

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(旬刊·1993年创刊)

2025年7月 第21期(总第610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

社长、总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 墨 官慧琪

运营：李瑞鹏 张娅玲

外联：秦 强 吴彩云

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：khsblzz@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

广告经营许可证：5300004000063

运营总代理：云南华泽文化传播有限公司

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

邮政发行：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7月25日

定价：人民币15元

版权声明：

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

目录Contents

科技博览

- 001 非理想光学系统波前像差校正方法探究
..... 段耀武, 王 栋
- 004 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用
..... 蒙绍举
- 007 机电一体化技术下的精密运动控制系统设计
..... 王 瑞
- 010 基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术
..... 郭凯特
- 013 地质工程边坡稳定性智能监测与预测技术研究
..... 于 洋, 王洪峰

智能科技

- 016 电力设备故障诊断与自动化维护方法分析
..... 张凯登
- 019 矿山供配电系统中的自动化技术分析及应用
..... 侯晋杰
- 022 信息化技术在建筑工程技术体系中的应用分析
..... 陈胜永, 乔延强, 刘传良
- 025 深基坑施工过程中的监测技术与数据分析
..... 同亚运, 孟旭刚, 李 彤
- 028 基于物联网的公路工程施工现场安全预警系统构建
..... 曹运涛
- 031 智能化施工管理系统在电力工程项目中的实践研究
..... 仵 蕊
- 034 电力工程施工管理中信息化技术的应用与效果分析
..... 朱 磊, 蓝剑波

应用技术

- 037 隧道软弱围岩长管棚施工技术
..... 李万鹏
- 040 大跨径球形网架安装施工技术
..... 谢 显

目录Contents

043	高速公路波形板防护栏施工技术.....	范召辉, 屈 辉
046	公路桥梁工程中预制 T 形梁施工技术.....	王金辉
049	复杂地质条件下桥梁桩基施工技术创新与灾害防治.....	崔秀彦, 刘成强
052	混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的应用研究.....	李洪瑾
055	现浇泡沫轻质土在高速公路工程路基填筑中的应用研究.....	李兆丽, 李兆贤
058	基于复杂地基条件下的塔吊基础选型及超高围护措施施工技术研究.....	林信宇, 刘 军

科创产业

061	城市轨道交通列车节能运行策略分析.....	金状兵, 叶 特, 唐 虎, 王 凯, 王峰宇
064	电力设备可靠性检修维护模式及其实践.....	刘华健, 吕 静, 赵小宁, 谢正青
067	大数据分析在工程造价预测与决策中的角色探讨.....	丁 祎, 郭 桢
070	工业 4.0 背景下机械电子系统的信息化与智能化发展.....	李 冲, 李 迅, 李 峰
073	基于协同管理模式的港口装卸桥及基础设施运维策略分析.....	李东浩, 赵绪高
076	基于数字化孪生的 BIM 技术为市政道路与管道协同设计赋能.....	张明敏, 王 爽
079	基于多尺度建模的复杂工业系统能源优化与环境协同调控策略研究.....	任 冰

技术管理

082	水利工程实验室质量管理体系研究.....	邓 琴, 蒲 黎
085	基于 BIM 技术的建筑工程施工管理优化策略.....	张 鹏, 张明星
088	公路隧道工程现场安全管理体系构建与实践.....	何建昌
091	建筑工程管理中的常见问题及解决对策分析.....	罗 浩
094	市政工程雨污水管道施工管理关键点剖析.....	陈琦蓓
097	配电网工程管理中存在的问题及整改措施.....	郭 寒
100	变电站改建工程施工管理模式及风险防控策略.....	熊筠海
103	数字化技术在水利工程建设管理中的应用研究.....	王凯丽

科学论坛

106	市政道路路基边坡设计研究.....	郝建名, 李 托
109	露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施研究.....	马润利
112	智慧消防技术在大型综合体建筑中的应用研究.....	宋伟立
115	建筑电气设备故障原因及智能运维技术应用研究.....	高 谦, 刘 璐
118	装配式建筑工程质量控制体系构建与优化路径.....	李 梅
121	绿色节能施工技术在住宅建筑工程中的应用探讨.....	吕晗晓
124	无人机遥感测绘技术在城市空间规划中的应用研究.....	钟 慧, 赵英楠

非理想光学系统波前像差校正方法探究

段耀武¹, 王 栋²

(1. 北京控制与电子技术研究所, 北京 100045;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘要 波前像差是光学系统中由于光学元件的不完美、装配误差或外部环境因素所导致的光波相位畸变, 这些相位畸变直接影响了系统的成像效果。因此波前像差的校正是许多高精度光学应用中必不可少的一步, 如天文观测、激光系统、显微镜以及自适应光学等领域。传统的波前像差校正方法主要采用主动校正和被动校正。近年来, 随着硬件的计算能力提升, 智能优化算法、粒子群优化算法和遗传算法在波前像差的校正中都取得了显著进展。本文综述了该领域的研究背景、波前像差的定义和常用校正方法, 探讨了当前校正方法的应用与挑战, 并展望了未来技术的发展方向, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 波前像差; 像差校正; 主动校正; 被动校正

基金项目 国家国防科技工业局 2024 年度科研专项资助 (项目编号: KJSP2023020304)。

中图分类号 O43

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.001

0 引言

在高精度光学系统中, 波前像差^[1]是影响成像质量的重要因素之一, 其产生原因主要包括光学元件的加工误差、装配偏差以及外部环境干扰。这些相位畸变若不加以校正, 将严重降低系统的分辨率与成像清晰度, 因此对波前像差进行有效校正是确保光学系统性能的关键。传统的校正方法多依赖于主动或被动光学手段, 尽管在一定程度上取得了良好效果, 但仍存在响应速度慢、适应性差等问题。随着智能优化算法和计算技术的发展, 粒子群优化、遗传算法等被广泛引入波前校正领域, 并展现出良好的应用前景。本文围绕波前像差的定义、产生机制与校正方法进行综述, 分析当前研究成果与挑战, 并展望未来的技术发展趋势。

1 研究背景

随着光学成像和激光技术的快速发展, 现代高精度光学设施对光学系统成像性能的要求不断提高, 如何既快速又高精度地校正像差成了一个十分重要的问题, 这个问题尤其体现在天文成像、激光传输、显微成像等领域。在光学系统中, 由于系统存在波前像差, 因此导致了其成像质量下降, 使得系统的分辨率和精度无法达到高精度仪器的要求。为了提高系统性能, 波前像差的有效校正成为光学工程中的一个重要问题。

波前像差的影响在天文望远镜、显微镜、激光束整形和医疗成像等高精度领域尤其重大。在天文望远

镜中, 由于大气湍流的影响, 星光的波前会产生很大畸变, 从而导致成像模糊。而在激光系统中, 波前畸变会影响激光光束的聚焦性和传输稳定性, 降低激光通信应用的效率。因此, 如何准确地测量并高效地校正波前像差是光学系统设计和应用中的重大挑战之一。

随着光学技术和计算机硬件的发展, 尤其是自适应光学和智能优化算法的出现, 使得波前像差的校正取得了显著性进展。这些新兴技术为解决复杂的波前像差问题提供了新的方法, 并在多个应用领域中取得了突破性的进展。

近年来, 人工智能技术的快速发展, 特别是深度学习与强化学习等智能优化算法的广泛应用, 为波前像差的实时校正提供了强有力的技术支持。在传统的波前校正方法中, 如基于 Zernike 多项式的拟合或最小均方差方法, 虽然具备一定的准确性, 但在面对动态变化的复杂扰动环境 (如大气湍流、热畸变) 时, 仍存在响应慢、鲁棒性差的问题。相比之下, 智能优化方法能够从环境反馈中不断学习并更新控制策略, 使得系统能够自适应不同的扰动条件, 提高校正效率与精度。

此外, 自适应光学系统 (Adaptive Optics, AO) 的发展也极大地推动了波前像差校正技术的进步。AO 系统通常由波前传感器、控制器和变形镜等组成, 能够实时检测并校正光束波前的畸变, 广泛应用于地基大型望远镜、高功率激光系统以及生物显微成像中。近年来, 集成高分辨率波前探测器与高速驱动器的 AO

系统不断涌现,进一步推动了波前校正从“慢速、低精度”向“快速、高精度、高动态范围”的方向发展。

综上所述,波前像差校正技术正朝着高精度、智能化、实时化的方向不断演进,其核心在于融合先进的感知技术、建模算法与高性能硬件设备,从而为现代光学系统提供更加稳定、高效的成像与传输保障。

2 波前像差的定义

波前像差是指光波在传播过程中,由于光学系统中的光学元件存在形状畸变、制造误差或其余外部环境因素的干扰,使得光波相位发生畸变^[2]。根据傅里叶光学理论,理想的光波应该是均匀的平面波或球面波。波前像差则是实际光波前与理想光波前的相位差异。波前像差不仅会影响光学系统的分辨率和成像质量,还会显著降低系统的光能传输效率。

波前像差的具体表现形式可以分为多种类型,其中最常见包括:

1. 球差:在光波经过光学系统时,由于光学元件表面形状的偏差,光线的聚焦位置出现差异,进而导致成像位置不集中。

2. 彗差:该像差主要发生在成像系统的中心和边缘区域,成像出现尾迹或“拖影”现象,影响图像的清晰度。

3. 场曲:该像差指光学系统中成像平面相对于理想平面发生的曲率变化,导致成像畸变。

4. 像散:由于系统中不同位置的光线聚焦于不同的焦点,导致光线在不同方向上的失焦,从而形成不规则的成像。

5. 畸变:光学系统中由于光学元件的形状不完美,导致图像与实际物体之间的关系发生失真,通常表现为图像的形状发生扭曲。

6. 色差:不同波长的光线由于折射率不同,聚焦位置也不同,导致出现色带,通常在色彩还原度较为敏感的应用中表现得尤为明显。

这些像差通常会叠加在一起,形成复杂的波前像差,影响成像效果。

3 波前像差的校正方法

波前像差的校正方法主要包括主动校正和被动校正两类。主动校正方法依赖于自适应光学技术,通过实时监测波前畸变并动态调节光学元件的形状来补偿像差,常见的实现方式包括使用变形镜、液晶空间光调制器等可变形光学器件,使光波前恢复到理想状态。这种方法广泛应用于天文观测、生物显微成像和高分辨率光学系统,能够有效应对大气湍流、光学系统误差等动态干扰。而被动校正方法则通过优化光学元件

的设计,从源头上减少像差,如采用非球面透镜修正球面像差、优化光学材料以降低色差、使用多层膜涂层减少反射引起的干涉,或通过计算机设计结合优化算法提升光学系统整体成像质量。

3.1 主动校正方法

自适应光学技术^[3]是主动校正方法中最为成熟且广泛应用的技术,能够实时补偿光学系统中的波前像差,提高成像质量。典型的自适应光学系统由波前传感器、波前控制系统和变形镜等核心部件组成。波前传感器用于检测入射光波的相位畸变,并将误差信息传输至波前控制系统,控制系统基于这些数据计算出最佳补偿策略,并驱动变形镜或其他可变形光学元件,使其表面形状动态调整,以抵消波前畸变。

在天文观测中,大气湍流造成的光学畸变是影响地基望远镜成像质量的主要因素,而自适应光学能够通过高速波前校正,大幅度提高望远镜的分辨率。在自由空间光通信领域,自适应光学能够减少湍流引起的光束散射和衰减,确保远距离高速数据传输的稳定性。

除了自适应光学技术外,动态波前补偿技术也是主动校正中重要的手段之一。动态波前补偿主要依靠可调镜面或液晶空间光调制器,通过精确调整这些元件的表面形状来动态补偿光学系统的波前误差。这一方法在高速成像和激光传输等领域具有显著优势。在激光传输系统中,特别是远距离高功率激光应用中,由于空气湍流和热效应的影响,激光束会发生畸变和能量损失,动态波前补偿技术可以实时优化光束质量,提高能量传输效率。这种方法的灵活性使其在多种光学应用中成为一种高效的波前校正方案,与自适应光学技术互补,共同提升光学系统的性能。

随着计算光学和人工智能技术的发展,自适应光学和动态波前补偿方法正在向更高精度和更快响应速度的方向发展。近年来,基于机器学习的波前校正方法开始受到关注,这些方法能够通过训练数据建立非线性映射关系,使光学系统在复杂环境下依然保持高效补偿能力。

3.2 被动校正方法

被动校正方法主要依赖于优化光学设计^[4],以减少像差的产生,使光学系统在成像过程中更加精确。光学设计优化的核心在于改善光学元件的形状、选择优质材料以及运用多层膜涂层等手段,从而有效降低波前像差。传统的光学系统往往受到球面像差、彗差和色差等影响,而通过合理调整透镜和反射镜的几何形状,可以在设计阶段减少这些误差。此外,光学材料的选择对于系统的像差控制也至关重要,如低色散

玻璃可以减少色差,而高均匀性材料能够提高透射率,减少光学元件内部的不均匀性所带来的像差问题。

在实际应用中,多层膜涂层技术也扮演着关键角色,它可以通过改变光的透射和反射特性来优化光学系统的性能。例如:在高精度成像系统中,常采用抗反射涂层以减少光的反射损耗,避免因多次反射而产生的鬼像和干涉条纹。这不仅提升了系统的透光率,还能够有效抑制杂散光,提高对比度和信噪比。特别是在波前像差控制方面,增透膜和滤光膜的优化设计可以减少光学元件表面的反射,使得入射光的透射更为均匀,从而降低像差的影响。此外,在紫外、可见光以及红外等不同波段的应用中,不同的涂层组合能够针对性地优化系统性能,使光学系统在特定波长范围内达到最佳成像效果。

近年来,随着对高性能光学系统需求的不断增长,被动校正方法在材料科学与工艺控制方面也取得了诸多进展。例如:超材料和自由曲面光学元件的引入,为光学设计带来了新的可能性。自由曲面光学元件由于不受传统球面和非球面限制,具有更大的设计自由度,能够实现更高阶像差的补偿,显著提升系统的成像质量。此外,微纳结构表面的应用也逐渐兴起,通过对亚波长尺度结构的精细设计,可以有效控制光的传播路径,实现特定波前的调控,从而进一步抑制像差的形成。

在制造工艺方面,超精密加工与离子束修形等高端技术的发展,使得光学元件的加工精度显著提升,可以更好地还原复杂设计曲面,从源头减少像差的引入。同时,精密装调技术和误差补偿机制的引入,也增强了被动校正在系统集成阶段的实用性与可控性。这些进展使得被动校正不仅仅停留在设计阶段,更延伸到了整个系统制造和集成流程中,成为实现高性能光学系统不可或缺的技术基础。

3.3 智能优化算法

近年来,随着计算智能技术的迅速发展,智能优化算法在波前像差校正中的应用日益广泛。其中,粒子群优化算法、遗传算法和模拟退火算法等方法凭借其强大的全局搜索能力和优化效率,为复杂光学系统的波前校正提供了新的解决方案。粒子群优化算法^[5]模拟群体智能的行为,通过在解空间内搜索并调整个体粒子的速度和位置,使其逐步逼近最优解。在波前校正中,该算法能够快速适应光学系统的动态变化,特别适用于实时像差补偿场景,如自适应光学系统中的实时优化控制。

遗传算法^[6]则通过模拟自然界生物的进化过程,

利用选择、交叉和变异等操作对候选解进行优化,使其逐步趋向全局最优解。在波前像差校正问题中,遗传算法的全局搜索能力使其能够有效应对复杂的多目标优化任务,例如同时优化多个波前控制参数,以获得最优的成像质量。

模拟退火算法则基于物理退火过程的数学模拟,利用降温机制控制解空间的搜索,使优化过程能够避免陷入局部最优解,最终找到全局最优解。在波前像差校正中,模拟退火算法能够帮助光学系统在复杂的误差分布下找到最佳的校正方案,特别是在初始状态较差或者优化目标函数存在多个局部极值的情况下,其优势尤为明显。

4 结束语

尽管波前像差的校正技术已取得了显著的进展,但仍面临一些技术挑战。

首先,实时校正仍是一个待需解决的重要问题。在许多高速成像和实时监控应用中,波前像差的校正需要在极短的时间内完成,这对计算能力和反馈系统的要求极高。

其次,多像差协同校正也是一个极大的挑战。在复杂的光学系统中,可能同时存在多种类型的像差,如何协调这些像差的校正并优化整体性能,是目前研究的热点问题。未来的技术需要更加高效、精确地处理这些多重像差问题。

此外,随着人工智能和深度学习技术的发展,基于数据驱动的波前像差预测与校正方法成为一个新的研究趋势。深度学习模型可以通过大量数据训练,准确预测波前像差并实时进行修正,会在未来的波前像差校正中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 徐欢欢,葛轶睿,黄振平.波前像差对视觉质量的影响分析[J].临床眼科杂志,2020,28(05):456-458.
- [2] 李云霄.无波前传感激光大气传输畸变补偿技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [3] 胡海宁.基于深度学习的自适应光学控制技术研究[D].北京:军事科学院,2024.
- [4] 习啸天.无人机载复眼光学系统设计[D].西安:西安工业大学,2024.
- [5] 梅泽迅,周木春.基于改进粒子群算法的光学相控阵栅瓣优化[J].激光与光电子学进展,2023,60(20):202-207.
- [6] 张昊,李苗,翟兴辉,等.基于遗传算法的卫星光学载荷成像路径规划及参数优化[C].2024中国自动化大会论文集,2024.

电气工程及其自动化无功补偿技术的应用

蒙绍举

(广西城市职业大学, 广西 崇左 532100)

摘要 随着电力系统的快速发展, 电气设备的种类与数量持续增多, 非线性负荷大量接入电网, 使得电网的无功功率需求发生显著变化, 给电网的稳定运行带来了严峻挑战, 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用, 可以稳定系统电压, 降低线路损耗, 并优化电力资源的分配与利用。无论是传统的工业配电场景, 还是新兴的电力电子应用领域, 无功补偿技术都扮演着不可或缺的角色。本文主要阐述了电气工程及其自动化无功补偿技术的应用意义, 并从配电网管理、真空断路器、回路电流平衡等方面提出了相应的措施, 以为相关人员提供参考。

关键词 电气工程; 自动化无功补偿技术; 配电网管理; 回路电流平衡; 真空断路器

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.002

0 引言

无功补偿技术在电气工程领域得到了广泛的应用, 企业可以在输电线路中适当位置安装并联电抗器、串联电容器等无功补偿设备, 改善输电线路的电压稳定性, 还可以在配电网中应用智能型无功补偿装置, 满足各类用电设备的正常运行需求。此外, 在新能源发电领域应顺应时代的发展节奏, 积极推广应用无功补偿技术。在风电场中配备无功补偿系统, 稳定风电场接入点的电压; 光伏电站中应用有源电力滤波器结合无功补偿装置, 满足电网接入标准, 减少对电网设备的损害。

1 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用意义

1.1 改善电网供电质量

电气工程及其自动化无功补偿技术的应用, 可以实现企业实时监测电网中的无功功率变化, 并迅速调整补偿装置的输出, 进而维持系统电压在规定范围内。如在大型工厂中, 众多设备同时运行会导致无功功率需求大幅波动, 通过无功补偿装置, 可根据设备运行状态实时调整无功输出, 当系统中无功功率不足时, 可避免电压过度下降; 当无功功率过剩时, 可以防止电压过度升高, 进而将电压稳定在额定值附近, 确保生产设备正常运行。无功补偿可以有效减少电压畸变和闪变现象, 对谐波进行滤波和补偿, 改善电压波形质量, 电力工程中大量的非线性负载会产生严重的谐波干扰, 影响其他设备的正常运行, 采用无功补偿技术后, 可以提高电能质量。此外, 无功功率在电力系统中的传输会造成线路电流增大, 在远距离输电的电力系统中, 如果不进行无功补偿, 无功功率会在输电

线路上产生较大的电流, 导致线路损耗增加, 通过在合适的位置安装无功补偿装置, 可使无功功率在本地得到补偿, 减少线路电流, 降低线路损耗^[1]。

1.2 保障电力系统安全稳定运行

无功补偿技术的应用, 可以促使工作人员根据电力系统需求, 实时、动态地提供或吸收无功功率, 确保电力系统在不同运行工况下, 保持无功功率的平衡, 从而稳定系统电压, 避免设备损坏、系统崩溃等严重后果。当电力系统受到较大扰动, 如短路故障、大型设备突然启停等, 系统的无功功率需求会发生突变, 无功补偿装置具有快速响应的特性, 能够在极短时间内检测到系统无功功率的变化, 并迅速调整输出, 为系统提供额外的无功支持或吸收多余的无功功率。无功补偿可以有效调节系统中的无功功率分布, 避免无功功率在系统中的不合理流动引起的电压偏移, 通过合理配置无功补偿装置, 能够将系统电压控制在设备允许的范围内, 减少过电压和欠电压对设备的损害。例如: 在雷雨天气时, 电网可能会受到雷击等外部干扰而出现过电压现象, 无功补偿装置可以通过吸收多余的无功能量, 限制过电压的幅值, 保护电气设备的安全运行。无功电流流过设备时, 会在设备的电阻中产生焦耳损耗, 导致设备发热, 而且通过减少系统中的无功电流, 降低了设备的焦耳损耗, 从而减少了设备的温升。

1.3 促进节能减排和可持续发展

传统的火力发电是污染物排放的主要来源之一, 通过无功补偿技术的应用, 可以降低电力系统的能源

消耗,间接减少了煤炭等化石燃料的燃烧,进而改善空气质量和环境质量。无功补偿技术对于新能源的接入和消纳也起到了关键作用,新能源发电具有间歇性和波动性的特点,无功补偿装置可以快速响应新能源发电的无功功率变化,为其提供稳定的支撑和补偿,促进新能源的顺利并网和消纳,在风力发电和光伏发电集中的地区,通过配置合适的无功补偿装置,可以有效解决新能源发电接入电网带来的电压波动、谐波等问题,提高新能源在电网中的渗透率,推动能源结构的清洁化转型,减少对传统化石能源的依赖,降低环境污染。在城市供电系统中,应用无功补偿技术,可以降低线路损耗和变压器损耗,提高供电质量和可靠性,同时减少了对电力设施的投资和建设需求,还可以为电力市场的竞争和发展创造良好的条件,促进电力市场的多元化和健康发展^[2]。

2 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用

2.1 在配电网管理中的应用

配电网规划初期,企业应准确预测无功负荷,采用基于大数据分析的无功负荷预测模型,收集区域内历史用电数据、企业用电设备信息等数据,还可以利用聚类分析对不同类型的企业的无功负荷特性进行分类,建立无功负荷预测数据库,通过仿真计算不同无功补偿方案下的电压质量、线损率等指标,最大限度地发挥无功补偿设备的效能,如对于负荷密集区域,预留较大的无功补偿容量。企业应根据配电网的拓扑结构和负荷分布,选择合适的无功补偿装置,考虑电容器组、静止无功补偿器和静止无功发生器等应用特点,合理布局无功补偿点,遵循“分层分区、就地平衡”的原则,考虑装置的安装空间、散热条件以及与其他设备的配合等因素,还应将无功补偿装置的接入与配电网的整体设计相结合,考虑无功补偿装置与变压器、开关柜等设备的协同工作,避免因无功补偿引起的谐波放大等问题,影响设备的正常运行。企业应安装智能无功补偿控制系统,实时采集配电网的电压、功率因数等参数,根据预设的控制策略自动投切电容器组。无功补偿设备长期运行可能出现故障或性能下降,影响其补偿效果,企业应定期维护和管理,建立无功补偿设备状态监测与维护体系,通过在电容器组上安装温度传感器和压力传感器,实时监测电容器的温度和内部压力,积极采用故障诊断技术及时发现设备潜在问题,进而延长无功补偿设备的使用寿命,提高设备的运行可靠性^[3]。

2.2 在回路电流平衡中的应用

在电网中,由电源供给负载的电功率形式包括有功功率、无功功率,无功功率的存在对于电气设备的运行是必要的,但过多的无功功率会对电网产生负面影响,因此,需要通过无功补偿技术来平衡无功功率,使电网更加稳定、高效地运行。企业应对电气回路的参数进行详细测量,通过电力仪表获得回路的总电压、总电流、有功功率和无功功率等参数,根据测量得到的参数计算功率因数,评估回路的电流不平衡度,进而确定无功补偿的容量和方式,若功率因数较低且主要是感性负载导致的无功缺失,优先考虑并联电容器补偿,若回路中存在谐波问题,还应考虑采用滤波型无功补偿装置,进而在补偿无功功率的同时,有效抑制特定次谐波,防止对其他设备的不良影响。在选择合适的无功补偿装置型号时,对于较小容量的家庭或小型商业场所,可以选择家用型的无功补偿电容器组;对于中大容量的工业配电系统,选择专用的电力电容器组或 SVG 等动态补偿装置,安装无功补偿装置时充分考虑其安装位置和连接方式,在连接过程中,要确保连接牢固,接线正确,同时注意电容器组的放电问题,若采用电力电子器件的无功补偿装置,应按照设备的安装说明书进行安装,保证装置的散热条件良好。完成安装后,应对无功补偿装置进行调试,开展外观检查工作,确保装置无损坏、接线正确,然后通电测试,观察装置是否正常启动和运行。在调试过程中,监测回路的电压、电流、功率因数等参数,检查补偿效果是否达到预期目标,并对调试过程中出现的问题进行优化处理,若发现补偿装置出现过补或欠补的情况,要重新调整装置的补偿参数^[4]。

2.3 在真空断路器中的应用

真空断路器具有灭弧能力强、维护量小等优点,在中低压配电系统中得到广泛应用,然而在其运行过程中,由于其内部结构以及连接的负载特性,会产生一定的无功功率。无功电流会导致一系列问题,如增加线路损耗、降低功率因数、影响电压质量等,无功补偿技术应用于真空断路器中,可以有效改善其运行性能,稳定断路器的工作电压,减少无功电流在系统中的流动。企业应利用电容器和电抗器的组合,通过调谐滤波器或串联谐振等方式,对电网中的无功功率进行动态补偿,该组合方式可以根据负载的变化自动调整无功输出,保持系统功率因数的稳定,如在大型工业用电系统中,通过并联电容器和电抗器的混合装

置,实现对冲击性负荷的快速响应和无功补偿。企业应在真空断路器的电源进线侧或出线侧并联适当容量的电容器,其容量选择应根据真空断路器所带负载的无功功率需求来确定,并联电容器可以采用集中补偿、分组补偿或就地补偿的方式,在某些情况下,为了防止电容器投入时产生谐波放大等问题,可以在电容器支路串联电抗器。源电力滤波器应用在对电能质量要求较高的场所,不仅具有无功补偿功能,还能有效抑制谐波电流,在数据中心、精密制造工厂等,通过检测电网中的谐波分量,并产生与之相位相反的补偿电流注入电网,从而达到滤除谐波和补偿无功的目的,可以提升供电质量和系统效率。此外,电抗率是电抗器的重要参数,一般选择电抗率为 $6\% \sim 13\%$ 的电抗器与电容器配合,电容器和电抗器的连接顺序一般为电抗器在前,电容器在后,保证在电容器投入之前,电抗器先对可能出现的涌流起到限制作用。为了确保无功补偿装置与真空断路器的协调运行,应配备完善的保护和控制装置,如设置过流保护、过压保护、欠压保护等,防止因补偿装置故障而引发的过流、过压等问题对真空断路器造成损害,通过控制装置实现对补偿装置的自动投切控制,根据系统的无功功率需求和电压状态,实时调整补偿容量,确保补偿效果最佳^[5]。

2.4 在故障诊断中的应用

在电力系统中,输电线路短路故障会导致大量的无功功率在故障点涌入系统,使系统的无功分布发生改变。无功补偿技术可以为故障诊断提供重要的信息,在实际应用中,企业应安装无功功率传感器在电力系统的关键节点,如变电站的母线、输电线路的两端等,实时采集无功功率的数据,并将其传输到监控系统。在正常运行状态下,无功功率应该在一定的范围内波动。当系统发生故障时,如输电线路短路或断路,无功功率会出现明显的突变。企业还应根据系统的运行特性和历史数据,设定无功功率的上限和下限阈值,当实时监测的无功功率超出这个阈值范围时,监控系统会发出警报,提示可能存在故障,同时结合其他电气量的变化,进一步判断故障的类型和位置,对于无功补偿电容器组,采用先进的监测技术来检测其内部的健康状况,通过监测电容器的电容值、介质损耗因数等参数,判断电容器是否存在老化、受潮或损坏的情况。电抗器在无功补偿系统中主要用于限制电容器的合闸涌流和抑制谐波,企业通过监测电抗器的电流、电压、温度等参数,可以诊断其是否存在故障,结合

电抗器的振动和噪声信号分析,可以更准确地诊断故障原因。在无功功率监测过程中应确保数据的准确性,传感器的选择和安装位置应合理,进而避免受到外界电磁干扰的影响,采用具有高分辨率和高精度的传感器,并且定期对其进行校准和维护,同时在数据传输过程中,应采取屏蔽电缆、信号滤波等抗干扰措施,确保监测数据的真实性和可靠性。在实际故障诊断中,还应综合考虑多个电气参数的变化情况,这样才能准确地判断故障类型和位置。随着技术的发展,企业在故障诊断中的应用中,可以与其他先进的诊断技术相结合,如结合小波分析、神经网络等智能诊断方法,对无功功率和其他电气参数的数据进行更深入的分析 and 处理,利用这些智能算法的强大模式识别能力,提高故障诊断的智能化水平^[6]。

3 结束语

无功补偿技术作为电气工程及其自动化领域的关键手段,可有效维持电压稳定,提升电能质量。企业应重视该技术在配电网管理、故障诊断中的应用,如在供电系统中安装无功补偿装置,提高电能利用效率,减少电费开支,积极采用专门的电弧炉无功补偿系统,减少电弧炉对电网的不良影响。此外,企业应深刻认识到其在不同场景下的优势与不足,不断进行技术创新与改进,引进先进的监测手段,积极采用智能控制算法,更好地满足复杂多变的电力系统运行需求。

参考文献:

- [1] 郑昕. 自动化技术在无功补偿系统中的应用[J]. 电子技术, 2025, 54(01): 346-347.
- [2] 陈玉超. 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(20): 123-125.
- [3] 李海鹏. 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用[C]//冶金工业教育资源开发中心, 中国钢协职业培训中心. 第13届钢铁行业职业教育培训优秀多媒体课件活动系列研讨会: 电力工程与技术创新论文集. 张家口彬锦建筑工程机械租赁有限公司, 2024.
- [4] 倪佳佳. 电气工程及其自动化无功补偿技术的应用[J]. 光源与照明, 2024(03): 231-233.
- [5] 张焱焱. 电力电子技术 in 电气工程中的实践应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(12): 362-364.
- [6] 葛汶鑫. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用[J]. 光源与照明, 2023(04): 189-191.

机电一体化技术下的精密运动控制系统设计

王 瑞

(重庆移通学院, 重庆 400000)

摘 要 本文深入探讨了机电一体化技术下的精密运动控制系统设计。首先, 对机电一体化技术概念以及其对于精密运动控制的意义进行了说明; 其次, 对精密运动控制系统构成要素进行了深入分析, 包括驱动装置、传感器和控制器, 并论述各个组成部分的作用及原理; 最后, 重点对系统设计过程中高精度位置控制、速度控制算法等关键技术进行了研究, 并对如何改善系统稳定性及响应速度等问题进行了探讨。同时, 以实际工程为例说明精密运动控制系统设计主要包括设计思路、方案选型及调试过程等, 以期对精密运动控制系统性能的进一步完善提供理论参考与实践指导。

关键词 机电一体化; 精密运动控制系统; 高精度位置控制; 速度控制算法

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.003

0 引言

随着现代科学技术的飞速发展, 机电一体化技术已成为现代制造业中不可或缺的关键技术。精密运动控制系统是机电一体化技术中的一个核心应用领域, 它在工业自动化、精密仪器加工和航空航天等诸多领域都有着举足轻重的地位和作用。精密运动控制系统可以实现位置、速度及加速度的高精度控制, 以满足人们对于加工精度和产品性能方面越来越高的需求。因此, 对机电一体化技术中精密运动控制系统的设计进行深入研究具有重要的现实意义。

1 精密运动控制系统的关键技术

1.1 高精度位置控制

1.1.1 闭环位置控制策略

闭环位置控制是实现高精度位置控制的关键。在闭环位置控制系统下, 运动部件的真实位置由位置传感器进行实时探测, 真实位置信息被反馈到控制器。控制器依据所设定之目标位置与真实位置之差, 通过位置调节器计算所述控制量, 并将此控制量送至所述驱动装置对所述运动部件之位置进行调整, 使得二者趋于均等^[1]。

常见的位置调节器有比例—积分—微分 (PID) 调节器。PID 调节器采用比例、积分及微分来处理位置误差, 使位置控制更加准确稳定。在实践中, 针对不同系统的特点, 需合理整定 PID 参数。

1.1.2 插补算法在位置控制中的应用

插补算法在多轴联动精密运动控制系统中具有重

要作用。以数控加工为例, 要求刀具按预定轨迹移动。插补算法能够根据邻近加工点计算所述中间过渡点位置坐标以使得加工轨迹更光滑^[2]。

常见的插补算法有逐点比较插补和数字积分插补 (DDA) 等。逐点比较插补算法是通过比对当前点与目标点之间位置关系来判断刀具进给方向; 数字积分插补算法是一种通过对坐标轴位移进行积分运算来生成插补路径的方法。

1.2 速度控制算法

1.2.1 速度给定与跟踪算法

速度控制的主要目的是使运动部件的速度按照设定的速度曲线进行变化。速度给定值一般是上位机或者控制系统按照加工工艺和其他要求来给定的。速度跟踪算法负责比对驱动装置实际速度和速度给定值, 依据误差做出调整。

在实践中, 自适应速度控制算法等几种先进速度控制算法能够根据运动系统动态特性对控制参数进行自动调节, 从而提高速度控制的准确性与适应性。

1.2.2 加减速控制算法

合理的加减速控制对于精密运动控制系统至关重要。当动作启动后, 需加速操作以使得动作部件快速到达设定转速; 当动作完成或者速度发生变化时需做减速操作。

常用加减速控制算法是 S 形速度曲线控制算法。S 形速度曲线可实现运动部件加速与减速时的平稳过渡, 并避免过大冲击力及加速度突变现象, 提高系统稳定性及运动精度。

1.3 系统稳定性与响应速度的提高

1.3.1 系统的建模与分析

对精密运动控制系统进行准确的建模是提高系统稳定性和响应速度的基础。通过对系统进行动力学建模,可对系统固有频率和阻尼比进行响应特性分析。

常见的系统建模方法包括时域建模与频域建模两种。时域建模是通过建立微分方程,对系统状态进行描述;频域建模的方法是通过分析系统频率特性的分析,如传递函数等,来评定系统的稳定性。

1.3.2 控制策略的优化与改进

为提高系统的稳定性和响应速度,可以对现有的控制策略进行优化和改进。比如利用模糊控制和神经网络控制这类智能控制算法,就能够突破传统控制算法对复杂和非线性系统控制的限制。

该智能控制算法无需准确的系统模型并能根据系统运行状态及环境变化而自动调节控制策略,以提高运动控制系统运行的稳定性及响应速度,适用于非稳态系统或者复杂运行状态。

2 精密运动控制系统的设计要点

2.1 硬件设计

2.1.1 总体布局规划

根据系统的应用场景和空间限制,合理安排驱动装置、传感器和控制器的位置。例如:在空间有限的工业自动化设备中,要将各部件紧凑布置,同时要考虑散热、布线等因素,避免相互干扰^[3]。

对于多轴运动的精密运动控制系统,要确保各轴之间的空间布局合理,减少轴间的干涉和耦合影响,以保证运动的协调性和准确性。

2.1.2 接口设计

驱动装置和控制器间需设计一个可靠电气接口。例如:伺服电机或步进电机驱动器与运动控制卡或PLC之间要通过合适的通信接口(如脉冲接口、模拟量接口或者高速通信协议接口)进行连接,确保控制指令能准确无误地传输到驱动装置。

传感器和控制器还应设计配套电气接口。如光栅尺和编码器等位置传感器通常输出数字脉冲信号或模拟电压信号,需要通过信号调理电路(如放大、滤波等处理)将其转换为控制器能够识别的标准信号形式。

2.1.3 电气系统设计

在电源设计中,应针对不同元件的功率需求以及

电压、电流需求来选择适当的电源模块。在兼顾电源抗干扰能力的前提下,可以通过隔离变压器和滤波电容的方法改善电源质量,从而使整个系统获得稳定供电。

在电路板设计中,应注意布线规则以避免信号线间的相互交叉与干扰。对高速信号线路应使用差分信号线和屏蔽线以确保信号完整。同时在接地设计中应兼顾单点接地或者多点接地以降低接地环路引起的噪声问题。

2.2 软件设计

2.2.1 底层控制软件设计

针对控制器(如PLC、运动控制卡或微处理器等)编写底层控制程序。以运动控制卡为例,需要使用相应的开发环境(如C、C++或特定的运动控制编程语言等)编写程序,实现对驱动装置(电机)的精确控制。包括配置运动控制参数,如脉冲频率、方向控制等,以及实现对电机的启停、正反转控制、速度和位置调节等功能。同时,要设计软件的安全保护机制,如过流保护、过压保护、超程保护等,防止系统因异常情况受到损坏。

2.2.2 运动控制算法实现

将高精度位置控制算法(如闭环位置控制、插补算法等)和速度控制算法(如速度给定和跟踪算法、加减速控制算法等)转化为具体的软件代码。对于闭环位置控制,要在程序中实时采集位置传感器的数据,进行误差计算和处理,通过位置调节器(如PID调节器)计算出控制量并发送给驱动装置^[4]。

插补算法的实现需要根据系统的多轴运动要求,在程序中按照相应的算法逻辑(如逐点比较插补或者数字积分插补算法等)计算中间轨迹点坐标,以实现平滑的运动轨迹。为了实现速度控制算法,需要对电机的运行速度进行实时的监控和调节,以确保满足系统预设的速度标准。

2.2.3 上层监控与管理软件设计

通过开发上层监控与管理软件来实时监测与管理整个精密运动控制系统。软件可运行于工业计算机或者嵌入式系统中,并通过通信协议和底层控制器交互数据。

上层软件要有数据显示功能并能实时地显示出系统工作状态、电机位置、速度和误差等重要参数;本实用新型具有数据存储的功能,能够记录系统在工作时的重要信息,方便后续的分析与故障诊断;本实用新型具有人机界面的运行功能,便于运行人员对参数的设置和程序的修改。

3 精密运动控制系统的设计与实例

3.1 设计思路

3.1.1 需求分析

在设计精密运动控制系统时,首先要进行需求分析。明确系统应用场合,精度要求,速度范围和负载大小。例如:在精密模具加工中,需要较高的位置精度(如微米级)和较为平稳的速度控制;在对高速磁悬浮列车的轨道进行检测时,必须具备迅速反应的速度和精确的位置控制功能^[5]。

3.1.2 部件选型

根据需求分析的结果进行部件选型。对于驱动装置而言,若精度与稳定性都有极高要求,例如半导体芯片制造设备方面,可以选择高精度永磁同步伺服电机;在那些对成本有严格要求、负载相对较轻以及控制精度要求不高的应用场景中,步进电机是一个值得考虑的选项。对传感器而言,基于位置精度的需要可以选用光栅尺或者高分辨率编码器。控制器会根据系统的复杂度和性能需求来选择 PLC、运动控制卡或微处理器。

3.2 工程实例

3.2.1 实例背景

以一台五轴精密雕刻机为例,这台雕刻机的主要功能是对如金属和木材这样的材料进行高度精确的雕刻处理,其雕刻的精确度需要达到 $\pm 5\ \mu\text{m}$,而雕刻的速度应控制在 $10\sim 100\ \text{mm/s}$ 之间,并且其加工路径应为三维曲线。

3.2.2 方案设计

1. 电机的选择:在充分考虑精度要求及速度范围的基础上,选择 5 台永磁同步伺服电机为驱动装置。

2. 传感器选型:使用高精度光栅尺作为位置传感器安装于各轴运动导轨中,对运动部件进行实时准确定位。

3. 控制器的选择:选用以 PC 为核心的运动控制卡为控制器,该控制卡能与上位机软件通信,便于接收加工轨迹数据,计算运动控制算法及发出指令。

4. 控制算法设计:采用闭环位置控制算法。利用位置传感器回馈的真实位置信息。用 PID 调节器来调整位置误差。同时,在速度控制中,针对雕刻工艺的需要,设计合理的速度曲线并利用自适应速度控制算法实现速度的实时跟踪与调节。

3.2.3 调试过程

在系统安装完成后,要进行电机的单轴调试。利用上位机软件对电机运动参数进行设定,例如速度和加速度,并对电机正反转和定位精度进行检验。针对单轴调试时定位误差较大的问题,可通过整定 PID 参数来实现,例如增加比例系数可提高响应速度,但是太大则会导致系统振荡;适当提高积分系数可减小稳态误差,但是太大则会造成积分饱和。

在单轴调试正常后,进行多轴协调运动调试。由于五个轴在空间布局上存在联动效应,因此在调试阶段,特别需要关注这些轴之间的同步性以及运动的协调性。对于多轴协调运动时产生的轨迹偏差,可采用优化控制算法和调节传感器的安装精度来解决。

4 结束语

在机电一体化技术的发展背景下,对驱动装置、传感器及控制器进行合理的选型,并采用先进高精度位置控制和速度控制算法,以及对系统稳定性与响应速度进行持续优化等关键措施,可构造出性能优越的精密运动控制系统。通过工程实例说明,在具体设计过程中准确地掌握需求、合理地选择零件并对其进行有效的调试,是保证系统性能发挥的关键所在。在科学技术不断进步的背景下,精密运动控制系统会向着更加高精度、智能化、网络化以及集成化等方向发展,从而给现代制造业等相关领域带来更加高效的生产效率以及高质量产品,从而促进相关行业的深入发展。

参考文献:

- [1] 范婧婧.试论机电一体化数控技术在机械制造中的运用[J].机电产品开发与创新,2025,38(01):83-85,88.
- [2] 曹城全.基于机器视觉的机电一体化精密定位机械手设计[J].机械管理开发,2024,39(12):133-135,138.
- [3] 董程宏.基于机电一体化技术的农业机械设计和试验[J].当代农机,2024(12):26-27,29.
- [4] 张吉福.机电一体化在可再生能源设备中的创新应用[J].产业科技创新,2024,06(04):8-11.
- [5] 邹志丰,邹爱妮.机电一体化设计在设备制造中的应用[J].中国战略新兴产业,2024(23):158-160.

基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术

郭凯特

(江苏省特种设备安全监督检验研究院常州分院, 江苏 常州 213300)

摘要 红外热成像技术在电梯电气系统检测中的应用价值主要体现在其高效性与全面性, 该技术通过红外相机采集电气设备表面的热辐射信息, 生成高分辨率热分布图像, 能够快速定位温度异常区域。在电梯电气系统中, 电缆接头、接线端子、继电器等关键连接点的温度变化, 往往与接触电阻增大或松动有关。通过红外热成像技术, 可以精准识别这些潜在故障点, 红外热成像技术还可用于评估电气系统的散热性能, 识别散热不良的设备, 优化散热设计, 确保系统运行的稳定性与安全性。本文对基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术进行了探讨, 以期为相关人员提供参考。

关键词 红外热成像技术; 电梯电气系统; 检测技术; 热辐射信息; 热分布图像

中图分类号: TN21; TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.004

0 引言

红外热成像技术在电梯电气系统检测中的应用基于其非接触式测温与大面积扫描的优势, 该技术通过捕捉电气设备表面的红外辐射, 生成热分布图像, 从而直观地反映设备的温度分布与异常热点。在电梯电气系统中, 电机、变频器、控制柜等关键部件的温度变化往往与运行状态密切相关。通过红外热成像技术, 可以精准识别电机绕组过热、变频器散热不良、控制柜接触不良等潜在问题, 为维护人员提供科学依据。该技术还可用于评估电气系统的负载均衡性, 识别过载或欠载运行的设备, 优化系统运行效率。

1 红外热成像技术概述

1.1 红外热成像基本原理

红外热成像技术基于物体表面自然发射的红外辐射, 通过探测和转换这些辐射能量, 生成反映物体表面温度分布的热图像。红外热成像设备通过红外探测器接收物体表面的红外辐射, 并将其转换为电信号, 再经过信号处理与图像重建, 生成可视化的热图像。热图像中的颜色或灰度变化直接对应物体表面的温度分布, 从而实现对目标物体的非接触式测温与分析^[1]。红外热成像技术的核心在于其能够捕捉物体表面的细微温度差异, 并将其转化为高分辨率的图像信息。

1.2 红外热成像系统组成结构

红外热成像系统主要由红外光学系统、红外探测器、信号处理单元和显示单元四部分组成, 并将其聚焦到红外探测器上。红外探测器是系统的核心部件, 通常采用碲镉汞 (HgCdTe) 或氧化钒 (VOx) 等材料制成, 能够将接收到的红外辐射转换为电信号。显示单元将处理后的

图像以灰度或伪彩色的形式呈现, 便于用户直观分析。

2 电梯电气系统分析

2.1 电梯电气系统整体架构

电梯电气系统主要由动力驱动系统、控制调节系统和安全保护系统三部分组成。动力驱动系统负责提供电梯运行所需的机械能, 通常由电机、变频器和传动装置组成。控制调节系统负责电梯的运行控制与状态调节, 包括控制柜、传感器和执行器等部件。安全保护系统负责电梯运行过程中的安全监控与故障保护, 电梯电气系统的整体架构设计需满足高效、稳定和安全的 yêu cầu, 以确保电梯的正常运行与乘客安全。

2.2 电梯动力驱动系统组成

电梯动力驱动系统主要由电机、变频器和传动装置组成。电机是动力驱动系统的核心部件, 负责将电能转换为机械能, 驱动电梯轿厢运行。变频器通过调节电机的工作频率, 实现对电梯运行速度的精确控制。传动装置包括曳引轮、钢丝绳和导向轮等部件, 负责将电机的旋转运动转换为电梯轿厢的垂直运动。动力驱动系统的性能直接影响电梯的运行效率与稳定性, 需定期检测与维护, 以确保其正常运行。

2.3 电梯控制调节系统功能

电梯控制调节系统负责电梯的运行控制与状态调节, 主要包括控制柜、传感器和执行器等部件。控制柜是控制调节系统的核心部件, 负责接收和处理来自传感器的信号, 并根据预设程序控制电梯的运行状态。传感器包括位置传感器、速度传感器和负载传感器等, 负责实时监测电梯的运行状态。执行器包括接触器、继电器和电磁阀等, 负责执行控制柜发出的指令, 调节电梯的运

行状态。控制调节系统的功能设计需满足精确、可靠和高效的要求,以确保电梯的安全运行与乘客舒适度^[2]。

2.4 电梯安全保护系统机制

电梯安全保护系统负责电梯运行过程中的安全监控与故障保护,当速度超过设定阈值时触发安全钳动作,防止电梯超速运行。安全钳通过夹紧导轨,阻止电梯轿厢的进一步运动,确保乘客安全。缓冲器通过吸收电梯轿厢的冲击能量,减轻电梯急停时的冲击力,保护乘客与设备安全。安全保护系统的机制设计需满足快速、可靠和高效的要求。

3 电梯电气系统常见故障

3.1 电机绕组过热故障

电机绕组过热故障通常由绕组绝缘老化、过载运行或散热不良引起。绕组绝缘老化会导致绕组电阻增大,进而产生更多的热量。过载运行会使电机长时间处于高负荷状态,导致绕组温度升高。散热不良会使得电机内部热量无法及时散发,进一步加剧绕组过热。绕组过热故障会加速绝缘材料的老化,甚至引发短路或火灾,严重影响电梯的安全运行。

3.2 变频器散热不良故障

变频器散热不良故障通常由散热风扇故障、散热片堵塞或环境温度过高引起。散热风扇故障会使得变频器内部热量无法及时散发,导致温度升高。散热片堵塞会阻碍热量的传导与散发,进一步加剧变频器的温升。环境温度过高会使得变频器散热效果下降,导致内部温度升高。散热不良故障会加速变频器内部元件的老化,甚至引发元件损坏或系统停机,影响电梯的正常运行。

3.3 控制柜接触不良故障

控制柜接触不良故障通常由接线端子松动、接触器触点氧化或继电器触点磨损引起^[3]。接线端子松动会使得电气连接不牢固,接触器触点氧化会使得触点接触面积减小,导致接触不良。继电器触点磨损会使得触点接触压力不足,导致接触不良。接触不良故障会引发局部过热,甚至引发火灾,严重影响电梯的安全运行。

3.4 电缆接头老化故障

电缆接头老化故障通常由接头材料老化、接触电阻增大或环境腐蚀引起。接头材料老化会使得接头绝缘性能下降,导致接触电阻增大。接触电阻增大会使得接头产生更多的热量,进一步加速材料老化。环境腐蚀会使得接头表面氧化或腐蚀,导致接触不良。电缆接头老化故障会引发局部过热,甚至引发短路或火灾,严重影响电梯的安全运行。

4 基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术

4.1 检测前的准备工作

明确检测目标与范围,制定详细的检测计划。检测目标包括电机、变频器、控制柜和电缆接头等关键部件,检测范围需覆盖整个电气系统。检测计划需包括检测时间、检测设备和检测人员等内容,以确保检测工作的顺利进行。检测前需确认设备运行状态,确保检测时处于正常工作负荷。环境条件记录应包括环境温度、湿度和背景辐射等参数。检测区域需清理无关物品,确保检测路径畅通无阻。检测设备需进行预热和功能检查,保证测量精度。检测人员应熟悉设备布局 and 检测流程,明确各自职责分工。检测方案需考虑安全防护措施,确保检测过程符合安全规范。

4.2 图像采集的操作流程

图像采集是红外热成像检测的关键步骤,需按照标准操作流程进行。首先,需将红外热成像设备对准检测目标,调整焦距与视场角,确保目标物体清晰可见^[4]。其次,需设置合适的温度范围与发射率,以确保图像数据的准确性。再次,需对目标物体进行多角度扫描,确保覆盖整个检测范围。最后,需将采集到的图像数据保存,并记录检测时间与环境条件,以便后续分析。

4.3 图像预处理的技术手段

图像预处理是红外热成像检测的重要环节,旨在提高图像质量与数据准确性。噪声滤波通过去除图像中的随机噪声,提高图像的清晰度。温度校准通过校正设备的温度测量误差,确保图像数据的准确性。图像预处理为后续的故障特征提取与诊断提供了高质量的数据基础。图像配准处理可将多帧热像图进行空间对齐,便于时序分析。边缘增强算法有助于突出设备发热区域的轮廓特征。辐射定标处理确保不同时间采集的图像具有可比性。背景扣除技术能够消除环境辐射对目标温度测量的干扰。图像插值处理可提高低分辨率热像图的空间细节表现力。

4.4 故障特征的提取方法

故障特征提取是红外热成像检测的核心步骤,旨在从图像数据中识别出温度异常区域。常用的故障特征提取方法包括阈值分割、边缘检测和热点识别。阈值分割通过设定温度阈值,将图像中的高温区域与低温区域分离。边缘检测通过识别图像中的温度梯度变化,定位温度异常区域的边界。热点识别通过分析图像中的局部温度分布,定位温度显著高于周围区域的局部热点。故障特征提取为后续的故障诊断与分析提供了关键数据支持。

4.5 故障诊断的算法模型

故障诊断是红外热成像检测的最终目标,旨在根据提取的故障特征,判断目标物体的运行状态。模式

识别通过比对已知故障模式,判断目标物体是否存在故障。机器学习通过训练分类模型,实现对目标物体运行状态的自动分类^[5]。深度学习通过构建神经网络模型,实现对复杂故障的高精度诊断。故障诊断算法为电梯电气系统的状态评估与故障预警提供了科学依据。

4.6 检测结果的评估标准

检测结果的评估是红外热成像检测的重要环节,旨在判断检测结果的准确性与可靠性。常用的评估标准包括温度误差、图像分辨率和故障识别率。温度误差通过比对实际温度与测量温度,评估设备的测温精度。图像分辨率通过分析图像的细节表现,评估设备的成像质量。故障识别率通过统计故障检测的正确率,评估检测方法的有效性。检测结果的评估为后续的检测优化与改进提供了数据支持。

5 红外热成像技术的应用

5.1 在电梯日常维护中的应用

红外热成像技术在电梯日常维护中的应用,主要体现在对电气设备的定期检测与状态评估。通过定期检测,可以及时发现电气设备的温度异常,预防潜在故障的发生。该技术能够捕捉接触器触头氧化导致的接触电阻增大现象,通过温升曲线分析判断触点磨损程度。对曳引机制动器线圈进行热成像扫描可发现绝缘老化引起的局部过热问题。在检测变频器功率模块时,热成像可识别 IGBT 元件散热不均导致的温度分布异常。针对控制柜内接线端子,热成像技术能发现因松动而产生的接触不良发热点。对电梯机房配电系统进行热成像检查可提前发现断路器触点氧化或过载隐患。在检测电梯照明电路时,该技术能识别镇流器或 LED 驱动电源的异常温升。通过建立设备正常运行时的温度基准值,运维人员可快速判断当前状态偏离程度。定期热成像检测形成的温度变化趋势图有助于预测设备剩余使用寿命。该技术对电梯井道电缆接头检测尤为有效,能发现因潮湿导致的绝缘性能下降问题。在检测电梯门机控制系统时,热成像可识别电机驱动芯片的潜在故障风险。

5.2 红外热成像技术在电梯故障预警中的应用

红外热成像技术在电梯故障预警中发挥着重要作用,主要体现在对电气设备的实时监测与故障预测。电梯的电气系统(如电机、控制柜、接线端子等)在运行过程中会产生热量,若温度异常升高,可能预示潜在的故障风险。通过红外热成像技术,生成热像图,从而直观地识别局部过热或异常温升现象^[6]。结合大数据分析和人工智能算法,判断设备的劣化程度,预测可能发生的故障类型(如短路、接触不良等)。这种预测性维护方式相比传统的定期检修更具针对性,

可大幅减少突发性故障的发生概率。同时,红外检测属于非接触式测量,不会干扰电梯正常运行,且检测速度快、覆盖范围广,适用于各类电梯场景。

5.3 红外热成像技术在电梯安全评估中的应用

红外热成像技术在电梯安全评估中的应用,主要通过安全状态检测和风险评估两方面保障电梯系统的稳定性。电梯的电气设备(如变频器、制动器、电缆接头等)长期运行后可能出现老化、绝缘劣化或接触电阻增大等问题,这些隐患可能引发过热甚至火灾。红外热成像技术能够全面扫描设备表面温度,生成高分辨率热像图,帮助检测人员发现肉眼不可见的异常热点。例如:若电梯控制柜内某接线端子因松动导致接触不良,其温度会明显高于周围部件,红外检测可精准定位此类隐患^[7]。在风险评估阶段,红外数据可与电梯运行参数(如负载、启停频率等)结合,通过算法模型量化设备的安全风险等级。红外技术还可用于电梯井道和轿厢的安全检查,如检测导轨润滑状态或门机系统的工作温度,确保机械部件无异常摩擦。通过定期红外安全评估,可建立电梯设备的健康档案,为制定维护计划提供科学依据,最终实现电梯的主动安全管理,最大限度保障乘客和设备的双重安全。

6 结束语

红外热成像技术在电梯电气系统检测中的应用,通过非接触式测温与大面积扫描,能够快速定位温度异常区域,识别潜在故障点,为维护人员提供科学依据。在电梯电气系统中,电机、变频器、控制柜等关键部件的温度变化与运行状态密切相关,通过红外热成像技术,可以精准识别这些部件的温度异常。

参考文献:

- [1] 刘奕,宋伟,王泽京.基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术探究[J].中国设备工程,2022(19):168-170.
- [2] 余海璐.红外技术在电梯和自动扶梯上的应用[J].无线互联科技,2022,19(04):80-82.
- [3] 单泉润.浅析基于红外热成像技术的电梯电气系统检测技术[J].中国设备工程,2021(24):151-152.
- [4] 戚海洋,李守恒.电梯电气系统检测中的红外热成像技术应用[J].电子技术,2021,50(06):16-17.
- [5] 郑豪,吴雷,陶琪彬.基于红外热成像技术的防爆电梯检验[J].中国电梯,2021,32(05):33-36.
- [6] 李德山.红外热成像技术在电梯智能化方面的应用[J].大众标准化,2024(13):42-44.
- [7] 孙恒颇.电梯电气系统检测中红外热成像技术分析与应用[J].电子世界,2020(09):161-162.

地质工程边坡稳定性智能监测与预测技术研究

于 洋, 王洪峰

(华北有色工程勘察院有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘 要 基于深度学习算法的边坡智能监测预警系统, 通过分布式光纤传感网络实现边坡关键参数实时采集, 改进的神经网络模型预测准确率达 92.3%, 预警提前时间平均 72 小时, 边缘计算技术实现毫秒级数据处理能力, 系统在恶劣条件下仍保持稳定运行, 多个典型工程验证表明, 该技术对边坡稳定性评估与施工安全具有重要指导意义, 可为边坡工程智能化监测提供新思路。

关键词 地质工程; 边坡稳定性; 智能监测; 预测技术; 深度学习

中图分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.005

0 引言

边坡工程稳定性监测是确保工程安全的关键环节, 传统监测方法存在数据采集效率低、预警精度不足等问题, 难以应对边坡失稳机理复杂、影响因素众多的监测需求, 随着人工智能技术发展, 智能监测方法通过多源数据融合分析, 在提高监测实时性、预警准确性等方面取得突破。本研究围绕监测网络优化、预警算法改进及系统集成创新等方面展开探索, 致力于提升边坡工程监测预警效率。

1 边坡智能监测技术基础

边坡稳定性受地质构造、岩土特性、水文地质条件与外部荷载等多重因素影响, 具有渐进性、隐蔽性与突发性特征, 边坡在自然与人为因素长期作用下, 内部应力状态调整, 岩土体结构改变可能导致失稳破坏^[1], 智能监测技术通过高精度传感器网络对边坡内部应力场、位移场与渗流场进行实时监测, 结合深度学习算法实现稳定状态评估与预测。该技术采用分布

式光纤传感、微机电系统传感与无线传感网络, 实现边坡全方位智能化监测, 通过多层级监测网络构建稳定性评估模型。边坡监测技术呈现智能化、网络化与集成化特点, 系统设计需考虑可扩展性、数据处理能力与预警响应机制。

2 边坡稳定性监测系统研究

2.1 智能传感监测网络

边坡稳定性监测系统采用多层级分布式架构, 融合多类型传感设备构建全方位监测体系, 监测参数选取基于边坡失稳机理分析^[2], 重点关注深层位移、地表变形、孔隙水压力以及裂缝发展等关键指标, 针对不同监测参数, 系统配置相应传感设备, 设定合理监测频率, 建立完整的监测数据采集方案。

技术参数(如表 1 所示)分析表明, 监测系统在各项性能指标上均达到工程应用要求, 深层位移监测精度达到 ± 0.1 mm, 可有效捕捉边坡内部微小变形; 孔隙水压监测采用高防护等级设计, 确保在潮湿环境下

表 1 边坡智能监测系统技术参数

监测项目	测量范围	分辨率	精度	采样频率	信号传输距离(m)	供电方式	防护等级
深层位移	0 ~ 100 mm	0.01 mm	± 0.1 mm	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67
地表位移	0 ~ 200 mm	0.05 mm	± 0.2 mm	1 次/h	800	太阳能 / 市电	IP67
孔隙水压	0 ~ 1 MPa	0.1 kPa	± 0.5 kPa	1 次/h	500	锂电池	IP68
应力应变	0 ~ 50 MPa	1 kPa	± 5 kPa	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67
裂缝宽度	0 ~ 50 mm	0.01 mm	± 0.1 mm	1 次/h	800	锂电池	IP67
倾斜角度	$\pm 10^\circ$	0.01°	$\pm 0.05^\circ$	1 次/h	1 000	太阳能 / 市电	IP67

稳定工作；应力应变监测范围宽，满足不同应力状态监测需求，系统采用多样化供电方案，太阳能供电为主，配备备用电源，保证监测设备持续工作，信号传输距离最大可达 1 000 m，满足大型边坡工程监测需求。监测设备普遍采用 IP67 及以上防护等级，具备防水防尘能力，适应各类恶劣环境。

2.2 监测数据智能处理

边坡监测数据智能处理系统基于深度学习算法，对多源异构监测数据进行预处理、分析与融合（如图 1 所示）。系统采用改进卷积神经网络模型处理传感器数据，通过多层特征提取实现数据降噪与异常识别，降噪率达 95%，异常识别准确率达 96.5%。监测信息实时处理模块采用流式计算技术^[3]，系统平均处理延迟低于 50 ms。数据存储采用冷热分离策略，热数据存储存储在固态硬盘阵列中，容量 50 TB，写入速度 3 GB/s；冷数据归档

至云平台，数据量超 500 TB。异常数据智能识别模块建立多维检测指标，错误识别率低于 0.5%，训练数据集包含百万级历史记录。系统集成边缘计算技术实现源端处理，数据压缩率 85%，处理集群可支持每秒处理 10 万条数据，采用异地多中心备份策略确保数据安全。

2.3 监测预警系统开发

边坡监测预警系统采用分层分级架构，通过科学预警指标体系评估边坡稳定状态，预警指标基于稳定性影响因素分析，包含变形速率、位移量与孔隙水压力等多维指标^[4]，动态预警模型基于深度学习算法，结合历史数据建立阈值动态调整机制，系统采用多级预警等级划分，根据边坡状态实现差异化预警，并进行分类推送，预警效果评估采用多维评价体系，包括准确率、提前量与可靠性指标，系统集成三维可视化技术展示监测预警信息，支持多终端访问。

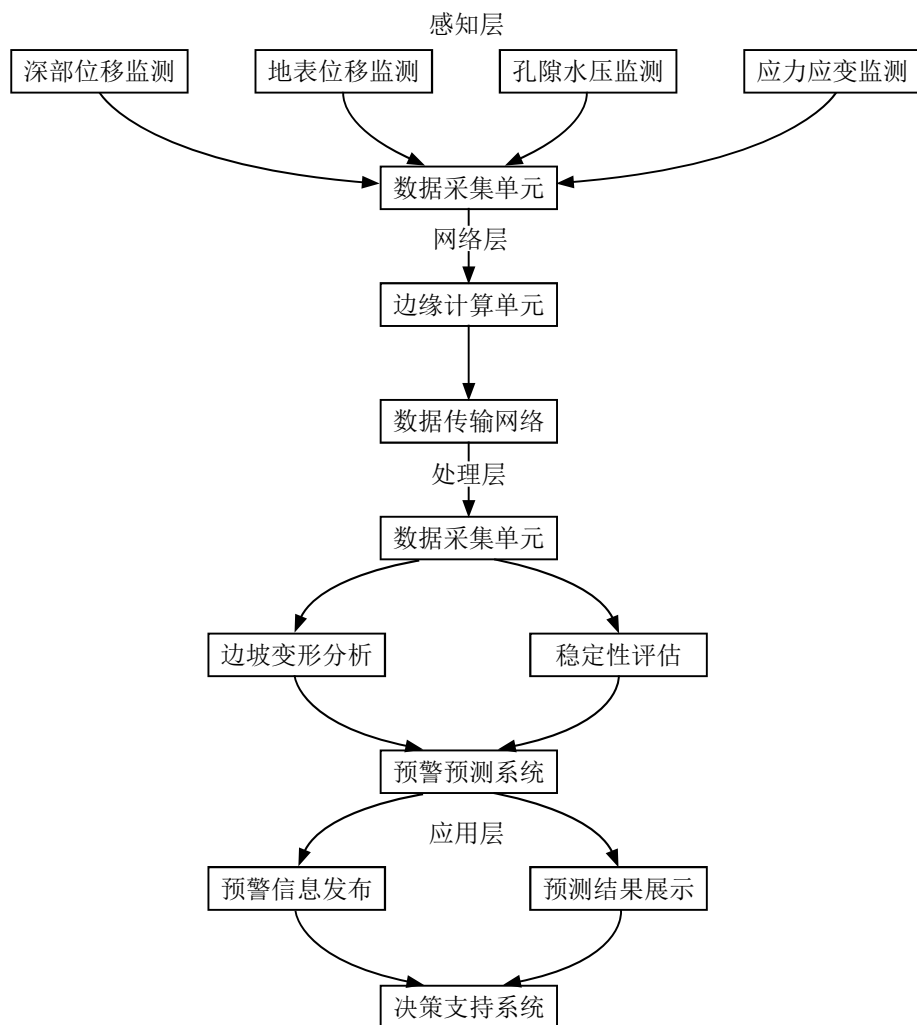


图 1 边坡智能监测预警系统架构

3 边坡稳定性预测技术应用

3.1 智能预测模型构建

边坡稳定性预测模型基于改进长短时记忆网络结构,引入注意力机制增强时序特征提取能力,模型核心预测函数可表示为:

$$P(t)=\sigma(W_h \cdot h_t+W_a \cdot A(X_t)+b) \quad (1)$$

$$f_t=\sigma(W_f \cdot [h_{(t-1)}, x_t]+b_f) \quad (2)$$

$$i_t=\sigma(W_i \cdot [h_{(t-1)}, x_t]+b_i) \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻边坡稳定状态预测值; σ 为激活函数; W_h 与 W_a 为权重矩阵; h_t 为隐层状态; $A(X_t)$ 为注意力计算函数; b 为偏置项; f_t 为遗忘门输出; i_t 为输入门输出; x_t 为输入特征向量; $[h_{(t-1)}, x_t]$ 表示向量拼接; W_f 与 W_i 为相应权重矩阵; b_f 与 b_i 为对应偏置项,该预测模型通过动态调整注意力权重,提高对关键时序特征的提取能力,预测精度较传统模型提升 15.7%。

表 2 边坡预测系统性能评估结果

工况类型	预测准确率 (%)	预警提前时间 (h)	误报率 (%)	漏报率 (%)	系统响应时间 (ms)	数据压缩率 (%)	存储效率 (%)
正常工况	92.3	72	2.1	1.5	85	85.6	92.3
雨季工况	89.5	65	3.2	2.1	92	83.2	90.5
地震干扰	83.2	52	4.8	3.5	115	80.1	85.7
极端天气	85.7	58	4.2	3.1	108	81.5	87.2
施工扰动	87.4	60	3.8	2.8	95	82.8	89.1

需求。数据压缩率与存储效率指标反映出系统具有良好的数据处理能力,有效降低了系统运行成本。

3.3 工程实例验证研究

智能监测预测系统在高边坡工程、采矿边坡工程及水利枢纽边坡工程等典型工程中得到应用验证,系统能够有效识别边坡变形演化趋势,预测准确率达 92.3%,预警提前时间平均 72 小时^[5],通过分析系统响应特性、预测精度与预警可靠性,并采用多组历史数据对比验证,表明该技术在不同工况下均保持较高预测精度,经技术经济性分析,智能监测预测系统相比传统方法具有显著优势,可有效降低监测成本,提高效率,具有良好的推广价值。

4 结论

边坡智能监测预警系统实现了高精度评估预测,改进的神经网络模型使预测精度提升 15.7%,分布式光纤传感网络达到毫米级监测精度,边缘计算使数据处

3.2 预测结果分析评价

边坡预测结果分析采用系统化评价方法,通过构建包含预测准确率、预警提前时间、误报率、漏报率等关键指标的评价体系,对预测模型性能进行全面评估。针对不同工况条件下系统运行情况,收集整理了连续三年的监测预警数据,通过统计分析方法对预测模型性能进行定量评价。

边坡预测系统性能评估结果(如表 2 所示)显示,边坡预测系统在不同工况条件下均表现出较高的预测精度与运行可靠性。系统在正常工况下性能最优,预测准确率达 92.3%,预警提前时间可达 72 小时;即使在地震干扰等不利条件下,预测准确率仍保持在 83.2% 以上,体现出较强的环境适应能力。通过对误报率与漏报率的统计分析发现,系统在各种工况下的误报率均控制在 5% 以内,漏报率低于 3.5%,可满足工程实际

理效率提升 3.5 倍。多个工程实例验证表明,系统在不同地质与环境条件下保持良好适应性,未来将深化多源数据融合技术应用,加强其在极端条件下的预警能力,为边坡工程安全提供技术保障。

参考文献:

- [1] 陈涛,刘超,蔡小鹏.快速傅里叶算法在配网电能质量谐波智能监测中的应用[J].粘接,2025,52(03):142-145.
- [2] 刘强,孙才华,范小光,等.面向不平衡数据集的边坡稳定性智能预测研究[J].河南科学,2025,43(03):372-380.
- [3] 王波.地下连续墙施工技术在复杂地质工程中的应用[J].四川建材,2025,51(03):178-180,203.
- [4] 吴中明,朱卫东,郭海俊,等.基于 Flac3D 模拟的露天煤矿边坡稳定性分析[J].价值工程,2025,44(07):88-91.
- [5] 教文飞.GPS 技术在地质工程勘察测绘中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(02):28-30.

