

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 1 月 第 2 期 (总第 627 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 1 月 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

- 001 热态性能试验安全管控方式分析
..... 欧颜超
- 004 电厂热控系统可靠性提升技术研究
..... 訾 才
- 007 基于环境因子分析的拦截网受力状态研究
..... 韩王畴, 杨 嘉, 刘 禹, 张志柳, 彭士健
- 010 热能回收技术在动力工程领域的创新与发展
..... 王志超, 蒋 毅, 杨林心
- 013 盾构机主驱动系统拆解与回装工艺优化应用
..... 王 贺
- 016 新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用发展
..... 葛永健

智能科技

- 019 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中的应用
..... 杨丕铮
- 022 智能化技术赋能电力设备安装施工的实践探索
..... 王樱霓
- 025 智能机器人在电力建设施工现场管理中的运用
..... 陈 祥
- 028 市政道路工程智慧工地安全管理体系的构建与应用研究
..... 孙 哲
- 031 煤矿机电系统中皮带运输设备的自动化改造与应用研究
..... 吕江龙
- 034 住宅建筑智能化工程中智能安防系统施工的技术优化与质量管理
..... 唐 庆

应用技术

- 037 某水库心墙坝坝壳地震液化措施探析
..... 张晓云, 马 杰, 刘 欣

目录 Contents

040	基于岩体结构特征的崩塌防治锚杆施工工艺研究	杨 健
043	道路检查井常见质量问题分析及预防	刘 斌, 王光岩, 黄洋洋, 刘思习, 高 旺
046	燃气阀门井渗水原因及防治对策探析	卓国穗, 梁壬午, 梁庚寅
049	储能站火灾防控关键技术及应用实践	曹光强
052	220 kV 高压电力电缆故障检测及原因探讨	罗诗铭
055	供水机房设备维护与维修技术的优化方法	莫超源
058	化工自动化仪表现场维护维修中的常见故障及应对策略	王 乐

科创产业

061	大型化工设备预防性维护体系优化研究	王其海
064	齿轮制造企业数字化转型中的生产管理创新	刘 浩, 张 鹿, 高 峰
067	基于全生命周期的钢铁企业设备管理实践研究	王英培
070	储罐压力控制策略在蒸发气处理系统中的实践研究	杜文锋, 汪 洋
073	基于 BIM 技术的工程造价概预算智能化编制方法研究	吕光美
076	光伏电站运维成本控制中的关键问题与精细化管理对策	刘春金
079	基于数智浪潮的企业管理重构路径探索——以华电科工经营信息管理平台为例	吴胜龙

技术管理

082	建筑文物工程保护中的材料老化机理防护技术	裴亚东, 卫经龙
085	保温结构一体化施工技术在建筑工程中的应用	田 越
088	建设单位视角下污水管网工程提质增效关键环节控制	王 恒
091	山岭隧道工程全工序机械化装备配置优化研究	胡世现
094	预防性公路养护技术在公路养护中的应用	薛 松
097	路基冲击碾压遍数对地基承载力的提升作用分析	代建龙
100	水泥混凝土路面日常养护及病害临时性处理措施分析	周从明
103	基于裂缝特性的公路路面裂缝养护施工技术应用策略探讨	张新磊

科学论坛

106	市政给水管网水力平差优化设计技术研究	汤皓然
109	水利工程与生态环境协同发展的路径研究	邵莎莎, 周淑玲
112	地质测绘工程的发展特点及新技术运用研究	张曰广, 李 克
115	基于水文地质勘察的沧州地面沉降监测方法与成因探析	杨宝安
118	河道行洪通道大中型水闸合理间距设计及行洪能力保障研究	陈 龙
121	新型电化学储能电站火灾风险特性与初期应急处置流程研究	袁福江
124	激光水深测绘技术在内河航道淤积区疏浚施工精度控制中的应用研究	雒 磊

热态性能试验安全管控方式分析

欧颜超

(中国核电工程有限公司华东分公司, 浙江 嘉兴 314300)

摘要 本文以国内某核电厂热态性能试验安全风险管控的难点、重点为基础, 对比以往同型号核电厂的热态性能试验安全管控方式, 综合阐述核电厂热态性能试验过程中热态性能试验安全管控方式对热态性能试验中风险的控制作用。通过热态性能试验风险分析, 得出热态性能试验的主要风险为人员烫伤风险和火灾风险, 分析导致上述主要风险的因素, 通过讨论和分析提出安全管控措施, 以期为后续核电厂热态性能试验安全管控方式提供有益参考。

关键词 核电厂; 热态性能试验; 设备性能验证; 安全风险管控

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.001

0 引言

热态性能试验是核能领域中设备性能验证的关键环节, 热态性能试验应尽可能模拟电厂的运行条件, 包括高温、高压等预期工况^[1]。如何在热态性能试验过程中保障人员及设备安全, 降低安全事故风险, 已成为核能行业关注的焦点。热态性能试验安全管控措施是降低安全事故风险的重要手段。如何确定和落实热态性能试验的安全管控措施不仅是技术层面的挑战, 更是对管理能力的考验。通过安全专项控制方案、风险预案、安全监督巡检、风险告知的协同合作, 可以有效降低试验风险, 保障热态性能试验的顺利进行。

1 热态性能试验风险分析

1.1 热态性能试验主要风险

以国内某核电厂为例, 通过对热态性能试验涉及的区域环境、设备状态及相关作业进行分析, 热态性能试验的主要安全风险及导致因素如下:

(1) 跑水风险: 在线检查不仔细、隔离措施不到位、临时装置水管连接不紧、水位控制不当、冲洗后临时管线内水未排尽导致的跑水。(2) 火灾风险: 上充泵、主泵等启动运行过程中发生火灾或厂房内可燃物料发生的火灾。(3) 物体打击风险: 高压导致的飞射物打击。(4) 触电风险: 系统跑水引起电缆、盘柜、电机等设备漏电。(5) 职业健康风险: 电机运行过程中产生的噪声、厂房内甲醛浓度超标等。(6) 机械伤害风险: 转动部位无防护、飞射物割伤等。(7) 窒息风险: 容控箱等储存氮气设备存在漏点。(8) 烫伤风险: 试验

人员操作高温阀门/管线时未佩戴隔热手套、隔热服。

1.2 热态性能试验风险分析

对上述热态性能试验主要风险及导致因素进行分析, 可能导致人身伤害的风险因素为火灾风险、物体打击风险、触电风险、机械伤害风险、窒息风险、烫伤风险。根据以往核电建设经验, 人员烫伤及易燃物着火有在热试期间发生的记录, 而物体打击、触电、机械伤害、窒息在基本安全管控措施及隔离做好后, 发生的概率较低。因此, 本文主要从热态性能试验的烫伤及火灾的角度来探讨热态性能试验期间的安全管控方式。

2 人员烫伤风险及火灾风险安全管控方式

2.1 风险控制措施层级

风险控制措施按优先级可以划分为本质安全(消除、替代)、技术改进(减弱、隔离)、工程控制、管理控制、个体防护、应急处置等层级, 每类层级的控制效果低于前一类层级, 通常采用多个层级的组合^[2]。以下列举每个层级可以实施的措施:(1) 本质安全(消除、替代): 一是消除, 从根本上消除危险源, 如移除危险源、停止使用危险有害物质、不再使用某设备、消除单调的工作或导致负面压力的工作等; 二是替代, 降低危险源的危害, 如用低危险性替代高危险性、用低危害物质替代高危害物质等。(2) 技术改进(减弱、隔离): 一是减弱危险源的影响, 如减少原材料使用量、降低危害物质浓度、降低设备使用电压等; 二是隔离, 将人与危险源隔离开, 如机械设置防护装置、设置隔

作者简介: 欧颜超(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 安全管理。

离区等。(3)工程控制:降低风险发生概率,如临边设置防护栏杆、现场通风排气、设置安全警示标识等。

(4)管理控制:如发布程序制度、制定安全操作规程、开展教育培训、执行专项施工方案、落实安全技术交底、开展专项安全检查等。(5)个体防护:即个人防护用品,如安全帽、防护面罩/眼镜、防尘口罩、防烫服等。

(6)应急处置:如制定应急预案或现场处置方案、配备应急设施、装备及物资等。

2.2 人员烫伤风险安全管控方式优化

人员烫伤能量源主要为热态性能试验过程中产生的高温蒸汽及高温介质流通的高温管道。高温蒸汽泄漏后,由于人员未做好个人防护措施暴露在高温蒸汽的能量源下,导致人员烫伤;高温管道未设置保温层,人员意外触碰导致人员烫伤。因此,要控制人员烫伤风险,就要对高温蒸汽及高温管道设置安全管控措施。根据现场调查及相关专业人员讨论,热态性能试验过程中可能发生高温蒸汽泄漏及人员触碰高温管道的情况如下:(1)热态性能试验范围内安全阀、释放阀相关区域蒸汽泄漏。(2)热态性能试验一回路高温高压、二回路高温高压相关系统及WSD系统内有法兰连接的相关区域蒸汽泄漏。(3)热态性能试验高温管道的边界电动阀和气动阀因人员误动蒸汽泄漏。(4)高温管道未设置保温层。(5)人员在高温管道上作业或作业地点靠近高温管道^[3]。

根据以上风险措施层级对人员烫伤的安全管控方式进行探讨可知,热态性能试验的高温是不可消除的,从这个角度来看,本质安全是不适用的,因此可以从技术改进(减弱、隔离)、工程控制、管理控制、个体防护方面考虑人员烫伤的安全管控方式。

经讨论和现场核实,高温蒸汽烫伤风险的管控方式有:(1)根据现场具体情况,选取对应的方式对蒸汽排放区域设置调试管控区,并粘贴相关警示标识。

(2)根据现场具体情况,选取对应的方式对蒸汽排放区域设置调试管控区,并粘贴相关警示标识。(3)试验前对蒸汽排放区域人员进行清场。(4)法兰连接处蒸汽泄漏时,及时关闭相关阀门,阻断蒸汽排放。(5)对高温管道的边界电动阀和气动阀进行隔离上锁。(6)试验期间,安排人员在相关入口处旁站或封闭入口门,禁止人员进入。

高温管道烫伤风险安全管控方式有:(1)根据现场具体情况,选取对应的方式对高温管道裸露区域设置调试管控区,并粘贴相关警示标识。(2)人员在高温管道或靠近高温管道的区域作业时,需穿戴防烫服^[4]。

为有效控制蒸汽烫伤、高温管道烫伤等安全风险,通过对多台核电机组热态性能试验进行分析和讨论,并考虑到对以往安全管控方式的优化,本文提出了对核电高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置制作列表,有针对性地对热态性能试验期间的高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置开展安全管控,对上述风险点位置设置安全管控区,安全管控区有限制人员出入数量或对风险进行警示的作用,从而降低人员烫伤风险。

从空间方面看,该安全管控方式避免了以往根据经验设置热试安全管控区,导致安全管控区设置遗漏的情况。根据这一原则,对某核电机组热态性能试验期间高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置进行辨识,高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置共106个风险系统设备或房间区域,分为热试进水前(25个)、离开60℃平台前(68个)、主蒸汽暖管前(13个)三个部分阶段设置调试管控区,避免风险位置安全管控区设置遗漏。

从时间方面看,这一安全管控方式通过分阶段设置调试管控区,可以使当前阶段未设置管控区的区域工作正常进行,既规避了安全风险,又解决了统一设置管控区导致非当前热试阶段的管控区内作业不能正常进行的问题,提高了作业效率,节省了人力、物力成本。

2.3 火灾风险安全管控方式优化

根据多台核电机组热态性能试验经验,并组织对热态性能试验火灾风险进行讨论,热态性能试验的火灾风险主要包括:柴油机区域火灾风险,主泵间火灾风险,配电间、机柜间火灾风险,辅助给水泵间火灾风险,高温管道或热试期间高温部分导致靠近管道的易燃物阴燃,设备冷却水泵间火灾风险等。通过以往机组经验及分析和讨论,热态性能试验的火灾风险主要来源于配电或机柜间电路短路或过载、高温管道或热试期间高温系统设备部分导致靠近管道的易燃物阴燃从而导致火灾。

由于配电或机柜间电路短路或过载导致的火灾在以往的核电热试期间较少发生,因此本文主要对热态性能试验期间高温管道或高温系统设备部分导致靠近管道的易燃物阴燃这一火灾风险点展开讨论。

由上文可知,热试期间会对高温管道及高温蒸汽可能泄漏位置设置安全管控区,从而限制人员出入数量,对风险进行警示。但是对于火灾风险尤其是阴燃情况的火灾成效并不大。

燃烧的三要素为可燃物、助燃物、点火源,要在热态性能试验期间杜绝火灾,就要阻断燃烧三要素其

中一个^[5]。热试期间的助燃物为空气，热试期间所有作业都处于开放空气中，因此不能阻断；热试期间的点火源为高温管道或高温系统设备部分，热试过程中，相应的管道和系统设备必须达到一定的温度，才能完成热试，因此不能阻断；热试期间的可燃物主要为热试期间靠近高温管道的木板、高温设备泄漏的油等，可以通过安全检查，热试期间巡检及时清理拆除，因此可以阻断。

热态性能试验期间，为了降低火灾风险，主要从可燃物方面阻断燃烧的形成，避免导致火灾。因此，热态性能试验前安全专项检查及热态性能试验期间安全巡检是杜绝火灾发生的重要手段。热态性能试验前安全专项检查期间将靠近高温管道或高温系统设备部分管道的易燃物进行清理，热试期间安全巡检排查专项检查遗漏的可燃物从而完成对热试期间火灾风险的控制。

以往的热态性能试验期间安全巡检由有热试经验的安全人员或相关专业人员开展，由于人的局限性可能会导致部分偏、边、角或个人认知意外的高温位置检查遗漏，从而导致检热态性能试验期间安全巡检不

到位。对此，本文提出使用热成像仪开展热态性能试验期间安全巡检这一优化建议。

红外热像仪利用红外探测器和光学成像物镜接收被测目标的红外辐射能量分布图形，反映到红外探测器的光敏元件上，从而获得红外热像图，热像图上面的不同颜色代表被测物体的不同温度。红外热像仪可将实际探测到的热量进行精确量化，同时测量物体表面各点温度的高低，直观显示物体表面的温度场，并以图像形式显示出来。因此可以通过热成像仪测量出高温部位，并将高温位置旁的易燃材料进行清理，如防火木材的碳化温度范围通常在 180 ~ 250 °C 之间，为了防止防火木材阴燃可以通过热成像仪对区域进行温度场测量，将靠近 180 °C 温度以上的防火木材进行清除。对于其他可燃物的自燃温度可通过 Arrhenius 方程估算^[6]：

$$k=A \cdot e^{-E_a/(RT)} \quad (1)$$

式(1)中， k 为反应速率常数， A 为指前因子(与木材种类相关)， E_a 为活化能(碳化木约 80 ~ 150 kJ/mol)， R 为气体常数， T 为绝对温度(K)。

使用热成像仪开展热态性能试验期间安全巡检与传统的热试安全巡检对比见表 1。

表 1 安全巡检优化前后对比

对比点	传统的热试安全巡检	优化后的热试安全巡检
针对性	覆盖面广，检查范围以个人经验为导向	使用热成像仪能够精准地测量出高温位置
人因因素影响	检查以个人经验为导向，人因因素对检查的影响较大	检查以热成像仪测量结果为导向，人为因素影响较小
检查达成的效果	只能检查出高温位置，不了解具体温度	可测量高温位置的温度，可根据温度利用公式判断是否会导致周边可燃物自燃

3 结束语

近年来，国家已批准建设多个核电项目，热态性能试验期间的安全管理对于核电项目建设进度有非常重要的影响。因此，核电机组热态性能试验安全管控方式对热试期间的安全管理举足轻重。热态性能试验过程中的安全管控方式必须根据建设工程的实际情况合理选择并开展，本文针对热态性能试验期间的人员烫伤风险及火灾风险，通过讨论和分析提出一系列优化后的安全管控方式，以期后续热态性能试验的安全管理提供借鉴，进而降低热态性能试验安全风险，减少事故发生。

能试验要求(GB/T 41584-2022)[S].北京:中国标准出版社,2023.

[2] 中国核工业集团有限公司.安全环保风险辨识与分级管控:Q/CNNC GB 22-2021[S].https://www.cnncc.com.cn/2021-11-22.

[3] 生态环境部.建设项目环境风险评价技术导则:HJ 169-2018[S].北京:中国环境出版社,2019.

[4] 罗云,裴晶晶,徐铭.安全风险管控-宏观安全风险预控与治理[M].北京:科学出版社,2020.

[5] 孙金华,王青松.火灾风险评估与控制方法[M].北京:机械工业出版社,2020.

[6] [美]K.J.莱德勒.化学动力学导论[M].北京:高等教育出版社,1987.

参考文献:

[1] 国家标准化管理委员会.压水堆核电厂装料前热态性

电厂热控系统可靠性提升技术研究

訾 才

(内蒙古国华准格尔发电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘 要 电厂热控系统是确保机组安全、稳定运行的关键技术支撑,其可靠性与电厂的发电效率、设备的使用寿命及电网的供电质量直接相关。当前形势下,热控系统的规模不断扩大、结构日趋复杂,其所面临的可靠性挑战也随之增加。本文从热控系统的硬件选型、软件优化、智能监测、运维管理四个维度切入,探讨提高电厂热控系统可靠性的技术路径,以期通过行之有效的技术措施为电厂热控系统提升抗干扰能力与故障自愈能力提供参考,进而为系统的长期稳定运行保驾护航。

关键词 电厂; 热控系统; 冗余容错; 智能监测

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.002

0 引言

热控系统作为火电机组的神经中枢,承担着参数采集、逻辑运算、指令执行、安全保护等关键功能。其运行稳定性是机组实现 AGC(自动发电控制)协调控制、RB(快速减负荷)工况响应及危急工况保护的先决条件。随着电力市场化改革进程的持续深入,电网对火电机组的调峰调频能力提出了更严格的要求。与此同时,机组频繁启停、变负荷运行工况也随之增加,这给热控系统的动态适应性带来了新考验。传统热控系统的可靠性提升主要依靠事后维修与定期校验,此种固化模式已难以适应复杂工况下的实时性需求。基于此,就新形势下提高电厂热控系统可靠性的技术手段展开探究,是保障火电机组安全经济运行、推动火电行业转型的关键。

1 基于硬件优化的热控系统可靠性提升技术

1.1 提高选型质量

硬件被视为热控系统运行的物理基础,其选型质量在很大程度上决定了系统的可靠性下限,依托高精度、抗干扰的硬件配置,能从源头上降低系统故障的发生率。传感器是热控系统的感知器官,为解决传统传感器在恶劣工况下可靠性不足的问题,需要配置高精度、抗干扰、智能化的新型传感设备。在温度测量方面,传统热电偶传感器本身存在冷端补偿误差大、抗振动能力弱等诸多难以忽视的缺陷,建议以光纤光栅温度传感器替代。此类传感器基于光的波长调制原理,不受电磁干扰影响,测量精度可达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,

适用于炉膛烟温、主蒸汽温度等关键参数的测量^[1]。在压力测量方面,针对高压、高振动工况下的压力测量需求,建议选用电容式差压变送器。该变送器采用微熔技术,兼具抗过载能力强、长期稳定性好等优势,其量程比可达到 100:1,能很好地适应机组变负荷运行时出现的参数大范围变化情况。在执行机构选型方面,需优先选用具有自诊断、自润滑功能的智能执行机构,如电液伺服执行机构内置位置反馈传感器与故障诊断模块,可实现对阀门开度、伺服阀电流等参数的实时监测。一旦出现卡涩、泄漏等故障时,其能自动发出报警信号,并标记故障的具体位置,以便于运维人员快速定位处理。除此之外,智能执行机构还支持远程校准与参数整定,省去了繁琐的现场拆卸环节,大大缩短了所需要的维护时间。

1.2 优化冗余配置

冗余配置是提高硬件系统容错能力的重要技术手段,依托关键设备的多重备份与无扰切换,可有效避免单点故障导致的系统瘫痪问题。针对火电机组的关键控制回路和保护回路,需合理制定冗余配置策略,着力构建“故障—安全”型硬件架构。控制器作为热控系统的核心设备,普遍采用双机热备冗余模式,即配置主控制器与备用控制器两个控制器,主控制器在正常运行状态下执行控制逻辑,备用控制器实时追踪主控制器的运行状态与数据。当主控制器出现故障时,系统可在 10 ms 内完成主备切换,切换过程中不会产生扰动,亦不会影响机组的正常运行^[2]。电源配置可采用双路冗余供电模式,即配置 UPS 电源与厂用电两

作者简介: 訾才(1979-),男,本科,助理工程师,研究方向:热控 DCS 控制系统及热控仪表。

路供电，并在两路电源之间设置自动切换装置。一旦厂用电中断，UPS 电源可迅速进行无缝切换，确保热控系统供电连续性，避免出现因电源中断导致的控制系统失电情况。在信号采集回路中，对于炉膛压力、汽轮机转速等涉及机组安全的关键参数，可采用三取二冗余配置，即同时安装三个同型号的传感器，控制系统通过逻辑判断，从三个测量值中选取中间值作为控制依据。当其中某个传感器失效时，系统将自动剔除故障信号，维持正常测量功能，此种配置方式能大幅度提升关键参数测量的可靠性。

2 基于软件优化的热控系统可靠性提升技术

2.1 控制逻辑设计

软件是热控系统的中枢神经，控制逻辑设计是软件优化的重中之重，在具体执行中需秉持“安全优先、协调控制、容错设计”的基本原则，构建完善的控制逻辑架构。在协调控制系统（CCS）逻辑设计中，需优化负荷指令的滤波与限幅策略，避免因电网负荷波动而频繁调整机组负荷；还需增设工况判断逻辑，面向机组启停、变负荷等不同工况，设置与之相应的控制参数，制定合理可行的调节策略，以确保控制系统的自适应调节。在保护系统逻辑设计中，需秉持“故障—安全”的设计原则，即在系统显露故障时，保护逻辑需发挥引导作用，将机组引导至安全状态。例如：当炉膛压力测量信号失效时，炉膛压力保护逻辑应自动触发“压力高/低”保护功能，以防炉膛爆炸或坍塌，保护逻辑还需设置延时判断环节，避免出现因信号瞬时波动导致的保护误动作^[3]。保护系统的连锁逻辑优化同样不能忽视，需明确各保护回路的优先级，尽量规避不同保护回路之间的冲突。例如：汽轮机超速保护的优先级高于 AGC 调节指令，当汽轮机转速超过额定值的 110% 时，系统可立即切断 AGC 指令，触发超速保护。

2.2 控制参数整定

控制参数整定是软件优化的另一个重要环节，合理的参数整定能提升控制系统的响应速度，避免出现因参数设置不当导致的系统振荡或调节滞后情况。PID（比例—积分—微分）控制是热控系统中应用最广泛的控制算法，其参数整定的合理与否同控制系统的调节质量直接相关。传统的 PID 参数整定主要采用经验法，整定效率低且参数适应性差，已难以满足复杂工况下的控制需求，亟需引入最新的智能整定算法，提升参数整定的精确性。例如：基于遗传算法的 PID 参数整定方法，可模拟生物进化过程中的选择、交叉、变异操作，在全局范围内搜索最优的 PID 参数组合，大幅

提升了控制系统的动态性能；基于模型预测控制（MPC）的 PID 参数整定方法，可建立被控对象的数学模型，就系统未来的输出情况做出准确预测，以此优化 PID 参数。例如：某电厂在 660 MW 机组的主蒸汽温度控制系统中引入了基于模型预测控制的 PID 参数整定方法，使主蒸汽温度的动态偏差从 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，调节时间缩短了 40%。除此之外，还需采用分段 PID 整定策略，基于机组负荷区间的差异设置不同的 PID 参数，如在低负荷区间，机组的热惯性较小，可适当减小比例系数，以避免系统超调；而在高负荷区间，机组的热惯性较大，可适当增大比例系数，以提升系统的响应速度。

3 基于智能监测技术的热控系统可靠性提升技术

3.1 工业互联网技术

以工业互联网、人工智能等为代表的新一代信息技术的迅速普及，为电厂热控系统的稳定运行注入了新的技术动能，极大地增强了系统的故障预警与自愈处理能力。依托工业互联网可以构建热控系统状态监测平台，将传感器、执行机构、控制器等设备的运行数据采集至云端集中存储并进行深入分析^[4]。平台采用分布式架构，支持海量数据的实时传输与处理，数据传输速率可达 100 Mbps 以上，能很好地满足热控系统的实时监测需求。除此之外，平台还具备数据可视化、故障预警、故障诊断等功能，运维人员可以实时查看系统各设备的运行状态与参数变化趋势。根据预设的阈值，平台可以实时预警设备的异常状态，如当传感器的测量值波动幅度超过阈值时，将自动发出报警信号。平台还可以参照设备的运行数据及历史故障信息，分析导致故障的缘由、定位故障的具体位置，为运维人员提供针对性的故障处理建议。

3.2 人工智能算法

人工智能算法是提升智能监测技术应用成效的关键所在，通过引入基于机器学习、深度学习的故障诊断算法，可实现故障的精准识别与早期预警。在热控系统故障诊断领域，机器学习算法有着广泛的应用前景，如基于支持向量机（SVM）的故障诊断算法，能精准识别传感器漂移、执行机构卡涩等故障；基于 BP 神经网络的故障诊断算法则拥有强大的非线性拟合能力，能妥善处理复杂的非线性故障数据，尤为适用于多因素耦合导致的故障诊断。深度学习算法的应用则进一步提升了故障诊断的精度，如基于卷积神经网络（CNN）的故障诊断算法，能自动提取设备运行数据中的深层特征，大大提升了故障诊断的自动化水平；基于长短期记忆网络（LSTM）的故障诊断算法，不仅能处理时

序数据,还能预测设备的未来运行状态,实现故障的早期预警。

3.3 故障自愈技术

所谓故障自愈,即当热控系统在出现故障时,不需要人工干预便能自动完成故障诊断、故障隔离、故障恢复的过程。故障自愈技术作为智能监测技术的高级应用,通过构建闭环的故障处理系统,可实现对各种故障的自动隔离与及时恢复,提升系统的容错能力。当系统监测到故障信号时,故障诊断模块可快速定位故障位置,准确识别故障类型;故障隔离模块可通过逻辑控制将故障设备与系统隔离开来,避免故障范围的继续扩大;故障恢复模块可利用冗余切换、参数重构等手段,助力系统尽快恢复正常功能。例如:当某一温度传感器出现漂移故障时,系统可自动定位故障传感器,将其从测量回路中隔离,同时切换至冗余传感器的测量信号,确保系统的正常运行;而当控制器出现故障时,系统可自动触发主备切换,确保控制功能的正常发挥。

4 基于全生命周期运维的热控系统可靠性提升技术

4.1 明确各环节的管理要点

要想确保热控系统的长期稳定运行,必须强化运维管理,以往固化的定期维修模式已难以适应当前形势下的运维需求,亟需构建覆盖热控系统各环节的全生命周期运维管理体系。在具体执行中,电厂需秉持“预防为主,状态检修”原则,明确各环节的管理要点:在设备采购环节,需设置完善缜密的供应商评价与设备验收机制,优先挑选那些具有成熟应用案例、通过国家相关认证的热控设备,设备到货后还需进行全方位的性能测试,确保其参数符合设计要求。在安装调试环节,需一丝不苟地执行安装验收规程,仔细核查传感器的安装位置、电缆敷设工艺、控制器的冗余配置,调试完成后还需进行72小时连续试运行,以验证系统的稳定性。在运行维护环节,建议采用状态检修模式,基于对设备运行状态的实时监测,准确判断其健康状况,继而拟定可行性更高的维修方案。例如:通过监测传感器的测量值波动幅度、执行机构的伺服电流变化,可判断设备是否存在老化、卡涩等故障隐患,及时采取预防性维修,避免故障的继续扩大。在退役报废环节,需综合评估设备的真实状态,及时更换达到使用寿命的设备,尽量避免因设备老化导致的故障^[5]。

4.2 建立标准化的运维流程

标准化的运维流程可以为运维工作的有序推进保驾护航,通过制定完善的运维规程,能很好地规范运

维人员的操作行为,防止人为失误导致的系统故障。电厂应继续完善热控系统的运维规程,进一步细化设备巡检、定期校验、故障处理、软件升级等工作的流程与标准。针对设备巡检,需制定内容详尽的巡检清单,明确巡检内容、巡检周期、巡检方法等细节内容,巡检人员需严格参照清单开展巡检工作,及时查找出潜在的风险因素。在日常校验工作中,需依循《火力发电厂热工自动化系统检修运行维护规程》的相关要求,对传感器、控制器等设备进行定期校验,并将校验数据及时记录存档。针对故障处理,需制定明晰的故障处理流程图,详细标明故障诊断、故障隔离、故障修复、系统恢复的具体步骤,避免故障处理过程中的盲目操作^[6]。在软件升级方面,需制定软件升级操作规程,明确升级前的准备工作、升级过程中的操作步骤、升级后的测试内容,确保软件升级工作的循序推进。标准化运维流程的实施,能大大降低人为失误导致的故障发生率,提升运维工作的质量与效率。

5 结束语

电力工业是国民经济的基础性产业之一,火电作为我国电力供应体系中举足轻重的一环,在能源保供中起到不可或缺的支撑作用。随着智慧电厂建设进程的持续深入,电厂热控系统可靠性提升技术的智能化程度将不断提升、可靠性评价体系也将进一步完善。在未来的研究实践中,需继续加强跨学科技术融合,推动硬件、软件、运维、智能监测技术的协同发展,为电厂热控系统可靠性的提高提供更高效的技术方案。

参考文献:

- [1] 赵创.提高电厂热控系统可靠性技术研究[J].应用能源技术,2022(10):36-39.
- [2] 孙震.提高电厂热控系统可靠性技术研究[J].电子技术与软件工程,2021(12):233-234.
- [3] 官同宇,张晓东.提高电厂热控系统可靠性技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2021(11):7-8.
- [4] 李娜.电厂热控系统可靠性的技术提高策略研究[J].电器工业,2022(05):53-55.
- [5] 胡程斌.提高电厂热控系统可靠性技术研究[J].智慧城市,2020,06(23):66-67.
- [6] 冯新江.电厂基建热控系统可靠性控制措施[C]//中国电力技术市场协会.2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(上册).辽宁大唐国际葫芦岛热电有限责任公司,2023.

基于环境因子分析的拦截网受力状态研究

韩王畴¹, 杨嘉², 刘禹¹, 张志柳², 彭士健³

(1. 海南核电有限公司, 海南 昌江 572733;

2. 中国核电工程有限公司, 北京 100080;

3. 中国船舶集团有限公司第七一九研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要 本文对核电站冷源取水口的拦污网相关监测数据进行分析, 研究不同环境因素对拦污网拉力值产生的影响。通过 2024 年 2 月到 8 月的监测数据, 统计并分析了潮位、流速、流向、风速及拦污网堵塞率对拦污网拉力的影响效果, 以期应对极端天气条件下可能产生的风险提供有益参考。数据相关性分析结果表明, 拉力值与潮汐之间存在负相关关系, 潮位变低时拉力变大, 潮位变高时拉力减小。而拦污网的堵塞率与拉力值呈正相关, 堵塞率变大时拉力值也逐渐上升。拉力值上升到一定程度时, 拦污网网面绷紧, 容易造成网兜断裂或撕裂, 导致其不能发挥拦截作用。

关键词 拦污网; 拉力监测; 潮汐周期; 堵塞率

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.003

0 引言

拦污网主要用于拦截水面的海生物、漂浮杂物等来保障核电站冷源系统的取水安全。拦污网受到潮汐^[1]、水流、风力、网孔的堵塞的影响。当拦污网受到的拉力超出其设计承载能力时, 网兜容易变形产生撕裂, 不能发挥其拦截作用, 容易对核电站冷源取水安全造成严重影响。本研究通过分析拦污网周围的潮位、水流流速等因素对拦污网拉力值的影响, 为拦污网设计、制定维护及清理工作频率提供科学参考, 进而为设计冷源系统的安全预警机制奠定基础。

本研究中数据监测时间范围为 2024 年 2 月 20 日到 2024 年 8 月 16 日, 包含拦污网附近的潮位、流速、流向、风速以及拦污网受到的拉力值。

1 拉力数据变化与极值分析

1.1 拉力值变化趋势

拉力值受潮汐变化和天气条件的影响, 在不同时间段出现了明显的起伏。在潮汐高峰期和低谷期拉力值对应发生波动, 表明潮汐周期对拉力的主导作用。如图 1 所示, 在 6 月 13 日至 6 月 20 日、7 月 10 日至 7 月 14 日这两个时段内, 拉力值显著增加且波动幅度较大, 则受到拦污网的堵塞影响。

1.2 极端拉力值的环境因素分析

拦污网拉力受水流冲击、潮汐变化等因素共同作用^[2]。依据流体力学原理, 水流冲击力与流速、流向、水位相关^[3]; 潮汐使流速流向周期性波动, 进而导致拉力呈周期性变化。根据伯努利方程, 流速越大冲击

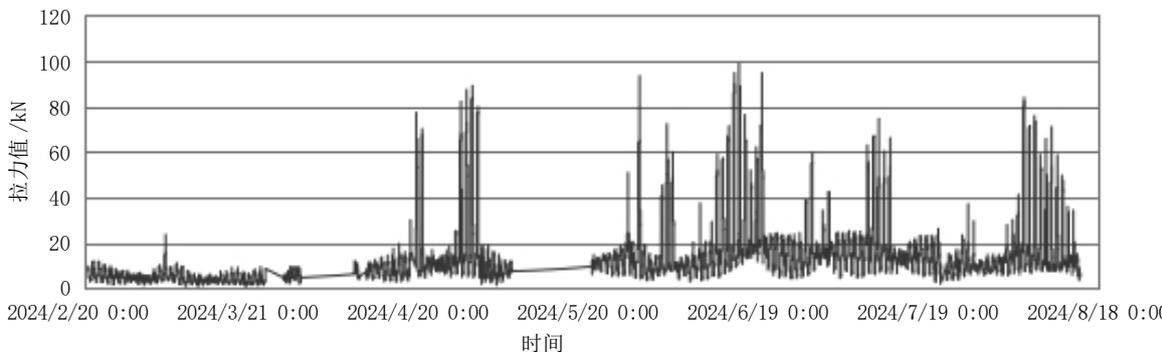


图 1 拉力变化曲线

作者简介: 韩王畴 (1997-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 核电厂取水明渠拦污网主缆拉力监测。

力越强、拉力越大；潮位也直接影响拉力，低潮位时流速快导致拉力大，高潮位流速缓、浮力强导致拉力小。

拉力值的急速变化与环境因素的大幅波动紧密关联，如图2所示。拉力值的最大值为98.55 kN，出现在2024年6月16日13:50，此时，对应的潮位为34 cm，风速达到了3~4级，这时低潮位加剧了水流的冲击作用，导致拦污网受到的拉力大幅上升；拉力值的最小值出现在2024年7月21日19:12，为1.78 kN。此时，潮位达到175 cm，当时天气情况为中暴雨，降雨量导致潮位上升。潮位上涨导致水流对拦污网冲击变小，拉力值降低。总结这种情况可以发现，低潮位、高流速容易导致拦污网拉力的上升，而潮位高时水流压力得到缓解，拦污网受到的拉力变小。

2 周期性波动与异常情况分析

2.1 潮汐周期与拉力波动的关系

监测数据表明，拉力值受潮汐周期影响呈正弦曲线式周期性波动，与潮汐变化高度一致。2024年6月13日至20日、7月10日至14日，拦污网网孔堵塞率高致拉力负荷上升，既验证了潮汐对拉力的影响，也体现了潮汐周期内网孔堵塞的叠加效应。

2.2 异常波动原因及环境因素的影响

在数据监测过程中观察到突发的拉力值变化。7月28日风速较大为0.6左右，风向几乎垂直于拦污网，风速对水的流速也产生一定影响，网面受到的冲击力剧增，引发异常拉力值峰值（见图3）。风速、风向等属于难以预测的因素，容易导致拉力发生突变，对拦污网的安全构成存在潜在威胁，监测此类环境因素至关重要^[4]。

3 拉力与潮汐、流速的相关性

3.1 拉力与潮位、流速的关联

拦污网拉力与潮位、流速之间存在显著关联性。拉力值整体上与潮位呈负相关关系，在2024年2月20日至2月29日，二者相关性系数达到-0.839，表明潮位对拉力变化的重要影响。随着时间推移潮位对拉力的影响逐渐减弱，5月之后相关性系数约-0.2，潮位影响减弱，拦污网堵塞率增加使得流速、流向的作用变大。

3.2 不同潮位条件下的拉力特征

在不同潮位条件下，拉力表现出不同的特征。低潮位时水流速度与拉力值呈正相关。当潮位低至-100 cm

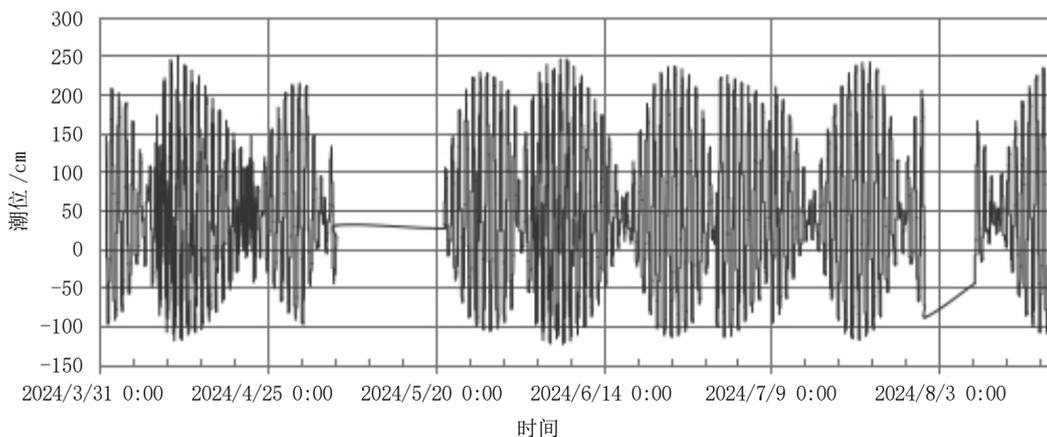


图2 潮位变化曲线

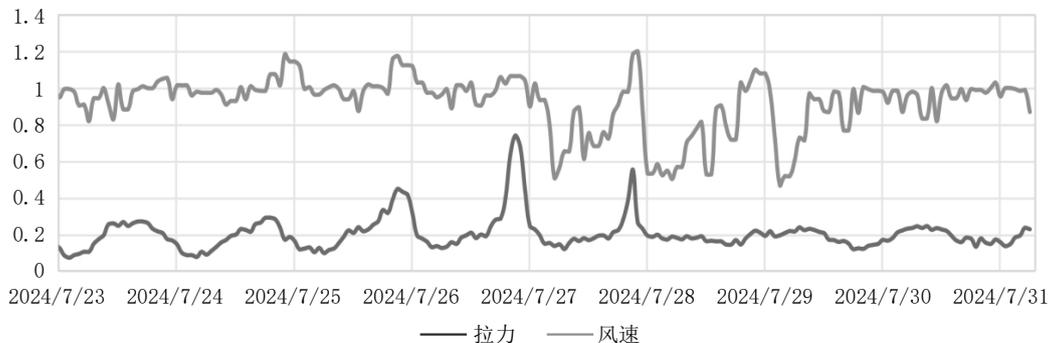


图3 拉力与风速变化曲线

以下时, 拉力值较高。随着流速增大, 拉力值明显上升(见表 1)。高潮位条件下浮力增强, 对拦污网的冲击力减弱, 拉力值相对较小^[5]。在潮位接近 175 cm 时, 拉力为 1.78 kN(见表 2)。

4 堵塞率对拉力的影响

4.1 拦污网堵塞率变化对拉力的影响

拦污网堵塞率也是影响拉力的关键因素。根据流动阻力理论, 网孔堵塞会削减水流通过, 水流在网面

集聚。当网孔被大量堵塞时, 水流冲击更为集中。堵塞率增加导致主缆绳拉力负荷增加, 形成结构安全隐患, 同时使得通过拦污网的流量降低, 网面上压力增大, 使拦污网受到的拉力增加。尤其在 6-7 月漂浮物增多, 这类现象更明显。

4.2 影响堵塞率的主要因素及安全性分析

拦污网的堵塞率受到漂浮物和海洋生物数量、潮流的影响。夏季、雨季由于降水增加, 河流、湖泊中的漂浮物更多, 使得堵塞率上升。当水温较高时海洋

表 1 低潮位拉力及流速流向信息

序号	时间	拉力 /kN	潮位 /cm	流速 / (cm/s)	流向 (°)
1	2024/3/91 6:00	5.55	-109	17.25	229
2	2024/6/14 8:00	11.25	-105	6.21	33
3	2024/5/28 7:00	19.70	-106	9.45	45
4	2024/6/8 4:00	14.15	-122	7.43	27
5	2024/7/6 3:00	23.75	-116	10.05	45

表 2 高潮位拉力、流速流向数据

序号	时间	拉力 /kN	潮位 /cm	流速 / (cm/s)	流向 (°)
1	2024/7/21 19:12	1.78	175	2.37	5.34
2	2024/9/6 19:00	3.76	171	2.75	12.57
3	2024/11/17 4:00	3.91	288	0.87	3.04
4	2024/11/17 5:00	3.83	252	0.89	2.55

生物生长繁殖活跃, 拦污网上附着生物数量增多也会加剧堵塞。高堵塞率增加了拦污网的负荷, 使得主缆绳和网体面临断裂风险^[6]。因此, 定期监测清理拦污网至关重要。

5 结论

本研究通过分析拦污网监测数据中的潮位、流速、流向、风速、网面的堵塞率, 以及拦污网主缆绳受到的拉力值等, 对引发拦污网拉力产生变化的因素进行了分析。研究表明, 拉力值与潮汐周期之间存在关联, 潮位较低时水流产生的冲击力大, 拉力值较大, 而潮位较高时拉力值相对较低。水流流向与拉力值间也存在明显关联, 当水流的流向垂直于拦污网网面时会显著增大冲击带来的压力, 导致拉力上升。拦污网的堵塞率影响更突出, 网面上附着物的增加使得水流无法快速通过, 拉力显著上升。这些分析结果能够为拦污网日常维护、清理频率的确定及结构性安全评估提供科学依据。后续研究可以围绕提高监测数据的采集频率, 量化各因素的影响效果, 还可以基于这些影

响因素建立拉力预测模型, 避免拦污网在极端条件下产生安全风险, 为核电站冷源监测的安全预警预测和应急预案的编制提供支持。

参考文献:

- [1] 杨沪, 盛文强, 李强, 等. 波流作用下核电拦污网水力特性分析 [J]. 水电与新能源, 2023, 37(08): 30-33, 57.
- [2] 沐雨, 解鸣晓, 王辉, 等. 波流联合作用下平面拦污网系泊动力响应特性研究 [J]. 水道港口, 2022, 43(04): 421-429.
- [3] 黄宣军, 郭朝禹, 孙运佳, 等. 某核电厂取水拦污设施波浪力试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2018, 38(03): 34-37.
- [4] 康君峰, 范敦敦. 核电站拦污网主绳拉力监测与分析 [J]. 低温建筑技术, 2017, 39(05): 57-59, 71.
- [5] 冯其科, 尚丰青. 基于潮流潮汐规律的稳泊管理 [J]. 中国水运, 2017(04): 50-52.
- [6] 邓楠, 王毅. 国内某电厂取水明渠拦污网工程设计 [J]. 港工技术, 2017, 54(02): 67-71.

热能回收技术在动力工程领域的创新与发展

王志超, 蒋毅, 杨林心

(泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646015)

摘要 热能回收技术是提升动力工程效率与节能减排的重要途径, 在各类动力系统中得到广泛应用。本文对热能回收技术的主要类型以及其发展历程进行了梳理, 着重分析了技术创新对提升能量利用率和环境保护的作用。研究表明, 新型材料和智能控制等创新技术能显著促进动力系统的综合性能优化, 热能回收技术的不断进步对推动动力工程的绿色转型与可持续发展具有积极意义。

关键词 热能回收技术; 动力工程; 新型材料

中图分类号: TK1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.004

0 引言

近些年, 热能回收的众多技术路径不断呈现, 其中余热锅炉、热泵、相变储热材料以及熔盐储能等技术逐步走向成熟, 并且在火力发电、工业制造、交通运输等动力工程系统中得到广泛运用。以智能控制为代表的信息化技术不断融合新型高效材料, 实现热能回收全过程的高效管理与优化, 显著提升系统综合性能。相关研究多聚焦单一技术性能及工程应用, 然而在提升整体能量利用率、减少环境影响方面, 技术创新与系统集成表现出更为重要的作用, 目前热能回收技术正处于快速发展与持续创新阶段。本文系统梳理此技术的主要类型和发展历程, 探讨技术创新在动力系统能量利用以及环境保护方面的作用, 揭示热能回收技术对于动力工程绿色转型和可持续发展的推动意义。

1 热能回收技术的发展背景

1.1 热能回收技术的兴起历程

热能回收技术的兴起源于工业革命以来对能效提升的迫切需求。在20世纪初, 余热利用的初步尝试主要是集中于简单的蒸汽动力系统中, 随着20世纪中叶工业进程的加快, 各类装备开始引入余热回收装置以期提高效率并减少能源浪费。21世纪, 环保法规日益严格, 对可再生能源的关注也在增加, 这进一步推动了该领域的发展^[1]。先进材料与现代控制技术的结合, 使热能回收技术在不同行业中的应用更为广泛, 成为动力工程中的关键部分。

1.2 节能减排需求驱动

随着全球能源资源的日益紧张以及环境污染问题的加剧, 节能减排已成为各国亟待解决的重要议题,

动力工程领域是能源消耗“大户”, 其能效提升对节能减排至关重要。在此背景下, 热能回收技术被视作提升能源利用效率的关键手段。该技术通过回收利用过程中的余热显著提升了系统的整体能效, 降低了能耗和排放。各国纷纷出台政策推动并鼓励热能回收技术的研究和应用, 以实现能源的高效利用以及环境的有效保护。热能回收技术的发展顺应了低碳经济的潮流, 为动力工程领域的可持续发展提供了新的动力。

1.3 动力工程中的能效挑战

动力工程领域面临严峻的能效挑战, 传统能源利用形式广泛存在效率低的问题, 引发了大量能源浪费, 化石燃料在发电和工业驱动中广泛应用, 致使二氧化碳及其他污染物大量排放从而加剧了环境恶化的趋势。为了降低对环境的负面影响, 提升能源的利用效率, 动力工程亟需技术革新, 热能回收技术因其能够有效捕捉废弃热能, 并加以再利用, 成为解决能效问题的关键路径。现代动力系统对高效率低排放的要求愈发严格, 促使人们持续探寻新材料与创新技术, 以实现能量的最大化转化以及最小化损失。

2 热能回收技术的主要类型

2.1 余热锅炉与有机朗肯循环

余热锅炉与有机朗肯循环作为热能回收技术的关键组成部分, 在动力工程领域应用广泛, 二者在提升系统效率、回收工业废热方面发挥着重要作用^[2]。余热锅炉主要通过回收工业废气中的显热来工作。它会将废气携带的热量传递给水, 把水加热成蒸汽。这些蒸汽既可用于发电, 为工业生产提供电力支持; 也能直接应用于工业生产环节, 满足特定的工艺需求。余

作者简介: 王志超 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热能动力工程。

热锅炉具有较高的热效率，能够充分挖掘废气中的热能价值，同时其低排放的特点也符合当下节能减排的环保要求，有助于减少工业生产对环境的负面影响。有机朗肯循环则另辟蹊径，采用低沸点有机工质，能更有效地将低温余热转化为电能，尤其适用于温差较小的热源场景。该循环系统结构简单，运行稳定可靠，即便在低温环境中也能保持高效运行状态，实现能源的有效回收利用。这不仅提高了能源的整体利用率，还能降低工业生产对化石燃料的依赖程度，对于推动能源结构的优化和可持续发展具有重要意义。

2.2 热泵与换热器

热泵与换热器在热能回收技术中发挥着至关重要的作用，借助高效的热量传递和转换来提高系统的整体效率，热泵在较低温差条件下可实现热量转移，能把低品位热能提升到可利用水平，在供暖制冷以及热水供应等领域应用广泛。换热器是能量传递的关键媒介，通过提升热交换效率以最大限度地利用废热资源。两者的结合极大地降低了系统能耗，其通过对热源和负载之间热量流动的优化实现。

2.3 热电转换材料应用

热电转换材料在热能回收技术中十分关键，能将热能直接转变为电能来实现高效能量利用。这类材料的热电转换效率的关键通常在于其具有显著的塞贝克系数，高电导率和低热导率。近年来，随着材料科学的发展，新型热电材料持续涌现，如铋碲化合物、钴酸钠以及硅锗合金等。这些材料表现出非常卓越的热电性能，能够在极为宽广的温度范围内稳定地工作。在推动热能回收技术的应用与发展方面，通过优化材料的微观结构来提升热电效能。

3 新型材料在热能回收中的应用

3.1 高效热交换材料

高效热交换材料在热能回收领域占据着至关重要的地位。这类材料的核心优势在于拥有优异的导热性能和稳定的化学性质，这使得它们能够在各种复杂工况下高效地实现热能的传递与储存，为热能回收利用提供了有力保障^[3]。在众多高效热交换材料中，先进的金属合金表现尤为突出。例如：铝合金和铜合金具有高导热系数，能快速将热量传出去，同时还具备良好的耐腐蚀性，可在恶劣环境中长期稳定工作。因此，它们被广泛应用于余热锅炉和换热器等设备中，有效提升了热能回收效率。此外，复合材料与陶瓷材料的应用也呈现出不断攀升的趋势。这些材料不仅拥有卓越的热传导特性，能在高温环境下保持结构稳固，

而且通过优化其微观结构，还能进一步提高热能传递效率，减少能源损耗。高效热交换材料为动力工程系统的整体性能优化奠定了坚实的基础，推动了热能回收技术向更高效、更环保的方向发展。未来，随着材料科学的不断进步，高效热交换材料将在热能回收领域发挥更加重要的作用。

3.2 纳米技术驱动创新

纳米技术于热能回收方面的应用展现出极为显著的创新可能性。纳米材料以其独特的物理和化学性质，如高效导热性以及优异的热电转换能力，成为提升热能回收效率的重要途径。在热电材料的开发进程中，纳米结构的引入极大地提升了能量转换效率，降低了热损失。纳米颗粒在热交换器中的应用对改善换热性能，增强热能利用率有帮助。纳米材料的粒径和结构通过调控热导率和热阻得以实现精确调节，进而优化能量传递过程。纳米涂层技术在提高热电设备的耐久性和稳定性方面发挥了关键作用。

3.3 智能材料与自适应系统

智能材料在热能回收方面的应用越来越广泛，在自适应系统的构建中起着关键作用。智能材料能优化热能转化效率，是因为其可以感知和响应环境变化，如形状记忆合金及相变材料能够依据温度变化来调整自身结构，进而提升系统的能量利用率，这些材料不仅实现对环境参数的实时调整，还具备优良的热响应特性，可通过多功能集成来保障系统的稳定性与效率。

4 智能控制技术促进综合性能优化

4.1 自动化调节系统

自动化调节系统在热能回收技术中起到关键作用，通过优化系统操作以及控制参数，实现了更高的能量利用率与稳定性^[4]。自动化调节系统对先进的传感器网络具有依赖性，能实时监测动力系统内的各类关键参数，如温度压力以及流量等。这些经智能算法分析处理的数据能够生成最优调节策略，实现快速响应与精准控制。动态调节能力可使系统于不同负荷及工况下维持最佳性能，降低人为干预引发的误差与不稳定性。自动化系统集成了自学习功能，能够依据历史运行数据展开模式识别与趋势预测，持续优化调节过程。

4.2 智能监测与故障诊断

智能监测与故障诊断是提升热能回收系统效率以及可靠性的重要手段。在动力工程中，借助先进的传感技术以及实时数据采集，能够对系统的运行状态予以全面监测。应用这些技术可以快速识别潜在的操作异常，以及进行故障预测，进而减少系统停机时间，

降低维护成本。机器学习与数据分析技术相结合使复杂动力系统的故障模式识别更为精准,不但提升了系统的整体稳定性,还强化了应对突发事件的能力。智能监测与故障诊断的应用极大地提高了热能回收系统的综合性能以及其在动力工程中的适用程度。

4.3 数据驱动的能量管理

数据驱动的能量管理在热能回收技术中起着极为重要的作用。通过精准的数据采集与分析来优化系统性能,现代动力工程中传感器网络对系统运行状态进行实时监测,收集大量能耗与产出数据,这些数据经先进算法处理,不但能有效识别系统运行中的能效瓶颈,还可借预测性分析防范潜在故障。数据驱动技术的应用使得能量流动更为高效,降低了不必要的能量浪费。结合机器学习技术进一步实现动态调整,提升了热能回收技术的可靠性与经济性。数据驱动的方法得到了广泛的普及,为动力工程的智能化管理提供了强有力的支撑。

5 热能回收技术推动动力工程绿色转型

5.1 环境保护效益

热能回收技术通过提高动力工程的能效,以及减少污染物排放,从而对环境保护产生了积极的影响。这项技术能大幅降低废热排放,把它转变成可利用的能源形式,以减少对自然资源的耗费,这不仅对降低燃料使用量有帮助,还能减轻温室气体的排放,有效地缓解全球变暖问题。热能回收技术的应用可降低有害物质的排放,提升空气质量,对人类健康和生态系统的维护发挥了关键作用^[5]。新型材料与智能控制的创新应用极大地推动了动力系统的优化,显著减少了能源转化过程中的损耗,大幅提高了能源利用效率,进一步强化了环境保护效益。热能回收技术对推动动力工程的绿色转型极为关键,为实现可持续发展的目标提供了技术支撑。

5.2 可持续发展路径

在动力工程领域,热能回收技术的应用是实现可持续发展的关键路径。通过对动力系统能效进行优化,能有效降低能源消耗和碳排放,推动生态环境的改进,进而实现动力工程的绿色转变。在可持续发展的过程中,热能回收技术不但推动了资源的高效运用,而且促进了新材料以及智能控制的技术进步。这些创新极大地提升了系统的整体性能,为行业提供了极为多样化的解决方案,充分满足了未来发展对环境保护的严格要求。热能回收技术对于达到经济效益与环境效益的双赢局面具有重要作用,能为构建清洁高效低碳的能源奠定坚实的基础。

5.3 推动行业转型升级

在动力工程领域,热能回收技术的广泛应用已成为推动行业转型与升级的关键力量。该技术通过有效降低能源消耗、提升系统整体效率,为产业结构的可持续发展提供了强大助力。新材料与智能控制技术的融入,进一步降低了热能回收系统的维护与运营成本,同时优化了能量利用路径,实现了能源的高效配置。在市场与政策的双重激励下,企业纷纷转向绿色技术方案,以提升自身市场竞争力,为行业的长远发展奠定了坚实的基础。热能回收技术将持续创新突破,引领动力工程领域迈向更加绿色、高效的新阶段,不仅助力实现碳中和目标,更将推动全球能源结构的深刻变革,开启可持续发展新篇章。

6 结束语

在动力工程领域中,热能回收技术呈现出极为显著的效率提升以及节能减排成效,通过对主流技术类型和发展历程予以全面且系统的梳理之后,清楚地明确了技术创新特别是新型材料的应用以及智能控制策略对于提高能量利用率、推动动力系统朝着绿色方向转型所发挥的重要助力作用。研究表明,这些创新手段对动力系统综合性能进行了优化,进而有效减少了环境污染,满足了当前行业向可持续发展转型的现实需求。尽管热能回收技术当前已获得了实质性的进步成果,然而在技术成本方面依旧存在长期运行可靠性以及集成兼容等方面的局限性。此外,在极端工况下的适用性关键部件寿命预测以及实际工程推广等问题也需要深入研究。未来,新材料与智能算法的协同创新将聚焦系统集成效率提升、构建标准化评价体系以提供技术推广科学指导、强化多学科交叉融合、拓展热能回收技术于新兴动力工程领域的应用空间等,为推动热能回收技术的广泛应用提供助力。

参考文献:

- [1] 郭红刚.冶金工业废气热能回收技术应用研究[J].中国金属通报,2025(01):16-18.
- [2] 罗书磊,马盼飞,韩芬,等.浆粕车间蒸球泄放汽热能回收技术改造[J].山东化工,2023,52(19):157-160.
- [3] 雷银贵,何春云,张燕.大型磷复肥企业蒸汽冷凝水低温热能回收技术研究[J].云南化工,2023,50(07):124-126.
- [4] 胡春廷.热能与动力工程中的节能技术应用[J].集成电路应用,2023,40(05):324-325.
- [5] 史圯.火电厂热能动力工程中的节能技术分析[J].电子技术,2023,52(03):214-215.

盾构机主驱动系统拆解与回装工艺优化应用

王 贺

(中铁上海工程局集团有限公司城市建设分公司, 上海 201900)

摘 要 主驱动系统作为盾构机的核心部件, 起到驱动刀盘旋转切削岩土的关键作用, 其结构复杂、施工工况差, 长期承受高负荷、强振动及地下水土侵蚀, 易出现轴承磨损、齿轮啮合异常、密封失效等故障, 其拆解与回装的工艺质量直接关系到整机的可靠性与使用寿命。本文基于对主驱动系统拆解与回装实操经验, 结合盾构设备制造厂家的工艺流程与控制要点, 优化主驱动系统拆解与回装工艺, 旨在对提高检修质量与效率有所裨益, 并为同类盾构设备的检修与维护工作提供技术参考。

关键词 盾构机; 主驱动; 拆解工艺; 回装工艺; 检修标准

中图分类号: TH6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.005

0 引言

盾构机作为隧道工程的核心设备, 当主驱动系统故障时, 需通过专业拆解与回装工艺进行检修维护, 而传统工艺存在拆解效率低、部件损伤率高、回装精度不足等问题, 严重影响工程进度。因此, 优化主驱动系统拆解与回装工艺, 提高检修质量与效率, 对保障隧道施工顺利进行具有重要的工程价值。

1 盾构机主驱动系统概述

1.1 主驱动系统的组成

盾构机主驱动系统主要由动力单元、传动单元、支撑单元及密封单元四部分组成。(1) 动力单元: 是主驱动的动力来源, 一般是多台大功率的变频电机或者液压马达, 作用是输出扭矩, 为盾构机的刀盘转动提供动力, 会根据盾构的施工地质、直径大小, 来匹配对应的动力功率。(2) 传动单元: 负责把动力单元输出的动力传递给刀盘, 常见的结构是行星齿轮减速器, 它可以把动力单元的高速小扭矩转化为刀盘需要的低速大扭矩, 部分主驱动也会搭配齿轮啮合的结构来辅助动力传递。(3) 支撑单元: 主要是主驱动的支撑结构, 包括主驱动的壳体、轴承组 (一般是直径大的交叉滚子轴承或者三排圆柱滚子轴承)。一方面要承载刀盘转动时的反作用力以及施工中的轴向推力, 另一方面也为其他单元提供安装的基础。(4) 密封单元: 是盾构机主驱动的保护结构, 因为主驱动的工作环境是地下的泥水、渣土环境, 密封单元一般是多层的唇

形密封或者迷宫密封, 作用是防止外界的泥水、渣土进入主驱动的内部, 同时也防止主驱动内部的润滑油脂泄漏^[1]。

1.2 主驱动系统的功能与作用

主驱动系统则是盾构机能够高效作业的关键所在。其首要功能是为盾构机提供强大且持续的动力。在盾构机掘进过程中, 主驱动系统通过驱动刀盘旋转, 使安装在刀盘上的各类刀具与掌子面的岩土直接接触, 依靠刀具的切削力和刀盘的扭矩, 将岩土破碎并切削下来, 实现隧道的向前推进。主驱动系统还在维持盾构机的稳定运行方面发挥着关键作用。主驱动系统通过精确控制刀盘的旋转速度和扭矩, 能够有效地调整盾构机的掘进姿态, 确保盾构机沿着预定的路线前进, 避免出现偏差和偏移, 从而保证隧道的施工精度和质量^[2]。

2 主驱动系统拆解与回装工艺

2.1 前期准备

(1) 安全防护: 构建刚性作业平台, 承载力不低于 50 t; 对主驱动系统进行泄压 (液压油、润滑脂)、降温处理, 悬挂“禁止启动”标识; 作业人员佩戴防砸鞋、安全帽及防尘口罩。(2) 技术交底: 核对盾构机型号、主驱动系统出厂参数, 明确拆解关键控制点; 绘制部件位置示意图, 标注螺栓规格、数量及紧固力矩。(3) 工机具: 配备液压扳手、液压拉伸器、雨布、风动扳手、无尘纸、起重设备 (额定载荷 ≥ 100 t)、部件存放架 (带防潮垫) 及密封件专用拆装工具。详见表 1。

作者简介: 王贺 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械管理。

表1 工机具表

序号	型号	单位	数量	备注
1	起重机 100 t	台	1	吊装拆解
2	液压拉伸器	台套	1	
3	液压扳手 (15 000 Nm)	台套	1	
4	风动扳手	台	1	
5	游标卡尺 (300 mm)	个	1	
6	深度尺 (500 mm)	个	1	
7	塞尺	把	1	
8	密封条	套	1	依据装配图配置
9	面胶乐泰 587	件	5	
10	记号笔	支	3	
11	无尘纸	卷	5	
12	雨布	卷	3	
13	其他辅材	套	1	螺纹紧固胶等

2.2 拆解流程

(1) 润滑系统处理与取样: 使用专用取样瓶对主驱动润滑油与减速机润滑油分别取样, 每部位取 3 份, 每份约 150 mL, 并严格编号。抽排箱体内存润滑油, 清理残留油污, 严禁油料外泄。(2) 外围部件拆除及保压实验: 对电机 (液压马达) 减速机、外围管路进行标识与拆除, 接口处加装堵头, 防止污染齿轮箱。对主驱动内外密封进行保压试验检测密封性能。(3) 齿轮副侧隙测量: 拆解前进行主密封保压试验, 记录初始密封状态。采用铅丝法测量齿轮副侧隙, 粘贴 $\Phi 4$ mm 铅丝于小齿轮, 回装后盘动齿轮, 测量碾压后铅丝最薄处厚度, 记录数据。(4) 主驱动吊出与翻身: 拆除主轴承与前盾连接螺柱, 按“米字型”保留 8 根螺柱作为安全支撑。吊出主驱动并进行翻身操作, 确保开挖面朝上。(5) 密封系统拆解: 依次拆除内外密封压环、密封件、隔环、外密封安装环与跑道环。所有部件均需打钢印标识, 吊运过程中保持水平, 防止变形与污染^[3]。

2.3 拆解注意事项

一是螺栓拆卸时采用分级卸载方式, 每级卸载力矩为额定力矩的 50%、30%、10%, 防止螺纹损伤; 二是核心部件 (主轴承、行星减速器) 吊离时, 起吊速度 ≤ 0.5 m/min, 吊索与部件接触面垫橡胶垫; 三是所有部件按拆解顺序编号存放, 螺栓、螺母与垫片一一对应, 避免混淆。

2.4 拆解过程关键要求

螺栓拆卸时采用分级卸载方式, 每级卸载力矩为额定力矩的 50%、30%、10%, 防止螺纹损伤; 核心部件 (主轴承、行星减速器) 吊离时, 起吊速度 ≤ 0.5 m/min, 吊索与部件接触面垫橡胶垫; 所有部件按拆解顺序编号存放, 螺栓、螺母与垫片一一对应, 避免混淆。

3 主驱动检测与维修

3.1 受控拆解环境要求

主驱动拆解需在防尘、防潮、恒温的地面车间或防雨棚内进行, 避免粉尘、水汽进入精密部件 (如主轴承滚道、齿轮啮合面); 拆解区域需铺设防护垫, 防止部件与地面直接接触造成划伤。

3.2 部件分级防护管理

(1) 精密部件 (主轴承、高速齿轮、密封件) 拆解后需立即进行油封或真空包装, 涂抹专用防锈油脂, 标注部件名称、状态及存放时间。(2) 壳体类部件需清理内部油污、铁屑, 封堵油口、法兰口防止杂物进入。

(3) 电气部件 (电机定子、传感器) 需做好防水、防短路保护, 单独存放^[4]。

3.3 部件清洗与检查

对所有拆解部件进行彻底清洗, 螺栓、密封件、钢质零部件分类处理。橡胶密封件严禁使用煤油清洗, 仅可用棉碎布擦拭。

3.4 关键部件检测

(1) 主轴承: 进行滚柱、滚道面、保持架的目视检查、精度测量、着色探伤。(2) 密封系统: 主驱动内外密封 4 道进出水口只留一个进水口作为气密性试验进气口, 其他孔全部封堵起来, 确保原来的水管连接管路接触良好无松动。主驱动只留 1 个观察口球阀口作为气密性试验进气口, 齿轮箱各开放的注油孔全部用闷头封堵, 确保原先未拆的油管、油脂分配器检查良好, 接头无松动。(3) 齿轮系统: 检查大齿圈与减速机输出齿轮的啮合面, 进行着色探伤, 根据探伤检测结果确定是否需要更换或维修齿轮, 避免回装时因齿轮损坏返工。(4) 螺栓与螺纹: 检查所有螺纹状态, 测量垫圈与压环磨损量。(5) 润滑系统: 拆解清洗润滑管路、滤芯、油泵, 检测管路堵塞情况和油泵压力输出性能。(6) 电气系统: 检测电机绝缘电阻、绕组阻值, 校验传感器 (温度、压力、转速) 的精度。

3.5 按缺陷等级分类修复

(1) 轻微缺陷: 如齿轮表面轻微划痕、壳体表面锈蚀, 可通过研磨、除锈补漆等方式修复。(2) 中度缺陷: 如轴承游隙偏大、密封唇口磨损, 可更换轴承

密封圈、调整游隙。(3) 重度缺陷: 如齿轮断齿、轴承滚道剥落、电机绕组烧毁, 需更换新部件, 且备件需符合原厂规格或同等质量标准^[5]。

3.6 修复过程工艺合规

部件修复需遵循工艺要求, 如齿轮啮合间隙调整需使用塞尺精准测量, 主轴轴承装需控制加热温度(避免高温退火), 螺栓紧固需按规定扭矩分次拧紧。修复后需再次检测, 确保部件性能达标。所有检测数据需如实记录于附件表格, 作为回装与验收依据。

4 主驱动系统回装工艺

回装工艺需严格遵循“反向拆解顺序、精准控制精度、强化密封性能”原则, 回装精度直接影响系统运行稳定性。

4.1 回装前准备

(1) 部件检测与修复: 对拆解后的核心部件进行全面检测, 主轴滚道圆度误差 ≤ 0.02 mm, 滚子无点蚀、裂纹; 行星减速器齿轮啮合间隙控制在 0.15 ~ 0.25 mm, 超出范围需进行齿面打磨或更换; 主轴表面粗糙度 $R_a \leq 0.8$ μm , 无划痕与锈蚀。(2) 清洁与润滑: 用无水乙醇清洗所有部件表面, 去除油污、杂质; 主轴滚道、密封槽及齿轮啮合面涂抹锂基润滑脂(型号: KLUBER NBU 15), 涂抹量为部件容积的 1/3 ~ 1/2。(3) 工具校准: 对扭矩扳手、激光测距仪、百分表等工具进行校准, 扭矩误差 $\leq \pm 2\%$, 测距精度 $\leq \pm 0.01$ mm。

4.2 主轴与转接座安装

将检测合格的主轴回装至驱动箱, 测量安装面贴合度, 合格后涂抹平面密封胶。驱动螺丝 M42 双头螺柱预紧力 875 kN 标准进行, 预紧力用液压拉伸器拧紧螺栓, 拧紧分三次进行, 拧紧按 50%、75%、100% 预紧力梯度进行。拧紧后螺纹端涂抹螺纹紧固胶, 螺栓端头用红色油漆笔标识。

4.3 密封系统回装

(1) 密封跑道环安装: 在凹槽内安装 O 型圈, 使用 EP2 油脂固定, 螺栓涂抹螺纹紧固胶, 扭矩分级施加。

(2) 密封与隔环安装: 按顺序安装唇形密封与隔环, 最后一道密封唇口朝下, 其余朝上。每道密封安装前均匀涂抹 EP2 油脂, 安装后测量 8 个点的深度并记录。

(3) 密封压环安装: 安装 O 型圈, 螺栓紧固后使用白色油漆笔标识。

4.4 系统测试

完成密封安装后进行保压测试: 驱动密封保压: 2 bar, 保压 20 分钟, 压降 ≤ 0.2 bar 为合格; 大齿

圈保压: 0.5 ~ 1 bar, 保压 20 分钟, 无泄压为合格。

4.5 减速机与齿轮副安装

回装减速机与花键轴, 采用铅丝法复测齿轮副侧隙, 红丹粉法检测齿面贴合度。螺栓分三次预紧至规定扭矩(与 4.2 安装方式一致), 并进行标识。

4.6 管线恢复与最终检查

回装所有外围管路, 恢复润滑、液压与冷却系统连接, 进行最终保压试验与运行前检查。

5 主驱动系统拆解与回装工艺质量控制与安全规范

(1) 标识管理: 所有部件拆解时进行编号与钢印标识, 防止错装。(2) 清洁管理: 作业过程中严禁油污、杂质污染密封面与螺纹。(3) 扭矩控制: 严格按图纸与工艺要求分级紧固, 并使用油漆标记。(4) 探伤与测量: 关键部件均需进行探伤与尺寸复核, 数据归档。

(5) 安全操作: 吊装作业需检查吊耳与索具, 翻身前进行结构安全检查^[6]。

6 结论

本文通过对盾构机主驱动系统拆解与回装工艺的系统研究, 得出以下结论: (1) 拆解工艺需遵循“先外后内、分级卸载、精准记录”原则, 可有效降低部件损伤率, 拆解效率提升 30% 以上。(2) 回装工艺的核心是控制同轴度、紧固力矩与密封性能, 拆除前做好标记、激光对中仪校准同轴度, 可确保装配精度满足设计要求。(3) 主驱动系统的拆解与回装是一项工序复杂、技术要求高的系统工程。通过规范的工艺流程、严格的工具管理与全过程质量控制, 可有效保障设备的可靠性与使用寿命。本文基于实际项目与检修指导书, 系统总结了主驱动拆装的关键技术与管理要点, 对类似盾构设备的维护与大修具有参考价值。

参考文献:

- [1] 李建斌. 土压平衡盾构机主驱动系统故障诊断与维修[J]. 隧道建设, 2020, 40(05): 721-727.
- [2] 王强. 盾构机主驱动轴承安装工艺优化研究[J]. 机械工程师, 2021(03): 132-134.
- [3] 王启宏, 张军. 盾构机设计与维修技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [4] 成大先. 机械设计手册(第 5 版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [5] 国家能源局. 承压设备无损检测第 5 部分: 渗透检测(JB/T 4730.5-2015)[S]. 2015-04-02.
- [6] 张卫国, 李强. 基于红丹粉的齿轮接触斑点检测方法研究[J]. 机械传动, 2020, 44(05): 156-160.

