

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(旬刊·1993 年创刊)

2025 年 8 月 第 24 期 (总第 613 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 翌 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 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录Contents

科技博览

- 001 古滑坡复活抗剪强度参数取值研究
..... 韩晓伟, 卢智玲, 李株莹, 王小勇
- 004 基于机电集成的机器人精度提升技术分析
..... 武培民
- 007 发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究
..... 陈子慧
- 010 基于检测数据的当量初始裂纹尺寸分布反推技术
..... 孙宇豪, 冯建民
- 013 软基堤防注浆—桩基耦合劈裂机理及智能调控研究
..... 温慧君
- 016 多模态传感器融合在工业机器人位姿修正中的应用
..... 唐宇翔

智能科技

- 019 智能识别技术在校园一卡通系统中的应用
..... 李 伟
- 022 大数据技术在码头运输调度管理中的应用
..... 张小伟
- 025 光伏逆变器谐波特性及其对电网的影响分析
..... 赵鹏飞
- 028 建筑电气智能化弱电系统安装及质量管理
..... 辜文浩
- 031 电力工程信息安全风险问题及量子加密通信防护策略
..... 王 霞
- 034 遥感与地面观测结合的淮河流域水资源动态监测技术
..... 魏美斯

应用技术

- 037 市政道路桥梁结构病害与加固施工分析
..... 刘少波, 王 颖, 王玉醒, 何宝凯
- 040 桥梁施工中的施工工艺问题与优化对策
..... 曹 凯

目录Contents

043	建筑电气工程配电线路施工技术难点探析.....	张海艳, 王珂, 孙建海, 邵华泽
046	复合土钉技术在深基坑支护工程中的应用.....	杨世雄
049	混凝土施工技术在水利施工中的应用探讨.....	贾云龙
052	地基处理技术在水利水电工程中的应用研究.....	董莹, 孙莹莹
055	波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术及应用.....	孙佳宇
058	复杂厚砂砾石覆盖层多护筒桩基施工质量控制关键技术研究.....	袁银莲

科创产业

061	电力设备全寿命周期运维检修策略研究.....	吕静, 赵小宁, 谢正青, 刘华健
064	氢能存储技术中新型纳米复合材料的创新研究.....	闫亚斌
067	新型土工合成材料在公路路基加固中的性能分析.....	范卫华
070	基于大数据分析的建筑工程造价风险预警机制研究.....	赵君
073	市政道桥施工中的绿色建造技术与可持续发展策略.....	吴晓
076	电气安装工程管理中BIM技术的深度应用与效能提升.....	刘虹伶
079	分布式电源接入配电网谐波污染问题与主动治理策略.....	王业帅

技术管理

082	建筑工程管理中创新模式的应用.....	武玉山
085	市政工程施工质量管理体系的构建与完善.....	陈琦蓓
088	装配式建筑施工过程监控控制要点及方法研究.....	朱光
091	现代化水利水电工程建设施工管理和技术应用.....	魏波
094	火力发电厂四大管道金属监督管理系统的实践应用.....	缪童
097	数字化技术在高速公路路基桥梁施工管理中的应用.....	杨刚
100	绿色建筑理念下高层建筑地下室深基坑支护工程管理策略.....	赵胡

科学论坛

103	桥梁施工技术创新发展对策研究.....	张海
106	水库坝基渗水问题及治理方案分析.....	蒋朝兴
109	市政供水管网爆损原因及对策分析.....	郭伟伟
112	船闸工程金属结构安装施工技术分析.....	刘鸿鹏
115	老旧城区市政给排水设计方案优化策略.....	李海洋
118	水利工程中的工程地质和水文地质勘测方法研究.....	杨世通, 丁荣武
121	面向复杂地质条件的煤矿采煤掘进支护技术分析.....	秦利明
124	薄煤层坚硬顶板工作面“主动承载引导泄压”沿空留巷技术研究与应用.....	尹岩, 甘超

古滑坡复活抗剪强度参数取值研究

韩晓伟, 卢智玲, 李株莹, 王小勇*

(广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545000)

摘要 大型滑坡抗剪强度参数的取值是一个复杂的问题, 尤其是在地质情况复杂多变的情况下会受到人为活动、地下水、地震等多方面的影响导致滑坡复活。在滑坡治理过程中, 准确地确定边坡的岩土体综合性抗剪强度参数 c 、 ϕ 值至关重要。但是对于参数的确定不能仅依靠实验室数据, 本文采用反演法进行参数分析, 综合评定得到一个相对合理的参数, 以期为复杂地质情况下边坡参数选取提供参考。

关键词 抗剪强度; 滑坡; 不平衡推力法; 反演法

基金项目: 2022 年度广西生态工程职业技术学院校级课题, 项目名称: 西南地区巨型滑坡治理过程中相关参数选择机制研究, 项目编号: 2022ZRKX07; 2023 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目, 项目名称: 基于 FLAC3D 的膨胀岩土复合边坡稳定性分析及支护参数研究, 项目编号: 2023KY1261。

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.001

0 引言

大型滑坡参数 (抗剪强度参数 c 和 ϕ) 的选取是滑坡稳定性分析与防治的关键问题。目前, 国内外研究主要通过以下方法获取参数: (1) 试验法: 滑坡滑带土经过长期剪切作用, 常处于残余强度状态, 需区分峰值与残余强度, 且试验结果易受取样扰动影响^[1]。国际学者提出以有效应力法替代传统 c - ϕ 组合模型。(2) 反演法: 单参数反演通过假定一个参数已知来求解另一个参数, 而双参数反演则通过多剖面极限平衡方程联立求解, 显著提高了参数与实际工程状况的匹配程度^[2]。(3) 工程经验类比法: 参考类似地质条件和滑坡类型的工程案例, 结合滑带土力学性质普遍低于滑体与滑床的规律进行参数修正。目前对于大型滑坡的研究大多采用多方法综合应用, 结合试验法、反演分析和监测动态校核, 以降低参数主观性误差^[3]。此外, 降雨、地下水、人为因素等外部因素都会影响参数变化, 如暴雨工况下粘聚力 c 的衰减显著高于内摩擦角 ϕ , 需通过渗流—应力耦合模型量化其动态变化。

1 工程概况

滑坡位于南盘江八渡镇, 主滑坡长约 300 m, 宽 460 ~ 570 m, 面积 16.40 万 m^2 , 平均厚度约 23 m, 体积约 377.20 万 m^3 , 属于一座古滑坡。根据前期勘察发现, 坡体已经经历过多次滑坡, 铁路修建前尚处于稳

定状态, 后来因为修建铁路, 导致古滑坡复活。铁路线从滑坡体的中部穿过将古滑坡体分割为上下两部分, 在多重因素综合作用下, 由于勘察设计时参数选取不当导致滑坡体复活。

滑坡出口处位于线路右侧堑坡。鉴于此, 施工中在三个山梁上设置了边坡防护桩共 31 根, 抗滑桩 76 根 (嵌入滑床以下基岩中), 以及截排地表水的整治措施。经过 4 年的地表位移观测, 以及钻孔动态监测, 线路左侧主滑体出现贯通性裂纹 3 道, 深部检测孔被剪断, 观测点位移量达 20 ~ 46 mm。上述结果表明线路上部边坡已经复活。

2 特征参数选取的讨论

2.1 滑带土位置确定及岩性分析

滑带位置确定至关重要, 现场确定滑带区域的位置主要靠钻孔取样、探槽探坑、平硐观察相结合的方法。对于这种复杂的边坡, 钻孔取样的方法受到观察范围的影响, 导致勘察结果的偏差, 平硐则能够更好地揭露滑带土的分布规律, 此处我们采用钻探和平硐相结合的方法, 通过平硐发现滑坡出现新滑带。

2.2 室内试验成果分析

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001) 分别对滑坡体和滑带土分开取样进行室内试验。按照规范中不平衡推力法计算进行反演, 主要计算参数是选

*本文通信作者, E-mail: 563251287@qq.com。

取滑带土的抗剪强度参数 (c 、 ϕ) 值。滑带土在室内试验时选取土体的残值强度, 滑坡体复活由于滑带土发生了较大范围的剪切变形, 残值强度更接近真实工作状态^[4]。对于取样扰动的问题, 钻孔取样相比平洞取样更容易造成扰动, 因此在取样时在平洞中取样。对于新滑带土取样 18 组, 老滑带土取样 24 组。下面对室内式样数据进行误差分析:

1. 平均值:

$$\phi_m = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i}{n} \quad (1)$$

2. 标准差:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \phi_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \phi_i)^2}{n} \right]} \quad (2)$$

3. 变异系数:

$$\delta = \frac{\sigma_f}{\phi_m} \quad (3)$$

根据《岩土工程勘察规范》中数据处理方法, 对室内试验的数据进行误差分析, 得出参数标准值。试验中老滑带土的饱和反复直剪强度 c 、 ϕ 值平均值分别是 15.04、13.51, 变异系数为 0.38、0.21, 修正系数为 0.84、0.91, 标注差为 5.96、2.81, 说明通过平洞取样样本的扰动小, 具有一定的代表性。

新滑带土饱和反复直剪强度 c 、 ϕ 值平均值分别是 18.53、16.39, 标准差 4.09、3.87, 变异系数为 0.22、0.24, 修正系数为 0.86、0.85。

通过对数据的误差整理修正, 最终得到, 新滑带土 (饱和状态) 反复直剪试验抗剪强度标准值 c 、 ϕ 分别为 15.97、13.97, 老滑带土 (饱和状态) 反复直剪试验抗剪强度标准值 c 、 ϕ 分别为 12.6、12.3。

2.3 现场试验成果

通过钻探和平洞可知, 滑带的平均深度大约 15 m, 埋藏较深, 为了得到准确的原位试验数据, 现场直剪试验只能选择在平洞中进行, 对新老滑带分别进行了现场直剪试验。

2.4 岩土参数综合取值

根据《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 0218-2006) 中的推荐比例为 0.5 ~ 0.9 的范围。张建华在研究黄土的现场试验和室内试验中得出重要结论, 受到试验条件、滑带土所处应力环境的影响, 原位试验与室内试验的参数比摩擦角在 0.77 ~ 0.87 之间, 粘聚力在 0.84 ~ 0.89 之间^[5]; 经过三峡库区蓄水后大量的滑坡治理, 推荐的经验权重比在 0.6 ~ 0.9 之间^[6]。结合本项目

特征现场试验和室内试验的参数权重比取 0.9 和 0.1。

2.4.1 老滑带土综合取值

由于老滑带土中含有大量碎石, 因此室内试验参数存在误差代表性差, 现场试验更能真实反映滑带土的实际情况, 滑带抗剪强度综合取值现场直剪试验及室内试验标准值的权重分别为 0.9、0.1。

2.4.2 新滑带土综合取值

滑坡复活后, 滑坡后部出现明显的拉裂缝, 拉裂缝连续性好, 连贯贯通, 滑坡前缘的抗滑桩则出现严重变形, 说明滑坡体整体性好。此时新滑动带土体强度低于峰值强度, 而又高于反复剪切试验的残值强度, 因此此处取值滑坡新变形带室内试验综合值取峰值标准值和残余值标准值的均值。

3 参数敏感性分析及反演分析

3.1 参数敏感性分析

由于参数变化会对稳定性系数产生影响, 因此需要对参数进行敏感性分析, 为下一步参数的反演法计算提供前提条件。选取剖面 18-18' 进行反演分析, 假设土体完全饱和 (见图 1)。18-18' 剖面滑动面呈现出近似折线形分布, 选择传递系数法来进行敏感性分析。

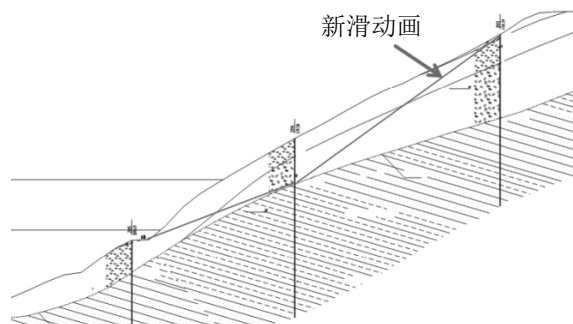


图 1 剖面 18-18'

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (4)$$

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi_{i+1} \quad (5)$$

式中: F_s 表示滑坡稳定性系数; ψ_i 表示传递系数。 R_i 表示第 i 计算条块滑体抗滑力 (kN/m); T_i 表示第 i 计算条块滑体下滑力 (kN/m); N_i 表示第 i 计算条块滑体在滑动面法线上的反力 (kN/m); c_i 表示第 i 计算条块滑动面上岩土体的粘结强度标准值 (kPa); ϕ_i 表示

第 i 计算条块滑带土的内摩擦角标准值 ($^{\circ}$) ; l_i 表示第 i 计算条块滑动面长度 (m) ; α_i 表示第 i 计算条块地下水流线平均倾角, 一般情况下取浸润线倾角与滑面倾角平均值 ($^{\circ}$) , 反倾时取负值; W_i 表示第 i 计算条块自重与建筑等地面荷载之和 (kN/m) ; θ_i 表示第 i 计算条块底面倾角 ($^{\circ}$) , 反倾时取负值。

经过对参数的敏感性分析可以得出结论: 当 c 值一定, φ 值每降低 2 度, 滑坡体稳定系数降低 0.11 ~ 0.13; 当 φ 一定, c 值每降低 2 kPa, 滑坡体稳定系数降低 0.01 ~ 0.02。通过对比发现 F_s 对于 φ 值的敏感性远高于 c 值, 该滑坡的稳定性受 φ 的影响更大。因此, 在反演法计算中可以假定 c 值为定值, 对 φ 值进行反演计算, 更加符合实际工程需要。

3.2 新滑动面反演计算分析

反演计算分析采用的是变形最大的剖面 17-17' (见图 2), 反演计算的原理是利用公式 (4) 和公式 (5), 滑动面较为清晰地沿折线分布, 采用传递系数法计算边坡稳定性系数较为合理。从公式中可以看出, 未知参数有三个: c 、 φ 值和边坡的稳定性系数 F_s 。

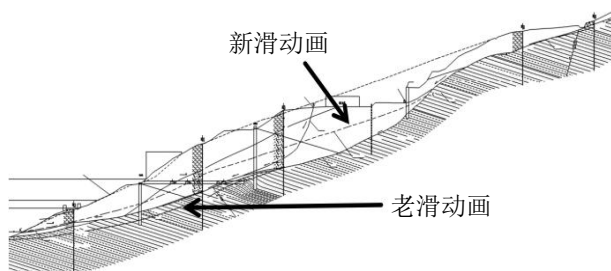


图 2 剖面 17-17'

1. 参数 F_s 的取值: 根据现有的规范《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T 0218-2006), 对边坡稳定性评价做了相应规定。

结合现场勘察实际情况, 根据现场深孔监测资料 Z6-08-24 号钻孔显示, 经过一年的位移观测, 该孔侧向位移累计 6.9 mm, Z6-8-21 号累计位移量为 9.8 mm, 并且滑坡体的顶部后缘出现大量拉裂缝, 局部抗滑桩出现剪切破坏, 滑坡前缘据深孔位移监测资料可知, 主滑坡中前部已复活, 复活后形成的新变形体后缘边界主要以拉张裂缝为界, 两侧及前缘与原滑坡边界一致, 属于整体变形, 微滑阶段特征。因此 F_s 的取值在 0.9 ~ 1.0 之间较为合适。此处假设 F_s 为 0.99。

2. c 值取值: 经过参数敏感性分析可知, c 对于安全系数的影响较小, 采用同样的方法进行室内试验和

现场试验, 分别按照 0.1 和 0.9 的权重比进行综合取值。得到 c 值为 12.72 kPa。

3. 反演计算 取剖面 17-17' 计算, 滑坡的前缘部分未出现大范围位移, 滑坡剩余推力取 0, 并将 $c=12.72$ kPa, 剩余推力为 0, 代入公式 (4)、(5), 最终得到滑坡的综合内摩擦角为 $\varphi=17.5^{\circ}$ 。

按照此参数取值方法, 综合取值, 对滑坡进行了重新治理, 经过监测显示, 滑坡位移得到了必要的控制。

4 结论

1. 滑动带位置的确定。参数选取中的第一步是确定滑动带的位置, 可以通过钻孔、平硐的方式找到滑动带位置。从钻心取样中可知, 老滑带土经过反复剪切后存在以下特征: (1) 钻孔中滑动土层与上下层存在较大差异; (2) 滑带土中砂石磨圆度较好。

2. 现场试验和室内试验综合取值。现场试验常见的是大型剪切试验, 现场原位试验比室内试验得到的参数更具代表性。通常情况下, 室内试验权重占比 0.1 ~ 0.3, 现场试验权重占比 0.9 ~ 0.7。这里我们选取了 0.9 和 0.1 经过验证, 是合理的。

3. 反演取值。由于边坡的复杂性, 地层变化的多样性, 同一边坡可能地层差异巨大, 无法通过试验反应整体的抗剪强度。但是可以根据边坡的位移监测结果或者变形结果来进行反算抗剪强度参数计算, 反算出来的 c 、 φ 值是边坡整体的抗剪强度参数。反演分析要根据滑坡体特征, 选定稳定性分析方法, 如传递系数法。反演分析是建立在现场试验和室内试验基础上的一套完整的取值方法。

参考文献:

- [1] 邓君君. 某土质滑坡参数选取及稳定性分析评价[J]. 土工基础, 2020, 34(03): 313-315, 325.
- [2] 江巍, 欧阳晔, 闫金洲, 等. 边坡岩土体抗剪强度的逆向迭代修正反演方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(08): 2287-2295.
- [3] 隆然, 刘兴东. 基于致灾机理分析的公路滑坡稳定性评价及治理方案研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(02): 33-37.
- [4] 吴必胜. 滑坡特征参数的选取探讨及应用研究[J]. 工程与建设, 2024, 38(02): 323-325, 336.
- [5] 冯阳, 李伟, 杨川. 基于 GeoStudio 的降雨-渗流耦合作用下边坡稳定性研究[J]. 土木工程, 2025, 14(04): 727-738.
- [6] 朱冬雪, 许强, 李松林. 三峡库区大型-特大型层状岩质滑坡成因模式及地质特征分析[J]. 地质科技通报, 2020, 39(02): 158-167.

基于机电集成的机器人精度提升技术分析

武培民

(三门峡技师学院, 河南 三门峡 472000)

摘要 为了提升工业机器人在复杂环境下的作业精度, 基于机电集成思路, 构建涵盖结构优化、电气系统集成与控制算法补偿的多层次提升路径。分析护盾式煤矿智能掘进机器人应用实例, 装配平面度控制在 $0.013 \sim 0.017 \text{ mm}$, 法兰同轴度最大值为 0.009 mm , 轨迹误差均值为 0.0217 mm 。分析结果表明, 三维协同控制体系可有效抑制微小扰动传播, 实现高精度稳定运行。

关键词 机电集成; 机器人精度; 结构优化

中图分类号: TP24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.002

0 引言

机器人作为现代工业自动化与智能制造的核心装备, 其运行精度直接决定了生产过程的效率与产品质量。在高柔性、高复杂度作业场景中, 系统微小误差的积累常导致性能退化, 影响整体作业可靠性。如何突破传统单系统局限, 实现结构、电气与控制系统的深度融合, 成为提升机器人精度性能的关键。在此背景下, 基于机电集成的机器人精度提升技术应运而生, 为解决多源误差耦合、系统动态响应不足等瓶颈问题提供了技术路径。

1 机器人精度影响因素分析

1.1 机械系统精度影响因素

机械系统在机器人精度中占据了核心地位, 其影响因素包括结构刚度、传动误差、装配精度以及材料特性等。机器人在执行任务时, 其机械结构的刚性决定了系统对外力的抵抗能力, 刚性不足则容易产生变形, 从而影响运动精度^[1]。同时, 传动系统中的齿轮啮合误差、轴承摩擦等都会导致运动误差的积累, 最终影响末端执行器的位置精度。此外, 机械装配过程中的微小误差也会通过传动链条逐级放大, 导致机器人整体精度的下降。材料的选择与热膨胀特性也会对精度产生影响, 材料的稳定性与耐磨性直接关系到机器人的长期工作精度。

1.2 电气系统精度影响因素

电气系统对机器人的精度控制起着关键作用, 其影响因素主要集中在驱动控制精度、传感器反馈精度以及信号处理稳定性三个方面。驱动模块中的伺服控制器若存在响应延迟、分辨率不足或电流环调节不稳定, 将直接导致电机输出微小偏差, 进而影响运动轨

迹的精确性。传感器作为反馈环节的核心, 其精度等级与抗干扰能力决定了姿态与位置的实时检测准确性, 若编码器或角度传感器存在非线性误差或零漂, 将对闭环控制系统造成累积性影响。此外, 电气系统中的电磁干扰、接地不良或通信延迟也可能引发指令信号的波动, 降低整体响应的一致性^[2]。

1.3 控制系统精度影响因素

控制系统作为机器人精度调控的中枢, 其性能直接决定着运动命令的执行偏差和轨迹重构能力。影响因素主要包括控制算法的解析能力、实时性调度机制及控制模型的误差补偿策略。若系统采用简化模型忽略动态耦合关系, 可能导致非线性扰动在执行端放大, 降低轨迹跟踪精度; 实时性调度中断或系统响应滞后将引起控制信号延迟, 使执行误差积累; 此外, 若反馈控制中未引入自适应或前馈补偿机制, 无法有效对抗负载变化与动态摩擦干扰, 精度将呈现不稳定波动^[3]。由此可见, 控制系统精度受多维因素耦合制约, 其稳定性与响应特性对整体精度具有决定性影响。

2 基于机电集成的机器人精度提升关键技术

2.1 机械结构精度优化技术

在机器人机械结构的精度优化过程中, 刚度提升与结构轻量化需协同推进, 避免因结构复杂性增加而引入耦合误差^[4]。采用有限元静力与模态分析表明, 臂部截面由矩形 ($40 \times 60 \text{ mm}$) 改为蜂窝状薄壁结构后, 在不增加质量的情况下, 一阶固有频率由 138 Hz 升至 213 Hz , 静态挠度降低约 40%。精密关节中, 轴承座与壳体的同轴度必须优于 0.005 mm , 方能保证径向跳动低于 $5 \text{ }\mu\text{m}$, 避免微振动累积误差; 若采用不锈钢衬套与碳纤维复合支撑组合, 单位质量刚度系数可提升 18%

以上,有助于抑制动态响应误差。此类结构需依托五轴数控加工,轮廓度控制优于 0.01 mm,形位误差累积不超过 0.02 mm,才能满足高精度装配。

在连接精度方面,减速器与法兰界面采用 H7/h6 配合以控制间隙在 4~9 μm,装配需在 20 ± 0.5 °C 恒温条件下完成,并辅以 0.003 mm 间隙定位销与手工刮研确保接触斑点 ≥ 75%。臂架材料选用拉伸强度 980 MPa、弹性模量 220 GPa 的 6061-T6 航空铝合金,兼顾刚性与减重,全部零件加工后统一进行时效热处理与硬质阳极氧化处理,以增强稳定性与耐磨性。最终经激光干涉仪校核表明,结构误差占末端位姿误差比重高达 38.7%,因此机械结构精度优化构成整机精度提升的关键环节。

2.2 电气系统集成优化方法

在电气系统的集成优化过程中,伺服电机与驱动器之间的匹配关系需精细配置,以确保位置控制与转矩输出的闭环性能。针对关节驱动模块,常采用额定转矩 3.5 Nm、峰值扭矩 12 Nm、分辨率达 20bit/360° 的多圈绝对值编码器电机,其反馈信号频率需在 2 kHz 以上,才能满足高频动态响应的伺服控制要求。驱动器需具备 12 位电流环、16 位速度环与 24 位位置环的分辨控制能力,电压波动适应范围应控制在 ±10% 以内,方可避免电源扰动对末端执行精度的传导。此外,驱动器与电机间的通信需采用 CANopen 或 EtherCAT 总线,带宽要求不低于 100 Mbps,帧间时延控制在 500 μs 以内,并通过分布式时钟同步技术进行伺服节拍统一,确保多轴联动的时序一致性。

电气线缆布线方式及电磁兼容设计亦对系统精度具有重要影响。在多轴机器人中,控制信号线与动力线采用独立屏蔽管线槽布置,信号电缆使用屏蔽层厚度不低于 0.6 mm、铜网编织密度达 85% 以上的双层铝箔+编织复合屏蔽结构,接地电阻控制在 0.1 Ω 以内,确保抗共模干扰能力满足 30 V/m 以上的电磁强度环境。在电缆线径选型方面,5 A 工作电流的动力线需使用截面积 1.0 mm² 以上的多股铜导线,其绝缘耐压需符合 UL1015 标准,耐压指标不低于 600 V,工作温度范围在 -20 °C 至 105 °C 之间。接口连接中,采用 MIL-DTL-38999 III 型抗振接插件,并辅以 IP67 防护等级接头,提升接触可靠性与环境适应能力。此外,整个布线需按照 IEC 60204-1 标准执行,对电气柜与负载设备之间的信号链路进行长度匹配与阻抗控制,以抑制回波效应和传输延迟^[5]。

2.3 控制算法精度补偿技术

在机器人运动控制系统中,为降低结构耦合、非线性扰动及传动滞后所引起的位置偏差,常采用前馈

补偿与模型驱动控制相结合的方式进行精度补偿。控制算法基于逆动力学建模,对机械系统中的质量分布、惯性耦合、重力分量及摩擦项进行统一表达,其动力学控制方程为:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C'(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q})$$

其中, $M(q)$ 为质量矩阵,需通过激光跟踪系统和刚体姿态辨识算法进行精确辨识,误差约束在 ±3%。 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 和 $G(q)$ 采用数据拟合与 LMS 方法进行离线建模,建模采样周期设置为 0.5 ms,单维偏差需小于 0.1 Nm。摩擦建模 $F(\dot{q})$ 基于 LuGre 模型,参数取值范围依据负载条件动态调整。整个前馈补偿系统运行周期需严格保持在 1 ms 以内,并通过中断优先级机制确保响应一致性。高频段动态干扰采用滑模扰动观测器,估算延迟控制在 250 μs,干扰幅值估计精度优于 ±0.05 Nm,有效缓解载荷变化对轨迹控制的影响。

为增强反馈系统对误差的实时调节能力,还需构建复合式控制器,复合式控制器融合比例-微分调节与模型预测机制以实现自适应反馈,系统采样频率设为 2 kHz,控制环步长 20 ms,预测窗口 200 ms,目标函数采用二次代价形式,权重 $\lambda=10$ 、 $\gamma=0.1$ 。反馈通道配置低通滤波器,截止频率 300 Hz,采样误差滤除率达 97% 以上,编码器输出角度抖动抑制至 ±0.02° 以内。运动控制器经 SPI 与 FPGA 连接,流水线并行处理速度反馈、状态估计与预测输出,单周期延迟小于 15 μs。为抑制关节间耦合误差,算法集成多轴交叉修正模块,基于运行状态动态重构增益矩阵,保持轴间位置差异 ≤ 0.03 mm,从而在复杂任务中维持高频闭环调节与干扰抑制能力。

3 基于机电集成的机器人精度提升技术应用分析

3.1 工程概况

本工程聚焦护盾式煤矿智能掘进机器人系统,集成截割、支护、钻锚、装载、运输等多项功能,提升煤矿掘进自动化与效率。系统包括全宽横轴截割机器人(切割宽度 4.5 m,切割高度 3.2 m,功率 200 kW),临时支护机器人(支护跨度 1.5 m,高度 2.0 m 至 3.5 m,速度 0.8 m/min),钻锚机器人(钻孔直径 42 mm,深度 2.5 m,速度 1.2 m/min),超前探测系统(深度 30 m,分辨率 0.1 m)等,确保作业高效、安全。

3.2 机器人精度提升技术的具体应用

在护盾式煤矿智能掘进机器人系统的精度提升过程中,工程实施单位采用“结构预补偿+多源数据融合+运动误差动态校正”三位一体方案实现全过程精度控制。针对结构精度控制,所有高精连接部件由五轴联动加工中心一次性完成,轮廓度控制优于 0.015 mm,

安装面平面度控制在 0.02 mm 以内,所有法兰接触面经 75% 以上刮研斑点验收。结构总装工艺引入激光跟踪仪实时位姿监测系统,全系统节点定位误差实时反馈至安装控制系统,保障装配累积误差控制在 0.05 mm 以下。关键传动部位采用齿侧间隙调节机构,调节步距为 2 μm ,现场通过干涉仪校准啮合误差分布,确保系统齿合稳定性。

在运动控制环节,引入高频反馈数据采集系统,编码器采样频率为 5 kHz,反馈通道支持 $\pm 10\text{ V}$ 模拟量与 RS-422 高速差分信号双通道冗余输入。位姿估算基于多传感器数据融合算法,融合 IMU、激光测距仪和光学标靶三类传感器数据,其中 IMU 零偏修正周期为 1.2 s,激光测距重复性精度优于 $\pm 0.3\text{ mm}$ 。控制器采用双核 DSP 并行控制平台,指令周期为 0.5 ms,控制带宽达 1.6 kHz,并通过自适应扰动观测器对作业过程中因煤岩非均质性导致的负载扰动进行实时补偿,实现持续运行过程中的精度动态校正。在整个系统调试过程中,每日采

集误差补偿数据不低于 3 GB,作为后续控制模型修正的基础。

3.3 工程实施效果与技术评估

为全面量化护盾式智能掘进机器人系统在精度提升方案落地后的运行表现,工程项目组构建了涵盖装配精度、运行稳定性与控制响应的分级评估体系,并采用三阶段监测策略:出厂试验、入井调试与连续作业周期。装配阶段对 124 个节点进行监控,每小时测量 3 次,利用激光跟踪仪与三坐标测量机交叉验证初始误差。运行阶段在 120 小时连续作业中采集结构位移、姿态偏差与电机温升,采样周期 0.2 s。控制响应则通过高频编码器反馈评估轨迹重复性与负载干扰抑制比,并以期望路径拟合残差作为关键指标。相关量化数据见表 1 与表 2。

从表 1 中的数据可知,装配平面度控制在 0.013 ~ 0.017 mm 之间,远优于 0.02 mm 的设计限值,标准偏差仅为 0.0018 mm,表明装配过程一致性高;法兰同

表 1 系统精度误差控制指标统计表

指标项	设计值	实测值区间	标准偏差	单项最大误差
装配平面度	$\leq 0.02\text{ mm}$	0.013 ~ 0.017 mm	0.0018 mm	0.019 mm
法兰同轴度	$\leq 0.01\text{ mm}$	0.005 ~ 0.009 mm	0.0012 mm	0.009 mm
滚动轴径向跳动	$\leq 0.006\text{ mm}$	0.004 ~ 0.005 mm	0.0006 mm	0.005 mm

表 2 多轴控制稳定性评估数据表

项目	关节 1	关节 2	关节 3	均值	最大瞬时偏差
指令轨迹与实际偏差均值	0.022 mm	0.019 mm	0.024 mm	0.0217 mm	0.036 mm
负载扰动下偏差增长率	6.30%	5.70%	6.90%	6.30%	7.50%
编码器稳定性残差	0.003°	0.002°	0.003°	0.0027°	0.004°

轴度最大值 0.009 mm,具备良好的轴系稳定性;滚动轴径向跳动控制在 0.005 mm 以内,说明旋转部件运行平稳,为后续动态精度提供基础保障。

由表 2 可知,三轴间平均轨迹误差为 0.0217 mm,最大瞬时偏差控制在 0.036 mm,均处于微误差级别;在负载扰动下,偏差增长率维持在 6.3% 以内,编码器残差波动在 $\pm 0.003^\circ$ 范围,说明控制系统在复杂工况下依然具备良好的跟踪能力与高频动态响应性能,有效抑制扰动传导效应。

4 结束语

基于机电集成的机器人精度提升技术通过结构优化、电气系统集成与控制算法补偿的协同实施,有效降低了各环节误差源对末端精度的影响。针对复杂工况的实际应用验证显示,系统具备高稳定性、高响应性与微误差控制能力。未来需进一步拓展多任务工况

下的自适应调节机制与模块化重构技术,以增强其在复杂作业环境下的广适性与持续精度保持能力。

参考文献:

- [1] 苗立晓.提升工业机器人精度的关键路径:基于激光跟踪仪的机器人结构标定技术[J].机器人产业,2025(02):57-64.
- [2] 赵艺兵,温秀兰,乔贵方,等.基于几何参数标定的串联机器人精度提升[J].计量学报,2020,41(12):1461-1467.
- [3] 乔贵方,高春晖,蒋欣怡,等.数据驱动的 6R 型串联工业机器人精度性能提升[J].组合机床与自动化加工技术,2024(08):66-69,74.
- [4] 徐逸凡.多传感器融合技术在工业机器人定位精度提升中的应用[J].造纸装备及材料,2024,53(06):36-38.
- [5] 王梦迪,李娜.基于工业机器人实验平台的焊接轨迹设计[J].信息与电脑,2025,37(08):133-135.

发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究

陈子慧

(中船电机科技股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要 发电机定子铁芯叠片涡流损耗是影响电机效率的关键因素。本文系统研究了涡流损耗的形成机理与分布特性, 重点探讨了叠片结构参数、材料特性和绝缘性能对损耗的影响规律。通过理论分析结合有限元仿真, 揭示了硅钢片厚度、层间电阻及短路效应与涡流损耗的关联机制。研究表明, 优化叠片厚度、提升绝缘涂层的阻断能力以及控制加工工艺能有效抑制涡流损耗。实验验证进一步证实了理论模型的准确性, 为定子铁芯设计与材料选型提供了理论依据和工程优化方向。

关键词 发电机; 定子铁芯; 叠片; 涡流损耗; 分布特性

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.003

0 引言

涡流损耗是发电机定子铁芯能量损耗的重要组成部分, 直接影响电机效率与温升。随着电机高功率密度与高频化发展, 叠片铁芯的涡流损耗问题日益突出。本文聚焦定子铁芯叠片的涡流损耗分布特性, 从材料选择、结构参数及绝缘性能等多维度解析其作用机理, 揭示不同工况下涡流场的分布规律, 阐明叠片间短路与绝缘失效对损耗的非线性影响, 并提出综合优化策略。通过理论与实验结合, 旨在为提升电机能效与可靠性提供技术参考。

1 涡流损耗的形成机理

涡流损耗源于交变磁场作用下导体内部形成的闭合感应电流, 其能量耗散遵循焦耳—楞次定律。根据麦克斯韦方程组, 交变磁场在铁磁材料中产生的感应电动势可表述为:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 B^2 d^2}{6\rho} \quad (1)$$

式(1)中, d 为硅钢片厚度, m; ρ 为材料电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。式(1)表明, 涡流损耗与频率 f 、磁感应强度 B 的平方成正比, 与电阻率 ρ 成反比^[1]。

硅钢片作为导磁材料, 其电阻率直接决定涡流损耗水平。典型硅钢材料 3.1 wt%Si 的电阻率为 $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 较普通碳钢 $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 提升约 3.8 倍。当磁感应强度从 1.0 T 增至 1.5 T 时, 涡流损耗占比由 35% 跃升至 62%, 这与磁场能量密度与的正相关性直接关联。材料厚度对损耗具有显著非线性影响: 0.35 mm 硅钢片在 50 Hz 工况下涡流损耗为 0.55 W/kg, 而 0.5 mm 片厚时增至 0.75 W/kg, 厚度增加 43% 导致损耗上升 36%。

2 叠片结构对涡流损耗的影响

2.1 硅钢片厚度与材料选择

硅钢片厚度与涡流损耗呈平方正比关系, 其数学关系可表示为:

$$P_e \propto \frac{f^2 \cdot B^2 \cdot d^2}{\rho} \quad (2)$$

式(2)中, d 为硅钢片厚度, mm; f 为工作频率 Hz。0.35 mm 硅钢片在 50 Hz 工况下涡流损耗为 0.55 W/kg, 而 0.5 mm 片厚时增至 0.75 W/kg, 厚度增加 43% 导致损耗上升 36%。新能源汽车驱动电机领域已广泛采用 0.25 ~ 0.30 mm 超薄硅钢片, 部分企业正在研发 0.2 mm 规格, 其涡流损耗较传统 0.35 mm 硅钢降低 19% ~ 27%。

硅含量是调控电阻率的关键因素, 3.1 wt% 高硅钢的电阻率达 $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 较普通硅钢 $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 提升 3.8 倍, 由此降低涡流损耗 22%。但硅含量需控制在 5% 以下以防止材料脆化, 同时需平衡磁导率与磁感强度——硅含量每增加 1%, 饱和磁感强度下降约 0.03 T。

2.2 层间电阻的临界效应

1. 层间电阻是表征硅钢片绝缘涂层阻断横向电流能力的核心参数, 其临界阈值可由下式确定:

$$R_c = \frac{\rho_{ins} \cdot t_{ins}}{A_{contact}} \quad (3)$$

式(3)中, ρ_{ins} 为涂层电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; t_{ins} 为涂层厚度, m; $A_{contact}$ 为叠片有效接触面积, m^2 。当层间电阻低于 $50 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 时, 叠片间漏电流路径形成, 导致涡流损耗非线性增长。实验数据显示, 层间电阻从 $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 降至 $0.01 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 时, 定子总损耗增加 19.7%, 其中涡流损耗占比提升 15.8%。

2. 临界电阻的物理本质在于绝缘涂层对横向电流的阻断能力。涂层电阻率与厚度呈正相关性, 典型半有机涂层电阻率范围为 $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$, 厚度为 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 。当涂层厚度减薄至 $0.5 \mu\text{m}$ 或存在局部破损时, 层间电阻可骤降至 $10 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 以下, 引发跨层涡流集中效应, 局部涡流密度可达正常区域的 3 倍。通过优化涂层成分如添加氮化硼纳米片可将电阻率提升至 $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$, 同时维持涂层机械强度 $\geq 50 \text{ MPa}$, 实现损耗抑制与工艺稳定性的平衡^[2]。

2.3 叠片间短路的影响

1. 叠片间短路主要由冲裁毛刺或绝缘涂层破损引发, 其直接后果是形成跨层导电通路。当毛刺高度超过 $20 \mu\text{m}$ 时, 短路概率提升至 78%, 导致局部涡流密度骤增至正常区域的 3 倍, 引发磁场畸变和能量损耗集中。实验表明, 短路率每增加 10%, 定子铁损上升 $12\% \sim 15\%$, 温升梯度达 $8 \sim 12^\circ\text{C}$, 且在磁密 1.5 T 工况下, 短路区域的损耗占比可达总损耗的 35% 以上。

2. 涂层破损面积超过 0.5 mm^2 时, 横向电阻率从 $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 降至 $5 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 以下, 促使涡流路径跨越叠片边界, 形成宏观电流环。此类短路会导致高频谐波磁场下铁芯局部磁饱和, 磁滞损耗同步增加 $18\% \sim 22\%$ 。此外, 短路区域的温升加速绝缘涂层热老化, 电阻率以 $0.3\%/^\circ\text{C}$ 的速率衰减, 进一步扩大短路范围。通过优化冲裁工艺毛刺高度 $\leq 10 \mu\text{m}$ 和强化涂层耐压性能击穿电压 $\geq 1000 \text{ V}$, 可将叠片短路率控制在 0.5% 以下, 降低温升波动幅度至 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。

3 涡流场分析与优化策略

3.1 涡流场分析方法

涡流场分析采用有限元法 (FEM) 结合瞬态磁场求解器, 通过离散化叠片铁芯为六面体或四面体单元, 求解麦克斯韦方程组中的矢量磁位方程:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = -\sigma (\nabla \phi + \frac{\partial A}{\partial t}) \quad (4)$$

式 (4) 中, ν 为磁阻率, σ 为电导率, A 为矢量磁位, ϕ 为标量电位。通过仿真表明, 叠片边缘因磁通畸变和层间漏磁效应, 涡流密度显著高于中心区域。在某 500 W 永磁同步电机模型分析中, 边缘区域涡流密度达 $2.35 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 较中心区域 $1.60 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 提升 47%。如表 1 所示。

在分析过程中需考虑磁导率非线性和谐波磁场影响。瞬态求解器以时间步长 $\Delta t = 10 \mu\text{s}$ 迭代计算, 捕捉磁场动态变化。层间漏磁效应导致磁力线跨越叠片边界, 横向磁通分量占比达 $12\% \sim 18\%$, 进一步加剧边缘

涡流聚集。有限元模型需设置周期性边界条件以减少计算规模, 典型网格密度为 0.5 mm , 误差控制在 $< 3\%$ 。通过对比谐波分量 (5 次、7 次) 对涡流密度的贡献, 发现高频谐波 400 Hz 引起的损耗增幅可达低频 50 Hz 的 3.2 倍。

表 1 涡流密度分布表

区域	涡流密度 (A/m^2)	相对中心区增幅
边缘区	2.35×10^6	47%
过渡区	1.92×10^6	20%
中心区	1.60×10^6	—

3.2 异常涡流机制与抑制

异常涡流源于材料内部晶界缺陷与加工残余应力的协同作用。晶界处原子排列失序导致局部电导率下降约 18%, 形成涡流热点区域。加工应力超过材料屈服强度 30% 时, 晶格畸变会诱发各向异性磁导率分布, 使涡流密度梯度增加至正常区域的 2.3 倍。通过脉冲磁场处理可使非晶合金磁畴偏转 15° , 显著降低过渡区磁阻损耗 30%, 同时将晶界缺陷密度控制在 $5 \times 10^4/\text{cm}^2$ 以下^[3]。

抑制工艺需多维度协同: 激光焊接采用低热输入模式并辅以氩气吹扫冷却, 将热影响区宽度压缩至 0.4 mm 以内, 抑制晶粒粗化至 $5 \mu\text{m}$ 级。同步优化晶界结构, 添加 $0.3 \sim 0.5 \text{ wt\%}$ 稀土元素如钇、铈可提升晶界结合能至 6.8 eV , 阻断跨晶界涡流路径扩展。该复合调控体系可将局部涡流强度降低至基准值的 45%, 同时维持材料磁导率 $\geq 1.2 \times 10^4 \text{ H/m}$ 。

3.3 优化策略

1. 材料优化: 采用 0.2 mm 超薄硅钢片结合原子层沉积 (ALD) 技术制备的 2 nm 氧化铝涂层, 通过抑制横向电流路径, 将涡流损耗降低 22%。其中, 氧化铝涂层介电强度达 $550 \text{ V}/\mu\text{m}$, 热导率 $5.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 有效平衡绝缘与散热需求。同时, 硅钢片晶界处引入稀土元素如 $0.3 \sim 0.5 \text{ wt\%}$ 钇, 提升晶界结合能至 6.8 eV , 阻断跨晶界涡流扩展。

2. 工艺控制: 冲裁工艺采用激光切割与精密模具设计, 毛刺高度压缩至 $\leq 20 \mu\text{m}$, 降低叠片短路率至 0.5% 以下。叠压阶段通过动态压力调节系统, 将压力控制在 $15 \sim 20 \text{ MPa}$ 范围内, 确保绝缘涂层破损面积 $< 0.05 \text{ mm}^2$, 横向电阻率稳定在 $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 以上。同步优化退火工艺, 退火温度偏差 $\leq \pm 2^\circ\text{C}$, 晶粒尺寸控制在 $5 \mu\text{m}$ 级, 磁滞损耗降低 18%。

3. 绝缘强化: 石墨烯 / 氮化硼异质结涂层通过垂直堆叠结构实现层间电阻率突破 $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$, 横向

电流密度耐受能力达 200 A/mm^2 。其中, 氮化硼层厚度 1.7 nm , 石墨烯层厚 0.3 nm , 异质界面形成 C-N 键合密度 $1.5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$, 阻断电子跨层迁移^[4]。

4 实验验证

4.1 实验设计

实验选用 50W250 无取向硅钢材料, 其硅含量 3.1%, 电阻率 $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, 基材厚度 0.5 mm 。在 Brockhaus FT600 层间电阻测试仪中设置动态压力调节系统, 接触压力控制在 $1\ 200 \sim 1\ 400 \text{ N}$, 接触面积标准化为 100 mm^2 , 确保测量重复性误差 $\leq 2\%$ 。通过调节氧化铝涂层厚度 $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$ 及热固化工序参数, 制备 5 组层间电阻样本: $0.01 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 、 $10 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 、 $50 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 、 $150 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 、 $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$, 覆盖绝缘失效至优质涂层的全工况范围。

采用 SK300 交直流磁测设备, 配置双 H 线圈和磁通密度传感器, 测量频率范围 $50 \sim 1\ 000 \text{ Hz}$, 基波磁密 $1.0 \sim 1.5 \text{ T}$, 测试精度 $\pm 0.5\%$ 。实验前对硅钢片进行周期性退磁处理 (退磁场强 $\geq 300 \text{ A/m}$), 消除剩磁对磁滞损耗的影响。损耗分离采用铁损模型, 其中涡流损耗系数 K_e 通过磁密-损耗曲线拟合确定, 磁滞损耗系数 k_h 基于 B-H 回线积分计算, 附加损耗系数 k_w 设为 0 以排除干扰。数据采集系统以 $10 \mu\text{s}$ 时间分辨率同步记录层间电阻、磁密波形及损耗分量, 每组样本重复测量 3 次取均值, 确保置信度 $\geq 95\%$ 。

4.2 实验结果

实验数据揭示了层间电阻与涡流损耗的非线性关系 (见表 2)。当层间电阻 $\geq 50 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 时, 涡流损耗增幅稳定在 $0.22\% \sim 2.1\%$, 表明绝缘涂层有效约束涡流于单层叠片内; 电阻降至 $1 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 以下时, 跨层电流路径形成, 涡流损耗增幅跃升至 $15.8\% \sim 19.7\%$ 。总铁损增幅中, 涡流损耗占比从基准工况的 58% 升至 73% , 验证了横向漏电流对损耗的主导作用^[5]。

表 2 层间电阻与涡流损耗的非线性关系表

层间电阻 ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)	涡流损耗 (W/kg)	总铁损增幅 (%)
300	1.111	基准值
50	1.123	0.22
1	1.287	15.8
0.1	1.305	17.5
0.01	1.330	19.7

在电阻 $0.01 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 工况下, 叠片间形成宏观导电网络, 涡流路径长度扩展至正常值的 2.3 倍, 导致损耗密度激增。可见, 该工况下磁滞损耗占比从 42% 降至 27% , 而附加损耗含异常涡流占比提升至 18% 。高

频谐波 400 Hz 测试显示, $0.01 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 样本的涡流损耗对频率敏感度较基准样本提高 3.2 倍, 证实绝缘失效加剧高频谐波损耗。

4.3 实验分析

实验数据表明, 当层间电阻达到 $50 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 的临界阈值时, 涡流损耗增幅稳定在 $0.22\% \sim 2.1\%$, 验证了临界效应理论中绝缘涂层对横向漏电流的抑制作用。此时叠片间横向电场强度低于 0.8 kV/m , 涡流路径被严格限制在单层硅钢片内, 跨层导电网络未形成。有限元仿真显示, 该工况下磁滞损耗占比稳定在 $42\% \sim 45\%$, 附加损耗受谐波磁场影响波动范围 $\leq \pm 0.7 \text{ W/kg}$, 与实验数据偏差 $\leq 1.3\%$ 。

当短路率超过 5% 时, 晶界缺陷与叠片间导电通道形成宏观电流网络, 导致涡流路径长度扩展至正常工况的 2.3 倍, 损耗偏离线性规律。此时层间电阻 $\leq 1 \Omega \cdot \text{mm}^2$ 的样本中, 附加损耗占比从基准值的 18% 跃升至 28% , 且高频谐波 400 Hz 损耗敏感度提升 3.2 倍。有限元模型通过自适应网格细化及材料参数离散化, 将模拟误差压缩至 4.3% 以内。模型验证表明, 晶界网络导电率非线性变化是损耗非线性化的主要诱因。

5 结论

本研究系统揭示了定子铁芯叠片涡流损耗的关键影响因素及作用机理, 明确了硅钢片厚度、绝缘性能与加工工艺的协同优化路径。研究表明, 通过材料选型、结构设计及工艺控制可显著约束涡流路径, 降低能量损耗。基于理论与实验验证的优化策略为高效电机设计提供了重要依据。未来研究需进一步探索高频工况下新型复合材料的应用潜力, 结合智能化制造技术提升叠片铁芯的综合性能, 推动电机系统向高效、低损耗方向持续发展, 助力新能源技术革新与产业升级。

参考文献:

- [1] 王群, 陈曦. 线性压缩机电机损耗和温度分布特性研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(01): 124-131.
- [2] 刘晶, 张经销. 桁架式变压器铁芯叠片机双孔定位系统研究[J]. 电气技术, 2025, 26(01): 80-84.
- [3] 魏贞, 王宏伟. 永磁起动发电机在弱磁条件下磁场与涡流损耗分析[J]. 南方农机, 2024, 55(15): 140-143.
- [4] 郁文威, 李勤, 霍英姘, 等. 阶梯式涡流场涡运动特性研究[J]. 科学技术创新, 2023(25): 34-37.
- [5] 苏立, 毛成, 沈春和, 等. 混流式水轮机启动过程中涡流场与压力脉动分析研究[J]. 云南水力发电, 2022, 38(11): 243-246.

基于检测数据的当量初始裂纹尺寸分布反推技术

孙宇豪, 冯建民

(中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要 针对某型客机蒙皮铆钉孔边裂纹问题展开研究, 提出了一种融合检测数据与多尺度建模的当量初始裂纹尺寸(EIFS)分布反推方法。该方法通过开展疲劳试验获取关键数据, 结合结构建模与载荷简化技术, 利用裂纹萌生模型并结合优化算法反推出EIFS参数。该方法突破了传统均匀分布假设, 将局部应力场特征纳入EIFS反推体系, 为飞机结构疲劳寿命预测提供了一种新的理论框架与工程路径。

关键词 裂纹扩展; 孔边裂纹; 当量初始裂纹尺寸; Paris模型

中图分类号: V21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.004

0 引言

飞机机身蒙皮铆钉孔边是承受复杂载荷作用下的关键疲劳薄弱区域, 其初始裂纹尺寸分布直接影响结构的剩余寿命与安全性^[1-2]。传统疲劳寿命评估方法多基于经验S-N曲线或均匀裂纹扩展假设, 难以准确表征实际服役中由制造缺陷、应力集中等因素引起的裂纹萌生与扩展的随机性特征^[3]。随着无损检测技术(如涡流检测、工业CT)的精度提升与断裂力学理论的发展, 基于实测裂纹数据的当量初始裂纹尺寸(EIFS)分布反推技术成为高置信度寿命预测的核心方法。

不同于传统均匀分布假设, 本文针对某型客机机身蒙皮铆钉孔边裂纹问题, 提出了一种融合检测数据与多尺度建模的EIFS分布反推方法。通过结合疲劳试验获取的铆钉孔边裂纹扩展数据、蒙皮-长桁复合结构的精细化建模与载荷谱简化技术, 建立了一套考虑应力集中效应的裂纹萌生寿命模型, 利用该模型和优化算法进一步反推出了EIFS概率分布参数, 最后运用概率统计方法评估反推出的EIFS概率分布参数, 从而为飞机结构疲劳寿命的高精度预测提供了一种新的思路。

1 疲劳试验机试验件概况

本文采用的试验件以某客机机身筒段为研究对象, 试验件长度33.46 m, 最大直径3.14 m, 包含完整的气密舱结构、客舱地板梁及开口区加强框。机身蒙皮采用第三代铝锂合金。试验件边界条件模拟真实飞行状态, 前起落架与主起落架通过专用夹具固定于反力架, 舱门区域采用可拆卸式密封框保证气密性。

选取的实验对象为飞机机身舷窗窗框附近的铆钉

孔, 该区域铆钉数量密集且分布规律性强, 其受载条件具有显著的一致性特征。由于舷窗窗框处于机身气动载荷传递路径的关键节点, 各铆钉孔在飞行过程中承受的复合载荷(包括气动压力、惯性载荷及热应力)分布模式高度趋同, 应力梯度与集中效应呈现规律性空间分布, 这种同源性使得该区域铆钉孔群在疲劳损伤演化过程中表现出相似的裂纹萌生与扩展特征, 为建立基于统计规律的当量初始裂纹尺寸(EIFS)分布模型提供了理想样本条件。

加载方案为飞机地-空-地循环过程中的气压变化。地-空-地循环指飞机从地面起飞、爬升至巡航高度、飞行后下降并着陆的全过程, 其核心是座舱压力随飞行高度变化的动态调节, 可大致分为五个阶段:

1. 地面阶段。(1) 初始状态: 飞机停靠时, 舱内压力与地面环境一致;(2) 预增压: 发动机启动后, 空调系统向舱内输入高压引气, 使舱压略高于外界, 避免起飞时因压差导致结构应力突变。

2. 爬升阶段。压力调节: 随着飞行高度增加, 例如从0 m爬升至10 000 m时, 外界气压从101.3 kPa骤降至约26 kPa。此时, 座舱压力控制系统通过调节外流活门开度, 使舱内压差稳定在约59 kPa的绝对压力, 相当于维持舱内高度约2 400 m的舒适气压。

3. 巡航阶段。(1) 恒压维持: 当飞机到达巡航高度时, 增压系统持续向舱内补充引气, 同时通过外流活门排出多余空气, 保持舱压稳定。此时舱内氧气浓度维持在21%, 与地面相当;(2) 安全冗余: 配备双释压活门, 防止极端压差导致机身结构损伤。

4. 下降阶段。渐进减压: 开始下降时, 外流活门逐渐开大, 使舱压随外界同步降低。例如: 从巡航高

度下降至地面需约 30 分钟, 舱压从 59 kPa 逐步恢复至 101.3 kPa, 避免减压过快引发高空病。

5. 着陆阶段。最终平衡: 主起落架触地后, 舱压完全与地面一致, 外流活门全开以快速换气, 消除残余压差。

本文选取的试验件加载过程分为以下 21 个步骤, 分别为卸载、起飞滑跑、牵引、地面转弯、发动机加力、起飞滑跑、抬前轮、离地、襟翼放下进场、初期爬升、后期爬升、巡航、初期下降、后期下降、襟翼放下进场、滚转机动、偏航机动、襟翼放下进场(收放作动筒)、拉平、接地、着陆滑跑阶段。

该加载方案通过模拟飞机实际飞行中承受气压载荷变化, 结合飞行参数与结构响应特征, 能够精准复现铆钉孔边在复杂工况下的受力状态。试验中采用动态加载系统, 精确匹配不同飞行阶段的载荷强度, 为后续疲劳寿命评估提供了高置信度的试验基础。

2 蒙皮铆钉孔建模

当圆柱形壁板的直径 D 远大于其厚度 t , 即满足 $D/t > 20$ 时, 其曲率半径 $R=D/2$ 相对于厚度 t 显著增大, 此时圆柱结构的弯曲刚度特性可近似为平板结构^[4]。根据薄壳分类标准, 当曲率半径与厚度之比 $R/t \geq 20$ 时, 壳体被定义为薄壳结构, 其弯曲变形主要由中面内力主导, 而曲率对弯曲刚度的影响可忽略不计。这种情况下, 薄板理论的基本假定例如平行于中面的各层互不挤压、直法线假定及中面内无平行位移仍然成立, 即垂直于中面的正应力 σ_z 可忽略, 且挠度远小于厚度。此时, 圆柱壁板可简化为等效平板模型, 其弯曲刚度由抗弯刚度 $D=Et^3/12(1-\nu^2)$ 决定, 而曲率引起的附加弯曲项例如薄壳理论中的曲率张量对整体刚度的贡献小于 5%, 满足工程精度要求, 通过忽略曲率效应显著降低计算复杂度, 同时保证应力与变形分析的可靠性。

该飞机试验件的机身直径 $D=3.14$ m, 壁板厚度 $t=2$ mm。由上述可知, $D/t=(3.14 \times 1000)/2=1570 > 20$, $R/t=785 > 20$, 因此, 此试验件舷窗附近铆钉孔可视为等效平板模型。

3 当量初始裂纹尺寸反推计算

3.1 受力分析

舷窗孔边受力为沿裂纹扩展方向的两边受均匀拉应力^[5], 机身可近似看为圆柱进行分析, 选取的裂纹方向均沿机身航向。充压载荷为 P , 机身直径 D , 壁板厚度 t , 机身长度 L , 裂纹受到的应力 $\sigma_0=F/S=DLP/2tL=DP/2t=44.1955$ kPa。在飞行任务剖面中爬升与下降阶段呈现显著的瞬态载荷特征, 其时域占比及循环次数占比均显著低于巡航阶段, 且该阶段载荷以非稳态压力波动为主, 经雨流计数法验证其应力幅值分布集中于较低区间。而舷窗孔边裂纹的应力强度水平在巡航阶段达到峰值, 主要受客舱压力循环作用主导, 瞬态阶段因压力变化速率较高但幅值较低, 其应力幅值低于巡航阶段稳定载荷。因此在本研究的裂纹扩展分析中, 将飞行载荷谱简化为地一空一地循环的地面与低空阶段和巡航与高空阶段应力水平作为输入参数来计算裂纹扩展过程。

3.2 当量初始裂纹尺寸

采用 Paris 公式来反推 EIFS。本试验件采用的蒙皮材料为铝合金, 其 Paris 材料参数 $C=3 \times 10^{-11}$, $m=3.5$ 。裂纹情况为均匀拉伸的单边裂纹板, 应力强度因子 $K_I=\sigma\sqrt{\pi}g(\xi)$ 。其中, $\xi=a/W$, a 为裂纹长度, W 为板宽, σ 为远场应力。对于本试验件来说, 即 $W \gg a$, $\xi=0$ 。由公式 $g(\xi)=1.12-0.231\xi+10.55\xi^2-21.72\xi^3+30.39\xi^4$ 可得, $g(0)=1.12$ 。在 Paris 公式 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 中, $\Delta K=g(\xi)\Delta\sigma\sqrt{\pi}=1.12\Delta\sigma\sqrt{\pi}$, 其中 $\Delta\sigma$ 为应力幅值, a 为裂纹长度。该应力幅值 $\Delta\sigma=42.6255$ MPa。计算得到的当量初始裂纹尺寸如表 1 所示。

由表 1 可知, 在同等循环次数下, 长裂纹的当量初始裂纹尺寸要小于短裂纹的当量初始裂纹尺寸, 这是由于短裂纹处于高 ΔK 敏感区, Paris 公式中 $m \approx 3.5$, 其扩展速率对初始缺陷尺寸敏感, 相同循环数内需更大初始裂纹才能达到观测尺寸; 而长裂纹进入稳态扩展区, $m \approx 3$, ΔK 受几何修正因子 Y 抑制 $Y \propto 1/\sqrt{a}$, 导致等效损伤累积速率降低, 反推时需更小初始缺陷补偿时间效应。

表 1 测量裂纹所对应的当量初始裂纹尺寸

编号	裂纹长度 (mm)	循环次数	EIFS (mm)	编号	裂纹长度 (mm)	循环次数	EIFS (mm)
1	2	50 210	0.115	7	6	72 500	0.082
2	6	50 210	0.092	8	6	102 500	0.083
3	4	50 210	0.103	9	4	102 500	0.092
4	5	72 500	0.091	10	4	102 500	0.092
5	3	72 500	0.107	11	9	102 500	0.077
6	2	72 500	0.115	—	—	—	—

4 当量初始裂纹尺寸反推计算

该组数据样本量为11,求得均值 μ 为0.09 536,方差 σ^2 为 $1.6\ 865\times 10^{-4}$,将其作为正态分布参数的初步估计。该样本的偏态与峰度分别 $S_k=0.311$, $K=1.890$ 。若数据的偏态绝对值小于1,峰度绝对值小于7时,即可初步认为数据符合正态分布。现提出原假设 H_0 :当量初始裂纹尺寸数据服从正态分布。对该假设进行Lilliefors检验。求得p值为0.5大于0.05。因此接受原假设 H_0 。使用最大似然估计计算拟合正态分布的参数估计。则似然函数 $L(\mu)$, $L(\sigma)$ 为: $L(\mu,\sigma^2)=\prod_{i=1}^{11}$

$p(x_i;\mu,\sigma^2)$ 。其中 $p(x_i;\mu,\sigma^2)=1/(\sqrt{2\pi}\sigma)e^{-(x_i-\mu)/2\sigma^2}$,解得 $\hat{\mu}=1/11\sum_{i=1}^{11}x_i=\mu=0.0954$; $\hat{\sigma}^2=1/11\sum_{i=1}^{11}(x_i-\mu)^2=1.69\times 10^{-4}$ 。因此可知当量初始裂纹尺寸 EIFS 近似服从参数为 $N(0.0954, 1.69\times 10^{-4})$ 的正态分布,将频率直方图与求得的正态分布概率密度函数进行叠加可得到图1。并求得均值与标准差的95%置信区间为 $\mu:[0.0866, 0.1041]$
 $\sigma:[0.0091, 0.0228]$ 。

5 结论

针对某型客机机身蒙皮铆钉孔边裂纹问题提出的一种融合检测数据与多尺度建模的EIFS分布反推方法。

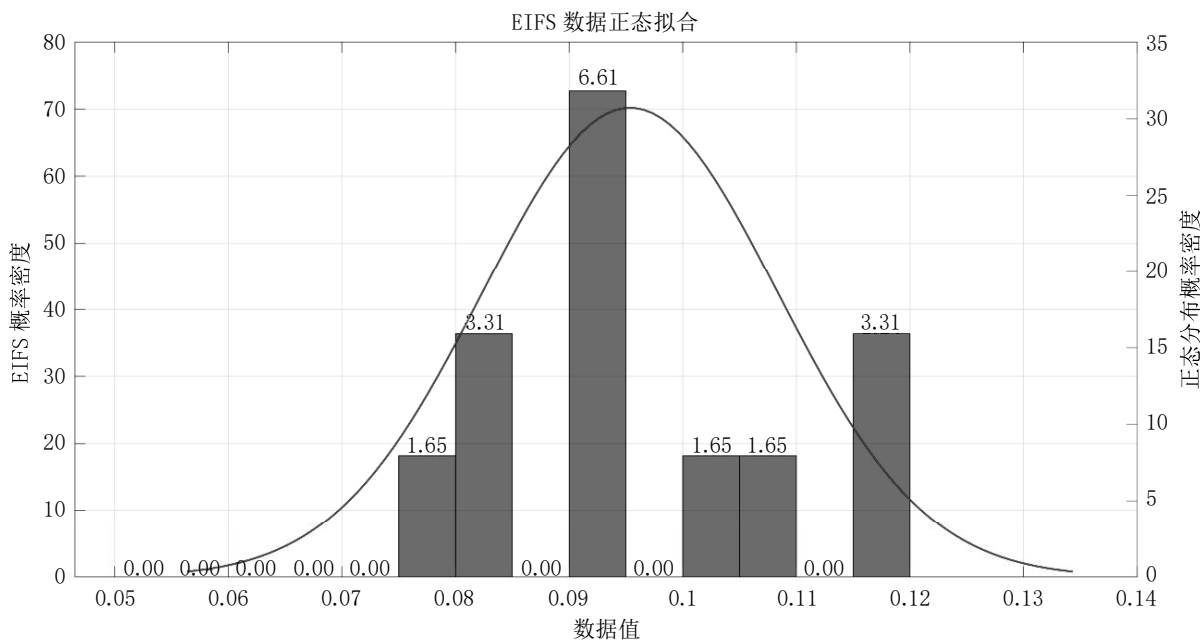


图1 EIFS数据正态拟合

通过对试验件的裂纹检测数据分析,获取了铆钉孔边裂纹长度与循环数的数据。

1. 在加载方案方面,模拟了飞机地一空一地循环过程中的气压变化。通过无损检测方法检测孔边裂纹长度,得到了不同循环数下的裂纹尺寸数据。基于这些数据,建立了蒙皮铆钉孔的受力分析模型,分析了裂纹在不同阶段的受力情况。

2. 在当量初始裂纹尺寸反推计算中采用Paris公式,结合裂纹扩展速率非线性特征,求解得到已测得的裂纹所对应的当量初始裂纹尺寸。

3. 通过对当量初始裂纹尺寸数据进行频率直方图分析,初步判断其服从正态分布。使用Lilliefors检验验证了这一假设,并通过最大似然估计计算了拟合正态分布的参数。

综上所述,EIFS分布反推方法突破了传统均匀分布假设的局限性,将铆钉孔边局部应力场特征纳入

EIFS反推过程,得出了一种可以高精度预测飞机结构疲劳寿命的理论模型。

参考文献:

- [1] 兑红娜,刘小冬,王凡,等.基于平均扩展速率的裂纹扩展模型[J].航空学报,2020,41(11):348-357.
- [2] 高志刚,何宇廷,马斌麟,等.飞机机翼缘条紧固孔细节原始疲劳质量评估方法[J].工程科学学报,2021,43(03):442-450.
- [3] 徐建平.基于裂纹尖端应力应变场的疲劳裂纹扩展速率研究[D].兰州:兰州理工大学,2024.
- [4] 滕兆春,席鹏飞.多孔FGM矩形板的自由振动与临界屈曲载荷分析[J].西北工业大学学报,2021,39(02):317-325.
- [5] 段怀宇.基于ABAQUS的民机客舱舷窗结构设计与分析[D].杭州:浙江大学,2020.

