

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(旬刊·1993年创刊)

2025年8月第23期(总第612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：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

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8月15日

定价：人民币15元

版权声明：

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

目录Contents

科技博览

- 001 经典种群优化算法研究
..... 段耀武, 王 栋
- 004 保险机构隔爆性能的工艺预测研究
..... 孔晓刚, 金 飞, 隋 军, 白 刚, 原 勇
- 007 大模型优化策略在智能调度中的应用
..... 王宇祥
- 010 一种用于城市扫雪作业的路缘积雪翻边装置
..... 姜明彬
- 013 基于PLC技术的电气工程自动化控制系统设计与实践
..... 伍灵鑫
- 016 现代机械设计方法中的数字化与智能化技术应用研究
..... 高冠斌

智能科技

- 019 电气自动化中电气接地及电气保护技术分析
..... 叶 盼
- 022 建材检测中新型智能化监测技术的应用探讨
..... 芦文娟
- 025 给排水系统的智能化改造与节水效率提升研究
..... 丁 静
- 028 智能照明系统在建筑工程节能设计中的应用研究
..... 彭海杰
- 031 物联网技术在叉车智能化中的深度融合实践研究
..... 彭倩云, 潘成杰, 江裕婷, 施向前
- 034 基于智慧交通的公路交通信息工程设计与管控控制
..... 黄日光
- 037 交通建筑中跨层结构振动响应的智能阻尼器减震控制
..... 孙连杰, 王 飞

应用技术

- 040 深基坑施工技术在桥梁建设中的应用
..... 张芹芹

目录Contents

043	现浇混凝土施工技术在建筑工程中的应用	陈琳, 陈大雁
046	城市道路建设施工中的软基加固技术研究	王浩, 徐泉城, 杨垒
049	桥梁施工中桥面铺装技术的难点与优化措施	王玉飞
052	道路桥梁工程质量控制及施工技术优化措施	徐强
055	超长结构后浇带施工技术在建筑施工中的应用	卢启航
058	建筑密集区道路改造中的新技术探索与实施效果	张梦迪, 李栋, 刘珂
061	钢结构井道电梯检验中电梯运行共振处理技术探讨	鲍宏谊

科创产业

064	数字化装配技术在制造业中的应用分析	解倩靓
067	社交媒体数据分析与用户画像构建研究	介童
070	装配式建筑工程造价核算方法与优化路径	王翼飞
073	智能移动终端技术在电力营销计量中的应用	李璐瑶, 成傲雪
076	数字化转型背景下供水工程智慧化管理探索	李皓巍
079	实景三维技术在测绘和地理信息领域中的创新与应用	王春义
082	高校碳资产管理智能决策支持系统的构建与实证研究	张恒, 刘易鑫, 翟夏妍

技术管理

085	建筑工程项目管理质量控制研究	余讯
088	城市排水泵站智能化运维管理分析	曾丽珊
091	房建工程砌体施工质量控制策略探讨	魏伟
094	市政给排水管道施工质量控制措施研究	王健, 徐淑鹏
097	市政道路桥梁项目前期管理重点环节分析	何婷
100	桥梁施工中的信息化管理问题与解决路径	储新天
103	BIM技术在工业厂房建设工程中的应用价值分析	李宁

科学论坛

106	矿山机械设备铸件铸造工艺探讨	黄萍, 陆建良
109	无人机技术在工程测量中的应用研究	李其峰
112	公路水泥稳定碎石基层施工工艺优化研究	梁峻僊
115	土木工程地下空间开发中的生态支护体系创新	姚东浩
118	公路桥梁设计中桥面材料选择对桥梁性能的影响	汪云飞
121	高原低气压环境下金属矿井巷支护技术应用研究	齐宏洋
124	极复杂地质条件下地面向多分支水平井精准着陆技术研究	杨睿哲

经典种群优化算法研究

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 随着计算机技术和算法理论不断地更新迭代, 优化问题的求解越来越重要。传统的优化算法依靠数学模型和梯度求解, 而种群优化算法作为一种不依赖梯度信息的全局优化算法, 凭借其良好的全局搜索能力和强大的适应性, 为解决复杂优化问题提供了一个新方向。种群优化算法的基本思想是通过模拟自然界中的生物或社会群体行为来寻找问题的最优解。常见的种群优化算法包括粒子群优化算法、遗传算法、蚁群智能算法和差分进化算法等, 这些算法的出现为许多应用领域如工程设计、图像处理和机器学习等提供了新的发展动力。本文对几种经典的种群优化算法进行了探讨, 分析了基本原理、优缺点和应用领域, 总结了当前种群优化算法的主要挑战与未来发展趋势, 以期相关人员提供借鉴。

关键词 种群算法; 优化算法; 算法寻优

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: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.001

0 引言

在现代科技迅速发展的背景下, 各类复杂系统的优化问题日益凸显, 如何在高维、非线性、多目标等约束条件下高效地寻找最优解, 成为科研与工程领域的核心问题。传统基于解析建模和梯度信息的优化方法在面对这些复杂问题时, 往往面临着计算效率低、易陷入局部最优等挑战。因此, 研究更具通用性和鲁棒性的优化算法尤为重要。启发式算法尤其是种群优化算法因其模型独立性、全局搜索能力强等优点, 在众多实际应用中崭露头角。

1 种群优化算法的基本概念

种群优化算法^[1]的核心思想源于自然界中物种进化的过程, 研究者通过对生物种群适应环境、竞争与合作等现象的模拟, 构建出高效的优化模型。在这一过程中, 每个个体代表一个可能的解, 而整个种群则共同参与搜索, 通过信息共享和协同进化, 不断地迭代更新解的质量。这种基于群体协作的搜索机制, 使得算法在探索复杂的多维解空间时, 极大地提高了找到最优解的可能性 (见图 1)。

与传统依赖单个个体局部搜索的方法不同, 种群优化算法在每次搜索中充分调动整个群体的信息优势, 通过个体间的互动与竞争, 有效避免了局部最优解的困境。

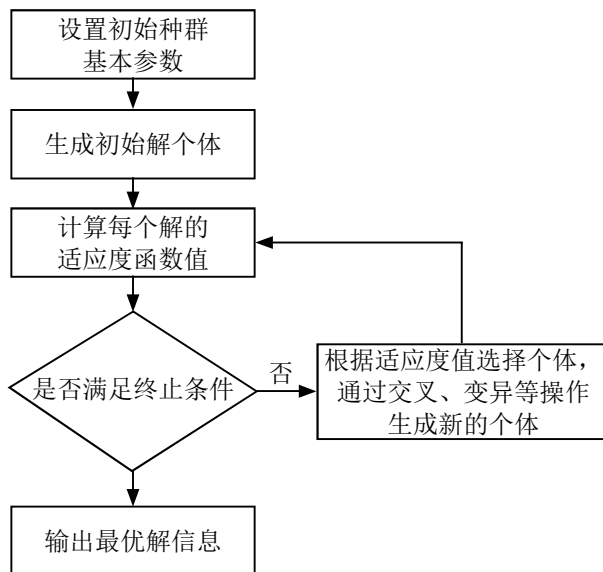


图 1 种群算法求解流程图

图 1 为种群算法的基本逻辑框架。最开始设置种群的基本参数, 然后生成初始解的集合, 其中每个解称为“个体”。通过计算每个解的适应度函数评估每个个体的优劣。最后进行终止条件判断, 终止条件一般为固定的迭代次数或分数指标等。如果满足终止条件就输出最优解信息, 否则根据适应度选择个体, 并通过交叉、变异等操作生成新的个体不断重复上述过程, 直到满足终止条件。

2 常见的种群优化算法

2.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法^[2]由Kennedy和Eberhart于1995年提出,灵感来源于鸟群的觅食行为。每个个体解被称为“粒子”,粒子通过不断在搜索空间中移动来寻找最优解。它利用公式(1)和(2)来生成新的种群个体,其中 V 是粒子在 t 时刻的速度, W 是惯性权重通常选择一个较小的值, $c1$ 和 $c2$ 是学习因子控制 pb 和 gb 的学习能力, pb 是粒子的历史最优位置, gb 是整个种群的历史最优位置, X 是粒子在 t 时刻的位置, V_{t+1} 是粒子在 $t+1$ 时刻的速度。

$$V_{t+1}=W \times V+c1 \times (pb-X)+c2 \times (gb-X) \quad (1)$$

$$X_{t+1}=X+V \quad (2)$$

粒子群优化算法的特点主要是无需梯度信息,算法简单,易于实现且具有较强的全局搜索能力,能够避免陷入局部最优。这些特点使得该算法在多个领域广泛应用。

2.2 遗传算法

遗传算法由John Holland在1975年提出,是一种模拟自然选择和遗传机制的优化算法^[3]。算法通过选择、交叉、变异等操作生成新一代个体,并不断迭代找到最优解。首先,设置参数并生成一个初始种群,并计算每个个体的适应度值。其次,通过选择操作,从种群中选择适应度值较高的个体作为父代进行交叉操作,生成新一代个体。为了增加种群的多样性,算法还会对某些个体进行变异,增加更多的探索范围。新一代种群个体通过选择、交叉和变异产生,并根据适应度保留优秀个体。最后,通过设定的终止条件来输出最优解。

传统优化方法在面对高维度、目标函数不连续或不可导的问题时常表现不佳,而遗传算法不依赖这些数学性质,因此在许多工程优化、函数拟合和参数寻优等场景中显示出良好的适应性。它通过种群中的个体并行搜索,避免了单点搜索的局限性,能够在庞大且复杂的解空间中有效进行探索,从而提高找到全局最优解的可能性。

另一个显著特点是遗传算法具有较强的全局搜索能力,这得益于其基于种群的搜索策略和交叉、变异等操作带来的多样性保持机制。这种机制使得算法可以在多个区域同时进行搜索,减少陷入局部最优的风险。然而,遗传算法也存在一定的局限性,尤其是在一些特定问题中,容易出现“早期收敛”现象,即种

群在进化过程中过早集中于某个适应度较高的区域,从而失去对其他潜在优质解的探索能力。因此,在实际应用中常需通过调整参数或引入改进机制来提升其搜索效率和收敛效果。

2.3 蚁群智能算法

蚁群算法由Marco Dorigo于1992年提出,模拟蚂蚁寻找食物路径的过程^[4]。蚂蚁通过信息素的释放和感知在环境中寻找最短路径或最优解。蚁群智能算法的主要应用领域包括旅行商问题、最短路径问题、组合优化问题等。它主要应用公式(3)和公式(4)。其中 $P_{ij}(t)$ 是蚂蚁在 t 时刻从路径 i 到 j 的概率, $\tau_{ij}(t)$ 是路径的信息素浓度, η_{ij} 是启发式信息, α 和 β 是控制信息素和启发式信息影响程度参数, N_i 是当前节点 i 的邻居节点集, ρ 是信息素挥发因子, Q 是常数, L_k 是蚂蚁 k 在路径上的路径长度。

$$P_{ij}(t)=\frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha[\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{K \in N_i}[\tau_{iK}(t)]^\alpha[\eta_{iK}]^\beta} \quad (3)$$

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho) \times \tau_{ij}(t)+\sum_{K \in G} \frac{Q}{L_K} \quad (4)$$

其核心优势在于能够通过模拟蚂蚁释放和感知信息素的行为,把局部搜索与全局搜索结合,从而提高对复杂解空间中的搜索效率,避免陷入局部最优。群体间的协作和正反馈机制使得算法具有较强的自适应性和鲁棒性。然而,蚁群算法也存在一些不足,主要体现在对参数的敏感性较高,特别是在信息素挥发率、更新强度等参数的选择上对最终性能有较大影响,若设置不当可能导致搜索效率下降或收敛不稳定。此外,在处理高维复杂问题时,由于需要维护大量路径和信息素矩阵,算法的计算资源开销和时间复杂度显著上升,影响其在大规模问题中的应用效率。

2.4 其他种群优化算法

随着计算机技术的不断进步,研究人员对种群优化算法进行了深入的探索和不断优化,提出了许多先进的新型算法。这些算法借鉴了自然界中生物的觅食、飞翔、迁徙等行为,通过构建模拟生物智能的搜索机制,实现了对复杂优化问题的高效求解。

其中,人工鱼群算法^[5]通过模拟鱼群的集群行为和觅食策略,使得算法在处理非线性、多峰问题时具有较高的求解精度和较好的鲁棒性。

与此同时,蝙蝠算法^[6]借鉴蝙蝠利用回声定位捕捉目标的生理特性,通过自适应调整飞行速度与搜索

路径,使算法能够迅速发现全局最优解,特别适用于连续优化问题和多目标优化任务。

此外,鲸鱼优化算法通过模拟鲸鱼捕食时的螺旋式搜索行为,将鲸鱼群体间的协作与竞争机制融入算法设计中,有效增强了全局搜索能力,在处理高维复杂优化问题时表现出优越性能。

这些新兴的优化算法在很多实际应用场景中展示了令人瞩目的表现。与遗传算法和粒子群算法相比,它们在收敛速度和全局搜索能力上具有明显优势。人工鱼群算法能够在搜索过程中平衡探索和开发,使得在局部细节优化与全局趋势把控之间取得良好平衡;蝙蝠算法利用动态自适应机制,对搜索过程中遇到的局部最优陷阱有较强的跳出能力;而鲸鱼优化算法则通过独特的螺旋更新策略和局部精细搜索,有效避免了陷入局部最优解的问题,增强了对复杂问题的求解能力。

3 算法的应用实例

种群优化算法作为一类重要的全局优化方法,已在众多领域展现出强大的应用价值,尤其在工程优化、图像处理、机器学习与数据挖掘等方面,取得了显著的成果。其核心优势在于能高效的在高维、复杂的搜索空间内寻找最优解,并且不依赖于问题的解析梯度信息,使其在非线性、多约束优化问题中具有广泛的适用性。

在工程优化领域,种群优化算法已被成功应用于结构优化、机械设计、控制系统设计等问题。例如:在航空航天和汽车制造领域,研究人员利用粒子群优化和遗传算法优化飞行器和车辆的空气动力学结构,以减少阻力并提高燃油效率。对于复杂的控制系统设计,种群优化算法能够帮助优化控制参数,如PID控制器的增益参数调整,以提高系统的稳定性和响应速度,广泛应用于自动化制造和机器人控制领域。

在图像处理方面,种群优化算法被用于图像复原、图像分割、图像匹配等任务,尤其在多模态优化问题中表现出了较强的能力。例如:在医学影像分析中,遗传算法和粒子群优化被用于图像分割,以精确识别病灶区域,提高疾病诊断的准确性。

在机器学习与数据挖掘领域,种群优化算法的作用同样不可忽视。粒子群优化和遗传算法常用于模型训练、特征选择、超参数优化等任务。例如:在深度学习中,研究人员利用遗传算法优化神经网络的结构和超参数,以提高模型的泛化能力和收敛速度。

4 算法的改进与挑战

尽管种群优化算法在优化问题上展现出了卓越的性能,并在工程、人工智能、图像处理、光学优化等多个领域取得了显著成果,但其仍面临诸多挑战。其中,收敛速率较慢、易陷入局部最优解以及计算复杂度随问题规模增长而急剧上升等问题限制了该算法在实时性强要求的领域使用。为了解决上述问题,研究人员进行了一系列的改进。例如:自适应机制的引入可以根据优化过程中的反馈信息动态调整参数,从而在算法的不同阶段灵活调整探索与开发的平衡,增强其跳出局部最优解的能力。此外,混合算法随着时代的发展逐渐成为研究热点。同时,局部搜索策略的加入也为种群优化算法提供了更精细的搜索能力,通过在解空间内执行局部优化步骤,可以有效提升收敛速度并提高解的质量。

5 结束语

种群优化算法作为一种强大的全局优化工具,凭借其无需梯度信息、适应性强等优势,已在众多复杂问题中展现出卓越表现。尽管在收敛速度、局部最优以及计算效率等方面仍存在挑战,但随着算法策略的不断优化和并行计算技术的快速发展,其应用前景愈加广阔。未来,随着多学科技术的融合与智能化程度的提高,种群优化算法有望在更加复杂、动态和高维的优化场景中实现突破,推动各领域技术创新与工程实践的深度发展。

参考文献:

- [1] 李雷雷,李盼池,赵娅.一种改进的量子粒子群优化算法[J].计算机与数字工程,2025,53(02):303-307,94.
- [2] 叶倩琳,王万良,王铮.多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(06):1107-1120,1232.
- [3] 孙雨辉,潘大志.基于改进遗传算法的冷链物流配送路径优化[J/OL].西华师范大学学报(自然科学版),1-12 [2025-04-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1699.N.20250414.1718.002.html>.
- [4] 吴榆俊,叶子青.蚁群算法在微电网容量配置优化中的应用综述[J].电气技术与经济,2022(03):20-22.
- [5] 洪刘.基于人工鱼群优化算法的室内可见光定位技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2020.
- [6] 张原宾.基于蝙蝠算法的支持向量机电力变压器故障诊断研究[D].长春:吉林农业大学,2023.

保险机构隔爆性能的工艺预测研究

孔晓刚, 金 飞, 隋 军, 白 刚, 原 勇

(内蒙动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要 本文对自紧式保险机构隔爆机理和工艺试验数据进行分析, 简明介绍了保险机构在装配过程中隔爆性能的工艺控制方法, 分析了保险机构隔爆性能相关影响因素的函数关系式, 明确了装配过程中的工艺控制参数, 并量化了检测要求, 通过隔爆试验数据的比较, 确定了保险机构的隔爆特征量和关系式, 旨在为实现保险机构隔爆性能的工艺预测提供借鉴。

关键词 保险机构; 隔爆性能工艺预测; 自紧式密封结构

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.002

0 引言

自紧式保险机构在生产中重复出现了隔爆失效的质量问题, 说明保险机构在装配工艺上存在不确定因素, 产品总装完成后无法保证其隔爆可靠性。如何在保险机构装配过程中有效地控制相关工艺参数, 通过确定一个隔爆特征量来提前预测产品装配后的隔爆性能, 成为保险机构隔爆失效的工艺攻关目标。基于此, 通过对保险机构的装配工艺研究与工艺试验考核, 确定隔爆特征量, 可以准确地判定保险机构的隔爆性能。

1 保险机构隔爆机理分析

1.1 自紧式密封结构及其作用机理

保险机构的隔爆原理基于自紧式密封结构, 在发生爆炸性气体泄漏时, 柱塞组件受火药燃烧瞬间形成的高压冲击力作用, 产生轴向运动, 使密封圈被进一步压紧, 实现自紧密封功能^[1]。自紧式密封结构是保险机构实现隔爆功能的核心, 其密封效果依赖于柱塞、密封圈及下体组件的精确配合, 密封圈在装配过程中需预压缩形成初始密封, 并在柱塞受压向下移动时进一步压紧, 最终形成自紧密封。但是受装配误差、零件公差以及柱塞偏移的影响, 密封圈一侧的压缩量可能不足, 导致密封失效。

1.2 影响隔爆性能的关键因素

隔爆性能的稳定性受到多个工艺参数的综合影响, 其中密封圈的截面直径 R 、柱塞下移量 S_1 、下体锥度 θ 以及柱塞组件的配合公差是影响隔爆效果的关键参数。函数关系分析表明, 柱塞下移量 S_1 直接决定了密封圈的压缩量, 而下体锥度 θ 影响柱塞的受力状态, 导致

柱塞在隔爆瞬间的偏移量 d_1 不同, 进一步影响密封效果。试验数据表明, 密封圈的初始压缩量 δ_1 必须满足最小阈值 0.4 mm, 以保障在隔爆条件下维持可靠的密封状态。工艺控制中应该借助优化柱塞的装配精度, 调整密封圈预压缩量以及精确匹配柱塞与下体锥面的几何关系, 保证隔爆特征量 ΔP 始终满足隔爆要求, 避免因参数偏差导致的泄漏失效。

2 保险机构隔爆失效机理与影响因素

2.1 保险机构隔爆失效的常见模式分析

保险机构的隔爆失效主要表现为密封失效和柱塞组件运动异常。密封失效的主要原因是密封圈的压缩量不足, 导致火压形成时密封圈无法提供足够的自紧力, 进一步造成泄漏。试验结果表明当密封圈的初始压缩量 δ_1 小于 0.04 mm 时, 隔爆效果不稳定, 泄漏概率大幅增加。柱塞组件运动异常也是影响隔爆性能的重要因素, 在火压冲击力作用下, 柱塞未能按照预定轨迹运动, 而是发生偏移或卡滞且导致密封面接触不均, 进一步造成局部泄漏。

2.2 柱塞组件偏移导致的泄漏失效机理

柱塞组件的偏移是导致隔爆失效的主要原因之一, 其根本机理在于装配公差的不匹配和柱塞组件的受力不均, 隔爆过程中火药燃烧产生的瞬时高压使柱塞组件沿轴向运动, 但由于制造和装配公差的影响, 柱塞可能产生径向偏移 d_1 , 导致密封圈的受力不均匀, 进一步形成泄漏通道。所以, 在工艺设计中, 必须严格控制柱塞组件的轴向下移量 S_1 及其公差范围, 以减少偏移对隔爆性能的影响。

2.3 影响隔爆性能的核心工艺参数

隔爆性能受多个关键工艺参数的影响, 其中最重要的参数包括柱塞下移量 S_1 、密封圈初始压缩量 δ_1 、下体锥度 θ 及密封圈直径 R 。如图 1 所示, 借助对多个批次的保险机构进行隔爆测试, 发现密封圈直径、柱塞下移量及装配公差微小变化都会影响隔爆效果^[2]。当柱塞下移量 S_1 超出规定范围时, 密封圈的压缩量不均匀, 导致局部泄漏概率增加, 下体锥度 θ 直接影响柱塞组件的运动轨迹, 不同锥度角度会导致柱塞的受力方向发生变化, 进一步影响密封圈的受力状态, 依靠精确控制上述关键参数, 并优化装配精度, 可以有效提高保险机构的隔爆合格率并提升其安全性能。

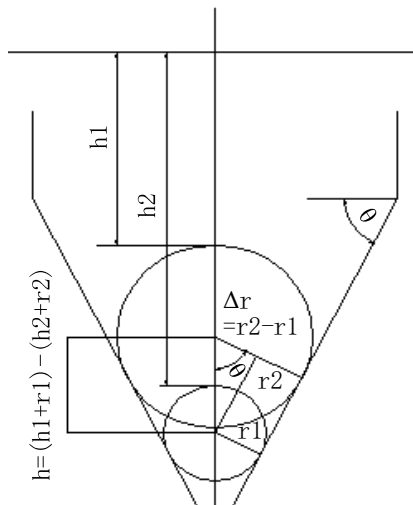


图 1 下体锥度与柱塞运动轨迹示意图

3 保险机构隔爆性能工艺控制方法

3.1 装配过程中的工艺控制策略

保险机构的隔爆性能受装配精度的直接影响, 所以必须制定严格的装配工艺控制策略, 以保证隔爆状态的稳定性。装配过程中柱塞组件与密封圈的配合精度决定了密封可靠性, 特别是柱塞下移量 S_1 和密封圈初始压缩量 δ_1 必须在控制范围内。工艺试验表明密封圈压缩量过小会导致隔爆失效, 而过大会影响装配可行性且导致装配应力增加, 所以在工艺实施中采用高精度测量仪器, 如百分表与深度尺, 实时监测柱塞的下移量和密封圈的压缩量, 保证其满足设计要求。装配过程中应采用高精度的定位装置, 减少组件的装配偏差, 避免因柱塞偏移导致的局部泄漏。

3.2 隔爆特征量的定义与量化标准

隔爆特征量是评价保险机构隔爆性能的重要参数, 其主要指标包括隔爆压力变化量 ΔP 、柱塞下移量 S_1 以

及密封圈初始压缩量 δ_1 。工艺试验表明, 当 $\Delta P > 0.16$ 且 $\delta_1 > 0.04$ 时, 隔爆成功率达到 100%, ΔP 反映了柱塞组件在隔爆状态下的相对运动, δ_1 直接影响密封效果, 而 S_1 决定了密封圈的最终压缩状态^[3]。基于大量实验数据, 对隔爆特征量的测量标准进行了明确规定: 密封圈压缩量需采用精密测量设备进行双重测量, 保证误差在可接受范围内, 柱塞的移动量需采用高精度测量平台进行监测, 保障 Δh 与 S_1 的关系符合设计要求, 如图 2 所示。

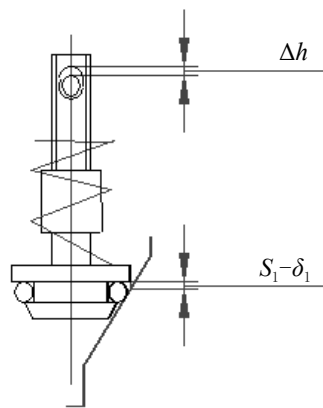


图 2 隔爆特征量测量示意图

3.3 保险机构装配工艺参数优化

装配工艺优化的核心在于减少工艺参数的波动, 保障每个关键参数在标准范围内, 通过对多个批次试验数据的分析, 优化了密封圈截面直径 R 、柱塞尺寸 D_1 和下体锥度 θ 的公差范围, 以减少装配偏差对隔爆性能的影响^[4]。试验表明, 采用高精度 CNC 加工提高组件匹配精度后, 柱塞组件的偏移量 d_1 减小, 密封圈的压缩量均匀分布, 提高了密封效果。在装配过程中采用动态调整方法, 根据柱塞的实际下移量 S_1 进行微调, 使隔爆特征量 ΔP 保持在最佳范围内, 最终优化后的装配工艺保证了隔爆合格率达到 100%, 证明了工艺优化的有效性。

4 保险机构隔爆特征量的测定与验证

4.1 隔爆特征量的数学建模与函数关系式建立

隔爆特征量是衡量保险机构隔爆性能的重要参数, 其数学建模主要基于柱塞组件的下移量 S_1 、密封圈的初始压缩量 δ_1 以及柱塞预压量 Δh , 通过大量试验数据分析, 建立了隔爆特征量与关键工艺参数之间的数学关系, 如下所示:

$$\Delta P = \Delta h \cdot (S_1 \cdot S_1)$$

其中, ΔP 代表隔爆特征量, Δh 为柱塞预压量,

S_1 为柱塞下移量, S_r 为参考值。实验结果表明, 当 ΔP 的数值较小时, 隔爆成功率较高, 反之则存在隔爆失效风险。

此外, 柱塞组件的装配公差、密封圈的尺寸偏差均会影响隔爆特征量的数值, 因此在数学建模过程中, 需要综合考虑各个工艺变量的影响。

4.2 工艺试验数据分析与隔爆阈值确定

工艺试验中对多个批次保险机构的隔爆特征量进行数据分析, 发现当密封圈的初始压缩量且 $\delta_1 > 0.04$ 隔爆特征量 $\Delta P > 0.16$ 时, 保险机构的隔爆性能稳定。为了验证该阈值的可靠性, 对不同规格的保险机构进行了测试。

结果表明, 当 δ_1 小于该值时, 密封圈的压缩量不足, 导致密封失效; 当 ΔP 小于 0.16 时, 柱塞组件的运动存在异常, 无法保证密封效果。具体试验数据如表 1 所示, 该数据用于优化工艺控制标准, 并作为隔爆性能的判定依据。

表 1 隔爆特征量的试验数据统计

试验编号	柱塞预压 Δh (mm)	柱塞下移量 S_1 (mm)	密封圈初始压缩量 δ_1 (mm)	隔爆特征量 ΔP	试验结果
1	0.85	0.61	0.05	0.24	通过
2	0.77	0.6	0.04	0.18	通过
3	0.58	0.53	0.03	0.12	失败
4	0.5	0.5	0.02	0.08	失败

从试验数据可以看出, 当 ΔP 低于 0.16 时, 隔爆失效概率明显增加, 所以在装配过程中, 需要保障柱塞的预压量和密封圈的压缩量满足既定标准, 以保证隔爆性能的稳定性^[5]。

4.3 保险机构隔爆试验方法与合格率评估

为了进一步验证隔爆特征量的工艺控制效果, 进行了多批次保险机构的隔爆试验考核, 试验过程中采用标准化试验装置进行模拟火压环境测试, 并实时记录柱塞组件的运动轨迹及密封状态^[6]。试验结果表明, 借助优化装配工艺, 提高柱塞组件的装配精度, 并严格控制密封圈的初始压缩量, 可以有效提高隔爆合格率, 具体的试验数据如表 2 所示。

表 2 的试验数据表明, 在采用优化后的装配工艺后, 保险机构的隔爆合格率提高至 90% 以上, 符合工程应用需求。

进一步的试验结果显示, 当柱塞的预压量和下移量严格控制在指定范围内, 隔爆合格率达 100%。这表明借助精确控制隔爆特征量, 可以有效提升保险机构的隔爆性能, 为批量生产提供可靠的工艺判定方法。

表 2 保险机构隔爆合格率统计

试验批次	试验数量 (台)	隔爆合格数量 (台)	隔爆不合格数量 (台)	隔爆合格率 (%)
A	8	8	0	100
B	10	9	1	90
C	12	11	1	91.7

5 结束语

通过对保险机构隔爆性能的工艺预测方法进行深入分析, 确定了影响隔爆性能的关键工艺参数, 并建立了数学模型与量化标准。研究表明, 密封圈的初始压缩量 δ_1 和隔爆特征量 ΔP 具有明确的临界值, 保险机构的隔爆性能稳定, 隔爆成功率可达到 100%。未来研究可进一步优化试验方法, 结合数字化检测技术并研究不同工作环境对隔爆性能的影响, 以提升保险机构在复杂环境下的适应性和安全性。

参考文献:

- [1] 武伟, 陈芷怡, 吕志超, 等. 基于 Modelica 的安全保险机构驱动装置系统仿真研究 [J/OL]. 弹箭与制导学报, 1-9 [2025-01-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=HgkNOCd8VPhzhQVeJxX5F3QOwOMI0jVBeXUCr-RWOHb1uh-4ACbc2oe2ROXKX_4VWTfHLqsRC1o6C4F1BtIHtK0dWE2xYqBZ8Uf3QkDInOXcJ-Md6LYeY9vtRktm8E-Yxzv8e262hYpOwMoS0br0rPtpRDObs4oYwKpiGMadFUfh769DGB1Pzw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 阙文星, 冯恒振, 姜文忠, 等. 飞片式引信微爆炸序列传爆 / 隔爆性能仿真 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 10-19.
- [3] 葛兴飞, 严思梁. 矿用隔爆电机焊接螺栓材料性能及加工工艺研究 [J]. 煤矿机械, 2022, 43(10): 105-109.
- [4] 解瑞珍, 褚恩义, 戴旭涵, 等. 微起爆序列设计及传爆与隔爆性能 [J]. 兵工学报, 2021, 42(06): 1178-1184.
- [5] 于佳鑫, 李伟兵, 李军宝, 等. 多层隔爆结构对威力可控战斗部能量输出的影响 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 33-42.
- [6] 阙文星, 冯恒振, 姜文忠, 等. 飞片式引信微爆炸序列传爆 / 隔爆性能仿真 [J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 10-19.

大模型优化策略在智能调度中的应用

王宇祥

(辽宁广告职业学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要 为了提升复杂场景下智能调度系统的决策效率与资源利用水平, 基于大模型优化策略进行系统性分析与实践探索。本研究聚焦多源异构数据处理、模型架构压缩、强化学习策略优化及分布式协同机制, 构建可适应动态环境与多目标约束的调度体系。以物流、云计算、城市交通等领域为例, 深入探讨大模型的应用机制。分析结果认为, 该策略在提升系统响应时效、降低计算成本及增强鲁棒性方面具有显著优势, 可为实现复杂调度系统的全局最优提供可行路径。

关键词 大模型优化策略; 智能调度; 强化学习; 分布式协同

中图分类号: TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.003

0 引言

在数据驱动与智能化需求不断增加的背景下, 传统调度策略在动态环境、资源异构性及多目标约束等复杂条件下逐渐显现局限性。大模型因其在深层特征提取、跨模态融合与策略生成等方面的优势, 为解决复杂调度问题提供了新的技术路径。将大模型优化策略引入智能调度系统, 既可突破局部最优困境, 又能提升资源利用效率与调度响应的时效性, 对推动智能系统运行效能具有重要意义。

1 大模型优化策略在智能调度中的作用

大模型优化策略在智能调度中通过融合高维数据处理与复杂模式挖掘能力, 显著提升了动态环境下的决策质量与效率。其核心作用体现在三个方面: 其一, 基于海量异构数据, 大模型通过时空特征建模与跨模态信息融合, 可精准预测任务需求与资源约束, 突破传统模型对局部特征的依赖^[1]; 其二, 借助模型架构优化, 在保证推理速度的同时降低计算成本, 满足调度系统对低延迟响应的严格要求; 其三, 通过强化学习框架实现动态策略优化, 例如: 在云计算资源调度中, 大模型基于历史负载与实时请求分布, 自主生成多目标协同的资源配置方案, 使资源利用率提升 20% 以上, 同时规避人工规则设计的局部最优陷阱。

2 大模型优化策略在调度中的关键技术

2.1 数据处理与特征提取

在智能调度系统中, 数据处理与特征提取采用多层次的技术架构(见图 1)。首先是多源异构数据的预处理技术, 包括时序数据的小波变换平滑处理、基于

局部异常因子的异常值检测、基于时空相关性的缺失值填补算法。在特征工程环节, 设计多尺度特征提取网络(Multi-scale Feature Extraction Network, MFEN), 该网络包含三个并行特征提取分支^[2]: 空间特征分支采用改进的 ResNet 结构, 引入空洞卷积扩大感受野; 时序特征分支使用双向 LSTM 结构, 增加跳跃连接以缓解梯度消失问题; 属性特征分支通过多头自注意力机制进行特征融合, 注意力权重通过 softmax 函数计算。知识蒸馏方面, 采用教师—学生网络结构, 通过温度参数 T 调节软标签的平滑度, 损失函数包含硬标签交叉熵损失与软标签 KL 散度损失的加权和。

2.2 模型架构优化策略

在模型压缩方面, 结合结构化剪枝与知识蒸馏双重机制, 通过 L1 正则化筛选非重要权重, 构建通道重要性评价指标, 引导剪枝过程在保持模型精度的前提下大幅降低冗余计算量。采用教师—学生网络进行知识迁移, 通过温度调节与软标签策略提高学生模型对深层语义的学习能力。量化策略引入混合精度计算, 关键计算路径维持 FP16 精度以保证数值稳定性^[3], 辅助层则采用 INT8 低精度量化以减小内存占用, 相关参数通过最小均方误差(MSE)优化精度损失。在计算架构层面, 设计自适应计算架构(ACA), 在不同网络层植入退出器(Exit), 基于任务复杂度动态调整网络深度, 实现低延迟响应。退出器采用轻量卷积门控函数判断当前特征是否满足提前终止条件, 从而节省计算资源。分层注意力机制(HAM)引入双重关注维度, 任务级采用 transformer 结构建模任务间全局依赖, 特征级则基于 squeeze-and-excitation 模块动态调整通道权重, 实现信息的有效聚焦与特征表达增强。

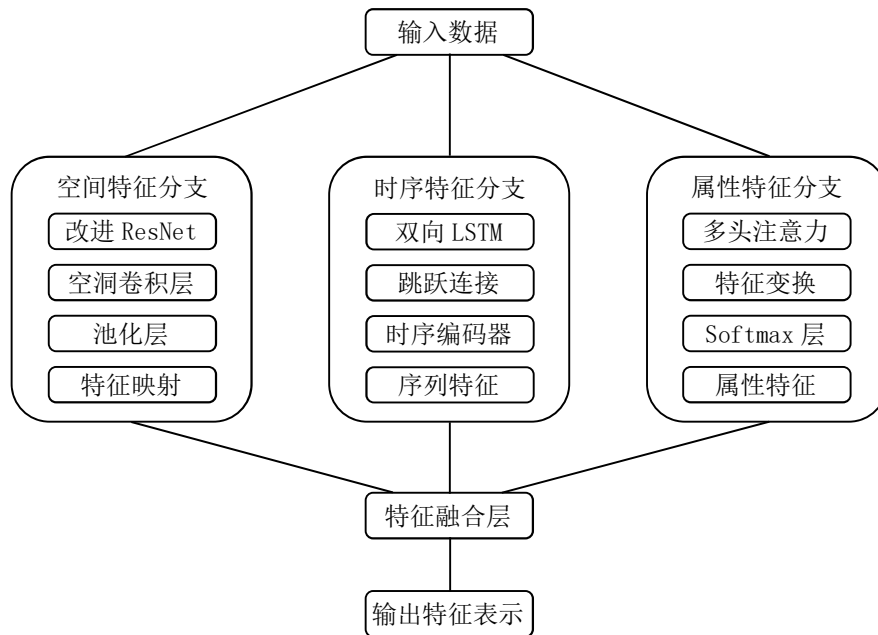


图1 MFEN 多尺度特征提取网络架构图

2.3 强化学习与策略优化

整体采用分层强化学习框架(Hierarchical Reinforcement Learning, HRL)，将复杂任务划分为可控的子目标以增强策略的可扩展性与收敛速度。高层策略网络基于选项学习(Option Learning)构建，定义若干个选项(Options)以应对不同调度子任务，每个选项由特定原子动作序列组成，实现任务规划与分解的抽象控制。低层执行网络采用双延迟深度确定性策略梯度(TD3)算法，构建双Q网络结构以缓解策略评估中的过估计偏差，搭配目标策略平滑机制(Target Policy Smoothing)稳定动作选择过程，从而提升决策鲁棒性。在状态建模方面，设计基于图注意力网络(GAT)的状态编码器，将调度环境表示为异构图结构，节点编码任务、资源等关键实体，边编码其间的依赖关系，实现任务间耦合建模与结构信息融合。探索策略采用参数化噪声方法，在策略网络参数空间中添加自相关高斯噪声，实现持续性探索。优化目标采用多目标形式^[4]：

$$J(\theta) = E \left[\sum_i w_i \cdot R_i(s, a) \right]$$

其中 w_i 为各目标权重，通过多目标进化算法(MOEA)动态调整。

2.4 分布式协同调度

分布式协同调度模块融合联邦学习与多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)两类技术路径构建智能协同机制。联邦学习框架采用 FedAvg 算法对各参与节点本地模型进行周期性聚合，通过本地 SGD 优化减

少梯度传输频次，提升通信效率，配合安全聚合协议(Secure Aggregation)在不暴露原始数据的前提下保障模型参数隐私。在多智能体系统设计中，引入 Actor-Critic 架构，每个智能体独立维护策略网络(Actor)与价值网络(Critic)，实现自治决策能力。智能体间通信机制采用注意力机制实现高效信息传递，消息编码环节利用变分自编码器(VAE)压缩高维状态表示，从而有效降低通信带宽开销。为保证系统一致性，引入基于 PBFT(Practical Byzantine Fault Tolerance)协议的共识机制，三阶段提交流程确保在部分节点不可靠条件下仍可达成全局调度共识^[5]。通信调度方面设计基于重要性采样的触发机制，仅在智能体对当前策略的不确定性超出阈值时才激活通信过程，进一步抑制冗余同步。整体架构采用分层调度体系：底层通过市场机制进行任务竞拍与资源匹配，中层负责冲突检测与优先级调解，顶层进行策略制定与全局资源协调，实现大规模系统下的高效智能调度协同。

3 应用场景与案例分析

3.1 物流与供应链调度

在物流与供应链调度领域，大模型优化策略通过整合多维度数据，实现从传统规则调度向智能化精准调度的转变。例如：某大型电商平台应用基于 transformer 架构的需求预测模型，将 SKU 历史销量、促销活动、季节性等特征作为输入，准确率提升至 92.3%。在库存优化方面，采用深度强化学习框架构建了动态补货策

略,模型同时考虑仓储成本、缺货成本与运输成本,通过值函数分解处理高维状态空间。相比传统 EOQ 模型,库存周转率提升 31.2%,仓储成本降低 25.8%。在配送路径优化中,设计基于图神经网络的混合整数规划求解器,将 NP 难的 VRP 问题转化为节点嵌入学习任务。针对动态订单场景,提出在线学习方案,模型可实时响应订单变化并动态调整配送方案。在多仓协同调度方面,构建分层强化学习架构:高层策略网络负责仓库分配,低层执行网络优化具体配送路径。实验结果表明,该方案在多目标场景下(配送时效、成本、负载均衡)相比启发式算法提升 18.7%。

3.2 云计算资源调度

云计算资源调度场景下,大模型优化策略主要解决资源分配、负载均衡与能耗优化等核心问题。例如:某大型云服务提供商采用图注意力网络建模数据中心拓扑结构,节点表示计算、存储、网络资源,边表示资源依赖关系。负载预测模型采用因果卷积网络结构,通过空洞卷积扩大感受野,同时引入自注意力机制捕获长程依赖。在资源分配策略上,设计了基于 PPO 算法的调度框架,奖励函数综合考虑资源利用率、服务质量、能耗效率三个维度:

$$R = w_1 \cdot Utilization + w_2 \cdot QoS + w_3 \cdot Energy_Efficiency$$

其中,权重参数通过多目标进化算法动态调整。为提升决策鲁棒性,引入基于 VAE 的不确定性建模模块,对资源需求与可用性进行概率建模。在处理突发负载时,采用分层调度策略:在宏观层面,通过 LSTM 网络预测负载趋势;在微观层面,使用轻量级 MLP 网络进行实时调整。

3.3 城市交通调度

在城市交通调度领域,大模型优化策略通过融合多源异构数据,实现了信号配时、车流疏导、应急响应的智能化管理。例如:某特大城市群智能交通系统采用时空图神经网络捕获路网动态特征,模型输入包括浮动车 GPS 数据、视频监控数据、信号灯状态等,输出包括路段车流量、行程时间、拥堵指数预测。在信号配时优化方面,构建了基于 Meta-RL 的适应性调控框架,能够快速适应不同时段、天气、事件等场景。针对区域协同调度,设计了多智能体强化学习架构,每个路口作为独立智能体,通过注意力机制实现信息交互。系统采用分层设计:策略网络负责宏观配时方案生成,执行网络负责微观参数调整,二者通过双向 LSTM 实现信息交互。在应急事件处理方面,提出了基于知识图谱的推理框架,将历史案例、专家经验等先验知识显式建模,提升决策可解释性^[6]。

3.4 其他领域

大模型优化策略在电力调度、医疗资源调度、制造业生产调度等领域也展现出显著优势。在电力调度方面,如某省级电网采用深度强化学习框架优化新能源消纳策略,模型输入包括气象数据、负载数据、电网拓扑等,通过图卷积网络提取特征,实现了储能设备与可调负荷的协同调度,提升新能源消纳率 15.8%。在医疗资源调度领域,如某三甲医院应用多目标强化学习框架优化手术室排班,将手术时长预测、医疗资源分配、应急响应等子任务统一建模,通过分层架构实现全局优化。在制造业生产调度方面,如某智能工厂采用知识蒸馏技术将专家经验迁移至调度模型,通过图注意力网络建模工序依赖关系,实现了柔性生产线的自适应调度,产能利用率提升 19.2%,交期准确率提升 24.5%。这些应用案例表明,大模型优化策略通过融合领域知识与先进算法,为复杂场景下的调度优化提供了新的解决方案。

4 结束语

大模型优化策略凭借其在高维数据处理、非线性建模与多目标优化方面的显著能力,已成为智能调度系统性能跃升的重要驱动力。多场景下的实证结果表明,大模型优化策略不仅提升了资源配置效率、系统响应速度与调度鲁棒性,更在复杂环境中展现出广泛适应性与扩展潜力。未来需进一步深入探索模型泛化能力与跨领域迁移机制,强化知识表达与决策逻辑的可解释性,并在大规模异构系统中构建更高效的协同优化框架,以实现智能调度从局部感知向全局博弈的优化。

参考文献:

- [1] 张雪岩. 基于人工智能的配电网智能优化调度策略探究 [J]. 电气技术与经济, 2025(02):30-33.
- [2] 梁延. 新能源汽车充电基础设施优化布局与智能调度策略研究 [J]. 汽车维修技师, 2025(02):46-47.
- [3] 彭寒梅, 颜飞, 谭貌, 等. 计及气网延时的电-气综合能源系统近端策略优化双智能体安全校正方法 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45(02):51-60.
- [4] 刘仲民, 王瑜. 计及 EV 和 BESS 的配电网削峰填谷两阶段优化调度策略研究 [J]. 电源学报, 2025, 23(01):160-172.
- [5] 曾超, 杨子涵, 崔子豪, 等. 基于 PSO-OBL 算法的平面移动类立体车库车辆调度优化模型 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25(02):816-824.
- [6] 马永翔, 王希鑫, 闫群民, 等. 电动汽车双层优化模型的充放电调度策略 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(02):267-276.

一种用于城市扫雪作业的路缘积雪翻边装置

姜明彬

(北京环境卫生工程集团有限公司, 北京 101117)

摘要 在道路除雪作业中, 传统设备无法完全清除路缘石根部积雪的问题, 因此, 在现有滑移装载机的基础上设计制作了路缘积雪翻边装置。该装置在特定作业场景下的应用、方案设计以及部件构造, 形成了一套完整且实用的解决方案。研究结果表明, 经过实体装置的设计、制作、安装、调试及运行, 有效解决了过去紧急情况下需人工清除积雪的难题, 大幅提升了作业效率与安全性, 取得显著的经济效益和社会效益。

关键词 路缘积雪翻边装置; 联接机构部件; 可折叠摆臂部件

中图分类号: TH24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.004

0 引言

随着城市环保要求不断提升, 冬季除雪作业已禁止大量使用融雪剂。当前工艺中, 机械设备需将主干道积雪推至路缘后逐步清理。然而, 路缘石附近因设备避障需求及绿植保护限制无法直接接触或使用融雪剂, 导致积雪残留。传统人工清理方式效率低且存在安全隐患。为此, 本研究基于滑移装载机设计路缘积雪翻边装置, 其接触部位采用弹性耐磨材料, 作业时将路缘石根部 30 cm 内积雪推至 30 cm 外区域, 由后续设备转运消纳。该方案在保护路缘石的同时, 提升了除雪效率与安全性, 符合北京市扫雪铲冰减用融雪剂的要求。

1 路缘积雪翻边装置的方案设计

鉴于紧急情况下单位需安排人工进行路缘石附近积雪清理这一情况, 结合书刊、文献、网络等大量有关冬季城市道路扫雪铲冰作业工艺的相关资料^[1-2], 根据扫雪铲冰作业路段道路特点, 结合现有的滑移装载机的相关技术参数, 提出了创新性设计。

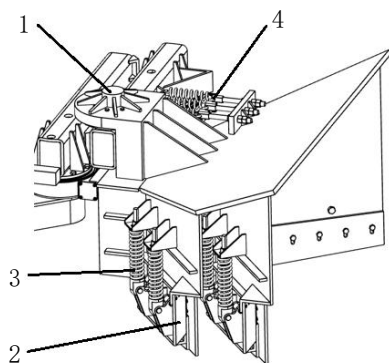
1.1 装置的主要构成

本装置主要由滑移装载机部分、联接机构部件、可折叠的摆臂部件、积雪翻边装置部件四个部分构成。装置的设计充分考虑了实用性及耐用性, 在保证作业效率的同时, 特别注重装置的可靠性与安全性。由于该装置的作用载体是滑移装载机, 其底盘距地高度 19 cm, 如果采用将装置在滑移装载机正前方进行推雪作业的方式, 积雪稍厚一点很容易造成作业中积雪超过底盘高度, 极有可能出现因为积雪本身的黏性而导致积雪逐渐堆积卡滞在车辆底盘前, 造成方案设计失败。

因此, 该装置在推雪翻边作业时采用折叠摆臂部件将翻边装置摆到滑移装载机的侧边进行作业, 解决了滑移装载机底盘低, 不便于推雪翻边作业的问题。此外, 装置的设计还考虑到了司机视线问题, 将作业时的翻边部件布置到了滑移机的侧前方, 便于操作者进行观察。

1.2 积雪翻边装置部件的设计

该装置通过联接机构与滑移装载机紧密结合, 利用摆臂部件的液压折叠机构功能, 将翻边装置灵活调整至合适位置。当液压折叠机构启动后, 可折叠摆臂缓慢展开至作业位置状态, 利用滑移装载机的升降功能将积雪翻边装置紧贴路面, 然后将调整方向盘将积雪翻边装置对正路缘石边缘向前进行推雪翻边作业, 可将路缘石根部及上部的积雪高效翻至距离路缘石 30 cm 的道路中央。同时, 该装置在推雪铲刀和装置整体联接部位, 都设置了与工作阻力方向相同的可回转的避障机构, 该避障机构分别采用可调节松紧的压簧和拉簧作为过载缓冲保护及复位的执行元件。压簧和拉簧的选型依据积雪翻边装置设计载荷采用《机械设计手册(新编软件版)2008》中的弹簧设计程序进行设计计算及校核, 并选取性能参数近似弹簧标准件。安装调试过程中通过可调节机构装置施加一定的预压缩力和预拉紧力, 保证积雪翻边装置在过载或遇到障碍时得到一定的缓冲或避开超过设计载荷的障碍, 并在过载或障碍消除后通过可调节松紧的压簧和拉簧快速复位, 同时保护路缘石和积雪翻边装置不被损坏, 大幅提高了清雪作业的安全可靠性, 积雪翻边装置部件构造见图 1。



1. 翻边装置联接部件；2. 耐磨弹性刮板；
3. 铲刀避障机构调节部件；
4. 装置整体避障拉簧调节装置

图 1 积雪翻边装置部件构造图

2 积雪翻边装置主要部件的选型设计

2.1 联接机构部件的选型设计

联接机构的选型设计至关重要，它直接关系到装置与滑移装载机的稳定联接和协同工作可靠性。因此，依据《土方机械 滑移转向装载机附属装置的联接》GB/T 25619-2023 进行了联接机构的结构设计，在制作材料上采用了高强度的 16Mn 合金钢板，经过严格的焊接工艺，确保联接机构具有足够的强度和耐久性，以承受复杂作业条件下的各种应力。在保证安全稳定作业的前提下，该设计有效平衡了成本与效率，为滑移装

载机在极端天气下的作业提供了坚实保障。经过反复模拟测试，联接机构在严寒条件下也能保持足够的强度、刚度和稳定性。此外，联接机构的设计还考虑了快速拆卸的需求，以适应不同的作业场景，液压装置接口采用便捷的液压快速接头，使得联接机构装置能在短时间内完成快速装卸，提高了设备的灵活性与作业效率。

2.2 可折叠摆臂部件的选型设计

摆臂的设计采用了高强度的 16Mn 合金材料，在确保摆臂刚度的同时，也实现了轻量化的目标。可折叠的摆臂部件在完成除雪作业后可以方便地折叠，极大地减少了设备的体积并改善了道路行驶通过性能，方便道路行驶、转运及停放保存，这不仅提高了设备的空间利用率，还减少了在城市狭窄道路上的行驶难度。通过液压折叠机构装置，操作人员能够轻松控制摆臂的展开与折叠，保证在不同作业环境下液压折叠机构装置都能迅速响应（见图 2）。

摆臂可折叠设计的执行元件，根据折叠臂和积雪翻边装置的工作负载特点，查阅相关行业标准并在市场找到适用本折叠机构的回转支承部件^[3]，依据厂家选型样本，选择具有自锁功能的 SE7 型蜗轮蜗杆回转轴承作为折叠臂的执行元件（见表 1），在确保安全的同时，增强了设备的稳定性和耐用性，可以有效提高摆臂部件的工作负载能力，提高了作业过程的可靠性。

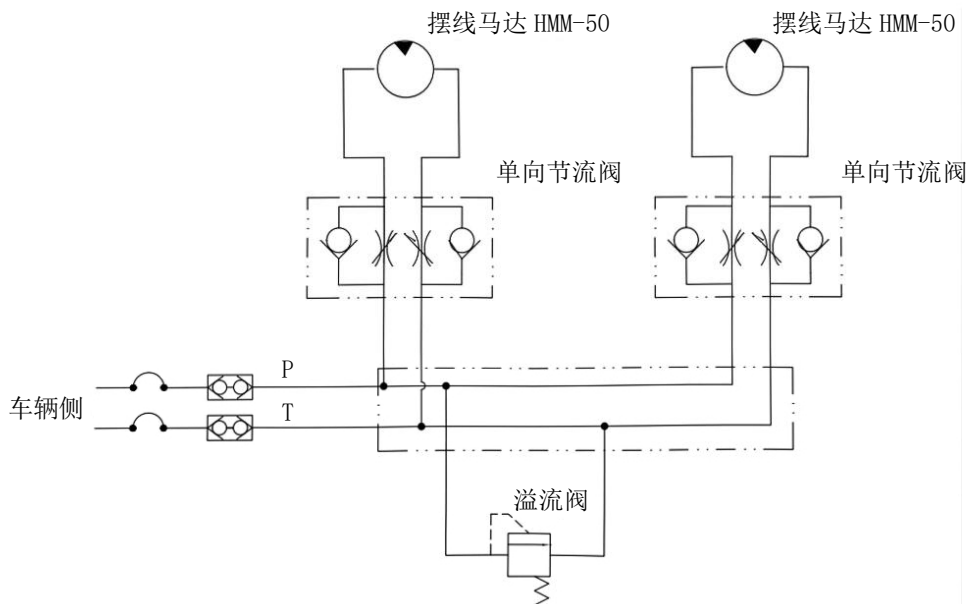


图 2 可折叠摆臂部件液压系统原理图

表 1 蜗轮蜗杆回转轴承选型参数

型号	额定输出 扭矩 kN·m	倾覆力 矩 kN·m	轴向静载 荷 kN	径向静载 荷 kN	轴向动 载荷 kN	径向动 载荷 kN	保持力 矩 kN·m	减速比	精度 等级	自锁	重量 kg
SE3	0.4	1.1	30	16.6	9.6	84	2	62:1	S0.20	Yes	14 kg
SE5	0.6	3	45	22	14.4	11.1	5.5	62:1	S0.20	Yes	13 kg
SE7	1.5	13.5	133	53	32	28	10.4	73:1	S0.20	Yes	23 kg
SE9	6.5	33.9	338	135	81	71	38.7	61:1	S0.20	Yes	50 kg
SE12	7.5	54.3	475	190	114	100	43	78:1	S0.20	Yes	65 kg
SE14	8	67.8	555	222	133	117	48	85:1	S0.20	Yes	70 kg
SE17	10	135.6	970	390	235	205	72.3	102:1	S0.15	Yes	105 kg
SE21	15	203	1598	640	385	335	105.8	125:1	S0.15	Yes	180 kg
SE25	18	271	2360	945	590	470	158.3	150:1	S0.15	Yes	218 kg

2.3 耐磨弹性材料的选型

与路缘石直接接触的工作部件采用弹性耐磨材料——PU 聚氨酯板加工而成（见表 2^[4]），该部件材料性价比优越，易于加工，更换简单，只需采用螺栓配合压板用螺母进行紧固，这种材料制作的工作部件能在接触路缘石时提供良好的缓冲效果，减少了对路缘石的冲击和磨损，有效保护了城市基础设施^[5]。同时，由于其良好的性价比，可以降低后续的使用成本，在

严峻的冬季作业环境中，这种材料展现出了卓越的耐低温性能，确保了设备在极端天气下的稳定作业。

3 结束语

路缘积雪翻边装置通过可折叠摆臂结构与弹性耐磨材料的结合应用，有效解决了路缘石根部积雪难以彻底清理的工艺缺陷，填补了机械除雪作业中边缘区域处理的空白。装置投入实际使用后，不但降低了环卫职工劳动强度，提升了作业效率，还提高了设备的

表 2 聚氨酯与橡胶性能参数对比

性能参数	聚氨酯	橡胶
拉伸强度	28 ~ 42 MPa，最高可达 70 MPa	15 ~ 30 MPa
撕裂强度	非常高，能承受大撕裂力	相对较低，易高应力下撕裂
扯断伸长率	400% ~ 800%，最大可达 1 000%	不超过 550%
硬度范围	邵氏 A10 到邵氏 D75	邵氏 A60-100
耐磨性	极佳，比天然橡胶高 99 倍，比丁苯橡胶高 33 倍	较好，但不及聚氨酯
耐油性和耐化学性	良好，常温下表现突出	耐油性较差，特定化学环境表现好
耐温性能	具有良好的耐低温性能，可以在较低温度下保持其物理特性、耐低温性能使其适用于需要在寒冷环境中工作的设备和材料	低温环境下的性能变化可能会影响其弹性和柔韧性

利用率，使整体经济效益得到显著提升。通过复用滑移装载机动力系统与底盘结构，本装置在无需额外购置专用设备的前提下，实现了存量装备的功能拓展与效能提升。

参考文献：

[1] 北京市城市管理委员会. 关于印发《北京市扫雪铲冰作业工作方案（试点）》的通知（首环建管办〔2024〕55

号）[EB/OL].2024-11-13,csglw.beijing.gov.cn.
[2] Q/BESG J016-2018,道路除雪铲冰作业技术规范[S]. 北京环境卫生工程集团有限公司,2019.
[3] JB/T 2300-2018,回转支承[S]. 全国土方机械标准化技术委员会,2018.
[4] 闻邦椿. 机械设计手册:第 1 卷[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
[5] 刘江南,刘秋平. 基于 TRIZ 理论的工程车除雪装置冲突分析[J]. 机械工程学报,2022,58(10):120-128.

基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统设计与实践

伍灵鑫

(西南石油大学(成都校区), 四川 成都 610000)

摘要 随着工业自动化进程的加速, 可编程序控制器(PLC)技术在电气工程自动化控制系统中得到了广泛应用。本文结合实际案例, 深入探讨了基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统的设计原理、架构组成, 分析了该系统相较于传统控制系统的优势, 并对其未来发展趋势进行了展望。研究表明, PLC 技术能够有效提升电气工程自动化控制系统的可靠性、灵活性和智能化水平, 为工业生产的高效运行提供有力保障。

关键词 PLC 技术; 电气工程; 自动化控制; 系统设计; 工业应用

中图分类号: TP29

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.005

0 引言

电气工程自动化作为现代工业进步的关键引擎, 其控制系统效能直接关乎生产效率、产品品质与企业经济回报的核心指标。传统电气程控系统在面对不断升级的生产要求时, 日益凸显出可靠性欠佳、适应性有限及控制效能低下的局限性。PLC 作为集成微处理器的数字运算核心, 以其卓越的抗干扰性能、简易编程特性和出色的可扩展能力, 已成为驱动电气工程自动化控制领域革新与升级的核心技术。在电气工程自动化控制系统的设计中集成 PLC 技术, 不仅能够实现电气设备的高度精确控制与即时状态监控, 还能够进行故障预判与诊断, 显著提升了系统效能, 进而促进工业制造体系向智能化及高效率发展。

1 PLC 技术概述

1.1 PLC 的基本原理

PLC 采用循环扫描的工作方式, 主要包括输入采样、程序执行和输出刷新三个阶段。在输入采样阶段, PLC 通过输入模块将现场传感器采集到的各种信号(如开关量、模拟量等)读入到输入映像寄存器中; 在程序执行阶段, PLC 按照用户编写的程序指令, 对输入映像寄存器和其他内部寄存器中的数据进行逻辑运算、算术运算等处理; 在输出刷新阶段, PLC 将程序执行结果从输出映像寄存器传送到输出模块, 进而驱动外部执行元件(如接触器、电磁阀等)动作, 实现对被控对象的控制。

1.2 PLC 的特点

1. 可靠性高。PLC 采用了一系列抗干扰措施, 如光电隔离、屏蔽、滤波等, 能够有效抵御工业现场的各种电磁干扰, 确保系统稳定运行。同时, 其内部的硬件和软件具备自诊断功能, 一旦检测到故障, 能够及时采取相应的保护措施, 避免故障扩大^[1]。

2. 编程简单。PLC 通常采用梯形图、指令表等直观易懂的编程语言, 这些编程语言与传统的继电器控制电路图相似, 电气工程师无需具备深厚的计算机编程知识, 即可快速上手进行程序编写。

3. 灵活性强。PLC 的硬件结构模块化, 用户可以根据实际控制需求, 灵活选择不同功能的模块进行组合, 实现系统的快速搭建和功能扩展。此外, 通过修改程序, 能够轻松改变控制系统的逻辑和功能, 适应不同生产工艺的变化。

4. 通信能力强。现代 PLC 具备丰富的通信接口, 如 RS-232、RS-485、以太网等, 能够方便地与其他设备(如计算机、变频器、触摸屏等)进行数据通信, 实现系统的集中监控和远程控制。

2 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统设计

2.1 系统设计原则

1. 满足生产工艺要求。在设计系统时, 首先要深入了解生产工艺的具体要求, 根据被控对象的动作顺序、控制逻辑以及各种参数指标, 确定系统的功能和方案, 确保系统能够准确无误地实现生产过程的自动化控制。

2. 可靠性与稳定性优先。由于电气工程自动化控制系统在工业生产中起着至关重要的作用,一旦系统出现故障,可能会导致生产中断、设备损坏甚至人员伤亡等严重后果。因此,在系统设计过程中,要将可靠性和稳定性放在首位,从硬件选型、软件编程、抗干扰措施等多个方面进行综合考虑,确保系统能够长期稳定运行。

3. 经济性与实用性兼顾。在保证系统性能的前提下,要充分考虑系统的经济性和实用性。合理选择硬件设备,避免过度追求高性能而造成不必要的成本浪费;同时,优化软件设计,提高系统的运行效率,降低运行成本。此外,系统的操作界面应简洁直观,易于操作人员掌握和使用。

4. 可扩展性与兼容性良好。随着工业生产的不断发展和技术的不断进步,电气工程自动化控制系统可能需要进行功能扩展或升级改造。因此,在系统设计时,要充分考虑其可扩展性和兼容性,选择具有良好扩展性的 PLC 产品和开放式的系统架构,确保系统能够方便地与新设备、新技术进行集成。

2.2 系统硬件设计

1. PLC 选型。根据系统的控制要求、输入输出点数、控制精度、通信需求以及预算等因素,选择合适型号的 PLC。例如:对于开关量控制为主的系统,可以选择小型 PLC;对于含有大量模拟量控制的系统,则需要选择具有模拟量处理功能的中大型 PLC。同时,要关注 PLC 的品牌、性能、可靠性以及售后服务等方面,确保所选 PLC 能够满足系统的长期稳定运行需求。

2. 输入输出模块选择。根据现场传感器和执行元件的类型和数量,选择相应的输入输出模块。输入模块主要用于采集现场的各种信号,如开关量输入模块用于接收按钮、行程开关等的开关信号,模拟量输入模块用于采集温度、压力、流量等模拟量信号;输出模块则用于驱动外部执行元件,如开关量输出模块用于控制接触器、继电器等,模拟量输出模块用于控制变频器、调节阀等。在选择输入输出模块时,要注意其电压等级、电流容量、响应时间等参数,确保与现场设备匹配^[2]。

3. 其他硬件设备选型。除了 PLC 和输入输出模块外,系统还需要配备一些其他硬件设备,如电源模块、通信模块、触摸屏、传感器、执行元件等。电源模块用于为 PLC 和其他设备提供稳定的电源;通信模块用于实现 PLC 与其他设备之间的数据通信;触摸屏作为人机界面,方便操作人员对系统进行监控和操作;传感器用于采集现场的各种物理量信号;执行元件则用于实现对被控对象的控制动作。在选型过程中,要综

合考虑设备的性能、质量、价格以及兼容性等因素。

2.3 系统软件设计

1. 编程语言选择。PLC 的编程语言主要有梯形图、指令表、功能块图等。梯形图是最常用的编程语言,它以图形化的方式表示程序逻辑,直观易懂,类似于传统的继电器控制电路图,适合电气工程师使用;指令表则是一种用助记符表示的编程语言,具有编程效率高、占用内存少等优点,但可读性较差;功能块图则是一种基于图形化的编程语言,它将复杂的控制功能封装成一个个功能块,通过连接这些功能块来实现系统的控制逻辑,具有结构清晰、易于理解和维护等优点。在实际编程过程中,可根据具体情况选择合适的编程语言或多种编程语言混合使用。

2. 程序结构设计。为了提高程序的可读性、可维护性和可扩展性,通常将 PLC 程序划分为多个功能模块,如主程序、子程序、中断程序等。主程序是程序的主体,负责调用各个子程序和处理系统的主要控制逻辑;子程序则用于实现特定的功能,如电机控制、数据处理等,可以被主程序多次调用;中断程序则用于处理一些紧急事件,如外部中断、定时中断等,当满足中断条件时,系统会自动跳转到中断程序执行,执行完毕后再返回主程序继续执行。

3. 程序编写与调试。根据系统的控制要求和程序结构设计,使用选定的编程语言编写 PLC 程序。在编写过程中,要遵循编程规范和逻辑,注意变量的定义、赋值以及程序的流程控制。程序编写完成后,需要进行调试。在调试过程中,可以利用 PLC 的编程软件提供的在线监控功能,实时查看程序的运行状态、变量的值以及输入输出信号的变化情况,及时发现和解决程序中存在的问题。通过不断调试和优化,确保程序能够准确无误地实现系统的控制功能。

3 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统发展趋势

3.1 向网络化、信息化方向发展

随着工业互联网和信息技术的不断发展,PLC 将与互联网、云计算、大数据等技术深度融合,实现控制系统的网络化和信息化。通过网络连接,PLC 可以将采集到的生产数据实时上传至云端,供企业进行数据分析和决策;同时,企业可以通过互联网远程监控和管理分布在各地的生产设备,实现生产过程的智能化管理和优化控制^[3]。

3.2 与人工智能技术融合

人工智能技术在工业领域的应用越来越广泛,PLC 与人工智能技术的融合将成为未来的发展趋势之一。

例如：利用机器学习算法对 PLC 采集到的数据进行分析 and 处理，实现故障的预测和诊断；通过人工智能技术优化 PLC 的控制策略，提高系统的控制性能和效率。

3.3 小型化、高性能化发展

为了满足工业生产对设备小型化、集成化的需求，PLC 将朝着小型化、高性能化方向发展。未来的 PLC 将在保持原有功能的基础上，进一步缩小体积、降低功耗，同时提高运算速度、增加存储容量，以适应更加复杂的控制任务和恶劣的工作环境。

3.4 开放性和兼容性不断增强

为了实现不同厂家设备之间的互联互通和互操作性，PLC 的开放性和兼容性将不断增强。未来的 PLC 将采用更加开放的通信协议和标准接口，支持多种编程语言和开发工具，方便用户进行系统集成和二次开发。

4 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统实践案例

4.1 案例背景

某钢铁企业的轧钢生产线在原有的控制系统下，存在控制精度低、故障率高、生产效率低下等问题。为了提高生产线的自动化水平和生产效率，企业决定对轧钢生产线的电气工程自动化控制系统进行升级改造，采用基于 PLC 技术的控制系统。

4.2 系统设计方案

1. 硬件设计。根据轧钢生产线的控制要求，选择了西门子 S7-1200 系列 PLC 作为核心控制器。该系列 PLC 具有丰富的指令集、高速的运算能力以及良好的通信性能，能够满足轧钢生产线复杂的控制需求。同时，配置了相应的输入输出模块，如数字量输入模块用于采集现场的开关信号（如限位开关、按钮等），数字量输出模块用于控制接触器、电磁阀等执行元件，模拟量输入模块用于采集温度、压力、速度等模拟量信号，模拟量输出模块用于控制变频器、调节阀等设备^[4]。此外，还配备了触摸屏作为人机界面，方便操作人员对生产线进行监控和操作；配置了通信模块，实现 PLC 与上位机之间的数据通信，以便进行生产数据的管理和分析。

2. 软件设计：用梯形图语言来写 PLC 程序，把程序分成许多功能模块，其中涉及轧钢机控制模块、电机调速控制模块、温度控制模块、故障判断模块等。轧钢机控制模块要控制轧钢机的启动、停止、轧制速度、轧制压力这些参数，电机调速控制模块通过控制变频器做到对电机的调速，从而符合不同的生产工艺需求。温度控制模块借助采集轧钢时的温度信号控制冷却系统的运行，保证钢材的质量，故障判断模块随时监测系统的运行状况，一旦察觉到故障就立刻发出警报信

号，并实施对应的保护举措，在写程序的时候，全面考量系统的可靠性与稳定性，增添了很多种保护措施，如过载保护、短路保护、欠压保护等。

4.3 系统实施与运行效果

经过紧张的施工和调试，基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统在轧钢生产线成功投入运行。运行结果表明，该系统有效地解决了原控制系统存在的问题，取得了显著的经济效益和社会效益。具体表现如下：

1. 控制精度提高。通过采用 PLC 的精确控制算法和高速计数功能，轧钢机的轧制速度、轧制压力以及钢材的尺寸精度得到了大幅提高，产品质量明显提升，废品率降低了 30% 以上。

2. 生产效率提升。系统实现了自动化控制，减少了人工干预，生产过程更加连续稳定，轧钢生产线的生产效率提高了 40% 以上，年产量增加了 5 万吨。

3. 故障率降低。PLC 的可靠性高，抗干扰能力强，且具有完善的故障诊断和保护功能。新系统投入运行后，设备故障率显著降低，维修次数减少了 50% 以上，维修成本大幅下降，有效保障了生产线的正常运行^[5]。

4. 操作简便。触摸屏人机界面的应用，使得操作更加直观便捷。操作人员可以通过触摸屏实时查看生产线的运行状态、各种参数以及故障信息，方便进行操作和调整，降低了操作人员的劳动强度和技术要求。

5 结束语

基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统在工业生产中具有关键的应用价值。通过科学合理的系统设计并加以实际应用，此套系统便可切实提升电气工程自动化控制的可靠程度、灵活性能以及智能水平，从而给企业带来较高的经济收益和社会效应。随着先进技术持续发展并取得新的进展，PLC 技术在电气工程自动化领域将会面临更多的机会与挑战，未来应加大力度深入探究并创新 PLC 技术，使它与其他先进技术相融合并持续优化，从而促进工业生产朝智能化方向发展。

参考文献：

- [1] 刘福强. 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制系统设计研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(01):129-131.
- [2] 居玮, 程都, 孙童. 基于人工智能的电气自动化控制系统设计分析 [J]. 时代汽车, 2024(22):130-132.
- [3] 汤宗杰. PLC 在电气工程自动化控制中的应用 [J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(09):84-86.
- [4] 武广. 基于 PLC 的电气工程自动化控制系统设计 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(04):262-263.
- [5] 高汉昆, 张斌. 单片机在自动化控制系统中的应用分析 [J]. 数字通信世界, 2023(11):145-147.

