科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 · 旬刊）

2026 年 10 月 第 30 期（总第 655 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 罂 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 10 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 兆瓦级风机主轴随机振动疲劳寿命分析 …… 艾凤军，李海涛，刘天鹏

004 光伏组件设备供应链稳定性提升路径探析 …… 赵 冰

007 轮式机械安全性能检验技术规范制定分析 …… 刘 浩

010 图算法在网络关联数据挖掘中的应用探析 …… 李聪瑞

013 薄壁风电轴承保持架加工变形控制技术分析 …… 韩泳佳

016 灯泡贯流式水电站 AI 巡检监视模式实践研究 …… 罗满江

智能科技

019 电力系统无功补偿技术应用研究 …… 余振龙

022 配电自动化提升配网供电可靠性探究 …… 拜旭东，朱鹏宇，胡 双，王俊凯

025 水电站数字化运维平台建设与应用实践 …… 韦佰泽

028 双馈风力发电系统电网适应性控制技术研究 …… 沈云皓

031 无人机航测在城市地形采集工作中的技术运用 …… 李锦昊

034 锅炉受热面壁温在线监测系统优化与异常预警研究 …… 李 博

037 基于物联网传感的重卡大功率充电桩运行状态智能监控技术研究 …… 刘子豪

应用技术

040 土木工程中天然石材接缝施工技术分析 …… 吴奇本

目录 Contents

043 隧道仰拱施工质量检测要点及现场控制对策 …… 闫 晗
046 铁溪隧道穿越煤系地层采空区施工关键技术 …… 武瑞琪
049 工程物探技术在岩溶区工程勘察中的应用分析 …… 黄政敏
052 水库大坝除险加固中帷幕灌浆施工技术应用研究 …… 朱慧平
055 公路预防性养护中同步碎石封层施工技术应用研究 …… 庄成龙，郑洪锋
058 塑性混凝土防渗墙在小型水库除险加固中的应用研究 …… 郑丽存

科创产业

061 碳中和目标下城市污水处理低碳转型策略 …… 冯芷璇
064 基于等级相关性与注意机制的短期电价预测 …… 刘 川
067 风电项目配套基础设施开发建设统筹谋划分析 …… 徐春强
070 信息化技术在建设项目用地报批中的实践运用 …… 李海燕
073 海外大型新能源 EPC 项目进度计划管理优化实践 …… 付术楠，赵 洁
076 新型电力系统网络安全管理体系建设与优化研究 …… 倪晨讯
079 火电厂厂用电系统电能损耗成因分析及降损优化研究 …… 陈利兴
082 面向通信信息系统的全国产化 2.25 kW 固态功放线性优化研究 …… 王文静

技术管理

085 高速公路路面施工技术质量控制要点 …… 任启超
088 电力设备运检一体化管理与风险防控研究 …… 许亚辉，孙叶翔
091 绿色施工理念下的建筑工程管理模式优化研究 …… 张刘敏
094 10 kV 配电线路改造工程施工组织管理优化研究 …… 蔡志峰
097 公路工程施工现场安全风险辨识与防控措施研究 …… 李 浩
100 水利工程施工质量风险成因及精细化管控体系构建研究 …… 肖圣春，宋 晨
103 高速公路桥隧路基工程监理项目管理实践——以苏台高速七都至桃源段 ST-JL2 标为例 …… 商林浩

科学论坛

106 风电光伏场站关键设备故障诊断技术研究 …… 张 敏
109 火电厂汽轮机辅机常见故障及检修方法研究 …… 王东宁，林 婧
112 分布式电源接入下输配电网架优化规划研究 …… 杨 悦
115 方锁通用锁体打孔夹具设计与自动化应用 …… 朱国富
118 工业固废协同处置对土壤理化性质的影响分析 …… 苏志成
121 智能化节水背景下农田水利灌溉系统优化改造实践 …… 侯 利
124 全站仪在公路路基路面施工放样中的应用与误差分析 …… 谢海明

兆瓦级风机主轴随机振动疲劳寿命分析

艾凤军，李海涛，刘天鹏

（大唐韩电（朝阳）新能源有限公司，辽宁 朝阳 122108）

摘 要 风机主轴作为兆瓦级风电机组核心回转承载部件，长期承受湍流风场带来的随机交变载荷，随机振动引发的疲劳失效会影响机组安全运行。本文通过构建主轴有限元数值模型，进行几何简化、网格离散与边界约束设置，依托湍流风场模拟结果提取主轴关键截面载荷，开展模态分析与应力功率谱求解，采用频域 Dirlik 模型实现疲劳损伤计算与寿命评估。数值计算得到主轴应力热点位置与对应的疲劳寿命参数，相关分析流程可为风电主轴振动疲劳评估提供参考。

关键词 兆瓦级风机主轴；随机振动；频域法；疲劳寿命；应力功率谱

中图分类号：TK83；O324 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.001

0 引言

随着风电装备向大容量、长服役周期方向持续升级，主轴作为传动链的核心承载部件，需同步传递风轮输出的扭矩与弯矩，结构长期处于随机振动载荷环境[1]。湍流风场产生的脉动载荷具备宽频随机特征，传统静力疲劳分析难以描述该类载荷下的结构损伤演化规律。本文建立兆瓦级风机主轴有限元模型，开展结构动力学与随机载荷的数值仿真，构建湍流风场对应的主轴载荷时序数据，求解主轴模态参数与应力功率谱，依托谱矩参数与 Dirlik 频域疲劳模型完成主轴疲劳损伤与寿命的定量计算，探究随机振动激励下主轴的疲劳演化特征。

1 兆瓦级风机主轴有限元建模

1.1 兆瓦级风机主轴几何模型简化

兆瓦级风机主轴为重载回转承载构件，过多细微结构会增大仿真计算量，降低应力求解稳定性。主轴疲劳失效多发生在轴肩、法兰过渡截面，螺纹、浅槽及微小倒角不改变主体应力传递规律。建模保留核心承载结构与关键尺寸，去除不承载的细小特征。该简化方式符合力学仿真通用原则，在保证应力计算精度的同时提升仿真效率。

1.2 模型网格划分与验证

兆瓦级风机主轴有限元模型选用高阶实体单元离散，该单元应力求解精度高，适合交变载荷工况。轴肩、法兰等应力梯度大的过渡区域采用加密网格，轴身平稳段使用常规网格，兼顾计算精度与效率。模型通过单元质量检查，满足机械仿真行业要求。开展网格无关性验证，对比多套网格仿真结果，应力偏差处于合理范围，模型计算性能稳定。

1.3 模型边界条件设置

兆瓦级风机主轴依靠前后轴承支撑限位，轴承约束直接影响力的传递路径。在轴承安装位置施加等效约束，限制径向位移与转角。主轴输入端保留扭矩传递自由度，匹配风轮动力输入；输出端参照齿轮箱装配约束，约束多余自由度[2]。该等效边界贴合主轴实际力学状态，可还原真实应力与振动响应。

2 兆瓦级风机主轴随机载荷谱构建

2.1 湍流风场数值模拟

大气边界层风场由平均风速与脉动风速组成，脉动风速产生持续随机扰动。风轮扫掠面不同高度风速存在空间相位差，进而产生交变倾覆载荷并传递至风轮。湍流风场模型采用行业通用湍流谱生成时域风速序列，输入参数匹配目标风场地表粗糙度、参考高度与湍流强度，风速样本参照风资源统计结果，剔除超出机组设计包络的极端风速。风速时序保留低频大尺度脉动与高频小幅波动特征，时间步长适配风机振动响应分析尺度。模拟输出多点风速时序数据，体现风轮扫掠面风速空间差异，为风轮气动载荷计算提供输入。

2.2 风轮气动载荷计算

气流与叶片相互作用产生升力和阻力，叶片旋转造成攻角随方位角周期性变化，放大气动载荷波动，两类载荷随湍流风速动态改变[3]。本文以叶片单元动

作者简介：艾凤军（1989-），男，本科，工程师，研究方向：新能源。

量理论为计算框架，考虑尾流效应与展向载荷分布，并引入叶尖损失修正降低端部载荷计算误差。将各叶片划分为展向单元，各单元气流参数取自湍流风场时序结果。对叶片气动力沿展向积分得到叶根载荷，再转换至风轮旋转中心坐标系，得到包含推力、扭矩与倾覆力矩的载荷时序，作为主轴力学输入原始数据。

2.3 兆瓦级风机主轴关键截面载荷提取

风轮端多维度载荷沿主轴传递，轴承支撑约束改变轴身弯矩分布。基于刚体静力学平衡原理建立风轮到主轴关键截面的力系转换关系，选取轴肩、法兰过渡等应力集中截面作为载荷提取位置。该类截面承受弯矩与扭矩耦合交变作用，加速疲劳损伤累积。对载荷时序做坐标变换与分量叠加，得到目标截面弯矩、扭矩时序，滤除对疲劳损伤贡献微弱的高频噪声。处理后的载荷时序作为有限元模型外部激励，用于主轴随机振动响应求解。

3 兆瓦级风机主轴随机振动响应分析

3.1 兆瓦级风机主轴结构模态特性计算

兆瓦级风机主轴结构固有振动特性直接决定结构对随机风载荷激励的动态响应程度，结构共振现象的产生条件可依托模态参数完成精准判定。回转构件运转过程伴随离心刚化效应，该效应会小幅改变轴系固有频率，模态计算计入该力学效应提升结果可靠性[4]。数值仿真软件依托建立完成的主轴有限元模型开展动力学特征求解，模型约束状态完全贴合主轴实际装配工况，保证动力学计算模型的力学等效性。模态求解算法针对回转类轴系结构优化迭代精度，能够精准提取结构多阶固有频率与对应空间振型。低阶模态参数主导主轴整体振动变形状态，高阶模态参数对应结构局部区域的微幅形变特征，高阶振型对应的局部变形往往集中在法兰与轴肩连接处，与应力集中区域存在对应关系。风场随机激励的主频区间可与主轴固有频率参数形成对照，频率参数的匹配关系能够判定结构动态响应的放大程度。模态参数的求解结果可为随机振动应力计算提供核心动力学基础，支撑后续结构应力响应的精准求解。

3.2 兆瓦级风机主轴应力热点位置识别

兆瓦级风机主轴结构几何尺寸的突变会造成局部应力传递路径发生偏转，应力数值的局部富集现象会持续累积结构疲劳损伤。应力集中系数随圆弧过渡半径改变，微小的轮廓变化即可改变局部应力峰值水平。随机载荷的交变作用会加剧局部应力的动态波动幅度，结构疲劳失效问题多起源于高应力富集区域。主轴有限元模型导入真实风载时序激励完成动态应力场求解，全域应力数据可完整反映结构不同位置的应力波动特征。应力数值持续偏高、波动幅值较大的结构区域可完成定位标记，标记区域对应主轴结构的疲劳危险位置。主轴轴肩过渡圆弧、法兰连接根部的几何突变位置普遍存在显著应力集中特征，此类结构区域作为疲劳分析的核心研究区域。热点区域网格保持加密设置，降低梯度较大位置带来的数值离散误差。精准的热点定位能够缩减无效计算范围，提升结构疲劳寿命评估的精准度与针对性。

3.3 结构应力响应功率谱求解

时域随机载荷的无序波动特征难以直接量化结构动态损伤规律，通过频域转换处理可实现随机载荷能量特征的规范化表达。模态阻尼取值参考同类钢材轴系构件试验结果，阻尼数值会影响共振区间应力能量的放大水平。主轴结构动力学传递函数可搭建载荷输入与应力输出的数值关联关系，函数参数由结构模态固有参数与阻尼参数组合形成[5]。热点位置的时域应力响应数据可通过傅里叶变换完成频域转换处理，转换结果可生成应力响应功率谱密度函数。功率谱密度函数可量化不同频率分量对应的应力能量占比，能量分布峰值对应结构共振作用下的应力放大区间，频率截断上限依据模态分析结果选取，舍弃无能量贡献的高频分量，减少计算开销。应力功率谱的完整分布数据可精准反映随机振动下的结构应力变化特征，可为谱矩参数计算与疲劳损伤求解提供完整的基础数据支撑。

4 基于频域法的兆瓦级风机主轴疲劳寿命预测

4.1 应力功率谱谱矩参数计算

频域疲劳评估体系依托随机振动信号的频谱特征量化结构损伤水平，应力功率谱谱矩参数可以有效刻画随机应力信号的能量分布、频率疏密与波动幅度特征。风机主轴承受的湍流风载属于典型宽频随机激励，应力信号不具备周期性规律，常规时域统计手段在处理海量载荷数据时，难以高效捕捉低幅值高频次的细微损伤贡献。谱矩参数的数学求解可以覆盖全频率域的应力能量组分，能够实现随机应力特征的完整量化。应力功率谱对应的各阶谱矩可由下式计算：

$$m_k=\int_0^{+\infty} f^k S_\sigma(f)\,df \tag{1}$$

式（1）中：m_k为k阶应力谱矩；f为结构振动频率，单位：Hz；$S_\sigma(f)$为热点截面应力功率谱密度，单位：MPa^2/Hz。

0 阶谱矩对应应力信号总能量水平，2 阶谱矩对应结构振动平均频率特征，4 阶谱矩对应应力峰值波动剧烈程度。数值求解时对连续频率区间做离散分割，选取有限个频率采样点，每个采样点提取应力功率谱密度数值。离散求和替代无穷区间积分完成数值近似运算，采样区间上限取高于主轴主要共振频率的数值，截断高频低能量分量，降低计算开销。三类核心谱矩参数可以完整表征主轴随机振动的应力动态特征，可为后续疲劳峰值期望与损伤系数的求解提供完整的基础参数支撑。

4.2 兆瓦级风机主轴累积疲劳损伤计算

兆瓦级风机主轴的运行应力始终处于随机交变状态，应力幅值、应力循环频率随湍流风况实时动态变化，传统固定幅值的疲劳计算方式无法适配复杂随机工况。频域疲劳计算模型可以依托频谱参数拟合真实应力循环分布规律，有效弥补时域计数方法在宽频随机载荷下的计算偏差。工程领域适用性极强的 Dirlik 模型可适配风电回转构件的随机疲劳计算场景，主轴结构累积疲劳损伤的具体计算表达式如下：

$$D=\frac{E[p]T}{C}\Sigma_{i=1}^{n}p_iS^m \qquad (2)$$

式（2）中：D 为结构累积疲劳损伤量；$E[p]$ 为单位时间应力峰值期望；T 为载荷持续作用时长；C、m 为主轴结构材料 S-N 曲线拟合常数；p_i 为对应应力幅值的出现概率；S_i 为离散化处理的应力幅值。

钢材材料参数依据机械结构疲劳设计标准选取，峰值期望参数取自谱矩计算结果。应力幅值区间划分若干离散等级，每一个等级计算对应幅值出现概率，概率分布函数依托 Dirlik 模型内置的概率密度函数生成。各项离散分量依次代入求和运算，求和结果再乘以单位时间峰值期望与载荷时长，得到给定时间区间内的总累积损伤。模型计算方式可以精准拟合主轴多频次、宽区间的应力循环特征，实现随机振动工况下结构疲劳损伤的精细化量化。

4.3 兆瓦级风机主轴疲劳寿命换算与求解

机械结构疲劳失效判定广泛采用线性累积损伤准则，结构材料的累积损伤数值达到临界阈值时，结构会萌生疲劳裂纹，经持续扩展后最终发生整体疲劳失效。恒定工况条件下的结构损伤累积具备线性变化特征，单位时间内的损伤增长速率保持稳定状态，损伤速率指标可以反向推导结构极限服役时长。主轴疲劳寿命的定量换算可通过损伤平衡关系完成求解，核心换算公式如下：

$$T_f=\frac{1}{D/T} \qquad (3)$$

式（3）中：T_f 为主轴结构极限疲劳寿命，单位：s；D/T 为结构单位时间累积疲劳损伤。损伤速率参数来源于既定工况下的稳态损伤计算结果，恒定风况环境可以保障损伤速率的计算稳定性。计算过程先取固定时长载荷对应的总损伤，总损伤除以该时长得到单位时间损伤速率。损伤临界阈值取 1，阈值除以单位时间损伤速率得到以秒为单位的疲劳寿命数值[6]。数值结果可以转换为小时、年等工程常用时间单位，方便与风机设计服役年限开展对比。数值计算结果能够直观反映兆瓦级风机主轴在湍流随机振动激励下的抗疲劳性能，可为主轴结构尺寸优化、工艺改进与设备运维周期设定可靠的理论参考。

5 结论

通过兆瓦级风机主轴有限元动力学建模与随机振动疲劳分析，获取主轴固有模态、应力热点分布与应力功率谱特征。谱矩参数结合 Dirlik 模型可实现宽频随机载荷下主轴累积疲劳损伤的定量计算，应力集中区域为疲劳损伤的主要产生位置。频域分析方法可规避时域雨流计数带来的计算开销，适合风机主轴长期湍流风载工况下的疲劳评估。该分析思路可用于同类重载回转轴系构件的随机疲劳计算，未来可拓展不同风况组合下的多工况耦合疲劳分析。

参考文献：

[1] 薛伟建，王建梅，黄虎，等. 考虑预紧力影响的风机轮毂 - 主轴法兰疲劳寿命研究 [J]. 机床与液压，1-11.[2026-08-28][2026-09-15] https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wFrtWXqGzUhJ2ziE0EaJMcFRfLUa5Hvc16B4_hKLyLAIcwiR4WWFo98Vnlmeobnpjx VBWFk1uvdWejVb95szrhjBoOXysTVg1KYOiY7tY5X4PR9gno0wb7Rhgd494s0IbsPqeM_gwWW-uBSDtTu2cDjtXSEbnHYt8eYkg-_5oOAlJezuFJ2Xmw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[2] 李小军. 基于故障树分析法的风机主轴轴承抱死关键技术要点解析 [J]. 新发现，2026(02):13-15.

[3] 郑六玉，刘发炳，潘荣俊，等. 风机主轴超声波检测现场试验研究 [J]. 机械设计与制造工程，2025,54(07):101-106.

[4] 张玮彤. 风力发电机主轴状态非接触检测技术研究 [D]. 长春：长春理工大学，2025.

[5] 罗胜曦，谢东洋，解轲，等. 风机 12.9 级叶根螺栓极限及疲劳承载影响因素分析 [J]. 华中科技大学学报（自然科学版），2025,53(01):86-91,106.

[6] 宁可，王奇，陈纪光，等. 倾覆力耦合的大兆瓦风机主轴 - 齿轮箱法兰结构疲劳寿命研究 [J]. 机械设计，2024,41(07):121-127.

光伏组件设备供应链稳定性提升路径探析

赵 冰

（中国电能成套设备有限公司，北京 100080）

摘 要 光伏组件设备供应链稳定性直接关系到光伏产业安全，当前关键设备供给集中、核心零部件依赖进口、跨境交付不确定等问题突出，仅靠管理手段难以从根本上解决这些问题。本文从技术视角界定供应链结构特征与稳定性评价维度，识别现实技术困境，提出模块化设计与标准化接口、数字孪生与工业互联网协同、国产化替代与技术备份三条技术支撑路径，并从协同仿真验证、试点应用评估、集成方案推广三个层面构建技术集成与验证路径，旨在为光伏组件设备供应链稳定性提升提供技术参考。

关键词 光伏组件设备；供应链稳定性；模块化设计；数字孪生；国产化替代

中图分类号：F274；TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.002

0 引言

光伏组件设备供应链稳定性研究多聚焦采购与供应商管理，对技术结构本身的脆弱性关注不足。关键设备供给集中、核心零部件进口依赖、接口不统一、数字协同弱等技术因素，才是制约稳定性的深层根源，仅靠管理手段难以触及。本文从技术视角界定供应链结构特征，建立稳定性评价框架，识别关键技术困境，提出面向基础供应、风险预判与极端断供三类场景的技术路径，并设计集成验证方案，为光伏组件设备供应链稳定性提升提供方法借鉴。

1 光伏组件设备供应链稳定性的技术内涵与影响因素

1.1 光伏组件设备供应链的技术结构特征

光伏组件设备供应链包含硅片设备、电池片设备、组件封装设备以及重要的零部件，技术结构具有上游集中、中游分化、下游分散的特点。上游的关键设备和主要零部件供应比较集中于少数企业，中游的设备制造环节的技术路线出现分化的现象，下游的组件企业的需求比较分散，并且交付周期也较短。造成供应链单点依赖性强，任何一个环节出现技术上的中断都会引起整个链条的连锁反应，稳定性天然脆弱[1]。技术结构特征是理解供应链稳定性的起点，也为后续评价维度构建和技术路径设计提供了基本依据。

1.2 供应链稳定性的技术评价维度与指标

供应链稳定性可以从供给连续性、技术适配性、交付准时性、质量一致性这四个方面来评价。供给连续性可衡量设备及零部件能否一直供应的能力，技术适应性是指设备同工艺路线相匹配的程度，交付准时性是指设备能否按时到达生产线，质量一致性能否保证设备的性能稳定。四个维度共同构成稳定性评价体系，为后续困境分析与路径验证提供统一参照。评价维度与指标的确立，使供应链稳定性从抽象概念转化为可衡量对象，让技术路径的提出有据可依。具体指标体系如表1所示。

1.3 影响供应链稳定性的关键技术因素识别

影响供应链稳定性的关键技术因素包括四类。一是关键设备依靠进口，PECVD、激光掺杂等设备的供应主要来自国外公司。二是核心零部件国产化率不高，

表1 供应链稳定性技术评价指标体系

评价维度	核心指标	技术含义
供给连续性	供给中断频次、替代周期	设备与零部件持续供给能力
技术适配性	工艺匹配度、接口兼容率	设备与产线工艺路线匹配程度
交付准时性	交付延迟率、运输损耗率	设备按期到达产线能力
质量一致性	故障间隔、良率波动	设备性能稳定水平

作者简介：赵冰（1990-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统。

真空泵、射频电源、精密运动模组等都是从国外进口的。三是设备接口不统一，不同的厂家设备不能互相替换。四是数字协同程度不够高，设备制造商、零部件供应商、组件企业之间存在明显的数据壁垒，风险预警能力弱。四类因素相互交织，共同削弱供应链稳定性。识别这些因素，是后续提出技术支撑路径和集成验证方案的前提。

2 光伏组件设备供应链稳定性的现实技术困境

2.1 关键设备与核心零部件供给集中度过高

关键设备与核心零部件供给集中度过高是首要困境。PECVD 设备、激光掺杂设备、高精度丝网印刷设备等主要设备的供应商比较集中，真空泵、射频电源、精密运动模组这些重要的零部件大多依靠进口，一旦供给方出现产能不足、技术封锁或者物流中断的情况，就会给国内组件生产线带来断供的风险，供应链稳定性受到直接冲击。供给集中度过高意味着替代周期长、议价能力弱，单一环节的技术中断即可沿供应链传导放大，是后续技术路径必须优先破解的核心问题。

2.2 上游原材料价格波动与产能错配

上游原材料价格的波动以及产能的错配都会造成供应链的不稳定。硅料、银浆、靶材等原材料的价格变动直接影响到设备的排产和交付速度，原材料供应不稳定也会造成设备工艺的不适应。产能错配是由于设备产能同组件扩产速度相脱离所造成的，一部分设备的交货时间变长，另一部分设备出现闲置的情况，整个供应链的效率被降低。原材料波动同产能错配互相叠加起来，致使设备制造端无法制订出稳定的排产计划，工艺适配性也随之下降，进一步放大了供应链的不确定性。

2.3 物流运输与跨境交付的技术不确定性

物流运输以及跨境交付有着明显的科技不确定因素。大型设备跨境运输时精密件容易受到振动、温度、湿度等环境的影响，造成运输损耗较高。由于清关技术标准不同而造成设备滞留的现象时有发生，从而使得交货期不能得到保证。由于跨境物流环节技术不确定性大，所以设备到货时间不稳定，给组件企业的生产安排带来困难，进而使整个供应链的稳定性变差[2]。物流和跨境交付的不确定性处在供应链末端，却直接影响设备交付准时性，与前两类困境共同构成供应链稳定性的现实约束。三类技术困境及表现如表 2 所示。

3 光伏组件设备供应链稳定性的技术支撑路径

3.1 设备模块化设计与标准化接口应用

设备模块化设计与标准化接口应用是提升供应链稳定性的基础路径。模块化设计把设备分成真空腔体、传输模组、控制系统等独立模块，降低单点依赖，当任何一个模块出现故障的时候就可以迅速替换掉，不会造成整个机器停止运转的情况发生。标准化接口使得不同的厂家设备之间可以互相替代，并且可以很快地更换，减少了对于某一个供应商的依赖程度，从而使得设备采购由单一供货模式变为多源选择模式。模块化和标准化相结合，使设备供应链由单点刚性供应变为多点柔性供应，供给连续性和技术适配性同步提升。从实施角度看，该路径技术门槛相对较低、改造成本可控、与现有产线兼容性好，企业可在新建产线中优先采用标准化设计，在存量产线中逐步推进模块化改造。因此，它是三条技术路径中最基础、最易落地的一条，其技术逻辑如图 1 所示。

表 2 光伏组件设备供应链主要技术困境及表现

困境类型	主要表现	技术影响
供给集中	关键设备与零部件依赖少数企业	断供风险高，替代周期长
原材料波动	硅料、银浆、靶材价格与供给波动	排产困难，工艺适配性下降
物流不确定	运输损耗、清关滞留	交付延迟，排产计划打乱

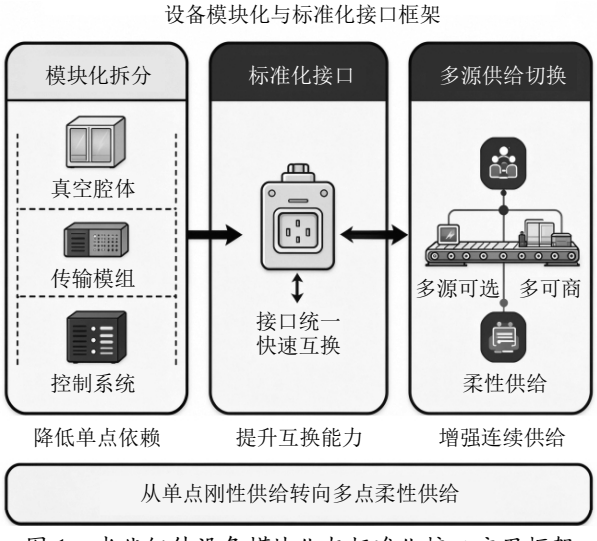


图 1 光伏组件设备模块化与标准化接口应用框架

3.2 数字孪生与工业互联网协同平台建设

数字孪生与工业互联网协同平台建设是提升供应链稳定性的关键路径。数字孪生把设备的状态实时呈现出

来，并且可以对设备的运行状况、零部件的损耗情况以及供应的风险做出预判，使风险在发生前即可被识别，为处置留出时间窗口。工业互联网平台打破设备制造商、零部件供应商和组件企业之间的数据壁垒，达成协同排产、风险预估的目的，从而缩减由于信息迟缓造成的交付延迟现象。两者相融合之后，就使供应链由被动应对变为主动预知，风险处理的时间往前推移，交付及时率及供应稳定度得到明显增强[3]。从实施角度看，该路径需软硬件协同投入，涉及数据采集、模型构建、平台部署等多个环节，初期投入较大，但一旦建成，对稳定性的提升具有系统性、持续性效果。

3.3 关键设备国产化替代与技术备份机制

关键设备国产化替代与技术备份机制是提升供应链稳定性的兜底路径。国产化替代分为整机替代和零部件替代两个方面，整机替代可以降低关键设备的进口比例，零部件替代可以提高核心部件的自主供应能力，两者同时进行才能达到完整的替代效果。技术备份机制依靠多种技术路线一起工作，当某一条技术路线出现问题的时候，还有其他的备选方案可以使用，不会因为某个技术被封锁而造成供应链的断供。从实施上看，国产化替代要经过样机验证、试点应用、批量推广三个阶段，技术备份机制要在设计之初就留出接口以及工艺兼容空间。国产化替代与技术备份结合，使供应链在极端情况下仍能维持基本运转，是前两条路径的重要补充。三条路径分别对应基础、关键、兜底三个层次，共同构成技术支撑路径的完整体系。

4 光伏组件设备供应链稳定性的技术集成与验证路径

4.1 供应链协同仿真与风险预警技术验证

供应链协同仿真以及风险预警技术验证属于技术集成检验的首要环节。在仿真建模方面，采用离散事件仿真方法，将设备制造商、零部件供应商、组件企业作为节点构建供应链网络模型，输入供给中断概率、物流延迟分布、原材料价格波动区间等参数，模拟多场景下的供应链运行状态。通过仿真的方法来模拟出由于供应中断、物流延误、原材料价格变动等原因造成的各种情况，并以此为基础来检验风险预警模型是否准确、及时。验证指标有预警提前量、误报率、漏报率。仿真验证结果显示，协同仿真以及风险预警技术可以很好地发现供应链上的薄弱环节，为技术集成方案优化提供依据，使风险处置从经验判断转向数据驱动。

4.2 国产化替代设备的试点应用与性能评估

国产化替代设备的试点应用以及性能评价属于技术整合检验的关键部分。国产化替代设备在试点产线中应用，从设备稳定情况、工艺匹配度、良率影响三个维度评估性能。设备稳定性以平均无故障时间和故障恢复时间衡量，工艺适配性以工艺参数达标率和接口兼容率衡量，良率影响以试点产线良率波动幅度衡量。评估结果表明，国产化替代设备的稳定性及工艺适配性方面已接近进口设备水平，并且良率的影响也处于可以接受的范围内，具备进一步推广条件，为国产化替代从单点试用走向批量应用提供了实证支撑。

4.3 技术集成方案的稳定性效果评价与推广路径

技术集成方案稳定性的效果评价以及推广途径属于技术集成检验的最后一部分工作。稳定性效果评价是从供给连续性、技术适应性、交付及时性、质量一致性四个维度综合打分，评价技术集成方案的整体效果[4]。评价结果表明，技术集成方案实施后，供给中断频次下降，替代周期缩短，交付延迟率降低，质量一致性提升，整体稳定性得分较实施前有明显改善。推广路径有试点推广、行业标准制定、产业链协同推广这三个层次，逐渐扩大技术集成方案的应用范围，不断提高光伏组件设备供应链的稳定性，形成一个由验证到推广完整的闭环[5]。

5 结束语

通过从技术视角对光伏组件设备供应链稳定性的内涵、困境与提升路径进行分析。结果表明，模块化设计和标准接口可以解决基本供应的问题，数字孪生同工业互联网联合起来可以达到风险预估的目的，国产化替代与技术备份可解决极端断供问题，三者分别对应基础、关键、兜底三个层次，共同构成提升供应链稳定性的技术体系。技术集成和验证途径使上述方案由理论变为实践。未来要加快技术集成方案的实施，增强光伏组件设备供应链的抗风险能力。

参考文献：

[1] 张旭龙.业主方视角下新能源光伏项目EPC模式供应链管理的风险评估与优化研究[J].中国集体经济,2025(25):77-80.

[2] 江燕兴.极高纬度地区光伏电站阵列优化与设备管理策略研究[J].电力设备管理,2025(07):83-85.

[3] 周沈.时间敏感需求下A公司光伏供应链协同研制策略研究[D].上海:东华大学,2024.

[4] 景家锤.基于绿色供应链的废旧光伏组件回收模式与优化研究[D].天津:天津理工大学,2024.

[5] 董一宁.双碳背景下北京光伏设备供应链网络设计与选择[D].北京:华北电力大学(北京),2023.

轮式机械安全性能检验技术规范制定分析

刘 浩

（上海般腾实业有限公司，上海 200093）

摘 要 轮式机械作为现代工业生产中的关键设备，其安全性能检验是确保设备能够安全平稳、高效运行的重要环节，亟须制定适配性强的专项检验技术规范。基于此，本文以推荐性标准《轮式专用机械车安全技术检验项目和方法》制定项目为研究对象，从轮式机械品类多、全生命周期风险识别、新旧设备差异化检验、电动轮式机械检验方法等层面系统剖析了检验技术规范制定中的技术挑战，在此基础上论述了相应解决对策，形成了一套适配轮式机械的安全性能检验技术规范。实践表明，该技术规范覆盖面广泛，能够高效识别轮式机械全生命周期风险情况，有助于保障轮式机械运行的安全稳定，可为促进该领域技术进步提供实践参考。

关键词 产品适配性；全生命周期；风险评价；差异化检验；电动轮式机械

中图分类号：TH2；T-652.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.003

0 引言

随着基建施工、工业生产、现代农业等领域的规模化推进，轮式挖掘机、装载机等轮式工程机械设备的应用边界持续拓展。但轮式机械的作业负荷波动大，工况环境相对复杂，长期作业易出现机身失稳、制动衰退等安全隐患，严重威胁施工安全。然而，现阶段轮式机械安全检验技术规范适配性差，部分老旧设备、全新智能设备无针对性检验标准，且检验流程、技术方案、评价标准等缺乏统一规范，致使漏检误检情况频发。基于此，本文立足于轮式机械作业实际与安全检验现行标准，系统研究其安全性能检验规范的全新制定思路，以期为轮式机械行业安全合规发展提供实践参考。

1 案例项目概况

推荐性标准《轮式专用机械车安全技术检验项目和方法》制定项目，旨在统一行业轮式机械安全性能检验的技术标准。项目基于国内对轮式机械行业统一检验规范的空白，系统梳理规范制定的技术难点，并采取了一系列精细化措施，统筹多品类轮式机械安全检验的统一规范，制定新旧设备、电动轮式机械的针对性检验标准，进一步明确轮式机械安全性能检验的范围、术语、检验项目、方法、技术要求与判定规则，形成完整的标准正文与配套附录，为项目标准实现高品质推广提供了有益助力。

2 轮式机械安全性能检验技术规范制定面临的挑战及应对措施

2.1 多品类覆盖与产品适配性平衡

轮式机械的品类繁多、功能差异化明显，涵盖工程轮式机械、场内机动车、非道路移动轮式机械等多个类别，各类设备作业场景、安全风险特征具有较大区别，检验项目并不统一，导致规范制定难以兼顾通用性及针对性，容易出现标准模糊、适配性不足的问题。对此，项目采取了制定通用安全性能检验标准，叠加明确差异化检验要点的策略，用以解决多品类覆盖与产品适配性的矛盾。项目先建立一个通用的安全检验框架，梳理装载机、挖掘机、推土机等轮式机械共同的核心安全指标，将车身外观、车辆底盘、车辆唯一性等共性项目纳入其中，明确基础的检验方法、检验要求、检验结果处置原则等相关规定，保证全品类设备安全检验的统一规范，以免出现标准模糊化、执行原则不统一的情况[1]。再依据轮式机械应用场景、实际工况等进行进一步的分类，将其分为工程作业类、场内转运类、非道路通行类等，结合不同品类设备的安全性能短板增设相应条款内容。其中，大型装载机等重载工程机械，重点关注其制动热衰退、抗倾覆稳定情况，转运车等场内作业设备侧重于狭窄空间下的转运能力，有无相应防撞警示装置，确保机械运行安全稳定。非道路通行轮式机械则是优化坡道行驶、复

作者简介：刘浩（1975-），男，本科，工程师，研究方向：机动车检测。

杂工况适应性等检验指标，通过分类增设专项检验标准，使其适配不同品类设备的安全隐患点。此标准的制定，可更有效地对不同品类及功能相近的轮式机械安全运行进行规范化检验，提升轮式机械安全检验规范的整体适配性，以此全方位保障轮式机械使用过程中的安全稳定。

2.2 全生命周期风险识别与评价

2.2.1 风险评价逻辑

针对轮式机械整体结构与普通车辆存在明显区别，传动、制动、转向等部件结构差异明显，结构复杂且运动轨迹各不相同，致使安全风险隐患点分散、风险成因复杂的情况，项目重新梳理了轮式机械全生命周期的风险评价逻辑。在该过程中，不再局限于设备某个阶段的检查，而是从设备投入使用到日常作业，再到老化损耗，直至报废退出的全过程开展风险梳理，通过源头识别及过程追踪，将轮式机械的全部风险隐患排查出来。结合轮式机械各系统结构特点，在投入使用阶段细致梳理设备本身自带的结构性短板，提前明确可能引发风险的诱因点位。接着，结合轮式机械的实际运行工况，分析各结构的联动配合情况，用牵引法进行驻车制动试验，再用非接触式汽车速度计、便携式制动性能测试仪，搭载人工测试的方法，进行行车制动试验，评价有无载荷变化、运动状态偏移带来的动态风险[2]。考虑到轮式机械安全风险不是单一问题所导致，可能由结构老化、复杂工况、操作习惯等多重因素叠加所致，因此评价逻辑重点梳理各类风险之间的关联关系，以此厘清安全风险的真实完整过程。待检测结束后，再依据试验结果进行系统化整体判断，通过全生命周期的风险梳理，形成轮式机械安全风险的评价逻辑，将试验结果分析及综合意见反馈汇总成送审稿，作为风险评价的关键依据。项目还搭载了风险库模块，支持对轮式机械的不同结构、不同工况设置隐患排查项，并分级分类管理。对于重载工程机械等高风险设备，自动匹配专项检查表单，通过落实分级管控责任，使风险识别水平达到预设目标。

2.2.2 检验判定指标

面对各类轮式机械差异大、作业场景不同，检验判定标准参差不齐的问题，如何制定可落地的判定指标，且兼顾通用范围及检查精度，成为此次标准制定的一大难点。此次技术规范制定以制动性能检验为例，先采用非接触式汽车速度计检验，按照规定的试车跑道边线，让被检车辆沿中线行驶，直至规定初速度或最高车速后，将变速器设为空档，急踩制动且不得转动方向盘，车辆停止后测量制动初速度及制动距离，检查车辆有无驶出车道边线。再进行便携式制动性能测试仪检验，测量车辆停止后的制动初速度，使用钢卷尺、红外线测距仪检验制动距离[3]。在此基础上，为进一步保证检验判定结果的真实可靠，制动性能判定指标还包含了人工测量，试车跑道如图1所示。

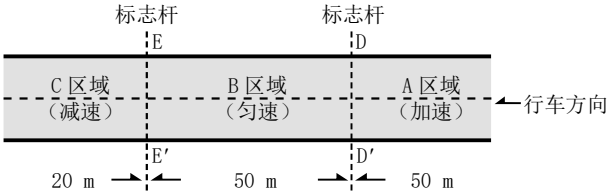


图1 人工测量被检车辆初速度及行车制动路试示意图

在现场放置D-D′和E-E′两处标志杆，使被检车辆沿试车跑道的中线行驶，在A区加速至规定速度后再匀速驶过B区，此时由检测人员用秒表记录车辆从D-D′到E-E′的行驶时间，进行初速度的相应计算。各类检验判定指标如表1所示，若偏离正常区间则视为行车制动存在风险点，由此获得精准可靠的安全性能检验结果。

表1 制动性能检验技术参数表

检测方法	测量范围	最大允许误差	分度值	精度	准确度
非接触式汽车速度计（速度）	5.0 km/h～50.0 km/h	±3.0%	≤0.1 km/h	—	—
非接触式汽车速度计（距离）	1.0 m～100.0 m	±1.0%	≤0.01 m	—	—
便携式制动性能测试仪	5.0 km/h～50.0 km/h	±3.0%	≤0.01 m	—	—
钢卷尺	50.0 m	—	1.0 mm	—	等级2级
激光测距仪（红外线）	0.1 mm～50 000.0 mm	—	1.0 mm	±2.0 mm	—
秒表	0.1 s～600.0 s	—	0.1s	±1/100 s	—

2.3 新旧设备差异化检验要求

经前期调研，目前行业内缺少统一的老旧轮式机械复检规范，现有检测条件参差不齐，新标准对新设备安全要求明确，但若统一套用严格要求约束存量在用设备，容易出现大量旧设备无法合规的情况。为此，项目严格区分新设备出厂检验、在用设备定期检验、设备改造后

变更检验等三类场景，制定差异化的校验要求，以此满足新机高标准要求，并确保覆盖旧设备的实际使用现状。

对于新设备的安全检验，先明确国产车辆新设备外形结构应与产品公告照片保持一致，除法规允许的自行变更情形外，不得存在结构改动、外形改造等情况，从源头规避非标改装设备流入实际使用场景[4]。同时，严格要求新设备发动机号码、驱动电机号码与车辆出厂合格证上的信息完全匹配，而对于常规驱动电机，若电机型号、编号被结构覆盖，则要求预留观察口，或是在外部覆盖件增设永久清晰的编号标识，确保新设备核验流程完整。在存量在用旧设备安全检验的过程中，重点关注安全性能层面，不再硬性要求其对标出厂公告原始外形参数，仅要求车身颜色、外形与车辆驾驶证存档照片无明显差异，不得私改车身颜色、车厢形状及内部结构。对于旧设备的动力号码验证，则以行驶证签注信息为准，要求现场可见编号、系统等级信息与证件内容一致，以此判定为合格，以免因设备常年作业磨损、配件正常更换而造成误判。另外，对于设备因故障维修更换或自行变更情形，单独设置专项检验标准，改造后设备需重新核对结构外形、动力参数等，确保改造后的设备状态符合登记备案要求，防止私自改装带来的安全隐患。通过新旧设备差异化检验，解决适配性冲突的问题，使轮式机械安全性能检验工作实现平稳过渡。

2.4 电动轮式机械新技术适配

轮式机械逐渐向电动化、智能化方向发展，但传统安全性能检验项目以燃油机械为主，对于电动轮式机械的电池安全、充电安全，以及智能轮式机械的系统安全、自主作业安全风险等方面，尚未形成成熟统一的检验方法，难以适配轮式机械技术迭代升级需求。此次规范针对性补充了电动轮式机械专项检验项目，在保留传统机械安全检验的基础上，新增电池安全、充电安全、智能作业安全三类专项检验内容。在该过程中，新增电池性能核查项目，现场测定电池实际容量、续航里程，排查电池老化、容量衰减等隐患，从源头降低设备作业中电池起火的安全隐患。再重点检验电路及充电接口，检测整车电路绝缘性能、线路老化情况，测定接口密封防护能力，以防充电过程中出现漏电、短路问题，以此补齐电动轮式机械电气安全检验的短板[5]。在此基础上，结合半自动、全自动作业设备的运行特征，统一规定急停按钮响应时间标准，确保设备触发急停指令后快速停机，核查设备故障保护逻辑，检验传感器失效、通信中断等突发工况下设备能否自动锁止并进入安全待机状态，确保不会在智能系统失控时引发作业事故。而对于智能轮式机械特有的感知类设备，则检测其在复杂工况下的数据采集、障碍物识别等情况，明确智能作业的安全边界，以此准确评估智能设备安全防护能力，确保设备能够提前识别异常工况并触发预警。

3 轮式机械安全性能检验技术规范制定综合成果分析

案例项目通过一系列精细化措施的落实，在规定期限内完成了轮式机械安全性能检验技术规范的专项制定。该技术规范明确统一检测范围、技术方法及判定规则，可以补齐国内轮式机械安全检验标准短板，且完全满足行业标准发布实施要求。在应用成果层面，该技术规范解决了重复检验、尺度不一带来的成本失控问题，减少了设备生产、租赁及运维等全流程合规成本，具备显著的经济价值。同时，该技术规范可与现有机动车安全检验标准形成互补，大幅提升了行业安全管控的规范化水平。

4 结束语

此次推荐性标准《轮式专用机械车安全技术检验项目和方法》制定项目结合行业检验缺陷，制定了覆盖多品类轮式机械的安全检验技术规范，有效满足了行业推广要求。在此过程中，围绕轮式机械全生命周期风险，合理规划风险评价逻辑及检验判定指标，制定适配新旧设备的差异化检验标准。同时，新增电动轮式机械专项检验项目，顺利攻克了技术规范制定中的技术难题。最终，《轮式专用机械车安全技术检验项目和方法》在发布实施后，获得了各方的高度赞誉，为行业标准的进一步发展积累了宝贵的实践经验。

参考文献：

[1] 刘建利，焦婧琼，刘梅桢 . 新能源轮式起重机高压系统功能安全设计研究 [J]. 工程机械与维修，2025(08):13-15.
[2] 屈云涛，李帅，李波，等 . 轮式起重机安全风险分析评价方法研究 [J]. 中国机械，2024(09):92-95.
[3] 陈作 . 多路况行驶的轮式装载机稳定性分析及安全控制 [D]. 重庆：重庆交通大学，2021.
[4] 丁豪坚，傅耀宇，王可，等 . 轮式装备性能鉴定试验故障等级评定方法研究 [J]. 装备环境工程，2024,21(11):47-54.
[5] 李海涛，马振利，贺永强 . 军用轮式车辆悬挂系统的性能评估与维修 [J]. 今日制造与升级，2023(11):130-132.

图算法在网络关联数据挖掘中的应用探析

李聪瑞

（商洛学院，陕西 商洛 726000）

摘 要 大数据时代的网络数据呈现规模化、复杂化、关联化特征，传统数据挖掘算法难以适配非线性、多维度的网络关联数据处理需求。图算法依托图结构的节点与边关联逻辑，可精准刻画网络数据的关联关系与拓扑特征，成为网络关联数据挖掘的核心技术。本文立足于网络关联数据挖掘的核心需求，阐述图算法的核心原理与适配优势，分析主流图算法的应用场景，梳理技术应用中的现存问题，并提出针对性优化路径，以期为网络关联数据挖掘技术的落地升级提供理论参考。

关键词 图算法；网络数据；关联数据挖掘；拓扑分析；数据挖掘应用

中图分类号：TP311.13；TP393 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.004

0 引言

互联网与信息技术的持续迭代，推动社交网络、物联网、电商平台等场景的数据体量持续激增，各类数据不再是孤立个体，而是形成相互交织的网络化关联体系。关联数据挖掘是从海量杂乱数据中提取隐性关联价值的核心手段，常规挖掘方法仅能处理结构化线性数据。图算法基于拓扑结构解析数据关联，能够突破传统技术局限，直观呈现数据节点的连接关系，当前已广泛应用于各类网络数据挖掘场景，系统探析图算法的实际应用价值具有重要的现实意义。

1 图算法在网络关联数据挖掘中的应用理论基础

1.1 图算法核心原理与分类特征

图算法是以图论为理论支撑，依托节点、边、权重等核心要素构建运算逻辑的数据分析算法，核心原理是将所有网络数据要素进行图结构建模，通过标准化遍历、计算、推演操作，解析图网络的拓扑结构、关联强度、节点权重等核心指标，以此量化数据之间的关联关系。根据应用功能与运算逻辑的差异，主流图算法可划分为四大核心类型，分别为遍历类算法、社区发现类算法、路径分析类算法与权重排序类算法。各类算法具备独立的技术优势与适配场景，能够针对性解决网络关联数据挖掘中的不同问题，同时各类算法可组合应用，大幅提升复杂网络数据的挖掘精度与分析效率。

1.2 网络关联数据挖掘核心内涵

网络关联数据是区别于传统结构化数据的新型数据形态，核心特征是以节点代表数据个体，以连接边代表数据之间的依存、互动、关联关系，整体呈现非线性、网络化、动态化的结构特点[1]。网络关联数据挖掘的核心目标是通过规范化技术手段清洗海量冗余网络数据，挖掘数据表层信息下隐藏的关联规则、拓扑规律与潜在价值，实现无序网络数据的结构化转化。该技术广泛服务于舆情分析、智能推荐、风险识别、网络拓扑优化等多个领域，是大数据价值落地的关键技术支撑。相较于传统数据挖掘聚焦数据属性特征的分析模式，网络关联数据挖掘更加侧重数据个体之间的联动关系分析，更加适配当下复杂网络环境的数据处理需求。

1.3 图算法适配网络关联数据挖掘的核心优势

传统数据挖掘算法多基于数据表、线性序列完成数据统计分析，仅能够识别显性数据关联，无法捕捉跨维度、跨层级的隐性网络关联，同时面对动态更新、结构复杂的大规模网络数据，存在运算效率低、分析误差大、适配性差等诸多短板[2]。图算法的核心优势在于与网络关联数据的结构高度契合，可完整复刻数据的网络化分布特征，直观呈现数据节点的层级关系与联动逻辑。同时，图算法支持动态数据更新分析，能够实时适配网络数据的增减与关联变化，且具备极强的兼容性与拓展性，可适配不同行业、不同场景的复杂网络关联数据挖掘工作，有效弥补传统挖掘技术的短板。

2 主流图算法在网络关联数据挖掘中的具体应用

2.1 遍历类图算法实现网络数据全域挖掘

遍历类图算法是网络关联数据挖掘的基础算法类型，核心代表为深度优先算法与广度优先算法，主要

作者简介：李聪瑞（2005-），男，本科，研究方向：计算机科学与技术。

功能是完成网络拓扑结构的全域检索与数据梳理。在实际应用过程中，深度优先算法以纵向检索为核心逻辑，从单一核心节点出发持续延伸遍历深度，直至完成整条关联链路的全部数据挖掘，适用于挖掘深度层级较深的纵向数据关联关系[3]。广度优先算法以横向扩散为检索逻辑，从核心节点逐层向外拓展遍历范围，全面覆盖相邻节点的关联数据，能够实现网络局部数据的全覆盖挖掘。两类遍历算法相互配合，可完成社交网络关系梳理、设备网络节点排查、舆情传播链路追踪等基础挖掘工作，为后续深度数据解析提供完整的数据基础。

2.2 社区发现算法实现网络数据集群分类

社区发现算法是挖掘网络数据集群关联特征的核心算法，典型代表为 Louvain 算法、GN 算法，核心应用价值是从复杂全域网络中拆分出关联性更强的子网络集群。复杂网络数据整体杂乱无序，不同数据节点的关联强度存在显著差异，社区发现算法可通过计算节点之间的关联密度与耦合程度，将关联紧密的节点划分为同一社区集群，将关联薄弱的节点进行剥离区分。在实际场景中，该算法可应用于社交圈层划分、用户群体聚类、产业关联集群分析、网络舆情阵营分类等场景。通过精准的集群分类，能够帮助工作人员快速区分数据层级，精准定位核心数据群体，提升关联数据挖掘的针对性与有效性。

2.3 路径分析算法挖掘数据关联传导规律

路径分析算法以最短路径算法、关键路径算法为核心，聚焦网络数据节点之间的关联传导路径与联动逻辑挖掘。网络关联数据的价值不仅体现在静态连接关系中，更蕴含在动态的关联传导过程中，数据节点的交互传播、影响传导、联动变化均依托固定路径完成。路径分析算法可精准计算任意两个数据节点之间的最优关联路径，识别网络中的核心传导链路与中转节点，同时能够排查网络数据关联中的断裂节点与异常路径。该算法广泛应用于电商物流路径优化、网络风险传导溯源、信息传播路径分析、交通网络数据联动挖掘等场景，能够精准捕捉数据动态关联的内在规律，实现从静态数据梳理到动态规律挖掘的升级[4]。

2.4 权重排序算法定位网络核心数据节点

权重排序算法以 PageRank 算法、度中心性算法、介数中心性算法为核心，主要用于量化网络数据节点的重要程度，实现核心关联数据的精准筛选。大规模网络关联数据中，不同节点的影响力与价值存在巨大差异，普通挖掘方式无法区分数据优先级。权重排序算法通过计算节点的连接数量、中转频次、辐射范围等核心指标，对所有数据节点进行权重排序，精准定位网络中的核心枢纽节点、高价值关联数据与关键影响因子。在实际应用中，该算法可用于舆情核心传播账号筛选、金融风险核心节点识别、电商核心流量用户挖掘、网络设备核心枢纽定位等工作，有效提升海量网络数据中高价值信息的提取效率。

3 图算法在网络关联数据挖掘应用中的现存问题

3.1 大规模复杂网络数据运算效率不足

当前各行业网络数据呈现爆发式增长趋势，网络节点数量持续增多，数据关联链路更加复杂，形成超大规模的复杂网络体系。传统基础图算法的运算逻辑较为固化，面对海量节点与高密度关联网络时，会出现运算冗余、迭代速度缓慢、算力消耗过大等问题。部分高精度图算法虽然能够保证挖掘精度，但运算流程繁杂，无法适配实时性、动态化的网络数据挖掘需求。尤其在物联网、全域社交网络等超大数据场景中，算法运算滞后性问题突出，难以实现网络关联数据的实时挖掘与动态分析，制约技术的实际应用效果。

3.2 动态异构网络数据挖掘精度有限

现阶段，多数常规图算法适用于结构统一、属性单一的同构网络数据挖掘，而实际应用场景中的网络关联数据多为动态异构数据。不同数据节点的属性特征、关联权重、更新频率存在显著差异，同时网络数据时刻处于新增、删除、关联变更的动态变化状态。常规图算法无法精准适配异构数据的差异化特征，难以精准识别动态变化的隐性关联关系，容易出现数据关联漏判、误判等问题。此外，部分算法对噪声数据的过滤能力较弱，海量冗余噪声数据会干扰节点权重与关联强度的计算结果，进一步降低网络关联数据挖掘的精准度。

3.3 算法组合应用适配性与通用性较差

单一图算法仅能完成网络关联数据的单项维度挖掘，无法满足复杂场景下多维度、全方位的数据挖掘需求，实际工作中需要依托多种算法组合完成综合分析。当前行业内尚未形成标准化的算法组合应用体系，工作人员多依托经验进行算法搭配，存在算法组合不合理、功能重叠、适配性不足等问题。不同图算法的运算逻辑、数据口径、评价标准存在差异，组合应用过程中容易出现数据衔接断层、运算结果冲突等问题[5]。同时，各类图算法的场景通用性较差，针对金融、医疗、工业等垂直领域的专属网络数据缺乏定制化算法模型，技术落地适配性不足。

3.4 图算法模型智能化融合程度较低

大数据与人工智能技术深度融合的行业背景下，数据挖掘工作逐步向智能化、自动化方向升级，但当前多数图算法仍停留在传统数理运算层面，与智能算法的融合深度不足。传统图算法仅能完成数据关联的量化分析与规律梳理，无法实现关联趋势预测、风险预判、智能分类等高阶功能。同时，现有图算法模型的自主学习能力较弱，无法根据持续更新的网络数据迭代优化运算逻辑，需要人工持续调整参数适配数据变化。智能化技术融合的缺失，导致图算法仅能实现基础的数据挖掘功能，难以挖掘网络关联数据的深层潜在价值，无法适配智能化数据应用的行业发展趋势。

4 图算法在网络关联数据挖掘中的优化应用路径

4.1 优化算法运算逻辑，提升大规模数据处理效率

针对大规模复杂网络数据运算效率不足的问题，需从算法底层运算逻辑入手完成迭代优化。技术人员可对传统图算法的冗余运算流程进行精简，简化非核心迭代步骤，引入分布式运算框架，将大规模网络数据拆解为多个子模块并行运算，大幅提升算法处理海量数据的速度。同时可搭建增量运算机制，针对网络中新增、变更的数据节点进行针对性运算，无需重复全域遍历数据，有效减少算力消耗。此外，还可根据网络数据规模分级适配算法模型，小型简单网络采用基础算法提升效率，大型复杂网络采用优化后的并行算法，实现运算效率与挖掘精度的双向平衡，适配大规模动态网络数据挖掘需求。

4.2 优化异构数据适配机制，提升数据挖掘精度

为解决动态异构网络数据挖掘精度不足的问题，需构建适配差异化数据特征的算法优化体系。首先，可在算法前置环节增设智能数据清洗模块，精准过滤网络中的冗余数据、噪声数据与无效节点，减少异常数据对挖掘结果的干扰。其次，对传统图算法的权重计算逻辑进行优化，针对不同属性、不同类型的数据节点设置差异化权重系数，适配异构网络的数据特征。最后，搭建动态更新适配机制，实时捕捉网络数据的关联变化与节点迭代状态，动态调整算法运算参数，精准识别动态网络中的隐性关联关系，有效降低数据漏判误判概率，全面提升复杂异构网络关联数据的挖掘精准度。

4.3 构建标准化算法组合应用体系，强化场景适配

行业需结合不同场景的挖掘需求，构建规范化、标准化的图算法组合应用体系，规避算法搭配的随意性问题。通过梳理各类图算法的功能优势、适用范围与运算特征，搭建算法匹配数据库，根据不同行业、不同场景的网络数据结构与挖掘目标，自动匹配最优算法组合模式。针对算法组合的数据衔接问题，统一各类算法的数据口径与运算标准，搭建数据互通接口，实现多算法运算数据的无缝衔接，避免结果冲突与数据断层。同时，针对金融、工业、舆情等垂直领域，研发定制化图算法模型，结合行业数据特征优化运算逻辑，全面提升算法的场景适配性与通用性。

4.4 推动图算法与智能技术深度融合，实现智能挖掘

依托人工智能、机器学习等前沿技术，推动图算法向智能化、高阶化方向升级，拓展数据挖掘的深度与广度。将图算法与机器学习算法深度融合，让算法模型具备自主学习能力，可依托海量历史网络数据持续迭代运算逻辑，自主优化参数设置，无需人工频繁干预调整。利用深度学习技术优化图神经网络模型，在传统拓扑结构分析的基础上，新增数据特征学习、关联趋势预测、异常关联识别等功能，实现网络关联数据从规律挖掘到趋势预判的升级。同时，搭建智能化数据挖掘平台，集成算法运算、数据分析、结果可视化、智能研判等功能，实现网络关联数据挖掘的自动化与智能化，充分释放网络数据的深层价值。

5 结束语

网络关联数据挖掘是大数据时代数据价值转化的核心手段，图算法凭借独特的拓扑分析优势，成为复杂网络关联数据挖掘的核心技术。本文系统梳理图算法的理论基础与主流应用场景，剖析当前技术应用中效率不足精度有限适配性较差等问题，提出针对性的算法优化与体系完善路径。未来需持续推动图算法的技术迭代与智能融合，完善标准化应用体系，进一步提升复杂网络关联数据的挖掘质量，让图算法更好地服务于各行业大数据分析与智能化发展。

参考文献：

[1] 鲍雨，肖明坤．算力网络技术在天翼视联的应用研究 [J]. 江苏通信，2025,41(03):19-22,45.
[2] 许郑．多元异构网络安全数据可视化融合研究 [J]. 信息与电脑（理论版），2024,36(22):77-79.
[3] 马健兵，徐池．基于论文语义与引用网络的技术发展趋势分析 [J]. 软件导刊，2024,23(11):100-106.
[4] 孙婷婷．巡查机器人路径规划算法与应用综述 [J]. 物联网技术，2024,14(09):127-130.
[5] 任诚，刘静，王宇，等．物联网中虚拟网络功能转发图算法设计 [J]. 计算机科学与探索，2025,19(06):1632-1639.

薄壁风电轴承保持架加工变形控制技术分析

韩泳佳

（江苏神意科技制造有限公司，江苏 泰州 225327）

摘 要 薄壁风电轴承保持架多为铝合金或黄铜等材质，加工时易受切削力、热应力等耦合作用，出现局部塌陷等变形问题。本文以大型风电轴承保持架加工项目为例展开研究，深入剖析了薄壁机加工变形的成因，论述了大直径薄壁环件机加工变形控制技术，具体涉及专用夹具夹紧力优化、去应力工序路线制定等关键内容。经实践验证，该项目形成的系统化加工方案能够有效解决薄壁风电轴承保持架加工过程中的变形难题，大幅提升了工件制作的合格率。

关键词 薄壁环件机；磁力底座；夹紧力优化；热处理；加工应力

中图分类号：TH133.33；TG75 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.005

0 引言

随着我国风电产业的快速发展，大型风力发电机组对核心部件的性能及可靠性均提出了更严格的要求。其中，轴承保持架作为风电轴承的关键组件，承担着引导滚动体运动等重要职能，但该部件结构多为大直径薄壁环件，刚性相对较弱，在车削等机械加工过程中，易受切削力等多重因素耦合影响产生变形，导致部件尺寸出现形状失真等情况，一定程度上制约了产品的最终装配精度。本文将大型风电轴承保持架加工项目作为研究对象，结合薄壁机加工变形的内在机理，探索大直径薄壁环件机加工变形控制技术的应用路径，对提升同类大型薄壁环件的精密制造水平具有重要的现实意义。

1 案例项目背景

1.1 基本情况

本次大型风电轴承保持架加工项目订单数量为 236 件，共计 149 万元。该部件属于大直径薄壁环件精密制造部件，但此次制造的部件存在直径大、壁厚小等特点，对应的加工难度较大且交付时间也较为紧张，这对产品的生产工艺水平提出了较为严苛的挑战。面对上述挑战，项目围绕薄壁件加工变形问题展开了系统分析，深入研究了变形的形成机理与影响因素，据此对专用夹具的夹紧力进行了优化设计，避免因装夹力不当而诱发工件变形；同时制定了针对性的去应力工序路线，有效消除了切削加工产生的残余应力。通过上述技术措施的综合实施，从装夹、切削到后处理各环节形成了完整的变形控制体系，为项目按期高质量交付提供了可靠的技术支撑。

1.2 工艺分析

此次制造的薄壁风电轴承保持架，采用的是 42CrMo4，此类材质在经锻造及热处理后，工件会存在毛坯残余应力，外加构件径厚比大、整体刚性偏弱，会进一步破坏环体刚度的连续性，加工过程中易产生椭圆畸变、平面翘曲、局部塌陷等变形缺陷。在进行车削工序时，需合理控制夹紧方式，规避径向夹紧带来的强迫变形，降低卸夹后的回弹误差，对应的切削参数也需根据材料特性进行合理控制，严格控制加工工艺的切削力与切削热，以减少让刀现象与表层残余应力的累积。在此基础上，工件加工后，需安排应力释放处理工序，抑制工件后续时效的变形问题，以持续保持架圆度、平面度等关键参数的达标效果，使其能够充分满足风电轴承的装配使用要求。

2 薄壁机加工变形成因剖析

项目涉及制造的两款产品，对应直径分别为 1 700 mm 与 1 900 mm，壁厚分别是 16 mm 与 20 mm，详情如表 1 所示。此类产品的径厚比值较大，构件整体结构刚度薄弱，圆度控制要求需控制在 1.4 mm 以内。在常规机加工工艺条件下，工件易产生多源耦合变形：一是在装夹阶段，工件受径向夹紧力影响，环体会产生弹性强迫变形，导致工件在加工时尺寸看似达标，但在卸除夹具后会发生回弹，造成圆度超差。二是切削过程切削力带来的让刀效应，断续切削形成的交变冲击，

作者简介：韩泳佳（1988-），男，本科，工程师，研究方向：机械制造。

会进一步引发工件的局部退让。三是切削热形成的周向温度梯度，会在工件加工去除材料阶段，打破毛坯原有的应力平衡，而残余的应力会重新释放，叠加其余外界因素的影响，致使工件的圆度指标难以满足设计阈值。

表1 产品规格详情表

批号	名称	规格（mm）	材质	计划数量
1	锻件	φ1758×φ1598×t188	42CrMo4	118
2	锻件	φ1919×φ1702×t252	42CrMo4	118

3 大直径薄壁环件机加工变形控制技术

3.1 磁力底座论证与排除

针对常规装夹工艺下薄壁环件易出现回弹、圆度超差等实际问题，项目开展了磁力底座精加工工装方案的专项论证。该类薄壁环件径厚比大、刚性差，若沿用传统三爪卡盘或端面压紧方式，夹紧力集中易导致工件受力不均而变形。经综合比选，确定采用全域均匀吸附的磁力底座装夹方案，以面接触替代传统点式、环式夹紧结构，使工件端面受力均匀分布，消除局部集中应力，从根源上规避强迫变形与让刀变形问题，有效保障了薄壁环件的加工精度与稳定性。但结合客户实际的技术要求，并与客户深度沟通确认后，得知此次42CrMo4材质风电保持架产品，需严禁一切带磁性物件直接接触工件，且产品终检设置了严格的剩磁专项检验项目，明确规定工件加工后不允许存在残余磁性，否则会影响轴承装配精度、运行稳定性、服役寿命等[1]。在此背景下，若采用磁力底座加工，工件加工过程会被磁化，产生持续性剩磁。若要满足质检标准，需配套增设专业去磁设备或专属去磁工序等环节，会额外增加设备采购、工序工时、人工检测等多项成本。因此，综合项目订单体量、交付周期、整体生产成本管控要求等多个方面，认为新增去磁工艺的投入成本过高、性价比较低且无实际落地价值，故摒弃了磁力底座的装夹方案。

3.2 专用夹具夹紧力优化

针对此次1 700 mm、1 900 mm大直径薄壁风电轴承保持架的产品特性，项目开展了装夹受力方式专项优化改进工作。根据传统大型立车四爪装夹工艺以径向向内夹紧为主要受力形式的装夹逻辑，深度剖析夹紧力的直接作用力点位，明确工件易产生径向挤压形变等情况的根本原因，摒弃传统径向夹紧模式，规避径向变形缺陷，创新采用虎钳式专用夹具，用于完成精加工的装夹，以实现夹紧力的结构性优化[2]。该方案主要是使用虎钳作为专用夹具，利用虎钳的工作原理，将夹紧作用力由传统的圆周径向向内挤压，转变为针对工件壁厚的侧向夹持固定。此方式在实际的装夹过程中，能够利用虎钳精准夹持环件的侧壁壁厚位置，全程无任何径向压紧力作用于工件圆环面，从根源上避免工件薄壁环体因径向受力产生的弹性变形、塑性凹陷或后续回弹变形等问题。

虎钳式的夹持点位相对稳定，受力也较为均匀，可有效约束工件加工过程中的微抖动与让刀现象，大幅改善大径薄壁件切削时的应力分布状态，规避断续切削带来的形变偏差。同时，此次受力优化方案能够在无需接触磁化设备，不额外增加工艺成本的情况下，适配产品的无磁加工要求，既能稳定保障工件加工后的圆度精度，完美适配此次大直径薄壁风电保持架的精加工变形控制需求，还能充分满足客户对工件加工的特殊需求。

3.3 去应力工序路线制定

由于此次加工工件所用材质较为特殊，存在工件加工应力集中等工艺难点，所以项目经过多轮工艺的迭代优化，最终确定了粗车、去应力、半精车、放置时效、精车的阶梯式应力释放加工工序路线，以保障产品圆度等关键形位精度能够满足相关技术标准。此工序路线的制定主要以分层切削、逐级释压为核心加工思路，从根源拆解并消除工件加工的残余应力，能够有效规避薄壁环件加工及后续存放或检测过程中的形变问题。其中，粗车工序会优先快速去除工件中的大部分加工余量，打破锻造、热处理毛坯原始的应力平衡状态，将加工时产生的大量切削残余应力，再利用后续专项去应力退火工艺进行消除，解决毛坯初始应力与粗加工应力叠加堆积的问题，避免前期应力遗留导致的后期变形偏差[3]。当工件完成去应力处理后，再对其进行半精车加工，进一步均匀修正工件余量、修整初步形位误差，小幅释放二次加工产生的轻微应力，缩减精加工的切削余量，降低精车切削的载荷。

半精车后增设的自然放置时效工序，能够让工件内部残留的微量应力充分缓慢均匀地释放，规避应力瞬时集中释放造成的扭曲或椭圆变形等问题。经以上工艺打磨，最后精车精加工面临的工件整体应力状态趋于稳定，切削余量小且切削力弱，从而显著降低因切削热或机械力诱发的二次变形风险。

3.4 加工精度与变形控制

鉴于两款薄壁风电轴承保持架对应成品需满足外圆、内孔直径 Φ±0.5 mm、高度 ±0.2，通过上述制定的工件去应力工序路线，以粗精分工序逐级消减变形。在实际的制造过程中，对锻造后工件进行正火细化组织、均匀基体，以稳定材料的内应力。粗车阶段，采用大切削用量快速去除大部分余量，重点在于均衡材料分布并初步修正几何形状，此时不过分追求表面质量与极限尺寸精度，允许变形充分显现[4]。针对去应力处理的工件，则将粗加工累积的残余应力使用退火消除，阻断其在薄壁状态下集中释放，再以较小余量的半精车搭配静置 24 小时工序，使工件的残余应力能够继续缓慢释放，促进工件的变形问题充分外显。此时再搭配小余量的精车锁定工件的最终尺寸，将总变形压缩在精车可修改的范围内。

在此基础上，对工件加工的切削参数进行分级控制，粗车采用 R2.4 大圆弧角刀，进给≤ 15 mm/min，转速≤ 30 r/min，侧重去除效率。精车更换 R0.8 小圆弧角刀，进给降至≤ 10 mm/min，减小切削力与切削热，抑制让刀与热变形。装夹精度随工序递进收紧，粗车找正允差 0.5 mm，调头收紧至 0.3 mm，精车最终调头装夹内孔精修，保证定位一致、降低装夹强迫变形，确保工件成品能够达到相关精度要求。

3.5 试制验证与生产应用

基于项目前期开展的变形机理分析以及分级去应力的工艺路线规划，开展了产品的试制验证工作。结合两款样件外径分别达到 Φ1758 mm、Φ1919 mm，壁厚仅 16.25 mm、20.25 mm 的实际几何特征，以及工件圆度指标要求控制在 1.4 mm 以内的加工要求，严格按照既定的加工工艺路线实施，各工序执行既定的工艺参数。在实际过程中，重点监控粗车后工件的应力释放状态及精车过程中的尺寸稳定性，并利用专用测量机对完工样件进行全尺寸检测。结果显示两款大直径薄壁保持架的实测样件圆度误差稳定控制在 0.8 mm 以内，优于既定的 1.4 mm 的技术指标要求，同时工件对应的端面平面度与径向跳动也完全符合图纸规定。此次试制验证，进一步确认了上述制定工艺路线的有效性，证明该方案能显著抑制薄壁环件在加工过程中的弹性变形与残余应力释放导致的二次变形。

将该工艺应用于产品的小批量试制阶段，该磁力底座装夹工艺被正式纳入风电保持架产品的生产流程。经连续多批次加工验证，采用新工艺加工的工件在尺寸精度与形位公差方面均表现稳定，相关产品顺利通过交检部门的逐项检验，满足图纸技术要求及客户验收标准。从生产统计数据来看，新工艺的成效主要体现在两个维度：其一，单件加工周期较传统装夹方式明显缩减，主要得益于磁力吸附免去了反复调整夹爪、校准压紧力的辅助操作环节，有效压缩了装夹占用的时间；其二，因装夹变形导致的圆度超差返修率得到有效控制，全域均匀吸附使工件受力状态高度对称，从根源上规避了局部集中应力引发的强迫变形问题，产品一次交检合格率显著提升。上述两方面改善共同推动了生产效率与经济效益的同步增长，既保障了此次风电保持架订单的稳定制造与按期交付，满足了客户对高精度产品的批量供货需求，也为公司后续承接同类大直径、超薄壁复杂结构件的精密加工任务提供了可复制的工艺范本，对企业精密加工技术体系的完善与市场竞争力的提升具有积极的推动作用[5]。

4 结束语

大直径薄壁环件的加工变形控制是提升风电轴承制造质量的关键环节。本文所述大型风电轴承保持架加工项目基于对大直径薄壁环件传统加工工艺的分析，以及对薄壁环件加工变形成因的深度剖析，实施了针对性的技术优化。在此过程中，该项目通过筛选装夹方案，结合专用夹具夹紧力的优化，有效解决了薄壁环件在加工过程中的弹性变形问题，并通过制定针对性的去应力工序路线，高效消除了工件的残余应力。同时，搭配对工件加工精度及变形的合理化控制，成功使工件的加工精度达到了规定标准。最终，经试制验证及生产应用，证实了该工艺方案在抑制薄壁件加工变形、提升尺寸稳定性等方面的显著成效。该项目于规定时间之前完成了高质量的任务交付，实现了产品经济效益与制造质量的双重达标。

参考文献：

[1] 刘晟杰，万光虎，聂延艳，等. 基于 DEFORM 的风电轴承保持架窗口冲裁过程仿真研究 [J]. 机械设计与研究，2025,41(03):272-278.

[2] 黄承志，韩瑜. 镍基高温合金薄壁环件的车削工艺研究 [J]. 锻造与冲压，2025(11):44,46,48.

[3] 赵培振，郑世育，郑广会，等. 再结晶退火在风机主轴轴承保持架中的应用 [J]. 锻造与冲压，2023(06):42-44.

[4] 周雨，胡林荣，王俊伟. 高温合金薄壁环件车削变形控制方案 [J]. 金属加工（冷加工），2025(10):48-51.

[5] 凌利月，程德华，张献国，等. 纯钼薄壁环件加工变形控制研究 [J]. 精密成形工程，2025,17(09):204-211.