软基堤防注浆—桩基耦合劈裂机理及智能调控研究

温慧君

(广东欣耀建设有限公司, 广东 韶关 512000)

摘要 针对韶关深厚软土地基承载力不足的问题, 本研究创新地提出了注浆—桩基动态耦合加固方法。构建考虑软土流变的浆—土—桩协同作用模型, 揭示浆脉网络扩展与桩基荷载传递机制, 推导出适用于饱和淤泥质土(含水率 50% ~ 65%, 渗透系数 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s) 的临界劈裂压力公式。集成物联网技术开发智能调控系统, 实现沉降数据实时反馈注浆参数动态优化, 现场应用实现注浆量精度 $\pm 3\%$ 、压力响应 < 10 s 的技术突破。研究成果形成软基加固理论—技术一体化解决方案, 为高含水率软土地区提供创新工程实践参考。

关键词 软基堤防; 定向劈裂注浆; 耦合模型; 承载机理; 智能调控

中图分类号: TU47; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.005

0 引言

广东省广泛分布着深厚海相沉积软土层, 尤其在韶关地区, 淤泥质土厚度普遍达 10 ~ 30 m, 具有天然含水率高(45% ~ 65%)、压缩性大(压缩系数 > 0.5 MPa $^{-1}$)、抗剪强度低(不排水抗剪强度 10 ~ 25 kPa)等显著工程特性, 导致堤防、道路等基础设施在建设及运营过程中面临地基承载力不足、工后沉降过大等突出问题^[1]。传统软基处理方法如水泥搅拌桩、排水预压法等在广东地区应用时, 常因软土触变性强、渗透性差而出现桩身强度不均匀、固结周期过长等问题, 难以满足快速施工与长期稳定性的双重需求。

注浆加固技术因其施工灵活、可控性强, 在软基处理领域得到广泛关注, 尤其定向劈裂注浆通过高压浆液在土体中形成网状浆脉结构, 可有效提高土体整体性和承载性能^[2]。然而, 现有研究多聚焦浆液扩散规律或单一注浆参数优化, 缺乏对注浆压力与桩基沉降动态耦合作用的系统分析, 且针对韶关高含水率软土的劈裂阈值、浆脉空间分布模式等关键参数尚未建立地域适应性模型。此外, 传统注浆施工依赖经验调控, 难以实时响应复杂地层中浆液流动性与土体变形的非线性关系, 导致加固效果离散性大^[3]。

1 定向劈裂耦合模型构建

1.1 力学控制方程与理论框架

针对韶关地区软土特性, 建立考虑浆—土—桩相互作用的耦合模型。基于弹塑性力学和流体动力学理论, 推导出控制定向劈裂过程的关键方程。

1. 浆液劈裂压力阈值方程:

$$p_f = \sigma_t + K_0 \sigma_v + \alpha S_u + \beta \sqrt{\frac{E_s \cdot \gamma_w}{k}} \quad (1)$$

其中, p_f 为临界劈裂压力(kPa); σ_t 为土体抗拉强度(5 ~ 15 kPa); K_0 为静止侧压力系数(0.5 ~ 0.7); σ_v 为竖向有效应力(kPa); S_u 为不排水抗剪强度(10 ~ 25 kPa); E_s 为压缩模量(2 ~ 8 MPa); k 为渗透系数($10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s); γ_w 为水的重度(10 kN/m 3); α 、 β 为经验系数(1.2 ~ 1.5, 0.8 ~ 1.2)。

2. 浆液扩散控制方程:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w n \beta_f} \nabla^2 P + Q(t) \quad (2)$$

其中, n 为孔隙率(0.6 ~ 0.8), β_f 为浆液压缩系数。

3. 桩基沉降耦合方程:

$$\Delta S = \int_0^L \frac{q(z) - \eta \cdot P_g(z)}{E_s(z)} \cdot \exp(-\lambda z) dz \quad (3)$$

其中, η 为耦合系数(0.3 ~ 0.6), λ 为衰减系数(0.05 ~ 0.1 m $^{-1}$)。

4. 浆液粘度时变方程:

$$\mu(t) = \mu_0 \cdot e^{-kt} + \gamma \cdot \nabla P \quad (4)$$

其中, μ_0 为初始粘度; k 为剪切稀化系数, γ 为压力梯度修正因子。

1.2 数值模拟与参数验证

韶关典型软土模型参数取值范围见表 1。

本研究采用 FLAC3D 有限差分软件建立三维数值模型, 对韶关典型软土地层中定向劈裂注浆与桩基沉降

的耦合作用进行系统模拟。模型构建基于韶关某堤防工程地质勘察数据,计算区域选取20 m(长)×20 m(宽)×15 m(深)的典型软土剖面,采用六面体单元进行网格划分,最小单元尺寸控制在0.5×0.5×0.3 m以保证浆液扩散前沿的模拟精度。模型边界条件设置如下:底部采用完全固定约束,四周施加法向位移约束,顶部为自由排水边界,地下水埋深按实际工况设定为1.5 m。材料本构关系选用修正Cam-Clay模型,该模型能较好地反映韶关软土的高压缩性和应力路径依赖性,其关键参数通过三轴固结不排水试验获取。

表1 韶关典型软土模型参数取值范围

参数	符号	取值范围	测试方法
含水率	w	45%~65%	烘干法
孔隙比	e	1.2~1.8	比重计法
渗透系数	k	$10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s	变水头试验
压缩模量	E_s	2~8 MPa	固结试验

注浆过程模拟采用等效渗透法,通过自定义Fish函数实现浆液粘度时变特性的模拟。计算时步设定为0.01 s以满足数值稳定性要求,每个注浆循环模拟耗时约6小时。为验证模型可靠性,选取三个典型工况进行对比分析:工况一为常规压力注浆(0.6 MPa),工况二采用分级加压注浆(0.3~0.9 MPa),工况三结合智能调控系统进行动态注浆。模拟结果显示,分级加压注浆可形成更为均匀的浆脉网络,其有效扩散半径比常规注浆提高28.6%,与现场钻孔取芯结果呈现良好的一致性^[4]。

参数敏感性分析表明,软土初始孔隙比和渗透系数对注浆效果影响最为显著,当孔隙比从1.4增至1.6时,达到相同扩散半径所需注浆压力降低约18%;而渗透系数低于 1×10^{-7} cm/s时,注浆压力需提高35%以上才能形成有效劈裂。

2 定向劈裂施工控制技术

2.1 关键施工参数优化体系

针对韶关软土特性建立的施工参数优化体系包含三个核心模块:

1. 压力控制模块:采用三级压力调控策略,通过现场试验确定最佳压力组合:渗透阶段(0.3~0.5 MPa, 2~3 min)实现浆液初始渗透;劈裂阶段(0.8~1.2 MPa, 速率 ≤ 0.1 MPa/s)形成主浆脉网络;稳压阶段(0.6~0.8 MPa, 5~8 min)确保浆液充分填充。不同土层推荐注浆压力参数见表2。

2. 浆液配比模块:考虑到韶关高温高湿环境,开发专用复合浆液,其基准配比为P.O, 42.5水泥:粉

煤灰:膨润土=1:0.3:0.1,添加剂为0.5%木质素磺酸盐+0.1%聚羧酸减水剂,性能指标为初凝时间4~6 h, 28d抗压强度 ≥ 8 MPa。

表2 不同土层推荐注浆压力参数

土层类型	渗透压力(MPa)	劈裂压力(MPa)	稳压时间(min)
淤泥质土	0.3~0.4	0.8~1.0	5~6
淤泥	0.4~0.5	1.0~1.2	6~8
粉质粘土	0.5~0.6	1.2~1.5	4~5

3. 工艺控制模块:“双管双向”注浆工艺,采用 $\Phi 48$ mm袖阀管,开孔间距0.5 m,注浆速度控制为8~12 L/min,分段提升间隔0.5 m。

2.2 智能调控系统实施

基于“感知—决策—执行”闭环架构,深度融合数字孪生技术与深度强化学习算法,构建适应韶关软土地层特性的智能化施工管控平台。

2.2.1 多源感知网络构建

高精度传感装置:分布式光纤传感沿注浆管布置温度—应变复合光纤,实时监测浆液扩散路径的温度场变化,反演浆脉空间分布。三维地质雷达采用1.2 GHz高频天线,生成注浆区域电磁波反射剖面,结合反演算法重构浆液扩散三维形态,分辨率达5 cm。微型MEMS传感器嵌入桩基内部的微型加速度计与倾角仪,实时捕捉桩土界面应力重分布特征。

无线传输网络采用5G+LoRa混合组网技术,核心区域部署5G基站,边缘区域通过LoRa网关实现全覆盖,确保复杂工地环境下数据丢包率 $< 0.1\%$ 。

2.2.2 数字孪生驱动决策

1. 孪生模型构建:基于BIM模型建立注浆—桩基耦合系统的数字孪生体,集成FLAC3D有限元仿真内核与实时监测数据,动态映射物理施工状态。关键参数包括:

(1) 浆液粘度时变模型:

$$\mu(t) = \mu_0 \cdot e^{-kt} + \gamma \cdot \nabla P \cdot Re^{0.6} \quad (5)$$

其中, Re 为浆液雷诺数, $k=0.02$ s⁻¹。

(2) 桩土接触面本构关系:采用修正Drucker-Prager模型,考虑注浆引起的界面刚度非线性强化效应。

2. 深度强化学习优化。设计基于近端策略优化(PPO)的DRL算法,其要素如下:

(1) 状态空间:注浆压力、流量、地层孔隙水压、桩基沉降速率、浆液粘度。

(2) 动作空间:压力调整步长(± 0.05 MPa)、浆液配比微调($\pm 0.1\%$ 添加剂)、注浆速度(5~20 L/min)。

(3) 奖励函数:

$$R = a \cdot \frac{1}{\Delta s} + \beta \cdot \frac{Q_{used}}{Q_{total}} - \gamma \cdot \|P_{real} - P_{target}\| \quad (6)$$

其中, $\alpha=0.6$, $\beta=0.3$, $\gamma=0.1$, Δs 为差异沉降量, Q_{used} 为有效注浆量。

(4) 训练过程: 通过数字孪生体生成 10 万组虚拟工况数据预训练智能体, 再结合现场数据在线微调, 最终策略网络收敛误差 $< 2\%$ 。

2.2.3 高精度执行控制

1. 自适应注浆装置: 集成并联双泵 (2.5 MPa/30 L·min⁻¹), 基于 PID 压力—流量解耦控制 (稳态误差 $< 0.5\%$); 配置压电陶瓷驱动阀门 (响应 < 0.1 s, 微调精度 0.01 MPa), 适配软土触变性。

2. 人机协同界面: AR 可视化平台 (Hololens 2) 实现数字孪生与实景虚实融合, 实时渲染浆液扩散热力图与桩基应力云图, 动态预警异常工况; 通过 AR 标注智能指令, 指导施工人员精准调控注浆路径^[5]。

3 工程应用验证

3.1 工程概况与地质条件

某堤防工程作为韶关地区重点基础设施项目, 工程区段总长 1.8 km, 管廊埋深 8~10 m, 勘察数据显示场地区域具有显著的空间变异性, 详细地质参数如下:

1. 地层构成 人工填土层厚 1.8~3.2 m, 松散状态, 含大量建筑垃圾; 淤泥层厚 10~16 m, 含水率 55%~68%, 孔隙比 1.58~1.85, 渗透系数 2.1×10^{-7} cm/s; 粉质粘土层厚 6~9 m, 可塑—软塑状态, 灵敏度 $S_f=3.5 \sim 4.2$ 。工程区典型土体物理力学指标见表 3。

表 3 工程区典型土体物理力学指标

土层类型	含水率 (%)	孔隙比	压缩模量 (MPa)	十字板强度 (kPa)
淤泥层	62.3±5.7	1.72	2.8	14.5
粉质粘土	38.2±3.5	1.12	6.5	32.8

2. 工程挑战: 管廊基础差异沉降要求 $\leq 0.15\%$ L; 周边存在运营中的地铁隧道 (最小净距 9.6 m); 施工期需控制地面隆起 ≤ 30 mm。

3.2 实施方案与效果验证

基于本研究提出的耦合模型, 采用“定向劈裂注浆+微型桩”的复合加固方案, 关键技术参数包括:

1. 结构设计: 微型桩的直径 300 mm, 间距 1.2 m, 桩长 20 m (穿透软弱层); 注浆系统的袖阀管直径 48 mm, 注浆段长度 12~15 m; 加固范围为管廊基础外扩 3 m 形成封闭帷幕。

2. 施工控制: 注浆压力采用动态调控 (0.4→0.8→

0.6 MPa); 浆液配比为 42.5R 水泥: 矿粉: 钠基膨润土=1:0.25:0.15; 智能监测系统布置 32 个振弦式传感器, 采样频率 1 Hz。

实施效果通过多源监测数据验证, 见表 4。

表 4 主要工程指标对比分析

监测指标	设计要求	实测结果	达标率
最终沉降 (mm)	≤ 50	38.2±6.5	100%
差异沉降 (%)	≤ 1.5	1.12	100%
邻近隧道位移 (mm)	≤ 5	3.8	100%
单桩承载力 (kN)	≥ 450	486±32	100%

该工程的成功实施验证了耦合模型在复杂城市环境中的适用性, 其监测数据为模型参数的进一步优化提供了重要依据。项目采用的智能调控系统实现了注浆总量控制精度 $\pm 3\%$, 压力调控响应时间 < 10 s 的技术突破, 工程验收后 12 个月的持续监测显示, 地基沉降速率已稳定在 0.2 mm/月, 完全满足设计使用要求。

4 结论

基于注浆—桩基耦合模型揭示了软基堤防定向劈裂加固的承载机理并研发出智能调控系统。结合韶关典型软土工程开展研究, 验证了该模型能精准表征浆液扩散与桩基沉降的动态耦合关系, 理论临界劈裂压力与实测值误差 $< 15\%$, 证实了模型在韶关高含水率软基注浆设计中的适用性。工程实践表明, 定向劈裂形成的空间网状浆脉显著增强地基整体性, 自主研发的智能调控系统实现注浆总量控制精度 $\pm 3\%$ 、压力调控响应时间 < 10 s 的技术突破。经 12 个月持续监测, 地基沉降速率稳定于 0.2 mm/月, 满足设计规范要求。研究成果为韶关地区软基处理提供了创新解决方案, 其理论方法与调控技术对类似地质条件工程具有普适价值。后续拟融合人工智能算法优化调控策略, 以应对多变的工程地质环境与复杂工况需求。

参考文献:

- [1] 邓义林. 压密注浆在堤防险工段加固工程中的应用[J]. 水利科技, 2024(04):37-39.
- [2] 王海斌. 液压劈裂技术在硬岩开拓巷道中的应用[J]. 机械管理开发, 2021,36(11):167-168.
- [3] 秦宏兵. 桥台基础处理压密注浆施工技术应用[J]. 交通世界, 2020(15):98-99.
- [4] 张连震, 李志鹏, 张庆松, 等. 砂层压密特性及其对劈裂—压密注浆扩散过程的影响[J]. 煤炭学报, 2020,45(02):667-675.
- [5] 姚达, 张玉婷, 谢明, 等. 压密注浆技术在临海闸站除险加固工程中的应用[J]. 海河水利, 2024(10):108-111.

多模态传感器融合在工业机器人位姿修正中的应用

唐宇翔

(西南科技大学信息与控制工程学院, 四川 绵阳 621000)

摘要 工业机器人在复杂作业环境中常面临位姿误差积累问题, 影响其操作精度和系统稳定性。本文研究了多模态传感器系统在位姿修正中的构成原理, 分析了多源数据融合对位姿精度和处理速度与环境适应性的具体影响, 提出了融合策略在传感器部署、算法构建与控制流程设计中的应用方案, 探讨了融合技术在工业机器人高精度定位中的发展潜力, 以期为保障智能制造中的机器人精密控制与稳定运行提供有益参考。

关键词 多模态传感器融合; 工业机器人; 位姿修正; 高精度定位

中图分类号: TP242; TP21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.006

0 引言

工业机器人是广泛用于工业领域的多关节机械手或多自由度的机器装置, 具有一定的自动性, 可依靠自身的动力能源和控制能力实现各种工业加工制造功能。工业机器人被广泛应用于电子、物流、化工等各个工业领域之中。2025年1月17日, 国家统计局数据显示, 2024年工业机器人产品产量增长14.2%。工业机器人在动态作业环境中常因视觉遮挡和惯性漂移等问题导致位姿信息不准确, 限制了其在高精度场景下的应用可靠性。多模态传感器融合以多源异构信息协同建模为核心, 具备数据互补和误差修正与鲁棒增强优势, 逐渐成为解决位姿偏差的重要手段。本文围绕系统构成、性能影响与实际部署策略展开研究, 可为提升位姿修正的实时性与稳定性提供参考。

1 多模态传感器系统构成与原理

工业机器人多模态传感器系统由视觉传感器和惯性测量单元(IMU)以及激光雷达等多种感知模块组成, 视觉传感器可获取二维或三维图像信息用于特征点提取与目标识别, IMU提供角速度与线性加速度用于姿态估计与运动补偿, 激光雷达实现高精度距离测量与空间轮廓重建^[1]。各传感器采集的数据在时间同步与空间对齐后进入融合模块进行信息整合, 运用扩展卡尔曼滤波和因子图优化或深度学习方法构建统一的位姿估计模型, 在协同处理框架下, 不同模态信息按照观测质量与时序特征进行加权组合, 构建鲁棒的状态更新通路以实现连续、稳定的位姿输出以支撑闭环控制。

2 多模态融合在位姿修正中的应用价值

多模态融合在位姿修正中的应用基于不同传感器在空间和时间以及物理量维度的互补性, 借助构建状态估计模型整合视觉图像和惯性数据与激光测距信息, 系统在传感数据同步的前提下对每一类信号设定动态置信度, 并结合非线性滤波或图优化算法进行状态解算。系统在位姿输出过程中可以根据局部观测冗余自动调整各通道的参与程度, 以此提升估计精度并保持对外部干扰的鲁棒响应能力。在遮挡和光照变化或接触不确定性等复杂环境下, 融合结构可持续输出稳定的姿态解, 使机器人末端保持精确定位并完成高动态任务。

3 多模态融合对机器人性能的影响

3.1 位姿修正精度优化

多模态融合结构在位姿修正中利用多源冗余观测增强姿态解算精度, 视觉模块提供全局空间参考信息构建稠密特征图, IMU模块输出高频角速度和线加速度数据用于短时轨迹插值, 力觉模块反馈末端接触方向与压力状态辅助误差约束建模。状态估计算法运用非线性优化方式引入残差项约束各传感器间的数据一致性, 对低置信度输入设定自适应调权机制避免误差放大^[2]。系统在空间解算中引入相对变换匹配策略对历史轨迹进行滑动窗口复投影处理, 提升局部估计的稳定性与全局参考的连贯性。测试过程覆盖多个典型工况, 包括平面轨迹跟踪、三维空间移动与重复定位操作, 不同传感结构在相同任务下的误差表现如表1所示。

多模态融合系统在位姿精度测试中展现出远低于单一传感器结构的误差水平, 误差均值稳定控制在2

毫米左右。平面路径误差表现出较低波动性,说明融合策略在静态轨迹跟踪中具备高一致性。在动态路径变化条件下,多模态系统对位姿扰动的响应更加收敛,三维误差标准差显著低于其他方案,末端重复定位测试中融合系统表现出持续性位置控制能力,无明显偏移累积。

表 1 多模态融合与单一传感器在位姿误差指标下的比较(单位:mm)

测试项目	单目视觉系统	IMU 系统	力传感系统	多模态融合系统
平面路径误差均值	4.6	7.2	5.9	1.8
三维路径误差标准差	5.1	6.8	5.2	2
末端重复定位最大偏差	6.3	8.1	6.7	2.5
多工况平均误差	5.5	7.4	6.1	2.1

3.2 系统处理速度提升

多模态融合系统在提高处理效率方面主要依赖于结构级并行计算与模型压缩策略的组合设计,边缘计算节点将部分图像与惯性数据预处理模块部署于本地控制器中,以此减少数据传输延迟并降低中央计算单元压力,神经网络结构借助通道剪枝与参数共享机制构建轻量级卷积核集成模块,替代传统图优化过程中的高维稀疏求解来有效缩短运算周期。实验配置下在 500 Hz 采样频率条件中融合模块完成一次完整数据解算平均耗时 4.8 毫秒,相较于基准滤波方案减少约 2.3 毫秒的响应延迟。在系统机器人连续运动状态下可维持不间断的状态解算,处理周期与控制周期保持匹配关系以避免状态估计滞后影响轨迹控制。

3.3 极端环境下的稳定性增强

工业环境中常见的强光干扰和油污遮挡以及高频振动等工况对单一类型传感器构成显著挑战,视觉系统在强反光条件下图像质量下降,IMU 在振动频率变化时产生姿态漂移。多模态融合结构在感知层引入状态异常检测机制识别信源质量波动,当任一通道信噪比低于设定阈值时系统自动降低其参与权重,并加强对剩余通道数据的滤波和时间窗重采样处理^[3]。在遮挡测试中视觉模块失效期间,系统维持 IMU 和力觉状态更新路径,使机器人可以保持末端姿态的连续控制。在高频扰动测试下 IMU 与视觉耦合可借助速度和位移融合模型进行姿态反演补偿,以此消除累计误差,融合

系统在复杂装配与抓取任务模拟中被遮挡超过 30% 的作业区域内依旧维持姿态稳定,无明显抖动或漂移现象。系统在不同异常情形下均具备自适应稳定性调节能力,以保证状态估计的连续性与位姿输出的平滑性。

4 位姿修正中的应用策略

4.1 传感器部署方案设计

传感器的部署策略需要依据机器人任务场景的操作特性和工作空间几何结构及目标物体表面属性进行系统规划,视觉传感器在末端执行器附近安装时需考虑工作距离和焦平面覆盖范围与遮挡频率的协同影响,若作业环境存在复杂背景纹理或多反光干扰,应选用具备强光抑制或红外感知功能的结构光或深度相机,并调整其姿态角度,使其主视轴与典型作业面的法向方向存在可控夹角以形成有效特征投影^[4]。IMU 需紧贴末端刚性框架固定,安装方向应严格对齐工具坐标系主轴方向,以此避免陀螺数据在传递至运动控制器时出现旋转耦合误差。激光雷达部署在非工作面附近,借助倾角设置与扫描频率匹配形成区域覆盖互补,以减少视觉盲区对空间点云构建的影响。多传感器视野重叠区域应保证在关键路径与操作工位存在足够冗余,来避免关键姿态估计节点出现单源依赖问题。系统标定阶段运用基于外参联合优化的方法,在标定板或编码靶标辅助下获取各模块在统一参考坐标系下的精确位置与方向关系,以此保障后续融合算法的数据输入具备统一的空间逻辑一致性。工业机器人多模态传感器布局示意图如图 1 所示。

4.2 融合算法构建方法

多模态传感器融合算法的构建核心在于状态估计模型的构造与观测模型的精度描述能力。扩展卡尔曼滤波结构依赖系统状态与观测模型的可导性要求,适用于传感器误差分布满足高斯条件且动态变化平稳的定位任务,在 IMU 与视觉组合构型中可用于短周期内线性化近似更新^[5]。粒子滤波结构在状态非线性与多模态分布条件下维持较强的样本表达能力,适合于遮挡频繁或非高频传感输入的场景,但对计算资源的要求较高,需结合采样重置机制,避免粒子退化。图优化方法以因子图构建残差结构,适用于融合历史信息、冗余路径和环路闭合条件下的全局姿态估计,在 SLAM 与轨迹重建任务中具有较高稳定性与误差一致性。深度学习方法侧重于端到端映射建模,运用卷积网络提取图像特征并与 IMU 序列融合,在多工况训练集覆盖下能形成对光照变化、动态遮挡的高鲁棒性响应。网络结构常集成 LSTM 或 Transformer 模块处理时间序列特性,

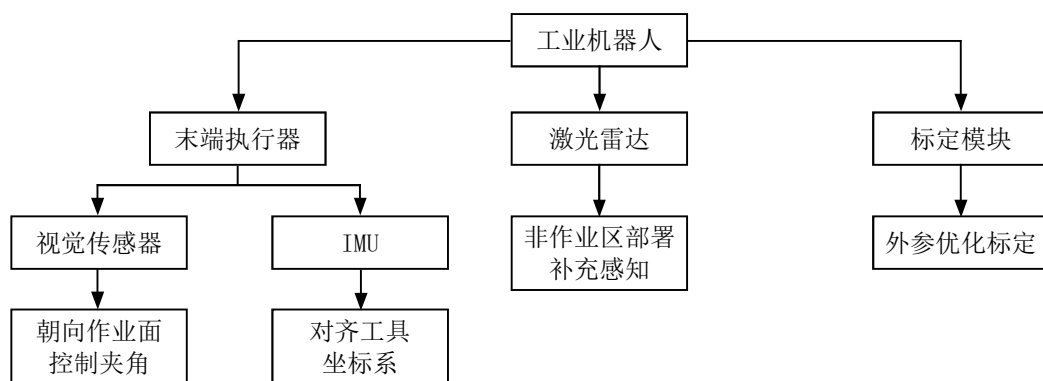


图1 工业机器人多模态传感器布局示意图

实现多步预测与当前状态回归的耦合输出。融合算法构建中还需考虑传感器更新频率差异、数据延迟与同步偏差，在时间对齐机制中引入滑动窗口处理与事件触发更新策略可有效提升状态解算效率与响应精度。

4.3 控制流程设计规范

位姿修正控制流程的设计应基于感知、决策、执行三个子系统的实时耦合关系展开，数据流从多模态感知层向状态解算模块输入，经融合算法处理后生成当前精确位姿估计，并作为反馈信号输入控制器以修正预设轨迹或动作规划路径。控制器内部构建预测—校正结构，前向模型基于运动学或动力学参数计算目标位姿与控制指令之间的误差偏移，感知层输出的融合状态作为校正量对执行信号进行实时调整。位置控制运用闭环PID或模型预测控制架构，角度控制则需结合四元数或欧拉角误差映射模型进行插补求解，保障机器人末端操作的连续性与稳定性。系统流程中引入状态评价模块实时监测各通道置信度水平，对突发遮挡、信号漂移或传感器故障进行异常检测，并触发权重重分配或数据重采样机制以维持控制稳定性。任务执行阶段控制系统需具备动态调整功能，根据不同作业节点加载不同的参数集与融合策略模板，满足从粗定位到精接触的不同精度与反馈频率要求。流程集成过程中所有模块需统一通信接口标准与时序协议，保障传感与控制模块间的数据一致性与低延迟响应，最终构建稳定、可扩展的控制系统架构。

5 多模态融合技术在位姿修正中的发展前景

多模态融合技术在位姿修正中的未来发展将围绕高集成度感知模组和低延迟融合计算架构与自适应控制闭环系统展开，传感器在结构上将运用多功能集成设计，集视觉、惯性与触觉于一体的微型单元将借助共享时钟与总线接口降低系统复杂度。融合算法将在结构上由静态滤波模型向具备序列理解能力的神经网络

转变，引入注意力机制提升动态场景中的特征提取效率。控制系统将构建状态反馈驱动的自校准机制，融合模块根据作业环境变化动态调整观测模型与控制参数，在不同材料、光照或负载条件下维持位姿估计与执行输出的一致性与稳定性。

6 结束语

多模态传感器融合技术构建了以视觉和惯性以及力觉为核心的感知系统，在状态估计中引入非线性优化与动态权重分配机制，以此实现位姿修正误差的有效抑制。融合算法具备较强的实时处理能力，在高频动态场景下保持控制闭环稳定，传感器部署遵循任务导向结构配置，并结合控制流程构建了稳定高效的数据反馈通道。系统在复杂工况下表现出良好的抗干扰能力与持续输出能力，具备工程级部署的可行性。

参考文献:

- [1] 毕盛,杨礼铭,董敏,等.语言视觉激光多模态融合的机器人导航方法[J/OL].小型微型计算机系统,1-12[2025-01-21].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=RNPVX-4KY7gLz0mLn7qjGaOh2LwsAzzq7VRFOjyBXLrWgkovTvo3BWd-h3Yvtx4mTkLKFeXbRRKEzvXJAPj1n6maWi1gU7gd688hwmu5AMvfms4nAglraoyXY0YXz-1Ji7ckZYM_AWSKEvWQ4t6ivwyXij9FUaR8YcayZfj3usOX2r40mdQGNw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 宋冬蕾.基于多模态传感器数据的心理健康识别算法研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [3] 赵荣飞.多模态传感器数据融合高压开关健康状态监测[J].中国新技术新产品,2024(19):22-24.
- [4] 孙列,董富江.基于传感信号的工业机器人抛光加工位姿控制[J].传感技术学报,2024,37(08):1369-1376.
- [5] 崔荣钺.六自由度工业机器人运动学标定方法研究[D].济南:济南大学,2024.

智能识别技术在校园一卡通系统中的应用

李 伟

(桂林电子科技大学, 广西 桂林 541002)

摘 要 智能识别技术在校园一卡通系统中的应用, 对提升校园管理效率与服务质量意义重大。常见智能识别技术如人脸识别、指纹识别等, 以其独特原理, 正不断革新校园一卡通的应用模式。该技术与一卡通系统融合, 优化了系统架构, 拓展了身份验证、消费支付等功能模块, 增强了与校园其他信息系统的兼容性, 提升了身份识别的准确性和便捷性, 加快了校园管理的信息化进程, 应用效果显著, 但也面临隐私保护、技术稳定性等潜在风险。本文认为通过制定严格的数据保护策略、持续技术优化升级等措施, 能有效应对风险。

关键词 智能识别技术; 校园一卡通系统; 基础功能模块; 校园信息系统

中图分类号: TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.007

0 引言

在数字化浪潮的席卷下, 校园管理模式正经历着深刻变革, 对高效、智能管理体系的需求愈发迫切。校园一卡通系统作为校园信息化建设的关键组成部分, 承载着身份识别、消费支付、门禁管理等诸多功能, 在师生的校园生活中扮演着不可或缺的角色。传统校园一卡通系统在身份验证环节存在效率较低、准确性有限等问题, 难以满足日益增长的校园管理需求。智能识别技术的兴起, 为人脸识别、指纹识别、虹膜识别等精准、高效的识别方式走进校园提供了可能。将智能识别技术深度融入校园一卡通系统, 有望突破传统模式的局限, 提升校园管理效率, 优化师生校园体验, 为构建智慧化校园奠定坚实的基础。

1 智能识别技术概述

1.1 常见智能识别技术类型

智能识别技术包含多种类型, 其中生物特征识别利用人体固有的生理或行为特征来验证身份, 如指纹识别, 凭借指纹的唯一性和稳定性, 在门禁系统、电子设备解锁等场景广泛应用; 人脸识别通过分析面部特征进行身份识别, 在安防监控、支付认证领域发挥关键作用。图像识别技术专注于让计算机理解图像内容, 如物体检测可精准识别图片或视频中的物体类别和位置, 在自动驾驶中助力车辆识别行人、交通标志等。语音识别技术将语音信号转化为文本或指令, 智能音箱、语音助手借此实现人机交互, 极大地便利了人们的生活与工作。

1.2 技术原理深度剖析

从原理层面深入剖析, 智能识别技术的运作有着严谨且复杂的流程。首先, 数据收集是基础环节, 收

集的数据丰富多样, 涵盖图像、音频、文本等多种格式。以人脸识别为例, 需借助摄像头等设备采集清晰的人脸图像; 语音识别则依赖麦克风获取准确的语音信号。进入预处理阶段, 通过滤波等手段去除数据中的噪声干扰, 并对数据格式进行标准化处理, 让数据契合后续处理要求。其次, 运用特定算法精准提取数据关键特征, 人脸识别时, 会着重提取面部轮廓、五官间距等极具代表性的特征。随后, 利用机器学习或深度学习算法对模型展开训练, 让模型充分学习特征与目标之间的内在关联, 不断优化各项参数以提高识别精度。最后, 将训练成熟的模型应用到实际场景, 输入新数据进行识别并输出结果, 实现身份判断、物体识别等功能^[1]。

1.3 技术发展趋势展望

在科技迅猛发展的浪潮下, 智能识别技术正朝着更为多元和深入的方向大步迈进。未来, 其在算法领域的创新步伐将持续加速, 新型深度学习模型会如雨后春笋般不断涌现, 针对光线昏暗、人员遮挡等复杂场景, 进一步提升识别准确率与效率。在多模态融合层面, 不再局限于单一维度识别, 而是有机融合图像、语音、文本等多模态信息, 以实现更为全面、精准的身份判定。例如: 在智能安防领域, 将人脸识别与语音识别深度结合, 进一步加强身份确认, 降低误判风险。随着物联网的蓬勃发展, 边缘计算与智能识别技术的融合会更加紧密, 大量数据于边缘设备本地处理, 有效减少传输延迟, 满足实时性需求, 如智能摄像头可在本地实时分析画面, 及时捕捉异常情况。此外, 鉴于数据安全的重要性日益凸显, 对数据隐私和安全的重视程度会不断提升, 进而促使加密、匿名化等保

护技术持续发展,为智能识别技术的广泛应用筑牢安全防线。

2 校园一卡通系统架构与功能

2.1 校园一卡通系统整体架构解析

校园一卡通系统架构是支撑其高效运作的关键。从技术层面看,采用分层架构设计,最底层为数据层,涵盖用户基本信息、消费记录、门禁权限等各类数据,存储于数据库中,保障数据安全与持久化。中间层是业务逻辑层,负责处理各类业务规则,如消费扣款逻辑、身份认证流程等。最上层是应用层,直接面向用户,以APP、刷卡终端、自助服务机等形式呈现。从部署架构来讲,基于校园网络,在校园数据中心集中部署核心服务器,确保系统稳定运行;同时,借助分布式缓存和负载均衡技术,应对高并发访问,提高系统响应速度^[2]。

2.2 基础功能模块详解

校园一卡通系统凭借其丰富且实用的基础功能,深度融入校园生活的方方面面。身份识别模块作为核心,利用卡片内置芯片或二维码,在门禁、考勤、图书借阅等关键场景中,迅速与后台数据库进行信息比对,精准确认师生身份,有力保障校园安全与管理秩序。消费支付模块功能强大,广泛覆盖食堂用餐、校内购物、水电费缴纳等各类消费场景,依托先进的支付技术,实时完成金额扣除与数据记录。并且,该模块支持与银行卡关联,让充值变得轻松便捷,一键操作即可完成资金注入。信息查询模块则为用户贴心服务,提供账户余额、消费明细、门禁记录等详尽信息的查询服务,用户只需通过专属APP或校园内的自助查询机,就能随时掌握一卡通使用情况,方便核对与管理,极大地提升校园生活的便捷性。

2.3 与校园信息系统的融合要点

校园一卡通系统与校园信息系统融合是提升校园管理效率的重要方向。与教务系统融合,可实现学生选课、考试签到等功能,学生用一卡通即可完成操作,简化流程,同时教务系统能实时获取学生考勤等信息,便于教学管理。与图书馆系统融合,一卡通充当借书证,实现图书借阅、归还、超期提醒等功能,还可将借阅信息同步至一卡通系统,方便学生统一查看。在融合过程中,要统一数据标准,确保不同系统间数据格式、编码一致;还要构建安全可靠的数据交互接口,采用加密传输、身份验证等技术,保障数据传输安全,避免信息泄露。

3 智能识别技术与校园一卡通系统的融合

3.1 融合的必要性及优势

在以往的校园管理体系中,传统校园一卡通系统主要依赖卡片识别方式,然而这种方式存在诸多弊端。卡片容易出现丢失情况,给师生带来不便与财产风险,一旦被盗用,更是会造成安全隐患,并且其识别速度相对迟缓,准确性也大打折扣,难以满足校园日益增长的管理需求。因此,智能识别技术与校园一卡通系统的融合势在必行^[3]。融合之后,师生无需再时刻携带实体卡,通过刷脸、指纹识别等方式就能让他们在门禁、消费等场景中快速通行,极大地提升了身份认证的便捷性。从安全性角度出发,智能识别技术依托的生物特征具有唯一性且难以伪造,能有效降低身份冒用风险,为校园安全保驾护航。在管理效率方面,系统可自动采集、分析各类数据,为校园管理决策提供有力的数据支持,例如通过深度剖析学生消费数据,精准把握学生饮食偏好,从而优化食堂菜品供应,提升校园服务质量。

3.2 融合实现的技术路径

在智能识别技术与校园一卡通系统融合的过程中,硬件与软件层面的优化升级必不可少。在硬件方面,迫切需要全面升级校园一卡通系统终端设备。例如:在门禁、消费机以及图书馆借阅设备上,都要集成先进的人脸识别、指纹识别模块,从硬件基础上确保设备能精准、高效地采集生物特征数据。软件层面同样关键,要全力开发适配智能识别技术的算法接口,以此实现与一卡通系统后台数据的顺畅对接与实时交互。同时,搭建统一身份认证平台意义重大。通过整合校园各类身份信息,保障智能识别与原有卡片识别在系统中的良好兼容性,让用户在不同场景下能自由、灵活地选择认证方式,并且确保数据实时同步,彻底避免信息不一致问题,为校园一卡通系统的高效运行筑牢根基^[4]。

3.3 融合过程中的关键问题及解决策略

在智能识别技术与各类系统的融合过程中,隐私保护无疑是最为关键的问题之一。智能识别技术在运作时会采集大量个人生物特征数据,如指纹、人脸信息等,这些数据一旦泄露,将对个人隐私和安全造成难以估量的严重后果。为有效应对此问题,可采用先进的加密存储技术,在数据采集后立即加密处理,并且在访问时设置多重授权验证,层层把关。同时,严格规范数据使用流程,清晰界定数据使用权限与范围,从源头杜绝数据滥用。此外,技术稳定性也不容忽视,

环境因素如光线强弱、温度高低等,都可能影响智能识别的准确率。通过持续优化算法,提升其对复杂环境的适应性;并部署备用识别设备,当主设备识别异常时能自动无缝切换,全方位保障系统正常运行。

4 智能识别技术在校园一卡通系统中的应用效果评估与潜在风险应对

4.1 应用效果的多维度评估指标

从识别效率来看,考量智能识别技术在校园一卡通系统中身份验证的速度,如在上下课、就餐等人员流动高峰期,系统完成一次身份识别所需的平均时间,时间越短,表明能更快地服务师生,减少排队等待现象,提升校园运转效率。在准确性上,关注识别准确率,统计识别错误的次数占总识别次数的比例,较低的错误率可确保系统判断无误,防止非授权人员进入校园或造成消费、权限管理的混乱。此外,系统稳定性也至关重要,统计一定时间段内系统出现卡顿、崩溃等异常情况的次数,以此衡量系统能否持续稳定运行,为师生提供不间断的服务。

4.2 可能面临的潜在风险分析

在隐私安全层面,智能识别技术在校园一卡通系统的应用中,涉及海量师生个人生物特征数据,这些数据包含指纹、人脸、虹膜等敏感信息。一旦在数据存储环节的加密算法强度不足,或者传输时网络防护存在漏洞,数据就极有可能泄露,这不仅会严重侵犯师生隐私权,更会引发师生对校园信息安全的信任危机,导致对一卡通系统的抵触^[5]。

技术故障风险同样不容小觑,人脸识别在光线昏暗、强光直射、面部有口罩帽子等遮挡时,指纹识别在手指受伤、有污渍、蜕皮等情况下,都会极大地影响识别准确性,甚至出现无法识别的状况,致使系统无法正常使用,给师生校园生活带来诸多不便^[6]。

此外,系统兼容性问题也频频出现。智能识别技术与校园一卡通系统原有模块、校园其他信息系统对接时,常因接口标准不同、数据格式不一致、通信协议不匹配等,造成数据交互受阻、功能难以正常实现,严重阻碍校园信息化建设进程。

4.3 风险应对措施与保障机制

在智能识别技术与校园一卡通系统融合过程中,应对各类风险十分关键。针对隐私安全风险,采用先进且高强度的加密算法,从数据采集伊始便对数据进行加密处理,确保在传输、存储、调用等各个环节的数据安全性,让数据泄露风险降至最低。同时,明确

数据使用权限,仅授权专业、经过严格审查的特定人员访问关键数据,并建立起严格的数据访问审计制度,详尽记录所有数据操作细节,以便在出现异常时精准追溯。面对技术故障,提前建立完备的应急预案,例如设置传统刷卡、密码验证等备用识别方式,以便在主识别技术因环境干扰或设备故障失效时能迅速切换,不影响正常使用^[7]。定期对智能识别设备进行全面维护和校准,及时跟进并更新技术版本,不断提高识别性能。为解决兼容性问题,在系统开发阶段就开展充分的兼容性测试,提前与校园内各相关系统深入沟通协调,统一数据标准和接口规范,全方位保障系统间的无缝对接。

5 结束语

智能识别技术与校园一卡通系统的融合,是校园信息化发展的重要突破。从硬件升级到软件优化,从多维度应用到风险防控,这一融合全面革新了校园管理模式。在身份识别上,其便捷性与安全性远超传统卡片识别;在消费支付、信息查询等功能上,也带来了更流畅、高效的体验。尽管在数据隐私保护、技术稳定性方面仍面临挑战,但随着加密技术、算法优化不断推进,这些问题正逐步得到解决。未来,随着科技持续进步,智能识别技术有望在校园实现更深度的应用,与教学、科研等场景紧密结合,为校园智慧化建设注入源源不断的动力,助力校园管理朝着更智能、更人性化的方向发展。

参考文献:

- [1] 张则青,黄莹,耿孝敏,等.视觉识别技术在板材智能分拣系统中的应用研究[J].现代信息科技,2025,09(02):139-144.
- [2] 杜成菲.智能语音识别技术在车机交互系统中的应用[J].电视技术,2024,48(04):217-219.
- [3] 郭南.生物识别技术在高校校园门禁系统中的应用[J].电子产品世界,2024,31(11):8-10.
- [4] 崔伟欣.智能语音识别技术在金融交易系统中的应用研究[J].电声技术,2024,48(12):70-72.
- [5] 张亮.人工智能技术在计算机网络安全中的应用[J].计算机应用文摘,2025,41(02):82-84.
- [6] 温俊元,陈威.计算机人工智能识别技术在教育管理系统中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)教育科学,2024(10):73-76.
- [7] 范远芳.人脸识别技术在高校中的研究与应用[J].信息记录材料,2025,26(03):114-116.

大数据技术在码头运输调度管理中的应用

张小伟

(广西钢铁集团有限公司, 广西 南宁 530299)

摘要 大数据技术在码头运输调度管理中的应用, 能优化运输效率, 提高资源利用率和降低运营成本。通过实时收集和分析码头设备、运输车辆、货物状态等数据, 管理人员能精确预测运输需求、调整调度策略, 减少等待时间和空驶率。同时, 各部门工作内容与职责的细化, 可加强各项技术的高效应用, 方便各部门的实践操作与相互交流, 及时共享信息, 为码头运输调度管理决策的制定提供可靠依据。此外, 大数据还支持对历史数据的深度挖掘, 识别潜在的瓶颈和问题, 从而实现智能决策, 提升码头整体作业效率。基于此, 本文对大数据技术在码头运输调度管理中的应用进行研究, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 大数据技术; 码头运输调度管理; 数据收集; 数据分析; 智能调度

中图分类号: TP31; U65

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.008

0 引言

传统的码头运输调度管理模式往往面临着信息不对称、资源配置不合理和响应速度慢等问题。而大数据技术的应用为解决这些难题提供了新的思路和解决方案。通过实时数据采集、分析与预测, 大数据能帮助管理者精准把握运输状况, 优化作业流程, 提升资源利用率。结合物联网、云计算和人工智能等技术, 码头的运输调度更加智能化、动态化、精细化, 为提升码头运输效率和降低运营成本提供了有力支持。

1 大数据技术概述

1.1 大数据的定义与特点

大数据是指在传统数据处理技术无法高效处理的情况下生成的大规模、多样化且复杂的数据集合。其主要特点包括体量大 (Volume), 数据量可达到 PB 级别, 随着技术进步和数据生成速度加快, 各行各业不断产生新数据; 种类多 (Variety), 涵盖结构化、半结构化和非结构化数据, 如文本、数字、图片、音频、视频等; 速度快 (Velocity), 数据生成速度极快, 能实时或接近实时地流入系统, 如社交媒体和物联网设备产生的实时数据, 这些特点共同决定了大数据处理的挑战和复杂性。

1.2 大数据关键技术

大数据关键技术涵盖数据采集、存储、处理、分析和可视化等方面。数据采集通过传感器、网络爬虫等手段收集信息, 常用技术如 Apache Kafka 和 Flume, 支持实时数据传输; 存储技术采用 Hadoop 分布式文件系统

(HDFS) 和 NoSQL 数据库 (如 Cassandra、HBase), 解决海量数据的高效存储问题; 数据处理则通过 MapReduce 和 Apache Spark 等框架进行数据清洗、转换与计算, 支持并行处理与实时分析; 数据可视化技术通过图表、仪表盘等直观形式展示分析结果, 帮助决策者作出精准决策。

2 大数据技术与码头运输调度管理概述

2.1 大数据技术剖析

大数据技术的核心在于处理海量、多样化、高速生成的数据。常见的大数据技术包括分布式存储技术 (如 HDFS、NoSQL 数据库)、数据处理框架 (如 Hadoop MapReduce、Apache Spark) 及实时流处理技术 (如 Apache Flink、Storm)。通过这些技术, 企业能在大规模数据中提取有价值的信息并进行实时决策支持。大数据的优势体现在高效的数据挖掘和分析能力, 为各行各业提供精准的预测分析、优化决策等服务。

2.2 码头运输调度管理体系

码头运输调度管理体系主要包括港口货物的接卸、堆存、转运和配送等环节的调度与协调, 其目标是提升物流效率、减少运输成本、提高港口作业效率, 该体系通常依赖于信息化技术来实现调度管理, 结合实时数据监控和智能算法进行调度优化^[1]。现代码头调度系统通常会集成自动化设备、传感器网络、货物跟踪系统等, 实时掌握船只到港、货物状态、设备运行情况等信息, 以便动态调整运输计划和作业顺序, 确保资源的最优配置。

2.3 大数据技术与码头运输调度管理的契合点

码头运输调度过程中涉及大量的船只、货物、设备等信息, 这些信息具有时效性和复杂性。通过大数据技术港口管理系统能实时收集和处理船期、天气、货物流动等数据, 利用数据分析优化运输路线和作业安排, 提升调度效率。同时, 机器学习算法能根据历史数据预测港口高峰期, 提前做好调度规划, 从而减少拥堵和等待时间, 提高整体物流效率。为全面提高码头运输调度管理效率, 还需各部门相互协作, 结合工作内容与需求应用大数据技术创建智能化平台, 方便各部门交流, 在平台中对各项信息及时共享, 相互交流的过程中发现问题、了解更多契合点, 有针对性地制定管理决策, 消除更多隐患与风险, 提高码头运输调度管理水平与质量。

3 大数据技术对码头运输调度管理的作用机制分析

3.1 数据收集与整合机制

在码头作业中, 数据收集与整合是确保高效运营的关键, 主要数据来源包括船只进出港信息、货物存储与运输数据、设备运行状态、天气与交通信息等。为了实现实时数据收集, 港口通常采用物联网技术如传感器、自动识别系统(如 RFID、条形码扫描器)等监控并采集港口内部和外部环境数据^[2]。此外, 港口内外的多个信息系统(如运输管理系统、仓储管理系统、船务调度系统等)需要进行数据整合, 以保证信息流的畅通和数据一致性。通过 API 接口、数据中台等技术手段, 方便各系统的相互联系与综合应用, 杜绝信息共享不佳、信息不准确等问题, 逐渐形成一个统一的数据平台。其中, API 接口是各类数据交换的重要桥梁, 各系统的信息交互高效、及时; 数据平台是对各类资源的深度整合, 对数据的处理方式、储存方式等标准化完善, 强调数据的一直性。通过对各智能化平台的合理应用, 减少信息重复采集、储存等, 信息资源的共享率明显提高。此外, 数据整合还为数据分析提供了准确支持, 方便业务决策的精准化处理。企业需加大投入与创新力度, 方便各部门相互交流与协作, 促进跨部门、跨系统的信息流动, 为管理决策提供更加科学和实时的数据依据。

3.2 数据分析与预测机制

数据分析技术(如数据挖掘、机器学习等)能从历史数据中提取出规律, 为实时决策提供依据。例如: 对货物流动、船期、设备使用等数据的分析, 系统可以预测高峰期、滞港情况及其他潜在的物流瓶颈, 提

前预警。而预测算法通过分析外部环境(如天气变化、航道拥堵等)和港口内外部动态信息, 能准确预测未来的港口运营情况。实践过程中对大数据技术的应用, 能实时监控和分析各类影响因素, 生成预判报告^[3]。例如: 天气变化可能导致航运延误, 航道拥堵可能影响船只的通行效率, 港口设备故障或繁忙时段可能会影响整体运营节奏。基于这些预测, 港口管理者可以提前进行资源配置和调度安排, 如调整船只进港时段、优化货物装卸顺序等, 从而提高港口运营效率。预测算法的应用能有效降低因突发事件或资源不足导致的运营风险, 确保港口的平稳运作, 并提升整体服务水平和竞争力。

3.3 智能调度与优化机制

智能调度与优化机制的关键在于运用大数据分析结果, 结合智能算法(如遗传算法、粒子群优化算法、强化学习等)实现调度决策的最优化。首先, 智能调度系统会根据实时数据(如船只到达时间、设备可用状态、货物种类和数量等), 自动生成调度计划, 并根据港口运作的优先级和资源限制进行调整, 确保各项作业高效、顺畅地进行^[4]。其次, 通过不断分析历史数据与实时数据, 系统能学习到最佳调度策略, 并在面对变化时进行动态调整。此外, 智能调度系统通过模拟和仿真技术, 能对不同的调度方案进行全面评估。在港口运营中, 调度方案的选择直接影响着资源的利用率和运营成本。通过仿真技术, 系统能模拟不同情景下的运营流程, 分析各种资源配置和调度策略的效果, 帮助管理者在多种方案中选择最优方案, 从而实现最大化的资源利用和最小化的运营成本。例如: 通过仿真分析, 优化货物装卸、运输和存储等环节的顺序, 减少不必要的等待和空闲时间, 提升整体效率。智能调度不仅提高了决策的准确性, 还能动态调整方案, 应对突发情况, 确保港口的高效运转, 并为港口降低运营风险, 有效提升资源的使用效率和经济效益。

4 大数据技术在码头运输调度管理中应用面临的挑战与应对策略

4.1 数据安全与隐私保护挑战

在码头运输调度管理中, 大量的敏感数据需要被收集、传输和处理, 包括船舶信息、货物运输记录、港口运营数据等, 这些数据往往涉及多个利益相关者, 如何确保数据的安全性和隐私性, 防止泄露、篡改或滥用, 成为亟待解决的难题。大数据在传输过程中容易受到黑客攻击, 由于数据传输链条长, 数据在不同

的信息系统之间流动时,可能会暴露在不安全的网络环境中,容易成为网络攻击的目标。因此,加强数据加密和认证机制,确保传输过程中的数据不会被窃取或篡改,是确保数据安全的重要措施。大规模的港口数据需要存储在云平台或数据中心,这些数据往往包含着敏感的个人、商业机密等内容,一旦发生泄漏可能会对企业声誉和客户隐私造成重大影响。因此,采用分布式存储、加密存储技术以及访问控制和权限管理措施,能有效提升数据存储的安全性。在隐私保护方面,港口企业需要遵循相关的法规和政策,如GDPR等数据保护法。为了保障用户的隐私,企业应采用匿名化、脱敏技术确保在数据分析与共享过程中,敏感信息不会被暴露。同时,数据使用的透明性和用户同意权的明确性也是保护隐私的重要方面。通过这些措施,可以最大程度地保障数据安全和隐私保护,避免因数据泄露带来的风险。

4.2 技术与人才短缺挑战

尽管大数据技术为码头运输调度管理带来了许多变革,但其成功应用仍面临技术和人才短缺的挑战。大数据的处理与分析要求高效的技术平台和强大的技术支持,而现有的技术基础设施和人才储备往往无法满足这一需求,造成技术落后和项目推进困难。港口运输调度的智能化与数字化转型依赖于强大的技术基础,如数据存储平台、大数据处理框架、人工智能算法等,这些技术平台的建设需要大量的资金、时间和技术积累,很多港口企业可能因资源有限,难以跟上技术的快速发展^[5]。同时,大数据技术的应用涉及数据挖掘、机器学习、人工智能等复杂领域,但目前市场上高水平的数据科学家和工程师相对短缺,使企业在进行技术转型时,面临人才供给不足的问题。此外,数据分析与人工智能领域的快速发展也要求现有员工不断更新技能,但由于培训资源和时间的限制,现有工作人员的技能提升往往滞后。为了解决这些问题,港口企业可以通过外部技术合作,引入先进的技术解决方案,并加强与高校、科研机构合作,培养专业的人才。再加上企业加强内部员工的培训和知识更新,通过构建开放的学习平台,提升员工的技术能力。通过这些措施能有效弥补技术和人才上的短缺,推动大数据技术应用的顺利实施。

4.3 业务流程与组织架构调整挑战

大数据技术在码头运输调度管理中的应用不仅是技术层面的变革,还需要业务流程与组织架构的调整。

港口企业通常采用传统的管理模式和业务流程,信息化水平较低,而大数据技术的引入意味着要对现有的管理模式进行深刻的调整,这一过程充满了挑战。在过去,港口调度更多依赖人工经验和传统的管理模式,信息传递较为滞后,决策也常常受到信息不对称的影响。而大数据技术的应用要求港口企业能够实时获取、处理和分析数据,从而做出及时而准确的决策,这种转变需要对传统的业务流程进行大规模的优化和重构,将数据驱动决策嵌入每个环节中^[6]。此外,业务流程的数字化转型还需要管理层的积极推动和支持,在转型过程中,管理层需要制定清晰的战略目标,并且在全员中提高大数据技术的应用意识,确保每个员工都能理解和接受变革。通过这些措施,港口企业能克服业务流程和组织架构调整的挑战,顺利实现大数据技术在运输调度管理中的全面应用。

5 结束语

大数据技术在码头运输调度管理中的应用极大地提升了港口运营效率和决策精准度。通过实时数据采集、智能分析和优化调度,港口能有效应对高峰期拥堵、资源浪费等问题,提升整体运营效益。但在应用过程中仍面临数据安全、人才短缺及组织流程调整等挑战,需港口企业在此方面特别重视,加强技术创新与人才培养,结合不同的工作内容与职责定期组织培训活动,引导人员学习新知识、新政策,全面提升员工的技能水平。同时,制定完善的协作机制,促进跨部门合作,以推动企业转型为核心目标,对新管理模式高效落实,帮助企业创造更大的经济效益,以实现大数据技术的最大价值。

参考文献:

- [1] 朱瑾,黄琦.路网资源分配下自动化码头水平运输调度与路径规划[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(08):2245-2255.
- [2] 田进,孙金余,吴绩伟.自动化集装箱码头水平运输工具调度模型设计[J].港口装卸,2024(02):51-55.
- [3] 李华,宗阳,马成彬等.信息自动化技术在港口运输调度管理中的应用[J].中国航务周刊,2023(30):57-59.
- [4] 孙博文.港口散货码头智能化控制和管理研究[J].运输经理世界,2022(07):58-60.
- [5] 黄鹭旭.传统集装箱码头智能化改造平面运输工艺与装备[J].中国港口,2021(11):60-62.
- [6] 彭湃,李秋,霍晨晨,等.船舶装卸作业中智能化集装箱码头应用现状[J].船舶物资与市场,2021(02):93-94.

光伏逆变器谐波特性及其对电网的影响分析

赵鹏飞

(中电投东北新能源发展有限公司, 辽宁 沈阳 110623)

摘要 随着光伏发电系统规模化应用, 逆变器谐波问题日益突出, 其对电网的影响需要引起人们的重视。在光伏逆变器将直流电转换为交流电的过程中, 开关器件非线性特性与控制策略引起的谐波会造成电网电压波形畸变, 增加系统能量损耗及降低供电质量。通过建立光伏逆变器谐波产生数学模型, 结合实验测试数据分析谐波传播特性, 深入研究了死区效应导致的低次谐波以及 PWM 调制产生的高次谐波对电网设备运行的影响。研究表明, 谐波不仅会引起电网电压波动及设备故障, 还可能导致系统崩溃, 因此需要通过优化逆变器设计与增设滤波装置等措施进行综合治理。

关键词 光伏逆变器; 谐波特性; 电网影响; 死区效应; 滤波技术

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.009

0 引言

全球能源转型背景下光伏发电快速发展, 但大规模光伏并网给电网带来了新的挑战。光伏逆变器作为光伏发电系统中的关键设备, 其谐波特性对电网稳定运行具有重要影响。当前研究主要集中在谐波产生机理与传播特性方面, 而对谐波综合治理的系统性研究相对不足。随着光伏装机容量不断增加, 逆变器谐波对电网的影响日益显著, 需从机理分析与特性评估到控制策略优化等多个层面深入研究, 为电网安全稳定运行提供理论支撑与技术保障。

1 光伏逆变器谐波产生机理分析

光伏逆变器作为太阳能发电系统中的核心部件, 其谐波产生机理涉及多个环节与复杂因素, 由于逆变器需要将光伏组件产生的直流电转换为符合电网要求的交流电, 这一过程中采用的高频开关模式不可避免地引入了谐波干扰。逆变器在运行过程中, IGBT 等开关功率器件的非线性特性加之死区保护设计, 使得输出电压波形产生畸变, 进而在基波分量之外引入了不同频率的谐波成分, 控制系统采用的 PWM 调制策略虽然能够有效控制输出电压波形, 但调制过程中的开关动作引起的电压应力波动同样会产生高次谐波分量^[1]。为准确评估逆变器输出的谐波特性, 通常采用总谐波畸变率 THD 作为主要评价指标, 同时结合功率因数 PF 以及各次谐波含量等参数进行综合分析, 深入理解光伏逆变器的谐波产生机理, 有助于制定合理的抑制措施, 提高逆变器输出电能质量。

2 光伏逆变器谐波特性实验研究

2.1 实验系统与测试方法

光伏逆变器谐波特性实验采用专业集成测试平台进行系统研究, 该平台主要由电网模拟器—RLC 可调负载—功率分析仪—示波器以及数据采集系统等核心设备构成, 电网模拟器通过模拟不同电网运行工况为实验提供基础电源环境, 同时配置的 RLC 可调负载能够模拟多种实际用电场景。实验过程中功率分析仪实时监测逆变器输出电压电流波形, 记录各次谐波含量变化情况, 示波器则用于观测瞬态波形畸变特征, 实验系统通过上位机采集分析设备运行数据, 对逆变器在不同工作状态下的谐波特性进行定量评估。测试方法遵循国家标准 GB/T 29319 规定的谐波测量要求, 重点关注总谐波畸变率与各次谐波含量以及谐波传播特性等关键指标, 实验平台的搭建确保了谐波特性数据采集的准确性与可靠性, 为深入研究光伏逆变器谐波特性奠定了坚实的基础。

2.2 不同工况下谐波特性分析

光伏逆变器在实际运行过程中面临复杂多变的工况, 输出功率随太阳能资源变化呈现动态特性, 这直接影响谐波的产生与传播规律, 为深入研究功率变化对谐波特性的影响, 通过可编程电源模拟不同光照条件, 采集逆变器在 20% 至 100% 额定功率范围内的运行数据进行定量分析研究。

基于表 1 实验测试数据分析表明, 光伏逆变器谐波特性与输出功率呈现显著的相关性, 其中总谐波畸

变率随功率增加明显降低,从低功率运行时的4.82%降至满功率时的2.45%,各次谐波含量分布显示,5次谐波在所有工况下占比最大,其次为3次谐波,这与逆变器采用的SPWM调制策略及死区时间设置密切相关^[2]。实验结果进一步验证了在工程实践中应尽量使逆变器在较高功率区间运行,既可提高发电效率,又能改善电能质量。

表1 不同发电功率工况下光伏逆变器谐波测试数据

发电功率 (%)	总谐波畸变率 THD (%)	3次谐波含量 (%)	5次谐波含量 (%)	7次谐波含量 (%)	11次谐波含量 (%)
20	4.82	2.15	3.76	1.85	0.92
40	3.95	1.87	3.12	1.56	0.85
60	3.21	1.52	2.85	1.23	0.73
80	2.86	1.25	2.43	1.05	0.62
100	2.45	0.98	2.15	0.87	0.51

2.3 谐波模型的建立与验证

基于前述实验数据,建立光伏逆变器谐波特性的数学模型对深入理解谐波产生机理至关重要,通过对实测波形进行傅里叶分析,结合逆变器的SPWM调制原理与死区效应,构建谐波产生的理论模型。

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:THD表示总谐波畸变率,用于表征波形失真程度的综合指标; U_1 表示基波分量幅值,反映输出电压的基本频率分量; U_n 表示n次谐波分量幅值,频率为基波n倍的谐波分量大小;n表示谐波次数,从

2次谐波开始累加计算; ∞ 表示理论上考虑所有高次谐波,实际分析中通常取至13次或25次,该数学模型揭示了总谐波畸变率与各次谐波含量的定量关系,为评估光伏逆变器输出电能质量提供了理论基础。通过对比分析发现,模型计算的谐波含量与实验测试数据的误差控制在5%以内,充分验证了模型的准确性。基于此模型可知,降低高次谐波幅值是改善逆变器输出波形质量的关键,这就要求在实际应用中优化SPWM调制策略,合理设置死区时间,并根据谐波频率特性设计相应的滤波装置^[3]。模型不仅能够预测不同工况下的谐波分布情况,还为制定谐波抑制方案与优化系统控制策略提供了重要理论依据,对提升光伏发电系统的电能质量具有显著的指导作用。

3 光伏逆变器谐波对电网的影响

3.1 对电网电压质量的影响

研究结果显示,光伏逆变器并网运行导致电网谐波含量整体升高,其中低次谐波增长尤为显著,图1中清晰展示了并网前后各次谐波含量的对比数据,纵坐标以0.5%为间隔标注谐波含量百分比,横坐标标注了从THD到13次谐波的各项指标。蓝色柱代表并网前数据,橙色柱代表并网后数据,可直观看出各次谐波的增长趋势,测试数据表明并网后电网电压总谐波畸变率从原有的2.3%上升至3.8%,3次谐波含量增加87%,5次谐波含量增加65%,7次谐波含量增加42%。这种谐波含量的显著增加主要源于逆变器开关特性与死区效应的叠加影响,不仅造成电网电压波形畸变加剧,还可能引发谐振现象,大量光伏逆变器接入配电网后,各次谐波在网络中的传播与叠加效应进一步加

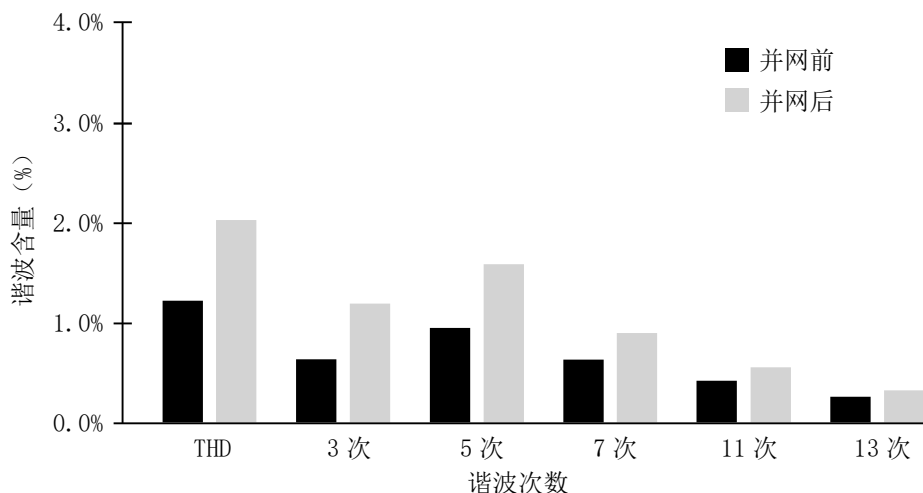


图1 光伏逆变器并网前后电网谐波含量对比分析

剧了电压质量恶化问题，这对用电设备的安全稳定运行构成了潜在威胁^[4]。

3.2 对电网设备的影响

光伏逆变器产生的谐波对电网设备造成的影响主要体现在发热损耗增加导致设备寿命缩短等多个方面，通过长期跟踪监测某大型光伏电站内变压器运行状态发现，谐波电流使变压器铁芯损耗增加 25% 以上，致使变压器温升超过设计值，绝缘老化加速^[5]。对配电线路的监测数据显示，谐波电流导致线路发热损耗较基波电流增加约 1.5 倍，不仅降低了线路输送容量，还加速了导线绝缘材料的老化，在电力电子设备方面，谐波引起的电压畸变会干扰设备正常工作，导致保护装置误动作频率显著提高。

3.3 大规模光伏接入情况下的谐波叠加效应

随着光伏发电规模不断扩大，多个光伏逆变器并网运行时的谐波叠加效应日益突出，需要系统评估不同容量光伏系统接入对电网谐波水平的影响。

通过表 2 分析大规模光伏并网运行数据可知，随着接入容量增加电网谐波失真率呈非线性增长趋势，当并网容量达到电网短路容量的 50% 以上时，谐波叠加效应显著增强，总谐波畸变率超过 5% 的限值要求。这种谐波叠加现象主要由多台逆变器间的谐波干扰耦合引起，且在电网阻抗较大的弱电网区域表现更为明显，实验数据揭示了大规模光伏并网需要综合考虑并网点短路容量比进行接入方案设计，避免谐波污染超标。

表 2 不同容量光伏系统接入时电网谐波失真率数据

并网容量(MW)	总谐波畸变率 THD (%)	3 次谐波 (%)	5 次谐波 (%)	7 次谐波 (%)	并网点短路容量比
1	2.85	1.45	2.15	1.12	2.5%
5	3.42	1.82	2.65	1.45	12.5%
10	4.15	2.25	3.18	1.85	25.0%
20	4.85	2.75	3.85	2.25	50.0%
50	5.65	3.25	4.45	2.85	125.0%

4 光伏逆变器谐波抑制技术与措施

4.1 逆变器控制策略优化

针对光伏逆变器谐波问题，优化控制策略成为降低谐波含量的核心手段，通过采用改进的 SPWM 调制技术结合死区时间补偿算法，可有效抑制低次谐波的产生。实际应用研究表明，将死区时间从传统的 4 μs 降低至 2 μs，并引入基于电流反馈的死区补偿控制，使 3 次谐波含量降低 45%，5 次谐波含量降低 38%。

4.2 谐波滤波技术应用

谐波滤波技术为光伏逆变器谐波治理提供了有效的解决方案，其中无源滤波器因结构简单、维护方便而得到广泛应用。传统 LC 滤波电路经过优化设计，其谐波抑制效果可通过谐波抑制传递函数数学模型描述：

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (2)$$

式(2)中：H(s)表示滤波器传递函数，L表示滤波电感值，C表示滤波电容值，R表示阻尼电阻值，s表示复频域变量，基于此传递函数设计的多分路无源滤波装置，可针对性吸收 3 次到 5 次等主要谐波分量，采用该滤波方案后逆变器输出电流总谐波畸变率从 4.8% 降至 2.1%，尤其对低次谐波具有显著抑制效果。结合有源滤波技术实现的混合滤波方案能够进一步提升谐波治理效果，使系统在不同工况下均保持良好的电能质量指标。

5 结束语

通过深入分析光伏逆变器谐波特性及其对电网的影响，阐明了谐波产生机理与传播规律。研究发现，逆变器开关特性与控制策略显著影响谐波产生，其中死区效应会引入低次谐波，PWM 调制则产生高次谐波。基于实验数据验证表明，谐波会引起电压波形畸变、能量损失增加及设备损坏等一系列问题，通过优化逆变器设计、采用先进控制策略及增设滤波装置等综合治理措施，可有效降低谐波对电网的不利影响，为光伏发电系统稳定运行提供重要保障。

参考文献：

- [1] 王美威,张洪阳,李君,等.大规模分布式光伏接入石化企业对配电网安全影响研究[J].安全、健康和环境,2025,25(01):16-23.
- [2] 王汉林,任敬刚,李澍,等.计及分布式光伏接入的接地故障选线方法研究[J].微型电脑应用,2024,40(12):165-169.
- [3] 严庆增,张子旭,郭龙振,等.基于SVPWM的三相电流源型逆变器简化重叠区补偿策略[J].实验技术与管理,2024,41(12):104-110.
- [4] 尹代杰,奚鑫泽,高贯斌,等.三相不平衡光伏并网系统间谐波电流产生机理及控制研究[J].控制工程,2024,31(11):2095-2103.
- [5] 王介宇,胡雪峰.一种考虑光伏治理资源的交直流配电网电能质量协同治理策略[J].常州工学院学报,2024,37(05):43-51,59.