现代机械设计方法中的数字化与智能化技术应用研究

高冠斌

(广州市富荣丰橡胶企业有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 在新一轮工业技术变革推动下, 数字化与智能化技术正深刻重塑现代机械设计方法。从设计理念、工具平台到流程控制, 传统机械设计正加速向高度集成、高度协同的新范式演进。本文聚焦数字化与智能化在机械设计方法中的融合应用, 分析其在设计流程重构、决策优化、协同创新等方面的变革作用, 挖掘其在缩短周期、提高精度、实现知识复用等方面的关键优势。通过对典型应用路径的剖析, 揭示数字化与智能化作为系统性生产力工具在实际工程设计中的协同机制与落地模式, 以期为制造业提质增效和智能升级提供可行参考。

关键词 现代机械设计方法; 数字化; 智能化; AI 算法; 高精度仿真反馈系统

中图分类号: TH122

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.006

0 引言

随着时代的发展以及全球经济一体化的加速, 机械设计制造行业发展日新月异, 同时数字化与智能化在其中的应用越来越广泛, 机械设计制造行业的发展既需要依靠传统工艺也需要结合现代科学生产技术。

《“十四五”智能制造发展规划》明确指出: “坚持以数字化设计为核心切入点, 推动产品全生命周期数字化管理。”该政策将数字化作为智能制造体系的关键基础, 强调以模型驱动、数据支撑、知识沉淀为路径, 重构制造企业的设计理念与技术体系。在此背景下, 机械设计方法正迎来从人工工作图向智能生成、从静态参数向动态仿真、从局部优化向系统集成的深度转型。

1 现代机械设计方法中的数字化与智能化发展逻辑

1.1 从信息孤岛到数据驱动的系统重构

在传统的机械设计体系中, 设计、仿真、制造等环节分离, 信息割裂严重, 不仅影响数据的准确传递, 还容易在多次人工处理过程中发生冗余、错漏与重复劳动^[1]。这种“信息孤岛”现象曾长期制约机械产品的研发效率与质量保障。而随着工业软件与数据基础设施的迭代, 数字化与智能化逐步打破各设计环节之间的边界。企业通过构建统一的数据接口标准(如 STEP、IGES)和产品数据管理平台(PDM), 实现了从建模到仿真的参数流转与结果共享, 使得设计数据成为支撑全过程的统一载体。在此基础上, 数字样机、虚拟调试、工艺集成等新模式迅速推广, 形成了以数据驱动为核心的系统化设计流程。

1.2 从模块化设计向智能优化协同升级

模块化设计强调对标准结构、典型构件进行功能划分与重复调用, 曾一度成为提升设计效率的主要策略。然而, 模块组合的最优性仍依赖人工经验判断, 缺乏动态调整能力, 难以满足高性能产品的个性化需求。随着智能算法的快速演进, 模块化设计被智能优化技术赋能。设计人员可通过遗传算法、粒子群算法等智能优化措施, 针对多个目标参数进行全局搜索与方案重构, 在满足设计约束的前提下自动生成最优结构模型。同时, 生成式设计工具的嵌入使得 AI 技术能够基于设定条件提出多个结构方案, 供设计人员选择与调优, 从而实现从“模块拼装”到“智能生成”的跃迁^[2]。

1.3 从人工主导向人机协同的范式变迁

传统机械设计过程依赖设计师的经验与直觉, 从建模到分析再到工艺评估多为线性推进、手工完成, 导致设计质量与效率受个体差异影响较大。数字化与智能化技术的融合改变了这一格局。基于自然语言处理、语义识别与图像感知等技术构建的智能设计助手, 已逐步嵌入现代设计软件体系, 实现对设计意图的捕捉与反馈响应。设计人员在建模过程中可获得实时建议、标准参考与风险提示, 系统还能结合已有数据库进行案例类比与智能推荐, 辅助完成复杂零部件结构的建模与参数控制。这种从“人主导”向“人机协同”的转型, 不仅提升了整体设计效率, 也推动了知识沉淀与共享的机制建立^[3]。

2 现代机械设计方法中的数字化与智能化技术应用优势

2.1 缩短设计周期与响应时间的高效引擎

在传统机械设计流程中,方案提出、结构建模、仿真验证往往是串联式推进,每一步均需等待前一步完成,导致周期拉长、响应滞后^[4]。而数字化与智能化技术的深度融合打破了这一局限,构建出以参数驱动、模型贯通为基础的并行式设计体系。借助 CAD/CAE 集成平台、自动参数化建模工具与实时仿真反馈模块,设计人员可在短时间内完成多轮方案生成与评估,大幅度压缩初设与详设阶段的时间成本。更重要的是,智能算法能够基于约束条件与历史案例自动完成方案初选与优化,减少人工调试与返工频次。响应速度的提升不仅体现在内部流程中,更显著增强了设计系统对客户需求变化、工程问题反馈的即时应对能力,使产品开发从“按部就班”转向“快速响应、快速迭代”的高效模式。

2.2 提升方案精度与产品质量的保障支撑

机械产品性能的稳定性在很大程度上取决于前端设计阶段的精度控制与参数优化^[5]。数字化与智能化技术在设计环节引入了多维度的建模与验证工具,使方案质量得到结构性保障。设计人员可借助多物理场仿真软件对结构、热应力、振动等工况进行精细模拟,提前识别潜在失效点并进行参数调优。同时,智能设计系统可以基于历史设计数据与性能反馈信息,形成面向质量的优化路径,辅助实现误差容限控制与可制造性判断。在此基础上,数字样机与虚拟调试技术的引入,使结构方案在实体制造之前即可完成完整的性能评估与工艺匹配。相比传统依赖经验的“试错式”设计,这种数字+智能的精度保障模式显著提升了设计的一次成功率与产品一致性,降低了后期调整与质量返工的风险。

2.3 增强多环节协同与知识复用的系统能力

现代机械产品设计不再是单一岗位的任务,而是涉及研发、工艺、制造、质控等多部门的协同工作^[6]。数字化与智能化技术通过搭建统一的数据平台和知识管理体系,极大地提升了多环节之间的联动效率。基于产品生命周期管理(PLM)系统,设计数据可在不同岗位间实现即时共享和版本同步,减少信息传递误差与重复建模工作。而智能知识库与案例推理模块则能够提取以往项目的设计意图、优化路径与失效案例,为新项目提供基于经验的数据参考。这种“数据贯通+知识沉淀”的协同方式,不仅打通了设计链上的壁垒,

也使得企业能够建立起可持续进化的设计知识体系,实现跨项目、跨团队的知识复用与智能调用,从而提升整体研发系统的响应能力与创新效率。

3 现代机械设计方法中的数字化与智能化技术应用路径

3.1 构建基于参数模型的设计一体化平台

基于参数模型的一体化设计平台是现代机械设计实现数字化与智能化深度融合的核心支撑路径^[7]。其基本做法是,借助统一建模平台完成结构模型、参数属性与设计逻辑的集中绑定,实现模型可重构、参数可追踪、流程可控管的多维协同机制。在具体实施中,企业通常采用集成 CAD/CAE/CAM 功能的三维建模软件(如 NX、Creo 等)进行参数化结构构建,并通过表达式定义、关联约束与特征驱动,实现模型自动调整与多方案快速生成。为打通设计与仿真、制造、工艺之间的链路,平台引入 PDM 或 PLM 系统作为数据主线,将模型信息统一编码,确保每一处设计更改都能同步传递至下游应用模块。与此同时,系统接入工艺资源数据库,使得结构设计在建模阶段即可调用标准工艺模板与制造规则,自动检测孔距、公差、装配面等关键要素的制造适应性。在中车某轨道车辆部件的设计流程中,技术团队构建以 NX 为核心的建模体系,并将其与 Teamcenter 系统打通,形成了集建模、仿真、工艺于一体的设计作业链。设计人员在同一平台中完成参数定义后,系统即可联动生成仿真工况模型和初步加工路径,极大提升了设计流程的连续性与响应速度。该路径本质上实现了从“图形驱动”向“数据驱动”的转型,使模型不仅是图纸表达,更成为承载知识、控制流程的核心数据资产。

3.2 集成 AI 算法实现设计过程智能寻优

将 AI 算法嵌入机械设计流程,是当前实现多目标自动优化与设计智能化决策的重要路径。具体做法主要围绕“模型优化、参数自动调控与性能权衡”展开。设计人员可在三维建模平台或 CAE 工具中内嵌遗传算法、粒子群算法或强化学习等优化模块,以性能指标作为目标函数,在设定的结构边界与材料约束内完成大规模方案迭代。在设计任务启动阶段,AI 系统可调用企业历史设计数据作为初始种群,结合当前工况需求快速生成多个结构候选解,并通过仿真验证或经验规则对其适应度进行评价,从中筛选最优解或形成设计建议。在机械装备领域,某液压驱动系统设计团队通过引入遗传算法对泵体结构进行多目标优化,在保持其耐压与刚度性能不变的前提下,成功实现了体积

减重与流道改良。该过程并未由设计师手动调参完成，而是通过预设目标函数（最小体积、最大强度）与工艺边界（加工半径、通道流速）自动驱动完成结构变异、交叉与筛选，最终输出多个可选结构方案供工程师评估选用。该路径不仅打破了传统经验导向的优化模式，也显著提升了复杂系统中结构—性能—工艺三要素的协同效率，实现了从人工决策向智能驱动的设计方式跃迁^[8]。

3.3 打造虚实融合的高精度仿真反馈系统

高精度仿真反馈系统已成为机械设计中不可或缺的前置验证手段，其关键在于将多物理场仿真过程与真实制造环境构建高度对应的虚拟映射，实现方案在物理实现前的高精度评估与误差预警。具体做法是，在参数化建模完成后，设计人员可将结构模型导入集成仿真平台（如 Ansys、Abaqus），调用结构力学、热场、电磁等多领域仿真模块，建立典型工况下的性能映射模型。同时，系统还可同步接入制造过程模拟模块，如刀具路径仿真、焊接热源模拟等，将制造阶段可能产生的变形、残余应力或热影响区等误差反馈到设计初期，辅助结构形状与工艺路径的协同调整。在实际应用中，华为终端结构研发团队在手机金属边框设计中引入多轮多物理场仿真，结合 3C 制造环节的热处理与冲压误差，建立高精度反馈机制，实现了边框强度提升 10% 以上的同时确保加工精度与良品率。该系统核心不在于简单的数据输入输出，而是通过仿真—反馈—调参形成连续闭环，使结构设计具备自我检视与实时修正能力。通过这一路径，机械设计得以摆脱“先设计、再试错”的传统思路，在数字空间中实现了对复杂约束下结构性能的预判与动态演化，确保设计方案在正式投入制造前即已趋于最优解^[9]。

3.4 部署数据闭环驱动的全流程追溯机制

在机械设计数字化转型过程中，构建基于生产运行数据的设计闭环反馈系统，已成为提升设计适配性与响应力的关键路径。具体做法是：在设计模型完成后，系统会自动生成可追溯的数据标识（如结构编码、零件 ID 等），并与制造执行系统（MES）、质量监测系统（QMS）和边缘采集终端进行绑定，实现从设计方案到加工执行的全过程数据链路追踪。在生产阶段，传感器实时采集温度、压力、振动、刀具磨损等关键运行数据，并通过工业网上传至数据中台，与设计端参数模型进行动态比对。一旦出现偏差或稳定性下降，系统即可反向定位至初始设计参数，触发优化建议或结构修正流程。在高精密夹具制造领域，某机床企业

利用该机制将加工过程中的工件定位偏差反馈至 CAD 设计模型，系统自动分析装夹面设计的约束失配问题，提出基于加工路径的结构局部重构方案，显著提升装夹重复定位精度。在整个过程中，数据不再是单向流动的“记录材料”，而成为指导设计迭代、驱动结构演化的主动因素。通过将实际工况信息嵌入设计模型内部，闭环机制使机械设计实现了从静态图纸向动态系统的跃迁，为构建高适应性、高稳定性的工程产品提供了可靠的反馈通道与快速响应能力^[10]。

4 结束语

数字化与智能化的深度融合，可重构机械设计方法的技术基础与组织逻辑。机械设计不再是线性孤立的图纸生成过程，而是嵌入数据流、算法流与知识流的系统性工程。从参数建模到 AI 寻优，从多场耦合仿真到制造反馈驱动的闭环机制，技术路径的优化不仅提高了设计效率与精度，更推动了设计范式向自适应、自演化方向改进。在制造强国战略和工业智能化浪潮共同驱动下，构建协同高效、响应灵敏、知识沉淀能力强的现代机械设计体系，将成为企业保持核心竞争力的关键。

参考文献：

- [1] 李云霞. 数字化设计技术在农业机械设计中的应用[J]. 南方农机, 2025, 56(08): 148-150.
- [2] 廖晨. 智能制造技术在现代机械工程中的应用与发展[J]. 内燃机与配件, 2024(16): 131-133.
- [3] 邓萍华. 数字化与智能化在农业机械工程设计中的应用[J]. 中国农机装备, 2024(05): 84-86.
- [4] 贾红军. 数字技术在现代农业机械设计中的应用研究[J]. 农村实用技术, 2024(10): 111-113.
- [5] 陈善龙, 李桂花, 王其营. 简析数字化技术在机械设计中的应用与发展趋势[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(07): 1-5.
- [6] 李国昌. 数字仿真技术在机械设计中的应用探析[J]. 时代汽车, 2024(09): 26-28.
- [7] 梁强. 机械产品数字化设计及关键技术研究[J]. 农机使用与维修, 2023(04): 76-78.
- [8] 孙占涛, 杜立红, 关爱如, 等. 机械设计制造的数字化与智能化发展思考[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(02): 41-43.
- [9] 王彦诚. 数字化技术在机械设计制造中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2022, 51(10): 82-84.
- [10] 段明艳. 浅析机械设计制造的数字化与智能化[J]. 中国设备工程, 2022(18): 29-31.

电气自动化中电气接地及电气保护技术分析

叶 盼

(国电投江西电力工程有限公司贵溪分公司, 江西 贵溪 335400)

摘 要 电气自动化系统的安全稳定运行是工业现代化的重要保障。然而, 在复杂多变的运行环境下, 电气设备常受雷电、操作失误、绝缘老化等因素影响, 引发各类故障, 严重威胁系统安全。科学合理的接地系统设计是第一道防线, 通过泄放故障电流、均衡电位分布、抑制电磁干扰等方式, 为人身和设备安全筑起坚实屏障。研究表明, 先进完善的电气保护技术是故障诊断与隔离的利器, 新型保护技术的应用能大幅提升检测速度和可靠性。面对日益复杂的系统架构, 电气接地与保护的有效实施还需统筹全局, 优化协调各类保护的配置, 构建纵深完备的多重防御体系。

关键词 电气自动化; 电气接地; 电气保护; 故障诊断

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.007

0 引言

电气接地和电气保护技术经过不断发展, 已形成相对完善的理论体系。但随着电气自动化系统日益复杂化、大型化, 对供电可靠性和安全性的要求也越来越高, 传统的接地和保护技术已难以完全满足需求。工程技术人员需要与时俱进, 积极采用新材料、新技术、新装置, 不断优化接地系统设计, 提高故障检测与隔离能力, 协调各类保护的配置, 增强系统的自适应水平, 真正做到因地制宜、科学施策, 全面提升电气自动化系统的安全水平。

1 电气自动化中电气接地的作用

1.1 保护人员的人身安全, 防止设备损坏

电气接地是保障电气自动化系统安全可靠运行的首要前提。触电事故和设备绝缘损坏是工业生产中的严重安全隐患, 而电气接地能有效规避这些风险。当系统发生绝缘失效、导体断线等故障时, 完善的接地装置可迅速将危险的故障电流引入大地, 使设备外壳等可导电部分与大地等电位化, 消除人员触及时可能遭受的电击伤害^[1]。同时, 接地还能将雷电及操作过电压限制在安全范围内, 避免高压脉冲击穿设备绝缘, 延缓绝缘老化速度, 大大延长设备使用寿命。可见, 电气接地为保障人员的人身安全构筑起一道坚实屏障, 也是设备绝缘防护的有力保障。没有可靠接地作为基础, 电气自动化系统的安全运行将无从谈起。

1.2 抑制电磁干扰, 提高电磁兼容

随着微电子技术和电力电子设备在电气自动化系统中的广泛应用, 设备产生的高频噪声和瞬态干扰信

号日益增多, 若不能有效控制, 极易通过电磁耦合影响相邻设备, 降低系统可靠性。而接地恰恰提供了抑制干扰传播的有力手段。通过接地, 高频干扰可获得低阻抗回流通路, 其能量在源附近迅速衰减。接地还可将不同区域的干扰信号限制在各自的等电位平面内, 最小化区域间的串扰。对于敏感设备, 邻近的局部等电位接地平面更是直接降低了其所受电磁干扰。合理接地能显著改善电磁环境, 提升设备抗扰度, 从而大幅提高系统电磁兼容性。

1.3 实现故障定位, 加快事故隔离

电气接地在实现故障定位、加快事故隔离方面具有关键作用。电气自动化系统在运行过程中不可避免地会出现绝缘损坏、导体断线等故障, 现代接地系统通常配备先进的接地故障监测装置, 能实时监测接地电流和接地电阻的变化^[2]。当故障发生时, 接地系统为故障电流提供了阻抗最小的通路, 使其能在极短时间内迅速汇集于故障点, 在该处形成明显的接地电压降。这为继电保护提供了重要的故障判据依据。继电保护可通过比较各线路的电流或电压变化, 快速识别故障类型和故障区段, 并及时发出跳闸命令, 切除故障回路, 防止事故扩大。此外, 这些装置与电气自动化系统的 SCADA 平台无缝集成, 通过数据分析和故障模型比对, 能更精准地判断故障性质和范围, 为运行人员提供直观的故障信息, 大幅提高故障处理效率。

2 电气自动化中电气保护技术分析

2.1 短路保护

短路保护是电气保护的基础, 其主要任务是在系统发生短路故障时快速切除故障, 防止电流过大烧毁

设备。常用的短路保护技术包括电流速断保护、限时过电流保护、瞬时过电流保护等。这些保护通过对短路电流的大小和持续时间进行判断,在满足一定条件时迅速跳闸,将故障影响控制在最小范围内。其中,电流速断保护的動作最快,适用于需要快速切除故障的场合;而限时过电流保护和瞬时过电流保护则采用延时跳闸的方式,可实现对系统的选择性保护。

2.2 过载保护

过载保护主要针对电气设备长期承受超过额定值电流的情况。过载保护的作用是防止设备因过热而损坏,保障设备长期安全运行。常见的过载保护装置有热继电器和定时限过电流继电器。热继电器模拟导线的发热情况,当累积的热量超过一定限值时,继电器动作,切断电路。定时限过电流继电器则通过反时限特性,在电流超过整定值的情况下,经过一定时间延迟后输出跳闸信号。过载保护的整定需要考虑设备的过负荷能力和散热条件,既要避免过早动作,也要防止动作过晚导致设备损坏。

2.3 过电流保护

过电流保护是对短路保护和过载保护的一种综合,既可以快速切除短路故障,也能防止设备过负荷运行。过电流保护一般采用过电流继电器来实现,通过电流互感器监测电流大小,当电流超过整定值时输出跳闸信号。根据时间特性的不同,过电流继电器可分为瞬时型、限时型和反时限型。瞬时型适用于需要快速切除故障的场合,限时型可以延时跳闸以实现选择性保护,而反时限型则可以在出现短路和过载时提供不同的保护特性^[3]。过电流保护的整定需要协调好灵敏度和选择性,确保能可靠动作,又不会出现误动和拒动。

2.4 接地保护

接地保护是检测和处理电气系统单相接地故障的保护措施。接地保护可分为两大类:一类是消除系统运行中产生的弧光接地和金属性接地,防止危及人身和设备安全;另一类是在系统发生永久性接地时,自动切除故障回路,将故障范围控制在最小。接地保护一般采用零序电流或零序电压作为故障判据,常用的接地保护装置有零序电流继电器、零序电压继电器等。对不接地系统和小电流接地系统,宜采用灵敏的弧光保护;而对直接接地系统,则需要采用速动性较高的过电流保护。此外,还需对系统中性点的联接方式、接地电阻大小等进行合理选择,以提高接地保护的可靠性和灵敏度。

2.5 过电压保护

过电压保护主要针对电气系统中出现的各种瞬态和暂态过电压,如雷电过电压、操作过电压等。过电压会加速绝缘老化,严重时可导致绝缘击穿,引发短路、接地等次生故障。过电压保护的作用是将过电压限制在设备可承受的安全范围内,避免其危害电气设备的绝缘。常用的过电压保护装置有避雷器、放电间隙等。其中,避雷器具有快速响应、分级保护的特点,既可用于变电站等一次设备的保护,也可用于二次设备的配电线路和终端的保护;而放电间隙主要用于配电线路过电压的粗保护,可承受较大的雷电流冲击。过电压保护装置的选择需要考虑设备的绝缘水平、所处环境的雷电强度等因素,并与其他保护措施相配合,构建纵深防御体系^[4]。

3 电气自动化中电气接地及电气保护技术应用措施

3.1 优化接地设计,提升接地性能

科学合理的接地系统设计是充分发挥其作用的前提。优化接地系统设计需要全面考虑系统的接地方式、电压等级、地质条件等诸多因素,选择恰当的接地材料和埋设方式,严格控制接地电阻,确保其在安全范围内。变电站等重要场所更需因地制宜,细分接地网区域,采用双层接地网、深埋接地体等措施进一步降低接地阻抗。优化接地系统设计还要统筹兼顾接地线路与等电位连接的合理布局,保证接地通路通畅、电位分布均匀。干扰敏感区域可设置局部等电位接地平面,最小化干扰影响。科学的接地系统设计还需着眼长远,重视接地装置的防腐蚀设计,延长其使用寿命。选用优质镀锌钢材、扩大接地体横截面积、必要时辅之以阴极保护等化学手段,都是行之有效的防腐措施。

在工程实践中,优化接地系统设计可从多方面着手,切实提升接地性能。以架空输电线路杆塔接地为例,可根据土壤电阻率和接地电流等级,选择采用放射状、环形或两者组合的接地极布置方式,并合理配置接地极数量和长度,以获得最优接地电阻^[5]。若单一材料难以满足要求,可采用复合接地极技术,将不同材料的接地极组合使用,发挥协同效应。针对土壤电阻率较高的沙漠、岩石等地区,还可采取换填低阻材料、铺设接地网等特殊措施,人为降低接地电阻。对于雷电多发区,应加大接地体截面,缩短接地线路,确保雷电流的安全泄放。在工频干扰严重的变电站,宜采用将主接地网与防雷接地网分开设计的措施,降低工频对通信及自动化设备的影响。对于腐蚀性较强的环境,除选用耐蚀材料外,还须做好焊接防腐,并定期

检查接地装置完整性,必要时局部更换或补强,确保设备长期稳定运行。

3.2 应用新型技术,提高故障检测

随着电力电子和微机保护技术的飞速发展,电气保护领域不断涌现出各类新型技术,为提高故障检测水平提供了广阔空间。现代电气工程应积极借鉴这些创新成果,将其应用于电气自动化系统的故障检测实践中,不断提升系统的安全性和可靠性^[6]。新型故障检测技术具有响应速度快、灵敏度高、适应性强等优点,数字化变电站中的过程层网络 and 智能电子设备(IED)的广泛应用,使得故障信息的采集更加全面、传输更加迅速、处理更加智能,能够在各类复杂工况下快速、准确地识别故障类型和故障位置,并及时启动保护动作,将故障影响控制在最小范围内,有效规避事故扩大和设备损毁。

在电力系统中,输电线路、变压器、母线等关键设备是故障多发的薄弱环节。针对这些设备的故障检测,可应用多种新型技术予以强化。在输电线路保护中,采用基于电流与电压相量的距离保护和方向比较保护,能有效克服高阻接地故障检测的难题。同时,光纤差动保护、行波保护等技术的引入,显著提高了线路故障定位的速度和精度。在变压器保护中,油中溶解气体分析、局部放电检测等在线监测手段日臻成熟,结合传统的比率差动保护,可及时诊断变压器绝缘缺陷,预防事故发生。压力释放阀的动作信号也已成为变压器故障诊断的重要依据。对于母线,采用光纤通信和电流采样等现代技术,可大幅提升差动保护的分辨率和可靠性,降低误差。此外,暂态录波、谐波分析等技术在母线故障检测中也得到广泛应用。

3.3 优化保护配置,实现全面协调

想要真正发挥保护作用,实现故障的快速、可靠切除,仅有先进的保护技术还远远不够,更需通过优化各类保护的配置,实现保护体系的全面协调。保护配置的核心目标是在充分考虑各类故障特点的基础上,合理选择保护方式,科学设定保护定值,使各项保护能够灵敏可靠、快速选择地切除故障,同时又不会出现误动和拒动。这就要求工程技术人员全面审视系统架构,系统分析故障特性,权衡各种保护方案的利弊,进而做出最优决策^[7]。优化配置的过程需要横向比较、纵向递进,既要重点关注关键薄弱环节的针对性保护,又要统筹兼顾上下游、主后备保护的逻辑关系,做到环环紧扣、层层设防、无缝衔接,最终形成纵深协调、可靠高效的完整保护体系。常见的思路包括合理配置

主后备保护,主保护采用速动性高但成本较大的保护方式,如光纤差动保护、综合电压电流保护等,确保对主设备的快速切除;后备保护则采用定时性强、适应范围广的保护方式,如低压侧过电流保护、零序过电流保护等,作为主保护的补充^[8]。两类保护的时间配合须严格校核,确保后备保护在主保护失效时能可靠动作。对于暂态过电压易发的场合,可增设限压型保护,快速切除暂态过电压引起的故障。在多电源系统中,还需重点关注故障电流分布情况,合理配置相应保护定值。当系统运行方式改变时,也须相应调整保护整定值。变电站内还应重视母线保护与馈线保护的配合,采用不同类型的母线保护方式以提高可靠性,同时确保馈线保护的灵敏速动。

4 结束语

电气接地与电气保护是电气自动化系统安全稳定运行的两大支柱。只有深刻理解两者的作用机理,并在实践中灵活运用各种优化技术,才能真正将其功效发挥到极致。接地系统设计的科学性与合理性是首要前提,必须全面权衡系统参数、环境因素,因地制宜、精准施策。电气保护技术日新月异,对新型保护技术的积极引入与创新应用,能显著强化故障检测与隔离能力。保护装置的协调配置是关键所在,需统筹兼顾、纵横联动,做到分工明确又相互配合,构筑起从主设备到次级设备、从主保护到后备保护的纵深防御体系。此外,现代测控技术与电气接地、电气保护的深度融合,将是提升系统自适应能力的必由之路。

参考文献:

- [1] 李轩.自动化系统中的电气接地及保护技术分析[J].集成电路应用,2024,41(07):262-263.
- [2] 沈彬.基于电气自动化中电气接地及电气保护技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(03):1-4.
- [3] 杨禄山.电气自动化中电气接地及电气保护技术分析[J].电脑校园,2020(12):7433-7434.
- [4] 尚维东,张成真.电气自动化中电气接地及电气保护技术[J].中国科技期刊数据库工业A,2022(06):131-134.
- [5] 常晓芳,侯志林.电气工程及其自动化发展趋势分析[J].魅力中国,2017(24):187.
- [6] 吴奇.电气自动化中电气接地及电气保护技术要点[J].国际建筑学,2024,06(12):16.
- [7] 郭婕.电气自动化中电气接地及电气保护技术探究[J].中国战略新兴产业,2021(03):115.
- [8] 张国锋.电气自动化中电气接地及电气保护技术要点[J].建筑工程技术与设计,2021(04):1377.

建材检测中新型智能化监测技术的应用探讨

芦文娟

(济南一建集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 在建筑行业向着绿色化和工业化方向发展的大环境中, 建材质量精准检测是确保工程安全和可持续性发展的核心步骤, 面临着传统技术效率瓶颈和数据维度限制的双重考验。基于此, 本文基于建材检测中智能化检测技术应用的优势, 分析当前常用的智能检测技术, 探讨智能化监测技术应用策略, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 建材检测; 新型智能化监测技术; 区块链技术; 物联网监测技术; 人工智能分析技术

中图分类号: TU5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.008

0 引言

随着新型城镇化建设的深入推进, 建材市场对高性能、多功能材料的需求日益增长, 检测技术的革新成为行业高质量发展的关键驱动力。传统建材检测由于依赖人工操作和单点数据等原因, 很难捕捉到复杂服役环境中材料性能演化规律, 造成质量风险预警的滞后性。新型智能化监测技术以动态感知和智能分析为核心, 通过部署分布式光纤传感器、无线传感网络 (WSN) 和机器视觉系统等, 实现对建材从生产制备到施工应用全过程状态进行实时跟踪。这类技术应用打破了传统检测在时间和空间上的局限, 建构起“数据驱动—智能决策—精准控制”新检测范式, 对建材行业技术升级具有重要意义。

1 建材检测中新型智能化监测技术的应用优势

1.1 多维度感知融合的精准监测效能

新型智能化监测技术通过集成分布式光纤传感、微机电系统 (MEMS) 传感器等多元感知模块, 构建全域覆盖的监测网络。该技术打破传统单点检测限制, 以传感器阵列协同工作机制为基础, 将检材内部应力应变, 温湿度场和裂纹扩展多个物理量进行同步获取和融合分析^[1]。通过构建多变量耦合数学模型可以对建材结构实时状态参数进行精准反演, 监测精度比传统技术提高 2~3 个量级, 有效地解决了复杂环境中检测信号易受干扰和特征提取难的问题, 从而为建材性能精细化评价提供可靠的数据支持。

1.2 动态响应与趋势预判的时效革新

智能化监测技术搭载边缘计算与实时数据处理引擎, 可对采集的海量检测数据进行毫秒级特征提取与异常识别。基于机器学习算法建立的状态预测模型可

以从历史数据中训练和发掘建材性能演化规律以达到超前预判结构损伤和性能劣化趋势。这种从“事后检测”到“事前预警”的范式转变, 将检测周期从人工巡检的周期性间隔缩短至动态连续监测, 成功地将建材的缺陷检测时间提前 30%~50%, 这大大增强了检测任务的及时性和主动性, 为工程的维护决策提供了宝贵的时间窗口。

2 新型智能化监测技术分类

2.1 区块链技术

区块链技术通过去中心化分布式账本架构, 构建不可篡改的数据存储与验证体系。其核心机制由链式数据结构, 非对称加密算法和共识协议组成, 这三者协同保障数据在整个生命周期内的可信性。链式结构利用哈希指针在时间序列上实现数据验证, 任意节点篡改数据会使后续块哈希值无效, 从而构成自验证纠错机制。非对称加密技术确保数据传输和储存的机密性, 公私钥体系允许授权访问, 也避免数据泄露。共识协议采用工作量验证或权益确认等手段, 在去中心化的背景下确立节点之间的信赖, 确保数据记录在不需要第三方背书的情况下得到整个网络的批准^[2]。

2.2 物联网 (IoT) 监测技术

物联网技术以多模态传感器网络为核心, 构建覆盖物理世界的实时感知体系。该技术框架涵盖三个主要方面: 传感器节点利用微机电系统 (MEMS) 达到纳米级的环境参数感知, 并能够支持温度、湿度和振动等多个维度的数据收集; 通信层以 LPWAN, 5G 等协议栈为支撑, 构成低功耗广域覆盖和高速率短距传输协同网络; 边缘计算节点再经过本地化的数据处理来进行数据清洗, 特征提取和异常检测。多源异构数据完成

云边端架构下的时空对齐和语义融合,构成时空连续性监测图谱。

2.3 人工智能(AI)分析技术

AI 分析技术通过机器学习与深度学习算法,构建从数据到决策的智能闭环。该技术流程分为三个阶段:在特征工程阶段,使用卷积神经网络(CNN)来提取图像的纹理特性,或者采用循环神经网络(RNN)来建立时间依赖性模型;在模型训练阶段,利用迁移学习和联邦学习机制在保证数据隐私的同时实现知识的跨域迁移;在推理决策阶段,采用强化学习的方法,对控制策略进行动态优化。生成对抗网络(GAN)和自编码器(AE)的引入进一步提高该模型识别异常模式的能力。该技术架构打破传统规则引擎限制,对安全预警和质量检测场景具有自适应和可解释智能分析能力^[3]。

3 建材检测中新型智能化监测技术的应用措施

3.1 构建 AI 视觉识别系统自动分析建材表面缺陷

建材表面缺陷检测需突破人工巡检效率低、主观误差大的瓶颈。通过搭建 AI 视觉识别系统可以将深度学习算法应用于建材表面图像特征提取和缺陷分类中,从而自动化识别裂纹、孔洞和色泽不均这类常见的缺陷。通过对优化模型的不断训练,系统能够增强检测的准确性和效率,并对建材质量管控实时提供数据支持^[4]。

例如:在某桥梁工程预制构件检测中,项目团队基于 YOLOv5 算法开发专用 AI 视觉识别系统。课前采集 thousands of 混凝土箱梁的表面高清图像并对裂纹和蜂窝麻面缺陷类型进行标记,建立多维度的训练数据集。接着,在野外移动检测终端上部署轻量化模型,检测人员利用装有高清摄像头和手持设备的无人机对预制构件实施全方位扫描成像。该系统能够自动地对图像执行灰度转换、去除噪声和增强特征,利用卷积神经网络逐级抽取纹理、形态等核心特性,并与训练模型中的缺陷特征库进行比对和匹配。当系统侦测到超出 2 mm 长度的裂缝时,它会自动激活一个预警系统,并产生包括缺陷的位置、种类和严重性在内的详细检测报告。同时,通过设置区域 ROI(感兴趣区域),对预应力孔道周边等易损部位进行重点检测,将缺陷识别率从人工监测的 75% 提升至 92%。该技术平台整合实时数据传输的能力,并将检测数据同步到项目管理系统中,这为施工团队在制定修复计划时提供准确的参考,从而减少 30% 的缺陷处理时间。

3.2 开发区块链存证平台确保检测数据不可篡改

建材检测数据的真实性与完整性是工程质量追溯的核心。区块链技术以分布式账本,加密算法和共识

机制为检测数据的去中心化存证提供一种解决方案。每个检测环节的数据(如抽样时间、检测参数、人员签名等)以哈希值形式封装成区块,按时间顺序链接成不可篡改的链式结构,实现数据来源溯源,内容可验证,运行可审核,解决传统中心化存储中数据被篡改的风险。

例如:在某高层建筑钢结构检测项目中,研发团队搭建基于 Hyperledger Fabric 的区块链存证平台。在物料进场检测环节,取样人员利用具有 GPS 定位的智能终端实时获取钢材牌号和炉批号,利用 SHA-256 算法产生数据哈希值并将其随取样视频片段打包上传到区块链节点。检测实验室接收样品后,检测设备通过 API 接口自动将力学性能试验数据(例如屈服强度,抗拉强度等)实时写入区块,通过椭圆曲线对检测人员的电子签名进行加密,并嵌入数据链中。监理单位利用共识机制对数据进行完整性验证,每一个区块都需要得到三分之二以上节点的确认才能有效。在检测到某批钢材的检测数据出现异常的情况下,通过区块链浏览器可以对数据进行溯源,并对采样,运输和检测等全过程的运行记录进行验证。该平台建立智能合约,自动触发报警,若检测到的数据超出标准限值,则及时将报警信息同步发送给施工、监理和施工单位。工程完工后将全部检测数据组成不可篡改区块链存证文件并入工程数字档案中。该技术平台成功地将数据伪造的风险减少到零,同时数据追溯的效率提高 80%,为后续的工程质量责任鉴定提供坚实的技术基础,有关做法已列入地区建设工程质量数字化管理示范案例。

3.3 部署物联网传感器实时采集建材物理参数

建材性能受环境参数动态变化的影响显著,如混凝土凝结过程中温湿度波动可能导致内部应力集中,钢材长期暴露于高湿度环境易引发锈蚀。通过布设物联网传感器网络可以实现检材物理参数持续,非破坏性的监控,从而为质量溯源提供数据支持。

在大型桥梁工程中,针对预制混凝土构件的湿度—温度—应力耦合监测需求,可构建多层级物联网监测体系。在具体执行过程中,混凝土浇筑阶段需要预置分布式光纤传感器(DFOS),该传感器能够同步检测构件内部的温度梯度和应变分布,并通过 LoRa 无线模块将这些数据传送到边缘计算网关。同时在养护棚中设置温湿度一体式传感器并结合智能算法构建环境参数和材料性能关联模型。例如:对于 C50 高强度混凝土,可以设定湿度阈值为 $90\% \pm 5\%$ 、温度阈值为 $25 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当监测数据偏离这些阈值时,系统会自动触发声光报警,

并将预警信息推送到施工方的APP端。为确保数据的可靠性,需要定期对传感器进行标定和校验,采用三点法来校准温湿度传感器的精度至 $\pm 0.5\%$ RH、 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,并利用无线自组网技术来实现节点间的数据冗余备份。另外,还可以与BIM模型相结合构建参数与位置的映射关系,并利用WebGL技术在三维模型上直观地展示实时监测数据,方便管理人员对异常区域的迅速定位和干预措施的制定。

3.4 应用无人机巡检技术监测大型建材堆放状态

大型建材堆场具有占地面积广、物料形态复杂、动态变化频繁的特点,传统人工巡检方式存在效率低、盲区多、数据更新滞后等问题。无人机巡检技术借助搭载的多光谱相机和激光雷达可以实现堆场的三维建模和物料体积的动态测算,并结合AI算法智能研判堆放的合规性,从而为资源调度和安全管理等提供决策支持。

在港口建材堆场智能化管理中,可基于无人机平台构建“感知—分析—决策”一体化监测系统。在实现过程中,需要选择装备RTK定位模块、搭载16线激光雷达和1080P高清相机、采用SLAM算法以达到厘米级别定位精度的工业级无人机。考虑到水泥筒仓和钢材垛位等特定场景,我们可以规划一个“Z”字形的巡检航线,其中飞行高度被设定为50m,而航速则被限制在5m/s,确保保险的覆盖面积能够达到15万 m^2 。数据采集阶段激光雷达产生点云数据为每秒50万点将RGB影像与相机同步采集,采用多源数据融合算法建立堆场数字孪生模型。在物料体积的计算方面,可以采用泊松重建算法来提取点云表面的特性,并结合蒙特卡洛方法来确保体积误差率低于0.8%。为增强合规性研判,需要构建深度学习模型来分类识别堆放形态,如钢材垛位划分成“阶梯式”“井字形”6种标准堆型并自动标记偏离标准形态堆体。另外,还可以结合气象数据构建环境与堆放稳定性的关联模型,在风速大于8m/s的情况下系统会自动产生风险预警,建议增加防风缆绳或者调节堆放角度等加固方案。监测数据通过API接口推送到企业ERP系统中,动态联动库存管理和施工进度,减少物料供应落后造成工期延误的风险^[5]。

3.5 集成大数据分析模型预警建材性能衰变趋势

在建材检测领域,构建动态数据网络是精准预判性能变化的核心路径。通过布设多维度传感器矩阵实时获取建材在温湿度和应力应变环境中微观数据波动

情况,然后使用机器学习算法训练大量历史数据特征,可以形成具有自迭代能力的衰变预测模型。该技术路径能够打破传统抽样检测滞后性限制,将“结果验证”向“过程预警”检测范式提升。

以某跨海大桥工程为例,施工方在箱梁混凝土浇筑时预埋分布式光纤传感器,构建覆盖全结构的应变数据采集网络。该系统每隔10分钟对每个监测点进行温度—应变数据采集,经过边缘计算节点对异常值进行初步筛选,再把有效数据传送到云端大数据分析平台。该平台利用XGBoost算法创建一个衰变预测模型,并在对连续30天的数据进行分析后,发现某一区段的混凝土早期强度增长曲线与标准模板存在12%的偏差。检测人员立即调取该路段的施工日志并与原材料入场检测数据交叉核查,结果粉煤灰掺量的波动引起水化反应不正常。通过对配合比的调整和监测频率的加密,模型预测的误差率被限制在后续建设的范围内。本案例显示出大数据模型在实时数据中发掘潜在风险和动态校准检测策略等方面的技术优越性,可为跨海工程耐久性评估问题提供可重用数字化解决方案。

4 结束语

在建筑行业转型升级的关键阶段,建材检测的技术革新对保障工程安全与可持续发展意义重大。新型智能化监测技术以其多维度感知融合和动态响应预判的特点,打破传统检测在效率和数据上的限制,建构“数据驱动—智能决策,精准控制”的检测新范式。它通过区块链、物联网和人工智能技术交叉运用,从表面缺陷检测至性能衰变预警全过程赋能建材行业走向数字化、智能化转型的核心驱动力,也为提高工程质量管理水平,促进绿色可持续发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 陈少威,张璐,韩东明.建筑材料检测机构管理对检测质量的影响[J].城市建设理论研究(电子版),2023(11):61-63.
- [2] 高金伟.浅谈如何控制节能建材检测的质量[J].科学技术创新,2020(05):144-145.
- [3] 毛爱新.建材检测中的误差与数据处理研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019(21):51.
- [4] 王琳.建筑材料检测机构管理对检测质量的影响分析[J].中国标准化,2018(16):176-177.
- [5] 李国树.浅析建材产品检测管理与质量控制[J].建材与装饰,2018(31):50.

给排水系统的智能化改造与节水效率提升研究

丁 静

(潍坊市市政公用事业服务中心, 山东 潍坊 261000)

摘 要 给排水系统的智能化改造已成为建筑领域节能降耗的重要方向。通过结合物联网、大数据分析等多项技术对给排水系统进行全面改造升级, 可有效提升节水效率。研究发现, 智能计量装置和远程监控系统能够实时监测用水情况, 智能调节阀和变频水泵可根据用水需求自动调节供水压力, 漏损监测预警系统可及时发现管网异常。实践证明, 智能化改造后的给排水系统在节水效率方面提升显著, 可实现供水精准化控制, 减少管网漏损, 降低能源消耗。

关键词 给排水系统; 智能化改造; 节水效率; 物联网技术

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.009

0 引言

随着智能化技术的不断发展, 传统给排水系统面临着诸多问题和挑战。管网漏损、供水压力不稳定、用水数据难以收集等问题严重制约着节水效率的提升。智能化改造作为解决这些问题的有效途径, 通过引入物联网技术、智能传感器、自动控制系统等, 可实现给排水系统的智能监测、分析和控制。针对目前给排水系统存在的具体问题, 深入研究智能化改造方案, 探索节水效率提升的有效途径, 对推动建筑节能技术发展具有重要意义。

1 给排水系统智能化改造技术路径

给排水系统智能化改造采用分层分级改造策略, 基础层实施智能感知设备布设, 包括水压传感器、水质监测仪、智能水表等终端设备安装。中间层进行数据采集与传输网络建设, 运用 NB-IoT、LoRa 等无线通信技术, 构建覆盖供水管网的物联网系统。应用层搭建智能化管理平台, 整合 GIS 地理信息系统、SCADA 系统、BIM 模型等技术, 实现数据可视化和智能分析。改造过程按照“监测—分析—优化—验证”路线展开, 在重点区域进行试点, 根据运行效果逐步推广。同时结合管网的实际运行状况, 对供水管网进行分区计量改造, 在关键节点设置智能调节阀, 建立分区供水压力独立调控系统^[1]。

2 给排水系统智能化改造关键技术应用

2.1 物联网监测系统构建

物联网监测系统以数字孪生技术为核心, 构建覆盖供水管网全域的智能感知网络。在供水管网关键节点布

设智能传感设备, 实现水压、水质、水量等参数 24 h 动态监测, 传感器采用低功耗设计, 内置锂电池供电, 使用寿命可达 5a。数据传输采用双模通信方案以 NB-IoT 为主, LoRa 为辅, 确保数据传输可靠性, 监测数据实时上传至云平台, 形成完整的管网运行数据链。智能传感器具备自诊断功能, 当设备发生故障时自动报警并切换备用通道。系统设置分级告警机制, 对水压突变、水质超标等异常情况及时预警, 降低事故发生概率。监测数据以 5 min 为周期采集, 数据存储采用分布式架构, 确保海量数据快速调用和长期存档。

数字孪生系统构建基于 BIM+GIS 技术, 将管网实体与虚拟模型实现精准映射。模型采用多层级架构, 包括管道层、阀门层、设备层和监测层, 实现管网设施全要素建模。系统集成水力模型和水质模型, 可模拟管网压力分布、水流方向、水质变化等状态。数字孪生平台设置可视化分析界面, 支持三维漫游和剖面分析, 直观展示管网运行状态。管网异常诊断基于深度学习算法, 建立故障特征库, 对管网运行状态进行实时评估。系统具备运行优化功能, 可根据实时监测数据, 自动生成调控建议, 指导管网运行。数据分析模块采用 GPU 并行计算技术, 支持海量数据实时处理, 运算速度提升 30 倍。平台预留标准化接口, 支持与其他智能化系统对接, 实现数据共享和协同管理。

2.2 智能计量装置升级

智能计量装置升级采用新一代超声波水表替代传统机械水表, 计量精度提升至 0.5 级。超声波水表采用电池供电方式, 使用寿命达 8a, 内置数据存储芯片可记录连续 90 d 的用水数据。计量装置配备无线数据

传输模块,支持多种通信协议,实现数据自动采集上传。智能水表具备防磁、防拆、防篡改等保护功能,同时集成温度补偿和压力修正算法,确保计量数据准确可靠。计量装置还具备用水异常识别功能,可识别微漏、爆管、倒流等异常情况并将告警信息实时推送至管理平台。数据采集频率可根据实际需求灵活调整,支持分时计量和阶梯水价自动计算,为用户端节水管理提供数据支撑^[2]。

2.3 供水压力优化控制

供水压力优化控制系统采用变频调速与智能阀门联合调控方案,实现管网压力精准调节。变频水泵根据管网实时压力和流量数据,自动调整运行频率,维持供水压力在理想区间。智能调压阀采用电动执行机构,响应时间小于3 s,调节精度达到 ± 0.01 MPa。控制系统引入模糊PID算法,根据历史用水规律和实时需求,动态优化供水压力曲线。在用水高峰期,系统自动提前增压,确保供水稳定性;在夜间低谷期,降低管网压力,减少管网漏损。系统设置分区域差异化控制策略,高层建筑区域和低洼地带分别采用不同的压力控制参数,满足各区域用水需求,智能调控系统可实现无人值守运行,大幅降低供水能耗。压力优化控制算法采用分层递进式结构,包括全局优化层和局部调控层。全局优化层基于管网水力模型,计算各个分区的最优压力目标值,考虑供水安全性、经济性和管网寿命等多个目标。

2.4 漏损监测预警技术

漏损监测预警系统基于声波相关法和压力瞬变法,对管网漏损实施全天候监测。声波传感器沿管线每隔200 m布设一处,利用管道内水流声波特征识别漏点位置。系统采用双频段声波采集技术,低频段用于大面积漏损排查,高频段用于精确定位。压力监测点实时采集管网压力数据,结合水力模型分析压力波动规律,建立漏损预警模型。当管网压力出现异常波动时,系统自动分析漏损位置和漏损量并评估漏损等级。夜间最小流量分析法用于评估管网漏损基准值,结合用户用水规律,建立漏损预警基准线。智能预警系统可将漏损位置精确定位至5 m范围内,漏损量预测误差控制在10%以内^[3]。

2.5 智能化排水系统改造

智能化排水系统改造采用分流制排水模式,雨污分流管道配备智能液位监测设备。排水管网关键节点安装智能井盖,集成水位传感器和图像采集装置,实现排水管网运行状态实时监控。在排水泵站配置智能

控制系统,根据管网水位和气象预报数据,优化泵站运行方案。排水系统采用双向流量计量装置,监测管网进出水量,评估管网渗漏情况。在排水管网转折处和汇流处安装水质在线监测设备,监测COD、氨氮等指标,对超标排放实施预警。智能化排水系统具备自清洁功能,在适当水位和流速条件下,自动冲洗管道淤积物,延长管网使用寿命。(见表1)

表1 排水系统智能化改造前后效果对比

监测指标	改造前	改造后	提升效果
管网漏损率	15%	8%	降低 7%
水质合格率	92%	98%	提升 6%
故障响应时间	120 min	30 min	缩短 90 min
运行能耗指标	0.45 kW·h/m ³	0.32 kW·h/m ³	降低 29%
排水管网淤积率	25%	12%	降低 13%

3 节水效率提升评估与优化

3.1 用水数据分析方法

用水数据分析采用多维度数据挖掘技术,对采集的海量用水数据进行深度分析。数据预处理阶段运用小波分析法消除异常数据,采用数据插补算法修复缺失数据,确保数据完整性。时间序列分析方法用于挖掘用水规律,建立用水预测模型,实现用水量、用水时段、用水峰值等特征量的准确预测。空间分析技术结合GIS平台,绘制用水分布热力图,识别高耗水区域。聚类分析方法对用户用水行为进行分类,划分用水模式,制定差异化节水方案。数据分析平台采用分布式计算架构,支持亿级数据实时计算,计算结果可视化展示。相关性分析方法用于研究气温、气压等环境因素对用水量的影响,优化供水调度策略^[4]。

3.2 节水效率评估指标

节水效率评估指标体系包含水力效率、经济效率和环境效率三个维度。水力效率评估指标包括管网漏损率、供水管网压力合格率、水质达标率等,采用权重系数法综合计算水力效率得分。经济效率评估指标涵盖单位供水能耗、供水成本、设备维护成本等,运用成本效益分析方法量化经济效益。环境效率评估指标考虑节水减排效果、水资源利用率等因素,建立环境效益评价模型,评估指标数据采用在线采集方式,实现评估过程自动化。评估周期分为日评估、月评估和年度评估三个层次,形成完整的评估报告。评估结

果应用于系统优化调节,持续提升节水效率,评估体系具有动态调整功能,可根据实际运行情况更新评估权重。

评估指标计算采用层次分析法确定各指标权重,建立评分标准。水力效率评估重点关注管网压力达标率和管网漏损率,压力达标率要求供水管网 24 h 压力维持在 0.2 ~ 0.4 MPa 范围内,漏损率控制在 12% 以下。经济效率评估采用单位供水能耗指标,计算每立方米供水消耗的电能,要求控制在 0.3 kW·h/m³ 以内,环境效率评估引入碳排放因子,量化节水措施的减排效果。评估系统配备数据挖掘模块,分析各项指标之间的关联性,识别影响节水效率的关键因素,评估结果采用评分卡形式展示,直观反映各项指标达标情况。系统具备评估报告自动生成功能,包含数据分析图表、评估结论和优化建议,为管理决策提供依据。

3.3 系统运行优化策略

系统运行优化策略采用多目标优化算法,平衡供水压力、能耗和水质多个目标。模型预测控制方法用于优化水泵群运行方案,根据预测用水需求提前调整水泵运行参数。供水管网压力优化采用分区域动态调控策略,建立分时段压力控制模型,实现精准调压。管网水龄优化基于水力模型仿真结果,调整管网流向和流量分配,降低水质衰减风险。阀门调控优化采用模糊控制算法,根据实时监测数据动态调整开度,保持管网压力平衡。系统运行优化策略还包括水泵启停顺序优化、管网水量平衡优化、水质调节优化等内容,形成完整的优化体系,优化控制策略具备自学习功能,持续优化控制参数。

优化策略核心采用基于深度强化学习的智能决策系统,构建供水系统数字孪生模型,实现全局寻优。决策系统将供水管网划分为多个控制单元,每个单元配备独立的优化控制器,实现分布式协同控制。系统设置智能巡检功能,定期评估各项运行参数,当发现异常波动时自动触发优化流程。优化目标函数综合考虑电费成本、药剂成本和设备维护成本,建立多目标平衡模型。系统配置智能预警模块,对潜在风险进行提前预判,确保优化方案的安全性。优化控制系统采用分级授权机制,关键参数调整需经多重验证,避免误操作导致系统波动。

3.4 经济效益分析方法

经济效益分析采用全生命周期成本法,计算智能化改造投资回收期。成本分析包括设备采购成本、安装调试成本、运行维护成本和更新改造成本。效益分

析考虑节水收益、节能收益、维修费用节省和人工成本节省等因素,净现值法用于评估改造项目经济可行性,考虑货币时间价值影响。敏感性分析方法用于研究水价变动、电价波动等因素对经济效益的影响。投资回收期计算采用动态回收期方法,考虑通货膨胀因素,经济效益评估结果作为改造方案优化依据,指导投资决策。效益分析采用动态跟踪方式,定期评估实际经济效益,验证分析结果准确性^[5]。

3.5 智能化改造成效评价

智能化改造成效评价建立综合评价指标体系,涵盖技术指标、运行指标和效益指标三个层次。评价方法采用层次分析法确定指标权重,运用模糊综合评价法计算评价得分。技术指标评价重点关注设备可靠性、系统稳定性、数据准确性等方面,采用定量评价方法。运行指标评价包括供水可靠性、管网漏损控制效果、水质保障能力等内容,结合历史数据进行对比分析。效益指标评价统计节水量、节能量、维护成本等数据,量化改造效果,评价结果采用雷达图方式直观展示,突出改造重点和不足。评价体系具备持续改进功能,定期更新评价标准,推动改造技术进步。

4 结束语

给排水系统智能化改造是一项系统工程,需要综合运用多种先进技术。通过物联网技术实现系统远程监控,利用智能传感器和自动控制设备提升供水效率,采用大数据分析技术优化系统运行参数。实践表明,智能化改造能够有效解决传统给排水系统存在的问题,显著提升节水效率。未来应进一步加强技术创新,完善智能化系统功能,提高系统运行可靠性,为建筑节能事业发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 范萍秋. 基于 BIM 技术的建筑给排水系统设计与优化研究 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2024(08):74-78.
- [2] 毛雨. 城市给排水系统的智能化改造与管理策略 [J]. 城市地理, 2020(20):28-30.
- [3] 夏方琴, 朱金, 喻春梅, 等. 城市综合体市政给排水与消防系统智能化应用研究 [J]. 消防界(电子版), 2024, 10(20): 73-75.
- [4] 张登. 城市给排水系统的智能化改造存在的问题和策略研究 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(11):98-101.
- [5] 张洪超, 姜普. 建筑给排水系统的节能节水改造措施研究 [J]. 中国厨卫, 2024, 23(11):262-264.

智能照明系统在建筑工程节能设计中的应用研究

彭海杰

(枣庄翼云城镇建设综合开发有限公司, 山东 枣庄 277000)

摘要 随着智能化技术的广泛应用, 智能照明系统应运而生, 它集成了物联网 (IoT)、人工智能 (AI) 和大数据分析等先进技术, 在节能和安全性能方面展现出巨大的潜力。智能照明系统在建筑工程节能设计中的应用日益受到重视, 减少能耗和提升能源利用效率是建筑行业发展的核心。本文探讨了智能照明系统在建筑工程节能设计中的具体应用, 分析了其在不同类型建筑中的实施效果。研究结果表明, 智能照明系统通过结合先进的传感技术和通信网络, 实现了对照明设备的智能化管理, 能够根据环境变化和人们的实际需求, 自动调节照明强度和时间, 从而显著降低能耗。

关键词 智能照明系统; 建筑工程; 节能设计

中图分类号: TU2; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.010

0 引言

随着科技的不断进步, 智能照明系统在建筑电气工程中的应用日益广泛。本文详细阐述智能照明系统的概念、特点及其在建筑电气工程中的重要作用。通过分析智能照明系统的组成部分和工作原理, 探讨其在节能、舒适度提升和安全保障等方面的优势。同时, 结合实际案例, 展示智能照明系统在不同类型建筑中的具体应用, 并对其未来发展趋势进行展望。

1 智能照明系统的组成部分

智能照明系统是现代建筑和智能家居中不可或缺的一部分, 主要由照明设备、控制系统以及传感器与网络三大组成部分构成。

照明设备是智能照明系统的核心, 通常包括 LED 灯具、智能灯泡等。这些设备不仅具备节能环保的特点, 还能够通过调节亮度和色温来满足不同场景的需求。

控制系统负责对照明设备进行智能化管理。它可以是一个集中控制的系统, 也可以是分布式的控制模块。用户可以通过手机应用、语音助手或物理开关来控制照明, 提升了使用的便利性。传感器与网络是智能照明系统的重要支撑。

传感器能够实时监测环境条件, 如光照强度、人员活动等, 并根据反馈信息自动调节照明设备的亮度。通过网络连接, 系统可以实现远程控制和状态监测, 使用户随时随地管理家中的照明情况。

2 建筑电气照明系统智能化及节能化的重要性

2.1 减少能耗

建筑电气照明系统是现代建筑不可或缺的组成部分。其能耗状况直接影响着整体建筑物的能耗水平。据国际能源署 (IEA) 发布的最新统计数据, 在全球建筑物电力需求中, 有 15% ~ 20% 被用于照明。近年来, 智能照明技术的相关研究已取得了丰硕成果。其中, LED 照明技术作为一种新型照明技术, 不仅能耗少, 而且使用寿命较长。相较于传统白炽灯等光源设备, LED 照明可为使用者提供更明亮、舒适的照明环境。随着技术不断进步, 智能控制技术的应用, 为建筑电气照明系统的节能带来了新的机遇。通过安装传感器、智能控制器等设备, 可实现对照明系统的实时监测调节, 根据实际需要自动开关灯具, 从而减少不必要的能耗。

2.2 满足多元化需求

伴随着物联网技术的迅猛发展, 建筑电气照明系统在智能化发展方面迎来了新的机遇。无论是在居民住宅, 还是商业建筑领域, 照明系统的智能管理, 都将是提升用户体验、实现舒适生活的关键。

智能照明系统除了能提升建筑的节能性外, 还能满足用户的多样化需求。以数字地址照明接口为例, 可将各种照明设备与本地或远程控制系统紧密连接, 实现灯具的快速响应, 进而灵活调节光源。相关数据表明, 采用数字地址照明系统的建筑, 其照明能耗可显著降低 15% ~ 25%。

此外,传感器技术的融入,可利用先进的光线传感器或者红外人体感应器,实时监测环境中的光线强度,同时也可与智能控制系统联动,实现灯具的自动感应。在光照充足条件下,智能技术能有效减少人工照明的使用。相关研究显示,这种节能效果可达 20%~30%。

智能照明系统的应用,不仅能提升节能效率,还能带来其他诸多益处。通过控制照明开关,智能照明系统可为用户提供个性化的照明体验,减轻生活负担,提升生活质量。在居民住宅中,智能照明系统还可根据家庭成员的活动习惯,自动调整灯光的强度和色温,营造出温馨、舒适的居住氛围^[1]。

3 智能照明系统在建筑工程节能设计中的应用

3.1 智能传感器技术在室内照明节能中的应用

在现代建筑中,智能传感器被广泛应用于室内照明的节能设计中,其主要作用是根据环境的变化自动调节照明强度,确保光照需求与实际环境的匹配,从而减少能源浪费。光照传感器主要用于根据自然光的变化调整人工照明的强度。比如在日光充足的早晨或下午,系统自动降低人工照明强度,而在阴天或晚上,灯光则会自动增亮,以确保室内光照达到最佳标准。在办公楼、学校等公共建筑中,传感器的布置非常重要。以写字楼为例,通过在每个办公室和公共区域安装红外传感器和光照传感器,使得每个区域的灯光能够根据使用需求智能调节。在客流量较大的办公室区域,系统自动调节灯光的亮度,而在通道或卫生间等低人流区域,灯光会在无人时自动熄灭或调至最弱亮度。通过这一系列的智能化控制,建筑的照明系统有效地降低了能耗。智能传感器还可与其他系统(如暖通空调、安防系统等)联动,形成全面的节能解决方案。例如:传感器可以与建筑管理系统(BMS)结合,优化空调、照明的配合工作,提高整体能效。

3.2 利用物联网技术实现照明系统的远程监控与管理

物联网(IoT)技术为智能照明系统的远程监控与管理提供了强有力的支持。通过物联网平台,用户可以实现对照明系统的远程控制、故障诊断和数据分析。例如:在商业大楼中,管理人员可以通过物联网平台,查看各楼层、各区域的照明状态,远程开关灯光,对照明系统进行故障诊断和维护安排。物联网技术能够提供高效的数据传输和处理能力,通过集中式管理实现对所有照明设备的状态监控。通过分析传感器反馈的数据,系统可以判断照明设备的运行情况,提前预警故障,避免照明设备发生故障后长时间未被发现。例如:通过实时监测电流和电压,系统可以判断灯具

是否存在故障或老化,提前告知用户进行更换或维修,从而提高系统的稳定性和可靠性。物联网平台能够提供云存储与大数据分析功能,用户可以对照明系统的运行数据进行长期存储与分析。通过对历史数据的分析,物联网平台可以为用户提供优化建议。例如:基于区域内的人员流动和照明使用数据,系统可以自动生成最优的照明策略,提升能效和使用舒适度。物联网技术的应用还可以实现智能照明的跨平台控制与整合。在不同的建筑、不同的环境中,用户可以通过同一个平台进行统一管理和控制。对于大型商业综合体或多个办公区域,物联网技术能够对各区域的照明设备进行统一调度与管理,实现资源的最大化利用。

3.3 可再生能源与智能照明的结合实践

在建筑节能设计中,将可再生能源与智能照明系统结合已成为一种趋势。太阳能和风能等可再生能源可以为照明系统提供清洁能源,而智能控制系统则负责根据需求调节照明设备的使用,减少对传统电网的依赖,进一步降低建筑能耗。在商业综合体中,建筑屋顶可以安装太阳能光伏板,生成的电力被用于供应室内的照明系统。在系统设计中,智能照明系统根据光伏发电的实时数据调节室内照明,确保在白天和光照充足时,照明系统使用太阳能供电,夜间则转为使用电网供电。这种结合方式有效地减少了对传统电力的消耗,并最大化了太阳能的利用率。系统还可以根据天气条件和能源生产情况动态调整。例如:当阴雨天气光伏板发电量较低时,系统会自动降低人工照明的亮度,或提前切换至备用电源,在保证照明需求得到满足的同时,最大程度地节约能源。在学校的实验室中,也可以采取类似的方案,太阳能和风能共同为校园照明提供能源,而智能照明系统则确保了照明的高效与灵活,特别是在一些不常用的教室和实验室,系统会自动调节灯光亮度或关闭不必要的照明设备^[2]。

3.4 采用建筑一体化设计

在建筑电气照明系统的智能化设计中,需要将一体化设计理念贯彻于整个建筑设计阶段。尤其是在项目的初始阶段,设计人员需要高度关注自然光利用的效率。在此基础上,还需对窗户与采光顶进行优化布局,通过引入适宜的自然光源,营造出明亮舒适的室内照明环境。其中,窗户的设计可借助双层低辐射中空玻璃。这种玻璃不仅能有效屏蔽外部热量、遮挡有害紫外线,还能确保室内空间接受适量的自然光照。同时,在采光顶的选择上,可使用透光率高达 65% 的聚碳酸酯采光板,以显著提升室内明亮度,减少对人工照明设备的依赖。

3.5 智能照明设备优化

智能照明节能技术从根源入手,通过优化调整灯具,最大程度降低能源消耗。在智能照明系统中,后台控制为核心环节,它能高效收集、分析各类数据信息,依据已采集的数据指令与环境数据,借助后台算法生成并下达相应的照明系统控制指令,让其他零部件得以适时调整。随着现代技术的持续发展,这种智能化的照明系统及相关设备能够与多个功能模块对接,满足用户群体的多元化需求^[3]。

总体来看,目前LED灯具与电源模块的有效融合能够进一步彰显智能照明设备自身的节能特点,电源供应变得更加稳定,效率明显提升,使LED灯具光强度能够基本保持稳定。同时,照明设备内部设置多重保护机制,使照明系统的使用寿命明显延长,能够第一时间解决存在的故障问题,维护工作成本明显降低。智能照明设备中设置的光传感器和红外传感器能够赋予其智能感知、互动能力。光传感器能够在周边环境光线强度出现变化的状况下,针对灯具亮度自主进行调节,室内光线具备仿自然特性,可以满足居民的照明需求,能够避免过度照明带来的能源浪费和视觉方面的问题。红外传感器可以发挥智能化感应作用,实现人来灯亮、人走灯灭的自动化控制目标,显著提升照明系统的节能效果。

目前的智能照明设备应用不仅展现在人们的居家生活方面,同时在公共设施、城市景观、商业办公领域等也有着十分重要的作用。从商业空间层面来看,智能照明设备的应用可根据具体的营业时间和客户流量优化调整照明方案,在为客户营造良好购物环境的前提下,提高能源管理的工作效率和质量。

3.6 智能照明系统在建筑外立面节能设计中的应用

建筑外立面的照明不仅起到装饰作用,还对建筑的能效产生重要影响。智能照明系统在建筑外立面中的节能应用,主要体现在根据环境条件、时间变化和外部需求调整外立面灯光的亮度与开关。动态调节外立面照明,不仅能节省电能,还能提升建筑的美学价值。在一些现代办公楼和商业综合体中,外立面的照明系统被设计为可以根据季节、天气、时间段等因素自动调节亮度。例如:在晚上,系统可以根据外部环境光线自动调整灯光的亮度和色温,避免光污染对周围环境产生影响,并确保建筑外立面在不同的视觉效果下保持美观。尤其是在节假日或特殊活动期间,系统可以在不增加额外能耗的情况下,通过预设模式调节外立面的灯光亮度和颜色,满足节庆氛围的需求。在一些大型购物中心的外立面中,智能灯光系统利用传感器收集外部光照数据,当自然光较强时,外立面的灯光会

自动调低亮度或关闭;而在夜间或天气较差时,灯光会自动增亮,确保建筑外立面的可见度和美观性^[4]。

4 智能照明系统的发展趋势

4.1 智能化程度不断提高

随着人工智能、物联网等技术的不断发展,智能照明系统的智能化程度将不断提升。未来的智能照明系统将能够实现更加精准的感知和控制,为用户提供更加个性化和智能化的照明服务。

4.2 与其他系统的融合更加紧密

智能照明系统将安防系统、建筑自动化系统、能源管理系统等其他系统进行更紧密的融合,推动建筑的智能化管理与控制。例如:智能照明系统可以与能源管理系统结合,实现照明能耗的实时监测和优化控制,从而提高建筑的能源利用效率^[5]。

4.3 绿色环保成为发展方向

随着人们环保意识的不断提高,绿色环保将成为智能照明系统发展的核心方向。未来的智能照明系统将更加注重绿色节能技术的应用。新一代智能照明系统将采用更节能、高效和环保的照明设备及控制技术,从而有效减少环境污染和能源消耗。

5 结束语

智能照明系统作为现代建筑电气工程的重要组成部分,凭借其高效、智能、节能的特点,在建筑领域展现出了广泛的应用前景。通过精准调节亮度、优化设备运行时间、收集与分析数据以及实现集中控制管理,智能照明系统不仅提升了照明质量,更实现了显著的节能效果。在酒店、建筑、教学建筑、地铁车站等多个领域,智能照明系统均发挥出了不可替代的作用。其高度的灵活性和智能化,使得系统能够精准满足各区域的照明需求,为不同场所提供舒适、安全的照明环境。

参考文献:

- [1] 张智能.建筑电气中智能照明控制系统应用解析[J].智能建筑与智慧城市,2022(03):152-154.
- [2] 徐冉.建筑电气设计中智能消防应急照明系统的应用[J].中国建筑金属结构,2020(10):66-67.
- [3] 刘松涛.建筑电气工程中智能照明系统的应用研究[J].光源与照明,2024(01):59-61.
- [4] 蒋琪.建筑电气中智能照明控制系统的应用[J].中国建筑装饰装修,2023(05):74-76.
- [5] 高勤有.智能照明系统在高校教学楼建筑节能改造中的应用探讨[J].江苏科技信息,2019,36(03):51-53.

物联网技术在叉车智能化中的深度融合实践研究

彭倩云¹，潘成杰²，江裕婷¹，施向前¹

(1. 杭州众诚咨询监理有限公司，浙江 杭州 310000;
2. 丽水市浙丽数字资源经营管理有限公司，浙江 丽水 323000)

摘 要 叉车作为重要搬运设备，其智能化转型至关重要。在工业 4.0 与智能制造蓬勃发展的当下，工业生产对物流效率和安全性要求不断提升，传统叉车已难以满足需求，物联网技术的兴起为叉车智能化转型创造了条件。物联网技术凭借强大的连接与数据处理能力，为叉车智能化带来新契机。本文深入探讨了物联网技术在叉车智能化中的融合实践，涵盖关键技术应用、实际案例剖析、面临挑战及应对策略等方面，旨在为推动叉车智能化发展提供借鉴，进而提升工业生产效率与安全性。

关键词 物联网技术；叉车智能化；智能监管

中图分类号: TH24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.011

0 引言

在工业 4.0 和智能制造蓬勃发展的时代背景下，叉车作为工业物流环节的关键设备，其智能化升级已成为必然趋势。传统叉车在管理效率、安全性等方面存在诸多局限，难以满足现代工业日益增长的需求。物联网技术的兴起，为叉车智能化转型提供了有力支撑。通过将物联网技术深度融入叉车领域，能够实现叉车运行状态的实时监控、数据的智能分析以及远程操作等功能，显著提升叉车的使用效率和安全性，进而优化整个工业生产流程。

1 叉车智能化发展现状

1.1 叉车智能化的趋势

叉车智能化已成为行业发展的核心方向，越来越多的企业开始引入先进的技术手段，对传统叉车进行智能化改造。从最初简单的自动化功能添加，到如今追求高度智能化的自主运行和协同作业，叉车智能化的步伐不断加快。智能化叉车不仅能够提高物料搬运的效率，还能降低人力成本和事故风险，为企业创造更大的价值^[1]。

1.2 物联网技术在叉车领域的应用潜力

物联网技术具备强大的设备连接和数据交互能力，在叉车领域有着广阔的应用前景。通过在叉车上部署各类传感器和通信模块，能够实现叉车与周围环境、其他设备以及管理系统之间的互联互通。这使得叉车的运行数据、设备状态信息等能够实时上传至云端，

为后续的数据分析和决策提供丰富的数据支持。同时，基于物联网技术的远程控制功能，操作人员可以在远离叉车的地方对其进行精准操作，大大提高了操作的灵活性和安全性。

2 物联网关键技术在叉车智能化中的应用

2.1 传感器技术

传感器是实现叉车智能化的基础。在叉车上，各类传感器发挥着关键作用。例如：位移传感器用于精确测量叉车的货叉升降高度和行驶距离，确保货物搬运的准确性；压力传感器则能实时监测叉车的承载重量，防止超载运行引发安全事故；倾斜传感器可感知叉车的倾斜角度，当叉车在不平整路面行驶或进行货物装卸时，一旦倾斜角度超过安全阈值，系统会立即发出警报，保障叉车的稳定性和安全性。这些传感器将采集到的大量数据实时传输到叉车的控制系统，为叉车的智能化运行提供了可靠的数据依据^[2]。

2.2 通信技术

通信技术是实现叉车物联网数据传输的关键。在叉车智能化应用中，常用的通信技术包括 4G/5G、Wi-Fi 和蓝牙等。4G/5G 网络具有高速率、低延迟的特点，能够满足叉车大量数据实时上传至云端的需求，确保远程监控和管理的及时性和准确性。Wi-Fi 则适用于叉车在企业内部相对固定区域的通信，提供稳定的本地网络连接，支持叉车与企业内部管理系统的高效数据交互。蓝牙技术则主要用于叉车与周边近距离设备的

通信,如连接手持终端设备,方便操作人员进行数据查询和操作指令下达。

2.3 定位技术

定位技术在叉车智能化中有着不可或缺的作用。全球定位系统(GPS)和室内定位技术相互配合,实现了叉车在室内外环境下的精准定位。在室外,GPS能够实时获取叉车的地理位置信息,帮助企业对叉车进行远程调度和监控。而在室内环境,由于GPS信号容易受到遮挡而减弱,此时室内定位技术如蓝牙定位、UWB(超宽带)定位等则发挥作用,通过在室内布置定位基站,精确确定叉车在仓库、车间等场所的位置,避免叉车之间的碰撞,提高物料搬运的效率和安全性。

2.4 云计算与大数据技术

云计算和大数据技术为叉车智能化提供了强大的数据处理和分析能力。叉车在运行过程中会产生海量的数据,包括运行轨迹、作业时间、设备状态等。云计算平台能够对这些数据进行高效存储和计算,而大数据分析技术则可以从这些复杂的数据中挖掘出有价值的信息。例如:通过对叉车运行数据的分析,企业可以了解叉车的使用频率和工作强度,优化叉车的维护计划,提前发现潜在故障隐患,降低设备故障率。同时,还可以根据数据分析结果,合理安排叉车的作业任务,提高叉车的使用效率和企业的物流运营效率^[3]。

3 物联网技术在叉车智能化中的融合实践案例

3.1 案例概述

金华市婺城区开展的叉车质量安全追溯体系建设项目,是物联网技术在叉车智能化领域的典型应用案例。该项目旨在提高叉车安全监管水平,优化监管措施,强化企业主体责任和地方安全监管责任。婺城区经济快速发展,叉车设备增长率上升,但在用登记叉车数量占比不高,且叉车监管存在诸多难题,如分布广、流动性大、违法违规成本低等,导致场车监管存在“真空地带”,叉车安全事故频发。

3.2 系统架构与功能实现

金华市婺城区叉车质量安全追溯体系建设项目,依托数改架构,融合物联网等技术构建体系。其系统架构主要含叉车物联设备、全链路监管平台、公共服务系统及可视化大屏。900台叉车物联设备分布在场内外,具备扫码启动、定位、告警等功能,保障叉车安全使用,实时监控运行状态。全链路监管平台基于浙江特种设备在线建设,涵盖多模块,全方位监管叉车相关单位、设备和人员,结合数据接口与物联数据,为监管决策提供支持。公共服务系统同样依托该平台,

设销售、使用、维修单位专区。销售单位专区负责账号、信息管理及上牌备案;使用单位专区涵盖登记、作业记录等功能;维修单位专区管理账号、人员及救援信息,提升管理效率与信息化水平。可视化大屏通过数据处理和模型建立,展示叉车各类数据及分析结果,如数量、作业、风险指数等,方便监管人员实时掌握运行状况和风险,及时决策。

3.3 实践效果与意义

金华市婺城区叉车质量安全追溯体系建设项目成果显著。借助物联网技术,实现叉车安全监管模式转变,开启“法治+智治”新局面。一方面,提高了安全监管水平。实时监控叉车运行数据,能快速发现并处理隐患,有效遏制超速、违规操作等行为,大幅降低安全事故发生率。另一方面,优化了特种设备监管措施,实现对叉车制造、销售、使用等全链条有效监管,提升监管精准度与效率。此外,强化了企业和地方监管责任,通过建立评价模型,将企业安全生产与信用挂钩,促使企业重视安全管理,监管部门也能依数据调整策略,加强重点区域和企业监管。该项目为全国叉车安全智慧监管提供了经验,有力推动叉车智能化发展。

4 叉车智能化中物联网技术融合面临的挑战

4.1 技术标准不统一

目前,物联网技术在叉车智能化领域的应用尚处于发展阶段,技术标准尚未完全统一。不同厂家生产的叉车物联设备在通信协议、数据格式等方面存在差异,这使得各设备之间难以实现无缝对接和数据共享。例如:一些叉车物联设备采用的是私有通信协议,与其他设备或系统的兼容性较差,导致在构建整体的叉车智能化管理系统时,面临着技术整合的难题,增加了系统建设和维护的成本。

4.2 数据安全与隐私保护

物联网技术应用使叉车产生大量数据,含企业运营、叉车位置及操作人员个人信息等。数据安全与隐私保护至关重要,泄露会致企业损失(如商业机密、客户信息丢失)及侵犯个人隐私。但目前面临网络攻击、数据窃取难防范,数据加密和访问控制技术待完善等挑战。

4.3 网络覆盖与稳定性

叉车作业环境多样,涵盖室内仓库、室外工厂及偏远物流园区等,网络覆盖与稳定性差异大。偏远地区或信号遮挡处,信号弱或不稳定会影响物联设备数据传输,导致延迟、丢失,影响实时监控和远程操作。且叉车智能化程度提升增加了对网络带宽的需求,保障复杂环境下网络稳定及带宽达标是亟待解决的问题。

4.4 成本投入与投资回报

将物联网技术融入叉车智能化需大量成本,涵盖设备采购、系统开发、网络建设、人员培训等,对企业来说是不小的开支,且短期内难见明显投资回报,让部分企业推进时存在顾虑。资金有限的中小企业更持观望态度,担忧投入过多却无相应经济效益,影响正常运营。

5 物联网技术在叉车智能化中的融合策略

5.1 推动技术标准的统一

在叉车智能化发展进程中,推动物联网技术标准的统一至关重要,而政府和行业协会在其中扮演着关键角色。政府应凭借政策引导与资源调配能力,行业协会在依靠专业凝聚力和行业影响力,积极组织叉车生产企业、物联网技术企业以及科研机构开展深度合作。共同围绕通信协议、数据格式、接口规范等核心要素,制定全面、科学且具有前瞻性的统一技术标准。统一标准能有效解决不同厂家设备间的兼容性难题,确保设备互联互通,降低系统集成时的技术壁垒与成本投入^[4]。这不仅有助于提高企业生产效率,还能促进整个叉车智能化产业形成有序竞争、协同创新的良好局面。此外,鼓励企业参与标准制定实施,可激发企业创新活力,提升其在技术标准领域的话语权,推动产业持续健康发展。

5.2 加强数据安全与隐私保护措施

物联网技术在叉车智能化中的深度融合,企业必须将数据安全和隐私保护置于首位,综合运用技术与手段筑牢安全防线。在技术层面,持续升级数据加密技术,运用先进算法对叉车运行过程中产生的海量数据进行加密处理,无论是传输中的数据还是存储于服务器的数据,都能有效防止被窃取和篡改。同时,构建精细且完善的访问控制机制,通过多因素身份验证、权限分级管理等方式,严格限制对数据的访问,只有经过授权的人员才能获取相应数据。此外,加大网络安全防护投入,安装专业的防火墙、入侵检测系统等设备,实时监测和抵御网络攻击。在管理方面,制定严谨的数据安全管理制度,明确数据操作流程和责任分工。加强员工的数据安全意识培训,通过定期培训、案例分析等方式,提升员工对数据安全重要性的认识,规范其数据操作行为,从人员层面降低数据安全风险^[5]。

5.3 优化网络基础设施建设

加大对网络基础设施的建设和优化力度,提高网络覆盖范围和稳定性。对于叉车作业的偏远地区和信

号薄弱区域,通过建设基站、信号放大器等设备,增强网络信号。同时,探索采用新兴的网络技术,如 5G 网络切片技术,根据叉车智能化应用的需求,为其提供定制化的网络服务,保障数据传输的稳定性和及时性。此外,加强与网络运营商的合作,共同优化网络资源配置,提高网络的可靠性和可用性^[6]。

5.4 合理规划成本与提高投资回报率

企业在推进叉车智能化过程中,应合理规划成本,制定科学的投资方案。在设备采购方面,根据企业的实际需求和预算,选择性价比高的叉车物联网设备。在系统开发方面,充分利用现有的技术资源和平台,降低开发成本。同时,注重提高投资回报率,通过对叉车智能化应用的效益分析,优化叉车的作业流程,提高生产效率,降低运营成本^[7]。例如:通过实时监控叉车的运行状态,合理安排叉车的维护计划,减少设备故障停机时间,提高叉车的使用效率,从而实现经济效益的提升。

6 结束语

物联网技术与叉车智能化的深度融合,为叉车行业带来了机遇与变革,实现了叉车智能化升级,提升了使用效率和安全性,金华市婺城区项目便是成功范例。但融合过程中存在技术标准不统一、数据安全等挑战。推动叉车智能化持续发展,需要各方协作,政府和行业协会需规范引导统一标准,企业需加强安全保护、优化网络、合理规划成本。未来,随着物联网及新兴技术的发展,叉车智能化空间将不断扩展,更智能化、自动化,与工业互联网协同发展,拓展应用场景,可为企业创造更多价值。

参考文献:

- [1] 张民生. 叉车行业加速智能化和绿色化转型[J]. 物流技术与应用, 2025, 30(01): 49-51.
- [2] 马争光, 刘泽华, 侯春, 等. 叉车式 AGV 智能化转运系统在定制化平板纸生产线的应用研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(08): 129-136.
- [3] 陈赛民. 叉车电动与智能化的发展趋势探讨: 以杭叉集团实际情况为例[J]. 中国储运, 2024(05): 45-46.
- [4] 佚名. 林德叉车亮相工业物流与仓储智能化发展大会[J]. 上海化工, 2022, 47(05): 91.
- [5] 本刊编辑部. 叉车行业: 数字化、智能化、绿色化升级趋势明显[J]. 物流技术与应用, 2020, 25(12): 86-88.
- [6] 李信芳, 刘徽. 叉车安全管理智能化瞻望[J]. 西部特种设备, 2023, 06(06): 34-38, 48.
- [7] 吴鹏. 人工智能技术在叉车制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(02): 108-110.

