

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 12 月 第 35 期 (总第 624 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 墾 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：khgslzz@163.com

网址：<http://www.khbl.net>

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025 年 12 月 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特别声明，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

科技博览

- 001 一种蓄电池开路智能防护装置研制方法 刘青松, 王桂烁, 张向成, 武鹏飞, 隋敬麒
004 输变电线路在极端气候条件下的适应性设计与优化 仇恒志, 王 飞
007 高温高压锅炉燃烧特性及 NO_x 治理技术的热工性能分析 刘望东
010 尾流效应下风机功率波动的时空特征与稳定控制策略研究 郭林聪
013 基于深度强化学习的主动配电网实时调度与电压控制策略研究 黄佳秦

智能科技

- 016 一种便携式低压漏电检测仪的研制 毕景玉, 田志超, 颜景龙, 许 斐, 崔 棂
019 机电一体化技术在智能制造中的应用 高鸿元
022 数字化测绘技术在工程测量中的运用探讨 赖培均
025 基于多场景多功能配电线路防鸟装置的研制 王宁信, 吴昊洋, 王靖超, 马 明, 许佳宁
028 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置研制 高 展, 赵安家, 明 鑫
031 复杂故障下继电保护装置优化与可靠性保障探究 管俊飞

应用技术

- 034 建筑电气施工中接零接地施工技术分析 刘国成
037 10 kV 配电线路接地故障定位与处理措施 韩育松
040 500 kV 出线场设备柱及构架柱安装方案与安全措施 黄培醒

目录 contents

043	建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术探讨	陆本武
046	定向钻穿沙颍河航道工程施工方案与技术措施	钟选明
049	九江港城西港区某码头工程总平面布置优化设计	郭云山, 王立平
052	南昌北二绕高速公路南新高架桥设计方案关键技术研究	欧阳坚, 黄武浩
055	“桩—墙—拱”协同体系在花岗岩残积土偏压隧道洞口施工中的应用研究	马铭骏

科创产业

058	新能源消纳关键因素分析及解决措施研究	陈笑非
061	PPP 模式下 EPC 总承包技术管理的核心策略	熊煊炎
064	EPC 项目造价预结算风险识别与控制策略研究	黄 星
067	低碳经济背景下火电厂集控运行节能降耗技术研究	赵 振
070	新能源背景下风电与光伏技术的应用策略与发展趋势	周世龙
073	新投产 LNG 接收站不同负荷阶段能耗特征与运行策略分析	汪 洋
076	大数据技术在城市轨道交通标准化运营管理中的应用研究	徐 健
079	基于分布式光伏 + 储能的智慧零碳园区电力系统设计与优化	王佐君

技术管理

082	多层砌体结构房屋加固技术分析	曹兆强
085	大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制	赵国峰
088	关于水利工程维修养护项目管理的探讨	钱 莉
091	公路工程路基路面病害的防治措施探析	吴建华
094	预防性公路养护技术在公路施工中的应用	王 婷
097	材料选择与路面修复技术在公路养护中的应用	张 鹏
100	填料类型对小型精馏塔传质效率的影响分析	禤广健
103	海上升压站平台一拖多空调系统的适用性探讨	袁 竞

科学论坛

106	水利工程对流域水资源优化配置作用研究	邹剑钧
109	国土空间规划生态修复优先区划定技术应用	王生欣
112	沉降控制技术在市政给排水管道施工中的应用研究	朱德馨
115	绿色建筑技术在住宅建筑中的创新应用研究	朱 雷
118	房屋检测鉴定在历史建筑保护中的综合应用研究	王 艺
121	现代房屋建筑主要测量方法对比与精度控制研究	罗嘉怡
124	房屋建筑工程测量全过程质量控制体系构建与实践	陈弘隽

一种蓄电池开路智能防护装置研制方法

刘青松，王桂烁，张向成^{*}，武鹏飞，隋敬麒

(国网东营供电公司，山东 东营 257100)

摘要 本研究设计出一种新的蓄电池开路智能守护装置，它的主要功能是避免因电池组突然断路造成系统停机的现象发生，该设备包含四部分关键内容：故障瞬时识别、多级安全判定区、动态冗余路径调控单元以及远程故障数据平台。结合状态预估警告技术、毫秒级主动隔离开关动作手段、不断变换提供电力计划、自身检测能力以及改良策略算法等多种特性，通过在线完成对可能存在的打开漏洞隐患进行智能化处理的办法，以期为保障整个电源系统的稳定工作提供借鉴。

关键词 蓄电池开路；智能防护；冗余供电；毫秒级隔离

中图分类号：TM912；TP277

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.001

0 引言

蓄电池组是直流电源系统的“心脏”，它关系到变电站、数据中心等关键设施的安全。但现有的保护大多针对短路和过载情况，并未考虑到危害同样巨大的蓄电池开路问题，而一旦出现开路，会导致后备电源系统彻底崩溃，进而引发控制单元失效、通信链路中断等致命后果。所以必须研制一种可以快速侦测、智能判断、冗余控制、远程交互的防护装置来应对这种危险性极大的开路故障。本文正是为了实现这个目标，研究一种可快速识别并处理开路事故的智能防护装置。

1 研制一种蓄电池开路智能防护装置的必要性

蓄电池的应用已经扩展到新能源储能、智能电网等重要领域，在数据中心通信基站、新能源汽车等场合起着重要的支撑作用。这些场景的连续运转对能源供给的稳定有着很高的要求，如果蓄电池发生开路故障，就会造成设备停机生产停滞，并且还会引发一系列的连锁反应^[1]。数据中心的核心设备如果因为开路突然断电，会造成重要的数据丢失或者系统崩溃；通信基站中断服务会影响大片区域的信号覆盖，新能源汽车行驶中开路风险更是直接关系到驾乘人员的生命安全。开路产生电弧易引发火灾，同时还会使精密元件受损，维修、更换这些精密元件所花费的时间与经济成本都很大。传统的防护方式是依靠人工巡查或者简单的过流保护，人工巡查受时间和人力的限制，不能做到全天候、全方位的监视，效率低且容易受到人为因素的影响，不能及时发现可能的开路隐患。简单

过流保护装置功能单一，不能及时捕捉到开路初期的微小信号，同时也不能很好地区分开路与正常断电的情况，容易出现误判，在真正危险的时候反应迟缓，在正常操作时发出错误警报，给生产运营和日常使用带来额外的困扰。从技术角度来讲，研发此设备需要制作高精度同步采集模块来捕捉毫秒级的开路信号，塑造自适应学习算法解析参数的特性，创建动态故障辨识模型防止误判。

2 一种蓄电池开路智能防护装置的模块组成

2.1 开路故障快速侦测模块

开路故障快速检测模块属于防护系统的核心感知单元，要冲破传统单一参数监测的局限性，塑造起多维度信号融合的技术架构。这个模块不仅要实现电压和电流信号的高频同步采集，还要把阻抗谱分析以及电极界面状态监视这些功能纳入其中，经由捕捉到开路事件之前接触电阻微小变动，电解质离子迁移速率不正常波动之类的特征信息，从而做到预先警示危险而不是等待已经发生的问题出现^[2]。从技术角度看，需化解高速采样与低噪干扰的矛盾：利用差分放大电路和自适应滤波算法，削减蓄电池充放电谐波，排除外界电磁噪声，准确提取毫秒级脉冲信号。为满足不同种类和容量电池组需求，应规划具动态校准性能的功能部件，用内置标准参考源定期调节测量精度，避免器件老化或温漂导致的数据失真。该系统与蓄电池管理系统双向通信，随时调节检测频率和灵敏度阈值参数，在浮充、大电流放电等工况下实现最佳监测效果。

*本文通信作者，E-mail：zxc17861078906@163.com。

传统侦测模块在复杂环境常因敏感或误判率高而失灵，本设计旨在解决这些问题，提高系统可靠性。

2.2 多级安全状态评估模块

多级安全状态评估模块要突破传统“故障—正常”二元划分形式，创建起依靠多种参数融合而成的动态分级评价系统，这个部分应当把开路检测单元所得到的电压波动情况、阻抗变动状况等即时数据同蓄电池健康程度有关指标（包含充放电周期数，容量衰退率以及内部温度差分布）结合起来加以利用，凭借多层次分析模型把电池运行态势分成四个级别，即常态、警报、轻微异常和严重失效，并且能够准确地显示其发展进程中的各种风险特点。从技术角度来讲，亟需攻克的关键难题是多源异构数据高效整合的问题。利用深度学习算法来提取各个维度的特征并赋予相应的权重，在此基础上引入动态调节机制以消除单点异常值所导致误判的风险；为了提高评估系统的实时性和灵活性，应该构建具有在线自适应优化能力的核心模块，并且能够通过不断采集典型的故障样本实现对模型参数阈值进行动态更新的功能，在面对电池老化、环境温湿度变化等复杂工况时仍然能维持较高的准确度表现。

2.3 智能冗余路径控制模块

智能冗余路径控制模块要冲破传统静态冗余设计的束缚，形成依靠实时故障数据而形成的动态切换机制，这个模块应当把备用供电通道规划同在线监测融合起来，凭借阻抗测量单元和通断状态传感器准确评判备用线路的工作情况，避免潜在问题引发切换失败。从技术角度讲，更重要的是处理好快速反应与系统稳定性的矛盾：经由固态继电器做到毫秒级高效转换，而且采用电压均衡策略削减瞬变干扰对目标负载造成的冲击；为了加强整体可靠性，可以采取分布式冗余架构，把多条备份支路划分成独立子系统，在某处出现单点失效的时候会自动启用替代方案，进而避开全局的风险隐患^[3]。同时要与多级安全状态评估模块协同工作，根据故障等级的动态变化调整冗余策略，如轻度故障只使用局部冗余路径、重度故障则启动全系统冗余切换等，在保障系统安全性的同时减少冗余运行带来的能耗损失问题，解决传统冗余设计能耗过高或可靠性不足的问题。

2.4 故障信息远程交互模块

故障信息远程交互模块要冲破传统的点对点通信束缚，创建含有数据传输、远程操控以及历史查询等多用途为一体的智能化互动平台。它的关键功能是故

障数据的即时传送（包括类型、时刻、严重度和电池状态参数等），并能接收到远距离控制命令（比如冗余切换开启、防护数值调节之类的操作），促使设备维修朝着自动化的方向发展。从技术角度来讲，重点是要解决在复杂环境里保持信号稳定的问题，融合各种通信手段，如无线蜂窝网络、LoRa 技术和以太网等，按照实际情况不断改良通道选取策略，防止单一链路出现状况而造成的数据丢失现象；还要依靠端到端加密算法保证重要资料的安全性与无缺损情况发生。本模块结合边缘计算技术，将采集的大量故障数据在本地预处理后传至远端监控平台，削减排传数据量与网络资源。应形成本地故障数据库，便于快速查询，为故障分析和模型改进提供数据支撑，突破传统远程交互模式在流转速度、安全保护及信息积累等方面的瓶颈。

3 一种蓄电池开路智能防护装置的功能实现

3.1 基于状态预测的预警

基于状态预测的预警机制要冲破传统被动应付范式，形成融合多种数据和高级算法的主动检测体系。这个平台既要包含蓄电池运作时的电压、电流以及温度等即时数值，又要深入探究其老化特征指标，比如极板硫化程度、电解质浓度变动情况以及内部电阻衰退趋向，通过多变量联合模型来实现故障识别功效。从技术层面来讲，要解决诸多要素非线性联系创建难题，采用深度学习同物理原理相融合的办法，在被大量信息所驱动的过程中找到潜藏异常信号的同时还要维持理论支撑以保证推理可信度，防止单纯依靠某项资料造成误判；为了加快反应速率并加强精确度，可以构建动态更新的数据库，不断追踪各个批次以及服役期间长短不一样的电池以往出现过的失效事例，以此改善模型表现力，从而符合复杂状况的实际操作需求并给予精准的服务^[4]。预警系统要按照具体的应用场景来确定停机损失的阈值，并且创建多层次分级报警机制，在关键工业供电区域，需要提早很长一段时间就发出警报并且推送运维指导方案，给操作人员留下足够的时间去执行干预措施，现在的短周期单一警告模式无法满足高可靠运行环境的需求，分层动态监测策略可以明显改善系统的反应速度和适应能力。

3.2 毫秒级快速主动隔离

毫秒级快速主动隔离技术是抑制开路故障蔓延的关键一环，它需冲破传统机械开关响应慢的束缚，发展成以固态器件为主导、智能控制逻辑高度集成化的高速隔离系统。在这个模块里要有高效的信号收集功能以及精准传递指令的能力，当监测单元察觉到异常

状况之后就利用硬件中断直接诱发隔离动作，省掉通常的数据处理步骤从而缩减反应时间；而且执行机构也要采用多通道并联固态继电器的设计方案，如此既可以加快每一次切换的速度，又可凭借冗余设计化解因为某个元件损坏而引发的安全隐患问题。从技术创新角度还要解决高可靠性和电弧防护之间的矛盾冲突：一方面选用软启动算法来改进适应动态负载的效果，保证电压电流平稳过渡，避免瞬时冲击所造成的设备毁坏情况发生；另一方面按照回路诊断信息及时调整固态继电器投切数量，并且可以在整个范围内实现安全稳定的运行效果。隔离机制要与多层次安全评价模块一同运作，按照故障严重情况来决定局部或者全局的隔离策略。单个电池发生断路的时候，只要对那个支路执行隔离处理就能避免整个系统全部失效，从而超越传统粗放式控制方式中“不是完全无效就是彻底中断”的固有弊端。

3.3 无缝切换的冗余供电

无缝切换冗余供电系统的设计要冲破传统模式下电压跌落的固有瑕疵，创建依靠动态电压补偿和精确同步控制的持续供能架构。关键之处在于事先规划好备用电源支路及双向功率变换装置，在主回路发生开路故障之时，通过快速接入机制实现备用电源的即刻接手，并凭借闭环控制系统随时检测两路电源之间的相位差别以及幅值波动状况，进而对备用通道发出参数实施调整操作，保证切换期间电压稳定不变、频率完全一致且相角协调无偏差，从而做到“零感觉”的平滑过渡效果。从技术层面来看，针对瞬时功率失衡情况的发生可以采用预测算法来提前预估可能出现的故障节点并激活预备状态；而面对负载特性改变所引发的冲击负荷现象，则应优化功率转换模块的功能表现力，既要改进宽范围调制精度又要加快响应速度，并且借助碳化硅半导体器件加速开关速率以准确跟随瞬态电流扰动变化，最终消除终端设备可能遭受到的电波干扰影响。冗余供电系统要配备回路状态监测模块，依靠其内部检测单元来动态考察备用回路的电气特性以及安全指标状况，一旦察觉到后备电池容量存在短缺现象时，这个模块就会自动开启外部应急电源装置，进而防止切换期间产生停电情况，并且可以妥善处理由于传统冗余结构忽视电源管理而引发的二次故障隐患问题。

3.4 自诊断与策略自适应

自诊断和策略自适应是系统稳定运行的重要保障。传统静态故障检测机制必须打破，智能化运维体系要创建起来，它包含故障树分析技术和强化学习算法，

有全方位的组件状态监测能力才行。内置传感器可随时搜集侦测单元、隔离机构以及冗余电源回路等关键参数（温升、电流起伏、电压偏离）的信息，并借助故障树模型剖析各个部件的失效情况及其连锁反应路径，以达到精准定位局部故障的目的；还可以结合历史故障数据来进行比较研究，找到经常出现的问题征兆特点并给出个性化的解决方案计划内容。技术上要重点破解多组件故障诊断中复杂的关联性难题，用贝叶斯网络模型来分析元件之间的交互关系，然后依靠概率推理去除干扰因素，准确找出真正的根本故障源头，避免传统单一模式在多个异常一起出现的时候发生漏诊状况；创建基于强化学习的自适应调节机制，在系统运作期间持续调整防护参数的配置方案。例如：在高温工作环境下，需立刻加快温控监测的速度和预警标准设定；而在电池老化后期阶段，则可适当减弱感知单元的敏感程度，并改良冗余切换规则的设计方式，从而符合设备性能逐渐衰退后的实际情况特点^[5]。

4 结束语

本研究成功研发出一种新型蓄电池开路智能防护装置，它的主要功能通过四个集成化的模块实现故障预估、瞬时隔离以及不间断供电的全链条自动守护效果，该设备融合了先进的状态监测技术和毫秒级主动断电手段，超越传统被动应付方式所存在的限制，大幅优化安全保护性能，并且装备冗余设计及即时观察体系，极大地改善了运行稳定性和可靠性。该防护装置可有效地避免由于电池开路引发的大面积停电事件发生，在保证重要设施电力供应安全性方面具有实际意义。

参考文献：

- [1] 罗璐,罗海云.一种变电站蓄电池组开路续流装置的研制[J].电气技术与经济,2024(04):135-137.
- [2] 赵玉才,郭阳,赵玉富,等.一种变电站废铅蓄电池搬运工具的研制[J].河南科技,2021,40(25):120-123.
- [3] 裴昆,凌端伟,吴琦,等.一种变电站蓄电池电压智能测量装置的研制[J].电气开关,2020,58(04):56-58.
- [4] 刘秋英.一种新型蓄电池放电仪快速连接装置的研制[J].机电信息,2019(36):8-9.
- [5] 南文娟,辛锋.一种通用型航空蓄电池充放电设备研制实践[J].中国设备工程,2019(22):115-116.

输变电线路在极端气候条件下的适应性设计与优化

仇恒志, 王 飞

(山东省环能设计院股份有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 极端气候事件频发对我国输变电系统安全构成严峻挑战。传统设计标准难以应对风灾、覆冰、高温及复合灾害的叠加影响。本文立足工程实践, 提出一套面向极端气候的输变电线路适应性设计与优化方案, 涵盖结构选型、材料优选、路径避让与智能运维四大维度。通过引入气候风险分区、多目标鲁棒优化及数字孪生技术, 构建“设计—监测—反馈”闭环体系。结合近五年国内典型工程案例与实测数据, 验证所提方法在提升线路韧性、降低全寿命周期成本方面的有效性。研究成果旨在为新一代智能电网建设提供可参考的技术路径。

关键词 输变电线路; 极端气候; 适应性设计; 结构优化; 覆冰荷载

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.002

0 引言

在全球气候变化背景下, 我国极端气象事件呈现频率高、强度大、复合性强的特征。据国家气候中心统计, 2019—2024年, 全国年均发生区域性极端天气过程达37次, 较2010—2018年增加21%。输变电线路作为电网骨干, 长期暴露于复杂自然环境中, 其安全运行面临前所未有的压力。2021年河南特大暴雨导致500 kV嵩郑线跳闸, 2023年湖南冻雨造成220 kV线路覆冰厚度达45 mm, 远超《110kV~750kV架空输电线路设计规范》(GB 50545—2010)中IV类覆冰区30 mm的设计上限。此类事件暴露出传统“静态+确定性”设计范式的局限性^[1]。本文结合多年参与国家电网重大工程的经验, 提出以工程落地为导向的适应性设计框架, 注重方案可行性、数据支撑性与经济合理性, 避免空泛理论推演, 力求为行业提供切实可用的技术指南。

1 极端气候对输变电线路的影响特征与设计短板

1.1 强风引发的结构动力响应

我国沿海及西北地区风灾频发。中国气象局数据显示, 2020—2024年, 华东、华南12级以上大风日数年均增长4.3天。强风不仅导致导线舞动(振幅常超5 m), 更诱发杆塔涡激振动与疲劳损伤。2022年台风“梅花”过境期间, 浙江某500 kV线路因未考虑阵风脉动特性, 塔腿基础剪应力超限18%, 出现不均匀沉降。风洞试验表明, 当风速超过35 m/s时, 传统猫头塔的涡脱频率接近导线一阶固有频率(约0.8 Hz), 共振风险显著升高。

现行规范采用静态风压公式: $W_0 = \frac{1}{2} \rho u^2$ 计算基本风压, 忽略风向突变、湍流强度与地形放大效应, 难以反映真实荷载谱。

1.2 覆冰荷载的非线性与不对称性

覆冰灾害具有突发性与空间异质性。实测表明, 在-5 ℃至0 ℃、相对湿度>85%、风速3~8 m/s条件下, 导线覆冰速率可达2~4 mm/h。2023年贵州冻雨期间, 某220 kV线路单相导线覆冰质量达12.6 kg/m, 对应冰厚约42 mm, 远超设计值8.0 kg/m(30 mm冰厚)。更严重的是, 覆冰常呈不对称分布, 导致横担扭矩超限, 金具断裂风险陡增。

覆冰脱落瞬间产生的冲击荷载亦被忽视。现场观测显示, 覆冰块重达30 kg时, 脱落引起的导线跳跃高度可达3.2 m, 极易引发相间闪络。

1.3 高温与复合灾害的协同效应

全球变暖推动我国多地夏季最高气温突破40 ℃。以LGJ-400/35导线为例, 环境温度由25 ℃升至45 ℃时, 弧垂增量达1.8 m; 若叠加日照与负荷电流热效应, 导线实际温度可达70 ℃以上, 弧垂再增0.9 m, 对地距离可能低于安全限值^[2]。

复合灾害更具破坏性。2024年初, 内蒙古经历“冻雨—沙尘暴—高温”三连击, 线路在72小时内承受覆冰增重、风振疲劳与热膨胀三重应力循环, 加速材料老化。此类多物理场耦合问题要求设计方法具备跨尺度协同能力, 而现行标准尚未建立相应机制。

2 适应性设计的核心方案体系

2.1 基于高分辨率气候风险地图的差异化结构选型

摒弃粗放式四级风 / 冰区划分，采用“宏观分区 + 微观校正”策略。融合 ERA5 再分析数据、地面气象站网及卫星遥感，构建 $1 \times 1 \text{ km}$ 分辨率的极端气候风险地图。在此基础上，推行模块化杆塔体系：

在基本风压 $\geq 0.75 \text{ kN/m}^2$ 区域（如福建沿海），采用紧凑型干字塔，迎风面积较猫头塔减少 22%，风荷载降低 18%。

在设计冰厚 $\geq 30 \text{ mm}$ 区域（如贵州、湖南山区），配置 V 型绝缘子串与防舞间隔棒，抑制不均匀覆冰引发的扭矩。

在高温高辐射区（如新疆吐鲁番），优先选用低弧垂导线，并加大交叉跨越净距裕度 15%。

2.2 高性能材料的工程化选型与经济性评估

在导线材料方面，重点推广碳纤维复合芯导线（ACCC）与高强度铝合金芯铝绞线（ACCR）。ACCC 热膨胀系数仅为 $2.0 \times 10^{-6}/\text{°C}$ ，是普通钢芯铝绞线的 1/10，在 70 °C 环境下弧垂减少 40%，且抗拉强度提升 35%。尽管初期投资高约 25%，但全寿命周期成本显著降低^[3]。

杆塔钢材推荐 Q420 及以上高强钢，并配套耐候涂层。加速腐蚀试验表明，Q460E 钢在盐雾环境下服役 10 年后强度保留率达 92%，优于 Q345B 的 78%。基础混凝土掺入 0.9 kg/m^3 聚丙烯纤维后，抗冻融循环次数由 150 次提升至 300 次以上^[4]。

表 1 不同导线类型在极端气候下的综合性能对比

导线型号	额定拉断力 /kN	热膨胀系数 / $10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$	70 °C 弧垂 /m	覆冰承载 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	单位造价 / $\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$	年均维护成本 / $\text{元} \cdot \text{km}^{-1}$	全寿命周期成本 (30 年) / $\text{万元} \cdot \text{km}^{-1}$
LGJ-400/35	92.0	19.5	8.6	8.0	85	18 500	1 250
JL/LB20A-400	98.5	18.2	8.1	8.5	92	17 200	1 180
ACCR-400	110.0	15.0	7.2	9.2	110	14 800	1 050
ACCC-400	125.0	2.0	5.2	10.0	135	11 500	980
JNRLH60/G1A-400	105.0	16.8	6.8	9.5	102	15 600	1 020
JL/H1A/G1A-400	100.0	17.5	7.5	8.8	96	16 300	1 120
JL/G1A-400	95.0	18.8	8.3	8.2	88	17 800	1 210
ACCC-500	145.0	2.0	5.8	11.2	165	12 000	1 150
ACCR-500	128.0	15.0	7.8	10.5	132	15 200	1 180
JL/LB20A-500	115.0	18.2	8.7	9.0	108	17 500	1 260

(注：数据来源于国家电网《导线选型技术导则（2023 版）》、南方电网试点工程实测及作者团队调研。)

表 1 显示，ACCC 在高温与重覆冰区域综合效益最优。设计阶段应结合区域气候特征进行成本—效益权衡，避免“一刀切”选型。

2.3 路径规划中的气候避让与微地形优化

传统路径选择侧重地形与拆迁成本，忽视气候敏感带。建议引入“气候脆弱性指数”（CVI），计算公式为：

$$CVI = 0.4 \cdot \frac{u_{max}}{u_{ref}} + 0.3 \cdot \frac{d_{ice}}{d_{ref}} + 0.2 \cdot \frac{T_{max}}{T_{ref}} + 0.1 \cdot R \quad (1)$$

式 (1) 中， u_{max} 为 30 年一遇最大风速， d_{ice} 为年均覆冰日数， T_{max} 为历史最高气温， R 为雷暴日数，分母为基准值。 $CVI > 0.75$ 的区域视为高风险带，应优先绕行。例如：川西某 500 kV 线路原规划穿越海拔 3 800 m 峰口， CVI 达 0.82。优化后向东偏移 12 km，沿河谷布线， CVI 降至 0.58，虽路径增长 3.5%，但预计年故障率下降 60%，投资回收期缩短 2.1 年^[5]。

3 多目标鲁棒优化模型与工程实现

3.1 目标函数构建

设线路总成本 $C=C_{建}+C_{运}+C_{灾}$ ，其中： $C_{建}$ 为建设成本（含杆塔、导线、基础）； $C_{运}$ 为 30 年运维成本（含巡检、维修、更换）； $C_{灾}=\sum P_i \cdot L_i$ ， P_i 为第 i 类灾害发生概率， L_i 为损失。

优化目标为最小化 C ，约束条件包括：杆塔应力比 ≤ 0.95 ；对地距离 \geq 规范值 +0.5 m 安全裕度；导线最大舞动振幅 $\leq 2.5 \text{ m}$ ；林木砍伐面积 \leq 地方环保限值。

3.2 不确定性处理与求解

采用区间数描述气候参数。设计风速取 $[u_{\text{mean}} - 1.5\sigma, u_{\text{mean}} + 2.0\sigma]$, 覆冰厚度取 $[d_{\text{mean}}, d_{\text{mean}} + 1.8\sigma]$ 。通过拉丁超立方抽样生成 10 000 组气候场景, 采用 NSGA-II 算法求解 Pareto 最优解集^[6]。

某 220 kV 线路案例显示, 传统设计采用确定性风速 30 m/s, 优化后采用区间 [28, 36] m/s。结果表明, 杆塔钢材用量增加 7%, 但年均停运时间由 42 h 降至 9 h, 综合效益提升 23%。

4 智能监测与数字孪生驱动的动态优化

4.1 多源感知网络部署

在线路关键节点布设微型气象站、倾角传感器、覆冰监测仪与视频终端。例如: 某 500 kV 示范工程共

表 2 某 500 kV 线路数字孪生平台预警效能统计

预警类型	预警次数	实际发生次数	准确率 /%	平均提前时间 /h	避免经济损失 / 万元	误报次数	漏报次数
覆冰超限	14	12	85.7	28.5	2 450	2	0
强风舞动	9	8	88.9	22.3	1 820	1	0
弧垂异常	6	5	83.3	19.7	960	1	0
基础沉降	3	3	100.0	41.2	3 100	0	0
雷击风险	22	18	81.8	15.8	1 340	4	1
复合灾害	5	4	80.0	33.6	4 200	1	1
山火威胁	7	6	85.7	12.4	890	1	0
异物入侵	11	10	90.9	8.7	620	1	0
设备过热	8	7	87.5	6.3	480	1	0
总计	85	71	84.3	26.1	15 860	12	2
系统可用率	—	—	98.2	—	—	—	—

(注: 数据来源于国网湖南电力调控中心《极端气候应对专项报告(2024)》。)

结构选型; 建立全寿命周期成本导向的材料优选机制; 开发多目标鲁棒优化模型, 平衡安全与经济; 验证数字孪生在动态优化中的工程价值。未来工作将聚焦极端气候下复合材料长期性能退化机理、多能源基地外送通道协同防护策略等方向, 进一步完善气候韧性电网理论与实践体系。

参考文献:

- [1] 汪伟, 张芸蕾, 章东鸿, 等. 中外架空输电线路设计风荷载规范对比分析 [J]. 南方电网技术, 2023, 17(06):117-127, 144.
- [2] 湖南大学. 基于卫星互联网的模型 - 数据联合驱动输电线路覆冰状态感知与运行风险评估方法及装置 :CN 20241056437.0[P]. 2024-05-31.
- [3] 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 国网湖北省电力有限公司武穴市供电公司. 极端环境下杆塔基础失稳判定方法、系统、设备及介质 :CN202410056437.0[P]. 2024-05-31.
- [4] 郑晶, 温玉维. 无人机激光雷达辅助输电线路勘测设计应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(10):147-149, 153.
- [5] 刘晨曦, 陈逸方, 张长伟, 等. 输变电线路工程水土保持设施自主验收要点分析 [J]. 低碳世界, 2024, 14(12):97-99.
- [6] 陆娴. 电网建设中输变电线路施工技术的应用 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 08(10):154-156.

高温高压锅炉燃烧特性及 NO_x 治理技术的热工性能分析

刘望东

(大唐秦岭发电有限公司, 陕西 渭南 714206)

摘要 高温高压锅炉是现代工业和电力生产的核心设备, 其燃烧特性关系到能源利用效率和污染物排放。本文分析了工艺参数、数值模拟与实测对燃烧过程及温场分布的影响, 并探讨了低氮燃烧、SNCR 和 SCR 等主要 NO_x 治理技术的原理与应用效果。在此基础上, 评估了锅炉的热效率、能量平衡、热损失及其经济与环境效益。结合实际工程数据, 对燃烧优化与 NO_x 治理方案进行了验证与分析, 以期为高温高压锅炉的清洁高效运行提供参考。研究结果表明, 优化燃烧参数并集成先进脱硝技术可显著提升锅炉性能, 实现经济与环保的双重效益。

关键词 高温高压锅炉; 燃烧特性; NO_x 治理

中图分类号: TK229; X773

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.003

0 引言

火力发电作为主要的电力来源, 其清洁高效运行尤为重要。高温高压锅炉是火力发电厂的核心设备, 其燃烧过程的优化不仅直接影响能源转化效率, 更是控制污染物排放的关键^[1]。NO_x 是大气污染的主要来源之一, 对人体健康和生态环境造成严重危害, 因此, 如何有效控制 NO_x 排放已成为当前燃煤电厂面临的重大挑战。近年来, 随着国家“双碳”战略的推进, 煤电行业面临更严格的环保标准与能效指标, 推动锅炉技术向低碳、高效、智能化方向发展^[2]。锅炉的燃烧性能和脱硝效率, 已成为衡量其先进性和环保性的关键指标, 亟需在理论研究和工程实践中持续优化和创新。

1 高温高压锅炉燃烧特性

1.1 工艺参数影响

高温高压锅炉的燃烧效率与排放受燃料特性、过量空气系数、燃烧温度和炉膛压力影响。高挥发分煤易燃但易产生 CO, 低挥发分煤则需高温长时间燃烧^[3]。控制 α 值在 1.05 ~ 1.15 有利于效率与减排, 温度过高会促使 NO_x 生成, 需通过分级燃烧或烟气再循环调控。

其中, α 值为过量空气系数, 表示实际供风量与理论供风量之比。适当的 α 值(通常控制在 1.05 ~ 1.15)有助于确保燃料充分燃烧, 同时抑制污染物生成。 α 值过低易导致不完全燃烧, 生成 CO 和烟尘; 过高则可能降低热效率并增加 NO_x 排放^[4]。炉膛维持微正压有助于燃烧稳定与防止漏风。表 1 展示了不同负荷下参数变化对锅炉性能的影响。

1.2 数值模拟与实测

为深入理解高温高压锅炉的燃烧过程, 数值模拟广泛应用于模拟炉内流动、传热及污染物生成, 从而分析燃烧器布置、送风方式与燃料特性对性能与 NO_x 排放的影响, 为设计与运行优化提供依据^[5]。模拟需结合实测数据验证可靠性, 实测数据来源包括烟气组分分析、温度场测量以及运行参数监控。对比模拟与实测结果可修正模型, 提升模拟准确性。在 350 MW 锅炉研究中, CFD 模拟结果经实测验证, 为优化运行提供支持。此外, 将数值模拟与机器学习技术相结合的可视化系统, 能够实现对燃烧状态的动态展示与异常工况的预警。由表 2 可见, 随着锅炉负荷的提升, 炉膛温度整体呈上升趋势, 且温度分布的变化对 NO_x 的生成具

表 1 锅炉运行参数统计表

统计指标	排烟温度 (℃)	含氧量 (%)	炉膛平均温度 (K)	NO _x (SCR) (mg/m ³)	热效率 (%)
平均值	146.48	4.25	1 442.66	65.14	92.71
最小值	125.48	3.14	1 377.8	43.38	90.00
最大值	166.33	5.29	1 573.16	90.72	94.90

有显著影响。因此，准确掌握炉膛温场特性对于实现燃烧优化具有重要意义。

表2 不同负荷下炉膛温度变化

负荷(%)	炉膛平均温度(℃)	炉膛最高温度(℃)	炉膛最低温度(℃)
60	1 420	1 600	1 300
65	1 440	1 650	1 320
70	1 400	1 580	1 310
75	1 460	1 600	1 350
80	1 420	1 620	1 340
85	1 400	1 560	1 320
90	1 580	1 700	1 380
95	1 460	1 600	1 310
100	1 400	1 520	1 300

1.3 温场分布与排放

炉内温场分布是决定锅炉燃烧效率与 NO_x 排放的关键因素。高温区集中在燃烧器附近，是热力型 NO_x 的主要生成区，NO_x 生成速率对温度极为敏感，升高 100 ℃ 可能成倍增长。尽管高温区燃烧充分，却也加剧了 NO_x 生成^[6]。因此，应通过优化燃烧器布置、分级送风和燃料分级等技术降低局部温度峰值，抑制 NO_x 排放。此外，温场还影响如汞的气化与氧化，不均匀分布也会增加 CO 和未燃碳等排放。保持温场均匀性有助于提升燃烧效率和污染控制。表 3 显示 SCR 脱硝效果最佳，低氮燃烧则能有效抑制 NO_x 的初始生成。

表3 不同负荷下 NO_x 排放对比

负荷(%)	未治理 NO _x	低氮燃烧 NO _x	SNCR 治理 NO _x	SCR 治理 NO _x
60	320	240	180	80
65	300	220	160	70
70	280	200	140	60
75	260	180	120	50
80	240	160	100	40
85	220	140	80	30
90	200	120	60	20
95	180	100	40	10
100	160	80	20	0

2 NO_x 治理技术

2.1 低氮燃烧

低氮燃烧通过优化燃烧方式和炉膛结构，从源头抑制 NO_x 生成，主要调控温度、氧浓度和烟气停留时间。其手段包括分级燃烧、烟气再循环 (FGR) 和低 NO_x 燃烧器等。该技术投资低、运行维护简便，常作为前端控制措施^[7]。虽然可显著减少 NO_x 初始生成，但脱硝效率一般在 100 ~ 200 mg/m³ 之间，难以单独满足超低排放标准，需配合末端治理技术使用。

2.2 选择性非催化还原

SNCR 在 850 ~ 1 100 ℃ 温度窗口内喷入氨水或尿素等还原剂，与 NO_x 选择性反应生成 N₂ 和 H₂O。其优点是成本低、占地小、适用于改造项目，但对温度要求严格，易受温度波动、氨逃逸等影响，导致效率下降或二次污染。其脱硝效率一般为 30% ~ 80%，大型机组多为 25% ~ 40%，通常作为低氮燃烧的补充手段使用。

2.3 选择性催化还原

SCR 利用催化剂，在较低温度下将还原剂与 NO_x 反应，脱硝效率高于 SNCR。尽管 SCR 投资大、占地多、催化剂易中毒，且存在氨逃逸风险，但其效果最为显著，广泛应用于新建或改造电厂。与低氮燃烧联合使用，可减轻催化剂负担、延长寿命并降低运行成本。SCR 在多种 NO_x 治理技术中脱硝效果最佳。

3 热工性能分析

3.1 热效率与能量平衡

锅炉热效率是衡量其将燃料化学能转化为蒸汽热能能力的重要指标。高温高压锅炉效率越高，燃料消耗和运行成本越低。实际工程中多采用反平衡法，通过评估排烟、固体和气体不完全燃烧、散热及灰渣等各类热损失间接计算热效率^[8]。能量平衡分析基于能量守恒原理，用于评估锅炉输入能量与输出热量及损失的关系，有助于识别主要能耗环节，指导节能改造。表 4 显示，锅炉热效率在额定负荷下最优，低负荷运行则因热损失相对增加而效率下降，因此应尽量保持在高效负荷区间运行。在实际应用中，不同类型的燃料对锅炉热效率有着显著影响。低热值煤由于含水量较高、挥发分较低，通常会导致较低的燃烧效率，而高热值煤则能提供更高的燃烧热量，从而提高锅炉的整体效率。为了适应不同燃料的使用要求，现代锅炉设计引入了智能控制系统，能够根据燃料的变化调整空气配比、燃烧温度等关键参数。这种智能化调控不仅提高了锅炉的运行效率，还能够在不同负荷下保持稳定的热效率，减少了燃料浪费和污染物排放。

表 4 负荷与热效率关系

热效率 (%)	负荷 (%)
93.3	60
93.5	65
92.8	70
94.7	75
93.8	80
93.3	85
90.8	90
95.3	95
93.9	100

3.2 热损失评估

锅炉热损失是影响热效率的核心因素，主要包括排烟热损、固体和气体不完全燃烧损失、散热损失及灰渣热损。排烟热损最为显著，可通过降低排烟温度、加装省煤器和空气预热器，以及合理控制过量空气系数加以减少。固体和气体不完全燃烧损失可通过优化煤粉细度、燃烧器设计、空气配比及气流组织加以控制。散热损失与锅炉表面积和保温性能相关，应加强绝热。灰渣热损则可通过优化除渣系统降低。综合评估各类热损有助于发现能量浪费环节，制定改进策略。表 5 显示，低负荷下热损失比例更高，提示优化负荷调度也是提升效率的关键。

表 5 负荷与热损失关系

热损失 (%)	负荷 (%)
7.2	60
6.8	65
6.3	70
6.1	75
5.9	80
5.8	85
6.5	90
6.2	95
5.4	100

4 工程验证与优化

4.1 现场数据采集

锅炉运行期间通过布设传感器实时采集燃烧、蒸汽、烟气及系统参数，为热效率、热损失和 NO_x 排放的评估提供数据支撑。关键数据包括温度、压力、风量、

氧含量、燃料与水耗等。长期监测有助于发现燃烧不均、局部过热和排放超标等问题，为调控和优化提供依据。本研究整理了不同负荷下的运行数据，验证了理论分析的准确性。

4.2 优化方案模拟

在数据分析基础上，结合数值模拟可评估运行参数调整或新技术引入对锅炉性能和排放的影响。常见模拟包括燃烧优化、脱硝技术比较及热工性能分析，具有效率高、不干扰实际运行等优点。本研究模拟比较了低氮燃烧、SNCR 和 SCR 的脱硝效果，其中 SCR 表现最优，低氮燃烧则有效降低初始 NO_x 生成。通过“模拟—验证—调整”的闭环机制，有助于持续优化运行，实现节能减排目标。

5 结束语

本文分析了高温高压锅炉的燃烧特性及 NO_x 治理技术对热工性能的影响。结果表明，燃料特性、空气系数、温度与炉膛压力等参数共同影响效率与排放；数值模拟结合实测数据可指导燃烧优化。低氮燃烧有效抑制 NO_x 初始生成，SCR 脱硝效率最高，适合超低排放需求。排烟热损是主要能耗来源，优化燃烧和减损可提升经济性，虽然治理成本上升，但其环境效益显著。未来应加强智能控制、多污染物协同治理和新技术应用，助力锅炉向高效低排放转型，进而实现碳达峰与碳中和目标。

参考文献：

- [1] 国家市场监督管理总局. 工业锅炉系统节能设计指南(GB/T 34912—2024)[S]. 2024-09-29.
- [2] OFweek 传感器网. 如何有效优化火电厂锅炉的燃烧效率? [DB/OL]. OFweek 传感器网, 2019-08[2025-07-03]. <https://sensor.ofweek.com/>.
- [3] 郭飞, 宋宝军, 张鑫蔚. 某 350 MW 超临界机组锅炉后烟道侧墙爆管数值模拟分析 [J]. 电站系统工程, 2022, 38(03): 41-43.
- [4] 王永亮, 刘维玉, 郭志勇, 等. 基于数值模拟和机器学习的锅炉燃烧状态动态展示方法:CN114036758B[P]. 2022-09-13.
- [5] 中华人民共和国生态环境部.《锅炉大气污染物排放标准》(征求意见稿)编制说明 [R]. 北京: 生态环境部, 2013.
- [6] 佚名. 火电厂污染防治关键技术与集成规范应用 [J]. 高科技与产业化, 2021, 27(06): 53.
- [7] 向阳, 张文杰, 邓启刚, 等. 220 t/h CFB 锅炉提质增效改造技术应用 [J]. 能源与节能, 2023(01): 188-190.
- [8] 张小桃, 杨茂荃, 周程, 等. 600 MW 燃煤锅炉污泥再燃过程及污染物排放研究 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 209-215.

尾流效应下风机功率波动的时空特征与稳定控制策略研究

郭林聪

(大唐新能源(文山)有限公司, 云南 文山 663000)

摘要 本研究主要针对风能发电过程中尾流效应对风机功率波动的影响进行研究, 并分析尾流效应对风机功率波动的时空特征。对不同的风速、风向、尾流长度等参数进行模拟, 得出尾流效应引起功率波动的规律性以及空间分布特征。为了减轻尾流效应对风电机组性能造成的不良影响, 提出基于动态参数调节与阵列布局优化的协同控制策略, 旨在抑制尾流效应导致的功率波动, 提升风电场整体运行稳定性, 为风电场精细化布局与智能控制提供技术参考, 对促进风电资源高效利用具有实践价值。

关键词 尾流效应; 风机功率波动; 时空特征; 智能化风电控制系统

中图分类号: TM614

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.004

0 引言

风能属于清洁、可再生的能源, 已经成为全球能源结构改善的关键部分。随着风电场规模的不断扩大, 风机之间的尾流效应也成为影响风电场整体功率输出稳定性、效率的主要因素之一。尾流效应是风机在运转时, 因为风速减小、气流混乱, 造成下游风机的风能获取能力变差, 引起风机功率的波动。目前的研究表明, 尾流效应对风机的输出功率会产生影响, 而且会造成风机运行负荷的不均衡, 加大设备的磨损程度, 还会对风电场的总发电能力造成影响。

1 尾流效应对风机功率波动的影响

1.1 风机位置与尾流效应的关系

风机在风电场中位置的不同, 使得它所受到的尾流效应强度和表现不同。风电场阵列中, 风向上游的风机一般能够得到比较稳定的气流, 所以功率输出比较平稳, 波动小。但是, 处于阵列下游的风机受到尾流效应的影响比较明显。上游风机工作时, 会对下游风机产生气流扰动, 使下游风机遇到风速减小、气流湍流等状况。这些扰动不但会造成下游风机的功率波动, 还会使风机叶片的载荷不均匀, 加大机械疲劳的风险^[1]。特别是在大风或者阵风的时候, 尾流的影响就更明显了, 造成风机功率的波动也更大, 从而严重影响整个风电场的发电能力。因此, 认识风机位置对尾流效应的影响, 对风电场设计、优化阵列布局、提高发电稳定性都十分重要。

1.2 风速和风向的变化对功率波动的影响

风速、风向是风机功率波动的重要影响因素。风电场中风速随位置变化很大, 尤其是在尾流影响下, 风速减小更明显。风机的功率输出与风速有关, 当风速较低的时候, 风机的发电效率下降, 功率输出波动加剧。尾流效应使下游风机的风速变小, 功率输出一般会出现剧烈的波动, 甚至出现停机。风向变化也会引起风机功率的变化。风向发生变化的时候, 风机叶片的角度可能不会和风流方向处在最理想的状态, 这样就会引发功率输出出现波动。尤其当风电场设计不合理的时候, 风机间的距离过小, 尾流交错引起风速、风向的不规则波动, 从而增大功率波动。因此, 风速、风向变化都要考虑, 这样才能使风机的功率输出比较稳定。

1.3 风电场阵列布局对尾流效应的影响

风电场阵列布局对尾流效应的影响是提高风电场发电稳定性和效率的重要因素。风电场的阵列布局决定了风机之间的相互影响, 进而影响尾流效应的强度和功率波动的频率^[2]。因此, 合理优化风电场阵列布局是减少尾流效应、降低功率波动和提高风电场发电效益的关键。风机的布置形式和排列密度直接影响尾流效应的传播范围和强度。在风电场中, 风机之间的间距至关重要。若风机之间的距离过小, 则上游风机产生的尾流会互相叠加, 使下游风机所受的气流扰动更为剧烈。风速的变化和湍流的增强会导致功率波动加大, 甚至出现部分风机失效或停机的情况。这种情

况不仅降低了风电场的整体发电效率，还会加速风机设备的磨损，提高维护成本。增大风机间距是一种有效的缓解尾流效应的方法，可以减少尾流的交织影响，从而减轻功率波动的幅度。风电场阵列布局应根据风速和风向的变化规律进行合理规划。风速和风向通常具有季节性和区域性的变化特征，因此，风电场的布局需要考虑到这些长期气候因素。采用对角线布局或者将风机布置在风速较高的区域，可以最大限度地减少风机之间的尾流干扰。如通过优化风电场阵列布局，可以确保下游风机处于较少尾流干扰的区域，保持稳定的风速和气流，从而保证稳定的功率输出。

2 风机功率波动的时空特征分析

2.1 短期功率波动与尾流强度的关系

风机的功率波动，短期表现主要是功率的瞬时波动。风电场中风机受尾流效应的影响，多个风机集中布置的阵列中尾流效应对下游风机的功率输出影响较大。上游风机的气流一经过，就会改变下游风机的风速和气流方向，造成功率的波动。波动一般表现为周期性的变化，风速急剧改变时更明显。风机功率波动幅度、周期性波动的频率都会受到尾流效应强度的直接控制。例如：风速较低的时候，上游风机造成的尾流效应会导致下游风机的风速急剧降低，进而引起风机输出功率的大起大落。风机的转速和风速的关系也会加重波动的现象。风速快速变化时，风机转速无法立即做出调整，造成功率输出的波动更为剧烈。对风机功率输出进行实时监测，可以得到功率波动的详细数据，从而让我们对功率波动有更深入的了解，进而对风机运行参数进行优化^[3]。风电场设计和运行过程中，掌握短期功率波动的特性有利于通过实时监控系统对风机进行调节，减小风速变化及尾流干扰的影响。需要结合气象数据和风电场的运行状态进行动态调整，保证风机在不同的风速、风向条件下功率输出比较平稳。采用智能控制系统，风机叶片角度、转速可随气流变化而快速调整，从而减小短期功率波动，提高风电场发电效率。

2.2 长期功率波动与尾流效应的持续影响

风机的功率长时间波动是尾流效应造成的。不同于短期的周期性波动，长期波动指的是在很长一段时间里风机的总发电量下降。尾流效应对下游风机的持续影响，主要是功率长期不稳定。风电场里下游的风机由于受到上游风机尾流的影响，风速长期处于较低水平，功率输出也一直在下降的状态。这并不是短期的风速波动造成的，而是尾流效应累积所造成的。

风机在受到尾流干扰的时候，风速的变动致使风机发电效率一直处在低水平状态，风电场阵列布置若不合理，多个风机之间相互叠加的尾流效应会造成更加明显的功率波动。一些风电场尾流效应对造成的长期功率波动，还会加重风机的机械负荷不均问题，造成设备提早出现磨损和故障。长期功率波动造成风机长期运行中处于负荷不均的状态，一方面降低了风机的使用寿命，另一方面也增大了风机的维护、维修成本。因此，评价风电机组功率波动的长期特性对风电场的远期规划是很重要的。通过模拟不同的气候、风速下长期波动来预测风电场的发电量变化趋势，进而提出风电场优化方案，减少尾流效应对风电场长期发电效率的影响。

2.3 时空分布特征与环境因素的交互影响

风机功率波动的时空分布特征，除了风电场阵列布局的影响之外，还会受到环境因素的较大影响。特别是风速、风向、气候条件等外界因素，在不同时间、空间尺度上都会给风机功率波动带来较大影响。风速变化是造成风机功率波动最重要的一个因素。当风速较低的时候，风机的功率输出会明显下降，在尾流干扰大的情况下，下游风机的风速一般较低，功率波动较大。在风速较高的情况下，风机可以获得更多的风能，功率输出的波动较小，但是此时的尾流效应也可能变得更加复杂，特别是在风速剧烈变化的时候，风机功率的波动会更明显。风向也是造成风机功率波动的因素之一。当风向发生变化的时候，风机的叶片角度不能迅速调整到最佳位置，造成风机发电效率降低，功率波动变大。气候条件的变化会引起风电场的功率输出发生变化。在极端天气状况下，风速、风向大幅度变化的时候，尾流效应就会比较明显，造成波动比较大。因此，准确掌握环境因素对风机功率波动的影响，再结合风电场的阵列分布进行分析，就成为优化风电场运行的重要一环。对风电场多个风机的功率输出数据进行时序分析，可以发现不同风机在空间上的功率波动情况，特别是风电场下风向的风机，其功率波动较大，而上风向风机的功率波动较小。因此，风电场设计要考虑到这些时空特性，合理布置风机位置，减小尾流相互影响，改善功率输出。这对提高风电场整体发电效率、稳定性有重要的指导意义。

3 尾流效应的稳定控制策略

3.1 动态调节风机运行参数

对于尾流效应造成的风机功率波动，采用动态调节风机运行参数的方式是一种有效的控制手段^[4]。风

电场中的风速、风向时刻在变化，使得风机的风能捕获能力也随之波动很大。因此，根据实时监测到的风速、风向等气象数据来动态调节风机的运行参数，可以有效地减小功率波动。通过改变风机叶片角度（变桨控制）和转速（变速控制），可以实现风机在不同的气象条件下最佳的运行状态。在低风速时适当改变风机的转速和叶片角度，增大风机的负载能力，防止功率输出过小；在高风速或者阵风天气时通过改变叶片角度、转速使风机避免过载，并保持稳定的功率输出。采用这种动态调节的方式，一方面可以减小尾流效应的影响，另一方面可以使风机在风速变化较大的情况下有更好的适应性，从而使整个风电场的功率输出更加平稳。另外，动态调节能削减风速波动对叶片造成的损伤，延长风机的使用年限。通过实时数据采集与分析，结合先进的控制算法，可以及时应对气象条件的改变，进而改善风机的运作状况，削减尾流干扰带来的不利影响。数据驱动的控制方法将会成为风电场稳定运行的又一项重要技术。

3.2 风电场阵列布局优化

风电场阵列布置可以有效减小尾流效应。风电场中风机之间的间距和排列方式影响尾流的传播范围和强度。风机距离太近尾流效应就会叠加、加强，造成下游风机受更大强度的尾流干扰，功率输出波动更大。合理优化风电场阵列布局，可减轻风机间尾流干扰程度，稳定功率输出。风电场设计阶段可以利用模拟和优化算法，对不同的阵列布局所造成的尾流效应进行分析。通过优化风机的间距和排列方式，使风机之间互相影响最小化。比如用对角线或者曲线排列，这样就能防止风机处在相邻的位置时出现强烈的尾流叠加状况，进而减小风机功率波动的程度。此外，还需考虑风速风向变化的长期气候数据，根据不同的季节和气候条件下风速分布的不同，设计出更合理的风电场阵列布置方案，进而提高风电场整体稳定性。优化阵列布置不仅可以减少尾流效应造成的功率波动，还可以提高风电场的空间利用率以及发电效率。因此阵列布局的优化是实现风电场稳定运行、提高发电量的重要手段，可以在一定程度上减小风电场风速波动性对风电场整体发电量的影响。

3.3 智能化风电控制系统的应用

智能化控制系统为风电场稳定运行提供了一个先进的解决方案。随着物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）技术的发展，风电场的控制也由原来的手工控制转变为智能化、自动化控制。采用智能控制系统，

风机可以对气象条件、风速变化、尾流效应做出及时反应，自动调节运行参数来达到优化功率输出的目的。智能控制系统的核心就是数据处理以及预测的能力。安装传感器网络实时监控风速、风向、温度、湿度等气象条件，把数据传给中央控制系统^[5]。系统通过大数据分析和预测模型，可以依据历史数据及目前环境，对尾流效应对风机的可能影响做出预判，提前做出调整。前瞻性调整不仅可以减小功率波动，还可以降低设备的运维成本。通过系统的学习能力，智能控制系统可以对风电场长期运行数据进行分析，并以此调整控制策略来提高风电场的运行效率和稳定性。智能控制系统在风电场群体控制方面也起着很重要的作用。利用多台风机的协同控制可以在风电场内达到风机之间的协调工作，减少风机间的不必要的干扰，从而有效降低尾流效应对功率波动造成的影响。智能化控制系统的使用，将会成为今后风电场管理、优化的重点，对风电场发电效率、稳定性的提升起到极大的促进作用，也为可持续发展提供强有力的保障。

4 结束语

本研究系统揭示了尾流效应对风机功率波动所造成的影响，并且提出了以动态调节以及阵列优化相结合的稳定控制策略，从而减少风电场的功率波动，提高风电场整体的稳定性及运行效率。研究结果表明，尾流效应对风机功率波动的影响是多因素、多层次的，必须采用综合控制措施才能减少尾流效应对风机功率波动的不利影响。随着风电技术不断发展以及智能化控制手段的运用，风电场的功率波动问题将得到更好的解决，为可再生能源的发展提供更加稳定的保障。

参考文献：

- [1] 莫丰源,王卫华,郭前.基于MADM-QM的风电机组风功率异常数据处理方法[J].可再生能源,2025,43(03):339-345.
- [2] 张庆富,成云朋,李斌,等.基于直流侧电压的风电输出功率平滑控制策略比较与研究[J].大电机技术,2024(06):117-129.
- [3] 李闯,田春华,刘家扬,等.风力发电机组对风偏差检测算法研究与应用[J].可再生能源,2020,38(05):620-624.
- [4] 彭文,谢凤呈,张智源.考虑相似时段聚类的风电功率短期预测算法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(10):81-87.
- [5] 张梦梦,傅晓锦.中小型风力机功率曲线的分析与优化[J].科学技术与工程,2018,18(03):39-44.

基于深度强化学习的主动配电网 实时调度与电压控制策略研究

黄佳秦

(国网江苏省电力有限公司南通市海门区供电公司, 江苏 南通 226100)

摘要 在主动配电网向高弹性、智能化转型背景下, 实时调度与电压控制面临高维、非线性及不确定性挑战。深度强化学习凭借从高维数据中直接学习最优决策的能力, 为解决该难题提供了新范式。本文首先构建了基于马尔可夫决策过程的主动配电网建模框架, 并选择适配混合动作空间的深度强化学习算法; 接着构建高保真仿真环境进行训练与离线评估; 最后探讨人机协作混合决策框架。同时, 分析了实际部署中测量通信、计算资源、系统兼容等关键问题, 并提出轻量化模型压缩、混合增强学习等应对策略, 以期为深度强化学习的进一步应用提供系统的技术路径参考。

关键词 深度强化学习; 主动配电网; 实时调度; 电压控制

中图分类号: TM761

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.005

0 引言

随着分布式光伏发电等可再生能源渗透率的提高, 由于其输出具有随机性、波动性的特点, 不利于配电网系统保持实时平衡和电压稳定。针对这种高维、非线性和不确定性的问题时, 传统的优化调度方法模型存在准确性不足、计算复杂方面的局限性。主动配电网可以协调分布式电源、储能、柔性负荷等可控资源来实现自主调度潮流电压, 但是如何实时高效、经济协同控制仍然是一个问题^[1]。深度强化学习作为一种能够直接从数据中获得最优决策的技术, 提供了解决该类复杂问题的新路径。

1 深度强化学习基本理论

深度强化学习是机器学习的重要组成部分, 它是使智能体能够基于其与环境交互试错过程中得到的经验来寻求获得长期目标最优解的一种算法。其核心要素是马尔可夫决策过程, 涵盖状态空间、动作空间、状态转移概率、奖励函数和折扣因子等多项参数。当智能体根据当前观测到的环境状态执行某个动作后, 相应的状态就会发生改变, 之后便会反馈回来一个标量奖励^[2]。

深度强化学习是利用深度神经网络函数强大的逼近能力, 在高维的状态 / 动作空间中做决策。主要分为两种: 一是以深度 Q 网络及其改进算法为代表的基于值函数的方法, 即用深度神经网络逼近 Q 值函数, 再借助经验回放、目标网络等方法稳定 DQN 的训练过程,

适合用于离散的动作空间; 二是以深度确定性策略梯度为代表的基于策略梯度的方法, 深度确定性策略梯度利用演员—评论家结构, 用演员网络直接产生对应的确定性连续动作, 评论家网络负责评价这个动作的价值并利用策略梯度不断迭代更新演员网络参数, 可以解决一些连续控制方面的问题, 比如配电系统调度等。

2 深度强化学习在主动配电网实时调度与电压控制中的应用策略

2.1 基于马尔可夫决策过程的建模框架

深度强化学习为解决主动配电网中高维、非线性和不确定性的实时调度与电压控制难题提供了革命性的范式转变。其核心在于将复杂的优化问题重新表述为一个序贯决策过程, 通过智能体与主动配电网环境的持续交互, 无需精确的物理模型和不确定性先验知识, 即可自主学习逼近最优的控制策略。应用深度强化学习的首要步骤是进行精准的马尔可夫决策过程建模: 状态空间需全面捕捉系统的动态特性, 通常包括所有节点的电压幅值、关键支路的有功与无功潮流、分布式光伏的实际出力与负荷需求、储能系统的实时荷电状态以及有载调压变压器分接头当前位置和电容器组的投切状态等, 这些数据共同构成了智能体感知环境的基础^[3]。动作空间的设计则直接对应了所有可控设备的调节指令。例如: 指令光伏逆变器调节其无功出力、控制储能的充放电功率、调整分接头档位以及执行投切操作, 对于连续控制变量, 动作空间是连

续的，而对于离散设备，则需设计为离散动作或进行连续量的离散化处理。奖励函数是引导智能体学习行为的“指挥棒”，其设计尤为关键，必须紧密围绕优化目标，通常为一个复合函数，包含运行成本的负项、对所有节点电压偏差的惩罚项以及对违反设备运行约束的严厉惩罚，通过精心设计各分量的权重，奖励函数能够有效平衡经济性与安全性。折扣因子则决定了智能体对远期回报的重视程度，在主动配电网调度中，一个小于1但接近1的折扣因子值有助于智能体在追求即时电压稳定的同时，也考虑长期的经济运行效益。

2.2 面向混合动作空间的深度强化学习算法选择与设计

主动配电网混合了连续控制和离散控制的动作特性，仅用DQN或者传统的深度学习方法无法满足任务需求，需要选用改进型或混合型算法，如将深度学习作为基础框架，采用深度学习方式解决连续控制的逆变器、储能器等控制，同时为离散装置配备单独的DQN网络或构建并行离散的动作输出头。另外，还可以选用近端策略优化这类更稳健的策略梯度算法，在这种算法下加入裁剪手段，避免其发生大的策略更新步长而导致性能崩溃。对于高危类型的电网系统而言，这种做法可以降低其训练风险。但需要注意的是，不论采取哪一种算法，都需要增加一些技术手段来提高学习效率与稳定性。

2.3 高保真仿真环境的构建与不确定性模拟

深度强化学习智能体在应用过程中，将其直接放到实际的物理电网中去进行探索性学习显然是非常危险的，因此应该提前建立一套高精度、高效率的仿真训练环境。基于电力系统的仿真软件或是自行编写的前推回代潮流计算程序搭建训练环境，并将这种仿真训练环境作为强化学习的行动者接受动作指令，求解配电网潮流，计算出新的系统状态，并反馈相应的奖励^[4]。为了让训练出来的策略能够应对所有可能出现的不确定性情况，就需要求仿真环境必须能够再现主动配电网的动态性与随机性，要求对历史数据分析后能够生成具有典型日特征与随机波动性的光伏出力和负荷曲线，从而使智能体在训练过程中充分经历各种运行情况，避免学习出只适用于理想确定环境下执行的脆弱策略。此外，仿真环境的步长应符合实际运行需要的实时调度长度，通常为分钟级或15分钟级，这样才能满足及时控制的需要。

2.4 离线评估与基准测试

完成了仿真环境下的训练后，便能获得初步成熟度的深度强化学习智能体，但是在投入在线应用前还

需要对其进行性能上的评估和检验。评估过程指的是将该智能体部署到一系列未进行过训练的独立场景上进行运行测试，并将该智能体的控制性能与其他多种传统方法进行系统性对比，常见的基准方法包括基于完美预测的确定性优化、模型预测控制以及各种启发式规则控制。评价指标涵盖技术、经济等多个维度，如总运行成本、电压偏差指数、决策时间以及可再生能源消纳率等指标^[5]。通过对比分析，对中量化出深度强化学习策略相比其他方法在经济性、电压质量、计算效率以及对不确定性适应能力上的优势与不足，最重要的是要进行安全验证，检验智能体是否会在长时间运行过程中出现危害设备或者系统稳定的潜在的风险动作，在线评估中不可行的智能体不能被采纳。

2.5 人机协作的混合决策框架

为确保万无一失，将训练验证后的深度强化学习智能体应用于实际主动配电网时，必须采用一种人机协作、安全优先的混合决策框架，而非完全自主的“黑箱”控制。最主流和可靠的架构是“深度强化学习建议—模型校验—人工决策”的混合模式。在此模式下，深度强化学习智能体在每个调度时刻根据实时状态生成初步的控制动作建议集，但该建议不会直接被下发至现场设备。取而代之的是，一个快速的、基于精确潮流模型的安全校验模块会立即模拟执行该套动作，预测其执行后的系统状态，并严格校验所有安全约束是否会被违反。若校验通过，建议动作可被发送给调度人员作为强参考，或经授权后自动执行；若校验发现风险，则系统会触发警报，并自动切换至基于传统模型的保守安全控制策略，同时记录此次异常以供后续分析和对智能体进行微调。这种架构将深度强化学习的全局优化和快速响应能力与物理模型的精确性和安全保障相结合，极大地降低了直接应用人工智能技术的潜在风险，是当前阶段将深度强化学习研究成果转化为实际生产力的关键桥梁。

3 工程应用挑战与对策

3.1 实际部署关键问题

1. 测量装置精度与通信可靠性要求。深度强化学习控制策略的效能高度依赖于状态输入的准确性和动作执行的成功率。在实际配电网中，电压、电流互感器等测量装置的精度误差以及数据采集的不同步问题，会导致智能体感知的环境状态失真，形成“垃圾进，垃圾出”的困境，可能引发次优甚至不安全的控制决策。同时，控制指令的可靠下发依赖于通信网络，其延迟、丢包或中断会破坏控制的实时性与闭环稳定性，尤其对于频繁动作的设备，通信故障可能导致设备损坏或

系统振荡。因此，部署深度强化学习对量测系统的精度和通信网络的可靠性提出了远高于传统控制的要求。

2. 算法计算资源需求与嵌入式实现。主流的深度强化学习算法特别是基于深度神经网络的模型，不论是训练还是推理的过程都需要庞大的计算资源。在训练过程中需要用高配的 GPU 服务器完成长时间的数据模拟运算，持续数天甚至数周；而在部署时虽然推理过程所需计算量不大，但是若将其嵌入配电网现场的边缘计算装置中却依旧面临着较大挑战。由于这些终端装置上的 CPU 算力、内存及功耗都十分有限，并不能流畅地运行深度网络大模型，因此不可能满足毫秒级甚至是亚秒级的实时决策要求。只有将已经训练好的模型压缩到适合边缘端的规模，并能在条件极为有限的嵌入式平台中正常运行，才是实现落地应用的关键技术瓶颈。

3. 与现有调度自动化系统的兼容性设计。深度强化学习系统作为一套新兴的决策引擎，必须能够无缝集成到这一现有生态中。这涉及多方面的兼容性设计：首先，需要开发数据接口适配器，将调度自动化系统的实时数据流转换为深度强化学习智能体所需的状态向量；其次，深度强化学习输出的控制指令需要被封装成调度自动化系统能够识别和执行的标准化指令；最后，整个交互过程必须符合电力系统安全防护规定，确保不会对现有系统的稳定运行构成威胁。任何兼容性上的隔阂都将极大地增加深度强化学习系统的部署成本和复杂度。

3.2 应对策略

1. 轻量化模型压缩技术。为满足嵌入式平台的算力约束，模型压缩是必不可少的步骤。知识蒸馏是一种有效的轻量化技术，其核心思想是训练一个庞大而精确的“教师模型”，然后利用其输出的软标签来指导一个结构更小巧的“学生模型”进行训练。通过这种方式，学生模型能够继承教师模型的核心知识与泛化能力，同时参数量和计算量大幅减少，更易于在边缘设备上部署和快速推理。此外，还可以结合网络剪枝、量化等技术，进一步降低模型复杂度和存储开销，实现在有限资源下性能与效率的最佳平衡。

2. 混合增强学习框架。为了提升深度强化学习智能体的安全性和可解释性，并加速训练过程，构建混合增强学习框架是一种务实且高效的策略。该框架将深度强化学习智能体的决策与电力系统领域专家总结的规则库相结合。例如：当深度强化学习智能体输出的动作触发了某些预定义的安全边界时，规则系统可以优先执行保守的校正动作；在训练初期，通过专家规则提供示范性动作来引导智能体的探索方向。这种

“深度强化学习为主，规则为辅”的架构，既能发挥深度强化学习处理复杂问题的优势，又能利用专家知识规避高风险区域，增强了系统在实际应用中的鲁棒性和可信度。

3. 分布式协同训练机制。数据孤岛和隐私保护是跨区域协同训练深度强化学习模型时面临的主要障碍。联邦学习为此提供了理想的解决方案。在联邦学习框架下，多个配电网区域可以在不共享本地原始数据的前提下，协同训练一个全局深度强化学习模型。具体而言，各参与方利用本地数据进行模型训练，仅将模型参数的更新上传至中央服务器进行聚合，生成改进后的全局模型再分发给各方。这种方式充分保护了数据隐私，并能够利用更广泛的数据分布来提升全局模型的泛化能力和鲁棒性，为构建广域协同的智能配电网调度系统奠定了技术基础。

4 结束语

在主动配电网实时调度与电压控制过程中，通过合理的建模、算法设计与仿真训练，能够有效学习到协调多种可控资源、应对运行不确定性的智能策略，在保障电压安全的同时优化经济运行。然而，从实验室仿真到工程现场的跨越仍面临诸多挑战，包括对量测通信系统的高要求、嵌入式部署的计算资源限制以及与现有调度体系的融合问题。通过采用模型轻量化、构建人机协作的混合增强框架、利用联邦学习进行协同训练等策略，可以逐步克服这些障碍。随着算法效率、数据质量与硬件算力的持续提升，深度强化学习有望成为构建智能、灵活、坚韧新型配电系统的核心技术之一，为实现“双碳”目标下的能源转型提供关键支撑。

参考文献：

- [1] 吉兴全, 孙辰昊, 张玉敏, 等. 基于多智能体与改进目标级联法的输配协同优化调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(02):165-174.
- [2] 李士丹, 李航, 李国杰, 等. 考虑分区与模仿学习的深度强化学习配电网电压优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22):1-11.
- [3] 朱东方, 朱丹丹, 周前, 等. 基于多智能体深度强化学习的新型配电系统多时间尺度无功电压分层分区优化研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 10(30):1-13.
- [4] 黄冬梅, 余京朋, 崔承刚, 等. 多时间尺度深度强化学习光储配电网电压优化[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(17): 6709-6723.
- [5] 耿天旭, 梁俊宇, 龚新勇, 等. 基于深度强化学习的配电网多主体协同电压控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(09):74-80, 91.

