进。项目原有设备已经老化,重新进口建设的费用预计需八百多万元,成本较高。而且原设备在实际应用中也凸显出诸多设计不足之处。例如:加热电源电压设计偏大,设备运行过程中频繁出现打火放电现象,容易产生工艺掉电,设备运行不够稳定;双螺旋走带系统一侧驱动张力过大,无法有效适配小张力系统运行;设备收放卷室空间设计也比较小,大卷盘空间不足。综合上述多方面

原因,提出此次设备创新研发项目,旨在攻克国内技术瓶颈,实现 RS 工艺超导薄膜隔离层设备的自主研发,并对设备既有技术缺陷进行改良,设计出一款能够满足 RS 工艺稳定生产新需求的高品质装备,完成对进口设备的国产化替代。

2 设备研发目标性能

本项目中的 RS 反应器主要用于在 12 mm 宽的基带上沉积 LaMnO 和 MgO 超导隔离层薄膜,基带材质为进口哈氏合金材质,适用厚度为 35 μm ~ 65 μm 不等,每卷基带连续单根长度为 100 m ~ 2 000 m。原设备采用的是一侧驱动控制速度,一侧放卷控制张力的模式,此次研发目标是将其改为中间驱动控制速度,两侧控制张力(一端牵引一端张力控制)的设计模式。要求工艺运行速度在 12 m/h ~ 450 m/h 之间且可控,并且能够在最高温度约 850 $^{\circ}\text{C}$ ~ 950 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下稳定走带,带材行走过程张力稳定,同时最薄带材工艺温度下行走的过程中,走带在导轮上不得出现边缘褶皱或骑边跑偏等情况,工艺误差需严格控制在 $\pm 5\%$ 以内。此外,新研发设备需避免原设备易打火放电的质量缺陷,整体运行状态应达到 24 h 连续稳定控制。

3 隔离层设备整体结构

按设备研发目标保守估算沉积速率,单靶材所需有效沉积区面积约为 270 cm^2 。设计隔离层设备整体结构,若考虑基带只在沉积区走一道,则沉积区结构长

作者简介: 周国山(1972-),男,本科,工程师,研究方向:机械设备的开发。

度至少需达到 180 cm，会导致靶材尺寸过大，且沉积区横向空间将被大幅浪费^[1]。故项目提出往返多次走带方案，充分利用沉积区宽度，既满足工艺需求，又可缩短所需沉积区长度，优化设备空间布局，实现结构紧凑化设计目标。经分析，采用螺旋式卷绕结构是实现这一走带模式的理想策略。具体设计中将每个靶材工艺位的有效沉积区宽度设计为 13.5 cm，长度设计为 200 cm，利用四轴螺旋卷绕装置驱动基带在沉积区内循环螺旋走绕 9 道次，达到在同一靶材位相同工艺条件下多次沉积的效果，满足工艺膜层厚度要求。设备整体采用双螺旋结构设计思路，在设备两侧各布置 1 个螺旋室，一侧执行 LaMnO 工艺制备隔离层薄膜，另外一侧采用 MgO 工艺为超导带材覆膜，整体采用反应溅射工艺实现隔离层薄膜沉积。优化后设备整体结构组成如图 1 所示，具体组成部分及其功能如表 1 所示。

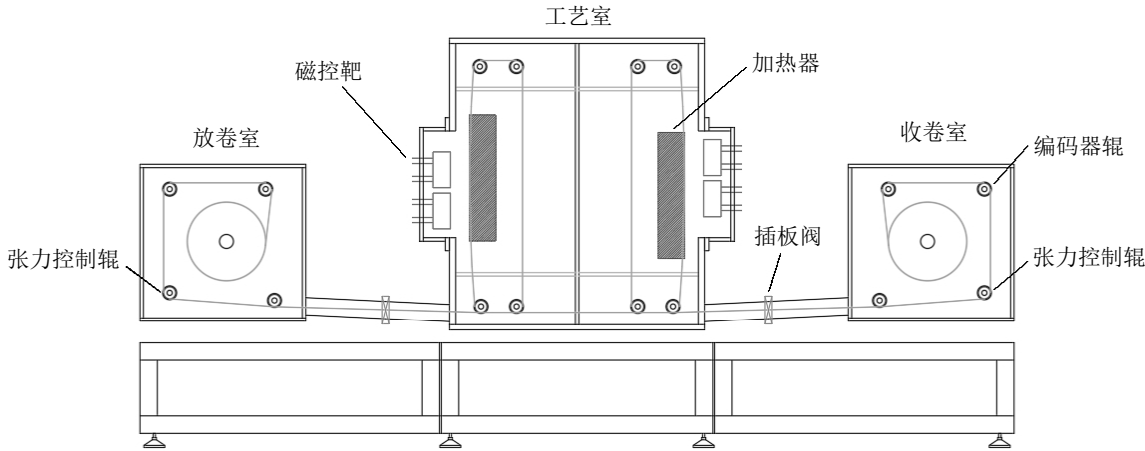


图 1 设备示意图

表 1 设备具体组成模块及其功能

系统模块	组成部分	功能
真空腔体系统	放卷室、镀膜室、收卷室等	提供反应溅射所需真空环境
钢带卷绕系统	伺服电机、张力传感器、导辊机构等	驱动基带行走卷绕
磁控靶及电源系统	磁控溅射靶、靶电源等	为反应溅射提供稳定供电
加热系统	高温电阻合金加热片、热电偶、温控器等	加热卷绕钢带，满足工艺所需温度要求
冷却系统	冷却水回路、过滤器、水压传感器等	对设备腔体、磁控靶、真空泵等部位进行循环冷却
抽气系统	双级旋片泵、罗茨泵、分子泵等	抽取腔体气体，维持工艺所需真空环境
真空测量	数显复合真空计、电阻规、电离规等	实时监测腔体真空度并反馈参数
控制系统	工控机、组态软件、伺服控制器、触摸屏等	全面控制各系统，保证设备安全稳定运行
安全防护系统	保护开关、报警灯等	设备出现异常运行状况时及时切断工艺电源并发出报警信息

4 隔离层设备国产化自主研发挑战与攻克

4.1 走带张力均衡性优化

走带系统是隔离层设备的核心执行机构，根据现有设备的使用经验，走带系统内部张力均衡性控制是影响走带质量的关键因素。传统螺旋卷绕结构设计走带模式主要有两种：第一种为一边放卷一边控制速度，中间螺旋卷绕机构负责辅助运动，因轴承导轮为灵活结构，放卷侧恒张力控制和收卷侧恒速控制会造成收卷侧摩擦力叠加而张力偏大，放卷侧张力偏小，生产薄基带时易产生卷边问题^[2]。第二种以中间螺旋卷绕结构作为主驱动，两侧做张力控制，基带速度完全由卷绕结构决定，收放卷两侧虽然可实现张力均衡控制，但需要将导轮和轴设计成固定结构，以满足两者高度同步的运动要求，而结构本身难以避免的加工误差可能导致基带抖动，同样会引发张力异常现象，造成基