基于智慧交通的公路交通信息 工程设计与管控控制探讨

黄日光

(莱阳市交通运输局, 山东 烟台 264000)

摘要 智慧交通是新时代交通运输现代化建设的重要方向。本文以公路交通信息工程设计与管控控制为研究对象,从交通信息采集、传输、处理、服务等环节入手,剖析了当前智慧交通建设的关键问题;针对海量异构交通数据融合、突发事件应急管控、精准信息服务等难点,探讨了交通大数据智能化处理、多模态感知下智能管控与车路协同信息交互等关键技术;提出了深化交通基础设施与信息化融合、强化大数据与人工智能应用、完善产业生态和政策标准、加强人才队伍建设等智慧交通升级改造策略,以期为推动传统公路交通向智能化、网联化方向发展提供有益借鉴。

关键词 公路交通; 信息工程; 智能管控; 大数据融合; 车路协同

中图分类号: U412

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.012

0 引言

传统公路交通面临交通拥堵、事故多发、能源消耗大等诸多挑战。为适应新时代经济社会发展需求,亟须加快推进公路交通信息化、智能化转型升级。随着大数据、人工智能、车联网等先进信息技术的发展,为破解交通领域难题带来新的契机。如何充分发挥新技术优势,突破传统交通信息工程在数据感知、传输、处理、服务等环节的瓶颈制约,实现全方位、全周期、可持续的智慧交通发展,成为业界关注的热点问题。

1 公路交通信息系统设计与管理控制中的关键问题剖析

1.1 公路交通信息采集与传输可靠性问题

公路交通信息采集与传输的可靠性是影响交通管理和服务效果的关键因素。恶劣环境干扰、设备故障、网络不稳等问题导致数据缺失、误差较大、延迟严重,难以满足实时动态管控需求。复杂场景下,固定式监测设备易受损,关键路段、时段信息盲区频现。此外,采集设备、传输协议互不兼容,加剧了系统集成与维护难度。这些问题制约了公路交通感知的时空覆盖度与可靠性,亟须引起重视和深入研究。

1.2 海量异构交通信息高效处理与融合问题

随着公路交通信息化、网联化的发展,雷达、视频、GPS等多源异构交通数据呈爆发式增长。异构数据在格式、精度、更新频率等方面差异大,难以直接比对关联。同时,海量数据对实时处理和融合应用提出了严

峻挑战,传统数据处理架构难以满足低延时计算需求。多源异构交通数据的标准化表示、实时语义映射、高效关联融合等关键问题亟待突破,这对于充分发挥海量交通数据的价值具有重要意义。

1.3 突发事件下交通管控决策支持问题

恶劣天气、重大活动、交通事故等突发情况给公路交通系统带来诸多不确定性因素,管控决策难度大。目前在突发事件快速感知、综合研判与协同处置方面缺乏有效的决策支持工具,主要依赖经验式的被动应急操作,事后效果评估与优化改进不足^[1]。这种应对突发事件的方式难以适应现代交通管理对多场景、强动态的响应要求,往往导致事件处置不及时、方案不科学、多部门联动不顺畅等问题,影响交通系统的安全、高效运行。

1.4 复杂交通场景下信息服务精准推送问题

城市快速路、高速公路等复杂交通场景下,车流密集、行驶工况多变,司乘人员对交通信息的需求呈现多样化、个性化特征。司机关注路况、事故、限行等行车安全信息,乘客偏好沿途景点、加油站、充电桩等出行服务信息。然而,当前交通信息服务以粗粒度、广播式推送为主,忽视了司乘人员的差异化需求,导致信息匹配度低、接收不及时、服务体验差等问题。精准、智能的交通信息推送服务亟待突破,这对于缓解信息过载、提升出行决策效率、优化公路通行环境具有重要意义。

2 面向交通大数据的公路交通信息融合处理关键技术

聚焦海量异构交通数据融合处理,探讨智能化数据修复、知识挖掘、交通预测等大数据分析技术在智慧交通中的应用,为管控与服务提供高质量数据支撑。

2.1 多源异构交通数据智能化清洗与修复技术

多源异构交通数据的质量参差不齐,普遍存在噪声、冗余、不一致等问题,给后续的关联分析、深度挖掘带来了很大的困扰。传统的人工检查、统计过滤等方法效率低下,难以应对海量数据场景。因此,迫切需要探索智能化、自动化的数据清洗与修复技术,充分利用机器学习、知识图谱等人工智能方法,对异构数据进行有效抽取、语义理解、一致性校验,识别数据中的错误、缺失、不确定性,并自适应构建模型实现数据修复、质量改进^[2]。在此基础上,还可挖掘多源数据的内在关联特征,自动生成完整性约束、一致性规则等,形成迭代优化、持续进化的异构交通数据治理体系,为后续应用奠定坚实的基础。

2.2 交通数据挖掘与知识发现技术

海量交通数据中蕴含着丰富的模式、规律、关联等隐性知识,但由于数据维度高、噪声多、稀疏性强等特点,传统的数据挖掘方法难以直接应用,需要探索融合深度学习、图神经网络、因果推理等先进人工智能技术,针对性设计复杂交通场景下的数据挖掘框架与算法,充分考虑时空依赖、多尺度效应、突发事件干扰等复杂语义特征,构建面向交通领域的知识发现流程与模型体系。(1)聚焦经典交通问题,如拥堵成因分析、事故多发路段识别等,挖掘数据内在关联,形成可解释的因果机理。(2)探索数据驱动的新问题、新场景,发现交通系统演化的新特征、新规律,刷新认知边界,助力理论创新。

2.3 基于大数据分析的交通状态评估与预测技术

传统方法主要依赖固定地点、间断时段的交通参数采样统计,难以全面反映交通系统的动态时空特征。亟需利用大数据分析技术,充分汇聚车、路、环境、行人等多维异构数据,刻画交通流时空演化的多尺度效应,构建反映宏观微观交通运行机理的评估预测一体化框架。

在实时评估方面,融合流量、速度、密度等多参数,建立科学的交通健康指数,多维呈现路网饱和度和通行效率等运行状态。在趋势预判方面,充分考虑周期性、突发性等多重影响因素,综合利用时空序列挖掘、因果推理等技术,探索滚动更新、持续优化的多步长交通预测模型,为管控决策提供前瞻性参考。

3 基于多模态感知的智能交通管控与引导技术

围绕动态交通流感知、事件检测、个性化诱导等,研究多模态数据驱动下交通管控的智能化升级策略,提升交通系统安全性、通行效率与精细化治理水平。

3.1 动态交通流智能感知与实时监测技术

动态交通流智能感知与实时监测是智慧交通的重要基础。传统固定式交通流采集设备布设受限、覆盖范围小、易受环境干扰,难以满足全时空、高精度、连续化的感知需求。随着车载 GPS、北斗定位等移动传感技术的发展,海量车辆轨迹数据为交通流监测带来新契机。车辆轨迹数据样本量大、时空分辨率高、实时性强,可精细刻画交通流时空演化^[3]。然而,轨迹数据也存在噪声大、异常多、语义模糊等问题,亟须研究智能化的数据清洗、修复与融合算法,提取隐含的速度、流量、密度等交通参数,构建全维度、动态化的交通监测体系,为智能管控提供关键支撑。

3.2 交通事件智能检测与应急联动处置技术

交通事件的快速发现与及时处置对保障安全、提高通行效率至关重要。传统事件检测主要依赖人工巡逻、热线举报等方式,存在发现不及时、信息不准确、处置不规范等问题。随着视频监控、车载传感、社交媒体等多模态数据快速增长,为事件智能检测提供了新思路。深度学习可用于构建视频图像智能分析模型,自动识别交通事故、违法行为等异常情况;自然语言处理可应用于道路风险隐患、重大活动等文本信息的智能提取与综合研判。在实现精准事件感知的基础上,还需建立多部门协同的应急联动机制,优化处置预案,提升突发事件应对能力,及时恢复交通秩序,最大限度降低事件影响。

3.3 个性化交通线路规划与诱导引导技术

随着交通网络日益复杂、出行方式日益多样,驾乘人员对个性化出行服务的需求不断提升。传统的 shortest 路径导航已难以满足实时路况避让、多目标权衡等复杂场景需求。亟须研究融合实时交通信息的个性化线路规划方法,综合考虑通行时间、路况拥堵、过路费用、限行管控等多源约束条件,智能推荐与用户偏好匹配的最优路线。同时,结合用户当前位置、行驶方向等实时场景特征,提供差异化的交通信息诱导策略,引导车辆在进入拥堵、事故多发路段前提前绕行,动态平衡路网交通压力。个性化、精准化的诱导引导不仅能提升驾乘人员的出行体验,也为缓解拥堵、促进路网均衡利用提供了新思路。

4 车路协同环境下的交通信息服务智能化关键技术

立足车路协同互联趋势,聚焦交通信息交互、精准服务与安全可信等关键技术,探索 LTE-V2X、区块链等

新技术赋能下的全场景、个性化智慧出行服务新模式。

4.1 基于LTE-V2X的车路协同信息交互技术

LTE-V2X是新一代车联网无线通信技术,支持车车、车路、车人等多场景直连通信,具有低时延、高可靠、广覆盖等优势。将其引入车路协同环境,可显著提升交通信息交互的实时性与灵活性。一方面,路侧单元可利用LTE-V2X广播信号传递配时、限速、拥堵等关键信息,协助车辆及时决策,提高通行安全与效率。另一方面,车载单元也可通过LTE-V2X主动上传车速、加速度、轨迹等实时数据,为道路交通状态评估、信号优化控制等提供数据支撑。此外,LTE-V2X还可支持车城信息交互,实现与智慧停车、电子收费等系统的无缝对接。

4.2 面向个体出行的交通信息精准推送技术

移动互联网、智能终端的普及,促进交通信息服务向移动化、社交化发展,对推送的精准性、时效性提出更高要求。传统的交通广播、路侧显示等信息发布方式难以满足个性化需求。亟须研究面向个体用户的精准推送技术,挖掘历史出行轨迹、实时位置、偏好标签等多维特征,刻画用户出行意图和决策行为,构建个性化信息推荐引擎。同时,考虑推送信息的优先级排序、呈现方式优化等,在不同时空环境下智能调整推送频次和粒度,最大化吸引用户注意力。探索增强现实、虚拟现实等新型人机交互技术,为用户提供沉浸式、交互式的出行信息服务。

4.3 基于区块链的可信交通信息服务技术

在交通信息服务智能化、个性化发展的同时,海量交通数据在采集、传输、存储、应用等环节也面临诸多安全隐患,对用户隐私保护、数据版权确权等提出严峻挑战。区块链技术有望破解数据确权难、流转慢、追责难等共性问题。第一,区块链分布式账本、智能合约等机制可用于构建车路协同数据交换网络,保障多源异构交通数据可信登记、授权共享与自主交易,促进数据价值有序流通与变现^[4]。第二,联盟链、私有链等多种区块链模式可灵活适配交通管理、运营、服务等场景需求,平衡数据共享开放与安全隐私的边界。区块链与物联网、边缘计算等新兴技术的融合应用,也为交通数据全生命周期的可信服务提供了新思路。

5 公路交通信息工程的智能化升级改造策略

公路交通信息工程的智能化升级改造是一项系统工程,需要在多方面协同发力、系统推进。其一,要着力提升交通基础设施与信息化的深度融合水平,统筹规划、设计、建设、运维等各环节数字化改造,将先进的传感、通信、计算等技术嵌入道路、桥梁、隧道、

收费站等传统基础设施,构建全覆盖、泛在化的智能化感知网络,提高交通系统的数字化、网联化、智能化水平。其二,要充分发挥大数据与人工智能技术在交通领域的应用优势,建立海量异构交通数据的汇聚共享与融合分析平台,研发交通流预测、事件检测、信号优化、需求响应等智能化应用,推动实时感知、动态分析、科学决策、精准服务等管理模式变革。其三,还需完善智慧交通产业生态与政策标准体系,加快关键共性技术、核心器件的自主创新,打造产学研用协同创新平台,健全标准规范、质量认证、测试评估等配套机制,营造规范有序、开放包容的产业发展环境^[5]。其四,加强智慧交通科技创新人才队伍建设也至关重要,要强化“新工科”交通运输专业建设,完善产教融合、校企联合的协同育人机制,培养懂交通、善管理、能创新的复合型人才,为智慧交通高质量发展提供源源不断的智力支撑。

6 结束语

加快推进公路交通信息工程智能化升级改造是顺应智能交通发展大势、破解行业发展瓶颈的必由之路。未来,应坚持需求导向与技术驱动相结合,在提升交通基础设施信息化水平的同时,强化大数据、人工智能等新技术在采集、管控、服务等环节的应用,优化顶层设计,完善标准规范,营造良好产业生态,加强复合型人才培养,多管齐下推动形成政府引导、企业主体、社会参与的智慧交通发展新格局,为建设交通强国提供坚实支撑。但是,受制于海量异构数据融合、复杂环境感知等方面的技术瓶颈,当前智慧交通建设仍面临诸多挑战,需各领域持续发力、协同攻关。

参考文献:

- [1] 赵永通,周冉,徐蛟.基于BIM的公路建设信息一体化管理云平台设计与实现[J].现代信息科技,2023,07(08):40-43,47.
- [2] 叶明,谭伟,史贺,等.公路工程沥青材料全过程管理信息系统的设计与工程应用[J].江苏建筑,2022(S1):117-120.
- [3] 吴飞,沈达佳.基于GIS技术的高速公路边坡施工信息管理系统设计[J].工程与建设,2021,35(06):1256-1259,1272.
- [4] 雷宗建,熊巍.高速公路养护网级管理信息系统功能设计[J].湖南交通科技,2020,46(04):131-134,141.
- [5] 戴晨.高速公路交通智能管理信息系统的设计与研究[J].科技资讯,2018,16(23):61,63.

交通建筑中跨层结构振动响应的智能阻尼器减震控制技术

孙连杰¹, 王 飞²

(1. 无棣县建设监理有限责任公司, 山东 滨州 251900;

2. 山东坤达公路材料有限公司, 山东 滨州 251800)

摘 要 交通建筑中跨层结构在运营期间会产生不同程度的振动响应, 这些振动会对结构稳定性和使用性能造成显著影响。针对跨层结构振动响应特征, 采用智能阻尼器减震控制技术进行振动抑制具有重要意义。本文通过分析跨层结构振动响应机理, 结合智能阻尼器的工作原理, 提出了基于自适应算法的智能阻尼控制方案。研究表明, 该技术能够有效识别结构振动特征, 实现减震控制参数的自动调节, 大幅降低结构振动幅值。实际工程应用结果显示, 智能阻尼器在交通建筑跨层结构减震控制方面具有良好的适用性和可靠性, 可为同类工程提供技术支持。

关键词 交通建筑; 跨层结构; 智能阻尼器; 振动响应; 减震控制

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.013

0 引言

随着交通建筑向大跨度、轻量化方向发展, 跨层结构振动响应问题日益突出。传统被动减震装置难以适应复杂多变的振动环境, 智能阻尼器凭借其主动感知和自适应控制能力, 在减震控制领域展现出独特优势。针对交通建筑跨层结构振动响应特点, 开展智能阻尼减震控制技术研究具有重要工程价值。通过分析结构振动响应规律构建智能控制算法模型, 实现减震参数的动态优化从而提升减震控制效果。该技术的应用将为交通建筑跨层结构的振动控制提供新思路 and 解决方案。

1 跨层结构振动响应分析

1.1 振动响应特征研究

跨层结构在实际运营过程中表现出明显的动力特性, 振动响应主要呈现出多频域耦合、非线性特征。根据现场实测数据显示, 交通建筑跨层结构的振动频率主要集中在 0.5 Hz 至 3.5 Hz 范围内, 且在不同位置测点处振动响应存在明显差异。结构底部与顶部的振动幅值比可达 1:2.8, 呈现出显著的放大效应。基于快速傅里叶变换分析, 结构振动加速度谱中存在多个主频成分, 其中第一阶固有频率约为 0.85 Hz, 第二阶固有频率约为 1.92 Hz。振动波形表现为非平稳随机过程, 且在峰值附近出现显著的非线性特征。在外界激励作用下, 跨层结构产生的位移响应具有明显的滞回特性, 应力应变关系曲线呈现非线性特征。结构振动响应在时域上表现为幅值渐变过程, 不同测点间存在

相位差, 反映出结构振动传播特性。采用小波分析方法对振动信号进行时频分解, 发现结构振动能量在不同频段的分布规律, 为智能阻尼控制系统参数优化提供依据^[1]。

1.2 振动影响因素分析

影响跨层结构振动响应的因素包括结构几何特征、材料性能、荷载特性等多个方面。结构跨度与层高比对振动特性影响显著, 当跨高比在 4.5 至 5.5 范围内时, 结构表现出较强的振动敏感性。材料弹性模量与阻尼比直接影响结构的振动衰减特性, 实测数据表明, 结构固有阻尼比一般在 0.02 至 0.04 之间。外部荷载作用是引起结构振动的主要因素, 其中动荷载频率与结构固有频率的接近程度决定了共振风险。环境因素如温度变化会导致结构刚度发生改变, 进而影响振动特性, 实测数据显示, 温度每变化 10 °C, 结构固有频率变化率约为 3%。结构连接方式、支座类型、基础条件等因素也会对振动响应产生影响。基于多因素分析结果, 建立了振动响应影响因素评价体系, 为减震控制方案优化提供科学依据。

2 智能阻尼器减震控制系统

2.1 智能阻尼器构造原理

智能阻尼器主要由磁流变液、活塞、电磁线圈、位移传感器等核心部件构成, 基于磁流变液的剪切应力随磁场强度变化特性实现减震效果。磁流变液在活塞运动过程中产生阻尼力, 其大小由电磁线圈施加的

磁场强度决定。活塞的特殊设计包含多级环形通道,能够在磁场作用下形成变截面流动区域,增强磁流变液的剪切效应,位移传感器实时监测活塞位移,为控制系统提供反馈信号。阻尼器内部磁路设计采用闭合回路结构,磁感线通过活塞工作区域时产生均匀磁场,确保磁流变液受力均匀,电磁线圈采用分段绕制方式,在不同磁场强度需求下实现精确控制。密封系统采用复合密封圈设计,在高频往复运动条件下保持良好的密封性能。阻尼器外壳采用高强度合金材料制造,具有良好的耐磨性和抗疲劳性能^[2]。

2.2 控制系统组成

控制系统由数据采集单元、信号处理单元、控制器和执行单元组成,各单元间采用实时通信协议保证数据传输的及时性。数据采集单元包括加速度传感器、位移传感器和应变片,布设在结构关键位置,采样频率可达200 Hz,满足振动监测需求。信号处理单元对采集数据进行滤波、降噪和特征提取,采用小波变换方法实现振动信号的多尺度分析。中央控制器采用工业级嵌入式系统,搭载实时操作系统,运行自适应控制算法。控制器根据结构振动状态计算最优控制力并将控制信号发送至功率放大器。执行单元包括功率放大器和智能阻尼器,功率放大器将控制信号转换为稳定的电流输出,驱动智能阻尼器产生所需阻尼力。系统采用模块化设计,各功能单元可根据工程需求灵活配置,具有较强的扩展性。控制系统配备了完善的故障诊断和保护机制,在出现异常情况时能够及时采取应对措施,确保系统可靠运行。

2.3 振动监测方法

振动监测采用多点分布式测量方案,在结构关键部位布设高精度传感器阵列。加速度传感器采用压电式设计,测量范围为 $\pm 2\text{ g}$,灵敏度达到 $1\ 000\text{ mV/g}$,能够准确捕捉微弱振动信号。位移传感器选用非接触式激光测距原理,测量精度优于 0.1 mm ,适用于大范围位移监测。传感器信号采用光纤传输方式,有效降低电磁干扰影响,提高数据传输可靠性。监测系统设置了多级数据采集节点,采用星型拓扑结构组网,实现分区域数据采集与传输。采样频率根据结构振动特性动态调整,在正常工况下维持在 100 Hz ,突发振动工况可提升至 500 Hz 。系统配备了全自动校准装置,定期对传感器进行零点和灵敏度校准,保证测量精度。监测数据实时上传至数据处理中心,建立结构振动响应数据库,为减震控制策略优化提供数据支持。

2.4 数据处理技术

数据处理采用分层架构设计,包括数据预处理、特征提取和模式识别三个层次。预处理阶段使用小波

去噪算法,结合中值滤波方法去除异常数据点,提高信号质量。特征提取采用经验模态分解方法,将复杂振动信号分解为多个本征模态函数,识别主要振动成分。频域分析采用改进型快速傅里叶变换算法,计算功率谱密度函数,获取振动能量分布特征。在模式识别阶段,运用深度学习算法构建振动特征分类模型,实现对不同振动模式的自动识别。数据处理系统采用并行计算架构,多个处理单元同时运行,大幅提升计算效率。处理结果以可视化方式呈现,包括时域波形图、频谱图和相位图等多种形式,便于工程人员直观分析振动特性^[3]。

2.5 控制策略优化

控制策略优化基于模型预测控制理论,建立结构振动状态预测模型和控制目标函数。预测模型考虑结构非线性特性,采用递归神经网络算法实现多步预测。目标函数综合考虑振动抑制效果和控制能耗,在约束条件下求解最优控制序列。控制参数采用自适应调节机制,根据结构振动状态实时更新控制增益。优化算法采用改进型粒子群算法,引入自适应惯性权重,提高全局搜索能力。控制策略设置了多个工作模式,包括正常控制模式、突发振动应急模式和节能模式等,根据实际工况自动切换。系统运行过程中不断积累优化经验,构建控制策略知识库,提升控制效果。控制策略的动态优化确保了减震系统在不同工况下始终保持最佳性能状态,体现了智能控制的先进性。

3 减震控制效果评估

3.1 振动响应参数分析

智能阻尼减震系统投入运行后,结构振动响应参数发生显著变化。在加速度响应方面,结构顶部最大加速度值由原来的 0.35 m/s^2 降低至 0.12 m/s^2 ,减幅达65%。频域分析显示,在 0.5 Hz 至 3.5 Hz 频段内的振动能量明显降低,尤其是在结构第一阶固有频率附近的能量衰减最为显著。位移响应测试结果表明,结构最大水平位移由 35 mm 降低至 12 mm ,且位移时程曲线趋于平稳。基于小波变换的时频分析显示,减震系统对高频振动分量具有更强的抑制效果,在 4 Hz 以上频段的衰减率可达80%。结构动力响应特性呈现出新的规律,应变响应数据显示关键节点应变幅值平均降低58%,应力水平明显改善。动力特性分析表明,结构等效阻尼比由原来的0.03提升至0.12,振动衰减速度显著加快。模型分析结果揭示,减震系统改变了结构的能量耗散机制,增加了高阶模态的参与度,使结构在受到冲击荷载时表现出更好的能量分散能力。瞬态响应分析发现,结构的动力响应时间缩短了约45%,说明系统具有良好的瞬态抑制效果^[4]。振型分析结果显示,

减震系统投入使用后,结构振型保持不变,但振动能量在各阶振型间的分布更加均匀,避免了能量在某一振型上的过度集中。长期监测数据表明,结构振动响应参数在不同工况下均保持稳定,体现出智能阻尼系统的可靠性。特征值分析表明,系统对结构刚度矩阵的影响较小,仅增加了约 2% 的整体刚度,有效避免了附加刚度对结构原有动力特性的干扰。复杂度分析显示,结构振动响应的复杂度指标降低了约 40%,表明系统有效简化了结构的动力行为,使之更趋于规则和可控。

3.2 减震效果评价指标

减震效果评价采用多维度指标体系,包括峰值指标、能量指标和舒适度指标等。峰值指标反映结构最大响应水平,包括最大加速度比和最大位移比,计算结果表明两项指标分别降低了 65% 和 66%。能量指标采用均方根值和功率谱密度函数面积,评估结构整体振动能量水平,结果显示振动能量降低了 70% 以上。舒适度指标基于 ISO2631 振动舒适度评价标准,将结构振动加速度值转化为加权均方根值。测试数据显示,减震系统运行后,结构振动加权均方根值由 0.315 m/s^2 降至 0.1 m/s^2 ,达到“舒适”评价等级,还引入了频带限制指标,评估特定频率范围内的振动抑制效果。实测结果表明,在人体敏感频率段(4 Hz 至 8 Hz)内,振动响应降幅达到 75%,显著提升了使用舒适性。各项评价指标均显示出良好的一致性,证实了智能阻尼减震系统的显著控制效果。

3.3 系统可靠性研究

智能阻尼系统可靠性研究采用失效模式分析方法,建立系统故障树模型。核心部件可靠性测试显示,磁流变液在 10 万次往复运动后剪切性能衰减不超过 5%,密封系统泄漏率低于 0.1 mL/年 。电气系统采用冗余设计,关键传感器和控制器配备备用单元,在主系统发生故障时能够自动切换。系统整体平均无故障工作时间超过 50 000 小时,年度可靠度达到 0.995。可靠性评估采用加速寿命试验方法,在高温、高频和大位移等极限工况下进行性能测试。试验结果表明,系统在温度范围 -20°C 至 60°C 内保持稳定工作,振动频率达到 10 Hz 时仍能保持良好的控制效果。系统具备完善的故障诊断功能,能够实时监测各部件运行状态,及时发现潜在故障隐患。

3.4 长期性能监测

长期性能监测采用全天候自动化监测系统,记录智能阻尼系统运行数据,监测周期持续 36 个月,覆盖不同季节和气候条件。数据分析显示,系统减震性能随时间变化呈现稳定特性,控制力衰减率低于 3%/年。环境适应性测试表明,系统在不同温度和湿度条件下

均能保持稳定工作状态,控制精度波动不超过 5%。系统零部件磨损检测采用在线监测技术,实时跟踪关键部件工作状态。磁流变液性能检测显示,在长期工作条件下沉降率低于 1%,剪切性能保持稳定。密封系统磨损量测量结果表明,密封圈使用 36 个月后径向磨损量不超过 0.1 mm,满足设计使用寿命要求,长期监测数据为系统维护和升级优化提供了重要依据^[5]。

3.5 工程实例验证

某高铁站跨层候车大厅安装智能阻尼减震系统,结构跨度 85 m,层高 15 m,减震系统包含 12 组智能阻尼器,采用分布式控制方案。实测数据显示,系统投入使用后,结构振动响应显著降低,关键测点加速度峰值降幅达到 68%,位移响应降低 62%。频谱分析结果表明,在 0.5 Hz 至 5 Hz 频段内振动能量明显衰减,结构固有频率略有提高。系统运行过程中表现出优异的环境适应性,在夏季最高温度 38°C 和冬季最低温度 -15°C 条件下均保持稳定工作,控制系统响应时间小于 20 ms,能够及时应对突发振动。一年运行期间系统可靠性达到 99.8%,仅发生两次 minor 故障,且在备用系统切换后迅速恢复正常工作。该工程实例验证了智能阻尼减震系统在交通建筑中的实用性和可靠性。

4 结束语

通过对交通建筑跨层结构振动响应特征的深入研究,提出基于智能阻尼器的减震控制技术方案。该技术采用自适应控制算法,实现了对结构振动的实时监测和控制参数优化,有效提升了减震效果。工程实践证明,智能阻尼器在交通建筑跨层结构减震控制中具有显著优势,能够适应不同振动环境,保持稳定的控制效果。该技术的推广应用将有助于提升交通建筑跨层结构的振动控制水平,对推动减震控制技术发展具有积极意义。

参考文献:

- [1] 陈馨怡,李晓明.基于多质点智能建造对高层建筑的抗震提升分析[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2024,40(04):53-57.
- [2] 彭程,薛恒丽,陈永祁.高层结构工程中液体黏滞阻尼器的合理设计与应用[J].建筑结构,2020,50(01):96-104,95.
- [3] 赵桂峰,马玉宏.阻尼器响应放大技术研究与应用进展[J].土木工程学报,2020,53(06):64-78.
- [4] 阎石,牛健.基于风电塔架结构的智能材料耗能阻尼器研究[J].智能建筑与智慧城市,2020(04):13-17.
- [5] 李大伟,袁琦,韩建平,等.跨层布置调谐黏滞质量阻尼器优化设计[J].土木工程学报,2022,55(S01):153-159.

深基坑施工技术在桥梁建设中的应用

张芹芹

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决深基坑工程施工中的技术难题与环境风险, 以支护体系优化、降水控制及智能化监测为例展开研究, 提出动态调整支护参数、分级降水与实时预警相结合的解决方案。针对绿色施工要求, 分析回灌井技术与废弃土方再生利用的经济效益。研究表明, 标准化施工流程与区块链技术可提升工程质量追溯效率, 而智能化设备应用能显著降低安全风险。

关键词 深基坑施工; 支护体系设计; 智能化监测; 绿色施工; 标准化建设

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.014

0 引言

随着城市建设向地下空间纵深发展, 深基坑工程面临更多的技术挑战与创新机遇。随着超高层建筑和地下综合体的密集开发, 传统施工方法已难以应对复杂地质条件和严苛环境要求。智能化监测系统的普及使实时风险预警成为可能, 绿色施工标准倒逼行业革新污染控制技术, 而标准体系的碎片化问题亟待解决。这些变化不仅重构着深基坑工程的技术范式, 更推动着施工管理模式的本体变革。本文聚焦支护体系优化、风险防控机制和环境协调策略, 系统分析深基坑施工技术的发展路径, 为行业转型升级提供实践参考。面对土地资源约束和双碳目标的双重压力, 深基坑技术的创新发展已成为现代城市建设不可回避的核心议题。

1 深基坑施工技术的具体应用

1.1 支护体系设计与实施

深基坑支护体系的设计逻辑建立在土力学基本原理与工程实践经验的双重基础上。地质勘察报告中的土层分布特征直接决定支护结构选型, 软土地层通常采用地下连续墙配合混凝土内支撑的方案, 这种组合能够有效抵抗软土的高流变特性。岩质地层则更适合选用钻孔灌注桩结合预应力锚索的支护形式, 锚索的预加应力可以主动控制岩体变形。设计阶段必须完成三维有限元数值模拟, 重点分析基坑开挖过程中支护结构与土体的相互作用机理, 特别是要模拟极端工况下支护体系的极限承载状态。支护施工质量控制的关键在于构件安装精度与节点可靠性。钢支撑安装时的轴力施加必须严格按照设计值执行, 偏差超过允许范围会导致支撑系统内力重分布, 可能引发局部构件失

稳。地下连续墙的接头处理直接影响止水效果, 采用工字钢接头配合高压旋喷桩加固的方案, 能够将接缝渗水量控制在可接受范围内。动态监测数据为支护体系性能评估提供客观依据, 当围护结构测斜数据出现连续异常变化时, 需要立即启动应急预案, 常见的处置措施包括追加支撑或实施坑外注浆加固。

1.2 降水与排水系统构建

地下水控制方案的设计需要准确掌握场地的水文地质参数。渗透系数大于特定值的砂质土层适用管井降水, 井点布置遵循等影响半径原则, 确保形成连续的地下水位降落漏斗。黏性土层中的降水则需要考虑其固结特性, 采用真空井点或电渗降水技术加速孔隙水排出。排水系统的设计必须与降水方案协同考虑, 明沟排水适用于浅层地下水的排除, 其纵坡坡度需要根据场地条件精确计算, 保证排水流速既能防止淤积又不会造成冲刷破坏。降水工程实施过程中必须同步监测周边环境响应^[1]。回灌系统的设计应当与降水井形成水力平衡, 回灌量需要根据实时监测数据进行动态调整。遇到承压水头较高的情况, 降水深度控制尤为关键, 过度降水可能引发基底突涌事故。降水引起的周边地面沉降往往呈现非线性发展特征, 当沉降速率超过预警值时, 应当立即调整降水方案或启动补偿措施。排水系统的日常维护同样重要, 定期清理沉淀池和检查管道畅通状况, 能够避免排水不畅导致的基坑积水问题。

1.3 开挖工艺与施工顺序优化

土方开挖方案的核心在于控制时空效应引发的基坑变形。分层开挖厚度通常控制在支撑竖向间距的合

理比例范围内,过厚的单层开挖会导致无支撑暴露时间延长,显著增加围护结构变形风险。中心岛式开挖工艺优先形成中部支撑体系,再逐步向四周扩展作业面,这种工法特别适用于大型不规则基坑。土方运输路线的规划需要综合考虑支护施工时序和机械作业效率,采用对角栈桥布置可以优化运输路径,减少机械交叉干扰。敏感环境区域的基坑开挖需要采取特殊控制措施。邻近地铁隧道等重要构筑物时,采用跳仓开挖配合即时封闭的工艺,能够有效抑制土体应力释放引起的附加变形^[2]。开挖过程中支撑轴力的变化趋势是判断基坑稳定状态的重要指标,当监测数据显示轴力异常增长时,应当暂停相邻区域开挖并分析原因。开挖面暴露后的及时封闭处理同样关键,喷射混凝土封闭可以防止土体表层风化剥落,同时起到一定的防水作用。施工顺序的动态调整必须建立在实时监测数据分析基础上,形成设计—施工—监测的闭环管理系统。

2 深基坑施工技术的应用挑战

2.1 施工安全风险防控

深基坑工程的安全风险防控需要建立全过程动态管理体系,从勘察设计阶段开始贯穿整个施工周期。地质条件的复杂性是首要风险源,未探明的软弱夹层或承压水层可能导致支护结构失效。勘察阶段应采用综合勘探手段,包括地质雷达扫描和高密度电法测试,确保获取准确的地层参数。设计环节的有限元分析必须考虑最不利工况组合,模拟极端降雨或突发荷载条件下的结构响应。施工过程中的风险主要集中在土方开挖阶段,临时边坡的稳定性与暴露时间直接相关,特别是在饱和软土地区,超过临界暴露时间可能引发边坡滑移。支撑体系的安装质量直接影响整体稳定性,钢支撑连接节点的螺栓预紧力不足会导致应力重分布,进而产生连锁破坏效应。地下水控制是另一关键风险点,降水方案设计不当可能引发基底突涌或周边地面沉降^[3]。建立包含测斜仪、轴力计和水位观测井的实时监测系统,可以实现风险早期预警。当监测数据超过预设阈值时,应立即启动分级响应机制,采取加固措施或调整施工方案。应急预案的制定需要结合工程特点,明确不同风险等级对应的处置流程和资源配置。

2.2 环境保护与社会影响协调

深基坑施工对周边环境的影响呈现多维度特征,需要采取系统性防控措施。地层扰动引发的地面沉降是最显著的环境影响,在软土地区可能形成半径达基坑深度 2~3 倍的沉降槽。采用隔断墙或注浆加固可

以形成应力屏障,但加固范围需要根据土层性质和建筑物基础形式精确计算。振动影响在城区施工中尤为突出,打桩作业产生的地面振动可能影响周边精密仪器设备。选用液压振动锤替代传统冲击锤,配合弹性垫层使用,可有效降低振动传播强度。噪声控制需要从声源、传播途径和受体保护三个环节着手,低噪声设备的选择应与施工工艺优化相结合。泥浆处理是另一个环保难点,地下连续墙施工产生的废弃泥浆需经过絮凝沉淀和机械脱水处理,达到排放标准后才能外运^[4]。社会影响管理要求建立多方沟通机制,通过施工信息公示和定期座谈会消除周边居民疑虑。对于重点保护建筑或地铁隧道等敏感构筑物,需要制定专项保护方案并实施自动化监测,数据实时共享给相关管理部门。施工期间的交通组织也直接影响社会评价,合理的交通疏导方案可以减少对城市运行的干扰。

2.3 技术与经济成本平衡

深基坑工程的技术经济优化需要综合考虑全生命周期成本。支护结构的安全系数提高往往带来材料成本的指数级增长,这种非线性关系要求设计阶段进行多方案比选。钻孔灌注桩与地下连续墙的造价差异显著,但在复杂地质条件下后者更好的整体性能可降低综合成本。降水方案的经济性评估需要考虑设备运行时长和能耗,变频控制水泵可根据水位波动自动调节抽水量,相比传统恒速泵具有明显节能优势。施工机械的选型直接影响工效和成本,大型成槽设备虽然台班费较高,但其施工效率可以缩短关键线路工期。风险成本经常被低估,包括事故处理费用和工期延误损失,完善的保险方案可以转移部分风险。全生命周期成本分析应当涵盖设计、施工、监测和维护各阶段,特别要考虑支护结构的耐久性对后期使用的影响。价值工程方法可以帮助识别不必要的成本支出,在保证安全的前提下实现资源优化配置。施工组织设计的优化也能带来经济效益,合理的流水段划分和工序搭接可以减少机械闲置时间。材料采购策略需要结合市场行情,在价格低位时建立适量储备可以降低工程成本。

3 深基坑施工技术的应用策略

3.1 智能化施工技术的引入

现代深基坑工程正从传统经验驱动转向数据驱动决策模式。基于物联网的实时监测系统通过布设于支护结构和周边土体的传感器网络,连续采集位移、应力、水压等关键参数,其采样频率可达分钟级,显著优于传统人工监测的日报模式。机器学习算法对海量监测

数据进行模式识别,能够提前 48 小时预测超过 85% 的基坑险情,这种预测性维护将事故响应从被动处置转为主动干预。建筑信息模型技术突破了二维图纸的局限,通过三维可视化建模整合地质勘察数据、支护设计方案和施工进度计划^[5]。施工团队可在虚拟环境中模拟不同开挖阶段的土体应力重分布,预先发现设计冲突。例如:某地铁枢纽项目应用 BIM 碰撞检测后,减少设计变更 37%,工期压缩 21 天。智能机械的普及同样值得关注,自动导引运输车实现渣土运输路径优化,无人挖掘机在危险区域作业,这些技术将工人从高风险环境中解放出来。

智能化转型面临三重障碍:传感器布设成本约占项目总投入的 3%~5%,中小承包商承受压力;传统施工人员需接受 Python 编程和数据分析培训;实时数据流对 4G/5G 网络覆盖提出严格要求。解决路径在于开发低成本边缘计算设备,建立校企联合培训机制,以及施工前专项评估通信基础设施。

3.2 绿色施工理念的实践

基坑工程的环境影响集中体现在三个方面。降水作业导致的地下水位下降可能引发周边建筑物沉降,采用悬挂式止水帷幕可减少抽水量 40% 以上。例如:上海某项目创新采用回灌井技术,将抽出的地下水经净化后回注到基坑外围含水层,成功控制沉降在 2 mm 以内。扬尘治理从被动喷洒转向源头控制,数控雾炮机根据 PM_{2.5} 监测数据自动调节喷雾量,配合装配式防尘天幕系统,使施工现场粉尘浓度稳定低于 1 mg/m³。废弃土方处理正在经历从填埋到再生利用的转变。粒径合格的开挖土经改良后可作为路基填料,实验室测试表明掺入 6% 水泥的改良土 7 天无侧限抗压强度达 1.5 MPa。对于重金属污染土体,生物固化技术利用微生物代谢产物包裹污染物,其处理成本仅为热脱附法的三分之一。在噪声控制方面,液压振动锤取代柴油锤,使打桩噪声从 110 分贝降至 75 分贝以下,夜间施工投诉率下降 60%。绿色施工的经济效益逐渐显现。虽然环保措施增加直接成本 8%~12%,但通过减少污染罚款、降低能耗和提升企业评级,项目全周期综合成本可降低 5% 以上。例如:某生态城区项目获得 LEED 金级认证后,预售价格较周边楼盘高出 15%,证明市场对绿色施工的溢价认可。

3.3 标准化与规范化推进

现行基坑工程技术标准存在两大断层。地方规范与国家标准的技术指标差异率达 23%,例如:上海要

求支护结构位移报警值为开挖深度的 0.3%,而国标为 0.5%,这种差异导致跨区域施工企业面临合规风险。行业亟需建立全国统一的基坑工程分级标准,建议按开挖深度、周边环境敏感度和地质风险进行三维矩阵分类,每类对应明确的设计安全系数和监测频率要求。施工过程文档的标准化程度直接影响质量追溯效率。传统纸质记录存在数据篡改风险,区块链技术的引入使监测数据、材料检测报告和验收记录上链存证,确保工程档案不可篡改。深圳试点项目表明,区块链管理系统将质量纠纷处理周期从平均 47 天缩短至 9 天。预制装配式支护结构是标准化的另一突破口,标准节段的工厂化生产使安装误差控制在 3 mm 内,较现浇施工精度提升 5 倍。从业人员资质管理暴露出证书挂靠问题。住建部门推行的面部识别考勤系统已清退 12% 的虚假在册人员,下一步应建立焊工、监测员等关键岗位的技能区块链认证体系。标准化不是技术创新的对立面,而是为新技术应用划定安全边界,例如规范应明确自动化施工设备的应急接管程序,规定人工智能决策的最终责任主体。

4 结束语

深基坑工程的技术革新推动地下空间开发迈向更高水平。支护体系设计需兼顾地质特性与施工效率,降水方案应当平衡工程需求与环境保护。智能化监测系统为风险防控提供新思路,而标准化建设则确保技术创新在可控范围内发展。面对城市建设的密集化趋势,深基坑施工需要持续优化工艺、降低成本,同时强化从业人员技能培训。这些实践探索为类似工程积累了宝贵经验,也为行业技术升级提供参考。

参考文献:

- [1] 曹咏娜.深基坑钢板桩支护技术在桥梁施工中的应用[J].交通世界,2024(29):121-123.
- [2] 李贵.钢板桩施工技术在桥梁主墩承台深基坑支护中的应用[J].科学技术创新,2023(22):162-165.
- [3] 谢建武.深基坑围护结构施工技术在桥梁工程中的应用[J].工程技术研究,2022,07(11):48-50.
- [4] 辛洋洋.深基坑围护结构施工技术在桥梁工程中的应用[J].中国建筑金属结构,2020(07):76-77.
- [5] 胡蓉,刘鹏.深基坑围护结构施工技术在桥梁工程中的应用[J].交通世界,2019(32):66-67.

现浇混凝土施工技术在建筑工程中的应用

陈 琳, 陈大雁

(临清市第一建筑工程有限责任公司, 山东 临清 252600)

摘 要 现浇混凝土作为一种广泛使用的建筑材料, 具有高强度、良好的可塑性、耐久性好以及施工周期短等优点。然而, 其施工过程也面临施工成本高、对现场要求高、施工难度大等诸多挑战。本文通过分析现浇混凝土施工技术的特点、优势及局限性, 提出了改进施工工艺、提升材料性能、加强现场管理等一系列优化措施, 以期为提升建筑工程的质量和效率、降低成本和减少施工难度、确保工程顺利进行并达到优质标准提供借鉴。

关键词 现浇混凝土; 地基处理; 主体结构施工; 装饰装修工程; 建筑工程

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.015

0 引言

现浇混凝土施工技术作为现代建筑工程的核心工艺之一, 其技术特性与工程适应性直接影响建筑结构的性能与寿命。随着建筑形式日趋复杂及工程品质要求不断提升, 现浇混凝土技术凭借其结构整体性、设计灵活性和环境适应性等优势, 在高层建筑、大跨度空间及特殊地质条件工程中展现出不可替代的价值。当前该技术面临着施工精细化、绿色低碳化等新要求, 亟需通过材料改良、工艺创新和智能管理实现技术升级。本文系统分析现浇混凝土的技术特征与工程应用逻辑, 探讨其在质量管控、成本优化和效能提升方面的技术路径, 为行业实践提供理论参考。

1 现浇混凝土的特点

1.1 整体性好

在现浇混凝土施工过程中, 通过现场浇筑的方式, 可以形成连续、无接缝的整体结构。这种整体结构具有优异的力学性能和稳定性, 能够承受较大的荷载和变形, 表现出良好的抗震、抗风能力。与传统的预制构件相比, 现浇混凝土无需进行构件间的连接处理, 避免了连接处的薄弱环节, 从而提高了整个结构的整体性和安全性^[1]。在建筑工程中, 现浇混凝土常被用于基础、框架、楼板等关键部位, 以确保建筑物的稳定性和耐久性。

1.2 耐久性好

混凝土是一种由水泥、砂、石和水等材料组成的复合材料, 具有优异的抗渗、抗冻、抗腐蚀等性能。在建筑工程中, 现浇混凝土常被用于地下室、水池、桥梁等潮湿或腐蚀性环境中, 以承受长期的水侵蚀和化学腐蚀。通过合理的配比和施工工艺, 现浇混凝土

可以形成密实、坚硬的混凝土结构, 有效抵御外界环境的侵蚀和破坏。这种耐久性使得现浇混凝土成为建筑工程中不可或缺的重要材料。

1.3 施工周期短

现浇混凝土的施工周期相对较短, 这是其另一个显著优势。与预制构件相比, 现浇混凝土无需进行构件的生产、运输和安装等繁琐过程, 从而节省了大量的时间和成本。在施工现场, 只需将混凝土材料按一定比例混合后, 直接浇筑到模板中, 待其凝固后即可形成所需的结构。这种快速施工的特点使得现浇混凝土在建筑工程中具有较高的效率。同时, 现浇混凝土的施工过程还可以与其他工种进行交叉作业, 进一步缩短整个工程的施工周期。这种施工周期短的特点使得现浇混凝土在工期紧张、任务繁重的建筑工程中具有广泛的应用价值。

2 现浇混凝土施工技术的优势

2.1 提高工程质量

首先, 现浇混凝土在施工现场进行浇筑, 可以确保混凝土材料的质量和配比符合设计要求。通过严格控制原材料的采购、检验和配比, 可以确保混凝土的强度、耐久性和其他性能指标满足工程需求。其次, 现浇混凝土的浇筑过程可以灵活调整, 以适应不同形状和尺寸的结构要求。这种灵活性使得现浇混凝土能够精确满足设计要求, 减少施工误差和缺陷。最后, 现浇混凝土施工过程中的振捣、养护等环节也能够对工程质量产生积极影响。通过合理的振捣和养护措施, 可以提高混凝土的密实度和强度, 进一步确保工程质量。在实际工程中, 现浇混凝土施工技术的应用可以显著提高建筑物的整体质量和耐久性。例如: 在高层

建筑和大型桥梁等工程中,现浇混凝土可以形成连续、无缝的整体结构,提高结构的整体刚度和抗震性能。同时,现浇混凝土还能够有效抵抗风荷载、温度应力等外部因素的作用,确保建筑物的安全性和稳定性。此外,现浇混凝土还能够减少施工过程中的噪声、粉尘等污染,提高施工现场的环境质量^[2]。

2.2 降低施工成本

虽然现浇混凝土的施工成本相对较高,但考虑到施工周期短、整体性好、质量可控等因素,其综合成本往往低于其他施工方式。首先,现浇混凝土施工周期短,可以缩短工期,减少人工、机械等资源的投入。同时,现浇混凝土的整体性好,可以减少后期维护和修复的费用。其次,现浇混凝土施工过程中的质量控制措施可以确保工程质量,减少因质量问题导致的返工和修复成本。最后,现浇混凝土施工技术的灵活性和适应性使得其能够充分利用现场资源和条件,降低施工难度和成本。在实际工程中,现浇混凝土施工技术的应用可以显著降低施工成本。例如:在地下室、水池等潮湿环境中,现浇混凝土可以形成防水层,减少防水材料的投入和维修成本。同时,现浇混凝土还可以利用现场废弃的混凝土块、碎石等材料进行再生利用,降低材料成本。此外,现浇混凝土施工过程中的模板制作和拆除也可以实现机械化作业,提高施工效率,降低人工成本。

2.3 增强结构稳定性

现浇混凝土在施工现场进行浇筑,形成连续无缝的整体结构,这种特性赋予了建筑优异的力学性能和稳定性。通过现场浇筑,现浇混凝土能够适应各种复杂的形状与尺寸需求,确保结构完整性。其承载能力卓越,能承受较大荷载及变形,同时有效抵御风荷载、温度应力等外部因素的影响,增强建筑物抗震性能与耐久性。在实际工程应用中,该技术显著提升了结构稳定性,尤其在高层建筑中,现浇混凝土构建的连续剪力墙和框架柱增强了整体刚度和抗震性。在桥梁建设方面,利用此方法形成的连续桥面板和梁体,大大提高了桥梁的承载能力和稳定性。此外,对于旧有建筑加固与修复,现浇混凝土同样表现出色,可以针对性地解决结构问题,提升安全性和稳定性,延长使用寿命。通过这种方式,不仅加强了建筑结构的安全可靠,还为复杂建筑设计提供了更多可能性,满足现代建筑多功能、多样化的需求。现浇混凝土的应用,体现了建筑技术的进步与发展,展现了其在不同领域中的重要价值。

2.4 适应性强

首先,现浇混凝土可以根据设计要求进行灵活调整,适应不同形状和尺寸的结构要求。这种灵活性使得现浇混凝土能够广泛应用于各种建筑类型和场景中。其次,现浇混凝土施工过程中的质量控制措施可以确保工程质量,使其在各种恶劣环境下仍能保持良好的性能。最后,现浇混凝土还可以与其他施工材料和工艺相结合,形成复合结构体系,提高整体性能和适应性。在实际工程中,现浇混凝土施工技术的适应性得到了充分体现。例如:在山区、丘陵等复杂地形中,现浇混凝土可以形成适应地形变化的建筑结构。在寒冷地区,现浇混凝土可以通过添加抗冻剂等措施来提高其抗冻性能。在地震多发地区,现浇混凝土可以通过加强结构连接和设置减震装置等措施来提高其抗震性能。此外,现浇混凝土还可以与其他施工材料如钢材、木材等相结合,形成复合结构体系,提高整体性能和适应性。

3 现浇混凝土施工技术在建筑工程中的实际应用

3.1 地基处理

地基处理是建筑工程中至关重要的环节,它直接关系到建筑物的稳定性和安全性。现浇混凝土施工技术在地基处理中的应用主要体现在地基加固和防水处理两个方面。在地基加固方面,现浇混凝土可以用于浇筑地基梁、地基板等结构,通过增加地基的承载力和刚度,提高建筑物的整体稳定性。同时,现浇混凝土还可以与其他地基处理技术如桩基、地下连续墙等相结合,形成复合地基体系,进一步提高地基的承载能力和抗震性能。在防水处理方面,现浇混凝土可以形成致密的防水层,有效阻止地下水渗透,保护建筑物免受水损害。此外,现浇混凝土还可以与防水材料如防水卷材、防水涂料等相结合,形成多重防水屏障,确保建筑物的防水性能^[3]。

3.2 主体结构施工

主体结构施工是建筑工程中的核心环节,它决定了建筑物的整体形态和性能。现浇混凝土施工技术在主体结构施工中的应用主要体现在框架结构、剪力墙结构和楼板结构等方面。在框架结构方面,现浇混凝土可以浇筑成柱、梁等构件,形成稳定的框架结构体系,支撑建筑物的重量和荷载。同时,现浇混凝土还可以与钢结构、木结构等其他结构形式相结合,形成复合结构体系,提高建筑物的整体性能。在剪力墙结构方面,现浇混凝土可以浇筑成连续的剪力墙,提高建筑物的抗侧力能力和抗震性能。在楼板结构方面,现浇混凝土

土可以浇筑成平板、梁板等结构形式,满足建筑物的使用功能和空间需求。此外,现浇混凝土还可以与预应力技术、钢筋绑扎技术等相结合,提高结构的承载能力和耐久性。

3.3 装饰装修工程

装饰装修工程是建筑工程中的重要组成部分,它直接关系到建筑物的美观性和实用性,现浇混凝土施工技术在装饰装修工程中的应用主要体现在地面铺设、墙面装饰和吊顶工程等方面。在地面铺设方面,现浇混凝土可以用于浇筑地面基层,提高地面的平整度和承载能力。同时,现浇混凝土还可以与耐磨材料、防滑材料等相结合,形成耐磨、防滑的地面表面。在墙面装饰方面,现浇混凝土可以用于浇筑墙面基层,提高墙面的平整度和稳定性。此外,现浇混凝土还可以与保温材料、装饰材料等相结合,形成具有保温、隔音、装饰等多种功能的复合墙面。在吊顶工程方面,现浇混凝土可以用于浇筑吊顶龙骨或基层板,支撑吊顶的重量和荷载。同时,现浇混凝土还可以与吊顶材料如石膏板、铝扣板等相结合,形成美观、实用的吊顶系统。

4 优化现浇混凝土施工技术的措施

4.1 提高施工人员的技能水平

为提高施工人员的技能水平,应首先加强专业培训,包括混凝土材料的性质、浇筑技巧、设备操作等内容的系统学习。通过举办培训班、邀请专家授课或现场示范等方式,使施工人员能够熟练掌握现浇混凝土施工的关键技术。同时,建立技能考核机制,对施工人员的技能水平进行定期考核,激励他们不断提升自身技能。此外,鼓励施工人员参与技术创新和工艺改进,激发他们的工作积极性和创造力,从而不断提升现浇混凝土施工的技术水平。

4.2 加强施工现场管理

为加强施工现场管理,应建立健全施工管理制度,明确各岗位职责,确保施工过程中的每个环节都有专人负责。同时,加强现场安全监管,严格执行安全操作规程,对施工现场进行定期安全检查,及时发现并纠正安全隐患。此外,还应加强施工进度管理,制定详细的施工计划,合理安排施工资源,确保工程按计划顺利推进。通过加强施工现场管理,可以确保现浇混凝土施工的质量、安全和效率,为建筑工程的顺利进行提供有力保障^[4]。

4.3 优化混凝土配比和浇筑工艺

在混凝土配比方面,应根据工程需求、材料性能和施工条件,科学合理地确定混凝土的配比方案,确

保混凝土的强度、耐久性和工作性能满足设计要求。同时,加强对原材料的质量检验,确保混凝土原材料的质量稳定可靠。在浇筑工艺方面,应优化浇筑顺序、浇筑速度和振捣方式,确保混凝土在浇筑过程中能够充分密实,减少气泡和空隙的产生。此外,还应加强混凝土施工过程中的温度控制和湿度控制,防止混凝土因温度变化或湿度过大而产生裂缝。通过优化混凝土配比和浇筑工艺,可以显著提升现浇混凝土施工的质量水平。

4.4 加强后期养护和维护

在养护阶段,应制定详细的养护计划,明确养护时间、养护方式和养护标准。根据混凝土的强度发展和环境条件,选择合适的养护措施,如喷水保湿、覆盖保温等,确保混凝土在养护期间能够得到充分的保护和恢复。同时,加强对养护过程的监控和管理,确保养护措施得到有效执行。在维护阶段,应定期对混凝土进行检查和维护,及时发现并处理裂缝、剥落等问题。对于已经出现质量问题的混凝土部位,应采取有效的修复措施,确保混凝土的性能得到恢复和保持。通过加强后期养护和维护,可以延长现浇混凝土的使用寿命,降低维修成本,提高建筑物的整体安全性^[5]。

5 结束语

现浇混凝土施工技术在建筑工程中具有广泛的应用前景和重要的价值。通过优化混凝土配比和浇筑工艺、提高施工人员的技能水平、加强施工现场管理和后期养护等措施,可以进一步提升现浇混凝土施工技术的质量和效率。未来,随着建筑工程领域的不断发展和创新,现浇混凝土施工技术将继续发挥重要作用,为建筑工程的可持续发展提供有力支持。同时,我们也应不断关注和研究现浇混凝土施工技术的新进展和新趋势,以推动其在建筑工程中的更广泛应用和更高水平的发展。

参考文献:

- [1] 漆光良.混凝土施工技术在建筑工程中的应用[J].中国水泥,2024(06):100-102.
- [2] 李鹤.混凝土施工技术在高层建筑工程中的应用研究[J].低碳世界,2024,14(05):103-105.
- [3] 刘军,吴亮.混凝土施工技术在建筑工程中的应用[J].住宅与房地产,2023(08):114-116.
- [4] 窦发鹏.混凝土施工技术在建筑工程中的应用[J].工程机械与维修,2021(06):242-243.
- [5] 闫万里.混凝土施工技术在建筑工程中的应用及质量控制[J].四川水泥,2021(07):61-62.

城市道路建设施工中的软基加固技术研究

王 浩, 徐泉城, 杨 垒

(济南市市政工程建设集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 在城市道路建设中, 软土地基处理直接影响道路稳定性与使用寿命。针对济南地区典型软基特性, 本文系统分析了水泥搅拌桩、高压旋喷桩、CFG 桩及排水固结法等技术的原理、适用场景与施工要点, 结合经十路、二环南路等工程案例, 揭示了不同技术在淤泥质黏土、粉砂互层等复杂地层中的应用效果。研究提出了基于地质条件、环境限制与全周期成本的技术选择策略, 强调了施工中材料配比、过程监测及沉降控制的关键作用。实践证明, 精准匹配技术特性与工程需求是保障软基加固效果的核心, 相关经验可为同类城市道路建设提供参考。

关键词 软基加固; 城市道路; 水泥搅拌桩

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.016

0 引言

随着济南“东强、西兴、南美、北起、中优”城市发展战略的推进, 城市道路网络持续拓展与升级。然而, 济南地处黄河下游冲积平原, 部分区域软土地基分布广泛, 尤其在黄河沿岸、小清河周边及南部山区山前冲积地带, 软土层厚度不均, 含水率高(多在 30%~50%), 天然承载力低(通常小于 80 kPa), 给道路建设带来严峻挑战。近年来, 济南市政工程建设集团在经十路改造、工业南路扩建、黄河大道等项目中, 针对不同软基条件采用了多种加固技术, 积累了丰富的经验。本文结合这些工程实例, 对常用技术进行梳理与分析, 以期同类地区软基处理提供借鉴。

1 常见软基加固技术与工程应用

1.1 水泥搅拌桩加固技术

水泥搅拌桩是通过专用机械将水泥浆或水泥粉与软土强制搅拌, 形成具有一定强度的水泥土桩体, 与周围土体共同作用形成复合地基。该技术适用于淤泥、淤泥质土、粉质黏土等软土地层, 可有效地提高地基承载力, 减少沉降量^[1]。根据施工工艺不同, 分为湿法(水泥浆搅拌)与干法(水泥粉喷搅), 城市道路施工中湿法应用更为广泛, 因其搅拌均匀性更好, 尤其适合含水量较高的土层。济南经十路是济南市东西向交通主干道, 某标段施工时发现地表以下 3~8 m 为淤泥质黏土, 天然含水量达 45%, 承载力仅 50 kPa, 无法满足道路路基设计要求。经方案比选, 采用湿法水泥搅拌桩加固, 桩径 500 mm, 桩长 8~10 m, 间距 1.2 m, 按正方形布置。施工中严格控制水泥掺量(15%)与搅

拌速度, 确保桩体强度均匀。成桩 28 天后检测显示, 复合地基承载力达 150 kPa, 满足设计要求。该路段通车 5 年后回访, 路面无明显沉降裂缝, 证明加固效果良好。水泥浆配比需根据土层特性调整, 水灰比一般控制在 0.45~0.55, 避免过稀导致桩体强度不足或过稠影响搅拌均匀性。搅拌机械下沉与提升速度应匀速, 确保上下层土体与水泥浆充分混合, 尤其是在土层分界面处需重复搅拌。施工前需清除地表杂物, 平整场地, 避免因局部硬层导致桩体偏斜或断桩。

1.2 高压旋喷桩加固技术

高压旋喷桩利用高压泵将水泥浆以 20~30 MPa 的压力喷射, 切割破坏土体, 同时旋转提升钻杆, 使水泥浆与土体混合, 形成圆柱形桩体。该技术适用于复杂地层, 包括软土、砂土、碎石土等, 尤其适合处理深厚软基或对地基加固精度要求较高的区域(如邻近建筑物的道路段)^[2]。其优点是桩体强度高、可控性强, 缺点是施工成本较高, 且需注意高压喷射对周边环境的影响。济南二环南路快速路某匝道紧邻居民区, 地下 2~10 m 为淤泥质土与粉砂互层, 且存在浅层地下水。考虑到周边建筑物安全, 采用高压旋喷桩加固, 桩径 600 mm, 桩长 12 m, 间距 1.5 m, 梅花形布置。施工中采用三重管法(水、气、浆喷射), 控制提升速度 15 cm/min, 旋转速度 20 r/min, 避免因压力过大导致地面隆起。检测显示, 桩体 28 天抗压强度达 3 MPa, 复合地基承载力满足 200 kPa 设计要求。该匝道投入使用 3 年来, 路基沉降量控制在 15 mm 以内, 优于规范允许值(30 mm)。喷射压力与提升速度需根据土层硬度调整, 在硬土层中可适当提高压力, 软土层中降

低提升速度以保证搅拌效果。施工前需进行试桩，确定最佳工艺参数，同时设置监测点，实时观测地面位移与周边建筑物沉降，避免施工扰动。水泥浆需随配随用，存放时间不超过 2 小时，防止初凝影响喷射效果。

1.3 CFG 桩复合地基技术

CFG 桩（水泥粉煤灰碎石桩）是由水泥、粉煤灰、碎石、石屑等材料组成的半刚性桩，通过沉管或钻孔方式成桩，与桩间土、褥垫层共同形成复合地基。该技术适用于黏性土、粉土、砂土等土层，具有承载力提高幅度大、沉降小、造价低等优点，尤其适合处理厚度较大的软基或对工后沉降要求严格的城市主干道^[3]。济南新旧动能转换先行区某道路沿线为黄河冲积软土，土层厚度 10 ~ 15 m，天然承载力仅 60 kPa。设计采用 CFG 桩复合地基，桩径 400 mm，桩长 15 m，间距 1.8 m，正方形布置，桩顶设置 30 cm 厚级配砂石褥垫层。施工中采用长螺旋钻孔压灌混凝土工艺，避免泥浆污染，成桩效率高。检测显示，单桩承载力达 800 kN，复合地基承载力 220 kPa，满足设计要求。该道路通车 2 年后监测显示，最大沉降量 20 mm，整体均匀性良好。桩体材料配合比需严格控制，粉煤灰掺量不宜超过 30%，确保桩体强度与经济性平衡。沉管或钻孔过程中需控制垂直度，偏差不得超过 1%，避免因桩体倾斜影响复合地基受力性能。褥垫层铺设时需分层夯实，厚度误差控制在 ±20 mm，保证桩土共同作用效果。

1.4 排水固结法加固技术

排水固结法通过在软基中埋设塑料排水板、砂井等竖向排水体，结合地表铺设砂垫层形成水平排水通道，再施加预压荷载（堆载、真空或联合预压），促使土体中孔隙水排出，加速固结沉降，提高地基承载力。该技术适用于厚度大（> 10m）、含水量高（>

50%）、渗透性低的淤泥及淤泥质土地层，尤其适合对工后沉降控制要求严格的城市主干道或桥梁引道工程。其优点是加固效果均匀、成本较低，缺点是需 3 ~ 12 个月预压期，工期较长^[4]。济南黄河滩区某新建道路沿线软土层厚度达 15 ~ 20 m，天然含水量 55%，孔隙比 1.6，属典型超软土地基。设计采用“塑料排水板 + 堆载预压”工艺：排水板正方形布置，间距 1.2 m，板长 20 m 穿透软土层；表层铺设 50 cm 厚中粗砂垫层，堆载高度 3 m（等效荷载 80 kPa），预压期 6 个月。施工中定期监测沉降速率，当连续 10 天沉降量 < 1 mm/d 时卸载。检测显示，地基固结度高，承载力从 40 kPa 提升至 130 kPa，工后 1 年沉降量控制在 25 mm 以内，满足道路设计标准。需根据土层渗透系数调整间距（一般 1.0 ~ 1.5m），确保排水路径短捷，塑料排水板需垂直插入，避免扭曲、断裂。堆载材料选用级配砂石，分层填筑（每层 30 cm）并压实，荷载大小需接近设计荷载（不超过 105%），防止地基失稳。沿道路轴线每 50 m 设置监测断面，埋设沉降板与孔隙水压力计，当实测沉降量达预测值 85% 以上时，可判断固结完成。

2 技术对比与选择策略

2.1 不同技术适用性对比

城市道路软基加固技术的选择需基于土层特性、处理深度、环境要求等多维度综合评估。以济南地区典型地质条件为例，常用软基加固技术的适用性对比见表 1。

2.2 选择策略

2.2.1 地质条件优先：从土层特性锁定核心技术

济南地区软土地基以黄河冲积形成的淤泥质黏土为主，兼具含水量高（40% ~ 50%）、压缩性强（压缩

表 1 常用软基加固技术的适用性对比

技术类型	适用土层	处理深度	承载力提升效果	环境影响	工期效率
水泥搅拌桩	淤泥、淤泥质土、粉质黏土	5 ~ 15 m	中等	低（噪声小、无泥浆污染）	中等（需 28 天养护期）
强夯法	砂土、杂填土、松散黏性土	3 ~ 10 m	较高	高（振动噪声大，可能影响周边建筑）	快（无需养护，施工周期短）
粉煤灰垫层	浅层软土（厚度 < 3 m）	1 ~ 3 m	较低	低（利用工业废料，环保性强）	快（施工简便，可快速回填）
高压旋喷桩	各类土层（含碎石、硬黏土）	5 ~ 20 m	高	低（施工精度高，对周边扰动小）	慢（工序复杂，需高压设备配合）
CFG 桩复合地基	黏性土、粉土、砂土	8 ~ 25 m	高	中等（长螺旋钻孔工艺污染较小）	中等（成桩速度较快，需褥垫层施工）

模量 $<4\text{ MPa}$)的特点,不同深度的土层分布直接决定技术选型:深厚软基(厚度 $>5\text{ m}$)如济南新旧动能转换先行区部分路段,软土层厚度达 $10\sim15\text{ m}$,需采用桩体复合地基技术。水泥搅拌桩适用于纯软土层(无碎石夹层),如经十路某标段,通过湿法搅拌形成连续桩体,有效控制工后沉降(5年沉降量 $<20\text{ mm}$);若土层含粉砂或薄砂层(如二环南路匝道区域),高压喷射可破除砂层胶结,形成高强度桩体(28天抗压强度 $3\sim5\text{ MPa}$)。浅层软基(厚度 $<3\text{ m}$)如城市支路或临时施工便道,可采用经济便捷的表层处理技术:利用济南周边电厂粉煤灰(需检测烧失量 $<15\%$),分层夯实后形成柔性垫层,适用于承载力要求 $\leq 100\text{ kPa}$ 的低荷载道路;在砂土或回填土地段(如济南机场周边道路),通过 $800\sim1\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能级夯击,可将地基承载力从 80 kPa 提升至 150 kPa 以上,但需控制夯击间距($4\sim6\text{ m}$)避免地面隆起。

2.2.2 环境限制导向:平衡施工影响与周边需求

城市核心区施工常面临居民区密集、地下管线复杂等限制,需优先选择低扰动技术。敏感区域(如居民区、学校周边)禁用强夯法(振动影响范围可达 20 m),改用水泥搅拌桩或高压旋喷桩^[5]。例如:在济南泉城路改造工程中,临近百花洲片区民居,采用湿法搅拌桩施工,通过控制搅拌速度(提升速度 $\leq 0.5\text{ m/min}$),将施工噪声控制在 65 dB 以下,未对周边建筑基础造成扰动。空旷区域或工业区道路优先采用强夯法或粉煤灰垫层。如济南临港经济开发区货运通道,沿线为砂土回填层,采用 $1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 强夯施工,每日可处理面积达 $5\,000\text{ m}^2$,工期较桩体工艺缩短且成本降低。

2.2.3 全周期成本考量:短期成本与长期性能的平衡

临时道路或低荷载道路(如小区内部路)选择粉煤灰垫层或换填法,单方成本 $<100\text{ 元/m}^2$,且施工周期短($7\sim10\text{ 天}$)。例如:济南某保障房小区内部道路,软基厚度 2 m ,采用级配砂石换填,虽承载力仅提升至 120 kPa ,但满足小区车辆荷载要求,且避免了桩体技术的冗余投入。城市主干道及快速路(设计使用年限 $\geq 15\text{ 年}$)需采用CFG桩或高压旋喷桩等长效技术。以济南顺河快速路南延工程为例,软基深度 12 m ,设计荷载为城-A级,采用CFG桩复合地基(桩间距 1.6 m ,桩长 15 m),初期成本较粉煤灰垫层高2倍,但工后10年沉降量控制在 10 mm 以内,避免了后期频繁维修的隐性成本,全周期经济性更优。

2.2.4 特殊场景适配:动态调整与创新应用

地下水丰富区域如济南小清河沿线道路,地下水

位埋深 $<2\text{ m}$,需避免采用干法水泥搅拌桩(易出现粉喷不均匀),改用湿法或高压旋喷桩,通过水泥浆护壁防止塌孔。在济南南部山区与平原过渡带,部分路段存在浅层溶洞,可采用“高压旋喷桩+注浆”组合工艺,先通过旋喷桩加固软基,再对局部溶洞填充水泥—水玻璃双液浆,确保地基整体性。

2.3 技术选择决策流程

在实际工程中,可按“勘察数据→设计要求→环境限制→成本测算”四步流程决策:(1)地质勘察:明确软土厚度、分层特性(如是否含砂层、有机质)、地下水情况;(2)荷载分析:根据道路等级确定目标承载力(城市快速路需 $\geq 200\text{ kPa}$,支路 $\geq 120\text{ kPa}$)及允许沉降量(主干道工后沉降 $\leq 30\text{ mm}$);(3)环境排查:标注周边建筑物距离(如 $<10\text{ m}$ 需控制振动)、地下管线位置(距桩体 5 m 内需调整工艺);(4)方案比选:建立技术—成本矩阵,如某项目同时满足“软基深度 8 m 、邻近居民区、设计承载力 180 kPa ”,则水泥搅拌桩与高压旋喷桩进入比选,最终通过试桩检测(如搅拌桩单桩承载力 600 kN vs旋喷桩 800 kN)结合成本差异(旋喷桩贵 30%)确定最优方案。

3 结束语

城市道路软基加固技术的选择需统筹地质条件、环境要求与全周期成本。水泥搅拌桩、高压旋喷桩等桩体技术在中深层软基处理中效果显著,粉煤灰垫层、强夯法适用于浅层或低荷载场景。济南地区工程实践表明,精准把控工艺参数与施工质量是控制沉降、保障道路长期稳定的关键。未来,随着城市建设向精细化发展,软基加固技术将更注重绿色材料应用、智能化监测及复杂环境适配,为高品质道路工程提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘永彬.软基加固施工技术在市政道路施工中的应用[J].运输经理世界,2021(27):16-18.
- [2] 杜东荣.软基加固技术在市政道路工程中的应用[J].江西建材,2022(12):186-187,189.
- [3] 宋伯克.城市道路软土地基处理工程应用分析[J].城市建筑空间,2022,29(S1):235-236.
- [4] 顾凌军.市政道路工程软土地基沉降加固技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(14):197-199.
- [5] 周权.软基加固施工技术在市政道路施工中的分析[J].科技创新,2019(16):110-111.