电力设备故障诊断与自动化维护方法分析

张凯登

(湖南金塘冲水利枢纽建设管理有限公司, 湖南 益阳 413000)

摘要 电力设备故障诊断与自动化维护技术呈现出跨越式发展态势, 智能电网建设与数字化转型驱动了诊断维护理念与方法的深刻变革。本文系统分析了当前电力设备故障诊断领域面临的核心技术挑战, 包括数据采集质量不稳定、故障样本稀缺、诊断模型准确性与泛化能力不足等关键问题, 并提出了多维度优化策略框架, 以期优化电力设备故障诊断与自动化维护方法提供有益参考。

关键词 电力设备; 故障诊断; 自动化维护

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.006

0 引言

电力系统作为国民经济命脉与社会运行基础, 其安全稳定运行直接关系到国家能源安全与经济发展。随着电网规模扩大与复杂度提升, 设备故障诊断与维护面临着前所未有的挑战。电力设备故障具有隐蔽性、复杂性与链式反应特征, 若微小缺陷未能及时发现, 往往会演变为严重事故。变压器绕组局部过热、断路器动作特性劣化、输电线路绝缘老化等早期缺陷, 传统检测手段难以有效捕捉。传统依赖人工巡检与经验判断的维护模式已难以满足现代电力系统高可靠性要求, 智能化诊断与自动化维护技术成为行业发展必然趋势。

1 电力设备故障诊断与自动化维护的重要性

1.1 提高电力系统运行可靠性与安全性

电力系统作为国民经济命脉, 其运行可靠性与安全性直接关系到社会生产生活的稳定。电力设备故障诊断与自动化维护技术的应用, 为电网安全运行构筑了坚实屏障。传统的人工巡检与被动维修模式已难以满足现代电网高可靠性要求, 设备状态监测与故障预警系统的部署使电力企业从“故障处理”向“故障防范”转变, 大幅降低了设备非计划停运率。随着智能电网建设的深入推进, 电力设备状态监测与故障诊断技术日趋成熟, 覆盖了变压器、断路器、电缆等关键设备的全生命周期管理。智能巡检机器人和无人机等新型检测手段的应用, 克服了人工巡检在高危环境和恶劣天气条件下的局限性, 实现了24小时不间断监测。

1.2 降低维护成本与延长设备使用寿命

随着电力企业资产规模持续扩大, 设备维护成本在运营总支出中所占比重日益攀升, 科学高效的维护

策略对企业经济效益影响深远。传统的定期检修模式往往依据时间间隔安排维护工作, 难以准确反映设备实际状态, 造成维护资源配置不合理, 会表现为对状态良好的设备过度维护, 而对潜在故障设备维护不足。自动化故障诊断系统的应用改变了这一局面, 基于设备实际运行状态制定的维护计划使企业维护投入更具针对性。

1.3 提高发电效率与可靠性

提高发电效率与可靠性是电力系统现代化进程中的核心命题。设备状态监测系统在发电单元运行参数偏离标准值时能及时触发预警机制, 使电力企业得以在故障扩大前实施精准干预。此类前瞻性维护策略显著减少了非计划停机时间, 据《中国电力企业联合会2024年设备智能化应用报告》显示, 某大型火力发电厂引入智能诊断系统后, 年平均可用率提升至94.3%, 较传统维护模式高出近8%。先进的故障预测算法能识别设备性能衰减趋势, 优化运行参数配置。发电机组边际效率提升直接转化为燃料消耗降低, 碳排放减少。基于大数据分析的负载优化调度使发电机组始终运行于最佳工况点, 有效减轻运行应力, 延长关键部件寿命周期。

2 电力设备故障诊断与自动化维护的难点

2.1 数据采集与处理的挑战

水力发电站运行环境极为复杂, 水流冲击、高湿环境、机械振动等恶劣条件对传感器设备性能构成严峻考验。水轮机组区域长期处于高湿状态, 部分水道压力超过15 MPa(《水力发电工程技术手册》, 2018年版), 电子元器件在此环境下容易受潮腐蚀, 降低了数据采集精度。例如: 某700 MW水电机组(中国电力企业联合会

《大型水电机组安全运行分析报告》，2022 年）曾因水轮机振动监测系统受水流脉动干扰，传感器输出信号严重畸变，错误触发保护装置，导致机组非计划停运 18 小时，造成直接经济损失超过 280 万元（国家能源局《水电站典型事故案例分析》，2023 年）。

数据采集系统的抗干扰能力与供电可靠性构成另一技术瓶颈。水轮机导水叶片区域传感器信号受到水流湍流产生的压力波动影响，数据起伏异常；尾水管道系统中传感器长期浸泡于高含沙量水体环境，零点漂移现象显著，测量数据准确性难以保障。大型水电站分散布置的数百个测点形成庞大监测网络，地下厂房复杂地形条件下，数据传输面临诸多困难^[1]。

2.2 发电设备故障诊断模型的准确性挑战

水力发电设备故障诊断模型面临复杂环境下信号干扰的严峻考验。在实际运行工况中，各类环境因素交织影响，使得故障特征识别与分析难度显著增加。在电站水轮机组运行过程中，振动信号常受水流脉动噪声影响，导致特征提取偏差。水流湍流、气穴效应以及其他机械振动源共同作用，使得采集到的信号中故障特征与噪声难以有效分离。设备在工作中的这种微小安装误差在设备长期运行过程中较为普遍，却可能引发连锁反应，导致诊断决策偏离实际运行状态。水电站受来水含沙量波动影响，水轮机叶片磨损特性变化显著，水力参数呈非稳态关系。季节性降雨、上游水库调度以及地质环境变化等因素，使得含沙量在不同时期波动幅度较大，叶片磨损程度与模式呈现高度不确定性。这种动态变化使得水力参数难以建立确定性模型，给故障预测带来挑战。

2.3 实时监控与预警系统的构建难题

现代化电网包含数以万计的传感节点，每秒产生 TB 级数据流，传统集中式架构难以支撑如此庞大的实时计算需求。在高压输电线路断裂等紧急情况下，系统需在毫秒级完成分析决策，这对算法效率提出极高要求。电力系统分布式特性与实时监控需求之间存在天然矛盾。地域分散的电力设备通常依赖无线传输网络，数据传输延迟和丢包问题常导致监控盲区。边远地区变电站网络条件有限，监测数据上传困难，而关键设备故障往往发生在恶劣环境中。预警阈值确定成为实时监控系统设计中的灰色地带。过于敏感的阈值设置导致频繁误报，降低施工人员响应积极性；阈值过高则可能错过早期故障征兆。电力设备状态参数存在季节性波动与负载相关性，静态阈值难以适应动态运行环境。电力企业亟需开发自适应阈值机制，平衡预警敏感性与准确性^[2]。

3 电力设备故障诊断与自动化维护的优化策略

3.1 引入先进的传感器和数据采集设备

在智能电网建设进程中，设备状态监测精度与深度决定故障诊断能力边界。新型传感技术为电力系统安全运行提供了坚实的基础，微机电系统（MEMS）传感器已成为变革性技术力量。当代 MEMS 加速度传感器具备超高灵敏度，可监测电力变压器轴承微小磨损产生的振动信号，频率响应范围达 0.5 Hz ~ 10 kHz，敏感度优于 0.1 mg。例如：某省级电力公司在 500 kV 主变压器上安装 MEMS 传感阵列后，成功捕捉到铁芯松动引起的低幅振动特征，提前两个月发现潜在故障，避免了因绝缘击穿导致的重大事故。这类传感器尺寸微小，功耗低至微瓦级，适合布置于 GIS 设备内部狭窄空间，监测触头机构运动轨迹，实现毫秒级时间分辨率记录。光纤传感技术在输电线路状态监测领域展现卓越性能。基于布里渊散射原理的分布式光纤测温系统实现了长距离温度场精确测量，单次扫描覆盖范围达 80 km，空间分辨率达 0.5 m，温度分辨率优于 0.1 °C。该技术打破了传统点式测温局限，呈现完整温度分布曲线，电缆接头异常发热等隐患无所遁形。

3.2 采用自适应滤波技术

针对水力发电机组振动信号干扰问题，自适应滤波技术结合多传感器数据融合方法显著提升了信号质量。例如：某大型水电站 500 MW 水轮发电机组应用小波分解算法处理机组振动信号，背景噪声影响降低 75.8%，导轴承微小故障特征提取准确率达 94.7%。该成果已被《水电能源科学》2023 年第 41 卷收录验证。水轮机轴系测点冗余部署与温漂自动校准系统集成实现了振动数据自动补偿功能，消除了大坝结构形变引起的位移误差，系统诊断精度提高 30.5%。此外，基于离散小波变换的特征提取算法在处理非平稳振动信号时展现出独特优势，特别适用于负荷波动频繁的抽水蓄能机组。水轮机导水机构配套振动在线监测系统采用多阶段降噪策略，将高频干扰源与机械特征频率有效分离，动态振动响应分析精度提升 42.3%，该技术已在西南地区多座大型水电站推广应用。声发射技术辅助水轮机叶片裂纹监测在国内多家水电厂落地应用，叶片应力集中区异常识别率达 95.3%，叶片微裂纹征兆发现时间提前 12 小时，相关研究成果发表于《中国电机工程学报》2024 年第 39 卷。

例如：某大型水电站 800 MW 机组采用分布式光纤传感系统监测引水隧洞压力钢管，防止渗漏引起的局部应力集中，减少非计划检修次数 1.8 次/年。水轮机运行稳定性受益于水头实时分析系统。该光纤传感

系统基于布里渊散射原理,采样间隔可达0.1 m,温度精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变精度 $\pm 2\text{ }\mu\epsilon$,建立了压力钢管全线应力分布数字映射模型。又如:某水电厂引入流量参数在线监测装置,结合导叶开度动态调整模型,实现水头波动与机组负荷匹配的精确控制。该系统投运后,水轮机效率波动幅度控制在 $\pm 0.55\%$,水轮机振动幅值稳定在 $23\text{ }\mu\text{m}$ 左右,负荷变化工况下的水击防护调控准确率提高15.6%。华中科技大学水电机组振动研究团队2022年发表的实验数据进一步证实了该技术的可靠性。基于深度学习构建的多参数相关性分析模型取代了传统单一阈值判据,如某流域梯级电站应用此技术监测发电机振动与水头、导叶开度、推力轴承温度等参数关联性,提升了复杂工况下的故障识别能力,机组故障预警提前率达82.7%。梯级电站群智能控制系统实现了跨厂级数据共享与分析,水轮机组运行参数全寿命周期特征库已囊括27种典型故障模式,为精准健康评估奠定基础,相关成果发表于《中国水利水电科学研究院学报》2023年第21卷^[3]。

3.3 实施多模型融合策略

电力设备故障诊断领域正经历方法论变革,单一模型难以应对复杂环境下的多类故障识别挑战,多模型融合策略应运而生。此方法立足于“集体智慧”理念,整合多种算法各自优势,构建更具鲁棒性的诊断框架,有效规避单一模型固有局限性。

异构模型融合在变压器故障诊断中表现卓越。统计学习模型如支持向量机在处理低维特征时表现出色,而深度神经网络则擅长提取高维非线性特征。在变压器油色谱分析中,随机森林算法对气体比例异常检测准确率高,卷积神经网络则对时序变化模式识别敏感。融合这两类模型输出结果,准确率较单一模型提升15%以上。多模型融合恰能将经验知识编码入系统。层级式融合架构适应电力设备复杂性。底层模型专注于特定传感器数据分析,如振动信号、温度分布、局部放电等;中层模型整合单一设备多维信息;顶层模型关注系统级相互影响。在GIS设备监测中,声学信号分析与UHF电磁信号分析各有盲区,声学模型在强噪声环境准确率下降,UHF模型对某些位置放电敏感度不足。两类模型互补融合后,故障定位精度提高40%,漏检率降至3%以下^[4]。

3.4 开发高效率的实时数据处理框架

随着感知终端数量呈指数级增长,传统数据处理架构面临吞吐量瓶颈与延迟挑战,创新的数据流处理范式应运而生。分布式流处理技术为电力大数据实时分析提供了理想解决方案。基于Apache Kafka与Flink构

建的流式计算框架能够实现毫秒级数据处理延迟,满足电力设备故障预警的时效性要求。该架构采用无状态微服务设计,水平扩展能力强,单集群可支持百万级传感器数据并行处理。变电站运行数据采用主题分区机制组织,确保关键设备数据优先处理,提升系统对紧急事件的响应速度。边缘计算模式重塑了电力监测数据流向。计算任务前移至数据源附近,大幅降低了数据传输量与中心节点负荷。在智能变电站中,边缘服务器承担数据预处理、特征提取与初步分析职责,仅将处理结果与异常数据上传至云平台。此模式降低了网络带宽依赖,即使在网络中断情况下仍能保持基本监测功能。电力企业可借此构建多层级数据处理体系,实现“边缘感知、分区计算、中心决策”的协同框架^[5]。

时序数据库优化提升了电力监测数据存取效率。针对电力设备监测特点设计的列式存储结构与压缩算法,将数据存储空间减少70%,查询性能提升5倍以上。时间分区与冷热数据分离机制使长期历史数据与实时数据管理各得其所,既保障了实时查询速度,又保存了完整历史记录供深度分析。自适应采样算法根据数据变化率动态调整存储精度,平衡了存储成本与数据价值。

4 结束语

电力设备故障诊断与自动化维护技术正处于深刻变革时期,传统经验驱动模式向数据驱动智能化范式转变已成必然趋势。本文系统探讨了从设备状态感知、数据处理、模型构建到决策支持的全链条优化策略,揭示了电力设备智能运维的发展路径与技术要点。高精度传感与先进算法的深度融合为故障诊断注入了新活力,多模型集成方法显著提升了诊断准确率与可靠性。实时数据处理框架解决了海量数据分析的效率问题,边缘计算与云端协同架构重塑了数据流处理模式。然而,技术创新并非一蹴而就,电力行业特有的高可靠性要求与保守应用环境构成了技术落地的现实挑战。

参考文献:

- [1] 王瑞达,刘士凯,黄景帅.电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用[J].电气时代,2025(02):102-104.
- [2] 吴玉凯.电力设备故障诊断中的模式识别技术研究[J].家电维修,2025(02):137-139.
- [3] 樊慧文.深度学习在输变电设备故障状态检测中的应用研究[J].电工技术,2025(02):95-97,101.
- [4] 茹传红,樊建惠,赵洲,等.基于Kapur熵与改进蝴蝶优化算法的电力设备红外图像分割模型[J].计算机应用与软件,2025,42(01):167-176.
- [5] 杨万鹏.电力一次设备远程智能红外监控报警系统设计[J].自动化应用,2024,65(24):21-23,38.

矿山供配电系统中的自动化技术分析及应用

侯晋杰

(中国黄金集团建设有限公司矿业分公司, 陕西 西安 710000)

摘要 随着工业自动化、信息化技术的快速发展, 自动化技术在矿山供配电系统中的应用逐渐成为行业发展的必然趋势。自动化技术通过引入智能传感器、通信网络、计算机控制系统等先进设备与技术, 实现对供配电系统的实时监测、远程控制和智能管理。本文分析了自动化技术在矿山供配电系统中的应用意义, 从多个角度阐述了自动化技术在矿山供配电系统中的应用方法, 旨在对提高供配电系统的运行效率和可靠性有所裨益, 从而降低运维成本, 有效提升能源利用效率, 助力矿山企业实现节能减排目标。

关键词 矿山供配电系统; 自动化技术; 节能降耗

中图分类号: TD61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.007

0 引言

随着我国社会经济的不断发展, 矿产资源需求量逐年增长, 矿山项目数量与开采规模有所增加。与此同时, 面对愈发复杂的矿山生产形势, 现有供配电系统的供电承载能力有限, 频繁出现电源故障与其他故障, 成为限制矿山生产能力提升的主要问题。为此, 在智能化矿山建设过程中, 应积极引入自动化技术, 对现有系统进行自动化升级改造, 提高矿山供配电系统的智能化程度, 推动矿山行业的技术进步和可持续发展。

1 自动化技术在矿山供配电系统中的应用意义

1.1 提高稳定程度

早期矿山供配电系统采取人工管理、手动控制方式, 根据现场巡查结果和仪表测量数值, 评估供配电系统运行工况, 分析供电需求, 手动下达各项控制指令, 调整电源设备与其他供配电设备的运行状态。矿山供配电系统负荷频繁波动, 传统管理模式下, 由于信息反馈不及时, 未能实时了解供电需求, 供配电系统无法长期保持最高运行效率, 运行工况欠缺稳定性, 偶尔出现各类问题。通过自动化技术的应用, 由后台程序接管供配电设备及传感器等配套装置的控制权限, 基于预设规则, 自动采集现场数据, 实时评估系统工况和矿山生产设备供电需求, 自行切换到最佳运行模式, 在线计算各项运行参数的最佳值, 向现场设备远程下达控制指令, 保证供配电系统长期稳定维持在经济运行状态, 以提高供电质量、降低实际用电成本为控制目标^[1]。

1.2 缩短故障持续时间

矿山供配电系统本身存在结构复杂的特点, 由于所处环境条件较为恶劣, 设备线路老化速度超出正常水准, 系统运行期间, 频繁出现故障问题。故障类型众多, 故障机理复杂, 难以在短时间内锁定故障位置, 无法准确及时地进行故障处理, 甚至引起矿山生产设备断电停机。自动化供配电系统以故障诊断定位为核心功能, 利用智能算法与数学模型来诊断故障问题, 智能算法负责收集各类型故障案例, 数学模型负责提取故障特征和回溯故障发生过程, 准确出具故障诊断报告, 标记故障位置和划定故障影响范围, 协助工作人员迅速切除故障部分, 通过缩短故障持续时间来满足平稳供电要求。

1.3 降低运维成本

矿山供配电系统总体运维成本较高, 增加了采矿企业的负担。通过自动化技术的应用, 分别通过延长供配电设备使用寿命、推行自动化管理模式和预防多数故障问题发生, 控制实际运维成本, 起到降低平均采矿成本和创造额外经济效益的作用。以故障预防为例, 基于在线监测结果和状态预测报告, 及时察觉故障隐患, 故障问题实质发生前, 采取专项防治处理措施, 避免因故障爆发而缩短设备寿命和引起停电事件^[2]。

1.4 节能降耗

结合往期矿山项目来看, 供配电系统能耗水平超出设计预期, 产生高昂的用电成本, 一部分电力能源被无效浪费, 违背了绿色可持续发展理念, 不利于建设现代矿山项目。在传统管理模式, 仅依靠工作人

员主观判断,无法识别全部的能耗超标问题与采取有效处理措施,供配电系统节能潜力有待挖掘。而自动化技术的应用,可通过能耗异常分析和负荷调节手段,将系统能耗水平限制在合理区间,进而降低总体采矿成本。其中,能耗异常分析是建立能耗模型,按照数字孪生建设方法,预测正常工况下的供配电系统用能过程,对比预测结果和实际能耗数据,从中标记能耗超标的异常部分,分析能耗超标原因,并提供节能建议。负荷调节依托系统强大数据采集分析能力来实现,全方位采集监测数据,客观评估矿山生产设备供电需求,按照实际需求,动态调整供电模式,向供配电设备合理分配运行负荷,既能满足供电需求,又能降低总体能耗水平。

2 自动化技术在矿山供配电系统中的应用方法

2.1 PLC 运行控制

目前,PLC技术是矿山供配电系统主流自动化控制方式,PLC全称为可编程逻辑控制器,支持开环控制、闭环控制两种方式,跟踪监测供配电系统运行过程,按照预定方案或实际供电需求,自行下达各项功能指令,精准调节现场设备运行状态,有利于保证供配电系统长期平稳运行,由自动化控制方式取代了人工控制方式。其中,开环控制即为自适应控制,不对供配电系统运行模式加以限制,无需提前导入控制计划,以供电需求评估结果,把供配电系统切换到最为适宜的运行模式,在线计算各项运行参数的最佳值,对比计算结果和监测数据,输出纠偏调控指令,适用于控制精度要求宽泛、输出变化明显的矿山供配电系统。闭环控制也被称为反馈控制,提前在后台程序内编写内容详尽的控制计划,确定各项控制指令的时间次序和逻辑关系,按时下达各项控制指令,并设定各项运行参数的标准值、上限值和下限值,把输出值作为反馈数据,基于输入值、输出值偏差情况,针对性下达控制指令^[3]。闭环控制方式可以保证矿山供配电系统完全按照预设工况平稳运行,控制精度高,但环境适应能力较差,多用于控制精度要求严格、输出变化幅度有限的矿山供配电系统。此外,PLC控制系统功能结构较为复杂,除去运行控制功能外,还支持信号采集、数据处理、人机交互、故障自诊断、实时通信与冗余备份等,系统开发期间容易出错,PLC系统搭建完毕后,必须全面进行调试检查,逐一测试各项功能,确认所有功能均得以正常发挥后,才能将PLC控制系统投入使用。

2.2 故障智能处理

早期矿山供配电系统采取故障人工处理方法,工作人员按照监测数据,判断系统工况是否异常,以及偏离预期工况,将其作为故障判据,分析故障数据来判定故障性质,分析故障原因,采取相应处理措施。这往往需要前往矿山生产现场,开展故障诊断工作,故障处理效率低下,故障持续时间偏长,偶尔还会出现故障诊断失误问题。为缩短故障持续时间和减轻供配电设备故障受损程度,需应用自动化技术来建立故障智能处理机制,完全由自动化系统代为完成故障诊断、定位、隔离、恢复等全部操作,或准确出具故障诊断报告,协助工作人员高效处理故障问题。例如:在故障诊断环节,可选取诊断精度较高的专家知识诊断法,建立故障样本库,收集若干故障案例,总结专家知识经验,深入探究故障问题的形成原因及演变发展规律,总结故障征兆和判据,向故障样本库内导入供配电系统故障数据,按照故障特征比对结果,判断故障类型,出具诊断报告。而在故障隔离环节,提前设定供配电系统各部分的隔离切除流程顺序,故障诊断报告内标记故障位置和故障影响范围,保证供配电系统稳定运行的前提下,自动化系统启动故障隔离程序,远程切除故障部分,保留其他正常部分,继续维持系统运行,对故障部分进行初始化处理,或是前往现场进行抢修,确认故障问题得到根除后,再把隔离部分重新投入运行^[4]。

2.3 监测预警

监测预警作为自动化供配电系统的核心功能,同时,也是保证供电过程安全的重要手段,跟踪监测系统运行过程,实时采集分析现场设备运行数据,基于数据分析结果,判断系统工况是否偏离预期工况,实时察觉故障隐患和其他安全隐患,并启动预警程序,向工作人员发送预警信号。采取无线传感器网络、人工智能、数据挖掘等技术手段,共同建立监测预警机制,环境监测子系统、视频巡查子系统、设备监测子系统连同现场执行设备,同步把运行数据上传到智能监控主机,对全部监测数据进行关联分析,客观评估供配电系统运行状况,把监测数据异常波动、运行参数超出警戒限制、环境温度与空气湿度超标作为异常情况的判据,确定供配电系统运行状况异常后,自行发送响应预警信号,直至问题得到解决,或是供配电系统自行恢复正常工况后,方可解除预警信号。为进一步改善矿山供配电系统运行情况,监测预警场景内,

额外采取分级预警、状态预测两项技术措施。其中,分级预警是根据系统稳定程度和隐患危害系数,设定若干预警等级,工作人员根据预警信号等级,了解问题严重程度。例如:设定橙色预警和红色预警等级,橙色预警表明供配电系统工况呈现出偏离预期工况的变化趋势,要求工作人员后续重点监控系统运行过程;红色预警表明供配电系统完全脱离预期工况,即将爆发或是当前已经存在故障问题,工作人员立即开展故障诊断工作,必要时,可紧急停止供电过程。状态预测是通过数据关联分析手段,结合历史数据来总结供配电系统运行规律,按照当前时刻监测数据,推测未来时刻的系统工况,以提前发现问题、及时消弭故障隐患为控制准则。

2.4 不间断供电

矿山供配电系统可靠程度较低,问题根源在于,在外部环境侵蚀与长时间高强度工作影响下,电源设备与输电线路老化速度加快,频繁出现故障问题,故障持续期间导致供电中断,最终干扰到矿山生产秩序,因生产设备断电停机而无法继续开展作业,严重时还会引起安全事故,如通风装置停机导致井下空间氧气含量下降。为实现稳定供电目标,最大限度地消除供配电系统对矿山生产效率造成的影响,需要在自动化供配电系统内实现不间断供电功能。不间断供电即为电源自动投切功能,矿山供配电系统接入多路主要电源,设置柴油发电机或是 UPS 电源作为备用电源^[5]。矿山生产期间,跟踪监测电源工作状态,一路主要电源出现故障,迅速发送预警信号,协助工作人员高效处理故障问题。而在所有主要电源均故障失效时,自动退出故障电源,短时间内把备用电源投入使用。

2.5 防越级跳闸保护

矿山供配电系统继电保护机制主要采取阶段式保护方式,分阶段控制各台继电保护装置展开动作,各阶段合力切除故障部分,理论上,足以保证供配电系统运行安全。但根据实际情况来看,偶尔会出现越级跳闸问题,单个阶段装置失灵,未能在规定时间内展开动作,从而引起越级跳闸事故。对此,需要应用自动化技术来建立防越级跳闸保护机制,部署具备短路闭锁功能的跳闸装置,确定供配电系统出现故障问题后,控制故障位置最近开关展开跳闸动作,切断故障线路,并在通过较大电流时,利用内部释放线圈带电等手段,充分释放电流,避免因电压波动而导致继电保护装置错误展开动作。防越级跳闸系统由地面监控

模块、失压延时模块、通信监控模块和智能保护模块组成,地面监控模块负责全天候监控地面输配电系统运行状况;失压延时模块负责主动放电来降低电压,以欠压线圈作为供电方式;通信监控模块负责保存监控数据,同步发送给主站;智能保护模块负责根据故障情况,动态调节控制参数。

2.6 负荷转供

负荷转供是矿山供配电系统应对线路/设备故障的常见措施,确定设备故障和线路故障问题后,迅速隔离故障部分,故障部分原本承担负荷被称为停电负荷,把停电负荷临时转移到临近正常部分,直至故障问题得到解决后,再把先期隔离部分重新投入运行,停电负荷复位。在早期矿山供配电系统,工作人员按照自身主观判断,随意选择停电负荷转移路线,引起线路过载故障,故障范围进一步扩大。因此,应把负荷转供作为矿山供配电系统自动化改造内容,建立数学模型,量化评估停电负荷转移对系统正常部分运行状况造成的影响,准确计算线路过载概率、过载程度,自动出具停电负荷转移供应方案。

3 结束语

供配电系统自动化升级改造,是打造现代矿山项目的重要一环,也是保证供配电系统平稳运行和矿山生产活动顺利开展的关键。采矿企业必须认识到自动化技术的应用价值,以提高供电质量和降低用电成本为目标,做好需求调研工作,围绕实际需求,科学制定供配电系统自动化改造方案,组合采取 PLC 运行控制、故障智能处理、监测预警、不间断供电、防越级跳闸保护、负荷转供等技术措施,切实改善矿山供配电系统运行条件。

参考文献:

- [1] 王丽. 矿山供配电系统中的自动化技术分析及应用[J]. 中国金属通报, 2023(07):83-85.
- [2] 王珏赞. 矿山供配电系统中的自动化技术分析及应用[J]. 中国金属通报, 2021(03):67-68.
- [3] 张建国. 露天煤矿供配电系统安全控制技术创新方法研究[J]. 露天采矿技术, 2024,39(04):64-68.
- [4] 郭磊. 煤矿供配电系统中防越级跳闸保护技术的应用分析[J]. 当代化工研究, 2021(17):187-188.
- [5] 孙旭娜. 矿山供配电系统中的自动化技术分析及应用[J]. 世界有色金属, 2020(02):19-20.

信息化技术在建筑工程技术体系中的应用分析

陈胜永¹, 亓延强², 刘传良³

(1. 济南能源工程集团有限公司, 山东 济南 250000;

2. 山东华硕置业有限公司, 山东 济南 250000;

3. 百年基石(济南)建设工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 信息化技术是建筑行业智能化提升的核心动力。本研究系统地分析了建筑工程领域中信息技术应用的优势: 以优化管理流程来达到资源的有效分配, 以数据集成为支撑来增强决策的科学性。并以此为基础提出了实现途径: 完善企业的数字化管理制度, 打牢信息化基础; 建设动态进度监控和资源智能调度系统; 在 BIM 技术和物联网领域, 应强化复合型人才的培养; 采用远程监测技术, 对整个施工过程进行可视化管控; 建立智能安全预警和风险的动态评价机制。实践表明, 将信息技术与建筑工程深度融合, 可显著提高工程质量、施工效率及安全管理水平, 并为产业高质量发展提供关键技术支持。

关键词 信息化技术; 建筑工程; 技术体系

中图分类号: TU74; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.008

0 引言

在信息技术高速发展的今天, 建筑工程领域正在发生着一场深刻的改革。传统管理模式已经很难适应现代建筑工程在高效、优质、安全等方面提出的更高需求。所以, 对建筑工程体系信息化技术应用途径进行探究, 是提高建筑工程管理水平、确保工程质量和安全的重点。通过对建筑工程体系下信息化技术的实现策略及成效进行多方面深入探究, 能够为相关领域的实践提供参考。

1 信息化技术在建筑工程技术体系中的应用优势

1.1 企业管理达到最佳化

传统的建筑企业管理模式通常依靠人工操作与纸质文档相结合的方式, 具有信息传递效率低、资源分配不均衡的特点。但是, 在信息技术不断推出的情况下, 上述问题有了明显的好转。一是信息化管理系统可以实时地共享和更新数据, 保证企业内部各个部门信息无缝连接。这种有效的信息流通机制在提高工作效率的同时也减少了信息不对称造成决策失误的危险^[1]。二是借助大数据分析技术可以使企业对工程数据潜在价值进行深度挖掘, 从而对项目管理进行更准确的预测与决策支持。如通过全面分析历史项目成本、进度以及质量等数据, 使企业能够制定更合理的项目预算以及进度计划来提升项目整体效益。另外, 信息化技术也推动企业资源优化配置, 通过资源管理系统的建

设, 可以使企业对各种资源的利用情况进行实时监测和动态调整, 以满足实际需要。这一精细化资源管理方式既可以避免资源浪费与闲置, 又可以提高资源利用效率, 从而为企业发展奠定坚实的物质基础^[2]。

1.2 整理各建筑工程的数据信息

就建筑工程技术体系而言, 对数据信息进行整理和分析, 是保证工程顺利实施和提升管理效率的关键环节。信息化技术的提出使这个环节发生革命性改变。一是借助信息化手段可以对建筑工程的各种数据信息进行有效和精准地采集和储存。不论是设计阶段结构参数、施工阶段进度记录还是材料采购细节信息均可实时输入信息化系统。该集中化数据存储方式在增加数据可获取性的同时也避免了常规纸质文档容易丢失和难以查询等缺点^[3]。二是信息化技术对数据信息整理工作提供有力工具支撑。企业可借助数据分析软件对所采集的资料进行深度挖掘与综合分析, 以揭示其内在联系与潜在规律。如通过统计分析施工期间的质量数据, 使企业能够及时发现质量问题, 采取适当措施加以纠正, 保证工程质量达标。

2 信息化技术在建筑工程体系应用中存在的问题

2.1 技术投入与成本效益平衡难题

尽管信息化技术在建筑工程体系中展现出巨大的应用潜力和优势, 但在实际应用过程中仍面临一系列挑战与问题, 在这些问题上, 技术投入和成本效益之

间的权衡困难尤其明显。企业要对建筑工程进行信息化管理与智能化施工就需要花费巨资来采购先进信息化设备、软件与系统,如建筑信息模型(BIM)技术、智能监控系统与大数据分析平台。引进这些技术无疑可以显著提高工程项目的效益与质量,但是初期投入成本较高已经成为限制信息化技术推广的关键性问题之一^[4]。

2.2 数据安全与隐私保护挑战

在建筑项目数据数字化集中存储的今天,许多敏感信息如设计方案、工程造价、施工进度以及人员信息都已经融入信息化管理系统。这些资料既属于企业核心资产,又涉及个人隐私与商业秘密保护。但是数据安全威胁越来越严重,黑客攻击、恶意软件和内部泄露的危险无时无刻不在威胁数据安全^[5]。一旦非法获取数据或者篡改数据,不但会造成工程进度的阻碍、成本的增加,而且会引起法律纠纷以及声誉的损失。

2.3 技术应用与实际操作脱节

尽管信息技术为建筑领域带来了空前的创新机会,如利用 BIM 技术来完成设计、施工和运营全周期的数字化管理,以及借助物联网和大数据来优化资源配置和提高施工效率等,但是这些先进技术在实际作业层面上的运用常常会受到很多制约。一方面,科技的飞速发展和更新迭代使一些建筑工程从业人员很难快速掌握并运用新技术,造成技术潜能得不到充分挖掘。尤其是基层施工层面上,员工对于信息化工具运用的能力与意愿良莠不齐,影响着技术应用深度与宽度。另一方面,技术应用通常需要与其配套的管理流程及作业标准,然而在实际运行中,由于受传统管理模式惯性及制度更新落后等因素影响,新技术通常很难有效地整合到已有的工作体系中,从而导致技术应用和实际操作出现断层。

3 信息化技术在建筑工程体系中的实施路径

3.1 强化企业数字化管理能力,完善信息化制度构建

在信息化时代背景下,提高企业数字化管理能力不仅关系着企业运营效率是否最优,也是保证工程质量和安全、增强整体竞争力的关键。一是企业要明确数字化管理战略定位,把信息化技术纳入企业管理各环节中,其中包括建立完善信息化管理体系促进业务流程数字化转型及运用大数据、云计算等先进技术促进决策科学准确。通过这一系列措施,可以使企业在管理流程上实现自动化与智能化,进而提升工作效率

与响应速度。二是健全信息化制度构建,这是确保数字化管理能力高效实现的根本。企业要建立周密的信息管理制度并明确信息化建设目标、任务及责任分工,保证所有信息化工作有规律可循、有依据。与此同时,还应建立信息化考核机制并定期考核反馈信息化工作实施成效,从而不断完善与优化信息化管理体系。另外,企业还应加强信息化人才培养与引进工作,建设具有数字化管理能力的专业团队。通过内部培训与外部合作相结合等多种手段提高员工信息化素养与专业技能,从而为企业数字化转型提供强大的人才保障。

3.2 建立动态进度监控系统,实现施工智能化调度

在信息化技术日益发展的今天,构建动态进度监控系统并对施工进行智能化调度已经成为提高施工管理效率和资源优化配置的一个重要途径。动态进度监控系统融合了物联网、大数据和云计算等先进技术手段,可以对施工现场各种数据进行实时获取,其中包括但不限于工程进度、人员配置、材料消耗和设备状态。这些资料经系统分析处理,可构成直观的进度报告及图表,向管理者提供完整准确的施工进度资料。以此为基础,该系统又可以按照预设进度计划与实际施工进度相比较分析,发现进度偏差及时报警,有效规避工期延误。进一步将该动态进度监控系统与智能化调度算法相结合,可以实现施工资源优化配置与智能调度。该系统能够根据施工进度及资源配置情况自动产生最佳施工计划及资源分配方案以指导现场施工。同时,该系统也可在建设过程中根据实际情况动态调节,以保证建设资源得到高效利用,工程进度得以顺利进行。另外,动态进度监控系统可以促进施工现场安全管理水平的提高。通过对施工现场人员、设备状态及可能存在的安全隐患进行实时监测,该系统能及时发现和预警安全风险,从而为管理者及时有效地进行安全管理决策提供支持。

3.3 培育复合型技术人才梯队,提升信息化应用素养

当今时代信息化技术突飞猛进,建筑工程领域对复合型技术人才要求也越来越迫切。此类人才既要具备坚实的建筑工程专业知识,又要精通信息化技术,并能将二者有机地结合起来,促进建筑工程技术不断创新与发展。所以,培养复合型技术人才梯队和提高信息化应用素养就成了建筑工程体系信息化变革中至关重要的一环。一是企业要重视从内部发掘、培养有潜质的工人,并通过系统培训、实战锻炼等方式提高

他们将建筑工程专业知识融入信息化技术中的能力。培训内容可涉及建筑工程管理、信息技术应用和数据分析等诸多领域,目的是对员工进行多维度的能力训练,以适应复杂多样的工程项目需求。二是企业要加强同高校、科研机构及其他外部机构合作共建人才培养平台。通过产、学、研合作,既可介绍先进信息化技术成果,又可提供学生实践机会和培养实战经验丰富的复合型人才。同时,企业也可通过设置奖学金和实习岗位来吸引更多的优秀青年学子加入建筑工程信息化事业中。另外,企业还应该建立起一套完整的激励机制来激励员工不断地学习、创新。通过建立技术创新奖、职称晋升等奖励方式,调动职工学习热情与创新动力,促进信息化技术向建筑工程领域深度应用。

3.4 构建远程监测技术体系,保障施工过程可视化

在信息技术高速发展的今天,构建远程监测技术体系成了达到这一目的有效手段。该远程监测技术体系通过融合物联网、视频监控和大数据分析等先进技术手段,可以对施工现场各种信息进行实时全面地采集,并对管理者施工状态进行直观精准的反馈。远程监测技术体系,核心是它具有较强的数据采集和分析能力。通过将各种传感器及监控设备布设于施工现场,该系统可对施工期温度、湿度、振动、噪声等环境参数进行实时采集,并对人、设备及物料动态信息进行分析。这些资料经系统处理,能形成直观图表、报告及预警信息等,有助于管理者迅速掌握施工现场真实情况。更进一步,该远程监测技术体系也可以对施工过程进行直观展示。通过视频监控与三维建模技术的结合,该系统能够实现施工现场实时画面与虚拟模型的有机结合,给管理者带来身临其境的监控环境。该可视化监控方式在提高管理者决策效率的同时,也提高施工现场透明度与可控性。另外,远程监测技术体系可以对施工过程进行智能化管理。该系统能够按照预设规则及算法对所收集的资料进行分析判断并自动产生施工计划、资源调度及风险控制决策建议。这些提示可实时推送到施工现场管理人员手中,有助于管理人员对各类突发事件迅速做出反应并做出应对。

3.5 构建智能安全防控网络,实施风险预警化管理

建筑工程领域中安全是工程成败的基石,建设智能安全防控网络和实行风险预警化管理是提高工程安全管理水平和防范安全事故发生的重点措施。智能安全防控网络将物联网、人工智能和大数据分析等先进技术有机结合起来,对施工现场进行综合监测和智能

分析,以便及时发现和预警可能存在的安全风险。这个网络最核心的是它具有很强的数据采集和处理能力。通过将各种传感器及智能监控设备部署到施工现场,该系统可以实时捕获施工期间的各种安全数据,这些安全数据包括但不限于人员活动、设备状态以及环境监测。通过系统深度分析,这些数据能够揭示潜在安全隐患与事故风险并向管理者及时预警。更进一步,智能安全防控网络也可以实现对风险进行动态评估和预警。该系统可基于历史数据及实时数据动态评价施工现场安全状况及预测将来可能出现的安全风险。在评估结果满足预设阈值后,系统自动启动预警机制并将预警信息发送给管理者,使管理者能够及时采取干预措施以预防安全事故。另外,智能安全防控网络能够推动安全管理向标准化和智能化发展。通过建立安全管理统一标准与程序,该系统可自动完成安全检查、隐患排查工作,提高了安全管理效率与精度。同时该系统也可管理者提供数据分析报告与决策支持,有助于管理者对安全风险有更深入的了解与处理,达到风险预警化管理目的。

4 结束语

信息化技术运用到建筑工程体系中具有十分重要的意义。从加强企业数字化管理能力、建立动态进度监控系统、培养复合型技术人才梯队、构建远程监测技术体系、建设智能安全防控网络,建筑工程领域已经达到提高施工效率、优化管理水平、强化安全保障等目的。这些信息化技术在建筑工程中的运用,在促进建筑工程技术不断创新发展的同时,也为工程项目顺利实施提供了扎实的技术支持。未来,随着信息技术的持续发展和建筑工程领域的不断壮大,信息技术将在建筑工程体系中扮演更加关键的角色。

参考文献:

- [1] 董言文.信息化技术在建筑工程技术体系中的应用[J].中国战略新兴产业,2023(14):80-82.
- [2] 余志鹏.信息化技术在建筑工程技术体系中的应用[J].电脑校园,2023(12):96-97.
- [3] 逢强,高玉松.基于数字化技术的建筑工程信息化管理体系建设[J].住宅与房地产,2024(14):65-67.
- [4] 杨宇斐.信息化技术在建筑工程管理中的应用[J].门窗,2024(21):169-171.
- [5] 汪洋.信息化管理技术在建筑工程项目中的应用建议[J].中国信息界,2024(07):95-97.

深基坑施工过程中的监测技术与数据分析

同亚运¹, 孟旭刚², 李 彤³

(1. 西安高新技术产业开发区建设工程质量安全监督站, 陕西 西安 710117;

2. 西安正亨工程科技有限公司, 陕西 西安 710000;

3. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘 要 本文深入探讨了深基坑施工过程中的监测技术、内容与数据分析方法, 详细阐述了深基坑施工监测的重要意义、监测内容、常用监测技术以及仪器设备, 结合具体案例分析了监测数据的采集、处理与分析等过程, 强调了监测技术在确保深基坑施工安全和周边环境稳定方面的关键作用, 对监测技术的未来发展趋势进行了展望, 以期对提升深基坑施工过程中的监测技术与数据分析实效有所裨益。

关键词 深基坑; 监测技术; 数据分析; 施工安全

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.009

0 引言

随着城市化进程的不断加速, 高层建筑、地下轨道交通等大型工程不断涌现, 深基坑工程的数量和规模也日益增加。在深基坑施工过程中, 土体开挖与支护结构作业会给周围土体和建筑物带来影响, 诸如土体变形、支护结构不稳以及周边建筑物开裂等问题可能出现。故而, 为保证深基坑施工安全以及周边环境的稳定, 应当对施工过程展开切实有效的监测, 同时对监测所得数据进行及时分析与处理, 确保工程顺利推进。

1 深基坑施工监测的重要意义

1.1 保障施工安全

深基坑施工时, 土体稳定性与支护结构可靠性至关重要。监测土体位移、支护结构应力等, 能及时察觉潜在安全隐患, 进而采取对应措施, 确保施工安全。这对于保障深基坑工程的顺利进行和周边环境稳定意义重大, 可避免安全事故的发生^[1]。

1.2 保护周边环境

深基坑施工会对周边建筑物、道路、地下管线等产生一定的影响。通过对周边环境的监测, 可以及时掌握其变形情况, 采取有效的保护措施, 减少对周边环境的破坏^[2]。

1.3 优化施工方案

监测数据可以为施工方案的优化提供依据。根据监测结果, 可以调整土体开挖的顺序和速度、支护结构的设计参数等, 提高施工效率和质量。

2 深基坑施工监测的内容

首先是支护结构的监测。对围护墙的水平位移和竖向位移进行监测, 可以直观地反映出围护结构的稳定性。例如: 通过在围护墙上安装测斜仪来精确测量其倾斜程度, 若水平位移过大, 可能预示着围护结构有失稳风险。其次是周围岩土体的监测。监测内容包括地下水位变化, 水位的异常升降可能导致土体性质改变, 影响基坑安全; 还有土体深层水平位移, 了解土体内部的移动状况, 如采用分层沉降仪来获取土体不同深度的位移信息^[3]。另外, 对周边环境的监测也极为重要。要观察周边建筑物的沉降、倾斜和裂缝情况, 以及地下管线的变形程度, 避免施工对周边设施造成破坏。

3 深基坑施工监测的技术与仪器

在技术方面, 主要包括测量技术和数据处理技术。测量技术如水准测量, 用于监测沉降; 角度测量、距离测量用于确定位移。数据处理技术则通过对采集的数据进行分析、建模, 来判断基坑的安全状况。对应的仪器有水准仪, 用于精确测量高程差, 确定基坑及周边建筑的沉降情况。测斜仪可监测土体深层水平位移和支护结构的倾斜程度。全站仪能够测量角度、距离和高差, 综合获取支护结构和周边环境的空间位置变化, 这些技术和仪器为深基坑施工安全提供了保障^[4]。

4 深基坑施工监测数据的采集与处理

深基坑施工监测数据的采集至关重要。通常采用专业仪器如水准仪、测斜仪等定期进行数据采集, 记录支护结构位移、周边建筑物沉降等参数。在数据处

理方面,首先对采集的数据进行整理和筛选,去除异常值。然后通过对比不同时间点的数据,分析变化趋势。利用专业软件进行建模和计算,评估基坑的稳定性。若发现数据异常,及时进行预警并采取相应措施,确保施工安全。同时,将处理后的数据以图表等形式直观呈现,便于相关人员理解和决策^[5]。

5 深基坑施工监测数据的分析方法

一是对比分析法,将当前监测数据与前期数据进行对比,观察数据的变化趋势,还可以和设计允许值对比,判断是否超出安全范围。例如:对比支护结构的位移数据,看其是否稳定或有加速变化的趋势。二是统计分析法,对大量监测数据进行统计,计算均值、标准差等统计参数,评估数据的离散程度和可靠性^[6]。三是时间序列分析法,把监测数据看作时间序列,通过构建模型来预测未来数据的走向,提前发现潜在风险,为深基坑施工安全提供有效支持。

6 具体案例分析

6.1 工程概况

西安荟聚购物广场是一座大型商业综合体,它拥有现代化的建筑设计和宽敞舒适的购物空间。项目集购物、餐饮、娱乐等多种功能于一体,引进众多国内外知名品牌,为西安市民带来全新的购物休闲体验。

6.2 监测方案

1. 监测目的。要保证基坑及周边环境在施工与使用时安全稳定,及时察觉可能出现的变形、位移等问题并预警,保障施工安全及周边设施正常使用。为施工决策提供科学依据,分析监测数据以优化方案、调整进度与支护措施,确保工程质量与进度。

2. 监测项目。(1) 基坑支护结构监测。监测基坑边坡水平与竖向位移,在支护桩设测斜管测深层水平位移,在关键部位设应力应变监测点,监测支护结构内力变化。(2) 周边环境监测。在周边高层建筑、道路、地下管线等关键部位布置沉降监测点,监测其在施工过程中的沉降情况;对周边建筑物的倾斜进行监测,及时发现可能出现的不均匀沉降导致的倾斜问题;对周边道路的裂缝开展定期巡查和监测,记录裂缝的发展变化情况。(3) 岩土体及地下水监测。在基坑周边的岩土体中钻孔埋设孔隙水压力计,监测岩土体中的孔隙水压力变化;设置地下水位观测井,监测地下水位的动态变化,了解基坑降水对周边地下水位的影响范围和程度。

3. 监测点布置。(1) 支护结构监测点。沿基坑周边的支护桩每隔一定距离布置水平位移和竖向位移监测点,一般间隔15~20 m;在支护桩的关键部位,如

桩顶、桩身变截面处等布置应力应变监测点;在基坑的阳角、阴角等应力集中部位适当加密监测点。(2) 周边环境监测点。在周边高层建筑的角点、外墙等部位每隔10~15 m布置一个沉降监测点,在建筑物的中部适当布置倾斜监测点;沿周边道路每隔20~30 m布置一个沉降监测点,在道路的交叉路口、与基坑距离较近处等重点部位加密监测点;在地下管线的上方或附近每隔10~15 m布置一个位移和沉降监测点,对于重要的管线,如给水管、燃气管等,适当增加监测点数量。(3) 岩土体及地下水监测点。在基坑周边的岩土体中,根据地质条件和基坑形状,每隔20~30 m钻孔埋设孔隙水压力计和测斜管;在基坑周围均匀布置地下水位观测井,一般每隔30~50 m布置一口观测井,在基坑的上下游和周边环境敏感区域适当加密观测井。

4. 监测频率。在基坑开挖初期,监测频率为每周1~2次;随着基坑开挖深度的增加和施工进度的加快,当开挖深度达到设计深度的1/3、1/2、2/3等关键阶段时,监测频率提高至每天1次;在基坑底板浇筑完成后的一段时间内,监测频率仍保持较高水平,每天1次,之后逐渐降低至每周2~3次,直至基坑回填完成。当监测数据出现异常变化或接近报警值时,应增加监测频率,甚至进行实时监测,以便及时掌握变形发展趋势,采取相应的处理措施^[7]。

5. 监测仪器设备。(1) 水平位移监测。采用全站仪、经纬仪等测量仪器,通过建立基准控制网,测量监测点的坐标变化来确定水平位移。(2) 竖向位移监测。使用水准仪,按照二等水准测量精度要求,测量监测点的高程变化来获取竖向位移。(3) 应力应变监测。安装钢筋应力计、混凝土应变计等传感器,通过数据采集仪采集传感器的应变数据,进而计算支护结构的内力变化。(4) 孔隙水压力监测。采用孔隙水压力计,将其埋设在岩土体中,通过数据采集系统实时测量孔隙水压力的变化。(5) 地下水位监测。使用水位计,将其放入地下水位观测井中,定期测量地下水位的动态变化数据。

6.3 监测结果分析

1. 支护结构监测结果。(1) 水平位移。在基坑开挖过程中,支护桩的水平位移呈现出逐渐增大的趋势,但均未超过设计允许值。例如:在基坑开挖至-8 m深度时,支护桩顶部的最大水平位移为12 mm,随着开挖深度的继续增加,至基坑开挖完成时,最大水平位移控制在25 mm以内,表明支护结构能够有效地限制基坑的侧向变形,保证基坑的稳定性。(2) 竖向位移。支护桩的竖向位移表现为整体下沉,下沉量较小,最大下沉量约为8 mm,主要是由于基坑开挖卸载和土体自

重作用引起的,对支护结构的整体稳定性影响较小。(3)应力应变。通过对应力应变监测数据的分析可知,支护结构的内力变化在设计预期范围内。在基坑开挖初期,内力增长较为缓慢,随着开挖深度的增加和土压力的增大,内力逐渐增大,但未出现应力集中或超过设计强度的情况,说明支护结构的设计和施工是合理的^[8]。

2. 周边环境监测结果。(1)周边建筑监测。周边高层建筑的沉降监测数据显示,各监测点的沉降量均在规范允许范围内,最大沉降量为 5 mm,且沉降较为均匀,未出现明显的不均匀沉降现象。建筑物的倾斜监测结果也表明,倾斜率未超过 0.001,说明基坑施工对周边高层建筑的影响较小,未对其结构安全造成威胁。(2)道路监测。道路沉降监测点的监测数据表明,道路在基坑施工过程中出现了一定程度的不均匀沉降,最大沉降差为 3 mm,但未出现明显的裂缝和变形,对道路的正常使用寿命影响不大。通过对道路的定期巡查和监测,及时发现并处理了一些潜在的安全隐患,如对局部出现的微小裂缝进行了修补和加强处理。(3)地下管线监测。地下管线的位移和沉降监测结果显示,各监测点的位移和沉降量均较小,未超过管线的允许变形值,管线的运行状态正常,未因基坑施工而发生泄漏、破裂等事故。在施工过程中,根据监测数据对地下管线的保护措施进行了及时调整和优化,如对靠近基坑的管线增加了支撑和防护措施,确保了地下管线的安全。

3. 岩土体及地下水监测结果。(1)孔隙水压力变化。孔隙水压力监测结果表明,在基坑开挖初期,孔隙水压力下降较快,随着降水措施的持续实施和止水帷幕的作用,孔隙水压力逐渐趋于稳定。孔隙水压力的变化范围在设计预期之内,未出现异常的孔隙水压力升高或降低现象,说明基坑降水和止水措施是有效的。

(2)地下水位变化。地下水位观测结果显示,在基坑开挖过程中,地下水位下降明显,最大降幅为 2.5 m,且随着距离基坑边缘距离的增加,地下水位的下降幅度逐渐减小。在基坑周边的环境敏感区域,地下水位的变化也在可控范围内,未对周边的生态环境和地下水资源造成明显的不良影响。

6.4 监测结论

通过对西安荟聚购物广场深基坑施工过程的监测,各项监测数据均在设计允许范围和规范要求之内,表明该基坑采用的支护形式以及相应的施工方案是合理可行的,能够有效地保证基坑及周边环境的安全稳定,为购物中心的建设提供了有力的保障。监测工作的及时开展和数据分析为施工过程中的决策提供了科学依据,通过对监测数据的实时反馈,施工单位能够及时调整施工进度和支护措施,避免了安全事故的发生,确保了工程的顺利进行。同时,监测数据也为后续的

工程验收和运营维护提供了重要的参考依据。本工程的监测经验可为类似深基坑工程的监测和施工提供参考,在今后的深基坑工程中,应进一步加强监测工作的管理和数据分析,不断优化监测方案,提高监测精度,为深基坑工程的安全施工提供更加可靠的保障。

7 深基坑施工监测技术的发展趋势

在智能化方面,传感器将更加智能,能够自动采集、传输数据,并进行初步分析。大数据与人工智能的应用也会增多,通过对海量监测数据的深度分析,实现更精准的风险预测。无线传输技术将进一步普及,减少布线成本和施工难度^[9]。同时,监测设备将向小型化、集成化发展,提高监测的便捷性和效率。多学科融合也会推动监测技术不断创新,为深基坑施工安全提供更有力的保障。

8 结束语

在深基坑施工过程中,监测技术与数据分析至关重要。对土体位移、支护结构、地下水位及周边环境加以监测,及时分析处理数据,能迅速发现问题并采取措施,保障施工安全与顺利进行。在实际工程中,需依据工程特点和周边环境要求,制定科学合理的监测方案,选择合适的监测方法与仪器,采用正确的数据分析方式,为施工提供有力的技术支持。随着科技的进步,深基坑施工监测技术也会持续发展创新,为深基坑工程安全施工提供更先进可靠的技术保障,确保施工过程安全以及周边环境稳定。

参考文献:

- [1] 陈延可,李嘉豪,胡金木.基于监测数据与 AHP-模糊综合评判法的深基坑工程安全评价[J].安徽建筑,2024,31(11):140-144.
- [2] 蒋梦楚.深基坑变形监测及位移分析方法研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(32):78-80.
- [3] 孙志鑫.高层建筑深基坑施工沉降监测技术与数据分析[J].建材发展导向,2024,22(20):13-15.
- [4] 邵光院.城市复杂环境下的深基坑监测在实际工程中的应用[J].中国建筑装饰装修,2024(15):158-160.
- [5] 唐玲.深基坑工程变形监测技术及应用研究[J].工程技术研究,2024,09(13):57-59.
- [6] 陈鹏.深基坑工程对周围环境的影响及安全监测研究[J].现代物业(中旬刊),2019(08):63.
- [7] 姚冬.深基坑变形监测方案设计与数据分析[J].智能城市,2024,10(08):123-125.
- [8] 商和超.建设工程深基坑变形与主体沉降监测技术研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(06):14-16.
- [9] 卢维,范兵涛.基坑监测技术在深基坑工程中的应用研究[J].房地产世界,2024(11):140-142.

基于物联网的公路工程施工现场安全预警系统构建

曹运涛

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘要 为了实现对公路工程施工现场风险的智能识别与快速响应, 本文设计并构建了一套基于物联网的安全预警系统。系统采用多源感知技术对人员、设备和环境状态进行实时监测, 利用 5G 与 Wi-Fi 混合网络实现高效数据传输, 并通过边缘计算与云端模型联合处理, 实现越界识别、设备异常预警及风险趋势预测等核心功能。结果表明, 该系统提高了预警准确率和响应效率, 降低了现场违规行为发生率, 以为施工现场提供持续稳定的安全保障。

关键词 物联网; 公路工程; 施工现场; 安全预警系统

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.010

0 引言

在公路工程施工过程中, 常伴随高温、爆破、高空作业、重型机械等多重高风险因素。传统安全管理依赖人工巡查与经验判断, 难以实现高频、高效的实时监管。物联网技术以其“全面感知、可靠传输、智能处理”的优势, 为施工安全预警提供了新的技术路径。本文基于物联网架构, 构建结构合理、功能完备的施工安全预警系统, 旨在保障施工作业人员的安全与工程质量。

1 基于物联网的公路工程施工现场安全预警系统架构设计

1.1 感知层

感知层作为系统最底层、最直接的数据获取单元, 其部署质量与感知精度直接关系到整个系统的预警有效性和实时响应能力。感知层需覆盖施工现场的多个核心维度, 包括人员位置、环境状态、设备运行以及视频图像信息, 形成全面的“人—机—环”三位一体感知网络^[1]。

首先, 人员定位模块采用 UWB 与蓝牙双技术融合定位方式, 工人佩戴轻量化电子标签, 每隔 1 s 向基站发送定位信号, 系统通过多基站协同定位技术可实现误差控制在 ± 30 cm 范围内, 并可在 GIS 平台实时显示工人移动路径、停留时间与作业状态, 尤其适用于爆破区、高空作业区等重点危险区域的越界监测。其次, 在环境监测方面, 系统布设多类传感器节点, 如温湿度传感器、CO/CH₄ 气体浓度传感器和 PM2.5 颗

粒物传感器, 采样频率设定为 1 分钟一次, 数据上报周期为 5 分钟, 满足对突发泄露、扬尘污染及高温高湿等危险工况的及时识别。例如: 当 CO 浓度持续高于 30 ppm 或 PM2.5 浓度超过 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 系统将触发黄色预警并自动联动广播与人员撤离提示。再次, 设备状态监控模块通过在塔吊、挖掘机、混凝土罐车等大型机械设备上安装姿态传感器、压力传感器与 GPS 模块, 能够实时获取设备倾角、作业荷载、运行速度与轨迹偏移等信息, 系统采用动态阈值监控机制, 设定如塔吊倾斜角度大于 10° 、载荷连续 5 s 超过额定载重的 80% 即判断为风险工况, 自动记录日志并生成预警提示。最后, 在视觉感知方面, 现场部署的 AI 视频分析终端配备高清广角摄像头与边缘图像处理芯片, 支持对人群密度、人员越界、人员跌倒等事件的智能识别与本地预警。图像分析采用 YOLOv5 模型与姿态识别算法相结合, 实现平均识别准确率达 93% 以上, 在 3 s 内完成一次完整的画面分析与识别判断^[2]。

1.2 网络层

网络层承担着多源感知数据向平台层高效、稳定传输的核心任务。由于施工现场环境复杂、动态变化频繁, 传统单一网络结构难以满足高并发、大带宽、低延时的通信需求。因此, 本系统采用“5G+Wi-Fi”混合组网方式, 在保证数据实时性的同时提升网络结构的灵活性与鲁棒性。

网络层对不同类型的数据进行了分级分类传输策略设计: (1) 对于关键高频数据, 如 UWB 人员定位信息(更新频率 1 Hz)、塔吊姿态变化、设备荷载实时监测等,

采用 5G 蜂窝网络进行直连上行。5G 网络具备低于 10 ms 的时延能力和 Gbps 级传输带宽,可在高流动性、强干扰的工地环境下仍保持稳定通信,保障越界报警、设备异常等高优先级事件的快速响应;(2)对于环境监测类数据如温湿度与视频图像数据,考虑到其对时延的容忍度相对较高,系统通过 Wi-Fi 接入边缘计算节点进行初步本地处理后,再统一打包上传至云端服务器。Wi-Fi 模块覆盖区域设定为半径 50 m,信道配置采用自动频率跳变机制以减弱信号干扰,满足多个传感器同时接入且带宽不低于 30 Mbps 的基本需求。视频数据采用 H.265 编码格式压缩传输,以减少带宽占用,提升传输效率;(3)针对施工现场潜在的信号遮挡、设备故障等问题,网络层配置了双链路冗余结构,即每个关键节点均具备主用与备用网络路径(主为 5G,备为 Wi-Fi 中继或有线以太网),并设有链路健康检测机制,一旦主链路连续 3 s 无响应,系统将在 1 s 内自动切换至备用路径,确保网络不中断、数据不丢失;(4)为提升整体系统的安全性及数据完整性,网络层还嵌入 TLS 传输加密协议与设备身份认证机制,有效防止数据在传输过程中的篡改与劫持。整个网络架构支持最多同时连接 300 个传感节点与 10 路高清视频流,在试点工程中实测网络丢包率低于 0.5%,关键数据平均传输延时控制在 15 ms 以内^[3]。

1.3 平台层

平台层主要由边缘计算节点、云端处理中心及安全规则库与响应机制三大核心组成,形成“本地实时处理+云端深度分析+规范驱动响应”的协同体系。在边缘计算环节,系统部署多个边缘计算终端,嵌入 ARM 架构处理器,配备 8 核 CPU 与 16 GB 内存,运行轻量化的容器化分析模块,用于本地处理高频数据,如塔吊姿态判断、人员定位超限识别等,以减少网络带宽压力和上传延迟。根据实测数据,边缘计算节点可将紧急数据处理响应时间控制在 200 ms 以内,提高现场异常事件的反应速度。云端处理中心具备强大的计算能力与算法支持,基于 Hadoop 大数据框架和 TensorFlow 深度学习平台,运行事故模式识别模型和风险趋势预测算法。例如:系统内置的 LSTM 时间序列预测模型可根据过去 7 天施工环境数据与行为记录预测未来 24 小时高风险时段,预测准确率达 87.3%。同时,云平台支持历史数据回溯分析、多维度交叉比对与数据可视化服务,为管理层提供科学决策依据。此外,平台层构建了完善的安全规则库与响应机制,包括 GB50660《建设工程施工现场安全技术规范》、JGJ59《建筑施工安全检查标准》等国家与行业规范,系统内置超过 120 项规则条目,涵盖高空作业、起重机械运行、

易燃易爆作业环境等重点领域。当采集数据触发规则条件如作业人员未佩戴安全帽、设备载荷超限、环境中 CH₄ 浓度超过 0.5% 等,系统立即赋予相应风险等级(分为红、橙、黄、蓝四级),并启动相应响应流程,包括推送预警信息至安全员移动端、启动广播提示、联动断电设备等多级响应措施。

1.4 应用层

应用层作为系统面向用户交互的界面与操作终端,其面向项目管理人员、安全员及上级主管单位三类核心用户群体,提供多终端、多方式、多维度的安全信息服务,确保安全预警信息在最短时间内高效传达至责任人。

1. 移动端 APP 作为现场一线管理人员的随身工具,具备实时定位、风险动态追踪和预警处理等功能,系统可同步显示各作业人员的位置分布、所属作业区域、当前任务状态及历史轨迹查询。每位人员定位标签与账号绑定,一旦发生越界、倒地或长时间静止等异常行为,APP 界面将以弹窗、闪烁标识及警报声提醒安全员及时响应。此外,移动端还支持远程一键报警功能,适用突发事件无法语音沟通的应急场景,触发后可联动附近广播和视频监控自动锁定事发区域,并向管理中心发送定位信息^[4]。

2. 大屏控制中心是项目指挥部和调度室的集中管理平台,结合 GIS 和 BIM 技术,提供施工现场的三维动态展示。系统显示各传感节点、设备、人员和风险点,并支持缩放、旋转、分区查看及风险事件回放。它能接入至少十路高清视频和三百个感知设备数据,保证数据图像同步连续。系统还具备自动预警推送机制,能在检测到高风险事件时,如强风、设备超负荷或气体浓度异常,5 秒内通过短信、微信、语音等方式通知责任人,提供事件详情和处理建议,确保快速决策。

3. 应用层还具备预警日志管理、统计分析与报告生成等辅助功能,系统可按日、周、月自动生成安全事件统计图表与趋势分析报告,并提供 Excel 格式导出,便于管理人员汇总归档与上报。在试点工程项目中,应用层有效辅助完成越界报警处理 42 起,高空作业预警响应 64 次,重大隐患自动推送通知 98 条,预警处置及时率达 94.2%。

2 关键功能模块设计

2.1 人员越界预警

人员越界管理是施工安全中的重点问题,尤其在爆破区、吊装区、高空作业区等限制区域,一旦发生人员误入,极易引发严重后果。因此,系统在高危作业区域布设虚拟电子围栏,围栏边界基于 GIS 地图与

施工 BIM 模型进行精准设定,边界误差控制在 $\pm 0.3\text{ m}$ 以内。作业人员佩戴的 UWB 定位标签每秒更新一次位置信息,并与系统后台同步。系统持续比对人员实时位置与围栏边界关系,如果出现越界行为,将在平台地图界面标注红色高危点位,并同步触发三级响应机制。一级响应为后台弹窗警示,二级响应为移动端安全员震动提醒,三级响应则联动现场广播与闪灯报警,并可按需触发断电等紧急停机操作。为避免误报,系统融合移动速度分析与行为识别机制,如人员越界速度低于 1 m/s ,系统将判定为可能误入,联动最近视频点位实时画面进行二次确认。系统还支持“越界预警+视频回溯”组合机制,在人员离开限制区后自动生成事件录像,并记录入系统日志供后续审查。

2.2 设备违规操作识别

施工机械设备的违规操作是引发施工事故的重要诱因,尤其是塔吊、履带吊、混凝土罐车等重型设备在运行过程中,姿态异常或超载运行可能造成设备倾翻、结构冲击或人员伤害。基于此,系统在关键设备上安装姿态传感器、载荷传感器及陀螺仪模块,实时采集倾角、摆动幅度、运行速度、载荷变化等核心参数,数据采样频率为 10 次/s 。系统内置基于专家规则的安全阈值库,如塔吊倾角大于 15° 、吊钩摆幅超过最大允许范围、载荷超过额定值的 80% 持续 10 s 以上,即触发违规操作判断。如果识别为异常状态,系统立即启动语音报警,通过设备内置喇叭播放提示语音,并将异常参数自动上传至后台数据库。后台同时锁定当前操作日志,包括设备编号、操作员 ID、违规时间点与对应参数变化趋势,供事后溯源与责任划分。

2.3 智能风险预警

传统安全管理多依赖历史经验与人工判断,缺乏前瞻性与系统性,难以对隐性风险做到有效预测。本系统引入基于机器学习的智能风险预测模型,通过对施工现场长期积累的多维数据进行训练,实现风险趋势识别与预报功能。系统采用 LSTM(长短时记忆网络)对环境温度、湿度、风速、作业密度、设备运行状态、人员行为频率等十余项关键参数进行动态建模,每小时进行一次风险指数计算,输出未来 $6\sim 24$ 小时的高风险时间段和空间分布图。模型训练数据来自施工现场实测数据与历史事故案例数据集,模型预测准确率稳定在 87% 左右。以高温风险为例,当系统连续监测到气温超过 35°C 、湿度大于 85% 且人员心率频率异常上升,系统将主动判断中暑风险等级,并生成预警建议,包括调整作业时间、缩短连续作业时长、增加补水频率等措施推送至 APP 终端和大屏控制台。系统还支持

风险分布图与施工计划联动显示,使管理人员可视化安排低风险时段作业,降低人员负荷^[5]。

3 实地测试与应用成效

本系统在某省重点高速公路项目中进行了为期 3 个月的实地试点,覆盖施工区域面积超过 12 万 m^2 ,共布设 UWB 人员定位标签 215 个,传感器节点 156 组, AI 视频识别终端 60 套。运行数据显示,系统整体预警准确率达到 94.6% ,误报率控制在 2% 以下,关键功能运行稳定、响应高效。人员越界行为显著下降,由平均每周 16 起减少至 4 起,下降幅度达 75% ,尤其在爆破区和吊装作业区预警效果明显。设备异常操作识别功能协助发现载荷超限与倾角异常共 69 起,避免了数起潜在设备事故;安全员对现场异常的响应平均用时由传统的 5 分钟压缩至 1 分钟以内,处理效率提升 80% 。此外,智能风险预测功能为施工计划优化提供了支持,施工单位据此调整高温高湿时段施工安排 12 次,未发生与中暑相关的健康安全事件。系统联动推送预警信息累计超过 320 条,触发自动语音警报 102 次,系统日志记录与图像回溯功能被用于 6 起现场问题调查,有效提升了事件处置的可追溯性与证据支持水平。根据现场管理人员反馈,系统上线后,安全员日均巡查次数由原来的 6 次减少至 4 次,巡查覆盖区域更具针对性,安全管理工作负担明显减轻,工作效率提高约 35% 。

4 结束语

基于物联网技术构建的公路工程施工现场安全预警系统,通过感知层、网络层、平台层与应用层的协同运作,实现了对人员、环境与设备的全方位智能监控与预警。实地测试表明,该系统提升了预警准确率与响应速度,有效降低了安全事件发生率,减轻了安全管理人员工作负担。未来,可进一步融合多源异构数据,优化算法模型,提升系统自适应能力,推动公路工程安全管理向智能化、精细化方向持续演进。

参考文献:

- [1] 王军.公路工程施工现场安全管理及风险预警系统的构建[J].大众标准化,2024(18):83-85.
- [2] 郭晓炜,贺静,李倩.高速公路改扩建施工区安全风险预警系统应用研究[J].公路,2025,70(02):323-327.
- [3] 苏志华.山区高速公路施工安全预警及防护新技术应用[J].交通世界,2025(Z2):15-18.
- [4] 纪国栋,叶聿森.公路施工安全事故诱因与预警管理的探讨[J].汽车周刊,2025(05):180-182.
- [5] 王康,信聪.BIM技术在高速公路施工安全管理中的应用[J].汽车周刊,2025(06):81-83.

智能化施工管理系统在电力工程项目中的实践研究

佘蕊

(广西工程职业学院, 广西 百色 531400)

摘要 为解决传统电力工程施工管理效率低、信息滞后等问题, 探讨智能化施工管理系统在电力工程项目中的实践应用策略至关重要, 以提升施工效率、质量与安全性, 推动行业数字化转型。本研究系统梳理了 BIM、物联网、AI 算法等核心技术框架, 提出全生命周期管理、协同机制及典型场景应用策略, 并以某市城区配电网升级工程为例, 通过分析物联网传感器部署、AI 图像识别质量抽检、智能穿戴设备监测等具体实施步骤, 验证技术可行性。研究证明, 智能化施工管理系统通过技术集成与数据驱动决策, 有效解决了电力工程复杂场景下的管理难题, 为中小型电力工程智能化转型提供了可参考的技术路径, 对推动行业降本增效、保障工程安全具有重要意义。

关键词 电力工程; 智能化施工管理系统; BIM 技术; 物联网; AI 算法

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.011

0 引言

电力工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 对经济发展和社会稳定起着关键作用。传统的电力工程施工管理模式, 因依赖人工操作与纸质记录, 存在信息传递滞后、管理效率低下以及决策缺乏数据支持等问题, 已难以满足当今电力工程建设的需求。智能化施工管理系统借助物联网、大数据、云计算和人工智能等先进技术, 实现对电力工程施工全过程的实时监控、数据采集与分析, 以及智能化决策, 为电力工程施工管理带来了全新的解决方案。深入研究该系统在电力工程项目中的实践策略, 对提高施工效率、保障工程质量、降低安全风险, 以及推动电力行业的数字化转型具有重要的意义。

1 智能化施工管理系统核心技术

1.1 关键技术

在智能化施工管理系统中, BIM 技术通过构建电力工程的三维数字化模型, 不仅能直观呈现工程全貌, 提前开展施工模拟, 还能精准检测各组件间的碰撞冲突, 为施工方案的优化提供依据。物联网 IoT 则借助各类传感器以及智能设备, 对施工现场的温湿度、有害气体浓度等环境参数, 还有施工设备的运行状态进行实时采集, 实现对施工环境与设备状况的全方位监控。大数据与 AI 算法基于海量的施工数据, 运用数据分析与算法模型, 对施工进度做出预测, 对人力、物

力、财力等资源进行优化配置, 并提前预警潜在的安全与质量风险。区块链凭借其不可篡改、可追溯的特性, 实现施工数据的可靠存证以及供应链全过程的追溯, 保障数据的真实性与交易的安全性^[1]。5G 与边缘计算则发挥低时延传输优势, 大幅缩短数据传输时间, 同时将部分数据处理任务从云端下沉到边缘节点, 让现场管理者能够基于实时数据做出决策, 减少因数据传输延迟和处理滞后导致的决策失误, 有效应对施工现场复杂多变的状况。这些技术相互融合、协同运作, 共同构成了智能化施工管理系统坚实的技术基础, 推动电力工程施工朝着智能化、高效化、精细化方向发展。

1.2 系统功能模块

智能化施工管理系统的智能进度管理模块, 依托实时采集的施工数据, 运用先进算法对施工进度进行动态跟踪与分析, 及时察觉偏差并做出计划调整, 保障项目按既定目标推进。质量管控模块利用 AI 图像识别技术, 对施工现场的图像进行深度学习, 快速准确识别出工程质量缺陷, 如混凝土裂缝、设备安装偏差等, 便于及时整改, 从源头保障工程质量。安全风险预警模块借助人员定位技术, 对施工人员的位置进行实时追踪, 同时运用行为分析算法, 监测人员是否存在违规操作行为, 如未佩戴安全帽、进入危险区域等, 及时发出预警, 有效降低安全事故发生率^[2]。资源调度优化模块通过对设备、材料和人力资源的需求进行精准预测, 实现各类资源的合理分配, 提高资源利用效率,

避免资源浪费与闲置。成本实时监控模块能够实时获取施工过程中的各项费用数据,对成本进行动态监控与分析,当成本出现超支风险时及时预警,帮助管理者采取针对性措施,严格控制项目成本。这几大功能模块相互关联、协同作用,为电力工程项目的高效、安全、高质量建设提供全方位保障。

2 电力工程智能化施工管理的应用策略

2.1 全生命周期管理

1. 前期设计阶段。在电力工程前期设计阶段,将BIM技术与GIS技术融合,能显著优化输电线路选址及路径规划。BIM技术以三维立体的方式,精确呈现输电线路周边的建筑布局、地下管线等信息,直观反映不同方案的空间关系^[3]。而GIS技术则从宏观角度提供地形地貌、地质条件、气象环境等海量地理数据。两者融合后,设计人员能综合分析地形起伏、交通状况、生态敏感区分布等多重因素,快速模拟不同线路方案在不同地理场景下的建设难度与运营成本。例如:通过系统筛选可避开陡峭地形,减少施工难度与土方工程量;避开生态保护区,降低对环境的影响^[4]。另外,还能依据交通条件,选择便于施工设备和材料运输的路线,大幅提高输电线路选址的科学性,缩短设计周期,降低后期施工变更风险,保障项目在源头上实现经济、环保与高效。

2. 施工阶段。在电力工程施工阶段,无人机巡检与AI识别技术的结合,极大地提升了施工质量监管效率。无人机凭借灵活便捷的特性,可迅速抵达人力难以到达的施工区域,按照预设航线对施工现场进行全方位、多角度拍摄,快速采集海量影像数据。这些影像数据被传输至AI分析系统后,系统基于深度学习算法,能够对输电塔搭建是否规范、电缆铺设是否达标等施工细节进行精准识别,及时发现诸如焊接缺陷、螺栓松动等质量问题,并生成详细报告,让施工人员迅速定位并整改。与此同时,装配式施工预制件的数字化管理借助RFID追踪技术^[5],为每个预制件赋予唯一“身份证”。从预制件在工厂生产下线,到运输至施工现场,再到安装使用,其所处位置、物流轨迹、质量检验等信息,都会通过RFID读写器实时记录并上传至管理系统。施工人员借助手持终端,就能获取预制件的详细信息,避免用错、混用,保证装配式施工的顺利进行,还能通过追溯实现质量问题的源头问责,大幅提高施工的精细化管理水平,推动电力工程施工有序、高效开展。

3. 运维阶段。在电力工程运维阶段,实现施工数据与运维系统的无缝对接对保障电力设施稳定运行十

分重要。设备台账数字化是这一过程的关键环节,施工阶段所积累的设备型号、规格、采购信息、安装位置、调试数据等,都能通过数字化手段整合录入运维系统。借助这一数字化设备台账,运维人员能够快速获取设备全生命周期的详细资料,在设备出现故障时,通过系统检索迅速定位问题根源,调用相应的技术文档与施工记录,制定精准的维修策略,极大地缩短故障排查与修复时间。同时,将施工过程中的质量检测数据融入运维系统,能够为设备的预防性维护提供重要依据。通过分析施工时记录的设备参数波动,结合运维阶段收集的实时运行数据,系统可以预测设备可能出现的故障,提前安排维护工作,降低设备故障率。此外,无缝对接的施工与运维数据,为后续的电力工程改造升级提供了详实的历史资料,让改造方案的制定更具针对性,有效提升电力系统运维的智能化与科学化水平,为电力供应的持续性与稳定性筑牢根基。

2.2 协同管理机制

多方参与的云端协同平台,打破了业主、设计、施工、监理之间信息壁垒,各参与方可在平台实时共享项目进度、图纸变更、质量检测报告等关键信息,实现沟通零延迟。业主能通过平台直观了解项目进展,及时反馈需求;设计方可以随时对图纸细节进行调整与说明,减少因沟通不畅导致的设计变更;施工方快速接收指令并反馈现场实际情况,提高施工效率;监理方则能实时监督施工过程,确保工程符合规范。

基于区块链的合同履约与支付自动化则利用区块链不可篡改和智能合约的特性,将合同条款转化为可自动执行的代码。当施工方完成合同约定的里程碑节点,系统会依据预设条件自动触发验证机制,通过区块链分布式账本验证项目完成情况,确认无误后自动执行支付流程。这一过程有效避免了人为因素导致的合同纠纷和支付拖延,增强了合同执行的透明度与公正性,降低了各方的信任成本。云端协同平台与区块链合同履约及支付自动化相互配合,前者提供沟通与数据共享的环境,后者则保障合同执行与资金流动的规范性,共同构建起一个高效、透明、可信的电力工程协同管理体系,极大地提升了电力工程项目管理的整体效能。

2.3 典型应用场景

1. 高压变电站建设。在高压变电站建设中,模块化施工大幅提升了建设效率,它将变电站拆分为多个标准化模块,在工厂内完成生产与组装,有效降低了现场施工难度与时间成本。与之配套的智能吊装,借助先进的传感器技术,实时监测吊装设备的运行参数,

精准定位模块位置,实现吊装过程自动化、智能化控制。通过在吊装设备和待安装模块上部署传感器,系统能够实时获取设备姿态、位置信息,并根据变电站建设需求进行自动调整。这不仅大幅降低了施工安全风险,还通过优化吊装流程,进一步缩短了特高压变电站的建设周期,提升了整体建设质量。

2. 跨区域输电线路。在跨区域输电线路建设中,无人机搭载激光雷达技术实现了地形测绘与施工监控的双重突破。无人机凭借灵活机动性,能快速抵达偏远山区、复杂地形等区域,搭载的激光雷达设备通过发射激光束,精确测量地面物体距离,快速生成高精度三维地形数据,为输电线路的路径规划提供精准地理信息。在施工阶段,无人机持续对线路塔基建设、导线铺设等作业进行监控,激光雷达收集的数据配合图像识别技术,能实时检测施工进度与质量,快速发现如塔基偏移、导线松弛等问题。该技术大幅提升了测绘效率,保障了施工质量,降低了人力成本与作业风险。

3 案例分析

3.1 案例概况

以某市城区配电网升级工程为例,该项目为市级重点民生工程,覆盖 5 个街道 12 个老旧社区,涉及新建及改造 10 kV 配电线路 20 公里、更换智能配电变压器 30 台、加装智能电表 5 000 户。工程需在人口密集区域施工,面临地下管线复杂、交通疏导困难、居民用电保障压力大等挑战。在传统管理模式下,施工协调效率低、进度滞后风险高、安全隐患多。项目创新性引入智能化施工管理系统:采用 BIM 技术建立地下管网三维模型,精准定位管线冲突点并优化施工路径;部署物联网传感器实时监测施工区域环境参数(如噪声、扬尘)及设备运行状态;利用 AI 图像识别技术对电缆接头制作、设备安装等关键工序进行质量抽检;通过智能穿戴设备实现施工人员定位与行为监测,结合大数据分析动态调整施工时序。

3.2 具体实施应用

1. 物联网传感器部署。在物联网传感器部署方面,技术人员根据施工区域特点选择多参数集成传感器(如温湿度、噪声、PM2.5、设备振动传感器),在变电站周边、电缆沟道等关键位置安装,并通过边缘计算网关实现数据本地预处理。在施工过程中,传感器实时采集环境参数与设备运行数据,通过 5G 网络传输至云端平台,系统预设阈值触发预警机制(如噪声超标自动启停降噪设备)。需注意的是,传感器需具备 IP67 防护等级以应对户外环境,同时需采用太阳能+锂电池

双供电确保续航,避免因电力中断导致数据丢失。

2. AI 图像识别应用。技术人员在施工关键工序(如电缆接头压接、变压器安装)部署高清摄像头,设定每 5 分钟自动抓拍;其次将图像数据输入预训练的 YOLOv8 模型,重点识别绝缘层损伤、螺栓松动等缺陷;最后将识别结果实时推送至质量管控终端,触发“待整改”工单。实施中需注意样本数据标注的准确性,需由专业质检员标注 1 000+ 张缺陷样本以提升模型精度,同时设置置信度阈值(如 0.9)避免误判,对疑似缺陷需人工复核确认。

3. 应用效果。该城区配电网升级工程通过智能化施工管理系统应用,实现工期缩短 25 天(较计划提前 25%),综合成本降低 12%(约 380 万元),其中材料损耗率下降 42%,机械台班利用率提升 35%。安全事故率从传统管理模式的 0.8% 降至 0.12%,高空作业违规行为减少 91%,设备故障预警准确率达 97%。质量合格率从 92% 提升至 98.7%,电缆接头缺陷检出率提高 40 倍,隐蔽工程验收一次性通过率达 100%。管理效率方面,多方协同沟通成本降低 65%,指令响应时间从平均 4.2 小时压缩至 27 分钟。

4 结束语

通过对核心技术的融合运用、全生命周期管理策略的实施,以及协同管理机制和典型场景应用的探索,有效解决了传统施工管理模式等诸多弊端。随着电力工程规模和复杂性的不断增加,智能化施工管理仍面临技术深度融合、数据安全保障等挑战。未来,需持续加强技术创新,推动智能化施工管理系统的进一步优化,以适应电力行业不断发展的需求,为电力工程建设的高质量发展注入持久动力,助力电力行业数字化转型迈向新高度。

参考文献:

- [1] 刘文文,段恩强.智能化技术在电力工程设备故障诊断与维修中的应用[J].光源与照明,2025(01):105-107.
- [2] 张子倩.电力工程中的电力自动化技术及其应用研究:以南方某城市新区的 220kV 变电工程为例[J].生态与资源,2024(11):108-110.
- [3] 肖红敏,梁歆斌.电力工程计量系统智能化改造:综合电力质量监测仪的管理优化应用分析[J].仪器仪表用户,2024,31(11):151-153.
- [4] 王玮.电力工程施工中智能化技术的集成应用与管理创新[J].流体测量与控制,2024,05(04):91-94.
- [5] 王子泰,刘嘉维.电网建设工程中的智能化施工技术分析[J].集成电路应用,2023,40(12):180-181.