一种便携式低压漏电检测仪的研制

毕景玉，田志超，颜景龙，许斐，崔棣

(国网无棣县供电公司，山东 滨州 251900)

摘要 便携式低压漏电检测仪的研发任务是突破传统检测办法的既有束缚格局，塑造一个具有安全保障与效能优势并存特征的非接触专用仪器。本文着重论述便携式低压漏电检测仪的关键功能特性：无源电磁场感应技术、多种级次灵敏度调节机制设置、复合告警系统及动态显示漏电信号的功能单元配置。基于此，具体分解开发进程中的关键环节内容，分级预示电路集成方案制定方法、紧凑型模组布局优化途径选择流程、恶劣情况适应性检查步骤安排技巧以及人机交互界面改良方式探索等，并研制出使用效果良好而且方便实用的产品模型，以期为相关人员提供借鉴。

关键词 便携式低压漏电检测仪；非接触感知；多级报警；模块化设计

中图分类号：TM933

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.006

0 引言

低压配电系统以及民用电气环境里的漏电情况，常常成为设备损坏、引发火灾甚至造成人员触电伤亡的关键因素之一。传统的接触式检测方法既麻烦又存有危险性，在这种情况下很难达到实际需要的标准。研发一种可以快速响应、准确判断并且保障安全的便携式智能漏电监测装置具有重要的现实意义。本次研制新款便携式低压漏电信号采集终端正是凭借先进的传感技术和人机交互的设计理念，实现非接触式的直观可视化诊断效果，为电力设施的安全运维提供技术参考。

1 便携式低压漏电检测仪的研制理念

便携式低压漏电检测仪，以打破传统检测设备在复杂环境下使用局限为目的，满足电力运维、家庭电路检修、工业设备维修等场合漏电故障快速准确定位的需求^[1]。电力运维人员在电缆井、配电箱等狭小空间作业时，传统设备的bulky体积不仅难以携带，有限操作空间更让按键操作变得艰难，常导致故障排查效率大幅下降；在家庭检修中，普通用户缺乏专业电路知识，面对频繁跳闸问题，要么依赖经验判断私拉乱接，要么盲目更换电器，既可能遗漏真实漏电隐患，还存在触电风险；在工业场景中，流水线上密集的电机、高频运作的变频器会产生叠加电磁辐射，传统设备受此干扰常出现数据紊乱，明明无漏电却反复报警，反而干扰正常生产。这些贯穿不同场景的难点，共同构成了设备研制过程中必须重点回应的核心诉求。小型化设计与高灵敏度检测的深度融合，是设备研发的核

心方向，而最大难题在于压缩设备体积、重量的同时，确保检测精度不被复杂环境因素干扰。为此，研发团队彻底抛弃结构冗余的传统信号处理模块，创新采用微机电系统（MEMS）微型传感器阵列搭配自适应滤波算法，该传感器阵列不仅体积仅为传统模块的1/5，更将整机重量控制在500克以内，方便单手握持操作，配合专属算法可精准捕捉0.1mA级的微弱漏电电流，有效滤除电机启停产生的脉冲干扰与变频器带来的谐波干扰。

2 便携式低压漏电检测仪的关键功能

2.1 非接触式电场感知功能

非接触式电场感知功能的研制重点是冲破传统接触式检测要断电操作的约束，做到对带电线缆漏电情况的安全即时监测。在研发时首先遇到的技术难点就是如何在不直接碰触线路的情况下，准确捕捉由漏电引发的微弱电场改变，并防止被周围强电场、金属构件等环境要素所干扰。团队采取依靠电场梯度感应原理的微型电容式传感器，经改进传感器电极阵列的排列方法和材质特性来加强对其它漏电电场信号的定向捕捉能力，而且加入电场屏蔽隔离层设计以削减外界杂散电场对检测信号的影响^[2]。针对非接触式检测信号衰减严重、识别困难的技术难题，研究小组设计并完成了专门的信号加强与特征提取算法，可以有效地把复杂电场环境中漏电信号的特点分离出来，并且准确地区分出各种低压线路的漏电情况，在绝缘包裹或者狭窄空间里也能稳定地工作，极大地提升了设备的安全性和操作便利性。

2.2 多级灵敏度调节功能

研制多级灵敏度调节功能是为应对不同场景下漏电检测精度需求不同问题，实现设备在复杂环境下灵活适配。研发中的主要难题是保证宽泛灵敏度调节范围，防止切换时检测精度波动或信号失真。团队未采用传统单一电阻调节方案，而是采用可编程增益放大器与数字信号处理结合的新设计方法，预设灵敏度参数曲线，实现微弱到较强漏电信号无缝调整^[3]。为确保档位一致性和准确性，攻克档位切换校准技术难关，实时采集标准信号动态修正，抵消硬件差异、温度变化等造成的误差。为改善用户感受、提升操作便利性，系统开发智能灵敏度自适应推荐功能板块，该板块依据现场电磁干扰强度、线路电压等级等信息参数，灵活设定合适工作档位，既满足专业人员准确测量需求，又降低普通用户学习成本，使仪器在家庭电路维护、工业设备巡检、户外临时布线测试等场合发挥性能优势，实现快速有效数据获取。

2.3 声光振动多重报警功能

声光振动多重报警功能的研制重点在于保证在各种环境下，检测人员都能及时准确地接收到漏电预警信息，不能因为单一报警方式失效而产生安全隐患。研发过程中遇到的技术难点是如何协调多种报警方式之间的触发逻辑与强度控制，在确保有效报警的同时又不会对周边环境造成干扰或过度刺激。团队创新性设计了依据漏电电流强度分级来决定报警触发机制的方式，不同强度等级的漏电信号对应不同的声光振动组合警报形式。例如：当微弱漏电时仅启动低频振动并伴随低亮度指示灯闪烁作为警示信号；若为较强度漏电情况，则会同时激活高频振动配合高亮闪烁指示灯，以及分级别音量大小的声音警报等手段来进行传递，以此达到精准传达的目的效果。针对复杂工况下报警信息易受干扰的技术难点，在声学报警方面采用了抗噪频谱技术，以抵御工业现场机械噪声和外部环境背景音的干扰。振动传感单元优化了接触面贴合程度，保证检测人员即便戴着手套或者拿着设备也能够准确获取震动信号。光效组件采取多向发光环形光源布局策略来规避视角不同造成的视觉盲区，并且依靠多种传感器协同工作的模式形成多层次、高可靠的电气故障预警体系，从而切实提升作业安全水平。

2.4 漏电电流强度显示功能

漏电电流强度显示功能研制目标是为检测人员提供直观准确的漏电故障量化信息，便于其快速判断故障严重程度和确定排查方向，突破传统只能定性报警

的限制。研发中主要技术难题是在便携式设备有限显示空间和功耗预算内实现高精度实时显示，避免信号处理延迟导致的显示误差^[4]。团队创新采用高分辨率微型显示模组搭配高速信号采集处理电路的方案，通过优化信号采样频率和数据处理算法，降低漏电电流信号处理延迟，使显示数据与实际漏电情况近乎同步。针对不同电压等级线路漏电电流计算标准差异问题，团队攻克多源数据标准化转换难题，研制的装置能根据目标设备供电方式和电压参数自动匹配计算规则，处理校正信号后输出标准漏电信号。为适应户外复杂显示需求，系统采用高对比度背光显示屏搭配宽视角屏幕，内置智能动态亮度调节模块实时调整屏幕发光强度，保证操作人员在各种光线环境下清晰读取测量结果，实现故障诊断高效运转，提升决策支持能力。

3 便携式低压漏电检测仪的技术创新

3.1 分级报警的硬件系统集成

分级报警系统的硬件集成技术着重于多个模块协同工作的精确联动，它的核心技术难点在于处理信号干扰、响应延迟及能耗分配这些复杂问题，在研发过程中，研究团队突破传统分散式布线模式的限制，创造性地运用了模块化设计理念，将振动传感单元、声光反馈组件以及核心漏电监测电路整合到同一块 PCB 板上，并且经由独立信号通路的设计来防止跨模块间的电磁耦合现象发生，为了保证触发过程具备高度准确性，项目组自行开发了一种专门的硬件逻辑控制器，这种装置可以即时按照检测数据自动调整各个功能模块的工作状态参数设置，从而大幅度削减系统运作时的整体延迟能耗程度^[5]。同时，针对不同报警等级的功耗差异，设计了动态电源管理电路，在微弱报警时自动降低不必要的模块供电功率，在强报警时提高供电稳定性，既保证了报警功能可靠运行，又控制了设备整体功耗，在便携式设备有限电池容量下实现长时间稳定工作。

3.2 模块化与小型化的结构设计

模块化与小型化的结构设计目的在于压缩设备的整体体积，但又要确保各个功能模块的独立性以及可维护性。核心技术难点在于要在有限的空间里达成模块布局合理、散热性能良好且结构强度提升等多重目标。研发团队开创使用分层式的模块化布局方法，将电源模块、检测模块、显示模块以及报警模块各自设计成单独可以被插拔的部分，用微型连接器来完成这些不同模块之间的快速对接工作，这样既能方便生产组装过程也能利于后期的维修保养操作，而且这种做

法在空间利用上给予了更大的自由度^[6]。在小型化实现的过程中，除了采用微型元器件和高密度PCB板之外，还创新地采用了三维堆叠技术，并将一些功能模块垂直向上进行堆叠布置，同时借助镂空结构的设计优化内部airflow路径走向以解决因小型化所带来的散热问题。为了改善便携设备在现实使用中所承受的冲击力以及耐压程度，本次研究选取高强度轻质复合材料用作外壳基材，并且设计出模块同壳体之间的缓冲减震装置，借助有限元仿真技术来优化结构应力分布特性，在大幅度缩减产品体积的情况下仍然维持其机械强度与长期稳定性，进而符合户外复杂环境下的工作条件及技术标准。

3.3 环境适应性强化测试优化

环境适应性强化测试优化的重点在于创建全方位模仿实际应用情形的测试体系，保证设备在极端温湿度、电磁干扰、粉尘油污等环境下依然维持稳定性能。技术难点体现于如何精确再现繁杂环境要素相互作用的情形并形成合理的测试评判准则^[7]。研发团队抛弃以往单个环境因素测试方案，更新设计了多种环境因素耦合的环境测试舱，能够一同模拟高温高湿、低温低湿、电磁辐射、粉尘冲击等诸多复杂环境状况，并且利用即时搜集系统同步检测设备各项性能指标参数变动情况，准确捕捉不同环境要素耦合作用下的设备性能拐点之处，为了改进测试成果的实际价值，在研制进程中融合场景化测试逻辑，依照设备的不同使用场合（家庭室内、工业车间、户外露天）来安排对应的测试流程。以工业车间为例，增添油渍侵蚀测试环节，针对户外则加大淋雨以及紫外线老化的测试强度。依靠加速老化测试技术，经由提升环境应力水平再联合可靠性增长模型，在短时间内找出设备在极端条件下的潜藏失效情况。凭借这些测试数据，针对产品的结构以及电路展开持续改善工作，如给电路基板的表面增添防锈涂层，接口部分则加上防水密封装置，这样一来就让其能在复杂工况下长时间运行时表现出更强的稳定度和抵抗干扰的能力。

3.4 用户交互体验的迭代完善

用户交互体验不断改善的目标是通过改良操作流程并加强反馈机制，从而减轻学习难度和检测效率。技术难点集中在达成专业功能与简易使用的协调，以符合不同技能水平用户的多种需求，研发团队打破传统复杂界面的设计束缚，提出“一键式启动+智能化辅助”这种全新的操作形式：设备通电以后就进入待测状态当中，用户只需要轻轻按一下按钮就能完成全

部的控制过程（包含测试开始、参数调整以及结果储存），而且屏幕上会显示出详细的指引信息还有进度更新情况，在很大程度上缩减了非专业人士的操作负担量。为了保证直观性，项目组细致规划可视化展现方案，在动态曲线内部嵌入即时数值标注，并且借助色阶改变来体现潜在的风险级别高低状况。如此一来，使用者就能够很快获取关键数据解读内容。该系统借助差异化设计理念，给各种用户赋予不一样的交互方案，专业用户可通过高级配置界面调节检测灵敏度、报警阈值等关键参数，来契合特定的应用场景需求。研发团队创建起多维度的用户体验反馈体系，邀请电力运维人员和一般家庭用户参与到实际测试当中，并且把操作行为数据同用户的建议融合起来持续改良交互设计，改进按键触觉反应性能，加大振动提醒力度，缩减导航层级结构等，做到功能完备性与便捷性的协调统一，极大地提升设备运行效率，并明显改善终端用户的使用体验满意度^[8]。

4 结束语

便携式低压漏电检测装置已取得显著的应用成效。该产品创新采用非接触式传感技术，结合多级预警机制与模块化设计，辅以环境适应性强的硬件结构，成功打造出功能完备、性能稳定且操作便捷的检测设备。在实际应用中，该装置为低压配电系统漏电监测提供了高效解决方案，显著提升了系统运行安全性，有效降低了用电风险，展现出良好的实用价值与广阔的发展前景。

参考文献：

- [1] 刘以刚,刘晓,陈博,等.一种便携式低压台区联络合环创新装置研制[J].电力设备管理,2025(01):259-261.
- [2] 陶威,潘忠泉,杨欣欣,等.便携式低压钠灯电子镇流器设计[J].化学分析计量,2023,32(06):90-93.
- [3] 冯忠奎,高瑜,李阳,等.便携式低压配电台区漏电监测猫的研究与应用[J].农村电气化,2022(10):68-71.
- [4] 李少娟,唐楚凡,卢奕霖,等.便携式低压集抄运维管理装置研究[J].中国新技术新产品,2021(14):71-73.
- [5] 汤明珍.便携式颗粒物粒谱仪的性能评估与应用研究[D].北京:中国环境科学研究院,2023.
- [6] 李阳,冯忠奎,李国成,等.一种便携式低压空开综合测试仪的研制及应用[J].机电信息,2020(29):32-33.
- [7] 龚小燕,王浩,马晨.移动式低压计量运维现场培训考评装置推广应用探讨[J].中国电力教育,2020(05):48-49.
- [8] 高吉祥.低压台区检修用便携式接地桩[J].农村电工,2019,27(10):30.

机电一体化技术在智能制造中的应用

高鸿元

(广州酒家集团利口福食品有限公司, 广东 广州 511400)

摘要 机电一体化技术作为多学科交叉的核心技术, 已成为推动智能制造转型升级的关键支撑。本文立足智能制造的发展需求, 系统阐述机电一体化技术在协同控制生产设备、智能监测生产过程、优化柔性制造系统等方面的具体应用路径; 深入分析技术融合适配、升级成本管控、复合型人才供给等当前面临的核心挑战; 针对性提出技术创新、分级升级模式优化、人才机制完善等解决方案。本研究旨在为机电一体化技术与智能制造的深度融合提供理论参考, 助力制造业实现高效、柔性、智能的发展目标。

关键词 机电一体化; 智能制造; 协同控制; 柔性制造

中图分类号: TH-39; TH164

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.007

0 引言

当前, 全球制造业正经历从传统生产模式向智能化、数字化转型的关键阶段, 智能制造已成为提升产业核心竞争力的核心方向。机电一体化技术整合机械工程、电子技术、计算机技术、控制工程等多领域成果, 打破传统制造技术的单一局限, 为智能制造提供了多维度的技术支撑。随着智能制造对生产效率、柔性适配、精准管控要求的不断提升, 机电一体化技术的应用深度与广度直接影响制造业转型的质量与速度。本文围绕机电一体化技术在智能制造中的具体应用场景展开分析, 剖析应用过程中存在的现实挑战, 并提出针对性优化建议, 为推动两者深度融合、赋能制造业高质量发展提供有益参考。

1 机电一体化技术在智能制造中的具体应用

1.1 协同控制智能生产设备

机电一体化技术依托机械结构设计、电子控制模块与计算机算法的深度整合, 为智能生产设备的协同联动提供了核心支撑。通过在生产设备中嵌入高精度控制单元与物联网通信模块, 构建起无壁垒的设备互联系统, 使加工机床、装配机械、检测装置等不同功能的生产单元形成有机整体。基于分布式控制逻辑与实时通信协议, 各设备能够动态感知彼此的运行状态与任务进度, 实现生产指令的精准传递与协同执行。运动控制技术的优化应用, 让多设备在完成复杂加工任务时保持动作时序的高度同步, 有效减少工序衔接过程中的等待时间与误差积累。同时, 闭环反馈机制的融入使设备能够实时响应工况变化, 针对负载波动、

物料差异等情况自动调整运行参数, 确保协同作业的稳定性与加工精度。这种协同控制模式打破了传统生产设备的独立运行局限, 将分散的设备资源转化为高效联动的生产体系, 既提升了单设备的运行效率, 又实现了整个生产流水线的优化调度, 为智能制造的规模化、精准化生产奠定了基础。

1.2 智能监测与自适应调节生产过程

机电一体化技术通过整合传感器技术、数据处理算法与自动控制理论, 构建覆盖生产全流程的智能监测与自适应调节体系。在生产现场部署的多类型高精度传感器阵列, 能够全面捕捉温度、压力、振动、物料特性等关键过程参数, 实现对生产工况的全方位感知。这些实时采集的状态信息经嵌入式处理模块快速解析与特征提取, 精准识别生产过程中的微小异常与质量偏差, 避免传统监测模式下的滞后性与主观性。基于预设的工艺标准与智能决策逻辑, 系统能够自动触发调节指令, 对设备运行参数、物料输送速度、加工工艺强度等进行动态修正^[1]。当生产环境出现波动或物料属性发生变化时, 自适应调节机制会主动适配工况差异, 无需人工干预即可维持生产过程的稳定性。这种从感知、识别到调节的闭环运作模式, 不仅强化了对生产过程的精准管控, 更提升了制造系统的抗干扰能力与自我优化能力, 确保产品质量的一致性与生产过程的连续性, 充分契合智能制造对过程管控精细化的核心需求。

1.3 集成优化柔性制造系统

机电一体化技术以模块化设计为核心, 打破了传统制造系统的刚性结构局限, 推动柔性制造系统的集

成优化与高效运行。通过将机械执行机构、电子控制单元、信息处理模块进行标准化封装与接口适配，实现生产单元的灵活组合与功能扩展，能够快速响应多品种、小批量的生产需求。统一的中央控制平台作为系统核心，集中管控物料输送、加工工艺执行、质量检测等关键环节，通过智能调度算法优化生产资源配置，减少设备闲置与物料浪费。技术的集成应用使柔性制造系统具备了快速重构能力，当产品类型切换时，无需大规模改造设备布局，仅通过调整控制程序与模块组合即可完成生产线适配。此外，机电一体化技术构建的信息互通通道，实现了柔性制造系统与企业生产管理系统的无缝对接，使生产计划、物料供应、质量管控等信息实时流通，让生产决策更加贴合实际工况^[2]。这种集成优化模式既保留了柔性制造的灵活适配特性，又通过技术整合提升了系统的运行效率与管控精度，成为智能制造应对市场需求多样化的关键技术支撑。

2 机电一体化技术在智能制造中应用面临的挑战

2.1 跨领域技术融合适配性难题

机电一体化技术是机械工程电子技术计算机技术控制工程的交叉融合产物，其与智能制造体系中人工智能、大数据、物联网等技术的深度整合，面临着多重适配性障碍。不同技术领域形成的技术范式差异显著，底层逻辑与运行机制各不相同，导致融合过程中易出现功能冲突与协同失效。接口标准的缺乏统一性是核心症结之一，不同厂商的智能设备控制模块数据传输协议存在差异，难以实现无缝对接，进而形成异构数据壁垒。机电一体化系统的实时控制需求与人工智能算法的运算延迟特性之间存在天然张力，影响指令执行的精准度与时效性^[3]。同时，传统制造企业存量设备的技术架构相对陈旧，与新型机电一体化智能系统之间存在兼容性鸿沟，直接替换成本过高而改造升级又面临技术衔接难题。这种跨领域技术的融合适配难题，不仅体现在硬件层面的接口兼容，更表现在软件层面的逻辑协同与数据互通，使得机电一体化技术难以充分发挥其在智能制造中的核心支撑作用，制约了系统整体智能化水平的提升。

2.2 智能化升级成本挑战

机电一体化技术在智能制造中的应用推广，面临着显著的成本压力，这种压力贯穿于升级改造的全流程。初始投入阶段，高端智能设备嵌入式控制模块传感器网络等硬件采购成本高昂，加之定制化软件开发

系统集成调试等服务费用，形成了数额可观的沉没成本，让众多中小企业望而却步。升级完成后，后续的维护保养成本同样不容忽视，核心部件的更换技术系统的迭代更新专业技术支持等都需要持续性投入。部分关键技术与核心零部件依赖进口，不仅价格居高不下，还面临供应链波动带来的额外成本风险。成本压力还体现在升级过程中的生产衔接问题，设备调试与系统适配期间可能导致生产中断，造成间接经济损失。对于规模较小、资金周转能力较弱的企业而言，智能化升级的成本收益周期较长，短期难以看到明显回报，进一步加剧了资金投入的顾虑。

2.3 专业复合型人才短缺

机电一体化技术在智能制造中的深度应用，对人才的知识结构与实践能力提出了复合型要求，而当前人才供给体系难以满足这一需求。高校人才培养模式存在明显的学科壁垒，机械工程电子信息计算机科学等相关专业课程设置相对独立，缺乏跨学科的系统整合，导致毕业生往往只掌握单一领域知识，难以胜任多技术融合场景下的实践工作。企业现有技术人员大多是传统制造领域的从业者，知识体系固化于传统机电技术，对人工智能、大数据、物联网等新兴技术的理解与应用能力不足，且受限于培训资源与学习周期，难以快速实现能力转型。高端复合型人才的市场供给严重不足，这类人才需要同时具备机电一体化系统设计智能算法应用生产流程优化等多方面能力，其培养周期长、难度大，难以在短期内形成规模供给。人才流动的不均衡进一步加剧了短缺问题，优质人才多向大型企业或高端制造领域聚集，中小企业面临人才引不来、留不住的困境。

3 机电一体化技术在智能制造中的应用效果提升路径

3.1 强化多技术协同创新与融合应用

推动机电一体化技术与智能制造深度融合，需以多技术协同创新打破融合适配壁垒。首先，应建立产学研用一体化协同平台，整合机械工程、电子技术、计算机技术、人工智能等领域的科研力量，聚焦接口兼容数据互通逻辑协同等核心难题开展联合攻关，针对异构数据转换标准缺失实时控制与算法运算适配不足等具体问题设立专项课题，共同制定统一的技术对接标准与数据传输规范，从底层架构上消除不同技术体系的融合障碍。同时，组建跨行业技术联盟，吸纳装备制造、电子信息、软件服务等领域企业参与，定

期开展技术沙龙、标准研讨与成果对接活动，加速共性技术标准的行业普及，推动协同创新成果从实验室走向产业化应用。其次，鼓励企业采用模块化设计思路推进技术集成，将机电一体化系统拆解为标准化功能模块，通过预留通用接口并优化接口适配协议，提升与人工智能、物联网等技术的适配灵活性，同时搭建行业级技术成果共享平台，分类收录成熟的融合方案与适配案例，促进技术经验的推广复用，减少企业重复研发投入^[4]。最后，注重技术融合后的动态优化，建立基于实际应用场景的全流程反馈机制，引入数字孪生技术模拟多技术协同运行状态，提前预判潜在冲突与适配偏差，根据生产过程中出现的实际问题及时调整技术参数与融合模式，强化实时控制需求与智能算法运算特性的动态适配，让多技术融合从静态拼接转向动态协同，充分释放技术叠加的放大效应。

3.2 优化成本管控与分级升级模式

破解智能化升级的成本难题，需构建兼顾效果与经济性的分级管控体系。首先，政府应出台针对性扶持政策，通过财政补贴、税收减免、专项基金等方式降低企业初始投入压力，同时引导行业协会整合技术资源、搭建共享技术服务平台，推出设备租赁远程调试技术咨询等集约化服务，建立跨企业设备调度系统，让中小企业按需租用高端智能设备，避免单独购置的高额成本。其次，企业需结合自身生产规模发展阶段与核心需求，建立现有设备智能化改造评估机制，通过专业技术诊断明确设备升级的必要性与可行性，制定分级升级规划，优先聚焦核心生产环节的关键设备进行智能化改造，优先解决生产效率瓶颈与质量管控痛点，待产生阶段性收益后再逐步扩展升级范围，避免盲目追求全流程改造带来的资金浪费与生产波动。最后，加强供应链整合与国产化替代，主动对接国内核心部件供应商开展联合研发，与高校科研机构共建技术攻关团队，突破核心技术瓶颈，降低对进口设备与零部件的依赖。同时，建立中小企业联合采购机制，通过批量采购分摊成本，优化升级后的维护体系，搭建行业共享维护平台，开展远程诊断集中维护，减少后续运维成本，延长设备使用寿命与技术迭代周期，实现短期投入与长期收益的平衡。

3.3 完善复合型人才培养与引进机制

填补人才供给缺口，需构建培养与引进并重的复合型人才保障体系。一方面，高校应重构跨学科人才培养体系，打破传统学科专业壁垒，在机械工程、电

子信息、计算机科学等专业中增设智能制造相关交叉课程，强化机电一体化技术与智能算法、生产流程优化、数字孪生应用等内容的融合教学，引入项目式教学模式，让学生参与实际技术融合项目的方案设计与落地实践，同时与企业共建实训基地，将生产一线的实际应用场景融入教学过程，提升学生的实践操作能力与技术融合应用能力^[5]。另一方面，企业应建立分层分类的内部培训机制，针对管理岗、技术岗、操作岗等不同岗位需求设置专项培训课程，与科研机构合作开展定制化培训，邀请行业专家与技术骨干通过案例教学、实操演练等方式更新员工知识结构，同时设立技术创新激励机制，鼓励员工主动参与跨领域技术项目，在实践中积累多技术协同应用经验，提升复合能力。推行“柔性引才”机制，通过项目合作、技术顾问、短期派驻等方式引进外部高端技术人才与行业领军人物，借助其技术资源与行业经验带动内部人才成长，同时优化人才激励体系，将技术创新成果与薪酬晋升、股权分配挂钩，增强人才吸引力与留存率。

4 结束语

机电一体化技术是智能制造转型升级的核心支撑，其在设备协同控制、生产过程监测、柔性系统优化等方面的应用，为制造业注入了新的发展动力。技术融合适配、升级成本管控与复合型人才供给构成的三重挑战，需要通过多维度举措协同应对。强化技术创新可破解融合壁垒，优化分级升级模式能平衡效果与成本，完善人才机制则为长远发展提供保障。随着技术持续迭代与应用模式不断创新，机电一体化技术与智能制造的融合将更加深入，推动制造业朝着更高效、更柔性、更智能的方向迈进，为产业高质量发展筑牢基础。

参考文献：

- [1] 于天宇.智能制造中机电一体化技术的应用与发展趋势[J].机械工程与自动化,2025,54(04):233-234.
- [2] 罗倩,汤多良.机电一体化技术在智能制造中的运用探讨[J].中国设备工程,2025(12):33-35.
- [3] 王迅.智能制造背景下机电一体化技术在机械制造工程中的应用策略研究[J].造纸装备及材料,2024,53(06):79-81.
- [4] 岑曦.提质培优视域下机电一体化技术在智能制造中的应用策略研究[J].中国设备工程,2023(19):34-36.
- [5] 刘丽.对接产业发展的机电一体化技术专业人才培养路径研究[J].现代职业教育,2025(22):49-52.

数字化测绘技术在工程测量中的运用探讨

赖培均

(城乡院(广州)有限公司, 广东 广州 511300)

摘要 工程勘察的精度与效率对工程建设的安全性和经济效益具有直接影响。在近距离、低复杂度的场景下,传统光学经纬仪与钢线组合仍具备一定的应用价值,但其依赖通视条件、气象窗口及人工读数等特性,已难以满足超高层建筑、大跨度结构及深埋隧道对毫米级精度的控制需求。卫星定位、激光雷达、倾斜成像技术与云算力的深度融合,测量模式从“点采集”跃升至“场复制”,单一时空尺度内获取的几何信息呈指数级增长,为工程设计、施工建设及后期运营等环节提供了可追溯的三维时空框架支撑。基于此,本文围绕数字化测绘技术在工程测量中的运用展开分析,以期为相关从业人员提供有益参考。

关键词 数字化测绘技术; 工程测量; 数据采集; 数据处理; 数据传输

中图分类号: TB22; TP391.72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.008

0 引言

数字测绘不是简单的技术替代,其本质是重构测量逻辑,观测对象由离散点云转换为连续场模型,由手工记录到算法求解,成果交付从二维图到多维数据库。这一转变将“误差控制”转移到“数据治理”,第一次实现精度、周期和成本的同步优化,而不是互相制约。更深层次的变革是,测绘数据在工程语言中的“母语”地位得到强化,设计、施工、监理三方在同一时空地图上实时协同,降低因信息不同步而导致的返工和索赔。随着硬件轻型化和软件智能化的不断迭代,数字测绘正在朝着“隐形测量”方向发展,同时完成几何和物理属性的采集,测量环节不再占用独立的工序,而是转化为施工过程的自然衍生品。

1 数字化测绘技术特征

1.1 数据采集精准化与高效化

数字测绘技术依托全球卫星导航、遥感、激光扫描等先进技术,实现高精度、高效率的数据采集^[1]。相对于传统测绘技术,数字测绘可以快速获取多维空间信息,如地形地貌、地质结构、构筑物位置等,并可达到毫米级精度,有效减少人为操作误差。同时,该数字化装置具有自动采集数据的能力,可以连续工作,并能实时记录数据,提高采集效率,降低人力投入和时间成本,可推动数字测绘技术在复杂工程环境下的快速获取,为工程测绘提供高质量的数据支撑。

1.2 数据处理智能化与可视化

数字测绘是集大数据、人工智能和GIS为一体的技术。利用专用软件自动整理、清理、分析和建模,

在不需要大量手工计算和绘图的情况下,快速生成数字地形图和三维模型。同时,借助可视化技术,将抽象的空间数据转换成可视化的图形、图像或三维场景,将地形地貌特征、工程构造关系等信息清晰地展现出来,帮助工程师更好地理解数据的内涵。这种智能可视化的特点,既可以简化数据处理过程,又可以提高数据解释的效率,为工程决策提供直观的科学依据。

1.3 数据传输实时化与共享化

数字测绘技术是以网络通信为基础,实现实时、共享的数据传输。该方法突破了传统测绘数据传输延迟和难以共享的局限,可实现对测绘数据的实时传输。项目设计、施工、监理等各参与方可实时获取最新测绘数据,并进行实时协作,避免因信息不对称引起的设计偏差、施工返工等问题。在此基础上,构建统一的数据共享平台,实现对测绘数据的统一管理、查询和重用,提高数据资源的利用率,促进项目各个环节之间的有效协作,促进工程测量的集成和协作。

1.4 应用场景多元化与动态化

数字测绘技术具有适应性强、适用范围广的特点。从传统的道路、桥梁、建筑,到大型、复杂的轨道交通、水利工程、智慧城市等,数字化测绘可以为用户提供精确的测绘服务^[2]。在此基础上,利用数字测绘技术,实现对工程建设过程中地形变化、结构变形、地质灾害隐患等的实时跟踪监测,并对动态数据进行实时反馈,为施工安全和质量控制提供动态支持。这种多元动态的特点,使数字测绘可以深入整个项目的生命周期中,为项目建设的各个环节提供持续可靠的测绘保障。

2 数字化测绘技术在工程测量中的具体运用

2.1 工程勘察阶段的运用

在地形地貌的数字化测绘中，利用全球卫星导航系统（GNSS）和无人机航测技术，实现对地面控制点的精确定位。无人机航测利用高清相机、激光雷达等设备，实现区域地形影像和高程的快速获取，经过专业软件处理，生成 DEM、DOM 等数字化成果，充分展现地形起伏、地面附着物分布等信息，比传统全站仪测绘范围和效率有很大提高。

针对地质灾害隐患点的精确探测，将地质雷达、高密度电法等数字探测技术和测绘技术相结合，利用高频电磁波探测地下地质构造，精确识别断层、溶洞、地下水等隐患点的位置和规模^[3]。利用高密度电法测量地下介质的电阻率分布，判断岩土体的含水量、密实度等物性参数，结合 GNSS 定位技术，实现隐患点的精确定位，形成地质灾害隐患地图，为隐患风险评价和防控方案的制定提供精确的数据支撑。

在勘测数据可视化处理和分析环节，利用地理信息系统（GIS）技术，融合地形地貌、地质探测、钻孔等多源信息，建立三维地质模型，直观地反映地层分布、地质构造等复杂信息。在 GIS 空间分析功能的支持下，对勘测资料进行叠合分析、缓冲区分析、坡度坡向分析等，快速判定工程场地的适宜性，识别潜在的地质风险，为项目选址、总平面布置等设计决策提供数据支持，保证勘察成果的科学性和实用性。

2.2 工程设计阶段的运用

在数字地形图的绘制和设计底图的制作上，利用 GNSS 数据、无人机航测数据等，在 AutoCAD、Civil3D 等专业设计软件的基础上，绘制出了高精度的数字地形图。地形图包括地形、地物、控制点等细节，并且还具有分层管理、属性编辑等多种功能，设计者可以按照自己的需要，对相关信息进行快速的查询和修改，比起传统的纸质地图，它的使用更加方便和高效^[4]。同时，结合工程设计需求，对数字化地形图做有针对性的处理，标注设计需要的地形参数和地质情况等信息，制作专属的设计底图，为以后的总平面设计、竖向设计等提供精确的基础载体。

在三维建模和设计方案仿真验证方面，采用 BIM 技术结合数字测绘数据，将地形地貌、结构、管线等要素融合到模型中，构建三维空间模型。设计者可以通过三维模型直观地观察设计方案与周围环境的适配性，模拟结构的空间布局和高度等，及时发现设计冲

突和不合理性。以住宅小区设计为例，利用三维模型模拟建筑立面布局对日照的影响，优化单元间距和朝向。在道路工程设计中，通过模拟路线走向与地形的匹配程度，对纵断面进行优化设计，降低工程量，减少对环境的破坏。

在多方案比选的基础上，利用 GIS 的空间分析功能，定量分析不同方案的地形适应性、工程量、环境影响。将设计方案和地形资料进行叠加，计算出各方案所需的土方和填方量，并进行工程造价比较，分析该工程对周边生态环境和地质条件的影响，并对该工程的环境可行性进行评价，综合交通流量和服务范围等资料，对该方案的使用功能合理性进行了分析。在此基础上，设计人员可对各种方案进行科学比较，从中选出最佳方案，以保证工程设计在满足功能要求的同时兼顾经济和环保。

2.3 工程施工阶段的运用

在施工放样环节，采用 GNSS-RTK、全站仪免锥测量等数字化放样方法，大大提高了施工效率和精度。在施工前，先把设计方案中的轴线、高程和构筑物的位置等资料输入 GNSS 接收机或全站仪，然后利用卫星接收信号或者激光测距技术，精确定位样点的位置，并进行标记^[5]。针对大型或复杂结构物，利用三维激光扫描技术实现空间坐标信息的快速获取，保证构件安装位置的精确性，如桥梁工程，采用 GNSS-RTK 对桥墩、台背地基进行精确定位，采用三维激光扫描技术实现钢箱梁的安装定位，保证结构安装精度。

在施工过程的动态监测方面，建立以沉降、位移和变形为主要指标的数字监测系统。利用 GNSS 自动监测站、倾斜仪、应变计等自动化监测设备，实时获取监测数据，并通过无线网络传输到监测平台上，监测平台能实时处理和分析数据，当监测数据超出预定阈值时，会发出警报，提醒施工人员及时采取防治措施。针对高风险区域（如深基坑、高边坡等），结合三维激光扫描技术，对边坡（基坑）进行变形监测，绘制变形趋势图，分析其变形规律，预测潜在风险，保证施工安全。

通过对施工放样数据、动态监测数据和施工日志等信息的集成，构建施工进度和质量的数字化管理平台。利用平台对施工进度进行实时监控，对计划和实际进度之间的差异进行比较，并对偏差产生的原因进行分析，对施工方案进行调整；融合施工质量检测数据和数字测绘数据，如混凝土浇筑厚度、构件尺寸等，在三维模型上标注质量数据，直观地检查质量满足设

计要求，精确定位不合格点并修正。同时，通过无人机航拍技术，定期对施工现场进行航拍，生成施工进度影像数据，将不同时段的航拍成果进行对比，将施工进度直观地展现出来，为施工管控提供可视化支持，提高施工管理的准确性和高效性。

2.4 工程竣工与运维阶段的运用

在竣工测绘和数字档案建设中，利用三维激光扫描、GNSS等技术，对竣工后的结构、管线、场地等进行综合测量，获得精确的竣工数据。用专业软件对竣工资料和设计资料进行比对分析，形成竣工测量报告，检验工程是否按设计要求施工，标注并解释偏差的位置。在竣工测量数据的基础上，建立一个工程竣工的三维模型，通过对模型、竣工图、测量数据、质量检验报告等数据的集成，构建一个数字化的竣工档案。与传统的纸质档案相比，数字化档案具有方便的查询、存储和可追溯的优点，为以后的维护、改建和扩建提供完备的基础数据^[6]。

在结构运行期，延续施工阶段的动态监测系统，根据运营要求对监测方案进行优化。可利用长期自动化监测设备，实时监测结构的沉降、位移、振动和应力等参数，并将监测数据实时传送到运营管理平台，分析数据的发展趋势和预警，并在结构发生不正常变形或损坏时，及时预警，通知维修人员及时维修。结合无人机巡检技术，定期对工程结构物进行全面覆盖巡检，特别是高空、边远等人工难以到达的部位，采用无人机航拍获取高清图像，采用图像识别技术分析结构面有无裂缝、锈蚀等病害，精确定位病害部位和程度，为维护和维修提供精确依据，延长工程使用寿命。

在地理信息系统的基础上，采用基于地理信息系统的项目资产管理系统。在该系统中，对工程资产进行分类管理，对资产的位置、型号、安装时间、维修记录等信息进行标注，使运维人员能够迅速地了解资产的相关信息，并制定出有针对性的维修方案。利用地理信息系统的空间分析功能，对资产分布及周边环境进行分析，从而优化资产维修路径，提高维修效率，结合资产监测数据，对资产的运行状况进行评估，并对资产的使用寿命进行预测，为资产的更新和报废提供决策支持。

3 数字化测绘技术实践效果分析

某城市轨道交通10号线全长28 km，沿线地形复杂，包括城市核心区、郊区农田和山体等，存在断层、溶洞等地质隐患，建设难度较大。项目采用数字测绘

技术，对整个项目进行全过程精确测量和有效控制。在工程勘测阶段，利用卫星定位技术，结合无人机航测，对沿线28 km范围内的地形地貌进行快速测绘，并生成高程模型和正射影像。利用地质雷达和高密度电法，对3个断层、7个溶洞等地质灾害隐患点进行精确探测，利用地理信息系统技术，建立三维地质模型，为线路布设提供科学依据。在设计阶段，以数字化测绘数据为基础，建立BIM三维模型，对线路走向、车站结构、管线迁移等设计方案进行仿真验证，通过多方案空间数据分析，对3条线路进行优化，减少土方开挖12万m³，节约工程造价8 000多万元。在施工阶段，利用GNSS-RTK技术，精确定位轴线和高程，误差小于3 mm。建立数字化施工监控平台，集成无人机航测进度影像和自动化监测数据，对施工进度和结构变形进行实时监测，对两次深基坑边坡小位移进行预警，及时采取加固措施，避免了安全事故的发生。项目完成后，利用3D激光扫描完成竣工测量，构建数字化竣工档案，构建基于GIS的运营管理平台，实现对轨道线路、站点结构、机电设备等资产的精细化管理，结合结构长期健康监测数据，实现对运营维护的精确支撑。

4 结束语

数字测绘将工程测绘由“后台辅助”推进到“价值中心”，其意义不仅在于提高测绘的精度和效率，还可以为基础设施的整个生命周期植入可追踪、可计算、可预测的数字化基因。未来，随着星群、激光雷达和人工智能等的低成本应用，建筑施工过程中将“隐形”测量，并形成与“材料、设备、能源”并列的“第四要素”，持续推进建筑业向安全、绿色、智能的方向发展。

参考文献：

- [1] 杨杰.工程测量中GIS技术和数字化测绘技术的应用[J].中国信息界,2024(07):35-37.
- [2] 胡南.数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(29):184-186.
- [3] 秦磊.数字化测绘技术在地质工程测量中的应用[J].石化技术,2024,31(08):150-152.
- [4] 田鑫雨.现代数字化测绘新技术及其在工程测量中的应用[J].现代农村科技,2023(11):120-121.
- [5] 杨李.数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究[J].河南水利与南水北调,2023,52(09):98-99.
- [6] 游进跃.数字化测绘技术在地质工程测量中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2023(08):107-109.

基于多场景多功能配电线路防鸟装置的研制

王宁信，吴昊洋，王靖超，马 明，许佳宁

(国网山东桓台县供电公司，山东 淄博 256407)

摘要 为了解决配电线路鸟害防护中传统装置功能单一、场景适应性差的问题，研发一款集探测、驱离、防护于一身的多场景防鸟装置。该装置以智能感知为基、协同驱离为核、场景适配为目标，集成了 24 GHz 雷达、520 nm 激光、声波、视觉协同驱离系统及复合绝缘防护结构，采用太阳能和市电双供能模式与自适应控制逻辑，可以适应 110 ~ 500 kV 输电杆塔、变电站、生态敏感区等典型场景。经过实验室试验和实地检验，装置对喜鹊、乌鸦等鸟害的驱离效果达到 95% 以上，鸟害故障减少 85% 以上，可以在 -25 ~ 60 ℃ 的环境和 11 级台风的条件下正常工作，为配电线路鸟害防护提供高效、科学的技术方案。

关键词 配电线路；鸟害防护；防鸟装置；智能感知；多场景适配

中图分类号：TM755

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.009

0 引言

随着生态保护力度加大、电网覆盖面扩大，配电线路的鸟害问题越来越突出，传统的防鸟刺、单一驱鸟器等装置因为功能单一（只物理阻挡或者单一驱离）、场景适用性差（不能兼顾野外杆塔、变电站、生态敏感区的差异），不能满足电网安全和生态保护协同发展的需要。据此，本研究把“多场景适配、多功能协同”作为核心，整合 TLKS-PSB101 激光驱鸟器的智能探测技术和山东电科院复合绝缘防鸟罩的防护理念，用模块化设计实现“主动探测—精准驱离—物理防护”全链条功能集成，重点突破不同场景下功能适配与环境适应的难题，研制出适配性强、效能高、生态友好的配电线路防鸟装置，为电网安全运行提供技术支持。

1 多场景多功能防鸟装置总体设计

1.1 设计理念与目标

装置以“效能优先、场景适配、生态兼容”为核心设计理念，明确三大核心目标：功能维度上实现探测、驱离、防护三位一体协同，避免单一功能的局限性；场景维度上覆盖野外高压杆塔、变电站设备区、东方白鹳等濒危鸟类栖息地等各种不同的场景，并通过动态适配满足不同的环境要求；性能维度满足宽温运行（-25 ~ 60 ℃）、低功耗（待机功耗≤5 W）、易安装（单人 30 分钟内即可安装完成）等运维要求，并保证驱离过程中不伤害鸟类，达到护线与护鸟的协同发展^[1]。

1.2 总体架构设计

装置采用模块化分层结构，自上而下依次为感知层、控制层、执行层、能源层^[2]。感知层装有 24 GHz FMCW 体制雷达（探测距离 15 ~ 20 m，测距精度 0.5 m）、

双拾音器麦克风阵列（提取鸟类声纹特征）、光敏传感器；可以实现鸟类轨迹和声音信号精准捕捉；控制层采用 ARM Cortex-M4 处理器，运行鸟类识别算法（支持向量机算法识别准确率超过 98%）、场景适配逻辑；实现多模块数据融合、指令下发；执行层有 520 nm 绿色激光模块（功率 0.5 ~ 2 W 可调）、20 ~ 40 kHz 变频超声波发生器、100LM 高亮爆闪灯及 RTV 涂料涂覆复合绝缘防鸟罩（伞径 800 ~ 1 600 mm）；实现多手段协同驱离和物理防护；能源层使用 100 W 太阳能板 +12 V/100 Ah 锂电池组合；兼容 220 V 市电接入；配 MPPT 控制器（转换效率 23%）；保证稳定供电^[3]。

1.3 场景适配逻辑设计

根据配电线路不同场景特性建立分类适配模型，对野外输电杆塔改进激光云台的 350° 水平旋转及 ±35° 垂直调节范围，采用抱箍式安装（Φ 300 ~ 600 mm 杆塔），增强激光扫描和超声波驱离功能，对变电站设备区采用围栏式安装，增大超声波四向覆盖范围（10 m），增加语音警示功能（28 种天敌叫声内置），对生态敏感区采用半伞式复合绝缘防鸟罩（适配双串绝缘子），自动将激光功率减小到 0.5 W 以下，关闭爆闪灯，仅保留超声波和低强度语音驱离，形成“场景—功能”动态匹配机制，保证在不同场景中装置效能与环境的匹配^[4]。

2 配电线路防鸟装置多场景功能研发

2.1 智能探测模块研制

智能探测模块采用了雷达和拾音两种探测方式相结合的综合技术方案，有效地解决了传统单一探测方式容易受环境干扰的缺点。雷达模块采用 FMCW 体制，

发射高精度线性调频信号，实时跟踪并分析鸟类飞行轨迹，能够准确识别速度为 $0.5\sim10\text{ m/s}$ 的鸟类目标，可以区分落叶、阵风等非目标，系统误识别率小于2%。拾音模块采用了4个高灵敏度、宽频响的麦克风阵列，以48 kHz的采样率采集环境声音，通过梅尔频率倒谱系数(MFCC)算法提取出鸟类鸣叫、筑巢、扑翅等多种典型的声纹特征，然后采用支持向量机(SVM)进行模式识别与分类训练，鸟类声学识别准确率大于98%。雷达和音频数据经由高性能控制层完成实时融合处理，系统引发的回应迟延少于0.3秒，仅当雷达察觉到契合鸟类活动特征的目标，并且拾音模块检测到相符的声纹时，才会触发驱离程序，这样就有效地把误触发比率控制在2%之下，明显改善探测环节的精确度和环境适应能力。

2.2 协同驱离模块实现

协同驱离模块集成“激光、声波、视觉”三种感官威慑机制，形成非伤害性的多维度鸟类驱离体系，避免鸟类对单一驱离手段产生适应性。激光单元采用520 nm绿色激光器，符合人眼安全Class IIIB标准，采用一字线型光学扫描，最大120°水平覆盖，对喜鹊、乌鸦等常见的大型筑巢鸟类进行高效驱离，驱离效率90%以上，且可以根据实际应用场景自由调节输出功率，0.5 W适用于机场、居民区等敏感区域，2 W适用于野外开阔地。声波单元集成20~40 kHz的变频超声波发生装置和语音警示模块，超声波频率每30秒换一次，防止鸟类形成习惯，声压级不低于110 dB，语音模块包含鹰、隼等天敌叫声以及高压警告语音，音量可以在60~100 dB之间调节，多种听觉威慑。视觉单元装有100LM高亮度LED爆闪灯，其频闪频率设为1 Hz，在夜间或者阴天等低光照环境当中依然可以起到较好的视觉警示效果。三大单元可以单独或者联合使用，野外采用激光、超声波、爆闪三种模式协同运行的方式，在敏感区域只用超声波和语音模块，既达到效果又保证安全。

2.3 复合防护与能源模块开发

复合防护模块采用高性能玻璃纤维增强环氧树脂复合材料，表面涂覆RTV防污闪涂层，具有良好的耐候性和电气绝缘性能，使用寿命可达10年以上。经过4轮风洞试验对外形流场结构和力学性能进行优化，伞状扩展的外形设计能有效阻断鸟粪造成的绝缘子闪络通道，防护覆盖面积比传统防鸟罩多出50%，可适用于110~500 kV各个电压等级的输电线路，包括单串和双串绝缘子的安装形式^[5]。能源模块采用太阳能主供、市电备供的双电源方式，100 W高效单晶硅太阳能板，光电转换效率23%，12 V/100 Ah磷酸铁锂电池组，循环寿

命>2 000次，可保证系统在无日照情况下工作7~10天。系统集成光感控制模块，能根据环境光照自动切换运行模式：白天全功能运行，夜晚则切换成低功耗模式，只保留雷达监测的基本功能，整体能耗降低60%。另外，模块预留标准USB接口，便于远程程序更新、数据导出，提高设备维护的便捷性和能源管理的稳定性。

3 多场景多功能配电线路防鸟装置适配性优化设计

3.1 极端环境适配优化

为解决南北气候差异大的问题，壳体用高强度ABS材料制作而成，抗冲击强度大于等于20 kJ/m²，经过IP55防护等级严格测试之后，在95% RH的高湿度环境下依然可以保持稳定的工作性能，可以有效抵御多粉尘的侵袭。温度适应性，装置完成-25~60 °C高低温循环试验，每次循环12 h，经过50次循环试验后仍然可靠。电路系统使用了宽温元器件，工作温度范围在-40 °C到85 °C之间，即使在极端的温度环境下也能正常运行；锂电池采用了特制的耐寒电解液配方，在低温环境下(-25 °C)，容量保持率仍大于或等于85%，给装置提供持续稳定的电源。结构强度设计时用ANSYS软件做有限元分析，对杆塔安装处加强，抗压强度≥50 MPa。经过风洞模拟实验验证，该装置可以抵御11级台风(瞬时风速30 m/s)产生的瞬时风压，能够在强风环境下避免出现位移或者损坏的情况，全方位满足野外极端环境的运行需求。

3.2 安装与运维适配设计

为了提高装置的通用性以及方便性，设计出一套通用型安装件，支持多种灵活安装方式。抱箍式安装适应Φ300 mm到Φ600 mm的杆塔，用高强度抱箍固定，保证稳固不松动；悬挂式安装适用于变电站横梁，用挂钩结构实现快速安装；围栏式安装适合设备区边界，沿围栏部署^[6]。单套装置重量只有3.5 kg，不需要借助大型设备，一人可在30分钟内独立完成安装，大大提高了施工效率。运维管理上装置装有GPRS模块，并支持NB-IoT通信技术，可实现远程实时监测设备状态。运维人员可以借助管理平台来查看激光功率、电池电量、模块运行状况等主要参数，一旦发现异常，装置的故障自诊断功能就会立即触发，如果检测到激光故障、供电不足等问题，就会通过短信及时报警，以便运维人员迅速作出反应。装置预留USB接口，现场可更新语音文件和算法程序，使装置功能可以根据需要进行灵活升级。根据实际的使用经验，该设计的运维周期可以长达6个月，极大地降低了运维的费用和劳动力。

3.3 生态友好性适配调整

在东方白鹳、丹顶鹤等生态敏感区，装置配备智能场景识别系统，当检测到进入生态敏感区域的时候

就会自动切换到生态模式。此时激光功率被严格控制在 0.5 W 以下，防止强光刺激到鸟类的眼睛，爆闪灯关闭以减少对鸟类的视觉干扰^[7]。同时只保留 20~30 kHz 低功率超声波，声压级控制在 ≤ 90 dB，以及低音量的天敌叫声，音量不超过 ≤ 60 dB，既能起到驱鸟作用，又不会对鸟类繁殖产生负面影响。复合绝缘防鸟罩为浅灰色，接近自然环境颜色，无反光层，减少对鸟类视觉的刺激。在山东黄河三角洲湿地试点监测中，装置工作时东方白鹳巢穴数量增加了 40%，并没有发现鸟类受到装置干扰的情况，真正实现了电网防护与生态保护协调发展。

4 多场景多功能配电线路防鸟装置性能测试与应用验证

4.1 实验室性能测试

国网某电力实验室搭建了高度还原实际场景的模拟测试环境，包含 1:1 比例的杆塔模型和专业的鸟类活动模拟装置。对喜鹊、乌鸦等 10 种常见鸟害进行驱离试验发现装置平均驱离成功率达到 95.3%，对喜鹊、乌鸦等大型鸟类的驱离成功率达到 98.2%。连续 720 小时供电系统稳定运行，供电系统稳定性达到 99.8%，全程没有断电情况发生。雷达探测距离误差 ≤ 0.3 m，可以对鸟类活动进行准确的监测，拾音模块声纹识别准确率可达 98.5%，可以准确识别不同的鸟叫声^[8]。另外，通过 1 000 次机械操作试验，包括激光云台旋转、安装组件拆卸等操作，装置未出现任何结构损坏或功能失效的情况，充分证明其能长期稳定运行。

4.2 多场景实地验证

在山东黄河三角洲湿地、河北承德山区野外杆塔、江苏苏州变电站设备密集区等三个典型场景开展为期 12 个月的现场试点工作。在山东黄河三角洲湿地，装置工作期间线路跳闸率为 0，保证了电网安全。同时东方白鹳巢穴数量较试点前增加 40%，实现生态保护和电网防护双丰收^[9]。河北承德山区，鸟害故障从试点前每月 3~5 次降到 0~1 次，减少 85%，激光驱离对筑巢鸟类的拦截率为 92%，有效降低了鸟害对电力线路的影响。在江苏苏州变电站，设备区鸟类入侵次数由原来的每月 12 次减少到每月 1 次以下，超声波与语音协同驱离方式既有效阻止了鸟类进入设备区，又没有引起任何扰民投诉，各个场景的适配性及防护效能均符合设计标准。

4.3 经济性与可靠性评估

从经济性上说，相比于传统的防鸟刺单价 200 元、使用寿命 3 年、单一激光驱鸟器单价 1 500 元、使用寿命 5 年的本装置，在考虑安装及运维费用的前提下降低了 30%。由于具备远程诊断功能，故障修复成本降低了 75%，大大减少现场维修次数及人力成本。从可靠

性来看，经过 12 个月的现场运行试验得出，装置平均无故障运行时间（MTBF）大于 5 000 小时，维护费用为传统设备的 1/4。另外，该装置能够降低由于鸟类活动造成的停电损失，一般一次停电损失为 10 万元左右，提高电网的稳定性，产生良好的经济效益和社会效益。

5 结束语

本文所研制的多场景多功能配电线路防鸟装置，采用“探测—驱离—防护”模块化集成+场景适配优化方式，突破了传统装置功能单一，环境适应性差的局限，实现了 110~500 kV 配电线路不同场景下的鸟害防护。通过实验室测试以及诸多场景的实地检验可知，该装置在驱离效能（成功率大于等于 95%）、运行稳定性（-25~60 °C 正常工作）和生态兼容性（敏感区鸟类繁殖未受影响）等多方面均有着不错的表现，为电网的安全运作提供了可靠的科技方案。后续的研究会改进鸟类识别算法（改善在复杂环境中的识别精确度），改进能源管理系统（增长离网待机时间），并探寻 AI 技术在场景自适应方面的应用，促使装置变得更为智能和高效。

参考文献：

- [1] 周伟,于长海,金泽,等.多功能分散剂 TF-205A 的应用场景研究[J].印染助剂,1-7[2025-07-10].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=VUvWpoE9A3KB2MAzWs2O-RseHWVvgZjTS9876pwrniGh8hwTuK8kAS0F50l39DvTR-5DHwcvGKjXj0JR5XGHS4TklAbGGR7EP_o06jZ_KNelwyT5Tv_hbpXtrml7OpqBQw4ICInVz7ocePsm8wlbDOW7f76Cf6V5jnpfrdxJ-TiYTpx_ApqQ==&uniplatfrom=NZKPT&language=CHS.
- [2] 谢笑环.多功能场景下的销售中心曲线空间设计[J].低碳世界,2025,15(05):82-84.
- [3] 王睿龙,刘丽,王海燕.医疗隐私应用场景下:数字水印技术的多功能应用与研究[J].郑州航空工业管理学院学报,2024,42(05):58-64.
- [4] 王采莲,张大藩.单身经济下多功能烹饪小家电产品创新设计研究[J].包装与设计,2024(05):104-105.
- [5] 刘显著,徐达,李栋,等.多功能多场景应用辐射定标光源光学系统设计[J].航空学报,2024,45(19):292-300.
- [6] 王赣华,刘鹏超.高稳定性会议场景的多功能视频系统设计与实现[J].电视技术,2023,47(12):76-80.
- [7] 邓俊荣.深圳市体育中心体育馆多功能场景应用分析[J].绿色建造与智能建筑,2023(11):85-88.
- [8] 王腾.考虑多场景的风储系统多功能协调控制技术研究[D].新疆:新疆大学,2022.
- [9] 陈雅娴.适用于多场景的便携干衣器设计[D].南昌:南昌大学,2021.

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置研制

高 展，赵安家，明 鑫

(国网山东省电力公司利津县供电公司，山东 东营 257400)

摘要 本研究研制了一种防高空杆塔作业人员误碰带电线路的警示装置。研制工作严格依照可靠性第一、适应性广泛和方便应用这三大原则展开，该装置的核心内容包括：把多种传感器融合起来实现多模感知，形成完备的分级预警体系，研发灵敏度高的近电感应模块，并且加入有效的抗干扰加强设计。研究结果显示，该装置可以有效地对临近的带电线上发出警报信息，从而为高空作业人员提供主动的安全保护，减少了触电事故的发生概率。

关键词 杆塔作业；防误碰；近电感应；分级预警；多模感知

中图分类号：TM75

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.010

0 引言

高空杆塔施工属于电力运维领域高危作业环节，人员误碰带电设备会带来人身安全风险。传统安全管理手段靠制度约束和个体防护意识来执行任务，缺少实时监测及动态预估功能，在复杂工况中有一定局限性。要从根源上加强现场操作的安全水平，需研制具备即时观测能力的智能化守护装置。本研究旨在研制一种便于携带或者穿戴的新型警示装置，通过精准地感知周围环境中各种电磁场散布特性，并在靠近危险源时可立即发出警示信息，为作业人员提供可信赖的保障措施。

1 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置概述

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置是保障电力作业安全的重要设备，它突破传统警示手段在复杂作业环境的限制，将多维度感知技术与动态预警机制结合，通过捕捉作业人员肢体动作轨迹、杆塔周边电场分布及环境参数变化，构建立体化风险识别网络。研发难点为保证感知数据准确、传输稳定，不受高压强电磁干扰和杆塔复杂结构影响，还要保证装置轻量化、抗恶劣天气。从技术架构上讲，该系统把微机电系统传感器、超宽带定位单元、自适应滤波算法融合起来，可以对作业人员与带电线路之间的安全距离实施动态检测，按照风险的等级高低分层报警^[1]。其主要功能是通过佩戴终端设备振动提醒、声光提示，同时杆塔警示标志同步闪烁，形成人、机、环三元互动的信息反馈闭环体系。这种装置彻底改变了过去依

靠人工观察、经验判断的被动安全模式，把安全防护从静态警示提升为动态守护。在实际作业中，它可以准确地捕捉到作业人员不自觉的危险动作趋势，提前发出预警信号，给作业人员留出足够的时间来反应。不管是在茂密林区遮挡视线的场景，还是在暴雨大风等恶劣天气下，装置都能够稳定运行，依靠强大的环境适应性，为一线作业人员筑牢安全防线，成为电力作业现场不可缺少的安全保障力量。

2 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置原则

2.1 坚持可靠性第一原则

按照可靠性第一原则从技术架构底层做起，建立全链条风险防控体系。它的创新之处就在于把故障树分析法与实时工况模拟技术相结合，在研发初期就对可能造成预警失效的，如高压电磁脉冲干扰等极端情况，进行数字化建模，并通过大量的模拟测试来改进应对策略。在核心模块中加入多路径数据校验机制，使得感知到的数据在传输过程中可以即时比对、纠错，防止出现误判或者漏判。另外，还要解决极寒或高温环境下元器件性能降低的问题，用特殊材料进行封装，用智能温控算法的方式，使关键元件能在恶劣的环境下持续正常运转。从技术实现角度来讲，该装置采取分布式供电架构，各个感知单元配有独立的备用电源系统，迅速达成电源切换，防止由于主电源失效造成设备停止运作。同时集成动态冗余算法模块，实时检测组件运行状态，当部分性能下降的时候启动备用通道，保证预警系统连续稳定。从风险预判到应急处置

的全流程设计，使可靠性从单一的指标变成了一直贯穿始终的核心支撑，在复杂多变的作业环境中也能筑牢安全防线。

2.2 遵循适应性广泛原则

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置符合适用范围广的特点，不再像传统的警示装置那样局限于某种类型的杆塔、某种电压等级的线路或者是某种地理环境，而是形成了模块化、可重构的体系。此体系能够按照不同的作业场景需求，灵活地对感知模块组合及预警算法参数进行调整，在山区多雾地带，自动增强红外感知模块的探测强度，改良声光预警的穿透性参数设置；在城市密集分布多条电线时，重点加强超宽带定位模块抵御外界电磁信号干扰的能力，避免周围电磁波对距离测算造成影响^[2]。想要达到广泛的适用性存在技术上的困难，一方面要解决不同电压等级线路电场特性不同导致的感知精度问题，使用自适应电场校准算法使装置可以识别线路电压类型，并调节相应的感知阈值标准，从而保证装置在各种电压环境下准确捕捉到潜在的风险信号。另一方面则是要面对杆塔结构类型的多样性，根据角钢塔、钢管塔、水泥杆等不同材质外形的特点，设计出能够快速匹配安装的部件组件，这些零件要具有足够的强度和灵活性，既要牢固地固定在各种杆塔上，又不能因为杆塔的振动而造成感知模块失稳。以场景为导向的柔性设计，使装置可以主动去适应环境而不是被动地去适应，大大拓宽了它的应用边界。

2.3 恪守便捷化应用原则

防高空作业误碰带电线路警示装置设计时要遵从便捷原则，看重现场作业人员的真实需求，还要把技术创新和人性化设计结合起来，从而冲破传统设备的技术瓶颈。系统的主要特点就是简单的操作加智能的辅助，采用快插式接口，不需要专业工具就可以快速安装，使用激光定位技术，可以自动对准，轻量级移动终端，图形化界面直接显示重要的报警信息，支持触摸交互查看相关信息。简化操作要平衡功能完整性，在保证电气连接稳定性、机械强度的同时，核心问题是智能辅助部分同工作流程的适配问题，通过准确识别作业场景目标、产生最适宜的布设方案，使技术辅助贴合实际的操作习惯。设备运维操作同样便捷，系统内部包含远程诊断功能模块，运行时能及时把数据上传到管理平台，方便技术人员精准定位故障并完成软件更新。对现场出现的各种异常情况，都有相应的维修指导方案可以参照，使维护变得简单且具有针对性。

全周期的便捷化设计既降低了操作人员的门槛，又保证了装置全生命周期内的高效、稳定运行，从而提升作业的安全保障水平。

3 防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置研制方法

3.1 集成多模感知技术

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置的研制，关键是打破感知技术的壁垒，依靠跨领域协同融合形成智能化感知网络，而不是简单地拼接传感器。红外热成像、电场感应、毫米波雷达、姿态传感器数据互补、相互校验。电场感应模块检测到线路带电之后，毫米波雷达追踪作业人员与线路的距离，红外热成像模块追踪作业人员的肢体动作，三种检测数据实时传递到中央处理单元进行综合分析，防止单一传感器受干扰误判。集成过程中会遇到很多难题^[3]。一方面要开发传感器转换数据接口和同步算法，消除信息频率、格式的差别，实现多源数据准确对接；另一方面采用轻量化边缘计算模型，在装置内对数据进行初步筛选和部分分析，平衡数据冗余度的同时保证运算效率，减少上传到远程平台的数据量，保证解析速度。根据杆塔结构以及作业人员活动范围，采用三维仿真技术对传感器布置及角度进行优化，保证监测范围覆盖且无信号干扰。该策略意在全方位、准确地感知现场人员、线路运行及周边环境的信息，为预警系统打下数据基础。研发团队特别注重感知模块的兼容性和抗干扰能力，经过多次测试调节算法参数，在高压电磁环境下仍能保证不同传感器数据输出的稳定性。针对杆塔作业中出现的金属遮挡、信号反射等现象，专门对雷达波的发射角度和热成像的识别阈值进行优化，保证复杂场景下的感知精度。同时边缘计算模块的加入提高了数据处理的速度，减少了装置对远程通信的依赖，在信号弱的地方也可以独立完成风险的初步判断，为后面分级预警提供可靠的技术支持，使多模感知真正成为装置安全防护的核心能力。

3.2 构建分级预警机制

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置打破了传统单一预警模式的技术束缚，开创性地将风险评价模型同现场动态特征参数进行融合，从而构造多维度差别化的分级预警系统。这个体系抛弃依靠固定空间距离划定警戒区域的老办法，转而考虑输电线路电压等级，操作是否符合规范以及外界环境干扰强度等要素，并凭借机器学习算法对以前发生的事故案例和

仿真场景数据执行深入分析，进而生成实时更新的风险量化指标，按照这种风险值来划分工作状态为三个级别：提示阶段只是触发穿戴设备里的小震动反应并伴随绿灯闪烁提醒；当进入预警就会一同启动声光报警并且照亮塔身的辅助标记以便指引姿态修正动作；危急情况下不但能加大视觉听觉警告力度，还会联结监控平台给地面指挥中心发出求救信息并操控施工机械停止运转以免发生意外状况。建立该机制的技术难点是保证风险评估准确及时，既要实时采集各影响因素变化数据，动态调整模型中各参数权重，来解决多因素权重如何动态分配的问题，以免固定权重造成评估误差。另外，还要深入研究不同作业环节的安全要求，做到预警措施与作业流程无缝对接，以确保预警不会打乱正常作业秩序，又能快速启动有效防护措施，真正实现分级预警精准响应，最大程度保障作业安全。

3.3 开发近电感应模块

防高空杆塔作业人员误碰带电线路警示装置攻破了近电感应模块的技术瓶颈。这个模块冲破传统单一频率信号依赖模式的限制，创新性地应用宽频域感知技术和智能识别算法，很大程度上改善了对不同种类输配电设施检测准确度以及反应速度。它的主要功能就是不仅能够精确分辨高压输电线缆，而且还能应付低压配网甚至包含通信电缆在内的复杂情形，并且依靠内置频谱解析单元提取目标线路独有的电磁特征参数值，再经由数据库标准模型库比较来自动判定电压等级和路径属性信息内容，在此之后为下一步灵敏程度调节提供数据支撑，从而防止发生相互干扰现象^[4]。在这一过程中需系统处理关键技术难点：针对强电磁环境抗扰动能力不足，采用多层屏蔽结构设计与自适应滤波策略剔除背景噪声；改进传感线圈材料特性与绕制工艺，提升微弱场源探测水平；结合实验数据分析出典型工况下三维电场分布规律曲线，引入动态校正机制改进测量结果准确性，保证整机运行稳定性达预期。该模块需具备低功耗特性，采用休眠唤醒机制与高效电源管理电路，在不影响感应性能的前提下延长运行时长，适合高空杆塔工作环境，满足不常换电池需求，确保带电线路检测准确，为预警系统稳定运作提供数据与状态保障。

3.4 引入抗干扰强化设计

高空作业防误碰带电线路警示装置研发重点围绕抗干扰特性展开系统化设计与改良工作。在硬件、软件以及结构这三个维度上建立全方位的抗干扰技术架构体系来应对复杂环境下多种干扰因素所带来的考验，

如电磁辐射现象、恶劣天气状况以及机械振动。就硬件而言，采用电磁兼容理念对核心电路实施合理布局安排，并且采取屏蔽隔离措施把那些比较敏感的元件同其他可能造成影响的因素分隔开来。其次是选择耐压水平较高并且具备较强抵御干扰能力的电子元器件作为主要材料之一，而且还要配备浪涌保护单元和滤波器组件等附加设施，从而有效减轻外部噪声对外界功能信号所造成的不良影响。软件部分，则开发出一系列专门针对该问题而设立的相关算法模型方案，其中包含数据校验规则设定方法、异常检测机制建立流程以及动态补偿策略制定步骤等内容。在实际运行过程中能够及时地识别并修正各种各样的异常情形表现出来的情况，如传感器收集到的数据存在偏差或者传输通道被堵塞的时候，相关的程序就会立刻启动纠错。特别是对于由瞬态脉冲引发的局部失真情况，可以利用特征对比的方式完成快速复原任务目标信号。引入该设计面临诸多技术难点，需为各类干扰制定专项抗干扰方案，处理多类干扰并存问题，因不同干扰源对装置影响机制不同，且要确保方案间无矛盾。同时，要通过仿真测试和实验，平衡抗干扰性能与装置体积、重量及功耗的关系，避免因过多抗干扰组件增加装置复杂度和成本，在保证抗干扰效果的同时优化整体规划^[5]。

4 结语

本研制项目完成对高空杆塔作业的防误碰带电线路警示装置开发，结合多模感知和建立分级预警机制，达成危险源识别准确告警目标，并且近电感应、抗干扰设计配合使产品在复杂电磁环境下依然可以稳定运行，彻底贯彻了可靠性、适应性、便捷性原则，为高空作业人员提供了主动的安全守护措施，在预防触电事故方面对电网安全稳定有重要的实践意义与应用效益。

参考文献：

- [1] 王振宇,邹德华,李智慧,等.高空翻转式无人机用导地线便携式挂架研究及应用[J].电气时代,2025(09):57-60.
- [2] 邹贊政.浅析输电线路防高空坠落柔性导轨减振装置的应用[J].机电信息,2018(09):47,49.
- [3] 刘代全.输电线路杆塔防坠落装置应用分析[J].机电信息,2012(15):44-45.
- [4] 何国飞,吴玉燕.钢绞线防坠落装置在杆塔登高作业中的应用探讨[J].广西电力,2008(04):69-70,73.
- [5] 刘劲松,孟昊,王禹民.送电线路防高空坠落装置[DB/OL].锦州:辽宁省电力有限公司两锦供电公司,2000-08-04.<https://www.tech110.net/portal.php?mod=view&aid=5076470>.

复杂故障下继电保护装置优化与可靠性保障探究

管俊飞

(江苏世昌电力工程有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要 随着电力系统结构日趋复杂和自动化程度不断提高, 继电保护装置面临的工作环境日益恶劣, 复杂故障的频繁发生对继电保护装置的性能和可靠性提出了更高要求。本文从全生命周期质量管理、日常维护巡检等方面构建可靠性保障体系, 通过自适应保护算法、分层分布式架构、状态监测诊断等技术的综合应用, 以期为显著提升继电保护装置应对复杂故障的适应能力和可靠性水平提供参考, 进而为电网安全稳定运行提供坚实的保障。

关键词 复杂故障; 继电保护装置; 自适应保护算法; 分层分布式保护体系; 可靠性保障体系

中图分类号: TM774

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.011

0 引言

继电保护作为电力系统安全稳定运行的“守护神”, 肩负着及时发现和隔离各类故障的重任。然而随着新能源的大规模接入、电网互联规模的扩大以及负荷性质的多样化, 电力系统呈现出结构日趋复杂、环境更加恶劣的特点。频繁出现的雷电、污秽等外部干扰以及设备自身的绝缘老化、机械磨损等因素引发的复杂故障, 对继电保护装置的适应性和可靠性提出了严峻考验。为确保继电保护装置在复杂恶劣环境下正常运行, 必须开展系统性的优化设计和可靠性保障探究, 这对于提高电网本质安全水平和供电可靠性具有重要意义。

1 复杂故障环境下继电保护面临的挑战与问题

1.1 复杂故障类型多样, 传统保护配置难以适应

电力系统中的复杂故障形态远比传统单一故障更多样, 其多样性不仅表现在故障类型上, 还体现在其时空特性与物理机制上。从故障持续时间看, 复杂故障包括毫秒级的瞬时性故障和持续性故障; 从涉及相数看, 既有单相故障, 也有复杂的多相故障; 从故障性质看, 既有金属性短路, 也有高阻抗故障和间歇性故障。这些多样性使得针对传统故障设计的保护装置在面对复杂故障时往往表现出明显的不适应性, 尤为突出的是复杂故障通常伴随着非线性现象, 如电弧放电、导体饱和等。

在电弧故障过程中, 故障阻抗呈现出强烈的非线性和时变特性, 故障电流波形严重畸变, 包含大量奇次和偶次谐波成分^[1]。这种非线性特性使得传统基于基波分量或简单特征量分析的保护算法准确性大大降

低, 容易产生“边界效应”导致保护装置误动或拒动。

1.2 故障传播速度加快, 实时决策能力亟待提升

现代电力系统正经历前所未有的变革, 规模不断扩大且结构日趋复杂, 联系愈发紧密, 这些变化导致故障传播速度显著加快, 特高压、超高压输电通道的广泛建设使电网各区域间的“电气距离”大幅缩短^[2]。在传统电网中故障电流和电压扰动需要几个电气周期才能传播至相邻区域, 而在现代超高压电网中, 故障波可在毫秒量级内横跨数百公里。

电力电子装置的广泛接入为故障高频分量提供了快速传播通道, 逆变器、变流器等电力电子设备本身响应速度快, 其内部控制系统能够在微秒级对系统扰动作出反应, 并通过开关器件的高频动作将扰动放大和传播。当这些设备集中接入电网特定区域时, 可能形成“故障扰动放大器”, 使故障影响范围迅速扩大。如某风电场集中接入区域发生单相接地故障, 原本可控的故障通过多台变流器的相互作用, 在百毫秒内扩展为多点故障, 最终导致大面积风机脱网。

1.3 设备老化失效风险增大, 可靠性保障机制有待健全

继电保护设备作为电力系统安全运行的重要保障, 其可靠性状况直接影响整个电网的安全稳定, 随着电网建设的快速发展, 大量保护设备已服役多年, 设备老化问题日渐凸显。目前, 我国电网中有相当数量的继电保护装置运行时间较长, 不少变电站仍在使用较早期的微机保护装置, 这些设备不仅在技术标准上相对滞后。加上其核心元件如电容器、继电器触点和光

耦等已经进入使用寿命的后期阶段，设备失效的可能性明显增加。这种情况下加强对老旧保护设备的管理和维护尤为必要，以确保电网运行的安全可靠。

复杂故障环境进一步加剧了设备老化进程，与标准故障相比，复杂故障通常伴随更为复杂的电磁暂态过程和能量释放，对保护装置产生更为严峻的考验。频繁的电压波动和电流冲击会加速保护装置内部元器件的疲劳损伤，电弧故障产生的高频干扰信号可能穿透传统电磁屏蔽，干扰保护装置的正常运行，系统谐振和铁磁谐振引起的持续过电压则可能导致保护装置供电回路和取样回路的绝缘加速老化^[3]。

2 继电保护装置优化设计与策略研究

2.1 自适应保护算法研究，提高对复杂故障的识别与判断能力

随着电力系统日益复杂，传统保护算法应对复杂故障时显得力不从心，这些固定阈值设置的方法往往在复杂故障面前陷入两难：定值设得太灵敏容易引起误动作，设得太迟钝又可能导致拒动。实际运行中电网工况千变万化，故障呈现出多样化特点，单一判据难以应对所有情况，特别是在电弧故障、高阻故障等非线性故障情形下，保护装置的判断变得尤为困难，这种“一刀切”的定值保护模式，已经难以满足现代电网的安全运行要求。

针对复杂故障的复杂多变特点，传统的以固定阈值为基础的保护算法已难以胜任，为准确识别复杂故障特征，必须赋予继电保护装置一定的自适应能力。一方面可通过提取电压、电流波形中的多种特征量，结合先进的信号处理和模式识别技术，构建复杂故障的多维度特征模型，利用模糊逻辑、人工神经网络等智能算法，实现对复杂故障类型的自适应识别和状态评估。另一方面针对复杂故障的随机性和不确定性可引入自学习机制，通过对海量历史故障数据的挖掘分析，总结复杂故障发生的规律，形成知识库和案例库供实时故障诊断时调用，通过算法参数的动态优化，不断提高继电保护装置的自适应水平。

2.2 分层分布式保护体系构建，增强系统冗余性与自愈性

当前电力系统保护面临的主要问题之一是传统集中式架构的局限性，这种架构下，各保护单元往往独立工作，信息交流有限且缺乏整体协同能力。分层分布式保护体系通过设置多个层级的保护单元，构建起更为灵活的保护网络，这种架构将保护功能按照责任范围划分为站内层、区域层和系统层，各层之间既相对独立又相互配合。站内层处理本站设备和直连线

的保护，反应最为迅速，区域层负责对多个相关站点的整体保护，能够基于更全面的信息作出判断，系统层则从全局角度监控电网运行状态处理跨区域协调问题。这种分层架构的一个主要优势在于信息共享机制的建立，通过高速通信网络各保护单元不再是信息孤岛，而是能够获取更为全面的系统状态数据。如当线路一侧检测到可能故障时，可立即与线路另一侧共享数据，通过比对双端信息提高判断的准确性，这种信息共享机制使得保护系统能够从更宏观的角度分析故障，减少误判概率。

冗余性是分层分布式保护的又一优势，当某一层级的保护装置发生异常时，其他层级能够及时接替功能避免形成保护盲区。如母线保护装置故障时，区域保护可自动承担其职责，虽然动作可能略慢但仍能确保基本保护功能完整性，这种功能冗余设计大大降低了单点故障的风险，提升了整体系统的可靠性^[4]。在工程实现上分层保护体系采用模块化设计思路，不同保护功能被划分为相对独立的功能模块，可根据实际需求灵活组合，这不但简化了系统复杂度，也便于日后维护和升级，使保护系统能够更好地适应电网的不断发展变化。

2.3 状态监测与诊断技术应用，实现设备状态的在线评估与预警

传统继电保护装置运行维护主要依赖定期校验和例行检修，这种“时间基准”维护策略存在明显弊端，一方面，固定周期的检修可能导致过度维护，增加不必要的人员投入。另一方面，装置实际劣化速度往往因运行环境和负载条件不同而差异巨大，固定周期难以适应这种差异，容易出现“维护过度”与“维护不足”并存的情况。更为关键的是，定期检修难以发现装置运行过程中的突发性故障，装置可能在两次检修间隔期出现关键性能下降而未被及时发现，埋下安全隐患。

状态监测与诊断技术通过实时采集继电保护装置运行状态数据，实现对设备健康状况的在线评估，使维护决策从“时间驱动”转向“状态驱动”，有效提升设备可靠性。核心理念是将传统的“被动等待故障”转变为“主动预知风险”，通过对设备状态的持续监测，及早发现潜在问题，在故障发生前采取干预措施实现预防性维护。状态监测系统的构建需从硬件入手，硬件层面需在继电保护装置的关键部位布置各类传感器网络，形成全方位的监测体系。温度传感器可监测装置各功能模块的发热情况及时发现异常发热点，湿度传感器可监控装置所处环境的潮湿程度评估腐蚀风险^[5]。电源质量监测模块可记录供电电压波动、电源杂波等

数据，判断电源系统健康状况，通信质量监测则可实时评估保护装置与外部系统的数据传输质量，发现潜在通信故障。

3 可靠性保障体系建设与管理

3.1 全生命周期质量管理，确保继电保护装置的可靠性基础

继电保护装置作为电力系统的“安全卫士”，其质量管理必须贯穿全生命周期各环节，才能有效应对复杂故障环境下的严峻挑战。全生命周期质量管理不仅关注设备本身的性能指标，更注重建立系统性的管理机制，确保从源头到退役的各环节无缝衔接从而形成质量闭环。

设计阶段是保证继电保护可靠性的关键起点，针对复杂故障环境的特殊性，设计必须充分考虑各类应力因素对装置的影响。电磁兼容性设计尤为重要，必须确保装置在强电磁干扰环境下仍能稳定运行。如通过合理布局印制电路板的信号走线，增加关键信号线的屏蔽层，采用数字隔离器替代传统光耦，可大幅提高抗干扰能力。

3.2 定期巡检与测试制度完善，及时发现和消除可靠性隐患

为及时发现和消除继电保护装置运行过程中出现的可靠性隐患，必须建立健全定期巡检和测试制度，巡检内容不仅包括常规的外观检查、清洁、联接紧固等，还应涵盖环境监测、运行工况记录等。测试则应针对保护功能的完整性、逻辑关系的正确性、定值的适用性等开展，既要进行常规的保护试验，也要模拟复杂故障工况进行专项测试。巡检和测试过程中如发现缺陷或异常，必须及时分析原因，制定整改措施，对于暂时不能消除的缺陷要评估其影响程度，必要时应用退出运行或采取应急措施防止问题扩大，定期巡检与测试是做好状态维护、保证继电保护可靠运行的有效手段。

巡检频率和深度应基于风险评估进行差异化设置，不同类型、不同重要程度、不同运行年限的保护装置，其巡检要求应有所区别。可采用“分级分类”的巡检策略：对于关键线路和设备的保护装置，或处于恶劣环境的装置，应提高巡检频率增加检查深度，而对于新投运的标准环境下的一般装置，则可适当降低要求。与此同时引入“动态调整”机制，根据装置的实际状态和历史表现，动态调整巡检计划。如某变电站的一台保护装置在近期多次报告自诊断异常，即应临时提高该装置的巡检频率直至问题解决，这种基于风险和状态的差异化巡检策略，既能提高整体效率，又能确保关键环节不放松。

3.3 应急处置与协同机制建立，最大限度减少故障的影响与损失

在复杂电网环境下，尽管可通过优化设计和加强管理来提高继电保护装置的可靠性，但仍不可避免地会出现各类故障，因此还必须建立完善的应急处置和协同机制。一方面要制定针对性的应急预案，明确故障情况下的处置流程和责任分工，储备必要的备品备件和应急器材，组织相关人员开展应急演练。另一方面要强化与调度、变电、线路等部门的横向协同，建立信息共享和联动机制，发生继电保护故障时调度要及时调整运行方式，变电和线路部门要做好设备巡视和就地处置，各方密切配合尽快恢复正常运行秩序。

物资储备是应急处置的物质保障，根据保护装置的类型和重要性，合理配置备品备件和应急器材，确保关键时刻“有备可用”。一方面对于核心保护装置，应配备足量的同型号备件，必要时甚至配置整机备用，另一方面对于通用性强的部件，如电源模块、通信板卡等，可实行区域共享机制从而提高资源利用效率。除常规备件外，还应配备应急发电设备、便携式保护测试仪等特殊器材，以应对极端情况，物资储备点的设置应兼顾覆盖面和响应速度，重要地区可设立专门的应急物资库，确保关键物资能够在最短时间内调配到位。

4 结束语

面对电网复杂故障环境日益严峻的挑战，继电保护装置优化设计与可靠性保障必须双管齐下。技术层面需重点发展自适应保护算法、分层分布式保护架构和状态监测诊断技术，提高对复杂故障的识别处理能力。管理层面应建立全生命周期质量管理、完善定期巡检测试制度、健全应急处置协同机制。这是一项系统工程，需多方协作，构建技术先进与管理规范并重的保障体系，为电网安全稳定运行筑牢防线。

参考文献：

- [1] 康睿智. 复杂故障下继电保护装置优化与可靠性分析 [J]. 机电产品开发与创新, 2025(03):132-134.
- [2] 刘科. 基于大数据的继电保护系统性能评估与优化 [J]. 电脑校园, 2025(06):166-168.
- [3] 许双斌. 继电保护装置可靠性的测试及提升措施 [J]. 光源与照明, 2023(01):174-176.
- [4] 李智伟. 电力系统中的电气二次设备及继电保护研究 [J]. 新潮电子, 2024(11):109-111.
- [5] 蔡永阳. 基于信息融合的智能变电站继电保护功能优化研究 [J]. 科学技术创新, 2025(05):53-56.