桥梁施工中桥面铺装技术的难点与优化措施

王玉飞

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决桥面铺装工程中材料适应性不足、施工精度难控等关键技术难题,以重载交通环境下钢桥面铺装为例开展系统性研究。本研究聚焦材料改性、工艺革新和管理优化三个维度,开发了基于 SBS 改性沥青的复合增强技术,将铺装层抗剪强度提升 40%;创新应用智能摊铺与激光整平技术,实现厚度误差 ± 2 mm 的施工精度;构建 BIM 协同管理平台,形成全过程质量追溯机制。针对特殊气候条件,提出差异化施工参数调整方案,旨在有效解决冻融循环与高温车辙问题,为复杂环境下桥面铺装工程提供技术参考。

关键词 桥面铺装;材料改性;质量管理

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.017

0 引言

桥面铺装作为保障行车安全与桥梁耐久性的关键环节,其技术标准与管理要求正面临新一轮升级。随着重载交通比例攀升和极端气候事件频发,传统铺装技术暴露出环境适应性不足、服役寿命偏短等突出问题。同时,新型城镇化进程加速推进,城市桥梁的集约化施工需求与既有交通保障压力形成双重挑战。智能建造技术与新型工程材料的快速发展,为破解这些难题提供了全新思路。在此背景下,系统梳理桥面铺装的技术瓶颈与管理痛点,探索材料—工艺—管理的协同优化路径,对提升桥梁工程全生命周期性能具有现实意义。

1 桥面铺装施工中的技术难点分析

1.1 材料性能与环境适应性问题

桥面铺装材料的性能直接决定铺装层的耐久性与服务寿命。在材料选择阶段,工程团队需综合考虑沥青或混凝土的力学特性与当地气候条件的匹配度。例如:高寒地区要求材料具备优异的低温抗裂性,而湿热地带则需重点关注材料的抗水损害能力与高温稳定性。材料配比设计不仅需满足规范中的基本强度指标,还需针对季节性温差、降水频率、冻融循环等具体环境因素进行动态调整。在实际工程中,材料性能的不足往往表现为早期开裂、剥落或车辙,这些问题通常源于实验室条件与现场环境的数据脱节。此外,新旧材料的界面兼容性也是技术难点之一,尤其在既有桥梁维修项目中,不同批次或类型的材料因膨胀系数差异可能导致层间剪切失效。

1.2 施工工艺复杂性与精度控制

桥面铺装的施工精度直接影响行车舒适性与结构安全性。与普通路面相比,桥梁结构的悬臂特性与振动效应要求铺装层厚度误差控制在更严格范围内。沥青混合料摊铺时,需同步解决桥面排水坡度与材料压实度的矛盾——过度压实可能改变设计坡向,而压实不足则会降低疲劳寿命^[1]。混凝土铺装则面临收缩应力集中的问题,若切缝时机或深度控制不当,可能诱发非预期裂缝。施工中的工艺衔接同样关键,例如防水层喷涂与铺装层摊铺的间隔时间需精确计算,过早施工会导致粘结失效,过迟则可能延误工期。对于钢桥面铺装,除常规工艺外,还需额外处理钢板防腐层与铺装材料的化学相容性,任何细微的工艺偏差都可能放大为后期界面剥离。

1.3 荷载与交通流量的压力考验

现代桥梁面临的动态荷载远超设计规范的历史数据。重载车辆的比率上升使铺装层承受更复杂的剪切—疲劳复合作用,尤其在收费站、匝道等制动频繁区域,材料表层易形成推移式破坏。交通流量的昼夜波动还会引发温度应力累积,例如大跨径桥梁在日间高温时段承受重载时,钢箱梁的局部变形可能传导至铺装层,形成反射裂缝。另一个隐性挑战来自车辆轮胎的摩擦频次,超高密度交通会加速集料表面磨损,降低抗滑性能。在特殊交通组织条件下,如单幅双向通行或施工便道转换,铺装层还需承担非对称荷载,这种非均匀受力会显著缩短局部修补周期。值得注意的是,荷载测试的实验室模拟往往难以复现实际交通中的随机冲击与振动耦合效应,导致理论寿命预测与实际性能存在偏差。

2 桥面铺装施工中的管理难点剖析

2.1 施工组织与协调问题

桥面铺装施工涉及多工种、多环节的交叉作业,组织协调的复杂性远超常规路面工程。由于桥梁结构的特殊性,铺装作业往往需要在封闭交通的条件下进行,但实际施工中常面临既有交通流无法完全切断的困境。施工方必须精确规划沥青拌合站、摊铺机、压路机等重型设备的进场时序,任何环节的延误都会导致后续工序的连锁反应。在大型立交桥项目中,不同标段的施工单位若缺乏统一调度,极易出现界面处材料性能不匹配或接缝处理不当的情况。夜间施工时的照明条件限制、季节性降雨对作业窗口期的压缩,进一步放大了协调难度。更为棘手的是,当铺装工程与桥梁主体结构维修同步进行时,钢结构防腐、混凝土修补与铺装层施工存在工艺冲突,各方对工作面交接标准的理解差异常引发责任推诿^[2]。

2.2 质量监控与验收标准执行

现行桥面铺装验收规范对平整度、摩擦系数等指标有明确要求,但现场质量管控存在测量基准选择的技术争议。使用桥梁防撞墙作为基准时,其自身安装误差会导致铺装厚度检测失真;采用全站仪等精密仪器虽能提高数据准确性,却受限于桥面振动导致的测量稳定性问题。在过程控制层面,防水层涂布厚度、沥青混合料出场温度等关键参数需要实时监测,但部分监理单位过度依赖施工方的自检报告,未能建立独立的平行检验机制。对于环氧沥青等特殊材料,其固化时间、粘结强度的检测需要破坏性取样,这与“零缺陷验收”的管理目标形成矛盾。部分项目为追赶进度,在未达到养护周期时便开放交通,导致验收数据与实际长期性能脱节,这种时间压力下的质量妥协往往在竣工三年内显现为早期损坏。

2.3 成本与进度的平衡难题

桥面铺装的成本控制面临材料价格波动与工艺选择的双重约束。高弹改性沥青等高性能材料虽能延长使用寿命,但其采购成本可能超出投标报价的20%以上,迫使施工单位在质量与利润间艰难取舍。在进度管理方面,城市桥梁的施工许可通常限定在夜间六小时内完成,为满足工期要求不得不采用分层摊铺等加速工艺,这种非常规操作既增加了人工费用,又降低了层间粘结可靠性^[3]。在成本核算体系中,传统定额模式难以准确反映钢桥面喷砂除锈等特殊工序的耗材损耗,容易引发建设单位与施工单位的结算争议。极端天气导致的停工索赔、设计变更引发的返工费用等隐性成

本,若未在合同条款中预先明确分担机制,最终可能转化为降低铺装层厚度的变相成本削减,为后期养护埋下隐患。

3 桥面铺装技术的优化措施

3.1 材料改性与创新应用

桥面铺装材料的性能优化正从单一指标提升转向多维度协同改进。聚合物改性沥青通过引入苯乙烯-丁二烯嵌段共聚物,显著提高了高温抗变形能力和低温抗裂性能,其弹性恢复特性可有效缓解重载交通造成的累积损伤。矿物纤维增强技术在沥青混合料中的应用,形成了三维网络支撑结构,使材料抗剪强度提升约40%,特别适用于大纵坡桥梁路段。针对钢桥面铺装的特殊需求,环氧沥青体系通过固化反应生成的热固性树脂,实现了与钢板超过1.5 MPa的粘结强度,彻底解决了层间滑移问题。新型反应型防水粘结材料突破传统乳化沥青的局限,其活性组分能与混凝土基面发生化学键合,形成不可逆的界面连接。在水泥混凝土铺装领域,超高性能混凝土通过优化颗粒级配和掺入钢纤维,将抗折强度提升至常规混凝土的3倍以上,大幅延长了铺装层的疲劳寿命。

3.2 施工工艺改进与标准化

现代桥面铺装施工已形成从基面处理到成品保护的全流程工艺控制体系。激光平整技术的应用使混凝土铺装层平整度误差控制在3 mm/4 m以内,智能摊铺机的GPS定位系统可实现沥青混合料厚度误差 ± 2 mm的施工精度。针对钢桥面铺装,喷砂除锈工艺标准已细化至Sa2.5级清洁度和50~100 μm 粗糙度的双重控制,为防水层提供理想基面。热拌沥青混合料施工推行“五度管理”模式,严格控制拌和温度、运输温度、摊铺温度、碾压温度和开放交通温度,每个环节设置红外测温预警系统。薄层铺装技术采用专用摊铺设备,实现15~30 mm超薄层的均匀摊铺,既节省材料,又能保证层间粘结质量^[4]。建立数字化管理平台,通过物联网设备实时采集压实遍数、振动频率等参数,确保工艺参数全程可追溯。

3.3 结构设计与防护措施强化

桥面铺装系统正从被动承受荷载向主动参与结构受力转变。组合式铺装结构在混凝土基层与沥青面层之间设置高粘改性沥青应力吸收层,有效抑制反射裂缝的扩展。在正交异性钢桥面板体系中,采用30~50 mm厚浇筑式沥青混凝土作为缓冲层,显著降低轮载对纵肋顶板的局部应力。边缘防水系统创新采用预制成型不锈钢滴水线,与聚合物改性密封胶配合使用,彻底

解决桥台接缝渗水问题。排水设计引入立体排水理念,通过设置双层排水结构和横向导水管,将渗入水快速排出桥体。

在防腐防护方面,锌加保护系统在钢桥面形成双重防腐屏障,其阴极保护效果可持续 20 年以上。对于特大跨径桥梁,在铺装层内预埋光纤传感网络,实时监测应变和温度分布,为预防性养护提供数据支撑。这些系统化解方案将桥面铺装的使用寿命从常规的 8~10 年延长至 15 年以上。

4 桥面铺装施工管理的优化策略

4.1 施工组织与流程优化

桥面铺装施工组织需要建立基于 BIM 技术的全流程协同管理平台,将设计方、施工方和监理方的信息流整合到统一数字模型中。通过 4D 施工模拟技术,可以预先识别各专业工序的空间冲突和时间重叠,优化设备进场路线和材料堆放区域。针对城市桥梁夜间施工的特殊性,采用模块化施工组织方式,将铺装作业分解为基面处理、防水层施工、混合料摊铺等标准化模块,每个模块配置独立的施工班组和质量控制点。在交通组织方面,实施动态车道管控系统,根据实时交通流量调整封闭区域,最大限度减少对既有交通的干扰。建立应急响应机制,对突发降雨或设备故障等情况预设备用方案,包括备用拌合站启动预案和施工段快速转换方案。跨区域大型项目推行“首件验收制”,在第一个施工段完成全部工艺验证后,后续标段直接复制优化后的施工参数和组织模式。

4.2 质量管理体系完善

构建覆盖材料、工艺和成品的全过程质量追溯系统,要求每车混合料附带电子标签记录原材料批次、拌合参数和运输轨迹。引入基于机器视觉的智能检测技术,通过高清摄像系统实时分析摊铺均匀性和压实效果,自动标记缺陷区域^[5]。完善第三方检测制度,委托具有桥面铺装专项资质的实验室进行盲样抽检,重点监控沥青混合料的级配稳定性和改性剂分散均匀度。建立质量责任追溯机制,将每个施工段的检测数据与具体操作人员、监理工程师信息绑定存档。推行“样板引路”管理方法,在工程实体旁同步制作工艺样板区,直观展示各层材料的施工标准和验收要求^[6]。针对特殊气候条件制定差异化管理标准,明确不同温湿度环境下的工艺调整参数和验收指标浮动范围。

4.3 成本与进度的动态平衡

实施基于挣值分析法的动态管控系统,将预算成本分解为可测量的进度节点,通过 BCWP、ACWP 等指标

的实时对比预警偏差。建立材料价格波动应对机制,对沥青、改性剂等主材设置阶梯式采购方案,在价格低位时锁定部分供应量。优化机械配置方案,根据施工强度曲线采用“核心设备自有+辅助设备租赁”的混合模式,降低固定成本占比。在进度管理方面,应用关键链项目管理方法,识别资源约束条件下的最优施工序列,在各标段间建立缓冲资源池。推行可视化进度管理,通过电子看板实时显示各作业面的计划—实际对比,对滞后工序自动触发资源调配指令^[7]。建立成本—进度关联分析模型,量化不同赶工方案的经济性比选,避免盲目压缩工期导致的成本激增。完善变更管理流程,要求设计变更必须附带成本影响分析,在确保工程变更决策的同时考虑技术必要性和经济合理性。

5 结束语

桥面铺装技术的创新发展需要材料改性、施工工艺改进和强化工程管理的深度融合。当前研究在聚合物改性材料、数字化施工装备等方面取得突破性进展,特别是钢桥面环氧沥青铺装体系成功解决了层间滑移顽疾。然而,面对超大跨径桥梁的变形协调、极端气候的加速老化等新挑战,仍需深化材料—结构一体化设计理论。未来,需重点关注新型铺装材料的开发应用研究,建立基于大数据的全生命周期性能预测模型。工程实践层面应强化标准规范与新兴技术的适配性,推动智能检测装备的标准化应用。这些方向的发展将助力我国桥面铺装技术实现从跟跑到领跑的跨越,为交通基础设施建设高质量发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 方国鼎.公路桥梁施工中的新型桥面铺装技术研究[J].产品可靠性报告,2024(05):147-149.
- [2] 李朋强.浅谈水泥混凝土桥面铺装施工控制技术在公路桥梁施工中的运用[J].中国设备工程,2021(22):53-54.
- [3] 宋贺贺.桥梁施工中聚丙烯纤维混凝土应用研究[J].广东建材,2024,40(08):157-160.
- [4] 张绪斌.桥梁施工中钢纤维混凝土施工技术要点探究[J].广东建材,2020,36(04):64-66.
- [5] 张兆增.市政桥梁工程的桥面防水处理技术[J].中国建筑金属结构,2024,23(09):118-120.
- [6] 李娣,刘李君,李威,等.大跨径索承桥钢桥面铺装技术应用现状分析[J].北方交通,2024(10):1-4,9.
- [7] 戴中伟.城市高架桥双层高弹高粘+防水粘结层钢桥面铺装体系施工技术研究[J].江西建材,2022(10):201-203.

道路桥梁工程质量控制及施工技术优化措施

徐 强

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 以道路桥梁工程为研究对象,就目前工程质量控制和施工技术中存在的问题展开分析,对工程质量控制要点和施工工艺优化途径进行探讨。本文详细阐述了施工准备、施工过程和验收阶段的质量控制要点,并结合实际工程案例对路基、路面、桥梁基础和上部结构等施工工艺的优化方法进行分析验证。研究表明,通过严控质量控制过程和合理的施工工艺优化,能有效地提高道路桥梁工程的建设质量,延长其服役年限,为交通基础设施建设提供可靠的技术保障。

关键词 道路桥梁工程;质量控制;路基施工技术;路面施工技术;桥梁基础施工技术

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.018

0 引言

道路和桥梁是交通基础设施中不可或缺的一部分,对促进区域经济交流和社会发展起着至关重要的作用。随着我国交通运输事业的不断发展,道路桥梁工程建设规模越来越大,对工程质量的要求也越来越高。高质量的道路桥梁工程,不仅能保证交通安全畅通,而且能减少后期养护费用,提高经济效益和社会效益。但是,由于受多种因素的影响,道路桥梁工程经常出现质量问题,施工工艺还有待完善。因此,对道路桥梁施工质量控制和施工工艺优化进行深入研究十分必要。

1 道路与桥梁工程质量控制及施工技术现状与问题分析

1.1 质量控制现状与问题

目前,我国在道路桥梁工程质量控制方面虽已有一系列规范、规范,但在实施过程中还存在许多问题。一些施工单位的质量意识不强,片面追求经济利益而忽略质量控制,存在着偷工减料、违规施工的现象。质量监督制度不健全,监督力度不够,存在监督漏洞,不能及时发现并纠正质量问题。另外,施工过程中对原材料的质量控制不严,一些不合格的原材料进入施工现场,对工程质量产生的影响^[1]。

1.2 施工技术现状与问题

从施工工艺上看,我国道路桥梁工程建设虽然已取得一些进展,但是与世界先进水平还有很大的差距。部分施工单位缺乏技术创新能力,仍沿用传统、落后的施工工艺,施工效率不高,已不能适应现代化建设的需要。新技术的推广应用缓慢,部分先进施工工艺因缺乏相应的技术人才及设备而不能有效地应用于工

程实践。施工工艺管理不规范,施工技术交底不到位,施工人员不能很好地理解施工工艺要求,这些问题都容易导致质量问题^[2]。

2 道路与桥梁工程质量控制要点

2.1 施工准备阶段质量控制

在道路桥梁施工过程中,施工准备阶段是最基本的环节。首先,必须对施工图纸进行会审。施工单位组织技术人员认真审核施工图纸,及时发现图纸上存在的问题及错误,及时与设计院沟通解决,保证图纸的准确、完整。其次,要进行合理的施工组织设计;根据工程特点、施工条件及质量要求,制订科学合理的施工方案、施工进度计划及质量保证措施,对施工过程进行指导。最后,对原料的质量进行严格的控制。进入工地的原材料,包括水泥、钢材、砂石等,要严格检查原材料的质量证明文件和规格型号,并按照规定抽样检验,不能用不合格的原材料。

2.2 施工过程阶段质量控制

在道路桥梁工程施工中,施工阶段是一个非常重要的环节。加强施工过程的质量控制,施工单位应在每道工序完工后进行自检,自检合格后提交监理单位验收,通过后方可进入下一道工序。例如:在填筑过程中,对各层填料的填筑厚度、压实度及含水量进行严格控制,以保证填筑质量;建立质量控制点,重点控制重点、薄弱环节;在桥梁墩台施工过程中,以绑扎钢筋、安装模板、浇筑混凝土为主要质量控制点,加强对各个环节的质量检测与监控^[3]。

2.3 工程验收阶段质量控制

工程验收阶段主要是对道路桥梁工程进行全面的质量检查。严格按照有关标准、规范进行验收,对工

工程实体质量、工程资料等进行细致检查。工程实体的质量检验主要是检查路基路面的平整度、强度和厚度,以及桥梁结构的尺寸和外观质量。工程资料审核内容主要包括施工图纸、施工记录、原材料检验报告、隐蔽工程验收记录等,以保证项目数据的真实性、完整性和准确性。对验收中发现的质量问题,要求建设单位立即整改,整改完毕后,再次验收,直到达到合格为止^[4]。

3 道路与桥梁工程施工技术优化措施

3.1 路基施工技术优化

路基是道路、桥梁的基础,其施工质量影响整个工程的稳定和耐久性。例如:针对某山区某道路工程,在施工初期,采用高含水率粘土作填料,使路基在雨季产生较大的沉降和变形。后期施工小组及时调整施工策略,采取晾晒法降低粘土含水率,掺入适量石灰改善土质。石灰在土体中与水发生化学反应,既能降低含水率,又能形成较高强度的胶结材料,从而显著提高填料的强度和稳定性。有关资料表明,对路基进行加固处理后,压实度可提高 15%~20%,使路基的质量得到有效的保证^[5]。

提高压实工艺也是必不可少的。传统的压实机械对于复杂的地形和不同的土壤条件很难达到理想的压实效果。目前,先进的振动压路机得到越来越多的应用,它利用高频振动产生的激振力,对填料进行重排,有效地提高压实度。在实际施工过程中,关键在于对压实次数、压实速度的控制。一般情况下,对于如砂砾这样的可渗透材料,初期压力降低(2~3 km/h),以保证材料的初期稳定性;在压实过程中,将车速提高到 4~5 km/h,增加压实次数(6~8 次),以达到设计要求的压实度;最后压紧后,用低速(2~3 km/h)将轮迹磨平,以确保表面平整。路基排水设计也应重点考虑,将路基范围内的积水及时排除。边沟、排水沟、盲沟等排水设施协同作用,使地面水和地下水快速地从路基中引出。

3.2 路面施工技术优化

沥青混合料配合比设计是沥青路面施工的核心环节。不同的沥青混合料对沥青混合料性能的要求也不同。针对城市快速路建设过程中车辆频繁制动引起的车辙问题,本项目拟采用低针入度—高软化点的沥青混合料,增加集料中粗集料的比例,并加入抗车辙剂,以提高沥青混合料的抗变形性能。此外,施工工艺的改进也是不容忽视的。采用高精度摊铺机精确控制摊铺温度、摊铺速度及摊铺厚度。以某市政道路沥青路面的施

工为例,采用智能型摊铺机,实现对摊铺温度的实时监控,达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的目的;摊铺速度保持在 2~3 m/min 左右,以保证摊铺过程的均匀性;本项目的实施,将沥青混合料的摊铺厚度控制在 $\pm 3\text{ mm}$ 以内,使路面的平整度达到国际先进水平($\text{IRI}=1.5\text{ m/km}$),有效地提高行车的舒适性和安全性。滑模摊铺机在水泥砼路面施工中的应用,是一个重大的技术突破。该设备能一次完成布料、振捣、成型和抹面等工序,比传统的施工方法提高 3~5 倍,而且路面质量更稳定。在施工过程中,混凝土配合比设计和振捣技术对保证路面质量至关重要^[6]。合理控制水灰比、砂率及外加剂掺量,可获得较好的工作性能和强度;在振捣过程中,要控制振捣的时间和频率,防止过振、漏振,避免出现蜂窝麻面等病害。

3.3 桥梁基础施工技术优化

桥梁地基是桥梁结构的“根基”,其施工工艺的优劣关系到桥梁的安全性和稳定性。旋挖钻机在钻孔灌注桩施工中的应用,极大地提高了钻孔的效率和质量。传统冲击钻机钻进速度较慢,易发生孔壁坍塌和孔径偏斜等缺陷。旋挖钻机采用旋转钻头切割土体,用钻杆将渣土排出孔外,钻速达到 3~5 m/h,钻孔垂直度误差小于 1/300,孔径误差小于 $\pm 50\text{ mm}$ 。在钻孔过程中,钻孔垂直度及孔径的实时监测非常重要,安装于钻机上的传感器及时发现并修正钻孔的偏差,避免塌孔、缩颈等现象^[7]。

为保证混凝土的连续、致密,桩基采用导管法浇筑。为防止混凝土浇筑时渗漏,在浇筑前,必须对导管进行水密试验。在浇筑过程中,导管底应埋入混凝土表面 1~3 m 处,随混凝土持续浇筑,逐步抬高导管高度,以确保混凝土能平稳上升。在大直径桩基中,采用二次清孔技术可有效地清除孔底沉渣,提高桩基承载力,是一种行之有效的方法。研究表明,采用二次清孔工艺使桩基承载力提高 10%~15%。

3.4 桥梁上部结构施工技术优化

桥梁上部结构施工工艺优化对提高施工效率和结构工作性能具有重要意义。采用预制拼装技术,实现桥梁施工的工厂化和装配化。预制场梁体标准化生产,不断优化模板设计及制造工艺,采用高精度钢模板及先进振捣设备,梁体外观质量可达到镜面效果,尺寸精度误差控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。预制梁运至工地后,由大型吊装设备组装,与传统的现浇施工相比,可缩短现场施工时间 50% 以上,且施工难度降低,安全可靠。采用移动模架法进行现浇梁施工,效率高。该工艺采用在

桥墩两侧设置移动模架,并随施工进度不断向前推进,从而实现连续浇筑梁。以某高架桥现浇梁为例,采用移动模架法,每7天一跨梁浇筑一跨,效率高达40%。在施工期间,为保证桥梁的外形和受力性能,必须对桥梁上部结构进行线形控制^[8]。采用全站仪、GPS等先进测量设备,并结合BIM技术,实时监控和调整梁体轴线,保证其线形满足设计要求,误差不超过 ± 10 mm。

4 高速公路路基路面工程案例

4.1 工程概况

某高速公路全长128 km,设计时速120 km,路基宽度为34.5 m,为双向6车道。本项目穿越平原丘陵交错区,地形复杂,部分路段为软土地基,施工难度大;同时,沿线地区气候多变,夏季多雨、冬季寒冷、干冷,给路面施工质量控制带来很大困难。项目总投资86亿元,建设周期为3年,其中路基与路面是整个工程的核心,影响着整个高速公路的使用寿命。

4.2 质量控制及技术优化措施

在质量控制方面,在施工准备阶段,组织3次会审施工图纸,发现和解决27个设计问题,保证图纸的正确性。在原材料方面,严格执行检验制度,对进场的126 000吨水泥,83 000吨钢材,568 000 m³砂石等原材料按规范要求抽样检验,每批都要检查一次,杜绝不合格材料流入工地。在此基础上,编制详细的施工组织设计方案,对各个工序的施工工艺及质量标准进行详细的阐述。

在施工过程中,制定一套严格的过程质量监控系统。以路基填筑为例,严格控制每层厚度30 cm以内,根据试验路段的实际情况,确定8~10遍的最优压实次数,用振动压路机压实,实时监测压实度、含水量,保证压实度不小于96%。在施工过程中,沥青混合料摊铺温度为160~170℃,摊铺速度为2~3 m/min,每铺完1 km,及时检测路面平整度,及时调整。

在施工工艺优化方面,采用透水性好、强度高的砂砾料作为路基填料,对于含水量超标的填料,采用晾晒加5%石灰的方法处理,总填土量达185 000 m³。在路面施工过程中,通过在沥青混合料中添加10%的胶粉改性剂,使其高温稳定性能提高20%,低温抗裂性提高15%。同时,采用高精度ABG8620摊铺机,使路面平整度标准偏差从1.8 mm降到0.8 mm。

4.3 实施效果

通过严格的质量管理,优化施工工艺,使高速公路路基路面工程取得明显的效果。路基压实度均达到标准,

平均压实度达97.2%,比设计指标提高1.2%;软土路基段沉降控制在15 mm以内,小于规范规定的30 mm。结果表明,该路面的平均平整度标准偏差为0.75 mm,较传统的路面平整度提高58.3%。路面抗滑性能系数(摆值)平均为75,满足雨天高速行驶的安全性要求。

从工程质量检验结果看,路基、路面的各项指标合格率达100%,优良率达92%,其中以路基、路面为例,设计合理、施工方便。该项目比预计的时间提前两个月完工,节约建设费用4 200万元,并且在通车后的3年里,路面没有出现明显的裂缝和车辙等病害,有效地延长了道路的使用寿命,极大地减少了后期养护费用,为地区经济发展提供了可靠的交通保证,同时也为同类型的高速公路路基路面工程建设提供了可借鉴的成功经验。

5 结束语

道路桥梁工程施工质量控制与施工工艺优化是保证工程质量与安全的关键。从施工准备、施工及验收三个阶段严格控制质量,优化路基、路面、桥梁基础及上部结构的施工工艺,可有效提升道路桥梁工程质量。施工单位要增强质量意识,加强质量监督,积极推广新技术和新工艺,对施工工艺进行持续优化,保证道路和桥梁工程的质量达到标准,促进我国交通事业的发展。同时,随着科学技术的不断进步以及工程施工经验的不断积累,我国公路桥梁工程的质量控制与施工技术仍需不断地创新与改进,才能满足未来交通发展的需要。

参考文献:

- [1] 涂德军.道路桥梁工程中预应力施工技术的应用与优化[J].现代交通与路桥建设,2024,03(04):225-227.
- [2] 罗锐,张良隆.市政道路桥梁施工技术及其质量控制探究[J].门窗,2024(12):184-186.
- [3] 李来东,赵海洋.市政道路桥梁工程施工技术应用及质量控制策略分析[J].运输经理世界,2025(05):107-109.
- [4] 杨海龙,肖威.初探道路与桥梁施工技术与质量控制对策[J].数字化用户,2024(09):41-42.
- [5] 陈曦.市政道路桥梁工程施工技术与质量控制[J].建材与装饰,2023,19(20):130-132.
- [6] 焦鹏.道路与桥梁工程施工技术重难点分析[J].中国哈尔滨经济贸易洽谈会会刊,2023(02):48-49.
- [7] 姬俊慧,张晓燕.道路桥梁施工中桩基施工技术与质量控制[J].汽车周刊,2024(12):123-125.
- [8] 李鹏飞.道路与桥梁沥青砼路面平整度施工技术的质

量控制措施[J].新疆有色金属,2023,46(04):60-61.

超长结构后浇带施工技术在建筑施工中的应用

卢启航

(上海市市政工程管理咨询有限公司山东分公司, 山东 济南 250000)

摘 要 超长结构后浇带施工技术作为解决建筑物变形、裂缝等问题的重要技术措施, 在建筑施工中发挥着关键作用。本文针对后浇带施工过程中存在的温度应力、混凝土收缩变形等问题, 通过材料选择、施工工艺和养护等环节的控制提出了相应的技术要点和解决方案。结合工程实例, 对后浇带的设置位置、宽度、浇筑时机等关键参数进行了分析, 探讨了后浇带的施工工序和技术要求。研究表明, 合理的后浇带施工技术不仅能有效控制混凝土裂缝, 还能提高建筑结构的整体性和耐久性, 为超长结构施工提供可靠的技术保障。

关键词 超长结构; 后浇带施工技术; 温度应力; 混凝土浇筑

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.019

0 引言

随着建筑规模不断扩大, 超长结构在工程建设中的应用日益广泛。超长结构由于其自身特点, 在施工过程中容易产生温度应力和收缩变形, 引发裂缝等问题。超长结构后浇带施工技术能够有效减少结构裂缝的产生。通过合理设置后浇带可以降低混凝土收缩变形对结构的不利影响, 确保建筑物使用功能和结构安全。因此, 深入研究和探讨超长结构后浇带施工技术, 对提高工程施工质量和结构耐久性具有重要意义。

1 超长结构后浇带设置要求

超长结构后浇带的合理设置是确保施工效果的关键环节。后浇带宽度需根据结构跨度及混凝土性能确定, 一般控制在 500 mm 至 800 mm 范围内。设置位置应选择结构应力较小、变形集中的部位, 避开荷载传力的主要路径。对于楼板后浇带, 应设置在跨中区域, 且需与梁、柱等主要受力构件保持合适距离。地下室外墙后浇带应设置在墙体应力较小处, 宽度应适当加大至 600 mm 至 1 000 mm 以满足防水要求。后浇带断面应考虑剪力传递需求, 采用凹凸错齿面或设置剪力键, 后浇带混凝土标号应比周边结构提高一个等级以提升结构整体性。在超长剪力墙中, 后浇带间距宜控制在 25 m 至 30 m, 且需结合施工缝和沉降缝统筹布置, 后浇带深度应贯穿整个构件截面, 确保结构变形协调性。对于高层建筑, 楼层后浇带宜错缝设置, 避免应力集中, 后浇带位置需预留排水措施, 防止积水影响混凝土浇筑质量^[1]。

2 超长结构后浇带施工工艺及技术措施

2.1 后浇带模板支设技术

后浇带模板支设作为关键施工环节, 需采用定型钢模板系统, 确保支模精度和刚度。模板选用厚度不小于 1.8 mm 的钢模板, 表面需平整光滑, 接缝严密, 支设前应对模板进行除锈处理并涂刷脱模剂, 确保成型质量。模板支撑体系采用可调节钢支撑, 立杆间距控制在 0.9×0.9 m, 水平杆件间距不大于 1.2 m, 模板接缝处采用橡胶条密封, 防止漏浆。对于垂直后浇带, 模板两侧应设置防倾覆支撑, 间距不大于 1.5 m。模板固定采用对拉螺栓连接, 螺栓间距宜为 400 mm 至 600 mm, 支模时应预留混凝土浇筑检查口和振捣窗口, 便于施工操作。模板标高和垂直度的允许偏差均控制在 3 mm 以内, 且需进行复核校正。拆模时间应根据混凝土强度确定, 一般不少于 14 d, 且需采用慢拆工艺, 避免对混凝土表面造成损伤。

2.2 钢筋连接及防锈处理

后浇带钢筋连接需采用可靠的连接方式, 确保结构整体性和受力性能。纵向受力钢筋采用套筒挤压连接或直螺纹连接, 接头抗拉强度不应低于钢筋抗拉强度的 1.25 倍。连接套筒选用 45 号钢加工而成, 内壁设有环形花键沟槽, 提高握裹力。钢筋丝头加工精度控制在 0.3 mm 以内, 套筒连接处需涂抹防锈油脂。对于箍筋及构造钢筋, 采用绑扎搭接, 搭接长度不小于 35 倍钢筋直径。钢筋表面防锈采用环氧树脂涂层, 涂层厚度控制在 200 μm 至 300 μm, 涂层附着力不小于 3 MPa。待钢筋连接完成后, 在外露部位涂刷防锈漆,

防锈漆厚度不小于120 μm ,施工过程中需采取防雨措施,避免钢筋锈蚀。钢筋连接施工完成后,需进行探伤检测,确保连接质量符合规范要求^[2]。

2.3 混凝土浇筑施工要点

后浇带混凝土浇筑是整个施工过程中的重点环节,混凝土强度等级应比结构主体提高一级。浇筑前应对接缝面进行凿毛处理,清除浮浆和杂物并用高压水冲洗干净。混凝土配制需采用高性能减水剂,坍落度控制在160 mm至180 mm,水灰比不大于0.45。浇筑时应采用分层浇筑法,每层厚度控制在300 mm至500 mm,振捣采用插入式振捣器,振捣时间不少于30 s。插入式振捣器插入深度应达到下层混凝土50 mm至100 mm,振捣点间距不大于振捣器作用半径的1.5倍。浇筑过程中需密切观察模板变形情况,严防跑模漏浆,混凝土浇筑应连续进行,如需间歇时间不应超过2 h。浇筑完成后及时进行表面收光并采取覆盖保温措施,养护时间不少于14 d,浇筑期间需对混凝土温度进行监测,温度不宜超过65 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4 接缝处理及防水施工

后浇带接缝处理对结构的防水性能和耐久性具有重要影响。接缝处理前需对原混凝土表面进行凿毛,凿毛深度控制在6 mm至8 mm,采用高压水枪清洗干净并保持湿润状态。防水施工采用“外贴内涂”的双重防水措施,外侧采用宽度不小于300 mm的遇水膨胀止水条,内侧涂刷柔性防水涂料。止水条安装位置宜在钢筋保护层内侧50 mm处,采用专用胶粘剂粘贴固定。防水涂料选用双组份聚氨酯材料,涂刷厚度不小于1.5 mm,延伸宽度超出接缝两侧各250 mm,在转角及变形较大部位增设防水附加层并采用加强型防水材料。对于地下室外墙后浇带,需增设宽度为500 mm的橡胶止水带,止水带中间设置凸肋,两端采用卡具固定。防水层完成后进行蓄水试验,蓄水深度不小于200 mm,持续时间48 h,确保无渗漏现象^[3]。

2.5 后浇带养护技术

后浇带养护对于保证混凝土性能和结构耐久性至关重要。养护措施包括温度控制和湿度控制两个方面。温度控制采用薄膜覆盖保温,冬季气温低于5 $^{\circ}\text{C}$ 时需采取加热措施,确保混凝土内部温度不低于10 $^{\circ}\text{C}$ 。夏季采用喷淋冷却,控制混凝土内外温差不超过25 $^{\circ}\text{C}$,避免温度应力开裂。湿度养护采用土工布覆盖并保持持续洒水,养护时间不少于14 d,土工布应延伸至接缝两侧各500 mm,确保接缝区域充分湿润。养护期间需对混凝土表面温度和湿度进行监测记录,发现异常及时调整养护措施,养护过程中禁止踩踏振动,避免影响结构性能。对于外露的后浇带混凝土表面,可采用

养护剂喷涂,养护剂喷涂量为350 g/m^2 至400 g/m^2 ,形成致密保护膜。养护期间需采用自动喷淋装置,设定定时喷淋间隔,确保混凝土表面持续湿润。

后浇带养护质量控制应建立专项检查制度,重点关注养护温度和湿度指标。养护温度监测采用埋设式温度计,监测点间距不大于3 m,每天测量记录不少于4次。对于大体积后浇带,需增设温度监测点,监测混凝土内部温度,采用电子式湿度仪测量表面湿度,湿度不得低于95%。当环境温度超过32 $^{\circ}\text{C}$ 时,需增加喷淋次数并在混凝土表面覆盖反光膜,降低水分蒸发,养护用水温度应接近混凝土表面温度,温差不宜超过15 $^{\circ}\text{C}$ 。养护期间需安排专人巡查,发现覆盖物脱落、损坏应及时修补,确保养护效果。养护记录应包括环境温度湿度、混凝土表面温度、养护措施等内容并建立养护台账。

3 超长结构后浇带施工工序及控制要点

3.1 施工准备及环境要求

后浇带施工前需做好充分准备工作,编制专项施工方案并进行技术交底。施工现场需搭设防雨棚,确保作业面不受雨水影响,环境温度要求在5 $^{\circ}\text{C}$ 至35 $^{\circ}\text{C}$ 之间,相对湿度不大于85%。现场材料堆放场地应平整坚实,设置排水措施,材料采用防雨布遮盖,模板、钢筋等材料进场时需进行质量检验并按规格分类存放。机械设备包括混凝土输送泵、振捣器等应检查完好并备足配件,施工人员需具备相应资质,并进行专业技术培训。测量放线应建立完整的控制网,复核原结构尺寸,确定后浇带施工基准线。施工区域应设置警示标志,划分施工区域和材料堆放区域,现场照明设施要保证施工面光照度不低于100 lx。后浇带结构所需的试验设备和检测仪器要准备齐全并进行检定校准,施工前需对原结构混凝土强度进行回弹检测,确保达到设计要求^[4]。

3.2 施工顺序及时间控制

后浇带施工顺序需结合结构特点和环境条件合理安排。地下室外墙后浇带应在主体结构完成28 d后进行浇筑,楼层后浇带应在上部结构施工完成后进行。竖向后浇带宜由下至上分段施工,每段高度不宜超过4 m,水平后浇带应在竖向后浇带完成后进行,避免交叉施工。施工时间选择在气温相对稳定的时段,避开雨季和极端天气,混凝土浇筑应在8 h内完成,养护期间禁止上部结构施工。模板拆除时间应根据混凝土强度确定,达到设计强度70%后方可拆除,防水层施工应在混凝土达到设计强度90%后进行。后浇带施工完成后需进行28 d的观测期,观测期内严格控制周边施工活动。施工过程中应建立施工记录,详细记录气温、湿度等环境参数和施工工艺参数。

3.3 混凝土配合比设计

后浇带混凝土配合比设计需满足强度、和易性和耐久性要求。水泥选用强度等级不低于 42.5 级的硅酸盐水泥,掺合料采用优质粉煤灰,其含量控制在胶凝材料总量的 15% 至 20%。粗骨料选用粒径 5 mm 至 25 mm 的连续级配碎石,细骨料采用中砂,含泥量不超过 3%。外加剂选用高性能减水剂,掺量为胶凝材料质量的 0.8% 至 1.2%。配制时水胶比严格控制在 0.42 以下,坍落度控制在 160 mm 至 180 mm,含气量控制在 4% 至 6%。混凝土 28d 抗压强度应比结构主体提高 5 MPa,抗渗等级不低于 P8。为增强混凝土抗裂性能,可掺入体积率 0.9% 的聚丙烯纤维,纤维长度 19 mm。混凝土配制时应控制水泥用量在 380 kg/m³ 至 420 kg/m³ 之间,砂率控制在 38% 至 42%,每立方米混凝土减水剂掺量不超过 8 kg。

配合比设计时需进行室内试配和现场试验,确定最佳配合比。试验过程中应重点关注混凝土的工作性和收缩性能,采用标准养护条件下的收缩试验方法,控制混凝土 28d 收缩值不大于 400×10⁻⁶。原材料进场时需按批次进行检验,细骨料含泥量每 200 m³ 检验一次,粗骨料针片状含量每 300 m³ 检验一次。粉煤灰需检测细度和烧失量,细度不大于 12%,烧失量不大于 5%。水泥需检测凝结时间和安定性,初凝时间不少于 45 min,终凝时间不大于 600 min。配制时应采用重量法计量,水泥、粉煤灰计量误差不超过 1%,粗细骨料计量误差不超过 2%,外加剂计量误差不超过 1%,确保配合比准确性。

3.4 接缝面处理技术

接缝面处理作为后浇带施工的关键环节,其处理质量直接决定了结构的整体性能和耐久性。接缝面处理首选人工凿毛或机械凿毛方式,凿毛深度必须严格控制,控制在 6 mm 至 8 mm 范围内,确保露出新鲜骨料。凿毛作业完成后,需采用钢丝刷对表面进行细致清理,彻底清除松动颗粒和浮浆。接缝面的高压水冲洗工序尤为重要,水压应始终保持在 1 MPa 以上,冲洗应采用扇形喷嘴由上至下、由内向外的顺序进行,直至冲洗水清澈方可停止。为确保接缝面保持良好的湿润状态,采用土工布覆盖洒水养护不少于 12 小时,养护期间需安排专人定期检查土工布的湿润程度,适时补充洒水。在后浇带混凝土浇筑前 2 小时,需选用性能稳定的环氧树脂胶泥作为界面剂,涂刷时应控制厚度在 1 mm 至 2 mm 之间,确保涂刷均匀无遗漏。

针对后浇带接缝面的施工质量控制,需重点把控以下几个方面:接缝面的垂直度和平整度必须严格遵守规范要求,垂直度偏差控制在 5 mm 以内,平整度偏差不得超过 3 mm。对于后浇带阴阳角部位,由于应力

集中,需采用专用凿毛工具进行精细处理,确保棱角完整无损,避免出现缺棱掉角现象。在接缝面处理过程中,应建立完善的施工记录和质量检查制度,每道工序完成后必须进行自检和互检,发现问题及时整改。处理完成的接缝面要及时组织验收,验收内容包括外观质量、几何尺寸、凿毛深度、清洁度等各项指标,只有全部满足设计和规范要求后方可进入下道工序。为确保验收的准确性,建议采用专业检测仪器对关键参数进行抽检并将检测数据详细记录在案^[5]。

3.5 施工检测及验收标准

后浇带施工质量检测包括混凝土强度检测、结构实体检测和防水性能检测,混凝土强度检测采用回弹法和钻芯法相结合,检测数量不少于 3 组。结构实体检测包括后浇带尺寸偏差、平整度和垂直度,尺寸偏差控制在 ±5 mm 以内,平整度偏差控制在 3 mm 以内,垂直度偏差控制在 1/1 000 以内。防水性能检测采用蓄水试验方法,蓄水深度不小于 200 mm,持续时间 48 h,观察渗漏情况,钢筋连接接头抽检率不低于 10%,检测方法采用超声波探伤。验收时需重点检查结构整体性、外观质量和防水性能,外观质量要求混凝土表面密实、无蜂窝麻面,接缝处无渗漏。结构整体性检查采用敲击法,检查结构是否存在空鼓现象,检测数据需详细记录并存档,作为工程验收依据。

4 结束语

超长结构后浇带施工技术通过科学合理的设计和施工,有效解决了建筑物变形和开裂问题。在实际应用中,通过优化后浇带设置位置、严格控制施工工艺和养护措施,可以显著提高结构整体性能。针对不同工程特点,采用合适的施工方案和技术措施,确保后浇带施工质量。实践证明,超长结构后浇带施工技术在建筑施工中具有较强的适用性和可操作性,可为同类工程提供有益的技术参考。

参考文献:

- [1] 杜波晓.超长结构后浇带施工技术在建筑施工中的应用[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(11):48-51.
- [2] 范晋文.超长结构后浇带施工技术在建筑项目中的应用[J].居业,2024(01):16-18.
- [3] 苗欢琳.超长结构后浇带施工技术在建筑项目中的应用策略研究[J].建材发展导向,2023,21(18):89-91.
- [4] 殷可嘉.超长结构后浇带施工技术在建筑施工中的应用研究[J].砖瓦,2024(11):158-160.
- [5] 李永生.超长结构后浇带施工技术在建筑施工中的应用[J].中国设备工程,2024(13):245-247.

建筑密集区道路改造中的 新技术探索与实施效果

张梦迪, 李 栋, 刘 珂

(山东国兴建设发展有限公司, 山东 聊城 252000)

摘 要 建筑密集区道路改造面临诸多技术难题, 传统改造方法已难以满足现代城市发展需求。本文针对建筑密集区道路改造中的技术创新与应用, 通过实地调研和数据分析, 深入探讨了新型路面结构优化技术、智能排水系统集成技术及快速施工工艺等创新方案。研究结果表明: 采用新型复合材料路面技术能有效延长路面使用寿命, 智能排水系统显著改善了道路排水效果, 快速施工工艺减少了施工对周边居民的影响。引入 BIM 技术和三维扫描技术, 实现了精准化改造和施工过程可视化管理, 为建筑密集区道路改造提供了新思路和技术支撑。

关键词 道路改造; 新型复合材料; 智能排水系统; 快速施工工艺

中图分类号: U418

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.020

0 引言

建筑密集区道路改造是城市更新过程中的重要环节。随着城市化进程加快, 传统道路改造技术已无法适应新形势下的工程需求。特别是在建筑密集区, 由于空间受限、地下管线复杂、施工难度大等问题, 亟需探索新型技术方案。新材料、新工艺、新设备的不断涌现, 为建筑密集区道路改造带来了新的机遇。通过创新性技术手段可有效解决传统改造中遇到的技术瓶颈, 提高改造效率和质量。基于此, 深入研究建筑密集区道路改造新技术具有重要的现实意义。

1 建筑密集区道路改造关键技术创新

1.1 新型路面结构优化技术

高模量沥青混凝土技术在建筑密集区道路改造中展现出独特优势。该技术采用改性沥青与纤维增强复合材料相结合, 使路面结构层次更加紧密。实践证明, 该技术能有效提升路面抗压强度和抗疲劳性能, 路面使用寿命延长 35% 以上。在结构层设计方面, 采用新型复合材料替代传统碎石基层, 减少了整体结构层厚度, 路面结构总厚度从原来的 65 cm 降至 42 cm。在沥青混合物中添加纳米改性剂, 提高了路面的粘结性和抗滑性能, 路面抗滑系数提升至 0.55 以上。为适应建筑密集区道路荷载特点, 在基层采用玄武岩纤维增强技术, 提高了基层强度, 路面承载力达到原设计标准的 1.3 倍, 有效解决了重载车辆频繁通行导致的路面早期损坏问题。新型结构优化技术不仅提升了道路使用性能还降低了后期维护成本, 每年每千米维护费用降低约 12 万元^[1]。

1.2 智能排水系统集成技术

新型智能排水系统采用模块化设计理念, 结合透水混凝土和生态排水沟渠, 构建了多层次立体排水网络。系统核心采用渗透—储存—净化—排放四级处理工艺, 在路面结构层铺设高效透水层, 渗透系数达到 0.4 cm/s。地下排水系统采用新型仿生排水管道, 管道内壁设计特殊螺旋纹路, 提高了排水效率, 在相同管径条件下, 排水能力提升 40%。排水系统配备智能监测装置, 实时监测积水深度和排水速率, 当积水深度超过 3 cm 时, 自动启动应急排水模式。在道路交叉口等重点部位, 设置智能调蓄池, 调蓄容量为 200 m³/km, 可有效应对短时强降雨。系统还集成了远程监控功能, 实现排水设施运行状态实时监测, 排水系统运行效率提升 50%, 暴雨期间路面积水时间缩短 2/3, 道路通行能力显著提升。

2 建筑密集区道路改造工艺创新

2.1 快速施工工艺应用

装配式路面铺装技术在建筑密集区道路改造中实现了重大突破, 该工艺采用预制路面板快速更换施工方案, 大幅缩短施工周期。预制路面板在工厂完成标准化生产, 现场仅需进行吊装就位和接缝处理, 单日施工里程提升至 450 m。预制构件采用高性能混凝土制作, 28 天抗压强度达到 85 MPa, 预制板采用蜂窝状内部结构设计, 在保证强度的同时减轻了构件重量。施工现场配备智能测距仪和激光定位系统, 确保预制板安装精度控制在 ±2 mm 范围内。接缝采用改性环氧树脂灌注技术, 接缝宽度控制在 8 mm, 防水性能显著提升。钢筋网架采用新型连接结构, 实现快速对接, 接头抗剪强度达到

主体结构的 95%。装配式施工工艺将传统 20 天的施工周期缩短至 5 天,且施工噪声降低 15 dB,有效减少了对周边居民生活的影响,工程施工效率提升 3 倍^[2]。

2.2 地下管线探测技术

多频雷达探测结合地质成像技术在地下管线探测领域取得显著进展,实现了地下管线的精确定位和三维可视化。探测系统采用双频雷达阵列,工作频率分别为 400 MHz 和 900 MHz,探测深度达到 4 m,横向分辨率优于 5 cm。地质成像系统采用人工智能算法处理探测数据,建立地下管线三维模型,准确识别各类管线的空间位置和走向。新型探测设备采用轮式移动平台,配备惯性导航系统和厘米级定位模块,探测定位精度达到 ± 3 cm。探测数据实时上传至数字化平台,生成地下管线分布图,标注管线类型、埋深、管径等关键参数。在复杂路段探测中采用多维度扫描技术,探测识别率达到 98%,避免了施工过程中对地下管线的破坏,显著降低了施工风险。

2.3 精准化施工控制技术

数字孪生技术在道路改造精准化施工中发挥着重要作用,结合北斗定位系统和激光扫描技术,实现施工全过程精准控制。施工现场部署 5G 网络和边缘计算设备,将实时采集的施工数据与 BIM 模型进行对比分析,施工偏差控制在 ± 5 mm 范围内。智能测量机器人搭载高精度全站仪,自动完成施工放样和竣工测量工作,测量效率提升 2.5 倍。路面平整度检测采用惯性激光检测系统,检测速度达到 80 km/h,平整度指标 IRI 控制在 1.8 m/km 以内。沥青摊铺机配备智能找平系统,实现横坡自动调整,路拱横坡精度达到 $\pm 0.1\%$ 。水泥混凝土振捣采用智能振捣棒,根据混凝土坍落度自动调整振捣频率和时间,确保混凝土密实度均匀性。

精准化施工控制系统集成了深度学习算法,建立施工工艺参数优化模型。系统根据路基压实度、环境温度、材料性能等多维数据,自动生成最优施工参数组合。压路机碾压轨迹规划采用遗传算法优化,重叠率控制在 23 cm,压实度均匀性提升 36%。摊铺机作业速度与材料温度联动控制,当沥青混合料温度低于 165 °C 时,自动降低摊铺速度,确保路面压实质量。基于机器视觉的实时检测系统,对摊铺厚度进行动态监控,发现偏差自动进行补偿调整。现场试验数据显示,采用精准化控制系统后,路面施工质量一次合格率达到 98.2%,施工效率提升 42%,工程质量显著提高。

2.4 噪声振动控制工艺

在建筑密集区道路改造过程中采用了多项创新性的减振降噪技术。其中,复合式隔振沟技术是一项重要突破,在路基两侧开挖 2.5 m 深的隔振沟,内部填充

高性能聚氨酯泡沫材料。该材料具有优异的减振性能,其微孔结构能有效阻断振动波传播,振动衰减率高达 85%。路面结构层选用新型橡胶改性沥青混合料,通过在沥青中掺入 3 mm 橡胶颗粒显著改善了路面的弹性模量和阻尼特性。这种改性沥青不仅提高了路面的耐久性,还能有效降低轮胎与路面的接触噪声,经实测路面噪声较普通沥青路面降低约 6 dB。施工过程中采用电动静压压路机进行碾压,其工作原理是通过纯静压方式进行压实,避免了传统振动压路机产生的强烈振动,在保证压实质量的将振动影响距离从 25 m 大幅缩减至 8 m。

为进一步提升减振降噪效果,在建筑物基础与路基之间设置了高性能减振垫。减振垫采用三元乙丙橡胶材料制成,其动态刚度仅为 0.015 N/mm³,具有优异的减振性能和耐久性。该材料在常温下表现出良好的弹性和阻尼特性,能够有效阻断地面振动向建筑物传播。在路缘石安装环节,创新性地采用了弹性支座设计,支座由天然橡胶与钢板复合而成,形成了“软—硬—软”的三明治结构。这种结构既保证了支座的承载能力,又能显著降低路面荷载向周边传递,减振效果达到 12 dB。通过这些技术的综合应用不仅确保了道路的使用性能,还最大限度地减少了对周边建筑的影响,为建筑密集区道路改造提供了可靠的技术支撑^[3]。

2.5 新型养护技术应用

智能路面养护机器人的应用标志着道路养护进入智能化时代。该机器人采用模块化设计,搭载多功能作业装置,包括高清摄像头、红外传感器、激光扫描仪等检测模块,可实现路面病害的智能识别与快速修复。其中,高清成像系统分辨率达到 4K,配合深度学习算法,使裂缝识别精度达到 0.3 mm,还能准确判断裂缝走向、深度等特征。对于微裂缝的修复,采用新型纳米渗透材料,该材料具有超强渗透性和粘结性,可渗透至 8 cm 深度并与原路面材料形成稳定的化学键合,修复后抗压强度可恢复至原强度的 92%,远超传统修复材料的性能。在坑槽修补方面,采用改性环氧树脂基快速固化材料,该材料具有优异的力学性能和耐久性。修补 2 小时后即可承受正常交通荷载,与原路面的结合强度达到 1.8 MPa,有效解决了传统修补材料粘结性差、修复后易开裂的问题。养护机器人配备了智能废料回收系统,通过真空吸附装置和筛分系统将废旧材料进行分类回收,修补材料利用率高达 95%。在预防性养护方面,采用精准控温、智能喷涂技术,确保防水封层均匀覆盖,喷涂厚度误差控制在 ± 0.2 mm 以内。这种新型防水封层不仅能显著提升路面的耐久性延长使用寿命 30%,还实现了养护成本的大幅降低,年度养护支出减少 25%,体现出显著的经济效益。

3 建筑密集区道路改造技术实施效果评估

3.1 路面结构耐久性分析

对改造后路面结构进行为期24个月的跟踪监测,数据显示新型路面结构展现出优异的耐久性能。在重载交通条件下,路面车辙深度增长率较传统结构降低45%,车辙深度控制在4 mm以内。路面弯沉值监测结果表明,经过200万次标准轴载作用后,路表弯沉值增长仅为0.02 mm,远低于设计允许值0.12 mm。采用落锤式弯沉仪测试路面结构层弹性模量,改造后路面结构层弹性模量提升38%,结构层次间剪切强度提高42%。针对不同季节气候条件下路面性能变化规律研究发现,夏季高温期间路面车辙抗变形能力提升55%,冬季低温条件下路面开裂率下降68%。疲劳试验结果表明,改造后路面结构疲劳寿命延长2.2倍,结构层粘结性能保持稳定,层间剥离现象明显减少,路面使用性能显著提升^[4]。

3.2 排水系统运行效果

针对新型排水系统运行情况进行系统化评估,在降雨强度25 mm/h工况下,路面积水深度控制在2 cm以内,较改造前降低65%。排水系统响应时间缩短至5 min,路面积水消退速度提升至8 mm/min。透水路面渗透系数测试结果显示,经过一年运行后渗透系数仍维持在0.35 cm/s以上,仅比初始值降低12%。智能调蓄系统在暴雨工况下表现突出,调蓄池启动时间控制在90 s内,有效削减峰值流量85%。地下排水管网水力性能测试表明,管网设计流速达到设计值的95%,管网淤积率降低至3%。智能监测系统记录数据显示,排水设施运行可靠性达到98%,系统故障率较传统排水系统降低75%,维护工作量减少60%,排水系统整体运行效能显著提升。

3.3 施工效率提升分析

新技术应用显著提升了建筑密集区道路改造施工效率,装配式施工工艺在实际应用中展现出明显优势。改造工程施工进度较传统工艺提前35%,单位面积施工时间从4.5 h/m²降至1.8 h/m²。机械化作业率提升至92%,人工工时投入减少56%,智能施工设备定位精度达到±2 mm,施工返工率降低至0.8%。BIM技术应用使施工工序衔接时间缩短45%,工序等待时间从2.5 h降至0.8 h,材料进场检验时间缩短65%,材料周转效率提升82%。施工现场管理人员配置较传统模式减少4人,施工效率提升带来的工期缩短效果显著,500 m标准段施工工期由原来的25天缩短至12天,施工组织效率大幅提升。

3.4 居民满意度调查

针对道路改造工程实施区域展开问卷调查,发放调查问卷500份,有效回收率达到95%。调查数据显示,

对改造后道路整体满意度达到92%,较改造前提升46个百分点。道路通行体验评分为4.6分(满分5分),道路路面平整度满意率达到95%。居民对施工期间噪声控制满意度达到88%,较传统施工提升52%,施工扬尘控制满意度达到91%,施工占道情况满意度为86%。道路排水效果满意度达到94%,路面积水问题投诉量降低85%,夜间照明效果满意度达到96%,道路景观改善满意度为93%。居民对新技术应用的认可度较高,95%的居民认为新技术应用明显改善了施工影响^[5]。

3.5 经济效益评估

新技术在道路改造中的应用产生了显著的经济效益。工程造价分析显示,装配式施工较传统施工节约成本12%。施工周期缩短带来的间接经济效益达到85万元/km,交通组织费用节约42万元/km。新型材料应用延长了道路使用寿命,年均养护成本降低32%,路面大修周期由8年延长至12年。智能化设备应用减少施工人员32%,人工成本节约168万元/km,施工机械使用效率提升45%,设备闲置率降低62%。BIM技术应用降低了设计变更成本,设计变更率从6.5%降至2.2%。全寿命周期成本分析表明,新技术应用使道路工程造价回收期缩短2年,投资回报率提升25%,经济效益显著。

4 结束语

通过对建筑密集区道路改造新技术的探索与实践,验证了创新技术在解决传统改造难题方面的显著成效。新型路面结构优化技术和智能排水系统的应用,大幅提升了道路使用性能;快速施工工艺和精准化施工控制技术的实施,有效降低了施工对周边环境的影响。这些技术创新不仅优化了施工工序,提高了工程效率,更为今后建筑密集区道路改造提供了可借鉴的技术方案。未来还需在实践中持续完善和优化这些技术,进一步提升道路改造的整体效果。

参考文献:

- [1] 张世瑜. “白改黑”道路改造工程设计及施工技术探析[J]. 江西建材, 2024(10):402-404.
- [2] 黄秀丽. 城市道路改造工程的项目管理[J]. 工程抗震与加固改造, 2022,44(02):I0004.
- [3] 尤仔凤. 共振碎石化技术在城镇化地区道路改造工程中的应用[J]. 散装水泥, 2024(06):110-112.
- [4] 李少杰, 王万鹏, 邢竞争. 城市更新背景下的道路改造策略与工程实践[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11):34-37, 58, M0006.
- [5] 崔俊, 廖志平. 市政道路改造工程造价影响因素分析[J]. 建筑经济, 2022,43(S02):81-83.

钢结构井道电梯检验中电梯运行共振处理技术探讨

鲍宏谊

(深圳市特种设备安全检验研究院, 广东 深圳 518000)

摘要 针对钢结构井道电梯运行的共振问题, 系统性分析了钢结构井道电梯运行共振的危害, 阐述了电梯运行共振原因, 以此为基础, 提出多维度共振处理策略。研究结果表明, 通过曳引系统优化、轿厢结构调整、导轨与导靴改进、钢丝绳维护等技术, 可控制钢结构井道电梯, 避免出现运行共振, 提高电梯运行品质, 为电梯运行安全性与稳定性提供技术支持。

关键词 钢结构井道; 电梯检验; 运行共振; 处理技术

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.021

0 引言

随着城市化与老龄化进程加快, 既有建筑加装电梯需求凸显。钢结构井道电梯因其轻量化、施工便捷及空间适应性强等优势, 在既有建筑加装场景中得到广泛应用, 可有效降低原建筑荷载并缩短工期。然而, 钢结构井道易因刚度不足或动态特性不匹配引发运行共振, 导致轿厢异常振动、噪声加剧, 甚至威胁控制系统稳定性, 既降低了乘梯舒适性, 又加速了部件损耗。因此, 亟需系统性分析共振成因并探讨针对性处理技术, 以提升电梯运行安全性与可靠性。

1 钢结构井道电梯运行共振的危害

1.1 乘坐舒适性降低

钢结构井道电梯运行共振, 将会出现左右晃动、上下颠簸、前后晃动情况, 伴随吱吱声、嗡嗡声、轰鸣声, 轻则电梯短暂停顿、突然减速或加速, 重则控制系统失效, 无法按照预设指令启动或停靠, 严重影响乘客乘坐体验。长期暴露于此种环境, 乘客身心均会受到损害^[1]。

1.2 电梯结构损伤

钢结构井道电梯在长期共振下, 会造成各部件疲劳磨损, 如螺栓连接松动、结构焊缝开裂等, 整体承载性能、使用寿命随之降低。并且, 高频振动会造成局部导轨偏移, 引发钢丝绳断裂等, 加剧结构失稳, 与建筑频率耦合, 共振范围更大, 威胁建筑安全。

1.3 设备故障率增加

在钢结构井道电梯严重共振下, 钢丝绳、导轨、曳引机等部件将会由于异常振动磨损加剧, 引发安全

事故, 威胁乘客生命安全。例如: 共振导致接线端子导线虚接, 控制系统出现误动作, 电梯门难以正常打开、关闭, 或是平层不准、急停等, 造成乘客被困或发生坠落事故。

2 钢结构井道电梯运行共振的原因分析

2.1 曳引系统问题

电梯曳引机是电梯主要部件, 输送和传递动力使电梯运行。曳引机的曳引轮槽、蜗轮蜗杆等部件出现磨损, 或是安装阶段精度不足, 影响曳引机的运行平稳性, 使电梯在运行中出现振动, 引发共振。例如: 运行中蜗轮蜗杆互相啮合, 随着齿间不断磨损, 啮合间隙会逐渐增大, 降低配合精度, 使得电梯运行出现振动。此外, 曳引钢丝绳张力不均, 受力不平衡, 也会引发共振^[2]。

2.2 轿厢结构问题

轿厢作为乘客乘坐和货物运输的空间, 结构稳固性、合理性可决定电梯运行平稳度。轿厢结构不合理, 出现底部支撑不足、轿壁刚度较低、安装精度较低(如轿厢架和轿壁安装偏差, 引发运行“偏心”), 导致轿厢在运行过程中发生变形, 产生振动。另外, 轿厢内的设备安装不牢固, 如轿厢门、操纵箱等, 在电梯运行时也会因晃动而产生振动, 引发共振。例如: 某电梯在装修后出现共振问题, 经检查发现是轿厢内的操纵箱安装松动, 使其在运行过程中, 与轿厢产生共振。

2.3 导轨导靴问题

导轨导靴是引导电梯垂直运行的部件。在钢结构井道电梯安装中, 如果接头不平、垂直度不足、两者

间隙过大, 将引发导轨阶跃、弯曲、失调等问题, 不平顺激励加剧运行摩擦, 使得振动随之增加, 见图 1。

例如: 导轨与导靴间隙较大, 电梯偏移晃动; 反之摩擦力增加, 加剧部件磨损, 引发振动。安装导轨垂直度不足, 使得电梯运行受更多侧向力作用不断晃动。

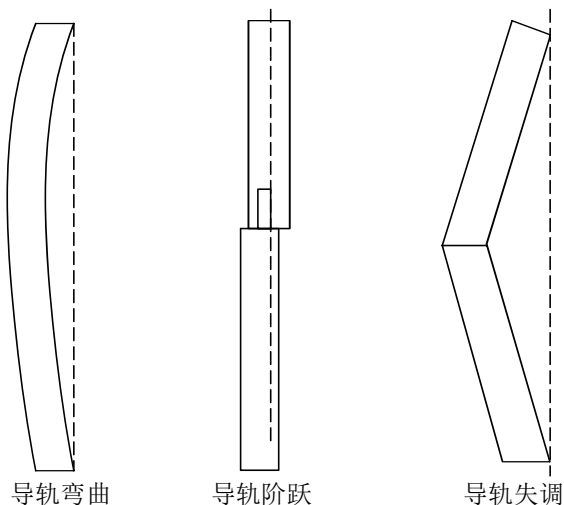


图 1 导轨不平顺激励

2.4 钢丝绳问题

曳引钢丝绳是连接轿厢和对重的重要部件, 具有控制、牵引作用, 其质量和状态对电梯的运行稳定性也有很大影响。它以钢铁为主要材料, 却在长期使用中, 容易出现受力不均; 钢丝绳的强度不足、弹性模量不均匀等, 在电梯运行过程中容易发生拉伸和变形, 产生振动。另外, 钢丝绳润滑不足, 使得曳引轮、钢丝绳之间摩擦力随之增加, 降低了其牵引控制能力, 加剧部件磨损, 引发电梯共振。

3 钢结构井道电梯检验中电梯运行共振处理技术应用

3.1 曳引系统优化技术

钢结构井道电梯曳引系统运行时, 内部蜗轮蜗杆互相啮合, 随着齿间不断磨损, 啮合间隙会逐渐增大, 导致配合精度下降, 对曳引机运行流畅性与稳定性造成影响, 长期磨损增加卡顿频率, 引发电梯共振。在处理过程中, 检修人员应当仔细排查曳引机问题、共振原因等, 针对不同问题采取恰当处理方案。如发现蜗轮蜗杆的磨损量超过规定值时, 应及时更换, 以保证传动的平稳性。

3.2 轿厢结构调整技术

电梯运行时轿厢需承担货物与搭乘人员, 内部重量加自重, 如果轿厢自身平衡性不佳将对电梯稳定运

行造成影响。具体处理如下: (1) 优化轿厢结构, 注重结构刚度与合理性, 避免箱壁较薄, 或是重心偏高, 选择恰当内部布局与装饰, 降低共振概率。并在底部设置平衡铁, 调整轿厢重心结构, 使其重心垂直于地平线, 优化轿厢质心位置, 控制偏载误差在 1.5% 以内, 做到平稳运行。(2) 提高安装轿厢精度, 对误差严格控制, 保证导轨牢固, 间隙满足要求, 且做好全面调试与检查工作。(3) 在电梯调试阶段, 应做好轿厢的静平衡。轿厢静平衡是指轿厢在某位置时的平衡状态, 可将电梯停在最底层, 轿厢拆除导靴后, 检查轿厢在自然悬挂状态下的平衡状态, 如果有偏差可以通过增加或减少轿底平衡铁的方法市轿厢平衡。对于高层高速电梯, 除了做好静平衡外, 还需要调整轿厢的动平衡。轿厢静平衡和动平衡调整的目的是使轿厢 4 个导靴的受力保持均匀并在设定的范围内, 有效降低电梯运行过程中的振动^[3]。(4) 考虑轿厢容易受力不均的问题, 要求定期检查轿厢情况, 发现控件松动或变形, 立即进行紧固或更换处理。(5) 轿厢安装电磁主动阻尼器, 底部设置“金属—橡胶”复合隔震垫, 动态调整阻尼力, 实时监控振动情况, 使得地板振动传递损失增加, 降低垂直振动幅度。

3.3 导轨与导靴改进技术

导轨与导靴是维持电梯运行平稳的关键装置, 直接影响电梯振动、噪声控制情况, 需做好安装及日常维护工作。特别是钢结构井道电梯对其要求更高, 应保证材料具备耐磨、耐压等特性。在导轨安装中, 控制导轨接头平整度与导轨垂直度。根据运行情况, 开展维护工作, 具体维护方法如下: (1) 检查轿厢导轨和设有安全钳的对重导轨的工作面接头, 该处不应有连续缝隙。测量局部缝隙值, 该缝隙值应不大于 0.5 mm。用直线度为 0.01/300 的平直尺测量工作面接头处台阶, 应不大于 0.05 mm, 超出规定值则修平处理。测量每列导轨工作面 (包括侧面与顶面) 相对安装基准线每 5 m 长度内的偏差, 应不大于下列数值: 第一, 轿厢导轨和设有安全钳的对重导轨为 0.6 mm; 第二, 不设安全钳的 T 型对重导轨为 1.0 mm^[4]。(2) 检查轿厢导靴, 来回摆动轿厢, 检查顶隙、侧隙大小, 及磨损靴衬情况; 检查弹簧弹性力。还要检查下部导靴, 人员可站在底坑, 调整轿厢至最底层检修部位, 左右晃动对其检查, 顶隙如果较大, 适当取下靴衬调整垫片; 侧隙过大, 则调节侧靴衬螺栓; 整体式靴衬添加垫片调整间隙^[5]。

(3) 导轨保持润滑清洁, 清理导靴、导轨面脏物。轿厢由于上下运动, 带动井道沙尘飞舞与空气流动, 容

易吸附至导轨工作面,严重磨损导轨与导靴,需要按规定清洗,减少摩擦损坏与共振概率。(4)导轨与靴衬磨损严重、间隙过大、卡入异物或歪斜斜,会造成啃轨情况,需根据实际原因,如导轨安装松动、扭曲,或导轨间隙不同,或上下导轨未对中等,及时更换靴衬。

3.4 钢丝绳维护技术

选择质量合格的钢丝绳,确保钢丝绳的强度、弹性模量等性能符合要求。钢丝绳如果出现绳股挤出、笼状畸变、部分挤压、扭结等异常特征,会导致应力不均匀分布,引发电梯共振,需做好检验工作。因此,若电梯钢丝绳出现异常,如一个捻距(约 $6d$, d 是钢丝绳直径)内断丝数量较多(见表1);钢丝绳严重锈蚀,填满绳股间隙;钢丝绳直径低于90%公称直径等,均需要报废处理^[6]。

表1 一个捻距内的断丝数量

断丝的形式	钢丝绳类型		
	6×19	8×19	9×19
均布在外层绳股上	24	30	34
集中在—根或者两根外层绳股上	8	10	11
—根外层绳股上相邻的断丝	4	4	4
股谷(缝)断丝	1	1	1

根据钢丝绳上述表现,采取“测、摸、看”的方式检验。具体如下:(1)查看钢丝绳外观,是否出现锈蚀问题;电梯曳引机座上 and 机房地面上是否出现红褐色锈粉或锈斑。(2)以放大镜观察钢丝绳断股、断丝情况;对于股内断丝,则利用无损探伤检测法,使用钢丝绳探伤仪合理判断。(3)以游标卡尺检测钢丝绳磨损情况,要求其设有宽钳口,钳口宽度跨越2个邻近股,测量钢丝绳平直位置。测量过程中,2点间距 $>1\text{ m}$,每点测量2组数据,取测量平均值,对比相关参数。(4)以激光张力仪检测绳间张力偏差,控制张力偏差 $\leq 5\%$ 。

同时,要定期对钢丝绳进行润滑,使用专用的钢丝绳润滑剂,减少钢丝绳与滑轮之间的摩擦力,延长钢丝绳的使用寿命。

4 案例分析

4.1 案例背景

某商业综合体项目安装多台钢结构井道电梯,运行3个月后,部分乘客反映电梯运行共振,即电梯轿厢振动、发出吱吱噪声等,降低了乘坐舒适性的同时,也会对电梯各部件、系统等造成磨损。

4.2 共振原因分析

商场管理者立即通知电梯维修人员开展电梯全面测试与检查,分析共振原因。具体如下:一是轿厢壁刚度不足,受到外力作用,容易引发变形,致使电梯运行产生振动、噪声。二是导轨安装垂直精度不足,使得电梯运行容易受侧向力影响。三是钢丝绳张力不均,运行时受力不平衡,引发电梯共振。

4.3 处理技术及效果

该项目针对电梯共振问题,采取以下处理方式:首先,对轿厢壁进行了加固处理,增加了加强筋,并重新紧固轿厢壁连接螺栓;其次,重新调整了导轨的垂直度,确保导轨安装符合要求;最后,使用张力测试仪对钢丝绳的张力进行了检测和调整,使各根钢丝绳的张力均匀。通过上述处理方法,有效解决了电梯共振问题,保证了乘坐舒适度,降低了部件磨损概率。

5 结束语

在模块化建筑技术不断发展的背景下,钢结构井道电梯新增装机量不断提高,特别是在老旧住宅电梯加装中得到广泛应用。电梯运行共振问题是一个复杂的系统问题,涉及诸多系统、部件,如轿厢、曳引机、导轨导靴、钢丝绳等。如果电梯频繁出现运行共振问题,就难以保证电梯运行安全性,影响乘客体验。因此,在钢结构井道电梯运行中,需结合共振原因,采取相应的处理技术,建立全过程电梯共振控制体系,延长电梯使用寿命,提高乘客乘坐体验。

参考文献:

- [1] 高文俊. 钢结构电梯检验中电梯运行共振处理探讨[J]. 中国设备工程, 2025(05):149-151.
- [2] 许志明. 电梯运行振动原因及减振措施探讨[J]. 中国设备工程, 2019(14):87-88.
- [3] 徐谢翔, 孟国桦, 徐义鸣. 电梯振动与噪声的产生原因和解决方法[J]. 中国电梯, 2022, 33(20):31-36.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电梯安装验收规范(GB/T 10060-2023)[S]. 2023-09-07.
- [5] 鲁华宾. 电梯滑动导靴的磨损及维护[J]. 装备制造技术, 2013(09):54-55, 65.
- [6] 国家市场监督管理总局. 电梯监督检验和定期检验规则(TSG T7001-2023)[S]. 2023-04-02.