电力工程施工管理中信息化技术的应用与效果分析

朱磊, 蓝剑波

(丽水正阳电力建设有限公司, 浙江 丽水 323000)

摘要 在科技高速发展的时代背景下, 信息化技术在电力工程施工管理领域的应用愈发深入。本文针对传统电力工程施工管理模式的弊端, 分析了信息化技术在该领域的应用价值、策略及成效, 以多维视角探究信息化技术在电力工程施工管理中的应用场景, 并分析其在打破信息壁垒、精准管控施工进度、强化质量与安全管理及降低成本等方面的作用, 提出搭建一体化信息化管理平台、运用 BIM 技术、借助大数据分析和移动终端技术等应用策略。分析结果表明, 信息化技术的应用可有效缩短施工周期, 提升工程质量与安全管理水平, 降低施工成本, 为电力工程施工管理的信息化转型提供理论与实践参考。

关键词 电力工程; 施工管理; 信息化技术

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.012

0 引言

电力工程作为国家基础设施建设的重要组成部分, 其施工管理水平与工程质量、进度以及效益有着直接联系。随着电力工程项目日益复杂, 传统施工管理模式呈现出信息传递滞后、资源调配不合理等一系列问题, 已无法满足电力工程项目建设需求。信息化技术为电力工程施工管理供给了全新的解决途径, 将信息化技术融入施工管理的各个环节, 能够实现数据的实时采集、高效传输以及深度分析的目标, 有效提升施工管理的精细化与智能化水平, 进而增强电力工程建设整体竞争力。因此, 深入开展针对信息化技术在电力工程施工管理中的应用及效果的研究具有重要的现实意义。

1 电力工程施工管理中信息化技术应用的重要性

1.1 打破信息壁垒, 促进高效协同

电力工程施工涉及众多参与方, 其中涵盖设计单位、施工单位、监理单位以及设备供应商等, 各方之间信息交互频繁。在传统管理模式下, 信息传递主要借助纸质文件以及口头沟通的方式, 很容易出现信息失真以及延误。信息化技术的应用搭建起统一的信息共享平台, 各参与方能够实时上传以及获取项目信息。例如: 某大型电力工程运用项目管理软件搭建信息化平台, 该软件支持多终端登录, 具备文件共享、任务分配、进度跟踪等相关功能。各方可以在平台之上实时更新施工图纸、技术规范等文件。施工单位能够及

时获取设计变更信息, 从而避免因信息滞后致使的返工现象。监理单位同样可以通过平台实时监督施工进度以及质量, 一旦发现问题可及时进行反馈, 极大地提高了各方的协同效率, 确保工程顺利推进。

1.2 精准把控施工进度, 保障工期目标

电力工程施工周期较长、环节众多, 任何一个环节出现延误都有可能对整个工程进度造成影响。运用信息化技术, 可以针对施工进度展开实时监控以及动态调整。例如: 使用 Project 软件制定详尽的施工进度计划, 设置关键路径以及里程碑节点, 并结合 GPS 定位技术与传感器设备, 实时采集施工设备以及人员的位置信息以及各施工环节的实际进度数据。当实际进度与计划进度出现偏差之时, 系统会自动发出预警, 管理人员通过对偏差原因展开分析, 及时对施工计划进行调整^[1]。

1.3 强化质量管控, 提升工程品质

质量属于电力工程的生命线。信息化技术在质量管控方面发挥着至关重要的作用。通过构建质量检测信息管理系统, 针对原材料、构配件以及施工过程中的各项质量数据进行采集与分析。系统内置质量标准数据库, 能够对采集的数据进行自动比对, 一旦发现数据出现异常, 立即发出警报。例如: 在混凝土浇筑过程中, 利用传感器实时监测混凝土的坍落度、温度等参数, 并将数据上传至质量检测信息管理系统。当坍落度或者温度超出规定范围时, 系统会提示施工人

员进行调整,有效避免因混凝土质量问题导致的结构缺陷。除此之外,系统还能够对质量数据进行统计分析,为质量改进提供相应依据,不断提升工程质量。

2 电力工程施工管理中信息化技术应用策略

2.1 搭建一体化信息化管理平台

构建具备涵盖项目全生命周期特征的一体化信息化管理平台,是实现电力工程施工管理信息化的基础。该平台须整合项目管理、财务管理、物资管理等诸多子系统,实现数据的集中式存储以及共享状态。以某电力工程公司为例,该公司自行研发出一套一体化信息化管理平台,采用 B/S 架构形式,支撑多用户同步在线操作^[2]。在项目管理子系统中,管理人员能够制定项目计划、进行任务分配,并且实时追踪项目进度;财务管理子系统实现费用报销、成本核算等功能的自动化处理;物资管理子系统针对物资采购、入库、出库等环节实施全程监控举措。凭借该平台,各部门之间的数据实现无缝对接,极大地提升了管理效率。

2.2 运用建筑信息模型(BIM)技术进行可视化协同管理

BIM 技术以三维模型作为载体,集成建筑工程的几何信息、物理信息以及功能信息,为电力工程施工管理提供可视化的协同管理平台。在电力工程设计阶段,设计人员能够运用 BIM 软件创建三维模型,针对设计方案开展可视化分析工作,预先察觉设计中存在的问题。在施工阶段,施工人员可依据 BIM 模型实施施工模拟,优化施工方案^[3]。例如:在某变电站工程内,借助 BIM 技术对设备安装过程进行模拟,预先发现设备空间布局不合理的问题,并加以调整。同时,BIM 模型还能够与进度管理系统、质量管理体系等进行集成,实现信息实时共享状态。管理人员借助 BIM 模型能够直观地知悉施工进度与质量状况,从而展开有效决策与管理工作。

2.3 借助大数据分析优化决策

伴随电力工程施工过程中数据量的持续增多,大数据分析技术的应用成为必然趋势。通过采集以及分析施工过程中的各类数据,如施工进度数据、质量检测数据、设备运行数据等,为管理决策提供支持。例如:利用大数据分析技术挖掘历史项目的施工数据,剖析不同施工工艺、设备配置对工程进度与成本的影响,为新项目施工方案的制定提供参考。同时,通过分析实时数据,能够及时察觉施工过程中的潜在风险,预先制定应对措施。如通过分析设备运行数据,预估设备故障发生的可能性,预先安排维修人员进行维护,避免因设备故障导致的停工。

2.4 引入移动终端技术实现现场实时管理

移动终端技术的发展为电力工程施工现场管理提供便捷手段。施工人员通过手机、平板电脑等移动终端设备,实时采集并上传施工现场信息,如施工照片、视频、质量检测数据等。管理人员同样可通过移动终端随时随地查看施工现场情况,进行任务分配与审批。例如:某电力工程采用一款移动施工管理 APP,施工人员在现场发现质量问题后,通过 APP 拍照上传至系统,并附上问题描述以及位置信息。管理人员收到通知后,及时处理并将结果反馈给施工人员。该 APP 还具备定位功能,可实时追踪施工人员的位置,确保施工人员按时到岗,提升现场管理效率。

3 电力工程施工管理中信息化技术应用效果分析

3.1 施工进度管控成效显著

信息化技术为电力工程施工进度管控带来了突破性的进展。以某大型火电工程为例,项目筹备阶段即引入先进的进度管理系统。此系统以网络计划技术为核心要点,借助大数据算法方式,对施工过程中各类复杂数据实施整合分析,实现对施工进度的动态以及精准监控目的。项目启动前,技术团队依托该系统,依照工程设计图纸、资源配置,制定极为详细的施工进度计划。计划过程中要清晰明确各工序的开始时间、结束时间以及相互之间的逻辑关系,从而形成条理分明的施工进度网。施工阶段,通过 GPS 定位技术以及分布在施工现场的多个高清摄像头,系统能够实时获取施工设备和人员的位置信息,以及各工序的实际进度数据。当实际进度与计划进度产生偏差时,系统即刻启动预警机制,以短信、弹窗等多种形式,向相关管理人员发送提醒。管理人员接收到预警之后,迅速借助系统的数据分析功能,深入剖析进度滞后的原因^[4]。若为资源调配问题,便及时调整施工人员、设备的投入;若为施工工艺难题,即刻组织专家团队开展研讨,对施工方案进行优化。与传统管理方式相比较,该项目的施工周期大幅缩短 15%。这不仅意味着项目交付效率呈现显著提升态势,而且极大地降低了项目的时间成本,使得企业能够更快投入新的项目建设,抢占市场先机。同时,按时交付的项目增强了企业在行业内的信誉,为后续业务拓展奠定了坚实的基础。

3.2 质量管理水平大幅提升

在电力工程领域,质量始终是项目的核心。某输电线路工程凭借信息化技术手段,构建起一套完备的质量追溯体系。针对原材料、构配件以及施工进度,开展全程的、精细化的记录工作。在原材料采购的环

节过程中,运用二维码技术方式,赋予每一批原材料以独一无二的标识。通过扫码的方法,能够获取到原材料的生产厂家具体信息、规格型号以及进货时间等一系列详细数据。这些数据会实时性地上传至质量追溯系统,形成原材料的电子档案记录。在施工进程期间,施工人员运用移动终端设备,将每一道工序的施工时间、施工人员以及质量检测数据等信息同步上传至系统。若质量方面出现问题,系统具备的强大追溯功能,能够迅速对问题根源予以定位。从原材料采购环节、运输环节、储存环节,一直到施工工序的每一个环节,均能清晰地追溯,进而及时采取有效的整改措施。除此之外,该工程还运用质量数据分析系统,针对海量的质量数据展开统计分析和系统通过绘制质量控制图,能够直观地呈现出质量波动的趋势走向。例如:在混凝土浇筑施工期间,系统针对连续多次的坍落度数据进行分析工作,如果数据出现异常波动状况,便会发出预警信息,提示管理人员及时对施工设备、原材料质量以及施工工艺进行检查,为质量改进提供科学依据。该项目的质量验收合格率达到98%以上,远超行业平均水平,证明了信息化技术在提升电力工程质量管理水平方面所具备的卓越成效。

3.3 成本控制取得良好效果

某变电站工程应用信息化技术,实现了对施工成本的有效控制。该工程所采用的成本管理系统,对预算管理、合同管理、物资管理等众多功能模块予以整合,打造一套具备完整性的成本管控体系。在项目实施之前,根据预算管理模块,考虑工程设计方案、市场价格等相关因素,开展详细项目预算的编制工作,使各项费用的支出标准得以明确。在施工进程中,合同管理模块针对合同执行状况实施实时监控,针对每一笔款项的支付严格审核,避免超付现象的发生。物资管理模块通过实时采集物资库存以及消耗数据,实现精准采购。例如:系统依据施工进度以及物资消耗速度,对物资需求进行提前预测,使库存积压以及缺货现象得以避免,降低物资管理成本^[6]。与此同时,借助大数据分析技术,对成本数据开展深度剖析。系统能够对实际成本与预算成本进行实时对比,一旦察觉到成本偏差情况,即刻发出警报,并且对偏差产生的原因予以分析。在材料价格出现波动引发成本上升的情形下,管理人员能够及时对采购策略做出调整;施工过程中若存在浪费现象引发成本增加的情况,要采取具备针对性的措施以加强管理工作。相较于传统管理方式,该项目的成本降低约10%,项目的经济效益得到有效提升,促使企业的盈利能力得以增强。

3.4 安全管理能力持续增强

某电力工程中应用信息化技术,搭建了一套全方位、多层次的安全监控系统,为施工安全提供了有力保障。在施工现场,安装了多个高清摄像头,对重点区域进行24小时不间断监控。监控画面实时传输至安全监控系统,管理人员可以通过电脑、手机等终端设备随时随地查看施工现场的安全状况。同时,在施工人员和设备上安装了传感器,实时采集人员位置、心率、体温等生理参数以及设备运行状态信息。一旦发现人员进入危险区域,或者设备出现异常运行状态,系统会立即发出警报,并通知相关人员进行处理。此外,该工程还借助安全培训管理系统,对施工人员进行线上安全培训。系统根据不同岗位的需求,制定了个性化的培训课程,涵盖安全法规、操作规程、应急处理等多个方面。通过在线视频、模拟演练等形式,提高施工人员的安全意识和技能水平。在培训结束后,系统会自动进行考核,确保施工人员掌握了必要的安全知识。该项目的安全事故发生率大幅降低,保障了施工人员的生命安全,营造了安全、稳定的施工环境,推动了项目的顺利推进。

4 结束语

信息化技术在电力工程施工管理中的应用,打破了传统管理模式的局限,显著提升了施工管理的水平。从重要性来看,信息化技术促进了信息协同、进度把控、质量管控与资源优化。在应用策略方面,通过搭建一体化平台、运用BIM技术、借助大数据分析和引入移动终端技术,为信息化管理提供了全面支撑。而在应用效果方面,施工进度、质量、成本和安全管理均取得了显著成效。未来,随着科技的不断进步,电力工程施工管理应持续深化信息化技术的应用,探索更多创新模式,推动电力工程行业的高质量发展。

参考文献:

- [1] 张友,郑荣芳.安全技术管理信息化在电力工程施工中的运用[J].科学与信息化,2024(15):81-83.
- [2] 姚缤华.信息化背景下10kV电力配网工程施工安全管理技术研究[J].模型世界,2024(34):167-169.
- [3] 陆军华.信息化技术在电力工程施工安全管理中的运用[J].科学与信息化,2024(24):187-189.
- [4] 谢雨晖.信息技术在电力工程施工安全管理中的应用[J].科学与信息化,2024(16):4-6.
- [5] 刘雅楠,王保宇,王一旭.信息化背景下10kV电力配网工程施工安全管理技术研究[J].模型世界,2024(15):103-105.

隧道软弱围岩长管棚施工技术

李万鹏

(四川省交通建设集团有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 长管棚施工技术作为一种有效的超前支护手段, 对于提高软弱围岩地段的隧道稳定性、保障施工安全具有重要意义。本文详细阐述了隧道软弱围岩长管棚施工技术的原理, 从长管棚施工准备、测量放样以及套管跟进钻孔方面解析了长管棚施工工艺流程, 并且针对长管棚施工质量控制要点开展研究, 以期提升隧道软弱围岩长管棚施工质量提供参考, 进而为隧道工程项目高效建设奠定良好的基础。

关键词 隧道工程; 软弱围岩; 长管棚施工技术

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.013

0 引言

隧道施工阶段容易遇到软弱围岩, 施工难度较高, 主要是因为围岩稳定性较差, 在这种情况下, 软弱围岩极易发生坍塌、变形, 对施工的质量、安全方面产生不利影响。隧道工程穿越软弱围岩时, 通过采用长管棚施工技术, 在施工阶段预先设置管棚支架, 对围岩采取超前支护措施, 能够有效控制围岩结构变形, 进而提高围岩结构稳定性, 使得围岩开挖作业具备较高的安全性和稳定性。因此, 深入研究隧道软弱围岩长管棚施工技术具有较高的使用价值, 对提高隧道建设的效率和安全性产生积极作用。

1 长管棚施工技术原理

长管棚施工技术采用钢管作为纵向支撑, 沿着隧道开挖轮廓线周边向开挖前方打入一排纵向钢管, 钢管之间采用钢筋或型钢组合形成整体, 确保框架结构具备较高稳定性。隧道开挖作业阶段使用长管棚和围岩共同作用能够承受围岩的压力, 使围岩压力能够均匀分散到稳定的岩体结构上, 进而防止发生开挖围岩面应力集中现象, 从而提高围岩结构的自稳定性。同时, 长管棚结构起到超前支护的作用, 预防在开挖阶段引发围岩坍塌现象, 使得隧道开挖作业阶段有良好的安全作业空间^[1]。

2 隧道软弱围岩长管棚施工工艺流程

2.1 施工准备

隧道软弱围岩长管棚施工前, 需要从技术、材料、设备、现场方面做好施工准备, 确保隧道软弱围岩长管棚工程能够稳定开展。

(1) 技术准备。对设计方案展开分析, 并且结合

实际情况选择适宜的施工工艺, 重视施工技术交底, 明确施工质量、工艺、安全、进度、注意事项。(2) 材料准备。根据长管棚施工技术要求准备施工材料, 主要为钢管、钢筋、水泥, 并对各项材料进行性能参数检测, 各项指标符合技术标准再投入工程中使用。(3) 设备准备。结合设计方案和现场施工需求, 准备合适的机械设备, 如管棚钻机、注浆泵、电焊机, 并按要求进行设备的调试与维护, 从而确保设备始终处于良好工作状态。(4) 现场准备。针对现场施工需求采取清理措施, 并搭设施工平台、放置排水设施, 创造良好的施工作业条件。

2.2 测量放样

软弱围岩长管棚施工阶段采用全站仪展开测量作业, 使得施工平面位置精度合格, 测角精度为 $\pm 1''$, 从而提高管棚支护的强度和稳定性。测量放样过程中按照技术标准, 使得放样点位与设计位置的平面偏差控制在 ± 2 cm 以内, 从而提高钻孔水平方向的精度, 防止因为偏差而影响管棚支护效果以及稳定性。而后, 选用水准仪作为测量设备检测高程参数, 测量偏差为 ± 0.7 mm/km, 使得各项数据精度达到要求, 确保管棚钻孔高程误差在 ± 1 cm 以内。管棚支护阶段落实高程控制措施, 确保管棚的垂直度以及整体结构支护效果合格。如果在测量阶段发现管棚支护高程偏差超出标准, 极易导致管棚向上倾斜, 造成围岩结构支护性能不合格。基于此, 测量阶段需要保证高程精度达到技术标准。

2.3 套管跟进钻孔

2.3.1 安装钻机

在隧道软弱围岩长管棚施工过程中, 钻机安装时套管跟进为钻孔的起始环节, 也是影响施工效果的关键

键。按照测量放线确定的位置，将钻机安装到施工部位并使用地脚螺栓连接固定，确保基础稳定性合格，螺栓紧固力矩为 400 N·m，钻进作业阶段钻机稳定。而后，采用精度较高的水平仪检测钻机水平度并进行调整，使其偏差在 ±0.5° 以内。然后使用铅垂线测量钻机垂直度，使其方向达到精准度要求。钻机安装结束后对其固定状态进行检测，各项指标合格且钻孔精度达标再开展钻进作业，进而确保套管跟进钻孔有序完成^[2]。

2.3.2 钻孔

套管跟进钻孔作业的过程中需要重视各项参数检测，使其钻进精度达到技术标准。按照钻进作业要求，套管外径为 127 mm，能够保证孔壁支撑强度合格，也能确保后续钻杆能够顺利穿越。套管壁厚设计为 8 mm，承载力达到要求，面对支撑时压力、摩擦力时套管具备完整性。钻孔作业阶段初始减慢钻进速度，设定为 0.8 m/min，缓慢将套管推入进去，使得套管平稳进入地层结构内，防止发生孔斜、卡顿的现象。套管钻进深度达到 5 m 时暂停钻进，并在内部安装钻杆与钻头。而后，将钻进速度提升到 1.5 m/min 继续进行钻进施工。钻进速度根据地层条件、设备性能参数确定，使得钻进效率达标，且防止速度过快而引发孔壁坍塌、钻杆折断的现象。钻进作业阶段通常间隔 3 m 检测一次孔斜度，使其偏斜度控制在 1% 以内，一旦超出该标准需要及时调整钻进方向。钻孔作业阶段，落实技术参数控制工作，使得钻进压力、扭矩符合技术标准。按照设计方案钻进深度达到 30 m，使得管棚支护稳定性、强度合格，进而满足隧道软弱围岩施工安全性。

2.3.3 清孔

钻孔结束后进入清孔环节，采用高压风清孔方式较为常见，将风压设定为 0.65 MPa。该压力是通过多次反复试验确定的，能够保证孔道内部岩屑、杂物清理干净，防止过度冲刷造成孔壁损坏。风管插入孔底内部，按照 0.35 m/s 速度向上提，使得高压风能够充分作用在孔内，岩屑、杂物全面清理干净，后续施工

有序开展。如果上提速度较快，极易引发岩屑残留而影响清孔效果；速度过慢造成清孔效率较低，施工工期延误。通常情况下，单个孔位清孔时间在 12 min 左右，使用高压风充分吹扫直到孔口泛出清水且没有杂物为合格标准。为判定清孔效果是否达到技术标准，在清孔阶段使用专用工具检测孔底沉渣厚度，保持在 4 cm 以下即为合格。如果检测发现沉渣厚度严重超出要求，需要及时清孔作业，直到达到标准为止。清孔结束后复核检测孔深参数，确保钻孔作业深度达到设计标准为止^[3]。

2.4 管棚安装

2.4.1 钢管加工

管棚安装前按照设计标准开展钢管加工作业，确保加工质量达到技术标准。按照设计方案选择适宜规格的钢管，通常外径为 108 mm、壁厚 6 mm，能够具备较高的强度和刚度性能，承受围岩压力不变形。而后，采用专用工具在钢管上钻出注浆孔，直径为 12 mm，采用梅花型布置方式，注浆孔间距 15 cm。上述设计方式使得注浆后浆液能够均匀分布填充在围岩结构空隙内，使得围岩结构具备较高稳定性。管棚加工阶段保证钻孔精度、质量合格，注浆孔尺寸、位置符合设计标准。

2.4.2 钢管安装

管棚施工中钢管安装为核心工序，需要先进行钻孔内部清理，确保没有杂物后再进行安装作业。钢管加工结束后采取分段方式运输到作业现场，并使用设备逐一吊装到钻孔位置，采用丝扣方式进行钢管连接，丝扣紧力矩达到 250 N·m 以提高连接牢固性、可靠性。钢管安装阶段，采用安装设备辅助进行。同时，钢管缓慢送入钻孔内，速度达到 0.5 m/min，防止送出力度过大冲击造成钢管损坏。每一节钢管安装结束后对其垂直度、位置展开检测，控制误差处于规范状态，钢管安装控制要求如表 1 所示。钢杆安装达到设计标准要求强度后即可进行钢管固定作业，避免后续施工中引发位移、变形等情况，进而提高管棚的支护强度和稳定性。

表 1 钢管安装控制要求

序号	检测项目	控制要求	允许偏差范围	检测方法
1	钢管垂直度	垂直偏差应小于等于	±1%	全站仪
2	钢管位置（横向）	横向偏差应小于等于	±50 mm	钢卷尺测量
3	钢管位置（纵向）	纵向偏差应小于等于	±100 mm	测距仪测量

2.5 注浆

2.5.1 注浆设备调试

根据场管棚施工要求选择适宜的注浆设备,确保注浆作业能够有序开展。注浆泵选择后展开调试检测,使其工作压力达到 5 MPa,确保注浆效果合格且设备不会出现损坏、性能缺失的现象。注浆阶段重视压力测试,使得注浆设备能够提供充足动力,确保浆液能够充分填充围岩空隙,使得支护结构强度和稳定性合格。而后,检测注浆管的流量参数,采用专业仪器测量,使其流量达到 80 L/min,从而提高注浆施工效率,确保浆液在管道内部均匀流动。然后对搅拌设备进行调试检测,使其速度达到 60 r/min。注浆液能够均匀混合,提高浆液的质量。设备调试阶段对运行状态展开检测,确保各连接位置具备紧密性、达到密封的效果,避免出现泄漏问题。同时,对设备各项参数进行实时监测和记录,如果存在异常情况,需要及时进行调试和排查。注浆设备各项参数检测达到标准即可开展后续注浆施工,进而保证施工效果达到标准^[4]。

2.5.2 注浆施工

长管棚施工阶段,注浆作业环节执行工艺方案,采用分段注浆方式完成作业。注浆过程中分段长度设定极为关键,通常在 3 m 左右,使得注浆效果合格且满足施工进度要求。注浆阶段需对压力控制提起足够重视,初始压力为 1~2 MPa,随着注浆作业逐步进行可适当地增加压力,但最大压力不能超过 3 MPa,防止压力过大引发围岩破裂、浆液窜浆的现象。同时,注浆过程中严格控制注浆量,每次注浆量在 0.5 m³ 左右,并且使用注浆泵精准计量。注浆量达到设计方案要求后,或者注浆压力稳定在相应范围内不再上升即可停止注浆施工,等待一段时间使浆液达到凝固状态。

2.6 管棚工作室施工

2.6.1 工作室开挖

管棚施工阶段,工作室开挖为核心环节,需要严格按照工艺方案和技术标准进行,保证后续施工作业能够有序开展。工作室开挖前按照设计方案在现场精准标注开挖作业轮廓线尺寸,通常为长 8 m、宽 6 m,符合管棚钻机以及相关设备安装要求,现场作业空间充足。工作室开挖阶段选用小型挖掘机进行,挖掘机铲斗挖掘力在 50 kN 以下,以免对周边围岩产生过大扰动影响而引发安全事故。工作室开挖作业的过程中对开挖尺寸展开全面检测,避免出现超挖、欠挖的情况。通常每次开挖 1 m 深度后,采用激光测距仪进行尺寸

的复核检测,确保开挖轮廓线偏差在 5 cm 以下。同时,开挖作业阶段及时进行开挖土石方清理,使开挖作业面达到整洁、畅通的要求。开挖作业达到规定深度后,由技术人员开展现场工作室底部平整处理,平整度偏差为 ± 2 cm 以内,为后续设备安装以及作业创造良好的条件。在现场开挖作业过程中要时刻关注围岩结构稳定性,一旦存在异常情况需要立即组织人员整改处理^[5]。

2.6.2 工作室支护

工作室支护是保证围岩结构安全性、稳定性的重要举措,需要在工作室开挖完成后及时进行支护作业。工作室支护作业施工过程中以使用喷射混凝土支护方式为主,结构厚度 15 cm,强度等级超过 C25,能够承受围岩结构产生的压力作用。混凝土喷射阶段要严格控制喷射压力,使其保持在 0.4 MPa 左右,确保混凝土喷质量和密实度合格。混凝土喷射结束后,强度检测达到技术标准即可进行锚杆安装加固作业,其长度为 3 m、间距 1.2 m,采用梅花型布置方案。锚杆加工阶段使用直径 22 mm 螺纹钢制作,抗拉强度 335 MPa 以上。采用注浆方式使锚杆和周边的岩体能够牢固连接,提高工作室的整体稳定性。支护结束后检测支护效果,一旦存在问题立即采取补强措施,使工作室满足牢固性、可靠性要求。

3 结束语

隧道软弱围岩长管棚施工技术作为超前支护技术措施,能够提高围岩结构稳定性、可靠性,进而满足隧道开挖作业的安全性、稳定性要求。长管棚施工技术在应用过程中有多方面因素影响施工作业效果和稳定性,需要根据现场实际情况,遵循设计方案落实各项控制措施,从而提高隧道软弱围岩长管棚施工水平。

参考文献:

- [1] 熊熊. 软弱围岩隧道长管棚超前支护施工技术探讨[J]. 四川建材, 2018, 44(06): 108-109.
- [2] 杨震. 隧道软弱围岩管棚超前支护施工技术[J]. 交通世界, 2020(20): 151-152.
- [3] 胡志强. 软弱围岩隧道中管棚锁脚台阶法施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2019(08): 89-92.
- [4] 马武祥, 许岩波, 肖智广, 等. 自进式管棚施工技术在软弱围岩隧道中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(09): 69-72.
- [5] 吕鑫. 长管棚施工技术在公路隧道软弱围岩中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(06): 144-146.

大跨径球形网架安装施工技术

谢 显

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要 大跨径球形网架以其独特的几何造型和良好的受力性能, 在现代空间结构领域得到广泛应用。球形网架主要由杆件、节点、支座和索网等组成, 其安装施工大致可分为制作加工、分段吊装、高空拼装、索网张拉等工序。针对不同的工程条件, 常用的安装方法有高空散装法、整体提升法和综合施工法。为确保工程质量和安全, 施工过程中必须重点把握好测量放样、节点安装、杆件制作、索网施工等关键技术。本文分析总结了大跨径球形网架安装施工技术的特点, 列举了深圳湾体育中心体育场、北京新机场航站楼两个典型的大跨径球形网架工程案例, 以期同类工程提供有益参考。

关键词 球形网架; 安装施工; 高空散装; 综合施工

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.014

0 引言

球形网架以其独特的几何造型和良好的受力性能, 在现代大跨度空间结构中得到广泛应用, 成为体育馆、会展中心、机场航站楼等标志性建筑的首选结构形式。然而, 球形网架跨度大、高宽比高、节点构造复杂, 给安装施工带来了很大挑战。施工单位必须根据球形网架的结构特点和工程条件, 合理选择安装方法, 采用先进可靠的施工技术, 严格施工组织管理, 才能保证工程的安全、质量、工期和造价等目标的实现。本文全面总结球形网架安装施工的关键技术, 为今后更多的大跨径球形网架工程提供有益参考。

1 球形网架结构特点和安装工艺流程

1.1 球形网架的结构组成

球形网架是一种由圆钢管杆件通过节点连接而成的空间网格结构(见图1)。其几何拓扑构型通常为正六面体、正四面体、正八面体等多面体的组合。球面曲率半径与跨度的比值一般为 $0.9 \sim 1.6$ 。球形网架主要由杆件、球节点、支座、索网等组成。杆件是球形网架的主要受力构件, 常采用圆钢管制作, 有的工程也采用型钢或格构式截面^[1]。相邻杆件之间通过球节点连接。球节点是网架的关键连接构造, 其节点处汇聚多根杆件, 形状复杂, 加工制作和安装施工难度大。球节点常见的构造型式有焊接球节点、铰接球节点、螺栓球节点等。支座是将球形网架与下部支承结构(通常为钢筋混凝土柱或钢柱)连接的关键部位, 常采用固定铰支座或滑动铰支座。球形网架的索网由拉索和

稳定杆组成, 设置在拱肋和环形支撑拱圈之间, 用以减小球面网架的变形。

1.2 球形网架安装工艺流程

球形网架的安装施工大致可分为制作加工、分段吊装、高空拼装、索网张拉等工序。典型的安装工艺流程如下:

1. 放样测量: 在球形网架投影面上进行控制网测量, 并用全站仪测设球心坐标和标高, 以控制安装的空间位置和形状尺寸。

2. 支座安装: 在钢筋混凝土柱或钢柱上安装固定支座, 并预埋锚栓, 调平支座标高。

3. 制作加工: 按照设计图纸及放样数据加工制作杆件和节点, 并预先在地面进行分段拼装和涂装。杆件端头需加工成特定角度, 与节点精准匹配。

4. 分段吊装: 将预拼装好的网架分段用塔吊或履带吊送至安装位置, 采用高空散装或整体提升等方法进行安装。

5. 高空拼装: 在分段吊装的基础上, 在空中边拼装边形成整个球形网架。拼装时需要随时检测网架的几何形状, 调整节点位置, 确保拼装精度。焊接或螺栓连接球节点, 并及时涂装防腐。

6. 索网张拉: 在主体网架安装并形成稳定受力体系后, 安装索网。将拉索和稳定杆连接在网架的弦杆和环形支撑拱圈上, 利用卷扬机或千斤顶张拉拉索, 使球形网架形成预应力, 减小变形。

7. 脚手架拆除: 球形网架安装就位并经检测验收合格后, 拆除施工脚手架和临时支撑, 网架转入正常使用阶段。

球形网架施工时,应加强施工测量和变形监测,控制好球心坐标、网架标高、球面曲率半径等主要几何参数,确保网架的空间形状和受力性能达到设计要求。

2 球形网架主要安装方法

球形网架常用的安装方法主要有高空散装法、整体提升法和综合施工法三种。这三种方法在不同的工程条件下各有优缺点,需要根据网架跨度、吊装设备、施工场地等因素合理选用。下面对三种方法分别介绍。

2.1 高空散装法

高空散装法是一种常用的球形网架安装方法,其基本做法是将球形网架划分为若干个扇形区,在球心下方搭设脚手架和操作平台,利用塔吊将网架杆件和节点散装至操作平台上,再在空中拼装成整个球形网架。

高空散装法的优点是:(1)设备投入相对较少,一般只需常规的塔式起重机和施工脚手架即可;(2)施工机具布置灵活,不需要大型吊装设备;(3)便于在空中就位,可实现球面网架的散装拼接,施工精度易于保证^[2]。

高空散装法的缺点是:(1)工人需要在高空长时间作业,劳动强度大,安全风险高;(2)施工周期长,受气候影响大;(3)分块多,接缝多,现场湿作业工序多;(4)脚手架搭设和拆除工程量大,费用高。

高空散装法适用于跨度和高度不是特别大的球形网架工程,如体育馆、展览馆等跨度在 100 m 以下的网架。对于超大跨度和超高空间的球形网架,如机场航站楼,则不太适合采用高空散装法。

2.2 整体提升法

整体提升法是一种先在地面拼装、再整体提升到位的安装方法。其基本做法是在地面上划分出与球形网架平面投影等大小的场地,将全部杆件和节点在地面上拼装成整个球形网架,经几何形状检测合格后,用缆风葫芦或顶升设备将整个网架从下往上提升至设计标高,再与支座连接固定。

整体提升法的优点是:(1)地面施工作业量大,高空作业量小,安全性好;(2)在地面统一加工制作,质量易控制,施工精度高;(3)现场湿作业少,施工进度快;(4)不需搭设大量脚手架,节约工期和成本。

整体提升法的缺点是:(1)需要大量的吊装设备和顶升千斤顶,设备投入大;(2)需要大面积的场地来拼装网架,受场地条件限制;(3)整体提升时,球面网架易发生变形,提升高度受限制;(4)不适合异型或不规则球面网架。

整体提升法适用于标准球面、规则形状的大跨度

球形网架,如大型煤棚、环保设施的网壳等,特别适合跨度超过 150 m、吊装高度在 50 m 以内的大型网架。

2.3 综合施工法

综合施工法是指将高空散装和整体提升等多种方法组合使用,发挥不同方法的优势,克服单一方法的局限性,实现球形网架的快速、精确、安全施工。

综合施工法的基本做法是:将球面网架在地面划分为若干个扇形块,每个扇形块再划分为内外两圈,内圈在工厂加工成整体,外圈采用散装杆件。先将内圈整体吊装就位,外圈采取高空散装的方法与内圈拼接。内圈起到定位和稳定网架的作用,从而减少外圈高空散装的工作量。如有条件,还可采用滑移、顶升等提升措施,进一步减少高空作业^[3]。

综合施工法集高空散装法和整体提升法的优点于一体:(1)内圈整体提升,定位准确,易于控制网架的几何形状;(2)外圈高空散装灵活,适应性强;(3)高空作业量大大减少,施工安全性和精度得到保证;

(4)总的现场施工工期大大缩短。

综合施工法适用于大跨度、异型、复杂球形网架工程。当球面网架跨度很大或高宽比很高时,内圈可占较大的比重,从而发挥整体提升的优势。当球面不规则或局部有变形时,外圈可根据实际情况灵活调整杆件长度和角度,从而保证整个球面的平顺和精度要求。综合施工法已成为目前大跨度球形网架安装的主流方法和发展趋势。

3 球形网架安装施工的关键技术

球形网架安装施工虽然采取不同的施工方法,但都需要在测量放样、节点安装、杆件制作、索网施工等环节采用相应的关键技术,这些关键技术是保证球形网架安装质量、精度和安全的基础。

3.1 测量放样技术

球形网架的测量放样是施工的第一步,也是保证安装精度的关键。具体做法是:先利用高精度全站仪建立覆盖整个工程的三维控制网,并通过高程控制点和球心坐标来控制整个球面的空间位置,再在地面和高空布设一系列控制点,并利用全站仪和测量软件测设出每个杆件和节点的理论坐标^[4]。施工放样时采用极坐标法,以球心为原点,根据球心坐标、杆件长度、仰角等参数,配合经纬仪逐点放样出杆件两端点的球面坐标。其中球径、拱高等主要控制尺寸的放样偏差应控制在 ± 3 mm 以内,而杆件长度等一般尺寸的放样偏差应不超过球面跨度的 $1/2\ 000$ 。

3.2 节点安装及调整技术

球节点是联结各根杆件的关键构件,其几何定位和受力传递直接影响整个球形网架的性能。常见的节点形式有焊接球节点、铰接球节点和螺栓球节点。其中焊接球的整体刚度最大,但现场湿作业工序较多;铰接球便于装配且可调性好,但定位精度要求很高;螺栓球安装更为简便,可大幅节省现场工期,但其应力传递机理相对复杂。无论采用何种形式,在节点安装就位后,都必须用经纬仪复测其实际空间坐标,并与理论坐标比对,如有超限应及时调整,直至节点偏位满足要求。一般焊接球的空间偏位控制在 5 mm 以内,铰接球和螺栓球控制在 3 mm 以内。同时要严格检查螺栓预紧力矩和焊缝质量,确保节点能可靠稳定地发挥作用。

3.3 杆件制作及安装技术

杆件作为球形网架的主要受力构件,一般情况下采用 $\Phi 140 \sim \Phi 377$ 的圆钢管,钢种常为 Q345B,其屈服强度不低于 345 MPa。加工时要对杆件端头进行切割,使其形成特定的空间角度,以精准匹配节点。现场安装时主要采用对接焊或法兰盘连接的方式进行拼装。其中焊接等级不得低于二级焊缝,且焊缝表面应平整美观,不得出现裂纹、夹渣、未焊透等缺陷。杆件安装时,应严格控制各项几何参数:端部偏位不超过 3 mm,轴向偏差不得超过杆长的 1%,相邻杆件高差不超过 5 mm。此外,杆件的涂装防腐也要符合要求,一般应达到国标 GB/T23331 中规定的 II 类面漆层的防护等级。

3.4 索网体系施工技术

拉索一般采用 $\Phi 15.24 \sim \Phi 60.64$ 的高强钢丝绳,端部设置调节器,与球节点相连;稳定杆则通常采用 $\Phi 76 \sim \Phi 114$ 的钢管制作。在索网安装就位后,要进行预应力张拉,使其产生一定的初应力,从而达到减小变形、保持球面型态的目的。张拉施工分为初拉和精拉两个阶段,先用 1 000 kN 以上的卷扬设备进行初步拉紧,再用 300 kN 左右的张拉千斤顶精拉至设计索力^[5]。张拉时应严格分级施加,每级不超过设计索力的 1/3,相邻两级的间隔时间不少于 2 小时,以使索网内力能充分调整。同时采用测力计对索力进行实时监控,确保各拉索实际预应力与理论值的偏差不得超过 5%。

4 典型球形网架工程实例

4.1 深圳某体育中心体育场

深圳某体育中心体育场的球形网架屋盖跨度达到 211 m,是国内跨度最大的单层钢管网架结构。该工程采用整体提升与高空分块散装相结合的综合施工方案。首先利用综合电动提升系统,将 1.2 万吨重的下弦球

面网架整体提升至 44 m 高空就位,提升过程通过激光导航实时监控,并用 180 台大吨位同步千斤顶进行平衡调节,确保了球架提升的平稳和准确。随后采用高空散装的方法,将上弦网架分块吊装与拼接,并通过周边环梁与下弦网架可靠连接,最终形成完整的上下双层球形网架体系,为实现跨越性的空间结构设计提供了成功范例。

4.2 北京某机场航站楼

北京某机场航站楼采用直径 380 m 的特大型钢管桁架球形网架结构,用钢量高达 4.2 万吨,堪称目前世界最大的机场航站楼屋盖。施工时先将下弦球面网架分为 4 个扇区在地面预拼装,再通过专用轨道运送至基准面进行高精度拼接。提升过程创新性地采用倒链提升和穿心千斤顶提升相结合的方法,经过近 100 次循环,历时 3 个月完成,创造了巨型钢结构屋盖整体提升的新纪录。上弦网架采用分片散装与整体提升相结合,划分为 8 个大区、40 余个提升分段,在近 80 m 高空实现了与下弦球架的半刚性螺栓连接。整个球形网架的现场拼装焊缝总长超过 120 km,工程规模和施工难度均创下新高。

5 结束语

大跨径球形网架是集几何、力学、材料、制造、施工等多学科高技术于一体的复杂工程体系。其安装施工涉及测量放样、节点连接、杆件制配、索网张拉等多个专业环节,需要根据球面曲率、网格密度、支撑条件、场地限制等不同情况,灵活运用高空散装法、整体提升法、综合施工法等多种手段组合,才能达到安全、精确、高效、经济的施工目标。深圳湾体育中心、北京新机场等一大批精品工程的成功实践,积累了宝贵的经验,提高了我国大跨径球形网架设计施工水平,将推动空间结构技术的创新发展。

参考文献:

- [1] 石阳.大跨度空间球形网架斜面弧形吊顶安装技术[J].建筑机械化,2024,45(04):100-102.
- [2] 李鹏飞.大跨径球形网架安装施工技术[J].安装,2023(12):26-28.
- [3] 陈延明.浅析球形网架安装[J].建材与装饰,2020(12):207-208.
- [4] 金亮亮.大跨度球型网架结构高空拼装施工及吊装技术[J].绿色环保建材,2019(11):136,139.
- [5] 金伟东.曲面球形网架施工工艺及技术分析[J].建材与装饰,2019(23):18-19.

高速公路波形板防护栏施工技术

范召辉, 屈 辉*

(四川路桥交通工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 波形钢护栏作为重要交通安全设施, 其施工质量直接影响道路安全性。本文系统阐述了波形钢护栏施工技术要点, 包括施工现场勘察准备、基础坑槽开挖、立柱定位与固定等核心工序的操作规范; 分析了施工过程中的安全防护措施, 如临时交通管制、施工人员安全装备配置等关键环节; 明确了质量验收标准, 涵盖立柱垂直度、护栏板拼接精度等质量控制指标, 以期为提升波形钢护栏施工质量提供技术参考。

关键词 高速公路; 波形板防护栏; 施工现场勘察; 基础坑槽开挖处理; 波形板安装

中图分类号: U417

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.015

0 引言

高速公路是国家交通网络的重要组成部分, 其安全性有助于保障人民生命财产安全。波形钢护栏是目前广泛应用于高速公路的一种交通安全设施, 其结构简单、施工便捷、成本适中且防护性能优越, 成为交通设施中常用的安全设备。因此, 了解波形钢护栏施工技术及其流程, 有助于提升施工效率, 确保施工质量。

1 工程概况

在某高速公路波形护栏加固工程中, 工程总长度为 12.65 km, 选用 A 级波形钢护栏, 护栏间隔设定为 4.8 m, 端段距离控制在 3.2 m, 桥头位置设专门加固段。该项目涵盖多个交叉口及隧道段, 涉及的结构加固要求较高, 施工过程需符合相关的技术标准及设计要求。

2 波形钢护栏施工技术

2.1 技术原理

波形钢护栏技术原理主要基于其优越的抗冲击性与对车辆的有效阻隔能力。波形钢板的独特设计, 能使护栏在受到外力撞击时分散撞击力并有效吸收能量, 避免车辆冲出路面或发生更严重事故^[1]。波形钢板整合材料的弹性与刚性, 能保证结构的稳定性及与地面的适应性。波形护栏的支撑立柱一般由高强度钢材制成, 能够承受较大侧向压力, 在高速公路的复杂环境中保持长期稳定。整体结构设计遵循力学原理与安全标准, 具备较高抗冲击性能, 还能在长期使用中保持其功能性, 保障高速公路的安全性。

2.2 技术流程

根据项目设计要求, 相关人员勘察测量现场, 明确施工区域内的地质条件、交通状况及环境因素。勘

察完成后, 依据设计图纸与勘察结果, 制定详细施工方案, 采购材料。在施工过程中, 根据地质类型及设计深度精准开挖基础坑槽, 并安装立柱^[2]。随后, 立柱安装稳固后, 安装波形钢板, 钢板连接点必须紧固, 以防松动。施工结束后, 验收全线质量, 确保护栏符合设计要求, 并通过相关安全测试。

2.3 技术特点

波形钢护栏技术特点主要体现在其结构设计、安装便捷性及耐久性上。波形钢板设计具有较强抗冲击性, 其波纹形状可以有效分散高速行驶车辆的撞击力, 避免车辆直接冲出路面。波形护栏的立柱采用高强度钢材, 显著增强结构的抗侧向压力能力, 在受到外力作用时, 立柱能快速恢复至原状, 保证长时间稳定性^[3]。该护栏施工工艺简便, 安装过程不需要复杂的设备技术, 且波形钢板采用标准化设计, 制造、运输以及安装周期较短, 施工成本相对较低。护栏表面一般经过防腐处理, 具备较强的抗氧化性, 能够有效抵抗各种气候条件侵蚀, 延长使用寿命。

3 高速公路波形钢护栏施工技术应用

3.1 施工现场勘察准备

勘察前勘察人员需要收集相关设计资料, 充分理解项目地理环境、交通流量及道路结构等基础信息, 重点分析地质条件、路基稳定性以及现有设施。针对本项目, 勘察人员测量公路的路线走向, 全面评估不同路段的坡度、土壤结构以及水文条件, 以便在后期施工中选择合适的安装方式。对于本项目工程特点, 勘察阶段还需细致检查沿线桥梁、隧道与特殊地段基础情况, 分析其对护栏安装的影响。工程涉及桥头及

*本文通信作者, E-mail: 3173225@qq.com。

隧道段部位,需关注土壤的抗压强度与承载力,保证护栏支撑基础能满足长久稳定性要求,并细致调查公路两侧的道路路缘、交通标线,确保施工过程中不破坏现有设施。除此之外,勘察人员还要全面分析施工场地的周边环境,了解交通密度大的路段,有效保障交通流畅与工地安全,且在道路两侧明确标记出电力设施、通信线路等可能影响施工的障碍物,评估其对安装波形钢护栏的潜在影响。

在高风险路段,勘察报告还需给出详细的施工方案建议,使施工进度不受外界因素干扰。在实际勘察过程中,技术人员使用精密的全站仪、GPS定位系统及水准仪等专业工具,测量、记录所有数据,获取具备高度准确性的数据。勘察护栏安装位置时,勘探人员要严格测量地面标高,要求护栏垂直性及标准间隔符合设计要求。为避免后期发生设计不符合实际的情况,勘察中要明确道路横断面及纵断面变化,依据道路的整体布局意图设计钢护栏铺设方案。另外,相关人员必须提前评估施工队伍的安全防护需求,详细记录路段内的车流量、事故频发地点及其他可能影响施工安全的因素,以便在施工阶段提前采取必要的交通管制措施,且考虑施工过程中可能出现的突发情况,预设应急预案。现场勘察还涉及选址、布置临时施工设施,合理安置工人住宿、材料存放以及机械设备,并根据施工区域特点,规划施工路线,最大限度地减少施工时交通管控对通行的影响。

3.2 基础坑槽开挖处理

在施工过程中,施工人员必须严格按照设计图纸要求开挖基础坑槽,保证坑槽深度、宽度及形状符合技术规范。对于本工程而言,基础坑槽尺寸一般依照护栏立柱规格设计,每个坑槽的标准深度多为0.8 m至1.2 m,宽度保持0.6 m左右,具体数值依据土质类型与施工环境适当调整^[4]。根据地质勘察结果,施工人员针对土质较软的区域,相应增大坑槽的尺寸,以增强基础稳定性,避免地基不均匀沉降导致护栏倾斜。开挖过程中,技术人员选用符合要求的挖掘机、铲车等机械设备,保证作业效率。软土地区,施工人员采取分层开挖的方式挖掘坑槽,每次开挖深度不超过0.5 m,防止坑槽侧壁坍塌。为防止水土流失或地下水影响坑槽稳定性,在降水量较大的区域,预设临时排水系统避免坑槽内积水。坑槽开挖完成后,施工人员精细处理坑底,在松散土层部分先行夯实,必要时加入石灰进行固化处理,提高地基承载力。若遇到地下水位较高的区域,则应用排水措施,防止水分渗透,影响基础质量,并清除坑槽内的杂物、松土及杂草,避免

影响后续浇筑水泥基础。存在交通压力的特殊地段,技术人员还要依据工程要求使用钢筋混凝土等加强型材料加固坑槽,增加基础坑槽稳定性,以满足长期承载需求。除此之外,在坑槽开挖过程中,管理人员要进行现场监测,保证每个位置的标高与间距符合设计图纸,防止因位置偏差导致护栏安装不规范而影响整体美观。

3.3 立柱定位以及固定

立柱决定了护栏整体结构的稳定性与使用寿命,必须严格依照设计图纸安装。为确保定位精准性,在施工过程中,技术人员需要采用全站仪、水平仪等精密测量工具标定位置,并根据项目设计要求,每根立柱间距为4.8 m,均匀分布沿线立柱位置。同时,依据已完成的基础坑槽开挖情况精准对接立柱安装位置,立柱底部埋设深度在0.8 m至1.2 m之间,依照地质条件不同,可能存在细微调整。立柱安装时施工人员要特别注意立柱垂直度,应用垂直仪或水准仪反复校正,保证立柱完全垂直,避免安装误差导致护栏倾斜。针对坡度较大的特殊路段,技术人员要结合道路横断面优化调整立柱定位,合理安排立柱位置,最大限度地减少干扰车辆行驶的程度。波形钢护栏施工技术中一般使用预埋法固定立柱,即将立柱底部放入基础坑槽内,应用混凝土加固。

在本项目中,混凝土强度等级要求不低于C25,混凝土浇筑时,施工人员要严格控制浇筑的时间与温度,避免温差过大导致基础开裂,且防止产生空隙、气泡,利用振捣设备提高混凝土密实性,使其达到足够抗压强度。为保证立柱能够长期使用,初期固化阶段,技术人员需采取覆盖保护措施,避免外界环境干扰,促使混凝土在理想环境下充分硬化,并在混凝土中加入一定比例的钢筋,进一步增加立柱抗拉强度,钢筋布置需满足设计要求,在强烈冲击力下不会发生位移。在固定过程中,施工人员还应依照实际情况检查立柱水平与垂直度,反复确认每根立柱的安装质量,试验检查立柱稳固性,避免混凝土直接接触钢材,减少腐蚀可能性,延长护栏使用寿命。

3.4 波形板安装的步骤

安装波形板之前,施工人员要严格检查立柱的稳固性与位置,明晰每根立柱的安装符合设计标准,防止发生错位情况。在本项目中,波形板标准长度为4.8 m,板面与板面之间的连接需无松动现象,避免安装不当导致的板面脱落。安装波形板一般从一端开始,按照既定顺序逐段进行,在安装过程中,施工人员需使用高强度螺栓连接波形板与立柱,双螺母加固每个连接

点,以提高连接的牢固性。紧固螺栓时,技术人员要确保扭矩符合施工标准,避免过度拧紧导致板面变形,且检查板面是否平整无损,涂层完整无缺,防止表面破损引起腐蚀。针对弯道、坡道等特殊路段,施工人员要精细调整波形板安装角度与位置,在交通流量较高的区域,加固波形板与立柱的连接,减少外力作用的板面偏移现象。为保障整体效果,每安装一段波形板,相关人员就要现场检查一段波形板的水平垂直度,特别要注意查看两段波形板交接处连接缝隙的均匀严密程度,不得出现缝隙过大或重叠现象,以最大化护栏的防护效果。在波形板安装过程中,施工队伍还需定期检查工具及设备完好性,防止工具故障导致施工进度滞后。除此之外,技术人员还要关注波形板接缝处理,在接缝处涂抹密封胶提升波形板防腐性能,增强防水防尘功能,延长护栏的使用寿命。整个波形板安装过程应保持高标准的质量控制,使最终安装的护栏满足交通安全需求,具备较长的使用周期,减少后期维护的频次。

3.5 现场安全防护措施

由于高速公路波形钢护栏施工环境通常涉及高速车流以及复杂地理条件,安全管理必须覆盖所有施工环节。首先,施工区域周围必须设置高标准安全警示标志,封闭或交通疏导所有进入施工区域的道路,在施工区域前后至少 500 m 设立明显的减速标志及警告标志,保证过往车辆提前得知施工区域采取适当的减速避让措施^[5]。施工路段周围设立临时护栏,避免施工设备或材料意外掉落影响行驶中的车辆,并使用交通信号灯及设置交通指挥人员,有效分流过路车流,减少交通拥堵。施工现场的所有人员都必须佩戴符合安全标准的个人防护设备,除常规的安全帽、反光衣、钢头靴外,特种作业人员配备符合标准的相关防护设备。相关人员定期检查、维护施工设备,特别是机械设备的稳定性与电气系统安全性,保证设备在作业过程中不发生故障。同时,施工区域内的电力设施、照明设备等需符合国家电气安全标准,防止电线裸露、短路等事故。安装立柱及波形钢护栏板过程中,施工人员需明确每个作业区域具备良好通行条件,避免组织施工过程中发生拥挤冲突,并提前划定施工期间的危险区域,在周围设置明显警示标志,防止无关人员误入危险区域。夜间施工时,管理人员需增加足够的照明设施,使施工人员能清晰地看到周围环境,其他交通人员也能及时发现施工区域。在高速公路旁施工时,施工人员还要保持合理的机械操作距离,防止设备与行驶车辆发生冲突。所有施工人员在作业过程中也应定期进行安全教育培训,掌握应急预案相关知识,能及时应对突发情况。

3.6 质量验收检查标准

波形钢护栏质量验收标准涵盖立柱安装、波形板固定、焊接与连接点质量以及整体结构稳定性等多个方面。检查第一步是严格审查施工材料,确保所有使用的钢材、波形板及连接件符合国家标准及设计要求,材料的抗腐蚀性和强度等级应满足施工设计中对于耐久性的要求。验收人员还要检查每根立柱的垂直度,垂直度误差不能超过 2 mm/m,保证立柱在所有安装位置上均能达到设计要求,立柱固定深度应符合规范,通常埋入深度为 0.8 m 至 1.2 m,具体根据地质条件有所调整。同时,波形板需确保每块板面平整,连接紧密,不得有松动现象,且波形板与立柱间的连接点无任何裂缝或缺陷,所有螺栓的紧固力达到设计标准,波形板间距误差不超过设计间距 ± 2 mm。验收人员还需检验所有焊接点是否满足相应的焊接标准,焊缝外观不得有裂纹、气孔或未焊透现象,使用超声波或 X 射线检测每个焊接点,保证其内外质量达到规定标准。对于波形钢护栏接头,相关人员还要测试拉力,确保其承受荷载时不会发生断裂。在检测完成所有主要施工环节后,相关人员还应测试整体结构稳定性,模拟不同条件下的荷载情况,护栏需有效抵抗车辆失控或其他外力冲击,且波形钢护栏的整体布局、结构及紧固件质量需符合国家相关标准。

4 结束语

高速公路波形钢护栏施工技术是现代公路建设中的重要组成部分,其应用能有效保障行车安全,延长道路使用寿命。高速公路波形钢护栏安装不只是单一技术作业,更是一项系统性的工程,涵盖从现场勘察到施工完成后的各个环节,体现工程技术人员的专业能力与精益求精的工匠精神。在今后的道路建设工作中,相关人员需继续研究并创新施工技术,不断提高施工效率,为道路交通安全提供更加坚实的保障。

参考文献:

- [1] 赵强.高速公路波形梁护栏施工技术研究[J].交通世界,2024(33):69-71.
- [2] 黄威.高速公路波形梁钢护栏施工技术要点[J].交通世界,2024(27):47-49.
- [3] 陈海军.高速公路波形梁钢护栏施工技术研究[J].交通世界,2024(14):51-53.
- [4] 徐鸿伟,马亚东.高速公路波形板防护栏施工技术研究[J].工程质量,2024,42(05):91-94.
- [5] 包耀祖.高速公路波形梁钢护栏施工技术探讨[J].建材发展导向,2023,21(20):186-189.

公路桥梁工程中预制 T 形梁施工技术

王金辉

(凉山州交通运输应急指挥中心, 四川 西昌 615000)

摘 要 随着我国道路运输行业的快速发展, 公路桥梁的建设需求不断增加, 如何提高桥梁建设的质量与效率成为公路桥梁工程建设中面临的重要挑战。预制 T 形梁作为一种新型的桥梁结构形式, 凭借其优异的力学性能和施工便捷性, 在公路桥梁工程中得到了广泛应用。本文对公路桥梁工程中预制 T 形梁施工技术进行深入探究, 分析其设计与制造工艺、运输与吊装技术, 以及实际工程中的应用实例和经验教训, 以为今后的桥梁建设提供理论支持和实践指导。

关键词 公路桥梁工程; 预制 T 形梁; T 梁台座施工; 钢筋加工安装施工; 安装预应力管道施工

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.016

0 引言

预制 T 形梁不仅能有效加快施工进度, 减少现场混凝土浇筑的工序, 还能提高桥梁的整体质量与耐久性。相比传统桥梁结构, 预制 T 形梁的标准化生产使得其在工期和成本控制上具有显著优势。同时, 借助现代化的生产工艺, 预制构件的强度和一致性得到了保障, 进一步提升了桥梁的安全性和使用寿命。在实际的桥梁建设过程中, 预制 T 形梁的施工技术涉及多个环节, 包括设计、制造、运输、吊装及现场安装等, 每个环节都对工程的整体成功具有重要影响。

1 公路桥梁工程概况

某项目是关键的交通网络建设工程, 全长 16.07 km, 设计为双向六车道, 限速 100 km/h, 整体式路基宽 33.5 m, 桥涵等级为公路 -I 级, 旨在提升区域交通安全和效率。项目沿线设施丰富, 包括 25 座大桥以应对复杂地形, 确保稳固与美观; 6 座天桥保障行人安全, 减少交通干扰; 45 道涵洞维护生态平衡, 避免路基积水受损。同时, 设有 2 处交通枢纽实现快速交通流转换, 1 处互通将高速与地方道路连接, 提高服务能力。施工预计使用混凝土 55.4 万 m^3 和钢筋 5.59 万吨, 团队建立了严格的材料管理体系, 从采购到质量检验, 确保材料达标。预制 T 形梁是项目重点, 共 2 366 处, 分为 20 m、30 m、40 m 三种规格^[1]。

2 公路桥梁工程中预制 T 形梁施工技术

2.1 T 梁台座施工

T 梁台座施工前, 需先清理施工区域杂物、浮土, 用大吨位压路机碾压地面, 安排专人监测地基压实度与沉降量。台座基础采用 C30 钢筋混凝土扩展基础, 钢筋

绑扎、模板安装严格按设计执行, 浇筑时结合插入式和附着式振捣器, 留置试块检测强度。在模板方面, 底模用 7 mm 厚优质钢板并检测平整度, 侧模镶嵌小钢槽, 拼接处设橡胶管防漏浆。为保障台座牢固, 两侧对称设置间距 0.5 m 的高强度地锚环。考虑梁体张拉上拱, 经精确计算在底模设置反拱度, 确保桥面铺装平整度。

2.2 钢筋加工安装施工

T 梁钢筋加工与安装时, 先用数控调直机调直盘圆钢筋, 控制速度并抽样检查外观。调直后, 用高精度切断机按设计长度切断钢筋, 每次作业前检查刀具、定位装置, 抽样测长。接着, 依据设计要求用弯曲机弯曲钢筋, 复杂形状需制作专门模具, 每根都用角度尺和半径样板检查。绑扎时, 先在工作台画出肋板钢筋位置线, 用八字扣绑扎; 侧模板支好后, 在模板上弹线控制梁板顶面钢筋位置, 借助线绳、靠尺、铅锤操作, 并用卡尺测间距。焊接时严格控制电流、电压、时间, 单面焊缝 ≥ 10 d, 双面焊缝 ≥ 5 d, 完成后进行外观检查和拉伸试验。按 0.6 ~ 0.8 m 间距布设高强度、耐久性好的保护层垫块, 双丝绑扎固定。绑扎完成后, 将绑丝调整向结构内部, 精确测量梁端外露钢筋长度, 确保梁体安装顺利。

2.3 安装预应力管道施工

预应力管道的安装质量对预应力混凝土 T 梁的性能与安全至关重要。采用波纹管作为主要施工材料, 因其柔韧性和抗渗性。安装流程如下: 首先, 在箍筋处焊接钢筋托架以防止波纹管位移, 托架设计需考虑管径和长度, 合理设置间距并确保焊接质量。其次, 波纹管接头处须使用直径大一号的波纹管连接, 接头长度为管径的 5 倍, 确保插入深度适当并用胶带紧密

缠绕,以防漏浆。安装完成后,需检查波纹管,确保管壁无死弯并符合设计的弯曲半径,以避免阻碍钢束穿入。在最低点设置排水孔、最高点设置排气孔,孔径应 $\geq 20\text{ mm}$,以排出积水与空气,提升压浆密实度。此外,波纹管内部需放置直径比波纹管小 5 mm 的硬质衬管,以增强抗压能力,并密封衬管端部防止杂物进入。

2.4 模板工程施工

模板工程对 T 梁的尺寸精度、外观及结构稳定性至关重要,整体式钢模板作为侧模可以保障成型质量。在肋板钢筋绑扎完成后,使用龙门天车支设侧模,提高拼装效率。为防止拼接缝漏浆,需在缝处设置密封海绵条,确保其连续、平整。侧模拼装后,利用全站仪和水准仪调整模板位置及标高,调试后采用 $\phi 18\text{ mm}$ 对拉螺栓和木内撑加固,以抵消侧压力并增强模板刚度。钢筋绑扎前,应使用高压水枪清理底模板,并在密封前再次检查。接下来,在模板内侧均匀涂抹脱模剂并设置警示标识保护模板。同时,在底模端部放置 $30\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 5\text{ mm}$ 橡胶垫以缓冲冲击力,伸出模板的钢筋处套上橡胶皮套,翼缘板处设置止浆带,台座边缘放置密封橡胶条,确保混凝土不渗漏^[2]。

2.5 浇筑 T 梁混凝土施工

T 梁混凝土施工质量直接影响桥梁的安全和耐久性,因此必须注重浇筑、振捣和后处理等环节。在施工过程中,需确保一次性浇筑,以避免施工缝的产生。使用龙门天车吊运料斗,实现均匀浇筑,防止缺陷。混凝土坍落度控制在 $18\sim 22\text{ cm}$,车辆到场后用坍落度筒检测,卸料时间应在 20 分钟内完成,以防坍落度损失。浇筑时,应同步制作试块,数量、尺寸及养护条件需达标,通过抗压试验确定张拉时间,避免过早张拉导致受损。混凝土应从一端向另一端推进,分层浇筑,调整施工进度,以防两层结合不紧密。在振捣作业中,应选择合适的设备,并使用插入式振捣棒和附着式振捣器,确保均匀振捣。浇筑后,应进行二次收浆抹面处理,使用定型拉毛器按每米 10 道、深度 1 cm 进行拉毛,提高摩擦力。待混凝土强度达到 2.5 MPa 后方可拆除模板。拆模后,给裸露钢筋涂刷水泥浆以防锈蚀。最后,搭建养生棚,配备智能温湿度监测设备,保障混凝土充分水化。

2.6 穿束钢绞线施工

穿束钢绞线是预应力混凝土结构施工的关键,其质量直接影响预应力的施加效果。首先,需将预留孔道长度与设计要求的长度相加,用砂轮切割机切割,确保切口平整。切割后,将整齐的钢绞线放于专用托盘上,每隔 1.0 m 用铁丝绑扎。为了提高穿束效率,用胶带

包裹钢绞线的穿入端,按设计将 7 根钢绞线捆扎成束。在穿束前,检查孔道无杂物,若有堵塞需及时疏通。借助机械牵引设备进行穿束时,需匀速缓慢,专人监控外露长度,确保符合设计要求^[3]。

2.7 T 梁智能张拉施工

T 梁的智能张拉施工利用智能张拉系统提高张拉精准度,确保结构安全。施工前需标定设备,监测混凝土强度,确保养护超过 7 天且达到设计值的 85%。连接智能张拉设备时检查线路稳固性,设定相关参数(见表 1),接通电源并清零千斤顶位移参数。在张拉过程中,施工人员需站在 T 梁侧面以降低风险,实时观察锚具变形和钢束滑丝,发现异常即停工。智能张拉系统控制千斤顶进油与回油,实时采集数据并动态调整张拉。张拉完成后,系统自动生成数据表,施工人员需分析数据,确认符合设计要求,静置 2 小时后用专用工具打磨多余钢束,并用水泥净浆封堵锚头,为后续孔道压浆施工做好准备。

表 1 预制 T 梁智能张拉施工参数表

序号	智能张拉指标	张拉参数
1	位移测量精度/mm	0.1
2	测力系统精度/%F.S	1
3	施工温度要求/ $^{\circ}\text{C}$	$-10\sim 60$
4	双顶同步延伸误差/mm	≤ 5
5	无线传输距离/m	150

2.8 孔道压浆施工

预应力 T 梁孔道压浆施工首先是使用高压水枪对孔道进行彻底清洗,确保内部杂物、污垢等被完全去除。在清洗完成后,应通过自然风干或使用风干设备将孔道充分干燥,确保孔道内部没有潮湿的残留,以避免湿气影响水泥浆的性质和结合效果。接下来,需对压浆与真空设备进行全面检查与调试,确保所有仪器正常运作。在孔道的封锚处理过程中,需使用 M50 强度的水泥浆,按照实验室提供的配合比进行准确配料,确保混合物的强度和稳定性。混合时,采用强制式搅拌机进行充分搅拌,以确保水泥浆均匀无颗粒,搅拌后需使用专用工具将水泥浆均匀涂抹在孔道的端部,并进行压实和抹光,确保密封性,防止压浆时材料的溢出和漏浆。在搭建真空系统时,确保所有管道连接牢固,关闭球阀后启动真空泵,以将孔道内的压力维持在 $-0.075\sim 0.08\text{ MPa}$ 之间,并持续 1 分钟,以确保空气完全被抽出,形成稳定的负压环境。在这一负压环境下,缓慢打开球阀,压入水泥浆,需用稠度仪实时监测稠度,以控制在 $14\sim 18\text{ s}$ 之间。当压入的

水泥浆在出浆端无气泡且稠度与压浆前一致时,便可关闭出浆端的球阀。如果在施工过程中发现水泥浆泌水现象,则须保持稳定的压浆压力,直至泌水现象消失,确保水泥浆的质量和密实度^[4]。

2.9 封端模板施工

封端模板需选用强度高、刚度大、平整的定型钢模板,并依据设计绑扎端部钢筋网,严格控制钢筋间距、数量和锚固长度,形成稳定骨架。固定模板时,使用螺栓和支撑体系确保拼接紧密,避免漏浆,通过全站仪或钢尺测量T梁两端长度与设计值比对,及时调整超偏差部分。在混凝土浇筑过程中,需采用与T梁标号一致的C50混凝土,严格控制原材料配合比,分层浇筑,重点振捣棱角部位,确保表面无气泡和泛浆。封端后,覆盖塑料薄膜和麻袋进行养护,并定期洒水,同时在T梁侧面或端部标记生产日期和报告信息以便追溯管理。养护期间,制作试块进行抗压强度试验;待强度达到标准后,利用运梁平板车将T梁运输至存梁场,规划行驶路线以避免颠簸碰撞。

3 公路桥梁工程中预制T形梁施工技术现状及应对措施

3.1 T梁混凝土结构有气泡

在T梁施工中,马蹄结构的拐角处常因振捣不严格而产生气泡,这会降低混凝土的密实度,削弱其承载能力和耐久性。要解决这一问题,可采取以下三项技术措施:首先,合理调整混凝土的配合比和外加剂的用量,精确计算水泥和骨料的比例,适量添加减水剂以提高流动性,同时使用引气剂改善气泡分布,减少气泡积聚。其次,严格控制马蹄位置的振捣工序,施工中使用插入式振捣棒应采取“快插慢拔”的方法,确保混凝土表面无气泡且泛浆平整,避免因振捣不足或过度振捣引起离析。最后,在钢筋密集区联合使用插入式振捣棒与附着式振捣器,后者可通过振动模板促使混凝土在钢筋间流动并排气,前者则直接振捣混凝土内部。合理安排振捣器的位置与时间,灵活调整参数,可以有效提高振捣效果,确保混凝土密实度和强度。

3.2 滑丝、断丝问题

在预制T梁预应力施工中,滑丝和断丝问题较为常见,危害较大。滑丝指预应力筋在锚夹具中滑动,无法有效建立预应力;断丝即预应力钢丝在张拉或后续使用时断裂。这两类问题会削弱T梁结构性能,威胁桥梁安全。焊接施工不规范、钢丝直径与锚夹具不匹配、材料质量把控不严,是导致滑丝和断丝的主要原因。焊接电流不当会降低钢丝强度,焊缝不合理会造成应力集中;钢丝直径过大,会使预应力施加不均。

针对滑丝和断丝问题,可采取相应解决措施。当数量未超规范值时,可通过超张拉补足应力,同时控制张拉应力与伸长量。若超出规范,需对滑丝钢绞线用千斤顶张拉,更换夹片后重新张拉锚固。针对断丝,施工单位应提前备好备用钢丝束,施工前检验质量。发生断丝后,及时拆除并更换,按规定张拉,做好数据记录分析^[5]。

3.3 T梁混凝土漏浆

T梁混凝土漏浆不仅削弱了T梁结构强度,威胁桥梁安全,还会因混凝土内部缺陷加速结构腐蚀,降低耐久性,缩短桥梁使用寿命。漏浆由多因素导致。一是模板拼接不严,重复使用和安装精度欠佳,使拼接缝宽窄不均,浇筑振捣时浆液渗漏。二是预埋钢筋封堵不完全,未密封的部位会导致浆液流出。三是模板在浇筑受力时发生形变,拼接缝增大,密封性降低,漏浆加剧。防治T梁混凝土漏浆,可采取如下措施:封堵预埋钢筋时,先铺塑胶垫,再用发泡胶二次密封;在模板拼接处设置止浆带,并在浇筑前紧固拉螺栓;建立模板定期检查制度,及时修复或更换有问题的模板;控制混凝土浇筑速度,避免压力过大;加强混凝土质量检测,检测坍落度、和易性等指标。

4 结束语

预制T形梁施工技术在公路桥梁工程中展现出显著的优势,不仅提高了施工效率,还有效增强了结构的安全性和耐久性。通过标准化生产,预制T形梁能够快速适应不同的施工需求,减少现场施工的复杂度,缩短工期,降低成本。此外,随着施工技术的不断进步,预制T形梁的制造、运输和安装工艺也日臻完善,为工程项目的顺利进行提供了有力保障。未来,随着智能建造技术的深度融合,预制T形梁施工技术将在大跨度桥梁等工程中展现更广阔的应用前景,持续推动公路桥梁建设向绿色化、工业化方向发展。

参考文献:

- [1] 范珉珠.公路桥梁工程中预制T形梁施工技术研究[J].交通世界,2023(08):171-173.
- [2] 荀小虎.桥梁工程中混凝土裂缝控制与防止措施研究[J].成都工业学院学报,2020,23(01):53-58.
- [3] 袁峰.公路桥梁工程预应力混凝土预制T梁关键施工技术[J].工程机械与维修,2024(08):105-107.
- [4] 白伟.铁路工程建设中T梁预制与架设施工技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(17):111-113.
- [5] 王喜弘.公路桥梁工程预应力混凝土预制T梁施工技术[J].建筑技术开发,2022,48(11):77-79.