建筑电气施工中接零接地施工技术分析

刘国成

(香江系统工程有限公司, 江苏 镇江 212200)

摘要 接零接地系统是建筑电气安全的核心保障, 直接关系到人身安全与设备稳定运行。本文结合当前建筑电气施工规范, 以某高层住宅建筑工程为例, 从接零接地系统的核心类型入手, 深入分析 TN-S、TN-C-S、TT 三种主流系统的适用场景与技术特点, 探讨接地体安装、接地干线敷设、零线与地线连接等关键施工环节的技术要点, 针对施工中常见的问题, 提出针对性解决对策, 以期为建筑电气接零接地施工质量提供参考。

关键词 建筑电气安全; 建筑电气施工; 接零接地施工技术

中图分类号: TU856

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.012

0 引言

随着建筑行业向智能化、高层化发展, 电气系统的复杂度与负荷密度显著提升, 接零接地施工的重要性愈发凸显。接零接地系统的核心作用是在电气设备发生异常(如漏电)时, 能够通过有效回路快速切断电源, 避免人身触电事故的发生; 同时抑制电网过电压, 保护电气设备免受损坏。基于此, 深入研究接零接地施工技术、规范施工流程、强化质量控制, 对保障建筑电气系统的安全稳定地运行具有重要的现实意义。

1 工程概况

某高层住宅项目, 总建筑面积 5.2 万 m², 共 28 层, 地下 2 层, 建筑高度 85 m, 属于典型的中大型民用建筑。项目电气系统负荷涵盖居民生活用电、公共区域照明、电梯运行、消防系统等, 总用电负荷约 800 kW, 对电气系统的安全性与稳定性要求较高。该项目电气系统采用 TN-C-S 接零接地系统, 严格按照规范要求把控各

环节质量, 通过分阶段测试与验收, 确保系统性能达标, 为后续技术分析与效果验证提供数据支撑。

2 建筑电气接零接地系统的核心类型与适用场景

建筑电气接零接地系统的选型需要结合建筑类型、使用功能以及电网结构等因素确定, 现行规范中主流系统包括 TN-S、TN-C-S、TT 三种, 其技术特点与适用场景中存在显著差异^[1], 如表 1 所示。

从表 1 可看出, TN-S 系统安全性能最优, 但施工成本较高; TN-C-S 系统平衡了安全与经济, 是民用建筑的主流选择; TT 系统则适用于特殊场景, 需配合漏电保护器使用。本项目在施工前根据建筑设计文件明确该系统类型选择为 TN-C-S 系统。

3 建筑电气接零接地施工的关键技术要点

3.1 接地安装技术

1. 自然接地体安装。自然接地体主要利用建筑结构中的钢筋混凝土基础、金属构件等, 其安装需满足

表 1 主流接零接地系统技术特点与适用场景对比

系统类型	核心结构	技术特点	适用场景	安全优势
TN-S 系统	工作零线(N 线)与保护零线(PE 线)完全分离, 全程独立敷设	1. N 线与 PE 线无电气连接, 避免零线电位漂移; 2. 漏电时故障电流大, 断路器快速跳闸(≤ 0.4 s); 3. 抗干扰能力强	高层住宅、医院、数据中心、精密仪器实验室等对电气安全与稳定性要求高的建筑	安全等级最高, 可有效避免人身触电与设备损坏
TN-C-S 系统	前半段(电源端) N 线与 PE 线共用(PEN 线), 后半段(用户端)分离为 N 线与 PE 线	1. 兼顾经济性与安全性, 减少线缆用量; 2. 分离点需做好重复接地, 确保 PE 线电位稳定; 3. 适用于低压配电系统	多层住宅、普通办公楼、商业综合体等一般民用建筑	性价比高, 满足常规安全需求
TT 系统	电源端中性点接地, 用电设备金属外壳单独接地(不与零线连接)	1. 接地系统独立, 互不干扰; 2. 漏电时需依赖漏电保护器(RCD)切断电源; 3. 接地电阻要求严格($\leq 4 \Omega$)	户外电气设备、临时用电工程、远离电源端的小型建筑	抗干扰能力强, 适用于分散式配电场景

以下要求：（1）利用钢筋混凝土基础作为接地体时，需要将基础内直接 $\geq 16\text{ mm}$ 的主钢筋焊接连接，形成闭合回路；其焊接长度需符合规范要求，单面焊接 $\geq 12d$ （ d 为钢筋直径），双面焊 $\geq 6d$ ，焊缝要求标准需保证其饱满、无夹渣、无虚焊。本项目中，地下车库基础主钢筋焊接长度均控制在 12 d 以上，焊接经外观检查与导通测试，确保了电气连通性；（2）利用金属管道作为接地体时，需要选择镀锌钢管等防腐性能良好的管道，严禁使用燃气管道、排水塑料管道等。管道之间需采用金属法兰进行连接，法兰处需加装跨接线，进而确保电气的连通^[2]；（3）自然接地体的接地电阻需要开展测试，若测试值 $> 4\text{ }\Omega$ ，需补充人工接地体，直至总接地电阻满足设计要求。本项目中，自然接地体安装完成后测试接地电阻为 $5.8\text{ }\Omega$ ，超出设计要求，补充了人工接地体。

2. 人工接地体安装。人工接地体分为垂直接地体与水平接地体，常用材料为镀锌角钢、镀锌钢管、镀锌扁钢等，安装要点如下：（1）垂直接地体安装：将镀锌角钢或钢管垂直打入地下，入土深度 $\geq 5\text{ m}$ ；若土壤电阻率较高，可采用换土或添加降阻剂的方式降低接地电阻，降阻剂需均匀包裹接地体，厚度 $\geq 100\text{ mm}$ ；（2）水平接地体安装：将镀锌扁钢水平埋入地下，埋深 $\geq 0.8\text{ m}$ ；水平接地体与垂直接地体之间需采用焊接连接，其焊接方式同自然接地体；（3）接地体安装完成后，需要及时进行防腐处理，对其焊接部位需涂刷两道防锈漆和一道面漆，以确保接地体使用寿命 ≥ 20 年^[3]。

3.2 接地干线与支线敷设技术

1. 接地干线敷设。（1）接地干线的材料选型需要符合设计要求，常采用铜芯线（截面积 $\geq 16\text{ mm}^2$ ）、镀锌扁钢（ 40×4 ）、镀锌圆钢（ $\phi 12$ ）等；线缆需沿建筑结构（如墙体、梁、柱）敷设，避免穿越卫生间、厨房等潮湿区域，若必须穿越则需做好防水处理。本项目中，接地干线选用镀锌扁钢（ 40×4 ），沿地下车库墙体与楼层梁体敷设，未穿越潮湿区域；（2）接地干线在墙体敷设时，需开设出深度 $\geq 30\text{ mm}$ 的线槽，在线缆敷设完成后，用水泥砂浆封堵；在室外敷设时，需采用埋地方式，埋深 $\geq 0.8\text{ m}$ ，线缆周围需填入细沙，上方覆盖混凝土保护层，防止线缆被损坏^[4]；（3）接地干线的连接需采用焊接或压接的方式，焊接要求同接地体，压接需使用专业压接钳，以确保连接的牢固性；干线每隔 $10\sim 15\text{ m}$ 需要设置一个固定点，避免线缆松动。

2. 接地支线敷设。（1）接地支线的截面积需要根据电气设备功率确定，一般情况下，铜芯线截面积 $\geq 2.5\text{ mm}^2$ ，铝芯线截面积 $\geq 4\text{ mm}^2$ ；支线需采用绝缘导线，

颜色统一为黄绿双色，便于识别，严禁与其他线缆混用颜色；（2）接地支线与电气设备连接时，需采用螺栓连接或焊接，连接点需要确保其清洁性，保证其无氧化层的标准要求；对于金属外壳设备，需要连接在设备专用的接地端上，严禁连接在设备的螺丝、螺母等非专用接地部位；（3）接地支线敷设的过程中，需要避免与动力线缆、照明线缆并行敷设，若必须并行，其间距需 $\geq 300\text{ mm}$ ，防止电磁干扰影响接地系统的性能。

3.3 零线与地线连接技术

本项目采用的是 TN-C-S 系统，该系统中 PEN 线需在建筑进线处进行重复接地，然后分离为 N 线与 PE 线，连接要点如下：

1. 分离点需设置明显的标识，严禁在分离点之后将 N 线与 PE 线再次合并；处理好的 PE 线需与接地干线连接，以确保电位的稳定。本项目在地下车库总配电箱处设置了分离点标识牌，清晰地区分出 N 线与 PE 线，且在分离处理后的 PE 线与接地干线焊接连接，其电位稳定在 0 V 左右。

2. 近线处的重复接地电阻 $\leq 10\text{ }\Omega$ ，若自然接地体接地电阻满足要求，可利用自然接地体作为重复接地带；PEN 线、N 线以及 PE 线的截面积需符合设计要求，避免截面积不足导致电流过载^[5]。本项目中，进线处重复接地电阻测试值为 $3.5\text{ }\Omega$ ，满足规范要求，且各线截面积均符合标准。

3.4 接地电阻测试技术

接地电阻是衡量接零接地系统性能的核心指标，其施工过程需分阶段进行测试，以确保符合设计要求。

1. 测试时机：分别在接地体安装完成后、接地干线敷设完成后以及整个系统施工完成后进行电阻测试。本项目进行三个阶段测试，均满足设计要求（ $\leq 4\text{ }\Omega$ ）。

2. 测试方法：采用接地电阻测试仪进行测试，测试时需将测试仪的三个端子分别连接接地带、电流极、电压极，电流极与接地带间距 $\geq 20\text{ m}$ ，电压极与接地带间距 $\geq 10\text{ m}$ ，以确保测试结果的准确性。

3. 测试结果处理：若测试值超过工程设计的要求，需要采取补充接地体、换土、添加降阻剂等措施，直至测试值达标；相关记录需完整留存，包括测试时间、测试部位、整改措施等，作为工程验收的重要依据。本项目三个阶段的测试记录均完整留存，详细记录了测试数据与操作人员信息，通过了工程验收。

4 建筑电气接零接地施工中的常见问题与解决对策

4.1 接地电阻超标

1. 问题原因。接地体入土深度不足，没有达到 2.5 m ，导致其与土壤接触面积过小；土壤电阻率过高，没有

采用合适的降阻措施；接地体材料的选择不当，如使用非镀锌金属材料，易腐蚀生锈；接地体之间连接不牢固，存在虚焊、假焊，导致接地回路断开。

2. 解决对策。（1）严格遵守规范要求安装接地体，垂直接地体入土深度 $\geq 2.5\text{ m}$ ，水平接地体埋深 $\geq 0.8\text{ m}$ ，确保与土壤的充分接触；（2）针对高电阻率土壤，采用换土（填入腐殖土、膨润土）、添加降阻剂、增加接地体数量等方式，进一步降低接地电阻；（3）选用镀锌角钢、镀锌钢管等防腐性能良好的接地体材料，禁止使用非镀锌材料；（4）加强接地体连接质量管控，焊接时确保焊缝饱满、无夹渣，焊接完成后进行防腐处理，必要时采用压接方式辅助固定。

4.2 零线与地线混接、错接

1. 问题原因。施工人员对系统类型理解不清晰，混淆TN-S、TN-C-S、TT系统的连接要求；线缆颜色标识不规范，N线与PE线未使用专用颜色（N线为蓝色，PE线为黄绿双色），导致错接；配电箱内端子排布置混乱，未明确区分N线端子与PE线端子，引发混接。

2. 解决对策。（1）施工前组织技术培训，确保施工人员熟悉不同系统的连接要求，严格按照工程设计文件开展施工，严禁随意变更系统结构；（2）规范线缆颜色标识，N线统一使用蓝色，PE线统一使用黄绿双色，严禁使用其他颜色线缆替代；（3）配电箱内端子排，需明确区分N线端子（标注“N”）与PE线端子（标注“PE”），端子排间距合理，避免线缆交叉混乱；施工完成后，逐一检查连接点，确保无混接、错接的问题。

4.3 材料选型不当

1. 问题原因。为降低成本，选用截面积不足的线缆、非镀锌接地体等不合格材料；材料采购时未进行质量检验，使用过期、生锈、破损的材料；材料选型未结合实际场景，如在潮湿环境中使用非防水线缆，导致线缆损坏。

2. 解决对策。（1）严格按照工程设计文件与规范要求选型，线缆截面积、接地体规格需满足实际负荷需求与安全规范，严禁选用截面积不足的材料；本项目所有接地线缆与接地体均按照设计标准采购，铜芯线截面积 $\geq 2.5\text{ mm}^2$ ，接地体选用镀锌材质，未出现材料规格不达标的问题；（2）建立材料质量管控机制，在材料采购时，需要审核供应商资质，进场后进行外观检查、性能测试等，合格后方可使用，在检查过程中需确保材料无破损、老化现象；（3）结合施工场景

选型，潮湿环境中选择防水型线缆、防腐接地体；户外场景中则选用耐候性强的材料，以更好地确保材料使用寿命与系统性能。

5 工程实践效果验证

本项目接零接地系统施工完成后，依据相关规定开展全面验收，核心验收指标与结果如下：

1. 接地电阻测试：系统整体接地电阻测试值为 $2.8\ \Omega$ ，进线处重复接地电阻为 $3.5\ \Omega$ ，均满足设计要求（ $\leq 4\ \Omega$ ），且低于规范限值，接地性能稳定。

2. 连接质量检查：对所有接地体、干线、支线的连接点进行逐一排查，共检查焊接点82处、螺栓连接点156处，无虚焊、漏焊、松动现象，N线与PE线标识清晰，无混接、错接问题的出现。

3. 材料质量验收：接地体、线缆等材料均符合设计标准，防腐处理到位，无生锈、破损等问题，绝缘性能测试合格。

4. 系统运行测试：模拟电气设备漏电场景，断路器在0.2 s内快速跳闸，漏电保护器动作灵敏，符合安全要求。

经验收，该项目接零接地系统施工质量全部达标，顺利通过工程验收，具备投入使用条件。

6 结语

建筑电气接零接地系统的施工质量是保障电气系统安全稳定运行的核心要素，其可靠性直接决定电气系统的安全与稳定。民用建筑配电系统优先采用TN-C-S接地型式，可实现安全防护与经济性的最优平衡。施工中需严控接地体安装、干线支线敷设等关键性环节，针对接地电阻超标等常见问题，通过规范操作、材料管控等对策规避隐患，可确保接地电阻稳定达标，实现长期安全运行。

参考文献：

- [1] 刘宁捷.浅析电力工程施工中的接地技术及故障排查[J].科技与创新,2025(15):130-132,139.
- [2] 王正凯.探究高层建筑电气施工中防雷及接地技术[J].建材发展导向,2025,23(11):106-108.
- [3] 钟栋,付井亮.输配电网施工中接地技术的研究[J].电力设备管理,2024(15):220-222.
- [4] 李嘉声.简述高层建筑电气施工中防雷及接地技术应用思考[J].中国设备工程,2024(11):232-234.
- [5] 王敬媛.高层建筑电气施工中防雷及接地技术应用思考[J].中国高新科技,2023(06):37-39.

10 kV 配电线路接地故障定位与处理措施

韩育松

(神华新街能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要 配电线路故障是影响线路运行安全性和供电持续性的重要负面因素, 以接地故障最为常见, 一般会占到配网故障总数 60% 及以上, 引发电气火灾、相间短路、设备绝缘损坏等事故, 因此掌握故障定位和处理技术至关重要。本文结合 10 kV 配电线路接地故障成因, 讨论 10 kV 配电线路接地故障定位技术、处理流程和预防技术, 旨在对保证 10 kV 配电线路运行的安全性有所裨益, 进而减少线路停电损失。

关键词 10 kV 配电线路; 接地故障; 定位技术; 故障处理; 故障预防

中图分类号: TM862

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.013

0 引言

10 kV 配电线路接地故障是电气故障的一种, 我国 10 kV 配电线路在发生故障后电压依然会保持对称, 可能维持 1~2 小时短时运行, 从而便于故障定位和处置, 但是非故障相电压可能导致线电压水平上升, 长时间运行可能引发设备绝缘击穿现象, 值得相关人士高度重视, 并着力推广故障定位和处理技术, 为配电线路运行安全保驾护航。

1 10 kV 配电线路接地故障成因

1.1 线路设备自身缺陷

首先, 绝缘子故障。绝缘子长时间运行后, 表面会堆积污秽, 空气若湿度过大, 可能发生闪络击穿现象。绝缘子材质不过关或安装质量较差, 也容易影响机械强度, 引发破裂损坏现象。其次, 导线故障。导线出现机械损伤、腐蚀和老化现象, 可能引发断线, 一旦落地即可形成接地。导线在绝缘子上未牢固绑扎, 也可能脱落至横担或地面, 引发电气故障。最后, 附属设备故障。配电变压器高压绕组单相绝缘击穿、避雷器性能较差、分支熔断器绝缘损坏等, 均有一定风险引发接地故障。

1.2 外部环境影响

首先, 自然环境。风力较大的天气容易引发导线风偏过大现象, 若导线和树木、建筑物距离较近, 可能形成短接。雾天、暴雨天气湿度较大, 也可能降低绝缘性能。雷击可能引发线路绝缘瞬时击穿, 引发接地现象。其次, 树木生长。线路通道中树木枝条若未及时修剪, 枝干和导线直接接触, 树木倒伏可能压断导线, 一般在林区、山区等地易于发生此类故障。最后, 生物和漂浮物影响。鸟类可能携带铁丝、树枝等导电物,

和导线直接搭接, 农作物秸秆、风筝和塑料布等重量轻的物体, 也可能在风力作用下搭接导线, 紧紧缠绕导线, 进而形成接地通路。

1.3 系统运行因素

一方面, 设备绝缘老化。配电线路设备长时间运行后, 绝缘性能有自然衰减可能, 即使电压处于正常范围, 也有一定风险发生绝缘击穿现象。另一方面, 谐振过电压。系统中容感性元件参数若未能正确匹配, 可能引发铁磁谐振现象, 引发电压异常升高, 间接诱发接地故障。

1.4 人为和施工因素

一方面, 外力破坏。人为破坏行为包括线路设备盗窃, 车辆撞击电线杆, 线路通道受违章建筑侵占等, 均会影响导线安全距离。另一方面, 施工误操作。线路检修场地或附近施工, 材料和工具可能遗留在线上, 施工机械碰撞导线、杆塔等, 也可能增加线路结构受损风险。

2 10 kV 配电线路接地故障定位技术

2.1 传统定位技术

1. 分段试拉法。分段试拉法在现阶段配网调度定位方法中应用最广泛, 依照相关要求, 若停电只是短时现象, 可通过试拉线路明确故障区间。操作时, 需先试拉小电流选线报警或存在故障象征的线路, 后续依照空载备用线路、故障风险大的线路、并网线路等顺序依次进行试拉, 最后试拉母线和附属设备。如果拉开某一线路开关后, 接地信号不存在, 即可判断该线路为故障线路。若线路距离较长, 可通过分段开关, 由后向前试拉, 缩小故障范围。分段试拉法操作难度低, 不用投入更多资金, 针对各类配网结构均有较强适用

性。但是故障定位时间较长，停电范围大，且需要频繁停电，尽管时间不长，但依然会对用户供电体验造成负面影响，特别是需要持续供电生产的工厂、住宅楼或写字楼等^[1]。

2. 母线分割法。若10 kV母线有接地信号，可采用母线分列运行方式，用不同独立部分分割母线，观察不同分段母线电压变化，可确定母线分段故障位置。这种方法可判断母线及其附属设备是否有接地故障，作为后续线路试拉的主要参考，避免无效停电现象大量出现。

3. 人工巡线法。人工巡线法同样可用于10 kV配电线路故障定位，明确故障线路后，运维人员可沿线路实地巡查。树木是否接触导线、线路是否有漂浮物、绝缘子是否损坏、导线是否断线，均为巡查重点。

2.2 现代智能化定位技术

1. 小电流接地选线技术。小电流接地选线技术可通过线路中零序电压、零序电流电气量的检测，通过信号处理算法辅助故障线路判断。这一技术一般可分成传统选线装置与智能选线系统，前者可基于相位比较原理、零序电流幅值原理选线，针对简单配网结构适用性较强，但需要多点接地、高阻接地时无法保障准确率；后者集合了人工智能算法、小波变换算法技术优势，具备复杂故障信号处理能力，即使有谐振干扰、高阻接地现象，也能保证选线准确率，可实现故障线路的快速定位^[2]。

2. 在线监测定位系统。在线监测定位系统包括通信模块、监测终端和主站系统等，可实时监测故障，提高定位精准性。通信模块可依托无线通信技术采集监测终端信号，并向主站系统传输数据，以实时传递故障信息。监测终端一般在线路分段开关、用户端和变电站出线端安装，可采用16位芯片设计，可靠性较高，功耗更低，可对故障状态下的状态信息、电气量数据等参数进行采集。主站系统可分析处理故障信息，结合线路接线图明确故障点位置，可及时发出报警信号，以便运维人员第一时间检修。这一系统可提高定位精度，响应速度更快，可减少巡线工作量，避免长时间或频繁停电，针对复杂结构和长距离的配电线路更适用。

3. 故障指示器定位技术。运维人员可以在电缆或导线上安装故障指示器，一旦线路存在接地故障，故障电流通过指示器，会同步产生磁场，触发指示器动作，发出无线信号或光信号。运维人员可沿线路观察指示器状态，快速确定故障段落。故障指示器定位技术直观性强，成本可控，且安装相对简单，一般在电缆线路、架空线路中相对适用，可和其他定位技术互相配合，实现定位效率进一步提升^[3]。

3 10 kV配电线路接地故障处理流程

3.1 故障前期判定处置

变电站10 kV母线一旦出现接地信号，值班人员应先查看电压监测系统，明确三相电压变化，结合电压特征判断故障类型，降低误判可能。若一相电压降到零，其他两相电压和线电压相等，即为完全接地；若一相电压降低，但未归零，其他两相升高，但未达到线电压，即为不完全接地；若一相电压降低，其他两相电压变化幅度较小，即为PT保险熔断；若三相电压有轮流升高现象，且有低频摆动情况，即为谐振过电压。若电压变化特征不明确，可在短时间内并列运行母线，判断是否存在真实接地故障表现。若发生接地故障，且现场有带电作业情况，应第一时间通知负责人停止作业，保障人员安全。故障发生时间、天气情况和母线电压数据等均需记录，为后续故障处理提供参考。运维人员需查阅调度手册，告知故障母线所带线路用户管辖单位，并通知用户，应对后续停电现象^[4]。

3.2 故障线路确定

依照相关管理要求，电网中性点不接地，或者经消弧线圈接地，接地运行时长应控制在2小时以内，运维人员应第一时间确定故障线路。首先，应优先利用小电流接地选线系统报警信息，确定可疑故障线路范围。其次，可采用短时停电试拉检测法，试拉顺序为故障象征线路、空载备用线路、高风险线路、并网线路和母线设备等。试拉阶段，若某线路开关被拉开后，接地信号消失，可判定该线路存在故障；若信号未消失，应当将开关立刻合上，并继续进行下一条线路试拉。若为双电源用户备用线路，故障检修时应先和用户管理单位确认，确认后方能试拉。针对重点用户线路，若接地运行时间超过2小时，可先通知用户，直接试拉线路，降低故障扩大风险。

3.3 故障区间和故障点定位

明确故障线路后，可采用分段试拉法将故障区间缩小。常规线路可以线路末端为起始点，逐步完成故障区间的定位；环网线路可以末端为起始点，分区段试拉，先明确故障范围，后续细化到具体区间；自动化线路可以遥控试送分段开关，与系统信号反馈结合，判定故障区间。明确故障区间后，运维人员可在现场巡检线路，找出具体故障点。巡线时需对区间内导线、杆塔、绝缘子和附属设备等进行重点检查，并与故障指示器信号结合，快速找出故障点。

3.4 故障处理和送电恢复

故障处理需明确以下原则：首先，安全第一。故障处理之前应先验电并接地，落实各项安全防护措施，

人员不能在带电状态下进行故障点处理。其次，最小停电。在不影响安全的前提下，非故障区域供电恢复需优先进行，缩小停电范围。另外，快速处置。运维人员应结合故障类型进行针对性处理，将故障处置时间尽可能缩短^[5]。

因故障类型不同，处理方法也会存在一定差异。针对导线断线接地故障，若导线可修复，人员可接续断线；若导线有严重损坏现象，需将受损线段更换，处理之后需对导线绝缘距离与导线弧垂进行处理，保证导线安全性符合运行要求。针对树木短接故障，人员可将接触导线的枝干修剪干净，并集中清理线路通道中超高树木，使导线和树木保持安全距离。针对绝缘子击穿现象，运维人员应将已经损坏的绝缘子及时更换，并做好附近绝缘子表面污秽清洁工作，重新安装绝缘子后，应检查其安装牢固性。针对漂浮物接地现象，应将导线表面漂浮物清理干净，检查线路绝缘是否有受损现象，若有必要，应测试导线绝缘性。针对设备故障接地现象，应及时更换避雷器、熔断器等故障设备，并针对有关设备进行预防性试验，保证设备性能合格。

故障处理过后，若线路安全可尽快恢复正常供电。调度人员接到运维人员故障处理情况汇报，可分别将故障线路分段开关和线路主开关合上。送电之后，应对母线电压正常性进行观察，判定接地信号是否消失，明确设备运行稳定性。恢复供电之后，需发布公告，告知用户停电原因与当前供电恢复情况。

4 10 kV 配电线路接地故障预防措施

4.1 完善线路设备运维管理

1. 定期巡检和维护。相关单位应成立专业运维团队，制定常态化巡检计划，将导线、杆塔、绝缘子、附属设备运行状态列为重点检查项目，例如导线是否有损伤、腐蚀和老化现象，杆塔基础是否牢固，塔身是否倾斜，绝缘子是否完好，表面是否有油污，拉线是否松弛、断裂等。若遇到特殊时段或特殊天气，应增加巡检频次，例如大风天气、雷雨季节等，应重点开展专项巡检、故障发生风险较高的区域，需增加夜间巡检人员，以便第一时间排查线路隐患。

2. 设备更新升级。运维人员应定期检查设备是否有性能劣化、老化现象，采购机械强度高、绝缘性能优良的新型设备并及时更换。针对开关设备、配电变压器等，需要定期进行预防性试验，并对设备运行参数、绝缘性能等进行检测，若设备不合格，应第一时间维修或更换。同时应提高线路绝缘水平，选择绝缘等级

比运行电压更高的绝缘子，强化线路抗击穿、抗污闪能力。

4.2 完善线路通道管理

针对树木通道，相关单位可建立线路通道树木台账，对通道中的树木进行定期修剪，保证树木和导线安全距离与规范要求相符。线路通道中若树木超高，或者有速生树种，可砍伐或移栽，从根本上减少树障为线路带来的隐患。相关单位还需和林业部门保持沟通，加强电力线路安全知识宣传，争取更多线路维护工作的支持。针对线路通道漂浮物，相关单位可在多发区域，例如厂区、农田等，增设线路绝缘子防污罩、防护网等，避免秸秆、塑料袋等缠绕导线。同时应强化线路附近施工管理，若施工项目和线路距离较近，应做好安全交底，设置警示标志，并委派专人监护，避免施工机械造成线路碰撞^[6]。

5 结束语

故障定位和处理是保障 10 kV 配电线路正常运行的重点环节，其中，传统定位技术操作简单，但无法有效提高检修效率。与之相对的是，现代智能化定位技术可实现定位效率与精度提升，是未来发展故障定位的重点方向。预防工作同样是减少 10 kV 配电线路接地故障的重点工作，通过完善线路设备运维管理和线路通道管理，可从根本上减少故障隐患。相关人员应重视现代智能化定位技术的应用，提高 10 kV 配电线路智能化和全自动化水平，并加强故障处理和预防工作落实，提高故障定位与处理效率，争取保证用户可靠电力供应。

参考文献：

- [1] 崔红森, 张信新. 一起 10kV 配电线路单相接地故障原因分析和处理 [J]. 电世界, 2025, 66(03): 52-53.
- [2] 郭翠梅. 10 kV 配电线路小电流接地故障区段自动定位方法 [J]. 自动化应用, 2025, 66(02): 185-187.
- [3] 陈欣, 杨瑞. 基于梯度提升决策树的 10kV 配电线路故障定位方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(09): 52-54.
- [4] 李凤全, 张志初, 付延明. 10kV 配电线路故障定位与智能化监测技术 [J]. 中华纸业, 2025, 46(09): 88-90.
- [5] 周晓宇. 10 kV 配电网线路接地故障的治理与预防 [J]. 周口师范学院学报, 2025, 42(02): 21-25.
- [6] 林越桢. 基于暂态波形和零序电流的 10kV 配电网单相接地故障定位方法研究 [J]. 电力设备管理, 2025(05): 40-42.

500 kV 出线场设备柱及构架柱安装方案与安全措施

黄培醒

(中国水利水电第七工程局有限公司机电安装分局, 四川 眉山 620860)

摘要 针对巴基斯坦 500 kV 出线场设备柱及构架柱安装工程实操需求, 本文聚焦施工全流程关键环节, 细化施工准备、场地布置、安装步骤等核心工序规划, 同步建立覆盖吊装作业、高空防护、危险点防控及文明施工的全方位安全管理体系, 融入针对性质量控制措施规范各环节操作, 旨在为同类高压出线场钢结构安装工程提供技术与安全管控思路参考。结果表明, 所制定方案明确各工序技术要点与安全准则, 形成兼具实操性与规范性的完整安装技术体系, 可有效解决现场施工与安全管控重难点。

关键词 500 kV 输电工程; 出线场设备柱; 构架柱; 安装方案; 吊装安全控制

中图分类号: TM752

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.014

0 引言

巴基斯坦 500 kV 输电工程作为区域能源基础设施升级的核心载体, 其出线场设备柱及构架柱安装质量直接决定了电网输电效率与安全运行水平。随着该国电力需求的持续攀升, 高标准完成此类重型构件安装不仅是工程建设的关键环节, 更对保障区域能源稳定供应、推动当地工业发展与民生改善具有重要的现实意义^[1]。海外施工场景下, 复杂地质条件、严苛气候环境及跨文化施工管理等因素, 对安装工艺的适应性与安全措施的完备性提出了更高要求。科学制定安装方案、强化全流程安全管控, 是规避施工风险、确保工程进度的关键举措。

1 工程概况

巴基斯坦卡洛特水电站厂房出线场构架柱安装工程由长江三峡技术经济发展有限公司巴基斯坦卡洛特经理部负责推进。构架柱整体布置在主厂房上游副厂房屋顶 EL. 444 高程, 整体结构涵盖中柱、边柱、横梁、钢梁、地线柱、走道及爬梯等核心部件。中柱外形尺寸达 $2\ 500 \times 7\ 000 \times 25\ 000$ mm, 重量 36.5 t, 边柱与中柱尺寸一致, 重量 35.3 t, 钢梁 2 重量 10 t, 三类构件构成安装作业的核心主体。构件连接以螺栓连接为主要形式, 环向焊缝执行一级焊缝标准, 对施工精度提出较高要求。吊装作业集中于上游副厂房 419 平台, 右侧吊装区域因通风口建筑存在, 现场调整空间受到限制^[2]。

2 出线场设备柱及构架柱安装方案

2.1 施工准备

施工启动阶段, 技术准备工作全面铺开。专业人员细致审核出线场构架柱设计图纸, 严格依照《钢结构工程施工及验收规范》(GB 50205-2001) 以及措施审查会议纪要核心要求, 精准编制施工方案。针对所有施工人员开展技术交底工作, 确保每一位作业人员清晰掌握施工流程与技术标准, 同时完成特殊工种资质严格核验, 保障作业人员专业能力符合施工要求。人力资源配置科学规划, 明确设置现场指挥统筹全局。基础与构件验收环节严格执行标准, 专业人员细致复核基础轴线位移、顶面标高及杯口尺寸, 确保各项参数符合偏差控制范围。对到货构件进行全面验收, 仔细复核外形尺寸及安装孔位精度, 从源头保障施工质量^[3]。

2.2 场地布置与运输

施工前期, 工作面清理工作有序推进。作业人员对吊装区域及运输通道内的杂物进行彻底清理, 对场地进行平整处理, 为后续施工创造安全、规范的作业环境。吊装设备布置结合现场实际情况精准规划, K50 塔机固定布置于上游副厂房 YCF0+84.5 轴线附近, 同步拆除 3# 机同侧原有塔机, 通过精准测算确保其 40 m 吊装半径内有效负荷稳定达到 10.1 t。200 t 汽车吊部署于上游副厂房 419 平台, 左侧支腿支点 1、2 稳固设置在下游墙体, 支点 3 安置于钢平台, 支点 4 坐落于 10 t 钢梁之上, 钢梁与楼板接触部位铺垫 $40 \times 900 \times 900$ 规

格钢板，右侧布置则根据通风口实际位置灵活调整，保障吊装作业稳定开展。

2.3 安装施工步骤

构架拼装环节严格遵循现场作业条件规划实施。塔机有效作业半径内的平整区域作为拼装场地，作业人员采用枕木铺垫支撑点并细致找平，确保构件拼装过程中受力均衡。构件就位前，依据钢印编号逐一核对，保障各部件精准匹配。螺栓连接严格遵循水平面从下而上、侧面从里而外的方向标准，法兰连接面保持洁净，杜绝垫片使用，螺栓紧固后外露丝扣控制在 2~3 扣，操作中采用对角均匀紧固方式，确保连接部位受力稳定。横梁拼装执行 L/500 预拱标准，拼装过程中通过拉线测量扰度，当日未完成拼装的杆件，次日复工前重新复测，避免因环境变化影响拼装精度^[4]。

构件吊装按照钢梁、设备柱、边柱及中柱、横梁、地线柱的顺序有序推进，各环节衔接紧密，保障施工流程顺畅。钢梁吊装时，钢梁 1、钢梁 3 作为边柱承重构件，钢梁 2 作为中柱承重构件，依次精准安装于基础预埋件之上，安装过程中反复检查连接部位，确保稳固可靠。边柱及中柱因体型庞大，采用分段吊装方式，按 Z1 至 Z6 的顺序逐节提升，起吊操作保持匀速缓慢，构件就位后及时调整垂直度，同步拉设 Φ12 mm 临时揽风钢丝绳，钢丝绳一端连接手拉葫芦与拉紧器，另一端固定于屋面楼板地锚，确认构件完全固定后再行卸钩，每节构件吊装前均提前搭设对应脚手架和作业平台，保障高空作业安全。横梁采用四点起吊方式，外侧钢丝绳搭配 3 t 葫芦调节受力平衡，构件两端设置白棕绳控制起吊过程中的晃动，起吊至离地 100 mm 时暂停作业，全面检查吊索绑扎、构件水平度等情况，确认无误后继续提升，就位后复核立柱跨距，精准对齐连接孔位，完成螺栓套设后按标准力矩紧固。地线柱在地面完成拼装，待桥架吊装全部结束后，通过法兰连接方式完成安装，确保连接部位符合技术要求。

所有构件吊装就位后，全面复核立柱垂直度，对偏差超出标准的部位及时调整，确保整体安装精度。随后对全部连接螺栓进行复紧操作，消除吊装过程中可能产生的松动隐患，构件表面涂层破损部位进行局部补漆处理，恢复防腐性能。临时揽风钢丝绳拆除按规范流程进行，先松开地面固定点，将钢丝绳收回至立柱下方整理盘好，再拆除立柱上方固定点，通过白棕绳缓慢下放至地面，最后对施工现场进行全面清理，移除施工废料与临时设施，完成整个安装工序。

2.4 质量控制

安装全过程质量控制以严格标准贯穿各环节，明确施工操作核心准则。焊缝施工执行统一规范，高度

设定为焊件最小厚度的 1.2 倍，确保连接强度满足结构受力需求。横梁与立柱连接采用双螺帽设计，通过双重固定增强连接稳定性，避免长期使用中出现松动现象。横梁拼装阶段，水平直线度控制在 10 mm 以内，通过精准操作保障构件安装后的平整度。

偏差控制环节细化标准，针对基础工序、钢梁柱组装、吊装验收等关键阶段，分别明确规范允许偏差及内控标准。基础轴线位移、顶面标高、杯口尺寸等参数按设计要求严格把控，钢梁柱组装过程中，柱的侧向弯曲矢高偏差规范允许值为 H/1000 且 ≤ 20 mm，内控标准收紧至 H/1000 且 ≤ 15 mm。柱的根开偏差规范允许 ±15 mm，内控标准调整为 ±10 mm。吊装验收阶段，柱中心线对轴线偏移规范允许 ≤ 10 mm，内控标准提升至 ≤ 8 mm。柱垂直度规范要求 ≤ H/1000 且 ≤ 25 mm，内控严格控制在 ≤ H/1000 且 ≤ 20 mm。螺栓外露丝扣统一保持在 2~4 扣，确保连接质量符合技术要求^[5]。

过程检验依托专业工具实现全方位管控，经纬仪、水准仪、扭力扳手等设备精准应用于各检测项目。轴线位移通过经纬仪或拉线结合尺量检查，顶面标高采用水准仪配合拉线尺量复核，螺栓紧固力矩借助扭力扳手精准检测。所有检测数据实时记录，形成完整质量管控档案，对发现的偏差及时调整，确保每道工序质量达标，从细节处保障整体安装工程质量。

3 500 kV 出线场设备柱及构架柱安装安全措施

3.1 吊装安全控制

吊装安全控制以设备性能保障与作业规范执行为核心，筑牢施工安全第一道防线。吊装作业启动前，专业人员对 K50 塔机、200 t 汽车吊进行全面性能检测，重点排查制动系统、起重机构、钢结构件等关键部位，确保设备处于稳定运行状态。200 t 汽车吊作业时，支腿下方均铺垫硬木块分散压力，遭遇软弱地基区域，提前进行路基铺砌处理，强化地面承载能力，避免作业过程中出现设备倾斜。吊索具选用 Φ19.5 mm(6×37) 规格钢丝绳，经测算安全系数达 6.34 倍，完全满足吊装承重需求。吊索与构件连接时，水平夹角控制在 45°~60° 之间，确保受力均匀，重物棱角接触部位铺垫管皮或方木，防止吊索磨损断裂。

在吊装作业过程中，吊物提升至离地 10 cm 时暂停操作，全面检查吊索绑牢固度、吊点设置合理性及设备受力状态，确认无异常后继续提升。恶劣天气下严格管控作业流程，六级以上大风或雷电天气直接停止吊装作业，避免环境因素引发安全事故。起重工与吊车司机提前统一指挥信号，采用哨声搭配旗语或

手势的沟通方式，信号传递清晰准确，遇有信号不明情况立即停止操作，待指令明确后再行作业。吊装区域周边设置隔离带，醒目位置张贴警示标识，非作业人员严禁进入隔离区域，起重臂覆盖范围内全程禁止人员停留，最大限度降低作业风险。

3.2 高空作业安全

高空作业安全管理聚焦防护措施落实与人员资质管控，构建全方位安全防护体系。高空作业人员必须持有有效上岗证件，经专业培训考核合格后方可参与作业。作业过程中全程系挂安全带，严格遵循高挂低用原则，将安全带挂钩固定在牢固构件上，避免挂钩位置低于作业平面。垂直攀登构架柱时使用攀登自锁器，保障上下攀登过程中的安全。在构架梁上水平行走时，提前挂设水平绳与延长绳，作业人员通过安全绳与水平绳连接，实现全程安全防护。工具具携带与物料传递执行严格规范，作业人员随身携带的工具具全部放入工具袋，小型材料、螺栓及较重工具通过滑车与小绳传递，绝对禁止抛掷行为，防止物体坠落伤人。

人员管理方面制定严格的准入标准，患有心脏病、高血压、恐高症等不适宜高空作业疾病的人员，严禁参与高空作业。酒后人员一律禁止进入作业现场，杜绝违规上岗情况。高空作业人员实行固定排班制度，确保每个人都拥有充足的休息时间，避免疲劳作业引发安全隐患。每日吊装作业前，专职安全员组织高空作业人员开展安全交底，明确当日作业风险点及防护要点，强化人员安全意识。

3.3 施工危险点防控

施工危险点防控坚持预防为主、源头管控的原则，针对关键风险点制定专项防控措施。作业现场严禁违章指挥行为，施工管理人员严格按照审批通过的方案组织施工，不得随意更改作业流程或下达违规指令。专项安全技术措施编制完成后，组织全体作业人员进行交底，确保每个人都清晰掌握措施内容，交底记录经全员签字确认后方可实施，作业人员有权拒绝无措施工或违章指挥指令。机械设备维护保养形成常态化机制，定期对塔机、汽车吊、电动工具等设备进行检修，详细记录设备运行状态与检修情况，发现故障及时停机维修，严禁机械设备带病作业。

用电安全管理落实严格标准，所有用电设备外壳均进行可靠接地处理，防止设备漏电引发触电事故。临时电源实行集中统一接线，线路布置规范有序，明确专人负责电源管理，定期检查线路绝缘状况、接线牢固度，及时更换老化破损线路，消除用电安全隐患。

组装及吊装区域按规范设置安全围栏，围栏高度符合安全标准，关键位置悬挂警示标志，提醒作业人员注意安全。沟道、孔洞、平台、扶梯等危险区域，全部安装安全可靠的防护设施，张贴醒目的安全警示牌，防止人员坠落或意外磕碰。作业过程中安排专职安全员进行现场巡查，对危险点防控措施落实情况进行动态检查，发现问题立即整改。

3.4 文明施工现场布置

施工现场平面布局严格按照施工组织设计执行，未经批准不得随意更改设备、材料堆放位置。作业区域划分明确责任区，落实专人负责日常管理，确保施工安全、质量与效率同步提升。设备、材料及各类物资进场后，及时进行标识标注，清晰注明物资名称、规格型号、用途及责任人，摆放过程中遵循有序合理的原则，避开消防通道与作业通道，同时符合安全防火要求。施工道路保持畅通无阻，路面定期进行清扫维护，杜绝积水、杂物堆积情况。道路沿线设置明显路标，指引车辆与人员通行，禁止在道路中间堆放设备、材料等物品，保障交通顺畅。施工现场设置专门宣传栏，张贴国家环境保护法及地方政府环保条令，强化作业人员环保意识。施工交通机具定期到管理部门进行审核，尾气排放不符合标准的车辆严禁投入使用，减少对周边环境的污染。

4 结束语

本文围绕巴基斯坦 500 kV 出线场设备柱及构架柱安装工程，系统阐述工程概况，细化施工准备、场地布置、安装步骤及质量控制等核心内容，构建覆盖吊装、高空作业、危险点防控及文明施工的全方位安全管理体系。未来可结合现场施工反馈持续优化工艺细节，强化多设备协同作业动态管控，进一步提升同类高压出线场钢结构安装工程的标准化水平与安全保障能力。

参考文献：

- [1] 刘嘉睿,于红玉.柔性支架钢索安装技术在柔性光伏支架安装工程中的应用 [J].安装,2024(03):14-16.
- [2] 谢龙飞,刘祥,吴攀,等.大型发电设备装配场地的设计及安装 [J].东方电气评论,2024,38(04):74-77.
- [3] 杨学明.复杂地形条件下光伏柔性支架应用 [J].城市建设理论研究(电子版),2024(03):10-12.
- [4] 赵岩.柔性光伏支架的施工方法浅析 [J].太阳能,2023(10):75-80.
- [5] 刘强强.光伏发电柔性钢索构架及组件安装施工关键技术 [J].安装,2024(10):33-35.

建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术探讨

陆本武

(兰州拓朴工程检测有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要 混凝土强度是决定建筑工程结构安全与耐久性的核心指标, 其检测技术直接影响工程质量评估的准确性。基于此, 本研究聚焦建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术, 明确建筑工程混凝土强度检测的重要性, 梳理回弹法、钻芯法、超声回弹综合法等常用技术的原理与应用场景, 指出当前检测中存在的技术局限性、操作规范性不足等问题, 提出技术优化、流程管控、人员培训等改进路径, 以期为提升混凝土强度检测精度、保障建筑工程质量提供参考。

关键词 建筑工程; 质量检测; 混凝土强度检测技术

中图分类号: TU755.7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.015

0 引言

在建筑工程领域, 混凝土凭借抗压强度高、可塑性强、成本可控等优势, 成为房屋建筑、桥梁隧道、水利设施等项目的核心建材。混凝土强度直接关联结构承载能力与使用寿命, 若强度不达标, 易引发裂缝、沉降甚至结构坍塌等安全事故。根据住建部数据可知, 近年我国建筑工程质量问题中因混凝土强度不合格导致的隐患占比超 30%。精准、高效的混凝土强度检测技术是工程质量管控的关键环节, 对预防质量风险、保障建筑安全具有重要现实意义。当前混凝土强度检测技术已从传统破损检测向无损、半无损检测发展, 但在实际应用中受检测环境、技术选型、操作水平等因素影响, 检测结果常出现偏差。因此, 在此背景下对建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术的深入探讨与优化具有重要理论与实践价值。

1 建筑工程质量检测常用检测技术

1.1 回弹法

回弹法是基于混凝土表面硬度与强度相关性的无损检测技术, 通过回弹仪测量混凝土表面回弹值, 结合碳化深度修正, 推算混凝土抗压强度。该技术操作简便、检测速度快、成本低, 无需破坏结构, 适用于大面积混凝土构件(如墙体、梁、柱)的现场检测^[1]。在应用中, 回弹法需注意以下两点: 一是检测面需平整清洁, 若表面有浮浆、油污, 需提前打磨处理; 二是碳化深度修正至关重要, 混凝土碳化会导致表面硬度升高, 若忽略修正, 易高估强度。例如: 在某住宅项目检测中未对墙体混凝土进行碳化深度测量, 直接依据回弹值判定强度达标, 后期钻芯验证发现实际强

度低于设计值 15%, 险些引发质量隐患。但回弹法也存在局限性, 对龄期不足 28 天、表面受冻或风化的混凝土, 检测精度易受影响。

1.2 钻芯法

钻芯法是通过专用钻机在混凝土构件上钻取圆柱形芯样, 经切割、磨平后进行抗压试验, 直接获取混凝土实际强度的半破损检测技术。该技术检测结果直观、精度高, 是验证其他检测方法结果的“基准方法”, 适用于重要结构构件(如桥梁支座、高层建筑桩基承台)的强度复核。钻芯法的核心在于芯样质量控制, 一是芯样直径需符合规范, 通常选用 100 mm 或 150 mm, 确保芯样代表性; 二是钻取过程需避免振动, 防止芯样开裂, 影响试验结果^[2]。例如: 某桥梁项目中检测人员因钻机转速过快导致芯样出现纵向裂缝, 后期重新钻取芯样后检测结果才准确反映混凝土强度。但钻芯法会对结构造成局部损伤, 需控制钻芯数量与位置, 且检测周期较长、成本较高, 不适用于大面积普查。

1.3 超声回弹综合法

超声回弹综合法结合回弹法与超声波检测技术, 通过回弹值反映混凝土表面硬度, 超声波传播速度反映混凝土内部密实度, 二者结合修正单一技术的局限性, 显著提升检测精度。该技术适用于表面质量较差、内部可能存在缺陷(如空洞、疏松)的混凝土构件, 在老旧建筑加固改造检测中应用广泛。例如: 在某厂房改造项目中混凝土梁表面存在风化现象, 单独使用回弹法检测误差较大; 采用超声回弹综合法后通过超声波传播速度发现梁体内部存在局部疏松区域, 结合回弹值修正, 最终准确判定该区域混凝土强度不达标, 为加固方案制定提供了可靠依据。但该技术对操作要

求较高，需确保超声探头与混凝土表面耦合良好，避免空气间隙影响声波传播速度测量^[3]。

1.4 拔出法

拔出法通过测量将预埋件从混凝土中拔出所需的力量，计算混凝土的抗拉强度，再依据《拔出法检测混凝土强度技术规程》中抗拉强度与抗压强度的换算公式，推导得出混凝土实际抗压强度，属于半无损检测技术。该技术适用于混凝土表层强度检测，尤其对喷射混凝土、修补混凝土的强度评估具有优势，喷射混凝土因施工工艺特殊，表层与内部强度差异较大，拔出法可精准反映表层20~50 mm深度的强度，避免内部结构对检测结果的干扰。在隧道工程中喷射混凝土施工后常用拔出法快速检测其早期强度（通常为7天龄期），判断是否满足下一步衬砌施工或围岩支护要求，为工程进度管控提供及时依据。拔出法的关键在于预埋件的安装质量，需在混凝土浇筑时按规范固定预埋件，确保其与混凝土结合紧密，若预埋件存在偏移、松动或表面有油污，易导致检测结果偏低10%~15%。且该技术检测范围较小（单个测点代表范围约0.1~0.2 m²），需按规范在构件上均匀布设3~5个测点，取平均值才能反映构件整体强度水平；同时，拔出法可与回弹法配合使用对回弹法检测结果存疑的区域，通过拔出法复核进一步提升检测可靠性。但拔出法对预埋件类型有明确要求，需选用符合规范的标准预埋件，禁止使用非标件，否则会影响力值测量精度与换算准确性。

2 混凝土强度检测技术应用中的现存问题

2.1 技术选型缺乏针对性

部分检测人员专业能力不足，未系统结合工程场景（如施工阶段、环境条件、工程类型）与构件特性（如尺寸规格、受力类型、龄期、使用功能）选择适配检测技术，导致检测结果与混凝土实际强度偏差显著，难以真实反映结构质量状态。这种选型偏差不仅直接降低检测数据精度，无法为工程质量评估提供可靠依据，还可能因技术与构件不匹配对结构造成非必要损伤，影响构件稳定性，增加后期修复成本与安全隐患，甚至延误工程验收进度，误导质量管控决策。

2.2 操作规范性不足

检测操作不规范是导致结果误差的重要原因，部分检测人员未严格遵循规范流程，如回弹法检测时未按规定选取测区（规范要求每个构件测区不少于10个）、测区分布不均，或超声检测时探头耦合剂涂抹不均；设备校准不到位，回弹仪、超声波检测仪等未定期检定（规范要求每年至少1次），仪器误差直接传递至检测结果。此外，部分人员数据记录潦草，关键信息缺失，

后期难以追溯。例如：某检测机构因回弹仪未校准，导致某项目混凝土强度检测值偏高8%，后期被质量监督部门查处，项目返工额外耗费成本超20万元^[4]。

2.3 环境因素干扰明显

现场检测环境对技术应用影响较大，在高温（气温超35 °C）、高湿（相对湿度超85%）环境下混凝土表面湿度快速变化，高湿会使表面软化，导致回弹值偏低3~5；冬季低温（气温低于5 °C）时混凝土表面受冻形成5~10 mm冻层，硬度升高，易造成回弹法检测结果虚高10%~20%。此外，施工现场的振动（如压路机、振捣棒作业）、粉尘（厚度超1 mm）等，也会干扰超声波传播速度测量，导致超声回弹综合法检测精度下降8%~15%。

2.4 数据处理与结果判定不科学

部分检测人员在数据处理中存在随意性，如忽略碳化深度（碳化深度每增1 mm易致强度评估偏差8%~10%）、超声声速的修正，直接采用原始数据计算强度；在结果判定时未结合构件受力特点与工程实际，仅依据单一检测值下结论。例如：对承受动荷载的桥梁构件，未考虑疲劳损伤（长期动载易使强度降10%~15%）对混凝土强度的影响，仅通过一次钻芯检测便判定强度达标，存在安全隐患。

3 混凝土强度检测技术的优化路径

3.1 科学选型，适配工程需求

根据构件类型、龄期、使用环境等因素合理选择检测技术，对大面积、非关键构件（如住宅地上墙体、普通办公楼楼板）优先选用回弹法进行普查，此类构件数量多、检测范围广，回弹法单人单日可完成80~100个构件检测，且无需破坏结构，能大幅提升普查效率；对重要构件（如桥梁主墩、高层建筑核心筒柱）、需验证强度的构件（如回弹法检测结果存疑的构件），采用钻芯法或超声回弹综合法，钻芯法可直接获取混凝土实体强度，误差控制在5%以内，超声回弹综合法能同时反映表面硬度与内部密实度，适用于对强度精度要求高的场景；对薄壁构件（如厚度≤150 mm的预制楼板）、喷射混凝土（如隧道衬砌、基坑支护面层）选用拔出法，拔出法检测深度仅20~50 mm，不会对薄壁构件造成结构性损伤，且能快速获取表层强度数据。同时，推广“组合检测法”，如某住宅小区主体结构检测中先用回弹法对3 000余个构件进行普查，筛选出186个疑似不合格构件，再用钻芯法对这些构件逐一复核，最终确认124个构件强度不达标，相较于全钻芯检测，节省成本约70%，兼顾检测效率与精度。

3.2 强化操作规范，严控检测流程

建立标准化操作体系，组织检测人员学习《混凝土强度检验评定标准》《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》等规范，针对不同检测技术制定详细操作手册，如回弹法明确测区布设需避开钢筋间距 $<100\text{ mm}$ 的区域、每个测区弹击 16 个点且弹击点间距 $\geq 30\text{ mm}$ ，超声回弹综合法规定超声探头耦合剂涂抹厚度为 $0.5\sim 1\text{ mm}$ 、声速测量需重复 3 次取平均值，明确各技术的操作步骤与质量要求；同时，加强设备管理，建立检测仪器台账，对回弹仪每 6 个月进行 1 次检定（使用频繁时每 3 个月检定 1 次），对超声波检测仪每年进行 1 次校准，确保设备精度符合要求，如某检测机构曾因未及时检定回弹仪，导致弹击能量偏差 18%，检测的某商业项目混凝土强度值偏高 15%，后期重新检定设备并复测，才纠正错误结果^[5]。此外，推行检测过程可视化，采用高清摄像头记录检测全程，拍摄内容包括构件编号、测区位置、操作步骤、数据记录等，每个检测环节均需留存影像资料，便于后期追溯与质量管控，如在某政府投资项目中通过可视化记录发现 2 名检测人员未按规范测量碳化深度，及时要求重新检测，避免了质量误判。

3.3 应对环境干扰，优化检测条件

针对环境因素影响采取针对性措施，高温环境下（气温 $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），选择早晨 6-9 点、傍晚 17-20 点等低温时段检测，或用湿布覆盖混凝土表面并洒水保湿，保湿时间不少于 30 分钟，确保表面湿度稳定，如某南方项目夏季检测时未采取保湿措施，回弹值比保湿后检测值高 7%~9%，经对比验证，保湿处理后的数据更接近实际强度；低温环境下（气温 $<5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），先用热风枪清除表面冻层（冻层厚度通常为 5~10 mm），再用保温棉包裹构件，待混凝土温度回升至 5 $^{\circ}\text{C}$ 以上（用红外测温仪实时监测）再检测，如某北方冬季项目中未回升温度直接检测，回弹法强度评估值比实际值高 22%，升温后复测才得出准确结果；粉尘较多的施工现 场（如未铺装的施工道路周边构件），检测前用高压气枪（压力 0.4~0.6 MPa）清理构件表面粉尘，再用干布擦拭干净，确保超声探头与表面良好耦合，避免粉尘导致的声速测量偏差。同时，开发环境自适应检测设备，如带温湿度补偿功能的回弹仪，该设备能实时采集环境温湿度数据，自动对回弹值进行修正，如某高铁项目使用该设备后高温环境下的检测误差从 12% 降至 5% 以内，减少环境对检测结果的干扰。

3.4 规范数据处理，科学判定结果

严格按照规范进行数据修正，回弹法必须进行碳化深度修正，根据碳化深度值（0~6 mm 对应不同修

正系数）调整回弹强度，如碳化深度 2 mm 时 C30 混凝土的回弹强度修正系数约为 0.92，碳化深度 4 mm 时修正系数约为 0.85；超声回弹综合法需根据声速与回弹值建立修正公式，针对不同强度等级混凝土制定专属修正曲线，避免通用公式导致的误差。同时，引入大数据与 AI 技术，构建混凝土强度检测数据库，收录不同地区、不同配合比、不同龄期的混凝土检测数据（已累计收录超 10 万组数据），通过机器学习训练强度推算模型，模型能自动识别混凝土骨料类型、养护条件等影响因素，对检测数据进行智能修正，如某科研机构开发的 AI 模型，数据处理精度比人工计算提高 25%，处理效率提升 80%。此外，结合构件受力状态与工程经验，综合判定结果，如承受动荷载的桥梁梁体，需考虑疲劳损伤对强度的影响（疲劳损伤会使强度降低 10%~15%），在判定时需适当降低合格阈值；对不合格构件需分析原因，如某项目混凝土强度不足，经排查是配合比中水泥用量不足（设计用量 320 kg/m³，实际用量 280 kg/m³）、养护时间仅 5 天，并据此提出整改措施，如采用压力注浆（注入 M50 水泥浆）+ 粘贴碳纤维布（2 层 300 g/m²）进行加固，整改后检测强度均达标。

4 结束语

混凝土强度检测是建筑工程质量管控的“安全阀”，其技术应用的精准性、规范性直接关系到建筑结构的安全与耐久性。当前回弹法、钻芯法等常用技术在实践中仍面临选型不当、操作不规范、环境干扰等问题，需通过科学选型、规范流程、优化环境、技术创新等手段不断完善。未来随着智能化检测设备的发展（如无人机搭载回弹检测模块、无损检测机器人），混凝土强度检测将朝着自动化、实时化方向迈进。同时，需进一步完善检测标准体系，推动检测技术与工程实践深度融合，为建筑工程质量安全提供更坚实的技术保障，助力建筑业高质量发展。

参考文献：

- [1] 刘俊.建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术分析[J].中华建设,2024(05):118-120.
- [2] 张贝.建筑工程质量检测中的混凝土检测技术要点探讨[J].产品可靠性报告,2025(06):69-70.
- [3] 孟令迎.建筑工程质量检测中的混凝土检测技术分析[J].居业,2024(04):96-98.
- [4] 相荣亮,李鹏.建筑工程质量检测中的混凝土检测技术应用分析[J].佛山陶瓷,2024(04):85-87.
- [5] 孟光大,孙福鹏,张光娟.混凝土检测技术在住宅建筑工程质量保证中的应用[J].居舍,2024(08):29-32.

定向钻穿沙颍河航道工程施工方案与技术措施

钟选明

(中铁十二局集团城市发展建设有限公司, 江苏 苏州 215101)

摘要 本文聚焦定向钻穿越沙颍河航道工程, 详细阐述了以“安全前置、全程可控”为原则的施工总体流程、前期测量准备、场地分区布置及航道堤防专项保护措施, 分析了航道周边噪声扬尘、地下管网保护、地层软硬交接等施工重难点及对应解决办法, 并构建了以 ISO 9000 为核心的质量体系、依托 HSE 的安全体系与环保措施, 以期为同类定向钻穿越航道工程提供技术参考。

关键词 定向钻穿越; 沙颍河航道; 施工方案

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.016

0 引言

沙颍河是华东重要的内河航道, 定向钻因扰动小、不中断通航成为其穿越工程优选, 但面临噪声扬尘、地下管网隐患、地层软硬交接、泥浆漏失及堤防保护等难题, 现有研究多聚焦单一环节。中铁十二局以“安全前置、全程可控”为原则, 构建全链条技术体系, 通过优化泥浆、立体防护、双维度监测等关键问题, 依托 ISO 9000 与 HSE 体系保障质量安全环保。本文通过阐述定向钻穿沙颍河航道工程施工方案与技术措施, 旨在为同类工程提供参考。

1 定向钻穿沙颍河航道工程施工方案与技术措施

1.1 施工总体流程设计

在定向钻穿越沙颍河航道施工中, 施工总体流程设计以“安全前置、工序衔接、全程可控”为原则, 形成环环相扣的作业链条, 流程图见图 1。该流程的衔接逻辑紧密围绕航道与堤防安全展开, 其中堤防安全监测设施埋设为后续施工提供实时安全数据支撑, 高压旋喷桩截渗墙先行施工可在穿越作业前构建堤防渗屏障, 避免后续钻进与回拖过程中泥浆渗漏引发堤防渗透风险; 导向孔施工则作为整个穿越工程的“基准线”, 其精准度直接决定了分级扩孔的轨迹与管道回拖的顺畅性, 后续每一道工序均以前置工序的合格验收为前提, 确保施工全过程不对沙颍河航道通航安全与堤防稳定造成扰动^[1]。

1.2 前期准备阶段技术措施

前期准备阶段的测量放线与控制工作, 是保障穿越轨迹符合设计要求的关键环节, 需严格遵循“校验先行、精准定位、多方确认”的技术逻辑。测量前需完成 GPS 全球定位仪的校验、施工图纸与交接桩记录

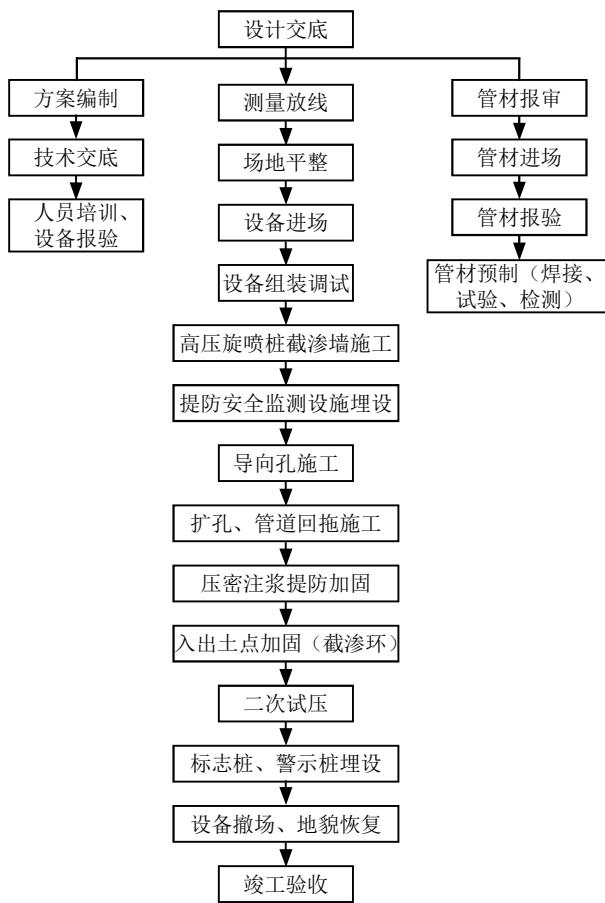


图 1 定向钻穿越施工流程图

的全面梳理, 同时备齐全站仪、木桩、白灰、盘尺等测量器具及防晒、防雨设备; 定位过程中采用全站仪测定穿越轴线及入、出土点位置, 沿轴线设置加密标示桩以保障后续施工定位连续性, 对地下障碍物需单独设置标志桩并注明其名称、埋深与尺寸, 且全程保

护测量控制桩防止移位；交桩环节需现场填写交接桩记录，对接收的控制桩采取护桩措施，放线完成后需邀请监理单位到场复核确认，确保穿越轴线与作业带边界线符合设计要求，为后续施工场地布置与钻进作业奠定精准基础。

1.3 核心施工工序技术方案

施工场地布置需结合沙颍河航道周边环境与施工需求，分区域实现“功能分区明确、安全防护到位、环保要求达标”的设计目标。入土端场地规划为 $60\times 60\text{ m}$ 临时占地，同步设置 $30\times 30\text{ m}$ 泥浆池，场地四周采用 2 m 高双边丝护栏网封闭隔离，内部局部铺设钢板硬化处理，施工机械设备下方与渣池内均铺设防渗布，防止施工污水与泥浆污染土壤；出土端场地为 $40\times 40\text{ m}$ 临时占地，配套 $20\times 20\text{ m}$ 泥浆池，采用彩钢围挡封闭并加装警示灯与反光条，提醒过往车辆减速慢行，回拖场地巧妙利用约 300 m 一般段管道临时征地，避免重复征地与额外地貌恢复工程量。泥浆池专项设计需严格遵循“分层开挖、防护到位、防渗可靠”原则，采用挖掘机分层开挖，基础施工阶段浇筑混凝土基础并安装防护栏，池底与四周铺设防渗透薄膜，边缘设置锚固沟将薄膜固定，防止泥浆渗漏污染地下水与航道水体^[2]。

1.4 航道与堤防保护专项措施

在定向钻穿越沙颍河航道施工中，航道与堤防保护专项措施以“防渗漏、强加固、实时监测”为核心，构建全流程防护体系：泥浆置换系统优化从风险预判、配方适配与工艺管控三方面发力，针对施工中可能出现的冒浆问题制定专项预案——当泥浆压力超过 2 MPa 时立即回撤 $1\sim 2\text{ m}$ 并保持旋转洗孔，出现泥浆渗漏则及时添加堵漏剂封堵地层缝隙，若发生泥浆溢出地层情况则钻设倒流孔引导泥浆回收；置换浆液采用水泥：膨润土：粘土：水玻璃：水 = $1:0.5:1.5:1.5:3$ 的重量比配方，既规避了纯水泥浆流动性差与纯膨润土浆强度不足的缺陷，又通过级配优化提升了管周密实度，工艺上采用双泵双路独立注浆系统实现管道回拖与注浆同步联动，控制注浆压力在 $0.8\sim 1.2\text{ MPa}$ 、充盈系数 $1.2\sim 1.5$ ，每段注浆后维持压力稳压 $3\sim 5$ 分钟，补偿浆液固结收缩以避免渗漏通道形成。堤防防渗处理形成“防渗墙+压密注浆+截渗环”的立体防护结构，高压旋喷防渗墙布设于迎水侧堤脚 1 m 处，墙底伸入管道中心线以下不小于 4 m 、墙顶低于现状堤脚 0.5 m 、顺堤向长 40 m ，采用桩径 0.8 m 的单重管旋喷工艺，水泥用量 185 kg/m 、水灰比 1.0 ；压密注浆在堤防管理范围内沿管道两侧各设 2 排梅花形注浆孔，孔距 2 m 、排距 1 m ，注浆深度伸入管底以下不小于 5 m ，浆液按

水泥：粘土 = $1:3.5$ 配比制备，注浆压力控制在 $0.3\sim 0.5\text{ MPa}$ ；定向钻出、入土坑各设置 3 道 $3\times 3\times 0.3\text{ m}$ 的装配式混凝土截渗环，拼缝处加装膨胀条密封，环外 1 m 范围内采用 10% 水泥土换填加固。堤防安全监测则通过“变形+渗流”双维度监测保障堤防稳定，变形监测在穿越轴线两侧堤顶内外侧、迎水坡与背水坡堤脚布设位移观测点，监测精度达 $\pm 3\text{ mm}$ ，沉降预警值为 $\pm 10\text{ mm}$ ；渗流监测在迎水坡、背水坡各设 1 个测压管监测地下水位，监测频率按施工期每 2 小时 1 次、穿越后 1 周内每天 1 次、 1 周后每周 1 次、稳定后每月 1 次执行，实时掌握堤防状态以规避安全风险^[3]。

2 定向钻穿沙颍河航道工程施工重难点分析及应对措施

2.1 航道周边噪声与扬尘控制

在定向钻穿越沙颍河航道施工中，航道周边噪声与扬尘控制是保障周边居民生活与空气质量的关键难点——施工所用钻机、泥浆泵等设备运行时易产生持续性噪声，若在居民休息时段作业会造成干扰，同时土方开挖、物料堆放与运输过程中易产生扬尘，对航道周边空气环境造成污染。针对此难点，噪声控制方面优先选用静音发电机等低噪声设备，从源头上降低噪声源强度，同时严格调整高噪声工序的作业时段，避开 $22:00\sim 6:00$ 居民休息时间，对临近居民区的施工区域额外设置声屏障，进一步阻隔噪声传播；扬尘管理则聚焦施工全流程，在土方开挖、场地平整等易起尘作业环节，采用洒水车与雾炮机配合的湿法作业模式，实时抑制扬尘扩散，对施工场地内裸露土方全覆盖防尘网，物料运输车辆均加盖篷布，防止运输途中扬尘外泄，确保符合沙颍河航道周边环保要求。

2.2 地下管网排查与保护

地下管网排查与保护是施工前期需重点突破的难点。由于本工程施工区域位于界首市城乡结合部，地下分布有大量通信光电缆、给排水管等既有管线，且部分管线埋设年代久远、资料不全，定向钻施工过程中若误碰极易造成管线损坏，影响周边居民与企业的正常生产生活。为解决此问题，前期探查阶段采用探地雷达对施工区域进行全面扫描，初步确定地下管线的大致走向与埋深，再通过人工探坑的方式对雷达探测结果进行精准验证，明确管线具体位置、规格与权属后，现场标注清晰的标志桩^[4]。

2.3 地层软硬交接

地层软硬交接控制是定向钻钻进过程中的核心技术难点，沙颍河穿越段地层存在明显的粉质黏土与粉砂夹层，两类地层的物理力学性质差异显著，粉质黏

土黏结性较强而粉砂层密实度较低，钻进时钻头受力不均易导致孔内形成台阶，不仅影响后续扩孔效率，还可能增加管道回拖阻力。针对该问题，首先从钻具优化入手，在扩孔钻头前端加装适配扶正器，确保钻头在穿越软硬地层时能均匀切削、稳定钻孔轨迹，同时在扩孔钻头与扶正器之间连接8 m长钻铤长轴，延长钻具系统整体长度以增强稳定性，当扩孔孔径超过750 mm时，在钻头后方加装浮筒，通过计算浮筒尺寸与材质提供适宜浮力，抵消部分钻头重量防止下沉；在工艺调整方面，严格执行分级洗孔制度，小孔径扩孔每完成3级扩孔作业后进行1次洗孔，大孔径扩孔每完成2级扩孔后洗孔1次，若监测发现孔内已形成台阶，则启用专用台阶修复钻具，结合冲击回转钻进技术磨削台阶边缘，恢复钻孔曲线平滑性。

2.4 多变中风化岩石地层泥浆调配

多变中风化岩石地层泥浆调配难点突出体现在中风化岩层破碎程度高、裂隙发育，施工过程中泥浆易沿岩层裂隙漏失，同时岩层破碎产生的岩屑颗粒较大，常规泥浆难以有效携带出孔，易造成孔内岩屑堆积。为应对此问题，泥浆配方采用动态调整策略，在基础配方基础上针对性添加防漏剂，利用防漏剂在岩层裂隙中形成封堵层，减少泥浆漏失量，同时将膨润土用量提高至4%以增强泥浆护壁能力，润滑剂添加量增至0.3%，降低钻具与孔壁的摩擦阻力；泥浆性能控制严格遵循既定标准，确保漏斗粘度维持在45~70 s、泥皮厚度≤1.0 mm、中压失水≤10 mL，施工过程中每2小时采用马氏漏斗、比重计等仪器对泥浆性能进行1次检测，根据检测结果实时调整添加剂用量，保证泥浆始终具备良好的护壁、携砂与润滑性能，满足中风化岩石地层钻进需求^[5]。

3 定向钻穿沙颍河航道工程质量、安全与环保保障体系

3.1 质量保证体系

本工程质量保证体系以ISO 9000标准为核心构建，明确项目经理为质量第一责任人，由质保工程师牵头统筹质量管理工作，机组质量员负责现场实时管控，形成“决策—执行—监督”三级管理架构。控制环节聚焦关键节点，材料验收时严格核查膨润土等核心物资的环保证明，确保符合环保与工程质量要求；工序管理执行“自检→互检→专检”三检制，每道工序需经三级检验合格后方可推进；对管道回拖、试压等关键工序，安排专人全程旁站监督，杜绝质量隐患。检测程序上，导向孔轨迹验收需满足平面偏差≤±1%穿

越长度、深度偏差≤±1.5%穿越长度，扩孔直径需达到管道外径的1.3~1.5倍，确保后续管道回拖顺畅。

3.2 安全生产保障

安全生产保障依托HSE体系展开，遵循“以人为本、安全第一”的方针，建立以项目经理为组长的HSE管理小组，HSE部负责专职监管，各施工机组配备专职安全员，实现安全管理全覆盖。现场措施围绕风险防控落实，临时用电严格执行“一机一闸一保护”制度，避免电气安全事故；钻机、泥浆泵等核心设备每日施工前需完成点检，确认性能完好后方可作业；施工人员按岗位要求佩戴绝缘手套、防毒口罩等防护用品，保障人身安全。应急预案针对施工常见风险制定，导向孔卡钻时立即回撤1~2 m洗孔清理，回拖力超限时启用辅助钻机反拖与滑轮组助力，堤防变形超预警值则暂停作业并采取应力释放措施，快速控制风险。

3.3 环境保护措施

施工产生的废弃泥浆需用专用罐车转运至当地环保部门指定弃渣场处理，严禁直接排入航道水体，避免污染水质；在生态保护方面，施工时间避开鱼类产卵期，严禁破坏作业带外植被，工程完工后及时对临时占地进行地貌恢复，采取复耕或植草等措施，还原区域生态环境，符合沙颍河航道生态保护要求。

4 结束语

定向钻穿越沙颍河航道工程以“安全、质量、环保”为核心目标，设计了全流程施工技术方案（含立体堤防防护、精准测量、合理场地布置），针对性解决了噪声扬尘、复杂地层等重难点问题，并通过完善的质量、安全与环保体系保障施工。工程最终顺利完成管道穿越，确保了沙颍河航道通航与堤防稳定，其技术与管理经验可为同类定向钻穿越内河航道项目提供借鉴。

参考文献：

- [1] 齐利华,邓海,谭庆俭,等.滨海河网城市污水管穿越河涌工程设计关键点[J].中国给水排水,2025,41(10):65-69.
- [2] 李春森.市政工程施工中地下管线的施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(07):121-123.
- [3] 姜宇飞,刘鹏,成磊,等.海对海水平定向钻跨越航道铺设海底管道施工工艺研究[J].石油和化工设备,2024,27(03):105-109.
- [4] 孙建军,倪晓雯.城镇燃气管道定向钻穿越内河航道通航条件影响分析[J].中国水运,2023(23):51-53.
- [5] 焦广宇,陈杨,曹良,等.供水管道水平定向钻穿越航道关键技术研究:以闽江水平定向钻穿越工程为例[J].安全与环境工程,2023,30(01):46-55.