数字化装配技术在制造业中的应用分析

解倩靓

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要 数字化装配技术作为连接设计端与生产端的核心纽带,是重塑产业竞争力的关键引擎。本文简要分析数字化装配技术的优势,重点强调数字化装配技术在航空航天领域、汽车制造领域、消费电子领域、工业机械领域的具体应用,并提出加强数字化装配技术在制造业中的应用措施,探讨其在赋能制造业高质量发展中的战略价值与实践路径,以期能够为相关人员提供参考。

关键词 制造业;数字化装配技术;虚拟装配;全流程数字化平台

中图分类号: F42

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.022

0 引言

随着工业互联网、人工智能、数字孪生等技术的深度融合,传统装配模式正经历着从“经验驱动”到“数据驱动”的范式变革。装配过程从依赖人工技艺转向基于实时数据的智能决策,装配质量从事后检测转向全流程预测性管控,装配资源从孤岛式运作转向跨企业协同共享。这一转变不仅显著提升了装配效率与精度,更推动了制造业向服务型制造、大规模定制等新业态延伸。

1 数字化装配技术的优势

1.1 提升效率

借助工业物联网(IIoT)进行实时数据采集,实现设备状态、工艺参数、物流信息等的秒级同步,与数字孪生技术构建的虚拟装配环境相配合,可预先对生产过程进行模拟并优化方案,把装配规划时间减少50%以上。在执行层面,机器视觉与AI算法的深度融合,使机器人可以自主开展高精度定位、缺陷检测及自适应调整,缺陷识别的精准度提升至99%,从而减少人工复检环节;智能拧紧系统可依据工况态势动态调控扭矩参数,避免因拧紧力度过紧或欠紧出现的返工,单工位效率实现30%的提升。数字化平台打破了信息孤岛,实现供应链、生产及质量数据的无间隙对接,利用大数据分析精确预测设备故障及质量隐患,非计划停机的时长降低了40%,订单交付周期缩短了25%,该“数据驱动+智能执行”模式,正改变着制造业的效率边界。

1.2 优化质量

通过工业物联网及唯一标识技术,实时记录下每个零部件的原材料批次、加工参数、装配记录以及检测数据,再关联到产品数字档案,若出现质量方面的

问题,能实现“一键追溯溯源”,与传统方式相比,定位效率提升90%以上。在流程管控环节,机器视觉系统与AI算法的深度融合,实现装配缺陷识别精度达微米级,可自动进行对划痕、裂纹、错位等30余种缺陷类型的检测,识别准确率达98%以上,极大地降低了人工目检存在漏检的概率。借助数字孪生技术构建的虚拟装配环境可提前模拟工艺参数对质量的影响,以仿真优化实现装配不良率降低60%,依靠大数据分析打造的质量预测模型,可预先预警潜在的质量风险,推动质量管控从“事后检验”向“事前预防”转变,辅助企业实现“零缺陷”生产目标。

1.3 降低成本

借助工业物联网实时采集的设备能耗、物料损耗、工时利用率等数据,依托AI算法构建的动态成本模型,可以精准估算生产波动对成本的影响大小,实现设备能耗降低20%、物料损耗降低15%。就工艺优化方面而言,数字孪生技术借助虚拟装配仿真,提前检查装配顺序与工装的匹配情况,杜绝因设计有缺陷导致的返工,单次试制成本降低达40%;智能拧紧系统借助扭矩大数据进行分析,自动调整参数,减少螺栓过紧或欠紧引起的材料损耗,工具维护成本下降了35%。数字化平台把供应链与生产数据打通,凭借需求预测与智能排产,实现库存周转率提升50%,减少资金占用所产生的成本,应用质量追溯系统后,次品召回与返修成本降低了60%,质量损失成本占比从8%降低到2%,该“数据驱动+智能执行”模式,推动对制造业成本结构的重塑,助力企业实现降本增效。

1.4 柔性生产

借助工业物联网(IIoT)与数字孪生技术,企业可实时反映物理装配线的运行状态,且凭借虚拟仿真

迅速验证工艺调整方案,把换型时间从传统模式的数小时压缩至 15 分钟以内,满足多品种、小批量订单迅速切换的需求。智能物流系统与 AGV(自动导引车)深度融合,促使物料配送路径可依生产计划动态优化,缩短因缺料造成的停机等待时长,设备综合利用率提高 40%。模块化装配工装与机器人柔性编程技术相结合,使同一条生产线可兼容不同规格产品的装配作业,工艺调整成本降低了 70%。

大数据驱动的产能预测模型可提前识别订单波动风险,采用智能排产系统动态优化产能负荷,避免出现过度生产及资源闲置状况。该“虚拟验证+动态调度”的柔性化生产模式,不仅提高了企业面对市场变化的响应效率,还借助资源的高效复用降低了多品种生产产生的额外成本,为制造业的转型升级注入新的发展动力^[1]。

2 数字化装配技术的具体应用

2.1 虚拟装配与工艺规划

数字化装配技术中的虚拟装配与工艺规划是推动制造业智能化升级的核心环节。通过构建产品的三维数字模型,并结合虚拟仿真平台,可在物理装配前对产品进行全方位的“预装配”验证。这一过程不仅涵盖零部件的几何干涉检查,更深入装配路径规划、工装夹具设计以及人机工程学分析。例如:在汽车制造领域,工程师可利用虚拟装配技术,在计算机中模拟发动机、变速箱等复杂总成的装配过程,提前发现并解决零部件之间的干涉问题,优化装配顺序,从而避免在物理试装阶段因设计缺陷导致的反复修改,显著缩短研发周期^[2]。

同时,虚拟装配技术还可结合工艺规划工具,对装配流程进行精细化设计。通过模拟不同装配策略下的生产效率、资源消耗以及质量稳定性,工程师能够选择最优的工艺方案。例如:在航空航天领域,针对飞机机翼等大型结构件的装配,虚拟装配技术可精确规划装配路径,确保每个紧固件的拧紧顺序与扭矩值符合设计要求,同时避免对周围结构造成损伤。此外,该技术还可评估装配过程中工人的操作舒适度与安全性,提前发现潜在的人机工程学问题,从而优化工作站布局,提升装配效率与工人满意度。

2.2 汽车制造领域

在焊装车间内,机器人借助视觉识别系统可实时获取焊点位置,借助激光传感器,把车身匹配精度提高到 ± 0.05 mm,切实降低白车身返修数量;在总装的操作环节,智能拧紧系统借助扭矩大数据分析自动调

整参数,达到螺栓预紧力一致性 99.5% 的水平,同时借助 RFID 技术实现零部件全生命周期追溯。柔性生产线借助数字孪生技术构建虚拟装配模型,可迅速验证各型车辆的装配工艺,将换型时间从传统模式的数小时缩短至 15 分钟以内,保障多品种共线生产的实现。在质量管控方面,AI 视觉质检系统以每秒 30 帧速率对车身表面进行扫描,缺陷识别的准确率超 98%,进而自动生成质量分析报告。数字化装配平台实现了 ERP、MES 与设备层数据的打通,做到物料精准配送及设备预测性维护,使库存周转率提升 50%,设备停机时间减少 40% 的效果,这些技术突破不仅重塑了汽车制造的工艺流程,还凭借数据驱动的智能决策体系,为车企构建起柔性化、高效化、高质量的生产新范式^[3]。

2.3 消费电子领域

在智能手机组装环节,依托机器视觉的柔性装配系统可实现 0.01 mm 级精度微型元件的定位,与六轴机械臂一起完成摄像头模组、电池等精密部件的毫米级装配,单台设备节拍缩短至 8 秒/件,和传统人工操作相比,效率提高 5 倍。智能拧紧系统借助扭矩传感器与 AI 算法协同配合,实现 M0.6 规格螺丝预紧力 99.8% 的一致性,有效抑制因装配应力引起的性能衰减。在进行可穿戴设备生产时,数字化装配平台集成激光投影定位技术,可将柔性电路板(FPC)的贴装精度控制到 ± 0.02 mm 范围内,借助在线 AOI 检测系统实现 100% 全检覆盖,推动缺陷逃逸率下降到 0.2% 以下。

2.4 工业机械领域

在重型机床总装阶段,采用激光跟踪仪与视觉定位系统组合的混合装配技术,可帮助床身、立柱等超大型部件实现微米级对接,结合六自由度调姿平台自动补偿形变误差,实现导轨直线度偏差控制在 0.01 mm/m 以内,装配效率提升了 60%。在风电齿轮箱生产阶段,智能拧紧系统凭借多轴同步控制和扭矩曲线分析行星轮系预紧力分布均匀性为 99.7%,有效降低了传动噪声及早期失效的概率^[4]。

在工程机械的液压管路装配方面,AR 辅助装配系统能实时将三维管路模型与真实工件进行叠加,协助工人完成异形管件的精准拼合,安装错误率下降了 95%。依托数字化装配平台的支撑,企业凭借数字孪生技术搭建起虚拟装配车间,可预先验证各型号设备的装配工艺,把试产周期缩短到原时长的 60%;工业物联网与 MES 系统的融合,能够实现设备状态数据、质量检测数据与生产计划的实时协同,做到装配资源的动态调度及质量风险的预先预警,这些技术突破不但解决了大型装备装配精度控制、多源误差耦合等问题,更凭借

数据驱动的智能决策体系，为工业机械的高效化、高可靠制造提供支持。

3 加强数字化装配技术在制造业中应用的措施

3.1 构建全流程数字化平台

该平台以三维数字模型当作核心载体，借助集成多物理场仿真技术，能在虚拟环境中对装配工艺进行提前验证与优化，对不同装配顺序中的干涉风险、应力分布与精度持续性进行模拟，将传统试错式工艺开发周期缩短 50% 以上。在工艺规划阶段，基于知识图谱的智能工艺决策系统可自动筛选出最优装配方案，通过数字孪生技术生成动态装配工艺路线，促使装配资源与生产节拍相符合。

在生产执行阶段，平台借助物联网终端实时采集设备状态、扭矩数据、温湿度等工艺参数，形成装配过程数字主线，运用机器视觉及力觉传感技术，构建智能装配工作站，能自主识别零件特征、检测装配质量且自适应地调整装配参数，实现装配精度的微米级调控。在复杂装备的装配方面，凭借增强现实（AR）技术提供三维装配引导，工人戴上智能眼镜后，即可获取虚拟叠加的装配路径及关键参数，极大地降低了对技能的依赖度^[5]。

产品质量管控阶段，平台整合多源异构数据，基于大数据分析机器学习算法构建质量预测模型，可以提前识别潜在的质量隐患并触发预警，依托区块链技术实现装配过程数据的不可篡改存储，为产品全生命周期追溯提供可信的数据支撑。

3.2 建立质量追溯与闭环管理体系

该体系围绕产品数字档案这一核心运作，借助物联网标识技术给每个零部件赋予唯一的身份编码，实时采集从原材料入厂到成品出厂的全生命周期数据，包括供应商信息、加工参数、装配记录、检测结果等关键质量相关要素，构建起可追溯的质量数据链条。在装配实施的环节，智能拧紧系统与视觉检测设备自动记录扭矩曲线、尺寸偏差等工艺参数，通过数字孪生技术打造虚拟装配模型，实现装配流程与质量数据的实时映射。

闭环管理机制借助大数据分析 AI 算法运行，对质量数据展开深度挖掘，通过建立质量预测模型，系统可预先识别潜在风险点并触发预警，如基于扭矩数据预测螺栓的松动倾向，利用尺寸偏差分析预测装配间隙超差风险，针对已存在的质量问题，体系会自动生成改进工单，随后推送至责任部门，同步借助历史

数据与工艺知识库提供优化方案推荐，通过数字化平台实时检验改进效果，促成“问题发现—分析改进—效果验证”的 PDCA 循环。

3.3 构建数字化装配产业协同网络

此网络以工业互联网平台作为底层架构，借助边缘计算节点实现装配设备、检测仪器、物流终端等异构系统的互联互通，构建覆盖供应商、制造商、物流商及终端用户的实时数据流。在产品设计之初，多主体在线协同得到协同网络支持，设计师可凭借云端实现三维模型与装配工艺数据的共享，与供应商实时探讨零件可装配性，运用数字孪生技术模拟装配流程，提早识别设计瑕疵并改进装配规划，把设计迭代周期缩短 60% 以上。

生产实施阶段，协同网络构建起基于数字孪生的虚拟装配车间，实时反映物理车间设备情形、物料库存及订单的进程情况，运用 AI 算法对生产数据进行动态分析，系统可自动对装配节拍作出调整、优化物流配送的路径，实现装配资源的高效统筹。若出现设备故障以及质量异常时，协同网络会触发跨企业应急响应机制，自动调配周边供应商的备件资源或实现生产能力互通，维持装配线持续运转^[6]。

4 结束语

通过工业互联网、数字孪生、智能传感等技术的深度融合，实现了装配过程的精准感知、动态优化与全生命周期追溯，显著提升了生产效率、装配精度与质量稳定性。尤其在复杂装备制造领域，数字化装配技术有效解决了传统模式下的工艺验证周期长、质量波动大、资源协同难等痛点，为多品种小批量生产提供了柔性化解决方案。

参考文献:

- [1] 黄浩,徐子贤.制造业数字化转型与产业融合:产品创新的视角[J].中国软科学,2025(01):47-57.
- [2] 成新轩,丰义,李明峰.制造业数字化转型与绿色技术创新的关系研究[J].工业技术经济,2025,44(01):115-121.
- [3] 伦健.制造业数字化转型中的关键技术与策略分析[J].中国科技期刊数据库工业 A,2024(07):45-48.
- [4] 胡凤,李漫青,宾宁.企业数字化能力影响因素分析:以广东省制造业为例[J].中国商论,2024(01):57-60.
- [5] 陈旭升,杨云慧,张晋硕.数字化融合赋能制造业技术创新:基于电子信息制造业的实证分析[J].科技和产业,2024,24(01):231-238.
- [6] 同[2].

社交媒体数据分析与用户画像构建研究

介 童

(对外经济贸易大学, 北京 100029)

摘 要 随着社交媒体使用量增长, 用户数据日益庞大, 如何解析海量用户行为数据并构建用户画像以实现精准商业化运营, 成为社交媒体运营者的关键课题。本研究从现有社交媒体数据分析技术出发, 探讨了内容分析、情感分析、社区检测等方法及其在用户画像构建中的应用, 基于实际业务需求, 明确了用户画像的基本结构与构建流程; 系统介绍了社交媒体数据挖掘的常用方法并分析其优劣; 通过大规模数据分析构建了具有代表性的用户画像模型, 并展示了其在推荐、广告及产品设计中的应用, 旨在为社交媒体企业提供有效的用户画像构建策略。

关键词 社交媒体数据分析; 用户画像构建; 数据挖掘; 推荐系统; 商业价值

中图分类号: TP317.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.023

0 引言

社交媒体作为基于互联网的通信平台, 得到广泛使用, 其数据量庞大, 涵盖用户基本信息及行为数据, 如微博及互动行为等。这些数据蕴含丰富信息资源, 通过解析可刻画用户行为模式, 分析需求与喜好, 构建精准用户画像, 为商业化运营提供支持。从业界看, 构建用户画像是社交媒体运营的关键环节, 与推荐、广告、设计等紧密相关, 但该领域研究与实践尚需深化。本研究探讨社交媒体数据分析与用户画像构建技术, 进一步完善用户画像构建的理论框架和技术方法, 以期对社交媒体数据分析与用户画像构建提供有益参考。本研究旨在解决以下几个主要问题: (1) 如何从社交媒体海量数据中提取用户行为特征; (2) 如何建立用户画像的基本架构和构建流程; (3) 如何有效利用社交媒体数据构建用户画像, 并评估构建方法的优劣。这些问题的解决对社交媒体运营具有重要意义。

1 社交媒体概述及其数据产生

1.1 社交媒体的发展现状与趋势

随着互联网技术的迅猛发展, 社交媒体已成为信息传播和人际交流的重要平台^[1]。近年来, 社交媒体的使用量呈指数级增长, 全球主要社交媒体平台的用户数量不断刷新纪录。社交媒体不仅限于个人用户的互动, 也成为企业品牌传播、市场营销和公共关系维护的重要工具。在技术创新的推动下, 社交媒体平台不断迭代发展, 功能日益丰富, 从最初的文字交流扩展到图片、视频和实时流媒体等多媒体形式。社交媒体呈现出移动化、碎片化、个性化的趋势, 用户可以随时随地访问平台, 与内容进行互动。人工智能和大

数据技术的融入, 使社交媒体具备了更加精准的用户行为分析和个性化内容推荐能力, 从而进一步提升了用户体验和平台粘性。基于此, 社交媒体的商业化潜力和社会影响力愈发显著, 推动了其进一步的发展与变革。

1.2 社交媒体产生的数据类型与特点

社交媒体平台上生成的数据类型多样且具有独特的特点。主要的数据类型包括文本、图像、视频和用户交互记录等。文本数据来自用户发布的帖子、评论和消息, 通常较为非结构化且包含丰富的情感和主题信息。图像和视频数据则主要用于视觉信息挖掘与分析。用户交互记录, 包括点赞、分享、关注等行为, 揭示了用户偏好和社交关系。社交媒体数据的特点表现为高频次、实时性和多样性, 使得数据分析具有较高的复杂性和挑战性。这些数据的结构化与非结构化特征对分析方法有着不同的技术需求^[2]。

1.3 社交媒体上的用户行为与数据关系

社交媒体用户行为与数据之间的关系复杂多样。用户的互动、分享、评论和点赞等行为产生了丰富的数据, 其中包括时间、内容、情感倾向等信息。这些数据不仅反映用户的个人兴趣和社交偏好, 还可能揭示其社群互动和影响力。这些行为数据深度解析对于构建精确的用户画像至关重要, 能够为企业提供更具有针对性的运营策略。

2 用户画像的基本构架与构建流程

2.1 用户画像的基本概述及重要性

用户画像是对用户特征的一种描述, 是通过收集和分析用户在社交媒体上的行为数据, 形成的一种数据化的用户行为模式和偏好展示。用户画像的构建具

有重要的战略意义，它可以帮助企业精准识别和理解用户，为个性化服务和精准营销提供支持。通过构建用户画像，企业能够根据不同用户群体的特征进行产品设计、广告投放、内容推荐等优化，进而提升用户体验和满意度。用户画像在资源配置和市场策略的制定中也发挥着关键作用。企业可以基于用户画像数据，制定更具针对性的市场策略和资源配置方案，以在激烈的市场竞争中占据优势地位。

2.2 用户画像的基础结构

用户画像的基础结构是用户画像构建的关键环节。用户画像主要由用户基本信息、行为特征、兴趣偏好和社交关系等模块组成。用户基本信息包括年龄、性别、地理位置等人口统计学特征；行为特征则涵盖用户在社交媒体上的互动记录，如点赞、分享、评论等行为数据；兴趣偏好通过用户浏览的内容、参与的活动、关注的话题等反映出个体的兴趣倾向；社交关系则通过用户的好友网络、关注关系、互动频次等揭示用户与其他用户之间的关系强度和影响力。这些模块通过整合和分析，为用户画像提供了完整的数据基础，有助于构建更为精准和立体的用户模型。

2.3 用户画像构建的流程及核心步骤

用户画像构建流程主要包括数据收集与准备、数据清洗与预处理、数据分析与特征提取、模型构建与优化、以及结果应用与验证^[3]。在数据收集与准备阶段，根据业务需求确定数据来源，确保数据的多样性和准确性。数据清洗与预处理步骤，删除噪声和缺失值，规范数据格式。在数据分析与特征提取过程中，使用各种分析方法提取有价值的用户特征信息。模型构建与优化环节，通过算法建模反复测试优化，确保模型的精度与可靠性。最终，将构建的用户画像应用于实际场景，并进行不断验证与调整。

3 社交媒体数据分析法与传统分析法的对比

3.1 社交媒体数据分析的基本方法

社交媒体数据分析涉及多种方法，其中内容分析、情感分析和社区检测是关键。内容分析通过对用户生成文本、图像等多媒体内容的分析，提取出潜在的主题、关键词及信息模式。情感分析则利用自然语言处理技术，识别并量化用户文本中的情感倾向，从而揭示用户情绪及态度变化。社区检测关注于社交网络中的群体行为，通过识别用户间的关系和互动模式，挖掘隐含的社区结构和关键意见领袖。与传统数据分析相比，社交媒体数据分析不仅需要处理非结构化和动态数据，还需在实时性和多源性上进行深度优化，以精准揭示用户行为特征。

3.2 常见社交媒体数据分析法的优劣势

社交媒体数据分析方法在处理海量、复杂且动态的数据方面表现出明显优势，包括实时分析能力和对非结构化数据的有效解析。特别是内容分析能够挖掘文本信息，情感分析可识别用户态度，社区检测则帮助识别用户群体和网络结构。这些方法也存在挑战。由于数据多样性和动态性，分析结果易受到数据噪声和平台算法变化的影响。隐私问题和数据的合规使用仍然是重大制约因素。与传统分析方法相比，社交媒体数据分析对技术设施和专业知识要求更高，增加了实施的复杂性。

3.3 社交媒体数据分析法与传统分析法的异同

社交媒体数据分析方法与传统分析方法在多个方面存在显著差异。数据来源上，社交媒体数据具有非结构化和实时更新的特性，而传统分析侧重于结构化数据。分析目标不同，社交媒体数据分析更注重识别用户情感、兴趣和社交关系，传统方法多用于定量分析和精确性预测。在方法技术上，社交媒体分析多采用自然语言处理和机器学习，传统方法更依赖于统计模型和实证分析。两者在处理数据量、反应速度和分析深度上各具优势，应用方向也有所不同^[4]。

4 用户画像模型构建及应用领域

4.1 基于社交媒体的用户画像模型构建

基于社交媒体的用户画像模型构建主要包括数据收集、特征提取和模型训练三个核心步骤^[5]。在社交媒体平台上，用户活动产生了丰富的内容，如文本、图像和交互信息。这些数据是构建用户画像的重要基础。通过自然语言处理技术和机器学习算法，从中提取出用户的兴趣、情感倾向等特征信息，从而形成多维度的用户特征库。利用这些特征进行模型训练，可以采用聚类、分类等机器学习方法，生成用户画像模型。该模型能够自动识别用户的主要特征和行为模式，为目标用户的分类提供科学依据。这一过程有效地融合了社交媒体数据的动态特性和复杂性，确保用户画像的精准性和实效性，实现个性化服务和精准营销的目标。

4.2 用户画像模型的精细化及多元化发展趋势

用户画像模型的精细化与多元化是社交媒体数据分析领域的关键趋势之一。在精细化方面，模型通过引入更丰富的用户数据，如地理位置、兴趣偏好和行为轨迹，使用户画像更具准确性与深度。在多元化发展方面，用户画像逐渐体现出跨平台整合的能力，整合不同社交平台的用户数据，以获得更加全面的用户视图。多维数据的融合与动态更新机制的引入，赋予画像模型更强的适应性与实效性。这些发展趋势使得

用户画像在精准营销、产品定制和用户体验优化等应用中呈现出显著的优势^[6]。

4.3 用户画像在广告投放推荐系统产品设计等领域的应用

用户画像在广告投放中,通过精准识别用户兴趣和偏好,实现广告内容的定向推送,提高广告点击率和转化率。在推荐系统中,用户画像辅助算法分析用户行为数据,提供个性化的内容或产品推荐,提升用户体验和满意度。在产品设计领域,用户画像为产品功能和服务的优化提供数据支持,帮助企业了解用户需求 and 行为模式,从而开发更符合市场需求的产品。这些应用提升了商业运营效率和市场竞争力。

5 商业化运营与用户画像构建

5.1 用户画像与商业化运营的必然关联

用户画像在商业化运营中起到了连接用户需求与企业产品的桥梁作用。通过深入分析用户的兴趣、习惯、消费行为等特征,运营者能够更精准地识别目标用户群体,制定个性化的营销策略。这种精准性不仅提高了用户的消费体验,还增强了用户对品牌的忠诚度。用户画像技术还可以帮助企业预见市场趋势,及时调整产品和服务以适应用户变化的需求。这种与时俱进的能力,让企业在竞争中保持领先地位,从而有效提升运营效率。精准的用户画像能优化广告投放策略,通过减少不必要的广告支出,实现最佳的资源配置和最大化的投资回报,形成市场中的竞争优势^[7]。

5.2 用户画像在商业化运营中的重要性

用户画像在商业化运营中具有显著的重要性。通过精准的用户画像,企业能够更加有效地识别用户需求和偏好,从而制定更为精细化的市场策略。这不仅能帮助企业进行个性化推荐,提高用户体验,还能优化广告投放效率,降低运营成本。用户画像能够揭示潜在趋势和市场机遇,使企业在产品设计和开发时更具前瞻性,从而在竞争激烈的市场环境中占据优势。基于用户画像的数据分析可以指导企业进行战略调整,提高决策科学性,从而提升整体商业价值,实现持续的业务增长和创新。

5.3 基于用户画像的商品推荐与优化策略

在商业化运营的大环境下,用户画像的重要性愈发凸显,它对于提升商品推荐系统的精确性和优化能力起着关键作用。

通过深入剖析用户的个性化特征和偏好,企业能够精准洞察用户需求。这就好比为企业点亮了一盏明灯,使其在产品的优化设计和营销策略制定上有了清

晰的方向。借助用户画像,运营者在商品推荐时能够综合考虑更多变量,如用户历史行为、兴趣爱好以及社交属性等。这些信息犹如拼图的关键碎片,帮助企业拼凑出完整的用户形象,进而提升推荐的准确度,让用户感受到个性化的贴心服务,极大地增强了用户体验。基于用户画像的优化策略,如同为企业的发展注入了强大动力。它不仅能够提高商品的转化率,让企业的每一分投入都能获得更丰厚的回报,还能推动企业更有针对性地进行市场细分。如此,企业可凭借用户画像精准定位目标客户群体,深入了解其需求与偏好。基于此,制定高度针对性的营销策略,使资源得以高效配置,不仅能有效提升商业价值,更能助力企业在竞争激烈的市场环境中脱颖而出,实现可持续发展。

6 结束语

本研究聚焦社交媒体数据分析与用户画像构建,提出了一套有效方法。首先,明确了用户画像的定义、构架及数据处理问题;其次,深入研究了社交媒体数据特性与分析方法,系统介绍了数据挖掘常用手段;最后,通过大规模数据分析,构建了行业代表性的用户画像模型,并展示了其在推荐系统、广告投放和产品设计等方面的应用。研究成果旨在能为社交媒体企业提供用户画像构建策略,以优化产品设计、辅助决策、提升运营效率与商业价值。但是,用户行为及其心理动机仍是挑战,未来需深入探索以更精准地理解用户需求。

参考文献:

- [1] 聂正宁,吴群.基于大数据分析的厨房收纳产品用户画像研究[J].艺术研究:哈尔滨师范大学艺术学报,2022(03):79-81.
- [2] 蔡皎洁.融合大数据分析的用户画像构建[J].情报工程,2022,08(01):100-110.
- [3] 王永明,陈宇星,殷自力,等.基于大数据分析的电力用户行为画像构建方法研究[J].高压电器,2022,58(10):173-179.
- [4] 殷琳.基于数据分析和用户画像的新闻推荐策略[J].大科技,2020(04):264.
- [5] 刘莹.时尚口罩的社交媒体大数据分析[J].包装世界,2022(10):76-78.
- [6] 冯晓娜,沈亚婕,于元勋,等.基于用户画像动态养成的高校图书馆数字素养教育模式研究[J].新世纪图书馆,2023(08):58-65.
- [7] 蒋玲,黄圣洁,赵欣.大数据环境下图书馆用户画像研究[J].科技创业月刊,2023,36(06):80-83.

装配式建筑工程造价核算方法与优化路径

王翼飞

(大华天陆新(山东)项目管理有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 装配式建筑作为建筑工业化的重要形式, 其造价核算与优化是推动行业可持续发展的关键。本文系统分析了装配式建筑工程造价的构成特点, 探讨了基于 BIM 与物联网、大数据、人工智能的核算技术, 并提出了预制构件智能制造、数字化施工模拟、供应链协同管理及区块链成本管控等优化路径。研究结果表明, 通过技术融合与管理创新, 可有效降低装配式建筑全生命周期成本, 提升项目经济性。

关键词 装配式建筑; 工程造价; BIM 技术; 物联网; 大数据分析

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.024

0 引言

装配式建筑通过标准化设计、工厂化生产、装配化施工, 显著提升了建筑效率与质量, 但其造价控制仍面临挑战。传统造价核算方法难以适应装配式建筑的复杂性, 导致成本超支、资源浪费等问题频发。随着 BIM、物联网、人工智能等技术的普及, 工程造价管理逐渐向数字化、智能化转型。然而, 如何将这些技术深度融入造价核算与优化流程, 仍是行业亟待解决的难题。本文通过分析装配式建筑的造价构成特点, 结合先进技术, 提出系统化的核算方法与优化路径, 旨在为行业提供实践参考。

1 装配式建筑工程造价构成特点

装配式建筑的造价构成与传统现浇建筑存在显著差异, 主要体现在以下几个方面。

1.1 预制构件生产成本占比显著

预制构件生产成本在装配式建筑造价中占据核心地位, 其构成涵盖设计、模具制作、混凝土浇筑、养护及质检等全流程环节。模具制作成本受构件标准化程度直接影响, 非标构件需定制专用模具, 导致单次生产成本显著上升。规模化生产通过提高模具复用率可有效摊薄单位成本, 但需平衡模具初始投资与生产规模的匹配性。生产设备的自动化水平直接影响生产效率与能耗, 高精度生产线虽能提升构件质量稳定性, 但设备采购与维护费用需纳入长期成本核算^[1]。

1.2 运输与安装成本构成复杂化

装配式建筑的运输与安装成本受多维度因素制约, 其复杂性源于构件体积、重量及现场施工条件的特殊要求。运输环节需综合考量道路承载力、转弯半径限制及超限运输许可等地理与法规因素, 长距离运输可

能引发额外的过路费或护送成本。安装阶段的机械选择直接影响成本, 大型吊装设备的租赁费用与作业时间呈非线性关系, 需通过施工方案优化实现效率最大化。高空作业安全措施涉及防护设施投入与人员培训成本, 而现场协调难度则可能引发窝工损失, 需通过 BIM 模拟与施工计划精细化管理降低不确定性。

1.3 全生命周期成本需系统统筹

装配式建筑的造价核算需突破传统阶段化思维, 将设计、施工、运营及拆除全周期成本纳入统一评估框架。设计阶段的材料选择直接影响后期维护成本, 例如: 耐候性材料虽增加初始投入, 但可显著降低维修频率与费用。结构体系的可拆卸性设计虽可提升拆除阶段的资源回收率, 却可能因连接节点复杂化增加施工成本。能耗系统的初期投资与长期运行费用需通过生命周期成本法(LCC)进行权衡, 如光伏构件的发电收益需覆盖其增量成本^[2]。

1.4 技术集成引发附加成本增量

装配式建筑中 BIM 建模、物联网监控及智能生产系统等技术的集成应用, 虽能提升管理效率, 但其软件购置、系统开发与运维成本构成新增成本项。BIM 模型的精细化程度与数据互通要求可能导致多专业协同平台的定制化开发, 增加初期投入。物联网传感器的布设密度与数据传输频次直接影响设备采购与网络运维费用, 需通过成本效益分析确定最优部署方案。人工智能算法的训练与迭代依赖高质量数据集, 数据采集与清洗成本需纳入技术应用的整体预算。

2 装配式建筑工程造价核算方法

2.1 基于 BIM 与物联网融合的核算技术

BIM 技术通过三维模型构建建筑全生命周期的数字化表达, 其核心价值在于实现设计、生产、施工、运

维各阶段数据的集成与共享。在造价核算中, BIM 模型基于参数化设计与构件库系统, 可精确统计预制构件的数量、材料用量及施工工序, 形成标准化的工程量清单。物联网技术通过传感器、RFID 芯片等设备实时采集构件生产进度、质量参数、运输轨迹及安装状态等动态数据, 与 BIM 模型形成双向数据流。例如: 生产环节的混凝土强度传感器数据可实时反馈至 BIM 模型, 动态调整养护周期与成本预测; 运输环节的 GPS 定位数据可与 BIM 进度计划对比, 预警延误风险并触发成本修正机制。协同平台通过标准化接口整合多方数据源, 消除设计变更、材料替换等环节的信息滞后问题, 避免因图纸与实际脱节导致的重复计算或成本遗漏。

2.2 大数据驱动的成本分析技术

装配式建筑造价核算需依托历史项目数据的深度挖掘与规律提炼。通过构建包含构件单价、工期、资源消耗、地域差异等多维度的行业数据库, 大数据分析技术可揭示成本影响因素的关联性。聚类算法通过特征相似性对项目进行分类, 识别不同装配率、结构类型或规模下的典型成本结构, 进而对比异常支出项并追溯成因。回归模型则通过量化装配率、材料价格、劳动力成本等变量对总造价的影响权重, 预测不同技术方案的经济性阈值。结合 GIS 技术的空间分析功能, 可将区域材料价格波动、交通条件、政策法规等地理因素纳入成本预测模型, 动态优化采购与物流策略。此外, 大数据技术通过时间序列分析与机器学习算法, 可评估极端天气、供应链中断等风险事件的概率及其对成本的潜在冲击, 生成风险敏感型成本估算与应急预案。

2.3 人工智能辅助的造价估算技术

人工智能技术通过算法模型重构造价估算的逻辑与流程, 实现从数据输入到方案优化的自动化处理。深度学习算法(如 BP 神经网络)通过训练历史项目数据与实时参数(如市场行情、技术参数), 构建非线性成本预测模型, 其优势在于捕捉隐含的变量交互关系并提升复杂场景的预测精度。遗传算法则通过模拟自然选择机制, 将成本、工期、质量等约束条件转化为多目标优化函数, 迭代生成满足经济性与可行性的最优设计方案。例如: 在预制构件选型阶段, 算法可同时评估不同构件组合的生产成本、安装效率与结构性能, 筛选出全局最优解。自然语言处理技术通过解析设计文档中的技术要求(如规范条款、功能描述), 提取关键参数并自动生成造价清单, 减少人工解读误

差。此外, 强化学习算法可模拟不同决策路径下的成本演化过程, 辅助制定动态调整策略^[3]。

3 装配式建筑工程造价优化路径

3.1 预制构件智能制造技术

预制构件智能制造技术通过系统性整合标准化设计、自动化生产与质量追溯体系, 实现成本控制与效率提升的双重目标。

模块化设计以统一接口与尺寸标准为核心, 通过构建标准化构件库, 减少非标构件的定制需求, 降低模具开发成本。标准化设计需兼顾建筑功能多样性与生产经济性, 通过参数化建模技术实现构件的灵活组合, 既保证通用性又满足差异化需求。智能生产线集成以工业机器人为核心, 通过自动化完成钢筋绑扎、混凝土布料、养护监测等关键工序, 减少人工操作误差与劳动强度, 同时提升构件尺寸精度与表面质量的一致性。

自动化设备的精准控制可有效降低材料损耗率, 例如通过智能布料系统优化混凝土配比与浇筑路径, 减少过量使用。

质量追溯系统通过 RFID 芯片或二维码技术, 将生产全流程数据(包括原材料批次、工艺参数、质检结果)实时记录并关联至构件唯一标识, 形成可追溯的数字档案。该系统通过数据分析可识别质量缺陷的根源, 如模具磨损或温控偏差, 从而针对性优化生产流程, 减少因返工导致的隐性成本。

标准化、自动化与追溯体系的协同作用, 使预制构件生产从离散式作业转向连续式精益制造, 显著提升资源利用效率与成本控制能力^[4]。

3.2 数字化施工模拟技术

数字化施工模拟技术依托 BIM 与算法模型, 构建虚拟施工环境以优化资源配置与作业流程。4D-BIM 进度模拟通过将施工进度计划与三维模型动态关联, 可视化呈现各阶段资源需求(如劳动力、机械、材料)的空间分布与时间序列, 识别资源供需矛盾点, 例如设备闲置或材料短缺时段, 从而调整采购计划与施工顺序。

碰撞检测与优化技术在虚拟环境中对构件安装路径与空间位置进行多维度校验, 通过算法自动识别管线冲突、结构干涉等问题, 生成冲突报告与调整建议, 避免因现场返工导致的成本超支。

吊装路径优化技术基于最短路径算法与能耗模型, 综合考虑起重机臂长、作业半径、地面承载力等约束条件, 生成多套吊装方案并评估其时间、燃料与机械

损耗成本，选择最优路径以降低机械租赁费用与施工周期。该技术通过虚拟仿真提前暴露施工风险，将传统经验驱动的决策模式转变为数据驱动的精准规划，减少现场协调难度与资源浪费，同时提升施工方案的经济性与可行性。

3.3 供应链协同管理技术

供应链协同管理技术以信息透明化与流程标准化为基础，重构装配式建筑的材料采购与物流体系。供应商分级管理通过建立多维度评价指标（如交货准时率、质量合格率、服务响应速度），运用层次分析法（AHP）或数据包络分析（DEA）对供应商进行量化评级，形成动态分级目录。高评级供应商可获得优先合作权，通过规模化采购降低单位成本，同时规避低质量供应商带来的隐性成本。需求预测与库存优化基于历史项目数据与实时进度信息，采用时间序列分析或机器学习模型预测材料需求波动，结合 JIT（准时制）模式制定采购计划，通过动态调整库存水位减少资金占用与仓储成本。物流路径智能规划整合多项目运输需求，利用路径优化算法（如蚁群算法、遗传算法）分析地理信息与交通限制，生成共享运输路线，降低空载率与单位运输费用。该技术通过供应链各环节的协同运作，消除信息孤岛与冗余环节，实现从原材料到施工现场的全流程成本压缩与效率提升^[5]。

3.4 基于区块链的成本管控技术

区块链技术通过分布式账本与智能合约机制，构建装配式建筑成本管控的可信体系。合同智能合约将付款条件、工期节点、质量标准等条款转化为可执行的代码逻辑，当满足预设条件（如验收合格、进度达标）时自动触发付款或违约处理，减少人工审核与资金挪用风险。成本数据上链存证要求所有交易凭证（如采购发票、施工签证、验收报告）以加密哈希值形式存储于区块链，确保数据不可篡改与全程可追溯，防止虚假报销与账目舞弊。多方协同审计机制允许业主、承包商、监理等参与方通过共识算法共同验证成本数据，例如通过零知识证明技术验证隐蔽工程的施工量，降低第三方审计成本的同时提升数据可信度。区块链技术通过技术手段重构成本管理的信任机制，消除信息不对称导致的合同纠纷与成本争议，实现全参与方的成本透明化与风险共担。该技术与传统财务系统结合，可形成从预算编制到结算审计的全链条成本管控闭环，显著提升装配式建筑项目的财务合规性与成本可控性。

3.5 绿色低碳技术集成应用

绿色低碳技术通过优化资源利用、降低能耗与碳排放，构建装配式建筑全生命周期的成本节约与环境效益协同提升机制。材料选择阶段采用生命周期评估（LCA）方法，综合考量构件生产、运输、施工及拆除各环节的能耗与碳排放，优先选用低碳建材（如再生骨料混凝土、低能耗钢材）与装配式光伏一体化构件，减少隐含碳成本的同时降低长期运营能耗支出。在施工过程中集成可再生能源技术，例如在预制构件工厂部署光伏发电系统与余热回收装置，通过能源自给与循环利用降低生产能耗成本；施工现场采用电动化运输设备与智能照明系统，结合能源监控平台实时优化用电策略，减少化石能源依赖与运维费用。在废弃物管理方面，通过 BIM 模型预设构件拆分与回收路径，实现建筑垃圾减量化与资源化，例如将拆除后的预制构件经分类处理后重新用于非承重部位，显著降低废弃物处置成本与新材料采购需求。在政策层面，绿色建筑认证体系（如 LEED、WELL）与碳交易市场机制的结合，可为采用低碳技术的项目提供税收优惠或碳排放权交易收益，形成经济激励与环境效益的双重驱动。

4 结束语

通过系统梳理装配式建筑工程造价的构成特点与核算方法，提出了基于 BIM、大数据、人工智能及区块链的优化路径。研究表明，通过技术融合与管理创新，可有效解决传统造价核算中的信息割裂、预测偏差等问题，同时通过智能制造、数字化施工、供应链协同及区块链管控，实现成本的全过程精细化管理。这些方法与路径为装配式建筑的经济性提升提供了理论参考与实践框架，对推动建筑行业工业化、智能化发展具有积极的作用。

参考文献:

- [1] 戚晓. 基于装配式建筑的工程造价动态控制与优化模型 [J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(01): 173-175.
- [2] 齐金. 装配式建筑平面布局及构件设计对工程造价的影响探析 [J]. 江西建材, 2025(01): 337-339.
- [3] 邵雯璇. 装配式建筑混凝土结构施工的全过程工程造价控制 [J]. 中国水泥, 2024(11): 91-93.
- [4] 白思宇. 装配率对装配式建筑工程造价的影响研究 [J]. 砖瓦, 2024(09): 105-108.
- [5] 高晓艳. 试论装配式建筑对工程造价的影响及改善路径 [J]. 工程建设与设计, 2024(15): 234-236.

智能移动终端技术在电力营销计量中的应用

李璐瑶，成傲雪

(国网湖北省电力有限公司武汉供电公司江岸供电中心，湖北 武汉 430010)

摘 要 自智能移动终端技术兴起以来，其在电力营销计量领域的应用稳步推进，已实现计量设备全生命周期的数字化管理与服务模式创新升级。随着能源数字化转型的加速与电力市场改革的深化，提升电力营销计量的智能化水平已势在必行。本文简要探讨了智能移动终端技术在电力营销计量中的具体应用，以期提升电力营销计量的工作效率、数据准确性和客户服务质量提供参考，进而促进电力企业的数字化转型与高质量发展。

关键词 智能移动终端；电力营销计量；应用管理

中图分类号: F42

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.025

0 引言

在能源数字化转型与电力市场改革深化背景下，传统电力营销计量模式依赖人工操作与纸质记录，存在效率低、透明度差、响应滞后等痛点，难以满足现代电网需求。智能移动终端通过集成物联网、大数据、AR（增强现实）及移动互联技术，实现计量设备全生命周期的数字化管控与服务模式的创新升级，为构建以用户为中心、数据为驱动的现代电力营销体系提供技术基础，推动电力行业高质量发展。

1 智能移动终端

智能移动终端凭借嵌入式传感器与边缘计算模块，实现现场作业数据即时采集与智能分析，结合 AI 算法，可自动比对历史负荷曲线，准确识别窃电嫌疑或计量误差，较传统人工核查效率有所提升。基于 5G-MEC（移动边缘计算）架构移动终端，可在无网络覆盖区域凭借本地缓存与增量同步技术，保证关键计量数据“离线不丢失、上线即归档”，此特性在偏远山区或灾害应急场景中更为突出。集成北斗/GPS 双模定位技术，移动终端可实时映射计量装置空间拓扑，当系统检测到某台区线损率异常时，可自动规划最优巡检路径并推送至运维终端，形成“异常感知—智能派单—现场处置—结果反馈”管理链条，以移动终端为载体技术融合，采用数据驱动的决策机制，推动电力营销计量从经验依赖型向智能精准型转变^[1]。

2 智能移动终端技术在电力营销计量中的应用优势

2.1 提升工作效率

传统电力营销计量工作依托人工记录与纸质文档，流程较为繁琐且易出错，智能移动终端采用集成条码扫描、RFID 识别等先进技术，运维人员在现场使用移

动终端扫描，即可快速获取计量设备型号、规格、安装时间、历史维护记录等详细信息，无需手动翻阅大量资料，缩短信息检索时间。

以现场抄表为例，智能移动终端支持实时数据上传与云端同步，抄表员在现场即可完成数据录入与校验，避免传统方式下需返回办公室进行二次录入操作。移动终端还可对电量突增突减等数据异常自动分析，即时提醒运维人员处理，提高问题处理有效性。借助移动终端 GPS 定位与导航功能，运维人员可迅速到达作业地点，合理规划巡检路线，避免因路线不熟或信息不畅导致耽误进程。

2.2 增强管理透明度

在传统管理模式，计量设备信息分散、作业流程不透明，导致管理漏洞频发，而智能移动终端采用数字化方式，实现全流程可视化。例如：在现场作业中，运维人员使用移动终端实时上传设备状态、巡检记录及处理结果，管理者可采用后台系统即时查看作业动态，准确掌握各项任务执行进度及质量，提高透明度。

以计量装置更换为例，移动终端可自动记录更换前后的设备参数、操作时间及人员信息，并生成带有时间戳的电子工单。若后续出现计量争议，管理者可快速调取历史数据，追溯操作细节，明确责任主体。

此外，移动终端的 GPS 定位功能可实时追踪运维人员轨迹，确保其按规定路线与时间节点完成任务，避免了虚报工时或漏检漏修等问题。

智能移动终端还支持数据深入分析，管理者可凭借多维度报表直观了解区域负荷分布、设备故障率等指标，识别潜在管理风险。例如：若某台区线损率异常，系统可自动关联该区域所有计量设备的运维记录，快速定位问题来源。透明化管理模式，可提升决策科学性，

还凭借数据驱动责任追溯机制，促使作业规范执行^[2]。

2.3 提高服务质量

在传统电力服务模式，用户办理业务或咨询问题需多次往返营业厅，流程繁琐且耗时。而采用移动终端设备，电力工作人员可现场完成业务受理、信息查询、故障报修等操作。例如：在用户申请增容或变更用电性质时，工作人员可利用移动终端实时调取用户历史用电数据，结合现场勘查结果，快速制定个性化服务方案，并采用电子签名技术完成合同签署，整个过程仅需几分钟即可。

移动终端还支持远程视频指导，当用户遇到用电问题时，可使用视频通话与工作人员实时沟通，工作人员可远程查看设备状态，指导用户进行简单故障排查，避免因等待维修人员上门而造成不便。智能移动终端还具备大数据分析功能，可根据用户用电习惯及需求，提供节能建议、用电安全提示等增值服务。例如：系统可分析用户用电高峰时段，推荐错峰用电方案，以便用户降低用电成本，此种以用户为中心的服务模式，可从根本上提升用户满意度，增强电力企业市场竞争力。

2.4 降低成本

在传统模式下，计量设备巡检、数据采集及故障处理依托纸质记录，效率低下，还会因人为失误导致重复作业情况，而智能移动终端引入，在扫描电表条码后，设备信息、历史数据及维护记录可自动同步至系统，无需手动录入操作，节省人力成本。此外，移动终端实时定位与路径规划功能，可优化巡检路线，减少车辆空驶里程及燃油消耗。以某供电局为例，应用移动终端后，巡检车辆日均行驶距离有所减少，燃油费支出同比下降^[3]。

凭借移动终端远程监控与预警功能，运维人员可提前发现设备隐患，避免故障扩大化导致高额维修费用。例如：系统检测到某台区电表异常后，自动推送维护任务至最近运维人员，故障处理时间得到压缩，设备损坏率也得到控制，节约维修成本。此外，移动终端还支持无纸化办公，电子工单与电子签名的全面应用，每年可节省大量纸张、打印及存储成本。以技术驱动的成本管控模式，可提升资源利用效率，为电力企业向低碳化、数字化转型提供支撑。

3 智能移动终端技术在电力营销计量中的应用场景

3.1 库房盘点

在传统库房盘点中，工作人员需要手持纸质清单，逐一核对设备信息，耗时耗力，还易因人为疏忽导致

数据错误。引入智能移动终端后，在库房盘点过程中，工作人员只需手持智能移动终端，如平板电脑或工业级 PDA，凭借内置条码扫描功能，可快速、准确地读取计量设备型号、规格、序列号、入库时间等信息，无需再手动输入或比对纸质清单，提高盘点效率。移动终端还可实时将扫描数据传输至后台系统，实现数据即时更新同步，保证库存信息准确。

以某电力企业库房盘点为例，在传统模式下，完成一次全面盘点需消耗大量时间，且容易出现数据滞后及错误。而引入智能移动终端，盘点时间缩短，且数据准确率提升至 99% 以上。工作人员只需在库房内按照预定路线行走，利用移动终端扫描设备条码，系统即可自动完成数据的采集、比对和分析。对于异常设备，如库存数量不符、设备损坏或过期等，系统还会自动发出警报，提醒工作人员及时处理。此外，智能移动终端还支持如按区域、按设备类型、按入库时间等盘点模式，满足不同场景下盘点需求。对于大型库房或设备种类繁多情况，工作人员可根据实际需求选择最为适配的盘点模式，提高盘点效率^[4]。

3.2 出、入库管理

传统出、入库管理依赖纸质单据及人工核对，易出现信息滞后、操作失误等情况，而智能移动终端引入可实现全流程实时追踪及自动化处理。在入库环节，工作人员使用移动终端扫描设备条码或 RFID 标签，系统可自动识别物资类型、规格及供应商信息，并与采购订单实时比对。例如：某供电局在接收一批新型智能电表时，运维人员采用移动终端扫描电表条码，系统可同步校验其型号、数量与订单一致性，并生成电子入库单并接入 ERP 系统，移动终端还支持拍照存档功能，可记录设备外观、包装状态等细节，为质量追溯提供依据。

在出库管理中，智能移动终端凭借权限控制与流程约束，保证物资发放准确合规。以某省级计量中心为例，当运维班组申领计量设备时，需凭借移动终端提交申请，系统自动匹配库存状态并触发审批流程。审批通过后，库房管理人员使用移动终端扫描出库设备条码，系统自动核减库存并生成出库记录，并向申请人发送电子领料单。若设备需紧急出库，系统支持一键加急功能，优先分配库存并实时通知相关人员，避免延误。

智能移动终端借助物联网技术实现库存状态动态更新。例如：当某型号电表库存低于安全阈值时，系

统自动触发预警并推送补货任务至采购部门,形成“需求—采购—入库”自助式管理。此外,移动终端还支持多仓库协同管理,依托 GPS 定位与路径优化算法,指导工作人员高效完成跨库区调拨任务,此种以移动终端为核心的出、入库管理模式,可减少人为干预,还可凭借数据穿透式分析,为物资调度与采购决策提供支持,促使电力企业实现降本增效^[5]。

3.3 装表接电

传统装表接电流程依赖纸质工单与人工记录,易出现信息错漏、操作不规范等问题,智能移动终端引入实现全流程标准化及可视化管控。在现场作业中,运维人员使用移动终端扫描用户电表条码后,系统自动调取用户档案、表计参数及安装方案,不再需要手动翻阅资料或重复录入数据。例如:在某新建小区批量装表任务中,工作人员借助移动终端一键加载预置标准化作业模板,根据现场勘查结果动态调整接线方案,并实时上传安装位置、封印编号、拍照存档等信息至营销系统。若遇到表计型号不符或线路异常,移动终端可立即触发预警,推送解决方案至运维人员,避免重复返工。

智能移动终端通过物联网技术实现表计与系统“即装即联”,以某供电公司为例,运维人员在安装智能电表时,采用移动终端配置表计通信参数,系统自动完成设备入网认证与数据同步,用户用电信息实时回传至主站,较传统人工调试效率提升。此外,移动终端支持“一键校验”功能,可现场检测接线正确性、表计计量精度及通信稳定性,保证装表质量达标。在作业安全管控方面,移动终端凭借 GPS 定位与电子围栏技术,强制运维人员按规定区域与流程操作。以移动终端为核心装表接电模式,缩短户表通电时间,凭借数据驱动标准化流程,降低人为失误率。以某试点区域为例,应用移动终端后,装表接电平均时长得到下调,用户投诉率也有所下降,为电力营销数字化转型提供支持^[6]。

3.4 客户服务与互动

在传统电力服务模式,用户咨询、故障报修及业务办理依赖电话沟通或线下窗口,响应速度慢且信息透明度低,而智能移动终端的引入可实现服务需求精准捕捉与高效响应。用户凭借移动终端即可实时查询用电量、电费账单、停电通知等信息,并可直接发起故障报修或业务申请。系统基于 LBS(地理位置服务)自动定位用户位置,推送运维人员信息,生成带

时间戳的电子工单,保证服务请求全程可追溯。例如:当用户反馈家中电表异常时,运维人员在移动终端接收工单后,可远程调取该电表的历史负荷曲线与实时数据,初步判断故障原因,并携带适配工具上门维修,平均响应时间缩短至 30 min 内。

系统根据用户用电习惯、设备类型及历史服务记录,推送节能建议、设备维护提醒或定制化套餐。例如:针对高耗能企业用户,APP 可生成用电效率分析报告,推荐错峰用电方案或分布式能源接入建议。对于居民用户,结合分时电价政策,推送谷段充电优惠活动,提升用户满意度,还根据需求侧管理促进电网资源的优化配置。此外,移动终端还支持视频客服与远程协助功能,当用户遇到复杂问题时,可使用 APP 发起视频通话,客服人员通过 AR(增强现实)技术远程指导用户排查故障,或直接操控智能电表进行参数设置。例如:某老年用户因不熟悉智能电表操作导致停电,视频客服通过移动终端实时标注操作步骤,用户跟随指引完成复电,提升应急响应能力。

4 结束语

智能移动终端技术凭借集成条码扫描、物联网、大数据分析 & AR 技术等创新功能,实现计量设备全生命周期的数字化管理,将服务触点延伸至用户终端。从实践效果看,提升了作业效率,降低了人力与运营成本,并采用实时数据交互增强了管理透明度。移动终端突破传统电力服务时空限制,使用户可依托 APP 自主查询、报修、缴费等操作。未来,随着 5G 与 AI 技术的深度融合,智能移动终端将拓展智能诊断、预测性维护等场景,推动电力营销计量向智能化、精细化方向发展,为构建新型电力系统提供支撑。

参考文献:

- [1] 王敬义,央拉,白珍,等.基于智能移动终端技术的电力营销计量应用分析[J].智能城市,2024,10(12):51-53.
- [2] 李嘉炜,孙浩,张欢.移动终端技术在电力营销计量中的应用[J].科技视界,2024,14(32):94-96.
- [3] 李刚,杨超,王志刚,等.移动终端技术在电力营销计量中的应用[J].中国信息界,2024(06):105-107.
- [4] 冯庆伟.智能移动终端技术在电力营销计量中的应用[J].电子技术,2024,53(06):254-255.
- [5] 金佳奔.智能移动终端技术在电力营销计量中的运用[J].电子技术,2024,53(03):262-263.
- [6] 成磊.移动终端技术在电力营销计量中的应用[J].电子元器件与信息技术,2023,07(12):170-173.

数字化转型背景下供水工程智慧化管理探索

李皓巍

(淄博市引黄供水有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要 当前社会经济不断发展,对水资源保障提出了更高的要求,水利事业需要从信息化向智慧化转变。本文基于技术—管理—制度协同视角,系统剖析数据驱动决策、智能应用系统开发及组织文化变革的赋能机制,提出以智能感知网络、动态决策支持体系及复合型人才梯队为核心的智慧化实施路径,通过数据治理闭环、算法模型迭代与跨域资源整合,可实现管网漏损率降低、应急响应时效提升的显著效能,为构建“感知—决策—服务”一体化的可持续供水生态提供理论范式与实践参考。

关键词 数字化转型; 智慧水务; 供水工程; 数据驱动

中图分类号: TP3; TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.026

0 引言

在全球气候变化加剧与城市化进程提速的双重压力下,传统供水工程管理模式面临信息孤岛、响应滞后与资源错配等系统性瓶颈^[1]。数字化转型浪潮为破解这一困局提供了技术支点,物联网、大数据与人工智能等技术正驱动水务系统向“感知—分析—决策”的智慧化范式跃迁。当前,供水工程智慧化实践虽在智能水表普及、远程监测等领域取得突破,但仍存在技术应用碎片化、数据治理机制缺失与组织惯性制约等深层矛盾。

1 数字化转型背景下供水工程智慧化管理的关键要素

1.1 技术支撑体系

1. 物联网与传感器技术。物联网与传感器技术构成供水工程智慧化管理的感知神经末梢,其核心在于通过全域覆盖、高精度感知与实时传输实现物理系统的数字化映射。在供水场景中,需分层部署多模态传感网络:于水源地布设溶解氧、浊度与重金属传感器,实现水质污染事件的分钟级预警;沿输配水管网安装压力变送器与光纤振动传感器,通过声波信号频谱分析精准定位微渗漏点;用户终端则集成超声波智能水表,同步采集用水量、瞬时流量及压力波动数据,结合边缘计算模块实时检测异常用水行为^[2]。

2. 大数据与云计算。大数据与云计算技术构成供水工程智慧化管理的决策中枢,通过海量数据的深度挖掘与弹性算力调度,驱动管理流程从粗放式向精准化跃升^[3]。基于Hadoop与Spark框架构建分布式数据湖,整合SCADA系统、GIS地理信息与用户投诉记录等

跨域数据流,利用流式计算引擎实现管网压力波动、水质异常的秒级响应。在算力支撑层面,采用混合云架构实现资源弹性扩展——私有云承载核心业务数据存储与机理模型训练,而公有云则处理突发性高并发任务,通过“数据—算力—知识”的三维聚合,为供水系统赋予动态感知、全局优化与自我迭代的智慧基因。

3. 人工智能与机器学习。人工智能与机器学习技术是供水工程智慧化管理的认知升级引擎,通过模式识别与预测优化突破传统经验决策的效能边界。在管网健康管理中,基于深度残差网络构建的漏损预测模型,可融合压力波动、声纹特征与土壤湿度等多维数据,提升漏点定位精度和检测效率。知识图谱技术的引入则破解了多源异构数据的语义关联难题,例如将历史维修记录、气象数据与用户投诉信息映射为“管材腐蚀—暴雨强度—爆管概率”的因果推理链,辅助制定预防性维护策略。

1.2 管理创新机制

1. 业务流程重构。业务流程重构是供水工程智慧化管理的核心驱动力,旨在打破传统“烟囱式”管理壁垒,构建以数据流为纽带的端到端流程闭环。通过引入业务流程管理工具与数字孪生技术,将水源调度、漏损控制、用户服务等离散环节整合为可视化协同链路。在用户服务领域,构建“用水申请—方案设计—施工验收—智能抄表”的一站式线上平台,通过OCR识别与RPA机器人自动校验用户资料,缩短报装周期。

2. 动态决策支持。动态决策支持系统是供水工程智慧化管理的“智慧大脑”,通过数据—模型—反馈的闭环架构实现管理策略的实时优化与自适应调整。其核心在于构建多目标协同的决策模型库,集成模型

预测控制、马尔可夫决策过程等算法，动态平衡水质安全、能耗效率与用户满意度等冲突性目标。在常态管理中，基于用户用水行为数据与气象预报信息，通过滚动时域优化动态调整水厂生产计划，使日均泵站能耗降低^[4]。

1.3 组织与文化变革

1. 组织架构调整。供水工程智慧化转型需突破传统科层制组织的刚性桎梏，构建“数据中台+敏捷团队”的柔性组织架构。

在纵向层面，打破“水厂—管网—用户”的条块分割，设立跨层级的智慧水务指挥中心，统筹数据资产管理与业务决策联动。

在横向层面，组建由数据工程师、水利专家与用户体验设计师构成的敏捷小组（Squad），采用“双线汇报”机制并行推进技术创新与业务优化。组织架构调整需配套权责清单与绩效考核体系变革，例如将管网漏损率、数据采集完整度等指标纳入部门 KPI，通过“数据驾驶舱”可视化呈现组织效能^[5]。

2. 数据驱动文化。数据驱动文化是供水工程智慧化转型的认知革命，其核心在于将数据要素从辅助工具上升为战略资产，重塑组织决策逻辑与价值创造范式。需构建“全员参与—全链治理—全场景应用”的文化培育体系：

在认知层面，通过“数据故事会”、数字孪生沙盘推演等沉浸式培训项目，推动员工从经验依赖型向证据导向型思维转型，例如开展“数字素养提升计划”，要求技术骨干基于 Python 工具自主分析管网压力数据并生成可视化报告。

在机制层面，建立数据质量“红黑榜”与数据贡献度积分制，将数据采集完整性、算法模型迭代频次纳入部门绩效考核，激励基层人员主动参与数据治理闭环。

在实践层面，推行“用数据说话”的例会制度，要求管理层基于 BI 仪表盘中的实时漏损率、用户投诉热力图等指标制定资源配置方案，摒弃“拍脑袋决策”惯性。

2 供水工程智慧化管理的实施路径

2.1 基础设施建设

1. 智能感知网络部署。智能感知网络的系统性部署，是供水工程智慧化管理的物理载体与技术先导。在水源地、输配水管网、二次供水设施及用户终端等全链路节点，需分层植入多类型传感设备：于水源保

护区布设水质多参数在线监测仪，实时追踪浊度、余氯及重金属含量；在管网关键交汇处安装压力变送器与流量计，结合声波传感器捕捉微渗漏信号；用户端则升级为具备远传功能的智能水表，同步采集用水量、水压波动等数据。通过 NB-IoT、LoRa 等低功耗广域通信协议的适配，构建兼具广覆盖与高并发的数据传输通道，解决复杂地下环境中的信号衰减难题。边缘计算节点的嵌入使得数据预处理能力下沉，通过本地化异常检测算法过滤噪声数据，降低云端负荷并提升响应时效。

2. 通信与网络平台搭建。通信与网络平台的构建是打通供水系统“感知—决策”闭环的核心纽带，需针对复杂场景设计多层级融合的传输架构。在主干管网与核心设施区域，依托 5G 切片技术构建大带宽、低时延的专用信道，满足高清视频监控与实时控制指令的传输需求；对于地下管廊等信号衰减区域，则采用 Mesh 自组网与 LoRa 扩频技术增强覆盖深度，确保传感器数据的稳定回传。混合云架构的部署实现了数据分流与资源弹性调度——边缘计算节点负责水质异常、压力骤变等关键数据的本地化预处理，而私有云平台则承载历史数据存储与深度建模任务。通信协议兼容性设计成为关键，通过 OPC UA 与 MQTT 协议的转换网关，实现不同厂商设备的数据互通。

2.2 数据治理与应用

1. 数据标准化与整合。数据标准化与整合是激活供水工程数据价值的核心前提，需构建覆盖数据全生命周期的治理框架。基于供水业务场景特征，制定统一的数据采集规范与编码体系。通过 ETL 工具与数据湖技术，将 SCADA 系统、智能水表及用户服务平台产生的结构化与非结构化数据清洗转换，建立包含设备状态、水质参数、用户行为等主题的标准化数据仓库。在跨部门协同层面，需建立数据共享交换平台，采用区块链技术实现水质监测记录、维修工单等敏感数据的可信流转与权限控制。

2. 数据分析与挖掘。数据分析与挖掘是驱动供水工程智慧化管理的认知引擎，依托机器学习与可视化技术将原始数据转化为可操作的决策知识。基于标准化数据仓库，构建涵盖管网健康度评估、用水需求预测及能效优化等主题的多维分析模型，例如采用孤立森林算法识别压力异常数据中的隐性漏损事件，或通过聚类分析划分区域用水模式以优化加压泵站调度策略。在知识发现层面，图神经网络（GNN）可解析管网拓扑结构与水力参数的复杂关联，辅助识别关键脆弱节点并模拟不同干预措施的系统性影响。因果推理技

术的引入能够区分数据中的相关性与因果关系，避免因气象因素与用水行为混杂导致的误判风险。

2.3 智能应用系统开发

1. 智能调度系统。智能调度系统的构建标志着供水工程从人工经验驱动向算法协同决策的范式跃升。该系统依托多源数据融合架构，集成管网压力、用户需求水量及气象预测等信息流，通过混合整数规划与模型预测控制算法，实现水源调配、泵站运行与储水设施联动的动态优化。例如：在旱季供水场景中，系统可基于深度强化学习模型模拟不同调度策略的长期影响，结合马尔可夫决策过程平衡当前用水需求与未来水资源储备的冲突。

2. 设备健康管理。设备健康管理系统的深度应用，推动供水工程从被动式故障维修向全生命周期主动防护转型。通过嵌入设备本体的振动、温度、电流等多维传感器，结合边缘计算节点实时提取运行特征参数，构建基于数字孪生的设备退化评估模型。例如：针对泵机轴承磨损问题，系统通过对比实时振动频谱与历史故障数据库的相似性，利用迁移学习算法预测剩余使用寿命，并依据劣化曲线生成润滑维护或部件更换的优先级建议。

3. 客户服务平台。客户服务平台的智能化升级，重构了供水企业与用户间的交互模式，通过多模态数据融合与语义理解技术实现服务精准触达。平台集成移动端应用、智能语音助手及Web门户等多渠道入口，基于自然语言处理引擎解析用户报修、咨询等非结构化诉求，自动关联工单系统与知识图谱生成定制化响应。在服务优化层面，利用协同过滤算法挖掘用户群体的共性需求，动态生成阶梯水价建议、节水方案等个性化报告，并通过可视化仪表盘呈现用水成本与资源消耗的关联性。

3 智慧化管理的保障措施

3.1 资金与资源投入

资金与资源的可持续供给是供水工程智慧化转型的底层支撑，需构建政府主导、市场协同的多元化投入机制。例如：采用PPP模式引入技术企业与供水机构共建数据中台，分摊前期建设成本并共享长期运营收益。在资源优化层面，需建立技术适配性评估体系，优先采购具备开放接口与可扩展能力的设备，避免因技术代际差异导致的重复投入。针对中小型供水企业融资难问题，可探索“技术租赁”模式，由第三方平台提供传感器、算法模型等轻资产服务，按需付费以降低初始投资压力。

3.2 安全与隐私保护

供水工程智慧化转型亟需构建覆盖数据全生命周期与系统全要素的安全防护体系。在技术层面，采用量子密钥分发（QKD）与同态加密技术强化核心数据传输安全，通过零信任架构（ZTNA）实现设备、用户和应用的动态身份验证与最小权限访问控制。在管理层面，需建立“攻防演练—威胁情报—应急响应”联动的动态防御机制。例如：通过数字孪生技术模拟勒索软件攻击路径，预演断网、数据篡改等极端场景的处置预案。

3.3 人才队伍建设

人才队伍是供水工程智慧化管理的核心动能，需构建“引育用留”全链条培养机制以破解复合型人才短缺瓶颈。建立产学研协同育人基地，开设“智慧水务”微专业课程，重点培养具备水利工程、数据科学与系统运维交叉能力的“π型人才”。针对现有员工，需实施数字素养提升计划，依托数字孪生仿真平台开展管网智能诊断、AI调度推演等场景化实训，推动传统技术骨干向“技术+数据”双核驱动转型。在激励机制层面，需将算法模型开发、数据治理成效纳入职称评定与绩效考核体系，设立“数字创新工作室”鼓励基层员工参与技术迭代。

4 结束语

数字化转型正重塑供水工程的传统管理范式，智慧化作为技术革命与管理创新的交汇点，已展现出显著的资源优化与服务升级效能。智慧化管理不仅实现了管网漏损率下降、应急响应时效提升等显性效益，更深层次推动了供水服务从“保障供给”向“价值共创”的范式跃迁。未来，需以动态演进的视角，持续融合5G-A、具身智能等先进技术，完善跨域协同的治理体系，并培育“人—机—水”共生的智慧生态，使供水系统真正成为韧性城市建设的数字基座。

参考文献：

- [1] 聂雄. 基于物联网的工业供水管网监测系统及用水量预测研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [2] 沈越. 城市供水动态评估体系的探索和数字化应用 [J]. 数字通信世界, 2023(09):132-134.
- [3] 曹文杰, 许健. 数字孪生技术在引洮供水工程中的应用 [J]. 水利技术监督, 2024(04):304-308.
- [4] 王良, 王伟强, 闫浩波, 等. 城市供水运营智慧化管理平台研究与应用 [J]. 内蒙古科技与经济, 2023(04):102-105.
- [5] 鄢铭, 王家华, 陈红勋, 等. 供水泵站智慧化管理系统的功能架构与实现 [J]. 中国市政工程, 2024(01):46-50, 153.