带损伤。故本次研发设计吸取以上设计经验,新设计一款四轴主驱动紧凑型螺旋卷绕装置。产品在固定板同一垂直面上安装四组螺旋卷绕机构,采用环形布置方式,通过四个拐点定位固定,每个拐点处分别设置 1 个传动轴,其中第一和第二螺旋卷绕机构传动轴上设置多个磁力驱动导轮,第三和第四螺旋卷绕机构传动轴上设置多个常规导轮。基带可在所述环形结构非工艺侧变轨,实现螺旋卷绕。设计的创新之处在于,所述磁力驱动导轮采用内外圈设计形式,可实现柔性传动。通过合理设定磁吸力,正常运行工况下利用磁珠和磁力驱动导轮的外圈产生的吸力摩擦,可驱动基带张紧。而当基带张力过大超出设计允许值时,导轮与外圈磁吸力小于张力,两者将自动断开,使导轮打滑空转,避免强制将基带拉得过紧,由此保证基带张力基本处于比较均衡的状态。同时,中间导轮采用分段驱动设计方法,搭配张力传感器伺服电机扭矩模式的闭环 PID 控制模式进一步精准控制张力,保持基带张力动态稳定平衡。

4.2 真空击穿问题改进

原设备加热系统为满足 RS 工艺的高温加热需求,电源电压设计比较大,但也导致真空击穿概率较高,进而导致设备实际使用期间经常会出现打火放电现象。面对这一技术缺陷,本次设计研发将原本的石英灯管加热方式改为电阻加热方式,优选不易放气的高温电热合金加热器,在镀膜室左右腔室各安装一套,前后位置可调节。加热底座采用水冷设计,防止底座变形。同时,每组加热装置分三段控制,每段均配置独立的温控器和热电偶,可根据实际需求灵活调节实际加热温度^[3]。加热器装配至设备中之前先对其进行加热放气除杂处理,一方面避免高温环境下材料释放污染气体,进而增加真空击穿概率;另一方面也有助于保障真空环境的洁净度,防止污染物影响成膜品质。在此基础上,设计采用 $< 60\text{ V}$ 的低电压供电模式,进一步降低打火放电风险。并配置大功率直流可编程电源,温度控制采用 PID 闭环控制模式,充分保证电压输出和调节的稳定性。

4.3 靶材中毒防范

在反应溅射工艺中,需要向反应腔内通入氧气,与靶材溅射粒子发生化学反应生成氧化物薄膜覆盖在基材上。该工艺环节常出现靶材中毒现象,其原因主要在于氧气流量计的控制反应速度低于溅射反应速率,工艺反应所需氧气量达到设计值后,流量计未能及时给予反馈,通入反应腔内的氧气量略有剩余。而靶材材料对氧气较为敏感,剩余氧气会继续对其进行氧化

作用,同样在表面形成一层氧化膜,给下次溅射造成阻碍^[4]。对此,项目采用先进的 PID 控制算法对氧气流量进行高精度控制,同时选择 Profinet 高速通信协议,大幅提升流量计响应速度,使氧气量调节更快速。并在算法中增加工况识别与保护算法,当检测到氧气过量时,自动调整工艺参数,从控制层面可靠抑制靶材中毒现象的发生。此外,还选用了中频电源击溅射靶,可同时对基带单面进行镀膜,提高工作效率,并起到减少靶材中毒和提高沉积质量的作用。

4.4 靶材温度控制

靶材过热引起的变形,不仅会影响溅射工艺,也会影响 RS 工艺超导薄膜隔离层成膜质量。本次设计研发将原设备冷却系统背板材质全部更换为高导热的无氧铜背板,并在设备内部增加了一定数量的冷却水流道,全面提升背板换热能力。同时,通过试验方式确定靶材与铜背板之间的最优贴合与固定方案,保证靶材界面与冷却背板紧密贴合,最大限度发挥冷却系统功能,确保整个工艺生产阶段,设备内部温度持续保持稳定均匀,继而保证靶材温度始终保持在最佳范围内^[5]。

5 结束语

隔离层 RS 国产化真空设备研发项目按设计预期顺利推进,项目创新设计“一端牵引、一端张力控制、中间导轮”的走带系统均衡控制走带张力,同时在加热系统和溅射工艺中引入 PID 控制算法,实现对工艺参数的高精度控制,解决了靶材中毒这一关键性技术问题。此外,通过优化冷却系统,创造最佳工艺条件,提高了隔离层生产稳定性,最终成功设计了一款高性能超导薄膜隔离层设备,经实际工艺验证,不仅设备制造成本远低于进口设备,大幅降低企业固定资产投入成本,而且设备性能质量可靠,可实现稳定生产。

参考文献:

- [1] 汤晨宇,刘磊,曾广根,等.基于 PLC 的原子层沉积设备系统设计[J].机电工程技术,2024,53(01):295-299.
- [2] 周洁鹏,封拥军,元洁,等.往复旋转对化学气相沉积薄膜性能的提升与应用[J].微纳电子与智能制造,2022,04(01):110-114.
- [3] 刘晋玮,曲虹屹,赵步文,等.基于薄膜带材卷绕成型的空间管材料制备设备设计与分析[J].航天制造技术,2025(04):31-40.
- [4] 陈国钦,袁祖浩,胡凡,等.离子束溅射沉积设备制备薄膜均匀性研究[J].电子工业专用设备,2021,50(04):35-39.
- [5] 魏宇浩.化学气相沉积工艺的设备优化分析[J].集成电路应用,2025,42(01):69-71.