九江港城西港区某码头工程 总平面布置优化设计

郭云山，王立平

(长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430072)

摘要 本文对九江港城西港区某码头工程布置进行优化设计，该码头工程存在周边环境复杂、陆域面积小、陆域功能布置复杂和社会车辆流量大等技术难点。通过采用各项先进设计技术和设计理念，以期为有效地解决码头工程总平面布置中存在的难点提供参考，进而实现铁、公、水及货物交易的无缝对接，优化港口物流园的设计，使码头技术和港口物流系统布置理念得到进一步突破。

关键词 总平面布置；立体交通系统；陆域布置

中图分类号：U656.1

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.017

0 引言

码头的总平面布置方案是决定码头经营生产的关键性因素，如何充分合理地利用土地资源是总平面布置方案的重中之重。本文解决了一系列极具开创性和挑战性的技术难题，可对陆域布置受限较多的码头提供设计思路，通过对周边环境、功能分区、未来发展等多方面因素的综合考虑分析、统筹布局，在满足装卸工艺作业流程要求的同时，提出一个经济合理、交通组织顺畅、管理方便的总平面布置方案^[1-2]。

1 工程概况

九江港城西港区某码头工程已竣工验收完成并投产运行，工程位于长江九江水道右岸，长江下游航道里程约 799.8 km 处，处于规划的九江港城西港区阎家渡作业区内，上距福银高速公路九江长江公路大桥 545 m，下距九江长江大桥 10.3 km，紧临九江市港城大道和九瑞大道，集疏运条件较好。

本工程共布置两个 5000DWT 泊位，上游侧为 1# 件杂泊位、下游侧为 2# 多用途泊位；码头水工结构采用高桩梁板结构型式。码头年吞吐量为 180 万 t，装卸货种为件杂货和集装箱。拟建码头工程段堤防为永安堤，属长江干堤，2 级堤防。

根据《九江港总体规划》，城西港区下设官湖作业区和阎家渡作业区，均为规划新建的作业区。其中阎家渡作业区以承担集装箱、件杂等公用性货物运输为主，同时服务于后方临港产业区的开发，为后方临港工业原材料和产成品运输服务。岸线范围自七房至新开河口，规划港口岸线长 1 250 m。规划建设集装箱

泊位、多用途泊位共 10 个，形成通过能力 1 250 万 t，其中集装箱 90 万 TEU。本工程的建设符合《九江港总体规划》。

1.1 水域布置

水域设计中，相关尺寸根据《河港总体设计规范》(JTS 166-2020)^[3] 取值：

1. 码头平台前沿设计水深按 $D = T+Z+\Delta Z$ 计算。
2. 直立式码头前沿设计高程=设计高水位+超高。
3. 同时考虑防洪要求，引桥梁底标高应高于防洪设计水位。

4. 码头平台泊位长度 $L=2L+3d$ 。
5. 码头前停泊水域宽度取船宽的 2 倍。
6. 回旋水域沿水流方向的长度按船长的 2.5 倍计算，回旋水域垂直水流方向的宽度按船长的 1.5 倍计算。

本工程码头前沿线布置在 -1.00 m 等高线附近，方位角 $-17^\circ \sim 163^\circ$ ，与工程水域等深线和水文主流向基本一致，码头平台长度为 245 m，宽度为 28 m，码头面标高 22.50 m。码头结构采用高桩梁板式结构型式，采用四层系缆，变形缝处采用悬臂结构。码头平台共 34 榼排架，平台排架间距为 7.5 m。桩基采用预制型嵌岩钢管桩和 PHC 管桩组合，每榼排架设 6 根直桩和 1 对叉桩。上部结构包括现浇钢筋砼横梁，预制安装钢筋砼纵梁、预制安装钢筋砼轨道梁、预制安装面板、现浇面板、面层、节点及护轮坎等组成。码头后方新建两座长度分别为 54.14 m、123.32 m，宽度均为 12 m 的引桥，与防汛大堤堤顶道路连接。引桥与码头平台连接处设喇叭口，每榼排架设 3 根桩，桩基采

用钻孔灌注桩，桩基持力层为强风化泥质粉砂岩。引桥及上堤路架空段上部结构均为现浇钢筋砼横梁、预制安装预应力空心板或现浇钢筋砼板，现浇面层、护轮坎等。上堤路实体段通过钢筋混凝土过渡搭板与架空段连接。

目前内河高桩码头上常用的件杂货装卸船设备有门座式起重机、固定吊、轮胎式起重机等。门座式起重机属于周期性作业机械，主要工作机构起升、变幅和旋转可同时作业，门座式起重机可沿轨道行走、作业灵活方便、速度快、通用性好，适用于大型高桩码头的装卸船作业。内河码头的集装箱装卸船设备主要有岸边集装箱起重机和多用途门机两种，岸边集装箱起重机主要机构包括起升机构、小车运行机构、大车运行机构和前大梁俯仰机构等，是大型专业化集装箱码头的首选设备。多用途门机主要机构与门座式起重机相同，通用性更强，适用于综合性码头。结合设备特点，本项目码头平台上共配置了1台40t·30m多用途门座式起重机（轨距10.5m）和3台16t·30m门座式起重机（轨距10.5m）用于件杂货和集装箱的装卸船作业。

1.2 陆域布置

码头陆域布置在长江大堤以内，福银高速九江长江公路大桥下游侧107m起至1037m处，陆域最大宽度约930m，纵深136~412m，占地面积约409亩。规划的九江港铁路专用线横穿港区，陆域后方紧邻正在建设的九江市港城大道。

根据本工程用地具体情况及《江西省长江河道管理条例》的要求，本工程生产区布置在长江大堤岸侧堤角50m范围以外，堆场、仓库均顺水流方向布置，对于码头平台正后方的陆域部分（距堤角50m范围以外）自北向南依次布置有1块集装箱空箱堆场、1块集装箱重箱堆场；码头平台后方上游侧陆域、靠近九江长江公路大桥侧布置2块件杂货堆场和2座件杂仓库，件杂仓库后方布置有2条铁路装卸线及其装卸作业区。码头平台后方下游侧陆域布置1块件杂堆场。堆场周围布置环形道路，陆域设2座上堤路分别与码头1#、2#引桥连接，上堤路面宽度均为12m，坡度为3.29%~4.57%。陆域内主干道宽15~25m，其余道路宽度为9~12m。

集装箱重箱堆场、件杂堆场和铁路线装卸堆场面层采用厚10cm的C50预制砼高强度联锁块，其下依次为5cm厚的中砂垫层、45cm厚的6%水泥稳定碎石基层、20cm厚的级配碎石垫层，垫层下铺设TGSG30-30土工格栅一层。空箱堆场面层采用厚8cm的C50预

制砼高强度联锁块，其下依次为5cm厚的中砂垫层、35cm厚的6%水泥稳定碎石基层、15cm厚的级配碎石垫层，垫层下铺设TGSG30-30土工格栅一层。港区其他场地面层均采用22cm厚的C30混凝土大板，基层采用25cm厚的6%水泥稳定碎石，垫层为15cm厚的级配碎石。港区道路采用沥青混凝土面层结构。面层采用4cm细粒式沥青混凝土+6cm中粒式沥青混凝土+7cm粗粒式沥青混凝土，基层采用40cm厚的6%水泥稳定碎石，垫层为25cm厚的级配碎石，垫层下铺设TGSG30-30土工格栅一层。

本工程陆域在紧邻港城大道处设大门2座。其中，陆域西南角为1#大门，进港道路宽25m，大门处设有两套地磅及配套设施；陆域中部为2#大门，进港道路宽15m。

陆域堆场上布置了集装箱和件杂货的堆取设备。集装箱堆场常用设备有轨道式集装箱龙门起重机、轮胎式集装箱龙门起重机等。轨道式集装箱龙门起重机与轮胎式集装箱龙门起重机相比，优点是堆场利用率高、环保效果好、维护成本低，缺点是机动性差。空箱堆场一般只采用空箱堆高机。件杂货堆场常用设备有龙门起重机、轮胎式起重机。龙门起重机与轮胎式起重机相比维修量小、堆场利用率高，能耗低。结合设备特点，本工程集装箱重箱堆场采用1台40.5t轨道式集装箱龙门起重机进行装卸，可以满足堆4过5装卸要求。空箱堆场采用集装箱空箱堆高机。件杂货堆场采用20t和40t龙门起重机及40t轮胎式起重机进行装卸作业，件杂仓库采用20t、40t，跨度为31m、25.5m桥式起重机和3t、5t的叉车进行装卸作业。

考虑码头作业时会占用部分长江大堤堤顶道路，为保证防汛道路随时畅通，沿大堤内侧（港区围墙外侧）顺堤脚修建一条长约513m、宽7m的实体防汛连接路，分别与码头1#引桥上游侧、2#引桥下游侧堤顶道路衔接，道路纵坡度5.51%~7.33%。防汛连接路与码头陆域2座架空上堤桥之间的净空高度不小于4.5m。

2 陆域布置特点

2.1 可利用岸线对应陆域面积过小

根据《河港总体设计规范》（JTS 166—2020）中堆场面积公式计算得到，集装箱重箱堆场需要的箱位数为323TEU，集装箱空箱堆场需要的箱位数为167TEU，件杂堆场需要的面积为3.43万m²，件杂仓库需要的面积为1.73万m²，同时还需考虑铁水联运，铁路专用线必须预留用地。本工程占用岸线245m，相对应陆域面积仅约75亩（约5万m²），陆域面积不能满足工艺计

算的需求。因此，总平面布置中需结合周边环境、功能分区，考虑多方面因素后进行统筹布局。

本工程为大桥下游第 1、第 2 个泊位，根据《河港总体设计规范》(JTS 166—2020)及港口规划，码头与大桥之间岸线不能利用为港口岸线建设码头，对应陆域弃之不用或挪为它用甚为可惜，无法发挥出此处地块的最大用处。通过合理论证，并结合工程实际需要，在预留 100 m 安全距离后，利用码头与大桥之间非港口岸线对应陆域 251.55 亩，用于建设件杂堆场、件杂仓库和规划铁路装卸区，总平面布置不仅解决了相邻地块不好使用的问题，同时有效解决了工程可利用岸线对应陆域面积太小的问题，充分发挥了港口岸线利用率。

2.2 实现铁、公、水及货物交易无缝对接

铁水联运模式具有高效、经济的特点，结合水运价格低和铁路长距离运输优势等特点，提升了货物交易的连贯性^[4-5]。本工程考虑铁路专用线进入港区陆域，且九江物流大市场紧邻码头陆域，本码头工程陆域功能布置复杂，陆域位于九江市规划的港城大道北侧与防汛大堤之间，规划布置有九江港城西港区专用铁路支线，港城大道南侧建设有九江物流大市场（该市场为长江下游重要的商贸物流中心）。

在设计中要充分考虑不同货种对铁水联运的要求，并结合九江物流大市场既有功能和集散能力，码头总平面布置时进行了合理创新。对本码头工程陆域布置进行了合理分区，预留铁路装卸堆场。根据规划铁路线与码头陆域的位置关系，堆场划分为两大块。其中，规划铁路线北侧、与防汛大堤之间为永久堆场，分别设置为集装箱重箱、空箱及件杂货堆场。该区域距离码头面最近，流动机械运输距离最短，这样实现了集装箱堆存和装卸效率的最大；按照适合列车装卸的原则，将铁路线以南的区域作为远期的铁路装卸堆场，有利于未来陆域堆存和装卸功能的扩展，近期作为件杂货堆场，实现了功能的远近结合。

考虑到九江物流大市场的功能和布局，规划铁路线以南、与港城大道之间，除局部办公区外，全部布置为仓储物流，采用前店后库的布置形式，与对面的九江物流大市场相呼应、融为一体。由此可见，本工程通过在总平面布置上合理创新，改善了集疏运系统，实现了铁、公、水、贸无缝衔接，提高了物流速度和堆场利用率。本工程推动了多式联运市场的繁荣，优化了运输资源的配置，为码头吸引货流，进一步提升了码头的服务质量，加强了码头的竞争力。

2.3 建立立体交通系统

本工程社会交通车辆流量大，横穿港内陆域，影响码头运营安全和运输效率。本工程陆域位于九江市规划的港城大道与防汛大堤之间，固定引桥与长江大堤平交，码头区域大堤是九江市区与上游永安镇之间的主要交通要道，许多社会车辆从长江大堤穿过，严重影响港内交通流。如果不将长江大堤上的社会车辆进行错道分流，社会车辆通行必将影响港内交通车辆通行的安全和运输效率。为确保码头水与陆域间物流顺畅，在长江大堤堤内坡脚处设计了一条连接道路与港内道路立交，连接道路上穿进港道路，使社会车辆与港内车辆有效分流，互不干扰，有效将社会车辆与港内交通进行分流，确保了港内运输安全，提高了运输效率。该方案与进港道路高架跨堤方案相比，大为节省了工程造价，提高了陆域场地利用率，降低了码头物流成本。

3 结论

1. 本工程的建设和运行产生了巨大的经济效益和社会效益。该码头工程凭借其高效率的物流运输系统，成为九江市乃至长江中下游重要的物流集散地，助力长江真正成为名副其实的“黄金水道”，充分发挥了长江航运的巨大效益。

2. 本工程陆域总平面布置方案充分考虑周边环境因素，利用大桥旁富裕用地解决了陆域面积小的问题，建立立体交通系统有效地实现了社会车辆与港内车辆的分流，布置过程中统筹规划、合理布局，实现铁、公、水及货物交易无缝对接。

3. 本工程在技术上达到了世界领先水平，使码头技术和港口物流系统布置理念取得了突破性的进展，优化了港口物流园的设计理念，研究成果在港口物流园设计中有广阔的应用、推广价值。

参考文献：

- [1] 张笑笑, 吕淑杰. 海盐泰山某企业内河码头总平面布置研究 [J]. 中国水运, 2023(09):54-57.
- [2] 邹红霞, 宏宝勇, 李华. 三亚南山港公共科考码头总平面布置 [J]. 水运工程, 2024(08):81-86, 109.
- [3] 交通运输部. 河港总体设计规范 (JTS 166—2020)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [4] 麦宇雄, 刘洋, 梁浩. 自动化集装箱码头平面与工艺总体布局现状与发展趋势 [J]. 水运工程, 2022(10):1-7.
- [5] 全裕龙, 陈晨. 常德某机制砂专用码头总平面布置方案研究 [J]. 珠江水运, 2023(12):47-49.

南昌北二绕高速公路南新高架桥设计方案关键技术研究

欧阳坚，黄武浩

(江西省交通设计研究院有限责任公司，江西 南昌 330002)

摘要 由于高速公路路线长，对社会各方面的影响大，高速公路桥梁方案设计时必须考虑投资造价、用地、施工、材料、创新、绿色环保、通航等这些因素的影响。本文以南昌北二绕高速南新高架桥为研究对象，对其方案设计关键技术进行深入研究。首先分析了南新高架桥的工程背景和设计理念、设计要求；然后介绍了方案比选、方案设计、结构设计和施工设计等方面的内容；最后通过综合分析，选择了经济合理、技术可行的方案，以期为类似工程提供有益参考。

关键词 南新高架桥；桥型设计；施工设计；方案比选

中图分类号：U448.28

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.018

0 引言

随着我国高速公路网络的持续加密与延伸，线路不可避免地需要穿越山川、河谷、城镇及生态保护区等复杂地理单元。在此背景下，高架桥以其能最大限度节约土地资源、减少对既有交通及环境分割、实现线路顺直等突出优势，已成为山区高速公路和都市圈高速公路的关键工程形式。然而，高架桥的建设面临着地形地质条件复杂、抗震与耐久性要求高、施工对周边环境影响大等一系列技术挑战。传统设计方案在应对特殊工况，如高烈度地震区、跨越高陡边坡或软土地基时，往往存在结构适应性不足、全寿命周期经济性不佳等问题。因此，对高架桥设计方案中的关键技术进行系统性研究，具有重要的理论意义与工程价值。本文针对桥梁结构选型与优化、抗震减震技术、高墩稳定性、预制拼装施工工艺以及全生命周期性能保障等核心环节展开深入探讨，以形成一套安全、经济、环保且高效的高速公路高架桥一体化设计解决方案，为我国同类工程建设提供有益参考。

1 工程概况

南昌北二绕高速公路是南昌市“两环十二射”高速公路网规划中二环组成部分。路线呈东西走向，起于安义县万埠镇的西二环高速，终于福银高速南新互通，路线全长约 52.2 km。北二绕高速公路采用双向六车道标准建设，路基宽度为 33.5 m，设计速度为 120 km/m，汽车设计荷载为公路-I 级。

北二绕高速终点 K46 ~ K50 路段长 4 km，设置南

新高架桥，处于赣抚平原尾闾农田区域，路线布设无法避免侵占农田。考虑沿线设计水位及交叉省道、县道因素，路线填土高度 6 ~ 9 m，需进行大量借土填筑。为节约用地、少占农田、降低造价，对该路段进行路基、挡土墙和桥梁等不同方案比选。

2 北二绕高速公路设计理念

基于公路设计的综合优化理念，需统筹以下核心原则：

一是投资造价：本项目建设资金有限，应尽可能降低工程造价。从工程建设的全过程，反复推敲施工的各个细节，精心设计方案、降低工程造价，达到可持续发展的要求。

二是环保节能：以创新的思维，积极应用绿色低碳、节能环保、工业化生产的新技术，加快工程建设的进程。

三是节约用地：国家基本农田数量有限，应尽可能降低路基填土高度，集约利用土地资源，减少工程占地。

四是功能安全：安全、耐久、适用、环保、经济和美观是桥梁设计的顺序原则^[1]。

3 方案比选

综合考虑工程造价、节约用地、技术创新和取土困难等多个因素，从路基、挡土墙和桥梁不同角度，选取以下几个方案进行比选，具体如下。

3.1 北二绕高速路基方案

一是常规路基方案。按常规路基进行填筑，降低工程造价。该段路基填高在 6.2 ~ 9.1 m 之间，除在跨越小河沟、被交机耕道处设置盖板通道，在跨逞性省道、

县道处设置 25 m 小箱梁分离立交桥外，其余均按采用常规路基进行填筑。

方案优点：此方案经测算，建安造价为 1 882 元 /m²，具有工程造价最省、施工方便、路基稳定美观、施工管养方便、耐久性好的特点。

方案缺点：此方案占用基本农田最多、用地面积最大，需要大量借土，且借土运距较远、公路两侧居民来往不方便。

二是设置挡土墙方案。分别采用设置路堤挡土墙或路肩挡土墙的方案，兼顾路基填土与挡土墙功能，以降低造价和节约用地^[2]。（1）设置路堤挡土墙。该段路基填高在 6.2 ~ 9.1 m 之间，设置高度 4 ~ 6 m 的路堤挡土墙，部分减少路基填筑土石方及边坡放坡用地，节约工程造价。（2）设置路肩挡土墙。该段路基填高在 6.2 ~ 9.1 m 之间，设置高度 6.2 ~ 9.1 m 的路肩挡土墙，最大限度减少路基填筑土石方及边坡放坡用地。（3）挡土墙方案的优缺点。方案优点：经测算，路堤挡土墙方案建安造价为 2 374 元 /m²，路肩挡土墙方案建安造价为 2 687 元 /m²。挡土墙方案具有造价较低、施工方便、路基稳定、施工管养方便、耐久性好的特点。方案缺点：此方案占用基本农田较多、用地面积较大，需要借土，且借土运距较远。

3.2 北二绕高速桥梁方案

一是设计要点。（1）桥位选址：桥位应尽量选择在地理条件优越、交通流量较大的区域，以便充分发挥桥梁的交通效益^[3]。（2）桥型方案：根据桥位地形、交通流量、施工条件等因素，选择经济合理、技术可行的桥型方案。（3）结构设计：结构应具有足够的承载能力、刚度和稳定性，满足现行规范的要求。（4）施工设计：在施工过程中应保证工程质量、安全、进度和投资控制等方面的要求。

二是比选要点。（1）比选内容。在桥梁方案比选时，一般选择结构性能、工程造价、保通性能、预制条件、运输条件、施工条件（难易性、安全、工期）、管养、环保和景观等作为比选的方向和角度。（2）比选方案：第一，在混凝土桥梁中，相同跨径下，小箱梁经济指标一般较其他砼结构低，而钢结构桥梁指标比砼结构高约 1/6 ~ 1/2。第二，在 20 m 跨径时，小箱梁和 T 梁较经济。其中 T 梁梁高较矮，无须内模，可减少施工工作量，有利于保证施工质量，且吊装重量小，组装效率高，故 20 m 跨径宜首选 T 梁。第三，在 30、40 m 跨径时，T 梁每平方米造价比小箱梁高约 1/10 ~ 1/5。当现场湿接缝工程量较大时，湿接缝的施工影响施工质量，此时小箱梁宜作为首选结构型式。

第四，在 50 m 跨径时，混凝土桥梁已不具备优势，上部结构宜首选少主梁的钢板组合梁方案，可避免较多的支座施工和养护工作量。第五，在 60 m 跨径时，钢箱梁宜作为首选，槽钢组合梁次之。中小跨径的钢槽组合梁一般多采用分离式箱体，整体景观效果较差。

结合本项目工程填土不高的特点，选取 25 m 小箱梁、6 m 桩板桥和 12 m π 形梁三个方案进行比选。

三是 25 m 小箱梁方案。25 m 小箱梁方案采用上部构造预制装配化施工，具有技术成熟、安全适用、简洁美观等优势。

上部结构型式为 25 m 跨桥面连续简支小箱梁，C50 砼，梁高 1.4 m，横向布设 10 片梁。下部结构采用单排双柱式桥墩，墩柱直径 1.4 m，桩基直径 1.6 m。

方案优点：经测算，25 m 小箱梁方案建安造价为 3 974 元 /m²。此方案占地面积最少、结构简洁流畅美观、安全适用、技术成熟、高速公路两侧基本无分隔、养护方便、耐久性好、桥下改路少，对环境影响小。

方案缺点：此方案造价稍高、运输起吊重量稍大，但运输片数少、下部结构施工速度稍慢。

四是 6 m 桩板桥方案。6 m 桩板桥方案采用节段顺桥向划分，上下部结构均采用预制装配化施工，具有承载力强、施工简便快捷、能适应不同的地质情况和土质、良好的耐久性和环保性等优点^[4]。

上部结构型式为 6 m 桩板桥，采用 C40 现浇钢筋混凝土板，跨中板厚 50 cm，桩顶处纵向两侧各 0.8 m 范围内板厚 80 cm，并设有过渡腋脚。下部结构采用直径 50 cm 的钢管桩。

方案优点：经测算，桩板桥方案建安造价为 2 738 元 /m²。此方案占地面积最少、可代替涵洞通道功能、全预制装配下部结构施工速度较快。

方案缺点：此方案跨径小，桥下墩柱多，梁板连接构件数量多、美观性较差、施工工艺要求高、后期养护困难、受沉降影响大，耐久性稍差、桥下改路工程多，对曲线段适应性较差^[5]。

五是 12 m π 形梁方案。12 m π 形梁方案采用节段顺桥向划分，上下部结构均采用预制装配化施工，具有极高的抗压强度、抗拉强度和抗冲击性能，结构稳定性好，采用便利的连接方式大大提升了结构连接的稳定性，缩短施工周期，预制构件的工厂化生产可以减少现场施工时间和劳动力需求，从而降低整体建设成本等优势。

上部结构型式为 12 m π 形梁，C50 砼，采用先张法预应力技术，梁高 80 cm。下部结构采用双柱式盖梁柱式墩，柱径 1.0 m；采用钻孔灌注桩基础，桩径 1.2 m。

方案优点：经测算， $12\text{ m}\pi$ 形梁方案建安造价为 $2 925 \text{ 元/m}^2$ 。此方案占地面积最少、可代替涵洞通道功能、全预制装配下部结构施工速度较快。

方案缺点：此方案跨径小，桥下墩柱及梁片数稍多，梁板连接构件数量多、美观性稍差、梁片数稍多、桩基需要打入设备、桥下改路工程稍多、对施工便道影响稍大、跨越被交路能力稍差。

3.3 北二绕高速方案比选

从上述路基、挡土墙和桥梁方案中可以发现以下几个比选方案各自的特点，分别为：（1）常规路基方案：造价最低，但占用农田最多。（2）路堤挡土墙方案：造价稍低，但占用农田第二多。（3）路肩挡土墙方案：造价较低，但占用农田第三多。（4） 25 m 小箱梁方案：造价最高，但占用农田最少，桥下使用功能、美观性最好，桥下改路工程量少。（5） 6 m 桩板桥方案：造价稍高，但占用农田最少，桥下使用功能、美观性较差，桥下改路工程量较多。（6） $12\text{ m}\pi$ 形梁方案：造价较高，但占用农田最少，桥下使用功能、美观性稍差，桥下改路工程量稍多。

得出方案设计的一般规律为：采用路基方案是最经济的方案，随着节地作用的增加，工程造价随之上升；采用桥梁方案是最节地的方案，随着跨径的增加，工程造价随之上升；采用大跨桥梁方案的使用功能比采用小跨结构好；全预制装配式结构更适合于小跨径、标准横坡的路段，在曲线段、超高渐变段使用稍复杂^[6]。

设计的关注点是经济、节地、创新节能环保，还是使用功能，这些因素的权重取值决定了方案的选择。

3.4 比选结论

根据造价、节地、创新和功能四个因素，以上几个方案的比选结论如下：

从造价上看，路基方案较优；从节地上看，桥梁方案较优；从创新上看，采用全预制装配施工的 π 形梁、桩板桥较好；从功能上看， 25 m 跨结构跨越被交路的方案较 $12\text{ m}\pi$ 形梁、 6 m 桩板桥更好。

因此，从经济角度看，建议选择常规路基填土方案；从全预制装配创新角度看，建议选择双 T 梁方案；单从桥梁安全适用美观、技术成熟、结构可靠、简洁流畅看，建议选择 25 m 小箱梁方案。最终方案应由综合各方面的因素考虑确定。

4 南新高架桥桥型设计

通过以上比较分析，考虑 S101 省道的升级改造及跨越大型重要水渠的需求，采用 25 m 小箱梁跨越，其余均采用 $12\text{ m}\pi$ 形梁方案，以满足使用功能和降低造价的目的。最终确定南新高架桥桥梁跨径组合为

$(31 \times 12\text{ m} + 2 \times 25\text{ m} + 53 \times 12\text{ m} + 3 \times 25\text{ m} + 152 \times 12\text{ m} + 3 \times 25\text{ m} + 81 \times 12\text{ m})$ ，桥梁全长 $4 006.5\text{ m}$ 。

跨越省道、县道处，采用 25 m 预应力砼简支小箱梁，2 孔或 3 孔一联，下部结构采用双柱式盖梁柱式墩，柱径 1.4 m ，基础采用钻孔灌注桩基础，桩径 1.6 m 。

其他跨越农田处，采用 12 m 全预制装配式 π 形梁结构，7~9 孔一联。梁高 0.8 m ，肋宽 0.3 m ，顶板厚 0.25 m ，单个 π 形梁宽 2.9 m 。下部结构采用双柱式盖梁柱式墩，柱径 1.0 m ，基础采用钻孔灌注桩基础，桩径 1.2 m 。

5 南新高架桥施工设计

5.1 25 m 小箱梁施工

25 m 小箱梁采用预应力砼桥面连续简支结构，下部结构采用柱式墩，上部结构采用预制装配施工，取消先简支后连续结构施工中的负弯矩钢束，简化施工流程，从而缩短建设工期。

5.2 $12\text{ m}\pi$ 形梁施工

$12\text{ m}\pi$ 形梁采用先张法预应力砼简支结构，下部结构采用柱式墩，上部结构采用工厂预制 π 形梁方案。全预制装配化施工，尤其是先张法施工工艺消除了后张法施工因预应力管道压浆普遍不实而导致的耐久性差的弊端，保障了施工质量和进度的要求。

6 结束语

本文针对南昌北二绕高速南新高架桥设计方案关键技术进行了研究，通过对设计理念、设计要点、方案比选、设计方案、结构设计和施工组织设计等方面分析，最终确定了经济合理、技术可行的 25 m 预制小箱梁 + 12 m 全预制装配式 π 形梁方案。本文的成果希望可为类似工程提供有益的参考。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2015)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [2] 张帆.改扩建工程互通匝道跨线桥施工交通组织设计研究[J].科学技术创新,2024(19):151-154.
- [3] 孟洋.不同墩柱形式的城市高架桥抗震性能研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):75-80,18.
- [4] 李大绪.赣州市文明大道快速路工程总体方案设计[J].城市道桥与防洪,2021(12):4-7.
- [5] 同[3].
- [6] 范忠圆.公路跨线桥中央分隔带内桥墩设计[J].交通世界,2023(27):91-93.

“桩—墙—拱”协同体系在花岗岩残积土偏压隧道洞口施工中的应用研究

马铭骏

(中铁六局集团有限公司, 北京 100089)

摘要 传统“套拱+管棚”支护体系在花岗岩残积土偏压隧道洞口施工中面临拱脚应力集中与雨季效能低下等结构性瓶颈。本文以深圳侨城东路北延通道 1# 隧道洞口工程为实证, 提出并系统研究了一种创新的“桩基承台—挡墙—护拱”协同承载体系, 旨在构建一套涵盖“协同设计理论、动态施工控制、信息化管理”的完整技术范式。通过引入基于实时反馈的桩基动态优化模型, 在保障结构安全(抗倾覆安全系数 ≥ 1.8)的同时实现降本增效; 通过集成 BIM 技术与自动化监测, 构建数据驱动的风险预警与决策支持系统, 为相关人员提供有益参考。

关键词 协同体系; 花岗岩残积土; 偏压隧道; 洞口施工

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.019

0 引言

深圳侨城东路北延通道 1# 隧道洞口工程处于典型的偏压地形, 且紧邻市政绿道, 最近处不足 5 m, 对沉降控制与结构稳定提出了极高要求。传统方案经数值模拟验证已不适用, 亟需技术突破。然而, 当前业界对于此类问题的研究多停留于具体技术措施的个案应用, 缺乏从“体系协同机理”到“全过程协同管控”的系统性方法论构建^[1]。本文基于该工程实践, 不仅旨在验证“桩—墙—拱”协同体系的技术可行性, 更致力于构建并阐述一套适用于该类工程的“理论分析—技术实现—管理支撑”一体化解决方案, 以期为行业提供一套可复制、可推广的技术管理范式。

1 “桩—墙—拱”协同体系原理与关键技术范式

为从根本上克服传统支护方案的固有弊端, 本文创新性地提出了“桩—墙—拱”协同承载体系, 并在此基础上形成了一整套与之紧密配套、逻辑严谨的关键技术范式。该体系的核心设计思想在于: 通过科学构建“桩基承台—挡墙—护拱”三者刚性连接所形成的三级荷载传递路径, 将传统方案中难以处理的、危害巨大的偏压弯矩, 高效地转化为一系列可以被明确识别、精确计算并可靠承担的轴力与剪力, 最终实现偏压荷载在空间维度上的系统性分散与安全转移。

1.1 协同体系工作原理与荷载传递模型

桩基承台作为“深基础”, 其主要功能是将部分巨大的偏压荷载, 特别是倾覆力矩, 通过桩体传递至

深部的稳定岩层或土体中, 从根本上提供抗倾覆稳定性, 如同为大坝打下深嵌于基岩的齿墙^[2]。

钢筋混凝土挡墙作为“刚性支挡”, 其作用是直接、主动地抵抗边坡的主动土压力, 并将一部分水平荷载通过其与桩基的刚性连接, 有效地传递至桩基, 共同工作, 形成了地面以上的刚性抵抗体系^[3]。

型钢护拱形成洞口的“环形支撑”, 其在隧道洞口开挖面前方形成一道强有力的环形支撑, 为开挖面提供即时的、连续的支护, 防止围岩松弛, 并与前方的桩基、挡墙通过预埋件刚性连接, 形成一个完整的空间协同受力^[4]。

三者并非简单的叠加, 而是通过精心的设计与施工, 共同构成了一个“深基锚固—刚挡支顶—环撑闭合”的立体化、高次超静定承载模型。该模型的优越性在于其荷载传递路径明确、力流顺畅, 各部分之间协同效应显著, 实现了“1+1+1>3”的结构效能。

1.2 基于动态反馈的桩基承台优化模型

基于动态反馈的桩基承台优化模型如下:

$$K = \frac{G_c \cdot x_c + G_w \cdot x_w + E_p \cdot h_p + R_B \cdot L_{桩} + T \cdot h_T \cdot \sin\theta}{E_a \cdot d}$$

分子 Σ (抗倾覆力矩):

$G_c \cdot x_c$: 护拱自重 G_c 及其力臂 x_c 产生的稳定力矩。

$G_w \cdot x_w$: 挡墙自重 G_w 及其力臂 x_w 产生的稳定力矩。

$E_p \cdot h_p$: 被动土压力 E_p 及其作用高度(力臂) h_p 产生的稳定力矩。

$R_B \cdot L_{桩}$: 桩基抗压力 R_B 及其力臂 $L_{桩}$ 产生的稳定力矩。

$T \cdot h_T \cdot \sin\theta$: 锁脚钢管锚固力 T 的竖向分力 $T \cdot \sin\theta$ 及其力臂 h_T 产生的稳定力矩。

分母 Σ (倾覆力矩):

$E_a \cdot d$: 主动土压力 E_a 是导致结构倾覆的主要荷载, d 是其力臂。

在 RK1+190 断面施工前, 抗倾覆验算显示原设计桩群安全储备与经济性不匹配。本研究据此提出了“基于实时地质反馈的桩基动态优化模型”。

该模型的核心是: 将施工勘察与监测数据作为动态输入变量, 对原设计进行实时、优化的闭环决策。经与设计方协同, 将桩径由 $\Phi 0.8$ m 增大至 $\Phi 1$ m 并优化其平面布局。实践验证, 此调整使结构抗倾覆安全系数从 1.5 提升至 1.82 以上, 同时在保证安全的前提下总体桩数由 8 根减少至 46 根, 减少 44%。此模型的应用, 标志着从“按图施工”到“设计—施工一体化优化”的范式转变。

1.3 大体积挡墙综合控裂标准工艺

为严格控制挡墙裂缝, 本研究制定并形成了一套标准化的综合控裂工艺。

1. 材料级配优化: 从源头控制入手, 优选低热或中热硅酸盐水泥, 并通过大量的室内试配, 确定了掺加优质 I 级粉煤灰 (掺量 20% ~ 25%) 及高效减水剂的高性能混凝土基准配合比, 显著降低了胶凝材料的水化热总量与放热速率。

2. 过程参数控制: 确立了“分层厚度 ≤ 3.5 m、内外温差 ≤ 25 °C”为核心的关键控制参数。通过预埋测温系统与人工调控冷却水流量的精细化操作, 并根据实时绘制的温度—时间曲线, 由专业人员精细调节循环冷却水管的流量与流速, 确保了大体积混凝土内部温升与降温过程始终处于受控状态, 从而成功杜绝了有害温度裂缝的产生, 实现了挡墙结构“无裂”的质量最高目标。

1.4 锁脚钢管精准施工与核心承力机制

在本协同体系中, 本研究将锁脚钢管从传统的“辅助稳定构件”提升为与体系协同工作至关重要的“核心承力构件”进行施工控制, 并通过实践明确了其最佳外插角控制区间为 $5^\circ \sim 8^\circ$ 。这一角度范围是基于力学分析与施工可行性综合平衡的结果, 既能最有效地将荷载传递至深部稳定岩土, 又便于机械进行施作, 其精准施工主要体现在两个环节:

1. 孔位三维高精度控制: 采用徕卡 TS60 等高精度

全站仪进行空间三维坐标的精准放样, 确保每根锁脚钢管的设计平面位置、高程及倾角在钻孔前就已得到精确标定。

2. 注浆体高完整性保障: 钻孔完成后, 严格执行先清孔, 后安装钢管, 再进行压力注浆的工艺流程。注浆压力根据围岩条件进行动态调整, 确保水泥浆液不仅能充满钢管内腔, 更能充分渗透并填充钢管与围岩之间的所有间隙, 最终形成一个“钢管—水泥浆—围岩”三位一体的高强度复合承载体。

通过上述一套精细化的施工工艺, 本项目所有锁脚钢管的实际安装倾角误差被严格控制在 $\pm 3^\circ$ 以内, 远优于传统 $\pm 8^\circ$ 的施工水平。最终挡墙水平位移被成功控制在 8.3 mm 以内的卓越成果, 从侧面强有力地证明了该构件在“桩—墙—拱”协同体系中确实发挥了预设的核心承力作用。

2 基于信息化的施工协同管控范式

本项目成功的关键在于构建并实践了一套“数据驱动的隧道洞口施工协同管控范式”, 实现了管理模式的现代化升级。

2.1 多源信息集成与智能预警管理

本研究搭建了项目级信息管理平台, 将三维 BIM 模型作为视觉底盘, 整合了地质模型、实时监测数据与施工进度信息。平台设定了基于数据的自动预警机制 (如位移速率连续超 1.2 mm/d 或挡墙倾角大于 0.5°), 实现了风险的即时感知与快速响应。这改变了传统依赖人工、经验判断的滞后管理模式, 转向了基于数据的、可追溯的科学决策。

2.2 典型施工问题的快速响应与动态处治

在 RK1+195 等断面, 针对全风化岩遇水易软化、机械成孔风险高的问题, 基于信息平台对地质条件的精准判断, 本研究依据预案库启动了动态处治程序, 将机械成孔工艺变更为人工挖孔桩。该方案能实时观察孔壁状况, 在干作业条件下彻底清底, 确保了摩擦桩的桩身质量与承载力。此案例是该管控范式下“主动预控、快速响应”能力的集中体现。

3 项目效益分析与模式推广价值

3.1 综合效益量化分析

为科学客观地评估“桩—墙—拱”协同体系的应用价值, 本研究选取了深圳地区另一个地质条件与工程规模相近、但采用传统“套拱 + 管棚”方案的隧道洞口工程作为对标项目, 进行了全面的综合效益对比分析, 其结果如表 1 所示。

3.2 关键工艺参数总结

基于本项目成功的工程实践与系统性的数据回溯分析,总结提炼出以下适用于“桩—墙—拱”协同体系的关键工艺控制参数体系。该体系不仅对本项目后续施工具有指导意义,更对行业内同类工程的标准化、精细化施工具有重要的参考价值(见表2)。

表 1 效益对比表

对比维度	指标	传统方案	本方案	改善效果
经济效益	支护结构成本(万元)	285	218	成本降低 23.5%
工期效益	关键线路工期	原计划	提前 29 天	工期大幅缩短
质量效益	运维返修率(次/半年)	0.6	0	质量显著提升
安全效益	挡墙水平位移(mm)	> 12(规范限值)	8.3	远低于规范要求

表 2 关键工艺参数表

关键工序	核心控制参数	控制目标	适用条件 / 备注
锁脚钢管安装	外插角 5° ~ 8°	有效传递荷载, 安装精度	V 级围岩, 偏压角 > 25°
大体积挡墙浇筑	分层厚度 ≤ 3.5 m 混凝土最高温升 ≤ 28 °C	控制温度裂缝	C35 及以上混凝土 通过智能温控系统实现
管棚施工	定位误差 ≤ 10 mm	保障超前支护效果	采用 BIM 放样 + 全站仪

偏压弯矩,高效地分解并转化为一系列易于被结构体系承担的轴向压力与剪切力。这一结构模式的创新,从根本上破解了传统“套拱+管棚”方案在拱脚处产生应力集中而导致结构破坏的长期性技术难题,为国内外同类复杂地质与环境条件下的隧道洞口设计提供了全新的、可靠的结构选型理论与重要实践依据^[5]。

2. 形成了一套基于动态反馈的关键技术参数集与优化方法:研究形成了可复制推广的关键技术群。特别是“基于实时地质反馈的桩基动态优化模型”,以及所总结的锁脚钢管外插角、大体积混凝土分层浇筑等关键工艺参数,定义了新体系下保障施工安全与质量的临界控制边界,对工法编制与规范细化具有直接参考价值^[6]。

3. 构建并实践了一个数据驱动的隧道洞口施工协同管理范式:本研究将 BIM、监测数据与施工管理深度融合,构建了“多源信息融合的风险预警与决策支持系统”。该范式将项目管理从依赖个人经验的“被动应对”,转变为基于平台数据的、可追溯的“主动预控”和“科学决策”,代表了现代化隧道施工管理的发展方向。

4. 本研究成果验证了通过体系创新与管理赋能实

4 结论

1. 提出并成功验证了一种针对显著偏压荷载的隧道洞口结构协同设计新模式:本研究通过理论与实践相结合,充分证实了“桩—墙—拱”协同体系通过其巧妙的刚性连接与明确的三级传力路径设计,其核心力学机理在于将传统方案中危害巨大的、难以处理的

现综合性工程突破的可行路径,为行业应对类似复杂地质条件下的隧道工程建设提供了从理论、技术到管理的一整套系统性解决方案,具备广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘小兵,张宇.桩式复合管棚套拱在偏压隧道洞口滑移治理中的应用[J].铁道标准设计,2025,69(02):132-137.
- [2] 王明,李华.桩拱一体化结构在浅埋偏压隧道洞口坍塌防治中的实践[J].公路交通技术,2021,37(05):89-94.
- [3] 朱合华,李晓军.从 BIM 到智慧隧道—隧道工程信息化技术发展展望[J].隧道建设,2021,41(01):1-10.
- [4] 毕志刚.闽南山区浅埋偏压大断面隧道洞口塌方机理与处治措施[J].中原工学院学报,2022,33(03):33-40.
- [5] 李冬生,潘元贵,郑余朝.全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与力学特性研究[J].水文地质工程地质,2025,52(04):214-227.
- [6] 程川芸.软弱围岩浅埋偏压隧道洞口施工工法研究[J].城镇建设,2023(16):166-168.

新能源消纳关键因素分析及解决措施研究

陈笑非

(四川能投巴中燃气发电有限公司, 四川 巴中 636700)

摘要 消纳新能源、构建清洁低碳能源体系、推动“双碳”目标实现, 是“十四五”期间新能源规模化发展的核心任务与关键指标, 也是优化产业布局、实现高质量规模化发展的必要条件。当前, 中国新能源装机容量持续快速攀升, 但消纳能力与装机量增速存在显著不匹配, 面临结构性、技术和政策性等多重障碍。本文围绕新能源消纳问题展开研究: 首先系统阐述其内涵、现存问题及战略意义; 其次深入剖析电源结构、电网架构、调节能力、市场机制等关键影响因素; 最后从电源侧优化、电网侧增强、市场侧完善三个维度提出改善路径, 以期为提升新能源消纳效率、加速能源转型提供实践参考。

关键词 新能源消纳; 电源协同; 电网支撑; 调节能力; 市场机制

中图分类号: TK01; TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.020

0 引言

新能源(主要为风电和光伏发电)作为清洁的、可再生的绿色能源, 已成为替代煤炭石油天然气等一次能源、调整优化能源结构的主体与主力。我国新能源装机量连续数年在世界排名领先, 新能源替代传统能源的比重也不断提升, 但同时也带来新能源消纳的行业难题。少数地区、部分时段因弃风、弃光带来了“清洁电力”资源的极大浪费, 更有新能源项目收益的缩水乃至损毁, 从根本上挫伤并迟滞了新能源产业发展者的信心。新能源消纳不仅是关系我国能源安全与生态环境的重要课题, 更是关系经济高质量发展的主要因素。因此, 围绕消纳瓶颈开展系统性研究并提出针对性解决方案, 对破解产业发展难题、构建安全高效的能源体系具有重要的现实意义。

1 新能源消纳的基础认知与发展态势

1.1 新能源消纳的核心内涵

新能源消纳本质是通过技术、机制与资源的协同配置, 将风电、光伏等新能源发电高效接入电力系统, 经发电侧、电网侧、用电侧的联动配合, 实现电能安全稳定输送至用户端, 避免出现发电并网难、并网后利用难的弃电问题, 最终达成新能源电力“发得出、送得走、用得上、用得好”的目标, 同时保障电力系统供需平衡与运行安全, 兼顾清洁性与稳定性^[1]。从实践维度看, 新能源消纳需破解其固有的间歇性、波动性与随机性难题——比如风电依赖风速、光伏受光照影响, 出力易随自然条件波动。这要求发电侧通过储能配套、多能互补(如风光储一体化)平抑出力波动;

电网侧需强化跨区域输电通道建设(如特高压工程)与智能调度能力, 实现电力资源跨时空调配; 用电侧则需推动需求响应, 引导用户错峰用电, 并拓展绿电消费场景(如工业绿电替代、电动汽车充电)。此外, 市场化机制是关键支撑, 通过绿电交易、辅助服务市场等手段, 可激发各主体参与消纳的积极性, 推动新能源从“量”的增长转向“量”“质”“效”协同提升, 为“双碳”目标落地提供核心电力保障。

1.2 新能源消纳的整体现状

近年来, 我国采取政策调控、技术更新、机制优化措施, 推动新能源消纳的整体水平稳中有升, 全国弃风、弃光率水平较低, 并处于“低弃电率”运行。但就空间格局来看, 消纳能力呈现明显的区域不均衡性, 新能源并网装机规模较大的中西部地区由于本地消纳能力有限, 其消纳困难主要集中在新能源集中开发区域, 消纳压力远远大于中东部用电需求较大的地区; 从时间格局来看, 新能源间歇性、波动性的出力特性与用电负荷时段规律不匹配现象突出, 高峰供电不足而谷期超发等问题带来“阶段性弃电”的问题尚未得以彻底解决, 消纳持续性有待进一步提升。全国新能源消纳监测预警中心数据显示, 2024年全国风电、光伏发电利用率分别达95.9%、96.8%, 虽保持高位但略有下降, 部分地区午间光伏大发时弃电率仍超10%。核心矛盾在于“源荷逆向分布”——风光资源集中于“三北”, 负荷中心却在东部, 跨区输电通道压力大。同时, 系统调节能力不足, 火电灵活性改造滞后、储能配套不够, 难以应对出力波动。不过, 省间电力现货市场

已显成效，试运行期间新能源利用率提升 1%，为跨区域互济提供了新路径。

1.3 新能源消纳的战略意义

从能源转型角度，提升新能源消纳水平是降低化石能源依赖、提高非化石能源消费占比的关键，直接助力“双碳”目标落地；从产业发展角度，稳定的消纳能力能保障新能源项目收益，激发产业投资活力，带动上下游产业链发展；从生态保护角度，新能源消纳量提升意味着清洁电力替代量增加，可减少污染物与碳排放，缓解大气污染与气候变化压力，实现经济发展与生态保护的协同推进^[2]。具体来看，在能源转型层面，高消纳率能加速风电、光伏等非化石能源对煤电的替代，2024 年我国非化石能源消费占比突破 18%，其中新能源消纳提升的贡献率超 40%，为能源结构从“煤电主导”向“多元清洁”转型筑牢根基。在产业维度上，消纳能力的稳定不仅吸引风电整机、光伏组件等核心产业加码投资，更带动储能电池、智能电网设备等配套产业扩张，2023 年新能源产业链产值突破 12 万亿元，消纳保障功不可没。在生态层面，按当前消纳增速测算，2030 年因新能源替代可减少二氧化硫排放超 800 万吨，相当于每年减少近 2 000 万辆燃油车的污染物排放，为蓝天保卫战与“双碳”目标提供双重支撑。

2 新能源消纳的关键影响因素剖析

2.1 电源协同不足

电源协同能力是影响新能源消纳的内在核心因素，当前我国电源体系存在“新能源占比提升快、调节型电源配套滞后”的失衡问题。新能源本身具有间歇性、波动性与随机性，无法根据负荷变化主动调节出力，需依赖其他电源配合调峰填谷；而在传统火电中，具备灵活调峰能力的机组占比偏低，多数仍以基荷发电为主，调峰意愿与能力不足；水电、核电受季节、技术特性限制，调节灵活性有限，难以充分弥补新能源出力波动缺口，导致系统在新能源出力高峰被迫弃电，低谷时依赖化石能源补能，形成结构性制约。

2.2 电网支撑薄弱

电网支撑作为新能源发电侧与用电侧的连接纽带，其能力不足直接表现为“新能源送不出、发不好”。电网规划滞后于新能源建设速度，在新能源集中地区，部分电网建设相对滞后于装机增速，当地并网资源不足，部分电力无法送出；跨省跨区通道支撑力度不足，在新能源比较丰富的中西部地区与负荷密度较高的中东部地区之间，通道数量不够、输电能力不足，富余电力无法有效外送，出现“本地消不出、外来送不出”

的困境；电网的智能化水平有待提高，新能源预测精度较低、调度灵活性不足，难以满足实时出力变化，从而进一步增加新能源的消纳难度^[3]。

2.3 调节能力短缺

灵活调节能力是电力系统适应新能源特点、保障新能源消纳的关键技术，目前我国调节资源总量与利用水平均存在不足。一方面，新型调节资源发展滞后，储能装机量与新能源装机体量不匹配，且成本较高、商业模式尚不明确、发展进程慢，虚拟电厂尚未实现规模化发展，无法将需求侧资源有效聚合以发挥调节作用。另一方面，调节资源调度管理效用低下，传统火电调峰潜力未得到充分发挥，各类调节资源（储能、需求侧响应等资源）及传统调节资源不能充分发挥优势协同发力，调峰填谷空间存在缺口，特别是在新能源夜间大发、用电负荷低谷期，无有效手段消化剩余新能源电量，弃电只能成为平衡系统压力的最后一道阀门。

3 提升新能源消纳水平的解决措施

3.1 优化电源协同体系

需以“新能源为主体，调节电源为支撑”为核心，破解新能源消纳的结构性制约，构建多电源协同支撑格局。统筹规划新能源装机规模时，需紧密结合区域消纳能力、实际负荷需求及调节资源储备，科学排布项目建设时序，坚决避免装机规模与消纳能力脱节，确保新能源出力“发得出、用得上”。针对调节电源，一方面积极推进火电灵活性改造，降低机组最小技术出力，显著增强系统调峰填谷能力；另一方面优化水电调度策略，充分发挥水电启停灵活的优势，实现与新能源出力的互补平衡。同时，适当前瞻布局核电项目，科学制定核电出力计划，为新能源消纳预留充足空间，最终形成新能源牵头、火电、水电、核电协同发力的电源体系，全面提升多电源支撑新能源消纳的综合能力^[4]。此外，可探索新能源与调节电源的“捆绑开发”模式，例如风光项目配套建设火电调峰机组或抽水蓄能电站，实现规划、建设、运行一体化，进一步缩短调节响应时间，让多电源协同更高效，为高比例新能源接入提供更稳固的支撑。在此基础上，需强化跨区域资源优化配置，依托特高压输电通道与智能电网建设，打破省域消纳壁垒，推动新能源电力在更大范围均衡分布、高效利用。建立健全市场化交易机制，完善辅助服务价格体系，通过容量补偿、调峰电价等激励政策，引导调节电源主动参与新能源消纳保障，激发市场主体协同积极性。同时，加快数字技术与电力系统深度融合，构建智慧调度平台，精准预测新能源

出力波动，动态匹配调节电源响应节奏，实现多电源实时优化联动。通过技术创新、机制完善与布局优化多管齐下，持续夯实多电源协同支撑基础，让新能源消纳从“能消纳”向“优消纳”升级，为能源结构转型与“双碳”目标实现筑牢电力保障。

3.2 强化电网支撑能力

围绕“规划先行、通道建设、智能化提升”主线，以电网升级畅通新能源外送路径，为新能源消纳筑牢硬件基础。在规划层面，将新能源送受端电网建设全面纳入整体电网规划，确保网架建设进度与新能源装机进度精准匹配、同频推进；同步加强新能源就地受端电网建设，扩大送端并网容量，提升新能源就地消纳比例，减少远距离输送压力。在通道建设层面，加快推进新能源密集区域至负荷中心的特高压通道建设，优化通道设计以提高输送效率与送电量，着力构建跨区域、大格局的新能源输送网络，有效破解“产地远、负荷偏”的输送难题，保障新能源“发得出、送得走”。在智能化层面，提速智能电网建设，运用大数据、人工智能等技术提升新能源出力预测准确率；搭建“源网荷储”协调调度平台，实现发电侧、电网侧、负荷侧的在线监控、动态跟踪与灵活调控，显著提升电网应对新能源出力波动的适配性与灵活性，为新能源高效输送与消纳提供有力支撑^[5]。同时，聚焦电网关键技术突破，加大柔性直流、新型储能等先进技术研发与应用力度，增强电网对高比例新能源的承载能力与灵活调控水平。强化电网运维数字化转型，通过无人机巡检、智能传感监测等手段，提升输电通道安全稳定运行水平，降低故障停运风险，保障电力输送连续性。健全电网规划与新能源发展的协同机制，建立动态评估调整体系，根据新能源开发节奏与负荷变化趋势，实时优化电网布局与通道容量配置。通过规划引领、通道升级、智能赋能三维发力，持续完善电网“硬件”支撑体系，让新能源外送更高效、消纳更顺畅，为能源清洁低碳转型提供坚实可靠的电网保障。

3.3 补齐调节能力短板

以“挖掘传统潜力、培育新型资源”为双路径，全方位提升系统调节效率，破解新能源消纳的调节能力瓶颈。在资源培育方面，一方面加快新型调节资源发展，通过政策补贴、电价优惠等举措降低储能成本，完善储能参与市场的盈利机制，推动储能与新能源项目联合开发或强制配套，强化储能调峰支撑作用；另一方面推进虚拟电厂建设，聚合工业、商业、居民等多元负荷，引导用户主动参与调峰填谷，充分挖掘需求侧调节潜力。在机制完善层面，搭建统一的调峰调

频调度平台，打破传统调节资源与新型调节资源的壁垒，实现传统火电、新型储能、需求侧响应的协同联动，提升调节资源利用效率。同时，持续优化调度规则，保障各类调节资源公平参与市场竞争，形成“资源多元、机制顺畅、协同高效”的调节体系，切实补齐系统调节短板，为新能源全时段安全高效消纳提供坚实保障^[6]。例如：部分试点地区已推动储能电站参与辅助服务市场，单次调峰收益提升30%以上；虚拟电厂聚合5000余户工业用户，高峰时段可削减负荷超20万千瓦，这些实践进一步验证双路径的可行性，为更大范围推广提供了经验参考。

4 结束语

能源电力转型过程中消纳问题始终是整个过程中的核心问题，新能源消纳水平的提升受电源协同、电网支撑、调节手段、市场机制等主要因素影响，我国新能源消纳虽整体向好，但结构性、技术性、机制性的问题尚未解决。进一步提升新能源消纳水平要从以下方面着力：通过电源协同推动问题解决，也就是解决新能源消纳本身的问题；通过电网建设、智能运维，解决新能源消纳的关键环节、关键路径的堵点问题；通过解决能力不足的问题，实现对新能源特性的系统调节适配；通过完善市场机制，解决各方参与新能源消纳的积极性、主动性问题。未来，系统性推进新能源消纳能力提升，实现“高效消纳、全额消纳”目标，进而构建清洁低碳、安全高效的能源体系，为平稳实现“双碳”目标筑牢基础。

参考文献：

- [1] 李群山,黄牧涛,曾令康,等.考虑断面耦合和越限控制的大电网新能源跨区消纳能力优化方法[J].武汉大学学报(工学版),2025,58(08):1246-1255.
- [2] 吴纯新.为大规模消纳新能源探索新路径:世界首个县级100%新能源新型电力系统试运行稳定[N].科学导报,2023-08-31(A08).
- [3] 冯帆,鲁宇,余新,等.提升新能源消纳能力的特高压直流系统频率支撑控制方法:CN202211352998.2[P].2023-01-24.
- [4] 马会萌,李相俊,吴荣宇,等.兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J].电力建设,2024,45(06):111-119.
- [5] 王小龙.新能源微电网中分布式电源的协同控制与优化调度[J].新潮电子,2024(12):172-174.
- [6] 陈晓龙,孙嘉,张俊林,等.新能源消纳与用户侧响应主从博弈的配电网智能软开关选址策略[J].电力自动化设备,2024,44(02):57-63.

PPP 模式下 EPC 总承包技术管理的核心策略

熊煊炎

(中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要 PPP 模式与 EPC 总承包模式的结合是基础设施建设领域市场化发展的重大趋势。技术管理是 EPC 总承包管理的核心要素, 其管理成效直接影响项目的建设质量、进度以及全寿命周期的价值。本文根据 PPP 项目公益性与市场化相结合的特点, 结合 EPC 总承包一体化实施的特征, 首先阐述 PPP 模式下 EPC 总承包技术管理的重要意义, 然后分析当前技术管理存在的主要问题, 最后提出相应的解决对策, 以期为 PPP 模式下的 EPC 总承包项目技术管理实践提供参考。

关键词 PPP 模式; EPC 总承包; 技术管理; 协同治理; 风险管控

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.021

0 引言

随着基础设施建设领域的不断深入, PPP 模式由于能够整合社会资本、分担项目风险、提高建设运营效率等优势, 在交通、市政、环保等领域得到了广泛的应用。EPC 总承包模式是以设计、采购、施工一体化的实施方式, 实现了项目建设环节的高度整合, 是 PPP 项目常用的建设实施模式。PPP 模式多元主体合作背景下, EPC 总承包的技术管理工作面临多方需求协调、全周期风险控制、技术高效协同引领等许多难题。技术管理的效果同项目建设期间的质量、安全相关联, 而且牵涉项目运营阶段的稳定、持续情况, 直接同政府、社会资本、总承包商等各方面的利益相联系。因此, 深入分析 PPP 模式下 EPC 总承包技术管理的意义、问题和核心策略, 对提升项目全生命周期价值、推动 PPP 模式健康发展有重要的现实意义。

1 PPP 模式下 EPC 总承包技术管理的意义

1.1 保障项目全生命周期质量与安全

PPP 项目一般具有建设周期长、运营年限久、技术要求高这三个特点, EPC 总承包模式下的技术管理贯穿设计、采购、施工、试运行全过程。通过系统的技术管理, 在设计阶段改进技术方案, 保证方案既能符合公益性需求, 又合乎工程实践的可行性, 在施工阶段规范技术操作流程, 加强质量控制和安全防范, 削减质量隐患和安全事故, 在试运行阶段做好技术调试和改良, 为项目长时间稳定运营创建根基。

1.2 提升项目资源整合与利用效率

PPP 模式涉及政府部门、社会资本方、设计单位、施工单位、供应商等很多参与主体, EPC 总承包商是核

心执行方, 需要通过技术管理实现各个资源的有效整合^[1]。技术管理可以推进设计、采购、施工环节的技术协同, 防止各环节脱节造成的资源浪费, 采用统一的技术标准和规范, 削减不同参与方之间沟通成本和协作阻力, 改善资源配置效率, 使项目投资效益得到最大化的实现。

1.3 强化项目风险防控能力

PPP 项目中技术风险、市场风险和政策风险等交织在一起, EPC 总承包环节的技术风险直接影响到项目整体风险控制的效果。技术管理能提前发现技术风险, 制订防控预案, 动态跟踪风险的变化来减少由于技术方案不合理、技术标准不符合要求、技术变更频繁等造成的损失, 保证项目能够顺利进行并且保护各主体的合法权益。

2 PPP 模式下 EPC 总承包技术管理存在的问题

2.1 技术标准协同不足

PPP 项目多元的参与主体存在着不同的技术规范体系和管理要求, 政府部门重视公益性和合规性, 社会资本方重视经济性和效率, 设计单位重视技术先进性, 施工单位重视实操性。EPC 总承包商在整合各方需求时没有统一的技术标准协调机制, 造成设计方案同施工实际相脱离, 采购设备和技术需求不契合等状况, 这既耽误了施工进程, 又埋下了质量问题的隐患^[2]。

2.2 技术风险管控滞后

PPP 项目全生命周期技术风险具有隐蔽性、传导性, 部分 EPC 总承包商缺少全周期技术风险意识。风险控制大多在施工阶段, 对设计阶段的技术可行性论证不够, 采购阶段没有设备技术风险评估, 运营阶段的技

术维护预案不完善。风险识别缺少系统性，对技术变更、地质条件变化等突发风险的应对能力不够，容易造成风险扩大化。

2.3 技术创新应用不足

PPP项目对于建设效率、运营效益、可持续性等方面的要求不断提高，传统的技术模式已经不能满足需求。由于EPC总承包商存在技术储备、成本考虑、创新激励缺乏等各方面因素，所以没有主动进行技术创新。在绿色建筑技术、智能化施工技术、数字化管理技术等新型技术的应用上存在滞后，不仅影响项目建设质量与运营效率，也不利于提升项目核心竞争力与可持续价值。

3 PPP模式下EPC总承包技术管理的核心策略

3.1 构建多元协同的技术标准体系

协同治理理论重视多元主体之间的互动协作以达到共同的目标，其中心思想就是建立起有效的协同机制、确定各方的权责、实现资源的共享。该理论冲破了单一主体管理的局限，看重依靠规则制定，沟通协商，利益均衡来达成多元主体的良性互动，这同PPP模式下的EPC总承包技术管理的多元参与特性十分吻合^[3]。PPP项目中政府部门、社会资本方、设计单位、施工单位、供应商等主体的技术诉求存在差异，技术标准的制定与执行不能依靠单一主体，需要依托协同治理理论来建立多方参与的协同机制。

为了保证EPC项目技术实施的规范性和适配性，在严格遵循现有国家、地方、行业以及企业技术标准和管理规范的基础框架之上，根据项目全生命周期的特点，衍生出符合EPC项目一体化管理特性的一系列专项技术标准和实施流程，据此需要成立多方参与的技标协同委员会，EPC总承包方为牵头单位，政府监管方代表、社会资本方代表、设计单位技术负责人、施工单位技术骨干、设备供应商技术代表等为委员，委员会在遵守上述标准核心要求的前提下，应制定完善的议事规则和决策程序，采用民主集中制的工作方式，保证各方的诉求能够得到充分的表达，合理兼顾并科学平衡；在技术标准制定过程中，委员会首先要对各个参与主体的技术规范、管理要求以及现有的各级标准相关条款进行系统收集，然后根据项目功能定位、建设规模、运营需求等主要因素，构建涵盖设计、采购、施工到试运行全过程的专项技术标准体系框架，框架要细化到各个环节，设计阶段要明确技术方案选型、图纸设计等标准及专业协同要求，对接行业设计标准，采购阶段要制定设备材料参数等标准，对接国家质量规范，施工阶段制定工艺、控制等标准，参照施工验

收规范，试运行阶段制定调试、检测等标准，参照运维规范，留有弹性调整空间，防止标准僵化。

3.2 建立全生命周期技术风险管理机制

全生命周期风险管理理论认为，风险控制应贯穿于项目规划设计到运营结束的全过程，通过对风险的识别、评价、应对和监督，降低风险造成的损失。该项目各阶段的风险是相互影响、相互传递的，某一阶段风险失控，就会导致风险传递到其他阶段。PPP模式下EPC总承包项目的特点有建设周期长、技术复杂度高、参与主体多，各阶段的技术风险表现形式不同，且传递性强，因此要按照全生命周期风险管理理论建立闭环的技术风险管控体系。其中“全过程覆盖”原则指技术风险管控不能局限于传统的施工阶段，要往前延伸到设计、采购阶段，往后覆盖到试运行阶段，做到技术风险管控无死角^[4]。

设计阶段用文献研究法、专家咨询法、类比分析法等主要识别技术方案可行性、地质勘察准确性、专业间协同、设计深度不够等风险。借鉴类似项目案例分析预估隐患，召集地质、结构、机电等领域的专家评定勘察资料的完备性以及准确性，排查地质情况误判的危险；塑造设计方案技术评审制度，让多方面专家论述方案的技术可行度、经济性和安全性，从起始环节规避技术风险。采购阶段，设备材料技术风险，通过对供应商调研、设备材料技术参数核实、样品检测等手段，发现由于设备材料质量不合格、技术不兼容、供应时间延误导致的技术问题、没有供应商技术支持等风险。实地考察关键设备供应商技术研发能力、生产工艺水平及质量控制体系，对样品做技术性能测试，检验设备与设计方案的兼容性及与其它设备的匹配性。施工阶段通过现场巡查、隐患排查、技术交底检查等方式，发现施工工艺不当、技术操作不规范、交叉作业配合不畅、突然出现的地质条件变化、技术变更连锁等风险。创建施工技术风险清单，确定风险点、风险特征以及影响范围，达到技术风险识别系统化的目的。试运行阶段：采用性能测试、负荷试验、故障模拟等方式来排查技术调试不完善、设备运行稳定性不足、运营技术支撑缺失、维护技术不足等风险。根据项目运营需求来制定详细的试运行技术风险识别方案，对潜在隐患做全方位的排查。

3.3 搭建技术创新激励与应用体系

技术创新扩散理论认为技术创新的推广应用要依靠有效的推广机制、激励措施和应用环境，经由多方参与形成创新应用的良性循环^[5]。该理论把技术创新扩散过程分为认知、说服、决策、实施、确认五个阶段，

并强调各个阶段要采取不同的措施来推动创新落地。PPP 模式下 EPC 总承包项目技术创新不仅要实现技术上的突破，还要依靠有效的扩散机制使创新技术在项目各个环节中得到应用，技术创新扩散理论为这个过程提供了重要支持。

为了保证技术创新精准匹配项目需求并且实现全周期成本最优，需要建立以技术价值为核心、成本管控为导向的科学技术创新管理体系，该体系核心包括技术创新选择制度和产学研合作创新平台两大部分，并且技术管理策略对项目建设成本的源头控制、后续运营成本的持续优化作用贯穿始终，成为成本管控的关键抓手。技术创新选择制度要确定刚性筛选标准和闭环管理流程，筛选标准围绕“技术—成本”协同逻辑展开，包含技术成熟度、经济性、适配性、可持续性四个方面的内容：技术成熟度需要创新技术经过权威试验验证才可具备工程应用条件，技术管理策略依靠创建“试验数据核查—工程案例追溯—现场试错管控”的体系来保证所选技术成熟可靠，高成熟度技术能够削减施工阶段调试成本、返工风险，并且可以防止运营初期由于技术问题引发的停机维修成本；经济性不是单一的成本降低，而是依靠技术管理策略构建起“全周期成本核算模型”，准确计算技术在设备采购、施工组织等建设环节的直接成本，同时预估运营阶段的能耗节省、人工削减等间接收益，优先挑选出“建设成本增幅不超过 5%、运营成本年降幅不低于 10%”的技术种类；适配性要求技术同项目功能定位和技术体系深度相契合，技术管理策略通过“项目管理模式适配分析”实现成本协同，EPC 总承包模式下，优先选择利于设计—施工—运维一体化集成管理的技术，防止技术同已有管理流程不兼容引发的协调成本上涨，可使跨部门协同成本降低约 12%。

3.4 构建数字孪生赋能的一体化信息协同体系

数字孪生赋能理论是以物理实体与数字模型实时映射为基点，用全要素数据集成、动态模拟分析、智能决策支持来打破信息壁垒，实现项目全过程精准控制、高效协同。该理论认为数据是核心生产要素，依靠数字化技术打通各个环节的信息流转通道，与 PPP 模式下的 EPC 总承包项目中多主体、复杂的信息需求以及各阶段之间的紧密衔接相契合，可以较好地解决传统管理中存在的信息不对称、协同效率低、决策滞后等难题。

为了实现项目信息的全生命周期贯通和高效利用，需要利用数字孪生技术建立包含设计、采购、施工、试运行全过程的一体化信息协同体系。首先搭建统一的数字孪生协同平台，平台整合 BIM 技术、物联网、

大数据等核心技术，具备数据采集、模型构建、实时交互、模拟分析四大功能，实现政府监管方、社会资本方、设计单位、施工单位等各主体的信息共享与在线协同，打破“信息孤岛”。其次要创建标准化的数据治理机制，规定设计图纸、设备参数、施工进度、质量检测等各种数据的采集标准、存储规范和共享权限，保证数据的准确性、完整性、及时性。设计阶段用平台做 BIM 模型的协同设计和审核，采购阶段实现设备材料参数和模型的精准对接，施工阶段通过物联网设备收集现场实时数据，再和数字模型动态对比，发现偏差立刻调整，试运行阶段在平台上模拟运营场景改进运维方案。最后要完善平台应用保障体系，成立以 EPC 总承包方为牵头单位的数字化专项工作组，组织各方技术骨干开展平台的搭建、运维、推广工作；加强人员的数字化技能培训，保证各参与主体熟练掌握平台的操作；建立数据安全管理制度，明确数据访问权限和保密要求，防止数据泄露。通过该体系可以实现项目信息实时流转、精准匹配、智能决策，提高跨主体、跨阶段协同效率 15% ~ 20%，为项目高质量推进提供数字化支撑。

4 结束语

PPP 模式下 EPC 总承包技术管理是一项系统工程，与项目整个生命阶段内的质量、效率以及价值息息相关。本文从技术管理的重要意义入手，分析目前存在的技术标准协同不足、技术风险控制滞后、技术创新应用不够等主要问题，然后根据协同治理理论、全生命周期风险管理理论以及技术创新扩散理论，提出相应的策略。EPC 总承包商在实践中要根据项目的具体情况，灵活采取各种策略，不断地对项目的技术管理体系和管理水平加以改善。提高技术管理水平既可保证 PPP 项目正常推进，也能促进基础设施建设的发展。

参考文献：

- [1] 谢赫曦, 王超, 李帅. EPC 总承包建设管理的要点分析 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(02):23-25.
- [2] 宫治国, 许维宗, 倪琪昌, 等. 高“纯度” EPC 总承包模式下的履约管理 [J]. 安装, 2021(12):12-14.
- [3] 贺彩峰, 刘才, 周朕, 等. EPC 总承包工程施工单位设计管理现状及策略研究 [J]. 建筑施工, 2021, 43(11):2440-2443.
- [4] 苗赛, 赵婉耀. 基于 EPC 总承包的建筑工程项目管理应用分析 [J]. 工程建设与设计, 2021(14):208-210.
- [5] 张防全. 建筑工程 EPC 总承包设计项目管理应用分析 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47(07):78-79.