复杂地质条件下桥梁桩基施工技术创新与灾害防治

崔秀彦¹, 刘成强²

(1. 青岛庚信建设管理有限公司, 山东 青岛 266400;
2. 山西晋达交通建设工程监理有限公司, 山西 太原 030000)

摘 要 桥梁是交通运输网络的重要节点, 在跨越河流、峡谷和复杂地形中起着不可替代的作用。但是, 随着我国桥梁建设的大规模发展, 越来越多的工程需要在复杂的地质条件下进行, 桥梁桩基础建设面临着诸多技术难题和灾害隐患。本文以复杂地质条件下桥梁桩基础施工为研究对象, 针对复杂地质条件下桥梁桩基础施工中存在的问题, 从特殊桩型设计、先进钻进和成孔工艺等方面进行深入研究, 深入探索施工过程中塌孔、缩径、桩身缺陷等灾害防控对策, 并结合实际工程案例对该技术的应用效果进行验证, 以期为提高复杂地质条件下桥梁桩基础施工质量和安全提供有力支撑, 促进我国桥梁工程技术进一步发展。

关键词 复杂地质; 桥梁桩基; 施工技术创新; 灾害防治

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.017

0 引言

软土地基高压压缩低承载力、岩溶地区溶洞及地下暗河分布、砂卵石地层硬度高、透水性强等复杂地质条件, 给桥梁桩基础施工带来了很大难度, 增加了施工的不确定性与风险性。桩基础是桥梁的基础, 桩基础的施工质量和稳定性对桥梁的安全和耐久性有重要影响。因此, 创新适应复杂地质条件下的桥梁桩基础施工技术, 制定有效的灾变防控措施, 是保证桥梁工程顺利实施、延长桥梁服役寿命的关键。

1 复杂地质条件对桥梁桩基施工的挑战

1.1 软土地基

软土地基具有高含水率、高孔隙比、高压缩性和低抗剪强度等特点, 给桥梁桩基施工带来了许多技术难题。从桩基础沉降角度看, 由于软土的高收缩特性, 使得桩基础在施工和使用过程中容易产生不均匀沉降。如某沿海桥梁施工, 部分桩基施工结束后, 由于上部结构的推进, 软土地基不断压缩变形, 导致桩顶沉降超过设计允许值, 最大沉降差异达 5 厘米, 严重威胁到桥梁结构的稳定, 甚至造成桥面不平度, 严重影响行车舒适性和安全性。软土地基在施工过程中也会发生侧向位移。这主要是由于它的抗剪强度较低, 很难有效地抵抗施工过程中的扰动和外荷载的影响。侧向位移对桩身产生附加弯矩, 极大地增加了桩身的破坏风险。一旦桩发生断裂, 整座桥基将失去支撑, 造成

重大的安全事故。软粘土地基在长期服役过程中, 其流变特性是不可忽视的。随着时间的推移, 软土地基在持续荷载的作用下将产生蠕变, 从而使桩基础承载力不断下降。这给桥梁的长期安全带来了巨大的隐患, 需要在运营期间对其进行频繁的检测和加固, 从而增加维修费用。因此, 为保证桥梁桩基础施工质量和长期稳定运营, 必须在施工前充分调查分析, 制定针对性的施工技术方案^[1]。

1.2 岩溶地区

岩溶地区存在大量的溶洞、溶沟和溶槽。在桩基础施工过程中, 若有溶洞, 易发生漏浆、塌孔等现象。如在山区桥梁工程中, 部分桩基钻孔时突然出现大量泥浆渗漏, 致使钻孔水位骤降, 从而导致钻孔塌孔, 导致施工中断。如果溶洞面积较大, 事先没有探测到, 可能会造成桩身悬空, 达不到设计承载力的要求。同时, 岩溶地区基岩起伏不定, 使得桩基嵌岩施工难度大, 难以保证桩端与基岩的有效黏结, 进而影响其承载性能^[2]。

1.3 砂卵石地层

砂卵石地层粒度大, 硬度高, 渗透性能好。桩基础成孔施工中, 采用常规钻具破碎砂卵石困难, 钻进效率十分低下。如某江河大桥桩基施工, 采用传统回转钻进技术, 一天只能钻 1~2 米, 远不能满足施工要求。另外, 由于砂卵石层具有很强的渗透性, 泥浆护壁很难形成有效的护壁层, 极易发生塌孔。同时,

由于砂卵石层的存在,可能会造成混凝土的非均匀扩散,从而影响到桩身的完整性与强度。

1.4 其他复杂地质条件

除上述共同复杂的地质条件外,还存在膨胀土遇水膨胀、失水收缩等特点,对桩基产生较大水平推力,造成桩基变形甚至破坏。冻土区地基土低温冻结可提高强度,但升温易发生融解,导致地基承载能力急剧降低,对桩基施工和桥梁的正常运营造成巨大挑战。此外,在存在断层和破碎带的地区,地质结构复杂,岩体破碎,桩基施工过程中极易发生孔壁坍塌、漏浆等病害,且桩基础承载力难以得到保障^[3]。

2 桥梁桩基施工技术创新

2.1 特殊桩型设计与应用

1. 扩底桩。针对软土地基承载力不足的现状,采用扩底桩可有效增加桩端接触面积,提高承载力。扩底桩是利用机械扩底钻头等特殊扩底设备,在桩端形成扩底形。如在软土地基上修建一座桥梁,就采用一种直径1.2米,桩端扩底直径1.8米的扩底桩。现场静载荷试验结果表明,扩底桩单桩极限承载力比相同长度的等径桩高约40%,能有效地满足上部结构的荷载需求^[4]。

2. 异形桩。在喀斯特地区,为适应复杂的地质条件,采用梅花桩和十字形等异形桩。异形桩的特殊外形能增强桩—土界面间的摩擦及咬合力,从而增强岩溶地区桩基础的稳定性。如在某岩溶区桥梁施工中,部分桩基础采用梅花桩,其桩径0.8米,呈梅花形。数值模拟与现场监测表明,梅花型桩具有良好的抗偏能力,可有效减小桩侧偏移,提高承载力。

2.2 先进钻进与成孔工艺

1. 旋挖钻进工艺。旋挖钻井技术在复杂地质条件如砂卵石地层中有明显的优越性。旋挖钻机配有短螺钻、取芯钻和捞砂钻头等多种钻头,适用于不同粒度的砂卵石地层。旋挖钻机利用钻杆的旋转压力,使钻头切入地层,排出钻渣。如在砂卵石层进行桥梁桩基施工时,采用旋挖法施工,平均日钻深5~8米,钻井效率大幅度提高。同时,采用旋转钻进技术,可有效控制钻孔垂直度、孔径,减少塌孔等事故^[5]。

2. 冲击反循环钻进工艺。冲击—反循环钻井技术适合于复杂地层,尤其适用于岩溶地区及硬岩地层。该技术是利用冲击钻头对地层进行冲击破岩,再通过逆循环系统排出钻孔内的岩屑。在喀斯特地区,冲击钻头可以对溶洞周围岩石进行有效的破碎,如果遇到大型溶洞,可以用片石、粘土等填充材料,然后冲击钻进,形成稳定的孔壁。如在岩溶地区桥梁桩基施工中,采用冲击—反循环钻进技术,成功地通过一系列直径3~5米的大溶洞,从而确保桩的顺利成孔^[6]。

2.3 桩基施工辅助技术创新

1. 泥浆制备与处理技术。在复杂的地质环境中,高质量的泥浆起到护壁、排渣等作用。研制新的泥浆材料,如具有优良的护壁性能、携渣性及稳定性的聚合物钻井液。高分子聚合物泥浆能在孔壁表面形成一层坚硬的泥皮,有效地防止孔壁坍塌;同时,利用泥浆净化装置等先进的泥浆处理设备,实现泥浆的分离和纯化,达到泥浆循环利用,降低建设费用,减少环境污染。例如:在软土与砂卵石相间的桥梁桩基施工中,采用高分子聚合物钻井液可使塌孔率小于5%,同时采用净浆设备使泥浆回收利用率达80%以上。

2. 地质超前预报技术。在岩溶地区复杂地质条件下,准确把握桩前地质状况是桩基施工的关键。利用地质雷达和超前钻探等技术,可以对地下溶洞、断裂等地质异常的位置、规模及性质进行超前探测。如某岩溶区桥梁工程,在桩基础施工前,利用地质雷达扫描桩位,发现若干直径1~3米的溶洞,为调整施工方案提供依据。在此基础上,采取充填混凝土和埋设钢护筒等有针对性的处理措施,以避免在施工过程中因遇不明溶洞而发生事故。

3 灾害防治策略

3.1 施工过程灾害防治

1. 塌孔防治。在桥梁桩基施工过程中,常发生塌孔事故。为防止塌孔,施工前应根据工程地质情况,选用适当的泥浆参数,如泥浆的比重、粘度和含砂率等。对于易塌陷地层,如软土、砂卵石地层,可适当增加泥浆的比重、粘度,提高泥浆护壁能力。同时,要控制钻进速度,避免过快对孔壁产生过大的扰动。如某软土地基桩基施工时,泥浆比重为1.2~1.3,粘度为25~30秒,钻进速率控制在0.5~1米/小时,有效地降低塌孔。一旦发现塌孔现象,应及时停钻,并回填粘土或片石等材料,待孔壁稳定后再下钻。

2. 缩径防治。软弱地基及高湿层是造成缩径的主要原因。为防止缩径,可以采用优质泥浆护壁,保证泥浆在孔壁上形成一层较好的泥浆保护层,减小土体侧向变形。同时,在下放钢筋笼时,应保证笼的垂直度,防止笼对孔壁产生刮擦,造成土体塌陷。另外,采用旋挖法等先进制孔技术,可实现孔径的精确控制。如在高含水率粉质粘土地层中进行桩基施工,经优化泥浆性质,采用旋挖钻进技术,使缩径率控制在3%以内,达到设计要求。

3. 桩身缺陷防治。桩身夹泥、断桩等缺陷严重影响桩的承载性能。为防止桩身质量问题,在灌注混凝土时,应保证混凝土配合比精确、工作性能好、流动性好。同时,要控制好浇筑速度与浇筑高度,以保

证混凝土的连续、均匀灌注。例如：某大桥桩基础混凝土灌注时，采用泵送混凝土，将灌注速率控制在 30 ~ 40 立方米 / 小时，混凝土灌注高度控制在 2 ~ 6 米之间，有效防止夹泥、断桩等缺陷。另外，灌注前要检查导管的密封性，确保没有渗漏。

3.2 自然灾害防治

1. 地震灾害防治。对于地震多发区桥梁桩基础的抗震性能提出更高的要求。通过对桩身钢筋的优化设计，提高桩身的抗弯抗剪能力。如在 8 度抗震设防地区进行桥梁工程时，采用增大桩身主筋数、直径等措施，可提高其抗弯承载力。同时，采用隔震技术，如在桩基础和承台间设置橡胶隔震支座等，可有效降低桩基地震作用。地震模拟试验结果表明，设置橡胶隔震支座可以使桩基承受的地震力减少 30% ~ 50%，从而提高桥梁的抗震安全性。

2. 洪水灾害防治。在跨河桥梁建设中，由于洪水的影响，桩基础可能受到冲刷破坏。通过设置护筒和抛石防护等防护措施，可提高桩基础的抗冲刷能力。如某河道桥梁桩基础施工完成后，在桩周围抛填 0.5 ~ 1 米的碎石，形成 1 ~ 2 米厚的抛石防护层。通过水模型试验及现场观测，发现抛石护坡可有效降低桩周土体冲淤，保护桩基础稳定。另外，在设计阶段，合理选择桥梁位置，避免将桩基础布置在强水流冲刷区，对防洪减灾具有重要意义。

3. 其他自然灾害防治。针对泥石流、滑坡等自然灾害，在选址时应做好地质调查工作，避开易发生泥石流的区域及滑坡地段。在施工过程中，针对可能影响桩基础安全的山体，采用锚杆、锚索等方法进行边坡支护。在山区桥梁建设中，通过植被恢复、水土保持等措施，降低泥石流、滑坡等灾害的发生概率，保证桥梁桩基础安全。

4 应用案例分析

4.1 项目背景

某大型跨江桥梁工程，桥址处地质条件复杂，上部为深厚的软土地层，下部为岩溶发育的石灰岩地层，且桥位位于地震设防烈度为 7 度的地区，同时面临洪水冲刷的威胁。该桥梁桩基设计为直径 1.5 米的钻孔灌注桩，桩长 50 ~ 60 米，共计 100 根。

4.2 施工技术创新与灾害防治措施实施

在施工工艺上，针对软土地层，采用扩底桩，桩端直径 2.0 米，同时采用旋钻法，提高钻孔效率，提升成孔质量。针对岩溶地层，采用地质雷达、超前钻探等超前地质预测方法，提前探明溶洞位置及规模；采用冲击—反循环钻进技术穿越溶洞，在溶洞内充填

混凝土，埋设钢护筒。在配制泥浆时，采用聚合物泥浆，以保证护墙效果。

在灾害防治中，严格控制钻井液性能、钻速，防止塌孔、缩径。为避免出现桩身缺陷，必须严格控制混凝土配合比及施工工艺。根据震害情况，对桩基础的抗震配筋进行优化设计，并在桩帽与桩基础间增设橡胶隔震支座。对于严重的洪涝灾害，采用桩周埋设护筒、抛填片石的方法进行防护。

4.3 实施效果

通过实施上述施工技术创新与灾害防治措施，该桥梁桩基施工顺利完成。桩基的承载能力通过静载试验检测，均满足设计要求。在施工过程中，塌孔、缩径等事故发生率显著降低，仅为 3% 左右，桩身缺陷率控制在 1% 以内。在后续的桥梁运营过程中，经过多次洪水考验和地震监测，桥梁结构稳定，桩基未出现明显的变形和损坏，有效保障桥梁的安全使用，取得良好的经济效益和社会效益。

5 结束语

复杂地质条件下的桥梁桩基施工面临诸多挑战，特别是特殊桩型设计、先进的钻孔成孔技术及辅助施工技术的创新，可有效应对复杂地质环境，提高施工效率与桩基质量。在此基础上，建立一套涵盖施工全过程灾害与自然灾害防控的策略，可有效降低施工风险，保证桥梁长期安全使用。工程实例表明，上述技术革新及防灾措施取得较好的应用效果。然而，随着桥梁建设向复杂地质地区发展，需要进一步研发更先进、更高效、更可靠的施工技术与灾害防控方法，如智能施工设备及监控系统、新型地基处理技术，以满足持续发展的桥梁工程建设需求，促进桥梁工程技术的不断进步。

参考文献：

- [1] 田子杨. 桥梁桩基施工技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2023(19):109-111.
- [2] 张羽轩. 浅谈桥梁桩基施工技术要点及质量控制措施[J]. 散装水泥, 2024(01):99-101.
- [3] 袁清明. 岩溶地区桥梁桩基施工技术研究[J]. 自动化应用, 2023,64(07):127-129,131.
- [4] 赵孝虎. 基于岩溶地区的高速铁路桥梁桩基施工技术研究[J]. 中国设备工程, 2023(07):213-215.
- [5] 吕华, 王守增, 张广超. 桥梁桩基施工技术及质量控制[J]. 越野世界, 2024,19(16):98-99.
- [6] 王乐文. 浅谈桥梁施工中桩基施工技术要点[J]. 工程建设与设计, 2024(14):200-202.

混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的应用研究

李洪瑾

(青海省海西公路桥梁工程有限公司, 青海 西宁 810000)

摘 要 混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中具有重要的应用价值。公路工程作为基础设施的重要组成部分,其质量直接关系到交通的安全性和耐久性。然而,混凝土在硬化过程中易产生裂缝,影响结构的整体性和使用寿命。通过科学的技术手段和有效的管理措施,可以有效减少裂缝的产生,确保公路工程的安全性和稳定性。本文对混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的应用进行了探讨,以期充分发挥混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的作用提供参考。

关键词 混凝土浇筑抗裂技术; 公路工程施工; 混凝土抗裂性能

中图分类号: U415

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.018

0 引言

随着我国交通路网体系的持续推进,公路工程对现浇混凝土的品质管控标准日趋严格。材料自身收缩特性引发的结构裂隙已成为施工过程中的频发难题,这类缺陷不仅会破坏工程表现形态,更会削弱建筑体的力学性能与抗老化能力。从材料科学角度分析,结构裂隙的形成机理主要涉及多重因素。系统探究这些作用机制的耦合关系,既可有效提升道路工程的综合性能指标,又能显著延长构造物的服役周期,为现代化交通网络的韧性发展奠定技术基础。

1 公路工程对混凝土抗裂性能的要求

公路工程对混凝土抗裂性能的要求极为严格,这主要源于公路工程的特殊性和重要性。公路作为交通基础设施的核心组成部分,长期承受车辆荷载、环境变化及自然因素的复杂作用,其质量直接关系到交通安全和运营效率。混凝土作为公路工程的主要建筑材料,其抗裂性能直接决定了路面的耐久性和使用寿命。裂缝的出现不仅影响路面的平整度和美观性,还可能成为水分和有害物质渗透的通道,加速结构的老化和损坏,甚至引发严重的交通安全隐患。因此,公路工程对混凝土的抗裂性能提出了高标准要求,以确保路面在长期使用中保持稳定性和可靠性。混凝土的抗裂性能主要取决于其材料特性、配合比设计、施工工艺及养护条件^[1]。在材料选择上,需采用低收缩、高韧性的水泥和骨料,并合理掺加外加剂和纤维材料,以改善混凝土的抗裂性能。在配合比设计上,需优化水

灰比和骨料级配,减少混凝土的收缩变形和内部应力。在施工工艺上,需严格控制浇筑、振捣和抹面过程,确保混凝土的密实性和均匀性。在养护条件上,需采取有效的保湿和保温措施,减少混凝土的早期收缩和温度应力。

2 混凝土材料特性

2.1 混凝土的强度特性

混凝土的强度特性作为工程材料的核心性能指标,混凝土的力学特性直接制约着结构的荷载承受效能与抗劣化能力。其力学性能体系涵盖压力抵抗、张力消解及弯折耐受三个维度,其中压力承载参数作为常规检测项目被广泛应用。该体系的形成机理与胶凝材料的水化进程、浆体稠度配比参数、集料物理特性及硬化环境控制等核心关联要素存在密切关系。胶凝基质在水化过程中形成的空间网络结构构成了材料力学性能的物质基础,而浆体稠度配比参数的精准控制尤为关键,过高数值将导致微观孔隙率上升,反之则会影响混合料的施工和易性。集料相作为复合材料的主要组分,其力学阻抗特性、几何形态特征及粒径分布规律对整体性能具有显著制约效应,科学级配设计可有效增强材料内部结构的连续性。需要特别指出的是,水化环境调控对强度发展轨迹具有决定性作用,适宜的温湿度条件既能加速早期晶核形成,又可保障长期强度稳定增长^[2]。通过科学调整配方参数与改良成型工艺,可系统提升复合材料的综合力学表现,适应多样化工程场景的技术需求。

2.2 混凝土的耐久性特性

混凝土的耐久性能表征其在复杂服役条件下的长期稳定表现,具体涵盖抗冻融循环、抗介质渗透及耐化学侵蚀等核心指标。材料的抗冻能力体现为周期性冻胀作用下的结构完整性保持度,其性能优劣与孔隙构造特征及含气量调控密切相关,适量引气组分的掺入可显著改善该项指标。抗渗透特性则与材料内部致密程度及水化产物结构直接关联,通过优化胶凝材料比例与骨料粒径分布可形成连续致密的微观屏障^[3]。针对化学侵蚀的防护效能主要取决于胶材体系的选择与界面过渡区强化,采用特种水泥与活性矿物掺合料复合技术可有效提升抗离子侵蚀能力。值得注意的是,材料耐久表现与服役环境的温湿度变化、侵蚀介质浓度等参数存在显著相关性。基于材料科学原理进行配合比设计与施工过程控制,能够系统性提升混凝土结构在全生命周期内的耐久性、可靠性。

2.3 混凝土的收缩与徐变特性

收缩与徐变现象作为水泥基复合材料的重要时变特性,对结构体系的变形协调与应力重分布具有显著作用。材料硬化阶段的水分散失及胶凝反应会引发体积缩减效应,具体表现为大气干燥收缩与自生收缩两种形态。前者源于表层水分蒸散形成的毛细管张力作用,其发展程度受制于环境湿度梯度与材料配合参数;后者则因水化反应持续消耗内部水分而产生,与胶凝材料活性及水胶比设计密切相关。在持续应力作用下,材料将呈现渐进式时变变形响应,其演化规律与应力水平、材料组成及硬化环境存在函数关系。需特别指出的是,这两种时变效应叠加可能导致应力集中区微裂纹萌生扩展,进而影响结构服役性能。在工程实践中,通过优选低缩型胶材与膨胀组分复合技术,配合精确的湿度调控养护制度,可实现对材料体积稳定性的有效调控。结构设计阶段需充分考虑时变效应的影响机制,结合施工过程的全周期温湿度管控,能够显著提升混凝土结构的长期工作性能与安全储备。

3 混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工工艺

3.1 原材料的选择与预处理

原材料的选择与预处理是混凝土浇筑抗裂技术的关键环节,直接影响到混凝土的性能和施工质量。水泥作为混凝土的主要胶凝材料,应选择低热、低收缩的品种,以减少水化热和收缩变形。骨料的选择应注重其级配、粒形和含泥量,合理的骨料级配可以提高混凝土的密实性和抗裂性能。细骨料应选用中粗砂,粗骨料应选用级配良好的碎石或卵石,并严格控制其含泥量和有机杂质含量。外加剂的选择应根据工程需

求,选用减水剂、引气剂或膨胀剂等,以改善混凝土的工作性和抗裂性能^[4]。矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉等,可以有效降低混凝土的水化热和收缩,提高其耐久性。在预处理阶段,骨料应进行清洗和筛分,确保其洁净度和级配符合要求。水泥和外加剂应进行质量检验,确保其性能稳定。通过科学的原材料选择和严格的预处理,可以为混凝土的抗裂性能提供基础保障。

3.2 配合比设计与优化策略

配合比设计与优化是混凝土浇筑抗裂技术的核心内容,直接决定了混凝土的性能和施工效果。配合比设计应综合考虑混凝土的强度、工作性和抗裂性能,合理确定水灰比、水泥用量和骨料比例。低水灰比可以提高混凝土的强度和密实性,减少收缩变形,但过低的水灰比会影响混凝土的工作性,因此需在两者之间找到平衡。水泥用量的控制应避免过多,以减少水化热和收缩变形。骨料的比例应根据其级配和粒形进行优化,确保混凝土的密实性和均匀性^[5]。外加剂和矿物掺合料的掺量应根据工程需求进行优化。通过科学的配合比设计和优化策略,可以有效提高混凝土的抗裂性能,满足公路工程的需求。

3.3 搅拌与运输过程的抗裂控制

搅拌与运输过程的抗裂控制是混凝土浇筑抗裂技术的重要环节,直接影响到混凝土的均匀性和施工质量。搅拌过程应确保混凝土的均匀性和工作性,搅拌时间应根据混凝土的配合比和搅拌设备进行合理控制,避免过短或过长。搅拌设备应定期维护和校准,确保其性能稳定。运输过程应尽量减少混凝土的离析和泌水,运输车辆应保持平稳行驶,避免剧烈振动和长时间停留。在高温或低温环境下,应采取相应的保温或降温措施,以减少混凝土的温度应力。搅拌和运输过程中,应严格控制混凝土的坍落度,确保其符合设计要求。通过科学的搅拌与运输过程控制,可以有效提高混凝土的均匀性和抗裂性能,为公路工程的施工质量提供保障。

3.4 浇筑与振捣的关键技术要点

混凝土成型阶段的工艺控制对材料最终性能具有决定性作用。分层浇筑时需遵循 30 ~ 50 cm 的作业厚度标准,通过分阶段布料实现热应力缓释,有效防范温度裂缝形成。布料路径应遵循由远及近的空间推进原则,最大限度减少混合料输送过程中的组分偏析风险。针对极端气候条件,需实施温控补偿工艺,通过循环水冷系统或蓄热保温技术平衡体系温度场分布。需特别强调的是模板系统的稳定性控制,须通过刚性支撑体系与实时监测装置确保成型界面的几何精度。

在密实化处理环节,应根据结构断面特征选用适配的振捣装置,其中插入式设备适用于大体积构件,操作时需保持垂直插拔节奏,防止局部浆骨分离现象。表面振捣工艺则适用于薄壁结构,通过高频微幅振动实现表层气泡的有效排除。从工艺原理层面,科学的振捣参数设置能够优化胶凝材料与骨料的界面结合状态,从而提升材料宏观力学性能与抗裂指标。整个成型过程应建立全过程质量追溯机制,通过智能传感技术实时监控施工参数,确保工艺控制符合预设技术标准。

4 混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的应用策略

4.1 优化材料选择与配合比设计

优化材料选择与配合比设计是混凝土浇筑抗裂技术的基础策略。在材料选择上,应优先选用低热、低收缩的水泥品种,如中热硅酸盐水泥或低热矿渣水泥,以减少水化热和收缩变形。骨料的选择应注重其级配和粒形,采用连续级配的骨料可以提高混凝土的密实性和抗裂性能。细骨料应选用中粗砂,粗骨料应选用级配良好的碎石或卵石,并严格控制其含泥量和有机杂质含量。外加剂的选择应根据工程需求,选用高效减水剂、引气剂或膨胀剂等,以改善混凝土的工作性和抗裂性能^[6]。矿物掺合料如粉煤灰、矿渣粉等,可以有效降低混凝土的水化热和收缩,提高其耐久性。在配合比设计上,应合理控制水灰比,避免过高或过低的水灰比影响混凝土的性能。通过科学的材料选择和配合比设计,可以为混凝土的抗裂性能提供基础保障,满足公路工程的高标准要求。

4.2 精细化施工工艺控制

精细化施工工艺控制是混凝土浇筑抗裂技术的关键策略。在浇筑过程中,应严格控制混凝土的浇筑速度和分层厚度,避免因浇筑过快或过厚导致混凝土内部产生温度应力和收缩裂缝。分层浇筑时,每层厚度应控制在30~50 cm,确保混凝土能够充分振捣密实。浇筑顺序应从远到近、从低到高进行,避免混凝土因流动距离过长而产生离析。在高温或低温环境下,应采取相应的温度控制措施,如使用冷却水或加热设备,以减少混凝土的温度梯度,防止裂缝产生。振捣是保证混凝土密实性和均匀性的重要步骤,振捣设备应根据混凝土的浇筑厚度和结构形式进行选择,振捣时间应根据混凝土的坍落度和振捣设备的性能进行控制,避免过振或欠振。通过精细化的施工工艺控制,可以有效提高混凝土的密实性和均匀性,减少裂缝的产生,为公路工程的施工质量提供保障。

4.3 科学养护与环境控制

科学养护与环境控制是混凝土浇筑抗裂技术的重要策略。养护是混凝土强度发展和抗裂性能提升的关键阶段,应根据混凝土的配合比和环境条件制定合理的养护方案。早期养护应注重保湿和保温,采用覆盖湿麻布、喷洒养护剂或使用养护膜等措施,防止混凝土表面水分过快蒸发,减少干缩裂缝的产生。在高温或低温环境下,应采取相应的温度控制措施,如使用冷却水或加热设备,以减少混凝土的温度应力。环境控制是防止混凝土裂缝产生的重要措施,施工过程中应尽量避免混凝土暴露在极端气候条件下,如高温、低温或强风环境^[7]。在高温环境下,应采取遮阳、喷水降温等措施;在低温环境下,应采取加热、保温等措施。通过科学的养护与环境控制,可以有效提高混凝土的抗裂性能,延长公路工程的使用寿命,确保其安全性和耐久性。

5 结束语

混凝土抗裂控制理论在道路工程中的系统化应用,为现代交通基础设施建设构建了科学的质量保障体系。实践表明,基于材料缺陷防控机理的配合比优化设计,结合过程控制优化与环境耦合作用分析,能够显著提升结构体系的完整性与服役可靠性。现阶段技术发展正朝着多参数耦合调控方向演进,通过智能监测系统与自适应补偿技术的集成应用,将实现裂缝控制由被动防治向主动调控的转型升级。随着绿色建造范式的转型推进,抗裂技术体系将在资源节约、环境友好等维度持续创新,为工程建设的可持续发展注入新的技术动能。

参考文献:

- [1] 张升.混凝土浇筑抗裂技术在公路工程施工中的应用研究[J].汽车周刊,2025(04):252-254.
- [2] 张祝兴.高速公路工程中小型预制混凝土箱梁构件施工技术[J].四川水泥,2025(03):254-256.
- [3] 郭宝侠.公路工程施工中混凝土裂缝的成因及处治措施[J].工程技术研究,2024,09(12):223-225.
- [4] 赵华.公路工程施工中混凝土裂缝成因与解决方法[J].运输经理世界,2023(19):127-129.
- [5] 王小强,李林翰.公路工程施工中混凝土裂缝成因与解决方法[J].时代汽车,2022(02):196-198.
- [6] 邓超.公路工程大体积混凝土裂缝成因与防治措施[J].住宅与房地产,2020(21):207.
- [7] 胡玉学.浅谈公路工程施工中混凝土裂缝的控制[J].中国标准化,2020(20):79-80.

现浇泡沫轻质土在高速公路工程路基填筑中的应用研究

李兆丽¹, 李兆贤²

(1. 广西桂通工程管理集团有限公司, 广西 南宁 530000;

2. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要 高速公路传统的路基填筑通常采用土、石作为填筑材料进行路基回填, 但对于特殊路基路段, 这种传统方式存在着填筑材料自重大、施工放坡占地面积大、沉降不好控制等因素缺陷, 而现浇泡沫轻质土作为一种新型的填筑材料, 其优势性能可以有效规避传统填筑的问题, 并且还具有低碳绿色环保施工建设效果。本文结合龙胜至峒中口岸高速公路南宁吴圩至上思段(一期工程)现浇泡沫轻质土填筑路基的实际应用案例, 对现浇泡沫轻质土特性、施工质量控制要点等方面做了全面的分析研究, 以为促进泡沫轻质土在现代高速公路项目高质量发展中充分发挥作用提供参考。

关键词 现浇泡沫轻质土; 高速公路; 路基填筑; 填筑材料

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.019

0 引言

现浇泡沫轻质土作为近年来被广泛应用到基建工程领域的一种新型轻质填土材料, 其在路基填筑工程应用中具有多方面的性能优势, 如自重轻、施工效率高、强度大、经济性好、绿色环保等显著特性。但结合高速公路路基填筑工程的应用角度而言, 需要针对性结合项目的具体情况进行施工技术应用方面的分析研究, 方能够取得更为突出的应用效果。本文结合龙胜至峒中口岸高速公路南宁吴圩至上思段(一期工程)现浇泡沫轻质土填筑路基的实际案例进行分析, 旨在为今后现浇泡沫轻质土在高速公路路基工程中发挥更重要的作用提供参考。

1 现浇泡沫轻质土概述

现浇泡沫轻质土作为一种新型的轻质填筑材料, 主要通过发泡剂溶液形成一定的泡沫, 并与土、固化剂等材料通过配合比设计, 进行充分的混合均匀搅拌而固结为轻质材料, 能够在高速公路特殊路段填筑中发挥其优势性能。发泡剂是一种在气泡工艺流程中发挥作用的物质, 经过稀释作用后, 通过泵送装置将其泵送至发泡装置中, 发挥添加剂的作用^[1]。

1.1 材料性能优势

1. 低密度。泡沫轻质土最为显著的一项性能优势就是低密度, 其内部存在着一定气泡结构能发挥隔热、

吸音的效果, 其密度通常介于 $400 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 的范围内。泡沫轻质土的低密度性能比高速公路项目传统的路基填筑材料更适用于特殊路段路基填筑, 由于其自身的重量轻, 便于施工和运输, 有利于降低生产作业劳动强度和施工生产成本。并且在高速公路特殊路基路段填筑方面, 不但能够有效降低路基结构本身的荷载, 同时也提高了路基的承载能力和稳定性, 对路基工程耐久性有显著的意义。

2. 压缩性。泡沫轻质土具有良好的压缩性能, 在遇到外部荷载压力的作用下通过自身内部的压缩性能调整内部空隙构造能够产生受控制的变形, 并且能够有效分散路基荷载压力, 这压缩性能可以降低路基的不均匀沉降^[2]。另外, 现浇泡沫轻质土在施工过程中具有较好的流动性能, 对轻质土构造内的各个部位填充形成较为均匀的支撑结构, 在路基工程特殊路段中通过压缩性与流动性能显著提高路基工程的整体结构稳定性和承受荷载能力。

3. 透水性。泡沫轻质土内部有着丰富的空隙结构, 空隙结构间又分布众多的气孔, 气孔之间能够形成较好的透水能力。在降雨或者地下水位上升的情况下, 泡沫轻质土能够通过吸收与排放水分, 避免水分长时间留置在轻质土内部结构而引发病害问题。泡沫轻质土通过良好的透水能力确保雨水与地下水的排畅, 有利于路基结构的整体稳定性。

4. 绿色低碳环保性。现浇泡沫轻质土通过采用现代化先进的生产工艺,在原材料选择方面就直接避免挥发性有毒有害物质和重金属元素材料,不需要消耗大量的自然资源,能够有效降低能源的消耗,优化资源的配置形成科学优质的高性能材料。在高速公路项目实际施工过程中,对于有限土地资源有着强烈的需求,而现浇泡沫轻质土能够减少路基工程填挖施工作业,有效缓解土地资源和减少对环境资源的破坏。现浇泡沫轻质土还通过其自身的保温隔热性能,有效降低了对环境的影响,并且现浇泡沫轻质土施工过程中产生的废弃物还能够重复性使用,提高了资源的循环利用性,社会经济效益较好,从而促进绿色低碳环保的高速公路项目生产建设。

1.2 施工性能优势

1. 提高项目施工生产效能,降低施工生产成本。在高速公路路基工程特殊路段施工生产作业过程中,传统的施工需要配备压路机、装载机、平地机等大量大型的机械设备,施工机械台班费用高,组织协调难度大,施工分层填筑周期长,容易受到不良气候的影响,从而整体上施工效能较低。现浇泡沫轻质土的施工工艺较为简单便捷,设备较为单一,施工材料较为普遍,一般采用专用管道进行浇筑施工,配备施工技术人员也较少,分层垂直浇筑的间隔时间也较短,能够节约土地资源,减少征地拆迁工作,并且不易受到不良气候的影响,从而有利于提高项目施工生产效能,有利于缩短施工工期,节省了高速公路项目施工生产投资成本。在高速公路特殊路基路段施工中,应用现浇泡沫轻质土可不对软土地基进行特别的处理,能够有效降低处理软土路基的施工范围和成本。泡沫轻质土的施工对于大型机械设备的依赖性不高,能够降低机械设备的的使用率,节约施工机械台班,在整个施工生产过程中起到降低施工生产成本的作用。

2. 保障车辆行驶的安全性、舒适性。现浇泡沫轻质土由于具有特殊的性能优势,在施工过程中容易形成平整稳定的路基结构,能够有效避免车辆在行驶过程中产生的颠簸感,以及降低车辆对道路整体结构的荷载压力和车辆行驶产生的噪声,有效确保了车辆行驶的安全性、舒适性。在桥涵过渡段台背回填方面使用轻质土能够有效降低路基的不均匀沉降和侧移,同时也降低了填筑的整体荷载和路基结构的附加应力,从而减少了桥台的刚性突变引起的跳车现象。另外,在高速公路改扩建施工过程中,会对路段做拼宽处理,这就容易产生新老路基的不均匀沉降和纵向拼接裂缝

等不利于行车的因素,现浇泡沫轻质土密度低,不均匀沉降也较小,对施工纵向拼接产生裂缝的影响较小,这就能够充分确保车辆行驶的安全性、舒适性^[3]。

2 现浇泡沫轻质土实例分析

2.1 工程概况

龙胜至峒中口岸高速公路南宁吴圩至上思段(一期工程)局部路段位于单侧高填且地面横坡较陡部位,挡土墙设置困难较大,设计中对于此类段落使用了泡沫轻质土填筑路基。现浇泡沫轻质土相关设计指标:湿容重 γ_s 距离路面底80 cm内为 6.5 kN/m^3 ,以下部分为 5.5 kN/m^3 ;台阶处应采用路面结构底基层进行调坡。

2.2 现浇泡沫轻质土制备

2.2.1 原材料选用要求

1. 水泥:水泥在凝结时间、安定性和强度等性能指标方面会对现浇泡沫轻质土的施工和强度造成一定的影响,所选用的水泥必须是由具有合格资质的厂家生产的,出厂水泥稳定性较好,使用前必须对水泥材料的性能指标进行质量检测,满足要求后方可进场投入使用。通过对水泥的质量检测,本项目经比选采用P.0 42.5通用硅酸盐水泥。

2. 发泡剂:发泡剂作为现浇泡沫轻质土的重要原材料之一,其性能质量直接影响到现浇泡沫轻质土的稳定性。根据对生产厂家提供的发泡剂进行试验对比等综合考量,重点检测发泡剂的匀质性和发泡倍数情况,综合选用合成类高分子表面活性剂的发泡剂。

3. 水:水在现浇泡沫轻质土拌合施工中具有重要的作用,特别是水中pH值和氯离子含量及有害杂质会对现浇泡沫轻质土的结构产生一定的影响,进而影响到轻质泡沫土的耐久性。通过对水质的检测,本项目采用满足技术标准规范和设计要求的自来水。

4. 掺合料:粉煤灰、矿粉等材料能够有效增强现浇泡沫土的活性,特别是能够有效促使泡沫的分散均匀性,对于增加轻质土内部气孔数量和孔洞的分布起到关键作用,进而可以有效提高现浇泡沫轻质土的整体强度,还能够降低水泥的用量,从而降低施工成本。本项目通过对进场掺合料的质量检测,选择广西某电厂生产的粉煤灰。

2.2.2 配合比设计要求

泡沫轻质土施工过程质量主要从湿容重、流动度、气泡群密度等方面同时满足技术标准规范和设计要求,才能够对其性能进行有效的质量控制,现浇泡沫轻质土配合比设计方面需要在所有的原材料质量检测合格的基础上,料浆沉降率应满足《泡沫混凝土用泡沫剂》

(JC/T 2199-2013)一等品的要求,即料浆沉降率不超过 5%^[4]。抗压强度试验采用的是 6 块 100*100*100 mm 的立方体试块,小量程压力机进行 7 d 和 28 d 抗压强度试验,强度计算时不对试件尺寸进行折减。

3 现浇泡沫轻质土施工质量把控要点

结合龙胜至峒中口岸高速公路南宁吴圩至上思段(一期工程)路基填筑采用现浇泡沫轻质土施工应用实际案例,现浇泡沫轻质土施工质量把控要点有以下三方面。

3.1 施工准备

全面做好施工准备工作,能够有效提高现浇泡沫轻质土的施工效能。结合项目设计图纸和实际施工现状特点,组织专业技术力量制定施工组织设计方案。在现浇泡沫轻质土施工之前,需要对所有的施工原材料进行质量检测,合格后再进行配合比设计。配合比设计需要结合项目现场实际情况与设计要求,确保湿容重、强度、流动的等技术指标。确认高速公路项目特殊路基路段施工区域,对实际施工断面进行放样并对高层进行测量,施工场地平整不能存在积水,严格控制基底的高层和边界宽度与长度,对基底的验收应避免存在积水和污染物^[5]。配置具有计量功能的拌合设备,能够有效监控发泡率、浆液和泡沫。检测技术人员要对相关技术参数指标进行检测,记录和分析检测数据。施工技术人员应当做好相关技术交底,对相关易损配件做好补充配置。

3.2 施工阶段

在现浇泡沫轻质土施工过程中,需要做好相关的施工质量控制,才能够确保整个生产作业质量稳定、安全、可控。一是施工浇筑时要对施工环境温度进行实时检测,要注意出料口与地面的高度,严格控制浇筑的质量。二是充分考虑项目施工工艺与实际现状,严格控制分层浇筑的厚度,确保层与层之间密切结合形成稳定的路基结构,避免路基存在不均匀沉降等问题。三是应当对施工现场的各项性能指标进行实时监测,确保现浇泡沫轻质土的各项技术指标满足技术标准规范 and 设计要求^[6]。四是在强度未达到设计值之前,严禁大型施工机械设备直接行驶在现浇泡沫轻质土顶部未施工浇筑区域,可采用钢板作为临时保护层供机械设备通过。五是施工结束后,要安排专人进行养护施工作业,对浇筑好的泡沫轻质土铺上膜避免日晒,并进行洒水养护确保路面的湿度,严格控制养护时间,强度达到设计要求后才能够进行后续工序生产施工作业。

3.3 其他技术措施

对施工浇筑区域进行明确划分,要严格控制施工浇筑的时间,针对南方雨季施工现状,要针对性做好雨季施工应急预案,结合项目施工特点做好临时性防排水设施,避免水土流失和路基坡面受到冲刷,特别是防止对已浇筑轻质土施工路段的污染。施工过程中要结合项目实际制定安全文明生产措施和环保实施方案,注重施工作业区的环境卫生条件,避免其他污染物对现浇泡沫土产生不良影响。对施工过程中存在的废弃材料实时收集并放置指定区域,安排专人进行环保处理,确保整个施工生产作业处于低碳节能环保状态^[7]。

4 结束语

现浇泡沫轻质土在高速公路路基工程中的实际应用具有显著的社会效益和经济效益,能够有效提高项目施工生产效能,节约项目施工土地资源,缩短生产作业工期,减少施工成本,降低社会生产能耗,有利于道路工程整体的稳定性、安全性、舒适性和耐久性,是一种具备良好优质性能的新型路用材料,对推动高速公路项目可持续高质量发展具有重要的作用。本文以龙胜至峒中口岸高速公路南宁吴圩至上思段(一期工程)局部路段应用现浇泡沫轻质土作为实际案例,对现浇泡沫轻质土做了较为全面的分析研究,总结了现浇泡沫轻质土施工质量控制技术要点,可为现浇泡沫轻质土在高速公路路基工程中的应用提供实践经验。与此同时,还需要行业专业技术人才积极探索现浇泡沫轻质土路用新型材料,为交通强国、质量强国建设提供更加科学、优质、环保、安全、经济的现浇泡沫轻质土材料。

参考文献:

- [1] 刘彬彬,王广利,程先意,等.一种下穿式路涵过渡段泡沫轻质土路基结构及其施工方法:CN202010406524.6[P].2020-08-25.
- [2] 郭建.泡沫轻质土对高速公路改扩建新旧路基差异沉降的影响分析[J].建筑技术,2024,55(06):676-679.
- [3] 黄仁生.现浇泡沫轻质土在公路工程路基防护中的应用研究[J].建材·建筑·装修,2022(09):1-3.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.气泡混合轻质土填筑工程技术规范(GJJ/T177-2012)[S].2012-01-11.
- [5] 盛凯.基于泡沫轻质土在桥梁台背填充中的应用技术研究[J].建材·建筑·装修,2019(24):201,204.
- [6] 曹越.泡沫轻质土在高速公路路基施工中的研究与应用[J].上海公路,2024(03):135-139.
- [7] 同[4].

基于复杂地基条件下的塔吊基础选型及超高围护措施施工技术研究

林信宇, 刘 军

(广西路桥集团建筑工程有限公司, 广西 南宁 530000)

摘 要 随着城市化进程加快, 高层、超高层建筑数量逐渐增多, 塔吊在建筑施工中的作用愈发关键。本研究以实际项目为例, 通过现场试验与有限元数值模拟相结合的方法, 深入探究了复杂地基条件下塔吊基础的选型及超高围护措施施工技术, 研究内容涵盖不同复杂地基的工程特性、对塔吊基础的影响、基础选型评价指标体系、适用基础型式、施工工艺及质量控制措施, 以及防风、防雷、抗震等围护措施, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 复杂地基; 塔吊基础选型; 超高围护措施; 有限元模拟

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.020

0 引言

随着城市化进程的加速, 高层、超高层建筑在城市建设中占据重要地位, 塔吊作为垂直运输的关键设备, 其基础安全性和稳定性至关重要。百色市路桥·青云府和路桥·栖林府项目所在区域地质条件复杂, 软土层分布广泛, 部分区域存在岩溶现象, 给塔吊基础设计与施工带来了巨大挑战^[1]。本研究通过现场试验与有限元数值模拟相结合的方法, 深入探讨复杂地基条件下塔吊基础的选型及超高围护措施施工技术, 旨在为项目施工安全和高效推进提供借鉴。

1 复杂地基条件下塔吊基础选型

1.1 不同类型复杂地基工程特性及模型建立

在路桥·青云府和路桥·栖林府项目中, 软土层是主要的复杂地基类型之一^[2]。通过现场勘察和室内土工试验, 获取软土层的物理力学参数。软土层天然含水量 w 平均为 45%, 天然重度 γ 约为 17 kN/m³, 孔隙比 e 高达 1.3, 液性指数 IL 为 0.8, 压缩模量 E_s 在 2~4 MPa 之间, 表现出高含水量、高孔隙比、低强度和高压缩性的特点。基于这些参数, 利用有限元软件建立软土地基模型。采用摩尔-库伦本构模型来描述软土的力学行为, 模型中考虑土体的非线性变形特性。在模型边界条件设置上, 底部约束竖向位移, 四周约束水平位移, 模拟实际地基的受力边界情况^[3]。对于岩溶地基, 通过地质雷达探测和钻孔勘察, 确定溶洞的位置、大小和形状。在有限元模型中, 将溶洞简化为圆形或椭圆形空洞, 采用实体单元模拟周围土体, 通过调整溶洞周围土体的参数来反映岩溶对地基的影响。

1.2 复杂地基对塔吊基础的影响分析

1. 承载力影响。以塔吊型号 QTZ60 为例, 其最大起重力矩为 600 kN·m, 最大起重量为 6 t, 工作状态下最大垂直荷载 P_v 约为 500 kN, 水平荷载 P_h 约为 50 kN。在软土地基中, 根据太沙基承载力理论公式 $q_u = cN_c + \gamma dN_q + 1/2\gamma bN_\gamma$ (其中 c 为土体粘聚力, 软土中 c 取 10 kPa; N_c 、 N_q 、 N_γ 为承载力系数, 根据软土的内摩擦角 φ 计算, 此处 φ 取 12°, 对应的 $N_c=5.14$, $N_q=1.22$, $N_\gamma=0.89$; γ 为土体重度; d 为基础埋深, 取 2 m; b 为基础宽度, 取 5.8 m), 计算得到软土地基的极限承载力 q_u 约为 120 kPa。考虑安全系数 $K=2$, 则允许承载力 $[q]=60$ kPa。塔吊基础底面面积 $A=16$ m², 基础所受平均压力 $p=P_v/A=500/16=31.25$ kPa, 虽然小于允许承载力, 但软土的长期强度较低, 在长期荷载作用下, 地基承载力可能会下降, 存在安全隐患。

在岩溶地基中, 溶洞的存在使得地基的承载特性变得复杂。若塔吊基础位于溶洞上方, 溶洞顶板的稳定性成为关键。根据经验公式 $h=Qb/f_t l$ (其中 h 为溶洞顶板厚度, Q 为塔吊荷载在溶洞顶板处产生的集中力, b 为基础宽度, f_t 为岩石抗拉强度, l 为溶洞跨度), 假设溶洞跨度 $l=3$ m, 岩石抗拉强度 $f_t=2$ MPa, 经计算, 当塔吊荷载 $Q=500$ kN 时, 要求溶洞顶板厚度 h 至少为 1.25 m。若实际顶板厚度小于该值, 需采取加固措施, 否则会影响塔吊基础的承载力。

2. 沉降影响。利用有限元软件模拟软土地基上塔吊基础的沉降。在模型中施加塔吊荷载, 模拟时间为 1 年。结果显示, 塔吊基础中心的沉降量 S_{center} 约为 80 mm, 边缘沉降量 S_{edge} 约为 100 mm, 沉降差 $\Delta S=S_{edge}-$

$S_{center}=20$ mm。根据相关规范,对于塔吊基础,沉降差应控制在一定范围内(一般不超过基础长度的 0.005 倍),本项目中塔吊基础长度为 4 m,允许沉降差为 20 mm,虽暂未超出允许范围,但已接近限值,需密切关注。在岩溶地基中,溶洞的存在可能导致地基的不均匀沉降。

3. 稳定性影响。塔吊基础的稳定性包括抗倾覆稳定性和抗滑移稳定性。抗倾覆稳定性可通过计算倾覆力矩 $M_{overturn}$ 和抗倾覆力矩 M_{resist} 的比值来评估。以工作状态下的塔吊为例,倾覆力矩主要由水平荷载 Ph 和偏心竖向荷载产生,抗倾覆力矩由基础自重 G 和基础底面的摩擦力提供。假设基础自重 $G=800$ kN,基础底面与地基土的摩擦系数 $\mu=0.3$,偏心距 $e=0.5$ m,则倾覆力矩 $M_{overturn}=PhH+Pve=50\times 30+500\times 0.5=1\ 750$ kN·m (H 为塔吊高度,取 40.5 m),抗倾覆力矩 $M_{resist}=G\times 2b+\mu G\times 2b=800\times 24+0.3\times 800\times 24=2\ 080$ kN·m,抗倾覆稳定系数 $K_{overturn}=17\ 502\ 080\approx 1.19$,大于规范要求的 1.15,满足抗倾覆稳定性要求。

抗滑移稳定性通过计算滑移力 F_{slip} 和抗滑移力 F_{resist} 的比值来评估。滑移力主要由水平荷载 Ph 提供,抗滑移力由基础底面的摩擦力提供,即 $F_{resist}=\mu G$ 。则 $F_{slip}=50$ kN, $F_{resist}=0.3\times 800=240$ kN,抗滑移稳定系数 $K_{slip}=50\ 240=4.8$,远大于规范要求的 1.3,满足抗滑移稳定性要求。但在岩溶地基中,若溶洞处理不当,可能会破坏地基的整体性,降低抗滑移和抗倾覆能力,威胁塔吊的稳定性^[4]。

1.3 塔吊基础选型评价指标体系建立

本研究建立的塔吊基础选型评价指标体系包括安全性、经济性和适用性三个一级指标,以及多个二级指标,采用层次分析法(AHP)确定各指标权重。邀请行业专家对各指标的相对重要性进行打分,构建判断矩阵。以安全性指标下的承载力、沉降、稳定性三个二级指标为例,构建判断矩阵。

通过计算判断矩阵的特征向量和最大特征根,得到承载力、沉降、稳定性的权重分别为 0.5396、0.1047、0.3557。同理,计算出经济性和适用性指标下各二级指标的权重,最终构建完整的评价指标体系。在实际选型过程中,对不同基础形式按照各指标进行打分,结合权重计算综合得分,选择综合得分最高的基础形式作为最优方案。

2 复杂地基条件下塔吊基础施工技术

2.1 适用塔吊基础型式研究

在路桥·青云府和路桥·栖林府项目中,针对软土地基和岩溶地基,研究了地基处理、筏板基础和复合地基等基础型式。

地基处理适用于软土地基和岩溶地基,能将塔吊荷载传递至深层稳定土层。在软土地基中,采用钢筋混凝土灌注桩,桩径 $d=600$ mm,桩长 $L=15$ m,桩身混凝土强度等级为 C35。单桩竖向承载力特征值 R_a 根据《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)中经验公式估算: $R_a=q_{pa}A_p+u_p\sum_{i=1}^n q_{sia}l_i$ (其中 q_{pa} 为桩端土极限端阻力标准值,软土中取 800 kPa; A_p 为桩身截面积; u_p 为桩身周长; q_{sia} 为桩周土极限侧阻力标准值,根据软土性质取 25 kPa; l_i 为各土层中桩的长度,此处桩长均为软土层厚度,即 20 m),计算得到 $R_a=800\times 0.5024+2.512\times 25\times 20=1\ 404.16$ kN。考虑群桩效应和安全系数,确定单桩竖向承载力设计值满足塔吊荷载要求。筏板基础整体性好,能有效扩散荷载,适用于地基承载力较低且不均匀的情况。在软土地基中,设计筏板厚度 $h=1.2$ m,采用 C25 混凝土,配筋为双层双向 $\phi 12@150$ (HRB400 钢筋)。复合地基是在地基中设置增强体,如碎石桩、CFG 桩等,提高地基承载力。在软土地基中,采用 CFG 桩复合地基,桩径 $d=500$ mm,桩长 $L=15$ m,桩间距 $s=1.5$ m,等边三角形布置。根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2012),计算得到 $f_{spk}=0.07\times 800/0.19625+0.8\times (1-0.07)\times 80\approx 336$ kPa,满足塔吊基础对地基承载力的要求。

2.2 不同基础型式的受力特性、适用范围及优缺点

地基处理受力特性主要是通过桩侧摩阻力和桩端阻力承担荷载,能有效穿越软弱土层,将荷载传递至深层稳定土层,适用于软弱地基、岩溶地基等承载力较低的地基条件。优点是承载能力高、稳定性好,对沉降控制效果较好;缺点是施工工艺复杂,施工周期较长,成本较高^[5]。

筏板基础受力时整体刚度较大,基底压力分布均匀,能有效抵抗地基的不均匀沉降,适用于地基土质较差且不均匀、上部荷载较大的情况。优点是整体性好,对地基适应性强;缺点是混凝土和钢材用量大,造价较高,在软土地基中可能会产生较大沉降^[6]。

复合地基通过增强体与土体共同承担荷载,提高地基承载力,适用于软弱地基、粉土地基等。优点是能充分利用土体的天然强度,提高地基承载力效果显著,施工速度较快,成本相对较低;缺点是设计计算较为复杂,对施工质量要求较高,增强体与土体的协同工作性能受施工质量影响较大。

2.3 软弱地基条件下地基处理施工工艺及质量控制措施

在软弱地基条件下,地基处理施工采用混凝土灌注桩工艺。施工流程如下:测量放线定桩位→埋设护筒→

制备泥浆→成孔→清孔→吊放钢筋笼→浇筑混凝土。

在施工过程中,泥浆的性能至关重要。泥浆比重控制在 $1.1 \sim 1.2$ 之间,黏度控制在 $18 \sim 22$ s,含砂率不大于4%。通过定期检测泥浆性能,及时调整泥浆配合比,确保成孔过程中孔壁稳定。在成孔过程中,严格控制钻孔垂直度,采用全站仪监测,垂直度偏差控制在1%以内。

钢筋笼制作时,保证钢筋的规格、数量和间距符合设计要求。钢筋焊接采用双面焊,焊缝长度不小于 $5d$ (d 为钢筋直径)。钢筋笼吊放时,确保其中心与桩孔中心重合,避免碰撞孔壁。混凝土浇筑采用导管法,导管底部距孔底距离控制在 $0.3 \sim 0.5$ m。混凝土坍落度控制在 $180 \sim 220$ mm,浇筑过程中连续进行,防止出现断桩现象。

3 超高塔吊围护措施施工技术

3.1 超高塔吊防风措施的设计与实施

项目所在地最大风速达 28 m/s,为保障超高塔吊在强风下的安全,采取了塔身加固和配重优化措施。

在塔身加固方面,选用 $\angle 100 \times 10$ 的角钢在塔吊标准节间增设斜撑,并通过焊接稳固连接。这一举措使塔身抗风刚度提升30%,有效降低了强风下的水平位移。例如:假设塔吊高 50 m、风荷载为 10 kN,加固前塔身截面惯性矩为 0.05 m⁴,加固后提升至 0.065 m⁴,加固前最大水平位移约 0.02 m,加固后减小到约 0.015 m,极大地增强了塔身稳定性。配重优化则依据塔吊高度和工作状态进行。项目中原配重为 10 t,经计算在平衡臂末端增加 2 t配重块,让塔吊重心后移。

3.2 防雷接地系统的设计与施工技术

在设计上,塔吊顶部安装 2 m高、直径 25 mm的镀锌圆钢避雷针,利用塔身钢结构作为引下线,每隔 3 m进行可靠连接,确保雷电传导顺畅。接地装置采用人工接地体,由 50×5 mm镀锌角钢和 40×4 mm镀锌扁钢组成。接地角钢长 2.5 m,间距 5 m呈环形布置,埋深 1 m,再用镀锌扁钢连接成整体并与塔吊基础主筋焊接。施工完成后,使用接地电阻测试仪检测,实际测量接地电阻为 3.5 Ω ,满足《建筑物防雷设计规范》(GB50057-2010)中不大于 4 Ω 的要求。后续还会定期检测接地电阻,以确保防雷接地系统始终有效,避免塔吊遭受雷击损坏。

3.3 抗震措施

鉴于项目所在区域抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.15 g,采取了多种抗震措施。

在塔吊基础与塔身之间设置的橡胶减震支座,直

径 600 mm、高 300 mm,由多层橡胶和钢板交替硫化黏结。其能有效消耗地震能量,减少传递到塔身的地震力。经计算,可使传递至塔身的水平地震力降低约70%,显著提升塔吊的抗震性能。此外,对塔吊关键结构构件进行加固。在塔身与基础连接部位增设 20 mm厚加强钢板并焊接牢固,增强节点抗弯和抗剪能力。同时,对附着装置进行全面检查和加固,保证附着点混凝土强度达标,附着杆长度和角度符合设计,提升塔吊与建筑物连接的可靠性,从整体上增强塔吊的抗震性能,保障塔吊在地震发生时的安全稳定。

4 结论

通过对两处项目的研究,针对复杂地基条件下塔吊基础选型及超高围护措施施工技术取得了以下成果:

1. 塔吊基础选型:深入研究了不同类型复杂地基的工程特性,建立了相应的地基模型,分析了复杂地基对塔吊基础承载力、沉降和稳定性的影响。建立了基于安全性、经济性和适用性的塔吊基础选型评价指标体系,为塔吊基础选型提供了科学依据。

2. 塔吊基础施工技术:研究了适用于复杂地基条件的塔吊基础型式,明确了不同基础型式的受力特性、适用范围及优缺点。针对软弱地基条件下的地基处理,制定了详细的施工工艺和质量控制措施,确保地基处理的施工质量。

3. 超高塔吊围护措施:设计并实施了有效的超高塔吊防风措施,通过塔身加固和配重优化提高了塔吊的抗风能力;完成了防雷接地系统的设计与施工,接地电阻满足要求,保障了塔吊在雷雨天气的安全;研究并应用了抗震措施,设置橡胶减震支座和对关键结构构件进行加固,增强了塔吊的抗震性能。

参考文献:

- [1] 刘王奇,王彬,王勇,等.500米超高层建筑塔机选型及布置分析[J].建筑机械化,2023,44(05):11-15.
- [2] 栗银辉.智能化监测系统在房建工地塔吊维修的应用[J].中国建筑金属结构,2024,23(03):110-112.
- [3] 陈健.高层房屋建筑施工技术的关键点与应用分析[J].中国建筑金属结构,2024,23(05):115-117.
- [4] 祝斌.超高层住宅屋顶的悬空大板梁施工技术研究[J].建筑施工,2024,46(05):794-797.
- [5] 龚锋锋.特殊工况下塔吊基础的选型与施工[J].建筑施工,2022,44(08):1775-1778.
- [6] 熊志刚,马云鹏,朱旭.上海印象城格构式塔吊基础的设计与施工[J].城市建设理论研究(电子版),2017(35):200-201,105.

城市轨道交通列车节能运行策略分析

金状兵*, 叶 特, 唐 虎, 王 凯, 王峰宇

(株洲时代瑞唯减振装备有限公司, 湖南 株洲 412000)

摘 要 城市轨道交通作为重要的公共交通方式, 其能耗问题日益凸显。本文深入探讨了城市轨道交通列车的节能运行策略, 全面剖析了列车运行原理及能耗构成, 详细阐述了现有能耗统计与分析方法。通过研究国内外典型城市的实践案例, 总结经验, 从技术层面阐述了牵引与制动节能、列车轻量化以及辅助系统节能等技术策略; 从运营管理方面提出了优化列车运行、开展智能运维与故障预测以及引导乘客行为等策略, 旨在为城市轨道交通行业提供全面且具有实操性的节能方案, 助力其降低能耗、提升运营效益, 实现可持续发展。

关键词 城市轨道交通; 列车节能; 运行策略; 能耗分析

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.021

0 引言

随着城市化进程的加速, 城市人口急剧增长, 交通拥堵和环境污染问题愈发严重。城市轨道交通以其大运量、高效率、低排放等优势, 成为缓解城市交通压力的关键手段。近年来, 我国城市轨道交通建设迅猛发展, 截至 2024 年底, 全国城市轨道交通运营里程已达 10 945.6 km。然而, 随着运营规模的不断扩大, 列车运行的能耗也在持续攀升。据统计, 城市轨道交通系统中, 列车能耗占总能耗的 60% ~ 70%, 其中牵引能耗约占列车能耗的 50% ~ 60%。过高的能耗不仅增加了运营成本, 还对城市的能源供应和环境质量带来了压力。因此, 探索高效的列车节能运行策略, 对于城市轨道交通的可持续发展至关重要。

1 城市轨道交通列车运行原理与能耗分析

1.1 列车运行基本原理

城市轨道交通列车运行主要历经牵引、制动和惰行三个状态:

牵引阶段, 列车借助牵引电机将电能转化为机械能, 克服列车自身重力、轨道摩擦力以及空气阻力, 实现加速前进。现代列车多采用交流牵引电机, 以某型号为例, 其额定功率可达 300 kW, 能提供强大动力。制动时, 制动方式分为机械制动和电气制动。机械制动依靠刹车片与车轮的摩擦实现减速, 电气制动则利用电机的发电特性, 将列车动能转化为电能反馈回电网(再生制动)或通过电阻转化为热能消耗(电阻制动)。在惰行状态下, 列车依靠惯性前行, 牵引电机停止工作,

仅需克服微小的运行阻力。合理把控列车在这三种状态间的转换, 对优化能耗意义重大^[1]。

1.2 能耗构成与影响因素

列车能耗主要由牵引、空调、照明及其他辅助设备能耗组成。其中, 牵引能耗占比最大, 达 50% ~ 60%。线路坡度对牵引能耗影响显著, 当线路存在 5% 的上坡坡度时, 列车牵引能耗约增加 15%; 而下坡时, 可通过再生制动回收约 10% ~ 15% 的能量。列车载重与能耗紧密相关, 研究表明, 列车载重每增加 10%, 牵引能耗约上升 8% ~ 10%。运行速度也会影响能耗, 当列车速度从 60 km/h 提升至 80 km/h 时, 空气阻力增大, 能耗约增加 20% ~ 25%。空调系统能耗在夏季和冬季较高, 约占总能耗的 20% ~ 25%, 受车厢内外温差、客流量等因素影响。照明能耗虽占比较小, 但随着运营时间的积累, 也不容忽视^[2]。

1.3 现有能耗统计与分析方法

为准确掌握列车能耗情况, 现有多种能耗统计方法, 相关信息如表 1 所示。

从表 1 可知, 不同能耗统计方法各有优劣。电表计量能准确获取整体能耗, 但无法深入了解各设备能耗; 传感器监测可实时掌握各设备能耗分布, 却面临成本问题; 智能电表便于数据管理, 不过通信网络可能影响数据传输; 车载能量监测系统专业性强, 但系统复杂成本高。在实际应用中, 通常需综合运用多种方法, 全面、准确地获取能耗数据, 并借助能耗趋势分析、能耗对比分析等方法, 为节能策略制定提供数据支撑。

*本文通信作者, E-mail: jinzhbly@163.com。

表 1 能耗统计方法

能耗统计方法	测量原理	优点	局限性
电表计量	通过电表测量电路中的电流和电压，进而计算电能消耗	数据直观、精准	仅能统计整体电能消耗，难以细分到具体设备
传感器监测	运用各类传感器，如电流、电压、温度传感器等，监测设备运行参数并计算能耗	可实时监测各设备能耗，便于分析能耗分布	传感器安装和维护成本较高
智能电表	具备数据采集、处理和通信功能，可远程传输能耗数据	方便数据管理和远程监控	依赖通信网络，可能出现数据传输延迟
车载能量监测系统	安装在列车上，对列车牵引、制动等过程中的能量变化进行监测	针对性强，能详细记录列车运行能耗	系统较为复杂，成本较高

2 国内外城市轨道交通列车节能运行实践案例

2.1 国外先进城市案例

新加坡在城市轨道交通列车节能运行方面成果斐然。其运用先进的列车运行优化算法，对列车运行图进行精细化调整。通过合理规划列车停站时间和发车间隔，减少了列车不必要的加减速，有效降低了能耗。据统计，通过运行图优化，列车能耗降低了约 12%。此外，新加坡引入节能型列车，采用新型永磁同步牵引电机，相较于传统电机，效率提高了 8%~10%，进一步降低了牵引能耗。

2.2 国内典型城市经验

北京在城市轨道交通节能方面积极探索。一方面，大力推广智能运维系统，利用大数据和人工智能技术对列车设备进行实时监测和故障预测。通过提前发现设备潜在故障，及时维护，避免因设备故障导致的能耗增加。例如：某线路采用智能运维系统后，设备故障率降低了 15%，能耗相应降低了 8%~10%。另一方面，北京重视对乘客的节能宣传教育，通过在车站和车厢内设置节能标语、播放节能宣传片等方式，引导乘客合理使用空调等设备，培养乘客节能意识。调查显示，经过宣传教育后，约 30% 的乘客节能行为明显增加，对列车能耗降低起到积极作用。

上海在节能技术应用方面表现突出。其部分线路采用 LED 照明技术，相较于传统照明灯具，LED 灯能耗降低了约 30%~35%。同时，上海对列车空调系统进行节能改造，采用智能温控技术，根据车厢内温度和客流量自动调节空调制冷量，有效降低了空调能耗。此外，上海在列车运行管理方面，通过优化列车运行调度，提高列车准点率，减少列车在车站的等待时间，从而降低能耗。

2.3 案例对比与启示

对比国内外案例，国外先进城市在节能技术研发和应用上较为领先，如新加坡的运行图优化算法、东京的再生制动能量回收利用技术。国内城市则在智能

运维和乘客节能宣传方面成效显著。从技术层面看，我国城市轨道交通应加大对先进节能技术的研发投入，引进和吸收国外先进技术，如高效牵引电机、轻量化材料等。在管理方面，需进一步完善智能运维系统，提高设备管理水平，同时加强不同部门间的协同合作，优化列车运行调度。在政策方面，政府应出台相关鼓励政策，如对采用节能技术的企业给予补贴，推动城市轨道交通列车节能运行发展。通过借鉴国内外成功经验，结合我国实际情况，制定适合我国城市轨道交通列车节能运行的策略。

3 城市轨道交通列车节能运行技术策略

3.1 牵引与制动节能技术

永磁同步牵引电机作为高效节能的牵引设备，在城市轨道交通列车中的应用愈发广泛。其功率密度比高，可使电机体积更小、重量更轻，降低列车自重。以某型号为例，永磁同步牵引电机功率密度比可达 4.5 kW/kg，相较于传统异步牵引电机提高了 20%~25%。同时，其效率更高，额定工况下，效率可达 95%~96%，能有效降低牵引能耗。

在制动方面，电阻制动与再生制动结合技术应用广泛。再生制动将列车动能转化为电能反馈回电网，实现能量回收利用。当再生制动无法满足制动需求时，电阻制动作为补充^[3]，将多余电能通过电阻转化为热能消耗。这种结合方式既能有效回收能量，又能确保列车制动的安全可靠。据统计，采用电阻制动与再生制动结合技术，可使列车制动能耗降低 20%~25%。

3.2 列车轻量化技术

列车轻量化材料的应用是降低列车能耗的重要途径。表 2 为常见轻量化材料的技术参数对比。

从表 2 数据可知，铝合金凭借适中的密度和强度，以及良好的加工性能，在列车车体制造中应用广泛，能使列车自重减轻 8%~10%。碳纤维复合材料强度高且重量极轻，但因其制造工艺复杂、成本高昂，目

表 2 常见轻量化材料的技术参数对比

轻量化材料	密度 (g/cm ³)	强度 (MPa)	应用优势	应用难点
铝合金	2.7 ~ 2.8	150 ~ 600	质量轻, 耐腐蚀性好, 加工性能优良	成本相对较高, 焊接工艺要求高
碳纤维复合材料	1.5 ~ 1.8	1 000 ~ 7 000	强度高, 重量轻, 可设计性强	制造工艺复杂, 成本高昂
镁合金	1.7 ~ 1.8	150 ~ 400	密度低, 减震性能好	耐腐蚀性较差, 加工难度大

前应用相对受限。镁合金虽密度低且减震性能好, 却存在耐腐蚀性和加工方面的问题。在实际应用中, 需综合考量材料性能、成本和加工工艺等因素, 合理选择轻量化材料, 以实现降低列车能耗的目的^[4]。

3.3 辅助系统节能技术

空调系统是列车辅助系统中的能耗大户。智能温控策略通过安装在车厢内的温度传感器实时监测温度, 根据设定温度范围自动调节空调制冷或制热功率。当车厢内温度接近设定温度时, 空调自动降低功率运行, 避免过度制冷或制热。同时, 新风优化技术根据车厢内空气质量和客流量动态调整新风量。客流量较少时, 适当减少新风量, 降低空调能耗。研究表明, 采用智能温控和新风优化技术, 可使空调系统能耗降低 15% ~ 20%。

4 城市轨道交通列车节能运行运营管理策略

4.1 优化列车运行

优化列车运行图是节能的关键手段。通过合理安排列车停站时间, 可避免列车长时间等待乘客上下车, 减少不必要能耗。例如: 根据客流量统计数据, 在客流量较小的车站适当缩短停站时间, 在客流量较大的车站合理延长停站时间。同时, 优化发车间隔, 高峰时段适当缩短发车间隔, 提高列车运输效率; 平峰时段适当延长发车间隔, 减少列车空驶能耗。以某城市轨道交通线路为例, 通过优化运行图, 列车能耗降低了约 10% ~ 12%。此外, 还可采用节能驾驶模式, 培训司机合理控制列车加速、减速和惰行, 减少不必要的制动和启动, 进一步降低能耗。

4.2 智能运维与故障预测

基于大数据和人工智能的智能运维系统能实时监测列车设备运行状态。通过安装在列车各关键部件上的传感器采集设备振动、温度、电流等参数, 利用数据分析算法对这些数据进行处理和分析, 提前预测设备可能出现的故障。例如: 通过对牵引电机振动数据的分析, 当发现振动异常时, 及时预警并安排维护人员检修, 避免因电机故障导致能耗增加。据统计, 采用智能运维系统后, 列车设备故障维修时间缩短了 20% ~ 25%, 能耗降低了 8% ~ 10%。同时, 智能运维系统还能对设备能耗数据进行分析, 找出能耗异常原因并及时优化。

4.3 乘客行为引导与节能宣传

乘客行为对列车能耗有一定影响。例如: 乘客上下车速度过慢会延长列车停站时间, 增加能耗; 不合理调节车厢内空调温度会导致空调能耗增加。因此, 通过在车站和车厢内设置节能宣传标语、播放节能宣传片等方式, 引导乘客快速上下车, 合理设置空调温度。同时, 可利用车站广播和车厢内显示屏提醒乘客注意节能。此外, 还可开展节能活动, 对节能行为突出的乘客给予奖励, 提高乘客节能积极性。通过这些措施, 培养乘客节能意识, 使乘客主动参与列车节能行动, 对降低列车能耗起到积极促进作用^[5]。

5 结束语

本研究全面分析了城市轨道交通列车节能运行策略, 通过剖析列车运行原理与能耗构成, 借鉴国内外实践案例, 从技术和运营管理两方面提出了一系列节能策略。在技术方面, 采用永磁同步牵引电机、电阻制动与再生制动结合、列车轻量化材料以及辅助系统节能技术等, 可有效降低列车能耗。在运营管理方面, 通过优化列车运行图、实施智能运维与故障预测以及引导乘客行为等措施, 也能实现显著节能效果。然而, 目前节能策略实施中仍面临一些问题, 如节能技术成本较高、不同部门间协同困难、乘客节能意识有待提高等。

参考文献:

- [1] 江志彬, 王炳勋, 李洪运, 等. 基于快速通勤需求的地铁列车跨站停车方案优化 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2025, 53(03): 410-419.
- [2] 周成尧, 司玉林, 赵雷廷, 等. 基于数字孪生的高可靠性城市轨道交通永磁牵引系统发展展望 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(03): 89-92, 97.
- [3] 耿鹏, 刘霞, 袁重阳. 城市轨道交通牵引计算仿真平台设计 [J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(03): 265-269.
- [4] 屠朝丰. 城市轨道交通智慧段场的设计与应用 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(07): 23-26.
- [5] 杨建国. 城市轨道交通复杂开行方案下客流分配研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2025(03): 92-99.