实景三维技术在测绘和地理信息领域中的创新与应用

王春义

(广州科测空间信息技术有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 实景三维技术是将采集数据转变为立体数字模型的一种技术, 是推动测绘以及地理信息领域工作开展的有效方法。在数字化发展的过程中, 数据量不断增多, 对数据的利用要求也越来越多, 利用实景三维技术采集数据、分析数据以及数据转化, 可以将获取的空间数据转变为三维模型, 提高内容的可观性且保障获取的数据全面、精准、高效。因此, 在测绘与地理信息领域, 实景三维技术具有极高的应用价值。本文阐述了实景三维技术在测绘与地理信息领域中的应用价值, 探讨了其创新和应用内容, 以期为相关从业人员提供有益的参考。

关键词 测绘领域; 地理信息领域; 实景三维技术

中图分类号: P2; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.027

0 引言

测绘与地理信息技术的核心在于信息技术、卫星通信技术, 在相关技术的支撑下拥有强大的测绘能力, 测绘方法与传统测绘手段有较大的不同^[1]。传统测量方法依赖水准仪、经纬仪等仪器, 操作者需要根据仪器操作要求花费一定时间进行准备, 同时在水准仪经纬仪的操作中, 需要花费不少时间才能完成测量任务, 不仅耗时且极为考验操作者对设备的操控能力^[2]。实景三维技术通过激光扫描、无人机摄影测量等, 可以快速收集空间数据并能保证获得的空间数据可靠、准确, 形成立体模型。与二维测绘相比, 实景三维技术具有数据整合和立体展示的优势, 在城市管理、工程规划以及资源监测等领域均有较好的表现。

1 实景三维技术在测绘和地理信息领域中的应用价值

1.1 获得高精度的地形数据

实景三维技术提供数据采集方法并可对采集的数据进行处理与展示, 为测绘和地理信息领域的诸多工作服务, 成为新型基础测绘的重要内容^[3]。在测绘与地理信息领域, 通过实景三维技术可以获得高精度的地形数据, 其能够成为测绘的重要支撑。基于提供的地理信息, 可以作为自然资源管理的空间基底, 提高自然资源管理的整体水平。实景三维技术在城市规划中的应用, 可以获取可靠完整且真实的建筑信息、地

质地貌, 能够为城市建设提供参考依据, 给出适合区域发展的建设方案。

1.2 提高数据利用水平

在土地信息领域, 以实景三维技术为地理信息管理服务, 可以将地理信息转变为立体模型, 数据获取量充足, 更可以利用其中的数据, 解决较多实际问题。在灾害监测中, 通过实景三维技术可以实现对自然灾害的动态监测, 结合灾害预防需要提供准确的地理信息, 由此做到应急响应并在发现险情的第一时间快速进行准备, 成为灾害预防以及管控的重要手段。

1.3 高效的获取信息

实景三维技术在地理空间数据管控中的应用, 可以基于建立便于观察数据的模型, 高效获取信息, 为地理决策服务。通过相关操作, 为决策者提供信息, 可以快速作出判断(见表1)。

表1 传统测绘与实景三维技术各项参数比较

测绘技术	测绘精度 /m	空间分辨率 /cm	数据覆盖范围 / (km ² /d)
传统测绘技术	0.5 ~ 1.0	100 ~ 500	0.5
实景三维技术	0.01 ~ 0.02	1 ~ 5	100

2 实景三维技术的关键内容

2.1 数据采集技术

实景三维技术在测绘与地理信息领域的应用取得了诸多成果。该项技术以数据采集作为基础, 数据采

集技术是实景三维技术中较为基础且重要的内容，可以理解数据获取形式。通过激光雷达发射的激光脉冲，测量脉冲时间，生成高精度的点云数据，基于相关数据可以建立测量区域的地理模型。无人机是数据获取的重要工具，在无人机上安装高分辨率的摄像机，可以从多个角度以及不同高度获取地面的影像数据^[4]。应用多源数据融合技术，可以获取不同类型的数据，其中包括时间、空间、光谱等，在相关数据基础上建立三维模型。

2.2 数据处理技术

在数据收集后，需要对其进行分析与处理，数据处理技术则是完成获取数据处置的主要方法，也是实景三维技术中较为关键的内容。随着数据处理技术的发展，数据算法得到改进，点云数据分类、去噪、标准性能均得到较好的提升。在数据处理过程中，可以依靠影像匹配技术进行多视角影像的识别，使纹理映射精度得到提升。在数据处置中通过压缩手段可以提高数据的精准度，减少数据处置量，加快数据的处理速度。

2.3 三维建模技术

三维模型管理以分布式计算技术作为基础，在三维模型构建中通过数据算法计算，快速建立大规模的数据集，在此基础上生成三维模型。三维建模环节，通过计算机技术处理收集的数据，同时从点云测绘数据中提取物体边界，预估数据反映的测量物，建立地形表面的建筑模型。人工智能算法是三维建模中的重要支撑内容，其具有极高的自动化以及智能化水平，可以在数据收集与获取中自动识别数据内容并能从中获取关键信息，生成复杂的三维形态。即便在数据有少量缺失的情况下，也可以基于算法推测数据和数据的关系并补全缺失内容，建立复杂地物的三维模型。

3 实景三维技术在测绘领域中的创新与应用

3.1 高精度地形测绘

实景三维技术在测绘环节可以根据数据获取需要，使用激光扫描、无人机等方法获取空间数据。在相关技术下，获取数据的速度变快且可提高空间数据的精准性，在数据运用下生成立体的三维地形模型。实景三维技术可以基于测绘环节所用的先进手段，细致捕捉地形特征，能获取某区域河流、山脊、植被覆盖等细节化的内容，由此成为地形测绘的重要支持，为测绘活动提供详细且丰富的信息。

在复杂地形的测绘中，实景三维技术的应用优势

尤为明显。例如：在使用传统仪器进行区域测量时，对于陡峭山地、悬崖等复杂地形，人力作业不仅低效，还存在不小的危险。而应用实景三维技术，可通过无人机上的摄像设备获取不同区域的环境以及地质结构状况，在提高摄影信息内容全面性的同时，也避免了获取数据存在误差^[5]。实景三维技术可以借助无人机中的摄像设备，缩短测绘所用的时间，同时所有数据采集与处理均通过系统平台进行，可以避免人为干预引发数据偏差过大的问题。

3.2 城市建设规划

在城市建设规划中，实景三维技术成为获取城市建筑物布局地形地貌以及道路网络的有效手段。应用实景三维技术获取城市信息，构建城市的立体模型。规划人员可以通过该模型了解城市的各项关键信息，基于对城市情况的掌握以及城市发展需要，提出合理的设计方案。以某城市建设活动为例，在城市信息的获取中，通过实景三维技术获取城市建筑物高度、绿地分布、道路网络等关键信息，将其以三维模型的形式呈现。规划人员可以通过模型直观获取绿地分布、道路网络、建筑高度等重要信息，围绕相关信息对城市建设进行多维度的分析。

在城市改造环节，实景三维技术可以将建设方案直观地展示出来，快速获取不同方案的信息，同时可以做出不同方案的横向比较。此外，实景三维技术应用到城市开发活动中，可根据模型以及技术算法，评估方案对城市光照、城市景观以及交通流量等关键要素的影响。在城市新区开发中，可以借助实景三维技术构建的立体模型，评估建筑群以及周边地块的关系。

3.3 灾害监测与预警

实景三维技术具有较强的展示性，通过获取数据构建的模型，可以为使用者提供观察目标对象的条件，对某一区域进行分析，在灾害监测和预警中也具有突出的作用。基于对区域情况的研究与掌握，可以做出可靠的评估结论。以某地区出现的泥石流灾害为例，使用实景三维技术，通过无人机航拍灾害现场状况并对灾害区域的山体进行持续性监测，生成高精度的立体模型。基于模型可以得到山体表面的数据，发现身体表面的细微变化^[6]。结合监测的数据，预测即将发生的灾害，预警系统会基于该结果提前发出预警信号，为当地救援人员开展活动争取宝贵的时间，避免造成严重的人员伤亡。

4 实景三维技术在地理信息领域中的创新与应用

4.1 地理空间数据的可视化

在地理空间数据的可视化处理中,实景三维技术将二维数据转变为三维空间数据变为可能。实景三维技术能够通过数据的处理,将其转变为空间模型,该模型具备极强的真实感,使用者可以通过模型快速观看建筑物,了解建筑物各部位的情况。在模型的使用中,还可以了解建筑物、地形和其他地物的空间关系。基于三维空间展示的直观性,便于使用者快速理解区域地理状况。将实景三维技术应用到地理信息领域后,可根据使用需求引入时间轴以及动态可视化的展示功能,由此可以提高数据展示的效果。在时间轴的使用下,用户可以观察某区域不同时段的变化情况,基于历史数据以及现有数据对区域的发展情况作出理性评估,更可以预测区域未来的发展情况。例如:在某城市建设期间使用实景三维技术,基于该城市的发展历史以及当下状况,构建不同时段的发展模型。通过三维模型的动态比较,可以获取城市道路网络、建筑密度以及绿化空间等数据。依靠模型分析数据,可以增强数据的解释力,为城市规划提供强有力的支持。

4.2 实景三维技术与虚拟技术的结合

实景三维技术通过对数据收集、处理、建模,实现数据的可视化展示。实景三维技术与虚拟现实技术、虚拟增强技术相结合,可提高模型的可视化效果。其在地理信息领域中的应用,可以根据创建对象设置沉浸式的场景,让观看模型的用户获得沉浸式的体验感受。在实景三维技术与虚拟技术构建的场景中,用户可以在创设的虚拟环境中获取三维空间数据,其具有极高的可视化水平,用户在获取三维空间数据的同时具有极强的参与感。

虚拟技术的效能较强,即便处理对象为复杂的环境,依然可以获取对应的数据并建立模型。例如:建筑物内部结构、地下管道等区域,应用实景三维技术并结合虚拟现实技术与虚拟增强现实技术,创建相应的模型,可将每个结构的空间布局展现出来。由此,用户可以直接观察相关区域,快速获取建筑的信息。在三维模型构建中,因虚拟现实技术以及虚拟增强现实技术的应用,可以突破二维数据在内容展示中的局限性。工程人员在三维虚拟环境中,可以根据管道的数据内容创建立体的地下管道结构,掌握地下管道的布局,直观地查看地下管道结构,可发现存在冲突的部位,提前进行规划,避免在施工环节出现问题。

虚拟现实技术以及虚拟增强现实技术是将平面内容立体展示的重要手段,其与实景三维技术的结合,可以应用在建筑设计、城市规划以及灾害应对等诸多领域。应用虚拟现实技术,可以建立相应的立体场景,获取更准确的信息^[7]。例如:在城市未来发展的预测中使用虚拟现实技术,可以基于城市当下的发展情况对各类建设方案进行评估,分析不同方案对城市发展的影响。结合立体模型提供的直观内容,便于规划人员对不同方案的效果作出评估。再比如,将虚拟现实增强技术与三维模型相结合,应用到灾害管理中,可向救援人员提供大量信息,便于对灾情进行评估和判断,基于现场掌握的信息,制定具有操作性的救援方案。例如:在某次火灾的救援中,通过虚拟现实技术、虚拟现实增强技术与实景三维技术的结合,收集火灾区域的数据,将数据转变为直观的立体模型,成为救援人员评估火灾现场地形的有效方法。此外,可以通过模型对建筑倒塌的情况进行评估和判断,借助虚拟现实增强技术找到现场最佳的救援路径,增强救援活动的响应力。

5 结束语

实景三维技术在测绘与地理信息领域中具有极大的作用,主要体现在环境监测、工程测量、城市规划等多方面。应用实景三维技术可快速收集数据,将数据转变为立体模型,提高数据的可观性,对测绘与地理信息领域的发展起到推动作用。在土地整治、城市规划、灾害监测等方面,实景三维技术已经展现出较好的应用价值。但是未来还需要进一步优化实景三维技术,以测绘与地理信息领域工作需求作为抓手,通过技术创新进一步提高实景三维技术在实际应用中的价值。

参考文献:

- [1] 张倩.基于地理信息系统与实景三维技术融合的智慧城市空间信息管理新范式探析[J].经纬天地,2024(06):11-14,32.
- [2] 余培杰,于学资.基于数字化实景三维技术的河南古建筑保护研究[J].江西建材,2024(10):170-172.
- [3] 赵贺,刘瑜琦.实景三维技术赋能数字孪生城市建设[J].中国安防,2024(09):88-91.
- [4] 梁斯佳.基于实景三维技术的宁寿宫花园数字化构建[J].广东园林,2024,46(03):31-35.
- [5] 李继光,杨柳.基于实景三维技术的城市景观视廊构建研究:以常州市天宁宝塔为例[J].现代园艺,2025,48(17):24-27.
- [6] 同[4].
- [7] 同[5].

高校碳资产管理智能决策支持系统的构建与实证研究

张恒¹, 刘易鑫², 翟夏妍³

(1. 武汉工商学院, 湖北 武汉 430070;

2. 河北传媒学院, 河北 石家庄 050299;

3. 新乡市礼仪文化研究会, 河南 新乡 453000)

摘要 针对高校碳资产管理需求, 本研究构建集成多源数据采集、实时监测、碳排放核算与多方案决策支持的碳资产管理智能决策支持系统(CDM-DSS)。通过物联网技术实现能源数据高效采集, 构建分层核算模型, 引入机器学习优化决策评估。实证显示: 系统核算误差率 $\leq 5\%$, 异常响应时间缩短50%, 决策支持使部门碳排放强度降低10%~15%。研究成果为高校绿色转型提供智能化解决方案。

关键词 CDM-DSS; 数据融合; 碳排放核算

基金项目: 本文系2024年武汉工商学院校级科研项目基金“高校碳资产管理系统: 高效与精确碳排放监控模型的研究与实践”(项目编号: A2024010)。

中图分类号: TP3; G647

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.028

0 引言

在“双碳”战略背景下, 高校能源管理数字化转型需求日益凸显。传统人工核算模式存在数据滞后、协同效率低等弊端, 且现有研究对高校这一特殊应用场景的适配性不足^[1]。本研究创新性地融合物联网感知、大数据分析、云计算与AI决策技术, 构建“感知—分析—决策—优化”的全链条智能管理系统, 重点突破多源异构数据融合、碳排放精准核算与动态优化决策等关键技术瓶颈, 为高校构建智慧化、低碳化的绿色校园管理体系提供可参考的解决方案。

1 高校碳资产管理智能决策支持系统的研究设计

1.1 理论框架

基于动态能力理论(Teece, 1997)与复杂适应系统理论, 构建“环境感知—资源整合—决策重构”三层架构。(1)环境感知层, 整合物联网与大数据技术, 实时捕获校园能源消耗、设备运行及政策变动等多元数据, 形成管理决策的数据基础^[2]。(2)运用数据融合算法消除部门间信息孤岛, 构建包含28项核心指标的碳资产管理资源池^[3]。(3)决策重构层, 基于自适应学习机制, 开发风险收益评估矩阵与多目标优化模型, 支持管理决策的动态迭代。该框架强调组织在碳资产管理中的动态学习能力, 通过物联网技术实现环境数

据实时捕获, 借助数据融合算法突破部门间信息壁垒, 最终依托风险收益评估矩阵实现管理决策的持续优化。

1.2 方法体系

本研究采用准实验设计, 选取国内某高校进行2019—2023年为期4年的追踪研究。通过倾向得分匹配(PSM)控制师生规模、学科结构等混杂变量, 构建双重差分模型(DID)量化系统效能:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 \text{Treat}_i + \beta_2 \text{Post}_t + \beta_3 (\text{Treat}_i \cdot \text{Post}_t) + \epsilon_{it}$$

其中, Treat_i 为处理变量(实验组=1, 对照组=0), Post_t 为时间虚拟变量(系统实施后=1), X_{it} 为控制变量(师生规模、学科结构、气候特征)。通过倾向得分匹配(PSM)控制组间异质性, 匹配后样本协变量标准化偏差均 $< 10\%$ 。

1.3 管理决策模型

高质量数据供给为管理决策模型的开发奠定基础, 但需通过科学的模型架构实现数据价值转化。本研究遵循“核算精准化→决策智能化→预警前瞻化”的递进逻辑, 在统一数据标准的基础上, 开发分级核算模型、多目标决策算法与复合预警系统, 形成完整的管理决策支持链条^[4]。

1. 碳排放核算模型。构建分级核算体系, 融合IPCC标准与高校管理实践:

$$CE_{total} = \sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i \times AF_i) + \epsilon$$

其中, AF_i 为部门活动水平修正因子, ε 为动态误差补偿项, 通过 LSTM 网络实现实时校准。

2. 多目标决策模型。建立包含经济性 (C)、环境性 (E)、可行性 (F) 的三维评估体系:

$$U = \max \left[w_1 \frac{C}{C_{\max}} + w_2 \frac{E}{E_{\max}} - w_3 \frac{Risk}{Risk_{\max}} \right]$$

采用 NSGA-II 算法求解帕累托最优解集, 支持决策者根据偏好选择减排方案^[5]。

3. 动态预警模型。开发基于 CUSUM 控制图与孤立森林算法的复合预警系统, 设定黄色预警 (响应阈值 $> 1.5\sigma$) 与红色预警 (响应阈值 $> 3\sigma$) 两级响应机制。

1.4 数据采集与变量测量

1. 数据来源。本研究数据涵盖电力、燃气等 6 类能源消耗数据, 设备运行日志及碳交易记录客观数据。对 236 名管理人员进行问卷调查 (Cronbach's $\alpha=0.87$), 采用 7 级 Likert 量表评估系统易用性与决策采纳率。在明确方法论框架后, 需构建适配管理学研究的测量体系。

2. 核心变量。以碳排放强度为核心因变量, 采用“部门碳排放量 / 建筑面积 (tCO_2/m^2)”的量化指标, 通过智能传感器实时采集数据。该指标设计体现了资源基础观的理论内涵, 能有效反映组织资源利用效率与环境绩效的关联关系。在自变量设计方面, 研究采用双重差分法 (DID) 的实验设计, 以系统干预效应的交互项系数 β_3 作为量化指标, 用于捕捉技术赋能对碳排放强度的净影响。调节变量聚焦管理者风险偏好, 基于前景理论框架, 通过问卷调查获取损失厌恶系数 λ 作为测度指标。同时控制气候因素的干扰, 选用“日均温度偏离历史均值 $\geq 2^\circ\text{C}$ 的天数”作为气候异常天数的操作化指标, 数据来源于专业气象 API 接口。该设计呼应高阶理论的核心主张, 能有效揭示管理者认知特征对技术赋能效果的边界影响。

1.5 技术实现

1. 技术实施路径。为实现理论模型向管理工具的转化, 本研究设计“四阶八步”技术实施路径。该路径以需求锚定为起点, 通过敏捷开发与迭代测试完成原型构建; 采用 RESTful API 接口实现与现有 OA、ERP 系统的无缝对接; 最终运用平衡计分卡 (BSC) 从财务、流程、学习、利益相关者四个维度进行综合绩效评价。这种技术路线既遵循软件开发规范, 又契合高校管理实际需求, 为后续实证研究奠定技术基础。本研究设计分阶段实施路线, 包含八个关键步骤: (1) 需求锚定, 通过 Kano 模型分析决策者需求优先级, 确定核心功能

模块; (2) 原型开发, 采用 Scrum 敏捷框架, 每两周进行迭代测试; (3) 系统集成, 构建标准化数据接口, 实现跨系统数据交换; (4) 效能评估, 运用 BSC 从财务、流程、学习、利益相关者四个维度进行综合评价;

(5) 试点运行, 选取 3 个典型校区进行为期 6 个月的试运行; (6) 参数调优, 基于试运行数据优化模型参数, 提升预测精度; (7) 全面推广, 在全校范围内部署系统, 开展管理人员培训; (8) 持续改进, 建立反馈机制, 每季度更新数据模型与决策规则。

2. 系统功能实现。本研究构建的 CDM-DSS 通过模块化设计实现“数据采集—核算监测—决策优化—闭环反馈”的全流程管理, 其核心功能模块及管理价值体现在以下四个维度 (见表 1)。

2 高校碳资产管理智能决策支持系统的实证分析

CDM-DSS 系统显著改善管理效能。核算精度, 实验组误差率 4.1% vs 对照组 9.3% ($\beta=-5.21***$)。响应速度, 预警响应时间 3.5 分钟 vs 18.2 分钟 ($\beta=-14.73***$)。减排效果, 实验组碳强度降幅 13.1% ($p < 0.01$) vs 对照组 4.2% ($\beta=8.92***$)。

量化分析结果揭示了 CDM-DSS 系统的技术赋能效果, 但需进一步解析其内在管理机制。下文将从决策优化与组织学习两个维度, 探讨系统如何通过重构管理流程实现效能提升。

2.1 决策优化

NSGA-II 算法生成的帕累托解集使实验组减排成本降低 22.4%, 利用 DEA 模型测算, $\theta=0.78$ 。还利用风险偏好调节作用, 当损失厌恶系数 $\lambda > 2.3$ 时, 管理者对高风险减排方案的采纳率下降 37%, 其中调节效应检验: $\Delta R^2=0.15$, $p < 0.01$ 。

2.2 组织学习

系统使用 6 个月后, 整体决策效率提升 58% (Mann-Whitney $U=1325$, $p < 0.001$), 季度校准误差降低 42% (ARIMA 模型 RMSE=0.38), 管理成本节约 43.8 万元/年, ISO14064 认证达标率提升至 92%。

3 讨论与启示

3.1 理论贡献

动态能力理论通常应用于战略管理领域, 本研究将其延伸至碳资产管理场景, 证明组织通过技术赋能可构建“数据感知—算法决策—反馈学习”的新型动态能力。这一发现为数字化转型研究提供了跨领域理论接口。实时数据驱动机制 ($\beta=0.47$, $p < 0.01$) 支持 Teece (1997) 提出的“感知—seize—重构”动态

表 1 CDM-DSS 系统核心功能模块及管理价值体现

维度	功能设计	管理价值
数据整合与资源协同管理	1. 部署 1 250 个智能传感器与 IoT 设备，构建覆盖电力、燃气、水务等 6 类能源消耗节点的实时数据采集网络 2. 开发标准化数据接口（RESTful API），实现教务、科研、后勤等 8 个部门管理系统的无缝对接 3. 设计设备自检→传输加密→格式转换→逻辑验证→人工抽检五级数据治理机制，数据可用率达 98.7%	通过打破部门间数据壁垒，构建校园级碳数据资源池，传统模式下需人工协调耗时 2 ~ 3 天，使跨部门数据共享效率提升 65%。该设计验证了资源基础观在碳资产管理领域的适用性，即通过异质性数据资源的整合形成可持续竞争优势
动态核算与实时监测体系	1. 构建分层核算模型。包含 IPCC 标准基础核算、教学、科研、后勤部门核算、会议、差旅专项核算三级嵌套模型 2. 开发实时监测看板，支持 5 分钟级数据更新，阈值>±15%自动标识异常波动 3. 设计误差自校正机制，通过 LSTM 神经网络动态修正核算偏差，月均误差率控制在 3.2% 以内	相较于传统年度核算模式，系统实现碳排放数据的实时可视化与动态追踪，使管理部门能够及时识别高碳环节。该功能印证了动态能力理论的核心观点——组织需通过实时数据获取与处理能力应对外部环境变化
智能决策与多方案优选	1. 开发碳配额智能评估模型：对比历史排放与分配额度，提前 30 天预警覆盖率 92% 的自动触发配额预警 2. 构建碳交易决策树：集成全国碳市场价格指数、政策导向等变量，生成交易策略备选集 3. 设计减排方案仿真系统：运用蒙特卡洛模拟评估不同减排组合的风险收益比，ROR ≥ 15% 方案通过率 89%	系统生成的决策方案使部门级碳排放强度降低 12.7%（p < 0.01），验证了管理决策理论中“数据驱动决策”的有效性。特别是在实验室能效优化场景中，通过设备调度策略调整实现年均节电 2.1 万度，体现资源配置优化的管理效能
闭环反馈与持续改进机制	1. 建立碳足迹动态监测平台，整合能源消耗、废弃物处理、绿色建筑等 12 类数据维度 2. 开发固碳措施推荐系统，基于 GIS 地图推荐光伏安装点位年发电潜力达 1.2 MW 3. 构建 PDCA 管理闭环，通过季度性数据回溯与模型校准，持续优化核算精度与决策效率	系统实施的“监测—评估—改进”循环机制，使高校碳资产管理水平提升至 ISO 14064 认证标准，较传统管理模式节约管理成本 43.8 万元/年。该设计体现了组织学习理论的实践价值，即通过持续反馈提升组织适应能力

循环，验证了动态能力理论。决策理论拓展，揭示风险偏好($\lambda=2.3$)与决策保守性的非线性关系($R^2=0.32$)，完善前景理论在环境管理中的应用边界。资源基础观深化，数据资源异质性(HHI 指数从 0.68 降至 0.29)验证了 Barney(1991)的 VRI0 框架在数字时代的适用性。

3.2 实践启示

系统使碳资产管理符合 ISO14064 标准的透明度要求，技术赋能制度创新，将合规率提升至 92%。人机协同决策范式，决策者采纳率与系统解释性呈正相关($r=0.63$, $p < 0.001$)，提示需增强算法可解释性设计。通过“数据可视化管理看板”降低部门协作摩擦成本，节约时间成本 64%，实现组织惯性路径突破。尽管本研究取得显著成果，但仍需客观审视其局限性。

4 结论

本研究通过严谨的实验设计验证了 CDM-DSS 系统在提升高校碳资产管理效能、优化资源配置及促进组织学习方面的显著作用。实证结果表明，CDM-DSS 系统使核算误差率降低 55.9%，碳强度下降 13.1%，决策响应

效率提升 3.2 倍，为高校落实“双碳”目标提供了可参考的智能化解决方案。研究不仅揭示了物联网与 AI 技术融合对管理流程的重构效应($\beta=0.62$, $p < 0.01$)，还发现系统使用时长与碳减排效果呈显著正相关($R^2=0.47$)。这些发现为数字化转型背景下的高校碳资产管理提供了理论与实践参考。

参考文献:

[1] 程迈越,周养,李梓源.博雅智慧打造数字化“双碳”服务品牌[J].企业管理,2023(08):90-94.
[2] 彭英.边缘计算在智慧校园物联网中的能效优化策略研究[J].智能物联技术,2024,56(02):48-52.
[3] 张伟杰,唐晓旭,王肖欣,等.碳排放核算方法综述[J].工程质量,2024,42(S2):167-169.
[4] 郭建军,廖权虹,白可,等.浅析碳核算数据模型及碳核算标准化体系建设[J].标准科学,2024(11):93-100.
[5] 刘树东,吴昊,丛佳,等.双碳目标下基于改进型 NSGA-II 算法的港口作业调度优化算法[J].计算机应用,2024(09):1-11.

建筑工程项目管理质量控制研究

余 讯

(浙江华东工程科技发展有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要 在建筑工程实施过程中, 落实项目质量管理可以控制工程项目成本, 及时了解并管控当前的工程进度。提高工程项目的安全管理水平, 是确保项目投入使用安全的重点。在施工过程中, 建筑工程项目管理由于人员、技术、材料等多种因素会出现质量问题, 导致无法按照约定期限交付。基于此, 本文通过探究建筑工程项目质量控制对策, 阐述工程项目质量管控的重要性以及意义, 并分析工程项目质量影响因素, 提出有针对性的改进建议, 以期为后续建筑工程项目管理工作提供参考。

关键词 建筑工程项目管理; 质量控制; 工程材料; 施工设备

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.029

0 引言

工程质量是项目经济效益的根本保障, 可以提升企业的品牌价值, 增强市场竞争力。若建筑项目出现质量问题, 不仅会增加项目建设成本, 还会因返工而延长工期, 导致项目投入使用的安全性达不到要求。因此, 应加强对项目工程质量管控的重视程度, 通过明确质量控制原则, 落实相应的管控措施, 有效提升质量控制的效果, 进而提升工程项目质量管控水平, 避免因质量问题影响项目的正常交付与使用。通过落实有效的建筑工程项目管理工作, 不仅可以强化改善项目质量, 还能提升工程施工效率, 是推动企业发展, 提高经济效益的关键。

1 建筑工程项目管理质量控制的意义

建筑工程项目管理的质量控制工作涉及多个方面。

首先, 从安全角度考虑, 质量控制可以有效保障工程的施工安全, 为项目施工创造安全的环境。从目前施工安全事故发生情况来看, 一旦出现安全事故, 除了会影响施工进度之外, 还会造成人员伤亡。质量控制的实施可以有效提升建筑结构的稳定性, 避免出现施工不规范或者其他问题引起的安全事故。在日常工作中, 安全是贯穿整个施工过程的核心要素, 对于常见的质量问题, 通过制定把控措施, 规范施工人员的工作流程, 严格按照规范要求开展施工工作, 注意把控细节问题, 尽可能地减少安全隐患^[1]。其次, 从经济角度考虑, 质量控制是提升企业经济效益的有效方式。高质量的施工项目, 可以减少返工、维修以及改造的成本, 工程的使用寿命也会更长, 从而在一定

程度上控制管理成本。如果施工环节出现重大的质量问题, 不仅要工程进行整改, 还需要投入额外的成本进行维护以及其他费用。工程项目质量控制能够从根本上解决此类问题, 从而确保工程项目在计划期限内完成交付。最后, 从企业发展的角度来考虑, 质量控制可以有效提升企业经济发展, 对促进企业拓展市场、提升企业的整体形象都非常关键。如今市场竞争越来越激烈, 想要在激烈的市场环境中站稳脚跟, 就需要提升自身的综合实力。而质量控制措施的落实, 可以实现对工程项目全过程的管理, 通过不断优化项目管理水平, 可以丰富企业管理经验, 促进企业建立完善的管理制度, 对促进企业稳定发展具有较强的驱动力。因此, 要根据实际情况制定建筑工程项目管理质量控制对策, 考虑造成质量问题的相关原因, 采取有针对性的改善措施, 这是提高工程质量的关键。

2 影响建筑工程项目质量的因素

2.1 技术因素

从设计技术层面看, 若设计人员技术水平有限, 可能无法准确运用先进的设计理念和方法。比如在复杂建筑结构的设计上, 不能精准地进行力学分析和模拟, 就会导致建筑结构存在安全隐患, 如计算失误使得构件承载能力不足, 后期可能出现墙体倾斜、楼板开裂等严重质量问题。另外, 对新型建筑材料特性了解不够, 错误选用材料, 会降低建筑的耐久性和适用性, 如在防水要求高的区域使用了不恰当的防水材料, 造成渗漏现象频发。施工工艺落后会导致施工效率低下且质量难以保证, 在混凝土浇筑时, 若振捣技术不

佳,会使混凝土内部出现空洞、蜂窝等缺陷,严重影响混凝土结构的强度。就目前来看,新技术、新工艺还存在推广困难的情况,仍旧有很多施工人员习惯于传统施工方法,无法及时掌握和应用先进技术,导致建筑精度和质量难以提升。因此,在施工项目过程中,应高度重视技术因素,确保工程质量的有效提升^[2]。

2.2 工程材料

工程材料的性能、规格、标准都会影响工程质量。建筑工程项目的实施涉及多种类的材料应用,如混凝土、钢筋、水泥等,每种材料都具有特定的性能要求。若材料质量未达到施工标准,则会引起一系列的质量风险。例如:砂石骨料中含泥量高时会降低混凝土的耐久性,水泥质量不达标或选用不当会引发混凝土裂缝,钢筋质量不达标直接影响建筑的结构安全性和抗震性能。这些潜在的工程材料质量问题都会严重威胁工程项目的建造质量,从而埋下安全隐患。因此,在建筑工程项目施工过程中,需要对施工材料严格把控,从采购、查验到使用,每个环节都需要严格控制,保证建筑材料的质量与性能都符合施工要求。

2.3 施工设备

先进的施工设备能显著提升施工的精度与效率。比如高精度的混凝土搅拌设备,能够精准控制各种原材料的配比和搅拌时间,使混凝土的质量更加稳定,从而保证建筑结构的强度和耐久性,而先进的吊装设备可以更精准地定位建筑构件,减少安装误差,提高建筑的整体稳定性。若设备频繁出现故障,不仅会延误工期,还可能在维修后再次投入使用时因调试不当等问题影响工程质量,比如一台经常出故障的振捣设备,可能导致混凝土振捣不密实,产生蜂窝、麻面等质量问题。

2.4 人员因素

在影响工程项目质量因素中,人员因素主要体现在两个方面:

首先,管理人员在质量管理方面意识较为薄弱,部分管理人员未能根据工程项目的实际要求落实相应的质量管理制度,导致质量管理工作缺乏系统性和针对性。与此同时,对工程项目质量控制投入不足,无论是人力、财力还是物力方面都难以满足质量控制管理的需求。其次,施工人员的专业素质和能力无法达到所需的要求。一些施工团队缺乏相关的工作经验,对施工工艺和质量控制要点无法精准把握,由于专业能力较差,所以在施工过程中质量问题频发。更为严

重的是,部分施工人员对质量问题重视不足,为了赶上工期而忽略质量管理^[3]。

3 建筑工程项目管理质量控制对策

3.1 完善组织管理体系

在建筑工程项目管理中,落实完善组织管理体系是保证质量控制的关键。

首先,建立完善的分层质量责任制度,对于项目经理、技术负责人、工程班组等各级人员的质量职责都要提前进行明确,并通过签订责任书的方式,将考核标准落实到人,使各层级都明确自身的质量目标以及责任范围,通过层层把关、责任到人的方式,做好有效的质量控制工作。与此同时,建设独立的质量监督管理部门,并配置专职质检人员,通过定期质检的方式,确保各施工环节都符合质量标准。在具体操作过程中,采取三检制的方式,通过自检、互检、专检相互结合,确保每道工序都经过严格的检验,确认合格后再进入下一个环节,从而有效避免质量隐患。其次,推行质量奖惩制度,从而增强全员质量意识和责任心。一方面,设置质量奖励机制,对完成优质工程的团队和个人给予物质和资金奖励,激发全员参与到质量管理中;另一方面,要对造成工程质量问题的相关人员进行追责,并以此种方式强化全员的质量控制意识,确保工程质量得到有效的提升。通过构建严密高效的质量管理体系,为建筑工程项目质量控制顺利实施提供有力的保障和支持。

3.2 优化技术质量控制措施

在建筑工程项目管理中,优化技术质量控制措施是提升工程质量的核

心。首先,通过加强对施工图纸会审的方式,确保施工的规范性。通过组织设计、施工、监理等多方单位参与图纸会审,识别并纠正存在的问题和缺陷,确保施工图纸的可行性和准确性,为后续施工工作奠定基础。其次,推广建筑信息模型(BIM)技术,提升技术质量控制水平。利用BIM模型进行三维碰撞检测以及施工模拟,能够直观地展示相互之间的空间关系,这种处理方式可以在模拟过程中找到潜在问题,提前制定方案进行优化。通过优化施工方案,可以有效减少施工过程中存在的变更与返工,提升施工质量和效率。通过落实相应的技术,可提升工程整体质量,缩短工期,降低施工成本,全面提高企业经济效益以及社会效益。因此,在建筑工程项目管理中,需要不断优化技术质量控制措施,从而落实有效的技术支持。

3.3 严格落实材料、设备进场检验工作

通过建立完善材料质量追溯体系,对钢筋、水泥等关键材料进行严格控制抽检,从源头上排除不合格的产品流入施工现场,确保所用的施工材料质量均符合标准。而设备进场检验可以检查设备的规格、型号是否符合要求,其性能是否完好。例如:起重机的起重量、起升高度、运行速度等参数需要与施工方案相匹配,通过检验确保其各项性能指标达标,避免在施工过程中出现设备故障,影响施工进度和质量;对于混凝土搅拌机,检验其搅拌均匀性、搅拌时间等性能,保证混凝土的质量。同时,还需要明确检验人员的职责和权限,采用科学合理的检验方法和手段,做好检验记录,对不合格的材料、设备及时进行退场处理,严禁在工程中使用。

3.4 强化人员素质与培训

强化人员素质,落实相应的培训工作是确保质量控制的重要环节。

首先,要坚持持证上岗,特别是对焊工、起重工等关键岗位,必须严格要求具有资格证书,并通过定期审核和评估的方式,确保其专业性和技能水平符合行业标准。其次,要提高技术人员的综合素质。根据技术人员的水平进行分类,分层级进行培训。针对管理人员,应重点进行质量管理体系的培训,管理人员除了要具备管理理念之外,还要不断学习先进的管理知识。施工人员则要重点培训实操技术并定期进行考核,确保能够熟练掌握施工技术和操作规程,提升施工质量和效率。此外,还可以通过组织质量活动月,开展事故警示教育等,营造“安全第一、质量至上”的施工理念,使全体施工人员重视质量以及安全工作,从实际行动出发,确保全员参与到质量管控中,落实相应的管理措施^[4]。

3.5 严格施工过程监控

为了对施工质量进行把控,要监控施工的全过程。对于隐蔽工程,要实施规范化的验收制度,并保留详细的录像资料,便于追溯和核查。通过落实全过程的监督,可以确保对隐蔽工程的质量严格把控,防止出现不合格或者后续质量问题。对于验收不合格的工程,要责令整改、返工,并对相关责任人处以相应的罚款。通过动态化质量检查的方式,可以有效提升施工过程中的监控效果。通过采取 PDCA 循环的管理办法,定期发布质量检查报告,披露施工过程中出现的质量问题,并进行及时分析和处理^[5]。此外,利用质量检测 APP 等现代化技术,实现问题的实时上传和限时整改,从

而进一步提高质量检查的效率和准确性。对于突发的应急事件,需要制定完善的质量应急预案,明确抢修流程以及责任分工,一旦发现此类事故,要迅速启动应急预案,并组织相关人员进行抢修,从而最大限度地减少事故损失。通过对施工过程严格监控管理,能够有效提升建筑工程项目管理的质量控制水平,确保工程质量的整体提升以及其安全性。

3.6 质量控制方法创新

创新质量控制方法在建筑工程项目管理中非常关键。采用先进的技术手段,可以及时发现问题并进行改正。通过建立质量数据平台,能够全面收集施工过程中的全部数据,其中包括材料检测数据、施工工艺参数、设备运行状态等。通过对这些数据的深入挖掘,并运用统计分析工具,可以精准分析质量波动的根本原因,并为质量改进提供依据。与此同时,QC 小组活动是提升质量控制水平的关键举措。QC 小组由一线工人、技术人员和管理人员组成,运用科学的管理办法和理论对质量进行改进,不断激发员工的积极性与创造力,让全员参与到质量管理工作当中。成员小组共同分析问题,制定解决对策,实施改进方案,可以有效解决工程中存在的质量问题^[6]。

4 结束语

建筑工程项目管理质量控制可以有效提升项目质量,从而提高项目建设效益,促进企业的发展。技术、材料、设备、人员等因素都会影响工程质量,需要结合工程项目质量问题的原因,有针对性地进行改善。通过提高全员对建筑工程项目管理质量控制的重视程度,采用多元化的技术控制措施来强化工程项目质量的管理效果和水平,促进建筑行业的健康稳定发展。

参考文献:

- [1] 郭金通.建筑工程项目管理及施工质量控制策略[J].城市开发,2025(01):153-155.
- [2] 鄢文龙.建筑工程项目管理及施工质量控制策略探析[J].建设机械技术与管理,2024,37(06):30-32.
- [3] 刘滔.建筑工程项目管理质量控制策略[J].建材发展导向,2024,22(22):108-110.
- [4] 黄雪峰.EPC 总承包模式下建筑工程项目管理研究[J].中国建筑装饰装修,2024(20):151-153.
- [5] 周子涵.建筑工程项目管理及施工质量控制探讨[J].建筑与预算,2024(05):28-30.
- [6] 刘静.建筑工程项目管理中的质量控制与管理措施[J].福建建设科技,2022(03):120-122.

城市排水泵站智能化运维管理分析

曾丽珊

(惠州市惠州大堤北堤管理中心, 广东 惠州 516000)

摘要 城市排水泵站作为城市雨污分流系统中的关键基础设施, 其主要功能在于应对强降雨天气条件下的内涝风险, 保障城市排水系统的高效运行与城市居民的生命财产安全。随着城市化进程的不断加快以及极端天气事件频发, 传统泵站运维模式已难以满足现代城市对高效、智能、可持续排涝系统的需求, 因此智能化运维管理技术应运而生, 逐步成为提升城市排涝系统韧性的重要手段。本文系统分析了城市排水泵站的基本原理与构成, 重点探讨了面对超大暴雨情形下泵站在预警系统、自动化管理与应急预案方面的智能化建设需求, 并进一步对能效优化与运维管理等关键技术路径进行了深入剖析, 旨在为城市排水系统的智能化升级提供有益参考。

关键词 超大暴雨; 城市泵站; 排涝管理

中图分类号: TV67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.030

0 引言

在传统排水系统中, 泵站运行高度依赖人工干预, 存在信息感知滞后、数据传输不畅、设备协同不足以及运维管理效率低下等问题, 难以实现对暴雨等极端水文事件的快速响应与精准调控, 导致泵站系统整体运行韧性与资源利用效率不足。信息技术的迅猛发展推动了城市基础设施管理模式的深层次变革, 基于物联网感知、边缘计算、人工智能算法及大数据分析等多维度融合的智能化运维理念逐步嵌入城市排水系统的构建与管理实践中, 使得泵站设备运行状态实现了全过程感知、全生命周期诊断与动态优化控制。

1 城市泵站的基本原理

城市泵站作为城市防洪和排涝的核心设施, 其基本原理是通过机械设备的运作, 迅速有效地将城市积水抽送到指定地点或自然水体中, 以防止雨水积聚导致的内涝。泵站主要由进水系统、泵装置和排水系统三部分构成。进水系统负责收集来自城市地表、排水管网以及雨水管道的积水, 经过初步的过滤和沉淀处理后, 将水输送到泵装置。泵装置是泵站的“心脏”, 根据水流量的需求启动相应数量和类型的泵, 通过电机驱动泵轮转动, 利用离心力将水抽吸并推送到出水管。排水系统则负责将泵送出的水流引导到河流、湖泊或其他预定的排水区域, 确保水流顺畅排出, 避免回流现象^[1]。

泵站的设计需考虑多种因素, 包括地理位置、地形地貌、常见降雨量以及极端气候情况的应对能力。此外, 现代城市泵站还融入了高度的自动化和智能化

技术, 如使用远程监控系统实时监测水位变化, 以及采用先进的控制系统自动调节泵的开启和关闭, 确保在不同的天气条件和使用需求下, 泵站能够高效、节能地运行。在泵站设计与运行中, 还需考虑到能效优化, 例如选择高效能电机和泵, 使用变频技术等, 以减少能源消耗并降低运营成本。

2 超大暴雨下的城市泵站排涝管理

2.1 预警系统与数据监控

在超大暴雨情况下, 城市泵站的排涝管理技术尤为关键, 其中预警系统与数据监控的应用成为提升泵站应急响应能力的重要手段, 这不仅涉及高精度的水文监测设备, 还包括先进的数据处理和分析技术。预警系统的基本功能是通过安装在关键地点的水位传感器实时监测各主要排水渠道和积水区的水位情况, 传感器收集的数据被传输到中央监控系统, 在此基础上, 利用地理信息系统(GIS)和水文模型对收集到的数据进行分析, 预测可能的洪水发展趋势和潜在风险区域, 实现对泵站运行的实时调控^[2]。数据监控系统则依托于强大的计算平台, 综合考虑气象预报、历史数据和实时数据, 对泵站的运行状态进行全面分析, 确保在暴雨期间泵站可以根据水位变化自动调整运行策略, 比如自动启停泵机、调节泵速以及开闭闸门等操作, 以适应不断变化的排涝需求。此外, 数据监控还包括对泵站机械设备的健康状态进行监控, 确保所有关键设备能够在高负荷条件下稳定运行, 及时发现并处理故障, 减少因设备故障造成的排涝效率下降或停机等严重后果。为了进一步提高系统的智能化水平, 部分

城市已开始引入人工智能算法与深度学习模型,对多源异构数据进行融合处理,从而实现更高精度的风险识别与趋势预测。通过构建动态神经网络模型,系统不仅能够快速响应短时强降雨带来的突发水位变化,还可依据历史运行规律优化泵站的启停逻辑与功率分配策略,提升整体运行效率与能耗控制水平。同时,预警系统还集成了移动端信息推送功能,一旦监测到异常水位或设备运行异常,可第一时间向运维人员和相关管理部门发送预警通知,确保人力资源能够迅速调度至重点区域开展巡查与干预作业。此外,系统平台还支持与城市应急指挥系统的数据对接,形成联动响应机制,实现从感知—分析—响应—反馈的闭环管理体系,在应对极端暴雨引发的城市内涝过程中发挥出精准、高效的技术支撑作用,为城市排水系统的智能化升级与韧性提升提供关键保障。

2.2 泵站的自动化与智能化管理

在超大暴雨情况下,城市泵站的自动化与智能化管理显得尤为重要,因为这能显著提高泵站应对突发水文事件的能力。自动化系统依托于先进的传感技术和控制算法,确保泵站能在无人干预的情况下,根据实时数据自动调整运行状态。智能化管理则通过集成的信息处理平台,实现数据的实时分析和决策支持。引入的算法,如反馈控制算法(Feedback Control Algorithm),是实现这一过程中的核心^[3]。

考虑到实时水位调控,反馈控制算法可以表示为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 是控制输入,即泵速调整; $e(t)$ 是误差项,表示实时水位与设定水位的差值; K_p 和 K_i 分别是比例和积分控制增益,用于调整控制力度和响应速度。通过调整这些参数,系统能够动态地适应不同的排水需求,减少泵站运行的能耗同时提高排涝效率。

为了优化泵站能效,可以引入能效优化公式,计算最佳泵速以降低能耗:

$$E_{\min} = \min \left(\sum_{t=0}^T P(t) \cdot u(t) \right) \quad (2)$$

其中, $E_{\min}$ 代表最小化的能耗目标, $P(t)$ 是在时间 t 的单位时间泵运行功耗, T 是考虑的总时间。该公式帮助确定在保持排涝效率的同时,如何调节泵站的运行策略以最小化能源消耗。这两个公式在城市泵站的自动化与智能化管理中具有关键应用:第一个公式确保泵站能根据实时水位变化自动调整泵的运行状态,优化排涝效果;第二个公式则用于优化泵站的能效,确保在达到排涝要求的同时,尽可能减少能源消耗。

通过这种方式,泵站不仅可以应对超大暴雨带来的极端条件,还可以实现经济运行,符合现代城市可持续发展的要求^[4]。

2.3 应急预案的制定

应急预案的目的在于确保在极端天气事件发生时,泵站能够快速、有效地响应,最大程度地减轻或避免因内涝引起的损害。在预案制定过程中,首先需进行风险评估,包括识别关键资产、评估潜在威胁、确定脆弱点以及预计可能的影响,这一评估为后续的预案制定提供科学依据。接着,设计应急响应措施,这些措施包括但不限于泵站设备的快速启动、紧急增加泵机运行数量、调整泵站运行策略以应对突增的水流量。同时,预案还需包括人员的紧急动员与培训,确保所有操作人员熟悉应急操作程序和安全措施,以及与本地应急管理部的协调机制,确保在需要时能够获得额外的支持与资源。另外,应急预案还应包括通信策略,以保证在应急情况下信息能够及时准确地传达给所有相关方。为确保应急预案的有效性,还必须定期进行预案的测试与演练,通过模拟超大暴雨情景检验泵站及相关人员的响应效率和处理能力,根据测试结果对预案进行必要的调整与完善。进一步而言,应急预案的动态修正机制至关重要,应建立常态化的预案评估和优化体系,将每次实战或演练中的问题与经验系统化归纳,纳入预案的修订依据。特别是在应对极端天气频发的新形势下,应急预案不应是静态文档,而需具备高度适应性及灵活性。例如:在暴雨强度超出既有预案设定上限时,应有备用方案可以迅速切换实施,如临时调度高功率移动泵站、部署临时蓄水区或快速封堵系统等。此外,预案中应引入智能化调度模块,结合实时数据与历史案例自动推荐最佳响应路径,提高调度效率和准确性。在跨区域协同层面,应急预案还应纳入周边泵站或水系的联动机制,通过共享信息平台实现资源统筹与互补,增强整体区域排涝能力。为提升公众安全防护意识,应急预案还可涵盖面向居民的风险提示、疏散路线图和避险指引,通过社区广播、移动端推送等手段广泛传播,有效减少人员伤亡和财产损失,形成政府主导、部门协作、群众参与的全方位应急管理格局。

3 优化泵站排涝效率的关键技术

3.1 能效优化技术

能效优化主要通过高效的泵选型、优化的系统设计、变频技术应用以及智能控制系统的整合来实现,

其中高效泵的选型要基于泵站的具体运行条件和水动力特性进行,确保在各种运行点上泵都能保持最佳效率;系统设计优化包括合理的管网布局和减少系统中的水力损失,通过减少管道弯头和调节阀的数量、使用高效的管材来降低摩擦损失;变频技术的应用则允许泵根据实际排水需求自动调整运行速度,有效避免在低负荷时过度消耗能源,同时也减轻了泵的启动冲击,延长设备寿命;智能控制系统通过集成传感器数据和运行反馈,对泵站进行实时监控和自动调节,以适应不断变化的排涝需求,系统可以分析泵站的能效数据和操作状态,自动识别能效优化的潜在点,例如调整泵的运行数量或顺序来匹配实时流量需求,确保系统在保证排涝需求的同时,最大程度地降低能源消耗。此外,周期性的维护和系统升级也是确保能效优化持续性的重要措施,通过定期检查和维护泵站设备,及时更换低效部件,更新系统软件和硬件,可以持续提升泵站的能效表现^[5]。在此基础上,还应引入能效评估与管理机制,构建泵站运行全过程的能效监测模型,实现从能源输入到输出效率的全流程量化评估。通过引入能源绩效指标(EnPI)和单位流量能耗指标,可以对不同工况下的能效水平进行实时对比与优化调整。同时,应采用数字孪生技术构建泵站虚拟运行模型,对不同运行参数组合下的能耗进行仿真分析,提前预判能效最优策略并反馈到实际控制系统中,以提升调度科学性和响应速度。在能源回收方面,对于具备地势高差条件的泵站,可设计势能回收装置,将水流势能转化为电能,进一步提升系统整体能源利用率。此外,应强化运维人员的能效管理培训,提升其对运行数据的识读和分析能力,确保技术系统与人工操作的协同优化。最后,通过构建泵站能效数据库,归集各运行阶段的能效数据,为后续的系统优化、运行管理和技术改造提供科学依据,实现泵站从传统高耗能模式向绿色、低碳、高效运行模式的根本转变,为城市排涝系统的可持续运行提供坚实支撑。

3.2 运维管理技术

运维管理技术的核心在于实施系统的维护策略和采用先进的监控技术,确保每一部分设备都能发挥最大效能,运维团队通过定期的设备检查和即时的故障修复,维护泵站的运行效率,避免因设备故障导致的排涝能力下降;此外,通过应用物联网技术,运维管理可以实现设备的实时监控和遥控操作,监控系统能够实时收集泵站的运行数据,包括流量、压力、电力消耗等关键指标,利用这些数据,运维团队能进行深

入的性能分析,及时调整运行参数,优化排涝策略。进一步地,智能诊断系统的引入为运维管理带来了革新,该系统通过分析历史和实时数据,预测潜在的故障故障和性能退化,提前采取预防措施,减少意外停机的风险,这种预测性维护策略显著提高了泵站的可靠性和安全性。运维管理还包括对泵站人员的培训和技能提升,确保操作人员能够熟练掌握现代泵站的自动化系统和智能化设备,从而在紧急情况下做出快速有效的响应。为了进一步提升泵站运维的系统化与精细化水平,应构建数字化运维平台,将各类监测数据、维护记录、设备履历以及预警信息集成到统一的信息管理系统中,实现对运维全过程的可视化、可追溯和智能决策支持。该平台通过建立多维度数据模型,不仅能够实现设备运行状态的实时评估,还可依据大数据分析技术对运行趋势进行建模预测,识别长期运行中的能效损耗趋势和系统薄弱环节,制定针对性的维保计划与改进策略。同时,应实施标准化作业流程和规范化管理制度,如设置关键部件更换周期、制定应急处置操作指引、实施绩效考核机制等,以提升运维工作的专业化程度和执行效率。

4 结束语

在现代智慧城市建设不断推进的背景下,全面推动排水泵站运维管理体系的数字化、网络化与智能化转型,已成为提升城市排水系统精细化管理水平、增强城市综合防涝能力的重要技术路径,同时也是构建高韧性城市基础设施系统的关键支撑。其研究不仅具有显著的现实工程应用价值,也在优化城市公共安全体系与促进可持续城市发展方面发挥着重要的作用。

参考文献:

- [1] 林晶晶,张滕,黄小龙,等.城市通江泵站排水对长江干流水质的影响:以武汉市江南泵站为例[J].长江流域资源与环境,2024,33(07):1550-1562.
- [2] 朱洁,应费,李敏捷,等.基于SMART原则的超大型城市排水泵站调研评估与分析[J].净水技术,2023,42(09):142-147.
- [3] 孙毅,邵知宇,束长宝,等.城市排涝泵站远程集控智能化改造研究[J].江苏水利,2023(11):60-63.
- [4] 顾雨涵,李佳钰.新规范城市下穿隧道排水泵站的设计[J].城市道桥与防洪,2023(02):130-133.
- [5] 王彤,任雪璐,关得天,等.北京城市副中心水系景观工程对水质的影响分析[J].水污染及处理,2024,12(04):77-86.

房建工程砌体施工质量控制策略探讨

魏 伟

(郓城县环境卫生服务中心, 山东 菏泽 274700)

摘 要 在房建工程中, 砌体施工是影响建筑结构安全、稳定性及美观性的关键因素之一。本文分析了当前房建工程砌体施工中普遍存在的问题, 如材料质量参差不齐、施工方法落后和监管不足等, 直接影响了建筑的质量和后续使用的安全性。针对这些问题, 提出了加强砌体材料的质量监控、采用现代化施工技术以及强化施工过程的监督管理等控制策略, 以为提升砌体施工的整体质量提供参考, 进而确保房建工程的稳定性与延长建筑物使用寿命。

关键词 房建工程; 砌体施工; 质量控制; 现场管理

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.031

0 引言

房建工程作为城市建设的重要组成部分, 其质量问题一直是社会关注的重点。砌体作为房建工程的核心构件, 其施工质量直接关系到建筑产品的整体性能, 包括结构安全、使用耐久性以及美观性, 然而, 由于多种因素的影响, 房建工程砌体施工过程中常常出现质量问题, 如材料不符合规范、施工技术不标准、监管力度不够等, 这些问题严重威胁到建筑的安全性和功能。因此, 系统探讨并改善房建工程砌体施工质量控制策略尤为重要。本文从材料选择、施工技术及管理监督三个方面对房建工程砌体施工质量控制进行分析和探讨, 旨在提供实际可行的解决策略, 为提升房建工程砌体施工的整体质量提供借鉴。

1 提升房建工程砌体施工质量的意义

1.1 保障建筑工程安全

在房建工程中, 砌体施工的质量是确保整个建筑物安全性的关键因素之一。高质量的砌体结构能够有效地承载各类荷载, 包括建筑本身的重量以及风压、雪荷载等自然力的作用。砌体结构的稳固性和耐久性决定了其在抵御地震、台风等自然灾害时的表现。良好的砌体施工应保证墙体的整体性和稳定性, 防止因温度变化、地基沉降等引起的裂缝和开裂。

此外, 优质的砌筑工艺还能提高建筑的抗震性能, 确保在极端天气条件下的结构完整性和安全性。通过采用合适的材料和施工技术, 砌体施工可以极大地降低建筑使用过程中潜在的结构风险, 从而保护人身安全和财产安全。

1.2 延长建筑物使用寿命

提升砌体施工质量对于延长建筑物的使用寿命具有至关重要的作用。砌体结构的耐久性强, 可以有效抵抗日常磨损及老化过程, 减少维护和修复的需求, 采用高品质的砌筑材料和先进的工艺技术, 能进一步提高墙体的密实度和强度, 增强其防水和防潮能力^[1]。良好的砌体施工不仅提升了建筑的物理防护性能, 还能有效减少环境因素对建筑的侵蚀, 如雨水渗透、冻融循环等自然破坏力的影响。此外, 砌体结构的稳定性降低了建筑物随时间变形或沉降的风险, 保持了其长期的结构完整和功能稳定。通过减少维修和改造的需求, 高质量的砌体施工为业主节省了大量的维护成本, 同时也减少了建筑更新的频率, 促进了资源的节约和可持续性发展。

1.3 提升建筑工程美观性和功能性

砌体施工的质量直接影响到建筑的美观性和功能性。精确和细致的砌筑工艺能够确保墙面的平整度和垂直度, 为后续的装饰和应用提供坚实和平滑的基础。均匀一致且精细处理的墙体表面, 无疑会增强建筑外观的整体美感, 同时减少未来涂饰和装修中可能出现的问题。高质量的砌体还具备良好的隔音和保温性能, 有助于提升室内环境的舒适度和节能效果。在设计阶段将砌体的这些功能性因素考虑进去, 可以实现更好的居住体验和环境适应能力。此外, 通过创新的设计理念 and 施工技术的引入, 砌体结构可以提供更多的设计灵活性, 建筑师和设计师可以利用这种灵活性探索更多创造性的建筑解决方案, 打造既美观又实用, 既环保又经济的房建工程。

2 当前房建工程砌体施工的不足之处

2.1 材料质量问题

在当前房建工程砌体施工中,材料质量问题是一个普遍存在的问题,部分施工单位为了降低成本,选用质量不达标或假冒伪劣的砌筑材料,如强度不足的砖块、水泥质量不合格等,直接影响了砌体结构的整体质量和性能。另外,材料储存和运输过程中的管理不当,也可能导致材料性能下降或损坏,如水泥长期暴露在潮湿环境中会影响其凝结性能,砖块在运输过程中的碰撞可能造成破损。此外,一些施工单位对材料的进场检验不够严格,未能及时发现和剔除不合格材料,导致劣质材料混入施工过程,同时,材料配比的不合理也是一个常见问题,如砂浆配比不当会影响砌体的粘接强度和耐久性^[2]。这些材料质量问题不仅会降低砌体结构的强度和稳定性,还可能引发墙体开裂、脱落等安全隐患,严重影响建筑物的使用寿命和安全性能。

2.2 施工技术不规范

施工技术不规范是当前房建工程砌体施工中另一个突出的问题。一些施工单位对砌体施工技术规范的执行不够严格,存在操作不当或偷工减料的情况,如砌筑过程中未按要求进行墙体的垂直度和平整度控制,导致墙面不平整或倾斜,砂浆饱满度不足,特别是对墙体转角和接缝处的处理不当,会影响砌体结构的整体性和强度。此外,一些施工人员的专业技能水平不足,对新型砌筑技术和材料的应用缺乏了解和经验,无法保证施工质量的稳定性。在施工过程中,未能严格执行砌体灌浆、预留洞口、墙体加固等关键工序的技术要求,可能导致结构隐患。同时,一些施工单位忽视了气候因素对砌体施工的影响,在不适宜的天气条件下强行施工,影响了砌体的凝结和养护效果,这些技术规范的问题不仅会降低砌体结构的质量和性能,还可能引发安全隐患,影响建筑物的整体质量和使用安全。

2.3 监理和管理不到位

监理和管理不到位是当前房建工程砌体施工中存在的又一个问题。一些工程项目的监理工作流于形式,未能有效履行监督和管理职责,对施工过程中的关键环节和重点部位缺乏有效监控,未能及时发现和纠正施工中的质量问题。同时,一些监理人员的专业知识和经验不足,无法准确判断和处理施工中遇到的技术难题。此外,部分施工单位的内部管理体系不健全,

质量控制措施执行不到位。例如:未建立完善的质量责任制和奖惩机制,导致施工人员缺乏质量意识和责任感。施工现场管理混乱,材料堆放无序,设备维护不及时,影响施工效率和质量。另外,一些项目缺乏有效的质量检查和验收制度,对已完工的砌体结构未进行全面检测和评估,容易遗漏潜在的质量问题。同时,施工单位与业主、设计单位之间的沟通不畅,可能导致设计变更或施工要求未能及时传达和落实。这些监理和管理方面的不足不仅影响了砌体施工的质量控制,还可能导致工期延误、成本增加等问题,影响整个工程项目的顺利实施和最终质量。

3 房建工程砌体施工质量的控制策略

3.1 加强材料质量控制

材料质量是房建工程砌体施工的基石,直接影响整体工程的质量和安全性。为确保砌体施工质量,必须从源头抓起,严格控制材料质量。在材料选择方面,应严格遵守国家标准和设计要求,选用优质砌筑材料。建立完善的材料采购制度,优先考虑信誉良好、质量可靠的供应商,要求其提供详细的产品质量证明文件,这不仅能保证材料质量,还能提高采购效率,降低采购风险。材料进场检验是质量控制的重要环节。对进场的砖块、水泥、砂、石等原材料进行抽样检测,确保其强度、密度、含水率等各项指标符合规范要求^[3]。特殊材料或新型材料可邀请专业检测机构进行全面评估,以确保其性能满足施工需求。建立材料检验记录档案,实现全程可追溯,为后续质量控制提供依据。材料储存和管理同样至关重要。建立材料台账,实行分类存放,做好防潮、防雨等保护措施,定期检查材料质量状况,及时处理变质或损坏的材料,避免不合格材料进入施工环节,合理规划材料堆放区域,确保材料存放环境符合要求,防止因存储不当导致材料性能下降。在施工过程中,严格控制材料的配比和使用是保证砌体质量的关键,砂浆的配合比要根据设计要求和现场条件进行科学调配,确保其强度和易性满足施工需求。建立材料使用跟踪记录,实现全过程质量控制。定期对使用中的材料进行抽检,及时发现和解决问题。

3.2 优化施工工艺和技术

施工工艺和技术的优化是提升房建工程砌体施工质量的核心策略。随着建筑行业的快速发展,新型砌筑技术不断涌现,为质量提升提供了新的可能,积极推广先进的砌筑技术,如薄灰砌筑、干挂砌筑等新型

工艺,不仅能提高施工效率,还能显著提升砌体质量。这些新技术能有效减少砂浆用量,降低墙体自重,提高墙体的平整度和垂直度。精准测量是保证砌体质量的基础,采用先进的测量仪器和工具,如激光水平仪、电子垂直仪等,能大幅提高测量精度,确保墙体的垂直度和平整度达到设计要求。这不仅能提高施工质量,还能减少后期修补工作,节约时间和成本。施工人员的技能水平直接影响施工质量。定期组织专业技能培训和考核,增强工人的操作水平和质量意识^[4]。培训内容应包括理论知识和实操技能,涵盖新材料、新工艺的应用。可邀请行业专家进行现场指导,解决施工过程中遇到的技术难题,提高施工团队的整体技术水平。制定详细的施工方案和技术交底文件至关重要。明确各道工序的质量要求和操作规范,确保每个施工环节都有章可循。施工方案应考虑到工程特点和现场条件,制定针对性的施工策略。技术交底应全面细致,确保每个施工人员都充分理解施工要求和质量标准。在施工过程中,严格控制关键环节的质量。墙体的砌筑顺序、砂浆的饱满度、砖块的搭接方式等都是影响砌体质量的重要因素,应根据设计要求和规范标准,制定详细的操作规程,确保每个环节都得到有效控制。

3.3 强化现场管理和监督

现场管理和监督是确保房建工程砌体施工质量的重要保障。完善的质量管理体系是高效管理的基础,建立健全的质量责任制,明确各岗位的职责和权限,形成全员参与、全过程控制的质量管理格局,制定详细的质量控制计划,包括质量目标、控制措施、检查方法等内容,为现场管理提供明确指导。加大监督检查力度是质量控制的关键。派驻专职质量检查员,对施工过程进行全方位、全过程的监督,这些检查员应具备丰富的施工经验和专业知识,能够及时发现和纠正施工中的质量问题。建立定期巡查制度,通过日常巡查、专项检查等多种形式,全面掌握施工质量状况^[5]。对关键工序和重点部位的管控尤为重要。如墙体转角、门窗洞口等易出现质量问题的部位,应进行重点监督。制定专门的检查清单,明确检查重点和标准,确保这些关键部位的施工质量,同时,对于新工艺、新材料的应用,应加大监督力度,及时总结经验,优化施工方法。建立完善的质量检测和验收制度,是确保最终质量的重要手段。对已完工的砌体结构进行全面检测和评估,包括强度测试、平整度检查、垂直度测量等。制定详细的验收标准和流程,确保验收工作的科学性

和规范性。对于不合格项目,应制定明确的整改要求和验收标准,确保整改到位^[6]。推行信息化管理,利用先进技术手段提高管理效率。BIM技术的应用可实现施工过程的虚拟仿真,提前发现潜在问题。移动终端的使用能实现现场实时监控和数据采集,提高监督效率。建立质量管理信息平台,实现质量数据的实时分析和共享,为决策提供依据,加强与设计单位、业主方的沟通协调至关重要。定期组织协调会议,及时解决施工过程中遇到的问题和变更。建立快速响应机制,对于紧急问题能够及时处理,减少质量风险。同时,加强与监理单位的合作,充分发挥监理的第三方监督作用,共同把控施工质量。建立有效的激励机制,调动施工人员的积极性。对质量表现优异的施工团队和个人给予奖励,可以是物质奖励,也可以是荣誉表彰,这不仅能增强施工人员的质量意识和责任感,还能营造重视质量的良好氛围^[7]。

4 结束语

砌体施工质量是影响房建工程质量的关键因素之一,通过严格筛选材料、采用现代化施工技术及强化现场管理,可以有效地提升砌体施工的整体质量。这不仅能够保障建筑的结构安全与功能稳定,还能延长建筑的使用寿命,提高建筑的经济和社会价值。未来,随着技术的进一步发展和管理方法的不断优化,砌体施工质量的控制将更加科学和高效,期待通过不断的技术创新和严格的质量管理,推动房建工程砌体施工质量向更高标准迈进,为城市建设贡献更多高质量的建筑作品。

参考文献:

- [1] 王新星. 房建施工中墙面裂缝和混凝土裂缝的预防对策研究[J]. 中国建筑金属结构, 2022(10):103-105.
- [2] 何健. 房建工程中墙体砌筑施工技术分析[J]. 房地产世界, 2022(11):129-131.
- [3] 蔡信团. 房屋建筑工程中填充墙砌体工程的施工技术浅析[J]. 四川水泥, 2021(11):113-114.
- [4] 邓攀. 房建施工中外墙防渗漏施工分析[J]. 四川建材, 2020, 46(04):102-103.
- [5] 孙洪宾, 聂亚男. 房建施工中常见质量问题研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(05):83-84.
- [6] 陈冬生. 某墙体砌筑工程施工关键技术[J]. 城市住宅, 2021(08):221-222.
- [7] 同[2].

市政给排水管道施工质量控制措施研究

王 健¹, 徐淑鹏²

(1. 济南水务集团, 山东 济南 250000;

2. 济南普利给水工程设计院有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要 市政给排水系统作为城市水循环代谢的关键基础设施, 其管道工程施工质量直接关系到水资源利用效率和城市防洪排涝安全水平。目前, 在施工过程中普遍存在测量误差大、沟槽开挖欠标准、管道安装有缺陷、闭水试验过程不严格等诸多问题。本文针对上述问题提出了高精度的测量控制、规范化的沟槽开挖、严格的管道安装过程、标准化的闭水试验和回填土的质量管理, 以期为提高施工质量、确保管道系统的长期平稳运行提供借鉴。

关键词 市政工程; 给排水管道施工; 测量放线; 沟槽开挖; 管道安装

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.032

0 引言

市政工程给排水管道是城市基础设施中非常重要的部分, 其建设质量直接影响着城市水资源是否能够得到高效利用、水环境是否能够得到保护和居民生活质量是否能够得到提高。但目前给排水管道在建设过程中所暴露出来的很多问题, 严重地制约着工程质量的提高。针对这一情况, 本文对市政工程中给排水管道建设质量控制进行深入探究, 并且提出相应的解决策略, 以期能够对促进我国市政工程中给排水管道建设质量的提高提供有益参考。

1 市政工程给排水管道施工的意义

1.1 提高城市水资源综合利用效率

给排水管道系统是城市水循环过程中的“血管”。给排水管道系统建设质量的好坏直接关系到水资源的配置和利用效率。优质的给排水管道施工可以保证供水系统运行的稳定性、高效性, 降低由于管道破损、漏水等原因导致的水资源浪费; 与此同时, 良好的排水系统又可以有效地对城市污水及雨水进行收集、处理、排放, 预防城市内涝灾害的发生, 确保城市水环境健康安全^[1]。因此, 以提升城市水资源综合利用效率为出发点, 强化市政工程给排水管道工程建设质量控制既是实现城市可持续发展所需, 更是提高城市居民生活质量, 推动经济社会和谐发展的一项重要措施。

1.2 增强城市水污染防治与防洪排涝能力

在城市化进程中, 人口密度不断加大、工业活动规模不断扩大, 城市水体所承受的污染压力也日益加大, 有效的给排水系统是抵抗水污染、保持水生态平衡的首要防线。经过科学规划、精细施工后, 给排水

管道可以更加高效地对生活污水和工业废水进行收集、运输、处理, 降低污染物向自然水体中直接排放的危险, 使城市水污染防治水平得到显著提高^[2]。面对如暴雨导致的城市内涝这样频繁出现的极端天气事件, 完备的给排水管道网络成为城市排水系统的关键部分, 它布局合理、排水能力足够、维护状态良好是保证暴雨期间城市快速排水和缓解内涝的关键^[3]。

2 市政工程给排水管道施工现存问题分析

2.1 测量放线误差导致管道定位偏差

在管道施工中, 测量放线被视为最关键的步骤, 它的精确度会直接影响到后续的沟槽挖掘和管道的安装等步骤的基准精确度。但在实际作业中, 由于施工场地地形复杂、测量仪器的精度有限、人为操作的疏忽和环境因素的干扰等诸多因素的叠加作用, 测量放线过程很容易产生累积误差^[4]。该误差将直接传递到管道的定位环节中, 造成管道轴线的偏移和坡度的失准, 继而诱发管道接口的错位和水流的不畅乃至逆流, 不但加大后期维护的难度和费用, 而且还会导致区域排水系统的功能故障, 危及城市防洪排涝安全和水环境质量, 突出测量放线工序标准化和专业化管理的迫切性。

2.2 沟槽开挖不规范引发边坡塌陷或基底扰动

规范执行沟槽开挖需要考虑地质条件、水文环境、开挖深度、支护方案等多维参数的影响。目前在施工环节中往往由于下列因素造成系统性风险: 一是地质勘察脱离方案, 对于软土、砂砾层、富水地层这类特殊地质没有进行有针对性的支护设计, 只凭经验套用普通的坡比系数使边坡的稳定性缺乏储备; 二是由于机械挖掘方法过于简单, 没有严格按照“分层分段,

对称平衡”的原则进行,经常出现超挖和欠挖的情况,特别是在接近坡脚的区域,不规范地使用“掏根式”挖掘,导致了边坡土壤的抗剪强度急剧下降;三是支护措施落后或无效,钢板桩和土钉墙支护结构后续不及时或连接节点不牢固,再加上降水和排水措施欠缺,地下水渗流诱发孔隙水压力改变,加剧了土体软化^[5]。

2.3 管道安装工艺缺陷导致渗漏或位移

管道安装过程中的工艺质量出现了接口处理不当、承插式橡胶圈的安装没有按照“洁净—润滑—顶推”的标准过程进行等问题,造成橡胶圈变形、挤压变形或者偏心错位,减弱了密封界面的压缩和回弹性;热熔对接焊缝在加热温度、压力、冷却时间参数不可控的情况下容易形成虚焊和熔瘤等应力集中缺陷;刚性接口水泥砂浆的比例不合适或者振捣不够密实都会由于硬化收缩而导致贯穿性裂缝的出现。管道轴线控制出现故障,人工组对于没有使用激光经纬仪这种高精度校准设备的管道,只凭经验目测进行调节,造成接口错口量过大、诱发生水流紊动冲刷损坏;管道悬空铺设于沟槽中或垫层不够厚,在自重和覆土荷载的作用下发生不均匀的沉降而形成“S”型挠曲或者界面脱节。

2.4 闭水试验流程不规范影响防水性能验证

闭水试验流程实施失真的问题主要集中在如下几个流程节点上:一是试验准备阶段存在瑕疵,没有做好管道接口和检查井井壁关键位置的预处理工作,造成渗漏通道受到临时性堵塞物的遮挡;注水前没有关闭预留支管或者没有设置止水盲板形成“旁路通道”,造成试验水体渗漏;二是实验实施阶段的失准和注水速率不符合“分级慢速加载”,由于水锤效应对接口密封结构造成的影响;如果恒压持续时间低于规定的 24 小时($DN \leq 1\ 000\text{ mm}$)或 48 小时($DN > 1\ 000\text{ mm}$),会导致潜在的渗漏缺陷没有得到充分的体现;水位观测频次不足(如每日仅测 1 次),无法捕捉瞬时渗漏率波动。

3 市政工程给排水管道施工质量控制措施

3.1 施工测量精度控制

施工测量精度控制作为确保项目整体质量和运行效能发挥的核心因素,随着项目规模的不断扩大和技术要求的不断提高,高精度测量的实现需要多维度配合进行:一方面要优先选择像全站仪、GPS 定位系统这样高精度和高稳定性的测量仪器以及建设严格的校准和维护制度,通过定期校准,部件更换和日常的清洗干燥保养,并配合利用档案记录,保证仪器的长时间准确工作;另一方面重点对测量控制网进行改进,由加密控制点,提高控制网精度向加强稳定性综合发力,对控制点进行合理布设和编号标识,利用精密导线测

量, GPS 静态相对定位的先进工艺,在建立防护设施的前提下,定期进行检测和维修,抵抗自然和人为因素的干扰。另外,人员素质的提升也是必不可少的,通过专业技能的培训、规范操作、质量控制流程的制定、加强团队协作的交流等方式,从各个方面提升测量人员的专业素养和操作能力。同时,积极引进信息化技术,在 BIM 技术的支持下实现测量数据的实时共享和可视化分析、GIS 技术用于空间分析、建模辅助决策等,利用无人机测量技术的高效性和灵活性的优点来获得丰富的数据源,并通过实时传输和处理来增强测量的效率和精度,进而建立覆盖仪器设备,控制网络、人员素质和信息化技术全方位、多层次的精度控制体系为管道工程的施工提供坚实的保证。

3.2 管道沟槽开挖质量控制

在对管道工程沟槽开挖进行质量控制过程中,需要建设全周期、精细化质量管理体系,该体系涵盖开挖前期准备、开挖期间监测、开挖后期验收三个核心环节,以保证施工安全和质量双重合格。在开挖前,需要根据详细的地质勘察报告、施工图纸、现场的实际情况对开挖方案进行科学的规划,确定开挖范围、深度、坡度等重要参数,有针对性地制定分层开挖和阶梯式放坡的技术措施,完成现场清理、支护、排水的风险控制。对于软土地基,高水位区域或者地质条件复杂的地区,预先布置钢板桩和水泥搅拌桩支护结构以及降水井和排水沟,有效地防止塌方和滑坡安全事故的发生。同时组织施工人员开展技术交底和安全培训,增强作业人员控制关键参数和安全应急响应能力。开挖时需要依靠激光测距仪、全站仪、无人机巡查等先进的监测设备对沟槽尺寸精度、边坡稳定性、地下水位变化情况进行实时和动态的监测。采用数值模拟和数据分析相结合的方法,对施工参数进行动态调整,使其能够满足复杂地质条件的要求,保证开挖质量满足设计要求。同时严格按照安全操作规程进行施工,强化现场人员管理和监督,杜绝超挖、欠挖、支护结构失效质量问题。开挖后需要按照设计的要求,对槽底的平整度、坡度、宽度以及支护结构的稳定性等进行严格的验收。对于软土地基或者高水位区域采用换填和注浆加固的方法来保证槽底承载力达到管道安装的要求。通过全周期、精细化的质量管控,为后续管道安装提供安全、稳定的作业环境,保障管道工程整体质量与运行安全。

3.3 管道埋设安装工艺控制

市政给排水管道施工复杂系统中管道埋设与安装过程的控制是工程质量确定的关键环节之一。这一流

程需要施工团队既要按照严格的工艺标准进行施工,又要根据现场情况进行灵活调整,才能保证管道系统能够长期平稳地运行。一是管道材料选择及预处理非常关键,要根据设计要求选择合格管材,安装前要经过充分质量检验,包括外观检查、尺寸测量以及为消除潜在缺陷而进行的必要性能测试。二是管道对接安装过程中,要采取准确的定位技术和牢固的支撑措施来保证管道轴线顺直、界面紧密,避免出现错位或者渗漏等情况而造成后期养护困难。对特殊地质条件或者复杂的施工环境也需要有专门的施工方案来满足地基沉降或者温度变化所产生的效应,例如使用柔性接口和加装补偿器。三是在施工过程中还应加强现场监督和记录,追溯各道工序的质量,保证追溯性和责任到人。通过该系列精细化工艺控制措施不仅能够显著提高管道埋设安装质量水平,而且能够有效地延长管道使用寿命和减少后期运维成本,为城市给排水系统安全、高效地运行打下坚实的基础。

3.4 闭水试验标准与实施

闭水试验是市政工程给排水管道系统质量验收工作中的核心步骤,它的规范和执行直接影响着管道能否长期平稳运行和城市水资源能否得到合理开发利用。为保证测试的规范性和有效性,必须严格按照国家和地方有关规范进行测试,并对测试水压、持续时间、观测指标等特定参数进行明确规定,使得试验条件和实际运行工况高度一致,从而为管道系统性能评价提供真实可信的依据。执行时精细的预检查是关键。需要对管道做全面的检测,主要包括接口密封性、管体完整性以及周围环境条件,消除一切可能存在的漏水隐患以保证测试工作的顺利开展。利用分段封堵和逐步加压等手段对管道各段进行单独或者组合检测,并通过对检测条件的精确控制,可以更加准确地确定渗漏点位置,从而为后续的整改工作提供清晰的方向。同时采用高精度水位计和压力传感器等先进的监测设备实时记录 and 数据分析测试过程。这些装置能准确地捕捉到水位变化和压力波动等重要参数,从而为测试结果的准确性和可靠性提供强有力的保证。对试验数据进行深入分析,能够及时发现可能存在的问题,从而为管道系统优化和完善提供科学的依据。对测试过程中出现的问题须立即纠正至通过复验。另外,闭水试验记录和报告要详细齐全,包括试验条件、试验过程、试验结果,以便对后续工程进行验收和运维管理。严格按照闭水试验标准和规范执行,能够有效地促进市政工程给排水管道系统整体品质的提高,保证其能

够长期平稳地运行,有利于城市水资源合理利用和环境保护。

3.5 回填土施工质量管理

回填土既要还原地面原貌,又要对管道进行均匀而充分的侧向支撑可避免不均匀沉降造成管道的变形或损坏。所以,回填土的施工质量管理要重点关注材料选择、分层夯实、质量检测这三个核心要素。在选材时,需要根据工程地质条件和管道材质科学地选择合适的回填土,并严格控制土料含水量和粒径分布,尽量避免采用腐殖土和淤泥质土这些不良土质。在分层夯实的过程中,坚持“分层填筑、层层夯实”的策略,并根据管道的埋深和土壤的特性来确定合适的分层厚度和压实标准,通过机械和人工两种夯实方式保证各层回填土满足设计所需密实度。同时加强现场监督和过程控制,实时监控和调整回填土分层厚度、压实遍数、含水量等主要指标。在质量检测中,要综合采用环刀法和灌砂法两种现场检测手段并结合室内测试数据,综合评价回填土压实度和承载力等性能指标,以保证回填土品质符合工程安全和使用要求。

4 结束语

市政工程中给排水管道的建设质量控制是一项系统性的工程,涉及多个环节。本文对目前存在的施工问题进行剖析,并提出诸多质量控制措施,主要涉及施工测量精度、沟槽开挖、管道埋设与安装、闭水试验以及回填土的施工质量管理。施工单位需要有责任心和专业素养,建立良好的质量管理体系和监督机制,保证工序规范的落实。通过精细管理、标准化操作、加强监督等措施,可以提高施工质量,确保管道系统的平稳运行,为城市的可持续发展做出贡献。未来,技术和管理理念上的革新将会把质量控制推向一个新的台阶。

参考文献:

- [1] 洪安娥. 市政工程给排水管道顶管施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2024, 09(19): 49-51.
- [2] 李亚昆, 王雪瑶. 市政工程给排水管道施工技术要点探析[J]. 百科论坛电子杂志, 2024(07): 91-93.
- [3] 陈子嘉. 在市政工程给排水管道施工中质量的控制对策[J]. 城市情报, 2023(09): 151-153.
- [4] 李赛鹏. 市政给排水施工的顶管技术应用分析[J]. 建筑技术研究, 2023, 06(02): 37-39.
- [5] 孙玉娟. 市政工程给排水管道施工中质量的控制[J]. 城镇建设, 2024(22): 76-78.