灯泡贯流式水电站AI巡检监视模式实践研究

罗满江

（广西国能水电开发有限公司，广西 梧州 543000）

摘 要 灯泡贯流式水电站受水头低、机组卧式布置、厂房空间狭长等特点影响，设备巡视点多面广、人工巡检劳动强度大、表计读数与跑冒滴漏等缺陷辨识一致性差。针对旺村电站传统人工巡检频次低、记录依赖人工、缺陷发现滞后等问题，本文以融合AI无人巡检为目标构建了由前端感知设备、AI分析平台和运检组织重构组成的AI巡检监视体系。实践表明，该系统部署80台各类摄像机和12台工业听诊器，支持9类AI识别模型，巡视频次由人工每班2次提升至系统每小时1次，运行组与巡检组分离实现了监视与操作的专业化分工，可为同类低水头灯泡贯流式水电站的智能化巡检优化提供参考。

关键词 灯泡贯流式水电站；AI巡检；智能监视；运检模式；设备状态感知

中图分类号：TK733；TP18 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.006

0 引言

随着水电智能化建设的推进，以人工智能、视频分析和状态感知为核心的智能巡检技术逐步替代传统人工巡视，成为水电站减人增效、提升安全水平的重要手段。灯泡贯流式水电站多布置于平原或丘陵地区的低水头径流式电站，机组采用卧式灯泡体结构，水轮机、发电机和辅机设备集中布置于狭长的厂房流道层，设备巡视通道狭窄、照明条件有限，长期依赖运行人员携带巡检仪逐点抄表、目视检查。旺村电站以融合AI无人巡检为目标引入AI巡检监视系统，对前端感知、AI分析和运检组织进行一体化设计，探索出一条适合灯泡贯流式电站特点的智能巡检路径，为同类存量电站的智能化升级提供技术保障。

1 工程概况与水电站传统巡检方式局限

1.1 旺村电站工程概况

旺村电站位于广西梧州桂江流域，安装3台单机容量20 MW的灯泡贯流式水轮发电机组，总装机容量60 MW，2013年投产发电。电站以发电为主，兼具防洪和航运调节功能。机组采用卧式灯泡贯流布置，发电机位于上游侧灯泡体内，水轮机位于下游侧，水流轴向通过灯泡体进入转轮。厂房分层布置流道层、发电机层和中控室，辅机设备包括技术供水、油压装置、压缩空气、渗漏排水和消防系统，设备分布沿厂房纵向展开，巡视路线长。每台机组对应一套辅机系统，三台机组并列布置后，巡检点沿厂房纵向重复排列，人工巡视需要逐机逐系统核对，巡视路线长、点位多。

1.2 传统人工巡检局限

优化前，电站运行人员按五班三倒方式值班，每班安排2次现场巡检，分别在交接班和班中进行。巡检人员沿流道层和发电机层逐点检查，读取温度计、压力表、液位计和电能表，目视检查有无漏油漏水、有无异响异味。这种方式在实际运行中暴露出明显不足。其一，巡检频次低，每日全场仅6次现场巡视，两小时间隔内设备异常无法及时发现。其二，灯泡体内设备空间狭小、噪声大，人员长期在高噪声环境下工作，劳动强度和职业健康风险较高。其三，表计读数和缺陷描述由人工填写，不同人员判断标准不一，数据难以纵向对比。其四，巡检记录以表格和纸质台账为主，缺乏对设备状态的连续跟踪，多数缺陷依靠经验判断，难以做到趋势预警。

2 灯泡贯流式水电站AI巡检系统总体架构与感知配置

2.1 系统总体架构

AI巡检系统采用“前端感知—边缘汇聚—平台分析—业务应用”四层架构[1]。前端由布置在厂房各层和户外开关站的摄像机、听诊器组成，负责图像和声音数据采集；边缘层由9面汇聚柜和1面屏柜组成，完成数据本地接入、光电转换和预处理；分析层由3台听诊器分析仓和AI服务器组成，运行视频结构化和声音识别算法；应用层将识别结果推送至运行监盘和

作者简介：罗满江（1998-），男，本科，助理工程师，研究方向：灯泡贯流式水电站电气运行及调度。

巡检闭环工单。系统与电站计算机监控系统相对独立，通过标准接口实现告警联动，不直接参与机组控制，保证监控系统安全。数据传输采用光纤环网为主、无线备份为辅的方式，前端设备就近接入汇聚柜，再经光纤上传至 AI 机房。图像数据在本地存储不少于规定周期，AI 识别结果以结构化数据形式存入历史数据库，支持按设备、按时间查询和趋势绘制。

2.2 前端感知设备配置

针对灯泡贯流式电站设备分布特点，前端感知设备按“表计可读、状态可见、异响可听”的原则配置。表计密集的柜面采用微距摄像机对准表盘，实现仪表自动读数；主通道和设备区采用变焦枪型摄像机进行大范围监视；对温度敏感的主变、发电机轴承和油管路采用热成像设备；对易发生渗漏的部位采用专用球机监视；灯泡体内和辅机设备区布置本安型工业听诊器采集设备运行声音[2]。表 1 列出了主要前端感知设备的配置及监测内容。

在布点原则方面，微距摄像机优先覆盖必须人工读数的关键表计，热成像优先覆盖轴承、油路和电气接头等温度敏感点，听诊器优先覆盖灯泡体和易产生异音的转动设备。设备选型兼顾防潮、防尘和抗干扰要求，适应厂房潮湿和电磁环境[3]。

表 1 旺村电站 AI 巡检系统前端感知设备主要配置

设备类型	数量 / 台	主要监测内容
变焦枪型摄像机	26	主通道、设备区大范围监视与细节放大
微距表计摄像机	31	温度计、压力表、液位计等表盘读数
半球摄像机	6	厂房通道、楼梯间等区域监视
热成像筒型摄像机	8	发电机轴承、油管路温度异常监测
热成像球型摄像机	5	主变、开关柜等关键设备测温
跑冒滴漏球机	4	油管路、水管路渗漏监视
本安型工业听诊器	12	灯泡体、辅机设备运行声音采集
合计	92	覆盖流道层、发电机层及户外开关站

2.3 AI 识别模型与功能

AI 分析平台部署 9 类识别模型，覆盖电站主要巡检项目。视觉类模型包括：表计读数识别，自动读取指针式和数字式仪表并换算工程量，与额定范围比较后判断是否越限；“跑冒滴漏”识别，通过图像对比判断油迹、水迹蔓延范围；人员违章识别，检测未戴安全帽、越限闯入和现场操作不规范；设备状态识别，判断指示灯、开关分合位置和闸阀开闭状态；热成像温升识别，在背景温度中识别异常温升点并标记位置。声学类模型基于听诊器数据，提取频谱特征，识别轴承异响、水力振动和阀门内漏等异常声音[4]。

平台对每帧图像和声音进行自动分析，识别结果以结构化数据存储，并对越限项目自动生成告警和工单。与传统人工巡检相比，AI 识别不依赖人员经验，判断标准统一，可实现 7×24 小时连续监视；对常规项目形成趋势曲线后，还能发现缓慢劣化的苗头，把事后告警前移为趋势预警。

模型上线前，电站组织运维人员对现场样本进行了标注和校准：表计读数模型用一个检修周期内的人工读数作为真值进行比对，热成像模型按不同季节和工况建立背景温度库，声学模型在机组停机、空载和带负荷等典型工况下采集声音样本建立基准。模型投运后按季度进行复核，对误报集中的点位调整识别区域和灵敏度，使识别结果逐步贴近现场实际[5]。

3 灯泡贯流式水电站运检模式重构与闭环管理

3.1 组织机构与人员配置

融合 AI 无人巡检模式后，电站将运行值班与设备巡检职能分离，组建运行组和巡检组两个运行小组。运行组配置 5 人，维持五班三倒，负责机组监视、远程操作和负荷调整，人员集中于运行调度班；巡检组配置 4 人，实行 24 小时不定时响应制度，负责现场设备核查、工单处置和定期维护。电站保留运行调度班（分设运行与巡检岗位），通过 AI 监视系统远程上传设备状态，实现少人值守。两组之间通过工单系统衔接：AI 平台发现异常后自动派发工单至巡检组，巡检组现场核实后反馈结果，运行组根据反馈调整监盘重点。

3.2 巡视频次与闭环流程

AI 巡检系统投运后，常规巡视由系统自动完成，巡视频次由人工每班 2 次提升至系统每小时 1 次，每

日全场巡视由约6次增加至24次。系统对表计读数、温度和渗漏进行连续采集，越限自动告警；对未越限的常规项目形成趋势曲线，供运行和检修人员分析。闭环流程为：前端设备采集数据，AI平台识别并判断，异常项生成工单推送至巡检组，巡检组现场核查并处置，结果回传平台归档。该流程将“人工发现—人工记录—人工派发”转变为“系统发现—自动派发—现场核实”，大幅缩短异常响应时间。系统投运前后每日巡视频次的对比如图1所示。

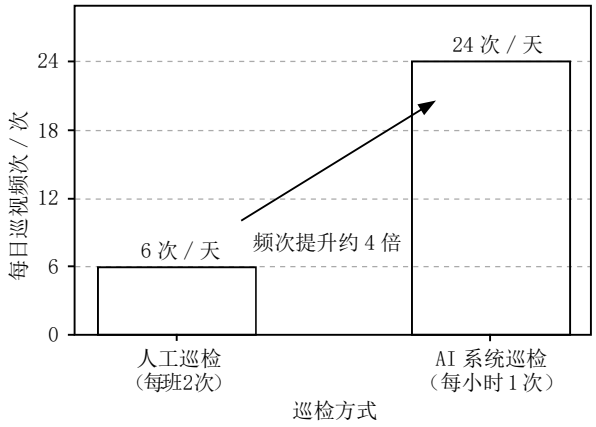


图1 旺村电站AI巡检系统投运前后每日巡视频

3.3 运行监视与现场巡检的协同

AI巡检监视模式下，电站建立“现场核实、监盘研判”的协同关系：运行组在运行调度班通过AI平台和监控系统对全厂设备进行集中监盘，对共性告警进行研判；巡检组在现场负责AI告警的最终核实和设备操作。AI系统生成的结构化数据和告警记录统一归档，作为电站运行分析和检修计划编制的依据。这种模式既保证了设备监视的连续性，又保证了现场处置的及时性，也为后续深化数据应用积累了基础。

4 灯泡贯流式水电站AI巡检监视模式实践分析

4.1 应用成效

从应用情况看，AI巡检监视模式取得了明显成效。一是巡视频次大幅提升，每日由6次增至24次，设备状态监视更加连续；二是人工劳动强度降低，运行人员从高频现场巡检中解放出来，转向监盘分析和异常处置；三是缺陷发现及时性提高，“跑冒滴漏”、温度异常和异响等问题在越限后较短时间内即被识别并派发工单；四是数据可追溯，表计读数和告警记录自动归档，为设备状态分析和检修决策提供了连续数据；五是管理效率提升，AI平台自动生成巡检报表，值班人员无需人工汇总抄表数据，工单闭环情况可在线统计，交接班由“口头交代+纸质记录”转变为“系统数据+工单记录”，交接内容更加客观完整。

4.2 应用问题分析

AI巡检监视模式实践中存在需要完善的环节。微距表计摄像机受表盘污渍、反光和照明影响，读数精度需要定期校验；热成像识别受环境温度变化干扰，温升阈值需按季节和工况调整；声学识别模型在机组不同负荷下的特征差异较大，需要持续积累样本优化模型；AI告警与人工判断之间存在误报和漏报，巡检组现场核实是闭环的必要环节。后续应通过模型迭代、阈值优化和现场样本积累，进一步提高识别准确率，降低无效工单数量，使AI巡检从“辅助监视”逐步走向“预警分析”。同时，随着运行数据和缺陷案例持续积累，可将AI识别结果与设备检修台账关联，逐步建立基于状态的检修策略，把巡检数据转化为检修计划编制和备件储备的依据，使智能巡检的价值从安全监视延伸到生产管理。

5 结束语

旺村电站的实践表明，灯泡贯流式水电站引入AI巡检监视系统，关键不在于单纯增加摄像机数量，而在于前端感知、AI分析与运检组织的协同设计。针对灯泡体卧式布置、厂房狭长、表计密集的特点，合理配置变焦、微距、热成像和声学等多元感知设备，构建统一的AI识别平台，并配套运行组与巡检组分离的运检模式，能够在较低人员配置下实现高频次、连续化的设备状态监视。该模式为同类低水头灯泡贯流式水电站的智能化优化提供了可复制的技术路径和组织经验，也为水电行业少人值守的推进提供了实践参考。未来将持续优化模型和阈值，深化数据应用，进一步释放智能巡检的安全效益和管理效益。

参考文献：

[1] 贾青龙,周文,秦新盛,等.智能巡检机器人在大型水电站中的应用[J].电子技术,2023,52(08):280-281.
[2] 蒲鸥,袁柏秋,陈绍南,等.水电站智能化巡检技术研究进展与展望[J].广西电力,2023,46(06):67-73,80.
[3] 赵书田,赵尕娟.无人机自动巡检技术在积石峡水电站的应用研究[J].水电站机电技术,2025,48(09):69-73,78.
[4] 胡航,闵四海,王利新,等.智能巡检无人机在水电站巡检中的应用探索[J].大电机技术,2026(S1):95-99.
[5] 张旭,南文姝.基于人工智能的水电站智能化巡检技术研究[J].电气技术与经济,2026(01):28-30.

电力系统无功补偿技术应用研究

余振龙

（宁夏龙源新能源有限公司，宁夏 银川 750002）

摘 要 随着新型电力系统建设工作持续推进，风电、光伏新能源机组大规模并入电网，系统容易出现无功供需失衡的情况，继而引发电压波动、电网损耗增大等一系列问题，对电网运行稳定性和电能质量造成不良影响。在电网运行过程中，无功补偿是改善电网调压效果、降低线路损耗、优化系统运行状态的关键技术手段。本文梳理了无功补偿的基本原理与实际作用，对比分析了不同类型无功补偿设备的运行特性，结合宁夏地区风光电源集中并网的实际运行特点，总结了当前新能源场站无功补偿运行中存在的各类问题，并针对性提出了优化改进方案，旨在为新能源场站调控方式改造提供参考，助力新型电力系统实现平稳运行。

关键词 电力系统；无功补偿；新能源并网；电网优化

中图分类号：TM714.3 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.007

0 引言

随着国内“双碳”目标推进，风电、光伏并网规模不断增大，传统以火电为主的电网结构发生明显改变。新能源出力受气象条件影响较大，波动、随机性强，容易造成电网无功供需失衡，引发电压偏移、谐波畸变、网损升高等问题，严重时还会造成机组脱网，影响电网安全稳定运行。宁夏地区风光资源富集，新能源电站集中并网、外送距离远，电压调控压力较大。宁夏龙源新能源所属风光电站也普遍存在出力波动引发的无功失衡、局部电压不稳等运行问题。无功补偿能够就地平衡无功功率，改善新能源并网带来的电能质量缺陷。基于上述现场问题，本文结合各类无功补偿技术的应用特点，依托场站实际运行情况，梳理现有技术短板并提出相应优化对策，为电网无功精细调控及新能源稳定运行提供参考。

1 电力系统无功补偿概述

1.1 无功补偿基本原理

电力系统中，有功功率可以对外做功，无功功率不直接做功，用来建立设备电磁场，却会影响电压与输电效率。变压器、线路这类感性设备，以及新能源配套电力电子装置，运行时都会消耗、扰动无功，容易造成系统无功失衡。

无功补偿一般遵循就地平衡原则，通过并联容性或感性装置，按需补充、吸收无功，调整无功潮流，以此提高功率因数、稳定电压、减少线路损耗并抑制谐波[1]。

1.2 无功补偿的核心作用

系统无功水平决定电压状态，合理补偿能够平抑电压波动，满足新能源场站多变的运行工况。无功短缺会拉低功率因数、增大线路电流与网损，无功补偿可减少无功电流，提升电网运行效益。

无功功率会占用输变电设备容量，补偿后可释放设备容量，增强有功输送能力。另外，新能源并网易带来谐波与电压闪变，不少新型补偿装置在调节无功功率的同时，也能改善这类电能质量问题。

2 电力系统无功补偿技术类型及应用特点

2.1 传统静态无功补偿技术

传统静态无功补偿设备结构简单、造价低廉，日常运维与检修操作难度低、成本少，适配传统电网的运维模式。但该类设备的核心短板是不具备动态主动调控能力，仅能输出固定容量的无功功率，仅适用于负荷运行平稳、无功波动幅度小的传统配电网场景，无法适配新能源电网的动态运行需求。

并联电容器补偿是目前电力系统中应用最广泛的基础无功补偿方式，技术原理成熟，通过在电网节点并联电容器组，输出容性无功抵消系统感性无功，实现无功平衡。该技术具备投资成本低、设备运行能耗小、现场安装调试便捷等优势，综合应用性价比高。但受技术特性限制，其补偿容量固定不可调，无法适配新能源出力随机波动带来的动态无功变化，且补偿效果受电网电压影响极大，电网电压偏低时补偿效能会大

作者简介：余振龙（1992-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气设备技术与运维管理。

幅衰减，因此仅可作为电网基础无功兜底补偿手段[2]。

并联电抗器补偿主要应用于电网轻载运行、长距离输电场景，核心作用是吸收系统过剩的容性无功，杜绝电网空载、轻载工况下的工频电压超标问题。宁夏新能源基地普遍存在远距离输电工况，线路空载、轻载时极易出现末端电压异常抬升现象，并联电抗器可有效改善该问题，是区域新能源送出线路、高压输电线路治理无功过剩的核心设备。

2.2 现代动态无功补偿技术

动态无功补偿技术依托电力电子器件完成无功调节工作，能够实现无功功率的连续、可调控制，设备响应速度快、调控精度更高。面对新能源并网带来的间歇性、波动性无功扰动，这类技术的适配性更好，也是目前新能源场站、智能电网建设中最核心的无功补偿方式。

静止无功补偿器（SVC）依靠晶闸管等电力电子器件完成动态无功调节，能够根据电网实时的无功变化，自主调整补偿容量。和传统静态设备相比，SVC的响应速度更快，可以有效抑制电网电压波动和闪变问题，一般适用于工矿企业负荷、常规变电站以及中小型新能源场站。但从实际运行情况来看，SVC设备运行过程中会产生一定的谐波，调压区间也比较有限，在新能源高渗透率的电网中，运行适配性并不是很理想。

静止无功发生器（SVG）是性能更优的新一代动态无功补偿设备，采用全控型电力电子器件，可实现双向无功快速调节，既能输出容性无功，也能吸收感性无功。该设备响应速度快、谐波抑制效果好、调压精度高，而且运行过程中的能量损耗较低。对比SVC设备，SVG可以更好地适配新能源大幅出力波动的场景，能够实时跟踪风光机组的出力变化，快速平衡系统无功功率。目前，宁夏地区的大型风电、光伏电站，基本都以SVG作为主要的无功补偿设备[3]。

有源电力滤波器（APF）的功能相对多元，不仅可以完成无功补偿工作，还具备良好的谐波治理能力。设备可以针对性补偿系统瞬时无功，抑制电网中的各次谐波，有效解决新能源变流器、变频设备运行引发的各类电能质量问题，大多应用在对电能质量要求较高的新能源集中并网区域。

3 新能源场景下无功补偿技术应用现存问题

3.1 补偿设备配置不合理

一些建成时间较早的新能源场站仍在使用固定电容器补偿装置。这类设备补偿容量固定，难以匹配风光出力的随机波动。风光大发时容易无功过剩、电压越限；出力低谷阶段又会无功不足，造成电压偏低。不少场站补偿容量设计存在问题，容量偏大造成浪费，偏小又达不到补偿要求，加上设备布设点位规划欠佳，难以实现无功就地平衡，局部无功潮流紊乱，降损效果不理想。

3.2 多设备协同调控能力不足

多数场站的SVC、SVG、电容器组单独运行，缺少联动控制策略。新能源机组自带变流器具备无功调节能力，但调控逻辑和外部补偿设备不一致，容易发生补偿重复、响应滞后、调控冲突等现象。无功资源没能得到充分利用，面对新能源并网带来的复杂无功扰动，整体调控效果并不理想。

3.3 设备运维与智能化水平偏低

传统补偿设备自动化程度低，投切依靠人工，响应慢，调控精度有限。部分场站对设备运维不够重视，老化、元器件故障等问题不能及时排查处理，造成补偿精度下降、设备故障变多。很多场站缺少完整的智能监测预警系统，不能实时监测电压、无功的动态变化，无功调控大多凭经验，很难实现精细的自适应调节。

3.4 谐波与无功耦合问题突出

新能源依靠电力电子变流器并网，运行时会产生谐波。谐波会干扰补偿设备，带来无功计算偏差。传统补偿装置只负责调节无功，无法同步治理谐波。谐波和无功扰动叠加在一起，会持续降低电能质量，威胁电网安全运行。

4 电力系统无功补偿技术应用优化策略

4.1 科学优化补偿设备选型与配置

无功补偿可以采用静态与动态补偿相结合的方案，依据各节点工况选配设备。负荷平稳、无功波动小的节点，可保留电容器、电抗器这类静态设备维持基础无功平衡；风光场站这类无功波动大的节点，应更换老旧装置，优先选用SVG、APF等动态补偿设备。

结合宁夏新能源集中并网、远距离外送的特点，测算场站无功需求，合理确定补偿容量与设备位置，实现无功就地平衡，降低远距离输送产生的网损。同时需结合区域电网负荷峰谷特性、新能源发电时序规律开展精细化选型，规避单一设备适配性差、补偿冗余或不足的问题。针对宁夏地区风电、光伏集中连片开发的格局，差异化配置高低压补偿设备，兼顾低负荷夜间工况与满发日间工况的无功需求，大幅提升设备利用率，减少无效投资与设备闲置损耗[4]。龙源孟家湾330 kV升压站在设计时就采用该方案，场站单台主变35 kV侧配置30Mvar电容器做基础无功支撑，搭配±30Mvar的SVG负责动态调节。静态设备托底，

SVG 快速平抑短时波动，改善白天电压偏高、夜间无功不足的问题，保障母线电压稳定在合格范围。

4.2 构建多设备协同无功调控体系

想要提升无功调控效果，需要整合新能源机组变流器、SVC、SVG、电容器组等所有可利用的无功资源，搭建一体化的协同调控平台，统一各类补偿设备的调控逻辑和运行参数。结合电网实时的电压、无功功率、机组出力等运行数据，制定分层、分级的调控方案，让静态设备负责基础无功兜底补偿，动态设备实时跟踪瞬时无功波动，通过两种设备相互配合，提升整体调控效果。

依托电网调度自动化系统实现全域数据互通，打破各类补偿设备独立运行、数据孤岛的弊端，按照“全网统筹、场站分级、设备联动”的原则划分调控层级。针对新能源出力随机性、间歇性特征，设定差异化调控阈值，优先响应动态设备快速调节能力，静态设备滞后兜底，避免频繁投切造成设备损耗，彻底解决传统模式下多设备调控紊乱、补偿滞后、资源浪费的问题。通过这种协同控制模式，能够有效解决多设备调控冲突、重复补偿等问题，提升电网无功响应速度和调控精度，更好地适配新能源出力波动的运行特性[5]。

4.3 提升无功补偿智能化运维水平

现阶段，智能化技术已经广泛应用于电力行业，各新能源场站可依托大数据、物联网等技术，搭建无功补偿智能监测调控系统，实时采集电网电压、无功功率、补偿设备运行状态等关键数据，实现无功扰动自动识别、设备自动投切、故障提前预警的智能化运行模式。

可引入人工智能算法对海量运行数据进行分析研判，精准预判新能源出力波动与无功负荷变化趋势，实现补偿设备的前置性、预判性调控，摆脱传统被动调控的局限。同时，搭建远程运维监控终端，实现设备运行状态全天候在线监测，自动生成运维报表与故障处置方案，缩短故障排查与处理时长，大幅提升无功补偿系统的运行可靠性与智能化管控效率。另外，还需要建立常态化的设备运维检修制度，定期对补偿设备、输电线路、控制系统进行检修和参数校准，及时更换老化、损坏的元器件，保证设备能够稳定、精准运行。除此之外，还要加强运维人员的专业技能培训，提升工作人员的无功调控和设备运维能力，减少人为操作失误引发的电网运行问题。

4.4 实现无功补偿与谐波协同治理

针对新能源并网后谐波与无功扰动相互耦合的问题，单一的无功补偿或谐波治理方式效果有限。各场站可采用无功补偿与谐波治理相结合的一体化改造方案，大力推广 SVG、APF 等多功能复合补偿设备，在完成动态无功调控的基础上，同步滤除电网谐波、抑制电压闪变问题。

新能源并网设备中的变流器、逆变器极易产生谐波污染，且谐波会加剧无功功率损耗、造成电压畸变，形成恶性循环。一体化治理模式可同步兼顾无功平衡与谐波抑制，针对性治理 3 次、5 次、7 次电网主要谐波，有效改善电网波形质量。同时，结合场站谐波实测数据优化治理策略，避免过度治理增加设备能耗，实现电能质量治理与电网经济运行双向兼顾[6]。另外，可通过优化设备控制算法的方式，提升补偿设备在谐波干扰环境下的运行稳定性，减少谐波造成的补偿偏差，从多维度改善新能源并网电能质量，保障电网安全稳定运行。

5 结束语

新型电力系统建设中，无功补偿技术可稳定电压、降低网损，改善电能质量，保障新能源安全并网。新能源大规模接入后，系统无功扰动变得更加复杂多变，传统静态补偿方式已经难以适配电网运行要求。本文梳理了各类无功补偿技术特点，结合宁夏新能源场站现场情况，总结出设备配置不合理、多设备协同调控差、智能化运维不足、谐波无功耦合等问题，并给出对应的优化方案。新能源企业应当根据场站工况优化补偿方案，借助智能调控手段改善并网电能质量，维持电网稳定运行，助力新能源产业发展与“双碳”目标落地。

参考文献：

[1] 林燕.无功补偿技术在电力电气自动化中的应用[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.第三届数字技术赋能工程建设领域数字化转型学术交流会论文集.2026.

[2] 雷浩,叶晓辉,胡文.1000MW 火力发电机组锅炉段配电系统动态无功补偿技术研究[J].电气技术与经济,2026(01):24-27.

[3] 秦铭远.电力变电无功补偿技术在电力系统故障检测中的应用探析[J].电子元器件与信息技术,2026,10(01):46-49.

[4] 陈思远,葛骏颜.电力系统中无功功率补偿技术优化研究[J].电工技术,2026(01):188-190.

[5] 刘鑫,王金鹏.电气自动化中无功补偿技术的应用研究[J].仪器仪表用户,2026,33(01):27-29.

[6] 尚博,尚伶.无功补偿技术在电力电气自动化中的应用[J].光源与照明,2025(12):254-256.

配电自动化提升配网供电可靠性探究

拜旭东，朱鹏宇，胡　双，王俊凯

（国网陕西省电力有限公司彬州市供电分公司，陕西 咸阳 713500）

摘　要　县域配电网线路绵延、站点布设分散，采用人工巡检与故障处置模式，故障排查周期普遍偏长，易造成较大范围停电，难以持续保障供电可靠性。依托实时数据采集与就地自愈控制机制，配电自动化可有效压缩故障隔离及供电恢复时长。本文从配电网供电可靠性影响因素与配电自动化作用机理出发，探讨配电自动化系统架构设计、核心功能，以及工程落地与运维管理相关策略，以期为相关人员提供参考。

关键词　配电自动化；配网供电；故障处置；设备运维；通信传输

中图分类号：TM727；TM76　　**文献标志码**：A　　DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.008

0　引言

电力供应稳定可靠是保障各类经济活动有序开展、满足社会民生基本用电需求的重要前提。配电网处于电力输配体系末端，其运行水平直接决定终端用户的用电体验。随着配电网覆盖范围持续拓展、网络拓扑结构日趋复杂，传统粗放式人工运维模式已难以适配当前配电网运行管理需求。融合状态感知与自动控制能力的配电自动化系统，是提升配电网供电可靠性的核心支撑。明晰该项技术工程落地的实施路径，对夯实电力供应保障能力、推进配电网智能化转型升级具有重要的现实意义。

1　配网供电可靠性的影响因素与自动化作用机理

1.1　故障处置的时效瓶颈

传统配电网发生故障后，处置流程多依托用户报修启动。运维人员接到工单后赶赴现场，沿线路逐杆、逐段开展故障定位。县域配网线路大量途经村镇、丘陵区域，部分偏远区段单程通勤耗时便可达十余分钟，人工排查平均耗时超40 min。确定故障点位后，仍需现场操作隔离开关完成故障区段隔离，再依次恢复非故障区域供电，完整处置流程通常持续1 h～2 h，停电波及范围广、用户停电时长偏长。若遭遇夜间降雨、暴雪等恶劣天气，巡线可视条件变差、道路通行受阻，故障处置时长将进一步增加[1]。

1.2　设备运维的覆盖盲区

县域配网线路广泛分布于山区、林地与农田区域，现有一线运维人力难以匹配全域运维需求。大量支线、分支杆塔地处交通不便区域，单次现场巡检往返耗时较长，年度巡检覆盖率与巡检深度难以保障，极易形成长期监管薄弱地带。加之传统巡检高度依赖运维人员经验，对导线内部劣化、接头隐性发热等无法直观观测的潜伏缺陷辨识能力有限。绝缘老化、接头锈蚀等渐进性缺陷无法通过常规目视巡检实现早期识别，通常发展至短路、线路跳闸后才会被发现。由于缺少常态化监测数据支撑，运维工作长期处于被动响应模式，难以落实隐患前置干预等预防性管理措施。

1.3　通信传输的支撑短板

早期投运的配网设备普遍未配套专用统一通信通道，不同厂商设备的通信接口、数据协议互不兼容。加之远离城镇的山区公网信号覆盖不足，设备运行状态难以实时回传；部分站点通信时延波动较大，故障告警信息传输至调度端耗时可达十几秒至数十秒，存在局部故障扩大引发整条线路停电的风险[2]。

针对以上三类突出问题，配电自动化依托实时数据采集、就地智能决策、远程协同调度形成完整工作链路。现场终端持续采集线路运行工况，替代低效人工巡检，及时捕捉各类运行异常；边缘终端可就地完成故障判别与开关控制；标准化通信通道打通设备与调度主站的数据交互链路，有效缩短故障处置周期，降低停电对居民片区、产业园区造成的影响。

2　配电自动化系统的架构设计与核心功能

2.1　感知层终端设备配置

感知层主要部署智能分段断路器、架空故障指示器及一体化电量传感器。其中，智能分段断路器内置微处理器与电流检测单元，适用电压等级10 kV，额定

作者简介：拜旭东（1999-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气工程及其自动化。

电流 630 A，短路开断容量不低于 20 kA；故障电流检测响应时间小于 1 s，接收分闸指令后动作时延控制在 30 ms 以内。架空故障指示器采用卡装式结构，安装作业无需停电，可同步监测相电流、零序电流与导线温度，电流测量精度 ±5%；故障触发后 2 s 内完成翻牌、闪光指示，并向通信模块上传告警信息。一体化电量传感器安装于电缆接头、开关进出线节点，采样频率 1 Hz，电压、电流测量精度可达 ±0.5%，能够精准反映节点负荷波动与温升趋势，为设备隐患预警提供数据支撑。安装作业中需保证传感器与导体表面紧密贴合，必要时填充导热硅脂，减小接触热阻[3]。

2.2 混合通信层组网方案

通信层采用“光纤主干、无线补充”混合组网方案，兼顾数据传输可靠性与工程建设成本。沿 10 kV 主干线路敷设 OPPC 光缆，传输速率 10 Gbps，打通变电站主控室与主干线路智能开关节点，为核心站点提供大带宽、低时延的数据传输通道。分支线路与偏远负荷点配置工业级通信模块，兼容 IEC61850、MQTT 双通信协议，依托多协议网关实现不同厂商设备的数据格式转换。针对公网信号薄弱的山区，加装高增益定向天线，将天线固定于杆顶支架并向下倾斜 15°，规避山体与高大林木遮挡，保障信号接收稳定。对于信号极度薄弱区域，增设北斗短报文传输模块作为备用通道，仅承载故障告警、开关状态等关键信息，保证极端工况下核心数据可靠传输。

2.3 边缘端故障自愈逻辑

边缘计算单元部署在变电站出线柜与主干开关节点，内部载入配电网拓扑模型，内置独立故障处置逻辑，无需等待主站下发指令，即可就地完成故障定位、区段隔离与供电恢复。当相电流突变量达到额定电流 2 倍以上，或零序电流大于 5 A 时，系统启动故障判别流程，融合多源监测数据，通过拓扑遍历锁定故障区段。完成定位后，边缘单元向故障区段两侧开关下发分闸指令实施物理隔离，从指令下发至隔离完成平均时长不超过 90 s。随后系统自动搜寻备用供电路径，校验转供线路承载能力，满足约束条件后依次下发合闸指令，逐步恢复非故障区域供电。整套自愈流程无需人工介入，调度主站同步接收设备动作日志与状态信息，主要承担事后核查、信息归档工作[4]。

2.4 云端调度优化模块

云端调度主站汇聚全域配电网运行数据，具备实时状态监测、负荷优化调控、预测性维护三大核心功能。状态监测界面依托实际网络拓扑展示实时运行参数，数据刷新周期 1 s，越限告警响应时延小于 1 s；故障发生后直观展示故障点位、隔离进程与供电恢复范围，便于调度人员掌握电网整体态势。负荷优化功能适用于负荷高峰、故障转供场景，以全网电压偏差最小、线路过载率最低为优化目标，自动求解网络重构方案，单次运算时长控制在 2 min 以内，生成的开关操作序列可直接下发至边缘单元执行。预测性维护模块持续采集断路器操作次数、绝缘部件温度等运行数据；当设备累计动作次数超 10 000 次或运行温度高于 75 ℃时，自动触发预警，并生成按风险等级排序的运维工单，指导运维人员提前消除设备隐患，降低配电网非计划停电故障发生概率。

3 配电自动化落地实施与运维保障路径

3.1 分区域差异化部署策略

配电自动化建设不宜全线统一采用高标准配置，应当结合供电区域负荷重要等级、线路规模与历史故障发生频次，将实施区域划分为三类并制定差异化配置标准，兼顾供电可靠性提升效果与工程投资成本。城区核心负荷区域包含商业集聚区与大型居民社区，10 kV 主干线路全线布设三遥智能开关，分段开关布设间距控制为 2 km，所有分支线路首端装设故障指示器，实现全线运行状态可监测、开关设备可调控。城郊一般负荷区域在主干线路关键分段节点配置二遥智能开关，为重要负荷分支增设故障指示器，优先保障主干线路故障快速处置能力。山区及偏远农业区域线路绵延、负荷密度偏低，仅在主干分界节点与大分支入口布设简易故障指示器及电动隔离开关，首要实现故障精准定位，有效降低人工巡线压力与交通运维成本[5]。

3.2 设备选型与安装规范

设备选型优先考量户外环境适应性与后期运维便捷性，核心技术参数需满足长期现场运行条件。智能开关外壳防护等级不低于 IP65，适应 -30 ℃～65 ℃环境温度，防污等级达到Ⅳ级，适配县域露天、多尘、温差波动大的运行场景。故障指示器内置长效一次性电池，使用寿命不少于 8 年，低功耗待机电流小于 10 μA，减少电池更替产生的运维开销。安装施工执行标准化作业要求：智能开关安装于电杆横担下方，对地高度不低于 4.5 m，操作机构朝向巡检通道，便于现场作业；故障指示器卡设于导线绝缘层外部，三相设备布置在同一断面，间距不小于 30 cm，规避电磁相互干扰；电缆接头测温传感器紧贴导体表面，间隙填充导热硅脂，保障温度采集精度。通信天线固定于杆顶支架，避开高大林木、建筑物遮挡；安装完毕后开展信号强度实测，

指标不达标时调整天线倾角或增设信号放大装置。

3.3 常态化运维管控标准

日常巡检实施分区频次管控：城区设备每月开展一次现场巡检，城郊设备按季度巡检，山区设备巡检周期为半年；遭遇自然灾害等特殊情形，按需加密巡检频次。巡检重点核查设备外观完好状态，并检测现场通信信号水平。巡检过程同步记录终端供电工况、开关储能状态以及接地、密封等关键部件情况，建立隐患分级清单，依据缺陷严重程度划定整改时限，实现隐患闭环跟踪管理。设备台账推行一物一码数字化管理，扫码即可调取全生命周期运行记录。供电企业每年组织全线故障模拟演练，针对故障定位偏差、开关动作超时等点位及时排查整治。同时将通信链路在线率纳入常态化考核，主干节点在线率不低于99.5%，分支节点不低于98%;连续离线时长超过24小时的站点，需在3个工作日内完成故障修复。

3.4 运维能力配套建设

运维班组实行调度端、现场端双向人员配置。调度人员需熟练掌握主站操作、故障研判与网络重构方案编制；现场运维人员精通设备安装调试、故障排查及元器件检修更换。培训内容兼顾自动化终端原理、混合通信故障排查、边缘自愈逻辑等理论知识，同时增设恶劣工况下应急处置科目，建立师带徒常态化培养机制，缩小新旧人员技能差距。企业每年组织两轮集中技术培训并配套现场实操考核，人员考核合格后方可独立承担作业任务。每季度开展故障处置复盘工作，结合真实停电案例复盘自动化系统动作逻辑与执行成效，综合分析定位失准、动作超时等问题成因，针对性优化系统参数与故障处置策略。为一线运维人员配备移动运维终端，支持就地读取运行数据、开关远程试操作、设备台账查询等功能，减少往返调度中心核验信息的耗时，全面提升现场故障处置效率。

3.5 工程建设全过程质量管控

配电自动化工程建设周期跨度大，涉及设备供货、现场施工、系统联调等多个环节，需建立覆盖全流程的质量管控机制，避免因建设疏漏留下长期运行隐患。项目开工前，技术人员结合线路台账、现场地形开展实地勘查，细化终端点位、通信通道架设方案，同步完成施工图纸会审，从源头规避终端安装位置不合理、通信链路规划缺陷等问题。设备进场阶段落实抽样检测制度，核对设备型号、技术参数与采购标准保持一致，重点查验智能开关、通信模块、传感器的出厂试验报告，杜绝不合格产品进入施工现场[6]。

现场施工严格执行标准化工艺规范，安排专业监理人员全过程旁站监督，重点把控设备接地施工、导线接线、通信线缆敷设等关键工序。单项施工完成后及时开展单体调试，核查终端数据采集精度、远程控制响应性能；片区施工结束后组织系统联调，模拟相间故障、接地故障等多种工况，检验边缘自愈逻辑、主站信息交互是否满足设计要求。工程竣工不能直接转入常态化运维，应当设置不少于三个月的试运行阶段。试运行期间持续跟踪终端在线率、故障动作正确率，收集调度与现场运维人员使用反馈，及时整改系统参数不匹配、信号传输不稳定等问题。试运行验收合格后方可正式移交运维班组，同步完成竣工资料、图纸、设备台账完整归档，实现建设环节与运维环节无缝衔接，保障配电自动化系统长期稳定发挥效能。

4 结束语

配电自动化对提升配电网供电可靠性具有重要价值。供电企业应在持续优化网架结构的基础上，动态调整自动化终端布设密度，同步完善配电网常态化运维机制，持续强化运维队伍专业能力，结合区域负荷变化与故障多发点位开展差异化建设，兼顾设备投入成本与实际运行效益，强化各系统之间的数据互通共享，打通监测、研判、处置全业务链条，减少信息孤岛带来的处置滞后问题，分阶段扩大自动化终端覆盖范围，在现有建设条件下稳步提升配电网故障抵御水平。

参考文献：

[1] 崔吉,李显鹏.配电自动化终端运行状态检测与可靠性分析研究[J].实验室检测,2026,04(12):140-143.

[2] 西秋敏,杨涛,殷玉亮.智能电网环境下配电自动化设备的机械结构可靠性研究[J].装备维修技术,2026(03):90-93.

[3] 卢跃宇,赵永和,施成勇.配电自动化系统机电执行机构可靠性研究[C]//中国企业评价协会科研成果出版与交流专业委员会.首届工程建设与技术变革学术交流会论文集(下).2026.

[4] 姚彦君.10kV及以下配电网中的配电自动化技术探析[J].电力设备管理,2026(08):46-48.

[5] 韩继业,华杰方,钱博辉.基于智能配电自动化的配电网供电可靠性提升系统设计研究[J].电气技术与经济,2026(04):19-22.

[6] 陈炜,戚耀辉,张建涛,等.配电自动化对提升供电可靠性的量化分析[J].黑龙江电力,2026,48(01):49-51,82.

水电站数字化运维平台建设与应用实践

韦佰泽

（广西国能水电开发有限公司，广西 梧州 543000）

摘 要 中小型水电站长期依赖人工巡检和分散监控，具有巡检频次低、异常发现滞后、数据孤岛等特征。结合灯泡贯流式水电站车间化改造实践，构建集前端感知、网络传输、数据中台和业务应用于一体的数字化运维平台，实现视频智能巡检、设备状态监测、移动巡检闭环和运行决策支持。平台投运后，日常巡视频次由每天 6 次提升至 24 次，异常响应时间由约 2 小时缩短至 10 分钟以内，现场值守人员相应压减。实践表明，数字化运维平台能够有效提升水电站设备监控的连续性和运维管理的精细化水平。

关键词 水电站；数字化运维；智能巡检；状态监测；闭环管理

中图分类号：TV74；TP399 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.009

0 引言

随着视频识别、边缘计算、物联网和工业互联网平台等技术逐步成熟，为水电站从“人防”向“技防 + 人防”转变提供了条件。建设数字化运维平台，把分散的监控、巡检和检修数据汇聚到统一平台，用智能算法替代部分人工重复性检查，成为中小型水电站提升运维水平的重要路径。灯泡贯流式电站厂房紧凑、设备密集，水轮机层和水车室空间狭小，人工巡检行走距离长、观察角度受限，恰好适合用固定摄像机和智能识别替代部分人工巡视，具有较强的代表性。本文结合灯泡贯流式水电站车间化改造实践，介绍数字化运维平台的架构设计、关键功能、应用成效和运行中需要注意的问题。

1 水电站运维现状与数字化需求

1.1 传统运维模式存在的问题

传统水电站运维主要依赖人工巡检和数据采集与监视控制系统（SCADA）集中监控，人工巡检根据班次定时开展，单台机组每天巡检 6 次左右，两次巡检之间设备状态处于“盲区”；现场巡检受人员经验和疲劳影响，对温度、油位、泄漏和表计读数等异常的识别存在漏判，夜间和恶劣天气下漏检概率进一步增大。SCADA 系统以运行参数越限报警为主，对缓慢发展的缺陷和视觉可见的“跑冒滴漏”缺乏感知，参数未越限时设备已经劣化的情况难以被及时发现。巡检记录以纸质表单或分散电子表格为主，缺陷从发现、派工到销号缺乏闭环跟踪，数据难以积累和分析。运行人员交接班时设备状态主要靠口头和书面记录传递，班次之间对缺陷发展过程缺乏连续掌握，容易出现同一问题重复发现、重复处理却无人系统跟踪[1]。老旧机组故障逐渐增多，备件更换和检修记录分散在不同班组，管理人员难以从全厂视角统筹安排检修计划。随着老旧机组进入故障多发期，单纯增加巡检频次和人员并不能从根本上解决问题，反而进一步加剧人员紧张。各子系统之间数据不互通，运行、检修和管理各自形成数据孤岛，管理人员难以从全厂视角掌握设备状态。

1.2 数字化运维平台建设目标

数字化运维平台的建设目标，是在不改变现有运检组织框架的前提下，用数字化手段把设备状态“看得更清、巡得更频、响应更快、管理更闭环”。具体包括：实现关键部位视频和状态量的全天候连续监测；用智能算法自动识别“跑冒滴漏”、温度异常、表计超限和人员行为等问题；将巡检、报警和检修工单统一到一个平台，形成“发现—派工—处理—复核—销号”闭环；为运行分析和设备状态评价积累连续数据。平台设计上兼顾新建和改造电站，强调利旧和分步实施，避免一次性大投入。建设中坚持“实用、可靠、可扩展”原则，优先改造故障多发、人工巡检困难的部位，再逐步推广到全厂，防止平台建成后因操作复杂而闲置。建设过程中同步梳理设备台账和巡检点位，把原来分散在各班组的检查标准统一到平台，避免线上线下两套要求。

作者简介：韦佰泽（1989-），男，本科，助理工程师，研究方向：水电站运维。

2 水电站数字化运维平台总体架构

2.1 前端感知层

前端感知层由高清摄像机、热成像设备、声学采集装置和机组在线监测装置组成。针对水轮机层、发电机层、球阀层和水车室等关键部位，配置变焦枪机用于设备状态扫视、半球摄像机用于室内定点监视、热成像筒机用于温度异常识别，配合本安声学装置捕捉机械异常声响。表计读数通过微距摄像机近距离采集，“跑冒滴漏”和油位通过定点镜头自动识别。前端设备根据区域分组供电和组网，关键部位双镜头覆盖，消除巡检盲区。摄像机镜头加装防护罩和自动吹扫装置，适应厂房内潮湿、多尘和油污环境，减少因镜头脏污造成的误报。对球阀、水车室等空间狭小部位，选用小型半球和广角镜头，保证关键设备无遮挡；对油槽、水管法兰等易泄漏点，定点安装近距离镜头，提高识别稳定性。

2.2 网络与边缘计算层

网络层负责把前端数据可靠传输到监控平台。厂内采用工业以太网汇聚视频和状态数据，重要信号双链路冗余；跨厂远程监视通过电力专网或VPN接入集控中心。边缘计算节点部署在机房侧，承担视频流预处理、AI模型推理和本地报警，减少上行带宽压力，保证网络中断时本地报警不丢失。关键报警根据“先本地声光、后平台推送”的顺序发出，避免依赖远程平台才发现异常。网络设计考虑水电站厂区大、设备分散的特点，在桥架和设备间就近设置接入交换机，光纤环网传输，提高可靠性。视频存储根据关键点位循环录像不少于30天，报警抓拍和短视频单独长期保存，便于事后追溯和事故分析[2]。

2.3 数据中台与AI模型层

数据中台统一接入SCADA实时数据、视频流、巡检记录和检修工单，完成数据清洗、时间对齐和存储，形成设备台账和历史数据库。AI模型层根据业务场景配置识别模型，覆盖油位水位和表计读数识别、温度异常识别、“跑冒滴漏”识别、机械异响识别和人员行为规范识别等场景。模型在边缘侧推理结果和视频抓拍一同上传，作为报警和工单依据。模型根据现场样本持续优化，降低误报和漏报。数据中台预留标准接口，便于后续接入水情、发电计划和物资管理等外部系统，避免形成新的信息孤岛。数据存储根据原始数据、报警记录和报表分层管理，热数据保留近期明细、冷数据归档历史趋势，兼顾查询速度和存储成本[3]。

2.4 业务应用层

业务应用层面向运行、巡检和管理人员，提供实时监视、智能报警、移动巡检、工单管理和运行分析等功能。实时监视画面根据厂房区域组织，值班人员在集控室即可完成原来需要现场巡视才能看到的部位；智能报警自动推送到值班人员和巡检人员；移动巡检通过手机或平板根据二维码点位确认，巡检轨迹和结果实时回传；工单根据报警自动生成，处理过程全程留痕；运行分析根据日、月汇总报警趋势和设备状态变化。应用界面根据岗位差异化设计，运行人员看监视画面，巡检人员看待办工单，管理人员看统计报表，减少跨岗位操作干扰。大屏集中展示全厂设备状态和报警概况，值班人员一屏掌握全厂运行情况。

3 水电站数字化运维平台关键功能与应用实践

3.1 智能视频巡检替代人工定时巡视

智能视频巡检把原来由人工步行完成的设备状态扫视转为由摄像机根据预设路径自动巡航。平台根据机组和区域设定巡航方案，变焦枪机在预定点位停留并抓拍，AI模型自动比对油位、水位、表针位置和温度，发现异常立即报警并推送截图。单台机组由原来每天6次人工巡检，提升为每天24次自动巡航，两次检查间隔由约4小时缩短至1小时以内。对夜间和恶劣天气等人员不便到场的时段，视频巡检实现了不间断覆盖。值班人员在监控屏上即可完成常规巡视，现场巡检人员由“走完全部点位”转为“处理报警和重点复核”，现场工作内容更加聚焦。对巡检中确认无异常的点位，系统自动记录巡检轨迹和时间，防止漏巡和代签。对夜间时段，视频巡检替代了人工照明巡视，既减轻了夜间巡检劳动强度，也避免了人员在设备间穿行的安全风险[4]。

3.2 设备状态监测与分级预警

平台对温度、振动、油位和压力等状态量设定多级阈值，正常状态由数据中台持续记录；接近预警值时提示值班人员关注；达到报警值时自动生成工单并通知巡检人员现场核实。热成像和声学装置补充了SCADA不直接采集的温度分布和机械声响信息，使缓慢发展的轴承温升、金属摩擦和阀门内漏等问题能够在劣化早期被发现。报警根据严重程度分级，一般问题纳入日巡检，紧急问题立即通知处理，避免报警过多造成“狼来了”效应。对反复报警的点位，平台自动汇总报警频次和持续时间，辅助判断是否需要安排停机检查。对温度和振动趋势缓慢上升的设备，平台根据周生成

变化曲线，避免因单次数值正常而忽视长期劣化。报警信息同时附带抓拍画面和实时数据，值班人员无需现场即可初步判断异常性质[5]。

3.3 移动巡检与缺陷闭环管理

现场巡检人员使用移动终端根据二维码点位完成检查，扫码确认到位，拍摄现场照片并填写检查项。发现缺陷时直接在终端生成工单，自动附带点位、照片和描述，派工到相应检修人员；处理完成后拍照复核，由专人销号。整个过程在平台上留痕，管理人员可根据设备、根据时间统计缺陷数量、处理时长和重复缺陷。相比原来纸质表单人工流转，缺陷平均处理周期明显缩短，重复发生的问题也更容易被追溯。工单超期未处理时平台自动升级提醒，防止小缺陷拖成大故障。对同一设备反复出现的缺陷，平台自动汇总历史处理记录，检修人员到场即可了解此前处理方式和备件情况，避免重复排查。

4 水电站数字化运维平台应用成效与问题分析

对照 1.2 节提出的建设目标，选取平台投运前后各 6 个月的运维数据逐项核验，主要指标对比如图 1 所示。日常巡视频次、异常响应时间和缺陷闭环率等核心指标均明显改善，基本实现“看得更清、巡得更频、响应更快、管理更闭环”的预期。

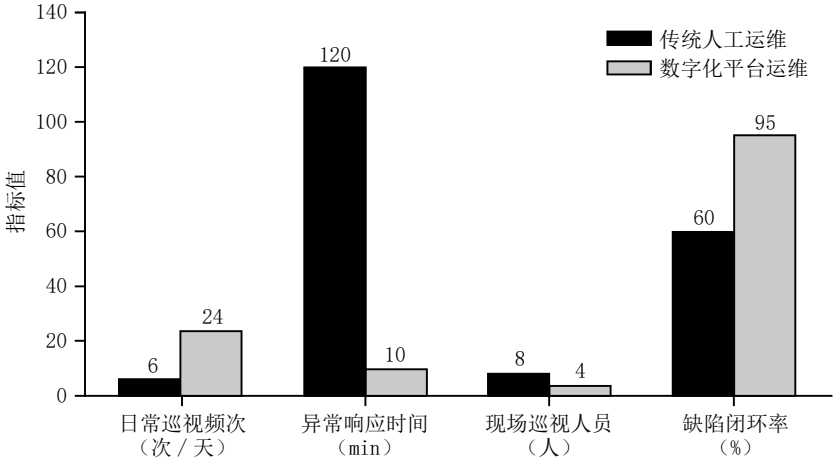


图 1 传统运维与数字化平台运维关键指标对比

在取得成效的同时，平台运行中也暴露出一些问题。一是 AI 模型在光照变化、镜头污渍和设备外观改造后需要重新校准，初期误报率偏高，需要一段时间的样本积累和调优；二是部分老旧仪表不具备数字化读数条件，仍需人工录入，影响自动化程度；三是运行人员对平台功能的熟悉程度不一，部分报警仍根据传统方式处理，平台价值没有完全发挥。这些问题通过建立模型定期巡检和误报复核机制、补充表计数字化改造、加强操作培训逐步改善。从长期看，平台的成效不仅在于减少了人工巡视量，更在于把设备状态数据连续保存下来，为状态检修和运行优化提供了原来不具备的数据基础。下一步可结合设备台账和运行年限，逐步探索基于历史数据的故障趋势预测，把运维管理再向前推进一步。

5 结束语

水电站数字化运维平台通过前端感知、边缘计算、数据中台和业务应用的分层架构，把原来分散的人工巡检和集中监控整合为连续、闭环、可分析的运维体系。智能视频巡检提高了巡视频次和覆盖范围，状态监测和分级预警把异常发现提前，移动巡检和工单管理实现了缺陷闭环，运行分析为检修决策提供了数据支撑。对中小型水电站而言，数字化转型不必追求一步到位，可以从关键部位智能巡检和报警闭环切入，分步扩展感知范围和分析深度，在有限投入下稳步提升运维水平。

参考文献：

[1] 黄春犁，胡美玲，赵会城. 水电站启闭设备的全寿命周期数字化管理系统 [J]. 现代工业经济和信息化，2022,12(10):34-36,38.

[2] 彭小明，陈瑛，管帝. 数字化技术在新集水电站建设管理中的应用 [J]. 水利水电快报，2024,45(S1):76-78,87.

[3] 肖楚生. 水电站机电设备智能运维系统的关键技术与应用展望 [J]. 小水电，2025(04):64-69.

[4] 李锦成，何展国，岳智猛，等. 水电站工程建设投资数字化管控系统研发与应用 [J]. 水电与新能源，2026,40(01):84-87,92.

[5] 刘建琳. 水电站档案数字化转型与智能发展分析 [J]. 水电站设计，2026,42(01):99-102.

双馈风力发电系统电网适应性控制技术研究

沈云皓

（华能江西清洁能源有限责任公司，江西 南昌 333000）

摘 要 风电并网规模持续扩增，电力系统对双馈感应发电机组的电网适配性能提出更严苛的运行约束。本文以风机低电压穿越、不对称故障抑制、动态无功支撑三大核心工况为研究主线，梳理转子侧与网侧变流器协同调控的主流技术体系，界定撬棒保护、储能辅助调控两类方案的适用场景与技术边界。对照现行风电并网标准中负序电流抑制、动态无功输出的量化指标，归纳现有控制方案在动态响应速度、直流母线电压稳压、故障短路电流建模分析方面的技术短板。从控制器参数优化整定、保护定值协同匹配两个维度，梳理可落地的技术改进思路，旨在为双馈风机电网适应性控制技术的优化迭代提供理论参考。

关键词 双馈感应发电机；低电压穿越；电网适应性；协同控制；无功支撑

中图分类号：TM614；TM315 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.010

0 引言

新能源发电渗透率持续提升，风电已成为电力系统调峰稳压的重要组成部分，电网对风电机组的管控要求逐步由常态化稳定并网延伸至电网故障阶段的暂态运行规范。双馈感应发电机具备定子直接并网的结构特征，电网电压跌落时会产生剧烈电磁暂态过程，容易引发转子侧过流、直流母线电压骤升等耦合故障问题。现行并网标准明确要求风机在不同深度电压跌落工况下持续并网，同步输出无功功率辅助电网电压恢复。故障工况下变流器主动控制与硬件保护装置存在动作冲突，合理协调二者功能分配与动作时序，是提升机组故障穿越能力、优化电网适配性能的关键研究方向。

1 电网适应性要求的演变与控制难题的形成

国内外风电并网规范持续迭代升级，对风电机组故障工况运行行为的约束趋于细化，不再仅考核机组故障不脱网基础能力，还对故障期间无功支撑水平、有功恢复速度及不对称故障负序电流输出指标作出明确限定，一定程度提升了双馈风机电网适配的控制难度。双馈风机定子直接并网的结构特点，使其对电网电压扰动更为敏感，电压跌落会诱发定子磁链畸变，在转子回路感应出大幅暂态电流，极易触发变流器过流保护。传统线性控制动态抗扰性能有限，撬棒保护虽可保障设备安全，却会造成机组无功吸收、削弱电网稳压效果，保护动作与主动控制的动态配合问题，是当前机组电网适配控制的核心难点。

2 低电压穿越控制策略的技术分类与性能对比

2.1 变流器协同控制与无功优先分配

双馈风机低电压穿越工况下，转子侧变流器的控制目标可划分为两类主流技术方向[1]。部分控制方案以设备安全防护为核心，依托磁链主动衰减算法削弱定子暂态磁链波动，从电磁感应源头降低转子感应过电流，规避功率器件过载损坏风险。另有控制方案以电网故障支撑为导向，在器件电流耐受限值范围内动态重构转子 d、q 轴电流配比，优先输出无功电流，适配并网标准对故障期间动态无功支撑的硬性要求，无功优先动态限幅策略即为该技术思路的典型应用。

网侧变流器主要承担直流母线电压稳定调控任务，是机组故障运行的重要保障环节。当转子侧故障功率无法正常外送时，网侧变流器可配合卸荷电路协同耗能，有效抑制母线电压异常抬升。电网发生不对称电压跌落时，机网侧电流会滋生二倍频脉动分量，需依托正负序分离控制实现精准调控。延迟信号对消法具备更优动态响应特性，相关控制方案已在 2.5 MW 机组硬件在环试验中得到性能验证。变流器主动限流控制与撬棒硬件保护需设置合理时序级差，可在最大限度保留机组可控能力的基础上，保障故障穿越过程平稳连续。

2.2 撬棒保护与储能配合的适用边界

撬棒保护是双馈风机应对深度电网故障的基础防护手段，电阻参数选型直接决定故障抑制效果与机组

作者简介：沈云皓（1995-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气自动化。

并网特性[2]。阻值参数存在明显的性能制衡特征，较大阻值可快速耗散转子故障能量，有效压制转子过流峰值，但会造成机组被动吸收电网无功，不利于故障电网电压恢复；偏小阻值难以充分抑制转子暂态过电流，设备防护效果不足。传统滞环触发逻辑识别精度有限，易受电网瞬时扰动影响，存在误触发隐患，优化后的触发逻辑可一定程度提升故障识别准确性。

撬棒装置投入后会闭锁转子侧变流器，机组短时丧失无功调节功能，容易造成局部电网无功空缺。为弥补该技术短板，行业逐步形成撬棒与储能协同调控方案，依靠撬棒完成转子过流保护，借助储能装置平抑系统不平衡功率，兼顾设备安全与电网支撑需求。该技术模式可有效拓宽机组故障穿越适配范围，但储能设备存在容量与成本约束，整体经济性相对有限，适配场景多集中于电网结构薄弱、故障高发的风电场场址。在极端深度电压跌落工况中，撬棒硬件保护仍为核心兜底手段，储能调控仅可作为辅助优化方式。

2.3 多源无功协同与控制器改进

传统单一化、分段式低电压穿越控制策略，仅适配简单单一的电网故障场景，在新能源多源并网的复杂电力系统中适配性有所不足。为改善机组故障运行与电网动态适配能力，行业构建起转子侧变流器、网侧变流器与静止无功发生器联动的多时间尺度协同控制体系[3]，故障期间可分层输出无功功率支撑电网稳压，故障清除后能够有效抑制系统暂态过电压，完善机组全故障周期调控性能。

为提升变流器抗扰动能力，各类非线性、智能改进控制算法逐步应用于风机调控系统。网侧变流器电压外环可引入径向基神经网络自抗扰控制，通过扩张状态观测器实时识别系统未知扰动并动态补偿，有效削弱直流母线电压的波动幅度。定子串联动态阻抗配合定转子双侧线性自抗扰控制的复合策略，可根据电压跌落深度自适应切换无功补偿与磁链衰减模式。这类改进控制算法降低了控制系统对精准机组模型参数的依赖，环境适配性更强。

3 现有电网适应性核心控制策略的技术优势与工程应用价值

3.1 变流器协同控制提升机组暂态稳定运行能力

转子侧与网侧变流器联动控制模式，适配双馈风机定子直连电网的结构特性，可针对性化解电网故障引发的电磁暂态问题。该控制模式可动态分配无功、有功电流分量，在电压跌落工况下快速抑制转子过流与直流母线电压异常波动。同时可适配对称、不对称两类电网故障场景，通过序分量补偿优化机组运行状态，一定程度提升故障全过程机组可控性，是风电低电压穿越落地应用的核心技术支撑。

3.2 保护与储能复合架构拓宽机组故障耐受范围

撬棒保护与储能装置结合的复合防控体系，实现了设备保护与电网支撑功能的有机结合。传统撬棒装置可快速闭锁故障过流通道，保障变流器核心器件安全运行，规避设备烧毁风险。配套储能设备能够弥补撬棒投入期间的无功缺口，改善故障阶段机组被动吸无功的缺陷。该架构适配不同故障深度的电网工况，有效拓宽了双馈风机的故障耐受区间，适配复杂电网的并网运行需求。

3.3 多源无功协同控制优化电网故障恢复特性

融合变流器与无功补偿设备的多源协同控制技术，突破了单机单一调控的局限性。该技术可依托多设备多时间尺度的调控优势，故障期间分层、精准输出无功功率，持续为电网提供电压支撑。故障清除后可快速抑制电网暂态过电压，平稳完成机组功率恢复过渡。搭配非线性抗扰控制器，能够降低模型参数偏差带来的调控误差，有效提升风电机组与区域电网的动态适配性能。

4 面向标准适配的控制参数整定与保护定值配合方法

4.1 基于负序标准约束的序分量控制器带宽设计方法

当前风电并网标准对不对称故障下机组负序电流幅值与持续输出时长作出明确量化约束，序分量控制器的动态性能，直接影响双馈风机故障并网的合规水平。延迟信号对消法常用于机组正负序分量分离，其控制带宽、滤波阶数与响应速度存在相互制约关系。缩短信号分解周期可减小相位滞后，提升系统动态响应，但会削弱谐波抑制能力，使高频扰动侵入控制环路，对调控精度造成一定影响。

工程设计可依据并网标准限值逆向完成参数匹配，结合并网点电网阻抗与电压不平衡度，确定机组允许的负序波动范围，据此设定滤波基础阶数。不同故障工况需采用差异化带宽配置，轻度电压跌落可适当降低带宽，减小信号延迟带来的控制偏差；深度不对称故障则提升滤波阶数，强化负序分量抑制效果，使机组运行状态贴合并网规范[4]。

转子侧与网侧变流器的调控裕度存在明显区别。转子侧器件电流约束更强，运行中优先保障正序功率稳定，负序抑制优先级相对较低。网侧变流器可调空间更大，可在直流电压波动允许范围内承担主要的负序抑制任务。控制器比例、积分参数需要匹配变流器容量与开关频率，参数取值不合理易放大高频噪声或

延长工况切换过程。通过硬件在环多工况参数扫描，能够筛选出适应性更强、运行更稳定的参数区间。

4.2 撬棒保护定值与变流器限流边界的协调整定方法

双馈风机低电压穿越的核心调控逻辑，依托变流器主动限流控制与撬棒被动保护的层级配合实现，两类保护动作阈值、响应时序的精准匹配，是规避器件损坏、保障机组连续并网的关键。工程应用中，变流器转子电流限幅通常设定为功率器件额定电流的1.5倍至2倍，为主动调控预留充足裕度。撬棒保护触发阈值需适度高于变流器限流上限，形成明确的动作时序层级，保证电网故障初期优先依托变流器算法完成电流抑制，仅在极端故障、主动调控失效时启动硬件保护，最大化保留机组可控调节能力。

电网电压跌落深度、定子暂态磁链分量，直接决定转子电流上升速率与峰值大小。保护定值整定需覆盖区域电网内概率最高的严重故障工况，杜绝极端工况下器件过流烧毁问题，同时规避轻度电压波动、瞬时电压扰动引发的保护误动、机组脱网问题。撬棒电阻参数选取存在双向制衡关系，电阻阻值提升可快速耗散转子侧故障能量，压低转子电流峰值，但会导致机组故障期间持续从电网吸收无功功率，不利于并网点电压自主恢复。

实际参数优化可采用多工况仿真遍历方式，统计不同电阻参数下机组低电压穿越成功率、无功吸收水平以及直流母线电压波动范围，筛选出兼顾设备安全与电网支撑能力的最优阻值区间。风电场多机组并联运行工况下，单台机组撬棒无序投切会造成并网点电压波动紊乱，影响整场故障恢复特性。因此，在单机定值整定基础上，尚需统筹场内所有机组的保护参数，适度错开部分机组保护动作时序，弱化集中投切带来的电网扰动，实现单机安全防护与整场电网适配性的双向平衡。

4.3 直流母线电压抑制中卸荷电路与网侧变流器的功率分配方法

电网故障引发的机网功率失衡，是双馈风机直流母线电压异常抬升的核心诱因。故障时段转子侧持续向直流侧传输电能，网侧变流器受电网电压跌落限制，有功外送能力大幅衰减，过剩电能会造成母线电容承压、电压超限。卸荷电路与网侧变流器的协同功率调控，是抑制直流侧电压波动、保障变流器安全运行的核心工程手段，两类装置的功率分配逻辑，需根据故障严重程度动态自适应调整[5]。

常规工况下优先依托网侧变流器完成过剩功率消纳传输，在器件电流限值范围内最大化向外输送有功功率，缓解直流侧储能堆积问题。电网轻度电压跌落时，网侧变流器电压调控裕度充足，基本可独立完成功率平衡调节，卸荷电路可保持休眠状态，减少频繁投切带来的设备损耗与电压扰动。当电网出现深度电压跌落，网侧变流器并网调压、送功率能力显著下降，系统功率缺口持续扩大，此时需提前触发卸荷电路介入调控，快速消耗直流侧过剩电能，避免母线电压突破电容耐压阈值。

卸荷电路可采用分级投切调控模式，依据直流母线电压偏差幅值，逐级投入不同阻值卸荷电阻，替代传统单一阈值硬投切方式，平缓电压调节过渡过程，弱化瞬时功率扰动。卸荷电阻的额定功率参数，需按照区域电网最严重故障工况校核确定，保障极端故障下能量消纳能力充足。直流母线电容容量与卸荷电路响应速度存在耦合关联，适度提升电容储能容量，可延缓故障初期电压上升速率，为变流器调控、卸荷电路精准投切预留充足响应时间，整体提升直流侧电压调控的稳定性与可靠性。

5 结束语

双馈风机电网适应性控制技术体系处于持续完善的过程中，传统单一撬棒被动保护模式逐步迭代为变流器协同调控、多设备无功互补、正负序精细管控的复合型控制体系。并网标准对负序抑制、动态无功支撑的细化要求，对控制策略的标准化、精准化运行提出更高要求。现阶段参数整定与保护匹配方案尚需依托硬件在环仿真与现场试验积累实测数据，进一步优化适配性。不同电网架构强度、多元故障场景下的自适应控制逻辑，以及风电场集群机组的协同保护策略，有望成为该领域未来深化研究的重点方向。

参考文献：

[1] 陈文超，孙泽禹，汪正军，等. 双馈风力发电机组更换发电机对电网适应性能力的影响[J]. 能源科技，2024，22(04)：65-69.

[2] 康海渊，巩飞. 风力发电机组超级双馈技术研究与应用[J]. 百科论坛电子杂志，2024(09)：31-33.

[3] 褚红博，杨怀强，徐辰辉. 基于动态电压补偿控制的新能源发电并网适应性研究[J]. 光源与照明，2026(04)：188-190.

[4] 尚敬，刘永江，徐凤星，等. 并网型双馈发电机组孤岛穿越控制方法，系统及发电机组：CN202211336295.0[P]. 2023-01-31.

[5] 代喜. 双馈风力发电机组变频系统故障分析及治理对策研究[J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术，2023(04)：31-36.