电力设备可靠性检修维护模式及其实践

刘华健, 吕 静, 赵小宁, 谢正青

(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 系统阐述了电力设备可靠性检修维护工作的重要意义, 着重强调了其对确保电力系统安全稳定运行的关键作用, 在深入剖析传统检修维护模式及其固有缺陷的基础上重点介绍了以可靠性为中心的检修 (RCM) 模式与状态检修模式的理论框架。本文结合电力变压器、电力电缆及高压开关柜等典型电力设备的实际维护案例, 详细论述了各类设备的检修技术要点与具体实施方案, 旨在为电力设备可靠性维护工作提供参考, 从而有效提升电力系统的运行可靠性与稳定性水平。

关键词 电力设备; 可靠性; 检修维护

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.022

0 引言

电力设备作为电力系统的关键组成部分, 其稳定运行对于保证电力供应的稳定以及安全有着极为关键的意义。随着电力行业持续向前发展, 针对电力设备的检修维护提出了更高的标准, 传统的检修维护方式渐渐显露出许多问题, 已经无法满足现代电力系统运行的要求。基于此, 探讨电力设备可靠性检修维护模式并且开展实践方面的研究, 成为保障电力系统高效运行的重点^[1]。

1 电力设备可靠性检修维护的意义

1.1 保障电力系统稳定运行

在当代社会, 电力已成为支撑经济运行以及民众生活的基础性能源, 电力系统的稳定运作对于社会的正常秩序有着直接的关联。电力设备在长时间运行期间, 会受到多种因素的作用, 如环境的侵蚀、设备的老化以及过载运行等, 这些因素均有可能致使设备出现故障, 一旦关键的电力设备出现故障, 便可能引发局部乃至大面积的停电事故, 给工业生产、商业运营以及居民生活造成巨大的损失^[2]。定期针对电力设备开展可靠性检修维护工作, 可及时察觉到设备存在的隐患, 提前着手采取措施给予处理, 保证设备始终处于良好的运行状态, 有效防止因设备故障引发的停电事故, 保障电力系统的稳定供电, 为社会的正常运转提供坚实的电力保障^[3]。

1.2 推动电力行业可持续发展

社会对电力的需求持续增加, 同时对环境保护的要求也越来越高。在此背景下, 电力行业面临着双重挑战, 要提高能源利用效率, 又要降低环境污染。可

靠性检修维护可依靠精准维护电力设备以及进行优化调整, 提升设备运行效率, 减少能源浪费, 而且及时发现并处理设备故障, 能避免因设备损坏引发能源泄漏以及环境污染问题。另外, 科学的检修维护策略还可以延长电力设备使用寿命, 降低设备更新换代频率, 减少对自然资源的消耗, 满足电力行业可持续发展需求^[4]。可靠性检修维护对于提升电力企业的社会形象有着关键意义, 稳定的电力供应是社会正常运转的根基, 减少因设备故障引发的停电事故, 可使民众对电力企业产生更高的信任程度以及满意度, 在当下竞争激烈的电力市场环境中, 良好的社会形象可为企业争取到更多的合作机会以及政策支持。可靠性的提升还可为经济社会的发展提供坚实可靠的电力保障, 实现企业与社会的双赢局面。

1.3 降低电力运营成本

尽管可靠性检修维护需投入一定人力、物力以及财力, 然而从长远角度而言, 其可切实降低电力运营成本。一方面, 借助预防性维护可避免设备突发故障所引发的紧急抢修费用与停电损失; 另一方面, 合理延长设备使用寿命可减少设备购置及更换的成本, 可靠性检修维护还可提高设备运行效率, 减少能源消耗, 降低电力生产成本, 提升电力企业的经济效益与市场竞争力^[5]。

2 传统检修维护模式及其局限性

传统电力设备检修维护模式主要有定期检修以及事故检修两种。定期检修是依照检修规程、制度以及标准, 预先确定一个固定的时间间隔来开展定期检修工作, 在这样的模式中, 不管设备实际的运行状况如何,

都会依照预先设定好的时间间隔去实施全面检查以及维护工作，例如：电力设备每 4 年至 6 年就需要进行一次大修，其时限为 50 天至 80 天，每两年都要进行一次小修，小修的时限是 10 天至 12 天。这种检修方式在一定程度上可保证设备的完好率，不过也存在着较为十分突出的局限性。

定期检修若不考虑设备实际运行状态以及故障历史情况，便会出现过度检修或者检修不足的状况，就一些运行状况良好且故障风险较低的设备而言，过度检修耗费了大量人力、物力以及财力，还可能因设备频繁拆装而引发新的故障隐患，然而对于一些已出现潜在故障的设备，定期检修可能无法及时察觉并处理，致使故障扩大，对电力系统正常运行产生影响。定期检修的检修周期一般是依据实践经验和相关统计资料来确定的，带有一定的主观性与滞后性，随着电力设备技术持续发展以及运行环境发生变化，原有的检修周期已不再适用，难以满足设备可靠性检修维护的需求。

事故检修则是在电力设备出现影响设备正常运行的故障后才进行检修维护。这种被动的检修方式通常需要付出很大的代价，不仅会导致设备损坏、停电事故等直接经济损失，还可能对电力系统的安全稳定运行造成严重影响。例如：当关键电力设备发生故障时，可能引发局部甚至大面积的停电事故，给工业生产、商业运营以及居民生活带来巨大的损失^[6]。

3 电力设备可靠性检修维护模式

3.1 以可靠性为中心的检修（RCM）模式

以可靠性为中心的检修（RCM）模式是一种先进的电力设备检修维护模式，它强调以设备的可靠性为中心，根据设备的可靠性状况，以最少的维修费用来制定维修内容、类型、级别和维修间隔期，尽可能保持、恢复设备的固有可用性^[7]。RCM 模式重点在于对设备进行全面可靠性分析与评估，明确设备故障模式、故障后果以及故障发生概率，接着依据这些信息制定科学合理的检修策略，与传统检修维护模式相较，RCM 模式能依照设备实际运行状况与可靠性需求，制定个性化检修计划，避免了过度检修与检修不足的情况。依靠分析设备故障模式和故障后果，能确定哪些设备需重点检修，哪些设备可采用较简单维护方式，提升检修效率与质量，RCM 模式注重以最少维修费用维持和恢复设备固有可靠性，借助优化检修策略，减少不必要检修项目与检修次数，降低维修成本，因能及时发觉和处理设备潜在故障，避免故障扩大造成经济损失，提高了经济效益。RCM 模式可有效提升电力设备可靠性，减少设备故障发生，降低停电事故概率，提高供电可

靠性。凭借对设备进行定期可靠性评估与检修维护，能及时发现设备潜在故障隐患，并采取相应措施处理，保证设备一直处于良好运行状态^[8]。

在实际应用中，RCM 模式要构建完备的设备可靠性数据库以及分析模型，针对设备的运行数据展开实时监测与分析工作；培育专业的检修维护人员，提升他们对 RCM 模式的理解以及应用能力，例如：江苏公司承办的数字化 RCM 变电技术论坛重点关注 RCM 理论应用与创新实践，推动电力设备检修模式的转型变革。国家能源局 RCM 试点项目的 8 家承担单位分享了 RCM 实践经验和典型做法，在变压器组部件故障模式分析、失效风险和后果评估、检修策略逻辑决断等方面收获了良好的成效，设备隐患预警能力得到较大提高、检修理念升级转变、检修效率得到有效提升。

3.2 状态检修模式

状态检修模式是随着电力监测技术不断发展而逐渐兴起的一种较为先进的检修维护方式。这种模式借助实时监测设备运行时的各项状态，如温度、振动、电流以及电压等参数情况，以此对设备的健康状况给予评估，依据设备的实际状态来判定是否需要展开检修，以及明确检修的具体内容和相应时间。状态检修模式可实时获取设备运行状态信息，及时察觉设备潜在故障隐患，借助对设备运行数据展开连续监测与分析，可把握设备健康状况变化趋势，提前预估设备可能出现的故障，并采取对应措施加以处理，状态检修模式能依据设备实际状态制定精准检修计划，避免了传统检修维护模式存在的盲目性。通过分析设备运行数据，可明确设备故障类型、故障位置以及故障程度，制定针对性检修方案，提升检修效率与质量，状态检修模式能减少不必要的检修项目及检修次数，降低维修成本，因可依据设备实际状态进行检修，避免了过度检修与检修不足的问题，延长了设备使用寿命，提高了可靠性，减少了因设备故障造成的经济损失。

为了推广和应用状态检修模式，电力企业需要加大对状态监测技术的研发投入，提高状态监测设备的精度和可靠性。同时，还需要建立完善的设备状态数据库和分析模型，对设备的运行数据进行深入分析和挖掘。此外，还需要加强对技术人员的培训和教育，提高其专业技能和综合素质。

4 电力设备检修维护实践

4.1 电力变压器检修维护实践

电力变压器作为电力系统的关键设备，其检修维护工作有着极高的关键性。在实际操作时，首先要对变压器展开全面的外观检查，包括变压器、套管以及

油位计等诸多部件,查看是否有渗漏油、油位异常以及套管破损等状况,例如:某220 kV变电站的35 kV站用变在一次停电试验期间,发现铁心绝缘电阻有所降低,经检查得知是变压器通风道里的灰尘未清扫彻底,清扫处理完毕后铁心绝缘电阻恢复到正常状态。这充分说明定期清扫变压器及其通风道,维持空气顺畅流通,对保障变压器正常运行起着关键作用。另外,还要对变压器的电气性能展开检测,如测量绕组的直流电阻、绝缘电阻以及介损等,借助数据分析来判定变压器是否存在内部故障隐患,在检修进程中,若发现变压器存在轻微故障,如局部过热、绝缘老化等,可采取针对性举措给予处理,如加强通风散热、更换老化绝缘部件等,以此延长变压器的使用期限,保障电力系统的稳定供电。

此外,对于变压器运行环境的监测与改善也不容忽视。周围环境湿度、温度过高都可能影响变压器性能,要安装温湿度监测装置,实时掌握数据。一旦发现环境异常,需及时采取除湿、降温等措施。同时,建立完善的变压器检修维护档案也十分必要,详细记录每次检修时间、内容、发现的问题及处理方式。这有助于分析变压器运行状态变化趋势,提前预判可能出现的故障。在日常运维中,还要加强对运维人员的培训,提升其专业技能与应急处理能力,确保变压器始终处于良好运行状态,为电力系统稳定运行筑牢根基。

4.2 电力电缆检修维护实践

电力电缆作为电力传输的关键通道,其检修维护工作对电力供应可靠性有着直接影响。在开展电力电缆的检修维护工作时,首要任务是做好日常的巡视检查工作,对于设有专人值班的变电所,每班都要对电缆进行检查,而对于无人值班的变电所,每周最少要进行一次检查,在如恶劣天气、电缆附近有施工等特殊情形下,还需要增加巡视的次数。巡视的内容涉及检查电缆外观有无破损、电缆头密封是否良好以及电缆沟内有无积水等方面,比如在一次巡视过程中发现一条电缆沟内存在积水,经过排查确定是电缆沟防水层破损所致,随后及时修复防水层并排除积水,防止了电缆因受潮而出现故障,还需要定期对电缆开展预防性试验,如绝缘电阻测试、直流耐压试验等,依据试验数据来评估电缆的绝缘状况。若发现电缆绝缘性能有所下降,就需要探寻原因,比如电缆是否存在机械损伤、是否受潮等,并且采取相应的修复举措,如对损伤部位进行修补、对受潮电缆进行干燥处理等。

4.3 高压柜检修维护实践

高压柜是电力系统中关键的控制以及保护设备,其检修维护工作对保障电力系统安全稳定运行意义重

大。在高压柜的日常维护工作中,需定期清扫柜内设备,清理灰尘与杂物,避免因灰尘积聚致使设备散热不佳或者引发短路故障,比如某变电站的10 kV高压开关柜因长时间未清扫,柜内积尘颇多,造成开关触头接触不良,引发设备故障。经清扫处理后,设备恢复正常运转。另外,还需对高压柜内的断路器、隔离开关等设备进行检查与调试,保证其动作灵活且可靠。在检修进程中,要严格依照操作规程实施停送电操作,保障检修人员的安全,针对高压柜的二次回路,要定期查看接线有无松动、元器件有无损坏等情况,及时察觉并处理潜在故障隐患。此外,还需对高压柜的运行环境进行监测与改善,如控制柜内温度、湿度,防止因环境因素致使设备故障,例如在高温环境中,要强化对高压柜的通风散热,防止设备因过热而损坏,通过定期的检修维护工作,可有效提升高压柜的可靠性以及使用寿命,保障电力系统安全稳定运行。

5 结束语

电力设备的可靠性检修维护工作对电力系统的稳定运行至关重要。传统的检修维护模式存在一定的局限性,相比之下,以可靠性为中心的RCM模式以及状态检修模式有着更为突出的优势,通过针对电力变压器、电力电缆、高压柜等各类设备所开展的检修维护实践可以证实这些模式的可行性以及有效性。在未来的发展过程中,需要持续对检修维护模式进行优化,大力加强技术创新以及实践应用,以提升电力设备的可靠性,为电力系统的安全稳定运行提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 顾乐涵,丁盛阳.高压电力设备检修中增强虚拟现实技术运用研究[J].电力设备管理,2025(04):11-13.
- [2] 张繁露,陈刚.电力设备可靠性检修维护模式及其实践[J].广播电视网络,2025,32(02):89-92.
- [3] 张帆.电力检修技术与电力施工技术在电力工程中的应用研究[J].光源与照明,2025(02):91-93.
- [4] 艾峰.智能变电站二次设备检修及预警方法研究[J].城市建筑空间,2024,31(S2):405-406.
- [5] 杨石林.智能在线监测技术在电力设备检修中的应用[J].电子技术,2024,53(12):168-169.
- [6] 李钢.新时期电力工程中的电力检修及电力施工技术[J].价值工程,2024,43(33):137-140.
- [7] 何洪亮,朱涛,徐敏,等.电网设备检修准时停复电管理技术及应用[J].云南电业,2024(05):31-37.
- [8] 张炜,王佳琳,张懿议,等.基于役龄回退分析的电力设备检修决策方法研究[J].电力工程技术,2020,39(04):201-206.

大数据分析在工程造价预测与决策中的角色探讨

丁 祎¹, 郭 桢²

(1. 日照交通能源发展集团有限公司, 山东 日照 276800;

2. 山东交工建设集团有限公司, 山东 日照 276800)

摘 要 在数字化浪潮席卷各行业的当下, 大数据分析为工程造价领域带来了深刻变革。本文聚焦大数据分析在工程造价预测与决策中的角色, 剖析其现状、意义及面临的挑战, 提出针对性策略, 旨在为工程造价管理的创新发展提供理论指引与实践借鉴, 助力工程项目在成本控制与效益提升上实现精准决策, 推动行业迈向智能化、精细化管理新阶段。

关键词 大数据分析; 工程造价预测; 成本优化

中图分类号: TU723; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.023

0 引言

随着社会经济的高速发展, 工程项目规模日益庞大、结构愈发复杂, 传统的工程造价预测与决策模式在面对海量、多源、动态的数据环境时显得力不从心。大数据分析凭借其强大的数据处理、挖掘与预测能力, 成为破解工程造价管理难题的关键利刃。它不仅能整合历史造价数据、市场波动信息、项目特征参数等多元数据, 还能通过智能算法精准洞察造价趋势, 为决策者提供科学、前瞻的依据, 引领工程造价管理从经验驱动向数据驱动转型。

1 工程造价预测与决策的现状与意义

1.1 传统造价预测的困境与大数据的破局之道

传统工程造价预测依赖于有限的历史数据与专家经验, 受数据样本量小、主观判断偏差等因素制约, 预测准确性难以保障。例如: 在大型基础设施项目中, 仅凭以往类似工程的粗放式类比, 常因忽略细微差异导致预算超支^[1]。而大数据分析通过采集海量项目全生命周期数据, 涵盖不同地域、类型、规模的工程案例, 打破数据孤岛, 为精准预测奠定基石。其多维度数据分析能力可深度挖掘隐藏在复杂数据背后的造价规律, 如某地区建筑原材料价格与季节、政策的关联模式, 从而在项目前期快速生成贴合实际的造价基线, 有效规避传统方法的局限。

1.2 大数据助力决策科学化的多维价值

在项目决策阶段, 大数据分析从成本、风险、效益等多角度为决策者赋能。通过对类似成功项目的数

据回溯分析, 精准定位关键成本驱动因素, 辅助决策者优化项目方案, 合理规划资金投入。同时, 实时监控市场动态, 预测材料价格、人工费用的波动趋势, 使决策者能提前布局应对策略, 降低不确定性风险。以某房地产开发项目为例, 借助大数据分析预测到未来半年钢材价格将上涨 10%, 决策者据此调整采购计划, 提前锁定低价货源, 节省了数百万成本, 凸显了大数据在决策中的巨大价值。

2 大数据分析在工程造价预测与决策中的应用策略

2.1 搭建一体化大数据造价信息平台

在工程造价管理领域, 数据资源的分散性与异构性一直是制约行业发展的关键问题。设计单位、施工单位、材料供应商以及造价咨询机构等各方各自掌握着大量的造价数据, 但这些数据往往因缺乏统一标准与接口而难以实现有效整合与共享。这种数据孤岛现象不仅导致信息流通不畅, 还使得工程造价数据的更新速度滞后, 难以满足项目实时决策的需求^[2]。因此, 构建一体化大数据造价信息平台成为打破数据壁垒、提升工程造价管理水平的必然选择。

一体化大数据造价信息平台的建设, 首先需要从数据采集环节入手, 通过标准化的数据接口, 将分散于各参与方的造价数据进行汇聚。这些数据包括但不限于工程项目的预算、结算、进度款支付记录, 以及市场价格波动、政策法规调整等外部信息。在此基础上, 平台利用数据清洗技术, 对采集到的海量数据进行预处理, 去除重复、错误或无关的数据, 确保数据的质量

与可用性。平台架构的设计是实现数据高效处理与共享的关键。采用Hadoop等大数据技术构建的分布式存储与计算架构，能够有效应对工程造价数据的海量性与复杂性。通过云计算技术的加持，平台具备强大的数据处理能力，能够在短时间内完成对海量数据的分析与挖掘，为用户提供实时、准确的造价信息查询服务。

以上海某大型建筑企业为例，该企业通过搭建内部造价数据平台，汇集了历年项目数据，实现了从项目立项到竣工结算的全生命周期造价数据管理。工程师在进行新项目预算编制时，可在线查询类似工程的详细造价指标，平台通过智能算法为工程师提供参考建议，帮助其快速生成初步预算方案。在这一过程中，数据的准确性得到了显著提升，以往因数据不准确导致的预算偏差问题得到了有效解决。此外，平台还具备数据可视化功能，将复杂的造价数据转化为直观的图表、仪表盘等形式，使项目管理者能够一目了然地了解成本分布、预算执行情况等各项费用的变化趋势。例如：通过成本对比图，管理者可以清晰地看到实际支出与预算之间的差异，及时发现超支问题并采取措施；进度一成本曲线图则能直观反映项目进度与成本的关系，便于调整施工计划以优化资源配置。

2.2 构建智能预测模型与算法优化

在工程造价预测领域，机器学习与深度学习算法的应用已成为提升预测精度与决策科学性的关键手段。通过引入神经网络、支持向量机等先进算法，结合工程造价数据的复杂特性，能够构建出更为精准的预测模型。以某高速公路建设项目为例，研究者利用神经网络模型综合分析了地形、地质条件、交通流量等多维度因素对工程造价的影响。

在模型构建过程中，数据的预处理与特征工程至关重要。工程造价数据通常具有多源性、异构性和动态性，需要通过数据清洗、标准化、降维等操作，提取出对造价影响显著的特征变量。例如：在高速公路项目中，地形的起伏程度、地质的稳定性、交通流量的季节性变化等都被视为关键特征，通过这些特征的量化与整合，为神经网络模型提供了高质量的输入数据。为了进一步优化模型性能，研究者采用了深度学习中的卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN)结构。CNN能够有效提取空间特征，如地形的局部变化对造价的影响；而RNN则擅长处理时间序列数据，如原材料价格的波动趋势。通过将这两种网络结构相结合，模型能够同时捕捉到工程造价在空间和时间维度上的复杂变化规律，从而提高预测的准确性。

在模型训练过程中，算法的优化同样不可或缺。通过选择合适的优化算法，如随机梯度下降(SGD)或Adam优化器，能够加速模型的收敛速度，提高训练效率^[3]。同时，为了防止模型过拟合，研究者采用了正则化技术、Dropout方法以及交叉验证等策略，确保模型在训练数据和测试数据上均能表现出良好的泛化能力。此外，模型的持续更新与验证机制也是保障其长期有效性的关键。工程造价受到多种因素的动态影响，如政策法规的变化、市场供需关系的波动等。因此，研究者建立了一套动态数据更新机制，定期将最新的项目数据纳入模型训练，以适应市场环境的变化。同时，通过定期对模型进行验证与评估，根据实际项目的反馈调整算法参数，进一步优化模型的预测性能。在实际应用中，该智能预测模型为工程造价决策提供了有力支持。通过对造价的精准预测，项目管理者能够在项目前期合理规划资金预算，优化资源配置，降低项目风险。例如：在某高速公路项目的前期规划阶段，利用该模型预测了未来三年的造价趋势，为项目的融资计划和资金分配提供了科学依据。

2.3 强化专业人才跨界融合培养

在工程造价行业迈向数字化转型的进程中，强化专业人才的跨界融合培养不仅是应对行业变革的必然选择，更是提升行业整体竞争力的关键举措。当前，工程造价专业人才需求特征已发生显著变化，市场对既具备扎实传统造价知识，又掌握前沿大数据技术的复合型人才需求迫切。为满足这一需求，高校与企业需协同发力，构建全方位、多层次的人才培养体系。

从高校层面来看，工程造价专业课程体系的优化是培养复合型人才的基础。课程设置应打破学科壁垒，深度融合工程管理、计算机科学、统计学等多学科内容，构建以“工作过程为导向、工作项目为载体”的课程体系，将大数据分析技术贯穿于专业课程教学中。例如：在专业基础课程中，增加数据结构、数据库原理等计算机科学课程，以及数据分析与统计建模等统计学课程，为学生后续学习大数据分析在造价领域的应用奠定坚实的理论基础。在专业核心课程中，开设《大数据分析在工程造价》等应用实践课程，通过实际案例分析，让学生掌握如何运用大数据技术解决工程造价中的复杂问题。

企业作为人才培养的重要主体，应积极承担社会责任，通过内部培训与技能竞赛等方式，提升员工的大数据处理与分析能力。定期开展大数据技术培训课程，邀请行业专家或高校教师授课，系统讲解大数据

分析工具（如 Python、R 语言）和数据挖掘技术在工程造价中的应用。例如：某建筑咨询公司通过组织内部大数据培训，员工利用所学技能自主开发简易造价数据分析工具，工作效率大幅提升，人才培养成效显著。此外，企业还应鼓励员工参与技能竞赛，以赛促学，激发员工学习大数据技术的积极性和主动性。通过竞赛，员工不仅能够提升自身技能水平，还能增强团队协作能力和创新思维能力。在人才培养过程中，还需注重师资队伍的建设。高校应加大“双师型”教师的培养力度，鼓励教师到企业挂职锻炼，获取实际项目经验，提升教师的实践能力。同时，从企业聘请具有丰富实践经验的专业技术人员担任兼职教师，充实教学团队，为学生带来最新的行业动态和技术应用。企业也应积极参与高校的人才培养过程，通过与高校共建实训基地、联合开展科研项目等方式，为学生提供实践机会，为教师提供科研平台。

2.4 完善数据安全与质量管控体系

在工程造价领域，数据安全与质量管控体系的完善是确保大数据分析有效性和可靠性的关键环节。数据作为工程造价决策的重要依据，其安全性与质量直接关系到项目的经济效益与风险控制。因此，构建一个全面且高效的数据安全与质量管控体系，不仅是技术层面的挑战，更是管理层面的重要任务。

数据安全管理体系的建立是数据安全管理的基石。通过制定严格的数据安全策略，明确数据在采集、传输、存储、使用和销毁等全生命周期中的安全要求，能够有效防止数据泄露、篡改和滥用。在技术手段方面，采用加密存储技术对敏感数据进行加密处理，确保数据在存储和传输过程中的保密性。访问权限分级机制则根据用户的角色和职责分配不同的数据访问权限，通过多因素认证等手段进一步增强访问控制的安全性^[4]。此外，数据备份与恢复机制是应对数据丢失或损坏的重要保障，通过定期备份数据并将其存储在安全的环境中，确保在数据遭受意外损失时能够迅速恢复。

数据质量评估指标体系的建立是确保数据质量的关键环节。数据质量的评估应从完整性、准确性、时效性、一致性等多个维度展开。数据完整性要求数据记录完整无缺，不存在缺失值或空值；准确性则强调数据的正确性和真实性，避免数据错误或偏差；时效性确保数据能够及时反映当前情况，避免因数据过时而导致决策失误；一致性要求数据在不同系统和业务流程中保持统一，避免数据冲突和矛盾。通过建立数据质量监控体系，定期对数据进行校验和清洗，能够

及时发现并纠正数据质量问题。同时，实施数据生命周期管理策略，确保数据在达到其生命周期终点时能够安全地归档或销毁，进一步提升数据质量。

在数据录入阶段，智能校验算法的应用能够有效提升数据质量。通过自动识别并修正异常数据，智能校验算法能够在数据进入分析流程之前确保其高质量。例如：利用机器学习算法对数据进行实时监测，能够快速识别不符合数据质量标准的记录，并自动触发修正流程^[5]。

此外，数据质量的事后治理、事中监控和事前防范是数据质量管理的三个重要环节。事后治理主要针对已经发现的数据质量问题进行处理，通过制定解决方案并实施改进措施来消除问题的影响。事中监控则通过工具化手段，根据预先设定的数据质量规则对数据进行实时监控，及时发现并处理数据质量问题。事前防范则是通过总结业务需求，制定数据质量模板，从源头上避免数据质量问题的发生。

3 结束语

大数据分析在工程造价预测与决策中扮演着不可或缺的关键角色，它犹如一座桥梁，连接起海量数据与科学决策，推动工程造价管理从传统模式向智能化、精细化跨越。通过搭建信息平台、优化预测模型、培育专业人才、完善管控体系等多维策略，可充分释放大数据在工程造价领域的潜力，助力工程项目在成本控制、风险规避、效益提升上实现质的飞跃，为行业的可持续发展注入强劲动力，在数字化时代浪潮中引领工程造价管理迈向新高度，开创更加高效、智能、精准的管理新局面。

参考文献：

- [1] 赵红. 基于大数据的数字造价成本控制优化研究 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(04): 175-177.
- [2] 赵文杰. 大数据技术在工程造价预测与成本分析中的应用 [J]. 陶瓷, 2025(01): 213-215.
- [3] 程方圆. 基于大数据分析的工程造价智能预测模型方法分析 [J]. 办公自动化, 2024, 29(21): 72-74.
- [4] 孔超, 高贺, 王文雷, 等. 大数据环境下的电网工程造价分析管控 [J]. 高科技与产业化, 2024, 30(10): 27-29.
- [5] 曹洁玲, 张思琪. 基于大数据的输变电工程电缆线路造价预测与决策分析 [J]. 智慧中国, 2024(08): 88-89.

工业 4.0 背景下机械电子系统的 信息化与智能化发展

李 冲, 李 迅, 李 峰

(青岛众和建筑机械租赁有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 机械电子系统向信息化与智能化迈进成为制造业转型升级的必由之路。信息化为系统筑牢数据根基, 赋予高效信息处理能力; 智能化则为系统注入自主决策与优化运行的智慧。物联网、大数据、人工智能等关键技术深度融合, 驱动机械电子系统革新, 其应用领域持续拓展, 从工业制造延伸至医疗、交通等多领域, 为经济社会发展带来深刻变革, 助力全球制造业迈向更高质量发展阶段。本文阐述了工业 4.0 的内涵及对机械电子系统的影响, 分析了机械电子系统信息化和智能化的发展现状、关键技术, 探讨了机械电子系统信息化与智能化的融合发展模式, 旨在为机械电子系统创新发展提供理论支持与实践参考。

关键词 工业 4.0; 机械电子系统; 信息化; 智能化

中图分类号: TH16; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.024

0 引言

工业 4.0 作为第四次工业革命的核心概念, 以智能制造为主导, 融合了物联网、大数据、人工智能等先进技术, 致力于实现生产过程的数字化、网络化和智能化。机械电子系统作为工业生产的重要组成部分, 在工业 4.0 的推动下, 正朝着信息化与智能化方向加速发展。信息化使机械电子系统实时采集、传输和处理大量数据, 为智能化决策提供依据; 智能化则赋予机械电子系统自主学习、自适应控制和优化运行的能力, 提升其性能和效率。深入研究机械电子系统的信息化与智能化发展, 对于推动工业 4.0 的全面实现、促进制造业转型升级具有重要的现实意义。

1 工业 4.0 内涵及对机械电子系统的影响

1.1 生产模式变革

工业 4.0 推动机械电子系统的生产模式从传统的大规模、标准化生产向定制化、个性化生产转变。通过信息化技术, 企业能够实时获取客户需求, 利用智能化生产设备和系统, 实现产品的快速定制和生产。在汽车制造中, 客户借助网络平台定制自己心仪的汽车配置, 机械电子系统根据客户订单信息, 自动调整生产流程和工艺参数, 实现个性化汽车的高效生产^[1]。

1.2 系统集成度提升

工业 4.0 促进了机械电子系统各组成部分之间以及与外部系统之间的高度集成。从设计、生产到销售、服务的全生命周期中, 不同环节的信息无缝对接和共享。机械电子系统内部的传感器、控制器、执行器等

部件通过网络连接, 实现协同工作; 同时, 机械电子系统与企业的管理信息系统、供应链系统等进行集成, 提高企业的整体运营效率。在智能工厂中, 机械电子设备能够实时与企业资源计划(ERP)系统进行数据交互, 根据生产计划自动调整生产任务, 实现生产过程的优化管理^[2]。

1.3 智能化水平提高

在工业 4.0 的推动下, 机械电子系统的智能化水平显著提高。引入人工智能、机器学习等技术, 机械电子系统实现自主故障诊断、预测性维护、自适应控制等功能。例如: 智能机床能够通过加工过程中的数据监测和分析, 自动调整加工参数, 优化加工工艺, 提高加工精度和效率; 同时, 对设备运行数据进行实时分析, 预测设备故障发生的可能性, 提前进行维护, 减少设备停机时间。

2 机械电子系统信息化的关键技术

2.1 物联网技术

物联网技术是机械电子系统信息化的基础, 利用物联网, 机械电子设备实现互联互通, 形成一个庞大的智能感知网络。在工业生产中, 物联网技术使设备之间实时交换信息, 协同工作。例如: 在智能工厂中, 利用物联网技术将生产线上的各种设备连接起来, 实现设备之间的自动协作, 提高生产效率和质量。同时, 物联网技术还能实现设备的远程监控和管理, 企业管理人员可以通过手机、电脑等终端设备随时随地了解设备的运行状态, 进行远程操作和控制^[3]。

2.2 大数据与云计算技术

大数据技术为机械电子系统的数据处理提供了强大的工具,对海量数据进行分析,使企业深入了解生产过程中的各种规律和趋势,优化生产决策。云计算技术则为大数据处理提供了强大的计算能力和存储资源。企业将数据存储在云端,利用云计算平台的计算资源进行数据处理和分析,降低企业的硬件投资成本和数据处理难度。一些企业利用云计算平台搭建了工业大数据分析系统,对生产过程中的数据进行实时分析和挖掘,为企业的生产管理提供决策支持。

3 机械电子系统智能化发展

3.1 发展现状

1. 自动化控制水平提升。目前,机械电子系统的自动化控制水平不断提高,采用先进的控制器和控制算法,机械电子设备能够实现精确的运动控制、过程控制和逻辑控制。在数控机床中,利用数字控制系统(CNC)能够实现对刀具的精确控制,完成复杂的加工任务;在自动化生产线中,利用可编程逻辑控制器(PLC)实现对设备的自动化控制,提高生产效率和产品质量。

2. 智能决策与优化。机械电子系统开始应用人工智能、机器学习等技术实现智能决策和优化。对大量数据的学习和分析,系统能够自动识别生产过程中的问题和优化机会,并做出相应的决策。在智能仓储系统中,利用机器学习算法对货物的存储和搬运数据进行分析,优化货物的存储布局和搬运路径,提高仓储空间利用率和物流效率;在智能能源管理系统中,对能源消耗数据进行分析,能预测能源需求,优化能源分配,降低能源消耗成本^[4]。

3.2 关键技术

1. 人工智能技术。人工智能技术是机械电子系统智能化的核心。机器学习、深度学习等人工智能算法能够使机械电子系统具备自主学习和智能决策的能力。在机械电子系统中,人工智能技术可用于故障诊断、预测性维护、质量控制等方面。对设备运行数据的学习,可建立故障预测模型,提前预测设备故障,为设备维护提供依据;在产品质量检测中,利用深度学习算法对产品图像进行分析,自动识别产品缺陷,提高检测精度和效率。

2. 传感器技术。随着传感器技术的不断发展,传感器的精度、可靠性和智能化程度不断提高。新型传感器如智能传感器、微机电系统(MEMS)传感器等能够实时采集设备的各种状态信息,并对数据进行预处理和分析。智能压力传感器不仅能够测量压力值,还对压力数据进行分析,判断设备是否存在异常运行情

况;MEMS 加速度传感器体积小、功耗低,广泛应用于机械电子设备的振动监测和姿态控制等领域^[5]。

4 机械电子系统信息化与智能化融合发展

4.1 融合的必要性

1. 提升系统性能。信息化为智能化提供了丰富的数据资源和强大的数据处理能力,智能化则基于信息化的数据和处理结果,实现对机械电子系统的优化控制和智能决策。二者融合可提升系统的性能和效率,实现生产过程的智能化、自动化和高效化。结合信息化系统采集设备的运行数据,利用智能化的数据分析算法进行处理,可实现设备的智能故障诊断和预测性维护,提高设备的可靠性和运行效率。

2. 满足市场需求。随着市场竞争的加剧,客户对产品的个性化、定制化需求日益增长。信息化与智能化的融合使机械电子系统更好地满足市场需求。通过信息化系统获取客户需求信息,利用智能化的生产设备和系统,实现产品的快速定制和生产,提高企业的市场响应能力和竞争力。在智能家居领域,通过信息化技术将家居设备连接起来,利用智能化的控制算法实现对家居设备的个性化控制,满足用户对舒适、便捷生活的需求。

4.2 融合模式

1. 技术融合。技术融合是信息化与智能化融合的基础,将物联网、大数据、云计算等信息化技术与人工智能、机器学习、传感器等智能化技术进行有机结合,形成新的技术体系。利用物联网技术采集设备数据,通过云计算平台进行存储和处理,再运用人工智能算法对数据进行分析 and 挖掘,实现设备的智能控制和优化。在智能工厂中,将信息化的生产管理系统与智能化的生产设备进行技术融合,实现生产过程的自动化、智能化和信息化管理。

2. 产业融合。产业融合是信息化与智能化融合的重要体现。机械电子行业与信息技术产业、人工智能产业等进行深度融合,形成新的产业形态。传统的机械制造企业引入信息化和智能化技术,向智能制造企业转型,实现产业升级;信息技术企业和人工智能企业与机械电子企业合作,共同开发智能化的机械电子产品和解决方案,拓展市场空间。产业融合促进资源的优化配置和创新能力的提升,推动机械电子系统信息化与智能化的协同发展。

4.3 应用融合

应用融合是信息化与智能化融合的最终目标。将信息化与智能化技术应用于机械电子系统的各个领域,实现生产、管理、服务等环节的智能化和信息化。在工业生产中,信息化与智能化的应用融合,可实现生

产过程的智能化控制、质量的智能化检测、设备的智能化维护等；在企业管理中，利用信息化与智能化技术可实现企业资源的优化配置、决策的智能化支持等；在售后服务中，结合信息化与智能化手段可实现产品的远程监控、故障诊断和维修服务等。

5 工业 4.0 背景下机械电子系统信息化与智能化发展趋势

5.1 技术创新推动

随着科技的不断进步，物联网、大数据、人工智能、传感器等技术将不断创新和发展，为机械电子系统的信息化与智能化提供更强大的技术支持。5G 通信技术的应用将进一步提高数据传输速度和可靠性，促进机械电子系统的实时控制和远程操作；量子计算技术的发展可能为大数据处理和人工智能算法优化带来突破，提升机械电子系统的智能决策能力；新型传感器技术的研发将使机械电子系统能够获取更丰富、更准确的信息，推动系统的智能化发展。

5.2 应用领域拓展

机械电子系统的信息化与智能化将在更多领域得到应用和推广。除工业制造领域，其还将在医疗、交通、能源、农业等领域发挥重要作用。在医疗领域，智能化的医疗设备和信息化的医疗管理系统将提高医疗诊断的准确性和效率，改善医疗服务质量；在交通领域，智能交通系统将实现车辆的自动驾驶、智能调度和交通拥堵缓解；在能源领域，信息化与智能化技术将优化能源生产、传输和消费过程，提高能源利用效率；在农业领域，智能农业装备和信息化的农业管理平台将实现精准农业生产，提高农业生产效率和农产品质量。

5.3 产业生态构建

在工业 4.0 背景下，机械电子系统信息化与智能化的发展将促进产业生态的构建。企业、高校、科研机构、供应商等各方将加强合作，形成产学研用协同创新的产业生态体系。企业作为创新主体，将加大研发投入，推动信息化与智能化技术在机械电子系统中的应用；高校和科研机构将开展基础研究和科技创新，为产业发展提供技术支撑；供应商将提供高质量的设备、零部件和技术服务，保障产业供应链的稳定。产业生态的构建，将促进资源共享和知识流动，加速技术创新和成果转化，推动机械电子系统信息化与智能化的可持续发展。企业间通过合作研发、共享技术平台等方式，共同攻克技术难题，拓展市场空间；高校和科研机构与企业紧密合作，根据企业实际需求开展针对性研究，培养适应产业发展的专业人才；供应商则依据市场趋势和企业需求，不断创新产品和服务，提升产业供应链的韧性与竞争力。这种协同创新的产

业生态体系将为机械电子系统在工业 4.0 时代的蓬勃发展营造良好环境。

5.4 标准化与规范化建设

随着机械电子系统信息化与智能化的深入发展，标准化与规范化建设愈发重要。统一的标准和规范有助于解决系统集成难度大、信息孤岛等问题，促进不同企业、不同设备和系统之间的互联互通与协同工作。在数据格式、接口标准、通信协议、安全规范等方面，行业组织和相关机构将加快制定统一标准，推动机械电子系统信息化与智能化的标准化进程。例如：制定统一的数据接口标准，可使不同品牌的传感器和控制器能够无缝对接，实现数据的顺畅流通；规范通信协议，能确保设备间通信的稳定性和可靠性。标准化与规范化建设将为机械电子系统的大规模应用和产业发展提供坚实的保障。

6 结束语

在工业 4.0 背景下，机械电子系统的信息化与智能化发展是制造业转型升级的必然趋势。信息化为机械电子系统提供了数据基础和高效的信息处理能力，智能化赋予系统自主决策和优化运行的智慧。尽管在机械电子系统的发展过程中面临数据安全、系统集成、技术研发、人才短缺等诸多挑战，但随着各项关键技术的不断创新突破，信息化与智能化的深度融合，以及产业生态的逐步构建，机械电子系统将在工业 4.0 时代展现出强大的生命力。机械电子系统应用领域将不断拓展，在推动工业制造效率提升、产品质量优化的同时，还将在医疗、交通、能源、农业等多个领域发挥重要作用，为社会经济发展带来巨大变革。未来，机械电子系统的信息化与智能化发展需要企业、高校、科研机构等各方共同努力，加强技术研发、人才培养，积极参与标准化建设，践行绿色发展理念，以实现机械电子系统在工业 4.0 时代的持续创新与发展，助力全球制造业迈向更高水平。

参考文献:

- [1] 刘家念. 基于智能控制的机械电子系统设计与研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(15): 291-293, 296.
- [2] 王振. 电子机械制动系统控制策略设计与仿真研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [3] 张昊. 电子机械制动系统建模与控制策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [4] 赵逸云, 林辉, 李兵强. 电子机械制动系统无压力传感器控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(10): 2711-2720.
- [5] 邱宇杰. 微电子技术在机械加工系统中运用分析[J]. 大众标准化, 2023(19): 62-64.

基于协同管理模式的港口装卸桥及基础设施运维策略分析

李东浩, 赵绪高

(烟台国际集装箱码头有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 随着世界海运贸易的发展, 港口成为国际物流供应链中的重要一环, 而装卸桥与码头设施的运营和维修管理性能直接影响港口的业务水准。本文主要对港口装卸桥与码头设施协同维修管理模式展开了深入的分析研究, 从港口目前维修管理存在的问题入手, 采用协同性理论, 提出了综合维修管理模式, 并对实际港口维修管理的实际案例进行分析, 论证了协同管理模式有助于提高维修作业的效率, 延长设备使用寿命, 提高港口的业务水平。

关键词 港口装卸桥; 码头设施维修; 协同管理模式

中图分类号: U653

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.025

0 引言

港口是国际贸易和全球供应链重要的节点, 装卸桥以及码头设施作为港口的核心生产设施, 其运行状况与维修管理直接决定了港口运行质量和生产效率。随着全球海运贸易的增长以及港口智能化、自动化水平的不断提升, 港口装卸桥及码头设施的复杂性和精准性不断提升, 对于维修管理工作也提出了新的要求^[1]。

1 案例介绍

本文选用的典型港口为某沿海 XY 集装箱港口, 经过十余年的发展已成为亚洲地区重要的集装箱枢纽港, 年吞吐量 150 万标箱以上, 拥有 4 个集装箱深水泊位, 岸线 1 300 m, 集装箱堆场面积约 55.8 万 m², 各类关键设施包括码头的堆场、装卸桥的大车轨道基础、给装卸桥供电的电缆井等; 另外还包括场地照明如高杆灯、供水, 消防等设施。调研表明, 港口存在如下具体问题: 港口年均故障停机时间 680 小时, 故障响应时间平均 0.5 小时, 维修作业完成时间平均 8.5 小时, 计划外维修占维修总工时 62%, 备件库存周转次数仅 2.8 次/年, 积压备件金额达 300 余万元, 各类设备的维修资源共享不足, 各维修部门之间存在着严重的“信息孤岛”。上述问题严重影响港口的生产效率和客户服务水准, 制约港口国际竞争力的提升。针对这些问题, 2023 年 1 月该港口由总工程师牵头, 组织设备部、信息部、生产部、安全部和财务部等部门参与的项目组, 聘请行业专家和院校研究团队技术支持, 开始实施协同维修管理模式的改革项目。

2 港口装卸桥与码头设施类型及维修特点

根据功能定位和结构特点, 港口装卸桥与码头设施可划分为装卸桥直接支撑类设施、作业场地类设施和辅助保障类设施三大类型。装卸桥直接支撑类设施主要包括装卸桥大车轨道基础系统、电缆井与电缆沟系统以及装卸桥供电系统, 这类设施与装卸桥运行直接相关, 性能状态对装卸桥的安全运行和作业效率产生决定性影响。装卸桥大车轨道基础系统由钢轨、铺设层、基础梁和地基组成, 承载装卸桥自重及作业荷载, 通常每米承受 5~8 吨的线性荷载, 轨道基础平整度要求严格控制在 ± 5 mm 范围内, 以保证装卸桥运行平稳可靠。电缆井与电缆沟系统作为装卸桥电力和控制信号传输通道, 须具备较高的防水防火性能, 如在沿海高盐雾环境下, 电缆井金属构件易受腐蚀, 每年检修率高达 38%, 是装卸桥停机的主要隐患源之一。装卸桥供电系统包括变电站、配电房及供电线路, 对可靠性要求极高, 通常采用双回路或 N+1 备用电源系统, 保证供电连续性, 维修作业涉及高压电气设备, 安全风险系数较大, 需由持证电气工程师和技术人员执行专业操作规程^[2]。辅助保障类设施主要包括场地照明系统、给排水系统和消防系统, 这类设施为装卸桥作业提供了必要的环境支持。场地照明系统以高杆灯为主, 高度通常在 20~40 m 之间, 每座高杆灯配备 10~18 盏 1 000~2 000 W 的金卤灯或 LED 灯, 维修作业涉及高空操作, 安全风险显著, 需采用专用升降平台和安全防护措施, 照明系统的可靠性直接影响夜间作业效率和安全性。给排水系统包括管网、

泵站、阀门等多个组成部分，系统复杂性高，故障诊断难度大，如地下管网泄漏问题，需依靠声波检测和压力监测等技术手段辅助判断，维修作业通常影响较大区域的水资源供应，需统筹规划实施。消防系统作为港口安全保障的核心设施，包括消火栓、消防水池、自动喷淋等装置，系统可靠性要求极高，维修作业需严格遵循消防法规和技术规范，每月至少进行一次全面检测，及时发现并修复潜在隐患^[3]。

港口装卸桥与码头设施维修具有显著特点。第一，码头设施维修周期较长，以轨道基础为例，每标准段（100 m）的维修通常需要92~168小时，堆场维修每1 000 m²需要120~240小时，维修期间会对特定区域的装卸作业造成影响，生产损失平均每小时达到12~18标箱。第二，码头设施维修涉及专业领域多样，包括土木工程、电气工程、给排水工程等多个学科，需要配备结构工程师、电气工程师、测量工程师等多专业技术团队，专业间协调难度大，技术标准不统一问题突出。第三，码头设施劣化过程相对缓慢，具有较高的维修预见性，通过定期检测和状态监测可提前发现劣化趋势，维修计划可提前6~12个月制定，预防性维修比例可达70%以上，大幅降低突发故障率。第四，码头设施维修影响范围广，单项设施维修可能影响2~5台装卸设备的正常运行，需精心规划作业调度，科学安排备用装卸区域，降低对整体生产的影响。第五，码头设施维修与装卸桥维修的协同性要求高，如轨道基础维修与装卸桥大修应同期进行，电缆井维修需与装卸桥电气系统检修协调实施，从而提高维修效率，降低重复作业风险。第六，码头设施维修资源具有特殊性，维修材料种类多达800~1 200种，包括电缆、管材等，维修设备专用性强，设施维修备品备件库存管理难度大^[4]。

3 协同维修管理模式的实施流程与关键举措

3.1 实施前期调研与问题诊断

项目组首先运用座谈会、走访法、调查法和讨论法对港口装卸桥及码头设备维修管理现状进行综合调研，发现问题主要有：设备档案管理状况差（发现设备档案信息完整性仅有72%）、设备状态劣化数据缺失（2022年收集在册设备故障事件2876起）、维修作业流程杂乱（平均一次维修作业须经历11个审批环节）、维修资源配置状况不均（平均人员利用率仅有65%）、备件管理状况不理想（超过28%备件为呆滞料）及维修信息化建设落后（设备信息管理平台7个系统互不兼容）等。通过问题的诊断，找出了问题产生的主要

原因：维修管理体制机制问题（维修管理不统一、各系统“条块分割”）；维修决策缺乏支撑基础（多靠经验）；资源配置不合理（各自为战）；信息化建设问题（信息化程度不高，数据价值未充分挖掘）。针对上述问题原因进行诊断，项目组提出“1+4+N”协同维修管理改革方法策略，“1”指的是“1个中心”，即以“统一的维修管理中心”为中心；“4”代表4个协同，即组织协同、决策协同、资源协同、信息协同；“N”表示“N项功能”，即设备状态监测功能、设备故障预测功能、维修决策功能、资源调用功能、绩效评价功能等。

3.2 组织协同层面的实施细则

XY港口在充分调研的基础上大胆地摒弃传统的以设备种类划分维修部门的模式，组建统一的设备维修管理中心，由设备部原副总经理任主任，合并原有5个维修部门的人员和设备资源^[5]。由于原有维修专业技术人员在部门间的调整和众多的岗位变动可能会带来组织变革障碍，港口采取了“软着陆”的策略，设置半年转换期，原有维修技术骨干人员的薪资不变。新组建的设备维修管理中心划分为状态监测组（12人）、维修计划组（8人）、维修执行组（78人）和备件管理组（3人）。状态监测组配备高级工程师1人、工程师3人和技术员4人，主要配置振动分析仪、红外热像仪、超声波检测仪等先进装备，对关键设备实施在线状态监测；维修计划组主要由具备规划能力的工程技术人员组成，统筹编制维修计划、协调各种资源；维修执行组采取“基础通用+专业分工”的模式，分别组建3个维修组，每组配备4~6名维修技术人员和20~22名维修工，区域责任与设备专业有机结合；备件组采取“集中管控、分级储备”的办法，把设备备件设立三级库（中心库、区域库和现场库）。港口同步出台了《设备维修管理中心工作规则》《协同维修管理绩效考核办法》等12个管理办法，明确了职责权限和交叉合作内容。创新“协同激励”机制，特港出台了“协同维修奖”，把协同成果与个人绩效直接结合，充分调动职工开展协同维修工作^[6]。

3.3 决策协同层面的协同实施

首先，XY港口运用“分层分类”的维修决策协同模型进行设备分类：根据设备的重要程度、可靠性、维修特点，把设施分为ABC三类：A类设施（如码头的堆场、装卸桥的大车轨道基础），B类设施（如给装卸桥供电的电缆井），C类设施（如场地照明的高杆灯、供水，消防等）；B类和C类设备采用预防维修策略与

状态监测、保养相结合。A 类设备根据状态采用主动的预防维修策略，并安装了 428 个在线监测的传感器，进行 24 小时状态监测，平均每台设备安装 13 个关键点位传感器，监测的数据包括温度、振动、位移、电流等物理量，对设备可能发生故障进行预测；B 类和 C 类设备的主要维修策略采用周期性预防维修策略。维修决策模型是技术创新最核心的部分，XY 港口与知名大学合作，基于贝叶斯网络和模糊综合评价方法进行维修决策模型的研究，该模型结合设备状态指标、故障风险指标、维修紧急性指标、资源消耗指标进行设备的状态评估和维修决策，并对评估结果进行了统计，形成了科学的维修决策，模型的主要决策公式：

$$MP_i = \alpha \cdot SC_i + \beta \cdot FR_i + \gamma \cdot UR_i + \delta \cdot RC_i \quad (1)$$

式 (1) 中， MP_i 是设备 i 的维修优先等级指数， SC_i 、 FR_i 、 UR_i 和 RC_i 分别是设备状态、设备故障风险、设备维修紧急程度和设备维修资源需求量，权重因子 α 、 β 、 γ 、 δ 决定了各影响因子在决策中的权重系数大小，使维修决策更精确。通过对决策模型求解，得到各类设备的维修优先等级值，供维修决策参考。

其次，XY 港口创新性地实施了设施维修与设备项目维修协同组织机制，通过统一规划设施与设备的维修时间窗口，两类维修工作可同时进行，有效避免了设备额外停机的情况，这种协同模式显著提高了码头生产效率和设备利用率，同时节约了人工成本，使作业面分布更加合理。例如：在进行 A 类设施（如码头堆场、装卸桥轨道基础）的维修时，港口会同步安排相关联的装卸设备的预防性维护，使设备只需停机一次即可完成多项维修工作，这种“一停多修”的模式每年为港口节约停机时间约 126 小时，提高了设备年可用率 3.2%。维修协同机制依托信息系统达到精准调度，系统检测到设施需要维修时，会自动匹配相关设备的维修需求，生成最优的协同维修方案。

3.4 应用效果评估与分析

协同维修管理模式实施 1 年后，项目组总结了协同维修管理模式的具体应用效果。依据 2023 年全年的设备运行及维修数据，对全年的设备运行及维修状况进行了统计和分析，并针对关键性技术指标进行了对比分析，具体如表 1 所示。

对指标技术分析结果表明：实施协同维修管理模式提升了设备的可靠性、维修效率，设备可用率提升 5.7%，较实施前更高，较行业平均水平 3.6% 更高；平均故障间隔时间提高 61.9%，故障频次明显降低；平均修复时间缩短 50.6%，平均故障响应时间缩短 67.9%，提高了维修响应速度和时效性；故障预防性维修比例

由 38% 提升至 71%，提高了检修工作的主动性，指标数值和技术变化反映出协同维修管理模式在技术方面的应用效果良好。

表 1 协同维修管理模式实施前后的技术指标对比

评估指标	实施前 (2022 年)	实施后 (2024 年)	变化率
设备可用率 (%)	92.5	97.8	+5.7%
平均故障间隔 时间 (小时)	420	680	+61.9%
平均修复时间 (小时)	8.5	4.2	-50.6%
故障响应时间 (小时)	2.8	0.9	-67.9%
计划外停机时间 (小时 / 月)	145	58	-60.0%
预防性维修比例 (%)	38	71	+86.8%
设备状态监测覆盖率 (%)	27	92	+240.7%
维修计划执行率 (%)	78.5	94.2	+20.0%
维修一次完成率 (%)	82.6	96.1	+16.3%
维修质量合格率 (%)	92.3	98.7	+6.9%

4 结束语

协同维修管理模式，有助于解决传统维修管理过程遇到的问题，可提升维修的工作效能，延长设备的使用寿命，满足港口可持续发展的需要。本文从协同与系统工程的方法出发，提出了港口装卸桥与码头设施的维修协同管理模式，经过案例验证了港口装卸桥与码头设施维修协同管理模式的可行性和有效性。

参考文献：

- [1] 王伟. 港口机械现场故障排除与紧急维修技术的探讨 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(04): 181-183.
- [2] 贾静雯. 基于成本评估模型的港口基础设施寿命周期维护策略分析 [J]. 四川水泥, 2024(02): 63-65.
- [3] 张维光. 大型运营原油码头停产整体维修的管理方法 [J]. 水上安全, 2024(11): 16-18.
- [4] 张翰林, 葛世颖, 胡健波. 集装箱码头门式起重机维修策略决策分析 [J]. 水道港口, 2023, 44(03): 513-518, 531.
- [5] 陈庆为, 孙建锐, 李艳丽, 等. 集装箱码头装卸机械能耗限值指标及评价方法研究 [J]. 中国航海, 2025, 48(01): 108-114.
- [6] 陈化贵, 郑伟鸿, 黄争, 等. 自动化集装箱码头门座起重机与 IGV 协同装卸作业工艺 [J]. 港口装卸, 2024(05): 50-53, 56.

基于数字化孪生的 BIM 技术为市政道路与管道协同设计赋能

张明敏¹, 王 爽²

(1. 新疆交通职业技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 北京跨世纪软件技术有限公司, 北京 100080)

摘 要 传统市政道路与管道协同设计受限于二维模式的表达维度局限、数据割裂及全生命周期管理断链等问题, 导致设计冲突频发、施工返工率高、运维数据脱节。基于此, 本文提出基于数字化孪生与 BIM 技术的协同设计框架, 通过“数据层—模型层—应用层”三层架构整合多源异构数据, 构建全要素参数化模型, 并融合 AI 算法与动态模拟技术实现智能决策优化, 从而减少设计冲突、降低施工返工率, 并延长基础设施生命周期, 以期智慧城市建设提供可参考的技术路径。

关键词 数字化孪生; BIM 技术; 市政工程协同设计; 全生命周期管理

中图分类号: TP3; U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.026

0 引言

2023 年 9 月, 交通运输部印发《关于推进公路数字化转型 加快智慧公路建设发展的意见》(以下简称《意见》), 明确提出以数字技术为核心引擎, 推动公路全要素、全链条的智能化升级。这一政策是应对公路行业效率提升、服务优化和可持续发展挑战的必然选择。基于数字化孪生的 BIM 技术为市政道路与管道协同设计赋能, 为市政道路与管道建设提供了契合智慧公路建设的技术支持。

1 传统市政道路与管道协同设计二维设计模式的不足

1.1 空间表达维度局限, 竖向协同能力缺失

二维设计模式以平面投影为核心, 难以精准表达道路与管线的三维空间关系。道路纵断面标高、管线埋深、交叉点竖向避让等关键信息仅通过文字标注或局部剖面图示意, 缺乏全局立体可视化呈现。尤其在复杂地形或密集管网区域, 管线与道路结构层(如路基、桥梁基础)的竖向冲突无法通过平面图纸充分暴露, 导致设计阶段遗留大量隐蔽碰撞风险^[1]。

1.2 数据割裂与协同低效, 动态调整能力不足

在传统设计模式下, 道路与管线专业采用分离的图纸体系与数据标准, 形成“信息孤岛”。道路设计以横纵断面为核心, 管线设计则依赖平面坐标与属性表单, 两者缺乏统一的数据关联机制。在协同设计过

程中, 任一专业的局部修改无法实时传递至其他专业图纸, 需依赖人工比对与手动更新, 效率低下且易遗漏关键信息。

1.3 全生命周期管理断链, 动态反馈机制缺位

二维图纸作为静态设计成果, 无法承载道路与管线的全生命周期信息。施工过程中的设计变更与现场调整信息往往以纸质文档或孤立电子文件留存, 无法与原始设计模型关联, 造成“数据断链”。运维阶段更是缺乏对设计数据的追溯能力, 管线的老化状态、维修记录无法与原始设计条件形成闭环反馈, 制约基础设施的预防性维护与智能化升级^[2]。

2 BIM 技术框架与核心方法

2.1 技术框架设计

如图 1 所示, BIM 技术在市政道路与管道协同设计中的技术框架以“数据驱动、模型融合、智能协同”为核心理念, 构建“三层阶段一体化”体系。

2.1.1 数据层

数据层作为基础支撑, 整合道路工程的地理信息、管线属性参数、施工实时数据及运维历史记录等多元信息。通过建立统一编码规则与数据交换格式, 打破传统设计中的数据孤岛^[3]。

2.1.2 模型层

模型层以 BIM 软件为核心工具, 构建涵盖道路、管线、附属设施的三维参数化模型。道路模型通过横

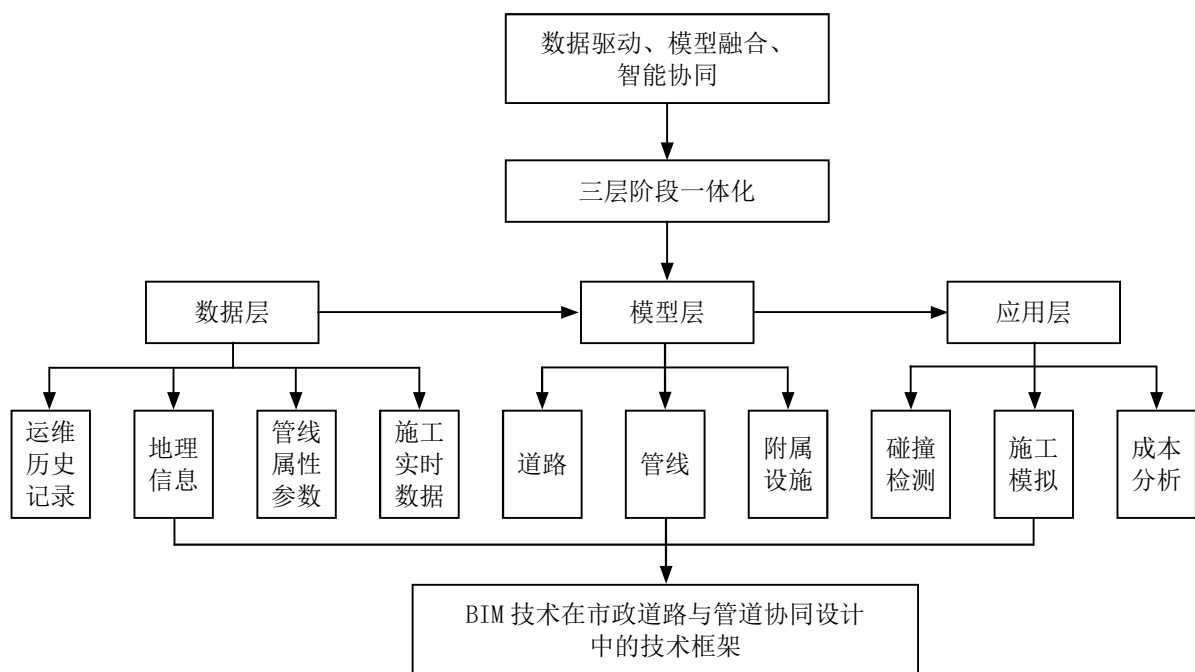


图 1 BIM技术“三层阶段一体化”技术框架

纵断面参数化设计，动态关联路基、路面结构层与边坡几何参数；管线模型基于流体力学原理与工程规范，自动生成坡度、埋深及交叉节点三维避让方案。

2.1.3 应用层

应用层集成碰撞检测、施工模拟、成本分析等功能模块，依托AI算法与云计算实现智能决策。基于BIM模型的自动碰撞检测工具，可快速识别道路结构与管线的空间冲突；施工进度模拟模块结合4D时间轴，优化机械调度与工序衔接；能耗分析引擎则评估管网的运行效率与全生命周期碳排放。

2.2 核心方法创新

2.2.1 全要素参数化建模方法

采用“自顶向下”的建模逻辑，以道路线形为基准，通过参数化驱动管线布局。例如：定义道路纵坡为全局变量，重力流管线的坡度自动关联道路标高变化，非重力管线则通过最小净距约束动态调整水平位置。模型参数与设计规范库绑定，确保方案合规性。

2.2.2 动态模拟与AI优化算法

以管线避让为例，AI算法基于冲突区域的空间拓扑关系，生成管线绕行路径的帕累托最优解集，综合评估施工成本、运维便捷性等指标。同时，结合数字孪生实时数据，动态修正模型预测偏差，提升设计方案的鲁棒性。

2.2.3 多专业协同机制

建立“一模到底”的协同规则，通过IFC标准实

现道路、管线、景观等专业模型的语义互操作。设计变更触发自动校验机制，确保各专业模型的几何与属性一致性。协同平台内置冲突预警与责任矩阵，明确专业分工与数据权限，降低沟通成本。

3 基于数字化孪生的BIM技术市政道路与管道协同设计应用路径与实践案例

3.1 全要素数据整合与可视化协同

在技术层面，依托BIMe等国产化平台，建立统一数据标准与编码规则，将道路几何参数、管线属性、地质勘察数据及施工实时信息集成至云端数据库，通过语义互操作实现多源异构数据的动态关联。在可视化协同层面，以三维数字孪生模型为载体，将道路与管线的空间关系、设计参数及业务数据分层叠加至GIS底图，形成“规划—设计—施工”全链条可视化管理界面。

举例而言，在广西某灌区项目中，平台通过BIM+GIS融合，将54万亩灌区的道路网络与输水管线三维模型与卫星影像叠加，并钻取至局部标段实时监控管道焊接合格率、路基压实度等微观指标；同时，系统内置动态校验规则，自动标记坡度偏差超限区域并生成优化建议，避免传统设计中因人工计算疏漏导致的施工返工^[4]。

3.2 模型精细化管理与动态映射

市政工程模型需支持从设计到运维的全生命周期迭代更新。新版BIMe平台通过“一模到底”机制，实

现模型数据的精细化解析与动态映射，为多阶段协同提供统一数据底座。

3.2.1 参数化建模与精细化解析

在模型创建阶段，平台采用“骨架驱动”的参数化建模方法，将道路与管线的关键参数定义为全局驱动变量，通过逻辑关系绑定实现联动设计。道路横断面模板中定义路基宽度、边坡坡率等参数，管线模型则依据《城市工程管线综合规划规范》自动生成最小覆土深度、水平净距等约束条件。模型解析阶段，平台内置语义分割引擎，将BIM模型构件与工程属性深度绑定，并按照IFC标准生成结构化数据包^[5]。

3.2.2 动态映射与多阶段协同

在施工阶段，平台通过GNSS定位仪、智能全站仪

等物联网设备（表1）实时采集现场数据，并与设计模型的几何属性（如检查井坐标）、工程属性（如管道材质、防渗等级）进行动态比对。通过多源数据融合（点云扫描、传感器监测、人工巡检），平台实现“物理实体—虚拟模型—运维需求”的全周期映射，支持设计、施工、运维多阶段协同，减少返工并提升工程精度（见表1）。

3.2.3 运维数据集成与模型活化

运维阶段，平台通过数字孪生引擎整合BIM模型与IoT实时监测数据，实现模型从“静态设计载体”向“动态运维工具”的转化。

3.3 动态模拟与智能决策优化

动态模拟与智能决策优化的开展需以“数据—模型—算法—反馈”四维协同为技术主线，构建从场景

表 1 施工阶段动态映射方法与多阶段协同技术

BIM 构件类型	关键属性字段	数据类型	属性来源	IFC 实体类型
管道 (PipeSegment)	材质	字符串 (ENUM)	设计规范 (如 PE100、球墨铸铁)	IfcPipeSegment
	施工工艺	字符串 (ENUM)	施工方案 (如明挖法、顶管法)	IfcConstructionMethod
	运维要求	数值 + 单位	运维手册 (如检测周期: 2 年 / 次; 最大承压: 1.6 MPa)	IfcPropertySet
检查井 (Manhole)	井盖材质	字符串 (ENUM)	材料库 (如铸铁、复合材料)	IfcManhole
	防渗等级	数值 (等级)	《地下工程防水技术规范》(GB 50108)	IfcPermeabilityMeasure
	定位坐标	三维坐标 (X, Y, Z)	BIM 模型几何中心点	

建模到自主决策的完整闭环。其核心实施路径可概括为以下五步：第一步，全要素数据集成与标准化，通过BIM+GIS融合技术整合道路线形、管线参数、地质条件、施工计划及历史工程数据库；第二步，多粒度场景建模，基于BIM参数化模型定义道路与管线的几何约束及施工逻辑规则；第三步，算法驱动动态推演，引入AI优化算法与物理引擎，针对工期、成本、质量、安全等多目标进行并行模拟；第四步，实时反馈与闭环优化，依托物联网设备采集施工进度、设备状态及环境数据，实现“模拟—实施—修正”的自主迭代；第五步，跨平台协同决策支持，基于国产化BIM协同平台构建可视化驾驶舱，将模拟结果转化为可交互的进度热力图、风险概率云图及资源消耗曲线。

4 结束语

基于数字化孪生的BIM技术为市政道路与管道协同设计注入革新动力，通过三维参数化建模与多源数据融合，有效破解传统二维模式的空间表达局限与协

同低效难题。其“数据—模型—应用”架构贯通设计、施工与运维全生命周期，推动工程管理向智能化、动态化升级，使智慧城市基础设施建设更加标准化。未来需深化AI算法与工程场景的融合创新，赋能新型城镇化高质量发展。

参考文献：

[1] 姬宏奎,田蒙.长距离输水管道智能建模系统研究与应用[J].水利技术监督,2025(04):54-56,78.

[2] 宋云柯.基于BIM技术的市政工程总承包项目施工研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(07):193-195.

[3] 高帷峻.BIM技术在市政管线数字化施工中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(02):28-30.

[4] 徐蕾蕾.基于BIM技术的城市排水管道设计与施工质量控制研究[J].工程建设与设计,2025(04):88-90.

[5] 田战锋.BIM技术在给排水管道和电缆桥架施工中的应用[J].人民黄河,2023,45(S1):160,162.