EPC项目造价预结算风险识别与控制策略研究

黄 星

(中国铁建电气化局集团第五工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 本研究针对EPC项目造价预结算风险管控问题, 构建“过程+要素”双维度识别框架, 运用AHP-熵权组合赋权法确定风险权重, 建立“预防—监控—应对”三级控制机制。通过某城市地铁项目实证表明: 设计优化节省预算8.7%, 主材价格锁定率达95%, 动态监控削减变更签证32%, 造价偏差率由12.5%降至3.8%。创新性提出BIM+GIS融合模拟技术及三维协同保障机制, 使抗波动能力提升40%, 为EPC项目造价风险管理提供系统解决方案。

关键词 EPC项目; 造价预结算; 风险识别; 风险控制; 全过程管理

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.022

0 引言

工程总承包模式在大型建设项目的应用日益广泛, 其造价预结算风险管控成为影响项目成败的关键因素^[1]。当前EPC项目普遍面临设计变更频繁、材料价格波动、合同界面模糊等风险挑战, 传统分段式管控模式难以适应“边设计边施工”的动态需求。现有研究多聚焦单一环节风险分析, 缺乏全过程量化评估与协同控制机制^[2]。本研究通过构建“识别—评估—控制”闭环体系, 创新融合WBS分解、德尔菲法、模糊综合评价等技术方法, 突破风险传导路径量化瓶颈。研究将填补EPC项目全周期造价风险管控的理论空白, 为总承包商提供可参考的实施路径, 对保障项目投资效益具有重要的实践价值。

1 EPC项目造价预结算风险概述

EPC模式是指业主将工程的设计、采购与施工整体发包给单一总承包商负责的“交钥匙”工程模式^[3]。在该模式下, 造价预结算工作表现出显著特殊性, 其核心在于依据初步设计确定总价控制目标, 并在实施过程中按合同约定进行动态调整与最终结算。由于EPC项目通常投资规模大、建设周期长、技术接口复杂, 造价超支风险贯穿全生命周期, 系统开展相关风险研究尤为必要^[4]。相较于传统承包模式, EPC工程在造价控制方面面临三方面主要挑战: 一是“边设计边施工”推进机制容易因设计深度不足引发大规模变更及成本波动; 二是固定总价合同虽可转移风险, 但条款中对工作范围、调价机制约定的模糊性常引发结算争议; 三是长周期建设下面临人工与主材价格的异常波动风险。总体来看, EPC项目造价预结算风险主要包括设计

风险、合同风险、市场价格风险、分包管理风险及不可抗力风险等类别。针对这些风险, 本研究构建“风险识别—评估量化—动态控制”的三阶段分析框架, 以实现造价可控的目标。

2 EPC项目造价预结算风险识别分析

2.1 风险传导机制与关键成因

在EPC项目模式中, 造价风险呈现动态传导特性, 其路径通常表现为单一事件引发连锁反应。例如: 初始设计缺陷可能马上触发工程变更, 继而导致成本超支。这种传导过程不仅放大风险影响, 还使控制工作复杂化^[5]。为开展根源归因工作, 本研究采用鱼骨图法进行系统解析。该方法将风险因素归类为人、机、料、法、环等维度, 帮助锁定根本驱动源。

其主要缘由囊括业主需求不明确、总承包方能力不足及市场价格异常波动三大要素。业主需求模糊常表现为设计阶段频繁调整, 直接推高变更频率; 总承包方能力不足则涉及管理经验欠缺或技术短板, 无法有效处理施工冲突; 市场价格波动如钢材价格异动, 会极大程度上冲击采购预算。

2.2 多层次风险识别方法设计

为系统识别EPC项目造价风险, 构建“过程+要素”双维度识别框架。过程维度按项目生命周期分为设计、采购、施工三大环节: 设计阶段关注方案可行性与标准偏差, 采购阶段聚焦供应商履约与订单时效, 施工阶段涵盖进度与质量风险。要素维度从资源角度分解为人工成本、材料价格、机械调度、管理协调四类风险。双维度交叉形成风险识别矩阵, 覆盖关键控制点。

建立结构化识别流程融合 WBS 分解与德尔菲法。先用 WBS 技术将项目分解为可量化工作包，如设计图纸审批、设备招标采购、现场施工管理等。再通过三轮德尔菲专家调查法开展工作：首轮征询潜在风险项，次轮评议风险发生概率，末轮确认核心风险清单。

风险权重计算模型支撑清单量化排序，其计算公式如下：

$$W_i = \frac{F_i \times S_i}{\sum_{j=1}^n (F_j \times S_j)} \quad (1)$$

式(1)中， W_i 表示第 i 项风险权重(范围：0~1)， F_i 为风险发生频率(单位：次/月)， S_i 是风险严重度评分(等级：1~5 分)，分母为所有风险项的影响值总和。该模型通过量化评估实现风险优先级划分，为后续控制资源分配提供依据。通过上述 WBS 分解与三轮德尔菲专家调查法，最终筛选并确认了包含 52 项风险因子的初始清单。对清单进行分析后发现，其中设计阶段的可控性风险因子数量占比达 35%；同时，根据专家对各项风险严重度的评分(1~5 分)，材料价格风险的影响系数均值高达 4.2 分。这两项数据清晰地体现了将设计风险与市场价格风险作为后续控制的关键方向。

2.3 风险指标体系量化评估

在前期形成的风险清单基础上，本研究构建了一套三级评估指标体系，以实现对风险的精准量化。一级指标按项目阶段划分为设计、采购、施工三大模块；二级指标聚焦风险类别，如设计变更、合同索赔、成本波动等；三级指标则进一步细化为 32 项可量化参数，如设计变更频率、合同索赔金额占比、钢材价格波动率等。该指标体系既体现了项目全过程特征，又实现了对风险要素的微观度量。

为科学确定各指标权重，本研究采用 AHP(层次分析法)与熵权法相结合的组合赋权方法。首先通过专家打分进行主观赋权，再基于历史项目数据进行客观赋权，最后将主客观权重进行线性融合，以兼顾专家经验与数据规律，确保权重分配的合理性与可靠性。

在风险等级评定方面，采用模糊综合评价法，将各项指标的实测值与预设的风险等级阈值进行比对，通过计算机辅助分析，得出各阶段风险属于“低风险”“中风险”或“高风险”的概率。评估结果显示，设计阶段的可控性风险权重最高，达 0.35；采购阶段的价格风险被判定为高风险的概率达 78%；施工阶段则主要表现为中度进度风险。这一评估结果为后续制定有针对性的控制策略提供了清晰的数据支持。

3 造价风险控制策略与案例验证

3.1 全过程动态控制体系构建

针对 EPC 项目造价风险特征，建立“预防—监控—应对”三级控制机制，形成全过程动态管理体系。预防阶段聚焦源头管控，设计环节推行限额设计标准与价值工程优化：通过设定单位面积造价上限约束方案选择，组织多专业团队开展功能成本比分析，消除冗余设计。采购环节实施材料价格风险转移策略，采用调差公式实现风险共担：

$$\Delta C = Q \times (P_m - P_b) \times K \quad (2)$$

式(2)中， ΔC 表示调差金额(单位：万元)， Q 为合同约定材料量(单位：吨)， P_m 是结算期市场均价(单位：元/吨)， P_b 为基准价格(单位：元/吨)， K 是风险分担系数(范围：0.3~0.7)。该公式将价格波动影响控制在合同框架内。监控阶段依托数字化平台建立实时预警系统，通过 BIM5D 平台集成模型与成本数据，对主材价格波动、设计变更累计量及进度偏差设定阈值，自动触发预警。应对阶段实行分级响应机制，针对不同级别预警采取相应纠偏措施，包括联席会议与争议评审小组仲裁等方式。该体系可提前锁定 70% 的风险敞口，缩短 60% 的响应时间，降低 45% 的争议成本，实现造价风险的闭环管理，并形成标准化控制流程，为各类 EPC 项目提供适用性解决方案。

3.2 某城市轨道交通地铁线路项目实证分析

为验证前述理论方法的实践效果，选取某城市轨道交通地铁线路项目开展实证研究。该项目总投资 20.3 亿元，采用 EPC 总承包模式，涵盖土建、轨道、机电安装及车站装修等全部内容，具有施工界面复杂、地下管线迁改多、各专业交叉作业频繁等特点。

在设计阶段，严格推行限额设计标准与多专业协同的价值工程分析。通过 BIM 技术进行全专业三维碰撞检查，优化车站综合管线排布，合并冗余桥架与风管 135 处，调整盾构机选型与推进方案，共降低设计概算 1.76 亿元，节省率达 8.7%。

在采购阶段，针对钢材、电缆、机电设备等主要材料及设备，实施集中采购与远期锁价策略。与优质供应商签订长期供货协议，成功锁定 12 类核心物资的价格，整体主材价格锁定率达到 95%，有效规避因市场价格波动带来的成本风险，预计节约采购成本 3 800 万元。

在施工阶段，依托 BIM-5D 管理平台，将 WBS 工作分解结构与造价清单动态关联，实现成本与进度数据的实时同步。平台自动监控土方开挖量、管片拼装进

度及机电安装工效，对异常签证申请进行自动筛选与预警，最终核减不合理变更签证32%，显著控制了因变更和窝工导致的成本增加。

通过构建成本偏差率函数对实施效果进行量化分析，该函数表示为：

$$\delta = \frac{|C_a - C_b|}{C_b} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中， δ 表示造价偏差率(单位：百分比)， C_a 为实际发生成本(单位：万元)， C_b 是基准预算成本(单位：万元)。实施前后关键指标对比见表1。

表1 风险控制实施效果对比表

指标维度	实施前数值	实施后数值	改善幅度
设计变更频率	4.2次/月	1.8次/月	-57.1%
主材价格锁定率	68%	95%	+39.7%
变更签证率	15.3%	10.4%	-32.0%
造价偏差率	12.5%	3.8%	-69.6%

表1数据显示，项目整体造价偏差率实现69.6%的降幅，印证了控制体系的有效性。对造价偏差的来源进行分解可知(见表2)，设计优化贡献了最主要的成本节约。

表2 造价偏差要素分析表

偏差来源	偏差值(万元)	占比	主要控制措施
设计变更	8620	46.3%	价值工程与BIM优化
材料价差	4120	22.1%	远期合约采购
签证索赔	3780	20.3%	BIM-5D实时核验
不可抗力	2110	11.3%	风险准备金计提

由表2可知，通过远期合约采购，材料价差得到有效控制，其波动幅度由实施前的±15%收窄至±5%。项目最终结算造价为19.48亿元，较初始预算降低8200万元，验证了该套控制策略在大型复杂地铁EPC项目中的良好适配性，为同类工程提供了可复用的实施路径。

3.3 跨周期协同保障措施

为确保造价风险控制体系可持续运作，构建制度、技术与组织三维协同保障机制。制度上，建立EPC风险金计提标准，要求总承包商按合同价3%~5%计提专项风险准备金，以覆盖不可抗力致成本超支。技术上，推广BIM+GIS融合造价模拟技术，通过地质与建筑信息系统叠加，预警地下管线冲突、优化土方平衡，减少施工设计变更。组织上，成立业主—承包商联合风

险管理小组，每月开风险联席会议，共享信息、协调争议解决。通过敏感性分析验证保障措施抗风险效能，具体数据见表3。材料价格波动±20%时，传统模式造价偏差率扩至18.7%，实施三维保障机制后偏差率控制在11.2%，抗波动能力提升40%。

表3 保障措施敏感性分析表

波动情景	无保障措施偏差率	单项制度保障	双项技术保障	三维协同保障
材料价+10%	15.3%	13.1%	11.8%	10.2%
材料价+20%	18.7%	16.2%	14.1%	11.2%
设计变更+15%	17.5%	14.9%	12.7%	10.5%
工期延误+20%	16.8%	14.3%	12.5%	10.9%

表3数据显示，三维协同保障机制呈现显著风险缓释效应。在材料价波动+20%的极端工况下，三维保障较无保障措施降低7.5%，较单项制度保障降低5.0%。特别在技术保障维度，BIM+GIS融合应用贡献最大边际效益(占总体改善值的38%)，其冲突检测功能减少返工损失达23%。组织保障则通过提前锁定82%的争议事项，降低仲裁成本35%。最终形成可复制的保障模式，为EPC项目全周期风险管理提供制度化支撑。

4 结语

本研究系统构建EPC项目造价风险识别与控制体系，实证验证其在复杂工程中的适用性。研究证实：基于双维度的风险识别框架可精准定位设计阶段核心风险；组合赋权法与模糊评价可实现风险量化评估；三级控制机制可有效降低造价偏差率69.6%。提出的三维协同保障措施可显著提升系统抗风险能力。未来研究可进一步探索智能预警算法在动态监控中的应用，并拓展不同工程类型的适配性验证，为EPC模式高质量发展提供持续支撑。

参考文献：

- [1] 尤娟.EPC项目建设全过程各阶段工程造价管理研究[J].中国招标,2025(09):210-213.
- [2] 高燕.EPC工程总承包模式的项目商务风险管控[J].中国住宅设施,2024(06):82-84.
- [3] 郑文婷.浅谈EPC总承包项目工程造价预结算阶段要点分析及对策[J].建筑与预算,2023(10):13-15.
- [4] 李伟,柯妍,胡红兵.EPC项目承包合同中工程造价风险分析与管控[J].工程造价管理,2023(01):25-31.
- [5] 章孝辉.EPC总承包项目工程造价控制要点探究[J].低碳世界,2025,15(08):169-171.

低碳经济背景下火电厂集控运行 节能降耗技术研究

赵 祥

(大唐吉林发电有限公司珲春热电分公司, 吉林 延边 133300)

摘要 在“双碳”目标驱动下, 我国低碳经济转型进入攻坚阶段。火电厂作为能源供给核心主体, 其集控运行的节能降耗水平直接关乎低碳战略落地成效与行业转型进程。本文立足低碳经济视角, 系统剖析火电厂集控运行节能降耗的现实需求, 明确系统性、实用性、经济性三大基本原则, 进而针对锅炉、汽轮机、电气及辅机四大核心系统, 构建靶向性节能降耗技术方案, 细化技术路径与实操要点, 以期为火电厂实现低碳转型提供技术参考。

关键词 “双碳”目标; 低碳经济; 火电厂; 集控运行; 节能降耗

中图分类号: TM621

文献标志码: A

D01:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.023

0 引言

面对全球气候变化与国内生态环境治理的双重压力, 发展低碳经济已成为我国能源领域的战略共识, 火电厂作为碳排放重点源, 其节能降耗改造是实现“双碳”目标的关键抓手。当前, 我国火电厂普遍采用集控运行模式, 但在实际生产中, 多环节存在能耗损失问题, 导致综合能耗与碳排放量远超管控标准, 制约了行业绿色转型进程。在此背景下, 依托技术创新对集控运行体系进行全方位节能降耗升级, 既是火电厂规避政策风险、提升市场竞争力的现实需求, 也是推动电力行业高质量发展的核心路径。

1 低碳经济背景下的火电厂集控运行节能降耗现实需求

1.1 政策合规

为加速实现“双碳”目标, 在短时间内改善生态环境持续恶化局势, 我国颁布相关政策, 对火电厂碳排放规模、综合能耗水平、排放标准进行严格限定, 如果违反政策要求, 将面临碳配额不足风险, 并遭受环保处罚。从火电厂自身经营生产角度来看, 对集控运行系统进行节能降耗改造, 是规避政策合规风险的核心举措, 必须将单位发电量碳排放量限制在 $750 \text{ g CO}_2 / (\text{kW} \cdot \text{h})$ 以内, 300 MW 亚临界机组与 600 MW 超临界机组的供电煤耗量分别限制在 $310 \text{ g / (kW} \cdot \text{h)}$ 以内和 $280 \text{ g / (kW} \cdot \text{h)}$ 以内, 脱硝效率不低于 85%, 氮逃逸量限制在 8 mg/Nm^3 以内^[1]。

1.2 市场竞争

随着用电需求的持续扩张, 我国电力行业实现快速发展, 电力市场化改革亦稳步推进并成效显著。然

而, 火电厂自身不仅面临日趋激烈的市场竞争, 还受煤炭价格波动等因素影响, 经营压力不断加大。对集控运行系统进行节能改造, 虽然短时间内会投入大量成本费用, 但后续通过降低综合能耗、免受环保罚款, 创造额外经济效益, 额外效益足以覆盖前期改造成本, 明显降低实际发电成本, 依托成本优势, 火电厂从激烈市场竞争中脱颖而出。

1.3 行业转型

集控运行节能降耗成果高度适配电力行业转型发展需求, 节能改造期间不会遇到过多阻力, 而是获得政策扶持等多重助力。从宏观角度来看, 行业转型需求包括数字化适配、多能源协同和低碳减排。一是数字化适配。推行数字化运行管理模式, 以大数据、人工智能等新一代信息技术作为管理工具, 实时采集、处理海量数据, 精准调控火电厂集控运行过程。二是多能源协同。在集控运行系统内预留接口, 火电厂和外部能源系统联动调度, 以低能耗运行作为协同调度目标。三是低碳减排。通过优化机组运行状态和采取多项脱碳技术, 满足火电生产需求的前提下, 严格控制碳排放量^[2]。

2 火电厂集控运行节能降耗基本原则

2.1 系统性

火电厂集控运行模式下, 主机设备和辅机设备并非作为孤立存在的管理对象, 而是保持紧密衔接, 构成有机整体结构, 各设备和生产环节相互影响。集控运行系统节能降耗升级改造期间, 工作人员必须遵循系统性原则, 将全部设备列为改造对象, 以整体效能最大化或是整体能耗最低为目标, 从全局角度出发,

科学制定改造方案，禁止盲目追求单体设备能耗最低而导致系统失衡。

2.2 实用性

实用性原则强调集控运行节能降耗技术方案具备落地应用条件，无需投入过多人力物力资源与消耗大量时间成本即可实现预期目标，如果方案内容过于繁杂、脱离实际情况，将导致后期改造效果偏离预期方向。一方面，尽量简化集控运行系统操作流程，或是编写自动化控制程序，确保集控运行过程和节能降耗效果免受人为操作因素影响。另一方面，主动适配现有设备型号和DCS系统来制定节能降耗方案，非必要情况下，不得全面升级火力发电设备和重新开发控制系统，尽量减少改造工作量。

2.3 经济性

在低碳经济背景下，降低综合能耗水平与实际发电成本，是火电厂集控运行系统节能降耗升级改造的核心目标。从火电厂经营角度来看，其也是动力来源，预期取得经济效益越高，火电厂升级改造意愿越强烈。因此，工作人员必须遵循经济性原则，即为经济适用原则，在保障火电厂生产安全和实现预期节能降耗目标的前提下，优先选择投资成本较低、投资回报周期较短的技术方案，同时满足火电厂成本控制要求。

3 火电厂集控运行节能降耗技术措施

3.1 锅炉系统

锅炉系统是火电厂项目最为核心的生产设备，也是能耗与碳排放核心环节，锅炉运行效率和集控机组整体节能效果密切相关。结合往期运行数据来看，锅炉系统当前主要存在燃烧不充分、余热资源浪费、脱硝系统能耗超标三项问题，针对性采取燃烧优化、余热回收、脱硝节能三项技术措施，实现方法如下。

第一，燃烧优化。以煤质适配和燃烧参数调控作为优化措施，锅炉燃烧效率提升%，即可减少3~5 g/(kW·h)不等的供电煤耗。煤质适配是在输煤机上部署煤质分析仪，按照预设频率，定时测量发热量、水分和灰分，测量数据提交给集控室，精准调整煤粉细度，优质煤的煤粉细度保持在18%~20%区间，低质煤的煤粉细度保持在15%~17%区间，燃烧器给煤量误差小于±3%。燃烧参数调控是把配风量和炉膛温度作为调控对象，一次风温稳定保持在280~320℃、一次风速保持在22~25 m/s，二次风采取分级配风模式，炉膛过量空气系数维持在1.2~1.25，要求炉膛中心温度处于1200~1300℃区间，两侧温差值小于50℃^[3]。

第二，余热回收。主动回收锅炉排烟热量，排烟

温度降低10℃可以带动机组热效率提升0.5%~0.8%。对于当地采取集中供暖模式的火电厂项目，推荐采取烟气余热供暖技术，锅炉尾部设置低压省煤器，接入城市供暖管网，引导锅炉排烟加热循环水，实际排烟温度约为110~130℃，可以把供暖水温维持在45~60℃。夏季无供暖需求，关闭低压省煤器旁路，确保锅炉运行状态免受影响。

第三，脱硝节能。以脱硝系统风机作为节能改造对象，采取变频调控技术，送风机和引风机上加装变频装置，变频范围设定为30~50 Hz，基于锅炉负荷规模，动态调节脱硝风机转速值，联动逻辑为锅炉负荷变动10%，风机转速调整5~8 Hz。全程跟踪监控脱硝风机运行状态，要求实际电流低于85%额定值，风压值不超过3 kPa。

3.2 汽轮机系统

火电厂集控运行体系内，汽轮机组以能量转换为功能定位，热效率是决定综合能耗水平的核心因素。理论上，汽轮机热效率越高，集控运行系统整体能耗水平越低。从现实层面来看，必须贴合汽轮机组负荷特性和设备状态来提升热效率，组合采取优化滑压运行曲线、通流部件维护、回热优化、提升真空度四项技术措施。

第一，优化滑压运行曲线。结合历史运行数据，绘制负荷—主蒸汽压力关联曲线，着手设定多种负荷工况下的主蒸汽压力标准值，通过传感器实时监测整齐压力变化情况，DCS系统自行下达纠偏调控指令。如果负荷变化速率超过5%/min，则采取“先稳压、后滑压”控制策略，避免因直接滑压调节而引发参数突变问题^[4]。

第二，通流部件维护。通流部件工作状态和汽轮机组热效率密切相关，建立长效化维护保养机制，工作人员定期清理通流部件表面污垢和积盐，调整汽封间隙，并开展相关测试，检验有效通流面积和漏汽率是否合格。汽轮机组运行期间，实时监测排汽温度、排汽压力两项参数，如果排汽温度超出55℃，或是排汽压力剧烈波动，迅速检查通流部件是否堵塞。

第三，回热优化。调整加热器运行方式，尽量保持高压/低压加热器100%投运状态，以机组负荷作为控制依据，精准调节各段抽汽压力和温度参数，要求加热器端差值小于5℃，疏水水位始终处于正常区间。

第四，提升真空度。汽轮机真空度和热效率呈现正比例关系，根据历史运行数据来看，提升1 kPa真空度，大致可提升0.3%~0.5%热效率，进而减少供电煤耗量，具体以真空泵变频改造作为实现方法。现有汽轮机组内加装变频装置，实时测量真空度和调整真空泵转速，真空度高于和低于-92 kPa的工况下，真空泵转速分别保持在30 Hz和35~40 Hz区间^[5]。

3.3 电气系统

在火电厂项目中，电气系统向火电实际运行能耗高于理论值，部分环节存在能源浪费现象，总体能源利用效率偏低，核心问题包括用电负荷分配不合理、电气设备运行效率低下。其中，用电负荷分配不合理是由于采取固定投运模式，未能根据峰谷电价变化、火电机组负荷变化进行调整，长期保持高负荷运行工况，存在“大马拉小车”现象。电气设备运行效率低下是由于运行方式不当、性能劣化而导致实际运行效率低于正常水准，需消耗更多电能才能满足使用需求，以变压器为例，问题在于运行状态失衡，实际负荷率不足 40% 和超出 85% 时的损耗剧增。因此，在电气系统节能降耗改造期间，必须围绕问题症结，针对性采取负荷分配优化、单体设备节能运行两项措施。

第一，负荷分配优化。由动态分配机制取代静态分配机制，DCS 系统实施监控所有车间用电负荷情况，每隔 5~10 min 全面统计火电厂能耗数据。根据历史运行数据，着手绘制机组负荷—设备效率关联曲线，基于实际负荷工况，精准切换相应负荷分配方案，并在电网谷段检修清洗设备，峰段降低非必要辅机电耗，以此来节省实际用电成本^[6]。

第二，单体设备节能运行。科学诊断各类电气设备能耗超标原因，量身制定节能运行方案，以变压器为例，其作为电气系统的核心设备，可采取优化投运、调整分接头等节能运行措施。优化运行是基于火电厂用电负荷情况，动态调整变压器投运台数，负荷比例超出与不足 70% 工况下，分别投运 2 台变压器和 1 台变压器。调整分接头是把外部电网电压波动情况作为控制依据，确认电网电压波动幅度超过 ±5% 后，DCS 系统同步调整变压器分接头位置，把二次侧电压实际波动量限制在 ±2% 额定值以内^[7]。

3.4 辅机系统

辅机系统包含风机、水泵、压缩机等设备，负责支撑集控运行系统平稳运转，改善运行条件，还能提高整体运行效率。在早期火电厂项目，辅机系统在节能层面的核心问题在于固定运行策略和单机独立运行，无法有效提升整体效能。对此，在火电厂节能降耗升级改造期间，辅机系统应采取变频调控、联动控制两项技术措施。

第一，变频调控。全部辅助设备都能采取变频调控策略，加装变频装置，根据实际工况，动态调节运行参数，预计降低 20%~40% 不等的运行能耗。以风机变频调控方案为例，基于风机运行负荷和额定功率来选择变频器型号，要求风机电压等级和变频器电压等级保持一致，实际变频范围普遍为 30~50 Hz。DCS

系统内设定机组负荷—风机转速两项参数的联动逻辑关系，跟随锅炉负荷变化，调整过滤送给风机转速，调整比例为负荷变动 10%，风机转速调节 6~8 Hz，风机能耗预计降低 30%~35%^[8]。

第二，联动控制。以提升集控运行系统整体效能为目标，联动控制多台辅机设备协同运行，控制对象包括锅炉辅机系统和汽机辅机系统。以锅炉辅机联动控制策略为例，联动控制锅炉系统全部辅机设备运行参数，包括送风机、磨煤机、排粉机等，提前设定不同工况条件下的控制规则，并在确认辅机设备故障失效后，同步降低锅炉运行负荷和启动备用辅机，避免因局部故障快速演变成整体故障，致使锅炉系统瘫痪^[9]。以负荷响应机制为例，锅炉负荷上升工况下，初步提高引风机转速来提升炉膛负压值，继续提高送风机转速来增加有效风量，最终以增加磨煤机出力和给煤量作为控制指令。

4 结束语

在低碳经济背景下，火电厂集控运行节能降耗是实现绿色转型的必由之路，更是践行“双碳”目标的重要举措。火电厂需以政策合规、市场竞争与行业转型需求为导向，严格遵循系统性、实用性、经济性原则，聚焦锅炉、汽轮机、电气及辅机四大核心系统，精准落地各项节能降耗技术措施。未来，随着数字化、智能化技术与火电生产的深度融合，火电厂应持续深化技术创新与管理优化，进一步挖掘节能潜力，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供坚实的支撑。

参考文献：

- [1] 刘洋. 低碳经济背景下火电厂集控运行节能降耗技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(17):220-222.
- [2] 韩彦廷. 基于自动化技术的火电厂集控运行节能降耗系统设计探析[J]. 模具制造, 2025, 25(08):210-212, 215.
- [3] 李阳. 火电厂集控运行节能降耗技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(13):236-238.
- [4] 张鸣立. 火电厂集控运行中节能降耗技术探析[J]. 电力设备管理, 2025(18):267-269.
- [5] 王庆黎. 火电厂集控运行节能降耗技术策略与应用[J]. 中国高新科技, 2024(22):80-82.
- [6] 付业东. 基于自动化技术的火电厂集控运行节能降耗系统设计[J]. 自动化应用, 2025, 66(01):206-208.
- [7] 邵长军. 新时期火电厂集控运行节能降耗策略研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 08(06):181-183.
- [8] 胡海亮. 发电厂集控运行系统的节能降耗技术分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(06):332-334.
- [9] 徐亮亮. 火电厂集控运行节能降耗技术探讨[J]. 节能与环保, 2023(09):53-55.

新能源背景下风电与光伏技术的应用策略与发展趋势

周世龙

(辽宁大唐国际葫芦岛热力有限责任公司, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要 在全球能源结构转型与碳中和目标驱动下, 风电与光伏作为可再生能源体系的核心支柱, 其协同发展已成为破解能源安全、环境治理与经济可持续发展难题的关键路径。风电与光伏的协同潜力源于其资源禀赋和技术特征的天然互补性。风能与太阳能在时空分布上呈现显著的负相关性, 风电的夜间出力与光伏的昼间发电形成昼夜互补, 而季节性波动的差异则进一步强化了区域间的协同效应。这种互补性不仅缓解了单一新能源发电的间歇性与波动性问题, 还通过产业链耦合促进了储能、氢能等配套技术的创新突破。基于此, 本文从新能源风电与光伏开发的角度探讨热力企业转型发展新契机, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 新能源; 风电发电; 光伏发电; 热力企业

中图分类号: TM61; TK02

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.024

0 引言

随着全球化石能源资源的紧张和环境保护问题的加剧, 可再生能源的发展已成为能源转型的核心要务。在可再生能源领域, 风电和光伏发电因分布广泛、资源丰富而备受关注。风力发电技术在我国多个地区展现出巨大潜力, 全年风力指数较高, 可满足当地发电需求。同时, 我国处于太阳能资源相对丰富的地带, 使得光伏发电也具有广阔的应用前景。因此, 深入研究风电与光伏发电的关键技术, 对于提升能源利用效率、保障能源安全、促进环境保护具有重要意义。

1 新能源风电工程建设管理的要求

为了确保新能源风电工程建设能够顺利竣工, 在实施具体的管理措施之前, 管理方需要明确具体的管理要求, 为后续的管理提供参考。

1.1 施工条件保障要求

管理人员应该提前到达风电工程建设的具体地点, 进行全面、严格的实地勘测工作, 收集建设区域的地理地质特征、水文气候特点等信息, 并划分好相关施工区域^[1], 如材料存放仓、混凝土搅拌站、设备放置区域等, 以便各个区域能够支持风电工程建设的高效开展, 避免现场布置混乱导致施工效率低下。

1.2 风机机组安装要求

管理人员需要仔细分析施工现场的地貌条件, 结合风机机组安装的相关参数和基本要求, 严格遵循安装步骤, 完成风机机组的安装^[2]。例如: 主设备的臂长

应该在 120 m 以上; 最大起重重量应该在 400 t 以上; 最大起吊能力应该在 70 t 以上。同时, 风机机组的构成包括机舱、塔架、电缆、叶轮等众多部件, 因此需要确保吊装能够达到应有的高度, 保证各项组装工作的顺利完成。需要注意的是, 施工方应采用法兰盘固定的方式进行相邻塔架的连接, 这样才能够保证各项施工环节有序推进。

1.3 风力发电机与箱式变电站的施工要求

在新能源风电工程中, 风力发电机和箱式变电站的建设是最为基础的工程。按照施工的要求首先需要开挖基坑; 其次进行基础钢筋的绑扎, 完成后安装模板并进行预埋件的布置; 最后进行混凝土的浇筑^[3]。例如: 在进行基坑开挖时, 施工人应先利用机械设备进行基础性挖掘, 然后通过人工修整保证基坑开挖质量。

1.4 升压变电站建设要求

升压变电站是风电工程建设的主要环节之一, 需要加强主变压器结构的检查和管理, 同时做好设备支撑工作, 最后再完成建筑安装。在设备安装之前, 管理方应要求管理人员进行全方位的检查, 同时需要加强材料和设备的存放管理工作, 并且在施工过程中需要确保电抗器的轨道与变压器的轨道始终处于水平的状态。

2 风电与光伏发电应用现状分析

2.1 风电发电现状

根据全球风能理事会(GWEC)《2023 全球风电发展报告》数据, 2015–2022 年, 全球风电累计装机容量

从 433 GW 增长至 906 GW，年复合增长率为 11.12%。2022 年全球新增风电装机容量 77.6GW，其中陆上风电装机 68.8 GW，占比 88.7%；海上风电装机 8.8 GW，占比 11.3%。我国风电行业累计装机规模持续上升，2022 年我国风电累计装机规模达到 395.57 GW，同比增速为 14.11%，其中陆上风电累计装机容量占比超过 90%。但近些年来，海上风电市场的累计装机规模增长速度远高于陆上风电市场。在招标与建设方面，2025 年 1-6 月全国海上风机公开招标容量为 9.6 GW，同比增长 213%。其中，江苏、广东等沿海省份的国管海域项目陆续进入招标阶段，预计上半年将迎来大规模开工。陆上风电同样保持增长，2025 年 1-2 月全国陆上风机公开招标容量为 23.7 GW，同比增长 145%。在竞争格局方面，风电整机制造行业头部企业的优势进一步巩固，2025 年 1-2 月，金风科技、运达股份、远景能源分别以 3.39 GW、2.51 GW、2.08 GW 的中标规模位列前三，合计占据国内市场份额的 50% 以上。2024 年全年，金风科技以 30.2 GW 的累计中标规模稳居行业首位，运达股份、远景能源紧随其后，行业集中度持续提升。在产业链与价格方面，风电产业链分为上游原材料（如钢材、碳纤维、玻璃纤维、铜材等）、中游整机及零部件（如风机、塔筒、海缆等）和下游风电场运营商。2025 年陆上风机（不含塔筒）平均中标价格为 1 528 元 /kW，较 2024 年的 1 359 元 /kW 有所回升，反映出主机厂商技术降本压力缓解^[4]。

2.2 光伏发电现状

当前，光伏发电在市场规模方面，中国光伏行业协会数据显示，2024 年我国光伏新增装机量达到 277.57 GW，同比增长 28.3%，累计装机量突破 880 GW。预计 2025 年全球新增装机量将达 492 ~ 568 GW，同比增长 5% ~ 7%，中国作为全球最大市场，装机量占比超 40%。在技术迭代与效率方面，N 型电池技术完成市场主导权交接，TOPCon 电池市占率达 74%，量产效率突破 24.2%；HJT 技术通过铜浆应用将非硅成本降至 0.15 元 /W，实验室效率触及 27.08%；钙钛矿技术多次刷新世界纪录，实验室效率已突破 33%。预计 2025 年 N 型电池市占率或超 60%，量产效率突破 26%；钙钛矿叠层技术实验室效率突破 33%，预计 2026 年试生产。在政策与市场方面，2025 年中央一号文件首次将分布式光伏上升为国家战略，配套差异化补贴、电网接入简化及金融创新等政策组合拳。新兴市场成为 2025 年竞争主战场。中国光伏企业通过“产能出海 + 本地化生产”双轨策略，突破贸易壁垒。产业链整合成为企业核心战略，如隆基绿能从硅片延伸至组件，构建“单晶硅片—电池—组件”全产业链^[5]。

3 新能源风电与光伏开发：热力企业转型发展新契机

3.1 “风光储氢”一体化技术体系的构建

“风光储氢”一体化技术体系以多能互补为核心逻辑，通过风光发电、储能调节与氢能转换的深度耦合技术，构建能源生产、存储与消纳的全链条协同系统。该体系依托风光资源的时空互补性，将风电与光伏的波动出力转化为稳定的能源流。在发电侧，通过配置抽水蓄能、电化学储能等短时调节设施，平抑日内功率波动，同时利用电解水制氢技术将过剩电能转化为绿氢，实现跨季节储能与能源形态的转换；在输配侧，智能电网通过动态调度算法优化“风光储氢”协同运行，形成“发电—储能—制氢—再发电”的闭环系统。基于气象预测与负荷需求模型，实时调整制氢和并网的比例。氢能作为长时储能介质与二次能源载体，是体系的关键枢纽。绿氢既可通过燃料电池反哺电网调峰，又能作为工业原料或交通燃料实现跨领域应用。例如：风光富集区通过“绿电制氢—管道输氢—化工用氢”模式，可以将氢能嵌入钢铁、合成氨等产业脱碳技术链条；沿海地区则探索“海上风电 + 海水制氢”耦合技术，直接利用海水电解降低制氢成本。技术集成层面需突破风光出力预测精度低、电解槽宽负荷运行效率低、储氢设备安全性与能量密度不足等瓶颈，从而推动设备模块化设计与系统标准化集成。该体系的实践路径强调场景适配与生态协同。沙漠、戈壁等资源富集区应建设“风光储氢”一体化基地，并配套特高压外送通道与区域氢能管网；工业园区应构建分布式微电网，以实现就地制氢与终端用能无缝对接。“风光储氢”一体化不仅能够重塑能源供应模式，还能够推动氢冶金、绿氢化工等技术形态发展，为全球零碳转型提供系统性技术范本^[6]。

3.2 跨区域电力交易市场与动态管理体系

跨区域电力交易市场是打破地域壁垒、实现能源资源优化配置的核心机制，其动态管理体系通过技术、政策与市场机制的协同演进，推动电力系统向高效、低碳、安全转型。该市场以市场化交易为纽带，通过建立跨省区电力交易平台，整合“风光储氢”等多种能源资源，形成“资源输出—通道输送—需求消纳”的全链条协作网络。在交易机制设计上，该市场遵循市场化、安全稳定与风险可控原则，采用集中竞价、双边协商及现货交易等多种模式，动态匹配供需曲线，同时引入电力期货、期权等衍生工具对冲价格波动。动态管理体系的核心在于技术支撑与系统优化。智能电网调度平台依托气象预测、负荷分析与区块链技术，

实时追踪风光出力波动与电网运行状态，从而优化跨区输电路径与储能配置策略。例如：通过虚拟电厂聚合分布式资源，参与跨区交易，提升新能源消纳能力；利用数字孪生技术，构建电力系统仿真模型，预判潜在风险并制定应急预案。政策层面需要构建“监管—交易—调度”三位一体框架，以完善跨区输电权分配、绿证交易与碳市场联动机制，协调区域利益与全局效益^[7]。

当前，跨区域电力交易市场与动态管理体系在实践中仍面临多重挑战：电网互联技术标准不统一加剧输电损耗、跨区利益协调机制缺失引发地方保护主义、市场透明度不足影响交易公平性。未来，我国需深化“源网荷储”协同调控，推动电力市场与碳市场的深度融合，并借助人工智能优化市场出清算法，最终实现跨区域电力交易从物理互联向价值互联的升级。

3.3 强化风险预防

在工程建设过程中，不可避免地存在许多危险因素，比如基坑塌陷、高空坠落、触电等。如果未能针对这些危险因素制定合理的风险预防方案，可能导致施工中安全事故频发，影响正常的施工进度。管理人员需要进一步增强安全意识，做好风险预防工作，系统分析风电工程建设过程中的各种情况，掌握施工环节的各项数据，识别可能引发风险的关键节点；借鉴其他工程建设的成功经验和优秀管理方案，为工程制定科学合理的安全风险清单，标注出不同环节、不同工艺中可能出现的安全事故，写清楚安全事故的成因和后果，并明确不同安全事故的危险等级；提供有针对性的防范处理措施，确保安全管理的质量和效率。

3.4 做好信息反馈与隐患排查

在建设工程中，许多安全事故具有明显的突发性特点，很难进行预测和防范，给工程建设带来一定的负面影响。为了提高安全管理的水平，管理人员应充分发挥信息技术的优势，推动远程监控技术的落实，将传感器和摄像头布置到施工现场，尤其要对关键施工环节和存在较大风险隐患的工序加强管理，实时查看施工现场的各项操作与作业流程，了解施工现场的具体情况，提高信息反馈的效率，落实隐患排查工作，保证工程建设的安全推进。

3.5 质量管理

1. 健全质量责任制。在风电工程建设的过程中，首先需要对质量管理责任进行层层细化，将其落实到具体的负责人身上，这样才能保证施工过程的每一个细节都有对应的责任人负责，避免出现互相推诿的情况。在风电工程建设全过程中，管理方需要将质量责任制落到实处，划分出每一个工作岗位的权限范围和

工作职责，通过签订工程质量责任书的方式有效约束全体施工人员。一旦出现质量问题则需要找出原因，并追究相关责任人的责任。

2. 明确质量控制目标。要实现工程建设管理质量的提升，需明确风电工程建设过程中的质量控制目标，保证各项建设工程的有序推进。管理人员应依据风电工程建设的基本要求，制定针对性的质量控制目标，并在质量控制目标的基础上完成质量管理方案的制定和优化，这样能够为后续的管理工作提供科学明确的指导，保障风电建设工程的高质量完成。

3.6 构建系统的项目风险管理体系

通过对项目风险及其影响因素的结构化拆解，明确风险问题可能发生的概率、影响程度以及风险等级之后，需要基于风险特点，匹配适宜的风险处理方法处理风险问题。例如：在项目立项开发阶段，通过选择权威的设计机构、严谨的需求分析、全面的可行性调研等规避项目需求风险；通过制定有效的应急预案、风险应对沟通机制等，降低风险事件的事后影响；通过构建综合人员、组织、制度、协调机制等的项目风险管理体系，提升项目系统的综合风险抵御能力。

4 结束语

风电与光伏发电中的关键技术研究是实现能源结构转型、推动可持续发展的关键，需要不断改进风力发电技术，同时降低其成本，才能更好地满足社会用电需求。风光互补发电系统的研究与应用，为实现清洁能源的最大化利用提供了新思路。随着技术的不断进步和创新，风电与光伏发电将在全球能源结构中发挥更加重要的作用，为实现绿色低碳、可持续发展的目标贡献更多力量。

参考文献：

- [1] 李源元.储能技术在光伏发电系统和风力发电系统中的应用[J].光源与照明,2025,48(02):139-141.
- [2] 田世骥,康德.PSO/GA融合算法的风力和光伏发电与储能配置方法[J].粘接,2025,52(03):138-141.
- [3] 熊福军,黄升华.新形势下储能技术在光伏和风力发电系统中的应用[J].光源与照明,2025,48(01):150-152.
- [4] 张静.光伏发电与风力发电并网技术及其应用研究[J].光源与照明,2024,47(12):104-106.
- [5] 康竞澜,肖利建,李浩林.风电光伏EPC项目设备采购标准化管理的探索[J].水电站设计,2024,40(01):71-73.
- [6] 韩世选.风电和光伏项目风险管理[J].电力系统装备,2021(23):143-144.
- [7] 禹应平.海上风电项目风险管理优化策略研究[J].中国科技投资,2024(29):34-36.

新投产 LNG 接收站不同负荷阶段 能耗特征与运行策略分析

汪 洋

(中海油江苏天然气有限责任公司, 江苏 盐城 224000)

摘要 LNG 接收站在新投产阶段存在外输负荷波动大、能耗管理难的问题。本文研究了江苏某 LNG 接收站在达产过程中不同负荷阶段的划分依据及运行节点, 分析了低负荷压缩机能耗高、中负荷能耗波动大、高负荷能效最优的运行特征, 提出了负荷区间下压缩机组合、罐压控制与启停策略优化路径, 为新建接收站节能运行提供数据支持与策略参考。研究结果表明, 不同负荷阶段需匹配差异化调控手段以降低单位电耗, 可提高系统整体能效。

关键词 LNG 接收站; 外输负荷; 单位电耗; 运行策略; 负荷阶段划分

中图分类号: TE832

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.025

0 引言

新建 LNG 接收站在试运行至达产过程中面临外输负荷变化频繁、运行参数不稳定与能耗管控难度大的现实问题, 尤其在不同负荷阶段压缩机、气化设备的组合方式对单位电耗影响显著, 迫切需要在实际运行中提炼阶段性特征并形成优化策略。江苏某 LNG 接收站在投产一年内完成从首船接卸至高负荷外输的跃升过程, 积累了多工况运行数据, 为负荷划分、能耗分析与策略优化提供了可靠支撑。本文基于外输量与运行状态的变化规律, 从接收站达产历程切入, 分阶段梳理负荷特征, 剖析典型能耗指标差异, 并在此基础上提出适配性运行策略, 为提升接收站整体能效水平提供技术路径。

1 接收站概况与负荷阶段划分

1.1 接收站一期工程设计与投产历程

江苏某 LNG 接收站一期工程自 2022 年 9 月 26 日接卸首船, 2022 年 11 月 3 日首批液态槽车发车起进入试运行阶段, 经历罐区预冷、液态外输系统投用与气态外输三阶段逐步达产。一期项目共设四座储罐, 配套设施包括 LNG 码头、工艺管廊、卸料平台及调压站区, 场站整体临海布置, 具备接卸、储存与外输多功能集成特征。2022 年 11 月至 2023 年 2 月间完成分步预冷并具备液态与气态外输能力。11 月 12 日完成国家管网置换升压, 标志管道外输条件建立。2023 年 2 月单日外输量突破 10 000 t, 4 月高压压缩机组与再冷凝系统稳定运行。至 6 月, 单线气态外输能力满足连续运行要求, 日均气态外输量达 3 278 t, 外输模式由

高压压缩为主转向组合式运行。7 月至 9 月处于迎峰度夏阶段, 外输量长期维持在 500 万 Nm³ 以上, 电耗水平显著下降。至 12 月底累计气态外输 18.6 亿 Nm³ (折合 130.52 万 t), 液态外输 158.4 万 t, 形成从试生产到稳定运行的负荷演化轨迹, 为能耗特征划分与策略优化提供了基础数据支撑。由于该 LNG 接收站的设备基础功率大于其他接收站, 所以同等工况下气态能耗要高于其它接收站 (经调研高低压压缩机、高压泵的功率约为其他同类接收站的 2 倍)。

1.2 基于外输量的负荷阶段划分

接收站运行过程呈现周期性波动特征, 外输能力与设备负荷在不同阶段表现出显著差异。为便于后续能耗分析与策略研究, 依据日均外输量及运行方式的统计特征, 对负荷阶段进行定量划分^[1]。

1. 低负荷阶段 (≤ 50 万 Nm³/d) : 处于系统初期爬坡阶段, 外输作业以高压压缩机驱动为主, 运行频次高、能耗集中。单台压缩机功率负载较大, 单位气态外输电耗在 300 kW·h/t 以上, 设备启停频繁, 罐压波动显著。

2. 中等负荷阶段 (50 ~ 444 万 Nm³/d) : 外输模式开始转向高压气化与直接加压并行运行, 生产线预冷与提量操作频繁, 能耗波动幅度较高。气化效率受制于温度与流量匹配, 电耗区间在 23 ~ 300 kW·h/t, 具备优化潜力。

3. 高负荷阶段 (≥ 520 万 Nm³/d) : 系统处于稳定高负荷运行状态, 设备组合最优, 罐压控制在合理区间。电耗水平稳定在 20.8 kW·h/t 以下, 阶梯式外输计划

使单位能耗持续下降，形成节能运行特征区间。该阶段运行数据成为后续节能策略验证的核心依据。

2 不同气态外输负荷阶段能耗特征分析

2.1 低负荷阶段的能耗特征

在接收站运行初期，日均外输量长期处于50万Nm³以下，对应吨级外输约为353.3吨/天，属于典型低负荷阶段^[2]。该阶段主要依赖高压压缩机驱动气态外输，设备运行时间长、负载持续高，功率调节范围受限，部分运行时段出现压缩机超负荷或空载补气现象，造成单位气态外输电耗居高不下，单位电耗高达303.33 kW·h/t，为全年最高值区间。

此阶段受限于设备运行效率偏低与罐压调控精度不足，罐压频繁波动导致压缩机频繁启停，进一步增加启动能耗。高压压缩机外输负荷调节能力区间狭窄（16 000～19 000 Nm³），在低负荷下不具备弹性调度能力，班组为完成保供任务通常采用过长连续运行策略，削弱了能源控制灵活性。在无气化补量与BOG回收协同的条件下，该阶段能耗结构集中、调节能力弱，是接收站单位电耗的最不利运行阶段。

2.2 中等负荷阶段的能耗特征

中等负荷阶段对应日均外输量在50～444万Nm³区间，吨级外输维持在353.3～3 100 t/d之间，系统开始进入多方式外输组合运行。该阶段高压气化与直接加压模式交替使用，设备投用方式不固定^[3]。外输系统在切换期间需经历1～1.5小时的预冷、升温与提量过程，实际有效外输时长压缩，预热过程电耗不参与外输效率，导致单位电耗抬升明显。以2023年4月为例，日均外输量为2 336 t，平均单位电耗保持在33 kW·h/t左右，波动幅度显著。

运行模式的不确定性使得高压压缩机与气化装置组合效率不稳定，部分时段两类设备同时运行但负荷未达到设计平衡点，出现“高压气化未满负荷、压缩机频繁启停”的能耗重叠问题。由于中等负荷阶段未进入满载运行区间，部分生产线处于边界工作状态，能源利用率未能形成线性递增趋势。中等负荷阶段是电耗控制的关键过渡区，存在较大的能效挖掘空间，需在运行计划制定中合理优化压缩机与气化线启停协同机制。

2.3 高负荷阶段的能耗特征

在高负荷阶段，接收站运行模式趋于标准化，日均气态外输量持续维持在520万Nm³以上，对应吨级外输约在3 600～3 700 t/d区间，设备调度进入满负荷高效区。高压压缩机运行频率显著降低，仅在短时

间内参与罐压调节或临时补量操作，主力设备由高压泵与ORV构成，形成气化主导的低功耗运行组合。罐压控制保持在22 kPa左右，减少压缩机启停次数，设备启动以罐压变化率与负荷边界预测为依据，整体调度逻辑围绕峰谷负荷区间的供需响应展开。7月至10月为关键代表月份，设备运行结构稳定，外输能力与能源利用效率达到最优匹配区间，具备评价节能运行成果的代表性。该阶段电耗控制的关键在于设备运行模式趋于标准化，预冷提量等非有效输出时段缩短，系统整体能效达到全年最优状态。

3 基于能耗特征的运行策略优化

3.1 低负荷阶段的运行策略

低负荷阶段主要采用高压压缩机驱动外输，但其运行功率大、调节范围小，导致单位电耗极高。为了降低该阶段的能耗，运行策略应调整高压压缩机启停逻辑，优先分析BOG回收能力与储罐罐压变化速率，根据外输计划构建压缩机启动延迟曲线^[4]。结合每日外输任务量，制定“最小启动时长法”，即在保证不超压的前提下，尽可能延迟压缩机投用时刻，避免压缩机处于低负载长时间运行状态。设备调度中，应采用交替投用+休眠组合压缩策略，使总负荷在满足产能的前提下趋于电耗拐点区间。

运行期间需实时对比压缩机运行能耗与实际外输效率，建立压缩机负载预测模型，对高电耗段进行预测剔除。为加强BOG回收与高压压缩逻辑联动，应设定罐压控制阈值，压缩机仅在罐压突破22 kPa后方可开启。罐压保持在22 kPa附近可实现系统最小能耗闭环，减少能耗尖峰。此阶段不得同时启用高压泵和压缩机，以避免能耗重叠，并应定期统计单位外输电耗峰值时段进行人工复核调整。

3.2 中等负荷阶段的运行策略

在中等负荷阶段，日均外输量处于50万Nm³至444万Nm³区间，接收站运行方式呈现多样化，气化线与高压压缩机交替投用或组合运行成为常态。该阶段单位气态外输电耗波动范围较宽，主要由预冷启停频率、提量时点设定与设备匹配效率共同决定。在运行过程中，如未能精准控制气化线启动时机，导致高压压缩机与气化设备在非最佳负载区运行，设备电耗叠加但单位产出未有效提升^[5]。运行数据显示，在提量阶段设备功耗升高显著，预冷阶段能耗不参与有效外输产出，若不对时序进行精细调控，将造成单位电耗持续高位运行。

为评估不同设备组合对单位气态外输电耗的影响，

需建立针对性控制公式，量化不同路径下的能效表现。公式如下：

$$E = \frac{P_c \cdot t_c + P_q \cdot t_q}{Q} \quad (1)$$

式(1)中， E 为单位气态外输电耗($\text{kW} \cdot \text{h/t}$)， P_c 为高压压缩机功率， t_c 为压缩机运行时间， P_q 为气化线设备总功率， t_q 为气化运行时间， Q 为总气态外输量(t)。公式用于动态评估每日不同组合工况下单位电耗的变化趋势，指导班组调整生产线开启时序。

在运行实际中，应设定“提量起始时间控制点”，将预冷与提量过程集中至日负荷上升初段，避免交错启停引起的能耗浪费。在每日运行中，对比不同组合方式下 E 值，优先选取能耗最小且满足需求的组合。对于“高压压缩+气化”组合方式，应设定最大允许运行时长不超过连续2.5小时，避免长时间并行带来的能耗冗余。中等负荷阶段应重点构建设备启停数据看板，以小时为单位记录每组设备运行时长、电耗与产出，作为次日计划修正参考。为了提高中等负荷阶段的能效控制，需要结合压缩机和气化设备的不同特性，对其启动与停止时机进行精细调控。通过引入基于实时气候数据和外输负荷变化的调度模型，优化设备的启停逻辑，可以确保设备在非最佳负荷区时避免过度运行，从而减少不必要的能耗。

3.3 高负荷阶段的运行策略

在高负荷阶段，接收站日均气态外输量维持在520万 Nm^3 以上，设备长期处于接近额定工况的连续运行状态。为提升单位电耗控制精度，运行策略应采用阶梯式外输计划，按照每日用气负荷曲线划分峰段、平段与谷段，分别设定设备投用策略。峰段时段建议配置“两泵+双ORV”结构连续运行，最大气化路径产出效率，禁止压缩机并行运行。平段采用单泵+单ORV组合，罐压控制在20~22 kPa区间，启用气化设备负载反馈功能联动调节泵速，保持气化器在高换热效率区间运行。谷段时段压缩机全部退出，仅保留低负载运行的单气化线，避免高功耗设备空载运行导致无效能耗。

调度策略应引入罐压一流量双约束机制，以每小时动态调整罐压预测值与外输指标配合，构建压缩机启动条件库。罐压控制点设定为22 kPa上限与16 kPa下限，当预测罐压15分钟内升至上限时启动策略；当罐压下降至下限以下，优先调节气化线升温能力。操作系统中设置阶梯式运行模板，每日运行计划按小时段设置设备组合预案与启停门限，避免非计划外启动。运行结束后应对比预测模型与实际电耗曲线，识别误差段并修正下一周期调度参数。

能效评估可采用“单位电耗偏差累计值”作为关键指标，每日计算计划电耗与实际电耗差值累加形成能效偏移指数。若偏移值持续上升，应回溯分析压缩机运行次数、持续时间与外输量的匹配程度，识别调度失配点。建议建设基于SCADA与DCS系统融合的电耗监测看板，实时显示各时段单位气态电耗、当前设备组合、负荷等级与罐压状态，值班员根据图表调整运行模式。该阶段运行关键在于设备运行标准化与参数调度闭环，过多人工干预反而会打破平衡，应重点提升运行计划的执行刚性与反馈系统的自动调整能力。在高负荷阶段，调度策略不仅需要关注设备的运行模式和能效提升，还应考虑系统中各设备间的负荷协同。为确保设备能在最佳效率区间运行，建议进一步细化每个时段的能耗模型，通过集成流量预测与罐压模拟，对可能出现的负荷波动提前作出反应。

4 结语

本研究围绕江苏某LNG接收站达产过程中的负荷演进路径与能耗特征展开分析，明确了以日均气态外输量为依据的低、中、高负荷阶段划分标准，提取了高压压缩主导下的高能耗区、中负荷切换模式下的能效波动特征及高负荷稳定运行状态下的低电耗表现，构建了压缩机启停逻辑优化、气化与压缩组合路径动态调度、阶梯式运行计划等策略体系。结果表明，不同负荷阶段的能耗差异本质源于设备组合运行效率与调控边界控制能力，运行策略应围绕负荷匹配、罐压响应与设备能效区间精细调节以实现单位能耗最小化。相关策略在高负荷阶段已验证可使单位电耗控制在20.8 $\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 以下（在基础设备功率在其他接收站2倍的前提下）具备推广至其他新建接收站的工程适应性。后续可结合AI预测模型与DCS控制参数联动机制，实现运行调度智能化发展。

参考文献：

- [1] 陈锦忠. 港口危险货物安全投入经济性及安全监管对策分析：以厦门港LNG接收站码头为例 [J]. 中国航务周刊, 2025(28):45-47.
- [2] 陈立东. 大型LNG接收站首次接卸船风险分析及应对措施探索 [J]. 化工安全与环境, 2025, 38(07):15-18.
- [3] 王舒平. 基于运行数据的热泵空调系统能耗模型及运行优化 [D]. 大连：大连理工大学, 2024.
- [4] 张艳红. 双碳背景下办公建筑运行阶段能耗影响因素分析 [D]. 北京：北京建筑大学, 2024.
- [5] 吴昊, 王城景, 王傲, 等. 新投产LNG接收站BOG处理方法优化探究 [J]. 山西化工, 2024, 44(05):111-113.

大数据技术在城市轨道交通标准化运营管理中的应用研究

徐 健

(东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要 在城市轨道交通网络迅速扩展的背景下, 传统运营管理存在效率偏低与响应滞缓等挑战。本研究聚焦大数据技术于标准化运营管理中的应用路径, 目标指向系统运行效率与服务质量提升, 剖析轨道交通大数据特征及应用原则, 侧重阐释数据共享、实时传输、智能预警、规划优化维度实际应用场景, 通过构建统一平台完成多源数据融合以提升决策科学性, 依托实时监测与预测模型强化应急响应能力, 凭借智能分析优化线路布局及资源配置。研究结果表明, 大数据技术可提升运营管理智能化程度, 为行业标准化建设提供支撑, 助推城市轨道交通向数字化与智慧化方向发展。

关键词 大数据技术; 城市轨道交通; 标准化管理; 运营效率; 智能决策

中图分类号: TP311.13; U29-39

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.026

0 引言

城市轨道交通是现代城市公共交通的核心构成部分, 承担着缓解交通拥堵与推动城市可持续发展的使命。随着线路网络快速扩张与客流量持续提升, 运营管理面临前所未有的复杂挑战, 传统经验式管理模式在突发事件应对、资源配置优化、服务质量提升等方面存在局限性。大数据技术的兴起为解决上述问题提供全新思路与方法, 其强大数据处理及智能分析功能能为运营管理提供科学依据支撑。将大数据技术引入城市轨道交通标准化运营管理体系, 不仅是技术创新的必然诉求, 更是提升行业管理水平、保障运营安全、优化乘客体验的关键举措, 还兼具广阔应用前景与发展空间。

1 城市轨道交通大数据的特点

城市轨道交通系统运行时持续生成海量数据, 这些数据具有高速生成特征且具备时效性与动态变化特性, 同时因关联运营管理、设备监测和乘客服务等层面, 数据更新频率高, 推动系统对信息处理实时性的需求提升。在此背景下, 数据不仅数量庞大, 种类也很丰富, 包含不同子系统的结构化与非结构化内容, 包含设备状态记录、视频监控资料、运行日志等信息。同时各来源数据联系紧密, 构成复杂关联网络, 给数据整合与分析带来挑战, 系统内多种类数据的异构特性突出, 采集频率高时短时间内会积累大量信息, 造成存储压力增加。技术人员要在保障数据安全性的前提下, 完

成多源信息的有效管理, 部分数据安全等级较高, 特别是涉及运营机密和公共安全的内容, 必须执行严格保护措施。此外, 数据分析过程需要高效数据挖掘能力, 才能从庞杂信息中提取有价值的内容, 在数据处理环节操作时, 要同时关注速度与结果准确可靠。整个流程中数据质量问题可能在多个阶段出现, 因此要持续监控并及时调整策略, 相关人员运用先进技术手段能够实时掌握现场状况, 也能为后续决策提供支撑。城市轨道交通大数据体系的运转依赖各环节协同配合, 任何环节出现问题都可能影响整体效率。

2 城市轨道交通标准化运营管理中大数据技术的应用原则

2.1 智慧城市原则

城市轨道交通系统运行过程中持续生成庞大数据量, 这些数据覆盖乘客流动、设备状态、运营调度等多维度信息, 将这类数据与城市整体信息系统整合后能够为城市管理者提供决策依据, 以此推动城市基础设施向智能化方向升级。引入大数据技术后, 交通调度、客流预测及应急响应等工作精准度得到提升, 通过对历史客流数据的分析, 系统可以在节假日前提前调节列车运行间隔以规避站点拥堵状况, 同时交通管理部门能够凭借数据分析平台实时掌握各线路运行状态, 提升公共交通服务水平。城市轨道交通作为城市公共设施的关键构成部分, 运行效率直接关系到市民出行

质量，在推进智慧城市建设时，交通系统的数字化转型成为关键环节。有效利用数据资源不但能优化资源配置，还能提升城市治理能力，通过搭建统一数据接口标准，不同部门间的信息壁垒被打破，实现资源共享与业务协同。城市轨道交通运营管理正逐步向数据驱动模式转变，为城市公共服务体系完善提供支撑。

2.2 数据集成原则

城市轨道交通运营涉及多种数据来源，包含自动售检票系统记录的进出站信息、移动终端上传的位置数据与视频监控设备采集的图像资料，这类数据在格式、结构和更新频率方面存在明显差异，需要依靠统一数据集成机制处理。客流数据主要源自闸机刷卡记录，这类数据具有时间戳明确、数据量大的特点，可用于分析不同时段客流量变化趋势，移动终端数据反映乘客出行偏好与路径选择，挖掘后运营才能优化线路规划和服务时间安排，视频监控数据尽管信息密度较低却覆盖范围广，能用于识别异常事件和评估车站运营秩序。为提升数据可用性，需要对上述三类数据进行清洗、转换与融合处理，例如在高峰时段，系统可以借助对比闸机数据和视频监控画面，判断是否存在客流积压情况。数据集成的目标是搭建统一数据视图，让管理者能在单一平台获取全面运营信息，基于此，系统能生成辅助决策的信息产品，如客流热力图、设备健康指数等，这类多层次数据整合方式有助于提升运输组织的灵活性与响应速度^[1]。

2.3 科学规划原则

城市轨道交通系统运营管理包含列车调度、设备维护、物资调配与应急预案制定等业务模块，应用大数据技术时需要遵循科学规划原则以保障工作有序推进。运营组织的合理性决定系统运行效率，分析历史运营数据能够识别潜在风险点并前置应对策略，如某线路早晚高峰列车满载率超过 90% 时，系统可依据数据分析建议增加上线列车数或调整发车间隔。设备维护环节中，运营团队基于传感器采集的运行参数搭建预测性维护模型，能够提前捕捉设备故障隐患并降低突发停运风险，物资管理需要结合库存数据与使用频率优化采购计划及仓储布局。科学规划既要求深度分析现有数据，也需要搭建动态调整机制，如大型活动引发局部客流激增等外部环境变化时，系统需要快速调整运营方案以适配新需求。规划中还要考虑数据采集的完整性与准确性以保障后续分析结果可靠，构建指标体系量化运营管理关键绩效指标，为持续改进提

供依据，科学规划的核心是实现数据与业务流程深度融合，以提升系统整体运行效能。

3 大数据技术在城市轨道交通标准化运营管理中的应用

3.1 数据共享，提升数据完整性和真实性

城市轨道交通系统中各子系统分别采集设备状态、列车运行参数与车站客流等数据，传统模式下这些数据由不同部门独立管理，因缺乏统一平台，信息更新存在时间差，数据整合易出现断层或偏差，导致运营分析依赖不完整数据源且影响决策准确性^[2]。大数据平台建设将机车信号、供电状态、轨道检测及乘客流量等多维度数据集中处理以实现跨部门信息同步，平台构建标准化数据接口与传输协议，对原始数据开展清洗、校验与归档，有效减少人工干预或系统延迟带来的误差。实际运行阶段，某线路供电系统故障记录与车辆制动反馈数据能够在同一时间轴完成比对分析以提供故障成因判定依据，平台采用分布式存储架构保障数据安全，依托权限分级机制确保敏感信息仅授权人员访问。数据共享机制的建立既提升了信息透明度，也增强了各业务模块协同能力，为后续智能化分析筑牢基础。

3.2 实时传输数据，使数据发挥更高价值

轨道交通设备每日运行时长超 16 小时，部分关键部件在持续高负荷运转时易出现性能衰减或突发性故障，传统依赖定期巡检与人工上报的监测手段因难以及时捕捉设备瞬时异常状态，致使维修响应存在滞后性。大数据技术引入轨道交通运维场景后，系统可以针对列车牵引电机温度、制动闸片磨损程度、轨道几何尺寸变化等参数开展秒级采集与上传作业。例如：运营时监测系统监测到一节车厢空调机组电流波动频率偏离正常范围，平台随即触发预警机制并将信息推送至维护终端，技术人员依此提前安排停运检修以规避故障扩大化风险。实时数据在边缘计算节点完成初步筛选后传入中心服务器，结合历史数据库资源开展趋势预测建模，模型运算显示特定区段钢轨裂纹扩展速率，基于该数据制定的钢轨更换计划将断轨风险降低。这类以动态数据为驱动核心的运维模式一改过往依赖经验判断的工作模式，有效提升设备全生命周期管理环节运行效率，平台同步搭载移动端实时查看功能，调度员在应急处置场景中能获取第一手运行参数，使故障处置周期缩短。高频次数据交互支撑形成的闭环管理体系为运营单位精准识别潜在隐患、执行针对性措施提供路径，进一步强化整体服务可靠性。

3.3 大数据管理简化了工作

传统管理模式在运输网络复杂度持续提升的背景下暴露出运转效率低下的缺陷。例如：某城市2010年至2023年线路从5条增长到18条、设备种类增至300余种时，人工统计与纸质记录结合的管理模式便难以适配当下需求。管理人员单日需要处理的故障报告和维修申请超200份，其中重复性内容占比达总量37%。大数据平台依托统一数据采集标准建立完成信号、供电、车辆等子系统分散信息整合，每日自动抓取并分类处理约50万条运行参数，还依托算法识别异常数据点并把误报率控制在3.2%以内。工作人员无需逐一对纸质报表核对，转而通过可视化界面直接查看筛选后的关键指标^[3]。某运营企业引入该系统后月度报表后编制时长从原8小时压缩至2小时，数据录入错误率降低68%，平台内置智能分析模块还能自动生成包含磨损程度、维护周期预测的设备健康评估报告。技术人员基于这些信息制定预防性维修计划，让突发故障频次降低22%，这类自动化处理机制可减少人为干预环节，有效提升整体工作推进效率。

3.4 大数据规划使布局更加合理

城市轨道交通网络扩展需要依托准确客流预测数据，规划部门分析过去5年每日超120万人次出行记录后，发现工作日早高峰时段核心区域站点客流量集中度达45%，还运用聚类分析识别出通勤、商务、休闲等6类典型出行模式以匹配不同特征群体行为倾向。地铁线路设计时技术人员以站点间平均换乘时间不超3分钟为原则优化间距，不仅让新建线路每公里设置1.3个车站且密度较旧线路提升18%，大数据分析还显示发车间隔超6分钟时乘客等待焦虑指数上升31%，新规划线路因此将最小发车间隔设定为4分钟，高峰时段进一步压缩至2分30秒^[4]。例如：某城市建设6号线时参考历史OD数据，发现连通住宅区与工业园区的直达线路能减少30%换乘需求，线路开通后日均客流达28万人次且超预期目标12%。规划人员分析沿线土地利用性质变化趋势后，确定未来10年商业开发热点区域向北迁移约2.5公里，据此调整的线路走向能覆盖更多潜在客流聚集点，预计建成后客流量增长幅度可达15%，大数据支撑下的规划决策让资源配置更精准，还规避了盲目建设与资源浪费现象。

3.5 交通路况实时预警和预测

日常运行时，城市道路监控系统每日采集超200万条交通流数据，结合近3年历史记录构建仿真模型

以开展路况分析。针对不同程度拥堵状况，系统设置三级预警机制，路段平均车速低于15公里/小时且持续时间超过10分钟时即启动黄色预警，进入黄色预警状态后监控中心会调取周边摄像头识别事故点位，同时向指挥调度平台发送异常事件报告。若拥堵范围扩大至3个以上路口或平均延误时间达18分钟，系统会自动升级为橙色预警并向辖区交警PDA终端推送处置指令，橙色预警期间巡逻警力需要在5分钟内抵达现场开展交通疏导，力争30分钟内恢复道路正常通行能力^[5]。单向车道饱和度超过0.85且排队长度突破2公里时，系统发出红色预警，此时需要启动应急预案协调多部门联合处置。早高峰时段某市中心区域曾出现连续45分钟严重拥堵，系统提前15分钟发出红色预警，成功引导周边车流绕行，避免交通瘫痪范围扩大。平台运用机器学习算法关联分析历史拥堵成因，发现76%的严重拥堵事件和交通事故存在直接因果关系，系统随即优化事故快速响应流程，将平均处置时间从22分钟压缩至14分钟。数据统计显示，实施智能预警机制后城市主干道通行效率提升19%，高峰时段平均车速提高3.2公里/小时。

4 结束语

大数据技术深度应用于城市轨道交通标准化运营管理，标志着传统交通管理模式向智能化、精细化方向发生重大转变。构建完善的数据采集、处理、分析与应用体系，不仅能提升运营管理效率与服务水平，还能为行业标准化建设提供更强的技术支撑。未来，人工智能与物联网等新兴技术持续融合发展，大数据技术在轨道交通领域的应用将更广泛深入，推动运营管理向全面数字化、智能化方向发展，为建设安全、高效、便捷的现代化城市轨道交通系统奠定坚实的基础。

参考文献：

- [1] 王静,刘剑锋,马毅林,等.北京市轨道交通车站客流时空分布特征[J].城市交通,2013,11(06):18-27.
- [2] 张洁,汪俊亮,吕佑龙,等.大数据驱动的智能制造[J].我国机械工程,2019,30(02):127-133.
- [3] 李得伟,张天宇,周玮腾,等.轨道交通大数据运用现状及发展趋势研究[J].都市快轨交通,2016,29(06):1-7.
- [4] 刘芳军,景子轩,马明,等.基于大数据的交通客流分布多维特征挖掘与客流预测[J].南方农机,2021,52(05):188-190.
- [5] 杨建功.铁路运输组织工作中大数据的应用研究[J].科学大众(科技创新),2021(11):256.