无人机航测在城市地形采集工作中的技术运用

李锦昊

（韶关市曲江区自然资源技术中心，广东 韶关 512100）

摘 要 现代城市规划、国土空间治理、智慧城市创建等发展过程中，城市地形数据的准确、高效获取是各项城市工程开展的基础。传统地形采集技术受城市复杂地貌、建筑遮挡、作业空间等诸多因素的限制，不能满足现代化城市精细化治理的要求。无人机航测技术由于具备灵活、覆盖面广、适应性好、操作简便等优势，渐渐代替了传统的测绘手段，成为城市地形数据获取的主要途径。本文以无人机航测技术在城市地形采集工作中的应用为研究对象，对技术运用的主要原则和作用进行系统的论述，从实际操作角度分析技术的运用途径，围绕城市地形采集工作展开，整理技术落地的主要逻辑以及实施要点，以期为相关人员提供参考。

关键词 无人机航测；城市地形采集；实地航测数据采集；航测数据处理

中图分类号：P208；P21 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.011

0 引言

地形数据是城市国土测绘、规划设计、工程施工、运维管理的基础载体，地形数据的采集质量直接影响到城市各项建设工作是否科学合理。传统的人工测绘、机载大型航测设备测绘等模式，在城市密集建成区、狭小街巷、复杂高差地形等区域作业时，存在着作业盲区多、人力成本高、周期长、场景适应性差等诸多不足，不能满足当下城市精细化治理和快速建设的要求。无人机航测技术依靠轻量化的飞行平台、高清的传感设备以及智能化的数据处理系统，可以迅速适应各种城市复杂的地形环境，完成全域地形信息的采集、捕捉和整合，很好地弥补了传统测绘技术的不足。

1 无人机航测在城市地形采集工作中的技术运用原则

1.1 精准适配性原则

精准适配性原则是无人机航测技术应用于城市地形采集工作时的首要核心原则，其主要含义就是使技术作业模式、设备参数、采集方案与城市地形特征、采集工作需求相匹配。城市地形不同于野外单一地形，具有空间碎片化、地貌多样化、环境复杂化等特点，中心城区建筑密集、街巷狭窄，城郊区域地形高差大、地貌类型混杂，各个片区的地形采集标准和应用需求也存在着较大的差别[1]。无人机航测作业过程中要根据城市各个区域的地形肌理、建筑分布、空间尺度来调整作业方案，对高密度建成区进行飞行航线和拍摄角度的优化，避免由于建筑遮挡造成地形数据缺失，对山地、水系、绿地等特殊城市地形进行传感设备参数的调整，保证地形高程、地貌形态、空间边界等主要信息的采集精度。同时还要根据城市地形采集的主要用途，将规划测绘、竣工测绘、更新测绘等不同的工作场景的精度标准加以区分，有针对性地选择无人机设备，调整飞行高度和重叠度，保证采集到的地形数据可以准确地满足后续城市建设、规划、管理等工作的实际需要，避免出现技术应用与场景需求不匹配的情况，提高航测作业的针对性和有效性。

1.2 安全规范性原则

城市人口密集、建筑林立、公共设施繁杂，空域环境和地面环境都比较复杂，因此无人机航测城市地形采集工作要严格遵守安全规范性原则，这是技术落地应用的基本保证。相比野外空旷作业环境，城市空域有众多遮挡物和管制区，各种民用、商用无人机飞行活动要严格按照城市空域管理的相关规定执行，作业前必须对作业区域的空域管控要求进行充分的核查，完成飞行报备和审批程序，避免进入禁飞区、限飞区，严禁违规飞行操作。从地面作业来说，要考虑到城市

作者简介：李锦昊（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：无人机与测绘。

人流、车流密集的特点，科学规划无人机起降点位，避开城市主干道、人员聚集区、学校、医院等重要公共区域，避免飞行作业给公共安全造成隐患[2]。航测全流程要符合测绘行业的技术规范和数据标准，从设备调试、航线规划、实地飞行、数据采集、后期数据预处理等各个环节都要按照标准化流程来推进，既能保证飞行作业的安全、公共安全和设备安全，又能保证采集的城市地形数据符合行业规范，具有合规性、完整性、可用性，为技术的常态化、规范化应用打下基础。

2 无人机航测在城市地形采集工作中的技术运用意义

2.1 革新城市地形采集作业模式

大型航空航测设备作业门槛高、成本大，不能满足小范围、精细化的城市地形补采、更新采集工作，不能满足城市动态化地形测绘的需求。无人机航测技术的落地应用，彻底冲破了传统地形采集方式的束缚，依靠小型化、智能化的飞行设备，达成自动化、立体化、全域化的地形数据采集，不需要很多人工实地踏勘测量，大大简化了地形采集的作业流程。无人机航测可以灵活适应大范围城市全域测绘、小范围片区更新测绘、局部地形修补测绘等各种场景，实现了城市地形采集作业的轻量化、高效化转变，彻底改变了以往依靠人力、大型设备的单一作业方式，构建起灵活多变、适应性强的现代化城市地形采集作业体系。

2.2 提升城市地形采集数据质量

无人机航测技术装备有高清成像设备、高精度传感装置，可以从高空立体化的角度对城市的全域地形进行全方位的扫描，克服了人工测绘视野的限制，可以准确地获取到细微地形高差、地貌边界、微地形变化等传统测绘方法无法发现的细节信息。作业时用标准化航线规划可以实现作业区域无死角全覆盖采集，避免人工测绘的遗漏和主观误差，依靠智能成像技术对城市地形、地物、地貌进行全方位的还原，使采集到的数据可以准确地对应城市地形的真实情况[3]。另外，无人机航测获取的原始数据可以借助专业的软件开展校正、拼接、优化处理等操作，从而改善数据的规整程度和精确程度，给城市各类建设活动提供高品质、高精确度的地形数据支持。

2.3 赋能城市精细化治理发展

无人机航测技术能够不间断、高效率地对城市的地形展开采集和更新，并且可以对城市建设中地形变化、地貌变化、空间格局变化等实施实时观测，从而达成城市地形数据的及时更新迭代，很好地解决了传统地形数据更新滞后、时效性差的问题。精准、及时的城市地形数据可以给城市国土空间规划、旧城更新改造、市政设施完善、生态绿地监管、城市防汛排涝设计等工作提供科学的依据，帮助相关管理部门准确把握城市空间资源现状，合理安排城市功能布局，精确找到城市地形隐患和空间治理短板[4]。同时，不断更新的地形数据库可以构建起城市空间数字化治理底座，促进城市地形测绘同城市治理的深度融合，促使城市治理由粗放式管理向精细化、数字化、智能化管理转变，从而全面提升城市空间治理的科学性与高效性。

3 无人机航测在城市地形采集工作中的关键技术运用

3.1 航测前期规划与设备适配技术运用

前期规划阶段，工作人员要全面整理出作业城市区域的地形情况、建筑分布状况、空域状况以及采集工作要求等基本情况，再从这些基本资料出发，对它们加以分析并加以评定，进而依照城市复杂的空间环境来确定合适的航测作业区。在此基础上，再将高密度建成区、城郊开阔地形、城市水系、山地高差地形等不同的作业片区进行区分，根据各个片区的空间特征以及采集难点来制定相应的飞行作业方案，使规划方案同实际地形环境更加契合。对城市建筑密集、遮挡较多的核心城区要优化航线规划模式，用交叉飞行、多角度拍摄的方式弥补垂直拍摄视野盲区，合理设置飞行重叠度保证相邻影像有足够重叠部分来保证地形数据完整性和拼接精度；对于城市开阔地形区可以优化飞行航线，减少不必要的重复拍摄，提高作业效率，防止资源浪费，达到采集速度和数据质量的平衡。根据城市地形采集精度要求和场景特点选择合适的无人机设备、传感器。轻量化消费级无人机适合于城市小范围、精细化地形补测工作，可以满足局部区域细节点位数据采集的要求，专业级测绘无人机可以对城市全域进行大范围地形测绘，具有较好的续航和载荷能力。同时还要配合高清可见光相机、倾斜摄影设备等，全方位满足城市二维地形信息和三维地形模型的采集要求，保证各种数据类型都能够被有效地捕捉到。另外，在正式作业之前需要做好设备调试、参数校准、电量检测、信号测试等工作，经过多次验证和测试来避免城市建筑遮挡造成信号中断、飞行偏差等问题，为后面的航测采集工作打下良好的技术基础，保证整个采集过程高效、稳定、可靠地进行。

3.2 实地航测数据采集技术运用

实地航测数据采集是无人机航测城市地形采集工作中的主要操作环节，它的主要目的就是利用无人机智能飞行技术，对城市全域地形、地物、地貌信息进行全方位、高精度的系统采集。无人机在正式飞行作业时会依照前期规划好的航线自行飞行，依靠自身携带的各种传感器和成像设备，不断搜集作业区的地形影像、高程数据、空间形态等主要数据，始终维持着一种自动化的、智能化的作业方式，完全不需要人工去操控飞行路线，进而显著提升采集速度并加强作业安全水平。根据城市复杂的多变的地形环境，作业人员可以借助实时图传系统对飞行状态和采集画面进行实时监测，当遇到突然出现的建筑遮挡、空域干扰、光线变化等影响采集质量的因素时，可以迅速做出调整，改变飞行姿态、拍摄角度和飞行高度，保证在各种地形条件下数据采集质量不受影响[5]。对城市道路、街巷、建筑基底、绿地水系、高差边坡等重要地形地段，作业人员可借助提升拍摄密度、增多拍摄角度的方法，加大对于细节数据的采集强度，从而保证各种微地形、特殊地貌信息可以全部保存下来，给后续的地形分析提供充足的数据支撑。采集时还要同步做好数据分类保存工作，明确各个片区、各个地貌类型采集数据的区别，防止出现数据混杂、缺失、错乱等情况，保证原始地形数据完整、有序、真实，为后续数据处理和地形成果生成提供高质量的原始素材，保证整个航测采集过程的顺利进行和高效完成。

3.3 航测数据处理与地形成果生成技术运用

完成实地航测采集工作之后，需要采用专业的数据处理技术对原始航测数据进行优化整合，得到标准的、可视化的城市地形成果，这是无人机航测技术落地应用、实现价值转化的重要环节[6]。原始航测影像数据由于受到采集环境、飞行状态、设备自身特性等各方面的影响，一般会存在画面重叠、光影偏移、轻微变形等现象，造成原始影像不能直接用作城市地形分析和建设工作。因此必须依靠专业的测绘数据处理软件，对原始的影像数据进行影像校正、拼接、融合、降噪等一系列的优化处理，消除由于飞行姿态的变化、光线环境的波动、设备误差等造成的数据偏差，最终得到一幅完整的、清晰的、规整的城市全域航测影像底图，为地形分析提供高质量的基础数据源。在此基础上，利用影像解译技术识别、分类底图中各种地物，并结合地形点位提取技术获得关键地形特征点的空间坐标，最后采用高程数据拟合法对离散的高程数据进行平滑处理，从而准确得到城市地形的高程信息、地貌边界、地物分布、地形坡度等主要地形参数，形成一套完整的、系统的城市地形数据体系。同时，根据城市地形采集工作实际应用需求，生成各种类型的地形成果，如二维城市地形平面图、三维城市地形实景模型、地形高程数据表等，用不同的方式全面地表现城市真实的地形肌理，满足各种应用场景下对数据的使用需求[7]。处理完地形成果之后，经由合规性、精准度核验确认其符合应用标准，就可以直接应用到城市规划设计、地形监测、工程建设、空间管控等各个工作当中，从而真正实现无人机航测技术在城市地形采集工作中的落地赋能，给城市精细化治理和数字化建设提供有力的数据支撑。

4 结束语

无人机航测技术凭借高效灵活、精度高、场景适应性强等核心优势，很好地满足了现代城市复杂地形环境采集工作的要求，已经成为城市地形测绘领域的主要技术手段。城市地形采集工作中的精准适配性和安全规范性两个主要原则，给技术的应用设定了标准底线，保证了航测作业的科学性、合规性，技术落地应用不但革新了传统的城市地形采集作业方式，大幅度提高了地形数据采集的质量，而且从技术角度为城市精细化、数字化治理提供重要的支撑。本文从应用原则、运用意义、实操技术路径三个方面对无人机航测在城市地形采集工作中完整的应用体系进行梳理，确定各个环节的技术要点及应用逻辑。

参考文献：

[1] 孙卓,邵知宇,詹子逸,等.超标降雨下城市复杂微地形精细化水力模型的构建[J].中国给水排水,2025,41(23):156-162.

[2] 冯建忠.无人机航测技术在城市规划中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(14):53-55.

[3] 杨翠花.基于无人机遥感技术的城市地形测绘方法研究[J].科技视界,2025,15(13):75-77.

[4] 郑明雪,沈祥成,罗治情,等.面向类城市路网空间的多时相多地形耕地地块边界提取研究[J].湖北农业科学,2025,64(10):190-194.

[5] 喻绵俊,何进,任小松.大型城市公园数字化地形营造技术[J].智能城市,2025,11(09):103-106.

[6] 陈步楼.激光三维扫描与无人机航测在复杂城市环境下的协同应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2026(01):60-62.

[7] 宋利奎.无人机航测及地理信息技术在地形测绘中的应用[J].中国金属通报,2023(03):204-206.

锅炉受热面壁温在线监测系统优化与异常预警研究

李 博

（安徽华电芜湖发电有限公司，安徽 芜湖 241000）

摘 要 超超临界机组锅炉受热面管壁超温是诱发管材蠕变损伤与爆管泄漏的主要因素。本文以芜湖某公司一期的厂级监控信息系统（Supervisory Information System at Plant Level，SIS）改造工程为研究背景，针对原有壁温监测测点不全、告警滞后等问题，从数据接入、传输存储、应用展示三个层面提出优化方案，构建实时告警与超限统计相结合的异常预警机制。实践表明，优化后的系统可实现全受热面壁温集中监视与分级预警。

关键词 锅炉受热面；壁温监测；SIS系统；异常预警；超超临界机组

中图分类号：TK223.3；TK32 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.012

0 引言

锅炉受热面管壁温度是反映机组运行安全状态的核心参数之一。超超临界机组蒸汽参数高、受热面布置密集，局部管壁温度偏差易导致材料寿命损耗加速，严重时引发受热面爆管事故。传统SIS平台壁温监测模块多依附于早期数据库架构，存在测点接入有限、刷新周期长、告警简单、统计不便等缺陷，难以满足当前机组精细化运维要求。依托SIS系统整体改造对壁温在线监测功能进行优化升级，建立完善的异常预警机制，具有重要的工程应用价值。

1 锅炉受热面壁温监测的现状与问题

1.1 壁温监测的工程必要性

锅炉受热面包括水冷壁、过热器、再热器、省煤器等部件，其管壁金属长期承受烟气侧高温腐蚀与工质侧高压冲刷的双重作用[1]。当管壁温度超过材料许用温度时，金属组织发生蠕变变形，持久强度随时间持续下降，最终导致管壁鼓包、开裂乃至爆管。据电站锅炉事故统计，受热面爆管占锅炉非计划停运事故的比例较高，而超温运行是诱发爆管的首要因素[2]。超超临界机组主蒸汽压力达25 MPa以上、温度达600 ℃级别，受热面管材长期工作在接近材料许用温度的区间，对壁温监测的精度与实时性要求更为严格。因此，对锅炉受热面壁温实施连续、准确的在线监测，是及时发现异常工况、防范设备损坏的基础手段。

1.2 原有监测系统存在的不足

芜湖某公司一期两台660 MW超超临界机组于2008年投产，配套SIS系统同期建成投运。受当时技术条件限制，原有壁温监测功能存在以下问题：其一，测点接入不完整，部分受热面管段壁温信号未纳入SIS平台，低低温省煤器、吹灰器等辅助系统数据缺失，运行人员无法掌握全受热面温度分布；其二，数据采集依赖老旧接口机，设备故障率高，数据传输中断现象频发，壁温数据的连续性与完整性难以保障；其三，告警机制简单，仅能对单点越限进行提示，缺乏分级告警与趋势预判能力，超温事件发现滞后[3]；其四，统计分析手段不足，超限记录分散，无法按管段、班组、时间段进行多维查询与汇总，不利于超温原因的追溯分析与运行调整；其五，系统架构分散，一期与二期SIS系统各自独立，壁温数据无法跨机组对比分析，难以支撑全厂受热面状态的统一评估。

2 锅炉受热面壁温在线监测系统优化方案

2.1 数据采集层优化

数据采集是壁温监测系统的基础环节。本次改造对一期7台接口机全部进行更换，新接口机采用四核处理器、8 GB内存、128 GB固态硬盘的工业级通讯管理机，配备4个网口与4个IO接口，运算性能与通信稳定性较原设备大幅提升。针对壁温信号接入，新增一台专用接口设备，采用Modbus-TCP协议接入壁温采

作者简介：李博（1988-），男，本科，工程师，研究方向：发电厂热控专业技术监督管理。

集装置，实现锅炉各受热面壁温信号的标准化采集。同时，完成 3 台机组低低温省煤器数据与吹灰器在线监测数据的接入，填补原有监测盲区。接口程序全部升级改造，覆盖一期 1#DCS、2#DCS、脱硫、ECMS、NCS、电量、电除尘及二期 3#DCS、辅网、电除尘共计 10 个数据接口，确保壁温相关数据来源完整、传输可靠。接口程序升级后，任意一台机组接口关闭或故障不影响其他机组的数据传输，系统采集可靠性显著增强。

2.2 数据传输与存储层优化

数据传输链路方面，敷设光缆将一期生产数据接至二期 SIS 系统，实现一期、二期数据的集中汇聚。更换一期接口机后连接的隔离装置，利旧二期 SIS 机房内南瑞单向隔离装置，保障生产控制区与管理信息区之间的数据安全。更换安全一区至二区、二区至三区间的交换机设备，满足一期、二期合并后数据上传态势感知平台与预警平台的带宽需求。数据存储方面，将原有 PI 数据库更换为国产 Thunderdb 实时数据库，采购容量为 10 万点，满足一期 2 万点与二期 5 万点合并后的存储需求，并预留扩展余量。数据库测点命名规则统一调整，一期、二期所有数据采集及应用功能重新配置数据库接口，保证数据存储时间不少于 3 年。服务器资源同步整合，一期实时服务器、DB2 服务器、镜像服务器功能并入二期现有服务器，新增数据转发服务器与镜像服务器，原二期镜像服务器做冷备，各服务器安装最新版防病毒软件。通过上述优化，壁温数据传输时延降低，历史数据完整性与可追溯性得到保障。

2.3 应用功能层优化

在二期 SIS 平台上重新建设 1#、2# 机组的壁温监测应用功能，并对 3# 机组现有功能进行升级。壁温监测模块包含三项核心功能：壁温实时监视以单页面柱状图形式集中展示所有种类管壁的壁温最大值，超温时柱状图变为红色并闪烁提示，点击各壁温对应链接可追溯查看该类管壁各段的实时温度状态，实现总体监视与细节追溯的结合；壁温实时告警功能实时刷新具体管段超温情况并自动记录，作为实时监视的补充手段，避免人工监视遗漏；壁温超限报表功能记录超限管段、超限时长、超限次数等信息，支持按时间段、管段、限值、班组等条件组合查询。此外，系统提供画面回放与测点趋势查询功能，可回溯历史工况下的壁温分布，选择任一或多个测点查询任意时间段内的趋势曲线，为超温原因分析提供数据支撑。生产实时全画面同步升级，运行人员通过工艺流程监视画面可监测 DCS、脱硫、NCS 及辅助控制系统的生产情况，壁温数据与其他运行参数在同一平台展示，便于综合判断机组状态。

3 异常预警机制构建

3.1 实时分级告警策略

异常预警的核心在于对超温事件的及时识别与主动提示。优化后的壁温监测系统建立分级告警机制，根据管壁温度超出限值的幅度与持续时间划分告警等级。一般超温事件通过柱状图颜色变化与闪烁进行视觉提示，提醒运行人员关注；严重超温事件在视觉提示基础上触发实时告警记录，自动写入超温管段编号、超温起始时间、当前温度值等信息。告警数据实时刷新，确保运行人员在超温发生后第一时间获取信息[4]。同时，告警功能与实时监视页面联动，点击告警记录可直接跳转至对应管段的温度详情页面，缩短异常定位时间。分级告警机制避免了单一阈值告警导致的信息过载或漏报，使运行人员能够根据告警等级合理分配注意力，优先处理严重超温事件。

3.2 超限统计与趋势分析

仅依靠实时告警不足以支撑运行优化与设备管理，需建立完善的超限统计分析机制。壁温超限报表模块对所有超温事件进行结构化记录，每条记录包含管段标识、限值类型、超温起止时间、持续时长、最高温度、超限次数等字段。系统支持按时间段、管段、限值等级、运行班组等多维度组合查询，可生成指定时段内的超温统计汇总。结合趋势分析功能，运行与检修人员可对频繁超温管段的历史温度曲线进行回溯，分析超温发生的工况特征，判断超温原因属于燃烧偏差、积灰结渣、流量分配不均还是管材老化，为运行调整与检修决策提供数据依据。趋势曲线支持多测点叠加对比，可同时展示同一受热面不同管段的温度变化，便于识别温度分布不均的问题，也可对比不同工况下壁温水平的差异，为运行方式优化提供参考。

3.3 预警闭环管理

异常预警机制的有效性取决于从发现到处置的闭环管理。系统将壁温超温告警数据纳入生产管理流程，超温事件记录自动归档，运行班组在交接班时需对当班期间的超温情况进行确认与说明。超限报表定期生成，作为机组运行分析会与设备状态评估的输入资料[5]。对于频繁超温或持续超温的管段，系统数据可直接支撑受热面寿命评估与检修计划制定，推动从被动抢修向主动预防的转变。同时，壁温监测数据与性能计算、耗差分析模块联动，超温工况下的减温水流量、烟气含氧量、排烟温度等参数同步记录，便于综合分析超

温对机组经济性的影响，实现安全性与经济性的协同优化。闭环管理机制确保每一次超温事件都有记录、有分析、有处置、有反馈，避免超温问题长期积累而引发设备损坏。

4 工程实施与验证

4.1 实施路径与质量控制

本项目按照硬件到货验收、系统安装部署、数据接入调试、功能测试上线的顺序推进。硬件设备到货后核验外观、产品合格证与技术资料；接口机与服务器完成操作系统安装、激活与安全配置；数据库安装调试并完成授权；敷设一期至二期光纤，完成一期机柜与接口机更换，验证一期数据在新数据库中全部可查；配置集团侧数据上传接口，确保传输有效率满足要求；完成JAVA平台发布与组态画面绘制，核对测点数据与DCS系统同步，历史曲线可查；最后部署性能计算、耗差分析、越限统计、壁温监测等应用功能并进行整体性能验证。各环节均设置H级质检点，验收标准明确，包括硬件外观与资料完整性、系统运行稳定性、数据采集准确性、功能部署完整性等，确保改造质量可控。施工过程中严格执行电力监控系统安全防护规定，隔离装置配置与网络分区符合规范要求，杜绝因改造引入安全风险。

4.2 应用效果

改造完成后，壁温监测系统实现了一期、二期3台机组锅炉受热面壁温数据的集中接入与统一展示，测点覆盖范围较改造前显著扩大，低低温省煤器与吹灰器监测数据成功接入。壁温数据刷新周期缩短，超温告警响应及时，运行人员可通过单一页面掌握全受热面温度状态，超温事件的发现时间与定位时间均明显减少。超限统计报表功能投用后，超温数据的查询与汇总效率提升，运行分析会可直接调取指定时段的超温统计结果，为运行调整与设备管理提供了可靠的数据支撑。系统整体运行稳定，未出现数据传输中断现象，任意单台机组接口故障不影响其他机组数据上传，达到了预期的改造目标。壁温监测功能与性能计算、耗差分析等模块在同一平台运行，数据共享便利，为机组安全经济运行提供了一体化的信息化技术支撑。

5 锅炉受热面壁温监测数据的工程应用与效益

5.1 对设备寿命管理的支撑

受热面管壁温度是影响管材寿命的关键参数，壁温监测数据的完善为设备寿命管理提供了量化依据。通过长期积累的壁温历史数据，可统计各管段的超温频次、累计超温时长与最高温度，结合材料蠕变特性曲线评估管材剩余寿命，为检修周期调整与换管决策提供数据支撑。对于频繁超温的管段，可在检修期间重点检查壁厚减薄与组织老化情况，必要时进行更换，避免运行中发生爆管。壁温数据与检修记录关联分析，可验证检修措施的有效性，如吹灰优化后壁温水平是否下降、燃烧调整后温度分布是否均匀，形成监测、分析、处置、验证的设备管理闭环，切实提升设备管理的精细化水平。

5.2 对运行优化的促进作用

壁温监测数据为运行优化提供了直接的反馈信息。运行人员可根据壁温分布情况调整燃烧器摆角、二次风配比与吹灰策略，改善炉膛出口烟温偏差，降低受热面局部超温风险。超温工况下减温水流量的变化与壁温响应的关联分析，可帮助运行人员掌握减温水调节的滞后特性与有效范围，提高温度调节的精准度。耗差分析模块结合壁温数据，可定量评估超温对机组热耗率与供电煤耗的影响，使运行人员在安全性与经济性之间做出合理权衡。长期运行数据的统计分析还可识别不同负荷、不同煤质下的壁温分布规律，为制定标准化运行操作卡提供依据，促进机组运行水平的持续提升。

6 结束语

结合芜湖某公司一期SIS系统改造工程，针对原有壁温监测系统在数据采集、传输存储、应用功能等方面存在的不足，本文提出系统化优化方案，构建包含实时分级告警、超限统计分析、预警闭环管理的异常预警机制。工程实践表明，改造后系统数据完整、告警及时、分析手段丰富，均可有效提升机组受热面安全监控水平与运行经济性。未来可进一步引入数据挖掘与智能算法，基于历史壁温数据建立超温预测模型，实现从被动告警向主动预判的升级。

参考文献：

[1] 郭云峰.350MW机组深度调峰对壁温的影响分析[J].电子技术,2026,55(03):286-287.

[2] 薛晓波,苏醒,焦世荣,等.基于风粉监控系统调控锅炉受热面壁温分布的方法及其应用[J].工业加热,2025,54(11):17-21,25.

[3] 魏铭毅.电站锅炉高温受热面壁温在线监测系统研究[J].电力设备管理,2025(01):114-116.

[4] 张向宇,郑树,周强,等.锅炉受热面壁温分布直接监测实验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(01):8-13.

[5] 刘建军.基于神经网络的电站锅炉炉内高温受热面壁温在线监测研究[D].上海:上海交通大学,2023.

基于物联网传感的重卡大功率充电桩运行状态智能监控技术研究

刘子豪

（昆明配售电有限公司，云南 昆明 650500）

摘 要 在新能源重卡规模化应用持续推进的背景下，180 kW ~ 480 kW 大功率直流充电桩成为港口、矿山、干线物流园区及高速服务区的核心补能基础设施。重卡充电桩长期处于大电流、高负荷、高频次运行状态，容易引发接头烧蚀、功率模块过热、绝缘老化、漏电等故障。传统场站存在隐患排查滞后、运维效率低下、安全风险突出等问题，难以适配大功率设备的安全运行需求。本文分析了基于物联网传感的重卡充电桩智能监控技术体系，阐述了该系统工作原理、实际部署应用方式及核心运维功能，以期为新能源重卡大功率充电设施的状态监测、故障预警、精益运维提供实践参考。

关键词 物联网传感；新能源重卡；大功率充电桩；运行状态监测

中图分类号：TM923；TP391.44 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.013

0 引言

在“双碳”战略推动下，国内货运行业绿色转型持续推进，新能源重卡已广泛应用于干线运输、港口及矿区作业场景，配套的 180 kW ～ 480 kW 大功率充电桩成为核心补能设施。与乘用车充电桩相比，重卡充电桩充电功率大、启停频次高，充电负荷呈现明显时段高峰，设备长期处于高负荷运行状态，加之多部署于露天、高粉尘、强电磁干扰的复杂工况，核心部件易出现温升异常、绝缘老化、接触不良等隐患[1]。当前多数场站仍采用人工巡检、事后维修的传统运维模式，难以提前识别早期故障隐患，易引发设备损坏、起火等安全问题，严重影响场站运营稳定性。对此，融合物联网传感、边缘计算与人工智能的智能监控技术，可实现充电桩运行状态实时感知、故障精准预警与智能运维，有效弥补传统运维短板。本文结合工程实际，系统梳理该技术的体系架构、应用方式及核心功能，为重卡大功率充电桩智能化运维落地提供技术参考。

1 重卡大功率充电桩运行工况与监控需求

1.1 实际运行工况特点

一是高负荷高频次运行，热损耗严重。重卡充电桩额定功率覆盖 180 kW ～ 480 kW，工作电流大、单次充电时长较长，功率模块、接线端子、充电枪头等核心部件持续发热，长期承受热疲劳损耗，易出现部件老化、接触不良等问题。二是服役环境恶劣，外部干扰强。设备多部署于露天高速服务区、粉尘密集的港口矿山、湿度较高的物流园区，长期面临温差剧变、凝露积水、粉尘堆积、设备振动等影响，大幅加速设备绝缘老化与机械部件损耗。三是电磁环境复杂，数据干扰大。场站多桩同时大功率充电时会产生强电磁辐射，易造成传感数据采集失真、设备控制逻辑异常，增加故障误判、设备误动作风险。

1.2 核心监控需求

结合场站运维统计数据与现有故障研究可知，重卡充电桩 80% 以上的突发故障均存在明确的前期征兆，主要集中在温升异常、电气参数畸变、环境工况超标等方面。传统单一的过压、过流阈值监测模式无法覆盖全场景故障隐患，难以满足大功率设备安全运维需求。为此，当前重卡充电桩智能运维需构建多维度全状态监控体系，核心需求包括：精准采集电气运行参数、实时监测关键部位温度变化、动态感知柜内环境状态、实现车桩数据协同交互、搭建故障分级预警与自动保护机制，同时具备设备健康评估、远程运维、数据统计分析能力，兼顾设备运行安全性与场站运维高效性[2]。

2 基于物联网传感的智能监控核心技术体系

2.1 多源物联网传感感知技术

传感感知层是智能监控系统的数据基础，通过布设多类型工业级传感器，实现充电桩电气、温度、环境、

作者简介：刘子豪（1994-），男，本科，助理工程师，研究方向：电气工程。

车桩交互四大维度运行数据的数字化、高精度采集，全面适配重卡大功率充电复杂工况[3]。

在电气参数传感方面，系统采用隔离型霍尔电流传感器、直流电压变送器、零序电流互感器及智能电表，分别部署于交流输入侧、DC-DC功率模块、直流母排、充电枪输出回路。该类传感器具备抗大电流冲击、抗强电磁干扰优势，可高频采集电压、电流、有功功率、功率因数、漏电流、谐波等核心参数，精准识别设备过载、漏电、绝缘老化、谐波超标等各类电气故障。

在温度传感方面，采用“接触式+非接触式”融合多点测温方案，消除监测盲区。将PT100铂电阻、NTC热敏电阻阵列等接触式测温器件，固定在IGBT功率模块、母排端子、线缆接头等核心发热部位；在充电枪触点、螺栓连接等易松动发热点位，布设无源RFID测温标签，实现无供电、长期稳定测温；搭配红外热成像设备对柜体整体进行非接触扫描，弥补单点传感器监测局限。现有研究证实，相较于固定温度阈值，温度温升速率更能体现设备早期故障特征，该测温方案可精准捕捉瞬时温升异常隐患。

在环境与安全传感方面，通过温湿度、烟雾、一氧化碳、水浸、振动传感器，实时监测柜内凝露、进水、散热失效、电弧分解气体、设备机械振动等状态，提前预判起火、部件卡滞、设备老化等安全隐患。车桩协同感知方面，基于国标GB/T通信协议与CAN总线对接重卡BMS系统，实时读取电池SOC、SOH、最大允许充电电流等核心参数，规避桩车充电参数不匹配引发的设备过载、电池损伤问题。

2.2 边缘计算本地预处理技术

重卡充电桩数据采集频次高、海量数据实时传输存在延迟高、带宽占用大、断网失效等痛点。为此，当前主流监控系统均搭载边缘网关，实现现场数据本地预处理。边缘网关可实时完成原始数据的降噪、滤波清洗、特征提取与阈值初判，实现数据轻量化处理。针对过温、漏电等高危故障，网关可实现毫秒级本地响应，自主执行降功率、紧急停机等保护动作，无需依赖云端指令，保障极端工况下设备安全稳定运行。正常运行数据经压缩打包后上传云端，有效降低传输带宽压力，同时支持网络中断时本地缓存数据，确保数据不丢失、监控不中断。

2.3 分层物联网传输技术

针对港口、露天高速服务区等场站网络信号不稳定的问题，系统采用多协议融合的分层传输架构，保障数据传输的稳定性与实时性。底层传感器通过RS485、CAN总线实现短距离、高可靠数据汇聚；场站端通过4G/5G、以太网双链路实现远程数据传输；系统整体采用MQTT、OCPP2.0.1行业通用协议，支持数据加密传输与断点续传。该传输方案可适配各类复杂场站网络环境，同时兼容老旧充电桩设备改造，无需更换原有设备主体，改造成本低、适配性强。

2.4 云端智能分析与故障诊断技术

云端平台依托大数据与人工智能算法，突破传统单一阈值告警的局限性，实现设备故障智能化、精准化研判，核心包含三类技术。一是基础阈值规则诊断，依托预设参数阈值，实现过压、过流、过温、漏电等常规故障的分级告警与基础研判；二是无监督机器学习算法，通过孤立森林、LSTM时序分析等模型学习设备正常运行特征，精准识别早期微弱异常，有效解决大功率充电桩故障样本稀缺、隐患难识别的行业难题；三是多特征融合判别技术，融合电气、温度、环境多维数据，过滤环境干扰引发的误告警，大幅提升故障识别准确率。同时，系统搭载PHM设备健康管理技术，可精准评估功率模块、充电枪、接触器等易损部件的剩余使用寿命，实现设备预测性维护。

3 物联网传感智能监控技术应用方式

3.1 新建场站标准化成套部署

针对全新规划建设的重卡补能场站，采用标准化成套部署模式搭建物联网传感监控系统。结合180 kW～480 kW不同功率等级充电桩的运行工况、负荷特性与故障规律，针对性布设全套物联网传感设备，重点覆盖功率模块、直流母排、充电枪触点、接线端子等故障高发、易发热关键点位，配齐电气传感、多点温度传感、环境安全传感等设备，构建全覆盖、高精度的现场传感感知网络。同时，配套部署边缘网关与物联网传输模块，完成传感设备组网调试、通信协议适配与运行参数标定，依据设备额定工况设置传感数据预警、降功率、紧急停机三级安全阈值，实现充电桩设备投运即可具备全方位智能化监控能力[4]。

3.2 老旧场站轻量化智能改造

针对传统存量重卡充电桩智能感知缺失、监测手段单一、仅支持基础计量的短板，采用轻量化改造方式实现智能化升级，无需更换充电桩主体设备。通过外置高精度物联网传感终端、无源测温标签、环境采集模块及边缘网关设备，快速补齐老旧设备的状态感知能力，弥补传统设备无法监测温度、环境、隐性故障的缺陷。改造后的传感系统可完全兼容场站原有运维管理平台，实现新旧设备数据互通、功能叠加。通过新增的多维传感数据采集，彻底解决老旧设备运行状

态不可视、故障隐患不可查的问题，以低成本、无停机影响的方式完成老旧充电桩监控能力的智能化升级。

3.3 场站日常协同运维应用

在日常运营过程中，系统采用“本地传感保护 + 远程集中管控”的协同运维模式。在设备运行全过程中，各类物联网传感设备持续采集实时运行数据，边缘网关依托实时传感数据实现毫秒级本地故障研判与安全保护，可独立应对过热、漏电、过载等突发故障，保障设备复杂工况下的运行稳定性。同时，云端平台汇聚全场站所有充电桩的传感数据，实现多设备、多场站运行状态的集中可视化管控，替代传统高频人工巡检模式。运维人员可依托传感数据变化规律预判设备健康衰减趋势，开展针对性维保作业。此外，系统可基于传感大数据联动车队管理系统与电网调度系统，结合充电桩实时负荷状态实现错峰充电、负荷均衡调度，有效提升重卡补能场站整体运营效率与电网适配性。

4 物联网传感智能监控技术核心应用功能

4.1 基于多源传感的全维度可视化监测功能

该功能是物联网传感监控技术的基础核心能力，依托全覆盖传感感知网络，实现重卡充电桩运行状态无盲区、高精度实时监测。通过电气传感器实时采集交直流电压、工作电流、输出功率、漏电流、谐波等核心电气参数，精准反映设备充电负荷与电气运行状态；通过多点温度传感阵列动态监测关键部位温度数值与温升速率，捕捉局部过热、接触不良等隐性隐患；通过环境传感器实时监控柜内温湿度、积水、烟雾、振动等工况，识别环境诱因故障；结合车桩协同传感数据，同步掌握重卡电池充电约束条件。所有传感数据实时汇总至可视化平台，直观展示设备空闲、充电、故障、离线状态，实现设备运行状态的数字化、可视化管控。

4.2 基于传感数据的分级告警与智能保护功能

系统依托实时传感数据的动态变化，构建三级智能告警与自动保护机制。一是轻微隐患预警，当传感数据小幅偏离正常工况区间，系统推送预警信息，提示运维人员提前排查，规避隐性故障扩大；二是智能功率调控，当传感监测到温度、电流等参数临近安全阈值，系统自动动态降低充电功率，在保障基础充电服务的前提下降低设备负荷，避免故障发生；三是紧急安全保护，当传感数据捕捉到急剧升温、漏电、绝缘失效等高危异常，系统立即触发断电保护，同步推送故障点位与故障类型信息，从源头杜绝设备烧毁、场站起火等安全事故，大幅提升大功率充电场景的运行安全性。

4.3 基于时序传感数据的预测性健康运维功能

该技术依托长期积累的时序传感大数据，结合 PHM 健康评估算法，实现充电桩核心部件的预测性运维。系统持续采集功率模块、充电枪、接触器等易损部件的温度、振动、电气损耗等传感数据，持续追踪设备性能衰减趋势，精准评估部件剩余使用寿命[5]。通过传感数据的细微变化，提前识别绝缘老化、接触电阻增大、散热能力下降等早期隐性故障，自动生成精准维保工单。该功能有效减少设备突发停机故障，降低非计划停运时长，同时通过持续迭代传感数据模型，不断提升故障识别精度，实现设备从“被动维修”向“主动运维”的升级。

4.4 基于物联网传感的远程智能运维功能

依托物联网传感组网与云端数据互通能力，系统实现充电桩全流程远程智能化运维，运维人员可基于云端同步的实时传感数据，远程读取设备运行日志、查看历史工况曲线、修正设备运行参数、复位设备状态，针对参数异常、轻微程序故障等常见问题，无需现场作业即可完成处置。同时，系统自动归档所有传感数据、故障记录、维保信息，构建设备全生命周期数字化台账，替代传统人工纸质记录模式，实现设备运维流程标准化、数字化、远程化。

5 结束语

基于物联网传感的重卡大功率充电桩智能监控技术体系依托多源传感感知、边缘计算、云端智能分析技术，搭建了全方位、全流程、智能化的设备运行监控与运维管理体系，有效解决了传统人工巡检运维效率低、隐患排查滞后、故障处置被动、安全风险高的行业痛点。系统通过多维度数据精准感知、边缘端实时安全保护、云端智能故障研判、全流程闭环运维管控，实现了重卡大功率充电桩运行状态可视化、故障预警提前化、设备运维智能化、负荷调度精细化，提升了重卡补能设备的运行安全性与场站运维效率。

参考文献：

[1] 肖晗. 重卡充电桩成“流量担当”[N]. 深圳商报,2025-04-16(A03).
[2] 国网湖南省电力有限公司. 湖南电动汽车公司: 临澧新安镇重卡充电站建成投运 [J]. 农村电气化 ,2024(08):24.
[3] 王强强. 新能源重卡充电服务区多类型储能系统的集成设计 [J]. 汽车画刊 ,2025(03):7-9.
[4] 孙洁 , 房新灿 , 刘晓悦 . 基于 NB-IoT 的充电桩数据监控及合理分配 [J]. 电测与仪表 ,2024,61(03):211-216.
[5] 房新灿 . 基于 NB-IoT 的充电桩远程数据监控 [D]. 唐山 : 华北理工大学 ,2021.

土木工程中天然石材接缝施工技术分析

吴奇本

（山东省滨州市无棣县城乡水务发展服务中心，山东 滨州 251900）

摘 要 天然石材因其优异的物理性能和装饰效果，在现代土木工程中应用日趋广泛，但接缝施工质量问题日益突出。石材接缝施工作为关键环节，其质量直接决定整体工程的耐久性、防水性能和视觉效果，传统接缝施工技术在填充材料选择、缝宽控制精度、工艺标准化等方面存在明显不足，导致接缝开裂与渗漏以及色差等质量缺陷频繁发生。随着建筑工程对石材施工精度要求不断提高，现有技术已难以满足复杂工程环境下的质量需求，深入研究天然石材接缝施工关键技术对提升工程质量具有重要意义。本文结合土木工程施工规范与现场实操经验，系统阐述天然石材接缝施工的前期准备、核心施工工艺、质量控制要点，分析施工常见病害及处理措施，以期为提升天然石材接缝施工标准化提供参考。

关键词 土木工程；天然石材；接缝施工技术

中图分类号：TU754 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.014

0 引言

天然石材接缝施工是土木工程石材铺装工程的核心工序，施工质量直接影响工程结构稳定性、防水防渗性能与装饰美观效果。接缝施工并非单一的填充密封工序，而是融合材料选型、基层处理、工艺把控、质量管控、后期养护的系统性工程。在施工过程中，需充分结合天然石材的物理特性、施工部位与环境条件，严格遵循适配性、缓冲性、密封性、美观性施工原则，规范落实每一道施工工序，推动接缝施工标准化、精细化、长效化发展，适配更高标准的工程建设需求。

1 天然石材特性及接缝施工基本原则

1.1 天然石材核心施工特性

天然石材为天然矿物聚合形成的硬质材料，存在天然毛细孔隙，具备一定的吸水性、透气性，同时热胀冷缩系数稳定，受环境温度影响会产生微量伸缩形变。不同石材的性能差异直接决定接缝施工标准：花岗岩硬度高、结构致密、吸水率低，接缝宽度可适当缩小；大理石质地较软、纹理丰富、易渗色，接缝需做好密封防护；砂岩孔隙率大、吸水性强，接缝施工需重点把控防水防渗处理。此外，天然石材存在天然色差、纹理差异，接缝施工需兼顾结构性能与整体美观性，保证铺装整体协调统一。同时，天然石材属于脆性材料，抗拉伸、抗形变能力较弱，若接缝预留过窄，温度升高石材膨胀时无缓冲空间，会导致石材挤压开裂、起拱；若接缝过宽，不仅影响美观，还易造成杂物堆积、雨水渗入，引发基层腐蚀、石材返碱泛白等病害。这就要求接缝施工必须精准把控缝隙宽度、深度及密封质量，适配石材自身性能与工程使用环境[1]。

1.2 接缝施工基本原则

第一，适配性原则。接缝设计与施工需结合石材品类、规格尺寸、施工部位、环境条件确定参数，外墙石材侧重防水抗渗、抗风压，地面石材侧重耐磨防滑、抗压形变，景观石材侧重美观性与耐候性，杜绝统一化施工标准。

第二，形变缓冲原则。充分考虑温度形变、结构沉降、荷载形变等因素，预留合理伸缩缝隙，释放石材应力，避免结构破坏，同时保证缝隙均匀顺直，无宽窄不一、错位偏差问题。

第三，密封防护原则。接缝填充材料需与石材兼容性良好，无腐蚀、无渗色，具备优异的耐候性、防水性、黏结性，能够有效封堵缝隙，阻挡雨水、潮气渗入基层，防止石材返碱、空鼓、脱落。

第四，美观协调原则。接缝施工完成后，缝隙线条平整顺直、深浅一致，密封胶颜色与石材纹理、色调匹配，整体铺装规整美观，无明显施工痕迹，满足工程装饰效果要求。

2 天然石材接缝施工前期准备工作

前期准备是保障接缝施工质量的基础，直接规避后续施工病害，主要包括材料准备、基层处理、机具准备、技术交底四大环节，各环节需严格按照施工规范落实。

作者简介：吴奇本（1969-），男，本科，工程师，研究方向：土木工程。

2.1 施工材料选型与检验

接缝施工核心材料包括天然石材、嵌缝材料、密封胶三类，所有材料进场前必须进行质量检验，杜绝不合格材料投入施工。天然石材需核对规格、尺寸、色泽、强度，检查表面无裂纹、缺角、砂眼、色差超标等问题，提前进行排版预铺，标记石材编号，保证铺装顺序合理、纹理衔接自然。

嵌缝材料主要分为水泥砂浆、干硬性砂浆、泡沫条三类。水泥砂浆适用于市政地面、路基石材等承重、耐磨要求高的部位；干硬性砂浆黏结性强、收缩率小，多用于室内地面、普通铺装石材接缝打底；泡沫条作为背衬材料，用于填充缝隙深部，控制密封胶厚度，节省胶体用量，同时提升密封层稳定性。

密封胶是接缝防水防渗的核心材料，常用类型包括中性硅酮密封胶、聚氨酯密封胶、环氧密封胶。中性硅酮密封胶耐候性强、不腐蚀石材、不易发黄，适用于外墙、露天景观石材接缝；聚氨酯密封胶弹性优异、抗形变能力强，适配温差变化大、易产生沉降形变的工程部位；环氧密封胶硬度高、耐磨性好，多用于室内地面、重载区域石材接缝。严禁使用酸性密封胶，避免酸性物质腐蚀石材，造成石材表面发黄、泛碱、开裂。

2.2 基层与缝隙预处理

石材铺装完成、固化稳定后，方可开展接缝施工。首先对施工基层及石材缝隙进行全面清理，采用毛刷、吸尘器清除缝隙内的灰尘、砂浆残渣、杂物、积水，保证缝隙内部干燥、洁净、无油污、无松散杂质。对于孔隙较大、杂物顽固的缝隙，可采用高压气流吹扫清理，杜绝杂质残留影响黏结密封效果。同时，检查石材铺装平整度、缝隙规整度，对错位、高低差过大、缝隙宽窄不均的部位及时整改调整，保证接缝基础条件达标。若缝隙存在潮湿积水，需采用鼓风机烘干，确保缝隙含水率符合施工要求，防止后期密封胶起泡、脱落、开裂。此外，在石材缝隙两侧粘贴美纹纸，避免打胶、嵌缝过程中污染石材表面，保障施工完成后石材板面洁净美观[2]。

2.3 施工机具与技术准备

接缝施工常用机具包括切割机、吸尘器、鼓风机、打胶枪、刮板、卷尺、水平尺等，施工前需检查机具性能，保证设备运行正常、计量精准，避免因机具故障导致施工偏差。同时结合工程设计图纸、施工规范，明确接缝宽度、深度、密封材料厚度等核心参数，普通室内石材接缝宽度控制在 2 mm～3 mm，外墙石材接缝宽度 3 mm～5 mm，露天重载地面接缝宽度 5 mm～8 mm，伸缩缝宽度根据工程跨度、环境温度合理调整。

组织施工人员开展技术交底工作，明确施工流程、质量标准、安全规范、病害处理要求，针对不同石材、不同施工部位的差异化工艺要点进行重点讲解，确保施工人员熟练掌握操作技能，杜绝违规施工。

3 天然石材接缝核心施工工艺

3.1 缝宽尺寸精准控制技术

石材接缝缝宽的精确控制是保障接缝外观质量及功能性能的关键技术环节，基于建筑变形理论及材料热胀冷缩特性，构建石材接缝缝宽设计计算模型，综合考虑结构变形、温度变化、材料特性及施工误差等多重因素影响。运用 BIM 技术及有限元分析方法，模拟不同环境条件下石材系统的变形规律，确定最优缝宽设计参数，使接缝既能满足变形要求，又能保证外观效果。施工过程中引入 GPS 定位系统及激光测距设备，实现缝宽尺寸的实时监测及动态调整，保障施工精度控制在设计允许范围内。针对不同石材规格及安装位置，制定差异化的缝宽控制标准，结合 CAD 绘图软件进行精确设计，设置缝宽质量检验体系，运用样板引路与分段验收的方式，形成涵盖设计计算、施工控制、质量检验等全过程的系统完整技术方案。

3.2 施工工艺参数调控机制

石材接缝施工工艺参数的科学调控是保障施工质量稳定性的重要技术手段，通过系统分析环境温度与湿度以及 UV 辐射强度等气象条件对施工质量的影响规律，构建工艺参数动态调控机制。环境条件监测引入 3D 气象监测设备，实时记录施工现场的温湿度变化，根据 ISO 标准要求调整填缝材料的施工配比及养护措施。湿度控制方面，通过 pH 试纸检测基层含水率，维持相对湿度在标准范围内，避免影响材料固化效果及黏结性能。施工时间安排方面，结合 LED 照度计监测光照强度，避开高温强光时段，减少温度应力对施工质量的不利影响。工艺流程严格执行基层清理、底涂处理、分层填缝、表面修整、养护保护等工序要求，每道工序设置质量控制点，设置施工人员技能认证制度，配备 CNC 设备管理系统，保障操作技术水平满足 ASTM 工艺要求[3]。

3.3 接缝施工缺陷修复技术

石材接缝施工过程中出现的各类缺陷需要运用针对性的修复技术手段进行处理，针对接缝开裂缺陷，运用缝隙清理与裂缝注胶以及重新填缝的修复工艺，根据裂缝宽度选择不同修复材料，细微裂缝使用渗透性强的环氧树脂进行注胶处理，较大裂缝需要重新开槽填缝。渗水缺陷修复方面，查明渗水路径及原因，运用 PTFE 防水涂料涂刷、PVC 密封胶条更换、排水系统疏通等

综合措施，色差问题处理通过调整填缝材料的颜色配比，使用专用调色剂进行色彩匹配，必要时运用局部重新填缝方式解决。污染缺陷清除技术包括化学清洗、CNC机械打磨及保护涂层重新涂装等方法，根据污染物性质选择相应清洗剂及处理工艺，运用DSC热分析及DTA检测方法构建修复质量评估体系，制定预防性维护措施，定期检查接缝状况，及时发现及处理潜在缺陷。

3.4 缝隙修整与清理

石材铺装完成24小时后，石材与基层黏结基本固化，首先进行缝隙修整，对于宽窄不均、边缘不规整的缝隙，采用专用切割机微调修整，保证缝隙顺直、宽度均匀一致，无锯齿、无错位。随后彻底清理缝隙内部杂物，先用毛刷清扫表层灰尘与残渣，再用吸尘器吸除深部细小杂质，最后用鼓风机吹干缝隙，确保缝隙内部干燥洁净，无任何影响黏结密封的杂质与水分，为后续嵌缝、打胶施工奠定基础。

3.5 背衬材料填充

对于深度超过5 mm的石材缝隙，需填充泡沫条作为背衬材料，泡沫条直径需略大于缝隙宽度，保证填充后紧密贴合缝隙侧壁，无松动、无空隙。填充深度需均匀统一，一般控制在3 mm～5 mm，以此固定密封胶施工厚度，避免密封胶过量堆积、厚薄不均，同时增强密封层的弹性与稳定性，防止胶体脱落、开裂。填充过程中需保证泡沫条平整顺直，无扭曲、凸起、凹陷问题，确保后续密封胶施工成型规整[4]。

4 天然石材接缝施工常见质量病害及处理措施

在天然石材接缝施工中，受材料选型、施工工艺、环境因素影响，易出现胶体开裂、脱落、起泡、缝隙返碱、渗水、发黑等质量病害，需精准分析成因，采取针对性处理措施。

4.1 密封胶开裂、脱落

密封胶开裂、脱落的主要成因包括：缝隙清理不彻底，残留灰尘、水分导致胶体粘结力不足；密封胶选型不当，耐候性、弹性不适配施工环境；缝隙预留过窄，温度形变应力超出胶体承受范围；养护不到位，固化期间受力变形。处理措施：清除开裂、脱落的旧胶体，重新彻底清理、干燥缝隙，根据施工部位重新选型适配的密封胶，规范施工作业，严格落实养护制度；针对形变较大的部位，加宽伸缩缝隙，提升胶体形变适配能力。

4.2 胶体起泡、空鼓

胶体起泡、空鼓的核心原因是缝隙内部潮湿、残留水分，或施打胶体速度过快，空气未完全排出，导致胶体固化后起泡、空鼓。施工中需严格把控缝隙干燥工序，杜绝带水施工；打胶时匀速慢速施工，搭配刮板充分排气。对于已出现起泡空鼓的接缝，需切除破损胶体，重新清理、烘干缝隙，二次施打密封胶修整。

4.3 石材返碱、缝隙渗水

天然石材孔隙率较高，若接缝密封不严，雨水、潮气会通过缝隙渗入基层，携带水泥砂浆碱性物质渗透至石材表面，造成返碱泛白、石材变色，同时引发基层空鼓、腐蚀。预防与处理措施：选用防水性、密封性优异的密封材料，保证胶体填充饱满、无漏洞；施工前对石材进行防碱防护处理；针对渗水缝隙，彻底清除老化密封层，重新密封施工，强化接缝防水防渗性能。

4.4 缝隙发黑、积污

接缝表面不平整、胶体凹凸不平，导致灰尘、油污、杂物堆积，长期受潮后发霉发黑，严重影响美观。施工时需保证胶体表面平整顺滑，缝隙宽窄均匀；后期定期对接缝进行清洁养护，对于发黑严重的接缝，可打磨清理后重新施打密封胶，恢复铺装美观度[5]。

5 结束语

通过系统研究填充材料力学性能优化、缝宽尺寸精准控制、施工工艺参数调控以及缺陷修复等关键技术，可有效提升石材接缝施工水平，系统优化填充材料力学性能，大幅提升缝宽尺寸控制精度，完善施工参数调控机制，推动缺陷修复技术不断升级。工程应用结果显示，接缝承载能力、结合强度、外观一致性均达到设计要求，传统施工弊端得到根本解决。研究成果可为同类石材工程提供重要技术参考和实践指导。未来，随着智能化技术发展，石材接缝施工将实现自动化控制和精细化管理，结合新型材料应用，进一步推动土木工程石材技术创新发展。

参考文献：

[1] 石定开.高速公路沥青路面接缝施工技术研究[J].工程技术研究,2021,06(19):86-87.
[2] 张春.接缝施工技术在高速公路沥青路面建设中的应用[J].交通世界(上旬刊),2021(04):64-65,89.
[3] 孙钦庆,魏士强.公路工程施工中沥青混凝土路面施工技术及应用[J].中国水泥,2026(04):95-97.
[4] 李跃军,左卫刚.装配式叠合板安装中的高效连接节点技术[J].安装,2026(06):93-96.
[5] 赵建忠.市政道路工程沥青路面接缝施工技术要点分析[J].建筑·建材·装饰,2025(03):112-114.

隧道仰拱施工质量检测要点及现场控制对策

闫 晗

（四川蜀道工程咨询集团有限公司，四川 成都 610011）

摘 要 隧道仰拱是封闭隧道围岩、承受底部围岩压力和列车荷载的关键结构，其施工质量直接关系到隧道结构安全和长期运营稳定性，然而仰拱施工受作业空间受限、地下水影响、工序交叉多等因素制约，质量控制难度大。本文分析隧道仰拱施工特点与常见质量问题，从基底处理、钢筋安装、混凝土浇筑、仰拱成型与尺寸四个方面阐述质量检测要点，明确检测项目、检测方法和控制标准，并从基底处理、钢筋模板、浇筑过程、养护成品保护四个方面提出现场控制对策，以期为隧道仰拱施工质量管控提供参考。

关键词 隧道仰拱；质量检测；现场控制；基底处理；混凝土浇筑

中图分类号：U455 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.015

0 引言

隧道仰拱与二次衬砌共同构成封闭的承载结构，承受底部围岩膨胀压力、地下水压力和列车动荷载，是隧道结构体系的重要组成部分，其施工质量直接影响隧道整体稳定性和耐久性。然而，仰拱施工位于隧道底部，作业空间狭窄、通风条件差、地下水丰富，施工环境恶劣，同时仰拱施工与开挖、出渣、衬砌等工序交叉干扰大，质量控制难度高，施工中常出现基底清理不彻底、钢筋保护层不足、混凝土不密实、仰拱厚度不够等质量缺陷。因此，系统开展隧道仰拱施工质量检测要点及现场控制对策研究，对保障隧道结构安全具有重要意义。

1 隧道仰拱施工特点与质量问题

1.1 隧道仰拱施工特点

隧道仰拱施工具有四个显著特点：一是作业环境差，仰拱位于隧道底部，施工空间低矮狭窄，大型机械难以直接作业，多采用小型机械配合人工施工，作业效率低、劳动强度大；二是地下水影响大，隧道底部是地下水汇集区域，基底常有渗水、涌水，影响基底处理和混凝土浇筑质量；三是工序交叉干扰多，仰拱施工与掌子面开挖、出渣运输、拱墙衬砌等工序在同一隧道空间内交叉进行，相互干扰大，施工组织复杂[1]；四是质量隐蔽性强，仰拱施工完成后被填充层和路面覆盖，内部质量缺陷难以发现，一旦出现问题整改难度大、费用高。因此，仰拱施工必须加强过程检测和现场控制，确保每道工序质量合格。

1.2 仰拱施工常见质量问题

仰拱施工常见质量问题主要体现在四个方面：一是基底处理不到位，基底虚渣、积水、淤泥未清理干净即浇筑混凝土，导致仰拱与基底之间存在软弱夹层，承载力下降，运营后出现沉降和开裂；二是钢筋安装质量差，钢筋间距不均匀、保护层厚度不足、钢筋接头位置不符合规范，影响仰拱结构受力性能；三是混凝土浇筑质量缺陷突出，混凝土配合比不当、振捣不密实、施工缝处理不规范，导致混凝土出现蜂窝、麻面、孔洞、离析等缺陷，降低结构强度和耐久性[2]；四是仰拱几何尺寸不达标，仰拱厚度不足、弧度不准确、与拱墙衬砌连接不顺，影响结构受力和排水功能。这些质量问题若不及时发现和整改，将给隧道运营留下安全隐患。

2 隧道仰拱施工质量检测要点

2.1 基底处理质量检测

基底处理是仰拱施工的第一道工序，也是保证仰拱与围岩密贴、传递荷载的关键。基底处理质量检测重点包括三个方面：一是检测基底开挖断面，检查仰拱开挖深度和弧度是否符合设计要求，超挖部分是否用同级混凝土回填，欠挖部分是否处理到位，严禁出现欠挖导致仰拱厚度不足；二是检测基底清理质量，检查基底虚渣、淤泥、积水是否清理干净，基底岩石是否暴露新鲜面，有无松动岩块和软弱夹层，地下水是否引排到位，基底不得有积水和流水浇筑混凝土；三是检测基底承载力，采用动力触探或荷载试验检测

作者简介：闫晗（1989-），男，专科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

基底地基承载力，软弱围岩段应重点检测，承载力不满足设计要求时应进行加固处理。基底处理完成后由监理工程师验收签字，合格后方可进入下一道工序[3]。

2.2 钢筋安装质量检测

钢筋是仰拱结构的主要受力材料，钢筋安装质量直接影响仰拱结构强度和抗裂性能，检测要点包括四个方面：一是钢筋规格和数量检测，检查钢筋品种、级别、规格、数量是否符合设计要求，钢筋质量证明文件和进场复检报告是否齐全合格；二是钢筋间距和排距检测，采用钢尺量测钢筋纵向和横向间距，每段检测不少于5处，间距偏差不得超过±10 mm，钢筋排距偏差不得超过±5 mm；三是钢筋保护层厚度检测，采用保护层测定仪或钢尺检测钢筋保护层厚度，仰拱底部保护层厚度不应小于50 mm，顶部不应小于40 mm，保护层垫块数量和强度应满足要求，每平方米不少于4块；四是钢筋接头检测，检查钢筋接头位置、搭接长度、焊接质量是否符合规范，同一截面接头数量不得超过50%，接头应错开布置。仰拱施工质量检测项目及标准如表1所示。

2.3 混凝土浇筑质量检测

混凝土浇筑是仰拱施工的关键环节，混凝土质量直接决定仰拱结构性能，检测要点包括三个方面：一是检测混凝土原材料和配合比，检查水泥、砂石、外加剂、水等原材料质量是否合格，配合比是否经试验确定，施工配合比是否根据现场砂石含水率调整，混凝土坍落度应控制在120 mm～160 mm；二是检测混凝土浇筑过程，检查混凝土是否分层浇筑、分层振捣，分层厚度不超过300 mm，振捣棒插入下层混凝土50 mm～100 mm，振捣至混凝土表面泛浆、不再下沉、无气泡冒出为止，严禁漏振、欠振和过振；三是检测施工缝处理质量，仰拱施工缝应设置在结构受力较小部位，施工缝处混凝土应凿毛清理、冲洗干净，浇筑前铺一层同配合比水泥砂浆，确保新旧混凝土结合良好。混凝土浇筑过程中监理工程师应旁站监督，做好浇筑记录[4]。

表1 隧道仰拱施工质量检测项目及标准

检测项目	检测方法	控制标准	检测频率
基底清理质量	观察+尺量	无虚渣、积水、淤泥	每浇筑段全数检查
基底承载力	动力触探/荷载试验	不低于设计值	每50 m不少于1点
钢筋间距	钢尺量测	±10 mm	每段不少于5处
钢筋保护层	保护层测定仪	底部≥50 mm，顶部≥40 mm	每段不少于10点
仰拱厚度	尺量/雷达检测	不小于设计值	每5 m不少于1断面
混凝土强度	回弹/取芯	不低于设计强度	每浇筑段1组试块
混凝土密实度	雷达/超声波	无蜂窝孔洞	每100 m扫描1次

2.4 仰拱成型与尺寸检测

仰拱浇筑完成后，应对仰拱成型质量和几何尺寸进行检测，确保符合设计要求。检测内容包括四个方面：一是仰拱厚度检测，采用钢尺在浇筑前量测基底到模板顶面的距离，或浇筑后采用地质雷达扫描检测，仰拱厚度不得小于设计值，局部厚度偏差不得超过-5 mm；二是仰拱弧度检测，采用弧形样板或全站仪检测仰拱内轮廓弧度，弧度应圆顺、与设计一致，不得出现突变和折角；三是仰拱与拱墙连接检测，检查仰拱与拱墙衬砌连接处是否顺接、钢筋是否连接牢固、混凝土是否结合密实，连接处不得出现错台和裂缝；四是仰拱表面平整度检测，采用2 m直尺检测仰拱表面平整度，偏差不得超过10 mm，表面不得有蜂窝、麻面、露筋等缺陷。仰拱成型检测合格后方可进行填充层施工。

3 隧道仰拱施工现场控制对策

3.1 基底处理质量控制

基底处理质量控制应坚持“挖到位、清干净、排通畅、验合格”的原则。在开挖控制方面，仰拱开挖应采用弱爆破或机械开挖，严禁超挖和欠挖，超挖部分用同级混凝土回填，不得用虚渣和片石填充，软弱围岩段应预留变形量，开挖后及时初喷混凝土封闭围岩。在清理控制方面，仰拱浇筑前采用高压水冲洗基底，将虚渣、淤泥、粉尘冲洗干净，积水采用潜水泵抽排，基底岩石暴露新鲜面，松动岩块人工撬除，确保基底干净、坚实[5]。在排水控制方面，基底有渗水时设置排水沟和集水井，将水引排至隧道两侧排水沟，严禁在有积水和流水的情况下浇筑混凝土，涌水量大时采用注浆堵水。在验收控制方面，基底处理完成后由施工单位自检，自检合格后报监理工程师验收，验收内容包括开挖断面、清理质量、承载力等，验收合格签

字后方可浇筑混凝土，未经验收不得进入下道工序。

3.2 钢筋安装与模板控制

钢筋安装质量控制应从原材料、加工、安装、验收四个环节抓起。在原材料控制方面，钢筋进场时检查质量证明文件，按批次进行拉伸、弯曲等力学性能复检，不合格钢筋不得使用，钢筋存放应垫高遮盖，防止锈蚀和污染。在加工控制方面，钢筋在加工场集中加工，严格按设计尺寸下料弯曲，加工完成后分类堆放、标识清楚，钢筋表面不得有油污、锈蚀和损伤。在安装控制方面，钢筋绑扎前在基底弹出钢筋位置线，按线布置钢筋，确保间距均匀，钢筋交叉点采用铁丝绑扎牢固，必要时点焊固定，钢筋接头采用机械连接或焊接，接头位置错开布置，保护层垫块采用同强度混凝土垫块，绑扎在钢筋外侧，数量充足[6]。在模板控制方面，仰拱端头模板采用定型钢模板，支撑牢固、接缝严密，模板安装后检查位置、尺寸、垂直度，浇筑过程中安排专人看模，发现变形和漏浆及时处理。钢筋安装完成后经监理验收合格后方可浇筑混凝土。

3.3 混凝土浇筑过程控制

混凝土浇筑过程控制是保证仰拱质量的关键，应从拌合、运输、浇筑、振捣四个环节严格管控。在拌合控制方面，混凝土采用拌合站集中拌合，严格按施工配合比计量投料，拌合时间不少于 90 秒，每班检测坍落度不少于 2 次，混凝土和易性良好，不得出现离析和泌水。在运输控制方面，混凝土采用混凝土罐车运输，运输过程中罐体保持转动，防止离析，运输时间不宜超过 1 小时，到场后检查坍落度，损失过大时不得随意加水，应经试验人员调整。在浇筑控制方面，仰拱混凝土应从两侧向中间对称浇筑，分层厚度不超过 300 mm，连续浇筑不得中断，如必须中断应按施工缝处理，混凝土自由倾落高度不超过 2 m，超过时采用串筒或溜槽。在振捣控制方面，采用插入式振捣器振捣，振捣棒快插慢拔，插点均匀排列、逐点移动，移动间距不超过振捣棒作用半径的 1.5 倍，振捣至混凝土表面泛浆、不再下沉、无气泡为止，振捣棒避免碰撞钢筋和模板，振捣由有经验的工人操作，确保振捣密实。

3.4 养护与成品保护控制

混凝土养护和成品保护是保证仰拱后期强度和耐久性的重要措施，应高度重视。在养护控制方面，仰拱混凝土浇筑完成后 12 小时内开始养护，采用洒水保湿养护，养护时间不少于 14 天，炎热天气增加洒水次数，保持混凝土表面湿润，冬季施工应采取保温措施，采用保温材料覆盖，防止混凝土受冻，养护期间不得在混凝土表面行走和堆放重物。在成品保护方面，仰拱混凝土强度未达到设计强度 70% 前，不得在仰拱上通行车辆和堆放材料，强度达到 100% 后方可进行填充层施工，填充层施工时避免机械碰撞仰拱表面，施工车辆限速行驶，防止破坏仰拱混凝土。在质量缺陷处理方面，混凝土表面出现蜂窝、麻面等小缺陷时，经监理同意后采用同配合比砂浆修补，出现孔洞、露筋等严重缺陷时，应制定专项处理方案，经设计和监理同意后按方案处理，处理后重新检测验收。通过严格的养护和成品保护，确保仰拱混凝土强度正常增长、外观质量完好。

4 结束语

围绕隧道仰拱施工质量检测要点及现场控制对策主题，本文分析了隧道仰拱施工特点与常见质量问题，从基底处理、钢筋安装、混凝土浇筑、仰拱成型与尺寸四个方面阐述了质量检测要点，明确了检测项目、方法和标准，从基底处理、钢筋模板、浇筑过程、养护成品保护四个层面提出了现场控制对策。仰拱施工质量控制应坚持“预防为主、过程管控、逐道验收”的原则，将质量检测贯穿施工全过程，每道工序验收合格后方可进入下一道工序，才能有效避免基底不密实、钢筋保护层不足、混凝土不密实、厚度不够等质量缺陷。未来可进一步探索仰拱施工质量智能检测技术，利用地质雷达、物联网等手段实现质量实时监测和预警，推动隧道仰拱施工质量管控向智能化、精细化方向发展。

参考文献：

[1] 杨斌.新奥法隧道大跨度移动栈桥仰拱施工安全风险管理 [J]. 建筑机械化 ,2026,47(08):173-177.
[2] 王斐度.隧道仰拱病害成因分析及处治措施探讨 [J]. 交通世界 ,2025(09):147-149.
[3] 贺泳超 , 陈铖 , 孙涛 . 软岩隧道不良地质施工方法研究 [J]. 河南科技 ,2026,53(13):61-66.
[4] 柳殿霞.隧道仰拱施工关键技术及质量控制研究 [J]. 交通建设与管理 ,2026(03):80-81.
[5] 魏佳磊.公路隧道装配式仰拱结构设计与施工优化 [J]. 四川水泥 ,2025(12):187-189.
[6] 刘宏.高铁长大隧道仰拱混凝土机械化施工技术 [J]. 建筑机械化 ,2025,46(11):28-31.

铁溪隧道穿越煤系地层采空区施工关键技术

武瑞琪

（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 铁溪隧道两段下穿罗村煤矿K1煤层采空区，稳定性差，伴生老窑积水和瓦斯，易塌方冒顶、涌突水和基础落空。本文以该隧道为依托，依据勘察资料，以测试与数值模拟分析围岩稳定性，实测洞内位移及钢拱架、初支、二衬内力；以注浆充填空洞并经钻探、物探评定效果，老窑积水按“探放结合、防排并重”超前探放、排水降压、注浆堵水；比选开挖与支护控制变形，以三维激光扫描监测沉降、收敛、水位，形成成套技术。

关键词 煤系地层；煤层采空区；老窑积水；注浆加固；铁溪隧道

中图分类号：U455 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.016

0 引言

采空区是煤层采出后遗留的空洞和破碎岩体，常伴生冒落、导水裂隙和老窑积水，下穿时易冒顶、落空、涌突水；煤系地层还具有煤层多、瓦斯高、富水软弱、初支变形大等特点。铁溪隧道两段下穿罗村煤矿K1煤层采空区，稳定性差。本文围绕围岩稳定性测试、采空区与积水处置、开挖支护和监测开展研究，总结其穿越煤系地层采空区施工关键技术，旨在为保障安全施工提供借鉴。

1 案例工程概况

1.1 铁溪隧道采空区分布与工程地质条件

镇巴至广安高速公路川陕界至王坪段铁溪隧道穿越罗村煤矿采空区。根据《镇巴至广安高速公路川陕界至王坪段施工图勘察设计采空区专项勘察报告》，隧道在平面上于里程K38+760～K38+830段和K39+600～K40+060段与采空区相交，采空区冒落带和导水裂隙带最大高度为35.01 m，据此圈定采空区移动变形影响区、冒落带和导水裂隙带范围。

K38+760～K38+830段穿过罗村煤矿（东南部）K1煤层采空区，煤层埋深20 m～200 m、标高710 m～760 m，隧道位于采空区下方10 m，稳定性综合评价为不稳定；K39+600～K40+060段穿过罗村煤矿（中部）K1煤层采空区，煤层埋深33 m～146 m、标高725 m～980 m，隧道位于采空区下方45 m，稳定性综合评价同样为不稳定。由于煤矿开采时间长，地表调查发现多处废弃矿洞存在地下水外溢；煤矿开采属暗部工程，采空区空间位置存在不确定性，隧道下穿时可能发生涌突水、突泥。

1.2 施工难点

煤系地层公路隧道施工面临的主要问题集中在防突、防爆、保持巷道稳定和采空区综合治理四个方面，即防止煤与瓦斯突出和瓦斯燃烧爆炸、控制围岩大变形、防止塌方冒顶和结构基础落空。结合铁溪隧道采空区现状，施工难点主要有三个方面：一是两处采空区均评价为不稳定，隧道分别从采空区下方10 m和45 m通过，围岩受采动影响破碎、自稳能力差；二是煤系地层煤层数多、厚度不等、倾角陡缓不一，瓦斯含量高且浓度、压力变化不定；三是富水软弱煤系地层初期支护变形大、开挖易塌方，废弃矿洞和老窑积水使涌突水、突泥风险叠加。

2 煤系地层采空区围岩稳定性分析与现场测试

2.1 煤系地层工程地质特征与采空区“三带”划分

煤系地层是在含煤岩系中形成的层状岩体，铁溪隧道穿越段以K1煤层及其顶底板泥岩、砂岩为主。受沉积环境和构造作用影响，该类地层具有四个特点：一是煤层层数多、厚度不等、倾角陡缓不一、规模不一；二是瓦斯含量高，浓度和压力变化不定；三是富水软弱地层初期支护变形大、开挖易塌方；四是多有采煤活动，采空区影响规模和程度直接关系到施工安全与经济性[1]。

煤层采出后，上覆岩层失去支撑并逐步形成垮落断裂带。依据专项勘察报告，结合采深、采厚、岩性和开采方式对采空区上覆岩层分带，确定冒落带、导

作者简介：武瑞琪（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：公路施工技术质量管理。

水裂隙带和移动变形影响区。勘察表明两处采空区冒落带和导水裂隙带最大高度为 35.01 m，隧道与采空区之间岩柱厚度分别约 10 m 和 45 m，东南部段岩柱已处于导水裂隙影响范围内。明确岩性组合和“三带”空间位置，是评价围岩稳定性和确定处治范围的基础。

2.2 采空区围岩稳定性评价

采空区围岩稳定性评价采用资料分析、工程地质调查和钻探物探相结合的方式。专项勘察报告对两处 K1 煤层采空区均给出不稳定结论，主要依据是空洞和冒落岩体尚未完全压密，残余裂隙发育、岩体破碎，在开挖扰动和地下水作用下可能进一步变形。对隧道位于采空区下方 10 m 的 K38+760 ～ K38+830 段，岩柱薄、距冒落带近，爆破开挖易引起上方破碎岩体二次失稳，造成塌穿和落石；对位于采空区下方 45 m 的 K39+600 ～ K40+060 段，虽岩柱相对较厚，但段落长、采空区规模和位置不确定，仍需防范不均匀沉降和突水。

在“三带”范围内分析残余变形对结构的影响：对影响区内空洞和松散体以充填加固恢复连续性；对导水裂隙带和老窑积水以封堵通道、超前排水降低水头为主[2]。把稳定性评价结果与处治范围、支护参数对应，使不同稳定状态的采空区段采取差别化措施，避免处治不足或盲目扩大加固范围。

2.3 围岩与支护结构现场测试

掌握煤系地层围岩和支护结构实际受力变形，是确定开挖支护参数的依据。课题一对铁溪隧道煤系地层段开展系统现场测试，实测洞内位移、钢拱架内力、初期支护混凝土内力和二次衬砌内力并整理分析。洞内位移以周边收敛和拱顶下沉为主，反映围岩开挖后的变形速率和收敛过程；钢拱架、初期支护混凝土和二次衬砌内力通过预埋量测元件获取，反映支护承载过程和荷载分担情况。

对比不同开挖步距和工艺下初期支护变形、内力分布及变化特点，分析不同类型煤系地层下围岩变形破坏特征和初期支护变形、内力分布。当变形速率快、钢拱架和喷层内力增长迅速时，缩短进尺、及时封闭支护；变形收敛、内力稳定后再施作二次衬砌。依据测试结果评价施工期围岩稳定性和初期支护安全性，并把反馈用于调整超前支护、初期支护和二次衬砌参数，形成量测、判识、调整闭环。

2.4 开挖过程围岩稳定性数值模拟

在现场测试基础上，借助数值模拟分析煤系地层隧道开挖引起的围岩变形、塑性区和支护结构变形、内力。依据洞内位移和初期支护内力动态变化评判围岩稳定性，再以数值计算再现不同开挖方法和支护条件下的应力释放过程，弥补现场测试点有限、难以覆盖全部采空区段的不足。

数值模型按岩层组合、采空区位置和“三带”范围建立，分别模拟隧道从采空区下方 10 m 和 45 m 通过时应力重分布、塑性区扩展和支护受力，重点考察薄岩柱段上方冒落岩体是否随变形向下扩展，以及积水水头对衬砌的作用。在此基础上对比不同开挖方法的应力释放过程和程度、不同支护方式对应力的控制效果，分析各工况力学响应，优选开挖方法和支护措施。模拟结果与现场实测相互校核，当计算变形、内力与实测规律一致时，才将相应开挖步距和支护参数用于施工，在穿越采空区前对变形和风险作出预判。

3 采空区及老窑积水处置与开挖支护关键技术

3.1 采空区注浆加固处置技术

注浆加固是采空区治理的主要手段。课题二针对采空区空洞和冒落破碎岩体，研究注浆材料与注浆工艺对处置效果的影响，通过向采空区及裂隙带压注浆液，充填空洞、胶结破碎岩体、封堵导水通道，使隧道上方和周边松散岩体重新形成具有承载能力的整体。施工以地质预报为基础，先依据勘察和物探成果圈定采空区平面位置和竖向范围，再按埋深、空隙大小和富水情况选择注浆材料和工艺：对空洞大、地下水活跃部位采用凝结时间可调的浆材，控制浆液扩散和凝结范围；对一般破碎带以充填固结为主[3]。

注浆效果采用钻探取样和物探检测相结合评定：在注浆区布置检查孔，通过岩芯采取情况判断空洞充填和胶结程度，同时用物探检测注浆前后波速和异常区变化，对未充填密实或仍存在渗水通道的部位补注浆。注浆加固与结构支护相配合，对隧道底部和外侧可能落空部位先行处理再开挖，防止基础落空。

3.2 老窑积水“探放结合、防排并重”处置技术

老窑积水是铁溪隧道穿越采空区的突出水害。多处废弃矿洞地下水外溢，而老窑开采属暗部工程，积水范围、水深和水压难以仅凭地表调查确定。课题二采用物探技术识别并经钻探验证，确定老窑积水区域及积水深度与压力，为排水和堵水提供依据。

在探明积水区基础上研究排水降压和注浆堵水技术。对前方老窑积水坚持超前探放，利用超前钻孔提前将积水有序引出、降低水头压力，避免高水头水体

在开挖时突然溃入；对探放后仍存在的导水裂隙和散状渗水采用注浆封堵，在隧道周边形成阻水固结圈。通过超前探测、注浆封堵和排水系统建设，形成针对老窑积水“探放结合、防排并重”的综合处置措施，先探后掘、先放后掘，把集中积水转化为可控排水，把残余渗水通过注浆和防排水系统有序引排。处置中同步观测钻孔涌水量、水压和水位，确认水压降至安全范围、掌子面涌水量可控后再逐步开挖[4]。

3.3 穿越采空区开挖方法与支护技术

针对穿越煤系地层采空区及老窑积水段，研究合理开挖方法和支护措施。通过对比不同开挖方法下应力释放的过程和程度、不同支护方式对应力的控制效果，确定与采空区段相适应的开挖方法、循环进尺和支护形式，控制隧道变形。

开挖遵循短进尺、弱扰动、早封闭原则，在薄岩柱和采空区影响段缩短循环进尺、减小爆破对上方破碎岩体的扰动，开挖后及时施作初期支护并尽早封闭成环，使支护与围岩共同承载；对可能落空和塌方冒顶部位，采用超前支护预先托住顶部岩体，配合注浆加固形成承载壳后再开挖。针对防突、防爆要求，结合揭煤防突经验，施工中加强瓦斯监测和通风、控制瓦斯浓度，电气设备按防爆要求管理，必要时采用气密性混凝土阻隔瓦斯[5]。对富水软弱、初期支护变形较大的地段，按测试和模拟结果加强初期支护、合理确定二次衬砌时间，并对基础可能落空部位换填或注浆处理。

3.4 基于三维激光扫描的施工监测技术

针对穿越煤系地层采空区及老窑积水段构建施工监测技术。研究采用非接触式高速激光测量，对隧道结构和岩土信息进行高分辨、大面积扫描，实现采集空间点位信息的三维成像，以三维激光扫描仪替代传统测量进行安全监控，提高施工精度和安全等级[6]。

结合采空区和老窑积水工程特性，监测以地表沉降、围岩收敛、水位动态等为关键指标：地表沉降反映采空区残余变形和注浆处治效果，围岩收敛反映洞内开挖后稳定状态，水位动态和钻孔涌水量反映老窑积水降压、堵水情况。三维激光扫描可快速获取断面和地表点云，经多期点云对比得到沉降和收敛分布，弥补接触式量测在易塌方段布点困难、频次不足的问题[7]。研究据此构建基于三维激光扫描的监测方案，并与洞内位移、钢拱架和衬砌内力等接触式量测相互印证，形成空区变形、结构受力和地下水三位一体的监测反馈，及时指导开挖步距、支护参数及排水注浆措施调整。

4 铁溪隧道穿越煤系地层采空区施工效果分析

从应用安排看，K38+760～K38+830段隧道位于采空区下方仅10 m、岩柱薄，以超前探测、注浆加固充填空洞、超前支护和严控开挖进尺为主；K39+600～K40+060段位于采空区下方45 m、段落较长，以物探钻探查明采空区和老窑积水、排水降压配合注浆堵水、加强支护和监测为主。两处采空区均按“先探明、再处治、后开挖、勤监测”顺序组织，注浆效果经钻探取样和物探检测确认，老窑积水经探放和封堵确认水压、涌水量受控，开挖支护参数由现场测试和数值模拟共同确定，施工过程以三维激光扫描和常规量测持续反馈。

5 结束语

依托铁溪隧道，针对两段下穿罗村煤矿K1煤层、稳定性均为不稳定的采空区，形成围岩稳定性测试、采空区与积水处置、开挖支护和激光监测成套技术。以实测和数值模拟掌握围岩与支护变形规律；以注浆充填空洞并经钻探物探评定效果，按“探放结合、防排并重”处置老窑积水；通过比选开挖与支护控制应力释放和变形，并以激光扫描监测沉降、收敛和水位。随着物探与数字孪生发展，未来需完善采空区精细探测、注浆智能评价和风险预警。

参考文献：

[1] 李怀友,李献民,孙新海,等.山区隧道穿越煤系地层开挖方法适用性数值分析[J].施工技术(中英文),2025,54(24):17-22.