水力发电机组调速系统性能优化策略分析

胡开成

(四川大唐国际甘孜水电开发有限公司, 四川 甘孜 626000)

摘要 水电作为清洁可再生能源, 在电力供给架构中占据重要地位。调速系统是水力发电机组调控转速、负荷的关键装置。受设备老化、参数匹配失衡、运维方式滞后、工况多变等因素影响, 部分机组调速系统出现响应滞后、波动偏大、调节精度不足等问题, 干扰发电输出稳定性。本文结合水电厂实际运行工况, 分析调速系统运行现状与现存问题, 从参数整定、硬件改造、控制逻辑、运维模式四个方向开展性能优化, 搭配数据表格对比优化成效, 旨在降低机组运行故障, 维持水电负荷平稳输出, 为同类型机组运维升级提供参考。

关键词 水力发电机组; 调速系统; 性能优化; 平稳输出; 水电运维

中图分类号: TK730.4+1; TM312

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.040

0 引言

我国水电资源储量丰富, 水电工程凭借污染低、调度灵活、调峰能力强等优势, 成为电网调峰、调频、调压的重要支撑。水力发电机组依靠调速系统完成转速控制与负荷调节, 系统运行状态直接决定机组并网稳定性、电能质量以及机组使用寿命^[1]。现阶段不少投运多年的水电机组, 调速装置长期高负荷运转, 加之现场工况复杂、外部电网负荷频繁波动, 系统各类性能缺陷逐步显现。因此, 针对水力发电机组调速系统开展系统性性能优化, 改善设备调节能力与运行状态, 对保障水电持续平稳出力、维护区域电网安全运行具有重要的现实价值。

1 水力发电机组调速系统运行特征及现存问题

1.1 调速系统基本运行特征

水力发电机组调速系统主要分为机械液压型、电气液压型、数字智能型三类, 目前存量机组以电液调速器与数字调速器为主, 整体运行具备三类典型特征。

第一, 工况联动性强。系统调节动作并非独立运行, 调节指令下发后, 会同步作用于导水机构、压力管道、水轮机转轮, 水流变化、机械动作、电气参数相互影响, 管道水锤、水流惯性都会制约调速响应速度^[2]。

第二, 动态调节范围广。水电厂需配合电网完成日间调峰、夜间填谷, 同时应对用电高峰、线路检修、负荷突变等场景, 调速系统需要在空载、并网、满负荷、变负荷等多种工况间频繁切换, 调节幅度与动作频次处于较高水平。

第三, 运行环境影响显著。水电站多处于山区, 水头随季节、降雨量产生明显变化, 高水头、低水头工况下, 水流动力特性不同, 同一套调速参数难以适配全部工况, 容易出现调节效果偏差。

除此之外, 机房温湿度、液压油品质、电磁阀灵敏度等现场条件, 也会持续作用于调速系统, 改变设备运行状态。

1.2 调速系统运行过程中的主要问题

结合现场巡检、试验记录与故障台账来看, 当前水电发电机组调速系统普遍存在性能衰减、调节异常、运维短板等问题, 直接影响机组出力平稳性。

第一, 控制参数适配性不足。机组投运初期整定的调节参数, 仅匹配设计工况, 长期运行后设备机械间隙增大、液压元件老化, 原有参数无法适配变水头、变负荷工况, 出现转速波动大、负荷调节超调、振荡等现象^[3]。

第二, 硬件部件性能下降。液压阀组、伺服机构、位移传感器、油泵等元件长期磨损老化, 出现内泄、卡涩、信号采集失真等故障, 造成调速指令执行延迟、动作不到位, 机组负荷难以稳定在设定区间。

第三, 控制逻辑存在局限。部分老旧调速系统控制程序老旧, 未针对孤网运行、电网扰动、突发甩负荷等特殊工况增设保护逻辑, 极端工况下易出现调节失控。

第四, 日常运维模式粗放。运维人员多侧重故障事后维修, 缺少常态化性能检测与预防性调校, 系统

作者简介: 胡开成 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 发电运行管理。

微小缺陷不断累积,逐步演变为影响发电输出的重大隐患。

2 水力发电机组调速系统全维度性能优化方案

2.1 分工况开展调速系统参数整定优化

参数整定是改善调速系统动态调节性能最直接的手段,摒弃传统单一工况参数设置模式,按照不同水头、不同运行状态划分区间,开展差异化参数匹配。首先开展机组水力特性摸底试验,分别在高水头、中水头、低水头三种自然条件下,完成机组空载扰动、负荷扰动、甩负荷试验,记录转速变化、导叶动作、负荷响应等全过程数据。其次依据试验数据,针对性调整比例增益、积分时间、微分时间、暂态转差系数等关键参数。高水头工况下水流冲击力强,适当降低比例增益,避免调节动作过激引发振荡;低水头工况水流动力偏弱,小幅提升响应参数,缩短调节滞后时长。完成参数初步整定后,进行连续 72 小时带负荷试运行,实时监测机组转速、出力曲线,针对短时波动区间再次微调参数,保证参数与现场水力条件、机组机械状态高度匹配。同时,建立参数台账,区分常态并网、孤网运行、调峰调频等场景,留存多套备用参数,实现工况切换时快速调用^[4]。

2.2 实施硬件部件升级与液压回路改造

针对元件老化、卡涩、内泄等硬件类故障,分模块完成部件更换与油路改造,提升系统执行精度与可靠性。对于使用年限超过十年的电磁换向阀、主配压阀、伺服油缸,选用耐磨、密封性能更强的同规格工业级元件进行替换,减少机械卡涩与液压内泄问题。全面梳理液压油循环回路,更换老化油管、密封垫片,在主油路、分支油路增设高精度过滤装置,阻挡杂质进入精密阀组。

定期更换符合工况要求的抗磨液压油,严格把控油液清洁度、黏度、抗氧化指标,防止油液劣化造成元件磨损。对转速传感器、导叶位移传感器等信号采集装置进行校验与升级,将老旧模拟量传感器更换为数字式传感设备,强化信号抗干扰能力,降低信号失真、断连概率。针对油压系统,优化油泵启停逻辑与稳压装置,维持系统油压稳定,避免油压波动影响导水机构动作精度,从硬件层面消除调节执行环节的缺陷。

2.3 完善调速系统控制逻辑与保护程序

依托现有数字调速器硬件基础,对内部控制程序、连锁保护逻辑进行补充完善,强化系统应对复杂工况与突发故障的处置能力。

一方面,优化常规调节逻辑,增加负荷平滑过渡

算法,在电网负荷增减、机组启停过程中,控制导叶开关速率,避免出力骤升骤降,减小对电网与机组本体的冲击。

另一方面,补充特殊工况控制逻辑,针对甩负荷、线路故障、外部电网剧烈扰动等场景,增设分级调节程序,当转速、负荷偏离设定阈值时,系统分步执行调节动作,而非一次性大幅调整。完善软硬件故障连锁保护,当传感器信号异常、油压过低、阀组动作超时等问题出现时,系统先发出声光告警,同步执行稳态调节,故障无法解除时再按照预设程序平稳停机,杜绝突发紧急停机造成电力输出中断。完成逻辑修改后,借助仿真平台与现场模拟试验反复验证,确保新增程序运行稳定,不存在逻辑冲突。

2.4 构建适配调速系统的精细化运维模式

优质的运维管理可以延缓设备性能衰减,降低故障发生概率,结合调速系统结构与运行规律,建立预防为主、修试结合的精细化运维体系。划分日常巡检、定期试验、专项检修三类工作内容,日常巡检重点查看油压、油位、设备温度、管路渗漏、信号指示灯状态,做好实时记录;每周对滤网、润滑部位进行清理养护,每月开展一次小范围扰动试验,抽检系统调节性能。

