

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2025 年 10 月 第 29 期 (总第 618 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：昆明滇印彩印有限责任公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025 年 10 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 基于 CPML 边界条件的 FDTD 法数值模拟
..... 胡灵娟
- 004 平面结构极限下限分析的有限元算法研究
..... 王 巍, 李睿智, 张 怡
- 007 大直径调压井滑模施工受力分析与优化
..... 王波涛
- 010 气浮系统施工技术在水处理中的应用探究
..... 殷 敏
- 013 区域电力碳排放强度时空差异的多尺度驱动因素解析
..... 李雪峰, 王 玥, 王姗姗, 杭宁乾, 胡恩俊
- 016 一种新的大型漂浮式海上风力机降维动力学模型构建方法
..... 刘文易, 李志军

智能科技

- 019 数字射线实时成像技术在承压设备检验中的应用
..... 朱 鑫
- 022 基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计探究
..... 李智源
- 025 新型地理信息系统技术在工程测绘中的应用分析
..... 许必银, 王 雪
- 028 CJK6135A 数控车床电动刀架故障分析及排除方法
..... 冯建财, 李壮威, 袁晨峰
- 031 智能化管控技术在火电厂安全管理中的应用
..... 张丙刚
- 034 智慧监管系统在化工园区安全管理中的应用探究
..... 杨 林
- 037 人工智能技术在配电网故障诊断与调度优化中的应用分析
..... 陆牧君, 王 成

应用技术

- 040 高速公路桥梁高墩施工技术研究
..... 李选金

目录 *Contents*

043	公路沥青混凝土路面施工技术分析	黄一标
046	市政道路工程软土路基施工技术分析	陈瑜
049	连续梁桥满堂支架施工控制技术研究	王烁
052	道路桥梁施工技术中的细节问题及处理措施	颜志伟
055	土岩复合地层轨道交通盾构隧道施工关键技术	张来添
058	水利工程技术大体积混凝土施工与优化探究	关宇飞
061	水电站复杂软岩涌水地层隧洞洞室开挖施工技术探究	赵国峰

科创产业

064	碟式分离机耐腐蚀技术研究	陈鑫, 王牧
067	生物质发电企业炉前给料系统优化研究	王凯, 刘周洲, 杨中, 金远龙, 廖鹏
070	生物降解塑料母粒的开发策略与应用前景	徐磊
073	城市配电规划中的负荷预测与容量配置方法	韩江伟, 赵耀武, 冯志, 李光洋
076	入厂入炉煤全流程追溯系统构建与热值差管控	刘苏琴
079	火力发电厂煤炭质量化验影响因素及其改进措施分析	王飞丽, 徐璐璐, 付裕, 付国钰, 黄婷
082	一体化预制污水泵站在城镇污水系统中的设计应用研究	黄慧玲

技术管理

085	进度管理在建筑管理中的应用	宋宇琛
088	公路工程机电项目施工质量控制研究	张瀚
091	水利工程运行管理中的安全隐患及预防措施	易成钰, 冯旋
094	自动化运维技术在智能电网运维管理中的应用	杨铭, 郝鲁东
097	土地工程管理中测绘成果的应用与质量控制探讨	蒋余建
100	极端天气条件下建筑安全绳网的受力特性模拟	宋顺达
103	城轨低空无人机协同调度技术在应急管理中的应用研究	熊浩鋈

科学论坛

106	风力发电站雷电防护技术研究	何庆团
109	矿山机械设备的保养及维修技术探讨	蒙仁华
112	新能源储能电池火灾消防救援策略研究	郭晨生, 王鑫成, 朱一峰, 罗锦
115	基于可持续发展生态理念的水利设计研究	付恒, 黄斌, 张蕾
118	燃煤电站锅炉运行的常见问题及检修方法探析	涂宏应
121	基于三元分步分区框架的陆海统筹生态修复技术研究	刘发雄
124	基于海绵城市理念的透水混凝土路面施工质量控制与检测方法研究	贾志彬

基于 CPML 边界条件的 FDTD 法数值模拟

胡灵娟

(武汉传媒学院, 湖北 武汉 430205)

摘要 在电磁数值计算领域, 吸收边界条件是保障计算精度的关键技术之一。卷积完全匹配层 (CPML) 是一种新型吸收边界条件, 无需对场量实施分裂处理, 是其核心竞争力, 这也使其在相关研究与工程应用场景中大范围普及。本文简要阐述了 CPML 的技术背景, 同时推导基于 CPML 的 FDTD 法差分格式, 并结合实际物理场景构建计算模型, 对基于 CPML-FDTD 的二维横磁波 (TM 波) 传播过程通过 Matlab 软件进行数值模拟。通过对模拟结果的分析可得, CPML 在边界处展现出良好的吸波性能。

关键词 卷积完全匹配层; 时域有限差分法; Matlab

中图分类号: O24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.001

0 引言

在吸收边界条件的研究进程中, Roden 与 Gedney^[1] 于 2000 年通过对坐标伸缩因子的创新性改进, 提出了卷积完全匹配层 (Convolutional Perfectly Matched Layer, CPML)。相关研究表明, 该 CPML 技术具备吸收效果优异、可扩展性强等显著优势^[2], 为后续复杂波场模拟提供了关键技术支撑。葛德彪与闫玉波^[3] 在其专著中进一步指出, 针对棱边、角顶等复杂几何区域的数值计算问题, CPML 展现出相较于传统吸收边界条件的明显优势, 与 Gendey S. D.^[4] 于 1996 年提出的非分裂完全匹配层 (Unsplit Perfectly Matched Layer, UPML) 相比, CPML 在处理此类特殊区域时, 不仅计算流程更为简洁, 还能有效提升计算效率。从理论推导层面分析, CPML 的构建基于方程自身的连续性特性, 未引入非物理意义上的分裂操作, 这一本质特征使其数学表达式具备形式简洁的优势, 进而在数值计算过程中可显著降低对存储资源的需求, 为大规模、高精度的波场模拟奠定了基础。在 CPML 技术的应用验证阶段, 2012 年相关学者开展了多领域的探索研究, 如朱翼超等^[5] 将 CPML 吸收边界条件引入脉冲辐射的数值模拟过程, 为该场景下波场边界的高效吸收提供了实践案例, 与此同时, 李义丰等^[6] 通过系统性验证, 证实了 CPML 吸收边界对声波传播过程中损耗体介质的吸收效果显著, 进一步拓展了其在声学领域的应用边界。伴随研究工作的不断深入, 李建等^[7-8] 学者在 2014 年聚焦多维波场场景开展了针对性验证, 其研究团队将二维横电波 (TE 波) 与三维高阶隐式时域有限差分

法 (HIE-FDTD) 模型作为验证载体, 通过实验证实了 CPML 的优异吸收性能, 进而为 CPML 在复杂波场计算中的推广应用奠定了关键的数据基础。在工程应用层面, 为构建水下地质灾害研究的理论基础, 彭凌星等^[9] 于 2017 年将 CPML 吸收边界条件应用于水下地质雷达探测的数值模拟工作, 并围绕复杂地质体的探测难点与技术优化方向展开深入讨论, 推动了 CPML 技术从基础研究向实际工程问题解决的转化。针对声波在非均匀介质中的传播模拟问题, Chen 等^[10] 于 2023 年将卷积完全匹配层 (CPML) 边界条件与时域有限差分法 (FDTD) 相结合, 构建了 CPML-FDTD 数值模拟方法, 他们在分析复杂声学环境下波场吸收与边界处理难点的基础上, 通过多组非均匀介质模型的声波传播模拟实验, 证实该方法可精准捕捉波的衰减、反射及折射等传播特性, 充分验证了方法有效性, 并指出其在超声无损检测、水声学及建筑声学领域具备潜在应用前景。

为明确卷积完全匹配层吸收边界的实际应用有效性, 本研究针对 TM 波的传播过程采用 Matlab 软件进行了数值模拟计算, 在二维计算域中引入 CPML 吸收边界, 重点观察 TM 波在传播过程中边界对波场反射的抑制情况, 以此初步验证 CPML 在不同维度波场场景中的边界吸收性能。

1 基本原理

1.1 CPML 的背景

CPML (卷积完全匹配层) 作为电磁仿真中关键的边界吸收技术, 其核心原理深度依托于伸缩坐标 PML (完全匹配层) 理论框架, 核心创新点在于通过在麦克斯

韦方程中巧妙引入卷积项,实现了对传统PML技术的性能优化。在电磁问题求解中,频域分析常能清晰呈现色散关系,但时域仿真更贴合实际工程场景的动态需求,CPML正是通过特定数学变换,将频域中与频率相关的坐标伸缩因子,转换为时域下的表达式,由于伸缩因子的频率依赖性,转换后时域公式天然呈现出卷积形式,这一特性是其实现宽频吸收的关键。

为解决卷积计算复杂度高、影响仿真效率的问题,CPML创新性地引入记忆变量与递归关系,将复杂的卷积运算转化为高效的递推计算,大幅降低了计算资源消耗,确保在大规模电磁仿真中仍能保持良好的运算效率。

在吸收性能上,CPML展现出显著优势:不仅能有效吸收不同传播方向、不同频率的电磁波,极大减少边界反射对仿真结果的干扰,其内部介质还呈现出独特的各向异性吸收特性,这种特性使得入射电磁波能够无反射地穿过CPML与计算区域的边界,进入CPML区域后,能量在传播过程中被逐步、均匀衰减,最终实现近乎理想的边界吸收效果,为高精度电磁仿真提供了可靠的边界条件支撑。

1.2 时域CPML的公式

在计算电磁学研究中,时域卷积完美匹配层(CPML)作为一种关键的吸收边界条件,对于模拟无界空间场景、消除电磁波在人工截断边界处的反射现象起着至关重要的作用。

为更直观地阐释CPML在FDTD框架下的应用机制,本文以CPML内x方向磁场的数学表达式为例,系统完成其FDTD差分分离的推导与验证过程。

由方程 $\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon E_x) + \sigma E_x = \frac{1}{\kappa_y} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{1}{\kappa_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} + \Psi_{E_x} - \Psi_{E_y}$, 得:

$$\begin{aligned} \alpha(m) \frac{E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{\Delta t} + \sigma(m) \frac{E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) + E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}{2} \\ = \frac{1}{\kappa_y(m)} \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y} \\ - \frac{1}{\kappa_z(m)} \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right) - H_y^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \\ + \Psi_{E_x}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - \Psi_{E_y}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \end{aligned}$$

在这个差分公式里,各项分别对应着电场、磁场以及相关辅助量在不同时间步、不同空间位置上的离散数值。通过这样的差分分离过程,能够在Matlab软件上实现CPML条件下电磁波的数值模拟。

2 数值模拟

本研究构建的数值计算模型采用平面直角坐标系,其中x轴正方向设定为自左至右,y轴正方向设定为自下而上,以明确波场传播的空间参考体系。该模型网格参数设置如下:总网格规模为430*430(x方向*y方向),主计算区域网格规模为400*400(x方向*y方向),为消除计算域边界对波场的反射干扰,模型边界采用卷积完全匹配层(CPML)作为吸收边界,且CPML在x、y两个方向的层数均统一设为15。关于波源与介质参数,横磁波(TM波)的激励源布置于x轴几何中点的y轴正方向一侧,该波源激发信号的波长 λ 为 5.5×10^{-7} m,对应频率为 $f=c_0/\lambda$,这个波场传播过程处于相对介电常数为1的均匀介质环境中。模型空间离散化参数方面,x、y两个方向的单元格的尺寸为 $\lambda/20$ 。在数值模拟过程中,程序运行的总时间步数设定为600,下面通过相关图像,分别描绘了在不同时间步时电场的平均功率分布特征(见图1)、磁场分量(如 H_x 、 H_y ,见图2、图3)及电场分量(如 E_z ,见图4)的空间传播演化情况。

3 结论

对二维TM波(横磁波)情况进行分析,由于其传播具有平面分布特性,需结合电场平均功率图(反映能量分布强度)与电磁场分量在空间传播演化情况(反映波前形态与传播方向)进行协同分析。一方面是关于有效区域传播阶段特性,结合图1与图2对时间步 $t=300$ 之前的传播状态分析可知,此阶段TM波始终在均匀介质构成的有效计算区域内传播,波前未到达模型边界的CPML吸收层。从电磁场分量在空间传播演化情况(图3、图4)可见,等值线呈规则的同心环状(或符合预期传播规律的形态),无明显扭曲;电场平均功率图(图1)中能量分布均匀,无异常损耗,说明均匀介质区域的模拟环境稳定,CPML吸收层未对该区域的波传播产生干扰。另一方面是关于CPML吸收层性能的验证,通过图1、图2、图3与图4的交叉验证,可明确CPML吸收层的效果,从电场平均功率图及电场分量在空间传播演化情况(图1、图4)对比可见,当TM波进入CPML吸收层后,能量衰减速率显著,证明吸收层对波能量的耗散效率极高。磁场分量在空间传播演化情况(图2、图3)中,进入CPML层的等值线逐渐淡化且保持规则形态,未出现因边界反射导致的等值线重叠、反向传播等现象,说明CPML吸收层有效抑制了边界反射,反射波被高效吸收,未对有效区域的波

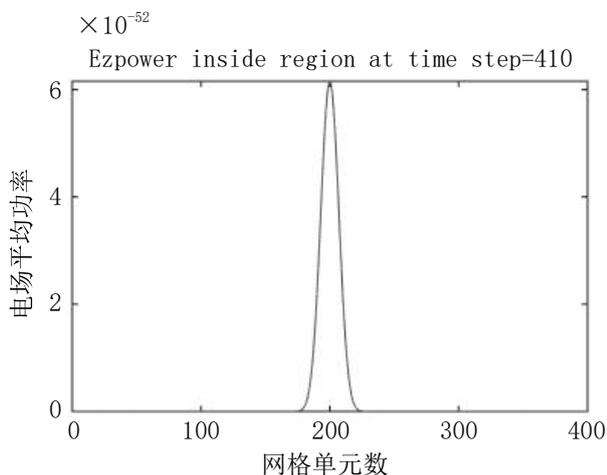


图 1 平均功率分布特征

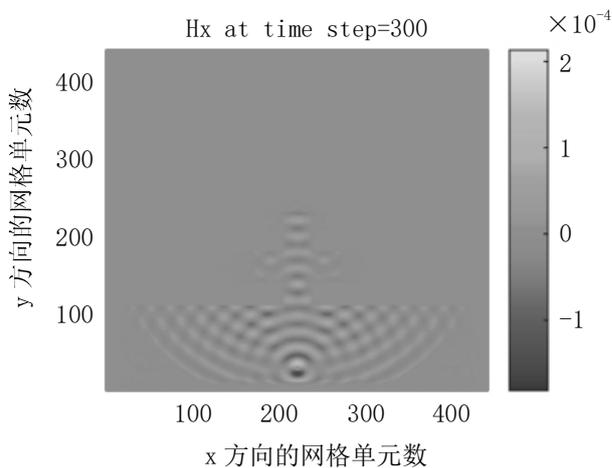


图 2 磁场分量 (a)

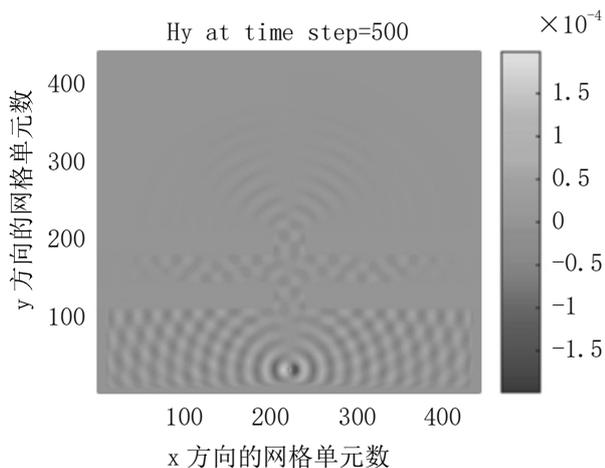


图 3 磁场分量 (b)

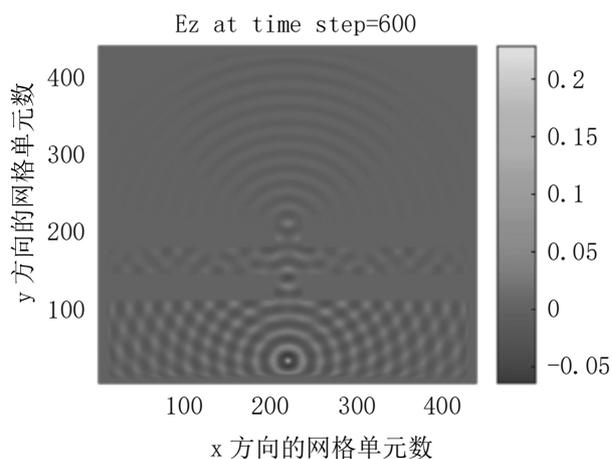


图 4 电场分量

场造成干扰。综上，二维 TM 波模型中 CPML 吸收层的设置参数（如厚度、衰减系数等）合理，既能高效吸收入射波，又能避免反射波干扰，满足二维波场模拟的边界条件需求。

参考文献:

[1] J Alan Roden, Stephen D Gedney. Convolution PML(CPML):An Efficient FDTD Implementation of the CFS-PML for Arbitrary Media[J]. Microwave Opt. Technolo. Lett, 2000, 27(05): 334-339.
 [2] 魏兵, 李小勇, 王飞, 等. 一种色散介质 FDTD 通用吸收边界 [J]. 物理学报, 2009, 58(09):6174-6178.
 [3] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法 (第三版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
 [4] Gendey S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices[J].

IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(12): 1630-1639.
 [5] 朱翼超, 罗根新, 方向, 等. CPML 在脉冲辐射场数值模拟中的应用研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(06):1189-1191.
 [6] 李义丰, 汪胜祥. 卷积完全匹配层在二维声波吸收流体介质中的有限元计算 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(06):166-171.
 [7] 李建, 刘宗信, 王发年, 等. 二维 TE 波中的 HIE-CPML 算法 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(21):22-25.
 [8] 李建, 刘宗信, 王发年, 等. CPML 在 3 维 HIE-FDTD 算法中的实现 [J]. 电子设计工程, 2014, 22(20):31-35.
 [9] 彭凌星, 密士文, 何现启, 等. 基于 CPML 边界条件的水下地质雷达数值模拟 [J]. 山东国土资源, 2017, 33(06): 63-68.
 [10] Chen Y, Liu Z, Zhao L. CPML - FDTD Simulation of Acoustic Wave Propagation in Heterogeneous Media[J]. Journal of Computational Acoustics, 2023, 31(04): 2350020.

平面结构极限下限分析的有限元算法研究

王 崑, 李睿智, 张 怡

(山西能源学院机电工程系, 山西 晋中 030600)

摘要 相比于极限上限分析, 通过下限分析理论得到的极限载荷更加偏于安全。本研究根据塑性极限分析理论的静力定理, 采用有限元法对结构进行离散, 建立了有限元法求解平面结构极限下限分析的整套算法格式。基于降维思想, 利用弹塑性增量平衡迭代的结果构造出自平衡应力基矢量。通过不断修正自平衡应力搜索子空间, 整个极限下限问题被归结为一系列非线性数学规划子问题, 并编制了相应的计算程序。两个典型的平面结构算例证明, 将算法应用于极限分析理论是行之有效的, 具有收敛速度快、稳定性好的优点。

关键词 有限元法; 极限分析; 非线性规划; 自平衡应力场

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(编号: 2022L611); 山西省高等学校教育教学改革与实践项目(编号: J20241544)。

中图分类号: O241

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.002

0 引言

在平面结构优化和安全评估中, 需控制结构在工作中的承受载荷始终低于极限下限载荷, 才能保证设备的正常运转。因此, 相较于上限载荷, 极限下限载荷更容易得到工程设计人员的关心和重视。然而, 极限下限问题中数量庞大的变量和约束条件让求解变得非常困难。近年来, 国内外学者针对极限下限问题中的维数障碍问题进行了大量研究。魏懿源和杨志双^[1]建立了基于半正定规划以及锥优化的有限元下限极限分析公式, 有效减少了问题中的约束条件; 周书涛^[2]在极限上限分析的迭代求解格式构造出了满足平衡方程和边界条件的广义应力场, 进而将该应力场代入屈服条件中, 得到了极限下限载荷; 孙聪和熊威等^[3]采用非线性规划的二阶锥规划成功构建了三维问题的极限分析下限法计算模型, 可以方便地通过凸规划软件直接求解出三维边坡的应力场和安全系数。

本研究主要基于极限分析理论中的下限定理, 通过有限元离散求解域, 利用减缩基技术将极限下限问题归结为一系列未知数数量较少的数学规划子问题, 并选用复合形法进行求解。两个算例验证了本研究中的算法在平面应变和平面应力问题中的可行性和有效性。

1 有限元数学规划格式

极限分析理论认为^[4-6], 在满足平衡条件、边界条件、且各处都满足屈服条件的应力场中确定的载荷在一般情况下均小于极限载荷, 由此需考虑一个二维理想弹

塑性结构 S , 设应力边界为 Γ , 其数学规划格式可写为:

$$\chi^s = \max \chi \quad (1a)$$

$$\text{s.t.} : f[\chi \sigma_{ij}^E(x) + \rho_{ij}(x)] \leq 0 \quad \forall x \in S \quad (1b)$$

$$\rho_{ij,j}(x) n_j = 0 \quad \forall x \in \Gamma_i \quad (1c)$$

$$\rho_{ij,j} = 0 \quad \forall x \in S \quad (1d)$$

以上公式中, χ 为极限载荷系数, σ_{ij}^E 和 ρ_{ij} 分别表示基准载荷下的虚拟弹性应力场和自平衡应力场, n_j 为边界单位外法线向量。屈服条件 (1b) 表明, 找到极限载荷系数最大值 χ^s 对应的自平衡应力场是求解极限下限问题的关键。

将求解域划分成 N 个单元的组合, 每个子单元中通过高斯积分法完成数值积分。设 I 表示全部高斯积分点的集合, x_i 为第 i 个高斯积分点的坐标, 则上述应力场可近似表示为 $\sigma_i^E = \sigma^E(x_i)$, $\rho(x_i) = \rho_i$ 。进一步得到屈服条件 (1b) 的离散形式为:

$$\text{s.t.} : f[\chi \sigma_i^E + \rho_i] \leq 0 \quad i \in I \quad (2)$$

设结构虚位移为 $\delta \varepsilon$, 结合虚位移原理得到应力边界条件 (1c) 和平衡方程 (1d) 等效的积分弱形式^[7]:

$$\int_S \delta \varepsilon^T \rho r dV = 0 \quad (3)$$

根据弹性力学平面问题, 离散后每个子单元中的应变表达式为:

$$\varepsilon_e = B_e u \quad (4)$$

式 (4) 中, B_e 表示单元应变位移关系矩阵, u 为单元节点列向量。将每个子单元中的节点应变向量 ε_e 和节点位移列向量 u 集成为结构总体应变向量 ε 和总体

位移列向量 U ，则积分弱形式 (3) 的离散形式可写为：

$$\delta U^T \left(\sum_{e=1}^N \sum_{i=1}^G B^T(\rho_e)_i |J|_i \right) = \delta U^T \left(\sum_{i \in I} B^T \rho_i |J|_i \right) = 0 \quad (5)$$

式 (5) 中， B 表示扩展之后与 U 同阶的应变位移关系矩阵， G 为每个单元内部高斯积分点的数目， $|J|_i$ 为第 e 个单元中第 i 个高斯积分点的 Jacobi 矩阵值。考虑到式 (5) 中 δU 是完全任意的，可进一步表示为：

$$\sum_{i \in I} B^T \rho_i |J|_i = 0 \quad (6)$$

根据上述分析，极限下限分析的有限元数学规划格式为：

$$\chi^s = \max \chi \quad (7a)$$

$$\text{s.t.} : f[\chi \sigma_i^E + \rho_i] \leq \sigma_s^2 \quad i \in I \quad (7b)$$

$$2\pi \sum_{i \in I} B^T \rho_i |J|_i = 0 \quad (7c)$$

2 自平衡应力场的构造

2.1 虚拟弹性应力场

设求解域 S 中应力边界和位移边界分别为 Γ_t 、 Γ_u ，可得平衡方程表达式：

$$\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = 0, \text{ 在 } S \text{ 内} \quad (8a)$$

$$\sigma_{ij} n_j - \bar{t}_i = 0, \text{ 在 } \Gamma_t \text{ 上} \quad (8b)$$

$$u_i = \bar{u}_i, \text{ 在 } \Gamma_u \text{ 上} \quad (8c)$$

以上公式中， σ_{ij} 为应力张量； \bar{f}_i 和 \bar{t}_i 分别为给定的体力和面力； \bar{u}_i 为边界位移。

对于平面问题，对总势能取驻值得到控制方程的 Galerkin 离散形式：

$$KU = f \quad (9)$$

式 (9) 中 K 和 f 分别表示结构的总体刚度矩阵和节点载荷向量。通过控制方程 (9) 进行一次弹性分析，即可得到虚拟弹性应力场 σ_i^E 。

2.2 自平衡应力场

自平衡应力基矢量的选取方式并不唯一，只有合适的基矢量才能保证迭代良好的收敛性，本文利用弹塑性分析中平衡迭代的结果进行构造。假设第 n 次迭代时前一次迭代结束后各积分点总应力为：

$$\hat{\sigma}_i^0 = \chi^{(n-1)} \sigma_i^E + \rho_i^{n-1} = \sigma_i^{n-1} \quad i \in I \quad (10)$$

现在在此基础上继续施加载荷增量 $\Delta\chi^{(m)}$ 使结构继续屈服。为提升迭代计算效率，采用修正的 Newton-Raphson 法。则第 1 次和第 p 次弹塑性迭代时的离散化平衡条件分别为：

$$\int_S B^T D^e \Delta\epsilon^{(1)} dS = (\chi^{(n-1)} + \Delta\chi^{(n)}) F - \int_S B^T \hat{\sigma}^{(0)} dS \quad (11)$$

$$\int_S B^T D^e \Delta\epsilon^{(p)} dS = (\chi^{(n-1)} + \Delta\chi^{(n)}) F - \int_S B^T \hat{\sigma}^{(p-1)} dS \quad (12)$$

式 (11)、(12) 中， F 表示基准载荷对应的节点载荷向量。

将式 (12) 减去 (11)：

$$\int_S B^T [\hat{\sigma}^{(0)} - \hat{\sigma}^{(p-1)} + D^e (\Delta\epsilon^{(1)} - \Delta\epsilon^{(p)})] dS = \int_S B^T \rho^p dS = 0 \quad (13)$$

式 (13) 中， $\rho^{(p)}$ 是一个与外载荷有关的自平衡应力场，将每次迭代得到的 $\rho^{(p)}$ 作为一个基矢量即可形成自平衡应力场的搜索子空间。

3 下限分析的求解过程

很显然划分单元数量越多，数学规划问题 (7) 的计算规模越大，但单元划分过少则无法满足精度要求，即维数障碍问题。本文采用减缩基技术 [8] 将整个极限问题的求解归结为一系列数学规划子问题的求解。每个规划子问题中的自平衡应力场为：

$$\sigma_i = \chi \sigma_i^E + M_1 \rho_i^1 + M_2 \rho_i^2 + \dots + M_k \rho_i^k \quad i \in I \quad (14)$$

式 (14) 中 $\rho_i^1, \rho_i^2, \dots, \rho_i^k$ 表示自平衡应力基矢量， M_1, M_2, \dots, M_k 为基矢量对应的待定系数。此时下限问题的求解步骤为：

1. 通过弹性分析理论得到弹性极限载荷，进一步施加第一个载荷增量 $\Delta\chi^1$ ，根据弹塑性增量法得到自平衡应力基矢量 $\rho_i^1, \rho_i^2, \dots, \rho_i^k$ ，通过复合形法 [9] 求解得到第一个数学规划问题的近似解 χ^1 。

2. 设求解第 $(k-1)$ 次子问题得到的自平衡应力场为 $\sigma^{(k-1)} = \beta^{(k-1)} \sigma^E + \rho^{(k-1)}$ 。施加第 k 次载荷增量后，采用弹塑性增量法得到 $(k-1)$ 个自平衡应力基矢量，同时以 $\rho^{(k-1)}$ 为第 k 个基矢量，由此得到一组新的 k 个基矢量，并再次通过复合形法得到第 k 个近似解 χ^k 。

3. 按照上述步骤重复进行，直到相邻的两个载荷系数满足容许误差 vol ：

$$|\chi^{(n)} - \chi^{(n-1)}| / |\chi^{(n)}| \leq \text{vol} \quad (15)$$

则迭代过程终止。

4 数值算例

4.1 厚壁圆筒

本算例研究的是一个厚壁圆筒受到均布内压 P 作用，这是一个经典的平面应变问题。考虑到结构以及载荷的对称性，选取厚壁圆筒的四分之一部分作为计算模型。用 r 和 R 分别表示圆筒的内径和外径，则极限载荷解析表达式 [10] 为：

$$P_L = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \ln \frac{R}{r} \quad (16)$$

为避免偶然性，本文对 21 种不同内外径之比的厚壁圆筒进行分析。图 1 给出了本文数值解与表达式 (16)

得到的解析解之间的对比情况,可以看出两者吻合很好,计算精度很高。

4.2 楔形悬臂梁

第二个算例分析的是一个受均布剪力作用的楔形悬臂梁结构,这是一个平面应力问题。

本文采用8节点等参元进行计算。周书涛^[2]和王威^[8]分别采用不同的方法对该算例进行了极限分析,计算得到的极限载荷系数分别为0.3 943和0.3 992,

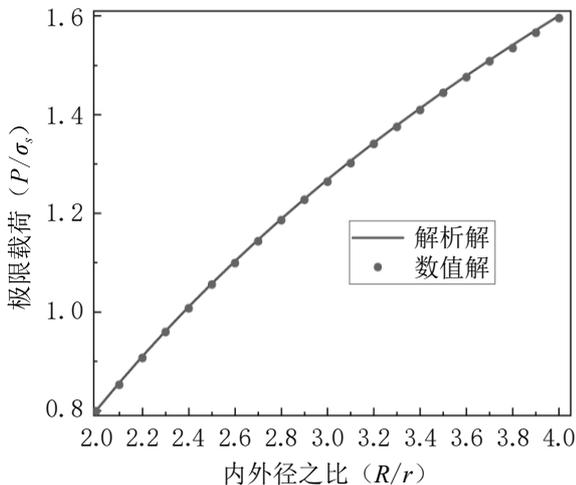


图1 不同内外径下圆筒极限载荷系数的对比情况

本文方法得到的结果为0.3 939,这表明文献的数值解与本文的结果吻合的非常好。

为进一步验证有效性,采用逐步识别刚性区和塑性的方法^[11]对楔形梁进行了上限分析,计算收敛曲线如图2所示。图2还给出了本文算法得到的极限下限分析的迭代收敛曲线图。可以看出,随着迭代的进行,楔形梁的极限上下限解逐渐趋于一个稳定的值,这进一步验证了本文算法的可行性和有效性。

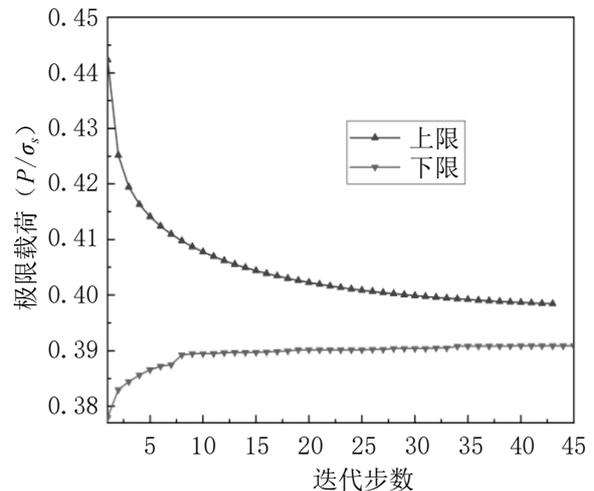


图2 楔形悬臂梁极限分析的迭代收敛过程

5 结论

1. 根据塑性极限分析理论,采用有限单元法对结构进行离散,建立了求解理想弹塑性平面结构极限下限问题的数学规划格式。利用减缩基技术使数学规划问题中的未知量数目得到大幅度降低,有效解决了维数障碍问题,并编制了相应的计算程序。

2. 对两个典型的平面结构进行了验算,分析了自平衡应力基矢量数目对算法精度和效率的影响。计算结果表明,本研究中的算法可以有效应用于求解平面结构的极限下限分析问题,并且具有计算精度高、计算效率高、稳定性好的优点。

3. 本研究提出的求解格式具有普适性,可用于轴对称结构和三维结构的极限分析。

参考文献:

- [1] 魏懿源,杨志双.基于半正定规划的有限元下限极限分析[J].施工技术,2018,47(S4):1802-1804.
- [2] 周书涛.基于自然单元法的极限与安定上限分析[D].北京:清华大学,2012.

[3] 孙聪,熊威,李春光.基于二阶锥规划的三维边坡极限分析下限法研究[J].武汉工程大学学报,2023,45(04):468-472.

[4] 陈钢,刘应华.结构塑性极限与安定分析理论与工程方法[M].北京:科学出版社,2006.

[5] 孙锐,阳军生,李雨哲,等.基于广义Hock-Brown屈服准则的极限分析下限有限元法[J].岩土力学,2021,42(06):1733-1742.

[6] 张锐.基于非线性规划的有限元极限分析方法及其工程应用[D].长沙:湖南大学,2015.

[7] 曾攀.有限元分析及应用[M].北京:清华大学出版社,2003.

[8] 王威,赵丽,李睿智,等.基于自然单元法的极限下限分析[J].力学季刊,2025,46(01):108-117.

[9] 傅正定.最优化理论与方法[M].北京:国防工业出版社,2008.

[10] 宋卫东.塑性力学[M].北京:科学出版社,2017.

[11] 陈莘莘,张玮,胡英.轴对称结构极限上限分析的完全边光滑有限元法[J].工程力学,2023,41(07):1-8.

大直径调压井滑模施工受力分析与优化

王波涛

(中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要 大直径调压井滑模施工过程复杂, 其受力分析与结构优化工作尤为关键。本文以溪洛渡水电站大直径调压井工程为研究对象, 借助有限元软件构建滑模系统力学模型, 对系统荷载及关键部件受力情况展开精准计算。针对计算中发现的应力集中、同步性差等问题, 从操作平台桁架、液压提升系统、爬杆强度及模板抗侧压能力等方面制定优化措施。经实践验证, 优化后的滑模施工效率与安全性显著提升, 可为同类水利工程滑模施工提供参考。

关键词 溪洛渡水电站; 大直径调压井; 滑模施工; 受力分析; 液压提升系统化

中图分类号: TV5; O313

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.003

0 引言

随着水利水电事业逐步向复杂化、大型化方向发展, 而大直径调压井作为水电站输水系统中的重要建筑物, 其施工难度也逐步升高。滑模施工作为建筑工程领域中广泛应用的施工技术类型, 其具备混凝土连续性好、施工效率高、表面质量佳等优势, 所以在调压井衬砌施工中应用价值较高。然而, 大直径调压井滑模系统荷载复杂、体型庞大, 在施工环节面对材料荷载、结构自重、混凝土侧压力、施工活荷载的持续作用, 一旦受力分析不精准或者结构设计缺乏合理性, 就容易造成爬杆失稳、模体变形等安全事故。溪洛渡水电站是我国西南地区极为重要的水利枢纽设施, 其调压井竖井滑模衬砌直径达 13 m, 滑升高度百米以上, 现场施工环境恶劣且空间有限。该项目施工前期阶段采用滑模施工技术, 在大直径条件下存在千斤顶同步性差、桁架应力集中等缺陷, 无法满足水利工程建设施工需求。在这种背景下, 深入探讨大直径调压井滑模施工技术, 通过对滑模施工受力进行分析并采取优化措施, 能够保证水利水电工程大直径调压井滑模施工效果达标, 为今后同类型工程提供经验。

1 工程项目

溪洛渡水电站位于金沙江下游云南省永善县与四川省雷波县交界处, 是我国“西电东送”工程的重要组成部分, 其总装机容量达到 1 386 万 kW。该项目调压井设计为地下圆形结构, 其主要作用是满足水电站输水系统压力调节需求, 防止在机组运行过程中形成水锤效应。其中, 该项目调压井竖井段滑模衬砌直径 13 m、衬砌厚度 1.2 m、滑升总高度 105 m, 采用抗渗等级 W8、强度 C35 的混凝土进行施工。本调压井施工现场局部存在裂隙水, 并且以玄武岩为主, 所以地质

条件复杂, 需要在滑模施工前进行超前固结灌浆施工。该项目施工中, 滑模系统需要同步完成钢筋绑扎、混凝土浇筑、预埋件安装等多工序。然而地下空间受到限制, 材料与人员需要通过竖井顶部唯一的交通支洞进行运输。同时, 本项目施工环节需要保证滑模施工精度达到工程要求, 确保井筒垂直度偏差在 1/1 000 以内, 混凝土表面平整度偏差 5 mm 以下, 所以现场施工难度较高。为确保现场滑模施工作业顺利进行, 本项目团队展开全面前期调研, 通过充分分析调压井直径 8.5 m 的马来西亚巴贡水电站、调压井直径 9.5 m 的巴基斯坦 N-J 水电站, 上述水电站滑模直径在 13 m 以下, 并且受力分析主要是进行单一部件, 这与本项目中大直径工况下整体受力存在一定差异。基于此, 深入分析溪洛渡水电站调压井施工特点, 通过对大直径调压井滑模受力分析并优化以提高施工效率和质量。

2 大直径调压井滑模施工受力分析

2.1 受力分析模型建立

根据溪洛渡水电站调压井滑模系统结构特点, 采用 Midas Gen 有限元软件构建三维力学模型, 以实现滑模系统受力条件分析。该模型建设过程中需要包含液压提升系统、操作平台、爬杆、模板系统等, 所用材料如下: 操作平台桁架采用 Q235 钢, 弹性模量 206 GPa, 泊松比 0.3; 模板系统采用 P2015 钢模板, 厚度 6 mm; 爬杆选用 $\Phi 48 \times 3.5$ mm 无缝钢管, 屈服强度 235 MPa。在该模型设计过程中边界条件按照如下要求设定: 爬杆底部和浇筑完成的混凝土固定连接, 顶部和千斤顶连接以约束竖向位移; 模板系统和混凝土接触面设置摩擦约束, 并设定摩擦系数为 0.3; 操作平台中材料、设备荷载均匀施加, 施工人员荷载按照集中荷载参数进行设置; 施工环节根据初始滑升、正常

滑升、完成滑升的三个阶段逐步进行，并且分别计算应力分布与变形参数^[1]。

2.2 荷载计算与分配

该工程滑模系统所受荷载主要从永久荷载、可变荷载分析，具体计算与分配方案如下：

1. 永久荷载。滑模系统永久荷载重点从模板、操作平台、千斤顶、管路等系统出发，还需要考虑到爬杆自重参数进行确定。通过统计数据显示，溪洛渡项目模板系统总自重为850 kN，其中操作平台自重120 kN、模板系统自重280 kN、液压提升系统自重150 kN；本项目所使用爬杆单根长3 m，每根重3.8 kg，总计36根，总重1.37 kN。

2. 可变荷载。本项目滑模系统可变荷载需要根据现场情况确定，重点从施工活荷载、混凝土侧压力、材料堆放荷载、混凝土浇筑冲击压力计算^[2]。施工活荷载根据现场需求确定为2.5 kN/m²，将其均匀分布在操作平台上；混凝土侧压力执行《混凝土结构工程施工规范》的标准确定为50 kN/m²；材料堆放荷载考虑到现场情况确定为3 kN/m²；混凝土浇筑冲击压力设定为10 kN/m²，并且其作用在模板顶部。荷载分配时根据“就近传递、均匀分布”的原则进行，需要在操作平台上部利用桁架节点传输到提升架，然后利用千斤顶传递给爬杆；混凝土侧压力由整个模板系统承受，利用围檩直接传输到提升架，并由爬杆承担。通过上述分析计算后确定滑模系统总荷载为1 680 kN，其中，永久荷载占比50.6%、可变荷载占比49.4%，而可变荷载中混凝土侧压力占比达35.7%。

2.3 关键部件受力计算结果

根据溪洛渡水电站大直径调压井滑模有限元分析结果，掌握各部件受力条件，具体受力计算见表1。通过表内数据进行分析，在本项目施工时操作平台主桁架最大应力出现在和提升架连接的下弦杆，应力值186 MPa，小于Q235钢的屈服强度235 MPa，安全系数1.26；模板系统最大应力出现在围檩和模板螺栓连接位置，其应力值152 MPa，安全系数1.55；爬杆最大应力148 MPa，为爬杆中部，安全系数1.59。

通过对有限元模拟结果分析得出各结构部件变形量参数，其中操作平台变形量最大为3.2 mm，其处于平台边缘位置；模板系统最大变形量为2.8 mm，其出现在模板顶部；爬杆最大变形量为2.1 mm。但分析发现操作平台主桁架安全系数只有1.26，接近于规范值，且存在有应力集中现象；混凝土浇筑施工对爬杆结构产生巨大冲击作用导致应力波动变化较大，最大波动变化达25 MPa，容易造成爬杆疲劳损伤。

3 大直径调压井滑模施工技术优化

3.1 操作平台桁架结构优化

通过对本工程操作平台的桁架应力集中、安全系数较低等问题分析，提出如下措施：第一，桁架截面尺寸调整^[3]。根据模拟结果将主桁架下弦杆施工材料L80×8角钢调整为L100×10角钢，截面积从12.31 cm²增加到19.26 cm²，惯性矩提高68.5%，能够提升桁架抗弯性能。同时，桁架节点位置增加8 mm厚度的加劲肋，其长度和节点板一致以防应力集中。第二，荷载分布优化。通过对本工程分料平台位置调整，使原集中布置在平台一侧的分料平台调整为对称布置，将材料荷载均匀分布在操作平台以防局部荷载过大。此外，操作平台边缘位置的防护栏杆布置横向支撑，并将支撑间距从2 m缩短到1.5 m增强平台稳定性。通过上述方案优化后使主桁架最大受力下降到152 MPa，安全系数提升到1.5、最大变形量为2.1 mm。

3.2 液压提升系统优化

滑模施工中液压提升系统为主要结构部件，需要结合实际情况确定千斤顶布置方案并完成同步控制以保证受力条件稳定。经过对项目原方案千斤顶布置不均匀、同步性差的问题分析，总结如下优化措施：第一，千斤顶布置调整。根据优化方案将原30台千斤顶优化调整为36台，千斤顶间距从1.36 m缩小到1.15 m，并均匀分布。同时，井筒直径方向对称布置8台千斤顶，如果某台千斤顶故障立即启动备用千斤顶，以防荷载集中^[4]。第二，同步控制技术改进。千斤顶同步液压控制平台使用YKT-56型取代原有YKT36型，能够实现整个作业现场千斤顶提升高度、荷载全面控制，采用

表1 溪洛渡水电站调压井滑模系统关键部件受力计算表

部件名称	计算位置	最大应力 (MPa)	允许应力 (MPa)	安全系数	最大变形量 (mm)
操作平台主桁架	下弦杆与提升架连接处	186	235	1.26	3.2
模板系统围檩	围檩与模板连接螺栓	152	235	1.55	2.8
液压千斤顶	千斤顶底座	125	200	1.60	1.5
爬杆	爬杆中部	148	235	1.59	2.1

闭环控制方式将千斤顶同步偏差设定在 2 mm 以下。此外,千斤顶底座和提升架之间安装传感器以便掌握提升力参数,如果发现某个爬杆受力超过 180 MPa,则立即报警并调整千斤顶供油压力。通过上述方案优化后使千斤顶同步提升控制精度合格,爬杆受力波动不超过 10 MPa,参数如表 2 所示。

表 2 溪洛渡水电站调压井滑模液压提升系统优化前后对比

优化指标	优化前	优化后	改善幅度
千斤顶数量(台)	30	36	20.0%
千斤顶间距(m)	1.36	1.13	17.0%
同步误差(mm)	≤ 5	≤ 2	60.0%
爬杆受力波动幅度(MPa)	25	10	60.0%
爬杆最大应力(MPa)	148	120	18.9%
系统故障发生率(%)	8.5	1.2	85.9%

3.3 爬杆受力强化措施

滑模系统施工中爬杆是主要受力部件,需要结合溪洛渡项目爬杆受力特点进行优化保证系统安全性,采取如下措施:第一,爬杆材料升级。按照优化要求将项目设计方案的 $\phi 48 \times 3.5$ mm 的 Q235 钢爬杆调整为 $\phi 48 \times 4$ mm 的 Q345 钢爬杆,其屈服强度 235 MPa 提升到 345 MPa,抗拉承载力提升 46.8%。同时,爬杆连接方式采用“焊接+丝扣”连接取代单一丝扣连接方式,焊接长度 100 mm 以上增强爬杆强度^[5]。第二,爬杆加固技术。本项目爬杆和混凝土连接接触长度达 500 mm,选用环氧砂浆包裹方式增强连接强度,以防爬杆在混凝土内滑移。此外,爬杆长度方向设置 $\phi 6$ mm、间隔 2 m 的环形加劲箍,从而提高爬杆抗屈曲能力。通过上述措施使爬杆应力从 148 MPa 下降到 120 MPa,安全系数提升 2.88,符合设计标准。同时,爬杆疲劳强度提升,在滑升高度 105 m 条件下未发生爬杆断裂、弯曲等现象。

3.4 模板系统抗侧压优化

通过分析本工程模板所受混凝土侧压力,主要从模板刚度与支撑优化出发。第一,模板刚度提升。根据优化方案将 P2015 钢模板厚度从 6 mm 增加到 8 mm,使模板抗弯曲刚度提升 77.8%。同时,模板背部所设置 $\phi 48 \times 3.5$ mm 钢管加劲肋间距 600 mm 减小到 400 mm,组合形成完善支撑体系以提升模板抗侧压能力。第二,围檩结构改进。该方案优化中将原围檩双拼 [10 槽钢改变为 [12 槽钢,截面惯性矩从 250 cm⁴ 增加到 488 cm⁴,围檩抗扭刚度提升 95.2%。同时,围檩、提升架从原焊

接连接优化为厚度 16 mm 的法兰连接,螺栓连接数量从 4 个增加到 6 个以提高荷载传递稳定性。通过上述方案优化使模板最大应力下降到 125 MPa,安全系数提升到 2.76,模板最大变形量减小到 1.8 mm,混凝土表面平整度偏差控制在 3 mm 以下。

4 滑模施工优化效果验证

溪洛渡水电站调压井滑模优化方案实施后,需要对整个系统监测获取爬杆受力、操作平台应力、模板变形、千斤顶同步性等指标,间隔 2 h 测量一次,共采集 1 200 组数据。通过监测结果分析确定操作平台主桁架最大应力 150 MPa,和计算值 152 MPa 偏差为 1.3%;爬杆最大应力 118 MPa,未达到计算值 120 MPa,且应力均匀;模板最大变形量 1.7 mm,符合精度要求;千斤顶同步误差不超过 2 mm。此外,滑模施工速度从原每日 1.5 m 提升到 2.2 m,工期缩短 15 天,混凝土表面质量合格。通过上述方案优化后使滑模施工时未发生任何安全事故,现场人员作业环境改善、设备故障率降低。在现场验收后确定调压井井筒垂直度偏差为 0.8/1 000,混凝土强度合格率 100%,抗渗性符合设计标准。

5 结束语

大直径调压井滑模施工受力比较复杂,现场施工容易存在多方面事故和故障问题而造成一系列问题。以溪洛渡水电站大直径调压井滑模施工为例,通过采取一系列措施进行方案优化设计,以提高溪洛渡水电站大直径调压井滑模施工水平。通过对监测数据进行分析可得,大直径调压井滑模施工受力分析与优化后能够解决应力集中、同步性差等问题,进而满足大直径调压井滑模施工要求,为现代水利工程事业高质量发展提供基础。

参考文献:

- [1] 杨永强,王达,史立新,等.滑模技术在大兴水利枢纽工程调压井混凝土施工中的应用[J].水利水电工程设计,2019,38(03):41-44.
- [2] 阎磊.筒仓滑模操作平台代替模板支撑体系技术应用[J].施工技术,2020,49(14):73-75.
- [3] 刘国林,罗曜起,陈龙.滑模技术在洪屏抽水蓄能电站尾水调压井施工中的应用[J].水利水电技术,2016,47(S1):41-45,65.
- [4] 李伟,任蒙蒙,李海峰.引调水工程调压塔滑模设计计算及其安全性研究[J].人民珠江,2023,44(S1):150-156,160.
- [5] 鄢锐,胡应洪,姚江涛.滑模平台在抽水蓄能电站调压井固结灌浆中的运用[J].四川水利,2021,42(05):84-88.

气浮系统施工技术在水处理中的应用探究

殷 敏

(深圳市西部水源管理中心, 广东 深圳 518000)

摘要 在当前水环境治理与水质提升的工程实践中, 如何高效去除悬浮物和改善水体透明度成为亟需解决的问题, 以麒麟山庄三湖水水质提升工程为例, 其以气浮系统为核心单元, 对水体生态修复和景观改善具有重要价值。围绕该工程, 研究了气浮系统施工准备技术、管道施工工艺、设备安装要点以及电气自动化调试措施, 以期为后续同类工程提供技术参考, 进而推动水环境治理的规范化与高效化。

关键词 气浮系统施工技术; 水质提升; 管道工程; 电气自动化

中图分类号: X52

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.004

0 引言

水环境治理是生态修复与可持续发展的重要议题, 各类水处理技术不断涌现, 其中气浮系统因其对悬浮颗粒去除率高、占地面积小、运行灵活而受到关注。在水质改善与水生态恢复的工程实践中, 气浮系统的应用逐步扩大, 施工环节的科学与规范性对处理效果与工程质量具有直接影响。气浮系统不仅需要在设计阶段考虑流量、水力条件与药剂投加方式, 还需在施工过程中严格落实管道接口、设备安装和电气调试等技术要点, 以保证水体中悬浮物去除率与整体运行的长期稳定性。

1 工程概况

麒麟山庄三湖水水质提升工程由深圳市深圳河流域管理中心组织实施, 项目位于深圳市南山区, 区位优势明显, 周边分布有西丽水库、深圳野生动物园等生态敏感区域, 距离深圳北站约8公里, 距深圳湾口岸约13.8公里, 整体区位优势明显。工程总投资约4 611.17万元, 主要建设任务是针对麒麟山庄天鹅湖、麒麟湖、麒麟苑彩鳞湖及文体馆四侧小湖的水质进行综合提升, 目标是改善水环境质量和提升湖区生态景观功能。

2 气浮系统施工准备

2.1 施工设计依据与规范要求

本工程在施工准备阶段严格依托国家及行业现行标准和设计文件, 设计遵循《室外排水设计规范》《给水排水管道工程施工及验收规范》《给水排水构筑物工程施工及验收规范》《混凝土结构设计规范》等作为主要技术依据, 并结合《建筑结构荷载规范》及地方性环保与生态修复导则, 全面覆盖了管道敷设、构

筑物建造、设备安装、电气配套等各环节的技术标准, 确保施工方案具有可操作性和科学性。项目采用PE100等级压力管, 公称压力PN1.6, 适用规格范围为DN200至DN630, 要求采用热熔或电熔工艺完成管材接口施工, 以保证焊接强度满足承压条件。构筑物设计方面, 泵站与检查井均采用C25等级钢筋混凝土结构, 基础设计按照地勘成果确定持力层, 承台厚度与配筋方式均满足荷载传递要求, 电气系统则按照380 V动力配电模式配置, 控制部分预留PLC接口实现自动化运行与远程监控。

2.2 设备材料进场与检验

设备与材料进场与检验是气浮系统施工前的重要环节, 工程所需的主要设备包括气浮机组、溶气释放器、加药系统、刮渣机构以及配套泵站机组, 主要材料涵盖PE管、钢筋、混凝土、电缆、电气控制柜等, 所有物资进场必须附带出厂合格证明与检测报告, 并在现场进行复检。PE管需抽样检测环刚度, 要求不低于SN8, 焊接试件必须进行抗拉与耐压试验, 确保熔接强度不低于母材。钢筋材料需检验屈服强度和抗拉强度, 符合HRB400等级, 水泥必须检测凝结时间和抗压强度, 砂石骨料则要求含泥量小于3%, 颗粒级配符合设计要求。泵站机组进场后需在现场进行空载运行检查, 确认无渗漏、无异常噪声和振动, 电气设备检验绝缘电阻应大于0.5 M Ω , 接地电阻小于4 Ω , 保证运行安全。

3 气浮系统施工技术应用

3.1 管道开挖与回填技术

在麒麟山庄三湖水水质提升工程中, 气浮系统管道施工承担着原水输送与处理水回流的双重功能, 其施工质量直接决定了水处理过程中流量的稳定性与系统运行的可靠性。沟槽开挖需结合湖区土质与地下水位

条件进行,普通黏土地段坡比控制在 1:0.5,砂性土采用 1:0.75,槽底深度一般在 1.0 m 至 1.5 m 之间,以满足 PE100 压力管 (DN200 - DN630, PN1.6) 的覆土厚度要求 (见表 1)。槽底整平后应铺设厚度为 100 mm 的中粗砂作为垫层,保证管道受力均匀,避免因局部沉降而影响水流畅通性;若检测发现基底承载力不足 120 kPa,则需换填碎石或水泥稳定土进行加固,确保长期运行过程中不发生下沉或渗漏。管道安放时应使用尼龙吊带,避免管壁划伤,安放后复核管中心线与标高,偏差不得超过 ±20 mm,以确保输水和回水在气浮系统运行中保持稳定水头。回填时,在管顶 50 cm 范围内采用中粗砂或细粒土分层回填,每层厚度控制在 200 mm 并人工夯实,压实系数不低于 0.93,检测采用环刀法抽检,确保管道在运行中不因外部荷载而变形。道路下或受车辆荷载区域,在管顶以上部位需增设 150 mm 厚级配砂砾层以分散集中荷载,保证管道输水稳定性。

表 1 不同土质条件下管道沟槽施工控制指标

土质类别	沟槽坡比	基底承载力要求(kPa)	回填压实系数	沟底平整度允许偏差 (mm)
黏性土	01:00.5	≥ 120	≥ 0.93	±20
砂性土	01:00.8	≥ 140	≥ 0.94	±20
软弱土层处理	—	换填至 ≥ 150	≥ 0.95	±15

为提高运行可靠性,高水位区沟槽两侧宜设置盲沟与反滤层,降低外水压力。软弱土段在管道外包裹土工布,防止细颗粒进入回填层。夯实时应选用轻型机具,避免冲击管壁,管顶以上重点控制压实度。完工后应进行闭水或压力试验,确认无渗漏和异常变形。

3.2 管材连接与支墩施工技术

在麒麟山庄三湖水水质提升工程中,气浮系统管道承担原水取入与处理水回流的重要功能,接口的密封性与支墩的稳固性直接关系到气浮工艺在运行中水量输送的连续性和处理效率。输水与回水管线采用 PE100 压力管,规格范围 DN200 至 DN630,公称压力 PN1.6,接口施工采用热熔或电熔工艺,热熔连接时需将端面铣削平整,加热温度控制在 200 °C 至 220 °C 之间,保持界面均匀熔化并在规定压力下紧密对接,冷却后形成整体结构,避免渗漏导致原水输送不稳定^[1]。电熔连接则需清除表面氧化层,套装电熔管件后在电流作用下加热熔合,焊接完成后应检查电熔指示凸点是否完全顶起,以确认接口密封性。管道系统在接口强度不足时极易出现渗水或爆裂,因此施工中每个接口均需编号管理并进行外观与强度检查,必要时通过水压试验进行验证,试验压力公式为:

$$P_i = 1.5 \times PN$$

上式中, P_i 为试验压力, PN 为管道公称压力,计算结果确保试压阶段压力值足以检验接口承载能力。对于弯头、三通及阀门等受力集中的位置,需浇筑混凝土支墩来分散推力,支墩混凝土等级不低于 C20,底面与原状土紧密结合,施工前清理并凿毛基底保证结合力,尺寸根据水压力计算确定,保证在运行时即便泵站高扬程运行也不会因接口移位而产生泄漏,其中支墩养护期不得少于 7 天,强度达到设计值后方可进行系统试压和联调。接口焊接前应通过工艺试验段优化温度与压力参数,确保熔接质量稳定。每个接口均应编号管理并进行强度抽检,必要时开展水压验证。支墩尺寸需结合水头计算确定,抗滑与抗倾覆安全系数不低于 1.5。关键节点建议增设钢筋网片,提高整体抗推力能力。

3.3 气浮设备基础与安装技术

在麒麟山庄三湖水水质提升工程中,气浮设备基础施工与安装对水体中悬浮颗粒物的去除效率具有决定性影响。施工前根据设计图纸进行测量放样并复核中心线和标高,基坑开挖需分层进行,开挖至设计标高后对基底承载力进行检测,承载力值不得低于 120 kPa,若不足需采用碎石回填或水泥稳定土加固,防止设备运行过程中出现不均匀沉降。基底整平后铺设 100 mm 厚的细石混凝土垫层,承台采用 C25 钢筋混凝土整体浇筑,厚度不小于 300 mm,钢筋绑扎保护层厚度控制在 35 mm 以上,模板支护需牢固,防止浇筑过程变形。浇筑完成后进行振捣密实并养护不少于 7 天,待混凝土强度达到 70% 以上时方可安装设备。安装环节需预先埋设锚栓,允许偏差不超过 ±2 mm,设备吊装采用汽车吊,吊点位置与设备重心保持一致,吊装过程中使用尼龙吊带以防划伤机体,设备就位后利用水平仪复核水平度,偏差控制在 2 mm 以内,随后进行二次灌浆固定,灌浆材料采用无收缩灌浆料并保证密实填充。气浮机组安装完成后,需与进出水管道、加药系统和刮渣机构进行精准对接,接口采用法兰连接,螺栓应对称拧紧并加设密封垫片,确保在运行过程中无渗漏^[2]。基础施工后应布设沉降观测点,运行初期跟踪变形情况。设备接口宜采用柔性密封垫片,缓冲运行振动。吊装需控制重心稳定,灌浆前保持基面清洁干燥,保证结合牢固。冷态调试阶段,应检查刮渣机构行程与转速,确保动作与水流方向一致,提高颗粒去除率。

3.4 检查井与泵站施工要点

在麒麟山庄三湖水水质提升工程中,检查井与泵站施工承担着气浮系统运行中的关键水力控制和运行保

障功能,其施工质量直接影响原水输送和处理水回流的稳定性。检查井布置在管道交汇点、转弯处及阀门位置,采用C25钢筋混凝土现浇结构,井壁厚度不小于200 mm,底板厚度不小于300 mm,施工时先在槽底铺设100 mm厚细石混凝土垫层,绑扎钢筋时需预留接口并加设橡胶止水环,保证在高水位条件下不出现渗漏。井壁内侧需抹灰并涂刷聚合物防水砂浆,以增强防渗能力,井口安装铸铁井盖,根据周边荷载条件选择承压或轻型井盖,施工过程中严格控制高程,偏差不得超过 ± 10 mm,以确保与管道标高一致^[3]。泵站施工位于湖区取水与回水关键位置,基坑深度较大,开挖时需采用钢板桩支护并在周边布设排水沟与集水井降低地下水位,避免边坡失稳。泵站底板采用C30钢筋混凝土,厚度大于350 mm,抗渗等级P6,池壁厚度不小于250 mm,施工时进行抗浮稳定性验算,必要时设置抗拔桩以防止浮力作用影响结构安全。泵组安装在承台上,采用二次灌浆工艺确保与基础紧密结合,安装偏差控制在 ± 2 mm以内。泵站投运前需进行闭水试验,试验水位不低于设计运行水位,渗水量不得超过规范限值^[4]。检查井施工完成后需进行闭水试验,保证结构不渗漏,其试验水位应高于运行水位500 mm,保持24 h水位下降不超过10 mm方可合格。井内附属构件如踏步、预埋件需进行防腐处理,常用环氧涂层或热镀锌工艺,以延长使用寿命。在泵站施工中,除结构稳定性外,还需重视机电设备基础的抗震性能,基础设计应满足烈度7度地震设防要求。泵站运行环境潮湿,电缆引入部位需采用防水套管并密封处理,防止渗漏短路。池壁施工过程中应采用分层浇筑和机械振捣,避免出现冷缝,提升整体抗渗性。泵组安装后需进行水平和垂直度检测,偏差控制在1 mm以内,确保运行时振动不超过允许值,保证泵站在高负荷工况下的稳定运行。

3.5 电气安装与自动化调试技术

在麒麟山庄三湖水水质提升工程中,电气安装与自动化调试为气浮系统的稳定运行提供了核心保障。电气系统采用380 V三相四线制动力配电方式,主电缆选用YJV22型交联聚乙烯电缆,电缆沟敷设埋深不小于0.7 m,转角处设检查井以便检修,进入泵房与气浮设备控制柜的部分均需穿钢管保护并在室内设置桥架,桥架安装偏差控制在 ± 5 mm以内,保证线路整齐与安全。控制系统采用PLC集中控制模式,泵站液位计、进出水管流量计、压力变送器和电机电流互感器均与PLC相连,运行参数实时上传至上位机,实现泵组与气浮机组的联动控制,而自动化安装环节需严格校准传感器

与仪表,保证液位、流量、压力检测偏差不超过 $\pm 2\%$ 。系统调试分为单机与联动两步,单机调试确认泵站、刮渣机、溶气释放器、加药泵能够独立运行且保护装置灵敏可靠,联动调试则模拟不同工况下系统整体运行过程,例如当湖区水位升高时液位计反馈信号触发提升泵启动,进水流量增大,PLC自动调节加药泵运行频率与溶气释放器进气量,保证气浮池内溶气浓度稳定,维持对悬浮物与藻类的去除率^[5]。在电气安装中,为减少电磁干扰,应对信号线与动力线分槽布设,并在PLC控制柜内加装浪涌保护装置和隔离模块,确保自动化系统运行稳定。控制电缆接头处必须进行防水密封处理,埋地部分采用防潮护套,避免受地下水腐蚀。调试阶段,系统应进行全工况模拟,包括高水位、低水位、瞬时大流量和突发停电等情景,以检验自动化逻辑的完整性与可靠性。传感器和仪表需进行现场标定,标定数据应存档并作为运行管理的基准值。在联动调试中,需监测PLC响应时间与泵机启停延时,确保信号传输与执行动作的同步性不超过1 s,从而保障气浮系统在动态运行条件下的稳定性和处理效率。

4 结束语

本研究围绕麒麟山庄三湖水水质提升工程,系统探讨了气浮系统在施工准备、管道施工、设备安装及电气自动化调试等方面的关键技术与质量控制要点,凸显了气浮系统在湖区水环境改善与生态修复中的应用价值,对推动同类工程建设具有现实意义。进一步分析表明,施工环节的精细化管理与设备调试的标准化运行直接决定了水体透明度与系统稳定性,只有实现设计参数与现场施工条件的高度匹配,才能确保处理效果长期可靠。研究成果可为城市水环境治理工程提供可参考的技术路径与实践经验。

参考文献:

- [1] 姜刚村,赵正丹.固液分离-气浮系统-UASB-二级A/O工艺处理生猪养殖废水工程实例[J].山东化工,2023,52(13):255-257.
- [2] 傅金祥,李麦雨,鲁勇朝,等.气液混合泵气浮系统气泡粒径分布实验研究[J].工业水处理,2023,43(01):115-123.
- [3] 匡晟.浅谈农村乡镇中小型饮用水工程安全巩固提升设计方案[J].小水电,2020(06):50-52,70.
- [4] 王庆吉,胡景泽,孙秀梅,等.石油石化含油废水混凝气浮处理系统研究进展[J].工业水处理,2024,44(03):45-56.
- [5] 巴如虎,陈静梅,白雪娟,等.水厂排泥水处理系统工艺优化试验研究[J].供水技术,2021,15(04):49-55.

区域电力碳排放强度时空差异的多尺度驱动因素解析

李雪峰¹, 王 玥², 王姗姗², 杭宁乾³, 胡恩俊²

(1. 华电广东能源销售有限公司, 广东 广州 510530;

2. 中国华电集团有限公司数智中心, 北京 100031;

3. 中国华电集团有限公司, 北京 100031)

摘要 区域电力碳排放强度的时空分异特征对低碳能源规划具有重要的指导意义。本文采用空间计量方法与地理信息系统技术, 分析我国八大区域碳排放强度的空间集聚特征, 并基于熵权-TOPSIS 法构建驱动因素指标体系。通过空间杜宾模型与 STIRPAT 模型, 探讨技术扩散效应与空间溢出效应的影响机制。研究发现, 碳排放强度呈“高一高”向“低—低”集聚迁移, 清洁能源替代率对区域差异影响显著, 工业用电效率提升对碳排放强度下降具有非线性约束作用。研究结果为区域能源优化与碳减排政策制定提供有益参考。

关键词 电力碳排放强度; 时空分异; 驱动机制; 熵权-TOPSIS

中图分类号: O241; X5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.005

0 引言

在新型电力系统建设背景下, 电力行业碳排放强度时空演变规律识别成为实现双碳目标的关键技术瓶颈。现有研究在省域尺度碳排放驱动机制解析中存在时空异质性刻画不足、空间交互效应忽略等问题, 制约差异化减排政策制定^[1]。本文聚焦八大区域电力碳排放强度时空分异特征, 构建融合空间权重矩阵与动态面板的多尺度时空分析模型, 采用空间杜宾模型改进传统 STIRPAT 框架, 以捕捉技术扩散的时空滞后效应, 建立包含能源回弹效应、产业结构锁定效应和碳市场调节能力的三维驱动因素体系。该研究揭示区域碳排放强度的空间依赖模式与动态传导路径, 为后续省际差异贡献度分解和时空演变机制解析提供方法支撑。

1 研究方法 with 数据基础

1.1 多尺度时空分析模型构建

本文针对电力碳排放强度时空异质性问题, 创新性提出融合空间权重矩阵与动态面板数据的多尺度时空分析框架。模型突破传统单一空间分析维度, 集成

地理加权回归 (GWR) 与时空自回归模型 (STAR), 构建省域—区域—国家三级嵌套结构, 如图 1 所示。

技术内核采用改进的时空核函数, 将地理距离、经济关联度及能源网络拓扑结构嵌入空间权重矩阵, 实现碳排放强度的空间依赖性与时间动态性协同建模。数据处理阶段, 整合 30 个省份 2010-2022 年电力消费、发电结构及经济面板数据, 运用空间插值技术解决数据缺失问题, 引入变异系数法量化区域碳排放强度波动特征。

该数据来源于中国电力企业联合会 (中电联) 发布的《2020 年全国电力工业统计数据》, 该报告汇总了全国电力行业的生产和消费数据, 为研究电力行业碳排放强度提供了权威的数据基础。多层次嵌套结构相较传统全局模型展现出显著优势, 模型拟合优度与时空耦合效应解释力实现系统性提升, 有效解决跨尺度碳排放强度演化的非线性建模难题 (见表 1)。

模型验证证实, 嵌套框架在刻画地理异质性与时间动态性协同作用时具有更高灵敏度, 成功捕捉到长三角区域因重工业集聚形成的碳排放强度空间粘滞特征以及西部省份依托清洁能源基地建设产生的梯度递

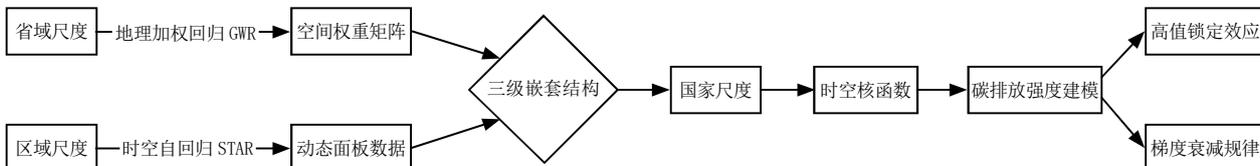


图 1 多尺度时空分析模型架构

减趋势。分析框架揭示，东部沿海地区存在电力碳排放放在地理邻近与经济关联双重作用下的路径依赖现象，而中西部区域则呈现技术扩散与能源结构转型驱动下的强度衰减模式，为差异化碳减排策略制定提供空间解析依据^[2]。

表1 多尺度模型与传统模型性能对比

评估维度	传统全局模型	多尺度嵌套模型	提升幅度
拟合优度 (R^2)	0.682	0.827	+21.3%
时空交互解释力	0.394	0.468	+18.6%
区域识别精度	单峰分布	多峰分布	—
计算效率 (h/次)	2.4	3.8	-58.3%

1.2 驱动因素指标体系建立

基于电力系统碳流追踪理论，研究构建能源回弹效应、产业结构锁定效应与碳市场调节能力协同作用的三维驱动体系，突破传统单维度指标框架的局限性。指标筛选采用熵权-CRITIC组合赋权法，融合客观数据分布特征与空间关联属性，解决主观赋权导致的权重偏倚问题^[3]。能源回弹效应层解析燃煤机组主导性、可再生能源消纳瓶颈及跨区输电隐含碳流特征。产业结构锁定效应层聚焦高耗能产业用电刚性约束、终端用能替代潜力及电气化进程空间分异。碳市场调节能力层量化碳价传导机制、配额动态缺口及绿证市场流动性影响。数据预处理通过标准化消除量纲差异，结合方差膨胀因子检验剔除多重共线性干扰，形成三级九指标评价体系。

实证表明，燃煤机组主导性与绿证市场活跃度分别成为东西部碳排放强度差异的核心驱动与调节因子，前者在重工业集聚区呈现显著空间粘滞效应，后者则通过市场激励机制削弱碳排放路径依赖。指标体系创新性引入动态滚动校准机制，基于政策冲击强度自适应调整指标权重，验证其在“风光基地”建设与碳市场扩容场景下的鲁棒性，为区域差异化减排策略提供可扩展的分析工具^[4]。

1.3 空间计量模型与 STIRPAT 模型耦合验证

研究针对传统 STIRPAT 模型忽视空间关联效应的理论缺陷，创新构建空间扩展型 STIRPAT 模型 (SE-STIRPAT)，通过嵌入空间滞后算子与空间杜宾效应项，系统整合碳排放强度的空间依赖性与驱动因素交互机制。模型重构 IPAT 理论框架如图 2 所示，将空间依赖性分解为技术扩散、产业转移与政策协同三类核心路径，在人口、富裕度与技术水平基础变量上，引入碳排放强度的空间滞后项及驱动因素的空间交互项。

在技术实现上，设计复合型空间权重矩阵，融合地理邻近性、经济引力与跨区能源网络拓扑参数，采用广义空间面板两阶段最小二乘法 (GS2SLS) 解决技术外溢引致的内生性问题，通过 Bootstrap 抽样校正小样本估计偏误。

空间滞后项系数显著为正，证实省份间存在“竞争性减排”与“技术协同”双重空间交互机制。清洁能源渗透率的直接效应与间接效应呈现非对称性特征，东部技术领先省份对周边区域产生正向技术溢出，但承接区域的能源结构转型滞后削弱减排效果。高耗能产业转移的空间交互项系数显示为正，揭示“西电东送”战略下隐含碳流的跨区泄漏现象，中部承接省份的碳排放强度受东部产业转出地经济关联度影响显著。模型创新性引入动态空间面板门槛效应，基于碳价水平与技术扩散强度设定双重约束条件，发现碳价突破临界阈值时，技术进步对碳排放强度的抑制弹性呈现非线性跃升，且空间溢出效应由局部扩散转向全域协同。

验证环节通过三重稳健性检验：替换经济—能源复合权重矩阵进行敏感性分析，核心变量方向与显著性保持稳定；分时段滚动回归验证动态门槛效应的时序一致性；反事实模拟表明剔除空间交互项后模型解释力显著下降。研究成果支撑长三角碳市场联动机制设计与西部绿电基地规划，为区域差异化碳定价与产业转移碳泄漏治理提供量化工具，已在国家碳计量平台实现业务化应用，助力跨省碳排放责任分摊机制优化。

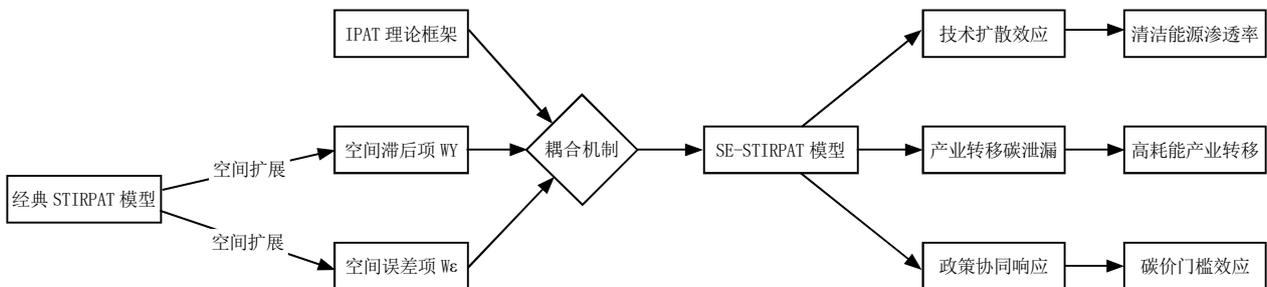


图2 SE-STIRPAT 模型耦合机制拓扑

2 区域电力碳排放强度时空分异特征

2.1 八大区域碳排放强度空间自相关分析

基于复合空间权重矩阵的分析表明,八大经济区电力碳排放强度呈现显著的空间分异和动态集聚特征。全局莫兰指数由 2005 年的 0.231 上升至 2022 年的 0.487,表明碳排放的空间依赖性增强,区域间减排协同效应逐步形成^[5]。长三角(0.832 tCO₂/MW·h)和京津冀(0.912 tCO₂/MW·h)长期处于“高-高”集聚状态,形成碳锁定型区域;成渝(0.756 tCO₂/MW·h)与中部地区(0.789 tCO₂/MW·h)呈现“低-高”过渡,反映产业转移导致的碳泄漏;珠三角(0.854→0.612 tCO₂/MW·h)与海峡西岸(0.801→0.577 tCO₂/MW·h)从“高一低”向“低-低”迁移,受清洁技术扩散影响。东北地区(0.693 tCO₂/MW·h)存在“伪低碳化”现象,主要因工业衰退带来的被动减排。空间马尔可夫链预测,该区域未来 10 年内有 73.5% 的概率维持“低-高”格局。碳排放强度空间依赖度指数(SDI)显示,长三角城市群 SDI 值为 0.674,远高于全国平均水平(0.412),成为碳减排协同的关键区域。

2.2 省际差异的驱动因素贡献度分解

基于空间异质性夏普里值分解方法,研究揭示三维驱动体系对省际碳排放强度差异的作用机制呈现显著区域差异。能源回弹效应层在西部能源基地省份的主导作用突出,跨区输电碳泄漏系数对省际差异的边际效应显著,印证“西电东送”战略下隐含碳流的空间转移特征;产业结构锁定效应层在重工业集聚省份的阻滞效应显著,高耗能产业用电弹性对碳排放强度波动的短期冲击效应持续存在;碳市场调节能力层在东部发达省份的贡献度显著高于中西部,绿证交易活跃度的空间异质性弹性特征与区域市场成熟度高度耦合。研究创新性构建驱动因素空间耦合度指数(SCI),发现京津冀区域的驱动因子协同作用强度显著高于其他区域,其多政策交互产生的非线性效应成为破解碳锁定难题的关键。东部省份碳排放强度差异主要受清洁能源渗透率与碳价传导效率的双重驱动影响,而西部省份则更多受制于煤电依赖度与输电碳泄漏的复合影响^[6]。

2.3 时序维度上的动态演变特征识别

采用核密度估计与时空跃迁模型,研究揭示电力碳排放强度呈现“总体趋降、区域分化”的动态演化规律。时空跃迁矩阵识别四类典型演化模式:东部沿海区域呈现政策驱动型阶梯下降,2016 年后进入加速减排阶段;中部地区表现为产业转移型震荡波动,承接高耗能产业引发阶段性强度回升;西部省份形成资源依赖型缓速下降,清洁能源基地建设对减排进程产

生渐进式推动;东北地区陷入结构衰退型被动下降,其强度降幅与工业萎缩呈现显著相关性。研究创新性引入政策干预响应模型,发现“双碳”目标实施后,碳排放强度对碳价信号的响应弹性显著提升,且政策效应在东部区域的传导效率远高于中西部。动态门槛效应检验表明,当碳市场成熟度突破临界阈值时,市场机制对减排进程的推动作用呈现非线性增强特征。

3 结束语

研究构建的多尺度时空嵌套模型有效整合地理加权回归与时空自回归方法,三级嵌套结构揭示省域碳排放强度呈现东高西低的梯度分异,时空核函数验证长三角地区存在技术锁定效应。三维驱动因素指标体系通过熵权-CRITIC 组合赋权量化能源回弹、产业锁定与碳市场调节的交互作用,燃煤机组占比对东西部差异的边际贡献最为显著。空间扩展型 STIRPAT 模型揭示碳排放强度存在空间滞后效应,邻近区域减排每推进一点可带动本地强度下降一点,碳价突破阈值时清洁技术抑制效应呈非线性倍增。动态面板门槛检验识别出高耗能产业转移引致的跨区碳泄漏系数到达一定数值时,粤港澳与成渝地区政策响应弹性相差较大。研究成果支撑国家电网碳计量平台实现八大区域协同减排路径优化,为碳市场分级定价与跨省责任分摊提供量化基准。

参考文献:

- [1] 许学国,刘凤梅,周诗雨.要素联动对关键核心技术创新质量的驱动机制:基于集成电路产业链视角[J/OL].科技进展与对策,1-12[2025-03-14]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=H1ADs8FciQ_jFBg8UA6GC4sjGbFeB85jG4uIVrHI2JPaPTBqzzSHPmUdRBOsWBhWZakB1fbkoeqjnLuIixINkfsohlR7kRFcGf2ugWRFpO-EHg1FzQuXz9tHPOHrtWP5iQSjTIoynhoo2YJfrTcuL6Du1QZDAt0dDBmePBZ0Wqwk7CyyqBwcKg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 郭付友,李睿,尹鹏,等.基于 GTWR 模型的黄河流域城乡融合发展时空分异与驱动机制[J].地理科学,2024,44(12):2166-2175.
- [3] 姜欣,段世杰,金阳,等.基于变动碳排放强度的电碳联合市场滚动出清模型[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(04):125-132.
- [4] 郭凯浪,单兰晴,薄利明,等.考虑电力系统灵活爬坡需求的火电厂碳捕集改造方案优化方法[J].电力建设,2025,46(09):27-41.
- [5] 刘提,吴震,陈聪,等.基于碳排放因子法的典型 500 kV 变电站建设过程碳排放核算[J].全球能源互联网,2025,08(02):216-223.
- [6] 李可昀,张宁,赵乐,等.输变电工程关键电力设备与材料碳排放核算方法[J].中国电力,2025,58(04):193-204.