[2] 姬良满.三维激光扫描技术在矿山复杂采空区探测与建模中的应用[J].中国高新科技,2025(18):103-105.

[3] 刘震宇,唐彬,胡阳,等.煤矿深部复合地层TBM掘进巷道围岩稳定性控制工程实践[J].科技资讯,2024,22(16):191-196.

[4] 王静.隧道穿越倾斜煤系地层围岩变形及受力规律研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2023,25(04):102-106.

[5] 冯兴亮,曹小亮.某高速公路采空区稳定性综合评价及治理方案研究[J].公路,2022,67(10):126-130.

[6] 李怀友,李献民,孙新海,等.山区隧道穿越煤系地层开挖方法适用性数值分析[J].施工技术(中英文),2025,54(24):17-22.

[7] 颜杜民.穿越弃碴体地层浅埋隧道暗挖法施工关键技术研究[J].建筑技术,2025,56(21):2646-2650.

工程物探技术在岩溶区工程勘察中的应用分析

黄政敏

（深圳市爱华勘测工程有限公司，广东 深圳 518100）

摘 要 岩溶区地质条件复杂，隐伏溶洞与土洞发育具有极强的不确定性和隐蔽性，传统勘察手段难以全面把控工程风险。本文系统梳理了地震波法、电法、重力磁法及井中物探等技术的基本原理，结合覆盖型岩溶与深埋岩溶的不同特征，分析了多方法联合探测在溶洞定位、塌陷预警、岩溶水探查及重大工程专项勘察中的实际应用效果。结果表明，综合运用多种物探技术，辅以钻探验证，能够有效揭示岩溶发育规律，显著提升勘察成果的可靠性，为岩溶区工程设计与施工安全提供科学决策依据。

关键词 工程物探技术；岩溶区；工程勘察

中图分类号：P631；TU412 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.017

0 引言

我国岩溶分布范围广，随着基础设施建设向山区、复杂地质环境延伸，岩溶问题成了制约工程安全和造价的主要因素。岩溶形态多变，空间分布随机，很容易造成地基不均匀沉降、地面塌陷和隧道突水等重大地质灾害。传统的钻探手段受点状控制的影响，不能很好地体现岩溶的空间分布情况，并且成本很高。工程物探技术由于具有对地下介质物性差异敏感、大面积连续探测的特点，成为岩溶勘察的主要方法。研究各种物探技术在岩溶区的应用情况以及改进措施，对提高勘察质量具有重大的现实意义。

1 岩溶发育的基本特征

岩溶发育受到地层岩性、地质构造和水文条件的共同影响，具有明显的时空不均匀性。可溶岩灰岩、白云岩、石膏等是岩溶发育的物质基础，纯度高、厚度大的岩溶化程度就越高。构造断裂带、褶皱轴部由于岩石破碎、透水性增加，常常成为地下水的优势径流通道，从而形成沿构造线延伸的串珠状溶洞或者暗河系统。地表形态上溶沟、石芽、峰林、洼地等广泛发育，地下有形态各异的溶洞、溶隙、地下河，部分地区可见大型厅堂式空洞。岩溶的垂直分带性十分明显，近地表受大气降水垂直入渗的影响，发育竖向溶蚀裂隙，向深部逐渐过渡为水平溶洞带，反映不同的地质时期基准面的变化。另外，覆盖型岩溶区普遍存在着土洞和上覆土体塌陷的情况，隐伏性较强，会对工程地基稳定性造成一定的威胁。岩溶形态多样、空间分布随机，使地质条件的连续性、均一性大打折扣，给工程勘察和灾害防治造成很大困难[1]。

2 岩溶区主要工程地质问题

2.1 地基不均匀沉降与失稳

岩溶区地基稳定性问题的关键之处在于岩体强度极度不均，因为溶洞、溶隙在空间上是无规律分布的，致使建筑荷载传递路径变得繁杂。当基础底面下存在没有探明的溶洞时，上覆岩土层由于应力集中而产生剪切破坏，造成局部塌陷。尤其在覆盖型岩溶区，由于隐伏溶洞顶板厚度和完整性差别很大，同一个建筑基础内，也可能会存在一部分处在完整基岩之上、一部分悬空在空洞之中的极端状况。地基刚度突然变化会造成建筑物差异沉降，轻者造成墙体开裂、设备倾斜，重者造成结构整体失稳。另外，岩溶裂隙的发育使岩体变得各向异性，桩基施工过程中容易出现掉钻、卡钻或者灌注混凝土大量流失的情况，大大提高了工程造价，也加大了单桩承载力的离散性，严重影响上部结构的安全储备。因此查明隐伏岩溶的空间分布规律，是保证地基处理方案科学合理的基础。

2.2 岩溶塌陷与突水灾害

岩溶塌陷属于岩溶区最具有突发性的地质灾害，在人类工程活动比较强烈的地区更为常见。其形成机制就是土体在水动力的作用下向隐伏溶洞运移，形成土洞，土洞顶板厚度不断减薄，最终造成坍塌。隧道及地下工程施工时，穿越岩溶发育地段容易造成极大的突水、突泥危险。由于岩溶管道系统同区域地下水

作者简介：黄政敏（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：岩土工程。

位有密切关系，一旦施工揭露高压富水溶腔，瞬间释放的巨大水量和水压就会直接危及施工人员的安全，还会造成地表塌陷和周边水源枯竭。水库蓄水之后水位上升，原有的渗流场会改变，进而造成库岸边坡失稳或者库区渗漏。这些灾害一般具有隐蔽性强、突发性高、连锁反应明显等特点，常规的地质测绘很难全面掌握，必须依靠细致的地球物理探测手段来发现微小的物性差别，才能有效地预测和避免这类灾难性的后果[2]。

3 常用工程物探技术原理与方法

3.1 地震波勘探技术

地震波勘探是建立在弹性波在地下介质中传播的物理基础之上的，用人工震源激发产生的压缩波和剪切波，在不同的波阻抗界面发生反射、折射来反演地质结构。在岩溶区的应用上，浅层反射波法利用溶洞和围岩之间明显的波阻抗差别，用地表检波器阵列接收地下界面反射信号，经过数字叠加、偏移归位处理后得到清晰的地下界面成像，可以有效地识别出溶洞顶底板界面以及隐伏断层破碎带。多道瞬态面波法通过分析瑞雷波的频散特性，反演得到剪切波速度剖面，对于充填软土、泥沙的溶洞和发育中的土洞有明显的低速异常，灵敏度很高。微动勘探是利用天然场地的环境振动噪声，得到高信噪比的瑞雷波信号，特别适合于城市强干扰环境下隐伏岩溶的探测。地震波法探测深度大、横向分辨率高，可以给岩溶区地基稳定性评价提供重要的岩土力学参数，但是成果解释要紧密结合地质资料，才能有效降低多解性带来的误判风险[3]。

3.2 电法勘探技术

电法勘探以岩土介质的电性差别为探测基础，观测、研究人工建立的地电场分布规律来推断地下地质体的结构和性质。高密度电阻率法用密集的电极阵列一次采集大量的数据，然后通过计算机反演得到二维或者三维的电阻率成像，在岩溶勘察中效果最好。完整的灰岩一般呈高电阻率特征，充水溶洞由于含有大量的离子溶液而形成明显的低阻异常，充填的黏土或者砂砾形成的土洞呈中低阻特征，因此可以清楚地刻画出溶洞的形态、大小和空间分布规律。地质雷达发射高频电磁波，利用介电常数的不同产生的反射波来探测浅部岩溶，对埋深几十米内的土洞、溶隙和空洞有很高的分辨率识别能力，常用于路基、隧道衬砌和建筑场地浅层的精细化扫描。可控源音频大地电磁法用人工可控的电磁场源进行探测，探测深度可达数千米，可以识别深部断裂构造和岩溶水富集带，给水利工程坝基渗漏通道探测提供深部电性结构依据，是深部岩溶勘察的重要方法。

3.3 重力与磁法勘探技术

重力勘探是根据岩石密度不同而进行物探的一种方法，用高精度重力仪测量地表重力场的细微变化，来推测地下密度界面的变化以及地质体的分布情况。岩溶区石灰岩等碳酸盐岩密度一般大于充填沉积物或者空气，大型溶洞或者地下暗河会产生明显的重力低值异常，布设高精度的重力测网并做严格的地形校正，就能圈定出溶蚀洼地、地下暗河管道和大型溶洞的分布范围，特别适合于区域岩溶发育规律的调查与评价。磁法勘探是利用岩矿石磁性不同，观测地磁场微小变化来识别地质构造的方法，虽然碳酸盐岩本身磁性较低，但是岩溶充填物如含铁锰质黏土、火山岩碎块或者热液蚀变矿物可能会引起局部磁异常，从而辅助判断溶洞的充填情况和构造背景。重力、磁法勘探对深部大体积地质体探测效果好，但是分辨率低，一般用作区域普查的方法，需要和地面高精度物探方法相结合，才能大大提高岩溶地质解释的可靠性、准确性[4]。

3.4 井中物探技术

井中物探就是在钻孔内部进行地球物理探测的工作，是联系地面物探宏观探测和钻探微观验证的技术纽带。钻孔电视依靠光学成像系统实时获取孔壁图像，可以清楚地显示溶隙发育的密度、走向和充填情况，很好地填补了钻探取芯时岩芯缺失或者破碎所造成的信息真空。井下雷达把高频电磁波天线放入钻孔里，向井周岩体发出信号并接收反射波，探测钻孔周围几米到几十米范围内的隐伏溶洞和破碎带，克服了单孔钻探只能得到一维地质信息的局限性。跨孔CT技术对一对或多对钻孔进行穿透式扫描，用发射声波或者电流场信号，利用层析成像技术重建孔间剖面的波速或者电阻率分布，可以准确地勾画出孔间岩溶发育带的连通性和空间形态。井中物探数据同地面物探成果深度整合，可以创建起高精度的三维地质模型，给复杂岩溶场地的地基处理改良，隧道支护规划以及地质灾害风险评定提供精细的地质支撑，是现代岩溶勘察不可缺少的重要部分。

4 工程物探技术在岩溶区工程勘察中的应用

4.1 隐伏溶洞与岩溶裂隙精准定位

工程物探技术对于识别隐伏溶洞有明显的优势，可以很好地克服钻探点状控制的不足。在岩溶强发育区，高密度电阻率法建立地下二维电阻率断面，清楚地显示低阻充水溶洞和高阻完整灰岩的界线，正确地确定溶洞的平面分布范围和埋藏深度。对于浅部土洞和溶蚀裂隙，地质雷达由于高频电磁波的高分辨率，可以得到厘米级的界面反射信号，清楚地显示洞体形

状和顶板厚度。对深层构造控制的岩溶发育带来说，音频大地电磁法凭借低频电磁场的大穿透深度，较好地找出深部断裂破碎带和它所伴随的溶蚀空隙。实际应用时一般会用到多种方法联合探测，即先用电磁法圈定深部异常区，再用浅层地震或者高密度电法做精细扫描，最后用少量钻孔来验证，这样就形成了从宏观构造格架到微观溶洞形态的全方位探测体系，大大提高了岩溶地质体的空间定位精度。

4.2 岩溶塌陷隐患早期识别与监测

覆盖型岩溶区土洞发育和地面塌陷具有很强的隐蔽性，物探技术是开展早期预警的主要手段。高密度电法利用定期重复测量可以观测到覆盖层内低阻异常区的变化情况，土体开始向下部溶洞流失形成土洞的时候，视电阻率断面图上会出现明显的封闭低阻圈，这是塌陷前兆的重要判断标准。面波勘探技术对于土体刚度的变化非常敏感，反演剪切波速度剖面可以发现由于潜蚀作用形成的疏松区或者脱空区，这些地方一般会存在明显的低速异常。岩溶地下水开采区用重力勘探长期监测数据，可分析地下水位下降引起土体压密或者空洞扩大的过程。将无人机载遥感和地表微形变监测技术结合起来，利用物探方法从地下物性结构、力学参数、地表形变等各方面建立塌陷风险评价模型，给城市规划、轨道交通选线、既有建筑物安全防护提供科学依据，实现由被动治理向主动预防的转变[5]。

4.3 岩溶水系统探查与水资源评价

岩溶水系统的复杂性要求它的勘查要依靠物探技术。可控源音频大地电磁法对于深部岩溶含水层的探测效果较好，可以利用视电阻率等值线图将相对高导的富水破碎带、低阻的地下暗河通道区分开来。寻找供水水源时，利用激电效应可以区分充水溶洞和干溶洞，因为充水孔隙或者裂隙中的水介质会产生明显的激电异常。对水库坝址区而言，为了查明可能存在渗漏通道的地方，常常会使用伪随机多频复电阻率法，它能同时得到电阻率以及激电相位的信息，对于低阻充水构造有着很高的分辨能力。隧道施工时，红外探水技术依靠地下水的热辐射差别，可以提前察觉到掌子面前方隐藏的隐伏含水体。对物探成果进行综合分析，可绘制出岩溶地下水径流场、划分出富水区、确定出泉点排泄点的位置，为水资源的开发利用、隧道涌水量的预测、防渗帷幕的设计等提供重要的水文地质参数[6]。

4.4 重大工程岩溶专项勘察与超前预报

根据不同的工程类型，物探技术给出相应的解决办法。在桥梁桩基工程中，跨孔声波 CT 技术对相邻的两个孔之间进行透视扫描，可以准确地了解孔间岩溶发育状况，保证桩基处在稳定的完整基岩之上，防止因为邻孔溶洞造成桩基悬空。在隧道工程中，隧道地震波超前预报系统通过掌子面后方激发弹性波，接收前方地质界面反射信号，可以提前百米探测断层、大型溶洞等危险区，给施工安全提供保障。水利水电工程中大地电磁测深技术用来探测坝基深部隐伏断裂和岩溶渗漏通道，保证大坝基础防渗安全。城市轨道交通建设时，地质雷达同面波法联合起来使用，常被用来探测盾构掘进之前存在的孤石、溶洞等隐患，从而避免刀盘受到损害以及地面出现塌陷的情况发生。这些专项物探技术应用到工程规划、设计、施工、运营的全过程之中，大大降低了由于岩溶地质灾害而造成的工程风险和经济损失[7]。

5 结束语

工程物探技术已经成为岩溶勘察的主要手段，多方法联合探测很好地解决了隐伏岩溶的识别问题。现阶段各类物探设备数字化、三维成像技术持续迭代，未来可依托三维地质建模平台整合多源探测数据，构建岩溶空间数字化数据库，为场地稳定性定量评价提供数据支撑。同时，从业人员需持续提升综合解译能力，规避单一物探手段存在的多解性缺陷，建立“物探先行、钻探验证”标准化勘察流程。对地质条件复杂、成果多解的情况还要加强物探和地质模型的耦合，用智能算法提高数据解译精度。只有将技术更新同工程实践紧密融合起来，才能对岩溶风险实施精确控制，保障工程建设全过程安全可控。

参考文献：

[1] 金小川 . 工程物探技术在岩土工程勘察中的运用研究 [J]. 中国高新科技 ,2025(24):85-87.
[2] 马欢跃 . 工程物探技术应用于岩土工程勘察中的价值探究 [J]. 中国金属通报 ,2025(09):201-203.
[3] 查道静 . 新型勘察技术在复杂地质岩土工程勘察中的应用 [J]. 建材发展导向 ,2025,23(08):49-51.
[4] 魏巍 , 苑永健 , 崔凯 , 等 . 工程物探在复杂地质岩土工程勘察中的应用 [J]. 四川地质学报 ,2025,45(01):96-100.
[5] 罗耀全 . 矿山岩土工程勘察中物探技术及数字化分析 [J]. 中国金属通报 ,2024(12):164-166.
[6] 李欣 , 冯晖元 , 赵鹏 . 工程物探技术在岩土工程勘察中的应用 [J]. 石材 ,2024(11):87-89.
[7] 焦兴隆 . 浅析工程物探技术在岩土工程勘察工作中的应用要点 [J]. 房地产世界 ,2024(11):146-148.

水库大坝除险加固中帷幕灌浆施工技术应用研究

朱慧平

（淄博市太河水库管理中心，山东 淄博 255178）

摘 要 针对水库大坝长期运行中坝基裂隙及接触带渗漏问题，本文围绕帷幕连续成幕和施工扰动控制，分析浆材选择、钻孔布置、分序分段灌浆、压力调控及质量检测，并结合工程资料评价加固效果。结果表明，同一库水位下坝后渗漏量由421.632 m^3/d降至130.464 m^3/d，降幅约69.1%，压力、注入率和抬动响应可用于识别异常孔段和浆液扩散状态。帷幕灌浆施工应根据地层差异动态调整参数，通过检查孔压水试验和运行期渗流监测衔接局部检测与整体评价，提高防渗帷幕连续性及加固可靠性。

关键词 水库大坝；除险加固；帷幕灌浆；防渗性能；孔位布置

中图分类号：TV543.5；TV698.23 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.018

0 引言

水库大坝长期受水压、岩体风化及水位反复涨落影响，坝基裂隙、接触带和原防渗设施薄弱部位可能逐步形成渗漏通道。渗流异常既造成水量损失，也可能增加局部扬压力和渗透破坏风险，因此，除险加固需要兼顾阻水与结构稳定。表面封堵难以覆盖深部裂隙，局部修补也可能留下绕渗通道；防渗墙等措施则受施工空间、地层及接头质量约束。钻孔注入水泥浆的帷幕灌浆技术能够处理坝基内部渗漏通道，已有大坝基础防渗工程采用该方法[1]。其应用难点在于隐蔽地层条件与灌浆响应不断变化，施工参数难以全线统一。围绕钻孔精度、浆液扩散、压力调整及检测反馈展开研究，分析连续成幕条件及施工前后效果的评价边界具有现实意义。

1 水库大坝除险加固中帷幕灌浆技术基础

1.1 帷幕灌浆技术原理

帷幕灌浆沿设计轴线布孔，利用孔内压力将浆液送入岩体裂隙与孔隙，浆液凝结后压缩有效过水断面，相邻孔段的处理范围衔接形成低渗透带。在灌浆压力作用下，浆液首先沿张开度较大、连通性较好的裂隙扩散，随后逐步进入次级裂隙，通过充填、挤压和胶结作用降低岩体透水性。随着灌浆孔分序加密，相邻孔段浆液扩散范围相互搭接，可逐步封闭主要渗流通道。浆液沿优势通道扩散，帷幕并非厚度均匀的实体墙，连续性主要取决于裂隙交切关系、孔间衔接及边界封闭条件。其作用是降低坝基渗透性、调整水头分布，为大坝稳定运行改善渗流条件。帷幕形成后可延长坝基渗流路径，减小局部水力梯度，使坝基渗流状态由集中通道向相对均匀分布转变，从而削弱异常渗漏及局部扬压力的不利影响。对于坝体和坝基同时渗漏的砌石坝，垂直、水平补强灌浆可与坝基帷幕灌浆组合使用[2]。这类组合处理中，坝体修补承担砌体缺陷封闭，帷幕主要控制基础通道，二者接触部位仍是防渗连续性的控制位置。

1.2 帷幕灌浆施工材料与设备

水泥浆液是岩基灌浆的常用材料，选材需兼顾颗粒细度、稳定性及结石体耐久性。普通水泥适用于具备相应可灌性的裂隙，细裂隙宜通过试验判断超细水泥的适用性，不能仅靠稀释改善颗粒通行条件。水泥黏土浆液可调节浆液稳定性及结石体变形性能，适用于经试验确认的充填和防渗处理，但黏土掺量过大会影响强度与细裂隙可灌性。化学浆液可用于常规水泥难以进入的微细裂隙或特殊堵漏部位，选用时需核查凝胶时间、耐久性、地下水相容性及环境要求。

钻孔设备应满足地层适应性和轨迹控制要求，灌浆泵的压力、流量范围需覆盖试验确定的工况。制浆机、储浆桶和输浆管共同维持均匀供浆，压力检测设备与流量计用于识别孔段响应。自动记录系统同步保存时间、压力、注入率和浆液密度，传感器校准及管路密封直接影响数据可信度。

作者简介：朱慧平（1972-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程。

1.3 帷幕灌浆施工主要技术参数

孔位布置与孔深决定防渗范围，孔距需适应裂隙方向及浆液扩散条件，帷幕底部和两岸端部应按设计与相对隔水地层或其他防渗构造可靠衔接。仅增加孔排或压力，仍可能因地层可灌性不匹配而无法形成有效帷幕，参数须经灌浆试验检验[3]。压力上限受覆盖厚度、岩体完整程度、结构约束和抬动响应控制；浆液配比则随吸浆变化调整，避免长时间稀浆灌注或过早加浓。灌浆顺序一般采用分序加密，结束条件同时考虑规定压力、注入率及稳定延续时间。具体控制值依据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL/T 62-2020）、设计文件和现场试验确定，不将某工程的孔距、压力或透水率目标直接作为统一限值。

2 水库大坝除险加固中帷幕灌浆施工技术应用

2.1 施工准备与钻孔施工

施工准备阶段核对地质剖面、既有帷幕位置及历次渗漏记录，查明断层、强风化带、坝肩绕渗区和防渗构造接头。测量放样沿设计灌浆轴线进行，孔号、坐标、孔口高程和倾角共同构成钻孔定位依据。施工平台须保持稳定，钻机安装后复核钻杆方向，避免基础松动使开孔位置与深部轨迹产生偏离。穿越土坝填筑体进入基岩时，护壁、隔离及钻进工法需兼顾坝体安全，防止钻孔供水造成冲蚀或串通。

钻进过程结合进尺、岩芯、返水和漏水情况识别地层变化，遇破碎、塌孔或突发漏失时调整钻进参数及护壁措施。先导孔取芯资料还应与原地质剖面对照，发现相对隔水层位置变化时重新核定终孔条件，防止按固定孔深收孔造成帷幕底部悬空。孔深通过钻具累计长度与终孔测量相互核对，孔斜分段检测，重点检查地层交界和软弱夹层附近。孔口定位合格并不保证深部孔距满足要求，倾斜累积可能扩大孔间空隙，使浆液处理区失去衔接。

孔壁和孔底清理以去除岩粉、沉渣及裂隙入口堵塞物为目的，冲洗压力与地层承受能力相匹配。回水澄清程度、沉积物变化和孔内通畅情况共同用于判断清理效果，软弱夹层采取适宜方式，避免过度冲洗扩大通道。清孔后及时进行孔段压水试验和灌浆，减少沉积物再次堵塞的影响。

2.2 灌浆施工工艺实施

灌浆分序与孔内分段分别控制平面加密和深度处理。Ⅰ序孔按较大间距先行施工，获取地层及吸浆特征，并处理主要通道；Ⅱ序孔插入其间，补充前序孔未覆盖区域；Ⅲ序孔继续加密，处理剩余透水通道。各序孔单位注入量及透水性变化是评价加密作用的线索，异常区域仍需结合检查孔结果决定补孔，完成三序施工不等于帷幕已经连续。

孔内分段方式由岩体稳定性、灌浆方法及试验结果确定。自上而下分段施工有利于先处理上部薄弱岩体，限制后续深段灌浆向浅部外逸；岩体条件适宜时，也可采用自下而上分段灌浆。接触段和断层带宜单独控制，段长过大容易使浆液集中进入某条大裂隙，掩盖同段其他部位的灌注不足。阻塞器位置应避开破碎孔壁，并检查密封效果。

浆液按质量比例计量，投料、搅拌和输送衔接进行，使用前检查密度、流动性、析水情况及存放时间。循环输浆过程中持续搅拌，过滤结块并检查管路，避免浓度变化及堵管造成压力突升。浆液由稀至浓的调整依据单位时间注入量和压力响应进行，不能单凭累计耗浆量机械换浆。

压力控制从试验确定的起始水平逐步进行。恒压下吸浆逐渐减少，可维持当前工况观察裂隙充填；吸浆突增而压力下降时，应排查外漏、串浆或通道扩展。压力升高同时出现抬动、裂缝或异常渗水，则需减压或暂停，并核查原因。循环式灌浆还需区分供浆量、回浆量和实际注入量，回浆管堵塞可能引起压力突升，流量计漂移也可能造成注入率误判。设备故障排除前，压力变化不宜直接解释为岩体充填状态改变。有效灌浆压力还受到地下水压力和管路损失影响，泵出口压力不能直接代表孔段压力。满足设计结束条件后进行闭浆、待凝及封孔，防止回流和孔道重新成为渗漏通道。

2.3 灌浆质量检测与问题处理

质量检查从孔段原始记录开始，核对钻进深度、分段位置、压力过程、浆液变换和异常处置，识别提前停灌、记录中断及压力异常。复杂地质条件下采用适应地层的帷幕灌浆技术能够实现基础防渗处理[4]，但局部岩性变化意味着全线平均耗浆量难以说明薄弱区质量，因此检测布置需兼顾代表性和异常位置。

检查孔宜覆盖断层、集中吸浆区、低吸浆异常区、帷幕端部及接头部位，在规定龄期后分段压水。透水率反映规定试验条件下岩体吸水特征，渗透系数则与采用的水力模型及边界条件有关，二者不能直接互换。压水试验前核验阻塞器密封和试段长度，记录稳定压力及流量，排除塞间漏水、管路漏水等影响。不同孔段比较时保持试验方法与统计口径一致，使低透水率确实对应目标岩段的渗透表现。结果评价同时核对各段透水率、合格段分布和帷幕完整性，避免整体平均值掩盖集中超标。

持续大量吸浆而压力难以建立时，应查明外逸方向，再选择加浓、限流、间歇灌浆或待凝复灌；细裂隙吸浆偏小但透水性仍高时，需排查孔壁堵塞、浆材不适及绕流。孔间串浆可根据连通范围封堵串浆孔或按批准工艺协同灌注。断层与裂隙集中区域经重复灌浆后仍异常时，可调整段长、浆材或补孔布置，处理后的检查孔复验与原异常孔段对应。封孔质量同样纳入检查，防止有效灌浆段合格而孔口、孔道留下缺陷。

3 帷幕灌浆施工效果分析与优化措施

3.1 防渗加固效果分析

罗田水库位于深圳市，是以供水为主、兼有防洪功能的水库，大坝采用均质土坝结构，基础风化岩及坝肩存在渗漏问题。其提标改造采用防渗墙配合坝基帷幕灌浆，相关灌浆工程于2023年10月至2024年1月实施。在库水位同为28.17 m时，坝后量水堰渗漏量由421.632 m^3/d降至130.464 m^3/d[5]。以施工前渗漏量为基数，根据原始数据复算，渗漏量减少291.168 m^3/d，降幅约69.1%。相同库水位提高了前后结果的可比性，该变化对应组合防渗措施的整体效果，未单独分解帷幕灌浆贡献。

局部检测与整体渗漏评价还存在不同尺度。该工程设计透水率目标为不大于5 Lu，而公开效果部分只给出抽检段透水率均小于10 Lu，后者不足以据此计算满足5 Lu目标的合格率。帷幕质量判断仍需逐段检测值及位置分布，不能以渗漏降幅替代局部验收。缺少同口径灌前、灌后渗透系数时，也不宜把渗漏量降幅换算成渗透系数降幅。稳定性评价应结合扬压力、坝体位移及下游渗流状态，确认防渗处理后未形成新的不利水头分布。

3.2 影响施工效果的主要因素

地质条件决定浆液迁移路径。宽大连通裂隙容易形成优先流动，局部耗浆增加却未必改善邻近细裂隙；充填裂隙则可能限制浆液进入，并在水压力变化后重新发生渗漏。岩性突变、强风化带与断层交切处，孔距和段长需要随地层变化调整。

施工参数之间存在制约关系。压力过低时浆液扩散不足，过高时可能引起水力劈裂和结构抬动；过稀浆液易析水，过浓浆液则可能在裂隙入口形成堵塞。分序施工间隔不当、邻孔相互干扰，也会改变浆液实际去向。

管理问题通常表现为参数变化未被完整记录、制浆与灌注衔接中断、异常处置后遗漏复验。自动记录仅能保存设备采集信息，孔段编码、浆液批次和现场异常仍需准确关联，否则压力曲线难以对应真实施工部位。

3.3 帷幕灌浆施工优化策略

优化应以满足防渗目标和结构安全约束为前提，将孔距、段长、浆液配比及压力过程作为可调整变量，同时考虑耗材、工期和补灌工作量。试验段可选择地质相近的部位比较不同配置，先排除出现抬动或透水性不满足要求的方案，再比较单位处理长度的材料消耗与施工时间。

方案比较还需记录材料批次、设备状态、检测龄期和施工中断情况，地层条件差异较大时进行分区评价，避免将部位差异归因于参数改进。

孔位调整重点关注帷幕端部、构造接头和残余透水通道，结合实测轨迹判断补孔位置，避免全线等量加密。浆液性能控制由单一配比检查扩展至制浆、输送和入孔状态检查，使入孔浆液与试验配方保持一致。

压力动态调整宜以孔段为单元，同步比较压力、注入率和抬动变化，在试验确认的安全范围内分级升压，异常时先判断通道变化再调整浆液。全过程检测则将钻孔资料、灌浆记录、检查孔结果和运行监测按空间位置关联。局部超标得到处理后复验，运行阶段在可比库水位下持续观察渗漏量及扬压力，识别帷幕端部绕渗和防渗设施接头变化。

4 结束语

帷幕灌浆通过充填坝基裂隙、减少有效渗流通道，能够成为水库大坝除险加固中的基础防渗措施。施工质量的控制重点是孔段处理范围有效衔接、浆液性能适应裂隙条件，以及压力过程兼顾扩散效果和结构承受能力。分序加密、孔斜控制与异常区复灌应由检测结果相互衔接，避免以耗浆量或工序完成数量判断加固质量。罗田水库同水位渗漏量的降低体现了组合防渗措施的应用效果，局部达标情况仍需逐段检测确认。将灌浆质量检查与运行渗流、变形监测结合，可为同类工程的参数调整和薄弱部位处理提供依据。

参考文献：

[1] 刘源.帷幕灌浆技术在大坝基础防渗工程中的应用[J].建设科技,2022(16):102-105.
[2] 杨志勇.溪口水库砌石拱坝渗漏原因分析及防渗加固处理[J].水利科技,2024(01):60-62.
[3] 杨绍良,李锡均,张绍平.水利工程帷幕灌浆误区之探讨[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S1):105-109.
[4] 周立忠,李绍平,杨永存.水利工程复杂地质条件下防渗帷幕灌浆施工技术[J].云南水力发电,2025,41(03):128-132.
[5] 高阳,黄贵,杨波.罗田水库提标改造工程坝基帷幕灌浆设计[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):18-22.

公路预防性养护中同步碎石封层施工技术应用研究

庄成龙[1]，郑洪锋[2]

（1. 葛洲坝武汉道路材料有限公司，湖北 武汉 430075；
2. 葛洲坝（武汉）公路养护有限公司，湖北 武汉 430030）

摘 要 同步碎石封层施工技术具有“同步洒布、快速成型、经济高效”的工艺特征，已成为沥青路面预防性养护的重要技术手段。本文概述了同步碎石封层施工技术原理及其适应用条件，然后从材料组成设计、施工工艺控制、质量检验验收三个维度展开技术分析，重点探讨了改性乳化沥青与单一粒径集料的匹配关系、同步碎石封层车作业参数控制及碾压工艺优化等关键环节。结果表明，同步碎石封层可有效封闭路面微裂缝、提升抗滑性能与防渗能力，施工后 2 h 内即可开放交通，单位面积养护成本仅为传统铣刨罩面的 25% ~ 35%。该技术可为公路预防性养护工程中同步碎石封层的设计与施工提供技术参考。

关键词 同步碎石封层；预防性养护；改性乳化沥青；同步洒布；碾压

中图分类号：U418；U416.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.019

0 引言

沥青路面是我国公路工程中应用占比最高的路面结构形式，随着全国公路路网规模持续扩张，大量早期建成的公路已逐步进入养护周期。我国公路养护需求呈现“存量巨大、增量迅速”的态势，传统养护通常在路面出现结构性破坏后进行铣刨重铺，存在成本高、施工周期长、交通干扰大等局限。预防性养护理念由此受到行业广泛重视，其核心在于在路面结构尚处良好状态时，主动采取干预措施以延缓病害发展、延长服役寿命，符合“高效、经济、绿色”的行业发展要求。同步碎石封层施工技术与传统的异步碎石封层相比，可显著提升封层与原路面的层间结合力，同时兼具施工速度快、开放交通早、综合造价低等经济优势。

1 同步碎石封层施工技术概述

1.1 同步碎石封层施工技术原理

同步碎石封层施工技术的本质是“沥青膜黏结碎石”形成的超薄功能层。其结构可分解为三个组成部分：下承层（原路面）、沥青胶结料膜、集料层。专用同步碎石封层车将沥青喷洒系统与集料撒布系统集成于同一底盘，通过车速与泵送系统的联动控制，实现沥青与集料的同步输出。沥青从喷嘴喷出后形成扇形雾状薄膜，集料随即覆盖于尚未破乳（乳化沥青）或尚未冷却（热沥青）的沥青膜上，两者在压路机的碾压作用下完成嵌入与嵌挤。乳化沥青在破乳前完成集料撒布，热沥青则需在温度降至黏结有效区间前完成碾压。同步工艺可获得更优的黏结效果，封层成型后，沥青膜、集料层共同作用实现防水、抗滑、耐磨的功能恢复[1]。

1.2 预防性养护适用条件

同步碎石封层并非适用于所有路面状况，其应用应满足严格的准入条件。同步碎石封层的核心功能定位是“功能恢复”。当路面结构强度充足、仅表面功能退化时，封层可发挥最佳效益；当中下面层或基层已出现结构性破坏时，封层仅能暂时改善表面，无法抑制病害继续向上反射。

2 同步碎石封层施工材料组成设计

2.1 沥青胶结料

沥青胶结料是影响封层黏附力、道路寿命、对温度变化敏感程度的关键因素。在选择沥青材料时，应根据公路等级、交通量大小、气候环境及施工方便等因素进行综合考量，在一级、二级公路优先采用 SBS 改性沥青或改性乳化沥青作为预防性养护的沥青胶结料。SBS 改性沥青能够提高高低温性能及耐久性。虽然 SBS 改性沥青的材料成本比普通沥青高 30% ～ 80%，但全生命

作者简介：庄成龙（1988-），男，本科，工程师，研究方向：道路施工及养护。

周期效益突出，长期道路维护成本可降低40%～60%。改性乳化沥青需控制破乳速度、筛上剩余量、恩格拉黏度等乳化性能指标。快裂型阳离子乳化沥青是同步碎石封层的首选，其破乳速度与集料撒布窗口的匹配性最佳[2]。

2.2 集料

集料为同步碎石封层的骨架，对封层的抗滑耐久性、抗飞散能力起着重要作用。集料通常选用单一粒级，如4.75 mm～9.5 mm及9.5 mm～12.5 mm等，根据沥青洒布量选择适当的集料尺寸。集料技术标准由力学性质、形状特点以及清洁度三部分指标组成。（1）力学性能。压碎值和洛杉矶磨耗损失表示集料在承受荷载作用下抵抗破碎的能力，直接影响着封层寿命长短（如表1所示）。（2）形状特点。针片状含量为同步碎石封层有别于常规沥青混合料的重要控制指标，集料针片状含量≤10%，远高于普通沥青面层的15%。（3）清洁度。集料清洁、干燥，不含泥土、有机杂质；施工前对集料进行筛分及预裹覆，增强其与沥青的粘附性[3]。

表1 同步碎石封层集料技术指标

技术指标	技术要求	试验方法
压碎值（%）	≤20	T 0316
洛杉矶磨耗损失（%）	≤25	T 0317
针片状含量（%）	≤10	T 0312
与沥青黏附性（级）	≥4	T 0323
水洗法＜0.075 mm颗粒含量（%）	≤1	T 0310
表观相对密度（g/cm^3）	≥2.5	T 0304
吸水率（%）	≤2	T 0304

2.3 沥青洒布量与集料撒布量匹配

沥青用量和集料用量之间的精确配比关系是同步碎石封层配合比设计的关键所在。沥青用量过少会导致无法完全包裹集料，封层容易出现松散脱落现象；沥青用量过多会造成封层泛油、表面构造深度不够的问题。集料撒布量采用“满铺率”进行控制，一般取覆盖率为80%～90%。根据原路面构造深度、集料粒径、沥青种类确定集料用量，随着集料粒径的增大，沥青洒布量也随之增大。洒布改性乳化沥青一般为1.4 kg/m^2～2.0 kg/m^2；集料的撒布量取决于粒径大小和满铺率的要求（如表2所示）。

3 同步碎石封层施工工艺

3.1 施工准备

做好施工准备工作是保证封层效果的基础。人工清扫原路面，并配合鼓风机吹扫或高压水冲洗，彻底清除路面的泥土、油污及松散颗粒。存在轻微车辙或局部沉陷的路段应修补找平，以免封层厚度不均。同步碎石封层车的标定是施工准备的重要环节。标定内容包括：沥青泵输出量与车速的联动关系、喷嘴雾化状态与喷洒扇形角度、集料料门开度与撒布辊转速的对应关系。正式施工前在试验段完成标定，确保沥青洒布量、集料撒布量与车速参数匹配。

3.2 同步洒布

同步洒布施工质量直接影响车速稳定性、洒布均匀性与衔接连续性。同步洒布要点：（1）车速控制。严格控制作业车辆行驶速度，使其与沥青泵排量、集料输送速率精确匹配，通常控制在4 km/h～6 km/h为宜。驾驶员应沿预设控制线匀速直行，避免中途变速或停车。（2）洒布均匀性。一般情况下沥青洒布最大偏差不超过±0.20 kg/m^{2}的设计值。沥青洒布装置应保证恒定的泵压，并关注喷头状况，以免温度过低或者杂物堵塞导致洒布不均匀。同时，根据喷头型号、洒布宽度严格控制喷洒高度，使相邻喷头之间的喷洒扇形有效搭接，形成等厚的沥青薄膜。集料撒布滚筒应匀速转动，料门开合适当，不得出现集料上下重叠或者漏撒的情况。（3）接缝处理。纵向接缝宜设置在车道标线处，采用对接方式，尽量减少接缝数量。横向接缝的处理更为关键：在每一幅施工的起点和终点铺设油毡，使洒布杆在油毡处启停，可获得平直的横向接缝。接缝处重叠10 cm～15 cm，下一幅施工前需清理干净预留沥青边缘的集料[4]。

表2 同步碎石封层沥青与集料参考用量

集料粒径（mm）	集料撒布量（kg/m^2）	乳化沥青洒布量（kg/m^2）	适用场景
9.5～19.0	22～27	1.8～2.3	下封层、应力吸收层
12.5～4.75	14～16	1.4～2.0	上封层（重交通）
9.5～2.36	11～14	0.9～1.6	上封层（中轻交通）
4.75～1.18	8～11	0.7～0.9	桥面防水或精细封层

3.3 碾压

碾压是使集料嵌入沥青膜、形成嵌挤结构的关键步骤。同步碎石封层的碾压作业需精准把握时机：碾压过早，热沥青黏度低，集料易被压路机轮胎黏走；碾压过晚，沥青已冷却或破乳，集料无法有效嵌入。热沥青同步碎石封层施工，通常在沥青温度降至 100 ℃时开始碾压，采用 9 t～16 t 胶轮压路机稳压 1 遍～2 遍，行驶速度 5 km/h ～ 8 km/h；改性乳化沥青封层施工应在乳化沥青破乳后、集料尚未被粘走前及时碾压，碾压遍数通常为 2 遍～ 4 遍，轮迹重叠约 30 cm。碾压过程中压路机不能天然转弯、刹车，否则造成集料推移[5]。

3.4 养生与开放交通

碾压完成后需进行短期养生，使沥青进一步固化、集料稳固就位。养生期间严禁施工车辆急刹车或掉头。对于热沥青封层，待路面温度降至环境温度后可开放交通；对于乳化沥青封层，破乳完成后通常 2 h 内即可开放交通。开放交通初期应控制车速，利用行车荷载进一步压实封层。

4 同步碎石封层施工质量控制与验收

4.1 施工过程质量控制

同步碎石封层过程控制比事后检验更重要。施工过程需严格控制以下关键参数：

1. 严格控制材料用量。通过同步封层车的计量系统记录每幅的沥青与集料实际用量，与设计值对比。沥青洒布量的最大偏差不应超过设计值的 ±0.20 kg/m^2，部分严格标准要求控制在 ±5% 以内，但需通过现场实测进行校验；碎石覆盖率以 90% ～ 95% 为宜。

2. 实时目测监测洒布均匀性。通过目视检查与铺砂法抽检，观察沥青膜是否连续、集料覆盖是否均匀，局部漏撒或沥青堆积应及时人工修补。

3. 沥青温度与气候条件控制。沥青的洒布温度需根据胶结料类型严格控制：普通石油沥青控制在 160 ℃～ 170 ℃；SBS 改性沥青控制在 170 ℃～ 190 ℃，橡胶沥青则需 180 ℃～ 200 ℃。同时，气温与路表温度同样构成施工的硬性约束。空气温度＜ 10 ℃停止施工；路表温度要求≥ 25 ℃；阴雨天气或路面潮湿时严禁施工，雨后需待路表完全干燥后方可作业。

4. 碾压时机把控。碾压时机的判断因胶结料类型而异，热沥青通常要求在沥青温度降至 100 ℃左右时开始碾压；当下承层温度＞ 40 ℃时应在 20 min 内完成碾压；下承层温度在 18 ℃～ 40 ℃时，碾压窗口缩短至 10 min[6]。

4.2 检查与验收

同步碎石封层的交工验收通常在开放交通 30 d 后进行，以使封层在行车荷载下完成最终稳定。验收检测项目：构造深度、摩擦系数反映封层的抗滑性能恢复效果；渗水系数反映其防水密封效果；碎石覆盖率是同步碎石封层特有的验收指标，反映集料撒布的均匀程度；外观检查重点关注是否存在无泛油、掉粒、推移等病害（如表 3 所示）。

表 3 同步碎石封层交工检查验收指标

检查项目	技术要求	检查频率	检测方法
构造深度	≥ 0.8 mm	每 1 km 测 5 点	铺砂法
摩擦系数	≥ 55	每 1 km 测 5 点	摆式仪
渗水系数	≤ 10 mL/min	每 1 km 测 5 点	渗水试验
碎石覆盖率	≥ 85%	每幅目测	面积法
外观质量	均匀、无泛油、无掉粒	全线	目测

5 结论

同步碎石封层作为沥青路面预防性养护的核心技术之一，该技术在材料、工艺与质量三个层面具有明显应用优势。研究结果表明：（1）同步碎石封层的适用条件具有严格的边界，仅适用于结构强度良好、病害以表面功能退化为主的中轻交通路段，重载交通与结构损坏路段不宜采用。（2）材料设计的关键在于沥青类型与集料品质的匹配。改性乳化沥青是上封层的推荐胶结料，集料针片状含量应控制在 10% 以内，沥青洒布量与集料撒布量的匹配关系需通过试验段标定。（3）施工控制的核心是“时机控制”与“均匀性控制”。同步洒布的车速稳定性、碾压的时机选择、接缝的处理质量是决定封层成败的关键环节。

参考文献：

[1] 熊跃.公路养护工程中同步碎石封层技术施工要点及应用效果评估 [J].四川水泥 ,2026(07):255-257.
[2] 路钧.公路碎石封层施工工艺优化技术探讨 [J].科技创新与生产力 ,2026,47(06):119-121.
[3] 王明.同步碎石封层技术在公路养护施工中的应用 [J].交通世界 ,2026(15):31-33.
[4] 师忠.公路养护橡胶沥青同步碎石封层施工安全管理与质量控制 [J].汽车画刊 ,2024(10):218-220.
[5] 张泽涛.公路工程中同步碎石封层施工技术 [J].四川建材 ,2024,50(06):186-188.
[6] 党吉.普通公路同步碎石封层养护施工技术研究 [J].交通科技与管理 ,2024,05(04):129-131.

塑性混凝土防渗墙在小型水库除险加固中的应用研究

郑丽存

（广东省惠州仲恺高新技术产业开发区农林水综合服务中心，广东 惠州 516003）

摘 要 本文以小型水库除险加固中坝体及坝肩渗漏治理为研究对象，结合石鼓水库长期运行、多次加固后仍存在高水位绕坝渗水，围堰填筑土料渗透系数偏大，左坝肩强风化岩体裂隙发育等实际工程问题。采用资料梳理、渗漏成因剖析、工程地质条件评价、施工全过程复盘总结等方法，系统分析塑性混凝土防渗墙在该类场景下的应用原则。结果表明，塑性混凝土防渗墙的工程应用需紧扣病险水库的渗漏特征，重点构建封闭式防渗止水体系，将渗漏精准探查、防渗墙轴线科学布设、塑性混凝土配合比优化及成墙全过程质量管控作为核心关键环节，全面提升小型水库防渗加固工程质量，保障水库长期安全稳定运行。

关键词 塑性混凝土防渗墙；小型水库；除险加固；渗漏治理

中图分类号：TV543.8；TV698.23 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.020

0 引言

小型水库多建于早期水利建设阶段，受施工条件、填筑质量、地质差异和运行维护水平影响，进入长期服役期后易出现坝体渗漏、坝基渗漏或者坝肩绕渗等问题。石鼓水库为小（1）型水利工程，承担灌溉、供水、防洪等功能，安全鉴定中渗流安全评价级别为C级，综合评定为三类坝，除险加固任务已由简单修补升级为综合治理。现有研究对塑性混凝土防渗墙的材料性能、钻探工艺及防渗效果已有较多讨论，但对小型水库复杂渗流通道识别，防渗墙位置确定、选材参数适配以及成墙质量管控之间的关联分析仍不充分。基于工程实践展开研究，有助于明确塑性混凝土防渗墙在小型水库除险加固中的适用范围、主要问题及控制要点，为同类工程防渗体系构建提供参考。

1 塑性混凝土防渗墙应用原则

1.1 契合水库病险特征

塑性混凝土防渗墙应用应以水库病险特征为基础，避免单纯套用一般防渗处理模式[1]。小型水库运行时间较长，坝体填筑质量、坝基透水带、坝肩岩石裂隙及既有加固遗留问题差异较大，防渗墙设计需围绕重要渗漏通道及薄弱部位展开。石鼓水库坝体填料呈中等透水性，左坝肩条形山体存在破碎强风化基岩，水位条件下仍有绕坝渗水现象，说明坝体防渗不仅限于中线，还应关注坝基与坝肩的水工连通，塑性混凝土防渗墙施工过程中，应结合安全性评价结果、勘探资料、过程观测成果及历史加固资料，明确渗透类型、规模和发展趋向，避免墙体深度、厚度、轴线位置等隐患。

1.2 统筹防渗加固需求

防渗加固需求具有系统性，塑性混凝土防渗墙布设应纳入坝体、坝基、坝肩及排水设施共同构成的防渗安全格局。石鼓水库除险加固方案中，大坝上游护坡维修、防浪墙加高处理、下游排水改善、排水棱体清理及量水堰重建均与防渗治理相关。坝体采用塑性混凝土防渗墙、坝基及左坝肩条状山体采用帷幕灌浆，体现出垂直截渗、基础处治和渗流监测相结合的综合性加固措施。小型水库防渗处理既要减除坝体的渗透危害，还要兼顾坝肩环渗、坝基渗流和下游排导通畅。

1.3 贯穿施工质量控制

施工质量控制决定塑性混凝土防渗墙的连续性、完整性和耐久性，贯穿测量放样、槽壁开挖、拌制、浇筑、接头施工以及检测验收各环节。小型水库除险加固多在既有坝体上实施，其作业面受坝顶宽、库内水位、排水系统及既有构造物限制，任何环节失控都会导致墙体夹泥、裂隙、压缩或接缝渗漏。石鼓水库除险加固施工应按照枯期时段、施工期过流控制及坝体防渗处理要求组织实施。质量管理应前移至事前准备阶段

作者简介：郑丽存（1993-），女，本科，助理工程师，研究方向：水利技术管理。

和过程监控位置，塑性混凝土防渗墙施工中，需重点关注沟槽倾角、混凝土性能、浇筑连续性、底部入土深度及墙段搭接质量，确保防渗墙真正发挥截渗加固作用。

2 塑性混凝土防渗墙在小型水库除险加固应用中存在的问题

2.1 渗漏成因判断偏差

渗流异常具有隐蔽性和复合性，若仅依据坝坡浸润点、排水支管出流位置或单次高水位现象判断渗漏来源，容易将坝体渗漏、坝基渗漏、绕坝渗漏及涵管接触渗漏混为一类。石鼓水库经多次加固后仍存在高水位状态下的绕坝渗流现象，左坝肩条形山体存在破碎强风化基岩，渗漏通道与库区水力联系密切，总长约在 50 m～130 m之间，填筑土石坝材料的渗透性适中，坝基下卧强风化粗面岩同样满足渗透条件。若渗漏成因判读停留在表层出水点识别，塑性混凝土防渗墙轴线、入射深度及封闭半径很可能偏离主渗漏通道，造成局部截水设施失效。

2.2 地层条件识别受限

塑性混凝土防渗墙设计施工中，地层识别精度直接影响墙底嵌入层位、钻进稳定性和截渗闭合效果[2]。小型水库坝基多由填筑土、残积土、全风化岩及强风化岩等介质组成，表层波状起伏、风化差异和裂隙发育较为明显。受早期建造条件、长期渗流作用及反复修缮作业等因素影响，库内可能存在局部松散区、脆弱夹层、新旧处理界面。若地质探查间距过大、物探解释粗略，或勘探成果未及时反馈至施工控制，容易误判透水层分布和相对防水层位置，导致墙根入土过浅、墙角封闭区域不足，在坝肩、坝基交接部位形成渗流绕行空间。

2.3 材料性能适配偏离

材料性能适配偏离主要表现为抗渗性、变形协调性、耐久性与施工和易性之间的指标失衡。塑性混凝土防渗墙对均质土坝除险加固时，材料不宜单纯追求较高强度，还需具备较低弹性模量及良好延展性，以适应坝体沉降、侧挤位移和承受水压的变化，减少墙体开裂风险。小型水库防渗墙所处的水文地质条件一般比较复杂，墙体需长期承受库水渗透压力、地下水侵蚀和坝体沉陷侧挤。若材料配比未充分考虑渗透系数变化、墙体接触条件、施工成槽深度和周围介质风化程度的影响，容易出现抗渗能力减弱、缩合裂缝增多、墙土间不协调变形等问题。

2.4 施工衔接管控失衡

工序组织一旦脱节，塑性混凝土防渗墙容易在槽段连接、防渗墙底座、墙体连续性和成槽后滤水环节形成质量风险[3]。石鼓水库除险加固方案涉及塑性混凝土防渗墙、坝基及左坝肩帷幕灌浆、下游排水设施加固改造等工程。若成槽施工、墙体构筑、注浆封堵、排水设施恢复等工作缺少统一管控，易造成防渗墙端部闭合不严、施工冷缝处理不当、墙后渗流排导不畅等问题。施工衔接失衡还会影响质量资料闭合，使隐蔽工程质量检测、复核确认及运维监测难以形成完整证据链。

3 塑性混凝土防渗墙在小型水库除险加固中的应用要点

3.1 渗漏探查技术

渗漏探查的关键在于还原库水入渗、坝体传递和下泄出逸之间的水力联系，将历史险情、水位变化、坝面异常、地质勘探与监测资料进行综合校核。小型水库经历多次维修加固后，坝体新旧填土界面、风化基部、坝肩开裂、管周结合缝容易共同构成渗漏通道，单一出水点难以准确反映渗漏源区。以石鼓水库为例，运行记录显示，1972 年石鼓水库左岸坝体高程 80.92 m以下的外坡出现约 40 m^2 的“牛皮涨”，2010 年涵管集中漏水并伴有坝脚排水棱体集中出水，2012 年灌浆后高水位 96.0 m以上仍出现绕坝渗水，表明渗漏路径并非单一坝体渗流问题。

塑性混凝土防渗墙施工前应采用钻探取样、压水试验、注水试验、渗透系数判定、岩体裂隙调查等方式查明坝体填筑土料、基础风化带及左岸坝肩条形山体渗漏区。探查阶段还应对水位、降水量、测压管、量水堰及巡坝检查记录进行比对分析，确定水库蓄水高程与出水量、浸润线位置与渗水点的对应关系。相关成果可作为防渗墙轴线选择、墙体底端入土深度、墙端封闭范围、局部加厚尺寸设计的依据。

3.2 墙线布设技术

墙线布设技术的核心在于把防渗墙轴线嵌入坝体—坝基—坝肩连续截渗体系[4]。小型水库土坝常存在新旧填土结合界面、坝基风化带、坝肩裂隙带及涵洞接触面等多类渗漏边界，墙体定位应根据主渗漏方向、地层渗透性及施工可行性综合确定。石鼓水库大坝为均质碾压土坝，长 300 m，最大高程为 32.8 m，正常蓄水位为 97.36 m，校核洪水位为 100.31 m。根据工程资料显示，此坝体材料的渗透系数一般，坝基处由强风化粗面岩构成，具有一定的透水性。左坝肩条形

山体在高水位条件下仍存在绕渗现象。墙线布设不宜只覆盖坝体渗漏段，还需考虑与坝基、坝肩防渗措施的衔接关系，保证整体防渗体系的平面闭合性。

结合石鼓水库除险加固方案，坝体选用塑性混凝土防渗墙，坝基及左坝肩条形山体采用帷幕灌浆，墙线布设应以坝体主截渗轴线为控制线，向两边伸展至稳固的河岸或是灌浆帷幕连接部位，避免墙端形成绕流通道。墙底高程应根据残坡积土露头、全风化粗面岩及强烈风化粗面岩分布确定，穿过坝体填筑土和强透水带部位后，嵌入相对隔水层或弱透水带一定深度。该工程防渗墙承受的最大水头差约12 m，按允许水力梯度40计算，理论墙厚0.3 m，考虑液压反铲及冲抓式成槽机的工作条件，取防渗墙厚度0.6 m。墙线布设不仅要解决平面定位问题，还要与墙体厚度、入岩深度、墙底封堵和相邻帷幕共同形成可施工、可检测、可评价的防渗体系。

3.3 配合比优化技术

配比优化应立足于防渗墙柔性截渗功能，不能简单采用常规混凝土“高强度、低水胶比”的单一控制思路。塑性混凝土防渗墙埋置于坝体和坝基内部，长期受库水压力作用、坝体变形和地基差异沉陷的影响，材料性能应在强度、弹性模量、防渗透能力和流动性之间取得平衡。石鼓水库坝体由风化残积土填筑，主要包含沙质黏土，夹杂少量强风化的岩石片状物，上部掺杂砾石土，总体压实程度不高。坝基粉质砂土层渗透系数为5.0×10^{-3} cm/s，其防渗墙最大深度为50.40 m。此类深槽防渗结构若材料模量偏大，墙体与周边土层变形难以协调，易产生应力集中和开裂隐患。

结合石鼓水库除险加固设计，塑性混凝土配合比应以低弹模、高抗渗、适宜流动性为主要控制目标。设计指标可控制为R28抗压强度1.0 MPa～5.0 MPa、弹性模量≤2 000 MPa、弹强比200～500、水胶比0.85～1.20、坍落度180 mm～220 mm、扩散度340 mm～400 mm、渗透系数≤10^{-6} cm/s、渗透破坏比降≥300。初拟配合比中，水泥110 kg/m^3、水380 kg/m^3、膨润土60 kg/m^3、黏土170 kg/m^3、砂700 kg/m^3、碎石700 kg/m^3、减水剂按水泥用量0.25%掺入。施工阶段仍需通过室内试配、现场试拌和成墙取样检测复核指标，使材料性能适应深槽浇筑、泥浆置换、墙段连接和长期截渗要求。

3.4 成墙质量控制

成墙质量控制应落在槽口导向、槽孔成形、清孔换浆、导管浇筑和接头处理等关键节点，重点保证墙体连续、槽孔稳定和墙底可靠嵌固[5]。石鼓水库大坝采用塑性混凝土做防渗帷幕。施工流程包括施工准备、钻机成孔、清碴和混凝土浇筑。导槽作为锁定槽口、防止坍塌和确保墙面稳定性的导向工具，应采用钢筋混凝土结构，导槽中线应与防渗墙轴线重合，平面轴线允许偏差控制在±15 mm，导墙顶高程允许偏差控制在±20 mm，并且施工工作台宽度不能低于8 m，成槽阶段应检测孔深、槽孔中心偏离、倾斜度、槽宽、槽形及嵌入基岩深度，防止墙身扭曲、内收和墙底悬空。

浇筑环节直接关系到防渗墙完整性，应在清孔验收合格后4 h内开始灌注混凝土，并采用垂直导管法由下而上连续成墙。浇筑过程中需对塌落度、扩散半径及流动性实施动态监控，并控制好导管位置、埋深以及混凝土面提升速度，终浇混凝土面应高于设计面0.5 m，减少顶面土堆及高差过大问题。槽段连接宜采用钻槽法，一期槽孔灌注24 h后开始实施接口孔施工，二期槽段造孔时对一期墙体套抓30 cm，并在清理替换浆料过程中刷洗接口孔。质量检查应包括打孔、终孔、清孔、衔接操作以及混凝土浇筑全过程，上道工序合格后方可进入下一道工序，成墙后应重点关注混合浆液、泥沙堆积、缺口、孔洞等缺陷。

4 结束语

石鼓水库除险加固实践表明，塑性混凝土防渗墙在小型水库坝体防渗工程中具有良好的适用性，其应用成效取决于病险特征识别、系统设计及施工质量控制的协调程度。针对渗源复杂、地层条件多变、性能要求高等问题，应将渗流监测、坝体布置、配比优化设计以及成墙质量控制贯穿工程全过程，形成坝体、坝基、坝肩相互衔接的连续截渗体系。未来，小型水库除险加固可进一步加强监测数据分析、施工过程信息化管理和运行期效果评价，提升防渗墙长期服役稳定性。

参考文献：

[1] 黄斌,郭先强,曹登超.塑性混凝土防渗墙施工技术研究与应用[J].人民黄河,2024,46(S01):157-158.
[2] 姬云辰,苏龙,闫炜,等.塑性混凝土防渗墙在水库除险加固工程中的应用[J].内蒙古水利,2025(05):13-14.
[3] 李小龙,陈小丹,李远辉,等.塑性混凝土防渗墙结合充填灌浆在某水库除险加固中的应用[J].广东水利水电,2025(10):69-74.
[4] 吴立彬,郭云波,刘映炯.塑性混凝土防渗墙在石碌水库除险加固中的应用[J].水利建设与管理,2025,45(03):43-48.
[5] 戴瑞景.低弹模塑性混凝土防渗墙在水库大坝防渗加固工程中的应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(09):118-121.

碳中和目标下城市污水处理低碳转型策略

冯芷璇

（吉林建筑科技学院，吉林 长春 130114）

摘 要 城市污水处理行业是温室气体的重要排放源，同时具有较强的能源与资源回收利用潜力。在碳中和目标指引下推动行业低碳化发展，对助力“双碳”目标落地、支撑城市绿色低碳转型具有重要现实意义。本文对污水处理系统中直接或间接的碳排放进行归纳分析，就节能降耗、能源利用、资源回收、工艺改良四个方面提出相应解决办法。根据研究结论，将精确曝气、厌氧氨氧化、好氧颗粒体、膜法厌氧工艺等加以结合，辅以碳核算及厂网河整体调控，污水厂可望由传统“能耗型”类设施变为“能源工厂”和“资源枢纽”。而转型过程中应注意避免水质恶化、操作风险或成本过高这类问题，未来要着力开发新材料、设计智能方案及高值产品。

关键词 碳中和；城市污水处理；低碳转型；能源回收；厌氧氨氧化

基金项目：吉林省教育厅重点项目“寒区地源热泵水侧生物污垢的群体感应调控技术研究”（项目编号：JJKH20261934KJ）。

中图分类号：X703；TU992 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.021

0 引言

当前，我国气候治理工作持续推进，已明确提出2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标，整体已进入低碳转型的关键攻坚阶段。城市污水厂是市政水环境治理中的关键设施，污水厂运行过程中的温室气体排放不容忽视。已有研究测算，污水处理行业碳排放量占总碳排放量的 7% ～ 8%，且随着处理率提高、排放标准趋严，这部分排放还在逐年上升[1]。但从另一视角下，污水里的有机物化学能和氮磷资源本身也可以回收利用，通过技术更迭，污水厂也能从“排碳大户”变成碳中和的贡献者。近年来，我国科研工作者围绕生物脱氮、功能材料、低碳工艺的研究层出不穷，但鲜有从全系统、全流程谈及污水厂的低碳转型策。基于此，本文分析污水厂的碳排放构成，整理主要低碳技术路径，指出落地中的难点与对策，为该行业技术升级和政策制定提供参考。

1 城市污水处理碳排放特征与核算体系

污水厂的碳排放并非常态性的处理阶段产物，而是收集、处理乃至污泥利用全过程的总和。就来源而言，一般可将所排碳划为直接型或间接型两类，二者在组成上差异显著。

直接排放主要来自生物处理过程中有机物的分解转化，涉及二氧化碳（CO_2）、甲烷（CH_4）和氧化亚氮（N_2O）。CH_4 和 N_2O 的绝对排放量虽然不及 CO_2 排放总量，但在百年尺度上，它们的增温潜势分别是 CO_2 的 28 倍和 265 倍，也正因如此，它们一直是污水厂减排管控里的主要靶标[2]；间接排放则主要是系统运行带出来的衍生排放。比如设备运转消耗的电和热，其背后对应上游化石能源燃烧后的排放；水处理用药剂、耗材，从生产、运输到废弃整个链条，都会释放二氧化碳。聚焦国内形势，污水厂普遍以传统活性污泥法为主，曝气环节耗电严重，间接排放常常占到总排放的 60% 以上，是行业最主要的排放来源[3]。

对于碳核算而言，目前常用的办法主要有三种：排放因子法、质量平衡法和现场实测法。在实际工程中，三种方式联用的核算体系逐渐成熟，是覆盖直接排放、间接排放和碳汇抵消的综合核算体系。最终，核算结果的精确度与进出水污染物浓度、污泥产量、曝气量、药耗以及当地电力结构相关。因此，建立标准化的数据采集、审核和质量控制，是科学制定低碳转型方案的前提。

2 城市污水处理低碳转型核心技术路径

2.1 节能降耗与智能控制技术

曝气环节是污水厂中的“用电大户”，电耗通常占全厂总电耗的 50% ～ 70%，成为节能改造的核心靶点。依托设备升级和智能调控双重维度，可在曝气环节实现精准节能：一方面更换高效节能曝气设备，把水泵、

作者简介：冯芷璇（1997-），女，硕士研究生，助教，研究方向：资源与环境。

污泥回流泵改为变频，替换高效电机，从硬件上降低设备的电耗；另一方面，加强溶解氧和氨氮的联合控制，根据进水水质、水量的实时波动调节曝气量，一般能够实现节电20%～30%，无效电耗大大减少。在工艺上，短程硝化反硝化、厌氧氨氧化这类自养脱氮低碳工艺，本身曝气需求小，无需额外投加有机碳源，能耗药耗可从源头降低。例如：借助功能载体材料把厌氧氨氧化功能菌群富集起来、维持其活性，反应器抗水质水量冲击的能力就能明显提高，这也是破解这项技术工程化稳定性不足、能大规模推广的关键[4]。

近年来，智慧水务在全球领航，城市污水处理的方式实现大规模转型，从以往传统方式转向通过大数据及机器学习的方式调节运行参数。采集水质、水量、溶解氧、氨氮等核心运行数据，进一步结合机理模型和数据驱动模型，便可对加药量、曝气量、污泥回流比这些关键参数进行优化和调整，提供了较为完整的数据链条。

2.2 能源回收：推动污水厂从耗能主体向产能主体转变

污水中有机物蕴含的化学能，理论上可达处理全过程能耗的3倍～5倍，具备能源自给的开发潜力[5]。目前成熟度较高、应用前景较广的能源回收路径主要有三类：污泥厌氧消化产沼气、污水源热泵供热制冷、微生物燃料电池产电。在这三类中，污泥厌氧消化是现阶段应用最广的产能技术。该技术可以通过中温或高温厌氧消化将污泥中的有机物转化为甲烷沼气，转化后的产物可用于厂区发电与供热，实现能源的就地利用。该应用在北欧部分污水处理厂已实现了能量盈余，丹麦某厂采用“厌氧消化+热电联产”系统，能源自给率超过150%[6]。我国国内大型污水处理厂虽已逐步推广该工艺，但因为受到污泥有机质含量偏低、消化效率不高、配套不完善等约束条件，整体能源回收率仍有很大的提升空间。但这项技术给我们提供了可行性的思路，未来可通过污泥预处理强化、多物料共消化与高效搅拌优化等方式，来提高沼气产气率与能源转化效率。此外，污泥脱水液中高浓度氮磷的处理也会增加能耗，需将污泥处理与污水处理作为整体进行协同优化。

污水源热泵利用污水水温全年相对稳定的特点提取冷热能量，可为厂区办公区、污泥消化池等设施供暖制冷，显著降低外部电、热消耗，能效比优于传统热泵系统。微生物燃料电池在降解有机物的同时可直接产电，虽目前功率密度较低、尚未工程化，但作为前沿产能技术仍具研发价值。此外，污泥热解气化、藻类培养产油等途径目前仍处于试验阶段。部分大型污水厂已尝试将沼气提纯后并入天然气管网或作为车用燃料，进一步拓展了能源产品的利用途径。

2.3 资源循环：氮磷回收与再生水高值化利用

污水里的氮、磷，一方面是水体富营养化的主要原因，另一方面又是紧缺的战略资源。以磷为例，全球磷矿储量有限、分布又不均匀，从污水中把磷高效回收出来，既有环境效益，也关乎资源安全[7]。目前工程上常用的是鸟粪石结晶法和磷酸钙沉淀法，能把磷加工成符合农用标准的缓释磷肥；氮则可通过气提制成硫酸铵，或经膜浓缩做成液态有机肥——污染物便能变成可用的资源。在实际应用中，回收产品还需满足农用标准，严格把控重金属与持久性有机污染物含量；而功能材料的吸附与催化作用，对于氮磷回收效率的提升、产品品质的改善也有显著影响。目前，我国城市污水进水碳氮比偏低，传统生物脱氮常常需要添加额外碳源，既增加药耗也间接增加碳排放；若可将氮磷回收与生物脱氮工艺耦合起来，可在减少外加碳源的同时，实现资源回收，真正实现能源的高效利用。再生水利用是资源循环的另一重要路径。采用达标尾水用于城市绿化、工业冷却、地下水回补及市政杂用，可替代新鲜水、缓解供水压力，并降低供排水系统能耗。因此，在未来，构建“污水—能源—农业—城市”的耦合体系，推动资源化由单技术应用走向系统化、集成化，是完成资源循环的重要路径。

2.4 工艺创新：新型低碳生物处理工艺研发与应用

传统活性污泥法以较高能耗与药耗保障出水水质，已较难适配碳中和发展要求，工艺原理革新是低碳转型的核心突破口。目前行业主要推广对象是好氧颗粒污泥以及厌氧膜生物反应器、厌氧氨氧化工艺[8]。

好氧颗粒污泥按结构来说是致密体，沉降效率高、能同时去除氮和磷，所占面积小、能耗也较低，处理流程可简化[9]。厌氧膜生物反应器以厌氧方式处理污水，把有机成分变作沼气，又达到清洁、发电及减泥三重目的[10]。厌氧氨氧化不依赖额外的有机碳源，可使曝气能耗减少近60%，对城市污水是可行的自养脱氮法。从长远看，应结合好氧颗粒污泥、AnMBR和厌氧氨氧化加以智能调控，形成由节能至产能、最后到资源利用的三位一体低碳处理方案。现在好氧颗粒污泥已做了一些市政污水中试，AnMBR对低温低浓度污水的适应性也逐渐被验证。

3 低碳转型的政策机制与系统协同保障

从整体角度说，有关低碳技术的开发及利用已经很紧迫，但要实现其大规模运用仍需政策、市场和系统配合。

首要的准备工作是统一核算方法，按行业要求来设计碳核算所依据的标准及方法学，将直接、间接乃至替代性的减排都纳入监测—报告—核查（MRV）范围，使核算有共同的参照点，由此获得对交易、对项目、对成效进行分析的数据资源。现在应把市场化激励机制的完善当作重点来抓。对已达到标准的低碳改造宜作碳交易处理，同时辅以补贴或税收上的便利，把能量自持、资源回收效率高的项目列入政策扶持范围。不过不能只依赖经济手段来调动减排积极性，核心是改变目前按单厂划分改造任务的习惯：采用厂网河整体思路，统一安排泵站、调蓄池及污水流程诸项技术细节，使各环节配合良好、不因厂内节支而系统多耗能，真正实现区域低耗、总体碳排减少的效果。

此外，有关市政、生态环境、能源及农业的各部门要做好协同安排，要促进跨部门合作与社会共治。同时需制定更明确的沼气或再生水、氮磷类有机肥使用标准；从资源利用的角度来说，应对再生水、污泥、磷回收物制定相应标准。另外，应以绿色债券、碳金融手段等新思路来推动绿色融资，使低碳改造所涉资金获得较优、较易取得的成本保障。

4 城市污水处理低碳转型的挑战与应对对策

现阶段，我国的低碳技术路线基本是可行的，实际困难多属于工程类问题，而经济性是最直接的障碍。采用厌氧氨氧化或 AnMBR 工艺前期投资成本较大，对中小型污水处理厂来说，单靠资金自筹不能很好地解决升级难题，很多好技术因而未被广泛采用。但如把合同能源管理、环境绩效合同这类方法引进来，又让社会力量承担部分投资、部分运营责任，便可在不使厂方立即负担重增的情况下达成成本分担、风险缓解的目标，由此为中小厂转型找到可行方案。其次，有关资源化产品安全及相应标准的论述应视为一体。资源化所涉的污染残留、出水水质、产品合格率诸项风险都应考虑，而在线监测（针对出水、再生水、肥料及碳基物）和生物毒性预报是应对这类问题的必要手段。当再生水被用作生态或景观用水时，必须对病原体及微量污染物在长时期内的累积做较充分的分析与预测。目前，有关再生水回用、氮磷材料、污泥碳基物的标准体系尚未统一，市场接纳因而有其限制。所以有必要把制定标准、认证办法及应用说明提上议事日程，界定质量限值、使用条件与检测方式，使市场获得通路。此外，有关运维能力滞后的事实也应予以重视。按现在的情况看，各类智能控制及新式调控方法使运行维护变得更为复杂，知识缺口尚存。以数字孪生技术来应对这种困难是可行的思路，它能做远端分析、自动调节或早期告警，不必完全依靠现场实践，因而有助于培养、造就素质优良、分工明确的运维类工作人员。

5 结束语

从碳中和思路来看，现有城市污水处理体系正经历改造或优化。污水厂要完成的任务已不只限于水质达标，其技术及方法趋向低碳循环、资源回收的方向。厌氧氨氧化、好氧颗粒污泥、智能调控、膜处理诸项技术若能成熟地配合使用，能量自持、资源循环、低排放状态在将来是可望现实的。低碳转型不是对某类工艺作简单更新，而是有关材料、流程、制度及管理的整体设计。要使技术、市场、标准三者协调运作，兼顾运行安全与水体质量，促成全链条低碳发展，推动“双碳”目标实现。

参考文献：

[1] 雷久鸣 . 全球碳排放变化趋势研究及对中国环境管理制度的启示 [J]. 环境科学与管理 ,2026,51(02):27-31.