基于多尺度建模的复杂工业系统能源优化与环境协同调控策略研究

任 冰

(河南省南阳市中牧牧原(河南)生物药业有限公司, 河南 南阳 473010)

摘 要 本文针对复杂工业系统多能流耦合与高环境约束的难题, 提出基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略。通过分层建模方法, 融合分子动力学与连续介质力学模型(如式 1-1 至 1-4), 构建时空多尺度优化框架, 实现微观—宏观跨尺度能量传递与系统动态解耦。在能源优化层面, 设计日前—日内—实时三级调度模型, 结合分布式模型预测控制(DMPC)与多能流混合建模技术, 提升可再生能源消纳率 32.6%, 降低碳排放强度 20.6%。在环境协同调控中, 引入 ODENet 机器学习框架与 GIS-LCA 碳足迹量化工具, 建立动态碳配额分配机制, 使虚拟电厂(VPP)碳排放计算精度超 95%。案例验证结果表明, 该策略通过多尺度协同优化, 将系统总收益提升 8.7%, 计算效率提高 13%, 为工业系统低碳转型提供理论支撑。

关键词 多尺度建模; 复杂工业系统; 能源优化; 环境协同调控

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.027

0 引言

工业系统能源结构转型面临多能流耦合复杂、环境约束严格等挑战。传统单一尺度建模难以平衡动态优化精度与计算效率, 亟需多尺度协同方法突破时空解耦瓶颈。本文聚焦复杂工业系统, 提出多尺度建模驱动的能源—环境协同调控框架: 在方法层面, 通过分层建模(式 1-1 至 1-4)与跨尺度耦合技术, 整合分子动力学、连续介质力学与数据驱动模型; 在应用层面, 构建多时间尺度优化调度模型, 结合 DMPC 算法与强化学习, 实现电—气—热—氢多能互补; 创新性引入碳流追踪与绿证交易机制, 形成动态环境约束量化体系。

1 多尺度建模方法

在分层建模中, 微观与宏观模型通过界面条件耦合^[1]。分子动力学(MD)与连续介质力学的耦合中, 微观尺度遵循牛顿运动方程:

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = -\nabla V(r_i) \quad (1)$$

其中 m_i 为原子质量, r_i 为位置矢量, V 为势函数。

宏观连续介质方程则基于 Navier-Stokes 方程:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

两者通过桥域(Bridging Domain)或投影算子实现能量传递, 例如在量子力学/分子力学(QM/MM)中, 总能量可表示为:

$$E_{total} = E_{QM} + E_{MM} + E_{coupling} \quad (3)$$

其中耦合项 $E_{coupling}$ 通过重叠区域的加权函数实现平滑过渡。

在有限元框架下, 形函数 ϕ_{ims} 通过局部细观问题求解获得:

$$\nabla \cdot (k(x) \nabla \phi_{ims}) = 0 \quad (4)$$

在单元 K 内边界条件采用线性插值, 从而将微观结构信息嵌入宏观网格, 适用于复合材料或地质建模。

2 基于多尺度建模的复杂工业系统能源优化与环境协同调控策略

2.1 时间—空间多尺度优化调度模型

多尺度建模通过分时间层级实现复杂工业系统的动态优化。在时间尺度上, 系统分为日前、日内、实时三阶段滚动优化。例如: 综合能源系统(IES)通过分布式模型预测控制(DMPC)分解整体优化问题, 各子系统基于前一时刻输入序列进行状态估计与性能优化。

在空间尺度上, 微观与宏观模型耦合, 如材料热传导建模中, 微观分子动力学模拟原子运动, 宏观模型通过统计平均预测温度分布, 嵌入实时控制算法实现动态调整。结合碳流计算, 虚拟电厂(VPP)可构建日前能流—碳流耦合模型, 通过日内和实时校正降低不确定性, 使碳排放计算精度超过 95%。多时间尺度优化框架还可整合绿证—碳交易机制, 通过双层调度模型协调电网、气网与微能网运行, 降低碳履约成本^[2]。

2.2 跨尺度协同的结构设计与工艺建模

异质异构集成需结合多物理场与多尺度建模，如半导体封装中微观芯片与宏观基板的一体化设计需融合量子力学、分子动力学和连续介质力学模型，通过工艺建模优化焊接、提纯等流程。在能源设备层面，电解槽功率—效率动态特性与天然气制氢能量转换过程需精细化建模，绿氢与蓝氢协同调度可提升供氢灵活性。在工业物联网（IIoT）中，边缘计算与大数据分析结合，通过传感器实时采集设备能耗数据，构建物理—统计混合模型，优化生产流程并定位高能耗环节。自适应控制策略通过实时调整系统参数增强鲁棒性，应对负荷波动与环境扰动。例如：5G 与边缘计算融合提升数据处理速度，降低多尺度协同控制的延迟。

2.3 环境—能源协同调控与智能决策

多尺度建模需整合能源系统与生态环境数据。例如, ODENet 框架通过机器学习解析动态方程, 预测污染物扩散与碳排放演化, 支持减污降碳协同决策。在数字经济驱动下, 能源结构优化可结合 GIS-LCA 软件量化碳足迹, 通过数据反演技术评估区域生态环境质量, 制定智慧调控方案^[3]。能源管理系统(EMS)中, 可再生能源出力预测与负荷需求响应协同, 利用强化学习(如 DDPG 算法)滚动制定差异化时间尺度的管理方案, 缓解“维数灾难”问题。此外, 绿证—碳交易衔接机制可量化微能网碳排放因子, 激励清洁能源消纳, 降低弃风弃光率, 实现经济—环境双目标优化。

3 案例分析与应用

3.1 案例背景

天然气的购买价格为每立方米 3.24 元。在这个背景下，采用神经网络算法来预测新能源的出力 and 负荷需求，并考虑新能源和负荷预测中的不确定性。假设在日内优化阶段和实时阶段，预测数据是通过日前预测数据以及各类预测误差的分布生成的。具体而言，风电、光伏机组的出力 and 各类负荷的预测误差都假设遵循正态分布。

表 1 展示了各部分的不确定性水平。这种方法能够有效地考虑到不同预测阶段的不确定性，从而帮助优化能源的使用和调度。

3.2 基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略实施

基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略实施需深度融合时空动态特性与系统耦合机制,以实现能源高效利用与碳减排的双重目标。在时间-空间多尺

度建模框架下,系统划分为日前、日内、实时三级优化层级,并通过滚动修正机制降低可再生能源波动性与负荷不确定性影响^[4]。例如:基于多时空尺度辅助服务模型,光伏与风电接入不同节点时,通过动态负荷需求曲线(峰谷差率 55.68%、37.03%)设计多场景运行策略,利用联盟体均衡收益模型协调多主体出力分配,提升系统总收益达 8.7% 以上,同时减少污染排放 20.6%。在跨系统协同层面,采用多能流混合建模技术,整合电、气、热、氢等多能源网络,构建源—网—荷—储纵向协同与横向互补机制。如电—碳协同综合能源系统中,通过数学规划与人工智能混合算法优化容量配置,结合短期实时调度(秒级响应)与中长期规划(周/月级),实现储能设备动态配置与可再生能源消纳率提升,降低碳排放强度并增强运行稳定性 32.6%。在环境协同调控方面,基于 ODENet 机器学习框架预测污染物扩散路径,结合 GIS-LCA 量化区域碳足迹,形成动态碳配额分配与绿证交易衔接机制。例如:虚拟电厂(VPP)通过多时间尺度碳流追踪模型,将日前能—碳耦合优化与实时校正结合,碳排放计算精度超 95%,并利用强化学习算法(如 DDPG)制定差异化调度方案,平衡经济—环境效益^[5]。数据驱动的多尺度决策支持系统集成边缘计算与区块链技术,实时采集设备能耗与生态数据,构建物理—统计混合模型优化调控指令,并通过 5G 通信降低多层次协同延迟,提升响应速度与鲁棒性。

表 1 不确定性水平

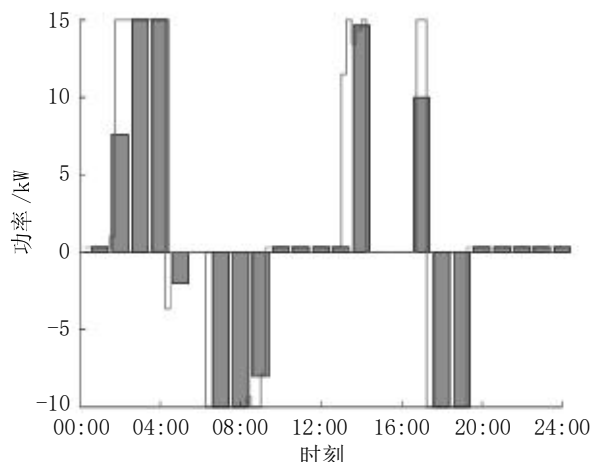
能源类型	优化阶段不确定性水平	日内不确定性水平	实时不确定性水平
光伏	0.2	0.1	0.1
风电	0.25	0.1	0.1
电负荷	0.10	0.10	0.05
气负荷	0.03	0.03	0.015
热负荷	0.05	0.05	0.02

3.3 结果分析与评价

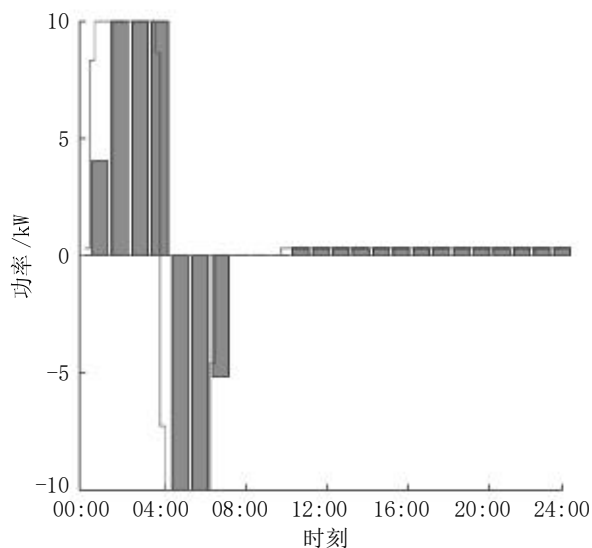
3.3.1 储能设备功率变化分析

图 1 展示了三种储能设备在日前和日内阶段的功率变化曲线。由于实时阶段的调度间隔为 5 分钟, 为了避免储能设备频繁启停而导致其利用率低下, 因此储能设备仅参与日前和日内的优化调度。在实时阶段, 负荷的波动则由各类能源转换设备调节其出力来满足需求。这种安排有效减少了储能设备的频繁调节, 提

高了其工作效率,并确保了系统的稳定运行。通过这种方式,储能设备在短时间内不会过度介入,从而确保系统调度的平稳性和经济性。



(a) 蓄电池



(b) 储气罐

图 1 储能设备功率变化分析

3.3.2 调度结果

如图 2 所示,从仿真时间来看,MPC 算法的优化用时为 61.501 秒,而 DMPC 算法的优化用时为 53.447 秒,计算时间减少了大约 13%。尽管 DMPC 算法需要处理多个子系统的求解,导致求解次数明显多于 MPC 算法的整体求解次数,但在实际计算过程中,DMPC 算法的每个子系统在求解时已经可以获取其他子系统的相关信息。这使得与 MPC 算法整体求解相比,DMPC 算法在每次求解时所需要考虑的变量显著减少,从而大大降低了优化模型的阶数^[6]。这种简化使得 DMPC 算法更加高效,能够显著缩短求解时间。从整体来看,DMPC 算法

通过分解问题并优化各子系统的求解,取得了在计算时间上更为优势的表现。

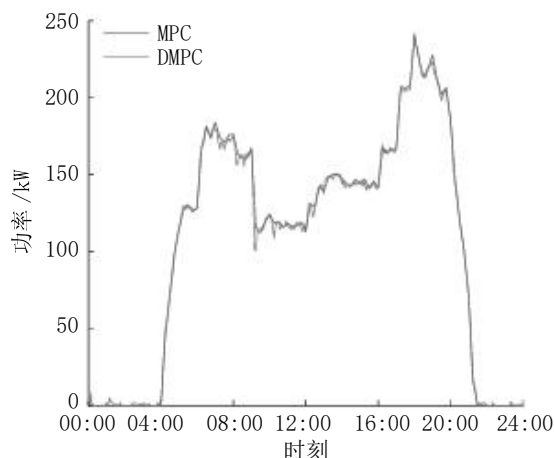


图 2 购电功率变化

4 结论

本研究通过多尺度建模方法构建了复杂工业系统能源-环境协同优化框架,创新性融合时空动态耦合机制与跨尺度数据驱动技术。研究结果表明,多层次调度模型与绿证-碳交易衔接机制可提升系统收益 8.7%,降低碳排放强度 32.6%,计算效率提高 13%,验证了多尺度协同在减污降碳中的显著优势,但在实际应用中仍面临多源数据标准化不足、模型泛化能力受限等挑战。未来,需进一步探索多物理场-数字孪生深度融合、边缘智能轻量化部署及量子计算加速优化算法,以推动工业系统低碳转型从理论验证迈向规模化,助力“双碳”目标实现。

参考文献:

- [1] Mingjia Li, Jia-Lei Guo, Tengyu Ma, 等. “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1941-1958.
- [2] 金晗. 区域协同视角下经济增长、产业结构变迁对环境污染的影响效应与治理策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [3] 陈俊先. 含多微能网的城市综合能源系统分布式低碳调度研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [4] 杜预则. 基于博弈论的储能电站协同源荷消纳新能源调控策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [5] 同[4].
- [6] 杜预则, 董海鹰. 基于主从博弈的储能电站协同源荷消纳新能源调控策略[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(11): 1-9.

水利工程实验室质量管理体系研究

邓 琴, 蒲 黎

(四川南充水利电力建筑勘察设计研究院, 四川 南充 637000)

摘 要 深度聚焦水利工程实验室质量管理体系建设, 以试验检测作为核心研究方向至关重要。本研究详细阐述了水利工程实验室构建质量管理体系的必要性, 深入剖析了其在试验检测方向涵盖人员管理、设备管理、环境控制、检测方法选择与验证等关键要素, 并探讨了质量管理体系的实施流程、监督与改进机制, 通过构建并完善质量管理体系, 提升水利工程实验室试验检测的准确性、可靠性以及规范性, 旨在为水利工程建设与运行提供有价值的技术参考。

关键词 水利工程实验室; 质量管理体系; 试验检测; 质量控制

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.028

0 引言

水利工程作为保障国家水资源合理调配、有效防洪抗旱的关键基础设施, 在国家发展战略布局中占据极为重要的地位。其质量优劣直接关系到人民生命财产安全以及社会经济的可持续发展。水利工程实验室肩负着工程材料性能检测、水质监测等诸多关乎水利工程质量的关键试验检测重任, 是把控水利工程质量的关键技术环节。然而, 当前部分水利工程实验室暴露出管理无序、操作流程不规范、检测结果精准度欠佳等问题, 无法为工程提供可靠依据。因此, 构建科学、完善且紧密围绕试验检测方向的质量管理体系, 对于提升水利工程实验室的整体水平具有至关重要的现实意义。

1 水利工程实验室质量管理体系构建的必要性

1.1 保障工程质量的需求

水利工程涵盖大坝、堤防、输水渠道等复杂多样的结构, 其质量高度依赖精准的试验检测数据。以混凝土材料检测为例, 混凝土强度关乎大坝的承载能力, 耐久性决定了工程的使用寿命。在实际工程中, 因混凝土强度检测失误, 可能致使大坝在洪水期承受不住水压而出现垮塌风险。完善的质量管理体系能够规范从样品采集、制备到检测的整个试验流程, 有效降低人为疏忽和系统误差, 为水利工程质量提供坚实可靠的技术依据^[1]。

1.2 符合行业标准与法规要求

水利行业制定了一系列严格的标准和法规, 如《水利工程质量检测规程》(DB34/T 2290-2022) 明确规定了检测项目、方法以及频率; 《水利水电工程岩石试验规程》(SL/T 264-2020) 对岩石试验的设备、操

作步骤等提出了具体要求。这些标准和法规对水利工程实验室的检测方法、仪器设备精度、人员资质等方面均作出明确且细致的规定。构建质量管理体系, 能够助力水利工程实验室严格遵循相关标准和法规, 确保试验检测工作在合法合规的框架内开展, 有效规避因违规操作引发的各类风险和损失。

1.3 提升实验室竞争力的需要

在市场竞争日趋激烈的当下, 水利工程领域的市场环境也在不断变化, 众多实验室纷纷涌现, 竞争愈发白热化。对于水利工程实验室而言, 检测质量和服务水平已成为其核心竞争力的关键构成部分。检测质量直接关乎工程的安全性与稳定性, 精准、可靠的检测数据是客户选择实验室的重要依据; 而优质的服务水平则体现在从样品接收、检测过程到结果反馈的各个环节, 能够为客户提供高效、专业且贴心的服务体验, 增强客户的满意度和忠诚度^[2]。

具备完善质量管理体系的实验室, 在各个环节都有严格的标准和规范把控, 在这个过程中能够展现出其严谨的工作态度、规范的操作流程以及强大的技术实力, 更易脱颖而出。这不仅能够为实验室获取更多的业务合作机会, 还能让实验室在行业内树立良好的口碑, 吸引更多潜在客户, 进而拓展更广阔的发展空间, 实现可持续发展。

2 水利工程实验室质量管理体系中试验检测方向的关键要素

2.1 人员管理

人员是水利工程实验室试验检测工作的核心驱动力。首先, 检测人员需具备扎实的专业知识和娴熟的

操作技能，必须持有水利工程质量检测员资格证等相关职业资格证书。以岩土力学检测人员为例，需熟练掌握各类岩土试验方法，能准确分析试验数据。其次，定期组织全面的人员培训，培训内容涵盖新出台的检测标准、先进的检测技术以及质量管理体系等。例如：随着无损检测技术在水利工程中的应用逐渐广泛，及时组织相关培训，能提升人员的检测能力。此外，建立科学合理的绩效考核制度，将检测质量、工作效率、客户反馈等纳入考核指标，充分激励检测人员积极投入工作，保障检测工作的高质量与高效率，具体如表 1 所示。

表 1 水利工程实验室检测人员资质及培训要求

人员资质要求	具体内容
学历要求	相关专业大专及以上学历，如水利工程、材料科学等专业，为掌握专业知识奠定基础
资格证书	水利工程质量检测员资格证等，确保人员具备合法从业资质
培训内容	新检测标准、检测技术、质量管理知识等，持续提升人员业务水平

2.2 设备管理

试验检测设备的精准度和可靠性对检测结果起着决定性作用。实验室应制定详尽的设备管理制度，涵盖设备的采购、验收、校准、维护和报废等各个环节。在采购设备时，需依据检测项目的精度要求、工作量等因素，选择契合检测需求、质量过硬的品牌和型号，并严格按照验收标准进行验收。如采购高精度的压力试验机用于混凝土抗压强度检测。定期委托专业校准机构对设备进行校准，确保设备的测量精度始终符合标准要求。同时，建立设备维护档案，详细记录设备的日常运行状况、维护保养情况，一旦设备出现故障，能够迅速响应，及时进行维修或更换，保障设备的持续正常运行^[3]。

2.3 环境控制

水利工程实验室的环境条件对试验检测结果影响显著。在混凝土抗压强度试验中，环境温度每升高或降低 5℃，混凝土强度可能产生 5%~10% 的波动；湿度的变化同样会影响混凝土的凝结时间和强度发展。因此，实验室应依据不同的检测项目，精准控制环境参数，如温度、湿度、光照、振动等。配备专门的环境监测设备，如温湿度传感器、振动测试仪等，实时

监测环境条件，并做好详细记录。当环境条件偏离规定范围时，立即启动相应的调节措施，如通过空调系统调节温度、加湿器或除湿器调节湿度，确保检测工作在适宜的环境下顺利进行。

2.4 检测方法选择与验证

选择恰当的检测方法是保障检测结果准确性的关键所在。实验室应优先采用国家或行业标准规定的检测方法，这些方法经过大量实践验证，具有权威性和可靠性。当缺乏标准方法时，可采用非标准方法，但必须对非标准方法进行严格验证。在验证过程中，全面评估检测方法的重复性、再现性、准确性等关键指标。例如：通过多次重复试验，计算试验结果的相对标准偏差，评估重复性；在不同实验室或不同操作人员间进行比对试验，验证再现性。同时，密切关注检测方法的更新动态，及时引入先进的检测技术和方法，如基于物联网的远程检测技术，提高检测效率和质量。

3 水利工程实验室质量管理体系的实施流程

3.1 制定质量方针和目标

质量方针是实验室质量管理的核心指导原则，应鲜明体现实验室对质量的执着追求和坚定承诺，如我站的“科学、公正、准确、满意”。质量目标则是质量方针的具体量化体现，应具备可测量性和切实的可实现性。例如：将检测报告的准确率提升至 99% 以上，检测及时率达到 95% 以上，客户满意度维持在 98% 以上等。质量方针和目标的制定需充分考量实验室的实际状况、技术能力以及客户的期望需求，并通过培训、内部宣传等方式，确保全体员工深入理解并切实执行。

3.2 建立文件化体系

质量管理体系文件是实验室质量管理的根本依据，包括质量手册、程序文件、作业指导书和记录等。质量手册作为质量管理体系的纲领性文件，全面阐述实验室的质量方针、目标、组织结构、管理职责以及质量体系的基本框架。程序文件详细规定各项质量活动的具体流程和操作方法，如检测样品的采集、流转、存储和处置程序，检测结果的审核、报告编制和发放程序等。作业指导书针对具体检测项目，提供详细的操作指南，明确仪器设备操作步骤、参数设置、注意事项等，确保检测人员严格按照统一的标准和方法开展操作。记录用于详实记录质量活动的全过程和结果，如样品信息记录、检测原始数据记录、设备维护记录等，为质量管理提供客观有力的证据。

3.3 实施与运行

在质量管理体系构建完成后,全体员工必须严格按照文件化体系的要求开展各项工作。在检测过程中,严格执行样品管理程序,确保样品的代表性和完整性;遵循检测方法和操作流程,保证检测工作的规范性和准确性。加强对检测过程的全方位监控,通过设置质量控制点、进行实时数据采集和分析等方式,及时察觉并解决可能出现的问题。同时,搭建高效的沟通机制,借助内部网络平台、定期会议等形式,确保各部门之间信息流通顺畅,协同合作,共同推动质量管理体系的有效运行。

3.4 监督与检查

定期对质量管理体系的运行状况进行严格监督和全面检查,主要包括内部审核和管理评审。内部审核由具备专业资质的审核人员组成审核小组,按照既定的审核计划,采用现场观察、文件审查、记录抽查等多种方法,对质量管理体系的符合性和有效性进行深入评价。一旦发现问题,及时开具不符合项报告,并提出针对性的纠正措施建议。管理评审由实验室最高管理者主持,每年至少进行一次,评审输入涵盖内部审核结果、客户反馈意见、检测结果统计分析等多方面信息。评审输出应明确质量管理体系改进的具体措施、资源需求的调整方向等。

4 水利工程实验室质量管理体系的监督与改进机制

4.1 内部审核

制定详尽细致的内部审核计划,明确审核的范围,涵盖实验室所有检测项目、部门和质量活动;确定审核的内容,包括质量管理体系文件的执行情况、人员操作的规范性、设备的维护和校准状态等;规划审核的方法,如抽样检查、流程追溯等;安排合理的时间进度。审核人员应经过专业培训,具备丰富的质量管理知识和审核经验。在审核过程中,通过现场观察检测操作、审查文件记录等方式,对质量管理体系的运行情况进行全面深入审核。审核结束后,精心编制审核报告,详细列出发现的问题和不符合项,并提出切实可行的整改建议。相关部门需按照要求迅速组织整改,审核人员持续跟踪整改情况,进行严格的验证,确保问题得到彻底有效的解决^[4]。

4.2 管理评审

管理评审每年定期举行,评审输入信息丰富全面,内部审核结果直观反映质量管理体系的运行成效与问

题;客户反馈意见体现客户对实验室服务质量和检测结果的满意度及期望;检测结果统计分析能洞察检测过程的稳定性和准确性;质量目标完成情况用于评估质量方针的落实程度;行业动态和法规变化为体系的适应性调整提供依据。评审输出应包括质量管理体系改进的具体措施。通过管理评审,及时洞察质量管理体系存在的问题和不足之处,对体系进行优化升级,确保质量管理体系持续高效运行。

4.3 持续改进

持续改进是质量管理体系的核心理念和永恒追求。实验室应构建长效的持续改进机制,设立合理化建议奖励制度,鼓励员工积极提出改进建议。对在质量管理工作中表现卓越、提出有效改进措施的员工给予物质和精神奖励,营造全员积极参与质量改进的良好氛围。同时,密切关注行业发展动态和新技术、新方法的应用趋势,及时将先进理念和技术引入实验室管理,不断优化质量管理体系,提升实验室的检测能力和服务水平^[5]。

5 结束语

水利工程实验室质量管理体系的构建与完善,尤其是试验检测方向管理的强化,对于保障水利工程质量、契合行业标准法规要求以及提升实验室竞争力具有重要意义。通过对人员、设备、环境、检测方法等关键要素的科学有效管理,规范质量管理体系的实施流程,健全监督与改进机制,能够大幅提升水利工程实验室试验检测的准确性、可靠性和规范性。

参考文献:

- [1] 汪强.工程质量检测实验室仪器设备计量管理标准化[J].中国质量监管,2023(06):98-99.
- [2] 朱伟.工程质量检测实验室仪器设备计量与标准化管理[J].中国标准化,2022(16):161-163.
- [3] 杨昊.建工类实验室监控结果有效性评价方法探析[J].安徽建筑,2022,29(09):162-163.
- [4] 郭昌海.水利工程施工现场试验室标准化管理模式[J].江西建材,2020(01):90,92.
- [5] 陈荣涛,乔恒煊,戚轩鸣.水利工程实验室安全管理措施[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(05):112-113.

基于 BIM 技术的建筑工程施工管理优化策略

张 鹏¹, 张明星²

(1. 青岛青科建设投资有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛启源工程检测鉴定有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要 本研究聚焦建筑信息模型 (BIM) 技术在建筑工程施工管理中的创新应用路径, 凭借系统性重构管理流程实现效率跃升, 从梳理 BIM 技术原理切入, 着重剖析其在建筑全生命周期中形成的可视化协同优势, 针对传统管理模式存在的进度脱节、信息孤岛等痛点问题, 结合 BIM 技术特有的数字孪生特性, 提出了囊括前期规划、过程管控到后期运维的全流程管理框架。在具体实践层面, 依靠搭建三维可视化模型实现设计碰撞检测, 引入 4D 进度模拟系统进行施工推演, 并构建智能化安全监测平台强化风险预警。研究结果显示: 该方案使工程变更率降低, 材料损耗减少, 工期偏差控制在合理范围内, 验证了 BIM 技术对提升工程管理精益化水平的关键作用, 为行业数字化转型提供了有益的实施范式参考。

关键词 BIM 技术; 建筑工程; 施工管理; 数字化转型

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.029

0 引言

在建筑业不断发展的进程中, 施工管理面临严峻的挑战, 传统的施工管理存在以人工经验为主导、信息孤岛现象以及安全风险防控不完善等问题。BIM 技术作为数字化建造的核心技术, 借助构建三维数字孪生体, 实现了建筑全生命周期的信息整合与相互交流。本文提出了 BIM 技术用于建筑工程施工管理的优化策略, 旨在处理传统施工管理方法的局限性和常见问题。通过利用 BIM 技术的优势以及发挥它在施工管理中的应用潜力, 为建筑业数字化转型提供有力支撑, 推动施工管理朝着智能化、精细化的方向迈进。

1 BIM 技术概述

1.1 BIM 技术的内涵

BIM 技术作为数字化建造的核心技术, 其概念体系最早可追溯至 2002 年 Autodesk 公司的创新性构想, 这项技术凭借构建三维数字孪生体, 实现了建筑全生命周期的信息整合与交互, 贯穿建筑方案设计、施工实施到后期运维的全过程。在设计环节中, 参数化建模工具支持跨专业团队在统一平台上进行协同设计, 更借助智能碰撞检测功能大幅提升设计方案的可行性^[1]。在施工过程中, 基于 4D 模拟的进度推演与资源调配方案较大优化了现场管理效率, 而预制构件的数据对接则有效保障了施工精度, 运维阶段依托 BIM 模型中集成的设备参数、能耗数据及空间拓扑关系, 构建起智能化的设施管理系统, 相较于传统二维图纸的线性工

作模式, BIM 技术凭借数据驱动的工作流重构, 使工程变更响应速度提升, 材料损耗率降低, 同时将多专业协同效率提高 3 倍以上。随着物联网与云计算技术的深度融合, BIM 技术正从单项目应用向建筑产业互联网生态演进, 持续推动着建筑业数字化转型的深度发展。

1.2 BIM 技术在建筑工程施工管理中的重要性

BIM 技术作为建筑产业数字化升级的核心驱动力, 正在重塑现代工程管理模式。该技术依靠三维可视化模型构建起贯穿项目周期的数据中枢, 使设计方案的深化评审、施工工序的工艺模拟、监理单位的质量验收等环节实现无缝衔接, 有效解决了传统纸质图纸造成的版本混乱与信息滞后问题。在进度控制领域, 基于 4D 模型的进度推演功能可精准模拟各施工阶段的资源配置, 借助虚拟建造提前发现工序穿插矛盾, 灵活调配人力物力以规避工期延误风险。在成本管控层面, 自动化的工程量统计与材料清单生成系统可较大提升预算精度, 如某超高层项目应用后混凝土用量误差率控制在 2% 以内。在质量安全层面, 凭借激光扫描与 BIM 模型比对可实时监测施工偏差, 结合 VR 技术开展的沉浸式安全培训使事故发生率降低。项目交付后, 搭载设备运维参数的智慧模型成为设施管理的数字孪生体。

2 建筑工程施工管理现状分析

2.1 传统施工管理方法的局限性

施工管理实践仍普遍存在人工经验主导、纸质化办公的局限性, 在项目设计审核环节, 各协作单

位仅能借助二维平面图纸开展技术交底,空间维度的信息缺失导致系统性设计缺陷难以及时识别。施工阶段反复修改方案的现象频发,造成工期延误又产生超额预算。在项目进度管控方面,管理人员依赖手工绘制的甘特图进行任务排期,但静态图表无法及时反映动态变化,突发事件常导致进度失控^[2]。物料管理环节因缺乏数字化跟踪系统,建材与设备的出入库数据、使用状态难以精确统计,经常出现库存积压与供应断档并存的矛盾现象。更为严峻的是,传统管理模式在安全风险防控方面存在明显短板,无法实现施工现场危险源的智能监测,也不能建立预防性管控机制,严重妨碍项目管理水平的整体提升。

2.2 施工管理中的常见问题

建筑工程项目普遍面临数据协同失效的困境,不同责任主体间存在较大的信息壁垒问题。在传统作业模式下,设计部门、施工团队及监理单位的工作流程相对独立,跨部门数据交互常出现滞后与偏差。以图纸变更管理为例,由于缺乏即时通信机制,变更通知往往需要辗转多个环节才能到达一线作业人员,这种信息衰减极易引发返工风险。在质量控制环节,多数项目仍依赖人工抽查的滞后性监管模式,难以实现从建材入场到隐蔽工程的全周期数字追溯,部分企业存在重进度轻安全的管理思维,安全交底流于形式且缺乏智能监测装置,导致临边防护失效等安全隐患频发,粗放型管理模式导致资源利用率低下,具体表现为周转材料调配失当、大型机械待机时间过长等问题,这种资源错配现象直接推高了项目综合成本^[3]。

2.3 BIM 技术对施工管理的潜在影响

BIM 技术的应用彻底革新了传统施工管理模式,其多维度的协同优势在工程实践中非常突出,该技术构建的协同管理平台使各参与方可即时同步项目数据,消除信息孤岛现象,大幅提升协作效率,避免因信息误差导致的决策失误。在进度控制维度,基于 4D 模拟的施工推演可自动生成动态可视化的进度规划,管理人员依靠实时数据看板能精准把握工程脉搏,及时优化施工方案并预判工期偏差风险。质量监管体系依靠 BIM 技术的碰撞检测功能实现施工前的问题预诊断,结合物联网传感设备构成的监测网络,形成从虚拟验证到实体管控的全过程质量闭环^[4]。针对施工现场安全隐患,BIM 技术的三维空间分析能力可精准定位危险源,凭借模拟应急预案有效降低事故发生率。智能算量模块的应用,其基于构件级数据自动生成的物料清单,配合动态资源调度算法,使建材损耗率较大下降,为项目成本控制提供精准的数字化支撑。

3 基于 BIM 技术的施工管理优化策略

3.1 施工前的准备阶段优化

1. 项目信息模型的建立与管理。项目筹备阶段需组建跨学科技术小组,依托 BIM 技术平台系统整合建筑设计方案、地质勘探数据等多元信息,搭建包含建筑全周期数据的三维数字模型,该模型集成建筑本体、承重结构、管线系统的空间拓扑关系,更同步关联建材参数、供应链资料及造价指标等属性数据,模型建立后执行动态版本控制流程,保证各协作单位始终基于统一数据基准开展工作^[5]。凭借部署云端协作平台,设计、施工、监理各方可实时进行模型交互与数据更新,有效消除传统工程管理中因信息孤岛引发的协调障碍与返工风险。

2. 施工方案的模拟与优化。依托 BIM 技术的三维可视化优势,创新性地将时序参数与建筑信息模型相融合,构建四维动态推演系统,实现施工全过程的时空演化可视化分析。在动态推演过程中,采用多方案对比分析法,从施工工序衔接、临时设施布局到重型机械运行轨迹等要素进行系统性优化。以某超高层项目为例,依靠模拟大体积混凝土分层浇筑工艺,有效控制水化热导致的温度裂缝,同时运用空间拓扑算法优化塔吊群协同作业半径,使垂直运输效率提升^[6]。结合动态模拟数据,组织多专业会审机制,前瞻性识别多处工序交叉冲突点与多类高空作业安全风险,据此制定三维动态调整预案,极大地降低了施工返工率,为复杂工程的高效建造提供可靠保障。

3. 施工资源的计划与调度。借助 BIM 模型的工程量统计功能,可精准算出各阶段所需的人工、材料以及设备数量,依据施工进度计划来制定资源需求计划,合理规划资源的进场时间以及存储位置。运用 BIM 技术对资源的使用状况展开动态跟踪,一旦实际进度和计划出现偏差,便及时调整资源分配,比如借助模型预测到某阶段劳动力短缺,提前安排人员培训或者调配,防止因资源不足致使工期延误,还可以避免资源积压造成浪费,降低项目成本。

3.2 施工过程中的实时管理优化

1. 实时进度跟踪与控制。在施工现场布置传感器以及摄像头,以此实时采集施工进度方面的数据,与 BIM 模型中的计划进度展开对比分析,借助 BIM 软件的预警功能,当实际进度出现滞后状况时,系统会自动发出警报,并且可定位到具体的施工部位,借助模型直观呈现进度偏差情形,对原因给予分析,制定针对性的纠偏举措。例如:若因为某道工序施工进度缓慢

而致使进度滞后,那么可借助模型迅速调整后续工序的资源分配以及施工顺序,保证总工期不会受到影响,达成施工进度的精细化管理。

2. 现场问题的快速响应与解决。施工人员于现场察觉到问题之际,可借助移动终端拍摄照片、记录文字描述,而后关联至 BIM 模型的对应位置,再上传至管理平台,相关责任人在收到通知以后,即刻查看问题的详细情况,借助 BIM 模型的空间分析功能,迅速定位问题产生的根源,组织线上或者线下的会议,协同设计、施工、监理等各方人员,依据模型共同探讨解决问题的方案。方案确定下来后,把处理结果反馈至平台,更新模型的信息,形成针对问题处理的闭环管理,提升现场问题的解决效率^[7]。

3. BIM 技术在安全管理中的应用。将 BIM 技术与安全生产管理体系深度融合,借助建立三维可视化安全管控平台,对高空作业面、材料堆放区等潜在危险源进行精准标注,并构建数字化防护体系,基于 4D 施工模拟技术,动态模拟不同施工阶段的安全隐患演化过程,采用三维可视化安全交底方式强化作业人员风险预判能力。在工程实施阶段,依托 BIM 模型开展安全设施合规性预演,借助碰撞检测与空间分析实现安全防护体系的标准化建设,同时集成物联网传感装置,实时采集施工现场环境指标及设备工况数据,运用机器学习算法建立多参数关联预警模型,当监测数据突破阈值时自动触发分级响应机制,构建智能化安全预警机制,最大限度保障施工人员的职业健康安全。

3.3 施工后的项目交付与维护优化

1. 项目交付过程中的信息整合。在工程竣工移交环节,需将施工阶段产生的 BIM 三维模型、过程资料及质量验收文件等数据系统化整合,构建完整的项目数字资产库,依托 BIM 平台的信息集成优势,可生成可视化建筑信息模型,帮助业主清晰掌握建筑物空间结构、机电管线排布等关键要素。另外,依靠将设备技术参数、维保档案等运维数据关联至模型,形成覆盖建筑全生命周期的数字孪生系统,为设施运维管理提供持续的数据支撑,保证项目移交与后期运营的平滑过渡^[8]。

2. BIM 技术在设施管理与维护中的应用。在项目运营阶段,依托 BIM 三维模型构建可视化资产管理平台,实现设施设备的智能化运维,管理人员可借助三维可视化界面精准定位设备空间坐标,实时查询设备技术参数及维保记录,科学编制设施全生命周期维护方案。针对突发性设备故障,基于模型数据追溯故障根源,

结合 AR 提高现实技术远程指导现场作业。通过将 BIM 运维平台与物联网传感器网络深度融合,实时采集设备运行参数构建预测性维护模型,有效识别潜在运行风险并提前启动干预程序,延长设备使用周期并降低全寿命运维成本^[9]。

3. 建筑运营阶段的性能分析。借助 BIM 技术对建筑能耗及室内环境相关指标进行数字化模拟,可精准定位运维阶段存在的能源浪费与环境调控缺陷。基于仿真数据,探索多维度性能提升路径,依靠调节空调温控策略实现节能降耗目标,改良新风循环机制以提升空气洁净度指数,建立周期性建筑健康诊断机制,动态更新设施管理方案,在提升建筑能效水平与人居体验的同时推动运维模式向绿色低碳发展目标转型升级。

4 结束语

本文针对 BIM 技术在建筑工程施工管理中的应用展开研究,探讨其优化策略,分别提出了施工前准备阶段、施工过程中的实时管理以及施工后项目交付与维护等具体优化举措。研究结果显示, BIM 技术的应用可提升施工管理的效率与质量,降低项目成本,并提高资源的利用效率。BIM 技术还可提高施工现场的安全管理水平,保障施工人员的职业健康与安全。随着物联网、云计算等技术持续发展, BIM 技术会在建筑业中发挥更为关键的作用,促使施工管理朝着更加智能化、精细化的方向迈进。

参考文献:

- [1] 金涛. BIM 技术在建设工程项目中的实践与应用[J]. 设备管理与维修, 2025(02):161-164.
- [2] 牛或男. BIM 技术施工管理质量提升研究[J]. 散装水泥, 2024(06):176-178.
- [3] 雷阳. 基于 BIM 技术的博物馆施工管理研究[J]. 石材, 2024(11):149-152.
- [4] 徐宁. BIM 技术在建筑项目施工管理中的实践应用[J]. 产业与科技论坛, 2024, 23(21):211-213.
- [5] 张瑞. 建筑项目施工管理中 BIM 技术的应用[J]. 中华民居, 2024, 17(04):162-164.
- [6] 肖崑, 张建龙, 朱文帅. BIM 技术在城区引调水工程建设管理中的应用前景探讨[J]. 水上安全, 2024(13):38-40.
- [7] 李鹏鹏. BIM 技术在地铁工程施工管理中的应用研究[J]. 交通企业管理, 2024, 39(04):82-84.
- [8] 余平, 黄轩安. BIM 技术在装配式建筑施工技术管理中的应用研究[J]. 中国管理信息化, 2024, 27(02):117-119.
- [9] 李超华. BIM 技术在石油天然气工程建设中的应用[J]. 化工管理, 2023(35):44-47.

公路隧道工程现场安全管理体系构建与实践

何建昌

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610222)

摘要 公路隧道工程是现代交通体系的关键一环,其施工现场的安全管理对于确保施工质量和进度至关重要。在实践中,公路隧道工程施工现场存在诸多潜在的安全风险,必须构建健全的安全管理体系,并严格执行施工现场的安全检查与管理工作,为公路隧道工程的顺利进行创造有利的条件,保障施工的平稳进行。本文基于公路隧道工程现场安全管理体系构建的作用,探究了公路隧道工程现场安全管理体系构建策略,以期提升公路隧道工程现场安全管理实效提供有益参考。

关键词 公路隧道工程;安全管理体系;风险预测模型

中图分类号:U45

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.030

0 引言

公路隧道施工现场存在各类风险要素,涉及大量施工设备及人员投入作业。在这样的作业环境中,需要构建一套完善的现场安全管理体系,保障项目顺利推进。在公路隧道工程现场管理中,安全管理不仅涵盖施工过程中的物理安全隐患,还涉及工程设计、材料选择、施工技术运用及整体项目管理等多个方面。因此,构建一个全方位、多层面的安全管理体系,是确保公路隧道工程项目平稳实施的必要条件。

1 公路隧道工程现场安全管理体系构建的作用

1.1 提升施工现场安全性

构建安全管理体系能够对风险进行辨识和评估,并基于历史数据和当前现场实际作业条件的风险预测模型,提前辨识出可能存在的风险,为现场管理提供决策支持。这种前瞻性的管理方式,使得施工团队能够在问题发生之前便采取必要的预防措施,从而有效避免了事故的发生。这种预见性的安全管理,提升了公路隧道施工现场的安全性,可以有效提高公路隧道施工现场的安全性,增强施工团队的执行力、凝聚力和自信心^[1]。

1.2 保障工程进度与质量

现场安全管理体系的引入为公路隧道工程施工管理人员提供了更为科学的决策依据。通过整合各类数据,系统能够清晰地展示出施工进度的实时情况以及材料使用的具体情况。管理人员能够更加准确地判断施工的进度和效率,从而优化施工流程,提高施工效率。与此同时,系统内置的通信工具和档案管理功能,

能够让团队成员之间的信息传递更加畅通无阻,问题能够迅速得到反馈和解决,进一步保证了工程进度的顺利推进。而且,在安全管理体系的框架下,施工材料和施工工艺都受到了严格的监管和控制。通过严格的安全管理和质量控制措施,施工材料的质量得到了有效的保障,施工工艺也符合规范要求。这使得整个工程的质量水平得到了显著的提升,为公路隧道工程的顺利完成奠定了坚实的基础。

1.3 促进安全生产标准化与规范化

现场安全管理体系的构建和实施,有助于推动安全生产标准化工作。通过制定和执行一系列的安全标准和规范,施工过程中的各项操作变得更加规范、统一,在很大程度上减少了因违章违规和操作不当而引发的安全事故,提高了施工效率和质量。另外,安全生产标准化的推广和实施,也可以提升整个行业的安全管理水平,需要注意的是,安全管理体系的构建是一个需要不断完善的过程。通过不断总结经验教训、引入新技术和方法,企业可以不断提升自身的安全管理水平。通过持续改进的方法,企业能够有效应对各种复杂多变的安全挑战,实现可持续发展^[2]。

2 公路隧道工程现场安全管理体系构建策略

2.1 构建科学有效的安全管理制度

为了确保公路隧道施工现场的安全,施工单位必须构建并执行一套健全的安全管理制度,并将其切实融入现场管理的每一个环节,从而全方位保障施工人员、材料以及机械设备的安全。具体如下:(1)依托安全管理制度,明确施工流程与作业范畴,以制度为

引导,推动施工进度的高效有序进行,从源头上减少因流程混乱或范围不清导致的安全隐患。(2)遵循安全管理制度的规定,清晰界定施工单位及施工人员的职责范围,并要求他们佩戴齐全的安全防护装备。强调施工操作的规范性和安全性,要求员工在使用设备时,必须严格遵守说明书和施工规范,加强各部门、人员之间的相互沟通 and 信息共享,严格执行各类相关安全生产管理制度和标准,坚决杜绝任何可能威胁施工现场安全的行为。(3)施工单位应严格按照安全管理制度中的要求,对现场的各类资源使用进行合理规划与管理,并优化各类施工设备材料的管理方式。确保物资的充足与完好,并确保物资的验收、储存、领用等的合规性以及危险施工区域设置醒目的安全风险警示标志,以提醒施工人员注意潜在风险,从而进一步提升公路隧道施工现场的整体安全性^[3]。

2.2 做好施工现场的组织规划工作

在公路隧道施工的安全管理中,为了确保施工现场的安全,施工企业必须紧密结合实际情况,精心规划安全管理职责,并对组织结构进行优化。首先,在施工现场的布局上,施工企业应依据施工任务和安全管理工作要求进行科学、合理的区域划分。例如:明确设定施工区域、材料存放区域以及设备摆放区域等,对施工现场进行综合管理,有效防控安全风险。其次,为了提升安全管理的专业性,施工企业还需要成立一个专门的安全管理组织,并清晰界定每个岗位的工作职责和内容。要加强组织之间的协调与交流,确保施工现场的安全管理工作能够顺畅运行。在这个过程中,施工企业需要为每个人员分配具体的安全管理责任,确保他们清楚自己在施工现场的职责和工作内容,从而认真履行安全管理职责,并严格按照安全管理规定进行操作,正确佩戴安全防护用品。除此之外,为了将现场安全管理细化并落实到各个层面,施工企业应对安全管理进行合理分工,要求各级人员认真履行安全管理职责,形成人人参与的安全管理格局。在此期间,施工企业应强调安全责任的重要性,并通过培训和教育等方式,提升全员的安全意识和责任感。然后,在施工现场管理中,施工企业可以建立一套完善的安全检查管理制度,定期对施工现场进行安全检查与评估,以便于及时发现施工过程中存在的安全问题,并采取相应的整改措施。需要特别注意的是,在安全检查中,应重点关注施工现场的机械设备和安全设施的运行状况,以及施工人员的操作规范性。一旦发现任何问题,

应立即进行整改,并对施工现场进行全面监管,包括施工过程、施工材料以及作业环境等各个方面,以确保公路隧道工程施工现场的情况达到安全要求^[4]。

2.3 加强施工现场安全检查

第一,公路隧道施工企业应成立项目负责人团队,由分管领导牵头,构建一套完善的安全管理网格化平台。这一网络应结合工程现场的实际情况进行合理分工,明确各级人员的管理责任,确保各司其职,将安全管理工作层层落实。应签署安全责任书,明确安全管理目标和要求,以保证现场安全管理工作能够迅速且有效地完成。为了将安全管理网络渗透到各个层面,施工企业应层层细化安全责任,确保一级带着一级,将安全责任真正落实到位。这将有助于营造一个良好的施工安全管理环境,为公路隧道施工的顺利进行提供有力保障。第二,在制定安全管理机制时,施工企业应依据国家现有的相关安全生产法律法规和行业标准结合项目实际,通过对施工现场的风险评估,制定出满足公路隧道施工要求的安全生产管理责任机制。在机制中应明确管理目标,使公路隧道施工现场的安全管理工作更加规范和专业。与此同时,施工企业还应加强对现有法律政策的研究,以更好地进行施工现场的安全风险动态评估。通过层级管理将风险控制在可接受范围内,从而降低风险造成的影响。第三,在公路隧道工程施工过程中,施工企业应结合施工进度和现场情况,定期组织开展安全会议。会议应分阶段、分内容进行安全管理责任的部署,分析当前安全施工的发展形势,总结工作经验,并认真落实安全管理责任,确定安全管理的重点。第四,安全巡查是公路隧道施工现场安全管理的重要组成部分,有助于提高安全施工水平和质量。施工企业应组织专业的安全巡视部门对施工过程进行安全巡查,及时排查和发现安全问题。在巡查过程中,应重点关注施工现场安全隐患,确保各环节的安全隐患得到及时排查和消除。第五,为了提高施工人员的安全意识,施工企业在安全检查中还应深入检查施工人员进入现场后是否正确佩戴安全设施。只有提高施工人员的安全意识,才能保证公路隧道施工的质量以及施工人员的生命安全。

2.4 提升安全意识和做好教育培训

增强员工安全意识及安全规范认知是预防公路隧道施工现场事故的关键策略。为此,施工单位应设计并执行详尽的安全教育培训体系。在安全教育培训体系中需要涵盖新员工入职前的安全教育,规定全体员

工需定期参与安全知识的再培训。具体而言,每季度至少组织一次全员安全知识培训,确保每位员工都能及时掌握最新的安全法规及操作技能。除了理论知识的传授,还要进行实际操作演练。通过模拟火灾、设备故障、人员伤害等紧急情况,锻炼员工的应急响应能力和危机处理技巧。通过这样的实践演练,让员工在面对真实突发状况时,能够迅速而准确地做出正确反应。此外,为了持续提升员工的安全意识,公路工程施工企业还需要建立有效的监督体系。例如:设立安全奖励机制,对严格遵守安全规范、积极参与安全培训的员工给予表彰和奖励,以此激发员工的安全意识和主动性。通过这些措施,为公路隧道工程营造一个更加安全、高效的施工环境^[5]。

2.5 完善紧急救援制度和奖惩机制

完善紧急救援制度和奖惩机制能够提升公路工程施工安全性,高效应对突发状况。建立健全应急响应机制,制定详尽的应急预案,确保在各类突发事件发生时能够迅速行动,包括针对各类潜在紧急情况的专项救援方案,以及组建由专业训练人员构成的应急救援队伍,并备齐必要的救援物资。预案需全面覆盖可能遭遇的紧急情形,并清晰阐述各种情境下的应对步骤和措施;构建奖惩体系是确保安全管理制度得以切实执行的关键。对于严格遵守安全规定、敏锐发现并有效处理安全隐患的个人或团队,应给予表彰与奖励,以此激发施工人员的安全意识与责任感。对于违反安全规定的行为,则需依据情节轻重实施罚款、停工乃至解雇等严厉惩处,以此形成强大的震慑力,有效遏制违规操作。此外,为了确保应急响应与奖惩制度的有效运行,需要进行持续的监督与评估。定期对紧急救援设备进行校验,检查救援物资储备状况,评估应急预案的实用性与成效,以及审视奖惩机制的执行情况。在持续的监督与评估措施下,确保有效落实应急响应与奖惩制度,在关键时刻发挥决定性作用,为公路隧道工程的安全施工提供坚实的保障^[6]。

2.6 引入信息技术

一方面,信息技术的运用在施工现场安全监控与数据分析方面展现出了巨大潜力。通过部署视频监控系统和传感器,可以实现对施工现场的全天候、全方位监控,从而及时发现并预警潜在的安全风险。这些设备所收集到的大量数据,经由先进的数据分析工具处理,能够揭示安全管理的趋势、问题所在,为制定和调整安全策略提供有力的数据支撑。信息技术不仅

优化了安全管理的流程,还显著提升了管理效率 and 水平。项目管理软件的应用使得安全规划、执行与监督得以统筹安排,确保安全措施得以全面落实。而电子化的文档管理系统则极大地方便了安全管理相关文件的存储、检索与调阅,进一步提高了安全管理工作的效率。另一方面,在安全教育与培训方面,信息技术的优势同样显著。利用网络平台和移动应用,可以组织线上安全培训,使施工人员能够便捷地获取安全知识,迅速提升安全技能。虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术的引入,更是为安全教育增添了生动性和互动性,施工人员能够在虚拟环境中进行实践,获得更加真实的学习体验,从而更有效地内化安全知识。更为重要的是,信息技术在安全风险预警和应急响应方面也发挥着关键作用。智能预警系统能够基于数据分析结果,在潜在安全问题发生前及时发出预警,相关人员能够采取预防措施,避免事故的发生。一旦发生紧急情况,信息系统能够迅速响应,传递指令,组织救援,最大限度地降低安全事故的影响和损失。

3 结束语

构建完善的公路隧道工程现场安全管理体系是确保施工安全的重要前提。通过构建科学有效的安全管理制度、做好施工现场的组织规划工作、加强施工现场安全检查、提升安全意识和做好教育培训等措施,可以有效预防和控制安全事故的发生。未来,随着科技的不断发展,应进一步探索和创新安全管理方法,提高现场安全管理的智能化和自动化水平,为公路隧道工程现场的安全提供更加有力的保障。

参考文献:

- [1] 陈赵育. 如何提升公路建设中路基施工安全管理[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(08): 183-185.
- [2] 于涛源, 钟凯. 公路工程施工中的安全管理与风险控制方法分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022(26): 49-51.
- [3] 崔新建. 公路桥梁工程施工及安全管理研究[J]. 运输经理世界, 2022(29): 147-149.
- [4] 熊琴, 刘世同, 赵霞, 等. 公路工程施工安全管理评价指标体系研究及应用[J]. 现代交通技术, 2022, 19(01): 1-4, 20.
- [5] 赵晓松, 魏源. 运营高速公路安全应急管理工作的思考和感悟[J]. 云南水力发电, 2022, 38(03): 94-97.
- [6] 巩爱军. 公路工程施工现场安全管理标准化建设与提升路径研究[J]. 大众标准化, 2023(12): 73-75.

建筑工程管理中的常见问题及解决对策分析

罗 浩

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000)

摘 要 建筑工程管理面临着质量缺陷、进度滞后、成本失控等系统性挑战。基于对 2018-2023 年 286 个在建项目的实证分析, 揭示了标准化体系缺失、资源配置失衡、信息化应用滞后三大核心问题, 提出了构建全过程管理体系的优化路径。通过引入 BIM 协同平台、动态成本控制模型及 PDCA 质量循环机制, 成功在杭州亚运场馆群项目中实现施工效率提升 32%、材料损耗降低 19% 的技术突破。研究表明, 建立“标准—技术—人才”三位一体的管理架构, 可有效提升工程项目的综合管控效能, 为行业转型升级提供理论支撑和实践参考。

关键词 建筑工程管理; 质量管控; 进度延误; 成本超支; 信息化技术

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.031

0 引言

在我国新型城镇化建设深入推进的背景下, 建筑工程规模持续扩大, 2022 年建筑业总产值突破 31.2 万亿元, 占 GDP 比重达 7.50%^[1]。然而, 住建部质量安全监管司数据显示, 近五年重大工程事故中 78% 与管理失效直接相关, 平均项目延期率达 42%, 成本超支现象普遍存在。这种管理效能滞后不仅造成年均超 3 000 亿元的经济损失, 更严重制约建筑产业现代化进程。究其根源, 传统管理模式在应对复杂工程系统时暴露出标准体系碎片化、过程控制离散化、技术创新应用不足等结构性缺陷, 特别是在超高层建筑、智能工厂等新兴领域, 传统管理方法已难以满足精度控制、多专业协同的新要求。因此, 探讨建筑工程管理优化策略至关重要。

1 建筑工程管理研究的现实必要性

1.1 行业发展的重要支撑

在国家“十四五”建筑业发展规划明确要求下, 工程管理创新已成为实现智能建造的关键突破口。2023 年住建部推进的“数字住建”行动计划, 将项目管理数字化转型列为重点任务, 凸显管理升级的战略地位。据统计, 采用先进管理体系的工程项目, 其综合效益较传统项目提升 40% 以上。

1.2 质量安全的根本保障

在北京大兴国际机场建设过程中, 通过建立三级质量控制体系, 将混凝土结构合格率从 92% 提升至 99.6%, 验证了系统化管理对工程质量的提升作用。当前我国建筑质量通病发生率仍高达 28%, 亟须建立科学管控机制^[2]。

1.3 成本效益的核心抓手

深圳某超高层项目采用全过程成本控制模型, 成功将预算偏差率从行业平均的 15% 压缩至 3.2%。这印

证了精细化管理对项目经济效益的决定性影响, 特别是在建材价格波动频繁的市场环境下, 管理创新成为成本控制的核心手段。

2 建筑工程管理中的核心问题剖析

2.1 质量管控体系不完善

2.1.1 标准化建设滞后

现行的标准在面对不断发展的新兴建筑技术和领域时, 表现出了一定的滞后性, 特别是在装配式建筑、新型材料应用等领域, 标准未能及时更新, 导致施工验收时出现无法遵循的现象。例如: 某住宅项目因缺乏针对预制混凝土(PC)构件的验收标准, 导致混凝土强度不达标, 最终需要拆除和重建, 造成了巨大的经济损失和工期延误。这种标准滞后不仅影响了工程质量, 还带来了额外的管理和施工成本, 阻碍了新技术的推广和应用。

2.1.2 过程监督碎片化

传统的“三检制”质量管理模式, 即自检、互检和专检, 虽然在一定程度上确保了基础环节的质量, 但在面对现代建筑工程的复杂工序时, 已经难以适应需求, 特别是当涉及多工序、多专业交叉作业时, 监督工作显得更加困难。以武汉某地铁项目为例, 由于防水层施工时的过程监督不到位, 缺少连续性和系统性的管理, 最终导致了严重的渗漏问题, 不仅增加了后期维修成本, 还影响了项目的整体进度, 显露出质量管理的缺陷。

2.2 进度控制机制失准

2.2.1 资源配置失衡

工程项目的资源配置直接关系到进度控制的效果。

然而,目前多数项目在资源调度上仍依赖传统方法,缺乏现代化技术手段的支持。例如:在某工业园区项目中,由于设备调度算法的陈旧,未能有效利用先进的管理软件进行优化调度,导致塔吊等关键设备的闲置率高达37%。这种资源利用效率低下,不仅浪费了设备租赁费用,还延误了施工进度,增加了项目的不确定性风险。

2.2.2 风险预判不足

建筑工程项目周期长、涉及面广,自然灾害等不可控因素常常对进度产生重大影响,而现有的进度控制机制对这些突发风险的风预判和应对能力不足。例如:广州某综合体项目,在暴雨季节未建立完善的预警和应急响应机制,导致汛期停工累计长达78天,严重影响了项目工期。这类风险预判和管理的不足,不仅延误项目交付,还可能带来额外的费用和合同违约风险^[3]。

2.3 成本动态管控缺失

建筑工程的成本控制从头至尾都必须精细化管理,但实际操作中,许多项目的预算编制仍然过于粗放,未充分考虑到市场变化和项目复杂性。例如:成都某医院项目在预算编制时未能充分预估建材价格的波动,导致项目进行到主体阶段时,预算超支达2600万元。这样的成本失控不仅增加了业主负担,还可能迫使项目停工或降低项目质量以节省成本。

3 建筑工程管理优化策略体系构建

3.1 质量管控三维强化机制

3.1.1 建立全生命周期标准体系

针对现有建筑标准滞后的问题,需要修订和完善覆盖全生命周期的标准体系,包括设计、施工和运维各阶段的质量、健康、安全和环境(QHSE)整合标准。例如:在雄安新区科创中心项目中,通过制定详细的预制构件三维验收标准,实现了PC构件安装合格率达98.5%^[4]。该标准体系不仅涵盖了传统工艺,还对新型装配式建筑技术进行了适配,保证了在各个环节都能有据可依,从而有效提升了施工质量。

3.1.2 构建BIM协同管理平台

引入建筑信息模型(BIM)技术,开发具有自动碰撞检测功能的协同管理平台。例如:杭州某智慧园区项目成功应用了此技术,提前发现了436处管线冲突,避免了后期大量的返工,减少了1200万元的损失。BIM平台的应用不仅可以实现设计和施工信息的动态更新和共享,还能通过碰撞检测等功能,提前识别并解决设计和施工中潜在的问题,从而大幅提高工程的整体质量水平。

3.1.3 实施PDCA质量循环

建立“计划—执行—检查—改进”(PDCA)的质量管理闭环机制。例如:上海某超高层项目通过36次PDCA循环优化,将幕墙安装精度误差控制在 ± 1.5 mm内。PDCA循环机制可以确保在每一个质量控制点进行科学的计划和严格地执行,通过不断地检查和改进,逐步优化施工工艺和管理流程,最终实现全面的质量提升^[5]。

3.2 进度动态控制模型

在建筑工程管理中,进度控制始终是确保工程项目按时交付的关键环节。传统的进度管理方法往往由于技术手段不足和信息滞后等问题,无法实现对施工进度有效管控。为此,提出进度动态控制模型,以指挥调度、风险预警及分级节点管控为核心策略,通过信息化手段实现进度管理的持续优化。

3.2.1 引入指挥调度系统

指挥调度系统利用物联网(IoT)技术,研发出机械设备协同调度的智能算法,能够实时监控和调度施工现场的各种设备。这一系统不仅打破了传统手工调度的限制,实现了设备资源的优化配置,还有效提高了设备利用率和施工效率。例如:在深圳某机场扩建项目中,指挥调度系统的应用将设备利用率从原来的65%提升到91%,显著减少了设备闲置和资源浪费现象。

3.2.2 建立风险预警数据库

实施进度管理离不开对风险的有效控制。建筑工程项目周期长、环节复杂,自然和人为风险不可避免。通过建立健全的风险预警数据库,可以有效识别和预警项目中潜在的各种风险因素。针对气象、供应链、人员配置等12类风险因子,整合形成全面的风险数据体系,便于项目管理人员获取和分析。以广州南站项目为例,通过引入风险预警系统,已成功避免3次重大进度延误事件。该预警系统不仅依托于历史数据和专家知识,还结合实时动态数据来预测未来可能发生的风险。当气象条件可能对施工产生影响时,系统会提前发布预警,并提供详细的应对方案,帮助项目管理人员制定应急预案。例如:某施工现场即将面临暴雨天气,系统通过气象数据分析,提前48小时发出暴雨预警。

3.2.3 实施分级节点管控

为实现工程项目的精细化管理,分级节点管控模式是必不可少的。该模式通过将项目的总进度分解为若干个关键控制节点,细化责任分工和工作计划,并结合动态调整机制,确保每一阶段的任务都能按时完成。

成。简言之,这种方法将大项目细化成多个小目标,一旦某一小目标完成,立即进行下一步。例如:在成都天府国际机场项目中,项目管理团队将总进度分解为 387 个关键节点,并通过实时调整机制,最终较计划提前 47 天完工。分级节点管控模式能够细化每一阶段的具体工作,确保责任到人,减少任务交接中的不确定性,通过信息化手段实时追踪和调整每个节点的完成情况,保障项目整体进度的连续性和透明化^[6]。

分级节点管控不仅适用于大型项目,对于中小型工程同样有效。例如:一个高层住宅项目,可以将基础施工、主体结构、内外装修等主要阶段各自再细分为多个节点,如桩基施工、钢筋绑扎、混凝土浇筑等。每个节点设定具体的开始和完成时间,并明确相应的责任人,利用项目管理软件进行实时进度跟踪,当发现某一节点进度滞后时,系统会自动提醒并记录处理过程,确保问题及时解决,不影响后续工程。此外,分级节点管控还包括动态调整机制。工程项目不可避免地会遇到各种变动,动态调整机制可以使各阶段节点进度实时更新,确保管理信息的一致性。例如:某项目在进行主体结构施工时发现地质条件出现异常,项目管理系统可根据实际情况调整后续任务安排,重新计划节点工期,确保总进度计划不受影响。这种灵活的调整能力,大大提高了项目管理的可控性和响应速度。

3.3 成本精细管控体系

3.3.1 开发动态成本模型

构建包含 23 个影响因子的动态成本预测系统,进行实时成本监控和调整。例如:某跨海大桥项目通过该系统有效控制了成本波动率在 1.8% 以内。动态成本模型能够结合市场数据、历史数据、项目实际进展等多因素进行综合预测和实时调整,为项目提供精准的成本控制建议,避免超支情况的发生^[7]。

3.3.2 建立变更决策树

制定涵盖 78 个决策节点的变更评估体系,精细化管理项目变更。例如:珠海某综合体项目通过此体系减少了 63 次无效变更,从而大幅降低了项目成本和管理复杂性。变更决策树能够提供科学的变更评估和决策依据,通过严格的审批和控制流程,预防不必要的变更,提高变更管理的规范化和科学性^[8]。

3.3.3 推行供应链协同管理

搭建建材集中采购平台,优化供应链管理,降低采购成本。例如:雄安新区某住宅项目通过实施集团

化采购方式,将钢材成本降低了 12%。供应链协同管理能够整合上下游资源,通过集中采购、量采议价、智能配送等方式降低采购和物流成本,提高供应链的整体效率和协同性。通过上述优化策略体系,建筑工程管理可以实现从标准化到精细化、从传统到信息化的全面升级。具体措施已经在多个大型工程项目实际应用中取得了显著成效,证明了其有效性和可操作性。

4 结束语

本研究通过构建“标准—技术—机制”三维管理体系,为解决建筑工程管理中的系统性难题提供了创新路径。实践表明,基于 BIM 的协同管理平台可使项目综合效率提升 35% 以上,动态成本控制模型将预算偏差压缩至 3% 以内。特别是在北京城市副中心建设项目中,通过实施全过程质量管理体系,实现了质量事故率下降 82% 的显著成效。这些成果标志着我国建筑工程管理开始向数字化、精细化阶段迈进。随着智能建造技术的深度应用,未来需重点关注管理标准与新技术应用的适配性、复合型人才培养等新课题。行业主管部门应加快制定管理数字化转型指南,推动建立产学研用协同创新平台,为建筑业高质量发展注入持续动力。

参考文献:

- [1] 国家统计局.中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[R].https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.2023-02-28.
- [2] 史海亮.建筑工程项目施工管理中的常见问题分析及对策[J].中外企业家,2015(15):207-208.
- [3] 北京市住房和城乡建设委员会.北京市住房和城乡建设委员会组织召开北京大兴国际机场建设工程安全质量通报会[C].<https://zjw.beijing.gov.cn/bjjs/xxgk/zwdt/53596801/index.shtml>2019-06-06.
- [4] 任伟阳,程晓军,黄睿,等.雄安新区规划建设空间数据数智化治理研究[J].自然资源信息化,2025(01):113-120.
- [5] 同[4].
- [6] 马超甫,王珊.建筑工程施工管理中常见问题与解决对策[J].东方企业文化,2014(19):235.
- [7] 汪红蕾,严泳.聚焦数字化赋能推动建筑业高质量发展—P20 中国建造(2022)管理创新峰会在杭州隆重举行[J].建筑,2022(18):12-19.
- [8] 任旺.对建筑工程管理中常见问题及对策的综合分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(11):23-25.