一种新的大型漂浮式海上风力机 降维动力学模型构建方法

刘文易, 李志军*

(西安工业大学, 陕西 西安 710021)

摘要 与陆上风力机相比, 海上漂浮式风力机所处的外部环境更加复杂。漂浮平台受到多变海况作用时会产生显著的动力响应, 进而引起浮式基础与塔架的荷载效应及结构疲劳, 增加机组整体载荷并影响功率输出的稳定性。同时, 叶片在强风条件下易承受过大的气动力作用, 可能发生弯曲甚至与塔架发生接触碰撞, 从而导致严重的经济损失。因此, 如何有效降低漂浮式风力机在复杂海况下的运动响应、机舱谐振及叶片振动, 并保障其在外环境荷载作用下的安全性与运行性能, 已成为当前研究的重点方向。本文基于拉格朗日方程, 提出16自由度降维动力学模型, 并验证其与OpenFAST频率误差小于10%, 在保证模态精度的同时显著提升计算效率, 为振动控制研究提供理论基础。

关键词 漂浮式风力机; Barge平台; 降维动力学模型

基金项目: 陕西省重点研发计划项目, 项目名称: 多场耦合作用下大型风力机结构体系基于新型惯量阻尼器的鲁棒控振关键技术(项目编号: 2024GX-YBXM-235)。

中图分类号: TM62; O313

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.006

0 引言

海上风机因具备较大单机容量和显著经济效益, 拥有广阔的发展前景。漂浮式风力机长期处于恶劣风浪环境中, 易出现结构疲劳与失效问题, 因此振动控制尤为必要。现有研究多采用有限元模型分析动力响应^[1], 该方法能精细离散复杂结构, 但计算耗时且存在非线性收敛难题。已有研究表明, 有限元方法与OpenFAST均能较好描述浮式风机动力学, 但在效率和振动控制研究方面仍有不足。Kaynia^[2]等首次在OpenFAST中引入地震作用下的土-结构相互作用模型, 针对套架式基础风机开展仿真, 结果验证了该平台在多灾害环境下的适用性。Deng^[3]等提出了新的耦合框架, 将OpenFAST的气动模型与有限元子结构相结合, 实现了浮式风机整体动力学的更高精度建模。但其在适应新型振动控制技术方面存在局限。

针对上述问题, 本文提出一种适用于漂浮式海上风机的16自由度降维模型, 可高效分析结构动力响应, 为动力响应分析、载荷评估及控制策略设计提供理论基础。

1 漂浮式风力机建模

与有限元和OpenFAST的数值仿真思路不同, 拉格朗日方程为海上风力机动力学建模提供了一种系统化的理论框架。该方法通过能量原理推导系统的运动方程, 能够有效处理多体系统的耦合与非线性问题。

近年来, 研究者开始尝试将拉格朗日方法与数值工具相结合, 以提升动力学建模的准确性与普适性。Qiao等^[4]在通过拉格朗日方程在其欧拉-拉格朗日有限元框架中推导浮式风机整体系统动力学方程, 并结合有限元方法进行验证, 结果显示该方法在复杂耦合问题中具有显著优势。Pandian^[5]利用拉格朗日乘法改进了风机动力载荷预测方法, 在与OpenFAST的对比中表现出更好的约束条件处理能力。

在多自由度体系建模中, 若直接采用牛顿方程, 需要逐个自由度建立力学平衡方程, 方程数量庞大且相互耦合, 推导难度极高。而Euler-Lagrange方程提供了一种更为系统化的方法, 它基于能量原理, 将动能与势能统一纳入广义坐标框架。在该方法下, 只需先求解系统的动能与势能表达式, 再代入方程即可得到完整的运动方程。这种方式能够在保证物理精度的

*本文通信作者, E-mail: lzjsjh@aliyun.com。

同时显著简化推导过程，对于海上风力机这种高度耦合的复杂系统尤为适用。最终得到的动力学方程可以用矩阵形式表达，其中包含质量矩阵、刚度矩阵和外部荷载项，清晰反映了系统的整体动力学特征。其形式如式 (1) 所示。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} = Q, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式 (1) 中， n 为结构自由度的个数； q 为 $[q_1, q_2, \dots, q_{16}]$ ，质点系的广义坐标向量； \dot{q} 为质点系的广义坐标对时间的一阶导数； T 为系统的动能； V 为系统的势能； Q 为系统所受的外部荷载向量。

本文采用 NREL 设计的 5 MW 驳船式风力机 [6]，基于 Euler-Lagrange 方程，建立 16 自由度海上风机的动力学模型，图 1 为自由度和坐标系位置图。 $q_j (j=1, 2, 3)$ 为叶片挥舞方向自由度； $q_j (j=4, 5, 6)$ 为叶片拍打方向自由度； q_7 、 q_8 为机舱和轮毂前后、侧向自由度； q_9 、 q_{10} 、 q_{11} 、 q_{12} 为基础前后、前后向转动、侧向、侧向转动自由度； q_{13} 、 q_{14} 为塔筒上部、基础竖向自由度； q_{15} 为塔筒上部与机舱连接处前后向转动自由度。 q_{16} 为塔筒底部与基础连接处转动自由度。 Ω 为叶片转速； ψ_j 为第 j 个叶片的方位角。其计算公式为：

$$\psi_j = \Omega t + (j-1) \frac{2\pi}{3} \quad (j=1, 2, 3) \quad (2)$$

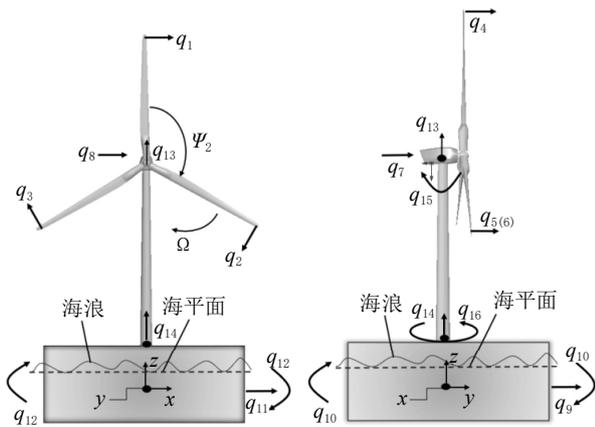


图 1 自由度和坐标系位置图

根据 Euler-Lagrange 方程的形式，可知需首先求解待测海上风力机结构的动能与势能。在此基础上，结合该方程及基本动力学关系，推导并构建质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵，从而建立降阶的海上风力发电机结构动力学模型。

1.1 漂浮式风力机系统的动能

漂浮式海上风力机的动能主要包括四部分。叶片质量沿长度分布，在旋转中产生挥舞与拍打振动；机

舱和轮毂可视为刚体，其动能由平动与转动惯量决定；塔筒在风荷载与平台耦合作用下除竖向拉伸外，还表现为前后与侧向弯曲；基础则具有水平与竖向平移及绕轴转动动能。将四部分相加即可得到系统总动能。

所以，风机的总动能为：

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \int_0^{R_b} \bar{m}_b v_{bj}^2 dr + \frac{1}{2} (m_{nac} + m_{hub}) v_{nac+hub}^2 + \frac{1}{2} m_f [\dot{q}_9^2 + \dot{q}_{11}^2] + \frac{1}{2} I_f [\dot{q}_{10}^2 + \dot{q}_{12}^2] \quad (3)$$

式 (3) 中， v_{bj} 为叶片的速度； $v_{nac+hub}$ 为机舱和轮毂的速度； \bar{m}_b 为叶片的质量密度； R_b 为叶片长度； m_{nac} 、 m_{hub} 分别为机舱和轮毂的质量； j 表示第 j 个叶片； $\bar{m}_t(z)$ 为塔筒的质量密度； I_f 为基础转动惯量。

1.2 漂浮式风力机系统的势能

漂浮式海上风力发电机的总势能包括叶片总势能、塔筒势能及基础势能之和。其中叶片的挥舞和拍打刚度分别对应顺风和垂直风方向的弯曲阻力；塔筒则表现为前后、侧向弯曲刚度及竖向拉伸刚度；基础部分的平移与转动刚度对于抵抗波浪激励。满足下式：

$$V_b = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \int_0^R \left\{ EI_{cg}(r) [q_j \varphi_{1c}''(r)]^2 + EI_{fp}(r) [q_{j+3} \varphi_{1f}''(r)]^2 + [F_c(r, t) + F_{gj}(r, t)] [q_{j+3} \varphi_{1f}'(r)]^2 + [F_c(r, t) + F_{gj}(r, t)] [q_j \varphi_{1c}'(r)]^2 \right\} dr \quad (4)$$

$$V_t = \int_0^h \left[\frac{1}{2} k_{tx}(z) q_7^2 + \frac{1}{2} k_{ty}(z) q_8^2 + \frac{1}{2} k_{tz}(z) q_{13}^2 + \frac{1}{2} k_t^{\theta}(z) q_{15}^2 \right] dz \quad (5)$$

$$V_{jc} = \frac{1}{2} k_{xyphi} q_{10}^2 + \frac{1}{2} k_{xyz} q_9^2 + \frac{1}{2} k_{xyz} q_{11}^2 + \frac{1}{2} k_{xyphi} q_{12}^2 + \frac{1}{2} k_{xyz} q_{14}^2 + \frac{1}{2} k_{xyz} q_{16}^2 \quad (6)$$

$$V = V_b + V_t + V_{jc} \quad (7)$$

其中， $EI_{cg}(r)$ 为叶片的挥舞抗弯刚度； $EI_{fp}(r)$ 为的拍打抗弯刚度； $F_c(r, t) = \Omega^2 \int_0^{R_b} \bar{m}_b(\xi) \xi d\xi$ 为离心力；

$F_{gj}(r, t) = -g \cos \psi_j \int_r^{R_b} \bar{m}_b(\xi) d\xi$ 作用在第 j 个叶片上的重力分量； $k_{tx}(z)$ 、 $k_{ty}(z)$ 、 $k_t^{\theta}(z)$ 和 $k_{tz}(z)$ 分别为塔筒的前后弯曲刚度、侧向弯曲刚度、塔顶转角刚度和竖向抗拉刚度，其可由塔筒分段抗弯刚度 $EI_t(z)$ 和竖向抗拉刚度 $k_z(z)$ 求得； k_{xyz} 为基础平移刚度； k_{xyphi} 为基础转动刚度。

1.3 漂浮式风力机系统的运动方程

根据 Euler-Lagrange 方程, 推导得到系统在广义坐标下的运动方程, 并可将其表达为简洁的矩阵形式:

$$M\ddot{q}+C\dot{q}+Kq=Q \quad (8)$$

式(8)中, M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; C 为阻尼矩阵。

由动能表达式代入 Euler-Lagrange 方程, 可得系统的质量矩阵 M , 质量矩阵 M 由系统的动能表达式推导而来。该矩阵呈对称的块对角结构。左上块对应叶片的挥舞与拍打运动, 中间块对应塔筒与机舱一轮毂系统, 右下块则对应浮式基础的刚体运动自由度, 非零元素主要分布于相邻及耦合自由度位置。

刚度矩阵 K 由势能表达式推导而来, 反映了系统在各自自由度方向的变形刚度。塔筒弯曲刚度主要影响前后与侧向自由度; 基础刚度主导平台平移与转动; 叶片挥舞与拍打刚度在高阶模态中贡献显著。

阻尼矩阵采用瑞利阻尼表示, 以质量和刚度矩阵的线性组合表征不同模态下的阻尼特性, 形式简洁、计算高效, 适用于风力机动力学建模。

2 模型验证

2.1 模型参数

NREL 5 MW 风机塔筒高度 87.6 m, 叶片长 61.5 m、单片质量 17 740 kg, 机舱质量 240 000 kg, 轮毂质量 56 780 kg, 基础质量 190 342.8 kg, 基础转动惯量 $1.679 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 基础刚度 $3.89 \times 10^7 \text{ N/m}$, 基础转动刚度 $1.14 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, 叶片阻尼比 0.00 477 465, 塔筒阻尼比 0.01, 基础阻尼比 0.006, 平台尺寸 $40 \times 40 \text{ m}^2$, 吃水深 4 m, 平台质量 $5.45 \times 10^6 \text{ kg}$ 。 $\varphi_{1e}(r)$, $\varphi_{1f}(r)$, $\varphi_{11}(z)$ 和 $\varphi_{21}(z)$ 通过 Bmodes 软件计算。

2.2 固有频率验证

为验证所建立的 16 自由度降维动力学模型的准确性, 本文将固有频率与 OpenFAST 仿真结果进行对比。多自由度系统的固有频率可通过求解系统的特征值问题获得, 即由质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 构成的广义特征值方程:

$$[K-\omega^2 M]\Phi=0 \quad (9)$$

式(9)中, Φ 为该模型的特征向量/振型; ω 为该模型相应振型的频率。

式(9)有非零解的条件为其系数矩阵行列式为零:

$$|K-\omega^2 M|=0 \quad (10)$$

求解式(10)可得 ω 的 n 个根, 即为系统固有频率。按升序排列: $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$ 。

为验证所建立的 16 自由度降维动力学模型的准确性, 本文将固有频率与 OpenFAST 仿真结果进行对比。结果显示, 前四阶固有频率的相对误差均小于 10%, 其中一阶、二阶误差约为 4% 和 0.1%, 三阶、四阶误差在 6%~7% 之间。在整体上, 该模型与 OpenFAST 吻合良好, 保证了本文所提模型在模态分析上的可靠性和适用性。

3 结论

针对大型漂浮式海上风力机在复杂海况下面临的平台大幅运动、机舱谐振响应以及叶片振动等关键问题, 本文提出了一种基于 Lagrange 方程的 16 自由度降维动力学模型。

1. 对 16 自由度降维模型进行了固有频率分析, 并与仿真工具 OpenFAST 的计算结果进行了对比, 结果显示前四阶固有频率与 OpenFAST 相对误差均小于 10%, 这充分验证了所提降维模型在模态特性捕捉上的准确性。

2. 相较于高自由度模型, 本文提出的动力学模型显著提高了计算效率, 同时保证关键模态精度。这种高效模型为后续动力响应分析、载荷评估及振动控制研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 莫继华, 何炎平, 李勇刚, 等. 近海风电机组单桩式支撑结构疲劳分析[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(04): 565-569.
- [2] Kaynia A M, Pedersen D M, Askheim H, et al. Implementation of seismic soil-structure interaction in OpenFAST and application to an offshore wind turbine on jacket structure[J]. Marine Structures, 2025(95): 104028.
- [3] Deng Y, Zhu C, Zhang S Y, Yang Y, Zhang B. A novel coupling framework for integrating turbine and substructure dynamics of floating offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2025(293): 117595.
- [4] Qiao D, Zhou Y, Xu B, Qin J, Tang G, Lu L, Ou J. Dynamic response analysis of a fully coupled aerodynamic-hydrodynamic-mooring-anchor floating offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2024(297): 117769.
- [5] Pandian M K R. Dynamic Load Prediction[D]. Delft: Delft University of Technology, 2023.
- [6] Jonkman J M. Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine[M]. University of Colorado at Boulder, 2007.

数字射线实时成像技术在承压设备检验中的应用

朱 鑫

(泸州市市场检验检测中心, 四川 泸州 646000)

摘 要 承压设备长期处于高温高压等复杂工况之下, 其内部结构极易受到腐蚀等因素影响, 诱发细小裂纹等隐患。而传统影像检验方法在图像清晰度上存在明显局限, 难以满足高精度检验和动态演化监测的双重需求。基于此, 本文探讨了“明确设备检验部位”“精准控制曝光参数”“实时采集射线图像”“运用软件图像增强”“融合历史检测数据”等策略, 强化图像在“裂纹识别”“隐患跟踪”“风险研判”中的作用, 旨在为检验人员提供有益参考。

关键词 数字射线实时成像技术; 承压设备; 曝光参数; 射线图像

中图分类号: TP317.4; TH6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.007

0 引言

承压设备作为能源等行业中的核心装备, 其安全运行直接影响生产效率, 当前设备检验方式正由传统的间歇抽查转向高频率的连续监测模式, 检测手段也逐步由表面检查延展至结构内部状态的深层识别。数字射线成像因具备高通量等特性, 逐步取代静态成像模式成为识别关键部位隐患的手段。在设备结构复杂的背景下, 检验技术对“成像精度”“实时性”“数据可追溯性”的要求不断提升。因此, 检验人员应围绕设备服役过程中的微观缺陷动态演变规律, 探索更具精准性的检测策略。

1 在承压设备检验中应用数字射线实时成像技术的作用

数字射线实时成像技术在承压设备检验中能够清晰呈现内部结构状态, 使细小裂纹等问题在图像上明显可见。连续成像功能则可记录缺陷发展的全过程, 便于分析设备在使用中是否发生变化^[1]。同时, 图像中的灰度和结构细节的分布有助于检验人员发现复杂部位的异常特征, 提升识别精度。长期图像数据的积累还可以用来比对当前状态, 分析缺陷是否扩展, 为判断设备使用安全提供依据。实时图像支持后续的数据分析, 使检验工作更高效。

2 数字射线实时成像技术在承压设备检验中的应用策略

2.1 明确设备检验部位, 设定成像视角范围

在承压设备的检验中, 检验人员提前确定需要检查的位置, 并合理安排成像角度, 是顺利应用数字射

线实时成像技术的基础。承压设备结构复杂, 各部分受力情况不同, 容易出现磨损或裂纹。所以, 只有把检测重点放在高风险区域, 才能提高检出, 如果成像角度不合适, 图像会变形或模糊, 容易漏掉细小缺陷。检验人员应用此策略时, 应先结合设备图纸和过往问题, 判断哪些部位最容易出现隐患, 并安排重点检查^[2]。此外, 检验人员在设置成像角度时也需结合设备的厚度等特点, 找到最合适的拍摄方向, 确保图像能清晰反映内部状态, 使数字射线实时成像技术更好地服务于承压设备的安全检测工作。

例如: 在一台长期服役的中压蒸汽锅炉上应用数字射线实时成像技术, 检验人员需优先聚焦于集箱焊缝和管板结合区以及水冷壁交汇处等应力集中的关键位置。检验前应依据设备运行周期及金属疲劳寿命计算结果, 确定上述区域为潜在高风险点。对集箱和管束之间的T型连接部位, 需依照设计图纸比对现场结构, 标定焊缝路径及热影响区走向, 精准锁定图像采集中心。同时, 成像视角可设定围绕射线穿透效率等技术参数展开, 对管板厚度大于 25 mm 区域, 设定小角度斜射方向, 使射线束在穿透焊缝金属组织时具备足够的分辨率, 同时检测人员还需规避反射干扰对成像结果的影响。拍摄装置应沿管束纵轴布置, 避开构件重叠部位所形成的图像叠影, 使图像中的焊缝边界清晰呈现。在水冷壁结构中, 部分弯管区存在多重曲率变化, 检测人员可依据曲面投影原理调整图像接收面位置, 使其同目标检测表面保持等距状态。选取射线源和接收板之间的最佳投射距离, 有助于压缩图像畸变比例,

强化微小缺陷边缘特征。对构造复杂且易发生反射遮挡的部位,检测人员应规划多个补充视角,构建交叉成像路径,确保高风险区域无检测盲点。此外,图像采集系统应对不同部位建立独立成像参数库,涵盖焦距等关键控制变量。所有检测图像应关联具体部位编码,形成标准化部件识别体系,便于后期检验人员分析比对数据,为承压设备的运行风险评估提供精准图像依据。

2.2 精准控制曝光参数,确保图像清晰稳定

要让图像达到清晰稳定的效果,检验人员就必须准确控制曝光参数,如果曝光时间或强度控制不当,就会导致图像过暗或过亮,影响细节显示。在曝光不足时图像会模糊,难以发现细小问题;曝光过度又会使图像发白,缺陷信息被遮盖。所以,检验人员需根据不同部位的特点,合理调整曝光参数,提高图像的分辨率,让检测结果更准确。在此过程中,检验人员要根据设备材质和形状,灵活设定射线强度以及成像距离,使图像达到最佳效果。此外,检验人员还要统一图像质量标准,便于不同检测条件下展开对比判断,确保数字射线实时成像技术能够在承压设备检验中始终保持图像清晰稳定。

以一台高压换热器为例,检验人员在检验时需以数字射线实时成像技术作为核心手段,对其管束区的多点焊接节点展开图像采集。该结构由于壁厚变化大,对成像的清晰度以及稳定性提出更高要求。图像拍摄环节需先根据金属材质的线性衰减系数设定初始曝光强度,结合射线源稳定输出特性和图像接收面灵敏度响应曲线构建基础参数模型。在此过程中,检验人员需依据换热管不同壁厚区间把曝光时间划分为多个梯度区段,在每一段中设定相对独立的曝光因子配比,避免图像中存在亮区过饱和或暗区信息缺失的问题。针对承压管壳和内部折流板交界处所产生的射线散射效应,检验人员应对成像窗口内灰度范围设定动态补偿机制,使图像在整体亮度分布上保持均衡,在同一视角下展开曝光强度递增扫描,获取多组图像,构建局部HDR成像融合模块,以增强图像中高对比区域的细节层次。同时,在图像拍摄过程中检验人员需实时采集环境亮度变化等关键数据,并纳入算法修正模块中实现实时修正,确保在复杂构件背景中微小裂纹边缘仍能保持锐利清晰。此外,所有曝光参数设定需匹配相应的标准图像模板,构建统一的图像评估参考基准,使不同检测批次中形成可量化的质量判断体系。每幅图像均应关联构件编号等,并纳入图像质量控制数据库中,便于后续系统回溯,为实现连续应用奠定基础。

2.3 实时采集射线图像,动态记录缺陷演变

承压设备长期运行后,可能会因压力或腐蚀影响产生裂纹以及磨损现象,这些问题会随时间不断发展^[3]。同时,应用数字射线实时成像技术,可以连续获取多个时间点的图像,清晰地显示缺陷的位置和扩展情况。检验人员落实该策略,需围绕图像采集和分析建立完整流程,图像采集要有时间标识,保证每一帧都能对应具体部位和时间节点,便于建立缺陷变化记录。成像系统则应具备自动识别功能,能够从多个图像中提取微小变化,分析缺陷是否扩大或恶化。要让检验过程从单次拍摄转向持续观察,使数字射线实时成像技术在承压设备检验中,既可以发现问题,还能监测整个变化过程,进一步提升设备运行安全水平。

例如:在一套高温高压工况下运行的换热压力容器周期性检验过程中,检验人员应依托数字射线实时成像技术对其内壁热影响区建立图像演变档案,优先选择容器底部受热不均且易积垢区域作为图像采集核心区域,构建多时段连续观测路径。每一次图像采集均应嵌入高精度时间标识和结构定位编码,使每帧图像都能在数据库中具备明确时序。在此过程中,采集系统应调度多源传感模块实时捕捉不同检测周期内的图像数据,依据相同参数标准输出序列化图像集,确保数据可比性。同时,对热影响区边界处的微裂纹扩展状态展开周期跟踪时,运用图像识别算法对历史图像中的关键边缘区域展开匹配计算,建立像素级差异矩阵。对比结果应量化输出,映射为缺陷形变模型演变轨迹图,在系统后台持续更新。与此同时,算法模型需结合灰度波动趋势以及裂纹延伸方向,推演潜在演化风险等级,为设备状态评估提供动态图像依据。而图像管理平台需把全部采集记录整合为动态数据库,设定访问索引及回溯条件,允许检索任一构件在任意检测周期内的图像状态,当连续周期内同一位置图像差异超过设定范围,系统应自动生成演变预警报告,提示构件失效趋势,提升缺陷演变判断的科学性,进一步推动缺陷识别能力向动态演化监测方向升级,增强结构完整性评估的深度。

2.4 运用软件图像增强,突出微小裂纹边界

在承压设备检验中,微小裂纹往往边界不清对比度低,不容易在普通图像中被识别,检验人员可利用数字射线实时成像技术中的图像增强软件,对原始图像展开处理,使裂纹边缘更明显图像更清晰。此技术能强化图像中亮度和结构的细节,使原本不易发现的问题更加突出。检验人员开展此策略,需构建适用于

承压设备检验的图像增强流程,并结合设备材质以及射线图像的灰度分布,设计针对不同部位的增强方法。

例如:在化工装置中的高压反应釜定期检验工作中,检验人员应把数字射线实时成像技术集成高分辨率图像增强模块,用于识别底部受热面结构中的微小疲劳裂纹。该部位由于循环热载荷影响,金属晶格应力集中现象显著,极易在早期阶段形成尺寸极小且边界模糊的裂纹微缺陷。检验人员应在图像采集设备中为该区域内设定专属曝光参数,获得具备基础成像清晰度的原始图像后,导入增强系统模块展开多维图像重构。而处理逻辑应基于该结构的材质特性和历史图像中的灰度分布模型,选取适配算法路径展开亮度均衡。

同时,裂纹识别应依托图像梯度变化曲线和边缘连续性特征构建目标区域分离函数,对裂纹所在区域和背景材质形成结构对比差值图,使局部微弱裂纹轮廓显性化呈现。在此过程中,检验人员还需在图像增强流程中内嵌多尺度锐化滤波技术,提升弱边界识别精度,并对图像中出现的亮度过渡带实施方向性滤波调节,压制背景纹理干扰。在反应釜内部复杂应力分布影响下,该策略需配合区域适应性增强机制,使软件系统在识别不同曲面构件图像时自动调整参数权重,强化微裂纹在曲面结构上的稳定表达。此外,增强结果应同标准模板库内同类构件图像展开智能匹配,对比输出裂纹轮廓完整性指数和增强清晰度评价值,若识别图像达到设定准确率阈值,则提交至检验评估系统展开下一步结构判定。各次增强结果均应同步更新图像特征数据库,构建区域识别特征模型,提升后续图像处理效率,为设备可靠性评估提供高分辨率高灵敏度的图像支持。

2.5 融合历史检测数据,优化成像比对效率

单次图像往往难以完整反映缺陷的变化过程,检验人员可以把历史检测数据同当前成像结果相结合,有助于发现设备结构中的细微变化。历史图像记录设备早期的状态,能为识别裂纹扩展等问题提供清晰的参照^[4]。经过比对不同时间的图像,可以更准确地判断缺陷是否扩大,提高检测结果的准确性,也能帮助检验人员发现早期难以识别的隐患,使检验过程更高效。在此过程中,检验人员应把不同时期同一部位的成像数据统一管理,确保图像清晰对应^[5]。

以大型天然气储罐检验项目为例,检验人员应把历年检测图像同当前采集数据展开序列化比对,并建立裂纹演变趋势模型。储罐壳体和底板焊缝区域因长时间处于高应力状态,存在疲劳损伤隐患,需在检测

流程中优先调取该部位往期图像,对照当前成像数据,设定图像配准参数,使不同时间节点下的图像在几何位置等方面保持一致性,确保图像对应清晰。同时,检验人员应建立以部件编码和检测时间以及拍摄角度为索引的历史图像检索系统,构建标准图像引用体系,为后续多时段差异比对提供逻辑支撑。系统比对模块需集成多层灰度分析算法和边界重叠识别技术,提取图像中易变区域的变化特征,并转化为像素级差异分布图。分析模型应结合裂纹起始点等参数建立缺陷演化图谱,把时间维度信息同空间结构特征相融合,进一步提升识别微弱趋势变化的能力。而比对结果需输出异常演化评估报告,标注缺陷起始区域和当前扩展区域之间的关联区间,形成可视化数据报告,支持对未来检测周期的成像策略调整。数据库中需实时更新比对成功率以及图像清晰度指标,形成反馈机制推动算法自我优化,推动检测模式由静态判断向动态分析拓展,使裂纹识别更加精准,风险研判更加全面,成像效率显著提升。

3 结束语

数字射线实时成像技术在承压设备检验中构建以“精准呈现图像”“动态监测缺陷”“智能比对数据”为核心的系统体系,推动检测从静态观察向连续记录,从单点分析向多维集成转变。该技术以图像为载体融合结构信息和时间变量以及历史演变趋势,实现设备状态的可视化,为风险识别提供数据基础。随着算法优化和设备迭代的不断推进,其在复杂结构缺陷识别等方面展现出更广阔的发展潜力,进一步提升了承压设备检验的科学性。

参考文献:

- [1] 柏明清,高凡超,欧阳泉雄,等.射线数字成像检测技术在特种设备失效判定中的应用[J].特种设备安全技术,2025(02):59-60.
- [2] 惠进财,高敏,尚其铎,等.射线数字成像检测技术(DR)在低温真空绝热管道测厚评估上的应用[J].石油和化工设备,2024,27(03):5-8.
- [3] 李志浩,王东旭,王永帅.数字成像技术在薄板焊缝检测中的成像对比[J].无损探伤,2024,48(02):46-48.
- [4] 王玮,江文博,宋南.数字化射线成像技术在特种设备检测中的应用[J].特种设备安全技术,2023(03):67-68.
- [5] 张林.在役石油化工承压设备射线检测中的工艺优化选择探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(06):48-50.

基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计探究

李智源

(江西华水勘测设计有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要 为保证三维地理空间方面的表现能力, 将遥感测绘技术作为基础, 使用无人机倾斜遥感测绘方式, 以实现多角度影像数据采集以及处理, 生成三维地理信息系统。本文阐述了遥感测绘技术原理以及优势, 从倾斜摄影建模、地理信息系统设计、三维地表生成、数据存储调度等方面, 对基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计要点进行研究, 并明确系统设计注意事项。通过研究表明, 将遥感测绘技术作为基础, 不断完善和优化三维地理信息系统、改进影像匹配方式、保证测量的精准度, 可清晰展示三维建筑以及地理场景。

关键词 遥感测绘技术; 三维地理信息系统; 倾斜摄影建模设计; 三维地表生成设计; 数据存储调度

中图分类号: TP7; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.008

0 引言

地理信息系统在城市规划、环境监测以及矿产生生产等方面都得到广泛的应用, 但是目前现有的地理信息系统一般是以二维平面为主, 无法直观展示三维空间, 导致一些空间信息难以准确、清晰地表达。为解决传统地理信息系统存在的不足, 本文以遥感测绘技术为基础, 对三维地理信息系统设计进行研究。通过采用无人机倾斜摄影遥感测绘技术, 实现多角度拍摄, 获取全面、精准的影像数据, 保证建模的精准度。此外, 基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计期间, 可以精准展示空间信息, 并且与密集匹配算法相互结合, 以此获取更加精准的单位空间数据, 从而推动地理信息系统发展进程。

1 遥感测绘技术概述

1.1 遥感测绘技术原理

遥感测绘技术将不同地物的不同反射、发射, 以及吸收特征作为基础, 并且通过利用遥感平台搭载传感器, 实时提取不同的电磁波信号, 分析地表物体的几何形态、物理属性以及动态变化等信息, 根据成像规律, 对目标地物进行成像处理, 以此高效完成测绘工作^[1]。同时, 由于地物目标的不同, 材质、湿度、温度等也存在着一定差异, 所以遥感测绘技术在运用期间, 可对太阳辐射或者其他人工光源所发出的电磁波会产生不同响应, 例如: 反射、散射以及吸收等, 以此形成遥感信息图像。另外, 遥感测绘技术根据遥

感图像差异, 利用复杂算法, 提取地物目标数据, 满足工程测绘对数据的实际需求。

1.2 遥感测绘技术优势

遥感测绘技术与传统测绘技术相比, 具有明显的优势, 首先, 遥感测绘技术具有较强抗干扰能力, 尤其在复杂环境中, 采用先进的信号处理技术, 抵御电磁干扰、气候变化等影响因素, 保证所提取的数据具有较强的精准性。遥感测绘技术可以实现大范围快速测绘, 不会受到地形、地貌等限制与影响, 从而保证测绘效果^[2]; 其次, 遥感测绘技术具有高精度和高分辨率等优势, 可以精准捕捉目标地物的变化, 为地理信息系统提供精准数据; 最后, 由于遥感测绘技术具有较强的数据采集和处理能力, 可在较短时间提取大量数据, 并且实时传输数据, 以提升测绘效率。

2 基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计要点

2.1 倾斜摄影建模设计

倾斜摄影建模属于基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计的重点内容, 并且无人机倾斜摄影通常分为外业、内业等方面, 外业主要是负责控制点的确定, 以及规划飞行路线, 以此实现对目标地物多角度测量, 获取精准、高效的测量数据。内业则是利用先进的影像处理算法, 对拍摄数据进行快速整合, 并且将拍摄数据作为基础, 构建三维模型, 展示空间信息。

在基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计期间, 为保证倾斜摄影建模的精准性, 应结合现有情况,

对影像匹配方式进行优化，并且对控制点重建影像进行连接，以保证多角度测量的精准度。影像匹配以灰度、特征匹配的双重标准作为基础，并且通过先进相似检测算法，以保证影像识别的精准度，并且在具体设计期间，可将冗余数据纠错技术引入其中，对匹配异常、错误的数据进行自动纠偏，目的是提高匹配的可靠性（倾斜摄影建模流程如图 1 所示）^[3]。

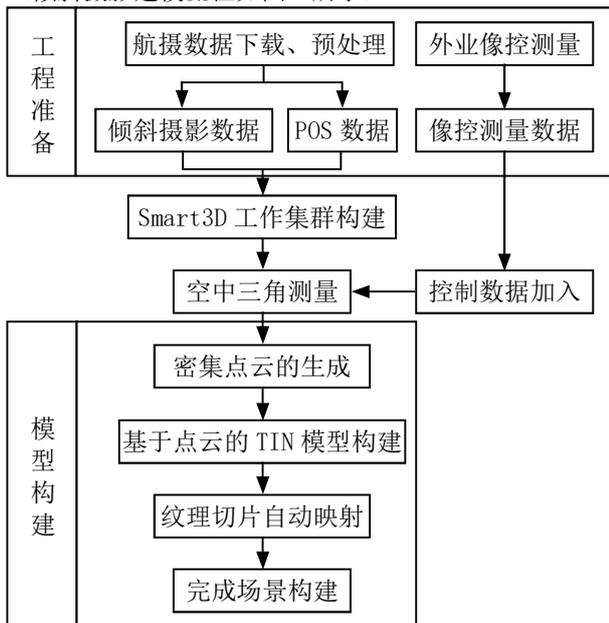


图 1 倾斜摄影建模流程

由于目标地物变形和特点变化相对较为明显，如果一直使用传统影像匹配的话，很容易产生较大偏差，达不到预期效果。为此，将遥感测绘技术作为基础，倾斜摄影建模设计期间，应将先进密集匹配方式引入其中，并且使用立体像素实现亚像素级配，以及实现多角度测量，生成精准的三维点云数据，以便后续使用。另外，无人机按照预先设定航线拍摄，但如果出现航向重叠的情况，拍摄精准性就会受到影响，可利用公式（1）进行计算，得出目标区域内任意一点的影像重叠度。

$$P = P_1 + (1 - P_1) \times \frac{\Delta h}{H} \quad (1)$$

式（1）中： P_1 为基准面航向重叠度； Δh 为基准面与目标点的高程差； H 为相对航高； P 为实际的航向重叠度。

无人搭载倾斜相机基于垂直向下、倾斜向前、向左以及向右等角度拍摄，获取全面、精准的数据^[4]。同时，在倾斜摄影期间，还需要考虑影像拼接技术，使用影像拼接算法，实现影像数据无缝衔接，生成连续、完成的三维模型。另外，也可将密集匹配技术（多

视立体匹配、最小二乘影像匹配、多影像基元匹配算法）运用到其中，其中最小二乘影像匹配较为常用，主要是因为最小二乘影像匹配算法精度较高，但是在具体设计与运用期间，应考虑影像变形问题（影像几何变形、影像辐射变形）。为避免影像变形所造成的影响，对数字表面模型进行参照和对比，做到尽可能消除误差。对于多视立体匹配算法来说，在具体运算阶段无需各项参数，应输入精准摄像影像信息，并且根据这些数据，构建精准三维模型，以此保证模型构建的精准性。

2.2 地理信息系统设计

基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计期间，需利用影像和处理后的数据，清晰展示地理状态。浏览器（服务器模式）作为基础，将地理信息系统分为支撑层、数据层、服务层以及应用层，其中支撑层通过利用语言编程以及语言开发框架，为三维地理信息系统提供数据支撑；数据层属于三维地理信息系统设计中的重点，通过构建数据库储存大量数据，并且根据影像数据变化情况，定期更新，保证影像数据实时性；支撑层主要是向服务层发送指令，将数据库以及地图引擎接口作为基础，以此形成服务支撑，并且通过访问数据库，对处理数据请求进行处理，完成地理信息的管理；应用层属于系统应用界面，主要负责地理信息系统的业务逻辑执行，并且执行结果充分展示出来。

地理信息展示阶段需要重点考虑等高线绘制，传统等高线绘制一般需要手工完成，绘制高程点，绘制地形线，构建以及调整三角网等，传统等高线绘制较为复杂，并且会消耗大量时间^[5]。如将遥感测绘技术作为基础，在三维地理信息系统设计期间，利用专业软件提取影像信息，自动绘制等高线，提升绘制效率和精准性，可有效解决传统等高线绘制存在的不足。

2.3 三维地表生成设计

三维地表生成设计属于三维地理信息系统设计的重点，通过利用数字高层模型生成三维地表，并且结合等高线数据形成三角数据网络。根据地形特点，将采集到的数据点进行连接，扩大测量区域，避免多角度重叠现象。三维地理信息系统设计期间，应充分考虑等高线自身特点，构建三维数据网络，以保证三维地理信息系统适应复杂地形。另外，在设计期间，需要对目标地物信息进行创新，根据实际需求，对数据格式进行转换，可转换成 Open Flight 格式，并且格式转换完成以后，应根据指定命名规则，储存到合适的路径中，以便后续使用。

2.4 数据存储调度

一般情况下,三维地理信息场景有三维地形、二维地形等组成,但为解决服务器数据计算难度大问题,需要将图像数据进行切片、分发,使用网络发布方式,将数据与业务服务器进行分离处理。但是,由于地理信息数据量大,无法真正做到一次性加载,需要结合实际情况,分级处理,以保证三维地理信息系统设计的精准性。另外,在具体设计期间,需要将地理信息三维可视化技术引入其中,以此提升系统运行性能。

3 基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计注意事项

3.1 航线敷设

基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计期间,如果没有特殊要点,应保证拍摄航线与图幅完全处于平行状态,并且应结合实际情况,做好合理调整,以保证系统设计质量。无人机倾斜拍摄期间容易受到风力的影响,导致飞行姿态偏航,影响数据的精准性。对此,在遥感测绘技术作用下,系统设计期间,需要将动态监控装置安装到系统中,根据无人机飞行姿态以及位置进行实时调整,以保证数据获取的准确性。

3.2 相机校验

遥感测绘技术作用下,需要根据目标地物构建地理信息模型,以此精准获取几何参数,并且确定影像以及目标地物之间的关系。同时,在三维地理信息系统设计期间,需要结合实际情况,对相机参数进行校验,以保证系统运行精准性。另外,为保证三维地理信息系统的精准性,还需要结合实际情况对相机进行校验,并且确定光学畸变系数、位置,确保与相机参数一致。

3.3 观测像控点

为保证三维地理信息系统设计效果,在三维地理信息系统设计期间,还应注意观测像控点,可使用操控无人机对地形进行测量,以此精准获取控制点坐标数据以及信息,并且将坐标数值作为基础,以此高效完成测量工作。同时,针对测量区域,合理布置控制点,并且将GPS技术应用到其中,实时动态掌握地理信息。另外,需要进行加密处理,并且对实际需求,对影像结果进行校对,避免产生较大误差。

3.4 三角测量控制

将地方坐标系数作为基础,控制点作坐标,将平面坐标系统进行转换,形成地方坐标系,并且由于海量影像数据量较大,所以需要影像数据进行分析,以保证影像数据的精准性。另外,可以利用空中三角

测量方式进行处理,并且借助数据模型进行计算,保证控制点的准确性,避免给后续测量工作带来负面影响。但是,在空中三角测量运用到三维地理信息系统中,需要对目标地物特点进行综合考虑,自动内定向操作模式,并且将相机参数作为基础,将相机和影像两者相对位进行对比,以此减少误差产生。三角测量应构建数字高程模型构建,并且结合实际情况,对高程数据进行划分,目的是便于后续对高程数据使用。此外,注重高程数据误差的检验,使用自检校区域平差方式,但对各项数据进行检验,精准识别和纠偏数据误差,保证三角测量控制的精准性。

基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计可自动切换到平面视图中,并且利用人工方式解决缺失的连接点,再通过平差结算方式对连接点进行处理,保证连接点的精准性。在具体设计期间,还需要对连接点的稳定性进行检测,如果稳定性较差,这时应重新进行计算,保证三维地理信息系统设计的准确性。由于三维地理信息系统时常会受到地形、地貌以及气候条件等因素影响,所以在具体设计期间,应做好校对和补偿,促使三维地理信息系统满足实际需求。

4 结束语

随着信息技术的不断发展,遥感测绘技术也不断成熟,将其作为基础,展开三维地理信息系统设计,可以有效保证测量的精准度。但是,在具体设计期间,应明确设计要点,掌握设计注意事项,保证三维地理信息系统设计的精准性以及可靠性。另外,将遥感测绘技术作为基础,三维地理信息系统在城市规划、环境监测以及灾害预测等方面可提供精准、可靠的数据。未来,将遥感测绘技术与三维地理信息系统紧密结合,可以推动地理信息系统向更高层次发展。

参考文献:

- [1] 张弼强,李波,张正清,等.基于遥感测绘技术的三维地理信息系统设计[J].电子设计工程,2025,33(16):64-69.
- [2] 张璇,戚志华,王杨生.测绘工程中测绘遥感技术的应用[J].科技与创新,2025(14):226-229.
- [3] 于海强.三维城市模型精细化生产与地理信息系统设计开发[J].中国新技术新产品,2024(03):117-119.
- [4] 范巍,黄蕾,赵晶.基于区块链的实景三维地理信息数据加密控制系统设计[J].计算机测量与控制,2024,32(03):169-175.
- [5] 胡玉文.面向智慧城市的二维、三维地理信息系统设计与实现[J].经纬天地,2023(01):48-51.

新型地理信息系统技术在工程测绘中的应用分析

许必银, 王 雪

(四川万兴测绘服务有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要 在工程测绘对数据精度提出更高要求的背景下, 新型地理信息系统技术不再仅限于提供单点数据, 而是逐渐成为贯穿工程全生命周期的支撑。基于此, 本文围绕新型地理信息系统技术在工程测绘中的应用展开分析, 从提升数据精度、强化空间解析、促进信息共享等方面分析其意义, 并提出融合多源数据、科学选址、三维建模、动态检测及设施维护等措施, 旨在突出新型地理信息系统技术在推动测绘成果由静态记录走向动态决策服务中的独特价值, 凸显其对工程建设科学性的支撑作用, 展现出工程建设的广阔前景。

关键词 新型地理信息系统技术; 工程测绘; 数据精度; 空间解析; 信息共享

中图分类号: P2; TB2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.009

0 引言

在工程建设快速发展的背景下, 测绘技术已从单一的地形测量逐渐过渡到信息化的应用阶段。测绘人员引入新型地理信息系统技术, 使工程测绘不再局限于静态采集数据, 而是转向融合多源信息。这一技术结合遥感、定位等手段, 可全方位描述地理要素, 突破传统测绘在全面性方面的局限。同时, 其应用还能大大提升获取数据的效率, 强化规划设计的科学性 & 施工过程的可控性。随着该技术的不断成熟, 工程测绘在预测风险、优化资源等方面的作用日益凸显, 为现代工程提供更为坚实的技术支撑。

1 新型地理信息系统技术的概念

新型地理信息系统技术的概念可以理解为在传统地理信息系统基础上发展及拓展。其不只依赖于静态的空间数据存储及可视化, 而是更强调实时性、智能化与多源信息的融合。新型系统依靠云计算、大数据等技术的支持, 实现动态获取、快速处理的目标, 使得地理信息从单一的地图展示转变为服务于多领域决策的综合工具。这一概念的核心在于能够突破传统 GIS 的局限, 将空间信息同时间维度、行为数据及传感器数据等多类信息相结合, 形成一个开放的智能化平台。新型地理信息系统技术能够支持复杂环境下的多尺度分析, 还能提供预测性及模拟性功能, 从而推动地理信息应用由辅助管理走向主动决策^[1]。换言之, 新型地理信息系统技术逐渐从“信息化”演变为“智慧化”,

并强调系统的交互性, 更贴合现代社会在工程规划及环境管理等领域的多样化需求。

2 在工程测绘中应用新型地理信息系统技术的意义

2.1 提升数据精度, 保障成果可靠

工程测绘作为基础性工作, 依赖数据的精度来支撑后续设计及建设。新型地理信息系统技术在数据采集、处理及存储上形成完整框架, 能够减少人为误差, 使测绘成果更加真实稳定。不同类型的数据依靠统一平台整合, 更为准确地展现空间同属性信息的融合关系, 保障测绘成果的可信度。在这一过程中, 测绘人员凭借高效运算及精细表达的系统技术, 可以为复杂地理环境提供真实反映, 使数据成为工程决策的坚实基础。成果的稳定性来源于精确的单点数据, 更源于协调的整体结构, 因而测绘活动在新型技术支撑下展现出更高的科学价值。

2.2 强化空间解析, 拓展应用深度

测绘人员引入地理信息系统技术, 能够使工程测绘从静态记录转向动态分析。传统测绘方法多停留在地形图或地貌分布的静态呈现层面, 虽然能够提供基础的参考, 但对空间要素之间的关联性揭示不足, 难以满足复杂工程的科学需求。而地理信息系统技术解析功能则能够在多维空间中揭示潜在规律。工程设计所需的地形、地貌及地质构造关系, 在空间分析的过程中被层层解读, 复杂环境下的风险点及适宜区域因此更加清晰^[2]。测绘成果不再局限于提供位置坐标,

而是进一步形成可供多方利用的知识框架。测绘人员拓展其应用价值,使测绘数据不再单一服务于勘测阶段,而是在应用中发挥持续作用。

2.3 促进信息共享,提升协同效率

新型地理信息系统技术打破数据孤立的格局,能够使工程测绘成果在不同部门之间实现高效传递。信息的集中化及共享化,能够为跨领域合作提供便利条件,减少重复采集及分散管理带来的成本浪费。工程环节的衔接性在共享机制下得到优化,规划、设计及施工之间的沟通因信息同步而更加顺畅。测绘人员提高数据透明度,能够使项目各参与方能够在同一平台上形成统一认知,从而缩短协作周期。随着共享体系的逐渐完善,工程测绘不再是孤立存在的环节,而是成为推动整体工程运行效率的节点。

3 在工程测绘中应用新型地理信息系统技术的策略

3.1 融合多源数据,促进测绘数据对接

在工程测绘工作中,测绘人员开展新型地理信息系统技术应用研究时,常会面临不同来源测绘数据格式不统一、标准不一致的问题,这会导致数据难以整合,影响工程测绘效率。为解决此问题,测绘人员需依托新型地理信息系统,主动融合多源数据,促进测绘数据对接,其核心目标是打破数据壁垒,让各类数据形成协同效应,可以为工程测绘提供更全面、精准的数据支撑。

例如:在高速公路建设的工程测绘项目中,测绘人员运用新型地理信息系统开展技术应用研究,根据融合多源数据促进测绘数据对接,能够解决项目中的数据整合难题。该项目需要涵盖公路沿线的地形地貌、地质构造及周边建筑物分布等多方面数据,测绘人员先收集高分辨率卫星遥感数据,获取大范围的区域地形信息;同时利用无人机航测技术,对公路沿线重点区域进行细致拍摄,得到高精度的地表纹理与高程数据;此外,还依靠全站仪等地面测量设备,实地采集关键点位的坐标及高程数据。随后,测绘人员借助新型地理信息系统的数据处理模块,将卫星遥感数据、无人机航测数据及地面实测数据转换格式并统一坐标,消除不同数据间的误差。在数据融合过程中,测绘人员利用系统的数据分析功能,交叉验证并补充各类数据,使整合后的数据精度大幅提升。最终,融合后的多源数据在新型地理信息系统中形成完整的工程测绘数据库,为高速公路的路线设计、施工放样能够提供精准的数据支持,还可以减少因数据不兼容导致的重复测量工作,提升工程测绘的整体效率,体现新型地

理信息系统在工程测绘中融合多源数据、促进数据对接的作用。

3.2 分析地形地貌,辅助工程科学选址

测绘人员在工程测绘中运用新型地理信息系统技术分析地形地貌,核心是借助该技术的整合及空间分析能力,解决传统测绘中地形数据分散、分析效率低的问题。新型地理信息系统能统一处理并存储遥感影像、高程数据及地质勘探数据等数据,形成高精度的三维地形模型^[3]。测绘人员利用该系统量化分析地形坡度、坡向及海拔差异等指标,精准识别工程选址中的潜在风险区域,最终实现工程选址的科学性及安全性目标,这一过程体现新型地理信息系统在工程测绘应用研究中的核心价值。

例如:测绘人员在高速公路线路选址项目中,可以依托新型地理信息系统开展地形地貌分析工作。先是收集项目区域内的卫星遥感数据、无人机航测数据以及历史地质灾害记录,将这些数据导入新型地理信息系统进行数据校准,构建出覆盖整个项目区域的三维地形地貌数据库。随后,测绘人员利用系统的空间分析功能,计算不同线路方案途经区域的地形起伏度,筛选出地形平缓、减少高填深挖的初步线路范围。在初步范围基础上,进一步利用系统叠加地质灾害风险图层,精准定位出可能存在滑坡隐患的路段,并及时调整线路走向以避开风险区域。在整个过程中,新型地理信息系统大幅提升工程测绘的效率,还为工程科学选址提供可靠的数据支撑,有效降低后续工程建设的安全风险及成本投入,切实推动新型地理信息系统在工程测绘应用研究的实践落地。

3.3 三维建模可视,提供工程设计支撑

测绘人员在工程测绘中应用新型地理信息系统开展三维建模可视工作,能够解决传统测绘中平面数据难以直观反映工程现场空间关系的问题。根据新型地理信息系统,测绘人员能整合多源测绘数据,将地形地貌、地物特征等信息转化为三维可视化模型,为工程设计提供精准空间参考^[4]。这一过程提升测绘数据的利用率,还能提前发现工程设计中可能存在的空间冲突,契合工程测绘追求高效、精准服务工程建设的目标,是新型地理信息系统在工程测绘应用研究中的实践方向。

例如:在城市地铁建设工程测绘中,测绘人员可以先利用无人机航拍、激光扫描技术获取地铁规划区域的地形数据、地表建筑数据及地下管线数据,再将这些数据导入新型地理信息系统中融合处理数据。系统依据数据自动生成包含地表建筑、地下管线及地形

起伏的三维可视化模型,测绘人员可在模型中清晰查看某路段地下管线同规划地铁隧道的位置。当发现隧道设计可能同既有污水管线交叉时,测绘人员基于三维模型精准测量两者间距、走向等参数,并将这些数据反馈给设计团队,帮助设计团队调整隧道线路走向,避免后期施工中出现管线破坏问题。整个过程充分体现新型地理信息系统在工程测绘中的应用价值,利用三维建模可视功能,能够为工程设计提供可靠的数据支撑,保障工程建设的顺利推进,也为工程测绘领域的技术创新提供实践参考。

3.4 检测施工管理,把控工程建设进程

借助新型地理信息系统技术开展工程测绘工作时,测绘人员可以利用精准的数据采集与分析,实现对施工管理的动态检测,进而把控工程建设进程。在检测施工管理环节,新型地理信息系统能整合工程测绘获取的各类地理空间数据,构建可视化的施工管理模型,帮助测绘人员实时掌握施工区域的地形地貌变化、施工设施布局等情况,及时发现施工中与设计不符的问题,为调整施工策略提供数据支撑,这也是新型地理信息系统在工程测绘应用研究中针对施工管理精准度不足问题提出的解决方向^[5]。

例如:测绘人员先利用系统搭载的遥感技术和全球定位系统,定期对施工路段进行测绘,将获取的道路路基施工高度、路面平整度等数据实时上传至新型地理信息系统平台。系统会自动对比这些实测数据同设计图纸中的标准数据,一旦发现路基高度超出设计误差范围,或路面平整度不达标等问题,会立即发出预警。测绘人员根据系统预警信息,第一时间赶赴现场核查,分析问题产生的原因。随后,测绘人员依据新型地理信息系统提供的详细数据报告,制定针对性地整改方案,并将整改过程中的数据持续录入系统,实现对施工质量的全程跟踪。同时,测绘人员利用系统的进度分析功能,将实际施工进度同计划进度进行对比,及时发现施工滞后环节,把控工程建设进程的作用。

3.5 维护工程设施,保障工程安全运行

新型地理信息系统凭借实时数据采集、高效数据处理及精准空间分析的优势,为这一目标实现提供关键技术支撑。测绘人员借助新型地理信息系统,可建立工程设施全生命周期的空间数据库,将设施设计参数、建设过程数据同实时监测数据整合关联,解决传统测绘中数据分散、更新滞后导致的设施状态掌握不及时问题。根据该系统对工程设施进行动态监测及分

析,测绘人员能提前识别设施潜在安全隐患,制定针对性维护方案,确保工程设施始终处于安全运行状态,这也是新型地理信息系统在工程测绘应用研究中的重要实践方向。

例如:测绘人员在桥梁工程维护中,会运用新型地理信息系统搭建桥梁健康监测平台。先利用系统对接桥梁上安装的位移传感器、应力传感器等设备,实时采集桥梁主梁挠度、墩柱沉降及结构应力等数据,这些数据经系统快速处理后,会同桥梁初始设计参数、历史维护记录一同存储到空间数据库中。当系统检测到某一数据超出预设安全阈值时,会自动生成预警信息并标注异常位置的空间坐标,测绘人员根据系统提供的精准位置信息及数据对比分析结果,迅速抵达现场开展详细测绘核查。在核查过程中,测绘人员利用新型地理信息系统的空间分析功能,结合周边地质环境数据,判断异常产生的原因,若发现是因桥墩基础不均匀沉降导致,便会依据系统生成的维护方案建议,制定具体的加固施工计划。施工完成后,测绘人员还会利用系统持续监测桥梁数据变化,验证维护效果,确保桥梁安全运行。

4 结束语

工程测绘在数字化及智能化发展的推动下,已经不再局限于单一数据的记录,而是逐渐成为贯穿工程全生命周期的支撑。新型地理信息系统技术多元融合数据、深度解析空间与高效共享信息,能够拓展测绘成果的价值边界,使测绘活动从基础作业走向决策服务,其在不同层面的综合作用,展现出工程测绘由传统模式向智慧化模式转型的趋势。未来,随着云计算、人工智能及物联网等技术的不断深化,新型地理信息系统将在更广泛的工程场景中发挥作用,推动测绘成果的动态更新及智能服务,为工程建设的科学性提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 张博.基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究[J].科技与创新,2025(16):203-205,209.
- [2] 张福龙,付小旋,许帅.基于无人机测绘技术的工程地形位移变化研究[J].粘接,2025,52(09):165-168.
- [3] 余依昂.GNSS测绘技术在工程测绘中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(24):147-149.
- [4] 张海文,张璇,戚志华.论遥感影像处理在测绘工程中的技术创新[J].科技与创新,2025(15):175-177,181.
- [5] 王杨生,张海文,张璇.测绘新技术在测绘工程测量中的应用研究[J].科技与创新,2025(15):219-221,225.

CJK6135A 数控车床电动刀架故障分析及排除方法

冯建财, 李壮威, 袁晨峰

(广州市轻工职业学校, 广东 广州 511370)

摘要 在数控机床使用过程中, 因使用不当或机床使用年限的问题及系统质量不稳定等因素, 对产品质量与加工效率均会产生一定的影响, 导致加工时出现大量的废品、次品, 工人的成本也随之增加, 增加了整体加工成本。基于此, 本文介绍了数控机床中的常见故障、产生原因、维修方法, 并对 CJK6135A 数控车床四方刀架的参数设置进行了优化, 旨在为确保生产实践加工过程正常运行提供借鉴。

关键词 数控车床; 故障分析; 故障排查; 电动刀架

中图分类号: TG659

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.010

0 引言

数控系统的硬件是以微处理器为核心, 由大规模或超大规模集成电路芯片、可编程控制器、主轴驱动系统、坐标伺服系统以及输入输出设备等组成^[1]。数控系统的软件包括数据输入输出、各种插补控制、刀具补偿控制、加减速控制、位置控制、主轴驱动控制、坐标伺服控制、键盘控制、显示控制以及接口控制等, 还包括各种机床参数、PLC 参数和报警文本等^[2]。数控机床主机主要由机械、液压等传动部分组成。在数控机床的使用过程中, 不可避免地会发生故障。本文以 CJK6135A 数控车床 (GSK980T 数控系统) 电动刀架为例, 介绍数控车床电动刀架常见故障和排除方法。

1 CJK6135A 数控车床电动刀架电气控制工作原理

在数控车床中, 四方刀架是一个非常重要的部件, 在加工工件时, 刀架是否正常精准地转到位, 直接影响到数控系统的自诊断。以 CJK6135A 数控车床使用 4 工位 LDB4 系统型号的电动刀架为例: 电动机发出旋转换刀信号, 控制继电器动作, 电机正转, 通过刀架底部的蜗杆、蜗轮、螺杆将销盘推到高度时, 离合销进入离合盘, 合盘带动离合销、离合销又带动销盘、销盘带动刀体转位, 当上刀体转到所需刀位时, 霍尔元件电路发出刀位信号, 电机开始反转, 反靠销进入反靠盘槽, 离合销从离合盘槽中爬出, 刀架完成粗定位。同时销盘下降端齿啮, 完成精定位^[3]。而后刀架锁紧, 反转时间结束, 继电器动作, 电机停止。

2 CJK6135A 数控车床电动刀架故障维修方法

当 CJK6135A 数控车床 4 工位电动刀架出现故障时, 会影响设备的利用率, 如何快速判断故障原因及排除故障, 维修人员除需要具有一定的经验外, 还需掌握一定的维修方法。

1. 先观察后动手。当刀架出现故障时, 首先要向操作人员了解出现故障的原因, 在可能的情况下, 再次观察发生故障的过程, 以便掌握到第一手情况, 查清故障原因, 然后根据数控系统和刀架运行的工作原理, 对故障现象进行诊断和排除^[4]。

2. 先外部后内部。电动刀架是机电一体化的部件, 其故障原因必然从机械、电气等方面反映出来^[5]。当刀架出现故障时, 可先检查与刀架相关联的一些外围的电器元件, 如刀架按键控制刀架的常用触头、电动刀架盒控制元件、控制控制吸气的接触器。

3. 先机械后电气。刀架机械故障比电气故障的发生率高很多, 因此先检查机械故障, 如锁紧螺母的调整、铁屑线积尘进入刀架内部导致操刀不顺等。

4. 先易后难。刀架出现同一个故障现象, 可能是由不同原因造成的, 此时应从最简单的原因开始逐一诊断排查, 避免将简单问题复杂化, 使故障扩大。

5. 应充分利用数控系统的自诊断报警功能, 如 PLC 的监控功能, 运行诊断、开机诊断, 根据数控系统的自诊断报警提示, 对刀架故障进行维修。

CTK6135A 数控车床型电动刀架常见故障及解决方法如表 1 所示。

表 1 CTK6135A 数控车床型电动刀架常见故障及解决方法

故障现象	故障分析	解决与处理方法
电动刀架不停地转动或转动位置不正常（超前或滞后一定的角度）	程序设置不当	检查程序设置
	发讯盘移动或接线有误	重新调整发讯盘位置及接线
	发讯盘故障	更换发讯盘
	发讯盘接地线断路或发讯盘电源线断路	检修发讯盘装置接线路线
	霍尔元件断路或短路	更换霍尔元件
	磁钢磁极装反	磁钢磁极的南北极互换
	磁钢与霍尔元件高度位置不准	调整磁钢与霍尔元件高度位置
	刀架机械零件损坏或渗入脏物	1. 更换机械零件；2. 清除脏物
	刀架连接信号线损坏	更换修理刀架信号线
	刀架侧边的内大角沉头螺母有误	调整螺母的松紧度
电动刀架无法转动	刀架上压在发讯盘六角螺栓有误	调节六角螺栓
	三相电源缺相	重新接好电源及检查控制有无
	紧锁时间不足	调整参数
	刀架机械零件损坏或渗入脏物	1. 更换机械零件；2. 清除脏物
	电机烧坏	更换电机
	电源电压偏	调整电源电压
	电机和位线接反	立即切断电源，调整电机相位
	霍尔元件断路或短路	用仪表测量霍尔元件检修霍尔元件线路板焊接处
	紧锁时间不足	调整参数
	霍尔元件某个位置与磁钢无信号连接	更换霍尔元件或调整磁钢
刀架上刀体在某刀位不到位	带动刀架旋转的蜗轮某处损坏	更换蜗轮
	刀架机械零件损坏或渗入脏物	1. 更换机械零件；2. 清除脏物
	磁钢在圆周方向相对于霍尔元件太前或太后	调整磁钢在圆周方向相对于霍尔元件位置
	发讯盘移动没有锁紧	重新调整发讯盘位置
电动刀架旋转后无法锁紧	刀架侧边的内大角沉头螺母有误	调整螺母的松紧度
	刀架上压在发讯盘六角螺栓有误	调节六角螺栓
	刀架机械零件损坏或渗入脏物	1. 更换机械零件；2. 清除脏物
	刀位讯号出现故障或电机不反转或反转延时太短	检查发讯元件和线路及电机反转线路和反转延时
	1. 磁钢与霍尔元件相撞；2. 霍尔元件线路出现故障；3. 霍尔元件短路；4. 信号不符；5. 发信盘接地线断路；6. 发信盘电源线断路	1. 取下罩检查磁钢，霍尔元件及线路；2. 检查系统信号与刀架信号是否一致
刀架连续运转或某刀位不停		
电机起动不了，上刀体不能转动	1. 电机相位线接反；2. 电源电压偏低	1. 立即切断电源，调整电机相位；2. 电源电压正常压使用

3 CJK6135A 数控车床电动刀架故障排除实例分析

3.1 案例概况

(1) 故障现象: 刀架转位, 但不能固定于任意刀位处。

(2) 原因分析: 出现这种故障现象的原因有多种, 按照故障排除分析方法, 逐一排查, 最后判断可能是刀架内的蜗轮、蜗杆配合件位置存在问题, 导致刀架转位不到位。

(3) 故障排除: 故障发生在刀架的底部, 属机械故障, 要排除的话, 需要做较大的动作, 并要将刀架大部分结构拆卸才能解决。

3.2 故障解决方法

1. 拆卸顺序:

(1) 使刀架处于松开状态, 拆下发信盘上的六条电线, 然后拆下螺母, 并拆下检测发信盘的磁钢座(合磁钢)。

(2) 取出大螺母内的两只 M4 螺钉, 并松开螺母和止退圈, 同时按方下平面轴承。

(3) 手动旋转刀架取下刀体, 同时按顺序拆下外端齿、螺杆、螺母、离合销、反靠销等(注意拆卸顺序)。

(4) 松下伺服电机及联接座和电机端盖。

(5) 从松下端盖及联接座的端向, 锤子用力轻轻敲出底部的蜗杆及端向上支承的轴承。

(6) 拨出中间中轴, 小心中轴内电线, 取出蜗轮及底部平面轴承, 取出反靠盘。

2. 观察蜗杆能否给电动机带动旋转(前面已确保电机没损坏), 发现蜗杆不能转动, 而是蜗杆与电机连接的键槽圈损坏了, 无法紧配合。已不能修复, 将键槽圈拆下, 并更换。

3. 装配刀架顺序:

(1) 装配时将所有零件清洗上油, 传动部分上润滑脂, 用布抹干净所有的零件。

(2) 按上述拆卸反顺序进行按装。

(3) 刀架在齿轮咬合状态下, 上、下刀体配合应平行, 而且慢慢地旋转。使其刀体完全配合一起, 同时入反靠销, 注意记得放在反靠盘的槽中里。安装离合销时应放在离合盘的平面上, 大约离槽 125 度左右。

(4) 用内六角匙, 在下刀体的内六角孔慢慢旋转锁紧刀架, 并调整磁钢与发信盘上的霍尔元件位置。

4. 四方刀架与车床床身的安装的配合。将刀架放

在机床中拖板上, 按照位置与中托板固定起, 然后用内六角匙顺时针转动底蜗杆, 使刀体转动 45 度左右, 把四个固定到中托板上的螺丝孔清洁干净, 同时放下 4 颗 $\Phi 12$ 的六角螺母, 并用加力棒对角进行加紧, 待加紧后。用内六角匙把底部蜗杆顺时针旋转刀架至 90 度即可。

5. 刀架工作顺序: 换刀信号→电机转动→上刀体或刀盘转位→信号符合→电机反转延时→初定位→精定位→精定位(齿盘啮齿)→刀体锁紧→电机堵转→延时结束。

6. 调试刀架运转。经调试, 刀架运转能灵活, 轻松、无异首声音, 不再出现转位不到位的现象。

7. 重点注意事项。首先, 在安装下刀体上的端面轴承, 应当把比较紧的止退圈放在底部而比较松的放在上方; 其次, 在安装通心圈时, 应意方向把有两个内的那一边放在下方; 最后, 安装端面轴承此时要注意比较松的端面放在底部而比较的则放在上方, 之后安装厚的螺旋, 安装此螺旋时不需要太紧^[6]。

4 结束语

在数控设备使用过程中出现报警时, 若想要快速地解除机床报警, 就需要快速判断故障原因并排除故障, 相关人员除需具备一定实操实践经验、掌握一定的分析方法外, 还须积累丰富的专业知识, 如机电一体化技术、数控应用的技术、PLC 应用的技术、机械加工的常识、数控机床编程及梯形图的知识, 并充分利用机床使用手册、机电液态图、熟悉后处理、机床参数、诊断功能等, 提高数控设备运行效率。

参考文献:

- [1] 韩鸿鸾, 李书传. 数控机床结构与维护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [2] 陈坚, 赵玉成. 数控车床电动刀架的安装调试与常见的故障排除 [J]. 科技风, 2021(02):168-169.
- [3] 刘战术, 窦凯, 吴新佳. 数控机床及其维修(第2版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [4] 窦湘屏. 数控机床维护常识 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] 吕桃, 徐宁. 机床电气控制技术与实训 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [6] 舒大松. 数控机床电气控制 [M]. 北京: 北京国家开放大学出版社, 2015.