建筑电气智能化弱电系统安装及质量管理

辜文浩

(四川华西安装工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘要 建筑电气智能化弱电系统是提升建筑功能、舒适度、安全性与效率的关键构成部分。本文结合具体项目案例, 详细介绍了智能化高空抛物监控、楼宇自控、通信系统优化及智能消防等关键子系统的特点与应用状况, 探讨了弱电工程施工过程中的桥架安装、电管敷设、线路铺设以及信息点位端接等工作重点, 并分析了材料管理、综合布线管理和现场环境管理等质量管理措施, 旨在为确保弱电系统的安装质量和实现长期稳定运行提供参考。研究结果表明, 科学的系统设计、规范的施工工艺以及严格的质量管理是保障建筑电气智能化弱电系统工程顺利施工的关键。

关键词 建筑电气智能化弱电系统; 施工工艺; 质量管理; 楼宇自控; 综合布线

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.010

0 引言

建筑电气智能化弱电系统是衡量现代建筑先进性的核心指标之一, 它不再只是简单起到辅助作用的设施, 而是集成了通信、控制、安防等多元功能的复杂网络, 直接影响着建筑的运营效率和使用者的日常体验。面对日益精密的系统设计和不断提升的功能要求, 弱电工程的施工安装质量和后期运维保障尤为关键。如何在复杂的工程实践中有效规避潜在风险并确保各子系统精准落地且协同工作, 是当前亟待解决的技术与管理方面的难题。

1 项目概况

项目位于我国南方沿海某市 CBD 区域, 是集商业、酒店、办公楼为一体的综合性商业体。项目建筑面积 215 km², 含两栋 143 m、182 m 的超高层塔楼。建筑设计旨在打造国际领先的绿色、低碳、高度智能化标杆, 对建筑电气智能化弱电系统提出了极高要求。项目弱电系统规划全面, 涵盖了实现精细化环境调控与节能管理的楼宇自控系统 (BAS)、保障园区安全的高清视频监控 (含智能化高空抛物监测) 与一体化安防系统、支撑高速信息交互的万兆主干综合布线与全覆盖无线网络、确保生命财产安全的智能消防报警及应急疏散系统, 以及会议、广播、信息发布等多个高度集成的子系统。本项目的弱电工程不仅要求技术先进、功能完善, 更强调系统间的深度融合与协同联动, 以及施工安装的高标准与全周期质量管控, 为用户提供极致高效、安全舒适的智能化体验^[1]。

2 建筑电气智能化弱电系统

2.1 智能化高空抛物监控系统

为了有效遏制高空抛物这种危害公共安全的行为, 该项目专门部署先进的智能化高空抛物监控系统, 在建筑外立面关键楼层每隔 5 层以及裙楼顶部有策略地布设总计 64 台搭载星光级 8MP 图像传感器的 4K 高清网络摄像机, 所有摄像机都具备 IP67 防护等级和 IK10 防暴等级, 通过千兆以太网接入, 采用 H.265+ 编码技术有效降低存储需求, 关键录像证据可在本地存储至少 90 天^[2]。

2.2 楼宇自控系统

楼宇自控系统的目标是实现对建筑内机电设备进行精细化管理以及能源优化, 该系统采用基于 BACnet/IP 协议的分布式网络架构, 核心部分是高性能的 32 位 DDC 控制器, 它具备至少 1 GB 的内存, 还有可扩展的 I/O 模块接口, 系统的总监控点数超过 15 000 点, 可全面监控管理空调通风系统, 如 AHU、VAV 箱、风机盘管等, 还有冷热源系统、给排水、送排风以及公共区域照明等, 传感器网络包含精度达到 ± 0.3 °C 的温度传感器、 $\pm 3\%$ RH 的湿度传感器以及响应时间小于 60 秒的 CO2 传感器。中央工作站提供图形化监控界面、能耗分析报表, 能精确到各区域、各系统, 能耗数据采集频率小于等于 5 分钟, 还具备故障诊断预警功能, 目标是实现综合节能率不低于 15%^[3]。

2.3 通信系统优化

综合布线系统中的水平子系统采用屏蔽 Cat. 6A 铜缆解决方案, 能够支持万兆以太网 (10GBASE-T) 传输

到桌面位置,信息点总数超过 8 000 个且所有链路都要通过 Fluke DSX-8000 等专业仪器进行永久链路测试,以此确保余量达到标准要求,垂直主干及建筑群子系统采用 OM4 多模光纤和 OS2 单模光纤混合部署的方式,核心层配置具备 40/100 Gbps 上联能力的高性能交换机,接入层交换机提供千兆 /2.5 Gbps 到桌面端口并且支持最新的 PoE++ (802.3bt Type 4) 标准,单端口可提供高达 90 W 功率来满足 IP 电话、高清摄像头及高性能无线 AP 的供电需求,无线网络采用 Wi-Fi 6E (802.11ax) 技术并通过精细的点位勘测与功率调优,确保办公区域无线信号覆盖强度优于 -65 dBm,支持 OFDMA 和 MU-MIMO 技术来实现高密并发接入且漫游切换时间小于 50 ms^[4]。

2.4 智能消防系统

智能消防系统的目标是提升火灾早期探测能力、降低误报率并实现高效智能联动。系统采用全地址编码技术,其核心是具备冗余配置的大容量火灾报警控制器 (FACP),单控制器回路容量能够达到 512 个地址点,系统总容量超过 20 000 个点。在探测层面广泛应用具备自诊断、抗污染补偿及多级灵敏度 (至少 3 级可调) 设置功能的光电感烟、感温复合探测器,还在数据中心、厨房等特殊场所配置吸气式极早期烟雾探测系统 (VESDA) 和图像型火灾探测器。系统具备强大的网络化能力,各控制器间通过冗余光纤环网连接来确保通信可靠,智能联动逻辑在接收火警确认信号后能于 2 秒内自动控制防火卷帘下降、正压送风 / 排烟风机启动、非消防电源切断、电梯迫降至首层,通过集成化的应急广播系统 (声压级 $\geq 75\text{dB(A)}$),语音清晰度 $\text{STI} \geq 0.5$) 及动态疏散指示系统引导人员安全撤离^[5]。

3 建筑电气智能化弱电系统施工

3.1 桥架安装

案例项目的弱电桥架安装严格依照《综合布线系统工程设计规范》(GB 50311-2016) 及《民用建筑电气设计标准》(GB 51348-2019) 等相关规范来执行,根据线缆路由、容量以及环境方面的要求,水平主干道选用 300×100 mm 及 200×100 mm 规格的热浸镀锌 (HDG) 槽式钢制桥架,以此确保具备优良的承重与屏蔽性能。数据中心区域采用铝合金梯式桥架从而有利于散热,桥架安装之前要精确进行放线定位,保证水平度偏差不大于 2 mm/m 且垂直度偏差不大于 3 mm/m。水平桥架吊装采用 M10 通丝吊杆并且支吊架间距严格控制 1.5 m 以内,垂直桥架沿墙或者柱敷设时固定点间距不超过 1.8 m,桥架连接处采用专用连接片并且要确保连接牢固、平整,整个桥架系统必须进行可靠

的电气连接,同时做好接地工作,使用不小于 6 mm² 的专用黄绿双色接地线 (PE 线) 通过接地螺栓与建筑物等电位联结带相连接,每段桥架本体及其非金属部件间的连接板两端需采用不小于 4mm² 的铜芯软导线做跨接,确保接地连续性电阻小于 0.1 Ω ,弱电桥架与弱电桥架平行敷设时最小净距要保持在 300 mm 以上,交叉处采用金属隔板进行隔离,桥架转弯半径不小于其内部线缆允许最小弯曲半径且通常不小于 150 mm,以此确保线缆敷设安全。

3.2 电管安装

为了保证该项目里穿墙、楼板以及特殊区域弱电线缆安全规范,电管安装环节采用高标准作业方式,主要选用 JDG (紧定式镀锌钢导管) 和 KBG (扣压式薄壁镀锌钢导管) 系列金属管,规格以 $\varnothing 20\text{ mm}$ 和 $\varnothing 25\text{ mm}$ 作为主要选择,用于墙体内暗敷以及吊顶内明敷使用,特定潮湿或者有腐蚀性气体的区域选用符合标准的 PVC-U 阻燃塑料管,管路敷设之前依据深化设计图纸进行精确定位,确保路径达到最短且弯曲数量最少,金属管路连接采用配套的直接头和锁母来连接,连接处做到紧密牢固并在管口加装塑料护口帽,以此防止损伤线缆绝缘层。管路弯曲采用专用弯管器进行冷弯操作,弯曲半径不小于管外径的 6 倍 (对于 PVC 管为 10 倍),并且两接线盒 (箱) 之间的弯曲角度总和不超过 270 度 (3 个直角弯),金属管路系统全长需要进行可靠接地处理,每段导管两端使用不小于 2.5 mm² 的铜芯软导线进行跨接,同时与接地干线实现可靠连接,管内穿线截面积严格控制在 40% 以内,以此保证散热以及未来扩容的空间。穿越防火分区及楼板的管路,其缝隙必须采用达到 2 小时耐火等级的防火泥或阻火模块严密有效封堵。

3.3 线路铺设

该项目弱电线缆敷设是确保系统性能的关键步骤,如 Cat. 6A 屏蔽双绞线、OM4 多模光纤及 OS2 单模光纤等各类线缆均选用符合设计及相关标准的优质产品,这些标准涵盖 TIA-568.2-D、ISO/IEC 11801 等。线缆敷设严格依照规划路由开展并遵循“先干线后支线”原则,于桥架或线槽内进行分层、分类、分束布放且不同类型线缆间保持适当间距,数据线缆与电力线缆平行敷设时最小净距需保持在 150 mm 以上,光纤和 Cat. 6A 数据缆敷设过程中严禁超出其允许最大拉伸力和最小弯曲半径,要使用专用放线架和牵引工具以避免线缆扭绞、打结或表皮损伤情况出现,所有线缆两端、转弯处及穿越楼层、防火分区处都要粘贴清晰、规范、耐久的标签且标签信息要与设计图纸及端接表完全对应,还要预留适当盘留长度,在设备端预留 3 ~ 5 m、

信息点处预留0.5~1 m以便于端接、测试和未来维护。

3.4 信息点位插座安装

信息点位插座作为用户接入网络的首个界面,该项目对它的安装质量要求特别高。首先要认真核对信息插座底盒的位置、标高(一般是距离地面300 mm)是否符合设计要求,从而确保底盒安装牢固又方正。其次开展线缆端接工作,对于Cat. 6A屏蔽信息模块,要小心剥除线缆外护套约25 mm,保留屏蔽层并按照要求进行接地处理,依照指定的T568B线色标准,把8芯线对精确且整齐地卡入IDC(绝缘刺破连接器)端子槽内,使用110型或兼容的专用冲击式打线工具完成端接,保证线对解绞长度不超过13 mm。端接完成之后,剪除多余的线芯,整理好线缆,将信息模块牢固地卡接在86型面板或地插模块架上。安装面板的时候,要确保其水平且垂直,紧紧贴在墙面上没有缝隙。所有安装完毕的信息点位都必须进行100%的永久链路性能测试,使用经过校准的Fluke DSX-8000或同等级别网络认证测试仪,依据TIA-568.2-D Cat. 6A或ISO/IEC 11801 Class EA标准开展测试,测试参数包含但不限于线序、长度(小于等于90 m)、插入损耗、近端串扰(NEXT)、远端串扰(ACR-F)等关键指标,所有测试结果都必须合格并且生成详细报告存档。最后在面板和配线架对应端口粘贴统一又清晰的标签,实现点位标识的可追溯性。

4 建筑电气智能化弱电系统质量管理

4.1 材料管理

严格开展材料管理工作是保障弱电系统质量的重要基石。所有进入施工现场的材料,都必须提供详细的产品规格书、原厂合格证、检测报告和国家强制性认证(3C)文件。项目部专门设立了材料验收小组,仔细核对品牌、型号、技术参数是否与设计要求完全一致,并且还要进行细致的外观检查,以此杜绝任何存在物理损伤或者规格不符的材料流入现场。对于核心交换机、服务器等关键设备需要进行通电测试,材料入库之后要分类存放在干燥、通风且安全的专用库房。对于精密电子设备要按照要求控制好温湿度,实行严格的领料制度,依据施工进度和用量凭单进行发放,以此确保专料专用,同时要做好详细的出入库记录,从而实现材料来源和去向的可追溯性。

4.2 综合布线管理

综合布线作为该项目信息传输的“高速公路”,其质量管理贯穿整个过程,施工的时候要严格按照最新标准来执行,质量管理部门要对线缆敷设的拉力(不超过

110 N)、弯曲半径(Cat. 6A安装时不小于8倍线缆外径)、线对解绞长度(端接时 ≤ 13 mm)等关键工艺参数进行全程旁站监督和随机抽查,所有超过8 000个的信息点位完成端接之后,必须采用经过认证校准的Fluke DSX-8000或同等级别测试仪进行100%的永久链路性能测试。同时,要建立完善的标签体系和竣工文档,涵盖点位图、配线架端接表及全套测试报告,以此确保系统的性能和可维护性。

4.3 环境管理

施工现场要一直保持整洁且有序的状态,施工垃圾需要做到日产日清,特别是在设备安装、线缆端接、光纤熔接等精密作业区域,要采取如使用吸尘器、临时封闭等有效的防尘措施,以此确保操作环境的洁净程度。严格执行成品保护相关制度,对已安装的桥架、线管、线缆、设备面板等采取覆盖、警示标识等保护措施,防止后续交叉作业造成污染或者损坏情况。加强与土建、装饰、机电等其他专业的沟通协调工作,合理安排施工时序并预留作业面,避免出现冲突和返工的问题。同时,要确保施工人员遵守安全操作规程,按要求佩戴个人防护用品(PPE),在设备调试和敏感区域作业时关注并维持适宜的温湿度环境,保障施工质量以及人员设备的安全。

5 结束语

建筑电气智能化弱电系统对于构建现代智慧建筑十分关键。通过探讨高空抛物监控、楼宇自控、通信优化和智能消防等核心子系统,详细阐述桥架、管线、布线以及端接等关键安装环节,同时强调覆盖材料、综合布线和现场环境的全方位质量管理。实践证明,只有将先进设计、规范施工和严格质量控制紧密结合,才能确保弱电工程成功交付与系统长期稳定运行,为实现建筑智能化、高效化和安全性奠定坚实的基础,以满足日益增长的用户需求。

参考文献:

- [1] 纪海洲.高层建筑设计要点及节能策略分析[J].产品可靠性报告,2025(03):113-114.
- [2] 帖成国.关于建筑电气技术在智能建筑中的应用策略[J].建材发展导向,2025,23(02):73-75.
- [3] 薛志明.建筑电气智能化弱电工程应用技术研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(S1):107-109.
- [4] 陈子玮.建筑电气智能化弱电系统安装及质量管理[J].中国建设信息化,2024(24):68-71.
- [5] 傅长安.基于智能建筑理念的建筑电气智能化设计[J].新城建科技,2024,33(11):10-12.

电力工程信息安全风险问题及量子加密通信防护策略

王霞

(雄特建设工程(山东)有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要 由于电力系统结构复杂、数据资产价值高, 信息安全风险日益凸显, 传统加密方式难以有效应对日益频发的网络攻击事件, 电力系统面临数据窃取、业务中断等重大安全隐患。基于此, 本文分析了电力工程信息安全的现状与挑战, 梳理了电力监控、智能电网通信、数据中心等环节的主要风险问题, 提出基于量子加密通信的信息安全防护策略, 从量子密钥分发、量子安全通信协议、量子加密存储等方面, 探讨了量子技术在电力系统入侵检测、数据传输保护、访问控制优化等领域的应用前景, 以为保障电力系统安全运行提供参考。

关键词 电力工程; 信息安全; 风险防控; 量子加密通信

中图分类号: TN91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.011

0 引言

电力系统作为国家关键基础设施, 其安全稳定运行事关国计民生。随着能源互联网、泛在电力物联网等新型电力系统加速建设, 电力工程信息化、自动化、智能化水平不断提升。电力系统规模庞大、结构日趋复杂, 数据资产价值也与日俱增, 由此衍生出诸多信息安全风险, 网络入侵、数据窃取、业务中断等安全事件频发, 给电网运行埋下重大隐患。传统加密技术受算法强度所限, 难以从根本上解决电力信息安全难题。为破解电力系统面临的信息安全困境, 亟需引入新型加密防护技术, 筑牢电力系统网络安全防线。量子加密通信技术以其“绝对安全”等独特优势, 有望成为保障电力信息安全的“利器”。本文在分析电力工程主要信息安全风险的基础上, 重点探讨量子加密通信技术在电力系统信息防护中的应用策略, 以为提升电力工程信息安全性提供参考。

1 电力工程信息安全风险的现状与挑战

1.1 电力系统信息安全威胁的多样性与复杂性

电力系统是一个复杂的网络物理融合系统, 涵盖发电、输电、变电、配电、用电等诸多环节, 系统架构异常庞杂。随着电力系统向着信息化、自动化、智能化方向发展, 信息技术与电力物理设施的融合日益紧密, 使得电网暴露在更加广阔的网络空间, 信息安全风险不断积聚。电力工业信息化进程加快, 企业管理、生产调度、市场交易等各个领域高度依赖信息系

统, 由此产生海量电力数据资产, 数据窃取、篡改的风险大大增加。能源互联网、泛在电力物联网建设提速, 海量智能终端接入电网, 数据采集、传输环节多, 边界防护难度大, 网络入侵、恶意代码植入等威胁更加凸显, 电力工控系统与 IT 系统的互联互通, 使得工业控制网络与互联网的边界日益模糊, 更容易受到来自 IT 领域的网络攻击。电力系统供电服务与社会民生息息相关。发生大规模信息安全事件, 极易在能源电力领域引发连锁反应, 对国家能源安全、社会经济稳定造成严重冲击, 电力工程信息安全形势日趋严峻, 亟需提高风险防控能力^[1]。

1.2 传统加密技术面临的局限性与挑战

电力系统大多采用传统密码学技术实现信息加密保护, 主要包括对称加密算法(如 AES、3DES)和非对称加密算法(如 RSA、椭圆曲线), 这两类算法在应对一般的网络威胁时, 能够发挥一定的作用。但在电力工程的复杂应用场景下, 仍面临诸多局限性, 传统密码算法的安全性主要依赖于密钥的保密性和算法自身的数学难题, 密钥泄露或算法被攻破, 加密体系将很快瓦解。随着量子计算、云计算等新型计算模式的发展, 传统密码算法面临被破解的风险与日俱增, 保障海量电力数据的长期安全, 是摆在电力工程信息安全建设面前的一道难题。电力系统终端节点分布广泛、数量庞大, 密钥管理的复杂度高, 传统的密钥分发方案存在较大局限性, 易引发密钥配送失误、私钥复制等问题, 增加安全隐患。电力系统对网络通信的高可靠、低时

延也提出了更高要求。传统加密技术在实现大规模组网时,不可避免地会带来通信效率损耗,面对电力系统复杂多变的应用场景需求,传统密码学技术暴露出诸多“短板”,亟需创新性的信息安全防护之策。

1.3 电力信息安全事件的危害与影响分析

电力系统作为国家关键基础设施,遭受网络攻击,极易在能源电力领域引发连锁反应,后果不堪设想。攻击者可能利用系统漏洞,侵入电网调度控制中心,窃取敏感数据,篡改关键参数,下达错误控制指令,导致电网运行严重失衡。变电站可能因此发生爆炸,输电线路过载熔断,大片区域陷入黑暗。电力中断将给工业生产、交通运输、通信网络等各个领域带来灾难性的连锁反应,工厂车间被迫停工,生产线陷入瘫痪,经济损失难以估量,居民日常生活更是困难重重,电梯无法运行,空调制冷系统停摆,自来水供应中断,给人们的衣食住行带来诸多不便。网络攻击导致电力系统大面积停运,将给国计民生带来灾难性影响。现代工业生产线高度自动化,完全依赖于连续稳定的电力供应,若电网瘫痪,工厂车间必然停工,造成的经济损失是惊人的。许多精密仪器设备在突然断电后很容易损坏,重新启动也需要很长时间,生产效率大打折扣。电力中断严重影响城市交通、通信网络、金融数据中心等关键领域,给人们的日常工作生活带来诸多不便。重要民生场所如医院、血库、疫苗冷藏库若是突然断电,将给公众健康安全带来威胁。电力信息安全事件一旦发生,其影响之深远,危害之巨大,实在是不堪设想^[2]。

2 电力工程中的主要信息安全风险问题

2.1 电力监控系统的网络入侵与数据窃取风险

电力监控系统是电力系统安全稳定运行的核心枢纽,集中承担电网运行监视、安全分析、故障诊断等任务,掌控着电网的“生命线”。

电力监控系统信息化程度高,外部接口多,易成为网络攻击的“重灾区”,来自互联网的恶意入侵、数据窃取威胁日益凸显,网络入侵者一旦攻破电力监控系统,窃取系统权限,即可任意操纵电网运行,置电网安全于危难之中。监控系统汇聚了海量电网实时工况数据,数据价值高,极易成为攻击者觊觎的目标,数据被非法窃取,不仅会泄露电网运行机密,更可能被对手恶意利用,实施精准打击。数据的恶意篡改也将严重影响监控系统判断,酿成错误控制决策,更有甚者,攻击者还可能借助监控系统进一步渗透发电、

输电等更深层次的控制系统,危及电网运行安全。筑牢电力监控系统网络安全防线,对保障整个电力系统安全至关重要^[3]。

2.2 智能电网通信环节的信息传输安全隐患

智能电网通过信息通信技术将电网各个环节紧密连接,实现电力系统的高度自动化和智能化。电网通信环节众多,传输距离远,数据资产的机密性、完整性、可用性面临巨大威胁,在发电侧,发电厂监控系统、故障录波装置等智能终端需要与调度控制中心实时通信。传输电厂运行状态、故障告警等关键信息;在输电侧,变电站自动化系统通过光纤、无线等通信方式接入调度数据网,上送电压、电流等海量测量量,通信链路如果被恶意窃听、侦测,电网运行机密将无所遁形,更为严重的是,部分变电站仍采用明文传输控制指令。遭到篡改,变电站将执行错误操作,埋下极大的安全隐患,配电自动化大量采集配电设备的实时运行数据,接入海量智能电表、新能源并网装置,产生的通信流量剧增,数据完整性难以保证。智能电网各个层级均面临数据传输安全风险,在高度互联的通信网络中确保信息高效、安全地流转,是智能电网建设必须考虑的重点问题。

2.3 电力数据中心的信息存储与访问控制风险

电力工程各环节产生海量数据,电力数据中心承担着数据集中存储、管理和应用的重任。当前不少电力数据中心在数据存储与访问控制方面还存在诸多风险。电力系统缺乏统一的数据分级分类标准,对敏感数据的脱敏处理不到位,使得核心数据资产面临较大泄露风险,部分电力部门的数据服务器、存储设备对外开放程度高,防护措施单一,易受外部入侵威胁。电力数据中心普遍存在身份认证、权限管理漏洞,虽然不同业务信息系统之间采取了一定的逻辑隔离,但内部人员一般拥有较高权限,可跨系统调阅数据,对访问行为缺乏细粒度审计约束,极易酿成“超权访问”。个别单位还存在人员私自利用工作便利复制、携带核心数据资产的情况。加强数据中心的安全防护,规范电力数据全生命周期管理,已成当务之急,从源头消除电力数据泄密隐患,最大限度控制信息安全风险,是电力工程必须直面的难题。

3 量子加密通信在电力工程中的防护策略

3.1 量子密钥分发技术应对网络入侵与数据窃取

针对电力系统网络入侵、数据泄露等安全风险,量子密钥分发(QKD)技术能够发挥独特优势。QKD利

用量子态制备、量子测量等物理机制,在通信双方之间建立“一次一密”的随机密钥,任何窃听企图都将引入不可避免的误码,通信双方能够及时发现非法窥探,进而废止密钥,这种基于物理层面的绝对安全保障,从根本上杜绝了窃听风险。电力工程可以将 QKD 技术应用于核心控制区、调度数据网等高安全需求场合,实现发电控制、电网调度系统与主控中心的加密通信,有效抵御网络入侵。在数据存储环节,利用 QKD 为海量电力数据提供端到端的加密保护,即使密文数据库泄露,攻击者也难以在有限时间内破解密文,最大程度规避数据泄密风险。QKD 技术生成的安全密钥可用于保护电力监控、变电站等系统的认证过程,防止内部私钥被复制、滥用。QKD 有望成为应对电力系统信息泄露的“利器”,筑牢电力工程的安全屏障^[4]。

3.2 量子安全通信协议保障智能电网信息传输

智能电网通信网络异常庞杂,传输链路交错重叠,传统加密方案难以全面覆盖,量子安全直接通信(QSDC)协议能够通过单光子序列直接传送秘密信息,无需事先分发密钥,简化了密钥管理,是保障智能电网通信安全的理想选择。基于 QSDC 技术,在智能电网部署多用户网络,实现各区域终端与控制中心的机密通信。QSDC 利用非正交量子态编码信息,数据的安全性直接由量子物理定律保证,攻击者无法通过测量获取隐藏信息,通信安全性显著提升。还可进一步采用诱骗态技术,即将部分信息比特编码为正交态,专门用于窃听检测,使得量子信道能够抵御更强的攻击。对于电力调度控制指令等核心数据,采用 QSDC 技术与认证协议相结合,保证指令传输机密性,验证通信双方身份,提供更高等级的安全防护。在智能电表、配电终端接入等场合,QSDC 多用户组网能力可有效支撑海量节点通信需求。QSDC 无需密钥协商、密钥存储等复杂流程,通信效率高,满足智能电网信息传输的低时延需求。量子安全通信有望成为智能电网通信安全的“护身符”。

3.3 量子加密存储技术强化数据中心访问控制

电力数据资产的存储保护与访问管控是确保数据机密性的重中之重。电力工程可以引入量子加密存储技术,利用量子密钥实现更为可靠的数据安全托管。量子加密存储将原始数据在本地利用量子密钥加密,密文数据上传至云端,用户凭借量子密钥才能解密访问。在数据存储阶段,电力部门可放心地将数据委托给第三方管理,即便内部管理人员也难以恶意窃取,数据泄密风险大为降低。在访问控制方面,可基于量

子密钥实现细粒度授权,不同部门、岗位人员持有不同的量子密钥,对不同分区的电力数据拥有相应读写权限,系统记录所有外来量子密钥及其操作行为,可溯源性强,配合严格的异常访问审计机制,对越权操作行为进行预警,从而从源头遏制内部人员超权访问、滥用职权等行为^[5]。由于量子密钥能够频繁更新,可定期轮换电力数据的加密密钥,使数据更新保护机制常态化,强化系统的长期安全性,量子加密存储技术将为电力数据的长期、可靠保护提供坚实的保障。

4 结束语

电力系统是经济社会运行的重要基础,随着电力工程信息化、网络化进程的不断加快,信息安全风险也日益突出,给电网安全稳定运行带来了严峻的挑战。传统密码学技术受制于自身局限,难以应对日益频发的网络攻击事件,电力系统亟需创新的信息安全防护策略。量子加密通信技术为破解电力工程信息安全困局指明了新路径。量子密码的“不可克隆”特性,信息论意义上的无条件安全,将从根本上消除窃密隐患;量子态易受扰动的敏感性,又使得窃听行为无所遁形,确保通信私密,QKD、QSDC 等量子安全通信协议分别针对电力核心控制系统、智能电网通信场景,有效规避网络入侵、数据泄露风险。量子加密存储进一步强化了电力数据资产的安全托管和精准授权,最大限度地避免了敏感信息泄露。电力工程应积极布局量子密码技术创新,结合行业应用实际,探索量子加密在电网入侵检测、安全通信、访问控制、身份认证等方面的最佳实践,构建一套全方位、纵深化的网络安全防护体系,为电力系统安全运行提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 盛佃清.面向数字政府的量子安全加密通信框架[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(04):815-822.
- [2] 梁东贵,梁哲辉,李韞莛,等.面向电网服务信息交互的数据通信安全策略研究[J].电子设计工程,2024,32(16):73-77.
- [3] 同[1].
- [4] 贾耕涛,倪玮栋,吴佳伟,等.面向能源互联网的电力量子保密通信关键技术研究及应用[J].电力信息化,2020,18(07):1-7.
- [5] 文涛,李夏,周海鹏,等.基于量子通信的电力系统安全传输机制研究与实现[J].无线互联科技,2024,21(18):1-3.

遥感与地面观测结合的淮河流域水资源动态监测技术

魏美斯

(河南省信阳市水文水资源勘测分中心, 河南 信阳 464000)

摘要 遥感与地面观测结合的水资源动态监测技术, 通过多源数据融合与模型耦合, 可以构建全方位监测网络。本文详细论述了该技术原理, 包括遥感利用传感器捕捉信息、地面监测站点精准测流采样等, 以及二者的结合方式, 进而构建淮河流域水资源动态监测技术体系, 确定监测指标。介绍了数据获取预处理流程, 通过集成技术方法构建模型, 并以怀洪新河子流域为例, 展示技术应用过程与效果, 证明其在提升监测精度、时效性及助力水资源管理决策方面优势显著。

关键词 淮河流域; 水资源动态监测; 遥感; 地面观测; 多源数据融合

中图分类号: TP7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.012

0 引言

淮河流域水资源时空分布不均, 供需矛盾突出, 水污染严重, 地下水超采等问题日益凸显。现有水资源监测体系虽日臻完善, 但部分区域站点密度不足, 设备更新滞后, 遥感数据精度和分辨率也有待提升。遥感与地面观测结合的水资源动态监测技术应运而生, 该技术融合遥感宏观趋势与地面数据精准校正的优势, 通过多源数据融合与模型耦合, 构建涵盖水量、水质及水资源利用的全方位监测网络, 为淮河流域水资源管理提供科学依据, 推动水资源管理迈向精准化与智能化。

1 淮河流域水资源特征与监测现状

1.1 淮河流域水资源特征

淮河流域地跨鄂、豫、皖、苏、鲁五省, 总面积约 33 万平方公里。地处南北气候交汇带, 降水丰沛但时空分布不均, 汛期降水占全年 50% ~ 70%。地形西高东低, 山地、丘陵、平原、洼地错落, 河流众多, 水系发达。在水资源时间分配上, 汛期径流量大, 枯水期水量少; 在空间上, 安徽省因地处中游且支流密集, 水资源相对充沛, 而湖北省因流域面积占比小, 水资源量最少。上游山区降水径流丰富, 中下游平原需水量大但本地水资源有限。淮河流域作为重要的农业产区和能源基地, 其水资源开发利用程度高, 兴建了大量水利工程。然而, 水资源供需矛盾突出, 水污染严重, 部分地区地下水超采, 水资源管理与调配难度大等问题也日益凸显^[1]。

1.2 淮河流域水资源监测现状

淮河流域水资源监测体系日益完善, 地面观测网络覆盖干支流, 自动化雨水情监测站实时报送信息, 数字孪生淮河建设稳步推进。监测指标涵盖水量、水质、水位等, 传感器、物联网、大数据分析等技术广泛应用, 遥感技术亦助力获取地表水体、植被、土壤湿度等信息, 为洪水预警、水资源调度等提供参考。然而, 部分偏远地区站点密度不足, 老旧设备更新滞后。尽管遥感数据精度和分辨率有待提升, 数据处理需专业支持, 但结合地面监测数据验证和加强技术人员培训, 正不断提高监测准确性。盱眙段已建成首个地表水—地下水一体化监测示范站, 探索一体化监测新技术。

2 遥感与地面观测结合的淮河流域水资源动态监测技术原理

2.1 遥感与地面观测原理

遥感借助气象卫星的可见光、红外和微波传感器, 以及陆地卫星的多光谱和高光谱传感器, 捕捉地物信息。利用水体在可见光波段反射率低、近红外波段反射率高的光谱特征, 结合时间序列影像, 通过水体指数法和机器学习分类法, 精准提取并监测水体面积变化。依据光传播原理和实测数据, 反演叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度等水质参数。地面观测则依托水文监测站点, 采用流速仪法和水位流量关系法测流, 机械式和电磁流速仪各展所长。水位流量关系法实现水位实时监测与流量推算。水质监测通过采样与实验室分析, 瞬时采样与累积采样相结合, 光谱分析法和离子色谱

法精准剖析水中污染物和离子成分。雨量计与蒸发皿则分别量化降水与蒸发，为水资源补给与消耗提供关键数据^[2]。

2.2 二者结合的技术原理

遥感与地面观测的结合，在水资源监测中展现出独特优势。遥感技术提供宏观趋势，地面数据精准校正，二者互补。其结合方式多样，或以遥感划定重点区域，地面跟进详查；或用地面数据校正遥感精度；或将遥感数据驱动模型，地面数据率定参数。时空尺度匹配与融合是关键，时间上插值遥感数据，空间上重采样匹配分辨率，线性和非线性方法促进数据融合。模型耦合则需理解二者相互作用，遥感反演参数，地面数据校准模型，还可构建耦合模型模拟水资源动态。构建模拟模型时，依目标选型，整合数据，率定参数，独立数据验证。在参数率定与优化方面，传统试错与现代智能算法结合，如遗传算法模拟进化，高效寻优，提升模拟精度与可靠性。

3 淮河流域遥感与地面观测结合的水资源动态监测技术体系构建

3.1 监测指标体系确定

1. 水量指标。水量指标主要包括水体面积、径流量和地下水水位等。水体面积通过遥感影像解译获取，利用 GIS 技术计算水域边界，结合地面观测数据校准，确保精度。径流量采用水文站监测数据与遥感反演数据相结合的方法，通过公式计算得出：

$$Q = \int (P - ET - S) dt \quad (1)$$

式(1)中， Q 为径流量， P 为降水量， ET 为蒸散发量， S 为土壤水分变化量， dt 为时间间隔。地下水水位则通过监测井实时数据与遥感监测的地下水位变化趋势进行综合分析，采用克里金插值法进行空间插值，获取区域地下水水位分布^[3]。

2. 水质指标。水质指标涵盖水温、色度以及关键污染物浓度，如化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3N)和总磷(TP)。水温通过热红外遥感数据反演并结合地面温度计校准。色度则采用高光谱遥感技术，通过特定波段反射率计算得出。污染物浓度综合运用遥感反演与地面采样分析，结合水质模型进行估算。以 COD 为例，其浓度估算公式为：

$$\text{COD} = k \cdot (R_{\lambda_1} - R_{\lambda_2}) \cdot e^{-\alpha \cdot L} \quad (2)$$

式(2)中， R_{λ_1} 和 R_{λ_2} 分别为特定波长的反射率， k 为校正系数， α 为衰减系数， L 为水体深度。此方法有效整合遥感与地面观测数据，提升水质监测精度。

3. 水资源利用指标。水资源利用指标包括灌溉用

水量、工业用水量和生活用水量。灌溉用水量通过遥感监测作物类型、面积及生长阶段，结合当地灌溉定额估算。工业用水量则依据企业规模、类型及单位产值用水量，运用统计模型推算。生活用水量考虑人口数量、生活水平及用水习惯，采用人均用水量指标进行估算^[4]。以灌溉用水量为例，其计算公式为：

$$IW = \sum (A_i \cdot ETc_i) \quad (3)$$

式(3)中， IW 为总灌溉用水量， A_i 为第(i)类作物的灌溉面积， ETc_i 为其作物需水量，由参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 乘以作物系数 Kc_i 计算得出。该方法综合遥感数据与地面统计信息，实现水资源利用的精细化监测。

3.2 数据获取与预处理流程

1. 遥感数据获取。数据融合与质量评估是遥感数据获取的关键环节。首先，对多源遥感数据进行融合处理，以提高数据分辨率和信息量。融合方法包括基于加权平均的算法：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

式(4)中， R 为融合后的反射率， R_i 为第 i 类遥感数据的反射率， w_i 为对应的权重。然后，进行数据质量评估，计算归一化差异水体指数(NDWI)以辅助水体提取。最后，结合归一化差异植被指数(NDVI)进行水体与植被的区分，并通过主成分分析(PCA)进一步优化数据质量，确保遥感数据的准确性和可靠性。

2. 地面观测数据收集。地面观测数据收集涵盖水位、流量、水质及用水量等关键信息的系统性获取。水位数据依托高精度水位计进行分钟级采样经，线性拟合修正短期波动：

$$H_{adj} = H_{raw} \cdot (1 + k \cdot \sin(\omega t + \phi)) \quad (5)$$

式(5)中， H_{adj} 为修正后水位， H_{raw} 为原始数据， k 、 ω 、 ϕ 分别为振幅系数、频率角和初相位。流量监测采用流速仪结合水力学公式：

$$Q = v \cdot A \quad (6)$$

式(6)中， Q 为流量， v 为流速， A 为过水断面面积。水质采样遵循分层随机布点法，运用便携式分析仪现场测定并结合实验室比对。用水量统计整合计量器具记录与抽样调查数据，通过时空加权模型构建区域用水强度分布，确保数据链完整性和空间连续性。

3.3 技术方法集成与模型构建

采用光谱与纹理特征的多层次水体信息提取算法，结合深度学习模型，实现了水体精细分类。通过耦合分布式水文模型与遥感数据驱动模型，并引入机器学习误差校正机制，成功模拟了降水—径流—地表水—地下水的全路径动态过程，解决了复杂流域尺度下的

参数化难题。此外,基于多源数据融合的水质综合评估模型,通过遥感反演与地面监测数据的协同校准,并结合时空加权的水质综合指数模型,实现了流域水质的精细化、动态化评估,为水环境管理和污染防控提供了科学依据^[5]。

4 淮河流域水资源动态监测技术应用案例

4.1 案例区域选择与背景介绍

本次应用案例选取淮河流域的怀洪新河子流域。怀洪新河子流域位于淮河中游,地跨安徽、江苏两省,是淮河流域的重要组成部分。流域内水资源丰富,但面临着水资源供需矛盾、水污染等问题。流域内农业灌溉用水量大,工业发展迅速,导致水资源利用效率低下,水体污染严重,亟需高效的水资源监测技术提供科学依据。

4.2 技术应用过程

遥感影像解译获取水体面积,GIS技术计算水域边界,结合地面观测校准。综合分析水文站流量监测数据、地下水监测井数据,获取水量、水质指标。多时相遥感影像提取不同时期水体范围,对比展示变化。怀洪新河子流域布设监测站点,采集水量、水质数据。模型运行模拟水资源动态,分析变化趋势、时空分布、水质演变,为管理决策提供依据。深度学习模型、分布式水文模型等模拟全路径动态过程,多源数据融合评估流域水质。图1展示了怀洪新河子流域水体面积随时间动态变化,反映水资源波动。

4.3 应用效果评估

新技术融合遥感与地面观测数据,在水资源监测中优势显著。相比传统方法,它能更精准地提取水体

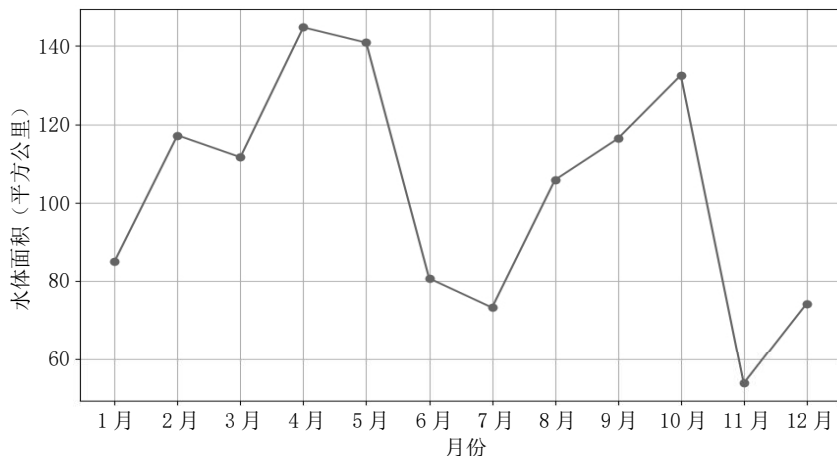


图1 水体面积变化曲线图

信息、反演水质参数及估算水资源利用量,时效性也大幅提升,实现水资源动态实时监测,空间覆盖更广,涵盖偏远及复杂地形区域。在水资源管理决策方面,该技术能准确监测水资源时空分布与动态,为调配、污染防控及生态保护提供科学依据,助力制定灌溉计划、优化用水配置、及时防控污染、调整湿地保护策略等,全方位支撑水资源管理。

5 结束语

淮河流域水资源动态监测技术的融合应用,标志着水资源管理迈向精准化与智能化。遥感与地面观测的协同,不仅突破了传统监测的时空局限,更在数据精度与时效性上实现质的飞跃。该技术体系通过多源数据融合与模型耦合,成功构建了涵盖水量、水质及水资源利用的全方位监测网络,为流域水资源管理提供了坚实的数据支撑。未来,随着技术的不断进步与

优化,该体系将在水资源调配、污染防治及生态保护等领域发挥更大作用,为淮河流域乃至全国的可持续发展贡献力量。

参考文献:

- [1] 曹炎煦,杨先发,樊孔明,等.基于遥感技术评估淮河流域母亲河复苏行动成效的方法研究[J].治淮,2024(12):68-70,88.
- [2] 赵朝贺,周娟,赵立科,等.水资源遥感动态监测探索与应用[J].陕西水利,2023(04):19-20,24.
- [3] 薛源,覃超,徐梦珍,等.基于多源遥感数据的河流断面提取进展与展望[J].遥感学报,2024,28(11):2719-2738.
- [4] 张蕊.基于高光谱图像的多源遥感数据融合方法及应用研究[D].南京:南京理工大学,2023.
- [5] 魏涛,奔驰.基于遥感技术的河流水质动态监测方法研究[J].工程技术研究,2025,07(03):245-247.

市政道路桥梁结构病害与加固施工分析

刘少波¹, 王 颖¹, 王玉醒², 何宝凯³

(1. 河北钧达建设工程有限公司, 河北 保定 073100;

2. 河北吉兵建筑工程有限公司, 河北 石家庄 050035;

3. 中元恒泰建设发展有限公司建筑设计分公司, 河北 石家庄 050031)

摘 要 市政道路桥梁作为交通系统的关键基础设施, 其结构安全与运行稳定性日益受到人们的重视。桥梁在长期服役中受交通荷载、环境侵蚀及设计施工等因素影响, 会逐渐暴露出疲劳裂缝、钢筋锈蚀、混凝土碳化等多类结构病害, 严重威胁交通安全与使用寿命。为提升桥梁耐久性与运营可靠性, 亟需开展病害识别与系统加固研究。本文针对桥梁常见病害类型, 分析其诱发机制并提出针对性加固技术措施, 以期为市政桥梁养护提供技术参考。

关键词 市政桥梁; 结构病害; 病害识别; 加固施工

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.013

0 引言

在现代城市交通体系中, 桥梁不仅承担着连接道路、跨越障碍的功能, 更直接影响着交通运输的效率与社会运行的稳定性。随着交通流量激增和环境条件复杂化, 桥梁结构面临的服役压力不断加剧, 频发的病害现象已成为当前市政管理中的重点难题。为应对这一挑战, 交通运输部于 2024 年发布了《公路路政管理技术标准》(JTG 4110—2024), 自 2024 年 11 月 1 日起施行, 旨在规范公路工程的管理与维护, 提升桥梁结构的安全性与耐久性。该标准的实施标志着我国在桥梁养护和加固方面迈出了重要一步, 为城市桥梁基础设施的运行质量提供了有力保障。

1 市政道路桥梁结构养护应遵循的基本原则

市政道路桥梁结构养护与加固应以结构体系的整体安全性和耐久性提升为核心目标, 在遵循既有设计荷载标准与《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021) 等行业规范基础上, 合理运用基于性能的结构加固理论, 实现从被动修复向主动预防的技术转型^[1]。加固方案应综合考虑桥梁结构刚度、延性、整体协同受力性能, 确保应力重分布过程中不引发局部应力集中或疲劳累积问题, 尤其在连续梁桥、悬臂结构等复杂体系中, 应对构造节点连接区实施有限元精细化建模与残余寿命评估^[2]。加固材料需优选模量匹配性高、粘结性能优良、耐久性强的复合材料体系, 如碳纤维布、聚合物砂浆、预应力碳板等, 以提升加固界面的有效性与协同工作性能。施工过程中应通过 BIM 技术集成施工流程、结构监测与运维数据, 实现全过程数字化

管控, 减少交通干扰并提高加固精度^[3]。养护体系建设应强化结构健康监测 (SHM) 与疲劳损伤识别算法的融合应用, 通过多源信息集成与实时数据反馈机制, 建立闭环式管控路径, 提升市政桥梁结构加固工作的科学性、系统性与可持续性。

2 桥梁结构病害产生的原因分析

2.1 交通荷载不断增长导致结构疲劳积累

随着城市交通需求激增和重型车辆频繁通行, 桥梁结构承受的实际荷载远超原设计标准, 尤其在主梁、桥面铺装与支座区域形成持续高频应力循环, 导致钢筋与混凝土疲劳损伤不断积累。在反复荷载作用下, 结构材料内部微裂纹萌生扩展, 最终演变为贯通裂缝, 严重削弱截面承载能力并造成构件刚度退化。同时, 频繁制动带来的冲击载荷对桥头跳车段、伸缩缝和剪力连接构件产生动态扰动, 易引发连接松动与节点开裂, 破坏结构整体受力路径。部分老旧桥梁因设计荷载等级较低, 其安全储备已无法适应当前复杂交通环境, 持续疲劳作用下构造细部出现裂纹扩展、混凝土保护层剥落、锚固区局部压碎等问题, 逐步演化为制约桥梁服役寿命的核心病害形式^[4]。

2.2 环境腐蚀条件恶化引起材料性能衰退

在开放环境长期服役过程中, 桥梁结构构件频繁受到多种腐蚀介质的耦合作用, 包括氯盐侵蚀、碳化作用、硫酸盐反应与冻融循环等, 严重削弱钢筋与混凝土的物理与化学性能。氯离子通过混凝土毛细孔道渗入内部, 引发钢筋点蚀与横截面积减小, 进而引起混凝土开裂与剥落, 破坏原有粘结力及协同受力机制。

碳化反应降低混凝土碱性环境,使钢筋失去保护膜加速锈蚀,结构承载力逐步降低。冻融破坏导致毛细孔压力骤增,引起混凝土碎裂与表层剥蚀。环境温湿度变化进一步加剧构件热胀冷缩不均,诱发变形集中与结构开裂。长期腐蚀不仅降低材料强度与刚度,而且破坏结构整体性,形成不可逆性能衰退过程^[5]。

2.3 设计参数偏差过大引起结构早期损伤

部分桥梁设计建造年代久远,所依据的荷载等级、交通工况与材料标准已与当前实际运行条件严重脱节,造成设计冗余不足与抗力储备匮乏。设计时对恒载与活载组合效应估算偏差,未能充分考虑多工况耦合下的受力极限,致使结构局部过应力运行,产生塑性变形甚至早期裂缝。结构构造细节设计不合理,如翼缘板开口位置设置不当、腹板厚度分布不均、纵横向联系构件刚度匹配失衡等问题,均易导致应力集中与应变不协调^[6]。部分简支梁桥未预留足够温度伸缩缝,热胀冷缩过程诱发接头部位开裂及支座位移异常。受力路径不连续与冗余度不足导致结构缺乏损伤后适应性,局部损坏易转化为系统性安全隐患,加速结构性能劣化进程^[7]。

2.4 施工工艺质量控制不到位诱发隐性缺陷

桥梁结构施工阶段的质量控制薄弱常埋下服役期结构病害的隐患,其中混凝土施工质量与钢筋施工工艺对结构安全性与耐久性影响尤为显著。混凝土浇筑时若振捣不密实,易形成蜂窝麻面、孔洞空腔,削弱构件抗剪与抗压能力,并为腐蚀介质提供侵入通道;养护期间若未控制温湿度条件,水化反应不足会导致早期强度不足与后期干缩开裂。钢筋布设未按图纸执行或保护层厚度偏差,会导致锈蚀发展加剧与粘结失效,进而诱发裂缝扩展与构件失稳。桥面铺装与防水层施工不到位易引发渗水及构造层间脱粘,削弱桥面结构整体性。施工中质量检测频次不足、数据反馈不及时,使缺陷未能在初期得到修复,逐步演变为深层次病害,影响结构长期服役性能与安全储备^[8]。

3 桥梁结构病害加固施工的分类对症处理策略

3.1 交通荷载频繁施压,应力重构缓解疲劳

桥梁在长期超限交通荷载及重复荷载作用下,关键构件的应力状态持续恶化,易发生疲劳裂缝与性能退化。为减轻疲劳累积效应、延缓损伤扩展进程,应通过结构应力重分布技术优化桥梁受力体系,使关键部位的应力集中区域实现卸载。外部预应力加固是应用最广泛的方式,通过设置外部钢绞线或碳纤维预应力板,在构件表面施加附加应力场,形成逆向应力抵

消原有拉应力峰值,显著降低疲劳裂纹扩展速率,并提高构件极限承载能力^[9]。

钢板粘贴加固通过环氧树脂将钢板与结构表面形成有效复合体,提高受拉区抗拉刚度,有效延缓疲劳开裂。碳纤维布(CFRP)包覆技术利用高强度、高延性的复合材料,增强构件表面抗拉能力和变形协调能力,同时改善裂缝控制能力与整体抗疲劳性能。上述加固方法应结合结构健康监测系统,进行应力响应实时监测,并采用应变计、振动传感器等设备评估重分布效果,确保结构整体性能优化。此外,重分布加固应考虑受力路径连续性与构造细部约束,避免局部刚度突变引起新的应力集中区域^[10]。在加固设计中引入疲劳寿命评估模型与非线性有限元分析方法,可实现精细化模拟与优化,从而制定出符合结构使用现状与服役需求的加固策略,实现结构延寿目标。

3.2 腐蚀介质持续侵蚀,封闭体系阻断路径

桥梁结构暴露在自然环境中,长期受到氯盐、湿热、酸性气体等腐蚀介质侵袭,导致钢筋锈蚀、混凝土碳化及截面退化。为有效阻断腐蚀因子渗透路径并提升材料防护性能,需采用防护材料综合封闭工艺对桥梁结构表层和潜在腐蚀区域进行系统加固与处理。防腐涂层技术通过在混凝土表面施加环氧涂料、聚氨酯涂膜或有机硅类憎水剂,形成致密保护膜,显著降低水分与氯离子的渗透速率^[11]。

阴极保护系统可通过外加电流方式或牺牲阳极设置,实现钢筋电位的负移位,抑制阳极反应,从而有效延缓腐蚀过程,尤其适用于湿度大、氯盐浓度高的滨海与盐冻地区。电化学脱盐与再碱化技术利用外部电场驱动腐蚀介质迁移,从混凝土中导出氯离子并恢复其碱性保护环境,适用于轻中度锈蚀状态的混凝土构件。在材料回补环节,应选用抗渗性优良、抗硫酸盐侵蚀能力强的高性能混凝土或聚合物水泥砂浆,配合钢筋除锈剂与防腐涂层,增强修补部位的耐久性与力学协同性能。结构表层修复完成后应配置复合防水层与排水引流系统,以降低表面滞水时间与孔隙水压,形成多层次、多手段联动的防护屏障体系。该类工艺技术具有广泛适应性和可操作性,能实现结构表观与功能的双重恢复,有效延缓桥梁因环境腐蚀导致的耐久性退化。

3.3 设计标准滞后落后,构造增强功能升级

由于部分桥梁设计阶段未能充分预判当前及未来交通发展态势或设计方法过于简化,导致桥梁构造受力体系存在先天性薄弱环节。在面临荷载升级与运行环境复杂化背景下,亟需通过构造补强与功能升级方式提升结构适应性与服役性能。构造补强手段包括增

设临时或永久性支撑系统,以改善主梁受力分布、增强抗弯刚度及剪切性能^[12]。

例如:增设纵向托架、横向支撑梁或施加钢拱支架,可实现受力路径重构,减小主构件应变水平。针对结构连接区域,如铰接段、支座区和节点区,应通过钢构件加焊、螺栓连接加固或构造焊接板优化连接性能,提高节点的强度储备与传力连续性。在桥面系统方面,可通过拓宽桥面、增设边缘梁或更换轻质高强桥面铺装材料,以实现桥梁横断面功能升级与流量承载能力提升。在几何形态调整方面,针对竖向净空不足或边跨偏短的桥型结构,可局部改造构造轮廓线或优化线形,降低不均匀沉降与受力突变风险。在设计功能升级的过程中,必须充分考虑并结合现有的结构承载力评估结果,以及详尽的交通流量预测数据。为了确保升级方案的科学性和全面性,应引入先进的多目标优化方法,系统地统筹和平衡结构性能的提升、交通功能的优化以及经济上的可行性。通过这种综合性的分析和优化,制定出最为合理和高效的加固改造路径。这样不仅能有效恢复结构的安全性,还能实现功能适应性的显著提升,从而确保整个升级项目在满足当前需求的同时,具备长远的可持续发展潜力。

3.4 施工质量控制薄弱,局部拆除恢复性能

施工缺陷在桥梁服役早期往往表现为隐性损伤,随着使用年限延长,这类缺陷逐步发展为构件开裂、连接松动、保护层脱落等显性病害。为彻底消除施工过程中遗留的结构弱点并恢复桥梁的原有性能,应采用局部拆除与重构结合的修复策略,以结构完整性与力学连续性为核心,通过工程化措施精准恢复损伤部位的受力与功能特性。

对存在蜂窝麻面、空鼓剥落或截面收缩的混凝土构件,应采用机械切割方式将损伤区域清除至健康界面,随后采用超高性能混凝土(UHPC)或聚合物修复砂浆进行填补与成型,确保修复区域具备高粘结强度与界面过渡性。对于钢筋锈蚀严重部位,需通过机械除锈、电化学脱锈或喷砂法去除锈蚀产物,裸露钢筋需涂刷环氧树脂或配套防腐底漆,再通过植筋、加焊等工艺恢复其受力能力。存在施工偏差的连接节点应通过螺栓重设、钢板加固、焊接补强等手段重新建立受力传递路径。裂缝治理过程中采用低黏度环氧树脂注浆法封闭微裂纹,并辅以外部碳纤维布约束,控制裂缝继续扩展。局部重构方案应以施工图复核与非破损检测结果为依据,利用结构重构仿真分析工具模拟重建后受力状态,确保恢复效果与原结构受力协调。该策略不仅能够有效消除潜在的安全隐患,确保桥梁

结构的长久稳定,同时还能在严格保障安全性的前提下,最大限度地减少对桥梁原有结构的干扰以及对交通运营的影响。通过科学合理的策略实施,不仅能够显著提升桥梁的整体使用寿命,延长其服务周期,还能进一步增强桥梁的安全冗余度,确保在各种复杂情况下仍能保持较高的安全性能,从而为桥梁的长期稳定运行提供坚实的保障。

4 结束语

市政道路桥梁作为城市交通系统的关键基础设施,其稳定性与持久性直接关系到城市运行的安全性和市民出行的便捷性。桥梁结构病害的成因复杂多样,涉及荷载环境、设计建造等多个环节,因此,在实施加固施工时必须做到系统化、科学化、差异化处理。当前加固技术日益成熟,材料选择与施工工艺不断优化,为高效修复各类病害提供了坚实的技术支撑。然而,在加固工作之外,更应注重预防性养护管理体系的建设,通过监测预警、定期巡检、信息化平台等手段,构建桥梁结构全生命周期健康管理体系,推进城市基础设施从“修复式管理”向“预测性维护”转型,为未来交通安全保驾护航。

参考文献:

- [1] 陈海宁.浅谈道路桥梁结构病害及其加固技术[J].建设监理,2024(S01):109-111.
- [2] 陈志良.道路桥梁常见结构病害及加固技术研究[C]//第三届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集,2024.
- [3] 周政杰.道路桥梁结构病害与加固施工分析[J].四川水泥,2023(07):274-276.
- [4] 张海波.道路桥梁结构病害与加固施工分析[J].电脑校园,2020(11):985-986.
- [5] 李健民.浅谈道路桥梁结构病害及加固技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2023(04):49-51.
- [6] 薛森,宋光强.道路桥梁工程施工中的常见病害与处理技术分析[J].智能建筑与工程机械,2023,05(05):28-30.
- [7] 钟省平.道路桥梁结构病害及加固措施研究[J].百科论坛电子杂志,2023(22):97-99.
- [8] 曾建.道路桥梁的常见结构病害及加固技术研究[J].运输经理世界,2023(04):128-130.
- [9] 万迎庆.对道路桥梁施工中结构病害问题的分析[J].城镇建设,2023(15):118-120.
- [10] 沈剑文.公路桥梁结构病害检测及加固措施[J].你好成都(中英文),2023(34):40-42.
- [11] 胡克林.公路桥梁养护与维修加固施工技术探讨[J].科技与创新,2024(15):138-140.
- [12] 孙启亮.高速公路桥梁养护与维修加固施工技术研究[J].运输经理世界,2023(31):128-130.

桥梁施工中的施工工艺问题与优化对策

曹 凯

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决桥梁施工中存在的工艺质量问题, 从施工技术标准执行偏差、材料性能劣化、设备精度不足等典型问题入手, 对施工标准执行、材料管控、工艺创新等关键环节进行研究。本文提出构建全过程质量追溯体系、推行智能施工装备、完善协同管理机制等优化对策, 提供覆盖设计、施工、验收各阶段的技术解决方案, 以期提升桥梁工程品质提供系统性的工艺改进思路, 对类似工程项目具有实践参考价值。

关键词 桥梁施工; 工艺优化; 质量控制; 智能建造; 安全管理

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.014

0 引言

当前我国桥梁建设正面临高质量发展的新要求, 施工工艺水平直接影响工程品质与使用寿命。随着基础设施投资规模持续扩大, 复杂地质条件、特殊结构形式的桥梁项目日益增多, 传统施工方法已难以满足现代工程建设的需要。近年来频发的桥梁质量事故暴露出施工环节存在的系统性缺陷, 亟待建立更加科学、规范的工艺管理体系。数字化、智能化技术的发展为施工工艺革新提供了新的可能性。在此背景下, 系统分析桥梁施工中的工艺问题, 探索切实可行的优化路径, 对提升工程建设质量、保障结构安全耐久具有重要意义。

1 桥梁施工工艺常见问题分析

1.1 施工技术标准执行偏差

在桥梁建设过程中, 设计规范与现场实施之间的断层现象普遍存在。设计单位基于理论计算提出的技术参数, 在施工环节常因操作便利性或成本考量被擅自调整。混凝土浇筑时的振捣时间不足会导致蜂窝麻面, 而预应力张拉顺序错误可能引发结构应力重分布。这些偏差往往不是单一因素造成, 而是技术交底不彻底、过程监管缺位与施工人员专业认知局限共同作用的结果。特别在采用新技术、新工艺时, 若未建立对应的质量控制节点, 标准执行就会流于形式。例如: 某斜拉桥索力调整案例显示, 施工方为追赶进度省略了设计要求的多次调索工序, 最终影响成桥线形。

1.2 材料质量管控薄弱

从源头采购到现场使用的全链条质量控制存在系统性漏洞。钢筋原材的力学性能检测报告造假现象时

有发生, 而商业混凝土搅拌站为降低生产成本可能减少胶凝材料用量。更隐蔽的风险在于材料进场后的性能劣化, 如支座用四氟板在露天存放后摩擦系数变化、锚具夹片油脂干涸导致预应力损失、缩缝橡胶带硬度指标。这些问题的本质是质量追溯体系失效, 材料验收仅停留在纸质文件核查, 缺乏从实验室到作业面的全过程见证取样制度^[1]。

1.3 施工设备与工艺局限性

装备能力与工程需求的错配会直接制约施工精度。移动模架造桥机在曲线段施工时, 若未配置自动纠偏系统, 梁体线形控制误差可能超出规范允许值三倍以上。工艺选择不当同样会引发连锁反应, 比如在岩溶地区采用旋挖钻成孔却未配备岩层扫描仪, 极易造成桩基嵌岩深度不足。这类问题折射出施工组织设计的形式化倾向, 设备选型论证时未充分考虑地质勘察报告的异常提示, 机械照搬同类项目的技术方案。

1.4 项目进度计划不合理

项目进度计划违背施工客观规律的现象屡见不鲜。连续梁悬浇节段的混凝土强度发展需要足够龄期, 但为满足节点考核, 部分项目在未达到设计强度时即提前张拉预应力。这种违背材料科学规律的做法, 不仅增加了结构开裂风险, 还会导致后期徐变变形超标。更深层矛盾在于进度计划缺乏动态调整机制, 如遭遇极端天气、特殊地质等不可预见因素时, 仍强行维持原定工期目标, 导致施工质量不达标, 为工程安全埋下隐患。

1.5 团队协作与沟通障碍

多专业接口管理失效会放大施工误差。如钢结构深化设计阶段未考虑运输限高条件, 到现场才发现梁

段无法通过既有桥梁；测量控制网复测周期与模板安装工序不同步，造成箱梁节段错台超限。当设计变更通过纸质文件逐级传递时，信息滞后可能使已施工部位与新要求产生冲突。这些问题暴露出传统“按图施工”思维的局限性，各参建方在技术衔接环节缺乏主动协同意识。

1.6 安全管理措施不到位

风险预控与现场执行脱节是事故根源。如满堂支架验收时未模拟实际荷载工况进行预压，混凝土浇筑过程中局部失稳引发坍塌事故。安全投入的边际效益被严重低估，比如索塔施工未配置防坠水平网，或爬模体系避雷装置缺失^[2]。这些隐患反映出现场安全管理仍停留在事后追责层面，未能建立基于危险源动态辨识的预防机制。

2 桥梁施工工艺优化的策略路径

2.1 强化技术标准落地执行

桥梁施工质量的核心保障在于技术标准的严格执行，这需要构建从设计到施工的全链条管控体系。设计阶段应当突破传统二维图纸的表达局限，采用 BIM 技术进行三维可视化交底，将抽象的规范条文转化为直观的施工指引。重点部位可制作工艺动画演示，明确钢筋绑扎顺序、混凝土浇筑流向等关键工艺要求。施工方案编制需建立专家评审机制，邀请设计单位、质量监督站共同参与论证，确保方案与设计意图的高度吻合。现场实施环节推行“首件验收”制度，每个分项工程正式施工前先做样板段，经多方验收合格后作为后续施工的质量基准。监理单位应当转变工作方式，配备智能检测设备实现过程数据的实时采集，改变传统的事后抽检模式。建立可追溯的质量责任体系，通过施工日志电子化、隐蔽工程影像存档等手段，实现质量问题的精准溯源。对于新技术、新工艺的应用，设置专门的工艺试验段，通过实体验证完善操作规程后再全面推广^[3]。施工单位应当建立常态化的标准培训机制，将技术人员的继续教育纳入绩效考核，持续提升团队的标准执行能力。质量监督部门可考虑引入第三方评估机构，定期对项目标准执行情况进行独立审计。

2.2 提升材料质量管理能力

材料质量管控水平的提升需要建立覆盖全生命周期的管理体系。采购环节实施供应商分级管理，建立包含历史供货质量、售后服务等维度的综合评价体系，实行优质优价的市场化选择机制。重点材料推行驻厂

监造制度，对原材料配比、生产工艺等关键环节进行全过程监督。运输过程采用物联网监控技术，实时追踪材料的温度、湿度、震动等参数变化，确保运输条件符合要求。施工现场建立智能验收系统，通过光谱分析、机器视觉等先进技术手段，实现材料关键性能指标的快速自动化检测。仓储管理应用环境智能调控技术，根据材料特性自动调节库房的温湿度条件，防止材料性能劣化。建立材料质量大数据平台，整合生产、运输、检测、使用等环节的全过程数据，通过智能分析预测材料性能变化趋势。针对新型材料的应用，制定专门的工艺试验和评估程序，包括相容性测试、耐久性评估等环节，确保其性能满足工程特定需求。完善材料质量追溯机制，采用区块链技术记录各环节的质量数据，实现问题的精准定位和责任认定。

2.3 推动设备与工艺升级

施工装备的智能化改造是提升工艺水平的重要突破口。传统设备应当进行数字化升级，加装传感器和控制系统，实现运行参数的实时监测与自动调节。重点推广具有自适应功能的智能施工设备，如自动调平的摊铺机、智能张拉的预应力系统等，减少人为操作误差。研发集成化施工平台，将定位导航、参数监测、质量控制等功能模块整合为一体化操作系统。在工艺创新方面，深化数字孪生技术的应用，通过虚拟模型与实体施工的实时交互，动态优化工艺参数。发展模块化施工技术，将现场作业转化为工厂化预制和精准组装的协同模式，提升施工精度和效率。建立工艺创新实验室，针对特殊地质条件、复杂结构形式等工程难点开展专项攻关，形成具有自主知识产权的成套施工技术^[4]。完善工艺评定标准体系，明确新工艺的适用范围、质量控制要点和验收标准，规范技术创新成果的推广应用。构建产学研用协同创新机制，搭建技术创新联盟，加速科研成果向现实生产力的转化。建立工艺创新激励机制，鼓励一线技术人员开展工艺改进和创新，将实用创新纳入企业工法库并给予相应奖励。

2.4 科学制定进度计划

现代工程项目管理要求进度计划具备足够的科学性和适应性。采用关键链项目管理方法，综合考虑资源约束、工序逻辑等因素，识别最优的进度实施路径。建立基于风险评估的缓冲机制，为地质条件变化、极端天气等不确定因素预留合理的时间余量。实施进度—资源—成本的多目标集成优化，运用运筹学方法寻找最佳平衡点，避免顾此失彼。推行 4D-BIM 进度管理技术，将时间维度融入三维模型，实现进度计划的立体

呈现和动态跟踪。建立智能预警系统,当实际进展偏离计划阈值时自动触发调整机制,确保进度受控。完善进度考核评价体系,将质量安全指标与工期要求进行捆绑考核,杜绝为抢工期而牺牲质量的行为。对于控制性工程节点,采用蒙特卡洛模拟技术预测可能的时间波动范围,制定针对性的保障措施。构建多方参与的进度协调机制,定期召开界面管理会议,及时解决专业间的进度冲突问题。开发基于历史数据的智能预测系统,通过机器学习算法优化后续工序的工期估算,提高计划的准确性。建立进度管理的知识库系统,积累各类工程的进度数据,为后续项目提供参考依据。

2.5 促进团队高效协作

参建各方的协同效率直接影响工艺优化的实施效果。构建基于云平台的协同工作环境,实现设计模型、施工方案、质量记录等工程数据的实时共享与共同编辑。推行集成项目交付模式,建立风险共担、利益共享的合作机制,打破传统的责任分割壁垒。实施矩阵式项目管理,组建跨职能的项目执行团队,促进专业间的深度融合。建立标准化的接口管理程序,明确各专业间的数据交换格式、时限要求和责任边界,确保信息传递的准确性和及时性。采用敏捷项目管理方法,通过短周期迭代不断优化协作流程,快速响应工程变化需求。完善变更管理机制,建立设计变更的快速确认和发布流程,确保变更信息能够同步传递至所有相关方。推行联合办公制度,将主要参建单位的关键岗位人员集中工作,减少沟通层级,提高决策效率。建立基于BIM的碰撞检测系统,定期开展专业间的模型协调,提前发现并解决设计冲突问题。培养具备多专业背景的复合型管理人才,在交叉领域发挥协调纽带作用,提升团队的整体协作能力。实施协作绩效评价制度,将团队配合度、问题解决效率等指标纳入合同考核条款,形成有效的激励约束机制。

2.6 健全安全管理体系

本质安全理念要求构建主动预防型的安全管理体系。推行安全设计评审制度,在方案阶段系统识别并消除潜在的安全隐患,从源头控制风险。建立分级管控机制,根据作业风险等级实施差异化管理,重点监控高风险作业环节。完善安全技术交底体系,采用虚拟现实技术模拟各类危险场景,提升交底的直观性和有效性。构建智能安全监控网络,整合人员定位、环境监测、视频分析等技术手段,实现施工全过程的实时安全监控。推行安全标准化管理,统一现场安全防

护设施的制式标准和设置要求,确保防护效果可靠可验证^[5]。建立隐患排查治理的闭环管理机制,规范隐患的发现、整改、验证、反馈全流程,确保每个隐患都得到有效治理^[6]。完善应急管理体系,制定针对不同事故场景的应急处置预案,定期开展实战化演练,提升应急响应能力。构建安全文化培育机制,通过行为观察、安全积分、亲情教育等方法,促进全员安全意识的提升。实施安全绩效与经济效益挂钩的激励机制,将安全表现与工程款支付、评优评先等直接关联,形成良性的安全投入回报循环^[7]。建立安全大数据分析平台,深度挖掘事故隐患的分布规律和演变特征,为安全决策提供数据支持。定期开展安全管理体系审核,从制度建设、资源配置、执行效果等维度进行全面评估,实现安全管理水平的持续改进。

3 结束语

桥梁施工工艺优化需要统筹技术标准、材料管理、设备升级等多维度要素。针对当前工程实践中暴露的质量通病,建立基于数字化技术的全流程管控体系尤为关键。研究提出的工艺改进路径既关注具体技术创新应用,更强调管理机制的协同优化。实施效果取决于参建各方对质量标准的严格执行和对新技术的合理运用。未来,应持续完善工艺标准体系,强化技术创新与工程实践的深度融合,推动桥梁建造质量向更高水平发展。

参考文献:

- [1] 王涓.道路桥梁施工管理中的问题及优化对策[J].造纸装备及材料,2021,50(01):127-128.
- [2] 张森.道桥施工中的技术问题与解决对策[J].四川水泥,2021(05):264-265.
- [3] 张泊,王金楼.道路与桥梁施工中的裂缝问题的解决对策[J].四川水泥,2021(05):299-300.
- [4] 张志.公路桥梁施工安全管理问题研究[J].科技风,2020(19):114.
- [5] 闭仕结.公路桥梁施工中预应力技术施工工艺与质量控制探析[J].企业科技与发展,2020(01):130-132.
- [6] 刘晓萍.铁路桥梁施工常见问题及解决工艺研究[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术应用与施工管理交流会论文集(下).中国铁路济南局集团有限公司青岛工务段,2024.
- [7] 匡大然.挂篮悬臂浇筑工艺在桥梁施工中的应用[J].住宅与房地产,2021(05):232-233.