每季度开展全套调速系统静态、动态试验,对比历史运行数据,判断设备性能变化趋势,提前排查潜在缺陷。制定部件寿命管理清单,根据元件磨损规律,提前规划易损件更换周期,做到到期更换、防患于未然。同时,加强运维人员技能培训,讲解不同工况下参数调整方法、故障判断思路、应急处置流程,提升人员实操能力,改变以往故障后被动维修的模式,让调速系统长期维持良好运行状态。

3 调速系统优化后的运行效果及质量保障管控

3.1 优化前后运行数据对比分析

为直观体现优化成效,选取同一台机组、相同水头区间、相近电网负荷条件,采集优化前后连续一个月的运行数据,重点对比转速波动率、负荷调节响应时间、故障发生次数三项核心指标。如表 1 所示,为优化前后关键运行指标对比情况。

从表 1 数据可以看出,经过系统性优化后,调速系统各项运行指标均得到明显改善,转速、负荷波动被控制在极小范围,设备故障大幅减少,机组电力输出的连续性与稳定性显著提升。在低水头、负荷频繁波动的极端工况下,系统也未出现振荡、卡涩等问题,整体调节性能满足生产运行要求。

表1 调速系统优化前后机组运行指标对比

监测指标	优化前运行数值	优化后运行数值	指标变化说明
机组转速波动率	$\pm 0.82\%$	$\pm 0.26\%$	转速波动范围大幅缩小, 运行更平稳
负荷调节平均响应时间	2.1 s	0.7 s	指令响应速度显著提升, 滞后问题改善
月度故障发生次数	8次	1次	故障频次大幅下降, 设备稳定性增强
负荷调节超调率	11.3%	2.9%	调节超调现象基本得到遏制

3.2 搭建全天候在线运行监测体系

依托水电厂现有的机组监控系统, 接入调速系统油压、导叶开度、转速、负荷、元件状态等实时数据, 搭建全天候在线监测平台。平台自动绘制转速曲线、负荷曲线、油压变化曲线, 运维人员可在中控室实时查看系统运行状态。

设置多级预警阈值, 当转速波动、油压数值、响应时长接近警戒范围时, 平台自动弹窗提醒, 并标注异常点位与关联部件。监测数据实行云端连续存储, 留存周期不低于一年, 便于后期调取分析设备性能变化规律。夜间、节假日等值守力量薄弱时段, 依靠在线监测实现无人值守状态下的自动监控, 第一时间发现微小异常, 避免小问题逐步扩大, 持续保障机组稳定出力^[5]。

3.3 严格执行定期试验与性能校验制度

将调速系统试验工作纳入电厂标准化作业流程, 明确试验项目、试验周期、操作标准与验收要求。常规试验包含空载扰动试验、带负荷扰动试验、导叶行程试验、油压稳定性试验, 按照月度、季度、年度分级开展。试验过程全程录像、留存原始数据, 试验完成后出具正式试验报告, 对比标准指标判定系统性能是否合格。

若试验发现调节精度、响应速度不达标, 立即分析问题根源, 区分是参数偏移、元件老化还是油路问题, 第一时间开展二次调校或部件检修。试验工作做到不简化流程、不降低标准, 以周期性试验把控设备性能状态, 确保调速系统调节能力始终符合电网运行与安全生产要求。

3.4 建立缺陷闭环管理与负荷动态适配机制

针对运行、试验、巡检过程中发现的各类缺陷, 建立发现、登记、处置、复检、销号的闭环管理流程。无论故障大小, 均统一录入设备缺陷台账, 明确处置责任人与完成时限, 缺陷处理完毕后必须进行现场试验复检, 确认问题彻底解决后方可完成销号。

结合季节变化、来水情况、电网调度指令, 动态切换调速系统配套参数方案。汛期水头偏高、流量充足, 启用高水头配套参数; 枯水期水位下降, 切换为低水头运行参数。电网下达大幅度调峰、调频任务时, 提前评估负荷变化幅度, 预判调节压力, 必要时提前安排人员现场值守。通过负荷与参数的动态适配, 让调速系统在全工况下稳定发挥作用, 长久维持水电生产平稳输出。

4 结束语

本文围绕水力发电机组调速系统展开研究, 总结设备工况联动、调节范围广、环境敏感度高的运行特点, 梳理参数失配、硬件老化、逻辑滞后、运维粗放等实际问题, 制定参数分工况整定、硬件升级改造、控制逻辑完善、运维模式优化四项改进方案, 结合相关数据对比优化前后运行指标, 同时搭建在线监测、定期试验、缺陷闭环、动态适配的长效管控机制。随着水电智能化改造不断推进, 未来可结合数字孪生、智能算法技术, 实现调速参数自主辨识、自动整定, 进一步减少人工干预。持续深挖调速系统优化空间, 强化设备运行可靠性, 能够更好地发挥水电调峰调频作用, 助力电力系统安全、稳定、高效运行。

参考文献:

- [1] 王国东, 江月周. 木坡水电站调速器液压系统优化研究[J]. 四川水力发电, 2026, 45(02): 59-62.
- [2] 杨年浩, 陆杰, 李海军, 等. 尾水河道拓挖条件下水电站机组稳定性分析及运行策略优化研究[J]. 水电能源科学, 2026, 44(04): 207-210, 236.
- [3] 蒋蓉蓉, 刘利民, 续磊, 等. 泵站高压变频调速系统的应用与维护[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(12): 174-176.
- [4] 陈旺林. 水电站调速系统升级改造[J]. 电工技术, 2025(24): 38-40.
- [5] 余振, 刘平. 某水电站机组有功功率异常调节的分析与处理[J]. 水电与新能源, 2025, 39(12): 85-89.

山地分布式光伏支架设计研究及优化应用

王建兵

(中核华兴华南分公司阳江三山岛陆上集控中心项目部, 广东 阳江 529500)

摘要 “十四五”时期,我国“双碳”目标实现路径稳步落地,全国各地有序推进“双碳”的各项工作。传统化石能源污染较大,不可再生的弊端逐渐凸显,而太阳能具备清洁、可再生的优势,拥有非常广阔的应用前景和巨大的发展潜力。本文以某山地分布式光伏 EPC 项目为依托,再结合山地较复杂的地形特点,分析光伏支架、地基、接线、设备选型等核心的设计要点,对该分布式光伏 EPC 项目开展全流程优化管控,有效突破因山地特殊的施工环境带来的制约,旨在为大幅提升现场施工效率提供参考,最终实现该项目的提质增效、节能降碳目标。