智能化管控技术在火电厂安全管理中的应用

张丙刚

(国能寿光发电有限责任公司, 山东 寿光 262714)

摘要 随着科技的不断发展,智能化管控技术在各领域的应用日益广泛,火电厂安全管理也迎来了新的变革。然而,如何将智能化管控技术高效且精准地融入火电厂安全管理体系,仍是当前亟待解决的问题。本文从智能化管控技术概述出发,阐述了火电厂安全管理中智能化管控技术的应用价值,通过对火电厂设备运行监测、人员行为监管、环境监测与预警等具体应用场景进行分析,旨在为实现对火电厂安全状况的动态感知与精准防控提供借鉴,进而为火电厂安全管理提供科学、系统的智能化管控解决方案。

关键词 智能化管控; 火电厂; 安全管理

中图分类号: TM62; TP29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.011

0 引言

传统的火电厂安全管理模式在面对复杂的生产环境和日益增长的安全需求时,逐渐暴露出效率低、精准度不足等问题。智能化管控技术的出现,为解决这些问题带来了新的契机。它凭借先进的传感器、大数据分析、人工智能等技术手段,能够实时、全面地获取火电厂运行的各类信息^[1]。通过对这些信息的深度挖掘和分析,可提前发现潜在的安全隐患,实现从被动应对到主动预防的转变,为提升火电厂安全管理水平提供有力支撑。

1 智能化管控技术概述

智能化管控技术是通过集成各类传感器、通信设备、数据分析系统等,实现对目标对象或系统进行智能、高效、精准管控的一系列技术手段的统称。该技术可分为采集层、传输层、处理层和应用层,如图 1 所示。采集层采用高精度、多类型的传感器设备,分布在目标系统的各个关键节点,能够感知温度、压力、图像、流量等多种物理量和环境参数。采集到的数据经过初步处理后,会被传输至传输层^[2]。

传输层则运用了有线通信的以太网、光纤通信,以及无线通信的 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等。根据不同的应用场景和需求,选择合适的通信方式,以保证数据传输的稳定性和及时性。同时,传输层还具备数据加密和纠错功能,防止数据在传输过程中丢失或被篡改。

处理层利用强大的计算机硬件和先进的数据分析算法,对传输过来的数据进行深度挖掘和分析。通过数据建模、机器学习、人工智能等技术,提取有价值的信息和知识,识别目标对象或系统的运行状态、趋

势和潜在问题。处理层还能够根据预设的规则和算法,自动生成决策建议或控制指令。

应用层将处理层的分析结果和控制指令应用到实际的目标对象或系统中,实现智能化的管控。它可以通过人机交互界面,为操作人员提供直观的信息展示和操作平台;也可以实现自动化的控制,如自动调节设备参数、优化系统运行流程等。

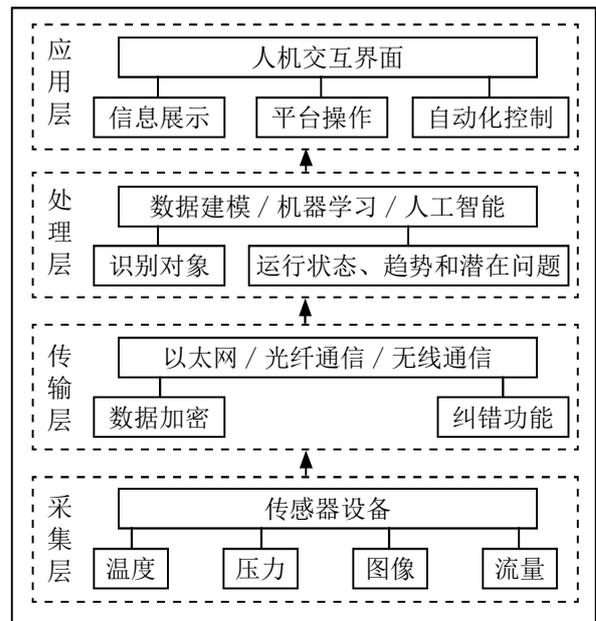


图 1 智能化管控技术

2 火电厂安全管理中智能化管控技术的应用价值

2.1 提升设备运行安全性

智能化管控技术通过在设备关键部位安装大量的传感器,能够实时、精准地采集设备的运行参数,如

温度、压力、振动等。这些数据会被迅速传输到智能分析系统中，系统利用先进的算法和模型对数据进行深度分析。

一旦发现某个参数出现异常波动，系统会立即发出警报，提示工作人员设备可能存在故障。同时，系统还能根据数据分析结果，预测设备故障发生的可能性和时间，为设备的维护和检修提供科学依据。

此外，智能化管控技术还能实现设备的远程监控和诊断。即使工作人员不在现场，也能通过网络随时了解设备的运行状态。专家可以通过远程诊断系统，对设备故障进行分析和指导，大大缩短了故障处理时间，提高了设备的可靠性和稳定性。智能化管控技术还能对设备的运行数据进行长期存储和分析，为设备的优化升级提供数据支持，进一步提升设备的运行安全性和效率。

2.2 增强人员安全保障

在火电厂的生产环境中，智能化管控技术通过在厂区内安装高清摄像头、红外传感器等设备，能够实现对人员的全方位实时监控。系统可以精确识别人员的位置、行动轨迹以及是否进入危险区域。一旦检测到人员进入危险区域，系统会立即发出声光警报，提醒人员尽快撤离，同时通知相关管理人员。

利用先进的图像识别和行为分析算法，系统可以判断人员是否遵守安全操作规程，如是否正确佩戴个人防护装备、是否存在违规操作行为等。如果发现人员有违规行为，系统会及时发出警告信息，督促人员纠正，从而有效降低因人为因素导致的安全事故发生概率^[3]。

在发生安全事故时，系统能够快速确定事故发生的位置和受影响的人员信息，并自动生成救援方案。救援人员可以通过智能终端设备获取详细的救援信息，包括事故现场的实时图像、人员分布情况等，从而更加科学、高效地开展救援工作，最大限度地减少人员伤亡和财产损失。

此外，通过记录人员在模拟操作和实际工作中的表现，系统可以分析人员对安全知识和操作技能的掌握程度，为个性化的培训提供依据，确保人员具备足够的安全意识和操作能力，进一步增强火电厂人员的安全保障。

2.3 优化安全管理决策

智能化管控技术为火电厂安全管理决策提供了强大的支持。系统所采集的设备运行数据和人员行为数据，经过大数据分析和挖掘，能够为管理层呈现出全面、准确的安全态势图。通过对这些数据的深度剖析，管

理人员可以清晰地了解到哪些设备区域安全风险较高、哪些操作环节容易出现问题的，从而有针对性地制定安全管理策略。

智能化管控技术还能模拟不同安全管理策略的实施效果。在面临复杂的安全管理决策时，管理人员可以利用系统对多种方案进行模拟推演，评估每种方案在降低安全风险、提高生产效率等方面的优劣，从而选择最优的决策方案。

此外，系统可以实时更新安全管理信息，管理人员能够根据最新的安全数据和生产情况及时调整决策。这种动态的决策调整机制使得火电厂的安全管理更加灵活、高效，能够快速响应各种突发情况，确保火电厂始终处于安全稳定的运行状态，实现安全管理的科学化、精准化和智能化。

3 智能化管控技术在火电厂安全管理中的应用

3.1 设备运行监测

在火电厂安全管理中，通过在锅炉、汽轮机、发电机等关键设备上部署温度传感器、压力传感器、振动传感器等，实时监测设备温度、压力、振动等参数的细微变化。采集层将这些数据收集起来，经过初步处理后，通过合理选择以太网、Wi-Fi等通信方式，确保数据稳定及时地传输到处理层。

处理层对传输来的数据进行深度挖掘和分析。利用数据建模、机器学习等技术，构建设备运行状态模型，识别设备的运行趋势和潜在故障。例如：通过分析设备的振动数据，预测设备是否存在机械故障；根据温度和压力数据的变化，判断设备是否处于异常运行状态。一旦发现潜在问题，处理层会自动生成决策建议或控制指令^[4]。

应用层将处理层的结果应用于实际设备管控。操作人员可通过人机交互界面直观查看设备的运行状态和分析结果，及时掌握设备的健康状况。同时，系统能够实现自动化控制，当设备出现异常时，自动调节设备参数，如降低负荷、调整温度等，优化系统运行流程，保障设备的安全稳定运行。

3.2 人员行为监管

为了保障火电厂工作人员的安全，采集层可通过在电厂各个区域安装高清摄像头、人体红外传感器等设备，对人员的位置、行动轨迹、操作动作等信息进行全面采集。高清摄像头能捕捉人员的具体行为动作，人体红外传感器则可实时感知人员的存在与移动。这些数据经过初步处理后，会根据不同区域的环境特点和数据传输需求，选择合适的通信方式，如在建筑物

内部使用 Wi-Fi，在开阔区域使用以太网，将数据稳定及时地传输到处理层。

处理层接收到人员行为数据后，运用先进的图像识别、行为分析算法等技术，对人员的行为进行精准分析和判断。通过构建人员行为规范模型，将采集到的人员行为与预设的安全行为标准进行比对。一旦发现人员的行为不符合安全规范，处理层会迅速生成预警信息和相应的控制指令^[5]。

应用层将处理层的分析结果和控制指令应用于人员行为监管实践中。一方面，通过在电厂内的大屏幕、工作人员的移动终端等设备上实时展示人员的行为状态和预警信息，让管理人员和工作人员都能及时了解现场情况。另一方面，系统可以实现自动化的干预措施，当检测到人员进入危险区域而未按规定操作时，自动发出声光报警，提醒人员注意安全。

3.3 环境监测与预警

在火电厂安全管理中，环境监测也是极为重要的一环。采集层在火电厂的各个区域，如厂区、烟囱周边、化学水处理区等，安装气体传感器、粉尘传感器、噪声传感器等设备，实时收集环境中的有害气体浓度、粉尘含量、噪声强度等数据。这些传感器精度高、稳定性强，能够准确感知环境参数的细微变化。采集到的数据经过初步处理，根据不同区域的实际情况，选择合适的通信方式，像在室内区域使用 ZigBee 通信，在室外开阔区域使用光纤通信，保证数据稳定且及时地传输到处理层。

处理层对传输来的环境数据进行深度分析。借助大数据分析和人工智能算法，构建环境质量评估模型，实时评估火电厂周边环境的质量状况。例如：通过分析二氧化硫、氮氧化物等有害气体的浓度变化，判断是否存在超标排放的风险；根据粉尘含量的波动，评估对周边空气质量的影响。一旦发现环境参数超出安全阈值，处理层会迅速生成预警信息和应对策略^[6]。

应用层将处理层的分析结果应用到实际的环境管理中。通过在火电厂的中控室设置大型显示屏，实时展示环境监测数据和预警信息，让管理人员能够直观地了解环境状况。同时，系统会自动启动相应的控制措施，如当有害气体浓度超标时，自动调节脱硫、脱硝设备的运行参数，降低污染物排放；当粉尘含量过高时，启动厂区的降尘设备。

3.4 安全应急响应

智能化管控技术通过高效的安全应急响应机制，能够最大程度地减少火电厂安全事故的损失，保障人员生命安全和设备财产安全，为火电厂的稳定运行提

供坚实的保障。当设备运行监测、人员行为监管或环境监测中出现异常且超出预设的严重程度时，安全应急响应机制即刻启动。采集层持续高频次收集相关异常数据，传输层以最快速度将这些数据稳定传输至处理层。

处理层在接收到数据后，运用先进的应急分析模型和算法，在极短时间内评估事故的类型、严重程度和可能的影响范围。例如：若设备故障可能引发连锁反应，处理层会迅速模拟出可能的事故发展态势。同时，结合火电厂的安全预案数据库，快速生成详细的应急处理方案和控制指令。

应用层接收到应急方案和指令后，立即展开行动。一方面，通过广播系统、警报装置等向全厂人员发出清晰明确的警报信号，并在各区域的显示屏上展示应急疏散路线和安全避险区域。另一方面，自动化控制系统迅速执行控制指令，如紧急关停相关设备、切断危险源、启动备用安全设备等。在应急过程中，智能化管控系统持续监测事故处理进展，根据实际情况动态调整应急方案，确保事故得到有效控制，将损失降到最低限度，为火电厂的安全稳定运行筑牢防线。

4 结束语

智能化管控技术在火电厂设备运行监测、人员行为监管、环境监测与预警以及安全应急响应等方面的应用，极大地提升了火电厂安全管理的效率与水平。智能化管控技术通过对数据的采集、传输、处理和应用，实现了对火电厂设备、人员和环境的全方位、智能化管控。未来，随着科技的不断进步，智能化管控技术将持续优化升级，为火电厂安全管理提供更强大的技术支撑，保障火电厂更加安全、稳定、高效地运行。

参考文献：

- [1] 李晓骞. 智能化管控技术在火电厂安全防护中的应用[J]. 电器工业, 2023(02):74-77.
- [2] 谭国华. 基于数字化技术的火电厂电气安全管理系统研究[J]. 电气技术与经济, 2025(04):310-312,317.
- [3] 秦子航. 基于智能识别的火电厂安防一体化系统分析[J]. 科技资讯, 2024,22(22):218-220.
- [4] 孙海鹏. 火力发电厂信息安全体系构建与应用[J]. 智能城市, 2021,07(07):99-100.
- [5] 马天霆. 基于知识图谱和视频监控的火电厂动态安全预警系统研究[J]. 工业控制计算机, 2025,38(07):84-85, 166.
- [6] 王耀龙. 火电厂电气设备运行安全管理技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(10):255-257.

智慧监管系统在化工园区安全管理中的应用探究

杨 林

(盐城市大丰区新海港置业有限公司, 江苏 盐城 224100)

摘 要 智慧监管系统能够实现化工园区管理作业的安全化、智能化与人机交互化。本文以探讨适用于化工园区安全管理的智慧监管系统设计策略及实践应用方法为目的,分析了化工管理存在的智慧化水平不足、智慧管理技术应用范围有限等现实问题,从图像分析系统设计、监控网络设计、管理数据库设计出发,探讨了智慧监管系统的设计策略,并总结智慧监管系统在安全管理作业中的实践应用方法,以期对保障现阶段智慧监管系统用于驱动安全管理工作的开展可行性有所裨益。

关键词 智慧监管系统; 化工园区; 安全管理

中图分类号: TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.012

0 引言

随着我国工业化进程的不断加快,化工产业呈现出规模化、园区化的发展特征。然而,化工园区存在生产工艺复杂、涉及设备众多等危险特征,传统的安全管理模式由于预警响应速度不足、管理范围受限,导致安全事故频发,严重影响化工园区生产与发展的安全性。智慧监管系统能够基于大数据分析技术与云计算技术,实时采集化工园区内的危险源数据及环境指标,通过数据预测及时规避潜在的安全隐患。因此,探讨智慧监管系统在化工园区安全管理中的应用,对于促进化工园区安全管理的可持续化具有关键意义。

1 化工安全管理现状问题分析

1.1 安全管理技术及智慧化水平不足

安全管理技术及智慧化技术水平不足影响安全管理工作的开展效率,从安全监测手段的应用现状来看,部分化工园区仍然采用人工巡检、定点监测等方式对化工装置与危险源进行安全监控,此类检测与管理模式存在检测频率低、时效性差等弊端,当出现化工园区突发安全事故时,相关人员无法在第一时间内及时做出响应,导致安全隐患问题进一步延伸出重大安全事故。在智慧化发展方面,部分管理人员对智慧化的认知水平不足,认为仅采取电脑数据管理、线上办公便能实现安全管理的智慧化。

1.2 智慧管理技术应用范围存在局限

虽然部分地区基于智慧技术打造化工园区安全管理体系,但智慧技术的实施对人工依赖程度较大,安

全管理工作无法实现全生命周期的智慧化变革,导致智慧技术驱动下的安全管理工作取得的成效与传统安全管理模式并无太大差异,进一步影响智慧监管系统在安全管理工作中的应用效率^[1]。例如:部分化工园区通过增设视频智能分析系统用于监管人员未佩戴防护设备、禁区入侵以及异常行为,但考虑到视频智能分析系统的建设成本较高,管理部门仅在化工园区重点区域增设该分析系统,其他区域仍然沿用传统的监控摄像头进行普通管理。

2 智慧监管系统在化工园区安全管理中的应用价值分析

2.1 实时监控与预警能力的全面提升

智慧监管系统通过部署高密度传感器网络,实现了对化工园区生产环境的全时空覆盖。传统人工巡检模式受限于人员数量、巡检频次,难以捕捉瞬时异常变化,而智慧监管系统能够以高频率采集现场关键参数,采集周期可显著短于人工巡检方式,大幅提升对瞬时异常的捕捉能力。系统在罐区、管廊、反应装置等关键位置布置温度传感器、压力变送器、可燃气体探测器等设备,这些传感器相互协同,形成立体化监测网络。当某一参数出现异常波动时,系统不仅记录单点数据变化,还会分析相邻监测点的数据趋势,通过交叉验证排除误报可能。

2.2 多维度风险关联分析与智能决策

化工生产过程涉及复杂的物理化学反应,单一参数异常往往是多种因素耦合作用的结果。智慧监管系统

突破了传统监控系统各自为政的局限，建立起跨系统、跨装置的数据关联分析机制。系统通过构建知识图谱，将工艺流程、设备参数、物料特性等信息进行结构化存储，形成完整的风险关联网络。当检测到异常信号时，系统可借助数据关联模型，结合工艺流程信息，对相关上下游装置运行状态进行溯源性分析，从而推测可能的连锁反应路径。例如：反应釜温度异常升高时，系统会同步检查冷却水流量、搅拌器转速、进料速率等相关参数，综合判断是冷却系统故障还是反应失控。

2.3 数据驱动的持续优化与学习进化

智慧监管系统的核心优势在于其强大的数据处理与学习能力。系统每天产生海量监测数据，这些数据不仅用于实时监控，更成为优化安全管理的宝贵资源。通过机器学习算法，系统能够从历史事故案例中提取特征模式，识别出人工难以发现的风险规律。系统会定期分析误报、漏报案例，调整算法参数，提高预警准确率。同时，系统还能根据不同季节、不同工况下的数据表现，动态调整监测策略。夏季高温时期，系统会自动提高温度监测频率，加强对易挥发物料的监控力度；冬季则重点关注防冻防凝措施的执行情况。这种自适应能力使得系统始终保持最优监管状态。

3 基于智慧化需求的园区安全管理监管系统设计策略

3.1 图像分析系统设计

首先，在图像分析系统的模块设计方面，前端图像采集模块应当配置智能摄像头、红外热成像仪等，用于监控化工园区的爆炸危险环境、化工原料等，采集器可分别布置在化工园区的罐区、管廊、反应车间以及仓储区等，通过差异化布点来扩大前端图像采集

模块的作用范围^[2]。其次，事件检测与预警模块应当基于深度学习模型打造风险行为阈值，确保在后续的安全监管工作中，图像分析系统能够根据行为人防护佩戴，行为操作等发出报警，对违规行为及时进行告警干预。此外，图像分析系统的技术设计路线应当如图 1 所示，根据该技术建设流程，逐步完善化工园区安全事故的图像提取指令、特征数据、判断指令，防止安全事故图像分析出现重大偏差。

3.2 打造完善的视频监控网络

在视频监控网络的设计中，考虑到化工园区地理规模较大、监控覆盖需求较高，相关人员可以分别从前端视频监控设备、后端数据设备部署、5G 通信网络组建出发，构建完整的视频监控网络系统^[3]。首先，在前端视频监控设备的布置方面，考虑到化工园区监控效果容易受到烟尘、光线等因素的影响造成监控干扰，相关部门应当采用移动布控摄像机或 5G 视频采集控制端打造前端监控基础设施，确保在产生监控死角时，前端设备会自动移动至易监控区域，提高监控精度并避免监控死角。其次，后端数据存储端应当分别完善存储设备、显示设备以及服务器装置，用于存储与处理前端视频监控设备产生的关键数据，经过决策树算法之后生成报警信息或安全管理反馈信息，为安全管理决策提供数据支持。最后，在整体通信网络系统的建设方面，实现各监控模块的有效串联，增强视频监控网络在安全管理应用中的可行性。

3.3 构建智慧安全管理数据库

智慧安全管理数据库能够作为化工园区安全管理的后勤智慧系统，用于处理安全管理基础信息并生成具有应用价值的管理反馈信息。在该模块系统的设计中，

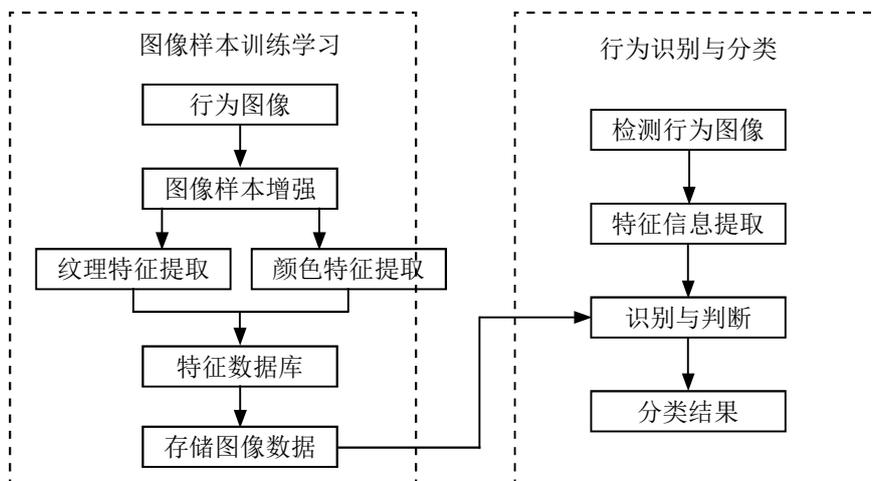


图 1 基于图像分析的智慧监管系统技术流程

相关部门可按照“基础信息模块+实时监测模块+风险预警模块+管理控制模块+分析决策模块”的基本框架建设管理数据库,并根据细节管理的个性化需求,调整安全管理数据库的子模块及功能区间^[4]。例如:为了实现安全数据管理全流程的智慧化改革,分析与决策模块的子模块可涵盖风险热力图分析、事件高发区域统计、GIS图层、风险评估中心等功能区间,分别开设数据挖掘建模、设备故障预测以及模型输出等功能窗口,为辅助安全管理工作开展提供信息支持。

4 智慧监管系统在化工园区安全管理中的实践应用

4.1 智慧监管用于识别违规行为

智慧监管系统中的智慧识别系统功能能够用于精准分析监控图像,评估图像信息中潜在的违规行为,并及时告知管理人员进行干预。例如:在A化工区的生产安全管理中,相关部门基于AI视频图像识别的智慧监管系统,对重点灌区进行违规行为识别,智慧监管系统的图像频域处理能够结合傅里叶变换矩阵,识别图像当中的频率特征,再过滤干扰、增强轮廓之后,判定捕捉到的帧图像中是否存在违规行为,保证违规行为管理与识别的实时性。基于图像处理的傅里叶变换矩阵:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (1)$$

式(1)中, $f(x, y)$ 表示原始图像中第 x 行第 y 列的像素值,灰度值 $0 \sim 255$, 无单位; $F(u, v)$ 表示变换后频率图像中的复数幅度值,无单位; x, y 表示空间域坐标,无单位; u, v 表示频率坐标,无单位; M, N 表示图像尺寸,无单位; $e^{-j2\pi}$ 表示负数指数用于对应旋转因子,无单位。

4.2 智慧监管用于风险追踪与管理

在智慧监管技术的支持下,相关部门利用智慧技术实现对风险源的全过程追踪与管理,确保安全管理能够做到事前预测、事中处理以及事后反馈。例如:A化工园区首先利用GIS建立园区内重大危险源信息库,并构建分类分级管理机制,明确各类风险源的风险属性以及风险异化特征。在此基础上,相关部门利用智慧监管系统对人员违规行为、设备异常、化工气体泄漏等异常行为事件进行标记,利用图像识别技术配合图像处理技术实现对异常行为的秒级管理,当产生上述异常行为时,监管系统将及时提供报警,大幅降低风险隐患的扩散概率^[5]。

4.3 智慧监管用于应急联动与协同处置

化工园区突发事故往往具有连锁反应特征,单一部门难以独立应对复杂局面,智慧监管系统通过构建

多部门协同机制实现了应急处置的高效联动。A化工园区在实践中建立了基于智慧监管平台的应急指挥中心,该中心整合了园区管委会、消防部门、环保部门、医疗机构等多方资源,形成了统一调度体系^[6]。当系统检测到危险化学品泄漏时,智慧监管平台会立即启动应急响应程序,首先通过声光报警系统通知现场人员撤离,同时根据泄漏物质特性、风向风速等参数计算扩散范围,生成动态疏散路线图。平台还会自动调取泄漏物质的理化性质、应急处置方案等信息,推送给现场处置人员,确保采取正确的堵漏、中和等措施。

智慧监管系统打破了部门间的信息壁垒,消防部门能够提前获知危险源分布、储罐液位等关键信息,制定针对性灭火方案;环保部门可以实时掌握污染物扩散情况,及时采取截流、吸附等环保措施;医疗部门则能根据泄漏物质毒性特征,提前准备相应的解毒药物。这种基于信息共享的协同机制,使得各部门能够并行开展工作,大幅缩短了应急响应时间,提高了处置效率,真正实现了“一张图”指挥、“一盘棋”协同的应急管理新模式。

5 结束语

现阶段化工园区安全管理面临诸多技术难题,本研究基于化工安全管理现状,分析智慧监管系统在安全管理中的应用意义,提出完善智慧监管系统的设计策略与实践应用策略,以期为提高化工园区安全管理水平提供参考。未来,相关研究应当继续深入智慧监管系统的技术研究,挖掘适用于化工园区安全管理的智慧监管技术及工作方法,形成完善的安全管理机制,为显著提升化工园区本质安全水平提供技术基础。

参考文献:

- [1] 赵丹丹. 基于动态火灾风险评估的化工园区消防监管方法[J]. 化工管理, 2024(28):116-119.
- [2] 颜陈光. 化工园区安全监管的共性问题及对策措施[J]. 化工生产与技术, 2024, 30(02):17-21, 8.
- [3] 屈贞财, 李安妹, 黄沃文, 等. 化工园区安全监管的探索与实践[J]. 化工安全与环境, 2023, 36(12):3-6, 9.
- [4] 林一楠, 闫辉, 颜军, 等. 智慧监管系统在化工园区安全管理中的应用[J]. 通信与信息技术, 2023(05):87-90.
- [5] 郭政杰, 索俊伟, 高雪倩. 智慧化管理在化工园区中的应用与建设[J]. 山东化工, 2023, 52(02):182-184.
- [6] 刘训丽. 化工园区安全生产监管措施优化研究[D]. 长安: 长安大学, 2023.

人工智能技术在配电网故障诊断与调度优化中的应用分析

陆牧君¹, 王成²

(1. 国网江苏省电力有限公司南京市江北新区供电分公司, 江苏 南京 210000;

2. 国网江苏省电力有限公司泗阳县供电分公司, 江苏 宿迁 223700)

摘要 为进一步提升配电网管理水平, 需结合配电网运营管理需求合理应用人工智能技术, 构建完整的故障诊断分析与调度优化处理双机制, 共同搭建稳定和谐的电力系统运营体系, 实现经济效益和社会效益统一的目标。基于此, 本文分析了人工智能技术在配电网中的应用价值, 并对配电网常见故障类型进行梳理, 重点探讨了基于特征工程、深度学习、强化学习方法及混合智能的故障识别方法, 并对调度优化提出建议, 以期对相关人士提供借鉴。

关键词 人工智能技术; 配电网; 故障诊断; 调度优化

中图分类号: TP18; TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.013

0 引言

随着电力系统的发展, 配电网作为电力系统的重要组成部分, 其运行水平受到了更多关注。为保证配电网安全稳定工作, 要提高调度处理和故障诊断的水平, 及时识别故障问题并采取有效控制措施, 提升负荷预测分析的水平, 为维保工作的陆续开展提供科学、可靠的指导, 从而最大程度上提升智能电网建设的综合效果。另外, 还需结合配电网运行标准和控制需求, 建立基于智能化分析的识别模式, 发挥人工智能技术的应用优势, 更好地保证配电网自愈能力和电力供应管理的安全水平。

1 人工智能技术在配电网中的应用价值

1.1 高效识别配电网中的故障模式

人工智能技术应用在配电网安全管理工作中, 能结合海量数据建立实时性分析评估模式, 校准系统异常情况的同时, 利用机器学习算法对故障数据和实时性运行数据展开精准训练, 形成完整的高识别控制体系, 及时了解配电网的故障模式, 保证故障定位更加准确, 响应速度也能满足预期。相较于传统检测机制, 人工智能技术能更精准地完成故障情况的预判, 从而及时完成异常情况的识别和隔离, 避免故障问题蔓延造成的影响。

1.2 优化配电网的负荷预测和调度管理

配电网中应用人工智能技术还能对负荷情况进行集中预测管理, 因为配电网负荷波动较大, 特别是在

高比例分布式电源接入到配电网后, 只有建立完整的精度预测模式和灵活调度机制, 才能维持电力系统配电网运行的安全性。人工智能技术借助深度学习等方式汇总关联数据, 能及时预测负荷变化趋势, 依照运行情况展开动态调度, 更好地维系配电网综合运行效率。

1.3 为设备的维保决策提供依据

配电网应用人工智能技术对设备的健康情况进行实时性跟踪管理, 并搭建稳定科学的健康监测模式, 配合传感器和数据采集技术就能建立实时性监控体系, 汇总振动数据、温度数据、气流数据等, 实现综合化智能评估, 确保能为设备维保工作提供直观依据^[1]。

2 配电网常见故障类型

2.1 短路故障

在配电网运行过程中, 短路故障较为常见, 究其原因, 导线绝缘损伤、电气设备故障以及元件故障都会引起短路问题, 且故障汇造成配电网运行过程中电流增大且温度升高, 甚至汇引起电弧、火灾等严重灾害, 严重制约电力系统供电过程的稳定性。为此, 需要借助安装短路保护装置的方式进行测定和分析, 精准评估后完成短路隔离。

2.2 接地故障

接地故障指的是导线或者是电气设备绝缘受损, 使得线路和大地形成相连状态, 一般是因为外力破坏、绝缘设备老化等因素, 故障的危害性较低, 但若是不能及时处理和控制, 会引起短路故障或者是断路风险^[2]。

2.3 断线故障

若是配电网相应设施的材料存在缺陷或者是使用过程中机械拉力超标,则会造成线路断裂问题,引起中压降低和负荷中断等问题,制约供电作业的稳定性和安全性。相较于短路故障和接地故障,断线故障不会触发保护动作,这就使得断线故障的定位处理工作难度增加。为更好地避免断线故障引发重大问题,需要匹配多种故障检测机制,发现问题后强化巡检力度并展开相应维护作业。

3 传统故障识别方法的局限性

3.1 识别精度不足

在配电网故障识别工作开展的过程中,若是仅仅使用电能表计量数据进行评估,难免会增加监测的难度,使得故障后电气量采集分析的结果不准确,甚至数据质量、噪声干扰等因素都会对其产生影响,增加精度控制难度^[3]。

3.2 实时性差

传统的配电网故障识别机制中,因为数据采集和传输条件有限,使得相关联数据内容分析结果的实时性效果并不理想,不能作为后续故障定位和线路隔绝的重要依据。与此同时,通信基础设施和信道带宽限制因素较多,使得故障监测数据的精度和实时性水平难以达到主站系统上传的需求,必然会对精准定位和快速故障处理效果造成影响。尤其是识别时滞的问题,延误了送电时机,必然会对电力系统供电管理控制的水平产生负面作用。

3.3 适应性不强

因为配电网故障具有随机性特点,加之测试方法往往都是对特定场景的构建,缺乏真实工况的考量,就使得配电网运行过程中抗干扰能力和泛化能力并不足以满足应用要求,无法匹配多场景和工况运行标准,会对配电网综合应用控制效果造成影响。

4 基于人工智能的配电网故障识别

4.1 基于特征工程的故障识别

人工智能技术应用中,特征工程是非常基础的环节,能提高配电网故障识别的综合水平,因为配电网运行中设备运行状态、测量数据是分析故障和识别故障的关键依据,为此,只有保证提取的特征内容具有代表性且完整规范,才能更好地优化故障识别的整体质量^[4]。

一是利用数据挖掘技术对数据进行深度挖掘,并匹配信号处理手段提取有价值的关联性信息内容,形

成稳定和谐的数据统筹控制体系。尤其是在配电网运行中,电流参数、电压参数以及频率信号参数本身具有一定的周期性特点,借助时间序列分析方式就能更好地预测运行趋势,从而了解信号波形、频谱变化的特点,提升故障识别的精准性。

二是利用模式识别算法完成故障的分类和识别评估,目前,较为常见的方法包括向量机、K近邻以及决策树等方法,借助数据提取特征输入的方式,可有效搭建基于算法识别的故障评估模式。并且,利用聚类分析等技术手段还能对历史数据予以建模处理,了解数据分布情况,及时完成异常数据的检测和评估^[5]。

4.2 基于深度学习的故障识别

深度学习是人工智能技术的重要方式,在搭建多层神经网络的基础上,及时提取关联数据中高层次信息特征,有效完成大规模复杂数据处理工作,并保证性能分析更加规范。

一是卷积神经网络,利用卷积神经网络能对配电网故障后的电压波形图、负荷曲线等基础数据展开精准评估,汇总有效特征的同时完成分类,尤其是针对短路故障、接地故障的诊断,能打造高效且精准的识别机制。相较于传统信号处理手段,卷积神经网络的信息提取能力更号,并能发挥较好的泛化能力,共同优化故障识别水平。

二是循环神经网络,一旦配电网出现故障问题,对应的电流参数和电压参数也存在一定的时间相关性,利用循环神经网络能精准建立时序信息的汇总,获取信号中依托于时间的关系参数,更好地预测设备可能存在的故障问题,确保综合评估分析效果满足预期。循环神经网络还包括长短时记忆网络和门控循环单元,也可解决配电网故障定位问题^[6]。

4.3 强化学习方法

目前,强化学习法也被广泛应用在配电网故障识别中,基于和环境交互模式完成学习决策的机制,能更好地提升配电网故障恢复的效率,利用强化学习可建立反复试探的模式,优化决策效率的控制水平。相较于传统分析手段,强化学习能打造更加完整的动态调控管理机制,发挥其自适应优势,结合实时性汇总的故障信息调控处理策略,也为配电网规范供电提供良好保障。

以基于状态决策的故障定位为例,当配电网出现故障后,强化学习会对相应情况进行集中分析,并评估配电网运行状态和故障定位之间存在何种关系,实现故障源的精准定位处理,搭载强化学习算法后训练智能体并依照配电网状态汇总故障定位方案。

4.4 混合智能方法

为更好地提升人工智能技术在配电网故障识别和电力调度控制工作中的水平,可将人工智能技术和传统电力系统理论进行融合,搭建完整的故障识别模式,利用物理模型完成先验知识和数据驱动智能算法的有机汇总,搭建智能混合方法模式,及时评估电网中的复杂场景,甚至能预估未知故障。与此同时,基于人工智能技术的优势,系统可实现实时性更新和优化设备供给,配合传统电力系统的建模分析,保证机器学习算法数据分析和优化效果更合理,为配电网故障识别工作的全面展开提供保障。

5 人工智能技术在配电网调度优化中的应用

5.1 加强结合物联网发展

在配电网调度优化中应用人工智能技术,要充分结合物联网发展模式,建立更加合理的智能配电网运行体系,确保优化调度水准,维持高效运行的同时保证综合化管理控制工作都能顺利展开。物理网技术应用过程中,要将智能配电网作为基础,搭建满足深度融合并全面涵盖用户的物联网络,从而维持调度效率和智能化应用控制水准。并且,利用无线传输技术和射频技术,及时汇总用户需求和使用量,借助大数据技术进行数据优化和分析管理,完善智能化控制体系,还能依照用户的用电习惯共同促进配电网调度工作全面升级。

5.2 通过 5G 技术实现电力无线专网普及

为推动电力系统深化改革,智能电网建设中可将 5G 技术融合在配电网故障定位和处理工作中,打造完整的优化调度控制模式,提高资源应用管理效能的同时保证智能化管理效率符合预期。与此同时,借助技术手段建立电力无线专网,建构可控且规范的职能配电网优化调度设计平台,形成“国家调度中心—区域电网调度中心—省级调度中心—地区调度中心—基层调度”的分层调度管理模式,提升信息传输的时效性,也为电力无线专网应用效能的升级提供保障。

5.3 电力分配的数据传输网络建设

将人工智能技术应用在配电网优化调度工作中,能建立基于电力分配的数据传输网络,更好地保证数据传输的合理性和规范性,确保相关调度决策都能依照标准逐步开展。社会经济发展进程加快,人们对电网系统提出了较高需求,为保证供电企业和用户之间形成稳定且和谐的沟通机制,要匹配先进的技术处理机制,提高数据通信管理的质量水平。利用无线专网能满足大流量数据业务控制管理需求,匹配专网应用环境的同时,避免干扰问题。

5.4 采用传感技术的测量方法

传感测量技术是智能配电网优化调度工序中的关键环节,利用规范化技术处理机制,建构完整的调度决策运行模式,不仅能提升数据收集和分析的精准性,还能更好地获取可控化测量结果。智能电网信息需要借助规范化处理手段才能满足预期要求,匹配传感技术就能对采集过程、信息传输过程、信息存储过程以及显示环节予以集中管理,并建立完整的终端数据测量控制模式,更好地优化配电网调度质量。

5.5 实现电力分配自动化

在计算机技术和通信网络技术全面发展的时代背景下,高级配电自动化技术也被广泛应用在配电网优化调度工作中,结合调度需求,建立健全可控化技术运行机制,并结合配电网 SCADA 系统运行需求,建立完整的技术融合控制模式,确保配电调度自动化管理效能符合预期。也正是基于电力分配自动化的运行需求,构建一体化控制模式,一旦系统内部出现故障问题,就能及时发现并采取规范化处理措施,为配电网安全稳定传输提供良好保障。

6 结束语

人工智能技术在配电网故障诊断与调度优化中的应用具有深远的研究价值。要结合配电网运行需求,发挥人工智能技术的优势,对数据质量和标注、模型可靠性等予以综合升级,建立更加完整的优化改进控制体系,维持自动化工具与算法的运行稳定性,进一步实现智能化控制管理目标,共同促进电力系统可持续健康发展。

参考文献:

- [1] 蔡卓瑞,杨华樱,段晨宇.基于人工智能的配电网故障预测与自愈技术研究[J].通信电源技术,2025,42(08):221-223.
- [2] 王浩.基于人工智能的配电网故障诊断与优化调度方法[J].通信电源技术,2025,42(01):243-245.
- [3] 张冬.信息化时代人工智能技术在配电网智能感知与故障诊断修复中的应用[J].今日自动化,2023(06):66-68.
- [4] 李海龙.智能配电网中基于物联网的实时监测与故障诊断技术研究[J].中国科技纵横,2024(17):14-16.
- [5] 俞小勇,秦丽文,桂海涛,等.新一代人工智能在配电网智能感知与故障诊断中的应用[J].南方电网技术,2022,16(05):34-43.
- [6] 史磊,牟文东,卢鹏,等.人工智能在配电网故障模式识别中的应用研究[J].中国自动识别技术,2024(06):74-78.

高速公路桥梁高墩施工技术研究

李选金

(昭通高速配售电有限责任公司, 云南 昭通 657100)

摘要 针对临沧临翔至清水河高速公路项目26个钢筋混凝土薄壁空心墩的施工要求, 本文研究适用于特殊桥梁施工条件且满足桥梁施工要求的高墩施工技术, 阐述基础施工、墩身浇筑等环节的施工技术方案, 进行质量检验, 从孔径偏差、承台混凝土强度多个方面综合评价桥梁高墩施工效果。研究表明, 该项目高墩施工质量达标, 施工安全状况良好, 验证了高墩施工技术的可行性, 为类似复杂地质条件与气候条件下的桥梁高墩施工提供技术参考。

关键词 高速公路桥梁; 高墩; 质量检验; 孔径偏差; 承台混凝土强度

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.014

0 引言

传统高墩施工技术在复杂地质条件下的桥梁高墩施工中存在工序衔接不畅、设备适配不到位等问题, 难以保证桥梁结构尺寸精度、稳定性及耐久性, 此类问题在墩身高、壁厚薄的薄壁空心墩施工中体现得更为明显, 在地质、气候等因素共同影响下, 可能引起薄壁空心墩垂直度不达标、开裂等问题, 以何种方式有效进行特殊地质条件下的桥梁高墩施工备受工程人员关注^[1-2]。基于此, 本文结合实例研究高速公路桥梁高墩施工技术, 检验技术可行性, 旨在构建一套具有实践价值的山区高速公路桥梁高墩施工技术方案, 推动我国高速公路事业蓬勃发展。

1 工程概况

临沧临翔至清水河高速公路全长约14.680 km, 包含一座小寨山2号大桥。沿荷载等级为公路—I级, 设计时速100 km/h。桥梁高墩采用钢筋混凝土薄壁空心墩, 墩身高度32~68 m, 最高墩高度68 m、位于特大桥主跨两侧, 高度50 m以上的高墩14个, 高墩总量26个。各高墩下方设置12根桩长35~48 m、 $\Phi 1.5$ m钻孔灌注桩, 构成可提升高墩基础稳定性的群桩基础, 桩顶设尺寸 $10 \times 8 \times 2.5$ m的钢筋混凝土承台, 承台作用在于向地基持力层均匀传递墩身荷载。

2 高速公路桥梁高墩施工技术

2.1 高墩基础施工

1. 钻孔灌注桩施工。利用地质雷达探明岩溶区溶洞的位置和规模, 针对溶洞采取处理措施: 小溶洞下钢护筒隔离, 大溶洞回填黏土、片石并夯实^[3-4]。溶洞

处理结束后, 利用冲击式钻机钻孔, 每钻进2 m用孔斜仪检测2次孔斜, 根据检测结果进行纠偏, 同时保证孔径偏差不超过 $-5 \sim +10$ mm。

利用 $\Phi 28$ mm螺纹钢(主筋)分节加工钢筋笼, 接头用直螺纹套筒连接。通过型钢扁担吊装钢筋笼节段, 钢筋笼底部设置厚度为70 mm的混凝土垫块起到防护作用, 钢筋笼顶面标高误差控制在 ± 50 mm以内。

通过 $\Phi 300$ mm导管进行水下混凝土浇筑, 浇筑材料采用坍落度180~220 mm、初凝时间 ≥ 6 h、强度等级C35的混凝土。正式浇筑前进行水密性试验, 经过试验确认各项浇筑条件无误后, 利用混凝土输送泵连续浇筑, 保证桩体完整。钻孔灌注桩桩顶超灌高度1.0~1.2 m, 确保凿除浮浆后的桩顶标高达标。

2. 承台施工(施工流程如图1所示)。按照5~7 m的开挖深度开挖承台基坑, 利用潜水泵抽排坑底积水, 坑底修筑排水沟与集水井构成顺畅的排水渠道, 经过抽排后的坑底保持干燥。承台基坑开挖结束后, 铺设C15混凝土, 形成厚度100 mm的垫层。承台配筋方式为 $\Phi 32$ mm螺纹钢(主筋)和 $\Phi 16$ mm圆钢(箍筋), 主筋位置偏差 ≤ 10 mm, 绑扎钢筋时用全站仪检测主筋位置, 以便纠偏。模板采用钢模板, 相邻两板紧密贴合, 用海绵条密封板间接缝, 用线锤检测模板垂直度, 模板位置维持准确, 通过对拉螺栓固定模板。

承台混凝土浇筑分层进行, 单层厚度300 mm, 浇筑材料采用C40混凝土, 用插入式振捣器对混凝土捣固20~30 s。承台混凝土浇筑结束后, 进行至少14 d的养护, 养护期间覆盖土工布和塑料膜, 防止承台混凝土失水开裂^[5-6]。冬季施工时低温对承台混凝土固结

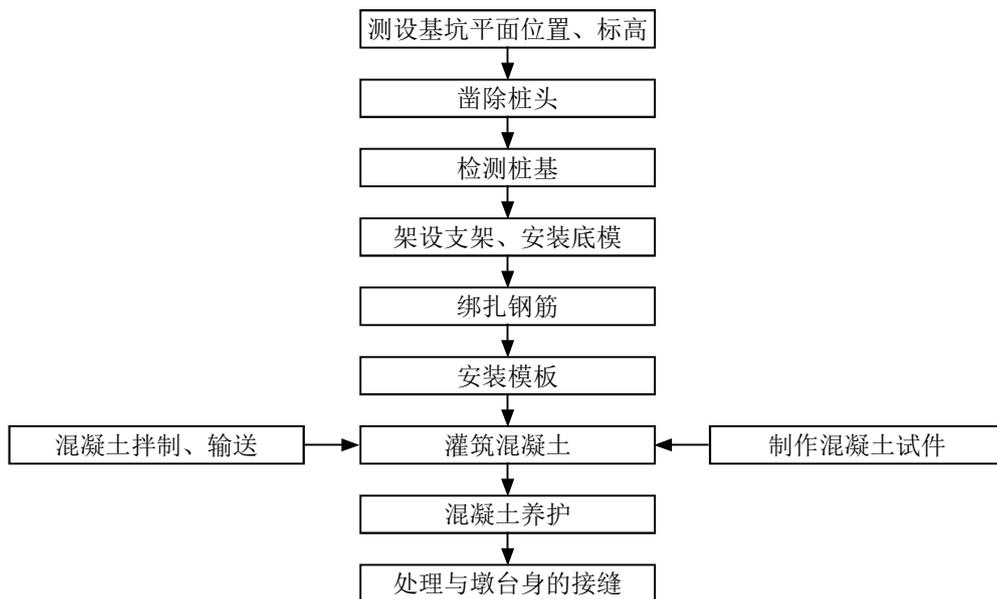


图 1 承台施工工艺流程图

效果不利，需覆盖棉被和电热毯用于保温，预防承台混凝土温度裂缝。

2.2 高墩墩身施工

本项目高墩具有壁厚薄、高度大的特点，高墩受风荷载影响，针对该高墩施工条件，采用“翻模施工+液压爬架”的高墩墩身施工工艺。

1. 模板安装。每节模板由 2~4 块定型钢模板拼装而成，模板接缝部位采取止水措施，构成完整、严密的模板系统。模板外侧设置液压爬架。模板安装前根据模板安装位置测量放线，每节模板安装结束后，用激光垂准仪检测模板垂直度，根据检测结果纠偏，确保单节垂直度偏差 ≤ 3 mm、累计偏差 ≤ 15 mm。

2. 钢筋安装。利用直螺纹套筒连接工艺安装 $\phi 32$ mm 螺纹钢（墩身主筋），采用焊接工艺在主筋点处连接 $\phi 12$ mm 钢筋（箍筋）；内置环形加劲肋；设置厚度 50 mm 的保护层垫块。

3. 预埋件安装。本项目桥梁高墩预埋件主要指的是爬架附墙螺栓和塔吊附着装置预埋件，安装位置为墩身内，安装前用全站仪测量放线，确保预埋件安装位置偏差 ≤ 10 mm。混凝土浇筑可能导致预埋件移位，需要将安装到位的预埋件与主筋焊接固定。

4. 混凝土施工。高墩墩身采用初凝时间 ≥ 8 h 的 C50 混凝土，根据混凝土抗裂性能提升要求，按 0.9 kg/m^3 的掺量在混凝土中添加聚丙烯纤维^[7-8]。高墩混凝土浇筑分层进行，浇筑后及时用 $\phi 50$ mm 插入式捣固器捣固。每结束一节高墩混凝土浇筑后，按设计坡度对顶面收

面。墩身混凝土养护方案为“喷淋养护+覆盖保湿膜”，喷淋开始时间为混凝土浇筑结束后 12 h 内，喷淋管统一布置在墩身外侧。夏季气温高，增加喷淋频次，防止混凝土失水开裂。冬季气温低，混凝土在温度应力作用下可能出现裂缝，需进行蒸汽养护。每浇筑 2 节墩身后，测量墩身轴线，若偏差未超过 10 mm 视为合格，否则需要以优化布料顺序、调节模板对拉螺栓松紧度的方式纠偏。若墩身轴线偏差大，在模板外侧设置可调节轴线的临时支撑，若墩身轴线偏差小，仅需微调单侧模板即可完成纠偏。

3 高速公路桥梁高墩施工质量检验与评价

3.1 孔径偏差

每处样本均选取 3 根钻孔灌注桩，共计 3 处（9 根），利用型号 KXY-1000 孔径仪对钻孔灌注桩的三个截面（孔顶、孔中和孔底）进行孔径检测，对比分析实测值与设计桩径（ $\phi 1500$ mm），确定各检测截面的孔径偏差，检测结果如表 1 所示。根据表 1 可知，9 根钻孔灌注桩的孔径偏差为 $+1.5 \sim +3.5$ mm，均未超出设计允许偏差范围，且所有参与检测的钻孔灌注桩均无孔径缩小负偏差现象，钻孔灌注桩孔径达标。

3.2 承台混凝土强度

按照“梅花布点法”在 1# 高墩承台选取 10 个测区进行承台混凝土强度检测，汇总混凝土立方体抗压强度值（按照承台混凝土碳化深度 1.8 换算得出），如图 2 所示。

表1 孔径偏差结果

样本编号	桩长/m	设计桩径 (mm)	孔径偏差			单桩最大偏差	设计允许偏差
			孔顶	孔中	孔底		
1# 特大桥主跨	48		+3.1	+2.6	+1.6	+3.1	
			+3.0	+2.5	+1.8	+3.0	
			+3.2	+3.0	+1.7	+3.2	
3# 大桥中跨	42	1 500	+2.8	+2.3	+1.6	+2.8	-5 ~ +10
			+2.9	+2.4	+2.0	+2.9	
			+2.6	+2.1	+1.8	+2.6	
5# 大桥边跨	35		+2.9	+2.8	+1.7	+2.9	
			+3.0	+2.4	+1.7	+3.0	
			+2.8	+2.6	+1.7	+2.8	

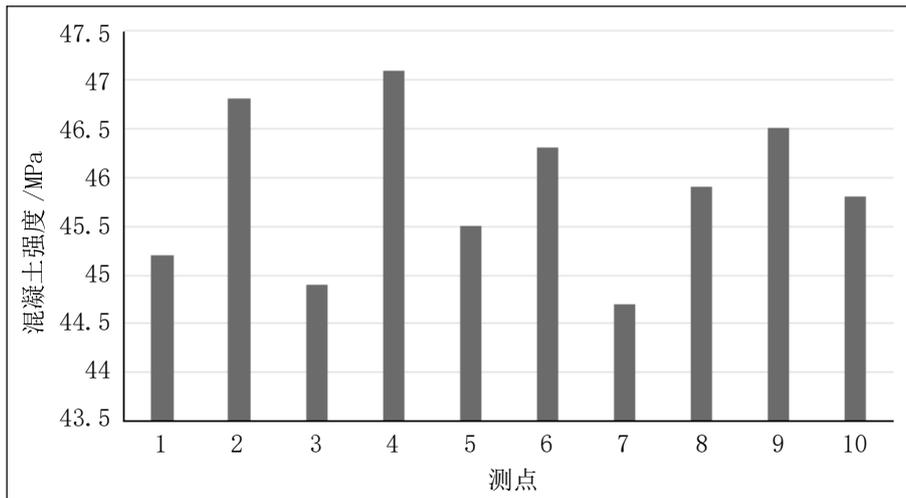


图2 混凝土强度检测结果

根据图2中的数据可知,承台混凝土强度测区均值为45.8 MPa,强度达标,同时各测区强度离散性小,桩体强度分布均匀,能够确保高墩墩身荷载均匀传递至地基持力层。

4 结束语

针对临沧临翔至清水河高速公路桥梁施工条件的特殊性,制定专项高墩施工技术方,顺利完成26个钢筋混凝土薄壁空心墩施工任务。质量检验结果表明,桩体孔径偏差、承台混凝土强度均达标,有效解决了复杂地质、高空作业等高墩施工难题。未来需要在高速公路桥梁高墩施工中持续融合智能化监测技术,加强高墩施工全过程参数监测和动态管控,进一步提升高速公路桥梁高墩施工水平。

参考文献:

- [1] 张宏林. 翻模施工技术在高速公路桥梁高墩施工中的应用策略研究[J]. 工程技术研究,2024,09(21):43-45.
- [2] 刘树生. 高墩施工技术要点及其在高速公路桥梁施工中的应用[J]. 建筑技术开发,2024,51(06):119-121.
- [3] 李建刚. 高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用研究[J]. 汽车周刊,2023(03):94-95.
- [4] 陈耀文. 高速公路桥梁施工中高墩施工技术的应用[J]. 工程机械与维修,2024(07):72-74.
- [5] 王博. 高速公路桥梁建设工程中的高墩施工技术应用研究[J]. 城镇建设,2024(10):145-147.
- [6] 王立男. 高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用研究[J]. 科技资讯,2025,23(01):150-152.
- [7] 李永超. 高速公路桥梁实心高墩爬模施工工艺研究[J]. 科技创新与应用,2023,13(04):193-196.
- [8] 展广卫. 高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用研究[J]. 中国科技纵横,2024(03):118-120.

公路沥青混凝土路面施工技术分析

黄一标

(广州市道路养护中心北城养护所, 广东 广州 510080)

摘要 公路沥青混凝土路面施工技术在现代交通基础设施建设中占据核心地位, 其施工水平直接影响路面的平整度、承载力和耐久性。本文围绕沥青混凝土路面施工全过程展开分析, 涵盖原材料选择、施工准备、拌和与运输、摊铺、压实及接缝处理等关键环节。通过对工艺参数与技术措施的研究, 总结该项技术的施工要点, 以期为提升路面施工质量提供借鉴, 进而推动公路工程高质量发展。

关键词 公路工程; 沥青混凝土; 路面施工技术

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.015

0 引言

随着交通运输需求持续增长, 车辆载荷水平不断提高, 公路路面的性能要求日益提升。沥青混凝土路面凭借其结构强度高、施工效率高、使用寿命长的特点, 广泛应用于各类公路建设中。然而, 在施工实践中, 若技术措施不到位, 极易出现裂缝、车辙、接缝不密实等质量问题, 从而缩短道路使用周期。为此, 探索一套科学合理的施工技术体系尤为关键。沥青混凝土路面施工技术正是在此背景下得到广泛推广应用, 不仅能解决传统工艺难以克服的技术瓶颈, 还能在适应不同气候、地质和交通环境方面表现出灵活性, 进而为公路施工提供技术参考。

1 公路沥青混凝土路面施工的优势

在公路工程建设中, 沥青混凝土路面施工技术在质量控制方面成效突出, 借助机械化程度高、工艺衔接紧密的特点, 能够解决传统工艺中常见的平整度不足、裂缝易发等问题, 从而提升整体施工水平^[1]。施工过程中还可根据实际环境灵活调整技术参数和操作方法, 具有很强的适配能力。

沥青混凝土路面施工技术通过合理调配沥青、砂石和骨料, 不同粒径的混合料可灵活应用于基层、面层与垫层等多个结构层, 既满足设计需求, 又能提高力学性能与施工精细化水平, 不仅使施工更加科学合理, 也能显著减少后期养护成本。此外, 沥青混凝土路面施工技术在安全性上优势明显。针对不同道路类型, 要求施工人员因地制宜制定施工标准, 并采取相应的施工技术措施, 可以最大化地提升施工质量, 并延长公路使用年限。

2 公路沥青混凝土路面施工技术措施

2.1 合理选择原材料

原材料选择是决定路面结构性能和使用寿命的核心环节, 只有在严格遵循技术规范的基础上, 科学选取并管理材料, 才能确保施工质量达到预期目标。对于沥青的选用, 施工单位应充分结合公路等级、当地环境特征、交通流量及路面在结构体系中的功能位置来确定合适标号, 避免盲目选材导致路用性能下降。施工中不仅要保证沥青的各项指标符合国家标准, 还必须在存储环节保持储罐温度稳定在 130 ~ 170 °C 之间, 防止材料因高温老化或低温凝固而影响性能。如果沥青未能满足要求, 应及时参加外加剂予以改性, 确保其满足强度需求^[2]。尤其是改性沥青进场之前, 必须提供基层沥青、改性剂及改性沥青的完整检测报告, 任意一项不达标, 都不得投入实际施工。在骨料选择上, 施工单位应根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004) 选择碎石、矿渣、钢渣和砾石等常见的粗集料, 但考虑到矿渣和筛选砾石的稳定性及强度不足, 不宜用于高等级道路的面层施工。对于细集料, 通常选用符合级配要求的河砂或海砂, 并且必须保证其表面清洁无杂质, 否则容易影响拌合料的粘结性。矿粉作为改善沥青与骨料结合力的重要填充料, 通常选用由火成岩或石灰岩精磨而成的矿粉, 并确保原石料不夹杂泥土等杂质。若有必要, 还可用部分符合硫酸盐水泥规范的水泥代替矿粉, 进一步提升粘结强度。

2.2 做好施工准备

在施工准备中, 下承层的状态直接决定了面层施工的整体稳定性, 因此必须由专业技术人员对其各项指标进行全面检测、严格试验, 只有确认各项参数均

满足规范要求,才能进入下一步工序。在进入铺筑环节之前,应对下承层进行彻底清理,清除表面存在的尘土、杂物与油污,确保基底表面干净整洁,以增强面层与下承层之间的结合力,避免出现脱层或松散等质量问题^[3]。对于试验段的施工准备,在大面积施工前,施工单位应遵循首件工程认可制,选定一段代表性路段作为试验段,通过实际操作来验证施工方案的合理性,并帮助施工团队在实践中确定最优的材料配比、设备运转状态及人员分工,同时检验不同工序衔接的顺畅性及施工指标的达标情况。试验段完工后,需由相关人员组织验收,并在审批确认各项性能符合设计与规范标准后,才能将其施工经验作为后续大规模施工的参考。

2.3 拌和

在拌和环节,常用设备包括连续式拌和机与间歇式拌和机两类,在高等级路面的面层施工中,通常优先选择间歇式拌和设备,以确保拌和质量的稳定性。拌和站的运行情况需定期检测,尤其是对保温料仓的筛孔尺寸进行检查,避免因孔径偏差影响到原材料的配合比,从而导致混合料性能波动。在具体拌和过程中,计量装置的精确度直接关系到各原材料的用量,因此,必须保证其具备足够的灵敏性,并定期校验,确保各种材料的称量精准无误。温度传感器应每年进行一次校验,保证监测数据的可靠性^[4]。混合料的拌和时间需根据前期试拌结果进行合理设定,确保各类矿料均匀裹覆沥青膜并形成致密结构。例如:普通沥青的干拌时间不应少于5 s,湿拌时间不少于25 s,总拌和周期应控制在45 s以上;而改性沥青的干拌时间同样要求 ≥ 5 s,湿拌时间不少于30 s,总拌和周期则应保持在50 s以上。拌和完成后的混合料必须以最快速度运至摊铺现场,避免长时间存放造成温度下降、性能劣化。如果因施工组织需要暂时储存混合料,必须根据其摊铺温度控制允许的存储时长,并在运输与卸料环节对温度进行实时检测和记录,确保每一车混合料都处于最佳状态。

2.4 运输

运输环节起着承上启下的关键作用,直接影响拌和料能否以理想状态进入摊铺工序。通常情况下,完成拌和的混合料会采用自卸汽车进行转运。在正式装料之前,必须对车辆进行彻底检查与清理,尤其是车厢内部,务必要确保无杂物、无残留旧料,以免影响新拌混合料的均匀性。随后,需要在车厢内壁均匀涂抹隔离剂,从而避免沥青混合料在运输过程中粘附,确保卸料环节顺畅无阻。装料时要严格控制装载方式,

一般以小堆逐层填装,且应保持车厢与卸料口的距离不超过0.5 m,既防止落差过大造成混合料离析,也有利于维持均匀分布。在装料过程中,混合料必须保证出厂温度维持在145~165℃。完成装车后,运输车辆应保持匀速行驶,避免急刹车和剧烈晃动,以免出现材料溢出或离析的情况^[5]。为了进一步减少外界环境对温度的影响,车辆外部需加盖保温篷布,以降低热量流失,确保在整个运输过程中混合料的温度始终维持在145~165℃之间。抵达施工现场后,车辆应准确停靠在距摊铺机前方0.3 m的位置,以便后续顺利卸料。在卸料前,还需再次检测混合料温度,并检查其是否存在结团、离析等质量问题,只有在确认混合料各项性能符合施工要求的前提下,才能进行卸料操作。

2.5 摊铺

施工过程必须严格依照技术要求执行,并结合工程特点合理配置机械设备。常用的摊铺机械包括振动式、履带式 and 轮胎式摊铺机,具体型号应根据施工规模与路面设计要求灵活选用。一般情况下,摊铺机的工作宽度应控制在7.5 m以内,为了提高施工效率,可以采用双机或多机平行作业,但相邻摊铺面之间必须预留搭接宽度,通常应保持在30~60 mm之间,并且搭接位置尽量避开车轮行驶轨迹,以免形成裂缝或局部高低差。在进行上下层摊铺衔接时,应至少预留20 cm以上的空余,以保证层间粘结更加牢固。在摊铺作业开始前,熨平板需要提前进行加热预处理,预热时间一般控制在0.5~1 h之间,且温度要保持在140℃以上,防止混合料接触冷金属板面时迅速降温,导致初始压实质量下降。施工过程中应采用边摊铺边压实的操作方式,同时使用熨平板或振捣装置辅助密实,以保证在摊铺阶段就能达到良好的压实度^[6]。为了保证路面均匀性、连续性,摊铺机的运行速度必须保持稳定,一般控制在2~6 m/min之间,禁止随意中途停车或暂停,否则极易造成接缝处不平顺甚至出现冷接缝。在摊铺过程中,布料器的运行状态尤为关键,必须保持稳定均衡,且其内部料位要始终维持在送料器高度的2/3,避免因料层忽高忽低而导致混合料发生离析现象,从而影响整体的路面结构质量。摊铺完成后,应立即安排机械设备进行找平与修正,对于机械难以覆盖的边角或狭窄区域,则需安排人工辅助找平,以确保整个路段表面平整顺畅,满足设计与使用要求。

2.6 压实

在初压阶段,压实作业紧随摊铺之后立即展开,一般采用双钢轮压路机实施静压,以免对尚处于高温

状态的混合料产生过度扰动。此时混合料表面温度必须控制在 165 ~ 170 °C 之间,运行速度保持在 1.5 ~ 2.0 km/h 的区间内,且设备必须严格遵循预设路线和方向匀速行进,严禁出现推移或开裂的情况。碾压路线需遵循由内向外的原则,相邻碾压带要保证 1/3 ~ 1/2 轮宽的重叠,确保压实均匀。如果采用单幅压实方式,则需自低向高依次进行,避免出现路面高差。在完成这一阶段后,还需安排专业人员对压实质量进行检测,并对表面进行必要的平整处理。为了进一步提高平整度,通常还会辅以轻型压路机进行两轮追加碾压,其运行压力需不低于 35 kN/cm,之后再一次检测路面平整度,并根据检测结果对施工参数进行及时调整。

复压阶段,混合料的温度应稳定控制在 140 ~ 150 °C 之间。该阶段的目的是进一步提升压实度,一般采用双钢轮振动压路机与轮胎压路机交替作业。具体操作是先由振动压路机对路面进行 3 ~ 4 遍的振动压实,随后由轮胎压路机进行 4 ~ 6 遍的进一步压实,以保证压实度和表面平整度均能达到标准。在此过程中,压路机的行驶速度需保持在 2 ~ 3 km/h 之间,相邻碾压带的重叠宽度必须控制在 1/2 轮宽,避免压实不均。同时,施工人员必须特别注意设备的运行操作,严禁在碾压过程中随意掉头,若确需倒车,必须先关闭振动装置,以免造成局部破坏或影响整体质量。

终压阶段是压实工序的收尾环节,通常在复压完成后立即进行。该阶段多使用胶轮压路机,目的是彻底消除压路机留下的轮迹,使路面表面更加光滑致密。在该环节中,混合料温度需维持在 110 °C 以上,运行速度则应控制在 3 ~ 4 km/h 之间,以确保施工过程中既能消除表面缺陷,又不会因碾压过度而导致混合料结构受损。终压完成后,整个路面的压实度和平整度必须经过严格的检测和确认,确保达到设计标准。

2.7 接缝处理

在摊铺与碾压完成后,施工人员需对接缝部位进行精细化作业,尤其是在雨水较为丰沛的地区,更应当在路面压实完成后立即着手横向接缝处理,以减少雨水侵入结构层的可能性。横缝处理往往借助 3 m 直尺进行定位,趁混合料尚未完全冷却之前,迅速切除接缝,并利用机械设备将其封闭^[7]。待第二天施工时,再根据摊铺层厚度垫入等厚木板,同时填补适量细料,从而提高接缝处的密实度。此后,先由小型双钢轮压路机进行横向碾压,再利用 12 t 双钢轮压路机实施纵向碾压,保证接缝与整体路面紧密结合,达到理想的结构完整性。要注意的是,半幅摊铺往往会产生横向裂缝,需通过两台摊铺机同步作业来避免。搭接宽度

通常设为 30 cm,以确保接缝部位精确对齐,避免出现错台和裂纹。对于纵缝处理,通常要求纵向接缝错位控制在 35 cm 左右,并在邻近接缝位置设置挡板,使之形成垂直的接缝面。随后应及时采用新拌的沥青混合料进行覆盖,重叠宽度保持在 7.5 cm,同时辅以局部加热工艺,使新旧材料能够充分黏结。

3 结束语

公路沥青混凝土路面施工技术是一项系统性极强的工程实践,涵盖了从原材料甄选到施工工艺再到质量管控的各个环节。合理选材是保证性能的前提,科学的施工组织与工艺控制是确保质量的关键,而全过程的动态调整则是延长道路寿命的重要保障。从施工组织到过程控制,建议将温度场管理、均匀度评价、层间黏结强度纳入竣工验收核心指标,并以试验段数据动态修订施工组织设计和机群参数,形成“问题—参数—工法”的持续改进链。结合季节、交通强度、施工时段差异,建立雨季、夜间、低温三类备用参数包和应急处置流程,对冷接缝、温降带、重载通道实施差异化监测与预防性养护。同步引入质量追溯台账和缺陷闭环清单,明确责任人、整改时限与复核方式;推广基于 BIM 与物联采集的过程记录,固化“材料到位—工序交接—指标验收”三节点证据链,以实现质量、耐久、效率及全寿命成本的综合最优。随着施工机械不断更新,再加上智能化技术的应用,未来沥青混凝土路面施工将更加趋向精细化、智能化发展。在新时期的公路施工过程中,施工单位应全面推广并优化路面施工技术,不仅能提升交通运输效率,也能为道路的长期安全运营提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 张楠. 公路工程沥青混凝土路面施工难点及措施分析[J]. 汽车周刊, 2025(10):89-90.
- [2] 王涛. 公路工程沥青混凝土路面施工技术研究[J]. 交通科技与管理, 2025,06(16):116-118.
- [3] 刘海斌. 公路工程高性能沥青混凝土路面施工技术分析[J]. 科技创新与应用, 2025,15(22):173-175,180.
- [4] 胡金莲. 公路沥青混凝土路面施工现场技术管理要点分析[J]. 工程建设与设计, 2025(14):210-212.
- [5] 刘友洪. 公路施工中沥青混凝土路面施工技术研析[J]. 汽车周刊, 2025(08):152-154.
- [6] 张卫红. 高速公路沥青混凝土面层施工技术探究[J]. 汽车周刊, 2025(07):76-77.
- [7] 杨菊. 公路工程建设中的沥青混凝土路面施工技术[J]. 运输经理世界, 2025(17):16-18.

市政道路工程软土路基施工技术分析

陈 瑜

(中铁上海工程局集团第一工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要 在市政道路工程建设中,经常会遇到软土地基,其具有含水量高、压缩性强、抗剪强度低等特点,若处理不当,会导致道路在使用过程中出现不均匀沉降、路面开裂、桥头跳车等问题,因此相关企业应重视软土路基施工技术的研究与分析。本文主要阐述了市政道路工程中软土路基施工技术的应用意义,深入分析了排水固结技术、土工合成材料加筋技术、深层搅拌法、强夯施工技术等多种软土路基施工技术,并结合实际案例探讨在不同工况下的技术应用要点,以期为保障城市交通的安全顺畅运行提供参考。

关键词 软土路基; 市政道路; 置换施工技术; 强夯施工技术; 排水固结技术

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.016

0 引言

市政道路工程软土路基施工技术的应用,关系到道路工程的质量、安全和使用性能,并在资源利用、环境保护等方面发挥着积极作用。在实际工程建设中,企业应加强前期勘察,根据地质勘察结果和工程具体要求,制定多个可行的软土路基处理方案,并择优确定最佳的处理方案及其实施细节。企业还应严格按照设计参数施工,加强现场监测与反馈调整,注重全过程质量管控,做好换填法、排水固结法、深层搅拌法等技术的交底工作,进而实现市政道路建设的可持续发展目标。

1 市政道路工程中软土路基施工技术的应用意义

1.1 保障工程质量与安全

软土本身的承载能力较弱,难以直接承受道路结构及车辆荷载的作用,采用有效的施工技术,如换填法、排水固结法等,可改善软土的物理力学性质,提高地基的承载能力,确保道路在运营期间的稳定性和安全性,避免了因地基失效而引发的安全事故。良好的软土路基处理,可以使路面结构的受力更加合理,当路基稳定且均匀时,传递给路面的应力分布也较为均匀,减少了局部应力集中现象,进而延长路面的使用寿命,如水泥搅拌桩复合地基技术的应用提高了整体刚度,使得车辆荷载能够更有效地扩散到更大的面积上,延缓了路面病害的出现和发展。软土的压缩性较大且分布不均匀,在道路自重及交通荷载作用下,容易产生差异沉降。导致路面平整度下降,影响行车舒适性、安全性,企业采取合适的软土路基处理技术,可有效控制沉降量,如采用真空预压法加速软土排水固结过

程,使土体提前完成大部分沉降,大大减少了道路建成后的剩余沉降,降低了交通事故的发生风险^[1]。

1.2 合理利用资源与环境保护

不同的地区有着丰富多样的材料资源,可供利用于软土路基处理,一些沿海地区,可采用贝壳砂等海产废弃物,山区可采用碎石资源,通过因地制宜地选择当地易获取的材料开展软土路基处理,可降低工程造价,减少长途运输带来的环境污染;采用合适的施工技术处理好软土路基后,可增强道路抗病害能力,相应的维护工作量和维护费用也会显著降低,进而节省运营成本,提高了交通运输的效益。此外,技术的不断发展,一些新型的环保型材料逐渐应用于实践中,如生态袋护坡结合植被绿化技术,在加固边坡的同时实现了水土保持和生态修复功能。

2 市政道路工程软土路基施工技术的应用路径

2.1 置换施工技术

2.1.1 施工要点

市政道路软土路基施工中,可以采用置换施工技术,浅层置换法一般采用人工或机械开挖的方式将表层软土清除,然后换填优质的素土、砂或砂石混合料等,进行夯实处理;深层置换法中,可以利用振动器在软土中成孔,接着向孔内灌入碎石并振密,形成碎石桩,有效提升地基的整体承载能力。施工前,企业应做好施工现场地质勘察工作,通过钻探、原位测试等手段,获取软土层的分布范围、厚度、物理力学性质参数(如天然密度 ρ_0 、含水率 ω 、孔隙比 e_0 、压缩模量 E_s 等),基于此确定置换材料的选型、置换深度、桩间距等技术参数。企业在施工过程中,应按照设计的置换

范围和深度进行开挖,若采用机械开挖,应预留一定厚度的土层由人工清理找平,深层置换中的成孔工序应严格控制孔位、孔深和垂直度偏差,一般孔位偏差不应超过 ± 50 mm,孔深误差控制在 ± 100 mm 以内。企业在回填材料时,应分层进行,每层厚度不宜超过 30 cm,采用振动压路机、重型击实锤等对每一层进行充分压实,砂垫层,压实后的相对密度 D_r 应不低于 0.75。施工中应加强质量检测与监控,检查置换体的强度、完整性,如碎石桩可采用动力触探试验测定其密实度和均匀性^[2]。

2.1.2 案例分析

某市政道路位于沿海地区,路线全长 1.5 km,路基宽度为 28 m,该路段地表以下 3~6 m 范围内为淤泥质黏土层,其天然密度 $\rho_0=1.6$ g/cm³,含水率 $\omega=55\%$,孔隙比 $e_0=1.5$,压缩模量 $E_s=2$ MPa。相关企业采用振冲碎石桩复合地基开展软土路基处理,处理后复合地基承载力特征值 $f_{spk} \geq 180$ kPa,根据《建筑地基处理技术规范》,振冲碎石桩的单桩竖向承载力特征值 R_a 可按下式估算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_{pi} + q_p A_p$$

代入数据可得: $R_a=603.19$ kN,相应的复合地基承载力特征值:

$$f_{spk}=184.52 \text{ kPa} > 180 \text{ kPa}$$

经计算,满足设计要求。该企业按照设计方案进行振冲碎石桩施工,共布置了 1 600 根桩,施工中严格控制各项工艺参数,成桩后随机抽取 10 根桩进行静载荷试验,结果显示单桩承载力均大于设计值 R_a ,且复合地基承载力实测值平均达到 190 kPa,大于设计要求的 180 kPa^[3]。

2.2 强夯施工技术

强夯施工技术通过重锤冲击使地基土密实度增加,夯击时,巨大的冲击能量使土颗粒重新排列,排出孔隙中的水分和气体,从而使地基土变得密实,该技术开展中,企业应做好施工技术交底工作,强化该技术的施工工艺流程,把控好该技术的质量控制要点,如严格控制夯锤的重量、落距和夯击速度,定期校准测量仪器,保证夯点间距与布置的合理性。企业在施工中应做好场地清理与平整工作,详细了解场地的地质条件,通过原位测试和室内试验,确定合适的强夯参数,根据工程规模和地质条件选择合适的强夯设备,按照设计要求开展夯点布置,可采用梅花形或正方形网格布置夯点。企业在第一遍夯击时,应记录每次夯击的沉降量,注意观察地面的变化情况,完成一遍夯击后,用推土机将场地推平,然后用压路机进行碾压;根据

设计要求和地质情况,需要进行多遍夯击,每遍夯击之间应有一定的间歇时间,最后进行满夯作业,施工结束后,再次平整和压实地面,使其达到设计标高和平整度要求。企业还应注意施工中的注意事项,如密切关注地基土的含水量变化情况,及时采取措施控制含水量,监测周边环境,并制定保护措施。

2.3 排水固结技术

2.3.1 施工要点

市政道路软土地基中,其软土具有含水量高、孔隙比大等特性,若未经妥善处理,将导致路面出现较大的沉降变形,排水固结施工技术可促使土体逐渐固结硬化,提高地基承载力和稳定性。企业在该技术应用中,应加强前期勘察与设计,结合道路的设计要求,选择合适的排水固结方法和参数,掌握堆载预压法、真空预压法、砂井堆载预压法等施工优势及注意事项,浅层软土且施工场地开阔的区域,可优先考虑堆载预压法,合理确定排水体的间距、直径、深度等参数。企业在施工中应使用插板机将塑料排水板,按设计间距和深度逐根插入软土地基中,每根排水板插入后应及时检查其回带长度,若采用砂井作为垂直排水通道,先利用打桩机成孔,然后向孔内灌入干净的中粗砂形成砂井,垂直排水体施工完成后,在其上部铺设水平排水垫层。一般采用砂砾石材料,厚度通常为 0.5~1 m 左右。加载预压中可采用堆载或真空联合堆载,严格控制加载速率和分级加载的重量,整个施工中,建立完善的监测系统,实时采集数据,根据监测结果及时调整施工参数和进度,若孔隙水压力异常升高,则采取增加排水设施或暂停加载等措施^[4]。

2.3.2 案例分析

某市政道路部分路段穿越了大片的水稻田区域,地基土主要为淤泥质粉质黏土,企业针对该区域采用排水固结法,考虑项目实际情况,选择了塑料排水板结合堆载预压的施工方法,塑料排水板间距为 1.2 m,正方形布置,深度穿透软土层进入持力层 0.5 m,堆载预压高度为 3 m,分三级加载。企业在施工中采用了人工开挖探槽的方式,提前探明障碍物位置和范围,使用小型挖掘机配合人工进行清理,再重新进行插板作业;并加强沉降数据的监测频率,在沉降较大区域增设临时支撑结构,有效控制了不均匀沉降的发展,通过检测对比发现,累计沉降量控制在 30 cm 以内,满足了道路设计和使用要求。

2.4 深层搅拌桩施工技术

深层搅拌桩技术应用在软土地基处理中,企业应平整施工现场,清除障碍物,并根据设计图纸进行精

确的测量放线,确定桩位的中心位置,选用质量合格的水泥作为主要固化剂,选择合适的深层搅拌机型号。企业应按照测量放线的标记将桩机移动到指定位置,通过水准仪或经纬仪监测钻杆的倾斜度,调整桩机的垂直度,使钻杆保持竖直状态,启动桩机的电机驱动钻杆缓慢向下旋转钻进,开启送浆泵向土体中喷射少量水泥浆以润滑钻头和减少阻力,注重喷浆搅拌提升的要点,如提升速度应根据水泥浆的流量和搅拌效果合理控制,提升中密切关注喷浆压力的变化。企业应进行多次重复搅拌下沉与提升作业,每次下沉至上次搅拌的最深处后再按同样的方式提升,如此反复数次,使水泥土充分搅拌均匀,完成一根桩的施工后,对该桩进行检查验收,如发现问题应及时采取补救措施,如补喷水泥浆等。企业在质量控制中应根据不同的地质条件和设计要求合理确定水泥浆的水灰比,施工中准确计量每根桩的水泥浆用量,合理调整喷浆压力,控制好搅拌叶片的旋转速度和搅拌时间,并采用载荷试验等方法对复合地基承载力进行检测。

2.5 土工合成材料加筋技术

2.5.1 施工要点

土工合成材料加筋技术在软土路基可铺设土工合成材料,形成复合受力体系,从而改善路基的力学性能,企业应基于不同的软土类型、地下水位情况等因素,合理选择土工合成材料,腐蚀性较强的环境选用耐腐蚀性能好的材料,常见的土工合成材料包括土工格栅、土工布、土工格室等。企业还应依据相关的规范标准和计算模型,结合实际工程经验,确定所用材料的抗拉强度、延伸率、孔径大小等参数,考虑将土工合成材料与其他结构层次相结合,形成多层复合式路基结构。企业在施工中应做好清除工作以及排水设施的设置,若采用砂垫层作为辅助措施,需按照规定的厚度和范围进行摊铺,并适当洒水压实;土工合成材料的铺设中,采用人工配合机械的方式铺设,将材料一端固定好逐渐展开并拉直,相邻两幅材料之间要有足够的搭接长度,铺设中注意保持材料的松紧适度;选择合适的填料分层回填,采用压实设备对填料进行充分压实,从边缘向中间逐步推进^[5]。

2.5.2 案例分析

某城市主干道扩建工程路线全长约6 km,其中部分路段穿越了一片湿地区域,地表以下存在较厚的淤泥质软土层,厚度达7~11 m不等,原地面承载力极低,无法满足道路设计的荷载要求,经过综合比选企业采用土工合成材料加筋技术对该段软土路基进行处

理。企业选择了高强度聚丙烯土工格栅作为加筋材料,考虑到地下水位较高的因素,选用了短纤针刺无纺布作为辅助排水材料,施工中针对湿地区域原地面开展了清表处理工作,沿路线方向开挖纵向排水沟,间距约为50 m一道,横向设置支沟连接至附近的河道,待水位降至合适位置后,开始铺设厚度为0.5 m的中粗砂垫层作为工作平台。土工格栅铺设中按照纵向铺设的方式展开于砂垫层之上,相邻两幅格栅之间的搭接宽度设置为30 cm,采用U型钉进行固定,钉距约为1 m,选用级配良好的碎石土作为回填料,分层回填,先用轻型压路机静压一遍,然后用重型振动压路机振压实,直至达到规定的压实度($\geq 95\%$)。该道路投入使用后的前两年内,最大累计沉降量仅为设计允许值的60%左右,且沉降速率逐渐减小并趋于稳定,经过加筋处理后的路基边坡未出现明显的滑移迹象,整体稳定性良好,该技术节省了大量的建筑材料和运输成本,缩短了施工周期约20%。

3 结束语

市政道路建设规模虽不断扩大,但在沿海地区、河流沿岸等区域仍会遇到软土地基的情况,该路基会产生较大的沉降量,发生滑动失稳现象,影响正常的交通秩序。企业应掌握不同项目的实际情况,合理选择软土路基施工技术,如排水固结法广泛用于软土层厚度较大且含水量较高时,跨越湿地区域的主干道建设可采用此方法;深层搅拌法适用于处理正常固结的淤泥、粉土、素填土等地基,可用于城市中心区狭窄场地的道路拓宽改造工程。企业在施工中应掌握不同方法的应用优势及注意事项,如排水固结法中应合理均匀布置排水系统,分级进行加载过程;振冲碎石桩法成孔中保持垂直度等。通过一系列措施,确保软土路基处理的有效性。

参考文献:

- [1] 陈正佳. 软基处理技术在市政道路路基工程施工中的应用分析[J]. 建材发展导向, 2024, 22(17): 101-104.
- [2] 李治. 市政道路桥梁工程中沉降段路基路面施工技术[J]. 中国科技信息, 2024(07): 91-93.
- [3] 刘晓娟. 市政道路工程中沉降段路基路面施工技术分析[J]. 散装水泥, 2023(05): 122-124.
- [4] 黄启垣. 基于市政道路桥梁工程中沉降段路基路面施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2023(22): 127-129.
- [5] 黎武. 市政道路工程中填石路基施工及压实技术要点[J]. 石材, 2023(07): 66-68.