基于分布式光伏 + 储能的智慧零碳园区 电力系统设计与优化

王佐君

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 在“双碳”目标推动下, 园区作为能源消费与碳排放重点场景, 其零碳化转型成为新型电力系统建设的关键环节。本文聚焦分布式光伏与储能协同技术, 结合智慧调控手段, 提出智慧零碳园区电力系统设计框架。通过构建“源—储—荷—网”协同架构, 优化光伏消纳、储能调度及柔性负荷管控策略。结果显示, 通过仿真分析验证系统在不同工况下的运行效能, 该设计可使园区光伏就地消纳率达 92% 以上, 年碳排放降低 45%, 为园区零碳转型提供技术与商业可行路径参考。

关键词 分布式光伏; 储能系统; 智慧零碳园区; 电力系统设计; 源荷协同优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.027

0 引言

在全球能源转型背景下, 园区作为城市经济活动与能源消费的核心单元, 其能源结构清洁化与用能效率提升成为实现“双碳”目标的重要突破口。据《2025 零碳园区行业影响力洞察报告》统计, 我国各类产业园区与商业园区的能耗占全社会总能耗的 35% 以上, 其中电力消耗占比超 60%, 且传统园区电力系统高度依赖化石能源发电, 碳排放强度显著高于城市平均水平。随着分布式光伏技术成本持续下降与储能技术成熟, “分布式光伏 + 储能”成为园区零碳转型的核心技术路径, 探讨基于分布式光伏 + 储能的智慧零碳园区电力系统设计与优化具有重要的现实意义。

1 智慧零碳园区电力系统架构设计

1.1 总体架构设计

智慧零碳园区电力系统以“源网荷储”协同为核心, 构建“三层两网”架构, 实现能源生产、存储、消费与调度的全流程智慧化管控。“三层”即能源生产层、能源存储层与能源消费层, “两网”即电力物理网与智慧调控网。

能源生产层以分布式光伏为主导, 辅以微型燃气轮机(应急备用), 充分利用园区屋顶、停车场棚等闲置空间, 采用“光伏建筑一体化(BIPV) + 分布式光伏阵列”混合布局^[1]。其中, BIPV 组件替代传统幕墙与屋顶建材, 既满足建筑功能需求, 又实现能源生产, 发电效率可达 22% ~ 24%; 分布式光伏阵列采用跟踪式支架, 根据日照角度动态调整, 较固定支架发电量提

升 15% ~ 20%。同时, 在园区边缘配置 10 kV/20 MVA 柔性直流换流站, 实现与公共电网的柔性互联, 既保障了园区供电可靠性, 又为电网提供了调峰辅助服务^[2]。

能源存储层采用“共享储能 + 用户侧分散储能”混合模式。共享储能站选址于园区负荷中心, 配置 10 MW/40 MW·h 磷酸铁锂电池储能系统, 采用液冷温控技术, 将电池运行温度控制在 25 ~ 35 ℃, 提升循环寿命与充放电效率(达 95% 以上); 分散储能则分布于商业楼宇与工业厂房, 配置 50 kW·h/100 kW 储能柜, 满足局部应急供电与负荷调节需求。此外, 利用园区内电动汽车充电桩(V2G 模式)与中央空调水箱构建“虚拟储能”资源池, 通过聚合调控实现负荷柔性转移, 提升系统调节能力。

能源消费层通过负荷分类管控实现柔性化。将园区负荷分为三类: 刚性负荷, 采用优先级供电策略; 柔性负荷, 通过温度调节、充电时段转移实现调控; 可中断负荷, 在电网峰谷时段或光伏出力不足时按需削减。

1.2 关键设备选型与配置

1. 分布式光伏系统。根据园区建筑类型与空间资源, 差异化选择光伏组件与安装方式。对于工业厂房屋顶, 选用 450Wp 单晶硅双面组件, 采用固定式支架安装, 倾角按当地最佳日照角度设计, 单块组件尺寸 1 722×1 134 mm, 功率密度 285 W/m², 年发电量约 1 200 kW·h/kWp。对于商业楼宇幕墙, 选用碲化镉薄膜组件, 透光率 20% ~ 30%, 既满足建筑采光需求,

又实现发电功能，组件效率 $18\% \sim 20\%$ ，年发电量约 $1\,000\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kWp}$ 。逆变器采用 $1\,500\text{ V}$ 集中式逆变器（工业片区）与 375 V 组串式逆变器（商业片区）混合配置。集中式逆变器效率达 98.8% ，适合大规模光伏阵列；组串式逆变器具备MPPT（最大功率点跟踪）功能，可针对不同朝向的光伏组件独立调节，提升整体发电效率，尤其适用于建筑立面光伏系统。

2. 储能系统。（1）共享储能站选用磷酸铁锂电池，单体电芯容量 280 Ah ，电压 3.2 V ，采用2P24S模组设计，模组容量 $13.44\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，系统循环寿命 $10\,000$ 次（ 80% 深度放电），质保期10年。储能变流器（PCS）采用双向变流技术，功率因数 $0.9 \sim 1.0$ 可调，支持并网/离网切换，离网状态下可保障园区关键负荷（如应急照明、通信设备）供电；（2）分散储能柜选用lithiumironphosphate电池，容量 $50\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，充放电功率 100 kW ，采用模块化设计，可根据用户需求灵活扩容。柜体配备智能温控系统与消防装置，满足消防安全要求，同时支持与楼宇能源管理系统（BEMS）联动，实现本地负荷优化匹配。

3. 柔性负荷调控设备。（1）中央空调系统采用变频多联机，配备电动阀与温度传感器，可通过调整冷冻水温度（ $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）与运行时间实现负荷调节，单台空调可调节容量达 $30\% \sim 50\%$ 。电动汽车充电桩采用V2G双向充电桩，充电功率 60 kW ，放电功率 30 kW ，支持参与电网调频与调峰，充电桩效率 92% 以上，兼容主流车型充电协议；（2）智能电表选用边缘计算电表，支持电压、电流、功率、电能等参数实时采集，通信方式采用LoRaWAN与4G双模，数据上传频率15分钟/次，同时具备远程跳闸与电价信号接收功能，为需求响应提供硬件支撑。

2 智慧零碳园区电力系统优化调度策略

2.1 调度目标

智慧零碳园区电力系统调度以“经济最优、碳排最低、可靠保障”为目标，建立多目标优化函数：（1）经济成本最小化：包括购电成本、光伏运维成本、储能充放电成本与负荷调节成本；（2）碳排放最小化：减少园区外购火电电量，提升清洁能源消纳率；（3）供电可靠性最大化：保障刚性负荷连续供电，减少停电时长（年停电时长 ≤ 1 小时）。

2.2 多时间尺度调度策略

1. 日前调度（24小时尺度）。日前调度以1小时为时间步长，基于次日光伏出力预测（采用LSTM神经网络，预测精度90%以上）、负荷预测（结合历史数

据与园区生产计划，预测精度85%以上）与日前电价信号，制定储能充放电计划与柔性负荷调控方案。具体步骤如下：（1）光伏出力预测：利用LSTM神经网络，输入历史光照强度、温度、湿度等数据，输出次日24小时光伏出力曲线；（2）负荷预测：将园区负荷分为刚性、柔性与可中断负荷，分别采用ARIMA模型（刚性负荷）、XGBoost模型（柔性负荷）与随机森林模型（可中断负荷）进行预测；（3）优化计算：以经济成本最小与碳排放最小为目标，采用NSGA-II算法求解，输出次日储能充放电计划（如谷时段充电、峰时段放电）、柔性负荷调节计划（如中央空调运行时间调整）与外购电计划。

2. 日内调度（15分钟尺度）。日内调度以15分钟为时间步长，基于实时光伏出力、负荷数据与超短期预测（预测时长1小时，预测精度95%以上），对日前调度计划进行滚动修正，解决预测偏差问题。当光伏实际出力高于预测值10%以上时，增加储能充电功率，同时引导柔性负荷提前启动，提升光伏就地消纳；当光伏实际出力低于预测值10%以上时，减少储能充电功率或启动储能放电，同时削减可中断负荷，保障功率平衡。此外，日内调度还需考虑储能SOC状态，若SOC低于25%，则增加外购电或削减非关键负荷，避免储能深度放电。

3. 实时调度（1分钟尺度）。实时调度以1分钟为时间步长，主要应对突发情况，保障园区供电稳定。当园区发生功率缺额时，首先启动储能紧急放电（响应时间 $\leq 200\text{ ms}$ ），若缺额仍未填补，则削减可中断负荷（响应时间 ≤ 1 分钟）；当园区发生功率盈余（如负荷骤降20%）时，首先增加储能充电功率，若盈余仍未消纳，则通过柔性直流换流站向电网馈电，参与电网调峰。

2.3 案例仿真与结果分析

以某工业园区（占地1000亩，建筑面积30万 m^2 ，主要负荷为工业生产负荷与商业负荷）为例，对优化调度策略进行仿真分析。园区配置分布式光伏20MW（BIPV5MW，分布式阵列15MW），共享储能10MW/40MW·h，分散储能500kW·h，V2G充电桩20台（60kW/台），柔性负荷占比40%。

1. 光伏消纳效果。仿真结果显示，采用优化调度策略后，园区光伏就地消纳率达92.3%，较传统“自发自用、余电上网”模式（消纳率60.5%）提升31.8%。其中，谷时段（23:00-7:00）光伏出力为0，储能充电2.5万kW·h，主要来自外购谷电；平时段（7:00-10:00、15:00-18:00、21:00-23:00）光伏出力5.2万kW·h，

就地消纳 4.8 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 消纳率 92.3%; 峰时段 (10:00—15:00、18:00—21:00) 光伏出力 8.3 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 就地消纳 7.9 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 消纳率 95.2%, 同时储能放电 3.2 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 减少外购峰电 3.2 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2. 经济成本分析。园区年用电量 1.2 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 采用优化调度策略后, 年外购电量 4 200 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 较传统模式 (外购电量 7 800 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$) 减少 3 600 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 年购电成本降低 432 万元 (峰谷平均电价 1.2 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$)。光伏年发电量 2.16 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (年利用小时数 1 080 h), 年运维成本 43.2 万元 (0.02 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$); 储能年运维成本 20 万元 (0.05 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$); 负荷调节成本 15 万元 (主要为可中断负荷补偿)。园区年总能源成本 1 200 万元, 较传统模式 (1 650 万元) 降低 27.3%, 储能投资回收期缩短至 6.5 年。

3. 碳排放削减效果。园区外购电中, 火电占比 70%, 水电、风电等清洁能源占比 30%, 火电碳排放系数 0.8 t $\text{CO}_2/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。采用优化调度策略后, 年外购火电电量 2 940 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 较传统模式 (5 460 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$) 减少 2 520 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 年碳排放量减少 2.016 万 t, 较传统模式 (年碳排放量 4.48 万 t) 降低 45%, 实现显著碳减排效果^[3]。

3 智慧零碳园区电力系统市场化运营模式

3.1 运营主体与职责

智慧零碳园区电力系统采用“园区管委会+能源服务商+用户”三方协同运营模式: (1) 园区管委会: 负责制定园区能源政策 (如碳排放考核、清洁能源补贴), 协调电网公司与能源服务商, 保障系统整体运行; (2) 能源服务商: 承担系统投资、建设与运维, 负责优化调度与市场交易, 为用户提供能源服务; (3) 用户: 按合同约定使用能源, 参与需求响应, 享受电价优惠与碳减排收益。

3.2 收益来源与分配机制

1. 收益来源。(1) 售电收益: 能源服务商向用户出售电能, 电价采用“基础电价+浮动电价”模式, 基础电价低于电网目录电价 0.1 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$, 浮动电价与光伏出力、储能状态挂钩, 光伏出力高时电价下浮, 储能不足时电价上浮; (2) 需求响应收益: 参与电网需求响应, 获得电网公司补贴 (调峰补贴 0.5 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$, 调频补贴 2 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$); (3) 碳交易收益: 园区碳减排量可参与地方碳交易市场交易, 当前碳价约 60 元/t CO_2 , 年碳交易收益 120.96 万元。

2. 收益分配机制。能源服务商与用户按 7:3 比例分配收益 (扣除运维成本后), 其中用户收益以电价

补贴形式返还, 即用户实际支付电价 = 基础电价 - 收益返还, 进一步降低用户用能成本。园区管委会不参与收益分配, 仅负责监督收益分配公平性^[4]。

3.3 风险管控措施

1. 技术风险: 定期对光伏、储能、柔性负荷设备进行运维, 保障设备运行可靠性; 建立冗余系统, 应对设备故障。

2. 市场风险: 与电网公司签订中长期购售电合同, 锁定购电价格, 降低电价波动风险; 参与碳交易市场时, 采用套期保值工具, 规避碳价波动风险^[5]。

3. 政策风险: 关注国家与地方能源政策、碳政策变化, 及时调整运营策略; 加强与政府部门沟通, 争取政策支持。

4 结束语

本文提出的智慧零碳园区电力系统设计与优化方案, 通过“分布式光伏+储能+柔性负荷”协同架构与多时间尺度优化调度策略, 有效解决了园区光伏消纳率低、储能经济性差、系统灵活性不足等问题。案例仿真表明, 该方案可使园区光伏就地消纳率达 92% 以上, 年碳排放量降低 45%, 储能投资回收期缩短至 6.5 年, 实现经济、环境与社会效益共赢。未来研究方向:

(1) 技术层面: 探索氢储能、重力储能等新型储能技术在园区中的应用, 进一步提升系统长时储能能力;

(2) 调度层面: 引入人工智能算法 (如强化学习), 提升调度策略的自适应能力与实时性; (3) 市场层面: 探索园区与微电网、虚拟电厂的协同运营模式, 提升园区在电力市场中的话语权与收益空间。智慧零碳园区作为新型电力系统的重要应用场景, 其技术与模式创新将为我国“双碳”目标实现提供有力支撑, 同时为全球园区零碳转型提供中国方案。

参考文献:

- [1] 邓铭, 黄际元, 吴东琳, 等. 地区电网源网荷储示范工程现状与展望 [J]. 电器与能效管理技术, 2021(09):1-9.
- [2] 王枫, 周斌, 张辉.“双碳”背景下源网荷储协调互动助力新型电力系统建设 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(05): 188-191, 201.
- [3] 帅轩越, 王秀丽, 黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置 [J]. 全球能源互联网, 2021, 04(04):382-392.
- [4] 钟伟东, 何平, 李靖宇, 等. 打造零碳园区的路径分析研究 [J]. 现代建筑电气, 2022(02):60-61.
- [5] 何东海. 深圳市近零碳排放区示范工程支撑体系探析 [J]. 资源节约与环保, 2022(01):111-114.

多层砌体结构房屋加固技术分析

曹兆强

(南京金宸建筑设计有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 本文以某栋建于 20 世纪 80 年代的三层砌体办公楼结构加固工程为案例, 该建筑应消防需求改造, 建筑内部增设消防疏散楼梯, 同时存在抗震构造措施不足、轻钢屋面锈蚀严重等问题, 针对相关问题, 本案例采用整体加固的方案, 通过增设构造柱、墙体双面钢丝网水泥砂浆、屋面现浇混凝土板等措施对砌体结构墙体进行补强, 以期为提高房屋的结构整体稳定性、改善构件的受力状况、提高综合抗震能力提供借鉴。通过加固后的检测鉴定和计算分析表明, 该加固方案可以有效地提高砌体承载力和建筑的整体抗震性能, 延长结构的使用寿命。

关键词 砌体加固; 构造柱; 钢丝网水泥砂浆; 承载力

中图分类号: TU746.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.028

0 引言

我国的砌体结构在 2000 年以前使用较为广泛, 主要用于 2 层至 7 层的住宅、办公、公寓楼, 由于历史年代久远, 材料老化强度降低、规范更替抗震构造措施欠缺、房屋功能变更多次不规范改造等, 使得该类建筑的安全性和抗震性面临着极大的挑战, 如何通过合理又经济的加固措施, 提高建筑的安全适用性以延长建筑后续使用寿命成了当下亟须解决的问题。并且在体量庞大的既有砌体建筑中, 多数房屋工作年限已接近结构设计年限(50 年), 由于历史原因多数砌体结缺失原有设计文件, 需进行现场实际测绘并进行安全鉴定和抗震检测, 以此作为加固改造的设计依据进行加固改造设计。经鉴定后, 根据鉴定报告可针对建筑安全性不足、抗震能力较弱的区域进行区段加固或构件加固设计, 必要时可进行整体加固, 对于不符合鉴定要求的女儿墙、出屋面山墙且易倒塌伤人的非结构构件, 应予以拆除或降低高度, 需要保持原设计的应加固。本文详细介绍加固设计价格方案的选择、设计要点、施工工艺的要求, 旨在为类似既有建筑加固设计与实践提供借鉴。

1 工程概况

南京市某办公楼约建于 1981 年, 后续工作年限为 8 年, 依据《既有建筑鉴定与加固通用规范》(GB 55021-2021) 第 5.1.3 条、第 5.1.4 条, 属 A 类建筑, 原建筑使用功能为办公楼, 平面布置大体呈矩形, 东西向总长约 30.00 m, 南北向总宽约 11.30 m, 建筑面积约 900 m²。

本次主要改造诉求: 原彩钢瓦屋面年久失修, 锈

蚀严重, 需拆除后改为现浇混凝土屋顶, 内部因消防需求增设一部混凝土楼梯。

2 鉴定结论

2.1 安全性鉴定

1. 一层部分墙体抗力 R 与作用效应 S 之比 (R/γ_0S) < 0.90, 承载力不满足规范要求, 评为 du 级。

2. 屋钢屋架抗力 R 与作用效应 S 之比 (R/γ_0S) < 0.90, 承载力不满足规范要求, 故按该项评定, 钢屋架均评定为 du 级。

综上, 该房屋的安全性等级评定为 Dsu 级, 安全性极不符合《既有建筑鉴定与加固通用规范》对 Asu 级的要求, 已严重影响系统工作, 必须立即采取措施。

2.2 抗震性鉴定

1. 房屋一二层纵向及横向墙体综合抗震能力指数为 0.90 ~ 0.86, 均小于 1.0, 不满足规范要求。

2. 跨度不小于 6 m 的大梁, 由独立砖柱支承, 不符合《建筑抗震鉴定标准》第 5.2.2.3 条。

3. 三层檐口处未设钢筋混凝土圈梁, 不符合《建筑抗震鉴定标准》第 5.2.4.3 条。

综上, 该房屋的综合抗震能力不满足 A 类砌体房屋(丙类、7 度、0.10 g、第一组、II 类场、后续工作年限为 9 年)的抗震鉴定要求。

3 主要的计算参数

1. 局部影响系数取值取: $\psi_2=0.80$ 。

2. A 类建筑承载力抗震调整系数的折减系数 0.85 (不可以同时对多遇地震影响系数最大值 a_{max} 进行折减 0.75)。

3. 抗震鉴定加固(安全性鉴定)标准: A类(09《建筑抗震鉴定标准》(89规范))。

4. 活荷载取(全楼未改变原建筑使用功能,按原荷载规范取值): 办公休息室 2 kN/m²、走廊 2.5 kN/m²、不上人屋面 0.5 kN/m²、楼梯 3.5 kN/m²。

4 计算结果分析

各层受剪极限承载力、综合抗震能力、屈服强度系数指数与加固前指数对比见表 1。

经过比较各层受剪极限承载力和综合抗震能力指数可以发现,通过增加构造柱(墙体得到有效的约束)及墙面面层加固(增强墙面平面内抗剪强度和约束变形),可以大幅度提升房屋整刚度和抗震能力;通过各层的屈服强度系数可以看出,整体加固和局部补强未造成刚度突变而形成新的对抗震不利的薄弱层或薄弱部位。

5 选择合理的加固措施

5.1 砖墙

由于房屋外墙常年雨水侵蚀,导致首层部分墙面酥碱风化,因此首层外墙采用钢筋混凝土面层加固,混凝土面层厚度小于 60 mm 强度 C30,其余楼层及首层内墙均采用钢筋网水泥砂浆加固,水泥砂浆厚度 35 mm 强度 M10,由于原建筑纵横墙均未设置构造柱,为提高结构的整体性和稳定性,在建筑四角增设构造柱、内外墙交接处增加加强筋,由此提高原有砖墙的抗震性能和承载能力。

5.2 砖柱

该房屋局部内框梁由砖柱支撑,砖柱自身的抗震延性不足,抗拉强度弱,为提高砖柱的受压受剪承载力和稳定性,在砖柱四周增加钢筋并浇筑混凝土,此方案虽占用较多空间,但能与框梁有较好的连接,从而显著提建筑结构的整体性。

5.3 梁

5.3.1 内框梁

原建筑有局部内框梁,内框梁跨度较大(7 m)、

表 1 加固前后指数对比表

楼层	加固前模型计算结果			加固后模型计算结果		
	1	2	3	1	2	3
X 向本层层间受剪极限承载力(kN)	3 341.5	1 873.2	905.8	16 010.9	8 700.5	6 223.0
Y 向本层层间受剪极限承载力(kN)	3 529.9	3 410.5	1 187.6	16 343.1	12 147.3	11 073.5
X 向本层屈服强度系数 ξ_{yx}	0.78	0.61	0.92	2.09	1.48	1.99
Y 向本层屈服强度系数 ξ_{yy}	0.82	1.11	1.21	2.19	2.07	3.54
楼层综合抗震能力指数	0.86	0.68	2.74	1.66	1.54	2.49

与墙体平面内搭接处未设置水平梁且楼板均为预制板,不能有效地传递正交方向的水平力,为防止平面外失稳,在梁墙搭接处增加正交方向的楼面梁,以此提高结构的整体性。

5.3.2 悬挑梁

原建筑走廊为悬挑外廊,走廊栏杆由铁艺镂空栏杆改为通高砖砌墙体,荷载增大原悬挑梁承载力不足需加固处理,又因首层建筑无法在对应悬挑梁的梁端处设置混凝土柱且梁下增加三角支架又影响建筑使用净高的要求,因此采用三面加厚的扩截面加固,由于悬挑构件植筋要求较高,承载力影响的系数 $\psi_{br} = 1.5$,通常植筋深度远超墙体厚度,所以本次案例将悬挑梁上侧受力钢筋穿过原来结构圈梁后延伸 1 m 后与墙体对穿锚固。

5.4 屋面

屋面层原结构为彩钢瓦轻钢顶,虽然自重轻、施工便捷,但整体性和对墙体的约束性远不及混凝土屋面,现浇混凝土屋面与圈梁、构造柱能够形成刚性节点,确保了地震力的有效传递,显著增强空间刚度和整体性,对砌体的不均匀沉降也有一定的协调作用。

5.5 楼梯

5.5.1 原有楼梯

原楼梯为钢筋混凝土 L型预制踏步板楼梯,部分踏步板出现裂缝,采用在 L形踏步板下的阴角和阳角处均粘贴 L60X6 角钢的加固措施,增强楼梯踏步的耐久性和承载力。楼梯四角增加构造柱以约束墙体编写延缓地震时的剪切破坏,从而满足《建筑抗震设计规范》第 7.3.1 条相关规定。

5.5.2 新建楼梯

新建楼梯主要考虑其与原砌体结构之间的可靠连接并协调工作,本工程选用的现浇混凝土板式楼梯,因其结构整体性好,受力传递路径明确,与砌体的连接也更为可靠。楼梯的梯梁不可与砌体墙平面外直接连接,需要在相墙体相应位置设置梁垫分散压力减小

局部受压，为了使楼梯楼、梁垫与砌体墙连成整体，从而提高节点处的抗震和稳定性，将梁垫与新增梁等高，并一期浇筑微膨胀混凝土，梁垫上下各配置2根直径14 mm的通常筋。

5.6 基础

屋面由原轻钢屋面改为混凝土屋面、墙体采用钢筋混凝土面层加固后使得基地轴力增大，根据测绘反馈，基础位于室外地面下1 m，综合房屋结构鉴定报告（基础安全性等级为Au级）按原建筑墙柱底力与改造后墙柱底力等比例扩大基础截面。若新增荷载未超过原荷载5%，地基基础考虑长期压密提高效应，能满足承载力要求，可不做加固措施^[1]。

6 多层砌体结构房屋加固施工要求

6.1 结构拆除

拆除作业应遵循先上后下、先平面后立面的施工顺序。进行结构拆除及凿除时，不得破坏需保留的构件，并应增设稳固支撑，配合防护措施和安全管理，控制局部失稳与倒塌风险。宜采用静力切割或分离方法，禁止使用大锤、风镐等强冲击工具；在拆除与凿除交界部位应缓慢细凿，防止结构产生隐蔽裂缝^[2]。

6.2 钢筋混凝土墙板加固与钢筋网水泥砂浆加固

在进行墙板加固施工前，应先将墙面原有抹灰及装饰层彻底清除，对砌缝沿深度约5~10 mm作凿刮处理，随后用钢丝刷将残余砂浆清理干净，并以压缩空气吹除浮尘，适当洒水湿润基层后，先均匀刷涂一层素水泥浆作为界面层；对于非粘土砖墙体，还需增刷一道胶粘型界面剂以增强新旧材料的结合力。铺设钢筋网时，应保证钢筋保护层厚度不小于15 mm，且网片与原墙表面之间预留的空隙不宜小于5 mm。竖向钢筋宜连续贯通上下楼层穿越楼板，紧贴墙面设置，并采用钢筋短支撑或托件固定定位。对墙体或楼板钻孔时严禁破坏原结构钢筋，贯穿墙体或楼板的新钢筋插入孔内后，应采用水泥砂浆灌实密封；当孔洞尺寸偏大时，可改用细石混凝土填充密实。钢筋混凝土墙板加固层浇筑宜优先选用喷射混凝土工艺成型，不得以人工抹灰方式完成；如需采用支模浇筑，应沿墙体高度分段施工，并尽量选用高流动性混凝土（如特种高流态混凝土）完成加固浇筑作业。双层钢筋网的拉结筋应按设计间距要求在砖缝处采用电钻打孔，锚筋孔径应是锚筋直径的2倍。

6.3 增大截面加固

本工程在构件截面放大处理时，采用含粗骨料的高强灌浆料或最大粒径不大于20 mm的混凝土；当截

面增量较小时，选用灌浆或喷射混凝土成型，单侧加厚超过100 mm时改用细石混凝土整体浇筑。新老混凝土交接面须凿毛、清洗并充分湿润，再刷素水泥浆或界面剂，以保证粘结可靠。采用三面或四面外包加固时，应事先处理构件棱角并清除浮浆、尘土。基础扩大段施工顺序为先做扩大基础，再进行上部构件加固^[3]。

6.4 缺陷裂缝修复

墙体出现酥松、掉块等缺陷时，应先将原有抹灰和饰面层彻底铲除，清理油污与浮浆，打磨至坚实基层并洒水湿润后，采用1:3水泥砂浆重新抹平，对松动勾缝砂浆一并凿除。裂缝处理应按缝宽分类确定工艺：当裂缝宽度在0.2 mm及以上时，可设置注浆嘴并采用环氧树脂浆液压注填充；当裂缝宽度小于0.2 mm时，可通过表面封闭法进行封堵处理^[4]。

6.5 植筋

对于砌体结构，植筋必须锚入砌体的构造柱、圈梁等混凝土构件中，因为砌块自身握裹力和强度不足以提供可靠的拉拔力，且砌体钻孔容易出现裂缝，这对于砌体本身造成二次损伤，因此在对砖墙加固时大多使用双面面层加固，墙体梅花拉结筋穿过灰缝拉结，减少对砌块的损伤。植筋施工时一般钢筋宜先焊后种植，施工中不可避免地出现只能后焊时，其焊点距基材砼表面应大于15 d，且应采用冰水浸润的湿毛巾包裹，以避免焊接时高温对胶体的强度造成影响^[5]。

7 结束语

我国目前的砌体结构在工业和民用建筑领域中仍广泛使用，对于砌体结构的加固必须先通过科学的检测与鉴定，分析其结构主体存在的问题（如材料老化、承载力不足、构造措施欠缺、早期改造不规范而使结构遭到破坏等），根据鉴定报告及现场实际情况（施工条件）因地制宜地选择加固方案，以确保最终建筑加固既经济又安全。

参考文献：

- [1] 姚佳莉.现有建筑结构抗震鉴定及加固设计研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(09):34-36.
- [2] 周秀秀.现有建筑结构抗震鉴定及加固设计探究[J].建筑与装饰,2021(06):7-10.
- [3] 何广保.既有砖混结构墙体加固施工技术[J].科技与创新,2024(14):87-89,93.
- [4] 卢山河.建筑工程中填充墙砌体工程施工技术分析[J].新疆有色金属,2024(03):103-104.
- [5] 周兰.现有建筑结构抗震鉴定及混凝土结构加固设计研究[J].佛山陶瓷,2023(03):22-24.

大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制

赵国峰

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 大断面浅埋铁路隧道作为铁路建设中的重要工程类型之一, 具有施工涉及空间大、结构复杂以及环境敏感等特征, 对施工技术提出更高要求。基于此, 本文围绕隧道工程特征, 总结设计方案优化、开挖方法规范、初期支护加强及监测管理完善等关键策略, 系统分析施工过程中的要点控制, 以期能够为保持围岩稳定、控制地表沉降、提高衬砌质量提供有益参考, 进而保障工程安全与长期耐久性。

关键词 大断面浅埋铁路隧道; 初期支护; 监测管理

中图分类号: U455.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.029

0 引言

随着铁路建设规模的不断扩大, 大断面浅埋隧道逐渐被应用于多种复杂地质条件和不同地形区段的施工实践中。此类隧道由于断面宽、埋深浅, 施工过程中对地层扰动明显, 结构安全与质量控制要求较为严格。为适应铁路运输对安全性的高标准, 施工必须在设计优化、工序衔接以及监测管理等方面形成全面控制。针对这些环节展开讨论, 对于提升铁路隧道施工水平和工程效益具有重要意义。

1 大断面浅埋铁路隧道的工程特征

大断面浅埋铁路隧道在施工中具有较为突出的工程特征, 其中在空间结构上断面较大, 需要满足列车运行的安全要求, 在施工过程中要考虑整体受力的均衡与围岩稳定。由于浅埋条件使得隧道顶部覆土厚度有限, 受地表环境和地下结构影响较为明显, 施工时需兼顾地层条件与隧道结构的相互作用。隧道断面大带来的受力范围广, 使围岩的稳定性以及承载能力直接决定施工是否顺利, 这一特点要求在技术控制上, 施工单位需更加注重合理的结构设计。与此同时, 大断面浅埋隧道还具有施工空间大、环境扰动范围广的特点, 要求施工人员在施工过程中加强监测结构变形, 以保证隧道整体稳定与地表安全。此外, 施工单位对材料和工艺的要求也应更加严格, 必须保持衬砌质量和支护效果, 以发挥长期运行中的耐久性。

2 大断面浅埋铁路隧道的施工难点

2.1 设计复杂多变, 施工准备要求高

大断面浅埋铁路隧道在设计阶段呈现多变性, 这种特征源于地质条件、地表环境以及隧道本身结构形

式的综合影响。设计内容涉及开挖断面、支护布置与衬砌结构等多个方面, 而这些参数之间相互牵制, 从而使设计环节面临高度复杂的协调关系。由于设计方案的变化直接决定了施工准备的深度, 因此一旦环节处理不当, 就会使后续工序衔接受到影响。同时, 施工准备的要求也因此被大幅度提升, 需要考虑设计中涵盖的多种条件, 还需全面统筹设备、材料以及现场组织。倘若准备工作存在任何薄弱环节, 就会使整体施工过程受到影响, 从而导致工程在初始阶段面临较高的不稳定性。

2.2 开挖扰动显著, 初期支护难度大

在大断面浅埋铁路隧道施工中, 明显扩大开挖作业对围岩和地表环境产生的扰动范围, 岩体原有的平衡状态容易被打破, 导致稳定性减弱。开挖断面越大受力集中越明显, 围岩失稳风险越高, 也随之加大影响范围。扰动效应表现在扩展围岩裂隙, 还反映在改变整体结构受力状态。与此同时, 初期支护面临巨大挑战, 因其需要在较短时间内承受较大荷载, 而大断面条件下荷载分布复杂多样, 使支护结构承载难度增加, 支护一旦不到位, 极易引发变形扩大甚至破坏, 造成施工局面复杂化。

2.3 地表沉降敏感, 监测控制压力大

在浅埋条件下, 大断面隧道施工使地表沉降表现出高度敏感性, 因为隧道上覆土层较薄, 地层应力释放容易传递至地表, 从而加速发生沉降。沉降变化反映在增大数值, 还表现为扩大范围和速率的不均衡, 使沉降规律难以把握。如果地表环境中存在建筑物、道路或其他设施, 就会进一步放大沉降的敏感性, 增加施工风险。与此同时, 监测任务的复杂性和频繁性

大大提升，监测系统需要覆盖的区域更广，数据量更为庞大，从而显著增加分析判断的难度。

3 大断面浅埋铁路隧道施工技术要点控制策略

3.1 优化设计方案，强化施工准备

在大断面浅埋铁路隧道的建设中，优化设计需要综合考虑地质条件、结构受力甚至环境因素，形成能够适应复杂情况的整体布局。施工准备必须紧密结合设计要求，涵盖技术文件、工艺安排以及资源配置，保持各环节协调统一^[1]。设计环节的前瞻性能够使施工阶段的组织更为清晰，而充分准备工作能够使各环节衔接更加顺畅。只有在设计与准备形成有机配合时，施工风险才会被有效降低，工程进展才会更为稳定。由此可见，优化设计与强化准备构成施工顺利开展的重要保障。

在大断面浅埋铁路隧道施工中，勘察人员布设一定密度的钻孔和探槽，获取围岩分级、地下水位以及土层分布等关键数据。例如：围岩若为Ⅲ类或Ⅳ类软弱围岩，承载力低且易塌方，则设计中需采用加强支护或超前预加固措施；若浅埋段覆土厚度不足10 m，地表建筑物密集，则需要增设临时支护以分散荷载。首先在施工现场，依据设计参数建立样板段，实测衬砌厚度、钢筋配筋以及喷射混凝土强度等关键环节。例如：喷射混凝土要求在初期支护中达到C25以上强度，厚度控制在20 cm左右，实测数据若偏离设计范围，则需立即调整配比或喷射工艺，从而保持支护效果。其次，设备选型需要满足断面规模较大的特点，采用断面适应性强的台阶法开挖配合湿喷机械臂施工，可以提高喷射效率，保证喷层均匀性。施工材料的进场也必须按照设计用量合理储备，如钢拱架间距常控制在0.8 m至1 m，数量与施工进度紧密挂钩，若储备不足则极易造成工序延误。同时，施工准备阶段要开展施工组织优化，编制详细的施工进度计划，把开挖、支护以及衬砌等关键环节明确到日程。并利用BIM技术模拟施工现场，可以提前发现不同工序之间的冲突，减少因空间不足或流程不顺带来的返工风险。在人员安排上，依据施工强度配备不同班组，保持24小时连续作业，以保证大断面隧道的施工周期不被拖延。例如：单班开挖循环进尺若设定为1.2 m，每日需完成2个循环，才能保持计划工期。这样可以提高施工效率，还能保障工程节点如期完成。

3.2 规范开挖方法，严格工序控制

断面浅埋铁路隧道开挖涉及空间范围广、扰动影响大的特点，因此必须科学规范方法和工序。开挖方

法的合理性直接关系到围岩受力是否均衡，而工序控制的严谨性则决定了整体结构能否保持稳定^[2]。为减少不必要的扰动，工序安排需要具备清晰的逻辑顺序，使各步骤之间衔接紧密。若在任何一个环节出现随意操作，就会逐步累积风险，进而影响施工安全。相反，当施工方法统一、步骤管理精细时，整体过程才能保持有序推进，从而使工程质量处于稳定状态。

大断面浅埋铁路隧道在开挖过程中，必须精细化规范方法，以减少围岩扰动并保持整体稳定。例如：当隧道断面宽度超过12 m时，采用三台阶七步法能有效分散应力集中，避免一次性开挖造成围岩大范围松动。台阶高度通常控制在2.5 m至3 m之间，开挖循环进尺则稳定在1.2 m至1.5 m，以减少对围岩结构的破坏。在工序控制方面，浅埋隧道位于地表敏感区，控制爆破技术就显得较为重要。施工单位采用光面爆破工艺，孔距与装药量必须严格按照设计参数执行，例如炮孔间距保持在30 cm至40 cm，装药集中在切口孔和掏槽孔，以降低对拱顶和周边岩体的冲击。爆破后立即由装载机和扒渣机清理弃渣，保持工作面干净，为支护创造条件。若工序衔接延误，围岩暴露时间过长，极易引发裂隙扩展或坍塌风险，因此缩短开挖与初支之间的时间间隔成为控制要点。工序安排的合理性体现在爆破和出渣，还涉及通风、排水、支护等多个环节。浅埋段通风条件差，开挖时需要配备大功率轴流风机，风速保持在每秒0.25 m以上，以排出有害气体，保障作业环境。在排水措施方面，开挖区必须布设纵向排水沟和集水井，保证渗水及时排出，避免软弱围岩因浸水而失稳。若排水系统不畅，施工面会出现泥化和塌陷，严重影响工序衔接。经过这一系列工序的严密衔接，可以保持施工环境的稳定性，降低事故发生概率。

3.3 加强初期支护，确保衬砌质量

初期支护在大断面浅埋铁路隧道中的性能直接关系到隧道结构的安全，支护强度不足容易扩大围岩变形，导致衬砌承载压力加重，从而影响整体耐久性。初期支护需要保持足够刚度，才能在早期施工阶段形成稳定条件^[3]。同时，衬砌质量的优劣反映在材料强度上，还体现在厚度控制、施工时间以及结构密实度等多个方面。若支护环节处理不当，衬砌效果会受到限制，最终使整体结构稳定性下降。因此，加强初期支护并保障衬砌质量，成为大断面浅埋铁路隧道施工中必须重视的要点。

大断面浅埋铁路隧道在开挖完成后，初期支护需要及时形成稳定结构，以控制围岩变形并为后续衬砌创造条件。喷射混凝土强度等级多设计为C25，初期厚

度一般控制在 18 cm 至 22 cm 之间，若围岩级别较差，则加厚至 26 cm 以上。混凝土在喷射后 2 小时内强度需达到 1.2 MPa，才能保证初期支护具备足够承载力，否则围岩可能出现持续变形，增加衬砌压力。钢拱架间距常保持在 0.8 m 至 1 m，采用工字钢或 H 型钢与喷射混凝土形成整体，提升支护刚度。若拱架布置过稀或强度不足，就会出现受力不均，导致拱顶沉降加大甚至局部破坏，因此精确控制拱架间距是保持隧道稳定的关键。锚杆长度通常为 3 m 至 4 m，间距为 1 m 至 1.2 m，以形成连续受力网络。锚固浆液强度等级不低于 M20，保证与围岩紧密结合。若锚杆质量不达标，支护整体性减弱，极易造成喷层开裂。施工中还需配合设置钢筋网，常用钢筋直径为 φ8 mm，间距 150 mm，经过与混凝土共同作用，显著提高抗拉性能。实践表明，当系统锚杆数量和钢筋网布设符合设计要求时，围岩变形速率明显降低，拱顶沉降控制在 15 mm 以内，比未设加密锚杆时降低近 40%。在初支完成后，衬砌施工必须紧跟，才能有效分担荷载。隧道二次衬砌常采用 C30 现浇混凝土，厚度根据不同部位控制在 40 cm 至 50 cm，拱顶厚度更大以抵抗上覆土体压力。混凝土浇筑过程中需严格控制坍落度在 160 mm 至 180 mm 之间，以保证密实性。若衬砌厚度不足或密实性不良易出现渗水，从而削弱耐久性。例如：某铁路隧道工程在施工中采用衬砌同步跟进的方式，使得初支与二次衬砌间隔不超过 25 m，结果拱顶沉降峰值控制在 12 mm 以内，衬砌裂缝率低于 0.5%，比传统间隔大于 50 m 的施工方式安全性显著提高。

3.4 加强监测管理，控制地表变形

在大断面浅埋铁路隧道施工过程中，地表沉降问题极易影响工程安全，因此监测管理具有重要意义^[4]。监测需要布设合理的测点，还要求在数据采集、传输以及分析过程中保持高效。管理环节应当形成完整体系，使监测结果能够及时反映施工动态^[5]。沉降一旦超出控制范围，便会使地表环境和隧道结构受到威胁，因此数据的及时分析与反馈成为重点。经过综合管理监测数据，可以稳定施工节奏，减少不可控风险。

大断面浅埋铁路隧道因埋深有限，上覆土层较薄，地表沉降敏感性高，若监测管理不到位，极易影响施工和运营安全。常用的监测手段包括全站仪测量、光纤光栅传感器、静力水准仪以及多点位移计，监测精度要求一般控制在 ±0.1 mm 至 ±0.2 mm，以保证数据能够真实反映沉降变化趋势。监测频率在开挖高峰期需保持每日一次，沉降速率超过 0.5 mm/ 天时必须立

即加密观测，避免沉降累积到不可逆水平。数据一旦超过警戒值，例如累计沉降达到 20 mm 以上，就要立即调整施工参数，否则会使隧道拱顶受力失衡，进而引发裂缝和渗水等问题。现场采集的数据需实时上传至监测平台，结合 BIM 和 GIS 系统开展三维可视化分析。例如：某铁路隧道工程在浅埋段采用光纤光栅传感器与自动采集系统，沉降数据每 30 分钟更新一次，最终使沉降曲线保持平稳，累计沉降控制在 12 mm 以内，比传统人工观测方式减少近 40% 的偏差。除地表沉降，拱顶下沉和隧道周边收敛也是监测的重点，监测数据显示，拱顶下沉速率超过 0.3 mm/ 天往往预示围岩失稳加剧，周边收敛速率超过 0.4 mm/ 天则可能导致拱架和喷层受力异常。施工中若能依靠实时监测系统在数据偏离正常值时立即预警，就能在衬砌施工前采取加固或调整工序的措施，防止风险扩大。例如：在某浅埋隧道工程中，监测平台曾在拱顶下沉达到 18 mm 时发出警报，项目部立即缩短开挖进尺并加密锚杆布置，最终使沉降控制在 22 mm 以内，避免地表建筑物出现开裂。

4 结语

大断面浅埋铁路隧道的稳定性关系到铁路结构的长期安全，在复杂地质条件和高强度运输荷载的共同作用下，隧道施工正面临更高的技术要求。为降低风险，施工需从整体出发，统筹地质环境与结构要素，推动设计与工序的科学化。未来，施工单位应立足隧道区段特点，深化信息化应用，强化支护与衬砌的协同能力，建立监测预警与管理维护一体化机制，全面提升铁路隧道的运营安全水平。

参考文献：

- [1] 闫磊, 姜渝, 岳志良, 等. 大断面超浅埋偏压铁路隧道爆破施工控制与振动传播规律研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(22):81-95.
- [2] 郝子鹏, 师康宁. 大断面超浅埋偏压高速铁路隧道施工安全控制关键技术研究 [J]. 西部交通科技, 2024(09): 121-124.
- [3] 景银丰. 大断面铁路隧道下穿富水堰塘浅埋段施工技术研究 [J]. 价值工程, 2024, 43(19):67-69.
- [4] 李泽钿. 大断面浅埋高速铁路隧道施工关键技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(06):106-108.
- [5] 王广波. 大断面浅埋高速铁路隧道仰拱施工关键技术设计及应用 [J]. 工程机械与维修, 2023(03):72-74.

关于水利工程维修养护项目管理的探讨

钱 莉

(安徽省淠史杭灌区管理总局, 安徽 六安 237000)

摘要 水利工程作为国家基础设施体系的重要组成部分, 在防洪减灾、水资源调配和生态保护等方面发挥着关键作用, 其运行状况直接关系到区域经济社会发展和人民生命财产安全。本研究针对现代水利发展需求, 系统探讨了水利工程项目管理体系的构建问题, 重点研究了维修养护的定义范畴、管理措施及实施路径, 提出完善管理制度、加强技术应用、改进人员管理、严格资金管理和强化风险防控等措施。研究结果表明, 科学有效的维修养护体系能够显著提升工程管理效率和质量, 实现全流程管控; 通过构建科学合理的管理体系, 整合各类要素资源, 可有效提升水利工程管理水平。

关键词 水利工程; 维修养护项目管理; 人员管理; 资金管控

中图分类号: TV698.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.030

0 引言

在新型基础设施建设和传统水利工程升级改造共同推进的背景下, 水利工程维修养护已从“被动抢修”变为“主动预防性养护”, 项目管理技术集成度和精细化要求明显提高。当前维修养护项目面临技术标准不一致、跨部门协同不好、数字化管理工具使用不够等挑战, 这导致养护方案和工程实际需求匹配度低, 既出现资源浪费, 也存在关键部位养护不好的问题。如何构建适合现代水利发展需求的项目管理体系, 整合技术、人力、资金等要素, 实现维修养护全流程可控、可溯、可优化, 成为推动水利工程管理水平提高、保障水资源可持续利用的重要问题。

1 水利工程维修养护概述

1.1 定义

水利工程维修养护是为了保证水利工程设施在设计的使用时间里一直能正常运行、防止运行风险和安全隐患, 按照国家和行业工程技术标准、规范, 结合工程实际运行情况和老化规律, 进行的周期检查、日常维护、故障修理和功能恢复等系统性的技术和管理活动。它的主要目的是让工程使用时间更长, 保证工程运行安全, 保持工程防洪、灌溉、供水、发电等综合效益稳定^[1]。

1.2 范围

水利工程维修养护的范围要根据工程组成和功能需求来定, 总体可以分为下面两类。

1.2.1 按工程组成分类

1. 主体结构养护: 包括堤防、大坝、水闸、泵站、

渠道、渡槽等主要建筑物的结构维护, 工作内容有裂缝修补、混凝土碳化处理、砌石工程勾缝、防渗体加固等。

2. 配套设施养护: 包括工程附属的机电设备(如水泵、电机、启闭机)、金属结构(如闸门、拦污栅)、监测设备(如水位计、渗压计)和管理设施(如管理用房、防汛道路)的检查和维修。

1.2.2 按养护性质分类

1. 日常养护: 指经常进行、工作量较小的维护工作, 如渠道清淤、清除杂草设备清洁润滑、外观检查记录等, 目的是防止问题出现。

2. 专项维修: 指针对特定故障或周期性需求进行的集中维修, 如闸门防腐处理、机电设备大修、堤防隐患治理等, 需要制定专门方案并实施。

2 水利工程维修养护项目管理有效措施

2.1 完善管理制度体系, 明确管理责任边界

管理制度是水利工程维修养护项目管理的基础, 其重点是靠规范文件明确项目全周期的管理标准、责任人和执行步骤, 防止管理漏洞和责任推脱。在制度建设中, 要重点包括三个方面: 一是责任划分制度, 要按照“谁主管、谁负责”原则, 明确项目建设单位、施工单位、监理单位和运维单位的具体责任, 保证每个环节都有对应责任人; 二是流程规范制度, 要细化从维修养护需求提出、方案编写、审批、实施到验收的全过程节点, 明确各节点的时间要求、资料提交标准和审批权限; 三是监督考核制度, 要建立量化的考核指标, 把维修养护质量、进度、成本控制情况和责

任单位的绩效联系起来，形成“有执行、有监督、有考核”的完整管理^[2]。

2.2 强化技术应用，提升维修养护精准性

技术创新是提高水利工程维修养护项目管理效率和质量的重点方法。通过使用先进监测技术、数字化管理工具和新型养护技术，可以实现从“被动维修”到“主动养护”的改变，减少项目成本，延长工程使用时间。具体可以从三个方面推进技术应用：一是推广智能监测技术，比如在堤坝、渠道等关键地方安装传感器，实时收集渗压、位移、水位等数据，通过数据分析提前发现结构隐患，防止突发故障；二是使用BIM（建筑信息模型）技术，建立水利工程全生命周期的数字化模型，在维修养护方案设计时可以模拟施工过程，优化方案细节，在实施时可以实现施工进度和质量的可视化管理，提高决策效率；三是使用新型养护材料和技术，比如对混凝土结构裂缝使用环氧树脂灌浆技术，对渠道防渗使用土工膜铺设技术。这些技术和传统方法相比有耐久性强、施工时间短的优势，可以有效提高养护效果^[3]。

不同技术在维修养护项目中的使用场景和效果不同，通过表1可以直观展示各类技术的核心价值。该表格整理了常见技术的使用场景、核心功能和实施效果，为项目技术选择提供参考，帮助提高技术应用的针对性和准确性。

2.3 优化人员管理，夯实人才支撑基础

人员是水利工程维修养护项目管理的工作核心。人员的专业能力、责任意识直接决定了项目管理效果。要通过“选拔—培训—激励”的全过程管理，建设一支专业、高效的管理和施工队伍。

在人员选拔时，要建立明确的标准。对于项目管理人员，主要考察其水利工程专业知识、项目管理经验和协调能力；对于施工人员，要检查其专业技能证

书（如水利工程施工特种作业操作证），确保其有相应操作能力。

在人员培训时，要建立长期培训体系，定期开展专业技能和管理能力培训，如项目进度控制、质量验收标准。同时，结合行业政策变化，如最新水利工程维修养护定额标准，开展政策讲解培训，保证人员知识体系和行业要求一致。

在人员激励时，要建立和绩效相关的激励制度，把项目质量、进度、成本控制成果和个人薪酬、晋升联系起来，同时设立“优秀管理者”“技术能手”等荣誉称号，调动人员工作积极性和责任感。

2.4 严格资金管控，保障项目经济高效

资金是水利工程维修养护项目顺利进行的物质基础。要通过“预算编制—过程监管—成本优化”的全过程管理，保证资金使用规范且高效，防止浪费和超支。

在预算编制时，要遵循“精准核算、科学合理”的原则，根据工程实际需要（如维修养护范围、技术难度）、市场价格（如材料费用、人工费用）以及行业定额标准，细化预算项目，明确各项费用的计算方法，同时预留5%~10%的应急资金，以应对项目实施中的突发状况（如材料价格上涨、额外维修需要）。

在资金使用监管时，要建立“专人负责、动态跟踪”的制度，指定专人负责资金支付审核，保证每一笔支出都符合预算方案和合同要求，同时通过财务软件、项目管理平台实时监控资金使用情况，定期比较实际支出和预算的差异，分析差异原因（如材料浪费、工期拖延），及时采取调整措施。

在成本优化时，要从技术和管理两方面着手。在技术上，通过采用新型材料、优化施工方案来降低成本（如采用预制构件减少现场施工费用）；在管理上，通过合理安排施工顺序、优化人员和设备配置来减少闲置成本（如避免设备长时间闲置、人员窝工），同

表1 水利工程维修养护项目常见技术应用场景及效果

技术类型	主要应用场景	核心功能	实施效果
智能化监测技术	堤坝、水闸、渠道关键部位	实时采集结构与水文数据、预警隐患	提前发现故障，减少突发事故损失，降低维修成本30%以上
BIM技术	方案设计、施工管理、运维记录	数字化建模、可视化管理、数据集成	优化方案设计效率，缩短施工周期15%~20%，便于后期运维追溯
新型防渗技术	渠道、水库坝体防渗处理	增强防渗性能、提升结构耐久性	减少渗漏量80%以上，延长工程使用寿命5~10年
混凝土修复技术	混凝土裂缝、剥落部位修复	恢复结构强度、防止病害扩展	修复后结构强度达标率100%，降低后期二次修复概率

时加强材料采购管理，通过集中采购、招标采购降低材料采购价格，实现资金使用效益最大化^[4]。

2.5 加强风险防控，确保项目平稳推进

水利工程维修养护项目实施时会面临自然风险、技术风险、管理风险等多种风险，要通过“识别—预案—评估”的系统防控机制，提前预防风险，降低风险损失。

在风险识别时，要建立完整的风险清单，根据项目所在地区、工程类型及实施阶段，如施工期、验收期，整理可能存在的风险点，确定风险发生的可能性和影响大小，如高风险、中风险、低风险。

在风险应对预案制定时，要针对高风险和中风险点制定具体应对办法，如针对暴雨天气的施工风险，制定“暂停户外施工、加固临时设施、排水防涝”的应急办法；针对技术方案缺陷风险，制定“方案多轮审核、专家论证、现场试验”的预防办法，同时明确预案的执行人员、启动条件和流程，确保风险发生时能迅速反应。

在风险评估时，要建立定期评估制度，每月或每季度对项目风险状况重新评估，根据项目实施进度调整风险等级和应对办法，同时在项目结束后开展风险复盘，总结风险防控经验，为后续项目提供依据，不断完善风险防控体系。

3 水利工程维修养护项目管理未来发展趋势

3.1 智慧化技术深度应用

智慧化是未来维修养护项目管理的关键趋势。依靠物联网、BIM（建筑信息模型）、大数据等技术，实现工程“状态感知—智能分析—精准处置”的完整管理过程。

在状态感知方面，在工程关键位置设置传感器（如应力传感器、温度传感器、流量传感器），实时收集结构状态和设备运行数据，结合无人机、机器人巡检得到的图像数据，实现工程全面、无遗漏的监测。

在智能分析方面，利用大数据技术对监测数据展开分析，建立病害预测模型。例如：通过堤防渗压数据变化预测渗漏风险，通过设备振动数据判断故障类型，实现风险提前预警^[5]。

在精准处置方面，基于BIM技术构建工程三维模型，将养护方案、施工进度、质量数据整合到模型中，实现可视化管理。同时，利用机器人完成高危、复杂环境的养护作业（如隧道内混凝土修补、高空间门维护），提高作业精准度和安全性。

3.2 绿色化养护模式转型

绿色化转型是遵循国家“双碳”目标与生态保护要求的必然方向，重点是在维修养护过程中降低资源消耗、减轻环境影响，实现工程效益与生态效益的共同提升。

在材料选用上，推广应用环保型、可循环材料。例如：采用生态混凝土（能透水、利于植物生长）代替传统混凝土用于堤防护坡，使用水性防腐涂料代替溶剂型涂料用于金属结构防腐，减少化学物质对水环境的污染。

在技术应用上，引入生态修复技术。例如：在渠道边坡采用植被混凝土护坡技术，既保证边坡稳定，又为水生生物提供栖息场所；在泵站排水口设置生态过滤设施，减少排水对下游水体的影响。

在资源利用上，推动水资源与能源的循环使用。例如：将泵站检修废水处理后用于灌溉或设备冷却，在工程管理区安装太阳能发电设备，为监测设备、照明系统供电，降低传统能源消耗。

4 结束语

水利工程维修养护项目管理是保障水资源可持续利用和水利设施稳定运行的重要部分。其效能提高需要将管理制度、技术应用、人员管理、资金管控和风险防控等多方面要素进行系统性结合。未来，随着智慧化技术广泛使用、绿色化养护模式转变以及市场化管理机制不断健全，水利工程维修养护将逐渐实现从依靠“经验”到依靠“数据”、从“单一功能维护”到“生态效益协同”、从“行政主导”到“市场竞争合作”的重大发展，为建设现代化水利基础设施体系提供有力保障。

参考文献：

- [1] 王文娟.农村小型农田水利维修养护的内在价值与路径研究[J].水上安全,2024(06):61-63.
- [2] 袁丰武,王维花,任泽俭.大中型水利工程机电设备维修养护工作分析[J].水电站机电技术,2024,47(02):77-80.
- [3] 吴栋桥.水利工程维修养护存在的问题及对策分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(14):155-157.
- [4] 张东华.小型节水灌溉渠(管)道的维修养护[J].河北农机,2023(08):72-74.
- [5] 刘超雄.加强水利工程管理养护工作的措施浅析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(08):128-130.

公路工程路基路面病害的防治措施探析

吴建华

(灌南城市发展集团有限公司, 江苏 连云港 223500)

摘要 公路路基路面在长期使用中受自然环境、施工质量及交通荷载等多重因素影响, 常出现翻浆、滑坡、水毁、车辙及裂缝等病害, 严重影响道路的结构安全。针对路基路面的施工要求进行分析, 并明确常见病害, 采取对应的防治措施, 是保障公路安全稳定通行的关键。基于此, 本文在分析路基与路面常见病害成因的基础上, 系统探讨相应的防治措施, 旨在实现病害的早发现、早处置与全周期防控, 为公路工程的建设与养护提供技术参考, 进而进一步延长公路使用寿命。

关键词 公路工程; 路基路面; 病害防治

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.031

0 引言

随着交通运输业的快速发展, 我国公路建设规模不断扩大, 但由于自然地质条件复杂、设计施工管理不规范及超载交通频繁等因素, 路基路面病害问题日益突出, 不仅降低了道路的平整度及承载能力, 也严重威胁行车安全。传统的修复式养护模式已难以满足现代交通需求, 迫切需要从工程源头和全寿命周期角度出发, 对病害形成机理与防治对策进行系统研究。因此, 立足公路工程实际, 针对路基翻浆、滑坡、水毁、车辙、裂缝等典型病害展开分析, 有助于为公路工程的科学管理与长效养护提供实践指导。

1 公路路基路面的施工要求

对于公路路基, 应具备良好的承载力、排水性、防渗性与稳定性。承载力是公路结构的基础指标, 路基必须能在车辆荷载长期反复作用下保持稳定, 不发生沉陷。施工中应选用强度高、压实性好的原材料, 结合分层夯实工艺, 严格控制含水量与压实度, 以保证整体承载性能^[1]。排水性能也是路基耐久性的关键, 应合理设计纵坡与横坡, 并设置边沟、盲沟、截水沟等设施, 使路面及路基内的水分能顺利排出, 避免渗水导致土体软化和冻胀破坏。防渗性能则需通过使用防渗材料或设置防渗层来实现, 以防地表水与地下水相互渗透, 减少水害风险。此外, 路基的稳定性还取决于地形与气候条件, 技术人员需在软土地基或高填方地段采取加固措施, 防止滑塌变形。对于公路路面, 施工应兼顾平整度、附着力、耐磨性、排水性及维护性。施工单位要严格控制摊铺温度与压实度, 确保路

面平整顺滑; 选用高品质沥青或混凝土材料, 提高路面耐磨性, 并在关键路段增设防滑层或减速设施。路面标线与标牌设置应符合标准要求, 保持清晰、耐久, 并预留养护修补空间, 保证道路在长期运行中的安全舒适。

2 公路工程路基路面的病害分析及防治措施

2.1 路基翻浆

路基翻浆常出现在气候寒冷、冰冻融化频繁的地区。当冬季地表冻结、春季逐渐解冻时, 路基中水分迁移显著, 导致上部结构含水量迅速上升、强度急剧下降。在行车荷载的反复作用下, 路面会出现弹簧状的软陷现象, 并伴随泥浆上冒、基层破裂、表面隆起等问题^[2]。此类病害多发生于土质较差、地下水位高或排水不畅的路段, 尤其在盐渍土、沼泽及湿地地带更为突出。其形成机理主要包括秋季水分聚集、冬季冻结膨胀及春融后含水量过高三阶段的交互作用。当路面结构的防水性能不足时, 降雨或融雪水会不断渗入基层, 使得局部土体失去承载力, 进而造成路基局部沉降与隆起并存的复杂变形, 严重影响行车平顺性。

针对路基翻浆病害的防治, 公路单位在设计阶段需充分调查冻土特性与地下水位, 合理确定路基填料, 优选透水性良好、抗冻性能高的砂砾土或级配碎石作为上部填层, 从根本上减少水分聚集。在施工阶段应设置完善的排水系统, 通过边沟、盲沟及渗沟将地表水和潜水有效导出, 防止冻结前水分滞留于路基中上层。对于湿地或沼泽路段, 可采用换填处理或设置防冻土工布、隔水层等结构, 以阻断毛细水上升通道。

化冻期内，技术人员应及时清除聚冰层积水，并在路面结构中形成具有良好渗排功能的临时蓄水层，以缓解解冻时水压对基层的破坏。此外，还要加强路面密水性维护、定期检测排水设施运行状况，保持路基干燥稳定，从而实现对翻浆病害的长期防控。

2.2 路基滑坡

路基滑坡主要发生在地形起伏较大、边坡陡峭或地质结构复杂的地段。当路基下卧层岩性松软、结构破碎，且长期受到降雨、地下水浸润或地表径流冲刷时，极易在重力作用下产生沿滑动面或滑动带的整体滑移，形成路基局部坍塌或整体失稳^[3]。其成因通常包含地质条件、施工扰动与水文作用三方面：一是底层岩性和地质构造为滑坡的形成提供了潜在滑动面及软弱带；二是不合理的开挖或填方破坏了原有的地应力平衡，使边坡稳定性下降；三是水的浸润作用既降低了土体的抗剪强度，又增加了滑体的自重，成为滑坡发生的诱导因素。部分地区由于缺乏完善的排水设施或边坡防护措施，导致雨季水分持续渗透，使得滑动面泥化软化、剪切强度进一步削弱，最终造成路基滑塌、结构损毁。

针对路基滑坡的防治，公路单位可采用抗滑桩支护结构来阻止滑体继续下移。抗滑桩通常为钢筋混凝土结构，主要承受水平荷载，其设计应确保滑坡体具备一定的自稳能力，同时合理控制桩身强度、埋深、锚固深度与桩间距，使结构既安全可靠又经济适用。同时，要从根源上削弱水的破坏作用，通过截水沟、排水孔、渗沟等设施及时排除地表水与地下水，防止滑动面长时间浸泡软化。在边坡上方可布设截水沟，下方设置排水盲沟，形成上下联动的水流通道。对于上重下轻的推动式滑坡，可采取削方减载与填土反压相结合的方法，以改善受力状态，提升整体稳定性。此外，应结合生态防护理念，在边坡表层种植草皮或根系发达的灌木，通过植物根系固土、吸水、减少雨水入渗来增强边坡抗滑性能。必要时配合框架锚索结构与植被培护双重措施，构建工程+生态一体化的长期防护体系，实现公路边坡稳固，并与环境协调共生。

2.3 路基水毁

路基水毁形成通常与地质构造复杂、降雨强度集中及排水体系不完善密切相关。当道路经过断裂构造带或岩性分化强烈的地段时，岩体易发生软化解体，细颗粒物质大量流失，导致路基结构松散，进而出现塌方、滑坡和泥石流等次生灾害。山区地形起伏较大，坡度陡峭，在重力与雨水冲刷的共同作用下，松散土

体极易被带走，引发边坡坍塌与冲沟扩大^[4]。而在平原或沿河地带，持续强降雨和暴雨会导致地表径流汇集，洪水漫溢冲击公路，造成路基淘空、冲毁及桥涵受损。若排水防护系统设计不当或施工质量较差，积水长期滞留在路基表层及内部，也会加速结构性破坏，导致局部塌陷、沉陷和路面隆起，严重影响道路的承载能力。

防治路基水毁应从防洪设计、应急处置与长期维护三方面统筹实施。在防洪设计阶段，公路单位应结合区域气象与水文特征进行科学预测，完善排水体系布局，合理设置边沟、截水沟、排水涵洞等设施，确保暴雨期间径流迅速排出，避免汇水集中冲刷路基。对于沿河段，应加固护坡挡墙结构，防止洪水漫溢冲击边坡。在雨季来临前要开展全面的水文观测、隐患排查，建立应急预案，汛期期间实行24小时值守监测制度，发现险情及时组织防洪抢险，采用砂袋、临时导流渠等措施快速封堵或引流，保障公路通行安全。水毁发生后，需立即进行抢修通车工作，清理塌方、疏通涵洞、铺设临时路面，确保交通不中断。待灾情稳定后，应严格按照技术标准恢复受损设施，修复边坡、桥涵，并同步开展植被恢复、河道整治，防止二次冲刷。

2.4 路面车辙

路面车辙主要表现为车辆轮迹处出现连续性凹槽，使行车平顺性下降并加速结构层破坏。其形成原因较为复杂，既与高温环境和车辆荷载有关，也与材料性能、结构设计和施工质量密切相关。当沥青混合料的高温稳定性不足或集料级配不合理时，路面在高温季节易发生流动变形；若车辆超载或重型交通量大，长期荷载作用下会造成路面压密下陷。此外，施工压实度控制不严、层间结合不良及面层厚度不足也会加剧车辙的产生。随着车辙不断加深，雨水易在凹槽处积聚，导致水损害加重、沥青剥落、坑槽生成，最终形成结构性破坏。严重时，车辙会引发车辆跑偏、甩尾等安全隐患。

针对路面车辙病害的防治，在设计与施工阶段，公路单位要选用SBS改性沥青或抗车辙型沥青混合料等高温稳定性强的沥青材料，并合理优化矿料级配，确保沥青膜厚适中、结构层强度匹配。施工中应严格控制摊铺温度与压实度，防止因压实不足导致的塑性流变^[5]。同时，应强化交通荷载管理，严格限制超载车辆通行，减轻路面长期受压变形。对于已出现轻微车辙（1cm）的路段，可采用热再生技术进行修复，或在铣刨毛后铺设稀浆封层、薄层罩面等处理方式，

恢复表层平整。而对于深度较大的严重车辙区域，则应采取铣刨重铺的方式，彻底清除损坏层后重新铺筑上面层与下面层结构。此外，还应结合季节变化进行定期巡查并加强路表检测，及时掌握车辙发展趋势，通过预防性养护延缓病害扩展，从而确保公路长期运行的安全性。

2.5 路面裂缝

路面裂缝主要包括荷载型裂缝与温度型裂缝两类。荷载型裂缝多由行车荷载反复作用引起，长期受重型车辆碾压后，路面结构层产生疲劳损伤，进而出现纵向、横向或网状开裂。温度型裂缝则与环境变化密切相关，当沥青面层在低温条件下产生收缩应力时，易出现低温收缩裂缝或温缩裂缝；而在干旱季节或材料收缩不均的情况下，也会形成干缩裂缝。若基层存在旧裂缝且未处理到位，还会在面层中反射出反射裂缝，使原有病害向上传递扩展。裂缝一旦贯通，将导致雨水渗入结构层，引起基层脱空、冻胀与剥离等次生损坏，进一步恶化路面性能，严重时会导致坑槽、沉陷等复合病害。

针对路面裂缝的防治，在设计与施工阶段，公路单位应选用抗裂性能良好的沥青材料，并合理控制面层厚度与级配结构，确保基层与面层结合牢固，避免因温度应力集中造成早期裂缝^[6]。对于已出现裂缝的路段，应根据裂缝程度采取分级修补。对轻微表面裂缝，可采用表面修补法，先清理裂缝，再均匀涂抹专用黏结剂进行封闭，防止水分渗入；对于中等程度裂缝，可使用注浆修补法，将水泥砂浆或环氧树脂灌入裂缝中，依靠其黏结力恢复结构整体性；而裂缝宽度较大、深度较深的严重病害，则宜采用填充修补法，利用水泥砂浆或环氧砂浆材料进行加固，增强结构层强度。此外，应结合定期检测与养护制度，针对气温变化较大的季节及时实施预防性封层处理，以延缓裂缝扩展。

2.6 路面坑槽

路面坑槽表现为局部结构破损、材料脱落或形成明显凹坑，是路面材料性能、基层强度、交通荷载与环境作用长期叠加的结果。从材料层面看，沥青路面一旦出现透水通道，雨水便会顺着细小裂缝渗入面层与基层之间，使原本稳定的结构受到水分软化，继而在车辆反复碾压下加速剥落。当基层或路基强度偏低，或者早期轻微病害未能及时处治，局部薄弱区域会在长时间荷载作用下持续扩大，最终形成坑槽。此外，车辆滴油、漏油造成的油类侵蚀常被忽视，但油膜渗入后会改变沥青黏结特性，使材料失去粘聚力，局部

结构很快出现松散脱落。若沥青混凝土层与基层之间因施工不当而存在隔离干扰层，层间剪切力不足，车辆荷载便会在薄弱界面形成拉裂与剥离，加速坑槽的产生。

针对路面坑槽处理，施工人员通常需要在充分评估损坏深度、结构状态和受力条件的前提下选择合适的工艺。对于深度超过 6 cm 的坑槽，必须采用分层修补方式，通过上下至少两层的结构重建来恢复原有承载力。下层多采用沥青稳定碎石结构以保证强度，上层则选用细粒式沥青混凝土实现表面密实度，而各层之间需保持 15~20 cm 的搭接宽度，避免形成贯通裂缝。摊铺沥青混凝土时，松铺系数一般控制在 1.25~1.3，使压实后厚度更加精准。为提升层间黏结效果，在涂刷黏层油前应使用喷灯均匀加热槽壁，使材料接触面达到更佳的附着状态。在遇到基层含水率偏高或局部强度不足的情况下，应先处理基层结构，清除破碎部分、改善排水或重新夯实，防止坑槽再次发生。

3 结语

公路路基路面病害的防治是一项系统性、长期性工程，涉及地质、水文、材料、结构及施工管理等多学科内容。防治工作的核心在于预防优先并加强过程控制，应通过完善的排水系统、科学的结构设计、严格的施工质量管理和持续的养护检测来构建稳定安全的公路基础。随着信息化、智能化技术发展，公路单位应加强先进信息技术在病害预警与维修中的应用，实现公路病害从被动修复向主动防控转变。只有建立完善的全生命周期管理体系，才能有效提升公路的使用性能，推动我国公路工程向高质量方向发展。

参考文献：

- [1] 廉建辉. 公路工程路基路面常见病害及防治对策[J]. 大众标准化, 2023(23):88-90.
- [2] 蒋名星. 公路养护中路基路面病害的处治措施[J]. 交通世界, 2023(16):113-115.
- [3] 杨伟. 公路项目路基路面病害及养护技术分析[J]. 交通科技与管理, 2023, 04(09):147-149.
- [4] 任礼妹. 公路混凝土路基路面病害分析及防治措施[J]. 运输经理世界, 2023(12):138-140.
- [5] 荆从明. 浅议公路路基路面病害的科学检测及预防养护[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(20):131-132.
- [6] 张文川, 朱莉亚. 公路工程路基路面病害及防治措施[J]. 工程建设与设计, 2020(06):61-62.