市政道路桥梁项目前期管理重点环节分析

何 婷

(桂林市市政工程管理处, 广西 桂林 541000)

摘 要 市政道路桥梁作为城市基础设施的核心组成部分, 其建设质量与效率直接关系到城市交通运行和民生保障。前期管理作为项目实施的首要环节, 涵盖了从项目策划到施工前的一系列关键工作, 对项目整体目标的实现具有决定性影响。本文结合实际工程经验, 从项目策划与决策、勘察设计管理、征地拆迁协调、招投标管理及前期手续办理等维度, 分析市政道路桥梁项目前期管理的重点环节及各环节的实施要点与难点, 探讨如何通过科学规范的管理手段规避风险、提升效率, 以期同类项目提供实践参考。

关键词 市政道路桥梁; 前期管理; 项目策划; 勘察设计; 征地拆迁

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.033

0 引言

市政道路桥梁作为城市交通网络的关键支撑, 其建设质量与效率直接影响城市运行效能与民生福祉。此类项目具有投资规模大、建设周期长、利益关联方多等特征, 前期管理涵盖策划决策、勘察设计、征拆协调等核心环节, 对项目整体目标的实现起到基础性作用。当前, 部分项目因前期管理粗放导致工期延误、成本超支等问题频发, 凸显出强化前期管理研究的必要性。本文结合工程实践, 梳理市政道路桥梁项目前期管理的重点环节, 剖析实施要点与风险防控策略, 以期同类项目提供可借鉴的管理路径。

1 市政道路桥梁项目策划与决策: 明确目标与路径

1.1 需求调研与功能定位

项目策划的首要任务是精准把握城市发展需求与民生痛点。这需要管理团队深入调研区域交通现状, 包括现有路网承载力、高峰时段拥堵节点、周边地块开发规划等, 同时结合城市总体规划中对交通枢纽、产业布局、生态廊道的布局要求, 明确项目的功能定位^[1]。例如: 2021 年启动的某市环城南路快速化改造工程, 前期团队通过半年时间走访沿线街道、企业及居民, 发现该道路不仅承担过境交通功能, 更是沿线多个新建小区的主要出行通道, 且毗邻城市湿地公园。最终在方案中增设了隔音屏障和景观步道, 既解决了交通拥堵问题, 又兼顾了生态保护与居民生活需求。

1.2 可行性研究的深度把控

可行性研究是项目决策的核心依据, 需涵盖技术、经济、环境、社会等多维度分析。在技术层面, 需论

证道路等级、桥梁结构形式、地质条件适应性等; 在经济层面, 需精准估算建安成本、征地拆迁费用及运营维护成本; 在环境层面, 需评估施工期扬尘噪声影响及运营期碳排放等; 在社会层面, 需预判项目对周边居民出行、商业网点的影响^[2]。例如: 某县级市在推进跨河桥梁项目时, 初期可行性研究仅侧重技术方案, 未充分评估河道航运需求与防洪标准, 导致初步设计方案被水利部门否决, 重新论证耗时 3 个月, 延误了项目推进进度。这一案例凸显了可行性研究需兼顾多方专业意见, 避免单一维度决策。

1.3 方案比选的系统性思维

在方案设计阶段, 需引入多方案比选机制, 从经济性、功能性、施工便利性及长远适应性等角度综合评判。例如: 某城市在老城区桥梁改造中, 针对“拆除重建”与“加固提升”两个方案, 前期团队组织交通、文物、规划等领域专家进行论证: 拆除重建方案虽能彻底解决桥梁荷载不足问题, 但需中断交通 12 个月, 影响周边 3 所学校、5 个社区的出行; 加固提升方案可缩短工期至 6 个月, 且保留桥梁历史风貌, 但需增加结构监测设备投入。最终结合老城保护规划与民生需求, 选择了加固提升方案, 既节约了拆迁成本, 又保护了城市记忆。

2 市政道路桥梁项目勘察设计管理: 筑牢技术与质量根基

勘察设计的灵魂, 其科学性与严谨性直接决定工程结构安全、建设成本及全周期运营效果。

2.1 勘察环节的精准性控制

工程勘察作为设计的首要依据，其成果质量直接影响结构安全性与造价合理性。在实际操作中，需重点管控勘察布点密度、钻探深度及地质样品分析。例如：某城市主干道建设期间，勘察单位按规范允许的最大间距200米布置勘探点，未能发现局部岩溶地质问题，导致桥梁桩基设计深度不足。施工过程中突发塌孔事故，不得不调整桩基方案，额外增加成本约500万元。此次教训后，当地针对地质条件复杂区域，将勘察布点间距收紧至150米以内，并建立第三方勘察成果评审制度，要求勘察单位同步提交钻探过程影像资料与土壤样品检测报告，从流程上杜绝因勘察疏漏导致的设计偏差，显著提升了地质勘察的可靠性。

2.2 设计方案的优化与落地衔接

设计阶段需在技术标准与实际需求间寻求平衡，避免脱离施工条件的“过度设计”或忽视长期运维的“设计不足”。例如：某桥梁项目初步设计时采用新型斜拉索结构，虽满足规范要求，但未充分考虑当地冬季频繁除冰作业对拉索防腐层的侵蚀作用。桥梁运营三年后，拉索防腐层出现大面积破损，不得不提前进行维护，增加了后期运营成本。这一案例表明，设计评审需引入施工单位与运维部门共同参与，从材料耐久性、施工工艺可行性及长期养护需求等多角度评估方案合理性。此外，针对市政项目周边环境复杂多变的特点，设计应预留动态调整空间。例如：某市地铁出口衔接道路设计中，考虑到后期商业开发可能带来的人流增长，在人行道宽度、交叉口渠化方案中采用模块化设计，为远期拓宽改造预留接口，避免了因规划调整导致的重复建设问题，实现了设计方案与城市发展需求的有机衔接^[3]。

2.3 多专业协同的精细化管理

市政项目涉及交通、排水、电力、通信等多个专业，各专业设计若缺乏协同，极易引发管线冲突、标高矛盾等问题。例如：某新区主干道施工时，因电力管沟与雨水管网设计标高不匹配，部分路段管线无法按图纸埋设，被迫临时调整路由，延误了工程进度，还对周边地块开发造成影响。针对此类问题，项目团队在后续管理中引入BIM技术，通过建立三维模型对各专业管线进行综合碰撞检查，提前发现并解决了12处设计冲突。同时，建立跨专业定期例会制度，要求交通、市政、管线等各设计单位同步更新图纸，实时协调排水坡度、管涵净空、管线走向等技术参数，确保各专业设计在空间布局与技术标准上相互匹配。这种“技术预判+

动态协同”的管理模式，有效避免了施工阶段因专业冲突导致的返工浪费，保障了设计方案的高效落地。

3 市政道路桥梁项目征地拆迁与协调：破解民生与进度难题

征地拆迁与协调工作是市政道路桥梁项目前期管理的难点，既涉及法律政策的严格执行，又关乎群众切身利益与多方诉求平衡。

3.1 政策执行的规范性与灵活性

征地拆迁必须以《土地管理法》《国有土地上房屋征收与补偿条例》等法律法规为准则，确保补偿标准统一、程序透明，同时针对具体问题灵活施策^[4]。例如：某城中村改造配套道路项目中，部分被拆迁户因对补偿标准理解偏差拒绝签约，导致工程推进受阻。项目团队采取双轨策略：一方面邀请政府法制部门召开政策解读会，公示同区域同类项目补偿方案，以“案例对比+条文解析”消除群众疑虑；另一方面成立专项工作组，针对低保家庭、高龄住户等特殊群体，协调社区提供临时安置住房，对接用工单位提供技能培训与就业岗位，将政策刚性与人文关怀相结合。经过3个月持续沟通，大多数住户完成签约，为项目按期开工创造了条件。这表明，规范执行政策是底线，而精准回应个体合理诉求、解决实际困难，是化解矛盾的关键。

3.2 利益相关方的沟通机制建设

市政项目往往涉及居民、企业、管线产权单位、行业主管部门等多方利益，需建立分层分类的沟通协调机制。例如：在某跨铁路桥梁工程中，铁路运营部门担忧施工影响线路安全，沿线工厂顾虑货物运输通道中断，周边居民则关注施工期间出行便利，各方对交通导改方案分歧显著。项目团队采用“现场踏勘+专题协商+方案公示”三步法：首先组织各方代表实地考察施工区域，直观了解工程影响范围；随后召开6次专项协调会，围绕铁路安全防护标准、工厂运输时段、居民便道走向等细节逐一研讨，形成“分阶段导改+临时便桥”方案——施工期间保留工厂每日早间3小时物流通道，为居民设置防滑降噪的临时步行桥，铁路部门派技术人员全程监督涉铁施工。通过持续公开工程进展与调整方案，各方从“对立质疑”转为“参与共建”，施工期间未发生一起群体投诉事件，保障了工程与民生需求的平衡。

3.3 管线迁改的前瞻性统筹

管线迁改涉及电力、通信、燃气、供水等多个产权单位，因专业壁垒与协调机制缺失，常成为工期延误的“痛点”。例如：某城市快速路建设初期，8家管

线单位各自为政,施工顺序混乱导致部分路段反复开挖,迁改进度严重滞后。项目团队随即建立“清单化管理+动态调度”机制:一是制定《管线迁改专项台账》,明确每处管线的产权单位、迁改技术标准、时间节点及责任人,同步标注与主体工程的交叉部位;二是每周召开跨单位调度会,协调吊车、管沟开挖等共享资源,解决不同管线埋设标高冲突、路由重叠等问题^[5]。如在处理高压电缆与天然气管道并行迁改时,通过优化路由方案,避免了原设计中两者间距不足的安全隐患,为主体工程施工争取了宝贵时间。

4 招投标与前期手续:规范程序与风险防控

招投标与前期手续办理是市政项目从前期筹备转入实施阶段的关键枢纽,既需严守法律法规确保程序合规,又要通过精细化管理防范履约风险与审批梗阻。

4.1 招标文件的针对性编制

招标文件是招投标活动的“灵魂”,需紧密贴合项目技术特性与实施需求,避免“模板化”导致的供需脱节。例如:某城市跨江桥梁工程招标时,针对主桥采用的钢箱梁悬拼工艺,在资格条件中明确要求投标人具备 3 项以上大跨度桥梁施工业绩、自有步履式吊装机设备,且需配备桥梁结构健康监测技术团队。这一设置精准筛除了不具备专项能力的企业,最终中标的施工单位凭借成熟的吊装工艺和智能化监测手段,提前完成主桥合龙,避免了因技术能力不足导致的工期延误。同时,招标文件在合同条款中细化了地质勘察数据偏差超一定范围时的调价机制,以及因文物发掘、环保政策调整等不可抗力导致的工期顺延规则,将地质突变、政策变动等潜在风险纳入契约框架,为后期可能出现的争议提供了明确的解决依据,从源头减少了合同纠纷隐患。

4.2 投标人资格审查的严格性

资格审查不能局限于资质证书的“纸面审核”,需构建“资料初审+实地核验+信用评估”的立体化审查体系。例如:某市政部门在主干道改造项目招标中,发现某投标企业虽持有市政公用工程施工总承包一级资质,但通过实地考察其在建的另一桥梁项目,发现存在混凝土浇筑振捣不密实、安全防护措施不到位等严重质量问题,经综合评估后取消了该企业的投标资格。此后,当地建立了“线上平台核查+现场实地踏勘”的双轨审查机制:一方面,通过建筑市场监管平台查询企业历史履约记录、失信行为等信用信息;另一方面,组织专家团队实地考察在建项目的质量管理体系、人员到位情况及施工工艺规范程度,要

求投标企业提供关键岗位人员近半年的社保缴纳证明,从源头上杜绝“挂靠”“转包”等违规行为。这种动态化、立体化的审查模式有效提升了中标单位的履约能力,为项目施工质量与安全奠定了坚实的基础。

4.3 前期审批手续的流程优化

前期审批涉及发改、规划、环保、住建等多个部门,流程繁琐且周期较长,需通过“清单管理+主动沟通+政策活用”提升办理效率。例如:某开发区在推进产业园区配套道路建设时,针对项目建议书批复、规划选址许可、环境影响评价、施工图审查等 10 余项审批事项,制定了详细的《审批手续进度清单》,明确每个环节的责任人和材料清单,安排专人每日跟踪各部门审批系统进度。当环评审批中出现拟建道路与生态保护红线部分重叠的问题时,项目团队提前与自然资源部门沟通,同步委托专业机构开展生态影响专题论证,补充提交了详细的红线调整方案和生态补偿措施,在评审会上一一次性通过审核,将原本需要 60 天的审批周期缩短至 20 天。此外,随着“放管服”改革的深入推进,多地推行“多规合一”审批平台和“并联审批”模式,管理者需及时掌握政策动态,积极利用数字化手段提升效率。

5 结束语

市政道路桥梁项目前期管理是一项系统性工程,涉及政策法规、技术标准、民生协调等多个领域。通过对项目策划、勘察设计、征地拆迁、招投标及手续办理等重点环节的分析,结合实际案例揭示了各环节的管理要点与潜在风险。实践证明,前期管理的核心在于“精准识别需求、科学论证方案、动态协调资源”。未来,随着城市化进入存量更新阶段,前期管理还需进一步关注低碳技术应用、智慧交通融合及全生命周期管理理念的落地,通过持续优化管理流程、提升专业协同能力,为市政工程的高质量建设奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 陶刚.市政工程项目进度管理有效措施研究[J].工程技术研究,2024,09(24):127-129.
- [2] 程晓鸿.浅析市政道路桥梁工程质量管理[J].产品可靠性报告,2023(10):110-112.
- [3] 孟军霞.市政道路工程质量监管研究[J].居舍,2022(21):132-135.
- [4] 王松林.市政道路桥梁施工质量问题及预防对策[J].城市建设理论研究(电子版),2023(09):97-99.
- [5] 李运魏.分析市政道路桥梁工程施工管理[J].中国住宅设施,2023(04):79-81.

桥梁施工中的信息化管理问题与解决路径

储新天

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 当前桥梁施工信息化管理面临技术标准碎片化、数据共享壁垒突出、人员数字化能力不足等核心问题, 本文针对性地提出三方面解决路径: 建立覆盖设计、施工、运维全周期的 BIM 标准体系, 运用联盟链技术构建可信数据共享平台, 重构高校课程与企业培训体系以培养复合型人才。实施层面建议采取阶梯式政策推进、弹性投资模式及第三方评估机制等保障措施。本文旨在为破解桥梁工程数据孤岛、提升协同效率提供可参考方案, 进而推动智能建造在重大基础设施项目的落地。

关键词 信息化管理; BIM 软件; 数据共享; 智能合约; 数字化转型

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.034

0 引言

新一轮科技革命和产业变革深入发展, 数字技术与基础设施建设加速融合。桥梁工程作为国家重大基础设施的重要组成部分, 正面临信息化转型的关键机遇期。随着 BIM、物联网、数字孪生等新一代信息技术在工程领域的广泛应用, 传统施工管理模式已难以适应高质量发展的新要求。在实践中, 跨江跨海等大型桥梁项目普遍存在数据标准不统一、系统兼容性差、专业人才短缺等突出问题, 严重制约了信息化效能的充分发挥。以某长江大桥项目为例, 设计单位与施工单位采用不同的数据标准, 导致工程信息传递效率降低 30% 以上。类似案例表明, 推进桥梁施工信息化建设, 不仅需要解决技术层面的标准化问题, 更需构建多方协同的管理机制。特别是在当前新型基础设施建设加快推进的背景下, 提升桥梁工程数字化水平对于保障工程质量、优化施工流程、降低安全风险具有重要的现实意义。

1 桥梁施工中的信息化管理问题

1.1 技术标准和平台建设缺乏统一性

桥梁施工信息化管理的核心障碍在于技术标准与平台架构的碎片化发展。不同施工阶段、参建单位以及设备供应商采用差异化的数据接口与通信协议, 导致测量数据、进度报表与质量检测结果无法跨系统流通。例如: 某项目采用的 BIM 建模软件与监理单位的进度管理系统存在版本兼容问题, 设计变更信息需经人工转换才能同步更新, 这种标准割裂直接造成工期延误与成本增加。更深层的问题在于行业缺乏强制性

的数据交互规范, 地方政府主导的信息化平台往往独立于企业自建系统运行, 形成数据孤岛。技术标准不统一还体现在硬件设备层面, 传感器采集频率与精度参数缺乏行业共识, 同一标段内不同厂商的监测设备输出数据存在系统性偏差, 为结构健康评估埋下隐患。

1.2 信息系统数据共享与集成问题

数据壁垒不仅源于技术标准差异, 更与参建各方的利益博弈密切相关。施工企业将材料消耗、机械效率等运营数据视为商业机密, 拒绝接入业主主导的集成平台; 而设计院出于知识产权保护考虑, 常对 BIM 模型设置访问权限。这种数据割裂状态使得施工动态模拟、风险预警等需要多源数据支撑的高级应用难以实施^[1]。例如: 某跨江大桥项目曾尝试建立全生命周期数据中台, 却因钢结构分包商拒绝提供焊接工艺参数, 导致疲劳寿命分析模型精度下降 40%。数据集成困境还反映在时序维度上, 勘察阶段的地质数据采用二维坐标系, 而施工监控系统使用三维 GIS 平台, 坐标转换过程中的信息损耗使得岩土变形预警延迟。

1.3 项目管理人员的信息化素养不足

传统施工经验主导的决策模式与数字化工具之间存在认知断层。现场工程师更依赖图纸会审等传统方法, 对基于点云数据的逆向建模技术接受度低, 如某预制梁场因未及时将实测偏差导入数控机床, 造成批次构件安装错位。管理层面对数据驾驶舱等可视化工具时, 往往陷入两种极端: 过度依赖系统报警导致决策僵化; 质疑数据真实性回归经验判断。这种素养缺失在分包队伍中更为突出, 施工人员使用智能安全帽时频繁触发误报警, 根源在于未接受人机交互培训^[2]。

更深层的矛盾在于,高校土木工程课程仍以力学计算为核心,毕业生缺乏 SQL 查询、BIM 参数化设计等数字化技能,企业不得不投入额外成本进行二次培训。

2 桥梁施工信息化管理的优化策略

2.1 完善信息化管理技术平台

构建统一的技术架构是推进桥梁施工数字化转型的基础工程。行业主管部门应当牵头制定覆盖全生命周期的技术标准体系,重点规范 BIM 模型交付格式、物联网设备通信协议和工程数据编码规则。例如:某跨海大桥项目通过实施统一的数据交换标准,使设计单位的有限元分析模型能够直接用于施工仿真计算,减少中间格式转换导致的信息失真。平台架构设计需要采用微服务理念,将进度管理、质量验评、安全监控等功能模块解耦开发,通过标准化 API 接口实现灵活调用。针对施工现场复杂环境,在关键工点部署边缘计算节点,实现监测数据的本地化预处理,降低网络传输延迟对实时决策的影响。平台运维应当建立持续改进机制,每季度评估数字孪生、计算机视觉等新技术的适配性,确保系统保持技术领先优势。同步构建多层次安全防护体系,采用数据加密传输、细粒度权限控制和操作日志审计等技术手段,保障工程核心数据安全。

2.2 加强信息化管理系统的系统集成与共享

打破数据壁垒需要建立多方协同的信任机制。基于联盟链技术构建分布式数据共享平台,各参建方在权限管控框架下实现工程数据的可信流通。例如:某长江大桥项目采用智能合约自动触发混凝土强度达标后的进度款支付,将传统审批流程从数周缩短至实时完成。建设企业级数据中台,整合来自 BIM 设计模型、施工监测系统和材料检测报告等多源异构数据,通过抽取—转换—加载流程实现数据的标准化处理。建立工程全域坐标转换服务,解决地质勘察二维数据与施工监测三维空间基准不匹配的问题,实现岩土工程数据的无缝衔接^[3]。引入数字孪生技术,通过物联网设备实时采集的应力、变形数据驱动 BIM 模型动态更新,构建虚实交互的施工管控体系。建立数据质量评价指标,对入库数据的完整性、准确性和时效性进行量化考核,确保分析决策的可靠性。针对敏感数据设置分级访问权限,在保障商业机密的前提下促进数据价值挖掘。

2.3 提升桥梁施工管理人员的信息化能力

人才梯队建设需要构建系统化的培养体系。高等院校土木工程专业应当重构课程体系,增设 BIM 协同

设计、工程数据分析等数字化核心课程。例如:某交通类高校与头部施工企业共建智能建造实验室,学生在校期间即可掌握无人机航测、点云处理等实践技能。企业培训需要实施分层培养策略:项目决策层侧重数据驾驶舱解读与风险预警系统应用,技术管理层主攻结构计算软件与物联网平台运维,现场作业层强化智能终端操作与 AR 交底接收能力。建立岗位能力认证制度,将 BIM 工程师、智慧建造师等资质与职业晋升通道挂钩,同时设立数字化转型专项奖励基金。例如:在某预制装配式桥梁项目中,采用混合现实技术指导复杂节点施工,使工人操作失误率降低六成。定期举办数字化施工技能竞赛,通过虚拟建造挑战赛等形式促进技术创新。构建知识管理系统,将项目实践中积累的信息化应用经验转化为标准化作业指导书,实现组织能力的持续进化。建立校企联合培养基地,通过双导师制培养既懂土木工程又精通信息技术的复合型人才。

3 桥梁施工信息化管理的实施路径与保障措施

3.1 信息化管理政策与标准体系建设

推进桥梁工程数字化转型需要构建层次分明的制度框架。行业主管部门应当制定阶梯式发展目标,将信息化要求深度融入工程建设全过程。政策制定应当区分强制性与指导性条款,对基础数据采集、模型交付标准等核心环节设定硬性约束,为新技术应用预留适度弹性空间。例如:某跨流域特大桥项目管理中,业主单位将 BIM 技术应用深度与工程进度款支付直接挂钩,有效促使各参建方落实信息化建设要求^[4]。标准体系框架设计需要遵循“横向协同、纵向贯通”原则,横向覆盖设计、施工、运维各业务板块,纵向贯穿数据采集、传输、存储、应用全流程。重点建立工程数据分类编码体系,统一 BIM 模型构件命名规则和属性定义,规范物联网设备数据接口协议。针对标准执行过程中的技术争议,建立由行业专家组成的仲裁委员会,确保标准解释的权威性和一致性。实施标准符合性动态检查机制,将检查结果纳入企业信用评价体系。鼓励具有技术优势的龙头企业参与标准制定工作,推动先进实践经验转化为行业规范。建立标准动态维护机制,每年组织技术审查会议,及时吸纳新技术、新工艺的应用成果,保持标准的先进性和适用性。

3.2 桥梁施工信息化管理的投资与成本控制

科学配置信息化建设资金需要建立全生命周期价值评估模型。投资决策应当基于成本效益分析,统筹

考虑建设期投入与运营期收益的平衡关系。例如：某特大悬索桥项目采用净现值法测算表明，虽然信息化系统初期投入增加约8%，但通过提升施工效率和质量管控水平，可在项目周期内实现投资回报。实施分阶段渐进式投资策略，优先建设具有基础性、通用性的平台系统，再根据工程进展配置专业功能模块。推行“核心系统共建、专业模块分担”的投资模式，由建设单位主导基础平台投资，施工企业按需配置专业应用系统，避免重复建设和资源浪费^[5]。成本控制重点把握三个关键节点：在硬件采购环节采用服务租赁模式替代设备购置，降低初始资本支出；在软件开发环节优先选用开源技术框架，减少商业软件授权费用；在系统运维环节实施远程监控管理，优化人力资源配置。建立信息化预算弹性调整机制，预留不超过总预算15%的专项资金用于应对技术迭代需求。完善投资监管制度，对重大信息化采购项目严格执行招投标程序，并实施全过程跟踪审计。制定合理的成本分摊方案，明确各参建方的费用分担比例和知识产权归属，建立利益共享机制。

3.3 信息化管理项目实施的监督与评估机制

构建全过程质量管控体系是确保信息化建设成效的关键保障。监督机制设计应当覆盖项目全生命周期，形成计划—执行—检查—改进的闭环管理。项目启动阶段要求编制详细的实施方案，明确技术路线、进度计划和验收标准，并组织专家评审论证。例如：某长江大桥工程建立三级质量检查制度，通过施工单位日常自查、监理单位专项检查、业主单位突击检查构建立体监管网络。评估指标体系设计需要兼顾定量与定性维度，技术性能方面关注系统稳定性、数据准确率和响应时效等可量化指标；管理效益方面考察流程优化程度和协同效率提升等质性指标；经济价值方面测算投资回报率和成本节约额等财务指标^[6]。引入具有资质的第三方评估机构开展独立评价，采用系统压力测试、用户满意度调查、现场实地核验相结合的方式确保评估结果客观公正。建立问题整改闭环管理制度，对评估发现的重要问题实行挂牌督办，整改结果作为后续工程款支付的重要审核依据^[7]。构建行业知识管理平台，将各项目信息化建设经验转化为标准化工作指南，促进最佳实践推广应用。建立系统运维长效机制，明确技术升级责任主体和资金来源，确保信息化成果持续创造价值。定期编制行业发展报告，系统分析信息化建设成效与不足，为政策调整和技术演进提供决策参考^[8]。

4 结束语

桥梁施工信息化管理是提升工程质量和效率的关键。当前存在的标准碎片化、数据孤岛等问题，实质反映了传统管理模式与数字化需求的深层次矛盾。以特大桥梁项目管理实践为例，统一技术标准、构建信任机制、培养复合型人才构成解决方案的核心要素。行业主管部门应当发挥主导作用，推动强制性标准制定与实施，同时保持技术演进的政策弹性。施工企业需要转变观念，将信息化建设视为提升核心竞争力的战略投资。高校人才培养体系应当加快改革步伐，弥合工程技术与管理能力的断层。未来，桥梁工程信息化发展需要在保持技术创新活力的同时，更加注重制度建设与人才培养的系统性，最终实现设计、施工、运维全链条的数字化协同，这一转型过程将为基础设施建设领域的高质量发展注入持久动力。

参考文献：

- [1] 朱思明. 道路桥梁施工材料的信息化管理与应用[J]. 企业科技与发展, 2024(12):69-72.
- [2] 孙鹏飞. 机械设备在公路桥梁施工中的管理及应用探讨[J]. 模具制造, 2024, 24(11):237-239.
- [3] 林伟聪. 新型检测技术在公路桥梁施工中的应用[J]. 中华建设, 2023(10):140-142.
- [4] 李胜辉, 朱梦艳, 吕建伟, 等. 钱塘江强涌潮水域桥梁施工安全管理信息化应用[J]. 中国公路, 2022(15):97-99.
- [5] 王杰钊, 陈磊. 基于互联网+的桥梁施工安全内业管理信息化建设[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(07):323-325.
- [6] 许俊, 董书鸣, 张晟. 桥梁施工监控的信息化管理[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会, 重庆市建设委员会, 重庆市交通委员会. 第十七届全国桥梁学术会议论文集(下册). 同济大学桥梁工程系, 上海通济科技有限公司, 2006.
- [7] 李超, 朱宏伟, 姜子清, 等. 铁路桥梁病害信息化管理系统设计[J]. 铁路计算机应用, 2024, 33(04):39-44.
- [8] 李阿坦, 古洲扬, 张旭, 等. 基于BIM与3DGIS的长大线路桥梁全寿命期信息管理系统应用研究[C]//中国图学会土木工程图学分会, 《土木建筑工程信息技术》编辑部. 《第九届BIM技术国际交流会:BIM助力新城建》论文集. 安徽省交通控股集团有限公司, 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 中铁大桥科学研究院有限公司, 2022.

BIM 技术在工业厂房建设工程中的应用价值分析

李 宁

(济南市钢城区城市管理局, 山东 济南 271104)

摘 要 BIM 技术在建筑领域的广泛应用, 为现代建筑事业发展提供了可靠支持。在工业厂房建设工程中, 科学地应用 BIM 技术能够提高工业厂房建设工程的质量。BIM 技术应用到工业厂房的设计、施工以及运维环节, 能够提高工业厂房建设工程的精确性, 保障工业厂房施工顺利进行, 并且做好后期运维工作。为此, 本文基于 BIM 技术在工业厂房建设工程中的应用价值分析, 明确 BIM 技术在工业厂房建设工程中应用的基本要求, 同时从工业厂房设计、施工和运维环节阐述 BIM 技术的具体应用, 以期为提高工业厂房建设工程整体水平提供有益参考。

关键词 BIM 技术; 工业厂房建设工程; 设计环节; 施工环节; 运维环节

中图分类号: TP3; TU27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.035

0 引言

BIM 技术在工业厂房建设工程中发挥着重要作用, 通过 BIM 技术的运用, 可以实现工业厂房建设的可视化功能, 有效优化项目的设计方案。同时, BIM 技术还能为施工人员提供清晰的施工效果, 展示重点环节的施工要点和细节, 提高项目整体施工质量。此外, BIM 技术在工业厂房建设工程运维环节也起到了重要作用, 利用 BIM 技术能够提高后期建筑运维的精确化效果, 保障工业厂房的整体建设水平。

1 工业厂房建设工程中 BIM 技术的应用价值

对于工业厂房建设项目而言, BIM 技术在不同建设环节都发挥着重要作用, 以下从项目的设计、施工和后期运维环节阐述 BIM 技术的应用价值。

首先, 在工业厂房设计阶段引入 BIM 技术, 可以实现项目协同与精准优化。利用 BIM 技术完成工业厂房设计时, 可以搭建协同设计平台, 确保工业厂房的结构设计、建筑设计、电气设计以及给排水设计都能在同一模型下协同完成, 避免由于各个环节设计冲突而影响工业厂房建设工程的整体效果。设计师还可通过 BIM 模型对厂房空间布局、采光通风等进行可视化分析, 提前发现设计缺陷并优化调整, 例如在复杂管道排布中, 利用 BIM 技术进行碰撞检查, 可减少后期因设计失误导致的拆改, 大幅降低设计变更成本。

其次, 在工业厂房施工阶段利用 BIM 技术可以有效提升施工效率与质量管控水平。BIM 技术能够打造精准的施工进度模拟体系, 确保施工单位合理规划资源

分配方案, 制定科学的工业厂房施工计划, 避免造成施工延误等问题。此外, 施工人员借助 BIM 模型也能够明确不同复杂施工环节的施工工艺, 降低施工失误问题的出现概率。通过 BIM 管理系统, 可实时监控施工进度与成本, 当实际进度与计划出现偏差时, 能及时调整施工方案, 实现精细化管理, 保障施工过程高效有序。

最后, 在工业厂房运维阶段引入 BIM 技术可以降低后期运维成本。通过 BIM 模型的引入, 可以集成工业厂房建筑的全生命周期信息, 运维人员能够通过模型精准定位设备的位置, 同时快速获取设备维护记录和参数信息, 有效提升设备维护效率。此外, BIM 模型还可用于模拟应急预案, 在火灾、设备故障等突发情况下, 帮助运维人员快速制定应对策略, 减少事故损失。通过实时监控设备运行状态, 结合历史数据进行智能分析, 可以提前预判设备故障, 实现预防性维护, 延长设备使用寿命, 显著降低运维成本。

2 BIM 技术在工业厂房建设工程中应用的基本要求

与普通民用住宅建筑项目相比, 工业厂房建设工程的功能需求和结构复杂度较为显著, 因此在 BIM 技术应用中也有更高的要求。

2.1 模型精度与深度要求更为严格

对于普通民用建筑而言, 工业厂房建筑的功能相对多样化, 因此在空间布局上不能做到像民用建筑那样规整, 因此对 BIM 模型的精度要求较高, 尤其是在工业厂房的空间布局以及厂房内部设备安装定位要求

极高。以汽车制造企业的工业厂房建设为例,该厂房对于生产设备按照精度要求较高,在BIM技术运用上也要充分发挥BIM模型的高精度空间定位优势。

2.2 多专业协同配合难度更大

工业厂房建设在多专业协调配合上也存在较大难度,常规的民用建筑的建筑结构、电气以及给排水等专业协同较为简单,但工业厂房建设除了这些专业以外,还要具备良好的工业设计,与常规的专业协同难度较高^[1]。例如:在化工厂房建设过程中,管道走向必须和电气线路、结构布局以及设备位置相互协调,如果存在任何偏差都会对后续生产造成严重的影响。

2.3 数据集成与分析要求更高

常见的工业厂房在后期运维过程中,不但要做好建筑层面的设施管理,还要针对生产数据进行详细分析,做好生产流程的优化,确保工业生产活动有序进行。以钢铁企业的工业厂房为例,在建设过程中BIM模型集成了设备运行数据、环境检测数据以及能耗数据,借助大数据分析技术能够精准识别设备故障和可能存在的风险。因此,在BIM技术应用中也要注重提升数据集成和分析能力,与工业厂房的生产系统充分结合。

2.4 人员专业素养要求更全面

由于工业厂房建设比民用建筑项目更为复杂,因此对参与工业厂房建设的人员专业素养要求也越来越高。由于BIM技术在工业厂房中的应用十分复杂,建设人员不仅要具备基础的BIM技术相关知识,还要充分了解工业生产流程和工艺。在进行BIM工业厂房设计过程中,设计人员必须充分了解工业生产队建筑结构和空间的要求。

3 BIM技术在工业厂房建设工程各环节中的应用

3.1 BIM技术在工业厂房设计环节的应用

在常规的工业厂房建筑规划设计中,不同专业的设计人员依据二维图纸进行作业,造成大量沟通不畅,增加设计冲突。采用BIM技术能够产生信息交换频繁的协作式设计模式。在这种模式下由建筑师对工厂的大体结构进行建模,准确设定工厂的外貌、尺寸、空间布局,接下来由结构师根据建模对结构进行设计,放置梁、板、柱等主体,同时,水、暖、电等相关专业人员也可以将他们专业相关的管路、线缆集成到模型之中。例如:设计管路线缆时观察其与结构部分及其他相关管线之间的空间关系,提前预见到可能发生的问题,从而能够直接在模型内对设计策略加以修改。

工业厂房建筑对照明、通风及能耗等方面均有严

格要求。工程师可通过导入专用模拟器将BIM模型导入,使模型更为精确地模拟建筑的各项属性。比如用工厂位置、建筑方位、窗子的位置大小等变量设置环境参数,使用模拟器将计算出每个房间内的光线,再通过模拟数据更改窗户设计使室内任何地方都有充足的均匀光线。为了增加通风效率,需要确定产生热量与脏污的位置及安装风扇的大小,然后通过模拟器描述出空气流动的路径与速度,继续调整通风机的布局,使其形成室内良好的通风气流。

工业建筑设计涉及较多专业知识及众多细项技术,传统二维模式无法令普通人员直接理解设计思路。但BIM模型具有可视化特征,能够去除这种交流障碍,设计师可通过向业主、施工企业及相关各方进行三维建模演示自己的思路,并通过虚拟漫游、剖视的方式亲身体验厂房空间,清楚各个部位的功能分区;而在互动过程中,各方人士都可以针对该可视化模型提出建议或反馈,设计师即可根据此修改设计图纸,以达到各方要求。同时BIM模型具有全生命周期工程数据集成,成为数字化的设计成果数据库,因此设计师可通过其中轻易实现模型化管理,追踪每项修改的时间和责任人,保证设计成果的正确和完整^[2]。

3.2 BIM技术在工业厂房施工环节的应用

BIM技术在工业厂房施工工程中发挥着重要作用,通过将BIM技术深入施工各个环节可以解决传统施工方式存在的问题,从而全方位提升施工效率和质量。

1. 施工进度管理。通过运用BIM技术,可以将工程项目进度应用的时空维度提升到4D的状态,在4D仿真模型中建立起建筑施工计划。在项目开始以及进行到建设结束的整个过程中,结合总的规划目标将每一次详细的建设步骤根据发生的先后顺序与时间精确地设置在BIM模型内。在建筑工程项目开始实施后,如果发现建筑施工项目的进程已经和原先设定的预计结果之间发生偏差时,能够直观地观察到进度是否处于偏差状态。工作人员一旦发现项目建设产生延误,出现进度落后等不良问题,就可以找到出现问题的主要位置,并对施工规划进行调整,合理调配人力物力,从而避免对建筑施工项目造成延误问题。例如:在大中型工程钢结构安装的过程中,如果发生一些无法预见的情况,延误工期,那么使用4D模型分析,可使施工单位工作人员重新优化后续施工步骤,优先处理一些损害影响不大的施工内容,并采取有效措施来提高材料的供应速度,确保建筑项目施工的进程不受影响。

2. 施工质量管控。在BIM模型的辅助下,施工人

员可以直观地管控工程建设质量。工业厂房建设开始前,设计人员可以通过 BIM 模型对现场施工人员进行详细的施工工艺指导,并充分发挥 3D 漫游和平面剖切的功能,为细节部分的建筑施工工艺及其质量标准提供详尽指导,从而避免施工中的错误操作^[3]。施工过程中可以通过手持终端获取工程施工现场的工作状态并利用 BIM 模型进行比对,及时发现和处理其缺陷。例如:浇筑混凝土时可以在模型中设置浇筑区域的控制标准,用手机扫描现场的混凝土浇筑情况,如果发现问题 BIM 模型会发出预警,便于工人及时纠正。

3. 建设资源管理。通过 BIM 技术可以帮助建筑工程企业对工程施工过程的物资进行合理分配。在项目建设中,管理人员利用 BIM 建模软件就可以定位每个工程建设节点所需要的物资和机械的具体数量。对于物料管理可以根据模型提取出来的物料清单,其中包含了各种大小、尺寸、用途等详细的信息,从而帮助工作人员进行详细的购买和贮存管理,避免不必要的材料堆积和闲置状况。对于机械的使用情况来看,利用 BIM 模型制定进入工地的日期和进行操作的日期,从而增加机械的利用率。同时,还根据项目建设的情况和工作人员技术要求对人员进行适时的调整,确保项目建设的推进。

4. 建设场地管理。鉴于工业厂房建设项目施工现场环境复杂且工种交叉作业现象较多,应用 BIM 技术可以有效地为施工人员提供直观且立体化的施工策划布控方案,即提供符合实际的物资堆放区、机械设备堆放区、生产场地及临时辅助构筑物等区域规划,同时也可以将施工过程的人员和物品流场进行模拟,从而优化场地行车道布置,减少交叉矛盾发生,提高场地利用率^[4]。例如:针对大型设备起吊可通过 BIM 模型对其行走轨迹进行模拟,以规避相关障碍,保证起吊过程安全快捷顺利。

3.3 BIM 技术在工业厂房运维环节的应用

1. 设备管理。借助 BIM 技术可以构建厂房内设备的全信息数字模型,在该模型中运营和维护人员均可方便获取设备的各项信息。当设备出现故障时,相关人员可以根据 BIM 模型定位功能精确识别故障设备,通过手机等电子设备读取详尽的设备描述和修理信息,在短时间内完成设备的维修工作,快速恢复厂房设备正常运转。例如:某栋建筑物中的大型送风设备出现故障,设备维护人员可在 BIM 模型上快速定位故障设备,了解设备的结构、历史故障以及故障修理,有助于减少维护发现与修理时间,降低对生产的影响。此外,通过 BIM 模型结合物联网技术,可实时监控设备的工

作状态,采集设备的各种参数,利用大数据分析技术预测设备可能存在的故障发展趋势,提前制定维护措施,变被动维修为主动维护。

2. 空间管理。工业厂房的空间形状复杂多样,并且不同的行业需要根据生产需要对工业厂房空间进行变更。通过使用 BIM 模型可以在最短的时间内呈现厂房内部空间的实时使用情况,从而帮助运维团队进行高效的空間规划。例如:当调整产线时可以利用 BIM 模型进行产线新布置方案的前期测试,实时查看空间变更后可能存在的路线拥堵和设备摆放不合适等问题,防止空间不理想从而引起工作效率降低的情况。此外,BIM 模型也可以给运维团队的仓库管理提供帮助,科学高效地安排货物放置地点,以提高仓库空间的利用率。

3. 应急管理。工业厂房车间经常面临着火灾和污染物泄漏等风险,因此对于可能存在的风险问题制定应急管理体系至关重要^[5]。借助 BIM 技术实施应急管理,可以提供可视化的应急管理模式。当遇到突发事件时,运用 BIM 建模可以对事件现场信息迅速掌握,如人员分布、机器位置和逃生路线等信息,从而制定出应对策略。另外,还可以运用 BIM 模型中的逃生模拟对逃生路线进行优化,确保人们能安全、快速地离开危险场所。

4 结束语

BIM 技术在工业厂房建设工程中的广泛应用,为工业厂房的设计、施工和后期维护提供了全新的技术支持。将 BIM 技术运用到工业厂房建设工程中的各个环节,有助于提高工业厂房的建设质量,加快施工进度,实现不同专业的协调作业,保障工业厂房建设的科学性,为提高工业厂房建设工程质量奠定坚实的基础,进而满足现代工业厂房建设项目的发展需求。

参考文献:

- [1] 王新见.BIM 技术在智慧工业厂房中的应用、挑战及未来发展[J].智能建筑与智慧城市,2024(S1):24-27.
- [2] 邱少丹,杜志崇,程立,等.BIM 技术在大型工业厂房招标投标阶段的应用研究[J].中国设备工程,2024(24):196-198.
- [3] 宋放,王洋,闫斌.细石混凝土施工技术在工业厂房工程中的应用研究[J].工程建设与设计,2024(14):215-217.
- [4] 赵苏雅,陈政,史杏春,等.基于 BIM 技术的大型工业厂房设计与施工交接点研究[J].机电工程技术,2024,53(01):264-267.
- [5] 苏明珠,陈泽宇,朱建跃.工业厂房施工阶段融合 BIM 技术的实践研究分析[J].四川建材,2023,49(07):134-136.

矿山机械设备铸件铸造工艺探讨

黄 萍, 陆建良

(海盐通惠铸造有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘 要 本文聚焦矿山机械设备铸件铸造工艺的技术要点与优化方向, 针对复杂铸件结构及恶劣服役环境, 分析传统工艺缺陷, 提出材料选择、浇注系统设计、凝固模拟、热处理等优化策略。以高耐磨高锰钢定位分料盘为例, 验证了通过三维模拟优化结构、雨淋式浇道设计、双联熔炼、阶梯冷铁强化等措施, 成功实现了铸件屈服强度 ≥ 800 MPa、冲击韧性 ≥ 120 J/cm²、表面硬度HRC48-52, 显著提升了其抗冲击与耐磨性能。

关键词 矿山机械设备; 铸件铸造工艺; 热处理技术; 双联熔炼

中图分类号: TD4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.036

0 引言

矿山机械设备作为资源开采核心装备, 其铸件需承受高载荷、强冲击及复杂应力环境, 铸造工艺直接决定设备可靠性。传统工艺因设计经验依赖性强、过程控制粗放, 易导致铸件内部缺陷与性能波动。在计算机模拟技术成熟与新材料研发的背景下, 铸造工艺正向精准化、集成化方向发展。因此, 本文深入探究矿山机械设备铸件铸造工艺应用, 旨在为工艺设计提供理论框架与实践参考, 助力矿山机械制造业提质增效。

1 矿山机械设备的特点分析

1.1 工作环境适应性特征

矿山机械需长期暴露在高温、高湿、多粉尘的井下或露天环境, 设备表面须具备抗腐蚀涂层与密封结构, 关键部件需采用耐磨损材料, 且需要适应不同矿体的倾角、硬度与赋存状态, 作业装置需要具有高度可调节性与地质适应性, 比如掘进机刀盘可根据岩性自动调整转速与切削力。

1.2 载荷承载的极端性

矿山机械设需要承受周期性冲击载荷与交变应力, 比如破碎机的动颚板需耐受瞬时冲击力达数千千牛, 输送机托辊需长期承受非均匀分布的物料压力; 矿山机械设的关键结构件, 需要通过有限元分析进行拓扑优化, 采用高强度合金钢与复合铸造工艺, 才能够确保在循环应力作用下不发生疲劳失效^[1]。

1.3 系统结构的复杂性

现代矿山机械已发展为机电液一体化系统, 包含机械传动、液压控制、智能监测等多个子系统, 比如采煤机集成多电机协同控制模块, 需实现截割路径规

划、滚筒调高与牵引速度的智能匹配, 其控制系统具有多参数耦合与非线性特征^[2]。

1.4 操作安全的高风险性

矿山作业环境存在瓦斯爆炸、透水、片帮等多重安全隐患, 设备操作直接关联人员生命安全。井下采煤机需在0.5 m以下能见度环境中作业, 滚筒截齿与煤壁接触瞬间产生的火花可能引燃瓦斯, 因此要求设备必须具备KBA127矿用隔爆认证。露天矿用钻机在30°斜坡作业时, 若制动系统响应延迟0.1 s, 可能导致200吨级设备滑坡距离超5 m。

1.5 运行维护的高成本性

矿山机械设备因长期处于重载、高粉尘、强冲击等极端工况下, 零部件磨损速率远超普通机械, 比如颞式破碎机的颞板需承受每秒数次的剧烈冲击, 导致其寿命通常不超过6个月; 液压支架的密封件在高压油液反复作用下, 平均每3个月需更换一次。此外, 设备润滑要求严格, 需使用抗磨液压油、极压锂基脂等特种润滑剂, 单台大型电铲的年度润滑成本可达数十万元。

2 矿山机械设备铸件铸造工艺要点

2.1 模具制作工艺

在矿山机械设备生产过程中, 模具工艺是保障铸件精度、质量与生产效率的核心环节。模具需承受高温金属液的冲刷、热应力循环及机械振动, 其设计需兼顾铸件结构特征、金属液流动规律与冷却控制要求。以破碎机动颞板为例, 该部件需承受高频冲击载荷, 其铸件内部需通过模具设计实现致密组织, 同时外形需保证与动颞体的装配精度, 其模具工艺需从设计、材料、加工、热处理四方面系统把控。

模具设计时, 首先需要确定分型面位置, 破碎机

动颚板铸件分型面通常设置于最大截面处,该模式既便于起模又减少飞边;模具的浇道系统,通常采用开放式阶梯设计,能够确保金属液平稳充型,内浇道截面计算按照铸件体积计算确定,通常取铸件平均壁厚的 1.2 ~ 1.5 倍;冷铁布置需结合凝固模拟结果,在动颚板齿部等厚大区域设置铜质冷铁,从而可以消除缩孔缺陷;排气系统设计时,一般采用直通式排气道与溢流槽组合,能够有效防止卷气缺陷,且模具需预留足够的加工余量,关键尺寸如安装孔位需设置工艺凸台,从而可以为后续机加工提供基准。

模具材料选择时,需要充分考虑到热稳定性与成本,破碎机动颚板模具主体可以采用 HT300 灰铸铁,其良好的铸造性能,能够保证模具表面质量;在镶块部分,可以选用 45 钢调质处理,能够增强耐磨性;砂型铸造模具需选用高硅铝合金框架,确保在高温下保持尺寸稳定性;模具型腔表面粗糙度,通常需要控制在 $Ra3.2\ \mu m$ 以内,通过电火花加工与手工抛光实现,减少铸件表面缺陷;模具基准面生产时,需要经龙门铣床精加工,平面度公差控制在 $0.05\ mm/m^2$ 。

在模具加工过程中,可以采用数控加工中心进行粗加工,能够保证分型面平齐度;关键型腔生产时,可以采用电火花成型工艺,利用石墨电极加工出齿形结构,放电间隙需要控制在 $\pm 0.02\ mm$;浇道系统加工时,通常采用线切割加工方式,能够确保内浇道截面过渡圆滑;模具合模后需进行低压试验,检测分型面密封性;热处理工艺采用去应力退火,消除加工内应力,回火温度控制在 $550\sim 580\ ^\circ C$,保温时间按模具厚度每毫米 1 分钟计算^[3]。

2.2 型砂配置与造型

型砂须具备足够的强度、透气性、耐火性和退让性,造型过程需要确保砂型与铸件结构的精准匹配。例如:在矿用磨机衬板制造过程中,该部件需承受强烈磨损与冲击,所以铸件要求表面粗糙度低、轮廓尺寸准确。磨机衬板铸件通常采用石英砂作为主体材料,其二氧化硅含量 $\geq 95\%$,粒度分布控制在 70/140 目,可以确保砂粒间形成紧密咬合;粘结剂可以选用膨润土与淀粉复合体系,膨润土加入量占砂重的 4% ~ 6%,淀粉占比 1.5% ~ 2.5%,通过混砂机干混 2 分钟后逐步加入水分;水分通常按砂重 * 季节系数计算,夏季一般取 4.2% ~ 4.5%,冬季一般取 4.8% ~ 5.2%,能够确保型砂紧实后无松散颗粒;混砂时间通常控制在 8 ~ 10 分钟,直到型砂呈现均匀湿润状态,手捏成团且轻弹即散为最佳。

造型工艺应用时,需要匹配铸件几何特征,磨机

衬板一般采用对开式两箱造型,下型使用震击造型机紧实,砂型硬度达 85 ~ 90 单位;上型可以采用手工春砂,重点保证分型面平齐度,间隙控制为 $\leq 0.2\ mm$;浇道系统可以采用雨淋式浇口杯,直浇道截面依据铸件热节圆直径设计,内浇道需要设置 3 ~ 5 道分散引入,从而可以防止金属液冲刷砂型;冒口设计遵循模数法,确保最后凝固区域有效补缩,冒口颈尺寸按铸件壁厚 1.2 倍确定;砂芯用于成型衬板安装孔,可以采用 CO_2 硬化水玻璃砂,芯骨需预先涂覆耐火泥,防止铸件渗碳缺陷^[4]。

2.3 熔化与浇注

矿山机械设备铸件制造过程中,熔化与浇注工艺的实施,可以直接影响铸件的凝固组织、力学性能及内部质量,熔化与浇注过程中需精准控制金属液成分、温度与流动状态,确保铸件获得致密结构与均匀性能。

以某型号矿用挖掘机斗齿为例,该部件需承受强烈冲击与磨损,其生产过程中熔化与浇注的技术参数如表 1 所示。

该矿用挖掘机斗齿熔化工艺采用冲天炉—电弧炉双联熔炼,废钢与增碳剂首先经冲天炉熔化成铁水,再转入电弧炉进行成分微调;在熔化过程中,技术人员需要严格控制碳当量 4.2% ~ 4.4%,确保铸件获得珠光体 + 渗碳体组织;铁水出炉前,需要经光谱分析,重点检测 Si (1.8% ~ 2.2%)、Mn (0.6% ~ 0.8%)、S ($\leq 0.05\%$)、P ($\leq 0.08\%$) 等关键元素,超标铁水需回炉处理。浇注系统采用了阶梯式浇道设计方案,直浇道截面积按铸件重量计算确定为 $80\ cm^2$,横浇道设置挡渣坝与溢流槽组合;浇注前,技术人员先对砂型进行预热,温度梯度控制在 $200\sim 250\ ^\circ C$ 范围内,能够减少金属液与型砂温差;浇注操作遵循“慢—快—慢”原则,先缓慢注入液面至浇口杯 1/3 高度,再快速充型至冒口根部,最后缓慢补缩防止飞溅。

2.4 热处理技术

以矿用输送机滚筒为例,该部件需承受大扭矩与交变载荷,其铸件要求表面硬度 HRC45-50,心部韧性 $\geq 40\ J/cm^2$,该设备热处理工艺路线可以采用“退火 + 淬火 + 回火”三步法。退火选用高温扩散退火,铸件随炉升温至 $880\sim 920\ ^\circ C$,保温 8 ~ 10 小时,可以消除偏析与枝晶偏析,获得均匀珠光体组织;淬火采用油淬工艺,铸件预热至 $550\ ^\circ C$ 后转入淬火炉,快速升温至 $840\sim 860\ ^\circ C$ 保温 45 分钟,能够确保奥氏体化完全;淬火介质选用机械油,油温控制 $40\sim 60\ ^\circ C$,搅拌速度 $0.8\ m/s$,从而可以保证冷却均匀性;回火采用高温回火工艺,铸件在 $560\sim 580\ ^\circ C$ 保温 6 小时,空冷至

表 1 某型号矿用挖掘机斗齿熔化与浇注技术参数

工艺阶段	参数名称	设定值 / 范围	控制要点
熔化	炉型选择	3 吨 / 小时冲天炉	双层炉衬预热至 800 ℃
	炉料配比	废钢 60%+ 生铁 30%+ 回炉料 10%	成分波动 ≤ ±0.5%
	熔化温度	1 520 ~ 1 550 ℃	铁水表面氧化膜呈亮黄色
	精炼处理	硅钙合金 0.8%	扒渣后测温取样分析
浇注	浇注温度	1 400 ~ 1 430 ℃	液面撒草木灰覆盖保温
	浇注重量	280 ± 5 kg	使用电子秤实时监控
	浇注速度	先快后慢 (40 s 完成)	控制液面上升速度防止飞溅
	浇口杯设计	漏斗形高 150 mm	内衬耐火泥减少飞溅
	冒口补缩	圆柱形 φ50 mm × 3	设置明冒口与暗冒口组合
	冷铁使用	石墨冷铁 3 处	预置在热节区域加速凝固

室温，获得回火索氏体组织^[5]。热处理设备可以选用箱式电阻炉，配备智能温控系统，炉温均匀性 ≤ ±5 ℃；装炉方式采用单层平铺，铸件间距 ≥ 50 mm，能够防止热处理变形；淬火转移时间控制 ≤ 8 s，采用专用淬火篮实现快速入油；回火后需要进行时效处理，铸件在 200 ℃ 保温 4 小时，可以消除残余应力，且热处理全程记录温度—时间曲线，关键节点取样进行金相分析，确保组织转变符合预期。

3 案例分析——以某型号高耐磨高锰钢定位分料盘为例

某矿山机械企业生产的 ZGMn13-4 型高锰钢定位分料盘，需长期承受矿石冲击与摩擦，铸件要求屈服强度 ≥ 800 MPa，冲击韧性 ≥ 120 J/cm²，表面硬度 HRC48-52。铸件设计采用三维模拟优化结构，壁厚均匀过渡避免应力集中，关键部位设置加强筋提升抗冲击性；分型面选择避开热节区域，浇道系统采用雨淋式底注设计，直浇道截面积按铸件重量计算为 120 cm²，横浇道设置陶瓷过滤器 + 挡渣坝组合；砂型采用呋喃树脂自硬砂，型砂紧实率控制 42 ~ 45，透气性 ≥ 85，确保铸件表面质量。

在熔炼过程中，采用了电弧炉 + LF 炉双联熔炼，废钢占比 65%，高碳锰铁与硅铁合金化；电弧炉熔清后测温取样，控制 C 含量 1.1% ~ 1.3%，Mn 含量 11% ~ 13%，Si 含量 0.3% ~ 0.5%；LF 炉精炼过程加入铝粒脱氧，喂 CaSi 线脱硫，白渣保持时间 ≥ 15 分钟，确保钢液纯净度 [O] ≤ 30 ppm，[S] ≤ 0.02%。出钢温度控制 1 580 ~ 1 600 ℃，液面撒稻壳保温。在浇注过程中，首先预热至 200 ~ 250 ℃，采用塞杆式浇口杯，浇注重量 280 ± 3 kg；浇注速度先快后慢，首 30 s 注入金属液

200 kg，后续 15 s 平稳充型；铸型采用了阶梯式冷铁强化激冷，冒口设计模数比铸件大 15%，从而能够确保顺序凝固。在热处理过程中，执行水韧处理，铸件入水温度 1 080 ~ 1 100 ℃，保温 40 分钟，出水后空冷；回火处理在 560 ~ 580 ℃ 保温 6 小时，可以有效消除残余应力；关键参数通过正交试验确定，能够确保获得单相奥氏体组织，晶粒尺寸控制 8 ~ 12 级；热处理后铸件表面进行喷丸强化，覆盖率达 200%，从而提升疲劳强度 30%。

4 结束语

研究成果为矿山机械设备铸件铸造工艺提供了理论框架与实践依据，通过系统优化材料、工艺参数及质量控制策略，有效解决了传统工艺中的缩孔、裂纹等缺陷问题，所提出的技术方案不仅提升了铸件的综合性能，更为行业向智能化、绿色化转型提供了新思路。未来，矿山机械设备铸件铸造工艺将会进一步发展，全面提升机械设备质量，从而保障矿山生产安全高效。

参考文献：

[1] 徐信水,唐洁,汪强.合理润滑技术在矿山机械维修中的应用[J].中国科技纵横,2023(20):91-93.
[2] 王成军,洪维立,白东明,等.矿用平板车车轮铸件铸造过程模拟及优化[J].铸造,2022,71(05):650-655.
[3] 姜鸿山,郭飞宇.矿山机械设备的智能维修技术研究[J].中国金属通报,2024(15):95-97.
[4] 汪强,徐信水.机电一体化数控技术在矿山机械中的应用[J].中国科技纵横,2024(06):133-135.
[5] 张志华,刘雪涛.铸造皮带机皮带跑偏原因分析及处理方法[J].中国铸造装备与技术,2023,58(02):24-27.

无人机技术在工程测量中的应用研究

李其峰

(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 随着我国科学技术不断发展, 无人机技术作为代表性技术逐渐成熟, 在诸多领域发挥着重要作用。无人机技术以其高效、精准、安全的特点, 为工程测量工作带来了前所未有的发展机遇, 不仅促进了测量技术的进步, 更为工程建设的顺利实施提供了坚实的技术保障。为了提升无人机技术在工程测量中的应用水平, 本文基于无人机的优势, 深入探究了无人机在工程测量中的应用, 以期能为相关人员提供有益参考。

关键词 工程测量; 无人机技术; 遥感技术

中图分类号: TP242; TB22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.037

0 引言

传统的工程测量方法往往面临诸多挑战, 如地形复杂区域测量困难、测量效率低下等, 无法满足现代工程测量需求。无人机技术凭借其高效安全、起降简单、多样化任务执行能力、长航时与远程操作、环境适应性强等优势, 为解决这些问题提供了新的途径。在工程测量中, 无人机技术的应用为行业带来了新的变革。研究无人机技术在工程测量中的应用, 对于提高测量效率、保证测量质量、推动工程测量行业的发展具有重要意义。

1 无人机技术在工程测量中的应用优势

1.1 操作简单化

与传统的飞机搭载摄像机作业相比, 无人机在飞行技术和作业效率方面更具优势, 其不仅具有节省空间、时间的优点, 而且反馈能力很强, 实际应用灵活, 成本相对较低。例如: 在一些小型工程测量项目中, 使用无人机可以快速部署, 无需复杂的场地准备和大量的人力物力投入^[1]。

1.2 数据监测效率高

无人机技术在工程测量领域的应用优势突出, 能够对整个工程建设情况进行实时动态监测。在实际施工过程中, 一旦发生突发情况, 可以借助无人机技术快速锁定问题的关键, 既能够保障建筑工程质量符合标准, 还可以大幅度提高工程的稳定性, 有效管控整体风险。

1.3 监控范围大

无人机技术与遥感技术深度融合, 能够最大程度保障测量主体的多样化, 持续拓展测量的覆盖范围。

无人机技术具备很强的可操作性, 操作人员可以根据实际需求灵活调整检测范围, 进而快速、精准地获取检测对象的详细信息。这种特性使得相关人员即便在复杂多变的环境中, 也能顺利达成测量目标, 为各类测量工作提供强有力的技术支持。

1.4 信息传递速度快

在工程测量中, 无人机技术的信息采集与数据处理功能得以充分发挥, 有力保障了信息采集的精准度与高效性。无人机能够迅速捕捉建筑工地的各项数据, 无论是地形地貌、建筑物轮廓, 还是施工进度情况等, 都能以高分辨率的图像和视频形式记录下来, 为后续的分析提供丰富且可靠的信息源。与此同时, 无人机技术还能对建筑工程项目的各类信息进行全方位、深层次的剖析。它可以对采集到的数据进行分类、整合与对比, 挖掘出数据背后隐藏的规律和潜在问题。通过分析不同时间段的测绘数据, 能够及时发现建筑物的沉降、位移等情况, 为项目的安全评估和质量监控提供科学依据, 从而有力推动项目的顺利开展^[2]。

1.5 数据安全可靠

无人机技术在工程测量中的应用得到了强有力的技术支持。相关工作人员需要紧密贴合工程行业的实际状况, 充分挖掘无人机技术的优势。在实际应用中, 无人机技术能够全方位、无遗漏地收集数据, 可以突破地形、空间等限制, 获取到丰富且详细的信息, 为后续的数据分析奠定了坚实的基础。借助先进的数据分析方法和工具, 对这些数据进行深入处理, 能够有效确保测绘结果的准确性和可靠性。此外, 计算机网络系统的安全保障功能也为无人机测绘数据的安全与稳定提供了可靠保障。在数据传输、存储等环节, 采

用多重加密和备份措施,可以防止数据丢失、泄露或被篡改。

2 无人机技术在工程测量中的应用

2.1 地籍测绘和地理信息系统(GIS)应用

在地籍测绘与地理信息系统(GIS)领域,无人机技术的应用为土地规划、城市设计及环境评估等项目带来了颠覆性的变革。无人机通过搭载高分辨率相机与激光雷达等尖端传感器,能够高效且精准地采集大范围的地形数据。其所配备的高分辨率相机,具备捕捉地表细微特征的能力,无论是建筑物、植被,还是水体等地表要素,都能被清晰记录,所获取的影像数据,可通过对地面物体颜色、纹理等特征的深入分析,为地图绘制和土地规划提供极为详尽的基础底图。而激光雷达传感器则专注于获取地表的高程数据,能够实现对地形的精确测量。对采集到的数据进行专业处理,可以生成高精度的数字高程模型(DEM)与数字表面模型(DSM)。其中,DEM精准呈现了地表的高程信息,DSM则涵盖了地表上诸如建筑、树木等所有物体的高程信息。这两种模型相互补充,为工程测绘提供了全面、精准的地形数据。

2.2 建筑结构监测和检测

在建筑结构监测与检测领域,无人机通过搭载先进的摄像头与各类传感器,能够实时、全方位地捕捉建筑物的各类信息,为项目管理团队提供全面且即时的建筑状态反馈。无人机巡航时,可实现无缝的全景覆盖,为建筑工地构建全方位的监测网络。其搭载的高清摄像头能够精准捕捉高分辨率影像,展现出建筑结构的整体宏观状况,同时,也能敏锐地察觉到细微处的变化与异常。这种从宏观到微观的全面监测能力,在很大程度上强化了监测工作的深度与广度,使得潜在的结构隐患无所遁形,为施工质量的精准把控提供了有力支持,实现了质量问题的早发现、早干预。除此之外,无人机所配备的传感器还能实时采集建筑物的关键数据,有助于监测建筑物的运行状态,帮助管理人员提前洞察可能影响结构安全的潜在因素,从而及时采取针对性的预防措施。在施工阶段,无人机的实时监测功能还能够敏锐地识别出施工过程中的各类误差以及不规范操作,并迅速将相关信息反馈给项目管理团队,为工地的安全管理提供了及时、有效的决策依据。

2.3 工地管理和进度控制

工地的全貌图像借助无人机技术得以清晰呈现,全面展示了施工现场的布局规划、建筑物的建设进度

以及各类设备的运行状态。这一全局视角为项目管理团队提供了对工地实际状况的全方位认知,使其能够更精准地把握整体情况。一方面,通过对无人机连续拍摄的图像进行细致比对,项目管理团队能够实现对工程进度的实时监测,以便于团队迅速察觉潜在的延误或问题,并及时采取调整措施,优化施工计划。这不仅显著提升了项目管理的灵活性,还大大增强了应对突发状况的反应速度。另一方面,无人机所提供的数据具有高度的精准性和实用性,可助力项目管理团队制定更加科学、合理的工程进度计划,减少施工过程中的不确定性因素,确保项目能够按照预定时间顺利完成。此外,无人机还能在大范围内精准捕捉施工现场的细微之处,如材料的堆放情况、设备的摆放位置等。项目管理团队可以根据实时监测到的资源利用情况,及时调整物资供应链,避免资源的浪费和闲置,有效降低项目成本,实现资源的最大化利用。

2.4 高精度测量和制图

在工程测量领域,无人机能够轻松搭载各类高精度的测量设备,这些设备具有强大的地形测量和建筑物制图能力。

第一,对于地形地貌的测量,无人机搭载的高精度设备展现出了极高的精准度,可以精确捕捉到地形的细微变化。通过先进的测量技术和算法,无人机将获取的数据进行快速处理和分析,从而准确地勾勒出地形的轮廓和特征。

第二,在建筑物制图方面,无人机可以从不同的角度和高度对建筑物进行拍摄和测量,获取建筑物的详细尺寸、形状和结构信息,并生成清晰、准确的建筑物图纸。更为重要的是,无人机通过快速、全面地获取数据,能够生成高精度的数字地面模型(DTM)。数字地面模型以直观、立体的方式呈现了地形地貌和建筑物的实际情况。工程设计和施工人员可以依据这个数字地面模型,进行更加科学、合理的设计和施工方案制定。

第三,在设计阶段,设计人员可以根据数字地面模型准确了解地形条件和建筑物周边环境,从而优化设计方案,提高工程的可行性和安全性。

第四,在施工阶段,施工人员可以依据数字地面模型进行施工规划和布局,合理安排施工顺序和资源分配,确保施工过程的顺利进行^[3]。

2.5 管道和线路巡检

在工程测量领域,尤其是在管道和电力线路的巡检工作中,无人机技术展现出了无可比拟的高效性和

安全性。以往对于管道和电力线路的巡检,往往依赖人工进行,工作人员需要沿着漫长的线路徒步检查,不仅耗费大量的时间和人力,而且在一些复杂地形或恶劣环境下,人工巡检面临着诸多困难和危险。与此同时,人工巡检也难免会受到主观因素的影响,出现漏检、误检的情况。而无人机具备快速响应和灵活机动的特点,可以在短时间内到达指定区域,并按照预设的航线进行精准巡检。在巡检管道时,无人机通过搭载高清摄像机和红外热成像仪等先进设备,能够全方位、多角度地对管道进行细致观察。高清摄像机可以清晰地捕捉到管道表面的细微变化;红外热成像仪则可以通过检测管道表面的温度差异,发现潜在的漏油点。对于电力线路的巡检,无人机可以轻松飞越高压铁塔和电线,对电线、绝缘子、金具等关键部位进行详细检查。通过高清影像,能够清晰地看到电线是否存在断股、磨损,绝缘子是否有破损、放电痕迹,金具是否松动等问题。一旦发现问题,无人机可以立即记录下问题的位置和具体情况,并将数据传输回地面控制中心。无人机巡检大大提高了巡检效率,而且不受时间和空间的限制,无论是白天还是黑夜,晴天还是雨天,都可以持续工作。除此之外,无人机巡检也极大地提高了安全性。工作人员无需亲临危险现场,避免了因攀爬高压铁塔、穿越复杂地形等带来的安全风险,有效减少了人员伤亡事故的发生。通过及时发现管道和电力线路中的裂纹、漏油、松动的连接等潜在问题,无人机巡检能够提前采取措施进行修复和维护,避免因故障导致的停电、停水等事故,减少了经济损失和社会影响^[4]。另外,定期使用无人机进行巡检,还可以建立详细的线路和设备档案,为后续的维护和管理提供有力的数据支持,进一步提高整个工程系统的可靠性和稳定性。

2.6 三维建模和虚拟现实

在工程测量领域,无人机凭借其卓越的性能和先进的技术,成为获取空间信息的关键工具。首先,无人机能够在不同的高度和角度,快速且精准地拍摄大量的照片或视频。当这些照片或视频被传输到计算机中,就可以借助专业的软件和技术,对这些影像进行深度分析,通过复杂的算法和匹配技术,识别出照片或视频中的特征点,并根据这些特征点之间的空间关系,逐步构建出高精度的三维模型。这些生成的高精度三维模型具有极高的应用价值。在建筑设计方面,设计师可以借助三维模型更加直观地感受建筑的空间形态和结构布局。他们可以在模型中自由地穿梭,从

不同的角度观察建筑的外观和内部空间,提前发现设计中可能存在的问题,如空间利用不合理、结构冲突等,并及时进行调整和优化。其次,三维模型还可以用于模拟建筑在不同光照条件下的效果,帮助设计师选择最合适的建筑外观颜色和材质,使建筑在实际建造中能够更好地融入周围环境。对于城市规划而言,三维模型提供了一个全面、立体的城市视图。规划者可以在模型中清晰地看到城市的地形地貌、建筑分布、交通网络等信息,从而更加科学地进行城市功能分区、道路规划和公共设施布局;通过模拟不同规划方案的效果,规划者可以直观地比较各种方案的优缺点,选择最优的规划方案,提高城市的运行效率和居民的生活质量。与此同时,这些三维模型还可以用于演示虚拟现实场景。在工程建设的前期,通过虚拟现实技术,项目团队可以身临其境地感受未来的建筑和城市景观,提前体验工程建成后的效果。如此一来,不仅有助于项目团队更好地理解 and 沟通设计意图,还可以让投资者和客户更加直观地了解项目的价值和潜力,增强他们对项目的信心。而且,在工程施工过程中,虚拟现实场景也可以用于安全培训和施工模拟,有助于提高施工人员的安全意识和操作技能^[5]。

3 结束语

无人机技术在工程测量中具有显著的应用优势,在复杂地形测绘、城市规划、矿山测量、海岸地形测量等多个方面得到了广泛应用。但是,无人机技术在学习过程中也面临着挑战,相关人员需要通过相应的解决方案,克服这些挑战,推动无人机技术在工程测量中进一步发展。未来,无人机技术将朝着智能化、集成化和专业化方向发展,为工程测量带来更多的机遇和变革。

参考文献:

- [1] 崔雷. 无人机遥感技术在水利工程测量中的应用分析[J]. 科技与创新, 2023(20):179-180, 封 3.
- [2] 张艺鹏. 无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用[J]. 四川建材, 2023, 49(10):41-42, 56.
- [3] 王承恩. 无人机航测技术在工程测量中的应用探索[J]. 产业创新研究, 2023(18):112-114.
- [4] 陈丽, 孙康宁. 无人机航拍技术在测绘工程测量中的应用[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(26):164-167.
- [5] 汪建波, 程锦. 简析无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(22):172-174.