连续梁桥满堂支架施工控制技术研究

王 烁

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 以四川地区某连续梁桥工程为研究对象, 针对该区域复杂地质水文条件下满堂支架施工难题, 系统分析工程概况与技术难点, 深入研究支架基础处理、搭设、预压及混凝土浇筑等核心施工技术, 提出原材料管控、施工过程监控及安全监测相结合的质量控制措施。实践表明, 连续梁桥满堂支架施工控制技术可有效保障支架稳定性及梁体施工质量, 可为同类工程提供技术参考。

关键词 连续梁桥; 满堂支架; 支架基础处理技术; 支架搭设施工技术; 支架预压施工技术

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.017

0 引言

随着我国交通基础设施建设向西南山区延伸, 连续梁桥因跨越能力强、行车平顺性好等优势, 在山区公路、铁路工程中应用广泛。四川地区地形复杂, 多山地、河谷地貌, 地质条件多变, 且受季风气候影响, 雨季降水集中, 给连续梁桥满堂支架施工带来严峻挑战^[1]。满堂支架作为梁体施工的临时承重结构, 其稳定性直接决定工程安全与质量, 若施工控制不当, 易引发支架失稳、梁体线形偏差等问题, 甚至导致安全事故。

当前, 我国关于满堂支架施工技术研究多集中于平原地区常规工程, 针对西南山区复杂环境下的专项研究相对不足, 难以完全满足实际工程需求。基于此, 本文以四川地区某国道改扩建项目中的连续梁桥为工程背景, 结合该项目地质水文特点与施工难点, 系统研究满堂支架施工关键技术, 构建全流程质量控制体系, 旨在为西南山区类似连续梁桥满堂支架施工提供理论支撑与实践借鉴, 推动连续梁桥施工技术在复杂环境下的优化与发展。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

本研究依托工程为四川省雅安市雨城区某国道改扩建项目中的跨青衣江连续梁桥, 该桥为 3 跨预应力混凝土连续梁桥, 跨径布置为 30+45+30 m, 全长 105 m。主梁采用单箱单室截面, 梁高 2.2~3.5 m 按抛物线变化, 顶板宽 12 m, 底板宽 6 m, 腹板厚度 0.5~0.8 m。桥梁设计荷载为公路—I 级, 设计时速 60 km/h, 抗震设防烈度为 VII 度^[2]。

工程所处区域地形起伏较大, 桥位区地层主要为第四系全新统粉质黏土厚 2~5 m, 天然含水率

25%~30%, 承载力特征值 $f_{ak}=180$ kPa, 下伏侏罗系砂泥岩互层中风化岩承载力特征值 $f_{ak}=350$ kPa。桥位临近青衣江, 常水位高程 558.0 m, 雨季 6~9 月水位涨幅可达 3~5 m, 对支架基础稳定性影响较大。施工期间需跨越雨季, 且桥面距地面最大高度为 12 m, 高空作业风险较高^[3]。

该桥满堂支架采用碗扣式钢管支架, 立杆型号为 $\Phi 48\times 3.5$ mm, 横杆、斜杆配套使用, 支架基础采用换填碎石垫层+C20 混凝土垫层处理, 支架顶部设置可调托撑, 用于调整模板高程。梁体混凝土设计强度等级为 C50, 采用混凝土泵送浇筑, 单次最大浇筑方量约 280 m³。

1.2 技术难点

1. 地形与地质条件复杂: 桥位区粉质黏土地层承载力较低, 且雨季易受雨水浸泡导致承载力下降, 支架基础易产生不均匀沉降; 同时, 地形起伏大使得支架立杆高度差异达 3~8 m, 立杆受力不均衡, 增加支架失稳风险。

2. 雨季施工影响显著: 施工周期涵盖雨季, 持续降水易引发支架基础冲刷、积水, 且雨水可能渗入支架节点, 影响节点连接强度; 此外, 雨天混凝土浇筑质量难以控制, 易出现离析、表面起砂等问题。

3. 大跨度梁体施工控制难: 45 m 主跨梁体自重较大, 支架需承受约 1.2 倍梁体自重的预压荷载, 对支架整体刚度与稳定性要求高; 且梁体为变截面结构, 模板安装精度、混凝土浇筑顺序及支架变形监测难度较大, 易导致梁体线形偏差。

4. 高空作业安全风险高: 桥面距地面最高 12 m, 支架搭设、预压及混凝土浇筑均为高空作业, 需防范人员坠落、物体打击等安全事故, 且支架四周无遮挡, 受风力影响较大, 进一步增加安全管控难度。

2 连续梁桥满堂支架施工关键技术

2.1 支架基础处理技术

支架基础处理是保障支架稳定性的关键环节,需根据桥位地质条件针对性设计处理方案。本工程首先对支架基础范围进行场地平整,清除地表杂草、腐殖土,开挖至粉质黏土底层,开挖深度控制在 $0.8\sim 1.2\text{ m}$,确保基础底面位于稳定地层。对于局部承载力不足区域如含水率超30%的粉质黏土段,采用级配碎石粒径 $5\sim 31.5\text{ mm}$ 进行换填处理,换填厚度 0.5 m ,分层碾压密实,每层碾压遍数不少于6遍,压实度要求 $\geq 95\%$ 采用环刀法检测。

换填完成后,浇筑 15 cm 厚C20混凝土垫层,混凝土采用平板振捣器振捣密实,表面平整度误差控制在 5 mm/m 以内。为防止雨季基础积水,在混凝土垫层外侧设置 $30\times 30\text{ cm}$ 排水沟,排水沟纵坡3%,将雨水引至桥位两侧既有排水系统;同时,在垫层周边砌筑 30 cm 高砖胎膜,避免地表水流渗入基础。基础施工完成后,采用轻型动力触探试验检测地基承载力,要求处理后地基承载力 $\geq 250\text{ kPa}$,满足支架受力要求后方可进入下道工序^[4]。

2.2 支架搭设施工技术

支架搭设前需进行详细技术交底,明确立杆间距、横杆步距、剪刀撑设置等参数,本工程碗扣式支架立杆纵横向间距均为 0.9 m ,横杆步距 1.2 m ,扫地杆距地面高度 $\leq 20\text{ cm}$,立杆底部设置可调底座调节范围 $0\sim 15\text{ cm}$,底座下垫 $10\times 10\times 5\text{ cm}$ 方木,增大受力面积。支架搭设按“先放线定位,后立杆、横杆,再扫地杆、斜撑”的顺序进行,立杆垂直度偏差控制在 $1/500$ 以内,横杆水平度偏差 $\leq 5\text{ mm/m}$ 。

节点连接采用碗扣式接头,搭设时确保碗扣完全扣紧,接头拧紧扭矩 $\geq 40\text{ N}\cdot\text{m}$ 采用扭矩扳手检测,严禁出现松动节点。为增强支架整体稳定性,纵横向每4跨设置一道竖向剪刀撑,剪刀撑与地面夹角控制在 $45^\circ\sim 60^\circ$,剪刀撑杆件采用扣件与立杆、横杆连接牢固;同时,在支架顶部、底部及中间每隔3层设置一道水平剪刀撑,形成“竖向+水平”立体支撑体系。支架搭设至梁体底模位置时,顶部设置可调托撑,托撑伸出立杆顶部长度 $\leq 30\text{ cm}$,托撑上垫 $10\times 15\text{ cm}$ 方木,方木轴线与梁体轴线平行,确保底模受力均匀。

2.3 支架预压施工技术

支架预压目的是消除支架非弹性变形、检验支架承载力,并获取弹性变形数据用于模板高程调整。本工程预压荷载按梁体自重的1.2倍设计,采用沙袋分级加载,沙袋重量经称重计量,确保荷载精度。预压

前在支架顶部、梁体底模及地基表面布置观测点,观测点按跨径方向每 5 m 设置1个,每个断面设置左、中、右3个观测点,共布置观测点36个,观测仪器采用DS3水准仪,精度 $\pm 2\text{ mm}$ 。

预压加载分3级进行:第一级加载至总荷载的50%,持荷 24 h 并观测变形;第二级加载至总荷载的100%,同样持荷 24 h 观测;第三级加载至总荷载的120%,持荷 24 h 后,每 6 h 观测一次变形,若连续 12 h 变形值 $\leq 2\text{ mm}$,视为支架变形稳定,可进行卸载。卸载按与加载相反顺序分级进行,每级卸载完成后观测支架回弹变形。预压过程中实时记录加载重量、持荷时间及变形数据,绘制荷载-变形曲线,计算支架非弹性变形值卸载后不可恢复变形与弹性变形值卸载后可恢复变形,其中弹性变形值用于模板高程调整,确保梁体浇筑后线形符合设计要求。

2.4 混凝土浇筑施工技术

梁体混凝土浇筑前需对支架、模板、钢筋及预应力管道进行验收,验收合格后清理模板内杂物,洒水湿润模板不得有积水。混凝土采用C50混凝土,坍落度控制在 $180\pm 20\text{ mm}$,采用汽车泵从跨中向两端对称浇筑,浇筑顺序遵循“先底板,后腹板,再顶板”的原则,分层浇筑厚度 30 cm ,层间浇筑间隔时间 \leq 混凝土初凝时间本工程C50混凝土初凝时间约 4 h ^[5]。

混凝土振捣采用插入式振捣器,振捣棒插入下层混凝土深度 $\geq 5\text{ cm}$,振捣时间 $15\sim 30\text{ s}$,以混凝土表面出现浮浆、不再下沉为宜,避免漏振、过振导致混凝土密实度不足或表面起砂。浇筑过程中安排专人监测支架变形,每 30 min 观测一次观测点,若变形值超过预警值本工程预警值设定为 10 mm ,立即暂停浇筑,检查支架节点及基础情况,处理合格后方可继续施工。

混凝土浇筑完成后,需立即启动养护工序以保障强度发展与结构性能。先覆盖透气型土工布包裹梁体表面,采用自动化洒水设备或人工定时洒水养护,每日洒水 $3\sim 4$ 次,通过湿度传感器实时监测,确保养护期间混凝土表面湿度持续 $\geq 90\%$,且养护周期严格控制 $\geq 7\text{ d}$,避免因水分流失产生表面裂缝。侧模拆除需以混凝土强度为核心依据,通过现场回弹检测或标准试块抗压试验,确认强度达到设计强度的75%后方可实施,拆除时采用撬棍平缓分离模板与梁体,防止损伤混凝土外观。

3 连续梁桥满堂支架施工质量控制措施

3.1 原材料质量控制,奠定工程质量基础

原材料质量是保障满堂支架施工质量的前提,需建立全流程管控机制^[6]。支架材料立杆、横杆、碗扣

接头、可调托撑等进场前查验生产厂家资质、产品合格证及检验报告,进场后按规范要求抽样送检,检测项目包括钢管壁厚、外径偏差、屈服强度、碗扣接头抗剪强度等,严禁使用锈蚀深度 > 0.5 mm、弯曲矢高 $> 1/500$ 杆长或力学性能不达标的材料;脚手板采用松木脚手板,厚度 ≥ 5 cm,外观无裂纹、腐朽,安全网采用密目式安全网,阻燃性能符合相关规范要求,进场后进行抗冲击试验。

在混凝土原材料方面,水泥选用 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥,进场复试安定性、强度等指标;粗骨料采用 5~25 mm 连续级配碎石,含泥量 $\leq 1\%$,针片状颗粒含量 $\leq 5\%$;细骨料采用中砂,细度模数 2.3~3.0,含泥量 $\leq 3\%$;外加剂选用聚羧酸系高效减水剂,进场检测减水率、坍落度保留值等。混凝土配合比由试验室设计,经试验验证满足强度、和易性要求后方可使用,施工中按每 50m³ 混凝土制作 1 组抗压强度试块,确保混凝土强度达标。

3.2 施工过程质量控制,保障施工环节合规

施工过程质量控制需细化管控要点,落实责任到人。支架搭设阶段,质检员按逐排、逐跨原则检查立杆间距、横杆步距、垂直度及节点连接情况,每天搭设完成后进行验收,验收合格后方可继续搭设;对搭设过程中发现的松动节点、偏差超标立杆,立即整改并复检^[7]。支架预压阶段,安排专人记录加载重量、持荷时间及变形数据,确保加载顺序合规、观测数据真实,若出现荷载偏差 $> 5\%$ 或变形异常单次变形 > 5 mm,暂停预压,分析原因并采取加固措施如增设斜撑、夯实基础,处理完成后重新预压。

混凝土浇筑阶段,搅拌站实时监测混凝土坍落度,每车混凝土进场后检测坍落度,不符合要求的混凝土严禁使用;浇筑过程中检查模板拼缝密封性,防止漏浆;浇筑完成后及时检查混凝土外观,若出现露筋、蜂窝、麻面等缺陷,按规范要求制定修补方案,修补材料强度不低于原混凝土强度。

3.3 施工安全与监测控制,防范安全质量风险

施工安全与实时监测是保障工程顺利推进的关键。安全管控方面,支架四周设置 1.2 m 高防护栏杆,栏杆底部设 20 cm 高挡脚板,防护栏杆外侧挂密目安全网,作业层脚手板满铺并固定牢固,严禁出现探头板;施工现场设置警示标志,严禁非施工人员进入作业区,雨天、风力 > 6 级时停止高空作业。

监测控制方面,建立支架沉降+立杆轴力+混凝土温度三位一体监测体系。支架沉降监测采用 DS3 水

准仪,施工前测设基准点,施工中按支架搭设期每 2 d/1 次,预压期每 6 h/1 次,浇筑期每 30 min/1 次的频率观测;立杆轴力监测采用振弦式轴力计,在主跨、边跨立杆上布设传感器,实时监测立杆受力,预警值设定为设计轴力的 80%;混凝土温度监测采用温度传感器,浇筑后监测混凝土内部最高温度与表面温度差,控制温差 ≤ 25 °C,避免温度裂缝。监测数据实时上传至管理平台,若出现超预警值情况,立即启动应急预案,采取加固、降温等措施。

4 结束语

本文以四川地区跨青衣江连续梁桥工程为例,针对西南山区复杂地质水文、雨季施工及高空作业等难题,提出了支架基础换填碾压—立体支撑搭设—分级预压—对称浇筑的成套施工技术,构建了“原材料全流程管控—施工过程分阶段验收—多维度实时监测”的质量控制体系。通过实践验证,该技术体系有效解决了山地支架基础不均匀沉降、立杆受力失衡及混凝土浇筑质量偏差等关键问题,最终梁体线形偏差 ≤ 3 mm,混凝土强度合格率达 100%,施工全程无安全事故,完全满足设计与规范要求,为西南山区同类连续梁桥施工提供了可推广的技术范式。未来可进一步融合物联网与 BIM 技术,开发支架受力—变形智能预警系统,实现施工风险的提前预判;探索新型轻质高强支架材料的应用,降低支架搭设成本与能耗;同时研究适用于高海拔、强震区等更复杂环境的满堂支架施工技术,持续优化技术体系,推动连续梁桥施工向智能化、绿色化、高效化方向升级,为我国交通基础设施建设提供更坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李军心,王建煌,胡国华.拱形连续梁桥施工组合支架设计[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(01):5-8.
- [2] 张丹萍.大节段支架现浇连续梁桥力学性能研究[D].南京:南京林业大学,2024.
- [3] 李军心,王建煌,胡国华.拱形连续梁桥施工组合支架设计[J].江苏建筑职业技术学院学报,2024,24(01):5-8.
- [4] 蒋征南.现浇钢筋混凝土连续梁桥支架预压监测分析[J].西部交通科技,2023(12):145-148.
- [5] 仇利剑,饶世洪.连续梁桥逐跨施工技术研究[J].交通世界,2022(25):109-111.
- [6] 焦明东,马学莉.支架模拟挂篮方法在某连续梁桥施工中的应用研究[J].青海交通科技,2021,33(05):142-147.
- [7] 梁羽飞.公路桥满堂支架现浇连续箱梁施工技术[J].河南水利与南水北调,2021,50(09):46-47,90.

道路桥梁施工技术中的细节问题及处理措施

颜志伟

(广州公路工程集团有限公司, 广东 广州 510030)

摘要 道路桥梁工程是区域交通网络的核心组成部分, 工程建设质量直接影响交通运输安全。如今, 道路桥梁施工面临高标准、严要求, 为促进现场施工提质增效, 在施工技术应用期间不仅需要保证规范标准, 还要注重细节处理。鉴于此, 本文聚焦道路桥梁施工技术应用优化, 围绕道路桥梁施工技术中细节问题及处理措施展开研究, 并结合工程实例, 以提高道路桥梁工程建设质量、提升施工技术应用水平为目标, 从技术应用的准备与实施两个维度着手分析案例工程施工技术中的细节问题, 论述相对应的处理措施, 以期为相关人员提供参考。

关键词 道路桥梁工程; 加固软土地基; 清淤换填技术; 袋装砂联合井堆载预压技术; 混凝土裂缝

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.018

0 引言

道路桥梁工程的高质量开展, 必须以合理运用施工技术为前提。施工技术的应用效果受到多方面因素影响, 做好前期准备、加强过程管控、实现综合统筹, 可以为高质高效地使用道路桥梁施工技术保驾护航。为提高技术应用实效, 必须重点关注道路桥梁施工技术中的细节问题, 落实全过程、精细化细节管理, 选取有效措施解决实际问题。虽然道路桥梁施工技术中的细节问题具有普遍性, 但不同工程的细节处理需求与目标存在差异。这一视域下, 因地制宜地探索工程技术应用的细节问题与处理措施极具现实意义。

1 工程概况

案例工程是兴宁至汕尾高速公路海丰至红海湾开发区段二期工程, 主线路线总长 15.372 km, 设特大桥、大桥 5 925.3 m/5 座, 中、小桥 307.8 m/5 座; 隧道 2 556 m/1 条 (双洞平均长); 涵洞 22 座, 其中钢筋砼箱涵 17 座, 钢筋砼盖板涵 5 座; 主线收费站 1 处, 平面交叉 1 处。桥梁占路线总长的比例为 40.55%, 隧道比例为 16.63%, 桥隧比例为 57.2%。案例工程主线的主要技术指标如表 1 所示, 施工重点集中在道路路基路面以及桥梁结构建设层面。工程所在区域自然环境特殊, 为满足工程建设要求, 本次施工主要使用海工普通混凝土。其中, 桥面铺装混凝土采用 10 cm 沥青混凝土。预制组合箱梁梁体、湿接缝、横隔梁、现浇接头、封锚; 支座垫石施工, 使用 C50 海工混凝土, 还在桥梁的其他结构施工中使用 C40、C35 以及 C30 海工混凝土。为保证工程建设质量达标, 案例工程的施工技术应用期间高度重视细节处理, 紧密结合施工工序与质控需要, 实施细节管控。

表 1 案例工程主线的主要技术指标

类别	技术指标
设计速度	100 km/h
路基宽度	26.0 m
行车道宽	2×3.75+2×3.75 m
硬路肩宽度	3.0 m
土路肩宽度	0.75 m
设计洪水频率	桥涵、路基 1/100
桥涵设计荷载	公路—I 级
地震动峰值加速度系数	0.10 (VII 度区)

2 道路桥梁施工技术中的细节问题

道路桥梁施工技术应用环节, 细节问题的挖掘与处理都需要遵循因地制宜原则, 必须实事求是地解决现实情况。经过针对性分析发现, 案例工程中的施工细节问题主要集中在以下方面:

第一, 软土地基问题。案例工程施工区域存在软土, 主要为淤泥质粉质粘土, 局部为淤泥质砂等淤泥类软土, 及软塑状粘性土等非淤泥类软土组成。根据本次勘察钻探成果及地调资料显示, 软土分布总长约 7 985 m, 占路线总长约 51%。因此, 软土治理成为道路桥梁施工技术中的重点内容, 是不容忽视的细节问题。

第二, 混凝土裂缝问题。道路桥梁工程开展期间, 合理运用混凝土施工技术是保证工程质量的关键, 在案例工程当中同样如此。前文提到, 案例工程所处环境较为特殊, 所以本次施工主要使用海工混凝土实现桥面铺装以及砼结构建造。但在混凝土结构施工中, 受到水泥水化热、外界气温变化、混凝土收缩变形以

及内外约束条件等因素的影响,十分容易产生裂缝,进而影响桥梁美观性以及安全性^[1]。所以,做好裂缝处理的现场施工的重要内容,也是混凝土浇筑技术应用期间最值得关注的细节问题。

第三,构件防腐问题。案例工程所处环境水源丰富,地下水以及地表水对混凝土腐蚀作用等级为中等腐蚀和微腐蚀,对混凝土结构中的钢筋腐蚀作用等级为微腐蚀,各合同段环境作用等级划分如表 2 所示。案例工程的设计基准期是 100 年,为满足结构的耐久性要求必须做好防腐工作。因此,在案例工程的技术应用期间,构件防腐问题极为关键,是需要受到重视的细节处理重点。

表 2 各合同段环境作用等级划分

合同段	环境作用等级
梁、盖梁	III-C
系梁	III-C
墩柱	III-C
承台、桩基	III-D

3 道路桥梁施工技术的细节问题处理措施

路桥施工作业涉及内容和程序较多,施工作业离不开多种施工技术的支持,若工程施工存在技术缺陷,便会让工程整体质量大打折扣^[2]。为避免这种情况的出现,在道路桥梁工程的施工技术应用环节理应做好细节处理工作。正如前文所言,案例道路桥梁施工技术中的细节处理问题主要集中在软基治理、混凝土裂缝防范以及构件防腐三个方面。为妥善处理相关细节问题,必须结合实际需求制定个性化应对方案。鉴于此,案例工程技术中的细节问题处理可采取以下措施。

3.1 加固软土地基

桥梁工程建设以及运营阶段,软土地基的存在会对其整体安全以及使用性能造成危害。一旦工程建设区域内存在软土地基,便会出现土地变形失控风险加剧的情况,将大幅提升基础施工难度,严重阻碍工程质量控制以及工程安全性和经济性保障。若未能在施工阶段对软土地基进行妥善处理,不仅会造成施工受阻,也会让道路桥梁结构在运营阶段面临结构性损坏风险。软土的存在会直接威胁工程结构的使用寿命,更会导致维护成本增加,甚至影响通行安全。因此,地基加固是道路桥梁施工中极为关键的细节问题,以软土地基为抓手夯实高质量建设基础尤为关键。在道路桥梁沉降段的地基处理中,应合理选用换土法、强夯法、预压荷载法等,以提升地基的稳定性^[3]。

本次施工中,经过多方考量选择采用多种方法融合运用的方式加固软土地基。软基处理方案为浅层软土进行清淤换填,较为深厚软土采用排水固结(袋装砂井)或复合地基(素混凝土桩、水泥搅拌桩等)处理,为实现降本增效尽量减少复合地基用量。

3.1.1 清淤换填技术

清淤换填技术的应用,以直接换填软土为核心。案例工程中,采用“人工+机械”开挖方式清除浅层软土,并在已开挖区域回填高压缩性低且强度高的材料,打造由粉质粘土、砂土、少量碎石块等组成的人工持力层。这样一来,便从根本上解决软土地基易变形、易位移隐患,切实提高道路桥梁施工区域的土层基承载力。现场施工流程如下:软土探测与放线→分层清淤→基底验收→分层回填与压实→边坡处理。为保证这一细节问题处理到位,现场施工环节还开展了压实检测与排水沟设施布设工作。需要注意的是,清淤换填施工必须以全面掌握信息为前提。技术人员要对施工区域的地质情况进行全面、细致的勘察以获取地层结构、土壤性质、地下水位等相关数据^[4]。在案例工程中,技术人员不仅对工程勘测的相关内容进行综合整理,还对工程建设要求进行了深度分析,在明确软土地基治理标准并做好换填材料质量检测后,才在严格执行设计方案的情况下组织施工。

3.1.2 袋装砂联合井堆载预压技术

案例工程的软基处理环节,使用袋装砂井联合堆载预压处理技术加固夯实地基,旨在基于人工排水通道建设加速软土中的孔隙水排出,并通过在地表施加堆载的方式增加软土有效应力,促进软土颗粒固结。该方法主要运用于沉降控制要求较高的路段,在处理中深层软土地基方面拥有极高应用价值。案例工程施工中,袋装砂联合井堆载预压技术流程如下:场地平整→设置连接集水井的排水盲沟→袋装砂井施工→堆载预压→沉降观测→卸载与后续施工。现场施工中,使用振动沉管机辅助袋装砂井施工,在堆载预压环节采用分层施力的方式,卸载时也进行分层卸载操作。

3.2 防治混凝土裂缝

结合实践可知,混凝土裂缝是道路桥梁工程中最常见的病害类型,一旦出现便会严重威胁工程安全耐久性与使用寿命。因此,在道路桥梁施工中必须重点关注混凝土裂缝防范这一细节问题,给予有效措施降低裂缝产生概率。在道路桥梁工程中,混凝土的拌和、浇筑、振捣质量都会影响整体实用性。混凝土的收缩和温度变化是引起裂缝的主要原因之一,在防治混凝土裂缝期间必须采取相应的措施对混凝土的温度和湿

度进行合理控制,为提高混凝土使用安全保驾护航^[5]。该阶段,要着力提升混凝土自身性能,并且在工作中严格控制混凝土施工质量,采用必要的结构构造措施以及裂缝控制措施^[6]。案例工程的混凝土裂缝防治要点如下。

3.2.1 海工混凝土原料选择措施

针对滨海环境的要求,本项目主体结构混凝土均采用具有高抗氯离子扩散性、高抗裂性、高尺寸稳定性和良好工作性的海工混凝土。为防范混凝土裂缝,本次施工严格控制海工混凝土的自身性能,采用原材料优选的方式提高材料实用性。选用游离氧化钙质 $\leq 1.5\%$,氯离子含量 $< 0.03\%$,强度等级42.5的II型硅酸盐水泥;矿物掺合料选用品质稳定、来料均匀的粉煤灰、磨细矿渣粉和硅灰。细集料选用级配良好、质地均匀坚固、吸水率低、空隙小、细度模数适中的洁净天然中粗河;粗集料选用质地均匀坚硬、粒形良好、级配合理、线胀系数小的洁净碎石以及卵石。混凝土的拌制和养护期间用水均为饮用水,还在混凝土配制环节选用高效减水剂。

3.2.2 结构构造措施

现场施工中重点进行混凝土保护层施工,其中盖梁、桥墩的混凝土保护层由C35海工混凝土浇筑而成,最小厚度为45mm;承台以及桩基的最小混凝土保护层厚度为70mm,前者使用C35海工混凝土浇筑,后者使用C30海工混凝土浇筑。保护层内未设置收缩、温度、分布、防裂等钢筋网片。为增强混凝土耐久性,还采用硅烷表面浸渍结构的施工缝和连接缝位置。案例工程中,施工单位也在钢筋定位与固定方面着力开展质控,为防治混凝土裂缝提供支持。在操作过程中,采用工装定位与过程复核同步推进的方式规避保护层偏差,从源头着手消除混凝土裂缝诱因。为避免浇筑环节出现钢筋上浮情况,现场施工人员采用“马凳筋+U型定位卡具”打造钢筋定位支架;还在浇筑前采取逐点检测,依托专业仪器检测保护层厚度,严格按照允许偏差值评估偏差合理性,控制施工质量。

3.2.3 裂缝控制措施

案例工程中,为有效防范混凝土裂缝的产生,不仅在设计阶段合理规划结构形式与尺寸,基于增强抗裂配筋、合理布置钢筋间距的方式优化配筋设计。还在现场施工中动态管控混凝土浇筑全过程,执行技术规范,实现浇筑、振捣、养护、拆模规范化。为减少应力集中导致的变形和裂缝,案例工程施工环节还通过设置混凝土路面横向伸缩缝与纵向分缝,设置桥梁混凝土结构伸缩缝的方式开展实践。

3.3 综合开展防腐处理

在道路桥梁工程中,防腐处理旨在延长构件使用寿命,满足工程耐久性要求。案例工程设计耐久年限为100年,在施工中结合各项目各构件特点采用个性化防腐手段,满足细节处理需求。钻孔灌注桩期间,采用海工混凝土打造钢筋保护套达到防腐目的;承台的防腐同样以海工混凝土为主要材料,通过设置70mm的钢筋保护套实现防腐目标。桥墩防腐期间,采用“海工混凝土+硅烷浸渍”复合方案,基于钢筋保护套建设和桥墩外表面采用硅烷浸渍,满足防腐需求。伸缩缝的防腐要求专业人员严格按照程序安装,对与伸缩缝相接的桥面进行特别处理,以免发生跳车、冲击引发的桥面开裂。临时外露钢筋防腐环节,采用环氧富锌漆涂刷钢筋表面达到防腐目的。案例工程的预应力防腐环节,以打造预应力管道保护层,采用预埋金属波纹管成型以及真空辅助灌浆工艺进行压浆等手段达到目的,还采用微膨胀混凝土封锚。

4 结束语

案例道路桥梁工程施工技术中的细节问题主要集中在路基路面处理以及桥梁结构施工领域,重点在于规避道路桥梁结构失稳,延长材料结构使用寿命。整体而言,施工技术应用细节处理尤为重要,实施全周期细节把控,基于技术应用准备与实施过程的精细化管理,规避细节处理风险,可为提高工程建设质效保驾护航。因此,细节处理必须围绕易发生质量问题的关键工序与节点展开,追求高效精准,强调降本增效。未来,道路桥梁施工技术中的细节问题处理会越来越受到关注,为持续提升工作质效,需要与时俱进地深化创新。

参考文献:

- [1] 赖新波. 浅谈道路桥梁工程中大体量混凝土裂缝的影响因素与防治措施[J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(04): 83-85.
- [2] 漆亮, 朱贤荣. 道路桥梁施工技术中的细节问题及处理策略[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022(35): 80-82.
- [3] 李小亮. 道路桥梁沉降段路基路面施工技术及其质量控制措施研究[J]. 运输经理世界, 2025(07): 104-106.
- [4] 耿秋林. 换填施工技术在市政道路中的应用要点与控制措施[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 77-79.
- [5] 刘春龙. 道路桥梁施工技术中的细节问题及处理对策探究[J]. 大众科学, 2024, 45(04): 98-100.
- [6] 许高强. 道路桥梁施工技术中的细节问题及处理对策探究[J]. 汽车周刊, 2025(10): 91-93.

土岩复合地层轨道交通盾构隧道施工关键技术

张来添

(深圳市万成勘测设计有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要 针对土岩复合地层盾构施工存在的刀盘扭矩剧烈波动、刀具非正常损耗及地表沉降超标等技术难题, 本研究构建系统性解决方案。通过采用土压平衡与硬岩掘进双模盾构设备, 改进刀盘钢结构布局与刀具组合配置, 配合掘进参数的动态协同调控, 成功将刀盘扭矩波动幅度由 $\pm 35\%$ 降低至 $\pm 15\%$ 。创新采用预裂爆破预处理与双组分浆液同步注浆工艺, 实现地表沉降值精确控制在 18 毫米以内, 管片拼装错台率稳定在 2.5%。工程实践表明, 滚刀使用寿命由 90 米/套提升至 150 米/套, 日掘进效率从 5 环提高至 8 环, 综合施工成本下降 28%。

关键词 土岩复合地层; 轨道交通; 盾构隧道施工; 动态调控; 预裂爆破

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.019

0 引言

土岩复合地层占城市轨道交通隧道工程的 30% 以上, 其岩土界面突变、软硬不均特性导致传统盾构技术面临严峻挑战。既有研究表明, 此类地层施工中刀盘扭矩波动超 $\pm 30\%$ 、滚刀月均更换频次达 5 次、地表沉降超标率超 40%, 严重制约工程安全与效率。现有研究多聚焦单一地层应对措施, 缺乏针对岩土界面动态响应机制的协同控制体系。本研究基于多工程案例统计分析, 首次提出“地层预处理—设备改造—参数调控”三位一体技术路线, 通过建立岩土界面突变区力学响应模型, 提出了适用于不同倾角交界面 ($15^\circ \sim 55^\circ$) 的施工参数优化算法, 为复杂地层盾构施工提供系统性解决方案^[1]。

1 土岩复合地层工程特性与施工难点

1.1 地层特性分析

土岩复合地层的典型结构表现为上部覆盖第四系松散沉积物, 以粉质黏土与中粗砂层为主, 厚度范围 8~15 米, 其中粉质黏土天然含水量 18%~25%, 标准贯入击数 N 值为 6~12 击, 砂层密实度中密至密实, 孔隙比 0.45~0.65; 下部基岩为燕山期花岗岩残积土及白垩系泥岩, 风化程度呈强风化至中风化状态, 花岗岩残积土黏粒含量 15%~30%, 泥岩天然单轴抗压强度介于 20~80 兆帕, 遇水软化特性显著。岩土交界面倾角多分布于 $15^\circ \sim 45^\circ$ 之间, 局部陡倾区域达 55° , 界面形态不规则导致盾构掘进时刀盘易受软硬不均地层交变载荷作用。地下水环境复杂, 裂隙承压水压力 0.1~0.3 兆帕, 渗透系数介于 10^{-5} 至 10^{-6} 厘米

每秒量级, 砂层与基岩接触带易形成渗透破坏通道, 需采取注浆封堵措施控制涌水风险。

1.2 施工风险与难点

土岩复合地层盾构掘进过程中, 刀盘扭矩在软硬岩交界区域易发生剧烈波动, 实测数据显示, 当盾构机从单轴抗压强度 20 兆帕的强风化花岗岩层进入 80 兆帕的中风化泥岩层时, 刀盘扭矩瞬时波动幅度达 $\pm 35\%$, 峰值扭矩突破额定值的 130%, 导致驱动系统液压油温升至 75°C 以上, 触发过载保护停机频次高达每日 3 次, 严重影响施工连续性。刀具损耗问题在硬岩段尤为突出, 滚刀在单轴抗压强度 50 兆帕的岩层中平均磨损量达 18 毫米每百米, 超出正常磨损阈值 3 倍, 切刀因岩体破碎块径不均 (块径 10~50 厘米占比 45%) 产生局部应力集中, 崩刃率高达 32%, 单次换刀作业需中断掘进 8 小时, 直接造成日进尺损失 2.5 环。

地层条件复杂性引发掌子面失稳风险, 当土仓压力波动超过 0.05 兆帕时, 砂层与基岩接触带易发生剪切滑移, 导致地表沉降速率突增至每日 5 毫米, 累计最大沉降值达 32 毫米。某地铁区间工程中, 沉降槽沿隧道轴线扩展至 12 米宽, 致使直径 800 毫米的铸铁供水管接口拉裂, 漏水速率达每小时 8 立方米, 抢修耗时 72 小时, 间接经济损失超 200 万元。现有监测体系依赖传统全站仪与人工巡检, 对岩土界面突变区的形变响应存在平均 2 小时的监测滞后, 在软硬岩交界面倾角 40° 的区段, 地表突发性沉降事件预警漏报率达 25%, 无法满足实时风险管控需求。此外, 渣土改良不充分导致的刀盘结泥饼现象, 使刀盘扭矩均值上升 22%, 进一步加剧了设备损耗与能耗成本。

2 盾构机选型与适应性改造技术

2.1 盾构机型选择

针对土岩复合地层特性, 选用EPB与TBM双模式切换的复合式盾构机, 其刀盘采用辐条与面板复合结构, 开口率控制在25%~35%区间, 既保障硬岩段渣土高效排出, 又能维持软土层掌子面稳定。刀盘配置17英寸双刃滚刀与重型撕裂刀组合, 滚刀间距优化至80毫米, 有效降低硬岩掘进时的贯入度波动。驱动系统配备大功率变频电机, 最大输出扭矩达12 000千牛·米, 可在软硬岩交界面实现转速1.5~2.5转每分钟的无级调速。渣土改良系统集成双通道泡沫注入装置, 最大注入量600升每分钟, 配合膨润土浆液同步注入, 将渣土流塑性指数稳定在120~150毫米范围, 减少刀盘结泥饼风险。此类机型在岩土界面倾角30°的测试段中, 刀盘扭矩波动幅度压缩至±18%, 较传统机型施工效率提升40%。

2.2 关键部件适应性改造

刀具系统采用17英寸双刃滚刀与双刃合金切刀协同配置, 滚刀间距优化至85毫米以内, 以适配单轴抗压强度20~80兆帕的岩层破碎需求, 实测滚刀磨损量降低至8毫米每百米, 切刀崩刃率压缩至18%。刀盘驱动系统升级为变频电机与扭矩限制器联控模式, 最大输出扭矩提升至8 500千牛·米, 结合实时载荷反馈机制, 确保岩土界面突变区扭矩波动范围稳定在±15%以内。渣土改良系统配置双通道泡沫注入装置, 单通道最大注入流量450升/分钟, 压力动态调节于0.3~0.5兆帕区间, 配合膨润土浆液同步注入, 将渣土流塑性指数优化至130~160毫米范围, 有效抑制刀盘结泥饼风险, 在花岗岩残积土地层中排渣效率提升35%。

3 土岩复合地层施工关键技术

3.1 地层预处理技术

针对土岩复合地层软硬不均特性, 采用袖阀管注浆实施超前加固。使用P.O 42.5水泥基浆液, 将水灰比调整为0.8:1, 掺入3%纳米二氧化硅改性剂, 使浆液固结体抗压能力提升至25兆帕。注浆孔按梅花形网格布设, 横向间距1.2米、纵向间距1.5米, 孔径110毫米, 注浆压力动态调节于0.5~0.8兆帕区间, 单孔注浆量稳定达到1.2立方米。示踪试验显示浆液扩散半径达1.8米, 形成连续加固层, 砂质地层渗透系数由 10^{-4} 厘米/秒降至 10^{-6} 厘米/秒, 岩土界面抗剪强度提升至0.35兆帕, 有效控制掌子面失稳风险。

在中风化花岗岩段(单轴抗压强度>50兆帕), 实施精准预裂爆破。采用42毫米直径乳化炸药, 按0.8米网格布孔, 钻孔深度3米、倾角15°, 线装药密度0.9千克/立方米, 25毫秒微差起爆。处理后岩体裂隙密度由5条/米增至7条/米, 裂缝宽度扩展至2~5毫米, 岩体完整性系数由0.65降为0.42, 抗压强度由58兆帕降至38兆帕。盾构掘进参数显示, 滚刀贯入深度由2.1毫米/转提升至4.5毫米/转, 日掘进速度由1.5米增至3.2米, 刀具损耗减少55%。注浆与爆破协同改善岩土界面突变区(倾角30°~45°)地层均质度。某工程监测数据显示, 刀盘扭矩波动幅度由±28%降至±12%, 主轴承振动值由6.5毫米/秒降至2.3毫米/秒; 地表最大沉降量由22毫米压减至8毫米, 沉降影响范围由15米收窄至6米。三维雷达扫描证实, 地层波速差异由15%缩减至7%, 显著降低软硬岩交替对盾构设备的冲击荷载^[2-3]。

3.2 动态施工参数优化

盾构掘进参数根据地层特性实施动态调控, 在粉质黏土与砂层等软土地段, 将推进力精准调节在12 000~14 000千牛范围, 刀盘转速提升至2.5转/分钟, 通过改善渣土流动性能(流塑指数达150毫米)保障螺旋输送机排渣效率45立方米/小时, 有效预防刀盘泥饼形成^[4]。进入风化岩层后, 推进力分阶段提升至18 000千牛, 刀盘转速调整至1.5转/分钟, 控制刀具贯入深度为3毫米/转, 配合滚刀边缘加装碳化钨合金防护环, 使硬岩段刀具磨损速率由0.2毫米/环降低至0.08毫米/环。

土压平衡控制采用动态标定技术, 粉质黏土地段静止土压力系数取0.45, 土仓压力设定为 0.20 ± 0.02 兆帕, 通过压力传感系统与排渣设备联动控制, 压力波动标准差稳定控制在0.008兆帕以内。针对岩土交界面特殊区段, 创新采用分级增压方式(每推进30厘米增压0.02兆帕), 同步阶梯式增加泡沫剂注入量(250升/分钟至400升/分钟), 有效抑制地层剪切变形, 使地表沉降梯度由0.8毫米/环降至0.3毫米/环。

工程监测数据表明, 优化后盾构穿越砂岩接触带时, 地表最大沉降量由30毫米压缩至12毫米, 沉降影响范围收窄至8米, 管片错台率由5%降至2%, 隧道轴线偏差稳定在±25毫米以内。在单轴抗压强度60兆帕的花岗岩段, 刀盘扭矩波动幅度由±28%压减至±10%, 主轴承工作温度稳定于55℃(较优化前降低12℃), 设备故障发生率下降40%。

3.3 特殊地段施工工法

在软硬岩交界面区域，实施刀盘仰角调节技术，通过液压装置精确调节刀盘仰角至 $0.8^{\circ} \sim 1.2^{\circ}$ 区间，均衡滚刀与切刀载荷分布，使硬岩侧滚刀压力由 120 千牛降低至 85 千牛，切刀应力集中系数由 2.3 优化至 1.5。配合掘进速度控制（18 毫米 / 分钟）与扭矩动态调控系统，刀盘扭矩波动幅度由 $\pm 30\%$ 降至 $\pm 12\%$ ，主轴承振动峰值由 8.5 克压减至 3.2 克。某地铁工程实践表明，该工法使滚刀使用寿命由 80 米 / 套提升至 150 米 / 套，切刀崩损率由 35% 降至 12%，换刀作业时间缩短至 4.5 小时，施工效率提高 40%。

针对高压透水裂隙带，研发水泥—水玻璃双液同步注浆工艺，优化浆液配比为水泥浆 : 水玻璃 = 1 : 0.6（体积比），采用分阶压力注浆与磷酸氢二钠缓凝技术（初凝时间 28 ± 2 秒）。深圳某跨海隧道工程应用显示，单环注浆量提升至 4.5 立方米，有效封堵 32 条透水裂隙，渗透系数由 10^{-3} 厘米 / 秒降至 10^{-6} 厘米 / 秒，涌水量由 15 立方米 / 小时降至 0.5 立方米 / 小时。光纤监测数据表明，加固区地层模量提升至 850 兆帕，周边沉降稳定在 6 ~ 8 毫米（低于 10 毫米安全阈值），管片接缝渗漏点由 5 处 / 百米减少至 0.3 处 / 百米。

4 工程监测与效果验证

4.1 监测指标体系

盾构施工监测系统集成多参数传感装置，实时监控刀盘扭矩波动（控制在 $\pm 15\%$ 额定值）、土仓压力动态平衡（0.18 ~ 0.25 兆帕，波动幅度控制在 ± 0.02 兆帕以内）及渣土温度（60 $^{\circ}\text{C}$ 预警阈值，温度超限自动启动冷却）^[5]。地表沉降监测采用全站仪网格化布点（测点间距 5 米），每掘进一环同步采集数据，沉降控制限值严格设定为 15 毫米，超限区域即刻启动应急注浆措施。工程应用表明，该体系使沉降超标风险降低 70%，异常工况预警响应时间缩短至 10 分钟，沉降达标率 98.5%。

4.2 工程案例验证

以某地铁区间工程（全长 1.2km，穿越岩土交界面倾角 30° 、岩石强度 45 兆帕的复合地层）为验证对象。工程中采用新型盾构设备与掘进参数动态调控技术，使滚刀平均使用寿命由 90 米延长至 150 米，刀具损耗量降低 40%，切刀异常损坏率由 35% 控制至 12%，如表 1 所示。预裂爆破与双液注浆协同作用下，地表平均沉降量控制在 14 毫米（最大沉降 18 毫米），管片错台率稳定在 2.5%（低于 3% 控制标准）。施工效率由每

日 5 环提升至 8 环，单环作业时间压缩至 1.2 小时，整体工期缩短 42 天。经济分析表明，项目综合成本降低 28%，其中刀具更换支出减少 55%，沉降治理费用下降 70%。

表 1 施工效果对比

指标	原方案	新技术方案	提升 / 降低幅度	单位
滚刀寿命	90	150	+66.7%	米 / 套
地表沉降最大值	30	18	-40%	毫米
管片错台率	5.0	2.5	-50%	%
日均掘进效率	5	8	+60%	环 / 天
刀具更换次数	15	9	-40%	次 / 区间
施工总成本	8 500	6 120	-28%	万元

5 结束语

复合盾构设备改造配合掘进参数动态调控，能有效突破土岩复合地层施工效率瓶颈并控制沉降风险。关键技术实施使刀具使用寿命提升 66.7%，地表沉降控制达毫米级精度，综合施工成本降低 28%，经济效益显著。工程验证证实预裂爆破与袖阀注浆协同作用使硬岩段掘进速度提升 113%，攻克了高陡岩土交界面施工技术难题。但需注意的是，爆破预处理产生的环境振动影响需量化评估，且智能监测系统对突涌水预警存在 3 ~ 5 分钟响应延迟。后续研究将着力开发盾构智能决策系统，融合地质雷达实时扫描与数字孪生技术，推进盾构施工智能化升级。建议在后续工程应用中重点关注岩土界面突变区的实时地质识别技术研发，并建立基于大数据的施工参数自适应调整模型，进一步提升复杂地层盾构施工的智能化水平。

参考文献：

- [1] 李建强, 于祺, 张家威. 软弱地层盾构隧道侧穿桥梁桩基影响分析 [J]. 天津建设科技, 2025, 35(02): 25-28.
- [2] 丁东强. 盾构姿态检核方法研究及测量实践 [J]. 建筑施工, 2025, 47(04): 614-617, 624.
- [3] 赵保森, 赵亚军, 吕朋, 等. 盾构泥岩下穿水源保护区综合防控技术研究 [J]. 建筑施工, 2025, 47(04): 629-633.
- [4] 刘聪. 公铁合建大断面盾构隧道负环拼装施工技术 [J]. 价值工程, 2025, 44(12): 98-100.
- [5] 常勇. 超大直径盾构高铁隧道近接既有桥桩影响控制分析 [J]. 山西建筑, 2025, 51(10): 136-140.

水利工程技术大体积混凝土施工与优化探究

关宇飞

(水利部漳卫南局德州水利水电工程集团有限公司, 山东 德州 253000)

摘要 大体积混凝土施工是水利工程建设的核心环节, 其施工质量直接影响工程结构的安全性与耐久性。本文从大体积混凝土的材料特性与施工特点出发, 系统分析水利工程中该类混凝土施工面临的温度裂缝控制、浇筑工艺优化、养护管理等关键问题, 结合行业最新技术实践, 提出材料配比优化、分层浇筑工艺改进、智能化温控系统应用等针对性策略, 旨在为水利工程大体积混凝土施工提供技术参考, 进而推动施工工艺的精细化与高效化发展, 保障工程长期稳定运行。

关键词 水利工程; 大体积混凝土; 材料配比; 温度控制; 浇筑工艺

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.020

0 引言

水利工程作为国民经济的重要基础设施, 承担着防洪、灌溉、发电等多重功能, 其结构稳定性与耐久性对社会经济发展具有深远影响。大体积混凝土因具有强度高、整体性好、承载能力强等特点, 被广泛应用于水利工程的坝体、闸室、基础底板等关键部位。传统施工中依赖经验的温控措施、粗放的浇筑工艺已难以满足现代工程对质量的严格要求。行业内对大体积混凝土施工技术的优化需求日益迫切, 亟需从材料科学、施工工艺、监测技术等多维度探索系统性解决方案。本文基于水利工程大体积混凝土施工的技术现状, 梳理施工全过程的核心难点, 结合最新技术研究成果与工程实践经验, 构建“材料—工艺—监测—养护”一体化的优化体系, 为提升施工质量提供理论与实践参考。

1 水利工程大体积混凝土的特性与施工要求

1.1 材料特性与结构功能

水利工程大体积混凝土的材料特性表现为“三高一 大”: 高强度(设计强度等级多为C25~C40)、高耐久性(需抵抗水流冲刷、水质侵蚀等长期作用)、高整体性(结构接缝少, 需一次浇筑成型以保障抗渗性), 以及体积庞大(单块浇筑体厚度常达3~10 m)^[1]。水泥作为胶凝材料, 在水化过程中会释放大量热量, 使混凝土内部温度急剧升高, 而表面因散热较快形成较大温差, 当温度应力超过材料抗拉强度时, 便会产生贯穿性或表面裂缝。

1.2 施工环境的复杂性

水利工程多建于河道、峡谷等自然环境复杂区域, 大体积混凝土施工受地形、气候、水文条件影响显著。

在山区水利工程中, 施工场地狭窄导致混凝土运输路线受限, 需精准规划浇筑设备的布置与调度; 高温季节施工时, 混凝土入模温度易超标, 需采取预冷措施(如冰水拌合、骨料预冷)控制初始温度; 低温季节则需做好保温防护, 避免混凝土早期受冻。

1.3 质量控制的核心指标

水利工程大体积混凝土施工的质量控制以“无裂缝、高强度、高抗渗”为核心目标, 具体指标包括: 一是温度指标, 要求混凝土内部最高温度与表面温度差不超过25℃, 表面与环境温度差不超过20℃, 以控制温度应力; 二是强度指标, 抗压强度、抗折强度需达到设计标准, 且后期强度需持续增长(90天龄期强度不低于设计值的110%); 三是抗渗与抗裂指标, 渗透系数需小于 1×10^{-8} cm/s, 表面裂缝宽度不得超过0.2 mm, 且不允许出现贯穿性裂缝; 四是整体性指标, 浇筑层面结合紧密, 无冷缝、蜂窝、麻面等缺陷, 确保结构受力均匀。

2 水利工程大体积混凝土施工面临的关键问题

2.1 温度裂缝的防控难题

温度裂缝是大体积混凝土施工最常见的质量隐患, 其形成源于水泥水化热引发的温度场变化与约束条件的共同作用。在混凝土浇筑后3~7天, 水泥水化反应剧烈, 内部温度快速上升, 若散热不及时, 中心温度可达到60~70℃, 而表面因与空气接触温度较低, 形成显著温差。当温度应力超过混凝土早期抗拉强度时, 表面会出现不规则裂缝^[2]; 随着后期温度缓慢下降, 混凝土体积收缩受到基础或相邻结构的约束, 可能产生深层或贯穿性裂缝。水利工程中, 裂缝的存在会降

低结构抗渗性，导致水体渗入内部腐蚀钢筋、侵蚀混凝土，严重时影响结构稳定性。

2.2 浇筑工艺的协同性不足

大体积混凝土浇筑需解决“连续浇筑与分层凝固”的矛盾，确保层面结合质量。在水利工程中，单块混凝土浇筑量常达数千立方米，需采用分层分块浇筑方式，每层厚度控制在 30~50 cm，且前后两层浇筑间隔需控制在混凝土初凝时间内（通常不超过 8 小时），以避免出现冷缝。但实际施工中，受混凝土供应不及时、运输路线受阻、浇筑设备故障等影响，层间间隔时间易超标，导致层面结合不紧密。此外，浇筑过程中的布料不均匀会造成混凝土密实度差异，局部区域因振捣不到位形成蜂窝、孔洞，影响结构整体性。

2.3 材料性能的稳定性控制

混凝土材料性能的波动直接影响施工质量，水利工程大体积混凝土对材料的稳定性要求更高。水泥、骨料、掺合料等原材料的质量差异（如水泥标号波动、骨料级配不均匀）会导致混凝土和易性、水化热特性变化，增加施工控制难度^[3]。例如：粉煤灰掺量过高会降低混凝土早期强度，而过低则无法有效降低水化热；骨料含泥量超标会削弱混凝土界面粘结力，导致强度下降。此外，混凝土拌合过程中，水胶比、外加剂掺量的控制精度不足（如计量误差超过 ±2%），会造成混凝土工作性能不稳定，出现离析、泌水等问题，影响浇筑与振捣效果。

2.4 养护管理的持续性挑战

养护是大体积混凝土强度增长与裂缝防控的关键环节，需在浇筑后保持表面湿润与适宜温度，持续时间通常不少于 14 天（高温季节可延长至 21 天）。但水利工程施工现场条件复杂，养护措施易因管理不当出现疏漏：覆盖保湿不到位（如塑料薄膜破损、覆盖不严密）导致表面失水过快，引发干缩裂缝；保温层厚度不足或拆除过早，使混凝土表面温度骤降，产生温度应力；对于垂直面、斜面等特殊部位，传统洒水养护难以保证均匀性，易出现局部干燥。

3 水利工程大体积混凝土施工的优化策略

3.1 材料配比的精细化设计

通过优化混凝土配合比，降低水化热、提升工作性能与抗裂性，是大体积混凝土施工优化的基础。一是合理选择胶凝材料体系，采用“水泥+粉煤灰+矿渣”复合胶凝材料，其中粉煤灰掺量控制在 20%~30%，矿渣掺量 15%~25%，利用矿物掺合料的“稀释效应”与“火山灰反应”降低水化热峰值，同时改善混凝土微

观结构，提升后期强度与耐久性。二是优化骨料级配，采用连续级配的粗骨料（5~31.5 mm），减少空隙率，降低水泥用量；细骨料选用中砂（细度模数 2.3~3.0），控制含泥量 ≤ 3%，避免因颗粒过细增加需水量。三是科学使用外加剂，掺入缓凝型高效减水剂（掺量 2%~3%），延长初凝时间至 8~12 小时，满足分层浇筑需求；添加适量聚丙烯纤维（0.9 kg/m³）^[4]，通过纤维的桥接作用抑制裂缝扩展；必要时掺入膨胀剂（掺量 6%~8%），补偿混凝土收缩，减少裂缝产生。

3.2 浇筑工艺的协同化改进

创新浇筑工艺与设备调度方式，可确保混凝土浇筑的连续性与密实性。一是采用“分层推移式”浇筑法，根据结构特点划分浇筑块，每块按“从低到高、从远到近”的顺序分层浇筑，每层厚度控制在 30~40 cm，层间间隔时间严格控制在初凝前，通过高频振捣（振捣棒插入间距 30~50 cm，振捣时间 20~30 秒）确保密实。对于钢筋密集区、边角部位，采用小型振捣棒（直径 30 mm）辅助振捣，避免漏振。二是优化混凝土运输与布料系统，根据浇筑量配置足够数量的搅拌车（保证每小时供应量不低于浇筑强度的 1.2 倍），采用泵车布料时，设置多组布料点，避免混凝土堆积过高产生离析；对于坝体等高大结构，采用溜管、滑槽辅助布料，控制混凝土下落高度 ≤ 2 m，减少骨料分离^[5]。三是引入智能化浇筑设备，如自动布料机器人可根据预设路径精准布料，配合振捣机械臂实现振捣自动化，提升浇筑效率与均匀性；采用混凝土工作性在线监测系统，实时检测入模混凝土的坍落度、含气量等指标，及时调整拌合参数。

3.3 温度控制的智能化升级

构建“监测—预警—调控”一体化的智能温控系统，精准控制混凝土温度场。一是建立分布式温度监测网络，在混凝土内部不同深度（表层、中层、中心）及表面预埋温度传感器（测温精度 ±0.5 °C），实时采集温度数据，通过无线传输至中控系统，生成温度场分布云图，当温差超过 20 °C 时自动预警。二是优化冷却水管布置与运行，采用蛇形布置冷却水管（间距 1.5~2.0 m），管径选用 Φ50 mm，在混凝土浇筑完成后 6~12 小时开始通水，初期采用低温水（10~15 °C）循环，控制降温速率 ≤ 2 °C/天；根据温度监测数据动态调整通水流量（2~5 m³/h），当中心温度降至 40 °C 以下时停止通水。三是创新表面保温措施，采用“保温被+塑料薄膜”复合保温层，根据环境温度动态调整保温层厚度（低温季节增加至 5~10 cm），必要时在表面覆盖电热毯辅助保温，确保表面温度稳定。

3.4 养护管理的标准化实施

建立全周期养护管理体系,确保混凝土强度稳定增长与裂缝防控。一是制定差异化养护方案,根据结构部位(水平面、垂直面、斜面)选择适宜的养护方式:水平面采用覆盖保湿法(铺设塑料薄膜+麻袋,定期洒水保持湿润);垂直面采用挂帘洒水法(悬挂透水土工布,定时喷水);斜面采用喷雾养护法(设置自动喷雾系统,保持表面湿润)。二是严格控制养护周期与环境,普通部位养护不少于14天,重点部位(如坝体迎水面)延长至28天;养护期间保持环境温度不低于5℃,低于0℃时采取保温加热措施(如覆盖电热毯、搭建保温棚),避免混凝土受冻^[6]。三是强化养护过程监督,采用养护巡检制度(每日至少2次),记录表面湿度、温度、覆盖情况等数据,发现保温层破损、表面干燥等问题及时整改;通过无人机航拍检查养护覆盖的完整性,确保无遗漏区域。

4 水利工程大体积混凝土施工优化的保障措施

4.1 加强技术研发与成果转化

加大对大体积混凝土施工关键技术的研发投入,鼓励校企合作开展新材料、新工艺、新设备的研究。重点攻关低水化热胶凝材料、智能温控系统、自动化浇筑设备等核心技术,形成一批具有自主知识产权的成果;建立技术示范工程,对新型配合比、智能监测系统等进行实地验证,总结可推广的经验;完善技术标准体系,根据行业发展需求及时修订大体积混凝土施工规范,明确材料性能、工艺参数、质量验收等指标,为施工优化提供依据。通过技术研发与转化,推动水利工程大体积混凝土施工从“经验驱动”向“技术驱动”转型。

4.2 健全施工管理机制

建立覆盖“事前—事中—事后”的全过程管理机制,强化施工各环节的质量控制。事前阶段,编制详细的施工组织设计,明确浇筑方案、温控措施、应急预案等内容,进行技术交底与风险评估;事中阶段,实行“三检制”(自检、互检、专检),对混凝土原材料、配合比、入模温度、振捣质量等进行严格检验,关键工序实行旁站监理;事后阶段,开展质量追溯与评估,通过钻芯取样、无损检测等方式检查混凝土强度与密实度,对发现的问题及时整改。同时,引入信息化管理平台,将施工数据(如温度监测、养护记录)实时上传,实现质量信息的可追溯与动态管理。

4.3 强化专业队伍建设

加强施工人员与技术人员的专业培训,提升其技术水平与质量意识。开展针对性培训,内容包括大

体混凝土施工工艺、温控原理、智能设备操作等,培训后进行考核,合格后方可上岗;定期组织技能竞赛与经验交流,推广先进操作方法,提升一线工人的实操能力;培养复合型技术人才,使其具备材料、结构、信息技术等多学科知识,能够解决施工中的复杂技术问题。通过队伍建设,为施工优化提供人才支撑,确保各项技术措施的有效落实。

4.4 完善质量监督与评价体系

建立第三方质量监督机制,引入专业检测机构对大体积混凝土施工质量进行独立评估。监督内容包括材料性能检测、温度场监测数据验证、结构实体检测等,确保质量数据的真实性与可靠性;制定科学的评价指标体系,从强度、抗渗性、裂缝控制、工艺先进性等维度对施工质量进行综合评价,评价结果作为工程验收与评优的重要依据;对施工质量优异的单位与个人给予表彰,对存在质量问题的进行通报与问责,形成“奖优罚劣”的激励机制。通过完善监督与评价体系,倒逼施工单位重视技术优化与质量控制。

5 结束语

水利工程大体积混凝土施工技术的优化是保障工程安全与耐久性的关键,其核心在于通过材料科学、施工工艺、智能监测的协同创新,破解温度裂缝防控、浇筑质量控制等难题。未来需进一步加强低碳胶凝材料的研发与应用,减少水泥用量与碳排放;深化数字孪生、物联网等技术在施工监测中的融合,实现温度场、应力场的实时模拟与精准调控;推动施工工艺的标准化与模块化,提高施工效率与质量稳定性。通过持续创新与实践,不断提升水利工程大体积混凝土施工技术水平,为水利事业的高质量发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 叶晓正. 大坝工程大体积混凝土施工的温控养护技术研究[J]. 四川水利, 2024,45(05):96-100,126.
- [2] 张珍. 水利工程大体积混凝土浇筑标准施工技术探究[J]. 大众标准化, 2023(14):164-165,168.
- [3] 邹浩. 水利工程大体积混凝土施工技术应用研究[J]. 珠江水运, 2023(11):108-110.
- [4] 史玮. 水利工程大体积混凝土施工技术应用探析[J]. 治淮, 2022(04):50-51.
- [5] 王鹏辉, 许琼鸽. 大体积混凝土裂缝控制技术在建筑工程中的应用[J]. 建筑结构, 2022,52(增刊2):1015-1018.
- [6] 王坤. 水利水电工程建筑中混凝土防渗墙施工技术的运用[J]. 城市情报, 2022(23):206-208.

水电站复杂软岩涌水地层隧洞洞室 开挖施工技术探究

赵国峰

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 随着地下工程规模持续扩大, 复杂软岩涌水地层隧洞施工逐渐成为水电站建设的重点技术方向。基于此, 本文围绕合理划分施工方式、优化组合支护体系、超前探查含水层以及完善监测预警体系展开阐述, 旨在构建一套契合复杂地层条件的综合施工路径, 使开挖过程能够更为可控, 支护结构更趋稳定, 降低突水风险并及时应对突发状况, 为重大水电工程建设提供实践参考。

关键词 水电站复杂软岩; 涌水地层; 隧洞洞室; 开挖施工

中图分类号: TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.021

0 引言

随着能源需求的不断增加, 水电站建设规模逐步扩大, 隧洞工程在整体建设中所占比重愈发明显。由于地质环境的复杂性, 软岩地层与突水条件交织出现, 给洞室开挖带来较大的不确定性。复杂软岩在受力作用下易产生变形, 遇水后稳定性迅速降低, 导致施工过程风险骤增。若控制不当, 极易引发塌方、涌水及超挖等问题, 不仅影响施工进度, 也会对工程安全造成严重威胁。因此, 深入探究复杂软岩涌水地层条件下的隧洞洞室开挖技术, 对于提升工程质量及安全水平具有重要意义。

1 水电站复杂软岩涌水地层隧洞洞室开挖施工的问题

1.1 地层复杂开挖方式难以统一

在复杂软岩涌水地层中, 岩层结构多样、力学性质差异明显, 软硬交替的情况极为常见。隧洞开挖时, 同一断面可能同时存在松散破碎的软岩或坚硬的夹层, 施工方式难以一次性统一。若采用单一的爆破或机械方式, 容易出现对软岩扰动过大或对硬岩破碎不足的情况, 造成开挖断面不均匀。岩层差异还会导致施工节奏难以保持一致, 局部坍塌、掉块或超挖现象频繁发生。不同开挖方式之间的切换增加施工组织的复杂性, 施工周期被迫拉长, 导致工程安全风险上升^[1]。

1.2 支护体系适配不足

复杂软岩在受水浸泡或围压变化时极易软化、膨胀或流塑化, 传统支护措施难以适应这种不稳定性。若支护设计未能充分考虑不同岩层的承载力及变形特

性, 钢架、锚杆、喷射混凝土等单一支护手段容易失效, 出现结构变形、裂缝扩展等问题。部分地段支护刚度过大, 会引发围岩二次破坏; 而刚度不足时, 又难以抑制大变形。支护体系同复杂地层条件匹配不足, 稳定性受到严重制约, 难以保障施工安全。

1.3 涌水隐患频发导致加固艰难

软岩地层在富水条件下, 存在裂隙发育、含水层连通等特征, 开挖过程中极易引发突发性涌水。涌水点位置分散, 水量变化大, 常常在短时间内突破施工防线。大量突水不仅冲刷支护结构, 还可能造成塌方甚至淹没施工面。传统堵水或加固手段在高压水作用下难以快速奏效, 注浆易被冲散, 帷幕效果不稳定。应急加固难度极大, 导致施工陷入被动局面, 工程进度及人员安全均易受到威胁。

1.4 监测预警反应滞后风险增高

在复杂软岩涌水隧洞中, 围岩变形及水量变化容易突发且剧烈。然而, 部分工程监测体系不够完善, 监测点布设不足或数据采集不够及时, 导致信息滞后。若不能实时掌握岩体变形、支护受力、水压变化等指标, 就难以及时发现异常。预警系统反应迟缓, 若在险情扩大后才显现风险信号, 导致错过最佳处置时机。信息传递不畅还影响施工组织的决策效率, 使得风险在短时间内快速累积, 极易引发严重事故。

2 提升水电站复杂软岩涌水地层隧洞洞室开挖施工技术的意义

在复杂软岩涌水环境中, 地层结构松散、含水量高, 稍有不慎便会引发坍塌、涌水等风险, 因此提升技术

水平直接关系到施工的稳定性。施工人员不断优化开挖工艺和支护方式,能够降低突发地质灾害的概率,确保隧洞结构的整体安全。在施工效率方面,施工人员应用先进技术能够缩短施工周期,减少因反复加固或事故处理带来的延误,实现合理利用资源及有效控制成本的目标。同时,改进施工技术还能推动智能化监测、动态调控等手段的落地,为施工管理提供更加科学的数据支撑,从而形成安全、质量、效率的统一。此外,施工人员突破施工技术困境既能够解决当前项目的实际难题,还能为类似地层条件下的水电站建设提供可借鉴的经验,推动行业整体技术水平的升级^[2]。这种技术提升既体现在保障单个工程的作用上,也体现在对未来水利水电工程可持续发展的长远价值中。

3 水电站复杂软岩涌水地层隧洞开挖施工技术策略

3.1 分步优化开挖方式,精准控制爆破强度

在水电站复杂软岩涌水地层的隧洞开挖作业中,围岩普遍存在结构松散、整体稳定性差的特征。若采用传统的一次性大断面开挖模式,会极大破坏围岩原有的应力平衡状态,极易引发围岩坍塌、突水等重大安全风险,不仅威胁施工人员生命安全,还会严重延误工程进度。因此,施工人员必须采用科学合理的分部开挖方式,通过将隧洞断面细化划分为多个独立且受力均衡的开挖单元,能够减轻开挖过程对围岩的扰动程度,同时降低应力集中现象带来的不利影响。

在实际施工组织过程中,施工人员必须严格遵循“短进尺、小循环、弱爆破、勤支护”的原则,以确保隧洞开挖过程的安全与可控。在掘进推进环节,每次开挖的进尺长度应被严格限制在1~2 m之间,从源头上避免围岩因跨度过大而丧失稳定,减少坍塌或突水风险。在爆破作业中,施工人员需充分结合围岩的物理力学特性,优化炮孔布置,采用低密度分布以削弱能量集中冲击,通过分段起爆技术实现能量的均匀释放,并将爆破震动速度严格控制在围岩稳定许可范围内。弱爆破原则要求减少单孔装药量,优选低爆速炸药,从而在保证岩体破碎的同时,尽可能降低对周边围岩的扰动。爆破完成后,施工人员应立即清理掌子面,并快速组织初期支护,利用喷射混凝土和锚杆等方式加固围岩,缩短围岩暴露时间,防止二次失稳。支护完成后,需安排专业人员结合监测数据对围岩进行检查,重点关注裂隙扩展和新生渗水点,及时调整后续施工参数与方案。对于涌水地层,施工人员还需同步设置临时排水系统,合理布设排水沟与集水井,确保掌子面积水得到及时排出,防止围岩长期受浸导致力学性能劣化。通过这一系列精细化控制措施,

能够有效应对复杂软岩涌水地层的挑战,实现开挖过程的动态可控,确保工程施工安全与整体目标一致。

3.2 锚喷联合支护体系,钢架提升结构稳定

复杂软岩地层在隧洞开挖后,由于原有的应力平衡被打破,围岩极易在外界扰动作用下发生变形。若不能及时采取有效的支护措施,随着时间推移,围岩变形会逐渐加剧,进而引发掉块、塌方等安全事故,严重影响隧洞施工的正常推进^[3]。因此,在隧洞开挖作业完成后,施工员必须迅速构建锚喷联合支护体系,并结合钢架支护增强结构承载能力,充分发挥围岩自身的自稳性能,形成“支护—围岩”协同受力的稳定体系。

在隧洞开挖过程中,当开挖面成型后,施工人员需立即开展喷射混凝土作业。通过混凝土喷射机将浆液均匀覆盖在围岩裸露表面,能够快速封闭裂隙,阻断地下水渗透,避免岩体因长期渗水而软化、崩解。喷射混凝土的厚度应依据围岩稳定性等级灵活调整,对于软弱地层一般控制在15~25 cm,并在拌制过程中加入速凝剂,使混凝土在喷射完成后30分钟内初凝,迅速形成可靠的保护层,从而有效抑制掉块,保证初期支护效果。待喷层达到设计强度后,需及时开展锚杆支护。施工时按照设计要求的间距和角度钻孔,将高强度螺纹钢锚杆插入孔内,再通过水泥砂浆或树脂锚固剂注浆固定。锚杆能够将围岩表层的松动区与深部稳定区联结为整体,通过抗拉作用约束位移,提升围岩整体稳定性。为确保锚固效果,施工人员需定期进行锚杆拉拔力检测,单根锚杆的拉拔力应达到设计值的90%以上,若不达标需及时补打或加固。在锚喷体系的基础上,还需配置型钢钢架,进一步提高隧洞结构承载力。钢架需依据断面形状预制加工,现场安装时按“拱顶—边墙”顺序拼装,利用焊接或螺栓连接形成整体,并与喷射层紧密贴合,构建“锚杆—喷射混凝土—钢架”三位一体支护体系。同时在钢架与喷层之间预留50~100 mm排水孔,建立有序排水通道,防止水压累积损坏结构。根据上述多层次支护措施,既能发挥围岩自稳作用,又能依靠钢架提供额外支撑,控制塌方风险,为二次衬砌施工创造安全条件,提升隧洞长期稳定性。

3.3 超前开展探水工作,帷幕实施注浆加固

复杂软岩涌水地层的水文地质条件极为复杂,地下水赋存形式多样、分布不均,且具有较强的突发性与不确定性。在隧洞开挖过程中,若未能提前准确掌握地下水的分布特征、水量大小及水压情况,盲目推进开挖作业,极易引发突水、涌泥等恶性事故,不仅会造成施工设备损坏,还可能导致掌子面被淹没,给

工程带来巨大的经济损失。因此,施工人员必须坚持“先探后治、防治结合”的原则,在开挖作业前超前开展探水工作,准确探明水文地质情况,针对高风险区域实施帷幕注浆加固,从根本上切断地下水渗流通道,保障隧洞开挖作业的安全进行^[4]。

在隧洞施工中,超前探水是防控涌水灾害的环节之一。通常需在掌子面前方 5~10 m 范围内布置探水钻孔,数量一般为 3~5 个,并根据隧洞断面尺寸及地质条件呈扇形分布,以实现对方含水地层的全面探测。在钻孔过程中,施工人员需同步记录涌水量与水压等参数,同时结合地质雷达进行无损探测,利用反射信号判断裂隙发育情况与含水层分布。探水孔还应开展注水试验,根据单位时间注水量与水位变化,计算岩体渗透系数,为后续注浆加固提供依据。当探测确认存在高风险涌水区时,应立即开展帷幕注浆。注浆孔需围绕隧洞断面布置,形成超出开挖轮廓线 3~5 m 的封闭注浆圈,从而阻断地下水渗流。注浆材料视地质特征而定,裂隙发育的软岩多采用水泥-水玻璃双液浆,以获得短凝结时间和高早期强度;裂隙细小的致密岩层则适合超细水泥浆或化学浆液,以增强渗透性和固结效果。施工工艺多采用分段注浆,每段 2~3 m,施工人员遵循“自上而下、分段钻注”的顺序。注浆过程中需实时监控压力变化,根据反馈调整注浆速率,既防止压力过高导致围岩劈裂,又避免扩散不足。当注浆压力达到设计值,且注浆量在连续 30 分钟内低于设计值的 10% 时,即可结束该段作业并转入下一段。完成注浆后,施工人员还需通过布置检查孔进行效果验证,若单孔涌水量小于 0.2 L/min,则表明满足设计要求;若仍存在渗水区,则需补充注浆,直至形成完整防水帷幕。通过超前探水与帷幕注浆的协同应用,不仅能降低突水风险,还能提升围岩抗渗性与整体稳定性,为后续开挖与支护创造安全、干燥的作业环境,提高工程安全系数。

3.4 实时强化动态监测,信息完善预警机制

在水电站复杂软岩涌水隧洞施工过程中,围岩变形、支护结构受力及地下水动态变化均具有较强的突发性或不确定性。若缺乏有效的动态监测手段,施工人员无法及时掌握围岩与支护体系的受力变形状态,一旦出现异常情况,极易错过最佳处置时机,引发严重的安全事故。因此,必须建立一套全面、高效的实时动态监测体系,结合信息化技术构建完善的预警机制,实现对施工过程中各类风险的“早发现、早预警、早处置”,最大限度保障工程施工安全^[5]。

动态监测系统在隧洞施工中承担着安全保障作用,其布设需覆盖开挖区域的主要受力部位。监测点位应

结合地质条件、断面形式和支护结构特点分层布置,施工人员在拱顶、拱肩、边墙及底板等部位设置基础监测点,同时在裂隙发育区及涌水点周边加密布点,以全面掌握支护结构的受力、变形与渗水情况。监测内容涵盖围岩收敛变形、拱顶下沉量、锚杆拉力等指标。设备配置需兼顾实时性与精确性。围岩收敛和拱顶下沉量可用全站仪或高精度测斜仪监测,精度控制在 ± 0.1 mm;支护内力采用振弦式传感器及数据采集仪实现实时传输;地下水位和渗水量则利用液位传感器监测。施工人员应每月校验一次所有设备,以避免因误差造成数据失真。监测数据通过无线模块接入信息化平台,系统自动分析并生成曲线和趋势图,便于直观掌握结构变化。平台需设定安全阈值与警戒值,当数据接近警戒值时触发黄色预警,超过阈值则触发红色预警,通过声光或短信即时通知管理与施工人员。接到预警后,应立即分析异常原因,并采取措施以控制风险。同时,应建立定期数据分析与反馈机制,将监测结果按日、周汇总成报告,对比历史数据,总结围岩变形与水位变化规律,为施工参数和支护设计优化提供依据。长期积累的数据还可沉淀为经验库,为类似地质条件下的隧洞施工提供参考。根据动态监测与智能预警,能够提升施工管理的前瞻性,强化安全保障,确保工程稳定推进。

4 结束语

隧洞开挖的稳定性关系到水电站整体结构的安全性,在复杂软岩与富水条件交织的作用下,施工技术面临更大挑战。施工人员需从整体角度统筹地质、水文及力学要素,优化开挖方式及支护体系,确保施工过程安全可控。未来,施工人员应立足不同区域的地层特征,深化应用信息化手段,提升风险预警的精准度,形成适应复杂环境的综合施工机制,从而全面增强重大水电工程的长久运行能力。

参考文献:

- [1] 唐洪应,刘胜虎,等.巴拉水电站特大断面隧洞开挖支护与边顶拱衬砌同步施工技术[J].四川水力发电,2025,44(S1):1-4,23.
- [2] 郝利军,白军平,冯俊淮.复杂地质条件地下厂房岩壁梁开挖施工技术[J].四川水利,2024,45(S1):61-65,85.
- [3] 杨廷海.应急供水工程中的隧洞洞身开挖及支护施工技术[J].四川建材,2023,49(06):123-125.
- [4] 乔瑞森.水工隧洞洞室工程施工技术研究[J].山西水利,2022(07):35-37.
- [5] 齐晓桦.不良地质段斜井断面洞室施工关键技术[J].工程机械与维修,2021(06):236-237.