新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用发展

葛永健

(南京大桥机器有限公司, 江苏 南京 211101)

摘要 新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用正逐渐成为提升天线性能的关键因素。随着科技的不断发展, 雷达抛物面天线在气象、通信等领域的应用日益广泛, 尤其是在对性能要求日益严格的背景下, 传统材料往往在重量、强度、电磁性能和耐环境性等方面存在一定局限性。基于此, 本文论述了新型复合材料, 尤其是碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料等在雷达抛物面天线中的应用, 通过分析其在轻量化、强度与刚性、电磁性能优化等方面的优势, 探讨了新复合型材料在提高雷达天线的性能和可靠性方面的作用, 旨在为促进新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用提供有益参考。

关键词 新型复合材料; 雷达抛物面; 天线; 电磁性能

中图分类号: TM2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.006

0 引言

随着现代雷达技术的快速发展, 雷达抛物面天线在高精度探测、远距离通信和空间监测等系统中发挥着不可替代的作用, 其设计与制造材料的选择直接影响整体性能。传统金属材料虽然具有良好的反射特性和稳定性, 但在轻量化需求与长期服役环境中暴露出重量大、易腐蚀、热胀冷缩影响精度等问题, 使其在更高性能要求的雷达系统中逐渐面临局限性^[1]。为了满足现代雷达设备对高效率、高稳定性和长寿命的要求, 复合材料因其密度低、强度高、耐腐蚀、热稳定性强以及可设计性强等优点, 逐渐成为抛物面天线的重要候选材料。复合材料不仅能够显著降低天线整体重量, 提高机械结构的稳定性, 而且能够通过材料参数优化改善电磁波反射效果, 有助于提升天线的方向性和增益性能。近年来, 碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料及多功能纳米复合材料在天线制造领域的应用不断扩大, 实现了从结构轻量化向高性能电磁兼容性的拓展, 使得抛物面天线在复杂环境中的可靠性显著增强。由此可见, 材料技术的发展正推动雷达抛物面天线向更高精度、更高效率、更高可靠性方向迈进, 为现代雷达系统的综合性能提升提供了重要基础和发展空间。

1 雷达抛物面天线概述

1.1 雷达抛物面天线的基本原理

雷达抛物面天线是一类利用几何光学反射原理实现电磁波定向辐射的高增益天线, 其核心结构由抛物

面反射器和馈源构成。抛物面具有独特的几何特性, 即焦点到抛物面任意一点的路径长度相同, 因此当馈源位于焦点处时, 发出的电磁波经过抛物面反射后会形成相位一致、方向集中的平行波束, 从而得到高方向性与高增益输出。其工作原理基于反射定律, 要求入射波与反射波的夹角相等, 因此反射面的形状精度、表面平整度和材料特性直接影响波束的均匀性、方向性以及天线的整体性能^[2]。如果抛物面表面存在误差, 将导致副瓣增大、主瓣畸变以及增益下降, 影响雷达对远距离或微弱信号的探测能力。同时, 馈源结构的选择与布置方式也会影响天线的能量分布, 如采用喇叭馈源、相控馈源等不同形式会造成不同的辐射特性。在工程应用中, 抛物面天线通常需要在特定频段内保持稳定的反射特性, 因此材料的热性能、刚度和电磁特性也尤为重要。随着材料科学和制造技术的发展, 复合材料反射器因其可实现高精度成型与优异的力学性能, 可提升抛物面天线在各类复杂环境中的可靠性, 为雷达系统提供更高质量的信号输出。

1.2 雷达抛物面天线的应用领域

雷达抛物面天线凭借其高增益、高方向性、高稳定性等特征, 在众多民用及公共领域中具有广泛而重要的应用价值。其典型优势体现在能够实现远距离的高质量信号传输与接收, 因此在气象监测、航空航天通信、卫星地面站、海洋观测以及应急探测等方面发挥着核心作用^[3]。

作者简介: 葛永健 (1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计与制造。

在气象领域,抛物面雷达天线可以实现对降水云团、风暴系统等气象目标的精细探测,通过高分辨率的扫描方式为天气预报、灾害预警和气象科研提供关键数据支持。

在民用通信领域,抛物面天线广泛应用于卫星通信地面站,能够实现稳定的长距离数据传输,支撑电视广播、远程数据交换、航空通信等业务需求。

在航空航天领域,抛物面天线既用于航天器测控系统,也应用于深空通信,通过高增益特性实现对遥远天体的探测和数据传输。

在海洋领域,抛物面天线可用于海洋浮标站、岸基观测站等设备,实现海面环境监测与实时通信。

此外,随着高精度雷达技术的发展,抛物面天线也在土地遥感、地质灾害监测、交通监测等领域发挥着越来越重要的作用,为社会公共服务和科学研究提供了稳定可靠的技术支撑。

2 新型复合材料概述

2.1 复合材料的基本定义与特性

复合材料是一类由两种或多种性能不同的材料经过有机组合后形成的新型工程材料,一般由基体材料和增强材料共同构成^[4]。基体材料通常起到黏结和支撑作用,它负责将增强材料保持在适当的位置,并在外部载荷作用下分配和传递应力;而增强材料则是复合材料性能的主要来源,通常由强度高、刚性大、耐疲劳性好的材料构成,如碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维等。这种“基体—增强体”结构使复合材料能够实现材料性质的互补融合,即将各自的优势有效结合,从而获得单一材料难以同时具备的综合性能。例如:碳纤维复合材料将碳纤维的高强度、高模量与树脂基体的轻量化、成型性好等特点融合,使材料在重量更低的情况下表现出优异的力学性能和环境适应能力。复合材料可通过改变纤维的铺层方式、体积分数、基体类型等方法实现性能可设计性,这也是其重要特征之一,使其能够根据不同工程需求进行定制化制造。在航空航天、交通运输、能源装备、电子信息等领域,复合材料因其高强度重量比、良好疲劳性能和耐腐蚀特性而被广泛采用。在雷达抛物面天线中,其独特的电磁特性尤为关键,复合材料不仅具有良好的电磁屏蔽能力,还可通过调整材料组成使其具备适宜的透波特性,有助于减少电磁干扰并确保反射面形状精确稳定^[5]。

此外,复合材料在温度变化较大的环境中仍能保持较小的热膨胀系数,有利于维持天线反射面的形状精度,避免因热变形而影响天线的方向性和增益。

2.2 新型复合材料的优势

新型复合材料相较于传统材料,其优势主要体现在轻量化、高强度、优异的电磁性能以及耐环境性等多个方面,这些特点使其在雷达抛物面天线等高性能设备中的应用越来越广泛。

首先,复合材料的密度通常低于金属材料,这使得它在减轻设备重量方面具有显著优势。在雷达天线的设计中,重量是一个至关重要的参数,天线的重量直接影响到系统的整体性能。复合材料的轻量化特性可以大大减轻天线的重量,从而减少对运载系统的负担,提升机动性并降低能源消耗。通过减轻天线的重量,复合材料为高效、灵活的雷达系统提供了重要支持,尤其是在动态和高机动性的操作中尤为突出。

其次,复合材料的强度和刚性在很多应用中超越了传统金属材料,这使得它能够承受更大的外部压力和风载荷。在恶劣气候条件下,如高风速或极端温度,复合材料可以有效保证雷达天线的稳定性与可靠性^[6]。特别是在一些高强度电磁环境下,复合材料的优异力学性能能够保证天线长期稳定运行,避免了传统金属材料在这些环境下可能出现的形变或损坏。新型复合材料的电磁性能也使其在雷达天线中得到了广泛应用。复合材料可以有效调节天线对电磁波的反射与吸收特性,优化天线的电磁辐射效率。许多复合材料能够在高频范围内表现出良好的透波性和低电导率,减少电磁干扰,提高信号传输的质量和效率。在雷达天线的应用中,这种性能优化可以大大提升天线的增益、分辨率和探测范围,确保雷达系统在复杂电磁环境中的优异表现。

3 新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用

3.1 轻量化设计与性能提升

雷达抛物面天线的重量直接影响其安装、运输和操作性能,尤其是在航空、航天领域,天线的重量往往成为决定系统整体性能的重要因素。为了提升系统的机动性和适应性,减轻天线重量是提升其整体性能的关键一环。新型复合材料,尤其是碳纤维复合材料,由于其独特的轻量化特性,成为减轻雷达天线重量的理想选择。碳纤维复合材料的密度相对较低,但在强度和刚性方面的表现却非常出色。其高强度、低密度的特点使得在不增加重量的情况下,天线能够保持或提升其结构稳定性和刚性。这种轻量化设计的引入,使得雷达天线在各种运载系统中具备更强的适应能力,可以更灵活地安装并减少对其他系统的负担,特别是在空间受限或对重量有严格要求的环境中更为显著。

此外,轻量化不仅有助于提升机动性、降低能源消耗,还提高了天线的抗震性能。在高风速、高温或其他极端环境下,复合材料的轻质特性可以有效降低天线因环境因素造成的损坏,提升了雷达系统的整体可靠性与适应性。

3.2 强度与刚性提升

雷达天线的强度和刚性对其长期稳定性和可靠性至关重要,尤其是在极端气候条件和高负载环境下,天线需要承受较大的外力和应力。新型复合材料,尤其是碳纤维增强塑料(CFRP),因其具有比传统金属材料更高的比强度和比刚度,成为雷达天线制造中的首选材料。与金属材料相比,复合材料在相同重量下提供了更高的强度,使得天线能够在更大的外部负荷下保持稳定形态,尤其是在暴风、高温等极端环境中。碳纤维增强塑料具有较高的抗变形能力,即便在大风、强震等条件下,天线的形状和性能也能够保持稳定,不容易发生变形或损坏,从而避免了雷达系统性能的下降。

此外,复合材料的良好力学性能大大提高了天线的抗撞击能力,尤其在恶劣气候或复杂环境下,复合材料能够提供额外的结构支撑,增强天线的抗冲击性,从而延长天线的使用寿命。与传统金属材料相比,复合材料在耐久性、长期可靠性和低维护成本方面具有显著优势,这使得雷达天线能够在更长时间内稳定运行,减少了系统的维护频次和运营成本。

3.3 电磁性能优化

新型复合材料在电磁性能上的优化作用同样是其在雷达抛物面天线中广泛应用的关键优势之一。复合材料的电磁特性可以通过调节其成分和结构来显著改善雷达天线的工作性能。特别是碳纤维和玻璃纤维等复合材料,由于其较低的电导率和特有的电磁特性,使得天线对电磁波的反射、透射和吸收特性得到了优化。这种优化能够有效提高天线的辐射效率,减少电磁波的损耗,进而提升雷达系统的性能。与传统金属材料相比,复合材料能够更好地减少电磁干扰和杂散信号,保证雷达信号的清晰度和质量,特别是在高频段和复杂电磁环境中表现尤为突出。采用复合材料制造的抛物面天线能够有效减少外界电磁干扰,保证信号的传输效率,提升信号的清晰度和准确性。此外,复合材料的层结构和复合配置设计还能够进一步优化电磁波的传播路径,提高天线的接收和发射性能。通过这种优化设计,复合材料可以提升雷达天线的增益、分辨率等关键性能,使得雷达天线在复杂电磁环境中

的表现更加出色,进一步提升雷达系统的探测范围和精度,满足高精度雷达要求。

4 结束语

新型复合材料在雷达抛物面天线中的应用为现代雷达系统的性能提升带来了前所未有的机遇,其在轻量化、高强度、高稳定性以及优良电磁特性等方面所展现出的优势。得益于复合材料可设计性强、比强度高、热稳定性好、耐腐蚀性强等特点,雷达抛物面天线在保持结构精度的同时,显著降低了整体重量,提高了设备在复杂环境条件下的工作稳定性和寿命。此外,材料的电磁特性优化也使得天线表面对电磁波的反射更加精确,有助于增强波束方向性、提升增益并减少副瓣,从而改善系统的探测能力和信号质量。尽管如此,复合材料在工程应用中仍存在一些亟待解决的问题。例如:某些高性能复合材料的制造成本较高、加工工艺复杂、界面结合可靠性需要进一步加强,以及长期服役环境下可能出现的材料性能衰减问题。这些挑战在一定程度上限制了其在更大规模领域中的推广应用。然而,随着材料科学的发展、制造技术的成熟、智能制造与精密成型技术的融入,复合材料的性能稳定性和经济性正不断提升。未来,复合材料将在雷达天线设计中扮演更加关键的角色,特别是在航空航天探测、气象监测、卫星通信等对高稳定性与高精度要求日益提高的领域,其独特优势将得到更广泛的认可。可以预见,复合材料技术的不断进步将推动雷达抛物面天线朝着更高性能、更高可靠性、更强环境适应性的方向持续发展,为雷达系统整体能力的提升提供坚实的材料基础与技术支持。

参考文献:

- [1] 张迪,陆希贤,刘充.一种小口径低副瓣抛物面天线设计[C]//中国电子学会.2023年全国天线年会论文集(上).北京无线电测量研究所,2023.
- [2] 王楠楠,陆满君,高昂卓,等.无源毫米波成像雷达准光路及聚焦天线设计[J].制导与引信,2023,44(02):41-49.
- [3] 潘加松,陈伟,王申,等.抛物面天线自动倒竖/展收机构设计[J].雷达与对抗,2022,42(02):39-43.
- [4] 张彦峰.抛物面式天线雷达料位计在料位测量中的应用[J].水泥技术,2021(05):60-61.
- [5] 陈传志,董家宇,陈金宝,等.空间大型星载抛物面天线研究进展[J].航空学报,2021,42(01):133-153.
- [6] 高洋.某多馈源雷达天线系统结构设计与实现[D].成都:电子科技大学,2018.

无人机遥感技术在水电工程边坡监测中的应用

杨丕铮

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730)

摘要 本文聚焦水电工程边坡稳定监测的重要性, 针对传统人工方式存在的效率低、危险系数高及信息获取局部等问题, 提出采用无人机遥感技术进行改进。通过研发一套集成动力飞行、传感器融合与数据解算的监测装置, 并在澜沧江流域大型水电站开展实地验证, 实验表明该方法能高效获取边坡表面信息、准确识别变形情况, 并实现潜在风险的提前预警, 从而显著提升监测效果与范围, 所生成的时间序列三维数据为边坡稳定性研究及智能化决策提供了有效参考。结合人工智能与多源数据融通, 可推动水电工程边坡管理向智能化、精准化方向发展。

关键词 无人机遥感; 水电工程; 边坡监测

中图分类号: TP242; TP7; TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.007

0 引言

水电工程坡体稳定对工程的安全性及环境的保护尤为重要。然而, 传统检测手段由于效率低、危险性高、覆盖范围不够等特点, 难以满足现实需求; 无人机遥感监测由于机动性强、精度高、成本低, 成为一种新型的监测方式。目前对此类内容研究尚少, 陈飞(2024)^[1]和张峰(2024)^[2]主要研究无人机在水利设施测绘中的广泛应用和效果; 胡泽理(2024)^[3]则针对雅砻江牙根一级电厂的水利用地图, 提出综合利用新技术可以提高水电工程用地调查的效果, 进一步表明该技术在信息收集、建模和判别变化等方面具有广阔前景和现实意义。因此, 本文主要通过叙述无人机遥感技术在水电工程坡体监测中的具体实施方案, 并利用不同

遥感数据以及智能分析技术进一步提高监测时效性、全面性、准确性, 从而为水电工程的安管理及预警提供参考。

1 无人机遥感监测系统与技术流程

基于无人机的边坡信息化检测系统能够满足对水电工程边坡准确度的检测要求, 并构成了系统化无人机遥感检测体系。无人机遥感检测体系包括无人机飞控系统、各类传感装置搭载负载、测站定位和姿态识别装置、地面控制台、专用的数据分析软件。从其技术路线出发, 旨在将野外数据采集、系统内人工智能识别与信息理解相结合, 建立从现实边坡至虚拟模型的整个系统闭环流程(见图1)。全方位的技术方案相较于传统方式有着极大的创新, 为实现边坡地貌信息

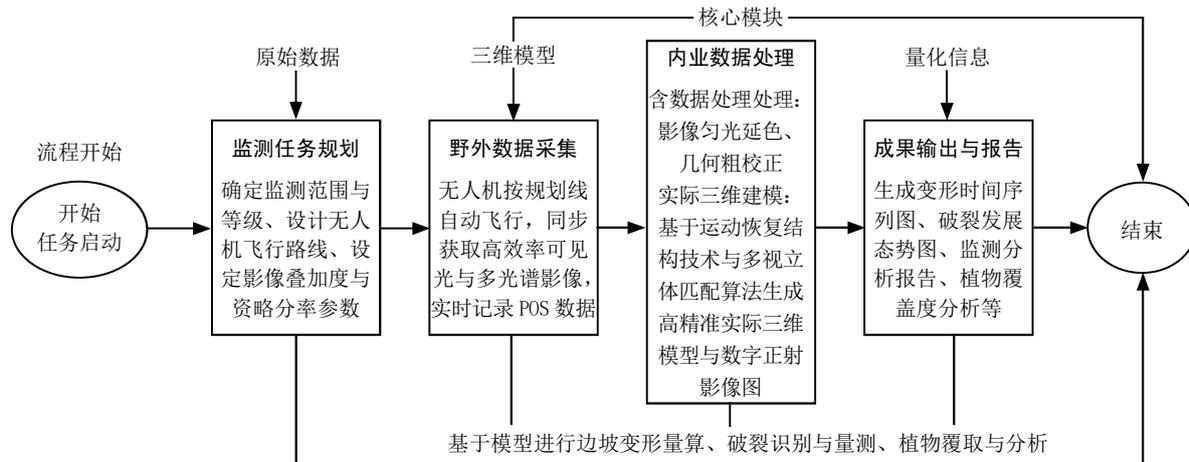


图1 无人机遥感监测系统与技术流程

作者简介: 杨丕铮(1994-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利水电工程。

捕捉快、准、实的量测提供了强有力的支撑^[4]。

无人机遥感过程是标准统一化和智能化的流水线工序。首先是科学地规划作业程序开始流程；其次是自动的信息获取；最后是利用一系列高级的计算方式得到深层次的信息。其可以用来量化工程决策，能够大面积地增强斜坡的监控水平，并且生成动态的三维数据，也能够用来辅助斜坡的稳定性、灾害预警等工程，推进水利设施安全管理实现现代化与智能化的飞速转型。

2 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中的应用案例分析

从2019年起，在中国西南部澜沧江上的一座大型水库（约 1.2×10^7 立方米）内的一个巨大滑坡体上，结合无人机航测技术和地基监测技术进行长期监测，定期通过高频次气象飞机获取厘米级精度影像及激光雷达点云数据：涵盖了一个超过5.6平方公里的复杂地区^[5]。在2022年的雨季之后，根据高分辨率的三维图像比较分析，工作人员迅速发现了新的边坡裂缝，并在接下来的三个月里观察到了它们的扩展，长度达到了8.5厘米并且向下移动了超过15厘米。此外，运用光谱数据反推的结果揭示出这个地区的表面存在异常的水分分布，表明了地下水流动加剧及不良地质条件发展的趋势性特征。加密监测至每周1次，同时利用AI技术实现裂缝时空变化的自动识别，辅助应急决策，指导施工单位采取修筑明沟等应急处理技术措施。同时，根据无人机数据进行下一步地质勘探钻孔选址优化，在对比传统勘察手段的情况下，此项技术可将险情发现到决策时间缩短约40天^[6]，形成了一条由风险确认—过程监控—预防评估的完整科技闭环链路。

如今该项成果已在锦屏一级、两河口等多个工程中得到应用，对提升水库区防灾减灾能力起到了积极作用。

3 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中应用的优势、问题与优化建议

3.1 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中应用的优势

相对于传统的人工巡检、现场作业方式，无人机监测技术提供了由大到小、静态到动态的高精度采集设备，替代了过去点状、离散式的被动安全检查模式，实现了全域、全时、全程智能监测（见表1）。在山区复杂的地形条件下，采用传统视频监测技术难以解决上述诸多难题，而多传感器协同控制技术和人工智能预警系统则能很好地弥补这些缺陷并为工程安全保驾护航^[7]。

无人机遥感技术具有全面的优势，已经成为一种代替传统检查手段进行辅助检查的技术，也是促进水电站边坡安全发展的创新技术。其优势为高效率、高精度、安全性高、成本低，在很大程度上解决了常规方法的空间跨度、连续观测时间和人身安全难以兼顾的难题。同时，提高了该项工作管理水平，并为早期风险发现、精准预警、科学防控等方面提供可靠的技术支撑，推动该项目建设边坡监测向智能化、精细化发展。

3.2 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中应用存在的问题

虽然采用无人机遥感技术开展水电站大坝边坡监测具有一定的优越性，但在实际应用中也存在一些困难，这些问题贯穿于无人机遥感技术的采集、处理、成果信息提取及应用全过程，并直接影响到精度、智能化以及辅助决策能力（见表2）。解决以上这些问题

表1 无人机遥感技术的优势

对比维度	传统监测方法的主要局限	无人机遥感技术的核心优势	带来的实际价值
作业效率与覆盖范围	依赖人工徒步，费时费力，覆盖范围有限	快速机动，单架次可完成数平方公里厘米级数据采集，效率提升数十倍	实现大范围高危边坡常态化普查，高频次监测成为可能
数据质量与维度	点状测量为主，数据离散，难以反映整体变形	获取高分辨率光学影像、三维点云，生成实景三维模型，毫米级形变分析	提供直观精准的全域可视化数据，识别早期微小变形
作业安全性与可达性	人员需进入危险区域，面临安全威胁	远程遥控，非接触式测量，无需进入危险区域	使高陡边坡等危险地段监测成为常规操作
成本与信息集成	人工成本高，数据格式各异，融合困难	综合成本更低，数据易与GIS、BIM平台融合	推动“空天地”一体化，提升管理效益和信息化水平

表 2 无人机遥感技术存在的问题

问题领域	具体技术挑战	潜在影响与当前局限
飞行平台与作业环境	复杂环境下飞行稳定性、通信可靠性及安全保障面临考验	可能导致任务中断、数据不全或安全事故，限制危险区域应用
传感器集成与数据质量	多传感器同步控制复杂，光照、植被等影响影像质量	影响三维模型精度，植被茂密区域地表信息提取困难
数据处理智能化程度	海量数据处理耗时，自动化程度低，微弱信息识别率待优化	制约监测实时性，依赖人工判读，难以快速提取预警信息
多源数据融合与机理融合	表面信息与 InSAR、GNSS 等数据时空协同融合困难	监测成果停留在表面现象，难以揭示变形机理，限制预测科学性
标准化与成果转化	缺乏全流程标准，成果对接决策系统困难	技术应用水平参差不齐，成果难以被工程管理部门标准化采纳

是实现该技术由可选变为可行、简单化及最优化的重要步骤，并有利于建立标准体系和广泛应用^[8]。

无人机遥感技术已从实验室研究走向应用和难点攻关，并且这些问题具有紧密联系和系统解决的特点，后续的工作应以进一步提高该技术的通用适应能力和智能解译能力为目标，并建立相应应用规范和技术评价体系，充分发挥无人机的优势，将边坡的安全监测手段由被动报警转变为提前预警，由表及里地探究问题的本质，从而更好地服务于水电工程的精品施工以及长久运行，提供更加可靠的科学依据。

3.3 无人机遥感技术在水电工程边坡监测中应用的优化建议

为增强无人机功能在特殊条件下的执行能力，需采用智能协同作业方式，普及适应恶劣条件下先进的无人机及无人机群监测技术，研究混合定位、仿地形避障等全天候全地形的数据采集手段^[9]；在信息管控上，借助 AI 来构建滑坡危险性样本库以及用于自动检测裂缝等特性的深度学习模型，并通过边缘计算机缩短处理时间；集成无人机、地面 SAR 等异构数据生成平台及地质建模以提高倾斜面变形预测能力；制定详细的技术标准，并建立系统接口，将无人机获取的结果纳入工程管理系统进行决策支持，实现技术的推广普及^[10]。

4 结束语

无人机遥感技术是水电工程边坡安全的必需性、高效性的监测方式之一，其工程实际应用证明了其具有提升检测效率和速度以及实现准确时间和空间分辨的优势。在发展性方面，该技术将更加专注于智能化和集成化方向，结合人工智能、互联网和多源遥感数

据研究复杂环境下信息的自动识别和自然灾害原理的智能分析等关键性问题，构建一套完整的集成实时感知—智能报警—原因分析的技术体系，进而促进水电工程边坡安全从被动防御式向主动预报预判式和智能化式转变，为水电工程标准化数字建模提供支持。

参考文献：

- [1] 陈飞. 无人机遥感技术在水利工程测量中的应用探究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(24): 179-181.
- [2] 张峰. 无人机遥感技术在水利工程测量中的应用分析 [J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(24): 154-156.
- [3] 胡泽理. 基于新技术的水电工程土地调查新方法研究: 以雅砻江牙根一级水电站为例 [J]. 资源与人居环境, 2024(07): 44-51.
- [4] 刘永强, 李俊成. 水利水电工程中施工技术及管理措施 [J]. 工程建设与设计, 2024(12): 239-241.
- [5] 邹锋. 遥感技术在水电站水土保持监测中的应用 [J]. 内蒙古水利, 2024(05): 101-102.
- [6] 杨雪茹. 无人机遥感监测技术在地质灾害调查的研究与应用 [J]. 世界有色金属, 2021(23): 157-159.
- [7] 马江河. 无人机航测在水利水电工程中的应用 [J]. 农业科技与信息, 2021(05): 79-81.
- [8] 陈凯明. 无人机低空遥感技术与人工智能技术融合发展 [J]. 通讯世界, 2025, 32(11): 143-145.
- [9] 李煜. 无人机遥感技术在农田水土保持动态评估中的应用 [J]. 农村科学实验, 2025(22): 59-61.
- [10] 曾俊飞. 无人机遥感技术在海滩垃圾监测中的应用研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(12): 70-72.

智能化技术赋能电力设备安装施工的实践探索

王樱霓

(浙江大有实业有限公司钱塘分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 在“双碳”目标引领下,我国新型电力系统建设加速,电力基建呈现规模化、复杂化特征,特高压工程等重点项目对施工精度与安全提出严格要求,传统安装施工模式已难以适配行业发展诉求。智能化技术为破解行业难点提供了有效路径,通过智能化调度系统、智能监测与检测、无人机与机器人应用、大数据与人工智能辅助决策及智能化安全管理等多维度实践,实现施工流程的自动化、精准化与协同化,显著提升施工效率、质量与安全水平,同时契合绿色施工与数字化转型趋势。

关键词 智能化技术; 电力设备安装; 智能监测; 无人机; 大数据

中图分类号: TP29; TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.008

0 引言

在“双碳”目标引领下,我国新型电力系统建设加速推进,电力基建规模持续扩大且技术要求不断提升,特高压工程、智能变电站等重点项目成为能源转型的核心支撑。与此同时,电力施工安全形势愈发严峻,强化施工安全管控、提升本质安全水平成为行业紧迫任务。在此背景下,智能化技术逐步成为破解电力设备安装施工难点的关键路径。例如:河北送变电公司在雄安复兴220千伏变电站、雄安500千伏变电站等工程中,通过BIM技术实现69 000余个螺栓精确安装、依托北斗系统达成施工“实时厘米级定位”,相关实践已通过数智化大赛验证了技术可行性与应用价值。

1 智能化技术与电力设备安装概述

1.1 智能化技术

智能化技术是以新一代信息技术为核心,融合传感感知、无线通信、数据处理、人工智能、北斗定位、数字建模等多领域技术成果的综合技术体系,其核心特征在于通过数据驱动实现作业流程的自动化、精准化、协同化与智能化,为传统行业技术升级提供核心支撑。

在电力工程领域,智能化技术的核心应用模块呈现出显著的场景适配性。物联网技术通过部署多类型智能传感器,实现对施工设备状态、作业环境参数、人员作业轨迹等关键信息的实时采集与联网传输,为施工全流程提供数据基础; BIM技术依托三维数字化建

模与参数化设计,将电力设备的设计图纸、技术参数、安装规范等信息集成于统一模型,支持施工方案的模拟推演与协同优化; 人工智能与大数据技术则通过算法模型对海量施工数据进行深度挖掘,实现进度瓶颈预测、安全隐患识别、资源配置优化等决策支持功能; 无人机与智能机器人技术凭借其灵活作业与高危环境适应能力,可替代人工完成高空巡检、精密装配、高危区域作业等任务; 北斗高精度定位技术则能提供厘米级的空间定位服务,为大型设备吊装、线路铺设等高精度施工环节提供保障。

1.2 电力设备安装

规范的电力设备安装能够为社会提供持续稳定的电能输送,适应多元领域的用电需求,同时有效预防因设备异常导致的各类安全隐患和经济损失。由此可见,电力设备的专业安装是确保整个供电系统高效运作的关键环节。要实现电力设备的精准安装,必须严格执行行业标准和技术规范; 选用专业工具和配套装置,提升装配效率,保证安装品质; 确保装配环境达到规定标准,包括适宜的湿度、良好的通风条件以及与可燃物保持安全距离等; 同时要兼顾后期维护的便利性,符合各项安全技术指标^[1]。在完成安装作业后,必须进行全面的检测和功能试验。电力设备的规范化安装对供电系统的稳定运行具有决定性影响。通过科学的设备选配、标准的安装环境、专业的装配工艺以及严谨的调试验收程序,能够确保电力输送的安全性和稳定性,从而全面提升电力系统的运行可靠性。

作者简介: 王樱霓(1993-),女,本科,助理工程师,研究方向: 电力设备安装施工管理。

1.3 智能化技术赋能电力设备安装施工的必要性

我国新型电力系统建设进入攻坚阶段，电力基建呈现规模化、复杂化、高端化的发展特征，传统电力设备安装施工模式已难以适配行业高质量发展诉求，智能化技术的深度赋能成为破解行业难点的必然选择。国家能源局数据显示，2023 年我国电网建设投资规模超 5 000 亿元，同比增长 8.5%，其中特高压、智能变电站等重点项目占比达 60%，此类工程往往面临施工环境复杂、精度要求严格、多专业协同难度大等挑战，传统依赖人工经验与二维图纸的作业模式，已无法满足厘米级安装精度与跨部门协同需求。

智能化技术赋能电力设备安装施工，使其在效率、安全、成本等层面均能有显著提升。能源转型背景下的绿色施工要求与行业数字化转型趋势，也对智能化技术赋能提出了刚性需求。随着装配式施工、绿色建筑理念的推广，需要智能化技术实现工厂预制与现场拼装的精准对接。

智能化技术不仅是解决电力设备安装施工现存难点的有效路径，更是契合新型电力系统建设、行业安全升级与绿色发展目标的必然选择。

2 智能化技术赋能电力设备安装施工的实践探索

2.1 智能化调度系统

智慧化调度系统能对施工现场的机械运行状况、施工进度、人员分布、气象变化进行实时采集，在此基础上运用数据融合与分析技术，精准预测出该项目的阻滞环节和延期风险，并在事前给出相应的解决方案。例如：当智慧化调度系统检测到某一个施工环节出现进度滞后的情况后，它可以自动对后续设备进行调度或是重排作业顺序，确保项目的建设不受影响；同时还能实时监测现场情况，根据人工智能技术预判可能出现的问题，做到预防性管控，降低事故发生率。

智能化调度系统是基于动态资源配置算法实现最优资源调度方案，可以按照实时利用率、人员技能匹配度、物资进场时效等多个维度自适应地生成最优资源调度方案，避免大型吊装设备等关键资源的空闲闲置浪费现象，还能够解决多专业间工序冲突问题。例如：特高压变电站设备安装中，可以协调变压器吊装的时间窗口、GIS 设备到货日期，在安排好起重机数量、施工人员以及安全员的前提下进行无缝衔接；可联动 BIM 三维模型、北斗定位系统等功能。当发现现场地质条件变化或气象预测发生重大风险情况时，可直接进行建模生成新路径及新机具位置配置，确保施工不受突

发事件影响而中断，提升对电力设备安装施工以及突发事件的应急响应速度。

2.2 智能监测与检测

应用智能监测与检测技术，改善设备安装调试、线路连接操作以及环境指标监控，确保工程质量达到设计标准，满足安全规范要求。各类智能传感装置涵盖了温度传感器、压力传感器、振动传感器、温湿度传感器、电流传感器、电压传感器等多种检测。采用无线传输网络及中央控制系统进行互联互通，并将采集信息实时上传至云存储计算处理平台，保证了检测结果的时效性和准确性^[2-3]。

针对电力设备安装的重要指标，如变压器就位偏差、GIS 设备法兰连接密封性等问题，可以通过激光雷达传感器结合位移传感器并应用机器视觉技术建立三维监测模型进行毫米级安装精度检测。高空作业、设备安装等环节实现“全流程无人化”，机器人自主完成塔材拼装、导线架设，人员仅负责远程监控。智能监测与检测技术能对整个施工质量进行全面管控，将监测数据与 BIM 模型关联，在每个组装过程中生成可追溯性的数据信息，包括设备参数、安装时间、操作人员、检测结果等一系列相关信息，不仅为项目的审查提供了数据支撑，也为以后的设备维护提供了精准的原始依据。同时，对于隐蔽工程如接线作业，可以通过红外热成像监测与电气参数实时采集相结合的方式实现自动识别虚接、错接等故障，显著降低后续运行过程中的风险隐患。

2.3 无人机与机器人技术

电力行业主要应用无人机进行高空巡检、线路检查及设备安装质量检测等工作。无人机携带高清摄像装置、红外热像仪对现场各方位影像资料及温度信息进行全面采集，并分析判断电力设施的物理缺陷和热力异常。对于高压线路检测来说，无人机按照预先设定好的航线对施工区域进行自主巡检，发现线路缺陷后向检修人员发出预警信息，可以有效规避传统人工作业高昂费用以及安全风险等问题。

目前机器人技术在电力工程安装中的运用主要是聚焦风险较高的工作环境，安装智能控制器，将机械手应用于变电所的设施组装与检修领域，完成高精度的机械装配、焊接以及电气连接操作^[4]。在科技联动及场景延伸上，在无人机应用领域不断拓宽的同时可以快速构建出建筑工地三维实景模型，并对机器人安装位置偏差进行精准测量，为施工调试提供有效参考依据；工业协作机器人则运用力控传感器和路径规划

算法,采用多机协同的方式进行大型设备模块化施工,在高海拔、高寒的极端施工环境中,其抗干扰性及持续作业能力远超前于人工,并可通过5G远程操控技术在安全位置下达危险工况指令,降低作业风险。

2.4 大数据与人工智能辅助决策

在工程现场,各类机械运行状态信息、作业人员的操作效率信息、现场环境变化信息以及机械设备实际作业情况等数据都通过物联网技术(IoT)实时采集,并将这些信息存入并计算到云平台上。这些丰富多元的数据流是AI模型的重要输入源,使人工智能系统能够基于历史信息及当前状态,预判建筑过程中可能存在的风险,实现对资源的合理配置,便于对管理决策提供数据支撑^[5]。具体而言,将项目进程以及材料使用数据相结合,智能系统能够借助深度学习技术预测特定施工节点的完工期限,实现人员与物料的最大化利用。另外,海量数据处理技术还能够对施工机械的运转参数分析挖掘,预知隐患,提前警示,关键在于将实时监测指标同既往检修历史记录比对分析,借助AI模型,使用模式识别算法发现设备运行过程中与历史问题相似的信号特征,推断设备状态,进行故障预判。

在施工过程中的进度管理环节,利用大数据技术和人工智能融合对工程项目的管理进行改进,在深度挖掘过往工程数据的基础上,AI模型能够现场作业的资源分配制定配置方案。AI系统可以通过以往的工作经验以及实时监测数据,给出最优的人力物力资源分配方案,既满足了项目时限的要求,又实现了最优资源配置。另外,智能调度平台还会综合考虑各工序的任务需求紧急程度以及时间节点等因素,制定科学合理的工作方针,减少资源浪费,提升整体施工效率^[6]。

2.5 智能化的安全管理

基于智能监测技术的安全管理措施可以动态监控施工作业的环境。各类传感装置持续采集包括氦气含量、硫化氢重要指标等各项数值,并将这些数据实时地通过无线网络传输至中央处理器处理。当检测到异常情况及时开启通风设施,将有害气体浓度降到安全水平,避免对人体的危害。

施工人员的安全管理在智能化技术应用方面取得了显著进展。在施工现场,采用智能防护装备保障作业人员安全。例如:作业人员佩戴GPS定位头盔,持续追踪人员的位置以及工作状态。实时数据会传输到后台服务器,一旦有人员进入危险作业区域,会立即触发预警机制并记录其作业时间及位置;在高压电气

设备操作区域,一旦出现未经允许的人员,系统会马上启动应急预案。强制要求操作者确认安全防护装备的佩戴情况。在实际应用中,在发现有人员误入高压危险区域时,系统会启动声光报警装置并关闭相关通道,规避触电风险。

为有效强化工地安全管理效能,可采用搭载高清摄像装置及环境监测模块的自动化巡检设备,在危险性较高的作业区域(如高温、高压环境)开展周期性巡查工作,并运用智能分析技术对采集数据进行即时处理,及时发现可能存在的安全风险^[7]。

3 结束语

智能化技术通过调度优化、精准监测、无人化作业、智能决策与安全管控等多维度协同应用,为电力设备安装施工破解了传统模式下精度不足、效率偏低、安全风险突出等核心难点,在施工全流程的自动化、精准化与协同化层面实现了系统性提升,其应用价值已在特高压工程、智能变电站等重点项目中得到充分印证。此类技术创新不仅精准契合了新型电力系统建设规模化、复杂化、高端化的发展特征,更响应了能源转型背景下绿色施工与行业数字化转型的刚性需求,推动电力基建从经验驱动向数据驱动、从人工主导向人机协同的深度变革。智能化技术在电力设备安装施工中的应用仍处于深化拓展阶段,未来需进一步强化多技术跨平台融合,完善数字化施工标准体系,提升极端环境下的技术适配能力,同时推动技术应用从重点工程向常态化施工场景延伸,实现规模化落地。

参考文献:

- [1] 车玉轩.自动化与智能化电气设备的适用性探讨[J].煤炭工程,2019,51(S1):145-147.
- [2] 李民.电力系统设备安装与调试技术分析[J].光源与照明,2023(07):228-230.
- [3] 江俊杰,胡军,马国明,等.数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J].高电压技术,2024,50(08):3271-3307.
- [4] 周荔丹,曹祖加,姚钢,等.泛在电力物联网的发展分析[J].现代电力,2021,38(02):119-128.
- [5] 戚颖.智能化施工技术在电网工程建设中的应用研究[J].新型工业化,2022,12(06):56-59.
- [6] 黄启明,杜佳节.电力设备安装与调试的技术探析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(10):200-201.
- [7] 刘畅.智能化监控系统在电力设备安装中的应用[J].电子技术,2024,53(04):320-321.

智能机器人在电力建设施工现场管理中的运用

陈 祥

(信阳华祥电力建设集团有限责任公司, 河南 信阳 464000)

摘 要 为解决电力建设施工现场传统管理存在的不足, 满足行业高质量发展所需, 本文立足智能机器人技术优势, 结合电力施工管理实际情况, 探索其在安全监管、质量控制、进度管理、物资管控方面的运用路径, 以期为电力建设行业智能化转型提供参考, 进而为能源基础设施高质量发展筑牢技术根基。研究表明, 智能机器人可通过自主感知、数据集成等功能, 助力管理转向“主动预判”, 有效提升管理效能、预防安全风险。

关键词 智能机器人; 电力建设施工现场管理; 安全监管; 进度管理; 物资管控

中图分类号: TP24; TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.009

0 引言

电力建设工程作为国家能源基础设施的核心组成, 具有作业范围广、安全风险高、技术要求严格等显著特征。传统施工现场管理依赖人工巡检、纸质记录、经验判断等模式, 存在效率低、隐患排查不全面等难点, 已难以满足现代化电力建设高质量发展的需求。随着人工智能、物联网、大数据、自动驾驶等技术的快速迭代, 智能机器人凭借其自主移动、精准感知、持续作业、数据集成等优势, 推动管理模式从“被动应对”迈向“主动预判”。基于此, 有必要依据电力建设施工现场的管理难点, 深入探索智能机器人在电力建设施工现场管理中的运用路径, 一方面提升工程管理效能、降低安全风险, 另一方面保障建设质量、推动电力行业高质量发展。

1 电力建设施工现场管理核心难点

电力建设施工中对智能机器人的高效应用, 恰恰反衬出传统管理模式的局限。面对复杂的施工环境、高强度的管理需求, 长时间采用人工管理方式, 逐渐暴露出不足之处, 这些问题在一定程度上影响着施工效率、工程质量, 更给安全管理带来新挑战, 具体体现在以下几个方面:

第一, 安全管理难度大。电力建设涵盖诸多高风险场景, 如高空作业、带电作业等, 人工巡查模式易受环境、生理极限等影响, 无法全天进行全方位监控与管理, 尤其对一些工作人员是否正确佩戴安全装备、是否存在违规行为等存在识别滞后情况, 进而埋下安全隐患^[1]。

第二, 质量管控精度不足。无论是电力设备安装、

混凝土浇筑, 抑或是线路架设等, 这些工序质量检测长时间采用人工测量方式、经验判断方式, 易存在数据偏差、检测标准不统一, 甚至难以精准追溯隐蔽工程的质量问题, 容易造成设备运行故障、工程返工等情况。

第三, 进度管理协同低效。施工现场汇聚施工队伍、设备、物资等诸多要素, 以往进度跟踪长期以来人工完成数据上报, 导致信息更新滞后、数据呈现碎片化。长期如此, 管理人员无法及时掌握施工进度、施工真实情况, 更无法在第一时间协调资源矛盾。

第四, 物资管理混乱。电力建设物资种类繁多, 所需数量较大, 若长时间采用人工盘点、人工记录出入库的方式, 不仅会出现物资丢失、领用混乱, 甚至会造成账实不符现象, 这些因素都会严重影响施工效率。

2 智能机器人技术的适配性

智能机器人已经全面融入移动机器人、机器视觉、激光雷达、边缘计算等诸多先进技术, 能为电力建设施工现场的管理需求提供全面支持。

第一, 自主移动能力。通过激光雷达、视觉导航等技术, 智能机器人技术面对非常复杂的施工环境, 也能自主规划出最佳路径, 有效规避现场障碍物, 一方面能实现全方位覆盖巡查, 另一方面无需人工参与^[2]。

第二, 多维度感知能力。智能机器人可搭载专门的设备, 如高清摄像头、红外热像仪、气体传感器等, 动态采集图像、温度等各项数据信息, 进而识别施工现场的潜在安全隐患, 还能第一时间发现质量缺陷。

第三, 数据实时传输与分析。智能机器人可结合 5G 通信技术, 将已经获取的数据信息, 精准上传到管理系统; 再利用边缘计算、AI 算法等, 对数据进行深

作者简介: 陈祥 (1990-), 男, 本科, 助理政工师、助理工程师, 研究方向: 电力工程安全管理。

层分析,及时发现异常,预警、预测现场管理趋势。

第四,持续作业能力。智能机器人采用电池供电,抑或是自动充电形式,可全天处于工作状态,突破人工巡检的工作时间局限,在保证工作质量的基础上提升管理效率。

第五,标准化作业能力。智能机器人可依据提前设置的程序、标准,严格有序开展作业,可防止人工操作产生的主观性、差异性影响,保障执行的现场管理工作规范、一致^[3]。

3 智能机器人在电力建设施工现场管理中的运用

在数字经济、新型电力系统建设融合背景下,电力建设工程具有更强的规模化、复杂化特点,传统施工现场管理模式已无法满足安全管控、质量把控、进度推进与物资调配的精细化需求。智能机器人从高空作业的安全巡查、隐蔽工程的质量追溯,从施工进度动态跟踪、海量物资的智能管控,正逐步渗透到电力建设施工现场管理的全流程。下文将围绕安全监管、质量控制、进度管理、物资管控四大核心场景,深入剖析智能机器人的具体运用路径与实践价值。

3.1 安全监管

电力建设施工现场,安全监管是一项重要任务,可应用智能机器人完成以下工作:

在人员安全管理方面,凭借机器视觉技术,智能机器人能动态化识别施工人员是否正确、规范佩戴防护装,如安全帽、安全带等;精准识别施工人员是否存在违规行为,如高空抛物、违规动火等。若发现违规行为,系统会第一时间发出声光警报,及时上传涵盖图像、位置、时间的违规内容,管理人员可进入管理平台进行干预^[4]。例如:变电站建设施工现场,智能巡检机器人可全面检查工作人员安全防护佩戴状况,精准识别率超过95%,将其与人工巡检比较,巡检效率高出3~5倍。

在设备安全监测方面,通过搭载一些专业设备,如红外热像仪、超声波传感器等,智能机器人可对变压器、开关柜等电力设备实施精准的绝缘检测、温度监测,能够及时发现设备存在的绝缘老化、温度过热等故障。同时,也可利用气体传感器,有效检测施工现场有无易燃易爆气体泄露,一旦超出标准会即刻发出预警,有效规避爆炸事故。以某一输电线路建设项目为例,智能巡检机器人就是利用红外线检测功能,发现电缆接头温度异常,有效预防设备烧毁事故,为整个项目挽回数百万的经济损失。

在环境安全预警方面,智能机器人能动态化监测施工现场的各项环境参数,如风速、湿度、能见度等,

再依据气象数据信息,提前设置台风、暴雨、高温等预警信息,方便施工现场安排工作进行参考。同时,智能机器人凭借环保监测设备,如噪声传感器、扬尘浓度检测仪等,动态监测施工现场的噪声分贝、PM2.5浓度等指标,若发现噪声超标、扬尘扩散等情况,系统会第一时间发出预警信息、记录数据,助力管理人员采取有效的管控策略,以此确保施工现场契合环保标准。

3.2 质量控制

在电力建设工程中,质量控制是重点,直接关系到电力设施运行安全。智能机器人可发挥自身集成化感知设备、高精度数据处理优势,高效完成施工工序检测、工程实体质量验收等工作,从本质上解决传统人工精度差、质控效率偏低等问题。

在施工工序质量检测方面,智能机器人能对一些关键工序,如混凝土浇筑、钢结构安装等构建自动检测体系^[5]。在智能机器人上搭载激光测距仪、高清视觉传感器,能有效获取施工关键参数,如混凝土浇筑期间,机器人能随时更新浇筑厚度、平整度、振捣实度等,严格管控数据误差,预防因人工测量产生的环境干扰、操作偏差;钢结构安装期间,可凭借视觉测量技术,详细核对安装坐标、设计参数,自动化检测关键指标,如垂直度、焊缝尺寸等,在0.5小时内就能完成全面检测,大幅提升工作效率,还能自动生成一份详细报告,防止纸质记录被篡改。

加强隐蔽工程质量追溯。针对地下电缆敷设、基础回填这些工序,在施工完毕后难以对其进行直观检查,人工检测易存在覆盖不全、追溯困难等问题,引入智能机器人后,可使用“智能机器人+360°全景摄像头、高清工业相机”进入作业制定区域,精准采集数据、录像,形成可视化参考内容。同时,利用集成RFID技术,精准读取材料电子标签记录型号、供应商数据,将可视化数据、RFID信息关联都上传至云端,进而创建全生命周期追溯链条。一旦后续发生质量问题,管理人员可进入平台获取所需数据,第一时间确定负责人员、查明问题所在,为后续整改提供可靠信息,真正从源头攻克隐蔽工程难监管问题。

3.3 进度管理

想要高效推进电力建设项目,做好进度管理非常关键,否则会影响工程交付周期、投资效益。智能机器人能利用自身机器视觉、AI算法、数据传输技术,动态更新施工现场人员、设备的相关重要数据,助理进度管理实现全流程数字化管控^[6]。

施工进度实施跟踪,应用智能机器人建立具有可视化特点的进度监测新体系。将其搭载高清摄像头、

AI 图像识别,精准锁定施工机械实际工作状况,如塔吊、起重器的工作次数、作业范畴、启停时间等信息;自动化统计施工人数、作业区域分布等,能够全方位感知整个现场施工动态。同时,根据预设施工计划,智能机器人可利用算法,将计划目标、实际进度进行对比,分析出工序完成率、实际偏差。例如:在风电项目建设中,智能巡查机器人利用图像识别技术,精准判定出风机基础浇筑、叶片安装等工序真实完成情况,自动生成一份数字化报表,不仅包含产生偏差的原因,还包含优化建议,管理人员只需进入系统就能全面了解项目实际状况,一方面提升决策效率,另一方面即刻调整偏差。

在资源协同调度方面,智能机器人起到数据枢纽功效。智能机器人能动态监测施工现场资源,如设备运行参数、物资库存余量、材料消耗速度等,第一时间将数据上传管理系统,构建最新资源台账^[7]。例如:施工区域缺少水泥、钢筋等物资,智能机器人会及时反馈信息缺少信息,根据运输路线提供最佳优化方案,帮助管理人员第一时间规划物资运输方案,杜绝出现停工待料现象;一旦塔吊、电焊机等发生故障,智能机器人能凭借传感器锁定异常数据,精确定位故障位置、划分故障种类,将故障信息推送维修人员系统,不仅节省故障排查消耗时间,还节省抢修时间,从本质上降低停工产生的影响。

3.4 物资管控

在电力建设项目推进过程中,物资管理作为基础保障,与施工成本、进度衔接关联紧密。因此,将智能机器人应用在以下方面,能彻底攻克人工管理效率低、追溯难等现状。针对智能物资盘点,可在施工现场仓库、堆放区设置针对性优化计划。在智能机器人上装置 RFID 读写器,方便机器人精准获取钢筋、水泥这些物资电子标签信息,还能利用视觉识别技术,有效核查物资数量、物质规格是否合格,自动产生一份涵盖账实差异分析的结果,协助管理人员完成动态账实管理。这种方式和人工清点、手工记录比较,智能机器人盘点的效率是人工的 5 倍以上,盘点误差率几乎不超过 1%。一方面节省盘点所消耗的时间,另一方面还节省人工成本,有效规避人工漏记、错记等情况^[8]。

在出入库自动化管理中,实现流程无纸化、智能化转型。在物资入库过程中,智能机器人可利用视觉识别、RFID 技术联动,精准获取物资型号、批次等数据,生成一份完整的入库录单,将记录存储到管理平台,有效删减人工登记、录入环节;在物资出库过程中,管理人员只需进入平台,输入领用指令,智能机器人

就可接受指令,进入目标物资存储区域,以此完成装卸、搬运工作,进而更新出库信息,确保系统信息准确,整个流程不需要人工参与。这种自动管理形式,可有效规避人工登记程序,预防人工操作产生的误差,使入库、出库程序都有详细记录。

物资运输跟踪场景,移动机器人主要承担现场物资转运工作,机器人能依据施工进度所需情况,自动规划出一条最优运输路径,安全、有序地将物资从仓库运输到施工区域。同时,利用定位技术,机器人可在平台更新自身运输轨迹、物资状态,后续预计运输完成时间等,管理人员只需进入平台就能随时了解物资运输情况,第一时间调节运输遇到的延误问题、拥堵问题,保证物资能满足施工需求,不仅保证了工序按时衔接,还能推动项目稳步实施。

4 结束语

智能机器人以技术创新为支撑,为电力建设施工现场管理提供了高效、精准、安全的解决方案,从安全监管到质量控制,从进度协同到物资管控,其规模化应用正推动电力建设行业向智能化、标准化、绿色化转型,为工程质量提升、安全风险防控和管理成本优化注入强劲动力。未来,应注重多机器人协同、AI 与数字孪生深度融合研究,充分发挥技术优势,构建更高效、安全、可持续发展的电力建设新格局,为国家能源基础设施高质量发展筑牢技术根基。

参考文献:

- [1] 魏传洪,李广贤,安旭,等.建筑外立面智能化施工机械的技术进展与应用研究[J].中国住宅设施,2024(S1):31-32.
- [2] 杨国强.加快智能建造产品技术应用 推动建筑业高质量发展[J].中国勘察设计,2022(03):33.
- [3] 孟庆禹,陈越,杨柳溪,等.建筑工程施工机器人现状分析、应用实例及发展探究[J].产业科技创新,2024,06(05):44-49.
- [4] 李继超,郭圣煌,孔刘林,等.施工现场火焰检测和预警机器人设计及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(04):141-146.
- [5] 刘娟,喻玮,郭晓芸.电力行业智能客服机器人识别准确率提升的关键[J].产业创新研究,2025(22):91-93.
- [6] 孔明,孙啸涛,吴蒙,等.基于 BIM 的智能放样技术在激光小镇钢结构施工中的应用[J].建筑技术,2023,54(02):145-148.
- [7] 邹少俊,屈璐.基于智慧建造的“华龙一号”钢筋施工技术优化研究[J].中国核电,2022,15(06):811-817.
- [8] 赵文广,王记涛.基于物联网的预制梁智能机器人养护管理系统建设[J].中外公路,2022,42(02):269-272.

市政道路工程智慧工地安全管理体系的构建与应用研究

孙哲

(南京睿艺环境工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 市政道路施工工期普遍较长, 施工环境多变, 传统的安全管理方式在危险预判、预防控制、人员管理等方面出现反应滞后、工作效率低、信息共享不及时等问题。本文以市政道路为例, 在智慧工地的基础上探讨如何解决上述问题。建立涵盖组织机构、管理制度及工作流程、信息管理系统三位一体的智慧安全管理体系, 采用智能化监控、人员认证、数据整合及分析等方式实现对施工安全风险的实时感知、隐患治理闭环管理和多主体协调决策, 以期为市政道路工程安全管理提供技术参考。

关键词 市政道路工程; 智慧工地; 安全管理体系; 风险管控; 信息化管理

中图分类号: U415; TP29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.010

0 引言

当前城市基础设施建设力度不断加大, 市政道路工程施工强度大、工序交叉多、安全风险源点多面广、变化频繁, 对安全管理提出更高要求。传统的依靠人工巡检和经验进行安全管理的方式无法及时了解风险情况, 隐患整改无法形成闭环, 对人员不规范行为管控措施单一, 已经不能满足当前工程安全管理的需要。近些年来, 智慧工地技术开始在工程建设中得到应用, 对安全管理工作模式提出了新要求, 可以通过信息化、数字化及智能化的方式将安全管理要素进行整合, 从而达到风险可视化、管理精细化以及决策科学化的目标。因此, 本文围绕市政道路工程实际, 研究智慧工地安全管理体系的构建方法与实施路径。

1 项目概况与安全管理难点

1.1 项目基本情况

某城市核心区市政主干道改扩建工程项目全长7.2 km, 按城市主干路双向六车道标准建设, 设计时速为60 km/h, 拓宽原有路面, 同时埋设雨、污管, 在路上设置交通红绿灯及路灯等相关设施。本项目处于市中心繁华地带, 沿线有大型居民区5处、交通枢纽3处, 施工区域与既有市政管线管网相互交错, 涉及深基坑开挖支护、大型机械占道作业、管线迁改保护等多类高危工序。现场施工高峰期作业人数达320人, 使用挖掘机、压

路机、起重机等大型机械设备85台套, 风险源呈条带状离散分布, 并受城市车流、沿线群众行为等因素影响, 对安全管理工作时效性、针对性、覆盖度提出较高要求。

1.2 传统安全管理模式下的主要难点

1.2.1 风险动态监控难

因本项目为线性施工特点, 各处风险源点多、线长、面广, 如深基坑边坡、高空作业平台、临电设备、管线保护范围等各类风险点多而散, 并处于不断变化中。传统的管理模式是采用人员定时巡检的方式进行管控, 容易造成巡检死角和频率不足等问题, 不能达到全方位全过程管控的目的。对于基坑沉降变形、围挡防护变形、临时用电超载等不易察觉的风险因素缺少有效监测方法, 风险状况信息获取不及时, 无法准确判断风险发展趋势, 经常存在风险预测不准、管控措施不能随风险动态变化等问题, 增加了安全事故发生的可能性。

1.2.2 隐患排查治理闭环效率低

传统隐患排查采用纸质记录、口头交代等方式进行, 排查信息传递路径长、容易产生失真现象, 并且隐患定级没有统一的标准, 造成隐患分级管控针对性较差。隐患整改过程中缺少对整改情况实时监控的工具, 无法明确隐患整改责任人, 隐患整改措施完成后, 还需要依靠人员到现场逐一验收确认, 操作复杂、效率低。有些一般隐患因为排查不到位、整改滞后演变

作者简介: 孙哲(1982-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

成重大隐患，并且隐患排查、整改、验收过程记录分散在不同系统中无法形成闭环管理流程，隐患治理可追溯性差，管控效率低。

1.2.3 人员行为监管手段不足

施工现场人员流动频繁、施工岗位繁多，传统的管理方式主要是依靠项目管理人员在施工现场巡查督导，无法有效实现对全员、全时段作业行为的管理控制。对于违章指挥、违章作业以及没有按照规定穿戴个人防护用品、特种作业人员无证上岗等不安全行为识别滞后，并缺少量化管控依据。缺少对岗前安全教育的有效考核方法，一些工人安全意识差、技术不到位就上岗作业，人员的不安全行为成为引发事故的主要原因。

1.2.4 多方协同与数据共享不畅

本工程参与方众多，包括建设单位、施工单位、监理单位、管线权属单位、交通部门等，在传统管理中，各参与方的安全管理数据分散在各单位各自的管理系统中，并未实现互联互通，信息传递主要依靠开会、发文、发函等形式进行，导致信息传递不及时，容易出现信息偏差现象。安全管控指令发布到执行反馈较为复杂、耗时较长，在发生突发事件后不能及时协同多方进行处理，无法利用各方力量形成安全管理合力，大大降低了整体的安全管理能力和事件应对能力。

2 智慧工地安全管理体系的构建与实施

2.1 体系总体架构设计

2.1.1 管理目标与核心原则

智慧安全管理体系建设以“风险提前防控、隐患及时治理、人员有效掌控、各方联动顺畅”为目标导向，利用管理手段和技术措施实现安全管理由“事后处理”

到“事前预防”的转变，“感性决策”到“理性分析”的转变，“人海战术”到“科技治本”的转变，从而减少事故的发生，提高隐患整改的速度，确保工程建设的安全可控。机制设计坚持以下原则：（1）匹配性，根据市政道路线性、交叉作业多的特点采用适宜的技术及智能化设备，并满足实际操作需求；（2）责任制，明确各部门职能，保证责任到人；（3）过程完整性，明确整个过程中各环节的任务安排，便于控制跟踪；（4）开放性，打破数据孤岛，建立数据共享、联动响应机制，提高统一管控能力^[1]。

2.1.2 组织架构与职责重构

基于智慧管理需求，重构“决策层—管理层—执行层—监督层”四级联动组织架构，明确各层级权责与协同关系，如图 1 所示。

决策层包含建设单位项目负责人、施工单位项目经理、总监理工程师，主要负责体系方案审批、资源配置、重大风险措施审查以及各方协调。管理层包含施工单位安全与技术部门、监理单位安全监督组，负责体系的日常运营管理、对智能监控的数据进行分析判断、对风险等级划分、隐患等级评定以及相应措施确定。执行层包括施工班组负责人、专职安全员、特种作业人员以及智能设备运维人员，负责现场巡查、上报隐患、执行措施。监督层由建设单位安全专员、第三方评估机构组成，负责体系运行考核、风险隐患治理质量复核、提出优化建议^[2]。同时设立跨主体协同小组，吸纳管线权属、交通管理部门专员，处理交叉作业协调与外部环境防控，形成“纵向分级管控、横向协同联动”格局。

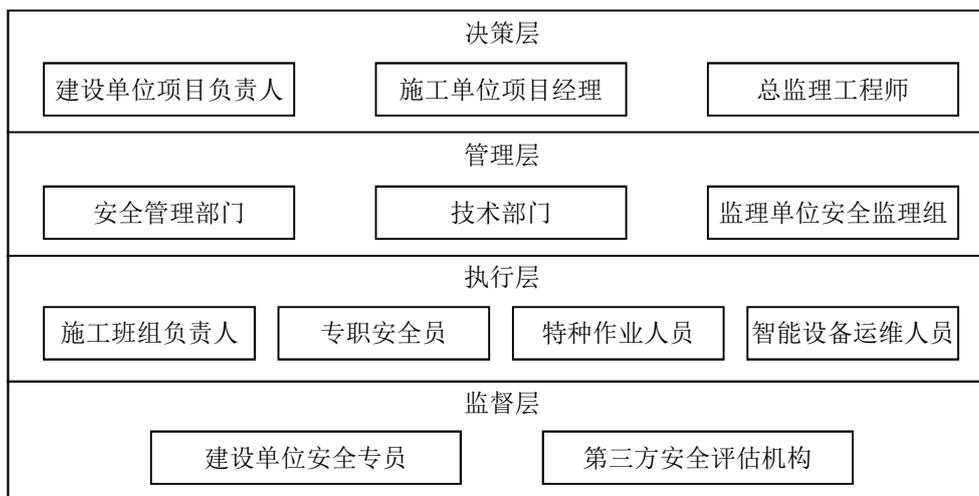


图 1 四级联动组织架构

2.2 体系构建的实施路径

2.2.1 管理体系基础建设与人员组织

管理体系的实施,需先做好基础条件建设工作,对项目安全管理工作现状进行调查摸底,并补充完善管理体系人员队伍,明确各级人员的工作内容及分工协作方式;同时针对相关人员组织开展智能化管理专题教育活动,就智能化管理相关知识、智能化终端应用方法以及规范程序等内容予以学习并考核,成绩合格者准予从事本职工作;建立基本的数据台账,如风险源清单、人员资质档案、设备配置台账等,夯实体系运行的基础管理及人员基础^[3]。

2.2.2 技术工具与管理流程融合

根据施工现场特点布设智能终端,在深基坑、高边坡、高空等危险部位设置视频监控、沉降监测等设施,配置人员实名制闸机、移动端巡检APP等装置。构建智慧安全管控系统,完成智能终端连接及业务数字对应,将风险识别、隐患排查等业务纳入系统,贯通业务信息流,保证信息系统和业务紧密结合,达到业务数据及时收集、准确传递及快速响应。

2.2.3 体系试运行与持续优化

选取典型施工段落进行1~2个月试点运行,成立工作组对实施情况进行监控,并听取各级单位的意见、建议,分析程序的便捷性、适用性和管理的有效性,总结存在问题,改进工序环节、调整机械配置及操作方案,细化相关管理制度措施,在确认有效后再加以推广应用。加强动态完善,分析评估运行情况,不断强化体系适应性和有效性。

2.3 关键管理机制建设

2.3.1 基于智能监控的风险分级管控机制

依托智慧安全管理平台构建风险分级管控核心,结合视频、传感等设备的数据信息,建立风险动态监管模型。对深基坑沉降量、临时用电载荷等数据进行实时采集,并与设定的安全临界值进行比对,确定风险等级后自动发出报警信号,将重大风险直接推送给决策层管理人员,较大及以下风险分别推送给相应的管理层次人员^[4]。建立分级分类管控措施清单,明确各等级风险巡检频率、管控人及处置时间,形成风险“监测—预警—管控—销警”管理闭环。

2.3.2 全员参与的隐患排查与闭环治理机制

隐患排查与治理构建“全员上报、分级审核、限期整改、复核销号”的闭环机制,依托移动端APP实现隐患排查数字化。明确各岗位隐患排查责任与范围,作业人员可实时上传隐患信息及佐证材料,系统自动

分类流转^[5]。管理层线上审核定级,明确整改责任主体与时限,整改过程实时反馈,监督层线上线复核,合格后归档销号,形成隐患治理全流程可追溯链路,激发全员安全管控积极性。

2.3.3 人员实名制与安全行为积分管理制度

以实名制为基础,整合闸机、视频AI分析技术,建立人员安全行为积分体系。人员入场完成信息备案与资质审核,培训考核合格赋予初始积分,作业中通过AI监控捕捉违章行为,自动扣除对应积分,积分低于阈值暂停上岗并强制复训。积分情况与绩效挂钩,高积分人员给予激励,形成“准入—监测—考核—激励”全链条人员管控机制,规范作业人员安全行为。

2.3.4 多方协同与数据驱动的决策机制

决策机制构建多方共享的数据平台,将建设单位、施工单位、监理单位等相关方的管理数据汇总到平台上,在安全管理上做到实时共享。同时形成定期召开数据研判会议的习惯,根据数据平台进行风险趋势、隐患治理效果等方面的研判并出具相应的报告,辅助决策者做出决策,当发生安全事故或者紧急情况的时候,会自动向相关的各方发出预警提醒。启动联合处置机制,落实各参与方应对职责和程序,提高应急决策能力和联防联控能力。

3 结束语

本研究基于市政道路项目的特点,通过优化组织架构、管理制度及工作流程,提出智慧工地安全管理体系的构建与实施。在此基础上,利用视频监控技术和大数据分析等信息化手段,可对施工现场的安全管理工作进行科学化、智能化管理,从而达到风险实时监控、隐患整改跟踪管理和人员操作全过程监管的目的。未来,需完善人工智能及大数据应用,提高系统的匹配度,在保障城市道路工程项目安全管理水平有效提升方面发挥更好的作用。

参考文献:

- [1] 李汉林.基于智慧工地平台的市政工程施工安全管理体系构建与应用[J].住宅与房地产,2025(32):74-76.
- [2] 黄春辉.市政道路智慧工地的安全监督与管理研究[J].产品可靠性报告,2025(09):185-187.
- [3] 李辉.建设工程中的智慧工地安全管理体系建设[J].城市建设理论研究(电子版),2025(05):46-48.
- [4] 程冠霖,刘辉,王丹.智慧工地安全管理等级体系研究与应用[J].石材,2024(01):31-33.
- [5] 徐修全,肖鸿博,杨晓海.基于智慧工地的信息管理系统应用研究[J].中国战略新兴产业,2025(33):23-25.

煤矿机电系统中皮带运输设备的自动化改造与应用研究

吕江龙

(河南天安十三矿煤业有限公司, 河南 许昌 461700)

摘要 煤矿机电系统中的皮带运输设备承担着原煤、矸石和物料输送的主力任务, 其运行效率直接关系到企业生产效率与安全风险水平。在智能矿山建设加快推进的背景下, 运输系统的自动化升级成为煤矿技术改造的关键环节。依托 PLC 集中控制系统、多点传感网络与变频驱动技术, 可有效构建皮带运输设备的智能控制体系, 实现运行状态的实时监测、异常工况的预警联动以及能耗的动态优化。自动化改造不仅限于技术替换, 更在于推动煤矿运输系统向智能、高效、集成的方向转型。

关键词 煤矿机电系统; 皮带运输设备; 自动化改造; PLC 控制; 智能监测

中图分类号: TD63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.011

0 引言

煤矿运输系统是机电一体化环节中的核心部分, 其中皮带机作为连续作业设备, 在井下煤炭产出、转运和装车环节中发挥着基础支撑作用。矿井运行环境复杂, 设备启停频繁, 运输链长且点多线广, 人工操作不稳定因素叠加, 增加了生产组织的困难程度。伴随智能化建设目标逐步落地, 皮带运输系统被纳入重点改造范围, 其自动化、集中化和智能化水平成为衡量煤矿现代化程度的重要指标。运输系统的升级不仅关系到生产效率, 还影响作业安全、人员配置和运维方式, 具有显著的现实意义与改造价值。

1 煤矿机电系统中皮带运输设备自动化改造的现实动因

1.1 传统控制模式存在的典型障碍

传统皮带机控制模式呈现三个显著障碍。其一, 运行信息不可实时获取, 设备状态依赖人工巡检判断, 跑偏、打滑、堆煤等异常无法被及时识别, 形成潜在安全隐患。其二, 启停控制分散在多个点位, 操作流程冗长且协调性不足, 在多段皮带联运条件下更容易出现指令不同步的情况, 运输链连续性受到影响。其三, 运维模式缺乏数据支撑, 检修更多依托经验决策, 导致故障预判能力较弱, 轻微机械异常会发展为整体停机事件, 此类限制直接降低了运输系统的稳定性, 对安全生产和产能组织造成不利影响。

1.2 政策推动与技术演进形成的升级动力

随着智能矿山建设进入实质推进阶段, 政策端对运输系统的升级提出更明确的要求。《煤矿智能化标准体系建设指南》对采掘、运输、通风等环节的智能化水平提出具体指标, 其中明确指出运输系统应实现“集中控制、实时监测、联动保护”的建设目标。此类标准体系不仅限于推动控制系统改造, 更在于打通信息采集、数据传输与智能响应的整体链路。在技术层面, PLC 集中控制、智能传感网络、边缘计算平台与远程通信技术日趋成熟, 为复杂运输系统构建智能调度平台奠定基础。煤矿对效率、安全与降本的多重需求叠加, 使皮带运输设备的自动化升级成为机电系统改造中的关键环节^[1]。

2 皮带运输设备自动化改造的系统技术路径构建

2.1 集中控制系统的集成优化路径

在煤矿日常运营的过程中, 利用更多的自动化技术, 可以进一步提高煤炭的生产能力和生产质量^[2]。在煤矿运输系统的自动化改造中, 集中控制是所有技术环节的基础模块, 其核心任务在于将各段皮带机、清扫装置、张紧装置以及沿线监测点纳入统一调度体系。系统以 PLC 为主站控制器, 构建分层结构, 使现场分站负责就地执行, 主站负责调度协调。井下各分站之间依托工业以太网或环网光纤构成骨干通信链路, 确保高湿、多粉尘条件下仍能维持稳定传输。运行指

作者简介: 吕江龙 (1988-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 机电运输。

令、传感数据、故障信息可在毫秒级完成交互，使调度人员能够在地面平台实时观察运输链的运行状态。集中控制界面通常采用图形化布局方式，将每一条皮带的运行方向、速度、电流变化、传感器状态以动态图标标注，调度人员可在界面上执行启停指令或调整逻辑参数。系统还可设置启停顺序表，在启动前自动执行各环节的状态确认，避免因局部积煤、托辊卡滞或张紧不足影响整线运行。部分煤矿还在集中控制中加入联动逻辑，如溜煤眼料位升高时自动减速皮带机，或在下一段皮带未准备就绪时禁止上游皮带启动，以减少煤流冲击。在运行安全方面，集中控制平台一般与故障保护模块深度融合，系统一旦检测到跑偏、打滑或电机过载，可自动切断对应皮带的驱动回路，并将报警信号推送至主控室大屏。为增强系统可靠性，可以采用双PLC架构或主备冗余模式，使核心控制逻辑在故障条件下仍能保持稳定运行。系统还可设置操作权限分级，将井下就地操作与主站调度进行区分，避免误操作造成运输链停摆。集中控制的作用不仅限于实现统一指挥，又在于构建可扩展的控制框架，使皮带运输系统具备与通风、排水、提升等其他机电环节协同的能力。可以将皮带机运行曲线与采煤工作面产量信息进行关联，使运输速度与来煤节奏保持一致，减少堆煤现象^[3]。此类集成模式使运输链从传统的机械运行单元转变为能够参与生产节奏调度的系统单元，为煤矿智能化运行奠定基础。

2.2 多点智能传感与运行状态监测网络

自动化改造的核心在于增强系统感知能力，而分布式传感网络正是构建智能运行体系的基础单元。在皮带运输系统中，需根据线路结构和工况分布，在关键部位布设多类传感器节点，常用参数包括跑偏、打滑、温度、速度、电流、张紧力、煤流量、物料料位等，这些数据构成了设备运行状态的动态映射。传感器安装位置通常设在驱动端、改向滚筒、头尾部张紧装置、中部托辊集中段及易积煤区域，确保信号采集具备覆盖性和代表性^[4]。为保证数据质量，应选用具备工业防护等级的耐煤尘型传感器，通信方式以RS485、CAN总线或工业以太网为主，在重要节点可配置无线冗余链路提升稳定性。各类数据由就地采集终端进行初步处理后上传至集中控制平台，在控制界面上形成实时可视化信息。调度人员可依托传感图层掌握皮带张力、物料分布、滚筒温升等细节，增强远程监控判断的准确性。系统还可设定参数阈值，在出现连续异常数据时主动触发声光报警，或联动执行急停指令，防止故障扩散。部分煤矿可以构建以传感数据为基础的状态

预警模型，依托历史运行数据训练出不同工况下的特征曲线，建立正常状态识别区间。当实际参数出现偏离时，系统会对偏移幅度、持续时间和变化趋势进行综合判定，判断是否构成早期故障信号，此类结构不仅限于实时监控，又在于实现趋势判断与主动识别，使运维从反应式向预测性过渡，增强运输系统的安全保障能力。

2.3 电机变频调速与能效自适应控制

煤矿皮带运输设备常年处于长时间运行状态，不同班次、不同采煤强度下所对应的物料输送量存在显著差异。在自动化改造过程中，应在皮带驱动系统中引入变频控制装置，使其根据负载变化实时调整运行速度，形成按需调节、动态响应的能效控制机制。变频调速系统一般由变频器、速度反馈装置、控制模块及人机交互界面构成。在运行过程中，煤流量传感器采集的物料密度数据可作为控制参数输入，结合皮带张力与速度变化趋势，控制逻辑自动计算出最适转速。系统可设定速度上限与下限区间，在运输高峰阶段维持稳定高效输出，在煤流不足或间歇段适度降速运行，从而使电机工作点始终处于高效区间。调速过程中的升降速斜率由程序控制，避免冲击或急变带来的机械冲击。部分煤矿引入了AI边缘运算模块，将变频调速与运行历史数据融合，建立预测模型以提前判断各时段负荷波动趋势。系统根据预估结果提前调整运行策略，减少频繁启停或速度突变，增强设备运行的柔性^[5]与稳定性。此外，在变频调速系统中叠加软启停机制，可降低启动电流，缓解电机与减速器的冲击磨损^[5]。

2.4 联动保护与故障预警机制设计

自动化改造中应嵌入联动保护与预警模块，实现设备状态识别与应急响应闭环。系统可在关键节点预设控制逻辑，当检测到跑偏、打滑、物料堆积、过载等信号时，根据响应等级自动触发局部停机、联动断电或全线保护。此类逻辑链路由PLC内部中断机制或外部紧急控制回路完成，不依赖人工判断。运行保护机制应与传感器数据形成联动，避免误报与漏报并存的现象。在非突发异常中，系统会首先以变频降速或阶段性报警提示形式介入，让运维人员留有应对缓冲。若异常信号连续并出现趋势加重，系统将切换为强制停机模式，确保设备与人员安全。不同等级的联动策略可按风险等级设置执行权限，使系统既具备灵活性，又不失刚性边界。为增强识别精度，部分煤矿已接入图像识别模块，对皮带撕裂、托辊脱落、积煤堆料等典型外观异常进行视觉判断。图像信号通过边缘计算节点本地识别后，将识别结果作为外部触发量纳入控

制系统,实现多源识别、联合判断。系统界面中还可集成故障追溯功能,记录异常发生时的运行参数、时序指令与干预动作,为后期运维分析与策略优化提供数据依据。联动保护的核心价值不仅限于故障处理,更在于构建安全防线,使设备运行具备预警能力与自恢复条件,增强系统的抗扰性与稳态恢复能力。

3 基于典型煤矿的皮带运输自动化改造实践应用分析

3.1 运输系统改造背景与原有运行状态

某地年产 300 万吨的井工煤矿,在智能化建设初期,运输系统仍采用分段操作与人工值守的运行方式。主运输皮带线总长近 2 400 米,由 4 组主驱动构成,控制台分别设置于井下不同点位,启停需人工手动确认。运输过程中,指令下达存在时差,设备运行无法形成协调逻辑,煤流断点时有发生。调度室仅能依托通话装置获得状态信息,缺乏实时参数支撑,远程监测与集中控制能力几乎为空白。井下设备受潮湿、粉尘等环境影响频繁故障,尤其在夜班或雨季运行阶段,跑偏、打滑、托辊温升等异常未能及时识别,极易形成局部堆煤或胶带损伤。运维模式以定时巡检为主,设备状态全凭经验判断,检修记录无数字留痕,工作重复、响应迟缓成为常态。为响应集团推进机电系统智能化管理的战略部署,该矿将皮带运输系统列入首批自动化改造工程试点。

3.2 集中控制系统与智能监测模块的集成建设

改造工程由矿机电中心牵头实施,改造路径以“构建集中控制—布设传感节点—引入智能调速”为三大环节。在井下沿线架设工业环网光纤,控制信号与运行数据统一接入地面调度平台。四组皮带驱动单元分别配置 PLC 控制模块,实现统一启停逻辑,并设定启停顺序、自检确认与异常响应程序。调度端配置可视化操作界面,运行状态、参数曲线、故障报警可在一屏展示,调度员可直接远程干预。监测系统布设 34 组传感节点,分布于驱动滚筒、改向托辊、头尾部落料点等部位,传感类型涵盖速度、张力、电流、温升、煤流量、打滑与跑偏状态。图像识别模块部署于关键断面,实现胶带撕裂、托辊脱落、积煤溢出等非参数信号的边缘识别,识别结果与 PLC 信号融合,形成多元协同判断机制。变频器根据负载状态动态调整电机转速,降低无效能耗,并缓解启停时的扭矩冲击。系统设置故障响应逻辑,当跑偏持续 10 秒未恢复,则自动停机并发出报警;若传感器检测温升异常且煤流无明显变化,则执行变频降速,待煤流平稳后恢复正常

工况。各段皮带启动前,系统会自动执行空载确认与信号确认,减少因张紧力不足或设备未联锁而引发的误启动。

3.3 运行效果与管理机制的协同优化成效

改造完成后,皮带运输系统稳定性明显增强。系统上线首季度,运输中断事件同比下降 64%,单次处理时长从平均 12 分钟缩短至不足 4 分钟。电机运行负载更加平稳,功耗下降 15% 以上,电能利用率进一步优化。在运行效率方面,因启停顺序被统一调度控制,班均运输量较改造前增长 10.4%,系统故障造成的物料堆积事件几乎消除。在运维机制方面,人工巡检强度显著压降。原本需 3 人现场值守的运行模式,改为 1 人轮岗+调度远控模式。系统每天自动生成运行日志、异常分析与维护建议,代替人工登记。托辊、清扫器与张紧装置的更换周期从“计划换”转为“状态换”,半年内托辊更换数量减少约 35%。调度平台集成的历史回溯功能支持异常数据再分析,为后续扩展 AI 预测模型提供数据积累基础。该项目作为集团内部运输系统智能化改造样板,被纳入设备运维改革试点范畴,并逐步推广至回风巷皮带与采区辅运系统。

4 结束语

煤矿机电系统的自动化改造是行业发展的关键方向,皮带运输设备在此类改造中承担着连贯生产与保障安全的核心作用。依托集中控制、智能感知与自适应调速等技术,使运输环节具备更强的协同能力与运行稳定性。自动化体系的建构不仅限于设备层面的技术增强,还在于重塑管理逻辑,使运行、维护与调度形成数据驱动的联动结构。未来的运输装备将在预测性维护、智能调度与全流程数字监管的支持下形成更具韧性的运行结构,为行业高质量发展积累更深的技术支撑。

参考文献:

- [1] 曾义.自动化技术在煤矿机电设备中的应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(05):142-144.
- [2] 吴涛,张勇.煤矿机电运输系统中的自动化技术运用[J].化工管理,2023(12):73-76.
- [3] 任富强,李刚,康宇全.煤矿机电运输系统中的自动化技术分析[J].新型工业化,2022,12(08):76-79.
- [4] 李云.自动化控制在煤矿井下皮带运输系统中的应用[J].能源与节能,2021(10):196-197,200.
- [5] 陈国华,马志鹏.探究煤矿机电运输系统自动化技术及其发展[J].冶金管理,2020(11):74-75.