预防性公路养护技术在公路施工中的应用

王 婷

(灌南县四通公路养护工程有限公司, 江苏 连云港 223500)

摘要 预防性公路养护技术作为现代公路建设的重要发展方向, 强调在施工阶段前置性防护并开展全周期管理, 以实现道路性能的长期稳定, 并延长公路使用寿命。本文基于公路施工的实际需求, 从路面、路肩、边坡、排水及附属工程等方面阐述预防性养护的主要技术措施, 旨在对促进公路养护工作由被动维修转变为主动防控有所裨益, 进而降低后期维修成本, 提高工程项目运行的安全性、经济性, 促进公路施工质量与管理水平双重提升, 为公路工程的可持续发展提供坚实的技术支撑。

关键词 公路施工; 公路养护; 预防性养护技术

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.032

0 引言

随着交通运输需求不断增长, 公路工程在高频运行和复杂环境下的耐久性问题愈发突出。传统养护模式多以事后修复为主, 存在成本高、周期长、对交通影响大的弊端。预防性养护理念的提出, 使公路施工从建成后维护向建设中防护转变, 即在施工环节通过科学设计、优质材料和智能检测手段预先防控潜在病害。该理念强调以全寿命周期为核心, 通过早期诊断、精准干预和动态管理, 减少后期病害发生率, 提升道路的长期使用性能。对此, 以公路施工阶段为研究重点, 探讨预防性养护技术在路面、路肩、边坡及排水设施等方面的应用策略, 有助于为公路工程高质量建设、智慧化运维提供实践参考。

1 公路施工中预防性养护的重要性

1.1 提升道路耐久度

在公路建设进入高强度运营阶段后, 路面结构长期承受车流荷载、气温变化及雨水侵蚀, 任何轻微的损伤若未及时处理, 都会迅速扩展为影响整体结构的深层病害^[1]。因此, 预防性养护的重要性首先体现为早介入。施工管理部门借助定期巡查、表面破损监测及裂缝趋势分析, 可以在病害刚刚出现时实施薄层覆盖、填缝封水、局部修补等轻量化措施。此类处置方式施工时间短、干扰交通小, 通过小成本投入抑制大范围损伤的发生, 从而延长路面的使用年限。此外, 预防性养护强调保持路面清洁、排水系统通畅、边坡稳定, 使道路常年处于良好技术状态。由于干预及时, 路面得以维持良好的整体强度, 未来发生大修的概率明显降低。

1.2 保障行车安全

在高速通行环境下, 路面性能的微小变化往往会放大为更明显的安全隐患, 因此预防性养护在行车安全方面的作用尤为突出。通过及时处理表面老化、早期车辙、轻微龟裂等问题, 可以维持路面足够的摩擦系数, 使车辆在雨天、湿滑弯道或长坡路段保持稳定性, 不易出现侧滑、甩尾等危险情况。同时, 预防性养护也会同步校查标志、标线、反光设施的完好度, 使道路引导信息清晰醒目, 减少驾驶员判断失误。对于交通量大、重载车占比高的路段, 技术人员通过适时喷洒抗滑材料、加铺薄层或提升排水效率等做法, 使结构始终保持良好的承载能力, 避免因局部损坏造成事故风险扩散。

1.3 改善出行体验

随着公路运输向高质量发展迈进, 预防性养护不仅关乎结构安全, 更涉及公众体验与沿线环境质量。通过保持路面平整干净、减少裂缝与坑槽, 车辆行驶的振动与噪声显著降低, 驾驶者能够获得更顺畅、舒适的出行感受。同时, 预防性养护还把沿线绿化、边坡整治、排水沟清洁等内容纳入整体维护, 使道路视觉环境更整洁, 行车视野更开阔, 有助于减轻驾驶疲劳。近年来, 养护领域越来越多地采用低排放沥青、抗滑环保薄层、节能型乳化材料等环保型材料及节能工艺, 使道路维护过程对环境的影响进一步下降。此外, 通过减少因严重病害引发的大规模封闭施工, 预防性养护能够显著降低拥堵概率, 避免因交通延误造成的社会成本, 从而使公路在长期运营中不仅保持能用, 更能保持好用, 实现向高品质服务性能转变。

2 公路施工中的预防性养护技术措施

预防性养护技术强调在公路尚未出现明显损坏前，通过监测、分析和轻量化干预保持路面结构的稳定状态，从而阻断损伤扩展趋势，延长道路使用寿命。其在公路施工中的具体应用如下。

2.1 路面预防性养护

施工单位应根据公路等级、气候条件及交通荷载强度，制定科学合理的路面质量检查周期。通常采用现场踏勘、钻芯取样或检测车巡检等方式开展检测工作，通过踏勘可及时掌握路面表层的平整度、裂缝及松散情况，而钻芯取样则能对路面结构层的密实度、强度及结合状况进行全面分析^[2]。对于交通繁忙、受气候影响显著的路段，应适当缩短检测周期，确保隐患在萌芽阶段得到处理。在材料选择上，预防性养护强调以防为主、以养代修。针对路面初期出现的裂缝问题，可采用具有良好流动性和早期强度的新型灌缝材料进行修补。该材料由水泥、细沙及一定比例的优质外加剂组成，具有微膨胀性，能在注入缝隙后迅速填充并与原结构形成紧密结合，从而防止雨水渗入造成二次破坏。灌缝完成后，裂缝处能形成稳固的结构连接，抑制裂纹扩展。此外，为延缓路面表层老化和磨损，可采用细骨料耐磨沥青混凝土作为表层防护材料。其典型配合比为胶凝材料 1、细骨料 2.95、石 1.89、精钢砂 0.37、水 0.52，通过添加精钢砂与降低水用量的方式提升耐磨性能。与普通沥青混凝土相比，该材料在车辆高频通行条件下能更好地抵抗剥落磨耗，延长路面寿命。

2.2 路肩预防性养护

路肩不仅起到公路结构的边界支撑作用，还承担着车辆紧急停车、排水及防护功能，其稳定性直接影响到路面与边坡的整体安全。由于长期受车辆荷载、雨水冲刷及温差变化等多重因素影响，路肩极易发生不均匀沉降、裂缝、剥蚀甚至脱空等病害^[3]。因此，在具体养护中，施工单位应确保路肩平整、密实并与主路面形成稳定衔接，定期采用踏勘、静载检测或红外扫描等方式对路肩进行状态评估，重点检查是否存在坑洼、裂缝及表层松散等问题。针对长时间停车或排水集中的区域，应结合交通特征和地质条件，采用注浆工艺修复沉陷部位，以恢复其承载能力。为防止路肩表层受磨损、渗水破坏，可在施工或后期养护阶段采用防渗型涂覆材料进行表面加固处理，提升抗渗透性。此外，施工单位应建立一年至两年的定期更换或检查周期，对出现松动、移位及脱离路面主体的路肩

石及时修复或更换，即使材料尚未完全损坏，也应通过提前更换或使用粘结修补砂浆加固的方式消除潜在隐患，为道路整体的安全运行提供坚实的保障。

2.3 边坡预防性养护

边坡作为公路两侧最易受自然侵蚀和地质变动影响的部位，若未进行系统性防护与养护，极易出现滑塌、坍方、滚石及水土流失等问题，直接威胁公路安全运行。因此，在施工与早期运营阶段，施工单位应通过结构检测、加固修复及生态维护等措施建立全周期预防体系。对于采用喷锚支护、砌体护坡或生态植被防护的边坡，应分别制定针对性的预防性养护方案，确保其在复杂地质环境下的稳定性。在喷锚支护体系中，养护的核心是监测锚杆受力与混凝土表层状况。施工人员可定期通过应力检测设备测量锚杆张拉力，及时判断是否存在预应力衰减或锚固失效的隐患；一旦发现承载力不足，可采用张拉补强或增设锚杆的方式进行结构加固^[4]。同时，应对外露混凝土层或砌块面板进行巡检，对起砂或表层开裂部位实施注浆填充或表面抹灰修复，防止裂缝扩大、水分渗透。必要时可在防护层外增设一层具防水功能的柔性砂浆涂层，进一步提升抗裂抗渗性能，确保支护体系在湿热环境和雨季条件下依旧保持稳定。对于以生态植被为主要护坡形式的工程，应定期检查植物的生长状态及根系稳固能力，尤其在季节交替或暴雨期后，要重点评估植被层的水土保持效果。为防止植物病害或土壤板结导致护坡失稳，可采取周期性灌溉、施肥、喷药等综合养护措施，同时适时补植成活率低的区域，维持坡面植被的生态完整性。在土壤含水率较低或冲刷严重的地区，可辅以土壤固化剂或防蚀纤维网加固，以提高抗冲刷能力。

2.4 排水设施预防性养护

公路在降雨条件下若排水不畅，极易造成积水、软基失稳及路面裂缝扩展等问题，其根源通常包括路面坡度变化导致排水口位置偏高、排水管道堵塞或破损及降水量超出设计排水能力等情况。因此，施工单位应定期检测公路纵横坡度与排水口高程，若因沉降或施工变形导致坡度不合理，应通过调整排水口或局部重铺路面予以校正，使雨水能顺利汇流至最低点。对于管道、井口及集水沟等部位，应根据设备特性制定相应的养护周期，易损部件需在达到设计寿命前进行更换。日常养护中，管理人员应对设备运行数据进行趋势分析，重点关注磨损程度、流量变化与运行负荷，通过数据预测设备潜在风险，提前制定维护或替换计

划，避免系统性故障发生^[5]。在时间安排上，预防性养护应重点集中在雨季来临前完成。养护人员需全面检查排水沟、边沟及管道通畅情况，对积存的淤泥、杂物进行清理，防止堵塞影响排水性能。若发现设施存在裂缝、破损或老化，应立即采取加固或修补措施，必要时进行整体更换，以确保其结构稳固性。同时，应对管道接口、检查井盖及集水井进行密封性检测，避免雨水倒灌或渗入路基，使公路在自然降雨条件下保持稳定运行状态。

2.5 公路栏杆预防性养护

在公路施工中，栏杆虽属于附属结构，但在公路边界、保障行车安全与规范人车分流方面具有不可替代的作用。其长期暴露于风雨、阳光及尾气污染等复杂环境中，极易出现锈蚀、褪色、松动等问题，若缺乏预防性养护，不仅影响公路整体形象，还会在突发情况下降低安全防护能力。因此，施工单位应建立定期清洁制度，保持栏杆表面光洁，防止尘土、油污及尾气沉积形成腐蚀层。对于空气污染较重或酸雨频发的地区，应在降雨后及时进行冲洗，以避免酸性物质长期附着造成金属表面氧化。在冬季或高寒地区要重点落实防冻养护，可通过更换抗冻型材料或在栏杆外层增设保温防护层，防止温度骤降导致的金属脆裂与焊缝开裂问题。同时，应定期检测栏杆表面防锈涂层的完整性，一旦发现剥落、锈蚀或变色，应及时打磨重涂或更换防腐层，以延长结构使用寿命。此外，为应对交通事故频发区域的风险，可结合道路实际情况设置反光标识、缓冲护栏及防眩装置，提高夜间行车安全性。在预防性维护中，还需关注栏杆的结构连接处与基础稳定性，防止因震动或外力冲击造成松动或倾斜。管理单位应根据交通流量与环境特征制定栏杆检查周期，一般建议半年至一年进行一次全面检测，对存在安全隐患的部分及时加固或更换。施工单位还应推动智能化养护管理，通过监测传感装置记录栏杆应力变化与腐蚀趋势，实现预警式维护，为道路运行提供持久的安全保障。

2.6 路灯预防性养护

由于路灯设施集成了电气系统、结构构件及通信控制装置，长期运行中易受气候、振动、湿度及电压波动影响而出现灯具老化、线路短路、亮度衰减等问题。为此，在公路施工阶段应同步规划预防性养护方案，构建以智能监测、周期检测和部件更新为核心的综合维护机制^[6]。现代路灯养护的关键在于引入信息化手段，可在每个路灯中植入物联网智能芯片，实时

监测亮度、电压、电流等运行指标，当出现亮度过低、电流突变或供电不稳等异常数据时，系统能第一时间将信息推送至管理终端，维护人员即可精准定位故障位置并实施针对性修复。同时，通过历史数据分析预测设备老化趋势，提前制定更换计划，提高设施运行的可靠性。

在日常维护层面，养护人员应定期检测路灯的亮度与照射角度，使用专业亮度计在灯杆下方、距离灯基一定范围的地面上进行测量，并在不同时段多次取样以获得平均照度值。对于支架、灯具固定螺栓及电缆管线等部位，应定期检验其牢固性与防腐性能，防止因松动或腐蚀引发安全隐患。另外，也可根据部件使用寿命与磨损程度建立周期性更换制度，确保新装部件的规格与质量符合标准，避免性能不匹配造成供电不稳。针对老旧设施，还应在表面涂覆防氧化保护层，以增强防晒防潮性能。

3 结束语

预防性公路养护技术的推广应用标志着公路设计理念的根本转变。通过在施工阶段提前融入检测、预警与防护机制，可实现工程质量的全过程控制，避免传统养护的滞后性，不仅能降低结构老化速率，延缓病害发展，也能提高道路安全性及通行舒适度。未来，施工单位应进一步推广先进技术在公路养护中的应用，构建以信息化管理为核心的预防性养护体系，使预防性养护成为提升公路施工质量、延长使用寿命、促进交通可持续发展的重要保障。

参考文献：

- [1] 高永豪.公路施工中预防性公路养护技术的具体运用[J].汽车周刊,2025(08):63-65.
- [2] 邬强.沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J].运输经理世界,2025(19):114-116.
- [3] 翟鹏.预防性公路养护技术在公路施工中的应用研究[J].运输经理世界,2025(16):132-134.
- [4] 王树杰,张鹏,邬冰,等.预防性养护技术在高速公路沥青路面养护中的运用评价[J].石油沥青,2025,39(02):56-62.
- [5] 王建军.预防性公路养护技术在现代公路养护中的应用[J].四川建材,2025,51(04):200-202,206.
- [6] 李文江,曹伟杰.预防性公路养护技术在现代高速公路养护中的应用探讨[J].价值工程,2025,44(09):112-114.

材料选择与路面修复技术在公路养护中的应用

张 鹏

(中国能源建设集团广西水电工程局有限公司, 广西 南宁 530001)

摘要 公路作为交通基础设施的核心, 其养护质量直接关系到行车安全、运营效率与使用寿命。本文以某省道养护工程为实例, 探讨公路养护中的材料选择与路面修复关键技术。针对该路段因重载交通与气候影响产生的车辙、裂缝等典型病害, 系统分析了 SBS 改性沥青、高模量混合料及泡沫沥青冷再生等材料的适用性与经济性, 并详细阐述了铣刨重铺、就地热再生、裂缝密封及基层补强等修复工艺。通过材料与技术的科学匹配, 结合绿色施工与智慧化管理, 可有效恢复路面性能、提升结构承载力并延长使用寿命。

关键词 公路养护; 材料选择; 路面修复技术

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.033

0 引言

随着我国公路网规模的扩张以及车辆的增加, 交通承载压力也越来越大, 公路设施存在较严重的路面破损问题且病害呈现多元化的发展趋势。其中, 重载交通量大和路面温差较大是导致沥青路面产生车辙、裂纹、龟裂等病害的重要原因, 如果不及时修复还会导致更加严重的路面病害, 影响公路使用寿命^[1]。公路养护工作可以保证路面使用安全, 延长公路使用寿命。养护工作质量和效果与选择的材料类型以及应用的修复技术工艺息息相关。因此, 根据路面病害类型选择合适的养护材料和修复方式并开展相应的处治工作, 对于增强公路路面的养护管理水平具有重要意义。

1 工程概况

某省道 S205 线 K50+000 ~ K55+000 段养护工程线路长 5 km, 为二级双向两车道公路, 设计速度 80 km/h, 路基宽度为 12 m, 路面结构为沥青混凝土面层 (5 cm) + 水泥稳定碎石基层 (20 cm) + 级配碎石底基层 (30 cm)。2015 年完工通车以来, 因该路段日均通过车辆达到 6 000 辆, 且重载车占总通行量的 30%, 经受自然环境影响后, 路面破损比较严重, 出现较多横向裂缝、纵向裂缝、网裂、车辙及坑槽等, 其中车辙最深处达 4 ~ 6 cm。此外, 部分路段出现基层部分松散、强度减小现象, 应针对薄弱点位进行相应处治。

工程的主要养护目标涵盖提高道路平整度、增强结构承载力、延长使用寿命等。基于此目标, 考虑到项目地属于温带季风气候区, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 温差变化大, 要求路面材料具有良好的抗疲劳、

水稳和温稳性能。因此, 在选材上要兼顾材料本身的功能性和经济性以及环保的可持续性问题, 从而有利于保证日后工程的长久寿命。另外, 还应该根据不同病害类型、病害程度采用分层处治的方式开展养护工作, 养护工艺采取铣刨重铺、就地热再生、开槽补强、裂缝灌浆和局部基层补强等技术和方法, 注重环保、经济及施工效率的平衡^[2]。

2 公路养护中的材料选择

公路养护材料的选择直接影响路面的耐久性、使用性能及经济性。科学的材料选择需结合病害类型、交通荷载、气候条件及施工工艺等因素, 确保养护工程的质量和长期效益。结合某省道 S205 线养护工程实际情况, 分析沥青混合料、基层材料、裂缝修补材料及新型环保材料的选用技术要点。

2.1 沥青混合料的选择

沥青混合料是路面养护中最常用的材料, 其性能直接影响路面的抗车辙、抗裂及防水能力。根据本工程的病害特点 (车辙、裂缝为主) 及气候条件 (温差大、多雨), 主要考虑普通沥青混合料 (AC 型)、高模量沥青混合料 (EME) 和温拌沥青混合料 (WMA)。普通沥青混合料适用于一般性修补及铣刨重铺路段, 其中 AC-16C 用于中面层以提高抗车辙能力, AC-13C 用于上面层以提升平整度和抗滑性, 重载路段 (如 K52+300 ~ K53+100) 则采用 SBS 改性沥青增强高温抗车辙和低温抗裂性能。高模量沥青混合料 (EME) 适用于车辙严重路段, 采用高硬度沥青或聚合物改性沥青提高抗永久变形能力。温拌沥青混合料 (WMA) 则在环保

要求较高区域使用,施工温度比热拌沥青低 $20\sim30^{\circ}\text{C}$,减少能耗和排放,同时保持良好的压实性能。

2.2 基层补强材料选择

部分路段基层松散、强度不足,需采用补强材料恢复承载力。水泥稳定碎石(CTB)适用于局部基层损坏修复,具有强度高、水稳定性好的特点,但易开裂,需配合应力吸收层使用,其水泥掺量控制在5%~6%,7天无侧限抗压强度 $\geq 3\text{ MPa}$ 。泡沫沥青冷再生混合料适用于旧料利用率高的路段,通过将铣刨的旧沥青混合料与泡沫沥青、水泥重新拌和形成柔性基层,具有节约材料、减少废料的优点,但初期强度较低,需养生3~7天。级配碎石则用于底基层局部补强,要求CBR值 $\geq 80\%$,压实度 $\geq 96\%$,以保证结构稳定性。

2.3 裂缝修补材料选择

裂缝是沥青路面的常见病害,修补材料要根据其裂缝宽度、深度情况来进行选择。裂缝宽度小于5mm时可以采用热沥青灌缝的方法进行处理,推荐使用橡胶改性沥青作为修补材料,可以更好地发挥其弹性恢复能力;裂缝宽度在5~20mm之间可选择聚合物改性密封胶,因为它的黏结性能好,具有一定的耐候性,抗温度变化能力强;贴缝带主要用于表面裂缝的临时修补或应急养护,在短时间内黏结稳定方便快捷,但耐久性差;裂缝宽度大于20mm的结构性裂缝,需采用高强度聚合物砂浆或环氧沥青进行填充修复,必要时还需对基层进行加固处理,以防止水分下渗和病害进一步发展^[3]。所有裂缝修补作业前均需进行彻底清缝,并确保施工时基面干燥、温度适宜,以保证材料与旧路面间的黏结效果与修复耐久性。

2.4 新型环保材料应用

为满足可持续发展要求,本工程尝试应用橡胶沥青混合料(ARAC)、再生沥青混合料(RAP)、生物沥青等环保材料作为路面修复材料。其中,橡胶沥青混合料利用废轮胎橡胶粉改性形成,具有较好的抗裂性能与降噪性能,适用于上面层,特别适用在城市周围路面的修补。再生沥青混合料通过掺入30%~50%的

旧料并结合再生剂使用,可以降低新料费用并节约资源。生物沥青则用于试验路段,用植物基改性剂代替部分石油沥青,利用其降碳的特点推动绿色养护技术发展^[4]。此外,本工程还积极探索使用建筑垃圾再生骨料等新型材料,在保证路用性能的前提下,进一步拓宽了固废资源化利用途径,为公路养护行业的绿色转型提供了有益参考。

2.5 材料选择的经济性与适用性分析

不同材料的成本、性能及施工要求差异较大,需综合比选,材料优缺点与适用场景如表1所示。

因此,在某省道S205线养护工程中,应选择SBS改性沥青用于重载车辙严重路段(K52+300~K53+100)上面层,配合高模量沥青混合料增强抗变形能力;基层补强采用泡沫沥青冷再生技术以提升旧料利用率;一般路段选用AC-13C普通沥青混合料平衡成本与性能;裂缝修复采用聚合物改性密封胶确保耐久性。同时,在环境敏感路段试点橡胶沥青混合料,实现技术经济性与生态效益的统一。

3 公路养护中路面修复技术的应用

公路养护工程需应用科学合理的修复技术恢复路面性能,延长使用寿命,其中,某省道S205线K50+000—K55+000段产生的车辙、裂缝、网裂以及局部基层破损等各类型病害,均由于该路段交通荷载增长与自然条件等因素的影响所导致。实际的修复作业中,应该对路面病害进行分层处置和分类修复,综合使用铣刨重铺、就地热再生、裂缝处治、局部补强等技术手段,使修复效果、施工效率及经济效益等方面均符合规范要求,也需要满足环境保护的相关规定。

3.1 车辙修复技术

车辙是重载路段最主要的病害之一,此段落的车辙深度达到了4~6cm,影响了车辆的行驶安全性。路面修复作业中,要依据不同的深度进行分级处治,深度小于2cm的车辙部分,用微表处或者超薄磨耗层对车辙处的路面进行翻修,增加防滑性和平整度;对于深度在2~4cm之间的中度车辙,使用铣刨法后加

表1 材料优缺点与适用场景

材料类型	优点	缺点	适用场景
SBS 改性沥青	高低温性能好, 抗车辙强	成本较高	重载、高温多雨路段
泡沫沥青冷再生	节约成本, 环保	初期强度低, 需养生	旧料利用率高的基层修复
橡胶沥青	抗裂性好, 降噪	施工温度控制严格	城市周边、噪声敏感路段
普通热拌沥青	成本低, 施工成熟	高温易变形, 低温易裂	一般性修补

入高模量沥青混合料或 SBS 改性沥青混合料的方式进行修补；对于深度大于 4 cm 以上的严重车辙，使用全厚度铣刨处治加铺新的结构层，同时将损坏的基础部分处治后再次进行填平处理，确保整个路基基础牢固。施工时严格控制碾压工序，运用智能化压实检测设备随时检测路面施工密实度情况，避免二次车辙的产生^[5]。在重载路段上采用 SBS 改性沥青混合料以及通过调整其级配组成、加大粗集料的比例等方法来提高混合料的抗车辙能力，延长修复后的使用寿命。

3.2 裂缝处治技术

裂缝是沥青路面最常见的病害之一，若不及时修复，水分渗入将加速基层和路基的损坏。本工程根据裂缝类型和宽度采用了差异化的处治措施：对于宽度<5 mm 的非结构性裂缝，采用高压空气清理后灌注橡胶改性沥青，确保密封性和弹性恢复能力；对于 5~20 mm 的较宽裂缝，先进行扩缝处理，再填入聚合物改性密封胶，提高粘结力和耐候性；对于伴随基层损坏的反射裂缝，则采用贴缝带+局部基层注浆的综合处治方式，阻断裂缝向上扩展。针对网裂区域，视损坏程度采取局部铣刨重铺或整体罩面处理，并在新铺层与旧路面之间设置应力吸收层，减少反射裂缝风险。施工中特别注重环境温度的影响，确保修补材料在适宜条件下固化，提高修复耐久性。

3.3 坑槽与局部损坏修复技术

坑槽多由水损害或重载冲击导致，本工程采用冷补料应急修复与热拌沥青混合料永久修复相结合的方式。对于应急抢修，采用高性能冷补沥青混合料快速填补，保证临时通行安全；对于永久性修复，则彻底清除松散材料至稳定基层，采用分层回填热拌沥青混合料（AC-13C 或改性沥青混合料），每层压实厚度不超过 5 cm，确保界面黏结质量。对于伴随基层损坏的坑槽，先采用快硬水泥稳定材料修补基层，再恢复面层结构。施工中引入红外热成像技术检测层间黏结状况，避免隐性缺陷影响长期性能。

3.4 基层补强与再生技术

部分路段基层出现松散、强度衰减现象，本工程创新应用了泡沫沥青冷再生技术。将铣刨的旧沥青混合料与 3% 泡沫沥青、1.5% 水泥现场拌和，形成柔性基层材料，既解决了旧料处置难题，又显著降低了材料成本。对于局部强度严重不足区域，则采用水泥稳定碎石（CTB）进行置换补强，补强层厚度根据 FWD 弯沉检测数据动态调整。施工中通过振动拌和工艺确保再生料均匀性，并采用土工格栅增强层间联结，防止反

射裂缝。补强完成后进行 7 天保湿养生，强度达标后方可铺筑面层。

3.5 预防性养护技术集成

除病害修复外，本工程还系统性应用了预防性养护技术。对整体状况较好的路段实施碎石封层防护，延缓老化；在纵坡路段采用抗滑薄层处理，提高雨天安全性；特别在桥头跳车路段应用了高分子聚合物注浆技术，精准调平差异沉降。所有技术应用均通过三维探地雷达检测指导，确保处治措施的精准性和经济性。通过建立修复后性能监测系统，定期采集平整度、抗滑等指标，为后续养护决策提供数据支撑。

3.6 绿色施工与智慧化管理

为降低养护工程的环境影响，本工程采用温拌沥青技术减少 30% 的碳排放，使用橡胶沥青实现废轮胎资源化利用。通过 BIM 技术优化施工组织，将交通封闭时间缩短 20%。现场配备智能压实监控、无人摊铺等数字化设备，提升施工质量可控性。旧料回收率达 95%，真正实现了全生命周期绿色养护。修复后跟踪评估显示，路面使用性能指数（PPI）提升 45%，预计使用寿命延长 8 年以上，验证了技术应用的显著成效。

4 结束语

某省道 S205 线养护工程通过精准诊断病害、科学匹配材料与工艺，构建了全结构层协同修复的技术体系。结果证明，分层分类处治可以大大提高处治精准度与效率，再生技术的应用具备良好的经济价值和环境价值。随着智能检测设备精度提升、低碳材料（如生物基沥青、再生骨料）技术成熟，公路养护正朝着“数据驱动决策、资源循环利用、全生命周期低碳”的方向发展，为保障公路行车安全与可持续交通发展提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 王哲. 公路路面的维护和修复策略 [J]. 中国储运, 2024, (10):121-122.
- [2] 任云龙. 沥青混凝土公路路面裂缝修复施工技术研究 [J]. 时代汽车, 2024(18):185-187.
- [3] 刘金鑫, 刘猛. 基于高速公路特征的沥青路面成套修复技术探析 [J]. 交通科技与管理, 2024, 05(17):101-103.
- [4] 唐贡辉, 高天. 公路养护中的材料选择与路面修复技术 [J]. 运输经理世界, 2024(17):126-128.
- [5] 代启胜, 武杨. 高速公路 ALGSZX 连续路段修复路面接缝技术影响因素研究 [J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(07):78-80, 83.

填料类型对小型精馏塔传质效率的影响分析

禤广健

(佛山市和利环保科技有限公司, 广东 佛山 528138)

摘要 小型精馏塔由于结构紧凑、能耗低及操作灵活等特点, 广泛应用于精细化工、制药、环保及实验室研发等各个领域。传质效率是决定其分离性能的关键指标, 而填料作为小型精馏塔内气液接触的载体, 其类型直接决定了气液两相接触面积、传质系数和流体力学性能。本文以规整填料、散堆填料及新型复合填料为研究对象, 通过实验测试与模拟分析, 系统比较了三者在比表面积、空隙率、液体分布均匀性等方面差异, 重点探究了其对传质单元高度(HTU)、等板高度(HETP)、液泛速度等传质效率评价指标的影响规律, 旨在为小型精馏塔的填料选型、结构优化及传质效率提高提供参考。

关键词 填料类型; 小型精馏塔; 传质效率

中图分类号:TQ051.5

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.034

0 引言

精馏技术在化工分离过程中占据核心地位。其中, 小型精馏塔由于体积小、投资低、适应性强等特点, 在少量物料分离、新产品开发及现场应急处理等场合具有不可替代的地位。传质效率是评价精馏塔分离效果的重要指标, 传质效率的高低直接影响分离纯度、能耗水平、生产效率等。填料是精馏塔实现高效传质的核心构件。目前, 工业及实验室中使用的填料种类繁杂, 不同填料在结构设计以及性能参数方面存在较大差异, 导致其在小型精馏塔中的传质效果大相径庭。然而, 针对不同填料类型在小型塔内的传质机理对比研究尚不充分, 缺乏针对特定场景的精准选型指导。因此, 系统研究填料类型对小型精馏塔传质效率的影响, 明确不同的填料的适用条件与优化方向, 对推动小型精馏技术向高效化、低成本化发展具有重要的现实意义。

1 研究填料类型对小型精馏塔传质效率的意义

1.1 完善小型精馏塔传质理论体系

小型精馏塔因为塔径小、高径比大等结构特点, 其内部流体力学行为和传质规律与大型精馏塔有较大差别, 传统的传质理论难以完全适应。填料是传质过程的核心载体, 其类型决定了气液两相接触方式以及传质路径。通过对不同填料类型对传质效率的影响进行系统比较, 可以揭示小型塔内“填料结构—流体力学性能—传质效率”之间的内在关联机制, 弥补现有理论对于小型塔传质规律研究的不足, 完善精馏传质理论体系, 为传质模型的优化与创新提供理论基础^[1]。

1.2 指导小型精馏塔填料精准选型

在精细化工、制药及生物工程等行业里, 小型精馏塔经常被用于高附加值、小批量物料的分离提纯, 对分离效率以及产品纯度有着非常高的要求。不同的生产场景中物料性质(如黏度、表面张力、腐蚀性等)及操作条件(如温度、压力、气液流速)各异, 对填料性能的要求也不同^[2]。研究填料类型对传质效率的影响, 有助于明确不同填料的性能优势和适用范围, 为企业依据实际生产需求科学选型提供依据, 避免由于填料选择不当造成的分离效率低下、能耗偏高等问题。

1.3 降低能耗与提升资源利用率

精馏是典型的高能耗过程, 小型精馏塔的能耗总量虽然比大型塔少, 但单位物料的能耗比例更高。传质效率的提高可以缩短分离流程、减小塔体高度, 进而减少加热蒸汽和冷却水量的消耗, 实现节能降耗。不同的填料类型其传质效率也存在着差异, 选择合适的填料类型可以在保证分离效果的同时, 最大程度地降低能耗。高效的传质过程可以提高物料分离纯度与回收率, 降低资源浪费和污染排放, 符合节能减排、绿色环保的发展要求, 有明显的经济效益和环保效益^[3]。

2 填料类型对小型精馏塔传质效率的影响

2.1 规整填料对小型精馏塔传质效率的影响

规整填料采用有序结构设计, 常见的有波纹填料、丝网填料、板片式填料等, 其特点是比表面积大、空隙率高、气液流动路径规整。小型精馏塔中规整填料可以改善液体分布的均匀性, 避免由于塔径小造成的液体偏流, 使气液两相在塔内充分均匀接触, 提高传质推

动力。同时规整填料阻力小，气液流动能耗低，液泛速度高，在高气液负荷下仍能保持稳定的传质效率^[4]。

研究表明，在相同的操作条件下，规整填料的等板高度（HETP）较传统散堆填料可降低 30%~50%，传质单元高度（HTU）可以降低 20%~40%，特别适合分离效率高、物料处理量小的精细分离场合。然而，规整填料加工成本高，且对物料中的杂质耐受性差，容易堵塞，这限制了它在含有固体颗粒或高黏度物料分离中的应用^[5]。

2.2 散堆填料对小型精馏塔传质效率的影响

散堆填料为颗粒状填料，在塔内随机堆积，常见类型有拉西环、鲍尔环、阶梯环、矩鞍环等，具有结构简单、成本低廉、拆装方便等优势。在小型精馏塔内，散堆填料随机堆积形成的气液两相剧烈湍动接触，提高了传质系数，但是液体分布不均匀，容易产生沟流、壁流现象，尤其当塔径较小时（一般小于 50 mm），壁流效应更明显，造成局部传质效率降低。

散堆填料的比表面积和空隙率较规整填料低，等板高度（HETP）大，传质效率低。但其操作弹性大，对气液负荷的适应性强，耐物料中杂质，不易堵塞，维护成本低。因此，分离要求不高、物料成分复杂和含少量杂质的小型精馏塔更适宜采用散堆填料，如实验室常规样品分离、工业废液简单提纯等场合^[6]。

2.3 新型复合填料对小型精馏塔传质效率的影响

新型复合填料是对传统填料结构进行改良或者将不同材料复合而成，常见类型有金属—陶瓷复合填料、多孔涂层填料、梯度结构填料等，其主要优点在于实现了传质性能、流体力学性能与耐腐蚀性三者之间的协同优化。在小型精馏塔里，新型复合填料按照传质需求来改变结构参数，可通过梯度孔隙结构设计优化气液分布，利用多孔涂层能加强表面润湿性，进而提升气液接触^[7]。金属—陶瓷复合填料具有金属填料的高机械强度和陶瓷填料的高耐腐蚀性，比表面积比传统散堆填料提高 20%~30%，空隙率比单一材料填料提高 15%~25%，传质效率比单一材料填料提高 10%~20%。此外，新型复合填料在抗堵塞、操作弹性等方面表现出色，很好地弥补了规整填料和散堆填料的不足，适用于高腐蚀、高黏度、含杂质等复杂工况下的小型精馏分离，有广阔的应用前景，但是其研发成本较高，大规模应用还须进一步推广^[8]。

3 提升小型精馏塔传质效率的填料选型与优化策略

3.1 基于分离需求的填料类型精准选型策略

1. 依据物料性质：对高纯度、低黏度、无杂质的物料，宜选择规整填料（丝网波纹填料等），利用其

高传质效率的特点来实现精准分离；对高黏度、含固体颗粒的物料，则选择空隙率大、抗堵塞能力强的散堆填料（阶梯环、矩鞍环等）；对腐蚀性物料，则选用陶瓷、聚四氟乙烯等耐腐材料制成的填料，或金属—陶瓷复合填料。

2. 依据操作条件：在低压、低气速且对分离效率要求高的场合，规整填料因其有序结构和低阻力特性更为适用；在操作负荷波动大的场合，应优先选择操作弹性好的散堆填料；若追求低能耗，则可选用阻力小、空隙率高的规整填料或新型复合填料。

3. 依据塔体结构：对于塔径小于 50 mm 的微型塔，为减弱壁流效应，应选用结构紧凑、液体分布均匀的小型规整填料（如微型波纹填料）；对于塔径在 50~200 mm 的小型塔，可根据需求采用组合形式，如上段使用规整填料保证纯度，下段使用散堆填料增强操作弹性^[9]。

3.2 填料结构参数优化策略

1. 比表面积优化：比表面积决定气液接触面积，增大比表面积可以提高传质效率，但是过量增大会导致流动阻力增大。小型精馏塔应根据物料扩散系数和操作流速来选择比表面积在 100~500 m²/m³ 之间的填料，在传质效率和流动阻力之间找到平衡。比如易分离的物料可选比表面积小一些（100~200 m²/m³）的填料来降低能耗，难分离的物料则选比表面积大一些（300~500 m²/m³）的填料提高传质效率。

2. 空隙率优化：空隙率越高，气液流动阻力越小，液泛速度越高，有利于提高操作负荷和传质稳定性。优化填料空隙率要结合塔内气液流速，保证空隙率在 0.7~0.95 之间。高气液负荷工况下采用空隙率大于 0.9 的填料（大孔径规整填料），防止液泛；低负荷工况下适当降低空隙率，增大比表面积。

3. 几何形状优化：改善填料的几何形状可以改善液体分布和气液接触状态。例如：把散装填料的圆形截面改为鞍形、环形与鞍形复合结构（矩鞍环、鲍尔环等），可减少液体沟流；对规整填料的波纹倾角进行优化（一般选择 30° 到 45°），既能保证液体停留时间，又能保证流动速度，提高传质效率^[10]。

3.3 操作参数与填料性能的匹配优化策略

1. 气液流速匹配：气液流速影响气液接触时间和湍动程度，填料类型不同，气液流速也不同。对于规整填料，适宜操作气速一般为 0.2~0.8 m/s，液气比宜控制在 0.5~2.0，防止气速过高引起液泛或者气速过低造成传质推动力不足；对于散堆填料，适宜气速

为 $0.1 \sim 0.6 \text{ m/s}$, 液气比为 $0.3 \sim 1.5$, 保证气液两相能够充分湍动接触。

2. 温度与压力适配: 温度影响物料蒸气压及扩散系数, 压力影响气液平衡关系, 需根据填料传质特性来调节操作参数。对传质系数受温度影响较大的填料(如丝网填料), 可以适当提高塔釜温度来增大扩散系数; 在高压操作场合, 应选用抗压强度高、空隙率稳定的规整填料或金属复合填料, 防止压力变化造成填料结构变形。

3. 液体分布器匹配: 分布器的性能直接影响液体分布的均匀性。规整填料宜采用槽式或孔式分布器, 保证液体均匀喷淋到填料表面; 散堆填料则可采用喷淋式分布器, 增大液体覆盖面积, 减少沟流。同时, 分布器的布液点密度应与填料比表面积相适应, 一般布液点密度为 $100 \sim 300 \text{ 点/m}^2$ 。

3.4 基于应用场景的填料组合与维护优化策略

1. 多类型填料组合使用: 根据分离任务进行优化组合, 可改善传质效果。例如: 在精细化工产品提纯中, 塔上段用高效的丝网规整填料保证产品纯度, 塔下段用耐负荷的鲍尔环散堆填料提高操作弹性, 既保证分离效率, 又保证运行稳定。

2. 填料预处理与定期维护: 金属填料采用酸洗、钝化处理去除表面油污、氧化层, 提高表面润湿性, 陶瓷填料做耐温、耐压测试, 保证性能稳定。运行过程中定期检查填料的状态, 散堆填料及时清理堆积的杂质和结块, 防止堵塞。规整填料检查有无变形、移位, 及时调整, 保证气液流动通道畅通。

3. 配套高效塔内构件: 适配新型塔内构件配合使用高效液体分布器、再分布器、除沫器等塔内构件, 可进一步提升整体传质效率。例如: 在填料层间装设液体再分布器, 可遏制壁流效应, 对高径比大的小型精馏塔效果明显; 选用高效除沫器以削减雾沫夹带, 防止气相中夹带的液体干扰传质过程。

3.5 智能化调控与能效适配优化策略

智能化调控、能效适配属于小型精馏塔填料高效运转的有益补充, 以工况匹配和精准控制能耗为手段, 继续发挥填料传质的潜力。

1. 实时检测、调节, 装有温度传感器、压力传感器、气液流速传感器等在线传感器, PLC控制系统可获得工况变化。根据规整填料的高灵敏度特性, 自动调节气液比、回流比等参数, 防止超出最佳传质区间; 对散堆填料系统重点检测压降变化, 及时预警堵塞风险并调节操作负荷。

2. 能效优化适配, 根据填料传质效率曲线来建立

能耗和分离效率之间的关联模型。在满足分离要求的基础上, 从再沸器热负荷、冷凝器冷却效率两方面入手, 减少单位产品的能耗。对低黏度物料精馏过程, 配合丝网规整填料的高效特性, 用变回流比调节, 降低无效能耗。

3. 用 Aspen Plus、COMSOL 等软件来建立小型精馏塔的数字模型, 在不同的填料、不同的操作参数下进行传质效果的模拟。经过仿真预估填料适配性, 预先改良组合方案及操作区间, 削减实际调试周期与资源耗费, 尤其适宜小批量、多品种的精细化工生产情形。

4 结束语

填料类型是影响小型精馏塔传质效率的主要因素, 其结构特征与性能参数直接影响气液两相接触质量和传质效果。合理的填料选择与优化是实现小型精馏塔高效、节能、稳定运行的核心所在。本文通过比较规整填料、散堆填料、新型复合填料对传质效率的影响来确定不同的填料性能优势、适用范围及局限性, 并从精准选型、结构优化、操作匹配及组合维护四个方面系统提出提高传质效率的方法。研究发现, 规整填料传质效率高, 散堆填料性价比高、操作弹性大, 而新型复合填料为复杂工况分离开拓了新途径。

参考文献:

- [1] 李璟, 邓国平, 刘宋然, 等. 双效变压精馏分离乙腈-正丙醇二元共沸物的工艺研究 [J]. 石油化工技术与经济, 2024, 40(06):18-22.
- [2] 戴遥龙. 精馏塔回流比优化与能源消耗关系分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(23):117-118, 121.
- [3] 朱迎臣, 刘艳. 年产 3.7 万吨异丙醇项目的异丙醇精馏塔模拟优化 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11):21-24.
- [4] 刘杨, 孙于涵, 杨鹏举. 煤制乙二醇精馏系统节能增效分析 [J]. 氮肥与合成气, 2024, 52(11):35-37.
- [5] 杨纪. Aspen Plus 在精馏塔操作培训中的应用 [J]. 广州化工, 2024, 52(20):135-137.
- [6] 葛长斌. 人工智能技术在甲醇精馏装置控制系统中的应用 [J]. 化肥设计, 2024, 62(05):52-55.
- [7] 高晓新, 王稚蒙, 陆凯锐, 等. 基于决策变量的多目标评价在教学中的应用: 萃取精馏分离异丁烯/异丁烷的优化设计 [J]. 实验技术与管理, 2024, 41(10):220-226.
- [8] 凌盈, 张鸿鹏, 辛华, 等. 离子液体萃取精馏分离乙腈-异丙醇共沸体系工艺模拟 [J]. 沈阳化工大学学报, 2024, 38(05):418-423.
- [9] 叶启亮, 徐超洋, 王丽涛, 等. 隔壁精馏塔分离氯丙烯工艺模拟优化 [J]. 化学工程, 2024, 52(10):52-57.
- [10] 陈杨. 乙烯装置丙烯精馏塔模拟研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(09):6-7.

海上升压站平台一拖多空调系统的适用性探讨

袁 立

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510530)

摘要 海上升压站平台是我国海洋新能源发展的重要基础设施, 其独特的工作条件对其制冷性能的影响规律与机理研究具有重要的理论和实际意义。一拖多空调系统因其一体化设计和高效率、低能耗等特点, 已成为一种可能的选择方式。本文以海洋升降台为研究对象, 对其环境约束、空间限制、能量供给和运维便捷性等技术特征进行深入研究, 分析环境适应性、负荷匹配、能耗经济性、可靠安全性等方面, 阐明一拖多空调在特定海域中的适用范围, 以期为海上升压站平台空调系统的优化选型提供理论参考, 进而促进我国海工设备节能减排的发展。

关键词 海上升压站平台; 一拖多空调系统; 环境适配性

中图分类号: TM614; TB657.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.035

0 引言

海上升压站平台具备能量汇集、升压输送等重要功能, 其稳定性关系到能源利用的高效和安全。海洋环境的高盐雾、强腐蚀和空间受限等特点, 对其环境适应性、能效和可靠性等方面的需求远远超过地面环境。一拖多空调凭借一台外部发动机带动多种内部发动机的结构特点, 在节省空间和降低能源消耗上表现出了巨大的潜能, 逐步成为海工设备选择领域的研究热点^[1]。本文研究成果为解决我国近海风电机组运行中面临的关键问题提供理论参考, 为推进我国海工装备节能升级和运营管理方式优化提供新思路, 对于丰富我国海工装备适配理论, 提高我国能源开发项目的整体效能, 均有重大的理论和实际价值。

1 海上升压站平台环境与空调系统约束条件

1.1 海洋特殊环境影响

由于海上升压站平台装置工作在高盐雾和高湿度的空气中, 海水中的盐雾颗粒极容易粘附在其上, 并沿其间隙进入结构部件中, 引起材料的侵蚀和元器件的绝缘特性退化。强突风和极端温度和湿度的交互作用会使装备的密封性能更加恶化, 从而增加了系统的渗漏风险。海水中存在的强腐蚀介质, 不但会降低其服役年限, 还会引发关键零部件的突然失效, 从而严重威胁到整个空调系统的正常运转。在此特定条件下, 对材料耐腐蚀性、密封保护程度和结构抗风性等方面进行明确规定, 是我国空调设计中亟须解决的关键问题。

1.2 空间布局限制与设备安装要求

海上升压站平台空间布局紧凑, 但其甲板和船舱的可用面积较小, 各种电气设备和线路密集布置, 对设备的尺寸和安装空间都有很大的要求。室外机需要根据平台上的承载规范进行调整, 室内机的设置要避免有较多的设施管道, 并要有足够的进出通道。在进行装备装配时, 必须充分注意其自身的特点, 以防止由于安装位置的错误而造成设备的位移和构件的损伤。另外, 在该方案中, 需要将该方案与整个平台的管路进行协调, 以最大程度地降低相互影响, 这就需要具有模块化的特征, 以适应在受限的平台上进行装置布置, 同时兼顾装置的可实现性和使用效率^[2]。

1.3 能源供给特性与节能降耗需求

海上升压站平台的能源供给主要依赖可再生能源或船舶发电系统, 其能量产出具有较大的波动性, 并且能量供应费用远大于陆上。而作为该平台的主体用能装置, 其能量消耗状况对整个平台的能量供求关系以及运行费用的调控具有重要意义。因此, 要求空调系统达到更高的效率和更低的能耗, 同时又要保证室内环境的温度调控。

此外, 该系统还需要根据平台能量供应的周期性变化特点, 对其进行柔性负载调整, 以防止能量供应短缺而造成的系统关闭。节能减排既是减少运行费用的实际需要, 也是保证系统稳定运行、提高能源利用率、实现系统能量匹配的关键。

1.4 设备运维可达性与可靠性标准

由于海上升压站平台远离陆地，需要依靠专门的维修船和维修人员进行维护，运行周期长，费用高，并且容易受到天气变化的影响。为了保证乘坐者的舒适性和装备的平稳运转，空调系统必须具有较高的可靠性，以降低失效次数。在发生事故后，需要方便地进行维修和维修，而对其主要零件要有很好的维护能力，减少维修的困难和节省时间。在此基础上，针对海上作业条件下海上作业能力受限的问题，采用高可靠的设计和方便的维修规划，保证海上作业人员能长时间正常工作，并减少维护和管理的费用。

2 一拖多空调技术核心特性分析

2.1 系统架构

一拖多空调系统采用“单台室外机搭配多台室内机”的集成化架构，将压缩机和冷凝器等核心制冷组件集成到户外机中，并利用冷媒管与多个室内单元相连，构成了一个集中供能、分布式终端的体系结构。该系统采用一体化的智能化控制，可以对各个室内机组进行独立调节和集中管理，不需要为各个房间分别安装一个外部机组。该体系结构使得系统构成为简化，外部单元的数目和占地面积减小，采用集中管线的方式减小了系统的复杂度，实现“集中控制，分散使用”的工作方式，既能适应多个地区的冷热电联供需要，又能实现整个系统的紧凑性。

2.2 工作原理

一拖多空调是利用室外机组压缩机将制冷介质压缩成高温、高压的燃气，经过冷凝器降温，形成高压液体冷媒，然后由节流器进行压力降低，形成较低温度、较低的雾化介质，并将其传送到各个室内机组。结合空调系统的工作原理，设计了一种新型的空调系统。该系统利用智能化的控制技术，对各个房间的温度进行实时监控，并按照负载要求调整制冷设备的工作频率和制冷介质的分布，从而对各个房间进行精确的温控。在某些室外机组停机的情况下，该装置能够在制冷介质和压缩机负载的情况下，自动调整制冷介质和压缩机的负载，防止能量的损耗，通过负载的动态匹配，达到多分区的自主调控和能量的最优配置^[3]。

2.3 核心优势

一拖多空调系统的核心优势集中体现在空间利用、能耗控制与灵活调控三个维度。采用多个室内单元与一个房间单元相匹配的结构，使外部单元的数目大大

减少，从而显著缩小了整个装置的占用范围，满足了有限的环境下的安装需要。该方案可以针对不同地区的负载情况进行动态调整，从而有效地解决了传统的单拖单一式空调的低效能量消耗问题，提高了能量的使用效率，达到了明显的节能目的。采用一体化的智能化控制体系，实现了各个机房的单独启动和降温，既可以适应不同地区的不同用途，又可以方便地进行集中的管理、维护和调度。另外，一体化结构简化了装置的管道和安装过程，减少了初期的建设费用，整个体系具有较高的模块化程度和应用场景适应性。

2.4 固有局限

一拖多空调具有显著的内在缺陷，主要表现为负载匹配度不够，系统运行主要依靠全局负载均衡，当局部地区负载突然变化或地区间负载差别太大时，会造成压气机性能降低，进而引起系统失效。另外，该设备的失效波及的区域较大，其中，以户外主机为中心，当出现故障时，会使与之相连的其他机房全部停机，且与单个并联的机房相比，该故障引起的功能性中断区域要大得多。此外，冷却介质管道布局较为复杂，管道的长短和直径的选取直接关系到制冷效果，如果不合理的话，很容易造成制冷剂分布不均匀。此外，该装置对装配精度有很高的要求，管线方向和接头的密封必须严密控制，不然会增加能量损耗和失效的风险，成为限制其在特定环境中使用的主要因素^[4]。

3 一拖多空调在海上升压站平台中的适用性分析

3.1 环境适配性

一拖多空调在海洋增压电站中对其服役环境适应性要求较高，其抗腐蚀性能和结构稳定性能要求较高。当前传统一拖多空调系统材料及封装设计不能有效应对高盐雾和强腐蚀环境，需要通过材料和保护结构的改进来提高其适应性。外部机壳体由抗腐蚀合金材料制成，内部电器元件也加入了不透水的封闭，可以有效减少海水对外部环境的腐蚀，但是保护等级的提升会引起设备的造价和冷却效果的改变。为适应平台阵风荷载特点，需要采用加固的支架来提高体系的抗风性能，但同时也带来了设备的附加载荷。一拖多空调系统可以通过特定的保护方案达到与海上环境的适应性，但需要兼顾保护和装备的功能，其环境适应性需要通过个性化的改装和升级来实现。

3.2 负荷匹配性

海上升压站平台各区域负荷差异显著且存在动态波动，其中控制室、配电室等区域需要实现连续平稳

制冷，而一些辅机房只需要间断调控，使得一拖多空调系统的负载匹配面临严峻挑战。然而，在多个地区负载急剧变化时，压缩机的调整反应会出现迟滞现象，进而影响某些地区的温控准确性。

另外，平台用能的波动性也会对空调的负载调控能力产生直接的作用，从而导致用电不均衡现象的恶化。通过优化控制逻辑和添加负荷预测模型，可以提高负荷适应性，但是不能彻底解决多个地区负载差别造成的工作负荷压力，需要根据平台负载特点进行自适应调整。可通过各区域负载历史数据与实时监测参数，动态分配冷媒供给，结合核心区域优先级机制，在满足控制室等关键场所需求的同时，平抑系统负荷波动，提升整体运行稳定性。这样不仅能够提升一拖多空调的工作效率，还能减少更多的能源损耗，为低碳理念的践行提供支撑。

3.3 能耗经济性

在能耗和经济效益方面，一拖多空调较常规的单拖单制冷具有明显的优点，其中央供电方式可以降低户外设备的无效运转损失，而智能化的负载调整则可以有效地减少能量的消耗，符合该平台的节能要求。在多平台协同工作的情况下，一拖多空调系统具有较高的整体能量效率，并且能够有效地减少能耗费用。但是需要指出的是，在海上进行保护和改建时，装置的能量消耗会轻微增加，如果与海水中的负载不相匹配，则会使一些能源收益被抵消。另外，该方法的初期投入较单拖式单一拖式的方案高，但是从长远来看，其整体的节能效果更好^[5]。

3.4 可靠安全性

一拖多空调在海上升压站平台中的应用，其可靠性和安全性必须同时考虑到事故的危险性和系统的稳定运行。由于机房外单元单一失效具有大范围的特点，与其高可靠度需求相冲突，需要添加后备机房外单元或进行备份以提高其故障容忍性能，但这样会造成设备投入和占地面积的增大。在海上运作过程中，由于受到海水的冲击和侵蚀，容易造成管道接头松动和密封失效，从而引起冷媒泄漏，需要通过加强管道紧固和密封试验来预防和控制。另外，为了防止电磁干扰对其他装置的正常工作，还需要根据平台的电力系统的安全要求来进行调整。通过对冗余结构和安全监控模型的更新，可以提高系统的可靠性和安全性，但需要在开销和保护效果之间进行权衡，并对其进行系统的优化。

3.5 运维便捷性

一拖多空调系统的维修方便程度需要根据运行工况进行全面评价，其一体化结构可减少设备数目，方便进行统一的巡检和管理，减轻维护工人的工作负担。该系统的智能化，可以对设备的运行状态进行自动的监测和报警，使维护工作人员能够迅速地发现问题，从而减少维修周期。然而，其核心组件高度集成化，比单拖一台困难得多，并且冷媒管结构也比较复杂，需要专门的装备和技术来进行检漏和维护，提高了维护技术要求。海水中的高盐度盐渍侵蚀会导致装备构件磨损，需要提高维修频率，进而增加运营费用。一拖多空调系统运行方便性表现为双向、集中式管理的优点明显，但其结构和特定的运行环境使得维护变得更加困难，需要对其进行优化，以提高维护的友好性^[6]。

4 结束语

本项目以海上升压站平台为研究对象，针对其运行条件，对一拖多空调系统的性能进行深入研究，确定其适用范围。一拖多空调系统运作模式在空间使用和能量调控上的优越性符合海洋增压电站的核心要求，但其环境适应性差和故障影响范围大，成为其实用化的瓶颈。通过材料升级、冗余设计和控制算法的措施，可实现对产品性能的有效调控。研究成果为海上升压站平台空调系统选型提供理论参考，丰富了海洋特殊环境下暖通设备应用的理论体系，并为我国一拖多空调系统的发展指明了方向，对推动我国海工装备的高效节能发展具有实践价值。

参考文献：

- [1] 班鑫磊,徐康乾.环境荷载联合作用下海上升压站模态参数识别[J].船舶工程,2025,47(S1):74-80.
- [2] 张永飞,高志康,张平,等.海上升压站基础结构设计选型分析[J].电力勘测设计,2025(10):26-31.
- [3] 李培,施善伟.海上升压站空调冷凝水回收利用装置的实施应用[J].企业管理,2023(S2):290-291.
- [4] 陈日帅,苗清波,王兆林,等.一拖多空调温控关机后漏热量问题的实验研究[J].家电科技,2023(S1):16-19.
- [5] 王兆林,苗清波,陈日帅,等.关于一拖多空调环境温度检测准确性优化的研究[J].家电科技,2023(S1):221-225.
- [6] 乔楠,付浩卡,桑豪伟,等.一拖多空调除湿降温系统的研究[J].资源信息与工程,2022,37(02):142-145.

水利工程对流域水资源优化配置作用研究

邹剑钧

(丹阳市水利局水利工程管理所, 江苏 镇江 212300)

摘要 流域水资源优化配置可以保障区域供水安全、生态安全与经济社会协调发展, 当前受气候变化与人类活动影响, 流域水资源时空分布不均、供需矛盾突出等问题普遍存在, 亟需通过系统性调控措施提升配置效率。本文围绕水库、引调水、河道整治、灌溉等水利工程类型, 分析其在流域水资源优化配置中的具体调控机制, 提出跨区域联合调度、智慧水利应用、节水型社会建设等实现路径, 以期为促进流域高质量发展提供有益参考。

关键词 水利工程; 流域水资源; 优化配置; 调控作用; 智慧水利

中图分类号: TV213

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.036

0 引言

我国流域水资源普遍存在时间上丰枯不均、空间上分布失衡特征, 加之城市化、工业化进程加快, 部分地区面临水荒与洪涝并存、生态用水被挤占等问题, “重开发、轻配置”的管理模式已难以为继。水利工程作为人为干预水资源时空分布的核心手段, 通过水库调蓄削峰填谷、引调水利工程跨区互补、河道整治修复生态、灌溉工程提质增效等多重功能, 对于破解流域水资源矛盾发挥着重要作用。

1 流域水资源配置现状分析

流域水资源配置是保障区域水安全、支撑经济社会可持续发展的核心环节。我国主要流域的水资源配置体系在应对气候变化加剧、用水需求多元化等挑战时, 仍面临诸多结构性矛盾与制度性瓶颈, 亟需系统梳理与精准施策, 现状特征可归纳为以下四个维度: 水资源时空分布失衡问题突出、供需矛盾随发展持续加剧、生态用水被严重挤压以及跨区域协同配置机制薄弱。问题的交织叠加制约着水资源的优化利用, 更对流域生态环境安全与区域协调发展构成严峻挑战。

1. 水资源时空分布失衡问题突出。受季风气候与地形条件影响, 流域存在时间上丰枯骤变、空间上南多北寡特征, 如黄河流域多年平均降水量仅446毫米且60%集中于7—9月, 冬春常因枯水导致断流, 长江流域虽水资源丰沛, 但流域内鄂北岗地等区域仍存在季节性缺水供需错位显著^[1]。

2. 供需矛盾随发展持续加剧。工业化、城镇化进程推高用水需求, 北方地区尤为突出, 黄淮海流域人均水资源量不足全国的1/5, 农业灌溉仍普遍采用大水

漫灌, 灌溉水利用系数仅0.55, 低于发达国家0.7的水平, 部分地区为保障城市供水过度抽取地下水, 形成大面积漏斗区, 地面沉降风险攀升。

3. 生态用水被严重挤压。为满足生产生活需求, 部分流域生态流量保障不足, 河流断流、湖泊萎缩现象频发, 如海河流域河道生态基流达标率不足, 永定河曾长期干涸, 西北内陆河下游湿地退化, 生物多样性受损, 生态系统服务功能减弱。

4. 跨区域协同配置机制薄弱。各行政单元多从自身需求出发, 缺乏统一调度平台与信息共享机制, 丰水期“弃水”、枯水期“争水”现象并存, 中小河流治理标准不一, 洪水风险转移问题突出, 整体配置效率偏低。

2 水利工程在流域水资源配置中的调控作用

2.1 水库工程的调蓄与供水调控功能

水库工程在流域水资源配置中承担着调蓄径流、削峰补枯和稳定供水的核心功能, 水库通过拦蓄来水, 平抑洪峰流量, 不仅保护沿岸区域安全, 也为后期调水提供储备条件。在枯水期或供水压力增大阶段, 水库可适时释放库水以补充河道基流, 维持城镇生活供水和基本生态流量。农业需水集中期, 水库可按需加大下泄量以满足灌区灌溉需求, 促进作物稳产增产。水库蓄存的稳定水量可在高峰用水阶段发挥调节作用, 平衡区域供水负荷。在多水库联调格局下, 上、下游间可通过调度库容形成梯级补水体系, 提高流域统一调控能力。水库工程在应对干旱、调节季节性水量差异和支撑工业、农业、生活用水连续性方面发挥着不可替代的作用, 是维持流域水资源可持续供给的基础枢纽。

2.2 引调水工程对区域水量再分配的影响

引调水工程通过构建跨区域输水通道，实现水资源从丰水区向缺水区、从丰水时段向枯水时段的再分配，是优化区域供需格局的重要手段，引调水工程的实施可弥补本地水源不足，缓解因降水偏少或地下水过度开采造成的供需矛盾。引调水工程不仅能提供稳定补给，也能在供水压力骤增时发挥应急调度作用^[2]。例如：在干旱年份或极端气候阶段，通过提高调水频次和输水流量，可有效避免城镇供水短缺，引调水工程通过定向补充河道水量，提高湿地水位，有助于维护生态系统稳定性，减少鱼类栖息地退缩，扩大工业和农业发展空间，通过提高区域水资源承载能力吸引经济布局，促进资源均衡配置。引调水工程通过构建时空补偿机制，实现流域范围内水资源的合理再分配，有效缓解区域间供水差异，提升整体水资源调控韧性。

2.3 河道整治与生态补水工程的调节作用

河道整治与生态补水工程在流域水资源配置中主要发挥改善水力条件、维持水体连续性和提升生态功能的调节作用。疏浚淤积物、优化断面形态、恢复自然弯曲度可提高水体流动性，减少局地滞留时间，提升河道的行洪和输水能力，生态化护岸和缓坡设计则可改善水生生物生境条件，增强水体自净能力，生态补水工程主要在枯水期或水体断流风险增大时，通过水库补水、引水分流或再生水回用等方式维持最低生态流量，该调节功能有助于改善河湖整体水动力结构，提升水质循环效率，补水可提高沿河地下水位，缓解因地下水过度抽取导致的地表沉降和生态退化，河道整治与生态补水工程在资源配置体系中形成互补关系。

2.4 灌溉工程对农业用水效率的提升作用

灌溉工程通过改善输水方式、提高灌溉均匀性和减少无效损失，在农业用水效率提升中具有明显的作用。渠系防渗、管道输水、智能量测等工程可减少输水过程损失，使更多水量有效到达农田。喷灌、滴灌、微灌等高效节水技术可实现按需补给，通过控制水分分布提高作物水分利用效率。灌溉工程可结合墒情监测实现基于作物需水规律和土壤水分状况的动态调节，减少无效灌水量，提高水生产力。灌溉工程的完善有助于稳定作物产量，提高农业抗旱能力，使农业系统在持续少雨年份仍保持经济产出，降低地下水开采压力，最终实现农业生产与水资源可持续利用之间的平衡。

3 水资源优化配置的实现路径与措施

3.1 建立跨区域联合调度与信息共享机制

3.1.1 构建跨区域协调组织体系与统一调度规程

在跨行政区供水矛盾较为突出的流域，应建立由水行政主管部门、城市水务机构、灌区管理单位和生态监管部门共同组成的联席协调机构，明确成员单位的调度权限与责任分工，实施统一调度规程。联席机制可设立定期会商制度，围绕库容消落安排、灌区需水曲线、城市供水高峰时段等要素开展协同研判，在遭遇连续少雨年份时由统一机构根据预警等级调整分水方案，对城市生活用水、河道生态流量和灌区灌溉实行差异化保障^[3]。例如：某流域上游布设有多座中型水库，承担下游城镇生活供水与灌区灌溉的双重功能，区域联调机构基于统一调度指令对农业灌溉计划实施分期编排，将集中灌溉分解为多个阶段，根据不同作物生长周期错峰供水，避免在关键育苗期之后仍维持高水量灌溉造成浪费，平台对城镇供水管网实时监测，当早晚高峰阶段出现压力下跌趋势，上游水库通过调节泄量“脉冲式”补水，使沿线取水厂进水量保持稳定，整个枯水期内该地区未出现河道断流、湿地退化等生态风险，居民投诉率下降，灌区作物单产保持在多年平均水平，提高流域水资源配置韧性。

3.1.2 搭建数据共享平台与标准化监测体系

跨区域调度常因水情信息不对称产生滞后和偏差，需建设覆盖流域的水文信息共享平台，接入降雨过程、水库库容、渠道输水量、地下水埋深、河道流速及水质指标等实时数据并制定统一监测标准，平台可嵌入水量平衡模型和供需预测模块，对未来水量缺口进行滚动预测，对可能出现的局部缺水区域提前预警，布设在线取水计量设备、自动化闸门及远程监测终端，可实现多库、多渠、多泵站的可视化调度。

3.2 推进智慧水利与动态决策支持系统应用

3.2.1 构建水资源大数据采集与数字孪生运行体系

随着水资源调度精细化需求提升，应在重点河段、灌区干支渠、地下水敏感区等位置布设在线监测传感器、流量计、水质站和墒情探头，实现实时采集水位、流速、浊度、土壤含水量及降雨量等关键数据并统一接入智能管控平台，将水库调蓄规律、河道补水特征和灌区需水曲线数字化表达，使管理者能够在虚拟环境中模拟不同调度策略的效果，提前评估风险点^[4]。例如：某灌区建设智慧监测系统后，平台可实时显示

各支渠流量、渠首水位和农田土壤湿度，当连续晴旱导致土壤含水率低于阈值时系统自动触发补水方案，调整闸门开度，为关键作物地块优先供水，对灌溉结束后渠道水量进行归集分析，识别超灌区域并给出用水预警，帮助管理单位优化轮灌顺序，该灌区平均无效输水损失降低约两成，灌水均匀度提升。

3.2.2 利用智能算法与优化模型开展多场景决策支持

在平台运行中，可引入机器学习、优化算法和水文预测模型，对未来降雨过程、蒸散耗水强度及管网压力变化进行模拟分析，通过计算不同调度策略下的水量分配结果，找出兼顾节水、保供与生态需求的最优方案。系统可建立数据库记录调度历史，自动识别常见耗水异常、管道漏损风险和非计划取水行为，并通过可视化界面向管理者直观呈现决策依据。例如：某河湖连通区在枯水年应用决策支持系统设置了三种调度情景，优先保障生活供水、兼顾灌区用水、强化生态补水，上游库区夜间错峰释放水量，通过干渠连通湖泊维持最低生态水位，同时压缩非关键时段的农业灌溉量，系统实时跟踪流量与水位变化，一旦监测点出现偏差，模型立即重新计算并下发调整指令，该区域在无额外水源输入的情况下实现了湿地水位稳定、城镇供水安全和灌区产量不降的目标^[5]。

3.3 实施节水型社会建设与生态用水保障策略

水资源短缺与生态退化的双重压力，倒逼流域治理转向节流与护源并重，实施节水型社会建设与生态用水保障策略，是缓解供需矛盾、维持河流健康、实现可持续发展的必然选择，节水型社会通过制度约束、技术革新与观念转变，从需求端减少水资源浪费，提升利用效率。生态用水保障则通过刚性约束与科学调度，确保河流、湖泊、湿地等生态系统的基本需水。二者协同既能“省出”更多水资源用于生产生活，又能“留足”生态空间维持系统平衡。

1. 全面推进节水型社会建设，强化需求端管理。建设节水型社会需要构建完善的制度体系。要严格落实水资源消耗总量和强度双控制度，将用水指标分解到各行业和用水户。推行阶梯水价制度和用水定额管理，对超过定额的用水实行惩罚性水价，对节水成效显著的单位和个人给予奖励。制定和修订用水产品、用水行业的水效标准，为节水工作提供技术依据，形成有效的约束和激励，促使全社会形成节水内生动力。

2. 加强技术创新与推广应用，提升用水效率。农业领域，要大力发展高效节水灌溉，推广滴灌、微灌

等先进技术，推进水肥一体化，提高灌溉水利用系数。工业领域，要加快节水技术改造，推广循环用水、串联用水等节水工艺，提高工业用水重复利用率。城镇生活领域，要全面推广使用节水型器具，降低供水管网漏损率，要积极推进非常规水源利用，加强再生水、雨水等资源化利用，减轻新鲜水资源取用压力，实现水资源从“粗放利用”向“集约高效”转变。

3. 健全生态用水保障机制，维护河流健康。保障生态用水需要建立科学的管理体系。首先要开展生态需水研究，科学确定河流、湖泊、湿地的生态基流和敏感期生态需水过程。其次要将生态用水纳入水资源统一配置，在制定流域水量分配方案时预留足够的生态水量。最后要完善生态调度机制，优化水利工程调度，保障重要河湖生态用水，对于生态严重退化的区域要实施生态补水工程，逐步恢复受损生态系统，及时发现和处置生态用水保障不足的问题，确保生态系统得到最基本的水量保障，维护河流生态环境。

4 结束语

水利工程通过调蓄、输配与生态调节，成为流域水资源优化配置的核心支撑。跨区域联合调度打破行政壁垒，智慧水利提升决策精准度，节水型社会与生态保障协同发力，既缓解了供需矛盾，又修复了水生态环境，提升了水资源利用效率，更推动了流域从“被动治水”转向“主动管水”。完善工程体系与制度创新将助力实现水安全、生态美与经济兴的有机统一，为流域高质量发展注入持久动力。

参考文献：

- [1] 于青云,于宁,盖炜.黄河资源配置与调度管理研究[J].现代工程科技,2025,04(15):189-192.
- [2] 马彪,邵朋昊,王天宇.安宁河流域灌溉发展潜力及水资源配置[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(S1):24-29.
- [3] 龙晓彤,牛永强.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[C]//河海大学,浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院),浙江省水利学会.2024(第十二届)中国水生态大会论文集.黄河水文勘察测绘局,2024.
- [4] 屠田霖,谢坤,王梅馨.高原湖泊异龙湖流域水资源配置分析[J].人民珠江,2024,45(S1):162-165,169.
- [5] 吾斯曼江.塔里木河流域资源配置模式及水价确定[J].河南水利与南水北调,2022,51(09):34-35.

国土空间规划生态修复优先区划定技术应用

王生欣

(西宁市城市规划馆, 青海 西宁 810000)

摘要 在国土空间生态保护与修复工作中, 实现精准化标准是提升治理效能的关键。基于此, 本文认为应结合生态修复优先区划定的目标, 分析国土空间规划生态修复优先区内涵, 并确定优先区划定的价值维度, 再联合 GIS 空间分析、遥感监测、生态系统服务评估、景观生态学、多源数据融合等技术, 确定生态修复优先区划定技术应用路径, 进而提高国土空间规划生态修复的针对性与科学性, 为现代社会生态环境改善做出贡献。

关键词 国土空间规划; 生态修复优先区划定; 遥感监测技术; GIS 空间分析技术; 景观生态学技术

中图分类号:P962; X171.4

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.037

0 引言

国土空间是人类赖以生存和发展的基础, 特别是在现代社会生态文明建设逐步进行的背景下, 生态修复已经成为优化国土空间开发保护格局的重要举措。国土空间规划中生态修复工作重点是进行生态修复优先区的划定, 通过科学合理的优先区划定方案, 能够提高生态修复效率以及资源配置率。目前国土空间格局随着生态功能退化、生态系统破碎化等因素影响, 需要采用先进技术手段确定生态修复的优先次序, 从而达到生态系统精准修复、靶向治理的目标。在该背景下, 深入分析国土空间规划生态修复优先区划定技术, 能够满足国土空间规划宏观要求以及生态修复工程的微观需求。

1 国土空间规划生态修复优先区概念

国土空间规划生态修复优先区需要在国土空间的空间范围内, 综合考虑到生态系统脆弱性、生态功能重要性、生态问题紧迫性等各项指标, 通过先进科学技术手段选择急需要进行生态修复的空间区域。生态修复优先区划定需要从如下三个方面进行: 一是空间指向性, 优先区划定需要结合国土空间规划的“三区三线”管控原则进行, 确定生态修复优先区的地理边界, 保证优先区和国土空间开发格局完美契合; 二是生态必要性, 生态修复优先区划定时需要结合生态系统功能退化、结构受损等特性, 也要综合考虑到区域生态、安全等因素, 尤其是重要生态廊道节点、生态敏感等作为优先区划定的核心; 三是实施可行性, 生态修复优先区划定时需要满足区域经济发展以及生态修复的目标, 这就需要在优先区划定中分析资金投入合理性、

修复技术适配性等方面, 防止脱离实际而存在理想化划定的情况。此外, 生态修复优先区划定并不是一成不变的, 需要结合国土空间规划调整以及生态系统变化做出动态改变, 通过不断的评估和优化使生态修复目标达到要求^[1]。

2 国土空间规划生态修复优先区划定技术价值分析

生态修复优先区划定离不开技术手段。用好这些方法, 能让修复工作更准、更实、更有效。

2.1 提升生态修复资源配置精准度

国土空间生态修复需要投入大量的技术、资金、人力等资源, 并且不同区域的生态问题有很大差异。如果没有科学技术作为依据, 将会存在资源浪费或错配现象。生态修复优先区划定技术以标准化指标体系和量化分析方法作为基础, 能够精准识别修复需求最迫切、生态问题最突出的区域, 从而明确生态修复的优先级顺序以及修复重点。在该背景下, 通过先进的优先区划定技术实现资源合理分配, 能够在一定的范围中确保有限资源分配到生态效益最高、民生关联最紧密的区域中, 如此能确保国土空间规划生态修复区域得到明确的范围。

2.2 衔接国土空间规划宏观要求

国土空间规划需要从整体角度出发, 确定生态保护、农业生产、城镇建设的目标。而生态修复优先区是实现生态保护与修复的重要举措, 其划定需要和宏观规划保持紧密衔接。生态修复优先区划定技术需要根据国土空间规划中“三区三线”数据、生态功能区划数据、土地利用现状数据等进行, 采用先进技术进行整合, 明确生态修复优先区边界和生态保护红线、

永久基本农田、城镇开发边界等管控边界协调一致，防止在优先区划定中和其他国土空间用途管制存在冲突。同时，生态修复优先区划定技术需要将生态目标分解为具体可执行的优先区划，确保宏观规划要求能够直接转化为可执行的生态修复区域。

2.3 支撑生态修复决策科学化

生态修复优先区划定的环节需要进行多维度指标和复杂空间关系的分析，而传统的经验判断方法、主观因素影响较为严重，并不能真正了解区域生态状况。优先区划定技术采用空间分析工具、量化模型、多源数据体系等先进措施，能够精准识别生态服务价值、生态系统脆弱性、生态问题紧迫性等指标，采用客观计算和可视化呈现方式确定适宜的优先区划定方案。优先区划定技术应用阶段能够形成详细的数据分析报告和空间分析图，进而了解各区域的修复需求以及生态特征，为决策者提供可靠性、直观的数据，能够防止生态修复优先区划定存在主观性与盲目性^[2]。

3 国土空间规划生态修复优先区划定技术应用分析

优先区划定需依托多种技术方法，结合区域实际，将生态问题识别与空间落地有效结合。

3.1 遥感监测技术

国土空间生态修复优先区划定中应用遥感技术，其充分利用无人机、卫星等多样化平台作为基础，并且在平台中搭载高光谱、多光谱、热红外等传感器获取国土空间生态要素数据。生态修复优先区划定中遥感监测技术能够及时掌握目标区域内土地利用类型、植被覆盖率、土壤侵蚀程度、水体面积、地表温度、植物生长状况等，进而形成长时间序列数据集，一般数据集能够覆盖5年、10年或更长以了解生态系统变化情况。遥感监测技术应用中需要先明确监测区域以及监测周期，一般监测区域需要和国土空间规划范围精准对接，监测周期则要考虑到生态要素变化速率确定，通常植被覆盖监测分季度进行、土地利用类监测按年度进行。同时，遥感监测技术需要选择与之相匹配的遥感数据源，Landsat系列卫星数据分辨率30 m，能够满足省级、市级大范围监测需求；Sentinel-2卫星数据分辨率为10 m，应用在市级、县级中心区域监测能够满足要求；无人机高分辨率数据空间分辨率达到厘米级，能够满足乡镇级小尺度尺寸区域监测^[3]。

遥感监测技术应用时利用几何校正、辐射校正等方式进行数据处理，其中，几何校正以地面控制点作为基准，将遥感影像和地理坐标系统精准匹配，以消除传感器姿态偏差、地形起伏引发的数据误差；辐射

校正根据大气校正模型消除大气散射吸收对数据造成影响，从而提高遥感监测的精准度。遥感监测数据获取后，其利用监督分类选择典型的地物样本训练分类器，能够进行土地利用类型的自动划分；植被指数计算方式采用红外波段和红光波段运算掌握植被覆盖度数据；水体提取能够在特定波段组合下区分水体与其他地物类型。根据上述监测数据绘制土地利用类型图、植被覆盖分布图、水体空间分布图、土壤侵蚀强度图，再利用矢量或栅格格式存储数据产品，并且监测中坐标系统和国土空间规划基础数据达到一致性要求。

3.2 GIS空间分析技术

生态修复优先区划定中应用GIS空间分析技术，其利用地理信息系统作为平台整合矢量数据和栅格数据，进而进行国土空间的叠加分析、缓冲区分析、网络分析等操作。该技术应用环节主要从生态功能区、生态敏感区、交通网络、土地利用等方面出发建设空间数据库，然后结合优先区划定技术体系把各种指标转变为空间图层。例如：GIS空间分析技术应用时将生态脆弱性分为高、中、低三个等级图层，将生态服务价值分为不同权重图层。而后需要利用空间叠加分析的方式把多要素图层进行叠加计算，再进行评价单元的综合得分统计。同时，国土空间规划生态修复优先区划定过程中，GIS空间分析技术利用缓冲区分析方式进行重要生态廊道、河流沿岸等区域划定保护范围，并综合网络分析识别生态链通性薄弱节点。最后根据评价综合得分以及空间分析结果确定生态修复优先区的初步边界，再利用该技术可视化功能进行划定范围调整并进行验证。此外，国土空间规划生态修复优先区划定过程中，GIS空间分析技术在生态修复优先区划定中还体现出强大的动态模拟与情景推演能力。通过集成遥感监测数据与多期土地利用变化图谱，可回溯区域生态演变趋势，识别退化热点区域；结合未来土地利用预测模型（如CA-Markov），可预判开发压力对生态空间的潜在侵占风险，从而提前划定“预防性修复区”。在成果输出阶段，利用三维地形建模与热力图渲染，可直观展示修复优先级的空间分异特征，辅助决策者进行边界微调。

3.3 生态系统服务评估技术

国土空间规划生态修复优先区划定中采用生态系统服务评估技术，其主要从供给服务、调节服务、支持服务、文化服务方面出发建设评估指标和量化模型。该技术应用中进行生态系统类型评估，将其分为森林、草地、湿地、农田等类型；而后结合不同生态系统选

择适配性评估指标，如湿地系统评估水质净化能力、生物多样性维持，森林生态系统评估碳储量、水源涵养量；然后应用当量因子法将不同生态系统服务转变为统一的价值量，再应用 InVEST 模拟土壤保持、水源涵养等服务空间分布；最后根据评估结果确定生态服务高值区、中值区、低值区，并把服务高值且受威胁程度高的区域作为优先候选区，进而为优先区划定提供生态功能重要性证据^[4]。

3.4 景观生态学技术

生态修复优先区划定中应用景观生态学技术时，其根据景观格局分析理论，并且计算景观指数、分析景观结构与功能关系实现精准划定。该技术应用时需要研究区域内景观类型图，并且将地表分为斑块、廊道、基质的三种景观要素。而后在景观格局分析中选取景观破碎度、连通性和优势度等关键指标，借助专业软件对公园及周边区域的景观数据进行处理和计算。在国土空间规划生态修复优先区划定过程中，通过这些指标，可清晰识别出生态功能较弱的地段，例如面积过小且孤立的绿地斑块、相互割裂缺乏联系的林带以及生态廊道中断的区域。同时，结合近年土地利用变化情况，分析景观退化趋势，如林地被耕地或建设用地蚕食、湿地面积持续缩减等现象。这些变化反映出部分区域生态结构正趋于松散，系统稳定性下降。在此基础上，将那些景观破碎明显、连通性不足，但土壤条件较好、邻近现有生态斑块、具备恢复基础的区域，列为优先修复重点。此类区域通过适当干预，较易重建生态联系，提升整体格局的整体性与稳定性^[5]。

3.5 层次分析法（AHP）

生态修复优先区划定中应用层次分析法需要建设地阶层次结构，进而把生态修复优先区中复杂问题分为目标层、准则层、标准层三个层级。该技术应用中需要先将目标层确定为生态修复优先区划定，准则层包含生态脆弱性、生态功能重要性、社会经济影响等维度，指标层则分为水源涵养能力、土壤侵蚀能力、经济发展水平、人口密度等指标；再邀请生态规划、地理和环境领域的专家，对同一层级的各评价指标进行两两比较，按 1 至 9 级判断其相对重要程度，形成判断矩阵。随后检查该矩阵是否自洽，若不一致程度在可接受范围内（通常以 CR 小于 0.1 为标准），则认为专家判断合理；否则需反馈意见并重新打分。在此基础上，计算每个指标的权重，先得出各层次内部的权重排序，再逐层合成，得到整体权重。最终将各评价单元按综合得分由高到低排列，划分为不同优先等

级，作为划定优先区边界的参考。整个过程强调专家经验与逻辑一致性的结合，使分区结果既有专业支撑，又具备可操作性。

3.6 多源数据融合技术

生态修复优先区划定中应用多源数据融合技术，其需要将 GIS 数据、遥感数据、实地监测数据、社会经济数据等进行匹配、校准以及融合形成统一数据产品。该技术应用中实现多源数据的预处理，如实地监测的土壤含水率数据和遥感反演的土壤湿度数据进行时空匹配，社会经济统计的人口密度数据和 GIS 土地利用数据进行空间关联；然后应用特征层融合、数据同化、决策融合等方式进行数据处理，再利用加权叠加方式进行多种来源数据的融合，模糊综合评价实现多决策数据融合；而后形成含有社会、生态、经济等多维度的数据集，能够解决单一数据精度不足、覆盖范围有限等缺陷；最后根据融合后的数据展开生态修复优先区的综合评价，能够反映出目标区域的生态状况、社会经济发展情况以提高划定的可靠性与全面性。

4 结束语

国土空间规划生态修复优先区划定技术是衔接生态保护目标与修复实践的关键桥梁，其应用水平直接影响生态修复工作的精准度与成效。随着国土空间规划体系不断完善与生态修复需求日益精细化，在国土空间规划生态修复优先区划定过程中，需要探讨划定技术的创新与整合方式，并且通过加强人工智能技术与传统技术的结合，提升数据处理效率与划定精准度。同时，国土空间规划生态修复优先区划定阶段，还需重视技术应用与区域实际的适配性，避免技术应用的“一刀切”，从而推动国土空间生态系统持续稳定向好，为生态文明建设奠定基础。

参考文献：

- [1] 徐林青. 基于 GIS 技术的国土空间规划分区方法 [J]. 住宅与房地产, 2023(36):65-67.
- [2] 王萌.GIS 技术在国土空间规划中的应用分析 [J]. 工程技术研究, 2024,09(09):218-220.
- [3] 严政. 测绘地理信息技术在国土空间规划中的应用 [J]. 住宅与房地产, 2024(12):80-82.
- [4] 张古月, 胡冬冬, 段吕晗, 等. 国土空间规划编制的数字化技术路径与实践 [J]. 规划师, 2024,40(03):28-34.
- [5] 张淑娟, 廖心琪, 卞勇, 等.“双碳”目标下国土空间规划编制技术与实践 [J]. 城市发展研究, 2024,31(01):89-96.