建筑电气工程配电线路施工技术难点探析

张海艳¹, 王珂², 孙建海³, 邵华泽⁴

(1. 湖北时空思维信息技术有限公司, 湖北 恩施 445099;

2. 山西睿帆建筑工程有限公司, 山西 太原 030000;

3. 北京京能建设装饰装修有限公司, 北京 102300;

4. 国投航空科技(北京)有限公司, 北京 100028)

摘 要 本文针对建筑电气工程配电线路施工中的技术难点进行了深入探究, 分析了复杂建筑环境下配电线路布设的难点, 包括建筑结构和装修对布线的影响; 探讨了配电线路材料选择与兼容性方面的挑战, 对材料性能要求及不同材料间兼容性问题进行了阐述; 针对就配电线路施工过程中的安全管控难题, 从施工现场安全风险识别和管控措施制定实施两方面进行了剖析。在此基础上, 提出了基于 BIM 技术对配电线路施工进行优化、研发应用新型配电线路材料、构建智能化安全管控系统等创新性解决方案, 以期有效克服传统施工模式下的技术瓶颈、提升建筑电气工程配电线路施工水平提供参考。

关键词 建筑电气工程; 配电线路; BIM 技术; 新型配电线路材料

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.015

0 引言

建筑电气工程是建筑工程中的重要组成部分, 其中配电线路施工又是电气工程施工的核心环节之一。然而, 在实际施工过程中, 配电线路施工往往面临诸多技术难题, 如复杂的建筑环境制约、材料选择与兼容性问题、施工安全风险管控等, 这些都对配电线路的施工质量和效率产生直接影响。为了突破传统施工模式的桎梏, 业内人士一直在探索创新性的解决方案。随着建筑信息模型(BIM)、新材料、物联网、人工智能等新技术的发展和应用, 智慧建造理念逐步深入人心, 为解决建筑电气工程配电线路施工技术难点提供了新的思路和方法。

1 建筑电气工程配电线路施工技术难点分析

1.1 复杂建筑环境下的配电线路布设难点

1.1.1 建筑结构对配电线路布设的影响

现代建筑的结构日益复杂, 对配电线路的布设提出了更高要求。高层建筑中的钢筋混凝土墙体、梁柱等结构构件, 会对线管和线槽的埋设形成阻碍; 而体量巨大的公共建筑, 其内部空间结构错综复杂, 给配电线路布设带来困难, 地下室、夹层等特殊空间, 施工环境狭小、光线昏暗, 且可能存在积水等不利因素, 增加了电气线路敷设的难度^[1]。当前, 许多建筑采用钢结构或装配式结构, 配电线路需要与建筑结构模块相协调, 对布线方式提出新的挑战。

1.1.2 建筑装修对配电线路布设的影响

随着人们对建筑品质要求的提高, 装修工程日益受到重视, 然而繁复的装修施工给配电线路布设造成了一定的影响。精装修工程中大量使用的吊顶、隔断等装饰性构造, 使得线路布设需要与之相协调, 并预留足够的接线盒和预埋管线; 而在施工进度上, 装修与电气工程交叉作业频繁, 配电线路铺设不得不受制于装修进度。此外, 不同功能空间对供电性能的要求存在差异, 如厨卫等湿区用电安全等级更高, 会议室等智能化程度高的区域需要预留更多的插座和网络接口, 这无疑加大了配电线路的设计难度。装修材料的不当选用, 也可能对电线电缆产生腐蚀, 影响配电系统的安全运行。

1.2 配电线路材料选择与兼容性难点

1.2.1 配电线路材料性能要求

配电线路所采用的导体和绝缘材料, 直接关系到供电系统的安全性、可靠性和使用寿命。导体材料需要具备优良的导电性能和机械强度, 一般采用铜或铝材质, 但在不同应用场景下, 导体截面积、绝缘等级、耐火性能等技术参数有所区别, 例如在低压配电系统中, 通常选用聚氯乙烯(PVC)绝缘导线; 而对于防火要求高的场所, 则需采用矿物绝缘金属护套电缆(MICC)。除导体外, 绝缘材料的选择也至关重要^[2], 其需要兼顾电气绝缘性能、机械强度和环境适应性, 目前常用

的绝缘材料包括聚氯乙烯、交联聚乙烯（XLPE）、橡胶等。工程设计人员需要全面评估供电对象的功率等级、环境条件，并考虑经济性因素，才能选择最优配置。由于配电工程专业性强，材料品类繁多，选材不当极易引发安全和质量隐患，这对相关人员的专业素养提出了很高的要求。

1.2.2 不同材料间的兼容性问题

配电线路施工涉及多种材料和设备，如导线电缆、线管、桥架、箱柜等，仅有优质的单一产品还不够，还需确保不同材料和设备之间的匹配与兼容，否则，即便单体质量过硬，一旦系统集成存在问题，也会影响配电性能。例如：在湿热环境下，如果电缆护套与金属桥架的材质不相容，可能加速绝缘老化；在振动较大的场所，若线管与管件连接过于刚性，易发生脱落或断裂；配电箱柜内部的母线排布和绝缘子设计，需匹配开关设备的技术参数，确保电器元件正常通断。配电线路是一个多材料、多设备集成的复杂系统，各部件之间错综交织、相互影响。

1.3 配电线路施工过程中的安全管控难点

1.3.1 施工现场安全风险识别

在建筑施工现场，火灾、触电、高空坠落、物体打击等危险无处不在，配电线路施工同样面临诸多安全风险，施工现场临时用电量大、线路复杂，私拉乱接、超负荷用电时有发生，极易引发电气火灾和触电事故。在建筑物上敷设线管、支架等作业，无法完全避免登高作业，若防护措施不当，容易发生高空坠落，电缆桥架、母线槽等大型部件吊装就位时，若指挥失误、操作不当，会造成严重的物体打击。在施工过程中，还会受到地质条件复杂、天气状况恶劣等不利因素影响，如遇暴雨、大风等，野外作业的配电线路极易遭到破坏。此外，各专业交叉作业频繁，经常发生管线破坏和遮挡等问题。

1.3.2 安全管控措施的制定与实施

建筑电气工程施工现场情况复杂多变，制定切实可行的安全管控措施面临诸多困难。首先，配电工程涉及多个专业和工种，各方诉求不一，在制定安全管理制度时难以兼顾各方利益，经常出现规定脱离实际、可操作性差的问题；其次，建筑施工周期长、环节多，要对每一个细节制定安全标准，工作量巨大且难以穷尽^[3]，即便安全制度再完善，如果缺乏有力的组织保障，也难以在现场严格执行，监管力量薄弱，责任追究不到位，使得安全措施流于形式；最后，施工进度和成

本压力巨大，项目管理人员常常顾此失彼，难以在进度、质量、安全之间找到平衡点。

2 创新性解决方案研究

2.1 基于BIM技术的配电线路施工优化

2.1.1 BIM技术在配电线路施工中的应用

随着BIM技术的发展越来越成熟，其在建筑电气工程领域的应用日益深入，利用BIM建模功能，可以在虚拟的三维环境中对配电线路进行可视化设计，直观呈现线缆布置方案、空间位置关系等，提前发现设计缺陷并加以优化，通过与建筑结构、给排水、暖通等专业模型的集成，可实现管线综合排布，有效规避管线碰撞、交叉等问题，在施工阶段，BIM模型可指导现场放线定位，提高布管精度，减少返工。利用BIM 4D模拟技术，可合理安排施工计划，优化工序衔接，缩短工期。BIM 5D功能还可实现工程量精确统计和成本控制。

2.1.2 基于BIM技术的配电线路施工方案优化

基于BIM技术的配电施工优化，需秉承“电气专业BIM模型—配电系统集成—配电施工4D模拟—配电工程精细化管理”的思路。首先，要构建完整准确的配电专业BIM模型，包括变电配电室、主干线、支线、照明、弱电等各系统。在建模过程中，应细化各构件参数，统一命名规则，为后续应用奠定基础；其次，利用族文件库实现快速建模，并与土建、机电等专业模型实现无缝集成，开展管线碰撞检查，优化管线综合布局；再次，在施工准备阶段，应用BIM 4D技术模拟配电施工全过程^[4]。将施工组织设计、进度计划与三维模型相链接，合理编排施工顺序，优化资源配置，提前预判施工难点，制定应对措施；最后，在施工过程中，深化BIM技术在配电工程管理方面的应用，包括现场管线复核、工程量统计、成本控制、竣工模型交付等，实现施工全生命周期的精细化管理，电气工程师要与BIM工程师紧密配合，充分发挥BIM技术优势，攻克配电施工各环节难题，打造精品工程。

2.2 新型配电线路材料的研发与应用

2.2.1 高性能绝缘材料的研发

配电线路的供电安全性和可靠性，很大程度上取决于绝缘材料的性能。传统的PVC、XLPE等材料虽在电工领域应用广泛，但仍存在老化失效、耐热性差等短板，尤其在高温、腐蚀性环境下，其绝缘性能恶化更为明显，对此，国内外科研机构、材料企业积极开

展新型绝缘材料的研发。一方面,改性优化聚合物分子结构,如在 XLPE 中掺入纳米陶瓷填料,制备复合改性 XLPE,提高绝缘强度和抗老化性能;另一方面,研发全新的绝缘材料,如聚酰亚胺(PI)薄膜绝缘,其具有优异的耐高温性、机械强度和电气性能;纳米复合绝缘材料,通过在聚合物基体中引入纳米级无机填料,既保持了高分子的柔韧性,又兼具无机材料的高强度、耐热性。这些新型绝缘材料可极大地拓宽电线电缆的应用场景,为配电线路的安全运行提供有力保障。未来,随着材料工程的进一步发展,基于纳米、石墨烯等先进技术的智能绝缘材料有望实现规模化应用,带来配电线路的革命性变革。

2.2.2 新型导体材料的应用

导体材料是配电线路的核心,其导电性能直接影响电能传输效率。目前常用的铜、铝导体虽然导电性能良好,但存在重量大、成本高等问题。铜资源的日益枯竭,也使得铜导体的应用受到限制,因此,研发轻质高导电性能的新型导体材料势在必行。碳纤维复合芯导线近年来成为研究热点,它以碳纤维作为内芯,外部包覆金属,既具有较高的导电率,又能显著降低线缆重量^[5]。此外,石墨烯导体、超导体材料等新型材料有望在未来实现工程化应用。在建筑电气领域,新型导体材料的推广还需要与整个配电系统相协调,对于降低线损、改善供电质量、提升能源利用效率等方面将产生积极影响,设计和施工人员要加强学习,掌握新材料特性,因地制宜地选用材料,优化设计方案,完善施工工艺,充分发挥新型导体材料的优势,推动建筑电气行业的技术进步。

2.3 智能化安全管控系统的构建

2.3.1 基于物联网的施工现场安全监测

配电线路施工涉及较多高危作业,事故风险高,传统的安全管理模式难以及时发现隐患。随着物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的发展,智慧工地建设如火如荼,为提高施工安全管理水平奠定了基础。通过在施工现场部署各类传感器,并接入物联网平台,可实时采集人员位置、设备状态、环境参数等数据。例如:每名施工人员佩戴 RFID 电子标签,实现工人出勤、定位监测;起重机、施工升降机等加装倾角、重量传感器,对设备运行状态进行监控;各作业面安装视频探头,对施工过程进行画面分析,及时预警危险行为;此外,噪声、烟感、风速等传感器对恶劣环境因素进行监测预警。海量数据汇聚至物联网管理平

台,采用大数据分析技术,可及时发现安全隐患并告警,为管理人员的安全决策提供数据支撑。在配电施工中,相关人员要主动了解新技术,完善传感器布置方案,做好数据管理与分析,借助科技手段提升安全水平。

2.3.2 智能化安全预警与决策支持系统

在配电工程施工中,面对错综复杂的危险源,仅凭人工难以对安全状况进行全面监管。因此,亟需研发智能化的安全预警和决策支持系统,基于物联网采集的实时数据,建立多维度立体化的安全评价模型,对施工过程中的各要素进行量化分析,动态评估安全风险等级^[6]。一旦监测数据超出安全阈值,系统就会自动预警,并给出相应的处置建议。管理人员可以在决策支持系统中实时查看安全指数、风险地图、对比分析等,直观地了解施工现场的安全状况,有的放矢地制定管控措施。此外,系统还应具备“一键报警”功能,现场人员发现重大危险时,可通过便携终端第一时间上报,启动应急预案。智能安全帽集成了定位、摄像、通信等功能,可作为移动终端纳入安全管理系统。

3 结束语

建筑电气工程配电线路施工面临着复杂建筑环境、材料选择、安全管控等诸多技术难题,传统的设计施工模式难以有效应对新形势下的挑战,BIM、物联网、等创新技术,为破解这些难题提供了新思路和新方法。相关单位应加大资金投入和人才培养,为新技术的推广应用创造良好的环境。只有多方协同发力,才能不断攻克配电工程技术难关,推动行业高质量发展,为人民群众安全可靠用电保驾护航,助力新型建筑工业化、城镇化建设。

参考文献:

- [1] 郭亚楠.建筑电气工程中低压配电系统的安装与调试[J].房地产世界,2024(22):122-124.
- [2] 徐虎.建筑电气工程施工技术难点探讨[J].中国住宅设施,2024(07):145-147.
- [3] 刘剑海.建筑电气工程中的供配电线路设计[J].集成电路应用,2023,40(04):104-105.
- [4] 詹朋.建筑项目电气供配电线路施工探讨[J].农家参谋,2020(10):186.
- [5] 钱冬梅.居住区供配电的建筑项目电气供配电线路施工探讨[J].门窗,2019(22):154.
- [6] 陈小龙.建筑项目电气供配电线路施工探讨[J].电子世界,2019(20):157-158.

复合土钉技术在深基坑支护工程中的应用

杨世雄

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决城市化进程中深基坑工程传统支护技术施工周期长、造价高、环境影响大等问题,对复合土钉技术在深基坑支护工程中的应用进行研究尤为重要。本文分析了复合土钉技术的理论体系,包括其组成、作用机理、适用范围;探讨了设计方法,涵盖土钉参数设计、面层结构设计及整体、抗倾覆、抗隆起稳定性分析;阐述了施工工艺及质量控制要点,包括工艺流程、关键技术、质量控制要点及常见问题处理措施。结合工程实例,验证了复合土钉技术在控制基坑变形、保障周边环境安全方面的有效性,以期同类工程提供参考。

关键词 复合土钉技术;深基坑支护工程;土钉成孔技术;注浆技术;喷射混凝土技术

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.016

0 引言

随着城市化进程不断加快和地下空间开发向纵深发展,深基坑工程规模也不断扩大、深度加深,对支护技术要求更高。传统的排桩支护、地下连续墙等技术虽成熟,但施工周期长、造价高、环境影响大。复合土钉技术作为新型支护技术,通过土钉、喷射混凝土面层与预应力锚杆的三维协同作用,形成“浅层加固—中层锚定—深层控制”的支护体系,具有地质适应广、施工效率高、成本低等优势^[1]。基于此,本文阐述复合土钉技术理论、应用,并结合实例分析,为同类工程提供参考。

1 复合土钉技术理论及应用

1.1 复合土钉技术概述

复合土钉技术是一种新型的深基坑支护技术,它将土钉、喷射混凝土面层、预应力锚杆等结构有机结合,形成协同作用的高效支护体系。根据支护形式的不同,可分为土钉—喷射混凝土面层复合支护、土钉—预应力锚杆复合支护以及土钉—格构梁复合支护等类型。其核心结构包括土钉、面层、锚杆及连接构件。该技术的作用机理主要体现在三个方面:土钉通过注浆加固土体,提高土体的抗剪强度和整体稳定性;喷射混凝土面层限制土体变形,防止局部坍塌;预应力锚杆提供主动支护力,进一步控制基坑变形。复合土钉技术具有施工便捷、经济高效、适应性强等特点,适用于软土、砂土、黏性土等多种地质条件,尤其在深基坑工程中表现出显著优势。其适用范围广泛,包括建筑基坑、地铁车站、地下停车场等地下空间开发工程,能够有效解决传统支护技术在高难度基坑工程中的局限性^[2]。

1.2 复合土钉支护设计方法

1.2.1 设计原则及流程

复合土钉支护设计应遵循安全可靠、经济合理、技术可行、施工方便的原则。安全系数需满足相关规范要求,《建筑基坑支护技术规程》(JGJ120-2012)规定,基坑整体稳定性安全系数一般不小于 1.3。同时,要考虑周边环境对基坑变形的限制,确保邻近建筑物、地下管线等不受影响。

首先进行工程地质勘察,获取土体物理力学参数,如土的重度、黏聚力、内摩擦角等。根据勘察结果及基坑周边环境、开挖深度等条件,初步拟定复合土钉支护方案,包括土钉长度、间距、直径,面层厚度、混凝土强度等级,锚杆长度、间距、预应力等参数。然后进行稳定性分析和变形计算,若不满足要求,则调整设计参数重新计算,直至满足各项设计指标^[3]。

1.2.2 土钉参数设计

1. 土钉长度: 根据经验公式计算^[4], 如下所示:

$$L=KH \quad (1)$$

式(1)中, L 为土钉长度, K 为基坑开挖深度, H 为经验系数, 一般取 0.5 ~ 1.2。

2. 土钉间距: 一般在 1.0 ~ 1.5 m 之间, 可根据土体性质和基坑深度适当调整。土钉间距过大, 支护效果减弱; 间距过小, 施工难度增加且经济性降低。通过有限元分析可知, 在一定范围内, 减小土钉间距可有效降低基坑边坡位移。

3. 土钉直径: 常用的土钉直径为 100 ~ 150 mm, 采用钻孔注浆工艺时, 可根据土钉拉力和注浆压力确定。例如: 对于拉力较大的土钉, 可适当增大直径以满足承载要求。

1.2.3 面层结构设计

1. 面层厚度：一般为 80 ~ 150 mm，采用 C20 ~ C30 喷射混凝土。面层厚度需满足抗裂和抗冲切要求，通过计算混凝土面层在土压力作用下的内力，确定合理的厚度。例如：在土压力较大的部位，可适当增加面层厚度^[5]。

2. 钢筋网布置：钢筋网一般采用 HPB300 或 HRB400 钢筋，直径 6 ~ 10 mm，间距 150 ~ 300 mm。钢筋网的作用是增强面层的抗拉强度和整体性，通过计算钢筋网在混凝土面层中的应力，确定钢筋的直径和间距。

3. 加强筋设置：在土钉头部和面层交接处设置加强筋，一般采用直径 14 ~ 20 mm 的钢筋，与土钉和钢筋网焊接牢固，以增强节点处的承载能力。

1.2.4 稳定性分析

1. 整体稳定性分析：采用圆弧滑动法，如瑞典条分法、毕肖普法等。通过计算滑动面上的抗滑力矩和滑动力矩，得到整体稳定性安全系数。例如：采用瑞典条分法计算时，安全系数计算过程如下所示：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (2)$$

式(2)中， c_i 、 φ_i 为第 i 条土条的黏聚力和内摩擦角， l_i 为第 i 条土条滑动面长度， N_i 、 T_i 分别为第 i 条土条滑动面上的法向力和切向力。

2. 抗倾覆稳定性分析：计算基坑支护结构绕某点的抗倾覆力矩和倾覆力矩，得到抗倾覆稳定性安全系数，一般要求不小于 1.5。抗倾覆稳定性与土钉长度、间距、面层厚度等因素有关，通过调整这些参数可提高抗倾覆稳定性。

3. 抗隆起稳定性分析：对于软土地基，需进行抗隆起稳定性分析。采用太沙基公式或其他经验公式计算基坑底部土体的抗隆起安全系数，确保基坑底部土体不发生隆起破坏。

1.3 复合土钉施工工艺及质量控制

1.3.1 施工工艺流程

1. 土方开挖：遵循“分层分段、严禁超挖”原则，每层开挖深度与土钉竖向间距相匹配，一般控制在 1.0 ~ 1.5 m，每段开挖长度根据现场实际情况确定，通常不宜超过 20 m。在开挖过程中，使用挖掘机进行作业，并配备人工进行修坡，保证边坡平整度和坡度符合设计要求。

2. 土钉成孔：根据设计要求，可采用人工洛阳铲成孔或机械钻孔方式。人工成孔适用于土质较好、深度较浅的情况；机械钻孔则适用于各类土质，效率较高。

成孔直径应满足设计要求，一般为 100 ~ 150 mm，成孔垂直度偏差不超过 1%。

3. 土钉安装：将加工好的土钉钢筋（常用 HRB400，直径 22 ~ 28 mm）插入孔中，土钉钢筋应顺直，表面无锈蚀、油污等。在土钉钢筋上每隔 2 ~ 3 m 设置一个对中支架，确保土钉位于钻孔中心。

4. 注浆：采用水泥浆或水泥砂浆进行注浆，水泥一般选用 P.042.5 普通硅酸盐水泥。注浆压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa，确保浆液充满钻孔。在注浆过程中，应注意观察浆液的返浆情况，若发现漏浆，应及时采取封堵措施。

5. 钢筋网铺设：在坡面上铺设钢筋网，钢筋网采用 HPB300 或 HRB400 钢筋，直径 6 ~ 10 mm，间距 150 ~ 300 mm。钢筋网与土钉钢筋应连接牢固，可采用绑扎或焊接方式，相邻钢筋网片之间的搭接长度不小于 300 mm。

6. 喷射混凝土面层：喷射混凝土强度等级为 C20 ~ C30，厚度 80 ~ 150 mm。喷射前，应先对坡面进行洒水湿润，喷射时，喷头应与坡面保持垂直，距离控制在 0.8 ~ 1.2 m，喷射顺序自下而上，分层喷射，每层厚度不超过 80 mm。

1.3.2 关键施工技术

1. 土钉成孔技术：在复杂地质条件下，如遇到砂层、卵石层等，可采用跟管钻进成孔技术，防止塌孔。对于含水量较大的土层，可先进行降水处理，再进行成孔作业。

2. 注浆技术：为提高注浆效果，可采用二次注浆工艺。第一次注浆完成后，待浆液初凝前，进行第二次高压注浆，压力控制在 1.0 ~ 1.5 MPa，以增强土钉与土体的粘结力。

3. 喷射混凝土技术：喷射混凝土时，可添加适量的速凝剂，以缩短混凝土的凝结时间，提高施工效率。同时，应控制好喷射混凝土的配合比，确保混凝土的强度和耐久性。

1.3.3 质量控制要点

在深基坑支护工程复合土钉技术应用中，质量控制极为关键。对于原材料，要对水泥、钢筋、砂、石等严格检验，每批进场都需提供证明文件并抽样检查。土钉施工时，需检查长度、间距、直径、倾角等参数，成孔深度比设计长 0.5 m 以上。注浆要控制压力、配合比和注浆量，完成后抽样检测。钢筋网和喷射混凝土也要检查铺设、搭接及强度、厚度等情况。

1.3.4 常见问题及处理措施

1. 塌孔：原因可能是土质松散、地下水丰富或成孔速度过快。处理措施为采用泥浆护壁、降低成孔速度、

增加护壁套管等方法,若塌孔严重,应回填后重新成孔。

2. 土钉抗拔力不足:可能是土钉长度不够、注浆不饱满或土体强度低。处理方法为增加土钉长度、进行二次注浆或对土体进行加固处理。

3. 喷射混凝土开裂:原因包括混凝土配合比不当、养护不及时或坡面不平整。处理措施是调整混凝土配合比,加强养护工作,在喷射前对坡面进行修整。

4. 漏浆:多因钻孔密封不严或注浆管破裂引起。可通过封堵钻孔、更换注浆管等方式解决,确保注浆过程顺利进行。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某城市地下停车场深基坑工程,基坑深度 15 m,周边环境复杂,邻近建筑物和地下管线密集。地质勘察显示,场地土层主要为粉质黏土和砂层,地下水位较高,土体力学参数为:重度 $\gamma=18.5\text{ kN/m}^3$,黏聚力 $c=25\text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi=20^\circ$ 。针对土体稳定性差、变形控制难度大等问题,设计采用土钉—喷射混凝土面层复合支护形式,土钉长度 12~15 m,间距 1.2 m,直径 120 mm;喷射混凝土面层厚度 100 mm,强度等级 C25;钢筋网采用 HRB400 钢筋,直径 8 mm,间距 200 mm。经稳定性分析,整体稳定性安全系数为 1.35,满足规范要求。

2.2 施工过程及监测分析

2.2.1 施工工艺流程

在施工过程中,严格按照“分层分段、严禁超挖”原则进行土方开挖,每层开挖深度控制在 1.2 m,每段开挖长度 15 m。土钉成孔采用机械钻孔,成孔直径 120 mm,垂直度偏差控制在 0.8%。土钉钢筋(HRB400,直径 25 mm)插入孔中,每隔 2.5 m 设置一个对中支架。注浆采用 P.042.5 普通硅酸盐水泥,第一次注浆压力 0.4 MPa,第二次高压注浆压力 1.2 MPa。钢筋网铺设时,钢筋(HRB400,直径 8 mm)间距 200 mm,与土钉钢筋焊接连接,搭接长度 350 mm。喷射混凝土强度等级 C25,厚度 100 mm,分两层喷射,每层 50 mm。

2.2.2 施工质量控制

对原材料严格把关,每批水泥、钢筋等进场均按规范抽样检验。在土钉施工中,实际土钉长度偏差控制在 $\pm 0.3\text{ m}$,间距偏差 $\pm 0.1\text{ m}$,直径偏差 $\pm 5\text{ mm}$,倾角偏差 $\pm 2^\circ$ 。注浆时,浆液配合比严格控制,注浆量比理论值增加 5%~10%,确保注浆饱满。钢筋网铺设间距偏差 $\pm 10\text{ mm}$,搭接长度偏差 $\pm 20\text{ mm}$ 。喷射混凝土厚度通过现场钻孔检测,平均厚度达到 102 mm,强度经检测达到 C26。

2.2.3 基坑变形监测及分析

在基坑周边共布置 10 个监测点,从基坑开挖开始至基础施工完成,进行了为期 3 个月的变形监测。监测数据如图 1 所示。

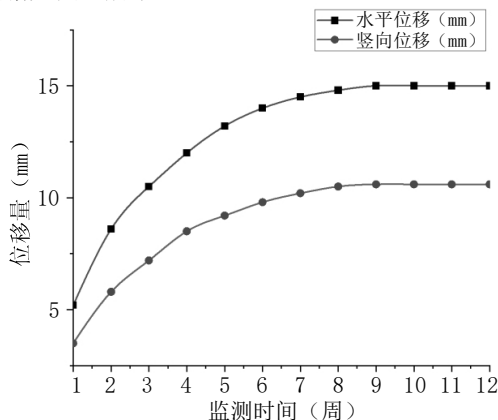


图 1 监测数据

从图 1 中的数据可知,基坑变形在开挖前期增长较快,随着复合土钉支护的逐步完成,变形逐渐趋于稳定。最终水平位移控制在 15 mm 以内,竖向位移控制在 10.6 mm 以内,均满足设计允许变形值要求,表明复合土钉支护技术在该工程中有效控制了基坑变形,保障了基坑及周边环境的安全。

3 结束语

复合土钉技术通过土钉、喷射混凝土面层与预应力锚杆的协同作用,能有效提升土体稳定性,控制基坑变形。其设计方法可根据地质条件与工程需求,精准确定支护参数,保障支护结构安全可靠。在深基坑支护工程应用中,严格的施工工艺与质量控制,使其在复杂地质及周边环境条件下仍表现出色。监测数据显示,基坑变形控制良好,验证了复合土钉技术在深基坑支护工程中的可行性与经济性,为同类工程提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 荆鹏.房建工程深基坑支护施工技术探究[J].建材发展导向,2025,23(02):37-39.
- [2] 丁学聪.房建工程深基坑支护施工技术应用分析[J].大众标准化,2025(01):28-30.
- [3] 宋仁松.建筑工程中深基坑支护施工技术的应用[J].中国住宅设施,2024(12):122-124.
- [4] 黄瑞.土钉支护设计模型优化与可靠性分析[D].福州:福州大学,2020.
- [5] 丁钰玲.水泥混凝土路面结构设计分析[J].黑龙江交通科技,2020,43(09):258-259.

混凝土施工技术在水利施工中的应用探讨

贾云龙

(中水淮河安徽恒信工程咨询有限公司, 安徽 合肥 230091)

摘 要 水利工程的施工建设能够对水资源进行合理的调配与利用, 减少自然灾害的出现, 为农业、工业的生产以及人们的日常生活提供保障。在水利工程施工过程中, 混凝土浇筑是极为关键的环节, 其质量直接影响水利工程的安全性、耐久性和功能性。本文以水利工程为背景, 介绍了水利工程混凝土施工技术, 如钢筋施工技术、混凝土浇筑技术、施工温度控制等, 重点探讨了混凝土施工技术的分类与特点, 并在此基础上分析了水利工程混凝土施工技术要点, 提出了水利工程中的混凝土施工质量控制措施, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 混凝土施工技术; 水利工程; 钢筋施工技术; 混凝土浇筑技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.017

0 引言

随着水利工程建设规模的不断增大, 相应的复杂性和施工难度也逐渐升高, 而混凝土作为主要建筑材料, 因其具备高强度、良好的耐久性以及适应各种复杂工况的优势, 广泛应用于水工建筑、房屋建筑、坝体、隧洞等重要结构的建设。因此, 混凝土施工技术与质量控制成为确保水利工程顺利进行和长期稳定运行的关键。

1 混凝土施工技术分类与特点

在水利工程中, 混凝土施工技术的运用至关重要。基础施工技术是确保混凝土结构质量的核心, 涉及混凝土浇筑与振捣等关键步骤。施工团队需严格控制浇筑速度和高度, 避免裂缝和气泡的产生, 同时, 通过振捣排除气泡和多余水分, 提高混凝土密实度和强度。基础施工技术的严格执行和监控, 对保证工程质量和稳定性具有决定性作用。修补施工技术用于修复混凝土结构因长期使用和环境侵蚀造成的损伤, 如裂缝、剥蚀等。此技术包括损伤评估、修补材料选择和施工工艺制定。通过详尽的勘察和评估, 选择合适的修补材料, 如聚合物修补砂浆或环氧树脂, 以确保修补后的结构强度和耐久性。修补过程包括表面处理、填充修补等步骤, 旨在恢复结构的完整性和性能。防护施工技术则旨在提升混凝土结构的耐久性, 延长使用寿命。主要措施包括防水、防腐和防冻技术。防水技术通过涂刷防水涂料或铺设防水卷材, 防止水分渗透; 防腐技术采用耐腐蚀材料或涂刷防腐涂料, 抵御化学侵蚀; 防冻技术则通过添加防冻剂或采取保温措施, 减少冻融循环

对结构的损害。总的来说, 水利工程中的混凝土施工技术涵盖了基础施工、修补施工和防护施工等多个方面。因此, 在实际施工中, 必须高度重视施工技术的选择和应用, 确保每一项技术的应用都能达到最佳效果, 为水利工程的长期稳定运行提供有力支持^[1]。

2 水利工程混凝土施工技术要点

工程概况: 引江济淮二期工程任务是在引江济淮一期工程基础上, 以城乡供水为主, 结合灌溉补水, 为区域应对供水安全风险、改善生态环境创造条件, 分为输水干线、骨干供水二大版块。其中淮南山南新区水厂取水口门工程站前设进水池, 取水口设在瓦埠湖右侧河道内, 通过引水钢管将瓦埠湖水引入泵站进水池。本工程设计取水流量为 $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$, 总装机容量为 $1\,420 \text{ kW}$ 。堤后依次布置引水钢管、进水池、主泵房、控制阀井等建筑物。工程场区位于淮南市小孤堆乡申咀子村西南瓦埠湖边, 瓦埠湖湖底高程约 17.50 m , 地面高程约 $20.50 \sim 21.15 \text{ m}$ 。场区地形平坦, 属于丘陵地貌。引水钢管建基面高程 13.75 m , 建基面主要位于第②层重粉质壤土上, 取水头部侧局部位位于第②1层淤泥质土上。加压泵站基坑开挖深 10 m 。

2.1 钢筋施工技术

钢筋施工技术在混凝土结构中起到了骨架的作用, 对整个结构的承载能力和稳定性具有重要作用。在钢筋施工过程中, 选购和检验是首要环节, 必须确保钢筋的强度、韧性和焊接性能符合国家标准和设计要求。此外, 钢筋的加工、安装、连接和保护也是施工过程中需要注意的关键点。钢筋加工要严格按照设计要求

进行切割、弯曲和焊接等处理,以保证加工质量。在钢筋安装过程中,要注意锚固长度、间距、保护层厚度等参数,确保安装准确无误。同时,采用合适的钢筋连接方式,如焊接、绑扎或机械连接等,以保证连接的可靠性和强度。在混凝土浇筑过程中,要采取适当措施保护钢筋,防止钢筋被混凝土浆体污染或损坏。在水利工程的施工过程中,钢筋的布置方法主要分为两大类:一类是在现场施工前,预先组装好钢筋结构的框架,再将其运输至工地进行最终的装配;另一类是直接将钢筋材料运送至工地,由现场工作人员依据施工设计要求进行接合。为确保钢筋工程的质量,施工组织必须根据实际情况选择合适的钢筋安装方式,以此确保水利工程的顺利实施^[2]。

2.2 混凝土配合比设计

首先,合理的配合比可以提高混凝土的强度、耐久性和工作性。在配合比设计过程中,要确保原材料质量符合国家标准,并进行相应的性能检验。根据设计要求和使用条件,通过计算确定水泥、砂石、水、外加剂等材料的比例。其次,根据混凝土的性能要求,对配合比进行灵活调整,以满足工程的特殊需求,如抗渗、抗裂等。最后,根据设计的配合比进行混凝土适配,并进行强度、耐久性等性能检验,确保混凝土的性能符合要求。在水工混凝土工程中,所采用的水泥强度等级通常需要达到 32.8 MPa 以上,并且每立方米混凝土中水泥的用量应不少于 300 kg。在选择混凝土的骨料时,设计人员需确保粗细骨料的比例适宜,并清除骨料中的土壤和杂质。混凝土材料的配比必须遵守国家规范和行业标准,尤其是在水利工程的施工阶段,配比的控制必须严格把控。冬季施工时,混凝土的水灰比应控制在 0.6 左右,若遇冻土条件,可降至 0.5 左右。添加防冻剂后,混凝土中的砂含量可减少约 3%。

2.3 混凝土拌制与运输

混凝土拌制要使用符合要求的拌和设备,以确保拌制的均匀性和稳定性。在拌制过程中要按照设计的配比进行,控制水泥、砂石、水、外加剂等材料的投放顺序和时间,确保混凝土拌制质量。在运输过程中,要使用适宜的运输车辆,避免长时间存放导致混凝土分层、离析或强度下降。同时,控制混凝土的运输时间,确保运输过程中的混凝土不分离、不漏浆、不受污染。为防止混凝土在拌制过程中提前凝结,必须先将骨料和水充分混合。施工管理人员需要在与混凝土拌制站

点的工作人员的沟通配合下,规划出最佳运输路径,以缩短运输时间至不超过 30 min。此外,还应采取有效的保温措施,防止混凝土在运输途中出现剧烈降温^[3]。

2.4 混凝土浇筑技术

混凝土浇筑技术是保证混凝土结构质量和性能的关键环节。混凝土浇筑应确保混凝土浇筑均匀、密实,以确保混凝土结构的质量和性能。在进行混凝土浇筑时,施工人员需注意控制浇筑的面积和速度,这样有助于减少混凝土热量的散失。在振动过程中使用振动器让混凝土得到均匀振动,并确保其与模具侧壁有足够的接触。震动速度应适宜,以尽可能保证混凝土材料的均匀性。在冬季施工,工程师应增加试验次数,对混凝土的抗冻性能进行测试,通常采用两个试块。测试后,工程师根据得到的数据,可实施有效的保温或加热养护措施,保证混凝土结构在既定时间内达到预定的强度要求。

2.5 施工温度控制

混凝土在浇筑和硬化过程中对温度有一定的敏感性,在施工过程中,要根据工程特点和气候条件进行温度控制,如在高温条件下采取降温措施,在低温条件下采取保温措施等。此外,还要注意及时调整施工措施,确保混凝土质量和性能不受温度影响。一是可以通过预冷手段来进行控制,施工人员可以在混凝土拌和阶段使用预冷骨料,以此来调节水化热。二是利用冷管法,在混凝土浇筑时减少硬化过程中带来的温度升高。施工人员可以根据具体的浇筑步骤,在预定位置预先布置冷水管,以此来实现对混凝土施工温度的有效管理,避免因水化热突然升高而对施工质量产生不利影响^[4]。

2.6 混凝土养护技术

混凝土养护应根据工程特点和设计要求进行,确保混凝土充分水化、强度发展正常。在混凝土养护过程中,要严格控制养护时间、养护温度和养护湿度等参数,确保混凝土充分硬化。针对不同季节施工也需要采取不同的养护措施,提高养护效果。在炎热的夏季,技术人员需留意高温对混凝土表层可能产生的不良后果。在这一过程中,施工队伍应执行定期的洒水护理工作,保证混凝土结构持续吸收水分。在冬季,技术人员应意识到低温可能会对混凝土浇筑质量造成不利影响,并实施有效的保温加温策略,防止混凝土因结冰而产生裂缝^[5]。

3 水利工程中的混凝土施工质量控制措施

3.1 加强原材料的质量控制

在水利工程中,原材料质量直接影响着结构安全与耐久。水泥作为混凝土的重要组成部分,其质量要求较高,必须符合国家标准,并通过进场检验确认无质量缺陷。水泥的抗压强度、细度及含水量等指标,必须通过专业检测手段进行评估,确保其符合设计要求。在砂石和骨料的选择上,粒径分布、级配情况及洁净度等都应符合技术规范。砂石中不得含有对混凝土有害的有机物及杂质,骨料的硬度和耐久性要求更为严格。进场的原材料应严格按照技术规范进行抽样检测,合格的原材料应有明确的检验合格证明,并建立完整的质量追溯体系。对于不合格的原材料,应及时剔除并替换^[6]。

3.2 完善施工过程中的质量监控

在浇筑前,应对施工现场进行全面检查,特别是钢筋绑扎、模板支撑、混凝土配合比等环节,确保符合设计要求。针对混凝土的配合比,应严格根据设计方案与材料实际情况进行调整,避免因配合不当导致质量问题。在进行浇筑时,需要严格控制浇筑顺序、浇筑速率及振捣方式,确保混凝土的密实度和均匀性。针对大体积混凝土施工,特别要注意温度控制,避免因温差过大导致裂缝,温控措施包括分层浇筑、浇筑间隔时间控制及温控养护。浇筑后,及时对混凝土进行覆盖养护,防止水分过快蒸发导致裂缝。施工现场的技术监控措施如应力监测和温控系统应当实时运行,利用传感器检测混凝土的应力和温度变化,保障混凝土强度和耐久性的正常提升,确保混凝土结构达到设计标准并维持长期稳定性^[7]。

3.3 加大混凝土强度与耐久性检测力度

针对混凝土强度,应采用回弹法和钻取法等常规检测手段。回弹法可以快速评估大范围区域的混凝土表面强度,而钻取试块法则通过实际取样进行抗压试验,获得更精确的强度数据。同时,强度检测的频率应根据工程的施工阶段及结构的重要性进行合理安排,确保每个关键节点都有充分的监控数据。对于耐久性检测而言,主要包括混凝土的抗冻性、抗渗性、抗化学腐蚀性等指标,需通过长期浸泡、冻融循环及化学试剂测试等方法进行全面评估。特别是在复杂环境下,如水库、坝体等部位,更应加强对混凝土长期性能的监测,确保其在恶劣条件下仍能维持稳定性^[8]。

3.4 提高施工人员的综合素质

针对施工人员的技术水平和操作规范,必须通过一系列措施进行系统性提升。在技术方面,施工单位应定期组织专业培训,强化混凝土施工技术的理论知识与实操技能,使员工了解混凝土配合比设计、浇筑技术、温控养护等施工要点,还要注重新技术和新工艺的学习,使其能够应对不断变化的施工环境与要求。同时,施工人员的质量意识需要进一步加强,定期开展质量管理和安全生产培训,提高其对质量控制标准和施工规范的认识。施工单位还应建立激励机制,通过绩效考核、岗位晋升等方式,促进员工不断提高自身的综合素质。通过这些措施,施工人员的技术水平、质量意识与管理能力得到提升,从而为整个工程的质量控制和施工进度提供有力保障。

4 结束语

水利工程混凝土施工技术及其质量控制是保障水利工程安全、可靠、耐久的关键。在施工过程中,必须重视每一个环节的技术规范和操作要求,严格执行质量控制标准,尤其是在浇筑前、浇筑中和浇筑后的全过程中加强监控,确保混凝土强度和耐久性满足水利水电工程的安全运行需求。未来,随着施工技术的进步和质量控制措施的创新,水利水电工程的施工水平将逐步提高,为水资源的合理利用和能源生产的可持续发展提供有力支持。

参考文献:

- [1] 蔡跃飞. 水利工程混凝土施工技术及其质量控制策略[J]. 工程与建设, 2024, 38(02): 412-413, 439.
- [2] 闫瑞. 水利工程建设中混凝土试验检测及其质量控制[J]. 工程建设与设计, 2024(06): 209-211.
- [3] 赵振忠. 水利大坝混凝土施工工程质量检测方法[J]. 云南水力发电, 2023, 39(11): 287-291.
- [4] 张国莉. 某水库工程混凝土防渗墙施工质量保证与安全管理措施[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(08): 105-106.
- [5] 徐琼祥. 试析水利工程混凝土施工技术及其设备质量控制[J]. 中国设备工程, 2023(03): 192-194.
- [6] 高歌. 水利工程混凝土施工技术及其质量控制策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022(34): 139-141.
- [7] 沈林. 水利水电工程中混凝土施工技术的应用分析[J]. 建筑与装饰, 2021(18): 130, 132.
- [8] 李灿荣. 混凝土施工技术在水利水电施工中的应用研究[J]. 中州建设, 2023(03): 34-35.

地基处理技术在水利水电工程中的应用研究

董 莹, 孙莹莹

(黄河河口管理局垦利黄河河务局, 山东 东营 257091)

摘 要 为解决水利水电工程中软弱地基承载力不足、沉降变形大及渗透稳定性差等问题, 本文围绕地基处理技术在该类工程中的实际应用展开系统研究, 分析不同类型地基处理方法的技术原理、适用条件及工程效果。通过归纳加固类、排水类、置换类及复合地基等主流处理技术, 提出针对性设计思路与质量控制要点, 强调多因素协同优化在提升处理效率与工程安全性方面的重要作用, 以期对水利水电工程的勘察设计、施工实施及后期监测管理提供参考。

关键词 地基处理技术; 水利水电工程; 加固类处理技术; 排水类处理技术; 置换类处理技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.018

0 引言

水利水电工程普遍处于地质条件复杂、环境约束严苛的区域, 地基稳定性直接影响主体结构的安全运行。随着工程规模扩大与荷载标准提升, 传统地基难以满足沉降控制与承载性能的双重要求。为保障工程性能及服役寿命, 需从工程实际出发, 深入探讨各类地基处理技术的适应性、工程性能及设计优化问题, 推动处理体系的系统化与高效化。

1 水利水电工程对地基处理的特殊需求分析

水利水电工程作为集防洪、发电、灌溉等功能于一体的重大基础设施, 其运行安全高度依赖地基的稳定性与承载性能。由于其构筑物具有结构体量大、荷载集中、工况复杂等显著特点, 地基处理不仅需满足高承载力和低变形的基本要求, 还必须兼顾渗透稳定性、长期变形控制及工程整体性协调等多重性能指标。尤其在水压力长期作用下, 地基土体易发生颗粒迁移、渗透破坏及劣化沉降, 进而诱发管涌、渗漏和整体失稳等灾害, 因而要求地基在力学强度、抗渗能力及微观结构稳定性方面显著提升。与此同时, 由于工程常处于高水位、软弱地基、复杂地质构造等特殊环境中, 需根据水文地质参数、地层分布特征及荷载作用方式, 精准选择地基处理方案, 确保土体物理力学性质得到系统改善^[1]。

2 地基处理技术分类及适用条件分析

2.1 加固类地基处理技术

加固类地基处理技术旨在通过改善土体结构、提高其力学性能和变形模量, 以满足工程对承载力和稳定性的要求。该类技术主要包括高压喷射灌浆、劈裂

灌浆、深层搅拌、注浆固结等手段, 适用于存在承载力不足、结构松散或存在软弱夹层的地基土层。高压喷射灌浆通过高速射流将水泥浆液喷入地基土中, 在高能流体剪切与搅拌作用下形成强度较高的固结体, 可将原状软土的抗压强度从原本的 50 ~ 100 kPa 提升至 300 ~ 500 kPa, 显著增强其承载能力和整体稳定性。劈裂灌浆适用于裂隙岩体与砂卵石地基, 通过控制浆液扩散路径和注浆压力 (一般控制在 0.5 ~ 1.2 MPa), 实现定向加固与填隙补强, 显著提高地基的均匀性与抗渗性能。深层搅拌则适用于高压缩性土层, 其通过机械搅拌装置将水泥类固化剂均匀混合入土体, 形成具有一定强度与刚度的复合土柱, 常见单桩抗压强度可达 12 MPa, 变形模量提升数倍。

2.2 排水类地基处理技术

排水类地基处理技术主要通过加速地基土体中孔隙水的排出过程, 促使土体固结沉降并增强其有效应力, 从而提升整体稳定性与抗剪强度, 适用于饱和软土、高含水率粉质土及淤泥质土层。典型方法包括真空预压、堆载预压联合处理、塑料排水板和砂井布设等。真空预压技术通过封闭膜系统和抽真空装置, 在土体内部建立 -80 ~ -90 kPa 的负压场, 使孔隙水产生定向流动, 配合预压荷载作用可在 90 ~ 180 天内将地基沉降度控制在设计值内, 同时将初始孔隙比由 0.9 降低至 0.6 以下。塑料排水板布设时通常间距控制在 1.0 ~ 1.5 m 之间, 深度依据压缩层厚度确定, 一般不超过 20 m, 通过有效缩短排水路径, 显著提升软土层的固结速率与均匀沉降控制能力。砂井处理适用于渗透性较强的土层, 可构成排水通道, 配合表层堆载实现快速沉降, 常见固结系数提升 1.5 ~ 2 倍^[2]。

2.3 置换类地基处理技术

置换类地基处理技术通过将原位承载力不足或压缩性过大的土体部分或全部移除,填入强度更高、压缩性更低材料,从而构建力学性能优越的承载层。该类技术适用于深厚软土、高有机质土及流塑状淤泥层,常用方法包括强夯置换、砂石桩挤密、碎石垫层与灰土挤淤等方式。强夯置换通常采用 6~25 t 夯锤,夯击能量控制在 2 000~6 000 kN·m,能够将原位土体挤压至侧方,同时形成嵌入性良好的置换体,在夯击深度范围内显著提高地基承载力,压缩模量可由原始的 36 MPa 提升至 20~30 MPa。砂石桩法通过在软土中沉设成孔设备,将砂砾料填入并夯实形成柱状结构,单桩承载力常达 250~400 kN,具备良好的排水与加固双重作用,适于承受中等荷载并控制沉降速率。碎石垫层技术主要用于浅层地基,通过人工或机械铺设碎石材料构建刚性承载平台,有效降低地基整体沉降量。

2.4 复合地基技术

复合地基技术通过在天然软弱地基中构建桩—土共同承担荷载的复合体系,以实现承载力增强、沉降控制及变形协调等综合加固目标。该技术适用于软土层厚度较大、荷载水平较高且沉降敏感性强的工程区域,常用形式包括 CFG 桩复合地基、水泥土搅拌桩复合加固、振冲碎石桩复合地基等。CFG 桩(Cement Fly-ash Gravel)由水泥掺合料和碎石混合形成,桩径常为 400~800 mm,单桩承载力可达 800~1 200 kN,复合地基的整体变形模量通常提升至 25~40 MPa,有效控制不均匀沉降并提升地基稳定性。水泥土搅拌桩复合技术适用于高含水率土层,通过深层搅拌机械将水泥类固化剂混入原状土体中形成柱状固结体,常规 28 天无侧限抗压强度达到 1.5~3.0 MPa,具备良好的抗渗与抗剪性能。振冲碎石桩适合渗透性中等至高的砂质地基,其桩体填料粒径控制在 20~40 mm,布桩间距通常为 1.5~2.5 m,可形成排水、加密与承载复合作用,显著提升基础整体刚度^[3]。

3 地基处理设计理论与关键参数分析

3.1 地基处理设计的基本原则

地基处理设计需在确保结构安全、控制沉降变形、满足耐久性要求的前提下,实现处理工艺的合理性与经济性的最优平衡。设计过程中应充分遵循“因地制宜、协同工作、结构匹配、系统优化”四项核心原则。在不同地质条件与荷载体系下,应根据地基土的工程性质、水文地质环境及结构对变形和承载性能的敏感程度,选择具备适应性性与针对性的处理技术。荷载传递路径必须保持清晰,地基与上部结构之间的接触界

面应具备稳定的应力协调能力,确保在工况变化及施工后期沉降阶段内地基系统性能不发生突变。对于软弱地基,需重点考虑其应力—应变非线性特征和固结延迟行为,在设计中引入时间效应修正模型,以控制次生沉降对结构的不利影响。应采用设计—施工—监测相结合的闭环机制,保证处理效果动态可控。施工扰动影响、结构附加荷载、地下水位变化等环境因子也必须纳入设计边界条件。

3.2 关键设计参数与评价指标

地基处理设计的科学性依赖于对关键参数的准确选取与合理分析,主要涉及地基承载力特征值、压缩模量、变形模量、渗透系数、固结系数、桩土应力比等控制指标。在承载力设计中,应根据标准贯入试验(N 值)、静力触探(qc 值)或室内三轴剪切试验结果,结合岩土本构模型,计算地基土的极限抗剪强度与设计特征值。压缩模量通常通过压板载荷试验确定,其数值范围依土层类型而异,软粘土常为 15 MPa,粉质黏土为 5~15 MPa,砂类地基可达 30 MPa 以上,是评估沉降量和变形速率的重要依据。渗透系数决定了软土中超孔隙水压力的消散速度,一般需通过固结试验获得,饱和软土渗透系数多为 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ m/s;固结系数则用于预测土体压缩沉降的发展过程,常采用 Terzaghi 一维固结理论进行估算。在复合地基设计中,桩土应力比是衡量荷载分配效率的关键指标,合理范围一般控制在 2.5~4.0 之间,确保桩体承载与土体协同变形^[4]。常见地基类型的关键设计参数与典型取值范围如表 1 所示。

4 地基处理施工技术与质量控制

4.1 施工工艺流程与设备配置

地基处理施工的技术路径需依据设计要求、地质条件及工程规模进行系统组织,确保处理效果稳定、结构性能达标。典型工艺流程包括场地清表与放样、地基预处理、主体施工、验收与整平四个阶段。各类处理技术均需配备与其匹配的高精度施工设备,以确保工艺参数控制的连续性与精度。以深层搅拌法为例,施工设备多采用双轴或多轴搅拌桩机,钻进深度控制精度需小于 ± 0.1 m,搅拌速度保持在 30~60 rpm,注浆速率常控制在 30~50 L/min,固化剂掺量需根据土层性质调配在 15%~25%。在高压喷射灌浆施工中,需使用三重管喷射系统,注浆压力应稳定维持在 25~30 MPa,旋转速度约为 10~20 rpm,提升速度不得高于 20 cm/min,以确保固结体成型完整。排水板施工需配置液压插板机,插入深度误差应控制在 ± 5 cm 以内,布设间距需严格依设计图控制在 ± 10 cm 范围内。施

工过程中必须同步进行设备参数记录与动态调整，确保所有工艺步骤按规范执行^[5]。

表 1 常见地基类型的关键设计参数与典型取值范围

参数名称	常见地基类型	典型取值范围	测试方法 / 依据
承载力特征值	软粘土	50 ~ 120 kPa	室内三轴试验 / 标贯试验
	粉质黏土	120 ~ 200 kPa	
	中密砂土	180 ~ 300 kPa	
压缩模量 (Es)	软粘土	1 ~ 5 MPa	静力触探 / 圆锥贯入试验
	粉质黏土	5 ~ 15 MPa	
	中密砂土	20 ~ 40 MPa	
渗透系数 (k)	饱和软土	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$ m/s	固结试验
固结系数 (Cv)	饱和粘性土	0.1 ~ 5 m ² /年	固结分析
桩土应力比 (η)	复合地基 (CFG 桩)	2.5 ~ 4.0	数值分析 / 静载试验反演
变形模量 (E)	砂类地基	25 ~ 50 MPa	地基变形观测 / 回弹模量试验

4.2 质量控制要点与监测技术

地基处理的质量控制贯穿施工全过程，需依托标准化流程、参数化指标与多源监测手段协同实施，确保各项工程指标满足设计要求。关键控制环节包括处理深度、加固范围、材料配比、工艺参数一致性及成品验收标准的落实。以搅拌桩为例，入土深度必须达到设计值 ±0.2 m 以内，桩体直径允许偏差不大于 ±5%，桩体无侧限抗压强度 28 天龄期应达到设计强度值的 95% 以上。在灌浆类处理技术中，应严格控制注浆压力、流量与浆液稠度，灌浆过程采用分段注入法，每段注浆体积误差不得超过 ±10%，浆液回流率需低于 30%，以防止因过量注浆引发土体扰动或上浮现象。质量监测主要依靠原位检测与物探技术，如动探测试、静力触探、钻芯取样、超声波检测等；其中，动探标准贯入次数应与加固前对比提升 50% 以上。成桩检测中，采用单桩静载荷试验或平板载荷试验评价承载力及变形模量，数据采集精度需满足 0.01 mm 位移精度。监测结果应及时反馈至施工控制系统，通过闭环调整施工参数，实现全过程质量可控、处理效果可追溯的技术闭环体系。

4.3 环境因素对施工的干扰与对策

地基处理施工过程常受多种环境因素干扰，包括地下水位变动、降雨条件、地温波动、地层扰动与周边结构敏感性等，这些因素对施工质量、工艺参数控制及设备运行稳定性构成显著挑战。地下水位变化会导致孔隙水压力动态上升，影响灌浆扩散路径与固结效果，需在施工前进行地下水位监测并设置导排系统以降低水位至安全标高以下，常规控制深度为施工底面以下 0.5 ~ 1.0 m。持续降雨可能引发场地软化与设备沉陷，应配置临时排水沟、防渗膜与碎石垫层，确保场地稳定性。地层扰动对浅层置换与挤密施工影响显著，施工时应采用逐段跳打、等距交错布设方式，避免集中扰动形成软弱夹层或扰动区。冬季施工时，地温降低会影响固化剂反应效率与桩体强度增长，应提高水泥掺量 10% ~ 15%，并选用低温型添加剂确保水化反应顺利进行。邻近结构施工应采用低噪声、低振动设备，并设置隔振沟或监测装置，控制振速不超过 2 cm/s，以防止诱发邻近建构物裂损。针对各类环境干扰因素，应制定专项应急技术方案与动态响应机制，确保施工过程稳定性与处理效果一致性^[6]。

5 结束语

地基处理技术在水利水电工程建设中发挥着不可替代的基础支撑作用，其效果直接关系到工程整体的安全性、耐久性与运行稳定性。面对复杂的地质条件与高标准的结构要求，需科学选择并合理组合各类地基处理方法，以实现承载力提升、渗透控制与沉降协调等目标。持续优化施工工艺与提升设计精度，是推动水利水电工程高质量发展的关键路径。

参考文献:

[1] 刘思源. 地基处理技术在水利水电工程中的应用探讨 [J]. 水上安全, 2025(02):151-153.
[2] 陈胜森. 防渗处理施工技术在水利水电工程中的应用 [J]. 新农民, 2024(04):40-42.
[3] 罗晓群. 不良地基处理施工技术在水利水电工程中的应用 [J]. 四川建材, 2021, 47(04):124-125.
[4] 朱宗洲. 水利水电工程施工中不良地基处理技术分析 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(23):114-116.
[5] 卢志斌. 水利水电工程施工中不良地基处理技术分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(10):80-82.
[6] 郭海龙. 浅析水利水电工程施工中有关不良地基处理技术 [J]. 中华建设, 2023(09):178-180.

波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术及应用

孙佳宇

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 随着我国现代化基础设施建设的不断完善和深入推进, 桥梁工程建设规模持续扩大。以标准跨径的预应力钢筋混凝土梁桥为主, 工程建设要求不断提升, 不仅要保证超高建设质量, 还要求高效的施工效率、有序的项目管理、绿色环保的施工技术。为了提高建造效率、保证工程质量、节约使用资源, 本文聚焦波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术, 结合 G5 京昆高速公路绵阳至成都段扩容项目清江互通 C 匝道桥, 分析了该技术在结构性能、经济性和环境适应性等方面的优势, 以期为类似桥梁工程建设提供有益参考。

关键词 波折型钢—混凝土组合桥面板; 桥梁工程; 钢板制造; 混凝土浇筑; 环境保护

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.019

0 引言

G5 京昆高速公路绵阳至成都段扩容项目(以下简称“成绵扩容项目”)是交通运输平安百年品质示范工程, 是以大力推动智慧高速公路建设为指导思想, 践行高质量发展新理念, 推进精品建造和精细管理, 打造优质耐久、经济高效、绿色集约、智能先进、安全可靠的现代化高速公路。本文通过介绍 G5 京昆高速公路绵阳至成都段扩容项目清江互通 C 匝道桥的建设, 分析波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术在桥梁工程中的应用及特点。

1 工程概况

清江互通 C 匝道桥第三联为四孔桥, 主梁由预制 I 型梁+波折型钢—混凝土组合桥面板+横隔板组合而成, 结构型式为主梁简支、桥面连续。其中, 波折型钢—混凝土组合桥面板底板为 5 mm 厚的波折型耐候钢板, 与现浇钢筋混凝土板形成最厚位置 24 cm、最薄位置 14 cm 的组合桥面板, 平均厚度 19 cm。波折型断面平行于路线设计线。波折型底钢板波高 10 cm, 波口宽 20 cm、波底宽 10 cm, 波间距 30 cm, 由平面薄板轧制成型。桥面板采用掺入多锚点、带压痕钢纤维的 C40 混凝土。现场完成波折型底钢板架设后, 吊放钢筋骨架, 最后浇筑 C40 钢纤维混凝土, 形成组合桥面板。波折型钢底板通过端封板与先张预制 I 梁顶板内的预埋钢板现场焊接相连。桥面铺装采用 10 cm 厚钢纤维混凝土; 待桥面板混凝土浇筑完成、检查平整度满足要求后再铺装防水粘结层, 最后铺装改性沥青混凝土面层。

2 波折型钢—混凝土组合桥面板的构造特点

在波折型钢—混凝土组合桥面板中, 钢板起到了承载荷载和提供刚性的作用。波折型钢板是一种具有

特殊形状的钢板, 其特点是在长度方向上呈波浪状折叠。该结构使得钢板具有较高的刚度和强度, 并能够有效分散荷载^[1]。常用的波折型钢板材料包括普通碳钢、高强度钢和耐候钢等。其中, 高强度钢具有较高的屈服强度和抗拉强度, 能够减小钢板厚度并提高桥面板的承载能力。

混凝土是波折型钢—混凝土组合桥面板的另一个重要组成部分。混凝土材料具备良好的耐久性、抗裂性和抗压强度, 以确保桥面板的长期稳定性和承载能力。常用的混凝土材料包括普通混凝土、高性能混凝土和纤维增强混凝土等。其中, 高性能混凝土具有较高的抗压强度和耐久性, 可满足桥面板在重载、频繁交通以及恶劣环境下的使用要求。

型钢—混凝土的组合作用: 波折型钢板与混凝土层之间形成了紧密的粘结作用, 钢板起到了刚性骨架的作用, 而混凝土则能够分散荷载并保护钢板免受腐蚀和损伤。

多点支承方式: 波折型钢—混凝土组合桥面板采用多点支承的方式, 使得荷载能够均匀分布到桥梁结构上, 减小了集中荷载对桥面板的影响^[2]。

3 波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术

3.1 钢板制造工艺

1. 材料准备: 选择合适的波折型钢板材料, 包括普通碳钢、高强度钢或耐候钢等, 并进行材料的质量检测和确认。

2. 钢板加工: 采用折弯或滚压工艺对钢板进行加工, 形成波浪状的折叠结构, 并确保加工精度和尺寸符合设计要求。

3. 钢板防腐处理：对钢板表面进行除锈和防腐处理，以提高其耐久性和抗腐蚀性能。

3.2 混凝土浇筑工艺

1. 混凝土配合比设计：根据桥梁的设计要求和使用寿命，确定合适的混凝土配合比，包括水灰比、胶凝材料种类和掺合物等。

2. 混凝土浇筑模式：根据桥面板的尺寸和形状，选择合适的浇筑模式，可以采用预制板浇筑或现场浇筑的方式。

3. 浇筑工艺控制：在混凝土浇筑过程中，控制浇筑速度、振捣方式和浇筑温度等参数，确保混凝土的均匀性和密实性^[3]。

3.3 连接方式和施工工艺

1. 桥面板与桥梁结构的连接：根据设计要求和桥梁结构的特点，选择合适的连接方式，包括焊接、螺栓连接或粘接等，并进行连接的质量检测。

2. 桥面板的安装和拼装：根据桥梁的几何形状和跨度要求，对波折型钢—混凝土组合桥面板进行现场安装和拼装，确保其与桥梁结构的协同工作。

3. 施工工艺控制：在施工过程中，控制施工顺序、工艺参数和质量要求，确保施工的安全性和质量可控。

3.4 施工质量控制

桥面板混凝土中掺入的钢纤维，采用多锚点带压痕的短钢纤维。应满足以下要求：（1）采用多锚固点的碳素冷拔钢丝切断型，表面应有明显的压痕，其长度应为 30 ~ 35 mm，直径为 0.6 ~ 0.9 mm，抗拉强度不低于 600 MPa。（2）钢纤维表面不得有任何杂质，粘连片、铁屑等同类杂质含量必须低于总重量的 1.0%。

（3）尺寸偏差不应超过公称值的 $\pm 10\%$ ，长径比偏差应在 $+15\%$ 以内，单根重量应在公称重量值的 $+15\%$ 以内。

（4）具有较好的外观形状，形状合格率应大于 90%。

（5）具有较好的弯折性能，应在一次弯折 90° 后不发生断裂现象。（6）具有较好的分散性，应在混凝土中不发生变形、结团等现象。

除上述明确要求外，对于一般施工工艺流程还应制定质量控制计划，包括材料检验、施工工艺控制、质量检测和验收等环节，确保桥面板施工质量符合设计要求和标准规范。同时，在施工过程中，进行桥面板的监测和测量，对施工质量进行实时监控，如板面平整度、连接缝间距等，并及时调整施工工艺，以确保施工质量的稳定和一致性。

3.5 安全文明施工

相关人员应充分重视安全措施，按照有关法律、法规、行业技术标准等设置安全设施，制定施工安全计

划和措施，包括人员防护、施工现场安全防护、材料存储和运输安全等，确保施工过程中的人员安全。在施工过程中应做好以下几点：（1）施工期间应提前做好好路段施工组织，减少施工对当地居民和厂矿的影响。

（2）施工时，应设置安全围栏、安全警示灯及指示牌。（3）所有施工人员须接受三级安全教育，特种作业人员（电工、焊工、起重机械操作等）必须持证上岗，每日开展班前安全交底会，针对当日作业内容进行风险分析，建立人员安全考核档案，定期组织应急演练。

（4）施工机械进场前须经第三方检测机构验收合格，临时用电系统执行 TN-S 三级配电两级保护，电缆敷设采用架空或套管保护。（5）编制专项应急预案，成立应急小组并公示 24 小时值班电话，现场设置医疗急救箱，与最近医院建立绿色通道。

3.6 环境保护

1. 施工期间对噪声的防治措施。本桥处城镇居民密集区内，在施工时要注意严禁高噪声设备在休息时间（中午或夜间）作业。

2. 施工期间对大气污染防治措施。要注意在施工期间的大气污染防治，尽可能减少粉尘对周围环境的影响。施工期间运输车辆行驶路线应尽量避免居民点和其他敏感点，并采取冲洗进出施工场地的车辆、对运输车辆进行遮盖等措施，减轻由于施工车辆运行导致的二次扬尘等污染。在施工过程中对可能造成扬尘的搅拌、装卸等施工现场，要有定时洒水等防护措施，以防止较大扬尘蔓延。特别注意不能随意倾倒淤泥垃圾。

3. 施工期间综合环保措施。（1）施工前应充分做好各种准备工作，详细调查，互相配合，对可能产生的影响做出准确、充分的分析，并做好应急准备工作。

（2）施工时，应设置安全围栏、安全警示灯及指示牌。（3）配合好交管部门的工作，确保施工期间城市交通的畅通。（4）运土车辆必须进行密封和覆盖，避免沿路抛洒；施工单位应对车辆进行每车次清洁。（5）施工中的弃土应及时清运至指定地点。（6）尽量使用低噪声的机械设备和施工工艺，限制夜间高噪声、振动施工。（7）避免或减小桥梁施工对河水的污染。（8）桥梁施工时尽量避免破坏原有植被。（9）施工中产生的各种污水应经过沉砂池沉淀后及时排出。

4 波折型钢—混凝土组合桥面板在桥梁工程中的应用

波折型钢—混凝土组合桥面板在成绵扩容项目清江互通 C 匝道桥中的实际应用，在结构性能上表现非常出色。首先，该组合结构的波折型钢板具有较高的

刚度和强度,能够有效分担桥梁荷载,确保桥梁的稳定性和安全性,提高了桥面板的抗弯刚度和承载能力,使桥面板能够承受较大的动态荷载和交通载荷。其次,混凝土与钢板的结合紧密,形成了一体化的桥面结构,具有较好的耐久性和抗裂性能,钢板的防腐处理和混凝土的配合比例优化确保了组合桥面板的长期抗腐蚀性能。混凝土层能够有效保护钢板不受外界环境的侵蚀,并提供了较好的抗裂性能。此外,波折型钢板的特殊形状设计有助于排水,减少积水对桥梁结构的侵蚀和损害。

在经济效益方面,由于波折型钢板的轻量化设计,减少了桥梁自重,降低了基础和支座的要求,节省了建设材料和成本^[4]。其次,由于该组合结构的模块化设计和工厂预制加工,施工过程相对简化,减少了施工时间和劳动力成本,这对于加快桥梁工程的建设速度和降低施工期间的交通干扰具有重要意义^[5]。此外,钢板的表面防腐处理和混凝土的抗裂性能使得桥面板具有较好的耐久性,减少了维护工作的频率和成本,由于该组合结构的模块化特性,可以快速更换受损的部件,降低了维护过程对交通的影响和维护费用的支出,较长的使用寿命和较低维护需求进一步降低了维护和修复成本,为投资者带来了显著的经济回报。

在环境适应性方面,首先波折型钢—混凝土组合桥面板采用波折型钢板作为主要结构材料,相对于传统桥面板中使用的大量钢筋,其钢材资源利用更为节约。在波折型钢板制造过程中,可以通过合理设计和优化切割方式减少钢材的浪费,同时波折型钢板具有较高的可再生性,可以进行回收再利用。其次,波折型钢—混凝土组合桥面板中的混凝土主要用于填充波折型钢板之间的空间,减少了传统桥面板中大量使用的混凝土用量,采用波折型钢—混凝土组合结构,可以最大程度地减少混凝土的使用,从而降低了对混凝土资源的需求。最后,波折型钢—混凝土组合桥面板在施工阶段相对于传统桥面板具有较低的能耗和碳排放,这主要归因于波折型钢板的制造过程相对简化,减少了钢筋的使用和混凝土的浇筑量。此外,由于波折型钢—混凝土组合桥面板的较长使用寿命,减少了更换桥面板的需求,从整体上降低了资源消耗和能耗。

5 波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术的发展方向

成绵扩容项目清江互通 C 匝道桥的波折型钢—混凝土组合桥面板应用案例为该结构技术的发展和推广提供了有力的实证和参考。其优异的结构性能、耐久

性表现和经济效益使得波折型钢—混凝土组合桥面板成为未来桥梁工程中的重要选择之一。该组合结构在桥梁工程中具备广阔的应用前景,并为未来类似工程提供了宝贵的经验和借鉴。

在技术改进和优化方面,既可以研究和开发新型材料以提高波折型钢—混凝土组合桥面板的性能和耐久性^[6],也可以通过结构设计和优化进一步提高波折型钢—混凝土组合桥面板的承载能力和刚度实现更轻、更强的结构,还可以改进施工工艺和连接方式,提高施工效率和质量控制水平,降低施工成本和时间。

在标准规范制定与推广方面,制定与波折型钢—混凝土组合桥面板相关的设计规范、施工规范和检测评价标准,规范化该技术的应用和推广,加强对波折型钢—混凝土组合桥面板技术的宣传和推广,增加相关工程的示范和应用案例,提高行业对该技术的认可度和接受度。

6 结束语

波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术在桥梁工程中的应用具有结构性能稳定、耐久性好、施工工期短、维护成本低、能耗少、资源再利用率高等优势,但仍存在技术应用推广不足、标准规范不完善等问题。为了进一步推动波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术的应用和发展,建议开展以材料性能、结构性能、施工工艺、标准规范制定与推广为重点方向的进一步研究。波折型钢—混凝土组合桥面板施工技术具有较高的应用潜力和发展前景,通过进一步的研究和探索,以解决现有的问题和挑战,推动该技术在桥梁工程中的广泛应用,为桥梁工程的建设和发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 杨静,郑志兵,赵鹏,等.波折型钢—混凝土组合桥面板的抗震性能研究[J].建筑材料学报,2017,20(03):446-453.
- [2] 陈新明,张贤民,徐波,等.波折型钢—混凝土组合桥面板的试验研究[J].交通标准化,2018,38(07):129-133.
- [3] 周鹏,王立杰,陈浩杰,等.波折型钢—混凝土组合桥面板施工工艺研究[J].交通科技与经济,2021,40(04):134-139.
- [4] 房永祥,任更锋.钢折板—混凝土组合桥面板力学性能优化研究[J].桥梁建设,2023,53(02):89-94.
- [5] 陈建军,张庆龙,刘文涛,等.波折型钢—混凝土组合桥面板的力学性能研究[J].公路交通科技,2020,37(11):68-72.
- [6] 郭敏,张静,任伟新.波形钢—混凝土组合桥面板受力性能研究[J].公路交通科技,2022,39(05):45-50.