关键词 光伏支架设计;地基处理;基础选型

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.041

0 引言

在丘陵山地光伏项目中,支架设计、施工与成本管理至关重要,这类场地多选用桩基基础搭配固定倾角支架。本文主要针对山地丘陵地形项目,探究地基处理、桩基选型与桩基长度优化,固定倾角式支架的倾角对标分析确定,整合逆变器支架结构,经技术验算证实优化可行。本文所采用的设计思路及优化措施适用于大型分布式光伏项目施工领域,尤其适用于地形复杂、地块分散且占地面积小、光照条件好的施工项目。

1 山地光伏支架基础选型

1.1 地基处理

(1) 换填法:处理浅表层不良土质,用 3:7 灰土或级配砂石回填夯实,压实度 $\geq 97\%$,成本高、质量控制难度大;(2) 强夯法:提升土体强度,仅适用于地势开阔区域,对施工温度与土体含水率要求高;(3) 挤密法:成孔后夯填石灰土,优化土体结构、提升承载力,适用范围有限,对气温要求高^[1]。

1.2 基础形式选型

现浇式基础土方开挖系数大、施工周期长、碳足迹高,山地项目淘汰率超 82%。当前主流为三大机械成孔体系:(1) 机械钻孔灌注桩:桩径 $\Phi 600 \sim \Phi 800$,入中风化岩 $\geq 3D$,混凝土水下 C35。适配复杂地层与陡坡作业,成孔快、环保,仅设备进场受地形限制;(2) 螺旋钻孔灌注桩:适用于软至中硬地层,浅层施工便捷,遇卵石/岩层易卡钻,深度受限;(3) PHC 管桩:工厂预制、施工快、无泥浆污染,需大型设备,山地运

输困难^[2]。结合三种对比,旋挖钻孔灌注桩适配山地复杂地形,综合效益最优。

1.3 基础设计优化

项目支架设计使用年限 25 年,基础 50 年,抗震设防烈度 6° ,固定倾角 20° ,原设计桩长 2.5 m,结合地质重新验算优化^[3]。场地土层含耕土、块石、黏土、中风化白云岩,各土层极限侧阻力、端阻力及抗拔系数按规范与勘测报告取值(如表 1 所示)。

2 山地光伏支架优化设计

支架按照 25 年结构重要系数取值 0.95,组件尺寸为 $2\,278\text{ mm} \times 1\,134\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,单个光伏阵列(2×14 块组件)安装进行设计。

拟建项目采用了结构形式简单,施工难度相对较低的最佳倾角式固定支架,其上部由电池板、支架次梁、主梁、斜撑、立柱组成、根据《光伏发电站设计规范》附录 B 差(见表 2)得出拟建地区最佳倾角参考值^[4]。还考虑山地地形条件下,山地光伏因地势异常复杂,山坡朝向各异、坡度各不相同,因此光伏方阵布置应满足各个地区,各子阵之间上午 9:00~下午 3:00 时间段内,前后左右互不遮挡原则优化设计。

引用规范文献并进行差值迭代计算法,考虑山地地形、施工安装难易程度,确定固定倾角式支架角度为 20° 。(1) 支架组串依山势顺坡向下依次布置;(2) 因山体自遮挡效应显著,该区域在空间布局时被列为限制性用地;(3) 依据坡向优先级序列(南坡 $\rightarrow$ 东南/西南坡 $\rightarrow$ 东/西坡 $\rightarrow$ 北坡)实施空间筛选,并通过坡

作者简介:王建兵(1989-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程、光伏工程。

表 1 场地勘测岩土层主要物理力学指标建议使用值表

土层名称及代号	土层状态黏性土：I _L	桩型		抗拔系数 λ	平均深度 m
		钻孔灌注桩			
		桩的极限侧阻力标准值 Q _{sik} (KPa)	桩的极限端阻力标准值 Q _{pk} (KPa)		
耕土	/	/	/	/	0.36
② 1 块石	较硬岩	160	3 000	0.75	1.16
② 2 黏土	可塑	70	1 200	0.72	1.66
③ 中风化白云岩	较硬岩	260	6 000	/	
④ 中风化白云岩	较硬岩	280	7 000	/	

表 2 摘录《光伏发电站设计标准（2024 年版）》（GB 50797-2012）附表 B

城市	纬度 φ (°)	斜面日均辐射量 (kJ/m ²)	日辐射量 (kJ/m ²)	独立系统推荐 倾角 (°)	并网系统推荐 倾角 (°)
昆明	25.02	15 333	14 194	φ+0	φ-1
南宁	22.82	12 734	12 515	φ+5	φ-4
云南文山	23.92	14 034	13 355	φ+2.5	φ-2

度地形施工适应性分析排除高难度作业区域。

2.1 阵列方位角、倾角及间距设计

阵列方位角、倾角及间距是光伏产电能力至关重要的影响因素。(1)阵列方位角: 在山地光伏排布设计时, 主要有三种思路。一是我国处于北半球地区, 房屋采光及光伏组件朝向大多面向正南方向区域; 二是根据山地坡度自然地势顺坡布置; 三是为了在日间 AM9:00 ~ PM5:00, 尽可能多地布置组件朝向设置在最大光照强度出现时刻或太阳辐射量直射最大时刻; (2)方向倾角: 由于山坡地形地质构造较为复杂, 区块面积小, 呈散落分布, 要按照最优倾角布置后, 既要满足太阳能组件最大限度地接受太阳直射辐射量, 又要满足现场施工可行性, 降低安装难度, 可以遵循理论公式计算和“化零为整”的总体原则, 全光伏区采用了统一陈列安装倾角; (3)组串之间间距: 太阳能组串并联最小间距, 使前后排、左右排组串之间互不遮挡。当太阳辐射量直射最大时, 组串之间相互遮挡对发电组件输出功率影响大, 当太阳辐射量直射弱而漫反射最大时, 组串之间相互遮挡对发电输出功率基本无影响。因此需要统筹考虑各种因素: 一是土地资源充裕, 用地审批量大且过审率高时, 可以适度加大组串之间间距, 以此提升整个项目发电; 二是土地资源匮乏, 用地审批难度大且过审率不高时, 按照项目规模装机容量, 统筹考虑组串之间间距。

目前光伏阵列方位角、倾角及间距采用 Pvsyst 陈列建模进行模拟仿真设计, 同时考虑项目整体成本、投资回报率、利润等多重因素进行设计计算, 最终选定了统一固定式角度安装方案。

2.2 光伏组串接线设计

单个 PV 模块因输出电流 / 电压较低, 需经串并联集成后方可并网。理想光照下, 子方阵总功率等于各模块功率代数和; 但当组件间存在遮挡、损坏或辐照差异时, 异常模块会形成热斑, 其输出功率下降并反向耗能, 导致整体效率降低及设备损伤风险, 从而降低整个子方阵发电效能。