住宅建筑智能化工程中智能安防系统施工的技术优化与质量管理

唐庆

(南京泽利建设工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 在智慧城市与智能住宅理念不断深化、住宅建筑智能化发展推动智能安防系统广泛应用的背景下, 针对智能安防系统施工过程中存在的设备安装不规范及系统调试不完善等问题, 本文以提升施工质量与系统稳定性为目标, 围绕设备安装及系统联动调试等关键环节, 提出一系列技术优化措施并构建全过程质量管理体系, 以期有效提升系统运行效率和工程验收合格率提供参考。

关键词 智能安防系统; 施工技术优化; 质量管理; 住宅建筑

中图分类号: TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.012

0 引言

智能安防系统作为住宅建筑智能化工程的核心组成部分, 其施工质量对住户生命财产安全及系统长期稳定运行有直接影响, 施工过程涉及多个技术环节与工艺细节, 施工单位实际操作中常因设备类型多样、系统联调难度大面临诸多挑战。为提升住宅智能安防系统建设质量, 有必要从技术层面优化安装流程与调试策略, 并在管理机制上建立更系统化的质量控制标准, 以实现工程效率与质量双提升、保障建筑智能化水平稳步提升。

1 智能安防系统施工的技术要点分析

智能安防系统在住宅建筑中涵盖火灾报警系统、声光报警设备、灭火装置以及电源电缆等多个子系统, 施工过程需要对设备精度、安装位置与系统响应进行综合控制。火灾报警系统通常包含烟雾探测器、温度传感器和火焰监测装置, 不同类型的探测器需安装在不同高差空间, 安装高度一般控制在2.5米至3.5米之间, 同时须避开送风口与强电干扰区域。声光报警设备的施工需要配合主控平台完成地址编码与信号回路配置, 每个回路不应超过20台终端设备, 布线应采用屏蔽双绞线以减少信号干扰。灭火系统中的消防栓与灭火器安装位置需结合疏散路线布置, 保持操作面无遮挡。电源系统作为联动系统运行的基础, 其施工中需完成分路设计与独立供电回路敷设, 线缆布设作为智能安防系统稳定运行的物理基础, 其路径规划和

敷设效率直接影响后期系统响应的及时性和维护操作的便利性。各子系统的联动调试环节要求构建以模块为单位的闭环测试流程, 系统稳定性与响应时效需满足住宅智能化验收标准, 在功能联调阶段需统一使用兼容性测试工具完成火警、故障与控制指令的实时验证, 施工过程的技术控制直接影响系统的集成效果与使用寿命^[1]。

2 智能安防系统施工的技术优化路径

2.1 传统施工方式存在的问题分析

在智能安防系统施工实践中, 设备安装阶段存在明显的误差控制不足, 常见问题有安装位置偏离设计图纸预定点位, 部分高空安装点存在支架倾斜与垂直误差, 影响探测角度与覆盖范围。由于缺乏严格的施工节点复核机制以及统一编号制度, 接线过程中常出现端子接错或导线反接, 增加了返工时间。在实际巡检记录中, 项目中存在设备点安装误差或接线错误, 均由手工安装和编号制度不严导致。线缆布设阶段问题表现为路径规划混乱, 不同弱电系统间交叉干扰严重, 桥架利用率低下。以某项目为例, 同一吊顶段出现三组以上重复敷设路径, 额外消耗线缆长度接近85米, 增加物资成本和工时。线缆编号主要依赖人工标签与文档对照, 效率低下的同时还容易存在错号与漏号, 后期排查故障时也需反复核对, 增加耗时。调试阶段问题更加突出, 多子系统并行调试依赖工程人员逐项测试, 缺少模块化管理与标准脚本, 调试过程平

作者简介: 唐庆(1981-), 女, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑智能化。

均用时超过 4 天，且联动逻辑一致性低，系统频繁出现响应延迟、信号漏传等故障，特别是在火警联动门禁与语音系统环节中问题最为集中，稳定性差距明显。

2.2 智能安防系统施工技术优化措施

设备安装方面可通过制定一体化标准流程强化管控，将选型、布点、编号与安装纳入统一施工模板^[2]，安装高度、支架偏差与端子接线均在模板中预设误差控制限值。通过采用标准化安装流程和智能校准工具，可显著减少设备定位误差，避免因手工操作导致的安装偏离，接线后由图纸复核小组逐点签字确认。线缆布设优化主要体现在路径前置规划与数字模型仿真，通过 BIM 系统建立桥架结构模型，预演线缆走向与节点布置，形成节点编号清单，并按布设段进行分批编号打印及预制线缆包发放。在某高层住宅项目中，采用分批打标与集中发放方式后，同等长度线缆编号时间从原来的 40 分钟压缩至 15 分钟，路径重复段减少至 1 条，桥架布设密度提高明显。系统调试阶段则全面引入模块化闭环测试流程，将火警、门禁、语音及照明子系统按逻辑功能划分为五类单元，每类单元采用自动脚本加载及模拟信号触发测试。统一使用可视化联动界面完成参数设定与反馈结果展示，并建立系统日志自动生成及分类储存机制，响应时间均控制在 4 秒内，减少因手工测试遗漏导致的误判。

2.3 优化措施实施后的效果分析

优化措施在实际工程中展现出显著成效。以某项目为例，在设备安装阶段，错装点数量由初期的 13 个下降至 2 个，支架安装合格点比例提升显著，工人单日作业点数增加至 42 点。线缆布设效率在该项目中体现最为明显，采用预制发放与信息化编号方案后，同栋楼敷设总工时从原先的 23 小时缩短至 15 小时，重复路径长度从 85 米减少至 18 米，节约成本超过千元。系统调试环节在联动一致性方面表现稳定，火警信号响应时间由平均 6 秒缩短至 2 秒，系统调试周期由原先的 4 天缩短至 2 天。表 1 为某住宅项目智能安防系统施工优化前后关键数据对比。

表 1 智能安防系统施工优化前后关键数据对比表

项目环节	优化前数据	优化后数据
设备安装误差点数	13	2
单栋线缆布设工时	23 小时	15 小时
重复布设长度	85 米	18 米
火警响应时间	6 秒	2 秒
调试总用时	4 天	2 天

表 1 显示，在安装与布线两个环节中，优化措施大幅提升了施工效率与准确性，设备错装点显著减少，作业稳定性提升。线缆敷设时间减少了 8 小时，降低了重复布线的材料浪费。在系统调试方面，火警响应时间缩短至原来的三分之一，系统调试总用时减少一半，证明模块化测试与自动化联动管理在提升系统运行效率与响应连贯性方面效果显著。

3 智能安防系统施工的质量管理体系

3.1 建立分阶段的质量控制标准

住宅智能安防系统工程涉及设备采购、布线施工、系统安装、联动调试与综合验收等多个环节，各环节之间存在显著的技术边界与管理接口。质量控制体系的构建应紧扣施工周期节点，明确每个阶段的验收标准与评价方法，形成闭环式管理路径。在施工准备阶段，需要完成图纸深化审查、施工方案评估与施工班组技术交底，确保技术要求与现场实际条件达成一致；材料设备进场需进行形式审查与抽检复核，涉及的控制要素包含设备品牌型号、电气性能参数与资质合规性；施工过程中的设备安装与线缆敷设应分区域设立质量验收工序，设定关键点检表，实施分项验收机制，杜绝未验收通过便进入下一阶段施工^[3]。

系统调试与验收阶段的质量标准制定，应在满足国家规范要求的基础上，结合工程项目具体场景设定功能性、稳定性与兼容性评估指标。各类调试内容按照功能模块划分调试单元，采用标准化测试脚本进行参数校验与逻辑响应测试，调试结果需录入项目数据库并由工程师签章确认。系统验收过程应开展联合评审机制，由建设单位、设计单位、施工单位与监理单位共同参与，围绕探测器灵敏度、联动响应准确性、摄像头覆盖范围、数据存储稳定性等方面进行多角度复核，确保功能闭环完整。图 1 所示为智能安防系统施工质量控制流程示意图，明确了从材料管控制到竣工验收的各阶段控制要点，有助于工程质量管理由结果导向向过程管理转变。

3.2 强化施工全过程的质量监督

智能安防系统作为集成度较高的智能建筑子系统，其施工过程包含大量专业接口与弱电控制节点，施工质量的波动容易引发系统运行的不稳定。施工全过程质量监督需打破传统阶段性检查模式，建立覆盖工前、工中与工后的三段式监管机制，并将各工序标准化为具体指标。在布线阶段，由项目部质检组联合监理单位设立固定巡视频次与抽查制度，规定线缆绑扎间距控制标准，避免线缆热积累与后期检修困难。每日完

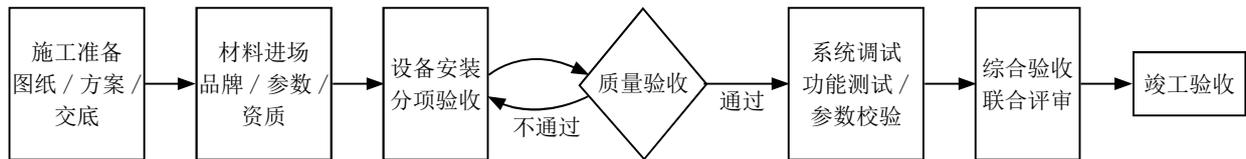


图1 智能安防系统施工质量控制流程示意图

成任务需在质量管理平台内进行任务上传与节点验收记录，管理系统自动分配待检批次并生成追踪编号，便于问题追溯与分责。

设备安装阶段的监督工作重点集中在设备的安装精度、定位偏差与接线规范。需严格检查设备安装位置与设计图纸的一致性，确保安装的水平度和垂直度符合要求，保证固定牢固、连接正确；监督线缆敷设的整齐度、弯曲半径及标识清晰度，避免交叉损伤。系统调试阶段使用模拟信号发射器进行报警逻辑测试与联动响应验证，每次测试记录响应延迟、状态变化日志与回传数据准确率，其中故障类问题处理设定响应时间不超过24小时且复检需由项目总工签字；质量监督体系结合视频记录、照片标注与二维码工单方式实现可视化溯源管理，以保证监管信息的完整性与实时性并有效提升问题发现与处理的及时性^[4]；布线阶段除标准化巡检外，还需加强线缆接口防护措施，以避免后期维护时出现接触不良，同时利用红外检测技术实时监控线缆温度变化及及时发现潜在热积累问题；设备安装时严格按照设计图纸复核，确保每个位置符合安装标准，避免因安装误差影响系统性能。

3.3 完善系统竣工验收与文档管理

施工阶段结束后，智能安防系统需经历结构完整性核验、功能响应测试与运行稳定性监测等一系列竣工验收程序。系统的交付不仅涉及设备是否运行，更关系到各子系统之间的逻辑协同与环境适配程度。竣工验收流程需组织专人对火灾报警、视频监控、门禁联动、照明控制等功能模块进行逐一检验。火灾报警系统验收应涵盖探测器探测范围核实、信号延迟时间记录与报警覆盖区域比对，抽测不少于每层2个区域。视频系统验收重点为图像清晰度与夜间红外功能响应，在走道与出入口区域设定特定观察点，每个点位应连续采集不少于15分钟监控数据。门禁系统联动测试中需检验异常信号下的开关控制逻辑，并检查各出入口刷卡响应与系统回传记录是否一致。

文档管理工作作为系统交付不可或缺的组成部分，其完整性与规范性决定后期运行保障与维护效率。项目文档应包含设计变更记录、施工日志、隐蔽工程影

像资料、调试报告、设备清单与操作手册六大模块，每类文档应按照系统模块划分存档逻辑，每个文件建立唯一编号标识并生成PDF与原始格式两种版本。管理系统采用分权限设置与双重备份机制，所有资料存储于本地专用服务器与远程云平台，满足数据安全与容灾需求。竣工图纸要求反映实际布线走向、设备编号与接线方式，图纸编号与设备编号保持一致，便于定位与查询。验收结束后，施工单位应对全部资料进行移交，建设单位与物业管理方完成文档核对与数字平台接入，形成闭环交付体系，实现从建设到运营的技术资料无缝衔接^[5]。竣工验收时，应根据项目实际需求增加系统的多角度测试，确保设备在不同工况下均能稳定运行。在文档管理中，应严格制定设备维护的时间表与记录，特别是对于关键设备，制定详细的维护计划，便于后期管理和操作。

4 结束语

在住宅建筑智能化快速发展的背景下，围绕智能安防系统施工技术与质量管理两大核心维度展开优化、以分阶段质量控制为基础并辅以全过程监督与标准化验收体系的智能安防系统，其施工质量直接影响整体系统运行效果与住户安全体验。在系统调试中建立稳定可靠的响应机制，可有效构建结构清晰和执行闭环的工程质量保障体系。未来应在技术与管理双重支撑下不断推进，为住宅建筑智能化工程提供更加坚实的安全基础与运行保障。

参考文献：

- [1] 蒲宏伟. 实验室智能安防管理系统的设计与实现[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2025, 27(04): 30-36, 69.
- [2] 谢志岳. 智能安防系统在老旧楼宇改造中的应用[J]. 通讯世界, 2025, 32(11): 197-199.
- [3] 孔维生, 方贵明, 梅海波. 基于大模型技术的安防系统智能运维应用探析[J]. 中国安防, 2025(11): 66-69.
- [4] 周建才, 涂宇轩. 高校智能安防保卫系统软件设计与开发技术[J]. 软件, 2025, 46(10): 150-152.
- [5] 徐方辰, 柏文玮. 基于多源数据融合的智能安防监控系统设计与实现[J]. 办公自动化, 2025, 30(20): 21-23.

某水库心墙坝坝壳地震液化措施探析

张晓云, 马 杰, 刘 欣

(山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要 针对心墙坝坝壳地震液化问题, 本文以诸城市牛台山水库为例, 上游现状砂壳粉土质中细砂部分在 7 度地震情况下存在地震液化破坏问题, 为保证大坝的整体安全, 须对上游砂壳粉土质中细砂部分进行抗震加固处理。通过采用挤密砂桩法对坝体液化问题进行抗震加固处理, 运用 Geo Studio 软件对加固后的大坝进行了边坡稳定分析, 在一定程度上验证了挤密砂桩法在处理心墙坝坝壳地震液化问题中的有效性。

关键词 地震液化; 加固措施; 挤密砂桩法; 边坡稳定; 心墙坝

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.013

0 引言

由于大坝上游坝壳粉土质中细砂存在液化可能性, 坝体液化后造成的后果会引起坝坡的“流滑”失稳, 导致大坝丧失挡水功能。因此, 抗震加固处理是不可或缺的重要方面。以诸城市牛台山水库为例, 采用挤密砂桩法加固处理地震液化问题, 运用 Geo Studio 软件的 SLOPE (边坡稳定计算模块) 对其加固后大坝进行坝坡稳定分析计算, 从而验证所采取的加固措施抗震效果的有效性。

1 工程概况

诸城市辛兴镇山东村境内的牛台山水库属中型水利工程, 总库容 1 140.3 万 m^3 , 以防洪为核心功能, 兼具供水、灌溉及生态补水效益。工程等别 III 等, 主要建筑物级别分设 3 级、4 级, 库区地震基本烈度 VII 度, 地震动峰值加速度 0.15 g。

水库建成于 1967 年, 大坝为粘土心墙坝, 坝长 550 m, 坝顶高程 88.2 m, 最大坝高 15.2 m, 坝顶宽 5 m, 坝顶设有防浪墙, 墙高 1 m; 粘土心墙顶宽 1.8 m, 顶高程 87.6 ~ 87.8 m, 坡比 1:0.5, 坝壳采用粉土质中细砂填筑; 迎水坡坡比 1:3.0, 采用浆砌石护坡, 背水坡坡比 1:2.5, 采用草皮护坡。

大坝上游坝壳粉土质中细砂经标准贯入锤击法、相对密度法综合判别, 存在液化的可能。坝体地震液化后会引发坝坡的“流滑”失稳, 导致大坝丧失挡水功能^[1], 应该采用可靠的工程措施^[2], 解决水库大坝上游坝坡安全隐患, 确保其安全运行。

2 抗震加固措施

2.1 加固方案比选

由大坝地震液化分析可知: 上游现状砂壳粉土质中细砂部分在 7 度地震情况下存在地震液化破坏问题, 针对坝体液化问题初步拟定翻压、挤密砂桩、翻压结合挤密砂桩三种加固方案进行比选。

2.1.1 方案一: 翻压方案

对上游坝坡液化区粉土质中细砂重新翻压, 翻压时将原砂壳挖除后分别堆放于坝后, 按设计断面逐层填筑并碾压密实, 翻压后相对密度要求不小于 0.8。翻压方案见图 1。

2.1.2 方案二: 挤密砂桩方案

对大坝上游壳液化区采用挤密砂桩法加固, 使砂壳颗粒重新排列, 减少孔隙, 固结密实, 提高砂壳的相对密实度、抗剪强度和抗液化能力, 使坝坡满足稳定要求。该方案的核心作用机制为依托桩体挤密效应及施工过程中的振动作用, 实现桩周土体密实度的提升, 从而提高土的抗液化能力。为避免对心墙造成扰动, 振冲范围选定为死水位以上, 且距离心墙 1 m 以外的范围, 振冲填料选用砂砾料, 振冲加固后相对密度不小于 0.8。

砂桩桩径为 0.4 m, 桩距 1.5 m, 正方形布置, 桩底高程需要入非液化层 0.5 m, 回填料采用级配好的中粗砂。挤密砂桩方案见图 2。

2.1.3 方案三: 翻压结合挤密砂桩方案

综合考虑地震液化工况、施工难易程度等因素, 拟定以兴利水位 83 m 为分界线, 采用翻压结合挤密砂桩方案, 具体方案如下:

作者简介: 张晓云 (1992-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

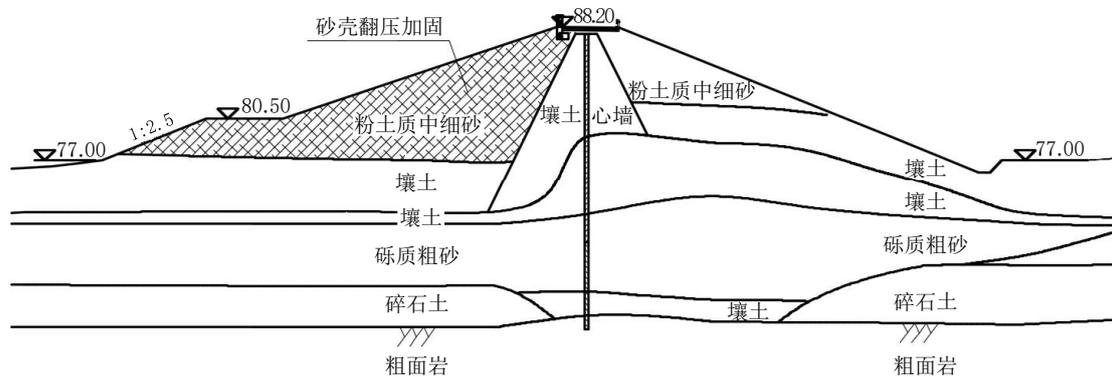


图1 翻压方案示意图

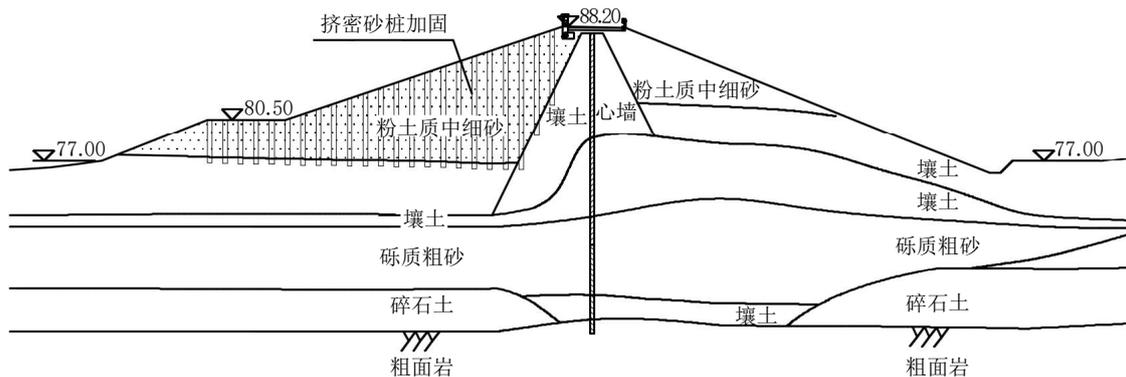


图2 挤密砂桩方案示意图

对大坝高程 83 m 以上的上游坝坡液化区粉土质中细砂重新翻压, 对高程 83 m 以下的上游坝坡液化区采用挤密砂桩法加固。砂桩桩径为 0.4 m, 桩距 1.5 m, 平均桩长为 5 m, 回填料采用级配好的中粗砂。砂桩平面布置采用正方形布置, 桩底高程需要入非液化层 0.5 m。翻压结合挤密砂桩方案见图 3。

2.2.4 结论

三种方案的优缺点如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 翻压方案虽然节省投资^[3], 但施工作业面大, 开挖量大, 施工条件要求较高, 且遇极端天气时坝坡稳定有一定风险性; 振冲方案需要多次设置工作平台, 施工工序较复杂, 工期较长, 临时工程投资较高; 翻压结合振冲方案施工较为灵活, 便于施工, 造价较低。因此, 从经济^[4]、技术的角度, 建议采用翻压结合振冲紧密砂桩方案。

2.2 振冲挤密砂桩设计

本工程坝壳振冲处理区域设置于大坝上游坝坡, 单桩施工进尺控制在 1.2 ~ 4.5 m。振冲施工前需完成场地预处理整平, 确保起重机、装载机及机动翻斗车

等设备通行作业条件。振冲处理范围内的地下埋设物与空中障碍物须彻底清除, 若因特殊情况难以清除, 应该在设计图纸及现场对应位置精准标识。

施工前应选取具有代表性且便于施工与检测的区域开展振冲试验, 依据试验成果确定水压、供水量、成孔速度、填料方式、单位孔填料量、密实电流及留振时间等关键施工参数。工程完工后 7 天内, 需组织坝体加固效果检验工作, 并同步提交完整的检验资料。

振冲挤密砂桩施工工艺流程为: 孔位定位→吊车吊装振冲器就位→开启供水阀门并启动振冲器→振冲至设计标高→分层下料并自下而上分段振密→全孔加固成桩后转移至下一孔位。

在设备选型方面, 选用 ZCQ-30 型振冲器作为核心振冲设备, 配套 14 kW 离心式水泵提供作业用水, 填料作业由机动翻斗车协同完成, 振冲器的起吊设备采用 10 t 履带式起重机。

2.3 技术要求

1. 填料应选用级配好的非液化粉土质中细砂, 并且填料速率应与沉管的提升速率相适应。

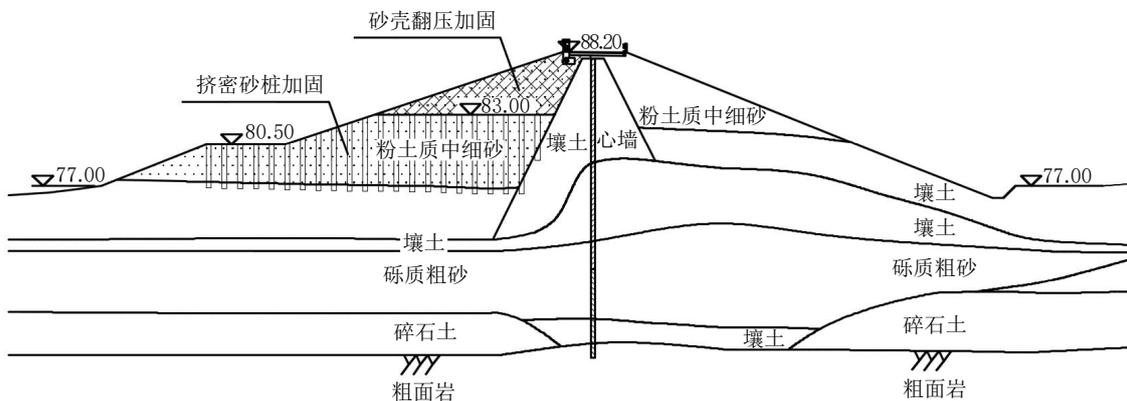


图 3 翻压结合挤密砂桩方案示意图

表 1 坝壳抗震加固方案比较

方案	优点	缺点
翻压方案	施工工艺简单，技术可行，施工技术易控制，施工质量易保证，临时工程投资较小	需要较大的施工场面，施工期较长，如果遭遇超标准洪水，工程施工进程与坝体结构安全均将面临威胁，客观上存在相应安全风险
振冲方案	施工期内的工程风险显著低于翻压方案，且施工活动受汛期的制约程度更小；施工过程无需开展大规模土方倒运作业，相较于翻压方案可有效缩短工期；同时该方案的处理成效更为理想	上游坝坡为 1:3，无法施工，施工中需从坝脚开始多次设置工作平台，施工期较长，技术要求高，须专业施工队伍
翻压结合振冲方案	结合了翻压与振冲的优点，同时翻压区域也为振冲提供较大的施工平台，减小临时工程投资	振冲施工对技术水平要求严格，工序流程相对复杂，需由具备专业资质与施工经验的队伍负责实施

2. 施工前应对大坝不同部位进行施工性试验，合理确定桩距、填料量、沉管时间、提升与挤压时间等施工参数^[5]。

3. 坝体上游砂壳翻压采用挖掘机将工作面上的土料开挖，用于振冲施工平台填筑，振冲施工结束后再将土料回挖至翻压工作面；压实采用拖拉机分层碾压；大坝翻压所缺土料外购解决。

3 大坝边坡稳定分析

本次边坡稳定计算采用 GEO-Studio 软件中的 Slope 边坡稳定计算模块，边坡抗滑稳定性分析，采用简化毕肖谱法进行分析计算。在上游水位为正常蓄水位 83 m，下游水位 76.12 m，在Ⅶ度地震工况下，计算上游坝坡的安全系数为 1.941，大于最小安全系数 1.15。

经计算，坝体采取抗震液化加固后，上游坝坡稳定安全系数满足规范要求。

4 结束语

挤密砂桩法通过改善砂壳密实度与抗剪强度，有效降低了心墙坝坝壳的地震液化风险。本研究创新点

在于结合工程实际优化施工参数，并通过数值模拟验证加固效果；局限在于未充分考虑极端气候对施工的影响。在后续研究中还需进一步研究多因素耦合作用下的加固效果优化，提升技术适应性。

参考文献：

- [1] 余云安. 水库沥青混凝土心墙坝受力响应研究[J]. 地下水, 2025, 47(05): 281-283.
- [2] 谭嘉蓉, 沈振中, 王观琪, 等. 特高砾石土心墙坝初次蓄水非稳定渗流特性分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2025, 43(07): 100-104.
- [3] 王晨浩, 刘柳, 李骏. 高沥青混凝土心墙坝坝体安全监测分析[J]. 四川水利, 2025, 46(03): 30-36.
- [4] 张承宗. 水库大坝黏土心墙风料坝型填筑质量控制[J]. 工程建设与设计, 2025(10): 228-230.
- [5] 熊堃, 杨晓红, 李麒. 强震作用下覆盖层上沥青混凝土心墙坝动力分析[J]. 人民长江, 2024, 55(S2): 263-268.

基于岩体结构特征的崩塌防治 锚杆施工工艺研究

杨 健

(四川省第十一地质大队, 四川 达州 635000)

摘 要 锚杆支护是崩塌防治的重要手段之一, 其有效性高度依赖对岩体结构特征的精准识别与其适配性施工工艺。本文以雅安市宝兴县灵关镇青山坪崩塌治理工程为研究对象, 系统分析该区灰岩边坡岩体结构特征, 提出分级差异化锚杆设计施工工艺; 重点阐述了基于岩体破碎程度的锚杆分区布设密度、自由段与锚固段长度确定方法、岩体破碎剧烈区段跟管钻进技术应用、注浆控制要点。工程实践表明, 该工艺有效提升了锚杆与岩体的协同工作性能, 明显增强了边坡整体稳定性。

关键词 锚杆支护; 岩体结构; 崩塌防治

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.014

0 引言

雅安市宝兴县灵关镇青山坪一带属典型灰岩陡坡地貌, 此类灰岩陡坡地貌在构造与风化双重作用下, 使得岩体结构面发育、完整性不良。而在岩体结构加固过程中采用常规化的强支撑等加固方式, 不能达到复杂岩体结构强度要求, 不仅会导致锚固力下降, 还会产生材料浪费的情况。近年来, 岩土工程领域日益强调“地质适配”理念, 主张支护设计与施工应紧密响应岩体结构特征。在此背景下, 亟需构建一种以岩体结构精细解译、施工参数动态调整为基础的锚杆支护技术方式。

1 工程概况

雅安市宝兴县灵关镇青山坪崩塌体位于省道 S308 改建工程规划线东侧, 属典型高陡灰岩自然边坡。前期勘查表明, 该边坡岩体受构造与风化作用影响, 节理裂隙发育, 岩体完整性差异明显。本文依托该工程, 深入剖析岩体结构特征对锚杆设计与施工的关键影响, 提出一套“岩体结构识别—锚杆参数分区—精细化施工控制”的技术体系, 利用锚杆支护的科学性与可靠性对节理裂隙发育、岩体完整性差异明显的崩塌体进行有效防治。

2 工程区岩体结构特征分析

2.1 地层岩性与构造背景

青山坪崩塌区出露地层主要为泥盆系中统养马坝组 (D_{2y}) 灰岩, 岩性坚硬, 呈薄至中厚层状, 块状构

造, 项目区位于宝兴背斜南东翼, 受小关子断裂与双石断裂夹持, 构造应力集中, 岩体节理裂隙发育; 岩层产状陡立, 优势产状为 $170^{\circ} \angle 85^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 层面近于直立, 与边坡走向 ($250^{\circ} \sim 270^{\circ}$) 呈切向关系, 对边坡整体稳定性影响较小。

2.2 结构面发育特征

现场调查与三维激光扫描揭示了边坡岩体主要发育两组优势节理。

J1 节理, 产状 $70^{\circ} \sim 85^{\circ} \angle 25^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 逆向坡面, 间距 0.3 ~ 2.5 m, 闭合或微张, 结合一般, 主要起切割作用。

J2 节理, 产状 $250^{\circ} \sim 260^{\circ} \angle 48^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 顺向坡面且倾角小于坡角 ($70^{\circ} \sim 85^{\circ}$), 为控制边坡稳定性的主导不利结构面, 属外倾卸荷裂隙, 易在降雨、地震等诱因下贯通失稳。此外, 风化裂隙呈网状不规则发育, 尤其在坡面浅表层, 形成厚度 2 ~ 6 m 的卸荷松弛带, 局部岩体呈碎裂状。

2.3 岩体完整性分区

依据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013), 结合岩体结构面组合、岩层厚度及现场揭露情况, 将边坡划分为两个岩体结构分区^[1]。

AB 段, 岩层厚度 0.1 ~ 0.4 m, 岩体较完整, 结构面结合一般, 岩体类别为 III 类; BC 段 ($9-9' \sim 14-14'$), 岩层厚度仅 0.05 ~ 0.15 m, 节理密集, 岩体

作者简介: 杨健 (1984-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 地灾施工。

破碎，结构面结合差，岩体类别为Ⅳ类，该分区结果直接决定了锚杆设计参数的差异化取值。

3 基于岩体结构的锚杆差异化设计

3.1 锚杆参数分区设计

根据勘查成果及《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[2]，青山坪边坡灰岩天然重度 28.3 kN/m³，饱和重度 29.0 kN/m³，结构面粘聚力 C=115~130 kPa、内摩擦角 $\phi=32^\circ\sim 35^\circ$ ，岩体与锚固体粘结强度标准值为 900 kPa。结合岩体完整性分区(Ⅲ类~Ⅳ类)，为确保锚杆有效穿越潜在滑裂面并锚固于稳定岩体，据此作为锚杆参数分区设计的力学依据。根据岩体结构分区及边坡分级(共 8 级)，确定锚杆参数。

3.2 自由段与锚固段长度确定

1. 自由段。根据勘查资料，边坡岩体因构造与风化作用形成明显分区。Ⅲ类岩体区松弛带厚度约 2~4 m，锚杆自由段应完全穿越潜在滑动面及卸荷松弛带，并在此基础上预留不少于 1~2 m 的安全冗余长度；Ⅳ类岩体区岩层薄、节理密集，松弛带厚度为 5~6 m，自由段长度取不小于 8 m。综合考虑滑面深度、岩体破碎程度及施工安全裕度，本工程锚杆总长按 6~11 m 分级设置，其中自由段占比显著。

2. 锚固段长度。锚杆长度由自由段与锚固段两部分构成，其设计需紧密结合青山坪边坡岩体结构特征及潜在破坏模式。锚固段长度依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)要求，按一级边坡抗拔安全系数 2.6 进行验算。

$$l_a \geq \frac{KN_{ak}}{\pi \cdot D \cdot f_{rbk}} \quad (\text{锚固体与地层的锚固长度}) \quad (1)$$

$$l_a \geq \frac{KN_{ak}}{n\pi d f_b} \quad (\text{锚杆与锚固砂浆的锚固长度}) \quad (2)$$

以上公式中， l_a 为锚固长度(m)； K 为锚杆抗拔安全系数，一级工程取 2.6； N_{ak} 为锚杆轴向拉力值 70 kN；

D 为锚固段钻孔直径，取 0.11 m； d 为钢筋直径，取 0.025 m； n 为钢筋根数，取 1； f_b 为钢筋与砂浆间的粘结强度设计值，取 2 400 kPa； f_{rbk} 为岩土层与锚固体的粘结强度标准值，取 900 kPa。

经计算，当锚固段长度为 3.0 m 时，可满足岩体与锚固体间粘结强度、钢筋与砂浆间握裹力的双重控制要求，确保锚杆在极限荷载下不发生拔出或滑移破坏，故锚固段统一 ≥ 3.0 m。

最终确定锚杆参数分区及长度设计如表 1 所示。

4 锚杆施工工艺

4.1 钻孔工艺

1. 常规钻进。该工艺适用于Ⅲ类岩体区。采用潜孔锤干钻法作业，钻孔前先核对锚杆孔位标记，调整钻机倾角至设计要求^[3]。钻进过程中控制钻速为 0.5~1 m/min，确保孔径稳定控制在 110 mm。成孔后立即采用高压风清孔，直至孔内无岩粉、碎屑排出。

2. 跟管钻进。该工艺专门针对Ⅳ类破碎岩体区。施工单位采用 40 型全液压锚固钻机，选用同心跟管钻进系统，完成 $\phi 108$ mm 套管同步跟进钻进，同心跟管钻进系统主要由锚固钻机、空压机、同心钻头、冲击器、管靴、套管组成。空压机压缩气体通过钻杆中心进入冲击器，完成对钻头的冲击做功，而后废气从钻头处排出，带出成孔过程中产生的弃渣。在钻进过程中同心钻头捶打管靴带动套管跟进，实现跟管作业。

4.2 锚杆安装与注浆控制

1. 锚杆制作。在钢筋加工过程中，按设计要求在钢筋上设置对中支架，对中支架采用 $\phi 8$ 钢筋制作，沿锚杆长度方向以 2 m 间距均匀布置，通过焊接方式与锚杆主筋固定^[4]。

2. 注浆工艺。采用孔底反向注浆法进行注浆作业。注浆材料选用 M30 水泥砂浆，由试验室根据原材料性

表 1 锚杆参数分区及长度设计

边坡区段	岩体类别	锚杆间距 (m×m)	锚杆长度 (m)	自由段 长度(m)	锚固段 长度(m)	施工工艺	设计轴向 拉力(kN)	要求抗拉拔值 (≥kN)
第 1 级边坡	Ⅲ类	3.0×3.0	6.0	≥ 3.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 2~3 级边坡	Ⅲ类	4.0×4.0	7.0	≥ 4.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 4~5 级边坡	Ⅲ类	4.0×4.0	8.0	≥ 5.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 6~8 级边坡 (一般区)	Ⅲ类	4.0×4.0	9.0	≥ 6.0	3.0	常规钻进	70	≥ 84 (70×1.2)
第 6~8 级边坡 (破碎区)	Ⅳ类	2.0×4.0/ 3.0×3.0	11.0	≥ 8.0	3.0	跟管钻进	70	≥ 84 (70×1.2)

能确定配合比。注浆作业采用注浆泵加压注浆，注浆压力稳定控制在0.2~0.4 MPa。

3. 质量控制。注浆前，施工人员将注浆管插至距孔底50~100 mm处，确保注浆管始终埋入浆液内。当孔口开始溢浆后，保持注浆压力稳定稳压30秒，确保浆液充分填充孔内间隙。针对长度超过5 m的长锚杆，采用二次补浆工艺，首次注浆完成24小时后，对孔口进行检查，若发现浆液下沉，立即采用相同配比的水泥砂浆进行补浆^[5]。

5 缺锚杆测试结果分析

5.1 锚杆抗拔试验结果

为验证锚杆设计参数与施工工艺的可靠性，工程在共计3469根锚杆中，于工程在Ⅲ类与Ⅳ类岩体代表性

表2 锚杆拉拔试验统计

边坡区段	岩体类别	锚杆长度(m)	设计拉拔值(≥kN)	实验值(kN)	实验值与设计值比值
第1级边坡	Ⅲ类	6.0	84	118	1.40
第2~3级边坡	Ⅲ类	7.0	84	118	1.40
第4~5级边坡	Ⅲ类	8.0	84	118	1.40
第6~8级边坡(一般区)	Ⅲ类	9.0	84	118	1.40
第6~8级边坡(破碎区)	Ⅳ类	11.0	84	118	1.40

边坡稳定性进行综合评估，边坡各监测点累计位移均小于8 mm，无新增裂缝或局部剥落现象。对比治理前稳定性计算结果(暴雨工况下 $K_{\text{f}}=1.041$ ，欠稳定)，分级放坡+差异化锚杆支护后，边坡整体稳定系数提升至1.498以上，达到《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)一级边坡安全储备要求。特别在BC段9-14剖面(Ⅳ类岩体区)，加密布设与跟管工艺有效抑制了卸荷松弛带进一步扩展。

6 结论

本文以青山坪崩塌治理工程为实践依托，针对高陡破碎岩质边坡的支护难题，系统构建了“岩体结构识别→锚杆参数分区→精细化施工”的技术体系。经工程实践验证，该体系兼具科学性与可行性，主要结论如下：(1)青山坪边坡岩体结构呈现显著分区特征，其中J2外倾节理构成控制性不利结构面，经勘察确定卸荷松弛带厚度分布在2~6 m，为后续支护设计提供了精准地质依据；(2)基于岩体类别划分结果及边坡分级情况，实施差异化锚杆参数设计，将锚杆间距控制在2~4 m、长度设定为6~11 m，同时按区域需求设计≥3~8 m的自由段，该设计思路大幅提升了

区段共布设175组检测锚杆(按锚杆总数5%取)，按《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086—2015)开展现场抗拔试验。试验采用分级加载方式，最大加载值为设计轴向拉力70 kN的1.5倍(即105 kN)。试验结果显示：所有检测锚杆在加载至105 kN时，位移稳定、无明显滑移或拔出现象，实测抗拔力均值达118 kN，满足一级边坡抗拔安全系数2.6的要求(见表2)。

5.2 支护效果与边坡稳定性验证

本项目工程施工完成后，结合施工期(6个月)及运行期(12个月，含一个完整雨季)的边坡位移监测数据(采用GNSS自动化监测系统，监测频率为施工期1次/天、运行期1次/3天)，对锚杆支护效果及边

支护结构的适配性与效能；(3)采用“跟管钻进+孔底注浆”组合工艺，通过自上而下分级开挖、破碎区跟管成孔及孔底反向注浆等关键技术，有效规避了施工坍塌风险，保障了锚杆施工质量。

参考文献：

- [1] 黄春晖,赵春晨,王扶义.空间交错隧道施工围岩应力影响范围及粘接锚杆作用机理的研究[J].粘接,2022,49(07):21-27.
- [2] 朱忠钱.岩土工程中抗浮锚杆施工技术的研究与分析[J].居舍,2023(36):67-70.
- [3] 赵常青,樊占东,冉黎明,等.破碎岩土高边坡锚索锚杆框架梁支护施工工艺[J].公路,2023,68(05):50-53.
- [4] 王晓卿.锚杆预紧对破碎岩体锚固与承载特性的影响[J].煤炭学报,2024,49(S2):606-615.
- [5] 丁潇,王睿,屈永龙,等.岩体离层作用下全长黏结型锚杆受力分析[J].西安工业大学学报,2023,43(04):341-346.

道路检查井常见质量问题分析及预防

刘 斌, 王光岩, 黄洋洋, 刘思习, 高 旺

(中建八局第四建设有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 道路检查井作为市政基础设施的关键附属设施, 承担管线检修、维护及通风等核心功能, 其质量直接关系到道路通行安全与管线运维稳定性。本文聚焦道路检查井全生命周期质量风险, 系统梳理井体结构开裂、井周沉降塌陷、井盖破损松动及防渗性能不足四类典型质量问题的表现形态; 从材料选用、施工工艺、设计适配及运维管理四个维度, 深度剖析各类问题的核心诱发因素; 针对性提出材料性能精准管控、施工工序精细化实施、设计参数优化及运维常态化监测等全流程预防技术体系。研究结合近 5 年行业实践成果与标准规范, 构建“问题定位—成因溯源—措施落地”的质量管控闭环, 旨在为提升道路检查井工程质量提供参考。

关键词 道路检查井; 材料性能; 设计适配性; 运维管理

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.015

0 引言

道路检查井广泛分布于城市主干道、次干道及支路路网, 是排水、燃气、电力、通信等市政管线系统的“节点枢纽”。其施工需统筹协调道路结构施工与管线铺设, 涉及基坑开挖、井体砌筑、回填压实、井盖安装等多道关联工序, 任一环节的质量疏漏均可能引发连锁问题。当前, 检查井投入使用后常出现井体与路面衔接不平顺、井盖异响、井壁渗漏等现象, 部分主干道检查井通车 3 年内即出现井周沉降超 20 mm 的问题, 不仅影响道路通行平顺性, 更可能因井周塌陷诱发车辆爆胎、管线破损等安全事故。因此, 精准识别常见质量问题的表现特征, 系统剖析成因并构建全流程预防体系, 是破解检查井质量管控难题的核心抓手。

1 道路检查井常见质量问题及表现特征

1.1 井体结构开裂

井体开裂是检查井最典型的结构性缺陷, 主要集中于井壁、井座与井筒连接处及井室底板, 按形态可分为横向、纵向及网状三类。横向裂缝多分布于井壁中上部, 缝宽 0.1~0.5 mm, 呈水平走向, 受温度变化影响明显, 高温季节缝宽缩小、低温季节扩张, 多伴随轻微渗漏水; 纵向裂缝多贯穿井壁全高, 缝宽可达 0.8 mm 以上, 常单侧分布并伴随井体倾斜, 倾斜度普遍在 1%~3%, 主要因地基不均匀沉降引发; 网状裂缝集中于井室底板及井壁下部, 裂缝密集交织呈蜂窝状, 缝宽 0.2~0.4 mm, 多因混凝土或砌筑砂浆强度

不足导致, 开裂后易引发底板承压能力下降, 重载车辆通行时裂缝进一步扩展^[1]。

1.2 井周沉降塌陷

井周沉降塌陷是影响道路通行质量的核心问题, 表现为检查井与周边路面形成明显高差 (5~30 mm), 路面出现环形裂缝, 严重时井周 1~2 m 范围内路面下沉、集料松散, 形成“凹坑”式破损。此类问题在重载车辆通行频繁的主干道尤为突出, 通车 1 年内沉降量可达设计允许值 (≤ 10 mm) 的 1.5~2 倍, 通车 3 年沉降量超 20 mm 的占比达 40% 以上^[2]。按沉降形态可分为整体沉降与局部塌陷: 整体沉降表现为井体与周边路面同步下沉但相对高差稳定, 源于地基承载力不足; 局部塌陷表现为井周路面单独下沉, 井体相对凸起, 沉降差可达 30 mm 以上, 主要因井周回填料土压实度不足, 受车辆荷载反复碾压后出现塑性变形。

1.3 井盖破损松动

井盖质量问题主要表现为破损、松动及异响三类, 其中破损以铸铁井盖最为典型, 呈现脆性碎裂、边缘缺损或中心凹陷, 破损后井口暴露形成安全隐患; 松动表现为井盖与井座嵌合间隙过大 (≥ 5 mm), 车辆碾压时产生规律性异响, 部分井盖可出现横向位移; 此外, 部分工程存在井盖与井座尺寸不匹配问题, “小盖配大座”导致井盖易错位, “大盖配小座”则引发边缘受力不均。统计数据显示, 采用再生铸铁井盖的破损率较球墨铸铁井盖高 60% 以上, 未采用防沉降井座的井盖松

作者简介: 刘斌 (1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路工程。

动发生率超70%，且松动问题在通车半年内即可显现^[3]。

此外，井盖与井座的长期适配性问题易被忽视，部分工程虽初期采用防沉降井座，但未考虑土壤长期沉降对嵌合关系的影响。例如：某沿海城市主干道检查井（2023年通车），采用传统防沉降井座但未设置沉降补偿结构，通车18个月后因土壤压缩导致井座与路面高差达12 mm，井盖松动异响发生率较通车初期提升45%。针对此类问题，新型防沉降井座已引入弹性补偿组件，通过内置橡胶缓冲层吸收10~15 mm的沉降量，同时采用“井座—路面一体化浇筑”工艺，将井座与周边2 m范围内的路面基层同步浇筑，增强整体承载性，某试点项目数据显示，该工艺可使井盖松动率降至5%以下。另外，井盖材质的环境适应性差异显著，在北方严寒地区，再生铸铁井盖因低温脆性，冬季破损率较球墨铸铁井盖高80%以上，而添加镍合金的球墨铸铁井盖（镍含量1.2%~1.5%），低温冲击韧性提升至12 J/cm²以上，可将冬季破损率控制在3%以内。

1.4 防渗性能不足

防渗失效表现为井体内部积水、井壁外侧返浆及路面湿渍三类形态。井体内部积水多因井壁砌筑灰缝不密实或底板混凝土振捣不充分，雨水从地表渗入井内，积水深度可达10~50 cm，雨季尤为严重；井壁外侧返浆表现为井周路面出现灰黑色泥浆渗出，源于井壁防渗涂层破损，污水或泥浆从管线渗漏后沿井壁外侧溢出，污染路面基层；路面湿渍集中于井周50 cm范围内，长期存在导致路面基层软化，诱发井周沉降。防渗失效不仅影响管线运维人员作业安全，更可能污染地下水环境，在排水管道系统中，防渗失效导致的地下水渗入量可占管道总流量的10%~15%。

2 道路检查井质量问题核心成因剖析

2.1 材料选用不合规

材料质量缺陷是质量问题的源头诱因：井体砌筑材料方面，部分工程选用强度等级低于MU10的页岩砖，或采用M7.5以下强度等级的砌筑砂浆，导致井壁抗压强度不足10 MPa，较规范要求降低30%以上；混凝土材料存在骨料级配不合理、外加剂掺量超标问题，底板混凝土28d抗压强度仅达C15标准，远低于规范要求的C25；井盖材料选用再生铸铁或劣质复合材料，抗拉强度不足150 MPa，较球墨铸铁井盖（抗拉强度≥420 MPa）差距显著。回填材料选用随意性大，部分工程直接采用基坑开挖的素土回填，含泥量超30%，压实后孔隙率达25%以上，易出现后期沉降^[4]。

2.2 施工工艺不规范

施工工序管控缺失是问题高发的直接原因：基坑开挖未按规范放坡，边坡坡度不足1:0.5，且未采取支护措施，导致基坑侧壁坍塌、地基扰动，引发井体不均匀沉降；井体砌筑时灰缝饱满度不足80%，存在通缝、瞎缝现象，部分转角处未采用丁砖砌筑，整体性不足；底板混凝土浇筑时振捣不密实，存在蜂窝、麻面缺陷，防渗性能先天不足。回填施工是核心薄弱环节，未采用分层回填（分层厚度超30 cm），压实机械选用不当（采用大型压路机碾压井周，导致井体受损），压实度仅达85%~90%，远低于规范要求的95%以上；井盖安装未采用防沉降井座，仅简单放置于井壁顶部，未进行二次灌浆固定，通车后易松动。

2.3 设计适配性不足

设计参数与现场工况不匹配加剧质量风险：井体结构设计未区分道路等级，主干道与支路采用相同尺寸的井体（内径均为1 000 mm），主干道井体未进行加强设计，承载能力不足；井座与路面结构衔接设计缺失，未设置过渡性钢筋网或加强层，导致井周路面受力集中；地基处理设计方案单一，对软土地基仅采用换填50 cm碎石的简单处理，未进行深层加固，承载力不足100 kPa，无法满足重载需求。此外，部分设计未考虑管线交叉影响，井体与管线冲突时随意调整井体位置，导致井体偏离道路中心线，受力不均。

2.4 运维管理不到位

运维监测缺失导致问题累积恶化：未建立常态化巡检机制，多数检查井仅在出现明显破损后才进行维修，裂缝、渗漏等早期问题未及时处理，逐步发展为结构性缺陷；巡检手段单一，依赖人工目视检查，无法识别井周路基沉降、井壁内部裂缝等隐蔽问题；维修养护不规范，井盖破损后随意更换为非标准产品，与原有井座不匹配；井周路面破损修补时未处理基层病害，仅进行表面罩面，短期内再次破损。此外，重载车辆违规通行未得到有效管控，超出井体设计承载能力，加速质量问题显现。

3 道路检查井质量问题预防措施

3.1 材料性能精准管控

建立“源头筛选—进场检测—过程抽检”的材料管控体系：井体砌筑选用MU15页岩砖或混凝土实心砖，砌筑砂浆采用M10预拌砂浆，确保灰缝抗压强度≥10 MPa；底板及井座采用C30商品混凝土，掺入适量膨胀剂（掺

量 8% ~ 10%)，提升抗裂性能，28d 抗压强度抽检合格率需达 100%。井盖选用球墨铸铁材质，抗拉强度 ≥ 420 MPa，井座采用防沉降型，适配不同道路等级（主干道选用承载等级 D400，支路选用 C250）；回填材料选用级配砂石或灰土（灰含量 10% ~ 12%），含泥量 $\leq 10\%$ ，压实前进行含水率调整（最佳含水率 18% ~ 22%）。所有材料进场时需提供出厂合格证，进场后按批次抽检，不合格材料严禁使用。

3.2 施工工序精细化实施

细化关键工序控制标准：基坑开挖按道路等级确定放坡坡度（主干道 $\geq 1:0.75$ ），软土地基采用钢板桩支护，基坑底部预留 30 cm 人工开挖层，避免机械扰动地基；井体砌筑采用“三一砌筑法”，灰缝厚度控制在 8 ~ 12 mm，饱满度 $\geq 95\%$ ，转角处采用“一丁一顺”砌筑，每砌筑三皮砖挂线校正，确保垂直度偏差 ≤ 5 mm/m^[5]。底板混凝土浇筑采用插入式振捣器分层振捣，振捣间距 ≤ 40 cm，直至表面泛浆无气泡，初凝后覆盖养护 ≥ 14 d；回填施工采用“分层回填 + 小型压实机械”方案，分层厚度 ≤ 20 cm，选用小型冲击夯压实，井周 50 cm 范围内压实度 $\geq 96\%$ ，外侧逐步过渡至 95%，压实后进行环刀取样检测。井盖安装采用“二次灌浆”工艺，先将井座放置于井壁顶部，调整水平后浇筑 C25 混凝土固定，通车前养护 ≥ 7 d，确保嵌合牢固^[6]。

3.3 设计参数优化适配

推行“工况适配”的差异化设计：按道路等级优化井体结构，主干道检查井内径采用 1 200 mm，井壁增厚至 240 mm，内置 $\Phi 12@200$ 双向钢筋网；支路采用 1 000 mm 内径，井壁厚度 200 mm；井座与路面衔接处设置 $\Phi 10@150$ 钢筋网（面积 1.5 m \times 1.5 m），提升抗裂性能。地基处理采用差异化方案，软土地基采用“换填 + CFG 桩”复合加固，换填 50 cm 级配砂石后布设 CFG 桩（桩径 400 mm，间距 1.2 m），地基承载力提升至 150 kPa 以上；普通地基采用换填 30 cm 碎石处理^[7]。优化井体布局，避开道路轮迹带，与管线冲突时通过 BIM 技术模拟调整路径，确保井体中心与道路中心线偏差 ≤ 50 cm，减少受力不均。

3.4 运维管理常态化落地

构建“巡检—监测—维修”全周期运维体系：建立月度常态化巡检机制，采用“人工 + 无人机”协同巡检，人工重点检查井盖松动、井周破损等显性问题，无人机搭载高清摄像头识别路面环形裂缝等隐蔽缺陷；

对主干道检查井安装沉降监测传感器，实时采集沉降数据，沉降速率超 2 mm/月时触发预警。制定分级维修标准，轻微裂缝采用环氧树脂灌注修补，严重开裂需拆除重建；井盖松动时重新灌浆固定，破损时更换同规格球墨铸铁井盖；井周沉降超 15 mm 时，采用注浆法加固基层，再进行路面罩面修复；井壁渗漏时采用水泥基渗透结晶型防水涂料修补，确保防渗效果。加强交通管控，主干道设置重载车辆限行标识，严禁超载车辆通行，减少外力破坏。

4 结束语

道路检查井质量问题的防控是一项系统工程，需突破“重施工、轻设计运维”的传统模式，构建“材料—施工—设计—运维”全链条管控体系。本文梳理的井体开裂、井周沉降等四类典型问题，其成因均涉及多维度因素交织，需通过材料精准管控筑牢质量基础，施工精细化实施把控关键环节，设计差异化优化适配工况需求，运维常态化监测实现风险预警。未来研究可进一步深化数字化技术应用，开发基于 BIM+ 物联网的检查井质量管控平台，实现施工过程参数实时上传与运维数据动态更新；探索新型材料与工艺的规模化应用，如高性能复合材料井盖、模块化井体装配技术，提升质量稳定性与施工效率；完善行业质量评价标准，将井周沉降、防渗性能等指标纳入市政道路工程质量验收核心体系，推动检查井质量管控从“事后维修”向“事前预防”转型，为市政基础设施高质量发展提供保障。

参考文献：

- [1] 许成邵. 市政道路中检查井沉降问题及优化措施[J]. 建筑与装饰, 2025(03):100-102.
- [2] 边森. 市政道路检查井沉降成因及其防治措施[J]. 汽车画刊, 2024(08):106-108.
- [3] 苏志红. 不同施工条件下可调式防沉降井盖施工技术[J]. 江西建材, 2023(02):319-320,323.
- [4] 王辉. 浅谈城市道路路面检查井及井周病害原因和防治措施[J]. 科技创新与应用, 2021(02):194.
- [5] 同 [2].
- [6] 胡曼曼. 隧道二衬纤维混凝土力学及抗渗性能研究[J]. 中国水泥, 2025(06):44-47.
- [7] 谭海星, 马安震, 刘洋, 等. 管道几何参数对钢筋混凝土检查井井壁性能的影响及优化设计[J]. 工程建设, 2025, 56(12):73-81.

燃气阀门井渗水原因及防治对策探析

卓国穗, 梁壬午, 梁庚寅

(国泰通能源设备集团有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 燃气阀门井的渗水主要是由于设计缺陷和施工不当造成的, 其中涉及结构防水不到位和工艺不合格的影响。本文从新建成和已建成的阀门井两个方面提出预防和处理措施: 新建成的井需要优化防水设计、加强施工监管; 对已建井采取堵漏、结构修复、套管防水、防倒灌等处理措施。通过系统性防范和维修措施, 以期为有效增强阀门井的防水性、确保燃气设施的安全运行提供有益参考。

关键词 燃气阀门井; 渗水原因; 内壁渗漏; 结构防水修复; 套管防水

中图分类号: TU996

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.016

0 引言

在城市地下空间环境日趋复杂的情况下, 阀门井渗漏现象逐渐突出, 已成为危及燃气输配安全、加快管道腐蚀、提高运维成本等方面的重大隐患。阀门井作为燃气管网中的重点构筑物, 渗水情况直接关系到管网的安全和使用寿命。渗水产生原因比较复杂, 大多与设计 and 施工环节不到位有关。本文对阀门井渗水主要成因进行系统分析, 有针对性地提出新项目防水优化措施和已建项目修复处理方法, 以期为加强阀门井防水可靠性研究提供参考。

1 阀门井渗水原因分析

1.1 设计因素

阀门井渗水源于设计环节中存在系统性缺陷, 这些缺陷是导致后继施工和运行阶段防水失效的根本原因。在结构体系方面, 部分阀门井设计对地下水位动态变化与周边土壤渗透特性评估不足, 导致井体埋深、壁厚及混凝土抗渗等级(如 P6、P8)选择不当, 不能有效地抵抗长期静水压力和土壤腐蚀介质等因素的综合影响。尤其在井室处于地下水位波动区或者回填土沉降活动区时, 如果刚性混凝土结构没有设置充分的变形缝或者后浇带, 就很容易由于不均匀沉降而出现结构性裂缝并形成贯穿性渗水通道^[1]。另外, 材料选型和构造设计不足是又一个重点诱因。传统砖砌井体虽成本较低, 但其砌体灰缝本身即为渗水薄弱环节, 若未在迎水面设置连续、封闭的柔性防水层(例如: 聚合物水泥防水砂浆、渗透结晶型防水涂料等), 仅依靠结构自防水难以满足长期防水需求。对于预制混凝土井、拼接缝的防水设计至关重要, 若密封胶选型

不当(例如: 抗老化、伸缩性能不够等)或嵌缝构造设计不合理, 同样会成为渗漏隐患点^[2]。

1.2 施工因素

施工环节是设计意图向实体工程转换的关键步骤, 其实施质量直接决定了阀门井结构防水性能能否得以发挥。由施工因素引起的渗水问题一般体现在工艺执行偏差、材料运用失当以及过程管控欠缺等方面, 这几方面因素叠加在一起最终破坏甚至解体所设计防水体系。第一, 混凝土工程的施工质量是最核心的影响要素。如果对混凝土拌合物的配合比把关不严、水灰比过大或者振捣不够密实等都会使混凝土中产生连通孔隙、蜂窝麻面等缺陷, 从而使混凝土的抗渗性能严重下降。在浇筑过程中, 若施工缝留设位置不当(如位于剪力最大处)、处理不规范(没有去除浮浆、没有设止水钢板, 也没有遇水膨胀止水条), 或者养护时间和湿度不够, 导致混凝土出现早期收缩和开裂, 从而在结构内部形成渗水路径。第二, 以防水层施工工艺存在缺陷为直接诱因。无论是卷材防水还是涂膜防水, 基层处理(如平整度、坚实度、干燥度等)不达标, 会导致防水层空鼓、剥离; 搭接缝的宽度不够或结合不牢固, 容易成为薄弱环节; 在管道根部、阴角等细部节点未按规范做增强处理(如附加层铺设), 则会因应力集中而破损。对预制井体安装来说, 如果接缝处密封材料填嵌得不够充实和连续, 或者基面干净不够而影响黏结时, 接缝防水就形同虚设^[3]。

2 阀门井渗水防治对策实施

2.1 燃气新建阀门井防水措施

2.1.1 优化防水设计, 提升结构合理性

对于新建成燃气阀门井渗水问题的预防和治理,

作者简介: 卓国穗(1984-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 阀门类、燃气调压装置的研究。

从根本上说是要建设具有可靠性和耐久性双重特征的系统性防水体系。优化防水设计的核心是贯彻“以防为主、多道设防、刚柔结合、综合防治”的原则。第一，提升结构的合理性、密实性与抗裂性。在结构选型与计算阶段，应依据工程地质勘察报告与地下水位历史数据，科学确定阀门井的埋深、壁厚及混凝土的抗渗等级（建议不低于 P8），对高水位或者腐蚀性土壤环境可以考虑使用抗硫酸盐水泥或者掺有优质抗裂防水剂高性能混凝土。结构设计中需要充分考虑地基不均匀沉降所带来的危险，采用布置钢筋混凝土底板、强化井壁环向、纵向配筋率以及受力集中部位增加构造钢筋的方法，有效地遏制混凝土收缩裂缝和沉降裂缝^[4]。第二，要构筑多层次、相辅相成的复合防水层。在混凝土结构自防水的基础上，于井室外壁增设一道全包式的柔性防水层（例如厚度为 4 mm 的 SBS 改性沥青防水卷材，或者厚度为 2 mm 的聚氨酯防水涂膜等），这种防水层要从底板垫层到井口依次敷设，同时保证阴阳角和管道穿墙处为增强层的铺贴。同时，在井室内壁施作一道刚性防水层（例如：厚度为 20 mm 的聚合物水泥防水砂浆），形成“外柔内刚”的防护体系，以抵御外部水压并防止内部冷凝。对细部构造特别是管道穿墙节点的设计须特别细化。推荐采用带翼环的钢制预埋防水套管，套管与管道之间应预留 20 ~ 30 mm 空隙，并采用具有高弹性、耐老化和长期防水性的柔性密封材料（例如：聚氨酯密封膏或者遇水膨胀的橡胶复合体系）进行多道填充密封，套管中部可预设注浆管作为后期补救通道^[5]。

2.1.2 强化施工监管，确保工艺落实

优化设计为防水体系建设提供蓝图，严格施工监管和准确工艺落实是蓝图变为实体质量的关键保障。加强施工监管，其核心是建立涵盖全过程、全要素标准化质量控制体系，以保证各防水工序严格按照设计意图和技术规范进行施工。第一，要从源头上控制关键材料和进场复试。所有防水材料（由混凝土外加剂、防水卷材、密封膏组成）均需核查其合格证、型式检验报告，并按规定进行见证取样，着重对它们的耐水性、延伸率、粘接强度、耐久性指标进行测试，从根本上杜绝不合格的材料进入施工现场。第二，以混凝土工程为基础环节的精细化过程控制。需要对商品混凝土配合比和坍落度进行严格监督，在浇筑过程中应使用机械进行充分振捣，排除内部气泡和间隙，尤其注意施工缝的处理、对后浇带及其他薄弱处进行规范加工，保证止水钢板的稳固安装和接缝表面凿毛的清洁。混凝土浇筑后的养护是控制早期开裂的重中之重，必须制定并执行严格的保温保湿养护方案（如盖上薄膜、

定时喷水等），养护期不应少于 14 天。对防水层的建设，监督的重点应该是基层的处理、细部的加强和成品保护。基层要以结实、平整、干爽为准则，阴阳角都要做圆弧形；卷材或涂膜的铺贴（涂刷）方向、搭接宽度、厚度必须满足设计要求，管道根部、预埋件周边必须增设附加层；在施工中和竣工后要采取有效的措施，避免防水层在后续的工序中受到破坏。

2.2 已建阀门井渗水治理措施

2.2.1 内壁渗漏治理：先阻水源，再堵渗点

对于已经建成的阀门井出现的渗漏问题，治理应遵循“精准勘察，分清轻重缓急，标本兼治”的系统性原则，特别是针对内壁可见的渗漏问题进行治理，其核心策略在于贯彻“先阻水源，再堵渗点”的工序逻辑。具体来说，准确地诊断渗漏水源和路径并临时导排。条件许可、确保安全时，应先检查、切断明水流入主要途径，如堵塞不正确排水管道连通、修补断裂临近水管等；如果井内积水较多，需要用大功率水泵强排水，有条件的可以布置带有导流管的临时集水井，使水位下降到待建地区下方，给后续操作营造一个干燥作业面是“阻水源”之要诀。以此为基础才能进行永久性封堵渗点，称为“堵渗点”。对于混凝土结构中出现的点状漏点或微小裂缝（宽度小于 0.2 mm），可以采用高压注浆法进行修复：使用电锤在裂缝的两侧斜向钻孔到结构的中部，埋设特制注浆嘴后，再经高压注浆设备在混凝土毛细孔和裂缝深处压注低粘度、高渗透性环氧树脂或者聚氨酯化学浆液；当浆液遇水胀大或凝固时，可有效地充填和封闭渗水通道，达到由背水面结构补强防水的目的。

2.2.2 结构防水修复：先固结构，再做内防

对已建阀门井的结构性渗漏治理，必须遵循“先固结构，再做内防”的根本原则，即优先恢复并增强混凝土承重结构的整体性、强度和稳定性，以此为基础再施做内部防水层。结构性修复要对损伤做出全面、准确的评估，需采用目视检查、敲击检测、裂缝测宽仪等方法，系统性地勘察井壁与底板，识别并标记出所有结构性裂缝（如贯穿缝、沉降缝）、混凝土剥落、钢筋锈蚀露筋及因强度不足导致的酥松区域，分析其成因（如过大的荷载、冻融循环、钢筋锈胀等）。评估结束后对不同类型的损伤进行加固。对于危及结构安全的宽大裂缝（宽度大于 0.3 mm）或局部承压不足区域，首要任务是进行结构补强。可采用沿裂缝开槽后嵌入“U”形钢筋并用高强无收缩灌浆料回填，或在井壁外侧（具备开挖条件时）增设钢筋混凝土扶壁柱、内贴抗拉补强碳纤维布或者钢板，从根源上遏制裂缝继续延伸、恢复承载能力。对混凝土表面由于碳化、

冻融、腐蚀等原因而产生的脱落、酥松等现象，一定要将其完全凿除到坚实的基层上，暴露出新鲜牢固的混凝土面和钢筋等，将锈蚀钢筋除锈防锈后，再采用高强聚合物修补砂浆或者环氧砂浆分层修补以恢复其断面尺寸和平整度。只有完成以上结构加固并保证承重体系的稳定性和基层牢固、干净、不存在可移动渗水点时，才能进入“内防”工程。在这一阶段，宜用对基层粘结力好、抗渗性高，并有一定韧性的防水材料来建造连续、密闭内防水层。推荐做法为：在加固修复后的整个井室内壁（包括底板）涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料，其活性成分可渗入混凝土毛细孔道，形成增水性结晶屏障；然后，将其整体抹压成厚度不少于15 mm的聚合物水泥防水砂浆，该防水砂浆层同时具有较好的抗渗、抗裂和对基面的粘结性，可有效地抵抗外界水压对其的穿透。对穿墙管根部及其他薄弱部位，应嵌设遇水膨胀止水条于防水砂浆层内，同时涂柔韧型防水涂料以作附加加强。

2.2.3 强化套管防水：重点处理柔性接口

已建成阀门井渗漏处理时，由于管道穿墙套管节点材质不同，相对位移较大以及服役环境较长等是导致渗漏高发的主要原因。治理工作需对既有套管接口状态进行彻底勘查，清除原有的失效密封材料（例如硬化沥青麻丝、已经剥落水泥石浆等），并认真检查套管本体、翼环、管道外壁是否完好，保证基层牢固、干净、无油。具体强化修复工艺要围绕建设多层次、高弹性柔性密封系统进行。建议采用“刚性止水、柔性填充、注浆保障”的综合策略。第一，如果原有的套管翼环出现锈蚀或密封不严密的情况，可以在井壁内侧的套管根部，围绕管道挖掘环形槽，并嵌入高性能的遇水膨胀橡胶止水圈或丁基橡胶密封带作为第一道防线，利用其遇水自膨胀的特性，紧密填充微缝隙。第二，主体密封层要使用专门用于动态接缝的单组或双组聚氨酯密封膏和硅酮密封胶，采用具有高弹性和高粘结力、耐老化柔性的材料分层填充并清洗环形间隙。在施工中要保证填塞充实致密、与管道和套管壁结合紧密，最后形成中间比两边稍高、有利于适应变形的鼓形断面。

2.2.4 防治倒灌措施：抬井或设防，避免淹没

预防和控制已建成阀门井由于地表径流或者洪水造成倒灌淹没是关系到设施内设备安全和长期运行可靠性的关键性治理措施。该策略是通过调整物理高程或建立主动的阻水屏障来阻止地表水进入井内，具体来说，可以遵循“抬井或者设防时切忌淹没”的双重路径。在场地条件许可、经济合理的情况下，“抬井”就是提高井口标高，这是一种根治性措施，一般涉及

既有井筒的接高处理问题：在保证原结构安全和牢固的前提下，在原井口以上部分浇筑新建钢筋混凝土井圈，建议将井口和井盖的最终完成面提高到周围地面的设计标高以上（通常建议高出15~30 cm），并形成一个向外的缓坡散水。该方法将水力关系一劳永逸地改变，井口自身就变成一个永久性凸起结构来阻隔地表水。但在城区道路或者密集管网区域内，井口显著升高会对交通或者景观造成影响，“设防”也就是安装防倒灌装置就成一种更为灵活和普遍的选择。其主要表现为井口或井内关键通道上增设特殊机械式防水密封装置。例如：可以将高性能橡胶密封圈设置于井盖下，也可以使用具有旋扣锁紧结构防水淹密封井盖等，这类设备可以在闭合过程中形成严密密封。另一个方法是在井室的入口管道上装置防止倒流的阀门（或称为“拍门”），这是基于允许井内的气体在维修时少量排放的基础上，但在地面水位上升的情况下，当外部压力超过内部时会自动闭合，从而形成单向止逆屏障。

3 结束语

燃气阀门井内渗水问题是关系到管网安全和寿命的关键性隐患，对其预防和处理需要贯穿设计、施工、运维等整个过程。本文对渗水的主要原因进行系统分析，阐明设计缺陷和施工不当为防水失效的核心原因，从新建成和已建成阀门井两个方面有针对性地提出应对措施：新建工程需立足“多道设防，刚柔相济”，通过优化结构设计与严格施工监管构建可靠防水体系；已建工程应遵循“诊断为先、堵排结合、结构为本”的原则，采取堵漏修复、结构加固、细部防水强化及防倒灌等综合措施。未来，需将智能监测和新型防水材料技术进一步整合，形成以防为主、防重于治的长效管理机制，提高阀门井整体防水性能和燃气管网作业安全性。

参考文献：

- [1] 单龙. 城镇燃气阀门井渗水原因及对策[J]. 安防科技, 2021(24):21.
- [2] 王溢维, 白云鹏, 李爽. 燃气阀门井智慧一体化安全运营技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(05): 93-95.
- [3] 罗晨光. 基于物联网的燃气阀门井泄漏报警监测系统研究[J]. 中国设备工程, 2023(13): 11-13.
- [4] 罗俊杰, 曹荀. 城市燃气阀门井泄漏风险评价及分类管理研究[J]. 城市燃气, 2023(12): 37-42.
- [5] 李继奎. 一种防泄漏燃气阀门井: CN202420273544.4[P]. 2024-10-22.