复杂厚砂砾石覆盖层多护筒桩基 施工质量控制关键技术研究

袁铨莲

(四川道路桥梁建设集团有限公司海外分公司, 四川 成都 610000)

摘 要 大型跨江桥梁、复杂山区隧道及城市互通立交等工程对桩基础施工技术要求较高, 钻孔灌注桩以其独特的优点在桥梁桩基施工中得到了广泛的应用。为控制灌注桩的垂直度和成孔桩径, 需埋设钢护筒, 但在深厚砂卵石地层施作护筒难度大, 存在砂砾石塌陷造成的安全、质量隐患, 以及护筒拔出时会对桩头质量造成不良影响。针对深厚砂卵石覆盖层中桥梁桩基施工易塌孔、成孔质量差及护筒拔除影响桩头完整性的技术难题, 本研究依托 G5 京昆高速公路绵阳至成都段扩容项目清江互通式立交工程, 系统分析了复杂厚砂砾石覆盖层多护筒桩基的施工风险与质量影响因素, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 砂砾石; 桥梁桩基础; 钻孔灌注桩; 质量控制

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.020

0 引言

随着高速公路与大型互通立交建设的不断发展, 钻孔灌注桩凭借其承载力高、适应性强的特点, 在深厚覆盖层地区得到广泛应用。桥梁桩基础作为交通基础设施的核心承载结构, 其施工质量直接影响到工程的安全性和耐久性。然而, 在砂砾石地层中, 松散的地质结构、高地下水位及动态施工荷载等因素导致成孔过程中塌孔频发、孔壁失稳及沉渣超标等问题, 严重制约桩基施工效率与成型质量。传统单护筒工艺因护壁深度不足、抗扰动力弱, 难以有效应对复杂地层的动态变形与塌孔风险^[1]。为此, 本研究以 G5 京昆高速公路绵阳至成都段清江互通立交工程为依托, 针对砂卵石覆盖层特性, 提出多护筒全跟进施工工艺。通过双护筒协同护壁、动态泥浆调控及精细化操作参数优化, 系统解决护筒埋设与拔除过程中的技术瓶颈, 旨在突破复杂地层桩基施工的质量控制难题, 为类似工程提供理论与实践参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

G5 京昆高速公路绵阳至成都段扩容项目 K45+690 ~ K130+033.406 段, 起点位于德阳中江县黄鹿镇, 止于成都市第一绕城高速公路, 全程 86.343 km。项目为双向 8 车道高速公路技术标准, 主线采用设计速度 100 km/h 和 120 km/h, 路基宽度 41.0 m、41.5 m、42 m 三种型

式。清江互通式立交 (K99+940 ~ K101+265) 位于成都市金堂县官仓街道办, 为全新建单喇叭式立交桥, 其主线桥全长 1 325 m, 桥面净宽 2×20.6 m, 桥梁下部结构设计为桩基础 + 柱式墩, 上部结构为采用预应力砼简支小箱梁、T 梁和钢混组合梁。

1.2 地质概况

桥区位于四川省东北部, 属冲积平原地貌区, 整体地形平缓, 桥梁跨越冲积平原, 多垦为旱地、水田, 局部修建乡村道路及民房。区内海拔约 448 ~ 453 m。场地出露及钻探揭露的地层为新生界第四系全新统人工填土层 (Q_4^{ml})、中下段冲积层 (Q_4^{1+2al})、上更新统中段冲积层 (Q_3^{2al}) 及中生界白垩系上统灌口组 (K_{2g}) 地层, 现分述如下:

1. 第四系全新统人工填土层 (Q_4^{ml})。该层于桥址区河堤、道路及民房填筑区, 以粉质粘土、卵石、细砂为主组成, 厚度约 0.7 ~ 1.0 m。

2. 第四系全新统中下段冲积层 (Q_4^{1+2al})。该层于桥址区地面表层分布, 以粉质粘土、粉土、粉砂为主, 厚度约 1.0 ~ 6.0 m。

3. 第四系上更新统中段冲积层 (Q_3^{2al})。该层主要分布于场地冲积平原, 主要为含卵石细砂、卵石等, 厚度约 5.0 ~ 15.0 m。

4. 中生界白垩系上统灌口组 (K_{2g})。根据钻孔探测结果和地面调查, 现场裸露和下伏地层为粉砂岩和砾岩。

2 复杂厚砂砾石覆盖层特点

2.1 与工程相关的各地层工程性质评价

1. 第四系全新统人工填土层 (Q_4^{ml})。人工填土: 分布于桥址区河堤、道路及民房填筑区, 厚度较小, 稍密, 承载力低, 不能作为桥梁桩基础持力层。

2. 第四系全新统中下段冲积层 (Q_4^{1+2al})。

(1) 粉质粘土: 分布于大桥所跨大部分区域, 厚度较小, 承载力低, 不能作为桥梁桩基础持力层。

(2) 粉土: 分布于大桥所跨局部区域, 厚度较小, 稍密, 承载力低, 不能作为桥梁桩基础持力层。

(3) 粉砂: 灰色, 主要由粉砂、圆砾组成, 稍密, 饱和, 分布不均, 承载力低, 属中等液化土, 不能作为桥梁桩基础持力层。

3. 第四系上更新统中段冲积层 (Q_3^{2al})。

(1) 含卵石细砂: 灰褐色, 以细粒为主, 稍密~中密, 饱和, 分布不均, 承载力低, 不能作为桥梁桩基础持力层。

(2) 砾砂: 灰褐色, 以粗粒为主, 稍密, 饱和, 分布不均, 承载力低, 不能作为桥梁桩基础持力层。

(3) 卵石: 主要成分为卵石、少量细砂及圆砾, 中密, 饱和, 承载力较高, 可以作为桥梁摩擦桩桩基础持力层。

4. 中生界白垩系上统灌口组 (K_{2g})。由粉砂岩、砾岩构成, 强风化带岩体较破碎, 岩质极软, 承载力低, 不宜作为桥梁基础持力层; 中风化之粉砂岩, 属较软岩, 稳定性好, 承载力较高, 可作为桥梁基础持力层。中风化之砾岩, 属较软~较硬岩, 稳定性好, 承载力较高, 可作为桥梁基础持力层^[2]。

2.2 结论及施工建议

场地覆盖层厚度较大, 以粉质粘土、粉土、粉砂, 细砂, 圆砾及卵石为主, 桩基施工会发生塌孔, 需加强排水护壁措施。

3 多护筒桩基施工概述

3.1 施工方案选择

本段内桥梁桩基共有 402 根, 其中桩径 $\Phi 1.5$ m 14 根, 桩径 $\Phi 1.8$ m 346 根, 桩径 $\Phi 2.0$ m 42 根。钻孔灌注桩主要采用旋挖钻成孔的方式, 钻孔在穿越粉砂、细砂、砾砂层等地层时, 受结构松散、地下水位高、抗剪强度较差的影响, 特别容易发生潜蚀、塌孔等现象, 这会造成扩径、超方、泥浆含砂量高、沉渣层过厚等施工质量问题, 严重时会造成桩孔局部塌陷或整体坍塌, 引发埋钻的严重后果^[3]。针对复杂厚砂砾石覆盖

层的处理, 本项目采用了多护筒全跟进式施工的方案, 在成桩质量上取得了良好的效果^[4]。

3.2 施工方法 (以 1.8 m 桩径为例)

本段采用双护筒方案, 外侧护筒直径为 2.2 m, 长 7 m, 起稳定土体作用。内侧护筒直径为 2.0 m, 长 12 m, 为施工全跟进式护筒, 长度直至强风化粉砂岩层。施工前先下 2.2 m 外护筒用于稳定土体, 旋进过程中再实时跟进直径 2.0 m 内护筒。

内钢护筒宜采用 Q345 钢板卷制, 厚度 12 mm, 沿长度每隔约 3 m 间距在护筒外壁增设一道宽 20 cm 厚度 10 mm 的加强环箍, 并与护筒外壁贴角焊接; 外钢护筒宜采用 Q345 钢板卷制, 厚度 12 mm, 沿长度每隔约 3.14 m 间距在护筒外壁增设一道宽 20 cm, 厚度 10 mm 的加强环箍, 并与护筒外壁贴角焊接。具体尺寸如图 1、图 2 所示。

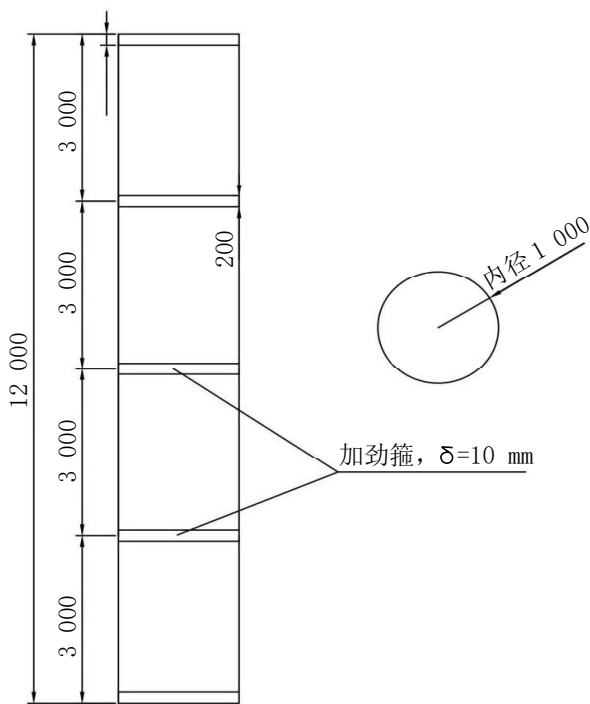


图 1 内护筒尺寸示意图

钢护筒制作完成后, 应验收其内壁接头顺适度、护筒矢圆度、护筒全长直线度等指标内容是否满足要求。护筒跟进采用震动下锤机进行。护筒起拔时, 利用震动锤将护筒震松, 再配合 75 t 吊车拔出。旋挖钻进过程中保持合理的孔内超压水头, 必要时向孔内补水, 以确保成孔质量。在桩位处设置定位及导向架, 护筒顶高出堰顶面 0.3 m, 护筒的内径应大于桩基直径 200 mm, 在打入过程中实时检查, 护筒位置应埋设

正确稳定,护筒中心和桩位中心偏差不得大于50 mm,倾斜度的偏差不大于1%。待内护筒全跟进至强风化粉砂岩层稳固后,即可按旋挖钻孔桩常规施工工艺进行,本文不再赘述。

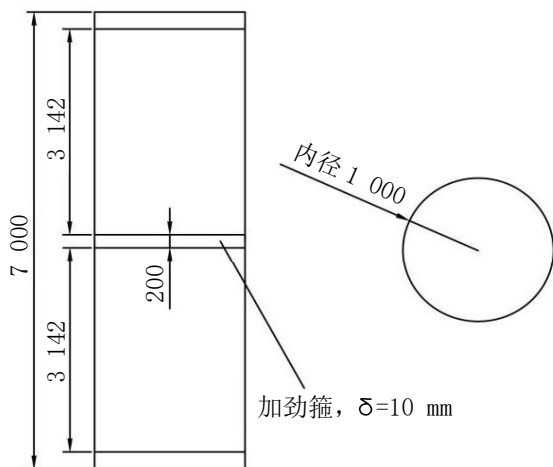


图2 外护筒尺寸示意图

3.3 施工注意事项

1. 多护筒全跟进式施工工艺主要是为了解决复杂后砂砾石覆盖层容易出现的塌孔问题,其作用主要在于防止初始塌孔的形成以及防止发生连续塌孔的恶性循环^[5]。

2. 在施工过程中,除了依靠钢护筒的防护外,还需要注意泥浆的水位高度,通常情况下泥浆液面要保持在地下水水位以上2~3 m。如遇到原地面高程不够的情况,可采用增加埋设的护筒长度或在桩孔周围设置粘土坝的方法。因为软土、砂土层和砂砾石均为易塌孔地层,从开孔到成孔的整个钻孔过程中,机械操作人员也需要时刻注意操作方式,必须做到提钻慢、放钻以及钻进转速慢的“三慢”原则,减少对孔壁的冲刷和扰动,给泥皮的形成留出足够的时间,充分发挥泥浆护壁的作用。

3. 安排专职辅助工时刻观察泥浆液面高度,当液面突然下降,出现大量气泡涌出时,可确定发生了局部塌孔,此时应立即停止钻孔作业,在保证钻头底部张开的条件下缓慢上提钻头,防止扰动引起二次孔坍塌。

4. 当出现局部塌孔的情况时,施工人员应一边上提钻头,一边不断向桩孔内注入泥浆,并在桩孔内加入足够的粘土,然后下放钻头,将粘土反转压实,钻头要持续边压边反转,待孔壁稳定无液面下降或气泡翻涌的情况后再钻进。

5. 在钻孔过程中,还应注意桩孔周围原有地面状

况。如发现塌陷迹象,应尽快采取适当措施,加固桩孔周围土体。在整个钻孔过程中,必须缓慢地起落钻头,并时刻注意原有地面沉降情况。一旦发现异常,应立即安排钻机撤离现场,并安排现场人员及时撤离^[6]。

6. 钻孔深度达到设计高程后,应对孔的孔径、孔深和倾斜度进行检测,符合规范要求后方可进行清孔,清孔时需将钻头钻进至设计孔深以下,钻斗留在原位,机械旋转数圈,使孔底松散的土体尽可能进入斗内,拔出钻机后,仍需对孔底残留松散土进行二次清理。通常采用掏渣筒(带挡板的钻斗)来排出孔底沉渣,如果孔底有渗水,且沉积时间较长,应采用水泵循环排出浊水,完成清孔后方可进行下道施工工序,并在灌注混凝土之前再次复测桩底沉渣厚度,如超出规范要求则应进行二次清孔,确保成桩质量合格。

4 结束语

多护筒全跟进式施工工艺作为复杂厚砂砾石覆盖层中钻孔灌注桩施工的关键技术之一,有效破解了该类地层中钻孔灌注桩易塌孔、成孔质量差及护筒拔除影响桩头完整性的核心难题。通过双护筒协同护壁、动态泥浆调控及精细化操作优化,既保障了钻孔灌注桩成孔过程中孔壁的稳定性的,减少了砂砾石塌陷引发的安全与质量隐患,又通过科学的护筒埋设与拔除工艺,降低了对桩头完整性的不良影响,显著提升了钻孔灌注桩的成孔效率与桩身质量。同时,该工艺在施工成本控制与安全可靠性方面表现突出,为类似复杂厚砂砾石覆盖层地区钻孔灌注桩工程的质量控制提供了切实可行的技术参考与实践借鉴。

参考文献:

- [1] 宋广明. 溶洞区域桥梁桩基施工技术研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(06): 133-135, 141.
- [2] 同[1].
- [3] 朱承坚. 软土地基桥梁桩基础设计地震力简化计算方法[J]. 工程建设与设计, 2025(03): 104-106.
- [4] 陈晨文, 杜光明. 长护筒成孔桩基施工技术在青岛地铁深大基坑中应用[J]. 土工基础, 2024, 38(06): 889-891, 895.
- [5] 韩朝宇. 桥梁桩基施工中永久钢护筒施工技术[J]. 工程机械与维修, 2022(02): 266-268.
- [6] 林圣. 桥梁桩基施工中永久钢护筒工艺及控制要点[J]. 四川建材, 2021, 47(02): 78-79.

电力设备全寿命周期运维检修策略研究

吕 静, 赵小宁, 谢正青, 刘华健

(国网安徽省电力有限公司霍邱县供电公司, 安徽 六安 237400)

摘 要 本研究系统探讨了电力设备全寿命周期运维检修策略, 重点分析了该策略在确保电力系统可靠运行、提高电力企业经营效益以及促进行业可持续发展方面的重要作用。具体研究内容包括: 规划设计阶段的全寿命周期理念应用、运行阶段的状态监测与评估、检修策略的优化实施, 以及设备退役阶段的科学管理与资源再利用等方面, 旨在为电力设备运维检修工作提供理论参考, 进而保障电力系统安全稳定运行, 实现资源优化配置与行业可持续发展目标。

关键词 电力设备; 全寿命周期; 运维检修

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.021

0 引言

电力是保障现代社会正常运转的关键性能源, 保证其稳定供应极为关键。电力设备作为整个电力系统的核心组成部分, 其性能状况与运行状态直接影响电力供应的可靠性。传统的运维检修模式存在多方面的局限性, 已经难以契合现代电力系统不断发展的需求。基于此, 全寿命周期运维检修理念应运而生, 该理念贯穿电力设备从规划设计阶段一直到退役报废阶段的整个过程。对全寿命周期运维检修理念的策略展开深入研究, 可优化设备管理工作, 保障电力系统处于稳定运行状态, 提高经济效益, 推动电力行业实现可持续发展。

1 电力设备全寿命周期运维检修的重要性

1.1 保障电力系统稳定运行

电力设备全寿命周期的运维检修工作是保障电力持续供应的关键。电力设备在长期运行过程中, 会受到各类因素的影响, 如环境侵蚀、机械磨损以及电气老化等, 这些因素均有可能致使设备性能降低甚至出现故障, 借助实施全寿命周期运维检修, 可在设备规划时期就全面考量其运行环境与使用要求, 运用科学合理的设计及制造工艺, 从根源上提升设备的可靠性与耐久性。在设备运行阶段, 定期开展巡检、检测以及维护工作, 可及时察觉设备存在的隐患, 并采取对应措施给予处理, 防止故障发生及扩大, 比如针对变压器进行定期的油色谱分析与局部放电检测, 可提前发现绝缘老化、局部过热等问题, 及时安排检修工作, 避免变压器故障引发停电事故, 保障电力系统的稳定运行, 满足社会对电力的持续需求。

1.2 提升电力企业经济效益

传统运维检修模式一般着重于设备故障后的维修工作, 这种做法会使设备停机时间增多, 对电力供应产生影响, 还会让维修成本有所上升。全寿命周期运维检修则强调针对设备展开全过程管理, 通过合理的运维策略以及检修计划, 可优化设备运行状态, 延长设备使用期限, 减少设备更换频率, 降低设备购置成本。凭借精准的故障预测以及预防性维护, 可避免不必要的维修工作与设备损坏, 降低维修费用与停电损失, 比如运用状态监测技术对输电线路实施实时监测, 依据线路实际运行状况安排检修, 可避免过度检修与盲目检修, 提升检修效率, 降低运维成本, 为电力企业带来经济效益^[1]。

1.3 推动电力行业可持续发展

电力设备全寿命周期运维检修是实现资源节约以及环境保护的有效办法。在全寿命周期管理中, 对设备的运行与维护进行合理规划, 可提升设备的能源利用效率, 减少能源浪费情况。通过延长设备的使用寿命, 削减设备的报废以及更新数量, 可降低对原材料的需求, 减少资源消耗以及环境污染。在设备退役阶段, 对废旧设备开展科学的回收与处理, 可实现资源的再利用, 减少废弃物对环境造成的影响, 比如针对退役的变压器进行拆解与回收, 把其中的铜、铁等金属材料加以再加工利用, 可节约资源, 而且可以降低对环境的破坏, 契合可持续发展的要求, 推动电力行业朝着绿色、低碳方向转变。

2 电力设备全寿命周期运维检修策略

2.1 基于全寿命周期理念的规划与设计阶段策略

从技术角度而言,需全面考量设备运行环境以及使用要求,不同地区的气候状况、地理环境等对电力设备产生的影响存在较大差异,比如在沿海地区盐雾腐蚀会导致设备寿命缩短30%,在规划设计时要针对此类特殊环境运用特殊防腐处理技术并选用耐腐蚀性能更佳的材料来延长设备使用寿命^[2]。同时要依据电网实际负荷需求以及发展规划合理确定设备容量和性能参数,若设备容量设计过小就无法满足不断增长的电力需求,使设备频繁过载运行,加速绝缘劣化;若容量设计过大则会造成资源浪费,增加初始投资成本。

工作人员需运用全寿命周期成本理念,针对设备的购置成本、运行成本、维护成本、故障成本以及退役处置成本等展开综合分析评估。在设备选型阶段,不应仅聚焦于设备的初始购置价格,而应全面考量设备于整个生命周期内的总成本,比如某些新型节能设备虽初始购置价格偏高,但其运行效率高且能耗低,在长期运行进程中能节省诸多电费与维护成本,从全寿命周期成本角度而言更具经济性。

在规划与设计阶段需要重视设备的标准化以及通用性,采用标准化的设计制造工艺,可提升设备的互换性与可维护性,减少备品备件的储备成本,并且有利于后续的运维检修工作。例如:在电网建设中,全面运用标准设计和典型造价,把标准设计完善至标准设备层级的G4层,在每项工程设计和评审流程中全面落实标准设计,保证标准设计和典型造价的应用率达到100%,品类优化应用率达到90%,如此便能提高工程建设的质量与效率,还可为后续的运维检修带来便利^[3]。

2.2 运行阶段的监测与状态评估策略

当下较为常用的状态监测技术包含带电检测以及在线监测等类型。

带电检测可在设备处于不停电的状况下,针对设备的局部放电、红外热像以及超声波等相关参数展开检测工作,及时察觉到设备所存在的隐患,如针对变压器实施带电检测操作时,可检测出变压器内部的局部放电情形,以此来判断绝缘方面是否存在缺陷。

在线监测技术可以对设备的运行参数进行实时且连续的监测,如温度、压力、振动、电流以及电压等参数,并把这些数据传送到监控中心进行分析处理,通过对这些数据进行长时间的监测与分析,可掌握设备的运行趋势,提前发现设备出现的异常变化情况。例如:对输电线路开展在线监测工作时,可以实时监测线路的导线温度、弧垂以及张力等参数,一旦这些参数超

出正常范围,便会及时发出预警信号,方便运维人员采取相应的应对措施^[4]。

状态评估一般采用定期评价与动态评价相互结合的办法,定期评价一般每年开展一次,其主要目标在于制定次年的状态检修计划。在定期评价过程中,会针对设备的各项运行参数、试验数据以及缺陷记录等展开全面的剖析,同时结合设备的运行年限、历史故障状况等诸多因素,对设备的健康状况给予评分和分级。动态评价是依据设备的实时运行状态以及特殊工况来进行适时的评价。举例来说,当设备出现异常工况、家族缺陷或者新设备首次投入运行的时候,便会进行动态评价,依据评价结果及时对检修计划以及维护策略作出调整。

想要保障状态评估的准确性与可靠性,就要构建科学合理的状态评估指标体系以及评估方法。评估指标体系应当覆盖设备的各个层面,如电气性能、机械性能以及绝缘性能等方面。评估方法可选用模糊综合评价法、层次分析法或者神经网络法等,依据设备的特性以及实际情形挑选适宜的评估方法。要强化对状态监测以及评估数据的分析与挖掘,借助大数据、人工智能等技术,搭建设备故障预测模型,实现对设备故障的早期预警以及精准诊断^[5]。

2.3 检修策略的优化与实施策略

当下常见的检修策略有故障检修、定期检修、状态检修、预测检修以及以可靠性为中心的检修等多种。

故障检修属于事后检修的方式,也就是设备出现故障之后才开展检修工作,此种检修方式尽管无需提前安排检修计划,却会致使设备停机时间增长,对电力供应产生影响,还会造成设备损坏程度加重,使得维修成本增加。故障检修仅适用于那些对供电可靠性要求不高、故障后果不太严重的设备。

定期检修指的是依照预先设定好的时间间隔来对设备展开检修的一种方式,此种检修方式在一定程度上确可保证设备的可靠性,然而因为没有充分考量设备的实际运行状态,容易出现维修不足或者维修过度的状况。维修不足会致使设备故障隐患无法及时发现以及处理,最终造成设备故障发生;维修过度则会增添不必要的检修成本,还会缩短设备的实际使用寿命^[6]。

以可靠性为中心的检修也就是RCM,它以设备可靠性为目标,通过对设备故障模式、影响以及危害性展开分析,也就是FMECA,来明确设备的检修需求以及检修策略。RCM着重对设备的关键功能和关键部件给予重点维护,凭借最小的检修成本获取最大的设备可靠性。实施RCM的时候,要全面考量设备的安全性、可靠性、经济性等诸多因素,制定出最契合设备的检修策略。

在实际的应用场景当中, 需要依据设备的类型、关键程度以及运行环境等诸多因素, 来挑选恰当的检修策略或者多种检修策略组合, 比如说, 对于像关键的主变压器、断路器这类设备, 可采用将状态检修和以可靠性为中心的检修相结合的办法, 以此保障设备的高可靠性运行, 而对于一些辅助设备, 则可以采用定期检修与故障检修相结合的方式, 在保证设备有基本可靠性的基础之上, 降低检修成本^[7]。

2.4 退役阶段的管理与再利用策略

电力设备在达到其使用寿命或因技术更新等原因需要退役时, 科学合理的退役阶段管理与再利用策略能够提高资源的利用效率, 降低对环境的影响, 实现电力行业的可持续发展。

在设备临近退役之时, 需开展全面的退役评估工作, 退役评估要从经济性、技术性、环保性以及社会性等诸多维度给予考量。经济性评估主要是剖析设备持续运行的成本与退役处置的成本, 同时还要考虑设备退役之后的残值回收状况, 要是设备继续运行的成本过高, 或者退役处置后可收获较高的残值回收, 那么退役或许会是更为经济的选择。技术性评估是判断设备是否依旧可满足电网的运行要求以及是否存在技术升级可能性的有效方法。若设备的技术性能已落后, 无法满足电网的发展需求, 并且技术升级的成本过高, 那么退役便成为必要之举。环保性评估需要考量设备退役过程中可能对环境产生的影响, 如设备中的有害物质的处理问题。社会性评估则关乎设备退役对当地社会经济发展、就业等方面所造成的影响。

依据退役评估所获得的结果来制定合理的设备处置方案, 设备退役之后的处置方式主要覆盖再利用、回收、拆解以及销毁等方面, 对于某些性能尚可且经过检修与改造后可继续投入使用的设备而言, 可以实施再利用, 比如说, 把退役的变压器经过检测、维修以及试验之后, 重新安装到对供电可靠性要求并非很高的电网当中继续使用, 或者是将其当作备用设备。对于那些无法再利用的设备, 则可进行回收处理, 回收处理主要是针对设备当中的有价金属如铜、铁、铝等以及其他可回收材料展开回收再利用, 以此减少资源的浪费, 如对退役的电缆进行拆解, 回收其中的铜导体以及绝缘材料, 对于含有有害物质的设备, 需要开展专业的拆解处理, 把有害物质进行安全处置, 防止对环境造成污染。比如对含有多氯联苯的变压器油进行无害化处理, 对于一些已经严重损坏、无法回收利用并且不含有有害物质的设备, 可以进行销毁处理^[8]。

销毁处理虽是设备退役后的末端处置方式, 但同样需遵循严格规范与环保要求。在进行设备销毁前,

应先对设备进行全面评估, 确保其确实无再利用和回收价值, 且不含有害物质。销毁过程要选择具备相应资质与技术的专业机构, 采用科学合理的销毁手段, 如机械破碎、高温焚烧等, 保证设备被彻底销毁, 避免其部件被非法重新流入市场造成安全隐患。

在整个设备处置进程当中, 需要构建完备的记录以及追溯体系, 针对每一台退役设备, 都要详细记录其评估结果、处置方式、处置时间以及处置单位等各类信息, 以此方便后续的查询以及监管工作, 如此一来, 既能保障设备处置符合规定要求, 又能为后续类似设备的处置提供一定的经验借鉴。强化与相关部门的沟通协作也有意义, 要和环保部门维持紧密联系, 及时掌握最新的环保政策与标准, 保证设备处置过程中各项环保措施可切实落实到位, 还要与资产管理部门协同开展工作, 对设备退役评估与处置流程进行优化, 提高工作效率并降低处置成本, 经过多方面的共同努力, 实现设备退役处置的科学化、规范化以及环保化, 为企业的可持续发展以及生态环境的保护贡献力量。

3 结束语

电力设备全寿命周期运维检修策略的研究与实践, 对于电力系统稳定运行、电力企业经济效益提升以及电力行业可持续发展有着重大意义。在规划、运行、检修以及退役等各个阶段采取科学合理的策略, 可有效提升设备可靠性, 降低成本, 减少资源浪费和环境污染。未来要持续完善此策略体系, 结合新技术与新方法, 推动电力设备运维检修朝着智能化、绿色化方向发展, 为电力行业长远发展提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 叶雪. 基于全寿命周期成本理论的电网企业技改项目投入产出评估研究 [J]. 中国市场, 2024(31):66-69.
- [2] 陈奕欣. 电力工程全寿命周期造价管理探析 [J]. 中国科技投资, 2024(30):53-55.
- [3] 柴栋. 基于改进 PSO 的配网自动化全寿命周期成本优化研究 [J]. 电气开关, 2024, 62(03):99-101, 111.
- [4] 毕竟, 李彦明, 丁超民, 等. 基于 AHP-CRITIC 技术的考虑全寿命周期成本下变电站项目实施方案比选模型研究 [J]. 中国新通信, 2024, 26(10):8-10, 73.
- [5] 基于新型电力系统模式下电网建设项目资产全寿命周期成本管理研究 [J]. 中国设备工程, 2024(S1):42-48.
- [6] 白杨. 电力企业基于资产全寿命周期成本的应用探讨 [J]. 西部财会, 2024(02):36-37.
- [7] 杨鲲鹏, 杜道强, 吴超锋. 基于知识库的电力设备全寿命周期管理系统设计与应用 [J]. 河南科技, 2022, 41(01):50-53.
- [8] 刘力伟, 兰鹏, 靳贤彬, 等. 基于资产全寿命周期管理的质量事件分析应用 [J]. 东北电力技术, 2020, 41(01):45-48.

氢能存储技术中新型纳米复合材料的创新研究

闫亚斌

(陕西百荟萃科技有限公司, 陕西 西安 710000)

摘 要 针对传统储氢材料在热力学稳定性与动力学速率方面的局限性, 提出一种基于 Mg-Ti-O 三元复合体系的创新设计策略, 通过水热合成与机械球磨协同工艺, 成功构建了具有梯度应变场的纳米异质结构, 实现了从原子尺度的晶格参数精准匹配到宏观尺度的非平衡态动力学调控。实验结果表明, 优化后的纳米复合材料在 298 K/10 MPa 条件下储氢容量达到 5.8 wt%, 较传统镁基材料提升约 40%, 且在 323 K 时仍能保持 4.2 wt% 的储氢能力, 展现出优异的热稳定性。

关键词 氢能存储技术; 新型纳米复合材料; 纳米复合体系; 材料表征技术; 吸附等温线测试

中图分类号: TB383

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.022

0 引言

氢能作为清洁能源载体, 其高效存储技术的突破已成为实现碳中和目标的关键瓶颈, 传统储氢材料受限于热力学稳定性不足与动力学速率迟缓的双重制约, 难以满足实际应用对循环寿命与快速响应的双重需求。纳米复合材料因其独特的界面效应与结构可调性, 为储氢性能的协同优化提供了新思路, 然而晶格失配引发的应力累积与氢扩散路径的拓扑限制仍是亟待解决的核心问题^[1]。

1 实验设计与材料制备

1.1 纳米复合体系构建方法

1.1.1 水热合成结合机械球磨的复合工艺

本研究采用水热合成与机械球磨协同的复合工艺制备新型纳米复合材料, 旨在通过多尺度结构调控实现储氢性能的优化提升。水热反应釜中, 控制反应温度在 180±5 °C、反应时间 12 小时的条件下, 前驱体溶液经成核生长过程形成具有特定晶面取向的纳米晶粒。

1.1.2 关键控制参数

晶格匹配度作为复合材料界面相容性的关键控制参数, 其数学表达式定义为:

$$\theta = \frac{a_1}{a_2} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, θ 表示晶格适配程度(%), a_1 和 a_2 分别代表两种复合组分的晶格常数(Å)。通过精确调控前驱体配比与合成参数, 成功将值控制在 98.296%~102.5% 的优化区间, 有效降低了界面应力导致的晶格畸变。实验发现, 当 θ 值接近 100% 时, 复合材料在球

磨过程中呈现出明显的取向附生现象, 这为后续储氢性能提升奠定了结构基础。

1.2 材料表征技术选择

1.2.1 BET 比表面积与孔径分布测定

为全面解析纳米复合材料的多级结构特征, 采用氮气吸附-脱附法测定样品的 BET 比表面积与孔径分布。测试在 77 K 低温条件下进行, 利用 BJH 模型计算介孔分布, DFT 方法解析微孔结构。典型样品显示出 2.5~3.8 nm 的窄孔径分布特征, 其比表面积最高达到 632 m²/g, 这为氢分子吸附提供了充足的活性位点。

1.2.2 XRD 晶体结构分析

X 射线衍射分析系统揭示了材料的晶体结构演变规律。如表 1 所示, 不同配比样品的晶格常数呈现规律性变化, 当 Mg₂Ni 与 TiO₂ 的摩尔比为 3:1 时, (101) 晶面间距从 0.238 nm 扩展至 0.246 nm, 这种晶格膨胀现象与储氢过程中的氢原子固溶行为密切相关。值得关注的是, 在 2 θ =43.5° 附近出现的宽化衍射峰, 证实了机械球磨过程诱导的非晶/纳米晶复合结构的形成。

表 1 不同配比样品的晶格常数对比

配比编号	Mg ₂ Ni 含量 (mol%)	晶格常数 (Å)	晶格畸变度 (%)
S1	25	5.213±0.003	1.32
S2	50	5.198±0.005	0.87
S3	75	5.205±0.004	1.05

在材料制备过程中, 特别注重工艺参数与结构参数的关联分析。水热阶段的 pH 值控制在 10.5~11.2 范围内, 既保证了纳米颗粒的均匀成核, 又避免了强

碱性环境对晶面生长的抑制作用。后续球磨过程中，通过实时监测粉末温度并将其控制在 80 ℃ 以下，有效防止了纳米颗粒的异常长大和相分离现象^[2]。这种多参数协同控制策略，使得最终获得的纳米复合材料同时具备高比表面积、适宜孔径分布和良好结构稳定性等特点，为后续储氢性能测试提供了理想的材料体系。

2 储氢性能实验分析

2.1 吸附等温线测试

2.1.1 温度—压力耦合作用下的储氢容量

通过自主搭建的高压吸附测试系统，系统考察了纳米复合材料在温度—压力耦合作用下的储氢行为。实验数据显示，随着压力梯度从 2 MPa 逐步提升至 12 MPa，材料吸氢量呈现典型的 Langmuir 型吸附特征，这种非线性关系揭示了氢分子在纳米孔隙中的多层吸附机制。

2.1.2 最佳样品

在优化工艺制备的 S2 样品中，其储氢性能展现出显著优势。如表 2 所示，该样品在 298 K/10 MPa 条件下实现了 5.8 wt% 的质量储氢密度，较传统镁基材料提升约 40%。这种性能飞跃归因于纳米复合结构带来的协同效应：高比表面区域为物理吸附提供了充足活性位点，而优化的晶格参数则促进了化学吸附过程中的氢原子固溶。值得关注的是，当测试温度升至 323 K 时，储氢容量仍能保持在 4.2 wt% 以上，显示出材料优异的热稳定性。

表 2 典型工况下的储氢性能对比

样品编号	温度 (K)	压力 (MPa)	储氢容量 (wt%)
S1	298	10	4.7
S2	298	10	5.8
S3	298	10	5.1
S2	323	10	4.2

2.2 动力学性能提升机制

基于非平衡态热力学理论，研究团队建立了界面扩散主导的储氢动力学模型。通过修正 Stokes-Einstein 方程，推导得出氢原子在复合界面的扩散系数表达式：

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (2)$$

式 (2) 中，D 代表界面扩散系数 (m²/s)，k_B 为玻尔兹曼常数 (1.38×10⁻²³ J/K)，T 为绝对温度 (K)，η 表示界面粘滞系数 (Pa·s)，r 为氢原子有效半径 (0.12 nm)。实验测定结果表明，当晶格匹配度 θ 接近 100% 时，界面粘滞系数 η 从常规材料的 4.7 MPa·s

降至 2.3 MPa·s，这直接导致扩散系数 D 提升了 1.8 倍^[3]。

深入分析氢脱附活化能数据发现，复合材料的表观活化能从 78 kJ/mol 显著降低至 52 kJ/mol。这种动力学障碍的削弱主要源于两方面机制：其一，纳米颗粒界面处形成的应变场降低了氢原子的迁移势垒；其二，异质结构诱导的电子云重分布创造了更多低能扩散路径。通过时间分辨光谱分析进一步证实，在脱附过程中氢滞留时间缩短了 65%，这与理论模型的预测结果高度吻合。这种动力学性能的实质性突破，为开发快速循环储氢系统提供了关键理论支撑。

在循环稳定性测试中，经过 50 次吸脱附循环后，S2 样品的储氢容量保持率仍达 92.3%，远高于传统材料的 76.5%。这种优异的循环特性可归因于复合结构对晶格膨胀应力的有效缓冲：一方面，纳米颗粒间的机械互锁抑制了材料粉化；另一方面，界面处的化学键合作用阻止了相分离的发生。通过对比不同温度下的性能衰减速率发现，当工作温度控制在 350 K 以下时，材料结构完整性可维持 200 次循环以上，这为其实际应用奠定了重要基础。

2.3 储氢性能强化机制拓展

2.3.1 寿命预测模型的建立

基于非稳态扩散理论推导的寿命预测方程，成功建立了储氢容量衰减与循环次数的定量关系：

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{N}{\tau}\right) \quad (3)$$

式 (3) 中，C 为当前储氢容量 (wt%)，C₀ 为初始容量 (wt%)，N 表示循环次数，τ 表征材料本征寿命的特征参数 (次)，β 为结构稳定因子 (无量纲)。通过拟合实验数据获得 τ=1520 次，β=0.084，理论预测与实测值的相关系数 R² 达到 0.983。该模型揭示当温度梯度 ΔT < 50 K 时，容量衰减主要受界面重构动力学控制；而当 ΔT > 80 K 时，体相晶格畸变开始主导衰减过程。如表 3 所示。

表 3 寿命模型参数验证

循环次数	实测 C/C ₀	理论预测值	相对误差 (%)
100	0.968	0.961	0.72
200	0.923	0.917	0.65
300	0.881	0.874	0.79

2.3.2 压力弛豫行为解析

通过原位压力监测发现，纳米复合材料在 10 MPa 充氢压力下的弛豫时间常数 τ_{1/2} 仅为传统材料的 38%，其动力学过程遵循修正的 Maxwell 模型：

$$P(t)=P_{\infty}+(P_0-P_{\infty})e^{-t/\lambda} \quad (4)$$

式(4)中, $P(t)$ 为实时压力 (MPa), P_0 和 P_{∞} 分别代表初始与平衡压力 (MPa), λ 是特征驰豫时间 (s)。实验测得 $\lambda=127$ s, 较常规材料缩短 62%, 这种快速压力平衡能力源于分级孔道结构的三维连通性——孔径分布在 2 ~ 50 nm 范围的介孔, 占比提升至 73%, 形成氢分子传输的高速通道^[4]。

深入分析驰豫过程的活化体积 ΔV 发现, 复合材料的 ΔV 值从 1.8 nm³ 降至 0.7 nm³, 表明氢原子迁移所需克服的空间势垒显著降低。这种效应与材料中存在的应变梯度场密切相关: 通过电子背散射衍射测定, 界面区域 0.5 μm 范围内的晶格应变梯度达到 3.2%/μm, 形成的定向应力场使氢扩散路径呈现各向异性特征。在 [001] 晶向的扩散速率达到 5.4×10^{-11} m²/s, 较随机取向提升 2.3 倍, 这为设计定向强化储氢材料提供了新思路。

3 热力学稳定性优化

3.1 循环吸附 / 解吸性能测试

历经 200 次连续吸脱附循环的严格测试, S2 样品展现出卓越的结构稳定性, 其储氢容量保持率始终维持在 92.3% 以上 (见表 4)。这种循环稳定性的突破源于纳米复合体系的多级应力缓冲机制: 一方面, 异质界面处的化学键网络有效分散了晶格膨胀产生的内应力; 另一方面, 三维互穿网络结构通过拓扑约束抑制了材料粉化。值得注意的是, 在初始 20 次循环中观察到 3.2% 的容量衰减, 这主要归因于表面吸附位点的不可逆饱和, 而后续循环过程的衰减速率降至每周期 0.04%, 证实了体相结构的完整性保持能力。

表 4 循环性能测试数据

循环次数	容量保持率 (%)	晶格膨胀率 (%)
50	98.5	1.2
100	96.8	2.1
200	92.3	3.8

通过原位 X 射线衍射分析发现, 循环过程中 (002) 晶面间距变化幅度控制在 ±0.8% 以内, 这种晶格弹性特征显著优于传统镁基材料的 ±2.5% 波动范围。进一步的热重—质谱联用测试表明, 经过 200 次循环后材料表面氧化层厚度仅增加至 2.7 nm, 较初始状态的 1.8 nm 增幅可控, 这得益于复合界面形成的动态保护机制。

3.2 活化能降低效应

基于非平衡态热力学理论, 研究团队建立了界面扩散主导的储氢动力学模型。通过修正 Stokes-Einstein

方程, 推导得出氢原子在复合界面的扩散系数表达式:

$$D=D_0\exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (5)$$

式(5)中, ΔE 代表解离活化能 (eV), $E_{\text{transition}}$ 和 E_{initial} 分别对应过渡态与初始态的系统总能。实验测得复合材料的 ΔE 值为 0.78 eV, 较单一组分材料降低 32%, 这种活化能降低效应主要源于界面处的电荷重分布——过渡金属元素的 d 轨道电子与氢的 1s 轨道形成杂化态, 使 H-H 键的断裂能垒下降。

密度泛函理论计算揭示, 在 Mg-Ti-O 三元界面区域, 电荷密度梯度达到 8.7×10^{21} e/cm³, 形成的强局域电场使氢分子极化率提升至 2.1×10^{-30} C · m²/V, 约为自由氢分子的 1.5 倍。这种极化效应不仅降低了氢解离的活化能, 同时增强了氢原子在晶格中的固溶稳定性。通过 Arrhenius 方程拟合不同温度下的解离速率常数发现, 表观活化能从 98 kJ/mol 降至 67 kJ/mol, 与理论计算结果偏差小于 5%, 证实了界面工程对热力学过程的调控有效性^[5]。

材料在热循环过程中的熵变特征进一步佐证了稳定性提升机制。差示扫描量热法测定显示, 复合体系在吸脱附循环中的熵产生率仅为 2.3 J/(mol · K), 较传统材料降低 41%。这种热力学优化使材料在 10 MPa/350 K 工况下的使用寿命延长至 1 500 次循环以上, 为实际储氢系统的工程化应用提供了关键性能保障。

4 结束语

将机器学习算法嵌入多参数工艺优化体系, 有望实现晶格匹配度与孔径分布的智能调控, 且发展原位表征技术解析氢原子在应变梯度场中的动态行为, 可进一步阐明储氢强化的量子机制, 本研究建立的材料设计原则与性能预测模型, 对推进固态储氢系统的实用化进程具有参考价值。

参考文献:

- [1] 高悦, 齐轩, 门展宇. 高分子纳米复合材料在能源领域的应用研究 [J]. 信息记录材料, 2024, 25(10): 21-23.
- [2] 全小刚, 李伟, 杨淑萍. 固体储氢性能及基本改进方法综述 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2024, 21(04): 68-80.
- [3] 佚名. 新型镁基固态氢存储材料通过鉴定 [J]. 浙江化工, 2024, 55(04): 41.
- [4] 高佳佳, 米媛媛, 周洋, 等. 新型储氢材料研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(06): 2962-2971.
- [5] 郭博文, 罗聃, 周红军. 可再生能源电解制氢技术及催化剂的研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(06): 2933-2951.

新型土工合成材料在公路路基加固中的性能分析

范卫华

(建德市交通设计有限公司, 浙江 杭州 311600)

摘 要 在公路建设中, 土工合成材料凭借其优异的加筋、排水和隔离性能, 已成为现代路基工程不可或缺的核心材料, 但新型土工合成材料在实践中还面临着耐久性不足、力学性能衰减、与土体界面黏结性能较差和适应性较差的困境。本文对上述性能改善难点进行了分析, 提出了发展高耐候性复合材料、引进纳米增强技术以及多向编织结构、完善材料表面结构设计、开发出适用于不同地质环境的定制化材料体系等性能改善策略, 以期能够为公路路基加固工作提供有益参考。

关键词 土工合成材料; 公路路基加固; 性能提升

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.023

0 引言

土工合成材料因轻质、高强和耐久的特点而被广泛地应用于公路路基的加固。但随着公路建设不断扩展到复杂地质条件及恶劣环境中, 新型土工合成材料的性能提升也遇到了新的考验。本文通过对新型土工合成材料在公路路基加固中的应用背景进行分析, 探究其性能提升所面临的困境, 进而提出解决策略, 旨在为促进我国公路建设提供参考。

1 土工合成材料在公路路基加固中的应用背景

随着我国交通基础设施建设的不断扩大, 对道路使用年限及通行能力有了更高的要求, 而传统的填土、夯实及碎石垫层加固方法在一些复杂地质条件及极端气候环境下也逐渐显露出其局限性。土工合成材料是高分子工程材料的一种, 具有重量轻、强度大、施工方便的特点, 对路基稳定性的增强, 沉降的控制和排水功能的提高表现出了明显的优越性。尤其适用于软土地基、高填方地段、湿陷性土壤区或者边坡加固工程, 它的作用是无法取代的^[1]。随着材料科学的发展, 一系列新型土工合成材料相继问世, 主要有增强型土工格栅、高分子复合膜和多功能土工织物系列, 除了满足力学性能外, 还更关注耐久性与环境适应能力。

2 新型土工合成材料在公路路基加固中的性能提升难题

2.1 材料耐久性不足, 易受环境因素(紫外线、湿热、冻融等)影响

目前使用的新型土工合成材料虽然在初期性能测试方面具有优异的性能, 但是在实际工程环境下, 其

服役条件是复杂多样的, 长期受紫外线照射、高湿极寒和反复干湿交替的自然因素影响, 性能的稳定性不是很好。以高原或者高温区域为例, 当太阳辐射强度达到实验室规定标准时, 一些材料表层几个月后就会发生脆化、变色甚至微裂纹等现象, 这一结构层级上的损伤很容易诱发性能的全面劣化。而且在我国南方多雨地区或者沿海湿热地区, 长期处于高湿度、高盐分条件下的空气, 很容易加快材料一些化学组分特别是织物类复合材料的时效, 受潮膨胀和干燥收缩相间时, 易发生剥离或者分层。另外, 我国北方冬季寒冷地区土体和材料之间冻融循环频繁, 使材料受到微观疲劳的积累, 当抗冻性能不充分时就会诱导强度降低或者界面失效。

2.2 拉伸强度和剪切性能在复杂工况下衰减明显

土工合成材料拉伸强度与剪切能力在静态实验中往往会呈现理想值, 但是将它们放置于复杂且受多重应力综合影响的路基体系时, 往往很难维持设计预期的真实承载性能。很多材料面对拉压混合荷载、边界应力集中以及不均匀沉降等情况, 其力学性能呈现出非线性退化的趋势, 特别是地震荷载作用下的力学性能、在高速冲击振动或者大型车辆经常碾压等动态环境中, 剪切层位承载能力急剧降低, 产生开裂、层间滑移或者应力集中等损伤。软土或者松散地层中因土体变形自身不确定因素的影响, 初始阶段材料应力适配还可以保持, 只是随土体固结、含水率而改变, 结构位移的调整、内部拉伸状态随着时间的推移也逐步改变, 造成局部区域的早期疲劳破坏^[2]。而结构设计

中忽略了材料在这些复杂工况下的性能持续衰减，往往形成“前期坚实，后期无效”的隐性风险模式。尽管一些新材料通过强化编织密度和改性聚合物配比来提高其理论强度，但是它们和实际工程环境之间仍然有明显的性能差距。

2.3 与天然土体的界面黏结性能差，影响整体加固效果

土工合成材料应用于公路路基的一个核心功能就是与天然土体构成一个稳定的力学协同体系，从而加强整体结构对承载及变形的控制。但在许多工程实践过程中，新型材料尽管在自身强度、延展性能等方面取得了突破性进展，但与周边土壤之间界面黏结力普遍较低，特别是在非均质土层、高水位地区或者细粒土壤等情况下，由于土与材料界面摩擦阻力的不足，结构失稳的风险明显增大。一些材料表面处理虽然采取了粗糙化和编织纹理以期增大接触摩擦系数，但是仍然难以在天然土体长时间潮湿或者剪切应力高度集中时保持牢固状态。界面失效既影响材料自身加固功能，又易诱导裂缝扩展和渗水路径变化等二次结构病害。特别是边坡防护、涵洞基础和其他结构，界面黏结不充分更容易引起局部滑移和塌陷，严重时会影响工程的整体稳定。

2.4 应用区域适应性差，难以应对高原、湿陷性黄土等特殊地质条件

尽管当前许多新型土工合成材料在设计阶段已考虑到一定的环境适应能力，但在面对地质条件特殊、气候极端的区域，材料适应性差的问题仍屡见不鲜。在青藏高原这样高寒缺氧的地区，昼夜温差的急剧变化不仅使材料经常发生热胀冷缩，而且使材料内部的应力一再发生调节，长期服役产生疲劳裂纹的可能性大大增加。但湿陷性黄土地区由于遇水后地基土体结构强度显著降低，叠加材料不能有效地适应土体体积的剧烈变化，易引起整体结构坍塌或者大范围沉降。另外，在如红黏土、高膨胀土、盐渍土等特定地质问题中，不同的离子浓度、pH值或有机物含量都可能对材料的物理和化学稳定性产生影响，有些物料甚至几个月就会发生膨胀、溶胀或者化学分解等^[3]。更为关键的是，对于这些地区还没有成熟的选材标准及适应性评估机制，在工程设计过程中多以经验选材为主，缺少系统化的数据支撑使得其一经投入使用又会产生性能问题和昂贵的维修代价，甚至会影响到交通通行安全和工程的长远运行。

3 新型土工合成材料在公路路基加固中的性能提升策略

3.1 开发高耐候性复合材料，提高抗紫外线与抗老化性能

近年来，由于公路基础设施长期服役性能要求越来越高，强紫外辐射与高温湿交替气候环境中传统土工合成材料老化失效现象越来越明显。在高海拔地区，有些材料在不到两年的时间里就出现了明显的脆裂和强度下降，这大大限制了它们在工程中的使用寿命。基于这一背景，研发高耐候性复合材料就成了提高路基整体加固效果的重要战略之一。利用聚合物改性技术，在聚酯、聚丙烯等基础材料中加入紫外线吸收剂、抗氧化剂等功能性助剂，可以在分子层面上增强其对光氧化反应的抵抗能力。尤其在热氧条件下，以调节分子链段结晶度和结构稳定性来有效地推迟材料降解进程。另外，近年来一些研究小组已经在土工织物表面处理中采用氟碳涂层和热压复合技术，显著增强了织物抵抗紫外线和臭氧腐蚀的能力。相比较而言，这种处理方法既可以形成一层致密且稳定的保护膜，又可以保持良好的力学性能，从而使得长期加载过程中性能衰减曲线变得较为平坦。值得关注的是，材料耐候性能并不只取决于某一单一因素，还与微观结构、添加剂分布均匀性和界面相容性多重因素息息相关。所以，在高性能复合材料的设计过程中要协同配比和工艺优化各种功能成分，以形成具有抗热老化、耐湿膨胀和耐光照降解多重特性的复合材料体系。与此同时，建立相关室外暴露测试和加速老化模拟评价体系是极其有必要的，这样才能真实地反映出各种复杂环境下的材料服役行为，为材料研究和开发提供可量化性能评估依据。

3.2 引入纳米增强技术与多向编织结构，提升其拉伸与剪切强度

公路路基不仅受到竖向荷载的作用，还受到从车辆荷载、土体侧向滑移以及其他复杂力学作用的影响，从而对加固材料拉伸与剪切性能有很高的要求。传统的单向编织结构因纤维排列取向单一，在面临多轴荷载时往往受力不均匀，断裂面较为集中，造成整体增强效果有限。为打破这一瓶颈，目前的研究已逐步结合纳米增强技术和多向编织结构来获取更好的力学响应特性。在纳米增强技术方面，碳纳米管、石墨烯氧化物和纳米硅颗粒等多种材料在聚合物基体中得到了广泛的应用，目的是为了增强界面的附着力和内部结构的致密性。纳米填料因其巨大的比表面积和界面

活性,可在微观尺度下形成多点锚固机制进而强化纤维网络整体协同作用。这种增强机制区别于传统填料以“填充”来提高性能的方式,更多的是依靠界面能和微观力传导路径构建来增强拉伸变形中材料所能抵抗的极限强度及应变能力。同时,多向编织技术不断进化,通过对纤维交叉角度和层间密度的调控,形成了一种类似于蜂巢状或者斜交网格结构的力学传递路径来有效地分散各个方向上受到的应力,从而避免了局部应力的集中^[4]。多向复合织物能适应实际工程复杂地形和非均质土体环境并保持高应变区域界面结合状态稳定,特别是有滑移潜势或者差异沉降路基区域。应该注意到纳米增强剂分散时稳定性的好坏直接影响到增强效果的好坏,所以需要从分散工艺优化、界面剂选择和纳米颗粒表面改性几个环节进行系统的研究。

3.3 改进材料表面结构设计,增强与土体的摩擦黏结性能

材料表面结构设计已经不限于传统的光滑的膜状或者单纯的编织结构,最近几年研究重点逐渐扩展到表面粗糙化和结构立体化。引入凹凸纹理,突起颗粒和双向拉伸孔网技术手段显著改善材料和土体的机械咬合,从而提高界面剪切强度。另外,有试验证明,微观尺度上分级毛细结构的构筑可以在填土压实时产生多重锁固作用,使得材料的表面与其周围的土粒结合紧密,从而产生近似“咬合—嵌固等”的复合界面。该多重耦合结构相对于传统单一摩擦机制在长期加载过程中显示了较好的抗滑移能力及抗剪性能。同时,材料的柔性和构型会影响摩擦黏结性能。以湿陷性黄土地区为例,柔性加强筋和土体之间的协同适应能力通常比刚性构件要好,而刚性构件容易由于应力集中而造成接触不均匀和早期破坏。一些先进材料在整体质量没有明显增加的情况下,通过使用交错纤维布置及局部加厚节点等方式达到受力均匀的目的,从而改善铺设适应性及提高现场施工效率。

3.4 针对不同地质环境研发定制化材料体系,提升区域适应性

我国地域辽阔,地质条件千差万别,既有东南沿海软土地基,又有西北高原多年冻土、盐渍土以及西南山区红黏土、岩溶地貌,不同地区对土工材料性能的技术要求迥异。标准化和单一配方材料体系往往不能满足实际项目中所有适应性需求,即使在某一地区也是无效的。所以,促进土工合成材料朝着定制化发展已经成为增强公路路基加固体系效果的重点途径。具体来说,软土广布的沿海地区要求材料具有优良的抗渗性和长期蠕变性能,才能抑制土的侧向流动和差

异沉降;但在盐渍土区域,物质的化学稳定性就成了优先选择,否则容易产生盐析、断裂乃至结构崩解等现象。为了解决这类问题,一些研究机构将耐盐离子腐蚀组分添加到聚合物基体上,与多层复合工艺相结合,研制了一类适合高盐环境下使用的抗老化型复合材料。另外,高原地区低温冻胀条件需要材料保持足够柔性和断裂延伸率低于 -30°C ,给材料低温韧性和抑制微裂扩展能力带来挑战。面向冻土环境研制的高弹性纤维复合材料常以特殊弹性聚合物为基体,辅以耐寒纤维网作为支撑结构,既保持高强度又具有强抗裂性及形变适应性。在山区,由于地质条件更加复杂,如频繁的降雨和陡峭的坡角,这对材料的排水性、抗滑性和快速铺设能力提出了全面的要求。在这种情况下,可以考虑把土工网格和排水通道整合在一起,采用一体成型工艺生产出具有排水导向作用的结构材料^[5]。定制化材料体系研究与开发不只是性能差异设计,还以工程地质环境为对象进行系统响应,需要与区域地质资料相结合、考虑到长期的气候数据、施工方法和成本控制等多个因素,我们构建了一个完整的“情景—性质—材料”匹配模型,以实现真正的区域匹配和应用的最优化。

4 结束语

新型土工合成材料在公路路基加固中的应用有着广阔的发展前景,但是也遇到了不少挑战。通过发展高耐候性复合材料,引入纳米增强技术与多向编织结构,完善材料的表面结构设计,根据不同的地质环境开发定制化的材料体系等策略,能够有效地增强其各项性能,进而为公路路基加固工作提供更可靠的技术支撑。未来,随着材料科学和工程技术的持续发展,相信新型土工合成材料将在公路建设项目中扮演更为关键的角色。

参考文献:

- [1] 焦文慧.新型带翼土工格室加筋路基工程特性研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2024.
- [2] 尤慧敏.论公路路基设计中的土工合成材料应用[J].产品可靠性报告,2024(04):104-105.
- [3] 毕聪.新型土工合成材料在沥青路面全生命周期中的应用[J].产业创新研究,2024(06):130-132.
- [4] 陈钊.PVA 高分子吸水土工合成材料的水分迁移效果及机理研究[D].深圳:深圳大学,2023.
- [5] 崔新壮,李骏,齐辉,等.新型智能土工合成材料 SE GB 在服役温度范围内含损伤演化的流变行为(英文)[J].Journal of Central South University,2022,29(04):1250-1261.