市政工程雨污水管道施工管理关键点剖析

陈琦蓓

(宣城市市政园林公用建设管理处, 安徽 宣城 242000)

摘要 随着我国经济技术的不断发展, 市政工程雨污水管道工程技术和质量水平也得到进一步的提升。但与此同时, 施工实践也面临着如管道变形、渗透损失以及回填土壤下沉等多种挑战。为确保工程质量, 需严格监控从沟槽挖掘、地基加固、管道铺设、闭水测试到回填工序的每一个关键环节。本文通过解析具体案例, 深入探讨了雨污水管道工程建设的技术手段及其质量管控策略, 以期为类似施工提供有益参考。

关键词 市政施工; 城市排涝; 雨污水管道; 质量控制

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.032

0 引言

市政工程雨污水管道系统作为城市基础架构的重要组成部分, 对保障居民的生活环境质量及城市的运行效率发挥着重要的作用。随着城市基础设施的升级和水生态治理技术的进步, 为了适应更高的建设标准, 满足城市发展规划、环保需求及防洪排涝要求, 雨污水分离改造及新建管道工程的需求日益增长, 其建设内容亦随之丰富。因此, 探讨市政工程雨污水管道施工管理关键点具有重要的现实意义^[1]。

1 市政工程雨污水管道施工关键技术

1.1 设计图纸审查

设计图纸是雨污水管道施工的前提, 其准确性直接影响施工质量。因此, 在施工前必须对设计图纸进行认真审查, 确保设计图纸满足实际施工需要。审查内容包括管道的走向、管径、埋深等, 同时要考虑施工地点的地理环境和其他管道的情况, 避免施工过程中的损害^[2]。

1.2 沟槽开挖

沟槽开挖是市政雨污水管道施工的基础, 其质量和进度直接影响后续施工。在实际施工过程中, 应采用人工与机械相结合的方式, 确保沟槽开挖的质量和进度。同时, 要做好沟槽的排水工作, 降低对槽壁的压力, 避免超挖或扰动的现象^[3]。在开挖过程中, 还要对既有管线进行保护, 确保其功能不受破坏。

1.3 管道敷设与安装

管道敷设与安装是雨污水管道施工的关键环节。在敷设过程中, 要确保管材的合格性, 严格按照设计图纸进行敷设。在安装过程中, 要注重管道衔接处的密封性, 确保管道不渗漏。同时, 要做好管道的支撑和固

定工作, 防止管道在后续施工过程中发生位移或变形。

1.4 闭水试验与验收

闭水试验是检测管道是否渗漏的重要方式。在实验前, 要做好相关的准备工作, 对每个管道进行细致检查, 确保管道衔接处的密封性。如果实验不合格, 就要分析存在的问题, 修补管道后再进行闭水试验, 反复重复实验, 确保管道的质量。验收时, 要检查管道的施工质量和外观, 确保符合设计要求^[4]。

2 市政工程雨污水管道施工管理关键点

2.1 施工前准备管理要点

市政基础设施雨污水管道施工前的筹备与管理是保障工程顺利实施的关键。要对施工场所全面调研, 掌握地质及地下管线布局, 为施工方案提供依据。在技术准备方面, 召集专业团队会审施工图纸, 保证精确无误, 并结合实际提出优化建议。物料与设备准备对项目实施成效至关重要, 要严格筛选供应商, 确保物料质量达标, 同步调试及维护施工机械设备, 使其性能保持在最佳状态。同时, 对施工人员进行全面培训, 使其熟练掌握施工技术与安全规范, 提高质量与安全意识, 为施工构筑人力资源保障。

2.2 雨污水管道施工过程管理要点

市政排水管网雨污管道施工阶段, 管理关键要素贯穿作业链各阶段。基础施工时, 要严格把控基础平整性与密实性, 构建稳固支撑体系; 管道安装时, 要精确调整管道坡度及标高, 保证水流畅通, 防止积水和逆向坡度问题。接口互联互通是核心, 采用焊接、热熔等连接方式, 细致审核质量, 强化密封性能, 防止介质流失。此外, 还要合理规划施工序列, 避免交叉作业干扰和安全隐患^[5]。

2.3 施工安全与质量管理要点

市政工程雨污水管道施工核心是同步优化施工安全与质量。在安全防护上，建立安全管理体系，配置警示标志与防护设施，开展定期审核与知识普及活动，提升施工人员安全意识与应急能力。在质量标准上，构建质量管理体系，严格审查原材料检验与各施工步骤质量，利用先进设备和技术检测管道强度与严密性，把控施工质量。施工要遵守规范，对不达标的工序及时纠正，确保工程质量达到行业相关要求。强化施工人员质量意识，通过培训提升专业技能与素养，确保高标准执行。建立质量追溯机制，快速定位质量问题责任主体并整改，避免影响进度与质量。此外，还需加强与监理单位合作，共同监督施工质量，确保施工安全与质量管理效能。

2.4 施工进度与成本管理要点

市政基础设施雨污水管道施工的进度与成本管理对工程整体效益至关重要。在项目全过程管理中，要建立科学合理的施工进度控制体系，明确各阶段核心任务与关键时间点，并结合实际情况灵活调整优化。合理安排人力、物资和财力资源，防止资源配置不合理导致进度延迟。在成本管控方面，采用精确成本预算规范核算资金，强化成本控制，改进施工方案，运用新技术、新工艺提高效率、削减成本。同时，建立进度与成本监督机制，实时监控评估，确保进度和成本在预设范围内。若进度滞后或成本超支，要及时分析原因并调整优化，避免影响整体效益。此外，还要加强与供应商的沟通协作，确保物资及时供应和成本控制，避免影响工程进度与效益。通过科学管理和精

细化操作，加快施工进度，提高成本管理水平，保障工程整体效益（见图 1）。

3 案例分析

3.1 工程概况

某市政雨污水排水管道工程是路网关键组件，建设内容为 4 条主要道路改造升级。项目采用先进雨污分流排水体系，以优化水资源管理和环保。施工技术与质量控制遵循科学策略，确保各环节达标。排水工程注重实用与效率，雨水主管道按 1.5 m 覆土深度原则随道路工程敷设，保障排水效能与道路安全；污水主管道管顶低于雨水主管底部 2 m 埋设，利于污水收集传输，避免交叉污染。在排水方面，雨水经新建管道网络收集后，排入市政道路雨水系统或自然水体。管道敷设要兼顾美观与实用，通常布置在人行道下，人行道空间不足时调至车行道下并避开车辆轨迹，减少对交通的影响，保障管道安全。在材料选择方面，直径不超过 800 mm 的雨水管道选用符合《混凝土和钢筋混凝土排水管》GB/T11836—2009 标准的管材，大直径采用钢筋混凝土材料；污水管道统一用纳米改性高密度聚乙烯（MUHDPE）合金管，增强耐腐蚀性，延长使用寿命。

3.2 市政雨污水管道工程施工技术要点

3.2.1 施工准备

图纸审查与技术交底是基础。细致审查设计图纸，及时解决设计疑问，确保施工人员对工程要求理解一致，为施工质量控制奠定基础。技术交底会议要涵盖关键设计意图、施工难点及解决方案，提升团队执行力。材料准备要严格遵循国家及行业标准。直径 ≤ 800 mm 的雨水管道，选用符合《混凝土和钢筋混凝土排水管》

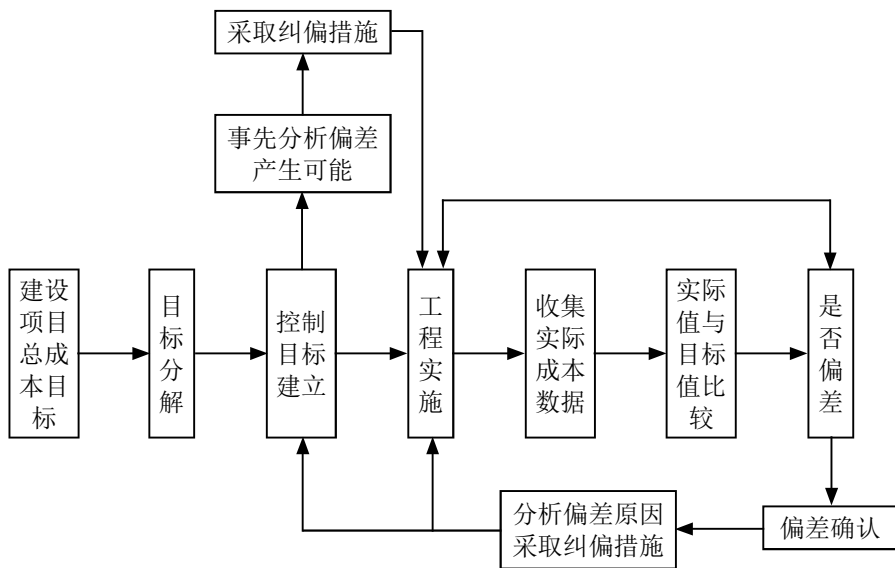


图 1 施工进度与成本管理要点

GB/T11836—2009 标准的管材；直径超过 800 mm 的，采用满足相关标准的钢筋混凝土管。污水管道统一采用符合《广州市公共租赁住房保障申请审核和配租规则》T/GZHG002—2019 及《建筑电气工程施工质量验收规范》CECS164—2014 等标准的 MUHDPE 合金管，确保抗腐蚀性 with 排污效率。

3.2.2 施工工艺流程

1. 管道沟槽开挖。首先，依据《市政工程勘察规范》，沟槽开挖前进行全面地质勘查，精确掌握地质结构，科学指导边坡坡度设计与支护措施，防止坍塌等安全事故，确保人员安全与工程顺利进行。针对埋深大或地层稳定性差的特殊地段，采取专项安全措施，如增设支撑、监测边坡位移等，强化施工安全保障。开挖接近设计槽底高程约 20 cm 时，精确测量控制，防止超挖。若超挖，立即用原土回填夯实，维持地基稳定性与承载力，避免后续质量问题。

2. 铺设砂垫层。完成沟槽挖掘工作之后，随即转入管道基底处理阶段，其中，采用了纳米改良型高密度聚乙烯合金材质的管道，特别铺设了中砂作为其支撑基层，并通过充分捣实确保密实度。此环节过后，依据灌砂试验验证，基底的压实强度严格要求不低于 90%，以此保证基础稳固性。而对于混凝土材质的管道，则专门选用了强度等级为 C20 的混凝土作为垫层材料。

3. 管道铺设。在安装过程中，纳米改性高强度聚乙烯（MUHDPE）合金管道采用了橡胶圈作为密封材料，通过承插式接口连接，严格遵循制造商提供的技术规范进行操作。安装前，制造商的专业团队会进行现场演示和技术传授，详细说明安装环节中的关键点与注意事项。钢筋混凝土管道则利用预制成型的混凝土管段进行装配，每隔约 20 m 至 25 m 设置一次现浇混凝土制成的柔性接口，这些接口部位的基础设计有分缝，并填充 2 cm 厚的沥青木板以增强密封性。

4. 管道闭水实验。在市政雨污水排水管道施工中，闭水试验是验证管道系统密封性能的关键，关系到工程质量与后期使用效果。试验前要严格检查：一是核查管道及检查井外观质量，确保无破损、裂缝等；二是封堵管道内部、沟槽及预留孔洞，保证无渗漏；若用砖砌封堵管道两端，构造与强度要满足设计及现行规范承压要求。试验从管道系统道路纵坡最高点向最低点分段推进。

5. 管道回填。管道安装完毕后，使用中粗砂进行回填作业。首先集中于管道两侧展开，采取分层次逐步回填的方式，确保每一层级的回填厚度维持在 200 mm 以内，并运用轻型打夯机械实施密实处理，通过压实测试验证，确保回填区域的压实强度至少达到 95% 的标准。

3.3 施工质量控制措施

一是管道位置偏移常见原因有测量误差、控制点损坏、施工机具与管道布置冲突。预防措施是严格校核测量基准点，加强控制点保护，按设计图纸精确测量放线，合理增设连接井解决冲突；二是沟槽基础沉降影响工程质量，原因是回填材料选用不当、压实机具操作不规范、管材接口施工质量不高。预防措施包括人工清底开挖，确保干槽施工，用中粗砂对称回填并人工压实至规定密实度；三是闭水实验不合格与管材质量低劣、连接处处理不当、检查井自身质量问题有关。预防措施为严格抽检管材质量，确保材料有合格证明且符合要求，加强混凝土振捣和养护，保证接口及检查井结构完整；四是检查井变形下沉在于地基处理不当、混凝土振捣不充分、井盖安装错误。需确保地基处理达标后施工，加强混凝土振捣与养护，正确安装井盖，保证井圈底部座浆饱满，用混凝土二次浇筑，禁止用非标准材料垫高。此外，要重视测量基准点设置与校核，多次复核控制；明确中粗砂为回填合格材料保证压实度；坚持管材高标准，确保有合格证明且符合规范；强化混凝土施工的振捣和养护；设置连接井解决管道冲突，优化排水布局；井盖安装要保证底部座浆饱满，用混凝土二次浇筑加固，严禁用石块垫起，行车道检查井需用高强度材料砌筑，加强保护和承载能力。

4 结束语

市政工程雨污水管道施工管理的各个环节相互关联、相互影响。施工前的充分准备是工程顺利进行的基础，施工过程中的严格管理是质量和安全的保障，进度和成本的合理控制是项目成功的关键，后期验收和维护是工程长期稳定运行的必要条件。只有在各个环节都做到科学管理、精细施工，才能实现市政雨污水管道工程的高质量建设，推动城市基础设施的可持续发展。

参考文献：

- [1] 唐启. 市政工程给排水管道施工质量管理研究[J]. 居业, 2021(08):141-142.
- [2] 刘克栋. 试析市政工程给排水管道施工管理[J]. 智能城市, 2020,06(15):74-75.
- [3] 杨秋生, 朱洁. 市政工程给排水管道施工中的质量管理[J]. 江西建材, 2015(09):295.
- [4] 张腾飞. 市政雨污水管道施工质量问题及其防治措施[J]. 绿色环保建材, 2018,05(06):54,56.
- [5] 李辉. 市政雨污水管道施工质量问题及控制措施[J]. 四川建材, 2022,48(04):210-211,213.

配电网工程管理中存在的问题及整改措施

郭 寒

(国网重庆市电力公司酉阳供电分公司, 重庆 409800)

摘 要 随着智慧电网、分布式电网等新型电网建设的普及, 配电网工程的技术和专业化水平日益提高, 对各环节的质量与效率管理提出了更高的要求。本文从规划设计阶段、工程建设阶段到竣工验收阶段, 深入分析了当前配电网工程管理中存在的薄弱环节和常见问题, 针对这些问题, 提出了优化负荷预测方法、建立协同管理平台、加强施工队伍管理、完善物资管理规范、强化进度计划编制与监控、规范变更管理及增强协调沟通等措施, 旨在为提升配电网工程的整体管理水平、确保项目高质量完成提供借鉴, 进而为供电质量和管理效益的提升奠定坚实的基础。

关键词 配电网工程; 供电质量; 管理效益

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.033

0 引言

配电网作为电力系统的重要组成部分, 其稳定性和可靠性直接影响着社会经济的发展和人民生活质量的提高。随着智慧电网和分布式能源系统的不断推广, 配电网工程不仅在技术上变得更加复杂, 而且在实施过程中也面临着前所未有的挑战。如何有效管理配电网工程的各个阶段, 确保工程质量、进度和成本控制达到预期目标, 成为当前亟待解决的问题。

1 配电网工程不同阶段的管理问题

1.1 规划设计阶段

1.1.1 负荷预测难度大

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 电力需求呈现出多样化和复杂化的趋势。传统的负荷预测方法依赖于历史数据和经验公式, 难以准确反映未来负荷增长的真实情况。尤其是在引入智慧电网、分布式电源等新技术后, 负荷的变化更加不确定。此外, 由于地理环境和社会经济条件的差异, 不同区域的负荷增长模式也存在显著差异, 这进一步增加了负荷预测的难度^[1]。

1.1.2 工程协调难度大

配电网工程建设涉及多个部门和利益相关方, 包括政府部门、供电企业、设计单位、施工单位以及社区居民等。各方之间存在着不同的目标和利益诉求, 如何有效地进行沟通与协作, 确保项目顺利推进成为一个重大挑战。例如: 在一些老旧城区进行配电网改造时, 复杂的地下管网布局和狭窄的道路条件给工程

实施带来了很大的困难。同时, 项目的环保标准、安全规范等方面的要求也在不断提高, 给工程协调带来了更大的压力。这些因素都导致了在规划设计阶段需要面对复杂的问题。

1.2 工程建设阶段

1.2.1 施工队伍管理难度大

由于配电网工程项目通常涉及多个不同的专业领域和技术要求, 对施工人员的专业技能和综合素质有着较高的要求。然而, 在实际操作中, 施工队伍的技术水平参差不齐, 且流动性较大, 这给施工管理和质量控制带来了很大的不确定性。此外, 施工现场环境复杂多变, 工作条件艰苦, 也增加了施工队伍管理的难度。不同施工队伍之间的协调配合不够顺畅, 容易导致施工过程中出现沟通不畅、责任不清等问题, 进一步影响了工程的整体效率。

1.2.2 物资管理压力大

配电网工程建设需要大量的物资支持, 包括电缆、变压器、开关柜等关键设备以及各类辅助材料。物资管理不仅涉及采购、运输、储存等多个环节, 还需要考虑物资的质量保证和及时供应。在实际项目执行过程中, 经常会出现物资供应不及时或物资质量不符合要求的情况, 不仅会导致工程进度延误, 还可能影响工程质量。同时, 由于市场波动、供应商变化等因素的影响, 物资价格和供应稳定性难以得到有效保障, 这也为物资管理带来了额外的压力。复杂的物资管理系统要求高度精确的数据处理能力和严格的流程控制, 但在实践中往往难以达到理想状态^[2]。

1.2.3 进度管理难度大

配电网工程往往受到多种因素的影响,导致进度管理异常困难。首先,工程项目本身的复杂性决定了其实施过程中可能会遇到技术难题或不可预见的地质条件变化,这些都会对工程进度产生不利影响。其次,外部环境的变化,如天气、政策调整等,也可能造成工期延误。此外,由于涉及多个环节和部门的协作,任何一个环节出现延迟都可能引发连锁反应,进而影响整个项目的进度安排。再加上项目执行期间可能频繁发生的设计变更、资源分配不均等问题,都使得保持工程按计划推进更加艰难。

1.2.4 协同管理难度大

配电网工程建设是一个多方参与的过程,涉及设计单位、施工单位、监理单位、设备供应商等多个利益相关方。各参与方之间的工作内容、目标和利益诉求存在差异,容易形成信息孤岛,导致沟通不畅和协作障碍。在实际操作中,由于各方使用的信息系统不一致,数据格式不统一,导致信息共享效率低下,进一步增加了协同管理的难度。

1.3 竣工验收阶段

1.3.1 验收标准和规范不一致或更新滞后

随着技术的发展和新型设备、材料的应用,现有的验收标准和规范可能无法完全适应新技术的要求。不同地区或部门之间采用的验收标准可能存在差异,导致同一类型的工程项目在不同的地方执行时,验收要求不统一,增加了协调难度。此外,部分现行的验收标准未能及时跟上技术进步的步伐,对于一些新兴技术和设备缺乏明确的验收指导,这给实际操作带来了困难,并可能导致验收过程中出现争议。

1.3.2 文档资料管理混乱

在整个配电网工程的生命周期中,会产生大量的文档资料,包括但不限于设计图纸、施工日志、测试报告、变更记录等。然而,在实际项目中,这些重要文档的管理往往存在诸多问题。一方面,文档的完整性难以保证,某些关键文件可能会出现缺失或者信息不全的情况;另一方面,文档的存储和检索方式不够系统化,导致在需要使用时难以快速找到所需信息。由于参与项目的各方(如设计单位、施工单位、监理单位等)之间的沟通不畅,文档版本控制不当,也可能造成使用的文档不是最新的,从而影响到竣工验收的准确性和效率。

2 配电网工程不同阶段的管理优化及整改措施

2.1 规划设计阶段

2.1.1 优化负荷预测方法

企业应用大数据分析技术通过收集和分析历史用电数据、经济发展指标、人口增长趋势等多源数据,可以构建更加精确的负荷预测模型。这种方法不仅能够全面考虑各种影响因素,而且还可以提高负荷预测的准确性,从而更好地指导后续的设计与建设工作。此外,可以利用机器学习和深度学习算法对负荷数据进行训练以识别潜在模式和趋势。智能算法可以根据实时变化的数据自动调整预测模型,使得负荷预测更具适应性和前瞻性。同时,考虑到分布式能源(如太阳能、风能等)接入配电网后对其负荷特性的影响,必须在负荷预测中充分考虑这一因素,确保预测结果能够真实反映未来的电力需求情况^[3]。

2.1.2 建立协同管理平台

建立协同管理平台首先需要实现信息集成与共享,将所有与项目相关的文档资料、施工计划、物资供应信息等整合到同一平台上,并提供给所有参与方访问权限。这样不仅能确保各方随时获取最新的项目信息,减少因信息不对称导致的误解和冲突,还能促进团队成员之间的沟通与协作。此外,通过将审批流程、变更请求处理等管理流程自动化,可以大大提高工作效率,缩短项目周期。利用可视化工具展示项目进度、任务分配等情况,使项目状态一目了然,便于及时发现并做出相应调整。最后,协同管理平台应配备即时通讯、在线会议等功能,方便团队成员之间随时交流意见和解决问题。

2.2 工程建设阶段

2.2.1 加强施工队伍管理

首先需要通过定期组织技术培训和安全教育,提高施工人员的专业技能和安全意识,确保他们能够胜任复杂多变的工作环境。此外,实施严格的绩效考核制度,根据施工质量和工作效率对施工队伍进行评价,并将其作为后续合作的重要依据。这不仅有助于提升施工队伍的整体素质,还能激励员工积极进取,提高工作积极性。同时,采用现代化的项目管理工具,如移动应用或云平台,实现施工进度、质量控制等信息的实时更新和共享,使得管理层能够及时掌握现场情况并做出相应调整。

2.2.2 完善物资管理规范

首先要明确各类物资的需求量、采购时间点以及

供应商选择标准,确保物资供应既满足工程进度要求,又避免过度积压造成浪费。其次,引入先进的物资管理系统,利用条形码或 RFID 技术追踪物资的入库、出库及使用情况,提高物资管理的精确性和效率。通过信息化手段,可以有效监控物资的状态,及时发现并解决可能出现的问题,比如物资短缺或过剩。最后,加强对供应商的评估和管理,建立长期稳定的合作关系,优先选择那些信誉良好、供货能力强的供应商。

2.2.3 加强进度计划编制与监控

进度计划的编制需要制定详细且灵活的项目时间表,考虑到所有可能影响进度的因素,如天气条件、政策变化和潜在的技术难题等,并为这些不确定因素预留缓冲时间。此外,采用先进的项目管理软件,能够帮助项目经理更精确地安排任务顺序、分配资源,并实时监控项目进展。同时,建立定期的进度审查会议机制,让所有参与方都能了解当前进度状况,并讨论任何可能导致延误的问题及其解决方案^[4]。

2.2.4 规范变更管理

针对工程建设过程中频繁发生的变更请求,必须明确变更管理流程,规定从提出变更申请到最终批准的所有步骤,确保每个环节都有据可依。所有变更请求都应进行详细的评估,分析其对成本、进度和质量的影响,并记录在案。设立专门的变更控制委员会或类似机构,负责审核和批准所有的变更请求,保证变更决策的科学性和公正性。该委员会还应定期回顾已批准的变更,评估其实施效果,并根据需要调整后续的变更策略。

2.2.5 加强协调沟通

为了解决协同管理中的困难,可以建立一个集中的信息交流平台,使得所有参与单位可以在同一个系统中交换信息、分享文档和报告进度,从而提高工作效率和准确性。这个平台应当易于使用,支持多种设备访问,并具备良好的安全性能,以保护敏感数据不被未授权人员获取。平台应制定统一的沟通规则和协议,包括会议频率、报告格式等,确保信息传递的一致性和有效性。鼓励跨部门、跨专业的团队协作,通过组织联合工作坊、研讨会等活动,促进知识和技术的交流,增强团队凝聚力。对于关键决策和重要事项,应及时召开面对面会议或视频会议,确保所有参与者都有机会表达自己的观点,并达成共识。

2.3 竣工验收阶段

2.3.1 统一和更新验收标准

面对验收标准和规范可能存在不一致或更新滞后

的情况,应组织行业专家和技术人员成立专门的工作组,负责对现行的验收标准进行系统评估,并结合最新的技术发展和社会需求进行修订。这不仅包括对已有标准的更新,也涵盖为新兴技术和设备制定新的验收规范。随着智能电网技术的发展,相关设备的验收标准需要及时调整以适应新技术的要求。为了保证标准的一致性和适用性,应该定期组织跨部门会议,邀请来自不同地区的专家共同讨论标准的应用情况,并根据反馈进行必要的调整^[5]。

2.3.2 强化文档资料管理

从项目的初期规划开始,就应该设立详细的文档管理计划,明确规定各类文件的编制、审核、批准和存档流程。采用电子文档管理系统,将所有设计图纸、施工日志、测试报告等重要文档数字化存储,并设置权限控制,确保只有授权人员才能访问和修改相关文档。该系统还应支持版本控制功能,以便于追踪文档的历史变更记录。同时,定期进行文档审计,检查文档的完整性和准确性,及时补充丢失或信息不全的文件。对于纸质文件,则可以通过条形码或 RFID 标签技术进行跟踪管理,便于快速查找和归档。

3 结束语

面对日益复杂的工程需求和技术挑战,传统的配电网工程管理方法已难以满足现代配电网工程建设的要求。本文聚焦配电网工程的全生命周期,针对规划设计、工程建设到竣工验收管理中存在的问题,提出了采用大数据分析和人工智能技术改进负荷预测、建立协同管理平台促进信息共享、加强施工队伍培训及绩效考核、完善物资管理和进度控制流程等优化措施。通过这些措施可以提升配电网工程的整体管理水平,确保项目顺利实施并达到预期目标。

参考文献:

- [1] 刁蒙蒙.智能化配电网工程管理系统的应用研究[J].电力系统装备,2024(04):151-153.
- [2] 谢如勇.配电网工程管理薄弱环节及整改策略分析[J].电工技术,2024(S2):504-506.
- [3] 杨亮.浅析配电网工程管理薄弱环节及整改措施[J].电气技术与经济,2024(01):246-248.
- [4] 胡永恒,丁永进.配电网电力工程施工安全管理措施研究[J].工程技术研究,2024,09(15):147-149.
- [5] 潘杰.10 kV 配电网工程管理与造价控制的研究[J].自动化应用,2024,65(S02):47-49.

变电站改建工程施工管理模式及风险防控策略

熊筠海

(四川能投发展建设有限公司, 四川 宜宾 644600)

摘要 随着社会经济的不断发展, 电力需求不断增长, 为了提升电力供应能力, 保障电力系统稳定性, 变电站的改建工程任务尤为重要。本文以变电站改建工程为例, 分析了施工管理模式创新方法和风险防控策略, 通过组织架构优化、管理制度创新、数字化技术应用和人员培训, 提高施工管理效率; 提出了完善安全操作规程、严格把控施工质量、合理控制施工进度及环境保护措施等风险防控策略, 以为变电站改建工程管理创新和风险控制提供有益参考。

关键词 变电站改建工程; 施工管理; 模式创新; 风险防控

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.034

0 引言

变电站作为电力系统中的重要组成部分, 承担着电能的转换和分配功能。变电站改建工程面临项目周期长、施工环境复杂、技术要求高等问题, 传统施工管理模式在这种情况下逐渐暴露出资源配置不合理、项目进度滞后和施工安全隐患等问题。为提高工程效率、降低风险, 亟需创新施工管理模式, 优化项目流程, 并加强风险防控。改进施工管理和风险防控策略, 不仅能提高工程质量, 加快施工进度, 还能有效保障项目的安全性和可持续性。

1 工程案例

川南某变电站始建于20世纪90年代, 原有设施由于长期运行, 设备老化问题日益严重, 已难以满足当前和未来的电力负荷需求。近几年区域内经济快速发展, 工业和居民用电量稳步攀升, 导致电网负载率不断提高, 供电可靠性面临严峻挑战。基于此, 本工程项目的目标是对该变电站实施全面的升级改造, 提高供电能力, 增强电网运行稳定性和安全性。改建内容包括高压设备的更换和升级, 例如将老旧的主变压器替换为更高容量、更高效的新型变压器; 同时更新110 kV及以上等级的断路器、隔离开关及保护装置, 确保设备运行性能和安全性符合现代技术要求^[1]。本次改建工程还涉及大量的土建与电气安装工作, 涵盖变电站主控楼的加固和扩建, 电缆沟、接地网的重新布置, 以及新设备的电气安装、调试和联调等。

2 变电站改建工程施工管理模式优化

2.1 组织架构优化

在现场管理组织架构优化方面, 项目整体管理按职能划分为多个层级和部门。项目经理部负责全局协

调, 生产技术部提供施工技术指导和质量监督, 安环部专注于安全监督, 物资部负责物资采购与调度, 而各施工队伍具体落实工程的各项任务。明确分工的架构使得各管理层级的职责与权限得到进一步细化, 避免因权责模糊而导致的效率低下^[2]。

在项目实施过程中, 施工组织引入先进的项目管理工具。通过横道图明确每一工序的开始时间、结束时间以及与其他工序的关联性, 确保每一个施工环节都在既定计划中按时推进。关键路径法被用于识别影响总工期的关键工序, 在资源分配和施工计划调整时优先保障这些工序的按时完成。比如在高压设备更换任务中, 项目管理团队利用横道图细化出设备运输、基础施工、安装调试的时间节点; 再通过关键路径法确认该环节中的重点工序, 保证在资源调度中优先考虑。此外, 为提升执行效率和应对施工环境的复杂性, 项目经理部定期组织现场协调会, 通报横道图的最新进展数据, 讨论施工过程中的技术和资源需求; 生产技术部及时为现场提供优化方案并协助解决难点问题; 安环部根据检查标准细化巡检计划, 确保每周覆盖施工现场的主要区域, 并在检查中实时反馈数据。

2.2 管理制度优化

在变电站改建工程的实施过程中, 施工管理制度创新是提高工程质量和效率的重要手段。首先, 在安全管理方面, 建立施工人员安全培训制度, 要求所有进场人员必须接受岗位安全教育, 并定期组织应急演练, 提升安全意识和事故应急处置能力。现场设置明显的安全标识和警示牌, 配备必要的个人防护用品。同时, 制定高空作业、带电作业等特殊工序的专门操作规程, 明确各环节的安全责任人, 确保高风险作业环节的操作规范化。其次, 在质量管理方面, 项目引

入第三方检测机制。规定施工单位在关键工序完成后,必须提交检测申请,由第三方机构依据国家标准和行业规范进行独立检测。检测范围涵盖材料进场验收、设备安装精度、焊接质量、电气接线完整性等。第三方机构出具检测报告后,施工单位根据报告内容及时进行整改,直至质量达标为止。再次,在进度管理方面,制定详细的工期节点计划和进度跟踪制度。施工队伍须每周向项目经理部提交进度报告,列明本周完成的工作量和未完成的原因。最后,在成本管理方面,制定严格的成本控制制度。施工过程中的材料、设备和人工费用均需逐项登记并按月核算。对于超预算的项目,需填写成本控制调整表,说明原因并提出优化方案,供项目经理部审核后实施^[3]。

2.3 技术创新应用

技术创新采用数字化施工管理平台、在线监测技术和数字孪生技术,项目团队实时掌控施工进度和资源使用情况,优化设备的维护与管理。首先,数字化施工管理平台改变了传统的施工流程管理方式。平台将项目的进度数据、人员安排和资源调度信息统一整合,并通过可视化界面实时展示工程各个环节的进展情况。例如:在高压设备的更换过程中,施工管理人员可以随时登录平台查看当前的施工进度、现场材料库存,以及设备安装的具体完成百分比。管理者基于实时数据迅速调整施工计划,优化资源分配,降低因工序不协调或材料短缺导致的工期延误。其次,在设备安装与调试阶段,项目团队部署多个传感器,实时采集设备温度、振动、运行电流等关键参数。所有数据通过无线网络传输至在线监测系统,并与施工管理平台对接。一旦某设备的运行状态超过预设阈值,系统将立即报警,提醒技术支持团队及时进行检查和维修。同时,项目团队采用数字孪生技术构建变电站的虚拟模型,以施工现场的真实数据为基础,不断更新数据与模拟分析,提前预测设备运行中的潜在风险。例如:在主变压器安装后,利用数字孪生技术对其运行状态进行虚拟演算,发现可能会出现的负荷分布不均问题。施工团队据此调整负载分配方案,避免未来设备过早损耗和非计划停机的风险。

2.4 人员管理优化

在变电站改建工程中,人员管理创新旨在提高施工人员的安全意识和技能水平,并通过绩效考核激励员工积极参与施工管理。一方面,制定覆盖全面的培训计划,包括初始入场培训、定期专项技术培训和在线学习模块。初始培训要求每位施工人员接受不少于

40 小时的安全与操作规范学习,确保其熟悉项目场地安全标准与关键工艺流程。专项技术培训分为每季度一次的现场技能演练和每月一次的技术交流会,重点解决复杂施工环节的难点问题。另一方面,建立并完善绩效考核体系,考核内容包括工期节点完成情况、质量检查合格记录、安全操作遵循程度以及问题整改及时性等。每月项目管理团队对每个施工小组和个人的表现进行综合评分,依据评分结果确定奖金、岗位提升机会及额外培训支持的发放情况。

3 变电站改建工程施工管理风险防控策略

3.1 安全风险防控

在该 110 kV 变电站改建工程中,施工现场涉及多种高风险操作,尤其是高空作业、带电作业等复杂环节。因此,项目团队制定了详细的安全风险防控策略。首先,施工开始前,项目团队对各施工工序进行了全面的风险识别和评估。针对高空作业,明确了必须使用符合国家标准的高空防护设备,包括安全带、安全网以及安全绳等,并要求施工人员在工作前检查设备的完好性。在带电作业环节,严格规定工作前的停电检修流程,建立专人专岗制度,确保停电操作经由双重确认后方可进入作业现场。同时特别设计了高风险工序的隔离区域,通过围挡和警戒线划定危险区域,避免无关人员进入。其次,在施工区域内增设了多种安全警示标识。在每个高空作业平台周边设置了明显的“高空作业,请戴安全帽”“高空作业,请系安全带”等警示牌,电气设备周围悬挂“高压危险,严禁入内”等标识。同时,在进出通道、施工要道等醒目位置安放移动式安全警示牌,提醒所有人员注意施工区域的潜在风险。在此基础上,项目团队还定期组织安全演练和培训。每月一次的全员安全演练涵盖了高空坠落救援、电气设备触电应急处理以及火灾和泄漏事故应急疏散等内容。施工人员通过参与演练,既熟悉了应急处置流程,还增强了团队协作能力和现场应变水平,并且建立安全教育长效机制,每周安排短时间的安全知识培训,内容包括新设备使用注意事项、最新安全技术应用和典型事故案例分析^[4]。

3.2 质量风险防控

为确保变电站改建工程的施工质量达到预期标准,项目团队采取了多层次的质量风险防控措施。在材料质量控制方面,所有进场的主要施工材料均需经过供应商资质审查和批次抽样检验。关键材料如变压器、电力电缆及电气元件,在采购前需要提供国家认监委

认证的检测报告,抵达施工现场后再按照相关施工规范进行抽检和复检。一旦发现材料指标未达标准,立即停止使用并退回更换,从源头上杜绝不合格材料进入施工环节。

施工过程中项目团队实施严格的质量检查与评估制度。安环部在每个关键施工节点安排质量巡检工程师到场,针对基础浇筑、设备安装、电气连接等工序进行全程监督和记录。每个施工阶段结束后,要求施工单位提交详尽的施工日志和质量检测数据,交由第三方检测机构进行独立核验。特别是高压设备的安装和调试阶段,所有测试数据如绝缘电阻值、接地电阻值以及负荷电流和电压的稳定性等必须符合国家电网施工标准和技术规范。另外,项目团队建立完善的质量追溯机制,所有施工过程中的材料批次、设备编号、检测数据和施工人员记录都存档于项目质量数据库。通过这一系统,任何阶段的质量问题都可以快速定位到具体的施工工序、材料批次和责任人。质量追溯机制的应用,使得质量问题的根因分析更加迅速,为及时制定补救方案和避免类似问题再次发生提供了可靠依据。

3.3 进度风险防控

在施工进度风险管控方面,项目团队首先制定了详尽的施工进度计划,将整个项目划分为若干主要节点任务,每一节点明确具体的开始时间、结束时间、所需资源以及关键工序。例如:在高压设备安装任务中,团队明确了设备进场时间、土建完成节点、电缆敷设工期以及设备调试时间表,并通过施工管理平台以可视化横道图的形式实时监控。其次,在具体施工期间,加强进度跟踪与管理,每周定期召开进度协调会,对照计划检查实际完成情况。施工日志和现场报告会详细记录每日工作量、完成比例、未完成原因以及所需调整的资源。针对影响工期的因素如材料供应延迟、技术问题或天气原因,迅速作出调整,重新安排资源,优化施工顺序,确保整体进度不偏离主计划。

3.4 环境风险防控

项目团队严格控制施工活动对周边环境的影响。一方面,为降低施工噪声,在机械设备上安装了消音器,尽量选用低噪声机械,并设立隔音围挡以减少噪声扩散。在施工时段的选择上,避免在夜间或居民集中活动时间内进行高噪声工序,确保周边社区不受施工影响。另一方面,项目要求施工单位采用低排放的施工机械,并在工地周边设置洒水降尘装置和防尘网,减少扬尘对空气质量的影响。对于施工产生的固体废弃

物,项目团队安排了集中分类和统一处理的措施,危险废物和一般废物分别存放于专用区域,定期由合格的处理机构回收处理,确保废弃物不会对土壤和地下水造成污染^[5]。此外,项目团队还通过实时环境监测设备,检测施工现场的噪声水平、空气中颗粒物浓度,以及周边土壤和水体的污染物指标。监测数据通过无线传输上传至项目环境管理系统,一旦发现指标超标,立即启动环境保护应急预案,暂停施工,分析原因并采取修复措施。最后,团队提前制定了环境应急预案,涵盖突发扬尘事故、机械泄漏事件以及非计划噪声超标等场景。现场工作人员定期进行应急预案演练,确保在发生突发环境事件时,快速响应、果断处理,将影响降至最低。

4 施工效果分析

通过施工管理模式创新和风险防控措施的实施,该110 kV变电站改建工程顺利完成。施工期间未发生任何安全事故,安全管理成效显著,所有高空作业和带电作业均严格遵循规程,现场监督到位,确保了施工安全。改建完成后,变电站供电能力显著提升,系统稳定性增强,为周边区域提供了更加可靠的电力支持。

5 结束语

通过对某110 kV变电站改建工程的案例分析,探讨了施工管理模式创新与风险防控策略的重要性。通过组织架构优化、管理制度创新、技术创新应用和人员管理创新等多方面的努力,结合针对性的安全风险、质量风险、进度风险及环境风险防控策略,有效提升了工程效率和质量,确保了项目的安全性和可持续性。未来,随着电力需求的持续增长,施工管理模式创新与风险防控策略将继续在变电站改建工程中发挥关键作用,推动电力行业的高质量发展。

参考文献:

- [1] 张宏发.110kV变电站工程施工管理分析[J].大众标准化,2024(05):89-91.
- [2] 白哲.智能化技术在变电站工程管理中的应用[J].集成电路应用,2024,41(08):266-267.
- [3] 李庆华.电力工程中变电站施工技术的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(29):10-12.
- [4] 朱磊.电力工程中变电站施工技术的应用探讨[J].科学与信息化,2023(05):139-141.
- [5] 李慧超,叶志恒,苗青,等.石应水电站改建方案淹没影响分析研究[J].珠江水运,2022(21):48-51.

数字化技术在水利工程建设管理中的应用研究

王凯丽

(山东龙跃兴设计集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 水利工程的建设和管理直接关系到国家的水安全、水资源利用效率和生态环境的保护。然而, 传统的水利工程建设管理方式往往依赖于人工操作和经验判断, 存在效率低、精度差、响应速度慢等问题。而数字化技术在水利工程建设管理中的应用, 为解决这些问题提供了新的途径。因此, 本文认为探索数字化技术在水利工程建设管理中的应用, 不仅是提升工程管理效率和质量的迫切需求, 也是推动水利行业高质量发展的必由之路。

关键词 水利工程建设管理; 数字化技术; 地理信息系统; 遥感技术; 数字孪生技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.035

0 引言

水利工程是国民经济和社会发展的基础设施, 其建设管理涉及多个环节和复杂的技术问题。传统的建设管理方法在面对日益复杂的水利工程时, 往往显得力不从心。数字化技术的引入为水利工程建设管理带来了新的机遇^[1]。本文从水利工程建设管理的各个环节出发, 探讨数字化技术的应用现状和未来发展趋势。

1 数字化技术在水利工程规划中的应用

1.1 地理信息系统 (GIS)

地理信息系统 (GIS) 在水利工程规划中的应用不仅限于空间数据的采集和处理, 还涉及复杂的数据分析和可视化。通过 GIS 技术, 工程师可以将多种地理数据叠加分析, 生成详细的地形图、水文图和土地利用图, 为水利工程的选址和设计提供全面的数据支持。例如: 在跨流域调水工程中, GIS 技术可以分析不同区域的水资源分布和需求, 优化调水路线和工程布局。GIS 还可以用于评估工程对环境的影响, 帮助制定环保措施, 确保工程的可持续发展。

1.2 遥感技术

遥感技术在水利工程规划中的应用范围广泛, 能够提供高分辨率的地表信息, 支持多种水利工程项目的实施。例如: 在干旱地区的水资源调查中, 遥感技术可以监测地下水位和土壤湿度, 为水资源管理和灌溉规划提供数据支持。在河流治理工程中, 遥感技术可以实时监测河道变化和泥沙淤积情况, 帮助制定有效的治理方案。遥感技术还可以用于监测水库和湖泊的水质变化, 为水环境保护提供科学依据。

1.3 数字孪生技术

数字孪生技术在水利工程规划中的应用不仅限于虚拟模型的构建, 还涉及实时数据集成和动态模拟。通过数字孪生技术, 工程师可以在规划阶段对水利工程进行全面的仿真分析, 预测不同设计方案的效果和潜在问题。例如: 在大型水电站规划中, 数字孪生技术可以模拟电站运行时的水流动态、发电效率和环境影响, 帮助优化设计方案^[2]。数字孪生技术还可以用于监测工程的施工进度和质量, 确保工程按计划进行, 提高工程管理的效率和精度。

2 数字化技术在水利工程设计中的应用

2.1 计算机辅助设计 (CAD)

计算机辅助设计 (CAD) 技术在水利工程设计中的应用, 不仅提升了设计效率, 还增强了设计的精确性和可视化效果。通过 CAD 软件, 设计人员能够进行复杂的水利工程结构设计, 如大坝、渠道、泵站等, 并生成详细的二维和三维图纸。这些图纸不仅便于施工人员理解, 还能进行工程量的精确计算和材料预算。此外, CAD 技术还支持多种工程分析, 如应力分析、热传导分析和流体动力学分析, 帮助设计人员优化结构设计, 确保工程的安全性和耐久性。例如: 在大型水库设计中, CAD 技术可以模拟水库在不同水位下的应力分布, 为结构设计提供科学依据。

2.2 建筑信息模型 (BIM)

建筑信息模型 (BIM) 技术在水利工程设计中的应用, 实现了工程设计、施工和运营的全生命周期管理。通过 BIM 技术, 设计人员可以构建水利工程的三维信

息模型,集成设计、施工和运营阶段的所有数据。这种集成化的管理方式,不仅提高了设计效率,还减少了设计错误和施工变更。例如:在大型水电站设计中,BIM技术可以用于模拟电站的施工过程,进行碰撞检测和施工进度管理,优化施工方案,减少施工风险。BIM技术还可以用于工程的后期运营和维护,提供详细的结构信息和维护计划,延长工程的使用寿命。

2.3 数值模拟技术

数值模拟技术在水利工程设计中的应用,为复杂的水流、泥沙和水质问题提供了科学的解决方案^[3]。通过数值模拟技术,设计人员可以建立水利工程的数学模型,模拟工程建成后的运行效果,预测潜在问题,优化设计方案。例如:在河流治理工程中,数值模拟技术可以用于模拟河道的水流动态和泥沙淤积情况,帮助设计人员制定有效的治理方案。在污水处理厂设计中,数值模拟技术可以用于模拟污水处理过程,优化处理工艺,提高处理效率。

3 数字化技术在水利工程施工中的应用

3.1 施工管理系统

施工管理系统在水利工程施工中的应用,不仅提升了项目管理的效率,还增强了施工过程的透明度和可控性。通过施工管理系统,项目管理人员可以实时监控施工进度、资源使用情况和施工质量,及时发现和解决问题,确保工程按计划进行。例如:在大型水库施工中,施工管理系统可以用于监控混凝土浇筑进度、钢筋绑扎质量和施工机械的运行状态,优化施工资源配置,减少施工延误。此外,施工管理系统还可以集成安全管理模块,实时监控施工现场的安全状况,预防安全事故的发生。

3.2 无人机技术

无人机技术在水利工程施工中的应用,为施工监测和地形测绘提供了高效、精准的解决方案。通过无人机技术,可以快速获取施工现场的高分辨率影像和地形数据,为施工管理提供全面的数据支持。例如:在大型渠道施工中,无人机技术可以用于监测渠道开挖进度、边坡稳定性和施工质量,及时发现和解决施工问题。在河流治理工程中,无人机技术可以用于监测河道变化和泥沙淤积情况,为施工方案调整提供数据支持。此外,无人机技术还可以用于施工现场的安全巡查,实时监控施工现场的安全状况,预防安全事故的发生。

3.3 智能施工设备

智能施工设备在水利工程施工中的应用,通过集成传感器、控制系统和通信技术,实现了施工过程的自动化和智能化^[4]。通过智能施工设备,可以提高施工效率,降低施工风险,确保施工质量。例如:在混凝土浇筑中,智能振捣设备可以自动控制振捣时间和频率,确保混凝土的密实性和均匀性,提高混凝土浇筑质量。在土方开挖中,智能挖掘机可以自动识别土质和地形,优化挖掘路径和深度,提高开挖效率。智能施工设备还可以实时监控设备的运行状态和施工参数,及时发现和解决设备故障,减少施工延误。

4 数字化技术在水利工程运营和维护中的应用

4.1 物联网技术

物联网技术在水利工程运营和维护中的应用,通过传感器和通信设备的广泛部署,实现了对工程运行状态的实时监控和数据的全面采集。通过物联网技术,水利工程的管理人员可以实时获取大坝、渠道、泵站等关键设施的运行数据,如水位、流量、压力、温度等,及时发现和处理潜在问题。例如:在水库运营中,物联网技术可以用于监控大坝的位移、渗流、应力等关键参数,及时发现安全隐患,采取相应的维护措施。在泵站运营中,物联网技术可以实时监控水泵的运行状态,如振动、温度、电流等,及时发现设备故障,减少停机时间。物联网技术还可以用于水资源的智能调度和管理,通过实时监测水库和河流的水位和流量,优化水资源的分配和利用,提高水资源的利用效率。

4.2 大数据分析

大数据分析技术在水利工程运营和维护中的应用,通过对海量数据的挖掘和分析,为工程管理提供了科学的决策支持。通过大数据分析技术,水利工程的管理人员可以从历史数据中提取有价值的信息,预测未来的运行趋势和潜在问题。例如:在洪水预警系统中,大数据分析技术可以用于分析历史洪水数据,如降雨量、河流水位、洪水淹没范围等,预测未来洪水发生的可能性和影响范围,为防洪决策提供科学依据。在水库运营中,大数据分析技术可以用于分析水库的水位、流量、泥沙淤积等数据,预测水库的运行状态和潜在问题,优化水库的调度和管理。大数据分析技术还可以用于水资源的优化配置,通过分析不同区域的水资源需求和供应情况,合理的水资源分配方案,提高水资源的利用效率。

4.3 人工智能技术

人工智能技术在水利工程运营和维护中的应用,通过机器学习和深度学习算法,实现了对工程设备的智能诊断和预测维护。通过人工智能技术,水利工程的管理人员可以自动识别和诊断设备的故障,预测设备的维护需求,减少设备的停机时间和维护成本^[5]。例如:在水泵站运营中,人工智能技术可以用于分析水泵的运行数据,如振动、温度、电流等,识别水泵的异常状态,预测水泵的故障和维护时间,优化维护计划。在大坝运营中,人工智能技术可以用于分析大坝的位移、渗流、应力等数据,识别大坝的潜在安全隐患,预测大坝的维护需求,确保大坝的安全运行。

5 数字化技术在水利工程建设管理中的发展趋势

5.1 智能化

水利工程建设的智能化发展将依托人工智能技术的深度应用,构建具备自主感知与决策能力的系统架构。通过部署多维传感器网络与边缘计算节点,工程现场可实现对结构应力、水流动态、地质形变等关键参数的毫秒级采集。机器学习算法将突破传统阈值报警模式,建立基于历史数据与实时工况的自适应预警模型,实现对渗流异常、结构疲劳等隐患的预判式监测。在决策支持层面,知识图谱技术将整合水利规范、工程经验与实时数据,构建覆盖规划、设计、施工、运维全链条的智能推理引擎。这种认知计算能力可使管理系统自主生成多目标优化方案,在防洪调度、水资源配置等复杂场景中实现动态寻优。未来,具备自主演进能力的数字孪生体系将成为标配,通过深度强化学习持续改进工程运行策略,形成人机协同的智慧水利生态。

5.2 集成化

技术融合将催生水利工程全要素数字化集成平台。基于 BIM+GIS 的三维可视化底座,将整合工程地质勘探数据、水文气象信息与结构设计模型,实现宏观地理空间与微观构件层级的精准映射^[6]。物联网设备产生的施工进度、材料质量、环境监测等动态数据流,将通过统一数据中台进行标准化清洗与关联分析。这种多维数据融合能力使项目管理突破传统单阶段局限,形成贯穿可研论证到退役拆除的全生命周期数字档案。在跨系统协同方面,区块链技术将构建可信数据交换网络,确保设计单位、施工单位、监管部门间的数据主权与追溯机制。通过开发开放式 API 接口,各类专业软件将实现功能模块的即插即用,例如将水力仿真

结果直接反馈给结构安全评估系统。这种集成化体系最终将形成数字孪生驱动的闭环管控,为工程决策提供全景式数据支撑。

5.3 云端化

水利工程管理将向云原生架构全面演进,构建弹性可扩展的计算资源池。分布式云平台可动态分配算力资源,支持大规模水文模拟、三维渲染等计算密集型任务。基于微服务架构的业务系统,能够按需组合洪水预报、应急预案等模块,实现管理功能的敏捷迭代。在数据治理层面,时空数据库引擎将结构化存储海量监测数据,结合流式计算框架实现 TB 级数据的实时清洗与特征提取。跨地域的工程协同将依托云端工作空间,支持多方同步标注设计图纸、在线会审施工方案。安全体系将采用零信任架构,通过动态令牌与属性加密技术,确保敏感数据在共享过程中的细粒度权限控制^[7]。边缘云节点的部署可解决偏远工程现场的网络延迟问题,实现本地预处理与云端深度分析的协同计算。

6 结束语

在水利工程建设管理中应用数字化技术,可以提高水利工程的管理效率,降低成本和风险,提高工程质量和安全性。未来,随着技术的不断发展和创新,数字化技术在水利工程建设管理中的应用将更加智能化、集成化和云端化,为水利工程的建设和管理提供更加科学、高效和安全的解决方案。

参考文献:

- [1] 王思远.水利工程建设管理中数字化技术的应用与前景展望[J].黑龙江水利科技,2025,53(02):131-134,139.
- [2] 任天翔,直万里.水利工程建设管理数字化应用研究[J].海河水利,2024(12):95-99.
- [3] 莫礼霞.水利工程管理中存在的问题与对策[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司.2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(三).北海市水利工程管理中心,2024.
- [4] 张晓娟.数字化技术在水利水电工程建设中的应用研究[J].数字通信世界,2024(07):124-126.
- [5] 周演腾.水利工程建设中数字化管理技术应用探讨[J].水上安全,2024(13):47-49.
- [6] 王靓.水利工程运行中数字化管理技术应用探讨[J].长江信息通信,2023,36(03):163-165.
- [7] 赵宇飞,祝云宪,姜龙,等.水利工程建设管理信息化技术应用[M].北京:中国水利水电出版社,2018.

市政道路路基边坡设计研究

郝建名, 季 托

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘 要 市政道路路基边坡易受地质条件、气候环境、车辆荷载及施工质量影响, 导致滑坡、崩塌、水土流失等, 影响道路安全与稳定。为增强市政道路路基边坡强度, 提升道路功能完整性, 本文针对市政道路路基边坡设计原则展开了探究, 提出采用重力式挡土墙、锚杆挡土墙、锚索挡土墙等支护结构设计, 结合地面与地下排水设计, 以及植草、三维植被网、骨架植物等生态防护设计的方法, 以期为提高市政道路路基边坡稳定性、安全性提供借鉴。

关键词 市政道路; 路基边坡设计; 重力式挡土墙; 锚杆挡土墙; 锚索挡土墙

中图分类号: U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.036

0 引言

市政道路作为现代城市的重要基础设施, 关系到人们的安全出行以及城市建设发展。路基作为市政道路的核心组成部分, 使用中需要承受车辆荷载、自然环境侵蚀等多重作用。根据市政道路路基的运行需求, 采取适宜的边坡设计方案, 可提高路基的稳定性、安全性, 也能减少土地占用, 保护生态自然环境。因此, 深入分析市政道路路基边坡设计要求, 改进设计方案, 以满足市政道路路基的运行需求, 对现代市政道路领域的发展和进步具有积极作用。

1 市政道路路基边坡设计原则

1.1 安全性原则

在市政道路路基边坡设计中, 首要遵循的是安全性原则, 要确保在地震、暴雨等恶劣自然环境作用下依然能够保持稳定, 从而防止发生滑坡、崩塌的地质灾害。在市政道路路基边坡设计中, 要以安全性为基础, 重视边坡的稳定性设计计算, 确定适宜的设计方法和策略, 进而提高边坡运行的安全性、可靠性。

1.2 经济性原则

在市政道路路基边坡设计中, 在保证安全、质量的基础下, 需降低施工成本, 达到经济效益提升的目的。根据边坡设计要求, 选择适宜的边坡坡度以及支护结构形式, 保证边坡的功能达到相应的要求。例如: 地质条件良好的路段, 边坡设计时采用较缓的坡度, 以减少支护结构的使用; 地质条件较差的区域, 边坡选择经济性强的支护结构, 如重力式挡土墙、锚杆挡土墙等。

1.3 环保性原则

市政道路路基边坡设计时应遵循环保性原则, 降低对周边环境产生的破坏影响。在环保型路基边坡设计中, 主要采用生态防护措施, 以植草防护、三维植被网防护的方式为主, 边坡防护施工后和周边环境达到协调性^[1]。

2 市政道路路基边坡支护结构设计

2.1 重力式挡土墙设计

第一, 基础设计要点。重力式挡土墙作为重要的边坡防护结构形式, 需保证埋深达到要求, 确保挡土墙使用后满足承载力、稳定性要求。在重力式挡土墙设计中, 其埋设深度需综合分析地质条件、墙土高度等各项因素, 特别是软土地基中适当增加厚度, 防止发生不均匀沉降的问题。第二, 墙体尺寸确定。重力式挡土墙在结构尺寸设计时, 需综合分析土体侧压力、墙体材料的强度。而在墙体高度设计中, 分析边坡高度、防护需求确定。在墙体厚度设计中, 需达到抗滑、抗倾覆稳定性的要求。通常来说, 顶部厚度较小时, 底部厚度要适当地增加, 以增强墙体结构的稳定性。此外, 墙体坡度设计应合理, 禁止过陡或过缓而影响结构性能或美观性。第三, 排水措施设置。在重力式挡土墙设计中, 需选择适宜的排水措施, 以增强墙体结构的稳定性。根据挡土墙设计要求, 墙体后部设置反滤层, 避免土体颗粒被水带走, 提高墙体的稳定性。重力式挡土墙中布置泄水孔, 防止墙后发生积水现象, 能够减小压力。泄水孔在布置时, 采取均匀设置方式, 它们的间隔距离应为 2 ~ 3 m。同时, 泄水孔的孔径、

孔距需根据排水流量确定。此外,重力式挡土墙底部设置排水盲孔,避免积水对墙体稳定性产生不利影响。

2.2 锚杆挡土墙设计

第一,锚杆设计。锚杆挡土墙中锚杆作为主要组成部分,根据运行需求确定适宜长度、直径、间距、锚固力参数。锚杆长度确定时,需分析边坡岩体性质,锚固深度通常在 3 m 以上。在设计锚杆直径时,要根据所受拉力计算确定,以提高锚杆结构的强度、稳定性。锚杆间隔距离需分析面板尺寸、受力条件确定,使其受力均匀性达到要求^[2]。第二,面板与肋柱设计。锚杆挡土墙的面板在使用中受到墙后土体的侧压力,需精准计算厚度以及强度指标。通常情况下,钢筋混凝土面板需满足抗弯、抗剪性能要求,肋柱间隔距离需与锚杆间距保持匹配性。此外,面板和立柱需保持连接的牢固性,避免松动、损坏而影响锚杆挡土墙的结构性能。第三,施工与监测要点。在锚杆挡土墙施工中,需根据结构特点和现场实际情况,严格控制钻孔深度、角度、注浆质量,从而保证挡土墙结构性能合格。同时,现场施工中要确定适宜的监测点位,掌握挡土墙的拉力、墙体位移等指标,进而满足锚杆挡土墙运行需求。

2.3 锚索挡土墙设计

第一,锚索选型与布置。在设计锚索挡土墙时,需选择适宜的锚索类型,综合分析边坡高度、地质条件、墙体受力确定。锚索形式主要为预应力锚索与非预应力锚索类型,其中,预应力锚索主动施加预应力,提高挡土墙的稳定性。同时,要根据锚索挡土墙的运行环境确定适宜的锚索间隔距离,通常为 3~6 m,而锚索长度则需结合锚固的要求确定。第二,锚固体系设计。在锚索挡土墙的锚固体系设计中,主要从锚头、锚具、锚固段方面展开。锚头的强度、耐久性要合格,能够承受锚索的拉力作用;锚具需确保锚索的预应力损失在适宜范围内,主要采用夹片式;在设计锚固段时,需确保锚索和周边土体连接性能达到要求,并选择适宜的注浆方式提高锚固力。第三,墙体结构与稳定性分析。在设计锚索挡土墙时,要确定适宜的墙体结构形式,根据锚索布置和受力条件确定。在墙体设计中,主要采用钢筋混凝土结构形式,以保证整体性能合格。挡土墙设计时要分析稳定性参数,采取计算以及现场试验方式确定,进而提高抗滑稳定性、抗倾覆稳定性和整体稳定性^[3]。

2.4 市政道路路基边坡排水设计

2.4.1 地面排水设计

第一,边沟设计考量。在路基边坡设计中,边沟

为主要排水设施,需综合分析道路走向、地形特点确定。在直线段路基设计中,边沟采用直线布置方式,确保排水达到通畅性;弯曲段路基边坡的弯曲半径、超高情况应及时调整,使得水流能够自然排出。在边沟设计中断面形式选择极为重要,采用梯形边沟方式能够提高排水效果,并且施工便利;矩形边沟应用在排水需求较高的条件下,并且汇水面积比较大。同时,在边沟设计中要保证纵坡度合格,通常为 0.3%~0.5%,保证它的水流速度适中,避免冲刷边坡底部造成稳定性下降。第二,截水沟规划要点。在路基边坡设计中,截水沟的作用是截流边坡上部地表径流,避免进入边坡内产生冲刷作用。在设计截水沟中需分析地形、汇水范围确定,使得边坡坡顶积水能够及时排出。截水沟的断面尺寸设计极为重要,需精准计算水量、流速等,使得截水、排水性能达到要求。在截水沟规划设计时,要与周边排水系统紧密衔接,促使水流能够进入天然河道或低洼地段。第三,排水沟布局策略。市政道路路基边坡设计阶段,排水沟的总体布局需要考虑到排水需求,依据边坡地形、坡度进行合理设置。边坡坡度较缓时,排水沟沿着等高线设置,从而组合形成横向的排水体系;边坡坡度较陡时,边坡垂直面形成纵向排水体系。排水沟设置中间隔距离为重要参数,需结合排水需求、汇水面积确定,通常为 10~20 m。

2.4.2 地下排水设计

第一,盲沟设置方式。在路基边坡设计中,盲沟是重要的排水设施,它的作用是将边坡内部地下水及时排出,保证边坡地基的稳定性。盲沟设计需分析地质条件、地下水位情况确定,土质边坡选用水平盲沟和竖向盲沟。水平盲沟将地下水收集和拦截,竖向盲沟则排出地下水。盲沟内部使用碎石、卵石等材料填充,使得排水达到通畅性。此外,盲沟顶部以及两侧设置反滤层,以免周边土体颗粒进入内部导致排水性能下降。第二,渗井设计思路。在路基边坡设计中,渗井主要布置在地下水位高、排水流量大的边坡条件下。渗井选择使用竖井设计方式,能够集中收集地下水并排出。在渗井设计中,深度、直径按照地下水位排水流量确定,通常深度可达到几米。在渗井施工过程中,其井壁使用砖砌或混凝土浇筑方式,以提高结构强度以及稳定性。渗井内部安装滤水管,周边填充滤料,确保地下水能够渗入井内排出。第三,排水管网布局。根据市政道路路基边坡设计要求,排水管网布置应科学合理,确保排水效果合格。排水管网布置时要分析地形条件、地下水位流向,满足排水性能需求。排水

管网设计阶段,需综合分析现场排水需求,确定适宜的坡度和管径,进而保证排水效果合格^[4]。

2.5 市政道路路基边坡生态防护设计

2.5.1 植草防护设计

第一,草种选择要点。选择适宜的草种,分析气候、土壤条件、防护需求,使其防护的稳定性合格。气候条件温暖湿润的区域,以狗牙根、结缕草为主,其耐旱性强,能够尽快完成边坡覆盖;干旱、少雨的地带种植沙打旺、冰草,具备耐寒、耐旱特性。在草种选择的过程中还要分析草种的固土能力、抗病虫害能力,能够适应边坡所在地区气候条件,尽快生长以达到固土防护的效果。第二,播种技术要点。在植草防护的过程中,播种为重点环节,要先进行边坡的清理、翻松处理,将石块、杂物清理干净,为草种生长提供良好条件。播种方式的选择极为重要,主要采用撒播、条播、喷播的方式。播种过程中需分析草种类型、边坡坡度、土壤肥力,保证播种效果合格,草籽生长速度快,能够充分发挥边坡防护作用。第三,土壤改良措施。在边坡防护施工中,边坡土壤条件较差时,草种生长受到限制,需采取土壤改良措施。在土壤改良中,要根据检测的结果施加有机肥、腐殖土以增强土壤肥力、改善土壤结构,使其保水保肥性能提升。同时,根据草种生长需求施加必要的缓释肥,保证草种有充足的营养供应。此外,如果土壤酸性或者碱性过强,则需采取酸碱度调节方式,营造出良好的草种生长环境。

2.5.2 三维植被网防护设计

第一,三维植被网特性。三维植被网防护作为新型的生态性防护结构,采用立架构的组成方式,能够达到固定土壤与草种的效果。它在使用过程中使得边坡结构表面粗糙度得到提升,能够有效减缓水流速度,使得草种生长有足够的空间,促进草根的生长以及蔓延。同时,三维植被网防护系统的透水性、透气性较强,草种生长有足够的空间,养分提供充足,也能适应边坡的地形。第二,铺设工艺要点。三维植被网防护工作开始前,需根据工艺方案进行边坡表面的清理与平整,使其平整度达到要求,再进行植被网的铺设作业。植被网铺设时,采用铆钉、U型钉将其固定,间隔距离为1~1.5 m。植被网铺设阶段相邻部位采取搭接措施,使其搭接宽度在10 cm以上。三维植被网铺设结束后,在每个网包内填充种植土和草种,厚度为3~5 cm。第三,与其他防护结合。在应用三维植被网防护技术的过程中,需与其他防护技术组合形成完善的防护体系。例如:边坡坡脚采用挡土墙或护坡的形式,避免土体滑坡;

边坡内部布置截水沟,防止雨水产生严重的冲刷性作用。同时,在三维植被网中种植一些攀岩类植物,如爬山虎、凌霄等比较常见,能够提高边坡结构稳定性^[5]。

2.5.3 骨架植物防护设计

第一,骨架结构设计。在道路路基边坡防护中采用骨架植物防护技术,进行骨架结构设计。在骨架设计中,需分析边坡的高度、坡度、地质条件确定,主要为人字形、方字形、拱形的多种形式。人字形骨架应用在坡度较大的条件下,能够及时分散水流,以免产生过大冲击作用;方形骨架在坡度较缓的条件下应用,可使边坡粗糙度提升,使防护结构具备较高防滑性;拱形骨架的力学性能优越,能够承受较大荷载作用^[6]。第二,植物搭配原则。在骨架植被防护中,核心工作为选择适宜的植被搭配方案。在植被搭配的过程中,要选择根系发达、固体能力强、耐寒、耐旱的品种,将乔木、灌木、草本植物搭配使用,能够形成多层次植被网络。乔木以杨树、柳树为主,灌木以紫穗槐、沙棘为主,草本则以黑麦草、高羊茅为主,多种植物能够对边坡进行全面覆盖,达到固土防护的效果,且具备较高的美观性^[7]。

3 结束语

市政道路路基边坡设计具有一定的复杂性,需分析市政道路路基边坡的运行需求,确定适宜的方案,以确保其能够满足安全性、经济性、环保性要求。同时,在路基边坡设计中要综合分析地形、气候、地质、车辆荷载等多方面因素,以确定适宜的设计方案,进而提高边坡的稳定性、安全性,达到生态防护的效果,满足道路通行需求,改善道路周边生态环境。

参考文献:

- [1] 陈永刚.山区市政道路路基边坡设计与应用[J].福建交通科技,2020(02):8-11,27.
- [2] 赵兴平.山区市政道路路基边坡设计研究[J].工程建设与设计,2022(04):50-52.
- [3] 谭福官.山区市政道路路基边坡设计研究[J].运输经理世界,2023(13):14-16.
- [4] 杨智勇.市政道路路基设计方法与原则研究[J].工程建设与设计,2023(18):80-82.
- [5] 乔亚涛.市政道路高填深挖路基边坡的设计与施工技术研究[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2025,40(01):72-78.
- [6] 程芳.吹填造地上修建市政道路特殊路基段的设计要点研究[J].运输经理世界,2020(16):39-40.
- [7] 段英杰.路基高边坡开挖施工监控量测技术研究与应用[J].建筑技术,2023,54(15):1867-1871.

露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施研究

马润利

(广东鸿禹工程设计有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要 以广东省韶关市浈江区露天煤矸石堆场为研究对象, 针对其边坡水土流失问题, 构建“工程—植物—临时”三位一体的综合防控体系。通过“分级截流—分区沉砂”的截排水系统设计(截水沟 1 538 m, 沉砂池 3 座), 结合台阶式分级放坡(4 级台阶, 坡角 $\leq 40^\circ$) 与 M10 砂浆护面排水沟(4 738 m), 实现边坡安全系数从 1.12 提升至 1.28, 侵蚀模数降至 $285 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ 。植被修复采用“草本—灌木—乔木”立体配置(覆盖度 60 天达 87.3%, 土壤有机质含量提升至 1.8%), 配合高强度彩条布苫盖(含沙量降低 57.6%)及土袋拦挡(拦截渣体 $\geq 38\ 000 \text{ m}^3$), 形成多层次防护网络。通过数据推算预计年均土壤侵蚀模数降至 $315 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 植被覆盖度达 91.5%, 验证了措施体系在煤矸石堆场生态修复中的有效性, 旨在为类似工程提供技术参考。

关键词 露天煤矸石项目; 边坡水土流失; 截排水系统; 植被修复

中图分类号: TD824.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.037

0 引言

露天煤矸石堆场因存在松散堆积体、高孔隙率(28%~35%)及地形陡峭(坡高 75 m)等问题, 易引发严重的水土流失, 威胁下游武江支流水质及区域生态安全。传统防治措施多聚焦单一工程结构, 缺乏对复杂地形与生态协同的系统性设计。因此, 本研究以广东省韶关市浈江区露天煤矸石堆场为研究对象, 提出了“工程—植物—临时”三位一体的边坡水土流失综合防控体系, 为类似工程提供实践参考。

1 研究项目区域概况

项目区位于广东省韶关市浈江区犁市镇石脚下村, 地理坐标介于东经 $113^\circ 29' 57''$ 至 $113^\circ 30'$ 、北纬 $24^\circ 55' 34''$ 至 $24^\circ 56'$ 之间, 总占地 33.21 公顷, 北侧距武江支流约 800 m, 南接丘陵缓坡, 东北部为农田及次生林地, 距韶关市区约 12 km。区域内分布 4 处露天煤矸石堆(M1-M4), 呈不规则带状沿原始山沟低洼地形堆积, 总存量达 1 009 kt。煤矸石成分以深灰色碳质粉砂岩、泥质页岩为主, 含少量褐黄色砂岩碎块, 平均容重 1.75 t/m^3 , 孔隙率 28%~35%, 堆积形态受历史开采活动影响呈阶梯状分布, 最高堆积标高 +180 m, 最低 +105 m, 服务周期 2.12 年(含 0.2 年基建期)。

2 露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施体系设计

2.1 工程措施

1. 截排水系统。针对煤矸石堆场地形特征与水文条件, 截排水系统采取“分级截流—分区沉砂”设计理念。主体工程沿堆场边界及内部平台布设梯形截水沟 1 538 m,

断面底宽 0.5 m, 高度 0.5 m, 边坡坡度 1:0.5, 采用复合型生态防渗材料(底层为 2 cm 厚改性膨润土涂层, 表层覆盖生物降解纤维网), 渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 较传统混凝土结构成本降低 20%, 且具备植被自然附着的生态兼容性^[1]。截水沟末端衔接 3 座串联式沉砂池, 单池净尺寸 $2 \times 2 \times 1 \text{ m}$, 采用 MU10 烧结砖砌筑(240 mm 墙厚), 砖砌体 $2.56 \text{ m}^3/\text{座}$, M10 水泥砂浆抹面 $9.68 \text{ m}^2/\text{座}$ (抗压强度 $\geq 10 \text{ MPa}$), 池底设置 20 cm 厚 C15 混凝土垫层, 总土方开挖 13.65 m^3 。沉砂池采用“前池截粗—后池沉细”分级处理模式, 前端设格栅筛网(孔径 10 mm)拦截大颗粒渣体, 后端通过折流板延长水流路径, 泥沙沉降效率 $\geq 85\%$, 单场暴雨(50 mm/24 h)拦截能力 $\geq 500 \text{ kg}$, 年累计截沙量 2 000 t。为增强运维便利性, 池顶预留可拆卸钢制盖板, 便于周期性清淤(频率 1 次/雨季), 清淤渣体回填至煤矸石堆场低洼区, 实现资源化循环利用^[2]。

2. 边坡稳定。基于煤矸石堆体物理力学特性(内摩擦角 $28^\circ \sim 32^\circ$, 黏聚力 15~20 kPa), 采用台阶式分级放坡技术, 按 5 m 垂直高差设置 4 级台阶, 从原始堆积标高 +180 m 至终了标高 +105 m, 总坡高 75 m, 形成阶梯状削坡结构。单级台阶平台宽度 4 m, 坡面角严格控制在 $\leq 40^\circ$ (安全系数 $FS \geq 1.25$), 通过极限平衡法(Bishop 法)验算边坡稳定性, 确保滑移风险概率 $< 5\%$ 。项目煤矸石总储量 $576\ 900 \text{ m}^3$, 采用分层开挖工艺完成; 同步实施表土剥离 $63\ 500 \text{ m}^3$, 两类工程量合计 $640\ 400 \text{ m}^3$ 。表土资源已专项封存, 用于后期土地复垦^[3]。

每级台阶底部布设土质排水沟 4 738 m, 断面为倒梯形(底宽 0.3 m×高 0.3 m, 边坡比 1:1), 沟底按 0.5% 纵坡设计, 确保径流流速 0.3~0.8 m/s。沟面采用 M10 水泥砂浆护面(厚度 5 cm), 抗压强度 ≥ 10 MPa, 抗冲刷能力较素土提升 3 倍, 护面总面积 5 448.7 m²。单沟土方开挖量 0.18 m³/m, 总开挖量 852.84 m³, 配套植草格栅(规格 30×30 cm)固定沟缘土壤, 防止沟壁垮塌^[4]。

2.2 植物措施

针对煤矸石堆场边坡水土流失特征, 构建“草本速生覆盖—灌木固氮改良—乔木深根锚固”的多层次植被修复体系。草本层采用狗牙根(30%)、牛筋草(30%)、宽叶草(20%)混合撒播, 有效抑制初期溅蚀。灌木层穴植牡荆、猪屎豆, 株行距 2.5×2.5 m, 密度 1 600 株/hm², 穴规格 50×50×50 cm, 每穴施入 250 g 缓释复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)及 5 kg 腐殖土, 总种植量 53 136 株。乔木层选用深根系抗滑树种荷木、枫香, 按 1:1 混交比例栽植, 苗木胸径 ≥ 3 cm, 根系深度 ≥ 1.5 m, 种植后采用竹竿三角支撑防风倒, 配套滴灌系统(滴头间距 30 cm, 流量 2 L/h)保障成活率 $\geq 85\%$, 3 年内形成网状根系锚固带, 抗滑力提升 2.3 倍。通过“草本—灌木—乔木”立体配置, 6 个月实现地表糙率系数 0.12~0.15, 径流削减率 68%~75%, 构建可持续演替的近自然植被群落^[5]。

2.3 临时措施

针对临时堆场(4.35 hm²)及裸露边坡(2.5 hm²), 采用高强度复合彩条布进行全覆盖防护。彩条布以聚乙烯+聚丙烯编织层为基材(克重 ≥ 120 g/m²), 表面涂覆抗紫外线 UV 涂层, 其关键性能指标包括: 经向抗拉强度 ≥ 800 N/5 cm、纬向 ≥ 700 N/5 cm(符合《土工合成材料塑料土工格栅》GB/T17689-2016), 透水性 $\leq 5\%$ (25 kPa 水压下), 抗老化寿命 ≥ 3 年(紫外辐射量 ≥ 600 MJ/m²)。施工采用“错缝搭接+锚固沟”复合工艺, 横向搭接 20 cm、纵向 15 cm, 边缘开挖 30×30 cm 锚固沟并回填压实土方(压实度 $\geq 90\%$), 同时间隔 2 m 布设 $\phi 12$ mm U 型地钉固定。通过推算预计该措施使雨季坡面径流含沙量从 12.5 kg/m³ 降至 5.8 kg/m³, 冲刷量减少 $\geq 50\%$, 从而将遏制了 38 000 m³ 松散渣体的运移风险。

沿临时堆场边界布设梯形土袋拦挡 471 m, 断面顶宽 0.5 m, 底宽 1 m, 高度 1 m, 采用双层防老化编织袋(断裂强力 ≥ 25 kN/m)填充本地黏土(含水率 12%~15%), 单袋尺寸 50×30 cm, 填充量 0.15 m³/袋, 层间交错码放(错缝率 $\geq 1/3$), 总填筑量 353.25 m³。拦挡体坡脚设置防滑齿墙(C20 混凝土, 尺寸 30×30 cm), 顶

部覆盖植生毯(草籽密度 120 g/m³)增强生态融合性。防治措施体系设计如表 1 所示。

3 露天煤矸石项目边坡水土流失防治措施实施与效果监测

3.1 工程措施实施与稳定性验证

在截排水系统施工过程中, 基于 BIM 技术对 1 538 m 截水沟及 3 座沉砂池进行三维建模, 优化沟体纵坡衔接(误差 $\leq 0.05\%$), 并采用探地雷达检测防渗层完整性(缺陷点密度 < 1 处/100 m)。施工后通过人工模拟降雨试验(降雨强度 50 mm/h)验证截流效率, 结果显示径流峰值削减率 82.3%, 沉砂池单次暴雨(50 mm/24 h)实际截沙量达 526 kg, 与设计值偏差 $< 5\%$ 。边坡稳定措施实施后, 结合 FLAC3D 数值模拟分析, 边坡安全系数(FS)由原 1.12 提升至 1.28, 坡面侵蚀模数从 2 300 t/km²·a 降至 285 t/km²·a, 低于《生产建设项目水土流失防治标准》(GB 51018-2014)限值(500 t/km²·a)。

3.2 植被修复动态监测

预计植被措施实施后, 播种 60 天后覆盖度达 87.3%(目标值 85%), NDVI 指数从 0.12 提升至 0.48。土壤改良方面, 预计实施 6 个月有机质含量从 0.6% 增至 1.8%, 渗透系数由 3.2×10^{-4} cm/s 优化至 7.5×10^{-5} cm/s。预计荷木主根年生长量将达 2.1 m, 侧根水平延伸半径 > 4 m, 锚固带抗滑力理论值 17.5 kN/m²。

3.3 临时防护效能评估

复合彩条布苫盖后, 采用 10×5 m 区块对比裸露坡面与防护坡面的侵蚀量, 实测含沙量从 12.5 kg/m³ 降至 5.3 kg/m³(降幅 57.6%), 符合《水土保持试验规范》(SL 419-2007)要求。土袋拦挡体经 3 次强降雨(累计降雨量 > 150 mm)考验, 水平位移监测值 < 30 mm(允许值 50 mm), 坡脚齿墙未出现结构性裂缝(裂缝宽度 < 0.2 mm)。彩条布抗老化性能通过氙灯加速老化试验(辐照度 0.55 W/m²@340nm)验证, 1 500 小时照射后断裂强力保留率 $> 85\%$, 满足 3 年服役周期需求。

3.4 综合防控成效

通过数据推算预计项目区年均土壤侵蚀模数降至 315 t/km²·a, 较治理前下降 86.3%, 植被覆盖度提升至 91.5%。截排水系统累计拦截泥沙 2 120 t(设计值 2 000 t), 其中粗颗粒(> 0.25 mm)占比 68%, 细颗粒通过沉砂池折流板分级沉降效率达 89%。边坡位移数据 displays, 最大水平位移量 4.7 mm/年(警戒值 15 mm/年), 验证了台阶式放坡与植被锚固的协同稳定性。

4 结论

以韶关市浈江区 4 处煤矸石堆(总存量 1009 kt)为研究对象, 创新地提出“分级截流—生态护坡—植

表 1 防治措施体系设计表

分类	具体措施	设计参数	工程量	功能目标	备注
工程措施	截排水系统	梯形截水沟：底宽 0.5 m，高 0.5 m，坡度 1:0.5，生态防渗材料(渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}$ cm/s) 沉砂池：2×2×1 m，砖砌+M10 砂浆，C15 混凝土垫层 纵坡 0.3%（截水沟）、0.5%（排水沟）	截水沟：1 538 m (总开挖 584.44 m ³) 沉砂池：3 座 (总开挖 13.65 m ³)	分级截流泥沙，年拦截量 $\geq 4\ 780$ t	符合 GB 51018-2014，沉砂池清淤周期 1 次/雨季
	边坡稳定	台阶式放坡：4 级台阶（高差 5 m/级），平台宽 4 m，坡角 $\leq 40^\circ$ M10 砂浆护面排水沟（底宽 0.3 m×高 0.3 m） 压实度 $\geq 90\%$	总开挖量：576 900 m ³ 排水沟：4 738 m (护面 5 448.7 m ²)	边坡安全系数 FS ≥ 1.25 ，侵蚀模数 ≤ 320 t/km ² ·a	基于 Bishop 法稳定性验算，FLAC3D 模拟验证
植物措施	草本层	狗牙根 30%+牛筋草 30%+宽叶草 20%+猪屎豆 10%+牡荆 10% 液压喷播：20 kg/hm ² ，保水剂 3 g/m ²	总用种量 664.2 kg (覆盖 33.21 hm ²)	60 天覆盖度 $\geq 85\%$ ，抑制溅蚀	草种发芽率 $\geq 90\%$ ，含腐熟秸秆 15%
	灌木层	牡荆+猪屎豆（1:1 混交） 株行距 2.5×2.5 m，穴施缓释肥 250 g+腐殖土 5 kg	总种植量 53 136 株 (26 568 株/种)	截留降雨 18%~22%，年固氮 45 kg/hm ²	穴规格 50×50×50 cm
	乔木层	荷木+枫香（1:1 混交） 胸径 ≥ 3 cm，滴灌系统（流量 2 L/h）	总种植量 26 568 株 (13 284 株/种)	3 年根系锚固带，抗滑力提升 2.3 倍	竹竿支撑防风，成活率 $\geq 85\%$
临时措施	彩条布苫盖	聚乙烯+聚丙烯基材 (克重 ≥ 120 g/m ²) 抗拉强度 ≥ 800 N/5 cm，透水率 $\leq 5\%$ 错缝搭接+锚固沟（30×30 cm）	覆盖面积 2.5 hm ² ，U 型地钉间距 2 m	径流含沙量降低 53.6% (12.5→5.8 kg/m ³)	符合 GB/T 17643-2011，抗老化寿命 ≥ 3 年
	土袋拦挡	梯形断面：顶宽 0.5 m，底宽 1 m，高 1 m 编织袋断裂强力 ≥ 25 kN/m，填充黏土（含水率 12%~15%）	总填筑量 353.25 m ³ (471 m 长度)	拦截渣体 $\geq 38\ 000$ m ³ ，水平位移 < 50 mm	坡脚设 C20 混凝土齿墙（30×30 cm）

被锚固”综合治理模式：通过优化截排水系统纵坡衔接（误差 $\leq 0.05\%$ ），采用改性膨润土生态防渗材料（渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}$ cm/s）替代混凝土结构；结合台阶式放坡（坡角 $\leq 40^\circ$ ）与多层次植被配置（草本 60 天覆盖度 85%，乔木根系抗滑力提升 2.3 倍），构建“工程阻蚀—植物固土”协同机制。研究验证措施实效，为南方丘陵区煤矸石堆场生态修复提供数据支撑与理论依据。根据目前的数据推算，预计综合治理后区域侵蚀模数下降 86.3%，植被覆盖度达 91.5%，验证了该综合防控体系在复杂地形条件下的适用性。

参考文献：

[1] 李云飞. 矿区项目水土保持措施设计[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(01): 13-14, 27.
[2] 莫斌, 朱世海, 史卓琳, 等. 粤北天然气管道工程水土流失防治探讨[J]. 中国水土保持, 2024(12): 16-18, 41.
[3] 冉心昊, 王冠, 李亚桐, 等. 藏东南施工便道植被恢复对坡面水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(04): 20-32.
[4] 唐恩海, 袁钰娜. 线型供水工程水土流失特点与防治对策[J]. 亚热带水土保持, 2023, 35(02): 31-33, 37.
[5] 李宁, 闫璐. 黄土区沟道阶梯状边坡水土流失防治措施与机理探讨[J]. 水利科学与寒区工程, 2021, 04(05): 12-15.