储能站火灾防控关键技术及应用实践

曹光强

(中石化胜利油田分公司胜利应急救援中心(消防支队), 山东 东营 257000)

摘要 电化学储能站作为新型电力系统的关键单元,在电网调峰调频、新能源消纳、用户侧能源供给等方面扮演着重要角色。而当前多数储能站以锂离子电池作为能量储存载体,受到电池材料不稳定、系统设计不合理、运维管理不到位等诸多因素的影响,发生火灾风险、爆炸风险的概率大幅提升,并且由此引发二次事故,不仅会损害储能设备,还会危及现场及周边人员的生命安全。基于此,本文围绕储能站火灾危险性及其成因展开论述,系统研究惰性气体窒息、定向高压细水雾冷却、电池热失控隔离阻断三种火灾防控关键技术的应用路径及实践效果,并结合火灾成因提出有效的处置对策,旨在为储能站的安全稳定运行提供参考。

关键词 储能站;火灾防控;惰性气体窒息;定向高压细水雾冷却;电池热失控隔离阻断

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.017

0 引言

在应对储能站火灾事故时,应当基于“损失最小化”原则,通过对电池材料特性、系统设计、运维管理等影响因素的深度解析,从技术根源着手,基于火灾防控“预防为主、防消结合”的核心原则,建立一套“预警、隔离、灭火”相结合的一体化技术应用体系,以实现火灾风险的有效管控,切实解决电化学储能站运营安全问题,促进电化学储能产业的规模化发展。

1 储能站火灾危险性分析

1.1 电池单体燃爆扩散的危险性

一旦储能站电池单体出现热失控,电池内部温度就会急剧上升,最高可达数百摄氏度,在高温作用下,电池外壳的耐热、耐压性能瞬间到达极限,导致内部电解液大量喷溅。喷溅出的高温电解液引燃能力极强,能够直接点燃电缆绝缘层、保温材料等易燃物及可燃物,故而形成持续性明火。由于电解液始终处于流动状态,因此,火势蔓延极快,火灾现场的复杂局面极难控制。另外,电池内部经过电化学反应之后,将释放出大量的氢气、一氧化碳、甲烷等易燃易爆气体,如果这些气体在短时间内快速积聚,则很容易达到爆炸极限,一旦与高温热源或者微小电火花接触,就会直接引发爆炸事故。而爆炸过程产生的明火将迅速向周边扩散,火势蔓延的风险进一步加剧。加之热失控环节产生的氟化氢、氯化氢等强腐蚀性有毒气体的存在,过火区域也将成为有毒危险区域,这就给后续救援工作增加了难度^[1]。

1.2 电池模组密集布局的连锁反应危险性

相比单体电池,电池模组排布密集,电池单体一旦出现明火,电池模组将直接出现“多米诺骨牌”的连锁反应风险,即便是局部火灾,也会在极短时间内升级为大规模火灾事故。在电池模组安装过程中,多数储能站均采用密集堆叠、矩阵排列的方式,模组之间通过汇流排、电缆桥架等导电部件连通,这就给热量传递、火势蔓延创造了有利条件。模组发生火灾以后,释放出的热量直接通过热辐射、热对流的方式传导至相邻模组,如果突破热失控阈值,将直接引发火灾事故。另外,储能站内的通风管道、消防管道等设施,往往成为火势蔓延的便捷通道,明火经过这些通道之后,其影响范围瞬间扩大数倍,随着热量在有限空间的持续积累,空间环境温度急剧上升,这就使未燃电池发生热失控的风险概率大幅增加,后续火灾扑救难度明显提升^[2]。

1.3 系统级火灾的次生灾害叠加危险性

当储能站火灾达到系统级之后,将极易引发一系列次生灾害,其危险性及其破坏力远超火灾本身。例如:火灾产生的持续高温直接影响储能站内的逆变器、配电柜、变压器等电气设备,加剧绝缘层碳化、老化速度,缩短设备使用寿命,甚至还会引发设备击穿、母线短路、电弧放电等故障,进而出现新的电弧火源。一旦电池火灾与电气火灾叠加在一起,场面控制难度极大。而在设备出现短路故障以后,电网电压骤降,严重的会造成区域性停电事故,给区域内的工业生产,以及居

作者简介:曹光强(1976-),男,本科,工程师,研究方向:应急管理。

民的正常生活造成严重影响。如果发展至系统级火灾，烟气中含有一氧化碳等有毒有害气体，在风力驱动下，会迅速向周边扩散，对周边环境造成严重污染。

2 储能站火灾成因分析

2.1 电池本体的技术缺陷

触发电池热失控的主要原因取决于电池本体的材料特性与制造工艺缺陷，电池正极材料的热稳定性存在天然技术局限性，比如三元锂电池的正极材料在受热条件下易发生分解反应，释放出大量氧气与热量，为热失控提供了充足的氧化剂与能量来源。而磷酸铁锂电池在极端工况下存在晶格结构破坏、产热加剧的风险。在制造工艺方面，如果工艺精度不足，则会加快火灾风险的发生速度。电极涂布环节，如果涂布厚度不均、涂层存在针孔或杂质，将造成电池内部电流分布失衡，局部区域因电阻过大产生大量焦耳热。电芯装配环节，如果极耳焊接不牢固、隔膜褶皱或破损，则极易引发电池内部正负极直接接触，形成内短路故障。如果不及时予以排查，将成为导致热失控的一大关键因素^[3]。

2.2 系统运行控制的技术故障

电池管理系统（BMS）中的硬件故障直接影响电池状态的监测与控制效果，如电压采集模块精度漂移，无法准确识别单体电池的过充、过放状态。电流传感器故障会造成充放电电流监测失真，导致电池长期处于过载运行状态。温度传感器失效或布置位置不合理，技术人员无法及时捕捉电池模组的局部高温，错失热失控早期干预时机等。而电池内部储能系统的控制策略与算法缺陷，也会增加火灾风险，如果BMS的充放电策略设计不合理，如采用恒流恒压充电模式时，充电截止电压设置过高，容易导致电池单体过充，电解液分解速率加快，产热与产气剧增。而均衡控制算法失效或均衡策略滞后，电池模组内单体将出现较大的电压差，部分电池因过度均衡处于过充或过放状态，引发局部热失控。与此同时，储能系统在进行功率转换时，容易形成外部短路火源，引燃电池模组。例如：逆变器的功率开关器件损坏，将引发逆变器输出电流畸变，故而产生大量谐波，使得电池模组充放电电流异常波动，增强发生火灾事故的风险。

2.3 外部环境与防护系统的技术短板

储能站在运行过程中，环境参数对运行安全性、稳定性造成直接影响。在高温环境下，电池热稳定性大幅降低，温度一旦超过电池正常工作温度范围，电池内部的化学反应速率就会加快，充放电过程中产热

增加，且热量难以有效散出，极易引发局部过热。而在低温环境下，电池电解液黏度明显增大，离子迁移速率下降，充放电过程中内阻增大，导致产热加剧。另外，电池内部储能装置的热管理系统一旦出现技术短板，电池模组热量将快速积聚，如果超出热失控阈值，则极易引发火灾。例如：风冷散热系统若风机选型不当、风道设计不合理，将造成散热风量不足、气流分布不均，电池模组内部存在散热盲区，局部高温无法有效驱散。液冷散热系统如果出现冷却液泄漏、管路堵塞或流量不足的情况，散热效率就会大幅下降，电池模组温度持续升高，最终引发热失控。

3 储能站火灾防控关键技术与应用实践

3.1 惰性气体窒息灭火技术

该技术的灭火原理主要是向储能舱室内充入氮气、氩气等惰性气体，置换并稀释舱内的氧气浓度，使其降至可燃物的临界燃烧氧浓度以下，以阻断燃烧反应的链式过程，达到灭火抑爆的效果。与过去的水基、泡沫灭火技术相比，惰性气体窒息灭火技术不会对电池模组造成二次水渍污染，也不会残留具有腐蚀性的化学物质，并且可以保留火灾后的电池残骸，这就为后续事故原因的溯源和电池性能分析提供完整的物证支撑。

以某200 MW·h磷酸铁锂储能电站火灾应急处置为例。该储能站在运行期间，由于单个电池模组热失控引发局部火情，现场监控系统在检测到舱内温度异常升高和可燃气体泄漏后，立即触发了惰性气体灭火系统的自动启动程序。系统在15秒内完成氮气的加压输送和舱室充注，通过持续调节舱内氧气浓度至12%以下，成功在30分钟内抑制了明火蔓延。在整个处置过程中，采用惰性气体窒息灭火技术既可以快速控制火势，也避免了二次爆炸事故的发生，为现场人员的生命安全提供了坚实的保障。惰性气体窒息灭火技术在储能站火灾扑救与处置领域的推广和使用，需要建立适配不同储能系统类型的参数调控体系。例如：集装箱式储能电站，应当结合舱体容积、电池类型和布置密度，精准计算惰性气体的充注量和充注速率，避免因气体压力过高导致舱体结构损坏。而针对大型储能电站的电池阵列，可以采用分区充注的方式，通过设置防火分隔单元，实现对火情区域的精准围堵，减少惰性气体的消耗量，提升灭火效率，最大限度地减少火灾损失^[4]。

3.2 定向高压细水雾冷却灭火技术

定向高压细水雾冷却灭火技术主要利用高压泵组将水加压至10~20 MPa，然后，通过雾化喷头将水流

破碎为直径 10 ~ 100 μm 的细水雾滴, 这些雾滴兼具快速吸热汽化和隔绝氧气的功能。细水雾滴在与高温电池表面接触以后, 快速汽化, 使电池模块的温度大幅下降, 有效阻断了热失控的蔓延路径。同时, 水汽化后形成的水蒸气会在舱内形成均匀的气幕, 进一步稀释氧气浓度, 辅助抑制燃烧反应。与传统的大流量喷淋技术相比, 高压细水雾的用水量仅为其 1/10 ~ 1/5, 灭火过程节省了大量水资源。

以某电网侧 100 MW · h 储能电站火灾处置为例。该储能站发生火情以后, 智能消防系统根据热成像传感器定位的火源位置, 自动启动了定向高压细水雾装置。通过对喷头角度的精准调整, 将细水雾精准喷射至起火的电池模块表面, 雾滴在高温作用下迅速汽化, 形成局部低温区域, 仅用 20 分钟就将电池温度从 600 $^{\circ}\text{C}$ 以上降至 100 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 成功阻止了热失控向相邻电池包的扩散。这种处置技术既可扑灭明火, 避免火势蔓延与复燃, 也使储能站在火灾免受更大的财产损失。近年来, 随着人工智能算法的引入, 实现了喷头喷射方向和雾滴粒径的动态调节, 灭火的精准度显著提升。特别在冬季严寒地区, 可以在供水系统中添加防冻剂或设置伴热保温装置, 确保细水雾系统在低温环境下正常启动, 同时也给储能站的安全运行提供了强大的技术支撑^[5]。随着人工智能算法及物联网技术的深度融合, 技术人员可以利用智能控制算法, 实时采集火灾的火源温度、影响范围、蔓延速度等真实的数据, 然后对喷头喷射方向进行动态调控, 以提高灭火效率与人力、财力、物力资源利用率。

3.3 电池热失控隔离阻断技术

电池热失控隔离阻断技术不同于上述两种技术, 其基本原理是在储能站当中设置多层级防火隔离结构, 结合主动式的热失控抑制装置, 将单个电池模块的热失控限制在最小范围内, 防止连锁反应的发生。与传统的灭火技术相比, 电池热失控隔离阻断技术更加关注于“防蔓延”层面, 而不是“扑灭明火”, 应用该技术时, 防火分隔构件、热失控抑制组件和智能隔离控制系统协同工作, 实现从热失控预警到隔离阻断的全流程自动化处置^[6]。

以某城市工业园区 50 MW · h 刀片电池储能电站为例。该电站采用了舱内分区+模组隔挡的双层隔离设计, 集装箱储能舱内部, 利用耐火极限达 4 小时的防火隔板将舱体划分为 3 个独立的电池分区, 每个分区之间设置防火门和烟气导流通道。每个分区内部, 相邻的电池模组之间均安装了陶瓷纤维防火隔挡和热失控抑制片。在一次电池模组过充测试中, 某一电池模组发

生热失控, 其释放的高温烟气和火焰被防火隔挡有效阻挡, 无法直接蔓延至相邻模组。同时, 模组表面的热失控抑制片在检测到温度超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 后, 自动释放出高效吸热的相变材料, 快速吸收电池热量, 延缓热失控的发展速度。随着该技术的不断升级与持续发展, 逐步形成了一套标准化、规范化、模块化的隔离体系。储能舱体设计环节, 应当严格把控防火分隔构件的材料质量关, 选用耐高温、抗冲击的防火材料, 如硅酸铝纤维板、防火岩棉等, 确保隔离结构能够承受电池热失控产生的高温和冲击波。针对大容量储能电站, 可以采用“蜂巢式”隔离布局, 将每个电池模组作为一个独立的单元, 通过密集的防火隔挡形成相互隔离的空间, 彻底切断热失控的传播路径。另外, 通过与储能电站在线监测系统的结合, 可以借助光纤测温、电压监测等技术对电池状态数据进行实时采集, 如果发现单个模组出现热失控前兆, 需要立即触发隔离区域的封闭程序和抑制装置的启动指令, 以改善和提高隔离、阻断效果。

4 结束语

随着新型电力系统建设进程的逐年推进, 电化学储能站已逐步成为能源转型的核心应用载体, 其规模化、高效化、集约化的发展趋势已成定局。针对储能站火灾采取有效处置对策, 首先需要从技术角度着手, 切忌专注于管理而忽略了先进灭火技术的重要性, 并在灭火实践当中积极推广使用惰性气体窒息灭火、定向高压细水雾冷却灭火、电池热失控隔离阻断等灭火处置技术, 进而为储能产业的规模化发展打下坚实的基础, 实现各类处置技术的高效化应用、创造性发展, 筑牢电化学储能站的安全防线, 为电力事业的蓬勃发展注入源源不断的驱动力。

参考文献:

- [1] 张文杰, 范旭明, 杜倩媛, 等. 基于热释离子探测与直流快速灭弧的储能站安全提升技术[J]. 电力与能源, 2024, 45(05):611-615.
- [2] 刘新超, 吴信立, 朱伟星. 基于超声波的储能站锂电池火灾极早期检测技术[J]. 电力与能源, 2025, 46(02):126-129, 134.
- [3] 梁运华, 潘志敏, 肖勇, 等. 化学储能电站消防安全风险分析[J]. 电力安全技术, 2022, 24(02):11-14.
- [4] 赵北涛, 郭洪昌. 国内外电化学储能电站安全分析及展望[J]. 农村电气化, 2022(01):69-71.
- [5] 同 [2].
- [6] 朱玲. 电化学储能电站火灾事故处置研究与思考[J]. 中国消防, 2024(10):60-63.

220 kV 高压电力电缆故障检测及原因探讨

罗诗铭

(广州南方电力技术工程有限公司, 广东 广州 510250)

摘要 220 kV 高压电力电缆作为城市主网的重要输电通道, 其运行安全性直接关系到区域供电系统的稳定水平。由于敷设环境复杂、运行负荷高、结构层级多, 电缆在长期运行过程中易受到机械损伤、绝缘受潮、绝缘老化及设计与制造质量缺陷等多重因素影响, 逐步形成隐蔽性强、演化周期长的结构性故障。本文围绕 220 kV 高压电力电缆常见故障类型, 对其形成机理进行系统分析, 提出处理与防范措施, 旨在对提升电网运行可靠性有所裨益。

关键词 220 kV; 高压电力电缆; 故障检测

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.018

0 引言

随着城市化进程不断加快, 用电负荷持续攀升, 220 kV 高压电力电缆在主网中的应用规模不断扩大, 其安全运行已成为保障城市电力系统稳定的重要基础。然而, 受地下敷设空间复杂、施工扰动频繁及运行环境湿热等因素影响, 高压电缆在服役周期内易逐步积累各类隐蔽性缺陷, 一旦发生击穿事故, 不仅检修难度大、停电范围广, 而且会对电网安全带来连锁性冲击。因此, 系统梳理 220 kV 高压电力电缆的故障类型、成因机理及检测方法, 并构建针对性的处理与防范路径, 对于提高运维精准性、降低运行风险具有重要的工程实践价值。

1 220 kV 高压电力电缆故障检测方法

1.1 电桥法

电桥法属于一种典型的定量型定位检测手段, 对隐蔽性较强、反射波形不明显的故障具有较高的识别精度^[1]。电力运维单位在开展电桥检测时, 通常由技术人员将同回路的一相故障电缆与一相非故障电缆进行短接, 并在电缆起始端接入单臂电桥装置, 通过连续调节桥臂电阻, 使电桥达到电气平衡状态。在此基础上, 依据两侧电阻比例关系, 结合线路原始长度参数, 即可反推出故障点到测量端之间的实际距离。该方法在 220 kV 电缆运行年限较长、局部老化现象明显的线路中的应用价值尤为突出。由于部分老化型故障在初期并不会形成明显的反射特征, 常规脉冲检测难以准确识别, 而电桥法可以通过电阻参数变化敏感捕捉线路内部异常区域, 提前锁定隐患位置, 避免绝缘缺陷进一步扩展。同时, 该方法操作流程相对规范, 对检

测人员的仪器配置要求较低, 适合在变电站日常巡视、定期状态检测以及突发停电事故初判中作为首选定量定位技术之一。

1.2 低压脉冲反射法

低压脉冲反射法是通过向故障相注入低压短脉冲信号, 借助电缆阻抗突变点产生的反射波特征来推算故障位置。运维人员在现场检测时, 通过专用脉冲发生器向线路发送低压脉冲, 当脉冲在传播过程中遇到开路、短路或低阻故障点时, 会形成明显的回波信号, 仪器系统根据发射与反射之间的时间差, 并结合电缆传播速度参数, 即可计算出故障点距离。该方法在 220 kV 电缆开路故障、低阻击穿故障中的适应性极强, 能够在无需完全掌握线路全长信息的情况下完成定位计算, 适用于城市地下复杂敷设环境^[2]。由于大量 220 kV 电缆线路穿越管廊、隧道和多层地下空间, 线路图纸不完善或路径变更频繁的情况较为普遍, 低压脉冲反射法的无路径依赖特性, 使其成为运维单位进行应急抢修定位时的重要技术支撑。

1.3 脉冲电流法

脉冲电流法主要针对高阻击穿类和闪络性故障, 通常由高压发生器对故障点进行受控击穿, 击穿瞬间会在电缆中形成明显的行波电流信号。检测系统通过高速采集设备记录电流波形在电缆两端的往返时间, 并依据传播速度模型推算故障点具体位置。由于击穿瞬间的电流行波具有强烈的时间特征, 因此该方法对高阻、间歇性闪络故障的识别能力明显优于常规低压检测手段^[3]。在 220 kV 电缆长期运行环境中, 绝缘受潮、老化变质等问题容易诱发闪络类故障, 若仅依赖传统

作者简介: 罗诗铭 (1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电力工程电气领域。

反射检测, 很难准确捕捉。脉冲电流法通过主动制造可控击穿条件, 使原本不稳定的隐患故障转化为可测量的电气信号, 从而大幅提升定位成功率, 运维单位可在不完全开挖的前提下快速锁定故障区段, 为后续精准检修提供关键数据支持。

1.4 万用表与直闪法联合检测

万用表法是通过对比缆芯与金属屏蔽层之间电阻参数的测量, 快速区分开路故障、断线故障等基础性问题, 当测得阻值为无穷大时, 可初步判断为开路故障, 而当阻值呈现为原缆芯电阻的两倍左右时, 则可判定为断线类故障。直闪法主要用于高阻闪络性故障的进一步定位, 通过高压闪络使故障点产生电流行波, 并利用测试端捕获到的反射电磁波波形的传播时间差, 从而推算故障点距离^[4]。二者联合应用, 一方面可快速筛选故障类型, 另一方面可通过闪络信号对复杂隐患点进行精确定位, 缩短停电排查时间, 减少大面积盲目开挖带来的经济损失。

2 220 kV 高压电力电缆常见故障及原因

2.1 机械损伤类故障

在电缆敷设、回填、道路改造及综合管线施工过程中, 电缆极易受到牵引、挤压、撞击及误挖等外力影响, 当外护套或金属屏蔽层发生变形或裂纹后, 原有的密封体系被破坏, 湿气与杂质便会沿微裂缝逐步侵入绝缘层内部, 使电缆的介电性能发生根本性变化^[5]。机械损伤会直接导致电缆外护套应力分布失衡, 使局部区域形成电场畸变区, 在高电压长期作用下, 这些区域会成为局部放电的高风险点。电缆弯曲半径不足或过度牵引还会造成导体绞合松弛及绝缘层微裂纹扩展, 使热循环过程中的热胀冷缩进一步加剧裂纹扩散速度。局部放电产生的热量会使绝缘材料发生碳化, 形成导电通道, 引发不可逆的击穿事故。

2.2 绝缘受潮类故障

绝缘受潮是指水分侵入改变绝缘介质的电气参数分布, 进而引发电场畸变与局部放电增强效应。水分一旦进入绝缘层内部, 会使原本均匀的电场分布产生集中现象, 局部区域电场强度显著升高, 极易形成放电通道。受潮状态下, 绝缘材料的体积电阻率与击穿强度同步下降, 电缆对暂态过电压和运行负荷波动的耐受能力显著减弱, 使系统稳定性明显下降。从形成机制上看, 绝缘受潮多与电缆端部密封处理不规范、护套完整性不足以及长期处于高湿地下环境密切相关。当水分通过端部、接头或护套缺陷逐步渗入后, 在热电耦合作用下会形成“水树化”结构, 使绝缘层内部产生大量微通道, 并在高电压激励下成为持续性的局

部放电源。局部放电释放的热量会加速绝缘材料分子链断裂, 使老化进程呈指数级增长, 最终形成贯穿性击穿路径。

2.3 绝缘老化变质类故障

绝缘老化变质是 220 kV 高压电力电缆不可逆的内生退化过程, 是因为高分子绝缘材料在长期电场、热场及环境应力耦合作用下发生的分子结构失稳导致性能退化。当电缆长期处于大电流运行状态时, 导体产生的热量会使绝缘层内部形成持续的热应力场, 促使分子链断裂与交联度下降, 材料结构逐步疏松, 击穿强度和介电常数发生明显变化^[6]。过负荷运行、瞬态过电压会加剧绝缘材料的电应力集中, 使内部局部放电活动更加频繁。放电产生的等离子体和热效应不仅会烧蚀绝缘材料表面, 还会形成导电碳化路径。随着老化程度不断加深, 电缆对系统扰动的容错能力迅速下降, 一旦发生电压波动或负荷冲击下, 便会引发击穿事故。

2.4 设计缺陷及制造质量故障

若在设计阶段电场分布模型不合理、绝缘结构冗余不足或应力控制参数设置不当, 会使电缆在额定运行状态下仍存在潜在电应力集中区。该类结构缺陷会在长期运行过程中逐步演化为局部放电源, 使绝缘系统始终处于慢性损耗状态。制造环节中的绝缘层厚度偏差、同心度不足、材料杂质残留及护套致密度不达标等问题, 会进一步放大电场畸变效应, 导致电缆在投运初期即处于隐性亚稳态运行。此类缺陷虽不易通过外观检查发现, 但在长期电应力与热循环作用下, 会快速演变为放电通道或击穿通路, 使电缆提前进入失效阶段。由设计与制造质量引发的故障往往呈现出重复性高、事故影响范围大、维修成本高等特点。

3 220 kV 高压电力电缆故障处理措施

3.1 机械损伤类故障处理措施

运维单位在完成故障定位后, 应首先对损伤区段进行物理完整性评估, 通过护套电阻测量、红外热成像及局部放电检测等手段, 判定裂纹扩展范围和绝缘碳化程度, 并据此确定必须切除的最小安全长度。对已经出现护套开裂、金属屏蔽变形或绝缘层微裂纹扩展的电缆段, 应实施切除重建处理, 防止残余缺陷在后续热循环中继续扩展。在修复过程中, 应同步重建金属屏蔽连续性、应力控制结构及防水密封系统, 使修复区的电场分布、热膨胀性能与原线路保持一致, 避免形成新的电应力集中点^[7]。同时, 隧道及管廊敷设线路还需对托架间距、弯曲半径及固定夹具进行重新校核, 通过机械支撑再平衡降低运行中的二次拉伸

与挤压风险。修复完成后,应对修复线路进行耐压试验、局部放电检测,并建立该线路的后续重点监测档案,在运行初期实施高频次温升、泄漏电流监控,防止机械损伤类隐患转化为重复性击穿事故。

3.2 绝缘受潮类故障处理措施

运维单位应首先对受潮区段实施水分入侵源排查,重点检查端部密封、接头压接结构及护套完整性,锁定水汽进入路径。对于已经形成水树化结构、局部放电持续活跃的区域,应实施受潮段整体切除重建处理,并同步更换端部密封组件,避免仅通过烘干或注胶等表面手段进行临时性处理。在修复过程中,应重新构建端部防水锥、应力控制层及金属屏蔽连续系统,使修复区的电气结构达到初始设计状态。对全线还应实施耐压试验与局部放电趋势扫描,识别潜在受潮风险点,并对高湿区段增设护套防水层或套管防渗结构,抑制地下水汽继续侵入。

3.3 绝缘老化变质类故障处理措施

运维单位在确认老化区段后,应对局部放电活跃度、温升曲线及绝缘耐压裕度进行综合评估,区分可延寿区段与必须切除区段。对已经出现碳化通道或耐压能力明显下降的区域,应果断实施切除重建,而对尚处于早期老化阶段的区段,则可通过绝缘强化、运行条件优化进行延寿处理。另外,运维单位应通过耐压试验、振荡波检测建立新的健康基线,并对老化敏感区实施端部密封强化、绝缘涂层增强及防潮阻隔处理。

3.4 设计缺陷及制造质量故障处理措施

运维单位应对故障批次电缆进行参数倒查,重点核验绝缘层厚度、同心度、护套致密度及端部密封结构是否满足设计要求,并据此判定是否存在系统性制造偏差。对确认存在设计或制造缺陷的区段,应实施整段替换处理,避免缺陷结构继续在系统中运行。同时,应将倒查结果纳入设备采购与施工标准修订体系,强化后续工程中的质量准入门槛。在施工层面,应重新核验弯曲半径、牵引力控制、接头制作工艺等关键参数的执行情况,并通过施工档案化管理确保全过程可追溯,从根本上降低故障发生率。

4 220 kV 高压电力电缆故障的防范对策

4.1 强化施工源头管控

220 kV 高压电力电缆故障的预防应从施工源头入手,通过严格的过程管控减少结构性隐患的形成^[8]。在电缆敷设前,施工单位应依据线路设计参数对敷设路径、转弯半径及托架布置进行复核,避免因路径变更或空间受限而导致弯曲半径不足、牵引力超标等问

题。在敷设过程中,应采用专用牵引设备对牵引力进行实时监控,防止导体拉伸变形和绝缘层微裂纹产生。同时,对接头制作、端部封堵及护套密封工序应实施全过程旁站监督,重点检查应力锥安装、屏蔽连续性恢复及防水密封质量,杜绝砂眼、褶皱和封堵不严等工艺缺陷进入运行阶段,从源头上减少机械损伤、受潮及结构缺陷类故障的发生。

4.2 建立运行状态监测机制

在电缆投入运行后,应构建以状态监测为核心的动态防范体系,使隐患在形成初期即可被识别和处置。运维单位可通过分布式光纤测温、局部放电在线监测及接地电流监测手段,对电缆沿线关键节点实施连续数据采集,形成温升、放电强度与泄漏电流的趋势模型,一旦出现异常偏移即可提前预警。对互联箱、终端头和接头区域,应实施高频次红外测温与专项巡检,及时发现接触不良、密封老化等潜在隐患。

5 结束语

220 kV 高压电力电缆故障的形成并非单一因素作用的结果,而是多种条件长期叠加的综合体现。通过合理应用低压脉冲、脉冲电流、电桥检测等技术手段,可实现故障位置与性质的快速判定,为后续修复提供可靠依据。同时,结合针对性处理措施,可有效抑制隐患扩展并延缓绝缘系统老化进程。未来,相关单位应在加强智能化监测体系建设的基础上,进一步完善高压电缆全寿命周期管理机制,从而持续提升220 kV 高压电力电缆系统的运行安全水平。

参考文献:

- [1] 高文江,胡国林.高压电力电缆接头的可靠性与故障诊断研究[J].内江科技,2025,46(11):11-12.
- [2] 钟云能,成奕佳.110 kV及以上高压电缆运维方式研讨[J].冶金动力,2025(05):40-43.
- [3] 于金亮,冯俊博,齐福东,等.基于人工智能的高压电缆接地故障诊断方法研究[J].科技创新与应用,2025,15(19):44-47.
- [4] 赵世喜.高压电力电缆故障分析与探测策略优化[J].电力设备管理,2025(12):29-31.
- [5] 王锋.电力电缆故障诊断与定位方法研究及应用[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [6] 郑灿.高压电力电缆故障诊断与故障预警的研究[D].济南:山东大学,2024.
- [7] 莫杰锋,刘家鸿,杨智针,等.高压电缆中间接头的故障原因与对策分析[J].电子技术,2023,52(10):204-205.
- [8] 杨宝金.高压电力电缆故障分析及处理[J].中国设备工程,2023(16):142-144.

供水机房设备维护与维修技术的优化方法

莫超源

(桂平市自来水厂, 广西 桂平 537200)

摘 要 水是生命之源、生产之要、生态之基, 供水系统作为城市的重要基础设施, 承担着保障居民生活用水与工业生产用水的关键职能。供水机房内水泵、阀门、控制柜、变频器等核心设备的正常运行, 是供水系统稳定供水的前提条件。基于此, 本文立足供水机房设备运行特点, 从日常维护、故障维修、管理优化等维度构建全流程工作体系, 提出针对性实施路径, 以期提升设备运行效率、降低故障发生率、保障供水系统持续稳定运行提供实践参考。

关键词 供水机房; 设备维护; 故障维修; 分级巡检技术; 专项保养

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.019

0 引言

随着城市化进程的加快和用水需求的不断增加, 给水机房设备的运行负荷越来越大, 设备的老化和故障的频繁发生越来越突出, 这对维护维修工作提出了严峻的挑战。在此基础上, 深入探讨供水机房设备检修和维护的科学方法并构建系统化和规范化工作机制对于确保供水安全和提高服务质量具有十分重要的实践意义。

1 供水机房设备维护目标与实施

供水机房是城市供水系统中的核心枢纽, 机房设备运行是否平稳直接影响着住户日常用水是否安全、稳定和足量供给, 也影响着工业生产是否能够正常进行。所以, 供水机房设备的保养和维护工作尤为重要, 保证设备平稳、可靠地运行是关键。供水机房中的泵、电机、阀门和控制柜, 各个环节紧密连接在一起, 共同组成了复杂的供水系统, 一旦某一装置发生故障, 则会造成整个供水流程的中断, 从而影响居民用水及企业的生产^[1]。通过定期维护保养, 如给水泵润滑、紧固螺栓、查看密封情况以及对电机进行绝缘检测和清理灰尘, 可以及时发现和应对设备可能出现的各种问题, 把故障隐患扼杀于摇篮中。同时, 建立一套完整的维修机制, 当设备出现突发故障时能快速反应、及时抢修, 尽量减少设备停运时间, 确保供水系统不间断工作, 给城市带来稳定、可靠的水源。

2 供水机房设备维护技术及应用方法

2.1 分级巡检技术, 加强对设备运行监控

分级巡检遵循“精准覆盖, 集中发力”的核心理念, 构建了一个“日常巡检—定期抽检—专项排查”

的三级监测体系, 以确保设备的运行状态能够被实时控制, 风险隐患能够及时预防。日常巡检需要清晰列出每天必检项清单并安排人员值班记录, 实时采集水泵、变频器和控制柜核心设备的电压、电流、压力和流量等主要运行参数并准确记录, 在设备运行过程中, 同步进行异响、渗漏和异常发热等潜在故障的排查, 并严格执行“每天检查一次, 每次检查记录一次”的闭环管理规定。定期抽检按每周、每月分级设置检测频率和内容: 每周抽检聚焦设备的润滑状况, 密封件的完好度, 线路连接紧固性等容易丢失的部分, 利用红外测温仪和万用表这类专业工具进行准确的检测, 发现零件磨损和线路松动的情况; 每月抽检结合技术、运维等多个部门的工作人员, 对设备的全月操作数据进行综合复盘和分析, 通过与历史同时期数据的对比, 准确辨识参数的波动情况, 提前判断可能存在的故障隐患^[2]。专门的排查工作主要集中在汛期、极端高温和寒冷的天气条件, 以及设备大修和故障修复后的关键环节, 特别是对应急供水设备的启动性能进行了重点验证、备用电源的带载测试及其他工作, 保证了设备在极端工况下能平稳地运行^[3]。

2.2 专项保养维护, 延长设备的寿命

专项保养以设备关键特性为核心, 量身打造差异化的维护方案, 综合考虑设备的运行规律和损耗特点进行精准保养, 尽可能地提高设备的使用寿命。对于水泵设备而言, 需要定期对轴承的润滑状态进行检查, 并根据设备的运行时长以及工况的不同及时对适配标号的润滑油进行更换, 以免因轴承干磨而导致部件受

作者简介: 莫超源 (1977-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机电设计、安装和维护。

损；定期将叶轮内杂物、水垢进行清洗，并检查密封环的磨损情况，及时替换老化失效密封件，避免漏水漏气造成运行效率降低^[4]。电气设备的检修主要集中在控制柜和变频器这两个核心上，对柜内进行经常性的除尘和清洗操作，并对线路接头的松紧度和绝缘层的完整性进行详细验证，采用绝缘电阻表对线路的绝缘性能进行检测，并对变频器的运行参数进行重新校准，以确保电气系统的长时间稳定运行。阀门、压力表、安全阀及其他辅助设备需要定期进行启闭可靠性校验和精度检测；在阀门丝杆和阀芯位置涂防锈剂以防锈蚀和卡涩；安全阀按照规范周期送入专业机构进行校验以保证起跳压力的准确性；压力表的定期校准确保了数据采集的准确性。泵体叶轮和过流部件利用高压水射流和专用除垢剂相配合，去除粘附在叶轮上的顽固水垢和杂质，并在清洗之后进行叶轮静平衡度测试，如果偏差大于5 g则需要及时修正配重，以免在工作过程中剧烈振动加重轴承的损耗。对于控制柜内的接触器、继电器等电磁部件，需要定期检查触点的烧蚀情况。当烧蚀面积超过10%时，应立即进行打磨或更换。同时，使用力矩扳手检查二次回路接线端子的压紧力矩，以确保满足设备手册的标准要求。对于那些长时间处于停机备用模式的设备，建议每个月至少进行15分钟的空载试运行，这样可以有效避免轴承油脂的固化和阀芯的卡阻，确保设备始终保持在一个良好的备用状态。

2.3 智能预警技术，故障准确预判

智能预警技术赋能为供水机房设备维护由被动抢修向主动预防转变提供了关键性技术手段，其核心是建设“智能传感采集—数据算法分析—分级报警处置”数字化运维体系以提高故障预判精准度和时效性。从硬件部署的层面上看，需要给水泵机组增加振动传感器和温度传感器，给电气控制柜分配电流电压监测模块以及给供水管网设置压力变送器，所有的传感设备都连接到机房的智能运维平台上，以实现设备运行数据的实时采集和传输，采集频率被设定为每5秒一次，以确保数据的连续性和完整性。平台携带了基于机器学习故障诊断算法的模型，需要提前输入水泵和变频器历史故障数据及正常运行参数阈值，通过对设备运行数据的实时比对和分析，系统能够准确地识别出异常的运行趋势。例如：当水泵轴承的温度以每小时超过2℃的速度持续升高，或者振动幅度超过额定值的15%时，系统会自动识别出轴承磨损的隐患。同时，系统能够按照故障的严重程度进行三级预警等级的划分，

将一级预警与轻微异常相对应，并推送到班组运维终端进行提醒注意，二级预警对可能发生的故障进行相应的处理，引发声光报警，并告知技术人员进行现场验证；三级预警与紧急故障相对应，应急处置流程自动启动并向管理部门报告。技术人员在收到预警信息之后，需要综合运用频谱分析和红外热成像等多种技术手段对故障点进行进一步核验，如使用红外热像仪对控制柜内温度分布情况进行探测，并对接触不良线路接头进行定位；利用频谱分析仪对泵的振动频率进行分析，判断叶轮的不平衡失效部位。对于预判到的故障隐患需要有针对性地进行处理，优先选择在线维护，尽量避免非必要停运，尽可能地保证供水连续性。

3 供水机房设备维修技术优化措施

3.1 快速诊断、精确定位

快速诊断和精确定位是提高设备维修效率的关键，通过“数据监测+现场排查+技术赋能”的三维模式，可以实现故障的快速定位，在供水机房智能化监测平台的支持下，对设备的运行数据进行实时抓取，在发生电压不正常波动、压力突然下降、流量不稳定等故障时，系统会自动启动报警，技术人员综合历史运行数据、设备维护档案等进行初步的分析，并判断出故障发生的大概范围^[5]。现场排查时，遵循“先易后难，先外后内”原则，首先检查设备外观是否存在渗漏、异响、焦味等直观问题，再使用专业工具开展深度检测：利用红外测温仪检查电气元件的发热点，利用万用表测试线路的通断，利用超声波流量计进行流量数据校验，针对水泵、阀门及其他机械部件，着重分析轴承磨损、叶轮卡滞和密封失效的常见故障点。对于复杂的故障，融入故障诊断系统的实现方法，利用大数据分析和振动监测的技术手段，准确辨识出设备内存在的隐性问题，如电机绕组的绝缘老化和变频器模块的破损。同时，对常见的故障类型及诊断经验进行总结，构建故障诊断知识库，清晰地描述不同故障典型特征、检查步骤和判断标准等，有助于维修人员迅速形成诊断方案，避免盲目拆机、扩大故障范围，实现“分钟级别的响应，小时级别的定位”。

3.2 标准流程、规范操作

标准流程对于确保维修质量和避免安全风险至关重要，可以构建“故障报告—方案拟定—安全交底—检修执行—现场清理”全过程规范体系，在故障上报环节中，确定报告的渠道、内容和期限，维修人员需要对故障的时间、现象和影响范围进行详细的记录，并形成书面的故障报告，作为制定方案的依据。在方

案制订阶段,以故障诊断结果为依据,并结合设备技术手册和安全规范,制定有针对性的维修方案,确定维修的步骤、需要的工具、备件型号和安全注意事项,复杂的故障需要组织技术人员进行会审,以保证方案的科学性和可行性。安全交底在工作之前是必须要做的,要给维修人员讲清楚工作中存在的风险点,比如电气设备停电接地、高空作业防护和有限空间通风,配备绝缘手套、安全帽、防毒面具和其他防护用品,实行“停电挂牌”“双人监护”的安全制度。在检修执行期间,严格执行方案和操作规程进行操作,在拆装设备的同时记录零件的编号及放置情况,以免安装错位。在替换部件时,必须严格遵守“原厂适配,型号统一”的原则,并在紧固螺栓和接线端子时,严格控制力度和扭矩,以确保连接的可靠性。检修结束后及时对现场工具、备件及废弃物进行清理,使机房重新整齐有序,并在填写检修记录表时对整个检修过程进行详细描述。

3.3 备件保障、促进效率提高

充足且适配的备件储备是缩短维修周期、提升应急处置能力的重要支撑。构建“合理库存加精准调度加动态管理”的备件保障体系,可以对备件进行需求分析,综合考虑设备型号、运行年限、损耗规律和故障发生率等因素,制定核心备件清单,优先储备水泵轴承、密封件、变频器模块、控制柜继电器、阀门阀芯等易损、关键部位的备件,同时预留一定数量的常用工具和应急配件,如万用表、扳手、备用电源等。设立标准化的备件仓库,分区分类存放并贴有明显标志,安装温湿度控制系统和防潮、防锈、防盗等设施,以保证备件的存储质量。通过实施“电子台账+实物标签”的管理策略,能够实时地更新备件的入库、出库和库存数量等相关信息,从而实现备件的精确查询和动态监控功能。优化备件调度机制,与优质供应商建立长期合作,签订应急供货协议,明确供货周期及质保条款,保证特殊备件采购的快速性。对跨地区的供水机房,建立备件共享平台,对本地区的备件进行统筹调度,以避免重复储备和资源浪费。定期进行备件盘点和状态检测工作,及时将积压时间过长和老化失效的备件进行清理和替换,并结合设备更新换代进行备件清单调整,保证备件和设备的适配性。通过建立科学备件保障体系,避免了备件短缺造成维修停滞的问题,极大地提高了维修效率。

3.4 质量校验、保证效果

质量校验是检验维修成果、保障设备稳定运行的最后一道防线,通过“多级检测+试运行验证+长期

追踪”确保维修效果达标,检修结束后,先进行静态检测,检验设备部件的安装是否稳固、线路的连接是否标准、密封是否紧密,并使用专业的工具对电气设备的绝缘性能、接地电阻和其他关键指标进行测试,检查设备参数与设计要求的吻合程度,以保证硬件修复质量。然后进行试运行验证,分阶段启动设备:空载试运行时着重考察设备的运行是否稳定、有无异响和温度的正常变化;负载试运行时逐渐增加运行负荷,对电压、电流、压力和流量的运行情况进行监测,比较检修前与检修后的数据差别,校核设备的性能能否恢复正常。对于关键的供水设备,其试运行的时间应不少于 24 小时,并指派专职人员进行全程监控,以便及时解决运行过程中可能出现的各种问题。建立长期跟踪机制,在检修结束后的一周、一个月和三个月内对设备进行回访检查,记录其运行情况,分析检修效果。同时,在设备档案中加入维修数据,总结维修经验和不足之处,并优化后续的维修方案。如果在试运行或追踪期间发现检修质量不过关,应立即停机进行复检,找出问题的根本原因,进行再检修,直到装置完全满足运行要求。通过全流程质量校验,确保维修工作“一次就位,长期靠得住”,避免故障反复发生。

4 结束语

供水机房设备维修和保养工作是确保城市供水系统平稳运行的核心环节之一,直接影响着供水安全和服务水平。因此,需坚持预防为主、加强日常保养精细化管理和故障维修标准化流程等原则,并通过完善管理制度、提高人员素养、引进智能技术,不断优化工作体系。未来,需进一步促进维护维修工作朝着科学化、规范化、智能化方向转变,持续提高设备运行稳定性和可靠性,从而为我国城市高质量发展和居民更好的生活提供坚实的供水保障。

参考文献:

- [1] 黄文峰.做好供水机械设备管理与维修技术的见解[J].广西农业机械化,2023(03):55-57.
- [2] 郭璐娟.供水厂设备维修中水泵机械密封技术的应用[J].机械管理开发,2024,39(08):297-298.
- [3] 张浩,李云鹏.农村供水系统安全性提升工程管理策略的研究[J].水上安全,2025(11):119-121.
- [4] 袁学文.基于融合数据驱动的设备寿命预测与主动维护技术[J].装备维修技术,2025(04):18-20.
- [5] 魏逸潇.智慧城市背景下的二次供水系统集成与未来发展趋势[J].智能建筑与智慧城市,2025(10):196-198.

化工自动化仪表现场维护维修中的 常见故障及应对策略

王 乐

(陕西延长石油(集团)油田气化工科技公司, 陕西 延安 716000)

摘 要 随着油气化工行业的不断发展, 作业过程中应用的仪表设备类别较多, 为确保化工自动化设备稳定运行, 需积极开展仪表现场维护与维修工作。针对设备运转中常见的故障类型, 如电气故障、机械故障、信号故障等, 需在出现问题后迅速采取针对性维修措施, 及时解决故障问题, 保障生产线持续正常作业, 避免停工风险。本文针对常见故障提出了系统性故障排查、定期维护与检查、加强人员技能培训及规范操作规程等针对性的解决策略, 以期显著提高仪表现场维护维修效率提供借鉴, 进而保障生产安全与效率。

关键词 化工自动化仪表; 维护维修; 电气故障; 机械故障; 信号故障

中图分类号: TH86

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.020

0 引言

随着现代社会的发展, 各行业的机器自动化程度越来越高, 其中仪表设备是一个重要的组成部件, 其稳定性与可靠性影响着整个生产效率。在设备运行使用过程中, 由于长时间处于工作状态, 经常会出现设备损坏、损毁等现象。为保证设备良好的使用效果, 需做好相关的检查及检测工作, 及时分析仪表设备故障问题, 提出相应的处理对策与方法。此外, 还需规范人员操作, 获取可靠数据, 严格执行各项标准, 增强设备运行的稳定性。

1 化工自动化仪表现场维护维修中的常见故障

1.1 电气故障

在对油田气化工科技公司开工 6 年以来仪表的周期性维修记录分析中发现, 电气类故障占比高达 23%, 是导致非计划停机的主要因素。其成因可归纳为三类: 一是供电质量类, 如电压暂降、谐波干扰; 二是线路与连接类, 如绝缘老化、接头松动; 三是设备本体类, 如元件过载、继电器失效。值得注意的是, 长期运行中的机械振动, 特别是安装在机泵、压缩机本体或附近的仪表, 会诱发螺栓连接的应力松弛。本研究通过扭矩实验发现, 尤其在仪表多股线并接或不加装线鼻子的情况下, 紧固扭矩在半年内可能衰减 35%, 这直接导致了接触电阻的异常增大。这类过载故障若未受有效防护, 往往会损坏电气元件, 甚至在极端情况下引发火灾, 导致停机。

1.2 机械故障

在工业现场, 机械传动系统的失效是导致仪表设备故障停机的主要原因之一。其机理主要可归结为长期循环应力下的疲劳损伤, 如陕西延长石油(集团)油田气化工科技公司 PSA 程控阀, 长期往复开关导致阀门传动部分疲劳损伤; 界面间的磨损失效, 如膨吹阀, 采用硬密封, 运行时因磨损导致密封不严, 最终失效。具体表现为: 传动带、齿轮等核心传动部件在持续运行中, 其材料会因微动磨损、点蚀等原因导致几何精度丧失, 进而引发传动效率下降、异响乃至卡死^[1]。另一类高发故障源于密封系统的失效。仪表机械密封的老化或损坏, 不仅会造成介质泄漏, 影响测量准确性, 更可能因腐蚀性介质外泄而引发二次故障。

1.3 信号故障

信号故障属于仪表现场中存在的普遍且不易发现的故障类型之一, 该类型的故障往往表现为传感器输出信号异常或者丢失, 导致测量结果不准确, 影响系统的运行状态。对于测量仪表而言, 其检测回路工作的稳定性会受到外界环境的影响, 如果外界环境温度或者湿度发生变化, 传感器的工作状态也会发生改变, 导致其输出信号产生偏差。例如: 当传感器处于高温或者低温下工作时, 其输出信号将会有所变化, 在一些工业场合中由于电气设备较多, 在此情况下会出现电气设备产生的电磁干扰、射频干扰, 影响信号的传输质量, 使接收端接收到的信号无法真实地反映实际情况^[2]。

作者简介: 王乐(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 仪表维修、维护及发展。

1.4 通信故障

通信故障为仪表现场故障中最复杂、最广泛的故障，当通信中断或者数据传输延迟时，会导致无法将实时数据传送至控制系统或监控系统，影响设备运行。通信故障出现的原因有很多，如网络故障、设备不兼容、通信协议配置错误等。其中以网络故障居多，特别是现在的自动化控制系统更注重网络稳定的情况，如果设备与控制系统的通信线路出现断开、接触不好或网络迟延等现象，则会导致通信中断情况。此外，设备不兼容也是造成通信故障的一个原因，特别是新旧设备间的协议、硬件接口等不能相容，会出现不能正常进行数据交换的问题。在系统更新或固件版本不同等情况下，很有可能会造成通信协议出现错乱，从而导致数据传输错误。

2 化工自动化仪表现场维护维修引发故障的原因

2.1 设备老化

由于设备使用时间较长，内部的一些零件会因为磨损、腐蚀或者疲劳等问题，造成设备自身的工作性能出现逐渐下降的情况。例如：电容、电阻等电子元器件，使用久了之后都会有所损坏；传感器本身对信号的灵敏程度和精确度都会出现一定的老化问题，导致测量数据有误差；机械类的组件，如齿轮、轴承等，在长期运转后影响机器正常运行，且会出现噪声、震动、卡住等状况，还会导致电路故障情况的发生，如电源不稳、接头接触不良等。

2.2 安装与调试不当

如果装置的安装方法不对，或者没有调试到位，则很有可能造成装置不能正常开启或运转。另外，常见的有电气线路接反、机械构件配合不好、装置位置安装不合理等现象。在安装过程中，若不按标准进行，则会出现连接有误或者连接处松动，最终会引起电气方面的故障。在调试时由于相关的一些参数设置不准确，装置无法给出正确值，如设定量程不对，传感器的校验不正确等，均会影响装置的正常工作^[3]。

2.3 操作不当

操作不当是造成仪表故障最常见的原因，特别是现场操作员由于经验不足，或者未按照规定操作时，造成设备出现故障，出现错误设置设备参数、忽略报警信号和不按时巡检等现象，最终使设备长期处于非正常运行状态。例如：开机高负荷时，不按开机顺序启动设备，则导致开机启动时无过载保护而出现电气或者机械事故。

2.4 外界环境因素

外界环境因素影响仪表设备的情况较多，如温度、湿度、电磁干扰、灰尘等均有可能成为导致仪表设备

故障的因素。当温度过高时，会使设备过热而使电子元件性能变差，传感器精度变低，严重时可将仪表设备损毁；如果温度过低，元件出现结露或电路不稳定的现象，影响设备工作时的准确性及反应速度^[4]。另外，湿度太大还会出现电气件因受潮而造成短路或接触不良，影响设备的正常使用，在湿度变化过大时使设备元件发生形变，造成设备的内部电路连接不稳定的现象。

3 化工自动化仪表现场维护维修策略

3.1 故障排除

故障排除首先要检查与诊断，迅速确定故障的发生范围，检查设备表面、电源、接口是否正常，是否存在异常声音或显示等故障现象，进行简单的故障排除。其次，观察设备运行状态、传感器状态，分析判断故障的发生是属于硬件问题还是软件问题，确定发生故障的具体范围和性质。例如：陕西延长石油（集团）油田气化工科技公司一台温度传感器因供电不稳而报警，经过初步检查发现电源接头松动，重新固定后问题得到解决。再次，需观察设备运行状态及传感器状态，分析判断故障是硬件问题还是软件问题，主要用到万用表、示波器等设备工具，对设备内部进行测量检测，然后逐渐查出存在问题的电路、元件、模块等^[5]。如果设备具备自检功能，还可结合设备错误代码及日志信息来快速判断故障类型，如一台流量计在运行中出现误差，通过读取设备日志发现软件版本过旧，更新后问题得到解决。最后，在明确故障原因之后更换/修复故障部件，参照该设备制造厂家的标准进行维修，并在更换或者修复时要符合相关要求，防止出现新的问题。

3.2 定期维护与检查

通过定期检修，人员能提前预知一些故障的发生，避免出现突然性的故障。日常维修涉及外观检查、内部清洁、润滑、螺丝紧固、电路连接等，对于长期处于恶劣环境中运行的设备而言，不定期的检查尤为重要，通过设备维修，了解设备运转状态是否良好，对温度、压力、流量等主要指标进行分析，保持在正常范围内；对于长时间使用产生的精确度失准现象，定期做好检测、校准工作，所用的标准仪器均须经过相关机构的认证，且按照规定标准进行校准工作。通过不断地记录、跟踪、修整，在后续工作中作为隐患故障模式预先辨识的参考和经验。对于风险较小的设备定期开展风险评估，有效降低其故障率，如对设备的薄弱点、易发生故障点、影响设备正常运行的环境等进行评估，做好相应的设备预防性维修计划，增强设备运行可靠性。

陕西延长石油(集团)油田气化工科技公司甲醛反应器进料阀,经过3年的运转,未定期进行维护工作,由于设备一直处于比较潮湿的环境中,导致阀门反馈电路板被水侵袭,此时阀门处于全开状态,反馈阀门未打开,导致甲醛装置切料停工。最终生产部门通过排查之后找到了出现此情况的原因,由于调节阀反馈外壳密封出现问题,导致内部的水分渗入设备中,从而使电路板出现短路的情况。针对上述出现的问题,也做出了相关的处理措施,具体处理如下:(1)增加设备巡检频次(每月开展外部检查),维护设备密封性;(2)增加防雨棚设备,减少雨水等进入电气设备;(3)更换老化的密封圈、电路板,有效防止由于设备故障而导致生产停车。通过处理措施的制定及实施,从根本上解决常规问题,有效提高设备运行的稳定性以及生产的安全性。

3.3 培训与操作规程

操作人员的技术水平直接影响着设备的稳定性,所以操作人员需要参加相关的技术培训,如熟悉设备的基本原理、了解设备常见故障的现象及排除方法、掌握设备日常保养技能、学会操作及监视技巧等。通过单位定期组织技术培训与考试,提高操作人员的综合素质,使操作人员遇到突发状况时作出正确的判断和选择,避免由于人为因素影响而导致设备故障的发生。同时,健全各项操作规程制度,是对设备安全使用的基本保障,对不同设备应有不同的操作规程,操作规程要按照设备的技术特性、工作环境、安全要求等具体规定操作中各个环节的操作要点及注意事项,操作人员必须严格按操作规程执行,不得擅自改动,避免因误操作而引起设备损坏或安全事故。此外,经常性地检查操作规程的执行情况,发现有违反规程现象,要及时纠正,并提出必要的惩罚措施,以促进规程更好地落实。在此基础上,加强人员的安全意识培训,让操作人员能识别出一些潜在的风险,避免发生安全事故。

3.4 故障分析与改进

故障模式影响分析(FMEA)是对设备发生故障原因的一种系统分析方法,通过判断每个故障模式的发生概率、严重度、可检测度等判别出需要优先控制的故障模式,从而降低风险。例如:设备的设计到制造、安装、运行等各个方面的薄弱点,彻底消除故障,在团队协助下帮助定位故障的根本原因,为以后的设备优化改进提供可靠根据,并提前预控,避免或降低设备故障率。同时,构建起良好的回检机制,做好设备故障数据、现场操作人员、用户使用等方面信息的收集汇总工作,及时发现设备的隐性缺陷,适时做出相

关技术改进^[6]。在持续改进中以数据分析为依托,针对实际情况确定改进方案,并进行阶段性校验。通过各项措施的执行落实,提高设备整体性能,延长设备使用寿命,确保设备能适应环境的变化,在各种工作环境下仍能稳定运行。

陕西延长石油(集团)油田气化工科技公司引黄工程流量计使用时间较长,出现读数偏差现象,致使生产不精确。经过对流量计的检测,发现其读数相较于实际流量偏低,偏差值达到17.3%。在实际需要测量流量为600 m³/h的情况下,流量计只显示496.2 m³/h,造成了原材料的浪费和影响生产计划的准确性。同时,因为引黄水质问题,容易形成水垢附着于流量计内壁,且原安装位置不合理,前后直管段长度不够,管道中有气泡和杂质,造成测量的结果不正确。根据实际情况重新设计新的流量计安装位置,并让前后管道里面流动更加平稳,避免气体以及杂质等混入。同时,使用灵敏度较高的电磁流量计,提高测量精度和响应速度,采取定时清理的制度,每季度对流量计里的积垢进行清理。经过相应的解决处理之后,相同问题未再发生,还为设备的维修改进工作提供了可靠依据,保证生产的稳定性。

4 结束语

通过开展仪表设备现场的维护与维修工作,操作人员能第一时间发现问题,结合实际情况深度分析,维修人员有较强的技术能力及丰富的实践经验,对出现的故障能准确判断,并提供适宜的应急预案,对设备加强维护和保养,降低故障发生率。同时,为企业的安全生产提供可靠保障,并加大设备维护和保养力度,满足企业各阶段的生产需求,降低投资成本,创造更大效益。

参考文献:

- [1] 高焕焕.化工仪表日常维护探究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(06):21-23.
- [2] 张青.石油化工仪表自动化设备常见故障及智能检测技术探究[J].山东化工,2024,53(23):203-205.
- [3] 张成贵.化工仪表故障诊断与维修技术的系统研究[J].仪器仪表用户,2024,31(08):15-17.
- [4] 马英.化工仪表维护与故障检修的思路及措施探讨[J].化工管理,2023(28):121-123,130.
- [5] 陈东昇.关于化工仪表自动化设备的预防性维修研究[J].广东化工,2022,49(15):198-200.
- [6] 孙永刚.浅谈炼油厂化工仪表的使用和维护方法[J].中国设备工程,2022(11):54-56.

大型化工设备预防性维护体系优化研究

王其海

(南通星辰合成材料有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要 本文以某石化企业公用工程系统为研究对象, 深入剖析了离心式空压机组、冷冻机组及循环水泵在固定周期检修体制下暴露的时机错配问题, 揭示了单维度监测技术在高频冲击捕捉、瞬态工况追踪及背景噪声分离方面的技术短板, 探索了基于设备劣化规律的动态维护触发机制, 研究了小波包分解、短时傅里叶变换、自适应噪声抵消等多维监测技术的集成路径, 构建了状态驱动的备件库存弹性管理模型。研究结果表明, 劣化曲线引导的维护决策能够有效消除过早干预与滞后响应的矛盾, 多维监测技术融合显著提升故障诊断准确性, 动态库存机制在保障备件供应连续性的同时实现资金占用优化。

关键词 大型化工设备; 预防性维护体系; 维护作业流程标准化

中图分类号: TQ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.021

0 引言

设备管理是化工企业生产的基础。它的核心体现在以现代设备管理思想与信息技术的整合为依托, 以企业设备资产、设备台账为基础, 通过对检修计划、工单、故障等业务的执行与跟踪, 管理设备全生命周期内的管理要素, 提高设备可靠性和维修效率, 降低维修成本。而对设备的维护管理是每个设备管理人员必须面对的至关重要的问题。传统的设备管理模式通过手工收集信息, 反馈慢、数据易失真, 造成设备管理的脱节, 无法及时掌握设备的使用情况, 不能起到预防性维护效果, 因不能及时更换设备可能造成巨大的经济损失。因此, 预防性维护是设备管理的基础。

1 工程概况

某大型石化企业公用工程系统于 2016 年投产运行, 主要承担全厂工艺装置的空气供给、冷冻供应及循环冷却任务, 核心设备包括离心式空压机组 4 台、离心式冷冻机组 3 台、离心式循环水泵 8 台及配套的板式换热器 52 台。离心式空压机采用多级叶轮串联结构, 单机功率达 28 MW, 转速稳定在 6 500 rpm 运行区间, 叶轮在高速旋转状态下承受交变应力作用, 轴承振动值、轴位移、油温、出口压力等关键参数需持续监控以防止突发性故障导致全厂供气中断。冷冻机组配置离心式压缩机作为制冷核心部件, 蒸发器内制冷剂在负压环境下沸腾吸热, 冷凝器侧冷却水结垢导致换热效率每运行 90 d 衰减约 12%, 压缩机负荷率被动升高

加剧轴承磨损速率。循环水泵叶轮在含悬浮物的冷却水介质中长期运转, 泵壳内壁冲刷磨损使叶轮与壳体间隙从设计值 0.8 mm 扩大至 1.5 mm 后扬程下降 8%, 影响换热器侧冷却水流量分配。现行维护体系以固定周期检修为主导模式, 大修周期设定为 18 个月, 中修周期为 9 个月, 日常点检频次为每班次 1 次, 维护计划编制主要依赖历史经验数据, 缺乏设备实时状态反馈支撑。备件库存管理采用安全库存法设置储备定额, 关键备件如空压机叶轮、冷冻机组轴承因采购周期长达 5 个月常出现库存积压占用资金约 950 万元, 亟需优化既有维护体系, 提升设备可靠性, 降低维护成本。

2 大型化工设备预防性维护体系现状分析

2.1 设备维护周期设定偏差分析

该公用工程系统现行 18 个月大修周期源自行业通用标准, 未充分考量离心式空压机组实际运行工况差异。空压机在 6 500 rpm 额定转速下连续运行时, 轴承承受径向载荷达 35 kN, 润滑油膜厚度随温度升高从初始 18 μm 逐步减薄至 12 μm , 金属接触摩擦使磨损速率在运行 8 000 h 后呈指数级增长, 固定周期检修模式难以捕捉轴承性能衰退的临界时点^[1]。在冷冻机组方面, 蒸发器内制冷剂蒸发温度每降低 1 $^{\circ}\text{C}$ 会使压缩机吸气压力下降 0.03 MPa, 压力比增大导致压缩功率上升 4% 至 6%, 但 9 个月中修周期采用统一时间节点安排清洗作业, 导致部分运行周期内换热效率已严重衰减, 却仍需等待计划检修窗口; 另有部分周期设备

作者简介: 王其海 (1986-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化工设备技改施工安装。

状态良好,却被动停机造成冷量供应中断。循环水泵日常点检每班次1次的频次设定参照常规设备标准,对于28 MW级大功率空压机组而言检测间隔过长,8 h的点检周期内轴承振动值可能已从预警阈值3.2 mm/s演变为故障状态5.8 mm/s,点检频次与设备风险等级匹配度存在明显缺陷,叶轮叶片疲劳裂纹在萌生阶段无法被及时发现,最终演变为断裂事故。

2.2 状态监测技术应用局限性分析

离心式空压机组现有监测系统仅采集轴承振动值、轴位移、油温三类基础参数,监测维度单一严重制约故障诊断准确率。空压机轴承在高速旋转工况下承受的载荷呈现周期性脉动特征,滚动体与内外圈接触区产生的冲击脉冲信号频率范围覆盖500 Hz至8 000 Hz宽频带,现有振动传感器采样频率设定为1 kHz明显不足,奈奎斯特定律要求采样频率至少达到信号最高频率的2倍才能避免频谱混叠,监测系统未能捕捉高频冲击成分,导致轴承外圈剥落等早期故障特征被淹没在背景噪声中,误判率高达32%,使约四分之一的非计划停机属于过度维护范畴。频谱分析技术应用层面存在更深层次缺陷,振动信号经快速傅里叶变换得到的频谱图仅反映稳态工况下的频率成分分布,空压机在启停过程中转速从0 rpm升至6 500 rpm的瞬态阶段,轴系固有频率与激振频率发生共振时振幅会出现突变峰值,传统频谱分析无法追踪时变特征,导致共振风险识别能力缺失^[2]。

冷冻机组压缩机轴承故障诊断面临类似困境,轴承内圈缺陷产生的特征频率为117 Hz,外圈缺陷频率为83 Hz,滚动体缺陷频率为156 Hz,但制冷剂在蒸发器内沸腾产生的气泡溃灭噪声频率分布恰好集中在80 Hz至200 Hz区间,背景干扰信号与故障特征频率发生频谱重叠现象,仅依赖频域分析方法难以实现有效分离,诊断准确率仅为58%,远低于工业应用要求的90%基准线。循环水泵叶轮动平衡状态监测同样受制于技术手段局限,泵在输送含砂量3 g/L的冷却水介质时,固体颗粒对叶片的非对称冲蚀使质量分布持续偏移,不平衡量每运行1 000 h增加约15 g·cm,现有监测系统仅在停机后采用便携式测振仪进行离线检测,运行期间不平衡量演变过程完全处于监控盲区,预防性维护决策缺少动态劣化趋势数据支撑,监测盲区直接削弱维护体系主动预防能力。

2.3 备件库存管理缺陷分析

安全库存法设置储备定额的管理模式未建立备件消耗与设备状态的动态关联机制。空压机叶轮、冷冻

机组轴承等关键备件采购周期长达5个月,库存管理人员为规避缺货风险倾向于提高安全库存水平,950万元库存资金占用中约38%属于超期储备件。备件需求预测仅依据历史消耗统计数据线性外推,未考虑设备在不同寿命阶段的故障率变化规律,投产初期浴盆曲线早期故障阶段备件需求波动剧烈时预测偏差尤为突出。库存周转分析显示部分型号机械密封件库龄超过36个月,橡胶材质老化使密封性能下降,实际使用时故障率反而高于新件,库存积压造成备件质量隐性劣化问题长期被忽视,库存管理与设备状态管理、采购周期管理之间的协同效应未能有效发挥^[3]。

3 大型化工设备预防性维护体系优化措施

3.1 基于设备劣化规律的维护周期优化

针对现行固定周期维护模式的局限性,首先建立设备劣化状态实时监测系统,在离心式空压机组轴承位置安装振动传感器与轴位移探头,采样频率设定为1次/min,连续采集3个完整运行周期的振动烈度、轴向位移、径向跳动等特征参数,同时记录对应时刻的转速、负荷率、进气温度等工况变量。数据分析显示,空压机在6 500 rpm额定转速区间运行时长累计达7 200 h后,轴承振动值从初始的2.4 mm/s升至4.1 mm/s,衰退速率明显加快,据此确定该转速区间下轴承寿命约为8 800 h,而非原定18个月对应的12 960 h运行时长,维护周期需缩短至11个月执行。在冷冻机组方面,技术团队在蒸发器进出口、冷凝器进出口分别布设温度变送器与压力变送器,每6 h自动记录温差、压差数值,累积150 d监测数据后建立换热效率—运行时长劣化曲线,曲线拟合结果表明,蒸发器换热效率降至设计值0.88倍时制冷量下降7%,冷却水结垢速率每升高0.5 mm会使效率衰减拐点提前12 d出现。基于劣化曲线斜率变化特征,装置将冷冻机组检修触发条件从固定9个月调整为换热效率降至90%、设计值或运行天数满240 d两项指标先达到先执行,避免设备状态良好时提前停机或性能劣化后延迟干预的矛盾。循环水泵叶轮间隙监测采用超声波测距传感器,探头安装在泵壳外侧对准叶轮外缘,每小时测量一次间隙值,间隙从0.8 mm扩大至1.2 mm时判定叶轮磨损进入加速阶段,需启动检修准备流程^[4]。

3.2 多维度状态监测技术集成应用

装置针对监测维度单一缺陷,在离心式空压机组增设高频加速度传感器,采样频率提升至25.6 kHz,传感器安装于轴承座三个正交方向以确保信号采集完整性。振动信号处理引入小波包分解技术,将原始信号

分解为 8 个频带子信号，轴承故障产生的 2 400 Hz 至 5 600 Hz 频段冲击成分得到增强显示，信噪比从 12 dB 提升至 28 dB。针对瞬态工况监测难题，系统部署短时傅里叶变换模块实现时频联合分析，生成的时频谱图清晰展现转速爬升过程中各阶固有频率激发时刻。当转速通过 2 100 rpm 临界区间时，轴系一阶弯曲模态产生共振峰值达 8.2 mm/s，持续 1.3 s，监测系统据此设定 2 000 rpm 至 2 200 rpm 转速区间，采用慢速爬升策略，加速度限制在 150 rpm/s 以内，将共振停留时间压缩至 0.67 s。

冷冻机组压缩机故障诊断采用自适应噪声抵消算法分离制冷剂沸腾干扰信号，气泡溃灭噪声成分被抑制 35 dB，轴承内圈缺陷 117 Hz、外圈缺陷 83 Hz、滚动体缺陷 156 Hz，特征频率在净化后频谱图中呈现清晰峰值，诊断准确率从 58% 跃升至 91%。循环水泵叶轮动平衡在线监测系统配置涡流位移传感器，连续采集轴心轨迹信号，当轴心轨迹椭圆度比值达到 1.8 时判定不平衡量超过允许值 20 g·cm，系统自动触发动平衡校正预警，见表 1。多维监测数据汇入中央诊断系统，

高频振动、时频特征、自适应降噪、轴心轨迹四类参数建立健康度评价模型，劣化趋势曲线为维护决策提供量化依据。

3.3 建立备件库存动态管理机制

针对备件库存管理缺陷，应建立基于设备劣化状态动态驱动的备件消耗量关联预测模型，该模型将 4 台离心式空压机的振动烈度、轴位移实时监测数据作为轴承需求预测输入变量，当 1 号机组振动值从初始 2.4 mm/s 升至 3.5 mm/s 进入劣化加速阶段时，系统自动将该机组轴承库存定额从常规 2 套提升至 3 套，同步触发采购周期 5 个月的新件订货流程，确保设备劣化至 4.1 mm/s 更换时点前备件到货。冷冻机组轴承需求预测引入换热效率衰减速率参数，效率每日降幅超过 0.8% 时判定轴承进入寿命末期，库存系统据此调增储备量 1 套，原有安全库存法固定定额模式被状态驱动的弹性定额替代，见表 2。在库存周转优化方面，装置设定机械密封件最大库龄 18 个月强制清理标准，超期件退回供应商更新，950 万元库存资金占用中的 360 万元超储部分在首个运行周期内释放，橡胶材质老化导致的密封性

表 1 多维度状态监测技术配置方案

设备类型	新增监测参数	技术手段	预警阈值
离心式空压机	高频振动 / 时频特征	25.6 kHz 加速度传感器 / 短时傅里叶变换	8.2 mm/s / 共振持续 > 1 s
冷冻机组压缩机	净化后故障特征	自适应噪声抵消算法	特征频率幅值 > 基线 1.5 倍
循环水泵	轴心轨迹偏心率	涡流位移传感器	椭圆度比值 > 1.8

表 2 备件库存动态管理机制配置方案

备件类型	触发条件	库存调整策略	库龄上限
空压机轴承	振动值 3.5 mm/s	定额 2 套增至 3 套	24 个月
冷冻机组轴承	效率降幅 0.8%/d	增储 1 套	18 个月

能隐性劣化问题得到消除^[5]。采购计划编制从年度固定批次调整为月度滚动评估机制，评估输入包含当月设备健康度变化趋势、备件消耗速率、供应商交货期波动三项要素，计划精度较历史经验外推法提升 39%。

4 结束语

设备维护从经验主导转向数据驱动的演进揭示了管理范式的深层变革，状态感知能力的提升将被动响应推向主动预防轨道，劣化规律的精准刻画消解了固定周期与个体差异间的矛盾，监测维度的拓展为故障捕捉开辟新路径，库存策略与健康状态的耦合重塑了资源配置逻辑，智能算法驱动的预测性维护将引领体系演进方向，优化后的维护模式终将为装置安全筑牢坚实的基础。

参考文献:

- [1] 卢文. 故障预测下的化工机械设备安全保障技术[J]. 化工管理, 2025(30):106-109.
- [2] 王健男. 化工企业公共工程设备的预防性维护策略研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08):130-131, 134.
- [3] 王钦, 张吉卫, 何磊, 等. 预防性维护系统在化工设备管理中的应用研究[J]. 网络安全和信息化, 2023(12):95-98.
- [4] 陈正领. 化工仪表自动化设备的预防性维护[J]. 化工管理, 2022(32):120-122.
- [5] 董惠民. 预防性维护措施在化工自动化设备中的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(10):38, 40.