沉降控制技术在市政给排水管道施工中的应用研究

朱德馨

(广东南方建设集团有限公司, 广东 茂名 525000)

摘要 本文聚焦沉降控制技术在市政给排水管道施工中的落地应用。结合工程实例, 从前期技术准备、管道铺设、安装到试验检测逐段梳理, 比较不同控制措施的特点与优势, 形成一套针对性方案, 将沉降控制在允许范围内, 提升管道施工质量, 延长城市基础设施使用寿命。研究结果显示, 若能将多种沉降控制技术进行综合运用, 并搭配科学合理的施工管理措施以及精准有效的监测手段, 可以大幅降低沉降风险。研究成果旨在为当前所研究的工程提供可行的解决方案, 同时为后续类似工程提供有益参考。

关键词 沉降控制技术; 市政给排水管道施工; 管道铺设非开挖技术; 顶管技术

中图分类号: TU992.05; TU991.05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.038

0 引言

市政给排水管网是城市基础设施的核心组成, 承担着供水、排涝及污水输送任务, 其施工质量直接决定了城市运行效率与居民日常体验。然而, 现场频繁出现的地面沉降, 使管道接口松脱、破裂, 继而漏水、渗水, 削弱系统功能; 沉降波及周边建筑与地下设施时, 还可能触发安全事故, 危及人身与财产安全。因此, 系统研究并应用沉降控制技术, 已成为保障市政给排水工程顺利实施与长期稳定运行的迫切需求。

1 工程概况

某城市老城区排水系统改造项目位于人流高度密集、交通繁忙的地段, 周边建筑物密集, 地下管线纵横交错。工程主体包括一座接收井、两座工作井、两段顶管及一段箱涵。顶管接收井与工作井的基坑深约8~9 m, 采用SMW工法桩围护。其中一段DN2000顶管自东段工作井出发, 沿南路东侧连续顶进305 m后到达接收井, 管顶覆土4.9~6.1 m, 管材为内径2 000 mm的F型钢筋混凝土管。场地软土深厚, 淤泥易固结, 土体结构易损, 差异沉降风险高, 对施工及后期运行均构成严峻考验。

2 前期技术准备

2.1 施工测量技术

施工测量奠定了市政给排水管道施工的基础, 一旦偏差, 进度与质量都会受到影响。开工前, 须依据设计图、控制轴线、中线及水准点完成放样, 精度必须满足设计要求。可利用全站仪将误差压到最低, 使

管道平面位置和坡度一次达标。开挖前, 还要清除地表障碍, 并探明地下管线、电缆等, 标出归属与走向, 设醒目标志, 经监理复核批准后方可动土^[1]。

2.2 加强管材管理

管材质量直接决定了管道的承载能力与使用年限, 也是抑制沉降的关键环节。材料到场前, 必须逐一核对质量证明, 确认指标满足规范与设计。外观不得出现裂纹、破损等缺陷。例如: 某工程曾要求进场钢管内衬水泥砂浆, 厂家须按规程加工并通过验收后方可发货; 外壁喷砂除锈至Sa2.5级, 合格后8 h内完成底漆涂装。IPN防腐漆按厂家配比搅匀, 内防腐“一底三面”, 外防腐“一底两面+一布两面”, 管端各留150 mm裸口便于焊接。通过上述管控, 管道质量得到保证, 也为后续沉降控制奠定基础。

3 管道铺设非开挖技术

非开挖技术是一种无需破坏地表即可完成管道铺设、更换或修复的方法。它对地面交通和周边环境的干扰小, 作业速度也快, 因此在市政给排水管网建设中应用普遍。顶管法、盾构法、浅埋暗挖法和定向钻法都属于常见的非开挖工艺, 各自的适用条件与特点见表1。

4 合理应用顶管技术

4.1 处理洞口土体

顶管启动前, 对关键穿越段先做预处理是降低风险的关键, 洞口土体尤甚。例如: 某工程先隔离再加固, 高压旋喷桩沿洞口环向喷射, 浆液与土体胶结后强度

表 1 不同非开挖技术的适用范围和特点

非开挖技术	适用范围	特点
顶管法	污水管道、雨水管道、供水管道等大直径管道	施工对地面影响小，适用于各种土质环境
盾构法	长距离、大直径隧道或管道，地质条件复杂或地面不允许大面积开挖	全机械化施工，效率高，安全性好
浅埋暗挖法	城镇软弱围岩环境，中小规模地下管道、隧道或地下空间开发	开挖深度浅，对地面交通和建筑影响小
定向钻法	电力电缆、通信管道、输油管道、输气管道等长距离或跨越障碍物铺设	施工灵活，可精确铺设管道

与稳定性同步提高，顶管推进时洞口无坍塌，施工安全与周边环境的隐患一并消除。

4.2 规划顶管始发区

顶管能否顺利推进取决于始发区的布置是否合理。场地必须平整且承载力足够，以便安装顶进设备和展开后续作业。例如：某工程在规划时将设备区与材料堆场分开布设，使工序衔接紧凑；同时埋设监测点，实时记录土体位移与沉降，一旦出现异常即可微调顶力或注浆量，从而保障安全。

4.3 合理顶进给排水管

依据本工程的具体要求，于顶进区域距离达 87 m 的位置，可选用规格为 2 000 mm 的三级钢承口预制钢筋混凝土管。给排水管道的总顶力计算，可依照以下公式来开展：

$$F_o = \pi D_1 L f_k + N_F \quad (1)$$

式（1）中， F_o 表示总顶力的标准值；取值 3.14； D_1 表示给排水管道外径，取值 2.4 m； L 表示管道顶径长度，取值 90 m； f_k 表示给排水管道外壁和土的平均摩擦力单位是 kN/m²，在本项目中可取值 8 kN/m²； N_F 表示给排水管道顶管机的迎面阻力，本项目取值为 4.9。经计算可得到 $F_o = 3.14 \times 2.4 \times 90 \times 8.0 + 4.9 = 5425.92 + 4.9 = 5430.82$ kN。施工人员结合工作现场条件考虑，可选择 1 台承重 500 t 的千斤顶，开展对市政给排水管道的顶进处理工作，使最大顶力控制在 5 000 kN，合理加设中继点以承担 431 kN 应力，从而满足项目的施工要求。

5 开挖技术的合理应用

局部地段因不具备非开挖条件，需沿管线实测中线并放样。结合道路红线宽度及土层分布，分段确定坡比：黏土段 1:1，素填土段 1:1.5，均用机械开挖，槽底预留 0.2 m 由人工清底。若出现超挖，即刻加固地基，使槽底承载力 ≥ 120 kPa，检测合格后立即安装给排水管并分层回填。堆土高度控制在 1.5 m 以内，坡脚距槽边 ≥ 0.8 m，以减小地表沉降。

6 给排水管道安装技术

6.1 管道下管与稳管

吊装前，先将管节沿管槽边缘依次排好，再逐节吊入槽内，避免在槽内搬运，提高作业效率。机械下管时，应保持匀速回转，落管低速轻放，禁止忽快忽慢或突然制动，严禁人员站在被吊管节上。长距离吊装宜选用尼龙绳。例如：某工程采用起重机下管，操作人员严格按规程执行，管道安全就位。下管后立即稳管，通过人工或机械微调位置与高程，使其满足设计要求^[2]。

6.2 管道连接

管道连接是给排水施工的核心环节，其质量决定了系统的密封性与寿命。工程中常见的做法包括焊接、法兰连接和承插连接。以某项目为例，钢管焊接前先由角磨机在管端开出 V 形坡口，对口间隙控制在 2 ~ 2.5 mm，错口量不超过壁厚的 10%。对口完成后立即点焊定位，复核平直度、标高与坐标，确认无误后再正式施焊。焊接时管子必须支垫稳固，分层施焊且层间焊缝错开，现场设置防风、防雨措施，成品焊缝不得出现咬边、夹渣，并保证足够的加强高。不同材质的管道则通过法兰螺栓过渡：安装前核对阀门、管件型号规格，检查橡胶垫片厚度与平整度，确认压盖螺栓留有调节余量；吊装时保持阀门及管件平稳，将法兰与管线调至同轴，使接口处于无应力状态，随后按对角顺序均匀锁紧螺栓^[3]。

6.3 阀门及管件安装

阀门与管件的安装质量直接决定了管道系统能否稳定运行。安装前，每批同牌号、同规格、同型号的阀门需抽检 10% 做耐压强度试验；若出现漏裂，再抽 20%，仍有不合格者则逐件复验。试验压力取阀门出厂规定的强度与严密性数值，并完整记录。安装时阀门应保持关闭，阀体箭头指向介质流向，内部不得残留杂物；阀杆及传动机构按图施工，手轮置于易操作处，动作灵活，外观整洁。完工后做空载启闭检查，要求开关自如、密封可靠。

7 雨水回灌技术应用

雨水回灌技术已成为缓解地面沉降的常用手段。其思路并不复杂：把收集的雨水重新灌入地下，补充含水层，抬高地下水位，从而削弱因抽水过量导致的沉降风险。城市给排水管网施工时，可将这套系统同步埋入——处理达标的雨水顺着回灌井缓缓渗入地层。以某市公园为例，屋面与道路雨水先汇入集水池，经沉淀、过滤、消毒后，由回灌井回注地下。只要前期规划得当，既能在源头抑制沉降，又能让雨水在地下和地面之间循环，实现双重收益。

8 实行管道闭水试验

管道闭水试验是检验无压管道（如排水管道、污水管道）系统是否具备承受内部设计压力的能力和防止接口渗漏的一种有效方法，在管道及检查井外观质量验收合格，管道未回填且沟槽内无积水情况下可做闭水试验。其试验所使用的仪器仪表必须满足下列要求：试验用水头应根据上游支墩高度确定；采用弹簧压力计时精度不得低于1.5级，最大量程为试验压力的1.3~1.5倍，表壳公称直径不小于150 mm，并经计量部门检定合格；采用自动测读仪时，应按国家现行标准《压力真空测量仪器》（GB/T 6879）的规定执行；观测管段长度不宜大于1 km，每个观察点上至少设置一个观测孔；其他条件均应按照规范的要求执行。管道试压前2~3 d，向试压管道内充水，注入管道内的水量要保证能充满整个管道断面，注满管道后，应在不大于工作压力条件下浸泡，浸泡时间不少于24 h。管道注水时，应打开管道各高处的排气阀，将空气排尽。待水灌满后，关闭排气阀，用电动试压泵加压，压力应逐渐升高，加压到一定数值时，应停下来对管道进行检查，无问题时继续加压，一般分2~3次升至试验压力，每次升压以0.2 MPa为宜。管道水压试验的压力值应达到管道的工作压力的1.5倍以上。当压力达到试验压力时停止加压，保持恒压10 min，对接口管身检查无破损及漏水现象，则认为管道强度试验合格。在试验压力下，10 min压力降不大于0.02 MPa，可以认为严密性试验合格，试压质量优良^[4]。

9 沉降控制技术在市政给排水管道施工中的应用效果评估

9.1 沉降量统计

根据沉降监测显示，管道沿线最大下沉8 mm，最小2 mm，平均5 mm，均低于15 mm的设计限值，完全满足设计要求。具体分布见表2。

表2 沉降量统计数据

监测点编号	最大沉降量 (mm)	最小沉降量 (mm)	平均沉降量 (mm)
01	6	3	4.5
02	7	2	4.5
03	8	3	5.5

9.2 沉降曲线分析

根据沉降监测数据绘制的曲线显示，沿线沉降分布均匀，未见显著差异。顶管推进期间，沉降增速较快；竣工后，变形逐步趋于平稳。

9.3 控制效果评价

沉降控制技术一旦落地，地面沉降对管道施工的干扰便被明显削弱，工程安全与质量随之获得可靠保障。顶管与地基加固协同作业，地基承载力提高，差异沉降显著减少；监测数据实时回传并触发预警，为调整施工参数提供量化依据，使整条作业线得以连续、平稳推进^[5]。

10 结束语

沉降控制技术对市政给排水管道施工至关重要。前期充分的技术准备为后续作业奠定稳固基础。铺管时，优先采用非开挖与顶管工艺，其扰动小的特点可将周边环境影响降至最低；确需开挖处，则缩小作业面，降低大面积暴露带来的风险。安装环节严格执行给排水管道工艺标准，确保接口严密、线形精准。同步引入雨水回灌，借助回补地下水平衡土体应力。管线敷设后按规定做闭水试验，验证整体密封性。上述措施协同作用，可有效抑制地面沉降，提升施工质量与运行安全，为城市基础设施提供可靠支撑。

参考文献：

- [1] 于政, 刘吴臻. 市政给排水工程中长距离顶管施工技术分析[J]. 城市开发, 2025(02):148-150.
- [2] 蔡之科. 盾构下穿既有桥桩施工控制技术[J]. 资源信息与工程, 2025, 40(02):85-90.
- [3] 吕卫东, 曹亚西. 高填方软土路基施工关键技术及沉降控制技术研究[J]. 建筑机械, 2025(04):113-117.
- [4] 陈兵. 长距离顶管施工技术在市政给排水管网建设中的应用[J]. 散装水泥, 2024(02):141-143.
- [5] 黎岩. 市政给排水管道基础处理及其施工技术研究[J]. 现代工程科技, 2024, 03(23):57-60.

绿色建筑技术在住宅建筑中的创新应用研究

朱 雷

(浙江汉宇设计有限公司, 浙江 义乌 322000)

摘要 全球气候变化加剧, 建筑行业在环境和能源方面面临严峻挑战, 绿色建筑技术的研究与应用成为行业发展的关键方向。本文聚焦住宅建筑各阶段中绿色建筑施工技术的应用与创新逻辑, 围绕资源高效利用、建筑能耗降低、居住者生活质量提升等目标展开分析, 研究覆盖节地与环境优化、节能技术应用、水资源循环利用、材料资源合理选用等维度, 结合实际案例体现技术落地后可持续性成效, 旨在为相关从业者提供有益参考, 助力我国住宅建筑领域绿色转型。

关键词 绿色建筑; 住宅建筑; 技术创新; 可持续发展; 节能环保

中图分类号: TU241.91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.039

0 引言

当前全球气候变化与环境污染形势持续加剧, 建筑行业作为能源消耗与碳排放的关键领域, 面临着严峻挑战。据联合国环境规划署 2023 年数据, 该行业占全球最终能源消耗的 36%, 并贡献了 37% 的与能源相关的碳排放。在此背景下, 绿色建筑已从理念探索发展为行业转型的核心路径, 通过全生命周期资源优化推动可持续发展。住宅建筑作为建筑行业核心板块, 绿色化改造与建设的价值持续凸显, 绿色建筑技术可以依托环保材料选用、节能设备投入、智能化系统搭建等路径, 减少住宅建筑能耗与环境负向影响, 还能为居民打造更健康舒适的居住空间。我国发布的《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019) 强化了碳减排性能要求, 将绿色建材应用比例纳入控制项, 并优化了可再生能源利用评价方式, 为绿色建筑技术在住宅领域应用提供了依据。

1 绿色建筑施工技术的定义与特点

绿色建筑施工技术在建筑全生命周期的施工阶段, 以生态可持续发展为核心导向, 通过技术集成与动态优化实现资源高效利用、环境影响最小化和建筑功能适配性统一, 是一种系统性施工方法。这项技术核心要义是打破传统施工单一效益导向, 构建“资源—环境—功能”协同的施工模式。绿色建筑施工技术具备资源循环的系统性, 在施工过程中既聚焦节能环保节水节材基础目标, 又强调各环节资源循环流转与损耗精准管控, 形成“取用—利用—回收—再用”的闭环体系。绿色建筑施工技术还有环境影响的前置管控性, 突破传统施工事后治理思维, 方案设计阶段就预判噪声、粉尘、废弃物

等污染风险, 依托技术选型与流程优化实现源头减排。绿色建筑施工技术的应用体现协同创新性, 不是单一环保技术叠加, 而是融合数字化管控、新型材料应用和生态适配技术开展综合创新, 还会随着环保需求与技术发展持续迭代。另外, 绿色建筑施工技术具有全周期价值的连贯性, 施工时充分考虑建筑运营阶段节能潜力与维护便利性, 实现施工效益和长期生态价值有机衔接, 推动建筑行业从粗放建设转向绿色集约。

2 绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的具体应用

2.1 节地与室外环境优化

2.1.1 合理规划建筑布局

规划者进行建筑布局合理规划时, 将立体开发理念作为核心指引, 通过地下空间分层规划与地上高层建筑紧凑布局提升单位用地承载效率, 同时预留集中公共空间满足居民需求。同时, 规划者运用数字化模拟技术优化建筑朝向与楼栋间距, 在保障日照通风标准的情况下减少空间冗余, 以此实现土地资源集约化利用。

在推进功能复合设计过程中, 将居住、社区服务、休闲配套等功能在地上地下叠加整合, 减少单一功能区域对土地的占用情况, 同时结合场地竖向特征采用台地式布局或地形适应性设计, 降低土方工程对土地的扰动, 形成“空间高效利用—功能复合叠加—地形适配优化”的递进式布局体系, 实现节地与使用舒适度的双重提升。

2.1.2 保护原有生态环境

第一, 构建近自然植被群落时优先选用本土适应性植物, 形成乔灌草复层绿化结构, 提升生物多样性与生态稳定性表现。第二, 采用海绵城市技术构建雨

水循环体系时，通过透水铺装、生态滞留设施促进雨水渗透与净化，减轻地表径流对生态环境的影响。第三，通过微地形营造与生态廊道设计打通场地内生态连通路径，缓解城市热岛效应，形成“原生生态保留—人工生态修复—循环系统构建—生态功能强化”的递进式保护体系，推动建筑与自然生态实现共生共存^[1]。

2.2 节能与能源利用

2.2.1 建筑围护结构节能技术

建筑围护结构节能技术围绕材料体系优化展开实践，选用高性能保温隔热材料搭配低辐射节能门窗降低传热系数与空气渗透量，同时强化构造节点设计，依托外墙外保温体系、屋面保温层优化和门窗密封技术消除热桥效应，提升围护结构整体热工性能。另外，结合遮阳节能技术，采用自适应遮阳系统与建筑形体一体化设计，依据季节和光照变化调节遮阳角度减少太阳辐射热传入，还可通过优化围护结构热惰性指标延缓室内温度波动、降低采暖制冷能耗需求，最终以材料性能提升为基础，构建节点优化、遮阳系统整合与热工性能强化形成节能体系，从源头阻断能耗传递路径。

2.2.2 可再生能源应用

第一，可再生能源应用需要基于场地资源禀赋选择适配类型，实现太阳能、地热能等清洁能源与建筑一体化设计。第二，推进光伏建筑一体化技术应用，将光伏组件与屋顶、外墙等围护结构有机融合以提升能源采集效率。第三，同时配套储能与能源转换系统，运用光储直柔技术、热泵系统实现可再生能源高效存储与梯级利用。第四，建立能源供需动态调控机制实现可再生能源与建筑用能负荷精准匹配，形成资源评估适配、采集系统集成、储能转换优化、供需动态平衡的递进式应用体系，以降低传统能源依赖度。

2.2.3 节能照明系统

第一，节能照明系统以自然采光最大化为原则，通过建筑开窗设计和内部空间布局优化引导自然光深度渗透，减少人工照明时长。第二，选用高光效低能耗光源与高效照明电器附件，降低单位照度能耗^[2]。第三，构建智能照明控制系统，结合人体感应、光线感应和时段调控技术实现照明需求与能源消耗动态适配。第四，优化照明光环境设计，在满足视觉舒适度前提下控制眩光与照度冗余，形成自然采光优先、节能光源替代、智能控制调节、光环境优化的递进式节能体系，实现照明节能与使用体验协同提升。

2.3 节水与水资源利用

2.3.1 节水器具应用

第一，节水器具应用环节将节水性能与使用功能

的协同适配作为核心选型原则，优先选用符合国家节水标准且适配住宅施工场景的高效器具来平衡节水效果与使用体验。第二，节水器具应用环节强化智能调控技术与节水功能的深度集成，依托流量感应、压力调节等智能化设计精准响应用水需求，减少无效耗水，同时注重器具安装与管网系统的匹配性优化，以标准化施工工艺降低接口漏损风险，再构建器具全生命周期的节水效能监测机制，持续优化用水效率。第三，节水器具应用环节结合住宅不同区域用水特性差异化配置器具类型，构建覆盖施工临时用水与后期居住用水的全场景节水体系，推动节水技术实现从单一器具应用向系统效能提升的跨越^[3]。

2.3.2 雨水和中水回用

第一，雨水和中水回用工作先构建分区域雨水收集系统，依据住宅建筑屋顶、绿地、路面等不同汇水场景设计差异化收集路径，结合弃流截污技术提升初始雨水净化效率。第二，再优化中水处理工艺组合，采用物理过滤、生物净化与消毒处理的多级工艺实现生活杂排水的水质达标转化，满足施工及居住阶段非饮用水需求。第三，建立雨水与中水的梯级利用机制，凭借智能化储水设施与供水管网的联动设计实现水资源的分质供给与循环补给，且强化处理系统的运行稳定性管控以确保水质安全与供水保障。第四，将回用系统与住宅景观用水、绿化灌溉、道路冲洗等场景深度融合，构建“收集—处理—储存—回用”的闭环体系，降低对市政水资源的依赖。

2.3.3 施工过程节水

第一，施工过程节水方面先推行施工用水精细化管理方案，安装智能计量装置实现各施工环节用水量的实时监测与数据追溯，为节水优化提供数据支撑；优化施工临时用水系统的闭环设计，以循环用水设备对混凝土养护、设备冲洗等耗水环节开展水资源回收再利用，减少新鲜水消耗。第二，强化管网与用水设备的漏损防控，选用优质管材、规范施工工艺并定期检漏维护，构建全流程漏损控制体系。第三，结合施工进度动态调整用水方案，以分区供水、错峰用水等管理措施平衡用水需求，同步开展施工人员节水培训，将节水理念融入施工全过程，实现从技术管控到管理赋能的节水效能提升^[4]。

2.4 节材与材料资源利用

2.4.1 绿色建材选用

第一，以全生命周期环保性作为核心筛选标准时，优先选取低能耗、低污染且可循环的建材产品，同时重点关注材料生产阶段的碳排放与污染物排放指标；

在建材性能与住宅使用需求精准匹配环节，在满足结构安全、耐久性等核心要求的基础上，强化材料节能、隔音、保温等附加功能，以提升资源利用效率。第二，践行本地建材优先选用原则，减少材料运输过程中资源消耗与环境影响，同时搭建绿色建材认证审核机制，保障材料质量与环保属性双重达标。第三，着力探索新型环保建材工程应用路径，依靠技术创新推动建材产业向绿色化转型，形成“环保属性—使用性能—地域适配”三位一体选用体系，实现节材与环保协同发展。

2.4.2 优化材料采购和运输

第一，构建集约化采购模式，依靠精准测算施工材料需求量制定科学采购计划，规避过量采购引发的资源浪费，同时推行集中采购与战略供应商合作机制，提升采购效率与材料质量管控水平。第二，在运输方案设计优化中，依据材料特性与运输距离选取低碳高效运输方式，优先采用铁路、水路等低能耗运输手段，且合理规划运输路线，减少迂回运输与空载率。第三，强化运输过程绿色管控，推广运用清洁能源运输工具，针对易损耗材料采取防护措施，降低运输损耗，同时构建运输过程碳排放核算机制。第四，构建采购与运输协同管理体系，凭借数字化手段实现材料供需精准对接，减少流通环节资源占用，形成“精准采购—低碳运输—高效配送”全链条优化模式。

2.4.3 建筑垃圾减量化和资源化

第一，从施工源头推进减量化举措，依靠优化施工方案、提高预制构件使用率等途径减少现场作业建筑垃圾，同时强化材料加工精度控制以降低施工损耗；构建施工现场垃圾分类回收体系，按材料类型开展分类存放与规范转运，明确回收责任与流程以提升垃圾回收效率。第二，推广建筑垃圾资源化利用技术，通过破碎、筛分、再生处理等工艺将废弃建材转化为再生骨料、环保砖等再生产产品，实现资源循环利用^[5]。第三，构建建筑垃圾减排核算与资源化评估机制，结合住宅施工特点优化再生材料应用场景，推动建筑垃圾从“末端处理”向“源头减量—过程回收—资源化利用”全流程管控转型，降低对原生资源的依赖程度。

3 绿色建筑施工技术的具体应用与案例分析

在某职工宿舍建设项目建设中，绿色建筑施工技术的融入不仅提升了建筑可持续性，还优化了居住者生活质量。项目设计运用区域功能划分方法，在建设契合节能与环保要求居住环境的同时，整合职工宿舍、学生浴室、办公区、运动设施、餐饮服务及其他配套设施，且各功能板块均依自身需求完成精细化规划设计。

职工宿舍区需兼顾隔音与保温效果，因而选用先

进墙体保温技术与隔音窗户；学生浴室安装节水型设施与热水循环系统，降低水资源消耗；运动中心和餐厅等公共区域设计侧重引入自然光与优化通风以减少人工照明、空调依赖；项目墙面配备遮阳设施缓解夏季高温对室温的影响，屋顶绿化设计既增加了美观性，又发挥隔热保温功能；室内空气质量改善同样受重视，借助光与空气循环天井设计实现自然通风照明，以降低能源消耗；项目引入百叶窗自动调节技术与景观水冷却系统，其中景观水冷却系统借助水蒸发散热为建筑提供辅助冷却。

上述措施展现该项目把绿色建筑技术融入实际施工的路径，既提升建筑环保性，又优化居住者生活体验，依托技术创新，项目在各层面达成能源高效利用与环境可持续保护目标。在全方位绿色施工技术应用过程中，该项目不仅取得绿色建筑认证，还成为区域内绿色建筑领域示范标杆。项目实际运行阶段采集的数据显示，与传统建筑对比，该项目节能率达 35%、节水率达 40%、碳排放量降低 30%，这一系列数据充分验证了绿色建筑技术的功效。

4 结束语

在探索建筑行业可持续发展路径过程中，绿色建筑技术在住宅建筑领域的应用成为必然选择，更是应对全球环境挑战的关键举措。在政策引导、技术创新和标准完善等方面协同发展的背景下，绿色建筑技术通过全生命周期资源优化与碳减排管理，已形成规模化应用基础。随着新材料、新技术、新工艺的持续迭代，绿色建筑技术正加速向智能化、集成化及人性化方向发展。同时，绿色建筑理念的普及深化，将推动社会形成“节能—减排—循环”的环保共识，为美丽中国建设与碳中和目标的实现提供系统性支撑。

参考文献：

- [1] 王明明, 杨亚楠. 绿色建筑技术在住宅建筑中的创新与应用研究 [J]. 居舍, 2025(31):70-73.
- [2] 李国华. 绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的应用 [J]. 中华建设, 2025(08):198-200.
- [3] 邓雷成, 田娜娜. 绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的应用 [J]. 陶瓷, 2025(06):179-182.
- [4] 郑立莎, 邹善伟. 关于绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的应用 [J]. 中华民居, 2024,17(06):30-32.
- [5] 殷超. 关于绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的应用 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024(12):77-79.

房屋检测鉴定在历史建筑保护中的综合应用研究

王艺

(广西壮族自治区建筑工程质量检测中心有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要 为提升清末木与砖混合结构祠堂的安全评估水平, 本研究围绕无损检测与低扰动干预的技术需求, 系统构建了多源无创检测与微创验证相结合的综合方法体系。通过融合三维激光扫描、红外热像与微动测试, 获取结构几何形态、含水分布及动力特性数据, 并借助微芯取样验证材料退化状况。在此基础上, 建立节点与整体稳定性双指标评估模型, 设定残值提升率阈值作为干预效果评判依据。实践表明, 该方法可显著提升结构安全状态, 验证了其在历史建筑保护中兼顾信息留存与结构可控的有效性, 为同类文保工程提供了可推广的技术路径参考。

关键词 历史建筑保护; 多源无创检测; 微创取样; 双指标安全模型; 残值提升率

中图分类号: TU746

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.040

0 引言

我国现存清末木构祠堂数量庞大, 长期环境侵蚀与荷载累积导致节点松动、材性退化, 传统经验式勘查难以量化风险。现行规范强调“最低干预”, 却对检测精度与评估指标缺乏系统指引, 造成加固过度或延误维护并存^[1]。随着激光扫描、微动测试等无损技术不断成熟, 构建兼顾精度与可逆性的综合评估体系成为迫切需求^[2]。本研究以某某历史街区清末祠堂为案例, 尝试整合几何、材性、动力多维度信息, 提出节点与整体双指标模型, 并建立残值提升率闭环, 探索适用于历史建筑的保护决策新路径, 为同类遗产提供参考的技术框架。

1 工程概况

某历史街区清末祠堂(1888年)位于江南水网腹地, 为抬梁式木构架与青砖空斗围护的合院建筑, 1997年列为省级文保单位。其主体结构保存原貌, 前檐斗拱、彩画及砖雕具有较高艺术价值; 梁架采用本地杉木, 槵卯以燕尾、透榫为主。然而, 长期环境侵蚀引发一系列病害, 其中, 2008年檐口下沉, 2015年白蚁侵袭, 2021年台风致新裂缝。近期检测发现, 明间脊檩竖向位移达42 mm且持续发展, 部分榫卯拔榫2~5 mm, 柱脚错动明显, 檩墙泛碱与砖体粉化加剧^[3]。上述问题已危及结构稳定与彩画保存, 因此亟须系统检测鉴定, 为精准干预提供依据。

2 综合检测技术体系的构建与应用

2.1 多源无创检测方案设计

为满足清末祠堂木与砖混合体系保护需求, 构建三维激光扫描、红外热像与微动测试的多源无创检测链, 全程规避接触彩画与檩枋表面以避免二次扰动。激光扫描采用相位式高精度仪, 站距≤15 m, 单站分辨率3mm@10m, 布设12站覆盖关键区域, 通过标靶拼接建立三角网模型, 提取0.5 mm级挠度偏差云图以提供绝对几何基准; 红外热像选用320×256像素制冷型探测器, 热灵敏度<0.05 °C, 于日落后2 h至日出前1 h对四区扫描, 按材质设置发射率(砖墙0.92、木构0.88), 定位含水率异常区; 微动测试采用三轴加速度计(0.2~500 Hz), 9测点同步采集600 s(采样率256 Hz), 通过H/V谱比法获取一阶自振频率反映整体刚度^[4]。三者通过Python脚本统一时空基准, 实现变形、含水率与频率的同步映射, 形成“几何基准、缺陷定位、刚度评估”的互补检测体系, 为安全评估奠定无损量化基础。

2.2 重点部位微创取样与力学性能验证

明间脊檩最大下沉跨位于祠堂正脊中部, 跨度4.8 m, 截面尺寸220×280 mm, 表面残存鎏金旋子彩画。为在保留彩绘完整性的前提下获取材性退化证据, 采用孔径≤6 mm的微创组合策略, 首先以微型阻力仪沿檩底隐蔽区按500 mm间距预压, 记录贯入阻力曲线, 快速判别弹性模量衰减区; 随后在阻力突降位置以中空金刚石

钻头实施径向阻力钻进取芯，钻速控制在 600 r/min，轴向压力低于 20 N，全程负压集尘，避免粉尘污染彩绘；所得微芯直径 5 mm、长 60 mm，立即置入恒温恒湿箱，供木纤维显微观测与力学试验。显微切片经 1% 番红溶液染色后，在 400 倍偏光显微镜下测量导管直径与壁厚，对照《中国主要木材识别图志》确定树种为杉木；依据导管填充率与裂纹密度，将虫蛀程度划分为 I 新鲜、II 初期、III 中期、IV 严重四级，用以修正后续承载力模型^[5]。微芯试件在 20 °C、65% RH 条件下采用微压缩试验，加载速率 0.5 mm/min，得到局部抗压强度后，与同树种标准值对比获得残余强度折减系数，量化截面损失对刚度的影响。全部钻孔以同色环氧泥封孔并压入古建专用木粉，表面随色做旧，实现视觉无痕。该微创路径将红外热像锁定的含水异常区与微动测试识别的刚度弱化区叠加，验证含水率升高与强度退化空间一致性，为后续精准加固提供可靠的材性参数。

2.3 结构安全综合评估模型

为量化清末祠堂木构架在几何偏差与材性退化耦合作用下的安全水平，构建节点安全系数 K_J 与整体稳定系数 K_G 双指标评估模型。 K_J 以单节点剩余承载力为评价对象，综合激光扫描所得几何偏差、阻力仪测得局部弹性模量折减及榫卯残存面积率，表达为材料强度特征值 f_j 、截面工作条件系数与节点削弱系数 C_j 的函数。整体稳定系数 K_G 则通过加权求和方式将各节点 K_J 转化为构架系统级指标，权重 α_j 依据榫卯数量占比分配，兼顾空间分布非均匀性^[6]。该简化表达式回避了复杂有限元迭代，可直接利用现场无损与微创数据，实现历史建筑快速安全筛查。

$$K_J = f_j \cdot \gamma_j \cdot C_j^{-1} \quad (1)$$

式(1)中， f_j 为节点材性强度特征值，单位 MPa，由微芯压缩试验确定； γ_j 为截面工作条件系数，综合考虑含水率与长期荷载效应，按实测含水率分段取值； C_j 为节点削弱系数，定义为有效残存截面与原始截面之比，通过激光点云截面重建获得。

$$K_G = \sum (K_J \cdot \alpha_j) \quad (2)$$

式(2)中， K_G 为整体稳定系数，无量纲； α_j 为第 j 类榫卯节点权重，其值等于该类节点数量与总节点数

之比，确保构件冗余度越大的区域对整体稳定性贡献越高；当 K_G 低于设定阈值时，触发详细加固设计，实现检测—评估—干预闭环。

3 历史建筑保护策略与后期监测闭环

3.1 基于检测等级的干预优先级排序

依据 K_G 与 K_J 双指标输出值，将祠堂木构架风险统一划分为 I 级轻微、II 级中等、III 级严重三级，对应干预紧迫性由高到低，并匹配最低干预原则下的技术套餐。I 级区域 $K_G < 0.60$ 且 $K_J < 0.55$ ，主要分布于明间脊檩及拔榫超 3 mm 的燕尾节点，采用“墩接+嵌肋”组合：先在节点下方设可逆钢木组合墩，传递竖向荷载，再在两侧嵌入弹性模量 ≥ 12 GPa 的竹质肋板，以改性环氧树脂点状粘结，既恢复抗弯刚度又保留原构件可识别性，现场作业无需大面积拆卸，造价约 2 200 元/节点，工期 2 d。II 级区域 $0.60 \leq K_G < 0.75$ 且 $0.55 \leq K_J < 0.70$ ，多见于金檩及透榫轻微松动，选用 CFRP 条带环箍方案，采用两层高强碳纤维布沿榫头周长包裹，纤维方向 $\pm 45^\circ$ ，搭接长度 80 mm，配套使用可逆环氧胶粘剂，抗剪贡献提高 30%，材料自重可忽略，对原结构增荷小于 0.05 kN/m，造价约 800 元/节点，工期 1 d。III 级区域 $K_G \geq 0.75$ 且 $K_J \geq 0.70$ ，结构基本完好，仅存在 0.5 mm 级裂缝，采取“局部落架”预防性维护，将瓦面分段揭开，暴露屋架后检查隐蔽榫卯，补充防虫药剂并重新设防滑榫销，完成后原位归安，最大限度保存历史信息，造价约 1 500 元/跨，工期 3 d。三套措施均遵循《中国文物古迹保护准则》可逆性与可识别性要求，现场设置标识铭牌记录干预时间与材料，确保后续管理档案完整。如表 1 所示，不同风险等级干预措施在造价、工期及可逆性上呈梯度分布，为决策部门提供量化比选依据。

3.2 数字化长效监测架构

在干预措施完成后，于祠堂木构架关键部位布设“光纤应变 + MEMS 倾角 + 环境温湿度”一体化传感器阵列，实现 0.1 Hz 连续采样。光纤应变计选用布拉格光栅类型，栅长 10 mm，粘贴在脊檩、金檩及檐檩跨中下表面，表面覆可剥离硅橡胶护套，既防虫蛀又便于后期维护；MEMS 倾角计分辨率 0.001°，布设于柱顶

表 1 不同风险等级干预措施对照

风险等级	判定标准	干预方案	可逆性	造价(元/节点)	工期(d)
I 级严重	$K_G < 0.60$ 且 $K_J < 0.55$	墩接+嵌肋	完全可逆	2 200	2
II 级中等	$0.60 \leq K_G < 0.75$ 且 $0.55 \leq K_J < 0.70$	CFRP 环箍	可逆	800	1
III 级轻微	$K_G \geq 0.75$ 且 $K_J \geq 0.70$	局部落架	可逆	1 500	3

与斗拱垫板之间，通过磁吸底座与木构件柔性连接，避免钻孔破坏历史材料；温湿度传感器置于通风阴影区，测量精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 与 $\pm 1.8\%$ RH，用于修正应变与倾角温度漂移。全部传感器经RS485总线汇入低功耗LoRa无线网关，发射功率20 dBm，空旷传输距离 $\geq 500\text{ m}$ ，网关隐蔽安装于屋面天沟侧壁，与瓦面同色涂装，满足视觉协调要求。系统采用12 V/20 W单晶硅光伏板配合20 Ah锂铁电池供电，连续阴雨条件下可自持7 d，避免引入220 V强电对木构产生潜在电气危害。采样数据经LoRa上传至云端时序数据库，通过MQTT协议加密传输，云端设置阈值预警，当应变增量超过 $50\mu\epsilon$ 或倾角变化超过 0.05° 时自动推送维护工单，实现保护—监测闭环。传感器布设避开游客视线主要通道，并利用原有卯口缝隙走线，确保旅游开放与实时监测同步运行。

3.3 保护成效后评估与反馈机制

在保护干预措施实施满一年后，为系统评估加固效果并形成可持续的管理闭环，本研究对祠堂木构架进行了全面的后评估复测。选择一年作为评估周期，旨在确保干预后结构已充分稳定，且材料与荷载重新分布趋于平衡，从而客观反映加固措施的长期效能。复测严格采用与初测同型号的三维激光扫描仪、红外热像仪及微动测试设备，从数据源头保证采集条件一致，避免因仪器差异引入系统误差，为后续精准对比奠定基础。通过复测获取节点安全系数 K_{J1} 与整体稳定系数 K_{G1} ，并与干预前 K_{J0} 、 K_{G0} 建立对比矩阵。引入残值提升率 η 量化加固效果，当 $\eta \geq 15\%$ 即判定为保护达标，可转入常规监测；否则启动二次加固程序，形成闭环管理。

$$\eta = \frac{K_{G1} - K_{G0}}{K_{G0}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中， K_{G1} 为干预后整体稳定系数， K_{G0} 为干预前整体稳定系数， η 为残值提升率，单位%。该指标源于前述双指标评估模型，聚焦整体稳定性而非局部波动，直接反映干预措施对结构系统级的增强幅度。

实证数据表明（见表2），明间脊檩的 K_J 由0.52提升至0.68， K_G 由0.58升至0.72， η 达24%，远超15%阈值，印证了“墩接+嵌肋”方案在严重退化区域的高效性；金檩区域 η 为18%，同样达标，显示CFRP环箍措施适用于中等风险节点；而西北檐檩因原始材性较好，干预后 η 仅为12%。虽高于预警下限，但未达阈值，触发了二次环箍加固工单。这一结果凸显了指标的灵敏度与实用性：即使原始状态较优，轻微性能衰减仍需主动管理，确保保护无遗漏。

表2 干预前后关键指标对比

构件位置	K_{J0}	K_{J1}	K_{G0}	K_{G1}	$\eta/\%$
明间脊檩	0.52	0.68	0.58	0.72	24
金檩	0.55	0.66	0.61	0.72	18
西北檐檩	0.63	0.69	0.70	0.78	12

基于 η 值的分级管理机制（见表3）将评估结果转化为可执行动作： $\eta \geq 15\%$ 判定为保护达标，转入常规监测； η 在 $10\sim 14\%$ 区间启动预警，加强观测频率； $\eta < 10\%$ 则视为不达标，立即启动二次加固。这种数据驱动的反馈机制不仅实现了保护措施的动态调控，还优化了资源分配，避免了“过度干预”或“维护延迟”的弊端。通过“检测、评估、干预、监测、再评估”的闭环流程，本研究证实了房屋检测鉴定技术在历史建筑保护中的综合应用价值，即以量化评估为核心，通过严密的逻辑链条与闭环管理，在保全历史信息的同时提升结构安全可控性，为同类文保工程提供了可推广的技术范式。

表3 残值提升率评估

η 范围/%	评估等级	管理动作
≥ 15	达标	转入常规监测
$10 \sim 14$	预警	加强观测
< 10	不达标	二次加固

4 结论

研究证实，多源无创检测与微创验证协同可兼顾历史建筑“信息保全”与“安全可控”双重目标；双指标模型以简明公式实现现场快速评判，残值提升率 η 为后续干预提供量化阈值。光伏供电与LoRa传输的隐蔽监测架构进一步保障长期数据延续。未来工作将扩大样本库，优化 α_j 权重算法，并探索AI预测在木结构健康评估中的应用，以完善历史建筑智慧保护技术体系。

参考文献：

- [1] 陈美玲,郭红光,董治,等.历史建筑更新的价值实现路径[J].建筑经济,2025,46(09):43-46.
- [2] 邓瑞,唐元丽,崔雪婷,等.检测鉴定在城市更新与改造中的应用与发展[J].建筑节能(中英文),2025,53(08):146-150,168.
- [3] 郭庆,王迎港.房屋安全性鉴定中结构检测的应用[J].中国建筑装饰装修,2025(14):148-150.
- [4] 李少博.房屋建筑工程结构检测鉴定方法要点分析[J].陶瓷,2025(07):216-218.
- [5] 刘文忠,綦超.写好历史建筑精细化保护文章[N].济南日报,2023-03-24(A05).
- [6] 同[5].

现代房屋建筑主要测量方法对比与精度控制研究

罗嘉怡

(城乡院(广州)有限公司, 广东 广州 511300)

摘要 测量工作作为工程建设的核心基础环节, 其精度水平直接决定了建筑结构安全性能、施工功能实现质量及工程综合效益。不同测量方法因技术原理、环境适应性与数据采集方式的差异, 在精度表现上存在显著区分。基于此, 建立科学测量方法遴选机制与精度控制体系具有重大工程意义。通过系统对比各技术方法的适用边界、误差特性及经济性指标, 可构建以“数据治理”为核心的精度管控范式。该范式突破传统“误差控制”与“成本周期”的制约关系, 可实现精度、效率、成本的三维协同优化。

关键词 现代房屋建筑; 测量方法; 精度控制

中图分类号: TU198

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.041

0 引言

科学选择测量方法并建立精度控制体系至关重要。通过对比分析各技术方法的适用边界与误差特性, 可构建以“数据治理”为核心的精度管控机制。这不仅能够避免“误差控制”与“成本周期”的相互制约, 也能通过三维时空框架的实时协同, 显著降低因信息不同步导致的返工风险^[1]。随着测量技术向“隐形测量”方向发展, 精度控制已从单一工序管理升级为贯穿设计、施工、运维全周期的系统性工程, 真正实现工程效益与安全品质的双重提升, 做好测量方法的比选和精度的控制具有重要的现实意义。

1 现代房屋建筑主要测量方法

1.1 三维激光扫描测量

三维激光扫描测量技术在运用过程中, 能够发射高密度光束, 运用全方位方式扫描目标物体。借助激光测距原理, 详细记录激光束由发射至接收时, 形成时间差、相位差, 并且计算扫描点和扫描仪之间的距离, 通过扫描仪姿态参数, 合理形成目标物三维点云数据。数据通过处理软件进行处理后, 便会造成目标物体三维模型, 运用数字化方式还原建筑结构。基于扫描范围和精度进行分类, 可将扫描仪分成两种形式, 即手持式、地面式。手持式扫描仪具有较强便携性, 对于复杂空间扫描测量, 具有较高的适用性。地面式扫描仪具有较高的精度, 能够达到 0.1 mm, 对于高精度测量工作的实施, 具有较高的适用性。三维激光扫描技术不仅精度高、速度快, 而且能够实现非接触, 运用

于复杂建筑或者是建筑修复当中, 具有比较明显的优势。其运用于复杂造型建筑中时, 主要是进行异形钢结构安装或者曲面幕墙安装, 在进行扫描以后, 获得构件三维数据。与 BIM 模型对比, 可有效控制构件安装精度。同时, 三维激光扫描测量还能够运用在竣工测量当中, 主要是进行数据归档、三维建模, 可以在建筑运维工作实施过程中获得较好的数字化基础^[2]。但是设备成本较高, 如果进行小面积简单测量, 性价比较低。

1.2 激光跟踪测量技术

激光跟踪测量精度较高, 可以发射激光束, 有效跟踪目标点反射器, 针对激光束的角度以及距离, 展开实时测量工作, 并且计算出目标点三维坐标。激光跟踪仪能够进行自动跟踪, 实时监测移动目标点, 具有较高测量精度, 能够达到 0.01 mm。对于比较大的空间范围, 可进行高精度动态测量。在进行测量工作时, 不会过多地被环境影响, 具有较高的数据稳定性。该技术比较适用于高精度构件安装以及变形监测。对于超高层钢结构, 开展钢梁、钢柱安装工作, 具有较高的适用性。可以加强对安装偏差的控制, 保证偏差处于允许范围内。其运用于精密设备安装中时, 能够进行精准定位, 并进行水平度调整; 也能运用于建筑变形监测当中, 适用超高层倾斜和沉降等监测, 通过实时方式获取变形数据, 进而在开展结构安全评估时, 可以获得充分依据。但是技术设备成本高, 适合高精度测量场景^[3]。

1.3 GNSS 测量技术

GNSS 测量技术根据三角定位原理，将测量点三维坐标计算出来。基于测量精度可划分成动态和静态。在进行静态测量过程中，需运用多台接收机，获取高精度坐标，可达到毫米精度。在进行动态测量时，主要是结合流动站、基准站，对数据进行实时传输，运用实时方式解算测量数据，可达到厘米级精度，在动态监测、实时放样当中具有较高的适用性。应用 GNSS 测量技术可以实现大范围和全天候，具有较高的效率，在规划阶段和施工前期应用广泛。在规划阶段运用时，能够进行大面积地形测量，并且实施地籍测量，进而迅速获得三维地形数据，确保建筑平面设计工作在开展时可获得比较充分的依据^[4]。在施工阶段运用时，主要是布设控制网，开展建筑红线放线，精准定位控制点。对于土方计算、基坑开挖，确保测量工作高效率具有重要作用。但是该技术在实际运用中可能会受卫星信号影响，不能进行精准定位，需和其他测量技术结合使用，效果更好。

1.4 全站仪测量技术

全站仪测量技术通过发射激光束，然后测量仪器和目标点距离，基于高精度角度测量模块，明确水平角以及竖直角，进而基于三角测量原理，获取目标点三维坐标。现代全站仪具有数据存储以及传输模块，能够实时传输测量数据，借助测量软件实现有效数据处理，并且输出结果。一些比较高端的全站仪可进行自动识别，能够自动搜索以及跟踪目标点，明显提高测量效率。全站仪测量技术在运用过程中，不仅具有较强的适应性，而且具有较高的精度，广泛运用在建筑施工当中。基础施工阶段，主要是运用在轴线放样、桩基定位当中，保证基础结构和设计之间具有较高的匹配度。运用于主体结构施工时，主要是进行高程传递、轴线投测，并且控制结构垂直度等。运用于装饰装修阶段时，主要是进行地面、墙面找平等。运用于竣工当中时，主要是进行高程测量、尺寸核查。但是在实际运用中，视线往往会被遮挡，需要进行多次转站测量，出现误差的可能性较大^[5]。

2 现代房屋建筑主要测量方法对比

2.1 测量精度对比

在测量方法不同的情况下，测量精度会有所不同，主要是受环境、距离等影响。基于静态测量精度分析，激光跟踪测量技术精度最高，然后是三维激光扫描测量技术，全站仪测量精度居中，而 GNSS 测量精度最低，难以适应高精度测量所需。

2.2 测量效率对比

在开展测量工作时，效率对工程进度具有较大影响。在测量方法不同的情况下，效率会有所不同，以数据采集速度、效率为表现。基于数据采集速率分析，运用 GNSS 测量方法时效率最高。如果是大面积场地放样，仅一天便能达到数万平方米。然后是三维激光扫描测量技术，全站仪测量技术效率居中，激光跟踪测量技术表现出的效率最低，在进行复杂构件安装过程中，需要数天才能完成。

2.3 环境适应情况对比

在开展测量工作时，往往会受到湿度、温度、光照等影响。结合环境适应性角度进行分析，运用全站仪以及激光跟踪测量时，表现出较强适应性，范围处于 -20° 到 60° 之间，能够适应多数地区所需。运用 GNSS 测量技术时，如果是高温、低温状态，则信号稳定性会有所下降，设备在运用时，处于 -10° 到 50° 较为适宜。如果是运用于极端气候中，需采用降温、保温措施。结合三维激光扫描设备，如果温度发生变化，会表现出较高敏感性，一旦温度波动超出 5°，则会造成测量精度明显下降，需采取温度补偿校准措施。分析遮挡适应性，GNSS 受到影响最大，如果是地下空间或者建筑密集区域，往往无法使用。三维激光扫描技术在运用时，受遮挡影响小。全站仪在一定程度上会受遮挡所影响，如果是复杂结构进行测量，往往需进行多次转站。而激光跟踪测量受影响最小，运用于复杂结构测量中时，仍可表现出较高精度。

2.4 测量成本对比

测量成本主要是结合运营成本、购置成本、人员成本。测量方法不同则测量成本也有所不同。其中激光跟踪测量成本最高，然后为三维激光扫描测量，再是全站仪测量，GNSS 测量成本最低。

2.5 测量难度对比

2.5.1 全站仪测量

全站仪测量操作难度属中等水平，仪器功能模块较多且操作流程复杂。操作人员需熟练掌握参数设置、对中整平、数据采集等核心技能，并须通过专业机构组织的系统培训与考核认证，取得相应上岗资质后方可独立作业。

2.5.2 激光扫描测量

激光扫描测量属于高难度技术作业范畴，涉及精密仪器的多参数协同控制与复杂数据处理。操作人员除需具备扎实的测绘基础知识外，还应掌握点云数据预处理、扫描路径优化等专业技能，同时需具备三维建模软件的熟练操作能力。

2.5.3 GNSS 定位测量

GNSS 定位测量实际操作难度中等，但设备安装与参数配置环节存在较高技术门槛。要求操作人员理解卫星信号接收原理、差分改正机制，能够独立完成基站架设、坐标转换等关键操作，并熟练使用专业数据处理软件。

2.5.4 无人机航测

无人机航测综合难度较高，涵盖飞行控制、影像采集、后期处理全流程技术链。操作人员需具备空域规划能力，掌握飞行姿态调整、重叠率控制等关键技术，同时需熟悉航测数据处理软件的操作规范，并具备完整的航测数据处理流程实施能力。

3 现代房屋建筑主要测量精度控制措施

3.1 做好测量仪器校准工作

在开展测量工作时，做好仪器校准工作，可加强对仪器误差的控制，需进行定期校准，正式使用前进行核查。如果是进行故障维修，实施维修后续复校。并且委托第三方检测机构定期校准。校准工作实施过程中，应基于规范展开全面校准。对于 GNSS 和全站仪，需每年进行一次校准，对于三维激光扫描、激光跟踪设备，需半年校准一次。并且仪器在使用前，需进行互检、自检，明确仪器限量、参数等。开展故障维修后，应进行及时复校，保证仪器在维修以后精度符合要求。

3.2 优化控制网的布设工作

在开展房屋建筑测量工作时，控制网为基准框架，控制网在布设时的精度往往对后续测量精度具有直接影响。在布设控制网过程中，需运用由整体向局部、由高级向低级的方式，将工程规模和精度要求作为参考，科学选择控制网等级。如果是高层住宅建筑，可布设首级控制网或者加密控制网。间距分别是 300~500 m 和 50~100 m，如果是超高层建筑，除布设首级控制网外，也需布设楼层控制网，保证间距在 20~30 m 之间，在进行测量过程中，保证测量具有较高精度。同时，在控制网布设过程中，应充分考虑便利性、稳定性。在选取控制点时，结合地势高、通视良好区域，通过钢管桩固定，设置比较明显的标识。如果是地形复杂区域，借助于全站仪、GNSS，运用融合布设控制网方式，通过运用全站仪，开展控制网加密布设，通过运用 GNSS，开展首级控制网布设，充分考虑效率以及精度^[6]。

3.3 优化处理测量数据

在开展测量工作时，通过优化处理数据，可以较大幅度上保证测量精度，借助数据处理算法以及软件，尽可能减少误差。处理全站仪和 GNSS 数据时，结合最

小二乘法，避免出现偶然误差，保证坐标计算精度。处理三维激光扫描点云数据时，结合迭代最近点算法，实现多站拼接，尽可能避免出现拼接误差。并运用点云去噪算法，有效去除环境噪声点，保证点云数据质量。处理激光跟踪测量数据时，结合实时动态平均算法，推动数据进行实时精度优化。最后，合理选择数据处理软件，保证和测量设备之间的适配性^[7]。

3.4 重视环境误差防控

在防控环境误差过程中，应进行主动规避，并进行实时监测和误差补偿。运用主动规避方式时，需参考环境条件，合理选取测量时间。处于低温、高温天气时，避免进行室外测量。如果风力超过五级，需避免安装高精度构件。如果处于强光环境，需使用遮光罩，避免全站仪产生过大瞄准误差。开展实时监测时，应运用实时方式监测环境参数。可运用温湿度传感器，有效监测温湿度。可运用风速仪，加强风力监测工作。一旦环境参数超过允许范围，需停止测量。实施误差补偿时，需参考环境监测数据，合理修正测量结果误差。如果是封闭环境，需进行人工环境调控，可使用通风设备，进而使测量工作在开展时能够获得比较稳定的条件，尽可能防止环境误差。

4 结束语

随着建筑形态向高层化、复杂化、智能化方向发展，现代房屋建筑测量工作需要运用多元化技术。不同技术在精度、效率等方面有所不同，需根据工程精度要求、所处阶段等，合理选取测量技术。给予测量精度控制充分重视，借助多元化方式进行精度控制，尽可能防止测量工作出现误差，保证房屋建筑测量质量，并且降低建筑工程成本。未来，房屋建筑测量工作应积极和人工智能、物联网等技术进行融合，确保测量工作的效果。

参考文献：

- [1] 郝德伟,张广良.房屋建筑测量技术在现代建筑设计与施工中的应用方法[J].中华传奇,2023(22):156-158.
- [2] 赵振朋.房屋建筑竣工测绘中房屋面积计算的问题与建议[J].城镇建设,2023(17):354-356.
- [3] 何旋丰.数字测绘技术在房屋建筑工程测量中的应用[J].中国航班,2023(12):105-108.
- [4] 李玉芹.现代测绘技术在地籍和房屋调查中的应用[J].汽车博览,2023(35):184-186.
- [5] 同[4].
- [6] 张红利.高层建筑工程测量精度分析与控制[J].居舍,2020(29):177-178.
- [7] 周永.工程测量精度的影响因素及控制研究[J].房地产世界,2024(20):122-124.

房屋建筑工程测量全过程质量控制体系构建与实践

陈弘隽

(城乡院(广州)有限公司, 广东 广州 511300)

摘要 为构建房屋建筑工程全生命周期测量质量管理框架, 研究以“策划—执行—反馈—优化”为核心环节, 设计包含要素维度与控制策略的三维体系。通过引入误差传递理论、控制网闭合差评估及偏差量化方法, 对基准设定、轴线投测、标高引测以及垂直度监控等关键工序进行系统化解析, 并结合实际工程案例验证其可行性, 结果显示, 各阶段测量数据均符合现行规范要求, 整体精度与可靠性显著提升, 形成了动态闭环的质量监管机制。研究表明, 偏差溯源分析、多点复核检验及实时校正措施可保障房屋建筑工程质量稳定, 建议推广基于量化指标的PDCA管理模式, 进一步完善施工过程中的精准管控能力。

关键词 房屋建筑工程; 质量控制体系; 测量精度; 误差传播; 全过程管理

中图分类号: TU198

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.042

0 引言

房屋建筑工程对测量精度的要求贯穿项目全过程, 基准点不稳、标高传递误差和垂直度偏差等问题仍是影响工程质量的关键因素。现行测量作业存在流程衔接、误差约束与数据校核的断层, 特别是在房产测绘相关环节, 如产权边界测量、房屋面积计算和房产信息更新等, 需要高精度的测量与数据支持。现有质量控制体系未能覆盖全过程, 缺乏系统化的控制框架。本文提出构建可量化、可追溯的全过程测量质量控制体系, 确保从基准建立到成果应用的各阶段数据一致性与精确性。基于“四阶段流程—五类要素—三层控制”模型, 结合误差传播、控制网复测及偏差量化方法, 对房屋建筑工程测量过程进行全面分析, 验证该体系在实际工程中的有效性, 并为后续房产测绘及建筑项目提供技术路径与管理框架。

1 房屋建筑工程测量全过程质量控制体系的构建

1.1 测量全过程的识别与划分

房屋建筑工程测量按作业顺序可划分为准备、实施、成果应用与反馈改进四个阶段, 各阶段以作业任务、控制节点与数据链路作为划分依据, 形成连续、可校核的技术流程链。准备阶段重点完成仪器精度检校、控制网复测与测量基准点稳定性确认, 确保后续测设基准具备一致性与可追溯性^[1]。实施阶段围绕轴线投测、标高传递、构件定位与结构垂直度监测开展工作, 通过重复观测、交叉校核与误差平差保持测量数据的

内部一致性, 并在关键节点配置双向复核机制以控制累计偏差。成果应用阶段将测量结果用于模板复核、结构校正与沉降监测模型更新, 形成设计—施工—校核的闭环信息链, 实现测量数据在施工活动中的即时调用与修正。反馈改进阶段依据实测偏差源进行误差溯源分析, 对控制网参数、观测方法及现场环境干扰进行校正, 形成持续优化的测量作业流程。各阶段任务相互衔接, 构成可执行、可核验的工程测量全过程结构。

1.2 质量控制要素的确立

房屋建筑工程测量质量管控的核心在于构建以“人、机、法、环、数”五要素为主体的质量保障体系, 其中误差源辨识、操作流程规范及数据处理链条是关键环节。人力资源管理着重于作业资质审核、岗位职责划分以及复核机制的设计与执行, 确保轴线投测、标高传递和沉降观测工作由具备标准化规程的技术人员完成, 并通过交叉验证减少个人差异带来的影响。仪器设备的选型需综合考虑其精度参数、检定周期以及环境适应性, 在投入使用前须对其核心部件进行校准测试, 从而保证量测基准的一致性和可靠性^[2]。方法要素涉及控制网布局、观测路径规划以及平差模型选择, 通过优化基准点分布、提升观测冗余度并科学选取平差策略, 增强测量数据的稳定性与可复现性。环境要素聚焦温度梯度变化、风速波动、光照条件及施工振动等外部干扰因素的影响, 运用温控调节技术、

防风遮蔽手段和减振装置实现对外界影响的有效抑制。数据要素则注重规范原始记录格式、执行外业到内业的一致性检验，并建立全程追溯机制以确保信息链条完整可靠。上述五类核心要素相互关联，共同构建了后续工作开展的技术支撑体系。

1.3 质量控制体系的构建

质量控制体系由流程、该模型基于三维结构框架设计，以误差传播机制作为量化依据。在流程维度上，系统划分为准备、执行、结果运用及反馈改进四个阶段，并通过时间序列整合各环节为连续链条^[3]。要素维度涵盖人员、设备、方法、环境和数据五大核心控制因子，将操作规程、仪器标定、观测技术与平差方案、干扰源防控以及数据分析质量纳入统一管控体系。控制维度则包含制度保障、技术支撑与信息管理三个层次，借助复审程序、冗余检测及结论验证构建多重约束网络。体系核心采用误差传播模型对成果量精度进行量化计算，如式（1）所示：

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (1)$$

式（1）中，成果量 f 的合成标准差 σ_f ，各观测量 x_i 的标准差 σ_{x_i} 按其敏感系数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 加权传播得到，反映了不同观测量对最终结果的影响程度，为体系实现可计算化精度控制提供基础。

2 测量全过程质量控制的实践

2.1 测量工作准备阶段的质量控制

测量准备阶段的任务在于建立统一且稳定的测量基准，主要包括仪器精度检校、控制网复测与观测环境适应性处理^[4]。控制网复测通过对既有控制点进行方位与距离核查，利用平面闭合差检验网形的一致性，其计算式见式（2）：

$$f = \sqrt{(\Sigma \Delta X)^2 + (\Sigma \Delta Y)^2} \quad (2)$$

式（2）中，闭合差 f 用于量化控制网整体的几何偏差，是判断基准是否可靠的关键指标； $\Sigma \Delta X$ 与 $\Sigma \Delta Y$ 为完整观测路线 X 、 Y 中方向的累计坐标增量，用以反映观测过程是否存在系统性偏移。当 f 超出规范限值时，说明控制点可能发生位移或观测步骤存在缺陷，需要重新检校或调整网形；当满足限值要求，则控制网可作为施工测量的有效基准。

在仪器方面，通过对全站仪、水准仪及激光垂准仪进行角度、距离与补偿精度检校，可减少系统误差对后续观测链路的影响^[5]。在环境方面，通过温度适应、选取低风速窗口及避开振动源，使基准建立过程中的外界扰动保持在可控范围内，为实施阶段提供稳定起点。

2.2 测量实施阶段的质量控制

测量实施阶段的控制重点在于保证轴线投测、标高传递与结构垂直度监测的精度一致性，通过冗余观测、交叉校核与动态复测减少过程性偏差。结构垂直度或层高传递误差可按式（3）进行量化判定：

$$\delta = \frac{h_1 - h_2}{H} \times 100\% \quad (3)$$

式（3）中：偏差率 δ 用于反映不同测站或不同方法获取的观测值在楼层高度 H 中的相对差异程度； h_1 与 h_2 为两次独立测得的标高或垂直度值，其差值体现观测链路的内部协调性。当 δ 超出控制阈值时，需立即进行复测并检查控制点稳定性，以避免累计偏差在结构高度方向上持续放大。

在轴线定位与构件放样过程中，通过正反向观测、多测站重复测量以及仪器自动整平补偿等技术手段，可显著降低偶然误差的引入概率。针对关键节点位置，则采取双人独立复核并同步记录原始数据的方式，进一步增强信息传递环节的数据可靠性^[6]。为评估实施阶段控制措施的效果，对主要定位点的轴线偏差、标高误差及剪力墙垂直度偏差进行了系统性统计分析，具体结果详见表 1。经检验发现，三类核心指标的最大值、最小值和平均偏移量均符合相关规范要求，充分体现了该体系在实际工程中的稳定性和精确性特征。

表 1 施工测量关键点偏差实测统计表

测量项目	规范允许偏差	实测最小值 /mm	实测最大值 /mm	平均偏差 /mm	合格率 /%
轴线位移偏差	±5	0.8	3.6	2.4	100.0
楼层标高误差	±3	0.4	2.8	1.7	98.6
剪力墙垂直度偏差	≤ 8	1.2	6.9	4.1	96.5

2.3 测量成果应用阶段的质量控制

测量成果运用环节的核心控制目标在于确保观测数据在结构校验、构件定位以及变形监测中的可靠性与协调性，保障前期构建的基准体系能在工程实践中实现闭环管理。针对模板支撑与钢筋布置工作，需将轴线投测及标高传递的数据融入现场放样流程，并通过比较设计坐标与实测值之间的差异来确定构件安装偏差范围，进而指导模板调整与钢筋复核操作，防止局部误差向整体结构扩散。对于垂直度和平整度控制，则应基于各施工区段的实际检测结果与预设参考点进行精确配准分析，及时发现并消除潜在累积偏差隐患，

在后续工序中采取针对性纠偏措施予以解决。

在沉降监测领域，通过定期复测各监测点并对比新旧数据序列，绘制出反映沉降速率与发展趋势的曲线图，以此评估结构是否存在非均匀变形现象。若检测到异常偏移，则需及时开展补充观测以确认趋势稳定性^[7]。对于竣工测量结果，可通过将其与设计模型或BIM基准进行配准分析，精确量化主要构件的实际偏差范围，并验证前期控制体系的有效性。建立基于数据分析、动态监控及误差修正的技术框架后，可实现施工全过程至成品验收阶段的数据闭环管理目标。

3 测量全过程质量控制体系的评价与改进

3.1 质量控制体系的监测与评价

质量控制体系的监测与评价以量化指标体系为核心，通过对观测精度、数据一致性与成果稳定性进行综合计算，判断全过程控制链条的有效性。为实现可计算化的评价模式，将控制点精度、施工偏差与成果完整性构建为三个核心指标，并采用加权评分方式进行综合量化，其计算式见式（4）：

$$Q = \alpha A + \beta B + \gamma C \quad (4)$$

式（4）中：综合评价值 Q 用于表征全过程测量质量的整体水平；指标 A 表示控制网与关键控制点的精度评价结果，反映基准体系的稳定性；指标 B 为施工过程中的轴线偏差、标高误差与垂直度偏差的综合评价，用于衡量实施阶段的控制效果；指标 C 则由成果完整性、数据连续性及外业—内业一致性构成，用于检验测量成果是否满足应用要求。权重系数 α 、 β 、 γ 根据工程特性与关键控制需求设定，使评价结果更符合实际测量重点。

结合表1的实测偏差数据，可对各指标进行量化赋值，并通过构建时间序列对 Q 进行动态监测，从而识别不同阶段控制效果的变化趋势。当 Q 出现波动或下降时，可借助偏差来源分析定位问题环节，为后续的误差溯源与控制策略调整提供依据，使质量控制体系在监测—评价—修正的循环中保持稳定运行。

3.2 质量控制体系的持续改进

质量管理体系的持续优化主要聚焦三个关键维度：偏差追踪、流程审核以及标准更新。通过构建闭环反馈机制，融合监测数据与评估结果，在多轮迭代中达成系统性改进目标。基于第3.1节生成的整体评价指数及各指标的时间序列特征，可识别潜在薄弱环节（如控制网络稳定性不足、垂直传递误差波动或成果一致性降低），并开展根源分析以明确问题成因。借助原始观测记录、复测信息和设备状态对比等方式实施精

准溯源工作，深入探究误差产生的可能原因（包括仪器漂移、操作偏差或外部干扰因素），为后续精细化调整提供科学依据。

在流程复核环节，通过对数据链路中的准备、执行及应用三个阶段进行系统化梳理，可精准识别冗余或薄弱节点，并对观测路径规划、复测频次安排以及校验点设置提出针对性优化建议，确保数据传输与控制指令的一致性。在此基础上，将修订后的操作规范、参数设定及相关典型误差案例整合成标准化文件，建立经验共享平台以供后续项目参考借鉴。借助PDCA循环机制推动持续改进工作，促使测量质量管理从单一静态约束向动态调节模式转变，从而实现管理体系的长效稳定发展并提升工程适应能力。

4 结束语

全过程质量控制体系依托流程分解、要素约束与量化评估构建系统框架，通过误差传播模型、复测网络技术及偏差定量分析工具，实现从基准建立、数据采集到成果检验的全链条闭环管理。实证研究表明，在该体系支撑下，轴线定位、标高设定及垂直度检测等核心指标表现出优异的稳定性，观测一致性大幅提升，结果精确可靠，充分彰显其在复杂工况环境中的应用潜力与发展前景。质量控制的有效性依赖偏差溯源、动态复测与数据校核的协同运行，通过PDCA机制持续调整流程节点与观测策略，在多轮迭代中保持体系稳定。在房屋建筑工程测绘领域，建议引入自动化观测技术、实时数据校核与数字化测量模型，通过智能化监测与高精度保障推动房屋建筑工程测量数据的更新与应用，推动全过程测量质量管理向模型驱动与数据驱动方向深化。

参考文献：

- [1] 何开俊.房屋建筑工程智能建造技术应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(30):65-67.
- [2] 徐晶,丛晓辉.高周转理念下的房屋建筑工程管理技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025(30):38-40.
- [3] 张斌.浅谈影响房屋建筑工程质量的主要因素及控制方法[J].产品可靠性报告,2025(09):172-173.
- [4] 王棋.绿色节能技术在房屋建筑工程中的应用分析[J].中国建筑装饰装修,2025(18):90-92.
- [5] 龚毅.房屋建筑工程施工质量与安全管理对策[J].城市开发,2025(18):106-108.
- [6] 蔡小柳.住宅房产测绘技术方案优化与质量控制要点探讨[J].居舍,2025(31):153-156.
- [7] 冯敏.基于现代数字房产测绘的房屋建筑面积核实方法[J].测绘技术装备,2025,27(03):14-18.