[2] 陶璇,操家顺,周亮,等 . 小型城镇污水处理厂温室气体排放特征研究 [J]. 环境工程 ,2026,44(09):202-213.

[3] 蒙小俊,葛光环,蒙欣 .“双碳”背景下城市污水低碳处理技术与资源化利用分析 [J]. 工业水处理 ,2026,46(03):33-46.

[4] 李怡珊,王慧倩 . 简述生活污水短程硝化厌氧氨氧化工艺的快速启动与稳定维持机制 [J]. 皮革制作与环保科技,2026,07(12):13-15.

[5] 杨媛,邓伟航,胡以松,等 . 碳捕获 - 厌氧消化耦合技术回收城市污水能源研究进展 [J]. 环境工程 ,2023,41(05):213-221.

[6] 于文豪,路冬雪,刘亚青,等 . 温度对纤维素厌氧消化产甲烷性能与微生物群落演替的驱动作用 [J/OL]. 生态学杂志 ,1-15[2026-09-18][2026-09-21].https://link.cnki.net/urlid/21.1148.q.20260916.1326.002.

[7] 张荣新,刘祎,傅金祥,等 . 鸟粪石沉淀法处理高浓度氮磷废水研究进展 [J]. 环境污染与防治 ,2024,46(08):1175-1183.

[8] 赵孟雷 . 双碳背景下城镇污水处理厂处理技术分析与展望 [J]. 广州化工 ,2026,54(02):23-25,141.

[9] 王香莲,贾春芳,马林,等 . 好氧颗粒污泥技术在小处理规模下的适用性研究：以农村分散式污水处理为例 [J/OL]. 环境工程学报 ,1-12[2026-09-15][2026-09-21].https://link.cnki.net/urlid/11.5591.x.20260915.1042.003.

[10] 索联锋,胡星,王泽天 . 厌氧动态膜生物反应器对污水厂尾水脱氮性能研究 [J]. 工业用水与废水 ,2026,57(04):70-76.

基于等级相关性与注意机制的短期电价预测

刘 川

（南京南自华盾数字技术有限公司，江苏 南京 210000）

摘 要 短期电价受负荷及历史电价等多重因素影响，波动性强且尖峰频发，准确预测对电力市场主体的报价决策具有重要意义。针对现有研究在模型输入选取上多依赖经验，容易采纳与电价相关性较弱的历史数据，进而影响预测精度的问题，本文提出一种基于Spearman等级相关性算法与注意力机制的长短期记忆网络（ATT-LSTM）短期电价预测网络。首先，采用Spearman等级相关分析历史负荷、历史电价与目标电价之间的相关性，筛选出相关程度较高的滞后特征作为模型输入。然后构建ATT-LSTM网络，利用注意力机制自适应分配不同输入特征对预测结果的贡献权重，提升模型在电价尖峰与跳跃点的拟合能力。基于澳大利亚电力市场实测数据的算例结果表明，该网络在平均绝对误差与均方根误差上均优于对比模型，验证了所提特征筛选策略与预测模型的有效性。

关键词 短期电价预测；特征筛选；注意力机制；长短期记忆网络

中图分类号：TM73；F426.61 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.022

0 引言

随着我国电力体制改革的深入推进，电力现货市场建设不断加快，电价作为电力市场的核心信号，其波动直接影响发电企业的报价收益、售电公司的经营策略与电力用户的用电成本[1]。新能源大规模并网进一步加剧了电价的不确定性，准确进行短期电价预测对市场各方规避交易风险、优化资源配置具有重要意义[2]。电价受供需关系、负荷、新能源出力等因素作用，呈强波动、强非线性特征，常伴尖峰跳跃，预测难度大[3]。负荷与电价密切相关，合理利用负荷与历史电价信息是提高预测精度的关键。现有预测方法分传统时间序列与人工智能两类。以自回归差分移动平均模型（AutoRegressive Integrated Moving Average，ARIMA）为代表的传统方法基于线性假设，难以刻画电价的非线性与突变特征[4]。以支持向量回归（Support Vector Regression，SVR）为代表的机器学习方法特征提取依赖人工经验，表达能力有限[5]。近年来，卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）、长短期记忆网络（Long Short-Term Memory，LSTM）等深度学习模型被广泛用于电价预测[6]。然而，现有研究在提升模型结构的同时，对输入特征的选取关注不足。模型输入通常包含多日多时刻的历史负荷与电价数据，不同输入变量与目标电价的相关程度差异较大，若不加以区分地全部输入，不仅增加计算负担，还可能引入与电价相关性较弱的信息，制约预测精度的提升[7]。因此，本文提出基于斯皮尔曼等级相关分析与注意力机制的长短期记忆网络（ATT-LSTM）预测方法，先筛选相关性较高的滞后特征作为输入，再以注意力机制突出关键时点信息，最后基于澳大利亚电力市场实测数据验证所提方法的有效性。

1 基于Spearman等级相关的特征筛选

输入特征的选取直接影响预测精度。历史负荷、历史电价与预测时刻电价的相关程度随滞后时间远近而不同，不加区分地全部输入易引入冗余。为此，采用斯皮尔曼等级相关筛选特征，该方法先将数值转为秩次再求相关，对尖峰等极端值不敏感，结果更稳健。设某候选变量观测序列为 $\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$，预测时刻电价序列为 $\{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$，二者对应的秩次序列分别为 $\{R_i\}$、$\{S_i\}$，则斯皮尔曼相关系数 ρ_k 为：

$$\rho_k=\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i-R^-)\cdot(S_i-S^-)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(R_i-R^-)^2\cdot\sum_{i=1}^{n}(S_i-S^-)^2}} \quad (1)$$

式（1）中：R^-、S^- 分别为两组秩次的均值，n 为样本数。$\rho_k\in[-1, 1]$，其绝对值越接近1，表明该候选变量与预测时刻电价的相关性越强。

设预测时刻为t，目标变量为该时刻电价 Y_t。考虑到预测时 Y_t 对应的实时负荷尚未发生，候选输入仅取滞后变量，构成候选集：

$$C=\{Y_{t-1}, \cdots, Y_{t-48}, Y_{t-96}; L_{t-1}, \cdots, L_{t-48},\} \quad (2)$$

式（2）中：Y_{t-k}、L_{t-k} 分别为滞后k个采样时刻的历史电价与历史负荷。数据采样间隔为30 min，一天含

作者简介：刘川（1987-），男，本科，工程师，研究方向：电力信息化。

48 个时刻，故滞后 48、96 对应前一日、前两日同一时刻，用于刻画电价与负荷的日周期性。滞后 1、2 等邻近时刻用于刻画电价走势的短期惯性。

分别计算候选集中各变量与 Y_t 的相关系数 ρ_k，并检验其显著性，构造统计量：

$$t=\frac{\rho_k\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho_k^2}} \tag{3}$$

在原假设该候选变量与 Y_t 不相关成立时，t 近似服从自由度为 n-2 的 t 分布。综合 ρ_k 大小与显著性检验结果，按以下规则筛选输入特征：（1）对于历史负荷变量，模型输入选取相关系数较高、且随滞后时间缩短而逐渐增强的邻近时刻负荷（前 1 ～ 3 个时刻，即 L_{t-1}、L_{t-2}、L_{t-3}），其直接反映预测时刻前的用电需求态势。（2）对于历史电价变量，则选取相关性强且具日周期含义的滞后电价（L_{t-1}、Y_{t-48}、Y_{t-96}），剔除与预测时刻间隔过远、相关性弱且易引入冗余的变量。

2 基于注意力机制的 LSTM 预测模型

将筛选得到的滞后电价与负荷特征作为预测模型的输入。为充分挖掘其中的时序信息，构建基于注意力机制的长短期记忆网络（ATT-LSTM）预测模型，其结构由输入层、LSTM 层、注意力层与全连接层构成。输入层接收筛选得到的滞后电价与负荷特征序列。LSTM 层沿时间方向依次读取输入，输出各时刻的隐状态。注意力层对各时刻隐状态加权求和，突出对预测未来电价更为关键的历史时刻。全连接层将加权求和得到的上下文向量映射为预测电价。LSTM 通过引入门控机制，有选择地保留与遗忘历史信息，有效缓解传统循环网络在处理长序列时的梯度消失问题。其记忆单元由遗忘门、输入门、候选门与输出门构成。设 t 时刻的输入为 x_t，上一时刻隐状态为 h_{t-1}，则各门控输出及单元状态更新为：

$$f_t=\sigma(W_f\cdot[h_{t-1};x_t]+b_f) \tag{4}$$

$$i_t=\sigma(W_i\cdot[h_{t-1};x_t]+b_i) \tag{5}$$

$$o_t=\sigma(W_o\cdot[h_{t-1};x_t]+b_o) \tag{6}$$

$$g_t=tanh(W_c\cdot[h_{t-1};x_t]+b_c) \tag{7}$$

$$c_t=f_t\odot c_{t-1}+i_t\odot g_t \tag{8}$$

$$h_t=o_t\odot tanh(c_t) \tag{9}$$

式（4）～（9）中：σ 为 sigmoid 激活函数，tanh 为双曲正切激活函数，W_f、W_i、W_o、W_c 与 b_f、b_i、b_o、b_c 分别为各门的权重矩阵与偏置，表示逐元素相乘。$\odot$ 为候选单元状态，c_t 为 t 时刻的单元状态，h_t 为 t 时刻的隐状态。由于电价序列常在平稳段与尖峰、跳跃段之间快速切换，门控机制使模型能够在电价发生突变时及时遗忘旧的运行状态、写入新的价格信息，从而更好地捕捉电价状态的动态变化。

对于 LSTM 输出的隐状态序列 $\{h_1,h_2,\cdots,h_T\}$，不同历史时刻对预测未来电价的重要程度并不相同：邻近时刻反映了电价的短期惯性，前一日相同时刻的隐状态蕴含着日周期信息，尖峰、跳跃点附近的状态则包含了电价剧烈波动的关键特征。为充分利用这些信息，引入注意力机制对各时刻隐状态自适应加权。

$$e_t=v_a^{\mathrm{T}}tanh(W_a\cdot h_t+b_a) \tag{10}$$

$$a_t=\frac{exp(e_t)}{\sum_{j=1}^{T}exp(e_j)} \tag{11}$$

$$c=\sum_{j=1}^{T}a_t\cdot h_t \tag{12}$$

式（10）中：v_a^{T} 是可学习参数，e_t 为 t 时刻隐状态的注意力得分，a_t 为经 softmax 归一化后的注意力权重，满足 $\sum a_t=1$，c 为加权求和得到的上下文向量。注意力权重越大，表明该时刻的历史状态对预测电价越重要，模型据此将有限的计算资源集中于关键历史时刻，有助于提升在电价尖峰与跳跃点处的预测精度。

3 算例分析

3.1 数据集与预处理

选取澳大利亚电力市场 2010 年 1 月 1 日至 2011 年 4 月 13 日的实测数据作为数据集，该数据集包括电价和实时负荷时间序列，每 30 min 进行一次采样，剔除掉异常数据后共包含 20 352 个时段[8]。由于电价与负荷量纲不同、数值差异较大，建模前对二者分别进行归一化处理，将其映射到 [-1,1] 区间，预测完成后对输出结果反归一化，还原为实际电价。

价格跳跃与价格尖峰是电价序列的典型特征。实际电力市场中，非正常价格跳跃、零电价以及价格尖峰时有发生。尤其在高风电渗透率、电源结构复杂的澳大利亚市场，电价曲线中的价格尖峰更为密集[9]。由于价格跳跃的发生时间和幅度难以被现有方法准确预测[10]，这类特性构成了电价预测的主要难点之一。为验证该模型在跳跃点和尖峰点上的预测表现，以波动率较高、价格尖峰较多的澳大利亚市场实测数据开展算例分析。

3.2 相关性分析结果

按照第 1 节方法，分别计算各候选滞后变量与预测时刻电价之间的斯皮尔曼相关系数，结果如表 1 所示。表 1 中，Y_{t-k}、L_{t-k} 分别表示滞后 k 个采样时刻的历史电价与历史负荷。由表 1 可见：负荷与电价的相关系数随滞后时间缩短而逐渐增大，邻近的 L_{t-1} ～ L_{t-3} 与预测时刻电价的相关性均维持在 0.8 以上，表明近期用电需求态势对电价具有较强影响。电价自相关在 Y_{t-1} 处最强，且 Y_{t-48}、Y_{t-96} 仍保持较高水平，体现出明显的日周

期特征。滞后较远的变量相关系数则明显下降。因此，以预测时刻当天前3个时刻的负荷量、当天前1个时刻的电价以及前一日、前两日同一时刻的历史电价作为ATT-LSTM模型的输入特征集。

表1 候选输入变量与预测时刻电价的相关系数

输入变量	相关系数	输入变量	相关系数
L_{t-1}	0.826	Y_{t-1}	0.991
L_{t-2}	0.819	Y_{t-2}	0.985
L_{t-3}	0.807	Y_{t-3}	0.972
L_{t-4}	0.774	Y_{t-48}	0.921
L_{t-48}	0.741	Y_{t-96}	0.873
L_{t-96}	0.695	Y_{t-336}	0.812

3.3 评估指标

为定量评价模型的预测精度，选取平均绝对误差（MAE）与均方根误差（RMSE）作为评价指标。设测试集共n个时段，y_i为第i个时段的电价真实值，y_i'为对应的模型预测值，则二者的计算式为：

$$MAE=(1/n)\sum_{i=1}^{n}\left|y_i-y_i'\right| \quad (13)$$

$$RMSE=\sqrt{(1/n)\sum_{i=1}^{n}(y_i-y_i')^2} \quad (14)$$

式（13）、（14）中MAE反映预测误差的平均水平，RMSE对较大误差更为敏感，能够突出反映电价大幅波动时段的预测偏差。

3.4 预测结果对比

为验证本文所提网络的有效性，将ATT-LSTM与LSTM、CNN-LSTM两种模型在相同的训练集与测试集上进行对比实验，采用平均绝对误差（MAE）与均方根误差（RMSE）作为评价指标，结果如表2所示。由表2可知，ATT-LSTM模型的MAE与RMSE分别为1.2085和1.9893，均低于LSTM与CNN-LSTM两种模型，其中MAE较LSTM降低31.3%、较CNN-LSTM降低10.5%，RMSE较LSTM降低21.1%、较CNN-LSTM降低7.9%，表明该模型的预测精度优于对比模型。

表2 不同运行模式的成本

评估指标	MAE	RMSE
LSTM	1.7586	2.5217
CNN-LSTM	1.3498	2.1604
ATT-LSTM	1.2085	1.9893

ATT-LSTM预测精度的提升，主要源于特征筛选与注意力机制两方面的共同作用。一方面，通过Spearman等级相关筛选，保留了与预测时刻电价相关性较强的滞后特征，剔除了相关性较弱的变量，使模型能够聚焦有效信息，降低了冗余对预测精度的不利影响；另一方面，即使输入特征已经过筛选，各历史时刻对预测的重要程度仍不相同：LSTM对各时刻隐状态不加区分地统一处理，难以突出关键信息，而ATT-LSTM通过注意力机制为不同时刻自适应分配权重，使其在预测时更关注贡献较大的历史时刻，尤其在电价尖峰与跳跃处能够获得更充分的信息支持，从而进一步提升了整体预测精度。

4 结论

针对电价预测输入特征选取易引入冗余的问题，本文提出基于Spearman等级相关与ATT-LSTM的短期电价预测网络，先筛选相关性强且具日周期意义的滞后特征，再以注意力突出关键历史时刻。二者结合能够使模型更准确地刻画电价的波动特征。澳大利亚市场算例表明，该网络误差低于LSTM与CNN-LSTM，验证了特征筛选策略与预测模型的有效性。

参考文献：

[1] 勾玄.基于机器学习电价预测的发电企业报价策略研究[D].成都：四川大学,2021.
[2] 郑志勇,陈田原,胡哲,等.短期电价预测的机器学习方法：现状、挑战与展望[J].河南科学,2025,43(01):90-98.
[3] 刘雪娟.混合机器学习算法在电价预测中的研究与应用[D].兰州：西北师范大学,2024.
[4] 龙飞,张峥毅.基于CEEMDAN分解重构去噪和小波变换卷积-iTransformer的短期负荷预测[J/OL].电子测量技术,1-12[2026-09-05][2026-09-08].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=qnK7kQe7qCAkz_TtA72ggPGxQQFU_TYVBtrmXPIM5An0o1s00Kdv-YXTZxlLzncni_hIbOcVpEHo_BFVlFbxWZF1rklHKX0JeeTnLi_OUjlNxkCLymaPvuvhjmqZdp_L9OZaJ-pc3tZaewPwVyJSNXCZTwFvrsD12Mp6RZj-1b7MOHjFIfALhQ==.
[5] 何勇琪,戴扬宇,王俊,等.基于模态分解与机器学习的电力市场出清价格预测[J/OL].现代电力,1-16[2026-09-01][2026-09-08].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=qnK7kQe7qCCMHRX_3fyMsQa-5U8jyMd37pKdOP1CxlYCBVLP4wIKo8V6Uj0TW2MyshA1S5sbVGbnUaslDRZ6rkn5xG-KrMdJ0svOKMDYKlZ1igTXXHznaLjWW2sQ1vBKjFHe4CfL51wgcGDrVynljG6j2mxQnrK8aLxxiNYxKgXBUjBODbiaMg==.
[6] 顾慧杰,周华锋,彭超逸,等.基于CEEMDAN-BERT-LSTM的现货市场电力价格预测[J].电力需求侧管理,2025,27(05):112-117.
[7] 吉兴全,曾若梅,张玉敏,等.基于注意力机制的CNN-LSTM短期电价预测[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):125-132.
[8] 曾若梅.基于神经网络的短期电价预测[D].青岛：山东科技大学,2023.
[9] 韩啸.居民用电负荷波动下含机械加工设备区域的市场电价动态预测[J].模具制造,2026,26(06):232-234.
[10] 王开舒.基于分解-重构框架的电价预测研究[D].武汉：华中科技大学,2025.

风电项目配套基础设施开发建设统筹谋划分析

徐春强

（广西桂冠电力股份有限公司广源分公司，广西 柳州 545000）

摘 要 配套基础设施是风电项目实现并网发电与长期稳定运行的重要支撑，其开发建设涉及集电线路、升压站等多个专业，具有专业接口多、施工时序交叉强相关特点。本文针对配套设施规划滞后、选址分散等突出问题，从构成特征、总体思路、关键设施统筹要点等方向提出风电项目配套基础设施统筹谋划技术路径。实践表明，坚持与主体工程同步规划、永临结合、集约用地和多专业协同，能够缩短建设周期、降低工程投资、减少生态扰动，为同类风电项目配套基础设施的开发建设提供参考。

关键词 风电项目；配套基础设施；永临结合；建设时序；协同管控

中图分类号：TM614 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.023

0 引言

“双碳”目标驱动下，风电开发建设规模持续扩大，陆上风电已由早期单一风机阵列布置向规模化、基地化、智能化方向发展。与常规电力工程不同，风电项目多分布于山地、丘陵、草原和沿海滩涂，场地条件复杂，风电机组点位分散，配套基础设施往往随风机阵列呈线状、点状布置。部分项目因大件运输通道未提前打通，设备到场后无法进场，造成吊装机械窝工；因集电线路和升压站滞后，风机基础完工后无法并网，形成较长的尾工等待期。因此，将配套基础设施作为一个有机整体进行统筹谋划，已成为风电项目建设管理中不可回避的关键环节。

1 风电项目配套基础设施的构成与特征

1.1 主要配套基础设施构成

风电项目配套基础设施是指为风电机组实现电能汇集、升压送出、运输安装和长期运行所必需的附属工程总和，通常包括以下几类。集电线路负责将各台风机发出的电能汇集后送入升压站，按电压等级分为 35 kV 及以下架空线路和电缆线路，山地地形受地形限制时常采用直埋电缆与架空线相结合的方式；升压站（开关站）承担电能升压、无功补偿、继电保护和并网点控制功能，是风电场的电力核心；场内道路与吊装平台承担设备运输与风机吊装作业功能，道路需满足超长塔筒、叶片的转弯半径和纵坡要求，吊装平台需满足起重机站位、支腿压力和组装场地需求；对外交通衔接风电场与既有公路、铁路、码头，解决大件设备进场通道问题；通信与监控设施负责全场视频监控、风机状态远程传输和生产调度；施工临时用水用电、弃渣场、施工营地以及环保水保工程，也是配套体系的重要组成[1]。

从投资构成看，配套基础设施合计占项目总投资的比重不容忽视，其中集电线路和场内道路平台通常占配套投资的主要部分。从工期看，配套工程的完成节点往往决定风机吊装和并网调试的最早开始时间，道路未通则吊装无法开展，升压站未受电则风机无法调试。

1.2 配套基础设施建设的系统性特征与统筹难点

风电配套基础设施特征表现如下：一是专业接口多，电力、土建、道路、通信、水保等专业在同一空间作业，接口划分直接影响施工组织。二是空间分散性强，一台风机对应一段道路、一个平台、一基基础，配套工程呈蛛网式分布，管理半径大。三是永临结合要求高，施工便道、吊装平台、施工营地等临时设施在建设期完成后，相当一部分可改造为永久运维道路、巡检场地和检修基地。当前配套基础设施建设统筹难点表现为：规划阶段配套设施常滞后于风机点位排布，导致集电线路和道路随风机点位反复调整；选址阶段各专业各自为政，升压站、集电线路、道路缺乏全局

作者简介：徐春强（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：新能源项目开发建设。

比选；施工阶段配套工程与主体吊装时序脱节，道路未通即进场、集电线路未建即要求并网；运营阶段临时设施移交不清，运维通道与检修场地长期缺位。这些问题表面上是单项工程的技术问题，实质上是缺乏整体统筹谋划所致。

2 风电项目配套基础设施开发建设统筹谋划的总体思路与基本原则

2.1 总体思路

配套基础设施统筹谋划的核心是将分散在各专业、各阶段的配套工程纳入同一规划框架，按照“同步规划、统一选址、合理时序、永临结合、集约高效”思路，在风机点位确定的同时同步完成配套设施布局，在主体工程开工前完成主要施工通道和吊装平台设计，在并网前完成集电线路和升压站调试，在移交前完成临时设施向永久设施的转化。其本质是把配套工程从“被动跟随”转变为“主动谋划”，从专业分割转变为系统协同[2]。

2.2 基本原则

同步规划原则：配套设施与风机阵列设计同步开展，避免后期被动调整。全局比选原则：升压站选址兼顾汇集距离、送出条件和地形地质，集电线路兼顾路径长度和施工难度，不单纯追求某一专业最优。永临结合原则：施工便道按永久道路标准一次建设，吊装平台预留检修场地，施工营地结合运维基地布置。集约用地原则：多台风机共用一段道路、一个平台，减少地表扰动。生态协调原则：配套线位尽量避让林地、耕地和生态敏感区，减少高填深挖。全生命周期原则：不仅满足建设期施工需求，还要兼顾20年运行期的巡检、检修和大件更换需求，避免建成后再行开挖扩建。

3 风电项目关键配套基础设施的统筹谋划要点

3.1 集电线路与升压站选址布置统筹

集电线路和升压站是配套投资中占比最大的两项。集电线路规划应在风机点位确定后，采用辐射式与联络式相结合的接线方式，使电能汇集距离最短、线路条数最少。山地项目应优先利用山脊、沟谷等有利地形走线，避免大开挖和长距离跨沟。电缆敷设与道路工程应协同设计，电缆沟随道路边坡布置，减少二次开挖。在接线方式上，同一回线路所带风机数量应均衡分配，避免单回线路过长或负载偏重，便于后期运行维护和故障隔离[3]。

升压站选址应综合考虑如下因素：靠近负荷中心以缩短集电线路、靠近送出方向以减少送出线路、靠近对外交通以降低设备运输难度。站址应避开滑坡、泥石流和软弱地基，场地平整工程量适中。升压站与集电线路应在同一轮设计中完成全局比选，不能先定站址再硬拉线路。表1列出了风电项目主要配套基础设施的功能定位与技术参数。

表1 风电项目主要配套基础设施功能定位与技术参数

设施类别	主要功能	典型技术参数
35 kV集电线路	汇集风机电能	架空/电缆结合，单回线路带8台～12台风机
升压站	电能升压与并网控制	35 kV/110 kV或220 kV，含主变与无功补偿
场内道路	大件运输与巡检	纵坡不大于9%，最小转弯半径满足叶片运输
吊装平台	风机吊装作业	满足主吊站位与支腿压力，面积随机型确定
通信监控	远程监控与调度	光纤环网+无线备份，全场覆盖
环保水保	生态保护与恢复	拦挡、排水、植被恢复

3.2 场内道路与吊装平台永临结合

场内道路和吊装平台是山地风电投资大、扰动强的配套工程。道路线形应结合风机点位和地形优化，沿等高线展线，控制纵坡和转弯半径，满足超长叶片运输的“行车视距—转弯—纵坡”组合要求。道路宽度按运输车型确定，施工期可适当加宽，运营期保留路面宽度并设置错车道。纵坡、转弯半径和会车点应在设计阶段通过车辆转弯模拟验证，避免现场因转弯半径不足而反复开挖；吊装平台应根据主吊机型和吊装方案确定尺寸，平台标高与风机基础协调，起重机支腿位于稳定地基上。统筹要点在于，施工期吊装平台在风机安装完成后，应结合运维需求改造为永久检修场地，用于后期叶片更换和大部件维护，避免重新征地、重新开路。道路设计阶段应同步明确哪些路段为永久道路、哪些为临时便道，临时便道在施工结束后进行植被恢复，做到临时用地“工完场清”。

3.3 对外交通与施工运输通道衔接

对外交通决定大件设备能否进场，因此，规划阶段应提前对既有公路、桥梁、隧道进行承载力和净空核查，必要时实施局部加固、拓宽和临时支护。运输方案应

结合设备分段长度，合理选择运输路径和运输时段。沿海风电还需考虑码头与堆场衔接。对外通道与场内道路应在同一运输组织方案中贯通，避免出现“末端通道”无法通行的断点。对沿线桥梁、隧道和转弯点应逐一形成核查清单，提前落实改造责任和完成时限[4]。

3.4 通信网络与智慧运维基础设施一体化

通信线路宜与 35 kV 集电线路同沟敷设，利用线路杆塔挂设光纤，避免单独立杆。全场监控、视频、环境监测和功率预测系统应统一规划、统一组网，预留智慧运维升级接口。升压站按无人值守或少人值守设计，视频、安防、消防和在线监测数据集中上传至集控中心。通信基础设施一次建成，既满足建设期调度需要，又满足运营期远程监控需要，避免重复布线和重复立杆。

4 风电项目配套基础设施开发建设时序协同与全过程管控

4.1 前期规划阶段的多专业协同

前期规划阶段应组建涵盖风资源、电气、土建、道路、水保的联合设计组，在风机点位排布的同时同步完成集电线路路径、道路线形、站址比选和对外交通核查。采用三维场地模型进行叠加分析，识别敏感区和工程地质问题，从源头上减少后期变更。规划成果应明确配套工程的工程量、占地范围和实施顺序，作为后续招标和施工组织的依据。对影响大件运输和并网节点的控制性工程，应优先安排勘察设计。前期还应对配套工程的占地、林地草地占用和水土保持方案进行同步论证，避免因手续办理滞后而影响开工时间[5]。

4.2 施工阶段交叉作业与接口管控

施工阶段应按照“先通道、后基础、再吊装、后线路、终调试”的顺序组织。场内道路和吊装平台先行贯通，为风机基础和吊装创造条件；集电线路施工与风机基础施工可分区并行，但电缆敷设必须在道路工程成型后实施；升压站土建与电气安装同步推进；全场调试安排在风机并网前完成；关键管控点在于接口划分：道路标高与基础环标高衔接、电缆沟与道路边坡衔接、吊装平台与起重机选型匹配、通信光纤与集电线路同沟保护。各专业之间以书面接口图和工序交接单明确边界，避免因界面不清造成返工。对道路与电缆、平台与基础、升压站与集电线路之间的交接节点，应设置中间验收，前道工序未验收合格不得进入下道工序。

此外，以相对月份为时间轴，展示前期准备、道路平台、风机基础、吊装作业、集电线路、升压站、并网调试七个阶段的搭接关系。其核心是解决配套工程与主体工程时序脱节问题：道路平台必须在风机基础开工前贯通，集电线路在吊装后期即开始敷设，升压站与吊装并行推进，并网调试安排在收尾阶段，各阶段合理搭接而非串行等待，从而缩短整体工期。合理的时序搭接还能减少吊装机械闲置和人员窝工，使各专业队伍在不同作业面之间有序轮换，避免出现长时间停工等待。

4.3 建成移交与运维期衔接

工程移交阶段应同步完成临时设施清单、永久设施清单和运维通道图纸的交接。临时便道按水保要求恢复，永久道路、检修平台、通信系统和监控设施移交运维单位。移交资料应包含各风机点位坐标、道路标高、电缆埋深、集电线路走向和升压站图纸，为运营期巡检、故障抢修和大部件更换提供基础数据。运维基地宜结合施工营地和升压站布置，实现人员、工器具和备件的集中管理。对运维期可能遇到的叶片更换、齿轮箱吊装等大部件作业，应在移交时明确吊装场地预留位置和道路承载标准。移交资料应同步电子化归档，建立配套设施台账，使运维单位能够快速定位道路、电缆、平台和升压站的位置与参数。

5 结束语

风电项目配套基础设施虽不构成风机本体，却直接决定项目的建设速度、投资水平和运行品质。统筹谋划的关键，在于打破各专业“各自为政”的传统模式，在规划阶段即把集电线路、升压站、道路平台、对外交通和通信监控作为一个系统整体进行同步设计和全局比选，在施工阶段通过合理时序搭接和接口管控实现多专业并行，在移交阶段完成临时设施向永久运维体系的转化。坚持永临结合、集约用地和全生命周期等原则，能够在满足建设期吊装运输需求的同时，为长期运行期的巡检检修创造条件，减少后期改造投入，实现工程建设与生态保护、当期投资与长期效益的协调统一，也为后续同类项目的方案优化提供可借鉴的思路。

参考文献：

[1] 赵靓.五大千万千瓦级海上风电基地周边配套产业加紧完善[J].风能,2022(10):44-47.
[2] 巫春平,杨超,陈飞燕,等.山地区域超低风速风电项目开发探讨[J].红水河,2023,42(02):66-69.
[3] 张金明.“双碳”背景下新能源市场项目开发路径研究[J].低碳世界,2024,14(10):154-156.
[4] 范银鹏.基于新能源开发的风电工程项目管理难点及改进途径探讨[J].工程建设与设计,2025(08):219-221.
[5] 晏飞.复杂地形的风能资源评估及山地风电项目开发策略研究[J].生态与资源,2025(10):76-78.

信息化技术在建设项目用地报批中的实践运用

李海燕

（鹤山市城乡规划测绘院有限公司，广东 鹤山 529700）

摘 要 建设项目用地报批业务流程繁杂，需要诸多部门协同，传统的手工操作方式效率低下，校验也相对困难。信息化技术可以很好地助力用地组卷报批、耕作层剥离方案编制、土地征收社会稳定风险评估等关键业务，并可以适配各种规划和市政设计的配套工作。本文根据用地报批工作实际情况，分析信息化技术应用现状及优化途径，以期为用地报批数字化、规范化发展提供借鉴。

关键词 信息化技术；建设项目；用地报批；用地组卷；土地征收

中图分类号：F301.2；TP315 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.024

0 引言

用地报批属于建设项目落地的重要环节，牵涉诸多核心技术业务以及规划设计工作。传统的线下作业方式存在着信息互通性差、资料容易出现错误、业务衔接缓慢等状况，不能满足现代化国土治理的要求。信息化技术的普及给用地报批提质增效提供了支持，可规范成果编制和流转过程。本文根据报批核心业务来分析信息化应用现状及不足，提出科学的优化路径，旨在为促进用地报批业务高质量发展提供参考。

1 信息化技术介入建设项目用地报批的业务基础

1.1 用地报批核心业务模块的现实需求

建设项目用地报批核心业务包括用地组卷报批、耕作层剥离方案编制、土地征收社会稳定风险评估报告编制，三类业务各有侧重但又相互联系。用地组卷报批承担资料归集整合、逻辑校验、材料报送的工作，是整个报批工作中的主要环节。耕作层剥离方案要依照土地现状条件来制订方案，给耕地资源保护赋予技术支撑。土地征收社会稳定风险评估报告以征收环节的各种影响为对象进行研判。三类业务都需要处理大量的空间信息、文本信息，传统的作业方式很难实现多源信息的统筹管理，客观上对信息化技术的介入提出现实需求。

1.2 关联配套业务的协同发展诉求

用地报批业务不是孤立存在的，它要同控制性详细规划、专项规划、市政管线道路设计等配套业务成果对接。规划类成果给空间管控提供约束条件，市政管线道路设计成果体现项目建设配套基础设施状况，二者都会成为用地组卷报批的参考资料。不同的配套业务产出数据格式、成果标准不一样，线下模式下成果调取比对工作量大。信息化技术可以打破各个业务成果之间的数据壁垒，使配套业务成果同用地报批核心业务达成业务协同，缩减跨业务资料对接的耗费。

1.3 数字化转型大环境带来发展契机

国土空间数字化建设不断推进，各类国土空间基础数据库不断丰富，给用地报批信息化落地提供底层数据支持。业务主管部门逐渐推行线上报送、线上审核的工作方式，使技术服务端改变作业方式[1]。信息化工具可以完成空间图层叠加、文本资料整理、成果格式转换等线上报批业务的工作。外部环境的改变，给信息化技术深入用地组卷报批、耕作层剥离方案编制、土地征收社会稳定风险评估报告编制等业务提供了有利的外部环境。

2 信息化技术在用地报批核心业务中的应用现状

2.1 信息化技术在用地组卷报批中的应用实践

用地组卷报批是用地报批工作的主体业务，信息化技术主要应用于资料归集、空间数据处理、成果规整报送等环节。采用信息化工具对多种空间数据进行叠加分析，核对地块范围以及各种管控边界是否一致，整理组卷材料，使文本类材料和空间图层相联。依靠线上业务平台对组卷成果进行初步自检，剔除基础资料中出现的逻辑矛盾，降低人工检查造成的失误。信息化手段可以简化重复的资料整理工作，提高组卷成果的规整程度，给后续报送审核打下基础。

作者简介：李海燕（1989-），女，本科，助理工程师，研究方向：建设用地组卷报批、土地征收风险评估及耕地再利用。

2.2 信息化技术在耕作层剥离方案编制中的应用实践

耕作层剥离方案编制阶段，信息化技术主要用在现状土层信息提取、剥离范围确定、剥离土方量计算、成果图纸输出等工作中。利用空间数据库获取地块土壤现状、地类分布等基础信息，用空间分析工具确定耕作层剥离实施范围，计算土方量，制作相应的专题图纸[2]。信息化工具可提高基础数据的获取速度，减少人工读图、手工计算造成的误差，保证方案基础数据具有较好的一致性。编制完成的方案电子成果可直接纳入用地组卷材料中，实现各业务模块间成果的衔接。

2.3 信息化技术在土地征收社会稳定风险评估报告编制中的应用实践

土地征收社会稳定风险评估报告编制阶段，用信息化技术进行基础信息采集、风险要素梳理、成果归档管理。通过信息化渠道获取征收相关的基础信息，对各种风险因素进行分类标记，建立信息台账完成风险点的分类梳理。利用信息化工具对报告文本进行结构化整理，把空间地块信息同报告文本内容联系，从而达成评估报告电子版本标准化归档的目的。信息化手段可方便业务人员调取以往的同类业务参考资料，辅助开展风险研判工作，评价报告电子成果也属于用地组卷整套材料的一部分，为整体报批流程推进提供支持。

3 信息化技术应用于用地报批业务的优化提升路径

3.1 强化用地组卷报批全流程信息化管控能力

用地组卷报批是业务体系中最重要的工作内容之一，要进一步加强信息化技术对用地组卷全流程的管控能力，在用地前期资料收集、中期成果编制、后期自检归档等各环节上发挥作用。在资料收集阶段，建立适应组卷业务的信息归集框架，对接国土空间基础数据库，自动获取地块的地类、权属、规划管控等基础空间信息，减少人工录入基础信息所造成的工作量，降低基础信息录入错误的发生概率。组卷编制阶段，创建标准成果模板体系，依靠信息化手段达成文本材料、空间图层、表格数据三者联动，当地块的空间范围发生变化的时候，关联的表格文本内容能够同步更新，防止出现多份材料之间逻辑不一致的情况。成果自检环节，创建多维校验规则，就用地组卷中常见的地类冲突、边界错位、材料缺失等问题实施自动筛查，对筛选出来的问题做出标记提示，便于业务人员及时修正处理。成果归档阶段创建统一电子档案库，把全部组卷材料依照业务规范分类存入，达成材料快速检索调取[3]。同时考虑控制性详细规划、专项规划、市政管线道路设计的成果接入，把规划管控条件、市政基础设施布局成果直接导入组卷业务流程，成为组卷编制的直接参照，减少人工拷贝转换各类配套资料的工作。根据业务实际不断更新校验规则，按照业务主管部门发布的新业务规范，对信息化工具内部校验逻辑进行更新，使信息化管控能力适应业务政策的动态变化，持续提高用地组卷报批业务的作业质量，为后续耕作层剥离方案、土地征收社会稳定风险评估报告的编制工作提供可靠的数据基础。在当前国土空间数字化治理的背景下，用地组卷报批的标准化、精细化程度不断加强，传统的手工统筹方式已不满足批量项目报批的需求。信息化管控体系的健全可以达到报批全流程动态追溯的效果，每一个资料的录入、修改、核验环节都有迹可循，从而规范业务操作过程。依靠大数据分析能力整理不同类型的项目组卷报批的高频问题，创建常态化的预警机制，提前防止出现报批驳回、补正调整等状况，从而加快项目的用地报批进程。另外，信息化系统可实现各部门间的数据共享，消除部门间的资料隔阂，使各方面的数据能够互相联系起来，使组卷成果更加合规、完整，符合常态化、规范化用地报批的要求。

3.2 完善耕作层剥离方案编制信息化作业体系

耕作层剥离方案编制业务同用地组卷报批业务存在数据互通需求，需创建相应的信息化作业体系，打通与组卷业务的数据流转通道。方案编制前期，直接复用用地组卷业务产出的地块空间范围、地类信息、权属信息等，不需要重复进行基础信息采集工作，减少不同业务之间数据重复采集造成的资源浪费。利用空间分析工具完善土层信息提取、剥离范围划定、土方量计算的工具模块，改进多图层叠加运算逻辑，对地块内部不同土层分布情况进行精细化识别，区分出适宜剥离区域和不适宜剥离区域，帮助业务人员确定合理的剥离范围。根据土方测算工作需要设置多套测算逻辑，根据地块地形条件选择合适的测算方式，提高土方测算结果的参考价值。图纸输出模块设置标准化制图模板，直接输出符合业务报送要求的专题图纸，图纸要素与方案文本、表格数据保持联动。方案编制完成后，信息化系统会自动生成标准化电子成果并推送至用地组卷业务模块，成为整套报批组卷材料的一部分[4]。建立方案成果版本管理机制，记录方案每次修改内容，便于业务人员查阅不同的版本编制内容，保证方案编制过程可以追溯。同步对接控制性详细规划和专项规划的相关成果，根据规划中耕地保护相关

的管控要求，对耕作层剥离方案编制的内容进行约束，使方案编制成果符合空间规划的相关管控导向。不断优化信息化作业流程，协调自动化运算和人工研判的关系，信息化工具输出运算结果后仍保留人工调整的空间，适应项目地块复杂多变的实际情况，提高耕作层剥离方案编制成果的实用性。耕地资源保护属于国土空间治理的主要内容之一，耕作层剥离方案的科学性直接关系到土地资源再利用效率，依靠信息化作业体系可以很好地克服传统编制模式精度不高、衔接不畅的缺点。信息化工具可以将区域耕地质量数据库、地形地貌数据库等基础资料综合起来，准确找到优质耕作层分布区，保证剥离工作的精准执行，避免耕地资源浪费。标准化的信息化作业流程可以统一各个项目的方案编制标准，避免由于人工经验的不同造成的成果参差不齐的问题，提高方案编制的规范性和统一性。通过业务数据的互联互通可使耕作层剥离方案同用地组卷资料、规划管控要求形成全方位匹配，使整套报批资料体系具有逻辑统一、标准统一的特点，提高方案审核通过率，促进耕地保护和项目建设的协同推进。

3.3 构建土地征收社会稳定风险评估报告信息化编制管理模式

土地征收社会稳定风险评估报告编制工作要对接用地组卷报批和耕作层剥离方案的业务成果，建立符合业务特点的信息化编制管理模式，打通三类核心业务之间的数据链路。报告编制前期，直接调取用地组卷业务中地块权属、征收范围、人口基础信息、复用耕作层剥离方案中土地利用相关成果，减少基础信息二次采集工作。建立风险要素信息库，使用信息化工具对征收相关信息进行分类归集，对各种潜在的风险要素进行标签化处理，方便业务人员开展风险识别梳理工作。创建报告结构化编制模板，把地块空间信息、征收基础信息自动填入报告文本相应位置，缩减大段文本手工录入的工作量，留出人工研判撰写分析内容的空间，保证报告分析内容符合项目实际状况。创建风险台账信息化管理模块，对识别出的风险点进行分级分类登记入库，并附带相应的化解措施，实现风险点台账和报告文本的同步更新。报告编制完毕后输出标准化电子成果，纳入用地组卷整套报批材料，直接用于整体报批报送工作[5]。同时，接入控制性详细规划、专项规划、市政管线道路设计等相关业务成果，结合项目规划建设内容、基础设施配套情况等，开展风险研判，丰富风险评估的信息来源。建立报告成果归档检索体系，对以往的同类项目评估报告进行分类存储，业务人员可以检索到类似项目的评估经验，为本项目的风险判断提供借鉴。完善成果版本管理，记载报告每一次的修改调整内容，达成编制全过程可追溯。在信息化编制模式的运行过程中，重视工具定位，工具只起到信息归集整理、自动填充、台账管理等辅助作用，核心风险研判工作仍由业务人员来完成，兼顾作业效率和成果质量。依靠三类核心业务数据互通，使用地报批整套业务链条运转效率得到提高，适应国土空间数字化建设的发展趋势。土地征收社会稳定风险评估属于用地报批的重要保障性环节，关系到项目的推进是否稳定、合规，传统的手工编制模式存在风险排查范围小、台账零散、经验复用性差等缺点。信息化编制管理模式能够达成风险要素的系统化、精细化管控，借助大数据对各类项目征地补偿、民生影响、配套建设等各方面风险案例进行整合，进而拓展风险排查的广度，加强风险识别的全面程度。信息化台账可实现风险点、化解措施、整改落实情况的动态更新和闭环管理，使风险评估工作有据可查、全程可控。标准化编制模板和成果归档体系可以统一报告编制规范，减少文本错漏、格式不统一等问题，实现行业经验的沉淀和复用，提高风险评估报告的专业性和严谨性，为土地征收工作平稳推进提供技术支持。

4 结束语

信息化技术对于用地报批的各项核心和配套业务有较好的赋能作用，可以提高资料编制、审核、归档等各方面的整体效率。现阶段用地报批信息化应用还存在很多不足之处，需要不断地完善用地报批信息化管控体系，打通各类业务数据的壁垒。利用平衡智能技术同人工专业判断相融合的方式，可以持续改进报批成果品质，给建设项目合规落地以及国土空间精细化治理提供有力支持。

参考文献：

[1] 彭惠武.用地报批勘界工作中多源数据融合技术的应用研究[J].房地产世界,2025(17):164-166.
[2] 崔静,张佳宝,储鼎,等.项目用地组卷报批管理系统设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2025,48(S2):56-57,60.
[3] 杜启勇,李琪琪.面向重大项目土地要素精准保供的用地报批工作困境与对策研究[J].黑龙江国土资源,2024,22(07):36-42.
[4] 翟兴华,邓少平.三调成果的建设用地审查报批地类认定关键方法研究[J].地理空间信息,2024,22(06):84-88.
[5] 周劲榕.基于GIS的建设项目用地报批辅助系统设计与实现[J].海峡科学,2023(11):91-94.

海外大型新能源 EPC 项目进度计划管理优化实践

付术楠，赵　洁

（中国能建国际集团，北京 100025）

摘　要　随着“一带一路”倡议推进，国内工程企业大量承接中东新能源 EPC 总承包项目。中东新能源 EPC 项目工艺复杂、参建主体多、受当地政策与供应链制约，进度延误风险突出。本文选取中东地区某大型新能源 EPC 项目作为研究对象，梳理项目在进度计划执行阶段暴露出基准计划脱离现场实际、进度上报数据失真、赶工措施落地不足、过程管控间断四大核心问题。针对上述问题提出重新编制贴合现场实际的基准计划、规范进度数据报送审核流程、建立关键路径专题会议机制、细化周度 KPI 滚动管控等改进方案。方案落地实施后，项目整体进度重新回到可控区间，可为国内企业开展中东同类海外新能源 EPC 项目进度管理提供实践参考。

关键词　海外 EPC；新能源发电；进度管理；分级审核；P6 软件

中图分类号：TM614；TU722　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.025

0　引言

在全球双碳转型背景下，中东各国大力发展可再生能源，风电、光伏等新能源 EPC 总承包项目市场规模持续扩大。国内 EPC 总承包企业依托完整产业链优势深度参与中东地区新能源项目建设。海外新能源项目设计、设备制造、跨境海运、土建安装、调试全链条长，受当地行政审批、港口清关、多国分包团队协同等多重因素影响，进度管控难度显著高于国内同类工程[1]。中东区域地缘环境特殊，项目执行不仅要面对工程技术难题，还要适配当地法律法规、劳工政策、海关商检制度。部分出海企业直接照搬国内项目经验编制海外项目进度基准计划，对东道国审批周期、跨境供应链、本地劳务资源约束考虑不足，造成计划与现场实际脱节，容易出现进度滞后、赶工效果不佳等问题[2]。中东某大型新能源 EPC 项目参建合作方来自全球多个国家，项目体量巨大，在执行过程中集中暴露出海外新能源项目进度管理的典型矛盾。本文基于该项目真实执行经历，诊断进度管理现存问题，总结优化实践，为同类海外新能源 EPC 项目提供借鉴。

1　海外大型新能源 EPC 项目概况与原进度管理体系

1.1　项目基本情况

中东某大型新能源 EPC 项目，属于当地重点新能源基建工程。总承包单位为国内大型能源工程企业，设计单位、设备供应商、土建及安装分包商来自欧洲、中东、中国等多个国家与地区。项目采用 Primavera P6 软件编制三级进度计划，前期组建多国人员构成的计划管理团队，搭建了初步的进度管理制度[3]。项目初期管理模式参照国际项目惯例：编制 WBS 工作分解结构，划分设计、采购、施工、调试各业务模块；按月度更新项目进度计划，输出 S- 曲线评价项目执行状态，识别项目关键路径，针对关键路径形成赶工建议，以邮件形式分发至各参建单位。整套制度框架形式完整，但缺少针对中东本地环境的约束细则[4]。

1.2　项目执行初期暴露的主要问题

1. 基准计划编制脱离东道国现实条件。初始基准计划编制较多借鉴国内项目建设经验，未充分实地调研当地图纸审批周期、设备跨境海运时效、港口清关流程、本地劳务资源约束。直接套用国内工序工期参数用于海外项目，导致基准计划先天合理性不足。海外项目图纸需要经过当地政府主管部门多轮合规性审查，审批周期不可控；大型新能源核心设备体积重量大，海运舱位、港口泊位资源紧张；本地熟练技工供给有限，高峰期劳务招募周期会拉长。上述外部约束在最初编制计划时估算偏乐观，造成计划目标与现实执行能力出现明显鸿沟。

2. 进度上报数据准确性不足。分包商、设备厂家上报进度数据主观性较强，缺少实物现场核验环节。海外项目普遍存在岗位一人多职现象，专业工程师同时承担设计管理、采购协调、现场施工管理等多项工作，

作者简介：付术楠（1988-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：工商管理。

难以充分核实每条作业实际完成程度；部分分包单位未配置专职计划工程师，进度填报随意，月报数据与现场实物工程量偏差较大。部分设备供应商仅依据出厂计划填报进度，忽略海上运输、清关滞港带来的时间损耗。仅仅依靠纸面报表，会出现系统显示进度完成度很高，而现场并没有收到设备的虚假繁荣现象。

3. 赶工建议流于纸面，落地执行力度弱。计划工程师每月识别关键路径，输出赶工建议，仅依靠邮件对外传递。项目缺少固定的专题协调会议机制，项目经理、各分包负责人无法集中对齐资源调配工作。虽然书面提出赶工方向，但人力、机械设备资源得不到倾斜，有限资源大量投入非关键路径作业，真正决定总工期的关键路径得不到保障，赶工收效有限[5]。计划部门属于职能支持部门，没有直接调度分包资源的权限。如果没有高层管理者在会议层面下达指令，单纯依靠邮件通知，分包单位优先级仍然偏向自身内部考核目标，不会主动向项目总工期目标倾斜。

2 海外大型新能源EPC项目进度计划管理优化改进方案

针对上述四类痛点，项目部结合中东海外项目客观条件，形成闭环式改进方案。

2.1 重新编制贴合现场实际的基准计划

（1）要求全部分包商、设备供应商结合自身资源条件与海外交付约束，提交本单位P6三级作业计划；（2）开展专项调研工作，摸清当地政府图纸许可审批时长、设备海上运输、港口清关、内陆运输全链条时间周期；同时调研本地劳务市场高峰、低谷用工供给情况，把外部风险缓冲时间合理纳入工序工期[6]；（3）总包计划工程师汇总各方计划，梳理设计—采购—土建—安装—调试之间逻辑约束关系，修正不合理工序逻辑；将图纸审批、设备清关这类外部强制节点作为紧前作业嵌入网络计划，而不是简单作为备注文字；（4）经过多轮迭代修改完善，提交项目经理以及业主计划管理部门审核，正式启用新版基准计划。

2.2 建立分级审核的进度数据报送机制

（1）将新版P6基准计划拆解下发至各参建分包，明确每月25日作为进度更新截止节点；（2）分包商、设备厂家提交月度进度报告，必须经过本单位负责人审核之后再报送EPC总包；配套考核约束机制，迟报、虚报进度与工程款支付进行挂钩；杜绝无负责人签字的非正式报表；（3）总包各专业工程师开展现场实物工程量核验，不能仅采信书面报表；针对采购模块，不仅看设备制造进度，同时跟踪发运、海运、到港清关全流程节点；计划工程师依据核验后的真实数据在P6系统完成更新，导出S-曲线，编制月度进度分析报告。

2.3 设立每月关键路径专题讨论会

每月进度更新工作完成后，固定组织关键路径专题讨论会，项目经理、副经理、各分包项目经理、设备催交工程师共同参会。（1）计划工程师解读当前关键路径以及高风险作业；（2）会议现场明确赶工任务，落实人力、机械设备资源投入，区分关键路径、次关键路径，实现资源差异化配置；（3）催交工程师明确关键设备督办要求；（4）输出会议纪要跟踪闭环，改变以往仅发送邮件、无人落实的现状。会议纪要作为项目正式文件抄送业主，同时作为后续工期索赔的过程证据留存。

2.4 增加周度KPI管控，填补管理空档

将关键路径上重点作业拆解为周度KPI考核指标，编制周报材料同步全部项目管理层。以周为单位跟踪实物完成情况，强化全员计划管控意识，消除两次月度复盘之间的管理真空，做到小偏差早识别、早纠偏，避免偏差持续放大[7]。周报作为人员轮岗交接的标准资料，保证岗位变动时进度管控连续性。

3 海外大型新能源EPC项目进度计划管理优化方案实施效果

改进制度正式落地后持续运行多个周期，从月度项目月报统计结果可以看出：项目整体实际累计进度回归计划允许波动区间，采购、土建安装各板块得到明显改善，持续扩大的进度负偏差得到遏制，业主审核月报后认可项目管控改善成效。项目后续遭遇公共卫生事件外部冲击，当地未将该事件认定为不可抗力，项目依旧承受较大外部压力，但这套进度管理制度被项目持续沿用，最大限度降低额外工期损失，项目各机组后续陆续完成并网发电。通过这套管理模式可以看到，海外EPC项目的进度管理，不只是软件工具的应用，更是制度流程、考核约束、会议机制共同构成的管理闭环。

4 海外大型新能源EPC项目进度计划管理体系模型构建

4.1 制度基础环节：开工前期建立完整进度管理制度

项目开工阶段编制正式项目进度控制管理计划，明确WBS编码规则、作业编号规则、权重分配规则、进度更新规则、月报周报报送要求，厘清总包、分包、设备厂家各方权责，作为全项目进度管理的制度依据。同时明确各分包单位应当配备合格专职计划工程师[8]。制度文件不能只作为归档材料，需要组织所有参建单位交底培训，让国内外分包、设备供货厂家清楚进度报送的时间节点、填报标准、考核结果。

4.2 基准计划环节：外部约束的逻辑化与计划固化

基准计划环节解决的是计划脱离现场实际的根源

问题，其内核不是重新排定工期，而是把不可控的外部条件转化为可计算的逻辑约束。该环节须三类输入同时到位：各分包与设备供方按自身资源条件提交的三级作业计划，对东道国图纸审批周期、跨境物流与劳务用工条件的专项调研结论，以及总包对设计—采购—施工—调试接口关系的统一校核。控制要点有二：一是政府审批、跨境运输等外部强制节点必须以紧前作业形式进入网络计划，不得留作附件备注；二是基准计划经项目经理与业主计划部门审定后即行固化，调整须走正式变更程序报业主确认，防止以频繁修改计划替代实质纠偏。

4.3 数据治理环节：分级审核与实物量核验

数据治理环节针对进度上报失真，在体系中承担数据源净化功能。其结构为三级过滤：分包与设备供方自审并签字报送，总包专业工程师现场核验实物工程量，计划工程师复核后在 P6 中计算。考核约束是过滤机制得以运转的前提，迟报、虚报与工程款支付挂钩，使数据真实性具有经济后果，而不只依赖职业自觉。采购类作业在该环节须按制造、发运、海运、清关全链条跟踪，厂内制造完成率不能替代实际交付能力。环节输出为 S- 曲线与月度进度报告，兼具履约报告与过程证据双重属性：既向业主报送，也完整归档，工期争议发生时可回溯每期数据的核验依据。

4.4 关键路径环节：动态识别与风险前置

关键路径识别环节为资源投放提供依据。采用浮时路径法在 P6 软件中计算，识别总浮时最小的作业链条，即为项目关键路径。需要强调的是，关键路径并非一成不变，随着部分作业提前或滞后，网络计划会动态变化，每次计划更新之后必须重新计算，不能沿用上月分析结论。该环节输出的关键路径与风险作业清单，正是下一环节的议事对象。

4.5 资源落实环节：关键路径专题会议机制

资源落实环节弥补的是“计划有建议、资源不落地”的组织缺陷。体系将关键路径分析结论接入一个具备决策权的场域：会议由项目经理主持，分包负责人与催交工程师到场，计划工程师只陈述事实与风险，人力、机械设备调配指令在现场下达，责任与资源同步落到具体单位。该环节有三点固化要求：会议时点固定于每次进度更新之后，赶工对象严格限定于关键及次关键路径，会议纪要作为正式文件抄送业主并归档。第三点使该环节兼具执行与留证双重功能，工期争议发生时可作为过程依据。

4.6 闭环监控环节：周度 KPI 与月度更新双层滚动

闭环监控环节是体系中唯一以周为单位运行的部分。月度更新解决“算得准”，周度 KPI 解决“盯得住”：只有把关键路径上的重点作业拆解为可考核的周指标，才能在两次月度复盘之间发现并处置偏差，避免偏差累积到月度才暴露。周报同时承担状态记录功能，是人员轮岗、休假交接的标准化文件，可降低海外人员流动带来的管控断层。至此模型形成完整回路：制度先行→基准计划生成→数据分级审核→关键路径识别→专题会配置资源→周月双层监控，监控结果再反哺下一轮基准与计划修正。

5 结论

（1）海外新能源 EPC 项目基准计划不能简单照搬国内建设经验，必须充分调研东道国审批流程、跨境物流、劳务法规等外部条件，需要把外部客观约束转化为网络计划内的逻辑关系，而不是作为附加说明；（2）进度数据不能单纯依靠分包单位口头或书面上报，必须配套现场实物核验、负责人审核、考核约束机制，保障进度数据源真实有效，避免出现报表进度好看，现场实际滞后的假象；（3）关键路径识别不能仅停留在计划工程师纸面输出，需要项目高层主持专题会议，会上统筹调配资源，赶工措施才能够真正落地。计划部门重在识别风险，资源调动需要管理层推动；（4）仅依靠月度计划更新不足以支撑大型海外项目，需要叠加周度 KPI 滚动监控，消除管理空档，实现动态闭环管控，同时周报文件可以化解海外人员轮岗交接带来的管理断层风险。对于出海中东的国内新能源工程企业，项目前期就要搭建适配海外场景的完整进度管理体系，配齐专业计划岗位人员，重视 P6 软件背后配套管理制度建设，而不是仅仅将软件作为绘图工具。

参考文献：

[1] 钱勇强 . 新时期海外工程项目管理面临的挑战与对策 [J]. 工程管理学报 ,2020,34(03):249-253.
[2] 吴超 , 李庆勋 . 基于 P6 软件的国际 EPC 项目进度管理与控制 [J]. 项目管理技术 ,2015,13(07):71-75.
[3] 马娟 , 刘强 .Primavera6 项目管理软件应用探讨 [J]. 山东电力技术 ,2011,38(04):78-80.
[4] 韩周平 , 韩诗雨 . 工程总承包项目进度计划编制探讨 [J]. 煤炭工程 ,2022,54(09):31-34.
[5] 马国丰 , 尤建新 . 关键链项目群进度管理的定量分析 [J]. 系统工程理论与实践 ,2007(09):54-60.
[6] 蓝燕云 .P6 软件多日历配置对海外工程项目进度计算的影响 [J]. 建设项目管理与工程总承包 ,2023(02):45-48.
[7] 龙维智 .P6 软件在大型火电厂基建项目的应用分析 [J]. 湖南电力 ,2013,33(02):17-19.
[8] 项目管理协会 . 项目管理知识体系指南 (PMBOK 指南第七版)[M]. 北京 : 电子工业出版社 ,2021.

新型电力系统网络安全管理体系建设与优化研究

倪晨讯

（国网江苏省电力有限公司扬中市供电分公司，江苏 镇江 212200）

摘 要 在能源转型不断深入的行业环境下，新型电力系统依靠新能源并网、数字化转型和智能化升级来实现体系的重新构建，网络结构表现出开放化、分布式、泛在化的全新特点，传统的封闭式电力网络安全管理方式已不能满足目前系统运行的要求。电力系统各类终端设备、数据传输链路以及业务平台的网络化联系愈加紧密，安全风险隐患表现出多元化的特征，并越发隐蔽。本文以新型电力系统运行特点和网络安全发展现状为出发点，对目前网络安全管理体系存在的短板和不足进行梳理，建立符合新型电力系统发展的安全管理体系框架，从制度、技术、运维等方面提出体系优化路径，以期为提高电力系统网络安全防护水平提供参考，进而保证电力系统安全稳定可持续运行。

关键词 新型电力系统；网络安全管理体系；网络安全管理制度；网络安全防护技术；网络安全运维管控

中图分类号：TM73；TP309 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.026

0 引言

随着“双碳”目标的持续推进和电力数字化改革的不断深入，新型电力系统逐渐从传统的以火电为主的运行模式中脱离出来，形成以新能源为主、多能互补、源网荷储协同的新运行模式。数字化、智能化技术广泛应用后，电力生产、传输、调度、用电各环节都被网络化地覆盖，提高了电力系统的运行效率，并打破了传统电力网络的封闭安全边界。目前，电力网络安全管理机制、防护技术和运维模式还存在一些同新型电力系统开放化、分布式运行特点不相适应的问题。因此，开展新型电力系统网络安全管理体系建设与优化研究，能够给电力行业网络安全管控升级提供理论支撑，对防范网络安全风险、保障能源网络安全具有重要意义。

1 新型电力系统网络安全管理体系发展现状

1.1 网络安全管理制度框架初步成型

目前，我国电力行业已建立基本的网络安全管控制度体系，根据电力系统运行特点制定一系列的网络安全管理规范和行业标准，初步形成以电力生产、调度、运维等重要环节为主要内容的安全管理制度体系。各类电力运营主体依照行业通用标准，创建内部网络安全管理机制，明晰各个岗位的安全管理责任，规范网络设备运维、数据存储传输、系统更新迭代等常规工作流程。整体制度体系可以满足传统电力网络的基础安全管控要求，为新型电力系统网络安全管理工作开展提供制度基础，但是不能很好地适应新能源并网、分布式终端接入等新型场景。

1.2 网络安全防护技术持续迭代升级

电力行业数字化转型期间，网络安全防护技术一同推进更新发展，防火墙、入侵检测、数据加密、漏洞扫描等基本防护手段在电力网络系统中得到普遍应用，可以有效地抵挡常规网络攻击以及违规访问行为。新型防护技术也渐渐加入电力安全管控体系中，依靠大数据、人工智能技术对网络风险进行监测、预警、溯源，从而大幅提高电力网络风险的主动防控能力。整体防护技术体系由被动防御转向主动防控，但是对分布式终端、无线传输链路等新的薄弱环节的专项防护技术还存在不足。

1.3 网络安全运维管控模式逐步完善

电力行业已经建立常态化安全运维体系，形成日常巡检、风险排查、漏洞修复、应急处理的闭环运维过程，专业的运维队伍对电力网络系统进行日常的安全控制工作，可以及时处理常规的网络安全隐患。与此同时，行业内也逐渐形成网络安全应急响应体系，就网络攻击、系统瘫痪、数据泄露等突发的安全事件制

作者简介：倪晨讯（1992-），男，本科，工程师，研究方向：电力安全管理。

订处置方案，并且不定期地开展应急演练，以提高突发事件的应对水平。但是，由于电力网络结构不断扩展，大量终端设备接入造成传统的手工运维模式压力越来越大，智能化、精细化的运维管控水平还需要提高。

2 新型电力系统网络安全管理体系存在的核心问题

2.1 安全管理制度适配性存在短板

现有的电力网络安全管理制度大多是以传统的集中式电力网络结构为基础来制定的，制度条款和管控标准更适合于封闭式、固定化的电力运行环境，不能很好地适应新型电力系统分布式并网、多主体参与、跨区域联动的新运行模式。新型电力系统接入主体类型多样，包括各种新能源场站、分布式用电终端、市场化交易平台等，不同的主体网络运行场景和安全需求也大相径庭，但是现有的制度缺少分层分类的精细化管控条款，制度约束和指导作用无法得到充分的发挥，部分新型电力业务场景存在着管理空白。

2.2 安全防护技术体系存在薄弱环节

现有的电力网络安全防护技术大多集中于核心调度系统、主干网络等重要部分，对于海量的分布式终端以及边缘网络的防护技术配置欠缺，总体上存在的防护体系漏洞比较明显。此外，新型分布式终端种类繁多，且其数据传输机制尚未形成统一标准，大多依赖无线公共网络接入，这一现状加剧了安全防护技术标准的缺失问题，使得“带病入网”现象频发。上述因素共同作用，使得电力系统的网络安全风险显著增加，电力系统网络空间边界防护难度进一步增大。同时，各类防护技术之间缺少有效的联动，数据共享和协同防控能力较弱，不能应对复杂的、组合式的新型网络攻击手段。

2.3 安全运维管控体系精细化不足

新型电力系统网络设备数量、终端类型、数据流量呈爆发式增长，网络拓扑结构更加复杂，但是目前电力网络安全运维还存在着粗放式的管理问题，智能化运维工具的应用范围比较小，对于海量终端设备的实时监测和动态管控的能力较差[1]。运维工作大多集中在事后处理上，事前的风险预测、事中的动态控制能力较弱，不能及时发现隐藏的、长久的网络安全风险。另外，运维岗位权责不清，缺少跨部门、跨主体的协同运维机制，风险处置效率低。

3 新型电力系统网络安全管理体系建设优化路径

3.1 优化迭代分层适配的安全管理制度体系

根据新型电力系统开放化、分布式、多元化的特点，以现有的制度框架为基础进行迭代优化，建立分层分类、精准匹配的网络安全管理制度体系，弥补新型业务场景下管理的空白[2]。首先，从行业整体发展的角度出发，细化新型电力系统各类接入主体的安全管理标准，对新能源并网、分布式终端接入、电力市场化交易、源网荷储协同运行等新型场景制定专项安全管理规范，明确各个场景下网络安全管控的要求、操作标准和责任边界，消除制度管控的盲区。其次，完善层级化的管理制度结构，创建起行业统筹、企业执行、岗位细化的三级管理制度体系，依照电力系统数字化运行的特点，更新网络设备管理、数据安全管控、系统权限管控、外包服务管理等配套制度，使管理制度全方位适应新型电力系统运行模式。最后，建立制度动态更新机制，根据网络安全技术更新、网络攻击手段升级、电力业务模式创新等的变化，定期对现有的管理制度进行梳理和修订，保证制度的时效性和适应性，给网络安全管理工作提供全面、精准的制度支持，从制度上规避新型电力系统各种网络安全风险。制度落地实施层面，还要建立制度执行监督和考核约束机制，解决传统电力安全管理重制定、轻落实的问题。新型电力系统参与者众多，各个参与者的安全管理能力、执行标准不同，构建统一的监督考核体系，可对各主体的安全行为加以规范，防止出现制度形同虚设的情况。同时，可以结合电力行业数字化管控的优势建立制度执行动态监督体系，对各环节的制度执行情况实行常态化的督查，对制度执行薄弱环节进行专项整改指导，使安全管理制度由纸面规范变为实际管控能力，不断夯实新型电力系统网络安全管理的制度基础。

3.2 构建全域协同的智能化安全防护技术体系

根据新型电力系统网络安全防护的薄弱之处，依靠数字化、智能化技术革新防护架构，创建覆盖全网、全域、全环节的协同防护技术体系，补齐传统防护体系存在的漏洞和缺陷[3]。一是扩大安全防护的覆盖面，在夯实核心调度网络、主干网络防护的基础上，加大分布式终端、边缘网络、无线传输链路的安全防护力度，统一分布式终端入网安全标准，创建终端入网检测、认证、监测一体化防护体系，从源头上把控终端入网安全隐患，破解终端带病入网的行业难题。二是推进防护技术的智能化升级，融合大数据、人工智能、区块链等前沿科技，创建智能风险监测预警平台，可以对网络流量、设备运行状况、数据传输轨迹展开及时采集并加以智能剖析，从而准确找出异常访问、网络攻击、数据泄露等风险隐患，加强风险的提前预知以及精确应对。三是搭建多技术协同防护架构，将防火墙、

入侵检测、数据加密、智能溯源、漏洞挖掘等各方面的防护技术融合起来，打通技术数据共享通道，使各种防护模块之间可以联动响应、协同防控，打破单一技术防护的局限性，对新型电力系统网络边界和内部链路的新型网络安全威胁进行全方位的防护。为使技术防护体系更具有适应性、稳定性，还需要推进防护技术同电力业务的深度融合，抛弃通用化网络防护技术的套用模式，按照电力调度、新能源发电、电力交易等各业务的运行规律和安全特性制订差异化的技术防护方案。持续推进防护技术迭代适配工作，根据新型网络攻击变异特性以及电力系统新增设备、新增业务安全需求，及时更新防护算法和技术模块，加强边缘节点、分布式场站轻量化防护能力，解决核心防护技术下沉不力、边缘防护薄弱的问题，构建核心强防护、边缘全覆盖、全域可联动的立体化技术防护体系。

3.3 打造精细高效的常态化安全运维管控体系

围绕新型电力系统复杂的网络结构和海量的终端设备，优化运维管控模式，创建精细化、智能化、协同化、常态化的运维管控体系，从而全方位提升网络安全运维管理效能，这也是新型电力系统网络安全管理体系优化的落脚点[4]。推进运维管控精细化升级，细化网络安全运维岗位职责，明确设备巡检、风险排查、漏洞修复、应急处置、数据管控等各个方面的工作标准和考核要求，根据不同的网络设备、终端、业务系统制定不同的运维方案，实行分类管控、精准运维，杜绝粗放式运维造成的风险遗漏问题。推进智能化运维能力提升，用自动化运维工具和智能管控平台取代传统的人工运维方式，对大量的终端设备进行实时监控、自动巡检、自修复漏洞、自动报警风险等，从而提高运维效率、减少人工操作的失误，将运维数据集中到平台上统一管理，给风险判定和改进提供数据支撑。完善协同运维工作机制，创建跨部门、跨主体的运维协同体系，打通电力调度、设备运维、信息技术、安全管理等方面的工作联动通道，形成常态化的沟通对接、风险联合排查、问题协同处置工作机制，解决多头管理、权责不明、处置缓慢等问题[5]。健全应急运维保障体系，根据新型电力系统网络安全风险特点，优化网络安全应急预案，细化不同种类安全事件的处置流程、处置标准和责任分工，定期开展常态化、专业化应急演练，提高运维团队应对突发网络安全事件的处置能力。建立风险复盘机制，对已发生的网络安全隐患和事件进行深入分析，找出问题产生的原因，优化运维管控流程和防护策略，形成风险排查、处置、复盘、优化的闭环运维管理模式，不断夯实新型电力系统网络安全运行基础。除此之外，还要加强运维队伍专业化建设，适应新型运维体系运行需要，根据智能化运维技术、新型防护设备和多元业务场景建立常态化人才培训体系，重点提高运维人员智能平台操作、新型风险识别、突发事件处置等专业能力。创建运维人才的考核和培养机制，培育一支专业的、复合型的运维队伍来弥补传统运维团队智能化、数字化能力欠缺的不足[6]。建立行业运维经验交流平台，汇集各种网络安全运维案例和处理办法，达成行业资源互通、经验共享的目的，不断改善运维管控流程，提高新型电力系统网络安全运维的专业性、精细度、智能化水平。

4 结束语

新型电力系统数字化、智能化、开放化的发展为电力行业高质量转型提供新动力的同时，也给网络安全管理带来了新的挑战与压力，传统网络安全管理体系的弊端愈加明显。本文从新型电力系统网络安全管理现状入手，总结出制度适配性不足、防护技术弱化、运维管理粗放等主要问题，进而提出制度、技术、运维三个层面的体系优化方案，构建符合新型电力系统发展要求的安全管理体系。未来电力行业要不断关注网络安全风险的新特点，持续改进安全管理体系，依靠制度健全、技术更新、运维提效等多方面措施，从各方面加强电力网络安全防线，为新型电力系统安全稳定、高效有序运行提供有力支撑。

参考文献：

[1] 张蓬鹤,宋如楠,李兴文,等.新型电力系统供用电安全技术研究与发展[J].新型电力系统,2025,03(04):384-396.
[2] 邓良辰,王娟,费佳颖,等.数智技术赋能新型电力系统建设[J].宏观经济管理,2025(04):49-58.
[3] 曹伟,吴繁宇,刘媛.面向新型电力系统的网络安全保障体系构建[J].广西电力,2024,47(05):63-68.
[4] 黄梦琦.基于大数据的新型电力系统网络信息安全防护策略研究[J].信息与电脑(理论版),2023,35(01):222-225.
[5] 张蓬鹤,宋如楠,李兴文,等.新型电力系统供用电安全技术研究与发展[J].新型电力系统,2025,03(04):384-396.
[6] 曹伟,吴繁宇,刘媛.面向新型电力系统的网络安全保障体系构建[J].广西电力,2024,47(05):63-68.