齿轮制造企业数字化转型中的生产管理创新

刘浩, 张鹿, 高峰

(山东能源装备集团中传矿用设备制造有限公司, 山东泰安 271000)

摘要 齿轮制造企业数字化转型,正在对生产管理模式进行深刻重构。转型以数据透明、过程精准、系统协同显著提高生产效率和柔性,但数据孤岛、管理脱节、工艺数字化不到位的问题依然制约着其发展。在此背景下,企业需要建构数据驱动新管理哲学、创建柔性自适应生产体系、创新数据应用场景、夯实技术和人才支撑等,旨在实现生产管理全面创新升级。

关键词 齿轮制造企业; 数字化转型; 生产管理

中图分类号: F425

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.022

0 引言

在全球制造业智能化大潮中,齿轮制造这一至关重要的基础环节的数字化转型事关产业链竞争力。以生产管理为经营核心是转型成效的关键表现。本文论述数字化转型给齿轮生产管理所带来的有利条件,分析目前存在的重大挑战,并在此基础上提出系统创新策略,旨在能对促进相关企业智能化生产和高质量发展起到理论借鉴和实践指引作用。

1 齿轮制造企业数字化转型中生产管理的优势

1.1 数据获取与透明化优势

数字化转型以数据为中心。传统齿轮生产管理、信息传递往往依赖纸质单据,手工记录且系统分散、数据滞后、片面甚至错误。数字化转型是通过将传感器、智能仪表、机器视觉系统、RFID广泛布设于生产现场来实现原料的入库,毛坯锻造以及热处理、齿形加工(车、铣、滚、插、磨)、检测、装配等全工序的实时数据采集^[1]。这些数据涵盖设备状态(如主轴转速、进给量、振动、温度)、工艺参数(如切削深度、冷却液流量等)、质量指标(如尺寸公差、表面粗糙度、齿形误差)、物料流转信息、能源消耗等。由此建立起来的“数据透明化”环境让管理者可以像有“透视眼”一样对生产现场实际情况进行实时透视。例如:借助车间级制造执行系统(MES)的看板功能,管理团队能够实时了解每一台数控机床的工作进度、设备的整体效率(OEE)、在制品(WIP)的库存布局以及订单交付的倒计时情况^[2]。

1.2 过程控制与精准化优势

在综合、实时数据获取基础上,数字化转型使得齿轮生产过程控制由“经验驱动”向“数据驱动”精

准化转变。在工艺控制方面,通过对历史加工数据与质量数据进行关联分析,可以建立关键工艺参数(如热处理温度与时间的曲线以及磨削砂轮的线速度等)与最终齿轮性能(如硬度、残余应力、疲劳寿命等)的量化模型^[3]。通过应用这些模型,能够对生产工艺进行进一步的优化和固化,并可以直接通过数字工艺卡将其发送到设备上,以确保每一批次的产品工艺执行都是一致的,从而降低人为操作的波动性。在质量控制方面,在线检测技术和SPC(统计过程控制)系统的结合,使得质量控制从传统的“事后检验”转变为“事前预防和事中控制相结合”。以磨齿工序为例,利用在线测量装置对齿形、齿向误差等数据进行实时反馈,该系统能自动判断变化趋势和对机床参数进行微调,从而达到加工过程中自适应补偿的目的,使质量偏差达到萌芽状态^[4]。

1.3 系统协同与柔性化优势

数字化转型以信息技术集成为手段,有效地打通齿轮制造企业内和企业与其上下游间信息流,建立一个高协同生产体系。在企业内部,通过ERP(企业资源计划)、MES(制造执行系统)、PLM(产品生命周期管理)、SCADA(数据采集和监控系统)等系统的深度集成,实现从订单受理、生产计划排程、物料采购及分配、车间作业实施,直至产品入库发运等全过程信息贯通和业务协同。在顾客订单发生变化或者紧急插单情况下,该系统能迅速模拟出物料、产能、交期等因素对生产计划的影响程度,动态地调整生产计划以带动供应链和生产线做出同步反应。在制造和执行的过程中,利用AGV(自动导引车)、智能立库和MES的协同作用,成功地实现物料的按需、准时和准确的自动配送,从

作者简介:刘浩(1980-),男,本科,研究方向:智能再制造。

而大大减少线边的库存和等待时间^[5]。这一系统协同能力使企业具有更大的生产柔性。面对市场对多品种小批量定制化要求不断提高的趋势,数字化生产线可实现程序快速切换、工装准备、工艺参数调用等功能,为混线生产提供支撑。例如:利用数字化双胞胎技术可在虚拟环境下模拟和优化新产品加工流程、验证工艺可行性、缩短试制周期以迅速应对市场变化和提高顾客满意度。

2 当前齿轮制造企业数字化转型中的生产管理存在的问题

2.1 “数据孤岛”与集成困境

尽管数据价值凸显,但“数据孤岛”问题在众多齿轮制造企业中依然普遍存在,成为阻碍数字化转型深化的瓶颈。所谓“数据孤岛”,就是各部门、各系统、各设备之间的数据相互隔离,不能畅通流通并进行有效集成。其成因复杂:第一,在技术层面,企业内各类自动化设备、数控系统(如西门子、发那科、海德汉)、专业软件(如 CAD/CAM、CAPP)以及管理信息系统往往来自不同厂商,使用不同的通信协议及数据标准以及没有统一接口规范等原因,造成物理连接及数据互通难度较大。第二,在管理层面,部门壁垒造成数据所有权认知过度,将业务数据看作是部门“私有财产”,数据治理机制与跨部门共享文化缺失。例如:设计部门几何模型和公差数据、工艺部门加工参数、生产车间实际实施数据、质量部门检测报告等,往往散见于各个系统,很难对其进行关联分析来对质量问题进行溯源或者优化工艺。

2.2 管理模式与数字技术脱节

许多齿轮制造企业在推进数字化转型时存在“重技术、轻管理”的倾向,即引入了先进的数字化系统和设备,却沿用传统的、以经验为主的管理模式及组织架构,造成技术和管理上的“两张皮”。第一,从管理理念来看,一些管理者仍然习惯层层汇报和会议决策等指挥控制方式,对数据驱动和即时响应等敏捷管理方式没有足够的接受程度,决策过程没有充分利用数字化平台所提供的实时信息以及分析工具。第二,在组织架构方面,传统金字塔式和职能化的部门设置同数字化转型对扁平化、网络化、跨职能协作团队需求相矛盾。当端到端流程优化需要以数据为基础时,往往会因为部门墙存在障碍导致推进困难。第三,在业务流程中,很多工作流程并没有以数字化环境为目标而重新创建。以生产计划排程为例,目前仍然以计划员亲身体验为主,没有与 MES 实时产能、设备状态数据进行深度融合,无法达到自动化有限容量排程;

质量处理流程仍然停留在纸质单据的转移上,没有做到全电子化闭环管理。

2.3 核心工艺的数字化深度不足

齿轮制造包含诸多核心关键工艺,如热处理(渗碳、淬火、氮化)、精密磨齿、修形等,这些工艺对齿轮的最终性能(如疲劳强度、耐磨性、噪声水平等)具有决定性影响。目前,这些核心工艺普遍数字化深度不够,已成为数字化转型“深水区”“硬骨头”问题。一方面是工艺机理难以数字化建模。例如:热处理时材料组织转变和应力场分布、磨削时材料去除机理、表面完整性的形成等,均是涉及多物理场耦合作用的复杂问题。若要准确地建立数字化仿真模型是非常困难和昂贵的,而且还需大量实验数据来进行验证。很多企业仍然主要依靠工艺专家经验,采用“试错法”进行生产。另一方面是工艺过程数据采集和闭环控制不力。对热处理炉而言,通常仅能采集温度、时间等宏观参数,对炉内气氛碳势准确控制以及工件心部和表面温差这一微观状态却缺少有效监控;对于高精度磨齿机,虽然能采集到部分电机参数,但对于砂轮与工件接触区的真实状态(如磨削力、磨削温度)的在线感知能力有限。

3 齿轮制造企业数字化转型下的生产管理创新策略

3.1 构建“精益为基,数据驱动”的生产管理新哲学

齿轮制造企业生产管理创新首先是管理哲学上的改革。必须确立“精益是基础,数据是动力”的新理念,将精益思想与数字技术深度融合。精益生产以消除浪费和创造价值为核心内容,为优化流程和提升效率提供方法论框架。数字化的转型为精益管理提供了一种前所未有的透明度和精准性手段。新管理哲学强调:数据作为一种新型生产要素和基本决策依据。企业需要在整个生产管理价值链中渗透数据驱动思维,包括战略规划和日常经营。这就决定管理者应该习惯用数据看板,而不是简单地通过听取汇报的方式去了解企业的运营状况;决策应该建立在数据分析所获得的洞察之上,而不是纯经验的直觉;改进活动应在发掘数据趋势和确定根本原因的基础上进行。同时,必须坚持精益原则,避免因数字化而产生新的浪费(如过分收集无用数据,打造花哨“面子工程”等)。具体执行时,要求企业高层形成共识,并通过培训、文化建设等方式把这种新哲学内化到所有员工共同的信念与行为准则之中,指导组织由“经验文化”走向“数据文化”“不断提升文化”。

3.2 打造“一体化、柔性化、自适应”的生产运营新体系

为了支持新的管理哲学，必须在组织和流程层面构建一个“一体化、柔性化、自适应”的新生产运营体系。一体化是指横向打通研发、工艺、生产、质量、供应链等环节，纵向贯通设备层、控制层、车间层、企业层，构建基于统一数据平台（如工业互联网平台）的业务协同体系。通过建立统一数据标准和接口规范促进 PLM、ERP、MES、SCADA 深度融合，使产品全生命周期内数据无缝流转和共享。柔性化就是要构造能对市场变化作出迅速反应的动态生产能力。为实现这一目标，需要推动模块化和可重构的生产线设计，采用柔性制造单元（FMC）和机器人等先进的自动化技术，并构建一个能够支持动态排产和混线生产的高级计划与调度系统。同时引入以订单为导向的快速工艺设计和工装快速制备管理模式。所谓自适应，就是使生产系统具有自我感知、自我分析、自我决策、优化等功能。通过部署更广泛的边缘感知设备，结合人工智能和机器学习算法，使系统能够实时感知生产扰动（如物料延迟、设备性能衰减、质量波动等），并且自动或者协助决策者做出调整，如动态重排工序、调整工艺参数、触发维护工单以达到生产过程动态优化和自愈的目的。

3.3 实践基于数据的生产管理新场景

在全新的管理哲学和运营体系中，要注重对特定数据应用场景进行创新与深化，使数据价值真正得以实现。需着重探究如下情景：第一，基于数字孪生进行全流程仿真和优化。构建覆盖设备、生产线甚至全厂的高保真数字孪生模型进行新产品工艺验证、生产布局仿真、物流路径优化和“假设分析”等，对虚拟世界的生产方案进行预演与优化，减少物理试错的代价，加快了创新的速度。第二，智能预测和决策支持。利用历史与实时数据，构建预测模型，应用于需求预测、设备预测性维护、关键零部件（如刀具）寿命预测、产品质量（如热处理变形）预测等。例如：对机床主轴振动频谱进行分析来预测剩余寿命、对来料参数及以往工序数据进行分析来预测最后齿轮精度等级等，从而达到前瞻性管理。第三，多人人机协同，智慧化操作。借助 AR（增强现实）技术，给装配、维修工人以直观操作指导；实时生产任务、质量预警、处置建议由移动终端推送给班组长；采用 AI 视觉实现外观缺陷的在线检测并协助人工质检。第四，供应链的协同和透明化。通过区块链或者物联网平台将订单状态、库存水平、质量数据等信息分享给关键供应商和客户，从而对供应链进行可视化和协同计划，以增强整个供应链韧性和响应速度。

3.4 夯实“技术+人才”的双重支撑

实现生产管理创新归根到底要靠扎实的科技和人才基础。从技术支撑上看，企业需建立前瞻性和务实性技术架构蓝图。其核心在于构建或导入强大、开放、兼容的工业互联网平台，使之成为数据中枢、赋能平台。平台要有较强的数据集成、存储、计算、分析、应用开发能力。同时，需要持续投资于关键使能技术：如用于复杂工况感知的先进传感器技术、用于设备互联的工业网络技术（如 5G、TSN）、边缘实时处理用边缘计算技术，深度分析用人工智能算法等。从人才支撑的角度来看，数字化转型对于人才的结构有了新的需求。企业急需三类人才：一是兼具齿轮制造工艺和信息技术的复合技术人才，能够在业务和技术之间承担桥梁作用，承担数字化解决方案设计和落地工作；二是善于数据分析与建模，能在大量数据中挖掘价值的科学数据人才；三是拥有数字化思维与变革领导力的管理人才。企业应当结合“外部引进+内部培养”的策略，构建多层次的人才培养体系，并与高等教育机构和职业学院合作，共同定制课程，并且对内建立数字化技能培训、岗位轮换、激励机制，形成学习和创新组织氛围。

4 结束语

齿轮制造企业生产管理创新是企业数字化转型能否顺利落地的关键问题。未来，企业要超越简单的技术引入，走向基于数据和精益管理哲学的体系重塑。通过不断推进管理理念、运营模式、场景应用协同创新，筑牢人才和技术根基，才能真正释放数字化潜能，打造面向未来的高效、柔性、智能的新型生产体系。

参考文献：

- [1] 林锐怡,殷超超,师陆冰,等. 齿轮制造中的残余应力及其对疲劳性能的影响[J]. 机械强度,2024,46(05):1216-1227.
- [2] 任宁,周峰. 超大模数爬升齿轮制造技术研究[J]. 机械传动,2022,46(10):125-129.
- [3] 吕晓峰. 高速,高质,高效的精密齿轮制造之路:访平湖市一鑫齿轮有限公司总经理金佳先生[J]. 数控机床市场,2024(06):52-54.
- [4] 王雪原,高宇琳. 我国隐形冠军制造企业技术阶梯优势提升机理[J]. 科学学研究,2023,41(09):1581-1593.
- [5] 邓昂乐. 某齿轮企业绿色智能工厂建设的创新与实践应用[J]. 智能制造,2024(02):50-53.

基于全生命周期的钢铁企业设备管理实践研究

王英培

(石横特钢集团有限公司, 山东 泰安 271600)

摘要 随着智能制造以及绿色环保的发展,传统的设备管理模式面临巨大的挑战。全生命周期管理是以设备的价值为核心,将工作范围延伸到设备的设计制造、选购安装、运行维修、改造更新直至报废全过程的一个管理闭环周期。其目的是将信息流与业务流相结合,在数字化的基础上实现状态监测及预防性维修管理,并建立基于全生命周期的成本决策体系。本文对设备全生命周期管理的实施对策进行了探讨,以期为相关人员提供借鉴。实践证明,该模式不仅能显著提升设备综合效率、降低综合运行成本、保障安全生产,也是对钢铁企业进行精细化、智能化改造的基础条件。

关键词 钢铁企业;设备管理;全生命周期;EAM;预防性维修

中图分类号:F425

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.023

0 引言

钢铁企业具有固定资产投资大、生产强度高、连续作业等特点,设备管理水平直接关系到企业的生产效率、生产成本以及节能减排效果。传统管理模式以事后维修为主,各环节之间缺乏有效沟通,造成“信息孤岛”和“管理短视”等问题。而推行设备全生命周期管理则改变了这一理念,主张在产品的设计、制造、使用及报废等全过程均运用技术、经济以及组织系统优化。探索应用先进的新型管理模式可以有效推动我国钢铁企业降本增效,提升竞争力。

1 设备全生命周期管理的核心内涵与实施价值

1.1 核心内涵

设备全生命周期管理是一种以设备为公司创造价值的战略资产管理理念,即认为设备不是生产过程外的机器,而是整个生命历程(从计划、设计到采购、安装、使用、维护、改进、改造直至报废)。其目标是寻求设备可用度、可靠性与安全性以及经济性的最佳平衡状态,实现整个寿命周期内资产综合效益最大和总成本最低的目的^[1]。

1.2 对钢铁企业的实施价值

钢铁企业实施设备全生命周期管理具有重要意义。从节省成本的角度看,可以对整个设备的全生命周期进行成本管理,即从购置阶段到后期运行维护以及报废处置的成本,避免因前期决策失误造成后期高昂的维修成本以及能源消耗。在稳定可靠性方面,做好

系统性防范工作及状态管理能够有效避免非计划停机事件发生,保证高炉及连铸机整体生产流程稳定进行。在决策支持方面,它为制定设备更新改造方案以及技术路线提供参考依据,从长期角度考虑投入产出比。另外,其对公司的发展规划也有重要意义。它是智能制造和数据分析的基础,也是建立数字化工厂和智慧工厂必备设备的信息基础和管理体系。

2 设备全生命周期管理的核心阶段与实践路径构建

钢铁企业需建立一套贯穿资产“一生”的、闭环的管理流程体系,具体可划分为紧密衔接的三个阶段。

2.1 前期管理

前期管理为钢铁企业奠定资产价值基础,前期管理决定了设备全生命周期约 70% 的成本,是管理成效的源头。

2.1.1 规划与设计选型的系统性论证

此阶段需根据企业的产品政策、产能计划、产品工艺改善方向进行。选型决策不应只以一次性购置价格为依据,还应当综合考虑技术先进性指标、技术经济适用性指标、可维修性、能耗等级、易损件互换性、供应商的配套服务、兼容升级能力等因素。例如:对于轧机主传动电机,在考虑其性能的同时还需考虑其平均故障时间间隔、在线监测功能及区域维护支持程度。

2.1.2 采购与安装调试的规范化控制

采购安装调试阶段是理念落地的保障环节。在采购环节应采取全生命周期成本(LCC)的衡量方式,将

作者简介:王英培(1989-),男,本科,工程师,研究方向:机械设计制造及其自动化。

后期的运维管理成本折现为现值，与购置价一起构成评标总价。关键设备要进行监造以及出厂试验，确保其产品质量。安装调试是机器效能的具体体现，因此需要建立完善的安装技术规范和调校程序，严格把控基础施工、对中精度、管路清洁度等关键工序，并对其作出严格的检验和确认。在调校完成后一定要形成包括竣工图、使用维护手册、试验报告、备件清单在内的全套装置档案，并准确录入EAM系统中，生成设备电子档案号。

2.2 中期管理

中期管理是保障资产高效运行与价值创造，这是历时最长、日常活动最密集的阶段，核心是实现设备安全、稳定、经济、长周期运行。

2.2.1 基于状态的智能运行维护体系

我们致力于构建一个“点检、监测、诊断和维修”的智能运维模式，在传统定检的基础上充分运用互联网传感技术，对关键机组如风机、大功率减速机是实现关键指标（振动、温度、油质等）进行在线监测。利用预测性分析模型可以提前预知问题征兆，并可根据其结果动态优化维护方案，从“计划维修”过渡为“预见性维修”。

2.2.2 维修策略的精细化与标准化管理

依据设备在生产中的关键性等级（如采用RCM可靠性中心维护法判定），分别制定维修方案：对于关键重要等级为A的关键设备，实行状态监测预防性维修，对于关键重要等级为B的关键设备，实行定期预防性维修，对于C级一般装备可以采取后修制，同时大力推进保养工作标准化建设，包括保养程序、技术措施及材料消耗标准，提升保养质量和效率^[2]。

2.2.3 贯穿始终的技术改造与效能提升

将技术改造视为设备全寿命过程中的“活力再生”。对性能衰退、技术老化及新工艺流程所需的设备进行有计划的改造升级，并在改造前进行经济性评价，确保其投入能有效提升产能、精度和能耗指标水平，并纳入统一的固定资产变更管理程序中。

2.3 后期管理

当机器因技术落后而无法继续使用或者经济性丧失，以及达到物理使用年限需要报废更换时，则应当进行合理、合法的资产回退处置程序，以该决策的技术性评估与经济性分析为前提条件，由技术人员、装备人员、生产部门、财务部门和环境部门组成的综合专家小组完成。评价的主要影响因素有：（1）技术条件：主要零部件老化程度以及可维修性和成本；（2）经济性：

维持使用所需维护成本及能耗支出与其效益的对比；

（3）合法性：是否满足新的安全、环保、节能法规要求等；（4）策略性：是否符合公司产能或者产品升级计划相吻合，如果这种机器还能用几年，就要考虑其可再造性。

绿色处置与残值最大化是目标。制定统一的机器报废方案，机器可以通过不同的方式进行处置：（1）出售拍卖：通过公物置换，让其获得一个合理的价格；（2）拆卸利用：将机器拆解成为零件，作为备件或重新冶炼为铁水；（3）定向更换：与供应商协商，以旧抵新冲减部分购置费；（4）绿色化处理：含有害物质如铅、汞、PCB的部件交有危废资质的专业公司进行处置。以上过程均应公平公开，留有记录，确保公司资产回流收益回归企业，同时满足循环经济及环保的要求。

3 设备管理的数字化转型

在数字化时代，企业资产管理系统已从记录工具演变为驱动设备全生命周期管理的核心引擎和决策大脑，其作用至关重要。

3.1 构建贯穿始终的设备数字孪生

在EAM系统中为每台关键设备建立与其物理实体一一对应的高保真数字孪生模型，并不是静态的数据，而是动态的生命日记，这个数字孪生体记录着所有关于设备的详细信息，并实时更新这些信息，如设备性能指标、供应商信息及所属产线位置、上下位关联关系以及备件互用性等。另外，还包括实时的传感器数值、在线测试结果、完整的历史维修工单记录、所用替换零部件清单、故障代码与故障排除方法等。最后，还包括总的维修成本、能耗成本、折旧成本的数据。这样集成化的虚拟图像成为将来所有分析、改善、决策可靠的数据库源点。

3.2 驱动业务流程的在线化、自动化与闭环化

EAM将原来散落在纸张、Excel表格以及经验中的管理流程动作固化为标准的、可追溯的线上工作流。例如：根据设备的使用年限或者状态阈值，自动创建预防性维护工单并发送到相应人员的手机上。巡检员用手机APP来执行巡检，并及时返回结果。出现故障需要报修时可以扫描机器上的条形码直接开始报修，并对不同的故障提供相应的解决方法及零件需求。修理完成后需在系统上记录耗时耗料并完成维修，以便费用统计自动生成。这种线上循环管理模式让整个过程更加公开透明、权责清晰、绩效可度量并形成知识资产积累，极大地提升了管理执行力。

3.3 深化数据智能分析与决策支持

在对数据进行汇总后，在系统中可通过分析模块提供有力的辅助决策支持：（1）可靠性分析：从故障类别、影响性及危害性等方面入手，确定设备的主要失效模式，指导设计改进或维修措施变更；（2）维修有效性分析：统计各类别设备平均维修时间、次数以及费用等方面的数据，对不同保修策略进行评价；（3）备件优化分析：依据历史使用情况进行未来需求预测，确定适当库存水平，并进行采购批次优化；（4）全生命周期成本报告：定期生成单台或某一类设备的全寿命总成本报告，清晰展现成本结构，便于决策是否需要做新升级改造。同时，引入机器学习技术，深度挖掘关键机组运行情况，建立故障预测模型，实现从“预防性维护”到“预测性维护”的跨越，真正将“救火”转为“防火”^[3]。

4 设备全生命周期管理实施保障体系

成功实施设备全生命周期管理是一场深刻的组织变革，需要系统的保障措施来保驾护航，跨越理念认同、组织协同、数据质量和持续优化等关键鸿沟。

4.1 推动战略认同与文化重塑

这是一项“一把手”工程。企业领导要充分认识到其战略意义，将其纳入企业发展战略规划，在资源投入、政策支持等方面给予长期稳定的保障。从全公司层面出发，采取教育、宣贯、典型引导等方式持续推动文化变革，将“我的设备我负责”的全员生产维修思想深入每个职工脑海，破除机械台账维护是设备部的事的传统思想，引导生产操作员做设备第一眼观者和第一责任人^[4]。

4.2 优化组织架构与跨部门协同机制

建议成立公司层面跨部门的设备资产管理部门，由公司分管领导牵头，设备、生产、工艺、采购、财务、信息化等部门负责人参加，负责审议设备规划方案、重大项目立项和报废事项以及实施过程中的重大问题。在具体操作中可以成立一个虚拟的资产经理团队，对重要生产线或是关键机组，指定专人负责（即资产所有者代表），对其全生命周期绩效负责，并赋予其打破部门壁垒进行资源配置的权利。

4.3 夯实数据根基与实现系统集成

“没有高质量的信息就无法进行良好的运营管理”。要建立严格的数据管理流程，明确所有设备信息（如型号参数、缺陷标记、检修记录）的标准录入方式、责任人以及审核流程^[5]，确保数据从源头的真实完整与时效。同时，EAM 软件不能成为“数据孤岛”，需要

采用如企业服务平台等形式及时把生产的停机情况反馈给 MES（企业资源计划），并与 ERP（生产执行系统）共享财务及采购信息，接入能耗计量，并将润滑油分析的结果归入实验室管理系统之中。只有充分融合各个子系统，才能建立完整的工作回路和数据价值链。

4.4 构建科学评价与持续改进循环

必须建立一套符合全生命周期管理目标并能量化为关键绩效指标的考核体系，包括：（1）结果性指标：设备综合效率、非计划停机次数、维修费用比率、备件库存天数；（2）过程性指标：预防维护计划执行率、状态监测覆盖率、平均故障恢复时间。定期发布设备资源管理绩效报告，召开管理评审会议，分析指标偏差原因，发现改进机会并制定纠正预防措施^[6]。“计划—实施—检查—处理”的螺旋式上升循环推进，促进设备全生命周期产品过程控制机制不断完善，形成良性发展趋势。

5 结束语

设备全生命周期管理是指钢铁企业对所管理设备从形成开始到最终退出使用的全过程进行有效控制的过程，是新时期下提升钢铁企业竞争力的有效措施之一。它是围绕价值创造这一核心理念，对全部设备资产各阶段采取系统的方法进行管理，并运用数字化技术将各个阶段串联起来并对之赋值的一种方法。这是对原有管理工具一次升级迭代的过程，也是对公司管理理念、管理架构、经营管理文化的全面变革。为实现高质量发展目标，钢铁企业须坚定不移地推行全生命周期的设备管理，加强基础建设，以促进生产效率提升、降耗增效、营造安全的作业环境及提高自动化水平，在激烈的市场竞争环境下形成长期稳定的竞争优势。

参考文献：

- [1] 何刚. 钢铁生产线多层级设备管理平台的技术实现与数据集成研究 [J]. 山西冶金, 2025, 48(03): 213-215.
- [2] 杜汉强. 浅谈钢铁企业数字化工厂建设实践 [J]. 中国设备工程, 2022(22): 34-36.
- [3] 北京首钢股份有限公司. 钢铁企业三维度精细化设备全生命周期管理体系的创新与实践 [J]. 企业改革与管理, 2025(07): 68-69.
- [4] 孙旭东. 钢铁企业机械设备维修管理探讨 [J]. 模具制造, 2023, 23(10): 244-246.
- [5] 吴琼. 设备全生命周期管理系统在钢铁矿山行业的应用与探索 [J]. 中国战略新兴产业, 2022(24): 72-75.
- [6] 舒九武, 张俊杰, 李先群. 钢铁企业机械设备的生命周期管理与检修策略 [J]. 中国金属通报, 2023(11): 213-215.

储罐压力控制策略在蒸发气处理系统中的实践研究

杜文锋, 汪 洋

(中海油江苏天然气有限责任公司, 江苏 盐城 224553)

摘要 为降低LNG接收站BOG压缩机运行能耗并优化储罐压力控制方式, 在分析不同工况下储罐压力变化规律和压缩机运行对压力影响的基础上, 提出一套基于实际运行状态的BOG压缩机运行优化策略。本研究选取三种代表性储罐液位与外输负荷组合工况, 测试不同压缩机台数下的储罐压力变化趋势, 制定针对非卸船、卸船前与卸船时三类典型工况的压缩机控制逻辑及参数。研究表明, 该策略能有效控制储罐压力波动, 保障卸料安全, 延长压缩机设备运行寿命。优化方案实施后压缩机日均运行时长明显下降, 节能效果显著, 具备良好的工程推广价值。

关键词 LNG储罐; 蒸发气处理; BOG压缩机; 压力控制策略; 运行优化

中图分类号: U653

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.024

0 引言

随着LNG接收站储罐规模逐渐扩大和节能减排要求不断提升, 合理控制储罐压力成为保障蒸发气处理系统稳定运行的重要环节。BOG压缩机作为关键设备, 其运行方式对储罐压力变化具有显著影响。本研究基于典型工况数据, 结合不同压缩机运行数量与储罐压力的响应关系, 探索适用于卸船与非卸船阶段的运行策略, 旨在为提升系统运行经济性与安全性提供参考。

1 储罐压力与BOG压缩机运行关系分析

1.1 不同工况下储罐压力变化规律测试

国内LNG接收站普遍采用大型全容式储罐结构, 该类储罐由内罐、外罐及夹层绝热系统构成, 内罐承担液体储存功能, 外罐提供结构支撑与二次防护, 夹层内填充高效绝热材料以降低外界热量侵入。在正常运行条件下, 储罐内LNG不可避免地吸收环境热量, 导致部分液体发生相变形成蒸发气, 蒸发气的持续产生是储罐压力变化的主要内因。蒸发气生成速率受储罐液位高度、罐内外温差、外输工况及绝热性能等多因素共同影响, 当蒸发气未能及时外排或处理时, 罐内压力将逐步升高。因此, 准确把握不同运行工况下储罐压力的变化规律, 是制定BOG压缩机运行策略与压力控制参数的重要基础。为深入掌握在不同工况条件下的压力变化趋势, 结合站内典型运行场景, 选取

三个具有代表性的液位与外输组合情况作为试验对象, 开展压力监测测试。测试采用罐顶压力变送器配合实时数据采集系统, 按10分钟间隔记录压力变化, 确保动态过程反映真实运行特性^[1]。表1汇总了本次测试所采用的三种工况参数设置。

表1 LNG储罐运行工况参数对比

工况	储罐平均液位(m)	气态外输计划(万方)	液态外输计划(车)
工况1	18.2	1 450	180
工况2	17.6	1 350	120
工况3	16	700	300

测试数据显示, 在工况1下, 液位较高且气态外输量较大, 系统整体处于蒸发气生成与排放量均高的状态, 压力波动明显快于其他工况; 工况2的液位略低, 外输负荷与工况1接近, 但表现出相对平缓的压力变化趋势; 工况3中液位最低, 气态外输计划明显下降而液态外输计划显著增加, 导致储罐自身压力释放路径以液态为主, 蒸发气累积速率低于前两种工况, 整体压力变化更为平稳。

1.2 压缩机运行数量对储罐压力的影响分析

在上述三种工况条件下, 分别测试1台、2台与3台BOG压缩机并联运行对储罐压力控制效果的影响。各试验在同一时间段内开展, 采用固定储罐起始压力,

作者简介: 杜文锋(1983-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 液化天然气接收站技术管理。

并维持其他边界条件不变，确保变量单一性与对比有效性。以工况 1 为例，在 1 台压缩机运行条件下，储罐压力每 2 小时平均上升 0.5 KPag，至第 6 小时累积上升至约 1.2 KPag，之后呈现趋缓态势，每两小时上升幅度下降至 0.06 KPag。2 台压缩机运行时，初始阶段压力每 2 小时下降约 0.6 KPag，至第 6 小时下降 1.3 KPag，之后下降速率放缓为每两小时 0.1 KPag。3 台压缩机联合运行时，前期下降速率与 2 台运行相近，6 小时累计下降 1.1 KPag，后续稳定在每两小时下降 0.06 KPag 左右^[2]。

在工况 2 中，1 台压缩机运行时的初期储罐压力略有下降后逐步上升，总体控制效果有限；2 台压缩机运行状态下压力下降幅度保持在每小时 0.25 KPag 左右，6 小时后累计下降值为 1.3 KPag；3 台压缩机运行表现出更为快速的压力下降趋势，但在第 8 小时后下降速率明显减缓，表明蒸发气已逐步压缩完毕，储罐内部趋于压力稳定。工况 3 数据则表明，在液态外输量显著上升的情形下，1 台压缩机运行时储罐压力仍缓慢下降，12 小时内下降幅度约为 1.0 KPag，2 台压缩机运行下降至约 1.8 KPag，3 台压缩机最大下降幅度达 2.2 KPag，前 6 小时为主要变化阶段，之后基本稳定。

表 2 反映出压缩机运行数量与储罐压力控制效果存在显著相关性。在蒸发气生成量较大的工况 1 与工况 2 中，2 台压缩机运行能够基本稳定维持压力不升，3 台压缩机则可实现压力快速下降。而在蒸发气累积速度相对较低的工况 3 中，多台压缩机运行的优势体现不如前两种工况明显，甚至可能造成能源浪费。总体来看，储罐压力在前 6 小时变化最为显著，压缩机运行控制策略应主要聚焦这一阶段的调度优化，后续阶段则可适度回收运行台数以降低电耗负担。

表 2 不同压缩机运行数量下储罐压力变化趋势 (KPag)

工况	压缩机台数	运行时间						
		0 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h
工况 1	单台	21.0	21.5	21.9	22.2	22.3	22.4	22.5
工况 1	两台	21.0	20.4	19.9	19.7	19.6	19.5	19.5
工况 1	三台	21.0	20.5	19.8	19.6	19.5	19.4	19.4
工况 2	单台	22.5	22.8	23.0	23.2	23.3	23.4	23.5
工况 2	两台	22.5	21.8	21.2	20.9	20.8	20.7	20.6
工况 2	三台	22.5	21.6	20.7	20.3	20.2	20.1	20.0
工况 3	单台	23.0	22.5	22.0	21.8	21.6	21.5	21.4
工况 3	两台	23.0	22.0	21.2	20.8	20.6	20.5	20.4
工况 3	三台	23.0	21.6	20.5	20.0	19.8	19.7	19.6

2 储罐压力控制策略制定

2.1 非卸船工况压缩机运行策略

在非卸船工况下，LNG 储罐液位处于相对稳定状态，外输节奏以气态与液态双通道为主，储罐压力变化幅度有限。依据前期测试中不同压缩机台数下的压力响应规律，非卸船工况采用逐级判断与动态调整原则。正常情况下保持 1 台压缩机运行，当储罐压力达到 23.0 KPag 且具备持续上升趋势时，启动第 2 台压缩机运行，若压力上升后未显著回落，在维持一定时间后仍持续增长，且超过 23.5 KPag 则投入第 3 台压缩机参与运行^[3]。当压力下降至 21.0 KPag 以下并维持稳定下降速率，且连续 4 小时内压力下降小于每 2 小时 0.2 KPag 时，可考虑停止第 2 台压缩机，保留 1 台持续运行。若进一步下降至 22.0 KPag 以下且压力波动维持小幅变化，则可关闭第 3 台压缩机，仅保留 2 台压缩机运行。该运行模式通过对储罐压力拐点识别、上升趋势判断与变化速率评估，动态调整运行台数，实现压缩机运行的实时响应与精准控制。在港无船作业期间，该策略以最低运行台数支撑系统稳定，兼顾系统安全与节能要求。

2.2 卸船工况压缩机运行策略

卸船工况压力控制策略需细分为卸料前阶段与卸料执行阶段，前者侧重维持卸料准备条件，后者关注卸料过程中储罐压力波动管理。在卸料前阶段，随着 LNG 船舶接靠与引航员登轮，卸料系统进入预冷准备状态，蒸发气释放速率显著上升，若控制不及时可能导致储罐压力接近上限。策略要求储罐压力需提前维持在 21.0 KPag 以内，尽量向 20 KPag 靠近，为后续卸料阶段预留足够压力空间。当已有 1 台压缩机运行且储罐压力在 21.0 KPag 以上并呈缓慢下降趋势，每 2 小时压力下降值接近 0.3 KPag 时，需启动第 2 台压缩机。当已有 2 台运行且压力下降趋势不明显，或压力值接近 22.0 KPag，且下降幅度不足以覆盖蒸发气增量时，需启用第 3 台压缩机。进入正式卸料阶段后，压缩机运行策略需根据进料方式动态匹配，若卸料过程中包含一期储罐下液操作，储罐中 LNG 与已存液相接触产生剧烈闪蒸，压力迅速上升，此时要求至少运行 2 台压缩机以保障压力快速释放。当储罐压力在 21.0 ~ 23.0 KPag 之间，运行 2 台压缩机；压力超过 23.0 KPag 并继续上升时投入 3 台联合运行。若卸料方式不包含一期储罐下液过程，蒸发气释放量相对平稳，储罐压力控制可适度放缓，当压力低于 20.0 KPag 且每 2 小时下降速率维持在 0.3 KPag 左右时，仅运行 1 台压缩机即可维持稳定运行。当压力处于 20.0 ~ 22.0 KPag

范围内时,建议运行2台压缩机进行调节;当压力超过22.0 KPag并持续上升时,则需投入3台压缩机保障卸料安全。压缩机投入与退出应根据阀门开启状态与卸料阶段转换点进行同步调整,结合预冷、换热与气液转化特性,动态调节运行模式,避免储罐因压力异常而触发保护措施^[4]。卸船工况中对压缩机调控的及时性直接关系到卸料流程连续性,合理控制可有效提升船舶接卸效率与岸站运行安全水平。

2.3 控制原则与参数设定

压缩机运行控制以储罐压力变化趋势为主导判据,结合实际液位高度、进出站物料流量及环境换热条件,构建以“趋势识别+阈值判断+响应调节”为核心的控制体系。储罐压力上升趋势采用2小时区间平均值判定,若区间内压力上升值超过0.5 KPag且无显著波动反转,即判定为持续上升趋势,需投入额外压缩机增强蒸发气处理能力。下降趋势判断原则为连续两个周期压力下降值超过0.2 KPag且无反弹迹象,若区间内下降值低于0.1 KPag则视为下降趋缓,需适当减少运行台数防止过度抽吸造成能耗浪费。在压力临界值设定方面,非卸船工况下高限建议设为23.5 KPag,低限设为21.0 KPag,卸船阶段根据蒸发气集中释放特性将高限设为24.0 KPag,低限设为20.0 KPag。液位控制参数主要作为运行补充依据,当储罐液位接近上限时调节压力响应速度,避免因液相膨胀造成压力突升。进料阀启闭顺序严格遵循比例控制原则,在卸料启动前阶段保持阀门10%~20%阶梯开度,预留蒸发气缓冲空间。切舱过程需以5分钟为单位缓慢开阀,避免压力急剧上升。在切换压缩机运行状态时要求控制操作频次,每4小时内压缩机启停不超过1次,避免频繁操作造成设备机械冲击与系统节奏失衡。控制系统建议引入分时电价优化模块,在11:00至13:00与22:00至08:00等低谷电价区间内优先安排多台运行任务,高峰时段则压缩运行规模,在不影响压力安全边界的前提下实现经济运行目标^[5]。

3 储罐压力控制策略实施与运行优化

3.1 分时电价下的运行时机选择

BOG压缩机运行时间直接影响接收站电力成本,结合分时电价机制进行策略调整具有现实意义。站内电价通常划分为低谷、平段与高峰时段,低谷为22时至次日8时与11时至13时,平段为8时至11时与13时至18时,高峰为18时至22时。在控制策略中设置电价识别模块,可使压缩机在压力允许范围内优先安排于低谷时段运行。在夜间22时至次日6时,将目标压力区间下移至20.0 KPag或更低,非卸船工况中可

提前开启第2台压缩机提升抽气效率,减轻高电价时段的运行负担。卸船准备阶段若预计进入高峰区间,可提前处理压力,缩短高负荷时间。卸料时如需3台压缩机并联运行,可结合卸船节奏错峰启动,尽量避开高峰。控制系统需具备电价联动功能,实现运行时与储罐压力变化的协同调整^[6]。

3.2 关键操作要点与注意事项

压缩机运行需依据储罐压力趋势与蒸发气特性进行动态调节,避免以瞬时波动为依据进行启停。判断压力变化需结合连续采样周期与液位、温度等参数,确保判断准确性。压缩机启停频率建议每日不超过两次,间隔不少于4小时,避免因频繁操作引发设备疲劳或系统不稳定。卸料前阶段的压力预降应在压力上升拐点前完成,防止蒸发气集中释放造成响应滞后。卸料期间应结合阀门开度与切舱节奏调整压缩机运行台数,避免闪蒸引发压力突升。切舱操作需分步进行,每步间隔控制在5分钟至10分钟,保留足够气相空间缓冲压力波动。压缩机多台运行时需保持负荷均衡,采用运行时长均摊策略提升设备利用效率。高温或高热负荷条件下应适当下调压力控制上限,减少突发蒸发气量积累。运行人员需熟悉策略逻辑与关键参数,定期开展演练与复核,在远程监控系统支持下建立报警联动机制,提升响应速度与调节精度。

4 结束语

本研究基于LNG接收站储罐压力变化特性,构建了分工况、分阶段的BOG压缩机运行控制策略,明确了各运行条件下的压力阈值与启停逻辑,结合分时电价优化手段,实现了运行成本与系统安全的双重提升。实际应用结果表明,该策略具备良好的适应性与可操作性,能够有效降低压缩机能耗并平稳调控储罐压力,为类似工程提供了可推广的运行优化路径与管理依据。

参考文献:

- [1] 赵保林,王海,王海波,等.丁烷全冷冻储罐蒸发气处理方案优化探讨[J].化肥设计,2024,62(02):24-26.
- [2] 龙德才.LNG接收站BOG产生及储罐压力控制研究[J].广州化工,2024,52(03):157-160.
- [3] 同[2].
- [4] 黄毅雄.LNG接收站蒸发气处理工艺研究[J].辽宁化工,2023,52(11):1620-1622,1626.
- [5] 陈焯,郭梁,杨少柒,等.液氢零蒸发储存系统研究现状与展望[J].真空与低温,2023,29(05):447-458.
- [6] 林本卿.基于普遍化压缩因子对小型LNG储罐蒸发气的计算研究[J].辽宁化工,2022,51(06):857-859,869.

基于 BIM 技术的工程造价概预算 智能化编制方法研究

吕光美

(中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘要 BIM (建筑信息模型) 技术作为多维数据集成与动态协同工具, 为工程造价概预算编制提供了构件级信息驱动与流程自动化的可能路径, 依托构件属性精准提取工程量数据, 结合规则库与价格接口实现清单生成与费用组价的智能化操作, 显著提升了预算编制效率与结果可控性。在模型变更频发的建设过程中, 通过差异识别与联动更新机制, 可实现预算结果的快速同步与动态调整。本文围绕 BIM 平台数据结构、规则引擎构建与预算结果输出方法展开研究, 提出一套面向实用场景的智能化概预算编制方法体系, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 BIM 技术; 工程造价; 概预算编制; 工程量提取; 智能组价

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.025

0 引言

工程造价控制的精度直接影响项目建设全生命周期的资源配置与资金计划, 概预算作为成本控制的起点, 其编制质量至关重要。在二维图纸与人工计算主导的传统环境中, 工程量获取效率低、清单匹配准确率差、费用计算受人为主观影响大, 已难以适应高频变更与复杂项目协同需求。BIM 技术通过构件参数化建模、空间定位与信息集成, 能够为预算系统提供高可信度数据基础, 实现清单自动化生成、费用动态化更新与成果可视化输出, 为概预算编制向智能化转型提供了现实路径。

1 BIM 技术与工程造价概预算的适配性分析

1.1 概预算编制的核心数据需求

工程造价概预算依托构件数量、空间定位、构造属性等多维数据进行工程量计算, 构件需具备可计量性、可编码性与可定价性, 预算生成的关键在于清单项目与构件之间建立准确映射, 结合消耗量标准与价格参数生成各类费用构成, 包括直接费、措施费、规费与税金等。预算数据应具备可追溯性、结构化与动态更新能力, 以适应设计阶段调整频率高、成本控制节点精细的工程需求, 构件工程量提取、清单归集逻辑与费用计算链条构成预算系统的核心运行基础。

1.2 BIM 技术的优势

BIM 模型以构件为数据单元, 每个构件包含三维几何、属性参数与工程语义, 具备天然的数据完整性与

一致性, 参数化建模支撑自动提量机制, 规避人为统计误差; 多专业协同模型可在统一坐标系内进行数据整合, 实现结构、机电、建筑等专业的工程量互校与核验^[1]。构件属性支持与定额条目建立逻辑映射, 为预算系统提供编码、分类与计价所需的全部输入, 设计变更同步更新机制可触发预算自动重算逻辑, 增强预算体系对设计调整的实时响应能力。

1.3 BIM 技术与概预算编制的适配逻辑

BIM 模型的数据结构与概预算的“量—价—费”逻辑高度契合, 构件工程量可依据《工程量清单计价规范》标准自动映射至清单条目, 构件参数触发组价规则执行, 构建“构件分类—清单编码—费用计算”链式规则体系后, 预算系统可依托模型数据实现自动驱动。此类逻辑不等同于静态导出, 而是依托语义规则与标准字段对模型数据进行结构化转译, 保障预算结果的准确性、完整性与更新效率, 因而成为预算编制系统的高密度数据源与逻辑触发器。

2 基于 BIM 技术的智能化概预算编制架构设计

2.1 系统整体架构构成与逻辑关系

智能化概预算系统构建以“构件数据—规则响应—预算生成”为主线, 分为数据采集、规则引擎、控制处理与成果输出四层, 数据采集层对接建模平台, 利用 API 调用构件 ID、几何字段、族名称及参数属性, 并完成标准化字段结构重组; 规则引擎层嵌套计量规

作者简介: 吕光美 (1989-), 女, 本科, 经济师, 研究方向: 工程造价。

范、定额标准与价格联动逻辑，根据构件分类与工程量字段自动选择清单路径与组价规则；控制处理层承担预算版本管理、模型变更联动与操作日志归档，构建全过程闭环数据链；输出层提供预算清单、费用结构报表与模型挂接视图，可导出至EXCEL、XML或与广联达、斯维尔等系统对接^[2]。整体架构由数据驱动、规则驱动与反馈驱动三线并行，形成逻辑完整、响应及时的智能生成机制。

2.2 构件级—清单级—费用级预算规则体系构建

预算规则体系分三层构建：构件级规则聚焦参数识别与量化模型，按构件族类型设定可提取字段与计量公式：

$$V=L \times B \times H \quad (1)$$

梁类构件以式(1)作为混凝土体积基准，其中， V 表示构件体积， L 表示梁的长度， B 表示梁的截面宽度， H 表示梁的截面高度，清单级规则按工程量清单计价规范匹配条目，利用构件参数交叉检索清单编码，解决“一构件多清单”与“清单项跨构件”的对应问题。费用级规则调取标准定额中的工料机消耗量与市场价格，结合项目地区措施费率，生成直接费、间接费与税金等各费用构成，系统支持多地区库切换与规则版本维护，确保适应区域标准差异与造价动态调整，构建预算生成逻辑的稳定基座。

2.3 智能化引擎集成方式设计

系统智能引擎需具备构件识别、规则判断与行为学习三种核心能力，构件识别模块集成关键词解析、参数组合判断与族类训练模型，提升对复杂命名构件的归类准确度；规则调用模块基于条件逻辑树构建“构件特征—预算路径—规则结果”映射机制，自动匹配清单项与费用路径；引擎允许预算员对系统自动判断结果进行人工复核与纠偏，修订信息被记录并回归学习模块；系统可集成XGBoost或LightGBM类算法，对历史项目预算数据进行误差分布分析与规则适配优化^[3]。借助持续训练与参数更新，逐步增强引擎的泛化能力与适应性，实现从规则执行到逻辑演化的闭环智能编制体系。

3 基于BIM技术的工程造价概预算智能化编制方法

3.1 基于构件信息的工程量自动提取与清单匹配方法

构件级工程量是构成概预算数据链的起点，其提取精度直接决定了清单生成与费用计算的准确性，BIM模型中的每一个构件均内嵌有三类关键信息：一为几何

信息，如长、宽、高、投影面积与体积；二为属性字段，如构件类别、施工部位、楼层标高、材质等级等；三为语义标签，如族名、构件编码与施工类型分类，这些数据通过API接口调用Revit、Tekla或Navisworks平台，解析为结构化字段供预算系统识别与匹配。

系统通过内置映射规则将构件归入对应清单项。例如：对于钢筋混凝土梁构件，需提取混凝土体积、模板面积与钢筋质量等参数，分别匹配梁混凝土、模板制作与钢筋制安清单项。为提高识别准确性，系统应构建“构件类型—参数字段—清单编码”的三维映射逻辑，确保不同构件族类均能准确匹配其工程量属性与预算编码。

在实际BIM系统中，构件与清单的匹配过程由构件族、参数组合、上下文逻辑综合判定，部分复杂构件如嵌套梁柱、变截面楼梯等还需引入构件分解算法(如BRep边界表示建模方式)进行切片处理，以提取有效算量单元^[4]。针对构件表达中存在截面不规则或曲面复杂的情况，可借助断面面积公式进行展开面积计算：

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (2)$$

式(2)中， x 为水平投影轴变量，通常对应构件的一个主方向维度； y 表示沿另一维度的边界函数，可理解为构件边界轮廓的高度值函数； $\frac{dy}{dx}$ 表示边界曲线在 x 方向的导数，反映斜率变化； \int_a^b 表示从区间 a 到 b 的积分运算，用于累加整段曲线或轮廓的微小段落所形成的面积或长度； $\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$ 为微分弧长单元的勾股合成长度，用以还原真实的曲线长度而非仅仅投影长度。

配合构件边界曲线及投影线数值，系统可自动估算其展开面积或实体体积，确保工程量计算满足《建设工程工程量计算规范》等相关条款，支持异形构件与精细计量项目的智能提量流程。

3.2 基于规则库的智能组价与费用动态生成机制

在预算编制中，费用结构通常划分为直接费、措施费、规费与税金等子项，每一项均依托工程量与定额消耗指标生成，系统完成构件与清单项匹配后，将自动调用定额库与实时造价数据库进行费用计算，核心公式如下：

$$F = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot P_i \cdot C_i \quad (3)$$

式(3)中， Q_i 为工程量， P_i 为定额工料机消耗量， C_i 为材料或人工机械单价。

在直接费部分，系统依据构件属性触发相应消耗量项，如墙体构件根据墙厚、墙高与材质类型调用不

同定额编号,措施费计算则依托模型逻辑判断自动识别,如高支模费用应在“层高大于 4.2 米”的楼板构件中触发;基坑支护费用可由“基础底标高低于自然地坪 2.5 米”条件激活。在系统架构中,应构建“费用触发条件—费用计算路径—标准费率源”的三层调用结构,以支持模型参数—费用项目间的联动。

在费用价格接口方面,应对接省级或企业造价信息平台,如住建部建设工程造价信息网、广联达云价库等,自动更新材料价格、人工指导单价与机械台班费,并支持设置滑动区间平均算法应对短周期价格波动^[5]。

税金计算采用公式:

$$T=(F_d+F_m+F_i)\cdot R_i \quad (4)$$

式(4)中, F_d 、 F_m 、 F_i 分别为直接费、措施费与间接费, R_i 为税率,预算系统应预置地区税费政策模板,动态计算增值税、城市维护建设税与附加费等构成项,确保合规性。

3.3 基于模型变更追踪的预算调整联动机制

设计阶段变更频繁,若预算数据无法实时响应更新,将严重削弱造价管控的精度,BIM 支撑下的预算系统可引入模型版本比对机制,识别变更构件清单并联动费用调整。在实际应用中,通过解析两版模型的 GUID(Global Unique Identifier)信息,系统可精确识别以下三类变化:新增构件、删除构件与属性变更构件。变更识别后,系统将生成“差异构件清单”,自动检索其对应清单项及费用路径。

以新增电气配电箱构件为例,系统将在预算模型中同步新增其对应的清单项及组价明细,并在“新增工程变更登记表”中生成条目,供造价人员复核或推送至合同变更模块,对属性变更的情况,如构件尺寸调整或材质变更,系统将触发工程量重算机制并更新费用字段,同时保留前后版本工程量差值,形成“差额预算条目”用于后续造价控制与商务洽谈。

预算联动机制还应支持事件级预警设置,预算员可标记特定构件(如大型钢结构、特种设备基础)为“关键成本节点”,若发生属性变动或位移超过设定阈值,系统将实时推送调整提示。变更日志应具备时间戳、责任人记录与操作路径回溯功能,以满足审计与合同管理的数据溯源需求。

3.4 基于智能审校与异常识别的预算质量控制机制

预算成果输出后,需执行多层次、多维度审校流程,确保其工程量完整性、逻辑合理性与费用准确性。在工程量校验模块中,系统应构建“构件总表”与“已计清单构件表”自动比对程序,检测是否存在未归属

清单项的构件,如识别到“结构板负筋”为模型中存在但清单缺失,系统将标注该构件为“未计项”并生成审校提示。

在费用校验方面,系统应引入历史类比机制,将当前项目单位造价与历史同类型项目数据进行偏差分析。例如:对主体结构施工单价,可设置 $\pm 8\%$ 的波动警戒区间,若超出系统将自动标红。配合机器学习模块,可通过训练历史预算审核记录,提炼“高风险组价特征”,如“模板面积与混凝土体积比例失衡”“吊装机械台班异常集中”等模式,提高对隐藏异常的捕捉能力。

为了增强可操作性,系统应构建一套“预算审校报告模板”,包含关键构件遗漏表、偏差项汇总表、风险费用条目与复核建议清单,预算员可对自动审校结论进行确认或驳回,所有操作路径自动记录形成“审校操作日志”^[6]。最终系统形成可提交审批的标准化预算审校文档,实现预算成果从生成到核验的闭环管理。

4 结束语

在建设数字化转型持续深化的背景下,BIM 技术赋能工程造价概预算的路径不再局限于建模展示层面,而应成为数据驱动与逻辑决策的关键枢纽,基于构件信息自动提量、规则驱动组价逻辑与智能引擎联动反馈,不仅增强了预算结果的准确性与时效性,也拓展了全过程成本管控的技术边界。概预算编制从线性人工判断走向模型语义识别、动态计算与闭环反馈,推动了工程造价管理由经验型向数据智能型跃迁,为实现高透明度、高响应力的投资控制体系提供了基础支撑。

参考文献:

- [1] 余建龙.BIM 技术在全过程工程造价管理中的应用研究[J].建筑设计管理,2025,42(11):60-64.
- [2] 马丽刚.基于 BIM 技术的工程造价决算审核应用[J].住宅与房地产,2025(32):68-70.
- [3] 张燕华.BIM 技术在工程造价管理中的应用[J].绿色建筑与智能建筑,2025(11):80-83.
- [4] 袁玲.基于 BIM 的多阶段成本控制在工程造价管理中的应用[J].散装水泥,2025(05):145-147.
- [5] 焦刘霞,侯高升.浅析 BIM 技术在水利工程造价管理中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(30):199-201.
- [6] 宋羿,李洪叶,禾浩辰,等.智能化技术赋能工程管理与工程造价的路径研究[J].科技创新与应用,2025,15(28):127-130.

光伏电站运维成本控制中的 关键问题与精细化管理对策

刘春金

(深能南京能源控股有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 在能源转型不断加速的背景下, 光伏电站已成为我国清洁能源体系的关键一环, 其运维作为保障电站长期稳定运行并实现收益最大化的核心环节, 成本控制水平直接关系到电站的投资回报率与市场竞争力。当前我国光伏电站运维成本控制面临人员配置不合理、设备管理滞后、管理模式粗放等问题, 这些问题制约着行业高质量发展。基于此, 本文从光伏电站运维成本的构成入手, 系统剖析成本控制中的关键问题, 进而提出针对性的精细化管理对策, 以期光伏电站运维成本优化提供理论参考。

关键词 光伏电站; 运维成本控制; 精细化管理

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.026

0 引言

全球能源加速向清洁低碳转型, 我国光伏产业顺势蓬勃发展, 累计装机容量已跃居世界前列, 成为能源变革的关键推动力。光伏电站虽前景广阔却有着投资大、周期长的特点, 其运维周期贯穿25年至30年的全生命周期, 成本占比不断提高且直接影响电站盈利。当前行业正从被动维修转向主动运维, 但部分电站仍沿用粗放管理模式, 导致成本高企与资源浪费。因此, 精准识别运维成本控制关键问题、建立精细化管理体系以实现降本增效, 已成为运营企业亟需解决的核心任务。本文将围绕这一课题展开分析并提出对策。

1 光伏电站运维成本的构成

光伏电站运维成本指为保障电站设备稳定运行与生产活动有序开展所产生的全部费用。厘清其具体构成是实现精准成本控制的基础, 主要包含四大核心部分, 人工成本是其中之一, 涉及运维人员的工资、福利、培训及保险等相关支出, 专业且科学的人员配置不仅能提升运维效率, 还能对成本形成有效管控; 设备维护与维修成本在总成本中占比突出, 涵盖日常巡检、定期保养、故障抢修及备品备件采购等费用, 光伏组件、逆变器、变压器等关键设备易受自然环境与老化因素影响, 使得此项成本成为管控重点^[1]; 能耗与物料成本虽单项金额不高但长期累积不可小觑, 包括运维过程中的电力、水资源消耗以及清洁工具、润滑油

等耗材支出; 其他间接成本则是电站运转的重要支撑, 涵盖办公费、场地租赁、安全防护、技术咨询及保险等内容, 这类成本不直接作用于设备维护却管控难度较大, 需特别防范资源浪费问题。

2 光伏电站运维成本控制中的关键问题

2.1 人员管理不规范, 人工成本管控失衡

人员管理是运维成本控制的核心, 当前不少光伏电站在这一环节存在突出漏洞。首要问题是人员配置缺乏科学性, 呈现人浮于事与人员短缺的两极分化, 部分电站未结合自身规模、设备数量及运维难度制定合理编制, 冗余人员直接推高人工成本, 而偏远电站常因招聘难题陷入人员短缺, 运维人员被迫超负荷工作, 既降低运维质量, 又埋下安全隐患。其次是人员专业素养不足且培训体系滞后, 光伏运维涵盖电力电子、自动化控制等多领域知识, 对专业能力要求极高, 但部分电站为压缩开支削减培训投入, 导致运维人员无法掌握新型设备操作与故障诊断技术, 设备出现问题时难以快速处置, 进而延长停机时间, 增加运维成本与发电损失。最后是绩效考核机制不健全, 大幅削弱了运维人员的工作积极性, 造成工作效率低, 进一步加剧了人工成本压力。

2.2 设备管理滞后, 维护维修成本居高不下

设备作为光伏电站发电的核心载体, 其管理水平直接关系到运维成本的高低, 而当前设备管理滞后已

作者简介: 刘春金(1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 光伏电站运维与管理。

成为多数光伏电站面临的共性问题。首先体现在设备巡检模式粗放且故障预警能力不足，部分电站仍依赖传统人工巡检，这种方式效率低、覆盖面有限，很难及时发现组件热斑、逆变器异常等隐性故障，往往要等到设备停机后才开展维修工作，此时故障已造成较大损失，维修的难度与费用也会显著增加，同时由于缺乏先进的监测技术与数据支持，无法对设备运行状态进行实时监控与趋势分析，自然难以实现故障的提前预警与精准预判。其次是设备维护工作不到位，过度维护与维护不足的情况同时存在，部分电站为避免设备故障制定过于密集的维护计划，造成维护资源浪费，而另一些电站为降低短期成本减少必要的维护环节，导致设备性能加速衰减、使用寿命缩短，反而增加了后期的维修与更换成本^[2]。最后是备件管理混乱，库存积压与备件短缺问题突出，部分电站未建立科学的备件需求预测机制，盲目采购导致库存积压并占用大量资金，而另一些电站则因备件储备不足，在设备突发故障时无法及时获取备件，进而延长停机时间并扩大发电损失。

2.3 管理模式粗放，成本管控缺乏系统性

当前我国部分光伏电站仍沿用传统粗放式管理模式，缺乏对运维成本的系统性管控，成本浪费现象十分突出，这一问题主要体现在三个方面。首先，成本管理意识薄弱且部门协同不足，部分电站将成本控制责任完全归于财务部门，运维、技术等核心部门却未树立明确管控意识，开展工作时往往只关注进度与质量而忽视成本因素，比如运维部门设备维修时过度追求快速解决，未优先考虑性价比更高的方案，技术部门引入新技术新设备时，因未充分评估长期运维成本导致后续压力陡增，各部门间又缺乏有效沟通协作机制，难以形成成本管控合力。其次，成本管控手段单一且缺乏精细化数据支撑，部分电站成本核算仍停留在传统事后统计层面，仅对已发生成本简单记录汇总，无法实现过程中的实时监控与动态调整，加之未建立完善成本分析体系，难以精准定位管控薄弱环节，使得控制措施缺乏针对性与有效性。最后，部分电站运维外包管理存在漏洞，对外包单位资质审核、服务质量评估及成本核算不够严格，直接导致外包费用虚高，进一步增加了运维成本。

2.4 外部环境影响显著，成本管控难度加大

光伏电站的运维工作易受外部环境干扰，这些因素的不确定性大幅提升了成本管控的难度，其中自然环境的影响尤为直接。光伏电站多选址于光照充沛区

域，部分区域常遭遇高温、高湿、风沙、冰雹等极端天气，这些条件会加速设备老化并提高故障风险，比如风沙会让光伏组件表面积尘进而降低发电效率，这就需要增加清洁频次从而推高清洁成本。冰雹、雷电等则可能直接损毁设备，带来高昂的维修与更换开支。政策与市场环境的波动同样关键，光伏行业对政策敏感度高，国家及地方在电价补贴、税收优惠、环保要求等方面的调整，都会直接或间接作用于运维成本，环保政策收紧可能要求电站新增环保设施投入，电价补贴退坡则迫使电站通过压缩运维成本维持收益。此外，光伏设备市场价波动、运维服务费上涨等市场因素，也会对成本控制形成不利冲击。

3 光伏电站运维成本控制的精细化管理对策

3.1 优化人员管理，实现人工成本精准管控

针对人员管理现存问题，需从人员配置、专业培训、绩效考核三个核心维度构建精细化管理体系，以此实现人工成本的合理管控。科学配置人员是提升人力资源利用效率的关键，电站需结合自身装机容量、设备类型、地理环境等实际因素，制定个性化人员编制方案，明确各岗位职责与具体工作内容，对于规模较大、设备集中的电站可采用集中运维模式精简冗余人员，对于偏远分散的电站则推广无人值守加远程运维模式，借助智能化技术降低对现场人员的依赖，同时建立区域运维中心实现人员共享与灵活调配^[3]。加强专业培训是提升人员素养的重要路径，需建立完善培训体系，制定分层次、分岗位的培训计划，内容涵盖新设备操作、故障诊断、安全规范等核心模块，采用线上加线下、理论加实操的组合培训方式，定期组织运维人员参与培训并通过考核机制保障培训效果，同时鼓励运维人员参与行业交流与技能竞赛以拓宽知识视野、提升专业能力。建立健全绩效考核机制能够有效激发工作积极性，需将成本控制、运维质量、发电效率等关键指标纳入绩效考核体系，明确各岗位考核标准与奖惩措施。例如：对运维人员发现隐性故障、降低维修成本的行为给予奖励，对因操作失误导致成本增加的行为进行处罚，通过绩效考核将成本管控责任落实到个人，充分调动运维人员的工作主动性与创造性。

3.2 构建全生命周期设备管理体系，降低维护维修成本

以设备全生命周期管理为核心，从巡检、维护、备件三大环节发力，可实现设备管理精细化并降低维护维修成本。首先，需升级巡检模式以强化故障预警能力，通过引入物联网、大数据、人工智能等先进技术构建

远程在线监测加智能巡检体系；在光伏组件、逆变器等相关设备上安装传感器实时采集运行数据，经云端平台分析处理实现设备状态实时监控；同时结合无人机、机器人巡检技术提升巡检效率与覆盖面，精准识别隐性故障，基于监测数据建立故障预警模型实现提前预判与精准定位，将被动维修转化为主动预防。其次，实施精准维护以优化维护策略，结合设备运行年限、性能参数、运行环境等因素制定差异化维护计划，避免过度维护与维护不足，新投运设备以预防性维护为重点关注磨合情况，运行年限较长的设备则加强状态监测并根据性能衰减趋势调整维护频率与内容；同时建立设备维护档案详细记录维护时间、内容、效果等信息，为后续策略优化提供数据支撑。最后，通过精细化备件管理实现库存优化，建立备件信息管理系统对采购、入库、领用、库存等环节全程跟踪，基于设备故障概率、维修周期等数据用科学预测方法精准预判需求，制定合理采购计划与库存定额，与供应商建立长期合作并签订应急备件供应协议，确保突发故障时快速获取备件，同时减少库存积压与资金占用成本。

3.3 推行精细化管理模式，提升成本管控系统性

突破传统粗放管理模式的局限，需打造全员参与、全流程覆盖的精细化成本管理体系，从意识建立、核算分析到外包管控形成完整闭环。强化成本管控意识是首要前提，通过多层次宣传培训让各部门充分认知成本管控的核心价值，树立全员参与的成本管理理念，同时建立以财务部门为核心，运维、技术、采购等部门紧密协同的管控机制，明确各部门职责分工与协作流程，比如技术部门引入新技术前需联合财务部门开展成本效益测算，采购部门选购设备耗材时则优先考量性价比优势^[4]。构建精准的成本核算与分析体系是核心环节，采用作业成本法等先进方式将运维成本细化分摊至每个作业环节与每台设备，清晰定位成本发生源头，依托成本动态监控平台实时追踪成本变动，对比实际支出与预算差异以快速发现问题，定期从人员、设备、物料等维度开展成本分析，精准识别管控薄弱环节为后续措施制定提供数据支撑。规范运维外包管理是重要保障，建立严格的外包单位准入标准全面评估其资质、技术能力与服务质量，签订内容详实的外包合同明确服务范围、收费标准及质量要求，加强外包服务全流程监督考核，定期评估服务质量与成本控制效果，对不达标单位及时更换以确保外包费用合理可控。

3.4 强化外部环境应对能力，降低不确定因素影响

为降低外部环境对光伏电站运维成本的冲击，需建立前瞻性应对机制。首先，要筑牢自然环境风险的

防控防线，在电站规划建设阶段就深入调研当地气候特征，选用适配本土环境的光伏设备与组件；运维过程中需构建极端天气预警体系并提前拟定应对方案，如台风冰雹等恶劣天气来临前加固设备，风沙过后迅速组织组件清洁；同时定期开展设备防风防水防雷等安全排查，通过持续提升设备对自然环境的适应能力，减少极端天气导致的设备损毁。其次，要强化政策与市场环境的研判能力，建立常态化政策跟踪机制以实时掌握国家及地方光伏行业政策动向，针对电价补贴退坡提前规划成本控制路径，依托精细化管理压缩运维开支来抵消收益波动，面对环保政策收紧则尽早推进环保设施升级，规避合规问题引发的额外成本^[5]。最后，还需加强市场动态监测，及时捕捉光伏设备及运维服务的价格波动信息，据此灵活调整采购计划与服务外包策略，从而有效降低市场变量对运维成本的干扰，确保电站运维成本始终处于可控范围。

4 结束语

光伏电站运维成本控制是关系到电站长期收益与行业高质量发展的系统工程。当前我国在这一领域正面临人员管理不规范、设备管理滞后、管理模式粗放以及外部环境影响显著等问题，这些问题严重阻碍了运维成本的优化提升。基于此，需通过优化人员管理、构建设备全生命周期管理体系、推行精细化管理模式以及强化外部环境应对能力等举措，实现运维成本的精准管控。随着智能化技术持续发展，光伏电站运维正朝着无人化、智能化方向转型，这为成本控制带来了新机遇。相关运营企业应积极拥抱技术变革，加大智能化运维投入，不断完善精细化管理体系，持续提升成本控制水平，推动光伏行业在清洁低碳能源转型中发挥更大作用。

参考文献：

- [1] 林浩宽.光伏电站运维成本分析与降低策略[J].电力系统装备,2025(03):170-172.
- [2] 廖章斌.大型光伏电站的组件布局与运维成本优化研究[J].现代工程科技,2025(14):105-108.
- [3] 李宁,唐凯.光伏电站运维管理探讨[J].水利电力技术与应用,2024,06(21):55-57.
- [4] 陈志娟.光伏电站的建设,运维成本分析研究[J].科技风,2020(07):181.
- [5] 晋晟铭.光伏电站运维管理探讨[J].工程管理与技术探讨,2025,07(01):113-115.