基于大数据分析的建筑工程 造价风险预警机制研究

赵君

(安徽德瑞工程咨询有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要 基于大数据分析研究建筑工程造价风险预警机制,从市场环境、项目管理和工程技术三大维度识别风险因素,分析其分类与特征。构建造价风险预警指标体系,选取成本偏差率、价格波动指数、进度绩效指数和质量缺陷率等关键指标,运用大数据分析方法对指标数据进行挖掘与处理。选择支持向量机(SVM)模型构建预警模型,通过历史数据训练与优化模型,确定预警阈值。研究结果表明:基于大数据分析的建筑工程造价风险预警机制能有效预警造价风险,为项目管理提供决策支持。

关键词 建筑造价风险; 大数据分析; 支持向量机; 风险指标体系; 动态预警

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.024

0 引言

建筑工程造价风险贯穿项目全过程,受多种因素影响,如原材料价格波动、设计变更、施工进度延误等可能导致造价失控。随着大数据技术的发展,其海量性和动态性特点为造价风险预警提供了数据支持^[1]。然而,当前造价风险预警研究多为定性分析或单一因素定量分析,缺乏基于大数据的系统性、动态性预警机制。因此,本研究基于大数据分析,构建建筑工程造价风险预警机制,旨在为项目管理提供科学决策支持,促进建筑行业健康可持续发展。

1 建筑工程造价风险因素分析

1.1 风险因素识别

建筑工程造价风险因素复杂,涵盖市场环境、项目管理和工程技术三大维度。在市场环境方面,原材料价格波动(如钢材、水泥、木材)受经济形势、供求关系和政策调整影响,波动频繁^[2]。钢材价格每吨上涨 100 元,工程材料成本可能增加 5%~10%。表 1 显示了常见建筑材料价格波动对造价的影响。

表 1 常见建筑材料价格波动对造价的影响

材料类型	单位	平均用量	价格波动范围 (%)	造价影响(%)
钢材	吨	1 000	±10%	±5%
水泥	吨	5 000	±8%	±3%
木材	立方米	200	±15%	±4%

同时, 劳动力市场变化和物价上涨导致建筑工人工资逐年上升。在项目管理维度, 设计变更因前期设计不充分、业主需求变更或地质条件不符, 会增加工程量、改变施工工艺或材料设备, 直接影响造价。施工进度延误使工期延长, 增加人工、材料、设备成本, 还可能产生违约金。其影响公式为:

$$\Delta C = \sum (N_i \times \Delta U_i) + \sum (Q_i \times \Delta P_i) + \text{违约金} \quad (1)$$

式(1)中, N_i 为用工人数, ΔU_i 为人工单价变化, Q_j 为材料用量, ΔP_j 为材料价格变化。在工程技术维度, 施工技术选择直接影响造价, 新型技术虽成本高但安全性更高。施工质量问题的返工和维修费用增加, 甚至影响使用寿命, 质量问题导致的返工和维修费用可能占总造价的 3% ~ 5%。

1.2 风险因素分类与特征

为了构建有效的预警机制, 建筑工程造价风险因素需按可控性与内外源性分类并分析其特征。可控风险(如施工进度延误、设计变更)可通过管理措施和技术手段控制, 其发生概率低但影响大, 且与其他风险(如设计变更与进度延误)相关。不可控风险(如原材料价格波动、自然灾害)受外部环境的影响, 难以预测和缓解, 影响程度大, 需通过大数据分析评估其与其他风险(如原材料价格波动与人工成本变化)的关联性^[3]。内部风险(如施工质量问题)与项目管理水平和技术能力相关, 可通过优化管理流程和技术方案控制; 外部风险(如政策法规变化)受外部环境的影响, 难以干预, 需通过综合评估其与其他风险的关联性。

2 基于大数据分析的建筑工程造价风险预警指标体系构建

2.1 预警指标体系的设计原则

构建建筑工程造价风险预警指标体系需遵循科学性、系统性、可操作性和灵敏性原则。科学性原则要求指标真实反映风险本质，如成本偏差率衡量成本控制效果；系统性原则强调指标体系全面覆盖风险方面，如结合成本偏差率、进度绩效指数和价格波动指数综合评估；可操作性原则指出指标需明确量化，便于数据采集，如价格波动指数提供具体数据支持；灵敏性原则要求指标能及时反映风险变化，如成本偏差率变化率助力预警^[4]。

2.2 预警指标的选取与分类

在建筑工程造价风险预警中，选取了成本偏差率（CV）、价格波动指数（PFI）、进度绩效指数（SPI）和质量缺陷率（QDR）作为关键指标，分别衡量成本控制、价格波动、进度执行及质量问题对造价的影响。这些指标被分为一级指标（成本风险、进度风险、价格风险、质量风险）和二级指标（CV、PFI、SPI、QDR）。权重分配基于各指标的影响程度，可通过专家打分法（如层次分析法，AHP）或数据分析法（如主成分分析法，PCA）确定。综合风险评分计算公式为：

$$\text{Risk Score} = \sum_{i=1}^n (w_i \times x_i) \quad (2)$$

式（2）中， w_i 为权重， x_i 为标准化指标值。预警指标的层级结构如图 1 所示。

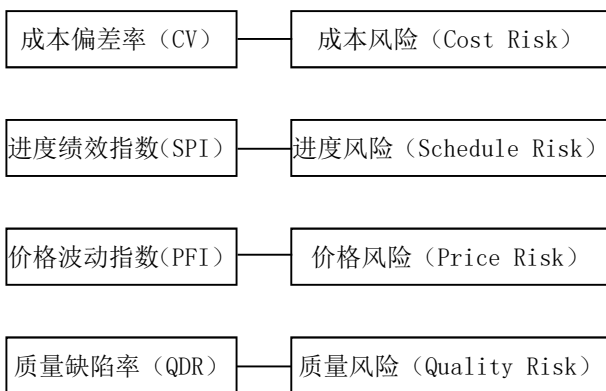


图 1 预警指标的层级结构

2.3 基于大数据的指标数据分析与处理

2.3.1 趋势分析：时间序列模型的应用

趋势分析借助时间序列模型识别造价数据中的长期趋势与季节性变化，常用 ARIMA 模型，其公式为：

$$X_t = \mu + \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (3)$$

式（3）中， X_t 表示时间序列数据， μ 为常数项，

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 是自回归系数，反映前期数据对当前数据的影响； $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为移动平均系数，与白噪声误差项 ϵ_t 相关。应用时需先检验数据平稳性，若非平稳需差分处理，再用 AIC 或 BIC 准则确定 p 和 q 值。如今，LSTM 等深度学习方法也用于处理复杂造价数据趋势预测，能结合多变量输入，提高预警准确性。

2.3.2 关联分析：风险因素关系的量化

关联分析用于量化风险因素间的关系，常用皮尔逊相关系数，其公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式（4）中， x_i 和 y_i 是两个风险变量的观测值， $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为它们的均值。该系数衡量两变量的线性相关程度，取值范围在 -1 到 1 之间。当 r_{xy} 接近 1 时，表示相关性较强。Spearman 秩相关系数则适用于非线性或非正态分布数据，通过计算变量的秩次进行相关性分析。此外，关联规则挖掘可发现多个风险因素之间的复杂关联，如“设计变更频繁”与“材料价格上涨”同时出现时，造价超支风险会显著增加。

2.3.3 聚类分析：风险群的识别

聚类分析采用 K-means 或层次聚类算法归类相似项目以识别风险群。K-means 的目标是最小化簇内平方和：

$$\min_{\{C_1, C_2, \dots, C_k\}} \sum_{j=1}^k \sum_{i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (5)$$

式（5）中， C_j 表示第 j 个簇， μ_j 为该簇的中心点。算法通过初始化簇心位置，不断迭代优化更新簇心和分配样本，直至收敛。层次聚类包括凝聚型和分裂型，通过不同链接方法（如单链接、完全链接、平均链接）度量距离。聚类结果可通过散点图、热力图等可视化技术展示，还可结合决策树或随机森林等分类算法挖掘各风险群的特征变量。

2.3.4 数据处理与综合风险评分

数据标准化通过公式：

$$x_i^{\text{norm}} = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (6)$$

消除量纲差异，将数据缩放至 [0, 1] 区间，式（6）中， x_i 为原始数据， $\min(x)$ 和 $\max(x)$ 分别为数据的最小值和最大值，标准化后的值 x_i^{norm} 便于不同变量间的比较。权重确定可采用层次分析法或熵权法，反映各风险指标的重要性。基于此，综合风险评分计算公式为：

$$\text{Risk Score} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i^{\text{norm}} \quad (7)$$

式（7）中， w_i 为第 i 个风险指标的权重， x_i^{norm} 为标准化后的风险指标值。根据评分设定预警阈值，通常将风险分为三级：低风险 [0, 0.3]、中风险 [0.3, 0.6]、高风险 [0.6, 1]，实现对建筑造价风险的量化评估与

预警，为决策者提供及时准确的风险信息，助力采取有效措施降低风险损失。

3 基于大数据分析的建筑工程造价风险预警模型构建

3.1 预警模型的选择与建立

建筑工程造价风险具有复杂性、动态性和不确定性，需要选择能够处理多变量、非线性关系且适应性强的预警模型。选择了支持向量机（SVM）模型，因其在处理小样本、非线性数据时表现出色，且泛化能力强^[5]。SVM模型原理：假设输入数据集为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ ，其中 $x_i \in R_d$ 是输入特征向量， $y_i \in \{-1, 1\}$ 是对应的类别标签。SVM的目标是找到一个超平面 $w \cdot x + b = 0$ ，使得两类数据的间隔最大化。间隔的大小由 $\frac{2}{\|w\|}$ 决定，因此优化问题可以表示为：

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \text{ subject to } y_i(w \cdot x_i + b) \geq 1 \quad (8)$$

通过拉格朗日乘子法，转化为对偶问题：

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (9)$$

式(9)中， $\alpha_i \geq 0$ 是拉格朗日乘子。最终分类函数为：

$$f(x) = \text{sign}(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b) \quad (10)$$

式(10)中， $K(x_i, x)$ 是核函数，常用的有线性核、多项式核和径向基核（RBF）。预警指标与模型结合：本文的预警指标包括成本偏差率（CV）、价格波动指数（PFI）、进度绩效指数（SPI）和质量缺陷率（QDR）。这些指标作为输入特征向量：

$$x = [CV, PFI, SPI, QDR] \quad (11)$$

输入SVM模型中，通过历史数据训练模型，学习输入特征与造价风险之间的映射关系，从而实现对造价风险的预警。

3.2 模型的训练与优化

本研究利用历史造价数据和已知风险事件作为训练数据，数据来源包括已完成项目的成本记录、进度报告和质量检查报告等。采用支持向量机（SVM）模型进行训练，选择径向基核函数（RBF）：

$$K(x_i, x) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2) \quad (12)$$

通过调整参数 C （惩罚系数）和 γ ，优化模型性能。使用交叉验证方法对模型进行验证和评估，计算模型的平均准确率、召回率和F1分数，以确保模型的可靠性和稳定性。表2是模型优化过程中的部分结果。

最终选择 $C=100$ 和 $\gamma=0.1$ 的参数组合，模型的平均准确率达到92%，召回率为88%，F1分数为90%。

表2 模型优化过程中的部分结果

参数组合	C	γ	准确率	召回率	F1 分数
1	1	0.1	0.85	0.80	0.82
2	10	0.1	0.90	0.85	0.87
3	100	0.1	0.92	0.88	0.90
4	10	0.01	0.88	0.82	0.85

3.3 预警阈值的确定

预警阈值的确定是风险预警系统的关键，本文结合统计分析、专家经验和风险偏好进行设置，并根据项目阶段和市场环境动态调整。具体而言，通过历史数据分布将风险等级划分为低、中、高三个级别，分别对应模型输出值的前30%、中间40%和后30%，阈值计算公式为：

$$T_k = \text{Percentile}(y, p_k) \quad (13)$$

式(13)中， T_k 为第 k 级阈值， y 为模型输出值， p_k 为对应百分位数。同时，邀请行业专家对阈值进行调整优化，并根据项目管理者风险偏好调整阈值以满足不同管理目标。在项目关键阶段或市场环境变化时，通过公式：

$$T_{\text{new}} = T_{\text{old}} \times (1 - \alpha) \quad (14)$$

动态调整阈值，式(14)中， α 为调整系数，以提高预警灵敏度。

4 结束语

基于大数据分析的建筑工程造价风险预警机制，通过识别市场环境、项目管理和工程技术三大维度的风险因素并分类，结合成本偏差率、价格波动指数、进度绩效指数和质量缺陷率等关键指标，利用大数据分析和SVM模型实现了造价风险的有效预警。研究表明，该机制能够精准识别风险，模型准确率和稳定性较高，并可通过动态调整阈值适应不同项目阶段和市场环境。未来可进一步优化模型并拓展应用范围，为建筑行业造价管理提供更有力的支持。

参考文献：

- [1] 董娜,卢泗化,熊峰.大数据背景下基于ABC-SVM的建筑工程造价预测[J].技术经济,2021,40(08):25-32.
- [2] 金海江.建筑工程造价咨询中的风险管理策略探究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2025(01):137-140.
- [3] 李青,许冬冬.建筑工程造价动态管理分析[J].新材料·新装饰,2025,07(05):191-194.
- [4] 邱静静.基于大数据分析的建筑工程项目风险管理优化[J].计算机产品与流通,2024(11):69-71.
- [5] 王红艳.基于大数据分析的建筑工程造价优化策略[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(12):165-168.

市政道桥施工中的绿色建造技术与可持续发展策略

吴 晓

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 城市基础设施作为城市发展的基石, 对城市经济的繁荣与城市形象的塑造具有深远的影响。本研究聚焦市政道路桥梁施工领域, 深入探讨绿色技术体系的实践发展, 通过优化设计、改进施工工艺及创新材料应用, 构建了低碳化施工技术体系, 并从设计、施工等多个维度提出智能监控、资源循环利用及绿色施工标准体系等管理策略, 旨在为项目的全面实施及行业的低碳转型提供有益参考。

关键词 市政道桥; 绿色建造技术; 低碳材料; 智慧施工管理

中图分类号: U415; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.025

0 引言

市政道桥工程作为城市基础设施的关键组成部分, 其特点包括庞大的工程规模、紧迫的工期以及复杂的施工环境。为了确保市政道桥工程的高质量完成, 项目建设过程中必须投入大量的资源和能源^[1]。然而, 传统粗放式施工模式导致的资源消耗与环境负荷问题日益凸显。在“双碳”战略目标的政策驱动下, 绿色建造技术在工程实践中的应用日益广泛。该技术将绿色性和节能性融入工程建设的全过程, 充分发挥绿色建造技术的积极作用, 促进基础设施建设的可持续发展, 为市政道桥工程的建设提供技术赋能^[2]。

1 绿色建造技术体系概述

1.1 低碳材料与资源循环技术

科技进步显著推动了现代能源技术的发展, 并催生了众多绿色施工技术。其中, 再生骨料混凝土技术尤为突出, 其节能环保特性得益于在建筑项目中有效回收建筑废弃物作为再生骨料, 替代了传统天然砂石资源^[3]。这一做法不仅降低了建设成本, 也减少了对自然资源的依赖。再生骨料混凝土技术的运用, 减少了对天然砂石的需求, 从而减轻了砂石开采对环境的破坏, 并缓解了资源紧张的局部问题。以北京某高架桥项目为例, 采用再生骨料混凝土技术, 30% 的材料替代率可实现 12% 的碳排放降低, 充分展现了现代技术在低碳环保方面的优势。此外, 温拌沥青技术作为一种创新应用, 通过向沥青混合料中添加有机降黏剂, 实现了拌合温度的降低, 减少了项目建设过程中燃料能源的消耗。

1.2 节能施工工艺

装配式桥梁技术充分利用了现代技术的优势, 其施工过程涉及的各类构件均能在工厂内完成预制, 随后根据施工需求运至工程现场进行拼装。该技术有效简化了现场施工步骤, 显著降低了施工环节产生的扬尘污染, 从而大幅提升了整体工程效率。在实施上海 S7 公路项目时, 根据工期进度要求, 采用了全预装拼装工艺。该工艺的应用使得工期缩短了 40%, 建筑垃圾减少了 60%, 为工程现场建设提供了有力支持^[4]。随着现代技术的持续进步, BIM 与 3D 打印技术的结合引起了广泛关注。该方法通过将 BIM 模型与 3D 打印技术相结合, 不仅能够利用模型优势优化施工方案, 还能利用 3D 打印技术完成局部复杂构件的制作。这不仅满足了构件制作的精度要求, 而且将绿色施工理念贯穿于工程建设的全过程, 显著提升了桥梁施工的效率。

1.3 环境友好型施工管理

物联网传感器具备实时监测现场环境的能力, 能够精确掌握空气 PM2.5 浓度及施工现场噪声水平的动态变化。在项目施工前, 通过在施工现场部署物联网传感器, 当监测到的环境指标超出预定阈值时, 系统将自动触发喷淋装置, 通过喷洒水雾的方式降低空气中的颗粒物浓度, 有效抑制扬尘污染, 从而保护施工现场的环境质量。以深圳某跨海大桥施工项目为例, 通过设置物联网传感器并运用智能监控系统, 根据现场实际情况采取相应的环境管控措施, 实现了 PM10 浓度降低 35% 的显著效果^[5]。在项目施工过程中, 不可避免地会产生大量废水排放, 这些废水若未经处理直

接排放，将对水环境造成严重污染。为提升水资源的利用效率，本项目在建设过程中构建了分级沉淀池和膜处理系统。在重力作用下，废水中的悬浮物逐渐沉淀，而膜处理系统则能有效去除其中的微小颗粒物。经过两级处理后，废水的总体水质得到显著提升，回收利用率达到了 80% 以上。该监测系统不仅减少了废水排放量，降低了对周边环境的污染风险，同时也减少了水资源的消耗。

2 全生命周期可持续发展策略

为了解全生命周期可持续发展战略在实践中的运用情况，下面将从海绵城市理念融合与全生命周期碳排放核算两个角度进行优化设计。

2.1 绿色设计优化

全生命周期可持续发展策略的核心在于绿色设计优化，将环保理念融入设计阶段，从源头入手减少对环境的负面影响。桥梁设计伴随着大量的基础设施，例如雨水花园，将海绵城市理念融入了绿色设计优化环节。这些举措既是对桥梁设计方案的美化，同时也能利用不同的措施提高地表径流渗透率，对缓解城市内涝、提高水资源利用率作用明显。河北省雄安新区市政道路建设时，将海绵城市理念融入绿色设计环节，使得年径流控制率高达 85%。桥梁和道路的优化设计需要充分利用不同的设备设施，既能发挥雨水花园等设施在雨水收集、储存方面的作用，也能通过水资源的再次利用推进城市的生态环保建设。绿色设计优化的另一重点则是 LCA（生命周期评价）模型，该模型能够从项目生命周期角度对其进行全面评估，掌握温室气体排放量的变化，该模型为设计的低碳化处理提供了帮助。

2.2 智慧施工管理

在绿色供应链管理中，严格控制运输半径，通过优先采购本地环保材料，显著降低了物流过程中的碳排放量。在现代建筑项目中，智慧施工管理的应用主要体现在两个核心领域：数字孪生平台与绿色供应链管理。数字孪生平台能够构建三维可视化模型，实时监控项目施工进度、资源消耗以及环境影响的变化，为现场管理和项目决策提供了坚实的数据支持。而绿色供应链管理则专注于环保材料的采购，严格控制供应链环节的能源消耗，确保了项目施工过程中资源的合理配置。在杭州亚运配套道路项目的建设过程中，数字孪生平台的理念得到了充分利用，不仅加强了成本控制，还提升了资源利用效率，材料浪费率降低了 15%。

2.3 运维阶段低碳化

光伏声屏障一体化技术作为现代科技进步与理念创新的结晶，通过在桥梁声屏障上集成光伏发电组件，实现了隔音与发电的双重功能。例如：在广某快速路的试点项目中，光伏声屏障的应用不仅为周边环境提供了清洁能源，而且在环境保护方面发挥了显著作用。在桥梁建设过程中，通过引入智能监测与预防性养护技术，实现了对桥梁结构的实时监控，确保了桥梁结构的健康状态。该技术能够实时识别结构问题，并迅速采取修复措施，有效防止了小问题的扩大，从而延长了桥梁的使用寿命。传感器的实时监控功能为桥梁结构提供了客观的预警信息，有助于项目管理的决策。随着人工智能与大数据技术的不断进步，这些技术在桥梁结构健康状态评估中的应用日益广泛，能够及时掌握桥梁结构的变化，并为后期维护计划提供有力支持。

3 案例分析

3.1 工程概况

本研究对象为一城市次干路，其全长为 0.72 公里。通过对该项目资料的深入分析，该路段的设计速度被确定为每小时 40 公里，路宽为 32 米，为周边区域的经济发展与交通流动提供了有力支撑。该道路沿线将与四条其他道路交汇，形成一个全新的交通网络。为了确保交通动线的流畅性，该道路被设计为连接现有道路与九顶山路，从而为城市经济建设提供了坚实的基础。基于此，本文将对绿色建造技术在工程实践中的应用进行深入探讨。

3.2 绿色技术应用

再生骨料混凝土作为一种新型混凝土材料，是通过将废弃混凝土进行再利用而制备的。在绿色施工技术的广泛应用背景下，再生骨料混凝土在特定案例中的应用比例已达到 40%。该比例的实现，不仅体现了废弃混凝土资源的有效再利用，而且显著降低了混凝土施工过程中对天然骨料的依赖。此外，该技术的应用减少了对骨料开采和运输的需求，从而节约了时间和人力成本。更重要的是，该技术的实施有助于减少碳排放，对环境保护产生了积极影响。在市政道桥施工中，再生骨料混凝土的应用不仅提高了废弃物的利用率，还促进了资源的循环使用。与传统混凝土相比，再生骨料混凝土在生产过程中减少了原材料的消耗，从而降低了对自然环境的影响。此外，再生骨料混凝土的使用还有助于减轻城市建筑垃圾的处理压力，减少了对垃圾填埋场和焚烧厂的依赖。在案例项目中，通过对再生骨料混凝土的应用比例进行科学规划，确保了

施工过程的顺利进行,同时也满足了工程质量要求。这一成功案例为其他市政道桥项目提供了宝贵的经验和借鉴,推动了绿色建造技术在更多领域的应用和发展。预制装配式路缘石通过工厂预制与现场组装相结合的施工技术,相较于传统施工方法,显著提升了施工效率,降低了成本,并且在项目施工过程中实现了更为精确的控制。该技术的应用减少了对天然石材及预制混凝土的开采需求,有效减轻了开采活动对环境的潜在负面影响。此外,装配式路缘石还具有高度的可定制性,能够根据具体项目的需求进行设计和生产,满足了不同道路环境和景观要求。这种灵活性和适应性使得装配式路缘石在市政道桥施工中得到了广泛应用,不仅提升了道路的美观性和实用性,还进一步推动了绿色建造技术的发展。同时,装配式路缘石的使用寿命长,维护成本低,为市政道桥项目的长期运营提供了可靠保障。太阳能作为一种典型的清洁能源,其利用光伏电路实现太阳能向电能的转换,进而通过电池储存电能,为路灯提供照明支持。与传统路灯相比,光伏路灯无需复杂的布线作业,从而降低了建设项目的成本。此外,光伏路灯发出的光线更为柔和,有助于塑造城市独特的夜间景观,并传递出城市致力于绿色节能的积极形象。光伏路灯还具备显著的环保效益。由于完全依赖太阳能发电,光伏路灯在使用过程中不会排放任何有害物质,对空气质量和环境没有负面影响。这一特点使得光伏路灯成为城市绿色建造的重要组成部分,有助于改善城市环境,推动可持续发展。

3.3 成效分析

在市政道路工程中,采用再生骨料混凝土及预制路缘石技术,不仅有效降低了对天然资源的依赖,而且显著提升了废弃材料的循环利用率。光伏路灯的应用,因其较低的能源消耗特性,减少了传统路灯布线作业所需的时间与人力成本,进而导致了项目建设过程中碳排放量的显著下降。在该市政道路工程中,通过综合实施上述措施,实现了碳排放量降低 18% 的成效,这不仅减少了资源的消耗,而且为环境保护提供了有力支持。在建筑项目的施工阶段,伴随着显著的能源消耗,同时产生大量建筑废弃物。通过在施工过程中应用再生骨料混凝土和装配式路缘石技术,不仅提升了现场废弃物处理的效率,而且有效减少了废弃物的排放量。据现场数据统计分析,上述措施使得施工现场的建筑废弃物减少了 55%,从而显著提高了资源利用的整体效率。此外,这些技术的应用还促进了施工现场环境的改善,减少了因废弃物堆积而造成的环境污

染问题。再生骨料混凝土的使用,不仅减少了对新骨料的需求,而且使得原本可能成为环境负担的废弃物得以循环利用,转化为有价值的建筑材料。装配式路缘石技术的应用,则通过工厂预制、现场组装的方式,减少了现场切割、加工等环节,进一步降低了废弃物的产生。这些举措共同作用下,不仅提升了项目的环保效益,而且为推动市政道桥施工的绿色化发展提供了有力支撑。照明设施在夜间行人及车辆行驶的安全性方面发挥着至关重要的作用。光伏路灯作为一种创新的照明技术,利用太阳能作为其光源,有效降低了传统照明方式所导致的电能消耗。据相关统计数据显示,在某市政道路工程项目中应用光伏路灯后,每年可实现约 30 万度电能的节约,此举为城市的可持续发展奠定了坚实的基础。

4 结束语

绿色建造技术与可持续发展战略的应用领域不断拓展。该技术不仅能够降低项目建设过程中对生态环境产生的负担,而且能够为项目带来长期的经济利益。随着科学技术的持续进步,绿色建造技术正处于不断更新与发展的阶段,为建筑工程项目指明了未来的发展路径。首先,技术创新是实现可持续发展的核心要素,因此必须在科技研发领域增加资源与能源的投入,持续开发先进技术,以减少施工过程中能源与材料的浪费,并将环保理念贯穿于工程建设的各个阶段。其次,政府应积极发挥引导作用,实现政策的协同效应,不断完善碳交易市场机制,激发市场活力,引导企业探索更为环保的施工方法,营造积极的绿色施工环境,推动行业的健康持续发展。最后,公众参与亦是不可或缺的一环,项目建设过程中应建立绿色施工公众监督平台,鼓励公众参与项目监督,行使监督权,以促进绿色建造技术与可持续发展策略的有效实施。

参考文献:

- [1] 项银聪. 市政道路桥梁施工中绿色施工技术的应用研究[J]. 砖瓦世界, 2020(06):248.
- [2] 任冬亮. 绿色施工技术在道路桥梁施工中的运用探究[J]. 中华建设, 2023(33):137-139.
- [3] 王康. 探究绿色施工技术在道路桥梁施工中的运用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(07):88-91.
- [4] 李华峰. 绿色环保理念下路桥工程施工技术应用分析[J]. 运输经理世界, 2020(16):87-88.
- [5] 王惠. 绿色施工技术在道路桥梁施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 05(06):82-83.

电气安装工程施工管理中 BIM 技术的深度应用与效能提升

刘虹伶

(国网湖南省电力有限公司水电分公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要 在建筑工程领域, BIM 技术的应用范围不断扩大, 已成为一种新型的施工管理手段。本文以某 220 kV 开关站改造工程为背景案例, 从建立模型、前期准备、设备验收、施工指导四个方面介绍了 BIM 技术在电气安装中的深度应用, 并总结了基于 BIM 的工程管理要点, 包括管线综合优化与碰撞检查、工程量统计、施工安全管理。研究表明: 应用 BIM 技术, 该工程施工成本降低、进度加快, 取得满意的施工管理效果, 可在类似电气安装工程施工中推广应用。

关键词 电气安装; 施工管理; BIM 技术; 管线综合优化; 工程量统计

中图分类号: TU71; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.026

0 引言

BIM 指的是建筑信息模型, 依托数字化技术, 为模型提供与工程实际情况一致的工程信息库, 包括几何信息、专业属性和状态特征等, 为工程施工管理提供共享平台。《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》提出, 大力推广 BIM 技术, 推进 BIM 技术在新型建筑工业化全寿命期中的一体化集成应用^[1]。在电气安装工程中, 因设备种类多、安装流程复杂, 需多个专业协同, 导致传统施工模式的效率低、质量控制不良, 甚至导致成本超支、工期延后。将 BIM 技术深入应用其中, 能优化现场施工管理模式, 提高模拟性和可视化程度, 达到降本增效的目标。本文结合实践探讨 BIM 技术在电气安装和工程管理中的具体应用。

1 工程概况

1.1 220 kV 开关站运行现状

某水电厂开关站建于 1960 年, 位于发电厂房右侧。其中 220 kV 开关站电气主接线为双母线带旁母接线, 总平面布置采用全户外 AIS 布置: 220 kV 出线间隔 3 个, 向东架空出线, 两用一备; 主变进线间隔 4 个, 由西南电缆进线; 电压互感器间隔 2 个, 母联间隔 1 个。站区主入口向西方向, 进站道路向北引出接入发电厂房区道路。根据调查, 220 kV 部分存在以下问题: (1) 配电装置区域内的结构支架、混凝土龙门架、钢桁架龙门架等安全隐患大, 增加了开关站全站停电风险。(2)

开关站虽然进行过改造, 但选用的设备均为老旧型号, 因运行年限长、遭受周边潮湿环境影响, 出现一定程度的老化和锈蚀现象。(3) 站内计算机监控系统采用集中布置方案, 不利于常规检修维护, 且对时精度不满足要求。

1.2 改造方案和施工内容

结合 220 kV 开关站运行现状和问题, 拟采用整体推倒重建改造方案, 改造完成后终期 5 回 220 kV 主变进线, 3 回 220 kV 出线, 220 kV 配电装置采用户内 GIS 布置, 以确保设备安全、稳定运行, 提高发电效益。根据改造方案, 施工内容主要包括一次设备、二次设备、土建、水工消防、线路、通信 6 个部分。该电气改造工程规模大、设备数量多, 加之工作环境条件干扰, 为提高施工质量, 满足进度、成本控制要求, 决定将 BIM 技术应用在电气安装和工程管理中。

2 电气安装中 BIM 技术的深度应用

在低压电气安装环节, 主要包括配电柜安装、变压器安装、母线槽安装和线缆敷设等内容, BIM 技术的应用体现在建立模型、前期准备、设备验收、施工指导四个方面, 详细介绍如下。

2.1 建立模型

基于 BIM 建立电气工程模型, 可将平面图纸转化为三维立体模型, 重现电气设备的全貌, 帮助施工人员更加准确深入地掌握图纸, 分析电气设备与现场环

境的关系,进而高效开展安装工作。在模型建立环节,关键是识别图层信息,将设备参数导入模型中,包括空间位置、参照点坐标等;然后提取墙体轮廓,为设备安装提供精确指导。

2.1.1 识别图层信息

利用 BIM 识别图层信息,可采用图层自动识别算法,该算法能识别图纸对应的多个图层,提高建模的准确性^[2]。在具体应用中,该算法具有较强的检索能力,其检索对象是特征元素,计算每个图层中单一特征元素的匹配度得分 *Score*,即可完成识别工作,计算公式如下:

$$Score = \begin{cases} 0, & \exists NC == false \\ \frac{N(SC == True) + 1}{N(SC) + 1}, & \neq \exists NC == false \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $N(SC=True)$ 表示符合匹配条件特征的数量, SC 表示充分条件, NC 表示必要条件, $false$ 表示错误匹配。根据计算结果, 进一步计算每个图层中所有特征元素的匹配度得分 T_{Score} , 计算公式如下:

$$T_{Score} = Score(FE) + \sum_{i=1}^{Score} Score(RE_i) \quad (2)$$

式(2)中, FE 表示图层中的特征元素, RE_i 表示特征元素 i 的临近相关元素。

2.1.2 提取墙体轮廓

提取墙体轮廓时,先对墙体自适应分块能提高提取效率和精度。具体方法是划分适应离散点数据,将电气设备的整体布局图像,划分为统一规格的网状结构,利用离散点数据描绘墙壁特征,并且符合动态变化与调整的要求。该环节,网状结构中的最优平均坐标点数量越多,提取到的墙壁特征越准确,表达式如下:

$$\begin{cases} W = X_{\max} - X_{\min} \\ H = Y_{\max} - Y_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, W 表示网格宽度, H 表示网格高度, $X_{\max}$ 和 $Y_{\max}$ 分别表示网格横、纵坐标的最大值, $X_{\min}$ 和 $Y_{\min}$ 分别表示网格横、纵坐标的最小值。在网格中, 定点坐标的密度期望值 ρ 计算公式:

$$\rho = \frac{n}{WH} \quad (4)$$

式(4)中, n 表示坐标的数量。搜索圆外接正方形的面积, 计算公式:

$$S = \frac{28A}{n\pi} \quad (5)$$

式(5)中, A 表示定点集的覆盖面积。得到 ρ 和 S 后即可计算电气安装场景中墙体的物理量 M , 计算公式:

$$M = S\rho = \frac{28A}{n\pi} \times \frac{n}{WH} = \frac{28A}{\pi WH} \quad (6)$$

2.2 前期准备

计算得到电气设备安装场景的图层和墙体轮廓后，能为构建三维模型提供准确数据。在前期准备环节，需要全面了解电气安装工程的内容。从设计图纸、安装方案和规范要求出发，确定科学合理的实施步骤及物料清单，针对图纸中的错误及时修正，预测安装施工可能遇到的问题，尤其是预埋件的位置和数量等，避免现场安装环节出现返工现象。

2.3 设备验收

电气设备零部件的质量，直接影响整合安装质量和性能，设备进场时必须展开全面验收工作。验收要点包括：（1）采购时要兼顾设备材料的先进性、实用性、耐久性，严格审查供应商的资质，避免出现以次充好问题^[3]。（2）满足国家节能环保要求，设备材料使用中不能出现污染、能源浪费等问题。（3）取样送检，经技术专家和监理工程师把关，确保质量和性能满足电气工程的要求。

2.4 施工指导

低压电气安装时,需严格审核设计图纸,重点把控设备型号、安装位置、技术规范等内容。因电气安装涉及多个专业,需在BIM模型中进行施工预演,分析不同专业的相互影响,发挥出协同作用。

2.4.1 配电柜安装

因配电柜结构体型较大, 安装时利用配电柜的高精度模型, 明确尺寸、门开启方向、进出线位置等属性, 确保配电柜与墙体、通风管道、消防设备间距 ≥ 50 cm, 避免后期返工。与此同时, 在 BIM 中模拟配电柜的运输通道, 确保设备的可通过性, 如门洞宽度 $\geq$ 设备宽度+20 cm^[4]。同时对基础槽钢定位, 导出坐标数据指导现场钻孔, 将误差控制在 ± 2 mm 以内。

2.4.2 变压器安装

变压器安装时,将变压器模型与结构梁柱模型整合,验证基础承重是否达标,要求基础承重 ≥ 1.5 倍设备重量。在变压器吊装环节,使用BIM技术模拟吊车选型、臂长角度,确保安全的作业半径。变压器安装完成,及时开展防雷接地施工,配备安全防护系统。在该工程中,基于BIM技术采取多项防雷措施,确保接地装置放置在指定位置,采用隐蔽方式布置接地导线;然后安装均压环、搭建避雷网,将室内接地干线与接地装置相连。

2.4.3 母线槽安装

母线槽安装时,一方面,利用 BIM 电气模块自动

生成母线槽的最短路径,减少弯头数量。同时集成力学软件,验证支架间距是否符合规范标准,要求水平段 $\leq 2\text{ m}$,垂直段 $\leq 3\text{ m}$;另一方面,在BIM中设定母线槽连接器允许公差,轴向 $\pm 3\text{ mm}$,径向 $\pm 1.5\text{ mm}$,模拟热膨胀位移,保证连接器精准安装。

2.4.4 线缆敷设

在线缆敷设环节,设定明确的线缆敷设规则,如强电与弱电线路间距 $\geq 30\text{ cm}$,弯曲半径 ≥ 10 倍线缆直径,由BIM自动生成最优路径。考虑到线缆类型多样、数量较大,为提高施工效率和资源配置率,将线缆敷设进度与BIM模型关联,实时监控敷设进度,出现异常及时预警。

3 电气安装工程施工管理中BIM技术的深度应用

3.1 管线综合优化与碰撞检查

管线综合优化与碰撞检查是BIM技术落地的核心环节,直接影响施工效率和工程质量^[5]。在该工程中,管线综合环节将电气桥架和母线槽模型与暖通、给排水、建筑结构模型整合,在同一个平台上确保其坐标系、标高体系一致。同时赋予管线系统类型、电压等级、防火等级等属性,方便后续智能筛选与冲突分类。碰撞检查环节主要包括硬碰撞、软碰撞两种类型,前者是实体交叉需100%消除,避免施工作业中返工。后者指的是安全间距不足、净高不足,根据规范要求进行动态调整。完成碰撞检查后自动生成报告,其中包含冲突位置的坐标、截图、责任主体及建议修改方案,支持PDF、Excel格式查看,便于施工班组在现场对照整改。

3.2 工程量统计

在该工程现场施工中,依托BIM模型实现精准计量,为相关物资的调配提供科学依据。实施要点包括:(1)在电缆桥架、配电柜等电气构件的模型中,置入规格、材质、单价等参数,可按系统类型自动分类统计^[6]。

(2)根据计量规则标准导出工程量清单,自动关联造价软件,相较于人工计算显著提升了效率。(3)针对设计变更情况,BIM模型可实现数据的实时更新,避免人工重复计算。

3.3 施工安全管理

电气安装工程的施工风险因素较多,为降低施工事故率,保障人员与设备安全,该工程在安全管理方面引入BIM技术。首先,建立安全数据库,集成电气模型和带电操作、高空作业等规范,自动识别高风险

作业类型,如高压配电室、交叉作业区等。其次,BIM技术和高精度传感器相结合,自动采集现场环境的温度、湿度、气体浓度等参数,出现异常数据自动预警,提示施工人员及时干预。最后,在安全培训活动中,利用BIM软件创设触电、坠落等虚拟场景,增强施工人员的安全意识和应急处理能力。

4 工程施工管理效能提升评价

4.1 施工成本降低

BIM技术的深度应用,降低了工程施工成本,其中材料浪费率从5.4%降低至1.7%,返工成本占比从4.6%降低至2.2%,提高了施工单位的经济效益。

4.2 施工进度加快

在电气安装工程施工管理中,BIM技术的深度应用加快了施工进度,实现了施工资源的精准化、动态化调配,将实际施工进度与预期目标的偏差控制在5%以内,最终在规定工期内完工,实际工期缩短4 d。

5 结束语

将BIM技术应用在电气安装工程领域,符合新型建筑工业化发展方向,也是提高施工信息化水平的必然要求。本研究结合工程案例,详细介绍了BIM技术在电气安装和工程管理中的深度应用,显著提升了施工管理效能,可在类似工程中推广。未来,随着大数据、云计算、智能算法等技术的发展,可与BIM技术紧密结合,提高电气安装工程的可视化程度,从以往粗放型管理模式转变为自动化、精细化管理模式,更好地实现预期管控目标。

参考文献:

- [1] 牛旭.房屋建筑电气设计中BIM技术的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024(19):88-90.
- [2] 廖彬,曹乾坤,赵志刚.PPP模式下BIM技术在装配式建筑电气工程中的应用探究[J].建筑与装饰,2025(01):118-120.
- [3] 黄颖峰,陈果,陈蕴,等.BIM技术在F市220kV北郊变电站迁建工程中的应用[J].海峡科学,2024(10):36-38.
- [4] 刘秀彬,闫博.建筑电气安装中智能化技术应用与质量提升策略[J].科海故事博览,2025(05):28-30.
- [5] 李杰.建筑机电安装中电气管线的预留技术研究[J].工程技术研究,2024,06(21):92-94.
- [6] 李丽萍,李萍萍,赵国磊.基于BIM技术的装配式变电站工程造价影响因素敏感性分析:以某220kV变电站为例[J].价值工程,2023,42(27):98-101.

分布式电源接入配电网谐波污染问题与主动治理策略

王业帅

(雄特建设工程(山东)有限公司, 山东 聊城 252000)

摘 要 随着分布式电源的大规模接入, 配电网谐波污染问题日益严峻。谐波污染不仅会降低供电质量, 还可能引发设备过热、绝缘老化等问题, 甚至诱发电力系统共振, 威胁配电网安全稳定运行。分布式电源自身输出谐波特性以及谐波在配电网中的传播放大效应, 是导致谐波污染加剧的主要原因。针对分布式电源接入引发的谐波问题, 亟需从源头控制、传播抑制等方面入手, 积极探索新型有源治理技术, 实现“源—网—荷”系统整合, 全方位构筑配电网谐波治理防线, 保障配电网安全经济运行。

关键词 分布式电源; 配电网; 谐波污染; 主动治理

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.027

0 引言

风电、光伏等分布式电源具有清洁低碳、灵活高效等优势, 受到国家政策的大力支持, 在配电网中渗透率不断提高。分布式电源的接入优化了能源结构, 提高了供电可靠性, 也带来了一系列问题, 谐波污染问题日益凸显。分布式电源采用电力电子设备并网, 自身输出电流呈现较大的谐波特性, 谐波经并网点注入配电网后, 在线路、设备等的作用下不断传播、叠加放大, 使配电网各节点电压、电流严重畸变, 谐波含量超标。谐波污染影响用电设备的正常工作, 加速老化, 降低寿命, 还引发配电网过热、振动等问题, 诱发电力系统并联谐振, 后果不堪设想。基于此, 研究分布式电源接入背景下的配电网谐波污染问题刻不容缓。

1 分布式电源接入配电网谐波污染概述

1.1 分布式电源与配电网的关系

分布式电源是指在用户端分散布置的小型发电设备, 主要包括小型风力发电、光伏发电、燃气轮机等。与集中式电源相比, 分布式电源具有清洁环保、灵活多样的优势, 能够就地消纳, 减少电能长距离输送过程中的损耗。分布式电源通过配电网与用户直接连接, 电力潮流呈现双向交互特性, 配电网由原来单一的“源—网—荷”结构向“源—网—源—荷”的主动配电网发展。分布式电源的接入虽然提高了供电可靠性, 优化了电能流动方式, 但也为配电网的规划、运行、控制带来了新的挑战, 尤其是谐波污染问题尤为突出, 给

配电网的电能质量管理、安全稳定运行造成严重影响。

1.2 谐波污染的基本概念与特性

谐波是指频率为工频整数倍的正弦量, 通常用总谐波畸变率(THD)表征。在实际配电网中, 用电设备的非线性特性, 会产生大量谐波电流, 并在线路和设备中传播叠加, 导致各测量点电压、电流波形畸变, 出现谐波污染, 谐波具有频率高、传播快、危害大等特点。谐波频率远高于工频, 在配电网中传播迅速, 可远距离扩散。谐波易引起设备发热、振动加剧、噪声增大、绝缘老化等问题, 加速设备损坏, 影响其使用寿命。频率接近的谐波易引发配电网的并联谐振, 导致谐波放大, 后果不堪设想, 谐波具有上述特性, 配电网受到谐波污染, 其影响将迅速蔓延, 危害配电网安全运行^[1]。

1.3 谐波污染对配电网的影响

分布式电源引发的谐波污染, 对配电网安全稳定运行构成严重威胁。(1) 加剧线路和设备发热。谐波电流在线缆、变压器等设备中产生附加损耗, 引起设备温升加剧, 加速绝缘老化, 影响使用寿命。(2) 引发电能计量误差。电能表等计量装置多采用感应式原理, 难以准确计量谐波电能, 导致计量误差增大, 影响电费结算。(3) 引起继电保护和安全自动装置误动。谐波会对继电保护和安全自动装置的电流、电压采样产生干扰, 致使保护误动或拒动, 威胁配电网安全。(4) 诱发并联谐振。当谐波频率与系统阻抗频率特性相近时, 易激发并联谐振, 使特定频率谐波分量被放大,

导致设备损坏。(5)谐波污染还会对用户端敏感设备产生干扰,引起音视频质量下降、控制失灵等问题,影响用户用电体验。谐波对配电网安全稳定运行危害巨大,必须高度重视。

2 分布式电源接入配电网谐波污染的主要问题

2.1 分布式电源输出谐波特征及机理

分布式电源是配电网谐波的主要来源,风电、光伏发电广泛采用电力电子变流装置并网,如逆变器等。其开关特性使输出电流呈现脉动,含有大量谐波分量,以光伏发电为例,光伏电池输出为直流电,需经逆变器转换为交流电并入配电网,逆变器采用脉宽调制技术,其开关频率通常远高于工频,致使输出电流频谱中含大量高次谐波。光照强度、温度等因素的波动,也导致逆变器输出功率、电流波形随之变化,谐波含量呈现间歇性特征,风电同样采用变流器并网,其输出谐波问题与光伏类似。分布式电源变流装置的高频开关特性,是引发配电网谐波污染的根源所在,分布式电源自身输出的谐波电流,通过并网点汇入配电网,并沿线路不断传播、叠加,导致整个配电网遭受谐波污染^[2]。

2.2 谐波在配电网中的传播与放大问题

分布式电源产生的谐波,在配电网中会出现传播和放大等问题,加剧谐波污染。谐波沿配电线路传播迅速,影响范围不断扩大,由于谐波频率远高于工频,在线路中传播衰减减小,可较远距离扩散,致使更多配电网节点受到污染。谐波在传播过程中不断与背景谐波叠加,使谐波含量不断放大,若不同分布式电源注入的同一频率谐波出现同相位叠加,则该频率谐波分量被进一步放大。配电网普遍存在无功补偿电容,其容抗随频率升高而降低,对高次谐波呈现小阻抗通路,使其在线路中远距离传播,当谐波频率接近系统谐振频率时,可能引发并联谐振,导致谐波急剧放大。谐波在配电网中的传播、放大效应不容忽视,配电网结构复杂、接入点多,使得谐波在其中传播、叠加更加难以控制。必须充分研究谐波污染的传播特性及机理,采取有效抑制措施。

2.3 现有谐波治理方法的局限性

针对谐波污染,目前主要采取被动治理为主的措施,存在一定的局限性。在分布式电源并网端安装无源滤波装置,如LC滤波器等,对输出谐波进行被动抑制,但随着电源容量增大,所需滤波器体积也急剧增加,不仅成本高昂,还占用大量空间,实用性不强。在配电网敏感节点处安装有源电力滤波器(APF),主动发出与谐波电流大小相等、相位相反的补偿电流,

实现谐波抵消,但APF成本较高,且容易受到配电网电压畸变的影响,治理效果不稳定。在用户侧安装无源滤波装置抑制谐波,但容易引起配电网系统谐振,反而使局部谐波放大,这些传统的谐波治理手段,大多为点上治理,只关注设备端,缺乏系统视角,未充分考虑谐波在“源—网—荷”间的传播与交互作用,只能消极被动地抑制谐波,而非从根源抑制谐波产生。现有治理措施难以从整体上解决分布式接入引发的谐波问题,迫切需从源头抑制、过程传播、用户侧防护等角度构建主动治理策略^[3]。

3 分布式电源接入配电网谐波污染的主动治理策略

3.1 分布式电源谐波源头控制技术

治理分布式电源引发的谐波污染,首先是从源头抑制谐波产生,可从并网条件、变流器拓扑和控制等方面入手,最大限度地减小分布式电源自身输出谐波。应从严规范分布式电源并网条件,将谐波含量控制纳入并网标准,对新接入的分布式电源提出总谐波畸变率上限要求,超标不予接入。在分布式电源设计环节,优化逆变器等变流装置的拓扑结构与控制算法,采用多电平逆变拓扑,显著降低输出电流谐波含量。对于已投运的分布式电源,采用有源滤波技术,在并网逆变器中增加有源滤波控制,实时检测输出电流谐波,控制逆变器主动发出补偿电流,抵消自身产生的谐波。可在分布式电源并网点附近设置谐波自动监测装置,实时监控其输出谐波水平,一旦超标立即启动限制措施,必要时可解列限额运行,通过上述源头主动控制策略,可有效抑制分布式电源自身谐波产生,从源头上遏制谐波污染^[4]。

例如:在某风电场接入配电网的工程实践中,通过优化变流器拓扑和控制方式,显著降低了风电机组的输出谐波。传统风电多采用两电平逆变器,其开关损耗大,谐波含量高,针对这一问题,该工程采用了三电平中性点钳位逆变器拓扑,在直流侧增加电容分压,将直流电压分为两部分,使每个开关管承受电压降低,降低开关频率,减小输出电流谐波。在控制环节引入脉宽调制预测电流控制算法,根据电网电压、风电机组输出电流实时计算PWM波形,优化逆变器开关管通断时序,进一步抑制输出谐波。通过上述拓扑和控制优化,该风电场逆变器输出电流总谐波畸变率降低了60%以上,有效抑制了风电机组的谐波产生。

3.2 配电网谐波传播抑制方法

针对谐波在配电网中的传播放大问题,可采取优化网络结构、安装主动滤波装置等措施,抑制谐波在

网中的传播。在配电网规划阶段,优化分布式电源与线路和负荷的布局,避免分布式电源过于集中接入,减少同一接入点汇集谐波叠加放大的风险。其次,加强配电网末端用户的谐波管理,鼓励高谐波发射负荷单独接入,避免其谐波向上游传播,污染整个配电网。在谐波严重超标的敏感节点,配置安装有源滤波装置,主动发出补偿电流抵消谐波,阻断其向邻近线路扩散。针对配电网普遍存在的无功补偿电容,可增加电容器组保护装置,如串联电抗器,抑制谐波进入,降低并联谐振风险,通过优化配电网的接入和连接方式,并在关键节点设置主动抑制装置,形成纵深防御体系,可有效抑制谐波在网中的传播放大^[5]。

例如:在某住宅小区配电网的谐波治理中,通过优化配电网结构和安装有源滤波装置,有效抑制了谐波在网中的传播,该小区内分布式光伏较多,不同业主的光伏逆变器并网形成多个谐波源,为避免各逆变器输出谐波在公共连接点处汇集叠加,配电网运营商对接入方式进行了优化。将分布较集中的光伏统一接入专用馈线,减少其他用户受谐波影响。在小区配电室低压母线处安装有源电力滤波器,监测母线谐波电流,控制滤波器主动发出补偿电流,抑制谐波向上层配电网传播。将谐波超标用户的光伏限电上网,督促其及时整改。从配电网全局着眼,优化网架结构,在谐波敏感节点增设主动抑制措施,能从网络传播层面阻断谐波污染,为配电网安全稳定运行筑起坚实屏障。

3.3 创新谐波治理技术与系统整合

随着分布式电源渗透率的提高,配电网谐波问题日趋复杂,传统治理措施难以从根本上解决问题,必须积极探索多元化的创新治理技术,并在“源—网—荷”间实现优化整合,全方位构建谐波污染防治体系。在分布式电源侧,研究基于虚拟同步机的主动配电网无源化控制,使分布式电源模仿同步发电机特性,主动合理调节有功、无功,改善电能质量,抑制谐波产生。在用户侧,推广应用无局放变压器,降低变压器对谐波的敏感性,开展用电设备谐波辐射限值管理,从用电环节遏制谐波产生。在配电网侧,开展基于谐波阻抗和谐振频率等指标的配电网规划,优化分布式电源与无功补偿装置的容量配置与接入点选择;研究基于配电自动化的谐波在线监测与智能抑制控制策略,实现全网谐波统一管控。通过在“源—网—荷”多环节采用创新治理技术,并实现全局协同优化,构建主动治理、全域覆盖的配电网谐波治理新格局,为配电网安全稳定运行保驾护航。

例如:某配电网运营商在谐波治理实践中,积极

应用了虚拟同步机、在线监测等多项创新技术,实现了“源—网—荷”的系统整合与协同治理。在源侧,通过虚拟同步机控制,使分布式电源具备类似同步发电机的惯性和阻尼特性,可根据配电网需求,主动调节输出特性,抑制谐波产生。在网侧,部署配电自动化终端,对全网各节点电压电流实时监测,评估谐波水平,一旦超标,立即下发控制指令,调整分布式电源出力,必要时切除高谐波负荷。在荷侧,积极推广应用 K-13 变压器,降低对谐波的敏感性;同步开展用户侧用电设备谐波辐射水平普查,对于严重超标的,责令整改或予以惩处,通过在“源—网—荷”各个环节综合施策、系统规划,谐波超标问题得到有效缓解。全网用户的平均谐波电流畸变率从原来的 14% 降低到 6%,供电可靠性从 99.967% 提升到 99.985%,用户投诉率大幅下降,在创新技术与系统整合方法的支撑下,该配电网谐波管理工作实现了“源头可治、过程可控、用户可管”的全过程一体化闭环管控,谐波治理效果显著。

4 结束语

分布式电源的大规模接入,在优化能源结构、提高供电可靠性的同时,也给配电网谐波治理带来了严峻的挑战。分布式电源自身的谐波特性,叠加在配电网中的传播放大效应,致使谐波污染问题日益凸显,危及配电网安全。面对新形势下谐波治理的新课题,必须与时俱进,积极践行“主动治理、多点抑制、过程控制、智能协同”的治理理念。在新一轮能源变革大潮中,配电网作为承上启下的枢纽,在谐波污染防治上先行一步、精准发力,为安全、高质、高效的能源流动提供坚实的保障。广大电力工作者要立足新发展阶段,践行新发展理念,主动顺应能源革命浪潮,积极探索能源与电力融合发展新模式。

参考文献:

- [1] 熊陶君. 基于虚拟谐波阻抗的配电网谐波主动防御系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [2] 王介宇, 胡雪峰. 一种考虑光伏治理资源的交直流配电网电能质量协同治理策略 [J]. 常州工学院学报, 2024, 37(05): 43-51.
- [3] 汪伟, 于希娟, 张雨璇, 等. 考虑用户谐波治理需求度的电能质量增值服务方案设计研究 [J]. 高电压技术, 2023, 49(S01): 141-146.
- [4] 侯超群, 熊伟, 张继红. 主动配电网谐波综合治理方法探讨 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020(09): 86, 100.
- [5] 肖玉斌. 浅析主动配电网谐波综合治理方法 [J]. 通讯世界, 2019, 26(04): 210-211.

建筑工程管理中创新模式的应用

武玉山

(淮北市园林管理处, 安徽 淮北 235000)

摘要 在建筑工程管理中, 传统建筑工程管理模式存在局限性, 通过引入新技术、优化管理流程以及提升资源利用效率, 可显著提升管理效率和质量。然而, 创新模式的应用亦面临着组织阻力、技术瓶颈以及适应性问题等挑战。针对这些挑战, 本研究对建筑工程管理中的创新模式进行了深入探讨, 详细论述了信息化、精益化、集成化三种创新模式在实践中的具体应用, 并提出了加强组织沟通、增加技术投入、提升管理者灵活性等策略, 旨在对促进创新模式的有效实施有所裨益。

关键词 建筑工程管理; 创新模式; 信息化管理; 精益化管理; 集成化管理

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.028

0 引言

随着建筑产业向智能化转型与“双碳”目标双重驱动下, 现代建筑工程管理正面临着多维度、系统性的新型挑战。在应对现代化、大规模、高复杂度的工程项目时, 传统建筑工程管理模式逐渐暴露出其局限性, 如信息孤岛与协同低效、成本控制难度大、质量与安全风险等问题^[1]。因此, 对建筑工程管理模式进行探索和创新, 已成为提升建筑工程管理效率和质量的关键^[2]。本研究探讨建筑工程管理中创新模式的应用, 分析传统模式的不足, 阐述创新模式的内涵与特征, 以及其在建筑工程管理中的具体应用。

1 建筑工程管理现状分析

1.1 传统建筑工程管理模式概述

在建筑工程项目管理领域, 传统模式通常建立在经验主义基础之上, 并遵循固定的管理流程。在此框架内, 项目管理者依据历史经验制定项目计划、进行资源分配、监控项目进度, 并确保工程质量。然而, 随着建筑技术的持续革新以及项目规模的不断扩大, 传统模式的局限性逐渐凸显^[3]。该模式可能因过于刚性而难以适应项目实施过程中的动态变化。

1.2 建筑工程管理面临的挑战

在当前阶段, 建筑工程管理领域正面临多维度的挑战。一方面, 鉴于建筑市场的竞争态势愈发激烈, 项目管理者在确保工程质量的前提下, 必须有效控制成本, 以提升项目的经济效益。这要求管理模式必须更加精细化、高效化, 能够精确预测并应对项目中可能出现的各种风险。另一方面, 建筑技术的迅猛发展, 新材料、新工艺、新技术的不断涌现, 对项目管理者的专业素养提出了更高的要求^[4]。

2 创新模式在建筑工程管理中的应用基础

2.1 创新模式的内涵与特征

创新模式是一种突破传统框架, 引入新思维、新方法和新技术以解决问题和促进发展的途径。在建筑工程管理领域, 创新模式的实践不仅限于技术层面的革新, 更广泛地涵盖管理理念、管理流程、管理手段等多维度的变革。其核心目标在于以更加开放、灵活和高效的方式, 应对建筑工程管理过程中遭遇的各类挑战和问题。创新模式展现出几个显著的特征^[5]。首先, 它具备高度的适应性, 能够依据项目实际状况和市场动态, 迅速调整管理策略和方法。其次, 创新模式强调效率, 通过优化管理流程、采纳先进技术手段, 提升管理效率, 减少管理成本。再者, 创新模式注重可持续性, 不仅着眼于当前项目的成功, 而且兼顾项目对环境、社会和经济的长远影响, 追求长期效益。最后, 创新模式倡导创新思维, 激发管理人员的创造力和想象力, 为建筑工程管理注入新的活力。

2.2 创新模式应用的必要性

在建筑工程项目管理领域, 创新模式的应用尤为关键。一方面, 鉴于建筑行业的迅猛发展与市场竞争的不断加剧, 传统的建筑工程项目管理模式已难以适应现代化、大规模、高复杂度的项目需求。创新模式能够突破传统框架的限制, 引入新的管理理念与方法, 从而提升管理效率与质量, 增强项目的市场竞争力。另一方面, 建筑工程项目管理正面临诸多挑战, 包括成本控制、质量管理、进度控制、安全风险等。创新模式通过引入先进的技术手段与管理工具, 能够更有效地应对这些挑战, 降低项目风险, 确保项目的顺利

实施。同时,创新模式亦能激发管理人员的创新思维与创造力,为建筑工程项目管理带来新的发展机遇与突破点。因此,创新模式在建筑工程项目管理中的应用具有极其重要的意义。

3 建筑工程管理中创新模式的具体应用

3.1 信息化管理模式

3.1.1 信息化管理的概述

在建筑工程管理领域,信息化管理作为一种创新模式的重要体现,通过运用现代信息技术手段,实现了对建筑工程管理过程中信息的收集、处理、存储及传递的全面数字化、网络化和智能化。该管理方式显著提升了管理效率,有效降低了人为失误,确保了信息的精确性和时效性。此外,信息化管理为项目决策者提供了全面且精确的数据支持,辅助其作出更为科学的决策。

3.1.2 信息化管理系统的构建

构建信息化管理系统是实现信息化管理的基础。一个完善的信息化管理系统通常包括信息采集系统、信息处理系统、信息存储系统和信息传递系统。信息采集系统负责收集项目过程中的各种数据和信息;信息处理系统对这些数据进行处理和分析,生成有用的管理信息;信息存储系统则负责存储这些信息,以便后续查询和使用;信息传递系统则确保信息能够在项目团队内部和外部之间顺畅传递。通过构建这样的信息化管理系统,可以实现建筑工程管理的全程信息化,提高管理效率和质量。

3.1.3 信息化管理在建筑工程管理中的应用

在建筑工程管理领域,信息化管理的应用极为广泛。针对项目管理,借助项目管理软件,可以制定详尽的项目计划,涵盖关键时间节点、任务分配、资源需求等要素,以确保项目依照既定计划顺利推进。在成本控制领域,信息化管理手段能够实现对项目成本支出的实时监控,及时识别并修正成本超支问题。至于质量管理,信息化管理技术能够实现对施工全过程的监控,确保施工质量满足设计规范。此外,信息化管理技术亦可拓展至安全管理、合同管理、文档管理等多个维度,从而全面提高建筑工程管理的水平与效率。综上所述,信息化管理的引入对建筑工程管理产生了根本性的变革,促进了该领域的现代化与智能化进程。

3.2 精益化管理模式

3.2.1 精益化管理理念

精益管理理念起源于制造业,其核心目标在于最大化价值创造与最小化资源浪费。在建筑工程项目管

理领域,精益管理强调以客户需求为驱动,通过不断优化管理流程、削减冗余环节及浪费,以提升管理效率与品质。该管理模式重视细节与过程控制,倡导持续改进与创新,旨在实现项目最优效益。精益管理理念在建筑工程项目管理中展现出广阔的应用潜力,有助于项目管理者更精确地把握项目进度,提高资源使用效率,并确保项目目标的顺利实现。

3.2.2 精益化管理在建筑工程中的应用策略

在建筑工程项目管理实践中,精益管理的应用策略主要涵盖以下关键领域。首先,通过流程优化,简化管理程序,削减冗余的审批环节和等待时间,从而提升工作效率。例如:可实施并行处理、快速反馈等机制,以加速信息流通和决策进程。其次,重视资源配置的合理性,依据项目实际需求动态调整资源分配,以避免资源的无效利用。这涉及人力、物力、财力等多方面资源,确保其得到最优化利用。最后,强调持续改进和创新,激励项目团队成员提出改进建议和创新思维,不断优化管理流程和方法,以提高项目管理水平。

3.2.3 精益化管理对建筑工程管理效果的提升作用

在建筑工程管理领域,精益化管理的应用显著提升了管理效能。首先,通过流程优化与资源配置的合理化,工作效率得以显著提高,项目周期缩短,成本得到有效控制。此举不仅为项目创造了更大的经济价值,还增强了项目的市场竞争力和客户满意度。其次,精益化管理倡导持续改进与创新,激发了项目团队成员的主动性和创新精神,促进了项目管理水平的持续提升。此外,该管理模式的应用还强化了项目的风险应对能力,确保了项目在复杂多变的环境中维持稳定运行。因此,精益化管理在建筑工程管理领域具有重要的应用价值和深远的意义。

3.3 集成化管理模式

3.3.1 集成化管理的概念

集成化管理是一种综合性的管理范式,其核心在于将管理过程中的各个环节、资源及要素进行有机整合,构建一个协同高效的整体系统。在建筑工程管理领域,集成化管理体现为项目管理、成本管理、质量管理、安全管理、合同管理等多个维度的深度融合,旨在实现信息共享、流程协同以及资源的优化配置。该管理模式致力于通过整合各方资源,提升管理效率,降低管理成本,确保项目目标的高质量达成。

3.3.2 集成化管理模式的构建与实施

构建集成化管理模式需明确管理目标,确立统一的管理标准和流程,以及建立有效的信息沟通机制。在建筑工程管理领域。首先,需建立一个跨部门的项

目管理团队,确保各方利益的协调和统一。该团队应涵盖项目经理、设计师、施工人员、成本控制人员、质量管理人员等,他们共同负责项目的整体规划、执行和监控。其次,需制定一套统一的管理标准和流程,确保各个环节的工作能够有序进行,避免信息孤岛和流程断裂。这包括项目计划制定、进度控制、成本预算、质量检查、安全监管等各个方面的标准和流程。最后,需建立有效的信息沟通机制,利用现代信息技术手段,实现信息的实时传递和共享,提高管理决策的效率和准确性。在实施集成化管理模式时,需注重过程的监控和调整。鉴于建筑工程项目具有复杂性和不确定性,管理过程中难免会遇到各种问题和挑战。因此,需建立一套完善的监控机制,及时发现和解决问题,确保项目按计划顺利进行。同时,需根据项目实际情况和市场变化,灵活调整管理策略和方法,保持管理模式的适应性和灵活性。

3.3.3 集成化管理在建筑工程管理中的优势分析

在建筑工程管理领域,集成化管理展现出其显著的优越性。首先,该方法能够显著提升管理效率,通过实现信息共享与流程协同,有效减少重复性工作与信息传递的延迟,从而加速项目进程。其次,集成化管理有助于降低管理成本,通过资源的优化配置与统一管理标准的实施,减少资源浪费与重复投资,进而提高资源利用效率。此外,该方法能够提升项目质量,通过实施严格的质量控制与监管措施,确保项目满足既定标准与要求,从而提高客户满意度。最后,集成化管理能够增强项目的风险应对能力,通过整合各方资源与建立有效的监控机制,及时识别并解决潜在问题,降低项目风险。因此,集成化管理在建筑工程管理领域具有广阔的应用前景与重要的实践价值。

4 创新模式应用面临的挑战与对策

4.1 创新模式应用面临的挑战

在建筑工程项目管理领域,创新模式的引入虽显著提升了管理效能,但亦伴随着若干挑战。首先,创新模式的实施需突破传统管理架构与思维模式的限制,此过程中常遭遇组织内外部的抵抗。部分管理人员对传统管理方法的依赖可能引发对新管理模式的质疑或反对,从而妨碍创新模式的推广与执行。其次,创新模式的运用依赖于尖端技术手段与信息系统,这要求项目团队必须具备相应的技术能力与资源投入。然而,在实际操作过程中,部分项目团队可能面临技术支撑不足或资金投入有限的问题,这将导致创新模式难以实现其预期效果。此外,创新模式的运用还须与项目

实际状况及市场环境相契合,这要求项目管理者必须具备高度的灵活性与应变能力,以便能够依据实际情况及时调整管理策略与方法。

4.2 应对挑战的策略与建议

针对创新模式应用所面临的挑战,本研究提出了一系列策略与建议。首先,强化组织内部沟通与协调机制,提升管理层对创新模式的认知与接纳程度。建议通过专业培训和理念宣讲等途径,普及创新模式核心理念及其优势,以增强管理层对新管理模式的信心与支持。同时,建议构建相应的激励体系,以促进管理层积极参与创新模式的实施与推广。其次,增加技术投入与资源配置,为创新模式的应用提供坚实的技术支持与保障。项目团队应积极采纳先进的技术工具与信息系统,以提升管理效率与精确性。此外,加强与外部合作伙伴的协同与交流,共同促进创新模式的应用与进步。最后,提升项目管理者适应性及应变能力,使其能够依据项目实际状况及市场环境,及时调整管理策略与方法。项目管理者需具备敏锐的市场洞察力与判断力,能够迅速识别并应对项目中的变化与挑战,确保创新模式的有效执行与项目的顺利推进。

5 结束语

建筑工程项目管理是一个复杂且动态变化的过程,其要求持续地进行管理方法的探索与创新,以适应市场演进和项目需求的转变。本研究深入探讨了创新管理方法在建筑工程项目管理中的应用,提出了信息化、精益化以及集成化三种具体的管理策略,并对其在实际操作中的优势与所面临的挑战进行了详尽分析。针对这些挑战,本研究进一步提出了相应的应对策略和建议,以促进创新管理方法在建筑工程项目管理中的广泛采纳与持续发展。未来,需持续关注建筑工程项目管理领域的创新趋势,致力于提升建筑工程项目管理的水平与质量贡献更多的学术智慧与实践力量。

参考文献:

- [1] 苏禹. 建筑工程管理现代化与精细化策略分析[J]. 住宅与房地产, 2025(02):83-85.
- [2] 许晓悦. 创新思维在建筑工程管理中的应用研究[J]. 房地产世界, 2023(22):72-74.
- [3] 汤佩韦. 基于可持续发展理念的建筑工程管理探析[J]. 中华建设, 2023(12):26-28.
- [4] 吴志博. 建筑施工现场安全管理问题分析及对策[J]. 建材与装饰, 2020(14):192-195.
- [5] 王建权. 建筑施工现场安全管理存在的问题及对策研究[J]. 建材与装饰, 2020(05):196-197.