火电厂厂用电系统电能损耗成因分析及降损优化研究

陈利兴

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332504）

摘 要 火电厂厂用电系统关系到火电厂运营效率及发展质量。火电厂厂用电系统运行过程中，由于电动机损耗、无功功率传输、谐波污染等因素影响，导致火电厂厂用电系统出现额外损耗，影响到其可持续发展。本文针对火电厂厂用电系统电能损耗成因及降损优化策略进行探索，以期为有效降低火电厂厂用电系统损耗提供参考，进而实现其可持续发展目标。

关键词 火电厂厂用电系统；电能损耗；损耗成因；降损优化

中图分类号：TM621 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.027

0 引言

火电厂在电能生产过程中，需配置大量主机配套设备与辅助系统以保证电厂正常生产，这些机械通常称之为厂用机械。厂用电系统的应用，目的在于把控厂用电设备的运行效率，并通过科学控制方式降低该系统的电能损耗，实现节能运行的目标。厂用电系统电能损耗控制时，火电厂应立足于自身的生产实际，把握厂用电系统电能损耗成因，采取针对性地控制方式降低损耗，以实现节能运行目标。

1 火电厂厂用电系统构成及设计原则

1.1 厂用电系统

火电厂厂用电系统在其生产过程中采取自动化、智能化控制方式，目的在于辅助火电厂运行发展的实际需要。厂用电系统包括机组高低压厂变、停机 / 检修变及其他供电网络和厂用负荷组成的系统，如厂用负荷、输煤系统、除灰系统、水处理系统等[1]。火电厂厂用电系统控制主要涉及厂用电率、厂用负荷、电气设备控制、厂用变压器控制等，工作人员应立足于火电厂实际生产情况发挥厂用电系统的功能及作用，以降低电能消耗，实现节能降耗的生产目标。

1.2 厂用电系统设计原则

火电厂厂用电系统设计时，应遵循可靠性、安全性、灵活性、经济性原则，以保证系统处于一个良好的运行状态，满足火电厂生产运行的实际需要。从火电厂厂用电系统设计原则来看，具体表现为：（1）可靠性优先原则。火电厂厂用电系统设计需要确保火电厂主机处于一个安全、稳定的运行状态，这就需要对厂用电系统的性能予以针对性把控，要求其重要负荷必需设备自动备用电源，保证该系统运行稳定性，进而更好地辅助火电厂的稳定运行；（2）安全性原则。火电厂厂用电系统设计及应用，需要充分考虑到火电厂运行的各种工况要求，避免因电气故障或人为失误引发的安全事故问题。基于此，火电厂厂用电系统设计需要充分考虑到安全性问题，确保设备、人员安全；（3）灵活性原则。从灵活性原则来看，火电厂厂用电系统设计应确保接线灵活性，可以适应火电厂各种运行方式要求，并可以为火电厂扩建及改造提供相应的支持；（4）经济性原则。火电厂厂用电系统设计需要降低成本支出，科学合理地配置电源、配电设备等，进而提升火电厂整体经济效益[2]。

2 火电厂厂用电系统电能损耗成因分析

2.1 电动机损耗

电动机是火电厂厂用电系统的重要组成部分，其在应用时对于火电厂安全稳定发电起到重要的影响。但由于电动机设备运行故障问题，可能给火电厂运行生产产生极为不利的影响。从电动机引发的电能损耗问题来看，具体表现为：（1）定子绕组烧毁。定子绕组烧毁是厂用电系统故障的主要成因，其占电动机各类故障总数的 30%，受此影响会导致设备运行停滞，并造成一定的经济损失；（2）轴承损坏问题。轴承损坏

作者简介：陈利兴（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：火力发电。

是厂用电系统电能损耗的又一成因，从轴承损坏的原因来看，包括轴承本身质量问题、滚动轴承润滑脂选用不当、机械设备振动、电动机与拖动机械设备装配不良等诸多因素影响；（3）转子鼠笼断条。从这一问题的成因来看，主要由于厂用电系统运行时，受到负载变化导致鼠笼条产生切向交变应力，从而导致金属疲劳引发的损伤断裂[3]；或是由于设备本身的制造工艺相对较差或是检修工作不到位引发的故障。

2.2 无功功率传输损耗

从火电厂电动机设备的特点来看，无功功率传输损耗属于典型的感性负荷，并且在运行时需要从电网中吸收大量的无功功率来建立磁场。电动机运行时的功率因数在0.7～0.9之间，轻载时可达到0.2～0.3之间。无功功率虽然不做功，但是其电流分量会流过变压器绕组、电缆导体及开关设备，并且在电流传输时会产生有功损耗。火电厂厂用电系统应用时，当无功电流增大线路压降，会导致远端电动机的电压偏离最佳值[4]。受此影响，无功功率的传输损耗会增大，成为厂用电系统损耗中的一部分。

2.3 谐波污染损耗

谐波污染损耗是电力系统中由高频谐波成分引发的波形干扰现象，具体表现为电流或声波偏离标准正弦形变的畸变。从火电厂厂用电系统的谐波污染损耗来看，其核心是由于变频器等非线性设备在运行过程中注入谐波，导致设备出现发热增加、效率下降、线损上升等问题，进而加剧电厂损耗。从火电厂辅机的运行特点来看，其能耗约占电厂用电的30%～40%，但在采用变频调速设备之后，变频器作为非线性负载，其会向厂用系统注入大量的谐波电流，从而引发谐波污染问题。从谐波污染导致的损耗情况来看，具体表现在线路损耗增加、变压器损耗加重、电机附加损耗、设备过热及寿命缩短问题等。

2.4 运行管理粗放损耗

除了上述技术层面引发的损耗问题之外，火电厂管理层面引发的电能损耗问题也同样重要，其对火电厂厂用电系统运行有着重要影响。从运行管理粗放损耗问题来看，具体表现为：（1）辅机耗电损耗排查工作开展不彻底，未及时发现厂用电系统的隐蔽性损耗，导致损耗控制工作不但为，影响到设备节能运行；（2）火电厂厂用电损耗管理缺乏足够重视，相关制度机制建设不到位，未为电能损耗控制提供相应的参考及指引，进而导致用电系统电能损耗管控工作不到位，影响到厂用电效率；（3）火电厂厂用电系统损耗控制效果不佳，相关工作未具体落实，导致工作人员缺乏责任意识，未贯彻落实降损节能工作。

3 火电厂厂用电系统电能降损优化对策分析

新形势下火电厂厂用电系统电能降损优化工作开展应注重强化工业节能减排，并立足于火电厂厂用电系统运行特点，注重从全面视角入手，实现科学降损优化目标，促进火电厂高效、稳定、可靠运行（见表1）。结合火电厂用电系统电能损耗成因，火电厂厂用电系统电能降损优化工作开展时，应注重把握以下几点内容。

表1 火电厂厂用电系统降损优化要点

优化维度	主要措施	适用对象	降损效果
设备技术改造	变频调速改造	风机、水泵类辅助机	节电率18%～60%
无功补偿优化	就地无功补偿	高压大容量电动机	功率因数提升至0.95
谐波治理	变频器PWM整流改造	变频调速设备	谐波畸变率下降5%以下
运行管理	精细化运行	全厂辅机系统	厂用电率降低0.08%～0.24%

3.1 辅机设备的变频调速改造

火电厂厂用电系统降损优化应做好辅机设备的变频调速改造，有效地降低辅助设备的运行能耗，以实现节能减排目标。在变频调速改造时，火电厂应注重以下几点：（1）减少空载运行的变压器。工作人员应对火电厂空载运行的变压器设备情况做好把控，减少空载运行的变压器，以减少电能资源的消耗；（2）积极探索厂用电系统变频调速系统建设，强化经济运行。火电厂用电系统的经济运行，应充分利用现有设备条件选择最佳运行方式，并优化负载调整，在确保安全供电的前提下最大限度降低变压器电能损耗，以实现节电的运行目标；（3）有针对性地做好辅机变频改造工作。火电厂辅机出力随着电机负荷大小变化而变化，电网负荷变化的同时发电机输出功率也随之改变，这就要求工作人员做好针对性调整，发挥变频调速的优势，以降低能源资源消耗。变频调速改造应立足于设备运行情况，注重把控变频调速的频率范围、动态响应、功率因数、功率效率等，以实现节能降耗的发展目标[5]。火电厂辅助机设备的变频调速改造，要求工作人员立足于系统运行情况，并对设备运行可能产生的能耗问

题做好针对性把控，通过采取变频调速运行方式，使设备运行符合火电厂生产运营实际需求，并以最低的能耗实现最大化的经济效益产出，确保火电厂运营发展的经济效益。

3.2 无功补偿优化及功率因数提升

从火电厂厂用电系统的运行特点来看，其中负荷最大的是大型感应电动机设备，其功率因数在 0.8 ～ 0.85 范围内，轻载运行时的功率因素会降低至 0.2 ～ 0.3 之间。火电厂厂用电系统运行时由于存在大量的无功电流，并且其在变压器绕组、电缆导体等设备中流动，从而产生附加有功损耗。针对此情况，为降低火电厂厂用电系统损耗，工作人员通过无功补偿的方式减少无功电流在系统中的长距离传输，进而实现降低能耗的目标。

3.3 强化谐波治理及电能质量优化

在火电厂厂用电系统电能损耗优化中，工作人员应对谐波治理及电能质量优化问题予以高度重视，以确保系统处于一个良好的运行状态。在此过程中，从火电厂厂用电系统的运行情况来看，随着变频器、电除尘等设备的应用，导致谐波污染成为厂用电系统损耗的重要来源。基于此，厂用电系统应用谐波治理技术手段，应注重以下几点：（1）在变频器集中配置区域设置 PWM 整流变频器替代传统的变频器，从根源上控制谐波的产生；（2）针对谐波源集中线路增加滤波装置，实现对谐波的就地吸收目标；（3）从整体视角入手做好谐波治理及无功补偿，提升治理工作开展的针对性、有效性 [6]。

同时，工作人员在电能质量优化时，应注重将谐波治理与变频改造工作协同推进。电能质量优化应从以下几个方面进行：（1）树立系统化思维，全面地考虑谐波治理与变频改造工作，为提升电能质量打下坚实基础；（2）针对性地控制谐波畸变，使其处于标准规定范围内，有效地降低其对厂用电系统的影响，确保厂用电系统处于稳定的工作状态；（3）加强移相变压器技术的应用，实现变频器过电流的有效控制目标，进而降低谐波注入，以保证移相变压器的稳定运行。

3.4 针对性提升运行管理工作质量

火电厂厂用电系统电能损耗控制时，除了强化技术层面的工作之外，还应注重从管理层面做好优化，以提升厂用电系统电能损耗控制效果。在此过程中，火电厂厂用电系统降损优化应推进精细化管理工作，并建立完善的制度保障，以确保降损优化目标实现。火电厂运行管理工作优化时，应立足于火电厂厂用电系统运行的实际情况，注重从细节管控层面入手，提升节能降耗控制效果，以确保火电厂厂用电系统处于更加稳定、可靠的运行状态 [7]。

火电厂提升运行管理工作质量应注重以下几点：（1）强化制度建设工作。制度建设为火电厂用电系统电能损耗控制提供保障，确保降损工作得到针对性的贯彻落实。基于此，火电厂应建立权责清晰、高效规范的节能管理体系，将节能指标纳入管理当中，推进降损工作得到有效的贯彻落实；（2）进一步做好过程管控工作。从过程管控层面来看，应强化辅机耗电的排查治理，通过过程化管控有效地降低损耗，以满足系统运行发展需要；（3）进一步优化运行。火电厂厂用电系统降耗优化，应立足于火电厂厂用电系统的运行发展情况，注重推进精细化运行措施来调整能耗；（4）建立综合管理机制。火电厂厂用电系统运行管理工作开展应强化综合管理，从系统化视角入手综合性地把控运行管理、无功补偿、变频调速等工作，使之与火电厂厂用电系统运行管控有效融合，针对性提升设备运行质量，降低能源资源消耗，实现火电厂厂用电系统节能发展目标。

4 结束语

火电厂厂用电系统电能损耗管控工作开展应立足于火电厂运行发展的实际情况，注重从系统化视角入手，把控损耗产生的原因，提升降损优化的质量，助力火电厂长远、可持续发展。同时，火电厂厂用电系统降损优化工作开展应注重建立完善的管理机制，并提升运行管理效果及质量，确保降损工作得到针对性的贯彻及落实，助力火电厂可持续发展。

参考文献：

[1] 马泽灏 . 光伏电站并网工程建设的电能质量优化技术与发电效率损耗控制研究 [J]. 中国高新科技 ,2026(07):47-48,51.

[2] 光明 , 孔令泽 , 泽日木 , 等 .220kV 同塔双回输电线路损耗分析及降损措施研究 [J]. 电器工业 ,2026(03):67-71.

[3] 李安 , 李吉侗 , 吕道鑫 , 等 . 提升配电网架空线路技术损耗评估精度的关键方法研究 [J]. 科技风 ,2026(05):89-91.

[4] 徐春秀 , 陈伟 , 孟祥光 . 基于无线通信技术的风电场电能质量检测方法研究 [J]. 电气技术与经济 ,2025(12):267-269,277.

[5] 孟祥树 , 张宏 , 刘拓 . 降低大型交流矿热炉设备电能损耗的研究与实践 [J]. 铁合金 ,2025,56(06):44-50.

[6] 邵其霞 . 配电网节能降损与电能质量管理研究 [J]. 大陆桥视野 ,2025(12):106-108.

[7] 栗志鹏 , 刘少博 , 杨浩 , 等 . 基于 PSO 的配电网谐波抑制与降损增效协同优化 [J]. 中国电力 ,2025,58(08):50-59.

面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性优化研究

王文静

（国家广播电视总局542台，北京 102400）

摘 要 为降低国产2.25 kW固态功放在额定输出状态下产生的增益压缩和调制失真，本研究分析多路功率单元幅相偏差对整机线性度的影响，提出幅相校准结合数字预失真的闭环优化方法。通过校正八路功率单元的合成状态，建立含记忆项的预失真模型，并依据输出反馈更新模型系数。结果表明，优化后功放输出功率保持在2.26 kW，邻道泄漏功率相对值由-31.4 dBc降至-46.8 dBc，误差矢量幅度由5.9%降至1.8%，说明该方法能够兼顾额定功率和信号线性度，满足通信信息系统的大功率信号传输要求。

关键词 通信信息系统；国产固态功放；线性优化；数字预失真；幅相校准

中图分类号：TN73；TN722.75 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.028

0 引言

在通信业务向宽带化、高阶调制方向发展的背景下，固态功放作为通信信息系统发射链路的末级设备，其线性度直接影响频谱占用和调制信号质量[1]。国产2.25 kW固态功放采用多路功率单元合成输出，额定功率运行时容易受到支路幅相偏差、器件增益压缩和温度漂移影响，进而产生邻道频谱扩展及星座点偏移[2]。针对上述问题，本研究采用幅相校准修正功率合成状态，建立数字预失真模型补偿动态非线性，并依据输出反馈迭代更新参数，以改善额定输出状态下的线性放大性能。

1 面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性特性

1.1 通信信息系统功放链路特征

通信信息系统发射信号经过基带处理和数字上变频后，由激励级送入固态功放，随后通过滤波组件及馈线单元输出[3]。基带侧输出20 MHz带宽的64阶正交幅度调制信号，信号峰均功率比为7.1 dB。固态功放承担末级功率放大任务，额定输出功率为2.25 kW，由八路功率单元经两级合成网络汇集输出。由于调制包络持续变化，功率晶体管的工作点在小信号区和压缩区之间移动。当峰值包络接近饱和功率时，瞬时增益下降会改变星座点幅度，漏极电流变化及匹配网络储能还会引入相位偏移。各支路信号经过功分、放大和合成后，任一通道的增益或相位发生偏移，都会降低合成效率，并使整机非线性呈现多单元耦合特征。因此，线性优化既需处理单个功率单元的器件失真，也需控制多路合成形成的幅相误差。

1.2 固态功放非线性失真机理

固态功放的非线性主要表现为输入输出幅度关系偏离比例状态，以及输出相位随输入包络变化。随着输入功率增大，功率器件逐步进入增益压缩区，幅度调制至幅度调制失真使高幅值采样点受到压缩，幅度调制至相位调制失真则造成星座点旋转。宽带调制信号还受到偏置网络、匹配电路和器件热效应影响，使当前输出不仅取决于当前输入，也与前序采样状态相关[4]。八路功率单元存在器件参数和传输路径差异，实测支路增益最大偏差为1.35 dB，相位最大偏差为11.6°。幅相偏差进入合成网络后，部分射频能量转化为隔离端损耗，支路反射功率随之升高。功率裕量被合成损耗占用后，需要增加激励才能达到额定输出，功率器件因而进入更深的压缩状态，形成合成偏差持续加重器件失真的传递过程。

1.3 固态功放线性优化需求

线性优化需要兼顾额定功率、频谱约束和调制精度，不能单纯依靠扩大功率回退量控制失真。根据系统链路预算，功放连续输出功率应保持在2.25 kW以上，额定状态下增益波动不超过0.5 dB，八路合成效率不

作者简介：王文静（1993-），女，本科，助理工程师，研究方向：通信工程。

低于 87%。针对 20 MHz 调制信号，邻道泄漏功率相对值应不高于 -45 dBc，误差矢量幅度应控制在 2.5% 以内。考虑功率单元温升造成的缓慢漂移，补偿参数还须具备在线修正能力。由此，优化过程需先消除支路静态幅相偏差，恢复功率合成的一致性，再对整机残余非线性建立逆向模型，最后依靠输出采样修正模型系数，使补偿状态能够随器件温度和输出功率变化保持稳定。

2 面向通信信息系统的全国产化 2.25 kW 固态功放线性优化方法

2.1 线性优化总体方案

线性优化采用射频支路校准和基带数字补偿相衔接的结构。发射信号经数字预失真处理后，通过数模转换和上变频形成射频激励，再由驱动级送入八路功率单元[5]。各支路入口配置数控衰减器和数控移相器，合成输出端通过 -50 dB 定向耦合器提取反馈信号。反馈信号完成下变频和模数转换后返回基带处理器，用于幅相测量、模型辨识和参数复核。校准阶段使用连续波逐路测量支路响应，将幅度差控制在 0.2 dB 以内、相位差控制在 2° 以内。支路静态偏差达到限值后，再加载调制信号采集输入序列和反馈序列，据此建立功放逆模型，补偿随信号包络变化的动态失真。

模型投入前，先将输出功率限制在额定值的 70%，完成反馈链路时延对齐和幅度归一化。处理器采用互相关方法估计整数采样延迟，再通过三次插值修正分数时延，使对齐误差不超过 0.1 个采样周期。输出功率随后按 10% 的步长逐级提高，每个功率等级稳定 3 min 后记录模型残差。当输出达到 2.25 kW 且残差均方根变化率低于 1% 时，将参数写入运行区。运行期间每隔 60 s 提取 65 536 个采样点，当邻道泄漏功率相对值连续两个窗口高于 -44 dBc，或反馈增益偏移超过 0.3 dB 时，控制器启动参数更新。

支路状态和器件温度同时纳入保护判定。支路反射功率超过 8 W、合成器隔离端功率连续 3 s 超过 30 W 或结温估算值超过 135 ℃时，控制器冻结预失真系数并将激励降低 0.5 dB，随后检查支路幅相状态。该处理顺序能够阻止异常数据参与模型训练，也可避免数字补偿掩盖功率合成故障。

2.2 功率合成单元幅相校准

幅相校准以第一功率单元为参考通道，其余七路依次接入测量状态。控制器保持总激励功率不变，通过支路耦合端读取复数响应，并计算各通道相对参考通道的幅度偏差和相位偏差。数控衰减器的调节步长为 0.05 dB，数控移相器的调节步长为 0.5° 。初次校准按照测量偏差写入补偿量，复测阶段采用半步修正，以免测量波动造成参数往复变化。单路连续三次测量的幅度极差不超过 0.08 dB、相位极差不超过 0.8° 时，测量结果方可写入控制器；超过限值时，将信号驻留时间延长至 500 ms 后重新采样。

支路初校完成后转入整机合成状态，控制器依据输出功率和隔离端功率复核校准结果。校准过程先将隔离端功率控制在 30 W 以内，再对幅度偏差超过 0.2 dB 的支路进行衰减调整，最后修正相位偏差。每轮仅改变一个支路参数，输出功率增加且隔离端功率下降时保留调整量，否则恢复上一状态并缩小调节步长。连续两轮输出功率变化低于 0.2%、隔离端功率变化低于 0.5% 时结束校准。校准后，支路增益最大偏差降至 0.18 dB，相位最大偏差降至 1.7° ，八路合成效率由 82.6% 提高至 88.4%。

2.3 数字预失真模型构建

幅相校准能够恢复多路合成的一致性，但器件增益压缩和记忆效应仍会造成动态失真。数字预失真采用记忆多项式描述功放逆向响应，其输出为：

$$z(n)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{p=0}^{(K-1)/2}c_{p,m}x(n-m)\left|x(n-m)\right|^{2p} \tag{1}$$

式（1）中：$z(n)$ 为预失真输出；$x(n-m)$ 为延迟 m 个采样点的输入信号；$c_{p,m}$ 为第 $2p+1$ 阶非线性项在第 m 个记忆点上的复数系数；K 为最高非线性阶数；M 为记忆深度。根据功放工作带宽和反馈结果，模型最高阶数取 7，记忆深度取 4，仅保留 1、3、5、7 阶分量，共形成 16 个复数参数。该参数规模能够描述功率压缩和短时记忆特征，并将在线计算量控制在处理器允许范围内。

模型训练数据分别从 50%、70%、90% 和 100% 输出功率状态采集，每个状态截取 32 768 个有效采样点。样本先剔除起始瞬态，再按照输入信号均方根值归一化。为避免低幅值样本占比过高，按照包络幅值将样本划分为八个区间，并从各区间等比例抽取数据。模型系数采用正则化最小二乘方法求解，正则化系数取 10^{-4}。辨识完成后，将预失真输出峰值限制在数模转换器满量程的 92%，防止信号硬限幅形成新的频谱分量。在线运行阶段只修正模型系数，不改变阶数和记忆深度。

2.4 输出反馈下的参数迭代

参数迭代以前向输入和反馈输出的归一化误差为依据。更新前，处理器检查输出功率、反馈增益和采样时钟状态，确认数据有效后构造误差序列。模型系数采用遗忘因子为 0.995 的递归最小二乘算法更新，新系数以 20% 的权重写入，原系数保留 80%，从而限制

单次调整幅度。更新后连续采集三个窗口，当邻道泄漏功率相对值改善超过0.5 dB且误差矢量幅度未增大时确认参数，否则恢复上一组系数。

散热器温度变化超过5 ℃、输出功率调整超过1 dB或邻道泄漏功率相对值高于-44 dBc时，检测周期由60 s缩短至10 s；参数连续稳定10 min后恢复原周期。幅相校准和预失真迭代不同时执行，保护条件触发后先检查支路状态，幅相偏差恢复至限定范围后再更新模型。运行参数分别存入工作区和回退区，工作区连续通过三个窗口检验后才覆盖回退区。通信业务切换或反馈采样异常时，控制器可在20 ms内恢复上一组有效参数。

3 面向通信信息系统的全国产化2.25 kW固态功放线性优化试验验证

3.1 试验环境设置

试验平台由信号激励、功率放大、输出采样和指标测量四部分构成，其中矢量信号发生器提供测试信号，定向耦合器提取功放输出，功率计、频谱分析仪和矢量信号分析仪分别完成对应指标测量。测试采用中心频率2.20 GHz、带宽20 MHz的64阶正交幅度调制信号，峰均功率比为7.1 dB，采样率为122.88 MS/s。功放在25 ℃环境下预热30 min，依次测试原始状态、幅相校准状态和闭环优化状态。每种状态连续运行60 min，每10 min记录一次测试结果，表中数据取六次测量的平均值。

3.2 输出功率测试

原始状态下，功放达到2.25 kW输出时需要较高激励，增益波动为1.18 dB。完成幅相校准后，合成效率提高，输出功率达到2.27 kW，增益波动降至0.43 dB。闭环优化投入后，输出功率稳定在2.26 kW，测试期间最大波动为±0.03 kW，增益波动进一步降至0.36 dB。结果说明线性补偿未依赖大幅功率回退，功放仍可保持额定输出能力。

3.3 邻道泄漏抑制效果

分别读取中心频带两侧相邻20 MHz频带内的积分功率，并计算其相对主信道功率的比值，测试结果见表1。

表1 固态功放线性优化试验结果

测试状态	输出功率/kW	增益波动/dB	邻道泄漏功率相对值/dBc	误差矢量幅度/%
原始状态	2.25	1.18	-31.4	5.9
幅相校准状态	2.27	0.43	-35.8	4.6
闭环优化状态	2.26	0.36	-46.8	1.8

幅相校准后，邻道泄漏功率相对值改善4.4 dB，说明支路一致性修正能够减弱合成过程形成的附加失真。闭环优化投入后，该指标降至-46.8 dBc，较原始状态改善15.4 dB，达到不高于-45 dBc的控制要求。左右邻道测量差值保持在0.6 dB以内，补偿后未出现明显的频谱偏斜。

3.4 误差矢量幅度测试

原始状态的误差矢量幅度为5.9%，高幅值星座点出现幅度收缩和相位偏转。幅相校准后，该指标降至4.6%，但仍超过2.5%的控制值。闭环优化状态下，误差矢量幅度降至1.8%，连续运行期间保持在1.7%至2.1%。输出功率变化未触发参数回退，表明反馈迭代能够跟随功率单元温升造成的缓慢漂移。

4 结束语

围绕全国产化2.25 kW固态功放在额定功率状态下的幅相失配和非线性失真问题，本研究从功率合成单元校准、数字预失真建模、输出反馈迭代三个方面提出线性优化方法，形成静态偏差修正与动态失真补偿相衔接的闭环技术路径。受限于试验信号带宽和连续运行时间，当前模型对复杂调制方式及长期温度漂移的适应性仍需拓展。未来可重点研究多工况样本驱动的模型阶次调整，引入在线参数辨识机制增强补偿状态跟踪能力，为国产大功率固态功放的工程整定及通信信息系统发射性能提升提供技术参考。

参考文献：

[1] 张能波，李凯，胡顺勇．面向卫星互联网的V波段500 W线性固态功放研制[J]．电讯技术，2025,65(04):602-607.
[2] 李凯，张能波，刘祚麟，等．Ka频段400 W氮化镓高线性固态功放研制[J]．微波学报，2021,37(06):52-56.
[3] 刘显．宽禁带功率放大器的线性化技术研究[D]．成都：电子科技大学，2025.
[4] 李飞锐，郑宝辉，王雷，等．一种具有温度补偿的GaN功放线性化器[J]．河北工业科技，2021,38(06):460-467.
[5] 孙光辉，张德伟，邓海林，等．用于固态功放反射式宽带预失真器设计方法[J]．强激光与粒子束，2022,34(12):80-85.

高速公路路面施工技术质量控制要点

任启超

（四川蜀道城建集团有限公司，四川 西昌 615000）

摘 要 针对高速公路沥青路面早期病害与质量离散问题，本文从原材料、拌和运输到摊铺碾压、检测验收梳理全过程控制要点。以半刚性基层和沥青面层为对象，明确原材料检验、配合比、拌和温度与级配、连续摊铺、压实温度与碾压组合要求，并引入拌和站动态监控、智能摊铺碾压、无核密度与红外测温手段。按工序设控制点、数据驱动纠偏，旨在减少离析、压实不足、开裂和水损害，提高平整度与耐久性，为标准化施工提供参考。

关键词 高速公路；沥青路面；半刚性基层；下承层处理；沥青混合料摊铺

中图分类号：U416.2 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.029

0 引言

高速公路路面结构直接承受行车荷载的反复作用，同时长期暴露于各类自然环境因素影响下，其服役质量直接决定道路服务水平与使用寿命。路面材料用量大、工序紧、受温度天气影响显著，原材料波动、离析、压实不足或接缝不当，通车后易演变为车辙、裂缝、坑槽等早期病害。以往质量控制多依赖人工经验和事后检测，难以及时纠正过程偏差；信息化施工把动态监控与工序验收结合，成为提升质量稳定性的方向。因此，系统梳理高速公路路面施工技术质量控制要点，对预防早期病害、延长路面寿命、降低养护成本具有现实意义。

1 高速公路路面施工特点与质量控制总体要求

1.1 路面结构形式与常见质量病害

我国高速公路路面普遍采用半刚性基层加沥青混凝土面层结构：下部为水泥稳定碎石等无机结合料稳定基层，提供强度和承载能力；上部为多层沥青混合料面层，承担行车荷载并提供平整、抗滑的行驶表面。两类材料在刚度、模量和收缩特性上差异明显，基层以强度和收缩裂缝控制为主，面层以高温稳定、低温抗裂、抗水损害和平整度控制为主，任一层级质量缺陷都会向上反射并逐步放大[1]。

从工程实践看，路面早期病害主要集中在以下几类：一是半刚性基层因水泥剂量偏高、含水量控制不当或养生不到位产生干缩、温缩裂缝，进而反射到面层；二是混合料级配、油石比波动和温度不均，造成油斑、花白料和性能离散；三是运输摊铺中集料离析、温度离析，导致局部空隙率过大、压实不均；四是碾压温度偏低、遍数不足或组合不当造成压实度不够，通车后出现车辙、松散和水损害；五是纵横向接缝处理粗糙，形成跳车和渗水通道。这些病害大多不是材料本身不合格，而是过程控制不到位所致，决定了质量控制必须前移到每道工序。

1.2 质量控制总体思路与技术创新手段

路面质量控制应坚持“预防为主、过程控制、数据说话”的思路，建立原材料、拌和、运输、摊铺、碾压到检测验收的全过程控制链条，把合格标准分解为可量测的工序参数，逐环节设控制点、明确偏差、频次和责任人，实行上道工序不合格不得转序管理。对基层强度、面层压实度、厚度、平整度、渗水系数等关键指标，实行首件工程认可制，先铺试验段确定松铺系数、碾压组合和遍数，再以首件参数指导全线。

在控制手段上，信息化、智能化是提升质量稳定性的创新方向。一方面，在拌和站安装生产数据动态监控系统，对每盘料的级配、油石比、拌和温度和产量实时采集、超限报警，杜绝随意改配；另一方面，在摊铺机、压路机上配置定位、温度和压实监测设备，实时显示摊铺温度、碾压轨迹、遍数和速度，借助无核密度仪、红外温度成像快速检测压实均匀性和温度离析，把以往靠人工跟测、事后取芯的“点”控制升级为全过程、可追溯的“面”控制[2]。

2 高速公路路面施工原材料与混合料质量控制

2.1 原材料进场质量控制

原材料是路面质量的基础，必须按批检验、合格使用。沥青应按品种、标号分别储存，进场查验出厂

作者简介：任启超（1994-），男，专科，研究方向：道路与桥梁。

合格证并检测针入度、软化点、延度、动力黏度和老化性能。改性沥青还应检验改性剂掺量和储存稳定性，储存温度和时间按规定控制，防止反复加热老化。粗集料重点控制压碎值、磨耗值、针片状含量、含泥量和与沥青黏附性，酸性石料用于面层时应采取抗剥落措施；细集料控制砂当量、棱角性和含泥量；矿粉必须干燥、不结块，不得用回收粉尘替代。

半刚性基层原材料方面，水泥宜选用初凝时间较长、安定性合格的普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥，不得使用快硬、早强水泥，以减少收缩开裂；碎石控制级配、压碎值和含泥量，拌和用水不得含有害杂质。所有材料按来源、规格分仓堆放、设置标识，细集料和矿粉防雨防潮，不同料源不得混仓。材料进场实行报验制度，监理见证取样、平行检验，检测不合格的材料限期清场，从源头消除质量隐患。

2.2 配合比设计控制

沥青混合料配合比设计按目标配合比、生产配合比和生产配合比验证三个阶段进行。目标配合比通过矿料级配合成和马歇尔试验确定最佳油石比，校核空隙率、矿料间隙率、沥青饱和度和稳定度、流值，并检验车辙、低温弯曲和水稳定性；生产配合比阶段从拌和站热料仓取样筛分，确定各热料仓比例并重新确定油石比；试拌试铺阶段用生产配合比拌料、铺筑试验段，通过取芯和性能检验验证级配、油石比与碾压工艺的匹配，三者一致后方可批量生产。

配合比设计应针对工程气候和交通条件，使混合料在高温抗车辙、低温抗裂和抗水损害之间取得平衡，避免片面追求某一指标。油石比过高易泛油、抗车辙能力下降，过低则易松散、耐久不足；级配偏细、空隙率过小易车辙，偏粗、空隙率过大易渗水。半刚性基层配合比应在满足7 d无侧限抗压强度的前提下控制水泥剂量，采用较低剂量和合理级配减少收缩裂缝。生产过程中配合比不得随意变更，原材料料源或规格变化时应重新进行配合比设计。

2.3 混合料拌和生产控制

拌和生产是把配合比转化为合格混合料的关键环节，应严格控制配料计量、温度和时间。拌和站计量系统应定期标定，集料、沥青、矿粉和外加剂按质量准确计量，逐盘记录实际用量并与设计值比对，级配和油石比超限时及时查找原因、调整冷料仓供料比例。沥青、集料加热和混合料出厂温度按沥青品种和黏温曲线确定，改性料高于普通料但不得超上限，防止过热老化，严禁使用超限或烤焦混合料。

拌和时间以混合料均匀、所有集料颗粒充分裹覆沥青、无花白料、无结团、无离析为准，干拌、湿拌时间通过试拌确定并保持稳定。储料仓暂存时应保温、限时，避免长时间储存造成温度下降、沥青滴漏和级配离析。拌和站应建立动态监控与逐盘记录制度，对油石比、级配、温度、产量自动采集并超限报警，数据可追溯到具体车辆和铺筑部位，发现异常批次及时拦截，使混合料质量在出厂前处于受控状态。

2.4 混合料运输控制

运输能力应与拌和、摊铺能力匹配，按运距和摊铺速度确定车辆数量，保证摊铺机前持续有料、不等料。运料车车厢应清扫干净并涂刷防黏剂，不得使用柴油类隔离剂污染混合料；装料时按前后中分三次移动车位，减少粗集料向一侧集中造成离析，并加盖双层保温篷布，减少运输途中的温度损失和雨淋。干热、大风或低温天气运输时尤其要加强保温，雨雾天气原则上不得摊铺[3]。

混合料到场后逐车检测温度，凭运料单核对出厂时间、车号和重量，温度低于规定下限、已结块或遭雨淋的混合料应予废弃，不得摊铺。卸料时运料车挂空挡、由摊铺机推动前进，避免撞击摊铺机造成摊铺波动；车厢升斗应平稳，防止大料滚落。通过合理调度缩短混合料从出厂到摊铺、碾压的时间，把温度损失和离析控制在最小范围，为现场成型质量创造条件。

3 高速公路路面现场施工关键工序质量控制

3.1 半刚性基层施工控制

半刚性基层应采用集中厂拌、摊铺机摊铺工艺，控制混合料含水量、摊铺均匀性和碾压成型。拌和含水量宜略大于最佳含水量并结合气温、运距调整，以补偿运输和摊铺中的水分蒸发；摊铺保持连续、均匀，按试验段确定的松铺厚度和系数控制标高，采用挂线或非接触平衡梁控制高程和平整度，严禁薄层贴补找平。碾压在混合料处于最佳含水量时及时进行，按先轻后重、先静后振、先边后中组织，压实厚度、遍数以达到规定压实度和平整度为准。

基层成型后应及时养生，采用土工布、麻袋覆盖洒水或喷洒养生剂等方式保持表面湿润，养生期一般不少于7 d，此期间封闭交通、严禁车辆通行；养生结束后及时铺筑面层或洒布透层、封层，防止暴晒开裂。施工中通过控制水泥剂量和含水量、加强养生、预设缩缝等措施减少干缩温缩裂缝，并对已出现的裂缝及时处理，避免反射到沥青面层。基层完工按批检测压

实度、厚度、强度、平整度和高程，合格后方可转序。

3.2 下承层处理与透层粘层施工

沥青面层摊铺前必须对下承层进行检查处理：基层或下面层表面应清扫干净、无浮浆、无松散、无污染，破损、坑槽和裂缝先行修补，高程和平整度超标部位处理合格。对半刚性基层表面按要求洒布透层油，保证一定渗透深度并与基层结合，表面不形成富油油膜；在沥青层之间、沥青层与水泥混凝土桥面等部位洒布粘层油，用量按基面类型通过试洒确定，洒布均匀、不破乳上车。

透层、粘层洒布应采用智能洒布车，控制洒布温度、用量和均匀性，做到不流淌、不堆积、不留白条，构造物和路缘石做好遮盖防污染；粘层油完全破乳、水分蒸发且不粘轮后方可摊铺上层。虽然功能层厚度很薄，但其黏结和封水作用直接影响层间结合，施工中应与面层同等管理，洒布后封闭交通、防止污染和破坏[4]。

3.3 沥青混合料摊铺控制

摊铺前摊铺机熨平板按规定预热，防止黏料、拉毛；采用非接触平衡梁或导梁控制厚度和平整度，下面层可挂线控制高程，上面层以平衡梁保证平整度。摊铺速度应与拌和、运输能力匹配，保持连续、均匀、不间断，一般控制在 2 m/min ～ 6 m/min 并相对恒定，避免时快时慢和中途停顿；螺旋分料器保持稳定料位（不少于送料器高度的三分之二），使混合料均匀分布，减少粗细离析。

摊铺过程中设专人检查厚度、温度和平整度，对局部离析、拖痕、油斑及时人工处理，离析部位挖除换料，不得在表面撒料掩盖。两台摊铺机梯队作业时，纵向热接缝应保持合理间距、搭接宽度并紧跟碾压，使接缝处结合密实；摊铺温度、环境温度和风速纳入现场记录，气温过低、雨天或路面潮湿时停止摊铺。通过连续、稳定、匀速摊铺，为后续碾压提供均匀、温度适宜的作业面。

3.4 碾压成型、接缝与检测验收

碾压是保证压实度和平整度的最后关口，应遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则，在混合料温度较高的有效压实窗口内完成。按试验段确定的温度区间、机具组合和遍数组织初压、复压、终压。初压及时稳压、整平，复压是达到规定密实度的主要阶段，优先采用轮胎压路机或振动压路机，终压消除轮迹。

碾压时压路机驱动轮朝向摊铺机，起步、转向缓慢，沿纵向由低到高、轮迹合理重叠，严禁在未成型路段掉头、急刹和停放；相邻碾压带重叠一定宽度，做到不漏压、不超压。横向接缝采用平接缝，切齐刨净、涂刷粘层油后摊铺，压实先横向后纵向；纵向接缝尽量采用热接缝，冷接缝应切割整齐、涂刷粘层并保证搭接结合。施工完成后待面层冷却到规定温度再开放交通，并做好成品保护，防止漏油、机械碾压和交叉施工污染[5]。

检测验收实行过程检测与成型后检验相结合：过程中用无核密度仪、红外成像和智能碾压系统监控压实均匀性与温度离析，成型后钻芯检测压实度、厚度，检测构造深度、渗水系数、平整度、弯沉和摩擦系数，各项指标满足规范方可验收[6]。对压实度不足、渗水超标、平整度差的区段分析原因、返工处理，并将检测数据反馈到拌和、摊铺和碾压参数调整中，形成“检测—分析—纠偏”闭环，推动路面质量由结果验收向过程保障转变[7]。

4 结束语

本文围绕高速公路路面施工全过程，梳理基层和面层质量控制要点，指出早期病害多源于材料波动、离析、压实不足和接缝不当，控制须前移到工序。明确三阶段配合比、逐盘计量、连续摊铺、碾压组合、接缝及成品保护要求，以试验段首件参数和温度、碾压控制表统一现场标准。拌和站动态监控、智能碾压、无核密度与红外测温，使质量控制由人工抽检转向数据驱动、全程可追溯。未来应推广信息化管控平台和压实实时评价，提升施工标准化与耐久性。

参考文献：

[1] 武毅男.高速公路沉降段路基路面施工技术与质量控制[J].工程技术研究,2026,11(10):156-158.
[2] 中华人民共和国交通运输部.公路路基路面现场测试规程:JTG 3450-2019[S].北京:人民交通出版社,2019.
[3] 陈涛.高速公路沥青路面施工质量控制技术要点[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):89-91.
[4] 张同新.高速公路沥青混凝土路面施工技术及质量控制措施研究[J].工程技术研究,2025,10(18):139-141.
[5] 齐银涛.高速公路施工技术及道路路面施工的质量控制对策分析[J].上海建材,2025(03):133-136.
[6] 李海龙.高速公路路面施工质量影响因素与对策[J].西部交通科技,2022(02):89-91.
[7] 何宗孺.高速公路桥隧施工质量控制分析[J].北方建筑,2025,10(03):52-55.

电力设备运检一体化管理与风险防控研究

许亚辉，孙叶翔

（国网新乡县供电公司，河南 新乡 453731）

摘 要 电力设备运行状态受负荷变化、环境条件、设备老化及检修质量等因素影响，在线监测、现场巡视和专业检测形成的信息不断增加，运行与检修之间的联系更加紧密。运检一体化管理需要保证设备状态信息连续传递，并使异常识别、任务生成、检修实施和结果反馈形成稳定衔接。针对设备状态异常、业务衔接、检修执行及资源配置风险，本文提出可从状态数据校核、业务流转规范、检修过程监督和资源统筹等方面进行控制，减少信息误判、任务断点、执行偏差和资源错配在运检链条中的累积，通过合理协调状态信息、业务任务和运检资源，有利于提高风险处置的及时性和设备运行可靠性。

关键词 电力设备；运检一体化管理；运行风险；设备状态基础数据；运检业务

中图分类号：TM73；TM63 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.030

0 引言

电力设备运维逐渐由周期性巡视和计划检修转向状态感知、动态研判和差异化检修并行的管理方式。变压器、开关设备、二次装置等设备运行参数不断积累，异常信息来源也由人工巡视扩展至在线监测、专业试验和历史缺陷记录。信息来源增加并不意味着风险判断必然更加准确，数据失真、业务交接滞后、检修任务执行偏差仍可能沿运检链条继续传递。运检一体化管理需要在设备状态、业务任务和检修活动之间保持稳定联系，使风险能够在形成初期被识别，并在后续环节得到及时控制。

1 电力设备运检一体化管理概述

1.1 电力设备运检一体化管理的基本内涵

电力设备运检一体化是将运行监视、现场巡视、状态检测、缺陷管理和检修组织纳入统一管理框架，使不同岗位围绕设备状态开展连续作业。其管理对象不仅包括设备本体和运行参数，还涵盖岗位职责、任务信息、检修记录及处置结果[1]。与单纯压缩岗位或集中业务不同，运检一体化强调运行信息与检修活动之间保持对应关系，使设备从异常发现到检修反馈具有统一的信息基础和管理边界。

1.2 协同运检的运行特征

协同运检具有业务关联紧密、信息持续更新和任务动态调整等特征。运行岗位掌握设备负荷、环境及实时工况，检测岗位补充专业试验和状态评价信息，检修岗位依据缺陷变化和设备状态安排作业内容[2]。不同业务不再以单一工序独立结束，而是围绕设备状态形成持续联系。检修任务也会随异常程度、停电条件和设备运行要求发生调整，使运检活动呈现较强的时序关联和专业协同性。

1.3 电力设备运检一体化管理的内在逻辑

电力设备运检一体化管理以设备状态变化为业务启动和调整依据。在线监测、巡视检查及专业检测形成基础状态信息，经综合判断后确定缺陷性质和处置等级，再结合设备重要程度、运行条件及检修资源形成任务安排[3]。检修完成后的试验数据、处理记录和设备状态重新进入设备档案，成为后续运行评价的依据。由此形成状态感知、信息判断、任务决策、检修执行和结果反馈相互衔接的管理关系，各环节前后依存而非孤立运行。

2 电力设备运检一体化管理运行风险识别

2.1 研判设备状态异常征兆

设备状态风险识别应建立在多源状态量的连续比对基础上。运行人员可将在线监测数据、巡视记录和专业检测结果按设备编号归并，重点跟踪温升、局部放电、绝缘电阻、介损、油色谱、振动及开关动作特性等参数[4]。单次异常不宜直接作为风险判据，需要同步结合设备负荷、环境温度、运行年限和历史缺陷，判断变化是否具有持续性、扩展性和趋势性。对不同时间段形成的数据，可按照日、周或检修周期进行趋

作者简介：许亚辉（1986-），男，本科，工程师，研究方向：配网运检。

势排序，观察异常是否具有阶段性集中、波动扩大或恢复后再次偏离等特征。若同一指标连续多个周期偏离基准值，或异常幅度随时间扩大，可据此提高风险关注等级。对同型号、同运行条件设备还可开展横向比较，分析个体设备与群体均值、历史稳定区间之间的偏差程度，减少仅依据单一阈值造成的判断偏差。

2.2 排查业务衔接风险节点

业务衔接风险识别应沿异常信息流转过程逐项核查。巡视发现异常后，重点检查记录中设备编号、发生时间、异常现象和初步判断是否完整，再核对信息是否按规定进入专业复核、缺陷定级和任务生成环节[5]。对于跨班组、跨专业任务，还需比较前后环节的设备状态、责任主体和任务内容是否一致，识别交接缺项、信息漏传、责任边界模糊和任务状态不同步等情况。排查时可结合任务时间轴，将上报时间、复核时间、定级时间和派单时间连续排列，判断是否存在异常停滞、重复退回或环节跳转。若同一缺陷在不同系统中存在处理状态、时间节点或责任信息不一致，还需对照原始记录和后续任务信息，判断业务流转中是否出现信息冲突、状态错位或责任转移不完整，并据此定位风险较集中的衔接节点。

2.3 判别检修执行偏差风险

检修执行偏差可通过既定计划与现场实际结果的对照进行判别。首先核查任务单和技术方案中的检修项目是否全部完成，重点识别关键部件拆检、参数调整和试验项目有无遗漏；其次对照技术要求检查现场实际工艺，包括操作顺序、紧固参数、绝缘处理和功能调试是否与方案一致。对检修过程中发生的临时调整，还应结合变更记录判断其是否经过必要的技术确认，避免将正常调整与执行偏差混为一类。作业结束后，再将试验数据、功能验证结果和复测状态与检修目标进行比较，并结合检修前基准值观察参数恢复程度。若关键项目未完成、工艺步骤发生明显偏离，或检修后主要参数仍未达到预期状态，则可判定存在执行偏差，并依据偏差发生位置、持续时间、涉及部件及对设备功能的影响范围确定其风险程度。

2.4 识别运检资源配置风险

运检资源配置风险识别应围绕任务需求与实际保障条件之间的匹配程度展开。检修任务生成后，可根据设备风险等级、作业项目、预计工时和专业交叉情况，对照班组人员数量、岗位资质、备品备件库存、专用工器具状态及计划停电窗口进行核查。高风险或跨专业任务重点检查一次、二次及辅助专业人员是否同时到位，关键岗位是否存在人员替补不足；备件则核对型号、参数、数量和库存状态，防止出现型号不符或临时缺件。试验仪器需检查校验有效期和可用状态，停电时间还应与工序先后、作业范围及恢复操作所需时间进行比对。若人员投入、备件准备或时间安排明显低于任务需求，或多专业作业时间相互冲突，可判定存在资源配置风险，并结合受影响的作业项目、设备等级和延期范围判断风险程度。

3 电力设备运检一体化优化管理与风险防控策略

3.1 校核设备状态基础数据

设备状态基础数据应纳入统一运检信息管理口径，由运行、巡视、检测和检修岗位围绕同一设备编号开展归集与校核[6]。在线监测值出现突升、突降或连续漂移时，先调取异常前后 30 min ～ 60 min 内的负荷、电压、环境温度和运行方式，检查采样周期、通信状态、传感器供电及测点编号是否一致；红外测温同步记录负载率、测距和测点位置，油色谱、局部放电、绝缘电阻、介损等结果则核对采样位置、仪器状态及前两次试验数据。异常值至少结合在线监测、巡视记录和专业试验中的两类信息交叉确认，同型号、同运行条件设备可进行横向比较。

运行、检测和检修记录采用统一字段管理，设备名称、间隔编号、缺陷部位、发现时间、运行工况、检测值和处理状态保持一致。人工录入数据实行录入与复核两级检查，关键参数与原始试验单、监测曲线逐项核对；数据修订保留原值、修正值、修改时间、责任人员和依据。连续性指标可按日、周或检修周期形成趋势序列，同一参数连续 3 个及以上监测周期偏离历史稳定区间时单独标记。不同系统出现设备状态不一致时，按照原始采集时间和审核后的专业检测结果统一最新状态，并同步更新状态评价和检修任务关联记录。

3.2 规范运检业务流转节点

运检业务按照“异常上报—专业复核—缺陷定级—任务生成—任务移交—结果回填”设置固定节点，各环节明确责任主体、办理时限、输入信息和输出结果。巡视人员发现异常后，在当班或规定时限内录入设备编号、异常部位、现场现象、负荷情况及影像资料；专业复核环节补充检测结果和缺陷等级，缺少关键字段的记录退回补充。一般缺陷纳入计划任务池，重要或发展较快的缺陷单独标识并提高流转优先级。跨专业任务统一使用同一任务编号，一次、二次及辅助系统分别列明工作边界、责任班组和前置条件。

任务移交时逐项核对设备状态、停电条件、作业

范围、协作班组和先后顺序，多班组连续作业应明确任务依赖关系。流转过程中出现延期、退回或范围调整时，在原任务中追加变更记录，不另建无关联任务。超过规定时限仍停留在同一节点的事项，可按每日或每班次检查处理状态；连续两次退回或多次转派的任务，重点核对责任接口和缺失信息。任务完成后回填处理结果、试验结论和设备最新状态，未彻底消除的缺陷保留原编号，并注明剩余事项和再次检查时间。

3.3 监督检修任务执行过程

检修任务进入现场后，应保持任务单、技术方案、现场记录和设备状态评价之间的一致性。作业前逐项核对设备名称、检修范围、停电区段、关键项目、工作票、安全措施和人员资质，专用工器具、试验仪器和备品备件按照项目清单逐件确认，需校验的仪器检查有效期，关键备件核对型号、参数和数量。工作负责人组织技术交底，明确作业顺序、控制点和禁止擅自变更的项目[7]。开关机构检查、导电连接紧固、绝缘处理、二次回路核查、保护功能试验等关键工序设置现场签认点，完成一项记录一项；确需调整工艺或扩大作业范围时，先记录调整原因和技术依据，再履行相应审批手续。

检修结束后按设备类型组织复测和状态再评价，不以工作票终结代替技术验收[8]。一次设备重点核对绝缘、接触状态和机械特性，二次设备检查回路、定值、信号和保护动作情况；在线监测装置同步观察检修后30 min～60 min内测点数据是否恢复稳定。复测结果与检修前异常值、历史基准和技术允许范围逐项比对，关键参数仍超限时不办理缺陷销项。验收结果、试验数据和设备最新状态同步回传运行端和设备档案，并继续关联原检修任务编号；设备恢复运行后的首个巡视周期仍保留本次检修任务标识，便于核对检修后状态是否稳定。

3.4 优化运检资源配置管理

运检资源配置可依据设备风险等级、检修项目复杂度和计划工期分级安排。一般单专业检修任务可提前1 d～3 d核对人员、备件和工器具，高风险或跨专业任务宜提前3 d～5 d完成资源确认。现场人员按工作负责人、专业作业人员、监护人员和试验人员分别配置，涉及一次、二次及辅助系统联合检修时，应至少保证各专业均有具备相应资质的人员到场。关键岗位可设置1名替补人员，避免临时缺岗造成任务中断。备品备件按照设备型号、技术参数和预计消耗量形成任务清单，常用易损件可按计划需求量增加10%～20%的机动储备，关键备件在作业前逐件核对型号、数量和完好状态。试验仪器、专用工器具及安全工器具应在作业前24 h完成清点，计量、测试类仪器同步检查校验有效期和电源状态。

停电窗口配置需结合检修工序、专业交叉和设备恢复时间综合确定。多班组连续作业时，可将各专业进场、交接、退出时间按30 min～60 min粒度细化，关键工序之间预留15 min～30 min交接时间，设备恢复、试验和验收可预留计划工期的10%～15%。同一周期内多项任务并行时，可按照设备风险等级、缺陷严重程度和停电影响范围确定资源优先级，高风险设备优先配置人员、关键备件和试验资源。任务范围扩大、缺陷等级上调或现场条件变化后，应重新核对人员数量、备件储备和剩余停电时间，不直接沿用原资源方案。

4 结束语

电力设备运检一体化管理的深化，关键在于保持状态信息、业务任务、检修执行和资源配置之间的连续联系，使设备异常能够被及时识别，管理责任能够准确承接，检修活动能够获得与任务需求相匹配的人员、备件和作业条件。风险控制还需依据设备状态和任务变化动态调整，减少数据失真、流程脱节、执行偏差和资源错配在运检链条中的累积。随着在线监测、状态评价和数字化运检手段不断完善，设备管理将更加依赖真实数据、规范流转、合理配置和现场反馈之间的协同关系。

参考文献：

[1] 张国顺，丁宗琦.新能源场站电力设备状态检修运维优化研究[J].电器工业，2026(07):118-123.
[2] 赵李鹏.变电站设备状态检修和运维一体化技术分析[J].通讯世界，2025,32(09):133-135.
[3] 周晟祺.电力变电设备状态检修技术及管理策略研究[J].电工材料，2025(03):106-109.
[4] 张玉超.大数据下智能变电站设备运维检修系统设计与实现[J].电力设备管理，2025(01):108-110.
[5] 金晓明.变电设备运检运维及检修一体化管控[J].电力设备管理，2024(15):140-142.
[6] 张玉超.大数据下智能变电站设备运维检修系统设计与实现[J].电力设备管理，2025(01):108-110.
[7] 朱泽继，吴毅力，王炳昱，等.特高压变电站设备检修安全风险评估与防控技术研究[J].电力设备管理，2025(01):223-225.
[8] 吕明利，向巴平措，平措次仁.变电站变压器检修安全风险评估与预测技术研究[J].电力设备管理，2025(01):226-228.

绿色施工理念下的建筑工程管理模式优化研究

张刘敏

（广东拓城建筑工程有限公司，广东 南雄 512400）

摘 要 在绿色低碳发展的持续推进下，建筑领域面临着绿色低碳转型的现实需求，而伴随工程建设规模的逐渐扩大，基于绿色施工理念的建筑工程管理模式也需要进一步优化。本文从绿色施工理念与建筑工程管理需求的契合关系入手，结合当前管理现状，探讨存在的现实问题，并进一步提出建筑工程管理模式优化路径，以期为推动建筑工程管理向精细化、协同化和低碳化方向发展提供参考。

关键词 绿色施工理念；建筑工程管理；智慧工地；施工组织设计；进度计划管理

中图分类号：TU71 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.031

0 引言

当前，全球可持续发展进程持续推进，我国也在绿色低碳转型进程中努力实现“双碳”目标。建筑工程作为支撑国民经济发展的核心支柱产业，长期以来为国家经济增长提供了关键支撑。随着建筑行业绿色低碳转型趋势的不断推进，如今的工程管理目标也得到了进一步拓展，以往相对稳定的质量、进度、成本和安全控制成为基础性要求，而节能降耗、污染防治、资源循环利用和生态环境保护等要求开始融入工程建设全过程中。虽然传统建筑工程管理模式在长期实践中形成了稳定的组织体系和过程控制方法，但其在当前绿色发展要求不断提高的背景下已经很难满足现阶段社会发展的需求。建筑行业在未来发展中需要积极引进全新的发展理念，推广绿色发展模式。因此，本文围绕绿色施工理念下建筑工程管理模式的优化展开研究，旨在为建筑工程绿色施工实践提供参考。

1 绿色施工理念与建筑工程管理模式优化的现实基础

1.1 绿色施工理念的发展概述

绿色施工理念是指在可持续发展思想基础上，以全面考虑建筑项目生命周期内对环境的影响为出发点，为实现资源高效利用与环境友好而实施的一种绿色、低碳发展的施工管理理念[1]。如今，规模快速扩张的基建发展阶段已经过去，新的发展要求让建筑行业更加注重质量提升、资源节约以及环境的友好发展。在资源约束不断增强以及环境保护要求持续提高的现实背景下，建筑施工活动开始被纳入资源利用效率和社会责任履行的综合评价体系之中。而在这一变化下，绿色施工理念在建筑工程领域的融入，将有望在保证工程建设基本目标的同时，降低施工活动对资源和环境造成的不利影响[2]。

从绿色施工理念的本质内涵上来看，绿色施工理念所具有的价值在于能够重塑建筑工程的管理目标和管理方式[3]。其要求施工管理不能只是为了完成工程任务和控制建设成本，而是应将节能、节水、节材、节地、环境保护和低碳施工等内容融入施工中的组织、现场管理、资源配置和过程评价之中，使建筑工程管理更多注重综合效益[4]。而基于绿色施工理念的引导，建筑工程将能够在提升施工效率和工程质量的同时，减少资源浪费和环境污染，推动施工现场管理由粗放控制向精细化、规范化和可持续方向转变，实现工程建设效益、资源利用效益和生态环境效益的协调统一。

1.2 当今时代发展下建筑工程管理需求与绿色施工理念的契合性分析

随着城乡建设绿色发展要求的不断强化，建筑行业原有依赖规模扩张和资源投入的建设方式受到一定的约束，建筑行业的工程管理也需要为了满足绿色低碳转型要求而进一步调整管理目标和运行方式。2021 年中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于推动城乡建设绿色发展的意见》提出，要推动城乡建设绿色发展，改变“大量建设、大量消耗、大量排放”的建设方式，这说明建筑工程管理需要对资源消耗、环境影响和建设过程实施有效的综合控制[5]。同时，2022 年住房和城乡建设部、国家发展改革委印发的《城乡建设领域碳达峰实施方案》也进一步提出了要推动城乡建设方式绿色低碳转型，对建筑节能、垃圾资源化利

作者简介：张刘敏（1988-），女，专科，助理工程师，研究方向：建筑工程管理。

用和能源资源利用效率提出了更高要求[6]。在这一系列政策背景下，建筑工程管理面临的是如何在工程建设全过程中实现节能降耗、污染防治、资源循环利用和低碳控制。

绿色施工理念与当前的建筑工程管理需求具有较强的契合性。建筑工程管理包括施工中的策划、材料采购、机械调度质量安全控制和竣工评价等环节，具有统筹资源、协调主体和控制过程的功能；而绿色施工理念是以生态友好为核心，根据不同地区的实际情况，在能源、土地、建材和水资源利用等方面开展节约利用工作，其应用到建筑施工中可以有效降低施工对环境的影响，使工程建设活动更加符合绿色低碳发展要求[7]。由此来看，绿色施工理念既回应了当前建筑行业绿色转型的现实要求，也为建筑工程管理模式优化提供了明确方向，能够推动工程管理由传统粗放型控制向精细化、协同化和低碳化方向发展。

2 绿色施工理念下建筑工程管理模式的现状分析

2.1 建筑工程管理模式的实施现状

如今，建筑工程管理已经开始逐步吸收绿色施工理念，部分施工企业在项目管理过程中将节能降耗、扬尘控制、噪声治理、建筑垃圾分类、绿色建材应用等内容融入了现场管理范围中。与以往以完成工程建设任务为目标的管理方式相比，当前的建筑工程管理在制度建设、现场检查、材料控制和技术应用方面已经出现一定转变。施工组织设计中开始增加更多关于绿色施工的相关内容，现场管理中也更加重视文明施工、环境保护和资源节约，这意味着绿色施工理念逐渐从外部的要求进入建筑工程管理体系设计之中。

然而，从实际运行情况看，绿色施工理念在建筑工程管理中的融入程度仍然不够深入。虽然不少项目设置了绿色施工目标，也配备了相应的现场管理措施，但整体管理体系还是沿用以往以进度、质量、成本和安全控制为主的传统体系，绿色施工更多充当辅助性的管理内容。甚至部分项目在前期策划阶段对绿色施工目标考虑不足，导致现场执行时主要依靠检查和整改的方式来推动，这也就相应缺少了贯穿策划、采购、施工、验收和评价全过程的连续管理机制。由此可见，当前建筑工程管理模式表面上已经具备了引入绿色施工理念的基础，但尚处于传统管理转向绿色化、精细化管理的过程性阶段中。

2.2 建筑工程管理模式中存在的主要问题

在建筑工程管理中，在施工目标、责任落实以及数据应用等方面还存在着一些影响绿色施工要求充分转化为稳定的现场管理效果的问题。

2.2.1 绿色施工目标与项目生产计划结合不够紧密

当前部分建筑工程所设置的绿色施工目标与项目实际生产计划之间的结合并不紧密。在项目的实际推进过程中，现场管理仍容易围绕节点工期、材料进场等常规环节展开，绿色施工要求多被安排到了文明施工检查、环保验收或阶段性整改中，未能真正进入进度计划的编排和施工资源调度过程中。且由于绿色施工目标缺少与施工节点同步安排的相关机制，导致扬尘控制、噪声控制、建筑垃圾减量等内容容易与现场生产安排脱节。一旦面临工期压力增大或多个工种交叉作业时，绿色施工措施就需要让位于施工效率，导致绿色管理要求形同虚设。

2.2.2 绿色责任传导不足

建筑工程管理普遍具有多主体协同的特征，需要材料供应商、劳务分包、专业分包等主体的共同参与。但在实际的项目管理中，绿色施工责任多被集中到了项目部或安全文明施工管理岗位，而与其他分包作业和供应链环节关联性不大。这也致使部分项目在绿色建材选用、材料包装回收等方面缺少统一的约束，最终影响到的是绿色施工要求在各个环节间的衔接不足问题。而且由于不同单位的管理标准和执行习惯有着不小的差异，如果项目部只是从现场检查层面提出要求，而没有将绿色责任纳入合同条款、验收标准和结算评价中，就容易出现项目层面有制度，但作业层面却难以落实的问题。

3 绿色施工理念下建筑工程管理模式优化路径

为了提升绿色施工理念在建筑工程管理中的落实效果，从计划管理、现场管控和数据整改三个方面提出优化路径，以此促进建筑工程管理模式优化。

3.1 将绿色施工要求纳入施工组织设计与进度计划管理

施工组织设计和专项施工方案编制决定了整个项目后续的施工部署、资源配置和现场管理方式，因此为了避免绿色施工要求仅仅成为原则性表述，应将绿色施工管理落实到施工组织设计、月度施工计划和周施工安排中。对此，项目部在编制施工组织设计时，应结合项目的工程规模、场地条件、周边环境、施工阶段和主要工序，确定出施工用水用电控制、材料堆放与周转使用、土方覆盖等具体的要求，并将这些内容同步纳入月度施工计划和周施工安排中，如表1所示。

在现场施工推进过程中，由生产经理、技术负责人和安全环保管理人员负责在施工例会中共同核对绿色施工措施与作业计划是否一致。核对内容包括查看材料进场批次是否与现场堆放条件匹配，机械设备使用时间是否与施工任务相符，裸土覆盖、车辆冲洗、喷淋

表 1　绿色施工要求纳入月度施工计划和周施工安排示例

施工阶段	月度施工任务	月度绿色控制要求	周施工安排
土方开挖	完成一区、二区土方开挖及外运	裸土覆盖到位，出入口车辆冲洗，运输车辆封闭	明确每日外运路线、冲洗责任人、洒水频次
基础施工	完成垫层、防水、钢筋及混凝土施工	控制泥浆外流，规范钢筋加工区用电，及时清理废料	每周核对排水沟、沉淀池、钢筋余料回收情况
主体结构	完成对应楼层钢筋、模板、混凝土作业	控制模板木方损耗，减少机械空转，分类堆放周转材料	按楼层安排材料进场批次、模板周转区和余料回收点
二次结构	完成砌筑、抹灰及管线预埋	控制砂浆和砌块损耗，减少楼层建筑垃圾堆积	每周明确砂浆用量、砌块领用量和楼层清运时间
装饰装修	完成墙地面、吊顶及安装配合作业	控制切割粉尘，分类回收包装物，做好成品保护	设置集中加工区，明确装修垃圾清运和包装回收要求
机电安装	完成管线安装、设备安装及调试准备	控制管材边角料，规范临时用电，减少调试能耗	每周核对管材加工、余料回收、设备试运行计划

降尘、楼层垃圾清运等措施是否随施工进度同步落实。

3.2　加强分包单位、材料设备进场与现场作业的绿色管控

为了更进一步提高绿色施工要求在现场作业层面的执行效果，项目部应把绿色施工要求落实到分包进场、材料验收、设备使用和作业面管理等全过程中。其中，在分包单位进场前，项目部要结合其具体的施工内容进行绿色施工交底，确定出每一项的材料限额领用、作业面清理、余料回收、垃圾分类、湿作业控制、夜间施工管理和文明施工要求，并将执行情况记录到日常检查和月度评价中。材料进场时，物资部门需要核对规格、数量和质量，并进一步关注材料是否符合绿色建材选用要求、包装是否便于回收、堆放条件是否满足防潮防损要求，以此来减少因二次搬运、堆放不当和领用失控造成的损耗。同时，在施工过程中，项目部需要以限额领料、余料退库、建筑垃圾清运记录、分包作业面检查等方式，把绿色施工要求落实到具体班组和具体工序中，使绿色管理进入现场实际作业环节中。

3.3　利用智慧工地数据完善现场检查与整改销项管理

在当前建筑行业数字化转型不断推进的背景下，智慧工地平台在各个行业领域中都有所应用，而在建筑工程管理中，智慧工地平台和在线监测设备也可以在现场管理中提供更加直接的数据支撑。在具体的实施中，项目部可将扬尘在线监测、噪声监测、视频监控等信息纳入日常管理中，由安全环保管理人员结合现场巡查结果进行分析，并在项目例会中通报和处理异常情况。当扬尘数据升高时，结合当天施工内容、裸土覆盖、道路清扫等情况查找原因；或当用电量明显增加时，应核对大型机械运行、夜间照明、加工区设备使用和临电线路管理情况。一旦发现问题后，就要立即形成整改通知，并相应确定出责任班组、整改内容和完成时限，整改完成后再以现场复查和数据变化的方式进行销项确认。

4　结束语

绿色施工理念下的建筑工程管理模式优化，是建筑工程管理适应绿色低碳发展要求的重要方向，也是提升管理质量、转变建设方式的契机。在现代建筑工程建设中，建筑工程管理不只是要控制质量、进度、成本和安全，还要将资源节约、污染防治和低碳施工融入工程的全过程管理中。而基于完善施工计划管理、加强现场作业管控以及利用智慧工地数据推动整改，将能够有效提升绿色施工管理的执行力，推动建筑工程管理向精细化、协同化和低碳化方向转变，最终为建筑行业高质量发展提供支撑。

参考文献：

[1]　吴伟.绿色施工理念下的建筑工程管理模式[J].中国住宅设施,2025(04):121-123.
[2]　魏朝军.绿色施工理念下的建筑工程管理模式创新路径[J].中国房地产业,2025(34):46-49.
[3]　尚中山.绿色施工理念下的建筑工程管理模式探析[J].建材发展导向,2025,23(07):103-105.
[4]　赵捷琛.绿色施工理念下的工程管理模式创新路径[J].中国战略新兴产业,2025(08):90-92.
[5]　中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于推动城乡建设绿色发展的意见》[J].云南农业,2022(03):9-12.
[6]　本刊编辑部.大力推进城乡建设领域绿色低碳发展[J].建设科技,2024(21):1.
[7]　江贞.绿色施工理念下建筑工程管理模式研究[J].新城建科技,2025,34(05):190-192.