基于数智浪潮的企业管理重构路径探索

——以华电科工经营信息管理平台为例

吴胜龙

(中国华电科工集团有限公司, 北京 100160)

摘要 在数字经济驱动下, 数据成为核心生产要素, 但大型集团面临“烟囱式”架构的局限, 存在企业运营受数据割裂和流程断点阻碍的问题, 华电科工将信息化演进规律、数据治理措施、中台战略及 BPR 作为支撑, 采用“1+2+N”顶层设计推进转型(“1”为数智基座, “2”为数据与智能中台, “N”为端到端数据驱动的业务应用), 采用定量与定性分析, 该模式有效性获专业验证, 从该模式中挖掘管理启示和实施的路线, 旨在为同类企业提供有益参考。

关键词 数智化转型; “1+2+N”架构; 数据治理; 数智基座; 能力中台

中图分类号: F425

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.027

0 引言

人工智能、大数据、云计算、物联网等信息技术的不断发展, 推动了全球经济与产业生态的革新。我国《“十四五”数字经济发展规划》明确提出“推动数字产业化和产业数智化”“发挥数据要素作用”, 为企业发展指明方向^[1]。华电科工作为大型综合性企业, 分子公司多, 资讯体系创建分散, 形成技术架构未统一、数据标准未一致的“数字烟囱”, 造成数据割裂、决策不准、流程效能不佳、资源重复投入等问题。华电科工开启经营信息管理平台的搭建工作, 以管理重构为核心, 借助统一平台破除数据隔阂, 打造高效运营体系, 提升管理与决策水平^[2]。

1 理论框架: 数智化转型的基石

华电科工经营信息管理平台的成功构建, 并非单纯凭借技术选型与项目管理达成, 其背后贯穿着对企业信息化发展规律、数据管理科学以及现代管理理论的深度认知和创新应用。

1.1 企业信息化的演进: 从支撑到引领

企业信息化的发展历程是一部不断追求业务与技术深度融合、不断提升集成与协同能力的演进史, 大致可分为三个阶段: 第一阶段: 部门级应用阶段(20世纪 80-90 年代), 计算机提升特定部门效率, 系统功能单一孤立, 价值在局部操作效率提升。第二阶段:

企业级集成阶段(90 年代末), 以 ERP 系统为核心, 企业打通内部产、供、销、人、财、物等资源管理流程。第三阶段: 平台化、中台化与生态化阶段, 核心思想是能力沉淀与复用, 信息系统从被动后台转变为快速响应前台业务创新的核心引擎^[3-4]。

1.2 数据治理的核心地位: 从管“数据”到治“资产”

如果说平台是数智化的“骨架”, 那么数据就是流淌其中的“血液”。“血液”的质量直接决定了机体的健康与活力。在平台建设初期, 华电科工管理层内部曾有过争论: 是应该优先开发业务功能, 以求快速见效, 还是先进行繁琐的数据治理? 最终, 管理层采纳了“数据先行, 治理为基”的战略, 这被事后证明是项目成功的关键。华电科工深刻认识到, 数据治理并非一次性的 IT 项目, 而是一项持续的管理职能。其成功实践, 必须构建起“人(People)、流程(Process)和技术(Technology)”三位一体的治理框架, 要从“管数据”向“治资产”推进。

1.3 中台战略的引擎作用: 能力的服务化革命

“中台”是近年来中国企业在数智化实践中对全球做出的重要理论贡献, 其核心思想是, 在快速多变的前台和稳定可靠的后台(如 ERP、财务系统等)之间, 构建一个共享能力层, 即中台^[5]。

华电科工根据自身业务管理及发展需要, 通过“能力沉淀”和“服务复用”的方式, 构建数据中台和智

作者简介: 吴胜龙(1988-), 男, 本科, 工程师、经济师, 研究方向: 数智化、科技创新工作研究。

能中台，实现对前台业务的快速响应与精准赋能，即所谓的“大中台，小前台”，从而在稳定性与灵活性之间取得平衡^[6]。

1.4 业务流程再造(BPR)的必要性:从“线上化”到“数智化”

经营信息管理平台的建设绝非简单地将旧系统功能进行复制粘贴，将原来线下审批流程原封不动地搬到线上，否则只会是“穿着新鞋走老路”，固化了旧的管理模式，无法发挥数智技术的真正作用。

业务流程再造(Business Process Reengineering, BPR)强调突破传统部门职能分割的组织边界，以端到端价值创造为导向，对企业核心业务流程进行系统性重构。在数智化时代，数据不再只是流程运行的记录结果，而成为驱动流程重塑、规则重构与决策优化的关键要素，为BPR的实施提供了前所未有的技术基础和治理支撑。华电科工经营信息管理平台的构建历程，就是一场特质鲜明的BPR实践，项目团队以客户价值为主导、兼顾经营目标，按照新的模式对核心业务流程开展重塑，揭示背后隐藏着流程逻辑的根本变革态势：从“基于人的信任”转变为“基于系统规则和可信数据的自动校验”。这是从“业务线上化”迈向“业务数智化”的本质区别^[7]。

2 数据治理：数智化转型的“压舱石”

华电科工在项目起始阶段就敏锐地察觉，若不根治“数据割裂”与“数据标准不一”的痼疾，任何先进的平台架构最终都会因“垃圾输入，垃圾输出”而走向失败，“重建设、轻治理”的传统信息化模式被公司抛弃，将数据治理界定为与平台建设同步实施的深刻管理变革，视其为促成数字化转型成功的“压舱石”。

首先从组织架构的层面切入，重新梳理权责，构建从顶层到底层的治理体系，于公司范畴清晰划定数据“谁决策、谁管理、谁负责”的界限，从起始点破除“责任悬空”障碍，让治理责任着实下沉到最精通业务的部门，若不相关业务活动相关的数据治理终将沦为“两张皮”，难以持续。项目团队借鉴BPR理念，将治理规范“嵌入”核心业务流程，使其成为业务活动的“内在要求”而非“额外负担”^[8]。华电科工的数据治理实践，是一套“组织—流程—技术”共同发挥作用的系统工程，它既为“1+2+N”架构筑牢了稳固的数据根基，更在公司内部建成了深度打磨数据资产、高效挖掘数据价值的长效机制，成为实现“业务重构”与“数据驱动”的核心前提与根本保障^[9]。

3 华电科工“1+2+N”基座架构构建与实践

基于上述理论框架，华电科工以满怀雄心壮志的战略决心和高效实用的实施方法，按照“1+2+N”架构顶层设计，即构建1套强大、融合、面向未来的数智基座，在其之上构建2个可多次复用的能力中台，以敏捷支撑N种快速迭代、柔性延展的上层业务应用场景，最终实现企业运营、供应链的协同运作、客户服务、智能生产等一系列顶层业务价值。

3.1 “1”套数智基座：稳固统一的技术与数据基座

数智基座是整个经营信息管理平台的技术根基，它并非简单的IT基础设施，而是一套集应用开发、数据管理、人工智能于一体的综合性平台基座。其核心由以下三部分构成：一是为前端应用和中台服务的敏捷开发提供了全方位工具链支持的应用开发平台；二是承载数据中台运行基础工具集，负责数据全生命周期的管理，确保数据资产“可见、可用、可管、可控”的数据管理平台；三是构建数字孪生平台、智能体平台、物联网平台和模型开发平台，形成“感知—建模—分析—决策—执行”完整闭环的人工智能实验室。

3.2 “2”个能力中台：数据与智能的核心引擎

在稳固的数智基座之上，华电科工构建了两大能力中台，将企业的核心能力以服务化的方式沉淀下来，实现最大化的复用，敏捷地响应前端需求。

数据中台是数据驱动的核心，基于湖仓一体化架构实现“采、存、管、建、通、用”全链路管控，实现数据资产实时流转、高效复用与高价值转化。

智能中台，通过将华电科工人工智能实验室的先进技术研究成果平台化、产品化，快速响应业务需求，让AI能力在与业务场景的碰撞中不断进化，最终为企业培育新质生产力，驱动创新增长。

3.3 “N”种场景：聚焦四大核心业务，创造业务价值

在数智基座的底层能力强力加持下，加上两大能力中台的坚实支撑下，平台以“项目”为绝对核心，聚焦关联最紧密、管理难点最突出的投标管理、采购管理、合同管理和工程项目管理四大核心领域，构建前端业务应用，即经营信息平台。这些应用不再是孤立的功能模块，而是共享同一套技术基座、同一套核心能力、同一套权威数据的“轻量级”应用。

场景：从合同预算到采购执行的数据驱动。

过去：依据销售合同情况去规划项目计划与物料清单，用Excel文件把资料发送给采购部门，采购部门以原始的手动方式编制采购计划，造成信息传递滞

后、存在出错风险，且缺少实时跟踪采购对成本和计划影响的功能。

现在：合同、项目、采购强控联动，销售合同未签订时，鉴于销售合同未签，项目经理申请提前准备，采购经理依据相关要求制定采购计划时，系统全面检查合同状态未签，系统自动填充已审批的提前采购明细，销售合同签订后，系统凭借程序自动生成执行预算待办，由经理主导编制执行预算，采购经理又一次开展计划制定的时候，系统开展对合同已签状态的核查，对引用执行的预算明细实施强控，采购完成后，中标信息及采购合同状态反向录入初始采购计划安排，形成计划—实施—反馈闭环。

4 系统集成架构：打通内外数据通路

经营信息管理平台并非是一个完全孤立的系统，它作为科工本部侧的业务运营核心，还需与集团统建的多个系统进行高效的数据交互，系统集成架构依托数据中台和企业服务总线（ESB）作为两大核心支撑，实现内外数据的互通互联。该集成架构以“松耦合”与“服务化”为核心思想，清晰地划分为“本部侧”与“集团侧”两大区域，这一凭借分层解耦展现清晰特质的集成架构，为减少系统间直接依赖进行有效隔离，增强了整体架构稳固和扩展两方面的特性表现，全面贯通了公司内外的数据通路，为建设数字智能一体化生态系统奠定了基础。

5 平台的应用成效与价值创造

5.1 核心价值：企业级数据资产的形成与应用

平台建设最核心、最深远的价值在于顺利地将以往分布于诸多业务系统、Excel 表格甚至个人电脑中，质量参差不齐的“数据”，系统有序地转化为了标准统一、质量可靠、可信可用、不断实现价值增长的企业级“数据资产”，各类数据资产被完整地沉淀在数据中台，采用数据服务门户与数据资产目录手段，为华电科工创造全新突破式的价值。

5.2 效率革命：运营协同能力的质变

经营信息管理平台上线后，基于流程再造与数据整合，大幅提升了运营协同的能力。从管理优化方面来看，经营信息管理平台上线后减少了管理内耗，释放组织活力。更重要的是，它打破了长期存在的“部门墙”，使市场、项目、采购、财务等部门人员依据同一套实时数据协作，项目经理清楚知晓付款状态和合同审批进度，财务人员为工作便利可实时查阅项目成本，降低信息不对称引起的会议、沟通与返工频次，

让员工更专注于价值创造，切实提高了企业运营效率和市场响应速度。

6 结论与未来展望

6.1 核心结论总结

华电科工经营信息管理平台成功实践为国内大型集团企业数智化管理重构提供了借鉴。构成其成功内在本质的核心要素有：高层战略决心作为根本前提，平台化架构凭借特性避免重复建设，实现统一效果且推动快速创新；通过优先治理数据，而后开发功能，以此奠定数据基础，业务与技术深度融合，业务专家和技术人员凭借能力互补协作解决实际问题；凭借数据驱动对业务流程重塑，从管理层面实现效率、成本和风险控制的突破改善。

6.2 未来发展蓝图

华电科工新一代数智化蓝图进入开展阶段，未来需不断扩展物资管理、资产管理、供应链管理等业务，建成遍及全价值业务链的数智化生态系统。在深度挖掘方面，着重加强智能中台的应用力度，挖掘数据价值，采用历史数据训练模型达到风险预测目的；集成物联网设备，凭借 BIM 技术构建数字孪生体，实现智能化管理，要通过业务支撑平台的不断发展，过渡至智能决策平台，成为驱动市场的整体竞争格局领先的“智慧大脑”。

参考文献：

- [1] 国务院.“十四五”数字经济发展规划[N].人民日报,2022-01-12(001).
- [2] 肖红,黄速建,赵剑波.大型企业集团数智化转型路径研究[J].中国工业经济,2021(03):174-192.
- [3] 戚聿东,肖兴志.数字经济时代的企业治理变革与创新[J].管理世界,2020,36(06):1-10.
- [4] 阿里巴巴数据技术及产品部.阿里巴巴大数据实践-数据中台之路[M].北京:电子工业出版社,2018.
- [5] 郝旭光,王超.企业数智化转型与组织韧性:基于双案例的探索性研究[J].管理世界,2022,38(01):158-177.
- [6] 中国信通院.数据治理研究报告—数据要素权益配置路径(2024年)[R].北京:中国信通院,2024.
- [7] 吴丹,冷新宇,梁少博,等.数字孪生环境中的企业数据治理模式研究[J].文献与数据学报,2025,07(01):33-47.
- [8] Weill, P., & Woerner, S. L. What's Your Digital Business Model?: Six Questions to Help You Build the Next-Generation Enterprise[M]. Harvard Business Review Press, 2018.
- [9] 陈春花.数字时代的组织管理[J].管理世界,2020,36(05):125-135.

建筑文物工程保护中的材料老化机理防护技术

裴亚东, 卫经龙

(陕西省文物保护工程有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 建筑文物是具有历史文化价值的物质载体, 材料老化是决定保护工程效果好坏的关键因素。本文从无机质、有机质文物材料固有的特性以及环境胁迫两个方面分析材料老化的内在机理和加速机理, 构建表面防护、结构加固、环境调控的三维防护技术体系, 阐明各种技术针对不同的老化机理所起的作用。通过分析防护技术同老化机理的适配逻辑以及多技术协同整合模式, 为建筑文物保护工程提供兼具科学性与实践性的技术参照, 从而实现对老化进程的精确抑制, 并保证文物本体的长久保存。

关键词 建筑文物保护; 材料老化机理; 防护技术; 表面防护; 结构加固

中图分类号: TU7; K87

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.028

0 引言

建筑文物的耐久性直接取决于构成材料的稳定性, 材料老化是自然和人为因素共同作用下不可逆的过程, 一直是文物保护工程的主要问题。砖石结构风化剥蚀, 木结构腐朽糟朽, 彩绘层褪色起翘, 夯土墙体酥碱崩解, 材料老化用多种方式危及文物的结构安全和价值存续。防护技术的研发与应用要以对老化机理的深刻认识为基础, 采用针对性干预的方式来延缓老化过程。

1 建筑文物工程保护中的材料老化机理解析

1.1 无机质文物材料老化的内在机理

无机质文物材料(如石材、砖瓦、夯土、金属等)的老化源于其内部晶体结构的固有特性与外部环境长期作用的结果, 其机理主要是物理结构破坏和化学组分变异的共同发展。石材类材料的老化源于其内部孔隙和微裂隙的存在, 环境中的水分依靠毛细作用渗透进去, 在温度变化引起的冻融循环中, 水分结冰膨胀产生的机械应力不断扩大裂隙, 同时溶解在水中的盐分结晶与潮解过程造成体积的反复变化, 造成材料表面颗粒脱落、结构疏松^[1]。以敦煌莫高窟砂岩壁画载体为例, 西北干旱区昼夜温差可达 20℃以上, 每年冻融循环次数超过 30 次, 加快岩体裂隙的扩展; 从化学角度来说, 空气中的酸性气体同石材里的碳酸钙等成分发生反应, 产生易溶于水的盐类物质, 促使材料的溶蚀和风化。工业城市中 pH 值小于 5.6 的酸雨会使大理石文物表面形成蜂窝状溶蚀坑, 实测结果显示 pH4.0 的模拟酸雨喷淋 30 天, 碳酸钙流失量可达原始质量的

12%。夯土、砖瓦材料的老化与黏土矿物的亲水性有关, 水分的持续作用使黏土颗粒间的结合力变弱, 出现酥化、崩解现象, 长期的干湿交替会造成材料的收缩与膨胀不均, 产生龟裂、剥落。例如: 西安城墙明代夯土墙体的检测结果显示, 含水率在 20% 以上时, 夯土抗压强度下降 58%, 孔隙率增大 35%; 金属类文物材料的老化主要是电化学腐蚀, 表面氧化膜损坏产生腐蚀电池, 水、电解质参与下发生氧化还原反应, 锈蚀产物生成并使基体材料损耗, 从而破坏文物结构的完整性。例如: 故宫太和殿鎏金铜缸检测表明, 在含氯离子的环境中, 铜基体点蚀速率是干燥环境的 8~10 倍, 腐蚀坑深度每年增加 0.3~0.5 mm。

1.2 有机质文物材料的降解机制

有机质文物材料(如木材、漆器、纺织品、纸张等)的老化是以分子链降解和生物侵蚀为主, 稳定性受材料自身的化学结构和外界生物环境的双重影响。木材属于天然高分子材料, 纤维素、半纤维素和木质素的共同作用维持结构稳定, 环境中的水分和氧气会引起纤维素的水解反应和氧化反应, 造成分子链断裂、聚合度降低, 表现为木材强度下降、糟朽粉化。苏州园林古建筑金丝楠木构件检测发现, 相对湿度 80% 时存放五年纤维素聚合度由 1 200 降至 450, 抗弯强度损失 42%; 另外, 木质素的氧化降解会使木材颜色稳定性遭到破坏, 造成褪色、变脆。漆器、纺织品中的天然树脂、纤维等成分也容易受到环境的影响, 紫外线照射会使分子链上的化学键被破坏, 造成材料老化变脆。经过 500 小时的紫外线照射, 丝纤维断裂强力下降 67%、断

作者简介: 裴亚东(1984-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 文物保护。

裂伸长率下降 81%；微生物（如真菌、细菌）以有机质为营养源，造成腐朽、霉变等生物病害，破坏材料物理结构及化学组成^[2]。在南方湿热地区，纺织品霉菌滋生的临界相对湿度为 75%，黄曲霉代谢产生的有机酸可以使局部 pH 值降到 3.5，加快纤维水解。纸张类文物的老化具有多重机理叠加的特征，纤维素的酸性水解、氧化降解与微生物侵蚀互相促进，使纸张变黄、发脆、撕裂强度下降，最终影响文物保存年限。例如：法国国家图书馆的中世纪羊皮纸研究显示，当纸张的 pH 值小于 5.0 的时候，纤维素水解速率呈指数级增长。

1.3 环境胁迫下的老化加速机理

建筑文物材料的老化过程不是孤立发生的，而是在温湿度波动、紫外线辐射、污染物侵蚀等环境因素的共同作用下加速发展，形成了复杂的老化胁迫体系。温度和湿度的剧烈变化是材料老化的主要因素，温度突然变化会使得材料内部产生热应力，破坏颗粒间的结合力，而湿度频繁变化会造成材料反复的湿胀干缩，使裂隙的产生和扩展更加严重。通过热成像技术检测可知，北京天坛祈年殿琉璃瓦在夏季昼夜温差大的时候，表面温度梯度可以达到 15 ~ 20 °C，产生约 1.2 MPa 的热应力；多孔材料受湿度的变化影响较大，容易引起盐分迁移结晶，从而加速老化。敦煌壁画地仗层中可溶盐（如硫酸钠、氯化钠）在湿度变化时的反复结晶，造成颜料层起甲剥离率年均增加 8.3%。紫外线属于高能辐射，可以破坏材料分子结构中的化学键，引发光氧化反应，加快有机质材料的降解，同时也会促进无机材料的光致变色和表面风化^[3]。光谱分析显示，300 nm 至 400 nm 波段的紫外线对纤维素的破坏作用是可见光的 12 倍，空气中的污染物（如二氧化硫、氮氧化物、颗粒物）沉降在文物表面，一方面会和材料发生化学反应破坏材料组分，另一方面会堵塞材料的孔隙而影响透气性，造成内部湿气积聚，间接加快老化速度。工业城市的 PM2.5 颗粒会使石材表面的孔隙堵塞率提高 40%，湿度传导效率减少 65%。另外，生物因素（如植物根系生长、昆虫蛀蚀）用机械破坏和生物代谢的双重作用来加剧材料的结构损伤，形成环境、生物、材料三者之间的恶性循环。平遥古城城墙裂缝中生长的构树根系，三年内可以使裂缝宽度从 2 mm 扩大到 15 mm，根系分泌物的酸性环境会加快夯土的化学分解。

2 建筑文物工程保护中的材料老化工程防护技术体系构建

2.1 基于老化抑制的表面防护技术

针对材料表面风化、侵蚀等老化现象，表面防护技术依靠形成功能性的防护层，隔绝老化因子同文物

本体的接触途径，实现对老化进程的源头把控。硅烷、硅氧烷类防护材料由于表面张力低、渗透性好，可以渗透到材料的孔隙中形成疏水薄膜，有效地阻止水分和盐分的侵入，又不会影响材料的透气性，适合于石材、砖瓦等无机质文物的防风化处理，其作用机理是通过化学结合和物理吸附双重作用，在材料表面形成稳定的防护屏障，抑制冻融循环和盐结晶引起的物理老化。对有机质文物使用含氟聚合物、纳米复合涂层等材料进行表面处理，可以在不破坏文物本体的情况下提高材料的抗紫外线能力、耐水性，延缓分子链降解和生物侵蚀，木质文物表面涂改性桐油和纳米二氧化硅复合涂层，保留传统工艺的兼容性，用纳米粒子填充提高涂层的致密性，提高对老化因子的阻隔效果^[4]。另外，表面清洁技术属于防护预处理环节，采用干冰清洗、激光清洗等非接触式方法去除文物表面污染物及老化产物，防止传统清洗方法对材料造成的二次损伤，为之后防护层的附着做好准备。

2.2 针对结构劣化的加固防护技术

当建筑文物材料因为老化而出现结构疏松、强度降低等问题的时候，加固防护技术利用补强材料和文物本体的协同作用，恢复并提高结构稳定性，防止老化造成的连锁破坏。对砖石结构文物的裂隙和酥化问题，用低压注浆法将无机或有机无机复合浆料注入孔隙和裂隙中，浆料固化后与基体材料形成整体受力体系，填补结构缺陷，提高材料的整体性及抗压强度，关键在于根据砖石材料的老化程度选择合适的浆料组分，保证加固材料与本体的相容性，防止因弹性模量不同造成二次应力损伤。木结构文物的加固技术重视保持材料的原有特性，用碳纤维布包裹、竹丝嵌入等方法加固腐朽部分，利用碳纤维的高强度和竹丝的柔韧性，提高木材的抗弯、抗剪能力，同时使用气调法等物理方法抑制木材内部微生物的活性，从结构加固和生物病害防治两个方面延缓老化过程。夯土墙体的加固结合传统工艺与现代技术，掺加草木灰、糯米浆的改性土进行表层抹面和内部夯补，利用传统材料的兼容性和现代改性剂的增强作用，提高墙体的抗风化和抗水蚀能力，延缓酥碱和崩解老化。

2.3 环境调控型防护技术

环境调控型防护技术通过改善文物的存放环境，减少环境胁迫对材料老化速度的影响，间接控制老化进程，是建筑文物长效保护的重要支撑。温湿度调控技术依靠智能监测和反馈系统，使文物所处环境的温湿度保持在合适的范围内，减小温湿度波动引起的物理老化，恒温恒湿设备控制室内文物库房的环境参数，

通风系统调节露天文物遗址的微气候,降低水分和温度对材料的侵蚀风险。紫外线阻隔技术就是通过设置过滤材料、遮阳设施等来减少紫外线对有机质材料的辐射损伤。在古建筑彩绘保护中使用低反射、高紫外线阻隔率的玻璃罩来保护彩绘颜料,既保证了展示效果,又有效延缓了彩绘颜料的褪色与粉化。污染物控制技术通过改善文物周边空气质量,减少酸性气体和颗粒物的沉降,在文物保护区周边设置绿化隔离带、安装空气净化设备,降低污染物对材料的化学侵蚀,定期进行环境监测来评估污染风险,为防护措施的调整提供依据。该类技术的主要原理就是通过控制环境因子,消除老化加快的外部诱因,给文物材料提供稳定的保存环境。

3 建筑物工程保护中的材料防护技术与老化机理的适配应用逻辑

3.1 基于老化机理的防护技术选型原则

防护技术的有效应用要依靠对老化机理的准确认识,选型过程要建立机理和技术特性之间的对应关系,实现针对性防护^[5]。对于由于水分和盐分引起的无机质材料酥化、裂隙老化,应选择渗透性好、疏水性强的表面防护材料和注浆加固技术,从源头上阻断水分迁移的路径,填补结构缺陷,抑制物理老化的发展;对有机质材料分子链降解、紫外线老化,采用抗紫外涂层与环境紫外线阻隔技术相结合的方式,既保护材料表面,又减少外部辐射胁迫。当文物材料受到多种老化机理的共同作用时,就要采用复合防护技术方案。砖石文物同时存在风化剥蚀和结构疏松的问题,首先要对老化产物表面进行清洗,再用注浆加固的方法恢复结构强度,最后施加疏水防护层阻断环境侵蚀。

3.2 多技术协同的防护体系整合路径

建筑文物材料老化过程具有复杂性、关联性,单一防护技术很难实现全面防护,需要建立多技术协同的整合体系,形成机理覆盖、功能互补的防护网络。在技术整合时,要依照“预处理—核心防护—后期维护”的逻辑流程,预处理阶段借助清洁、脱盐等手段去除老化诱因和产物,为后续防护技术的应用做好铺垫;核心防护阶段按照老化机理组合表面防护、结构加固和环境调控技术,形成立体防护格局;后期维护阶段依靠长期监测和定期养护,及时察觉老化新趋向,调整防护措施^[6]。古建筑整体保护工程中使用表面疏水防护、木结构碳纤维加固、智能环境调控三者协同的体系,表面防护技术阻断外部环境侵蚀,加固技术

解决结构老化问题,环境调控技术削弱老化加速诱因,三者形成有机整体,实现对多重老化机理的全面抑制。

3.3 基于监测反馈的防护技术动态调控机制

建筑文物材料的老化是不断演化的,单靠静态防护很难长期有效地进行,所以需要在技术体系中加入监测反馈,以实现防护和老化状态的同步进行。动态调控核心在于采用多源监测数据,抓住材料湿度、含盐量、裂隙扩展和表面化学组分改变等关键指标进行连续采集和趋势分析,适时确定老化加速点。在监测表明湿度增加引起盐分迁移风险增大的情况下,可以加强疏水层的养护或者对局部通风进行调节;在微裂缝扩展速率增大的情况下,可以进行局部低压注浆加固,以免裂缝向结构性损伤演变;紫外线强度季节性上升时增加遮光覆盖的比重,使得防护措施始终和老化驱动力相匹配。另外,对监测数据进行模型化分析,可对老化发展短期趋势进行预测,并对防护策略进行事前调整,从而实现整体体系由“静态设定”向“自适应调控等”的转变。该基于监测的动态机制,有效地延长了防护材料和加固结构使用周期并减少了反复干预,对文物材料起到更加稳定和持续的保护效能。

4 结束语

建筑文物工程保护的主要任务是利用科学的防护技术手段,减缓材料老化速度,保持文物的历史价值和结构安全。材料老化机理是防护技术研发与应用的逻辑起点,决定了防护措施是否有效,各种防护技术的本质就是通过物理阻隔、结构补强、环境改善等途径,延缓老化机理的作用过程。

参考文献:

- [1] 王静芳.基于古建筑修缮的文物建筑保护与利用[J].炎黄地理,2025(06):133-135.
- [2] 姜晓丹.以小修防大修,助文物“延年益寿”[N].人民日报,2025-06-19(013).
- [3] 何冬寒,陈金格.石质文物建筑保护修缮:以重庆璧山区朝元寺牌坊为例[J].收藏,2025(06):7-9.
- [4] 李哲艺.庐山牯岭历史建筑群保护之规划与实施评估研究[D].北京:北方工业大学,2025.
- [5] 白冰,段萍.优化生物酶杀菌技术应用于文物建筑保护的方法研究[J].文物鉴定与鉴赏,2025(09):45-48.
- [6] 张雯涵.文物建筑屋顶保护修缮技术研究:以郑州文庙大成殿为例[J].东方收藏,2025(03):132-134.

保温结构一体化施工技术在建筑工程中的应用

田 越

(山东省武城县建筑安装工程有限公司, 山东 德州 253000)

摘 要 在国家“双碳”目标和绿色建筑政策推动下, 建筑节能技术不断发展。其中, 保温结构一体化施工技术作为结构体系与保温系统同步建造的一种创新方法, 逐渐成为节能工程的重要发展方向。该技术通过在结构施工阶段将保温芯材与墙体一起成型, 使建筑外围护结构同时具有承重、防火、保温的功能, 很好地弥补了传统外保温易老化、易脱落、火灾风险高等不足。基于此, 本文对保温结构一体化技术的特点、典型构造、施工优势、工程实施要点进行了论述, 通过工程实践分析施工质量控制要点。经研究发现, 该技术可以明显改善建筑的节能效果, 使建筑的热损失降低 30% 以上, 并且其使用寿命可以与主体结构的使用寿命保持一致, 从而为建筑的安全性和耐久性提供可靠的保证。

关键词 保温结构一体化; 建筑工程; 垫块绑扎; 保温板安装; 建筑节能

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.029

0 引言

墙体保温是建筑节能体系的核心环节。以薄抹灰系统为代表的传统外墙外保温形式在我国应用时间较长, 但随着工程体量增大、使用年限延长, 其缺点逐渐暴露出来, 如空鼓脱落、热桥问题突出、抗风压性能不足、使用易燃材料造成的火灾隐患等。另外, 传统保温层寿命一般不能与主体结构同步, 后期维护费用高。在此情况下, 保温结构一体化施工技术被研发并快速得到应用。该技术要求主体结构施工时嵌入保温材料, 墙体就成为兼具结构和保温功能的整体构件, 从根本上改变保温作为外贴附加层的施工逻辑。该种方式符合建筑工业化、绿色化发展大方向, 对提高建筑节能性能、延长外墙系统寿命有重大意义。

1 保温结构一体化施工技术的特点及典型构造

保温结构一体化的核心就是同步构造, 即在浇筑或者砌筑墙体结构的时候, 将保温芯材以模板或者砌块的形式嵌入墙体, 使墙体在成型阶段就具有保温功能, 避免传统保温系统的二次施工。它的构造一般由三部分组成: 保温核心材料、承重或者围护层、专用连接件和锚固体系。采用材料复合、结构设计的方法, 使保温和结构成为一个可靠的整体。目前常见的一体化构造形式有两种: (1) 免拆型复合保温模板。采用复合保温板作为永久性外模板, 内侧配合传统模板,

通过拉杆和专用连接件固定, 最后浇筑混凝土与模板形成整体。模板外侧可以直接进行抹面、饰面处理, 施工流程简洁高效。模板一般采用无机防火板、轻质混凝土等作为保护层, 中间填充岩棉、石墨聚苯板等保温芯材, 具有防火性及保温稳定性。(2) 自保温复合砌块。采用混凝土或者加气混凝土作为基体, 在砌块内预埋保温条板, 砌筑完成之后即可达到墙体热工性能的要求。该种材料强度高、防火性能好, 特别适合作为填充墙。这两类构造一起组成了目前一体化保温体系的主要技术路线, 在寒冷、严寒地区得到广泛应用^[1]。

2 保温结构一体化施工技术的优势

2.1 提升建筑防火性能

传统外保温系统中采用可燃材料时, 在火灾工况下会产生助燃作用, 极易引发安全事故。一体化保温体系一般采用 A 级不燃材料作为主要的保温介质, 再加上外包无机防护层, 在高温条件下可以保持结构稳定, 不会让火势沿着外墙蔓延。在工业建筑、化工建筑等对防火等级要求较高的场所, 一体化体系的防火性能优势更加明显, 为建筑主体结构及人员安全提供更好的保障。

2.2 减少工期, 节约整体造价

该技术把保温施工提前到主体施工阶段, 利用免拆模板或者自保温砌块完成“结构+保温”的同步成型。

作者简介: 田越 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

建筑封顶后不需要再做外保温安装,可以直接进行外饰面施工,大大减少现场工序。同时免去了搭设脚手架、二次粘贴保温板、外墙抹灰等传统工序,节省了人工成本,降低了材料和设备的租赁费用。更重要的是,一体化体系耐久性好,几乎不需要后期维护,与传统的外保温相比整体经济性更好^[2]。

2.3 提高建筑施工效率

利用预制程度较高的保温板材或者砌块,可以在主体结构施工阶段快速就位,减少了湿作业以及交叉作业的影响。另外,由于保温层被整体嵌入结构中,所以不存在保温层后期脱落、热桥处理复杂等问题,使现场施工更加标准化、可控化。对于框架结构建筑来说,使用该体系可以很大程度上提高墙体成型质量,进而提高整个工程的施工效率。

3 保温结构一体化施工技术的应用

3.1 垫块绑扎

垫块合理布置影响钢筋保护层厚度和混凝土耐久性。在工程实际中,与易变形的塑料垫块相比,砂浆、混凝土垫块形状更稳定,有利于保证保护层厚度一致。垫块一般采用梅花形布置,间距30~50 cm,可以防止外模板强度不够,出现垫块陷入的情况。若因特殊情况必须使用塑料垫块,应进行改良设计,将接触面加工成圆盘状,增加接触面积,降低施工风险^[3]。

3.2 保温板安装与固定

保温板施工包含排版、切割、连接件固定和拼缝处理等工序,排版时按照深化设计进行,尽量减少非标尺寸,连接件的设置数量和位置必须严格按照方案执行,一般每平方米不少于5~8个,拼缝要紧密结合,较大缝隙用同类材料填塞,必要时用胶带封缝,防止浇筑混凝土时浆液渗入影响保温性能。

3.3 模板工程与混凝土浇筑

外侧保温模板在施工中既是模板又是保温层。内侧要设置常规模板,用螺栓保证整体稳定。浇筑混凝土时要分层进行,控制坍落度和下料速度,防止因振捣不当时保温板移位或变形。一般建议使用小口径振捣器,保证混凝土充分填充连接件周围和齿槽部位。

3.4 安装连接件和受力预埋件

连接件、受力预埋件的安装是保温结构一体化体系形成稳定整体的关键环节,其质量好坏直接影响到外墙的抗风压能力、保温层的可靠程度、饰面系统的荷载传递效果。实际施工中连接件一般由工程塑料锚

栓、金属吊挂件、螺杆、特殊形状的锚固底座等组成,通过预设的孔洞或者定位槽嵌入外模板中,与后浇筑的混凝土形成牢固的整体受力单元。预埋件一般设置在梁、柱、墙等结构的重要部位,为日后安装幕墙构件、设备支架、外墙附属构件等提供必要的受力节点。施工前应根据深化设计图、节点构造详图对连接件的数量、布置间距、锚固深度进行检查,保证满足设计要求。安装时采用“先固定、后复核”的方法,用扭矩扳手检查紧固力矩,使连接件在模板受力、自重、振捣作用下保持稳定不移位。预埋件的安装应结合钢筋排布情况提前调整,防止钢筋保护层厚度受到影响或者预埋件偏位。并且所有的预埋件都要做防腐处理,比如镀锌或者涂防锈漆,以确保长期耐久。模板吊装、混凝土浇筑时还要有人观察,及时纠正可能出现的位移,保证整体构造严密可靠^[4]。

3.5 抹面层与饰面施工

抹面层与饰面施工是保温结构一体化体系的最后一步重要工序,它的好坏既关乎建筑外观,又牵涉体系耐久性、防水性及抗裂性能。抹面层施工一般用聚合物砂浆、抗裂砂浆或者水泥基薄抹材,在复合模板外侧形成一层均匀致密的防护层,提高整体防水、抗裂性能。施工时应根据外模板表面情况、环境湿度、温度选择合适的砂浆配比,基层应湿润但无明水。为了提高抗裂性,抹面层需要压入耐碱玻纤网格布,使网格布处于整个抹面层厚度的中间或者偏外侧位置,利用网布的拉结作用来减少热胀冷缩产生的裂缝。网布搭接宽度一般不小于100 mm,转角处应做双层加强处理。饰面层施工包含涂料、瓷砖、石材、金属挂板等,应按工程定位及使用环境选定。涂料饰面需要打磨、清理、封底处理基层,保证涂料附着力;瓷砖饰面要使用柔性瓷砖胶粘贴,加强锚固措施防止脱落。施工时要控制饰面材料的含水率及环境温度,冬季施工时应做好保温养护,防止低温下砂浆强度不够。

4 保温结构一体化施工质量控制与注意事项

4.1 设计更复杂

保温结构一体化施工技术相比于传统的外保温系统而言,在设计阶段构造的复杂度更高,需要结构、保温、防火、节能、饰面等多专业的协同设计。设计人员依据项目所在地区的气候状况、建筑用途、外墙所承受的荷载以及防火标准来选定合适的保温厚度与构造方式,还要经过热工运算保证墙体传热系数符合标准。另外,支模体系、连接件布置、预埋件位置、

节点热桥削弱措施等都应在设计阶段确定下来, 并采用标准化、模块化的构造, 方便安装和质量控制。门窗洞口、外挑构件、外墙阴阳角等热工薄弱部位, 更需要单独设计, 通过加密连接件、增加保温层厚度、使用保温型过渡构造等方式来保证连续性。鉴于一体化的体系具有“一次成型”的特性, 若设计失误, 在后期是很难进行修改的, 所以必须通过设计审核、专家论证等手段来严格控制, 保证从开始就具有良好的安全性与可施工性^[5]。

4.2 周期化检查制度

为了保证施工质量的稳定可靠, 工程要建立周期检查制度, 对施工全过程实行动态控制。检查内容有材料进场检查、模板安装情况、连接件布置密度与位置、保温板安装平整度、拼缝处理情况、混凝土浇筑情况、抹面层抗裂措施落实情况等。检查制度应该分为自检、联合检查和关键工序专项验收三类。在混凝土浇筑、模板拆除前应开展隐蔽工程验收, 用现场实测、照相记录、签字确认的方式形成可追溯资料。对于窗洞口、梁柱相交等对整体性能有影响的节点应重点抽查, 必要时使用红外检测设备检测热桥。另外, 要制定缺陷整改制度, 对不符合要求的部位采取返工或者加固措施, 保证一体化体系的稳定运行。

4.3 与建筑工业化发展相适应

保温结构一体化作为绿色建筑、建筑工业化的新方向, 与装配式建筑体系有着天然的联系。一体化体系中大量的构件可以实现工厂预制, 如复合保温模板、自保温砌块、连接件、预埋件模块化组合等, 可以减少现场加工, 提高施工速度。工业化生产的材料质量更稳定, 构造更标准化, 质量风险可以进一步降低。在实际工程中可以与装配式结构、装配式外挂墙板等系统组合, 形成整体化的节能墙体系统。预制外墙板集成保温芯材、结构层和饰面层, 实现工厂一次成型、现场快速吊装, 大幅度减少湿作业, 提高施工效率及施工季节适应性。随着建筑工业化的水平提高, 该技术将更好地发挥出在节能、环保、降耗、提效等方面的综合优势^[6]。

5 保温结构一体化施工技术的综合效益分析

保温结构一体化施工技术在工程中的应用表现出很好的综合效益, 主要表现在以下几个方面。一是节能效益。此技术保温层与结构融合一体, 实现建筑外围护系统整体热工性能提升, 使供暖、制冷能耗降低 30% 以上, 长期运行可大幅减少能源浪费。二是经济效

益。由于保温和结构同步施工, 减少了传统保温的二次施工成本, 省去了后期的维护费用, 综合造价反而更低。三是安全效益。一体化体系采用 A 级不燃材料作为主要保温芯材, 并通过防火隔离构造进行整体封闭, 有效地解决了传统外保温的火灾隐患; 整体性强、抗风压能力强, 特别适合高层建筑和沿海地区建筑; 耐久性, 保温层同混凝土一起浇筑, 无空鼓、脱落等现象, 保温性能可与建筑寿命同步。四是环保效益。该技术具有较好的环保效益, 可减少施工现场湿作业和材料浪费, 结合装配式建造模式可进一步减少粉尘、噪声污染, 是绿色建筑实施的重要途径之一^[7]。

6 结束语

保温结构一体化施工技术是建筑节能体系的发展方向之一, 突破了传统外保温同建筑主体分离的技术局限, 依靠结构、保温、防火等各方面的集成化设计, 达成更高层次的节能目标。实践证明, 该技术不仅能提高建筑的热工性能和安全性, 在施工效率、工程质量、经济成本、使用寿命等方面也表现出明显的优势, 是我国建筑工程领域值得大力推广的一项先进技术。随着建筑工业化以及绿色施工理念不断深入, 保温结构一体化施工技术将会拥有更广阔的发展空间。通过完善标准体系、提高材料性能、改善施工工艺、加强设计与施工的协同等措施, 该技术将会在更多的建筑工程中起到关键的作用, 为建筑领域节能减排、高质量发展提供强有力的支撑。

参考文献:

- [1] 艾尔肯·克热木. 现浇一体化保温免拆模板外墙保温系统施工工艺研究 [J]. 工程建设 (维泽科技), 2024, 07(07): 173-175.
- [2] 刘冬熠, 吴承泽, 潘翔, 等. 复合保温一体板低损耗施工体系关键技术 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49(03): 31-34.
- [3] 陈朝辉, 柴小龙, 俞斌, 等. 房建工程中的外墙节能保温技术及材料应用研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(04): 128-130.
- [4] 王婷. 新型节能设计理念在建筑暖通设计中的应用 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(02): 130-132.
- [5] 阳启航. 关于建筑外墙节能保温材料及其检测技术 [J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(07): 69-71.
- [6] 孙建林, 黄中峰, 刘海峰. 硅墨烯保温与结构一体化系统的相关研究 [J]. 建筑技术开发, 2024, 51(12): 97-100.
- [7] 李振海. 建筑保温与结构一体化体系施工工艺研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024(19): 177-179.

建设单位视角下污水管网工程 提质增效关键环节控制

王 恒

(南京润科公用事业有限公司, 江苏 南京 211299)

摘 要 在城市高质量发展与生态文明建设双重驱动下, 雨污分流改造成为治理黑臭水体、提升人居环境的核心工程, 却面临施工复杂、标准高、协调广等挑战。本文以某雨污分流改造及管网新建工程为研究对象, 梳理项目全生命周期三阶段关键控制点, 构建精细化管理体系。前期聚焦投资分解、承包商优选与合同风控; 实施阶段运用动态节点管控、全过程可追溯质量链等四大机制; 验收阶段强化检测、结算审核与移交管理。结果表明, 该体系有效实现了“三零一受控”目标, 为同类市政工程提供可参考的管理范式。

关键词 污水管网工程; 雨污分流; 提质增效; 全生命周期管理

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.030

0 引言

随着我国城镇化进程的深入与生态文明建设要求的提高, 城市污水收集系统的提质增效已成为改善水环境、提升城市承载能力的紧迫任务。污水管网工程作为典型的隐蔽性、线型市政工程, 其在城市地下空间中的施工常面临复杂环境适应、既有管线避让等多重技术挑战, 且工程质量直接影响后期运行维护成本与系统效能^[1]。具体而言, 管网系统在长期服役过程中需承受土壤腐蚀、荷载变化、污水腐蚀等多重应力作用, 对材料耐久性和结构可靠性提出更高要求^[2]。因此, 构建科学合理的工程设计标准与施工质量控制体系尤为重要, 这直接关系到基础设施的长期安全稳定运行。基于此, 探索并建立一套贯穿项目全生命周期、以目标为导向、以技术为支撑、以量化考核为手段的精细化管理体系, 是实现污水管网工程从“规模建设”向“质量效能”转型的关键。

1 项目前期准备与招标采购阶段关键控制

1.1 规划设计与投资控制目标确立

案例工程为某污水管网工程, 涉及雨污分流改造、新建 DN315 mm ~ 1 000 mm 规格的 HDPE 管、球墨铸铁管等管网共 3 318 m, 同步开展检查井及配套设施建造, 项目总投资 3 844 万元。为确保工程顺利推进, 建设单位需严格控制设计深度, 明确管道材料性能、管径尺寸及施工工艺参数, 避免设计疏漏引发返工; 同时,

对各分项工程造价进行分解, 将投资误差控制在 $\pm 5\%$ 以内, 并预留应急资金, 以应对地下管线穿越保护、地质变化等突发状况。

1.2 招标文件编制与承包商优选

工程需重点完成片区内的雨污分流源头接驳整治, 全线敷设配套管网 3 318 m, 并同步实施排洪箱涵的综合改造(含清淤、修复)等关键任务, 以构建畅通高效的地下排水“微循环”。建设单位应于招标文件中明确确定雨水与污水分流接驳的规范、管道材料质量标准及频次、顶管施工作业沉降控制的数值等技术规定, 防止投标主体由于理解误差而产生报价漏项的状况。与此同时, 优先选择具有同类污水管网施工经历、具备顶管或者开槽埋管专项资格证书, 并且配备顶管机械、检验仪器以及专业持证人员的主体, 确保其能力与本项目复杂的管线作业需求相匹配。

1.3 合同风险防范与责任体系构建

工程具有现状管线复杂、多工艺交叉作业的特点。在项目契约中, 应明确规定施工前管线勘察责任、管线意外损坏的赔偿机制、工期延误的归责与补偿, 以及材料进场检验不合格的退场与返工费用承担方式^[3]。同时, 需清晰界定各方权责: 建设单位负责设计交接与对外协调, 施工单位对工程质量、安全与工期负主体责任, 监理单位实施全过程监督。此外, 合同中还应明确验收未通过时的整改时限及违约金标准, 通过契约手段系统管控项目执行风险。

作者简介: 王恒(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

2 工程建设实施与过程管控阶段关键控制

2.1 以动态节点管控为核心的进度管理增效

该工程摒弃传统粗放式管理,构建了“三级计划—关键节点—动态纠偏”的精细化进度管控体系。通过要求施工方编制并报批总控、月度、周度三级计划,持续推进管网现状评估和修复工作,建立管网长效管理与考核评价机制。针对污水处理厂进水污染物浓度偏低片区,全面管控外水入侵问题的排查溯源进度,重点核查施工降水排入、水体倒灌及地下水入渗等点位的清单建立与整治情况;严格追踪雨季溢流污染削减工程进展,量化考核排口、截流井改造完成率及源头雨水减量设施建设规模,并动态监测雨前管网水位“错峰腾容”调度落实情况。在保障排水防涝安全的前提下,细化溢流应急管控措施,针对已完成管网改造区域,重点督导雨季溢流快速净化设施的立项、建设与调试进度,确保配套排放管控要求同步制定并落地执行。

2.2 以过程可追溯为核心的质量管理增效

质量管理重心从事后检验转向全过程闭环控制,构建具备可回溯特性的质量责任链条体系。严格施行材料“先检验而后使用”以及不合格物品迅速隔离的规范机制,从起始源头进行质量把控;针对隐蔽工程类别推行“文字记录材料加上影像资料信息再加上三方签署文件”的终身责任制度模式,实现了隐蔽施工工序环节的“透明化”呈现状态;在关键施工工序部位把控 CCTV/QV 内窥检测的结果数据、材料强度的分析报告等内容,实现数据与施工段落、工序的实时映射,确立从“结果导向”转变为“过程控制”的质量管理新模式。形成的不可篡改档案有效保障了责任追溯,切实解决了隐蔽工程质量监管难、透明度低的问题。

2.3 以风险预控为核心的安全与变更管理增效

该工程建立了主动式风险防控与高效地变更响应机制。在安全领域,工程摒弃传统的被动监管模式,确立了“源头准入与过程严控”的双重防线。针对深基坑开挖、高危管段铺设等高风险环节,施行严格的“专项方案准许”机制,赋予一线安全监督人员针对重大风险源的“一票否决权”。同时,通过组建常备现场应急救援队伍及开展月度实战化应急演练,将被动应付转变为主动筹备,确保安全管理无死角^[4]。针对市政管网工程隐蔽性强、变数多的特点,项目部推行“技术与经济双向融合”的变更管理模式,确保每一笔投资都在受控范围内。为规范变更管理,实施分级管控。一般性变更须遵循“先算账、后干活”原则,经技术经济比选与造价核算后方可实施。针对地下管线冲突

等紧急情况,开设“临时指示”绿色通道,允许监督人员先行处置。同时启动“现场即时签证”程序,要求监理、业主、施工三方现场联测、同步确认工程量,以影像及验收记录锁定事实,杜绝事后争议。所有变更计价严格依据合同单价或经审核的新增项目组价执行。通过建立变更造价动态台账,实时监控累计变更额与概算的偏离情况,一旦接近预警线即启动纠偏,实现“静态控制、动态管理”。

2.4 以内外联动为核心的协同管理增效

项目构建了内外协同、高效响应的管理生态。该组织体系内部借助“线上实时通信工具搭配线下固定周期举行的会议”这种双重运行机制,结合工程施工每日报告、工程监理每日记录以及工程每周汇报等规范性文件的有序传递,做到信息同步获取水平状态,并且对日常出现的问题能够在 2 小时之内做出回应,使得决策产生效果的速率得到很大程度的提高^[5]。在对外协调方面,实行“前置告知+专人响应+刚性抢修”的精细化作业体系:施工进场前 5~7 天,通过张贴安民告示、交通导改图及对接社区网格群,实现“线上+线下”施工信息全覆盖;设立 24 小时投诉专线与“社区联络员”岗位,推行“扫码诉求”机制,确保居民反馈 30 分钟内现场核实、4 小时内形成闭环;同时构建“2 小时紧急抢修”刚性承诺,组建常备应急突击队与物资库,针对突发管线损坏等事故严格执行“15 分钟响应、30 分钟到场、2 小时内恢复基本功能”的处置标准。通过上述内外部高效联动的实操举措,切实消除施工对周边的干扰,为项目顺利推进营造和谐稳定的外部环境。

3 竣工验收与总结评估阶段关键控制

3.1 功能性检测、竣工资料及实体质量复核

严格执行国家现行验收规范,落实“工程实体质量与技术资料”同步验收机制。关键功能性检测全权委托具备资质的第三方机构实施:重点开展管道严密性试验(闭水/闭气试验),确保管线无渗漏;实施 CCTV(管道内窥镜)全覆盖检测,精准识别管内结构性缺陷,专项排查管口连接情况,彻底杜绝雨污混接、错接隐患,确保管网系统结构安全与运行通畅。竣工资料需图实一致、签章齐全,完整归档。实体质量复查外观无缺陷,尺寸误差在允许范围内,抽检合格率 100%。

3.2 竣工结算审核与造价最终控制

秉持合规、精准、节约原则,分阶段审核结算。施工单位提交结算,经监理初审、造价咨询终审后出具报告。对比结算与概预算,完成支付并按规定预留质保金,确保最终成本控制在批复概算内。

3.3 工程移交、保修管理及项目后评估

规范移交流程，明确资产与资料清单，签署协议并办理资产划转。组织施工方案运维单位进行技术交底，确保顺利衔接。项目后评估总结经验，优化后续管理模式。工程移交与运维保障管理评估如表1所示。

通过上述量化指标的系统性执行，该项目工程移交管理能高度达成“清晰、完整、合规、平稳”的目标。通过数字化移交与精细化交底，不仅能实现“零误差

移交”，更能为后续长达数十年的管网运维提供可靠的数据基础与顺畅的协作起点，有效避免了传统工程“重建设、轻移交、交付即扯皮”的弊端，是项目全生命周期“提质增效”理念在最终环节的坚实落地。工程提质增效控制核心聚焦三个技术层面：

(1) 结构方面的封闭状态和功能层面的检验证实。采用“分段闭水试验+CCTV/QV内窥检测”组合拳，以量化数据严控管道渗漏与接口错位，确保管网系统在物

表1 工程移交与运维保障管理评估

评估维度	关键指标	核心标准 / 要求	基准值	项目目标
资产资料	清单一致性	账实完全相符，无遗漏错项	100%	100%
	归档完整率	资料全套移交，签章完备	100%	100%
	数字化移交	GIS数据、CCTV视频100%入库	100%	100%
技术质量	交底覆盖率	隐蔽 / 关键点100%现场标识	100%	100%
	存量缺陷数	三级及以上结构性缺陷	0处	0处
	培训合格率	运维关键岗位人员考核通过率	≥95%	≥98%
权责合规	协议完备性	权责界定清晰，保修条款明确	明确	完全明确
	手续时效性	申请至签约完成周期(工作日)	≤15天	≤10天
	权属变更率	实物与财务账目划转完成率	100%	100%
运维平稳	首月故障数	因遗留问题引发的故障事件	≤3次	≤1次
	运维满意度	接收单位综合评分(百分制)	≥90分	≥95分
	质保响应率	缺陷响应及时率与关闭率	100%	100%

理层面的绝对封闭与严密。(2) 雨污分流在本质属性上的核查工作。实施“影像排查+水质指纹”双重检验。利用CCTV全覆盖排查接口混接，辅以晴天雨水井水质(氨氮指标)抽检，从物理连接与水质指标两方面双向验证分流实效。(3) 数字化资料的移交过程和责任落实的闭环管理。确保竣工图、CCTV影像与GIS坐标数据“账实相符”。引入运维单位前置参与验收，通过数字化资料的无缝移交，实现从工程建设向长效运维的平滑过渡。

根据上述控制措施，关键量化指标的预期设定与结果如下：在实体质量方面，管道严密性合格率以实测渗水量满足规范要求为标准，预期可达100%(分段)；结构性缺陷(三级及以上)目标为零。在分流效果方面，雨污混接错接点数量、雨水井晴天水质达标率(关键指标达地表V类水标准)分别预期为零处和≥95%。在数据完整性方面，竣工资料“图实一致”率与数字化系统录入率均以100%为预期目标。在管理效能方面，运维接管一次性通过率与投资控制有效率(竣工结算金额不超过批复概算)亦均以100%为预期控制目标。

4 结束语

通过将竣工验收标准从传统的“外观、资料”检查提升为以“内窥检测量化、水质验证结果化、数据移交数字化”为核心的技术管控，能有效将质量隐患控制在交付前。该工程所采用的关键控制措施，能系统性达成“零缺陷、零混接、零误差移交”的量化目标，是实现污水管网“提质”与“增效”的根本保障。

参考文献：

[1] 王磊,崔诺,焦文海,等. 济南某区域污水管网外水诊断工程实践[J]. 给水排水,2023,49(12):100-105.
 [2] 李小江. 深圳市鹤公岭污水处理系统提质增效工程实践与应用[J]. 水利科技与经济,2023,29(03):12-16.
 [3] 陈致远,资惠宇. 感潮河网区污水处理系统提质增效的措施研究[J]. 低碳世界,2024,14(10):13-15.
 [4] 林峰,吴瑶,汤浩,等. 山区城镇污水系统提质增效排查实例分析[J]. 人民珠江,2023,44(S1):182-186,201.
 [5] 陆文林,钱铎怀,黄浩辉,等. 东莞市水乡片区污水管网外水入侵排查及整治对策研究[J]. 给水排水,2023,49(S01):433-438.

山岭隧道工程全工序机械化装备配置优化研究

胡世现

(中铁隧道局集团有限公司六处工程分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 山岭隧道工程建设阶段, 若想提升隧道工序衔接性, 就需要提高工程建设效率与工程质量。本文通过分析山岭隧道全工序机械化装备配置思路, 并且从超前地质预报作业线、开挖出渣作业线以及仰拱施工作业线等方面解析山岭隧道全工序机械化装备配置优化要点, 以期通过实施全工序机械化装备配置方案, 能够为山岭隧道工程项目高效建设提供有益参考。

关键词 全工序机械化; 隧道施工; 智能建造; 延榆铁路; 机械化作业线

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.031

0 引言

基于国家“交通强国”战略以及铁路建设高质量发展的要求背景下, 隧道工程正向着机械化、智能化、绿色化方向不断进步与转型。本研究以黄家堰隧道工程为例, 明确其地质条件, 且围岩级别具有良好的稳定性, 为实施全工序机械化施工创造了良好的基础条件^[1]。通过机械化作业大幅降低人员直接参与高风险作业的频次, 缩短危险环境暴露时间, 同时推动施工人员从普通劳务型向专业技能型产业化工人转变。采用标准化施工、信息化赋能、清单化管理、智能化控制等多项技术措施, 相较于传统钻爆法, 实现施工时间显著节约、工程质量稳步提升、作业人员数量大幅减少的多重效益, 形成工效高、安全性能好、施工质量可靠、经济效益显著的良好局面。

1 山岭隧道工程全工序机械化装备科学配置体系

1.1 配置原则与总体思路

装备选型并非简单堆砌先进设备, 而是强化系统内部匹配与协同。该项目在实现“全工序覆盖、关键工序强化、人机高效协同”目标的同时, 首先要满足安全作业要求, 通过机械化替代人工完成高风险、高强度作业, 减少人员直接参与危险工序的频次; 其次要适配产业化工人技能特点, 选用操作便捷、智能化程度高的设备, 降低对普通劳务工人的依赖; 再次要确保各工序装备能力与施工节拍匹配, 避免“木桶效应”。例如: 开挖能力提升需与出渣、支护能力相匹配, 否则会造成工序等待、降低工作效率; 最后要优先选用技术成熟、市场验证度高、售后服务完善的产品, 保障施工顺利开展并提高安全可靠^[2]。

1.2 全工序机械化装备集群

山岭隧道全工序机械化装备配置过程中, 机械化装备可按照项目的规模与特点进行选择。就目前看来, 常规的工程项目全工序机械化装备配置可参考表 1 进行配置, 而针对其他特殊类型需求的隧道项目则根据工况进行调整。

2 机械化作业线协同施工实践

2.1 超前地质预报作业线

项目坚持“物探先行、有疑必钻、有突必取、有水必查”原则, 建立多级超前地质预报系统。运用 TSP、地质雷达等物探手段判定不良地质带, 再采用 C6 多功能地质钻机实施超前水平钻孔取芯进行精准判定; 全电脑三臂凿岩台车在钻设炮孔的同时完成加深炮孔, 起到辅助验证作用。“物探+钻探+加深炮孔”的机械化探测模式, 替代了传统人工地质判识的经验化做法, 不仅大幅提升了地质预报准确率, 更避免了人员进入未知风险区域勘察, 从源头减少安全隐患^[3]。

2.2 开挖出渣作业线

开挖是隧道施工的首要工序, 也是传统钻爆法中人员密集、风险较高的环节^[4]。在开挖出渣作业的过程中, 传统的钻爆法与机械化作业模式的钻孔作业方式与单孔钻进时间等参数均存在很大不同, 如下对比了两者的特点, 详见表 2 所示。

2.3 初期支护作业线

初期支护的及时性与质量直接关系到围岩稳定性, 传统人工支护存在效率低、精准度差、人员高空作业风险高等问题。该项目采用“两臂一篮”拱架安装台车,

作者简介: 胡世现 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 山岭隧道机械化配套。

表1 全工序机械化装备配置

功能类别	装备名称	数量	作用
前端探知	多功能地质钻机	—	探明地质
	三臂凿岩台车（带加深炮孔）	—	探知+前期炮孔
开挖主力	三臂凿岩台车（中铁装备）	2台	主要开挖
	拱架安装台车	1台	安装拱架
	湿喷机械手	1台	混凝土湿喷
支护核心	多工位全自动仰拱栈桥	2台	仰拱施工保障
	12米防水板铺挂台车	2台	铺挂防水板
仰拱保障	12米数字化智能衬砌台车	2台	智能衬砌施工
防排关键	蒸汽养护台车	1台	衬砌蒸汽养护
	喷淋养护台车	2台	衬砌喷淋养护
成型核心	隧道综合智能检测车	—	施工后质检
	整体式水沟电缆槽台车	—	水沟电缆槽施工
末端质检	—	—	—
辅助配套	—	—	—

表2 传统钻爆与机械化作业模式比较

对比内容	传统钻爆法	机械化作业模式
钻孔作业模式	人工钻孔	双机六臂（3台三臂凿岩台车同步打眼）
单孔钻进时间	—	1.5分钟
开挖出渣综合效率提升	—	80%
施工循环时间缩短比例	—	60%
装药作业方式	需撤离现场重新准备	凿岩台车自带吊篮原位转换，无需撤离
出渣作业配置	—	2+1+3机出渣
单车装渣时间	—	不超过3分钟
单循环开挖作业人员	10~12人	3~4人
人员作业内容	直接参与钻孔、装药等现场作业	仅负责设备操作与监控，不直接暴露高风险环境
单循环减少作业人员数量	—	4~6名

一次性完成拱架精确定位及支护，替代6~8名工人的人工架设作业，定位误差从±5厘米缩小至±2厘米，支护效率提升3倍；锚杆钻注采用钻注锚一体化台车完成钻孔—注浆—安装一体化流水作业，湿喷混凝土采用“双机”湿喷机械手，执行“三喷两刮一找平”工艺。相较于传统人工喷射，湿喷机械手效率提升30%，混凝土回弹率从15%~20%降至5%以下，施工质量显著提升，同时避免人员直接接触高粉尘、高喷射强度作业环境，作业人员数量减少50%以上。项目支护作业线从“胎模预制、精准定位、组拼合拢、锚网固结”均严格按照标准工艺执行，确保初期支护的封闭性和结构安全性，同时推动作业人员向设备操作、工艺管控的产业化工人转型。

2.4 仰拱施工作业线

该项目配备全液压多工位仰拱栈桥，集成自动走行、模板辅助定位、移动布料小车等功能，实现仰拱衬砌、填充及中心水沟模筑三者同步施工，三道工序一气呵成，同时设置清基、立模、浇筑三个工位并行作业。相较于传统钻爆法的分步施工模式，工期缩短40%以上，且能满足III级围岩120米仰拱安全步距要求；栈桥配套仰拱全弧模及防上浮装置，有效避免全拱浇筑过程中错台、漏浆等质量通病，保障仰拱结构的整体性及耐久性。机械化作业将仰拱施工的作业人员从8~10人减少至3~4人，且人员无需直接参与模板架设、混凝土浇筑等高强度作业，大幅降低劳动强度与安全风险，同时对作业人员的设备操作、工序协同

等专业技能提出更高要求,助力产业化工人培养^[5]。

2.5 防水板自动铺挂作业线

防水层是隧道的“生命线”。常规的人工铺挂防水板容易出现搭接褶皱、搭接偏移、焊缝不实等问题,存在质量隐患,并且工作效率较低。该项目使用 12 米自动铺挂台车,其自带多节旋转伸缩臂,可通过参数设置实现一键自动贴合隧道面,使防水卷材可一次展开成型铺挂到位。平整度、密实度高于传统人工铺挂,且铺挂时间从原来人工铺挂 9 小时以上时间降到 6 小时内即可完成,每组支护平均只需要 2~3 人操作,节约了约 70%,且优良率达到 99% 以上,完全避免了人工铺挂存在的质量问题。

2.6 智能衬砌浇筑作业线

二次衬砌是隧道的最内层防护壁垒,传统的浇筑方式存在布料不均、振捣不密实、拱顶空洞等问题。该项目采用了 12 米智能衬砌台车加装“智能振捣、水平定向冲顶、自动布料、智能信息化”4 套系统,通过按程序设定可实现自动布料、振捣和冲顶拱顶等功能,将隧道内的混凝土密实、饱满,所有的施工参数(浇筑量、振捣时间、冲顶压力等)会实时上传到信息平台,并能形成数据闭环,可以达到质量可追溯的目的。与传统的手工浇筑相比,采用智能衬砌台车后效率提高了 40%,衬砌厚度合格率达到 98% 以上,拱顶空洞发生率仅为 1%,人员减少了 60% 左右,主要负责设备调试、数据监控、质量检验等工作,提高了产业工人实际操作水平^[6]。

2.7 智能养护作业线

混凝土养护可以保证混凝土的强度,防止混凝土开裂。而采用人工洒水湿养的传统方法存在无法做到及时养护、无法做到均匀养护、养护效率低下等弊端。该项目使用了“蒸汽+喷淋”双模智能养护台车,并使用了微电脑控制程序,根据现场环境温度的变化自动调节养护的频次、周期以及水温,达到使混凝土处于最佳水化状态的目的。相比人工养护的方式,智能养护台车可将养护效率提高 50%,混凝土强度达标率由原来的 92% 提升到 99%,避免了由于养护问题带来的开裂、强度不够等质量通病的发生,减少养护人员的数量,由原来传统的养护 3~4 人变为现在只需要 1~2 人,同时该类养护的作业人员必须经过调试设备、养护参数调整等的专业培训才能进行此项养护工作,促进产业化工人队伍建设^[7]。

2.8 智能检测作业线

隧道工程竣工阶段质量验收属于隧道施工的最后阶段,由之前的隧道封闭施工改为现程的正常通车运

营,传统的手工检测方式检测效率低下,数据难以保证,且不能全部覆盖到。为此,在传统隧道检测基础上引入隧道综合智能检测车,集成“非接触多通道空气耦合探地雷达”“智能视觉检测系统”“车载式三维激光扫描系统”三种关键技术手段进行隧道衬砌内(空洞、不密实)、表面(裂缝、剥落)和结构变形三项信息的一体化检测。较人工检测速度快两倍以上,检测时间仅为其五分之一,检测精度提升 95% 以上,能有效保障验收检测数据的真实性,为隧道后续养护工作奠定了良好的基础。用智能检测代替传统的徒步检测,检测人数从原来的 4~5 人降至 2 人以下,并要求有数据解译能力和设备维护技能的专业人员,进一步完善了产业化工人技能体系。

3 结束语

全工序机械化施工是破解隧道工程安全、质量、工期、成本等一系列问题的关键。在工程实践阶段,通过把安全放在第一位,利用机械化代替危险人的操作,能将人员的危险操作时间降到最低;以产业化工人核心支撑,推动施工队伍从劳务密集型向技术密集型转型,减少普通劳务工人依赖;以超越传统钻爆法为关键导向,实现施工时间节约、质量提升、人员精简的多重效益,通过精准的装备配置、高效的作业线匹配、科学的管理手段赋能,全工序机械化施工方式的运用,在确保工程建设安全的基础上,也能为打造优质工程奠定稳固基础。在往后项目开展阶段,需积极融合人工智能、5G、数字孪生等技术,确保隧道机械化施工智能化,推动隧道施工向“无人化”“自主化”方向转型发展。

参考文献:

- [1] 张守同.全电脑三臂凿岩台车在隧道机械化施工中的应用探讨[J].现代城市轨道交通,2022(01):58-62.
- [2] 陈爽.公路隧道机械化施工设备配置分析[J].中国设备工程,2022(09):181-183.
- [3] 陶文江,王飞.特长隧道机械化施工组织研究与应用[J].企业管理,2022(S2):34-35.
- [4] 胡恩来.隧道智能化机械化施工关键技术应用研究[J].工程技术研究,2023,08(12):79-81.
- [5] 李钊,刘坤,单足阳.浅析高速公路隧道全工序机械化配套施工技术[J].湖南交通科技,2023,49(02):146-150.
- [6] 张晓东,吴全德,范永在,等.大断面隧道成套设备机械化快速作业研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):416-424.
- [7] 王祥.高速公路隧道自动机械化技术应用[J].智能建筑与智慧城市,2023(12):161-163.