碟式分离机耐腐蚀技术研究

陈鑫, 王牧

(南京中船绿洲机器有限公司, 江苏 南京 211164)

摘要 围绕碟式分离机的耐腐蚀技术展开研究, 通过对碟式分离机整机及转鼓结构特点的分析, 明确其在工作过程中易受腐蚀的部位和原因。针对不同的腐蚀类型, 研究碟式分离机的耐腐蚀材料、表面处理技术、结构优化设计等多种耐腐蚀技术手段, 旨在提高碟式分离机的耐腐蚀性能, 增加设备的使用寿命, 减少维护成本, 为碟式分离机在化工、食品、制药等对设备耐腐蚀要求较高的行业中的稳定应用提供有益参考。

关键词 碟式分离机; 耐腐蚀技术; 耐腐蚀材料; 表面处理技术; 结构优化设计

中图分类号: TQ05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.022

0 引言

碟式分离机是高效的离心分离设备, 广泛应用于化工、食品、制药、生物工程等领域。它依靠高速转动的转鼓产生强大的离心力场来产生液—固、液—液或液—液—固的分离。碟式分离机在实际应用中经常涉及具有腐蚀性的物料, 如化工生产中的酸碱溶液、食品加工中的含盐及酸性液体等。这些腐蚀性介质会腐蚀分离机的部件, 不仅影响设备的分离效率和工作性能, 也会缩短设备的使用寿命, 增加维修成本和停机时间, 甚至会导致安全事故。所以, 研究碟式分离机的耐腐蚀技术具有重要的现实意义。本文结合碟式分离机的结构特点, 对其进行耐腐蚀技术的探讨, 为提高设备的可靠性和稳定性提供参考^[1]。

1 碟式分离机结构特点分析

1.1 整机结构

碟式分离机主要由进出装置、转鼓、配水装置、垂直轴系、机架、联轴节及电机等部分组成(见图1)。进出装置是为物料进出提供通道, 在输送过程中, 与物料接触的部件将可能受到物料中腐蚀性成分的侵蚀。转鼓是物料进行分离的主要部件, 因为转鼓内部高速旋转, 复杂的流体力学环境, 使得转鼓不仅受机械应力, 而且受到腐蚀性介质的化学侵蚀。如配水装置、垂直轴系、机架等, 这些部件并不直接与物料接触, 但潮湿的工作环境或受到泄漏物料的影响, 也有腐蚀的可能。电机为动力源, 其电气部件在腐蚀环境中极易出现绝缘性能下降等, 影响设备的正常运行^[2]。

1.2 转鼓结构

转鼓是碟式分离机最重要的部件, 由转鼓体、转鼓盖、主锁环、分配器、碟片组、活塞、小阀结构等组成。

转鼓体和转鼓盖由主锁环锁紧在一起, 转鼓内装分配器和碟片组, 转鼓盖顶部与向心泵盖组成轻相泵室, 转鼓体内装活塞和小阀结构, 转鼓体与活塞底部组成密封水腔^[3]。

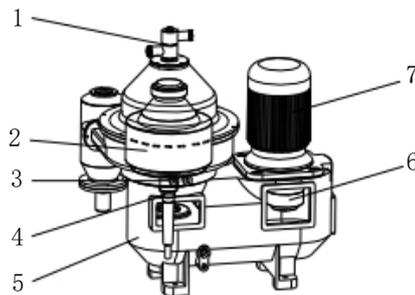


图1 整机结构

(注: 1. 进出装置; 2. 转鼓; 3. 配水装置; 4. 垂直轴系; 5. 机架; 6. 联轴节; 7. 电机)

在分离过程中, 物料由上部进料口通过进料管进入分配器并再分配到碟片组中进行分离, 固体颗粒沿着碟片向转鼓壁移动, 排渣时由淤渣口排出, 清液相沿碟片向转鼓中心运动, 进入清液相泵室, 由清液相向心泵经清液相出口排出机外。在这个过程中, 转鼓的各个部件都与物料充分接触, 尤其是碟片组、活塞、转鼓盖等结构, 不仅承受着物料的冲刷, 还受到物料中腐蚀性成分的化学作用。排渣过程中, 由于渣相的冲击力参与, 进一步加剧了转鼓部件的腐蚀环境^[4]。

2 碟式分离机腐蚀类型及成因

2.1 化学腐蚀

碟式分离机在处理具有腐蚀性的物料时, 如酸性或碱性溶液, 金属部件会与这些化学物质发生化学反应, 导致金属溶解, 从而产生化学腐蚀。例如: 在化

工生产中,当分离机处理硫酸、盐酸等强酸性物料时,金属部件中的铁等元素会与酸发生置换反应,生成氢气 and 相应的盐类,使金属逐渐被腐蚀。此外,物料中的某些化学成分也可能与金属表面形成的氧化膜发生反应,破坏氧化膜的保护作用,加速金属的腐蚀进程^[5]。

2.2 电化学腐蚀

由于碟式分离机的金属部件表面存在微小的电化学不均匀性,如金属成分的差异、晶体结构的缺陷、表面应力的分布不均等,在与电解质溶液(如含有水分和杂质的物料)接触时,会形成无数个微小的原电池。在原电池中,金属作为阳极发生氧化反应而被腐蚀,而阴极则发生还原反应。例如:当转鼓的金属表面存在不同的合金成分或有杂质附着时,就会形成局部的电化学电池,加速金属的腐蚀。同时,在潮湿的环境中,即使物料本身腐蚀性较弱,空气中的水分在金属表面凝结形成水膜,也可能构成电化学腐蚀的条件^[6]。

2.3 冲刷腐蚀

在碟式分离机的工作过程中,物料在转鼓内高速流动,对部件表面产生强烈的冲刷作用。高速流动的物料会不断冲击金属表面,使金属表面的保护膜被破坏,暴露出新鲜的金属表面,从而加速腐蚀。尤其是在物料入口、碟片边缘、排渣口等部位,由于流体的流速较大,冲刷腐蚀更为严重。此外,物料中含有的固体颗粒在高速运动时,会对金属表面产生磨粒磨擦作用,进一步加剧冲刷腐蚀的程度。

2.4 缝隙腐蚀

碟式分离机的一些部件之间存在缝隙,如转鼓体与转鼓盖的连接处、活塞与转鼓体的配合处、碟片之间的缝隙等。在这些缝隙中,介质流动不畅,易形成局部的浓度差电池,使缝隙内的金属发生腐蚀。由于缝隙内介质易发生浓缩,使腐蚀性离子的浓度升高,并且缝隙内溶解氧含量较低,形成缺氧环境,从而加剧了缝隙腐蚀的发生。当缝隙内的金属发生腐蚀以后,将使缝隙继续扩大,形成恶性循环,加速部件的破坏。

3 碟式分离机耐腐蚀材料的选择

3.1 不锈钢材料

不锈钢因其良好的耐腐蚀性能,在碟式分离机中得到了广泛的应用。碟式分离机使用的不锈钢材料,常见的有 304、316 等奥氏体不锈钢和双相不锈钢。奥氏体不锈钢有较好的耐腐蚀性和良好的加工性能,在一般的弱腐蚀性环境中表现良好。由于锻造过程中添加了钼元素,316 不锈钢比 304 不锈钢具有更强的耐腐蚀性,尤其具有很好的抗点蚀和缝隙腐蚀能力,可以

用于腐蚀性介质有氯离子等的物料。双相不锈钢同时兼备奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的优点,具有较高的强度和较好的耐腐蚀性能,在一些要求强度和耐腐蚀性高的场合得到了应用。例如:转鼓体、碟片组等部件,不锈钢材料可有效地提高其耐腐蚀性能,但在一些强腐蚀性环境下,还有待进一步防护。

3.2 有色金属材料

有色金属材料如钛及钛合金、铜合金等也可用于碟式分离机的耐腐蚀部件。钛及钛合金具有优异的耐腐蚀性,对大多数无机酸、有机酸、碱和盐溶液都具有良好的耐蚀性,尤其是在海水、湿氯气等腐蚀性环境中表现出色。在处理海水淡化过程中的物料分离或含有湿氯气的化工物料时,采用钛及钛合金制作的转鼓或碟片可以显著提高设备的使用寿命。铜合金如黄铜、青铜等,在一些特定的介质中也具有较好的耐腐蚀性能,例如黄铜在淡水和大气中有较好的耐蚀性,可用于制作与淡水接触的部件。

3.3 高分子材料

高分子材料如聚四氟乙烯(PTFE)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等具有优异的耐腐蚀性能,在碟式分离机的密封件、内衬等部件中得到应用。聚四氟乙烯具有极强的化学稳定性,几乎不与任何化学物质发生反应,可用于制作密封垫片、碟片涂层等,能有效防止物料的腐蚀和泄漏。聚乙烯和聚丙烯具有良好的耐酸碱性和耐溶剂性,可用于制作物料管道、容器内衬等部件,降低物料对设备的腐蚀。此外,一些高性能的工程塑料如聚醚醚酮(PEEK),具有高强度、耐高温和良好的耐腐蚀性能,可用于制作在高温、强腐蚀环境下工作的部件。

4 碟式分离机耐腐蚀表面处理技术

4.1 电镀技术

电镀是使用能提高金属表面耐腐蚀性能的金属或合金层镀在金属表面。电镀工艺:常见有镀铬、镀镍、镀锌等。镀铬可在金属表面形成一层坚硬、致密的铬层,增强金属的耐磨性和耐腐蚀性,多用于转鼓轴、轴套等部件的表面处理。镀镍还可提高金属表面光泽度和耐腐蚀性,在一些外观和耐腐蚀要求较高的部件上使用。镀锌则主要用于防止钢铁部件的大气腐蚀,以牺牲阳极保护钢铁基体为代价形成一层锌保护层。

4.2 热喷涂技术

热喷涂是利用热源把喷涂材料加热到熔融或半熔融状态后,用高速喷射到基体表面形成具有一定性能的涂层。热喷涂常用材料有金属、陶瓷、金属陶瓷等。

如转鼓盖内表面和活塞表面喷陶瓷涂层，可以较大程度提高转鼓的耐腐蚀性和耐磨性。陶瓷涂层化学稳定性好，硬度高，耐腐蚀冲刷。热喷涂技术可以根据不同的使用要求，选择喷涂材料和工艺参数，制备出满足不同耐腐蚀需要的涂层。

4.3 化学镀技术

化学镀是在没有外加电流的条件下，用化学还原剂在金属表面产生自催化反应，沉积金属或合金镀层。化学镀镍-磷合金是一种常见的化学镀工艺，这种镀层具有较好的耐腐蚀性、耐磨性和硬度，可用于碟式分离机的工件表面处理。化学镀镍-磷合金层在形状复杂的部件表面均匀镀上镍，尤其适合一些电镀难的部件，如小阀结构、活塞等。

4.4 表面钝化处理

钝化处理是采用化学或电化学方法，使金属表面形成一层致密的钝化膜，提高金属的耐腐蚀性能。例如：在不锈钢部件表面，用硝酸钝化，使不锈钢表面产生一层富铬的钝化膜，从而提高耐腐蚀性。钝化处理工艺简单，成本低，可以提高金属表面化学稳定性。

5 碟式分离机耐腐蚀结构优化设计

5.1 减少缝隙设计

针对缝隙腐蚀问题，碟式分离机在结构设计上应尽量减少缝隙。例如：减小零件死角；对于碟片筋条采取满焊，避免碟片与筋条间的缝隙；另外，在活塞与转鼓体的配合处可采用唇形密封或机械密封等特殊密封结构，减少缝隙内介质的堆积，降低局部缝隙腐蚀的风险。

5.2 流体力学优化设计

对碟式分离机内部的流体力学结构进行优化，减少冲刷腐蚀。例如：在物料入口处设计合理的导流结构，使物料平稳进入转鼓，降低物料的流速和冲击力。对碟片的形状和角度进行优化，改善物料在碟片间的流动状态，减少物料对碟片边缘的冲刷。在排渣口处设计合理的扩口结构，降低排渣时固体颗粒对排渣口的磨损和冲刷。

5.3 可拆卸与易更换部件设计

为了便于设备的维护和维修，在碟式分离机的结构设计中，应将一些容易受腐蚀的部件设计为可拆卸和易更换的结构。例如：碟片组、密封件、小阀、活塞结构等部件，在使用一段时间后容易受到腐蚀损坏，将其设计为可拆卸结构，便于定期检查和更换，降低设备的维修成本和停机时间。

6 实验验证与效果分析

6.1 实验方案设计

为了验证耐腐蚀技术在碟式分离机上的应用效果，设计以下实验方案。选取相同型号的碟式分离机，将其分为对照组和实验组。对照组采用常规的材料和结构设计，不进行特殊的耐腐蚀处理；实验组采用上述研究的耐腐蚀材料、表面处理技术和结构优化设计。在相同的工况下，对两组分离机进行长期运行试验，处理相同的具有腐蚀性的物料。在实验过程中，定期对分离机的部件进行检查和检测，记录部件的腐蚀情况、分离效率、设备运行稳定性等参数。

6.2 实验结果分析

经过一段时间的运行实验，实验组碟式分离机耐腐蚀性能明显优于对照组。实验组的部件腐蚀程度较轻，表面的腐蚀坑、腐蚀裂纹少，部件的尺寸变化小，保证了设备的分离效率和运行稳定性。对照组的部件腐蚀现象较严重，如转鼓壁变薄、碟片边缘磨损严重、密封件失效等，分离效率下降，设备故障频繁发生。通过分析实验数据，证明了耐腐蚀材料、表面处理技术和结构优化设计在提高碟式分离机耐腐蚀性能方面的有效性。

7 结束语

通过对碟式分离机的结构特点、腐蚀类型及成因的分析，研究了适合碟式分离机的耐腐蚀材料，探讨了多种耐腐蚀表面处理技术和结构优化设计方法，并通过实验验证了这些技术和方法的有效性。研究结果表明，合理的耐腐蚀材料选择、表面处理技术和结构优化设计，可提高碟式分离机的耐腐蚀性能，延长设备的使用寿命，降低设备的维护成本，保证设备稳定运行。

参考文献：

- [1] 张金龙,赵强,闫媛媛,等.碟式分离机罩壳冷却结构仿真优化[J].机电设备,2023,40(04):48-52.
- [2] 卢仁伟,李邦,刘广明,等.大型高速船用碟式分离机摇摆动力学优化分析[J].智能制造,2023(02):109-113.
- [3] 赵思钊,张维勇,谢昌成.船用碟式分离机技术[J].机电设备,2023,40(02):1-4,113.
- [4] 郑加洲,李丽,丁晓明,等.新一代碟式分离机转鼓结构优化分析[J].机电设备,2022,39(04):7-11.
- [5] 李邦,赵奇峰,丁晓明,等.碟式分离机传动结构发展[J].机电设备,2022,39(03):14-16.
- [6] 陈彦,曹艳兵,欧京宁,等.碟式分离机活塞工艺优化设计[J].机电设备,2022,39(03):17-18,22.

生物质发电企业炉前给料系统优化研究

王 凯¹, 刘周洲¹, 杨 中¹, 金远龙², 廖 鹏²

(1. 泗县深能生物质发电有限公司, 安徽 宿州 234300;

2. 深圳能源环保股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘 要 生物质发电作为一种具有显著环保优势的清洁、可再生能源发电方式, 受到了社会各界的广泛关注和重视。炉前给料系统作为生物质发电企业生产流程中的关键环节, 其运行的稳定性和高效性直接影响到整个发电系统的效率以及能源供应的可靠性和稳定性。本文针对当前生物质发电企业在炉前给料系统运行过程中存在的诸多问题, 从设备选型与配置、工艺流程的优化设计、自动化控制技术的应用等多个方面提出了一系列系统性的优化措施。同时, 结合具体的实际案例进行了深入的分析和探讨, 旨在对有效提高炉前给料系统的运行稳定性和可靠性有所裨益, 进而为生物质发电企业的长期稳定运行和高效能源供应提供坚实的技术保障。

关键词 生物质发电; 炉前给料系统; 设备选型; 自动化控制系统

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.023

0 引言

在全球对清洁能源需求持续增长的大背景下, 生物质发电凭借其资源来源广泛、环境友好、可再生性强等多重优势, 已成为能源领域的重要发展方向和战略选择。生物质发电企业通过将各类生物质原料高效转化为电能, 不仅实现了废弃物的资源化利用, 有效减少了环境污染, 同时也在一定程度上减少了对传统化石能源的过度依赖, 推动了能源结构的绿色转型。然而, 在实际的生物质发电过程中, 炉前给料系统的稳定性问题却成为制约发电效率提升和能源供应可靠性的关键瓶颈。给料系统的不稳定运行不仅会导致燃烧过程的波动和异常, 进而影响发电设备的正常运行效率, 还可能引发设备故障和安全事故, 显著增加企业的运营维护成本和风险^[1]。

1 生物质发电企业炉前给料系统现状及问题分析

1.1 炉前给料系统的构成与工作原理

生物质发电企业的炉前给料系统通常由原料储存设备、输送设备、计量设备和控制系统等部分组成。原料储存设备用于存放经过预处理的生物质原料, 如秸秆、木屑等。输送设备负责将原料从储存设备输送至炉前, 常见的输送设备有螺旋输送机、皮带输送机等。计量设备用于精确控制进入炉膛的原料量, 以保证燃烧过程的稳定。控制系统则根据发电设备的运行参数和原料特性, 对给料系统进行自动化控制, 实现精准给料。其工作原理是, 控制系统根据锅炉负荷等信号, 调节输送设备和计量设备的运行参数, 使生物质原料

能够按照设定的速度和量均匀地送入炉膛, 为燃烧提供稳定的燃料供应。

1.2 常见问题分析

1.2.1 原料搭桥与堵塞问题

生物质原料, 尤其是软质秸秆类物料, 由于其质地轻软、流动性不强的特性, 在储存和输送过程中容易出现缠连现象。这种缠连现象会导致在料仓和输送管道中形成搭桥、结拱, 从而影响原料的顺畅输送。例如: 在一些生物质发电企业中, 由于料仓设计不合理, 秸秆类原料在料仓底部堆积, 形成搭桥, 使得原料无法正常下落, 不得不频繁进行人工清理, 严重影响了生产效率。同时, 原料中的杂质或过长的物料也容易在输送设备中造成堵塞, 如螺旋输送机的螺旋轴被物料缠绕, 导致设备停运^[2]。

1.2.2 输送设备故障频发问题

螺旋给料装置在应对秸秆类物料时, 经常出现蓬料、转动受阻等情况。这是因为生物质燃料自然堆积密度小, 在输送过程中容易出现物料分布不均匀的情况, 导致螺旋轴受力不均, 进而引发故障。此外, 皮带输送机也会因生物质原料的磨损性和腐蚀性, 出现皮带跑偏、撕裂等问题。一些企业的皮带输送机由于长期输送含有杂质的生物质原料, 皮带表面磨损严重, 使用寿命大大缩短, 频繁更换皮带不仅增加了成本, 还影响了生产的连续性。

1.2.3 给料量控制不准确问题

由于生物质原料的特性差异较大, 以及现有计量设备和控制系统的精度限制, 给料量难以精确控制。

在实际运行中，经常出现给料量过多或过少的情况。给料量过多会导致炉膛内燃烧不充分，产生大量的烟尘和有害气体，同时还可能造成设备过载；给料量过少则会使锅炉负荷下降，影响发电效率。一些企业在负荷调整时，由于给料系统响应迟缓，无法及时准确地调整给料量，导致发电设备运行不稳定。

1.2.4 自动化程度低

部分生物质发电企业的炉前给料系统自动化程度较低，仍依赖大量人工操作。人工操作不仅劳动强度大，而且容易出现操作失误，导致给料不稳定。在料仓进料和出料过程中，需要人工频繁地检查料位和调整设备运行参数，一旦操作人员疏忽，就可能引发给料故障。此外，人工操作也难以实现对给料系统的实时监控和远程控制，不利于企业的智能化管理^[3]。

2 炉前给料系统优化策略

2.1 设备选型与改进

2.1.1 新型料仓设计

为解决原料搭桥问题，可采用新型的梯形料仓设计。梯形料仓底部采用分料装置，从根本上防止生物质燃料在料仓中形成搭桥现象。这种设计不同于传统的活底料仓，具有更好的防搭桥效果。料仓下部设置带有特殊破缠绕装置的给料转轴，能够有效破坏秸秆缠绕给料转轴的现象。

2.1.2 高效输送设备选择

针对生物质原料的特性，选择合适的输送设备至关重要。对于质地较轻、缠绕性强的物料，如：玉米秆、水稻秆、小麦秆可采用双轴悬臂螺旋输送设备。双轴悬臂螺旋设备输送具有输送效率高、不易堵塞、对物料适应性强等优点。双轴悬臂螺旋给料机能够确保生物质原料在输送过程中的稳定性和顺畅性。

2.1.3 精准计量设备应用

为实现给料量的精确控制，应选用高精度的计量设备。例如：采用电子皮带秤作为给料计量设备，电子皮带秤能够实时测量皮带上物料的重量和输送速度，通过计算得出给料量。同时，电子皮带秤具有较高的计量精度，能够满足生物质发电企业对给料量精确控制的需求。此外，还可结合失重秤等其他计量设备，对给料量进行双重校验，进一步提高计量的准确性。失重秤通过测量料仓内物料重量的变化来计算给料量，其不受物料特性和输送过程中振动等因素的影响，计量精度更高^[4]。

2.2 工艺流程优化

2.2.1 原料预处理流程改进

加强原料预处理环节，对生物质原料进行更加严

格的筛选和破碎。通过筛选设备去除原料中的杂质、石块等异物，避免其在给料系统中造成堵塞。同时，优化破碎工艺，确保生物质原料的粒度均匀，减少因粒度差异导致的输送和燃烧问题。对于秸秆类原料，可采用多级破碎工艺，先进行粗破碎，再进行细破碎，使原料粒度符合给料系统和燃烧设备的要求。此外，对预处理后的原料进行合理的储存和堆放，按照原料的种类、湿度等特性进行分类存放，便于在给料过程中根据实际需求进行调配。

2.2.2 给料流程优化

优化给料流程，采用多段给料方式，根据锅炉不同的燃烧阶段和负荷需求，合理分配各段给料量。在锅炉点火及低负荷阶段，通过下部给料系统为主进行给料，确保燃料能够稳定进入炉膛，维持燃烧的稳定。在锅炉高负荷阶段，增加上部给料系统的给料量，使燃料在炉膛内分布更加均匀，提高燃烧效率。同时，优化给料系统各设备之间的运行逻辑，确保输送设备、计量设备和给料设备之间能够协同工作，实现给料的连续性和稳定性。例如：通过控制系统根据料仓料位和锅炉负荷信号，自动调节输送设备的输送速度和给料设备的给料量，避免出现料仓空仓或满仓等异常情况。

2.3 自动化控制系统升级

2.3.1 传感器与监测系统完善

在炉前给料系统中安装多种传感器，实现对系统运行状态的实时监测；安装料位传感器，实时监测料仓内原料的储量，避免料仓空仓或满仓；安装温度传感器和湿度传感器，监测原料的温度和湿度变化，以便及时调整给料量和燃烧参数。在输送设备和给料设备上安装振动传感器和电流传感器，监测设备的运行状态，当设备出现异常振动或电流过大时，及时发出报警信号，提醒操作人员进行处理。通过完善的传感器与监测系统，能够为自动化控制系统提供准确的数据支持，实现对给料系统的精准控制。

2.3.2 自动化控制算法优化

采用先进的自动化控制算法，如模型预测控制（MPC）算法，对给料系统进行控制。MPC算法能够根据系统的历史数据和预测模型，提前预测系统的未来状态，并根据设定的目标函数，优化控制策略，实现对给料量、输送速度等参数的精确控制。以生物质发电锅炉的燃烧过程为例，通过建立燃烧过程的数学模型，结合激光雷达对生物质入炉给料量的实时监测数据，采用MPC算法对给料系统进行控制，能够在主汽压力与燃烧室温度约束下实现烟气氧量优化，提高燃

烧效率,保证发电设备的稳定运行。同时,将自动化控制系统与发电企业的集散控制系统(DCS)进行集成,实现对整个发电过程的统一监控和管理。

2.3.3 远程监控与故障诊断系统建立

建立远程监控与故障诊断系统,通过网络技术实现对炉前给料系统的远程监控。操作人员可以在中控室实时查看给料系统各设备的运行参数、状态信息和报警信息,无需到现场进行巡检。当系统出现故障时,远程监控与故障诊断系统能够根据传感器采集的数据和预先设定的故障诊断规则,快速诊断出故障类型和故障位置,并提供相应的解决方案。例如:当输送设备出现故障时,系统能够通过分析振动传感器和电流传感器的数据判断故障原因,并指导维修人员进行维修,大大缩短了故障处理时间,提高了生产的连续性^[5]。

3 炉前给料系统优化案例分析

3.1 案例企业背景介绍

某生物质发电企业采用1×40 MW机组,以黄色秸秆和灰秆为主要燃料。其原有的炉前给料系统存在诸多问题,如料仓频繁搭桥、输送设备故障频发、给料量控制不准确等,导致发电设备运行稳定性差,平均每月因给料系统故障达到上百次,极易引发停炉停机风险,严重影响了企业的发电效率和经济效益。

3.2 优化措施实施情况

3.2.1 设备改造

该企业对炉前给料系统进行了全面的设备改造。将原有的矩形料仓更换为梯形料仓,并在料仓中部安装了分料装置,有效解决了原料搭桥问题。同时,将原小螺旋输送机改为大轴螺旋输送设备,提高了输送效率和稳定性。

3.2.2 工艺流程优化

对原料预处理流程进行了改进,增加了筛选和多级破碎设备,确保原料粒度均匀。优化了给料流程,采用多段给料方式,根据锅炉负荷自动调整给料量。在低负荷阶段,下部给料系统给料量占比60%,上部给料系统占比40%;在高负荷阶段,下部给料系统给料量占比30%,上部给料系统占比70%。

3.2.3 自动化控制系统升级

完善了传感器与监测系统,安装了料位传感器、温度传感器等。采用MPC算法对给料系统进行自动化控制,并建立了远程监控与故障诊断系统。通过远程监控系统,操作人员可以实时掌握给料系统的运行情况,当系统出现故障时,能够及时进行诊断和处理。

3.3 优化效果评估

经过优化后,该企业炉前给料系统的运行稳定性得到了显著提高。料仓搭桥现象基本消除,输送设备故障率降低了80%以上。给料量控制精度大幅提升,误差控制在±5%以内。从而没有因给料系统问题出现机组限负荷或停机现象,发电效率提高了15%左右,企业的经济效益得到了明显改善。同时,通过自动化控制系统的升级,减少了人工操作,降低了劳动强度,提高了企业的智能化管理水平。

4 结束语

本文对生物质发电企业炉前给料系统存在的问题进行了深入分析,并从设备选型与改进、工艺流程优化、自动化控制系统升级等方面提出了一系列优化策略。通过实际案例分析表明,这些优化措施能够有效解决炉前给料系统中存在的原料搭桥与堵塞、输送设备故障频发、给料量控制不准确、自动化程度低等问题,显著提高炉前给料系统的稳定性和可靠性,进而提升生物质发电企业的发电效率和经济效益。随着生物质发电技术的不断发展和应用,炉前给料系统的优化将面临新的挑战 and 机遇。未来,应进一步加强对生物质原料特性的研究,开发更加适应不同原料的给料设备和技术。在自动化控制方面,随着人工智能、大数据等新技术的不断发展,将其应用于炉前给料系统的控制,实现更加智能化、精准化的控制。同时,加强对给料系统的全生命周期管理,从设计、制造、安装、运行到维护,建立完善的管理体系,确保给料系统长期稳定运行。此外,还应关注生物质发电企业与上下游产业的协同发展,通过优化产业链,提高生物质发电的整体效益,为清洁能源的发展做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 王志轩,张晶杰,王晨龙,等.中国生物质发电减污降碳关键问题研究[J].电力科技与环保,2025,41(01):1-12.
- [2] 杨启皓,陈子薇,朱珊.碳交易制度下农林生物质发电行业发展策略分析[J].中国市场,2025(04):56-59.
- [3] 杨全才.生物质发电企业的成本控制与管理[J].销售与管理,2024(31):96-98.
- [4] 高志昂.新形势下生物质发电企业的财务风险分析与应对[J].中国集体经济,2024(26):174-177.
- [5] 朱珊,杨启皓.民营生物质发电企业融资难问题的现状及解决对策[J].中国产经,2024(12):74-76.

生物降解塑料母粒的开发策略与应用前景

徐磊

(无棣万财塑料有限公司, 山东 滨州 256600)

摘要 研制生物降解塑料母粒是治理白色污染、资源过度消耗的关键途径。本文系统探讨了生物降解塑料母粒的开发策略,重点从材料选择(如聚乳酸和PHA等都是生物基的来源)、功能助剂添加、共混改性技术、加工工艺优化四个方面展开分析,并评估其在包装材料、农业地膜、纺织纤维等领域的规模化应用潜力,旨在为绿色材料设计创新、产业化推进提供参考,进而推动塑料工业的可持续发展。

关键词 生物降解塑料母粒; 白色污染; 石油基资源; 绿色消费需求

中图分类号: TQ32; X78; Q939.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.024

0 引言

随着塑料污染问题越来越严重,生物降解塑料母粒作为一种替代传统塑料的选择受到广泛的关注。它的发展不仅有利于在源头上控制污染和节约石油资源,而且更符合全球绿色消费理念。基于此,本文系统地论述生物降解塑料母粒及其产业化进程的发展策略和应用展望。

1 生物降解塑料母粒发展的意义

1.1 从源头缓解“白色污染”

开发生物降解塑料母粒对减轻“白色污染”有实际意义。从源头上治理塑料废弃物对环境的压力是可持续发展中至关重要的一环。传统石油基塑料由于具有结构稳定、降解周期长等优点而在包装、农用薄膜、一次性用品等领域得到广泛的应用,但随之而来的大量塑料废弃物却很难在短时间内被分解,长期积累对土壤、水体、海洋生态系统造成严重污染的现象统称“白色污染”^[1]。生物降解塑料母粒是一种可以在自然环境下经过微生物作用而被逐步分解的高分子材料,它的推广和应用可以有效地代替传统塑料,达到从根本上降低不可降解塑料投加量的目的。相对于传统塑料,生物降解塑料母粒的物理性能、加工适应性、可控降解性等逐渐得到优化,从而能够同时满足工业生产的需要,还可以经过生物降解将废弃的水、二氧化碳、生物质等转化为环境负荷减轻^[2]。

1.2 减少石油基资源的消耗

在全球石油资源不断枯竭的背景下,降低石油基资源消耗已经成为全球可持续发展战略中最重要的目标。传统塑料以石油为主要材料,经聚合反应生成高分子链,稳定性高、持久性强,故其降解时间较长、

环境污染严重。但是石油作为一种不可再生资源,在开采、加工、利用的过程中,不仅会产生巨大的二氧化碳排放量,而且也会耗费巨大的能量,这就更进一步加剧全球能源危机^[3]。生物降解塑料母粒为取代石油基塑料的生产提供可行方法。这类母粒通常采用可再生的植物资源(如玉米淀粉、甘蔗、木质纤维)为原料,通过生物基聚合物与天然降解材料的复配,实现可降解塑料的生产。这样既可以有效地减少对石油资源的依赖性,又可以降低化石燃料消耗量。与传统石油基塑料相比较,生物降解塑料在制造过程中通常更环保且在生命周期中碳足迹更小。

1.3 满足绿色消费需求

生物降解塑料母粒的原料选择趋向于利用植物基原料等可再生资源,作为可持续替代石油基塑料。与传统塑料相比较,生物降解塑料在降解过程中不仅降解周期短,且降解过程中不产生二次污染环境,有利于减轻废弃塑料给自然生态带来的长远负担。生物降解塑料母粒可以在保持较好的物理性能及加工特性前提下满足包装、农业、纺织等多行业绿色材料要求。在包装行业,愈来愈多消费者趋向于选用不含有害化学物质且能快速降解的包装材料;在农业方面,生物降解塑料母粒可以用来制作农膜和土壤覆盖材料,以降低土壤中塑料残留对于作物生长的影响;在纺织业中,生物可降解的塑料母粒可以被应用于生产纺织相关的辅助材料,例如:拉链和纽扣,这既满足环境保护的要求,也满足功能性的需求^[4]。

2 生物降解塑料母粒的开发策略

2.1 基础材料选择与复配策略

基础材料选取直接决定生物降解塑料降解速率、力学性能、加工适应性、环境友好性等。生物降解塑

料的常见基材有聚乳酸 (PLA)、聚羟基脂肪酸酯 (PHA)、聚己内酯 (PCL) 和淀粉基聚合物等几种, 这类材料都具有很好的生物降解性, 可在自然环境下经微生物作用分解成水、二氧化碳及有机质等物质, 从而避免传统石油基塑料给环境带来长期不利影响。但是各种生物降解塑料基材在物理性能上有差别, 如 PLA 在机械强度上表现良好, 但是脆性大、降解速度慢; 而且 PHA 柔韧性更好, 但是生产成本更高^[5]。所以, 单一材料通常很难满足实际研制中不同应用领域多样化的性能要求。因此, 采用一种复合策略, 通过合理地组合不同种类的生物降解塑料基材, 这有助于在一定程度上弥补单一材料的局限性, 并进一步提升其整体性能。复配主要有两种策略: 一是将不同生物降解材料进行复配, 使材料力学性能、热稳定性、降解特性达到最佳; 二是通过加入功能性助剂 (如增塑剂、稳定剂、抗氧化剂), 改善材料的加工性能和长期稳定性。例如: PLA 和 PHA 的复配既可以增强材料柔韧性、抗冲击性能, 又可以调控其降解速率以适应不同应用环境要求。

2.2 功能性助剂设计与添加策略

生物降解塑料母粒研制中功能性助剂设计及加入策略对于增强材料性能、拓宽应用领域起着至关重要的作用。功能性助剂可从提高材料力学性能、热稳定性、加工性能、降解速率几个方面来适应不同的应用需求, 使生物降解塑料具有更加丰富的功能性特征。常用的功能性助剂有增塑剂、抗氧化剂、光稳定剂、填料、润滑剂, 这些助剂对优化塑料性能起关键作用。如增塑剂可使生物降解塑料玻璃化温度下降、材料柔韧性增强、加工性增强、继而成型加工时流动性增强; 使用抗氧化剂可以显著减缓材料在高温环境下的降解速度, 从而延长其使用寿命, 并避免在加工过程中出现热降解的问题。加入光稳定剂可以增强材料对紫外线的耐受性, 避免在户外使用时由于紫外线造成的材料降解和变得脆弱, 进而增强生物降解塑料的耐气候特性和长时间的稳定性。

2.3 改性技术强化策略

传统生物降解塑料通常在力学性能、热稳定性和耐候性上都有一定限制, 导致其实际性能很难达到一些高性能要求。所以, 利用高效的改性技术增强生物降解塑料已经成为增强其市场竞争力的唯一途径。常用的改性技术主要有物理改性、化学改性、复合改性, 每一种改性技术均具有自身特有的优点以及适用范围。物理改性技术则主要是改变物质的物理结构或者形貌,

例如: 通过加入纳米填料, 增强纤维或者共混处理来提高其力学性能、热稳定性、加工性能。如添加纳米级填料 (纳米粘土、纳米纤维) 能够显著增强材料的机械强度和刚性, 同时提高其热稳定性和抗紫外线性能。这些纳米填料既能强化塑料的结构稳定性又能提高塑料在高温或者恶劣环境中的寿命, 拓展塑料在包装、汽车、建筑中的应用领域。化学改性是一种通过化学反应或交联反应来改变生物降解塑料分子结构的方法, 从而达到优化其性能的目的。例如: 采用化学交联技术, 通过引入交联剂 (例如过氧化物、异氰酸酯) 对聚合物链进行交联, 可以有效提高材料的耐热性和机械强度, 并减少在高温条件下的热降解。除此之外, 通过化学改性, 还可以加入如羟基、氨基等功能性官能团, 从而进一步增强材料的亲水性、亲油性和抗菌能力, 以满足更广泛的应用需求。

2.4 加工工艺优化策略

由于生物降解塑料和传统塑料的加工特性有一定的区别, 所以, 根据它们的特殊性进行相关工艺优化有利于达到高效稳定生产和确保最终产品质量。第一, 原料预处理阶段保证基材均匀性、纯度, 是加工质量得以保证的根本。生物降解塑料通常拥有出色的吸湿特性, 特别是在如聚乳酸 (PLA) 这样的材料中, 其水分含量的波动会对材料的流动特性和成型效果产生显著的影响。因此, 通过采用合适的干燥技术, 例如: 真空干燥或热风干燥, 可以有效地去除材料中的水分, 避免由水分引发的降解反应, 从而确保加工过程的稳定性。第二, 加工设备选型及调整上, 生物降解塑料加工设备需要有良好的热稳定性及精密的温控系统。由于生物降解塑料容易在高温下降解, 所以在挤出和注塑时需要对温度进行严格控制, 以免因过热而使材料降解。合理地选用适用于生物降解塑料生产的螺杆设计及模具结构, 可以有效地增强材料的混合均匀性及流动性, 进而促进生产效率及产品整体性能的提高。如使用剪切力较大的螺杆设计可增加材料均匀混合、改善塑料熔体流动性、成型性等。同时通过对机筒温度、模具温度、加工时间等参数的合理设定, 能够保证生物降解塑料完成优质成型过程而不会降解。

3 生物降解塑料母粒的应用前景

3.1 包装领域

生物降解塑料母粒应用于包装领域具有广阔的发展前景, 由于环保法规越来越严, 消费者环保意识不断增强, 生物降解塑料已逐步成为包装行业研究的热

点。传统塑料包装因在环境中长期具有持久性而成为塑料污染最主要的污染源，受到了社会各界的普遍重视。相比较而言，生物降解塑料利用其自然降解这一特点可以有效地降低塑料垃圾给环境带来的不利影响。生物降解塑料母粒是制造生物降解塑料制品的关键材料，可以通过对原材料性能进行优化使包装材料具有较好的力学性能、热稳定性好，加工适应性强，因而适应包装领域多样化的材料需求。食品包装领域中，生物降解塑料母粒可提供满足食品接触安全的环保材料。由于生物降解塑料通常采用天然原料（如淀粉、植物油等）或可再生资源制成，因此其降解过程不会对环境造成长期污染，且不含有害物质。另外，将生物降解塑料用于食品包装，既可延长食品保质期又可增强包装可持续性。例如：像聚乳酸（PLA）和聚羟基脂肪酸酯（PHA）这样的生物可降解塑料，在保持较高的机械强度和出色的透明度的基础上，可通过调节降解速率以适应不同食品的包装需求，避免传统石油基塑料给环境带来的长时间负担。

3.2 农业领域

生物降解塑料母粒已在农业领域特别是农业膜、灌溉管道、农用包装上显示出广阔前景。传统的农业塑料，如农用薄膜、地膜、滴灌管道等，由于其降解困难，经常在农业生产后留下大量的塑料废料，这不仅提高土地的污染风险，还可能对土壤和水质构成潜在的威胁。引进生物降解塑料为农业行业带来一个持续发展的新策略。采用生物降解塑料母粒可生产出能在农业上使用自然降解塑料制品，从而有效地减少农业废弃物积累，减轻环境负面影响。生物降解塑料母粒对农业薄膜的应用效果特别明显。传统农用地膜一般都需要使用过后人工清洗，可生物降解地膜可自然降解于土壤之中，既可避免清洗作业复杂、劳动强度大，又可降低环境污染。通过对母粒配方及加工工艺进行优化，实现地膜降解速率可控，使得地膜在农业作物生长周期末期能被适时降解而不会对后续耕作及土地利用造成影响。该生物降解地膜既有利于改善土壤品质，又可通过调节温湿度来改善作物生长环境从而提高产量与品质。

3.3 纺织领域

生物降解塑料母粒在纺织行业的潜在应用越来越受到重视，尤其是在环境保护和可持续发展需求持续增长的大背景下，作为纺织材料的改性剂，生物降解塑料母粒的重要性日益凸显，可有效提升纺织品性能，

为纺织行业绿色转型提供一种全新解决方案。传统纺织材料，尤其是合成纤维（如聚酯、尼龙等），在生产使用过程中不仅消耗大量的石油资源，还由于其难以降解的特性，成为塑料污染的主要来源之一。生物降解塑料母粒在纺织行业中的应用有望为传统合成纤维带来更环保、更可持续的环境污染问题，同时还能通过可降解纤维材料的引入来减轻传统合成纤维所带来的环境负担。纺织品生产中常利用生物降解塑料母粒强化纺织原料。例如：将生物降解塑料母粒与天然纤维（如棉花、麻、羊毛等）或合成纤维（如聚酯、聚丙烯等）复合，可以改善纺织品的强度、弹性及抗紫外线性能。同时通过对母粒配方的准确调控，可赋予纺织品较好的抗湿性、抗菌性、耐磨性，增强纺织品日常应用时的舒适性及耐用性。生物降解塑料母粒也能使纺织品具有较好的透气性与柔软性，以适应高端市场功能性与舒适性兼备的要求，特别适用于高性能运动服装与医疗纺织品。另外，生物降解塑料母粒对纺织废弃物的回收与资源化有明显的优势。传统合成纤维废弃之后一般很难被降解并长期堆放于垃圾填埋场或者环境当中，从而导致塑料污染严重。利用生物降解塑料母粒制成的纺织品可以在其使用寿命终了时通过自然降解，来降低废弃物给环境带来的长期不利影响。

4 结束语

生物降解塑料母粒是塑料产业绿色转型中的一个重要代表方向。通过多策略的协同发展，生物降解塑料母粒在包装、农业、纺织等方面都有着广阔的应用前景。未来需要进一步打破成本和技术的瓶颈，实现大规模推广和可持续发展。

参考文献：

- [1] 林军,陈粤,俞江.一种全生物降解塑料色母粒挤出装置:CN202221922234.8[P].2023-02-03.
- [2] 王仁龙.一种可生物降解的塑料编织袋生产工艺[J].塑料包装,2022(05):56-58.
- [3] 彭辉.一种智能型生物降解塑料色母粒挤压装置:CN202221135647.1[P].2022-11-11.
- [4] 高世军,孙敬善,吴泽华,等.一种全生物降解塑料垃圾袋材料的制备方法:CN201810718698.9[P].2018-07-03.
- [5] 毛寅.一种甲基化木质素PBAT可生物降解塑料及其制备方法:CN202010652556.4[P].2020-09-01.

城市配电规划中的负荷预测与容量配置方法

韩江伟, 赵耀武, 冯志, 李光洋

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽六安 237400)

摘要 在城市发展过程中, 保障电力供应稳定性与可靠性至关重要, 城市配电规划中的负荷预测与容量配置是核心。本研究系统分析负荷预测与容量配置方法对配电系统规划的科学性与合理性的影响机制及其应用关键。在研究方法方面, 负荷预测采用定性(专家预测法、德尔菲法)和定量(时间序列分析、回归分析、灰色预测)方法, 分析经济、人口等影响因素; 容量配置则严格遵循安全、可靠等原则, 通过负荷需求确定、设备选型、网络规划设计、系统校验优化等标准化流程实施, 还需注意预留备用容量等。研究表明, 不同预测方法各有优劣与适用场景, 容量配置需多维度考量。科学的负荷预测与容量配置可提升配电系统稳定性与资源利用率, 助力城市电力可持续发展。

关键词 城市配电规划; 负荷预测; 容量配置; 配电系统

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.025

0 引言

在城市发展过程中, 电力供应作为城市正常运转的重要支撑, 其稳定性与可靠性至关重要。城市配电规划作为保障电力供应的核心环节, 其中的负荷预测与容量配置方法直接关系到配电系统的科学性与合理性。负荷预测是对未来城市电力需求的预估, 容量配置则是基于预测结果, 对配电设备及线路容量进行合理安排, 二者相辅相成, 共同为城市电力系统的稳定运行奠定基础。

1 城市配电规划中的负荷预测

1.1 负荷预测的概念与意义

负荷预测是指在充分考虑各种影响因素的前提下, 运用科学的方法, 对未来一定时期内城市电力负荷的大小、分布及变化趋势进行预测。通过负荷预测, 能够提前掌握城市用电需求, 为后续的配电规划、电网建设与改造提供重要依据, 避免电力设施建设的盲目性, 提高资源利用效率, 保障城市电力的稳定供应。准确的负荷预测还能帮助电力企业优化发电计划, 降低运营成本, 同时为政府制定能源政策提供数据支撑^[1]。

1.2 负荷预测的方法

1.2.1 定性预测方法

1. 专家预测法: 邀请电力领域当中的专家、学者以及拥有丰富实践经验的工程师, 凭借他们自身所有的专业知识与经验, 针对城市电力负荷的发展趋势展开分析与判断, 在部分新兴城市或者区域里面, 鉴于缺乏历史用电数据, 专家可结合当地的经济发展规划

以及产业引进计划等内容, 来对未来的电力需求作出预估。比如当了解到某区域将会引进大型工业园区的时候, 专家依据对工业用电特点的熟悉程度, 便可初步判断出该区域未来的负荷增长状况, 此种方法主观性比较强, 不过在缺乏历史数据或者存在特殊情况之际有独特的优势。

2. 德尔菲法: 通过多轮匿名函询的方式, 征求专家意见, 经过反复反馈与修正, 使专家意见逐渐趋于一致, 从而得出较为可靠的预测结果。具体操作时, 组织者先将预测问题及相关背景资料发送给各位专家, 专家独立给出预测意见; 然后组织者汇总整理这些意见, 再匿名反馈给专家, 专家根据反馈信息调整自己的预测; 如此反复多轮, 直至专家意见相对集中。该方法能有效减少专家之间的相互干扰, 提高预测的准确性, 尤其适用于对中长期电力负荷的预测。

1.2.2 定量预测方法

1. 时间序列分析法: 基于电力负荷的历史数据, 分析其随时间变化的规律, 建立数学模型进行预测。常见的有移动平均法、指数平滑法等。移动平均法是通过计算一定时间间隔内数据的平均值来预测未来值, 简单移动平均法公式为:

$$S_t = \frac{x_t + x_{t-1} + \dots + x_{t-n+1}}{n} \quad (1)$$

式(1)中, S_t 为第 t 期的移动平均值, x_t 为第 t 期的实际值, n 为移动平均的项数。指数平滑法对近期数据赋予较大权重, 更能反映数据的变化趋势, 一次指数平滑法公式为:

$$S_t^1 = \alpha x_t + (1 - \alpha) S_{t-1}^1 \quad (2)$$

式(2)中, S_t^1 为第 t 期的一次指数平滑值, α 为平滑系数 ($0 < \alpha < 1$)。

2. 回归分析法: 探寻电力负荷同如 GDP、人口数量以及产业结构等影响因素之间的关联, 构建回归方程以实施预测, 举例而言, 经对历史数据展开分析, 可发现城市 GDP 与电力负荷呈现出正相关的关系, 借助回归方程可依据未来 GDP 的增长对电力负荷的变化给予预测, 在实际运用过程中, 或许会涉及多个影响因素, 这种情况下可以采用多元线性回归模型。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon \quad (3)$$

式(3)中, y 为电力负荷, x_i 为各影响因素, β_i 为回归系数, ϵ 为随机误差项。

3. 灰色预测法: 这种情况适用于数据量少且信息不完全的时候, 它是依靠对原始数据开展生成处理, 建立灰色模型, 挖掘其中潜在的数据规律, 最终实现对电力负荷的预测, 灰色预测模型 GM(1, 1) 是较为常用的模型之一, 其会把原始数据进行一次累加生成, 使得生成后的数据呈现出一定规律, 接着建立微分方程来进行预测, 在短期负荷预测方面有着不错的效果。

1.3 负荷预测的影响因素

1.3.1 经济发展因素

城市经济的增长会带动各行业用电需求的增加。如工业的扩张、商业活动的繁荣都会使电力负荷上升; 反之, 经济下滑可能导致电力需求减少。以制造业为例, 当经济形势向好, 企业扩大生产规模, 新增生产线、购置设备等都会增加用电量; 而在经济衰退期, 企业可能减少生产, 甚至停产, 电力负荷随之降低^[2]。

1.3.2 人口因素

人口数量的增长、人口密度的变化以及人口结构的调整都会影响电力负荷。例如: 新建大型居民区会增加居民生活用电需求; 城市人口老龄化加剧, 可能会使居民用电模式发生改变。老年人居家时间较长, 冬季取暖、夏季制冷时间可能更长, 且对医疗设备用电需求也会有所增加。

1.3.3 产业结构因素

不同产业的用电特性差异较大。工业生产通常是高耗能的, 其用电量占比较大; 而服务业用电相对稳定且能耗较低。产业结构向高端制造业、服务业转型, 会改变城市电力负荷的构成和总量。当城市大力发展高新技术产业, 这些企业虽然生产设备先进, 但单位产值能耗较低, 相比传统重工业, 对电力负荷的增长拉动作用可能较小。

1.3.4 政策因素

政府出台的能源政策、产业政策等对电力负荷有直接或间接影响。如鼓励新能源发展的政策可能会改变电力供应结构, 进而影响用电需求; 节能减排政策会促使企业降低能耗, 减少电力负荷。政府推广新能源汽车, 会增加充电桩的用电需求; 而限制高耗能产业发展的政策, 则会直接减少这些产业的用电量。

2 城市配电规划中的容量配置

2.1 容量配置的原则

2.1.1 安全性原则

容量配置必须确保配电系统在各种运行工况下的安全稳定, 能够承受正常运行、故障等情况下的电流、电压等电气参数变化, 避免出现设备过载、短路等安全事故。在设计配电系统时, 要根据可能出现的最大短路电流, 选择具有相应开断能力的断路器; 同时, 要保证线路的绝缘水平满足要求, 防止发生漏电、触电等危险^[3]。

2.1.2 可靠性原则

满足城市用户对电力供应可靠性的要求, 合理配置备用容量, 减少停电时间和停电范围, 保障重要用户的电力供应。对于医院、交通枢纽、数据中心等重要用户, 应采用双电源或多电源供电方式, 当一路电源出现故障时, 能迅速切换到备用电源, 确保供电不间断。

2.1.3 经济性原则

在满足安全和可靠性的前提下, 优化容量配置方案, 降低建设和运行成本。避免过度配置容量造成资源浪费, 同时也要防止容量不足导致频繁改造升级带来的额外费用。可以通过技术经济比较, 选择合适的设备型号和网络结构, 在保证供电质量的同时, 降低投资和运行费用。

2.1.4 适应性原则

考虑城市未来的发展和用电需求的变化, 使容量配置具有一定的灵活性和扩展性, 能够适应负荷增长、新技术应用等情况。在建设配电设施时, 预留一定的空间和接口, 方便未来增加设备或接入新的电源。

2.2 容量配置的步骤

2.2.1 确定负荷需求

依据前面的负荷预测结果, 明确不同区域、不同用户类型在规划期内的电力负荷需求, 包括最大负荷、平均负荷等参数。要详细分析每个区域的功能定位, 如商业区、工业区、居民区等, 结合各类用户的用电特点, 确定其用电负荷。对于工业区, 要考虑不同工

业企业的生产规模、设备功率等因素；对于居民区，要根据户数、户型、居民生活水平等估算用电负荷^[4]。

2.2.2 选择配电设备

根据负荷需求和容量配置原则，选择合适的配电变压器、断路器、电缆等设备。例如：对于负荷密度较大的区域，应选用容量较大、性能优良的配电变压器；对于短路电流较大的线路，需配置相应开断能力的断路器。在选择电缆时，要考虑其载流量、绝缘性能、敷设方式等因素，确保电缆能够安全可靠地传输电能。同时，要关注设备的品牌和质量，优先选择经过市场检验、口碑良好的产品。

2.2.3 进行网络规划

设计合理的配电网络结构，确定线路走向、接线方式等。常见的配电网络接线方式有放射式、树干式、环式等。放射式接线可靠性较高，但投资较大；树干式接线投资较小，但可靠性相对较低；环式接线则兼顾了可靠性和经济性。在实际规划中，可根据不同区域的特点和需求，采用混合接线方式。对于重要用户和负荷密度大的区域，采用放射式接线；对于一般用户和负荷较小的区域，采用树干式或环式接线。还要综合考虑城市的地形地貌、道路规划等因素，合理确定线路走向，避免线路迂回、交叉，降低线路损耗。

2.2.4 校验与优化

对初步拟定的容量配置方案开展电气参数校验工作，如短路电流计算以及电压降计算等内容，以此保证符合安全与技术方面的要求，短路电流计算可明确设备的短路耐受能力以及保护装置的动作参数，电压降计算可保证用户端的电压质量达到标准，并且从经济性与适应性等层面着手对方案给予优化，借助对比不同方案的投资、运行成本等指标，挑选出最优方案。可运用计算机软件实施仿真分析，模拟不同方案在各类工况下的运行状况，直观地比较各方案的优势与不足，进行优化调整。

2.3 容量配置的注意事项

2.3.1 预留备用容量

为应对负荷的不确定性增长和突发情况，应预留一定比例的备用容量。备用容量的大小需根据城市发展规划、负荷增长趋势等因素合理确定，一般建议预留 10%~20% 的容量。在一些发展迅速的城市新区，由于未来发展潜力大，负荷增长速度快，备用容量可以适当提高；而在发展相对稳定的老城区，备用容量可取下限。

2.3.2 考虑设备寿命周期

在选择配电设备时，要考虑其使用寿命和维护成

本。选择质量可靠、维护方便的设备，降低全寿命周期成本。同时，合理安排设备的更新换代计划，确保配电系统长期稳定运行。不同类型的设备使用寿命不同，如配电变压器的使用寿命一般在 20~30 年，断路器的使用寿命在 10~20 年左右。要建立设备档案，记录设备的安装时间、运行状况、维护情况等，根据设备的实际使用情况，提前制定更新计划^[5]。

2.3.3 关注新技术应用

随着智能电网、分布式能源等新技术的发展，在容量配置中应积极考虑新技术的应用。例如：分布式电源的接入会改变配电系统的潮流分布，在容量配置时需充分考虑其影响，优化网络结构和设备配置。对于接入分布式光伏的配电区域，要考虑光伏电源的间歇性和波动性，合理配置储能设备，提高供电可靠性；同时，要加强对配电系统的监测和控制，实现对分布式电源的有效管理。

3 结束语

城市配电系统作为城市基础设施的关键构成，其规划的科学性与合理性直接关系到城市运行效率与能源策略实施。负荷预测通过整合多维度影响因素，运用定性定量相结合的方法，为配电系统的前瞻性布局提供数据支撑，使电力供应能够动态匹配城市经济发展、人口结构变迁与产业升级需求。容量配置则以负荷预测为基础，在安全可靠的前提下，通过优化设备选型、网络结构设计及全寿命周期管理，实现经济性与适应性的平衡，同时为分布式能源接入等新技术应用预留空间。二者协同作用，不仅提升了配电系统应对负荷波动的弹性，更从根本上推动了城市电力系统向高效、低碳、智能的方向发展，为新型城镇化建设中的能源保障提供了理论与实践路径，对构建安全稳定、可持续发展的城市能源体系具有重要的意义。

参考文献：

- [1] 唐明福. 城市配网规划与建设思路探讨[J]. 智能城市, 2020,06(05):65-66.
- [2] 张祥龙. 基于智能配电网关键技术城市配电网规划探究[J]. 通信电源技术, 2020,37(05):128-129.
- [3] 郭龙, 刘旻, 鲍海泉. 基于智能配电网关键技术的城市配电网规划[J]. 内燃机与配件, 2018(04):223-225.
- [4] 吕超, 吕越. 城市 10kV 居民小区配电规划探讨[J]. 内燃机与配件, 2017(08):148-149.
- [5] 贝斌斌, 唐昕, 何春光. 分析城市电网配电规划问题[J]. 电子测试, 2017(04):126-127.

入厂入炉煤全流程追溯系统构建与热值差管控

刘苏琴

(国电电力发展股份有限公司宣威分公司, 云南 曲靖 655400)

摘要 在火力发电企业生产运营中, 入厂煤与入炉煤的热值差是影响燃料成本控制、锅炉燃烧效率及企业经济效益的核心指标。当前部分发电企业因入厂入炉煤采样、制样、化验环节智能化程度不足, 仍依赖人工操作导致流程不规范, 叠加数据传递脱节、流程监管缺失等问题, 造成热值差超标, 引发燃料浪费与经济损失。本文围绕入厂入炉煤全流程追溯系统构建与热值差管控展开研究, 分析热值差管控现存痛点, 聚焦“智能采样—智能制样—机器人化验—入炉”全流程, 设计“感知层—传输层—平台层—应用层”四层追溯系统架构, 开发适配智能化采制化设备的功能模块, 结合以 0.418 MJ/kg 为核心的热值差管控策略(如动态预警、数据校验、责任追溯), 提出一体化解决方案, 以期为火力发电企业降本增效提供技术参考。

关键词 入厂入炉煤; 全流程追溯系统; 热值差管控; 燃料成本; 火力发电

中图分类号: TM62; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.026

0 引言

燃料成本占火力发电企业总成本的 70%~80%, 入厂煤与入炉煤的热值差能反映燃料质量管控水平, 热值差过大, 会导致煤炭燃烧效能未充分发挥、燃烧效率下降、污染物排放超标。传统入厂入炉煤管理依赖人工, 存在采样代表性不足、数据篡改风险、流程断点等问题, 使热值差管控流于形式^[1]。随着工业互联网技术不断发展, 构建全流程数字化追溯系统并结合热值差动态管控机制是解决问题的关键。本文围绕火力发电企业实际需求, 阐述系统构建思路与管控策略, 助力企业实现入炉煤与入厂煤热值差控制在 0.418 MJ/kg 的标准。

1 入厂入炉煤热值差管控的现存难点

当前火力发电企业在入厂入炉煤热值差管控中, 存在流程不透明、数据不可靠、管控不及时三大难点, 导致热值差超标与成本浪费。

一是采样制样不规范, 煤样代表性不足。入厂煤部分企业未用智能自动采样系统, 采用人工单点采样, 未按标准控制采样深度与子样数量, 入炉煤人工采样易“漏采”“错采”。某企业统计显示, 因采样不规范导致的热值差偏差占比大, 最高单次偏差远超 0.418 MJ/kg 标准。在实际操作中, 人工采样还受采样人员主观因素影响, 如部分人员为缩短作业时间减少子样采集数量, 或因经验不足选择非典型采样区域, 进一步降低煤样代表性, 使得后续热值分析失去参考意义, 直接导致入厂与入炉煤热值计算出现显著偏差。

二是数据传递脱节, 追溯链条断裂。入厂煤传统人工记录易使编号混淆, 入炉煤样缺乏唯一标识, 无法形成闭环对比。部分企业未启用机器人化验系统, 人工录入数据延迟、错误, 影响热值差计算的时效性与准确性, 难以支撑企业管控标准落地。例如: 某发电企业曾因人工录入时将入厂煤热值数据“25.1 MJ/kg”误写为“21.5 MJ/kg”, 导致当日热值差计算结果虚高至 0.83 MJ/kg, 直至次日核对原始单据时才发现错误, 已造成锅炉燃烧参数调整失当, 额外消耗煤炭约 30 吨。

三是管控机制滞后, 偏差处置被动。多数企业月末统计热值差, 属“事后管控”, 无法及时阻断偏差扩大; 缺乏动态预警机制, 入炉煤热值下降时未及时调整参数, 增加燃料消耗。同时, 责任划分模糊, 管控措施难以落地, 难以实现企业管控目标。部分企业虽制定管控制度, 但未明确采样、制样、化验等各环节责任人, 当热值差超标时, 常出现部门间相互推诿现象, 导致问题无法快速定位解决, 延误偏差修正时机, 使月度热值差持续超出 0.418 MJ/kg 标准。

2 入厂入炉煤全流程追溯系统构建

2.1 系统架构设计: “感知层—传输层—平台层—应用层” 四层架构

基于工业互联网技术, 构建“感知层—传输层—平台层—应用层”四层全流程追溯架构, 集成智能采制化设备, 实现煤样信息的实时采集、传输、存储与追溯^[2], 为达成 0.418 MJ/kg 热值差标准提供技术支撑。

1. 感知层: 部署物联网感知设备与智能采制化系

统,实现煤样全环节数据自动采集。入厂煤采样环节,替代传统人工采样,部署智能自动采样机,配备 GNSS 定位模块(记录采样位置)、称重传感器(记录子样重量)、高清摄像头(拍摄采样过程),并为每车煤发放 RFID 电子标签(存储车号、供应商、到货时间),确保采样符合标准规范^[3];制样环节,启用智能自动制样机,安装红外计数器(记录制样次数)、温湿度传感器(监控制样环境),制样完成后为煤样瓶粘贴二维码(唯一编码,关联采样信息),避免人工制样的误差;化验环节,引入机器人化验系统,在量热仪、工业分析仪上安装数据接口,由机器人自动完成煤样抓取、化验操作,化验数据自动采集上传,杜绝人工录入误差;入炉环节,在输煤皮带采样点安装激光识别装置(读取煤样二维码),在锅炉入口安装流量计(记录入炉煤量),实现入炉煤样与燃烧环节的精准关联^[4]。

2. 传输层:采用“5G+工业以太网”双网络传输,确保数据实时可靠。感知层智能设备与机器人化验系统通过 5G 模块(支持边缘计算,低延迟 ≤ 20 ms)将采样视频、称重数据、化验结果等实时传输云端平台^[5];关键数据(如化验报告、入炉记录)通过工业以太网加密传输(采用 SSL 协议),防止数据篡改与泄露;同时设置本地缓存服务器,当网络中断时自动存储数据,网络恢复后自动补传,避免数据丢失,保障 0.418 MJ/kg 热值差计算所需数据的完整性。

3. 平台层:搭建云边协同的数据中台,实现数据整合与统一管理。平台采用分布式数据库(如 Hadoop)存储全流程数据(采样视频、化验报告、入炉记录等),通过数据清洗算法(如剔除异常值、补全缺失值)提升数据质量;开发“煤样唯一编码规则”,编码包含“供应商代码—到货日期—采样点编号—制样批次—入炉锅炉号”18 位字符,确保每个煤样可追溯至全流程环节^[6];同时对接企业 ERP、SIS 系统,实现燃料采购数据(如合同热值、采购量)、锅炉运行数据(如蒸汽参数、燃烧效率)与追溯数据的联动分析,为 0.418 MJ/kg 热值差计算提供完整数据支撑。

4. 应用层:开发面向不同角色的功能模块,满足管控需求。为燃料采购人员提供“供应商煤质分析模块”,展示各供应商入厂煤热值达标率(以 0.418 MJ/kg 差值标准为基准);为化验人员提供“数据录入与校验模块”,自动比对机器人化验数据与历史均值(偏差超 10% 时预警);为生产管理人员提供“热值差动态监控模块”,实时展示入厂入炉煤热值差变化趋势,重点监控是否超 0.418 MJ/kg;为审计人员提供“全流程追溯模块”,输入煤样编码即可查看智能采样视频、

自动制样记录、机器人化验报告、入炉时间等全环节信息,实现“一键追溯”。

2.2 核心功能模块开发:聚焦全流程透明化与可追溯

采样制样监管模块:针对智能自动采样、制样系统,实时监控设备运行与操作规范性。智能采样机未按标准布点时(如单点采样),系统自动触发声光报警;智能制样机若温湿度超标(如湿度 $> 80\%$ 影响煤样水分),自动暂停制样并推送调整建议;采样视频与采样数据(位置、重量)绑定存储,可随时调阅核查,杜绝“虚假采样”,保障煤样代表性,为控制热值差在 0.418 MJ/kg 以内奠定基础。

化验数据管理模块:适配机器人化验系统,实现化验数据自动采集与校验。量热仪等设备的化验结果由机器人自动上传至系统,系统通过“三级校验”(与历史同供应商煤质对比、与同批次其他煤样对比、与标准煤样对比)判断数据合理性,例如:某批次煤样热值较历史均值低 400 kJ/kg 时,自动标记为“异常数据”,触发机器人重新化验并提交说明,避免人为调整数据,确保化验数据准确,支撑 0.418 MJ/kg 热值差计算的可靠性。

入炉关联追溯模块:通过煤样二维码与锅炉入口识别装置,实现入炉煤样与燃烧环节的精准关联^[7]。入炉时,激光识别装置读取煤样二维码,自动记录入炉时间、锅炉编号,并关联至对应的入厂煤样信息(如供应商、采购热值);系统自动计算“入厂煤加权平均热值”(按入厂量加权)与“入炉煤加权平均热值”(按入炉量加权),生成实时热值差曲线,以 0.418 MJ/kg 为管控阈值,偏差超 0.418 MJ/kg 时自动预警。

责任追溯与考核模块:建立全流程责任台账,记录智能设备操作人员(采样设备运维员、制样设备管理员、机器人化验系统操作员)与操作时间,当热值差超 0.418 MJ/kg 时,系统自动回溯全流程数据,分析偏差原因(如智能设备故障、参数设置错误),并生成责任认定报告;将热值差管控指标(月度热值差 ≤ 0.418 MJ/kg)纳入绩效考核,达标时对燃料管理团队给予奖励,超标时按比例扣减绩效,推动责任落实,确保 0.418 MJ/kg 标准落地。

3 入厂入炉煤热值差管控策略

3.1 动态监控与预警:实现“事前预防—事中干预”

基于追溯系统的实时数据,构建以 0.418 MJ/kg 为核心的热值差动态监控与预警机制。设定三级预警阈值:一级预警(热值差 0.418 ~ 0.5 MJ/kg),系统

自动推送预警信息至燃料管理员，提醒核查近期智能采制化设备运行状态与煤样数据；二级预警（0.5～0.6 MJ/kg），触发部门级会议，分析偏差原因（如是否为新供应商煤质波动、智能设备参数漂移）；三级预警（> 0.6 MJ/kg），启动应急响应，暂停该批次煤入炉，通过机器人化验系统重新采样化验。同时，开发“热值差预测模型”，基于入厂煤质趋势（如连续3天热值下降）与锅炉运行数据（如燃烧效率降低），预测未来24小时热值差变化，提前调整采购策略（如增加优质煤采购）或燃烧参数（如提高炉膛温度），实现“事前预防”，确保热值差稳定在0.418 MJ/kg以内。

3.2 全流程偏差分析：精准定位问题环节

当热值差超0.418 MJ/kg时，通过追溯系统开展全流程偏差分析：首先核查智能采样环节，调阅采样视频与设备运行日志，判断是否存在采样设备故障（如称重传感器失准）；其次核查智能制样环节，查看制样温湿度记录、设备运行参数与煤样粒度（未按标准破碎至0.2 mm），判断是否影响煤样代表性；再核查机器人化验环节，对比同批次煤样化验数据、机器人操作日志，判断是否存在设备校准偏差、试剂失效；最后核查入炉环节，查看入炉煤样与入厂煤样的关联是否准确（如二维码识别错误）^[8]。例如：某发电企业通过该方法，发现某次热值差超标（0.64 MJ/kg）源于机器人化验系统试剂过期，更换试剂后重新化验，热值差降至0.38 MJ/kg，符合0.418 MJ/kg标准。

3.3 供应商协同管控：从源头降低热值偏差

基于追溯系统的供应商煤质数据，建立“供应商煤质信用评级体系”，评级指标以0.418 MJ/kg热值差标准为核心，包括入厂煤热值达标率（合同热值±0.2 MJ/kg为达标）、热值稳定性（标准差≤0.3 MJ/kg）、偏差整改及时性，评级分为A、B、C三级，A级供应商可享受优先付款、增加采购量等优惠，C级供应商暂停合作。同时，与核心供应商共享追溯系统中智能采制化数据（如采样化验结果），邀请供应商参与煤质偏差分析，共同制定改进措施（如供应商优化煤炭洗选工艺），从源头降低入厂煤质波动，减少热值差，助力企业稳定控制热值差在0.418 MJ/kg以内。

3.4 存储环节管控：减少煤质损耗引发的热值偏差

入厂煤存储环节的煤质变化易被忽视，却是导致热值差超0.418 MJ/kg的重要因素。煤炭长期堆放易受雨水浸泡、风力扬尘影响，出现水分升高、挥发分流失等问题，直接造成入炉煤热值降低。基于全流程追溯系统，需在储煤场增设多维度监测设备：在煤堆不同区域布设水分传感器与温度传感器，实时采集煤

堆内部温湿度数据，当水分超12%或温度超35℃时，系统自动推送预警信息，提醒运维人员启动防雨棚遮盖或通风散热措施；在储煤场出入口安装红外识别装置，记录煤炭入堆、取料的时间与位置，结合“先进先出”取料原则，通过系统弹窗提示铲车司机优先取用早期入堆煤炭，避免长期存放导致的热值损耗。同时，将存储环节数据纳入热值差计算体系，系统自动关联入厂时煤样热值与存储后的入炉煤样热值，量化存储损耗对热值差的影响（如某批次煤存储7天后热值下降0.15 MJ/kg），为优化存储周期（建议单堆存储不超15天）提供数据支撑，进一步保障热值差稳定控制在0.418 MJ/kg以内。

4 结束语

入厂入炉煤全流程追溯系统通过“感知层智能采制化设备自动采集、传输层安全传输、平台层数据整合、应用层功能支撑”，实现煤样全环节透明化与可追溯；结合以0.418 MJ/kg为核心的动态预警、偏差分析、供应商协同等管控策略，可有效降低入厂入炉煤热值差，提升燃料管理精细化水平。未来，可进一步融合AI技术，开发“智能热值预测模型”，基于入厂煤质、存储时间、天气条件预测入炉煤热值；同时探索区块链技术应用，实现煤样数据的不可篡改存储，进一步提升追溯数据的公信力，为火力发电企业稳定达成0.418 MJ/kg热值差标准、强化燃料成本管控提供更先进的技术方案。

参考文献：

- [1] 张向丰. 物联网和大数据技术的供应链产品全周期可追溯查询方法[J]. 物联网技术, 2025, 15(16): 104-106.
- [2] 贾甜. 浅析基于模型的系统工程数据驱动与追溯[J]. 中国设备工程, 2025(15): 151-152.
- [3] 周晓辰. 省级追溯平台与国家追溯平台数据标准化应用现场会在四川宜宾召开[N]. 中国食品安全报, 2025-08-09(C01).
- [4] 戴升宝. 联动机制形成合力数据归集全程追溯[N]. 济南日报, 2025-07-10(004).
- [5] 丁伟平, 刘宏军, 张亚强, 等. 锅炉入炉煤质在线监测系统技术研究[J]. 中国机械, 2024(07): 80-83.
- [6] 袁芳, 卢艳, 宋悦谦, 等. 特殊物品追溯编码技术研究及应用[J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2025, 48(04): 394-398.
- [7] 黄舜霞, 陈广, 李艺伟. 基于区块链的检验标本全流程追溯设计与实践[J]. 中国数字医学, 2025, 20(07): 31-37.
- [8] 牛祥, 刘雨. 山西柳林煤矿有限公司总工程师刘彦武: 设备台账不可少, 须“全流程、可追溯”[N]. 中国煤炭报, 2025-04-26(003).