10 kV配电线路改造工程施工组织管理优化研究

蔡志峰

（广东立信电力服务有限公司，广东 佛山 528500）

摘 要 针对10 kV配电线路改造中施工计划与现场节奏衔接不紧、资源调配精度不足、停电作业组织偏粗及现场变动反馈滞后等情况，本文围绕施工组织管理开展优化研究。结合线路改造施工特点，将作业区段与停电批次对应，采用滚动计划细化现场任务，并依据施工节点调整人员、机具和材料配置；以计划恢复送电时间为约束倒排关键工序，设置异常触发后的任务切换方式。在此基础上，从责任落实、技术过程控制和应急资源配置方面完善保障措施，形成适用于10 kV配电线路改造的施工组织管理方法。

关键词 10 kV配电线路；线路改造；施工组织；停电作业；动态调度

中图分类号：TM72；TU721 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.032

0 引言

10 kV配电线路改造通常需要在既有电网运行条件下组织施工，停电时间有限，现场作业又常与原有线路和周边环境相互影响[1]。在施工过程中，拆除旧线、立杆架线、设备更换和送电验收前后联系紧密，一处延误就可能影响后续安排。部分工程仍沿用较为固定的施工计划，现场情况发生变化后调整不够及时，人员和机具也容易出现等待或重复调配[2-3]。针对上述情况，本文从施工计划、资源安排、停电工序和现场调度等方面分析现有组织方式，并提出相应优化措施，同时完善责任分工、技术支撑和应急保障，以提高10 kV配电线路改造施工组织的协调性和执行效率。

1 10 kV配电线路改造工程施工组织管理现状

1.1 施工计划衔接不足

10 kV配电线路改造通常先确定总体工期，再向周计划和日作业计划分解。现有计划编排更多围绕工程量展开，对停电批次的嵌入还不够细。进入现场后，同一施工周期内不同区段的作业时间差异较大，原有计划常需根据停电安排重新调整。部分任务虽然已列入周计划，但真正能够实施的时间仍取决于现场许可和前序完成情况[4]。计划调整后，相关节点未能同步更新，导致阶段计划与当日安排之间存在脱节，滚动修正的及时性还有不足。

1.2 资源配置不够精准

线路改造所需资源会随施工阶段变化。杆塔作业对起重设备依赖较高，架线阶段更关注牵引机具的连续使用，设备安装则需要专业人员及时到位。现有资源安排多按班组固定配置，较少根据区段进度动态调整。某一作业点结束后，设备转场时间没有充分纳入后续安排，容易造成下一作业点等待。材料供应也存在类似情况，部分物资按批次集中配送，具体到杆位时仍需再次分拣。资源配置尚未完全跟随实际作业节奏变化，影响现场周转效率。

1.3 工序组织仍需细化

10 kV配电线路改造各工序前后联系紧密，前一道作业完成后，还要满足下一环节的进入条件。当前现场组织已形成较明确的施工顺序，但对工序交接的判断仍偏重“是否完成”，对“是否具备继续施工条件”关注不足。旧设施拆除结束后，后续安装仍需确认作业位置是否满足要求；设备安装结束后，也要复核接线条件是否具备。上述确认工作若安排在下一工序开始后再进行，就会增加现场等待时间。停电前准备工作与停电后作业之间的边界仍需进一步细化。

1.4 现场变动响应偏慢

线路改造直接面对既有设施，现场信息需要在施工过程中不断核实。在实际作业中，原有设备状态与前期资料存在差异的情况较为常见，现场人员发现问

作者简介：蔡志峰（1979-），男，本科，工程师，研究方向：电力管理、电力工程施工管理。

题后，需要按管理流程逐级反馈。现有处理方式中，不同类型问题的响应路径区分不够清楚，一般事项也可能进入较长的确认流程[5]。处理意见形成后，施工安排还需再次传达到班组，信息传递存在时间差。现场条件已经发生变化，而原有任务仍按既定计划保留，调度调整往往慢于实际施工节奏。

2 10 kV 配电线路改造工程施工组织管理优化策略

2.1 分段编制滚动计划

施工计划不再直接按总工期顺序下达，而是先建立区段与停电窗口的对应关系。具体编排方式如图 1 所示。项目部依据改造范围划分杆位区段，再结合现场作业界面确定各区段的施工边界；停电安排则作为时间约束，明确每个批次的允许作业时段和计划送电节点。在此基础上建立“区段—停电窗口”任务映射，将每个区段在不同停电窗口内的施工内容生成独立任务包。任务包对应具体作业位置，写明计划工作量，并设置进入条件和完成节点，未满足条件的任务不得提前进入日计划。

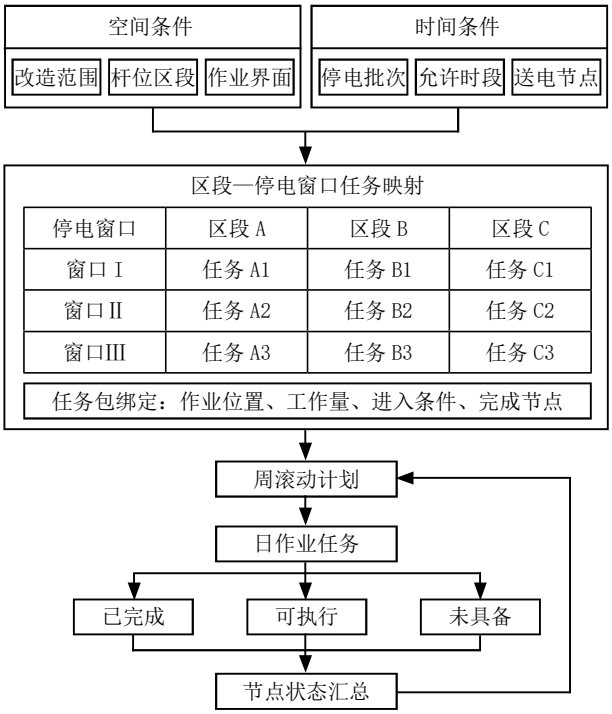


图 1 10 kV 配电线路改造分段滚动计划组织模型

周计划从任务映射表中提取具备实施条件的任务包，再结合当期停电安排形成日作业任务。现场执行后，按杆号或设备编号更新节点状态，将任务划分为已完成、可执行和未具备三种状态。状态信息每日汇总，已完成任务退出后续计划，可执行任务优先进入下一作业日，未具备任务继续保留并复核启动条件。周计划依据节点状态重新滚动编排，不改变已经进入施工状态的任务，使后续安排始终对应实际完成位置和有效停电窗口。

2.2 动态配置施工资源

资源配置以已下达的日任务为依据，不按班组长期固定占用机械和专业人员。项目部在周计划确认后核算各区段工作量，先确定施工班组的基本配置，再把吊装设备、牵张机具和试验仪器作为共用资源集中调度。杆塔组立结束后，吊装设备随即退出原区段，转入下一具备施工条件的杆位；架线任务未达到启动条件时，牵张设备不提前进场占位。专业人员同样按照工序节点调配，试验人员在设备安装接近完成时进场，不与安装班组长期绑定。

材料按施工区段形成领用清单，导线、金具和开关设备对应到杆位或设备编号后配送。当天未投入施工的材料保留在项目材料点，不随班组反复转运。资源调度以“任务已具备条件”为启用标准，以“本工序完成”为释放节点。表 1 给出典型工序的基准配置，实际使用时按照当日工作量增减，不将表中数量作为固定班组编制。

2.3 倒排停电作业节点

停电作业不再从许可开始时刻顺序向后安排，而是先确定计划恢复送电时间，再反向核定各关键节点。恢复送电前预留验收和操作时间，据此确定试验最迟结束时刻；再向前推算设备接线、导线连接和旧设施拆除的完成节点。每道工序均给出最迟交接时间，班组接收任务时同步掌握本工序可占用的有效时长。作业过程中以节点时间控制推进，不以单纯完成工程量作为停电阶段的调度依据。

停电前一天完成杆位复核和工器具检查，当日停

表 1 典型施工区段资源动态配置参数

施工工序	基准作业量	班组人数 / 人	主要机械配置	单班计划完成量
杆塔组立	4 基	6	汽车起重机 1 台	4 基
导线展放	1.80 km	8	牵引机 1 台、张力机 1 台	1.80 km
开关设备安装	4 台	5	高空作业车 1 台	4 台
接线试验	6 处	4	绝缘测试仪 1 套、核相设备 1 套	6 处

电前将材料送至指定作业点。工作许可下达后直接进入拆旧作业，不再安排现场清点等准备事项。拆旧完成即进行位置确认，满足条件后转入安装；安装结束后立即完成接线复核，再移交试验人员。前一工序超过计划节点时，现场负责人依据剩余停电时间压减可后移的非送电关键作业，不压缩试验和验收时段。未达到送电条件的新增工作转入下一停电批次，避免临近送电节点继续增加施工内容。

2.4 异常触发动态调度

现场调度预先设定任务切换条件，不等异常事项全部处理完毕后再重新排计划。施工班组发现原设备参数与记录不符、作业通道临时受限或既定作业面不能继续施工时，立即暂停受影响任务，并在现场记录中标明具体杆号和当前完成状态。施工负责人根据问题是否影响停电范围及恢复送电节点决定后续调度方式。能够在现场解决的问题直接处理，当前区段仍可继续施工；需要技术确认的问题暂时封存原任务，人员和共用机具转入已具备条件的备用作业面。

备用任务从当日计划中的待执行项目选取，不临时增加计划外工作。原任务处理完成后，先核对剩余作业量和可用时间，再决定当日恢复还是转入下一批次。涉及停电范围变化的事项不在现场直接调整，原任务保持暂停状态，待新的作业条件确认后重新进入滚动计划。每次任务切换均记录暂停时间、转移位置和恢复节点，日计划结束时据此修正下一工作日安排，使现场变化直接进入调度过程，而不是停留在信息上报环节。

3 10 kV配电线路改造施工组织优化保障措施

3.1 完善施工组织责任体系

施工组织责任按照项目管理层、专业负责人和作业班组逐级落实。项目负责人统筹停电批次、施工区段及总体节点，重点处理跨专业、跨区段的计划调整；专业负责人负责本专业作业条件核查，确认人员、机具和施工面是否满足开工要求，并在工序交接时签认完成状态。班组长依据日任务单组织现场作业，记录实际开工、完工及暂停时间，不自行调整计划外任务。对于需要临时转移作业面的情况，由施工负责人统一下达调度指令，避免多个班组分别改变施工顺序。每日作业结束后汇总节点完成情况，未完成事项明确责任人和后续处理时限，再纳入下一周期计划。责任划分以具体施工节点为界，不以部门职责简单代替现场责任。

3.2 强化施工技术过程支撑

技术管理从施工准备阶段延伸至工序交接。开工前按照杆号和设备编号复核设计资料，对改造范围内的接线关系、设备参数及现场位置逐项确认，发现图纸与实物不一致时先完成技术核定，再下达对应任务。施工方案按区段编制，停电作业内容单独列出操作顺序和限制条件，技术交底直接对应当天作业位置，不采用整条线路一次性交底的方式。关键工序开始前，由技术负责人核查前序完成状态，重点确认拆旧后的安装条件、设备固定情况和接线条件；达到要求后再移交下一班组。施工过程中形成的变更记录同步标注到施工图和任务单，避免后续班组继续使用旧版本资料。涉及送电前检查的内容，由施工记录、试验结果和现场复核相互对应，缺项内容在进入验收环节前补齐。

3.3 健全应急资源保障机制

应急资源按照现场高频中断因素提前配置，不单独设置大规模备用队伍。项目部保留一定数量的机动人员，用于临时补充关键作业点；常用工器具和易损件设置备用量，集中存放在靠近主要施工区段的位置。吊装、运输等共用机械安排备用调配渠道，主设备无法继续使用时直接调用邻近作业点设备，不重新启动采购或租赁流程。关键材料按杆位和设备编号核对后预留少量备品，对现场更换频率较高的金具、连接件等单独管理。遇到停电时间调整或局部作业受阻时，优先调用已备案资源，调用过程同步记录去向和占用时间，作业恢复后及时补充备用量。

4 结束语

10 kV配电线路改造施工受既有线路运行条件和停电时间限制，施工组织需要落实到具体区段及作业节点。本文将总体计划逐级分解到现场任务，以施工进展修正后续安排，并按照工序实际需求调配施工资源；停电阶段以恢复送电节点反向控制作业时序，现场条件发生变化后及时切换可执行任务。在实施层面，进一步明确节点责任，规范技术资料核验和工序交接，同时配置必要的应急资源。该组织方式适用于既有10 kV线路分段改造及设备更新施工，后续可结合更多工程数据继续修正任务时长和资源配置参数。

参考文献：

[1] 崔立可.10 kV电力线路迁改施工风险点和应对措施研究[J].科技资讯,2026,24(11):223-225,229.
[2] 林志聪.电力电气工程中线路安装与施工技术研究[J].中国设备工程,2026(17):196-198.
[3] 张嘉伟.能源发展公司电网改造工程技术管理与实践成效[J].电力设备管理,2026(14):229-231.
[4] 姚维为.TL区10kV线路改造工程项目安全管理评价研究[D].太原:太原理工大学,2024.
[5] 曹旭.不中断运营条件下地铁安防系统改造施工技术与全流程管理[J].工程技术研究,2026,11(10):132-134.

公路工程施工现场安全风险辨识与防控措施研究

李 浩

（四川镇广高速公路有限责任公司，四川 巴中 636600）

摘 要 公路工程施工具有线长面广、工序复杂、交叉作业多、环境条件多变等特点，施工现场安全风险辨识与防控是保障工程顺利推进的关键。本文从项目管理方视角出发，梳理公路工程施工现场安全风险管理必要性，系统辨识高处作业、起重吊装、基坑隧道、临时用电与机械作业等关键环节的安全风险，从完善管理体系、强化风险分级管控、加强关键工序技术管控、推进信息化智能化四个方面提出防控措施，以期为公路工程施工现场安全管理提供参考。

关键词 公路工程；施工现场；安全风险辨识；风险防控；安全管理

中图分类号：U415.7 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.033

0 引言

公路工程项目作为基础设施建设中的关键部分，因其涉及路基、桥梁、隧道及路面等多专业领域而呈现出复杂性特征。其显著特点包括施工线长、作业节点密集、工序衔接频繁以及现场环境复杂多变，这些因素共同增加了安全管理的难度。在此背景下，项目建设方作为工程实施的核心主体，在施工现场风险管控中发挥着重要作用。深入探究施工现场的安全风险评估方法及其防控对策，对优化公路工程项目的安全管理体系并有效预防潜在事故具有重要意义。

1 加强施工现场安全管理的必要性

施工现场安全管理是保证公路工程顺利进行的重要因素，它在各方面都有重要的作用。由于公路工程项目投资规模大、施工周期长、参与主体多，所以在安全管理中任何疏忽都可能导致人员伤亡、经济损失、工期延误等问题，从而影响项目整体进度和质量目标的实现[1]。从法律层面来讲，《建筑法》《安全生产法》以及相关行政法规均对工程建设领域安全生产管理作出了明确的规定，要求建设单位切实履行安全生产主体责任并建立完善的监管机制，否则将会受到行政处罚甚至信用降级等严厉的后果。公路建设由原来的粗放式向机械化、工厂化、智能化转变，新技术的应用给传统管理模式提出了更高的要求，也给安全管理带来了新的挑战。从社会责任角度来说，安全生产既是保障劳动者权益的手段，又是评价企业社会价值的指标之一。加强施工现场的安全管理，既是应对复杂风险环境的战略选择，也是实现可持续发展的必要途径。

2 公路工程施工现场安全风险辨识

2.1 高处作业风险辨识

高处作业是公路工程施工中最常见的高风险作业，主要包括桥梁墩柱模板安装与拆除、挂篮悬臂浇筑、高边坡防护、脚手架搭设与拆除、跨线施工等。风险辨识应重点关注以下几个方面：（1）作业人员资质与培训，高处作业人员必须持证上岗，未经培训或考核不合格人员不得上岗；（2）安全防护设施，安全带、安全网、防护栏杆、操作平台等防护设施是否齐全有效，安全带是否高挂低用；（3）作业环境，六级以上大风、暴雨、大雾等恶劣天气是否停止高处作业，夜间施工照明是否充足；（4）交叉作业，上下层同时作业时是否设置隔离防护层，是否有专人指挥协调[2]。

桥梁挂篮施工是高处作业风险最为集中的环节，挂篮拼装、前移、混凝土浇筑过程中均存在坠落和垮塌风险。风险辨识应重点检查挂篮设计验算、锚固系统、限位装置、行走轨道等关键部位，挂篮前移时是否对称同步、是否有专人指挥，混凝土浇筑是否对称均衡。高边坡作业应重点辨识边坡稳定性，检查坡面是否有危石、裂缝，作业前是否进行排险，是否设置警戒区和警示标志。

作者简介：李浩（1992-），男，本科，助理工程师，研究方向：安全管理。

2.2 起重吊装作业风险辨识

起重吊装作业在公路工程桥梁施工、构件安装、材料转运中广泛应用，风险主要来自起重机失稳、吊物坠落、钢丝绳断裂、指挥失误等。风险辨识应重点关注：一是起重机选型与站位，起重机额定起重量是否满足吊装要求，站位地基是否坚实平整，支腿是否全部伸出并垫实；二是吊索具检查，钢丝绳、吊钩、卡环等是否有断丝、磨损、变形，是否在检验有效期内；三是吊装方案，大型构件吊装是否编制专项方案并经过审批，是否进行技术交底；四是指挥信号，指挥人员是否持证上岗，信号是否统一明确，起重机司机与指挥人员是否配合默契。

预制梁架设是公路工程起重吊装的关键工序，风险等级高。风险辨识应重点检查架桥机的设计验算、安装验收、试吊检验，架桥机过孔时是否对称操作、是否有专人监护，运梁车轨道是否平整牢固，梁体吊装是否四点平衡、是否有溜绳控制。跨既有线吊装还应辨识对既有线路运营的影响，是否制定专项防护方案，是否与运营管理部门协调，是否设置防护棚架和驻站联络人员。

2.3 基坑与隧道施工风险辨识

基坑施工风险主要包括边坡坍塌、坑底隆起、管涌、流砂等，在软土地区、地下水丰富地区尤为突出。风险辨识应重点关注：（1）基坑支护设计，支护形式是否与地质条件匹配，是否经过计算验算；（2）降排水措施，降水井布置是否合理，降水效果是否满足开挖要求，是否对周边建筑物造成影响；（3）基坑监测，是否按规范布设监测点，监测频率是否满足要求，监测数据是否及时分析预警；（4）开挖顺序，是否遵循“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”原则[3]。

隧道施工风险主要包括塌方、涌水突泥、瓦斯爆炸、岩爆等，地质条件复杂地段风险更高。风险辨识应重点关注：一是地质超前预报，是否采用TSP、地质雷达、超前钻探等手段查明前方地质情况；二是支护及时性，开挖后是否及时施作初期支护，支护参数是否与围岩级别匹配；三是监控量测，拱顶下沉、周边收敛等监测数据是否稳定，是否有突变迹象；四是通风与瓦斯检测，隧道通风是否满足要求，瓦斯隧道是否配备检测设备和防爆电器，是否严格执行瓦斯检查制度。

2.4 临时用电与机械作业风险辨识

临时用电是公路工程施工现场的基础性工作，也是触电事故的主要源头。风险辨识应重点关注：其一，配电系统，是否采用三级配电两级保护，配电箱是否做到“一机一闸一漏一箱”，漏电保护器是否灵敏有效；其二，线路敷设，电线是否架空或穿管保护，是否有拖地、泡水、破损情况，过道电线是否有防护；其三，接地接零，设备金属外壳是否可靠接地，重复接地是否符合要求；其四，用电管理，是否有专人负责临时用电管理，是否定期检查维护，作业人员是否掌握用电安全知识。雨季施工还应重点辨识配电箱防雨、线路绝缘等情况。

机械作业风险涉及挖掘机、装载机、压路机、摊铺机、拌和站等各类施工机械。风险辨识应重点关注：（1）设备状态，机械设备是否定期保养，制动、转向、灯光、喇叭等安全装置是否齐全有效，是否存在带病作业；（2）操作人员，是否持证上岗，是否严格执行操作规程，是否有酒后上岗、疲劳作业情况；（3）作业环境，机械作业范围内是否有人员逗留，倒车时是否有专人指挥，夜间作业照明是否充足。公路工程施工现场主要安全风险辨识汇总如表1所示。

表1 公路工程施工现场主要安全风险辨识表

风险类别	主要作业环节	典型风险因素	风险等级
高处坠落	墩柱施工、挂篮浇筑、高边坡作业	防护缺失、违章作业、恶劣天气	重大
物体打击	交叉作业、爆破、吊装	高空落物、飞石、物料坠落	较大
坍塌	基坑开挖、隧道施工、支架搭设	支护不足、地质不良、超挖	重大
机械伤害	土石方、路面施工、构件安装	违章操作、设备故障、防护缺失	较大
触电	临时用电、设备维修	线路破损、漏电保护失效、违章用电	一般
起重伤害	预制梁架设、构件吊装	起重机失稳、吊索断裂、指挥失误	重大

如表1所示，高处坠落、坍塌、起重伤害被辨识为重大风险，是安全管控的重点对象；物体打击、机械伤害为较大风险；触电为一般风险。风险辨识结果为后续分级管控提供了依据。

3 公路工程施工现场安全风险防控措施

3.1 完善安全管理体系与责任落实

项目管理主体要健全安全生产保障体系，设立专门的安全生产组织机构，确定项目经理为安全生产的

第一责任人。必须配备专职安全管理人员，形成横向到全员、纵向到基层的安全监管网络。制定并落实全员参与的安全职责分配机制，签订责任协议细化任务分工，实行定期考核与结果挂钩的考核激励制度。完善系统化的安全管理规范体系，保证各项操作有章可循、有章可依。

加强员工安全教育培训，新入场人员必须经过三级安全教育，特种作业人员必须经过专业培训并取得相应资格证书后方可上岗。应定期开展安全知识竞赛、应急演练等活动，提高全体员工的安全意识和应急处置能力。

3.2 强化风险分级管控与隐患排查

推行风险分级管控机制，根据风险辨识结果，将安全风险分为重大、较大、一般、低四个等级，实行差异化管控。重大风险由项目负责人牵头管控，编制专项施工方案并组织专家论证，设置警戒区域和警示标志，安排专人现场监护；较大风险由部门负责人管控，制定专项防控措施；一般风险由班组管控，落实岗位安全职责；低风险由岗位人员日常注意。建立风险动态更新机制，工程进展、环境变化时及时重新辨识、评价风险[4]。

深化隐患排查治理，建立日常排查、专项排查、综合排查相结合的隐患排查体系，日常排查由班组和安全员每日进行，专项排查针对高处作业、起重吊装、隧道施工等高风险环节定期开展，综合排查由项目领导小组每月组织。对排查出的隐患建立台账，实行定人、定时、定措施的整改，整改完成后复查销号，形成闭环管理。

3.3 加强关键工序安全技术管控

对高处作业、起重吊装、基坑、隧道等关键工序加强安全技术管控。高处作业严格执行高处作业审批制度，作业前检查安全防护设施，作业中安排专人监护，恶劣天气停止作业；推广使用装配式操作平台、防坠器等先进防护装备，提高本质安全水平。起重吊装方面，大型吊装编制专项方案并审批，吊装前进行试吊，作业中统一指挥、信号明确，起重机严禁超载、斜拉。

基坑施工方面，严格按方案开挖和支护，加强基坑监测，发现异常立即停工处置。隧道施工方面，坚持“先预报、短进尺、弱爆破、强支护、早封闭、勤量测”原则，根据地质情况动态调整支护参数，瓦斯隧道严格执行“一炮三检”和“三人连锁放炮”制度。临时用电方面，由专业电工负责安装维护，定期检测漏电保护器，严禁私拉乱接。机械作业方面，实行设备进场验收和定期保养制度，操作人员持证上岗，严禁违章操作。

3.4 推进安全管理信息化与智能化

利用信息化、智能化技术提高安全管理的效能。在高处作业面、起重吊装区、隧道洞口、基坑周边等重要区域安装摄像头，24 小时不间断地对施工现场进行监控，管理人员可以使用手机或者电脑随时随地查看现场情况。推广使用人员定位系统，给作业人员佩戴定位芯片，实时掌握人员分布情况，隧道等封闭空间可以进行人员进出登记以及遇险报警[5]。

采用BIM技术对施工方案进行模拟以及安全交底，利用三维模型把施工工序和风险点直观地表现出来，提高交底的效果。采用智能安全帽，集定位、通话、报警、摄像等功能于一身，作业人员在作业过程中如果遇到危险可以立即发出警报，管理人员接到报警信息后可以立即做出处理。用无人机对高边坡、大跨度桥梁等区域开展安全检查工作，可以改善检查的效率以及范围。创建安全管理信息平台，把风险管控、隐患排查、教育培训、应急管理等纳入其中，达成安全数据的集中管理与分析应用，给安全决策提供数据支撑。

4 结束语

围绕公路工程施工现场安全风险辨识与防控，本文从项目管理方视角梳理了安全风险主要类型及管理必要性，系统辨识了高处作业、起重吊装、基坑隧道、临时用电与机械作业等关键环节的风险，从管理体系、风险分级管控、关键工序技术管控、信息化智能化四个方面提出了防控措施。实践表明，系统的风险辨识和有效的防控措施可显著降低安全事故发生率。未来可进一步深化人工智能、物联网等技术在安全管理中的应用，提升风险预判和智能防控水平。

参考文献：

[1] 许俊.工程施工现场安全风险分级管控与隐患治理研究[J].中华建设,2026(07):66-68.
[2] 钱鲲.公路工程施工风险可视化管理方案研究[J].交通企业管理,2026,41(04):131-134.
[3] 何旭阳,夏志彬.公路工程施工现场安全风险管控技术分析[J].城市建设,2026(18):130-132.
[4] 张军军.公路工程施工管理中的质量风险防控[J].汽车画刊,2026(06):209-211.
[5] 郁乃斌.公路施工项目管理风险识别与控制策略综述[J].时代汽车,2026(13):190-192.

水利工程施工质量风险成因及精细化管控体系构建研究

肖圣春，宋　晨

（宿迁市苏水工程检测有限公司，江苏 宿迁 223800）

摘　要　水利工程具有施工周期长、露天作业多、结构体系复杂、受自然环境制约强的显著特点，施工质量直接关系到防洪安全、水资源调度与民生保障效益。当前水利施工普遍存在粗放式管理模式，质量隐患隐蔽性强、诱因多元，极易引发渗漏、沉降、裂缝、结构失稳等工程病害，影响工程服役寿命。为破解传统质量管理流程松散、责任模糊、管控滞后等问题，本文从环境、人员、材料、技术、管理五个维度剖析施工质量风险深层成因，构建全流程、标准化、可溯源的精细化质量管控体系，提出适配水利复杂工况的落地举措，以期为提升水利工程施工标准化水平、筑牢工程质量安全防线提供实践参考。

关键词　水利工程；施工质量；自然环境风险；人员能力风险；精细化管控

中图分类号：TV52　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.034

0　引言

水利工程是国家水安全保障体系的基础性设施，在防洪减灾、农田灌溉、生态治理、城乡供水等领域发挥不可替代的支撑作用。随着水利现代化建设推进，工程建设规模持续扩大、施工技术不断更新，对施工精度、结构耐久性、质量稳定性提出更高标准。传统粗放型管控模式侧重结果验收，忽视过程动态管控，难以适配复杂水文地质与多变气候施工场景，质量风险隐患频发。精细化管理以标准化、网格化、闭环化管控为核心，契合水利工程高质量发展需求。深入研判施工质量风险诱因、搭建系统化精细化管控体系，对减少施工缺陷、提升工程品质、规避后期运维风险具有重要的现实意义。

1　水利工程施工质量风险管控的现实意义

水利工程多临水、露天布设，涵盖坝体、水闸、堤防、渠道、防渗结构、护坡桩基等多类型构筑物，施工工序交叉密集、隐蔽工程占比高、外界干扰因素多，质量容错率极低。一旦施工阶段出现质量缺陷，则后期整改难度大、成本高，且极易演变为结构性安全隐患，威胁流域防洪与供水安全。

开展施工质量风险精细化管控，能够改变传统“重进度、轻质量、重结果、轻过程”的管理弊端，实现风险前置预判、隐患提前治理、工序全程可控。通过细化岗位职责、规范工序标准、量化质量指标、闭环隐患整改，可有效降低人为操作偏差、环境干扰缺陷与管理漏洞问题，保障工程结构密实度、防渗性、稳定性达标，延长工程服役年限[1]。同时，精细化管控体系能够规范参建各方行为，提升项目整体管理规范化水平，助力水利工程建设从规模速度型向质量效益型转型。

2　水利工程施工质量风险主要成因分析

2.1　自然环境风险：工况复杂，施工稳定性差

水利施工现场多处于河道、滩涂、山区区域，水文、地质、气象条件复杂多变，是诱发质量问题的重要外部因素。汛期水位涨跌、突发降雨、大风低温、昼夜温差过大，会直接干扰混凝土浇筑、土方填筑、防渗铺设等关键工序。例如：低温环境易造成混凝土水化反应异常，引发表面开裂、强度不足；雨天施工易导致路基回填含水率超标、压实度不达标，出现后期不均匀沉降。

2.2　人员能力风险：质量意识薄弱，操作规范性不足

施工与管理人员综合素养是影响工程质量的核心人为因素。当前水利一线作业人员多为临时劳务人员，未接受系统专业培训，对施工规范、技术标准、工序流程掌握不扎实，普遍存在经验化施工、简化工序、随意操作等问题。混凝土振捣不均匀、养护时长不足、钢筋绑扎间距偏差、防渗材料铺设不规范等常见质量通病，多由人为操作不标准导致。

作者简介：肖圣春（1986-），男，专科，工程师，研究方向：水利工程。

2.3 材料设备风险：源头管控不严，基础质量薄弱

工程原材料、机械设备是保障施工质量的基础，材料设备管控疏漏会直接造成结构性质量缺陷。水利工程所用水泥、砂石、钢材、止水带、土工膜等关键材料，对强度、抗渗性、耐久性指标要求严格。在实际施工中，部分项目存在材料进场抽检不严格、批次检测流于形式的问题，不合格砂石、受潮水泥、老化止水材料被投入使用，导致结构强度不足、防渗效果不达标。

在设备层面，振捣设备、压实机械、测量仪器长期使用未及时校准维保，易出现设备精度偏差、作业性能下降，造成填筑压实度不足、混凝土密实度不均、测量定位偏差等问题，从源头埋下质量隐患，影响整体工程施工精度与稳定性。

2.4 施工技术风险：工艺落实不到位，技术适配性不足

水利施工工序复杂、技术标准严格，不同构筑物、不同工况对施工工艺要求差异较大。部分施工单位技术方案流于模板化，未结合项目地质条件、水文环境、结构特点编制专项施工方案，工艺参数适配性不足。在大坝填筑、渠道衬砌、防渗施工、桩基施工等关键环节，存在分层厚度超标、碾压次数不足、接缝处理粗糙、养护周期不足等工艺落实问题[2]。同时，新技术、新工艺推广应用不足，部分老旧施工工艺难以适配现代化高标准水利建设要求，且技术交底不细致、班组落实不到位，导致标准化施工难以落地，工序质量参差不齐，各类工艺缺陷累积形成系统性质量风险。

2.5 管理制度风险：管控体系粗放，闭环机制缺失

现阶段，部分水利工程项目质量管理体系不完善，是质量问题频发的根本内因。一是管理制度碎片化，缺少细化的工序管控标准、风险排查标准、质量考核标准，管理工作无据可依，随意性较强。二是参建各方责任划分模糊，建设、施工、监理、检测单位权责边界不清，出现质量问题易相互推诿，整改责任难以落实。三是管控模式滞后，以事后验收为主，缺少事前预判、事中管控的动态管理机制，隐蔽工程、交叉工序的质量监管存在盲区。四是考核问责机制缺失，质量奖惩力度不足，导致全员质量管控积极性不足，粗放式施工、违规操作问题屡禁不止，质量风险长期存在。

3 五维一体精细化施工质量管控体系构建

结合水利工程质量风险五大成因，立足于施工全生命周期，构建源头把控、过程严控、动态监测、闭环整改、考核赋能的五维一体精细化管控体系，实现质量风险全方位、标准化、常态化治理。

3.1 前置环境研判，建立工况适配施工机制

针对自然环境不确定性风险，建立施工环境动态研判与工序调整机制。施工前期全面勘察场地水文、地质、气象条件，编制环境适配性专项施工方案，明确雨季、低温、汛期的施工禁忌与防护措施。建立气象、水位实时预警机制，合理统筹施工计划，避开极端天气作业。

针对软弱地基、复杂岩层区域，提前开展地基预处理、加固补强施工，优化填筑与浇筑工序。对混凝土、防渗工程等对环境敏感的工序，搭建临时防护设施，做好保温、防雨、保湿养护，最大限度降低自然工况对施工质量的干扰，保障复杂环境下施工稳定性。

3.2 细化人员管控，打造专业化施工管理队伍

构建分层培训、持证上岗、权责到人的人员精细化管理机制。针对一线作业人员，开展岗前专项培训，重点讲解施工规范、工艺标准、常见质量通病与整改要求，考核合格后方可上岗。针对技术与监理人员，定期开展新技术、新标准、风险研判能力培训，强化隐蔽工程、关键工序旁站监管履职能力。

建立网格化岗位责任制，将施工区域、施工工序细化分解，明确每个岗位、每个工序的质量责任人，实现“人人有责、层层负责”。同时，强化全员质量安全教育，摒弃重进度、轻质量的错误理念，树立精细化、标准化施工理念，从人为层面规避质量风险[3]。

3.3 严控材料设备，筑牢工程质量源头防线

建立材料设备全流程精细化管控制度，严把采购、进场、存放、使用、维保五道关口。材料采购优先选择资质齐全、信誉良好的供应商，建立材料溯源台账；所有进场材料必须开展抽样复检，指标不合格材料严禁进场、严禁使用，留存完整检测档案。

规范材料存放管理，对水泥、止水带、土工膜等易受潮、易老化材料做好防潮、防晒、防腐保护，杜绝材料性能衰减。建立机械设备常态化校准、维保、检修制度，定期校验测量仪器、振捣设备、压实机械精度，及时维修更换老旧设备，保障设备作业稳定性与精准性，从源头杜绝基础质量缺陷。

3.4 规范工艺流程，实现施工工序标准化管控

推行工序精细化、标准化作业模式，杜绝经验化、随意化施工。针对大坝填筑、混凝土浇筑、防渗施工、桩基施工等核心工序，编制标准化作业指导书，明确工艺参数、操作流程、质量标准、验收要点，细化分层厚度、碾压频次、振捣范围、养护时长等关键指标。

严格落实技术交底制度，技术管理人员向施工班组精准交底工艺要求与质量控制点，确保全员清晰掌

握施工标准。实行“工序自检、班组互检、技术专检、监理抽检”四检制度，上道工序验收不合格严禁进入下道工序。针对隐蔽工程全程拍照留档、全程旁站监督，实现工序施工可追溯、质量可管控，杜绝工艺落实不到位引发的质量隐患。

3.5 完善制度体系，构建闭环化质量管理机制

搭建系统化、标准化、常态化的精细化质量管理制度，补齐传统管理短板。一是完善质量管理规章制度，细化风险排查、工序管控、隐患整改、验收评定、档案管理等全流程标准，实现质量管理有据可依。二是明确参建各方权责边界，细化建设单位统筹责任、施工单位主体责任、监理单位监管责任、检测单位溯源责任，杜绝责任推诿[4]。

建立“风险预判—过程管控—问题发现—整改复核—总结复盘”的闭环管理机制，常态化开展质量风险排查，对发现的缺陷问题建立台账，明确整改责任人、整改时限、整改标准，整改完成后复核验收，实现隐患清零。同时，优化考核问责机制，将施工质量、隐患整改、标准化落实情况与绩效奖惩、评优评先挂钩，对质量违规行为严肃问责，全面压实质量管理责任。

4 水利工程施工精细化管控体系落地保障措施

4.1 强化全过程动态监管

摒弃传统单一、被动的事后验收整改模式，全面推行事前预判、事中管控、事后复盘的全周期闭环质量监管模式。依托常态化现场巡查、关键工序旁站监督、专业无损检测、阶段性抽样复检等多元化管控手段，实现施工全过程、全方位、动态化监测。精准捕捉施工过程中容易忽视的细微质量缺陷、工艺漏洞与潜在安全质量风险，提前排查隐患、靶向处置，实现风险前置治理、源头管控，从根本上减少返工整改问题，大幅降低工程质量整改成本与施工损耗，有效提升工程施工标准化、规范化水平，保障工程项目整体建设质量。

4.2 推进数字化赋能管控

结合智慧水利现代化建设发展要求，立足于水利工程施工管理痛点与难点，创新引入数字化、信息化智能管理手段，搭建一体化施工质量信息化管理平台。依托平台电子台账归档、施工全程影像留存、质量数据实时上传更新、施工隐患风险智能预警等多项核心功能，全方位覆盖工程物料进场、各道施工工序、现场作业人员、安全质量隐患等关键环节的数字化闭环管控。有效规避传统人工管理记录疏漏、数据滞后、台账混乱等问题，显著提升质量数据的精准度、真实性与全程可追溯性，精准把控施工全过程质量细节，高效排查整治各类施工隐患，稳步推动水利工程质量管理模式，从传统人工粗放管控、经验化管理，向标准化、智能化、精细化的科学管控模式全面转型。

4.3 建立常态化复盘机制

定期常态化开展施工质量专项复盘工作，聚焦水利工程施工全流程，系统梳理施工过程中高频出现的质量通病、隐蔽性风险隐患以及日常管理中的薄弱漏洞。同时，全面总结现场优质施工工艺、标准化管控的成熟经验，结合工程实际建设情况，针对性优化细化施工实施方案、完善现场管控细则与管理制度。坚持问题导向、成果导向双向发力，通过常态化持续复盘、动态整改、迭代优化，不断健全完善工程精细化管控体系，从源头规避施工疏漏，有效消除各类重复性、顽固性质量问题，稳步夯实施工管理基础，全面提升水利工程施工标准化、规范化、精细化质量水平[5]。

5 结束语

水利工程施工质量风险成因复杂，涵盖环境、人员、材料、技术、管理多个维度，各类隐患具有隐蔽性、累积性、滞后性特征，传统粗放式管理已无法适配新时代水利高质量建设要求。精细化管控以标准化、网格化、闭环化、数字化为核心，能够全方位破解水利施工质量管理短板。通过精准研判各类质量风险诱因，搭建五维一体精细化管控体系，从源头、工序、制度、人员、技术多维度压实管控责任、规范施工行为、排查质量隐患，可有效降低施工缺陷发生率，全面提升水利工程施工质量与结构稳定性。在水利工程高质量发展背景下，持续深化精细化质量管理、完善管控体系、强化落地保障，能够切实筑牢水利工程质量安全防线，保障水利工程长期安全、稳定、高效运行，为区域水安全与民生保障事业夯实基础。

参考文献：

[1] 常洪霞.水利工程施工质量全过程动态管控体系构建探究[J].中国品牌与防伪,2025(06):81-83.
[2] 王续凯.水利工程施工质量影响因素及控制措施研究[J].行车指南,2024(04):76-77.
[3] 何穆然,祝高升.水利工程施工安全风险管控与隐患排查治理研究[J].四川水利,2026,47(03):167-171.
[4] 李丹丹.水利工程河道堤防施工质量管理[J].中国科技纵横,2026(10):121-123.
[5] 靳桂斌.水利水电工程管理及施工质量控制措施研究[J].中文信息,2026(05):155-156.

高速公路桥隧路基工程监理项目管理实践

——以苏台高速七都至桃源段 ST-JL2 标为例

商林浩

（江苏中源工程管理股份有限公司，江苏 南京 211500）

摘 要 高速公路桥隧路基工程施工工序繁杂、工况多变，监理精细化管理是保障工程质量、安全与进度的核心关键。本文以苏台高速七都至桃源段 ST-JL2 标监理项目为实例，结合项目路基、大型桥梁施工特点，系统梳理工程现场监理管控的各类突出难点，针对性制定分区管控、台账管理、标准统一等全流程优化管控措施，总结落地后的实践成效，以期为同类高速公路路基桥涵工程的监理项目管理、提质增效提供实践参考与借鉴思路。

关键词 高速公路；桥隧路基工程；监理管理；工序管控；品质工程

中图分类号：U415.1 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.035

0 引言

高速公路路基桥涵是公路交通体系的核心承重结构，工程建设标准严格、施工覆盖面广、技术体系复杂，监理精细化管控是保障工程建设品质、筑牢安全生产防线的核心环节。苏台高速七都至桃源段作为区域重要高速路网组成部分，承担着打通区域交通脉络、完善路网布局的重要职能。其中 ST-JL2 标段涵盖大中型桥梁、路基、软基处理等核心施工内容，建设规模大、技术参数高、服务周期长，对现场监理的系统化、专业化、全过程管理能力提出了极高的建设要求。

1 案例工程概况

苏台高速七都至桃源段工程为区域重点高速公路建设项目，线路整体呈南北走向，主线全长 18.221 km，全线按照双向六车道高速公路标准设计施工，设计行车速度 120 km/h，标准路基宽度 34.5 m，整体建设规格高、通行承载能力强。本次 ST-JL2 监理标段管辖主线长度约 9.8 km，覆盖三段核心路基桥涵施工区域，施工内容涵盖多座大中型桥梁、主线路基、软基处理及施工现场各类临时配套工程，施工内容综合性极强。项目核心施工体量庞大，包含数千根桩基、千余片预制箱梁及七十余万方土石方施工任务，项目建安总费用约 42 亿元。本项目监理服务周期共计 54 个月，分施工阶段与缺陷责任期两大阶段，监理主要负责现场取样送检、质量安全、进度环保及合同统筹管理，既定建设质量与安全标准严格。

2 高速公路桥隧路基工程监理项目管理实践难点

2.1 多面作业交织，工序界面管控受限

苏台高速 ST-JL2 标段施工内容高度复合，同步开展桥梁桩基、墩柱、现浇箱梁、预制梁安装、路基土石方填筑及大面积软基处理等多项作业，多支施工队伍多点位、全方位并行施工，现场多工序立体交叉作业特征极为显著。各专业施工队伍施工节奏、作业进度互不统一，桥梁主体施工与路基配套施工、临时工程与主体工程施工相互穿插，工序衔接界面杂乱，无清晰的交接管控边界。同时，本标段衔接多个施工标段，不同施工单位的施工工艺、作业标准、管理体系存在细微差异，跨标段衔接部位工序交错复杂。监理人员面对大范围、多工种的交叉作业场景，难以实现全方位、无死角实时管控，极易出现工序衔接管控漏洞，大幅增加现场质量与安全管控难度。

2.2 隐蔽工程频发，过程闭环执行受阻

本标段桥梁、路基施工包含大量桩基、承台、软基桩体、基坑回填等隐蔽工程，此类工程施工深埋地下、完工后完全覆盖，具备极强的隐蔽性、不可逆性，一旦出现质量缺陷无法直观排查，后期整改返工成本极高、难度极大。项目施工高峰期，隐蔽工程作业点位多、施工节奏紧凑，部分施工班组为抢抓工期，存在擅自超前施工、隐蔽工序未报验即覆盖施工的违规行为[1]。与此同时，现场施工实操、取样送检、验收核验、资料归档等工作链条脱节，现场施工进度超前于试验检

作者简介：商林浩（1991-），男，本科，工程师，研究方向：交通运输工程。

测与资料记录进度，隐蔽工程验收台账、检测数据无法实时同步更新，全过程质量追溯链条断裂，监理过程管控闭环难以形成，为路基沉降、桥梁桩基受力不稳等工程质量隐患埋下长期风险。

2.3 多方诉求交织，现场管控平衡困难

ST-JL2标段参建主体多元，涵盖建设单位、代建单位、多家施工联合体及监理单位，不同主体的管控目标与工作诉求存在显著差异，形成现场管控多方博弈的复杂局面。建设单位重点把控工程整体品质、建设投资与合规性，管控标准、验收要求严格；各施工联合体以完成施工任务、保障施工进度为核心目标，往往优先追赶工期，对施工细节质量、安全文明施工、生态环保管控的重视程度不足。此外，各施工班组技术水平、管理模式、作业规范程度参差不齐，施工执行标准不统一。监理单位作为中立管控主体，需要统筹平衡质量、安全、进度、投资、环保多重目标，在多方诉求冲突、执行标准不一的现场环境中，管控统筹难度大、执行阻力突出，难以实现标准化、一体化现场管控。

2.4 内外业不同步，履职过程存在脱节

本标段施工线路长、作业面分散，桥梁、路基、软基等多个作业点同步推进，监理工作涵盖现场外业管控与内业资料整理、试验检测管理、合同台账登记等多重内容，内外业履职压力极大。项目施工高峰期，现场旁站、隐患巡查、工序验收、现场协调等外业工作任务繁重，监理人员精力集中于现场管控，极易忽视内业资料的同步更新与梳理，普遍存在重外业、轻内业的履职偏差[2]。现场施工实际情况、试验检测原始数据、隐患整改记录无法实时同步至台账资料，造成内外业信息不对称、数据不同步。同时，监理岗位日常分工衔接不够紧密，人员轮岗、工作交接存在疏漏，导致监理履职记录残缺、更新滞后，整体监理工作规范性、完整性不足，出现明显的履职脱节问题。

2.5 阶段工况转换，管理衔接存在缺口

苏台高速ST-JL2标段施工周期长达54个月，整体施工流程分为基础处理、主体结构施工、附属工程施工、缺陷责任期养护等多个核心阶段，不同施工阶段的作业内容、施工工艺、管控重点和安全风险存在根本性差异，工况转换特征明显。在各施工阶段衔接过渡节点，监理团队的人员配置、管控重心、工作方案未能及时适配调整，路基基础施工与桥梁主体施工、主体工程与附属工程施工的监理管控衔接存在断层。施工前期侧重基础质量管控，后期侧重结构安全与外观质量管控，阶段转换时易出现管控标准衔接不畅、巡查重点错位的问题。此外，工程完工后转入缺陷责任期，现场隐患排查、养护监管、问题整改等工作衔接滞后，极易形成阶段性管理空档，影响项目全周期管控的连续性与完整性。

3 高速公路桥隧路基工程监理项目管理实践优化措施

3.1 划分管控区段，明晰工序交接边界

结合ST-JL2标9.8公里主线桩号排布与三段施工标段划分情况，项目全面推行网格化分区监理管控策略，按照QL3、QL4、QL5施工范围精准划分独立监理责任片区，实现施工区域与监理职责精准对应。各片区固定配置一名专业监理工程师与两名专职监理员驻场履职，明确各片区桩号范围、管辖工序、岗位职责与管控标准，实行片区终身责任制。项目严格落实公路工程首件验收认可制度与三检交接管理制度，针对桥梁桩基、墩柱浇筑、箱梁架设、路基分层填筑等核心分项工程，在大规模施工前完成首件施工、工艺核验与标准固化，形成标准化施工范本后全面推广实施[3]。针对现场多专业同步施工特点，科学编制工序穿插与错峰施工计划，规范土建、桥梁、附属工程的施工时序。对跨标段衔接界面实行双监理联合核验制度，所有交接工序同步完成影像留存、台账登记与签字确认，以标准化界面管理保障各工序衔接有序、施工推进规范可控。

3.2 落实台账管理，强化隐蔽工程管控

项目依据现行公路工程监理规范，搭建标准化、闭环式隐蔽工程台账管控体系，全面覆盖桩基施工、预应力管桩、水泥搅拌桩、承台浇筑、台背回填、基坑施工等所有隐蔽施工工序。专项台账细化完善标准化登记字段，系统记录施工桩号、作业时间、结构尺寸、浇筑方量、压实参数、试验送检批次、现场值守人员及验收结论等全维度施工数据，实现施工资料可追溯、可核查。项目常态化执行隐蔽工程24小时提前书面报备制度，所有隐蔽工序开工前均完成条件核查与手续报审。关键隐蔽工序全程落实监理旁站制度，动态监测混凝土坍落度、桩基垂直度、入土深度、分层填筑厚度等核心工艺指标。同步推行日清归档工作机制，每处施工点位留存完整影像资料，当日完成取样送检、数据核对、资料归档，严格执行验收合格、资料齐全后方可覆盖的标准化施工管控流程。

3.3 统一执行标尺，消解诉求博弈矛盾

针对多家施工联合体作业标准不一的问题，监理部结合项目图纸、招标文件及行业规范，编制《ST-JL2标现场施工统一管控细则》，细化路基碾压遍数、桥梁钢筋保护层、混凝土养护时长、环保扬尘管控等量化验收标准，全线所有班组统一执行、无特例。建立每周固定调度 + 每日现场碰头机制，每周组织建设、代建、施工单位开展专项核查，每日现场同步整改各类偏差问题[4]。面对工期与质量冲突，实行质量一票否决制度，明确抢工期不得简化施工工序、降低工艺标准。对现场违规作业、标准落实不到位的班组，现场下发整改通知单、限期闭环，统一全线执行尺度，彻底消解多方诉求博弈带来的管控乱象。

3.4 统筹业务分工，弥合履职信息偏差

项目结合标段施工点位分散、工序繁多的作业特点，优化完善监理团队岗位分工体系，细化各岗位工作职责与工作标准，构建权责清晰、分工明确的内外业协同工作模式。明确外业监理人员专职负责施工现场旁站值守、日常安全质量巡查、工序现场核验、现场施工协调等一线管控工作，内业监理人员专职负责台账动态更新、试验检测资料汇总、合同计量梳理、竣工资料整编等资料管理工作。创新推行内外业岗位绑定搭档机制，固定人员对接专属施工片区，实现现场施工管控与资料整理同步联动。严格落实每日监理工作复盘制度，每日汇总梳理现场施工情况、工序验收成果与巡查记录，当日完成数据核对、分类归档与台账更新。同时，规范监理人员轮岗、调岗、交接标准化流程，依托书面交接清单完成工作移交，经双方签字、总监复核确认，全方位保障监理履职工作连续、规范、完整。

3.5 前置过渡筹划，贯通全期管理链条

结合项目长周期、多阶段递进式施工特点，监理团队实施全周期前置筹划、分阶段差异化管控策略，按照基础施工、主体桥梁施工、路基附属施工、缺陷责任期养护四个阶段，分别编制专属监理管控方案，精准匹配各阶段施工管控需求。基础施工阶段重点落实软基处理、桩基施工的旁站管控与沉降观测工作，常态化加密现场巡查频次，严控基础施工成型精度。主体施工阶段聚焦箱梁现浇、墩柱浇筑、预应力张拉、桥面铺装等核心工艺，严格把控结构施工质量与外观精度[5]。工程收尾阶段重点排查附属工程、交通安全设施、环保工程的施工细节，完善工程成型品质。各施工阶段转换前提前开展监理专项交底培训，明确新阶段管控重点与验收标准，梳理衔接工作清单建立清零台账。缺陷责任期安排专人常态化全线巡查，动态排查病害、更新养护台账，搭建全周期、无断点的标准化监理管控体系。

4 高速公路桥隧路基工程监理项目管理实践成效

本次项目落地的分区管控、隐蔽工程闭环台账、标准化管控等精细化监理举措，全面提升了 ST-JL2 标段工程建设整体管控水平，取得了实打实的建设成效。项目全施工周期 54 个月内实现安全生产零责任事故、零环境污染事故，安全文明施工管控完全达标。全线所有路基、桥梁分项工程验收合格率达 100%，顺利实现交工验收合格、竣工验收优良的既定质量目标。在团队履职方面，监理人员整体到位率 94%、人员调换率仅 6%，人员培训覆盖率 100%，无人员资质、技术职称降级问题，监理队伍稳定性与专业性充足。依托规范化监理管控，项目成功蝉联 2022、2023 年度省级“平安百年品质工程”创建示范项目，总监办获评年度“优秀总监办”，各项管控指标均优于合同及行业规范标准。

5 结束语

苏台高速七都至桃源段 ST-JL2 标工程工况复杂、管控难度突出，是山区及跨区域高速路基桥涵工程的典型代表。项目针对多工序交织、隐蔽工程管控难、多方协调复杂等痛点，通过分区管控、台账赋能、标准统一、分工统筹、全期衔接的精细化管理模式，有效破解了高速监理管理难题，保障了项目优质、安全、高效推进。本次监理管理实践积累了丰富的现场管控经验，形成了适配高速桥涵路基工程的监理管控体系，可为同类高速公路基建项目监理工作提供切实可行的实践借鉴。未来可进一步优化数字化监理手段，持续提升工程监理智能化、精细化管控水平。

参考文献：

[1] 程钰翔 . 公路工程施工监理实施及其质量监控要点 [J]. 中国建筑知识仓库 ,2025,19(02):130-133.
[2] 刘云 . 提高高速公路路基工程施工监理的措施分析 [J]. 运输经理世界 ,2026(01):28-30.
[3] 刘云 . 公路工程监理在施工阶段的质量控制实践措施 [J]. 运输经理世界 ,2025(34):13-15.
[4] 罗旭 . 路基工程施工监理控制要点分析 [J]. 运输经理世界 ,2023(12):22-24.
[5] 高雷 . 公路工程监理的全面质量管理探析 [J]. 四川建材 ,2023,49(03):216-218.

风电光伏场站关键设备故障诊断技术研究

张 敏

（大唐丘北风电有限责任公司，云南 文山 663200）

摘 要 随着风电、光伏在能源结构中的占比持续攀升，其场站关键设备的高效运维与精准诊断已成为保障电网安全与经济运行的核心挑战。本文针对新能源场站监测数据多源异构、运行工况复杂多变、故障样本稀缺等实际难题，开展智能故障诊断技术研究。系统分析关键设备故障机理与多源数据特征，研究基于注意力机制的多源数据融合与健康指标构建方法，创新提出变工况自适应学习与小样本迁移诊断模型，并增强模型可解释性，最终构建场站级边云协同监测与动态预警体系，以期为相关人员提供参考。

关键词 风电；光伏；故障诊断；多源数据融合；深度学习

中图分类号：TM61；TH17 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.036

0 引言

在“双碳”目标的持续推动下，我国风电、光伏产业已实现规模化、高质量的跨越式发展。但是，新能源场站大多布局在戈壁、山地、沿海等极端环境区域，核心发电设备长期面临恶劣自然环境的考验，设备非计划停机故障率逐年攀升，运维成本不断提高，直接影响场站的实际运营收益[1]。面对这一行业痛点，传统依赖人工巡检、固定阈值告警的运维模式已完全无法适配高密度、大规模新能源场站的运行需求，行业迫切需要构建一套包含多源数据、适合复杂工况、从系统角度出发的智能故障判断体系。

1 风电光伏场站关键设备故障类型与特征分析

1.1 风电机组核心部件典型故障机理

风电机组核心部件故障机理比较复杂。齿轮箱处于动力传递的核心地位，其典型故障包含齿面点蚀、断齿以及轴承磨损等。振动信号里存在特征频率调制和边频带现象。发电机故障大多体现为轴承损坏和绝缘老化，轴承故障会造成特定频率的振动，而绝缘老化则致使局部放电并使得温度不正常上升。叶片出现裂纹、覆冰或者雷击损伤等情况时，会改变自身的气动外形和结构动力学特征，这些特征体现在振动、声音以及功率曲线的异常状况当中。深刻认识这些物理机理是将监测数据转换成故障预判的前提。

1.2 光伏发电单元主要失效模式

光伏发电单元存在多种失效模式，光伏组件常见的失效类型有热斑效应、电位诱导衰减以及隐裂等情况，其中热斑会引发局部高温并致使输出功率缩减，而电位诱导衰减（PID）会造成组件性能逐步下降。逆变器属于关键的电力电子装置，它的IGBT模块会发生疲劳老化现象，直流母线电容的容值也会出现衰减情况，这些都是主要故障表现，其具体体现为输出波形发生畸变、谐波含量增多。汇流箱和接线盒往往会出现连接点松动、烧蚀以及直流电弧故障等状况，从而致使接触电阻变大、绝缘性能减弱。这些失效模式最终都会表现在输出电流－电压特性发生异常变化上。

1.3 多源异构监测数据特征提取与筛选

风电光伏场站装有SCADA、振动、红外、电气等多源异构监测系统，可以从SCADA的时序数据当中获取均值、方差、偏度之类的时域统计特性[2]。解决“维数灾难”需要执行特征筛选，可以依靠滤波器，也可以用像递归特征删除这样的封装方法，并结合分类器的表现来做选择，为后续的融合和判断提供数据依据。

2 多源数据融合与状态表征方法

2.1 异构传感器数据预处理与时间配准

多源数据融合之前要执行严格的预处理步骤，其中涉及数据清洗环节，用以解决缺失值以及那些较为明显的异常点问题，可以利用插值法或者前后均值法来填补空缺之处。数据规范化目的在于把各个特征的尺度归于同一水平，常见的做法是采用最小－最大规范化或者是Z-score标准化方法。而时间配准则属于一项主要难点，因为不同传感器的采样频率存在很大

作者简介：张敏（1996-），女，本科，助理工程师，研究方向：风电场合同管理、结算、采购立项。

差别，针对秒级 SCADA 数据和分钟级振动数据等情况，有必要把高频次的数据执行降采样操作，或者给低频次数据实施插值处理，从而使其达到相同的起始时间点。一般按照诊断分析所必需的最低时间分辨率（每十分钟间隔）来做重采样和对齐工作，这样才能保证同一时段下各类不同模态的数据得以有效相互关联。

2.2 基于深度学习的跨模态特征融合策略

深度学习给多模态数据深度挖掘提供很强的互补信息工具。可以运用依靠特征级融合的深度网络架构，比如用一维卷积神经网络来处理振动时序信号，获取它的局部依赖和频谱特征；再用长短期记忆网络去处理 SCADA 慢变参数序列，找到其中的长期趋势。之后在网络的中间层把不同路径得到的高阶抽象特征做拼接或者加权融合。更为先进的方法是采用注意力机制，让网络自己学会各个模态特征对于特定故障判断任务来说的重要程度权重，实现自适应的特征融合，进而产生更具区分能力的综合特征表现形式。

2.3 设备健康状态退化指标构建

创建连续的健康状态退化指标对于实现预测性守护十分关键。依靠融合之后的深度特征，可以形成健康基线模型。一种常见的做法是训练一个只采用正常状态数据的深度自编码器网络，其重构误差就能够充当健康指标，设备状态离正常越远，重构误差就越大。还有一种方法是利用健康状态评分模型，把融合特征映射成 0 到 100 之间的健康指数，这个指数能够直观表现设备从“健康”过渡到“亚健康”，再到“故障”的连续退化情况，给早期预警和剩余使用寿命预测提供予定量依据，从而做到从二值判断向连续趋势分析的状态评价转变。

3 复杂工况下智能故障诊断模型

3.1 变工况自适应特征学习网络

实际场站中的设备工况起伏很大，这会影响到干扰特征的获取。要想加强模型的鲁棒性，就要形成变工况自适应学习网络，其核心在于学习与工况无关的故障敏感特征。可以利用对抗性学习框架，主干特征获取网络在生成判别性特征时，会加入一个工况判别器网络，通过对抗训练，促使主干网络获取的特征能够“蒙蔽”工况判别器，也就是特征里最好不包含风速、功率之类的工况信息，以此去掉这些干扰因素[3]。最后，模型学到的特征重点体现设备自身良好的状况，这样无论处于何种工况，相同的故障都会表现出类似的特征，从而大幅优化了判断模型的泛化能力。

3.2 小样本条件下故障迁移诊断技术

工业判断当中，严重故障样本稀少属于常见情况。迁移学习是一种有效的应对方案，可以凭借源领域，比如其他风场或者仿真平台，其包含大量历史故障数据，预先训练一个深度判断模型。对于目标领域即特定新场站，它只有少量样本数据，这时采用微调策略，把网络底层用来获取通用特征的层固定住，仅仅依靠少数目标样本去微调上面的分类器，促使模型尽快适应新设备的特点。还可以运用领域自适应方法，最大均值差异损失之类的方式，在特征方面缩小源域和目标域的数据分布差距，实现知识从“数据充足之处”向“数据缺少之地”的有效过渡，从而解决冷启动问题。

3.3 模型可解释性与诊断置信度评估

加强“黑箱”模型的可信度研究十分关键。可以利用类激活映射这样的可视化技术，把模型用于判断故障所依赖的部分，以热力图的形式重新显现到最初的输入数据之上，比如标示出那些引发判断属于“轴承故障”的重要振动频段区域，从而让诊断结论具备可追溯性。而且，给诊断输出添加置信度评定，可通过模型在 softmax 层的输出概率，或者借助贝叶斯神经网络来估算预测的不确定性。对于置信度较低的诊断结果，系统会启动人工复查机制，防止盲目相信模型，进而创建可靠的人机协作诊断闭环，提升该技术在工程实际应用中的认可度和实用性。

4 场站级协同监测与预警体系

4.1 设备间耦合影响与故障传播路径分析

场站内设备并非各自独立运行。风机之间存在尾流效应，风机由于故障停机时，会改变风流场，从而加重下风向风机载荷波动及疲劳程度。在光伏阵列当中，组串内部的组件呈串联状态，单个组件若出现严重故障，很可能造成整串功率急剧缩减。深入剖析此类物理与电气关联十分关键，可以凭借图论来对场站执行拓扑建模，把节点当作设备，把边视作连接或者影响的联系。融合历史故障资料，采用贝叶斯网络或者因果推断手段，计算故障沿着网络流传的可能性及其影响范围，进而为从系统角度找出源头故障并阻止连锁事件发生提供理论支撑。

4.2 基于边云协同的实时诊断架构设计

为实现随时判断并优化资源的目标，就要规划边云协同架构。在边缘位置，安装在风机或者逆变器控制柜里的轻量化判断模型，依靠本地的计算资源，及时剖析关键且采样率高的数据，做到从毫秒到秒级别

的异常识别以及紧急停机保护。在云端，则汇集全场站大量的过往和即时数据，运行复杂的深度学习及退化趋势预测模型，展开从分钟到小时范围的深入分析和健康评价，而且承担模型训练、优化以及统一更新的任务。云和边通过安全通道来同步，云端向下发送新的模型和阈值，边缘端上传特征和中间结果，从而实现计算负载与判断性能的最优平衡。

4.3 多时间尺度动态预警阈值优化

固定警报阈值很难适应设备的动态运行状况，这极易引发误报和漏报现象。要解决这个问题就得形成多时间尺度的动态警报体系，按照不同的响应需求来设定多种警报层级。秒级阈值适合于振动超限、电流突变等亟需应对的故障情况，可以做到快速防护；而分钟/小时级阈值则用来观察温度逐渐上升、功率出现异常等逐步显现出来的不足之处。这个阈值会遵照设备以往的健康基线即时做出调整，比如利用指数加权移动平均再配合3σ规则来做动态计算；至于天/周级阈值重点在于留意健康指标长时间以来的恶化态势，从而用于预见性的保养工作[4]。这种动态阈值方法不断学习设备正常运行模式，可以有效过滤随机波动和环境噪声，自动适配异常状态与正常波动，大幅提升警报的精准度和可靠性，减轻了运维人员无效巡视的负担。

5 系统验证与工程应用评估

5.1 典型风电场与光伏电站案例验证

为验证所提出的技术体系，选取装机容量为200 MW的典型风电场与100 MW的光伏电站作为案例。风电场采用一年期的SCADA数据和部分关键机组的振动数据，光伏电站则采用逆变器运行数据和Ⅳ扫描数据。把历史工单和报警记录当作故障标签。在实验设置方面，按照时间把正常数据和各类故障数据划分成训练集和测试集，而且利用不同风速和辐照度范围来验证变工况性能。比较的基线模型包含支持向量机、随机森林这些传统方法，还有依靠单个数据源的深度学习模型，以此全方位评估所提出融合和自适应方法的优势。

5.2 诊断时效性与准确率对比分析

在风电机组齿轮箱故障诊断方面，该模型整体准确率达98.7%，比仅依靠单一SCADA数据的诊断方法高5.2%。处于变工况情况下时，该模型针对未见过的工况具备较强的泛化能力，其准确率比未采用对抗性学习方法时高出12.5%。在光伏逆变器IGBT早期故障警报当中，系统实现了平均可提前7天发出故障警报的能力，漏报率小于2%。边云协同架构中的即时性能评定表明，边缘端对于紧急故障判断的延误小于500毫秒，云端执行深度分析的时间间隔为10分钟，如此一来就满足了即时异常检测以及精确状态评价这两个方面的需求。通过混淆矩阵、ROC曲线等可视化分析显示，模型针对各类故障均维持着较好的识别能力和泛化性能。

5.3 运维策略优化与经济效益评价

技术的应用促使运维模式从事后维修朝着预测性维护方向转变。依靠健康状态退化指标，可以制订不同的巡视与维修计划，针对健康指数下滑的部件展开重点巡视，优化备品备件库存。经济效益评定表明，在案例场站当中，大概能够削减非计划停机时间约为20%，增长年发电量超过1.5%，规避重大恶性事故之后便免去了高额维护成本[5]。早期警报和精确判断减少了日常巡视所需的人力，初步估计投资回报期为2年至3年，这就表明智能故障判断技术具备突出的经济效益及其应用推广价值。

6 结束语

通过构建“机理－模型－系统”的风电光伏场站智能故障判断技术体系，多源数据融合和深度学习特征获取，实现了对设备状态的精确感知。改进设计的对抗自适应网络和迁移判断模型明显提升了模型在变工况、小样本情况下的判断能力。边云协作框架和动态警报机制实现了从部件到场站的多层次状态评价。验证结果表明，本文所提出的方法切实加强了故障判断的准确率和早期警报能力，但在应对极端数据缺少状况时的适应性仍需要进一步探究。未来，可将物理机理和深度学习结合起来，探寻同数字孪生平台深入融合的办法，从而实现更具可解释性、适应性更强的智能运维。

参考文献：

[1] 李晓飞.光伏风电系统的实时监控与故障诊断技术[J].科技与创新,2025(22):121-124.
[2] 张家榕.风电光伏场站设备运维中的风险预控技术研究[J].电力设备管理,2025(07):74-76.
[3] 曹瑞峰,刘子华,袁婷,等.基于改进SVM的新能源电站故障诊断方法[J].浙江电力,2023,42(11):11-20.
[4] 王嘉媛,李洋,李媛,等.关于风电、光伏发电与水力发电结合的研究[J].中国设备工程,2023(10):263-265.
[5] 谢望.基于电流特征的光伏和风电变流器开关管开路故障诊断研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.

火电厂汽轮机辅机常见故障及检修方法研究

王东宁，林　婧

（山东能源集团新能源集团有限公司，山东 泰安 271000）

摘　要　汽轮机辅机是火电厂动力系统稳定运行的关键支撑，但在实际运行中受工况复杂、设备老化、维护不当等因素影响会出现各类故障，这些故障易导致机组非计划停机与效率下降。本文针对汽轮机辅机系统常见故障的类型及形成机理展开系统性分析，结合火电厂设备运维的实际需求，提出涵盖状态监测、故障诊断、修复处置及预防性维护等环节的全流程检修对策与技术方法，旨在为保障设备可靠运行、提升火电厂整体运行效率与安全生产水平提供技术参考。

关键词　火电厂；汽轮机辅机；轴承故障；齿轮故障；密封故障

中图分类号：TK263；TM621.4　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.037

0　引言

汽轮机辅机涵盖给水泵、凝汽器、增速箱、调节阀门等 20 余类设备，承担介质输送、能量传递、参数调控等核心功能，其运行状态直接影响机组发电效率与安全[1]。据国家能源局与中国电力企业联合会联合发布的《2024 年全国电力可靠性年度报告》，全国纳入统计的 1 952 台燃煤机组全年共发生非计划停运 767 次，其中三大主设备（锅炉、汽轮机、发电机）引发的非计划停运占 88.47%，锅炉是主要原因，占全部燃煤机组非计划停运总时间的 68.97%①。随着机组向高参数升级，辅机运行环境更严苛，传统“事后维修”模式已无法满足连续运行需求，亟需针对核心故障类型建立系统化的“诊断—检修”体系。

1　火电厂汽轮机辅机常见故障类型

汽轮机辅机五类核心故障的关键信息汇总如表 1 所示。

2　火电厂汽轮机辅机核心故障标准化检修工艺

2.1　轴承故障检修

以给水泵滑动轴承更换为典型场景，检修需先完成基础准备工作，包括对给水泵系统断电断水确保安全，拆除轴承端盖并清理轴承座内残留油污与杂质，同时准备好符合规格的新轴承（巴氏合金材质，径向游隙控制在 0.12 mm～0.18 mm）及适配润滑油（L-TSA46 型号）；旧轴承拆除环节采用液压拨轮器，设定压力 5 MPa～8 MPa 平稳拔出旧件，避免传统敲击方式对轴颈造成划痕或变形损伤；新轴承安装时切换至 8 MPa～10 MPa 压力的液压安装工具，将轴承精准压装至轴颈，确保过盈量维持在 0.02 mm～0.03 mm 的设计范围内；随后用千分尺实时测量径向间隙，通过增减调整垫片将间隙校准至 0.15 mm 的最优值；最后开展测试验收，先空载运转 2 小时，确保振动值＜0.08 mm/s、温度＜70 ℃，再进行 4 小时带负荷测试，确认各项参数稳定无波动。相较于传统工艺，液压安装可避免轴承局部应力集中，使使用寿命延长 50%，更换润滑油时采用真空抽排技术（残留量＜5%），有效防止旧油中杂质污染新油，保障润滑效果。

2.2　齿轮故障检修

针对增速箱齿面点蚀修复，需先拆除齿轮箱端盖，用中性清洗剂清洗齿轮表面油污与灰尘，通过专用量具测量点蚀面积与深度以确定修复方案：若点蚀面积＜15%，采用 1 000 W 功率的激光熔覆设备在齿面形成 0.2 mm 厚的熔覆层，待冷却后进行 IT6 精度的齿面磨削，恢复齿面光滑度与啮合精度；若点蚀面积＞15%，则直接更换同型号新齿轮以避免故障扩大；齿轮安装后用塞尺测量齿侧间隙，确保间隙处于 0.1 mm～0.15 mm 区间，同时通过调整垫片将啮合偏差控制在＜0.02 mm；最后加注 N320 型号齿轮油至油标 1/2～2/3 处，空载运转 1 小时监听有无异响，验证传动稳定性。传统补焊修复易因高温导致齿面变形，而激光熔覆修复可精准控制热输入，修复后齿面精度达 IT6 级，承载能力恢复至新件的 90% 以上，大幅降低更换成本[2]。

2.3　密封故障检修

凝汽器管板密封修复需先借助超声波检测仪（频率 500 kHz）沿管板表面扫描，定位泄漏管束位置并

作者简介：王东宁（1992-），男，本科，工程师，研究方向：发供电技术。

表1 汽轮机辅机五类核心故障类型汇总表

故障类别	典型涉及设备	故障特征	核心成因	故障表现及危害
轴承故障	给水泵轴承、风机轴承、油泵轴承	振动超标（＞0.12 mm/s）、温度升高（＞80 ℃）、异响（“沙沙”/“咯噔”声）	润滑失效（油膜破裂、油液污染）、安装偏差（对中误差＞0.05 mm）、材质疲劳（应力集中）	油膜失效致黏着磨损，附加载荷过大滋生疲劳裂纹，短期内轴承彻底失效；三体磨损引发振动升高，最终出现轴承裂纹、滚动体剥落[3]
齿轮故障	增速箱齿轮、减速器齿轮、给水泵增速齿轮	啮合异响（“刺耳摩擦声”）、齿面磨损/点蚀、振动频率异常（边频带出现）	润滑不良（油膜厚度＜5 μm）、啮合偏差（齿侧间隙＜0.1 mm）、过载运行（载荷超额定值1.2倍）	齿面磨损失准、大面积点蚀，交变载荷下裂纹扩展直接造成断齿，振动冲击异常
密封故障	凝汽器管板密封、给水泵轴端密封、阀门填料密封	介质泄漏（凝结水/油液渗漏）、压力下降（凝汽器真空度降3 kPa～5 kPa）、密封面腐蚀	密封件老化（橡胶件硬度＞85ShoreA）、间隙超标（密封间隙＞0.1 mm）、腐蚀侵蚀（Cl^-/酸性介质）	密封面间隙扩大，凝结水发生泄漏；液膜破裂产生干摩擦，密封面快速高温磨损；填料磨损压缩量下降，密封间隙变大，介质外漏
传动系统故障	联轴器（刚性/弹性）、皮带传动、链条传动	传动异响、振动周期性波动、转速偏差（＞1%）	联轴器对中偏差（径向＞0.03 mm）、皮带松弛（张紧力＜500 N）、链条磨损（节距伸长＞2%）	产生附加弯矩，轴系振动超标，运行出现异响皮带打滑转速失准，单边磨损严重，使用寿命大幅缩减[4]
控制系统故障	调节阀、压力传感器、温度变送器	阀门卡涩（开度调整滞涩）、信号失真（误差＞5%）、拒动（指令无响应）	积灰卡阻（阀芯积灰厚度＞0.2 mm）、传感器漂移（零点偏移＞2%）、控制逻辑错误（程序漏洞）	监测信号漂移失真，温度、压力数值显示偏差过大；阀门动作卡顿响应变慢，甚至出现拒动，调控精度失效

做好标记；拆除泄漏管束后，用专用工具清理管板孔内残留的胀接层，再用细砂纸打磨管板密封面至粗糙度Ra＜1.6 μm；新管束安装采用数控胀管器，设定2.5%～3%的胀管率对管束进行胀接，使管束与管板紧密贴合，确保密封间隙＜0.05 mm；密封效果验证分两步进行，先对凝汽器注水至0.5 MPa压力，保压30分钟观察压力无下降，再采用氦质谱检漏仪检测，确保泄漏率＜1×10^{-9} Pa·m^3/s。传统人工胀管受操作经验影响，胀管率波动范围达1%～4%，易出现密封不严问题，而数控胀管可将胀管率偏差控制在±0.1%，使密封可靠性提升90%，有效减少凝结水泄漏风险。

2.4 传动系统故障检修

联轴器对中调整需先采用激光对中仪（精度±0.001 mm）测量当前偏差，若检测出径向偏差0.08 mm、端面偏差0.06 mm，需松开电机地脚螺栓，通过增减厚度精度±0.01 mm的调整垫片微调电机位置，逐步将径向偏差修正至＜0.03 mm、端面偏差＜0.02 mm；调整完成后按设计扭矩紧固地脚螺栓（M24螺栓设定300 N·m扭矩），避免螺栓松动导致后续偏差；最后进行1小时空载运转测试，监测联轴器部位振动值＜0.05 mm/s，确认传动平稳。传统百分表对中精度仅±0.05 mm，难以满足高转速设备需求，激光对中仪精度提升后可减少传动附加弯矩，降低轴系振动噪声，延长联轴器与轴承的使用寿命。

2.5 控制系统故障检修

调节阀卡涩检修需先拆除调节阀端盖，取出阀芯后放入功率500 W的超声波清洗机，使用中性清洗剂清洗阀芯表面0.3 mm厚的积灰与油污，彻底清除卡阻异物；更换石墨填料时控制15%的压缩量，调整填料压盖使密封间隙＜0.05 mm，防止介质外漏；随后用标准信号发生器输入4 mA～20 mA模拟信号，逐一校准调节阀各开度档位，确保实际开度与指令误差＜1%；最后开展空载动作测试，验证调节阀从0%～100%开度调整无滞涩，响应时间＜0.5 s。传统人工擦拭清洗积灰清除率仅60%，易导致卡涩复发，超声波清洗清除率达98%，配合石墨填料的优异密封性，可将卡涩复发周期从2个月延长至12个月，减少频繁检修带来的停机损失[5]。

3 火电厂汽轮机辅机典型故障诊断案例

故障表现：某300 MW亚临界机组#1给水泵（型号DG400-180，2018年投运，负责锅炉给水输送，设计出口

压力 18 MPa、流量 400 t/h），在连续高负荷运行（负荷率 90%）15 天后，运行人员首次发现轴承座区域出现轻微“沙沙”异响，初期未引起重视，3 天后异响逐渐加剧且伴随振动感，巡检时用便携式红外测温仪测得轴承温度从正常运行的 65 ℃升至 85 ℃，同时通过机组 DCS 系统监测到轴承座振动值从稳定的 0.08 mm/s 攀升至 0.18 mm/s，远超《机械振动 在旋转轴上测量评价机器的振动 第 2 部分：功率大于 50 MW，额定工作转速 1500 r/min、1800 r/min、3000 r/min、3600 r/min 陆地安装的汽轮机和发电机》（GB/T 11348.2-2012）标准规定的滑动轴承振动限值，随即启动专项诊断流程。

故障诊断及检修：诊断团队首先开展振动分析，将压电式振动传感器灵敏度 100 mV/(m/s^2)）固定在轴承座垂直与水平方向关键测点（距轴承中心 100 mm 处），以 20 kHz 采样频率连续采集 30 分钟振动信号，通过小波去噪算法消除电机电磁噪声（50 Hz 工频干扰）后，进行傅里叶变换得到频谱图，结果显示 15 Hz 频率处出现明显峰值，幅值达 0.9 mm/s，该频率经计算确认是滚动轴承外圈故障特征频率（给水泵转速 3 000 r/min，外圈故障频率 f_0=0.3×n/60=0.3×3 000/60=15 Hz），且该幅值是正常运行时的 4.5 倍，初步判定轴承外圈存在磨损；为进一步明确故障诱因，团队从给水泵润滑油箱底部取样口抽取 L-TSA46 润滑油样，送至实验室采用原子吸收光谱仪检测金属元素含量，发现 Fe 元素含量达 130 ppm，远超正常运行时的 30 ppm 上限，同时用运动黏度测定仪测得 40 ℃时油液黏度从设计值 46 mm^2/s 降至 37 mm^2/s，水分含量 0.16%（标准≤0.05%），综合判断润滑失效（油液劣化、水分超标导致油膜承载能力下降）是轴承磨损的核心诱因。最终诊断结论为给水泵轴承外圈严重磨损，需立即停机更换同型号轴承（型号 31320，径向游隙 0.12 mm～0.18 mm），同时彻底更换润滑油并清洗油管路，避免残留污染物加剧新轴承磨损。

4 火电厂汽轮机辅机常见故障日常预防维护措施

4.1 加强日常监测，实时把控运行状态

火电厂需要加强日常监测，以“高频次、易操作、全覆盖”为原则，由运行人员按标准化流程执行，重点关注故障先兆性参数：每 2 小时用精度 ±0.01 mm/s 的便携式振动仪测量轴承座振动值，用 ±0.5 ℃精度的红外测温仪记录温度，超阈值立即记录上报；每日巡查齿轮箱与联轴器听辨运行声音，用张紧力测试仪检查 V 型带张紧力，用 ±0.1% 精度的转速表核对主动轮与从动轮转速偏差，记录凝汽器真空度；每 4 小时用 ±0.1% 精度的标准信号发生器校准压力、温度传感器，确保调节阀开度指令与反馈偏差＜ 1%，所有监测数据实时录入运维系统，便于分析故障演化规律。

4.2 定期开展维护，深度排查潜在隐患

火电厂要定期维护，由检修技术人员结合专业工具开展深度检测，针对性消除累积性隐患：季度维护聚焦润滑系统，取轴承、齿轮箱油样进行离线分析，更换 10 μm 过滤精度的油过滤器滤芯，清洗滤网并记录颗粒类型以判断磨损来源；半年维护针对齿轮与密封系统，用频率范围 20 Hz～20 000 Hz 的声学分析仪检测齿轮箱噪声，用 ±0.01 mm 精度的超声波测厚仪检测凝汽器管束壁厚，对联轴器进行激光对中检测；年度维护开展全面隐患排查，更换硬度＞ 85ShoreA 的老化密封件，对调节阀阀芯、阀座进行超声波清洗，检查控制系统程序逻辑，对齿轮齿面进行磁粉探伤，维护后出具检测报告，明确“合格项—整改项—复查时间”，形成闭环管理。

5 结束语

火电厂汽轮机辅机是火电厂运行的核心设备之一，其正常运行对于火电厂的生产效率和安全性具有重要意义。本文针对汽轮机辅机轴承、齿轮、密封、传动系统、控制系统五类核心故障，系统剖析其机理特征，提出针对性诊断技术与标准化检修工艺。通过案例验证表明：该技术体系可使辅机故障处理效率提升，降低年维护成本。未来，需推动辅机运维从“事后维修”向“预知维护”转型，为火电厂高效低碳运行提供支撑。

注释：

① 中国水力发电工程学会 .http://www.hydropower.org.cn/cn/index/734_1105043_127543。

参考文献：

[1] 王志锋 . 火电厂汽轮机辅机常见故障及检修方法研究 [J]. 中国设备工程 ,2023(09):185-187.
[2] 孙佳喜 . 汽轮机辅机常见故障及检修方法研究 [J]. 科技创新与应用 ,2020(25):113-114.
[3] 韩威 . 火电厂汽轮机辅机检修管理现状及对策探讨 [J]. 中国设备工程 ,2022(23):59-61.
[4] 周志峰 . 分析火电厂汽轮机辅机检修管理的现状及对策 [J]. 甘肃冶金 ,2020,42(06):70-72.
[5] 李展 , 成振松 , 尤默 , 等 . 某火电机组汽电双驱引风机系统辅机故障控制仿真及试验分析 [J]. 热能动力工程 ,2023,38(09):174-182.