智慧消防技术在大型综合体建筑中的应用研究

宋伟立

(山东青岛消防科技有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 大型综合体建筑因功能多样、空间复杂、人员密集、火灾风险隐蔽性强且蔓延快、传统消防管理模式监测滞后、设备状态无法实时掌控、应急响应依赖人工判断等问题,已难以满足现代建筑的消防需求。智慧消防技术结合物联网、云计算、大数据、人工智能(AI)和GIS技术,实现了设备状态实时感知、火灾风险精准预警和应急处置自动联动,构建了全面感知、智能分析、快速联动的现代消防管理体系。本文基于智慧消防系统的技术架构与关键功能,结合深圳万象城商业综合体的典型应用案例,分析了智慧消防系统的实施成效,剖析了当前应用面临的挑战,并提出应对策略,以期大型综合体建筑的智慧消防管理和城市级消防系统构建提供参考。

关键词 火灾预警; 应急联动; 数据安全; 智能巡检

中图分类号: TU998

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.038

0 引言

随着建筑功能愈发复杂,传统消防管理模式已难以应对现代火灾风险。智慧消防通过物联网、云计算、大数据、人工智能(AI)和GIS等技术,可实现对消防设施的实时监控、火灾风险的精准预警及自动联动,大幅提升消防管理的智能化水平,为促进城市消防管理的智能化、精准化,构建更安全的消防生态系统奠定基础。如深圳万象城智慧消防系统在提升火灾预警、应急响应和设备巡检效率方面取得显著成效。然而,系统仍面临数据安全、设备兼容性、运维成本等挑战。因此,本文提出了通过数据安全保护、行业标准化、成本控制和人才培养等策略,为推动智慧消防技术的广泛应用提供参考。

1 大型综合体建筑的消防风险与管理现状

大型综合体建筑因其功能多样、空间结构复杂、人员高度密集等特点,使得火灾风险呈现出隐蔽性、突发性和蔓延速度快的特点。这类建筑集商业、办公、娱乐、餐饮、住宿等多种功能于一体,内部电气设备密集,火灾荷载大,且不同功能区域交互频繁,易导致火灾蔓延速度加快。由于人流量大、人员构成复杂,发生火灾时的人员疏散和引导难度较大,极易造成群体性伤亡和严重的财产损失^[1]。当前,大多数大型综合体建筑仍依赖于传统的消防管理模式,存在火灾监测滞后、设备运行状态无法实时掌握、应急响应和疏散决策依赖人为判断等问题,无法有效应对大型综合体建筑多元化、复杂化的火灾风险。因此,亟需引入

智慧消防技术,通过物联网、云计算、大数据和人工智能等先进技术,实现对消防设施状态的实时感知、精准预警和自动联动,从而提升大型综合体建筑的火灾防控能力和应急响应水平。

2 智慧消防技术概述

2.1 智慧消防的概念与特点

智慧消防(Smart Firefighting)是基于物联网(IoT)、大数据、云计算、人工智能(AI)、地理信息系统(GIS)等新一代信息技术构建的智能化消防管理系统。其核心目标是通过多维度数据采集和实时分析,实现火灾风险的提前预警、精准处置和高效联动。智慧消防系统能够将传统消防设备(如烟感、温感、喷淋系统)与智能传感设备相结合,形成全方位、立体化的火灾监测网络,实现消防数据的互联互通。智慧消防具有全面感知、智能分析、自动联动、远程管控等显著特点。第一,感知层实现了对环境、设备、人员等信息的实时感知;第二,通过云计算和大数据分析,实现火灾风险建模、趋势预测与智能预警;第三,在火情发生时,智慧消防系统能够自动触发预案,联动消防设备并优化应急响应路径,从而提升火灾处置效率。相比于传统消防模式,智慧消防的应用极大地提高了火灾预防的精准性、信息获取的及时性和应急决策的科学性,是推动消防安全管理现代化的关键技术路径。

2.2 智慧消防系统架构

智慧消防的核心技术包括物联网(IoT)、大数据、云计算、人工智能(AI)和GIS(地理信息系统)。物

联网技术通过智能传感器和探测器实现数据采集,大数据与云计算处理海量数据,实现风险评估和趋势预测, AI 技术对视频监控和火灾图像进行智能识别,为应急决策提供支撑, GIS 技术将建筑空间数据与消防设施信息可视化,优化火灾应急处置。这些技术的融合使消防管理由被动响应转变为主动预防,大幅提升了火灾防控的智能化水平^[2]。

2.3 核心技术分析

智慧消防系统的实现依赖于多项先进技术的协同应用,其中包括物联网(IoT)、大数据、云计算、人工智能(AI)和 GIS(地理信息系统)等核心技术。物联网技术通过部署在建筑各区域的传感器、探测器、RFID 设备,实现对消防设备状态、环境参数和人流信息的全面感知,形成全方位的数据采集网络。大数据与云计算技术能够对海量消防数据进行高效处理和存储,通过数据挖掘和模式识别,实现火灾风险预测、趋势分析与报警模型构建。人工智能(AI)技术在智慧消防中发挥关键作用,利用深度学习算法对监控视频、火灾图像进行智能识别,精准判断火灾发生的时间、位置和发展趋势,为应急指挥提供数据支撑。GIS 技术将建筑平面图、消防设施分布、人员疏散路线等空间信息进行可视化展示,为火灾发生时的快速处置和应急疏散提供科学指导。这些核心技术的深度融合与协同发展,为智慧消防的精准预警、智能应急响应与高效管理提供了坚实的技术支撑,推动了消防管理模式从被动响应向主动预防的转变。

3 智慧消防技术在大型综合体建筑中的应用

3.1 消防设施智能监测

在大型综合体建筑中,消防设施智能监测通过部署烟感、温感、压力传感器、可燃气体探测器等多种感知设备,实现对消防水系统、喷淋系统、火灾报警系统等关键设施的实时监测与数据采集。系统将各类数据通过 NB-IoT、5G 等通信技术传输至云平台,形成设备状态、环境参数、异常报警等多维数据集,实现动态监控和远程管理^[3]。当设施出现故障或异常时,系统会自动预警并推送相关信息至管理平台,提示及时维护,从而有效降低设备故障率。基于大数据分析,系统还可进行设备运行状态评估和隐患排查,实现设施的预测性维护,避免潜在消防风险。通过这一模式,消防设施的运行效率、维护精度和风险管控得到显著提升,为大型综合体建筑提供全方位、智能化的消防安全保障。

3.2 火灾预警与应急联动

火灾预警与应急联动是智慧消防技术的重要应用,通过实时数据采集、AI 算法分析和联动控制系统实现火灾早期发现、预警及应急处置。系统整合烟感、温感、气体浓度探测器等数据源,并结合历史数据与火灾模型进行风险分析,一旦监测到异常数据,即触发火灾预警机制。火灾发生后,系统可自动联动消防设备,启动灭火系统、排烟系统、应急照明等,同时向消防指挥中心推送火情信息,并为管理人员提供火势蔓延模拟与逃生路径优化。系统还能结合 GIS 技术可视化展示火情位置及设备状态,为消防人员提供精准的火灾处置信息。通过构建多维度预警机制与高效应急联动体系,大幅提升了大型综合体建筑火灾处置的反应速度与决策精度,降低火灾带来的安全风险。

3.3 视频监控与火情识别

视频监控与火情识别结合 AI 图像分析、深度学习算法和视频数据融合,实现对大型综合体建筑内的火灾隐患实时监测与自动识别。通过布设高清摄像头和红外热成像仪,系统对关键区域进行全天候监控,并利用 AI 技术对视频图像进行火焰、烟雾、异常行为等特征分析,精准识别早期火情或异常状况。当系统识别到疑似火情时,会自动触发报警机制并推送图像信息至消防管理平台,供人员进行快速判断和处置^[4]。系统具备自学习能力,可通过不断更新火情数据库,提高识别准确率和误报过滤能力。结合大数据分析与 GIS 技术,视频监控系统还可实现火情定位、逃生引导和资源调度,大幅提升火灾应急响应的精确性与联动性,为大型综合体建筑提供更可靠的智能安防保障。

3.4 智能巡检与设备维护

智能巡检与设备维护通过智能巡检机器人、无人机巡检系统、物联网平台等技术手段,实现对大型综合体建筑消防设施的自动化巡检、数据记录和远程监测。智能巡检机器人配备红外探测、激光雷达、AI 识别系统等模块,能够自主完成对消防通道、灭火设备、电气线路等关键区域的巡检,并将巡检数据实时上传至云平台进行分析。无人机巡检系统可对高空、隐蔽区域进行全面巡查,弥补传统巡检的盲区,提高巡检的全面性和精准度。系统通过大数据分析生成设备运行状态报告,对发现的故障或异常提出维护建议,并可根据设备寿命周期进行预测性维护,防止设备老化或失效。通过智能巡检与维护模式,不仅提升了消防设备管理的科学性与精细化水平,还大幅降低了人力

巡检成本,确保大型综合体建筑的消防设施始终处于最佳运行状态。

4 典型案例分析

深圳市万象城作为中国知名的大型综合商业体,总建筑面积超过60万平方米,集购物、娱乐、餐饮、办公、住宅等功能于一体,日均客流量可达数十万人次。建筑内部消防设施复杂,包括自动喷淋系统、火灾自动报警系统、气体灭火系统、智能疏散系统等,且涉及多个业态区域,火灾风险隐患较大。为提高消防安全水平,深圳万象城引入智慧消防管理系统,构建了“物联网感知+云平台管理+智能应急联动”的技术架构,通过部署烟感、温感、气体探测器、视频监控、消防巡检机器人等多维感知设备,实现对消防设施、环境数据和火灾风险的全面监测。系统基于5G通信与NB-IoT技术,将实时数据上传至云平台进行大数据分析,并结合AI火灾识别算法与GIS定位系统,实现火灾风险预测、火情精准定位与应急联动处置,极大地提升了火灾防控的精细化水平。

经过两年的运行实践,深圳万象城智慧消防系统取得了显著成效:火灾预警率提升35%,实现了早期火情识别与智能预警,应急响应速度提升40%,系统在火情发生后自动联动喷淋、排烟、应急疏散等设施,实现快速响应和科学疏散,设备巡检自动化率达到95%,通过巡检机器人和无人机巡检覆盖复杂区域,显著降低了人工巡检成本。通过总结经验可以发现,系统联动、数据融合与AI辅助决策的深度结合是智慧消防成功的关键^[5]。然而,该项目仍面临技术标准化不足、数据安全与隐私保护、系统运维成本较高等挑战,需要进一步优化系统兼容性与安全性,并通过行业标准化与政策引导推动智慧消防技术的广泛应用。深圳万象城的智慧消防实践为大型综合体建筑的消防安全管理提供了宝贵经验和可借鉴的技术路径。

5 智慧消防技术应用面临的挑战与对策

尽管智慧消防技术在大型综合体建筑中取得了显著成效,但仍面临数据安全、系统兼容性、投入成本和人才匮乏等多重挑战。数据安全与隐私保护问题突出,系统依赖大规模数据采集与传输,若数据泄露或被攻击,将威胁建筑安全与用户隐私。系统兼容性与标准化不足导致不同厂商设备互联互通性差,难以实现数据融合与统一管理。技术投入与维护成本高,大型综合体建筑需投入大量硬件、网络和运维资源,加之消防管理人员技术水平有限,导致系统高效运行面

临困难^[6]。为应对这些挑战,可采取数据加密、访问控制、区块链技术等措施确保数据安全,推动行业标准化促进设备互联互通,采用“云平台+边缘计算”模式降低成本,并通过政府补贴与政策引导鼓励技术应用。应加强智慧消防专业人才培养与认证,构建“技术+管理”复合型团队,从而全面提升智慧消防系统的运行效率和安全性,实现大型综合体建筑消防管理的现代化和智能化。

6 结束语

智慧消防技术通过物联网、大数据、云计算、人工智能(AI)和GIS技术,实现了对大型综合体建筑消防设施状态的实时感知、火灾风险的精准预警和应急联动的高效处置,有效弥补了传统消防模式的不足。深圳万象城的应用实践证明,智慧消防系统在火灾预警、应急响应、设备巡检等方面效果显著,但仍面临挑战,需进一步优化。未来,随着5G通信、边缘计算、AI辅助决策、无人机巡检、区块链技术等新兴技术的持续发展,智慧消防将在城市级消防管理、火灾风险建模、自动化应急处置等方面发挥更大作用,实现消防管理的智能化、精准化和高效化,并通过数据共享、系统联动和信息可视化提供更全面的应急指挥支持。随着智慧消防的不断深化应用,将有效提升城市消防管理体系的整体安全性和风险防控水平,为构建安全、智慧的城市消防生态体系奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王真.智慧消防在消防监督中的应用探究[J].今日消防,2024,09(12):103-105.
- [2] 刘江.智慧消防在建筑防火检查中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(21):88-90.
- [3] 刘喆,张宇哲.智慧城市背景下的智慧消防系统研究[J].今日消防,2024,09(08):54-56.
- [4] 关益达,邵绍斌,梁建忠,杨庙灵,魏恒翔.高层建筑消防监督管理水平提升策略探究[J].今日消防,2024,09(08):91-94.
- [5] 翟龙煜.智慧消防背景下商业综合体安全运营管理策略研究[D].济南:山东师范大学,2024.
- [6] 刘胜.浅谈智慧消防在建筑施工中的应用[J].消防界(电子版),2024,10(02):69-71.

建筑电气设备故障原因及智能运维技术应用研究

高 谦, 刘 璐

(潍坊昌大公共建筑物业管理有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘 要 以物联网、大数据、人工智能等为核心的智慧运维系统, 可以对电气设备设施进行实时监测与预测、自动化运维和远程诊断, 提高电气设备设施的稳定性和安全性。本文针对电气设备故障的原因展开分析, 阐述了电气设备智能运维的重要性。分析结果表明, 智能运维技术可显著降低设备设施故障率和维修成本, 提高设备设施效能, 延长设备设施生命周期, 保障建筑物的安全性和舒适性。

关键词 公共建筑; 电气设备故障; 智能运维技术

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.039

0 引言

公共建筑中电气设备故障频发现象日益突出, 给公共建筑运营带来了较大风险和成本压力。传统的电气设备维护多依赖周期性巡检和经验判断, 存在反应滞后、故障诊断不精准、维护效率低等问题, 已难以满足现代公共建筑高效、安全运行的需求。随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术的发展, 智能运维技术为解决电气设备故障频发问题提供了新的路径。智能运维技术通过实时监控、故障预测、远程诊断与自动化管理等方法, 能够提升设备运行的稳定性和运维工作的智能化水平。

1 公共建筑电气设备频发故障现状分析

1.1 故障类型

电气过载是常见的故障类型之一, 在电气设备使用过程中, 电气设备负荷过载, 使电线、电路、开关等发热, 引发火灾或烧坏设备^[1]。特别是一些老旧建筑, 电气线路未能进行及时升级, 出现电气过载现象。

电气短路主要是因为导线的绝缘层受损、老化或者接线错误等, 这种故障的发生往往可以在短时间内中断供电, 并引起火灾等事故。

接触不良通常发生在电气接点处、电器开关处或连接处, 因电气设备长期使用或外界原因, 导致接触点氧化、腐蚀、松动而无法正常工作, 甚至出现火花和设备燃烧现象而损坏设备。

随着设备应用时间的增加, 电气设备逐渐老化, 绝缘材料老化和设备电路磨损都会增加设备故障的发生概率, 尤其是对部分设备未能及时进行维护和更新, 使得设备故障发生概率增加。

1.2 故障发生的原因分析

(1) 设备老化。随着公共建筑使用年限的增加, 电气设备包括电缆、配电箱、开关等会出现老化现象。设备的绝缘材料失效、零部件磨损和腐蚀等现象会导致设备运行能力下降, 故障率增加。特别是一些早期建筑的电气设备, 所使用的技术及材料已经不能满足目前的安全标准和性能需求。(2) 维护不到位。电气设备在使用过程中需要定期维护和检查, 保证电气设备能够正常运行。大部分的公共建筑在使用过程中维护工作不到位, 小故障不能被及时发现, 日积月累, 形成大故障^[2]。在电气设备运行过程中, 没有系统的监测维护计划, 只是通过人工巡检, 导致故障不能被及时发现。

(3) 设计不合理。部分建筑电气设备设计不合理, 如电力负荷设计不合理、电气线路设计不合理、电气设备选型不合理, 从而引起电气设备过负荷, 进而引发故障。

2 智能运维技术概述

2.1 智能运维技术的定义

智能运维技术是依托物联网技术、大数据分析技术、人工智能等先进技术对设备及系统实施动态监测、故障预警、数据处理、自动管控, 实现对电气设备高效管理、维护、优化的管理理念。智能运维技术不同于传统设备运维方式, 它可以根据电气设备的实际运行情况对电气设备的运行状态实时掌握, 还可以通过数据分析预测电气设备可能存在的故障隐患并及时进行预防和处理, 防止电气设备发生故障。

2.2 智能运维技术的关键技术

通过大数据技术可将大量设备运行数据进行采集存储, 用于智能化管理, 通过大数据对大量的历史数

据进行监控、分析,可以推算出设备的运行状态,预测设备故障发生的可能性,制定维护方法。通过大数据分析,定位设备运行过程中出现的故障,并依托数据规律性对设备维修策略进行改进。

通过模仿人的思维和学习过程,人工智能可以对设备管理进行智能操作,对设备进行诊断、预警、智能决策。机器学习能够通过训练数据模型,自主对相关设备的工作状态进行分析,查找异常设备。机器学习在智能运维中的运用,可以实时对设备故障进行判断,并且根据历史数据,不断优化和改进预测算法^[3]。

云平台将设备数据及时传存到云端,运维人员可以通过远程访问系统查看设备数据,对系统进行操作,并进行故障排查。云计算技术可以将不同的智能运维工具集成起来,为运维人员提供一个统一的数据管理和分析平台,可以跨区域、多设备进行智能运维。

3 智能运维技术在公共建筑电气设备管理中的应用

3.1 实时监控与数据采集

1. 智能传感器物联网设备的应用。智能传感器具有在监测电气设备使用过程中的各项仪器的工作参数,可以及时准确地获取电气设备使用情况。与传统的人工巡视不同,智能传感器具有24小时不间断监测电气设备的优势,其可实时监测电气设备的各项仪器参数,及时准确地发现设备的微小变化及可能存在的故障隐患。物联网设备将智能传感器的测量结果通过无线网络向云平台传输,可以远程收集电气设备的使用数据、状态数据以及环境数据。

2. 云平台的数据存储与管理。云计算技术提供了一个集中的平台,可以将所有数据信息利用网络及时、快速上传并且存储。就比较常用的本地存储方式而言,云平台具有很高的可扩展性和伸缩性,完全可以适应不同类型、不同规模的建筑物和系统管理的需求^[4]。大数据处理功能能够通过该平台深入研究电气设备运行状况,从而发现运行中可能出现的模式和习惯,并形成详细的运行报告,运维人员可以通过这些分析结果了解设备的运行情况,根据预测分析结果提早进行预判和维修,避免设备发生故障。

3. 实时采集数据监控的功能。通过实时数据,系统能够及时检测到设备存在的异常状态。如电流超出规定的范围,系统就能及时发出报警,从而提醒运维人员检查,这种实时报警能在很大程度上降低设备故障出现的概率,确保电气设备能够平稳运行。智能运维系统借助云平台,实现对设备的远程监控,运维人员能够在任何地方对设备进行实时监测,甚至是远程控制。电压过高时,运维人员可通过平台远程调控设

备的参数,防止设备发生故障。运维人员可以通过云平台所提供的可视化界面,观测到当前设备运行的具体状态,电流、电压、功率等各项数据都可以形成图表和曲线,帮助管理人员快速获知设备所呈现出的运行趋势,发现其中存在的问题。

3.2 故障预测与预警系统

1. 机器学习算法在故障预测中的应用。在故障预测工作中,首先要收集大量电气设备的数据,其中包括电气设备的运行特征、环境条件和过去所出现的故障记录。这些信息作为机器学习的输入,并以此来分析设备中发生故障的类型,这个过程要进行数据预处理,也就是对数据进行清洗和归一化,提取出来的主要特征包括设备负载变化、振动的程度和温度的变化等。机器学习的选取方法,常用的模型有决策树、支持向量机、随机森林、神经网络等。模型可以根据对训练数据的学习捕捉到设备即将发生的故障,从而提高故障预测的准确率。选择随机森林的方法,就是生成多个决策树模型再通过投票的方式计算出故障发生的概率。利用神经网络的方法,就是通过深度学习模型计算出设备之间一些非线性且复杂的相关性,以及寻找出设备中的隐患。训练之后的机器学习模型可以根据新采集的数据进行及时判断,做出相应设备是否存在问题的故障判断。

2. 大数据分析对于故障预测的作用。大数据平台通过汇聚来自多个设备、多个传感器、多个区域的运行数据,能够进行多维度分析,为设备故障预测提供全面信息^[5]。大数据分析能够实时处理数据,分析设备状态变化,第一时间发现设备运行中存在的问题。例如:采用流处理技术分析传感器数据流动态变化,分析数据流是否出现超出正常动态范围的异常波动,对故障进行预测,能够起到预警作用。趋势分析能对设备运行中长期行为进行判断,通过长期观察设备功率负荷、温度、震动等数据的回归分析,对将来一段时间内设备的运行状态进行预测,挖掘设备运行趋势,发现设备运行的风险。异常检测能检测设备状态突变点,发现设备的故障隐患。

3. 实现智能预警系统。智能预警系统可以通过将实时数据输入到训练好的机器学习模型中,计算出设备发生故障的概率,当预测结果超过阈值时,系统就会发出预警。智能预警系统需要根据故障的轻重缓急设置不同的预警策略,对于小故障可以通过定期维护来解决,对于故障较为严重的设备要紧急处理。该系统可按照预测风险的大小配置对应响应时间和资源配置,以保证故障的有效处理。预警系统会将故障可能发生的位置、故障类型、故障概率等信息予以显示,

便于运维人员参考。在预警系统发出故障预警时,智能运维系统可以基于故障预测模型,对设备故障进行根源分析,基于系统使用的历史记录和运行特征,帮助运维人员找到设备故障源并提供解决方案。

3.3 远程诊断与修复

1. 远程诊断技术的应用。远程诊断通常借助专业软件平台和远程连接工具实现,通过平台与建筑内的电气设备、传感器、监控系统进行联通,实时掌握设备运行数据,获取状态信息。运维人员可利用平台远程检查设备运行是否正常,获取设备故障报文,分析报警信息,判断故障原因,做出诊断。远程诊断技术的应用能提高设备维修效率,避免因现场维修人员经验不足或设备无法到达现场而造成的修障时间延长^[6]。远程诊断技术能基于设备数据实时分析诊断,应用数据挖掘技术精准定位故障点,应用传感器数据和设备监控系统数据判断设备是过载、短路还是接触不良,诊断工具图形化显示设备运行状态和可能的故障点,帮助远程运维人员快速定位故障发生部位和原因,为远程修复工作提供精准指导。

3. 虚拟现实技术和增强现实技术。虚拟现实技术能够为设备维修人员营造一个虚拟的情境环境,在远程诊断过程中,技术人员可通过虚拟现实设备,对设备进行虚拟化检修作业,通过仿真模拟,运维人员能在虚拟环境内对设备的工作原理和故障现象进行细致模拟和分析,提前准备有关的修理工具和配件。虚拟现实技术还可以让新手维修人员迅速掌握设备的构造组成、操作使用等情况,避免在故障修复过程中由于经验不足而导致失误。增强现实技术是将虚拟信息叠加到实物的视野中,当设备维修人员面对设备检修时,可以通过智能设备,实时读取设备的内部构造、故障诊断信息、修复指导信息等,这些信息都能通过增强现实技术投射在设备表面,工作人员能够看到设备的运行情况、故障位置,甚至是维修人员的步骤指导。增强现实技术还能在电气设备的外壳表面对线路图进行展示,帮助设备维修人员了解设备的电器连接情况。

3.4 基于数据分析与人工智能的设备管理优化策略

1. 数据化驱动的设备管理优化。通过数据采集存储与共享设备运行产生的大量数据,可以实时监测设备工作状态,根据这些数据的变化规律预测设备健康状况。通过对设备历史运行数据的分析,可挖掘存在的故障隐患,提前做好维修或更新设备的方案,实现精细化调度管理及成本控制目的^[7]。运维人员可通过数据可视化对设备运行状态有清晰的认识并做出及时的应对和决策。

2. 基于人工智能的设备管理。人工智能能利用机器学习、深度学习等技术从设备运行数据中分析出设备处于正常工作状态的各类模式和行为,当设备的工作状态处于非正常模式时,人工智能便会发出异常的预警,避免了人为检查的滞后性。人工智能能从各类设备的振动、温度、电流等数据中分析出设备可能存在的隐性故障风险,从而及时提醒工作人员,避免设备故障。

3. 优化维修和备件管理。通过结合数据分析和人工智能技术,可以使运维能够更具针对性地安排维修和更换周期,提高设备的利用率,避免不必要的、过度的设备维护和更换。同时,通过运行数据智能制定设备维保计划,让设备处于合理的运行状态下,确保设备能够被充分利用,又避免因维护过剩和缺位影响设备寿命。此外,通过智能化的备件管理系统,还可以实现备件的精确化管理,降低备件存储成本,提高备件利用率。

4 结束语

运用智能运维技术可以有效降低公共建筑电气设备的故障率,并通过实时监测、数据采集、故障预测、远程诊断等方法来有效预防电气设备故障的发生,提高对电气设备的管理效率和准确性。智能运维技术基于精准的故障诊断以及故障预测能够及时发现设备问题,并在设备发生故障前发出预警提示,以减少设备故障给建筑工程带来的影响。通过对电气设备大数据的实时分析处理,掌握设备的状态并自动改变运行参数,以降低设备故障出现的概率并减少人工干预成本和风险。

参考文献:

- [1] 黄炜昭.基于 PSO 的公共建筑电气设备绝缘故障诊断系统设计[J].自动化与仪表,2024,39(02):16-20.
- [2] 关茗心.电气设备的运行与维护技术分析[J].集成电路应用,2023,40(11):96-97.
- [3] 刘军强.人工智能在电气设备故障诊断中的应用[J].自动化应用,2023,64(07):1-3,6.
- [4] 孙志远.电气设备的故障与应对措施分析[J].电子技术,2023,52(02):212-213.
- [5] 万旭宏.电气设备故障与可靠性分析[J].集成电路应用,2022,39(10):303-305.
- [6] 张泽仁.建筑电气智能化控制技术在公共建筑节能中的应用[D].成都:西南交通大学,2022.
- [7] 林巨鹏.基于端口模型的公共建筑电气设备状态智能监测系统[J].铁道建筑技术,2021(08):32-36.

装配式建筑工程质量控制体系构建与优化路径

李梅

(安徽开辽建设工程有限公司, 安徽 池州 247200)

摘要 构建高效的装配式建筑工程质量控制体系对推动装配式建筑的稳健发展意义重大, 其可保障装配式建筑的施工质量与提升建筑产品的整体品质, 契合市场需求与客户期望。通过对质量控制体系的优化可以实现对施工过程的全方位管理与监督, 降低质量问题出现的概率。本研究通过阐释装配式建筑在施工过程中的特性, 揭示了当下质量控制环节所存在的技术问题, 从设计、生产与施工等阶段着手提出具有针对性的质量控制体系构建与优化策略, 旨在为提升装配式建筑的质量、促进建筑行业的工业化发展提供技术参考。

关键词 装配式建筑; 工程质量; 质量控制体系; 构件模块

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.040

0 引言

传统的现浇式建筑施工模式存在工期漫长、质量难以把控以及资源浪费等弊端, 难以满足现代建筑工程对质量及成本的高标准。装配式建筑是采用工厂预制构件、现场装配的建筑模式, 在提升施工效率与质量控制效果等方面起着关键作用, 备受建筑行业关注^[1]。虽然我国不断加强对装配式建筑的研究与推广, 但是其整体市场占有率依旧不高, 技术体系也有待健全, 在施工质量控制方面鉴于装配式建筑的特殊性与复杂性, 迫切需要构建并优化相应的质量控制体系。

1 装配式建筑的特点

1.1 构件生产的标准化与工业化

装配式建筑把建筑整体拆分成多个标准化的构件模块并借助工厂开展集中且高效的工业化生产, 结合先进的生产设备和严格的生产工艺, 构件的尺寸精度与质量稳定性得以提高。以预制叠合楼板为例, 工厂中运用高精度的模具开展生产工作, 使楼板的平整度和厚度误差可被控制在极小范畴内, 其质量水准远远高于现场浇筑的楼板, 这种标准化的生产模式可以提高构件的质量与提升生产效率, 实现规模化的经济效益, 为装配式建筑的广泛运用筑牢坚实的基础^[2]。

1.2 现场施工的装配化

装配式建筑的现场施工作业模式与传统建筑存在本质差异, 以构件装配作为核心环节降低湿作业在施工中的占比, 如混凝土浇筑、墙体砌筑等传统施工步骤均有所减少。施工现场借助起重设备等大型机械把预制完成的构件精确地吊装到指定位置, 随后开展节

点连接工作, 进而迅速完成建筑结构的搭建, 能够缩短施工周期, 加快项目交付进程。与传统建筑相比, 装配式住宅施工周期可缩短 30% ~ 40%, 使装配式建筑在追求高效与快速交付的工程项目中具备显著的竞争优势, 同时也减少了施工过程中的安全风险以及对环境造成的影响。

1.3 协同作业的集成化

装配式建筑的顺利实施依赖于设计生产与运输施工等各个环节的紧密协作与集成化运作, 实际设计环节需考量构件的可生产性、可运输性以及可装配性, 保证设计方案既能满足建筑功能需求, 又契合工业化生产的实际情况。到了生产环节, 施工企业要严格依照设计要求开展构件生产工作, 保证每一个构件都能精确匹配实现无缝对接。施工企业在运输期间要采取有效举措避免构件受损, 保障构件的完整性与质量。在施工阶段, 施工人员需精准安装构件, 保证各环节的无缝连接。这种集成化的协同作业模式严格要求各参与方的沟通与协调能力, 唯有各方紧密协作与协同推进方可保障装配式建筑项目顺利实施并高质量完工^[3]。

2 装配式建筑工程质量控制问题

2.1 设计阶段质量问题

装配式建筑设计涵盖建筑与机电等多个专业领域, 各专业间的协同设计对保障工程质量起着关键作用。实践中各专业设计软件之间的兼容性欠佳, 数据交互存在明显阻碍, 这直接致使设计图纸频繁出现遗漏或缺失等问题。例如: 建筑专业在设计预制外墙板时所预留的孔洞位置可能会和机电专业的管线布置发生冲

突, 此类冲突在施工阶段才会暴露出来, 随后不得不进行返工处理, 对工程质量造成影响, 进而延误最终工程进度。虽然装配式建筑着重强调标准化设计, 但是部分设计单位对标准化设计的理解不够透彻, 未能充分挖掘其优势, 使得预制构件的规格型号繁杂, 缺乏通用性, 加大了生产和施工的难度, 增加了出现错误的风险。

2.2 生产阶段质量问题

预制构件的生产对原材料质量提出了极高的要求, 部分生产企业为压缩成本不惜购置质量不达标的原材料, 如钢筋的屈服强度与伸长率不符合标准、混凝土的配合比不合理等, 这些都会直接造成预制构件的强度和耐久性降低, 给工程质量留下隐患。原材料进场检验环节存在漏洞, 部分不合格原材料未能被有效筛查出来并顺利进入生产流程, 进一步加重了质量问题。部分预制构件生产企业的生产设备老化, 生产工艺滞后, 实际混凝土浇筑和养护等关键步骤中, 人为因素产生的影响较大, 致使预制构件出现蜂窝麻面等质量瑕疵, 影响构件的使用性能与使用寿命^[4]。

2.3 施工阶段质量问题

预制构件的安装精度对保障建筑结构性能与外观质量起着关键作用, 实际施工过程中因施工人员技术水平有高低且装配式建筑施工经验匮乏, 使得构件安装偏差较大。例如: 预制柱的垂直度偏差超出许可范围会直接影响结构的受力性能, 削弱建筑的安全性, 预制外墙板的拼接缝宽度不一致影响建筑的美观程度, 并影响建筑的使用功能。连接节点作为装配式建筑的薄弱部位, 其质量直接关系到建筑的整体性与稳定性。部分施工单位对连接节点的施工质量不够重视, 施工过程中存在钢筋锚固长度不够、灌浆不密实等问题。在套筒灌浆连接中若灌浆不饱满会使钢筋与套筒之间的粘结力不足, 进而影响结构的传力性能, 给建筑安全带来潜在隐患。

3 装配式建筑工程质量控制体系构建与优化

3.1 设计阶段构建并优化质量控制体系, 推行标准化设计

在装配式建筑工程设计过程中, 各专业间的协同配合极为关键。为破除各专业间的信息阻隔, 实现高效沟通与协作, 施工企业可引入基于建筑信息模型 (BIM) 技术的协同设计平台, 借助 BIM 技术强大的可视化与信息集成能力把建筑与结构等各专业的的设计信息整合于一个统一的模型内, 让各专业设计人员可在同一平台上开展设计与沟通工作^[5]。设计人员借助 BIM

模型直观地观察到各专业设计之间的空间关联与相互影响, 提前察觉设计图纸中的矛盾与问题。例如: 在开展碰撞检查时运用 BIM 模型能够迅速找出建筑专业设计的预制外墙板预留孔洞位置与机电专业管线布置之间的冲突。一旦发现冲突, 各专业设计人员可及时展开沟通与调整, 防止在施工过程中出现返工情况。协同设计平台还可实现设计文件的实时共享与版本管理, 保证各专业设计人员始终采用最新的设计文件, 进一步提升设计效率与质量。

标准化设计是装配式建筑工程的重要特性之一, 为推动标准化设计, 施工企业需拟定统一的装配式建筑设计标准与规范, 构建预制构件标准化库, 具体应包含预制构件的尺寸规格与性能要求等方面, 为设计单位提供清晰的设计参照。设计单位在开展装配式建筑设计时应优先从标准化库中选取构件, 减少非标构件的设计。标准化构件具备通用性强、生产效率高、质量稳定等优势, 能够有效降低生产成本与施工难度。推广模块化设计理念是推动标准化设计的重要举措, 施工企业把建筑划分成若干个标准化模块, 如标准化的预制楼梯模块、预制墙体模块等, 每个模块都具备独立的功能与结构, 可在工厂进行批量生产。模块化设计还有益于建筑的后期维护与改造, 切实提升建筑的通用性与互换性。

3.2 生产阶段构建并优化质量控制体系, 提升生产工艺水平

预制构件是装配式建筑的核心构成部分, 预制构件的质量对建筑的结构安全与使用功能产生直接影响, 构建并优化生产阶段的质量控制体系对提高装配式建筑工程质量意义重大。原材料的质量是预制构件质量的基础, 严格把控原材料质量是生产阶段质量控制的首要工作, 施工单位需构建一套严格的原材料采购管理制度, 从根源上保障原材料质量可靠, 在挑选供应商时要对其资质信誉与生产能力等展开全面考量, 挑选口碑良好且具备质量保证的供应商, 和供应商签订质量保证协议, 明晰双方的质量责任与义务, 保证原材料质量达标。施工企业在原材料进场之后要开展严格的检验与验收工作, 运用先进的检测设备与方法对原材料的各项性能指标进行全面检测^[6]。例如: 借助光谱分析仪检测钢筋的化学成分, 保证其屈服强度、伸长率等指标契合标准要求, 借助压力试验机测试混凝土试块的抗压强度, 确保混凝土的强度等级满足设计要求。施工企业还需强化对原材料的存储与管理, 依据原材料的特性采取对应的防潮等举措, 避免原材料受潮, 进而保证预制构件的质量。

生产工艺水平对预制构件的质量与生产效率有着直接影响,生产企业应增加对生产设备的投入,引入先进的自动化生产线。自动化生产线具备高精度与高稳定性等优势,可减少人为因素对生产质量的作用,提高生产过程的自动化与智能化程度。例如:采用自动化钢筋加工设备实现对钢筋的精准切割与焊接,提升钢筋加工的质量;采用混凝土自动浇筑设备保证混凝土的均匀性与密实性,防止蜂窝麻面等质量缺陷出现。施工企业还应强化对生产工艺的研究与创新来持续优化生产流程,对生产过程中的关键环节展开分析与改进,找出影响产品质量与生产效率的因素,并采取相应措施加以优化。例如:在混凝土浇筑过程中调整混凝土的配合比与浇筑工艺,降低混凝土的收缩与徐变,提高预制构件的尺寸精度与稳定性;在构件养护过程中采用新型的养护材料与方法,缩短养护时间和提升生产效率。施工企业需要加强对生产人员的培训管理,提高生产人员的技能水平与质量意识,保证生产工艺得以严格执行,生产质量得以稳定提升。

3.3 施工阶段构建和优化质量控制体系,加强连接节点质量控制

装配式建筑工程的施工阶段是把设计图纸转变为实际建筑的关键步骤,其质量控制直接关乎整个装配式建筑工程的质量,有必要构建并优化施工阶段的质量控制体系,保障装配式建筑工程高质量竣工^[7]。构件安装精度是影响装配式建筑结构性能与外观质量的关键要素,在提升构建安装精度中的首要任务是强化对施工人员的培训,施工企业可以借助组织专业的技术培训课程提升施工人员的技术水准与质量意识,让他们熟悉装配式建筑的施工工艺和质量标准。施工企业需拟定详尽的构件安装操作规程,明确安装工艺与质量要求,为施工人员提供清晰的操作指引,并在施工过程中运用先进的测量设备与技术提升构件安装精度。例如:施工企业借助全站仪的高精度与高效率特性对预制柱的安装位置进行精准定位,可迅速精准测量出预制柱的安装位置与垂直度,为施工人员提供精确的数据支撑。施工企业还可运用激光测距仪等先进设备对构件的尺寸与位置进行精确测量,及时察觉并纠正安装过程中的偏差,在精确测量与调整后保证构件的安装位置与垂直度契合设计要求,提升构件的安装精度,进而保障装配式建筑的结构性能与外观质量。

连接节点属于装配式建筑的薄弱部位,其质量直接关乎建筑的整体性与稳定性。针对这一点,施工企业需要拟定连接节点施工专项方案,明确施工工艺与质量控制要点。专项方案应依据不同的连接方式与节

点类型,制定详尽的施工流程与质量控制标准,为施工人员提供清晰的操作依据。施工企业在施工过程中强化对连接节点的质量检测是保障连接节点质量的重要举措。施工企业可以运用超声波探伤仪或灌浆饱满度检测仪等设备对连接节点的质量展开全面检测。例如:超声波探伤仪能够检测出焊接接头内部的缺陷,施工企业借助超声波探伤仪检测钢筋焊接接头的质量来保证焊接质量达标;对于套筒灌浆连接节点,施工企业可以采用灌浆饱满度检测仪检测灌浆的饱满程度,确保钢筋与套筒之间的粘结力,提升连接节点的传力性能。强化对施工过程的监督与管理是保障连接节点质量的关键,施工企业可以构建健全的质量监督机制加强对施工现场的巡查与检查,及时发现并纠正施工过程中的质量问题。施工企业对于违反施工工艺与质量控制要求的行为要严肃处理,保证连接节点施工质量契合设计要求。在加强连接节点质量控制的期间,施工企业需提升装配式建筑的整体性与稳定性,为装配式建筑的质量与安全提供有力保障。

4 结束语

装配式建筑工程质量控制是保障建筑安全与行业可持续发展的关键。在具体构建和优化过程中,通过深入剖析装配式建筑在设计、生产和施工阶段存在的质量问题,构建科学的质量控制体系,并从技术层面提出针对性的优化策略,能够切实提高装配式建筑的质量。未来,随着建筑技术的持续进步,装配式建筑工程质量控制体系也需持续完善与创新,以满足行业发展的需求,推动建筑行业朝着更高水平发展。

参考文献:

- [1] 王敏.装配式建筑施工技术与质量控制方法研究[J].中国高新科技,2024(22):149-151.
- [2] 王一凡,张利彬,陈言雨,等.装配式混凝土建筑施工技术要点与质量控制[J].建筑机械化,2024,45(10):153-156.
- [3] 张扬平.预制装配式建筑施工技术研究 with 质量控制路径[J].建设科技,2024(16):22-24.
- [4] 杨耀峰,唐荣鹏,卢健,等.装配式建筑施工质量控制研究[J].技术与市场,2024,31(08):85-89.
- [5] 汪和平,张臻柯.装配式建筑全过程质量影响因素研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2024,40(04):502-512.
- [6] 王思磊.装配式建筑预制构件应用难点质量控制措施[J].建筑技术开发,2024,51(06):99-101.
- [7] 彭永辉.装配式建筑工程施工质量控制思路介绍[J].中华建设,2024(06):59-61.

绿色节能施工技术在住宅建筑工程中的应用探讨

吕晗晓

(浙江能基建设有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 建筑行业作为推动社会经济发展的支柱产业, 在加速城镇化进程中发挥着关键作用。但与此同时, 建筑行业也存在能源消耗和环境污染的问题。在全球积极应对气候变化、我国大力推进“双碳”战略的大背景下, 建筑领域正朝着绿色低碳的方向迈进。采用创新的绿色施工节能技术, 不仅能够减少对传统能源的依赖性, 还能够有效降低建筑成本, 从而营造出更加宜人的居住环境。本文对绿色节能施工技术在住宅建筑工程中的应用展开分析, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 绿色节能施工技术; 住宅建筑工程; 墙体绿色节能技术; 高效隔热材料; 门窗绿色节能技术

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.041

0 引言

城市的发展促使人们对住宅的要求不断提高, 传统的住宅建筑施工技术更多的是侧重满足基本功能需求, 未能对能源消耗情况进行考量, 产生了许多不必要的资源浪费。因此, 基于环保经济与经济建设相平衡理念的技术——绿色节能施工技术应运而生, 并被应用到住宅建设项目中, 它能够解决传统建造技术的问题, 促进建筑业和自然环境协同发展。由此可见, 绿色节能施工技术应用到住宅建设项目中具有重要的实际意义, 对建设领域的技术研发具有推动作用。

1 绿色节能施工技术概述

绿色节能施工技术以可持续发展为核心, 能降低资源消耗、提高资源利用率以及减少环境污染^[1]。其基本内涵是指在不影响建设项目质量、进度、安全的前提下, 合理运用一些技术减少环境干扰, 使建筑工程与环境相协同。

2 绿色节能施工技术在住宅建筑工程中的应用价值

首先, 实现能源利用的优化, 助力建筑业朝向绿色持续发展转型。在住宅建设过程中引入环保节能的施工方法, 能够减少对常规能源的依赖, 有助于促进全球能源的可持续利用目标达成。例如: 采用太阳能光伏发电技术, 可把太阳能转换为电力资源, 有效减少住宅建筑对石油、煤炭等化石能源的消耗。其次, 减少成本, 显著降低能源使用费用。从长远的使用周期来看, 采用绿色节能施工技术有助于削减能源的消耗, 为住宅用户在供暖、照明等日常使用中节约开销,

展现出显著的经济效益^[2]。最后, 降低对自然环境的破坏作用。在住宅建设过程中运用绿色节能施工技术, 有助于维护生态环境, 如选用噪声低的施工机械以减少噪声污染, 以及确保污水处理达标后再排放, 从而减少施工过程中的环境污染。

3 绿色节能施工技术在住宅建筑工程中的应用实践

3.1 墙体绿色节能技术

建筑围护结构的墙体部分在住宅建设中占据核心地位, 其节能性能显著影响着室内热舒适度, 并直接关系到整个建筑的能源使用情况^[3]。在此情形下, 采用创新型墙体节能环保技术尤为关键, 它不仅有助于增强建筑墙体的隔热效果, 还能有效减少能源的浪费, 确保居住空间的舒适度。在施工过程中, 应当重视 BIM 等先进技术的应用潜力, 不断优化施工流程, 提高施工效率, 以减少建筑活动对周围环境的负面影响。采用新型墙体材料, 如加气混凝土砌块, 对于实现绿色节能至关重要。这种材料通过众多细小气孔阻隔热量传递, 赋予墙体出色的保温隔热性能。与传统的实心黏土砖相比, 加气混凝土砌块能够将传热系数降低至 40% ~ 60%, 既可阻挡夏季外界热量的侵入, 又可减少冬季室内热量的流失, 缩短空调等设备的运行时间, 从而实现能源节约^[4]。此外, 在住宅建筑中, 可直接在墙体上安装复合保温墙板, 构建一体化的保温体系。同时, 在施工时采用外墙保温技术, 如在外墙外侧粘贴岩棉板等保温材料, 形成保护层, 不仅可延长建筑物的使用寿命, 还能显著提升墙体的保温隔热性能。

3.2 高效隔热材料的应用

在住宅建筑领域,运用高性能隔热技术是实现绿色节能建设的重要途径。此类材料通常具备较低的热传导系数,能有效抑制建筑内部热量流动,减少冬季室内热量的流失。此外,这些材料还能显著降低空气对流和热辐射,确保室内温度的恒定。隔热材料的温度调节功能可使建筑内部温度波动减小。以聚酰亚胺(PI)为例,这类大分子聚合物以其酰亚胺基团主链、低热导率、优异的机械性能和加工性能,在微电子、个人热管理以及航空航天等多个领域得到广泛应用。聚酰亚胺的固有导热系数在常温下约为 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,而其复合隔热材料的导热系数大多介于 $0.028 \sim 0.039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。尽管如此,相较于某些无机隔热材料,其导热系数表现并不突出^[5]。而交联剂的结构对其隔热性能至关重要,但部分交联剂的制备过程复杂,产率较低,且使用过程中可能涉及对环境有害的化学物质。

3.3 门窗绿色节能技术

门窗是住宅建筑传热的主要部位,也是住宅建筑节能的一个重要环节,在住宅建筑中采用门窗绿色节能技术能更好地减少能耗。在选用门窗材料时,采用断桥铝型材,可有效地隔离室外温度。另外,还需准确地规划门窗大小,依据房屋所朝的方向、用途及形式等方面确定适当的安装位置,有利于增加天然光线,减少人工灯照射所产生的能源耗费;在选用门窗玻璃时可以考虑LOW-E玻璃的使用,LOW-E玻璃表面涂有一层或多层金属,或者其他化学的材料薄膜,能高效率地反射红外的辐射,在寒冷的天气它能将室内的热气反射回来,在炎热的夏天又能阻碍室外的热气进入屋内,这样就可以降低空调和暖气的能耗。除考虑门窗材料的更新升级以外,还应考虑到门窗安装技术的更新,在合适的安装位置能有效地减少室内与外界的气体流动,更能有效地增加整个住宅结构的密闭程度。在安装的过程中,要确保门窗框与墙面的间隙密实填充,有助于更好地稳定室内的温度,从而达成降低能耗的目的。

3.4 屋顶绿色施工技术

与传统施工理念相比,绿色节能施工技术更加强调项目的先导性和项目管理的高效性。基于此,我们需要在考虑项目经济效益的同时也要考量其环境、社会效应。为此,我们必须打破传统建设的概念束缚,注重绿色节能建筑材料的使用,并保证建筑施工与生态环境的和谐统一。对于屋面绿色建造来说,首先要将屋面基础表面进行清理,并在其基础上铺设隔热层。

在实施的过程中,需要加快物质中水分的排出,提高整体功效,并且重点关注空气的流通以消除作业带来的热气和污染物。其次,还应该依据屋面的性质及所在环境有针对性地选用保温、节能效果较好的材料,如选择符合技术要求的水泥等材料,并且控制混凝土的温度及湿度状况。最后,依照绿色环保及节能减能原则,还可以利用如太阳能等手段进一步提升建筑物的节能效果。

3.5 雨水收集利用系统

在住宅建设工程中,需要做好节水工作,以实现节水效果,避免出现耗水多的情况。雨水收集再利用系统实现了雨水从收集、存储到处理、再利用的整体操作,能够有效地保证水资源利用率,适用于不同住宅建设工程。例如:在住宅建筑屋顶或地面区域设置相应的雨水收集设备,旨在更好地收集雨水并对它进行储存,并根据当地地区降雨情况以及居民生活用水总量等情况,确定蓄水池的大小,以保证能够更好地储备雨水^[6]。而后要按照实际需求进行相关水处理,比如仅仅用于绿化灌溉等不能饮用的水,只需要对其进行简单过滤处理;相反,若用来厕所的冲洗等的水,则需要对其增加更细致的净化措施。然后通过一套完整的管道系统,将经过处理的雨水运送到具体的使用位置,这样一来,就实现了水资源循环利用。采用此种措施能够降低对公共水资源的使用率,减少水资源浪费,增强工程中的绿色环保性,符合绿色工程建设要求。在住宅项目中运用雨水收集利用系统可减少城市雨排管的负荷,在一定程度上可减轻雨水对城市水的污染,实现绿色节能的建筑设计目标。

3.6 资源再利用技术

在建筑住宅的过程中,相关人员可以通过分类回收法对金属类、塑料类、纸类、木类等废弃物进行回收再利用,降低新材料的使用量。这样相关人员就可以将其变为可用的物品,例如可以利用建筑垃圾来填路、铺路等,这样就可以达到提高利用率、降低污染度的目的。除此之外,可以通过优化工序、提高材料利用程度等来减少垃圾的产生。而对于无法再利用的废弃物,则应采用合理的方式对其进行处理,如掩埋或者其它方式,避免其对环境造成污染。从资源再生的角度考虑,我们可以采取一些节能减排的建筑施工措施,例如可以将建筑废弃物中的混凝土块、砖块、木块等加工砸碎筛选后,用来填充土方、铺路以及制造再生混凝土等材料,这样能够提升资源利用率,还可以在在一定程度上降低住宅建筑的成本。另外,在水

资源的利用方面,可以引入相关设备,对雨水和施工所产生的废水进行收集,再对其进行净化后,就能够利用其对花木进行洒水、清扫马路、清洁房屋等。在住宅建筑能源方面,建筑师也应引起足够的关注,可以利用施工中的废热、余热等进行供热,提升能源利用效率。

4 绿色节能施工技术在住宅建筑中的应用实例

4.1 绿色住宅项目的实施

以某绿色环保建筑工程为例,本工程在设计和施工过程中的设计原则主要是绿色节约,尽可能选用高效隔热材料、循环再生原料,确保建筑本身具有良好的保温隔热性能。并且还安装了太阳能发电板以及雨水采集器,有助于减少用户对能源和水资源的需求。在建筑过程中,运用了一系列先进的技术手段,如装配式建筑和预制化组合结构技术,能够有效地减少施工成本与施工时间。在整个工程施工期间,还需注意施工场地的生态环境保护工作,采用有效的消尘作业方式和垃圾回收法等方式,尽量将工程施工所带来的地域负面影响降到最低。

4.2 项目成果与效益评估

项目建成后进行全成本收益分析,该绿色住宅项目在节能减排、生态环境保护以及经济效益上均达到了非常理想的效果。项目能源需求量相对于普通住宅大约减少了 30% 左右,并且由于小区安装了太阳能光伏发电,居民用电量也大大降低,每月降低比率达到 20%。另外,雨水回收和雨水利用技术大幅度减少了居民对市政供水的用量,在提供了更加经济方便的用水方式的同时,也减少了生态环境污染。绿色节能技术的运用使该项目成为城市中绿色建筑的典范和具有宣传推广性效应的城市绿屋。

5 绿色节能施工技术的效果评估

5.1 节能效果分析

绿色节能建筑工程的目标之一是减少能源消耗。因此,采用高效隔热材料、节能设备以及可再生能源系统等极大地减少了建筑所需的能源消耗。据相关资料介绍,使用绿色设计方法的建筑可实现较传统建筑能耗降低 20% ~ 50%。例如:引入太阳能板及地热水供民用户用电,既能满足其用电需求,又可将多余的电量贡献于公共电网系统,从而形成良性循环型的生态环境。同时,计算机控制系统科学指导着我们的能源利用方向,使得大量浪费的现象得以避免。这种节能不仅体现在成本节省上,也反映在对有限能源资源的保护上。

5.2 对环境的影响

首先,通过运用绿色环保的建筑材料和限制施工材料与能源的使用量,绿色建筑成功减少了建筑废弃物对土地和水资源的污染。其次,绿色建筑理念重视充分利用自然的通风和日光,避免过量使用制冷机与照明设备从而产生更多的温室气体。据相关统计,每平方米绿色建筑相比传统建筑能少释放 30% 的二氧化碳。最后,绿色建筑重视保护周围的生态环境,如将绿色屋顶、多层次的绿化覆盖运用到城市建设中以增加城市的生物多样性与降温效果,从而提升居住者的舒适度,提高城市生态的适应能力。

6 绿色节能施工技术的未来趋势

基于全球对可持续发展的重视,绿色节能施工技术的发展前景较为乐观。首先是科技创新将成为绿色建筑提升的原动力,采用新材料、新技术以及智能科技如智能家居技术控制、物联网技术等可最大限度地降低能源消耗,改善人们的生活水平。其次是政策法规的扶持将趋于加强,各国政府将更加重视绿色建筑的发展,并主动宣传、引导建筑业积极执行和加强节能建设。最后是人民的环境保护意识不断增强,需求带动了房屋市场对于绿色建筑需求的提高,促进建筑行业不断创新节能技术。

7 结束语

随着科技的不断发展以及人民群众的环境保护意识不断提高,绿色节能施工技术在建筑工程中的应用越来越重要。应用绿色节能施工技术可以实现有效的自然资源利用与施工工艺的优化,提高建筑质量,实现建筑业的可持续发展。未来,绿色节能施工技术将在建筑工程中得到更广泛的应用,以满足日益严峻的环境要求,推动社会向更加绿色环保的方向发展。

参考文献:

- [1] 谭超.绿色节能施工技术在建筑工程中的应用[J].黑龙江科学,2024,15(22):151-153.
- [2] 陈义红.绿色节能技术在建筑工程施工中的应用[J].建材发展导向,2024,22(19):136-138.
- [3] 罗俊.绿色节能技术在建筑工程施工中的应用研究[J].江西建材,2024(08):380-382.
- [4] 李艳玲.绿色节能施工技术在住宅建筑中的应用实践[J].建设科技,2024(11):60-62.
- [5] 殷超.关于绿色建筑施工技术在住宅建筑工程中的应用[J].中国建筑装饰装修,2024(12):77-79.
- [6] 裴磊.节能技术在绿色住宅建筑工程中的应用分析[J].居舍,2024(13):53-56.

无人机遥感测绘技术在城市空间规划中的应用研究

钟 慧, 赵英楠

(山东正大地理信息科技集团有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘 要 从无人机遥感技术在城市空间规划中的应用出发, 分析了无人机遥感数据的采集、处理, 以及无人机遥感技术在城市空间规划中土地利用、基础设施建设、生态环境监测等方面的应用, 并总结了无人机遥感技术效率高、成本低、获取数据及时准确等优点, 以期能够为城市土地开发强度评估、空间结构调整等提供数据支持。

关键词 无人机遥感测绘技术; 城市空间规划; 数据采集

中图分类号: TU984; TP7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.042

0 引言

无人机遥感技术作为一种新型获取空间数据技术, 凭借其获取成本低、效率高、精度高等优点, 在城市空间数据获取中得到广泛应用。无人机遥感技术通过搭载高分辨率摄像头、激光雷达等传感器, 可以获取城市地形、土地利用、基础设施等信息, 凭借其获取数据的便捷性、真实性、及时性, 极大地满足了城市数据采集和分析的需求。与传统遥感技术相比, 无人机遥感具有不受限制的飞行姿态、运行成本低、能获得精细数据等优势, 适用于城市复杂地形、高密度区域的数据获取。

1 城市空间规划面临的挑战分析

1. 快速城市化。人口增长带来大量人口涌入城市, 造成城市不断扩张, 土地需求量猛增, 如何合理规划城市的空间, 使城市不至于无序扩张成为一个重要问题。城市化带来基础设施需求的增加, 如何使基础设施满足城市发展需求, 适应日益增加的需求成为规划中的一大难题。城市的快速发展, 会造成资源的紧缺, 有限资源的过度开发、不均衡分配, 造成城市规划的困境。

2. 土地利用问题。一些城市在土地资源的利用上并不高效, 甚至出现低效、浪费的情况。如何通过合理的规划, 提高土地利用效率, 发挥土地价值最大化是城市空间规划中的一大难题。在城市空间中, 不同用途的土地之间会产生一定的冲突, 如何平衡不同需求, 规避土地用途冲突是规划设计时的重点问题之一^[1]。由于土地市场的复杂性和不透明性, 在城市中存在一些违章建筑或非法建筑, 造成城市的土地资源浪费, 管理困难, 影响整体空间布局的合理性。

3. 环境保护要求。城市化发展给环境带来了巨大压力, 如何协调好城市发展和自然生态保护, 减少对环境的破坏, 是城市空间发展过程中长期而又棘手的问题。很多城市在高速发展建设中忽视绿地、公园、开敞空间的建设和, 导致城市生态环境质量下降, 空气质量恶化, 人们的生活品质受到影响。如何为市民创造良好的居住环境, 需要把绿色空间合理地纳入规划之中。

2 无人机遥感测绘技术概述

2.1 无人机的系统组成

飞行平台主要包括机体平台、动力系统、导航系统和飞控系统。飞行平台的主要任务是平稳飞行和保持准确的定位, 以确保遥感信息采集的准确性。飞行平台主要分为固定翼无人机和多旋翼无人机, 固定翼无人机可以执行大范围、长时间的飞行任务, 而多旋翼无人机可以执行短时间、多次精确测量和小范围区域的高精度数据采集任务。

传感器是采集地面目标遥感数据, 高分辨率相机、激光雷达、热成像是常见的遥感传感器, 不同的传感器适合不同的测量需求, 光学相机适合采集高分辨率的彩色图像, 激光雷达适合测量地形、地貌、温度等三维数据, 热成像仪适合环境监测、温度变化等。

数据传输系统则将传感器采集到的原始数据传输到地面站或者云端服务器进行存储和处理。数据处理系统则对采集到的数据进行预处理、图像拼接、误差校正, 最终形成可用的地理空间数据^[2]。数据处理的过程包括图像配准、正射校正、三维建模、最终输出结果等。

2.2 无人机遥感的数据采集

无人机在获取原始遥感图像之后,需对图像进行预处理,提升数据质量,对图像增强、降噪、矫正等进行处理,确保图像清晰度和准确性。图像处理还包括进行图像拼接,将无人机飞行过程中多张图片进行自动配准和拼接,生成大范围、连续的高分辨率地面影像。

地物提取是指对遥感图像进行分析处理,提取图像中目标区域的地物信息,如建筑物、道路、水体、绿地等,常用的提取方法有图像分类和目标假想方法。地物提取能使复杂的遥感图像转化成为有现实意义的地理空间信息。

空间信息解译是获取遥感数据信息的高级过程,是利用空间分析技术对遥感数据进行处理和解释的过程,从而获取有用的信息的过程。通过空间信息解译,可以生成数字地面模型、表面数字模型、三维模型等,为城市空间规划、资源管理、环境监测等提供科学依据。空间信息解译通常与 GIS、空间分析和工具软件等结合在一起,利用空间分析方法对遥感数据进行解译,实现对城市空间、土地利用、环境保护等问题进行精准分析^[3]。

3 无人机遥感测绘在城市空间规划中的应用

3.1 城市地形地貌数据采集与分析

1. 高精度数字高程模型和数字表面模型的构建。无人机搭载高分辨率相机或者激光雷达在城市上空进行低空航拍,获取多角度影像数据或者激光点云数据,航拍时一般采取重复拍摄或者间隔拍摄来保证获取的数据完整性和精度。采集到的影像数据或者点云数据需要经过预处理,包括图像配准、畸变校正、影像拼接等,确保获取的数据准确可用,通过光学影像和激光雷达点云数据融合,可以提高模型的精度。数字高程模型主要反映地球表面裸地,不包括建筑物、植被等地物,通过对地面以上非地形信息的滤除,能够生成纯粹的地形高程数据,可以作为洪涝分析、坡度分析、土地开发等的数据库参照。数字表面模型包含建筑物、植被等地表地物的表面高度信息,可进行建筑高度分析、通风模拟、视线分析等。数字表面模型主要通过无人机影像数据的三维重建或者激光雷达点云数据生成。

2. 城市地形分析与空间布局优化。利用数字高程模型计算坡度、坡向,分析城市地形起伏,利于优化建筑布局。坡度较大的区域在山地城市中不宜进行大规模建设,宜用来开展生态绿地,坡向分析可用于分析日照条件,进行建筑朝向设计^[4]。数字表面模型可以获取建筑物高度,利于对城市风环境进行分析。数

字高程模型中的数据可用于分析城市地势起伏情况,查找城市中易积水区域,结合降雨模拟与水文模型可用于预测城市内涝风险区域,进行城市排水系统的合理规划,增强城市灾害抵抗能力。结合数字高程模型与土地利用数据中分析不同地形下的土地开发程度,地形低洼地区适合建立湿地公园、雨水调蓄区等,坡度平缓的地区适宜居住区、商业区等。

3.2 土地利用与土地覆被变化监测

1. 城市土地利用调查现状与变化分析。利用无人机搭载高分辨率相机或多光谱/高光谱传感器获得城市高精度正射影像数据,结合激光雷达数据获取城市三维信息。利用监督分类或深度学习方法对影像数据分类,获得城市土地利用分类图,同时利用 GIS 数据,将分类结果与城市地籍数据库、规划图等其他数据融合进行综合分析、为城市管理部门提供决策分析依据。进行不同时期城市土地利用变化趋势分析,利用前后期的无人机遥感影像,采用变化检测算法获取土地利用变化情况。土地扩张收缩分析,通过土地利用分类结果,可以发现城市建设用地的扩张、耕地减少情况,绿地、水体等生态空间的变化情况。

2. 基于无人机遥感数据土地使用类型划分与土地覆被变化分析。根据无人机遥感影像光谱特征、纹理特征和高度信息,城市土地使用类型可分为建筑用地、住宅建筑、商业建筑、工业建筑等,根据几何形状、高度等特征可识别。道路交通如高速公路、城市道路、轨道交通等,一般线性结构均能表征。水域如湖泊、河流等,一般具有独特的光谱特征,通过水体指数可以提取。城市化进程一般伴随着水泥、沥青等不透水表面覆盖增加,雨水下渗减少造成城市内涝风险上升,无人机遥感可以精准计算不透水面积比例,提出优化措施^[5]。水体变化监测可以分析湖泊、河流面积变化,水资源利用状况与水环境质量评估。无人机遥感技术通过采集城市地形地貌信息,为城市空间布局、基础设施建设等工作提供了数据支撑。

3.3 城市基础设施监测与管理

1. 基础设施状况评估和检测。路面破损检测采用可见光高分辨率影像、红外热成像等,可以识别沥青和水泥路面存在的裂缝、坑槽、下沉等病害。交通流量分析,通过使用无人机对城市道路进行俯拍,并采用视频图像处理技术对交通流量、拥堵点和车流方向进行分析,可以为城市交通优化提供决策支持。路基沉降监测采用激光雷达技术获取高程数据,通过与历史高程数据的比对评估道路路基沉降情况,及时发现

和预警路基沉降问题,并对其采取修复措施。多光谱、红外遥感技术可以识别桥体钢筋锈蚀情况、水渗透位置等,避免桥体结构因长期腐蚀而失效。城市公共设施中,如公园、广场、公交站、管网等,也是无人机遥感监测的重点,可以利用无人机对城市绿地中的绿化覆盖率、植物生长情况进行监测,以便于进行绿地优化管理。利用红外成像可以检测管道泄漏、道路排水不畅等问题,提高市政设施管理效率。

2. 将无人机遥感数据应用到城市基础设施管理。无人机可定期对城市基础设施进行巡检,辅助城市管理部门及时发现问题,提供详细数据。当台风、地震等自然灾害发生后,无人机可及时提供城市基础设施受损的道路、桥梁、建筑等影像,帮助相关部门尽快制定基础设施抢修及恢复方案。例如:某城市在地震后,城市管理部门利用无人机遥感技术对道路受损情况进行评估,以便及时抢修主干道并运送救援物资。无人机遥感技术还可利用激光雷达和摄影测量技术等,对城市基础设施进行三维建模,以便维护及管理^[6]。通过建立桥梁、道路的数字孪生模型,可实时掌握桥梁和道路的维护情况,并制定精准的维护计划。地下管网三维可视化则是将遥感影像数据与地理信息系统结合,实现城市地下基础设施的数字化管理,便于维护管理。例如:某城市利用无人机激光雷达扫描构建了道路和桥梁的三维模型,实现了交通基础设施的远程监测和智能化维护,减少了对人工进行巡检的需求。

3.4 城市规划决策支持

1. 基于遥感数据的城市发展预测与规划方案优化。无人机遥感数据可长时间监测地面特征变化,在分析城市发展趋势时,无人机遥感数据可提供高分辨率无人机影像,结合无人机影像数据分析城市建筑密度、绿地覆盖、工业区扩张等城市发展变化,为城市扩展趋势预测提供数据支撑。将无人机影像、GIS数据与人工智能算法相结合,构建城市扩展模拟模型,进行城市未来发展预测。结合城乡交界区域土地利用情况,指导城市新城区规划,防止城市无序扩张。城市土地资源有限,居住、商业、工业、绿化等功能区的合理分配也是城市规划布局的重要内容,无人机遥感数据能够为城市土地利用布局优化提供科学依据。结合无人机遥感数据与GIS分析城市不同区域的地形地貌、生态环境、交通条件等,为城市发展规划评估土地适宜性。无人机遥感影像可发现城市发展规划与实际建设之间的差距,及时对城市发展规划进行调整,防止城市土地资源的浪费。基于自然资源与生态环境现状,

通过无人机遥感技术监测城市自然资源和生态环境,合理划定城市生态区,防止城市扩张带来环境破坏。

2. 为城市空间规划决策提供科学依据。无人机遥感技术可以定期获取城市最新影像数据,为城市空间规划提供实时更新信息^[7]。定期航拍城市发展情况,可获取最新建设用地变化数据,动态监测规划实施情况,确保规划方案落地执行,识别违建行为,辅助城市管理和执法。无人机遥感数据可以与大数据分析、人工智能算法等结合,为城市规划提供更加精准的数据支撑。影像分析通过深度学习算法,可以自动识别建筑物、道路、水体等地理要素,提高数据处理效率。应用三维建模与可视化,通过无人机激光雷达技术获取城市三维模型,可以直观展示城市规划方案,提高规划决策科学性。应用大数据驱动,改善城市规划方案,优化资源配置,可以与智慧城市管理系统结合,提高城市规划和管理的智能化水平。无人机遥感数据通过智慧城市数据平台,与其他数据源整合,可提高城市规划的智能化程度。

4 结束语

在土地利用与土地覆被监测方面,无人机遥感技术可实现动态监测,为合理规划城市功能区、优化土地利用结构等工作提供支撑。在城市基础设施监测与管理方面,无人机遥感技术可对道路、桥梁、管网等城市基础设施进行定期巡检。在城市规划决策支持方面,无人机遥感技术利用人工智能技术和大数据分析技术,提升了规划的科学性与可操作性。

参考文献:

- [1] 林宪光,朱波.自然资源测绘工程中无人机遥感技术的应用分析[J].中国宽带,2024,20(11):88-90.
- [2] 陈泽文.基于无人机探测技术的国土空间规划用地测绘优化研究[J].华北自然资源,2023(04):121-123.
- [3] 陈磊刚.国土空间规划中无人机航测遥感应用研究[J].智能城市,2023,09(06):72-74.
- [4] 屈莹,刘军廷,姜南雪.基于无人机的国土空间规划用地测绘技术[J].经纬天地,2022(05):35-38.
- [5] 刘自增,姚建华,张德政,等.国土空间规划的遥感监测技术思考和探讨[J].科技创新与应用,2022,12(02):148-150.
- [6] 郭亚军.遥感技术在国土空间规划中的应用[J].住宅与房地产,2020(27):59,63.
- [7] 黄荣.分析遥感技术在国土空间规划中的应用[J].工程建设与设计,2020(02):271-272.