公路水泥稳定碎石基层施工工艺优化研究

梁峻信

(四川成宜高速公路开发有限公司, 四川 宜宾 644000)

摘要 公路作为国家交通运输的重要组成部分,其路面质量直接关系到行车安全和通行效率。水泥稳定碎石基层作为公路路面的重要构成部分,以其良好的力学性能、耐久性和经济性,在公路建设中得到了广泛应用。然而,随着交通量的不断上升和车辆荷载的日益增加,对水泥稳定碎石基层的施工质量提出了更高的要求。本文在介绍水泥稳定碎石基层施工原理的基础上,对水泥稳定碎石基层施工流程和措施进行了研究,并分析了常见的施工问题 and 解决措施,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 公路路面; 水泥稳定碎石基层; 混合料拌; 摊铺作业; 碾压施工

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.038

0 引言

公路路面基层施工是保证路面结构质量和长期稳定性的重要环节,其中水泥稳定碎石基层作为常见的施工材料,因其较高的强度和良好的稳定性被广泛应用于各类公路建设中。然而,在实际施工过程中,由于施工技术、材料配比、设备性能等因素的影响,水泥稳定碎石基层的施工质量常常受到影响,导致基层的压实度不足、离析现象严重、裂缝等质量问题频发,这些问题不仅影响路面使用寿命,还增加了后期养护和维修成本。因此,优化水泥稳定碎石基层的施工工艺,提高其施工质量和性能,成为当前公路建设领域亟待解决的技术难题。

1 公路水泥稳定碎石基层施工概述

水泥稳定碎石基层的施工技术原理主要基于水泥与水反应后生成的水化产物对碎石颗粒的胶结作用。在施工过程中,水泥与水发生水化反应,形成以硅酸钙、铝酸钙为主要成分的水化物,这些水化物通过化学结合将碎石颗粒牢固地黏结在一起,形成具有较高强度和稳定性的整体结构。水泥稳定碎石基层的强度和稳定性不仅依赖于水泥与水的化学反应,还与碎石的级配、颗粒形状及粒径分布等因素密切相关^[1]。施工时,碎石颗粒在压实过程中通过相互嵌挤作用,进一步提高了基层的压实度,改善了其抗压性能。

实验研究表明,当水泥掺量控制在4%~6%范围内时,水泥稳定碎石基层的7天无侧限抗压强度可达到3~5 MPa,这一强度水平能够满足公路路面承受长期车流荷载的要求。

2 公路水泥稳定碎石基层施工流程

2.1 施工准备

在施工前,需使用路面平整度测定仪对底基层的平整度进行检测,确保平整度偏差控制在10 mm以内。对于存在的局部不平整或松散部位,应采用平地机进行修整,以确保基层的平整度和压实度达到设计要求。此外,还需要通过灌砂法检测底基层的压实度,确保压实度达到96%以上。水泥的选用应严格按照标准进行,一般选用强度等级为P·042.5的普通硅酸盐水泥,其各项性能指标必须满足国家标准的要求。在施工过程中,还需要定期对水泥进行抽样检验,以确保其质量合格,避免受潮或过期水泥对水泥水化反应的影响。碎石的选用要求质地坚硬、洁净,通常选用石灰岩碎石,最大粒径不得超过37.5 mm,并依据不同粒径范围进行精确的分级备料。碎石的储备量应根据工程的进度和水泥稳定碎石配合比的要求进行合理计算,确保各类碎石的供应充足且质量稳定。依据设计图纸,使用全站仪精确恢复道路中心线和边线的平面位置,并每隔10 m设置一个稳固的中桩和边桩,以确保整个施工区域的平整度和线性准确性。中桩和边桩的平面位置偏差应控制在10 mm以内,同时,在每个桩上标记出水泥稳定碎石基层的设计高程,误差控制在5 mm以内。

2.2 混合料拌和与运输

在拌和过程中,根据搅拌机的类型和混合料的特性,通常要求拌和时间不少于45秒,以确保各组充分混合。在拌和过程中,混合料的色泽应均匀一致,杜绝出现花白料或离析现象。在混合料的运输过程中,为保证摊铺作业的连续性,应根据施工现场的摊铺进

度, 确保混合料的运输路线长度不超过 15 km。运输路线过长可能导致混合料在运输过程中出现初凝现象, 影响其摊铺效果和强度发展。为了避免摊铺机因等待混合料而长时间停机, 合理的运输路线能够确保混合料及时、均匀地输送至摊铺机, 避免因等待而浪费混合料或造成摊铺作业的中断。

2.3 摊铺作业

摊铺作业采用两台性能先进且调试精准的摊铺机进行梯队作业, 一前一后相距 5 m 至 10 m 同步摊铺。这种梯队作业方式能够有效提高摊铺效率, 并确保基层的均匀性和连续性。摊铺机配备了高精度的自动找平系统, 其找平精度可达 ± 2 mm, 能够精确控制摊铺的厚度和表面平整度。自动找平系统根据预先设置的高程基准线进行实时调整, 确保摊铺面始终维持在设计的高程范围内, 避免出现不均匀的摊铺层或严重的波动现象^[2]。

在实际施工中, 摊铺速度应综合考虑混合料的供应能力、摊铺宽度以及现场施工条件等因素, 合理确定摊铺速度, 一般控制在 1.5 ~ 2.0 m/min 之间。同时, 摊铺机的运行必须避免出现停顿、急停和频繁启动等现象, 这些情况不仅会影响混合料的均匀摊铺, 还可能引起基层表面不均匀、厚度不一致等问题。

在摊铺过程中, 专人负责松铺厚度、平整度等关键指标进行频繁检查, 每隔 10 m 检查一次松铺厚度, 并确保平整度误差控制在 8 mm 以内。如果发现不符合要求的情况, 应立即调整摊铺机的工作参数或进行人工修整。

2.4 碾压施工

碾压施工的过程通常分为初压、复压和终压三个阶段, 每一阶段的碾压方法和工艺要求都至关重要。初压阶段使用 12 吨双钢轮压路机进行静压碾压 1 至 2 遍。初压的主要目标是使混合料初步稳定, 增强基层的整体结构, 消除松散现象。此阶段的碾压速度严格控制在 1.5 ~ 1.7 km/h 之间, 保证压实的均匀性和连续性。初压不仅为后续的复压作业奠定了基础, 还有效地提升了基层表面的平整度, 确保其满足后续碾压要求。

复压阶段选用 22 吨单钢轮振动压路机进行振动碾压 3 至 4 遍。在此过程中, 振动压路机的振幅和频率需要根据混合料的类型及压实层厚度进行优化匹配。振幅一般控制在 1.5 ~ 2.0 mm, 频率则控制在 30 ~ 40 Hz 之间。复压的主要作用是进一步提高水泥稳定碎石基层的密实度和强度, 消除初压过程中可能出现的孔隙和松散层。通过合理调整振动压路机的工作参数, 能

够实现最佳的压实效果, 确保基层的密实度符合设计要求, 增强其耐久性和抗压强度。

终压阶段再次使用 12 吨双钢轮压路机进行静压碾压 1 至 2 遍, 速度控制在 2.0 ~ 2.5 km/h 之间。终压的目标是消除轮迹, 进一步提高基层表面的平整度, 使其更加光洁, 为路面铺设提供理想的基础。在终压过程中, 通过适当的碾压速度和压实遍数, 能够有效地消除复压过程中可能产生的表面不平整问题, 确保基层表面平整、密实, 达到设计要求的性能标准。

2.5 接缝处理

1. 横接缝处理。若因故中断摊铺时间超过 2 小时, 必须设立横向接缝, 以避免基层混合料过度干硬, 影响后续摊铺的质量。首先, 在摊铺机平稳驶离混合料末端时, 必须确保末端混合料的表面整齐、光滑, 并用专用工具修整断面, 使其垂直于路中心线, 确保断面的垂直度偏差不得超过 3° 。这一操作是为了确保横接缝的整齐性, 为下一次摊铺提供平整的接缝界面。接缝处修整完成后, 下次摊铺前, 使用洒水车对接缝处进行均匀湿润, 以提高混合料的粘结性和压实性。湿润后的接缝处将被铺筑新的混合料, 摊铺机和压路机继续沿接缝处作业。压路机在接缝处的碾压作业至关重要, 必须进行不少于 3 遍的碾压, 确保接缝处的平整度和密实度达到与整体基层一致的标准, 消除接缝处可能存在的松散层, 确保无缝衔接^[3]。

2. 纵接缝处理。在水稳基层施工中, 纵接缝处理至关重要, 它关乎基层的整体质量。纵接缝处理主要针对多幅摊铺或施工中断形成的纵向接缝, 其质量控制直接影响基层整体性和结构强度。当摊铺需分幅进行时, 应采用模板支架固定前幅混合料边缘, 确保垂直度偏差 $\leq 3^\circ$ 且呈直线。接缝处松散混合料需用切割机垂直切除, 保留至少 30 cm 平整面并清扫碎屑。湿润环节需用洒水车均匀喷淋, 湿润深度以渗透下层 1 ~ 2 cm 为宜, 避免过量造成局部软化。摊铺新幅时, 应与前幅重叠 5 ~ 10 cm, 待混合料初凝后采用直尺辅助切除多余部分, 形成垂直纵缝。碾压工艺需遵循“高频低幅结合”原则, 终凝后应检测接缝垂直度、平整度及无侧限抗压强度, 垂直度误差超限时需局部返工处理。

3 公路水泥稳定碎石基层施工常见问题及解决措施

3.1 裂缝问题

裂缝产生的主要原因之一是水泥用量过大或混合料中细集料比例过高。过多的水泥会增加混合料的水化热, 导致水泥稳定碎石层在硬化过程中发生较大的体积收缩, 从而引发裂缝。此外, 细集料比例过高则

容易增加基层的收缩性,使得基层表面容易出现裂纹。另一个常见原因是养护不及时或养护措施不当,特别是在施工后未能及时进行充分的湿养护,导致基层表面失水过快,水泥水化反应无法充分进行,进而导致干裂现象的发生。

为有效避免裂缝的产生,应从混合料配合比优化和养护管理两方面入手。首先,合理优化混合料的配合比,减少收缩裂缝的风险。根据试验和经验数据,通常将水泥用量控制在4%~6%,细集料含量控制在30%~35%,以平衡基层的强度和收缩性。同时,可以添加缓凝剂、减水剂等外加剂来改善混合料的性能,降低其收缩率,进一步减少裂缝发生的可能性。其次,在基层碾压完成后,应立即启动养护工作,采用覆盖保湿材料(如土工布或塑料薄膜)和定时洒水等措施。养护期间,应严格控制基层的开放交通时间,只有当基层强度达到设计强度的90%以上时,才可允许车辆通行,以避免过早承受荷载对基层造成裂缝损害^[4]。

3.2 离析问题

离析问题的主要原因之一是拌和过程中搅拌设备性能不佳、搅拌时间不足或搅拌不均匀。如果搅拌设备存在故障或未能按照设计要求进行调整,混合料中的粗细集料可能未能充分混合,导致离析现象的发生。另一常见原因是运输过程中的不当操作。尤其在车辆行驶过程中,颠簸、紧急制动或混合料装载不合理,都可能导致混合料在车厢内发生位移和分层,进一步加剧离析问题。长距离运输或路况较差的情况下,离析现象更为突出。摊铺作业中摊铺机的螺旋布料器高度和转速设置不当,也会影响混合料的均匀分布,导致离析现象的发生。

为有效解决离析问题,首先要改进拌和工艺,确保搅拌设备的良好性能。定期对搅拌设备进行检查、维护和调试,确保其能够均匀地搅拌混合料,避免因搅拌不均匀引发离析。此外,运输过程中应选择车况良好、悬挂系统稳定的车辆,并合理控制车速,避免因颠簸和急刹车引发混合料分层。尤其在长途运输时,应尽量避免过于激烈的行驶操作。在摊铺阶段,摊铺机的螺旋布料器高度和转速应根据混合料的性质和摊铺厚度进行合理调整,确保混合料均匀分布,避免因布料不均而导致离析。

3.3 压实度不足问题

压实度不足的主要原因之一是压路机吨位不足或碾压遍数不够。如果选择的压路机吨位较小,或者碾压过程中未能按照设计要求进行充分的碾压次数,基

层可能未能达到所需的密实度,导致基层结构松散,强度不足。此外,混合料的含水量也对压实效果有着直接影响。过干或过湿的混合料都会影响压实过程,尤其在含水量偏低时,水泥稳定碎石层容易出现黏结不良,导致压实不充分;而含水量过高则会使混合料变得黏稠,压实时难以均匀压实,造成基层密实度不足^[5]。

为了解决压实度不足的问题,需要从压路机选择、混合料含水量控制以及压实过程的管理三个方面采取针对性措施。首先,根据基层的厚度和施工要求,选择合适吨位的压路机,并严格按照设计规定的碾压遍数进行作业。合适的压路机吨位能确保压实过程中提供足够的压力,使基层达到预期的密实度。其次,在拌和过程中,应严格按照配合比加水,并根据天气情况、运输距离和施工现场的具体情况进行适当调整,确保混合料含水量处于最佳范围,以利于压实。控制压路机的行驶速度也是关键因素。在碾压过程中,应保持压路机的匀速行驶,避免速度波动,确保压实功均匀地作用于基层。压路机的碾压速度波动范围应严格控制在 ± 0.2 km/h以内,避免出现忽快忽慢的情况,从而确保压实效果均匀一致。

4 结束语

通过对公路水泥稳定碎石基层施工工艺的深入分析,探索了优化施工方法和提高施工质量的有效途径。合理的材料配比设计、优化的摊铺与碾压技术、精确的温湿度控制等措施,能够显著提升公路水泥稳定碎石基层的密实度、抗裂性和耐久性,从而提高公路路面的整体质量和使用寿命。特别是在施工过程中,针对常见的裂缝、离析、压实不足等问题,提出的改进方案具有较好的可操作性,并能有效避免施工中常见的质量隐患。

参考文献:

- [1] 王晶.市政道路工程中的水泥稳定碎石基层施工技术探究[J].建材发展导向,2025,23(05):64-66.
- [2] 田辉,高传武.市政道路施工中水泥稳定碎石基层施工技术应用分析[J].建设机械技术与管理,2025,38(01):111-112,115.
- [3] 赵丹华.道路工程建设中的水泥稳定碎石基层施工工艺刍议[J].城市建筑,2025,22(04):207-209.
- [4] 李丹.水泥稳定碎石基层工艺在市政道路工程中的具体应用[J].建筑技术开发,2025,52(02):72-75.
- [5] 李梁.浅谈水泥稳定碎石基层施工质量控制与检测[J].工程建设与设计,2025(02):213-215.

土木工程地下空间开发中的生态支护体系创新

姚东浩

(中建八局第二建设有限公司, 山东 济南 250000)

摘要 本文分析了传统支护体系对材料性能和结构形式等方面的限制, 并从生物矿化积极保护、仿生结构和功能植被协同以及多能流耦合智能调控等方面提出了创新需求, 在最小干预, 仿生设计和系统协调原则的基础上, 采用推广植被混凝土喷播, 研究开发高韧性生态锚杆和建设水土植被协同系统等措施、实施装配式生态混凝土模块化施工的路径构建体系等。研究结果表明: 相关技术的应用能够促进植被覆盖率、界面粘结强度的提高, 达到支护和生态修复的协同作用。生态支护体系的革新促进了项目从被动承载到主动适应的飞跃以及地下空间的可持续发展, 并在今后的发展过程中朝着智能生态体方向迈进。

关键词 土木工程; 空间开发; 生态支护体系

中图分类号: TU9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.039

0 引言

边坡支护是土木工程中的一项基础性工作, 土木工程施工相对较为复杂, 一旦基础工作存在问题, 会对工程的质量产生严重的影响。地下空间开发中的生态支护体系创新, 本质是对“生态优先、绿色发展”理念的工程实践响应。传统支护技术所产生的生态负效应突出表明工程系统和自然系统需要协同发展, 现代岩土工程理论研究不断深入和生态材料技术研究不断取得突破性进展, 为支护体系生态化转型提供理论和技术支撑。基于此, 建立多学科交叉生态保护理论框架并探索同时具备工程安全和生态保护功能的技术体系对于促进地下空间开发可持续化有着重要的实践意义。

1 传统土木工程支护体系局限性分析

1.1 材料性能维度的功能性瓶颈

传统支护体系对材料本构关系的挖掘存在显著滞后性, 其设计理论多基于理想弹性模型, 难以适配复杂应力路径下材料的塑性损伤演化特性。在高地应力和强震极端条件下, 由于钢材应变强化效应和混凝土应变软化特性不能形成协同工作机制而使支护结构提前进入非线性破坏阶段。该材料性能单向化利用方式使支护体系对流变地层长期变形响应过程中应力重分布自适应能力不足, 可能最终由于材料性能阈值被打破而失去承载功能, 突出传统材料设计理念和工程实际需求存在结构性矛盾^[1]。

1.2 结构形式维度的协同性缺陷

既有支护结构的力学传导路径呈现明显的离散化特征, 各构件间的连接节点多为刚性约束或铰接形式,

缺乏对变形协调机制的系统性构建。多维荷载耦合条件下“桩—锚”和“桩—撑”这两种典型结构体系容易产生局部应力集中, 且邻近构件刚度不同将进一步加剧该应力分布非均质性。该结构形式碎片化设计模式导致支护体系很难构成整体化受力共同体且抗突发荷载能力受最薄弱环节性能上限约束, 暴露传统结构体系协同工作机制和全寿命周期内可靠性设计中存在的深层不足。

2 土木工程生态支护体系创新需求

2.1 基于生物矿化作用的主动防护机制构建

传统支护体系多依赖工程材料被动阻隔环境作用, 现代生态需求催生生物与工程协同的主动防护路径。为实现单纯的力学稳定性, 需要将微生物诱导的碳酸钙沉积 (MICP) 等生物矿化方法整合到支护结构中, 并通过有针对性的方式来调节微生物的代谢行为, 裂隙发育区内原位产生碳酸钙胶结物形成具自修复作用的生态防护层。这一过程需要解析岩土—微生物—工程材料多场耦合作用机理, 构建以酶活性调控为核心的矿化速率预测模型以解决传统支护体系应对渐进性地质灾害的滞后性, 并动态统一力学稳定和生态修复^[2]。

2.2 仿生结构设计 with 功能植被协同体系

受自然岩土体植被根系网络启发, 生态支护需构建“刚柔相济”的仿生结构体系。采用仿根系网络三维加筋结构进行设计, 使高分子复合材料和功能型植被根系相互耦合形成具有力学承载和水土保持双重功能的复合结构层。需要着重考虑植被根系分泌物改善岩土体物理和化学特性作用, 构建根系生长应力和支

护结构变形动态平衡模型以打破传统植被护坡浅层固着限制,实现由地表生态修复向深部岩土体稳定性增强的跨尺度调控和自我维持能力生态防护系统建设。

3 土木工程地下空间开发中的生态支护体系构建原则

3.1 最小干预原则——锚定地质本底的结构自稳性

地下空间开发需以地质本底特征为基准,避免过度扰动围岩原始应力场。支护体系的设计要以地层自稳能力的评价为依据,优先选择锚杆和喷射混凝土作为柔性支护,只对地质条件突变地区的刚性结构进行补充。采用弹性支护刚度设计使支护力和围岩变形动态相匹配,减小围岩产生应力集中的危险。在施工期需要建立围岩位移的监测和预警机制,在位移速率小于阈值的情况下可以逐渐减少人工支护的干预,以保证围岩的自承能力对结构稳定性的支配作用^[3]。

3.2 仿生设计原则——重构岩土—结构协同机制

支护体系应模拟自然岩土体应力传递路径,采用分形几何优化支护单元排布。通过仿生锚杆群空间拓扑重构形成与植物根系相似的三维锚固网络以增强支护体系抗剪切能力。同时采用仿生界面处理技术来加强支护结构和围岩之间的接触作用,仿生界面粗糙度的设计需要满足摩阻力与位移之间的非线性关系以保证支护力能够随着围岩变形而自适应调整。该仿生机制能够有效地消解传统支护体系中应力集中缺陷并实现支护结构和围岩协同变形。

3.3 系统协调原则——构建多场耦合的支护体系

支护体系需统筹考虑渗流场、应力场、温度场的耦合作用。通过构建三维渗流—应力耦合模型对排水系统和支护结构进行空间优化配置,以保证渗流路径和支护薄弱区的错位分布。在温度场控制中,用相变材料充填支护结构空隙并以材料的相变潜热来平衡围岩的温度起伏,减小热应力在支护体系中的作用。多场耦合设计需要对支护体系关键参数进行参数敏感性分析以确定安全阈值范围,从而构成支护—排水—温控三位一体协同控制体系。

4 土木工程地下空间开发中的生态支护体系创新路径

4.1 推广植被混凝土喷播支护技术应用

在地下空间开发中,传统硬质支护易导致边坡生态断裂带形成,需通过植被系统重建实现力学稳定与生态修复的协同。植被混凝土喷播技术可以通过优化骨料级配和植物生长基质的比例来构筑“混凝土骨架—

微生物—植物根系等”复合结构层,提供草本和灌木渐进式的生长环境,同时遏制坡面水土流失,突破岩质边坡植被难以自然定植的工程瓶颈^[4]。

在某城市地下综合管廊边坡治理工程中,针对强风化砂岩坡面(坡率1:0.75),施工团队采用三层式植被混凝土喷播工艺。首先,通过高压风枪清理浮石并钻孔植入12 mm钢筋锚杆(间距 1.5×1.5 m),挂设8#镀锌铁丝网形成力学支撑框架;其次,分两次喷播底层混凝土(强度C20,骨料粒径5~10 mm,含3%聚丙烯纤维),首次喷播厚度80 mm覆盖铁丝网,二次喷播时嵌入50 mmPVC透水管(间距 3×3 m)形成排水通道;最后,在表层喷播含草灌种子(狗牙根:紫花苜蓿:胡枝子=5:3:2)的生态基质层(厚度20 mm,含腐殖土40%、保水剂5%、微生物菌剂2%)。在施工期间,使用无人机进行航拍以监控喷播的均匀性,并通过土壤墒情传感器动态地调整养护策略。经过6个月的努力,坡面的植被覆盖率已经达到92%,草本植物的根系深入混凝土层的3~5 cm深度,而灌木的根系则穿透到基岩的裂缝中。通过现场的拉拔试验,测定植被混凝土与基岩之间的粘结强度可以达到0.35 MPa,与传统的喷锚方法相比,提高40%,有效地阻止坡面岩石的进一步风化。

4.2 研发高韧性生态锚杆支护工艺

传统锚杆支护体系在富水软土地层中易因蠕变变形引发生态链式破坏,需通过材料革新与结构优化提升支护体韧性。高韧性生态锚杆以纤维增强树脂锚杆体,可降解套筒和多功能锚头为构件构建“柔性承载—水体渗透,植物生长”的一体化结构,它不仅可以通过纤维复合材料减缓应力集中造成的脆性破坏,还可以利用套筒降解产生的孔隙通道进行地下水循环和植物根系穿插作用,解决硬质支护和生态系统之间空间竞争矛盾。

例如:在某地铁车站深基坑支护工程(开挖深度18 m,地层为淤泥质黏土)中,研发团队设计“竹纤维增强树脂锚杆+生物基降解套筒+多孔陶瓷锚头”组合体系:锚杆体采用 $\Phi 25$ mm竹纤维—环氧树脂复合杆(抗拉强度 ≥ 600 MPa,断裂伸长率8%~10%),杆体全长设置螺旋状凹槽(间距50 mm)以增强与注浆体握裹力;外套管采用聚乳酸(PLA)可降解材料(壁厚3 mm,降解周期12~18个月),沿管长开设梅花形透水孔(孔径8 mm,间距200 mm);锚头采用多孔陶瓷材料(孔隙率 $\geq 35\%$),内置缓释肥胶囊与植物种子舱(狗牙根种子密度500粒/舱)。施工时采用套

管跟进法成孔（孔径 150 mm），注入含膨胀珍珠岩（粒径 2~4 mm，掺量 15%）的水泥—水玻璃双液浆，待浆液初凝后拔除套管。监测数据表明，在基坑挖掘过程中，锚杆的最大拉应力达到设计值的 68%，而地面的沉降则被限制在 25 mm 之内；经过 12 个月的时间，套管得到完全的降解，注浆体的表面出现蜂窝状的渗透通道，而锚头的周围也开始出现密集根系，这些都经过 X 射线衍射的详细分析，在注浆体与土体的接触面上，生成钙矾石等胶凝物质，这使得界面的粘结强度比普通砂浆锚杆提高 28%。同时，还形成一个以锚杆为中心的微型生态岛，实现支护功能和生态修复的时序性协同。

4.3 构建地下空间水—土—植被协同支护系统

在地下空间开发中，单一支护结构易引发水土失衡与生态割裂。通过构建水—土—植被协同体系，可利用植被根系固土、微生物改善土壤结构、导水系统调节地下水位，形成动态生态平衡。该模型基于生态工程学原理，采用多要素耦合的方式加强支护结构的抗变形能力的同时减少对原生环境的干扰，为地下空间的开发提供一种可持续生态防护方案^[5]。

因此，在某城市地下综合管廊建设中，针对富水软土地层易发生流沙和支护结构老化问题，项目组采用“三维根系固土+导水植被毯+微生物注浆”协同技术。首先，在支护结构基面上铺设具有导水通道的植被毯，毯体内埋设耐水湿狗牙根和芦苇根系以根系网络强化岩土界面黏结力；其次，在管廊的顶部 2 m 的区域内，逐层注入微生物菌剂和胶结液，通过利用巴氏芽孢杆菌的代谢产物来形成碳酸钙晶体，从而填补土壤的孔隙并增强其承载能力；最后，沿纵向在管廊内布置渗透式集水管将过量的地下水引入植被根系区形成“吸水—固土—导水”的循环系统。在施工过程中，通过实地拉拔试验来观察根系与土壤之间的握裹力如何变化。当监测数据达到设计标准的 85% 时，会启动分层覆土的技术，以确保支护结构与其周围的生态环境能够同步发展。

4.4 推行装配式生态混凝土支护结构模块化施工

传统现浇支护施工存在现场污染重、生态修复滞后等问题。装配式生态混凝土技术通过工厂预制带孔隙结构的支护模块，集成植物生长基质与微生态载体，实现“支护结构的安装和生态的恢复同步化”。该模型以预制装配技术为主线，在采用混凝土孔隙率对植物生长环境进行调节和解决地下空间支护与生态恢复之间时序矛盾的前提下，采用标准化模块设计来提高

施工效率，提供一种城市地下空间绿色开发工业化解决方案。

例如：某山地城市地下停车场边坡支护工程中，采用 C30 生态混凝土预制模块进行分层支护。该模块采用 L 型榫卯的构造方式，并在迎土面上预先设计一个 30×50 mm 的种植槽。在这个种植槽里，填充由腐殖土、缓释肥和保水剂按照 4:2:1 的比例混合而成的复合基质。施工时，先通过锚杆将底层模块固定于修整后的边坡，模块间预留 20 mm 宽的生态缝，填充混合草籽（由高羊茅占 60%、黑麦草占 30% 以及紫花苜蓿占 10% 组成）的纤维混凝土浆料；中层模块内部配备一个直径为 50 mm 的 PVC 导水管，该导水管的开口与边坡的排水盲沟相连，从而构建一个立体的排水系统；顶层模块安装藤蔓植物攀爬架并选择五叶地锦垂直绿化。施工期利用 BIM 技术对模块的安装次序进行仿真，并利用二维码标签跟踪各组件养护周期和植物生长指标。根据监测数据，模块在安装完成后的 6 个月内，其植被覆盖率已经达到 92%，而边坡的表面径流系数也下降到 0.35。与传统的浆砌工艺相比，模块之间的榫卯连接方式的抗剪强度提高 58%。

5 结束语

地下空间开发的生态化转型涉及工程与自然系统在复杂地质环境中的协同发展。对生态支护体系进行创新性探索，展现由材料性能优化向多场耦合系统建设转变之路，从而实现由“被动承载”向“主动适应”的功能跨越。这一创新打破了传统技术中的生态阈值，在工程安全和生态保护之间构建起动态平衡框架。未来生态支护体系将进一步向自组织、自修复和自维持等智能生态体优化，从而为地下空间开发可持续发展提供技术支持，并促进土木工程范式重构。

参考文献：

- [1] 徐云. 土木工程施工中边坡支护技术的应用[J]. 石材, 2025(04):37-39,141.
- [2] 焦阳. 基于土木工程建筑施工中的边坡支护技术探究[J]. 建筑技术开发, 2025,52(01):34-37.
- [3] 孙凯姣. 土木工程建筑施工中的边坡支护技术探究[J]. 建材发展导向, 2025,23(01):67-69.
- [4] 郑贵日. 土木工程施工中深基坑支护施工技术[J]. 工程建设与设计, 2024(24):166-168.
- [5] 卢俊廷. 土木工程施工中边坡支护技术的作用与应用研究[J]. 散装水泥, 2022(04):105-107.

公路桥梁设计中桥面材料选择对桥梁性能的影响

汪云飞

(安徽交检交通发展研究中心有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 公路桥梁设计中桥面材料选择直接影响结构安全、耐久性能及行车体验。本文针对荷载传递效率问题, 分析高强混凝土与复合材料的力学响应特性, 探讨不同环境条件下材料抗侵蚀机理, 比较被动防护与自修复技术的优劣; 研究表面特性对车辆行驶的多维度影响, 包括摩擦行为、温度效应及电磁兼容性; 结合轻量化设计、预制装配和标准化生产策略, 建立全寿命周期成本优化模型, 以期桥梁工程材料选择提供系统解决方案。

关键词 桥面材料; 结构性能; 耐久性设计; 行车舒适性; 全寿命周期成本

中图分类号: U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.040

0 引言

我国交通基础设施建设正处于高质量发展转型期, 公路桥梁作为关键节点工程面临新的技术挑战与发展机遇。随着交通量持续增长和重载车辆比例上升, 传统桥面材料在长期服役过程中暴露出耐久性不足、维护成本高等突出问题。智能交通系统快速发展对桥面功能提出更高要求, 自动驾驶技术需要材料具备特定的电磁兼容特性。在碳达峰、碳中和目标推动下, 桥梁建设必须兼顾性能提升与资源节约。气候变化导致的极端天气频发, 使既有环境分区标准面临重新评估。在此背景下, 深入研究桥面材料与桥梁性能的内在关联, 探索经济高效的解决方案, 对提升我国桥梁工程品质具有重要意义。

1 公路桥梁性能的核心构成要素

1.1 结构承载能力的基本要求

结构承载能力构成桥梁性能的物理底线, 其本质是力学系统对多重荷载的响应与抵抗机制。设计规范中明确规定的恒载、活载、风荷载及地震作用组合, 要求主梁、墩台、基础等构件在弹性阶段保持稳定应力分布, 并在极端条件下控制塑性变形发展。现代桥梁工程更强调承载体系的冗余度设计。例如: 连续刚构桥通过墩梁固结形成超静定结构, 在局部构件失效时仍能通过内力重分布维持整体稳定。材料性能对承载能力的制约尤为显著。高强混凝土的抗压强度与钢材的屈服极限共同定义了截面抵抗矩的理论边界, 而材料非线性特性则影响裂缝扩展与破坏模式。工程实践表明, 纤维增强复合材料在提升抗拉承载效率的同

时, 能有效延缓剪切裂缝的贯穿性发展^[1]。承载能力的动态衰减同样不可忽视, 氯离子侵蚀导致的钢筋截面损失或预应力筋的松弛效应, 均会随时间推移削弱初始设计安全裕度。荷载谱系的演变对承载标准提出新挑战。重载交通比例上升使得疲劳应力幅频次分布向高危区间偏移, 而车桥耦合振动引发的冲击系数波动, 要求动力响应分析纳入承载评估体系。相应地, 基于监测数据的承载能力实时评估方法正在取代传统静态校核, 通过应变模态识别与损伤指标量化, 实现从规范符合性向状态适应性的范式转换。

1.2 耐久性能的关键作用

耐久性能是桥梁在全生命周期内抵抗环境侵蚀与材料劣化的能力表征, 其经济价值往往超越初期建设成本。混凝土碳化深度与钢筋锈蚀速率的数学模型显示, 保护层厚度每增加10毫米, 可延长结构退化拐点出现时间约1.5个周期。冻融循环地区的盐冻剥蚀问题则需引入气孔间距系数小于200微米的引气混凝土, 通过微观结构优化阻断毛细水迁移路径。耐久性设计正从被动防护转向主动调控。阴极保护系统通过施加恒定电流抑制钢筋电化学腐蚀, 而迁移型阻锈剂能在裂缝出现后自主修复钝化膜。值得注意的是, 不同腐蚀因子的协同效应可能导致防护措施失效, 如沿海地区氯离子与硫酸盐的双重侵蚀会加速混凝土的膨胀性破坏。这要求环境作用谱的划分精确到5公里网格尺度, 而非简单沿用气候分区标准。维护策略的优化同样影响耐久性实现^[2]。基于可靠度的预防性养护模型证明, 在锈蚀率达到临界值前0.3个标准差时进行涂层更新, 可比事后维修降低60%的全周期成本。智能监测技术

的介入进一步改变了耐久性评估模式,埋入式光纤传感器对 pH 值和氯离子浓度的分布式测量,为退化进程提供了细胞级诊断手段。

1.3 行车舒适性的用户体验需求

舒适性评价本质是人车路系统的振动传递优化,其标准已从静态平整度扩展到多维度动力学指标。国际粗糙度指数 IRI 低于 2.0 米/千米的基础要求,正在被竖向加速度均方根值 0.3 米每平方秒的乘坐舒适度阈值所补充。连续梁桥的挠度控制不仅涉及视觉安全感,更与车辆悬挂系统的二次振动激发直接相关。桥面铺装体系对舒适性的贡献常被低估。聚合物改性沥青混合料相比传统 AC-13 混合料,可将轮胎振动噪声降低 4 分贝以上。伸缩缝处的跳车现象则需通过梳齿板动态咬合设计控制高差突变,德国最新规范要求接缝区 30 米范围内的纵坡变化率不超过 0.5%。风障设计在提升侧向稳定性的同时,也需考虑气动噪声对驾驶心理的影响,多孔介质风障可使湍流强度衰减 40% 而不产生显著风噪声。人机工程学原理正在重塑舒适性设计范式。基于眼动实验的护栏透视率优化证明,横向杆件间距保持视距的 1/8 至 1/10 时,能有效缓解驾驶员穿越高架桥的压抑感。照明系统的色温调节则通过影响昼夜视觉适应性,间接改善了长隧道桥梁衔接段的事故率。这些发现促使舒适性标准从物理参数向生理—心理复合指标演进。

2 桥面材料对公路桥梁性能的具体影响

2.1 材料强度与荷载传递效率的关系

桥面材料的强度特性从根本上决定了荷载传递的效率和安全性。高强混凝土凭借其优异的抗压性能,能够将集中轮载有效扩散至更大面积的桥面板区域,显著降低局部应力峰值。这种应力扩散效应与材料的弹性模量直接相关,弹性模量每提高一定比例,桥面板的荷载分布半径可相应扩大。纤维增强聚合物复合材料则通过定向纤维排布实现各向异性强度分布,在主应力方向形成针对性强化^[3]。正交异性钢桥面板的纵向加肋设计改变了传统均质材料的受力模式,使局部集中荷载转化为整体性结构响应。材料强度与韧性的平衡关系尤为关键,过高的强度指标若伴随韧性下降,可能导致冲击荷载下的脆性破坏。这种矛盾促使工程界研发具有应变硬化特性的新型金属合金,在保持高强度特性的同时提升塑性变形能力。桥面材料的疲劳性能同样不容忽视,重载交通下的循环应力作用可能引发微观裂纹的累积扩展,最终导致材料在远低于静态强度的情况下遭到破坏。

2.2 材料抗环境侵蚀能力的重要性

环境侵蚀是桥面材料性能退化的主要驱动因素,其影响具有明显的区域差异性。寒区桥梁面临的除冰盐渗透与冻融循环协同作用,要求混凝土材料同时具备低渗透性和高抗冻性。氯离子扩散系数成为衡量混凝土耐久性的关键指标,掺入硅灰等活性掺合料可显著降低该系数。钢桥面的腐蚀防护需要构建多层次的防御体系,热喷铝层与有机涂料的复合防护展现出优于单一方案的耐久性能。沿海地区的盐雾侵蚀更为严峻,不锈钢复合钢板或玻璃纤维增强聚合物等耐蚀材料的使用成本虽高,但全寿命周期核算可能更具经济性。新型自修复材料通过内置微胶囊或形状记忆合金纤维,在裂缝萌生阶段主动触发修复机制,实现了材料耐久性的动态维持。这种智能化防护理念改变了传统的被动防护模式,使材料具备对环境变化的适应能力。环境因素的时变特性也不容忽视,随着气候变化的加剧,原有环境分区标准可能需要进行适应性调整。

2.3 材料表面特性与车辆行驶体验的关联

桥面材料的表面特性直接影响车辆行驶的安全性和舒适度,这种关联具有多物理场耦合特征。表面微观结构决定轮胎接触区的摩擦行为,激光纹理化处理形成的规则凸起能维持摩擦系数的稳定性,而露石混凝土的宏观纹理则通过快速排水提升湿滑条件下的安全性。表面特性的耐久性同样重要,耐磨性能不足会导致纹理随使用时间衰减,进而影响长期使用效果。材料的热物理性质通过温度场分布影响行车体验,高反射率铺装可降低夏季表面温度,减轻车辙变形和热岛效应。这种温度调节作用还能改善冬季结冰条件,提升全天候通行能力。随着智能交通系统的发展,桥面材料的电磁特性成为新的研究维度,某些复合材料对毫米波雷达的反射特性可能影响自动驾驶车辆的感知精度^[4]。材料颜色的心理效应也逐渐受到重视,恰当的色调选择能够缓解驾驶员的长距离行驶疲劳。表面特性的优化需要平衡多重要求,如防滑性能与轮胎磨损、排水效率与结构强度等矛盾关系,这促使表面工程设计向多目标优化方向发展。

3 公路桥面材料选择的经济性与施工效率的平衡策略

3.1 轻量化材料降低运输与安装成本

轻量化材料的应用直接减少了物流环节的能源消耗和机械使用成本。纤维增强聚合物复合材料制成的桥面板单位面积重量仅为混凝土构件的五分之一,使得单次运输可承载更大大有效荷载,显著降低偏远地区

桥梁建设的物流压力。这种材料特性同时改变了吊装设备的选型标准,中小吨位起重机即可完成安装作业,减少了大型设备进场带来的场地准备费用和时间延误。材料轻量化还重构了桥梁支撑系统的设计逻辑。采用铝镁合金桥面系的钢结构桥梁,其下部墩柱截面尺寸可缩减30%以上,连带影响基础工程的土方开挖量和混凝土浇筑量。对于软土地基上的桥梁建设,这种自重减轻带来的连锁效应尤为明显,能够避免昂贵的地基处理措施。但轻质材料的刚度特性需要特别关注,通过蜂窝夹层结构或纵向加劲肋设计来保证局部承压稳定性,是平衡重量与性能的必要措施。轻量化带来的施工便利进一步体现在快速化安装环节。模块化设计的复合材料桥面板可通过标准化连接件实现现场无焊接拼装,将传统需要数周的桥面铺装作业压缩至数天内完成。这种施工方式特别适用于交通繁忙路段的桥梁改造工程,能够最大限度减少对既有交通的干扰。随着3D打印技术在大型构件制造中的应用,轻量化材料的形态优化将获得更大设计自由度,进一步释放运输和安装环节的成本节约潜力。

3.2 预制构件缩短现场施工周期

预制装配式桥面技术将大量现场作业转移至条件可控的工厂环境,从根本上改变了传统施工的时空组织方式。预应力混凝土空心板在预制场内完成养护和强度发展,运抵现场后直接吊装就位,避免了现浇混凝土所需的支架搭设和养护等待期。这种转变使桥面施工不再受天气条件严格制约,雨季施工效率提升尤为明显,整体工期可缩短40%以上。预制构件的精度控制带来施工质量的系统性提升。工厂化生产环境下,钢纤维混凝土的配比均匀性和振捣密实度能够达到实验室水准,这是现场作业难以企及的品质保证。标准化模具的使用确保构件尺寸误差控制在毫米级,消除了现场模板安装偏差导致的接缝处理难题。对于需要预埋传感器或管线的智能桥面系统,预制过程能够实现各类预埋件的精确定位,为后续运维提供可靠的数据采集基础。模块化预制还推动了施工组织的深度优化。将桥面划分为运输单元最大化的标准块体,配合BIM技术预先模拟吊装顺序,可以实现施工现场的流水作业^[5]。这种组织方式显著降低了各工种交叉作业的协调难度,使人力配置效率提升50%以上。针对城市桥梁建设的特殊限制条件,分段预制后的夜间快速安装模式已在多个特大城市的交通改造中得到成功验证,单次封闭交通时间可控制在六小时以内。

3.3 标准化生产提高规模化经济效益

标准化生产模式通过重复利用模具和工艺参数,摊薄了单个项目的研发和试制成本。桥梁面板采用统

一模数尺寸设计后,模板周转使用次数从不足十次提升至百次量级,直接材料成本下降25%以上。这种规模效应在区域路网建设中表现更为突出,相邻项目共享预制场地和生产线,使设备利用率达到最优状态。材料标准化促进了供应链的集约化管理。统一技术要求的钢材采购量增加带来议价能力提升,批量订购可使原材料成本降低15%左右。混凝土配合比的区域统一化便于骨料基地的定点供应,减少因材料来源差异导致的质量波动。这种集中采购模式同时简化了质量检验流程,相同标准的重复验证大幅降低了检测成本占比。标准化与定制化的辩证统一是提升经济效益的高级形态。基于参数化设计的标准构件库,能够通过有限模块组合满足多样化需求,既保持规模生产优势,又兼顾项目特殊性要求。数字孪生技术的应用进一步强化了这种柔性生产能力,在设计阶段即可精确计算每种标准化方案的边际成本,为决策提供量化依据。随着建筑工业化程度的不断提高,标准化生产的经济半径正在扩大,跨区域协作共享预制资源已成为行业新趋势。

4 结束语

桥面材料选择需要统筹力学性能、环境适应性及使用功能三大核心要素。现代桥梁工程应当突破传统材料应用的局限性,将智能材料特性与工业化施工技术有机结合。耐久性设计需考虑气候变化带来的新挑战,行车舒适度评价应拓展至人—车—路协同优化层面。经济性分析必须立足全寿命周期,平衡初期投入与长期维护成本。未来,应聚焦多功能复合材料的开发应用研究,以及数字化技术在设计施工运维全过程的深度融合,推动桥梁工程向更安全、更耐久、更智能的方向发展。

参考文献:

- [1] 简方梁,杨永明,焦亚萌,等.大跨度公铁两用桥梁公路桥面系设计研究[J].铁道标准设计,2021,65(11):11-16.
- [2] 杨文娟,陈莹,吴沛,等.敏感水体公路桥梁桥面径流排水系统设计方法[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(04):60-67.
- [3] 闫杰森,吴荣国.高速公路扩宽桥梁设计分析[J].黑龙江交通科技,2025,48(02):58-62.
- [4] 李凯.大跨度公路桥梁结构设计要点研究[J].工程技术研究,2025,10(03):193-195.
- [5] 吕中维,张雅林,李伟亭.高速公路桥梁设计中的振动与减振控制技术研究[J].运输经理世界,2025(03):94-96.

高原低气压环境下金属矿井巷支护技术应用研究

齐宏洋

(新疆金能昆仑矿业有限责任公司, 新疆 维吾尔自治区 848500)

摘要 本研究聚焦高原低气压环境下金属矿井巷道支护技术的适用性与优化路径, 围绕低气压、大气稀薄、气候特殊等因素对巷道支护系统造成的复杂影响展开系统分析。探讨了高原环境对岩体应力、围岩破坏模式及支护结构稳定性的干扰作用, 评估了锚杆锚索、喷混支护、钢拱架等主流技术在高原条件下的适应性表现, 并进一步提出结构参数调整、材料工艺改进、通风支护协同与智能监测系统集成等针对性优化路径。通过多角度的技术剖析与系统性路径构建, 以期高原金属矿井巷道支护提供实践参考。

关键词 高原环境; 低气压; 金属矿井; 巷道支护

中图分类号: TD85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.041

0 引言

随着金属矿产资源开发强度的不断加大, 高原地区金属矿井的安全与稳定问题日益突出。受限于特殊的自然环境条件, 尤其是低气压、稀薄空气、昼夜温差大等因素, 传统巷道支护技术在高原区域应用中面临显著挑战^[1]。围岩失稳、材料老化、支护结构耐久性不足等问题频繁出现, 严重制约了矿井生产效率与安全水平。因此, 围绕高原低气压背景下支护系统的适应性展开研究, 不仅能为提升矿山工程安全提供路径参考, 也对推动高原资源高效利用与绿色开采具有积极作用。

1 高原低气压环境对矿井巷道支护的影响分析

1.1 大气压力变化对岩体应力的影响

高原地区因海拔较高, 导致常年处于低气压状态, 大气压力明显低于平原地区。这种气压环境不仅改变了岩体内部孔隙中的气液平衡关系, 也对地应力分布产生间接干扰。在封闭或半封闭的巷道结构中, 围岩与空气之间的压差增大, 容易促使原本稳定的结构发生微变形, 从而导致应力集中加剧。特别是在存在节理、裂隙发育或软弱层的岩体中, 原有的应力场分布受到扰动后可能发生不均衡应力释放, 引发局部破坏或失稳。这种应力扰动往往隐蔽性强, 不易在前期探测中显现, 却对支护结构的适应能力提出更高要求。

1.2 低气压对围岩破坏的诱导作用

在低气压条件下, 岩体孔隙水的蒸发加速, 导致围岩含水率波动频繁, 使岩石微结构失稳风险增加。

尤其是在裸露岩面处, 围岩体易受到干湿循环交替与气压骤变的共同作用, 进而诱发微裂隙的扩展与连接, 逐步演化为显著的结构破坏。这一过程中, 围岩的原始稳定状态被打破, 初期破裂多呈现出以剥落、崩落为主的形式, 随后可能发展为大规模的坍塌或变形。因此, 在这种诱导作用下, 支护系统所承担的不仅是传统意义上的静载荷约束, 更要具备动态适应围岩状态突变的能力^[2]。

1.3 气候条件对支护稳定性的影响

高原地区气候变化剧烈, 昼夜温差大、风速高、湿度变化明显, 这些因素都会对支护材料和结构性能产生复杂影响。在昼夜循环中, 温度剧烈起伏容易引起支护材料的热胀冷缩, 加速其疲劳损耗过程。当支护体系中存在钢材构件时, 更容易因温差循环而出现微变形或连接部位的疲劳裂缝。同时, 高原空气中的含氧量低、紫外线强, 也可能加快部分材料的老化速度, 尤其对表面裸露的支护喷层或锚固胶体影响明显。这些因素共同作用下, 使得原本设计寿命内的支护结构出现早期性能衰减, 影响巷道长期稳定性。

1.4 稀薄空气对施工支护的限制

在高原施工环境中, 稀薄空气不仅对人员体能和施工效率造成直接影响, 也间接限制了支护技术的正常实施。受限于低氧条件, 施工人员操作精度与持续作业能力下降, 喷浆作业、锚杆安装等关键环节易出现技术细节缺失, 增加隐患。同时, 设备运行效率亦受到制约, 部分气动或电动工具在高原表现出动力不足、稳定性差的问题。此外, 稀薄空气对材料固化反

应也有潜在影响,部分化学锚固剂在低气压下反应过程延缓,降低早期强度形成速度。这些问题在短时间内或许影响不明显,但在长距离或深井作业过程中,往往会在局部节点积累形成系统性隐患,对支护安全构成长期挑战。

2 现有支护技术在高原低气压环境中的适应性

2.1 锚杆锚索支护的适应性分析

在高原金属矿巷道中广泛使用的支护形式包括树脂锚杆、锚索加预应力系统、组合式托盘锚杆等类型。以 $\Phi 20$ mm树脂锚杆为例,其锚固剂在高原地区气压偏低、温度变化大的环境下固化速度减缓,早期强度形成滞后,锚固效果存在不确定性。高原岩体含水率波动大,易导致锚固体与孔壁之间结合力降低,引发锚杆松动脱落^[3]。对于锚索支护系统,如使用 $\Phi 15.2$ mm钢绞线,预应力释放与保持能力受低气压条件制约,张拉过程中若未及时调整张拉力与回弹量,极易产生残余变形。联合使用的W钢带+树脂锚杆系统在高原软弱围岩段存在托盘受力不均问题,加上人为操作误差,整体支护刚度下降。这些问题说明常规锚杆锚索系统需在锚固剂反应温度适配、钢材耐腐蚀处理和张拉技术稳定性方面进行适应性优化。

2.2 喷混技术在高原地区的应用表现

当前常见的喷混支护技术以湿喷混凝土为主,常配合聚丙烯纤维增强型C25混凝土配比,并采用速凝剂A型或B型控制初凝时间。在海拔超过3 500 m的工况中,混凝土表面蒸发加速,喷层内水分迅速流失,未固化部位极易产生裂缝,纤维易外露、界面结合力减弱,影响粘结性能。以诺顿诺华干湿一体喷浆机为代表的施工设备在高原高寒地区表现出流速不稳、风压不足的问题,导致喷层厚度难以均匀控制。部分矿区尝试引入高性能聚羧酸系减水剂与复合型缓凝剂对配合比进行调整,但仍难以解决夜间低温冻结对早期强度的不利影响。此外,高原地区施工中泵送距离常因地形限制变长,加剧了喷浆材料的离析与沉淀风险,整体支护性能大打折扣。因此,喷混技术在高原地区的应用需要在外加剂体系、施工设备适应性和喷层早期养护机制上系统升级。

2.3 钢拱架及联合支护的适用性

钢拱架支护常见类型包括U29、U36热轧槽钢拱架,以及与喷混、锚杆组合形成的“拱一喷一锚”联合支护结构。在高原深埋巷道和断层破碎带等地质复杂区域,该结构能有效分散围岩压力,提升整体支护强度。实际工程中使用的U36拱架虽具备良好承载性能,但

在高原富水矿区,因氧气稀薄与空气干湿剧变,构件腐蚀速率显著加快,影响其使用寿命。高原地区施工中常用手工电弧焊接拼装,受限于气压低、电流波动等条件,焊缝质量难以保障,一旦产生焊接裂纹,支护系统承载力迅速下降。部分矿区尝试改用螺栓连接式拼装或热镀锌处理拱架以延缓腐蚀,但安装周期延长、人工成本上升,限制了推广效率。因此,钢拱架在高原地区的适用性虽具优势,但其使用需建立在可靠的防腐处理、拼装工艺和地质适应性匹配的基础之上。

2.4 工艺与材料对环境的响应性

高原矿井支护材料主要包括树脂类锚固剂、硅酸盐水泥、复合型外加剂和钢结构构件,其性能受环境变化影响显著。以M20快固树脂为例,在低气压下其固化时间延长30%以上,早期粘结力不稳定,尤其在低温下表现出脆化现象。喷混用C25硅酸盐水泥若缺乏有效保温养护措施,温差引起的体积变化将导致早期开裂。钢构件在含水率大、氧气含量低的环境中容易形成电化学腐蚀,加快锈蚀进程,特别是埋入围岩的锚杆部分最为脆弱。在施工工艺方面,锚孔清理、注浆均匀性和喷浆厚度控制在高原作业中常因操作疲劳和设备效率下降而出现偏差,直接影响支护整体质量^[4]。因此,在高原低气压条件下,支护系统对材料性能、固化环境和施工工艺提出了更高适配性要求,不仅需对材料配比做出调整,更应配合智能化施工设备以提升作业精度。

3 高原低气压环境下支护技术的优化路径

3.1 支护结构参数的优化设计

面对高原低气压环境下岩体应力场分布的不稳定性与围岩自稳能力普遍偏弱的现实,支护结构设计不再适合沿用平原地区的标准参数体系,而应根据实际地应力测量与围岩等级划分结果进行动态优化。在软岩与破碎岩层较为集中的高原金属矿巷道中,建议优先采用高强度组合型结构体系,如将传统单一锚杆支护升级为“ $\Phi 22$ mm左旋等强螺纹钢锚杆+W钢带+钢拱架+湿喷层”的复合式联合支护结构,合理控制锚杆间距在0.8 m以内,锚固长度应根据围岩自稳圈深度设置,一般延伸至2.5 m以上,以确保锚固体穿透潜在破坏带。拱架间距由原标准的1.0 m缩减至0.6~0.8 m之间,增强整体支护刚度,同时增设加强环与连接板提升连接部位的稳定性。在参数配置过程中,还应参考现场监测数据持续优化结构布置,结合围岩收敛变形速率实施动态调整,以实现支护系统的刚柔结合与主被动控制统一^[5]。

3.2 材料抗性与工艺的改进

高原地区独特的气候与低气压环境对支护材料性能提出了更加严格的要求,因此,传统材料体系与标准配比需进行改良与再设计。在喷混材料方面,应采用 C30 以上强度等级的湿喷混凝土,并添加体积含量 0.9% 以上的聚丙烯纤维,以提升早期抗裂能力和变形适应性。为了应对水分蒸发过快导致的表面干裂问题,可引入三组分复合缓凝型速凝剂(如 NAH-PCE-GY 型),在保证初凝时间可控的前提下提升喷层均匀性与附着性^[6]。锚固剂则推荐使用 M30 型快硬树脂,具有较强的温度适应性与固化稳定性,其在低气压条件下表现出更好的早期强度增长曲线,适合高原低温环境下快速锚固作业。钢结构构件如锚杆、拱架应优先选用耐候钢 Q420NH,并进行双层热镀锌+环氧涂层处理,以抵抗氧含量低与紫外辐射强导致的腐蚀加速问题。在工艺方面,应实施“喷前湿润、分层施工、两次成型”的施工流程,利用多通道喷头实现连续作业,提升厚度控制精度并降低回弹率,确保支护层结构致密性与力学稳定性。

3.3 通风与支护的协同优化

由于高原地区空气密度低、含氧量不足,通风系统对作业空间中的粉尘扩散、材料固化、施工温度控制等多个环节具有间接主导作用,需将通风系统纳入巷道支护整体规划之中。在支护作业区域内,应采用局部送风与负压排风组合的分区通风模式,配置变频风机与智能风量调节装置,实现风压、风量实时调控,以适应不同工序对空气流速与湿度的需求变化^[7]。在锚杆注浆作业中,风流过大会导致浆液反喷与粉尘干扰,需设置锚固工位遮蔽风幕,有效控制气流扰动,提升注浆质量。在喷浆施工阶段,推荐设置封闭式喷浆舱体结构,通过循环空气加湿系统控制喷层环境湿度在 80% 以上,并配合远程监控系统实现喷头位置精确定位与喷层厚度实时反馈。在高原重点矿区,如西藏某铜矿已试点部署风压联动式喷浆控制系统,其通过气压传感器判断最佳喷射窗口,显著降低了喷层开裂与附着不良率,反映出通风与支护施工协同融合的显著技术优势^[8]。

3.4 支护系统的智能化监测

高原环境的不确定性使得巷道支护的长期安全性难以通过单一静态设计方案保障,因此,构建以“传感感知—数据采集—智能分析—动态反馈”为主线的支护监测体系已成为支护技术发展的必然趋势。在锚杆锚索支护中,应布设基于 FBG 传感技术的应力监测

光纤系统,实时感知锚杆内部轴力变化、塑性变形进度与结构松动征兆,结合数据采集仪定时上传,构建锚杆失效趋势图。在拱架支护区域,建议应用无线荷载传感器与位移监测仪(如 SRR-A 型结构应变计),监测拱架受力分布程度与变形位移同步演化过程。喷混层可安装表面裂隙成像监测系统,通过高清摄像头与 AI 图像识别算法识别早期喷层开裂与渗水迹象,实现自动报警。为提升监测响应速度,系统需集成 LoRa 无线网络模块并接入矿井调度平台,实现支护状态数据云端可视化展示与移动端访问。在高原实际应用中,已有项目实现基于 BIM+GIS 融合的“支护状态三维展示平台”,将支护数据与地质信息融合展示,辅助施工与运维过程中的精准决策,形成高原矿井支护从“经验判断”向“数据驱动”过渡的有效路径^[9]。

4 结束语

高原低气压环境对矿井巷道支护技术提出更高要求。未来应在适应性强的新型材料研发、多源环境数据驱动下的智能支护系统构建以及支护装备与监测技术的高度集成方向持续推进,推动巷道支护从结构抗力主导向“结构—环境—监测”三位一体融合发展。同时,应加强现场工况反馈机制,形成“设计—施工—监控”一体化闭环系统,不断提升高原矿山工程的安全性、可靠性与运行效率,为复杂生态区资源开发提供稳定技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨小聪,蒋合国.新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J].中国矿业,2024,33(05):9-21.
- [2] 于志钢,王龙,孙韶男.采矿工程中支护质量管理及其监测技术的运用[J].中国金属通报,2023(09):16-18.
- [3] 王宏江.金属矿蚀变岩体变形特征及最佳支护时间研究[J].山西冶金,2023,46(01):105-107.
- [4] 许金成,张绍江,李岗,等.金属矿破碎带巷道围岩支护优化设计[J].中国矿山工程,2021,50(06):92-96.
- [5] 王龙浩.金属采矿工程巷道掘进和支护应用[J].世界有色金属,2020(22):45-46.
- [6] 费旭东.高海拔地区金属矿井人工增氧装置的通风扩散规律实例研究[D].长沙:中南大学,2022.
- [7] 邓红卫,钟智明,田广林.高原矿井分段式增氧通风数值模拟研究[J].黄金科学技术,2021,29(05):698-708.
- [8] 姚银佩,蔡泽山,王辉林,等.高原矿井通风参数及风机选型研究与应用[J].黄金,2020,41(10):37-39.
- [9] 张国梁,蒋仲安,姚尚辉,等.高原环境下的矿井通风机性能变化与修正[J].矿业研究与开发,2020,40(07):100-105.

极复杂地质条件下地面定向多分支水平井精准着陆技术研究

杨睿哲

(焦作市神龙水文地质工程有限公司, 河南 焦作 454000)

摘要 以焦煤公司赵固矿区为研究对象, 聚焦极复杂地质条件下地面定向多分支水平井着陆的关键难题。通过深入剖析矿区独特的水文地质与生产现状, 系统阐述精准着陆方案的优化设计、实施过程及创新要点。结合赵固一矿15031工作面的实际工程案例, 运用详实的施工数据与分析, 验证该方案在攻克钻孔着陆技术瓶颈、提升钻进效率方面的显著成效, 以期为煤炭行业在复杂地质环境下开展水害超前治理提供有价值的实践参考。

关键词 赵固矿区; 极复杂地质条件; 精准着陆方案; 水害治理

中图分类号: TD8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.042

0 引言

随着煤炭开采活动的持续深入, 矿井面临的水文地质问题日益严峻。赵固矿区作为焦煤公司的主力生产基地, 凭借高度机械化的综采、综掘技术, 实现了煤炭开采效率的大幅提升。为保障生产的连续性与安全性, 提前开展采、掘工作面的水文地质勘察, 并实施超前预注浆等水害治理措施成为当务之急。然而, 地面定向多分支水平井在施工过程中, 精准着陆问题成为制约该技术应用效果的关键技术瓶颈, 严重影响水害治理工程的整体质量与进度。本研究深入分析赵固矿区极复杂地质条件下地面定向多分支水平井着陆的技术难题, 通过优化设计精准着陆方案, 有效解决钻孔着陆困难、施工效率低下等问题, 旨在显著提高水害治理工程的成功率与实施效率。

1 赵固矿区地质与生产现状分析

1.1 矿区水文地质条件

赵固矿区地层结构复杂, 自上而下依次分布奥陶系中统马家沟组、石炭系上统本溪组和太原组、二叠系下统山西组、新近系及第四系等多个地层单元。其中, 石炭系上统太原组和二叠系下统山西组作为主要含煤地层, 蕴藏着丰富的煤炭资源。然而工作面上覆巨厚的第四系、新近系冲积层, 形成全掩盖区地质特征, 极大地增加了水文地质勘探工作的难度与复杂性。L8灰岩含水层是矿区主要的充水水源, 其厚度介于10.60~11.49 m之间, 距离21煤层底板仅27.09~27.16 m, 承受着5.3~5.4 MPa的高水压, 突水系数

达到0.195~0.199 MPa/m^[1]。在煤炭采掘工程活动的影响下, 煤层顶底板受到扰动, 加之该区域地下水水平与垂向补给条件良好, 使得工作面面临着极高的突水风险, 严重威胁着矿井的安全生产与正常运营。

1.2 矿区生产现状

在赵固矿区煤炭开采过程中, 广泛应用先进的综采、综掘设备, 生产机械化程度处于行业领先水平, 这使得煤炭开采效率得到显著提升。但高速的开采进度导致生产接续紧张, 为确保生产的有序进行, 必须加快推进水害治理工程。地面区域水害治理工程作为重要的防治手段, 其核心技术——地面定向多分支水平井施工, 却因矿区复杂的地质条件面临诸多挑战。如地质构造复杂多变、地层岩性差异大等问题, 严重影响钻孔施工的准确性与效率, 制约着水害治理工程的顺利开展。

2 地面定向多分支水平井着陆难题分析

2.1 正常地质条件下的着陆困难

在常规地质条件下, 地面定向钻孔的设计主要依赖相邻勘探钻孔提供的数据支持。然而, 在赵固矿区, 勘探钻孔间距普遍达到几百米, 且施工区域多为尚未开采的“处女地”, 所依据的等高线数据大多基于推断得出。这种数据获取方式导致定向钻孔在实际应用中存在较大误差, 最大误差可达数十米。由此造成钻孔设计与实际地层情况严重不符, 使得钻孔在着陆过程中难以精准定位目标层位, 极大地影响了水害治理工程的准确性与有效性^[2]。

2.2 复杂地质条件下的施工难点

当多分支水平井施工遭遇地质构造时,施工难度呈几何级数增长。首先,准确获取地质构造的具体位置、落差、走向等关键参数成为首要难题。在复杂地质环境中,受多种因素干扰,传统勘探手段难以精确测定这些参数。一旦施工区域内连续出现多个断层,标志层作为重要的地质参照依据将丧失,施工人员只能依靠有限的经验以及对周边地质资料的综合分析来判断目的层位置,这种判断方式缺乏准确性与可靠性,盲目性较大,极易导致钻孔偏离预定目标层位。

此外,断层带区域地层岩性杂乱,岩石质地松软,在进行注浆加固后,扫塞作业通过断层带时,破碎的地层极易产生新的钻孔通道,不仅严重影响钻孔施工进度,还对钻孔的稳定性构成威胁。若断层实际位置与前期预估存在较大偏差,且此时一开套管已完成下入,将对二开井段的正常施工以及二开套管的顺利下入造成严重阻碍,甚至可能导致整个钻孔工程失败,造成巨大的经济损失与工期延误。

3 精准着陆方案优化设计

3.1 方案优化原则

精准着陆方案的优化严格遵循准确性、可靠性、高效性和经济性四大原则。准确性原则要求确保钻孔能够精确着陆于目标层位,为后续水害治理工作奠定基础;可靠性原则旨在提高方案在复杂地质条件下的适应性与稳定性,降低施工风险;高效性原则通过优化施工流程、采用先进技术手段,缩短施工周期,提高钻进效率;经济性原则则强调在保证工程质量的前提下,合理控制成本,实现经济效益的最大化。

3.2 优化技术措施

在复杂地质条件下,技术团队采用“先探目的层,再核标志层”的递进式勘探策略。首先利用先进的钻探与探测技术,对目的层进行初步探查。若对目的层的位置、属性存在疑问,则进一步对标志层展开详细勘探。通过高精度测量目的层与标志层之间的层间距,并与邻近勘探钻孔数据进行细致对比分析,结合地质模型构建与数值模拟技术,精准确认目的层位,有效避免因层位误判给后续施工带来的风险。

针对断层位置偏差导致二开井段水平段过长、下套管困难的问题,运用定向钻井技术领域前沿的随钻测量(MWD)、地质导向(LWD)技术,实时获取钻孔轨迹参数与地层信息^[3]。借助专业的计算机模拟软件,基于地层条件、断层分布、一开套管下入深度等多源数据,构建三维钻孔轨迹模型,制定多种轨迹优化方

案。通过对各方案的技术可行性、施工难度、成本效益等指标进行综合评估与对比分析,筛选出最优方案,确保钻孔能够准确着陆并顺利完成二开套管下入作业。

4 方案实施与应用

4.1 赵固一矿 15031 工作面应用案例

1. 工作面概况。赵固一矿 15031 工作面对应地面位于大麻村,地表以农田为主,地势相对平坦。井下空间位置上,东接尚未掘进的 15041 工作面,西临 15021 工作面,南靠北翼轨道运输大巷。工作面上覆巨厚冲积层,地面标高处于 +83.8 ~ +85.4 m 区间,井下标高为 -432.5 ~ 457.1 m,二 1 煤层厚度在 5.1 ~ 6.5 m 之间,平均厚度达 5.8 m,煤层倾角较为平缓,仅为 1° ~ 4°,煤层稳定性良好,结构相对简单。

该工作面整体呈现向斜构造形态,这种特殊的地质构造使得水文地质条件极为复杂。作为主要充水含水层的 L8 灰岩含水层,在高压与大突水系数的作用下,加之采掘活动对煤层顶底板的扰动影响,以及周边丰富的地下水补给,突水危险性极高。同时,工作面顶板基岩厚度预估在 48 ~ 78 m 之间,进一步加剧了水害治理工作的难度。

2. 钻孔设计方案。针对 15031 工作面的水害治理需求,工程初步规划设计 2 个主钻孔,即注 9 孔与注 10 孔,采用从工作面西北向东南方向的分支定向布局方式。注 9 主钻孔与注 10 主钻孔间隔 770 m,每个主钻孔分别设置 6 个分支钻孔,各分支钻孔间距控制在 50 ~ 60 m。施工采用地面区域超前注浆加固治理技术,旨在通过对 L8 灰岩含水层进行全面探查与注浆加固,增强二 1 煤层底板一定厚度范围内岩层的完整性,提升煤层底板与 L8 灰岩含水层之间各岩层的抗压强度,进而提高煤层抵御水压的能力,有效降低采掘过程中的水害威胁^[4]。

钻孔施工在冲积层阶段先进行直孔段钻进,根据表土层实际厚度与地质条件,可适时进行一定角度的造斜作业。待钻孔成功进入 L8 灰岩层位后,调整为水平钻进状态并深入工作面,直至终孔均保持在 L8 岩层中施工。通过多个分支孔的协同作业,在 15031 工作面二 1 煤层底板下部的 L8 灰岩区域构建起基本覆盖的探查网络,钻孔最大设计深度约为 1 750 m,确保实现对工作面的全方位探查与治理。

3. 注 10 孔造斜段施工过程。注 10 孔主孔施工区域内存在矿井边界断层 F15 (落差范围 20 ~ 220 m) 和物探 DF102 断层 (落差 10 m),由于断层具体参数信息缺失,等高线图上仅标注大致位置,导致着陆点垂深与地层倾角等关键数据不明。为确保钻孔精准着

陆,按照施工方案要求,依次施工探目的层L8灰岩孔、探标志层二1煤层孔以及着陆下套管孔。

探L8灰岩孔施工过程中,在钻孔深度达436m时首次揭露基岩顶板,继续钻13.5m(即449.5m处)下入一开套管。后续钻进至580m、650m、920m深度时,分别遭遇F15-1、F15-2和DF102断层,其落差分别为70m、138m和27m。当钻孔深度达到858m时,揭露煤层,根据上返岩屑判断为全煤,通过降斜操作打穿煤层,经测量计算煤层垂深约5m,初步确定为二1煤层。但该煤层标高与邻近注9孔及地面11204钻孔见煤标高相近,却与等高线计算的煤顶标高存在近30m的偏差,经综合分析判断此处存在断层构造。施工团队继续采取降斜措施,最终在920m左右深度探测到灰岩,结合出煤后立即见灰岩的特征以及与稀盐酸的剧烈反应现象,判定此为L8灰岩,成功探明着陆点L8灰岩的具体垂深^[5]。

由于探L8灰岩孔过程中对灰岩层位的判定存在不确定性,为进一步确认L8灰岩层位,在主孔造斜段650m处进行侧钻施工探二1煤层孔。通过定向钻进技术,在780m左右位置将井斜角度提升至 $94^{\circ}\sim 95^{\circ}$,持续钻进至936m时见煤,983m时完全出煤,测得煤层厚度约4m,且该煤层距下方灰岩距离为28m,与邻近勘探孔数据高度吻合,最终确定此处为L8灰岩,同时探明了DF102断层的走向。

然而,实际揭露的DF102断层位置较原设计向外平移162m,在一开套管已下入的情况下,导致二开井段水平段(井斜 $\geq 85^{\circ}$)过长,原设计方案下套管难度极大。定向技术部门迅速响应,经过深入研究分析,提出两个优化轨迹方案。方案一计划在600m(井斜 69.88°)处侧钻,上提30m避开岩屑含煤地段,随后在610~660m井段以 8° 狗腿度将井斜增至 82° 左右,660~860m稳斜钻进200m,860~930m以 $4\sim 5^{\circ}$ 狗腿度将井斜增至 89° 左右见灰岩后起钻下套管;方案二则选择在过一开套管10m左右的460m(井斜 38.51°)处侧钻460~640m以 8° 狗腿度将井斜增至 81.6° 左右,640~880m稳斜钻进240m,880~930m以 5° 左右狗腿度将井斜增至 89° 左右见灰岩后起钻下套管。经综合评估,最终选用方案二进行施工。

在着陆下套管孔1施工过程中,当井深达到604m左右时,出现约 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 的漏失现象,根据指令起钻进行注浆作业,采用粘土水泥浆(比重 1.20 g/cm^3),注浆压力达到6.5MPa后结束^[6]。在扫塞至580~588m段时,遭遇上提下放困难、塌孔、卡钻等问题,尝试调整优质泥浆、循环孔内大颗粒物等措施均未奏效,

最终改用纯水泥浆(比重 1.25 g/cm^3)进行注浆,通过促使水泥充分扩散、长时间候凝,对周围破碎地层进行二次加固,注浆终压同样为6.5MPa,本次共注入水泥93t。

着陆下套管孔2施工时,充分吸取孔1的经验教训,选择在460m处侧钻,与孔1保持5m以上的空间间距,有效避开塌孔地段。但在施工至540m位置时,出现与邻井注15孔串浆现象,停泵后井口返水,注15孔注浆压力从6.5MPa骤降至3.5MPa。随即按照要求起钻注浆,对导通的断层裂隙进行加固处理,共注入水泥12t、粘土48 m^3 (因材料供应中断停止注浆)。注浆完成后继续施工,最终在930m深度实现成功着陆,并顺利、安全地完成二开套管下入作业,为后续三开施工创造了良好条件。

4.2 应用效果分析

“极复杂地质条件下精准着陆方案”在赵固一矿15031工作面注10孔的成功应用,克服了复杂地质条件带来的重重困难,顺利完成二开井段施工并实现二开套管的精准下入,为三开施工奠定了坚实的基础。该方案的实施显著提升了焦煤公司在定向多分支井施工领域的技术水平,加快了企业对定向井核心技术的掌握进程,有力推动了企业向高科技、多元化方向发展。

5 结束语

围绕赵固矿区极复杂地质条件下地面定向多分支水平井着陆难题,通过深入研究与实践探索,成功完成精准着陆方案的优化设计与实施。在研究过程中,系统分析了矿区地质与生产现状、钻孔着陆难题,提出并应用科学合理的优化技术措施,充分验证了方案在解决技术难题、提升钻进效率、创造经济与安全效益等方面的显著成效。

参考文献:

- [1] 闫雷芳.复杂水文地质条件下的矿井防治水技术应用[J].矿业装备,2024(07):7-9.
- [2] 姜文浩.联合注浆在工作面底板水害防治中的应用[J].煤炭科技,2021,42(04):83-87.
- [3] 姚克,李泉新,方俊,等.煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研究[J].煤炭科学技术,2022,50(12):36-42.
- [4] 王强.定向分支钻探注浆技术在煤矿防治水中的应用[J].煤炭与化工,2022(07):78-81.
- [5] 安许良地面区域水害治理技术在赵固一矿的应用[J].建井技术,2023,44(04):1-11.
- [6] 马瑞胜,耿燕文,张明明,等.水文地质条件极复杂矿井底板岩溶水害强化注浆加固应用与效果分析[J].当代化工研究,2024(17):5-8.