市政工程施工质量管理体系的构建与完善

陈琦蓓

(宣城市市政园林公用建设管理处, 安徽 宣城 242000)

摘要 市政工程作为城市基础设施的核心组成部分,其建设质量直接关系到城市运行的安全性与居民生活质量,构建并完善市政工程施工质量管理体系对于确保工程质量至关重要。本文从组织机构优化、制度建设升级、责任落实强化、质量检查监督精准化以及信息化平台构建等关键方面,详细阐述了体系构建的核心要点,提出了强化全程管理效果、优化控制流程逻辑、加强培训师资配备、推行标准化施工流程以及建立评估改进制度等完善途径。实践证明,通过全面构建与持续完善管理体系,可以有效提升市政工程施工质量,确保工程安全。

关键词 市政工程; 施工质量管理体系; 标准化施工

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.029

0 引言

市政工程施工环境的复杂性、涉及主体的多样性以及质量影响因素的多元性,传统的质量管理模式已无法满足现代工程建设需求,构建一个科学且完备的质量管理体系,成为提升市政工程施工质量的关键所在。随着我国城市化进程的加速,市政工程建设规模不断扩大,复杂度也日益提升。面对这一挑战,如何确保市政工程的施工质量,成为行业内外普遍关注的焦点。传统的质量管理模式往往侧重事后检查与补救,而忽视了事前预防与事中控制的重要性,这导致质量问题的频发与整改成本的增加。因此,探索并建立一种适应现代市政工程特点的质量管理体系,对于提升施工效率、保障工程质量具有重要意义^[1]。本文探讨市政工程施工质量管理体系的构建,包括组织机构的合理布局、制度建设的不断完善、责任落实的有效保障、质量检查监督的全面提升以及信息化平台的构建等方面,并提出相应的完善策略,以期为提高市政工程施工质量管理水平提供参考。

1 市政工程施工质量管理体系的构建

1.1 建立健全质量管理组织机构

从项目规划与设计、材料采购、施工监管到竣工交付的全过程,应设立专门的质量控制岗位,并采用矩阵式管理方法,促进不同专业人员之间的灵活协作。例如:工程技术人员与质量检测人员的协同工作,同时组建专家顾问团队,为质量管理提供专业的建议和技术支持,以促进组织机构的高效运作和全面的质量控制。此外,明确各级质量管理人员的职责与权限,确保责任与权力的对等,避免管理盲点或权力重叠,

形成自上而下、逐级递进的质量管理责任体系。同时,建立定期的组织协调会议机制,及时交流工程质量状况,解决质量管理过程中遇到的问题,确保质量管理体系内部信息的畅通无阻和决策的迅速执行^[2]。通过这些措施,可以确保质量管理组织机构具有高效的执行力、灵活的应变能力,为市政工程施工质量的持续提升奠定坚实的组织基础。

1.2 制定完善的质量管理制度

完善的质量管理体系是确保市政工程品质的关键。必须废除过时且混乱的规章制度,构建一套精细化、可操作的质量管理路径,使之与工程实践紧密结合,对各施工阶段的质量标准进行细化,并设定可量化的质量验收标准。同时,应改进激励机制,对那些严格遵守质量管理体系、促进工程质量提升的团队和个人,给予物质奖励和荣誉表彰。实施质量追溯机制,对质量问题进行逆向排查,明确责任主体。此外,应定期对质量管理体系进行评估和更新,以适应不断变化的工程技术与管理环境^[3]。体系中应融入预防为主的原则,针对施工过程中可能出现的质量问题,预先制定应对策略,以降低质量风险。还应明确质量问题的处理流程和责任追究机制,确保在质量问题发生时能够迅速响应、及时整改,并对相关责任人进行问责。此外,加强质量管理体系的宣传和培训,确保每位员工都能深入理解并严格执行体系要求,形成全员参与质量管理的良好氛围。

1.3 落实质量责任制

确保市政工程施工质量管理的核心在于严格执行质量责任制。该制度旨在改变以往责任界限模糊的状况,

明确全员质量责任细则,从项目负责人至一线施工人员,均需明确各自在质量控制中的具体职责与方向。采用目标管理方法,将质量目标按阶段细化,实施质量责任书的签订,确保每位员工清晰认识到自身工作对整体质量的影响程度。同时,建立质量责任考核机制,按照既定周期对员工履行质量责任的情况进行评估,并据此实施奖惩,以增强员工对质量责任的意识,确保质量责任贯穿于工程的每一个环节和每一位员工。此外,质量责任制的实施应与绩效考核体系紧密相连。通过设定科学合理的质量考核指标,定期对项目各参与方的质量管理活动进行评估,并依据评估结果实施相应的奖惩措施^[4]。这不仅能够激发员工参与质量管理的积极性,还能有效规范员工行为,保障质量责任制的顺利执行。在执行质量责任制的过程中,还应重视信息沟通与反馈。通过构建有效的信息交流平台,及时收集和处理项目中的质量问题,确保问题能够得到快速响应和解决。

1.4 建立质量检查与监督机制

为确保市政工程的质量,必须建立一套全面的质量检查及监督机制。该机制旨在超越传统的事后质量甄别方法,通过构建一个全方位、实时监控的质量检查体系,以实现工程的有效控制。在施工准备阶段,应对原材料及构配件进行严格的质量检验。在施工过程中,应实施对各个工序的实时监控与控制。施工完成后,进行全面的质量验收工作。此外,引入第三方正规检测机构参与,以增强检查过程的公正性和专业性。利用移动互联网技术,实现质量数据的即时上传与分析,确保能够及时发现并纠正质量缺陷。为确保质量检查与监督机制的有效运行,还需制定详细的质量检查计划及标准。该计划应明确各阶段、各工序的检查内容、方法及频率,确保检查工作的系统性和全面性。同时,建立质量问题追溯机制,对发现的质量问题进行深入剖析,追溯其根源,并采取有效措施防止同类问题再次发生。此外,加强对质量检查人员的培训与考核,提升其专业素养和责任心,确保检查工作的准确性和公正性。通过这一系列措施,构建起一个高效、严谨的质量检查与监督机制,为市政工程的优质建设提供坚实保障。

1.5 构建信息化质量管理平台

信息化质量管理平台整合了工程建设中的各类信息资源,包括质量评估数据、进度跟踪数据、人员相关资料等,实现了信息的集中统筹与共享。该平台采用大数据分析技术,对质量数据进行深度挖掘,以期

提前发现质量潜在问题。同时,引入建筑信息模型(BIM)技术,对工程进行三维建模,清晰展现施工流程与质量状况,便于及时调整施工方案。通过便携式终端设备,实现了质量信息的即时传播与反馈,从而提升了管理效率,推动了质量管理向科学化、精准化、高效化的方向发展^[5]。例如:某市政道路建设项目借助信息化质量管理平台,施工团队可以实时获取各个施工路段的质量评估数据。比如在路基压实度检测方面,通过平台收集的数据进行大数据分析,系统发现某一段路基压实度数据呈现异常波动趋势,经过进一步排查,确认是由于压实设备操作不当导致。基于此,管理人员及时调整了设备操作方式,避免了潜在的路基质量问题。又如,在桥梁施工部分,利用BIM技术构建三维模型,施工人员能够直观地看到桥梁各个结构部位的施工流程和质量状况。当发现桥梁支座安装位置在模型中与设计稍有偏差时,可立即在实际施工中进行纠正,调整施工方案,避免了后续返工带来的成本增加和工期延误。同时,现场施工人员通过便携式终端设备,如智能安全帽、手持平板等,能够及时将现场发现的质量问题,如混凝土表面的细微裂缝,实时反馈给质量管理人员。质量管理人员在收到信息后,迅速组织专家远程会诊,给出解决方案,这一系列操作在短时间内完成,极大地提升了管理效率。整个项目在信息化质量管理平台的助力下,科学化、精准化、高效化地推进,最终高质量交付使用,为城市基础设施建设提供了有力保障。

2 市政工程施工质量管理体系的完善

2.1 强化全过程质量管理

市政工程质量管理的施工全过程中占据核心地位,突破了以往过分强调施工而忽略前期筹备与后期维护环节的思维定式。自项目启动初期阶段始,采纳质量监控理念,对工程选址及方案设计环节执行细致的质量评价,对每道工序进行严格的质量把关,不仅重视物质实体品质,施工环节必须对安全质量、环境质量等要素进行全程跟踪。构建并实施一项长效的质量监控体系,对工程运行状况进行系统的跟踪与反馈,采用物联网技术架构,实时跟踪并记录工程项目各阶段的质量数据,为质量监控提供实时支持,实施质量信息全程可追溯的动态跟踪,对各个环节的质量管理实施全面监控。此外,全过程质量管理还强调了对工程变更的有效控制。在市政工程施工过程中,由于各种因素的影响,工程变更时有发生。为了确保工程质量,必须建立完善的工程变更控制机制,对变更请求进行

严格审查,确保变更的合理性和必要性。同时,对变更后的施工方案进行重新评估,确保新的施工方案能够满足质量要求。

2.2 优化质量控制流程

强化市政工程质量监管流程的改革对于提升市政工程品质至关重要。该改革旨在打破传统流程中各阶段相互独立的局限,通过实施流程重组,构建一个全面且综合的质量监管与评估体系。该体系将施工、检验及验收等关键环节整合,形成一个连贯的体系,确保信息传递的无缝对接与整合。另外,采用项目管理的专业工具集,实现质量流程的可视化监督与效果跟踪,精确设定各阶段的时间安排与质量标准。同时,设立核心质量监控的关键阶段,对重点区域及关键工艺环节实施强化监管。

此外,制定并实施质量监控流程的反馈机制,结合现场施工的实际进展,对施工流程进行适时调整以优化施工质量,从而提高质量监管的执行效率与成效水平。

2.3 加强质量管理人员培训

市政工程项目的质量水平与质量管理人员的综合素养密切相关。为提升质量管理水平,需对传统单一的培训模式进行革新,采取多元化的培训策略。具体而言,应邀请在专业领域具有权威地位的专家进行知识分享讲座,深入解析现代质量管理与控制领域的最新规范以及理念的演变路径。同时,组织现场考察学习活动,并制定操作手册,借鉴国际及国内优秀工程在质量改进措施方面的成功经验。此外,采纳网络教育互动体系,为质量管理人员提供灵活的学习途径和丰富的资源库。实施培训效果的评估机制,对培训成效显著的个体进行知识技能的评估与认证,并根据评估结果开展针对性的后续培训。

2.4 推行标准化施工

实施标准化施工措施是提升市政工程品质的核心策略。为此,必须建立全面且详尽的施工规范和操作手册,对材料选择、施工技术、质量监控等关键阶段进行系统性分析。本研究采纳了模块化施工的核心理念,对工程项目进行模块化分解,以增强施工过程的一致性和可复制性。在施工现场构建规范化施工样本区,使施工人员对施工标准和质量要求有直观的理解。同时,引入质量认证体系,对符合标准化施工规范要求的项目执行认证审核,以推动施工企业全面贯彻施工标准化规程。

2.5 建立质量评估与改进机制

构建科学的质量评估体系与持续改进机制,是确保市政工程质量持续提升的关键。本研究对传统单一的定性评估方法进行了系统化优化,提出了结合定量与定性分析的综合评估体系。通过应用层次分析法、模糊综合评价法等数学模型,实现了评估模型的构建与验证。该体系能够对施工质量进行全面、客观的综合分析。基于评估结果,本研究对产品质量问题的成因进行了深入的理论分析,并制定了针对性的改进措施清单。此外,本研究还构建了质量监控的跟踪体系,对优化策略的实施效果进行了动态跟踪与综合评价,确保了质量问题的有效整治与持续跟踪。为确保持续改进的有效性,还建立了定期的评估与反馈机制。该机制包括定期的现场检查、数据收集与分析,以及基于评估结果的策略调整。通过与施工团队、监理单位的紧密合作,实现了对施工质量问题的及时发现、快速响应与有效解决。同时,将质量评估与改进机制的实施效果纳入绩效考核体系,激励各方积极参与质量管理,形成了全员参与、持续改进的良好氛围。这一系列措施的实施,不仅提高了市政工程施工的质量水平,也为类似项目的质量管理提供了有益的参考与借鉴。

3 结束语

构建与完善市政工程施工质量管理体系是一项复杂的系统工程,需要从多个维度进行综合考量。通过建立完善的组织架构、全面的质量管理制度、明确的责任落实机制、高效的检查监督体系以及先进的信息化管理平台,可以为市政工程施工质量提供坚实的基础。同时,强化全过程质量管理、优化控制流程、开展专业人员培训、执行标准化施工以及建立评估与改进机制,能够进一步提升质量管理水平,确保市政工程的高质量完成,为城市的可持续发展和提高居民的生活质量提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 陆瑞.建筑工程施工质量的精细化管理体系构建[J].城市开发,2024(12):98-99.
- [2] 杜广敏.水利工程施工项目质量控制与质量管理体系的构建[J].水上安全,2024(15):4345.
- [3] 滕永生.市政工程施工质量管理中存在的问题和对策分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(21):211-213.
- [4] 郭海辉.市政工程施工质量管理中存在的问题和对策[J].居舍,2022(15):106-109.
- [5] 滕永生.市政工程施工质量管理中存在的问题和对策分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(21):211-213.

装配式建筑施工过程监理控制要点及方法研究

朱 光

(安徽淮武工程项目管理有限公司, 安徽 淮北 235000)

摘 要 装配式建筑施工过程监理控制对项目质量、安全、进度和成本至关重要, 预制构件生产、运输、安装等环节需严格把控。传统监理方法存在信息传递滞后、协同不足等问题, 已无法满足现代装配式建筑施工要求。本研究基于建筑信息模型(BIM)、物联网和大数据等先进技术, 构建信息化、智能化的监理体系, 分析了质量控制、进度控制、安全控制和成本控制要点, 提出了基于大数据的造价风险识别与应对策略, 并通过案例分析验证了创新监理控制方法在提升项目质量、保障施工安全、控制工程成本和优化施工进度方面的有效性, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 装配式建筑; 监理控制; BIM技术; 物联网; 大数据

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.030

0 引言

装配式建筑以其高效、环保的优势, 成为建筑行业转型升级的重要方向。然而, 其施工过程的复杂性对监理控制提出了更高要求。预制构件的生产、运输、安装等环节紧密相连, 任何一个环节的疏漏都可能影响工程质量、安全和进度。传统的监理方法难以满足装配式建筑精细化管理的需求, 信息传递滞后、协同不足等问题日益凸显。因此, 探索信息化、智能化的监理控制方法势在必行。将BIM、物联网、大数据等先进技术融入监理工作, 构建全方位、全过程的监控体系, 对于提升装配式建筑施工管理水平具有重要意义。

1 装配式建筑施工过程监理控制要点分析

1.1 质量控制要点

1. 在预制构件方面, 需严格检验原材料, 把控进场关, 并进行抽样复检。生产过程需全程监督, 确保从模具、钢筋骨架到混凝土浇筑、养护各环节都符合标准。构件验收则需详细检查外观、尺寸偏差和结构性能。

2. 在节点连接方面, 梁柱节点需控制钢筋锚固长度和灌浆料施工, 剪力墙节点则要确保套筒安装和钢筋连接质量。

3. 在构件安装时, 吊装需选择合适的吊具和方法, 并控制吊装速度; 定位与校准则需精准测量, 确保构件垂直度、平整度和标高偏差均符合要求, 并及时固定^[1]。

1.2 进度控制要点

装配式建筑施工进度控制核心在于预制构件生产与现场施工的协同。利用BIM技术制定生产计划, 进行4D模拟, 精准预测构件需求。在生产过程中, 实时信息反馈系统及时传递进度数据, 快速诊断偏差并制定应对策略, 如优化供应链、设备预警维护等。现场施工进度计划编制需系统考虑吊装顺序、设备作业等因素, 采用网络计划技术细化任务。多层次的进度监控体系, 结合移动巡检和EVM(挣值管理)方法, 量化分析偏差。针对偏差, 从人员调配、物资供应、施工工艺等多维度调整, 如灵活调配人员、JIT配送(准时制配送)模式、引入新型装配技术, 确保施工高效有序进行。

1.3 安全控制要点

装配式建筑施工安全控制要点集中在预制构件吊装与现场防护。吊装时, 设备选型须与构件重量和尺寸匹配并留有安全裕度, 使用前严格检查试运行。吊具与索具需专门设计, 确保构件平衡。作业前制定专项方案, 进行技术交底和培训, 设置警戒区域, 专人指挥, 试吊确认安全后再起吊, 可采用吊钩视觉监控和风速仪等技术实时监测。现场防护方面, 临边、洞口需及时设置牢固的防护栏杆和安全平网, 并定期检查维护。高处作业人员需配备安全带、安全帽, 平台需稳定并设置防护棚, 严禁恶劣天气作业, 全方位保障施工安全^[2]。

1.4 成本控制要点

装配式建筑成本控制的核心在于预制构件和现场施工的成本管理。在预制构件方面,需优化设计,合理选材,控制生产过程,提高模具周转率,降低运输成本。在现场施工方面,人工成本需合理规划、动态调配,并加强培训与绩效管理;材料成本需优化采购策略、库存管理,并监督使用过程;机械成本需合理选型、调度,并做好维护保养。综合成本控制则需完善成本核算与分析体系,强化合同管理与索赔,并实施目标管理与考核,将成本控制责任落实到人,激发全员参与,实现全过程成本控制,从而提高项目经济效益。

2 大数据分析在建筑工程造价风险中的应用

2.1 大数据在装配式建筑造价风险管理中的优势

大数据分析在装配式建筑造价风险管理中展现出显著优势。海量、多类型的数据以及快速处理能力,使其能全面识别风险因素,从市场材料价格波动到施工现场装配效率,均能挖掘出潜在关联。基于大数据的风险预警模型,可实时监测数据,提前预警潜在风险,为项目管理人员提供决策依据。同时,大数据分析能精准量化风险,实现动态评估,帮助制定更合理的应对策略。通过对类似项目数据的分析,优化资源配置,提高资源利用效率,降低成本,从而有效降低造价风险^[3]。

2.2 基于大数据的装配式建筑造价风险识别

在装配式建筑中,大数据已成为识别造价风险的关键工具。通过整合历史造价、市场行情及政策法规等多源数据,构建全面的风险因素库。运用关联规则挖掘和聚类分析等数据挖掘技术,揭示数据间的潜在联系,例如材料价格与政策调整的关联。深入分析不仅识别常见材料、人工成本及设计变更风险,更关注预制构件生产、物流运输及现场装配等潜在风险。精准识别为前期风险评估和应对策略提供可靠依据,助力从业者预判并防范造价风险,保障项目顺利进行。

2.3 装配式建筑造价风险的量化评估模型构建

为量化装配式建筑造价风险,构建基于大数据的评估模型至关重要。该模型融合多层次分析架构,采用模糊综合评价法,将风险因素划分为材料成本、人工成本、设计变更、构件生产、物流运输及现场装配六个维度。各维度权重通过层次分析法(AHP)确定,并引入熵权法修正主观权重,提升客观性。风险隶属度函数采用三角模糊数表示,构建风险评价矩阵 R 。最终,通过模糊运算综合评估风险等级。模型计算公式为:

$$Z=W \times R \quad (1)$$

式(1)中, W 为权重向量, R 为风险评价矩阵。该模型可动态量化各阶段风险水平,为风险管控提供数据支撑,提升决策科学性^[4]。

2.4 基于大数据的装配式建筑造价风险应对策略制定

基于大数据的装配式建筑造价风险应对策略,需结合项目特点制定。大数据分析可提前识别设计缺陷与施工工艺问题,优化方案规避风险;精准量化风险因素,合理配置资源,建立质量监控系统,降低成本。分析保险与合同数据,选择合适产品与模式转移风险。利用大数据确定风险阈值,制定储备金计划。大数据支持实时监控,收集多维度信息,对接市场数据,建立预警模型,及时通知管理人员。依据实时数据和预警,灵活调整策略,确保造价有效控制,提高项目成功率,促进行业可持续发展。

3 装配式建筑施工过程监理控制方法研究

3.1 传统的监理控制方法回顾与分析

在装配式建筑施工过程监理控制中,传统方法占据重要地位,包括巡视、旁站和平行检验等。巡视通过动态巡回检查,及时发现质量问题、安全隐患及进度偏差,但内在质量把控不足,实时监督效果欠佳。旁站则对关键环节进行全程监督,确保施工符合规范,但缺乏对生产环节监控,且精力有限,难以兼顾所有因素。平行检验通过独立复核,验证质量,但范围有限,难以全面掌握质量波动,且对进度和成本控制作用间接。此外,传统方法信息传递效率低,缺乏协同整合,难以形成全面监理体系,无法满足高质量控制需求^[5]。

3.2 创新的监理控制方法探索

1. 基于BIM技术的监理控制方法。BIM技术在装配式建筑施工监理中的应用,可构建信息共享模型,提升监理精细化水平。通过BIM模型模拟构件生产、运输、安装等环节,提前发现并解决潜在问题。结合物联网技术,实时采集现场数据,实现进度、质量、安全动态监控。以下公式可用于评估BIM技术应用效果:

$$E=\frac{Q_1-Q_0}{Q_0} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, E 为BIM技术应用效果提升率, Q_1 为应用BIM技术后的监理控制指标值, Q_0 为应用BIM技术前的监理控制指标值。该公式可量化分析BIM技术在提升监理工作效率、降低质量缺陷率等方面的贡献,为持续改进监理控制方法提供数据支撑。

2. 物联网技术在监理控制中的应用。物联网技术

通过在施工现场部署传感器、RFID 标签及视频监控设备，构建了全面感知的数据采集网络。该网络实时获取预制构件的应力应变、温湿度、定位信息，以及施工现场的环境参数与人员设备状态。基于云计算平台的数据处理与分析，实现了施工过程的透明化与可追溯性。监理工程师通过物联网数据，可量化评估施工质量、精准调控施工进度、及时预警安全隐患。构建基于物联网的监理控制模型，其预警准确率 P 可通过以下公式计算：

$$P=\frac{N_w}{N_w+N_f}\times100\% \tag{3}$$

式(3)中， N_w 为预警准确次数， N_f 为预警失败次数。该模型有效提升了监理工作的预见性与科学性，为装配式建筑施工过程的精细化管控提供了技术支撑。

3. 大数据驱动的监理决策方法。在装配式建筑施工监理中，大数据驱动的决策方法是提升监理效能的关键。通过整合海量项目数据，如历史造价、构件生产、施工进度、质量检测及安全事故等，运用数据挖掘和机器学习技术进行深度分析，为监理工程师提供精准且科学的决策支持。大数据分析可预测造价变动趋势，识别潜在风险，优化施工方案，提升施工效率和质量，降低安全风险。实时监测质量数据，及时发现缺陷，防止问题扩大。综合考虑多维度信息，预测进度延误风险，提前制定应对措施。挖掘安全隐患规律，精准定位薄弱环节，强化安全防护。

4 案例分析

4.1 项目概况

某市新建的装配式保障性住房项目，总建筑面积达 10 万平方米，由 10 栋装配整体式混凝土剪力墙结构的单体建筑组成，装配率高达 60%。项目选址于某市某区某街道，建设周期为 2023 年 1 月至 2024 年 12 月。以下将从质量、进度、安全和成本四个维度，对该项目的施工过程监理控制情况展开分析。

4.2 项目质量与进度控制成效

预制构件项目质量与进度控制成效显著（见表 1）。在质量控制方面，原材料进场检验合格率达 98%，构件验收阶段外观、尺寸偏差合格率分别达 96% 和 95%，结构性能合格率 100%，生产及安装问题均及时整改。在进度控制方面，运用 BIM 技术、4D 模拟及实时信息反馈系统，精准预测需求并监控进度。通过优化供应链、设备预警维护、灵活调配人员等措施，将预制构件生产进度偏差控制在 5% 以内，现场施工进度偏差控制在 3% 以内，确保项目顺利进行。

表 1 项目质量进度控制成效

控制方面	指标	成果
质量控制	原材料进场检验合格率	98%
	构件外观质量合格率	96%
	构件尺寸偏差合格率	95%
	构件结构性能合格率	100%
进度控制	问题整改	及时整改到位
	预制构件生产进度偏差	控制在 5% 以内
	现场施工进度偏差	控制在 3% 以内
	措施	优化供应链、设备预警维护、灵活调配人员等

4.3 安全与成本控制成效

吊装作业 800 次零事故，得益于精心的设备选型和吊具设计，以及严格的技术交底和警戒设置。吊钩视觉监控和风速仪等技术手段，及时发现了 12 次潜在风险。现场安全防护同样严密，500 处防护栏杆、200 处安全平网，以及高处作业的全面防护措施，有效预防了坠落事故，18 处防护问题被及时发现并整改。在成本控制方面，通过优化设计、提高模具周转率等措施，预制构件成本降低了 33 万元；现场施工则通过合理调配人员和优化采购策略，节省了 22 万元。

5 结束语

装配式建筑施工过程监理控制研究显示，质量控制、进度控制、安全控制和成本控制是关键要点。通过 BIM 技术、物联网技术和大数据分析等创新方法，监理工作实现了信息化、精细化和智能化。案例分析表明，这些方法能够有效提升项目质量、保障施工安全、控制工程成本，并优化施工进度。未来，装配式建筑监理应进一步推广和应用这些先进技术，构建更加完善的监理控制体系，推动装配式建筑行业的高质量发展。

参考文献：

[1] 李建设. 基于 BIM 的装配式建筑监理质量安全控制探究 [J]. 建筑·建材·装饰, 2024(10):31-33.
 [2] 潘奇. 建筑工程监理在装配式建筑质量控制中的作用及技术措施探讨 [J]. 砖瓦世界, 2024(01):136-138.
 [3] 石宸诚. 装配式混凝土建筑构件生产过程的监理控制要点 [J]. 建设监理, 2024(11):36-40.
 [4] 张小明. 装配式建筑工程施工质量控制与监理对策 [J]. 陶瓷, 2024(05):234-236.
 [5] 张悦. 装配式建筑工程的监督管理控制研究 [J]. 中国住宅设施, 2023(03):49-51.

现代化水利水电工程建设施工管理和技术应用

魏 波

(四川华电杂谷脑水电开发有限责任公司, 四川 成都 610000)

摘 要 现代化水利水电工程建设需系统优化施工管理与技术应用, 进而提升施工组织效率、增强复杂工况适应力与整合多方资源支撑, 构建高效有序的管理体系。基于此, 本文在施工管理方面提出明确阶段目标、规范作业秩序、强化质量检查与建立安全机制; 技术应用方面提出推广碾压混凝土筑坝、高压旋喷加固、水下混凝土浇筑以及预应力锚固等先进技术, 旨在为全面提升水利水电工程建设质量提供有益参考。

关键词 水利水电工程; 施工管理; 碾压混凝土筑坝工艺; 高压旋喷加固技术; 水下混凝土浇筑技术

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.031

0 引言

水利水电工程是基础性、战略性重大工程体系, 其建设水准直接关系国家水资源调控能力。在建设实践中, 传统施工模式已难以满足高质量发展需求, 相关部门需在管理体系与技术体系中引入多维协同机制, 推动施工组织由静态转为动态调度, 推动工程技术由经验驱动向数据赋能发展, 进而系统融合全过程、全要素、全场景的工程建筑。

1 现代化水利水电工程建设施工管理和技术应用的意义

1.1 提升施工组织效率

在多工序交叉、多专业协作的复杂建造环境中, 调度体系的科学性直接决定施工进度的连贯性。在工程建设中, 管理人员构建以时间节点为核心的动态调度框架, 能明确各作业单元的时序关系, 有效减少工序间等待时间, 降低施工冲突频率, 并动态匹配机械、人力与物料资源, 使施工组织从静态计划走向实时响应, 有效增强对突发事件的应急协调能力, 全面提升工程实施的系统性^[1]。

1.2 增强适应复杂工况

在深基坑、高边坡以及水下结构等多类高风险施工环境中, 单一技术路径难以应对多重建筑风险。管理人员集成地质雷达、三维建模等多源技术手段, 能够从数据感知到结构应对闭环联动, 提升工程体系响应突发变形、结构渗透及稳定性变化的速度。在统一技术平台支撑下, 施工方案具备更高的动态适应性, 在保障工程质量的同时, 也能拓展工程在极端地质条件下的可建性边界。

1.3 促进整合多方资源

水利工程实施涉及设计、施工、监理等多个主体, 若缺乏系统协调, 极易导致计划脱节、资源错配^[2]。管理人员构建以流程驱动、责任共担为核心的协同体系, 可促使各参与方在统一信息架构下相互配合, 提升工程整体组织效率, 也为科学决策提供支撑基础。这种协同机制也有助于进一步推动工程资源从碎片化供给转向集约化调度, 构建以融合、联动为特征的现代工程管理生态。

2 现代化水利水电工程建设施工管理

2.1 明确施工阶段目标, 细化分解任务节点

水利水电工程具有工期长、工序繁以及技术要求高等特点, 传统粗放式计划无法满足动态环境下的精准控制需求。施工管理人员拆解工程全生命周期, 可以形成阶段性目标, 提升施工组织的系统性。清晰的施工阶段目标还有助于施工人员动态调整施工计划, 也为质量控制、安全保障与资源配置奠定基础^[3]。在工程施工管理中, 管理人员需按照功能区域、施工工艺、时序逻辑等维度分层解构大体量的建设任务。例如: 围绕大坝主体施工, 管理人员可将其划分为坝基开挖、防渗处理、分层填筑等多个子任务, 分别制定目标进度计划。再依据每个子任务的专业属性与技术路径细化为若干工序单元, 确保计划执行具备可监测性。同时, 在不同节点间建立约束关系, 利用信息化手段动态衔接, 实时依据现场反馈灵活修订施工进度。在水轮机房施工过程中, 管理人员还能在计划中提前加入设备基础、结构吊装以及安装预埋等节点, 做到统筹流程、预控工序, 进而压实责任边界, 促使各协作单位围绕核心目标形成工作闭环, 有效规避交叉干扰, 实现高效联动施工现场。

2.2 建立分区施工流程,规范现场作业秩序

在现代化水利水电工程建设中,建立分区施工流程是实现高效管控现场作业秩序的基础措施。在水利水电工程中,施工管理人员若施工区域划分不清、流程组织混乱,极易引发资源浪费与安全隐患。科学规划功能区、作业区以及通行区,且配套标准化的施工路径、作业流程与责任分工,可划分整体施工场面为若干相互衔接、互不干扰的工作单元,实现连续化作业流程,进而降低施工冲突风险,提升现场响应效率。以水电站厂房与引水系统同步施工为例,在总体规划中,管理人员应依据地形地势、水文条件与施工难度将施工场地划分为坝基区、厂房区、隧洞区以及临建设施区,并在此基础上细化各区的作业顺序。在区块间管理人员还要设置调度管理节点,由总控平台统一调配资源,保证物资配送、人员进出以及工序衔接有序进行,避免重复作业。这种基于区块管理的施工流程设计模式,既可有效解决现场作业的组织混乱问题,还能清晰化管理职责,为后续质量监管与进度考核提供清晰的依据,推进水利水电工程建设管理现代化。

2.3 强化现场质量检查,压实技术执行责任

在水利水电工程中,现场质量检查既是质量管控的基础支点,更是技术规范落地、执行工艺标准的关键保障。管理人员构建全过程质量追踪机制,明确质量检查频次、节点与责任人,配合检测数据,可推动技术要求由文件走向现场化、可视化,进而打通标准落实的“最后一公里”,有效提升质量检查的系统性^[4]。以高压灌浆帷幕施工质量管控为例,现场施工质量需围绕控制灌浆参数、校核钻孔偏差等关键指标展开全过程管控。作业准备阶段,技术部门要依据地质勘察报告设定灌浆压力、浆液配方以及施工步距,形成标准化工艺参数表,并同步下发至作业班组。在施工过程中,施工管理人员设置独立质量检测记录,由检测人员实时测定浆液密度、流速与终凝时间,结合钻孔扫描结果判断帷幕完整性。孔段封闭前,还需由技术负责人与质检人员联合交叉复检,确保灌浆结果符合封闭条件,且同步上传数据至质量监管系统,由项目部技术管理岗二次分析。在整个流程中,工程管理人员前移检查节点、细化责任链条能促使施工质量从记录过程转变为压实责任,保证所有技术规范落实在作业一线,构建起以检查促执行、以责任促规范的现代施工管理体系。

2.4 推行安全管理闭环,防控风险隐患环节

大型水利水电工程建设周期长、交叉作业密集,若安全管理机制存在断点,极易诱发高空坠落、机械

伤害等事故。安全管理的核心在于构建“事前识别、事中控制、事后复盘”三维联动机制,保证每个风险源均有前置预案。同时,工程管理人员借助数字化平台能实时监控作业行为以及机械状态,进而在工程全周期管理中加入隐患排查,实现由静态安全管控向动态防控的转变,使施工现场各类安全风险可视、可控、可追溯。以地下引水隧洞掘进作业安全管理为例,作业前期,管理人员应基于涌水量预测与通风能力评估,制定精细化风险识别清单,以此为依据布设多点监测装置。在作业实施过程中,管理人员持续采集风险数据,由控制中心实时分析比对,若发现超限趋势,及时进行报警,联动执行人员暂停作业,撤离风险区域。同时,每日完成风险确认单,保证每个作业单元均检查完成装备。当出现异常情况时,管理单位及时要求责任单位启动隐患分析会商机制,明确隐患源头及整改方案,同步上传数字化安全平台接受监管部门审核。整改完成后复验并提交验收报告,形成完整的问责闭环,从根本上避免风险环节失控扩散,筑牢现代化水利水电工程在极端工况下的安全保障。

3 现代化水利水电工程建设技术应用

3.1 碾压混凝土筑坝工艺,缩短主体施工周期

碾压混凝土筑坝工艺是现代化水利水电工程中广泛推广的核心施工技术,凭借其高效施工速度、优良结构性能与显著节能优势,在加快主体施工进度方面展现出显著成效。与传统混凝土相比,碾压混凝土具有较低坍落度、较大颗粒级配以及较强早期强度,适用于连续大体积分层铺筑,能有效减少模板支护,显著提升施工效率。该技术优化物料配比,使坝体浇筑不再依赖繁复的支模流程,缩短从浇筑到强度形成的周期链,在满足结构功能性要求的同时,有效压缩工期,已成为大中型重力坝建设中的主流技术路径。以120米级重力坝为例,若采用传统常态混凝土筑坝工艺,单日最大浇筑高度一般不超过0.8米,且需等待7天左右完成初期养护,方可进行下一层施工。而采用碾压混凝土后,单日可实现2米以上的分层浇筑厚度,24小时内即可达到脱模强度,有效提升施工效率。同时配合摊铺机与重型碾压设备作业,施工人员能控制每层铺筑厚度在30厘米,碾压遍数达4至6次,进而形成高密实度、低渗透性的坝体结构。在材料方面,合理的水胶比有助于控制含水量在2.5%至4%之间,在保证混凝土施工性良好的同时,具备良好的抗裂性能。此外,该工艺大幅减少模板与养护用水,节约每立方米混凝土成本达15%,在保障坝体耐久性的前提下,

有效压缩工期, 充分体现现代工程建设技术在工期控制维度的先进性。

3.2 高压旋喷加固技术, 增强基岩抗渗能力

高压旋喷加固技术是现代水利水电工程处理地基的重要手段, 结合高速旋转与高压注浆的作业原理, 能在基岩与松散土体间形成低渗透率、高强度的加固体, 有效提升坝基、隧洞等关键结构部位的抗渗承载能力^[5]。该技术是将浆液在 20 ~ 40 MPa 压力下喷射至地层中, 并借助旋转在指定深度范围内构建连续的加固柱体, 从而形成强度均匀的止水屏障。相较于传统灌浆工艺, 高压旋喷技术适用于风化裂隙发育、渗流通道复杂的环境, 在现代复杂工况水工项目中具备不可替代的优势地位。以消能底板下部基岩渗透加固工程为例, 若工程区域岩体以中风化泥质粉砂岩为主, 裂隙发育、水压梯度高, 对结构安全构成持续威胁。工程施工人员采用单管旋喷施工工艺, 以水泥—水玻璃复合浆液为主, 控制水灰比在 0.6 左右, 且在施工过程中, 采用 GPS 定位装置控制喷头布设误差在 ± 5 cm 范围以内, 实时监控浆液扩散范围。该技术路径既能构建物理连续性良好的止水帷幕, 也能避免大量开挖所带来的环境风险, 展现出现代水工建设中深层抗渗控制的技术深度。

3.3 水下混凝土浇筑技术, 保障深水作业质量

由于水体的流动性与水泥颗粒易分散等特点, 水下混凝土需具备良好的抗离析性、抗水洗性与自密实能力。同时, 施工人员可以配合导管、泵送或料斗等浇筑技术方式, 控制浇筑速率, 防止发生冷缝或夹层等结构缺陷。技术实施过程中需结合水深、浇筑厚度等条件, 确定施工工艺参数, 构建闭合且不扰动的投料流程, 保证水下混凝土结构在质量及强度上符合工程功能性要求。以压力管道取水基础段水下浇筑为例, 设计要求在 16 米水深下完成底板结构的整体成型, 作业环境存在水流扰动、结构面复杂、定位精度高等挑战。技术方案采用导管法浇筑, 单根导管内径为 250 mm, 配套浮动支撑架, 保证导管下端始终埋置于新浇混凝土层内 20 ~ 30 cm。在混凝土配比中, 施工人员加入减水剂与抗离析剂, 控制坍落度控制在 22 ~ 24 cm, 延长初凝时间至 3 小时, 以适应长距离输送。在施工过程中, 施工人员分节安装导管段落, 顶部安装压力平衡舱, 动态调控导管下端稳定性。同时浇筑过程采用连续供料、分格推进策略, 控制每格浇筑厚度在 0.8 m, 严格限制导管提升速率在 20 cm/min 以内, 避免形成负压现象。该技术路径标志着深水作业中混凝土成型

质量从经验型操作迈入数据驱动的精细化阶段, 有效拓展复杂环境下结构浇筑的技术边界, 提升水工工程在极端环境中的施工能力。

3.4 应用预应力锚固技术, 稳定边坡施工结构

施工人员在现代水利水电工程中依托主动加固理念, 借助张拉为锚杆或锚索施加预应力, 能构建地内外应力场的协调体系, 有效抑制潜在滑动面位移。该技术相较于传统重力防护措施, 具备体系轻质、受力合理与可调节性强等优势, 可在不改变坡体整体结构的前提下, 主动控制岩体剪切破坏, 是高陡边坡、隧道洞口及卸荷平台等复杂边坡区段的关键控制技术。以高程差逾 90 m 的边坡支护工程为例, 其岩体风化程度差异大、节理裂隙发育, 存在局部滑裂风险。基于此, 施工人员可采用三级预应力锚固体系, 每级锚固深度依次为 12 m、16 m 与 20 m, 锚索采用 $\Phi 15.2$ mm 钢绞线, 单孔设置 3 ~ 5 根索体, 锚固段长度不小于全长的 60%。同时依据坡体自重与外部荷载联合计算张拉控制力, 控制张拉误差在 $\pm 5\%$ 以内。施工阶段, 采用跟管钻进方式, 保证孔壁稳定, 注浆材料以水泥—水玻璃双液为主, 浆液比为 0.8:1, 以形成密实锚固体, 进而精准调控不良地质条件下的边坡形变, 全面提升边坡工程在现代化水利水电工程建设中的适应能力。

4 结束语

在现代水利水电工程建设中, 精细化的施工管理与先进技术应用已成为保障工程质量的关键。通过精准的任务、规范的流程以及前瞻的风险防控, 构建高效的施工管理体系。同时, 施工人员利用筑坝工艺、地基加固技术及水下作业等技术, 也能增加结构体系的可靠性。通过优化施工管理和技术应用, 可以显著提升水利水电工程项目的整体效益。

参考文献:

- [1] 乐武辉. 现代化水电施工技术应用分析[J]. 水上安全, 2025(04):34-36.
- [2] 车永春. 探究堤防工程施工技术在水利工程建设中的应用[J]. 全面腐蚀控制, 2025,39(02):118-120.
- [3] 陈志胜. 现代化水利水电工程建筑的施工管理和技术[J]. 冶金管理, 2023(15):11-12.
- [4] 陈德岭. 现代化水利水电工程建筑的施工管理和技术[J]. 水上安全, 2023(06):172-174.
- [5] 张瑞刚. 现代化水利水电工程建筑施工管理和技术分析[J]. 冶金丛刊, 2020,05(18):94-95.

火力发电厂四大管道金属 监督管理系统的实践应用

缪 童

(安徽淮南洛能发电有限责任公司, 安徽 淮南 232000)

摘 要 本研究详细论述了四大管道金属监督管理系统的功能模块及其在实际应用过程中所面临的挑战, 涵盖了数据精确性、金属材料性能评估以及系统稳定性等方面的问题; 探讨了针对系统实施效果的评估方法, 并提出了优化数据采集流程、增强金属材料性能评估模型的准确性和提升系统容错能力等改进建议, 旨在为提升系统性能、确保发电厂的稳定运行提供有益参考, 进而实现系统的持续优化和完善。

关键词 四大管道; 金属监督; 性能评估; 实施效果

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.032

0 引言

火力发电厂作为电力生产的关键环节, 其安全稳定运行对于确保国家能源安全和促进经济发展具有至关重要的作用。在火力发电厂中, 连接锅炉与汽轮机核心组件的四大管道, 其金属材料的性能直接关系到发电系统的安全性和可靠性。然而, 由于长期承受高温、高压、腐蚀等恶劣环境的考验, 四大管道的金属材料易出现蠕变、疲劳、腐蚀等损伤现象, 这可能导致泄漏、爆裂等严重事故的发生^[1]。因此, 对四大管道实施金属监督, 及时识别并处理潜在的安全隐患, 对于确保火力发电厂的安全稳定运行具有极其重要的意义。

1 火力发电厂四大管道金属监督管理系统概述

1.1 系统定义与目标

火力发电厂四大管道金属监督管理系统是一种融合了现代信息技术、传感器技术、数据分析技术以及金属材料科学等多学科知识的综合性管理系统。该系统的核心目标在于实时监测与评估四大管道金属材料的运行状态, 及时识别潜在的损伤与安全隐患, 为确保发电厂的安全运行提供坚实的技术支持^[2]。通过该系统, 能够实现对四大管道金属材料的温度、压力、应力等关键参数的实时监控, 以及基于历史数据与实时监控数据的材料性能退化分析和剩余寿命预测, 进而为发电厂的维护管理提供科学依据^[3]。

1.2 系统组成与架构

火力发电厂四大管道金属监督管理系统构成了一个集成化的管理平台, 其核心由数据采集模块、实时监控与分析模块、预警与报警模块等关键组成部分构

成。该系统架构以高效的数据处理为重心, 借助尖端的传感技术与数据分析算法, 实现了对关键金属部件, 包括主蒸汽管道、低温再热器蒸汽管道、给水管以及高温再热器蒸汽管道等的全面、实时监控与管理。该系统的主要目标在于确保火力发电厂的安全稳定运行, 同时提升金属部件的使用寿命和整体运营效率^[4]。

1.3 关键技术分析

火力发电厂管道金属监督管理系统的核心技术涵盖了无损检测技术、金属材料性能评估方法以及数据挖掘与分析技术。无损检测技术构成了系统实时监测的基础, 其通过超声波检测、射线检测、磁粉检测等手段, 实现了对关键管道金属材料内部缺陷及损伤情况的非破坏性检测。金属材料性能评估方法则依据材料的力学性能和化学性能, 通过蠕变寿命预测、疲劳寿命评估等技术手段, 对关键管道金属材料的性能进行量化分析^[5]。数据挖掘与分析技术则致力于处理和分析大规模监测数据, 以提取有价值的信息和规律, 为系统的故障预警和诊断提供数据支持。

2 四大管道金属监督管理系统的功能模块

2.1 数据采集与监测模块

数据采集与监测模块构成了四大管道金属监督管理系统的核心基础, 其主要职责在于实时捕捉关键运行参数。该模块主要通过部署高精度传感器网络来实现, 能够对四大管道金属材料的温度、压力、应力、振动等关键参数进行实时监控。实时监控这些参数对于及时发现管道金属材料的异常变化具有至关重要的作用。为确保数据的精确性和实时性, 系统集

成了先进的信号处理技术和数据校验机制。在准确性方面,系统通过定期校准传感器和采用多重数据比对策略,有效减少了误差;在实时性方面,系统采用高速数据传输技术和分布式数据处理架构,确保数据能够迅速采集并传输至中央处理单元进行分析。

2.2 金属材料性能评估模块

金属材料性能评估模块构成了四大管道金属监督管理系统的核心组成部分之一。该模块依托于数据采集与监测模块所提供的丰富实时监测数据及历史数据,对四大管道金属材料的性能进行深入分析。首先,该模块运用统计学方法和机器学习算法对历史数据与实时监测数据进行综合分析,以识别材料性能的退化趋势^[6]。通过分析材料的蠕变、疲劳等长期服役过程中的性能变化,系统能够评估出材料当前的健康状态。进一步地,该模块还实现了金属材料剩余寿命预测算法。该算法综合考虑了材料的当前性能状态、历史服役记录、环境条件以及预期的负载变化等因素,采用先进的数学模型和仿真技术,精确预测出四大管道金属材料的剩余使用寿命。这一功能不仅为发电厂的维护计划提供了科学依据,还极大地提高了维护效率和安全性,有效降低了因管道故障导致的停机风险和经济损失。

2.3 故障预警与诊断模块

2.3.1 故障预警机制的设计与实施

故障预警机制通过对实时监测数据与历史数据的综合分析,能够识别出四大管道金属材料潜在的故障风险,并预先发出预警信号。该机制的设计充分考虑了金属材料性能退化规律、运行工况以及环境因素等多方面的影响。在执行监测与分析的过程中,系统严格遵循预设的预警规则和阈值,对通过多种途径实时采集的数据进行持续的监测和深入的分析。

2.3.2 故障诊断流程与算法研究

在 60 MW 机组四大管道金属监督管理系统中,故障诊断流程的设计至关重要。首先,通过传感器网络实时采集管道运行数据,包括温度、压力、流量等关键参数。其次,利用数据预处理技术滤除噪声和异常值,以确保数据的准确性和可靠性。在特征提取阶段,采用主成分分析(PCA)等方法从高维数据中提取有效且低维的特征。最后,运用人工神经网络(ANN)或支持向量机(SVM)等智能算法进行模式识别,以判断故障及其类型。针对 60MW 机组的特定需求,重点关注焊接缺陷、材质劣化、腐蚀等问题,并通过算法优化提升诊断的准确性和实时性。

2.4 维护管理模块

2.4.1 维护计划的制定与优化

在四大管道金属材料管理过程中,维护计划的制定与优化占据着至关重要的地位,其为关键材料长期稳定运行提供了坚实的基础。该功能模块基于金属材料的详尽性能评估、精确的故障预警与诊断信息,以及发电厂整体运行规划,智能化地自动生成或辅助管理人员手动制定维护计划。在制定维护计划过程中,系统全面考虑维护工作的优先级排序、合适的时间窗口选择以及资源的合理分配,确保所制定的维护计划科学合理且切实可行。此外,该系统还具备强大的动态优化与调整功能,能够灵活应对发电厂运行工况的波动以及金属材料性能随时间逐渐退化的趋势,确保维护计划始终与实际需求相符合,为四大管道金属材料的持续稳定运行提供坚实的保障。

2.4.2 维护记录的电子化管理与分析

电子化管理与分析维护记录在现代化工厂管理中占据核心地位,其目的在于显著提高维护工作的效率与品质。该系统运用尖端电子技术,对每次维护活动的详尽信息进行精确记录与管理,包括维护活动的具体时刻、执行地点、参与人员、工作内容细节以及使用的工具和材料等关键数据。此外,系统内置的高级统计分析功能能够自动产生多种报表和图表,例如维护频次的详尽统计、维护成本的深入分析以及故障率的趋势图等。这些直观的数据展示为用户提供了宝贵的信息支持,使他们能够全面掌握四大管道金属材料的维护状况和运行趋势,进而依据这些数据制定出更加科学合理、针对性强的维护策略,确保设备的高效稳定运行。

3 系统实践应用中的关键技术问题与挑战

3.1 数据准确性与完整性保障

在实施四大管道金属监督管理系统的实践中,数据的精确性与完整性是确保系统高效运作及准确评估金属材料性能的关键。然而,鉴于发电厂环境的复杂性以及传感器技术的局限性,数据在采集与传输过程中易受到多种干扰及误差的影响,这给数据的精确性与完整性带来了挑战。为确保数据的精确性与完整性,系统必须实施一系列策略。首先,在传感器的选择与布局方面,必须确保传感器具备高精度与稳定性,并合理布局传感器位置,以全面且精确地反映四大管道金属材料的运行状态。其次,在数据采集与传输过程中,必须采用先进的数据校验与纠错技术,以及时发现并修正数据中的错误与异常。此外,还需构建完善的数据质量控制体系,对采集的数据进行定期校验与评估,以确保数据的精确性与可靠性。

3.2 金属材料性能评估的准确性

在四大管道金属监督管理系统中,金属材料性能评估的精确性是一个关键性的技术难题。鉴于金属材料性能受温度、压力、应力、腐蚀等多种因素的综合影响,精确评估其性能必须综合考量这些因素,并运用先进的评估方法与模型。然而,在实际操作过程中,评估方法与模型的局限性,以及数据的不完整性与不确定性,均可能对金属材料性能评估的精确性产生负面影响。为了提升评估精确性,系统需持续优化评估方法与模型,引入更多评估指标与参数,并强化数据预处理与清洗工作,以降低数据噪声与异常值的影响。此外,建立评估结果的验证机制亦至关重要,通过与实际运行数据的对比分析,不断验证与优化评估方法与模型的精确性。

3.3 系统稳定性与可靠性提升

系统稳定性与可靠性是确保四大管道金属监督管理系统长期稳定运行的核心要素。然而,鉴于发电厂环境的复杂性以及系统本身的局限性,实践中系统可能遭遇多种故障和问题,从而对系统的稳定性和可靠性造成负面影响。为了增强系统的稳定性和可靠性,必须实施一系列策略。首先,在系统设计阶段,必须充分考虑系统的冗余性和容错性,采用尖端的硬件与软件技术,以确保系统在故障发生时能够自动进行切换或恢复。其次,在系统运行阶段,建立完善的监控与报警机制至关重要,以便及时发现并处理系统中的异常和故障^[7]。此外,定期对系统进行维护和升级也是必要的,这有助于及时修复系统中的漏洞和问题,从而提升系统的稳定性和可靠性。同时,强化系统安全管理和防护措施,以抵御外部攻击和恶意破坏,确保系统的安全稳定运行。

4 系统实施效果评估与改进建议

4.1 实施效果评估方法

对四大管道金属监督管理系统的实施效果进行评估是确保其达到预期目标的关键步骤。评估方法的选择需遵循系统性、客观性和可量化性原则,以保障评估结果的精确性和有效性。首先,通过对比分析法,对系统实施前后的关键指标,如四大管道金属材料故障率、维护成本、停机时间等进行对比,直观地展示系统带来的改善效果。其次,通过问卷调查或访谈的方式,收集发电厂管理人员、技术人员和操作人员对系统使用体验、功能满意度、操作便捷性等方面的反馈,全面评估系统的实际应用效果。此外,利用数据分析技术,对系统采集的大量数据进行深度挖掘,分析系统在预测金属材料性能退化、提前发现故障隐患等方

面的准确性和及时性,进一步验证系统的有效性。最后,结合经济效益分析,评估系统实施后带来的直接和间接经济效益,如减少故障停机损失、降低维护成本等,为系统的持续优化和推广提供有力依据。

4.2 系统改进建议

针对当前四大管道金属监督管理系统的实际应用状况,本文提出了一系列改进建议。首先,建议强化对传感器网络的维护与管理,以确保数据采集的精确性和稳定性,防止传感器故障或损坏引发的数据缺失或错误。其次,建议对数据预处理流程进行优化,以提升数据处理的效率和准确性,降低噪声和异常值对后续分析的干扰。同时,建议对特征提取算法进行精细化调整,以更好地适应60 MW机组四大管道的实际运行环境,从而提取出更具代表性的故障特征。最后,建议完善预警机制,确保在故障发生时能够及时、准确地触发预警,为运维人员提供充足的反应时间。这些改进建议均基于当前实际状况,旨在通过优化系统功能和流程,提升四大管道金属监督管理系统的实用性和可靠性,确保机组的安全稳定运行。

5 结束语

四大管道金属监督管理系统作为发电厂设备管理的关键组成部分,其有效实施对于提升设备的可靠性及降低维护成本具有至关重要的作用。通过持续完善系统功能与技术手段,能够进一步增强系统对金属材料性能的精确评估能力以及故障预警的时效性,为发电厂的稳定运行提供更为坚实的支撑。未来,随着技术的持续进步与应用场景的不断拓展,四大管道金属监督管理系统将在更广泛的领域发挥关键作用,为工业设备的安全运行与高效管理做出更大的贡献。

参考文献:

- [1] 罗志涛. 火力发电厂小型预埋件精准定位工装精细化施工技术分析[J]. 科技与创新, 2025(02):124-127.
- [2] 程龙, 安文彬, 李敬君, 等. 火力发电厂热动系统绿色环保优化及措施研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024(11): 196-197.
- [3] 同[1].
- [4] 马玲珑. 基于风险导向的火力发电厂经济管理体系构建研究[J]. 电气技术与经济, 2024(11):281-283.
- [5] 马玲珑. 循环经济背景下的火力发电厂资源配置与优化[J]. 电气技术与经济, 2024(12):258-260.
- [6] 孙贺斌, 李军, 周治伊, 等. 水电站金属技术监督管理[J]. 电力安全技术, 2020(06):65-68.
- [7] 同[4].

数字化技术在高速公路路基桥梁施工管理中的应用

杨 刚

(安徽远航交通科技有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 本研究系统探讨了建筑信息模型 (BIM)、物联网和大数据分析等数字化技术在高速公路路基桥梁施工管理中的应用。通过构建数字化管理平台, 实现了设计精度提升、施工效率提高及施工管理智能化水平显著增强。研究发现, 数字化技术在应用过程中仍面临数据安全隐患、技术标准不统一、专业人才短缺等挑战, 需向着智能化、自动化、绿色化方向改进, 推动跨领域协同合作, 为高速公路建设带来更加科学的运营模式。

关键词 数字化技术; 高速公路; 路基桥梁施工管理; BIM 技术; 物联网技术

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.033

0 引言

随着科技的发展, 数字化技术正逐步渗透到各行各业, 进一步推动了传统产业的创新与变革。在高速公路建设领域, 数字化技术的应用正逐步改变着传统建设模式, 为交通基础设施的创新与发展带来了新的希望与活力^[1]。在国家交通网发展过程中, 高速公路建设是重中之重, 其建设质量和运营效率直接关系到国家经济的发展和人民生活的改善。然而, 传统的高速公路建设模式存在诸多痛点, 如施工难并且周期较长等问题。数字化技术的应用, 为解决这些问题提供了有效途径^[2]。

1 数字化技术在高速公路路基桥梁施工管理中的应用

1.1 BIM 技术在设计阶段的应用

BIM 技术是高速公路数字化建设的中流砥柱, 为整个建设过程提供了强大的技术支撑。凭借 BIM 技术, 能够构建出高度逼真的高速公路三维模型, 将设计、施工、运维等各环节的信息无缝衔接, 实现协同作业, 打破信息孤岛。

在实际的高速公路建设项目中, 众多团队都已从中受益。在设计桥梁时, 设计师运用 BIM 技术构建出精细的三维桥梁模型, 不仅能直观呈现桥梁的外观与结构, 还能模拟不同荷载、温度、风速等工况下桥梁的受力状态。通过分析模拟结果, 设计师可精准发现潜在问题, 提前优化设计方案, 避免在施工阶段出现重大设计变更, 大大提高了设计精度^[3]。

同时, BIM 技术支持多人、多专业在同一模型上实时协作。结构工程师、建筑师、机电工程师等可基于

同一平台开展设计工作, 设计信息能够实时更新与共享, 各专业之间的设计冲突得以提前解决, 有效提升了设计效率, 为后续施工的顺利进行提供了有力保障。

1.2 物联网技术在施工监控中的应用

物联网技术凭借其强大的互联互通能力, 在高速公路施工监控领域发挥着关键作用。它能够将高速公路上的各类设备、行驶车辆以及施工人员紧密连接, 实现信息的实时传输与高效共享。

在实际应用中, 物联网技术可全方位实时监测高速公路的路况信息, 包括道路平整度、车流量等, 还能精准掌握气象状况, 如温度、湿度、风速等, 为行车安全筑牢坚实防线。此外, 物联网技术推动了高速公路的智能化管理变革, 如智能收费系统让车辆通行更加便捷高效, 智能照明系统则可根据实际需求自动调节亮度, 实现节能降耗。

在桥梁施工管理环节, 物联网技术借助传感器网络构建起全方位监测体系, 重点监测桥梁相关参数, 如振动参数、应变参数、位移参数等, 为桥梁结构健康监测提供海量精准数据^[4]。通过先进的技术深入整合分析相关监测数据, 能够敏锐捕捉桥梁的潜在隐患, 进而及时制定并实施维护措施, 确保桥梁始终处于安全稳定的运营状态。

1.3 大数据分析技术在交通管理中的应用

大数据分析技术在高速公路交通管理领域的应用价值日益凸显。它能够对高速公路上交通流量、行车速度、车辆类型等海量且复杂的数据进行实时精准监测与分析, 为交通管理与决策筑牢科学依据根基。

以成都自动驾驶测试基地为例, 该基地借助高速

公路数字化建设的显著成果,构建起高度仿真的测试环境。在这里,智能化技术全面落地,高速公路实现了自主感知、自主决策与自主控制。

大数据分析技术的精准实施能够准确监测交通流量,深度剖析数据,精准把握不同时段、不同路段的流量变化规律^[5]。基于此,可为自动驾驶车辆提供精准的路径规划与决策支持。例如:当检测到某路段即将出现拥堵时,系统能迅速为自动驾驶车辆规划出一条畅通高效的替代路线,有效提升交通效率。同时,通过持续监测行车速度、车辆类型等数据,可针对一系列问题采取应对措施提供有力支撑,全方位保障行车安全,有力推动高速公路交通管理朝着智能化、高效化方向大步迈进。

1.4 数字化技术在施工管理中的综合应用

在高速公路建设领域,数字化技术与物联网技术的深度融合正深刻改变着施工管理的模式与成效,以呼北国家高速公路山西省朔城至神池段(简称“朔神项目”)丁庄窝大桥施工管理为例,其综合应用成效显著^[6]。

在朔神项目丁庄窝大桥的施工管理中,数字化与物联网技术构建起一套高效、智能的管理体系。借助数字化功能,桥梁施工管理实现了全方位优化。在资源分配上,系统能够依据实时数据精准调配人力、物力,避免资源浪费与短缺,提升项目整体资源利用率。在工程质量监管方面,通过物联网传感器实时采集数据,对施工过程进行严格把控,及时发现并纠正质量问题,有效防范质量风险。

同时,该系统实现了对钢筋、水泥等施工原材料的实时监控,确保材料质量与供应稳定;对混凝土浇筑、预应力张拉等关键施工步骤进行实时管理,保障施工工艺的规范执行;对桥梁施工重大风险源进行实时监控及预警,提前消除安全隐患。此外,BIM进度推演与现场施工进度对比功能,使项目管理者能及时调整施工计划,确保工程按期推进。关键数据可追溯功能则为工程质量追溯与责任认定提供了有力依据。采用该系统后,施工效率显著提升,质量管控更加精细,为高速公路建设的高质量发展提供了坚实的保障。

2 数字化技术在施工过程中应用面临的挑战

在数字化技术为高速公路施工管理带来诸多便利与变革的同时,其应用过程中也面临着诸多挑战。

2.1 数据安全问题

数据安全问题首当其冲。高速公路建设涵盖大量敏感信息,如设计图纸关乎工程结构安全,施工计划涉及工程进度与资源调配,交通流量数据则与区域交

通规划紧密相连。这些信息一旦泄露,不仅会使企业遭受重大经济损失,更可能对国家安全和公共利益造成难以估量的威胁。因此,强化数据安全管控刻不容缓,需采用先进的加密技术,对数据进行全方位保护,防止数据在传输、存储过程中被窃取或篡改,同时建立严格的安全管理制度,确保数据访问权限的合理分配与管控^[7]。

2.2 技术标准不统一

技术标准不统一也是一大难题。当前,数字化技术在高速公路施工管理中的应用缺乏统一规范,不同单位各自为政,采用的技术路线千差万别。这导致数据格式不一致、接口不兼容,使得整体数字化采集处理成本大幅增加,数据共享和应用也困难重重。为推动数字化技术的广泛应用,行业需尽快制定统一的技术标准和处理规范,明确数据格式、接口标准等,促进各单位之间的数据互通与协同工作。

2.3 专业人才短缺

专业人才短缺同样制约着数字化技术的发展。数字化技术的应用需要既懂工程技术又懂数字化技术的复合型人才。然而,目前公路工程管理领域此类人才匮乏,现有从业人员数字化素养和技能水平有待提高。因此,需加强人才培养和引进力度,通过开展专业培训、与高校合作培养等方式,培养一批适应数字化时代需求的专业人才,为数字化技术在施工过程中的有效应用提供坚实的人才保障。

3 数字化技术在施工管理中的创新探究

在高速公路建设蓬勃发展的当下,数字化技术正以前所未有的态势融入施工管理,不断推动着行业变革。以下从多个维度深入探讨其在施工管理中的创新应用。

3.1 智能化决策支持系统的开发

高速公路施工管理涉及海量数据处理与分析,开发智能化决策支持系统成为必然趋势。该系统巧妙融合大数据分析 with 人工智能技术,对施工全流程数据进行实时监测与深度剖析。以交通流量数据为例,系统可精准捕捉交通流量的时空变化规律,通过复杂算法预测未来交通趋势。基于这些预测结果,管理者能够提前规划施工时段,避开交通高峰,优化施工期间的交通组织方案,减少对正常交通的影响。同时,对施工进度数据的分析,可及时发现潜在延误风险,如材料供应不足、设备故障等,从而迅速调配资源,采取针对性措施,确保施工按计划推进。

3.2 虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术的应用

VR和AR技术为高速公路施工管理带来了全新的视角和体验。借助VR技术,可构建高度逼真的虚拟施工

场景,让管理人员和施工人员仿佛置身于实际施工现场。在这个虚拟环境中,他们能够提前模拟施工流程,全面排查潜在问题和风险,如地质条件变化对施工的影响、施工工艺的可行性等,提前制定应对策略,降低实际施工中的不确定性。而 AR 技术则在实际施工现场中发挥强大作用,通过叠加虚拟信息,为施工人员提供实时、精准的指导^[8]。例如:在复杂结构施工中,施工人员可通过 AR 设备获取详细的施工步骤、尺寸要求等信息,提高施工精度和效率,同时减少因操作失误带来的安全隐患。

3.3 区块链技术在数据管理中的应用

区块链技术凭借去中心化、不可篡改、可追溯等特性,在高速公路施工数据管理中展现出独特优势。在施工过程中,涉及材料采购、施工进度、质量检测等众多环节,数据真实性至关重要。区块链技术将这些数据以加密形式记录在分布式账本上,一旦记录便无法被篡改,确保了数据的完整性和可信度。各方参与者可通过区块链平台实时查看和验证数据,实现数据的透明共享。同时,区块链的可追溯性使得任何数据变动都能被准确记录,方便对施工过程进行全程监督和管理,一旦出现问题,可迅速追溯责任源头,提高施工管理的规范性和公正性。

4 数字化技术在施工管理中的发展趋势及应用前景

4.1 智能化与自动化发展

未来,数字化技术将向智能化和自动化方向发展。通过应用人工智能、机器学习等技术,实现高速公路施工管理的自动化和智能化。例如:开发智能施工机器人,实现自动化的施工操作;利用智能传感器和监控系统,实现施工过程的实时监控和自动预警。这些技术的应用,将大大提高施工效率和质量,降低人力成本和安全风险。

4.2 绿色化与可持续发展

随着环保意识的不断提高,绿色化和可持续发展成为高速公路建设的重要目标。数字化技术可以为绿色化建设提供有力支持。例如:通过应用 BIM 技术,优化设计方案,减少资源浪费和环境污染,比如在设计阶段精确计算材料用量,避免过度采购;通过物联网技术,实现能源的智能管理和优化利用,降低能源消耗,如智能照明系统根据环境光线自动调节亮度。未来,数字化技术将在绿色化建设方面发挥更加重要的作用,助力高速公路建设实现经济效益与环境效益的双赢。

4.3 跨领域协同合作

数字化技术的发展将促进跨领域的协同合作。在高速公路建设领域,数字化技术可以与交通、环保、

能源等多个领域进行深度融合,实现数据的共享和互通。例如:通过与交通管理部门合作,实现交通流量的实时监测和调控,根据施工路段情况合理规划交通分流方案;通过与环保部门合作,实现施工过程中的环境监测和治理,实时掌握扬尘、噪声等污染指标并采取措施。这些跨领域的协同合作,将为高速公路建设带来更加全面和高效的管理模式,提升项目整体效益。

4.4 应用前景展望

随着数字化技术的不断发展和应用,其在高速公路路基桥梁施工管理中的应用前景十分广阔。未来,数字化技术将实现高速公路建设全生命周期的智能化管理,从设计、施工到运维,各个环节都将实现数字化和智能化,例如基于数字孪生技术构建的虚拟高速公路模型,可实时模拟运行状态进行预测性维护。同时,数字化技术还将推动高速公路建设向更加高效、安全、绿色的方向发展,为经济社会发展提供更加有力的支撑,成为交通基础设施建设的重要驱动力。

5 结束语

数字化技术革新了高速公路路基桥梁施工管理,BIM、物联网、大数据分析等技术的应用提升了设计精度、施工效率与管理水平,但在实际应用中仍面临数据安全、技术标准不统一、人才短缺等挑战。本研究探讨了数字化技术在高速公路路基桥梁施工管理中的应用。通过构建数字化管理平台,切实增强了施工管理智能化水平。未来,高速公路路基桥梁施工管理将向智能化、自动化、绿色化发展,实现跨领域协同,构建高效、安全、绿色的运营模式。

参考文献:

- [1] 李鑫.工程施工行业与数字化技术的相关性思考[J].建材发展导向,2022,20(04):108-110.
- [2] 文建国.公路施工标准化管理探析[J].四川水泥,2016(06):138.
- [3] 彭建宏.数字化技术在公路路面施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2023(06):89-91.
- [4] 范本高.数字化技术在高速公路改扩建路面施工中的应用研究[J].建筑技术开发,2021,48(08):123-125.
- [5] 龙运泉,刘远明.BIM技术在道路工程设计中的应用与发展[J].中国勘察设计,2020(11):92-95.
- [6] 刘飞.数字化管理在工程中的应用[J].建筑科技,2020,04(02):85-88.
- [7] 衣倩,王琰.公路基础设施数字化标准体系构建研究[J].中国标准化,2023(09):65-72.
- [8] 王建伟,高超,董是,等.道路基础设施数字化研究进展与展望[J].中国公路学报,2020,33(11):101-124.