热斑效应目前采用的是利用二极管的单向导通性, 在组串接线旁边接入二极管。被遮挡的组件在低电流、低功率运行时, 正常光照辐射组件产生的大电流会通过旁路二极管导通, 相当于被遮挡光伏组件此时处于短路状态, 保护了组件, 又不影响子方阵其他正常工作组件发电总功率, 二极管压降低, 损耗功率可以忽略不计。

当各个组件均正常工作时, 电流均相等, 旁路二极管处于截止状态, 通过在各子阵旁路设计单向导通二极管, 可有效解决山地光伏区子方阵间部分组件因遮挡而损坏其他组件, 进而降低子方阵整体发电效能的问题。

为平衡阴影遮挡、线缆成本与山地施工适配性, 光伏子阵列采用双竖排模块化布局, 组串单元数 ≤ 2, 并以 C 型回路连接模式构建低损耗电气网络, 满足以下设计目标: 阴影覆盖面积减少 30% ~ 40%; 线缆总长度较传统星型布线可以节省 25% 以上; 山地坡度适应性提升至 35°。

2.3 逆变器选型设计

逆变器作为光伏厂区的核心设备, 逆变器的选择影响到光伏系统发电效率光伏电站安全可靠性的运行。

以下参数指标为逆变器选型使用的关键：（1）宽域电压适应性光伏组串输出电压受辐照强度、气象参数及负载特性影响呈宽幅波动（ $\pm 25\%V_{dc}$ ），要求设备具备动态电压匹配能力（DC 输入范围覆盖 $V_{mpp_min} \sim V_{oc_max}$ ），并维持交流侧电压稳态误差 $\leq \pm 2\%$ ；（2）能效等级阈值：建立功率—效率分段标准。大功率型（ $> 100\text{ kW}$ ）：额定负载 $\eta \geq 95\%$ ，低载工况（ $10\%P_n$ ） $\eta \geq 90\%$ ；中小功率型（ $\leq 100\text{ kW}$ ）：额定负载 $\eta \geq 90\%$ ，低载 $\eta \geq 85\%$ ；能效测试需符合相应标准；（3）电能质量管控输出特性需满足并网同步要求：电压谐波畸变率（THDv） $< 3\%$ ；频率波动范围 $\pm 0.5\text{ Hz}$ ；相位偏差 $< 1^\circ$ ；（4）动态 MPPT 优化：集成自适应 MPPT 算法（如扰动观察法 / 电导增量法），实现光伏阵列动态阻抗匹配，追踪精度 $\geq 99.5\%$ ，响应时间 $< 200\text{ ms}$ ；（5）智能保护体系：构建多级防护机制。故障穿越： $175\%U_n$ 持续 0.5 s 不脱网；功率限制：过载 110% 时自动调整工作点至 I-V 曲线安全区；保护模块：集成孤岛保护（UL 1741）、直流注入抑制（ $< 0.5\%I_n$ ）；（6）数字化监测架构：配置 RS485 以太网通信接口，支持 Modbus/TCP 协议，扩展外置传感器通道（辐照度、组件温度），数据采集周期 $\leq 1\text{ s}$ ，满足 IEC 61850 规约^[5]。

组串式逆变器主要适用范围较广，可用于用户、大、中、小型屋顶及地形复杂的丘地带等分布式电站以及大型荒漠电站。集中式逆变器只适用于大型荒漠电站。集散式逆变器的应用范围较广，集合了两种逆变器的方案特点，但此种逆变器在实际应用中较少，技术上较集中式逆变器和组串式逆变器成熟度低，故本工程目前暂不建议选用集散式逆变器；集中式和组串式逆变器都能满足电网接入的指标要求。在可靠性方面，组串逆变器防护等级高，故障影响面小；整体效率与发电量方面组串式可提升 3% 以上发电量；场地布置方面：本工程所处山地地形起伏较大，集中式逆变器占用平地面积较大，带来较高的场地平整和土方开挖费用；在初始投资方面：由于近几年组串式逆变器技术成熟，慢慢市场占有率扩大，设备价格有所下降，虽然逆变器设备成本比集中地单瓦造价高，但组串逆变器减少了相对的电缆和土建成本，与整体集中式逆变器方案建站成本几乎持平；在后期运维中组串式逆变器具有检测精度高，故障定位精确，配合智能化的管理系统更能实现智能化运维，可减少运维人员及运维成本，因此本项目建议选择组串式逆变器方案。

2.4 光伏支架的优化

由于选定逆变器方案为组串式逆变器，通过对安装逆变器位置的光伏支架进行了局部优化，通过在光

伏支架底部增加了安装逆变器的双排横担支架，横担利用了光伏支架主梁，两端均采用抱箍固定的方式与支架立柱相连接。光伏支架底部加装逆变器进行优化时，还考虑以下相关问题：（1）为便于逆变器安装，同时考虑底部进风和后续维护， $600\text{ mm} \leq$ 底部距离 $\leq 800\text{ mm}$ 。优化措施：后逆变器离地距离不小于 1.2 m ；（2）底部空间需同时满足交流线缆垂直进入接线舱的要求。优化措施：底部空间预留 1.2 m ，满足逆变器安装作业人员作业半径要求；（3）为了便于逆变器散热，保证最佳性能，不推荐多排交错、背靠背和靠墙安装。优化措施：逆变器安装时优先考虑逆变器通风散热，安装时逆变器周围通风距离及间距均大于 800 mm ；（4）若逆变器安装在杂草场所，需要例行除草，以免影响底部进风或造成外部风扇损坏，否则需要对其安装下方地面做硬化处理，面积 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。优化措施：通过优化逆变器安装位置后，由于光伏支架前期施工时已对原地面进行了清表施工，后期光伏组件安装后，逆变器在太阳能光伏组件的下方位置，因此植物在光照不足的环境生长缓慢，后期通过周期性电站运维管理可以避免植被影响问题。

3 结束语

山地光伏项目因为其特殊的地理环境因素，施工建设难度相比平原、戈壁难度较大，本文通过对某山地光伏项目为例，从基础选型、支架结构以及设备适配等方向开展设计优化，选用合适山地地质的旋挖钻孔灌注桩，采用组串式逆变器和支架一体化安装方案，有效解决了地形问题、施工效率低等问题，通过设计方案的优化，可以有效提高施工效率，降低建设难度与成本，为同类项目提供有效参考。

参考文献：

- [1] 周淑贞. 气象学与气候学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [2] 河海大学, 三峡大学, 中国工程建设标准化协会. 输电线路杆塔带翼板螺旋桩基础技术规程 (T/CECS1755-2024) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [3] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范 (GB50009-2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 上海电力设计院有限公司, 中国电力企业联合会. 光伏发电站设计规范 (2024 年版): GB50797-2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范 (JGJ94-2008) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

数字化背景下配电网智能化改造思路探析

李瀛澜，于寒霄

(国网北京市电力公司，北京 100031)