预防性公路养护技术在公路养护中的应用

薛松

(灌南县四通公路养护工程有限公司, 江苏 连云港 222500)

摘要 预防性公路养护是一种以主动干预为核心的养护理念, 强调在病害处于萌芽阶段时提前干预, 通过轻量化、持续化的技术措施实施早期干预, 从而保持路面良好性能, 是提升道路寿命、保障交通安全并降低养护成本的重要手段。本文围绕预防性公路养护技术的实际应用, 分析其在延缓病害发展进程、提升道路运行安全、减少交通干扰等方面的优势, 并提出涵盖时机把握、技术选型和资源调配的应用策略, 旨在为构建高效经济的现代公路养护体系提供实践参考。

关键词 公路养护; 预防性公路养护技术; 雾封层技术; 裂缝

中图分类号: U4118

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.032

0 引言

公路作为交通体系的关键基础设施, 其运行状态直接关系到区域经济效率和公众出行体验。随着交通流量不断增长、重载运输频繁及气候环境变化加剧, 公路路面老化速度明显加快, 若继续依赖传统的事后性维修, 不仅无法及时遏制病害扩散, 还会造成高额养护成本。预防性养护理念的提出为公路日常养护提供了新的思路, 已成为现代公路养护体系的重要组成部分。

1 预防性公路养护技术在公路养护中的应用优势

1.1 延长道路寿命

在公路长期运行过程中, 路面结构会不断受到荷载作用与环境变化的共同影响, 若缺乏及时的预防性干预, 轻微裂缝、表层老化和浅车辙等早期病害往往会在短时间内向下扩展, 最终演变为需要大规模维修的结构性损坏^[1]。预防性养护的核心优势是通过提前处理早期病害, 使道路衰退速度明显放缓, 各结构层保持稳定状态。由于病害被拦截在早期阶段, 道路的疲劳累积减少, 结构层的承载能力得以延续, 整体使用年限得以延长。同时, 由于道路不会频繁出现需要深度维修的大病害, 后期的集中性大修次数随之减少, 全寿命周期的养护成本也更容易控制, 使公路在日常交通负荷下更具耐久性。

1.2 提升行车安全

道路安全性能的下降往往始于表层细微变化, 导致抗滑能力减弱、构造深度降低、排水性下降或表层

逐渐光滑, 如果不进行前置干预, 这些轻微变化会在雨雪天气或夜间行驶中转化为安全风险。预防性养护则可以在性能弱化尚未形成事故隐患之前提前恢复路面功能, 使驾驶环境保持稳定^[2]。同时, 也可使得道路表观状态更加均匀, 减少因表面不规则导致的车辆跳动, 使行驶感受更加平稳。在持续维护的机制下, 公路在各种天气、流量和车速环境下都能保持稳定的安全性能, 驾驶员也能获得更明确的路面反馈, 从而整体提升交通运行的安全水平。

1.3 减少交通干扰

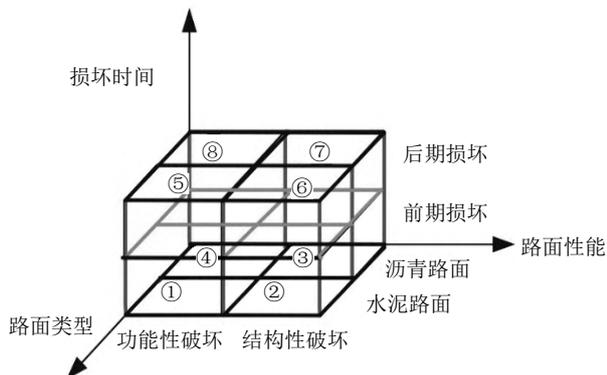
道路养护对交通的影响程度往往取决于病害的严重程度和处置方式。在传统模式下, 当病害已经发展到结构性损坏阶段后才进行修复, 通常需要较长的施工周期和较大范围的交通管制, 而预防性养护的优势是将处置时间前移, 使维护工作保持轻量化。由于处理的多是表层轻微老化、细裂缝或浅车辙, 所需的干预更短、规模更小, 不会频繁占用车道或长时间封闭交通^[3]。例如: 提前完成表层提升, 可避免后期因结构性损坏而实施长时间的大面积施工; 及时封闭细裂缝能够减少突发性坑槽形成, 使道路不需要因应急抢修而反复封道; 雾封层和微表处等技术施工周期短、交通恢复快, 使道路在维护过程中保持较高的通行率。更重要的是, 预防性养护可以让道路整体状况长期保持稳定, 从根本上减少突发病害带来的交通阻断, 使社会运行更加顺畅。

作者简介: 薛松(1990-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路养护施工。

2 预防性公路养护技术在公路养护中的应用策略

2.1 准确把握养护时机

养护单位在开展预防性公路养护时，必须准确把握介入时机，使病害始终停留在可控范围。预防性养护三维轴图如图 1 所示。



(注：①功能性破坏，前期损坏；②结构性破坏，前期损坏；③功能性破坏，前期损坏；④结构性破坏，前期损坏；⑤功能性破坏，后期损坏；⑥结构性破坏，后期损坏；⑦功能性破坏，后期损坏；⑧结构性破坏，后期损坏。)

图 1 预防性养护三维轴图

养护单位要建立分层巡查体系，将人工巡查、车载检测和无人机航拍组合使用，形成“日发现、周排查、月检测”的工作节奏。通过持续监测路面细裂缝、浅车辙和松散点，确保任何早期迹象都能被及时发现并处理。同时，养护单位应将所有巡查信息量化处理，建立动态数据库，将裂缝宽度、裂缝深度、车辙深度、构造深度下降幅度等指标以曲线形式呈现，使病害变化趋势清晰可读，以帮助管理人员识别加速衰退的关键节点^[4]。例如：裂缝宽度进入 0.2 ~ 0.8 mm、深度低于 15 mm 的区间时，系统应自动提示进入封缝处置阶段；车辙深度达到 2.4 ~ 4.1 mm 的早期区段时，则应自动归入薄层罩面或微表处的预处理区。养护单位可将这些触发标准固化为书面制度，建立《预防性养护干预表》，明确每种症状对应的处置期限。例如：封缝类病害要求 30 天内完成、浅车辙类病害要求在下次施工窗口完成、局部老化区域要求在季度计划内提前介入。

2.2 优化微表处施工

在公路日常运行过程中，路面往往会在不知不觉间进入轻度老化阶段，外观看似完好，但抗滑性、构造深度和表层黏结性能已开始下降。为了避免这些早

期变化逐渐演变为结构性损伤，养护单位需要提前采取具有恢复功能的预防性技术，其中微表处是提升表层性能最常用的方式之一。为确保该技术真正发挥作用，养护单位首先应在日常巡查中重点观察路面的磨损区增多、表层色泽变浅、表观结构变平滑及车辆制动痕迹变长等迹象^[5]。随后将符合条件的路段纳入年度预养护计划，通过路况趋势分析明确干预时间，使微表处真正承担起提前修、提前保的作用。计划制定后，确定微表处的矿料级配要求（见表 1），然后结合交通量、季节温度和气候特征选择合适的养护时间，避免在雨季、高温或车流高峰期安排作业，使薄层维护的效果更稳定。微表处完成后，养护单位应继续跟踪维护的状态，通过增加巡查频次及时发现薄层磨损、局部脱落或碎料堆积等情况，并在问题刚出现时采取迅速处理措施，确保薄层保持连续、完整且均匀。

表 1 微表处用矿料级配要求

筛孔（方孔筛）/mm	通过筛孔的质量 /%
9.5	100
4.75	90 ~ 100
2.36	65 ~ 90
1.18	45 ~ 70
0.6	30 ~ 50
0.3	18 ~ 30

2.3 加强雾封层技术的应用

在公路表层进入早期老化阶段时，雾封层是最具针对性的预防性技术之一，因此养护单位在日常养护过程中应当将其作为表层性能衰退的首选干预手段，并建立一套系统化的应用机制。首先，养护单位应当通过巡查与路况检测及时识别表层进入初期老化的路段。例如：发现表层光泽减弱、构造深度下降、摩擦性能逐渐变弱或出现细微裂纹时，应当将该类路段纳入雾封层的重点处理范围，使预养护介入建立在对路面功能变化的及时捕捉之上。其次，养护单位应当将雾封层的应用纳入年度预养护计划，通过对交通量、气候条件和路段类型的综合分析，确定合理的施作周期，使封层处理在气温、湿度和交通组织最有利的区间内进行，从而确保封层材料能够充分渗透并形成稳定保护膜。在日常养护中，养护单位应当持续关注封层完成后的运行状况，通过定期巡查掌握薄层的均匀性、粘结性和磨损情况，尤其是对坡道、弯道及重载车辆通行频繁的路段，应适当提高巡查频次，以便在

薄层出现轻度磨损或局部失效时及时采取补强措施,避免损坏点进一步扩大。

2.4 做好裂缝封闭处理

在公路进入早期退化阶段时,裂缝往往是最先出现的表层病害,也是最容易被忽视的隐患。为避免轻微裂缝进一步扩大、形成渗水通道并引发深层结构性损伤,养护单位在日常养护过程中应把裂缝封闭作为关键性的预防性措施系统推进。对此,应当建立裂缝巡查制度,通过定期巡查、图像识别或裂缝测量设备及时掌握裂缝的分布范围、宽度变化和深度趋势,将裂缝纳入单独的管理序列,使其处于持续监控状态。对于宽度处于早期阶段的小裂缝或呈片状分布的发丝裂缝,应当立即将其纳入预封闭范围,避免因忽视而让水分沿裂缝渗入基层,引发脱空、唧浆或冻融破坏。同时,养护单位应当按照裂缝类型与发展特征制定分级封闭制度,对轻度线状裂缝采取快速封闭,对长距离裂缝实施连续封闭,对网状裂缝安排区域性表层预处理,从而确保不同形式的裂缝都能获得对应的处理方式。为防止封闭效果因环境或交通影响而变差,养护单位还应当合理安排封闭时段,在气温适宜且路面干燥的条件下实施,确保封闭材料充分发挥密封作用,形成稳定阻水层。在后续日常养护中,养护单位应强化裂缝封闭后的跟踪维护,通过巡查记录封闭区域的稳定性、渗水迹象和表层磨损状况,发现封闭带出现轻微翘边、脱粘或磨损时立即采取修补措施,避免封闭点失效后再次成为新的渗水入口。

2.5 提升表层性能

在道路长期运行过程中,表层性能衰减往往早于结构损坏,尤其是抗滑能力、构造深度和密水性会随着磨损与老化逐渐下降。为此,养护单位应定期检测掌握表层的抗滑指标、构造深度变化和表观磨损情况,将表层性能纳入独立的监测体系,使性能弱化能够被及时识别。一旦出现构造深度不足、摩擦能力减弱或表面纹理趋于平滑等早期迹象,就说明路面已经进入功能性衰退阶段,应当立即将相关路段列入表层提升的计划范围。同时,养护单位应当根据路段特性制定差异化的性能恢复方案^[6]。对于抗滑性能下降但结构仍完好的路段,应当优先安排采用具有恢复表观结构能力的预防性技术,比如利用薄层型提升工序恢复路面表面纹理;对于密水性弱化的区域,应当安排封闭性更强的预处理措施,减少雨水与污染物的侵入;对于磨损集中的区域,应当将其纳入轻量级表面增强计划,以免局部磨损继续扩大。

2.6 建立智能养护管理体系

在公路进入常年运行阶段后,病害往往呈现分散、变化隐蔽、发展突然的特点,传统依靠人工经验判断的方式已难以满足预防性养护对时效性、精准性的要求。因此,养护单位在预防性养护过程中应建立数字化巡查机制,通过高频巡查记录、路况采集设备和信息化系统将裂缝、磨损、构造深度衰减及轻度变形等数据实时收集,使每条道路的早期退化信息形成可追踪的档案库。然后利用趋势分析模型对路况发展进行预测,通过比对巡查数据的变化速度判断哪些指标正在接近衰退阈值,从而在病害出现明显迹象之前提前纳入预养护安排。养护单位还应建立预警机制,根据不同病害的关键指标设置触发条件,一旦某项指标连续下降或波动异常,系统应当自动提示需要提前介入,避免因延误而导致病害突然扩大。对于交通量大、重载车辆密集或受气候影响显著的路段,应在系统中设置重点监测。

3 结束语

预防性公路养护技术通过前移养护时机、控制病害发展速度、改善表层功能及强化管理机制,为公路的长期稳定运行提供了更具成本效益的路径。该模式的实施不仅能减少深层病害发生,使道路在较长周期内保持良好的服务水平,还能帮助养护单位以更加精准的方式组织预防性处置,实现由被动反应向主动维护的转变。未来,随着养护机制的进一步完善,预防性养护将成为公路管理的核心方向,为延长公路寿命提供更加坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李富旭.预防性养护技术在公路养护工程中的应用[J].汽车画刊,2025(09):128-130.
- [2] 赵建峰.公路工程预防性养护技术应用研究[J].运输经理世界,2025(23):125-127.
- [3] 徐旭波.公路工程中的预防性养护技术研究[J].运输经理世界,2025(20):102-104.
- [4] 陈彦男.沥青路面预防性养护技术在公路养护中的应用[J].科技与创新,2025(11):136-139.
- [5] 韩家伟.公路养护中预防性养护技术的应用与效益分析[J].汽车周刊,2025(06):19-21.
- [6] 王凯.预防性公路养护技术在公路养护中的应用[J].科技创新与生产力,2025,46(04):140-143.

路基冲击碾压遍数对地基承载力的提升作用分析

代建龙

(中铁十九局集团第一工程有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要 为解决路基施工中冲击碾压遍数把控不精准及与地基承载力量化关联不明的问题, 依托高速公路改扩建工程, 通过现场试验探究不同冲击碾压遍数对地基承载力的影响。结果表明, 地基承载力随碾压遍数提升呈“前快后缓”特征, 16 遍为高效提升临界节点, 20 遍时达相对稳定状态, 较初始值提升 54.2%; 压实效果存在深度衰减效应, 提升作用集中于浅层。本研究揭示了二者内在关联, 旨在为优化施工参数、平衡施工效率与成本提供科学参考。

关键词 冲击碾压遍数; 地基承载力; 路基施工; 压实效果; 现场试验

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.033

0 引言

路基作为公路工程的核心承载结构, 其地基承载力直接决定了路面使用年限与行车安全, 是保障工程质量的关键指标^[1]。冲击碾压技术因压实效率高、适配性强等优势, 已被广泛应用于路基强化施工中, 但当前研究多聚焦压实度、沉降量等表层指标, 对冲击碾压遍数与地基承载力的量化关联及提升规律探讨不足。依托高速公路路基改扩建工程实践, 结合冲击碾压技术在复杂土质路基中的应用场景, 针对现有施工中碾压遍数缺乏精准把控的问题, 开展专项研究。本研究通过现场试验探究不同冲击碾压遍数对地基承载力的影响, 旨在揭示二者内在关联, 为优化施工参数、提升地基承载性能、降低工程成本提供科学依据, 对同类路基工程施工具有实践参考意义。

1 工程概况

本研究依托某高速公路路基改扩建工程, 项目起于两条高速交叉口, 终于枢纽互通, 原线路为双向四车道, 局部路段为六车道, 改扩建后为双向八车道, 设计速度 120 km/h, 路基宽度由 28 m 拓宽至 42 m。工程地处江淮分水岭区域, 属淮河水系, 沿线地势呈波状起伏, 分布标高 30.38 ~ 68.00 m, 主要土质为低液限黏土, 夹杂膨胀土、软土等特殊土, 地质条件复杂。区域属南北气候过渡带, 年平均气温 15.2 °C, 年降水量 1 071.45 mm, 地下水以松散岩类孔隙水和红层孔隙裂隙水为主, 局部路段需通过渗沟排水。为强化路基

承载性能, 工程采用三边形冲击压路机开展路基处理, 该路段的地形、土质及水文气候条件, 为探究冲击碾压遍数对地基承载力的影响提供了典型试验场景。

2 路基冲击碾压遍数对地基承载力影响试验方案

2.1 试验设备选型

试验核心压实设备选用 25 kJ 三边形双轮冲击压路机, 该设备具备稳定的冲击能量输出特性, 可精准适配路基强化施工的核心需求, 其压实宽度为 2×900 mm, 结合工程实际施工条件, 最佳工作车速控制在 10 ~ 12 km/h, 单次铺层厚度适配 500 ~ 1 000 mm 的工程常规要求。为保障试验检测数据的准确性与可靠性, 配套选用灌砂法检测套装、精度 0.1 g 的电子天平、测角精度 ±2" 的全站仪、平板载荷试验仪及含水率快速测定仪等设备。所有试验及检测设备均提前完成专业计量校准, 确保各项检测指标的精准性, 为后续试验数据的科学性提供设备保障。

2.2 试验路段与测点布置

试验路段选取依托工程中地质条件具代表性的区段, 路段长度 160 m、宽度 40 m, 其土质以低液限黏土为主且夹杂局部特殊土, 与工程全线地质条件保持一致, 可充分反映实际施工场景。测点采用三维网格状系统布置, 纵向按每 20 m 间距设置 1 个观测断面, 横向在距路线中桩 3 m 处、中桩位置及另一侧距中桩 3 m 处各布设 1 个测点, 形成全覆盖监测网络。每个测点分别在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 三个深

作者简介: 代建龙 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程。

度层设置检测点，重点聚焦表层及浅层地基性能变化，确保监测数据全面覆盖地基主要受力层，为精准分析冲击碾压对不同深度地基承载力的影响提供数据支撑。

2.3 试验参数设计

试验采用梯度化设计冲击碾压遍数参数，共设置8个梯度水平，分别为0遍（初始未碾压状态）、5遍、10遍、12遍、14遍、16遍、18遍、20遍，以系统探究不同碾压遍数下地基承载力的变化规律。碾压施工采用来回错轮作业方式，相邻轮迹无重叠，纵向每遍冲压错开冲击轮总周长的1/6，行驶速度严格控制在10~12 km/h，碾压范围延伸至路基坡脚外1 m，保障路基全域压实均匀性。施工前需精准检测地基表层30 cm范围内土体实际含水率，确保其处于最佳含水率的-4%~+2%区间；若含水率不达标，则通过洒水增湿或晾晒降湿方式处理，避免含水率偏差影响压实效果及试验数据准确性。

2.4 检测指标与方法

2.4.1 压实度检测

采用灌砂法测定压实度，步骤如下：按规范开挖试坑，称取坑内土样质量 m_x ，测定含水率 w ；向灌砂筒注满标准砂，称取质量 m_1 ，倒置后注入试坑，记录注满试坑的标准砂质量 m_2 。通过公式（1）计算湿密度 ρ_w ，公式（2）计算干密度 ρ_d ，最终按公式（3）求得压实度 K 。

$$\rho_w = \frac{m_x}{m_1 - m_2} \rho_s$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01w}$$

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{dmax}} \times 100\%$$

以上公式中： ρ_s 为标准砂密度 (kg/m^3)； ρ_{dmax} 为室内击实试验测得的最大干密度 (kg/m^3)。

2.4.2 地基承载力与沉降量检测

地基承载力采用平板载荷试验测定，承压板面积 0.5 m^2 ，分级施加荷载，记录各级荷载下的沉降量，取比例界限对应的荷载值作为地基承载力特征值。沉降量采用全站仪实时观测，每完成预设碾压遍数后，对所有测点进行沉降数据采集，与初始状态对比分析沉降规律，间接反映地基密实度与承载力变化。所有检测指标均按规范要求的频率进行，确保数据的代表性与可靠性。

3 路基冲击碾压遍数对地基承载力影响试验结果

3.1 冲击碾压遍数与地基压实度的关联规律

试验发现，冲击碾压遍数与地基压实度呈显著正相关，且存在明显的深度衰减效应，具体数据如表1

所示。初始状态（0遍）时，各深度层压实度普遍较低，表层（0~20 cm）仅80.9%，深层（40~60 cm）为76.3%。随着碾压遍数增加，压实度持续提升，但增长速率差异显著：前14遍压实度提升迅猛，表层在14遍时达91.9%，较初始状态提升13.6%；14~20遍期间增长趋缓，20遍时表层压实度仅增至93.2%，6遍内仅提升1.3%。同时，压实效果随深度递减，20 cm以下深度压实度始终低于表层，40~60 cm深度20遍时仅79.5%，印证了冲击能量的深度传递损耗特性。

表1 不同碾压遍数下各深度地基压实度检测结果(%)

碾压遍数 (遍)	0~20 cm 深度	20~40 cm 深度	40~60 cm 深度
0	80.9	78.7	76.3
10	88.8	85.1	77.8
14	91.9	84.6	78.6
16	92.6	84.8	78.9
20	93.2	85.0	79.5

3.2 冲击碾压遍数对地基承载力的提升规律

地基承载力随冲击碾压遍数的提升呈现“前快后缓”的阶段性特征，检测结果如表2所示。初始状态下，地基承载力特征值仅120 kPa，无法满足高速公路路基设计要求；碾压5遍后承载力达138 kPa，增幅15.0%；10~16遍为快速提升阶段，16遍时承载力升至176 kPa，较初始状态提升46.7%；16遍后提升速率显著放缓，20遍时承载力为185 kPa，较16遍仅增加5.1%。这一发现表明，16遍左右是承载力高效提升的临界节点，超过该遍数后，土体颗粒密实化潜力接近耗尽，承载力边际增益降低。

表2 不同碾压遍数下地基承载力特征值检测结果

碾压遍数(遍)	0	5	10	16	20
承载力特征值(kPa)	120	138	155	176	185

3.3 冲击碾压遍数与地基沉降量的对应规律

试验发现，地基累计沉降量随碾压遍数增加呈阶梯式增长，且增长速率与承载力提升规律高度契合，数据如表3所示。初始状态无沉降，碾压5遍后沉降量达30 mm，土体颗粒开始初步密实；10~14遍沉降量激增，14遍时达100 mm，较5遍增长233.3%；16遍时沉降量仅101 mm，增长近乎停滞；20遍时沉降量为129 mm，16~20遍期间仅增加28 mm。这一结果说明，沉降量的快速增长阶段对应地基承载力的高效提升期，当沉降增长趋缓时，地基已接近稳定密实状态，继续增加碾压遍数对承载性能优化作用有限。

表 3 不同碾压遍数下地基累计沉降量检测结果

碾压遍数 (遍)	0	5	10	14	16	20
累计沉降量 (mm)	0	30	67	100	101	129

4 路基冲击碾压遍数对地基承载力的提升作用

冲击碾压技术对地基承载力的提升作用,本质是通过冲击轮瞬时释放的动能向土体深层传递,驱动土体颗粒发生位移、重组与咬合,进而降低孔隙率、提高密实度的物理力学过程,其强化效果不仅与碾压遍数呈显著量化关联,还受到冲击能量传递特性、土体力学响应规律及外界环境条件等多重因素的综合制约^[2]。结合本试验实测数据可知,研究区域初始状态下地基表层 0~20 cm 压实度仅为 80.9%,远低于高速公路路基压实度设计标准,对应的地基承载力特征值仅 120 kPa,无法满足双向八车道高速行驶荷载对路基承载性能的核心要求。经 20 遍冲击碾压处理后,表层压实度提升至 93.2%,地基承载力特征值最高增至 185 kPa,较初始状态提升 54.2%,这一数据充分印证了冲击碾压技术对低液限黏土路基承载性能的显著强化效果,也为该技术在同类复杂土质路基工程中的应用提供了直接数据支撑。

冲击碾压遍数的临界效应是提升地基承载力的核心控制因素。试验数据显示,前 16 遍碾压过程中,地基承载力呈快速增长态势,从 5 遍的 138 kPa 升至 16 遍的 176 kPa,11 遍内提升 38 kPa,平均每遍提升 3.45 kPa;而 16 遍后提升速率显著放缓,16~20 遍期间承载力仅从 176 kPa 增至 185 kPa,4 遍内仅提升 9 kPa,平均每遍提升 2.25 kPa。这一现象的核心原因在于,在冲击能量作用下,土体颗粒逐渐从松散状态向密实状态过渡,前 16 遍已基本完成颗粒重组与孔隙挤压,土体密实化潜力接近耗尽,后续碾压仅能产生少量残余沉降,对承载力的边际增益大幅降低^[3]。从工程经济性角度分析,16 遍时承载力已达 176 kPa,满足高速公路路基设计要求,过度增加碾压遍数会导致施工效率下降、机械损耗及能耗增加,造成不必要的成本浪费。

冲击能量的深度传递衰减特性,是导致不同深度地基承载力提升效果存在显著差异的关键原因,这一规律与试验中不同深度压实度检测结果高度契合。冲击轮施加的瞬时冲击荷载(本试验采用 25 kJ 冲击能量)需通过土体颗粒逐层向下传导,在此过程中,一方面由于土体颗粒间的摩擦力、黏结力会消耗部分能量,另一方面冲击应力会随深度增加呈扩散状分布,导致单位面积上的能量密度快速降低,最终呈现“表层能量集中、深层能量匮乏”的分布特征。试验数据

显示,表层 0~20 cm 土体直接承受冲击轮的瞬时荷载,能量传递损耗最小,压实度从初始 80.9% 提升至 20 遍的 93.2%,提升幅度达 15.2%,对应的承载力提升幅度也达到最大值;而 20~40 cm 深度压实度最高仅 85.0%,40~60 cm 深度仅 79.5%,对应的承载力提升幅度也远低于表层。这一规律清晰表明,冲击碾压技术对地基承载力的提升作用主要集中在 0~20 cm 浅层区域,深层土体受能量传递限制,密实化效果有限。因此,在实际高速公路路基改扩建工程中,对于深层地基承载力不足的路段,若仅依靠单一冲击碾压技术,难以实现全深度范围的承载性能达标,需结合工程地质条件采用分层冲击碾压、换填改良(如换填级配碎石)或深层加固(如 CFG 桩复合地基)等组合工艺,通过“浅层强化+深层加固”的协同方案,实现各深度层地基承载性能的均衡提升,保障路基整体稳定性^[4]。

此外,地基承载力的提升与压实度、沉降量的变化呈现高度协同性。当压实度从 80.9% 提升至 93.2% 时,累计沉降量从 0 mm 增至 129 mm,承载力同步从 120 kPa 提升至 185 kPa,三者的量化关联充分说明,土体密实化是承载力提升的核心机理,而碾压遍数则是调控这一过程的关键参数。通过精准控制碾压遍数,可实现地基密实度与承载力的高效匹配,避免欠压导致承载不足或过压造成资源浪费^[5]。

5 结束语

冲击碾压遍数通过调控土体密实化程度,对地基承载力产生显著提升作用,其提升规律呈现“前快后缓”的阶段性特征,16 遍为承载力高效提升的临界节点,20 遍时承载力达到相对稳定状态,较初始值提升 54.2%。这一研究结果为工程中优化冲击碾压施工参数提供了科学依据,合理控制碾压遍数(16~20 遍)可在保障地基承载力满足设计要求的同时,实现施工效率与成本的平衡,对同类路基工程施工具有积极的参考价值。

参考文献:

- [1] 季征,刘绍平.不同配重压路机对路基压实度与碾压遍数关系的影响[J].黑龙江交通科技,2023,46(11):11-15.
- [2] 史越.改扩建路基路面设计优化研究[J].工程技术研究,2024,09(04):188-190.
- [3] 任惠翔,李群.冲击碾压施工技术在高速公路路基施工中的运用[J].大众标准化,2025(06):59-61.
- [4] 杨生浩.浅谈高速公路湿陷性黄土路基冲击碾压施工工艺研究[J].建筑安全,2023,38(03):79-81,85.
- [5] 韩伊凡,李文豪.冲击碾压技术在高速公路路基施工中的应用[J].工程建设与设计,2025(14):201-203.

水泥混凝土路面日常养护及病害临时性处理措施分析

周从明

(灌南县公路事业发展中心, 江苏 连云港 222500)

摘要 水泥混凝土路面作为高级刚性路面, 具有使用周期长、刚度高、承载能力强、养护需求低及耐久性好等优势, 但其刚性结构特性对基层抗冲刷性能要求高, 且对超载荷载及基层脱空现象表现出高度敏感性。一旦发生破坏, 裂缝扩展速度快, 维修需采用整板破除工艺, 施工周期长。本文就水泥混凝土路面的日常养护技术和常见病害的临时性处理方法进行系统阐述, 旨在为类似工程维护提供有益参考。

关键词 水泥混凝土路面; 养护技术; 裂缝; 坑洞; 沉陷

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.034

0 引言

在全面推进“四好农村路”建设的背景下, 为更好地服务乡村振兴战略, 交通运输主管部门持续推动农村公路建设向资源集约、环境友好的方向发展。结合我国资源禀赋与实际情况, 在县乡公路建设中, 水泥混凝土路面因其材料易得、耐久性好等特点, 仍被广泛应用。需要强调的是, 水泥混凝土路面竣工后的科学养护对其全寿命使用性能至关重要。基于此, 本文重点探讨了水泥混凝土路面的日常规范化养护技术, 并分析了常见病害的快速处治方法, 以期对相关养护实践提供参考。

1 水泥混凝土路面日常养护技术

1.1 日常养护的基本要求

1. 水泥混凝土路面的日常养护内容主要有五个方面: (1) 水泥混凝土路面病害的日常观察和经常性检查。(2) 水泥混凝土路面的日常保洁。(3) 水泥混凝土路面破损的临时性修补。(4) 水泥混凝土路面的接缝养护。(5) 水泥混凝土路面的冬季养护。

2. 制定日常养护计划。在水泥混凝土路面长期运营过程中, 科学制定分层次、分周期的养护计划, 是保障道路性能稳定、延缓结构性损伤的重要基础。因此, 养路部门需要根据路面特性、交通量变化和区域气候条件, 建立由年度计划、季度计划、月计划、周计划到日计划逐级细化的管理体系, 使各项养护任务在时间安排上呈现出均衡性。年度计划往往作为总体框架,

需结合全年养护工作量、预算分配及各类作业的季节性特征进行统筹, 使大型或季节敏感型工程合理施工, 避免集中施工对交通组织造成冲击^[1]。季度与月度计划则进一步明确作业节点, 将清扫、检查、灌缝、排水设施维护等常规任务分解至具体时间段, 并与人员、机械调度紧密结合, 使养护资源得到最大化利用。周计划和日计划则承担落实执行的作用, 强调工作量均衡分布、及时调整, 使养护团队能够根据实际情况迅速响应路面变化。

3. 养护机具和材料准备。(1) 采用机械进行日常清扫时, 应在清扫前检修好机械, 保证清扫设备能正常使用, 采用人工进行日常清扫前应准备好清扫工具。(2) 更换或补充路面接缝的填缝料时, 根据修补、更换的接缝长度准备好填缝料。(3) 在冰冻地区的冬季养护中, 根据养护里程和面积及撒布次数准备防滑融雪材料。

4. 日常巡查。(1) 巡查的目的: 第一, 发现路面的破损情况和结构物的损坏情况。第二, 发现并清除道路上影响交通的障碍物。第三, 检查排水系统是否完好畅通。第四, 掌握养护工作的实施情况及工程质量。

(2) 巡查分日常巡查和特殊巡查: 第一, 日常巡查由养护班组进行, 每天一次。第二, 特殊巡查一般是针对发生特殊情况下可能危害道路交通安全时而进行的巡查工作。

1.2 清扫保洁

水泥混凝土路面清扫的目的是为了保证路面的使用功能, 且保证路容路貌干净整洁, 沿线环境美观清

作者简介: 周从明(1988-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 公路建设与养护。

爽,行人车辆通行安全。清扫的主要范围包括:行车道、人行道、中央分隔带、隧道、桥梁伸缩缝、交通标志等附属设施^[2]。

1. 水泥混凝土路面可采用人工保洁、机械保洁或人工结合机械保洁三种方式:(1)高速公路、一级公路和交通繁忙的其他等级公路的水泥混凝土路面清扫应采用机械作业,机械清扫不到的死角辅以人工清扫。

(2)交通量小的二级(含二级以下)公路水泥混凝土路面可采用人工清扫,根据情况逐渐过渡为机械清扫。

(3)无论机械或人工清扫均宜避开交通量高峰时段,清扫时不得污染环境和危及行车安全,清扫后的垃圾应运至指定地点进行处理。

2. 路面如被油污、化学品污染应及时清洗,以免造成永久性损伤。(1)油类清洗。当油类洒落路面面积较大时,要迅速撒砂以防车辆出现滑溜事故,然后在交通量较少时用水冲洗干净。(2)化学物品清洗。化学物品洒落路面后,有时必须采用相应的中和剂进行化学处理,经处理后再用水清洗干净。(3)路面清洗注意事项:第一,一般性污染应在交通量小的时候进行清洗,对突出事故造成的油类洒落,一定要及时处理,不得污染环境。第二,对于清洗作业速度、喷水压力、用水量要预先试验确定。第三,冬季清洗时,如气温在 0℃以下,则路面有结冰的危险,应尽量避免。

1.3 接缝保养和填缝料更换

1. 接缝养护的要求。(1)若硬质颗粒落入接缝内部,将限制混凝土板的正常伸长,最终使接缝受到破坏,因此必须提前防范。第一,应先将路面上的杂物彻底清除,使异物无法靠近缝隙区域。第二,凡是已经进入接缝的坚硬碎物,都需及时剔除干净,避免其成为板块胀缩活动的阻碍物。(2)为避免雨水沿缝隙渗入路基、引起软化而导致板块受损,应重点保持接缝区域的排水与密封状态。第一,路表的排水系统要随时保持畅通,让积水无滞留空间。第二,缝内填料则必须保持完整,不得出现破损,以形成有效的防水屏障。

(3)只有使填缝料保持密实饱满并牢牢黏附在缝壁上,才能确保接缝表层平整、不冒水,从而保障面层的整体使用质量。第一,当环境温度升高、混凝土面板发生伸长,而导致填缝料被挤压并隆起(高速与一级公路超过 3 mm、其他等级超过 5 mm),此时需用铁铲等工具将突起部分削除,恢复路面平顺。第二,当温度下降、板块收缩、缝隙扩大并出现空隙时,应选择当地最冷的时段重新灌注同类填缝料,以免泥砂进入接缝或雨水顺缝渗入。

2. 填缝料的日常与周期更换。(1)日常更换主要指对局部脱落或缺损处进行补料,这是维护作业中出现频率最高的一项内容,几乎需要长期重复进行。(2)填缝料的更换周期由其自身寿命、铺筑质量和路面状况共同决定。以目前国内材料研发及应用水平来看,大部分填缝料的使用年限通常不超过三年。

3. 填缝料应具备的关键性能要求。(1)必须能够牢固附着在混凝土板缝壁上,使其在温度引起的伸缩过程中依旧不脱落。(2)材料应具有较高延伸率与良好的回弹特性,以适应板块收缩而不发生断裂。(3)应具备良好的耐高温与嵌入能力,夏季暴晒下不会流淌、外溢,同时具备抗水性与不渗透性。(4)在冬季低温条件下不得产生脆裂,还应保持一定塑性与延展性。(5)耐久性必须可靠,能够在恶劣气候与反复荷载作用下保持稳定性能,不会过早老化或磨损。

2 水泥混凝土路面病害的临时性处理措施

水泥混凝土路面产生病害后,为了道路使用的安全,避免病害的进一步恶化,在日常养护中要对病害采取临时性处理措施。

2.1 病害的临时性处理要求

病害处置必须遵循及时、快速、安全的基本原则^[3]。由于公路养护具有经常性、周期性与预防性的特点,一旦路面出现裂缝、松动、坑槽、接缝破损等早期病害,如果不立即采取措施,极易在车辆荷载、气候变化的共同作用下迅速恶化,进一步威胁行车安全。因此,养护人员在巡查中发现问题后,应做到快速响应、及时处置,将病害控制在可管理范围内。当条件受限或无法开展彻底维修时,还需实施临时性处理措施。例如:及时封闭裂缝、铺设应急材料、设置警示标志等,以阻断损害的继续发展,为正式维修提供支持。

2.2 病害的临时处理方法

2.2.1 裂缝

1. 裂缝分为表面裂缝和贯穿混凝土板全厚度的裂缝。为防止雨水从裂缝中渗透至基层和路基,对裂缝常常采用封闭处理。

2. 对于表面裂缝及虽然贯穿板厚但面板仍能满足强度要求的裂缝,且面板稳定的,可采用聚氨酯类、烯类、橡胶类、沥青类胶粘剂对裂缝进行封闭^[4]。

3. 对于裂缝造成板块强度不足的,采用环氧树脂类、酚醛和改性酚醛树脂类胶粘剂对裂缝进行封闭。

4. 封闭方法及工艺流程:(1)将缝内脱落物及灰尘等清除干净,一般采用铁钩和吸尘器等工具清理,对宽度小于 3 mm 的表面裂缝,也可以采取扩缝灌浆的

办法封缝。(2)根据裂缝长度配备封缝料。(3)为防止污染路面,在灌缝前应在缝的两侧撒砂或滑石粉。

(4)用灌缝机或灌缝器将封缝料灌入缝中。(5)待封缝料冷却硬化后清理干净施工现场。

2.2.2 坑洞

1. 水泥混凝土路面坑洞产生的主要原因:(1)当粗集料未经过充分清洗、表面附着泥粉或含泥量过高时,会降低其与水泥浆体之间的黏结强度,使混凝土在车辆荷载反复作用下逐渐剥松,最终形成坑洞^[5]。若拌合料中混入泥块、朽木等杂物,材料整体均匀性被破坏,局部强度偏低,雨水渗入后更容易产生剥落,加速坑洞扩大。(2)在施工过程中,若混凝土未被充分振捣,内部会形成空洞或蜂窝状结构,导致该区域承载能力不足。在温度变化、车辆反复冲击下,薄弱部位会首先破损,进而演变为坑洞。此外,模板不稳、养护不到位等问题也会削弱混凝土表层的整体性能,使其更易受到侵蚀。(3)大型车辆金属硬轮通过时会路面对路面产生集中冲击,尤其在低温条件或路面已局部破损的情况下,更容易击碎表层混凝土。同时,运输车辆掉落的硬物若多次碾压,也会造成表面材料剥落,成为坑洞的触发点。

2. 临时处理坑洞的方法有:填充沥青混凝土、沥青冷补材料、高强度水泥砂浆等。这些材料能够在短时间内恢复路面平整,沥青类材料施工便捷,适用于应急修补;高强度水泥砂浆适合对结构性损伤较深的坑洞进行临时恢复,使路面具备基本承载能力。

3. 填充前应将坑洞内的松动物及尘土清除干净,并适当修整坑壁,使界面形成坚固基底,确保填补材料与原结构紧密结合,延长临时修补的有效期。

2.2.3 沉陷

水泥混凝土板块沉陷主要是路基强度不足所致。沉陷的临时处理方法是:

1. 对于沉陷深度有限、板底尚未完全失稳的路段,可直接在表面铺设一层薄层沥青混凝土,通过调整厚度来消除路面高差。此种处理方式施工简便、见效快,能够暂时恢复道路的平整度,并降低车辆对沉陷板块的重复冲击,有利于延缓破坏发展。

2. 若沉陷较深,仅铺设薄层材料难以实现补强,此时需先在下部铺一层沥青碎石形成过渡层,以改善受损区域的支撑条件,再在上部铺筑沥青混凝土恢复结构与表面功能。此种修补方式能够更有效地填补沉陷空间,减轻路基薄弱点的集中应力,提高临时修复的稳定性,为后期进行彻底处治赢得时间。

2.2.4 断板

1. 对于仅出现断纹但板块整体几何形态仍保持稳定的路段,最关键的是阻断水分与杂物进入断缝内部,避免因基层受潮或冻胀导致破损进一步发展。因此,可采用灌注型密封材料将断缝封闭,使板块在短期内维持原有承载力,同时降低车辆荷载对断缝处的冲击。

2. 若断板已经发生翘曲、错台或局部碎裂,说明结构受力体系已遭破坏,此时需快速恢复路面的承载能力。冬季条件限制较多,可优先选用沥青冷补料进行应急处理;在常温条件下,则宜采用沥青混凝土加铺修补,使车辆通过时不再产生冲击,避免断板进一步传播扩大。

2.2.5 板角破损处理

对于板角破损但未发生变形的路段,可通过封缝材料进行临时包边处理,使板角不再继续剥落,并防止水分从破损处渗入基层,保持板块整体稳定。当板角破损伴随下陷、翘曲等变形时,则需采取加铺沥青混凝土或沥青冷补料的方式,在破损区域形成新的承载层。通过摊铺、压实,使表面恢复平整后再开放交通,既能有效分散车辆荷载,也能减少对损坏板角的二次冲击,为后续彻底维修创造条件。

3 结束语

水泥混凝土路面的长期稳定性不仅依赖于建设阶段的质量控制,更取决于运营阶段的精细化养护。临时修补虽不能替代系统性的维修工程,但在保障行车安全、维持道路服务水平方面具有不可替代的作用。未来应在完善巡查机制、提升材料性能和优化应急处治技术等方面持续推进,使水泥混凝土路面养护工作更加高效规范,从而全面提升道路运行质量。

参考文献:

- [1] 交通运输部.公路水泥混凝土路面施工技术细则(JTG/T F30-2014)[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [2] 交通运输部.公路水泥混凝土路面养护技术规范(JTG 5151-2020)[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [3] 王松根,宋光明.公路水泥混凝土路面预防性养护技术[M].北京:人民交通出版社,2018.
- [4] 杨刚,李鼎夫.基于断裂力学的水泥混凝土路面断裂分析[J].江苏建材,2025(05):45-46.
- [5] 马雪梅.水泥混凝土路面的裂缝控制与修复方法研究[J].低碳世界,2025(08):142-144.

基于裂缝特性的公路路面裂缝 养护施工技术应用策略探讨

张新磊

(灌南县四通公路养护工程有限公司, 江苏 连云港 222500)

摘要 在公路路面长期承受交通荷载、温度变化和自然老化的条件下, 裂缝逐渐成为影响道路性能与结构安全的主要病害。针对裂缝类型多样、发展机制复杂、修补需求差异明显的特点, 有必要构建一套契合不同病害阶段的养护施工策略。本文在总结裂缝成因的基础上, 探讨具体的养护施工技术措施, 旨在延缓裂缝扩展, 实现路面运营性能的长期稳定, 为公路养护提供技术参考。

关键词 公路路面; 裂缝; 公路养护; 再生材料

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.035

0 引言

随着交通运输需求不断增长, 公路路面的使用强度持续攀升, 结构层在高温、低温、降雨与重载叠加作用下呈现复杂应力状态, 裂缝病害因此具有高频出现、扩展迅速、治理难度大等特征。裂缝不仅破坏路面平整度, 也会形成水损害的渗入通道, 进一步诱发松散、坑槽和反射裂缝等一系列深层次结构问题, 使道路的全生命周期成本显著增加。在当前公路养护体系加速向精细化、智能化转型的背景下, 单一的修补方式已难以满足复杂病害的治理需求, 亟需寻找更加有效的应对模式。

1 公路路面的裂缝成因

1.1 材料性能衰退引发结构抗裂能力下降

在公路路面中, 沥青混合料需要具备足够的黏结性, 才能在温度波动和车辆荷载作用下保持结构完整性^[1]。然而, 在实际工程中, 由于材料生产过程控制不严、级配结构不合理或含泥量偏高, 面层常会形成较大的空隙率, 使路面内部的力传递路径变得松散而不稳定。当空隙过大时, 路面抵抗弯拉应力的能力明显下降, 裂缝便容易沿薄弱区域萌发。此外, 基层和底基层中水泥用量不足或超量, 也会导致材料出现不同程度的干缩, 水化反应释放的热量在短时间内使结构产生不均衡收缩, 等到材料失水后, 收缩应力不断累积并最终超过抗拉能力, 引起基层开裂。沥青材料在长期日晒、氧化和反复荷载下会逐渐老化, 轻质组分挥发后, 材料变得脆硬, 一旦遇到低温, 很难抵御温缩作用;

遇到高温, 又容易发生流动变形, 最终形成贯通裂缝。

1.2 气候环境作用导致温度裂缝不断扩展

由于公路路面暴露在外部环境中, 昼夜温差、季节气候变化及冻融循环都会持续影响材料结构, 从而造成不可忽视的温度裂缝。许多地区昼夜温差超过十几摄氏度, 当温度骤降时, 面层材料迅速收缩, 而基层和底基层的收缩响应较慢, 层间温缩差异导致应力集中, 裂缝便沿横向或纵向显现。在冬季持续低温条件下, 收缩会进一步加深, 使原本微小的裂纹不断向纵深和宽度方向扩展。高温季节同样会对路面造成损伤, 沥青在高温环境中处于软化状态, 容易丧失应力松弛能力, 在重载反复碾压中形成不可恢复的塑性变形^[2]。当高温与强日晒并存时, 材料中的轻质成分加速挥发, 使路面更加脆化, 进入秋冬温差再次加大后, 裂缝很容易在之前的老化位置上重复出现。降雨与温度叠加作用也会加剧裂缝发展, 雨水沿裂缝渗入后, 使面层湿度增加, 在阴晴交替中引发新的体积变化, 最终导致裂缝呈现持续扩展状态。

1.3 交通荷载作用下的疲劳损伤导致裂缝生成

随着公路交通量快速增长, 重载车辆占比不断提升, 路面在全寿命周期内承受的疲劳荷载累积远高于设计水平。当车辆频繁经过同一轮迹带区域时, 面层和基层反复受到弯拉应力作用, 材料内部的疲劳损伤逐渐累积。从微观结构来看, 每一次荷载都会在材料内部产生细小的位移差, 当累积效应超过材料允许范围后, 裂缝便沿应力最大处开始显现^[3]。若路段存在

作者简介: 张新磊 (1986-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 公路养护施工。

超载车辆通行现象,疲劳破坏的发生速度会成倍增加,尤其是在长坡路段、货车集中路段和临近匝道的转向区更为明显。不均匀沉降同样使路面无法有效分散荷载,当基层因承载不足而发生微小下陷时,面层便出现随之弯曲的现象,在弯矩作用集中的区域形成纵向裂缝。在沥青逐渐老化后,材料抵抗剪切力与拉伸力的能力明显下降,使疲劳裂缝从最初的单线裂纹逐渐演变成网裂或龟裂的结构破坏,严重影响路面整体稳定性(见图1)。

1.4 施工质量缺陷埋下早期裂缝隐患

施工阶段的控制水平直接决定了路面是否具备良好的初始抗裂性能。若基层压实度达不到要求,内部会产生许多不可见的松散区,在干缩、湿胀或荷载反复作用下,容易形成早期裂缝并向上反射至面层。在混合料摊铺过程中,如果料温不稳定或运输延误导致温度下降,材料之间的黏附力会显著减弱,使面层内部留下结合不牢的接触面,后期便会在车辆荷载下沿此界面迅速产生剥离裂缝。在旧路加铺过程中,如果未彻底清除松散部位,或未在接缝处涂刷黏层油,新旧材料结合不密实,接缝便成为未来裂缝的首发部位^[4]。施工组织不合理也会带来隐患。例如:在低温环境下摊铺导致混合料无法正常成型,在强风环境下碎石等基层混合料表面水分蒸发过快造成早期干缩,从而导致原本坚固的结构出现裂缝,并随时间不断扩大。

2 公路路面裂缝养护施工技术应用策略

2.1 基于病害特征提高修补区域稳定性

裂缝的自然发展往往会呈现边缘破碎、剥落、松散等特征,如果未经切割便直接填补,修补材料与旧路表无法形成可靠结合,后期在车辆荷载反复作用下极易产生二次开裂。因此,在路面裂缝进入处理阶段之前,施工单位需要对病害形态进行细化分类,并

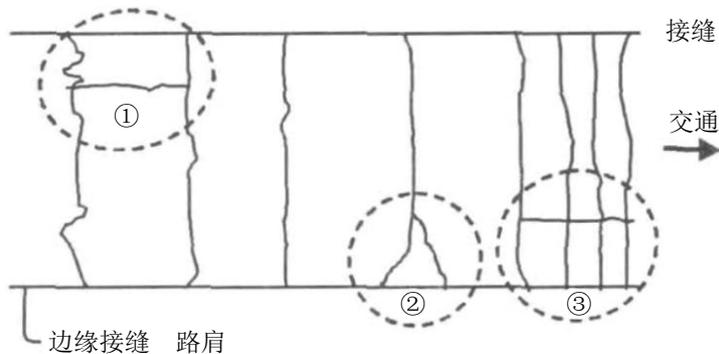
据此选择合适的切割方式,使修补区域获得几何可控的槽口结构。切割整形的常见做法是对病害区域进行8~10 cm深度的线切割划槽,将病损部分切割成规则的块体,再通过机械碎化方式得到合适粒径的材料。切割过程中不仅要保证切缝直顺,而且要保证槽壁平整,使后续的黏结界面具有良好的咬合作用。切割后还需及时清除碎屑与粉尘,保持槽口干燥,避免潮气影响材料浸润。对槽口进行热风或机械吹干处理,以提升新材料的填充质量,从而为后续施工提供坚实的基础,减少由于界面几何不均匀而引发的早期破坏,使修补层在服役期内保持稳定性能。

2.2 采用再生材料重构结构层

在裂缝处于结构性损伤阶段时,仅依靠浅层封缝已无法阻止破坏扩展,此时就需要采用深层碎化再生技术,通过重新编织结构层来恢复路面整体的承载能力^[5]。针对结构疲劳严重的路段,施工中通常会先将表层进行8~10 cm深度的碎化处理,使表层形成便于再生的碎料,再加入比例合适的新拌混合料进行重构。例如:将旧料与新混合料按3:7至4:6的比例混合,其中矿粉或粉煤灰置换比例为15%~20%,骨料粒径控制在0.075~16 mm范围内,从而使新旧料混合后重新形成稳定骨架,使结构层的抗压、抗弯与抗剪能力都有明显恢复。此外,再生层通过压实、整形等工序,可形成紧密的嵌固状态,使结构层内部的微裂纹得到封闭,消除隐形薄弱点,避免裂缝在后期发展为贯穿性病害,不仅降低材料成本,也通过提高材料利用率减少运输与堆放压力,尤其适用于深度结构病害集中出现的中重交通路段。

2.3 应用规范化灌缝与封缝工艺

在裂缝规模较小、尚未出现大面积结构破坏的情况下,灌缝与封缝是最常见且最具经济性的养护工艺。



①单个冲断; ②剥落以及“Y”形裂缝; ③3个冲断

图1 公路路面裂缝示意图

其核心目标是阻断水分进入基层的路径, 延缓因湿胀、冻融、剥离等造成的进一步损害。在施工环节中, 裂缝通常需要进行机械开槽, 使其形成一定的宽度和深度, 确保填缝材料深入缝底并保持稳定嵌固^[6]。常用的开槽宽度一般控制在 15 mm 左右, 根据裂缝深度可进行逐层填补。在材料选择方面, 需要保证填缝胶具有良好的高温抗流动性、低温抗脆裂性及长期黏结能力。沥青路面灌缝流程如图 2 所示。

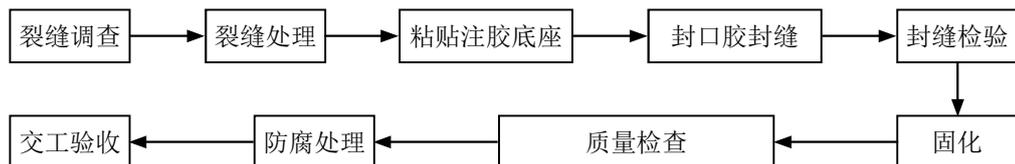


图 2 沥青路面灌缝流程

修补区在外观上与原路面保持一致, 并减少车辆行驶时的冲击感。

2.4 利用机械设备提高施工精度

裂缝养护施工是否稳定取决于过程控制是否规范, 而机械化施工正是提高施工一致性的重要手段。传统依靠人工进行清缝、填补、压实等操作, 不仅施工效率低, 质量也容易因操作差异造成波动。随着机械设备的普及, 裂缝处理流程实现了更高的标准化。例如: 在开槽过程中使用专业切割机, 可以确保槽体深度和宽度按照既定要求保持一致, 避免出现偏差。碎化作业设备能够稳定输出目标粒径, 使 15 mm 左右的碎块更加均匀, 便于再生处理。灌封设备能够稳定控制材料温度, 使其在适宜范围内进行灌注, 避免出现材料流动性不足或过度渗透的现象。在压实环节, 采用振动压实设备可以在单位时间内产生更高的压实力, 使新旧材料界面更紧密, 密实度更均匀。此外, 机械化作业可以显著降低施工过程中的人为误差, 提高路面修补区域的质量均衡性, 使修补后路段在荷载作用下表现更稳定、更耐久。尤其是对于大面积裂缝密集路段, 通过机械化施工还能提升整体施工效率, 使施工过程对交通影响更小, 更适合国省干线等运输强度大的道路。

2.5 构建全过程质量监管体系

裂缝修补若仅依靠单点施工技术, 很难形成可持续的养护效果, 因此从施工前期到后期评估建立全过程监管机制具有重要意义。施工前, 管理单位应根据病害分布、裂缝类型、病害等级等数据制定科学的养护方案, 明确哪些路段适合灌缝, 哪些路段需要碎化再生或槽化补筑。在施工过程中, 需要对材料进场进行严格检测, 核查沥青、胶料、水泥基材料是否达到设计要求; 对施工环境进行监控, 包括温度、湿度、风速等因素

在具体施工中, 灌缝前必须对缝内进行彻底清洁, 清除砂粒、粉尘和松散物, 保持干燥状态。如果缝内残留水分或污染物, 会显著降低材料附着性, 使早期脱槽风险增加。灌缝温度也需严格控制, 过低会导致材料无法流动到缝底, 过高则会产生过度分散, 使胶料出现气泡甚至烫伤槽壁。施工时应采用分层灌注方式, 使材料与槽壁完全接触, 以提升材料的密实状态。封缝工序完成后, 还需在裂缝周围进行表面抹平, 使

是否适合施工; 对压实度、平整度等指标进行抽检, 确保施工质量达到预期。施工结束后, 还需建立长期追踪制度, 通过巡查设备、三维路表扫描等方式, 动态记录裂缝的变化趋势, 为未来的养护决策提供数据基础, 使公路结构性能在全生命周期内保持稳定状态。

3 结束语

综合各项技术实践可以发现, 公路路面裂缝治理的关键不在于单一工艺的优劣, 而在于能否根据裂缝的发展阶段与病害特征形成科学稳定的综合施工体系。多工序协同下的养护体系能够有效延缓裂缝扩展速度, 降低后续大修风险, 使公路在长期运营中保持较高的结构稳定性。未来, 随着材料技术与智能检测能力不断提升, 施工单位应进一步优化养护技术措施, 使裂缝养护逐步向预测性方向发展, 为实现公路的安全耐久、经济运行提供更有力的支撑。

参考文献:

- [1] 王倩. 公路路面裂缝养护措施及施工技术[J]. 工程建设与设计, 2025(01):216-218.
- [2] 陈永亮. 高速公路路面裂缝养护施工技术研究[J]. 交通世界, 2024(36):38-40.
- [3] 刘敏, 瞿隆钰. 高速公路路面病害成因及养护施工技术[J]. 云南水力发电, 2024,40(S2):32-34.
- [4] 李文海. 公路路面裂缝养护措施与施工技术研究[J]. 产品可靠性报告, 2024(03):107-109.
- [5] 康馨月. 农村公路沥青路面病害与养护施工技术关键探析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(31):154-156.
- [6] 熊承桥. 公路路面裂缝的养护施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2023(17):154-156.

市政给水管网水力平差优化设计技术研究

汤皓然

(昆明市规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要 在城市基础建设过程中, 市政给水管网水力性能直接关系到供水运行效率与稳定性。水力平差作为管网设计重点, 通过数学模型协调流量与水头损失, 实现系统压力与流量的合理分配。本文阐述了市政给水管网水力平差的基本原理, 分析了水力平差数学模型与求解算法, 并针对市政给水管网水力平差优化设计关键技术展开研究, 以期对相关设计人员提供理论参考。

关键词 市政给水管网; 水力平差; 水头损失; 节点流量

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.036

0 引言

城市发展使市政给水系统面临水量增加、供水面积增大、能耗偏高的问题。在此背景下, 给水管网如何为用户提供稳定连续的优质供水压力成为难点。给水管网是水厂与用户间的核心输配枢纽, 其水力设计质量直接影响供水压力均衡性、水质稳定性及运行能耗。传统管网设计依赖经验估算, 难以适配复杂拓扑结构与多工况环境下的需求预测和水量计算。水力平差技术可依据管网拓扑关系, 构建管网拓扑与水力参数的数学模型, 通过大范围协调水量与水头, 让方案既满足用户用水需求, 又实现系统压力科学分配, 保障泵站高效运行。当前, 基于计算机仿真与优化方法的水力平差已发展为多目标、多约束的优化设计手段, 成为现代市政给水工程建设中不可或缺的技术。

1 市政给水管网水力平差基本原理

1.1 水力平差的定义与目标

水力平差是指当已知管网的拓扑结构、各节点用水量和水源供水条件时, 求解水力方程组, 求出管段流量、节点水压和管段水头损失, 实现管网系统的水流连续性和环路上水头闭合, 达到符合实际的水力工况的状态解。平差的结果作为后期管径选择、泵站扬程确定、阀门调节的重要参数。

1.2 基本守恒定律

水力平差建立在两个基本守恒定律之上: 一是质量守恒, 表现为节点流量连续性, 即流入任一节点的总流量等于流出流量与该节点用户用水量之和; 二是能量守恒, 表现为任一闭合环路中, 沿环路各管段水

头损失的代数和为零。这两个定律构成水力平差的数学基础, 适用于树状网与环状网^[1]。

1.3 管网拓扑结构表达

管网可由其节点及管段组合为图论模型: 节点表示管网上的用户接驳点、水源出口或者交汇点, 并具有用水量或者供水量属性; 管段是连接节点的元线, 元线具有长度、直径、粗糙度等物理属性。环状管网根据独立回路分别建立能量方程; 树状管网按照水头传递顺序确定路径并联立建立能量方程。现代水力模型借助于拓扑图中各结点间相关邻接矩阵或者关联矩阵用数字符号直接表示, 适合计算机识别处理。

2 水力平差数学模型与求解算法

2.1 节点流量与水头损失方程

在市政给水管网水力平差中, 各节点流量方程是质量守恒的基本体现: 管网内任一点的流入管段流量与流出管段流量之和, 等于该点的用户用水量; 水源点为负值(向系统供水), 普通用水点为正值(从系统取水)。这一基本平衡是构建整个水力模型的基础。水头损失描述水流沿管段流动时, 由摩擦力引发的能量损失, 其大小与管段长度、管径、管壁粗糙度及流速相关。管道水头损失有两种经验公式, 适用于不同管材与流态, 可依实际选择模型表述。水头损失对节点水压分布影响显著, 平差计算时必须纳入考量。

2.2 环状管网平差方程

在闭合的管路环中, 沿环路方向依次经过各管段所累积的水头损失, 其代数和必须为零。这是因为水流从某一点出发, 绕行环路一周后回到原点, 总能量

作者简介: 汤皓然(1999-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 市政给水排水工程。

不应发生变化。在实际计算中,需预先设定环路的绕行方向,管段水流方向与环路方向一致时,其水头损失取正值;相反时取负值。由于水头损失与流量之间呈非线性关系,环路方程无法直接求解,必须通过迭代方式逐步逼近真实解。每一次迭代根据当前流量计算各管段水头损失,求出环路闭合差,再据此调整管段流量,使闭合差逐步减小。这一过程需对所有独立环路同步进行,直至所有环路的闭合差均满足收敛条件^[2]。

3 市政给水管网优化设计方法

3.1 管径优化配置

管径优化配置以全生命周期成本最小化为目标,综合考虑管材购置费用、土建施工成本及水泵运行电费。设计过程中需满足多项水力约束条件,包括各节点最小服务水头不低于规范要求,管段内水流速度控制在 0.6~2.5 米每秒范围内,以及单段或累计水头损失不超过允许值。优化方法涵盖线性规划、非线性规划、遗传算法及粒子群优化等数学规划与智能算法。在工程实践中,常先采用经济流速法初步选定管径,即根据管段设计流量和推荐流速范围反推管径规格,形成初始方案。随后将该方案输入水力平差模型进行校核,检查节点水压、流速及水头损失是否满足约束。若存在超限情况,则调整管径并重新计算,直至所有指标符合设计标准。该过程可手动迭代,也可通过优化程序自动完成,最终形成经济合理的管径配置方案。

3.2 多水源协调供水

对于多水厂或多水厂、高位水池联合供水系统,需协调匹配各水源供水量与水压。水力平差模型可将水厂出水节点设为定流量节点、高位水池节点设为定压节点,也可按需灵活调整边界类型,通过模型计算不同工况下各水源的合理供水量;优化目标可根据实际设定为系统总扬程最小、均衡水厂供水负荷或降低主干输水管流量峰值等。多水源模型需在基本水力方程基础上增加额外控制方程(如水池水位、流量函数关系、多水源压力差限值等),求解时需同时满足节点流量连续、环路能量闭合及水源边界条件。借助多水源模型可模拟水厂启停、水池蓄放、水厂调峰补压等过程,实现复杂供水系统的联合调度。

3.3 控制点与压力管理

市政给水管网设计时一般选定一个至两个控制点来进行水力计算,往往位于管网的末端或者最高点,控制点最小服务水头一般控制在 16~28 米范围内,用来满足用户的正常生活和消防用水要求。水力平差计算是以此控制点水头为已知数求取水源扬程、泵站

出口压力或水池底高程。管网延伸或地形高差较大时可增设若干控制点对应不同的压力区间,并按需要设立减压阀或者变频泵站等来进行系统分区控制,减压阀压力设置依据本区的服务水头确定;变频泵按实际流量变化来自动调节出口压力。控制点位置、水头值、分区边界的选定对管径大小、泵站规模、运行能耗有影响,是设计优化的重要决定性因素^[3]。

3.4 节能降耗策略

水泵运行能耗占供水系统总运行成本的 60% 以上,节能设计需要考虑日变化流量工况,在实际工作模式下建立试验工况曲线,并计算不同运行方式下各水泵组的日能耗,从而优选方案:多台水泵并联运行,按需开停;设置变频调速装置,随时调整水泵转速;设大小泵切换,提高小负荷工况时的运行效率;在系统中布置高位水池或调蓄水池,在低谷电价期间抽水到高位水池/调蓄水池储存,利用储存的水白天通过重力向用户供水等方式,以此来减少日间的泵运行时长。水力模型能够在不同调度方式下得出水泵扬程、流量以及运行时长的数据,并通过这些数据来分析出电耗情况。例如:在流量为设计值的 70% 时,变频泵的轴功率仅为原来的 34% 左右。因此,对于这些量化的数值,有助于为水泵的选型、水池容积的确定和运行制度的安排等工作提供参考,进而形成节能型管网系统。

4 水力平差模型精细化处理

4.1 节点流量动态分配

传统水力模型常将沿线用户用水量简化为节点流量,未考虑实际分布特性。精细化处理可按地理位置将管段服务用户划分为若干虚拟节点,分散局部用水负荷;也可采用流量分配系数法,按管长、用户密度、用水类型确定比例,将管段总流量分至两端节点。工厂、医院等独立大流量用户需单独建模,不可集中赋值,否则易导致局部水压偏离实际。细化节点流量分布更贴合工程实际,能反映管道沿线水流变化,尤其适用于支状或混合式小区管网,可提升模型可信度与分析价值^[4]。

4.2 管段水头损失参数校准

管壁粗糙度随运行年限增大呈恶化趋势,因此新管与旧管 C 值或 ϵ 值差距明显。在新建工程的设计过程中,一般按照新管的标准参数计算;而改建工程应根据现场实测水压及流量,用试算方法得到模型中相应管段的真实 C 值并对其进行校核。通常是在校准过程选取多处测压点和流量监测断面,在稳定的工况下同时采集管段上的阻力参数,并用相应的反演算法进行迭代运算以调节出相应的管段阻力系数,直到模型

的模拟值等于或接近实测值为止。局部损失如弯头、阀门等项,对于大口径的长距离输水管来说可忽略,对于小型管道和其小区支管来说也不能忽略,计算时可折算成当量长度进入水头损失计算。例如:90°弯头可视为1/2~1倍管径的直管,即相应的管长也可代替直管长度。参数校准可以有效提高模型的精度^[5]。

4.3 多工况模拟分析

管网要考虑到很多不同工况,比如水力平差的时候就需要分别建立模型校核。最高日最高时工况用来校核正常情况下的供水能力;消防工况需要在指定的几个节点叠加每秒10~30升的消防流量,并且要检验出该工况下管网的最不利点水压不低于10米;事故工况模拟主干管段发生故障情况,判断其他所有路径能否保证基本的供水;夜间低峰工况校核管网的最小运行压力和泵站调度方案。针对不同的工况,管网对应的各节点流量边界条件也不同,具体来说,在消防工况中只在发生火灾的节点增加流量,其他节点仍按正常情况供水平衡;事故工况关闭主管道部分管段,则重新算全网的流量重新分配。多工况分析能够从各个方面了解到管网在极限或者不正常状态下水力参数的变化情况。

5 工程实施中的关键技术要点

5.1 拓扑结构与基础数据准确性

在构建水力模型时需准确的管网基础数据。通过详细的管网测绘工作获得管线的平面坐标、长度、管径、管材类型、埋深等,获得管网各个节点处的地面高程,然后根据不同区域用户数量、用水性质、使用规模等把用户用水量分配到各个节点,形成对应各个节点的用水量。如果管网年代久远没有资料或者已有资料不全,可结合地下管线探测技术、用户的水表历史数据与现场实际的压力测试数据来进行管网补充和完善。而节点高程则是影响水压的一个重要因素,在此过程中应选用精度较高的水准仪或者是利用一些可靠的地理信息系统来进行该类测站的数据采集。在整个过程中切忌由于高程问题造成最后的水力分析结果产生偏差,所有的数据最终都要统一成一个编码,然后进行统一的分类保存,建立整个水力模型。

5.2 模型验证与校核

完成水力模型后需要根据现场实际测得的数据来进行验证。在典型运行工况条件下选定具有代表性的监测点,同时在同一时间对各个断面的水压值以及各管段上代表性的几个节点处的流量进行同步监测,并把它们与模型模拟的结果进行对比,看其数值及曲线走势是否一致。如果存在大的系统误差,则可以针对模型中的管段粗糙系数、节点用水量分摊方式等参数

进行相应的修改,然后再次进行平差计算,经多次调整使模型输出逐渐接近实际测得情况。经校核并符合实际情况的模型是进行下一步优化设计、进行各种方案的比选、作出应急分析的可靠的参考资料。整个校核过程中都必须有详细的技术记录,包含测点布置图、测点数据采集时间、工况描述、调整依据等内容。

5.3 与BIM及智慧水务系统集成

目前市政给水工程多运用数字化交付,对于不同的建筑信息模型(BIM)水力平差模型可以作为其水力分析模块,实现市政给水工程从设计、施工到运维全周期的数据连续传递;基于BIM项目的水力平差模型可用于项目设计中管网三维管线的路线优化、碰撞检测;项目投入使用之后,水力模型可与智慧水务平台进行对接,接入实时监测数据,如源端流量、泵站运行状态、管网节点的压力变化以及用户用(废)水的变化,并将收到的边界数据实时更新到模型中进行仿真模拟计算管网运行情况,辅助调控决策、漏水定位、应急处置等工作。随着大量实时数据不断反馈,逐步形成具有一定反馈与预测能力的数字孪生水力模型,实现供水系统智能化的城市供水管理。

6 结束语

市政给水管网水力平差优化设计集成了流体力学、图论、优化理论和计算机技术等跨学科知识和技术,采用科学的数学模型,用精细化参数处理手段和多目标优化方法完成对管网各项评价指标的计算,并实现了管网投资经济性、供水可靠性、运行节能性的统一。在物联网、大数据、人工智能等信息技术的支撑下,水力平差或能由原来的静态设计工具转变为动态决策平台,助力城市供水系统更加智慧化、韧性化和可持续发展。未来,设计人员需要不断地提高对设计模型的综合应用能力,推进给水工程建设由经验型设计向数据型设计转变。

参考文献:

- [1] 罗春幸.市政供水管网建设中管网平差的应用及意义[J].中华建设,2019(02):140-141.
- [2] 魏超.某商场给排水管网水力计算探析[J].河南科技,2021,40(33):84-86.
- [3] 刘亮贤,曾富平.市政给水管网水力模型优化及漏损控制研究[J].城市建设,2025(15):31-33.
- [4] 林榕.市政给水管网设计中的要点分析[J].中国住宅设施,2023(06):46-48.
- [5] 王建国,徐文晓.集中供热管网的水力平衡优化[J].区域供热,2023(01):53-59,84.

水利工程与生态环境协同发展的路径研究

邵莎莎, 周淑玲

(山东临沂水利水电建筑安装公司, 山东 临沂 276002)

摘要 本研究围绕水利工程与生态环境的协同需求展开, 从理论层面剖析工程建设对生态系统结构与功能的影响, 强调生态约束在工程中的重要性; 总结我国水利工程生态协同的总体表现, 并揭示工程扰动、水生态退化与管理分散等主要问题; 进一步提出生态友好型设计、水生态修复、全生命周期管理以及技术协同与管理优化等实现路径, 突出工程措施对生态功能恢复与系统稳定性的促进作用, 旨在为水利工程建设与生态环境保护的协调融合提供有益参考。

关键词 水利工程; 生态环境; 协同发展; 生态修复

中图分类号: TV5; X5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.037

0 引言

水利工程在保障水资源供给、防洪排涝与经济社会发展中发挥关键作用, 但其建设与运行过程可能引发生态扰动、栖息地破碎化以及水生态系统功能退化等问题。在生态文明理念引领下, 工程建设与生态环境保护之间的关系受到广泛关注, 探索二者的协同路径具有重要意义。加强对水利工程生态影响机制的认识, 有助于在工程效益与生态安全之间实现平衡, 为推动水资源可持续利用与水生态系统健康提供科学依据, 并依托引入生态理念优化工程建设方式, 促进工程管理向生态友好方向转型, 为水利工程的可持续发展与生态环境改善提供理论参考。

1 水利工程与生态环境协同发展的理论基础

水利工程与生态环境协同发展的理论基础, 源于对自然系统整体性的认识, 水资源在流域中以水文循环的方式不断转化和迁移, 生态系统的结构与功能又紧密依赖这一循环, 因而水利建设不能脱离生态过程而独立存在, 水利理念在当代更加强调整以自然规律为依据, 尊重河流自组织能力, 将工程措施嵌入生态系统的承载范围之内, 在此类理解下, 生态阈值、系统反馈和整体平衡成为规划设计的重要依据^[1]。依托协调水量分配、维护水生栖息地、保持河湖连通等方式, 工程运行与生态系统的调节机制共同发挥作用, 形成水资源开发利用与生态保护的动态平衡, 此类基于系统思维和生态原理的认识, 构成了水利工程与生态环境协同发展的理论支撑。

2 水利工程生态协同发展的现状与问题

2.1 水利工程生态协同发展的现状

目前水利工程在规划、建设与管理过程中生态协同意识日益增强, 工程实践逐步从传统以供水、防洪、灌溉等单一功能为中心, 向兼顾河湖生态健康、水资源可持续利用的综合管理模式延伸, 生态友好型设计理念得到推广, 许多工程采用生态护岸、生态廊道、水系连通等措施, 在保障工程安全的同时增强环境适应性, 各地依托河湖生态修复恢复水生植被、重建栖息地结构并调整水动力条件, 增强生态系统稳定性。在管理环节, 越来越多的项目引入全生命周期管理思想, 将生态保护贯穿规划、建设、运行到退役全过程, 同时借助监测、信息化平台建设和部门协作推进技术协同与管理优化, 使工程运行状况与生态变化可以在同一平台上联动管理, 便于及时调整调度方案和维护策略等。

2.2 水利工程生态协同发展存在的问题

尽管生态协同理念逐渐深入, 但实际推进过程中仍面临多方面的制约, 具体有: 第一, 部分工程在设计阶段依然以工程效益与经济目标为主导, 生态友好型设计的系统性和适应性不足, 对流域水文过程、生态敏感区域和关键物种需求等考虑不够全面, 工程结构与生态过程之间仍易出现功能冲突, 难以从源头实现工程与生态协同; 第二, 水生态系统修复的力度和精细化程度仍显不足, 修复措施往往局限于形态恢复

作者简介: 邵莎莎 (1982-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程技术。

或植被补植,缺少对水动力格局、栖息地网络和食物链结构等整体生态要素的综合增强,且修复后缺乏长期监测与维护机制,生态效应易受外界干扰而难以稳定维持;第三,全生命周期管理体系尚未健全,生态保护责任在不同阶段之间出现断点,运行期的生态调度、实时监测和反馈机制不够完善,生态数据难以有效支撑管理决策,生态目标难以在工程全寿命范围内保持连续性和约束力,在流域多工程联合运行条件下尤为突出;第四,技术协同不足和管理机制分散的问题依然突出,不同部门在规划原则、技术标准、监测体系和治理措施等方面缺乏统一协调平台,信息共享不畅、管理手段不统一,工程运行与生态保护的联动性明显不足,难以形成协同推进的合力,整体上削弱了水利工程与生态环境协同发展的成效^[2]。

3 水利工程与生态环境协同发展的实现路径

3.1 推行生态友好型设计,提高工程环境适应性

在水利工程建设中,生态友好型设计是实现工程稳定运行与生态系统健康共存的基础,需要依托系统化的设计流程逐层推进,确保工程结构与自然环境协调统一,并在设计全过程持续兼顾生态敏感点与水动力变化规律,使工程自始至终处于可控、可调的生态约束之中:第一,在前期规划阶段开展生态敏感性调查,识别关键栖息地、水文通道和生态风险点,为设计提供基础依据,同时结合区域生态战略明确设计约束和生态底线;第二,在总体设计中融入生态需求,将水动力、水质、水量等生态因子纳入工程方案,合理选择生态护坡、柔性挡护和自然式渠道等设计形式,使工程结构尽量顺应自然过程并预留必要的生态空间;第三,在施工方案中加强对生态扰动的控制,依托围控施工、分时施工等方式减弱对自然环境的破坏,并设置生态缓冲带降低施工影响,防止对敏感区域出现二次损伤;第四,在设计完成后建立动态评估机制,根据监测结果适时调整工程细部结构,以增强工程的环境适应性生态兼容性,让工程在运行过程中保持生态友好特征并具备持续优化的能力。

某地开展河道治理时,由于多年冲刷导致岸坡不稳,当地既需要安全防护,又希望恢复沿河生态景观,形成兼具稳定性与自然性的河岸带,工程团队在前期调研中识别出多处重要水生植物带和鱼类洄游路径,明确生态保护需求,为后续方案奠定基础;在设计阶段采用柔性生态护坡、分段式缓坡和透水结构等方案,使工程结构与自然水流保持协调,并增设水生植物缓

冲区改善微生境,施工过程中采取分段围护、避开鱼类繁殖期作业,对保留的自然水草区设防保护,尽量缩小扰动范围。工程完成后原有栖息地得到保留,新增浅滩和水生植被带改善生境条件,岸坡稳定性提高,整体河段生态景观更具连续性,生态功能恢复速度明显加快,实现工程安全与生态功能的同步增强。

3.2 强化水生态系统修复,提升生态功能稳定性

水生态系统修复旨在恢复河湖的结构完整性和生态过程,需要按照生态系统演替规律和生态需求开展有序推进,并在修复全过程融入动态调控机制,以适应生态系统随外界变化不断调整的特性,从而让修复工作在不同水文条件与环境压力下保持持续有效^[3]。为增强修复成效,应建立清晰的系统修复路径:第一,依托生态诊断明确水体污染源、栖息地退化原因和水动力结构变化,形成修复目标并识别限制生态恢复的关键瓶颈,为修复策略提供基础依据;第二,根据诊断结果制定综合修复方案,包括水环境改善、底质优化、水生植被重建等措施,使修复行动更具针对性,并统筹短期成效与长期生态恢复需求;第三,在实施修复措施时遵循自然演替规律,构建多层次、多类型的生境结构,依托多样化生境增强系统韧性,使生态系统具备自我恢复能力;第四,在修复完成后持续开展生态监测,动态调整修复策略,确保整体生态功能维持稳定并让恢复成果能够长期巩固和逐步优化。

某湖泊因多年受周边开发影响,水质变差、栖息地破碎,当地政府提出以生态修复为核心改善整体环境的需求,期望湖泊恢复基本的水生态功能,项目启动前开展了系统化水生态诊断,确认主要问题为水草衰退、底泥劣化与生境单一,并评估湖泊自我恢复能力,修复方案围绕改善水动力、重构水生植被、优化浅滩结构等方面展开,实施过程中逐步恢复挺水植物带、构建鱼类繁殖区并优化底质环境,从而增强整体生态承载力。修复完成后的监测结果表明,浅水区出现多样化生境,鱼类活动范围扩大,水体透明度提高,生态系统呈现明显恢复趋势,湖泊功能逐步稳定,最终实现结构与功能的同步增强。

3.3 建立全生命周期管理体系,保障工程生态协调性

要保持水利工程长期生态协调性,就需要将生态保护贯穿工程全寿命,从规划到退役均形成一体化管理机制,并把生态目标自工程启动之初就纳入系统性约束框架,各阶段因而对生态过程保持较高敏感性与

响应性,为此,在规划阶段设置明确的生态底线和约束要求,将生态风险评估作为立项必备环节,同步开展生态水量、生态空间等关键要素预判;在建设阶段建立生态监管体系,对施工扰动、水质影响及生态敏感区保护进行全过程控制,并依托信息化监测及时调整施工措施,施工行为与生态需求得以保持协调;在工程运行阶段建立生态调度制度,依托水量管理、生态放水、河湖连通等措施维持生态功能,工程运行与自然节律更加一致并保障重要生态过程的连续性^[4]。工程后期及退役阶段持续开展评估,适时实施生态补偿或结构优化,强化全周期生态保障能力,工程生命周期各阶段实现有机衔接并不断优化生态表现。

某地区新建水库工程在立项时即提出确保下游生态稳定的管理目标,形成较为完整的全生命周期生态管理需求,成为当地水生态保护的重要示范,规划阶段设立生态流量底线并识别周边敏感区域,生态因素成为方案比选的重要依据,建设过程中设立生态监督岗,对施工弃渣、水体扰动等影响实行严格监管,建立突发生态事件应对流程,投入运行后实施生态调度,依托定期补水和维持下游水位梯度保持河道生态过程,下游生态系统维持基本完整性。工程运行几年后又进行了生态评估,对部分岸线开展修复补强,进一步增强系统韧性,最终该工程在防洪与供水功能发挥的同时,下游河段水生生物数量逐步恢复,生态系统稳定性明显提高,全生命周期管理的综合效益得到体现。

3.4 加强技术协同与管理优化,促进工程生态融合

在水利工程与生态保护共同推进的背景下,技术协同与管理优化是实现二者深度融合的关键,需要从组织协调、技术整合与制度优化等方面形成闭环,使各参与主体在统一框架下协同推进,并确保工程运行过程中生态目标和工程目标能够同步实现。为了构建有效协同体系,应遵循以下步骤:其一,在工程规划阶段建立多部门协作机制,共享生态、水文、工程等基础数据,提高决策一致性,并防止因信息不对称造成方案冲突,同时形成跨领域共识,为后续推进奠定基础;其二,在设计与实施阶段推进多领域技术融合,将生态修复、信息监测、工程结构优化等技术体系进行匹配与组合,使不同技术间形成互补关系,并增强整体工程的综合适应性;其三,在管理阶段完善跨部门协调制度,依托信息化平台实现生态与工程运行状态的实时共享,提高管理反应速度,让调度与治理更加精准;其四,构建长效管理机制,持续优化技术标

准和管理流程,使工程运行与生态需求保持一致,实现持续协同,并为后续工程积累可复制的经验^[5]。

某地区实施河道综合治理时,因涉及水利、环保、规划等多个部门,需要建立协同管理体系以兼顾防洪与生态需求,防止部门间重复建设与管理分散,项目启动后成立联合工作组,整合各部门的水文资料、生态调查结果与土地利用规划,为方案制定提供统一基础,减少信息断层,在建设阶段采用集成化技术体系,将生态河道设计、水质净化设施和智能监测系统共同应用,形成互补效果,增强整体治理能力。工程运行后依托信息平台共享实时水质、水位及生态监测数据,为各部门协同调度提供依据,使管理更加精细化,工程实施后河段生态功能得到改善,管理效率明显增强,展现出技术协同与管理优化带来的综合优势,并成为区域水生态治理模式创新的参考案例。

4 结束语

水利工程与生态环境协同发展是实现人与自然和谐共生的重要路径,未来水利工程建设将更加注重顺应自然规律,依托完善生态治理理念、创新工程模式和强化系统管理,使工程安全与生态健康共同增强。目前,流域综合治理、生态监测技术和智慧调控体系正在不断进步,水利工程的运行方式将更加精细化、生态化,能够主动适应环境变化并保持生态功能的连续性。同时,生态文明建设的深入推进也将促进多部门协同与社会广泛参与,为工程实践提供更加牢固的制度与技术支撑,也为构建可持续的水安全与生态格局夯实基础。

参考文献:

- [1] 李娜.生态水利工程建设对农业生态环境与经济效益的协同效应[J].山西农经,2025(10):126-128,179.
- [2] 马莉.水利工程绿色施工与生态环境保护的协同研究[J].清洗世界,2025,41(03):107-109.
- [3] 胡振鹏.生态适应性协同方法及其应用[J].长江流域资源与环境,2022,31(08):1712-1722.
- [4] 刘晗.农业水资源利用与生态环境保护协同发展的实践研究[J].皮革制作与环保科技,2021,02(22):81-83.
- [5] 徐浩东.水利工程中水环境生态治理防护技术研究[J].张江科技评论,2024(12):87-89.