分布式电源接入下输配电网架优化规划研究

杨 悦

（国网江苏省电力有限公司扬中市供电分公司，江苏 扬中 212200）

摘 要 随着新能源发电技术迭代以及电力系统低碳转型推进，风电、光伏、微型燃气轮机等分布式电源装机规模持续扩容，已经成为输配电网电能供给的关键组成内容。以往输配电网架以单向潮流、集中供电为架构设计理念，网架结构、设备参数、运行模式均适配常规火电集中并网的供电场景。本文从技术层面出发分析分布式电源并网对输配电网的技术影响，构建网架优化规划体系，阐述优化技术与实现路径，以期为新型电力系统背景下输配电网架的升级改造与科学规划提供技术参考。

关键词 分布式电源；输配电网架；网架拓扑结构重构；线路参数优化；电网节点优化

中图分类号：TM715 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.038

0 引言

分布式电源具有间歇性、波动性、分散性的运行特征，大规模接入后彻底改变了输配电网的潮流分布、电压特性与损耗特性，引发潮流双向流动、电压偏移、网损激增等相关技术问题。为适配分布式电源规模化并网的发展需求，解决网架结构与新型供电模式的适配性矛盾，增强输配电网的消纳能力、运行效率与安全稳定性，进行分布式电源接入下输配电网架优化规划的专项技术研究具有重要的工程价值与现实意义。

1 分布式电源并网技术特性

一是出力随机波动性，光伏、风电等可再生能源分布式电源的出力全部依赖光照、风速等自然条件，无稳定出力保障，昼夜、季节出力差异极大且短时出力波动起伏明显，难以保证恒定功率输出；出力的快速变化易引发配电网电压频繁偏移，当分布式电源高密度接入时，还会增大电网调峰压力，需要配套储能装置平抑功率波动，降低间歇性对供电质量的冲击。二是接入位置分散性，分布式电源无需依托大型变电站布局，可分散接入输电网末端与配电网各层级节点，接入点位灵活且分布零散，打破了传统电网自上而下的集中供电格局；大量分散电源就近消纳电能，缩短供电距离，但多点分散接入也增加了故障定位难度，传统配网保护策略难以适配双向潮流运行工况[1]。三是并网形式多样性，各类型分布式电源的并网接口与控制方式不同，同步机型分布式电源拥有惯性支撑能力，逆变型分布式电源通过电力电子设备并网，无机械惯性、响应速度快但抗扰动能力弱，不同并网形式的电源对电网的技术影响存在明显特征。

2 分布式电源接入对输配电网架的技术影响

2.1 电网潮流分布异化

分布式电源分散并网后，各接入节点可就地产生电能，当分布式电源出力大于本地负荷时，多余电能将反向输送至上级电网，进而形成双向潮流运行状态。大规模分布式电源集群并网时，区域电网内多节点先后产生反向潮流，会重构区域潮流分布格局，发生局部潮流拥堵、潮流偏移基准工况等现象。而且，分布式电源的随机出力波动会造成潮流大小动态变化，潮流波动频次与幅度进一步提升，基于稳态潮流设计的网架结构不能适配随时变化的潮流工况，易存在线路潮流越限、设备负载率失衡等运行困境。

2.2 电网电压质量劣化

输配电网网架的线路阻抗、节点连接方式决定了电网电压分布特性，以往网架的电压梯度按照单向供电模式设计，从电源侧到负荷侧电压慢慢小幅衰减，电压偏差一直控制在规定范围内。分布式电源接入负荷侧节点后会提升接入节点的节点电压，抵消线路电压损耗，当分布式电源出力过大时将引发节点电压越上限，发生过电压现象。而当分布式电源出力骤降或停运时节点电压会马上跌落，进而导致电压波动与电压偏差超标[2]。此外，逆变型分布式电源并网中会产生一些谐波，叠加网架原有电压畸变后会再次削弱电网电压波形质量，带来电压谐波畸变、三相电压不平衡等技术问题，极大地制约着用电设备安全。

作者简介：杨悦（1989-），男，本科，工程师，研究方向：输配电系统规划设计。

2.3 电网网络损耗增加

电网网损由线路、变压器等网架设备的阻抗损耗构成，损耗大小与潮流大小、潮流分布均匀性密不可分。分布式电源并网引发的潮流双向流动与动态偏移会使一些线路潮流增加、部分线路轻载运行，网架潮流分布极不均衡，线路阻抗损耗大幅提升。分布式电源出力的随机波动会使网架设备一直处于变负载运行状态，设备损耗难以维持最优水平，区域电网综合网损率显著提高。

3 分布式电源接入下输配电网架优化规划原则

3.1 潮流适配性原则

优化规划以动态潮流特性为依据，摒弃稳态潮流规划理念，兼顾分布式电源出力波动、双向潮流运行工况，依托网架结构调整、线路参数改进以及节点布局重构以达到全工况下的潮流分布均匀化，避免发生潮流拥堵、潮流越限等现象，有效提升电网潮流承载水平。

3.2 安全稳定性原则

网架优化要全方位增强电网电压、频率稳定支撑水平，依托优化网架拓扑结构、健全电网层级衔接关系，增强电网惯性支撑与抗扰动能力，最大限度抑制电压波动、谐波畸变与频率偏移，从根本上保障电网在分布式电源全出力工况下的顺利运行。

3.3 能效最优原则

以减少电网综合网损为目标，通过网架重构来完善电能传输路径，减少潮流交叉流动与无效损耗，均衡各线路、变压器负载率，提高电网电能传输效率，保证电网运行能效最大化[3]。

4 输配电网架优化规划技术模型构建

4.1 优化目标函数

一是电网综合网损最小化，以网架所有输电线路、配电线路及变压器的阻抗损耗总和最小为目标，量化各潮流工况下的设备损耗，规避潮流不均衡造成的额外网损；二是节点电压偏差最小化，以全网各节点电压与额定电压的偏差均值最小为目标，抑制分布式电源出力波动产生的电压偏移、电压振荡现象，保障电压质量稳定；三是网架负载均衡度最优，以全网线路、变压器设备负载率的方差最小为目标，解决传统网架适配分布式电源并网后出现的重载、轻载两极分化，增加网架设备利用率。

4.2 约束条件

一是潮流约束，遵循基尔霍夫定律，保障各节点潮流收支平衡并限定各线路、变压器的潮流传输容量，防止潮流越限与拥堵；二是电压约束，限定全网各层级节点电压一直处于国家标准允许的偏差范围内，抑制过电压、低电压及电压波动问题；三是设备运行约束，限定网架各类电力设备的负载率、温升及运行工况处于额定允许范围，保障设备安全运行；四是网架拓扑约束，保障优化后网架拓扑结构连通性完整，没有孤立节点与故障盲区，并且适配电网层级供电的拓扑逻辑。

4.3 模型求解技术

本次优化模型为多变量、多约束以及非线性复杂优化模型，线性求解算法精度低、收敛性差，难以满足工况优化需求。选用改进智能优化算法完成模型求解，依托算法迭代优化网架拓扑结构、线路截面和节点连接方式等重要参数，引入动态权重系数优化多目标协同求解精度，规避局部最优解问题。嵌入电网潮流实时计算模块，模拟分布式电源各出力工况下的电网运行状态，保障求解结果适配全场景运行需求，输出最优的网架优化规划方案[4]。

5 分布式电源接入下输配电网架关键优化技术

5.1 网架拓扑结构重构技术

拓扑重构优化重点是打破传统固定辐射式网架结构，依托调整线路连接方式、优化节点组网模式，构建多联络的柔性网架拓扑结构。针对分布式电源集中接入的区域配电网增设区间联络线路，完善网架环网结构，增强电网潮流转供与动态调节能力；针对输电网末端薄弱网架，优化层级拓扑衔接关系，消除电网薄弱节点与薄弱线路，提升全网拓扑均匀性。网格化拓扑结构可实现潮流多路径传输，解决分布式电源并网引发的潮流拥堵、负载不均情况，并且加强电网故障转供能力，减轻电源波动对电网运行带来的扰动[5]。该技术可将配电网环网联络率提升至 95% 以上，输电网末端网架薄弱点削减 80%，有效将电网潮流不均衡系数控制在 0.15 以内，故障转供时间缩短至 20 ms 以内，大幅提升分布式电源并网后电网的供电可靠性与潮流调节冗余度。

5.2 线路参数优化升级技术

线路参数优化旨在针对老旧线路、重载线路进行升级，围绕区域分布式电源并网规模与最大潮流传输需求，优化线路导线截面，降低电能传输损耗。针对分布式电源并网引发的高频潮流波动工况，完善线路绝缘参数以及动态承载能力，增强线路对动态潮流、波动工况的适配程度；对于轻载冗余线路可以拓扑调整与参数匹配优化，加快线路负载率提升，高效处理网架设备利用率失衡情况，以保证全网线路参数与潮流

工况之间真正契合。通过替换JL/G1A-240及以上大截面导线，可将线路有功损耗降低12%～18%，升级后的线路动态载流量可提升25%，适配分布式电源0～100%出力区间的高频波动工况，同时将轻载线路平均负载率从30%提升至55%～65%，彻底改善电网设备利用率偏低的问题。

5.3 电网节点优化配置技术

节点优化配置技术的重点是统筹区域负荷分布与分布式电源并网布局，优化电源接入节点与电网分压节点的布局。对分布式电源集群接入区域增设分压节点与联络节点，分散潮流压力，防止单节点潮流过载；优化节点电压支撑配置，结合节点出力波动特性匹配无功支撑装置，使节点电压更加稳定。此外，规范分布式电源并网节点层级，实现不同容量分布式电源适配对应电压等级电网接入，防止低压电网大容量电源并网产生的潮流与电压扰动情况。该优化方式可将单节点最大潮流承载压力分摊40%以上，搭配SVG动态无功补偿装置后，节点电压波动偏差可控制在±2%额定电压范围内，同时规范并网标准后，低压侧大容量电源并网扰动故障发生率可降低90%，保障电网电压运行稳定性。

5.4 网架动态适配优化技术

通过在网架重要节点、线路配置动态调节设备，构建网架动态调节体系，持续性响应分布式电源出力波动以及负荷变化。依托电网实时潮流、电压监测数据调整网架潮流传输路径与无功分布，修正电网运行工况，抑制电压波动、潮流偏移等问题。优化网架运行控制逻辑，实现网架结构与分布式电源出力的动态协同匹配，在新能源大发、小发和停运等各工况下均可以保持电网最优运行状态，最大限度增强网架对分布式电源间歇性、波动性的适配水平。通过配置智能调压装置、柔性直流调节设备，可实现电网工况毫秒级动态响应，潮流偏移修正精度可达98%，在分布式电源出力波动幅度±30%的极端工况下，仍能维持电网功率因数稳定在0.95以上，全网运行损耗降低10%～15%[6]。

6 输配电网架优化后电网技术性能提升分析

在潮流运行特性方面，优化后的网格化网架结构实现了潮流多路径传输，真正突破了传统网架单向潮流的局限，消解了分布式电源并网引发的潮流拥堵、双向潮流紊乱情况，全网潮流分布均匀性明显提升，线路、变压器负载率趋于合理，电网潮流承载能力与动态调节能力也大大提高，可全方位契合分布式电源全出力波动工况的潮流运行需求。

在电压质量方面，依托节点优化、无功适配与拓扑重构，电网电压梯度分布更合理，抑制了分布式电源出力波动造成的电压偏移、电压振荡，节点电压一直维持在标准区间。网格化网架结构增强了电网谐波抑制能力，电压波形畸变率下降，全网电压合格率与波形质量提升，真正解决了新能源并网带来的电压质量劣化问题。

在电网能效方面，线路参数优化与潮流路径重构降低了网架设备的阻抗损耗，消除了潮流交叉流动、负载失衡引发的额外网损，全网综合网损率下降，电能传输效率提升。同时，设备利用率更加均衡，避免了传统网架部分设备过载损耗、部分设备闲置浪费的问题，电网整体运行能效实现最优状态。

在安全稳定性方面，优化后的网架拓扑结构连通性更强、冗余度更高，电网抗扰动能力以及故障容错能力提升。网架动态适配体系可快速响应分布式电源的随机波动与电网扰动，维持系统频率、电压稳定，解决了大规模新能源并网所造成的电网惯性不足、稳定性偏弱等技术难题。

7 结束语

分布式电源的规模化并网彻底改变了传统输配电网的潮流分布、电压特性与运行模式，对网架结构的适配性、稳定性提出了全新的技术要求，基于集中供电模式设计的输配电网架已无法适配新型电力系统的运行需求。网架技术优化可解决分布式电源并网带来的电网运行技术难题，实现网架结构与分布式电源运行特性的适配，增强输配电网的新能源消纳能力、电能传输效率与安全稳定运行水平，加快电力系统低碳化、智能化发展。

参考文献：

[1] 赵瑞锋,侯祖锋,王超,等.内嵌可行割约束的输配电网分布式交替优化供电恢复策略[J].智慧电力,2026,54(03):30-38.

[2] 董晓钦.新型电力系统背景下输配电网协同运行研究[C]//河南省豫商经济文化交流协会.2026中国城建经济研讨会论文集(中册).2026.

[3] 林晨宇.面向新能源消纳的输配电网经济调度优化模型[J].电气自动化,2025,47(03):33-36.

[4] 吴文强.考虑分布式资源用户入网引导的输配电网运营商区块链支撑系统[D].南京:东南大学,2024.

[5] 房凯,胡德建,杨光.接入分布式电源的输配电网协调无功优化[J].安徽电子信息职业技术学院学报,2022,21(05):7-13.

[6] 赵硕.输配电网损与分布式电源接入的相关影响因素分析[J].通信电源技术,2020,37(12):219-221.

方锁通用锁体打孔夹具设计与自动化应用

朱国富

（浦江宝儿制锁有限公司，浙江 金华 322200）

摘 要 打孔夹具作为锁体加工的专用工装，其设计精度与自动化水平直接影响了锁体孔位的加工质量及生产效率。本文以方锁体通用打孔夹具项目为例，结合现有夹具的局限性，从钳口可调靠山、夹紧系统设计等方面论述了多规格通用打孔夹具的设计策略，并设计夹具自动化控制方案，提高生产线自动化水平。实践表明，本文所设计的方锁通用锁体打孔夹具，有效解决了多规格方锁批量生产中的打孔夹具通用性差、定位精度不足等问题，降低了操作人员的劳动强度，满足现代工业生产线的自动化生产需求。

关键词 锁体加工；打孔夹具；定位精度；钳口可调靠山；数控机床

中图分类号：TG75；TP29 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.039

0 引言

锁体打孔夹具是挂锁加工中关键的工艺工装，也是提升成品挂锁使用性能、降低售后故障的重要基础。然而，传统挂锁制造使用针对单一规格锁体设计的专用夹具，“一规格一套夹具”的加工模式在面对多规格、小批量的生产需求时，暴露出夹具调换频繁、调试时间长等弊端。部分老旧夹具结构设计不合理，导致定位基准磨损快、夹紧力分布不均等，使锁体孔位加工精度波动较大，难以满足高精度自动化装配线的要求。本文将方锁通用打孔夹具项目作为研究对象，探索多规格通用的打孔夹具设计优化策略，旨在为进一步提升锁具产线的生产效能提供参考。

1 案例项目背景

本文以某企业方锁通用打孔夹具项目为例，该企业钢锁体打孔加工采用“一规格一套夹具”的生产模式。为了适配市场需求，实现多规格、高精度生产，项目需针对性研发通用性高、加工精度高、可自动化控制的打孔夹具。项目目标在于克服钢锁体加工单规格单夹具的局限，使新型夹具能覆盖企业 80% 以上不同规格的钢锁产品加工，提高打孔工序的加工精度与自动化水平。

2 现有夹具局限性分析

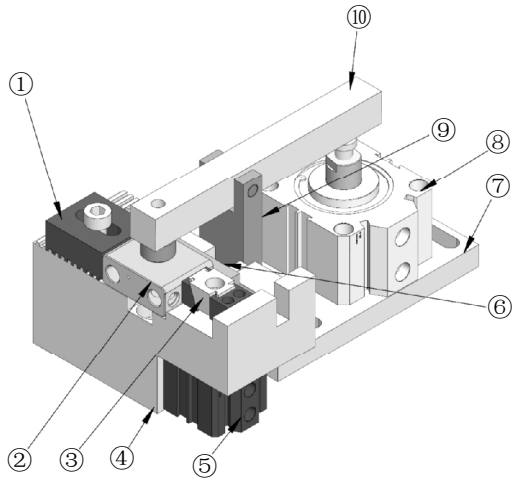
厂区现有钢锁打孔夹具，存在较多局限。一是夹具通用性较差，每套夹具仅适配单一规格的钢锁产品，无法兼容多型号锁体打孔加工，在产品规格切换时需频繁更换、调试夹具，降低了产线的生产效率，无法适配多样化的生产需求[1]。二是夹具成本较高，单一规格对应一套专用夹具，导致工装采购、制作、维护、存储成本大幅增加，且工装利用率较低，造成生产成本增加与资源冗余。三是现有夹具的定位精度存在明显缺陷，夹具固定结构较为固定，无法适应同一规格产品毛坯的尺寸偏差，易出现孔位偏移或孔距超差等问题，直接影响锁体加工的精度及产品合格率。四是现有夹具自动化程度偏低，全程采用人工手动夹紧的加工方式，夹紧稳定性差，易受人工操作误差影响，导致加工精度不稳定，且人工手动夹紧方式大幅增加了工人的劳动强度，导致生产线作业效率低下，难以满足大批量、高效的自动化生产加工需求，严重制约了产线生产节拍的提升。

3 多规格通用打孔夹具设计开发

3.1 钳口可调靠山设计

挂锁锁体目前存在五种不同规格，但是均为方形，只是大小尺寸不同。因此，通过设计钳口可调靠山结构改变夹持开口大小，适配五种不同尺寸锁体。如图 1 所示，该结构基于六点定位原理，采用不完全定位方式，以钳口可调靠山为核心多规格适配零件，搭配各定位组件在 X+、Y+-、Z+-5 个自由度上约束锁体。其中，X+ 自由度依靠后挡条抵住锁体底面，所有规格锁体的底面定位基准一致，均靠在后挡条上。Z+- 自由度由锁体孔夹具座承托锁体下表面，SDA63×15 气缸带动长杠杆下压锁体上表面，限制 2 个自由度。Y+- 自由度由钳口可调靠山与 OK 夹配合完成，使用时由 SDA32×10 气缸驱动 OK 夹，将锁体侧面压紧在钳口可调靠山定位面，限制 2 个自由度。

作者简介：朱国富（1976-），男，专科，工程师，研究方向：机电设计。



（注：①钳口可调靠山；②50不锈钢锁体；③M6单边OK夹；④锁体孔夹具座；⑤SDA32×10气缸；⑥后挡条；⑦气缸底板；⑧SDA63×15气缸；⑨杠杆支架；⑩长杠杆。）

图1 方锁通用打孔夹具

钳口可调靠山配置长槽螺丝孔与锯齿底面，实现了结构Y轴向的开口调节。在夹具更换不同规格锁体时，先松开靠山锁紧螺钉，沿长槽滑动调整钳口宽度，调整到位后重新锁紧螺钉，再由锯齿结构咬合锁止，保证定位精度。可调式钳口靠山结构如图2所示，锯齿咬合锁止可避免无级调节的偏移松动问题，大幅提升多规格切换时的定位精度与可靠性。长槽螺丝孔则为钳口调节提供充足的行程，使其能适配不同锁体的夹持定位需求。钳口可调靠山解决了传统夹具通用性不足的难题，无需更换夹具，仅通过微调靠山钳口即可完成多规格锁体的固定，兼顾调节的灵活性与定位的稳定性，大幅提升夹具的通用性及加工的适配性，降低工装成本。

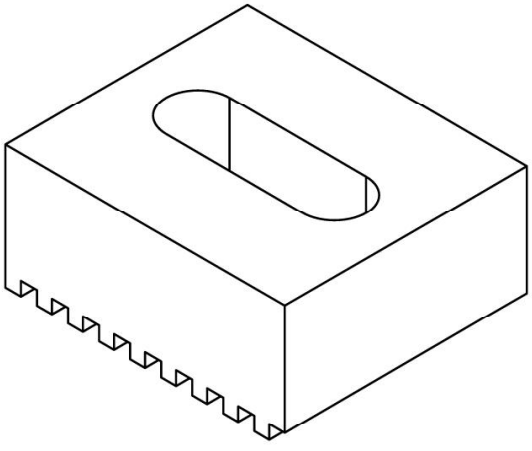


图2 钳口可调靠山结构示意图

3.2 夹紧系统设计

以往夹具依赖工人手动夹紧，夹紧力度不均匀，且定位约束性较差，同时受锁体毛坯尺寸偏差的影响，工件夹紧后易出现打孔偏位或精度超差等问题。对此，项目创新设计了双气缸组合夹紧系统，以锁体孔夹具座、后挡条、钳口可调靠山为定位基准，利用气缸联动杠杆、OK夹，弥补毛坯尺寸偏差，提升打孔精度。

在具体设计中，双气缸双向夹紧作为夹紧系统的基础布局，其中，SDA63×15气缸搭配长杠杆夹紧Z向锁体大面；SDA32×10气缸搭配OK夹夹紧Y向锁体侧面，形成大面与侧面双向的立体夹紧结构，如图1所示。借助双向夹持力，精准覆盖锁体核心受力定位面[2]。如果直接利用气缸夹紧锁体，夹紧力偏小，加工钻孔时锁体易因震动引发位移。因此，设计还创新融入了杠杆原理，Z向、Y向通过长杠杆、OK夹结构放大了气缸输出的力，使得作用在锁体大面和锁体侧面的夹紧力足够高，锁体被牢牢固定在夹具上，提高钻孔加工精度，满足孔位加工公差要求。Z向气缸行程为15 mm，Y向气缸行程为10 mm，面对同规格但毛坯尺寸存在偏差的锁体，气缸可以自动调节伸缩距离。毛坯尺寸偏大时，气缸伸缩量减小；反之，毛坯尺寸偏小时，气缸伸缩量增大。这样，在气缸有效行程范围内，可有效弥补产品毛坯的尺寸偏差，使锁体贴合靠山、锁体孔夹具座。

该夹紧系统摒弃了人工紧固方式，以气动驱动为核心，利用气动夹持响应速度快、动作稳定安全等优势，将单次工件装夹时长控制在5 s以内，大幅缩短装夹工时，降低了工人劳动强度。双气缸的协同夹紧结构，搭配钳口可调靠山结构，实现多规格锁体精准稳定装夹，为打孔工序的自动化控制奠定基础。

3.3 夹具材料选型

根据40-60系列不锈钢挂锁锁体的加工条件，综合考量工件硬度、夹持磨损、批量生产载荷等要素，对整套夹具零部件实施差异化材料选型，使夹具能在长期高负荷工况下保证结构强度及定位精度[3]。如表1所示，钳口可调靠山所选材质为Cr12，该材质具备优异的耐磨性、淬透性，能够承受长期摩擦、挤压、磨损等工况，可有效抵抗不锈钢工件带来的摩擦损耗，同时能够有效控制夹具制作成本。锁体孔夹具座、气缸底板、杠杆支架，此类部件为夹具主要承载基础件，材质选择普通碳钢，其整体结构刚度好，抗形变能力较强，能够规避大批量反复夹紧工况下的本体变形，保证各安装孔位、基准面不变形，防止锁体打孔偏移。夹具后挡条是夹具X向限位直接接触不锈钢锁体的零

件，采用合金钢材质，利用合金钢优异的耐磨性及抗冲击能力，抵抗工件频繁装夹撞击，使夹具不易出现压痕、磨损等损伤，保障夹具定位基准的长期稳定。针对不同零件的受力、摩擦工况进行差异化选材，有效避免局部零件过早磨损失效，保障夹具使用寿命，夹具定位精度长期可靠，降低工装维护更换频率[4]。

表 1 夹具零件材料

零件名称	材质
长杠杆	45 号钢
杠杆支架	普通碳钢
气缸底板	普通碳钢
后挡条	合金钢
锁体孔夹具座	普通碳钢
钳口可调靠山	Cr12

4 夹具自动化控制

由于现有数控机床无可用外接 IO 控制点，无法直接输出信号驱动夹具气缸动作，若新增独立控制器则会提升改造成本，同时还会增加机床加工动作与夹具夹紧动作时序不同步的风险，易发生锁体未夹紧就打孔加工等情况，引发工件报废、刀具磕碰等问题。所以，充分挖掘现有数控机床资源，经现场勘查发现该机床配备 8 工位旋转刀架，实际生产仅使用 4 个工位。在自动化改造时，利用其中 2 个闲置工位的输出信号作为控制源，外接中间继电器实现信号转换，驱动夹具两套气缸完成夹紧、松开动作。无需对机床主控系统硬件进行大规模改造，通过中间继电器完成电平信号隔离转换，将刀架工位输出信号转化为气缸电磁阀驱动信号，分别控制夹具系统上部 SDA63×15 气缸与侧面 SDA32×10 气缸动作，实现夹具夹紧机构自动化控制。

在软件改造层面，采用自定义 G 代码，完成机床与夹具的通信协同。编写专用 G 代码指令，将刀架工位切换动作、夹具夹紧、打孔加工、夹具松开整套工序进行时序绑定。当加工程序运行时，只需执行对应的自定义 G 代码，机床便可调用闲置刀架工位输出控制信号，再经过中间继电器驱动气缸完成工件装夹，夹具夹紧信号确认后，机床执行打孔切削动作，直至加工完成，再利用 G 代码指令输出信号，驱动气缸松开工件，从而实现了装夹、加工、松件的全流程自动化控制。

5 现场调试与验证

项目对新型通用锁体打孔夹具的多规格适配能力、夹紧定位性能、夹具与机床的联动控制功能，逐项开展现场调试与验证[5]。调试阶段对钳口可调靠山进行了档位调试。借助锯齿咬合结构与长槽螺丝孔反复调节夹持开口，依次装入 40、45、50、55、60 五种规格的不锈钢挂锁锁体，校验靠山调节锁紧后的定位可靠性，并核查不同规格工件装夹贴合状态。再开展夹具系统的定位夹紧性能验证，调试两侧气缸，模拟同规格锁体毛坯尺寸偏差工况，反复执行夹紧、松开动作，检查工件夹紧后是否存在间隙，并对加工后的锁体孔位进行尺寸检测，核对孔距、同轴度等关键指标，验证夹具定位精度。而后开展机床联动通信调试，完整跑通装夹、打孔、松件整套加工流程，校验机床动作与夹具动作时序匹配度。经过多次工件试生产验证，使用新型夹具加工的锁体，各项指标均能够达到合格标准，新型夹具有效解决了原单一规格夹具成本高、不通用、定位精度差、自动化不足的问题，满足企业多规格方形锁体量产需求。

6 结束语

结合企业现有锁体打孔夹具的局限性，本文围绕夹具的结构与自动化控制方案进行了设计优化，有效突破了单规格夹具的通用性瓶颈，实现了多型号方形锁体的高效共线生产。针对打孔夹具通用性差的问题，采用带有锯齿的钳口可调靠山，搭配螺丝孔长槽，使夹具适合不同规格锁体且调节精度可靠；夹具增设双向夹紧气缸，协同长杠杆、OK 夹提高了夹具的定位精度。同时，基于既有机床的实际情况，利用多余工位连接中间继电器，搭配自定义 G 代码，实现夹具数字化控制。最终，经现场调试与验证，新夹具各项性能指标均达到预期要求，锁体装夹时间≤ 5 s，孔位公差 ± 0.05 mm，可适配该企业 80% 以上的钢锁加工规格，提高了其在钢锁市场的竞争力。

参考文献：

[1] 国兴洋,孔凡臣,王加祥,等.焊合桥壳车削工装夹具设计 [J]. 机电技术 ,2025(05):81-85.
[2] 王萍,王金鹏.机电维修中电机定子高精度定位夹具设计 [J]. 今日制造与升级 ,2024(12):127-130.
[3] 卢泽斌.零件数控加工时夹具设计对加工精度的影响及改进 [J]. 模具制造 ,2023,23(11):151-153,156.
[4] 任昭,姚万军.基于CROE的加工中心夹具设计及有限元分析 [J]. 现代制造技术与装备 ,2022,58(12):114-116.
[5] 辛百灵,陈桂芳.桥壳中段卧式双面数控镗床专机夹具设计 [J]. 制造技术与机床 ,2021(12):44-46.

工业固废协同处置对土壤理化性质的影响分析

苏志成

（瑞盛环境股份有限公司，江苏 宜兴 214215）

摘 要 为了研究工业固废协同处置技术对土壤理化性质的影响规律，确定合适的协同处置比例，本研究选择典型工业固废和供试土壤，设置不同的固废协同处置比例梯度进行试验。用标准化的检测方法系统测定和分析处置后土壤物理性质（容重、孔隙度、含水量等）和化学性质（pH值、有机质含量、养分含量、重金属含量等）的变化特点，比较不同处置比例下土壤理化性质的差异。结果表明，工业固废协同处置对土壤理化性质有显著影响，合理的处置比例可以改善土壤孔隙结构、提高土壤有机质和养分含量，但是过量处置容易造成土壤pH失衡、重金属累积等问题。根据试验结果，分析固废协同处置对土壤理化性质的影响机理，提出兼顾土壤改良和固废无害化处置的协同工艺适宜范围。研究成果可为工业固废资源化利用与土壤生态修复的协同发展提供数据支撑和技术参考。

关键词 工业固废；协同处置；土壤物理性质；土壤化学性质；处置比例

中图分类号：X705；S153 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.040

0 引言

随着工业化的不断发展，工业固废的排放量也在不断增大，传统的堆存、填埋等方式处置工业固废，占用大量土地，而且容易通过淋溶、渗漏等方式造成土壤、水体、大气环境污染，对生态系统安全构成威胁[1]。工业固废协同处置属于固废无害化、减量化、资源化的重要技术途径，依靠多种固废的配伍协同，可以实现污染物的协同降解、养分的互补利用，给固废资源化利用提供新方向。目前，对于单一工业固废对土壤性质的影响已有较多的研究，但是不同类型工业固废协同处理后对土壤物理、化学性质的综合影响规律以及合适的处置比例的研究还比较缺乏，协同作用机理也未完全明了。因此，本文进行工业固废协同处置对土壤理化性质影响的试验，分析处置后土壤理化指标变化特征，确定合适的协同处置比例，探讨其内在机理，为工业固废协同资源化利用技术优化、土壤生态修复、区域生态环境质量改善提供理论依据和实践支撑[2]。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自某典型农田表层土壤（0 cm～20 cm），去除石块、根系等杂质后，自然风干、研磨、过2 mm筛，备用。土壤基础理化性质如下：容重1.32 g/cm^3，孔隙度48.5%，田间持水量22.3%，pH值6.8，有机质含量18.6 g/kg，全氮1.05 g/kg，全磷0.62 g/kg，全钾18.3 g/kg，重金属（铅、镉、铬）含量均符合土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618-2018）限值要求。选取当地排放量较大的粉煤灰、钢渣两种典型固废，经过预处理去除杂质，烘干至恒重，研磨过1 mm筛。粉煤灰主要化学成分：SiO_2 52.3%、Al_2O_3 28.6%、CaO 6.8%；钢渣主要化学成分：CaO 42.5%、Fe_2O_3 21.3%、SiO_2 15.6%；两种固废均经检测无有毒有害物质超标，具备协同处置的可行性。

1.2 试验设计

试验采用盆栽的方式进行，以粉煤灰和钢渣固废协同处置比例为变量，设置五个处理组，CK（对照组，不加固废）、T1（2%固废）、T2（5%固废）、T3（8%固废）、T4（12%固废），每组做三次重复，保证试验数据的可靠性。每个试验盆装土5 kg，按照设定的比例加入预处理后的工业固废，充分搅拌后，调节土壤含水量至田间持水量的70%，放在温室里培养，培养周期为90 d，在培养期间定期浇水，保持土壤含水量稳定，避免外界因素的干扰。

1.3 检测指标与方法

培养结束后，采集各处理组的土壤样品，按照标准化的方法测定有关指标。土壤物理性质指标：容重用环刀法测定，孔隙度根据容重和土壤密度计算得出，

作者简介：苏志成（1987-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：生态环境工程。

田间持水量用重量法测定；土壤化学性质指标：pH 值用电位法（土水比 1:2.5）测定，有机质含量用重铬酸钾氧化—外加热法测定，全氮用凯氏定氮法测定，全磷用钼锑抗比色法测定，全钾用火焰光度法测定，重金属（铅、镉、铬）含量用电感耦合等离子体质谱法（ICP-MS）测定。

2 试验结果与分析

2.1 工业固废协同处置对土壤物理性质的影响

不同的工业固废协同处置比例对于土壤物理性质的影响是不一样的。对照组 CK 的土壤容重都呈下降趋势，孔隙度和田间持水量呈上升趋势，且变化规律一致，在 T2 处理组（5% 固废）达到最佳效果。由表 1 可知，T2 处理组土壤容重为 1.16 g/cm^3，比 CK（1.32 g/cm^3）减少了 12.1%；孔隙度提高到 53.5%，比 CK 提高了 10.3%；田间持水量达到 24.2%，比 CK 提高了 8.5%。T4 处理组（12% 固废）土壤容重比 T2 处理组增加 4.8%，孔隙度减少 3.2%，田间持水量下降 2.9%。这说明适量工业固废协同处置可以改善土壤颗粒结构，降低容重、增加孔隙度，提高土壤保水能力，但是过量添加容易造成固废颗粒团聚胶结，反而破坏土壤物理结构的稳定性。

表 1 不同协同处置比例对土壤物理性质的影响

处理组	容重（g/cm^3）	孔隙度（%）	田间持水量（%）
CK（0%）	1.32±0.03a	48.5±1.22c	22.3±0.85c
T1（2%）	1.25±0.02b	50.8±1.05b	23.1±0.78b
T2（5%）	1.16±0.03c	53.5±1.31a	24.2±0.92a
T3（8%）	1.18±0.02c	52.8±1.14a	23.9±0.81a
T4（12%）	1.21±0.03b	51.8±1.20b	23.5±0.75b

2.2 工业固废协同处置对土壤化学性质的影响

工业固废协同处置对土壤化学性质的影响是双向的，既可以提高土壤养分储备，也可以引起 pH 失衡和重金属微量累积，且该效应随处置比例的变化而变化[3]。土壤养分及有机质方面，各处理组均优于对照组，其中 T2 处理组提升效果最好，T4 处理组虽然养分含量较高，但是综合风险上升。土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均随固废添加比例增加先升后降，峰值均出现在 T2 处理组，该组土壤有机质含量达到 23.0 g/kg，比 CK 提高 23.6%；全氮、全磷、全钾含量分别为 1.24 g/kg、0.78 g/kg、20.6 g/kg，比 CK 分别提高 18.2%、25.8%、12.5%。

养分提高主要是由于粉煤灰和钢渣中含有的钙、硅、氮磷等元素可以直接补充土壤养分库，疏松的固废结构给微生物活动提供了一个良好的环境，有利于土壤有机质的合成和积累。在 pH 值和重金属方面，随着固废添加量的增加，土壤的 pH 值呈持续上升的趋势，CK 组 pH 值为 6.8，T2 组升至 7.3，处于适宜作物生长的范围（6.0 ～ 7.5），而 T3、T4 处理组的 pH 值分别达到 7.6、7.9，超出了适宜的范围，容易造成土壤中磷、铁等元素的固定，降低养分有效性。

从重金属含量上看，各处理组的铅、镉、铬含量均满足《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）限值要求，但是呈微量累积的趋势。T4 处理组铅、镉含量比 CK 分别上升 15.3%、12.1%，铬含量上升 8.7%，主要是由于工业固废中含有微量的重金属，随着固废添加量的增加在土壤中逐渐富集。因此适量的固废协同处置可以改善土壤的化学性质，过量则容易造成 pH 失衡和重金属微量累积，造成土壤质量潜在风险[4]。

2.3 不同协同处置比例对土壤理化性质的差异分析

为了更直观地反映各个处理组土壤理化性质的综合表现，用隶属函数法对容重、孔隙度、有机质、全氮、全磷、全钾、pH 值 7 项主要指标进行综合评价，得到各处理组综合得分（见表 2）。结果表明，各处理组综合得分排序为 T2（0.82）＞ T3（0.65）＞ T1（0.53）＞ T4（0.48）＞ CK（0.31），T2 处理组综合表现最好，与其他处理组差异显著。

方差分析结果表明，T2 处理组与其它处理组的各

表 2 不同协同处置比例下土壤理化性质综合评价得分

处理组	容重	孔隙度	有机质	全氮	全磷	全钾	pH 值	综合得分
CK（0%）	0.21	0.25	0.28	0.30	0.27	0.32	0.45	0.31±0.04d
T1（2%）	0.43	0.51	0.46	0.42	0.48	0.45	0.58	0.53±0.03c
T2（5%）	0.85	0.92	0.87	0.82	0.89	0.78	0.75	0.82±0.05a
T3（8%）	0.78	0.85	0.81	0.76	0.83	0.72	0.38	0.65±0.04b
T4（12%）	0.62	0.68	0.73	0.69	0.75	0.66	0.21	0.48±0.03c

项指标及综合得分差异均达到显著水平（P＜0.05），说明5%的固废协同处置比例是该试验条件下适宜的固废协同处置比例。

3 工业固废协同处置影响土壤理化性质的机理及工艺优化方向

3.1 工业固废协同处置影响土壤理化性质的机理

工业固废协同处置对土壤理化性质的影响，是物理作用和化学作用共同作用产生的[5]。

从物理机理上看，粉煤灰呈疏松多孔结构，钢渣颗粒硬度高，二者协同添加可以填充土壤孔隙，打破土壤黏粒团聚体，降低容重、增加孔隙度，提高土壤保水保肥的物理空间；但是过量添加时，固废颗粒之间容易发生胶结反应，形成致密团聚体，导致土壤孔隙堵塞，物理性质变差。

从化学机理上讲，钢渣中含有的碱性氧化物（CaO、MgO）可以中和土壤的酸性，提高pH值，释放钙、磷等养分元素；粉煤灰中的硅、铝元素可以和土壤有机质结合，促进养分的固定和积累；但是过量添加时，碱性物质累积造成pH值过高，固废中微量重金属通过吸附、沉淀作用在土壤中累积，进而影响土壤的化学性质。固废协同处置还可以间接影响土壤微生物群落结构，从而调节土壤有机质分解和养分循环，进一步加强土壤理化性质的影响。

3.2 工业固废协同处置工艺的适宜性与优化方向

根据试验结果，5%的工业固废（粉煤灰、钢渣各占50%）的协同处置比例为该试验条件下最合适的方案，既可以实现工业固废的资源化利用，又可以改善土壤理化性质，具有生态效益和环境安全性的双重优势。

从工艺优化的角度来说，首先要根据固废的类型来调整配伍比例，对不同成分的工业固废进行预处理（活化、筛分）来降低有害成分的含量，从而提高协同处置的效果。其次要结合目标土壤类型（酸性、碱性、中性）来调节固废添加量，对于酸性土壤可以适当增加钢渣的比例来中和酸性；对于碱性土壤则减少钢渣的添加量，防止pH值失衡。最后可以引入微生物强化技术，搭配功能微生物菌剂来缓解过量固废造成的土壤结构恶化的问题，同时促进重金属钝化，提高协同处置的综合效益。

4 结论

本研究采用不同比例的工业固废（粉煤灰和钢渣的比例为1:1）协同处置对土壤理化性质的影响试验，通过图表数据的分析得出如下结论：

一是工业固废协同处置对土壤理化性质有显著影响，呈现低比例弱效、中比例最优、高比例劣化的规律，适量添加可以改善土壤物理结构（降低容重、增加孔隙度）、提高土壤化学性质（增加有机质和养分含量），过量添加会导致土壤物理结构恶化、pH失衡和重金属微量累积。

二是不同的协同处置比例对土壤理化性质的影响差异很大。经过综合评价，5%的固废添加比例为试验最优比例，在该比例下土壤容重、孔隙度等物理指标和有机质、养分等化学指标均达到最优水平，pH值适宜，重金属含量未超标，综合效益最高。

三是工业固废协同处置通过物理填充、化学反应、微生物调控的协同作用影响土壤理化性质，粉煤灰和钢渣的颗粒互补、成分协同可以实现固废资源化和土壤改良的双赢。

该研究成果为工业固废协同处置技术的推广应用、土壤生态修复提供数据支撑和试验依据，但是试验只针对农田土壤与粉煤灰、钢渣组合，且为90 d短期培养试验，存在一定的局限性。未来需要扩大试验范围，涵盖不同的土壤类型（酸性、碱性土壤）以及工业固废的组合，开展长期定位试验，监测土壤理化性质和生态功能的长期变化，进一步优化协同处置工艺参数，探索固废预处理技术与微生物强化技术的耦合应用，为不同区域、不同类型固废与土壤的协同处置提供更加全面、可靠的技术参考，推动工业固废资源化利用与生态环境保护的协同发展。

参考文献：

[1] 杨超,唐焕,王蔓.生活垃圾焚烧发电厂协同处置一般工业固废环境影响评价难点分析[J].清洗世界,2025,41(03):169-171.

[2] 叶恒棣,蔡飞翔,丁成义,等.热解与烧结协同处置富碳有机固废的新工艺[J].烧结球团,2022,47(06):49-56.

[3] 姜萌萌,钟崇巍,胡蝶,等.生物炭-污泥协同黑麦草修复煤基固废堆场表层土壤及重金属污染风险评价[J].环境工程学报,2025,19(06):1455-1463.

[4] 罗欢.皮革固废制多孔炭治理土壤污染研究[J].西部皮革,2025,47(13):4-6.

[5] 关冰,吕林有,赵艳,等.多源固废协同利用沙地生态治理的可行性探讨[J].水土保持应用技术,2022(06):4-6.

智能化节水背景下农田水利灌溉系统优化改造实践

侯 利

（山东省济南市长清区人民政府孝里街道办事处，山东 济南 250300）

摘 要 水资源短缺与农业用水低效是制约我国现代农业高质量发展的核心瓶颈，推进农田水利灌溉系统智能化、节水化改造是落实国家节水行动、发展智慧农业的关键举措。本文立足于智能化节水发展背景，系统梳理农田水利灌溉系统优化改造的核心理论基础，深入剖析传统灌溉系统存在的设施老化、管控粗放、水资源利用率低、智能化水平不足等突出问题，构建“感知—传输—决策—执行—运维”一体化的智能灌溉优化改造体系。结合农田灌溉工程实践，阐述智能化改造的关键技术、改造方案与实施路径，通过实例验证优化改造的节水、节能、增产增效成效，并针对改造过程中的技术短板、资金投入、运维管理、普及应用等现实难题提出优化对策。研究结果可为新时期农田水利智能化升级、农业水资源高效利用、灌区现代化建设提供实践参考。

关键词 智能化节水；农田水利；灌溉系统；硬件设施；运维管理体系

中图分类号：S275 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.041

0 引言

我国是农业用水第一大国，农业灌溉用水量占全国总用水量 60% 以上，但当前农田灌溉水有效利用系数偏低，农业水资源浪费突出。随着物联网、大数据、人工智能等数字技术与水利工程深度融合，智能化节水已成为农田水利核心发展趋势，为传统灌溉系统转型升级提供了全新路径。农田水利灌溉系统是支撑农业生产的基础性保障工程，其运行效率直接决定农业用水水平与粮食生产稳定性。近年来，国家高度重视农田水利现代化，出台了《国家节水行动方案》等政策，对大中型灌区智能化改造、精准节水灌溉技术推广、智慧灌溉体系构建提出明确要求。本文梳理现有农田灌溉工程运行现状，开展灌溉系统优化路径研究，识别影响运行效能的核心技术瓶颈，形成科学可落地的系统性优化策略，补齐传统灌溉模式短板，实现节水减耗与生态环保目标，最终助力农作物产量与品质同步提升。

1 传统农田水利灌溉系统存在的主要问题

1.1 基础设施老化，输水损耗严重

传统土渠输水方式渗漏、蒸发损失大，输水利用系数普遍低于 0.6，大量的水资源在输送过程中被浪费。而且老旧泵站设备能耗高、运行不稳定，水泵与管网匹配度差，灌溉供水压力不均，容易造成局部过灌、局部欠灌，不仅造成水资源的浪费，还会增加灌溉能耗和运维成本。部分农田灌溉设施布局不合理，碎片化严重，无法满足规模化、标准化智能灌溉改造的需求。

1.2 灌溉管控粗放，精准化水平不足

传统的农田灌溉大多依靠农户的人工经验来决定灌溉的时机和灌溉量，没有科学的数据支持，主观性和盲目性都很明显。多数灌区还采用统一的大水漫灌方式，不能按照作物种类、生育期、土壤墒情等不同条件进行差异化灌溉，造成无效灌溉现象比较普遍。由于传统灌溉管控模式信息化程度低，无法对土壤湿度、管网流量、田间积水等情况进行监测，在灌溉过程中不能动态调节，因此雨后重复灌溉、干旱少灌等问题频繁出现，水资源浪费更加严重。

1.3 智能化水平滞后，系统协同性差

目前，基层农田灌溉智能化普及率整体偏低，大部分灌区没有安装智能监测、调控设备，仍然依靠人工启闭阀门、人工巡查管网、人工统计水量。少数完成初步智能化改造的灌区存在设备碎片化、系统不兼容问题，感知终端、控制设备、管理平台各自独立运行，数据不能互通共享，不能形成闭环管控体系[1]。缺乏成熟的智能决策算法支撑，大多数属于定时灌溉、定

作者简介：侯利（1978-），女，本科，工程师，研究方向：农田水利。

量灌溉，不能根据气象、作物生长动态来调整灌溉方案，智能化节水优势不能充分发挥。

1.4 运维体系不健全，长效运行能力差

农田水利灌溉系统存在“重建设、轻运维”的问题。传统的灌溉设施没有形成常态化的巡查、维护、检修机制，设备故障不能及时发现和处理，从而造成灌溉系统运行效率不断下降。智能化改造后，部分灌区缺少专业运维人员，基层管护人员数字技术操作能力不够，不能熟练使用智能管理平台、排查设备故障、优化灌溉参数，造成智能设备闲置、系统功能浪费。此外，灌溉系统管护资金投入不足，市场化运维机制缺失，无法保证智能灌溉系统的长期稳定运行。

2 智能化节水背景下农田水利灌溉系统优化改造方案与实践路径

2.1 总体改造原则

本次优化改造根据农田灌溉实际情况，按照四大核心原则来执行。一是节水高效原则，以提高灌溉水有效利用系数为目标，用设施改造、智能管控的办法最大程度地减小水资源的浪费。二是因地制宜的原则，依据地区气候特点、土壤特征、农作物种植方式以及灌区面积等不同情况选择合适的智能化改造方案，防止同质化的现象发生。三是经济适用原则，既要考虑改造投入又不能忽略日常运行支出，在保证系统运行的基础上优先进行改造，并且选用价格便宜、性能好并且易于维护的智能设备来达到最佳效果。四是长效稳定原则，在完成硬件设施建设后还要做好软硬件平台运维和后期保障工作，创建出具有长期运营能力的现代智能灌溉系统。

2.2 硬件设施优化改造，夯实节水基础

对传统灌溉设施老化、损耗严重的问题进行全面的硬件升级。实施输水设施提质改造，淘汰老旧土渠、破损管网，采用防渗渠道、PE防渗管网替代传统的输水设施，大幅度降低输水渗漏和蒸发损耗，把灌区输水利用系数提高到0.85以上。依据农田分布、灌溉半径来安排管网及渠道布局，使各个灌溉单元相互衔接又不造成干扰，形成一张没有空隙且均匀稳定地提供水流的网络。完成泵站、动力设备智能化改造，更换高能耗、低效率的老水泵，使用变频调速水泵、智能稳压装置，用变频控制技术按照灌溉要求动态调节供水量和压力，降低灌溉耗能15%到20%。对泵站运行状态进行实时监控，达到设备过载、缺水、故障自动报警的目的，使设备运转稳定可靠[2]。优化田间灌溉终端，根据作物种植模式，配置滴灌、微喷灌、低压管道灌溉等节水终端，替代传统的漫灌方式，从而实现田间精准供水，减少田间无效水分蒸发。

2.3 智能管控系统搭建，实现精准灌溉

基于五层闭环技术架构，搭建一体化智能灌溉管控平台，实现灌溉全过程数字化、智能化管控。一是覆盖全部的灌区，把灌区面积、地块分布、土壤差异都考虑到进去，在布设土壤墒情、气象、流量、压力传感器的时候，根据各个地方的不同情况进行合理布置，从而实时获取到各个方面的各种数据，并以此来建立起全面完善的农田灌溉感知网络。二是搭建云端智能决策平台，嵌入优化的PSO-LSTM需水量预测模型、作物需水算法，整合实时监测数据、历史灌溉数据、气象预报数据，智能分析不同地块、不同作物的实时需水量，自动生成精准灌溉方案，动态调整灌溉时间、灌溉水量、灌溉区域，彻底替代人工经验灌溉模式。系统可以利用未来气象数据提前预判灌溉需求，规避雨天无效灌溉，进一步提高节水效果。三是部署智能执行控制系统，在各灌溉分区安装智能电磁阀、远程控制闸门、PLC控制器，对接云端平台，实现灌溉指令自动执行、分区独立管控。管理人员可以通过电脑端、手机APP远程实时监控灌溉状态、手动调整灌溉参数，实现无人值守智能灌溉，大大提高灌溉管控效率[3]。同时，安装精准计量设备，达到灌溉用水精确计量的目的，为按量计费和节水考核提供数据支撑。

2.4 运维管理体系优化，保障长效运行

构建以专业化管护、常态化运维、数字化监管为特点的长效机制。一是建立常态化的设备运维机制，制定智能设备、管网、泵站定期巡查、检修、维护制度，定期清理管网堵塞、校准传感器、检修控制设备，及时排查安全隐患，保证系统稳定运行。二是加强对基层人员的技术培训，就智能平台的操作、设备故障的排查、参数的优化设置等方面开展专项培训，提高管护人员的数字化运维水平，解决智能化设备“不会用、用不好”的问题。三是完善资金保障机制，把农田水利建设、节水改造专项资金整合起来，创建智能化灌溉系统运维专项资金，确保设备更新、系统升级、日常维护等方面有充足的资金支持。市场化运营方式可以借助专门的水利运维公司来实现，并对灌溉系统的管护进行专业化、标准化的操作。四是建立健全用水管理制度，推行精准计量、按量收费制度，建立农业用水节水考核机制，强化农户节水意识，倒逼农业用水高效利用。

2.5 分阶段改造实施路径

为保证改造工作的顺利开展，效果可控，采用分阶段、分区域推进的策略。第一阶段是摸底规划和试

点改造，全面排查灌区设施的短板、设备现状、灌溉痛点问题，结合区域农业发展规划，制定差异化的改造方案，选取典型地块开展智能化改造试点，验证技术适配性及节水成效。第二阶段是全域推广改造，总结试点经验，分批推进管网、泵站、智能终端、管控平台全域改造，完成老旧设施替换、智能系统搭建、灌溉模式升级。第三阶段为优化提升和长效运维，完善运维管理制度，优化智能算法参数，升级平台功能，建立常态化监测、评估、优化机制，持续提升灌溉系统智能化节水效能。

3 农田水利灌溉系统优化改造过程中存在的问题和优化对策

3.1 现存突出问题

从目前农田灌溉智能化改造工作实施情况看，还存在着一些问题和不足之处。一是技术适配性不够好，部分改造工程盲目套用通用方案，没有考虑区域土壤、气候、种植模式差异化的设计方案，智能算法参数适配性差，精准灌溉效果不理想；部分智能设备抗恶劣环境能力差，在田间复杂环境下故障率高。二是资金投入大，智能化设备采购、管网改造、平台搭建前期投入大，基层财政压力大，小型农田地块改造覆盖率低。三是技术普及和人才储备不足，农户和基层管护人员对智能化技术认识不够，操作能力差，存在重建设、轻应用的问题；专业的智慧水利技术人才匮乏，不能支撑系统的持续优化升级。四是数据融合程度低，部分灌区智能系统数据孤立，没有与农业气象、农田管护、水资源调度平台数据互通，数据价值没有被充分挖掘。

3.2 针对性优化对策

一是加强因地制宜的精准改造，提高技术适配性。创建灌区改造前期调研机制，全面排查区域水土资源、种植结构、灌溉需求，制定差异化、个性化的改造方案。根据不同的场景选择适合的智能设备和灌溉模式，大田规模化种植采用智能管网滴喷灌模式，小块零散农田使用低成本智能节水设备[4]。不断改进智能算法，按照本地作物需水规律来调整模型参数，提高灌溉决策的精确度；选用耐高低温、抗腐蚀、高稳定的田间智能终端，减少设备故障率。二是拓宽资金投入渠道，降低改造成本压力。整合国家、地方农田水利专项扶持资金，加大对智能化节水改造的政策扶持和资金补贴。积极引入社会资本，探索政企合作、市场化运营模式，鼓励企业参与灌区智能化改造和运维[5]。优化改造方案，优先聚焦核心短板，分批分期推进改造，避免盲目投入，提高资金利用效率。三是加强人才培育和技术普及，提高应用实效。建立常态化技术培训机制，面向基层管护人员、种植大户、农户开展智能灌溉技术实操培训，提高群众技术应用能力。引进智慧水利、数字农业等专业技术人才，组建专项技术团队，负责系统优化、故障排查、技术指导。用田间示范、案例宣讲、效益比较的方式向农民展示智能化节水灌溉的优点，提高农民自发使用的意愿[6]。四是推进数据融合共享，创建一体化智慧体系。打通灌溉管控平台和气象、农业、水利调度等系统的数据接口，实现多源数据融合共享，构建全域智慧水利管控体系。深度挖掘灌溉数据、作物生长数据、水资源利用数据，给灌区水量调度、种植结构优化、节水成效评估提供数据支撑，充分发挥数字化技术赋能作用。

4 结束语

在智能化节水与农业现代化发展的双重背景下，推进农田水利灌溉系统智能化改造，是破解农业水资源浪费难题、提升灌溉效率、保障粮食安全、推动农业绿色高质量发展的必由之路。本文梳理归纳智能节水领域的核心理论与主流技术方法，从传统农田灌溉系统普遍存在的设备老化、管控粗放、智能化水平不足等痛点切入，构建涵盖硬件提质、智能管控、运维升级三大维度的系统性改造体系，并结合工程实践验证了该方案的科学性与可行性。随着数字技术持续迭代与节水技术不断创新，农田水利灌溉系统将朝着全域感知、智能预判、自主调度、无人值守、精准高效的智慧化方向演进。未来需持续深化数字技术与农田水利场景的深度融合，迭代优化智能灌溉算法模型，建立健全长效运维保障机制，推动智能化节水灌溉技术全域普及，全面提升农业水资源利用效率，为智慧农业建设与节水型社会构建提供坚实的支撑。

参考文献：

[1] 阿勇嘎.智能化高效节水灌溉系统在农田水利工程中的应用研究[J].农业机械,2026(05):139-141.
[2] 冉小丽.农田水利节水技术的创新与应用[J].南方农机,2025,56(17):70-72,91.
[3] 薛玉东.农田水利灌溉中的节水灌溉技术革新研究[J].农机市场,2025(08):96-98.
[4] 张盘英.小型农田水利灌溉可持续发展运行机制研究[J].河南农业,2025(12):73-75.
[5] 陈国.高效节水灌溉技术在农田水利灌溉中多元化应用的探讨[J].农民致富之友,2026(20):105-107.
[6] 阿勇嘎.智能化高效节水灌溉系统在农田水利工程中的应用研究[J].农业机械,2026(05):139-141.

全站仪在公路路基路面施工放样中的应用与误差分析

谢海明

（肇庆市技师学院，广东 肇庆 526040）

摘 要 公路路基路面施工放样精度要求高，全站仪因设站灵活、坐标放样便捷而被广泛采用。为规范其作业流程并控制放样偏差，本文依托某公路项目，从控制点复核、仪器检校、放样数据准备、现场放样实施及成果复核等环节，梳理全站仪放样方法，分析相应误差，并提出针对性的控制措施，以期为公路路基路面施工放样精度控制提供有益参考。

关键词 全站仪；路基放样；路面放样；施工测量

中图分类号：U412.24；P204 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.042

0 引言

公路路基路面施工放样要将设计线形、结构层边线、高程准确传递到现场，其精度直接影响到路基宽度、边坡位置、路面厚度、平整度。路基施工阶段用中线、边桩、开口线来控制，路面阶段用基层边线、面层边线、高程来控制。本文根据某全长6.48 km公路项目，对控制点、仪器、操作、环境、计算误差进行分析，评价放样精度，提出施工建议，为同类施工放样提供参考。

1 案例项目概况

1.1 工程概况

案例工程为某公路路基路面施工标段，路线起讫桩号为K0+000～K6+480，全长6.48 km。项目为双向四车道，设计速度为80 km/h，路基宽度24.5 m，路面宽度23.0 m。沿线地形为缓丘和平原微丘，局部路段填挖交替，最大填高为6.2 m，最大挖深为5.8 m。施工区域布设GNSS E级控制网，控制点间距约500 m，并采用全站仪进行控制点加密和施工放样。项目所在区域季节性降雨较为明显，对观测时段和放样节奏存在一定影响，因此施工放样需结合天气条件合理安排。

1.2 路基路面结构

路基采用整体式断面，标准横断面为行车道、硬路肩、土路肩和中央分隔带。填方路段边坡坡率一般为1:1.5，挖方路段根据岩土类别采用1:0.75～1:1.0。路基压实度按规范分区控制，填方路基应分层填筑、分层压实，挖方路基应控制边坡开口位置和坡率。路面结构由沥青混凝土面层、水泥稳定碎石基层和底基层组成，面层分为上面层和下面层，基层和底基层分两层摊铺。

由于路基路面分层施工，放样控制要和各个结构层边线、高程、横坡相适应。路基阶段控制中线、边桩、开口线，路面阶段控制基层边线、面层边线、高程、横坡。曲线段、超高段、横坡变化段，根据设计坐标逐桩计算放样数据，防止结构层宽度变化引起的边线误差[1]。

1.3 放样精度要求

路基路面放样精度直接影响路线线形、结构层厚度及路面平整度。依据现行公路施工规范及设计文件，放样控制主要包括中线、边桩、开口线、基层边线、面层边线和高程。主要限差要求如下：（1）路基中线偏位不大于20 mm。（2）路基边桩偏位不大于30 mm。（3）路面边线偏位不大于10 mm。（4）高程放样限差为±5 mm。

放样前需对控制点进行复核，确认坐标和高程成果可靠；放样中宜采用全站仪坐标法或极坐标法，逐点测量并检核。对于关键桩号、构造物衔接段及曲线控制点，应增加检核次数。

2 全站仪用于公路路基路面施工中的放样作业

2.1 控制点复核

控制点复核是全站仪放样的前置环节，目的是在控制点坐标、高程成果在现场条件下依然可靠。作业前应收集项目控制网成果、点之记、设计坐标、高程

作者简介：谢海明（1974-），男，本科，一级实习指导教师（中级），研究方向：公路养护。

资料，核对控制点等级、点位位置和保存状态。该项目平面控制用 GNSS E 级网，高程控制用四等水准联测，因此复核工作要分别对平面、高程两类成果进行[2]。

平面复核采用全站仪观测相邻控制点间的水平角与边长，并与坐标反算值比较；高程复核可采用三角高程或水准方法，将复测结果与原成果比较。具体复核内容包括：（1）边长与角度复核。观测相邻控制点的水平角、斜距或平距，将反算边长和角度与实测值比较，较差应满足相应规范限差。（2）高程复核。采用三角高程或水准联测，确认控制点高程未发生明显变化。（3）点位稳定性复核。检查标石稳固性、护桩完整性以及点位是否位于施工影响范围之内。

2.2 仪器检校

全站仪及其配套棱镜应处于检定有效期内，作业前完成必要检校。检校内容主要包括：（1）三轴关系与补偿器检校。检查视准轴、横轴与竖轴之间的几何关系，确认补偿器工作正常。（2）度盘与测距检校。检查水平度盘、竖直度盘指标差，测定测距加常数和乘常数。（3）棱镜常数与对中器检校。核对棱镜常数设置，检查光学或激光对中器的对中精度。

高精度放样时，棱镜常数设置错误会造成固定尺度偏差，仪器参数必须和所用棱镜一致。作业前还要检查电池电量、存储空间、气泡、脚架、对中杆的状态。设站时全站仪必须严格对中整平，后视定向时宜用第三个已知点进行检核。若检核坐标差值大于限差，则需重新定向或者检查仪器参数。检校记录应作为测量资料归档，不合格仪器不得投入使用。

2.3 放样数据准备

放样数据准备以设计文件和路线要素为依据。根据直线、缓和曲线和圆曲线要素，逐桩计算中桩坐标、切线方位角及各结构层边线坐标。计算内容主要包括：（1）路基放样数据。包括中线点、边桩点、边坡开口线点的平面坐标与设计高程。（2）路面放样数据。包括基层边线、面层边线坐标及各层设计高程。（3）特殊路段数据。包括曲线起终点、缓圆点、圆缓点、超高渐变段及构造物衔接段的加密点数据。

放样数据要经过独立校核。校核内容有桩号连续性、坐标计算正确性、相邻点距离和方位角、边线宽度、横坡方向、高程传递关系。关键位置要单独标识并加密放样点。整理好的数据可以导入全站仪，也可以打印出放样表，方便外业记录和复核。数据准备阶段的错误一般具有系统性，一旦进入现场就很难通过单点检核来发现，因此独立校核环节不能省略[3]。

2.4 放样作业实施

放样作业按照设站、定向、放样、检核、记录的顺序来进行。设站时选择稳固、通视良好的控制点，全站仪对中整平后输入测站坐标、仪器高、棱镜高。后视定向可以使用已知点坐标或者方位角的方式进行，并且用第三点进行检核。坐标放样时，仪器按照测站坐标和待放点坐标来计算方位角和水平距离，计算公式为：

$$d=\sqrt{(x_p-x_s)^2+(y_p-y_s)^2} \quad (1)$$

$$\alpha=atan2(y_p-y_s,x_p-x_s) \quad (2)$$

式（1）、（2）中：x_s、y_s 为测站坐标；x_p、y_p 为待放点坐标；d 为水平距离；α 为方位角。

棱镜对中杆置于待放位置后，观测坐标与设计坐标较差满足要求即可标定。作业实施的主要环节如下：（1）路基放样。先恢复中线，再依据设计宽度和坡率放出边桩、开口线，并控制各层高程。（2）路面放样。根据基层和面层宽度放出边线，结合设计高程和横坡控制松铺厚度。（3）加密与辅助检核。曲线段、超高段及视距不良处应加密放样点，必要时采用偏角法或逐渐趋近法辅助检核。

每站放样完成后，应对已放点进行复测，记录点位偏差；迁站后应重新定向并检核公共点。

3 全站仪用于公路路基路面施工中的放样误差分析

3.1 误差来源

全站仪放样误差控制点复核、仪器检校、数据准备、现场作业全过程。根据误差来源分为控制点误差、仪器误差、操作误差、环境误差、计算误差。控制点误差属于起算数据误差，会以系统性方式传达到所有的放样点上；仪器误差主要是由于测角、测距和棱镜常数的偏差造成的[4]；操作误差是指对中整平、后视定向、棱镜放置、照准精度等操作中出现的误差；环境误差是由温度、气压、大气折光、风力等因素引起的；计算误差则可能出现在坐标推算、方位角计算、高程传递这三个环节上。

3.2 控制点误差

控制点误差是放样误差的主要来源。如果站点或者后视点本身存在点位偏差，那么所有由该站放出的点都会产生同向偏移。平面控制点误差主要是由控制网观测精度、平差模型和点位稳定性所造成的；高程控制点误差主要是由水准联测精度以及沉降变形所引起的。项目使用 GNSS E 级网和四等水准联测，虽然可以满足控制要求，但施工期间机械振动、填挖荷载和降雨等都会造成局部点位位移，因此需要定期复测。

控制点误差对放样点的影响是传递的。当站点存

在平面偏差时，放样点就会随之产生近似的同量偏移；后视点存在偏差时，方向也会发生偏差，而且方向偏差对于远离测站的放样点影响更大。因此放样前要对设站点、后视点进行复核，并选择第三个已知点作为检核点。对于施工影响范围内控制点，要检查标石稳固性、护桩完整性。复核结果超限时，不能直接使用放样，必须查明原因后重新观测或者平差。控制点复核记录应完整归档，作为后续误差分析的原始依据。

3.3 仪器操作误差

仪器操作误差直接决定现场放样精度。对中整平误差会造成测站坐标发生偏移，进而造成观测方向和距离的系统性偏差；后视定向误差会造成全站仪水平度盘定向产生偏差，造成所有放样点绕测站旋转；棱镜对中杆倾斜或者棱镜常数设置错误就会造成固定的距离偏差。实际作业中操作误差一般比仪器标称精度大，应该作为误差控制的重点。

3.4 放样精度评定

放样精度评定以设计限差和实测偏差为依据。根据项目要求，路基中线偏位不大于20 mm，边桩偏位不大于30 mm，路面边线偏位不大于10 mm，高程限差为5 mm。评定时要分别统计平面点位中误差和高程中误差，然后和限差比较。平面点位中误差是用检核点实测坐标减去设计坐标得到的差值来计算的；高程中误差是用检核点实测高程减去设计高程得到的差值来计算的。检核点数量应该包含直线段、曲线段、超高段和构造物衔接段，保证评定结果有代表性[5]。

4 全站仪用于公路路基路面放样中的施工建议

4.1 控制点保护

控制点是全站仪放样的起算依据，其稳定性直接影响到放样成果的可靠性。施工期间填挖作业、机械行驶、材料堆放、降雨冲刷等都会造成控制点位移或者标石损坏，所以要将控制点保护纳入现场管理。对于位于路基范围内的控制点，在施工前要完成迁建或者加固工作，迁建之后需要重新联测并更新成果。位于路基范围外的控制点应设置醒目护桩和警示标识，防止机械碰撞。测量人员负责定期巡查、复测，施工人员不得擅自移动、覆盖控制点。填方路段施工时，在控制点周围不得堆载、取土；挖方路段施工时，不得边坡开挖影响控制点基础稳定。雨季施工前，对控制点排水情况进行检查，必要时加设排水设施。

4.2 放样过程控制

放样过程控制以作业规范化、检核制度化为主要内容。设站前要对控制点复核成果进行确认，仪器检校记录要完整；设站时要严格对中整平，后视定向后用第三已知点检核。放样数据要提前校核，桩号、坐标、高程、边线宽度不能出现系统性错误。现场放样时，要按照先控制后细部、先整体后局部的顺序进行，路基阶段以中线、边桩、开口线为要点，路面阶段以基层边线、面层边线、高程为要点。曲线段、超高段、构造物衔接段应该增加放样点和检核点。曲线段可以按照设计要素逐桩计算坐标，在曲线起终点、缓圆点、圆缓点处单独设点检核；超高段应该根据横坡变化控制边线位置和高程；构造物衔接段要提前和相关施工工序协调，防止因放样点被覆盖或者破坏而返工。

4.3 成果复核

复核内容应该包含平面位置、高程、边线宽度、横坡方向和点位密度。平面复核可以用全站仪复测、钢尺丈量或者已知点检核的方式；高程复核可以用全站仪三角高程或者水准方法。复核比例要包含关键桩号和薄弱环节，对路基中线、边桩、开口线和路面边线要逐点或者按较高比例进行检核。

复核结果要形成记录并与设计限差比较。平面点位偏差、高程偏差超过限差时，应分析误差来源，采取相应的纠正措施。对于同向偏移的多个点，先检查控制点、后视定向、棱镜常数；对于随机离散的偏差，检查对中整平、棱镜放置、照准操作。复核记录、放样记录、仪器检校记录一起归档，形成可追溯的质量资料。

5 结束语

全站仪用于公路路基路面施工放样时，控制点稳定性、后视定向、仪器对中整平、棱镜常数设置等都是影响成果质量的重要因素。现场作业应按照先复核控制点、再检校仪器、后放样检核的顺序进行操作，对曲线段、超高段、构造物衔接段进行加密检核，保证路基边线、路面边线、高程传递的可靠性。

参考文献：

[1] 徐彬轩.软土地区新建高速公路路基施工中超大体量泡沫混凝土的实践[J].黑龙江交通科技,2025,48(11):58-61,74.
[2] 谢金龙.GPS-RTK技术在高速公路路面施工测量中的精度控制与研究[J].建筑机械,2026(07):121-125.
[3] 田晓鹤.公路沥青路面固化土基层施工技术分析[J].交通世界,2023(31):76-78.
[4] 鲁攀,黄齐龙,谌启阳,等.鄂西地区红砂岩路基填筑施工要点[J].交通世界,2025(25):54-56,60.
[5] 吴舒杰.GPS RTK技术在公路勘测设计与路线施工放样中的应用[J].工程机械与维修,2026(08):109-111.