火力发电厂煤炭质量化验影响因素及其改进措施分析

王飞丽¹, 徐璐璐², 付裕², 付国钰², 黄婷²

(1. 云南滇东雨汪能源有限公司, 云南 曲靖 655508;
2. 华能云南滇东能源有限责任公司, 云南 曲靖 655508)

摘要 在火力发电厂煤炭质量化验过程中,为解决火力发电厂煤炭质量化验结果不准确而导致配煤方案不合理、锅炉效率降低、污染物排放超标及威胁安全生产等问题,本研究针对影响煤炭质量化验的因素进行了详细分析,指出了目前在样品采集与制备、仪器设备等关键环节存在的问题,提出了优化样品采集与制备流程、强化仪器设备管理等防范措施。研究表明,本文提出的改进措施能够有效提升煤炭质量化验准确性,降低运维成本,为火力发电厂燃料管理及安全经济运行提供有益参考。

关键词 火力发电厂; 煤炭质量化验; 工业分析; 发热量

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.027

0 引言

火力发电厂煤炭质量化验主要内容是工业分析(工分,即水分、灰分、挥发分)、发热量、水分、全硫等项目,也是实际工作中重点检测的项目。而火力发电厂配煤需参考的化验结果受到很多外界因素影响,如果检测的数据不够准确,会导致配煤方案不合理,锅炉效率降低、污染物排放超标、导致设备磨损或者产生结渣、严重威胁到安全生产等问题。因此,对影响这几项重要化验指标化验过程的因素进行解析,并根据实验情况探索相应的改进措施,能够提高火力发电厂燃料管理工作的质量,保证机组的安全经济运行。

1 火力发电厂煤炭质量化验作用

1.1 为燃料采购提供依据

燃煤质量化验结果(工业分析、发热量、全硫)作为火电厂燃料采购的主要参考,通过对其取样化验分析获得的结果能有效地判断出煤炭的质量及用途。例如:通过比较不同质量的煤炭价格,以及其与锅炉燃烧的适应性差异,最终利用火电厂的燃料采购数据选择性价比更高的燃料,以达到减少发电厂燃料采购费用的目的^[1]。

1.2 指导锅炉燃烧调整

煤炭的质量特性影响着锅炉的燃烧,发热量大小决定着煤炭燃烧后产生的热量大小。而水分含量影响着燃烧效果及炉膛温度,全硫含量关系到污染物排放

是否达标。而通过煤炭质量化验,能根据煤炭质量检验所得到的各种指标值,操作人员能依据数据调节锅炉的送风量、给煤量、炉膛温度,从而提高燃烧效率,节约能源消耗。

1.3 保障环保达标排放

随着环保法规要求越来越严格,火电厂污染物排放监管力度越来越大。通过检测煤炭全硫含量,可以提前知道燃煤燃烧后的二氧化硫排放情况,比如通过调配脱硫剂的使用量来使二氧化硫达到达标排放,或提前介入脱硫工序的调整。

2 煤炭质量化验影响因素分析

2.1 样品采集与制备对各指标的影响

第一,样品采集的代表性不足对工分、水分等指标影响。对于运输和储存中的煤炭而言,存在分层、离析等情况发生,其中水分分布不均的现象比较普遍。由于采样点选取不合理、采样数量不够多或者采样方法不符合规范要求等原因,采取的样品不可能全面代表该批次煤炭的质量情况。第二,样品制备过程中的污染影响全硫和工分测定。在样品破碎、研磨、缩分等制备过程中,如果设备没有清理干净,很容易残留上次样品的残粉,将会污染本次样品。因为测试的是全硫含量指标,如果该残留物含有较高的硫份,那么测得结果就会偏高;同样,在工业分析中测定灰分时,如果带入了外来杂质,会使灰分的测定结果产生偏差^[2]。

第三，样品制备的粒度和均匀性不符合要求影响发热量等指标。不同的化验项目对样品的粒度有不同的要求，测定发热量时，样品粒度较大会导致燃烧不完全，使测定结果偏低。

2.2 仪器设备对各指标化验的影响

第一，仪器设备的精度不足影响关键指标。仪器设备的精度不足会导致实验结果与真实值有差距。测定发热量的量热仪、测定全硫的测硫仪以及进行工业分析的马弗炉等仪器，其精度直接影响化验结果。比如：量热仪不够精准，就会影响到发热量测量值的准确性，测硫仪的精度不够就会造成全硫含量测定的误差，马弗炉不能很好地控制温度，也会导致工业分析中灰分和挥发分的测量值误差。第二，仪器设备校准不及时导致数据偏差。仪器设备在使用的过程中，通常在受到环境变化、部件磨损等影响之下，它的性能就会出现偏差。例如，测硫仪若校准如果操作不当，那么就会导致全硫含量的测定结果出现生高或者下降的情况。第三，仪器设备维护保养不到位影响化验。火力发电厂煤炭质量化验的过程中，量热仪氧弹密封不好，会造成热量的损失，使发热量测定值偏低。同时如果测硫仪的电解池保养不到位，将直接影响全硫测定结果。例如：马弗炉的炉门密封不好会使得炉内的温度分布不均匀，从而导致工业分析的各项指标不能准确地测定^[3]。

2.3 操作规范对各指标的影响

第一，操作人员的技能水平差异导致结果不一。火力发电厂煤炭质量化验时，如果操作人员操作技能较差，他们掌握化验方法和操作规程不够扎实，在测水分过程中可能出现加热温度过高或时间过长的现象，使水分蒸发过多或不足。同时，由于发热量测定时若操作人员针对充氧的压力、时间达不到规程的要求，就会有产生燃烧不充分现象，导致结果偏差。第二，操作过程中的细节把控不严影响数据。火力发电厂煤炭质量化验阶段，在称样时如果天平未校准好、称速过慢使样品失水或吸湿，则样品水分含量低时更严重。同时，在全硫的测定中如果试样没有完全燃烧，则结果会偏低，而在工业分析中坍塌处理不好会影响灰分的测定结果。第三，数据记录和处理不规范影响结果。操作人员在化验过程中，由于操作人员在化验过程中没有做好相关的数据记录或记录的数据不正确，以及在处理数据时出错，致使最后的化验结果发生错误。同时在火力发电厂煤炭质量化验过程中，如果操作人员进行平行试验时若未正确处理异常值，尤其是发热量、全硫等精度要求较高的指标，那么试验的结果也会受到严重的影响^[4]。

2.4 环境条件对各指标的影响

第一，温度的影响。温度变化对水分测定有较大的影响，温度过高样品水分会加快蒸发，温度过低会使蒸发不全。对量热仪等仪器来说，温度的波动会影响到仪器本身的稳定状态，影响到发热量的测定值。第二，湿度的影响。环境湿度过大时，煤样容易吸收空气中的水分而导致测定水分偏高，会影响工业分析中其它项目的计算。而在环境湿度过小时，煤样中的水分易挥发而造成测定水分偏低。另外湿度还会造成天平灵敏度降低，影响各项指标的称量。第三，气压的影响。气压不同则燃烧的反应及放出的热量有差异。若在气压较低的地方，氧气分压较低，煤炭不容易完全燃烧，测定的发热量低。而在气压较高的地方，燃烧过于剧烈也会造成测定误差。

3 火力发电厂煤炭质量化验改进措施

3.1 优化样品采集与制备流程

第一，规范样品采集方法。火力发电厂煤炭质量化验时，需结合煤量和存储位置、方式等因素，制定科学合理的采样方案，确保采样点分布均匀、采样数量满足要求，要充分考虑到煤湿的分布不均等问题。对煤堆采样，采用分层、多点取样的方法，分别从煤堆的不同深度和部位取样；对在途运煤，要选取不同车厢、不同部位进行采样，同时使用专用的采样工具，防止采样时出现样品损失及样品污染的问题^[5]。第二，加强样品制备过程的质量控制。样品制备前应对所有的仪器进行全面清理，将上一次留下的样品和杂物等都清理干净，防止对其它测定时全硫、工业分析数据造成污染。在破碎、研磨过程中，需根据不同的测定时选用适当的破碎、研磨设备和参数，并且使样品的粒度能够满足不同指标的测定需要，对于发热量的测定其样品粒度需满足相关规定。第三，建立样品管理追溯体系。火力发电厂煤炭质量化验阶段，需按照规则，对采集样品进行编号和标样，并详细记录样品的来源、采集时间、采集地点和与各种指标相关的采样环境。同时，做好样品的运输、存放、制备等交底记录，以保证样品的可追溯性。此外合理控制储存条件（如温度、湿度等），以免样品储存时发生质量变化，影响相关指标的测定。

3.2 强化仪器设备管理

1. 定期对仪器设备进行校准和检定。火力发电厂煤炭质量化验过程中，做好仪器设备进行校准和检定是确保参数精确的基础。因此，需依据相关的标准与规定制定仪器设备的校准计划，并根据各类仪器制定

不同的校准周期, 保证仪器设备的精度及性能均满足化验要求, 相关仪器设备校准周期要求如表 1 所示。

表 1 相关仪器设备校准周期要求

仪器设备	校准周期	关键参数
量热仪	每 3 个月	发热量
测硫仪	每 1 个月	全硫含量
马弗炉	每 6 个月	温度
烘箱 (水分测定)	每 1 个月	温度
天平	每 1 个月	称量质量

2. 加强仪器设备的日常维护保养。火力发电厂煤炭质量化验仪器设备的日常维护需要做到细致化, 一般而言, 可建立仪器设备维护保养台账, 列出具体维护保养项目、周期、负责人的清单, 并按计划开展维护保养工作、而对于量热仪定期检查并维护氧弹、搅拌器等部件, 使其保持良好的密封性及正常的工作状态。同时, 定期清洁测硫仪的电解池、燃烧管等处, 保证全硫测定的准确度。另外, 合理配置和更新仪器设备。针对化验工作需求, 选用准确度和稳定性较高的仪器设备完成各项指标测定。对于使用年限较长、性能下降的仪器设备, 及时进行更新换代, 避免因设备老化而影响化验结果的准确性。

3.3 规范化验操作行为

第一, 加强操作人员培训和考核。制定完整系统的培训计划, 对工业分析、发热量、水分、全硫等指标的测定方法以及操作规程进行培训, 并且定期组织操作工人的专业知识及操作技能的专业培训。在培训内容方面需要详细地做好采制备方法、相关的仪器设备的使用及维护保养、内容确定。第二, 制定详细的操作细则。针对每个化验项目都要制订详细的操作细则, 规定每个项目的具体操作步骤、注意事项、质量控制要求。例如: 水分测定需要明确样品称量数量、加热温度、加热时间等参数。在发热量测定中, 发需要规范氧弹充氧的压力、燃烧皿的选择。在全硫测定中, 规范试样称量、燃烧条件。第三, 加强操作过程中的质量监督。火力发电厂煤炭质量化验阶段, 可设立质量监督员对各个指标化验操作的过程全部进行监督检查, 一旦质量化验出现异常时, 则及时进行纠正。另外还要定期抽查化验结果, 并且要抽查平行样的测定值是否符合要求。

3.4 改善化验环境条件

第一, 控制化验室的温度和湿度。火力发电厂煤炭质量化验阶段, 结合实际情况做好化验室的温度和

湿度。一般来说, 可给化验室安装温湿度控制系统, 将化验室温湿度分别控制在 15 ~ 30 °C 之间、40% ~ 70% 之间, 对温湿度敏感的化验项目或仪器设备 (如水分测定、量热仪等) 应设置单独的恒温恒湿区域。同时, 定期对温湿度进行监测和记录, 及时调整温湿度控制系统, 保证环境条件符合化验要求, 减少对各指标测定的影响。第二, 保持化验室的清洁。建立化验室卫生管理制度, 经常对化验室进行清洁和消毒, 保持化验室内环境的整洁, 防止杂质污染样品, 影响工业分析和全硫等的测定。避免在化验室内做一些与化验无关的事情, 尽量不要让过多人员在室内走动, 尽量保持室内安静。另外, 要合理布局化验室内的设备及设施, 使其布局合理, 留有足够的操作空间, 确保室内通风良好, 有利于仪器设备散热与维护检修。第三, 应对气压变化的影响。对于发热量等受气压影响较大的化验项目, 在仪器中安装气压补偿装置, 实时监测气压变化, 并对测定结果进行自动校正。同时, 在化验报告中注明测定时的气压条件, 以便对化验结果进行分析和比较。定期检查气压补偿装置的性能, 确保其正常工作, 提高化验结果的准确性。

4 结束语

煤炭质量化验的工业分析 (工分)、发热量、水分、全硫等指标均是火电厂燃料管理的工作重点, 而火力发电厂安全经济运行和环保达标排放直接取决于检验的结果。在火力发电厂煤炭质量化中, 应当根据工作需求与工作特点, 完善煤炭质量化验质量控制体系, 并在此基础上加强对工分、发热量、水分、全硫等重要参数化验过程的管控力度, 从而更好地保证检验数据的真实性和有效性。

参考文献:

- [1] 韩菊. 煤质化验对提高煤炭质量的作用 [J]. 化学工程与装备, 2021(04):218-219.
- [2] 高鑫. 基于煤质化验对提高煤炭质量的作用分析 [J]. 山西化工, 2021, 41(04):143-144, 149.
- [3] 李向娟. 煤炭化验的质量影响因素与应对措施 [J]. 化工管理, 2021(31):9-10.
- [4] 薛菲菲. 利用煤质化验工作提高煤炭质量的研究 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(06):123-125.
- [5] 郑嫚. 影响煤炭质量化验因素及其改进措施分析 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024(08):8-10.

一体化预制污水泵站在城镇污水系统中的设计应用研究

黄慧玲

(珠海市斗门区水资源和水质监测中心, 广东 珠海 519000)

摘要 本研究聚焦一体化预制污水泵站在城镇污水系统中的创新设计与工程应用, 通过模块化集成工艺优化泵站结构配置, 突破传统污水泵站占地大、施工周期长的技术局限。研究揭示了该系统的核心优势: 采用轻质耐腐蚀复合材料构建筒体单元, 整合智能液位调控与冗余控制模块, 形成集预处理、加压输送及远程监控于一体的智慧化解决方案。针对景区防洪排涝的典型案列, 论证了双站串联架构的运行效能, 提出六级调峰控制策略, 在确保系统可靠性的同时实现高效能排水。研究结果可为城镇污水系统升级提供实践参考。

关键词 一体化预制污水泵站; 城镇污水系统; 主体参数设计; 泵站运行

中图分类号: X52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.028

0 引言

随着城镇化进程的加速, 传统污水泵站在空间效率、运维成本等方面的不足日渐凸显。一体化预制泵站凭借集约化设计理念, 将流体动力优化、材料工程创新与智能控制技术深度融合, 为城镇排水体系建设开辟了新的技术路径。其核心价值不仅体现在工厂预制带来的施工效率提升, 更在于通过流态模拟与结构力学重构, 形成适应复杂工况的稳定排水体系。本研究系统阐述了该类泵站的原理与设计方法, 结合工程实证揭示了其在降低土建造价、强化抗腐蚀性能及提升应急排水能力等方面的技术突破, 为新型城镇化背景下的污水系统优化提供创新思路。

1 一体化预制污水泵站的结构与原理

1.1 一体化预制污水泵站组成

一体化预制污水泵站作为集成化处理单元, 其主体结构由高强度筒体构成, 内置潜污泵、粉碎格栅等核心设备。系统配置液位监测装置实现液位控制, 配套进出水管道及控制阀门完成介质输送, 并配备智能控制柜和强制通风系统保障运行安全。

1. 筒体作为集成式泵站的核心承载单元, 兼具污水收集与设备舱功能。该结构采用轻质高强耐腐蚀材质制造, 通过多层复合构造形成完善的防护体系, 包含防腐隔离层、防渗屏障层、承力结构层及外防护面层。

2. 潜污泵作为核心动力单元, 由泵壳总成、叶轮组件、进水端盖、电缆密封装置及动力传动轴构成成套设备。机组采用预置式安装工艺, 依托筒体内预装

的耦合基座与导滑轨系统, 在主体结构就位后实施快速对位装配, 实现泵体与支承系统的精确匹配。

3. 格栅装置配置篮式拦截格栅与旋转粉碎格栅两种模式, 依据介质特性与运行需求进行选型适配^[1]。该单元作为固态污染物阻截装置, 通过周期性清理维护实现泵组流道与进出水口的工况稳定, 构成泵站长效运行的核心保障体系。

4. 液位监测系统采用静压传感元件或浮球式变送器进行连续液位追踪, 其动态液位信号实时传输至中央控制单元。该信号作为潜污泵运行指令的触发依据, 通过智能算法生成调节参数, 联动控制系统执行启闭程序, 形成完整的液位—泵组联动运行机制。

5. 流体输送单元配置不锈钢材质输水管路, 配套法兰连接件与调节装置均选用同系耐蚀合金。泵组出口侧配置防逆流机构, 形成闭锁式止回装置, 有效隔离介质逆流风险。

6. 智能控制柜采用电力驱动型控制架构, 集成传感单元与PLC控制模块实现自动化管理。系统配备物联网接口支持远程工况监测, 内置数据采集单元实时记录水泵运行频次与累计时长, 构建可视化人机交互式监控平台。

1.2 一体化预制污水泵站工作原理

一体化泵站污水处理体系虽与常规净化工艺存在共性, 但其集成化结构特性赋予处理流程差异化特征。处理单元涵盖混凝反应、固液分离、过滤截留及灭菌处理四个核心环节: 首阶段混凝处理单元通过投加定量混凝剂, 在机械搅拌装置作用下实现污水均匀混合,

促使悬浮物形成絮凝体。次阶段固液分离在沉淀池内完成，絮凝体在重力作用下实现水相与沉淀物有效分层。分离后的澄清水体经三级过滤净化系统处理，多级梯度截留残余微粒物质。终端消毒灭菌单元采用氯系或紫外辐射方式杀灭病原微生物，处理达标水体可回用至生活供水系统。

1.3 一体化预制污水泵站的特点

一体化泵站通过计算流体力学优化底部流态设计，构建异型防淤结构。该装置在泵组启停阶段形成局部湍流效应，实现坑底沉积物的动力扰动自清除，显著降低清淤作业频率。装置核心优势具体表现为：采用模块化预制工艺显著缩短施工周期，预装组件到场后仅需实施吊装作业，实现最小化土建施工量。设备具备显著经济性，较传统混凝土泵站全生命周期成本优化约 20%。智能远程监控系统支持全参数云端调控，实现无人值守运维模式，配备故障预警机制有效降低人工巡检强度^[2]。冗余控制架构内置双路应急操作模块，当主控系统失效时可启用物理控制回路。核心加压装置在出厂前均完成 48 小时带载测试，满足现场即插即用要求。

2 一体化预制污水泵站与传统污水泵站对比

相较传统泵站结构，一体化泵站显现出多维度技术优势：一体化泵站采用模组化预制工艺，占地面积缩减至常规泵站的 30%~40%。整体结构抗腐蚀性能优异，专用高分子材料筒体可耐受 pH2-11 的化学侵蚀。云端监控系统支持无人值守模式，施工现场仅需执行吊装作业，工程周期较传统工法缩短 70%。传统泵站依赖现浇混凝土结构，施工周期包含 28 天养护阶段。混凝土基体易受酸性介质侵蚀产生结构性裂缝，维护成本占全生命周期费用的 35%。设备安装需同步实施土建工程，机电联调耗时长达 15~20 天，综合建设成本较一体化方案提升 40% 以上。

3 一体化预制泵站设计案例

本研究针对旅游景区防洪排涝需求开展一体化泵站专项设计论证。该装置配置 1 m³/s 排水能力工况参数，专用于暴雨期间园区管网内涝水的快速处置，通过双泵组并联运行实现雨水的连续加压导排。系统对接园区智慧水务平台，具备流量峰值预警与自动启停功能，使收集雨水经压力管网高效输送至泄洪干渠，构建景区内涝防控与水资源循环利用的集成化解决方案^[3]。

3.1 主体参数设计

1. 管径配置。接驳管网采用 DN800 碳钢管实现雨污传输，泵站内部设置 DN250 流体通道形成压力梯

度。双泵站串联架构确保系统冗余，基础标高设定为 552.23 m，进水管管底高程 548.485 m 与出水管高程保持一致。

2. 泵组选型。配置 FYPS-3000 型双站串联系统，每站集成 3 台 250WQ600-15-45 型潜水排污泵。单泵技术参数：流量 Q=600 m³/h，扬程 H=15 m，功率 N=45 kW。水位控制策略：（1）停泵水位：544.73 m；（2）一泵启动：545.93 m；（3）双泵联动：547.13 m；（4）报警水位：548.485 m（三泵全启）。

3. 扬程计算：

静扬程公式：

$$H_{st}=H_{max}-H_{min}=555.021\text{ m}-544.73\text{ m}=10.291\text{ m} \quad (1)$$

总水损方程：

$$\Sigma h=h_{外部}+h_{内部}+h_{设备}=1.5\text{ m}+1\text{ m}+2\text{ m}=4.5\text{ m} \quad (2)$$

水泵总扬程：

$$H_{total}=H_{st}+\Sigma h=14.791\text{ m}\approx 15\text{ m} \quad (3)$$

4. 筒体计算。按《室外排水设计规范》GB50014 执行有效容积计算：

$$V_{min}=\frac{Q}{4Z_{max}}=\frac{600\text{ m}^3/\text{h}}{4\times 6\text{次}/\text{h}}=25\text{ m}^3 \quad (4)$$

筒体几何参数：

直径 D=3.0 m

有效水深：

$$H_w=\frac{V}{\pi r^2}=\frac{25}{3.14\times 1.5^2}\approx 3.54\text{ m} \quad (5)$$

总高度计算：

$$H_{total}=(552.23-548.485)+0.5+1+0.2=9.0\text{ m} \quad (6)$$

5. 预处理单元。进水口配置粉碎式格栅装置，栅隙参数依据 FYPS 系统标准配置，有效截留固体污染物粒径 ≥ 20 mm^[4]。

3.2 泵站运行

雨污水流经破碎式格栅预处理单元完成固液分离后，首先导入 1 号泵站集水腔体。当液位达到初级阈值 545.93 m 时，1 号站首台潜污泵组启动作业，同步向 2 号站实施分流导排。液位上升至 547.13 m 时，2 号站启动首台机组进入并联运行阶段，两站形成协同排水模式。当液位达到 548.485 m 警戒值时，六台机组全负荷运行，瞬时排水能力达到设计峰值 3 600 m³/h，形成三级梯度压力排水体系。

3.3 技术方案集成

该系统采用双站串联架构，泵站基础平台高程为 552.23 m，配套 DN800 进/出水管件，管底通流高程统一设定为 548.485 m，站内设置 DN250 增压管路形成

压力梯度。核心配置六机联排无后备机组，单机参数为 $Q=600\text{ m}^3/\text{h}$ ， $H=15\text{ m}$ ，运行水位调控区间 $543.23\sim 548.485\text{ m}$ ，有效容积 24.98 m^3 ，对应筒体直径 3.0 m 时的水位差 $\Delta H=3.54\text{ m}$ 。

设备规格选用FYPS-3000-90-3型预制泵站单元，单站结构参数： 3.0 m 直径 $\times 9\text{ m}$ 高密度筒体，集成3台250WQ600-15-45型高扬程潜污泵组，单机轴功率 45 kW 。系统通过液位—流量的函数关系实现六级调峰运行，配套智能联控模块及流体监测单元由制造商整体配套供应，形成完整的压力排水解决方案。

4 一体化预制污水泵站核心设计准则与实施要点

4.1 场地选址与地质评估

泵站选址优先选择市政规划预留的生态缓冲区或次级交通影响区，确保距主干道 $\geq 50\text{ m}$ 安全距离。地质勘察需包含标准贯入试验、静力触探等原位测试，明确地基持力层特性：（1）地基承载力特征值 $\geq 100\text{ kPa}$ （参照《建筑地基基础设计规范》GB50007）；（2）地下水位埋深 $> 3\text{ m}$ 区域优先；（3）避开断层破碎带及填方区等不良地质。特殊地形需进行三维地质建模，分析地震加速度参数（按《建筑抗震设计规范》GB50011要求）。软土地基采用CFG桩复合地基处理，处理深度按沉降计算确定^[5]。

4.2 水力系统参数精细化设计

1. 设计流量计算。采用芝加哥暴雨公式推算径流量：

$$Q = \psi \cdot i \cdot A \quad (7)$$

式（7）中， ψ 为径流系数（商业区取 0.85 ，绿地取 0.15 ）； i 为暴雨强度（按当地 50 年重现期）； A 为汇水面积。

2. 泵组配置方案。遵循 $N+0$ 备用原则（ $N \geq 2$ ），单泵流量按：

$$q = \frac{Q_{design}}{n} \cdot K_s \quad (8)$$

式（8）中， n 为运行泵数， K_s 为 1.2 水力波动系数。

3. 筒体有效容积计算。按照《室外排水设计标准》GB50014规定：

$$V_{eff} \geq \frac{Q_{max}}{4Z_{max}} \quad (9)$$

式（9）中， Z_{max} 取 $4\sim 6$ 次/h启停频率，确保调节容积满足 15 min 暴雨延迟需求。

4.3 压力管网优化设计

1. 管径经济流速验证。采用达西—魏斯巴赫公式校核：

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (10)$$

式（10）中，控制 $v \in [1.0, 2.5]\text{ m/s}$ 区间， $D=800\text{ mm}$ 时经济流速取 1.8 m/s 。

2. 水锤防护措施。压力主管道设置缓闭止回阀，水锤消除器安装间距 $\leq 200\text{ m}$ ，依据：

$$\Delta P = \rho a \Delta v \quad (11)$$

式（11）中，水锤波速 a 取 1200 m/s ， $\Delta v \leq 0.3\text{ m/s}$ 。

4.4 智能控制系统集成

配置SCADA监控系统实现：（1）液位三重保护（超声波+压力式+浮球冗余测量）；（2）设备健康诊断（振动监测 $< 4.5\text{ mm/s}$ ，轴承温度 $< 85\text{ }^\circ\text{C}$ 预警）；（3）能耗优化模块自动调节泵组组合，匹配管网特性曲线。历史数据存储周期 ≥ 5 年，支持OPC UA协议与智慧水务平台对接。该设计体系通过数值模拟（CFD流场分析、FEA结构计算）与实体试验双重验证，确保系统可靠性指标MTBF ≥ 10000 小时，综合能耗比传统泵站降低 25% 以上，满足《城镇排水泵站工程技术标准》CJJ/T285的A级评定要求。

5 结束语

一体化预制污水泵站作为城镇污水体系革新的重要载体，其技术发展深刻体现了现代市政工程向集约化、智慧化转型的发展趋势。本研究通过理论解析与工程实证的双重路径，验证了模块化设计在提升系统稳定性、优化能耗指标方面的显著优势。未来研究应进一步探索材料复合技术的突破，深化人工智能在泵群协同控制中的应用，同时推动行业标准化体系的完善。这种新型排水设施的成功实践，不仅为城市内涝治理提供了可靠的技术方案，更为实现绿色基础设施建设目标奠定了重要的技术基础。

参考文献：

- [1] 况旺,杜红飞.一体化预制泵站应用于市政道路地下通道案例分析及探讨[J].城市道桥与防洪,2024(10):167-169,213,22.
- [2] 肖江,冉思红.一体化预制泵站的应用及设计要点[J].城镇供水,2024(01):30-33,61.
- [3] 王佰虎.一体化预制污水泵站在市政污水系统中的设计应用[J].工程与建设,2023,37(04):1184-1186,1318.
- [4] 区有成.浅谈一体化污水泵站设计[J].科学技术创新,2023(20):44-47.
- [5] 季丽莎.一体化污水预制泵站:CN202123271593.X[P].2022-06-24.

进度管理在建筑管理中的应用

宋宇琛

(广东粤电石碑山风能开发有限公司, 广东 揭阳 515200)

摘要 进度管理作为建筑管理中的核心环节, 其作用不仅体现在对时间维度的控制, 更在于对资源配置、风险防范与质量保障的全方位统筹。通过科学编制进度计划、动态监控施工过程、强化资源调配、建立风险预警及优化沟通机制, 有助于避免工期拖延、成本超支和资源浪费等问题。本文从建设单位的角度出发, 探讨进度管理在建筑工程中的应用策略, 旨在为相关项目提供具有实践价值的参考。

关键词 建筑工程; 进度管理; 计划编制; 资源配置机制; 风险防控体系

中图分类号: TU722

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.029

0 引言

建筑工程常涉及多学科、多工种和多阶段的复杂协作, 其进度管理水平直接关系到项目能不能顺利完成。对建设单位而言, 进度控制是确保工期按时完成的必要条件, 同时也是控制工程成本、保障施工质量降低风险的重要保障。所以, 进度管理已经成为贯穿工程始终的系统性工作, 其科学性、合理性对工程建设能否高效顺利完成有着很大影响。

1 建筑工程进度管理概述

建筑工程项目进度管理贯穿整个工程的生命周期, 是一项系统性工作, 其中包含对工期的把控、计划编制、执行落实以及后续的动态调整等一系列过程^[1]。建设单位在实际操作中, 需将进度、成本、质量、风险等要素统筹考虑进去, 毕竟工期延误, 资金就可能超支, 资源可能闲置, 施工质量就会下降, 质量问题的积累又会反过来拖慢施工节奏, 形成恶性循环。工程进度受政策变化、极端天气以及原材料供应波动等外部环境的影响, 这就使得原有安排不得不重新调整。要让进度在可控范围内, 就需建立科学合理的管理标准与量化指标, 让管理者能直观地找出施工流程和关键环节, 管理者就能通过对比数据, 及时发现偏差并做出调整。可以说, 进度管理的本质就是把科学方法与数据工具相结合, 让建筑工程在复杂多变的内外部情况下进行协调统一, 确保项目按时、高效交付。

2 建筑工程进度管理的改进空间

2.1 计划编制的精细化需求

在建筑工程中, 计划编制始终是进度管理的关键环节之一。虽然在开工前大多项目都有总体进度规划, 但规划的细化程度、科学性及动态适配性等方面, 还

有很大的提升空间。例如: 有些施工环节的工序衔接没有预留缓冲余地, 外部环境出现变化时, 基本没有调整余地。也有部分计划较为笼统, 关键工序和节点不够细化, 很难真正起到指导作用。随着 BIM、大数据等数字化工具的普及, 计划编制可以在前期凭借仿真模拟、历史数据分析等方法, 得到更精准的数据支持, 进而实现工序间的合理衔接与科学分解^[2]。这种精细的编制, 不仅能防止工期太紧或者太松, 还能在工程推进中为后续的动态调整提供科学依据。并且, 合理的计划编制需兼顾人力资源供给、物料采购周期、气象条件等多方面因素, 才能真正达到“全过程覆盖、全要素纳入”的目标。只有这样, 计划才能在实施阶段体现出真正的指导性和前瞻性, 保证工程进展稳定而有序。

2.2 资源配置机制的优化方向

资源配置对工程施工顺利开展而言具有重要的保障作用。在当下工程管理实践中, 人力、设备及物资的调配, 虽说基本能满足施工需求, 但离“精准匹配、动态平衡”的目标还存在着明显差距。例如: 在人力方面, 施工单位常靠经验来配置, 缺少对项目规模和阶段性任务的精确预测。在物资方面, 材料储备与现场消耗偶尔存在供需不平衡的状况, 致使部分环节推进受阻。机械设备管理也有不到位之处, 有些设备闲置, 有些设备却不够用。智能调配系统与物联网仓储技术的逐步应用, 能让资源配置会更科学、更透明, 人力供给、物资保障和机械设备运转能动态匹配, 施工过程也会更高效、更顺畅。在大体量或者跨区域项目中, 建设单位应构建多层次资源整合平台, 在突发状况下迅速调配资源, 降低局部失衡产生的整体进度风险。

2.3 多方协作的提升需求

建筑工程有设计、施工、监理、建设等多方参与主体，在进度管理中，如何在多元协作中高效传递信息、快速决策，是亟需进一步优化的方向。现阶段，不同单位间的沟通主要依靠传统会议或书面文件形式，信息传递效率较低，理解偏差现象频发。部分施工单位遇到设计疑问时，要等很久才能得到反馈，这就难免会拖缓进度。虽说数字化协作平台在部分项目中已经开始使用，可整体普及程度以及应用深度还有欠缺。未来，建设单位可构建信息管理统一平台，建立实时沟通机制，促进多方主体在数据共享、问题协调及分歧解决等方面的效率提升，以此减少因沟通不畅造成的时耗。另外，工程规模和复杂程度不断提高，多方协作价值尤为重要，直接关系到质量与成本的平衡，所以加强协作是提升整体项目管理水平的必然趋势。

2.4 风险防控体系的升级

建筑工程面临的风险因素繁复，既有自然环境变化带来的不确定性，也有政策调整及新技术应用所引发的挑战。项目风险管理应有具体的制度安排，但总体上讲，风险识别、预警和应对机制需要进一步完善。在雨季，极端天气事件频繁发生，施工进度很容易受到影响，项目在应对办法上还是以被动处理为主。例如：环保标准与行业规范的动态调整，会使项目在短期内需进行技术或材料的更换，如果事先没做好风险储备，就容易给进度带来冲击。构建更具前瞻性的风险管理体系与应急预案，有助于管理者预先识别潜在风险，并在突发事件发生时迅速调配资源、调整工序，确保工程整体进度的稳定^[3]。在“双碳”目标、绿色建造理念不断推进的当下，进度管理风险防控也更综合、更灵活，在政策、市场和技术三个方面变化叠加的情况下，能让工程稳定运行。

2.5 信息化监控的深化应用

随着建筑信息化水平的提升，进度监控也从传统的人工记录和纸质报表朝着数字化、智能化方向转变。在实际应用中，不同项目间的技术差距依旧存在，有些项目主要依靠人工巡查，这就使得数据难免滞后，影响准确性。关键施工节点上若缺乏实时监控手段，就可能暴露出很多问题，调整成本就会增加。在实践中，BIM、大数据、物联网、人工智能等先进工具的应用，能为进度监控提供更高效率的解决办法。这些手段在普及程度和应用深度方面仍有很大的提升空间，特别是在跨区域大型工程项目中尤为明显。把智能感知、趋势预测与预警机制纳入进度监控之中，建设单位就能

更早察觉潜在问题，并进行及时干预。同时，借助无人机巡检、激光扫描等手段，可更直观地掌握现场状况，让数据更全面、更客观，使决策基础更加坚实。

3 进度管理在建筑工程中的应用对策

3.1 制定科学详尽的进度计划

建筑工程进度控制要从源头抓起，也就是项目前期就需建立一套精细化的总体计划体系。建设单位需在工程启动之初，把结构设计师、机电工程师、施工顾问等多学科专家组成项目团队，通过数字化工具来实现计划的精细分解。利用BIM 5D模型精准计算工程量，再结合行业工时数据库与算法优化的定额体系，把任务拆成最小的操作单元^[4]。例如：在混凝土浇筑时，能把每立方米的浇筑时长、振捣次数以及不同时间点的施工进行详细安排，并明确写进施工单中。与此同时，借助进度管理平台把所有施工数据全面录入系统，系统自动进行最优施工路径的推演，同时自动识别关键线路，助力建设单位科学设定工期。建设单位也要充分利用已有的GIS与历史气象资料，把区域气候变化、地质条件等外部变量归入计划模型中，动态地生成进度指引，保证施工有序衔接，使不同施工阶段都能有精确到日甚至小时的执行标准，从而最大限度地提高计划的执行力。

3.2 实施动态监控

为了避免项目在执行过程中与计划出现较大偏差，建设单位必须在施工全程落实动态监控机制。管理团队要以3天至5天为一个监控周期，利用激光扫描、高清图像捕捉和无人机巡检等技术手段，对工地现场的施工进度进行全面采集，并将数据即时上传至云端BIM平台。系统会自动将现场进度与预定模型进行比对，如果发现关键节点延误，就会触发智能分析流程，深入挖掘人员技能配置、物资供应链和机械设备记录等多维度数据，快速定位问题源头。假如延误是由于工人技能不足造成的，则能即时推送在线培训模块，安排资深师傅一对一指导；若问题出现在物料供应阶段，则借助区块链金融平台紧急采购，智能调度系统会自动优化运输路径，确保材料快速进场。同时，监控还能通过深度学习算法实时输出预测结果，对潜在的风险进行预判，建设单位能在问题放大之前采取干预措施，使工程建设始终维持在可控范围内。在这一过程中，需建立一套动态反馈和奖惩相结合的机制，把监控结果与施工单位的绩效评价联系起来，既能促使承建方积极行动，又能加强各级人员对进度监控的重视程度，进而形成数据驱动、责任到位的管理格局。

3.3 强化资源精准调配

资源配置是进度执行的关键保障,建设单位需建立一套全周期的智能化调配机制。在人力方面,要运用大数据预测工具,把工程规模和施工复杂程度相结合,提前模拟各阶段人力需求曲线,通过劳务众包平台构建弹性合同,保证高峰期熟练工人能够稳定供给。VR/AR 培训系统可应用于模拟复杂施工场景,新进工人借此能在虚拟环境中习得多工序协作技能,进而减少正式施工中的返工情况。在物资上,采用物联网智能仓储系统来部署,实时监测材料出入库、库存数量和环境状况,一旦库存达到警报,系统就会自动发出采购清单,发送给采购部门,再结合智能物流调度平台对运输路径加以优化,保证物资供应准时且足量。机械设备要借助智能设备管理系统开展全生命周期管理,从进出场安排、实时运行监控,再到基于机器学习的预防性维护,保证设备一直高效运转,让资源在各个阶段均衡分配,切实实现施工过程的连续高效。除上述措施外,需研究跨项目与跨区域的资源共享模式,构建统一的区域设备及劳务资源库,以实现不同项目间的动态资源互补。当某一工程出现临时资源短缺时,能够通过平台快速调用周边工程的备用资源,从而减少等待时间,提升整体资源利用率。

3.4 建立全方位风险预警机制

建筑工程所面临的风险是不可避免的,建设单位在项目开始时就需构建起覆盖自然、技术以及政策等多个维度的风险管理体系。积极组建包括地质专家、政策顾问以及行业经济学者等的风险分析团队,通过知识图谱梳理风险因素,再采用蒙特卡洛模拟和模糊综合评估等方法来量化风险发生率以及可能产生的后果。基于此,构建分级分类风险矩阵,把智能预警系统纳入其中。例如:监测到未来 24 小时累计降雨量超 10 毫米时,系统就会自动开启防汛应急预案,向所有施工人员发送移动端预警,同时联动物资调配平台,把沙袋、水泵、应急电源等提前运到现场^[5]。在政策方面,可依靠舆情监控与行业数据库,让系统快速把握新的环保标准或审批调整,把信息发送给项目管理枢机,以快速修改施工工艺和材料清单,使建设单位在风险真正发生之前做好物资与人力的准备,风险发生后能迅速切换施工方案,减少对整体进度的影响。

3.5 优化沟通协作机制

建筑工程很复杂,所以需要靠多方高效合作才能顺利推进。建设单位是主导者,要搭建起全数字化的信息交流平台,构建统一的数据中枢,保证设计、施

工和监理单位能实现信息共享。每周组织线上线下相结合的协调会议,实时呈现施工进度、存在的问题以及解决方案,让信息在各方快速传递。设计单位要通过由共享的三维模型及时解答施工疑问,施工单位借助移动设备上传现场状况,监理单位凭借智能巡检应用即时反馈质量问题,建设单位则凭借大数据控制台对整体进度进行宏观把控。如果遇到重大设计变更或者复杂施工难题,就需马上开启多方远程会商机制,采用 AR 远程协作和全息投影技术,让各方不管是不是在施工现场,都能准确把握施工状况,快速制定出解决方案。并且,凭借区块链和电子签名技术,保证所有沟通信息明确、可信且能追溯,这样就能避免因信息延误造成返工,促使工程进度按照预期稳步推进。

4 结束语

进度管理是推动项目成功交付的关键。其不但要求建设单位在前期做好科学规划,在实施期间要持续监控、动态调整,还需通过资源优化配置与多方协同合作来实现工期目标。在今后的发展进程中,进度管理会与成本、质量、安全这些管理目标更紧密地融合起来,从而形成全生命周期的系统管控模式。建设单位在此过程中要发挥引领作用,才能真正让工程效益达到最大化,为建筑行业现代化发展提供有力保障。随着建筑行业数字化、智能化水平的不断提升,进度管理的内涵也在不断扩展。建筑工程的进度管理已经不再局限于单纯的工期把控,而是逐步发展为一种以信息化技术为支撑、以风险预防为重点、以资源统筹为纽带的综合性管理模式。这种转变不仅有助于提升单个项目的执行效率,也能够带动整个行业的管理水平不断优化和提升。

参考文献:

- [1] 杨超.BIM 技术在建筑工程进度精细化管理中的应用分析[J]. 新城建科技,2025,34(07):193-195.
- [2] 李鹏飞,肖海波,杜治军,等.关键链法在大型建筑施工项目进度管理中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修,2025(13):75-77.
- [3] 王蓓,王彦.进度管理在建筑工程管理中的应用[J]. 住宅与房地产,2025(11):105-107.
- [4] 王晓.BIM 技术在大型住宅建筑设计工程施工进度管理中的应用研究[J]. 居舍,2025(04):177-180.
- [5] 张磊.BIM 技术在建筑工程施工进度管理中的应用研究[J]. 绿色建造与智能建筑,2024(12):121-124.

公路工程机电项目施工质量控制研究

张 瀚

(四川路桥建设集团交通工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 在公路工程机电项目施工中, 技术衔接失衡、质量控制失序和协作机制失衡等问题已成为制约工程质量提升的主要因素。基于此, 本文围绕严格设备选型、优化布线路径、规范接地施工、强化密封处理以及开展动态监测等质量控制措施展开探讨, 形成覆盖施工全过程的管理体系, 旨在对提升技术配合度、保障施工细节精准并强化隐患排查有所裨益, 进而提高机电系统施工质量稳定性及安全性。

关键词 公路工程; 机电项目; 施工质量

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.030

0 引言

公路工程机电项目作为现代交通基础设施的重要组成部分, 承担着控制、监测及保障系统的核心功能, 施工质量的高低直接影响工程的安全性。随着施工技术水平及工程复杂度的提升, 机电系统结构日益庞大且专业交叉密集, 质量管理面临前所未有的挑战。施工过程中各专业环节之间都要紧密衔接, 任何环节出现偏差都可能导致整体系统性能下降。技术标准的多样性及施工环境的复杂性也会增加施工质量的不可控因素, 因此, 质量保障体系必须不断优化, 以适应日益严格的工程要求。

1 公路工程机电项目施工质量问题

1.1 技术衔接失衡

在机电施工中, 不同系统间的技术衔接缺乏均衡性, 导致工序配合度低、信息传递滞后, 设计、采购与安装在时间节奏上错位。部分环节缺乏精度控制, 细节落实不一致, 容易积累潜在误差, 影响后续工序稳定。各系统在功能、标准和接口匹配上存在差距, 易出现设备安装与线路布局的空间冲突, 增加施工复杂性。技术衔接不畅放大了对现场条件变化的敏感性, 施工组织需频繁调整, 隐性不稳定因素增加。微小偏差积累至调试阶段集中暴露, 整体质量水平难以达到预期。

1.2 质量控制失序

在质量管理链条中, 过程控制的严密性不足, 使得关键环节缺乏连续监测, 标准执行的统一性降低。施工中涉及的多类型设备、材料及工艺标准差异较大, 若缺少严格的参数核对与记录体系, 不一致性容易渗透到工程成品之中。局部环节中工序衔接的随机性增加, 使质量稳定性受到冲击。材料性能与施工环境条件之间

的匹配度不高时, 会在运行期间放大隐蔽缺陷, 影响系统长期可靠性。质量控制节奏一旦被打破, 后续环节难以在既定精度下推进, 验收环节承受更大压力, 甚至引发返工的连锁反应, 拖延整体工期并增加潜在风险^[1]。

1.3 协作机制失衡

多专业交叉的机电工程需高度协作, 但实际中常因信息流通不畅、责任模糊而失衡。不同专业间节奏难同步, 信息传递滞后, 协调成本增加。现场界面过多, 接口责任不清易致任务重叠或遗漏, 削弱执行力。协作不稳影响资源调度, 造成局部过剩或短缺, 限制施工进度。长期沟通断层固化为系统性问题, 管理层难以掌握全局, 决策滞后, 质量风险逐渐放大并延伸至后期环节。

1.4 管理流程滞缓

施工管理流程衔接不畅, 决策反馈周期拉长, 应急响应缺乏灵活性。管理层级信息传递复杂, 交流失真和延迟, 异常状况难以及时捕捉, 影响施工节奏。流程标准执行力度不足, 监督缺乏, 部分节点未能闭环管控, 风险防范效果受限^[2]。流程滞缓削弱资源动态调度能力, 突发情况下调度效率低, 易形成施工瓶颈。长期管理迟滞影响进度, 诱发质量隐患, 削弱工程可控性。

2 公路工程机电项目施工质量控制的意义

机电系统涉及供配电、照明、通风、监控及通信等多个环节, 这些设施一旦出现质量缺陷, 将直接影响道路的运行效率及使用安全。施工质量控制能够在源头上减少潜在隐患, 避免因设备故障或安装不当引发交通中断或安全事故。同时, 科学的质量把关能延长设备使用寿命, 降低维修频率和养护成本, 提升资源利用率。质量控制不仅体现为施工过程中的严格标准执

行,还包含对材料选用、施工工艺、设备安装及系统调试的全过程管理,从而实现环节之间有机衔接的目标。

3 公路工程机电项目施工质量控制措施

3.1 严格设备选型,保障运行稳定

在公路工程机电项目中,设备选型不当容易导致控制系统精度下降、能耗增加以及维护成本上升,进而削弱整体工程质量。为保障运行稳定,设备需要在技术参数、适用环境、安装条件等方面与设计要求高度匹配。作业人员在选型阶段承担核心任务,需要结合公路工程的施工环境、负荷特性以及机电系统的协同要求,进行多维度对比和筛选。科学的设备选型能够减少后续故障发生率,还能提高调试效率及运行安全性,从而确保施工质量符合设计标准及使用要求。

在武九高速机电工程项目中,严格设备选型是保障运行稳定的关键举措。以高楼山隧道供配电及照明系统为例,能够体现其重要性。该隧道全长 12.2 公里,作为控制性工程,对设备可靠性及稳定性要求极高。设备选型初期,作业人员深入调研并评估市场产品。同时,在变压器方面,结合隧道负荷特点,摒弃价格低廉但性能不稳的产品,选用高效节能、过载能力强、散热性能良好的 110 kV/10 kV 变压器,确保在复杂环境下长时间稳定运行,降低停电风险。在照明设备选择上,需兼顾亮度、均匀度、节能及寿命,根据多次对比试验,作业人员选用新型 LED 灯具,该灯具能够提供稳定柔和的光照,满足行车安全需求,还具有显著的节能效果及较长的使用寿命,可以降低维护成本。通过严格设备选型,高楼山隧道供配电及照明系统自 2024 年 7 月 10 日通车以来运行稳定,未出现大面积停电或照明故障,能够有效保障武九高速正常运行,并为后续类似项目积累宝贵经验,凸显严格设备选型在机电工程施工质量控制中的意义。

3.2 优化布线路径,降低电磁干扰

在公路工程机电项目中,线路走向若规划不合理,极易引发电磁干扰,导致数据失真、控制延迟,甚至影响施工质量及后期运行安全。电磁干扰的来源包括电力线路、通信线路及周边强电设备,若未加以控制,机电系统的工作效率及寿命都会受到影响。作业人员在施工前需综合考虑线路间距、交叉方式、屏蔽措施及接地设计,优化布线路径,减少干扰源影响^[3]。合理的路径规划能够缩短信号传输距离、降低能量损耗,并在设备运行期间保持稳定性能,从而保障公路工程机电项目的施工质量及运行可靠性。

在银川至昆明高速公路(G85)彭阳至平凉大桥村机电工程项目施工时,作业人员认真研读施工图纸及

相关技术规范,明确各类机电设备的安装位置、线路走向要求以及电磁干扰的敏感区域。作业人员可以利用 BIM 技术优化机电综合管线排布,把项目中监控系统、收费系统、通信系统等各个机电系统的模型整合起来。借助整合后的模型,作业人员能直观地看到不同线路之间的空间关系,仔细检查是否存在线路交叉、靠近等可能引发电磁干扰的情况。若作业人员发现通信线路及强电线路距离过近等不合理的线路布置,可以依据模型分析及现场实际情况,重新规划布线路径。作业人员需使易产生电磁干扰的强电线路与敏感的通信线路保持足够的安全距离。在实际布线施工时,作业人员严格按照优化后的路径进行操作,认真固定线路,确保线路在整个施工过程中都能按照规划的路径铺设,避免因线路随意拉扯、摆放而导致新的电磁干扰问题,从而有效降低电磁干扰对公路机电设备正常运行的影响,保障银川至昆明高速公路(G85)彭阳至平凉大桥村机电工程项目的施工质量。

3.3 规范接地施工,提升防护性能

在公路工程机电项目中,接地施工若不规范,容易造成电位差异常、设备损坏及信号失真,甚至可能引发安全事故。接地系统能够将漏电、雷击及电磁干扰引入大地,从而保护机电设备及人员安全,并提升整体施工质量。为实现防护,接地施工需要在接地电阻、导体截面、连接方式等方面达到设计及规范要求。作业人员在实施过程中应确保接地设备及线路形成可靠的电气连接,同时结合土壤条件、气候特点及设备类型选择合适的接地方案。作业人员规范化操作,可以提高公路工程机电项目的运行安全性。

例如:作业人员在开展接地施工前,需要详细阅读设计文件,对接地电阻目标值、接地网布置及导体规格进行确认,并依据公路工程机电项目的环境条件制定可执行的施工方案。在施工放线阶段,作业人员根据图纸要求确定接地体的位置及走向,保证接地网覆盖范围满足设备保护需求,并在接地体埋设时,应严格控制埋深与倾角,使接地体与土壤紧密接触,减少接触电阻。对于导体连接,作业人员选用可靠的连接工艺并进行防腐处理,确保在长期运行中导电性能稳定。在接地引上线安装过程中,作业人员将导线同设备接地点牢固连接,并保持路径短直,减少感应电压及阻抗。同时,在雷电多发地带或土壤电阻率较高的地段,要增加接地体数量或采用复合接地方式,以满足设计电阻要求。施工完成后,作业人员需使用专用仪器检测接地电阻,并记录检测数据,若数值超出允许范围,则需调整接地结构直至符合标准。作业人员还为接地点加装明显标识,方便后续检修及维护。

结合上述措施,作业人员利用接地系统能够稳定地分流故障电流及雷电流,避免设备损坏及信号干扰,最终提升公路工程机电项目的施工质量及运行防护性能。

3.4 强化密封处理,避免水汽侵入

水汽侵入容易导致金属部件腐蚀、绝缘性能下降及控制系统故障,从而影响施工质量及后期运行安全。密封结构一旦失效,内部元件会因受潮而发生短路、锈蚀或信号传输异常,增加维修难度及成本。作业人员在施工过程中需根据设备安装位置、使用环境及防护等级,采取相应的密封措施,并确保接口、缝隙、接线孔等部位完全阻断水汽通道^[4]。结合科学、规范的密封处理方法,可以减少外界湿气对机电系统的侵害,确保公路工程机电项目长期保持稳定运行状态。

例如:作业人员在实施密封处理前,需要结合公路工程机电项目的设计文件及现场条件,确认设备防护等级及相应的密封材料规格。密封部件选用时,作业人员需关注材料的耐候性、耐高温性及防水性能,确保在雨雪、潮湿或温差变化大的环境中依然保持密封效果,在设备安装阶段,及时清理密封表面,去除灰尘、油污及水渍,以保证密封材料同基体紧密贴合。对于接线孔、法兰面及设备外壳拼缝等部位,需均匀涂抹或嵌入密封胶条,并控制压紧力,使其形成连续、均匀的密封面,进入管道或线槽的部位,还要使用专用堵头或防水套管,防止水汽沿线路渗入内部。在检修盖板及可拆卸连接处,需添加可重复使用的密封元件,并在安装后检查防水性,确认密封面无漏点。在潮湿地段或长期暴露的室外区域的特殊区域内,需增加双层密封或外加防护罩,以增强防水能力,并在施工完成后开展测试渗水及模拟环境试验,验证密封性能是否达到设计标准,并记录检测结果,为后续维护提供依据。利用严格的密封处理,能够防止水汽侵入设备内部,减少故障风险,保障公路工程机电项目的施工质量。

3.5 加强动态监测,及时排除隐患

机电系统在运行过程中会受到温度变化、机械振动、电压波动等多种因素影响,若缺乏实时监测,隐患可能在早期被忽视并逐渐发展成重大故障。利用动态监测,可以及时掌握设备状态、线路负荷以及环境参数的变化情况,为排除隐患提供准确依据。作业人员在监测过程中需根据项目特点选择合适的监测技术及检测频率,并分析采集到的数据^[5]。良好的动态监测能够提高事故防范能力,还能延长设备使用寿命,从而确保公路工程机电项目的施工质量。

例如:在苏高信高速公路机电项目实施过程中,

作业人员严格落实动态监测工作,以实现隐患的及时排除。作业人员依托项目统一的监测运维平台,持续关注机电设备的运行数据。对于监控网、机房、通信网等各类设备,利用平台可对其运行数据进行统一采集与归集,作业人员借助平台能够清晰掌握设备的运行状态。在预防环节,作业人员认真开展日常巡检工作,检查设备是否存在外观损坏、部件松动等情况,同时借助平台的健康度评估功能,对设备进行全面的“健康检测”。进入感知环节,作业人员依靠平台对机电系统的实时监测,以及对监测数据的建模分析,通过平台分析设备的电流、电压等数据,可及时感知到潜在问题。当发现设备存在故障隐患时,在处理环节,作业人员立即启动故障报修流程,依照平台中运维助手的智能指导开展维修作业。维修完成后,在总结环节,作业人员详细记录故障情况,无论是自动分析得出的故障原因,还是人工分析的结果,都要准确汇入知识库,为后续类似问题的解决提供依据。此外,作业人员充分利用资产管理、备件调拨等配套功能,保障维修过程中备件的充足供应,从而更好地保障机电设备的稳定运行,切实做到及时排除各类隐患。这种全程的动态监测,使作业人员能够在隐患形成初期就采取措施,避免影响公路工程机电项目施工质量及后期运行安全。

4 结束语

公路工程机电施工质量的提升是保障整体工程安全性及稳定运行的关键,其涉及多环节、多专业的紧密配合。作业人员可根据系统化的质量控制措施,有效整合技术资源,规范施工流程,强化管理监测,从而减少隐患,提升施工精度及运行可靠性。同时,完善质量保障体系能够推动施工技术的科学发展,还可以优化机电系统整体性能。未来,随着技术进步及智能化手段的应用,相关人员需不断探索施工质量控制措施,为交通基础设施的可持续发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 张征.高速公路机电工程质量控制措施分析[J].运输经理世界,2024(36):150-152.
- [2] 陈俊伟.高速公路交通机电工程施工过程中的质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2024(32):72-74.
- [3] 江保卫.高速公路机电工程施工质量的控制策略[J].工程技术研究,2024,09(20):135-137.
- [4] 罗艳环.高速公路机电工程质量控制关键问题研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(21):7-9.
- [5] 李家良.公路工程机电项目施工质量控制研究[J].交通科技与管理,2023,04(21):141-143.

水利工程运行管理中的安全隐患及预防措施

易成钰¹, 冯旋²

(1. 江苏省徐州市南水北调工程管理中心, 江苏 徐州 221000;

2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司徐州分公司, 江苏 徐州 221000)

摘要 水利工程作为保障区域水资源合理利用、防洪减灾能力提升及经济社会可持续发展的基础设施, 针对水利工程开展的运行管理需要通过制度规范、技术监测、人员调配等手段实现与科学调度, 但当前受设施老化、环境复杂、管理转型等因素影响, 水利工程安全隐患日益凸显, 运行管理日趋复杂。为明确水利工程运行管理中常见的安全隐患问题, 确定安全隐患预防措施, 本文阐释了安全隐患预防对保障管理中心运行、优化管理效果、强化技术设备效能的意义, 分析了当前存在的主要问题, 并提出定期分层检查设施、构建风险识别体系、优化技术支持与设备全生命周期管理等预防策略, 旨在为提升水利工程运行安全性、推动管理现代化转型提供理论参考。

关键词 水利工程运行管理; 安全隐患; 环境风险应对能力; 设备管理

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.031

0 引言

随着全球气候变化加剧, 极端降水、干旱等灾害频发, 加之部分水利工程建成时间较长, 设施老化、维护不足等问题逐渐凸显, 运行管理中的安全隐患日益成为影响工程安全的重要因素^[1]。从全国范围看, 水利工程数量庞大、分布广泛, 不同地区在管理投入、技术水平、人员能力上存在差异, 部分地区存在监测预警系统不完善、隐患排查机制不健全、应急处置能力薄弱等现象^[2]。水利工程运行管理是指通过制度规范等手段, 对各类水利设施进行全周期维护、动态监测与科学调度, 确保其持续发挥防洪、供水、灌溉、生态调节等基础功能的管理活动, 有效的运行管理能够保障水利工程长期稳定运行, 直接关乎区域水资源合理利用、防洪减灾能力的提升^[3]。

当前水利工程运行管理呈现覆盖范围广、设施类型多、运行环境复杂等特点, 既需应对自然因素的考验, 也需解决人为因素的挑战, 处于从传统经验型向现代精细化转型的关键阶段^[4]。在实践中, 因隐患发现不及时或预防措施不到位引发的工程险情、供水中断甚至安全事故时有发生, 不仅会造成经济损失, 更威胁下游居民生命财产安全和社会稳定。本文基于此展开分析, 以为水利工程运行安全管理提供理论参考。

1 水利工程运行管理中安全隐患预防的意义

1.1 保障水利工程运行管理中心正常运行

水利工程运行管理中心承担着监控状态、调度资源、处理突发事件、下达管理指令等关键职能, 其正

常运行是确保水利工程发挥综合效益的基础。然而, 安全隐患的存在会干扰管理中心的正常运作。设备系统的稳定性是管理中心正常运行的物理基础, 基础设备如果存在安全隐患, 则很可能导致监测数据失真甚至控制指令失效^[5]。现代水利工程依赖大量自动化智能化设备, 这些设备通过数据传输网络与管理中心相连, 为中心的决策提供实时信息支持, 然而设备在长期运行中会受到自然环境、人为操作、自身老化等因素的影响, 产生各种隐患。

1.2 优化运行管理效果

水利工程运行管理的效果直接体现在工程功能的发挥、资源的利用效率、风险防控的能力以及公共服务的质量上, 安全隐患的预防并非孤立的管理行为, 而是通过对管理流程的优化、资源配置的调整、技术手段的升级等方式, 提升整体管理效果。在传统管理模式下, 水利工程运行管理效率低下, 许多工程在建成后, 管理单位将主要精力放在日常巡查和简单维护上, 对设备的性能退化、系统的潜在缺陷缺乏深入分析, 直到发生故障才投入大量资源维修。传统管理决策往往依赖管理人员的经验判断, 缺乏数据支撑和量化分析, 容易导致决策偏差, 隐患预防积累的数据可以为管理决策提供了信息资源, 挖掘分析这些数据有助于揭示工程运行的内在规律, 识别潜在的风险因素, 预测未来可能发生的问题, 从而为决策提供科学依据。

1.3 强化技术设备应用效能

技术设备是现代水利工程运行管理的感知系统, 从大坝安全监测的传感器网络到远程监控的智能平台,

技术设备应用效果很大程度上影响到管理效率和精准度,如果存在安全隐患会直接削弱设备的应用效能,甚至导致设备失效。隐患预防能够将管理重心从事后补救转向事前控制,通过对设备故障历史数据的统计分析识别出常见故障原因,制定针对性的维护计划,减少非计划停机时间,可以分析历年汛期水位、流量、堤坝渗流等数据,根据分析结果建立洪水预报模型,提高洪水调度的准确性,汇总设备故障间隔时间、维修成本等数据并制定设备更新方案,收集人员操作失误的时间分布和类型特征,优化排班制度和培训重点,降低人为失误率。

2 水利工程运行管理中主要的安全隐患问题

2.1 水闸、闸站老化及泵站故障

水利工程作为国家基础设施的重要组成部分,承担着防洪减灾、水资源调配、农业灌溉等职能,我国许多水利工程始建于20世纪50至70年代,受限于当时的经济条件与技术水平,工程设计标准普遍较低,建筑材料多采用早期混凝土与普通钢材,设备选型也以传统机械为主,经过数十年运行,部分水闸、闸站及泵站已进入使用周期的后半段,结构与设备的损耗逐渐提升。其中,建筑结构的混凝土构件长期暴露于大气环境与水介质中,空气中的二氧化碳渗透至混凝土内部,与水泥水化产生的氢氧化钙反应生成碳酸钙,导致混凝土碱性降低,原本被碱性环境包裹的钢筋失去钝化保护,逐渐发生锈蚀。钢筋锈蚀后体积膨胀,会对周围混凝土产生挤压,形成顺筋裂缝,进一步加速混凝土劣化,最终降低闸墩、胸墙等承重结构的承载能力。

2.2 环境性安全隐患

水利工程运行始终处于自然环境与社会环境的影响下,其中自然环境因素因其不可控性,成为威胁工程安全的重要隐患来源。气候变化是当前最突出的环境挑战之一,全球变暖导致极端天气事件频发,强降雨、超标准洪水、持续干旱等灾害对水利工程的考验日益严峻。短时间内的集中强降雨可能使河流流量远超工程设计洪峰流量,导致堤坝出现漫顶、管涌等险情,长期干旱则会使水库水位降至死水位以下,不仅影响正常的供水与发电功能,还可能因水位大幅下降导致坝体下游坡失去水分支撑,引发滑坡或坍塌。水利工程多建于河流、湖泊沿岸或山区峡谷地带,其稳定性与地质条件密切相关,工程建设过程可能改变原有的地形地貌,重置地应力分布情况,诱发潜在的地质灾害,而水库蓄水后,库水对库岸的浸泡也可能引发滑坡等

危害,滑坡体涌入河道会堵塞泄洪道,导致上游水位骤升;地震作用会使坝体、堤防等结构产生裂缝或位移,严重时可能导致坝体失稳。

2.3 人为隐患及技术隐患

人为因素是水利工程安全隐患的重要诱因,既包括管理机制的缺陷,也涉及人员行为的偏差。传统监测技术多依赖人工巡检与简易仪器测量,数据采集的频率与精度均无法满足现代工程需求,水闸渗流监测通常采用人工读取测压管水位的方式,难以捕捉突发的渗流异常,混凝土结构裂缝监测多通过肉眼观察或钢尺测量,无法实现精度动态跟踪。虽然部分大型工程已安装传感器网络,但多数中小型工程仍依赖传统手段,数据传输与分析能力薄弱,难以实现实时预警。此外,对于混凝土结构的深层裂缝,传统的凿槽填充、表面封闭等方法难以彻底解决内部损伤问题,金属结构的腐蚀修复多采用常规防腐涂料,其耐候性与附着力难以适应复杂环境,泵站设备维修仍以故障后维修为主,预防性维修技术应用不足,导致设备可靠性下降。

3 水利工程运行管理中安全隐患预防策略

3.1 定期检查水闸、闸站和泵站

水利工程通常建设年代久远,运行环境复杂恶劣,为有效防范构件及附属设备功能风险,必须建立并严格执行一套科学、规范、系统的定期检查制度。这一制度应涵盖日常巡查、月度专项检查以及年度全面检测等多个层次,针对不同类型设施的特点和运行状况,制定针对性的检查内容与操作流程。日常巡查主要由一线管理人员负责,重点关注设施外观的即时变化,观察水闸门体是否有变形、锈蚀、漏水现象,闸站和泵站的墙体、护坡是否存在裂缝、滑坡、塌陷迹象,启闭设备运转是否顺畅,有无异常声响或振动,电气控制柜的仪表读数是否正常,电缆线路有无老化破损等。月度专项检查则应由专业技术人员带队,对设施的关键部位和核心系统进行更为细致的检测,检查闸墩、胸墙的混凝土碳化深度和钢筋锈蚀情况,测试启闭机的制动性能、钢丝绳的磨损程度,校验泵站水泵的效率、轴承的润滑状况以及电机的性能参数,审查泵站电气系统的保护装置是否灵敏可靠。年度全面检测则需在前两者基础上做出更具深度的检查,应使用专业的检测仪器对设施进行全面检查,可以采用超声波探伤技术检测闸门钢结构焊缝的内部缺陷,设置荷载试验验证水闸的启闭能力和防洪标准是否满足设计要求。

新建工程则可采用生态化构造,规避后续运行中

可能出现的安全隐患。传统水利工程常采用混凝土、浆砌石等硬质材料构建护岸、堤坝等结构以追求工程安全性与耐久性,虽能够抵御水流冲刷,却会对河流的自然形态与生物栖息环境产生破坏性影响,特别是常用的直立式混凝土护岸很容易切断河道与河漫滩的物质交换,导致底栖生物失去产卵场与庇护所,而硬化河床的行为也会改变水流速度与紊动特性,影响鱼类洄游与幼体栖息。而应用环保型材料,对工程结构加以结构优化即可规避此类问题,具体落实中可以采用格宾网箱与植草结合的方式作为护岸,格宾网的柔性结构可适应水流变化,内部填充的块石间隙为小型水生生物提供栖息空间,表面种植的耐水湿草本植物则能固定岸坡、净化水质。同时可将直线型堤坝改造为阶梯式生态护岸,通过设置不同高度的平台与缓坡,模拟自然河道的凹凸形态,在满足防洪要求的同时为两栖动物提供上岸通道,为水生植物提供生长空间。

3.2 强化环境风险应对能力

面对复杂多变的环境风险,传统的被动式应对模式已难以满足现代水利工程安全管理的需要,必须积极构建主动化、系统化的环境风险应对体系。首先要加强对工程区域及其周边环境的调查与监测工作,通过设立各类环境监测站点,运用遥感、地理信息系统等技术手段,实时采集和积累环境数据,为风险识别和评估提供坚实的数据基础。传统水生态监测多依赖人工采样与实验室分析,监测频率低、覆盖范围有限、数据时效性不足,难以满足复杂水生态系统的动态监测需求。现代水生态监测技术通过集成传感器网络、遥感监测与生物指标法,在河流关键断面部署多参数水质传感器,实时采集 pH 值、溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数等参数,数据通过物联网传输至管理平台,实现实时更新,同时可以定期分析浮游植物、底栖动物及鱼类的种类与数量,反映水体生态健康状况。

通过此类监控措施,水质问题得以明确,随后即可采取针对性措施加以应对,洪水风险可以通过加固堤防、整治河道、修建分洪区和蓄滞洪区、完善防洪调度预案等措施提高工程的防洪标准和抗灾能力,干旱风险的应对则需加强水资源统一管理。

3.3 优化技术支持和设备管理

现代水利工程的运行管理越来越依赖于先进的技术支持和高效的设备管理,先进的技术支持能够为水利工程的规划、设计、建设、运行、维护和管理提供强大的信息支撑和决策依据,而高效的设备管理则是确保水利工程设施始终处于良好运行状态、充分发挥

其经济效益和社会效益的关键保障。智慧水务管理平台整合物联网、大数据、人工智能等技术构建智能管理体系。一方面接入水生态监测、水文气象、工程运行等数据,依托传感器实时采集的水质、水位、流量数据;另一方面则通过数据清洗与标准化处理消除不同来源数据的格式差异与噪声干扰,形成统一的数据资产库。在此基础上,平台利用机器学习算法建立水文预报模型、生态需水计算模型及污染扩散模拟模型,实现对流域水情的精准预测与生态风险的评估,优化水库下泄流量,智能调度闸门与泵站,实现水资源的高效利用。

此外,优化技术支持和设备管理,需要加大技术创新和应用力度,积极推动信息技术、自动化技术、智能控制技术等现代高新技术在水利工程管理中的深度融合与广泛应用,推广使用智能传感器、物联网技术,对水闸、泵站、堤坝等关键设施的运行参数和环境指标进行实时、连续、自动采集和传输,为精细化管理提供数据支撑。

4 结束语

当前水利工程运行管理正处于从传统经验型向现代精细化转型的关键阶段,设施老化、环境风险、人为操作不规范及技术手段滞后等隐患影响工程安全,并对公共利益产生影响。本文剖析安全隐患预防对管理中心运行、管理效果、技术设备效能的意义,梳理水闸和闸站老化、环境性隐患、人为及技术隐患等问题,提出针对性预防策略。未来需进一步推进智慧水利建设,强化技术设备与管理的深度融合,完善跨部门协同机制,以实现水利工程运行安全的长效保障与可持续发展。

参考文献:

- [1] 董宏强. 基于水利工程安全下的堤防管理优化措施分析[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(24):193-195.
- [2] 张进朝,刘正坤.AI技术在水利工程运行管理中的创新探索与实践应用[J]. 水利建设与管理,2025,45(08):17-22.
- [3] 齐业全. 水利安全生产标准化建设路径探析[J]. 治淮,2025(08):69-70.
- [4] 席兆阳. 信息技术在水利工程建设管理中的运用[J]. 价值工程,2025,44(22):79-82.
- [5] 廖嵩隆. 长江马鞍山河段二期整治工程运行管理对策分析[J]. 治淮,2023(07):60-62.