摘要 在数字经济飞速发展与新型电力系统建设的双重背景下，传统配电网的薄弱环节日益凸显，难以适配新型用电格局。为推动配电网向高效、安全、绿色、智能方向升级，本文立足于数字化技术赋能逻辑，结合城乡配电网运行管理实际，分析当前配电网建设运维中存在的突出问题，并依托数字化核心技术，从感知体系、网络架构、运维模式、调度控制、数据应用等维度提出系统化改造思路，配套完善保障措施，旨在为基层供电企业配电网数字化、智能化升级建设提供参考。

关键词 数字化；配电网；智能化改造；新型电力系统

中图分类号 TM76；TM727.2

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.042

0 引言

随着我国“双碳”战略深入推进、数字基础设施全面落地以及电力市场化改革持续深化，电力系统的源网荷储结构发生根本性变革。传统配电网以人工运维、经验调度、被动抢修为主，拓扑结构固化、数据感知碎片化、设备智能化程度较低，易出现电压波动、线路过载、故障排查滞后等问题，无法适配新型电力系统“源网荷储协同互动”的发展需求。数字化技术的普及应用，为城乡配电网转型升级提供了关键技术支撑，也是解决传统电网运行难题的核心路径。基于此，本文结合配电网现场运行实际，综合各类数字化技术应用优势，系统梳理智能化改造的核心思路、实施路径与保障方案，为配电网高质量、可持续发展提供实践支撑。

1 数字化背景下配电网智能化改造的重要性

配电网智能化改造以数字化、网络化与智能化为核心发展导向，依托新一代信息技术实现对配电网设备终端、通信网络、运维管理体系、调度控制平台及供电服务模式的全方位升级与体系重构。改造工作的核心目标在于搭建主动配电网运行体系，有效解决传统配电网存在的信息割裂、管控模式滞后、场景适配性不足等突出问题。当前，新能源分布式并网、多元负荷接入规模持续扩大，传统配网已难以适配复杂的用电格局。智能化改造可打通数据壁垒，实现电网状态实时感知、故障快速定位与自愈处置，大幅缩减停电时长^[1]。同时，兼顾农村配电网的经济性、实用性与城市配电网的兼容性、灵活性，全面提升电网供电

可靠性、新能源消纳水平、电力资源配置效率与用户供电服务质量，精准适配新型电力系统的建设标准与发展需求。

2 当前配电网运行与改造现存问题

2.1 全域感知体系不完善

现阶段，基层配电网的智能感知终端整体覆盖率较低，尤其是农村低压台区与线路末端的问题较为突出，普遍存在监测设备缺位、感知盲区较多的问题，城市老旧配电网的传感设备配置也存在明显的不足。同时，当前市场传感设备品牌繁杂，不同厂家的设备数据标准、通信协议未能统一，兼容性较差。传统传感设备的数据采集维度单一、更新频率较低，仅可完成基础电压、电流数据的采集工作，无法精准监测设备温升、线路损耗以及绝缘状态等关键运行指标，无法实现对电网运行的全方面把控^[2]。

2.2 通信网络架构滞后

配电网现有通信模式多以光纤专网、无线公网混合组网为主，部分老旧区域仍采用传统载波通信方式，传输速率低、时延高、抗干扰能力弱。老旧通信架构缺乏统一标准，不同通信制式难以互联互通，系统协同能力薄弱，难以支撑多业务数据同步交互。农村地区地形复杂、光缆敷设困难，通信覆盖不足；城市配电网面对海量终端数据传输，网络带宽不足、组网灵活性较差，且存在数据传输安全隐患，无法满足边缘计算、实时调度、故障自愈等智能化功能的运行要求，制约数字化技术的落地应用。

作者简介：李瀛澜（1994-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统规划与运行及电算协同。

2.3 运维模式传统粗放

现阶段配电网运维仍依赖人工巡检、定期检修、被动抢修的传统模式,运维效率不高且人工成本偏高。人工巡检易受环境、人员状态影响,漏检、误判情况时有发生,难以实现对设备状态的全天候动态监测。传统模式也难以适配海量智能终端的运维管控需求,整体管理精细化程度偏低。农村配电网设施分散、巡检工作量大,设备故障后需逐段排查;城市配电网设备老化严重、状态评估依赖经验,缺乏数据化研判手段。设备潜在故障无法提前预判,线路故障、设备损坏等问题频发,同时运维、调度、营销数据相互割裂,存在明显信息孤岛,无法实现全业务协同联动^[3]。

2.4 源网荷储协同能力弱

分布式光伏、户用储能、电动汽车充电桩的规模化并网,深刻改变了配电网传统单向供电模式,形成了电力双向互动格局,而电网负荷波动呈现显著的不确定性。其中,农村配电网负荷季节性差异极大,电网规划建设与实际用电需求匹配度不足;城市配电网网架结构薄弱,区域供电互济能力有限。与此同时,现阶段没有完全智能化程度的调度控制体系,在实现源网荷储各类资源的动态优化配置方面存在一定的困难,从而产生对电网运行的稳定性与经济性的不利影响。

3 数字化背景下配电网智能化改造核心思路与实施路径

3.1 搭建全域智能感知体系

以“全覆盖、高精度、标准化”为原则,推进配电网感知终端智能化升级,构建立体化全域感知网络。在中高压线路、分段开关、联络开关等关键节点部署配电自动化终端,在低压台区推广智能融合终端,配套加装智能传感器、故障指示器、温度监测设备;农村台区重点在配电变压器、柱上开关、分支箱加装智能化终端,城市配电网替换智能开关、智能变压器、智能电表,实现配电网设备运行状态、环境参数、负荷数据的全方位、实时化采集。针对不同区域电网的运行特点差异化布设设备,进一步夯实感知网络的硬件基础。各类感知设备协同运行、有序衔接,形成层级清晰的感知网络矩阵。同时,统一终端数据接口与传输标准,农村设备兼顾防雨、防尘、防腐防护要求,依托“无人机+激光扫描+GIS建模”技术完成配电网精准建模,消除感知盲区,实现配电网运行态势的实时监测与动态管控,为智能分析、调度决策提供可靠数据支撑。从源头保障数据采集的完整性与准确性,为配电网智能化运行奠定坚实的基础^[4]。