地质测绘工程的发展特点及新技术运用研究

张曰广, 李 克

(山东数维规划设计有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 在基础设施建设以及资源开发持续有序推进的背景下, 地质测绘工程已成为针对自然资源调查、工程选址和灾害防治的关键技术依托, 其技术升级会直接对相关工作效率与质量造成影响。目前, 该领域处于从传统人工观测模式转为数字化、网络化、智能化阶段。本文首先对新时期地质测绘数据获取的技术需求进行了梳理, 再总结其在数据积累、生产流程和服务方式上的阶段性特征, 重点介绍了“3S”集成等多项新技术的应用路径与优势, 最后从技术、管理、人才和标准层面提出优化建议, 以期为促进地质测绘工程的发展提供参考。

关键词 地质测绘; 3S技术; 无人机; 三维激光扫描; 人工智能

中图分类号: P64

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.038

0 引言

地质测绘是以测绘科学理论与方法为基础, 综合获取并表达地表与近地地下地质体空间位置、几何形态及物性特征的应用技术体系, 是矿产资源勘查、能源开发、工程建设和地质灾害防治等工作的前置环节和基础支撑。我国地质测绘外业大多依靠传统光学仪器以及人工实地踏查, 数据采集效率受地形与交通条件的制约很明显, 成果形式大多是纸质图件与文字说明, 无法满足目前对高精度、多维度且快速更新的要求, 伴随卫星导航定位、遥感、地理信息系统以及信息通信技术急剧进步, 地质测绘作业逐步实现从“点线式”观测到“空天地一体化”综合感知的变迁, 数据生产由离散图幅进入连续数字底图阶段, 服务对象由单一行业拓展到国土空间规划、生态修复以及应急管理等多个领域。系统梳理地质测绘工程的发展特点, 深入分析新技术的工程应用方式及其潜在问题, 对于提升地质测绘现代化水平、服务国家能源资源安全与生态文明建设具有现实意义。

1 地质测绘数据获取的技术需求分析

地质测绘的首要任务是为地质解释与评价提供可靠空间数据基础。随着工程建设规模扩大、地质问题日趋复杂, 其数据获取环节呈现出多项新需求特征。对空间精度与分辨率的要求持续提高, 城市地下空间开发、重大工程选址等应用场景需要厘米级及以上精度的地形和构造资料, 以便支撑精细化计算与模拟; 观测范围及时间维度持续延伸, 区域资源调查、灾害

风险评价都离不开大范围连续的数据, 而且要借助重复观测实现变形与环境变化的动态监测; 作业环境的多样性愈发明显, 高海拔、高寒等特殊地带对设备的适应性以及作业安全要求更高, 传统地面测量无法兼顾效率与安全; 数据共享及综合利用的需求大幅增强, 不同部门、不同项目需借助统一基准与标准开展数据叠置和联动分析。为满足上述需求, 需引入更高效安全、自动化程度更高的观测技术, 并在数据组织、质量控制和多源融合方面形成系统解决方案。

2 地质测绘工程的发展特点

2.1 资源丰富

在多平台观测与长期积累的双重作用下, 地质测绘已实现从“数据匮乏”到“资源丰富”的转变。GNSS、航空摄影、无人机航测、激光扫描、物探与钻孔调查等多种手段协同运作, 让地形地貌、地层构造以及工程设施可在不同尺度与维度获取完整的空间信息; 数据库与信息系统建设不断推进, 零散的测绘成果被整合进统一的数字管理平台, 实现了多时相、多类别数据的集中保存与高效检索, 且外业数据能凭借网络与云计算实现实时回传, 大幅拉近内外业的时间间隔。丰富连续的数据既为三维地质建模、趋势分析预测提供了条件, 也为大数据和人工智能在地质领域的应用筑牢了基础。

2.2 数字化测绘阶段

在电子测距、计算机与“3S”技术广泛应用后, 地质测绘全面进入数字化阶段。外业观测逐渐将经

作者简介: 张曰广(1994-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 测绘工程。

仪、钢尺等传统测量工具替换为全站仪、GNSS 接收机和电子手簿,测量数据实现自动记录、即时校核;内业流程依托 CAD、GIS 和数字制图系统进行数据处理、图件编制以及成果的转换事宜,地质图件从纸质图幅过渡到可编辑的数字产品,数字地形模型与数字地质图的打造,让多比例尺、多专题的数据能在统一平台进行管理并增量更新,大幅提升了成果的一致性以及可扩展性。与传统手工制图相比,数字化测绘在精度控制、工作效率、成果共享和再利用方面优势突出,为后续的三维建模和智能分析提供了可靠的基础环境^[1]。

2.3 服务维度:从数据供给到决策支撑

传统地质测绘服务过去仅给出基础图件和文字说明,当下其成果多是以数据库、三维模型等形式嵌入业务流程里,采用多源数据空间分析及情景模拟,可为矿产勘查、工程比选、灾害分区等提供量化支持,并有边坡失稳模拟、成矿远景评价等典型应用,实现了从单一技术支撑到综合信息服务的转型,在空间治理中的作用愈发突出。

3 地质测绘新技术的主要运用

3.1 “3S”技术集成应用

GNSS、遥感和 GIS 综合应用构建了当前地质测绘技术体系的核心框架,GNSS 给出统一、高精度的空间基准,是实施控制网布设、工程放样与移动测量平台导航的关键举措;遥感借助多光谱、高光谱以及雷达传感器,从空中以及空间平台获取大面积地表资讯,实现对地形地貌、岩性组合及构造线索的快速辨认与变化监测;GIS 来承担多源地学数据存储、管理、分析以及可视化的相关任务,可执行空间叠加、缓冲区分析、网络分析以及三维场景构建等事宜。通过“3S”技术的深度集成,可以形成从数据获取、处理到成果表达与分析的一体化技术链条,使地质测绘在区域调查、矿产勘查和灾害风险评估中的支撑能力明显增强^[2]。

3.2 虚拟现实技术在地质测绘成果可视化中的应用

虚拟现实技术依托三维建模与人机交互手段,将复杂的地质体结构和地貌景观以沉浸式方式呈现出来。把数字地形模型、三维地质模型与高分辨率影像数据完成融合后,可构建逼真的虚拟地质场景,用户可在虚拟环境里面漫游、旋转和剖切,直接观测断裂展布、褶皱的实际形态、矿体空间位置与工程设施的相互联系,与传统二维图件相比,这种可视化途径更有益于复杂地质构造的理解与沟通,利于多专业团队在相同空间语境里开展方案研讨。同时,虚拟现实还可用于模拟工程施工过程和灾害演化情景,实现“所见即所得”

的风险识别和应急演练,在地质教学和科普宣传方面也具有较高的应用价值。

3.3 地面三维激光扫描技术的应用与改进

地面三维激光扫描技术通过高频率发射与接收激光脉冲,获取目标表面密集点云,可精细刻画地物的几何形态及纹理特征。此技术在露头精准测量、滑坡与边坡稳定性评价、地下巷道形态收集以及地质遗迹数字化保护等方面表现出明显优势。与传统测量方法相比,其具备的非接触、高精度和高效率特性,尤其适合危险或难以抵达的作业环境。为适应野外复杂的周遭条件,目前在工程实践中渐渐加强对设备轻量化、防尘防水性能及电源续航的改进工作;在数据处理层面,点云滤波、分类、特征线提取和网格重建等算法的优化,有助于提升自动化程度并缩短处理周期。通过与无人机航测、地基雷达等技术的联合应用,可实现多尺度三维数据的互补与融合^[3]。

3.4 地质大数据与人工智能技术

多源观测与长时间序列监测使地质测绘数据呈体量大、类型多等大数据特征。大数据平台为存储管理与计算提供支撑。人工智能在模式识别、预测分析里优势十分显著,可用于遥感解译、成矿预测、灾害风险分区等实例。随着算法与算力发展,AI 将融入更多环节,推动地质测绘从“经验驱动”向“数据驱动”转变。

3.5 高分辨率卫星遥感技术的应用与创新

高分辨率卫星遥感通过获取亚米级空间分辨率的全色和多光谱影像,使区域尺度的精细地质解译成为可能。在实施资源调查期间,可以采用光谱特征开展岩性分带、蚀变信息识别以及构造线的提取;在地质灾害监测的工作当中,采用时间序列的光学或雷达影像展开分析,可辨认地表发生的变形、滑坡体的扩张和地裂缝的拓展等特征;在生态环境评价进程中,高分遥感为植被覆盖情况、水体分布以及土地利用类型的动态监测提供了数据支撑。伴随国产高分卫星系统与商业卫星星座的完备,遥感数据获取的时效性、可及性得到大幅提升。针对地质问题的特殊性,需要在光谱解译、形变反演和多源数据融合等方面持续开展方法创新,使卫星遥感更好地服务于地质测绘工程^[4]。

3.6 无人机倾斜摄影测量技术

无人机倾斜摄影通过搭载多镜头相机,从不同视角同步获取地物影像,结合 POS 系统提供的外方位元素,可实现高精度实景三维重建。这项技术能反映地形的高低起伏,又能把建筑物和斜坡的立面信息完整记录,适合在露天矿山、地质灾害隐患点、城市地质

环境和工程施工现场开展精细测图。与传统航测对比,无人机具备起降便捷、低空飞行以及数据获取精度高的特性,尤其适用于中小区域的快速测绘及动态更新。需要注意的是,无人机作业易受天气、空域和操作规范等因素影响,数据体量较大,对后续存储与处理提出更高要求,工程应用中往往需与地面控制测量和激光扫描等技术联合使用,以保证整体精度与完整性。

3.7 智能测绘装备与平台

在装备端,测绘仪器逐渐向自动化和智能化方向升级。带有自动目标识别和跟踪功能的智能全站仪,可在复杂工地环境中持续完成高频观测;装有多传感器的移动测量车、水上无人测量船与综合物探平台,实现了道路、河道及地下管线等多场景、多要素的快速测量工作,借助信息系统的项目管理平台可把任务分解、人员与设备调度、过程质检和成果验收等环节纳入一个统一框架,形成从外业采集到内业生产全步骤的可追溯线路。通过对仪器状态、作业轨迹和数据质量的实时监控,可以及时发现异常并进行调整,提高项目管理的透明度和成果交付的可靠性^[5]。

4 测绘新技术在地质测绘工程中应用的优化策略

4.1 加强测绘新技术的集成应用研究

不同测绘技术各有优势和适用边界,单一手段难以应对复杂多变的地质环境。应把解决实际地质问题作为导向,开展运用多平台、多手段的协同观测方案设计及评估研究,依托构建“天—空—地—地下”一体化观测体系,实现卫星遥感、航空摄影、无人机航测、地面测量、物探与钻探等技术的空间校准和数据耦合,基于统一基准与数据标准完成多源信息的综合分析。进一步结合三维建模和数值模拟方法,可针对矿山开采、重大工程建设和地质灾害防治建立定量评价与预测模型,使测绘成果更加贴近工程需求。

4.2 提高地质工程测绘的管理水平

测绘新技术的大量应用使地质工程项目的组织管理更加复杂,既需要保障技术路线的合理性,也要控制质量和成本。需根据项目的规模以及技术特点优化组织结构,界定责任分配和信息传递脉络,形成跨专业合作体系。在项目管理方面,可引入现代项目管理举措和信息化工具,对进度、经费和质量实施全流程监控,并针对关键技术环节设置节点验收及风险评估;在质量把控方面,应制定覆盖数据采集、处理和成果编制事宜的质量标准与检验方法,完备仪器检校、现场复测以及成果抽样检查制度,运用内部审查与外部评估相互联合的方式,保障成果既真实又一致^[6]。

4.3 人才培养体系构建

推广新技术离不开匹配的人才队伍作支撑,高校以及科研院所应凭借传统专业基础,对遥感、地理信息及计算机等课程进行强化,促进学科交叉与实践联合,培养地质与信息技术复合型的专业人才;企业和主管部门需构建持续培训体系,按岗位设分层培训内容,同时通过多种途径搭建人才成长平台,打造结构合理的专业梯队。

4.4 建立健全测绘新技术的应用标准规范

在新技术加速迭代的过程中,如果缺乏统一完备的标准规范体系,容易出现技术路线分散、数据格式多样和质量难以比对等问题,不利于成果共享和工程推广。应结合地质测绘这个行业的特点,系统梳理各类技术在数据采集、处理、成果表达及质量验证各步骤的关键指标,制定与之契合的技术准则和作业指引,就坐标基准、数据精度、元数据内容和成果交付形式等作出清晰界定。同时,要通过行业试点和项目实践对标准执行效果进行评估,结合反馈不断修订完善,使标准体系既具有前瞻性,又具备可操作性,逐步推动新技术应用的规范化、规模化和产业化。

5 结束语

在新技术的推动下,地质测绘逐渐从传统人工观测朝着数字化、网络化、智能化深度过渡,呈现的特点有数据丰裕、流程数字化、服务维度拓展。相关新技术实现了空间认知及决策支撑能力的质量升级,但这个领域依旧面临技术集合不够、标准体系不完善、复合型人才稀少等挑战。未来需聚焦技术协同、管理优化、人才培养与标准建设,助力其更好地服务国家相关战略需求。

参考文献:

- [1] 范超杰,张贺,巴楠,等.基于三维测绘技术的八字桥数字化保护应用研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(07):47-49.
- [2] 李贵柱.测绘新技术在测绘工程测量中的应用探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(23):181-183.
- [3] 刘晓金,宫帅良.无人机测绘技术在海岸带矿产地质沉降监测中的应用与展望[J].中国矿业,2024,33(S1):215-218.
- [4] 王国鹏.测绘地理信息技术在地质勘查工作中的应用发展探讨[J].新疆有色金属,2023,46(04):21-22.
- [5] 肖云龙,刘新娟.水文地质在矿山地质勘查中的重要性分析[J].世界有色金属,2023(14):116-118.
- [6] 郭瑞,王为.探讨测绘新技术在地质测绘工程中的应用[J].世界有色金属,2023(19):223-225.

基于水文地质勘察的沧州地面沉降监测方法与成因探析

杨宝安

(石家庄七零二地质勘查有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘要 本文基于区域水文地质勘察成果与地面沉降长期监测数据, 对地面沉降的空间分布特征、累积演化规律及其成因机制进行了系统分析。在识别现有监测与风险判定中存在问题的基础上, 结合地下水开采条件与工程建设需求, 提出了以监测优化、水资源调控和工程适应性控制为核心的地面沉降控制措施, 以期为平原型开发区地面沉降风险管理提供技术参考。

关键词 水文地质; 地面沉降; 勘察措施; 监测技术

中图分类号: P64; TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.039

0 引言

地面沉降作为华北平原地区最具代表性的缓变型地质灾害之一, 其发生发展过程具有隐蔽性强、累积性显著、恢复难度大的特点, 长期以来对区域土地利用安全、城市基础设施稳定性以及重大工程建设形成潜在约束^[1]。在资源型地区, 长期采矿、排水疏干及地表工程建设等因素不断扰动原有水文地质条件, 导致含水介质应力状态与孔隙结构发生改变, 进而诱发不同程度的地面沉降现象。随着矿业开发方式由地下开采向露天开采转变, 地表剥离规模扩大、排水方式集中化, 使地下水位波动幅度加大, 地表—地下水耦合关系更加复杂, 沉降的形成机理呈现出多因素叠加、时空差异显著的特点。传统地面沉降研究多侧重形变结果描述, 往往忽视水文地质条件在沉降演化中的主控作用, 难以准确解释沉降分布差异及其发展趋势。

1 项目概述

1.1 项目背景

沧州高新技术产业开发区位于沧州市区西北部, 规划范围东至迎宾大道一带, 西至京台高速西侧, 南至永济路与广顺路, 北至朔黄铁路北侧, 规划面积约 25.99 平方千米。评估区域位于河北平原东部冲积平原亚区范围之内, 其地貌单元主要囊括了微高地、泛滥坡平地以及泛滥洼地等类型。整体地势呈现出平坦开阔的状态, 地面高程一般处于 6.7 ~ 7.8 米之间, 第四系沉积的厚度达到了 450 ~ 490 米。沉积物主要是

以粉质黏土、粉砂以及细砂互层的形式存在, 有典型的多层含水结构方面的特征。

1.2 区域水文地质分析

地下水的类型属于第四系松散岩类孔隙水, 它可划分成浅层和深层这两个主要系统, 浅层地下水的埋藏深度大概在 2 ~ 4 米之间, 其补给条件相对而言比较好, 深层地下水的埋藏深度大约是 60 ~ 73 米, 它是区域工业以及市政供水的关键水源。由于受到长期超量开采的影响, 深层地下水的水位持续下降, 区域的水文地质条件总体呈现出补给不足、调节能力较弱的状况, 对地面沉降的敏感性比较高。在上述地质背景条件下, 评估区地下水系统呈现出典型的第四系松散层多含水组结构特征, 不同含水层之间既存在一定的水力联系, 又在隔水层作用下保持相对独立的水动力响应特性。浅层孔隙水主要受大气降水、地表径流及人工回灌影响, 水位变化具有明显的季节性与短周期波动特征, 而深层承压含水层则以区域侧向补给为主, 对开采强度变化极为敏感。

2 勘察方法

2.1 监测方法与技术路线

评估区地面沉降监测主要依靠区域地面沉降监测网络, 运用水准测量作为主要手段, 并结合历史监测资料来开展时序对比分析, 通过构建稳定的基准点体系, 对沉降量以及沉降速率进行长期跟踪, 较为准确地呈现地面沉降的空间分布格局及其变化趋势。

作者简介: 杨宝安 (1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文地质。

2.2 累计沉降量分布特征

依据2015年沧州市地面沉降监测所取得的成果,在评估区域当中,累计地面沉降量整体处于900~1800毫米的范围之内。不过在局部的一些区域,沉降量超过了1800毫米,观察累计沉降量等值线的分布状况,可以发现沉降中心呈现出从城区朝着外围逐渐变弱的态势,评估区域处于沉降漏斗的影响范围之内,属于沉降相对比较突出的区域。这样的分布特点和区域深层地下水集中开采的区域高度契合,体现出较大的人为控制特点。

2.3 沉降速率变化特征

2015年,评估区域的年均地面沉降速率大概是5~12毫米每年,整体而言处于中低速沉降的区域范围之内。然而,在局部区域,沉降速率相对来说是偏高的,把沉降速率分区图结合起来进行观察可发现,沉降速率在空间方面的变化相对比较平缓,并没有出现极端突变的区域,这种情况说明地面沉降主要是以持续性压密沉降为主,并非是由工程扰动所引发的局部沉降。

3 沧州地面沉降监测的问题及成因

3.1 监测结果显示沉降长期累积显著,但短期速率对风险识别的指示性不足

从当前已有的监测成果情况分析,沧州市地面沉降呈现出典型的“低速率、强累积”特性,根据《沧州市地面沉降监测网络运行与监测报告》可知,在评估区域内。1970年至2015年期间累计沉降量已经达到了900~1800毫米,然而在2015年时年均沉降速率仅仅只有5~12毫米每年。从速率指标方面进行观察,其数值处于《地质灾害危险性评估规范》中所规定的“弱—中等发育”区间范围,但是累计沉降量却已明显超过了强发育判定阈值^[2]。这就说明仅仅依靠短期沉降速率是很难全面地反映出地面沉降的真实风险水平的。具体实施阶段,运用公式 $H=H_0+V \times Y$ 来对沉降量展开外推推算,到2021年底的时候评估区域累计沉降量预计达到960~1830毫米,沉降效应呈现出持续放大的态势。由此可看出,当前的监测体系在风险表达方面更容易弱化长期累积效应,对于规划区中远期工程安全的指示能力存在着一定程度的不足,地面沉降发育程度分级与评估区判定结果对比如表1所示。

评估区域在过去5年期间,平均地面沉降速率处于5~12毫米每年的范围。仅从速率指标方面来判断,该数值处于弱发育和中等发育的区间之内,尚未达到强发育所对应的速率阈值标准。然而按照公式推算到2021年年底时,评估区域累计的地面沉降量已经达到了

960~1830毫米,较大超过了《地质灾害危险性评估规范》中强发育等级所规定的800毫米累计沉降量控制数值^[3]。这一结果显示出,评估区域地面沉降有典型的“低速率、强累积”特性,其发育程度不可仅仅依据短期的沉降速率来进行判定,而应当以长期的累计变形效应作为主要的控制指标,综合速率以及累计沉降量这两项指标来进行判定,评估区域地面沉降的发育程度应当确定为强发育。

表1 地面沉降发育程度分级与评估区判定结果对比

发育特征	发育程度	近5年平均沉降速率 (mm/a)	累计沉降量 (mm)
分级标准	强发育	≥ 30	≥ 800
分级标准	中等发育	10~30	300~800
分级标准	弱发育	≤ 10	≤ 300
评估区现状	—	5~12	960~1830
判定结果	强发育	—	—

3.2 沉降空间分布与地下水开采区高度重合,反映人为扰动的主导作用

依据2015年累计沉降量分布图以及沉降速率分区图可发现,沧州市地面沉降中心呈现出较为突出的空间集聚特性。评估区处于区域沉降漏斗的影响范围之内,累计沉降量一般处在900~1800毫米的区间,局部地区接近甚至超过1800毫米。沉降等值线整体呈现出椭圆状分布状态,其形态和深层地下水集中开采区高度契合,而与地貌起伏或者构造分区的相关性相对来说比较弱。这样的特征说明,评估区地面沉降并非由单一的自然压密过程所主导,而是在区域尺度上受到人为抽取地下水活动的控制^[4]。尽管评估区在2015年沉降速率仅仅是5~12毫米每年,还没有表现为高速沉降区,不过在长期深层地下水水位下降的背景之下,体现出沉降中心位置稳定、沉降量持续积累的现状。

3.3 水文地质结构条件与地下水超采耦合,是沉降持续发育的根本成因

对水文地质条件展开分析可知,评估区第四系沉积厚度处于450~490米之间,含水层与黏性土层呈现出多层交互分布的状况。深层地下水的埋深达到了60~73米,整体的水文地质条件欠佳,在长期超量开采深层地下水这一行为的作用之下,地下水水位持续下降,使得原本由孔隙水承担的上覆荷载逐渐转移至土骨架,岩土体的有效应力有所增加。就砂层来说,补给恢复后其体积有一定的可逆性,而对于广泛分布的黏性土

层来讲,其孔隙压缩过程有着十分突出的不可逆特性,释水固结一旦发生便很难恢复,最终形成永久性的地面沉降。正是在这种“多层含水系统—黏性土压密—长期抽采”的耦合作用当中,即便沉降速率在某些阶段不高,评估区的地面沉降依然呈现出持续发育且难以自然消减的特征。

4 地面沉降控制措施

4.1 基于水文地质模型构建沉降评价体系

在地面沉降防控工作中,仅依赖沉降监测数据进行结果性判断,往往难以及时识别潜在风险源头,而以水文地质模型为核心构建沉降评价体系,则能够从机理层面提升评价的前瞻性与科学性。针对评估区第四系松散岩类孔隙水多层赋存、深浅含水层水力联系复杂的特点,应在系统水文地质勘查基础上,构建反映含水层结构、补给—径流—排泄条件及开采扰动特征的水文地质概念模型,并进一步引入地下水位动态、含水层压缩性参数等要素,形成服务于沉降分析的量化模型框架。在评价指标体系构建中,应以模型输出的水位变化幅度、垂向水力梯度演化及含水层压缩响应作为基础约束,将地面沉降监测成果嵌入模型进行综合判读。另外,在数据分析阶段,应把累计沉降量作为主控指标,与年均沉降速率一同纳入评估体系,重点关注累计沉降量接近或超过 800 毫米、1 000 毫米等关键阈值的区域。结合已有推算结果,评估区至 2021 年底累计沉降量已达 960 ~ 1 830 毫米,这类区域应优先列为重点管控单元,防止因沉降速率阶段性偏低而低估长期工程风险。

4.2 以地下水开采强度控制为核心的水资源结构优化措施

监测资料以及沉降分布特征显示,评估区地面沉降的空间格局和深层地下水集中开采区极为相符,控制沉降发展的关键之处在于降低深层地下水系统持续的应力释放。在实施路径方面,要结合开发区产业结构以及用水需求,对现有的用水结构展开系统调整,逐渐减少对第四系深层地下水的依赖。展开来说,可以依靠引入地表水、再生水以及区域调配水源,替代部分工业和市政深层地下水取水量,同时对现有的取水井实施分区、分层、分时管理,防止在局部区域形成新的水位漏斗,并且要结合地下水水位动态监测成果,建立地下水开采量与地面沉降响应的联动机制,当监测到水位持续下降或者沉降速率出现异常变化时,及时启动限采或者减采措施,从源头削弱黏性土层不可逆压密的持续发展态势。

4.3 提升建设工程对不均匀沉降的适应与防控能力

鉴于地面沉降在短期内无法彻底消除这一现实状况,工程适应性控制成为降低沉降危害的关键补充方式,评估区的规划用地类型主要为工业、居住以及市政设施。在建设过程中需充分考量区域沉降背景,于场地处理与结构设计阶段预先留出沉降适应空间,具体的操作办法如下:在场地平整阶段适度抬高建设标高或者预留沉降余量,以此减少长期沉降对室外高程以及排水系统的影响;在结构设计方面,借助提升基础刚度、采用整体性较强的基础形式以及强化上部结构整体性,提高建筑物抵御不均匀沉降的能力;对于关键的市政管线和道路工程,应采用柔性连接或者可调节结构形式,降低沉降差异对使用功能的影响^[5]。

5 结束语

在城镇化与产业集聚持续推进的背景下,地面沉降已不再是单纯的地质现象,而是水资源利用方式、工程建设模式与区域地质条件共同作用的综合结果。通过对沧州高新技术产业开发区地面沉降问题的系统分析可以看出,平原区沉降风险的本质并不体现在短期变形幅度上,而更多表现为长期累积效应与工程适应能力之间的结构性矛盾。基于水文地质条件开展沉降监测与成因分析,有助于突破传统以速率为主的风险认知框架,使地面沉降问题在规划、建设与运行阶段得到前移式管控。将监测数据、地下水调控与工程技术手段协同纳入管理体系,不仅是降低沉降危害的现实路径,也为开发区实现安全开发与可持续利用提供了地质环境层面的支撑。

参考文献:

- [1] 田苗壮,赵龙,崔文君,等.南水北调背景下地下水位上升对地面沉降控制与影响:以北京潮白河地下水系统为例[J].中国地质,2023,50(03):872-886.
- [2] 邵景力,白国营,刘翠珠,等.我国地下水管理面临的问题与对策:兼谈地下水“双控”管理[J].水文地质工程地质,2023,50(05):1-9.
- [3] 韩晔,郑玉萍,胡海博,等.多孔非稳定流承压含水层抽水试验典型案例探讨[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(S01):175-180.
- [4] 蔡德世,郭文涛.新形势下水文地质因素对于地质灾害的影响研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(02):180-183.
- [5] 詹景祥,谢荣安,陈建东,等.高精度地面沉降协同监测方法[J].中国科技成果,2021(15):20.

河道行洪通道大中型水闸合理间距设计及行洪能力保障研究

陈 龙

(山东新汇建设集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 对河道行洪通道大中型水闸合理间距进行设计,是保障河道行洪顺畅、提升防洪安全水准的关键。本文以河道行洪通道水文水力特性与大中型水闸功能定位为基础,全面剖析水闸布局对行洪的作用机制,建立包含核心原则、关键因子、计算模型的水闸合理间距设计体系,构建保障行洪能力的工程手段与调度举措。通过引入水闸间距与行洪能力的耦合计算模型,结合典型河道实例对设计方法的科学性与实用性加以验证,合理的水闸间距可使河道行洪流量提升15%至20%,让壅水高度维持在设计要求的限值范围内。该设计体系及保障策略旨在为河道行洪通道水闸布局优化和防洪安全保障提供理论借鉴。

关键词 河道行洪通道; 大中型水闸; 合理间距设计; 行洪能力保障

中图分类号: TV66

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.040

0 引言

大中型水闸作为河道行洪通道的重要控制工程,承担着洪水调度、水量调节、安全防护等多重功能,其间距布局的合理性直接影响水流形态、行洪速度与壅水程度。当前部分河道水闸布局存在间距过密导致水流壅塞、过疏导致调控失效等问题,引发行洪能力下降、洪涝风险加剧等连锁反应。基于此,本文深入剖析河道行洪通道与水闸基础特性,探索水闸合理间距设计方法,构建行洪能力保障体系,为河道防洪工程优化升级与安全运行提供技术支撑。

1 河道行洪通道与大中型水闸基础特性分析

1.1 河道行洪通道水文水力特性

河道行洪通道的水文水力特性由流域气候、地形地貌、地质条件与河道形态共同决定,直接影响行洪过程的水流状态与能量传递。平原河道行洪通道多呈现宽浅型断面,河床坡度平缓(通常在1%~5%之间),水流速度分布均匀,洪水过程具有峰高量大、历时漫长的特征,洪峰流量往往是平水期流量的数十倍甚至上百倍,悬移质泥沙淤积是影响河道断面形态与行洪能力的主要因素。山区河道行洪通道多为窄深型断面,河床坡度陡峭(可达10%~30%),水流速度快、冲击力大,洪水过程具有暴涨暴落的特点,洪峰历时短但峰值流量大,河床冲刷与砾石推移运动对行洪通

道稳定性影响显著^[1]。不同类型河道的水文水力参数差异可通过图1更直观地体现,其核心指标(河床坡度、洪峰流量倍数、水位一流量敏感系数等)的对比,进一步明确了平原与山区河道行洪特性的分异特征。

1.2 大中型水闸功能定位与核心技术参数

大中型水闸在河道行洪通道中承担着多重核心功能,其功能定位需与流域防洪规划、水资源配置目标相契合。水闸核心技术参数直接决定了其功能实现效果,设计流量需满足河道行洪能力与水资源调配需求,通常按百年一遇或千年一遇洪水标准确定,大中型水闸设计流量多在1 000~10 000 m³/s之间。闸孔尺寸与数量需根据设计流量、河道断面形态与水流速度综合确定,闸孔宽度一般为8~16 m,高度为5~10 m,确保过流能力与结构稳定性。启闭能力参数包括启闭设备功率、启闭速度与调节精度,大中型水闸多采用电动卷扬式启闭机,启闭速度控制在0.5~1.0 m/min,调节精度误差不超过5%,保障流量调控的精准性。抗冲抗渗性能参数要求闸基渗透系数不大于1×10⁻⁶ cm/s,闸体抗冲流速不低于3 m/s,抵御水流冲刷与渗透破坏。

1.3 水闸布局对河道行洪的影响机制

水闸布局通过改变河道水流边界条件与水力特性,直接影响行洪通道的行洪效率与安全水平。水闸间距过密时,相邻水闸之间的水流相互干扰,上游水闸下泄水流尚未充分扩散便遭遇下游水闸阻挡,形成叠加

作者简介: 陈龙(1992-),男,本科,工程师,研究方向: 水利水电工程设计。

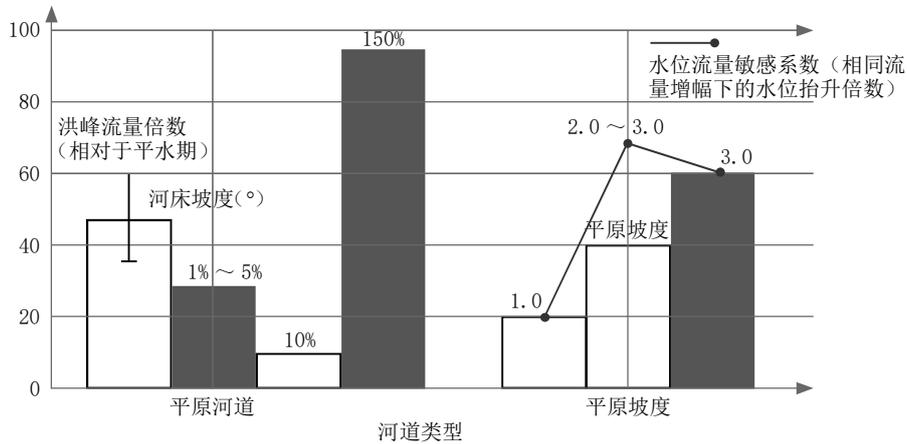


图 1 平原河道与山区河道核心水文水力参数差异

壅水效应，导致河道水位异常抬升，超出两岸堤防设计高程，增加漫堤风险。密集布局的水闸会分割行洪通道，使水流呈现分段壅塞状态，行洪阻力增大，行洪历时延长，降低洪水下泄效率，导致流域内洪水总量累积。水闸间距过疏时，单座水闸控制范围过大，无法实现对行洪过程的精细化调控，部分河段因缺乏有效控制节点，水流速度过快引发河床冲刷，或流速过慢导致泥沙淤积，破坏河道行洪断面形态^[2]。水闸布局与河道弯道、支流汇入口等关键节点的相对位置也会影响行洪效果，水闸设置在弯道凹岸易受水流冲击导致结构损坏，设置在支流汇入口上游易造成支流洪水倒灌，这些影响机制为水闸合理间距设计提供了重要理论支撑。

2 大中型水闸合理间距设计方法研究

2.1 影响水闸合理间距的关键因素

河道水文特征是影响水闸合理间距的核心因素，设计洪峰流量决定水闸过流能力需求，流量越大，单座水闸控制范围需相应缩小，间距应适当加密；水闸核心技术参数对间距设计具有直接约束作用，设计流量大、调控精度高的水闸控制范围更广，间距可适当增大；反之，技术参数较低的水闸需减小间距以保障调控效果^[3]。两岸防洪标准与堤防工程条件也影响间距设计，防洪标准高、堤防坚固的河道可适当扩大水闸间距；防洪标准低、堤防薄弱的河道需加密间距，通过精细化调控降低壅水压力。

2.2 水闸合理间距计算模型与优化方法

基于河道水力平衡原理与行洪安全约束，构建大中型水闸合理间距计算模型，综合考虑设计流量、允许壅水高度、河道平均流速、水闸过流能力等关键参数，模型公式如下：

$$L = \frac{K Q_d T}{v H_{hollow} B} \quad (1)$$

式(1)中， L 为水闸合理间距(单位：m)； K 为安全系数(取值范围1.2~1.5，根据河道重要性与洪水风险等级确定，重要防洪河道取高值)； Q_d 为河道设计洪峰流量(单位： m^3/s)； T 为设计洪水历时(单位：h)； v 为河道允许平均行洪流速(单位：m/s，根据河床质组成确定，沙质河床取1.0~1.5 m/s，岩石河床取2.0~3.0 m/s)； H_{hollow} 为允许壅水高度(单位：m，不超过两岸堤防设计高程与河道正常水位差值的30%)； B 为河道平均行洪宽度(单位：m)。

以行洪能力最大化、壅水高度最小化、工程成本最低化为优化目标，采用遗传算法对间距方案进行多目标优化，筛选出兼顾安全、效率与经济的最优方案。以某平原河道为例，设计洪峰流量5 000 m^3/s ，允许壅水高度1.2 m，河道平均行洪宽度200 m，允许平均行洪流速1.2 m/s，安全系数取1.3，设计洪水历时72 h，代入公式计算得到合理间距为1 875 m，经数值模拟验证，该间距下河道壅水高度控制在0.9 m，行洪历时满足设计要求，验证了模型的科学性。前述平原河道实例的合理间距参数、不同间距下的流态差异，以及从间距布局到行洪保障的完整逻辑，可通过图2直观呈现。

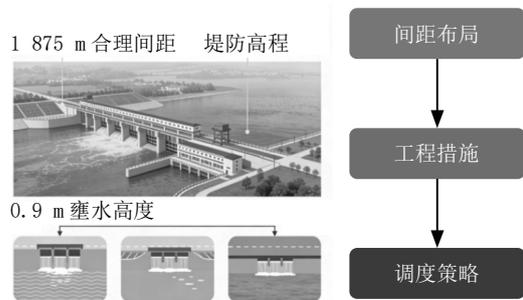


图 2 水闸合理间距工程示意及行洪能力保障流程

3 河道行洪能力保障体系构建

3.1 行洪能力保障的核心目标与评价标准

行洪能力保障的核心目标是确保河道行洪通道在设计洪水条件下,能够在规定时间内安全下泄洪水,不发生漫堤、溃堤等洪涝灾害,同时保障水闸结构安全与行洪过程稳定。具体目标包括:设计洪水位河道行洪流量达到设计标准,无显著行洪阻滞;河道壅水高度不超过允许限值,两岸堤防处于安全运行状态;行洪过程中水流形态平稳,无剧烈冲刷、淤积或回流现象;水闸调控响应及时,能够根据洪水过程动态调整运行状态^[4]。行洪能力评价标准围绕核心目标构建多维度指标体系,行洪流量达标率要求设计洪水位实际行洪流量与设计流量的比值不低于95%;壅水高度控制标准要求最大壅水高度不超过允许壅水高度的1.1倍;行洪历时标准要求设计洪水位流域上游至下游出口的下泄时间不超过设计行洪历时;水流稳定性标准要求河道断面平均流速变异系数不超过0.3,无局部流速超出抗冲限值的区域;水闸调控精度标准要求水闸实际下泄流量与设计调控流量的偏差不超过5%。

3.2 基于合理间距的行洪能力工程保障措施

以水闸合理间距为基础,通过工程技术措施优化行洪通道条件,提升行洪能力。河道断面整治工程针对水闸控制河段的淤积与冲刷问题,采用机械疏浚与生态护岸相结合的方式,清理河道淤积泥沙,恢复行洪断面面积,平原河道行洪断面面积需维持在设计标准的90%以上。对水闸上下游影响河段的河床进行固化处理,采用浆砌石、混凝土预制块等抗冲材料铺设护底与护岸,增强河床抗冲能力,避免水流冲刷改变河道断面形态。配套建筑物协同优化工程要求水闸与两岸堤防、支流节制闸、泵站等建筑物形成协同体系,堤防工程需与水闸间距布局相匹配,在水闸控制河段适当加高加固堤防,提升壅水承载能力;支流节制闸需与干流水闸联动,避免支流洪水对干流行洪造成干扰。

3.3 水闸运行调度与行洪能力协同保障策略

设立基于洪水预报预警的动态调度模式,归并气象、水文、水利工程等多源监测数据,构建流域洪水预报的模型,提前24~72h预估洪水过程、洪峰流量及到达时间,以预报结果为依据制定分级调度方案,将洪水分成一般洪水、较大洪水、特大洪水三个等级,对应各不相同的水闸开启关闭样式与间距调控举措。处于一般洪水期时采用常规调度模式,按照设计流量平稳下泄;针对较大洪水期,采用错峰调度模式,通过调整相邻水闸开启与关闭的先后顺序,防止洪峰叠

加碰头;特大洪水泛滥期采用应急调度模式,把全部水闸都开启,最大限度增强泄洪能力,构建水闸群协同调度体系,利用物联网、大数据跟人工智能的技术,实现多座水闸的集中把控与协同运转,实时监测各水闸上下游水位、流量等方面的水力参数。采用智能算法优化各个水闸的开启关闭幅度,保证水流的状态平稳无波动,实现行洪效率的最大化目标。增强运行维护以及应急管理力度,设定水闸定期检测及维护的制度,每年汛前对水闸的结构、启闭设备、监测系统实施全面检修工作,并将老化部件换掉,保证设备实现正常运行^[5],拟定洪水应急处置预案,明确不同洪水等级情形中的应急响应流程、人员职责及处置手段,按照一定周期开展应急演练,提升应对极端洪水时的快速反应水平,构建行洪能力动态监测与评估体系,借助布置在河道与水闸的传感器实时采集行洪工作数据,按规定周期对行洪能力评估,依照评估结果调整运行调度策略和工程保障相关措施,实现行洪能力的长期维持。

4 结束语

对河道行洪通道大中型水闸合理间距进行设计,是保障行洪能力、防范洪涝灾害的关键技术部分,其设计质量直接关系到流域防洪安全和社会经济的稳定。本文对河道行洪通道、水闸基础特性进行系统分析,探究水闸布局对行洪的影响机理,构建含有核心原则、关键参数、计算模型的合理间距设计模式,提出基于工程手段与运行调度的行洪能力保障办法。构建的水闸合理间距计算模型,为间距设计提供了量化工具。以实例验证,该设计方法以及保障体系具有较高的科学性与实用性,已在部分流域的河道防洪工程中试点应用,可明显增强河道行洪能力以及防洪安全系数。

参考文献:

- [1] 黄杨华.周宁县城区高水高排项目河道整治技术[J].湖南水利水电,2022(01):93-95,98.
- [2] 卫春仲.芹田水闸迁建工程优化设计对策研究[J].陕西水利,2023(06):141-143.
- [3] 周淑娟,郭朔彤.水闸交通桥安全加固技术方案应用[J].河南科技,2021,40(19):62-65.
- [4] 陈艳.改进Apriori算法的行蓄洪区水闸控制方法[J].水利技术监督,2023(08):28-30,71.
- [5] 冯博.渭河小量级洪水条件下华州区三座挡水闸工程运行管理的思考[J].陕西水利,2020(12):62-64.

新型电化学储能电站火灾风险特性与初期应急处置流程研究

袁福江

(浙江道宇安环科技有限公司, 浙江 杭州 310022)

摘要 本文针对规模化电化学储能电站快速发展伴随的火灾安全风险, 系统分析了其火灾风险特性。首先梳理了储能电站的基本构成与主要电池类型, 重点阐述了锂离子电池热失控的诱因及连锁反应机理; 其次深入剖析了储能电站火灾的典型特性: 隐蔽性、突发性、爆炸性、复燃性、毒害性与复杂性。针对这些特性, 构建了一套以“早期预警、快速抑制、防止蔓延”为核心的初期应急处置流程, 强调了“P. I. E. R.”(隔离、抑制、降温、评估与处置)原则在实战中的应用; 最后对未来技术与管理方向进行了展望, 以期提升电化学储能电站的安全水平与应急响应能力提供参考。

关键词 电化学储能; 锂离子电池; 火灾风险; 热失控; 应急处置

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.041

0 引言

在全球能源结构向清洁化、低碳化转型的背景下, 以风电、光伏为代表的可再生能源不断发展。然而, 在产业繁荣的背后, 安全问题日益凸显, 其中火灾风险尤为突出。国内外已发生多起电化学储能电站火灾爆炸事故。例如: 2021 年北京丰台储能电站事故、2023 年甘肃省民勤县某磷酸铁锂储能电站火灾事故等, 深刻揭示了电化学储能, 特别是锂离子电池, 在特定故障条件下可能引发难以控制的热失控火灾, 其破坏力远超传统火灾。

与常规电力设施或建筑物火灾相比, 电化学储能电站火灾在物质燃烧特性、发展演化机理及灾害后果上均表现出显著的独特性与极高的危险性。电池模组或系统内部积聚的化学能瞬间释放, 可能导致爆炸、喷射火、有毒气体大量释放及长时间的复燃风险, 给传统消防救援理念与措施带来巨大挑战。

1 电化学储能电站火灾风险特性分析

1.1 储能系统基本构成与电池类型

典型的大型电化学储能电站主要由电池系统(电池模组、电池簇、电池架及电池管理系统 BMS)、功率转换系统(PCS)、能量管理系统(EMS)、温控系统以及配套的电气与建筑设施构成。其中, 电池系统是

核心能量载体, 也是主要风险源^[1]。当前主流技术路线包括锂离子电池(磷酸铁锂 LFP、三元锂 NMC 等)、液流电池、钠硫电池等。锂离子电池, 尤其是 LFP 电池, 因综合性能优势占据市场主导, 也是火灾事故的主要关联对象, 故本文以其为主要分析对象。

1.2 锂离子电池热失控机理

火灾风险的根源在于电池“热失控”(Thermal Runaway)。热失控是指电池内部生热速率远超散热速率, 积累的热量引发一系列连锁放热副反应, 导致电池温度急剧升高(可达 800 °C 以上), 最终可能引发起火爆炸的过程^[2]。主要诱因可分为三类:

1. 机械滥用: 如碰撞、挤压、针刺导致隔膜破裂, 引发内部短路^[3]。

2. 电滥用: 包括外部短路、过充电、过放电。过充电可能导致负极析锂、正极结构破坏并释氧; 过放电电极化可能导致铜集流体溶解。

3. 热滥用: 外部高温环境或局部过热, 导致 SEI 膜分解、隔膜收缩熔化等。

一旦触发, 连锁反应通常遵循以下路径: SEI 膜分解→负极与电解液反应→隔膜熔化→内部短路→正极材料分解释氧→电解液燃烧分解。此过程伴随大量可燃气体(如 H₂, CO, CH₄, C₂H₄ 等)和有毒气体(如 CO, HF, POF₃ 等)的释放。

作者简介: 袁福江(1972-), 男, 本科, 注册安全工程师、一级注册消防工程师、一级安全评价师, 研究方向: 工业电气安全、储能电站消防安全、安全评价。

1.3 火灾风险典型特性

基于热失控机理，储能电站火灾呈现出以下鲜明且高危的特性：

1. 隐蔽性与突发性：热失控初期（数分钟至数小时）可能在电池内部缓慢孕育，外部征兆不明显。传统烟感、温感探测器难以及时发现。BMS虽能监测电压、温度异常，但对内部微观短路的预警能力有限。一旦内部反应达到临界点，能量释放将极为迅猛，表现为突然的明火、爆炸或气体喷射，留给人员响应的窗口极短。

2. 爆炸性与喷射火风险：热失控产生的高温高压可燃气体在电池壳体内积聚，当压力超过壳体承受极限时会发生物理爆炸（壳体破裂）。释放出的可燃气体与空气混合，遇火源即发生剧烈的气体爆炸（化学爆炸）。同时，高压气体携带高温固态颗粒物和火焰从泄压阀或破裂口高速喷出，形成喷射火（Jet Fire），可瞬间引燃数米甚至更远距离的可燃物，极具杀伤力和蔓延性^[4]。

3. 复燃性：即便明火被扑灭，电池内部（尤其是大型模组或簇内部的电池）可能仍处于高温或持续反应状态。残余热量可能导致相邻电池发生热蔓延，引发新的热失控。深层或内部的电池因灭火剂难以渗透，冷却不彻底，极易在数小时甚至数天后再次复燃，给现场监护和清理工作带来长期挑战^[5]。

4. 毒害性：电池电解液（含锂盐、有机溶剂）及电极材料在热分解和燃烧过程中，会产生大量有毒、腐蚀性气体。氟化氢（HF）是最危险的产物之一，具有极强的刺激性和腐蚀性，低浓度即可对呼吸道和皮肤造成严重伤害，且不易被常规过滤式防毒面具滤除。此外，一氧化碳（CO）、五氟化磷（POF₃）、各类有机物蒸气等也构成严重的健康威胁和环境污染^[6]。

5. 火灾发展复杂性：火灾在储能舱或集装箱内的蔓延受多种因素影响：电池排列方式、电气连接、热管理系统状态、舱体通风条件、灭火系统介入时机等。火灾可能从单个电池通过热传导、热辐射、火焰蔓延或喷射火引燃等方式，沿模组、电池簇、电池架路径呈指数级扩散，形成多点同时热失控的“雪崩效应”，灭火难度极大^[7]。

2 储能电站火灾初期应急处置流程构建

鉴于上述风险特性，传统的“发现大火—报警—出水灭火”模式完全无法应对。初期应急处置（通常指从异常发现到专业消防救援力量全面接管前的阶段）的核心目标是：快速预警、控制事态、防止灾难性升级、为专业救援创造有利条件。流程应遵循“P. I. E. R.”原

则：隔离（Isolate）、抑制（Suppress）、降温（Cool）、评估与处置（Evaluate&Respond）。

2.1 第一阶段：早期预警与确认

1. 预警信号识别：运维人员或监控系统需高度关注多层次预警信号。

2. BMS/EMS告警：电池电压异常（压差过大）、温度异常升高（簇内温差超限）、绝缘故障、气体探测器（对H₂，CO，VOC等）报警、烟雾探测器报警^[8]。

3. 物理征兆：异常声响（如泄压阀动作声、爆裂声）、异味（电解液溶剂味、塑料烧焦味）、电池舱/集装箱通风口冒出白烟。

4. 初步研判与确认：任何异常信号都不应被忽视。监控中心应立即调取相关视频、数据记录，远程初步判断风险等级。同时，通知现场巡检人员在做好全套个人防护（至少为自给式空气呼吸器SCBA、防火服、耐HF手套）的前提下，从安全距离外进行观察确认，严禁无防护靠近或打开舱门。

2.2 第二阶段：初期应急响应启动

一旦确认存在热失控迹象或初期火情（如冒烟），立即启动紧急停机与隔离。

1. 电气隔离：通过EMS远程或现场紧急切断开关，断开故障储能单元与电网及站内其他健康系统的电气连接，防止电气短路扩大。

2. 能量泄放（如条件允许且安全）：在确保隔离的前提下，通过可控方式对故障簇进行放电，降低其能量状态。

3. 区域隔离：警示并清空危险区域（建议初始半径不小于50米），设立警戒线，禁止无关人员进入。

4. 启动固定灭火系统：若储能舱/集装箱设计有固定式灭火系统（目前以全淹没七氟丙烷等气体系统和细水雾系统为多），应立即手动或自动启动。其作用主要是抑制明火、稀释可燃气体浓度、争取时间。但需清醒认识，气体灭火剂难以穿透电池内部实现深度冷却，仅靠此系统无法保证不复燃。

2.3 第三阶段：初期火灾抑制与冷却

此阶段是防止灾难性升级的关键，可能由受过专业训练的站内应急队或首批到达的消防力量执行。

1. 安全评估与防护：救援人员必须佩戴SCBA，穿着A级化学防护服或专业灭火防护服，确保全面防护有毒气体（特别是HF）和高温。

2. 通风与排烟（谨慎进行）：如果储能舱设有联动的防爆排烟系统，可启动以排出有毒烟雾和可燃气体，降低内部温度和爆炸风险。严禁在未评估情况下强行破拆通风，以免引入新鲜空气引发爆燃。

3. 关键战术：大量水持续冷却。

(1) 核心原则：针对锂离子电池火灾，大量、持续、直接的注水冷却是目前最有效的方法。水能有效吸收热量，降低电池温度至热失控反应阈值以下，并能稀释和冲刷有毒腐蚀性液体^[9]。

(2) 操作方法：使用消防水带，从舱门、泄压口或专门设计的消防接口，向电池架（尤其是故障簇）进行持续、大流量（建议不低于 500 L/min per cluster）的注水冷却。即使明火已灭，仍需对受影响区域及相邻电池进行长时间（数小时甚至更久）的持续冷却，直至温度传感器显示整体温度降至环境温度且长时间稳定。

(3) 注意事项：水流可能导致电池短路产生火花，但与热失控的巨大能量相比风险可控。应使用雾状水以减少对电气设备的直接冲击，并注意积水可能导致的触电风险（已进行电气隔离的前提下）。

2.4 第四阶段：现场监护与移交

1. 持续监护：明火扑灭且冷却停止后，必须对现场进行至少 24 ~ 48 小时的严密热成像监测，持续监控温度变化，严防复燃。

2. 环境监测：使用有毒气体检测仪持续监测现场周边空气，特别是 HF 浓度，确保疏散和警戒范围安全。

3. 信息移交：将事故发生的详细过程、已采取措施、电池类型、潜在危险等信息完整移交给后续抵达的专业消防救援指挥员和事故调查组。

4. 废水处理：灭火冷却产生的废水中含有毒有害物质，必须进行收集，按照危险废物管理要求进行处置，防止二次污染。

3 虚拟储能电站初期火灾应急处置推演

为验证上述流程，设想某 100 MW/200 MW·h 磷酸铁锂储能电站一个电池舱发生热失控预警。

1. 情景：监控平台显示 A05 电池簇温度以 2 °C/min 速率异常升高，同时 VOC 探测器报警。

2. 预警与确认：监控员立即锁定 A05 舱视频，发现轻微白烟从通风口溢出。判定为热失控初期征兆，启动应急预案。

3. 隔离：远程指令断开 A05 簇及所在 PCS 的断路器，并切断该舱供电。现场安保迅速清空周围 100 米区域。

4. 固定系统动作：自动气体灭火系统启动。监控显示舱内明火未起但烟雾浓度增加。

5. 初期灭火冷却：站内应急队（3 人，全套防护）抵达舱外安全位置。连接消防栓，通过预留的消防注水口，向 A05 电池架位置持续注入雾状水，流量约 600 L/min。同时启动防爆排烟风机。

6. 结果：注水开始后 15 分钟，舱内温度从峰值 280 °C 开始稳定下降。持续冷却 4 小时后，温度降至 50 °C 以下并稳定。此期间无明火爆发，无爆炸发生。

7. 监护：使用热像仪持续监测 12 小时，温度无回升。设置警戒，废水由专业公司收集处理。

8. 推演结论：快速预警、果断电气隔离、及时启动固定系统以及最关键的早期大流量水冷却干预，成功将事故遏制在萌芽状态，避免了热失控链式反应和灾难性火灾，印证了初期应急处置流程的关键作用。

4 结束语

电化学储能电站的火灾风险具有隐蔽突发、易爆复燃、毒害复杂的鲜明特性，对传统消防安全体系构成了全新挑战。应对这一挑战，必须树立“防救并重、重在初期”的理念。未来仍需从多维度提升储能安全水平：在技术上，研发安全性更高的电池材料（如固态电池）、智能预警 BMS、高效定向灭火与冷却系统；在标准与设计上，强化消防安全设计规范，强制要求设置消防接口、安全距离、防爆泄压及废水收集设施；在管理上，制定并常态化演练针对性的应急预案，加强运维与消防人员的专业培训，形成“设计—制造—安装—运维—应急”的全链条安全管理闭环。

参考文献：

- [1] 中国电力企业联合会, 全国电力储能标准化技术委员会. 电力储能用电池管理系统: GB/T 34131-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [2] 周志钻, 王博轩, 宋露露, 等. 锂离子电池热失控行为及火灾危险性研究综述 [J]. 消防科学与技术, 2024, 43(05): 605-610.
- [3] 王腾. 基于机械滥用的动力电池热失控特性分析研究 [J]. 当代化工研究, 2024(22): 30-32.
- [4] 胡斯航, 王世杰, 刘洋, 等. 锂离子电池热失控风险综述 [J]. 电池, 2022, 52(01): 96-100.
- [5] 钱宇清, 左付山, 叶健, 等. 锂离子电池热失控机理分析及控制方法研究 [J]. 电源技术, 2022, 04(11): 1227-1232.
- [6] 许乐俊, 王世林, 王勇, 等. 低压环境下锂离子电池热失控特性研究进展 [J]. 电池, 2023, 53(06): 687-691.
- [7] 曹勇, 杨大鹏, 朱清, 等. 大容量磷酸铁锂电池模组热失控研究 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(07): 2462-2469.
- [8] 李润源, 郭傅傲, 赵钢超. 集装箱式锂离子电池储能系统消防安全早期预警方法 [J]. 储能科学与技术, 2024, 13(05): 1595-1602.
- [9] 徐宝勇. 电化学储能电站火灾分析及处置措施研究 [J]. 今日消防, 2023, 08(04): 11-13.

激光水深测绘技术在内河航道淤积区疏浚施工精度控制中的应用研究

雒磊

(四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610047)

摘要 激光水深测绘技术具有高精度、高效率及大范围实时获取水深信息的优点, 已成为内河航道淤积区疏浚施工精度控制的重要手段。本研究针对淤积区地形变化快、施工环境复杂的特点, 构建了激光测深数据获取、处理与施工控制的技术流程, 典型疏浚区段应用验证了其适用性。研究表明, 该技术可提升水下地形模型精度, 减少浅水、浑水条件下传统测量的误差累积, 增强施工断面控制能力, 提高疏浚成形质量, 为精细化管理提供有益参考。

关键词 激光水深测绘; 淤积区; 疏浚施工; 精度控制; 内河航道

中图分类号: TN24; U61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.02.042

0 引言

内河航道淤积区形态变化频繁复杂, 常规测深在浅水、多泥沙环境受限, 疏浚施工精度难保持稳定。激光水深测绘技术凭借高分辨率与快速成图能力, 为动态水下地形获取提供新路径, 清晰呈现淤积区特征, 为施工精度控制筑牢数据基础。随着航道高质量治理需求持续增加, 复杂水域高效可靠疏浚控制的实现已成行业关注的焦点。因此, 探讨激光水深测绘技术适用性与应用成效, 可推动航道疏浚向精细化、智能化发展。

1 内河淤积区疏浚施工精度受限的主要因素分析

内河淤积区地形变化受水沙动力显著影响, 河床形态短时间内即可发生冲淤交替, 疏浚施工依赖的水下地貌信息持续不稳定, 传统测深多依赖单波束或多波束声呐, 高含沙水体中易出现信号衰减、回波散射增强等问题, 获取的水深数据存在噪声大、覆盖率不足、浅滩区域空白等缺陷^[1]。淤积区泥沙粒径细、悬浮浓度高, 水体光学与声学特性变化明显, 测深结果随环境条件波动, 难以为疏浚施工断面控制提供连续可靠的数据基础。通航压力较大的河段, 水流紊动增大, 水下地形扰动频率提升, 施工计划常因测深信息滞后无法精确匹配实际作业需求。

施工精度受限的另一关键原因是淤积区材料组成复杂, 软质淤泥层厚度不均, 局部夹杂硬质杂物或残留构筑物, 施工设备推进疏浚时易出现吃力不足、超

挖或欠挖, 机械铲刀或吸头在不同沉积物界面切削阻力差异较大, 缺乏水下地形数据与剖面模型支撑, 施工参数难以实时调控。淤积区通航船舶频繁, 水下螺旋桨扰动加速泥沙再悬浮, 清淤作业区域能见度和水动力环境进一步恶化, 测量设备难以长时间稳定作业。疏浚工程常用的事前测量、过程跟踪与验收测量存在时间差, 淤积持续发生使河床形态短时间内可能出现新变化, 施工单位面对的数据常与真实水下地貌存在偏差, 影响施工断面控制精度。

测绘与施工组织脱节亦是制约精度的重要因素。部分河段施工需在限定通航窗口内完成, 测深、数据处理与施工指挥需在有限时间内循环进行, 传统测量方式在数据解析、网格化建模与成果输出耗时较长, 施工信息更新不及时, 淤积区缺乏统一细化的动态地形监测体系, 测绘成果与施工现场缺乏实时联动, 调度部门难以及时掌握施工断面变化趋势。施工船舶定位系统精度不足, 会造成理论施工线与实际施工轨迹偏移, 地形变化快的河段, 这类偏移对疏浚成形质量的影响被进一步放大, 淤积区在沉积环境、水动力条件、材料属性和作业管理等方面均存在复杂性, 传统测深方式在精度与时效上难以满足精细化施工需求, 成为制约疏浚精度的重要因素。

2 激光水深测绘技术在复杂水域中的适用机理

机载激光测深系统与多波束测深系统一样, 属于条带式全覆盖测深系统。然而不同的是, 多波束测深

作者简介: 雒磊(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 航道整治与疏浚工程。

系统的条带式测深是通过采用发射、接收指向性正交的两组换能器阵,通过点源声波幅度和相位的控制,实现波束形成,一次获得与航向垂直方向上几十个甚至几百个海底地形数据来实现的。机载激光测深系统则是通过扫描装置的转动,从而随着飞机的飞行,激光点在水面形成了条带状的全覆盖水深测量。由于扫描装置的不同,机载激光测深系统的扫描方式被分为直线、弧线、圆形和椭圆形四种。激光水深测绘技术在复杂水域的适用性,依托光学测距原理与高频脉冲激光回波处理机制共同实现,绿光激光可穿透浅水与中浑浊度水体,能量在水界面与水底形成双回波特征,为水深计算赋予可分离性与高精度,激光束发散角小、点位密度高,河道弯曲、滩槽交替及淤积变化显著区域可保持稳定测点分布,对浅滩、坡脚、冲刷坑等细微地形捕捉能力突出^[2]。激光信号在浅水与复杂河床构型条件下噪声干扰更低,不会因多路径反射与水下障碍物引发回波紊乱,提升水底识别能力,结合机载平台快速扫描特性,短时间内可获取高分辨率水下数字地形模型,为淤积区水深测绘提供持续密集的数据支撑。

在动态水域环境中,该技术借助激光点云处理算法区分浑水中散射光与有效回波,波形分解、能量阈值判别、回波时延校正等模型,可有效剔除漂浮物、气泡群及水体浑浊引发的杂散信号,提升水底回波提取可靠性。复杂流速场下水面扰动引发激光入射角变化,测绘系统借助惯性测量单元与姿态解算模型,实时修正激光发射方向及回波路径,保障测深结果几何精度。机载激光测深可整合近岸地形测绘功能,实现水陆一体化数据获取,河岸线移动明显、淤积与冲刷交界频繁变化区域,能实现连续地形表达,为后续疏浚精度控制提供完整空间参考框架。

多泥沙内河淤积水域中,淤积物颗粒的粒径分布、悬浮浓度及光学吸收特性,对测深精度影响显著。激光水深测绘系统针对性选取特定波段绿光激光源,搭配定制化水体光学参数反演模型,可在一定阈值范围内补偿水体吸收与散射作用引发的激光信号衰减,即便是浑浊度波动频繁的淤积区域仍能稳定维持有效水体穿透能力。回波强度分析可精准区分软质淤泥层、水下硬质构造及密度差异区域,提升复杂水底结构识别性能。针对河床快速演变特性,该技术可高时效完成重复测量,构建多期连续激光点云序列,从地形时序变化趋势中精准识别沉积速率与演变方向,推动疏浚施工控制从静态数据依赖转向动态数据驱动模式,为复杂水域精准疏浚作业奠定坚实的技术基础。

3 基于激光测深的疏浚精度控制流程构建

激光测深构建疏浚精度控制流程的核心是构建贯穿数据获取、三维建模、施工指令生成与动态校核的协调体系,让测深成果与施工过程形成对应关系,激光测深平台进入作业水域,借助高频脉冲激光回波记录完成大范围高密度点云采集,河床起伏显著或淤积堆高不均区域,可经多航线叠加提升覆盖完整性^[3]。点云数据完成姿态、时间与空间坐标统一校正后,结合水面波动补偿模型、光学衰减修正模型重建回波,最终生成的水下表面可达厘米级纵向精度,该阶段成果作为疏浚设计断面基础数据输入,为后续施工控制提供地形参照。

技术流程中段,激光测深点云需转化为工程指挥可用的数字地形模型,经网格化表达、坡度分析与断面线提取,完成目标疏浚深度与现状地形的差值分析,系统依据差值矩阵生成施工控制图层,施工设备可在导航系统实时读取待挖深度、边界线位置与作业限制区域,水体浑浊度变化或淤积速率偏高易引发地形变化偏差,流程中增设动态阈值判断模块,对快速沉积风险区域预警,触发局部补测程序。施工指令生成环节融合地形模型与疏浚船定位系统,赋予施工路径规划连续性与自适应性,提升设备挖削轨迹与设计断面的匹配度。

施工持续进行时,激光测深数据按预设时间间隔或作业进度阶段更新,短周期内捕捉地形变化并反馈至控制系统,动态监测成果进入滤波、配准与时间序列分析模块,生成实时差异图并与疏浚目标比对,即时识别超挖、欠挖及局部反淤区域,系统经控制台向施工设备反馈新深度指令,精细调节挖削强度、推进速度与路径位置。断面线附近关键位置,可依据激光点云密度设定更高检测精度,确保边坡角度与槽底平整度符合施工要求,流程快速循环中持续更新疏浚参考面,推动精度控制从离散测量模式转向连续监测模式,保障整体施工过程稳定的几何精度与空间一致性。

4 典型淤积区疏浚段的技术应用与精度验证

在典型淤积区疏浚实践中,激光测深技术应用始于目标河段全面扫描,高密度点云重建淤积形态动态变化,提供后续分析所需精确空间数据。淤积区多呈现细颗粒沉积占比高、地形过渡突变、软硬界面混杂特征,传统声学测深难以准确识别真实底界,激光测深在此环境下保持稳定数据穿透能力,浅滩、坡折带及局部冲刷坑等地貌单元可维持均匀点位分布^[4]。点

云解算融合多回波分离技术,有效区分水底与水上结构回波信号,提升地形模型细节表达度,初始地形模型清晰呈现淤积分布范围、堆积厚度变化及局部沉积中心,为疏浚强度分区、施工顺序设置及设备功率配置提供可靠依据。

在疏浚施工过程中,需在不同施工阶段持续获取多期测深数据,检验激光测深技术空间精度与动态监测能力,点云序列时间维度叠加分析可反映河床实时变化,短周期内识别槽底成形形态与设计断面的偏差,施工船结合高精度定位与激光测深成果完成路径校核,挖削刀头或吸头位置误差控制在厘米级。局部区域出现反淤或淤泥液化引发的塌边趋势时,点云纵向剖面变化可即时暴露异常区域,系统随即调整施工参数并触发局部补挖流程,保障槽底平整度与设计深度一致。水流紊动较强河段,激光测深依托惯导系统实时修正姿态扰动,获取数据保持稳定几何精度,为施工控制提供可连续追踪依据。

施工完成后的精度检验阶段,最终点云与设计地形的差异分析可直观呈现施工断面成形质量。差值模型揭示超挖、欠挖区域,反映边坡线坡比合理性、槽底微起伏残留及局部回淤迹象,差值网格统计支撑精度验证量化疏浚效果,帮助施工单位掌握平均偏差、最大偏差、体积误差等关键控制指标,激光测深高分辨率特性提升指标计算可靠性,浅滩及形态变化频繁区段,传统方法易出现的空白带与误差累积显著减少。精度验证结果为完善施工参数、优化作业组织方式及评估淤积动态提供全面数据支撑,推动疏浚控制从经验式判断转向精细化量化管理。

5 激光测深辅助疏浚控制的成效提炼与方法总结

激光测深在疏浚控制中的成效源于高密度点云构建的连续地形表达,淤积区复杂多变的河床形态被准确捕获,施工区域空间信息保持实时更新,高分辨率测深成果清晰呈现槽底起伏、边坡过渡及软硬界面分布的结构特征,为疏浚参数设定提供精细化依据^[5]。点云数据在差异分析中表现突出,多期序列构建可量化表达淤积速率、冲刷趋势及局部沉积中心移动轨迹,赋予疏浚控制空间预测能力,快速覆盖能力提升大范围作业区扫描频率,测量环节不再制约施工进度,整体作业组织的流动性与协调度同步提升。

在持续施工控制中,激光测深与导航定位系统、施工机理模型紧密耦合,控制方式从静态分段式转向动态跟踪式,点云实时配准后生成的差值矩阵,助力施工设备精确识别当前作业点深度偏差,系统对偏差

矢量化处理,自动调整挖削路径、推进速度及刀头姿态控制参数,使设备挖削轨迹与目标断面保持收敛关系。复杂河段水动力变化引发的局部反淤,可通过激光测深快速识别并纳入补挖流程,动态环境下仍能保障施工断面稳定性可控。在边坡控制上,高密度点云强化坡脚线识别能力,施工人员可依据实时坡度曲线调整作业方式,避免过度切削导致坡面失稳,也防止欠挖形成的陡直界面影响后续维护。

施工完成后的质量评估阶段,激光测深三维表达优势将工程质量控制从点状抽查模式升级为面状全覆盖模式,点云差异统计可使疏浚体积、边界线偏移、槽底平整度及异常区域分布以量化指标呈现,提升验收过程的客观性与可追溯性。淤积活动频繁、地形易重塑的河段,多期点云序列能揭示施工后的短期回淤趋势,助力管理部门及时制定维护决策,延长疏浚成效保持周期。激光测深在疏浚控制中形成的完整方法体系,使测量、建模、施工与检验形成闭环,让复杂水域施工精度控制具备高频修正、高度透明与高可靠特征,为内河航道淤积区精细化治理提供稳定技术支撑。

6 结束语

激光水深测绘技术在淤积区疏浚施工中的实践,为复杂水域精度控制提供了可靠的数据基础与高效技术路径。高密度点云的连续表达、动态更新能力及与施工系统的深度耦合,推动了传统静态测量作业方式转向实时监控与精细化调控。淤积区河床快速变化带来的地形不确定性,经激光测深有效削弱,疏浚断面、槽底形态与施工轨迹保持更高一致性。该技术在应用流程、验证方式与控制策略上形成完整体系,展现出多类型内河航道适用潜力,可为后续治理维护奠定坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 朱淑丹.面向电力系统稳定性的高精度功率器件控制策略设计[J].产业创新研究,2025(22):97-99.
- [2] 贺蜀光,丁勇,陈文秀,等.三氯化氮制备生产线提高氯气流量控制精度的方法[J].化工自动化及仪表,2025,52(06):1006-1009.
- [3] 林培章.南澳河综合整治中的护坡疏浚施工关键技术研究[J].水利技术监督,2025(08):315-318.
- [4] 廖君伟.水下地形复杂区域航道疏浚施工工艺创新研究[J].珠江水运,2025(07):47-49.
- [5] 谢永春,严林,马丽媛.航道施工中耙吸挖泥船疏浚施工数据深度挖掘与产能优化[J].珠江水运,2024(22):118-120.