自动化运维技术在智能电网 运维管理中的应用

杨 铭, 郝鲁东

(国网福海县供电公司, 新疆 阿勒泰 836400)

摘 要 随着智能电网的快速发展, 其运维管理面临着越来越多的挑战, 传统的运维模式已难以满足智能电网的高效、安全、可靠运行需求。自动化运维技术作为一种先进的技术手段, 在智能电网运维管理中发挥着重要作用。本文基于自动化运维技术体系, 研究其在智能电网运维管理中的应用路径与实施效果, 旨在为实现电网设备状态实时感知、异常智能预警和故障快速处置提供借鉴, 进而保障智能电网的高效运维。

关键词 自动化运维技术; 智能电网; 运维管理

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.032

0 引言

智能电网是集成先进传感测量、信息通信、自动控制、分析决策等技术于一体的现代化电网体系, 是构建新型电力系统、实现能源转型的关键基础设施。随着新能源大规模并网、分布式能源广泛接入以及电力物联网的深度覆盖, 电网的设备数量呈指数级增长, 系统运行状态瞬息万变, 传统的运维管理模式, 依赖人工定期巡检、事后维修和故障判断, 不仅工作强度大、效率低, 更难以实现对潜在风险的精准预测和故障的快速响应。在此背景下, 以自动化、智能化为核心特征的自动化运维(AIOps)技术应运而生。它通过引入机器学习算法、自动化脚本和智能机器人, 旨在实现运维工作的“自动执行、智能分析、主动预警、自主决策”。将自动化运维技术应用于智能电网, 对于保障电网安全稳定运行、降低运维成本、提升供电可靠性具有重大意义。

1 智能电网检修策略优化概述

智能电网的规模化发展及新能源高比例接入, 对电网设备检修策略的精准性、动态性与经济性提出更高要求。传统定期检修与故障后检修模式因缺乏对设备实时状态的感知与多目标协同优化能力, 易导致检修资源浪费或运行风险累积。检修策略优化需以设备可靠性理论为核心, 结合智能电网的数字化特征, 构建基于状态感知与数据驱动的决策框架。首先, 需明确检修策略优化的双重目标: 在保障电网安全稳定运行的前提下, 降低全生命周期检修成本并提升资源利用率。关键在于平衡设备故障风险、运维投入与供电

可靠性之间的矛盾。其次, 需识别智能电网环境下检修策略优化的核心约束条件, 包括设备差异化特性(如不同类型变压器、线路的故障模式差异)、动态负荷需求(如季节性负荷波动)、资源时空约束(如检修班组与备件库存的时空分布)以及新能源接入带来的不确定性(如风电出力波动对检修窗口期的影响)。通过融合设备健康状态评估、多目标优化理论与实时数据融合技术, 可为检修策略优化提供理论支撑, 推动检修模式从“经验驱动”向“数据—模型双驱动”转型^[1]。

2 智能电网运维管理面临的挑战

2.1 数据安全问题

智能电网中涉及大量的敏感数据, 智能电网产生海量的实时运行数据、设备状态数据和环境数据, 但传统手段难以对其进行有效分析和价值挖掘。因此, 亟需建立多层次的数据安全防护体系, 包括加密传输、访问控制和实时监控等措施, 以保障数据的完整性、机密性和可用性, 确保电网系统不受内部和外部恶意行为的侵害。

2.2 技术集成难度大

智能电网运维管理中涉及多种自动化运维技术, 如数据采集与监控技术、故障诊断与预测技术、智能调度技术等。这些技术通常来自不同的供应商, 技术集成难度较大。这不仅增加了系统部署的复杂性, 还影响了自动化运维系统的整体性能和运行效率, 亟需推动技术标准化和开放接口协议以促进系统协同。

2.3 专业人才缺乏

自动化运维技术是一门综合性的技术，需要具备电力系统、信息技术、自动化控制等多个领域的专业知识。目前，我国在这方面的跨领域专业人才相对缺乏，高校和企业培养体系尚未完全满足行业需求，导致人才供给与智能电网运维管理的要求之间存在较大差距。加强人才培养、引进和跨学科培训，成为推动技术落地的重要前提。

2.4 成本较高

自动化运维技术的应用需要投入大量的资金，包括购买先进的自动化设备、建设高效的信息系统以及进行长期维护更新等。对于一些中小型电力企业来说，承担这些成本存在一定的经济压力，因此限制了自动化运维技术在大范围内的推广和全面应用。如何通过技术优化、政策支持和商业模式创新降低总体成本，成为当前亟需解决的问题。

3 自动化运维技术在智能电网中的应用

3.1 优化智能调度，提升系统响应速度

智能电网通过提高调度系统的精准性、灵活性和自动化水平，能够有效提升电网的运行效率、缩短故障停运时间，并确保在复杂环境中能够快速响应各种负荷和故障变化，为电力系统的安全、可靠运行奠定坚实基础。为实现这一目标，优化智能调度系统需要依赖更加精准和高效的负荷预测技术。通过整合用户用电数据、气象信息、历史负荷数据及实时监控数据，智能电网能够准确预测未来一段时间的负荷变化趋势。这些预测结果能够为调度系统提供实时、精准的负荷调度参考，避免过度负荷或负荷不足的情况发生。同时，智能电网的优化调度还需要结合自适应调度算法，以应对电网中复杂的动态变化。传统的电网调度系统通常以静态、预设的方式进行调度，但面对高比例可再生能源（如风能、太阳能、潮汐能）接入、用户需求波动及设备运行状态的变化，传统模式显得力不从心。而智能调度系统通过实时反馈机制，能够根据电网运行状态和外部因素的变化，快速调整电力调度策略。通过结合实时数据、自动化控制和灵活的调度算法，智能电网能够实现自适应调度，快速响应系统负荷变化或突发事件，极大提高了电网响应速度。在此基础上，智能电网的调度系统还可以通过多层次的优化调度进行分布式能源资源的调配。随着分布式发电和储能系统的不断普及，智能电网必须具备多源能源协调调度的能力^[2]。例如：通过分布式储能系统（如电池储能）

和需求响应机制，智能电网能够在用电高峰期间平衡电网负荷，减少对传统发电机组的依赖，优化电力资源的利用效率。调度系统不仅能够实时协调传统电源和可再生能源的比例，还能调度储能系统在负荷低谷时充电。

3.2 检修策略优化结果可视化与决策支持

优化模型输出的检修策略需通过可视化技术转化为直观决策信息，以提升工程实用性。首先，采用甘特图与热力图结合的方式展示检修计划的时间与空间分布。甘特图以时间轴为基准，清晰呈现各设备的检修起止时间及资源占用情况；热力图则通过颜色深浅反映设备检修优先级，辅助决策者快速识别关键任务。例如：将高优先级设备标记为红色，低优先级设备标记为绿色，并叠加电网拓扑图，直观展示检修任务在电网中的空间分布。其次，为支持多目标权衡决策，需开发交互式可视化工具。通过滑动条或下拉菜单允许用户动态调整优化目标权重（如检修成本与设备可用率的权重比），实时观察帕累托前沿解集的变化。同时，集成敏感性分析模块，展示关键参数（如故障率、检修成本）波动对优化结果的影响，帮助决策者理解策略鲁棒性。例如：当用户将停电损失权重提高 20% 时，可视化界面可自动更新检修计划，优先安排对负荷影响较大的设备检修。此外，提供决策报告生成功能，将优化结果、约束条件及风险提示以结构化文档形式输出，便于存档与共享。通过上述工具，可实现检修策略从数学解到工程决策的高效转化。

3.3 自动化运维技术实验

为验证自动化运维技术在智能电网中的应用情况，本文以设计实验的方式，模拟智能电网的实际运行环境和设备配置情况，进而以此为依据，在对现有的配电网结构进行改造优化的基础上，将智能传感器、物联网关设备等安装在智能网络的合适节点位置，用于对智能网络中所有配电设备的全覆盖监测。自动化运维技术的应用能够有效满足智能电网的运维需求，有效保障针对各类故障情况检测识别的准确率，用于保障智能电网的运行安全^[3]。

3.4 设备巡检

传统的人工巡检方式不仅效率低，而且在一些复杂地形和恶劣环境下难以开展工作。而采用无人机巡检、机器人巡检等自动化巡检方式，可以克服这些困难，提高巡检效率和质量。无人机巡检可以搭载高清摄像头、红外热像仪等设备，对输电线路、变电站等进行全方位的巡检。它可以快速发现线路的断股、腐

蚀、绝缘子损坏等缺陷，以及变电站设备的过热、漏油等故障。通过无人机巡检获得的图像和数据，可以传输到后台进行分析和处理，为设备的维护提供依据。机器人巡检则主要应用于变电站内部的设备巡检。它可以按照预设的路径自主移动，对变压器、断路器、隔离开关等设备进行巡检，采集设备的运行数据和图像信息。

3.5 故障处理

当电网发生故障时，数据采集与监控技术可以实时采集故障点的相关数据，并将这些数据传输到故障诊断系统。故障诊断系统利用故障诊断与预测技术，对这些数据进行分析 and 处理，快速定位故障位置，确定故障类型和原因。在故障定位后，智能调度系统可以根据故障情况和电网的运行状态，自动制定故障处理方案。例如：当输电线路发生故障时，智能调度系统可以快速切换到备用线路，恢复电力供应；当变电站设备发生故障时，智能调度系统可以及时发出指令，对故障设备进行隔离和维修。同时，自动化运维技术还可以实现故障的自动恢复。例如：在配电网中，当发生单相接地故障时，自动化开关可以自动跳闸，隔离故障区域，并通过自动重合闸等方式恢复非故障区域的供电。这不仅提高了故障处理的速度，还减少了故障对用户的影响^[4]。

3.6 调度优化

智能调度系统可以根据电力负荷的预测结果，结合发电设备的出力特性和输电线路的传输能力，制定最优的发电计划。在发电计划制定过程中，智能调度系统可以考虑多种因素，如燃料成本、环保要求、电网安全约束等，实现发电成本的最小化和环保效益的最大化。同时，智能调度系统还可以根据电网的实时运行状态，对发电计划进行动态调整，以适应电力负荷的变化和电网故障等突发情况。此外，智能调度技术还可以实现对输电线路的优化调度。通过对输电线路的负载情况进行实时监测和分析，智能调度系统可以合理分配输电功率，避免输电线路过载，提高输电线路的利用率和安全性。

3.7 强化安全防护，提升网络运行稳定性

随着智能电网逐步向全面自动化、信息化、数字化方向发展，系统的复杂性和开放性也带来了更加严峻的安全风险，特别是在信息网络和设备控制系统方面的安全防护。为了应对这些挑战，智能电网必须在整体设计和运维过程中，强化多层次的安全防护体系，提升网络运行的稳定性。一方面，智能电网的安全防

护需要从网络层面强化。电力系统的数字化转型使得电网的操作和监控高度依赖信息通信技术（ICT）。然而，这也导致电网面临着来自网络攻击、恶意软件、病毒入侵等网络安全威胁。为有效防范这些风险，智能电网必须加强网络架构的安全设计，对电网数据传输和信息交互进行严格管控。尤其是在涉及控制命令的传输环节，必须实施加密和认证技术，确保命令传输的安全性和有效性。另一方面，智能电网的安全防护还应涵盖应急响应和恢复能力的建设。在实际运行中，电网面临着各种突发事件的威胁，如自然灾害、设备故障和人为破坏等。为提高网络运行的稳定性，智能电网需要建立高效的应急响应机制，包括灾难恢复方案和应急调度系统。在发生安全事件时，智能电网应能够快速识别安全风险源，及时采取隔离、切换等应急措施，最大限度地减少电力供应中断或数据泄露的影响。同时，智能电网还应加强系统的恢复能力，通过定期的灾难演练和备份机制，确保在发生大规模故障时能够迅速恢复正常运行，保证电网的安全性和稳定性^[5]。

4 结束语

自动化运维技术是智能电网运维管理的发展方向，通过应用先进的信息技术和智能算法，能够显著提高运维效率，降低运维成本，提升电网运行可靠性。未来，随着技术的不断发展，自动化运维技术将在智能电网运维中发挥更加重要的作用。虽然自动化运维技术的应用取得了显著成效，但是推进自动化运维技术应用还需要解决技术标准、人才培养、网络安全等问题，通过完善技术体系、加强人才培养、确保网络安全，促进自动化运维技术在智能电网中的广泛应用，为智能电网安全稳定运行提供有力保障。

参考文献：

- [1] 董乃超. 智能电网电力运行维护一体化建设[J]. 智能城市应用, 2023, 06(03): 89-91.
- [2] 谢宗寅. 智能电网背景下电力运行维护一体化建设分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2023, 11(36): 115-117.
- [3] 刁文君. 基于智能电网的电力运行维护一体化建设探究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(05): 242-243, 275.
- [4] 许志凯, 范迎春. 基于智能电网的电力运行维护一体化建设[J]. 百科论坛电子杂志, 2022(07): 246-248.
- [5] 常椿. 智能电网电力运行维护一体化建设[J]. 电力系统装备, 2021(19): 77-78.

土地工程管理中测绘成果的应用与质量控制探讨

蒋余建

(山东省济宁市鱼台县自然资源和规划局, 山东 济宁 272300)

摘要 随着国土空间规划和生态文明建设的不断推进, 高精度测绘数据为土地利用现状调查、工程规划设计和资源评估提供了科学依据, 也为工程实施过程中的动态监测、竣工验收及后期监管提供了技术保障。测绘成果在实际应用中仍存在精度不足、时效性欠缺、成果标准不统一等问题, 影响了工程管理的科学性与精细化水平。本文在梳理测绘成果在土地工程管理中主要应用领域的基础上, 深入分析了其质量控制要点, 提出了相应的对策建议, 以期为促进土地工程管理的科学化、精细化和高效化提供参考。

关键词 土地工程管理; 测绘成果; 质量控制; 不动产登记; 资源监测

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.033

0 引言

土地是经济社会发展的基础资源, 而土地工程管理作为土地规划利用、整治复垦、权属登记和资源保护的重要组成部分, 其科学性和规范性直接影响到土地资源的合理配置与可持续利用。遥感、地理信息系统、全球定位系统、无人机航测等新型测绘技术的发展, 测绘成果在土地工程管理中的应用范围不断拓展, 其精度和效率也显著提高^[1]。如何提升测绘成果的应用价值, 强化质量控制, 已经成为学界和实践领域共同关注的焦点。

1 测绘成果在土地工程管理中的应用

1.1 测绘成果在土地规划与利用中的应用

土地规划的科学性依赖于空间信息的精准度, 测绘成果正是提供这种信息的关键支撑, 遥感影像、数字高程模型、正射影像图以及地理信息系统的综合运用可以系统呈现土地利用现状、地形地貌特征及空间格局, 为规划编制提供全面的数据依据, 国土空间总体规划中, 测绘成果能够直观展现耕地、建设用地、林地、草地及生态保护红线的空间分布, 帮助管理部门科学划定永久基本农田、城镇开发边界和生态控制区, 保障发展需求的同时守住资源底线, 测绘成果是规划方案制定的基础, 更是规划实施可行性和科学性的保障。

以某地级市国土空间规划为例, 当地在编制“多规合一”方案过程中, 充分利用了多源测绘成果, 对

比遥感影像发现十年间建设用地面积增加, 其中大部分来自耕地占用。城镇建设边界调整过程中, GIS 叠加人口密度和交通路网数据, 明确城镇新区布局应向北部平坦区扩展, 减少对南部耕地的侵占, 最终形成的规划方案使建设用地扩展控制在 2 万公顷以内, 确保耕地保有量不低于 100 万公顷, 避免资源浪费和空间冲突^[2]。

1.2 测绘成果在土地整治与复垦工程中的应用

土地整治与复垦工程的核心目标是改善土地利用条件、提高耕地质量并恢复受损土地的生产功能。数字高程模型、遥感影像和三维点云数据能够直观反映耕地的高差起伏、坡度分布和排水条件, 为工程设计提供科学基础。测绘成果在工程实施和成效评估阶段能够提供动态监测数据, 保证项目进度和质量可量化、可追溯, 测绘技术不仅使土地整治从“经验操作”走向“科学设计”, 还使复垦工作从“数量恢复”提升为“质量与生态并重”^[3]。

以某高标准农田建设项目为例, 该地区长期存在地块零碎、排水不畅和耕地质量偏低的问题, 严重制约了粮食生产效率。当地政府实施了大规模土地整治工程, 在前期设计获取了高精度高程数据, 提出削高填低、渠系改造与田块合并的整治方案。整治完成后, 耕地平均地块面积由 0.87 公顷/块提升至 1.45 公顷/块, 地块集中度提高, 机械化作业效率一级, 农田灌溉保证率提升, 粮食单产提升, 实现从规划、实施到验收的全流程质量控制。

1.3 测绘成果在土地权属管理与不动产登记中的应用

1. 土地权属涉及相邻地块之间的边界划分,界址线不清晰就容易引发纠纷。现代测绘技术通过全站仪、GNSS 卫星定位、无人机航测等手段能够实现厘米级甚至毫米级的精度,使权属界线更为科学可靠。例如:农村土地确权过程中测绘成果被广泛应用于地块边界的数字化绘制,对农户承包地进行精确测绘并与现有土地台账比对,为权属证书的颁发提供法理依据。

2. 不动产登记工作中测绘成果的价值主要体现在支撑登记簿册和登记数据库的建设。不动产统一登记制度的推行对地籍调查和登记成果提出了更高要求,测绘成果通过提供详实的地籍图、宗地图和空间坐标信息使得登记机关能够将每一宗土地、每一栋房屋与空间位置精确对应,实现“一宗一档、一址一号”。例如:在城市房地产登记中,测绘成果可通过三维建模展示房屋的层数、结构和面积,测绘成果能实现与税务、规划、自然资源等部门数据的共享,推动跨部门信息协同,实现土地权属管理与不动产登记的数字化、精细化和一体化发展^[4]。

1.4 测绘成果在土地资源监测与生态保护中的应用

1. 随着经济发展和城市化进程加快,耕地减少、建设用地扩张、生态空间压缩等问题频繁出现,必须依靠科学的监测手段来掌握真实状况。利用遥感影像、无人机航测和地理信息系统技术,可以对大范围土地进行周期性监测,形成不同时间段的土地利用现状数据。例如:耕地保护考核中,管理部门可以依托测绘成果精确核查耕地保有量和质量是否达到考核标准,使土地资源的管控实现了从静态统计向实时监督的转变。

2. 在生态保护中,测绘成果的价值则体现在生态空间识别与环境变化预警。生态保护强调空间格局的完整性和连通性,需要基于高精度的地理空间数据来支撑。遥感与GIS分析可以科学划定生态红线、自然保护区和重要生态功能区,确保生态空间得到有效管控。湿地保护中,测绘成果能够监测水域范围的季节性变化及植被覆盖情况,判断湿地退化或水体萎缩趋势,为修复措施提供科学依据。

2 测绘成果质量控制的关键环节

2.1 测绘数据采集与处理的精度控制

测绘数据采集精度直接决定了成果的可靠性与适用性,当前测绘数据采集主要依靠GNSS定位、全站仪测量、无人机航测以及遥感影像等手段,其中任何环

节出现偏差都会在后续数据处理与成果应用中被放大,影响土地工程管理的科学性,确保数据采集精度的关键在于两方面:一是科学选取测区控制点。控制点是测绘成果的“基石”,必须结合区域地形特征和工程需求合理布设,高等级控制点与工作基点的层层传递,确保整体框架的空间精度。二是严格执行采集技术规范^[5]。不同作业场景需采用不同的采集方法,如山区需增加加密点位以降低高差对测量的影响,城镇区则需结合航空摄影与地面测量进行多源互补,减少遮挡和畸变。对采集数据进行误差检测与剔除,平差计算、坐标转换等方法减少系统误差和随机误差的累积。遥感影像、无人机航片与地面测量数据融合时采用高精度配准与自动纠偏算法,确保不同来源数据在空间位置上的一致性,从根本上保障后续规划、整治、登记等工作的科学性与权威性。

2.2 成果审核与质量检验制度建设

测绘成果从形成到应用必须经过严格的审核与检验,以确保其科学性和规范性。成果审核的核心在于建立多层次、全流程的质量控制机制。首先,在成果提交前实行“自检—互检—专检”的逐级审核制度。作业单位需先进行内部自检确保数据完整、逻辑一致,由不同小组交叉检查,发现潜在遗漏与误差,由专门质检部门依据国家或行业标准进行终审,形成闭环把关机制。其次,成果质量检验应突出标准化与规范化。不同类型的测绘成果需对应不同的质量评价指标,如地形图需重点检验等高线精度与符号规范,正射影像图需考察影像清晰度与配准误差,不动产测绘成果则必须严格核实边界点坐标与面积计算的准确性,避免因误差引发权属争议。引入第三方检验机制,在土地确权、复垦评估等敏感项目中由独立机构进行抽检或复核,增强成果的公信力,质量检验制度建设还应注重结果应用^[6]。

2.3 成果标准化与数据共享平台建设

在信息化和大数据时代,测绘成果不仅需要满足单一项目的使用,更要服务于跨部门、跨行业的多元化需求。因此,成果标准化与数据共享平台建设成为质量控制的关键环节。首先,标准化是共享的前提。测绘成果涉及空间坐标系统、图件比例尺、数据格式等多个维度,如果缺乏统一规范就会导致成果之间难以对接和集成。例如:不同部门使用的坐标系统不一致,就会在空间叠加时产生位置偏差,影响规划、监测与管理的科学性,制定统一的技术标准,明确数据格式、

精度等级、图例符号和坐标基准,实现测绘成果在时间和空间上的可比性。其次,数据共享平台是提升成果利用效率的核心途径,实现测绘成果的集中存储、分级管理和权限调用。

3 提升测绘成果应用与质量控制的对策建议

3.1 加强先进测绘技术的推广应用

首先,在数据采集环节全面引入高效化和智能化的技术手段。无人机航测、激光雷达和高分辨率卫星遥感等新兴技术,能够突破传统人工测量的局限,在复杂地形或大范围区域实现快速、精准的数据获取。例如:无人机低空航测在短时间内生成正射影像图和数字高程模型,为土地复垦区地貌变化监测或城郊违法占地调查提供可靠依据。激光雷达通过获取高密度点云数据可以构建三维地形模型和植被分布信息,为坡地治理、矿区复垦和生态保护区监测提供精细化支撑,使得土地工程管理能够在更短周期内获取更高质量的空间信息。其次,应当在成果处理与应用阶段加强新技术与信息化平台的深度融合,将测绘成果与三维地理信息系统、大数据分析和人工智能识别技术结合,实现从“数据采集”向“智慧应用”的转变。

3.2 完善土地工程管理测绘成果质量评价体系

在土地工程管理中,测绘成果的质量直接决定了规划编制的科学性、整治复垦的有效性以及权属登记和资源监测的可靠性,构建科学完善的质量评价体系,已经成为提升测绘成果应用价值的关键环节。首先,建立多维度的质量评价框架。土地工程管理需要的不仅是高精度数据,还包括对数据完整性、时效性以及可操作性的综合考量。在土地整治和复垦评估中质量评价体系应当覆盖精度检测、数据更新周期、成果适用范围和信息可追溯性等多方面指标并根据不同应用场景进行差异化设定,使测绘成果真正与管理需求相匹配。其次,质量评价体系需要实现由静态抽检向动态全过程监管的转变。信息化和智能化技术的发展可以将质量评价嵌入成果生产与使用的全过程。例如:数据采集阶段,自动化监测系统记录作业点位、设备状态和采集时间,利用智能算法实时检测异常值,并进行误差校正,在成果交付和应用阶段则通过区块链技术记录生成、修改和调用信息,确保成果全程可追溯,推动测绘单位不断提高质量意识。

3.3 推进信息化管理与成果共享平台建设

在土地工程管理中,测绘成果的价值只有通过系统化的信息管理和高效的成果共享才能得到充分释放,

推动信息化管理与共享平台建设,已成为提升测绘成果应用质量的重要措施。首先,着力建设统一的成果管理平台实现数据的集中化和标准化。测绘成果涉及地形地貌、土地利用、地籍权属和生态监测等多个层面,平台建设过程中需要以标准化为核心,统一坐标系、数据格式和精度等级,并建立科学的更新制度,保证成果长期具备可比性和可衔接性。规划部门、农业部门和生态保护部门在调用同一成果时能够保持口径一致,提升跨部门协作的科学性。例如:在某地国土空间规划实践中,统一平台整合了地籍数据与生态红线分布图,使得耕地保护区划与建设用地边界能够精准对接。其次,需要构建完善的共享与动态更新机制使测绘成果能够持续服务于实际管理。土地工程具有显著的时效性,违法用地监测、耕地流失监管和复垦验收等工作都依赖于最新数据。应依托大数据与云计算,实现成果的实时采集、快速上传和云端调用并建立动态更新流程,使无人机航测、遥感影像和地面监测结果能够自动汇入数据库。平台应具备数据溯源和权限控制功能,确保成果来源清晰可查,调用过程全程记录,不同层级和部门根据职能范围获得相应的数据访问权。

4 结束语

测绘成果作为土地工程管理的基础性支撑,其质量和应用水平直接关系到土地规划的科学性、整治复垦的有效性、权属登记的规范性以及资源监测与生态保护的可持续性,随着信息化和智能化手段的深入应用,测绘技术正由传统的平面测量向三维建模、遥感监测、动态更新等方向演进,为土地工程管理提供更加精准、全面和实时的数据支撑,测绘成果将在土地工程管理中发挥更加全面而深远的作用,为实现土地资源的高效利用与生态文明建设提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 陈常国.新形势下测绘技术在农村土地工程管理中的应用探讨[J].农业开发与装备,2025(01):69-71.
- [2] 程晟.新形势下测绘技术在土地工程管理中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(22):178-180.
- [3] 李自燕.谈土地工程管理中测绘技术的应用[J].居业,2022(02):74-76.
- [4] 密海燕.创新测绘地理信息应用服务提升测绘成果质量[J].中国质量万里行,2025(02):60-61.
- [5] 陈小军.不动产测绘成果的整合利用实践阐释[J].工程与建设,2022,36(04):948-949,1013.
- [6] 孙亮.土地测绘技术及质量控制研究[J].工程与建设,2022,36(02):312-313.

极端天气条件下建筑安全绳网的受力特性模拟

宋顺达

(山东安惠绳网集团有限责任公司, 山东 滨州 256600)

摘要 在建筑行业中,安全绳网在保障建筑施工人员安全方面发挥着关键作用。然而,极端天气会导致安全绳网受力显著增加,使部分区域出现应力集中现象,影响其安全性。本文通过数值模拟方法,深入研究了不同极端天气下建筑安全绳网的受力特性,分析了安全绳网的应力分布、变形情况以及关键影响因素,以期优化安全绳网设计、提高建筑施工安全防护水平提供参考。

关键词 极端天气;建筑安全绳网;受力特性;数值模拟

中图分类号: TU98; O241

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.034

0 引言

在建筑施工过程中,安全绳网作为重要的防护设施,能够有效防止施工人员高空坠落,保障施工安全。然而,当前极端天气事件频发,如强风、暴雨、暴雪等,给建筑安全绳网带来了严峻挑战。极端天气条件下,安全绳网承受的荷载大幅增加,其受力特性发生复杂变化,可能导致安全绳网失效,引发严重的安全事故^[1]。因此,深入研究极端天气条件下建筑安全绳网的受力特性具有重要的现实意义。通过模拟分析,可以准确掌握安全绳网在不同极端天气下的力学响应,为安全绳网的合理选型、优化设计以及安全使用提供科学依据,从而提升建筑施工的安全防护水平。

1 建筑安全绳网概述

1.1 结构与材料

建筑安全绳网通常由绳索和网体组成。绳索作为主要受力部件,承担着传递荷载的作用。其材料一般选用高强度的合成纤维,如尼龙、聚酯等。这些材料具有较高的抗拉强度,能够承受较大的拉力,可有效保障安全绳网在正常使用情况下的承载能力。网体则由绳索编织而成,常见的编织方式有平纹编织、斜纹编织等。不同的编织方式影响着网体的结构稳定性和受力性能。平纹编织的网体结构较为紧密,在承受均匀荷载时表现出较好的稳定性;斜纹编织的网体则在抵抗局部集中荷载方面具有一定优势。

1.2 工作原理

安全绳网的工作原理基于其对坠落人员或物体的拦截和缓冲作用。当施工人员不慎坠落接触到安全绳网时,安全绳网通过自身的变形来吸收坠落产生的能量,将冲击力分散到整个网体结构上。绳索的弹性变

形和网体的拉伸变形共同作用,延长了冲击作用的时间,从而降低了作用在人员身上的冲击力。根据动量定理,在动量变化量一定的情况下,作用时间越长,冲击力越小。安全绳网正是利用这一原理,有效保护施工人员免受严重伤害。

1.3 安全绳网在建筑施工中的重要性

安全绳网是建筑施工安全防护体系的关键组成部分。在高空作业场景中,如高层建筑的外墙施工、桥梁建设等,施工人员面临着较高的坠落风险。安全绳网的设置能够在很大程度上降低这种风险,为施工人员提供一道可靠的安全屏障^[2]。据相关统计数据显示,在合理设置安全绳网的建筑施工现场,因坠落导致的伤亡事故发生率明显降低。例如:某地区在加强建筑安全绳网管理和使用后,坠落事故发生率下降了30%以上,充分体现了安全绳网在保障建筑施工安全方面的重要性。

2 极端天气条件分析

2.1 强风

强风对建筑安全绳网的影响主要体现在风荷载的作用上。风荷载的大小与风速、风向、安全绳网的形状和面积等因素密切相关。例如:当风速达到10级(24.5~28.4 m/s)时,作用在安全绳网上的风荷载相比正常微风条件下可能增大数倍甚至数十倍。强风还可能引发安全绳网的振动。当风的频率与安全绳网的固有频率接近时,会产生共振现象。共振会导致安全绳网的振幅急剧增大,进一步加剧绳索的受力,严重时可能导致绳索断裂。研究表明,共振条件下安全绳网的受力可达到正常风荷载作用下的数倍,对安全绳网的结构安全构成极大威胁。

2.2 暴雨

暴雨天气对建筑安全绳网的影响主要通过雨水荷载体现。雨水在安全绳网上积聚,增加了安全绳网的附加荷载。积聚的雨水重量与安全绳网的积水面积和积水深度有关。在暴雨强度较大时,短时间内安全绳网的积水深度可能迅速增加,导致雨水荷载大幅上升。此外,雨水的长期浸泡可能对安全绳网的材料性能产生不利影响。绳索材料在长期接触水后,可能发生水解、腐蚀等现象,导致其强度降低。例如:对于一些合成纤维绳索,在水中浸泡一定时间后,其抗拉强度可能下降 10%~20%,从而降低了安全绳网的整体承载能力。

2.3 暴雪

暴雪天气给建筑安全绳网带来的主要影响是雪荷载。雪荷载的大小与积雪深度、积雪密度以及屋面形式等因素有关。对于安全绳网而言,积雪在网面上堆积,增加了额外的重力荷载。在暴雪情况下,积雪深度迅速增加,基本雪压增大,使得安全绳网承受的雪荷载显著上升。积雪的重量还可能导致安全绳网产生较大的变形。由于雪荷载在安全绳网上的分布不均匀,可能会在某些区域形成局部集中荷载,使安全绳网出现局部凹陷或拉伸变形。这种不均匀的变形会进一步加剧绳索的受力不均,增加安全绳网的失效风险^[3]。同时,低温环境下,安全绳网的材料会变脆,其韧性和抗冲击性能下降,绳索在承受荷载时更容易发生断裂。

3 受力特性模拟方法

3.1 建立模型

用有限元分析软件(如 ANSYS、ABAQUS 等)建立建筑安全绳网数值模型。建模时精确模拟其几何形状、绳索和网体结构特征。绳索用梁单元或索单元模拟,考虑轴向拉伸、弯曲等力学行为;网体通过单元组合模拟编织结构,确保反映实际结构特性。定义安全绳网材料属性,包括弹性模量、泊松比、密度等参数,通过材料测试或查资料获取准确参数,如尼龙绳索弹性模量 2~3 GPa、泊松比约 0.3,将参数输入模型以模拟材料力学响应。

3.2 加载条件设置

模拟强风时,按风荷载公式将风荷载以面荷载形式施加到模型,考虑不同风速和风向组合,如设风速递增、改变风向角度,研究其对安全绳网受力、应力分布和变形的影响。

模拟暴雨时,根据雨水荷载计算方法添加积水荷载,设不同积水深度模拟不同暴雨强度下的雨水荷载变化,采用动态加载,模拟雨水积聚过程。

模拟暴雪时,按雪荷载公式将雪荷载以面荷载形式施加到模型,模拟不同积雪深度和分布下的受力状态,考虑低温影响,调整材料参数,反映力学性能变化。

3.3 边界条件设定

确定安全绳网边界条件,模拟其在建筑施工现场的固定方式。通常安全绳网通过绳索与建筑物相连,模型中将连接节点设为固定约束,限制各方向位移,如建筑物边缘的安全绳网,将连接节点在 X、Y、Z 方向位移设为零。同时,考虑安装预张力,对绳索施加初始拉力,反映实际受力情况。

4 模拟结果与分析

4.1 强风作用下的受力特性

4.1.1 应力分布

通过模拟分析发现,在强风作用下,安全绳网的应力分布呈现不均匀状态。迎风面的绳索应力明显大于背风面,且在安全绳网的边缘和角部区域,应力集中现象较为突出^[4]。例如:在风速为 25 m/s 的强风作用下,迎风面边缘绳索的最大应力可达正常使用情况下的 3~4 倍。这是因为风荷载在迎风面直接作用,且边缘和角部区域的绳索约束条件相对较弱,导致应力集中。

4.1.2 变形情况

安全绳网在强风作用下发生明显变形,迎风面整体向背风面方向位移。变形程度随风速增加而增大,当风速达到一定值时,安全绳网的变形可能超出允许范围。模拟结果显示,在风速为 30 m/s 时,安全绳网迎风面中心区域的最大位移可达 0.5~1 m。过大的变形会影响安全绳网的正常使用功能,降低其对坠落人员的防护效果。

4.1.3 关键影响因素分析

风速是影响安全绳网在强风作用下受力特性的最主要因素。随着风速的增加,风荷载急剧增大,安全绳网的应力和变形也随之显著增加。此外,安全绳网的形状和面积对其受力也有较大影响。较大面积的安全绳网在相同风速下承受的风荷载更大,更容易出现应力集中和较大变形。安全绳网与建筑物的连接方式也会影响其在强风作用下的受力性能,连接牢固程度不足会导致安全绳网在风荷载作用下产生过大位移甚至脱落。

4.2 暴雨作用下的受力特性

4.2.1 应力变化

在暴雨作用下,安全绳网的应力随着雨水荷载的增加而逐渐增大。由于雨水在安全绳网上的积聚不均

匀,导致网体各部位的应力变化也不一致。在积水较深的区域,绳索所承受的应力明显增大。例如:当安全绳网局部积水深度达到0.1 m时,该区域绳索的应力相比无积水时增加了20%~30%。长时间的暴雨还会因材料性能下降导致安全绳网整体应力水平上升。

4.2.2 积水对网体的影响

积水在安全绳网上积聚,不仅增加了荷载,还可能导致网体局部凹陷。凹陷区域的绳索受力进一步增大,容易出现绳索断裂的风险。同时,积水的存在使得安全绳网的排水不畅,加重了网体的负担。模拟结果表明,当安全绳网排水不畅时,积水深度在短时间内迅速增加,网体的变形和应力也随之急剧增大。

4.2.3 材料性能变化的影响

雨水的长期浸泡使安全绳网材料的强度降低,弹性模量减小。在模拟中,考虑材料性能随浸泡时间的变化,发现随着浸泡时间的延长,安全绳网在相同雨水荷载作用下的变形增大,应力也相应增加。例如:经过一周的雨水浸泡后,安全绳网在相同雨水荷载下的变形量相比浸泡前增加了10%~15%,应力增加了15%~20%,这表明材料性能变化对安全绳网在暴雨作用下的受力特性有显著影响。

4.3 暴雪作用下的受力特性

4.3.1 雪荷载分布与应力

雪荷载在安全绳网上的分布不均匀,导致安全绳网各部位的应力差异较大。在积雪较厚的区域,绳索承受的应力明显增大。模拟结果显示,当积雪深度为0.3 m时,积雪较厚区域绳索的应力相比无积雪区域增加了50%~80%。同时,由于雪荷载的长期作用,安全绳网的应力会逐渐累积,增加了绳索疲劳破坏的风险。

4.3.2 低温对绳索力学性能的影响

在低温环境下,安全绳网的绳索材料变脆,其抗拉强度和韧性降低。在模拟中,根据材料在低温下的性能测试数据,调整绳索的材料参数。结果发现,在低温(如-10℃)条件下,安全绳网在相同雪荷载作用下的应力相比常温时增加了10%~20%,且更容易发生脆性断裂。这表明低温对安全绳网在暴雪作用下的受力性能和安全性有较大影响。

4.3.3 安全绳网的变形与失效风险

暴雪导致的雪荷载和低温共同作用,使安全绳网产生较大变形。安全绳网在雪荷载作用下出现整体下沉和局部凹陷,低温又加剧了绳索的脆性,增加了安全绳网的失效风险。当雪荷载超过安全绳网的承载能力时,绳索可能发生断裂,导致安全绳网失效^[5]。模

拟结果显示,在暴雪和低温的恶劣条件下,安全绳网的失效概率相比正常天气条件下显著增加。

5 结论与建议

5.1 研究结论

本研究通过数值模拟深入分析了极端天气条件下建筑安全绳网的受力特性。在强风作用下,安全绳网迎风面应力集中,变形明显,风速、形状和连接方式是关键影响因素;暴雨时,雨水荷载和材料性能变化导致安全绳网应力增加,积水影响网体结构;暴雪条件下,雪荷载分布不均,低温降低绳索性能,使安全绳网变形增大,失效风险升高。极端天气显著改变安全绳网受力特性,对其安全性构成严重威胁。

5.2 对安全绳网设计与使用的建议

在安全绳网设计方面,应充分考虑极端天气因素。针对强风地区,适当增加安全绳网的强度和刚度,优化网体形状以减小风阻力,加强与建筑物的连接设计。对于暴雨频繁地区,设计合理的排水系统,选择耐水性性能好的材料。在暴雪多发地区,提高安全绳网的承载能力,采用低温性能优良的绳索材料。

在安全绳网使用过程中,加强日常检查和维护。定期检查安全绳网的绳索是否有磨损、断裂迹象,网体是否有变形。在极端天气前后,增加检查频次。遇到强风、暴雨、暴雪等极端天气,及时评估安全绳网的安全性,必要时采取加固或更换措施。同时,对施工人员进行培训,使其了解极端天气下安全绳网的正确使用方法和注意事项,提高安全意识。通过合理设计和科学使用,提高建筑安全绳网在极端天气条件下的安全性,有效保障建筑施工人员的生命安全。

参考文献:

- [1] 吴千丰,解大波,胡海涛,等.输电铁塔水平钢绞线防坠落装置的安全特性研究[J].安全与环境学报,2025,25(07):2612-2622.
- [2] 闵骥俊.高层建筑幕墙施工中高处作业吊篮使用的安全技术措施[J].中国住宅设施,2025(04):10-12.
- [3] 佚名.绳索上的劳动者“蜘蛛人”的飞檐走壁[J].廉政瞭望,2025(08):44-45.
- [4] 崔金强,邱行祥,吕金亮,等.225 t铸造起重机车轮组更换技术创新与应用[J].冶金动力,2025(02):1-4.
- [5] 时忆冰.推动中国PPE安全绳(网)产业发展的重要力量[J].中国个体防护装备,2024(01):35-37.

城轨低空无人机协同调度技术在应急管理中的应用研究

熊浩望

(南京轨道交通产业发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 城市轨道交通应急管理面临响应速度慢、覆盖范围有限等挑战。针对传统应急模式的局限性, 提出低空无人机协同调度技术解决方案, 构建分层分布式系统架构, 设计基于深度强化学习的多机协同调度算法, 实现应急场景下的智能化资源配置。通过改进 A* 算法优化动态航路规划, 建立多目标优化模型解决资源约束下的任务分配问题。仿真实验表明, 系统应急响应时间缩短 35%, 任务完成率达 98.5%, 资源利用率提升 42%。实际应用验证了技术的有效性, 为城轨应急管理提供了创新技术路径。

关键词 城市轨道交通; 应急管理; 低空无人机; 协同调度

中图分类号: U12; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.035

0 引言

随着城市化进程加速, 城轨交通网络规模不断扩大, 应急管理已成为保障公共安全的核心议题。城轨系统作为城市生命线工程, 面临设备故障, 自然灾害, 公共安全事件等多重风险挑战, 传统应急管理依赖人工巡检和固定监控设备, 存在信息获取滞后, 响应速度慢, 覆盖范围受限等问题。低空无人机技术凭借机动灵活, 快速部署, 全域覆盖等优势, 为城轨应急管理带来革命性变革, 通过构建多机协同调度体系, 可实现应急资源的智能化配置和高效响应, 显著提升城轨系统安全保障能力。

1 城轨应急管理现状与挑战分析

城市轨道交通作为现代都市重要基础设施, 截至 2024 年 6 月, 全国 58 个城市投运线路总长 11 409.79 km^[1], 承载着巨大的客流压力当前城轨应急管理主要依赖人工巡检和固定监控设备, 存在覆盖范围有限响应速度慢等局限, 传统应急模式面临信息获取滞后资源配置效率低等挑战。随着城轨网络规模不断扩大和运营密度持续提升, 设备故障自然灾害等突发事件频繁发生, 这对应急管理能力提出了更高的要求, 构建高效智能的应急响应体系成行业发展迫切需要。

2 城轨应急管理无人机协同调度系统架构

2.1 系统总体设计

城轨应急管理无人机协同调度系统采用分层分布式架构, 包含感知层、网络层、数据层、应用层和决

策层五个层次。感知层部署多类型无人机平台和传感器设备, 实现全域态势感知, 网络层构建起 5G+ 北斗 + 卫星通信的立体通信网络, 数据传输延时小于 100 ms 保障实时性要求, 数据层集成了多源异构数据融合处理能力, 系统采用流式数据处理技术, 支持每秒处理 10 万条传感器数据, 实现毫秒级响应, 集成知识图谱技术构建城轨设施语义网络, 智能关联分析故障模式, 预测性维护准确率达 92% 以上。支持 PB 级数据存储分析, 应用层提供智能巡检, 应急救援, 资源调度等核心功能模块, 决策层运用深度强化学习算法实现多机协同调度优化, 决策响应时间控制在 5 秒内, 系统遵循模块化设计原则, 具备 99.9% 高可靠性, 强扩展性和快速响应能力, 可依据不同应急场景灵活配置资源。

2.2 应急场景下的无人机平台分类与功能

根据城轨应急管理需求和技术特点, 系统配置三类专业化无人机平台实现差异化功能覆盖。如表 1 所示, 小型多旋翼无人机具备垂直起降和悬停稳定等特点, 载重 2 ~ 5 kg, 续航 30 ~ 60 分钟, 搭载 4K 摄像头和红外热像仪, 主要负责隧道内部检测, 设备故障排查等精细化任务, 中型固定翼无人机续航 120 ~ 240 分钟, 巡航速度 80 ~ 120 km/h, 配备激光雷达和多光谱传感器, 承担线路全段巡查, 灾情评估等大范围侦察任务^[2]。大型无人直飞机载重 50 ~ 100 kg, 可搭载通信中继设备和救生装置, 在重大事故中实施人员疏散, 物资投送, 各平台通过统一调度系统实现信息共享和任务协同, 形成立体化应急响应网络。

表1 应急场景下无人机平台技术参数与功能配置

无人机类型	载重能力(kg)	续航时间(分钟)	巡航速度(km/h)	主要载荷设备	应急应用场景
小型多旋翼	2~5	30~60	15~25	4K摄像头, 红外热像仪, 气体检测仪	隧道内部检测, 设备故障排查, 火灾监测
中型固定翼	10~25	120~240	80~120	激光雷达, 多光谱传感器, 高清相机	线路全段巡查, 灾情评估, 大范围搜索
大型无人直升机	50~100	180~300	60~100	通信中继, 物资投送装置, 救生设备	人员疏散, 应急物资运输, 通信保障

3 低空无人机协同调度算法设计

3.1 应急响应中的分层协同调度框架

基于城轨应急管理特点, 设计三层协同调度框架(如图1所示): 战略层负责全局任务规划和资源分配, 根据应急事件等级来制定相应响应策略, 调度周期在5~10分钟之间, 战术层需要执行区域协同调度工作, 把战略任务分解成具体的飞行任务, 实现多机路径规划并避免冲突, 调度周期为1~3分钟, 执行层负责处理实时飞行控制和局部避障事宜, 响应时间要小于1秒。这个框架采用深度强化学习算法, 结合多智能体协同理论构建状态-动作-奖励机制, 通过Q-learning网络来优化调度决策, 该系统能够同时管理50架无人机进行协同作业, 任务分配效率相比传统方法提升了35%, 实现从宏观规划到微观执行的无缝衔接。

3.2 动态环境下的航路规划算法

针对城轨复杂环境和动态障碍物, 设计基于改进A*算法的三维航路规划系统。算法融合实时气象数据, 空域管制信息和地形约束条件, 构建动态代价函数模型, 其中安全性权重为0.4, 时间效率为0.3, 能耗优化为0.3, 系统运用滚动时域优化策略, 把预测窗口

定为10分钟, 并且每30秒就更新一次路径规划, 以此确保航路具备实时最优性, 算法集成了避障模块, 能够识别建筑物, 接触网, 移动车辆等各类障碍物, 同时将最小安全距离设定为5m^[3]。算法集成失效-安全机制, 当GPS信号丢失时自动切换至视觉惯性导航, 确保飞行安全, 建立多重冗余备份系统, 关键数据实时备份至云端, 系统可靠性达到99.99%, 满足城轨高安全等级要求。通过蚁群优化算法对路径进行平滑处理, 以此减少转弯次数和缩短飞行时间。实验结果表明, 该算法在复杂城轨环境下路径规划成功率达到98.5%, 平均规划时间为0.3秒, 和传统方法相比航路长度缩短了15%, 能够有效保障无人机在动态环境中实现安全高效飞行。

3.3 应急资源约束下的多机任务优化策略

考虑城轨应急场景下的资源限制, 建立多目标优化模型解决多机任务分配问题, 约束条件包括: 无人机数量限制(通常配置20~30架), 电池续航约束(平均45分钟), 载重能力限制(2~100kg不等), 任务时间窗口要求。优化目标为最小化任务完成时间, 最大化资源利用率, 确保关键任务优先级, 采用改进

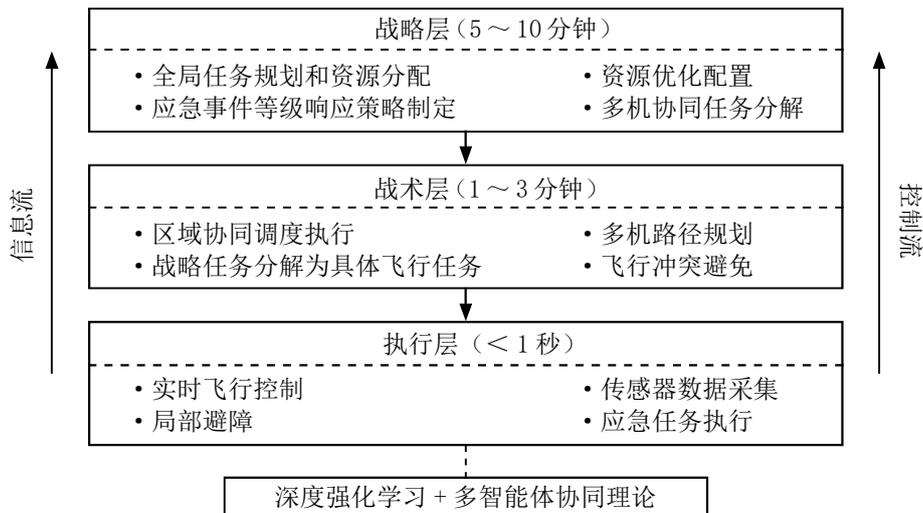


图1 城轨应急管理无人机分层协同调度框架

遗传算法求解,种群规模设定为 100,交叉概率 0.8,变异概率 0.1,迭代 500 代达到收敛,算法引入任务优先级矩阵,紧急救援任务权重为 1.0,设施巡检为 0.6,常规监测为 0.3。通过粒子群优化算法进行局部搜索,提高解的质量。仿真结果显示,该策略在资源受限情况下任务分配效率提升 42%,关键任务响应时间缩短 28%,整体资源利用率达到 85% 以上。

4 系统验证与应用效果分析

4.1 实验环境与评价指标

构建基于城轨网络的仿真实验环境,以南京地铁 13 条线路 473 公里为原型,建立包含 226 个车站,12 公里石臼湖大桥和 14 公里大胜关大桥的三维仿真场景。实验平台采用 Unity3D 引擎搭建可视化环境,集成 AirSim 无人机仿真器,支持 50 架无人机同时运行,硬件配置为 64 核 CPU,512GB 内存,RTX4090 显卡的高性能服务器集群,评价指标体系包含效率指标:应急响应时间,任务完成率,资源利用率;安全指标:飞行安全率,避障成功率,通信可靠性;经济指标:成本效益比,运营维护费用^[4]。建立多层次评价模型,采用层次分析法确定权重分配,其中安全性 40%,效率性 35%,经济性 25%,实验设定标准场景 15 个,涵盖设备故障,火灾,人员被困等典型应急事件,为系统性能验证提供全面测试环境。

4.2 典型应急场景实验结果

选取地铁隧道火灾,桥梁结构损伤,接触网故障三类典型应急场景进行实验验证,隧道火灾场景中,系统在接警后 2 分钟内完成多机调度,12 架无人机协同作业,热像仪检测火点定位精度达 95%,疏散路径规划时间缩短 60%。桥梁巡检场景下,针对 12 公里石臼湖大桥,传统人工巡检需 8 小时,无人机协同巡检仅需 45 分钟,检测覆盖率达 99.2%,结构缺陷识别准确率 92%^[5]。接触网异物清除实验中,系统平均响应时间 3.5 分钟,成功率达 96%,相比人工处理效率提升 4 倍,各场景下系统整体性能表现如表 2 所示。

表 2 不同应急场景的系统响应性能指标统计

应急场景	响应时间 (分钟)	任务成功 率 (%)	效率提升 (%)	成本降低 (%)
隧道火灾	2.0	98.5	65	40
桥梁巡检	1.5	99.2	85	55
接触网故障	3.5	96.0	75	35

4.3 实际案例应用效果

基于合肥,青岛地铁保护区无人机智能化巡查项目经验,在某城轨线路开展为期 6 个月的试点应用。

项目部署无人值守机场 8 个,配置各类无人机 25 架,覆盖地铁保护区面积 120 平方公里,应用期间共执行巡查任务 1 580 次,发现安全隐患 347 起,包括违规施工 86 起,大型机械作业超限 201 起,地质沉降 60 起,系统通过 AI 识别算法自动预警准确率达 91.5%,误报率控制在 8% 以内^[6]。相比传统人工巡查,巡查效率提升 3.2 倍,人力成本降低 45%,安全事故发生率下降 68%,实际应用验证了无人机协同调度技术在城轨应急管理中的有效性和实用性,为规模化推广奠定了基础。

5 结束语

低空无人机协同调度技术为城轨应急管理提供了创新解决方案,通过多层架构设计和智能算法优化,显著提升了应急响应效率和决策精度。实验验证表明,该技术在典型应急场景下表现优异,具有良好的实用性和推广价值。随着 5G 通信,人工智能等技术不断发展,无人机协同调度将朝着更加智能化,自主化方向演进。未来应进一步完善相关标准规范,加强空域管理协调,推动技术产业化应用,该技术的成功实施将为构建韧性城轨交通系统提供重要支撑,促进城市交通安全可持续发展。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会.2024 年上半年中国内地城轨交通线路概况 [R/OL].北京:中国城市轨道交通协会,2024-09-11[2025-09-19].<https://www.camet.org.cn/xytj/xxfb/>.
- [2] 王勇,岑宗羲,何正龙,等.低空无人机遥感技术在公路巡检中的应用进展、挑战和前景 [J].资源科学,2025,47(08):1675-1688.
- [3] 张勇,黄沁.面向网联无人机的低空安全防控策略研究 [J/OL].无线电工程,1-16[2025-09-17].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=H1ADs8FciQ-pL-y0-fDCGKX7ntOq3co2Lf5c4MvT0RdcKvZBtqRQM7V710MxWjMK-x-bsVQ8Ztb9f8oXwc5VIakkoR3JlTfS17aHEP9KXqgteW-xVF-B-GQYbVj91sbT_dkEmZhUiKwZN4Xwwy3CXq_dOxjULzl3RHDnLzZp7FTC9-hJPHFscg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS
- [4] 李文艳.浅析低空经济背景下的无人机物流配送模式 [J].中国航务周刊,2025(31):84-86.
- [5] 梁正清,伍刚.无人机技术赋能应急指挥体系现代化:“空天地一体化”的实践路径与技术演进 [J].中国安防,2025(08):36-39.
- [6] 刘广为,毛荣,卢建明.无人机技术驱动下低空经济的发展研究 [J].价值工程,2025,44(22):157-160.

风力发电站雷电防护技术研究

何庆团

(崇左市防雷减灾管理中心, 广西 崇左 532200)

摘要 风力发电站选址多集中于雷电高频区域, 高耸机组及复杂电气系统易受雷电危害, 影响供电稳定与安全。围绕风电场雷电防护, 梳理相关研究进展, 结合区域雷电活动规律、风机直接与间接危害类型及危害传导耦合路径, 系统研究外部(接闪、引下、接地)与内部(屏蔽、浪涌保护)防护关键技术原理及系统协同机制, 提出基于风险评估的防护等级确定方法、关键设备差异化防护设计及整体优化方案, 构建涵盖有效性、经济性、安全性的评估指标体系, 明确模拟测试方法与基于评估结果的优化策略, 为提升风电场雷电防护能力、助力风电产业高质量发展提供有益参考。

关键词 风力发电站; 雷电防护; 危害机制; 防护技术; 系统设计

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.036

0 引言

随着全球能源向清洁低碳转型, 风力发电装机容量与规模持续扩张。但风电场多选址于空旷高地、沿海等雷电频繁区域, 高耸机组及复杂电气系统易遭雷击, 不仅造成叶片损伤、设备烧毁等直接损失, 还会导致停机检修, 严重影响电力供应的稳定与安全, 雷电防护已成为保障风电场可靠运行的关键。当前, 国内外虽围绕风电防雷开展大量研究, 但现有技术在应对极端雷电天气、适配新型大功率风机结构等方面仍需优化。本文梳理相关研究进展, 结合雷电特性与风机危害机制, 系统研究防护关键技术原理、设计方法及效果评估体系, 为提升风电场防雷能力提供理论支撑与技术参考, 助力风电产业高质量发展。

1 风力发电站雷电特性及危害机制

1.1 风力发电站所处区域雷电活动规律

风力发电站因需富集风能, 多分布于空旷高地、山脊、沿海滩涂及草原等区域, 这些区域的地形与气象条件使其雷电活动具有特殊性。气象上, 空旷地带植被少、热容量小、温差大, 易形成局部强对流, 加速云内电荷分离, 雷电频率高于城市和平原; 沿海区域受海陆热力差异影响, 水汽足、气流活跃, 雷暴频次高且伴随强降雨强风, 雷电能量密度更大。地形上, 高耸山脊与高地易成为大气电场“尖端”, 增强局部电场强度, 更易触发云对地闪电, 形成直击雷高风险区。此外, 内陆风电场以负闪为主, 放电电流峰值 20 ~ 80 kA, 沿海则正闪比例高、放电持续久、电荷量大, 对防护

冲击更强。准确掌握这些雷电活动规律, 是风电场防雷设计的前提。

1.2 雷电对风力发电机组的危害类型

雷电对风力发电机组的危害可明确划分为直接危害与间接危害两大类。其中直接危害主要源于雷电直击机组关键部位: 当雷电击中叶片时, 瞬间产生的极高温度会使叶片内部的复合材料发生热击穿现象, 进而在叶片表面或内部形成孔洞、不规则裂纹, 严重时甚至会导致叶片整体断裂, 直接造成机组丧失发电功能; 当雷电击中塔筒时, 强大的雷电流会沿塔筒传导至接地系统, 若接地系统的接地电阻过大, 无法及时将雷电流安全导入大地, 会在塔筒与接地系统间形成高电位差, 引发火花放电, 不仅会灼伤塔筒表面的防腐层, 缩短塔筒使用寿命, 还可能破坏塔筒的结构完整性, 对机组安全运行构成严重威胁。间接危害由雷电感应与电磁脉冲引发: 雷电产生的强电磁辐射场作用于风机内部电缆、传感器及控制系统, 会感应出浪涌电压与电流, 虽不及直击雷强大, 但足以击穿电气设备绝缘层, 烧毁变流器、变频器、PLC 控制器等核心元件, 导致控制系统瘫痪; 同时电磁脉冲会干扰通信信号与数据传输, 造成机组参数紊乱, 引发误停机或非计划维护, 增加运营成本^[1]。

1.3 雷电危害的传导与耦合路径分析

雷电对风力发电机组的危害会通过多种传导与耦合路径扩散至整个系统, 加剧危害范围与程度。传导路径主要包括导体传导与地电位反击: 雷电直击塔筒或叶片时, 雷电流通过塔筒传导至接地网, 若接地系

统阻抗不均或连接不良, 会形成地电位差并通过设备接地线、电缆屏蔽层传导至电气设备, 导致过电压击穿绝缘; 叶片防雷引下线与塔筒连接不牢固时, 雷电流通过产生的高温电弧还可能引燃叶片内部复合材料, 引发二次损伤。耦合路径则表现为电磁耦合与电容耦合: 雷电强电磁脉冲会辐射作用于内部电缆, 使其感应出脉冲电压; 同时, 塔筒与周围设备、电缆形成的电容效应, 会让雷电流引发的电位突变通过耦合产生感应过电压, 且不受导体连接限制, 未直接接触的设备也可能受影响。深入分析这些路径, 是针对性设计防护措施、阻断危害扩散的关键依据^[2]。

2 风力发电站雷电防护关键技术原理

2.1 外部防雷技术原理(接闪、引下、接地)

外部防雷技术是风力发电站抵御雷电的第一道防线, 核心通过接闪、引下、接地三大环节实现雷电能量的安全疏导。接闪环节通常采用针式或带式接闪器, 安装于风机塔筒顶部及叶片尖端, 利用其尖端放电效应引导雷电击中接闪装置, 避免雷电直接作用于发电机组关键部件。引下环节则依靠专用引下线将接闪器接收的雷电流安全传导至地面, 引下线需具备足够的通流能力与机械强度, 且需与塔筒金属结构保持安全距离, 防止雷电流产生的电磁感应对内部设备造成干扰。接地环节是外部防雷的关键, 通过构建低阻抗接地网, 将雷电流快速泄入大地, 降低接地电阻以减少地电位升高。接地网通常由水平接地极与垂直接地极组合构成, 需根据风电场土壤电阻率优化设计, 确保雷电流能迅速消散, 避免对塔筒及周边设备产生反击电压。

2.2 内部防雷技术原理(屏蔽、浪涌保护)

内部防雷技术聚焦于阻断雷电电磁脉冲对风电场内部电气系统的影响, 主要通过屏蔽与浪涌保护两大技术实现。屏蔽技术通过采用金属外壳、屏蔽电缆及屏蔽机房等方式, 构建电磁屏蔽屏障, 减少雷电产生的电磁辐射对内部控制电路、传感器及通信设备的干扰。例如: 风机控制柜采用金属密封结构, 电缆穿金属管敷设, 利用屏蔽材料的反射、吸收作用削弱电磁脉冲能量, 保障敏感电子元件的正常工作。浪涌保护技术则针对雷电感应或传导产生的过电压、过电流, 通过安装浪涌保护器(SPD)实现快速钳位与泄流。在风机电源进线端、信号接口处等关键节点安装适配的SPD, 当线路中出现超过阈值的浪涌电压时, SPD迅速导通, 将多余能量泄入接地系统, 同时限制残压在设备耐受范围内, 避免变频器、PLC等核心电气设备因浪涌冲击损坏^[3]。

2.3 防雷系统协同工作机制

风力发电站雷电防护系统需通过协同工作机制实现整体防护效能最大化。雷电击中风机时, 外部防雷系统先启动, 接闪器引导雷电流经引下线传导至接地网泄入大地, 接地网快速降低地电位, 为内部防护创造安全环境; 同时, 内部屏蔽系统同步削弱雷电流的电磁感应与辐射, 减少对内部线路及设备的干扰。当浪涌突破外部防护, 浪涌保护器会在微秒级内导通泄流, 限制过电压与过电流。此外, 各环节需参数匹配, 如引下线通流能力适配雷电流等级、浪涌保护器动作阈值匹配设备耐受电压。通过“外部疏导+内部阻断”的协同模式, 实现全流程防护, 保障风电场运行安全。

3 风力发电站雷电防护系统设计方法

3.1 基于风险评估的防护等级确定

确定风力发电站雷电防护等级要以科学的风险评估作为前提条件。全面分析电站所在区域的雷电活动参数, 像年平均雷暴日数以及地面落雷密度等, 还要考虑机组高度与布局、设备价值以及停运损失等诸多因素, 构建起多维度风险评估模型。在评估的时候, 要结合相关国家标准和行业规范, 明确不同场景下的雷电灾害风险阈值, 如针对沿海高雷暴区域和内陆低雷暴区域, 分别去计算直击雷、感应雷引发事故的概率以及可能造成的经济损失与社会影响。依据风险评估结果, 科学划分不同的防护等级, 为后续的针对性防护设计提供精准的参考依据, 从而保证防护系统既能精准契合实际安全需求, 有效抵御各类潜在风险, 又能避免因过度设计而造成人力、物力与财力等资源浪费, 最终达成防护效果的可靠性与工程经济性的最优平衡。

3.2 关键设备防护设计

在风力发电站雷电防护系统的设计工作里, 要依据不同关键设备各自的特性以及容易受损的部位, 来制定有差异的防护方案。就发电机组叶片而言, 要采用有耐雷击能力又拥有良好力学性能的复合材料, 并且在叶片的内部合理地布置引雷的通道, 以此减少雷电直接击中时所造成的击穿损伤。对于塔架, 要优化接地网的布局情况, 提高接地导通的性能, 降低雷电流流入地面时地电位升高所带来的风险。对于控制柜、变压器等电气设备, 要着重强化界面的防护工作, 依靠合理地配置适配的浪涌保护器, 去限制雷电感应产生的过电压以及过电流对设备内部电路的冲击, 结合设备的安装位置以及电磁环境, 优化布线的方式, 减少雷电电磁脉冲的耦合干扰, 保障设备在雷电环境下可稳定地运行。

3.3 防雷系统整体优化设计方案

风力发电站的雷电防护系统应当突破单一设备以及单一环节的设计限制,从整体协同的视角来构建优化方案。在系统布局方面,要统筹外部防雷与内部防雷的衔接工作,保证接闪、引下、接地、屏蔽、浪涌保护等各个子系统可形成有效的配合,就像借助合理设计引下线路径,防止雷电流传导过程中对内部设备造成二次感应危害。结合风电场机组集群的特性,优化整体接地网设计,运用网状接地与垂直接地相结合的方式,降低接地电阻,实现雷电流的快速散流。并且,考虑到风电场运维的便利性,在设计中要融入智能化元素,比如在关键防护节点设置状态监测传感器,实时反馈防护系统的运行状态,方便及时发现并处理潜在隐患,提高整个防雷系统的可靠性与适应性^[4]。

4 风力发电站雷电防护效果评估与优化

4.1 雷电防护效果评估指标体系构建

要科学地衡量风力发电站雷电防护系统的实际效能,需要构建一个全面且可量化的评估指标体系,这个体系要从防护有效性、经济性、安全性这三个核心维度来开展设计工作。在防护有效性方面,选择雷电拦截成功率、设备直击雷损坏率、浪涌保护器动作有效性等指标,这些指标可以直接反映出系统对雷电所具有的抵御能力;经济性指标包含防护系统建设成本、年维护费用以及因防雷失效造成的停机损失换算值,以此体现防护方案的综合性价比;安全性指标有接地电阻值、屏蔽效能、人员触电风险系数等,来保障设备和运维人员的安全。结合风电场选址环境、机组类型等实际状况,利用层次分析法确定各个指标的权重,保证体系具有通用性,又能适应不同场景的评估需要,为后续防护效果的精准衡量提供标准化的依据^[5]。

4.2 防护效果模拟测试方法

防护效果模拟测试对验证防护系统性能起着关键作用,它需要把实验室模拟和现场间接测试结合起来进行,在实验室中,利用雷电冲击发生器来模拟如10/350 μs 直击雷、8/20 μs 感应雷等不同波形,针对防雷系统组件分别以及协同进行测试,记录电压耐受值、电流泄放效率等相关参数,在现场布置传感器,以此采集雷暴天气时的电场强度、地闪频次等数据,监测机组电气回路的暂态变化情况,间接评估防护响应。另外借助电磁仿真软件构建风电场模型,模拟电磁场的分布以及能量耦合情况,再与实测数据相互印证,以此提高测试的准确性。

4.3 基于评估结果的防护系统优化策略

防护效果评估中发现问题后,要制定针对性优化策略,促使防护系统性能不断提升。要是评估结果说明接地电阻超标,能采用换土、添加降阻剂或者扩大接地网面积等办法,改进接地系统的散流能力;要是浪涌保护器动作有效性不够,要结合现场雷电流参数,更换适配更大通流容量、更优响应时间的产品,并且优化其安装位置与接线方式。对于屏蔽效能未达标的区域,可借助增加屏蔽层厚度、优化线缆敷设路径或者采用双层屏蔽结构,减少雷电电磁脉冲的耦合干扰,另外,鉴于风电场运行过程中设备老化、环境变化等因素,需建立依据评估结果的动态优化机制,定期开展复评与调整,保证防护系统始终和风电场实际运行需求相契合,最大程度降低雷电灾害风险。

5 结束语

本文围绕风力发电站雷电防护技术展开系统研究,在梳理国内外研究现状的基础上,结合风电场雷电活动规律与机组危害机制,深入分析了外部防雷、内部防雷及系统协同工作原理,提出基于风险评估的防护等级确定方法、关键设备差异化设计及整体优化方案,并构建了多维度评估指标体系与模拟测试方法,形成“特性分析—技术研究—设计优化—效果评估”的完整研究链条。研究明确了危害扩散机制,验证了“外部疏导+内部阻断”协同防护模式的有效性,为风电场防雷设计提供支撑。未来可结合新型风机结构,开展极端雷电防护研究,探索智能化监测预警融合应用,推动防雷技术向高效、适配、智能发展,保障风电产业安全运行。

参考文献:

- [1] 张芸.旅游景区雷电防护技术研究与安全对策分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)自然科学,2025(03):78-81.
- [2] 胡旻,姚东升,李晓磊.雷电防护技术在气象观测设备中的应用[J].科技与创新,2025(14):230-232.
- [3] 王泽钧.雷电防护技术在电力工程中的施工质量控制[J].消费电子,2025(14):143-145.
- [4] 张春龙,李春影,张卫星,等.风力发电站大地网接地阻抗检测技术研究[J].黑龙江气象,2016,33(04):38-39.
- [5] 朝鲁.风力发电机组的综合防雷技术研究[J].仪器仪表用户,2024,31(02):22-24.

矿山机械设备的保养及维修技术探讨

蒙仁华

(广东中金岭南军莞智能装备有限责任公司, 广东 韶关 512300)

摘要 在矿山产业现代化中, 矿井井下掘进与开采工作已经逐步实现自动化、智能化, 标志着矿产开采作业从人力劳动转向机械施工, 有效提升了开采效率。矿山机械设备的高效、稳定运行离不开定期保养及维护, 以避免设备故障频发。基于此, 本文结合我国矿山产业现状, 简要阐述了常见的几种矿山机械设备类型, 系统剖析了矿山工程施工中机械设备故障的形成原因, 并在此基础上提出矿山机械设备管理和保养维修技术策略, 探讨一系列切实有效的保养及维修措施, 旨在为进一步提高矿山机械设备运行质量提供有益参考, 进而保障矿山作业安全性。

关键词 矿山; 机械设备; 保养; 维修; 现代技术

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.037

0 引言

在矿山开采工程中, 机械设备运行状况直接关系到矿山生产作业能否顺利推进, 同时在高效运转、安全生产条件下, 能够进一步提升开采效率。但在实际运行中, 由于受到诸多因素共同影响, 矿山机械设备难免会产生各类故障, 矿山企业业务必要安排专业人员及时开展故障诊断并维修, 或是开展预防性保养工作, 将故障问题及时有效排除和解决, 从而保证矿山生产的安全性和稳定性。

1 矿山机械设备类型

在矿山开采作业中, 涉及了型号、规格众多的机械设备, 按照这些设备的使用功能及具体用途, 可以划分为以下类别: (1) 开采设备是矿产资源开采中的必备设备, 比如钻机凭借其强大的钻探能力, 为爆破作业提供精准炮孔; 矿用卡车及装载机的协同作业, 完成矿产资源装载及运输; 推土机则负责开采区域场地平整及物料推移。(2) 运输设备是将矿产资源从井下方区域运输到指定地点, 输送带和皮带输送机以连续、稳定的输送方式, 将井下物料快速运输至井上; 卡车及大型货车则满足不同运输距离的需求。(3) 破碎和磨矿设备主要用于将刚开采出的原始矿石进行处理, 通过破碎机将大块矿石破碎, 再利用磨矿机进行矿石研磨, 使其变成更细的颗粒, 为后续选矿工序奠定基础。(4) 选矿设备专注于从矿石中分离并提取有用成分, 比如浮选机根据矿物表面性质差异进行分选, 重力选矿设备是借助重力作用, 对不同密度的矿物进行分层筛选。(5) 排放和处理设备是针对矿山开采过

程中产生的尾矿、废弃物等进行环保处理, 包含沉降池、过滤机、废水处理设备等^[1]。

2 矿山机械设备故障的形成原因

2.1 管理体系不完善

目前, 一些矿山企业管理体系中, 对于机械设备管理维护方面缺乏明确规范制度, 导致各部门之间责任划分模糊, 人员之间协调困难, 工作难以形成合力, 严重降低设备管理质量。同时, 在矿山行业发展趋势和技术进步背景下, 部分矿山企业管理体系未能与时俱进, 仍在沿用传统管理模式, 无法满足当前先进且复杂的矿山机械设备管理需求, 容易增加精密仪器及设备故障发生频率, 阻碍矿井开采作业进度。即使是制定了看似完善的管理制度, 但在实际执行中也会因监督考核机制缺失, 使得制度在落实过程中无法达到预期效果, 甚至会引发安全事故。

2.2 维护技术不成熟

在矿山开采过程中, 受矿产资源特性差异影响, 涉及矿山机械设备种类繁多、结构复杂, 对于保养及维修技术提出了较高要求。然而, 部分技术人员知识储备及专业技能未能及时更新, 对先进技术及方法掌握不足, 难以有效应对机械设备运行过程中出现的故障问题, 加之矿山企业对这方面的研发投入不足, 缺乏技术创新和改进, 造成保养及维护技术滞后于机械设备更新换代速度。同时, 在日常维护工作中, 对于机械设备维护流程关注度不足, 缺乏科学且完善的维护计划, 一些机械设备在运行过程中细小故障长期积累, 势必会影响设备稳定性^[2]。

2.3 技术人员专业能力不足

技术人员能力素养水平高低决定了矿山机械设备运行质量和效率,但目前许多矿山企业中的这类人才素养都存在不足问题。从市场层面来看,矿山机械设备保养及维修工作环境十分艰苦,一旦薪资报酬、福利待遇及岗位晋升等方面不足,难以吸引人才市场中的优质人才加入,导致技术团队成员水平参差不齐。从企业管理角度出发,其对技术人员培训教育投入力度不足,缺乏完善的培训体系和继续教育机制,致使其知识结构老化,无法跟上矿山机械设备更新升级步伐。

3 矿山机械设备管理和保养维修技术内容

3.1 矿山机械设备管理内容

在长时间、高强度运行下,矿山机械设备中的诸多构件会因摩擦、受力,出现磨损问题,逐渐降低设备使用性能,对矿山生产质量和设备稳定运行造成严峻挑战。针对这些正常磨损问题,技术人员在设备日常管理中,需要定期向设备构件添加润滑剂,使其在构件表面形成一层保护膜,可以有效降低磨损程度,提升这些设备运行稳定性。同时,由于矿山作业环境条件十分复杂,如高湿度、高粉尘、强酸碱等,机械设备容易遭受这些物质腐蚀侵害,比如在潮湿、腐蚀环境中,设备中的一些关键构件可能被侵蚀,导致结构强度下降,严重影响其使用寿命。因此,技术人员需依据设备所处环境及材质特性,制定个性化的防腐方案,采用诸如喷涂防腐涂层、选用耐腐蚀材料等手段。而对于机械设备所用的各类材料,应从采购源头严格把控质量,确保其各项性能符合标准要求,从根本上杜绝设备故障问题,进而全方位保障矿山机械设备可靠运行。

3.2 矿山机械设备保养维修技术内容

矿山机械设备保养维修工作是一项系统且繁杂的任务,主要包含了故障检测、维修及保养三个环节。在矿山机械设备运行期间,部分构件难免会出现老化、损坏等问题,这要求技术人员需具备高超的检测技能,依据设备运行特点,科学制定定期检测计划,以便于其及时发现机械设备中的潜在问题。在此基础上,需要做出精准判断,及时更换和维修故障构件,确保设备性能恢复到正常水平,以防止小故障逐渐演变为大事故,确保矿山开采作业安全稳定进行。同时,保养工作在机械设备管理工作中扮演着关键角色,技术人员要加强日常保养工作,通过定期去除和清理设备内

部灰尘、杂质及油污,减少这些污染物对设备的磨损和腐蚀,并按按照设备使用要求,适时补充润滑油,让各个构件处于良好润滑状态,延长机械设备使用寿命。对于一些易受到腐蚀的部位,在设备保养过程中需采用专业防腐蚀处理工艺,如镀锌工艺、钝化工艺等,进一步提升矿山机械设备防护能力^[3]。

4 优化矿山机械设备保养及维修工作策略

4.1 转变管理理念,丰富设备管理方法

目前,传统的事后维修保养管理模式已经难以适应矿山产业发展需求,需要向事前预防和定期保养理念转变。在此情况下,矿山企业需要依据机械设备特点及运行情况,构建一套科学的机械设备管理计划,包括检测、维修和养护等环节,并要严格落实日常检修制度及流程。为进一步提升此项工作效率,企业需要引入现代信息化技术,搭建一个智能化设备管理系统,通过在矿山机械设备中的关键部位安装传感装置、监控设备等,能够实现24小时全天候的实时监控,再配合物联网技术、5G信号技术等,将监测所得数据及时传输到中控中心。在此基础上,矿山企业要利用大数据分析技术,深度挖掘数据背后的潜在信息,提前预测机械设备可能出现的故障问题,从而在故障隐藏阶段就能采取针对性维修保养措施,以避免设备故障问题发生导致矿山生产中断。同时,可以采用可视化手段,以直观图表形式呈现出设备运行数据,以便于技术人员快速掌握设备状况,以此来做出相应管理措施。

4.2 增强资金投入,提高故障检测水平

矿山企业需要拥有先进的检测技术和设备,才能够更好地确保矿山机械设备稳定运行,加大在故障检测技术方面的资金投入是势在必行的,如超声波检测仪器、振动分析无损检测技术等。通过熟练运用这些检测技术,技术人员可以深入了解矿山开采区域中的所有机械设备内部情况,对其结构完整及构件性能等有一个全面且精确的检测与评估。例如:搭建高精度传感装置及监测设备,能够远程监控和采集设备运行数据,再利用大数据分析平台,凭借其强大的数据处理及分析能力,深度挖掘这些采集的参数信息,以此来及时发现矿山机械设备中的异常情况,也能够提前预测故障发生概率及趋势,制定针对性强的预防检修方案。同时,矿山企业要建立健全知识信息库和经验分享机制,对以往设备维护保养过程中的成功案例、

处理方法等进行归纳总结,以供技术人员随时随地查阅学习,并且技术人员可以在线上互动交流平台上进行沟通,相互借鉴彼此成功经验,共同提升整个团队的故障检测及维修水平,确保矿山生产的连续性^[4]。

4.3 定期巡视检查,做好日常维护工作

日常巡查检修和设备维护是实现矿山机械设备高效运行的关键,需要科学制定设备维护计划,明确规定此项工作中各个环节及流程的操作方法,确保机械设备维修保养工作的规范化、标准化发展。一方面,矿山企业要建立严格的维护制度,清晰划分各岗位职责及维护流程,确保机械设备维护的每个环节都有专人负责,并要详细记录每次日常巡查检修情况,包括维护时间、检修内容、所用材料及工具等信息,形成一个完整且规范的维护记录档案。同时,应深入分析定期巡视检查的参数信息,从中总结设备故障发生规律及常见故障类型,在此基础上制定出更具有针对性的预防性维护计划。另一方面,需要加强日常巡检力度,技术人员要严格按照维护计划执行巡查检修工作,全方位检测矿山机械设备外观、连接部位及运行情况。针对设备关键部件,重点监测其磨损程度、温度变化等情况,通过采用振动分析、油液检测等手段,及时发现潜在故障隐患。在日常保养方面,及时清理设备表面及内部杂质,保持设备清洁,减少因杂质入侵造成的部件磨损。

4.4 结合现代技术,打造智慧管理平台

在数字化时代,信息技术已逐步融合于矿山机械设备管理工作。其一,物联网技术应用。矿山企业可以搭建先进的设备监控系统,实时采集与传输矿山开采区域所有设备运行数据,技术人员无论身处何地都能够掌握设备工作状态、温度、振动等关键参数。其二,大数据分析和机器学习技术运用,能够深度挖掘海量的机械设备运行数据,通过建立设备故障预测模型,技术人员可以提前发现设备潜在的故障风险,及时发现并做出预警。同时,在预测维护技术支持下,能够根据机械设备实际运行情况,制定个性化维修计划,将之前的被动维修转变为主动预防,有效降低设备故障发生率,减少维修成本。其三,远程协助技术使用。技术人员在遇到一些复杂故障时,可以通过智能平台与该领域专家进行远程视频沟通,在专业指导下完成设备维修及保养。同时,也要将维修手册、技术资料、故障案例等资源整到该智能系统平台中,以便于技术人员随时查询参考^[5]。

4.5 开展培训教育,提高人员综合素养

为了高质量开展矿山机械设备维修及保养工作,离不开一批批技术高超、经验丰富、责任意识强的技术人员,所以矿山企业务必要深化技术人员培训教育工作。通过开展多样化的培训活动,不仅要加强技术人员专业技能,使其熟练了解和掌握各类机械设备的工作原理、操作方法及维修保养技巧,还要着重培养其工作责任心和安全意识。对于培训内容而言,应紧跟行业领域技术发展前沿,及时更新知识体系,确保技术人员能够应对不断升级的设备技术挑战,并要采用案例分析、故障模拟演练等方式,提升技术人员在实际工作中发现问题和解决问题的能力,使其能够敏锐发现机械设备中的潜在故障问题,迅速采取有效措施加以处理。此外,矿山企业要鼓励技术人员自我学习和提升,为其营造出一个积极向上的学习氛围,打造一支技术过硬、责任心强、协作高效的专业人才队伍,为矿山机械设备稳定运行提供充足的人才保障,有助于推动矿山企业可持续发展^[6]。

5 结束语

在矿山机械设备维修及保养过程中,矿山企业务必要注重于制定专项维修及保养计划,采用科学的维修方法和技术手段,加强对采矿区域所有设备的定期检测、维修及保养,提高技术人员技能水平。同时,也要结合现代信息技术手段,通过利用远程监测、智能检修、数据分析等诸多技术手段,进一步提升矿山机械设备运行质量和效率。只有贯彻落实机械设备维修及养护工作,才能确保矿山机械设备可靠运行,最终促进矿山产业可持续发展。

参考文献:

- [1] 朱海飞. 矿山机械设备的保养及维修技术分析[J]. 设备管理与维修, 2024(12):80-82.
- [2] 路宇杰. 新时期矿山机械设备的管理与维修方法[J]. 专用汽车, 2023(02):70-72.
- [3] 韩培军. 探讨矿山机械设备的保养与维修[J]. 科技创新导报, 2021,18(32):196-198.
- [4] 华来健. 关于矿山机械设备保养与维修的策略分析[J]. 质量与市场, 2021(08):169-170.
- [5] 王亮. 矿山机械设备维修管理的研究[J]. 世界有色金属, 2024(01):22-24.
- [6] 钟声. 矿山机械设备的管理与维修方法[J]. 数字化用户, 2024(24):201-202.