3.2 优化通信网络架构

本文构建以光纤通信为主体、无线专网与 5G 通信为辅助、边缘组网作为补充的复合型高速通信网络体系,对传统老旧载波通信设备完成迭代升级,并持续扩大光纤专网的布设覆盖范围。在区域部署上,农村配电网以光纤网络作为骨干传输架构,针对位置偏远的供电台区,配套采用无线专网实现信号补盲;城市配电网依托电力专用 5G 网络,支撑海量终端设备的数据实时传输。结合不同区域的地理与运行特征差异化选用通信方式,可整体强化网络覆盖范围与数据传输性能。各类通信模式形成互补格局,在保障网络覆盖广度的同时,兼顾数据传输效率。通过布设边缘计算节点,实现业务数据本地化处理,有效削减云端数据传输负荷、缩短传输时延,适配故障自愈、实时调压、负荷快速调控等低时延业务的运行要求。与此同时,进一步健全网络安全防护体系,全面部署身份认证、数据加密等安全手段,抵御数据泄露、网络攻击等安全风险,从数据传输、设备访问等层面构建多层安全防护机制,保障通信网络持续稳定运行,为配电网各项业务的数据交互提供安全、高效、可靠的传输支撑。

3.3 重构智能化运维体系

依托大数据、数字孪生核心技术,搭建一体化配电网智能运维管控平台,构建高精度电网虚拟仿真模型,全景可视化展示电网运行状态、设备工况、负荷变化趋势,为运维工作开展提供直观、精准的数据参考。优化传统“定期检修、被动抢修”的粗放运维模式,建立“实时状态监测+数据智能研判+精准化运维”的全新工作机制。通过 AI 智能算法深度挖掘电网运行数据、历史故障数据,精准识别设备潜在隐患,推动运维模式从故障后的被动处置,转变为故障前的主动预判、精准治理,有效降低设备故障发生率,缩小停电影响范围。针对城乡电网差异化特点,简化农村配电网巡检流程、提升故障定位效率,完成城市老旧设备智能化升级。打通运维、调度、营销数据壁垒,实现全业务数据互通、协同联动,有效缩短故障定位、隔离、复电时长,推动配电网运维工作向智能化、精益化、高效化全面升级^[5]。

3.4 完善智能调度体系

为适配新型电力系统多元主体并网的发展需求,对配电网调度控制系统进行智能化升级,嵌入新能源出力预测、负荷动态仿真、无功优化调控等智能算法,实现分布式光伏、储能、电动汽车等新型电力主体的全面可观、可测、可控,提升电网对多元负荷的统筹

管控能力。搭建边缘计算与云端协同调度架构,精准完成电网负荷动态调配、电压无功优化调控、故障后网络快速重构。结合区域用电特征差异化实施调度策略,针对农村配电网适配季节性负荷变化规律,针对城市配电网优化网络架构并提升供电互济能力,以此削弱新能源出力间歇性、波动性引发的电网波动问题,提升新能源就地消纳水平。此外,搭建源网荷储协同交互平台,引导柔性负荷参与电网调峰与电压调节,促进电力资源优化配置,推动电网运行模式向灵活化、集约化转型。该举措能够有效发挥调度系统效能,全面增强配电网运行韧性与综合运营效益。

3.5 深化数据价值应用

以数据赋能为核心,构建配电网大数据分析应用体系,整合电网运行、设备、用户用电、气象数据。打破各类数据分散孤立的局面,形成完整的数据资源池,为后续深度挖掘分析奠定基础。通过数据分析实现线损精益化治理、负荷精准预测、电网隐患排查、供电质量优化,精准定位高损台区、异常负荷、设备缺陷,为电网改造规划、运维决策、营销服务提供数据支撑。农村配电网依托数据优化负荷管理、避免设备重过载与资源闲置;城市配电网通过数据打通消除信息孤岛,同时依托数字化平台优化用户服务,实现用电监测、故障报修、电费查询、需求响应智能化便捷化,提升服务精细化水平,使数据价值深度融入电网运营与客户服务各个环节,实现数据驱动管理、数据优化服务、数据创造价值。

4 配电网智能化改造保障措施

4.1 强化技术保障

持续引入数字孪生、人工智能、边缘计算等前沿电力数字化技术,加强新技术、新设备试点应用与落地推广。搭建技术研发与应用联动机制,结合城乡配电网运行实际优化智能算法、终端设备性能,农村改造注重经济性与实用性,避免过度配置;城市改造统一设备、数据、通信技术标准,保障系统兼容、数据互通,解决改造技术难点。

4.2 健全管理制度

建立健全配电网智能化改造项目管理、运维管控、数据安全、设备运维等配套管理制度,明确改造施工、设备验收、日常运维、数据管理的标准流程。细化各岗位职责分工,规范项目立项、建设、验收、运维全流程管控,农村改造遵循有序推进、分期实施,城市改造同步衔接城市规划,避免盲目改造、重复建设,保障改造工作稳步高效实施^[6]。

4.3 加强人才建设

配电网智能化改造兼具电力专业与数字化技术双重属性,对运维、技术人员综合能力要求较高。企业需常态化开展数字化技术、智能设备操作、智能平台运维专项培训,提升现有员工专业能力。同时,引进电力数字化、大数据分析、智能调度等专业人才,打造兼具电力运维经验与数字化技术能力的复合型人才团队,为改造落地与长效运维提供人才支撑。

4.4 加大资金投入

配电网智能化改造涵盖终端设备升级、通信网络改造、业务平台搭建、核心技术研发等多项内容,这些项目内容的整体资金需求规模较大。电力企业应统筹做好资金规划与资源调配,增设智能化改造专项经费,将农村老旧薄弱电网、高负荷供电台区以及城市新能源集中接入区域列为优先改造对象。与此同时,主动对接各类政策扶持资金,积极探索多元化投融资路径,为配电网智能化改造工作的持续开展提供稳定的资金保障。

5 结束语

通过对配电网开展全方位智能化升级改造,能够有效地弥补传统配电网的运行管理不足,推动配电网由粗放式、经验化的传统管控模式,逐步转向数字化、精细化、智能化与协同化的现代化运行模式,显著提升电网供电可靠性、新能源消纳水平与电力公共服务质量。未来,需持续依托数字化前沿技术,不断优化改造路径、完善运维体系、深化数据赋能,持续推进配电网迭代升级,为新型电力系统构建与能源绿色低碳转型提供坚实的电网支撑。

参考文献:

- [1] 缪云龙,康志明.电气系统自动化在城市配电网中的智能化改造方案[C]//广西网络安全和信息化联合会.2026年第十一届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会论文集.2026.
- [2] 杨波,余渊,邱才瑜.农村地区配电网集中型馈线自动化智能化改造方案研究[J].仪器仪表用户,2026,33(01):61-63.
- [3] 于子恒,姚开源.农村配电网智能化改造关键技术研究与应用[J].大众标准化,2025(24):51-53.
- [4] 王平平.智能电网发展背景下的城市配电网改造分析[J].光源与照明,2025(08):254-256.
- [5] 陈慧萍.新型电力系统下配电网施工智能化改造路径探索[J].电气应用,2025,44(08):54-59.
- [6] 董智,吴豫,张亚飞,等.新型电力系统背景下配电网的智能化规划与管理研究[J].自动化应用,2024,65(24):48-51,64.