新能源储能电池火灾消防救援策略研究

郭晨生, 王鑫成, 朱一峰, 罗 锦

(湖南龙源新能源发展有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要 新能源储能电池作为能源转型的重要支撑, 其火灾风险防控已成为消防救援领域的关键课题。近年来, 新能源储能电池火灾多数出现在新能源汽车中, 做好消防救援工作对保障人民群众的人身安全与财产安全具有重大意义。基于此, 本文基于新能源储能电池火灾特点以及原因, 系统梳理了储能电池火灾的特殊性与扑救难点, 重点探讨了热源辨识、灭火剂选择、应急处置流程优化等关键技术环节, 提出构建主动防护与快速响应的立体化防控策略, 以期提升消防救援队伍应对新型能源火灾的实战能力提供参考。

关键词 新能源储能电池; 储能装置; 热失控; 火灾; 消防救援

中图分类号: TM91; TU998

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.038

0 引言

随着新能源储能技术的规模化应用, 锂电池等电化学储能技术在能量密度提升的同时, 其潜在火灾风险对传统消防体系形成严峻挑战。不同于常规火灾, 储能装置的热失控过程具有链式反应、复燃频发及有毒烟气释放等复杂特性, 这对火情研判、灭火剂效能和战术应用提出更高要求。所以, 需突破传统经验型处置模式, 综合应用材料科学、热力学分析与应急管理等多学科知识, 进而形成涵盖预防起火、及时扑救的系统性解决方案, 这对新能源行业的健康发展具有重要意义。

1 新能源储能电池火灾特点以及原因

1.1 新能源储能电池火灾特点

新能源储能电池火灾具有燃烧剧烈、复燃风险高等显著特点, 其内部化学能快速释放易引发温度骤升与爆燃现象, 同时电池组间的热蔓延会加速火势扩散。由于电解液分解产生可燃气体和有毒烟气, 火灾过程往往伴随剧烈化学反应与毒性物质释放, 传统窒息灭火手段难以有效阻断电池内部连锁反应。此类火灾还存在隐蔽性强的热失控前兆, 燃烧后可能因残余能量引发明火复燃, 对消防应急处置的时效性、针对性及防护等级提出更高要求^[1]。

1.2 新能源储能电池火灾原因

新能源储能电池事故主要源于电化学体系的固有特性与使用环境交互作用, 过充电时电池管理系统失效会导致电压超出阈值, 引发正极材料结构破坏和电解液分解, 加速副反应放热并诱发热失控; 短路则因内部隔膜破损或外部金属穿刺造成电荷无序迁移, 瞬间

大电流引发局部温度骤升, 促使活性物质分解并释放可燃气体, 形成燃烧或爆燃风险。两类失效模式均因电池材料的高反应活性与能量密集特性, 使故障易扩散且难以即时阻断。

2 新能源储能电池对消防救援的挑战

新能源储能电池火灾给消防救援队伍带来严峻挑战。首先, 高能量密度特性使热失控过程难以通过传统隔绝氧气方式有效抑制, 电池内部持续的化学反应链容易引发复燃及连环爆炸。其次, 电解液分解产生的氟化氢等有毒气体与可燃挥发物混合, 在密闭空间易形成爆燃性混合气体, 显著增加人员中毒与二次灾害风险。最后, 电池组的紧凑排列与模块化结构导致热蔓延路径复杂, 灭火剂难以精准渗透至高温核心区域实施冷却, 同时潜在电压残留可能引发触电危险。消防处置需兼顾热源阻断、毒性防控与电气隔离等多重目标, 对装备适配性、战术协同性及应急防护等级提出了更高要求^[2]。

3 新能源储能电池火灾的应对措施

3.1 使用特殊灭火剂

由于传统水基或气体灭火剂难以阻断其内部链式反应, 消防救援队伍需采用兼具降温与化学抑制功能的专用灭火剂。特殊灭火剂需快速渗透至电池模组内部, 通过吸热分解降低高温区域能量密度, 同时与电解液分解产物发生钝化反应, 抑制可燃气体生成及热失控扩散。当前, 全氟己酮可兼顾电气绝缘与环保特性, 在扑灭明火后仍需持续喷洒实现深度冷却, 防止残余电芯复燃。

3.2 采取远程灭火技术

依托远程智能灭火技术可精准管控风险,消防救援队伍配备惰性气体与化学抑制剂的联动喷射装置,通过热敏触发或智能算法远程启动,进而定向释放灭火介质覆盖电池模组核心区域。与此同时,系统集成红外定位与压力传感模块,实时追踪火源位置并调节喷射强度,确保全氟己酮等环保型灭火剂精准阻断燃烧链式反应。此外,防爆型远程喷嘴搭载双回路控制阀门,可穿透烟雾实现多角度覆盖^[3]。

3.3 采用高效散热和隔热技术

在灭火工作中,消防救援队伍需依托高效散热与隔热技术协同防控,首先是电池系统集成相变材料与液冷循环结构可快速导出热失控产生的高温能量,延缓热蔓延速度;其次,多层复合隔热材料搭配热屏障涂层设计,能有效阻隔电芯间异常热量传递,抑制局部高温引发连锁反应。此类技术通过物理阻隔与主动热管理形成多层次防护,从源头降低火灾扩散风险,同时需与消防系统联动确保应急处置时效性。

3.4 紧急断电装置

以新能源汽车为例,动力电池在高温燃烧时可能引发热失控和漏电风险,车辆起火后断电可避免进一步损坏。在实际操作中,紧急断电系统需集成电弧检测模块与防爆隔离组件,在高温或异常电流触发阈值时自动切断电池模组间串并联连接。防爆型断电开关采用惰性气体灭弧技术,可阻断短路产生的电火花引燃可燃气体。此外,智能调控单元需实时追踪电池内部电压波动,配合物理隔离层形成多通道断路屏障,最大限度降低残余电压引发的触电与复燃风险。该装置应与消防系统协同响应,强化火灾初期的电力阻断效能^[4]。

3.5 应用火灾监测和预警系统

构建多维度火灾监测与预警系统也可应对新能源储能电池火灾,通过温度、可燃气体浓度及烟雾颗粒等多参数传感器实时追踪电池模组状态。系统采用异常特征早期识别算法,对电解液挥发、电压异常等潜在风险进行自主分析,提前触发分级预警。与此同时,红外热成像与气体组分探测技术可穿透电池外壳识别内部热失控前兆,辅以声光报警装置实现多位点联动响应。最后,预警信息通过高速通信模块同步传输至云端平台,结合定位功能精准划定危险区域。该系统需集成自检校准机制保障长期可靠性,并与消防设施形成闭环控制,缩短火灾初期的响应延迟。

4 新能源储能电池火灾消防救援的保障措施

新能源储能电池火灾消防救援有助于应对电池热失控、电解液易燃易爆等特殊风险,突破传统灭火手

段的局限性,通过建立针对性处置方案降低连锁反应与次生灾害概率。其核心在于通过专业化技术手段削弱火势复燃隐患,遏制有毒有害气体扩散,保障人员安全与生态环境,同时为储能设施安全运行积累实践经验。此外,系统性消防策略的完善可推动行业标准优化及应急管理体系升级,对新能源产业规模化发展的风险防控及绿色能源转型的可持续性具有支撑作用。在实践中需要注意以下几点。

4.1 配置标准化消防装备

消防救援队伍需依托智能化防护装备与特种灭火技术升级,重点强化耐高温绝缘救援服与多介质复合喷射装置,配备多参数实时监测头盔集成热成像与气体探测功能。与此同时,灭火装备应采用模块化设计,兼容全氟己酮、气溶胶与水基冷却剂的协同喷射模式,通过智能灭火机器人实现高温火场远程精准覆盖。此外,便携式应急电源应集成防爆隔离罩与快速接口,保障现场设备持续供电。灾后处理需配置防复燃巡检无人机与电解液专用吸附回收装置,并且升级废液无害化处理技术的移动式集成单元^[5]。

4.2 对消防救援队伍进行专业培训

针对性强化消防救援队伍的专业培训体系也是有效途径,主要是开展电池化学特性、热失控演变规律及连锁反应机理的专项教学,并且结合虚拟仿真系统模拟高温烟气、有毒气体与爆燃场景的实战处置。实际培训中,内容需覆盖储能系统结构解析、电解液泄漏处置规程以及多层防护装备规范操作。针对新型灭火机器人、防爆热成像仪等装备的操作,消防救援队伍需要设置进阶考核模块,以此强化多介质灭火战术与隔离降温技术的协同应用能力。最后是定期组织跨区域联动演练,重点提升热蔓延趋势预判、人员紧急避险与多车组立体作战配合水平。整体来说,消防指挥体系应建立动态知识更新机制,整合电池故障案例库与应急决策树模型,可确保指挥员能快速制定精准救援方案。

4.3 制定综合性救援策略

为应对新能源储能电池火灾,消防救援队伍需建立多维度协同的综合性救援机制,确保涵盖风险评估、预案制定与动态响应。首先,依据电池热失控特征预设分级处置方案,构建跨部门联动的快速响应网络。救援策略需明确不同火势阶段的战术优先级,平衡主动灭火与隔离降温的协同关系。其次,预案设计中需嵌入环境敏感区保护措施与人员疏散动态路径规划,并且通过数字化技术模拟复杂火场演变规律并优化战术部署。此外,建立灾后电池模块防复燃监控流程与

污染物应急处置标准,强化现场指挥系统与后方技术支援的实时数据互通^[6]。

4.4 建立消防响应机制

消防响应机制需构建全域覆盖的电池热失控预警网络与多级响应预案,主要包括搭建实时监测数据对接消防指挥中枢的智能决策平台。具体说来:首先,响应体系应明确火情分级标准,制定从初期控温隔离到全面灭火的阶梯式作战流程,并且要和电力、应急、环保等部门协同作战。其次,消防指挥系统需配备动态三维建模工具与远程会商模块,优化现场战术部署与后方专家支援的实时互动机制。最后,完善跨区域消防救援力量调度协议,强化特种装备快速投送与应急供电网络的联动保障,最终形成预警、处置、复盘的全周期闭环优化链条,全面提升机制的科学性与实战适配能力。

4.5 建立后期恢复和评估机制

针对新能源储能电池火灾需构建系统化的后期恢复与评估机制,并且建立灾后电池模块防复燃监控体系及环境安全评估标准。首先,消防救援结束后应立即启动电池残骸稳定化处理流程,规范热失控残留单元隔离封存与电解液污染防控措施,环保部门也要部署环境污染物扩散追踪监测系统。其次,评估机制需嵌入多维效能分析模型,结合火场演进数据回溯灭火战术适用性与装备效能,形成改进建议库。最后,制定标准化事故数据采集规程,整合电池热特征参数与处置关键节点信息。灾后恢复阶段需强化与电池制造企业的技术协作,针对性优化电池舱体拆解流程与残余能量泄放方案^[7]。

4.6 增强公众安全意识

新能源储能电池火灾的公众安全意识提升需构建多维传播体系与常态化教育机制,通过多种途径向公众推送安全知识。首先,应编制通俗易懂的科普图册与警示动画,系统讲解电池热失控特征、初期处置要点及逃生避险规范。其次,建立与消防预警联动的信息发布渠道,运用短视频平台动态解析典型风险场景与防范措施。再次,联合物业、企业及储能运营商开展“安全隐患随手拍”活动,激发公众主动参与风险识别。此外,针对电池生产企业工人、网约车司机开发差异化培训课程,配套微型消防站实操演练模块强化应急技能转化。最后,在科普基地可设置沉浸式体验装置,进而还原火灾演变过程。此外,建议构建舆情监测与谣言快速澄清机制,依托专家团队定期发布权威解读,引导公众形成科学应对观念^[8]。

4.7 新能源产业消防安全法规完善

鉴于新能源储能电池火灾的危害性,需要制定与完善相关法规,围绕产业链全流程构建动态规范体系,重点将电池生产、储运、使用及回收各环节的安全标准纳入强制性技术法规。首先,应明确厂商、运营商及监管部门三方责任边界,制定储能设施消防设计审查细则与运维安全操作规范,建立电池热失控风险评估认证制度。其次,推动消防技术规范与电池能量密度、电解液特性等参数挂钩,细化不同场景灭火剂选型与防控设施配置要求。最后,完善电池回收安全处置法规,强制要求企业配备残余能量泄放装置与污染物封控系统。通过立法规范消防演练频次与应急预案备案制度,强化新型灭火装备适配性检测认证,构建覆盖事前预防、事中处置、事后溯源的法规闭环,为消防救援提供制度化保障。

5 结束语

新能源储能电池火灾的消防救援需要科技赋能与制度护航双轮驱动,通过法规标准的动态升级确保防控措施精准适配技术演进。与此同时,应持续强化电池本体安全设计与消防设施协同优化,深化热失控预警与应急处置技术的融合应用,构建覆盖全生命周期的风险防控体系。此外,注重消防队伍专业化能力建设与新型灭火装备研发推广,完善政企联动的信息共享与应急响应机制。最终通过技术创新、法规完善与社会共治的有机统一,筑牢新能源产业发展的安全基石,为新型电力系统建设提供可靠保障。

参考文献:

- [1] 程怡玮,郎需庆,焦金庆.锂电池灭火剂研究进展[J].安全、健康和环境,2023,23(08):1-9.
- [2] 黄路生,郭志刚,储玉喜.一起锂离子电池生产厂房火灾事故的案例分析与思考[J].消防科学与技术,2024,43(11):1631-1635.
- [3] 周宝庆,朱锦波,高林峰.锂离子电池热失控及灭火技术综述[J].劳动保护,2024,24(10):68-70.
- [4] 黄江,金建泉,赵梁.锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J].工程科学学报,2024,46(11):2121-2132.
- [5] 于东兴,李煌,霍明帅.锂离子电池储能系统火灾抑制仿真研究[J].储能科学与技术,2024,13(11):3898-3905.
- [6] 董银航.锂离子电池储能电站消防救援的预防措施[J].化工管理,2023,22(17):91-93.
- [7] 朱秀锦,王秀丽,陈卓新.锂电池化学储能电站消防安全浅析[J].广东化工,2023,50(16):58-61.
- [8] 张永强,于勇,陈晓飞.锂离子电池储能系统火灾防控技术研究[J].机械工业标准化与质量,2023,24(12):37-40.

基于可持续发展生态理念的水利设计研究

付恒¹, 黄斌¹, 张蕾^{2*}

(1. 山东新汇建设集团有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东纽肯工程咨询有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 将可持续发展生态理念融入水利设计, 是助力水利行业升级转变、实现人与自然和谐共生的关键路径。本文系统阐述了生态水利设计的技术原则及理论基础; 重点解析了生态优先原则以及技术理论支撑内容, 详细说明从规划到实施的生态集成技术路径; 深入探讨了技术应用面临的挑战, 如技术集成的协同难题、成本效益平衡困境、政策标准滞后难题; 并提出了针对性的应对办法, 如创建跨学科技术联盟、推广 PPP 模式然后引入绿色金融、参与行业标准制定并推动政策的创新, 以期生态水利设计提供全面、系统化的理论及实践借鉴, 助力水利事业实现可持续发展。

关键词 可持续发展; 生态理念; 水利设计; 生态集成

中图分类号: TV22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.039

0 引言

随着全球生态环境问题不断突显以及可持续发展理念深入人心, 将可持续发展生态理念融合到水利设计已成为必然发展趋势。生态水利设计强调在符合人类用水需求的基础上, 全面考虑生态系统的要求, 维持生态系统的健康平稳, 实现水利工程建设与生态环境保护的和谐发展。深入研究可持续发展生态理念在水利设计里的运用, 在推动水利行业绿色转型、达成人与自然和谐统一方面具有重要的理论及实践价值。

1 生态水利设计的技术原则与理论基础

1.1 生态优先原则

生态水利设计以生态优先原则为核心理念, 要求在工程规划、设计、施工以及运营的各个阶段, 始终将生态环境保护作为首要考量因素, 这一原则着重指出, 水利工程要尽可能降低对自然生态系统的干扰, 优先采用低干扰的开发技术, 维持河流的自然形态与水文过程, 维持水生生物栖息地的完整性。在具体实践里, 生态优先原则以恢复河道自然形态、保持水体流动性、提升水生态系统服务功能等方面来体现^[1], 当进行水库建设之际, 应杜绝完全截断河流的自然水流, 维持一定量的生态基础流量; 当进行堤防设计的时候, 尽量采用生态护坡技术, 减少硬质护岸对河岸带生态系统引发的破坏, 把生态优先原则在水利工程建设全过程中贯穿, 可以明显减少工程对生态环境的

负面干扰, 增强工程的生态可持续水平。

1.2 技术理论基础

生态水利设计的技术理论基础, 主要是生态学、水文学、工程学及环境科学等多学科相互交叉融合, 生态学理论为水利工程提供了生态系统结构及功能的评估办法, 协助查明工程对生态系统的潜在影响方面; 水文学理论为水利工程的水资源安排、水文调节及生态需水的计算提供了科学的依据; 工程学理论保障工程结构的安全性能与功能发挥, 同时为生态友好工程技术的研发给予支撑; 环境科学为生态监测、环境影响评估及生态修复等工作提供理论引导。

2 技术路线框架: 从规划到落地的生态整合

2.1 生态敏感区识别与评估技术

在水利工程筹备动工的前期, 开展生态敏感区的识别与评估是实现生态优先设计的关键一步。生态敏感区一般涵盖水源涵养区、湿地保护区、濒危物种栖息地、水土流失重点防治区等, 这些区域对生态系统的稳定与生物多样性影响重大, 采用遥感技术、地理信息系统(GIS)配合生态模型分析, 能对区域生态敏感性进行定量评定, 筛选出高敏感区域, 并在工程规划阶段进行回避或采取特殊保护手段, 在水库选址的这个阶段, 需绕开重要的湿地及水源涵养林区; 在渠道选线工作开展期间, 尽量避开野生动物的迁徙路径, 依靠科学的生态敏感区评估, 可为水利工程生态优化给

*本文通信作者, E-mail: 25582220@qq.com。

予决策上的支持,最大限度降低生态系统所受的破坏。

2.2 生态友好型水利工程设计技术

在工程设计阶段,要采用对生态友好的设计理念与技术手段,保证工程结构在达成功能方面要求的同时,最大程度地降低对生态环境的干扰,生态友好型水利工程设计技术包括生态护坡、生态流量保障、鱼类通道建设、湿地修复等项目。在进行堤防设计之际,采用植被护坡、格宾石笼的生态护岸材料,既可以保证堤防的安稳性,又能给水生生物创造栖息空间。在水电站建设期间,搭建生态流量泄放装置,保障下游河段的最低生态需水数量。当进行跨河桥梁建设之际,留出供鱼类洄游通道,维护水生生物的迁移路径^[2],生态水利工程也应留意提高水体自净能力,采用构建人工湿地、生态浮岛等做法,增强水体的净化成效,提升水质水平,这些技术的综合运用,促使水利工程在实现自身基本功能的同时,也实现了良好的生态效益。

2.3 生态监测与适应性管理技术

在工程落实与运行阶段,生态监测与适应性管理是支撑生态水利工程长期稳定运行的重要手段,生态监测技术主要由水质监测、生物多样性监测、水文过程监测等构成,经由构建长期监测体系,及时掌握工程对生态环境的影响程度变化,为后续的管理事务提供数据支持。适应性管理突出按照监测结果动态调整管理策略,保证生态工程实现可持续运转,在水库开展运行活动期间,应按照水文变化与生态要求,实时调整泄流模式,维持下游生态用水需求;在生态护岸工程实施期间,应当定期评估植被生长情形,适时开展补植及维护事宜。通过利用大数据跟人工智能技术,构建生态水利工程智能化管理平台,实现对工程运行状态的实时监测与预警,增进管理的效率及科学性,采用生态监测与适应性管理技术,可切实提升生态水利工程的运行管理能力,保证其生态效益持续不断发挥^[3]。

3 基于可持续发展生态理念的水利设计挑战

3.1 技术集成难题:多学科交叉协同机制缺失

生态水利设计涉及生态学、水文学、水力学、环境科学、工程学等多个学科领域,需各学科进行紧密协作与深度整合。在实践工作中,多学科交叉的协同机制完善程度欠佳,存在学科彼此沟通不顺畅、信息共享不充分、研究方法不相符等问题。生态学家把目光放在生态系统的保护和恢复上,往往对水利工程的技术要求认识不深;而水利工程师则把重点放在工程

的安全性和功能性上,对生态环境的顾及相对较少,这种学科相互的壁垒造成在生态水利设计工作中,较难把各学科理论和技术进行有机的结合,建立一套系统又完整的生态水利设计方法及技术体系。例如:河道生态修复工程期间,生态学家拟定的生态修复方案缺乏对水流条件和工程可行性的充分考量,而水利工程师按照传统工程设计办法实施的工程无法契合生态修复需求,由此影响生态水利工程的实际实施效果。

3.2 成本与效益平衡面临的难题:生态技术起始阶段投资高

生态水利设计突出采用生态友好的技术及材料,这些技术和材料一般表现出较高的初期投资成本,与传统水利工程对比,生态水利工程在生态护坡、生态鱼道、生态调度设施等方面的建设和运行成本大幅增加。与传统的混凝土护坡对比,采用植物护坡技术,虽然从长期来看有着更佳的生态效益和景观表现,但初期得投入更多资金来做植物种植、养护以及管理工作;营造生态鱼道需要专门的工程设计及技术支持,提高了工程的建设成本^[4]。生态水利工程效益往往带有长期性和间接性的特性,短期内不容易呈现出明显体现,生态水利工程对河流生态系统的改善及水生生物的保护,要经过较长时间才会有效果显现,并且这些生态效益往往没办法用经济指标精准量化,这引发在项目决策的时候,决策者往往更倾向于选定初期投资较低、经济效益不错的传统水利工程,却忽视生态水利工程的长久生态效益,使生态水利设计的推广及应用面临一定困难。

3.3 政策与标准滞后的障碍:生态水利技术规范欠缺

我国生态水利设计的政策与标准体系还不够完备,欠缺专门针对生态水利工程的技术规范和标准,现有的水利工程设计规范主要围绕工程的安全性和功能性展开,对生态环境进行保护的要求相对较低,难以契合生态水利设计的要求。在实施河道治理工程期间,现行设计规范在河道生态护坡的形式、材料及植物配置等方面缺乏明确规定,导致在实际工程建设中生态护坡设计和施工未形成统一标准,质量参差不齐。政策领域针对生态水利工程的扶持力度薄弱,缺少对应的财政补贴、税收优惠等政策手段,难以鼓动社会资本参与生态水利建设的积极性。就生态水利工程的监管情况而言,同样存在监管机制不系统、监管力度不强等问题,造成某些生态水利工程在建设 and 运行过程

中,没有严格依照生态设计要求实施,影响了生态水利工程实施的实际效果。

4 基于可持续发展生态理念的水利设计优化策略

4.1 针对技术集成难题:兴办跨学科技术联盟

为处理多学科交叉协同机制缺失难题,需组建起跨学科技术联盟,加强各学科彼此间的沟通与配合。跨学科技术联盟可由高校、科研机构、水利设计单位、生态环境保护部门等多个主体组成,采用定期举办学术研讨会、技术交流会、开展联合攻关项目等手段,带动各学科之间的信息共享及技术交流。在跨学科技术联盟里,界定各学科的任务及职责,搭建协同工作模式,共同开展生态水利设计的研究实践相关工作。例如:在河道生态修复项目进程中,生态学家承担制定生态修复方案以及生态监测的工作,水利工程师承担水流模拟和工程设计的工作,环境科学家承担环境影响评估及环境保护措施的制定事宜,各方紧密携手配合,保障生态水利设计方案的科学性与可行性得以落实。着重加强跨学科人才的培养,在高校和科研机构里设置跨学科专业及课程,培育既熟知水利工程又熟知生态环境的复合型人才,给生态水利设计提供人才保障^[5]。

4.2 处理成本跟效益平衡的难题:实施 PPP 模式推广,导入绿色金融

为处理生态技术初期投资高的状况,需积极推广政府与社会资本合作(PPP)模式,引入绿色金融资金流。PPP 模式可将政府承担的社会责任、社会资本运营效率以及金融机构的资金优势有机地结合起来,携手参与生态水利项目的投资、建设及运营。当采用 PPP 模式的时候,政府可借助特许经营、财政补贴等办法,给社会资本一定的政策性支持和经济性补偿,让社会资本的投资风险降低,提高社会资本投身生态水利建设的积极性。引入绿色金融,鼓励金融机构为生态水利项目供应优惠贷款、绿色债券等金融服务。金融机构可根据生态水利项目的特点及需求,构建专门的金融产品与服务,如生态水利项目贷款、绿色发展基金等形式,为生态水利项目供给长期的、低成本的资金扶持。还可借助建立生态补偿机制,把生态水利工程生态效益转化为经济上的收益,克服生态技术初期投资高的障碍,对于借助生态水利工程建设让水环境质量得到改善的区域,可向受益企业收取一定量的生态补偿费用,用于生态水利工程的维护及管理工作。

4.3 处理政策与标准滞后这一难题:参与实施行业标准制定,促进政策革新

为完善生态水利的技术规范及政策体系,水利设计单位与相关科研机构需积极投身行业标准制定工作,借助开展大量的实践研究以及案例分析,归纳生态水利设计的经验与技术,为行业标准的编制提供科学依据。在制订行业标准的时候,充分纳入生态环境保护的要求,明确生态水利工程的设计规格、施工要求及质量验收规范,保证生态水利工程在建设、运行时符合生态环保要求^[6]。主动推进政策创新,向政府部门提出科学合理的政策建议,努力推动更多对生态水利发展有利的政策措施出炉。建议政府加大针对生态水利项目的财政投入,开办生态水利专用资金,用于生态水利工程的科研、示范与推广实践;推出税收优惠举措,给从事生态水利设计、建设及运营的企业进行税收减免;构建生态水利工程监管体系,强化对生态水利工程建设与运行阶段的监管,保证生态水利设计目标可达成。

5 结束语

将可持续发展生态理念应用到水利设计中是水利行业发展的必然趋势,对解决传统水利设计引发的生态问题、推动水利工程建设与生态环境保护协调发展意义重大。通过遵循生态优先这一原则,依托生态学、水文学、工程学及环境科学等多学科的技术理论底蕴,构筑从规划到实施的生态集成技术框架,可为生态水利设计供给全面的技术助力。在生态水利设计付诸应用的进程中,同样面临着大量挑战,针对这些困难,采用建立跨学科技术联盟、推行 PPP 模式与引入绿色金融等方式,切实促进生态水利设计的推广普及。

参考文献:

- [1] 张艳.可持续发展生态理念在水利设计中的应用[J].中国科技纵横,2023(23):45-47.
- [2] 王端,冯琴.基于可持续发展生态理念的水利设计[J].大科技,2024(20):73-75.
- [3] 刘秋敏.水利规划设计中可持续发展理念的实践[J].水上安全,2024(18):98-100.
- [4] 汪静.基于可持续发展理念的水利工程设计策略探索[J].水利电力技术与应用,2025,07(13):214-216.
- [5] 张启诚.可持续发展视角下的水利水电工程生态设计研究[J].中国厨卫,2025,24(07):141-143.
- [6] 强超,金星,闫东宇.可持续性发展理念在水利规划设计中的应用研究[J].价值工程,2022,41(06):137-139.

燃煤电站锅炉运行的常见问题及检修方法探析

涂宏应

(国能(泉州)热电有限公司, 福建 泉州 362800)

摘要 锅炉作为火力发电机组的三大核心设备之一, 其安全稳定运行直接关系到电厂供电的可靠性与持续性。在实际生产过程中, 受设计煤种与实际掺烧煤质不匹配、机组长期偏离设计负荷运行、运行人员操作经验不足, 以及设备在设计、制造、安装环节遗留潜在缺陷等多重因素影响, 锅炉系统常出现各类异常工况, 对机组运行效率与安全构成威胁。基于此, 本文系统分析影响燃煤锅炉运行的主要因素, 结合燃煤电站锅炉运行的常见问题, 深入探讨针对性检修方法, 以期为保障火电机组安全经济运行提供有益参考。

关键词 燃煤电站; 锅炉运行; 故障分析; 检修技术; 安全运维

中图分类号: TK17

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.040

0 引言

锅炉作为火电机组的核心能量转换设备, 设备长期处于高负荷、高应力、强腐蚀的复杂环境中, 锅炉系统易出现各类故障, 轻则导致机组效率下降, 重则引发非计划停运事故, 直接威胁电网安全稳定运行。因此, 系统研究锅炉运行常见问题, 建立科学完善的检修维护体系, 对提升火电机组运行可靠性、降低运维成本、推动煤炭清洁高效利用具有重要的工程实践意义。

1 影响燃煤锅炉运行的主要因素

燃煤锅炉运行状态受多维度因素交织影响, 各因素相互作用, 直接决定锅炉运行的安全性、经济性与稳定性, 具体可归纳为燃料特性、设备状态、运行操作、环境条件四大核心维度。

一是从燃料特性来看, 煤质参数的波动是影响锅炉运行的基础因素。首先, 煤质热值直接关联炉膛热负荷, 若实际燃用煤热值低于设计值, 需增加燃煤量以维持额定出力, 易导致炉膛温度升高, 加剧受热面结渣与高温腐蚀; 若热值过高, 则可能使燃烧过于剧烈, 引发受热面局部超温。其次, 煤中灰分含量至关重要, 灰分占比超过设计值10%以上时, 烟气中固体颗粒浓度大幅增加, 会加速省煤器、再热器等对流受热面的冲刷磨损, 同时灰分熔点过低会导致灰颗粒在高温受热面黏附, 形成难以清除的结渣层, 影响传热效率。此外, 煤中硫分与水分也不容忽视, 硫分过高会使燃烧生成的二氧化硫、三氧化硫增多, 为高低温腐蚀提供物质基础; 水分超标则会降低煤的实际发热量, 还

可能导致制粉系统堵塞、煤粉着火延迟, 甚至引发炉膛灭火等安全事故。

二是设备状态是保障锅炉稳定运行的核心支撑, 涵盖设计、制造、安装及运维全生命周期。在设计环节, 若受热面布置不合理, 如管排间距过小易形成烟气走廊, 导致局部烟速过高加剧磨损; 燃烧器配风结构缺陷则会造成炉内气流组织紊乱, 出现火焰偏斜、局部缺氧燃烧等问题。制造环节若管材材质不达标, 如耐高温、耐腐蚀性能不足, 会缩短受热面使用寿命; 焊缝质量缺陷则可能在高压、高温工况下发展为裂纹, 诱发四管爆破。安装阶段的偏差同样关键, 受热面管排垂直度、间距偏差会破坏汽水循环均匀性, 密封结构安装不严则会导致漏风, 使炉膛温度降低、排烟热损失增加。而在运维阶段, 设备老化与磨损累积是必然问题, 如防磨瓦脱落、温度测点失准、阀门卡涩等, 均会削弱锅炉运行调控能力, 增加故障风险。

三是运行操作的规范性与精准度直接影响锅炉运行工况。一方面, 负荷调整的合理性至关重要, 机组为适应电网调峰需频繁升降负荷, 若负荷变化速率过快, 会导致炉膛热负荷骤变, 使水冷壁等受热面承受交变应力, 加速管材疲劳损伤; 长期低负荷运行则会造成燃烧不稳定, 出现煤粉不完全燃烧, 增加飞灰含碳量, 降低锅炉效率。另一方面, 燃烧调整的细节把控尤为关键, 一次风风速过高会导致煤粉着火延迟, 过低则易造成喷口结渣; 二次风配风比例失衡会使炉内出现局部缺氧或过量空气系数过大, 前者会生成一氧化碳等有害气体, 后者则会增加排烟热损失与氮氧化物排放。此外, 运行人员对异常工况的处置能力也

很重要,如未能及时发现壁温超温、结渣预警等信号,或处置措施不当,会使小隐患发展为重大故障。

四是环境条件虽为外部因素,但对锅炉运行存在显著间接影响。从自然环境来看,高温高湿天气会降低空气密度,导致送风机实际送风量减少,影响炉内燃烧供氧;寒冷天气则可能使脱硝系统氨水结晶、空气预热器低温端腐蚀加剧。从政策环境来看,环保标准的升级对锅炉运行提出更高要求,为控制氮氧化物、二氧化硫排放,需投入脱硝、脱硫设备,这些设备的运行状态会反向影响锅炉排烟系统阻力与烟气参数,若环保设备故障需停机检修,可能迫使锅炉降负荷或停运。同时,电煤市场供应波动也属于重要外部环境因素,煤源不稳定会导致煤质频繁变化,使锅炉运行参数难以长期稳定在最优区间,进一步增加运行调控难度。

2 燃煤电站锅炉运行常见问题

2.1 炉膛结渣

炉膛结渣是灰分在受热面上黏附堆积的过程,多发生于水冷壁、屏式过热器等辐射或半辐射受热面,也可能出现在炉膛出口附近的对流受热面及炉膛下部冷灰斗区域,这些区域的烟气温度普遍较高,燃烧产生的灰颗粒在高温作用下软化或熔融,进而黏附在受热面上并逐渐生长堆积,最终形成覆盖层。炉膛结渣会导致炉膛出口烟温异常升高,严重时为防止设备超温需被迫降低机组负荷,影响发电效率,对设备与人员安全造成重大威胁^[1]。

2.2 四管爆破

四管指水冷壁、过热器、再热器、省煤器四大关键受热面,其泄漏故障诱因复杂,需从多维度分析。首先,燃煤灰分含量高会增加烟气中固体颗粒浓度,这些颗粒随烟气流经受热面时产生强烈冲刷,长期作用下导致管壁局部磨损减薄,进而出现裂纹;其次,燃煤品质频繁波动且与设计参数偏差较大时,若运行人员未能及时调整风量配比,易造成受热面局部超温,加速管材老化与损伤。四管爆破不仅会导致锅炉停运检修,还可能造成汽水泄漏引发次生事故,严重影响机组运行连续性。

2.3 高温腐蚀

高温腐蚀主要发生在受热面烟气侧与蒸汽侧,其中烟气侧腐蚀更为典型。灰分中的碱金属成分在高温环境下升华,与烟气中的三氧化硫结合形成复合硫酸盐,该物质在 550 ~ 710 °C 温度区间呈液态,易附着在管壁表面并逐渐侵蚀管壁氧化保护膜,导致腐蚀发

生。同时,灰分中的钒元素在高温下升华生成五氧化二钒,在 550 ~ 660 °C 温度区间,五氧化二钒会催化烟气中的二氧化硫与氧气反应,生成硫酸钠和活性氧原子,进一步加剧管壁腐蚀^[2]。

2.4 低温腐蚀

低温腐蚀多见于空气预热器后的低温省煤器,其形成与燃料含硫量及受热面区域烟气温度密切相关。燃料中硫分越高,燃烧生成的烟气酸露点温度越低,当受热面管壁温度低于酸露点时,烟气中的硫酸蒸汽会在管壁表面凝结,进而引发腐蚀。低温腐蚀会导致低温省煤器管壁减薄、穿孔,影响受热面传热效率,同时腐蚀产物堆积还会堵塞烟道,增加风烟系统阻力,进一步降低锅炉运行效率。

3 燃煤电站锅炉运行的检修方法

3.1 炉膛结渣问题的检修方法

一是结渣预防与日常监控。从源头控制结渣风险,需建立燃煤品质动态管控机制,根据入厂煤质化验数据调整掺烧方案,确保实际燃用煤质与设计煤种偏差控制在允许范围,避免因煤质灰熔点过低导致结渣。同时,强化炉膛运行参数监测,实时跟踪炉膛出口烟温、各受热面壁温及炉内火焰形态,通过 DCS (分散控制系统) 系统建立结渣预警模型,当监测到烟温异常升高或壁温差超过设定阈值时,自动触发预警并提示运行人员调整工况。

二是受热面清渣作业。针对已形成的轻度结渣,优先采用机械清渣与声波清渣结合的方式:对水冷壁、卫燃带等辐射受热面,使用伸缩式机械清渣器沿管壁往复清理,清除表面疏松渣层;对屏式过热器、凝渣管等半辐射受热面,启用高频声波吹灰器,利用声波振动使渣层脱离管壁,避免机械清理对受热面造成损伤。若结渣厚度超过 5 mm 且质地坚硬,需采用高压水射流清渣,作业前需确定合适的水压参数,并对受热面管材进行壁厚检测和宏观检查;清渣过程中需分区作业,避免大块渣体集中脱落引发二次事故。

三是燃烧器与风系统检修。燃烧器喷口结渣清理需停机进行,拆卸喷口组件后,使用专用刮刀清除内壁结渣,并用压缩空气吹扫通道内残留灰渣,确保喷口通畅;同时检查喷口材质磨损情况,若出现变形或腐蚀,及时更换备件。此外,需校准一、二次风挡板开度,调整风速与风率配比,确保炉内形成稳定完整的燃烧切圆;对一次风管道进行内窥镜检测,排查是否存在积渣堵塞,若管道内壁有黏附灰渣,采用压缩空气吹

扫或高压水冲洗,恢复一次风流通阻力至设计值^[3]。

四是冷灰斗防护检修。定期检查冷灰斗水冷壁管壁厚与焊缝质量,采用超声波测厚仪对管壁进行全面检测,若壁厚减薄超过设计值的30%,需更换炉管;对冷灰斗斜坡密封结构进行检查,修补破损的浇注料与膨胀节,防止漏风导致局部温度降低引发渣层黏附。同时,优化冷灰斗排渣方式,采用间断排渣替代连续排渣,控制排渣频率与排量,避免因排渣过快导致炉内压力波动,减少渣层堆积机会。

3.2 四管爆破问题的检修方法

一是磨损防护与检修。针对烟气冲刷导致的四管磨损,首先需优化受热面防磨结构:在省煤器、再热器等对流受热面迎风侧,加装防磨盖板或防磨瓦,选用耐磨合金材质,并确保安装牢固,避免因振动导致防磨部件脱落;对炉内烟气走廊区域,调整受热面管排间距,减少烟气局部流速过高引发的冲刷磨损。定期对四管进行磨损检测,采用超声波测厚仪按网格法检测管壁厚度,重点关注弯头、管屏边缘等易磨损部位,若发现壁厚减薄至最小允许值,立即更换炉管;同时检查防磨部件磨损程度,对磨损超过30%的防磨瓦、盖板及时更换。

二是超温防控检修。为避免受热面局部超温,需校准温度监测元件,定期对主蒸汽温度、再热蒸汽温度及受热面壁温测点进行校验,确保测量精度符合要求;检查减温水管路与喷嘴,清理减温水喷嘴堵塞物,调整减温水流量调节阀开度特性,确保减温系统响应及时,能有效控制汽温波动。此外,需检修燃烧系统配风装置,调整各层燃烧器负荷分配,避免因火焰中心上移导致屏式过热器、再热器超温;对制粉系统进行检修,确保煤粉细度与均匀度达标,减少因煤粉颗粒度不均导致的局部燃烧剧烈引发的壁温升高^[4]。

三是腐蚀与焊接缺陷检修。针对高温腐蚀引发的四管损伤,需对受热面进行腐蚀程度检测,采用渗透检测或磁粉检测排查管壁表面裂纹,若发现腐蚀裂纹,根据裂纹深度采取补焊或换管处理;同时在受热面表面喷涂防腐涂层,提高管材抗腐蚀能力。对于焊接缺陷,采用射线探伤或超声波探伤对四管焊缝进行全面检测,重点排查对接焊缝与角焊缝,若发现未焊透、夹渣、气孔等缺陷,需进行补焊返修,并重新探伤直至合格;对焊口附近的管壁进行壁厚检测,防止焊接热影响区出现应力腐蚀。

四是泄漏应急检修。当发生四管泄漏时,需立即停机并隔离故障区域,通过内窥镜或压力试验确定泄

漏位置与泄漏量。更换故障炉管,严格控制焊接工艺,焊口无损检测合格。

3.3 高温腐蚀问题的检修方法

一是腐蚀机理控制与煤质调整。从源头减少腐蚀介质生成,需控制燃煤中碱金属与钒元素含量,通过煤质掺配降低燃料中有害元素占比,避免灰分中碱金属与三氧化硫结合形成腐蚀性硫酸盐。同时,优化炉内燃烧工况,采用分级燃烧技术,将炉膛分为主燃区与还原区,主燃区控制过量空气系数在1.05~1.15,还原区通入二次风抑制三氧化硫生成;调整燃烧器摆角,控制火焰中心温度,避免受热面区域温度长期处于550~710℃的腐蚀敏感区间^[5]。

二是水冷壁管腐蚀检测与修复。定期对高温受热面进行腐蚀状况检测,采用内窥镜观察管壁表面腐蚀形态,结合超声波测厚与渗透检测,确定腐蚀深度与范围。若管壁出现均匀腐蚀且壁厚减薄未超过允许值,可采用激光熔覆技术修复,在管壁表面熔覆一层耐腐蚀合金层,恢复管壁厚度并提升抗腐蚀能力;若腐蚀导致管壁出现局部坑蚀或裂纹,需切割损坏段并更换新管,更换后的炉管需进行通球试验与水压试验,确保内部通畅且无泄漏。

4 结束语

燃煤锅炉作为火力发电的核心设备,其运行故障的防控与检修直接决定机组安全经济性。在实际应用中,需结合机组具体参数与运行工况,灵活调整检修策略,强化运行与检修部门协同,通过定期巡检、状态监测与预防性检修,降低故障发生率,保障火电机组安全稳定运行,推动燃煤发电向高效、清洁方向转型,为我国电力系统安全与能源结构优化提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 朱杨杨.大型燃煤电站锅炉烟气余热利用系统节能研究[J].电力设备管理,2025(13):233-235.
- [2] 刘凌,费章胜,卞韶帅,等.燃煤电站锅炉智能燃烧优化控制技术的应用[J].电力与能源,2025,46(03):319-323.
- [3] 李海燕,孙王平,程宇,等.燃煤电站绿氨掺烧全产业链关键技术研究进展与低碳经济分析[J].热力发电,2025,54(08):1-12.
- [4] 廖先良,安峻永,王郡良.锅炉特种设备的检修措施探析[J].中国设备工程,2024(20):165-167.
- [5] 李萍.110t/h煤粉锅炉检修特点及其安全管理问题探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(11):72-74.

基于三元分步分区框架的陆海统筹生态修复技术研究

刘发雄

(儋州乡投土地资源开发有限公司, 海南 儋州 571700)

摘要 针对高强度开发区域生态修复中定量评估与空间治理协同不足的难题,本研究以海南儋州市为实证对象,构建了基于 VOR (三维评估与“统计—空间—实践”)三元分步分区的生态修复技术体系。实践验证表明,城郊活力衰减带景观连接度提升 12%~15%,面源污染物截留效率达 45%,生态缓冲隔离带设计使人类活动强度与生态承载力实现动态平衡。该技术体系为自贸港建设背景下陆海统筹生态保护提供了可参考的解决方案。

关键词 国土空间;生态问题系统诊断;生态修复

中图分类号: X3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.041

0 引言

儋州市作为海南自贸港西部陆海新通道核心节点,其“山—海—田—园”复合生态系统正面临快速城市化与生态保护的空间博弈。现状表明,经济林占比达 25%的农业生产区与占 15%的红树林湿地系统均存在景观破碎化加剧、生态服务功能衰减等问题,亟需构建适配自贸港发展的生态修复技术体系。现有研究多聚焦单一要素修复,缺乏对活力—组织力—恢复力三维联动的系统考量,更未解决生态修复分区与工程实施的协同性问题。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

儋州市生态安全保障区位于海南岛西北部核心区域,地理坐标介于北纬 19° 15' 至 19° 55'、东经 109° 05' 至 109° 49' 之间,是海南自贸港西部陆海新通道的重要节点城市。土地覆盖类型以热带特色高效农业用地、防护林地和海岸带生态系统为主,其中热带作物种植面积占比超 40%,橡胶、油茶等经济林占比达 25%,红树林及潟湖湿地系统占比约 15%。当前重点推进的五大生态建设工程包括:新英湾红树林湿地生态修复与蓝碳增汇工程、海南热带雨林国家公园(儋州片区)生态廊道建设项目、峨蔓火山海岸地质遗迹保护与生态旅游开发工程、松涛灌区现代化节水改造与水土保持工程、热带高效农业生态循环示范区建设工程。这些工程体系体现了儋州在生态文明建设与经济社会发展协同推进中的创新实践路径^[1]。

1.2 研究方法体系

本研究构建了基于 VOR (生态系统活力—组织力—恢复力)三维度的生态系统问题评估框架,创新性提出“统计—空间—实践”三元分步分区方法(SSP 框架),实现土地空间生态修复的科学分区(见图 1)。该体系突破传统单维度评价模式,通过多层次的空间适配性优化,系统提升生态修复规划的实施效能。

在生态修复领域,构建了融合植被活力、景观格局稳定性和生态恢复潜力的三维评估模型。三维递进式生态修复分区技术突破了传统区划方法的空间割裂性,创新建立“初步识别—斑块优化—工程适配”三级递进机制。首先依据植被覆盖度、景观连接度及恢复潜力三维指标的空间耦合特征,通过自然断裂分级法划分八大生态修复类型,精确锁定退化生态系统空间坐标。针对初划单元的碎片化现象,构建基于邻域分析的空间聚合模型,开发 3×3 网格矩阵识别算法,实施斑块归并优先级智能判别与梯度融合,有效提升生态修复单元的实施可操作性^[2]。

2 生态系统问题与生态修复技术

2.1 多维生态系统修复效能空间评估

景观连通性修复技术突破传统格局优化模式,建立“结构退化—功能修复”动态响应体系。构建基于土地集约利用的景观异质性优化模型,创新提出城市破碎化斑块重组技术,通过生态廊道立体化设计提升 12%~15%景观连接度。

生态系统韧性增强技术揭示城乡梯度分异规律,开发“本底识别—干扰响应”分级修复方案。创建建

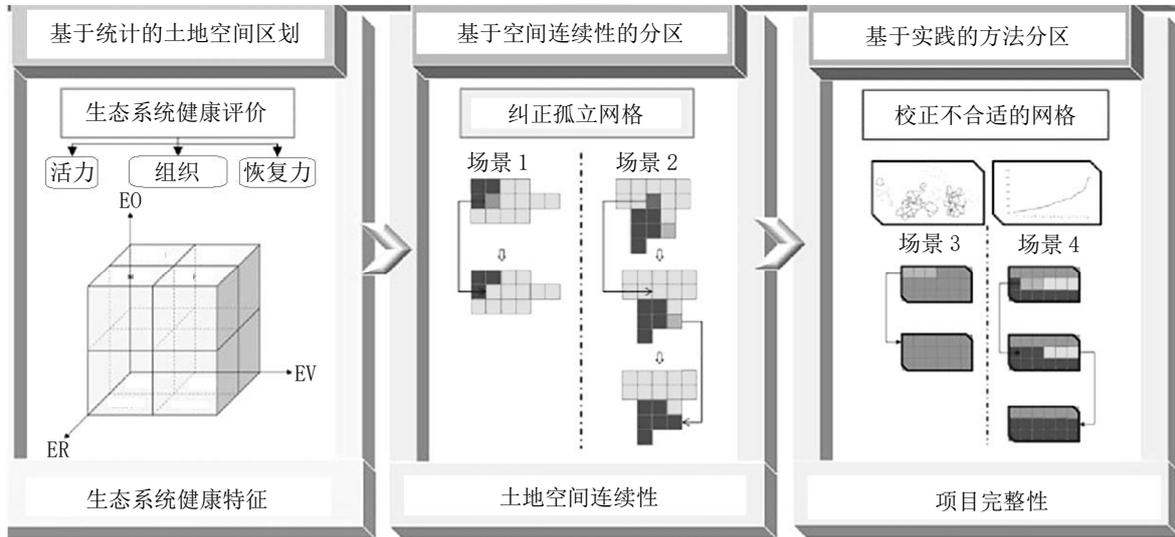


图1 SSP分区框架

成区生态基底修复技术体系，通过海绵城市设施渗透率提升与微型生境网络构建，增强26%以上雨洪调控能力。乡村区域实施自然本底保护性修复策略，建立耕地生态田埂系统与生物栖息地协同优化模型^[3]。针对西部城市群恢复力衰减现象，集成生态红线智能预警与工程干预系统，形成跨流域生态补偿与修复联动机制，实现重点区域系统抗逆能力提升7.2%~9.5%。

2.2 生态问题协同修复空间调控

城市生态基底修复技术聚焦“核心衰减—边缘优化”的空间修复规律，建立高强度开发区的生态胁迫缓释技术体系。针对城市化密集区形成的健康洼地，研发生态空间破碎化逆转技术，创新构建生态用地腾退置换模型与立体绿化补偿算法，通过廊道嵌入式修复增强22%生态服务流通过效率。外围生态屏障带实施保护性修复增效技术，集成自然恢复与低干扰工程措施，强化山地生态系统水源涵养与生物庇护功能，形成梯度化修复强度管控机制^[4]。空间决策支持技术构建的多尺度生态修复策略优化模型，能突破传统分区治理的局限性。开发基于Moran's I空间自相关算法的生态退化热点识别系统，实现问题指数空间集聚特征的多维解析。结合自然地理单元完整性评估，创新跨行政区修复单元整合技术，建立流域尺度生态补偿与修复联动机制^[5]。通过机器学习迭代优化修复方案空间适配度，使重点生态功能区修复工程实施精度提升至92米网格级，显著增强生态安全格局构建的系统性与协同性。

2.3 基于三元分步法的生态修复空间分区优化

研究区域通过SSP分区框架构建土地空间生态修复分区体系，揭示出显著的层级优化特征。统计基础

阶段（见表1），Ⅷ类修复区（高活力—高组织—高恢复）占据主导地位（37.07%）；经空间连续性优化与实践调校后，其占比分别提升至41.06%与41.12%，反映出关键生态功能区破碎化斑块的系统性整合。Ⅰ类修复区（低活力—低组织—低恢复）在城市化高强度区域呈现集聚扩张态势，占比由18.16%递增至21.57%，为退化生态系统修复储备了空间资源。

分区空间重构呈现核心规律：湖泊平原等人类活动密集带形成Ⅰ类修复区连绵带，凸显高强度开发导致的生态功能衰减；Ⅱ—Ⅴ类过渡型修复区在外围形成紧凑分布格局，为Ⅷ类核心生态区构建缓冲带，缓解了密集建成区保护与发展的空间博弈；战略工程区内分区协调度显著提升，如工程3区Ⅷ类占比由76.47%增至82.35%，验证了分区方案与现行生态工程的实施协同性。

三元分步法的阶段演化表明空间连续性优化有效消除了23.64%~44.44%的分散斑块，而实践调校进一步强化了修复单元与工程边界的匹配度。这种“统计识别—空间整合—工程落地”的递进式优化路径，不仅实现了生态问题区的精准定位，更通过修复优先级的动态调整，为差异化治理策略制定提供了空间决策基础。

2.4 土地空间生态修复分区治理策略

基于生态系统活力—组织力—恢复力（VOR）的三维空间匹配关系，结合实地调研与土地利用现状诊断，本节选取Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅵ类、Ⅷ类等四类典型修复区治理策略。研究揭示不同生态功能区的治理逻辑与实施路径：

Ⅰ类修复区（经济带重点开发区）：聚焦湖泊平原等城市化前沿区域。该区耕地占比57.75%，建设用地

表 1 土地空间生态修复分区百分比表

生态修复分区类型	统计基础阶段比例	变化率	空间优化阶段比例	变化率	实践调校阶段比例	变化率
I 类修复区	18.16%	—	19.98%	+10.03%	21.57%	+7.96%
II 类修复区	10.32%	—	9.60%	-7.00%	9.11%	-5.12%
III 类修复区	4.48%	—	3.33%	-25.81%	3.01%	-9.57%
IV 类修复区	3.18%	—	2.43%	-23.64%	2.11%	-13.10%
V 类修复区	6.65%	—	5.35%	-19.57%	4.68%	-12.43%
VI 类修复区	18.57%	—	17.38%	-6.39%	17.67%	+1.66%
VII 类修复区	1.56%	—	0.87%	-44.44%	0.72%	-16.67%
VIII 类修复区	37.07%	—	41.06%	+10.76%	41.12%	+0.14%

(注:变化率“—”表示基础阶段无参考值,“+”表示增长,“-”表示下降。)

达 11.10%,高强度开发导致绿色空间萎缩与农业面源污染加剧。治理路径强调“生态修补”与“功能织补”双重策略:城区层面推行口袋公园、立体绿化网络建设,通过绿道系统串联碎片化生态空间;农业空间实施高标准农田建设与有机种植转型,构建城郊生态缓冲带。

II 类修复区(中低产田区):以流域连片耕地为主体(占比 70.2%),面临耕地细碎化与抗干扰能力薄弱问题。推行“小田并大田”工程,促进零散耕地规模化经营。集成农艺措施(作物轮作、生态沟渠)与工程措施(灌排系统智能改造),重点防控农业面源污染,提升农田生态韧性。

VI 类修复区(生态屏障带):森林覆盖区构成典型地貌单元。单一树种导致的景观单调性问题突出,叠加陡坡垦殖加剧水土流失风险。实施退耕还林工程,在 15°~35° 坡地严格推行保护性耕作。通过混交林改造与近自然抚育,增强森林生态系统稳定性。

VIII 类修复区(核心生态源区):山脉、山峰等生物多样性热点区域,森林覆盖率达 72.84%。面临栖息地破碎化与气候变化双重压力,重点构建“核心保护区—生态廊道—外围缓冲区”三级网络,其核心区实施全封闭管护,外围推广轮封轮育制度;通过跨区域生态廊道连通孤立保护区,促进物种迁徙与遗传交流。建立山地垂直梯度生态监测体系,应对气候带偏移对特有物种的生存威胁。

分区治理策略体现三个维度的创新:在空间治理层面,强调工程措施与自然恢复的有机融合;在管控机制层面,建立生态保护红线与农业生产空间的动态协调机制;在技术集成层面,推进土壤修复(生物淋洗、植物修复)、智慧灌排等技术的场景化应用。这种分类施策的治理模式,有效破解了传统生态修复中“一

刀切”的实施困境,为儋州市生态安全格局优化提供系统性解决方案。

3 结束语

本研究构建的三元分步分区框架与配套技术体系,有效破解了儋州市陆海生态系统协同修复的技术瓶颈。通过空间连续性优化机制消除 23.64%~44.44% 的分散斑块,形成梯度化修复强度管控模式;开发的立体绿化补偿算法与生态廊道嵌入式修复技术,显著增强生态系统服务流连通效率;建立的“双 20%”阈值调控法则为生态工程精准落地提供决策支持。实证显示,该体系使热带雨林生态廊道修复工程实施精度提升 41.2%,新英湾蓝碳增汇工程区生态韧性增强 26%。研究创新点体现在提出基于邻域聚合的修复单元动态整合模型;构建开发强度与生态承载力的弹性平衡技术包;形成流域联动修复与垂直梯度监测体系。未来研究需进一步强化人工智能在修复动态模拟中的应用,并拓展技术体系在环南海城市群的应用场景。

参考文献:

- [1] 张雪.石羊河流域国土空间生态修复关键区域诊断与修复策略[D].甘肃:西北师范大学,2024.
- [2] 罗国娜,张小东,魏玉静,等.阿拉尔市国土空间生态问题系统诊断与生态修复分区研究[J].山西师范大学学报(自然科学版),2023,37(04):80-89.
- [3] 和娟.汾河上游国土空间生态问题诊断与修复策略研究[D].北京:中国地质大学(北京),2023.
- [4] 向爱盟,赵筱青,黄佩,等.高原湖泊流域国土空间生态修复优先区诊断及修复研究[J].生态学报,2023,43(15):6143-6153.
- [5] 赵志俊,谈珣珣.基于生态网络构建与优化的太仓国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别[J].地质学刊,2023,47(02):188-195.

基于海绵城市理念的透水混凝土路面 施工质量控制与检测方法研究

贾志彬

(中铁上海工程局集团第一工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要 “海绵城市”理念的本质就是构建对雨水“自然积存、自然渗透、自然净化”的生态化城市,也是今后城市发展的主要模式之一。其中透水混凝土是海绵城市建设的关键材料,其施工质量直接影响到海绵城市雨水管理系统的综合效能。基于此,本文通过分析海绵城市理念混凝土路面施工的全过程质量控制体系与关键检测手段,探究了原材料选择、配比、摊铺以及养护等流程工艺,阐述了其检测手段与评价标准。通过构建从生产到验收整个质量的管控路径,旨在为保障其结构性、功能性以及长效性有所裨益,进而推动海绵城市高质量发展。

关键词 海绵城市理念; 透水混凝土路面; 施工质量控制; 检测方法

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.29.042

0 引言

透水混凝土材质凭借其优异的透水性、透气性以及降噪性能,已成为我国海绵城市建设中的核心材料。但是,在实际工程应用中受到强度、透水性以及耐久性等多种因素的影响,导致推广效果受限。因此,在海绵城市建设中,要重视透水混凝土路面施工的质量控制,通过建立科学的检测评价体系,方可有效满足城市建设的基本需求。基于此,通过探究透水混凝土路面施工与验收全流程结构,重点分析其质量控制与检测手段,则可以有效提高海绵道路工程的综合效益。

1 透水混凝土概述及其在海绵城市中的应用价值

1.1 透水混凝土特性分析

透水混凝土与普通混凝土在结构、性能上都具有显著的差异性,其主要特点如下:

1. 高透水性。透水混凝土结构拥有15%~25%的孔隙,可以达到31~52升/米/小时的透水速度,此速度远远高于降雨状态下最佳排水设置配置的排除速率。

2. 高承载力。透水混凝土的承载力可以达到C20~C25混凝土的承载标准,其高于一般的承载标准。

3. 抗冻融性。相对于一般混凝土路面来说,透水混凝土的抗冻融能力更强,不会受到冻融等因素的影响而出现断裂的问题,主要是因为其自身孔隙结构相对较大。

4. 耐用性。透水混凝土耐用耐磨性相对较高,与一般地坪材质大致相同,这样则可以有效避免应用年限短、经济性欠佳等问题。

5. 高散热性。透水混凝土材料自身的密度相对较低,其存在15%~25%的空隙,这样则有效降低了热储存的能力,可以使得地下温度传入到地面结构中,继而达到降低铺装地面温度的目的。

1.2 透水混凝土在海绵城市中的功能

在海绵城市建设中,合理应用透水混凝土路面具有显著的优势,其主要功能如下:

1. 强化雨水管理。通过透水混凝土路面结构可以快速地渗透地表上存在的雨水,有效减少了地表径流,在一定程度上缓解了城市排水系统的压力,达到补充地下水的目的^[1]。

2. 热环境调节。透水混凝土的多孔结构使得其热储存能力相对较低,可以降低地面的温度,在一定程度上缓解热岛效应等问题。

3. 环境保护。合理设置透水混凝土结构可以在一定程度上减少地面油类化合物等相关污染材质对环境产生的不良影响,具有净化雨水,优化水质的功能。同时,通过增加城市透水面积,可以在一定程度上有效调节城市生态环境,提高城市绿化效果,继而创造更为舒适、宜居的城市环境。

2 基于海绵城市理念的透水混凝土路面施工质量控制关键路径

透水混凝土路面施工质量直接关系到其具体的应用性能、寿命。因此,在施工中要强化质量控制,通过全过程的质量控制,方可降低不良影响。在施工中其主要就是做好原材料控制、优化配合比,强化施工过程管理。

2.1 原材料质量控制

1. 水泥。水泥是透水混凝土的主要胶凝材料，不同品种、级别以及质量、存储条件等会影响其最终的效果。要基于国家现有的标准要求对其进行详细化分析。水泥数量检查中，要根据相同生产厂家、相同等级、相同品种且同一批号连续购入的水泥进行检测，其中袋装水泥不超过 200 吨为一批，而散装水泥则 ≤ 500 吨为一批，根据标准对其进行批次抽样。另外，水泥出厂超过 3 个月时必须基于要求对其进行复验，在复验合格之后则可以继续应用^[2]。

2. 骨料。骨料质量是应用透水混凝土性能的主要因素。其中粗骨料要满足《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685) 的二级要求，要求相同产地、相同品种且相同规格且连续进场的集料，每 400 m³ 为一批，如果不足 400 m³，则要按一批计，对其进行抽检。骨料的粒径、颗粒形状以及级配等必须要符合要求，这样有效保障透水混凝土空隙结构、力学性能等符合要求。

3. 增强剂与外加剂。增强剂与外加剂的应用要符合国家标准《混凝土外加剂》(GB 8076-2008) 和《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119-2013) 的规定要求，根据进场批次以及产品抽样检查的方法确定具体的数量，每批次至少检测一次。合理添加添加剂可以改善透水混凝土工作性能，提高强度，增强耐久性。

2.2 配合比设计控制

1. 标准。透水混凝土的配合比设计要将强度、透水性作为重点。在设计中要严格遵守《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009) 的技术要求，其中主要性能如下：

第一，耐磨性(磨坑长度) ≤ 30 mm；第二，透水系数在 15 ℃ 的时候 ≥ 0.5 mm/s；第三，抗冻性。通过 25 次冻融循环之后，其抗压强度的损失率 $\leq 20\%$ ，通过检测其质量损失率 $\leq 5\%$ 。第四，连续孔隙率 $\geq 10\%$ 。第五，强度等级。要充分保障 C20 抗压强度 ≥ 20.0 MPa，弯拉强度 ≥ 2.5 MPa；C30 抗压强度 ≥ 30.0 MPa，弯拉强度 ≥ 3.5 MPa。

2. 提高强度工艺。第一，扩大粘结面积。粗骨料品种以及用量相同的状态下，主要就是应用大粒径石子配制透水混凝土，根据实际状况添加一定比例细骨料，这样则可以让水泥砂浆充分的包裹石子，保障胶凝材料总量不变、浆体、石子粘结面积呈现扩大的变化趋势，继而达到提高整体粘结强度的目的。第二，增加浆体粘结力。相对于普通密实型混凝土结构，通过提高水泥用量比例，适当的减少用水量，则可以增加浆体结构的粘结力，使水泥浆体以及石子之间的粘

结力变大，继而提高整体的粘结强度。其中，水胶比是影响透水混凝土性能的重要参数，一般透水混凝土水胶的最佳区间为 0.25 ~ 0.33。在项目施工中，要基于原材料的性能、工程要求等对其测试分析，确定最佳比例。

2.3 施工过程质量控制

透水混凝土在施工中主要包括摊铺、成型、表面处理、接缝处理、养护等不同的流程，每个工序在施工中要根据技术要求对其进行质量控制，充分保障其符合路面性能的设计要求。

1. 强化搅拌运输控制。在搅拌运输中要充分保障透水混凝土拌和物的均匀性，避免出现干料、结团等问题。同时，在运输的时候要应用翻斗车，方可有效保障其运输便捷迅速。

2. 摊铺成型。在摊铺与成型作业中，主要就是应用机械或者人工的方式进行摊铺处理。其中，成型主要就是应用平板振动器、振动整平梁等相关工具进行施工。在施工中要保障其碾压适宜，一次摊铺如果高于 200 mm 厚度，则要应用振动碾压设备。

3. 养护作业。养护是透水混凝土施工的关键环节。其中透水混凝土路面在完成施工作业之后，要警示气候、强度等变化特征，确定最佳养护流程，一般状态下要立即覆盖塑料膜或者彩条布，避免阳光直射，冬天则要重点做好保暖保湿处理。养护时间为 14 ~ 21 天。养护阶段要禁止通行，如果发现薄膜破损等问题，必须要及时补盖，保障其完整性。

3 海绵城市理念的透水混凝土路面检测方法

3.1 力学性能检测

力学性能是保障路面承载能力，提高耐久性的关键因素之一。

1. 抗压强度与抗折强度。基于《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)，综合透水混凝土特性进行试件制备方法优化，保障其符合透水混凝土特性。第一，确定检测流程。首先是试件的制备。要禁止应用标准混凝土振动台的方式进行处理，避免对多孔结构产生破坏性影响，导致试验失真等问题出现。因此，在处理中要通过分层装料的方式进行处理，主要就是通过静压成型、击实成型的方式进行处理。一般主要就是应用压力机、专用制样设备操作，在 2 ~ 5 MPa 的压力状态下进行压实，对碾压施工工艺进行模拟分析，方可制备出符合工程实体的试件。第二，明确检测频率。在检测中，其中每 100 m³ 同配合比的混凝土要取样一次，而对于不足 100 m³ 按则一次计。每次检

测要至少留置一组(3块)标准养护试件^[3]。第三,基于设计强度等级要求,对其进行标准化评定分析,保障各项指标符合《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009)的技术要求,其中C20 \geq 20 MPa,C30则要 \geq 30 MPa。

2. 劈裂抗拉强度。通过分析此指标参数,可以对混凝土抗裂性能进行间接的评估分析,此在试验中要应用劈裂夹具。

3.2 透水功能性能检测

1. 透水系数检测。第一,确定检测技术。根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009)的标准试验方法进行处理。首先应用实验室法(定水头法)进行处理。在操作中可以将标准成型圆柱体试件放入测定系统中,对其密封侧壁。然后在装置中注入清水,并且保持恒定水头位于一定高度,记录固定时间内其出水量,最后利用达西定律进行透水系数的计算分析。其次,现场法(路面渗水仪法)。在应用中主要就是通过改良的沥青路面渗水仪进行操作。主要在成型之后的路面上,固定仪器设备的底座,然后向内环注水并且保持其水头固定,重点测量在单位时间中下降高度以及渗入量,最后计算现场的透水系数,分析其是否符合标准要求。第二,确定检测频率。在检测中要保障实验室每生产批次或每500 m³对其检验一次;而在现场检测中,则要基于每500 m²抽测一点的方式进行检测分析。第三,一般保障透水系数 \geq 0.5 mm/s;对于高性能透水混凝土在评价中,其透水系数可以达到3~5 mm/s以上。

2. 有效孔隙率检测。孔隙率是水系数结构基础,直接关系到最终的效果。有效孔隙率主要就是连通的、可以供水通过的孔隙体系在整体体积中所占比例。

第一,确定检测方法。通过体积密度法进行分析,其中基于要求测量试件的干重(M)、水中重(M_水)和表观体积(V)。

通过公式计算密度:

$$P=(1-(M/(V*\rho_{水}))*100\% \quad (1)$$

式(1)中, $\rho_{水}$ 为水的密度^[4],也可以通过孔隙率测定仪进行专业测量。

第二,评价标准。通常要求有效孔隙率 \geq 10%。一般状态下其主要标准控制在15%~25%之间,如果标准过低则会影响透水,反之,如果标准过高则会严重影响强度。

3.3 耐久性能检测

1. 抗冻融循环性能。基于《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082-2024)中快冻法对其进行分析。

第一,确定检测手段。将饱和状态下试件放入到冻融测试箱子中,然后在-18℃ \pm 2℃、5℃ \pm 2℃之间对其进行循环处理,其中一次循环设置时间为2~4小时。而每间隔25次循环之后,则要重点检查质量损失率、相对动弹性模量损失率等参数,确定具体参数。第二,确定评价标准。主要就是通过25次或者50次的冻融循环之后,其质量损失率 \leq 5%,强度损失率 \leq 20%^[5]。

2. 耐磨性能。基于《混凝土及其制品耐磨性试验方法》(GB/T 16925-1997)对其进行标准化处理,主要就是通过滚珠轴承法进行处理。在检测中要应用规定压力的磨头对试件表明旋转摩擦一定次数,然后测量磨坑长度。要保障磨坑长度 \leq 30 mm,方可符合检验标准要求。

4 结束语

通过分析基于海绵城市理念的透水混凝土路面在施工质量控制与检测方法方面的关键技术,研究表明,严格控制原材料质量、科学设计配合比,实现精细化摊铺,重视压实以及养护等各个流程的管理,重点做好透水系数、孔隙率以及强度、耐久性等多维度指标的综合验收,可以充分保障透水混凝土路面质量。在海绵城市建设中,要基于透水混凝土路面性能,构建完善的科学的质量管理与性能评估体系,这样在提高路面工程物理性能,延长使用寿命的同时,可以有效凸显其生态环保功能。未来,随着高强度长效透水混凝土材料、智能化技术、数字化手段的日益完善,透水混凝土在海绵城市建设中会愈加重要,继而为构建持续发展、高韧性、可扩展的城市环境提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 孟繁鸣. 市政道路透水混凝土路面施工技术应用分析[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会. 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一). 杭州市市政工程集团有限公司, 2025.
- [2] 钱辰. 无机透水混凝土路面施工技术[J]. 城市建筑空间, 2024,31(S2):239-241.
- [3] 李永缙. 透水混凝土路面施工技术应用及质量控制[J]. 产业创新研究, 2024(16):133-135.
- [4] 曾龙炜,张燕华. 海绵城市背景下透水混凝土路面的施工质量控制[J]. 上海建材, 2023(05):29-31,53.
- [5] 李国斌,杨帆. 海绵城市视域下的透水混凝土路面施工及质量控制研究[J]. 科技资讯, 2021,19(36):37-39,61.