绿色建筑理念下高层建筑地下室深基坑支护工程管理策略

赵 胡

(中国五冶集团有限公司安徽分公司, 安徽 滁州 239001)

摘 要 本文以绿色建筑理念为导向, 探索其在高层建筑深基坑支护工程中的创新应用路径。研究聚焦工程全生命周期管理, 围绕设计、施工、运维等关键环节构建环保管理体系, 提出环保材料选用、支护与主体结构一体化设计、地下水保护利用等绿色管理策略, 并明确政策引导、企业责任、社会监督参与等实施路径, 以期对促进绿色建筑理念全面实施有所裨益, 为城市地下空间开发提供可参考的绿色技术解决方案。

关键词 绿色建筑理念; 高层建筑地下室; 深基坑支护工程

中图分类号: TU94

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.034

0 引言

随着全球对环境保护和可持续发展的日益重视, 绿色建筑理念逐渐成为建筑工程领域的重要指导思想。高层建筑作为城市发展的重要标志, 其地下室深基坑支护工程不仅技术复杂, 而且对环境影响显著。传统的深基坑支护工程管理往往侧重于工程的安全性和经济性, 而忽视了环保和节能的要求^[1]。在绿色建筑理念的引领下, 高层建筑地下室深基坑支护工程管理需要更加注重资源的高效利用、环境的保护和生态的平衡。因此, 研究绿色建筑理念下高层建筑地下室深基坑支护工程管理策略尤为重要和迫切。

1 绿色建筑理念概述

1.1 绿色建筑理念的核心要素

绿色建筑理念是倡导建筑与自然和谐共融的设计、建造及运营模式。其核心涵盖节能资源利用、生态环保及室内环境健康性。节能资源利用聚焦建筑全周期, 力求最大程度节约资源、降低能耗、减少环境负荷。生态环保要求设计施工时充分考虑对周边生态环境的影响, 采取措施护资源、保生物多样性^[2]。此外, 绿色建筑还重视室内环境健康, 确保空间采光佳、通风畅、空气优, 为居住者营造健康舒适之境。

1.2 绿色建筑理念在建筑工程中的应用现状

全球愈发重视环保与可持续发展, 绿色建筑理念在建筑工程领域得到广泛应用。众多建筑项目采用太阳能光伏、雨水回收利用、绿色建材等技术, 以降低能耗、减少污染、提高环境性能。同时, 多国政府相继颁布政策法规, 激励绿色建筑发展^[3]。在建筑工程

实践中融入绿色建筑理念, 既能提升建筑环保性与可持续性, 又能推动关联产业创新升级, 为建筑领域绿色转型筑牢基础。

2 高层建筑地下室深基坑支护工程管理现状

2.1 深基坑支护工程的特点与挑战

深基坑支护工程是高层建筑地下室建造的关键一环, 技术难度颇高。一方面, 深基坑开挖深度大, 对支护结构要求严格, 需综合考虑地质、地下水、周边建筑与管线分布等要素, 设计安全且经济的支护方案。另一方面, 深基坑支护施工过程中的不确定性因素较多, 如土质变化、地下水渗流等, 都可能对支护结构的稳定性造成影响, 增加施工难度和风险。同时, 深基坑支护工程在施工过程中也面临着显著的环境影响与风险。开挖过程中产生的土方需要妥善处理, 否则可能造成土地资源的浪费和环境污染。此外, 支护结构施工可能引发周边地层的变形和位移, 对周边建筑物和管线造成损害, 甚至引发安全事故。因此, 在深基坑支护工程的施工过程中, 必须采取有效的环保措施和风险防控措施, 确保工程的安全顺利进行。

2.2 传统管理模式的局限性

在传统的高层建筑地下室深基坑支护工程管理模式中, 成本控制往往被视为首要目标, 而环保意识则相对薄弱。这导致在施工过程中, 为了降低成本, 可能会忽视对环保材料的使用和对废弃物的妥善处理, 从而造成资源浪费和环境污染。此外, 传统管理模式还存在施工过程中的资源浪费与污染问题。例如: 施工过程中的用水、用电等能源消耗未能得到有效控制,

造成能源浪费；施工机械和设备的使用效率不高，导致资源利用效率低下；同时，施工过程中产生的建筑废弃物未能得到充分利用，大量废弃物被随意丢弃或填埋，对环境造成压力。因此，传统的管理模式已经难以满足绿色建筑理念下对高层建筑地下室深基坑支护工程的管理要求，需要探索新的管理策略和方法。

3 绿色建筑理念下高层建筑地下室深基坑支护工程管理策略

3.1 设计阶段的绿色管理策略

3.1.1 环保型材料的选择与应用

环保型材料的选择是绿色建筑理念的核心之一。在深基坑支护工程的设计中，应优先考虑使用可再生、可回收或低环境影响的材料。例如：可以采用具有高强度、耐腐蚀且可回收的钢材作为支护结构的主要材料，减少对传统混凝土等材料的依赖。同时，对于支护结构中需要使用的防水材料、密封材料等，也应选择环保型产品，确保在施工和使用过程中不会对环境造成污染^[4]。此外，还应注重材料的本地化选择，减少运输过程中的碳排放。通过优选环保型材料，不仅可以降低工程对环境的影响，还能提高支护结构的耐久性和可持续性。

3.1.2 支护结构与主体结构相结合的设计思路

在深基坑支护工程的设计中，应将支护结构与主体结构相结合，实现一体化设计。这种设计思路有助于减少材料的使用和浪费，提高结构的整体稳定性和安全性。例如：可以将支护桩与地下室的剪力墙相结合，使支护结构在承担临时支护作用的同时，也成为地下室永久结构的一部分。通过这种设计思路，不仅可以减少支护结构的拆除和重建工作，降低施工成本 and 环境影响，还能提高工程的整体效率和可持续性。

3.1.3 地下水资源保护与利用的设计考量

地下水资源是宝贵的自然资源，在深基坑支护工程的设计中应充分考虑其保护和利用。首先，应采取有效的防水措施，防止地下水渗入施工区域，避免对地下水资源的浪费和污染。其次，可以设计地下水回收系统，将施工过程中产生的地下水进行收集和处理，用于施工用水或周边环境的灌溉等。此外，在支护结构的设计中，还应考虑对地下水位的控制，避免因施工导致地下水位异常变化，对周边环境造成不良影响。通过综合考虑地下水资源的保护和利用，可以实现深基坑支护工程的绿色施工和可持续发展。

3.2 施工阶段的绿色管理策略

3.2.1 节能与资源高效利用措施

施工阶段是能源消耗和资源消耗最为集中的环节，

因此必须采取有效的节能与资源高效利用措施。首先，应优化施工流程，合理安排施工顺序，减少不必要的重复工作和等待时间，从而降低能源消耗。其次，应推广使用节能型施工设备和机械，如电动挖掘机、低能耗混凝土搅拌车等，减少燃油消耗和碳排放。同时，还应加强施工现场的能源管理，如合理设置照明系统，利用自然光照明，减少电力消耗。此外，应鼓励使用可回收和再利用的材料，如废旧钢材、再生混凝土等，提高资源利用效率，减少资源浪费。

3.2.2 环境保护与污染控制措施

施工环保与污染管控是绿色建筑理念的关键构成。首先，严控施工噪声，采用隔音举措，科学排班，避开夜间或居民休憩时段开展高噪声作业。其次，强化扬尘治理，布设洒水降尘设备，定期清扫场地，削减扬尘污染^[5]。再次，做好建筑垃圾分类处置与资源化利用，回收可再利用垃圾，按环保要求处理不可回收垃圾，降低垃圾环境危害。最后，加强地下水保护，防止施工废水渗入含水层，保障地下水资源安全。

3.2.3 施工安全与质量管理

在绿色建筑理念下，施工安全与质量管理并重。其一，完善安全管理制度，强化人员安全培训，提升安全意识与操作技能，筑牢施工安全防线。其二，严控施工过程质量，按照设计规范施工，保障工程质量达标。同时，引入先进技术工艺，提升效率与质量，减少返工浪费。强化对二者的管理，既能保障施工人员的安全，又能增加工程耐久性与可持续性，契合绿色建筑理念。具体而言，应建立健全的安全生产责任制，明确各级管理人员与操作人员的安全职责，确保安全责任到人。此外，定期组织安全演练，提高应对突发事件的能力，减少安全事故的发生。在质量管理方面，实施全过程质量控制，从材料进场、施工过程到成品验收，每一环节都严格把关，确保工程质量符合设计要求及绿色建筑标准。同时，鼓励技术创新，采用先进的施工技术和管理手段，不断提升施工效率与质量水平，推动绿色建筑理念在高层建筑地下室深基坑支护工程管理中的深入实践。

3.3 运营与维护阶段的绿色管理策略

3.3.1 基坑支护结构的长期稳定性监测与维护

在运营与维护阶段，应建立基坑支护结构的长期稳定性监测机制。通过定期的专业监测，及时发现支护结构可能出现的变形、裂缝等安全隐患，并采取相应的维护措施。同时，应建立健全的维护管理制度，明确维护责任人和维护周期，确保支护结构得到及时有效的维护。此外，还应加强对支护结构周边环境的

监测,防止因外部环境变化对支护结构造成不利影响,从而确保基坑支护结构的长期稳定性和安全性。

为了进一步提升基坑支护结构的稳定性,还可以考虑采用先进的监测技术,如远程监控系统,实现实时监测和数据传输,提高监测效率和准确性。同时,针对监测中发现的问题,应及时组织专家进行会诊,制定科学合理的维护方案,确保维护工作的针对性和有效性。通过这些措施的实施,可以有效延长基坑支护结构的使用寿命,保障高层建筑地下室的安全稳定。

3.3.2 地下水资源的持续保护与利用

在运营与维护阶段,应继续加强对地下水资源的保护与利用。首先,应定期检查和维护地下水防水设施,确保其完好无损,防止地下水渗入建筑内部或对施工区域造成水害。其次,应继续实施地下水回收与利用系统,将建筑内部或施工区域产生的地下水进行收集和处理,用于冲洗、灌溉等,实现水资源的循环利用。同时,还应加强对地下水位的监测和管理,确保地下水位保持在合理范围内,防止因地下水位异常变化对周边环境造成不良影响。

3.3.3 运营过程中的能耗管理与节能减排措施

在运营过程中,应加强对能耗的管理,采取有效的节能减排措施。首先,应对建筑内部的照明、空调、通风等系统进行优化设计和合理运行,减少能源浪费。例如:可以采用智能控制系统,根据实际需求自动调节照明亮度和空调温度,实现能耗的精准控制。其次,应推广使用节能型设备和产品,如LED照明灯具、高效节能空调等,降低设备本身的能耗。同时,还应加强对运营过程中产生的废弃物的分类处理和资源化利用,减少废弃物对环境的污染,实现资源的循环利用。通过这些节能减排措施的实施,可以降低运营过程中的能耗和碳排放,符合绿色建筑理念的要求。

4 绿色建筑理念下高层建筑地下室深基坑支护工程管理策略的实施路径

4.1 政策引导与支持

绿色建筑理念在高层建筑深基坑支护工程中的推行,政策引导支持不可或缺。政府需出台政策明晰绿色建筑标准要求,筑牢其发展法律根基。同时,借助财政补贴、税收减免等激励手段,促使企业与项目采用绿色技术及管理策略。此外,强化绿色理念的宣传和推广,提升社会认知,为该理念在深基坑工程管理中的应用营造优质政策生态。

4.2 企业责任与行动

企业作为绿色建筑理念的实践者,应承担起相应的责任,积极采取行动。首先,企业应加强对绿色建

筑技术和管理策略的研发和创新,不断提高自身的绿色建筑水平。其次,企业应在项目策划、设计、施工、运营等全生命周期中贯彻绿色建筑理念,确保项目符合绿色建筑的标准和要求。同时,企业还应加强对员工的绿色建筑培训和教育,提高员工的绿色建筑意识和专业技能。通过这些措施,企业可以推动绿色建筑理念在深基坑支护工程管理中的广泛应用,为绿色建筑的发展做出积极贡献。

4.3 社会监督与参与

社会监督与参与是绿色建筑理念落地的关键。各界应强化对绿色建筑项目的督评,保障项目达标合规。公众需积极参考绿色建筑活动,提升自身的环保与绿色建筑认知。此外,媒体及公益组织应加大绿色理念的宣传和推广力度,增强社会关注与支持。通过多方监督参与,可营造全社会共促绿色建筑发展的氛围,为该理念在深基坑工程管理中的应用筑牢社会根基。

5 结束语

绿色建筑理念是建筑领域未来发展的指向标。于高层建筑深基坑支护工程管理而言,融入绿色建筑理念既能提升工程环保与可持续性,又可削减成本、精进质量。绿色管理策略及实施路径,可为深基坑工程绿色化转型提供有益参考。未来应强化绿色理念的宣传和推广,激励更多企业与项目采用绿色技术及管理手段,共促绿色建筑发展,助力打造宜居、美丽且可持续发展的城市生态。

参考文献:

- [1] 杨威,徐小云,史新,等.北京城市公园景区提升改造工程与养护研究:以陶然亭公园水生植物及周边绿地生态景观提升改造工程为例[J].城市建筑,2023,20(18):209-212.
- [2] 张国栋,沈亚琳,张羽晴,等.城市更新中商业升级改造创新管理要点研究:基于喷淋系统改造的工程管理分析[J].科技创新与应用,2023(22):146-149.
- [3] 董超.重大绿色民生工程复杂性、异质性的一体化系统融合管理机制研究:以京堰对口协作工程建设项目为例[J].现代商贸工业,2023(18):77-79.
- [4] 刘立慧,张睿,杨光,等.基于BIM技术的建筑工程管理影响因素与策略分析:以某污水处理厂BIM应用分析为例[J].中国建设信息化,2023(14):62-66.
- [5] 李寅倩.建筑工程管理创新及绿色施工管理探讨:以中国援斯里兰卡水技术研究与示范联合中心项目为例[J].房地产世界,2023(14):70-72.

桥梁施工技术创新发展对策研究

张 海

(新政建设集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘 要 为解决桥梁施工技术创新中的发展瓶颈问题, 以智能化施工、绿色技术和模块化建造为例, 对技术创新面临的实施障碍展开系统分析。研究揭示了技术应用失衡、研发能力不足和标准滞后等核心问题, 提出分级标准体系、多元化资金投入和跨学科人才培养三项关键对策。针对风险管理环节, 构建了包含技术验证、市场监测和组织优化的防控框架, 以期为提升桥梁施工技术创新效能提供实践参考。

关键词 桥梁施工; 技术创新; 智能化建造; 绿色施工; 风险管理

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.035

0 引言

我国桥梁建设正处于新一轮技术变革的关键期, 数字技术与绿色发展的双重驱动对施工工艺提出更高要求。随着“十四五”规划对基础设施智能化的战略部署, 桥梁施工领域的技术创新已从单纯追求效率转向质量、安全、环保的多维提升。然而, 在实际推进过程中, 技术创新面临着应用断层、标准滞后、人才短缺等现实问题。这些问题在山区桥梁、跨海通道等复杂工程中表现得尤为突出, 直接影响着我国基建技术的国际竞争力。本研究立足于行业最新发展动态, 系统剖析技术创新面临的瓶颈问题, 探索智能化、绿色化转型的有效路径, 为促进桥梁施工技术高质量发展提供实践参考。

1 桥梁施工技术创新存在的问题

1.1 技术应用水平参差不齐

不同施工主体对先进技术的采纳能力存在显著分化。大型工程集团通常具备完善的研发投入和人才储备, 能够快速整合智能监测系统、自动化施工设备等新兴技术。相比之下, 中小型施工企业受制于资金链压力和人力资源缺口, 往往停留在传统工艺阶段。这种分化不仅导致同类项目的工程质量波动, 更可能引发行业生态的恶性循环——技术滞后者因竞争力下降进一步丧失创新资源。技术落差的另一根源在于区域基础设施的配套差异。经济发达地区更容易获得高精度传感器、三维建模软件等技术载体的支持, 而偏远地区的施工团队即使掌握方法论, 也常因硬件缺失难以实施。例如: 基于北斗系统的实时形变监测技术需要配套通信网络支持, 但部分山区项目仍面临信号盲区问题。这种客观条件限制使得技术推广无法通过单

一的政策引导实现均衡。更深层的问题在于技术标准与现场实践的脱节。部分创新成果在实验室环境中表现优异, 却未能针对复杂地质条件或极端气候场景进行适应性调整。当施工团队机械套用标准化方案时, 往往遭遇预期外的地基沉降或材料疲劳问题。

1.2 技术创新瓶颈制约发展

核心技术自主研发能力的不足构成首要障碍。在桥梁抗震设计、大跨度结构计算等关键领域, 国内施工方仍依赖进口软件和专利技术。这种依赖性不仅推高建设成本, 更导致技术迭代受制于人。当国外更新算法标准时, 国内项目往往需要重新采购设备或支付高额升级费用。这种被动局面本质上源于基础理论与工程应用研究的衔接断裂。创新风险的分担机制缺失进一步抑制了技术突破动力。桥梁施工具有明显的不可逆特征, 任何新工法的试验都可能带来数千万级的经济风险^[1]。当前行业缺乏针对创新失败的保险产品或政策兜底, 致使施工方更倾向采用保守方案。这种风险规避倾向与BIM技术推广初期的困境类似——尽管全生命周期管理理念已被广泛认同, 但实际应用仍集中在设计阶段而非施工全流程。人才结构失衡则从操作层面阻碍了技术转化。现场工程师对传统工艺的路径依赖, 与年轻技术人员的先进知识体系之间常出现断层。例如: 某跨海大桥项目曾出现无人机巡检数据因无人解读而闲置的情况, 暴露出技术工具与人力资本的不匹配。

2 施工技术创新的核心方向

2.1 智能化施工技术的突破

工程现场的数据采集方式正在发生根本转变。毫米波雷达与激光扫描的组合应用, 使结构变形监测从

离散点测量升级为全断面连续扫描。这种变化让施工团队能够捕捉到传统手段无法发现的微小位移趋势，为及时调整施工方案提供依据。智能算法的引入则使数据处理效率产生质的飞跃，原本需要数小时的分析工作现在可以实时完成。施工机械的自动化升级面临环境适应性的考验。虽然无人摊铺机在试验场表现出色，但实际工地上的物料波动和天气变化仍会影响作业精度。为解决这个问题，新一代控制系统开始整合气象数据和材料特性参数，建立动态调整模型。塔吊智能防撞系统则通过建立三维作业空间模型，将误判率控制在万分之一以下。

2.2 绿色施工技术的应用推广

材料革新正在改变传统的施工环保范式。新型矿物掺合料的应用使混凝土的氯离子扩散系数降低了一个数量级，大幅提升结构耐久性的同时减少了维护频次。施工废水的电化学处理装置能在现场完成净化循环，其运行能耗仅为传统方法的十分之一。太阳能薄膜与施工临时设施的集成设计，使部分项目的临时用电自给率达到30%以上。这种分布式能源模式特别适合偏远地区的桥梁建设。这些技术突破使绿色施工从单纯的环保要求转变为具有经济竞争力的选择。能源管理系统的智能化升级带来新的节能空间。基于负荷预测的电力调配系统可以优化施工现场的能源使用节奏，避开用电高峰期的同时保证关键工序的电力供应^[2]。

2.3 模块化与装配式技术的深化

结构分解逻辑的革新推动着模块化发展。将桥梁分解为运输单元时，不再简单按结构划分，而是综合考虑运输条件、吊装能力和连接便利性。这种系统思维使山区项目的构件重量控制在直升机吊装范围内，解决了传统方法的运输瓶颈。节点设计的标准化程度直接影响施工效率，新型插销式连接的安装时间比焊接缩短80%。质量管控体系需要与装配式技术同步进化。工厂预制阶段引入的机器视觉检测系统，能够识别肉眼难以发现的微小缺陷。现场拼装时使用的智能校准装置，可将误差控制在0.5毫米以内。这些技术进步使装配式结构的质量稳定性首次超越现浇结构，为技术推广扫除了关键障碍。

3 技术创新发展的保障措施

3.1 完善技术标准与规范体系

现有技术标准对新工艺的包容性不足成为首要障碍。传统规范主要针对现浇混凝土结构制定，当面对3D打印桥梁构件或智能张拉系统时，往往缺乏对应的验收条款。这种情况导致创新技术在实际应用中面临

合规性困境，即便其技术性能已经过充分验证。标准更新机制的僵化问题尤为突出，从新技术出现到被纳入规范通常需要三到五年周期，严重滞后于工程实践需求。分级分类的标准体系可能是解决问题的有效途径。可以参照医疗设备的管理模式，建立桥梁技术的风险等级划分制度。对于非承重部位的创新工法，适当放宽审批要求；而对主要受力构件的革新，则维持严格的认证程序。同时需要建立规范的快速修订通道，对于经过试点验证的新技术，缩短标准更新流程至一年以内^[3]。这种差异化管理既能保证工程安全，又为技术创新留出空间。标准国际化对接是另一个亟待加强的领域。随着“一带一路”项目的推进，我国桥梁企业经常面临与欧美标准体系的冲突。建立中外标准等效性认证机制，组织专业力量开展标准对比研究，这些工作都能显著提升中国技术的国际认可度。

3.2 资金投入与资源配置

创新资金的投入结构存在明显失衡。目前大部分研发资金集中在施工设备采购环节，而对基础理论研究和转化的投入严重不足。这种重硬件轻软件的倾向导致许多核心技术难以突破，只能停留在表面改进层面。建立多元化的资金投入机制势在必行，应当区分基础研究、应用研究和产业化推广不同阶段的资金需求特点，制定差异化的支持政策。风险投资机制在工程建设领域的缺失制约了技术创新。相比其他行业，桥梁施工的技术创新具有周期长、投入大、风险高的特点，传统金融资本往往望而却步。设立专业化的工程技术创新基金，引入保险机构分担研发风险，建立政企风险共担机制，这些措施都能有效降低创新门槛。特别是对于中小企业的技术创新，更需要建立专门的融资渠道和担保体系。资源配置的碎片化问题也需要引起重视。当前各个施工企业的研发活动往往各自为政，导致重复投入和资源浪费。建立行业级的创新资源共享平台，推动关键设备的租赁共用，组织联合攻关团队，这些措施都能显著提升资源利用效率。

3.3 人才培养与团队建设

工程技术人才的培养模式面临转型升级。传统土木工程教育过于侧重结构计算和施工工艺，对数字化技术和新材料科学的涉及严重不足。高校课程体系需要重构，增加BIM技术、智能算法、绿色材料等新兴领域的教学内容。同时要打破学科壁垒，促进土木工程与计算机、材料、机械等学科的交叉融合。现场技术人员知识更新机制亟待完善。许多资深工程师对新兴技术存在认知鸿沟，而年轻技术人员又缺乏工程

经验。建立常态化的技术培训体系,组织创新技术现场观摩,设立导师制培养机制,这些措施都能促进技术传承与创新。特别是对于智能建造装备的操作和维护,需要建立专门的资格认证体系^[4]。创新团队的组建方式也需要革新。传统的部门分割模式不利于跨专业协作,应当建立以项目为导向的矩阵式管理结构。组建由设计、施工、科研人员组成的联合团队,实施全过程协同创新。特别是在技术攻关阶段,更需要打破组织边界,建立灵活高效的工作机制。

4 技术创新的风险管理与应对策略

4.1 技术风险的识别与防控

技术可行性验证是风险防控的基础环节。新型施工工艺在工程应用前,应当完成实验室模拟、缩尺试验和专家论证三级验证流程。数字孪生技术的引入为风险预判提供了新途径,通过建立虚拟施工场景,可以模拟复杂地质条件下的结构响应。对于涉及主体结构安全的关键技术创新,必须设置独立的技术评审委员会,采用盲审方式评估技术方案的可靠性。技术标准适配性风险需要特别关注。当创新技术超出既有规范框架时,可能面临验收障碍。建立新技术临时许可制度具有现实必要性,由行业协会组织专家团队开展专项评估,出具限定范围和时间的应用许可。同步推进技术创新保险机制建设,开发针对首台套应用的专属保险产品,通过风险分摊降低企业创新成本。在跨海桥梁等重大项目中,可以考虑设立技术创新风险准备金,为试验性工法提供资金保障。

4.2 市场风险的预警与规避

市场需求变化构成持续性风险。技术研发前应当开展系统的市场调研,分析不同区域、类型桥梁建设的技术需求特征。建立市场动态监测平台,定期收集业主单位的技术偏好信息,及时调整研发方向。对于长周期研发项目,建议采用模块化开发策略,根据市场反馈灵活调整技术路线,避免资源浪费。技术迭代风险具有突发性特点^[5]。智能建造领域的快速发展使得技术生命周期明显缩短。研发团队需要建立竞争技术跟踪机制,定期评估自身技术的领先优势。保持核心技术架构的开放性,预留接口兼容未来升级需求。在专利布局方面,应当形成核心专利与外围专利的组合保护,构建多层次的技术壁垒。对于可能被替代的技术方案,提前制定转型预案,降低沉没成本损失^[6]。

4.3 组织风险的化解与协调

跨部门协作需要机制创新。技术创新涉及设计、施工、监理等多方主体,传统的线性管理模式效率低下。

矩阵式项目组织能够有效整合各方资源,设立专职的技术协调岗,负责进度跟踪和问题解决^[7]。建立定期技术协调会制度,采用问题清单化管理,确保协作障碍及时消除。在重大技术创新项目中,可以考虑组建实体化的联合创新中心,实现人员、设备和数据的深度融合。人才流动风险威胁技术延续性。核心技术骨干的流失可能导致项目中断。完善人才保留机制尤为重要,实施技术骨干的股权激励计划,设计清晰的职业发展通道。建立技术文档的标准化管理体系,采用区块链技术确保研发过程的可追溯性。推行导师制人才培养模式,形成老中青结合的技术梯队。对于涉及商业秘密的核心技术,应当签订竞业限制协议,保护企业的创新成果^[8]。

5 结束语

桥梁施工技术创新正处于转型升级的关键阶段,智能化、绿色化和工业化的发展方向已形成行业共识。技术标准体系的完善为创新活动提供了制度保障,而风险防控机制的建立则确保了技术转化的稳定性。人才培养模式的革新和资源配置的优化,从根本上解决了创新动力不足的问题。这些系统性对策的实施,不仅能够提升单个项目的施工质量,更有助于推动整个行业的技术进步,为基础设施建设高质量发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 江家宝.高速公路桥梁施工技术创新与实践研究[J].运输经理世界,2024(28):127-129.
- [2] 孙红飞.高速公路桥梁施工中的预应力混凝土技术突破与创新[J].中国住宅设施,2023(12):166-168.
- [3] 李飞虎.高架大跨度桥梁施工工艺与技术创新[J].运输经理世界,2023(33):101-103.
- [4] 梁沁强.市政桥梁施工技术的管理以及创新思路探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(25):73-75.
- [5] 李炜.桥梁施工中的钢筋混凝土结构施工技术创新[J].交通世界,2020(25):112-115.
- [6] 王小伟.基于绿色理念的公路桥梁施工技术研究[J].运输经理世界,2024(27):43-45.
- [7] 代勤飞.高速公路后张法预应力混凝土桥梁施工技术与应用[J].科技创新与应用,2024,14(22):193-196.
- [8] 吕灵敏.市政道路桥梁施工中的绿色施工技术应用[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术与施工管理交流会议论文集(下).浙江丰家建设有限公司,2024.

水库坝基渗水问题及治理方案分析

蒋朝兴

(江门市新会区龙门水库管理所, 广东 江门 529000)

摘要 水库坝基渗水问题是水利工程建设中的重大安全隐患, 会给水库的正常运行以及周边区域安全带来严峻的挑战。本文剖析了某水库坝基渗水的具体成因, 包括地质构造的复杂性、施工质量参差不齐、材料自身所带有的缺陷以及运行管理方面出现的疏漏等诸多环节, 并提出了切实可行性的治理策略, 旨在为有效解决水库坝基渗水问题提供实践参考。

关键词 水库; 坝基渗水; 消力池; 廊道排水孔; 黏土斜墙

中图分类号: TV62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.036

0 引言

水库作为水利工程的关键组成部分, 是重要的基础设施, 其在防洪减灾、农田灌溉、电力供应以及城市供水等诸多重要领域都发挥着不可替代的作用。水库坝基渗水问题作为水利工程领域中最典型的安全隐患, 一方面会降低水库的蓄水能力, 另一方面会对其正常运行造成干扰, 并且还有可能导致坝体滑坡、溃坝事件, 进而给周边地区的安全带来严重的威胁。因此, 针对水库坝基渗水问题展开全面且细致的研究, 具有重要的现实意义和工程实践价值。

1 工程概况

某水库涵盖了灌溉、防洪、水产养殖以及旅游观光等诸多方面作用。水库建有 15.2 m 高的均质土坝, 上游流域面积为 77.3 km², 设计库容为 19.48×10⁶ m³。近几年, 水库实施的除险加固工程成果显著, 各项关键工程顺利完成。穿坝灌溉输水涵管不但材质优良, 而且还配备了精密的铜片止水装置, 其进口底板高程控制在 32.48 m, 出口底板高程则控制在 31.31 m。另外, 加固工程里的液压抓斗塑性混凝土防渗心墙厚度为 0.6 m, 墙底延伸深入到岩层 0.5 m。同时, 坝基防渗帷幕也深入隔水层 5 m 处。水库基坑底高程为 26.2 m。经过检查, 大坝帷幕完全符合既定的标准与要求, 正式开启了下闸蓄水运营。不过, 在蓄水作业不断推进的过程中, 发现存在两处渗水的问题。其中一处渗水点位于坝脚消力池的底部区域, 另一处则在廊道排水孔部位。

2 水库坝基渗水问题分析

2.1 坝脚消力池渗水分析

通过对水位观测数据进行分析, 尽管水库水位处于不断上升的态势, 但下游坝脚消力池三角堰的出水

点, 水位波动的范围微小, 仅仅是在 2.8 ~ 2.9 cm 之间变动。同时, 该出水点的流量同样维持在恒定的状态, 一直保持在 0.19 ~ 0.20 L/s 这个区间范围之内, 并且其水质状态清澈, 不存在任何杂质。在稳定情形下, 体现出水库水位所发生的变动并没有对下游消力池的出水点带来直接及显著的影响。通过分析得出该区域出现的渗水情况, 主要是源自两岸山体内部所存在的地下水渗透^[1]。

2.2 廊道排水孔渗水分析

随着蓄水位持续升高, 廊道排水孔的流量渐渐呈现出增加趋向, 直观地反映出水库水位同廊道渗水状况二者之间存在着十分密切的关系。在对坝基渗水量评估过程中, 参考了《水力发电工程地质手册》相关规定内容, 并且综合坝基所依靠的坚硬的岩体具体特性, 运用特定的计算公式来开展量化分析:

$$Q = KH \frac{T}{L} B \quad (1)$$

在公式(1)中, Q代表总渗流量; K为渗透系数(m/d), 用于量化材料的渗透性能; H表示上下游水头差, 单位为m, 反映了水位间的高度差异; B代表坝体长度(m), 以此衡量坝体的延伸范围; T指裂隙带深度(m), 揭示了坝基中潜在渗漏通道的深度; L为坝底宽度(m), 决定了渗漏路径的宽度。

基于获取的观测数据, 可通过公式(1)求解渗透系数K, 结合坝基的实际渗透特性, 全面评估大坝防渗措施是否达标, 并判断水库蓄水过程中坝基透水率的变化是否符合预期。大坝当前的蓄水高程及排水孔的渗水位置已在图1中标注。在计算过程中, 采用参数值如下: Q为实际测量的渗流量; H为对应库水位与廊道渗水点之间的水头差; T取值为裂隙带深度, 即防渗帷幕的实际深度, 约为20 m; L根据实际的出水位置确定为渗径的宽度, 如图1所示。

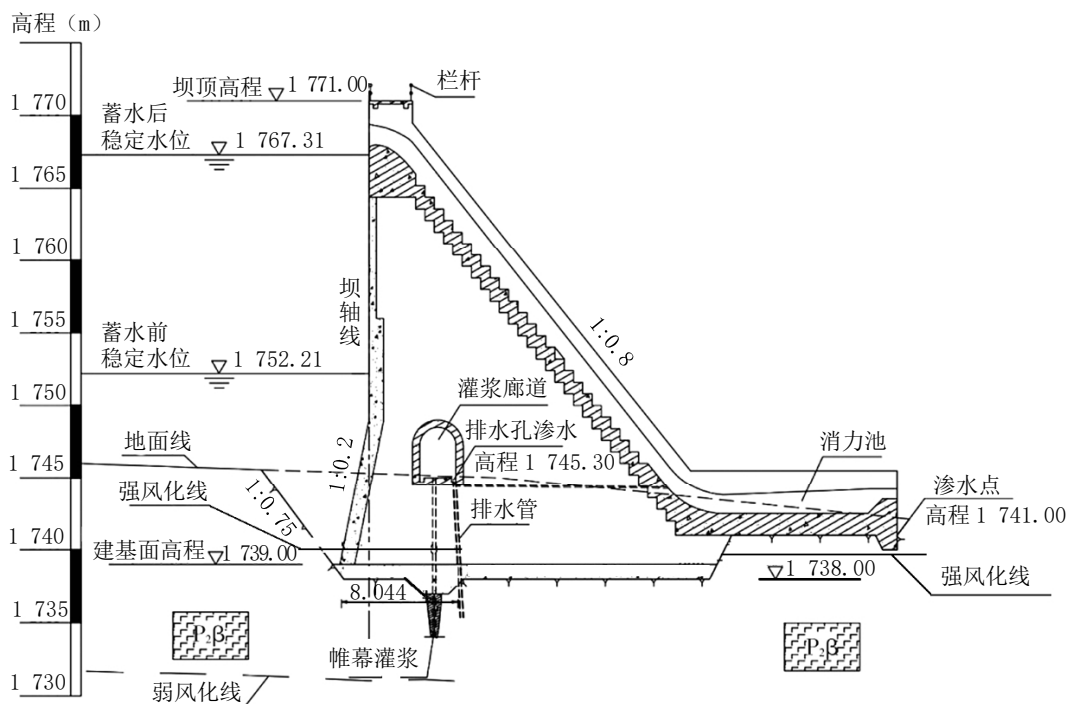


图 1 大坝现蓄水高程及排水孔渗水位置示意图

计算得出以下结论：蓄水前，库水位高程稳定在 1 752.21 m 时，坝基的渗透系数 K 为 2.809×10^{-7} cm/s，对应的透水率 q 约为 2.4 Lu；蓄水后，库水位高程稳定在 1 767.31 m 时，坝基的渗透系数 K 降低至 1.104×10^{-7} cm/s，透水率 q 也相应减少至约 1.0 Lu（见表 1）。

表 1 各时段坝基透水率统计表

时段	透水率 /Lu
施工期（压水）	2.78（平均值）
蓄水前（底水头）	2.4（公式计算）
蓄水后（高水头）	1（公式计算）

表 1 数据显示，在监测的时段范围内，坝基的透水率全部都与相关规范控制标准相契合。同时，随着水库中蓄水量持续不断地增长，坝基的透水率明显地呈现出了逐步下降趋势。究其原因，很有可能是因为在水库蓄水过程中，泥沙在持续不断地沉积。这些沉积的泥沙等沉积物，对坝基区域所存在的裂隙起到了填充的作用，从而导致坝基的透水性明显降低。另外，当水库运行在防限水位以下时，坝基所承受的水压力相对较小，这有助于减少坝基渗漏的可能性。同时，较低的水位也意味着坝体与水体之间的接触面积减少，从而降低了渗漏的通道和范围。即使在防限水位下运行，仍需关注坝基的渗漏情况。因为渗漏不仅与水位

高低有关，还与坝体的材料、结构、施工质量以及地质条件等多种因素有关，因此，水库管理部门应定期进行检查和监测，及时发现并处理潜在的渗漏问题，以确保水库大坝的安全和稳定^[2]。最后，通过图 1 可以看出，蓄水位已高出堰顶高程，会有经溢洪道自泄出现现象，对渗漏现象有危险的影响。

3 水库坝基渗水治理方案

水库坝基出现渗漏问题的原因有多种，如坝址的工程地质条件欠佳，坝体自身结构的稳定性不够，施工过程中存在质量方面的不足，原本设置的防渗措施没能发挥效用，还有施工管理方面松懈等问题。面对诸多长期存在着的难题，要制定一套相对完整且成体系的解决办法，把坝肩上游的黏土防渗斜墙和坝体内部的混凝土防渗墙有机地结合起来，以便能够从根源上去除掉渗漏方面可能存在的隐患。在此基础上，制定并且落实一套既科学又高效的防渗方案^[3]。

3.1 黏土防渗斜墙构建方案

解决坝体土壤存在的渗水问题要依照“上堵下排”原则来规划，在坝肩的上游岸坡构建黏土斜墙。黏土斜墙在处理大坝施工质量问题、管涌坍塌、浸润线异常上升以及坝身发生漏水等多个方面都具备显著的优势。在具体施工的过程中，首先要把水库的水排空，揭开护坡结构，铲除表层的土壤，挖松 10 ~ 15 cm 深

的土层,同时将含水量过高的土体进行清理,要分层填筑黏土并且进行严格的夯实操作。为了进一步提升防渗的实际效果,在斜墙底部应当设置截水槽,让其深入坝基相对不透水层的位置,这样就能有效地阻断渗漏通道,防止水分继续往下面渗透,从而可以明显地降低渗透流量。在下游区域,要配置反滤以及导渗的相关设施,确保坝内渗出的水安全又顺畅地排到坝外,进而让渗透处于稳定的状态。

黏土防渗斜墙在具体设计方面要遵循下列要求:其一,黏土的渗透系数要严格把控,使其处于坝身土料渗透系数的1%以下,以此保障良好防渗效果。其二,斜墙顶部的厚度不能小于0.5~1.0 m这个范围,而底部厚度要依据土料容许的水力坡降情况来确定,但不得小于作用水头的1/10,并且其最小厚度不能少于2 m,通过这样的设置来强化整个结构的稳定性。其三,斜墙的上游面应当铺设保护层,可选用砂砾或者非黏土材料,让其从坝底一直延伸到坝顶,其厚度要比当地冰冻层深度大一些,一般会设定在1.5~2.0 m这个区间,从而保护斜墙,使其免受水流冲刷以及冻融等带来的破坏。其四,斜墙的下游面需要铺设反滤层,以此来提升坝体的整体稳定性以及防渗性能^[4]。

3.2 修建混凝土防渗墙

考虑到该水库复杂且多变的地质环境,可在坝肩的上游位置构建黏土斜墙,一定程度上增强坝体整体的防渗性能。同时,还可在坝体内部修筑混凝土防渗墙,形成一道可靠的防渗屏障。这两项措施彼此相互配合、相互辅助,从根源处彻底解决某水库坝基存在的渗水问题。混凝土防渗墙具备施工速度快、材料利用率高以及防渗效果显著等优点,尤其适用于坝高处于60 m以下、坝身质量欠佳且渗漏问题时常发生的均质坝。考虑到施工方法存在的差异,混凝土防渗墙可以被划分成槽孔式与连续圆柱式两种不同的类型。综合某水库地质特征,适宜选取槽孔式防渗墙,并且要采取分段处理的方式,把每段槽孔的长度把控在5~12 m范围之内。具体的施工步骤如下:首先要开凿出第一期槽孔,随后浇筑混凝土,等混凝土达到了特定的强度(一般来说大概需要一周的时间)之后,接着开凿第二期槽孔,同时对第一期槽孔的两端进行套削处理,以此来保证搭接处的墙厚能够契合设计的要求。槽孔施工运用劈打法,也就是先依照一定的间隔开凿出主孔,然后再对主孔之间的副孔进行劈打操作。

为了提升防渗墙的防渗性能,可将防渗墙的厚度设计为0.6~0.8 m区间范围内。还可以在防渗墙的

两边填充黏土,形成黏土心墙的结构形式。与此同时,为了让防渗墙与坝体的接触径得以优化,并且使坝顶的应力集中现象有所减轻,建议在坝顶采用高塑性土料来进行填筑,而且要将其底部嵌入基岩之中,嵌入的深度控制在0.5~1 m之间,通过这样的方式来增强二者连接的稳定性。除此之外,还需要保证防渗墙的两端能够与岸坡防渗设施或者岸边基岩紧密地连接在一起,从而构建完整且连续的防渗体系。另外,考虑到部分坝段可能会出现防渗功能失效的情况,建议把防渗墙修建到167 m的高程位置,以此来恢复并提升它的防渗性能。

3.3 其他应对措施

案例水库坝基渗流处于相对稳定的状态,在渗漏问题彻底解决之前,要进一步强化日常管护工作中的观测工作。尤其在发生暴雨、洪水这类自然灾害时,应当适度增多观测的频次,留意渗流所发生的变化情况,同时也要注意量水堰的水质情况。同时,必须把蓄水位严格把控在159 m以下。一旦察觉到有异常或者存在潜在的风险,就应该立刻上报,并且要采取有效的举措来妥善处理风险,以保证大坝的安全^[5]。

4 结束语

水库坝基渗水问题是影响水库安全运行的关键因素之一。本研究对水库坝基渗水问题全面分析后,提出了相应的治理方案,旨在适用于不同地质状况以及工程要求的水库坝基防渗处理。在落实治理方案的过程中,要依据实际情况选择治理方案并且进行优化组合,让治理效果达到最佳状态。同时,还要进一步加强对水库坝基渗水问题的监测以及研究工作,持续提升水库坝基渗水治理技术的水准与效率,从而保障水利工程稳定运行。

参考文献:

- [1] 李利蓉.贵州某水库水文地质条件对水库渗漏的影响分析[J].河南水利与南水北调,2019,48(01):31-32.
- [2] 吴钦峰.角峪水库坝基渗水问题分析及治理方案探讨[J].中国水运,2024,24(20):77-79.
- [3] 吴祖德.岩溶地质条件下水库坝基渗漏问题研究[J].水利科学与寒区工程,2023,06(11):64-67.
- [4] 周彦龙,高小文,冉海林.马鹿水库坝基防渗处理方案设计[J].水利技术监督,2021(05):178-182.
- [5] 王冬,闫小龙,申永斌.基于数值模拟的水库滑坡变形特征预报研究[J].水科学与工程,2023(03):65-68.

市政供水管网爆损原因及对策分析

郭伟伟

(北京京源水务有限公司, 北京 102425)

摘要 供水管网爆损是城市供水系统运行中常发生的安全问题, 不仅会造成水资源浪费和经济损失, 还可能引发道路塌陷、交通中断等次生灾害, 其成因涉及管材缺陷、施工质量、非均匀地质沉降、材料性能退化、水锤效应及运行压力失衡等多重因素。基于此, 本文从管材选择、施工质量、地质条件、金属管道腐蚀、水锤效应产生、运行压力波动等多角度系统分析了供水管网爆损原因, 并针对性地提出优化管材选型、完善设计规范、严格施工工艺、强化防腐措施等策略, 旨在为降低供水管网爆损风险、提升供水系统可靠性、保障基础设施安全运维提供有益参考。

关键词 供水管网; 管道爆损; 给排水; 城市供水

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.037

0 引言

供水管网爆损是指供水系统运行中可能出现结构性损坏、突发性破裂等问题导致系统功能失效、管网压力骤降并导致水体流失的问题, 通常其成因在于供水管网局部穿孔、焊缝开裂、接口脱节或出现裂缝导致水资源大量流失^[1]。国际水协会对供水管网爆损的定义中提出, 每小时漏水量超过 10 立方米的供水管网爆损事件即为重大事故, 此类事故不仅会导致直接经济损失, 还可能会进一步引发其他社会问题, 是城市基础设施的重要威胁^[2]。而供水管网爆损的成因具有复杂性和系统性, 开展针对性预防工作时可能出现无从着手等问题。早期灰口铸铁管易腐蚀, 新型钢管、聚乙烯管虽性能优化却存在电化学腐蚀、低温脆裂等局限。施工环节中基础处理不当、接口密封不足, 或者软土沉降、冻融循环等地质环境因素都会威胁管网稳定性。

供水管网爆损影响原因包含施工方式不佳、管道老化腐蚀、结构性破坏等多个方面。解决策略需从多个角度共同入手分析。鉴于此, 本文从管材问题、施工质量、地质条件、腐蚀老化、水锤破坏和运行压力角度出发, 分析供水管网爆损的常见原因, 并分别提出防治策略。

1 供水管网爆损原因

1.1 管材问题

供水管网所使用的管材材料类别是直接决定管网寿命的关键因素。早期供水管网主要为灰口铸铁管,

这类管网连续浇筑、刚性连接, 但其管体内部结构疏松, 经常出现内沟、黑渣、气孔难以消除等问题。

历经数十年发展, 目前国内供水管网所用管道材料逐渐优化, 常用的管材主要包含钢管、聚乙烯 (PE) 管、球墨铸铁管。其中, 钢管具有接口少、管材长度大、耐高压、抗拉强度高、韧性好等多方面应用优势, 但具体应用时容易受土体等因素影响发生电化学腐蚀并最终引发管网爆损^[3]。球墨铸铁管抗压强度更高, 但容易受到电化学腐蚀影响, 管道老化腐蚀后内壁氧化层脱落, 而后管道劣化速度进一步加快。聚乙烯管具有较强的耐腐蚀性能, 可用于环境腐蚀严重趋于水源疏松, 但聚乙烯管道也存在抗冲击性能不足、低温抗裂性能不足等问题, 环境温度较低时受到外部载荷影响则更容易产生裂纹等问题。

1.2 施工质量

施工质量问题供水管网爆损的隐性影响因素。在工程实践中可能出现基础超挖、回填不佳、防腐不到位、接口质量差、零件不配套、长距离安装未设伸缩节等问题, 导致管材运行安全性不足^[4]。首先, 部分工程出于各方面原因, 可能出现超挖、欠挖等问题, 超挖、欠挖可能因地面受路面载荷、自然降水等因素而发生不均匀沉降, 对管道产生剪切应力。超挖不回填则会由于夯实效果不佳导致管道受力不均匀, 引发爆管等问题。此外, 地区供水管道采用钢管、球墨铸铁管等管道时, 必须做好防腐措施, 措施不到位或管线周围存在有轨电车等可能产生杂散电流, 导致电化学腐蚀加速, 引发爆管。

1.3 地质条件

通常条件下, 自然土体的承载能力基本都能满足管道荷载要求, 因此只要将供水管网设置在冰冻线以下的天然土层, 就可在不设额外加固处理的基础上保障管道运行稳定性。但后续管网运行中, 可能会出现各方面问题, 导致底层受到不均匀扰动, 最终引发管道损坏。常见原因主要包含: 管道上方存在弱土土体, 但施工时未经有效加固; 管道基坑上方土体基本良好, 但部分区域集中隐藏部分腐殖土且未经有效加固处理; 管道路径中存在高含水量淤泥质土层或腐殖质土体, 且仅对部分路段作刚性处理; 土体土质含水量分布不均匀, 导致秋冬季节封冻速率不一, 管道受压力差导致管道爆损^[5]。

1.4 腐蚀老化

管道输送的水体为净水, 内部包含少量氯离子其他离子, 受周边细菌影响、土体杂散电流、土壤酸碱成分等影响, 金属质管道材质发生电化学反应并受腐蚀。早期使用的钢管, 当前使用的球墨铸铁管、钢管如没做好内部防腐处理则都可能出现这类问题。管道内部腐蚀达一定程度后, 就会产生水利条件变坏、有效输水管径减小、管道负担增加等问题, 并最终导致局部穿孔甚至爆管。

铸铁管受电化学腐蚀作用后可能会出现石墨化现象, 此时从外观上看铸铁管依旧保持良好运行状态, 但管道已软化到十分严重的程度, 甚至稍稍用力就能切削管道, 在外力作用下非常容易出现漏水等问题。钢管受电化学腐蚀后, 则非常容易在焊接接口位置出现漏水, 因此需做好内壁防腐措施。

1.5 水锤破坏

供水管网内部水锤现象的产生, 主要在于水流速度快速变化导致压强交替升降, 并对供水管网内壁产生水力冲击, 其产生原因主要在于闸阀启闭不合理、管道设置不规范、水泵设置不佳等。

供水管线通常两端分别连接高位水池或泵站, 管线内部水流保持恒定流速并呈正压运行, 但出现电网

停电、调整输水量导致水泵切换等问题时, 就很容易导致管线内部水流状况急剧变化, 此时接近泵站出口位置的水流流速降低, 远离泵站出口的水流流速则受惯性影响而维持原有流速, 导致管道出现负压, 尤其是坡度较大区域处管道负压更加严重, 导致水中气体析出或水柱分离, 严重时还会导致部分区域出现空管段^[6]。而调整完成后重新启动工作阀, 就会导致之前滞留的水体转向并与新流入水体弥合, 产生严重碰撞, 对管道内壁产生水力冲击。

1.6 运行压力

当前部分地区供水管网开展节能降耗工作, 结合城市用水需求灵活调整供水管网运行压力, 虽然有考虑到管网承受压力, 但部分地区计算管网承受压力时所用参考因素为管网设计数值, 并未结合供水管网长期运行中产生的损耗进行进一步计算。在此基础上, 供水管网开展水压调度时就可能部分时段运行压力高于当前承受能力, 在高、低峰水压作用下导致管网受力状态不佳, 最终引发管网爆损, 此类问题在老化严重的管网体系中更加常见。

2 供水管网爆损控制策略

2.1 管网选材优化

当前管网材料相关研究不断推进, 可以根据当地供水管网运行特点、供水需求选择合适的管道材料, 也可以在供水管道中加入特定组分改善管道应用性能。新铺设管道应从安全性、管材造价、内壁摩擦系数、管道寿命、运维成本等角度综合对比, 比选最合适的管材。现结合常用供水管材应用优势及劣势展开分析(见表1)。

供水管网管道选材应结合当地气候状况、供水需求、压力状况、地质情况等多方面因素共同分析。与河道距离较近的区域需要采用抗腐蚀性能较强且具备良好力学性能的钢筋混凝土管、加砂玻璃钢管, 并根据管道需求做好防腐处理。而开展管道防腐蚀处理时, 也需根据管道特点和外在环境制定针对性防腐措施, 例如部分管线受管径等因素影响, 管内水分会停留较

表1 常用供水管材应用优势及劣势

类别	塑料管	钢管	加砂玻璃钢管	钢筋混凝土管	球墨铸铁管
应用优势	抗腐蚀性能强、方便运输、造价适中	机械性能好、可推广性高、可靠性强	不需防腐处理且抗腐蚀性能强、方便运输、水利条件好	抗腐蚀性能极强、造价低	运输方便、运维方便、事故率低、可结合各类配件、防腐性能强
应用劣势	存在管件配套问题	耐腐蚀性能不足且造价较高	生产厂家少、需现场制作管件、造价较高	对地质条件要求高、无标准化管件	造价较高

长时间,可结合钢塑复合管、高密度聚乙烯管等材料以避免水质二次污染问题。

2.2 优化管网设计

管网设计中应结合《室外给水设计规范》《给水排水设计手册》等相关设计规范,严格做好管网设计。具体实践中,应结合以下注意事项开展:首先应结合地区实际情况选择合适管道,并配备空气室、调压井、水锤消除器、排气阀等配套设施,如果所用管材为钢管,还需在特定距离上设置管道伸缩节;软土土体和硬土土体相交位置应当设置万向伸缩器,避免土体不均匀沉降导致管道受剪力,并做好防温度应力措施;寒冷地区管道埋深不得超过规范要求,避免气温影响;结合当地供水管网实际运行情况做好防水锤效应措施;管线交叉位置、管道需过河点位需采用钢管做倒虹吸管。

2.3 施工技术优化

供水管网施工中应严格按照施工规范开展作业,具体施工时应着重考虑管底基础、管道安装和覆土质量等多方面因素。其中管底基础施工时应当首先检查底部是否存在石块等异物,避免后续运行期间不均匀沉降将导致应力集中,并应铺设一层高质量砂或黏土,确保底层平整,并确保管道下部能够完整接触土体;管道安装则应特别关注管道接头位置安装质量,目前无论是 PVC 管道还是常规球墨铸铁管道均采用柔性橡胶材质接口以降低动荷载、土体荷载和温度差导致的管道应力破坏,提高供水可靠性;管道覆土效果会通过后期土体沉降对管道产生应力影响,尤其是大口径管道对于覆土均匀性、夯实效果有更高要求,回填土夯实密度不足则可能导致不均匀沉降并引发管道变形等问题,因此需结合工程规范要求做好土体检测,避免管道周围土体有石块或其他坚硬物体存在,并确保覆土厚度满足达标。

2.4 防腐处理

供水管道,特别是金属管道,对于防腐处理有一定要求。金属管道的防腐处理要求首先清除管道表面锈斑,而后使用干燥空气吹除管道内壁存在的粉尘。《室外给水设计规范》中明确要求金属管道内壁防腐处理中应优先考虑水泥砂浆衬里,除水泥砂浆外也可根据工程特点及预算考虑采用环氧粉末、环氧液体涂料进行防腐。外防腐处理也需根据管道种类不同选择不同措施,其中球墨铸铁管、铸铁管需采用环氧煤沥青涂料或沥青等涂料加以处理,而钢管对于外防腐要求更高,通常要求两层玻璃纤维布配合三层环氧煤沥青处

理,腐蚀问题严重的区域则设置三层玻璃纤维布配合四层环氧煤沥青加以处理。

部分地区含硫量或其他离子含量较高,需要采取措施防止电化学腐蚀,针对管道直接接触电解质溶液的情况通常采用阴极保护技术加以处理,具体应用时可以采取牺牲阳极法将管道与合金或金属材料连接,避免管道金属材料极化,也可采用强制电流保护法,将管道金属材料与电源负极连接,并提供外部电流。

2.5 管网体系智能运行

针对管网运行体系当前存在的问题,需深入调查供水管网当前实际运行状态,针对服役超过一定年限的管道加装内衬或分段替换,并逐步推进供水管网内部传感器网络安装工作,实时感知管道当前运行压力,基于压力数据和管道运行故障相关数据优化运行压力算法,保障供水管网安全运行。此外,可通过分段式调节阀、电动缓闭阀等策略降低水锤压力产生冲击波的强度,坡度较大区域则可设置排气阀门,需调整水压时估测区域水压状况并根据需求开启排气阀。

3 结束语

围绕供水管网爆损问题,系统剖析管材性能局限、施工缺陷、地质扰动、腐蚀老化、水锤效应及压力失衡等核心诱因,并针对性提出材料优选、设计优化、工艺升级、防腐强化等分级应对策略。未来研究需进一步探索智能监测技术在爆损预警中的应用,推动新材料开发与管网数字化管理深度融合,并建立涵盖地质勘测、材料研发、施工监管、运维诊断的全周期防控机制,推动城市供水系统安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 顾向荣.供水管网爆管监测方法的探索[J].城镇供水,2020(02):42-45,93.
- [2] 戴雄奇,王博彦,林峰,等.供水管网爆管率预测与影响因子分析[J].供水技术,2020,14(01):1-5.
- [3] 王伟.如何制定市政供水管网爆管事故应急预案[J].门窗,2019(19):237,241.
- [4] 张忠贵,王玉岚,邓洋,等.供水管网爆管时空聚类分析研究[J].湖北第二师范学院学报,2019,36(02):36-38.
- [5] 周毓,王晓锐,邹康兵,等.超滤背景下低药剂消毒对供水管网水质安全的影响[J].环境工程学报,2025,19(04):913-921.
- [6] 朱丽红.供水阀门的源头控制管理[J].流体测量与控制,2024,05(06):114-117.

船闸工程金属结构安装施工技术分析

刘鸿鹏

(安徽建工路港建设集团, 安徽 合肥 230031)

摘要 船闸工程作为水利工程的重要组成部分, 船闸金属结构的安装施工技术直接关系到工程的稳定性和安全性。因此, 在施工过程中, 必须严格遵循相关技术标准和规范, 确保每一步施工都达到设计要求。同时, 还需对施工现场进行实地勘察, 了解地形地貌、水文条件以及周边环境, 为施工方案的制定提供可靠依据。本文结合实践经验对船闸工程金属结构安装的施工技术进行详细分析, 探讨其关键技术和施工要点, 以为类似工程提供参考。

关键词 船闸工程; 金属结构安装; 人字门安装; 门体吊装; 顶枢安装

中图分类号: U66

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.038

0 引言

船闸工程是水利工程中的关键设施, 用于调节水位, 实现船舶的通航。金属结构作为船闸工程的主要组成部分, 其安装施工技术的优劣直接影响到船闸工程的整体性能^[1]。因此, 对船闸工程金属结构安装施工技术进行深入分析, 对于提高工程质量、保障通航安全具有重要意义。

1 工程概况

淮河航道临淮岗复线船闸工程位于霍邱县和颍上县交界处, 涉及河南、安徽两省, 主体工程跨三县, 控制面积 4.22 万 km², 为一等大型工程。设计标准为 100 年一遇洪水, 滞洪 85.6 亿 m³, 1 000 年一遇洪水标准校核, 滞洪 121.3 亿 m³。新建船闸为 2 000 t 级, 闸室尺寸为 240×23×5.2 m, 设计代表船型为 2 000 吨级和 1 000 t 级机动驳。船闸闸首孔口净宽度为 23 m, 人字闸门关门时夹角为 22.5°。上闸首人字闸门门扇计算宽度为 13.60 m, 设计厚度为 1.5 m, 计算高度为 13.63 m, 门龛宽度为 2.30 m; 下闸首人字闸门门扇计算宽度为 13.86 m, 设计厚度为 2.0 m, 计算高度为 18.36 m, 门龛宽度为 2.70 m。工作阀门采用平板阀门。金属结构安装包括上闸首人字门 2 扇及埋件、工作阀门 2 扇及埋件、检修闸门埋件 1 孔, 下闸首人字门 2 扇及埋件、工作阀门 2 扇及埋件、检修闸门埋件 1 孔, 以及 24 套浮式系船柱及埋件。上闸首人字闸门: 计算宽度为 13.60 m, 设计厚度为 1.5 m, 计算高度为 13.63 m, 门龛宽度为 2.30 m。下闸首人字闸门: 计算宽度为 13.86 m, 设计厚度为 2.0 m, 计算高度为 18.36 m, 门龛宽度为 2.70 m。金属结构安装包括: 上闸首人字门 2 扇及埋件, 工作阀门 2 扇及埋件, 检修闸门埋件 1 孔, 下闸首人字门 2 扇及埋件, 工作阀门 2

扇及埋件, 检修闸门埋件 1 孔, 浮式系船柱及埋件 24 套。

2 船闸金属结构安装施工流程

1. 人字门安装工艺流程: 底枢轴座安装→顶枢埋件安装→门轴柱埋件安装→底枢及顶枢二期砼浇筑→底枢安装→顶枢安装→门体吊装、安装、拼焊→斜接柱、门轴柱承压条安装→门体调整及附件安装、调整→门轴柱二期砼浇筑→现场防腐→底枢及橡皮安装→人字闸门无水调试→灌注环氧砂浆→人字闸门有水调试^[2]。

2. 工作阀门安装工艺流程: 施工准备→测量放样→底枢安装→二期砼浇筑→主、副、侧轨、门楣安装→二期砼浇筑→阀门吊装、安装→止水橡皮检查、调整→工作阀门无水调试→工作阀门有水调试。

3. 浮式系船柱安装工艺流程: 施工准备→测量放样→埋件安装→浮式系船柱吊装调试。

4. 检修闸门埋件安装工艺流程: 施工准备→测量放样→底枢安装→二期砼浇筑→主、副轨安装→二期砼浇筑。

3 金属结构安装施工技术分析

3.1 人字门安装施工技术分析

仔细审查施工图, 制定人字门安装方案, 并对作业人员进行技术交底。安装测量放线步骤包括: 测量底枢旋转中心, 投影顶枢旋转中心, 放出控制点和线。主要测量仪器包括全站仪和水准仪。底枢由多个部件组成, 部分部件与门叶整体吊装, 最大不可拆分部分重约 0.5 t。底枢支承座安装前, 需焊接安装支架, 使用 16 t 汽车吊吊装就位, 并调整水平偏差^[3]。合格后焊接底枢支承座调整螺栓, 与预埋件焊接牢固, 并复测相关尺寸。枕座预埋件采用 25 t 汽车吊逐块吊装就位, 并与调整角钢焊接。安装完成后, 采用铅垂线控

制调整枕座扭曲,并测量中心线直线度。相同方法用于安装枕垫块、支垫块。

3.2 门体吊装及焊接

上闸首人字门最重门叶为第一节,重 24.5 t,共 3 节单节,门叶采用 300 t 汽车吊进行吊装。下闸首最重门叶为第一节,重 22.35 t,共 5 节单节,门叶采用 200 t 汽车吊进行吊装。查看施工现场道路情况,上闸首人字门使用 300 t 吊车从上游道路进场,吊车就位后在检修门门槛位置吊装。下闸首人字门使用 200 t 吊车从下游道路进场,在下游人字门门槛上就位^[4]。吊装措施:(1)清理钢管、模板,修整施工道路后进行闸门吊装。(2)300 t 汽车吊进入现场,运输车辆转运闸门构件至吊装位置,按顺序吊装闸门各节。(3)每节门叶吊装前,地面焊接走台和栏杆,作为操作平台,上下通道使用爬梯或梯笼。(4)门叶吊装后,用千斤顶调整水平、垂直度,调整后固定支墩和门叶。(5)门叶几何尺寸检测合格后,进行节间焊接,焊接人员持证上岗,确保焊缝质量。

3.3 顶枢安装

利用全站仪精确测定并标记左右拉架的中心线,以门叶顶部旋转中心的高程作为基准,进而确定左右拉座的高程,确保两拉架的吊装定位准确无误:拉杆中心线的交点与顶枢中心的重合度偏差不得超过 2 mm;顶枢轴线与底枢轴线同轴度公差应控制在 0.5 mm 以内;拉座中心高程的偏差应控制在 +3 mm 范围内;拉座两端的高差应不超过 1.0 mm^[5]。在安装过程中,需密切关注各部件的相互位置关系,确保顶枢与底枢的精确配合。在顶枢安装到位后,采用专用工具进行紧固,防止松动。同时,对安装完成的顶枢进行复查,确保所有参数均满足设计要求。在安装过程中,还应做好施工记录,为后续的质量控制和维修提供可靠依据^[6]。

3.4 门体附属构件安装

门体附属构件主要包括背拉杆、护木(柔性护木、钢护木)、工作桥等。在门叶节间焊缝焊接完成后,进行附属构件的安装。背拉杆的主要功能在于提升门叶的刚度以及防止斜接柱端的下垂现象。在安装前,在背拉杆两端下方搭建长 1.5 m,宽 1 m 的工作平台。吊装过程中,采用多点吊装法,以控制背拉杆在吊装过程中的变形。定位后,在其上端两侧焊接反力支座,并使用两台 100 t 的千斤顶对背拉杆施加预紧力,随后收紧背拉杆螺母,拆除反力支座和施工平台,从而完成背拉杆的安装^[7]。施工方法如下:(1)按照先主背拉杆后副背拉杆的顺序进行施加。依据主背拉杆加力后副背拉杆自动收紧的规律,可采用主带副的施工

策略。(2)在加力过程中,需注意主、副背拉杆之间的相互作用,尽量在粗调加力阶段减少两杆之间的应力差。(3)在微调阶段,目的是使门体斜接柱和门轴柱的变形达到理想状态,应力达到设计范围,同组中背拉杆的应力差应小于 1%。同时,尽量减少两端柱中间部位的鼓肚现象,以确保后续支枕垫块两侧环氧填料的填筑间隙。

3.5 左右门叶联合安装

完成门叶独立安装和整体调整后,进行连构件安装。门叶主体焊接基本完成,需镗孔作业以确定顶枢回转中心。通过放样点复测顶枢轴孔,确保满足设计要求后安装顶枢轴。顶枢安装后,待混凝土强度达到预定值,拆除门叶支撑,使用启闭机和监测仪器调整门叶扭曲变形和径向跳动,以满足使用要求。人字门门体调整包括背拉杆预应力、顶枢中心和径向跳动量的调整。背拉杆调整前,贴应变片并使用千斤顶顶升门体,调整遵循先主杆后副杆原则。调整至斜接端板中心垂直度和主副杆受力在设计范围内^[8]。通过背拉杆预应力调整门叶刚度,测定径向跳动调整顶枢轴线。检查门体径向跳动值验证摆正情况,通过水平仪测量调整左右拉杆长度,直至径向跳动小于 1.5 mm。安装底节支垫块,调整至全关位置,确保支垫块顶紧枕座。支、枕垫块间浇注填料应符合相关规范。支、枕垫块安装以枕垫块为基准,对称度和垂直度公差为 1 mm,间隙检查符合规定。安装就位卡钳座、导轮等附件,调整卡钳座与导轮位置。

3.6 金属结构防腐涂装

涂料配套使用,针对本工程底、中、面涂料,由制造厂家统一采购。埋件安装后,外露面由于焊接对油漆面的损毁,根据设计要求进行防腐。封闭底漆为环氧封闭底漆二道,干膜厚 60 μm,中间漆为环氧云铁二道,干膜厚 100 μm,面漆为聚氨酯面漆三道,干膜厚 80 μm,漆膜总厚度 240 μm。船闸人字闸门现场拼接后,门叶对接焊缝将原本油漆面损毁,按设计要求将损坏面防腐后,再按照面漆为聚氨酯面漆三道,干膜厚 80 μm,并保证漆膜总厚度 240 μm。为确保涂装质量,涂装前应对金属表面进行彻底清理,去除油污、锈蚀和旧漆层,确保表面干净、干燥。在涂装过程中,应严格控制涂料稀释比例和涂装层数,保证每层涂装的均匀性和附着力。涂装完成后,应对漆膜进行厚度检测和外观检查,确保漆膜厚度达到设计要求,且表面光滑、平整、无漏涂、气泡和剥落等缺陷。同时,涂装施工应在良好的通风条件下进行,避免涂料挥发对人体造成危害。此外,涂装材料应存放在干燥、阴

凉处,避免阳光直射和高温,确保材料的质量和稳定性。

3.7 工作阀门的安装施工技术分析

船闸金属结构安装工程技术人员审阅施工图,确定阀门施工方案,并对作业人员进行技术交底。平面门安装测量放线步骤包括:测量孔口中心线、门槽中心线及底板高程控制点。主要测量仪器有全站仪、水准仪等。底槛安装涉及从工地运输、卸载至基准点,并在钢支撑平台上进行调整。调整顺序为高程、中心,最后复查高程,使用水准仪和调整螺栓进行精细调整。中心线调整采用拉线法和千斤顶移位法。调整后,进行焊接固定,并每隔1 000 mm测量1点。轨道安装包括运输至现场、临时起吊、调整高程和扭曲,确保技术指标符合规范。门楣安装则通过塔吊吊至现场,测量并调整门楣与底槛的垂直距离,最后焊接固定。

3.8 工作阀门吊装、安装

施工现场具备工作阀门安装条件,所有埋件二期混凝土已具备施工条件。工作阀门吊装前检查:门槽内杂物清理干净;检查浇筑后门槽尺寸是否符合设计要求;底槛上方杂物清理干净;预备肥皂水等给轨道润滑,防止水封受损。工作阀门到达施工现场,利用吊车将阀门缓缓吊起,做静平衡试验,使用水准仪测量阀门两端底梁高差,记录数据。单吊点阀门安装前作静平衡试验,其左右倾斜度不应超过门高的1/1 000,且不大于8 mm可继续吊装施工,如不满足规范要求,上报施工技术负责人,提出解决方案报监理审批,直至静平衡试验完成后,方可吊装入槽。使用汽车吊将工作阀门吊起插入门槽,为保护底封水,事先在底封水处垫上方木,在放入门槽时,在轨道上撒泼肥皂水,以保护侧水封、顶水封橡皮。

3.9 浮式系船柱安装施工技术分析

技术人员仔细审查施工图,制定浮式系船柱安装方法,并对作业人员进行技术交底。安装步骤包括测量孔口中心线、导轨中心线和标记底板高程控制点。使用全站仪和水准仪进行测量。通过螺母调整埋件位置,并用全站仪控制精度。确保埋件在浇筑砼时稳定,对接接头错位进行处理,焊疤和焊缝余高磨平,进行防腐处理。埋件安装后,检查合格后5~7天内浇筑砼。导轨和护角底高程根据闸室不同而定,埋件基础面钢筋使用 $\phi 25$ 钢筋支撑。根据高程计算埋件底高程与钢筋距离,使用槽钢作为基准,用汽车吊将埋件吊入,测量垂直度和控制点。使用 $\phi 16$ 钢筋加固埋件,底槛高程为12.34 m。浮式系船柱用平板汽车运输至闸室,用25 t吊车吊装至槽内,检查升降功能。

3.10 检修闸门埋件安装工艺流程参照工作阀门埋件安装工艺流程

检修闸门埋件安装工艺流程主要包括以下几个步骤:(1)准备阶段,确认埋件的安装位置、周边环境及混凝土浇筑情况。根据设计图纸,准备所需的埋件及配件,确保材料符合相关标准。准备安装所需的工具,如起吊设备、电焊机、测量工具等。对参与安装的人员进行安全培训,确保其了解安装过程中的安全注意事项。(2)埋件安装阶段,对埋件进行外观检查和变形校正,确保埋件符合设计要求。对门槽内的一期混凝土进行凿毛处理,并清理渣土和积水。根据设计要求,调整预埋螺栓的位置和高度。利用起吊设备将埋件吊入预定位置,并利用预埋螺栓和拉紧器进行调整和固定。对埋件的接头进行焊接,并磨平焊缝,确保埋件表面平整。对埋件的安装精度进行复测,确保符合设计要求,并进行验收。(3)二期混凝土浇筑与养护,在埋件安装完成并验收合格后,进行二期混凝土的浇筑。对浇筑完成的二期混凝土进行养护,确保其强度达到设计要求。

4 结束语

船闸工程金属结构安装施工技术是船闸工程建设中的关键环节。通过合理的施工准备、安装顺序与方法、焊接与连接技术以及防腐与保护措施的应用,可以有效提高金属结构的安装施工质量和性能。同时,加强质量控制措施的实施也是确保船闸工程稳定性和安全性的重要保障。未来,随着技术的不断进步和创新,船闸工程金属结构安装施工技术将会得到更加广泛的应用和发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.船闸工程施工规范(JTS 218-2014)[S].2014-12-01.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.水运工程质量检验标准(JTS 257-2008)[S].2008-12-22.
- [3] 刘峥,章少兰,黄琬.适用于水上施工的船闸闸首结构与施工方法[J].水运工程,2020(03):169-173.
- [4] 同[1].
- [5] 耿新林.船闸闸门吊装工艺的研究与应用[J].中国港湾建设,2022,42(01):68-71.
- [6] 国家能源局.NB/T 11418—2023,水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程[S].2023-12-28.
- [7] 徐莉萍.高港枢纽二线船闸工程安全复核报告[R].南京:高港枢纽二线船闸工程安全鉴定会,2023.
- [8] 陈秋声.大型船闸多空箱混凝土结构预制钢筋混凝土模板施工技术[J].工程技术研究,2021,06(13):96-97.

老旧城区市政给排水设计方案优化策略

李海洋

(阜阳市城乡规划设计研究院有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 目前老城区给排水系统还存在一些缺陷, 如仍采用镀锌钢管, 这类管材易锈蚀, 使用寿命短, 且不能满足生活用水的水质卫生标准; 水表空转问题也时有发生, 这可能是由于水表质量不合格或安装过程中施工不当造成的, 损害了用户的利益。针对以上缺陷, 老城区给排水系统需要进行全面的改造和升级, 包括制定合理的排水计划、总体规划分期建设、提高排水管网系统的管理水平等措施。本文提出强化水源保护、优化供水网络、构建节水体系; 通过管网改造、海绵设施提升防洪排涝, 推进分布式污水处理; 建立智慧运维、完善应急预案, 提升系统韧性等多维优化策略, 以期有效解决老旧设施改造等难题提供有益参考, 进而促进城市可持续发展。

关键词 老旧城区; 给排水系统; 智能化管理; 应急响应

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.039

0 引言

在新型城镇化战略深入推进的背景下, 老旧城区作为城市存量空间的重要组成部分, 其市政基础设施改造升级直接关系到城市高质量可持续发展。其中, 给排水系统作为城市生命线工程的核心部分, 直接关系到居民的日常生活和城市的正常运行。然而, 由于历史原因和长期缺乏维护, 老旧城区的给排水设施普遍存在着老化、布局不合理、水资源利用效率低等问题。这不仅影响了居民的生活质量, 也制约了城市的可持续发展。

1 老旧城区市政给排水系统现状分析

1.1 设施老化显著

老旧城区给排水设施因长期失修, 管道多采用铸铁或混凝土材质, 易受道路沉降、地下水侵蚀, 出现管壁锈蚀、接口松脱等问题, 导致水流阻力增大、水质污染风险上升, 供水压力损耗严重。水泵、阀门等设备因超期服役, 存在电机效率衰减、密封件老化等隐患, 部分设备甚至无法自动启停, 年均维修成本增加 30% 以上, 突发故障频发影响居民用水。

1.2 布局与空间矛盾突出

老旧城区管网呈“小管径、高密度、雨污合流”特征, 管径普遍小于 DN400, 暴雨时易发生“顶托”现象, 道路狭窄导致扩容受阻, 排水能力骤降 40% ~ 60%。雨污合流管网占比高达 70%, 污水冲击污水处理厂, 导致出水水质不稳定。人口密度超 3 万人 / 平方公里, 暴雨期间局部积水 0.5 ~ 1 米, 严重影响交通与安全。

1.3 资源利用与保护失衡

设施老化与布局缺陷导致水资源利用效率低下, 管网破损年漏损率达 15% ~ 20%, 相当于流失 10 万人用水量。雨污合流系统增加污水处理厂运行成本, 吨水处理能耗高出 25% ~ 30%。污水直排现象占比 15%, 导致河道氨氮、总磷超标 3 ~ 5 倍, 生态修复成本增加 500 万元 / 平方公里, 形成“资源浪费—污染加剧”的恶性循环。

1.4 应急能力与需求脱节

老旧城区给排水系统暴露三大脆弱性: 合流制管网暴雨时排水能力仅维持设计标准的 40% ~ 50%; 应急预案未覆盖管网爆裂等特情, 跨部门联动响应时间长达 2 ~ 3 小时; 老旧管网耐压值低于 0.8 MPa, 二次供水设施无备用电源, 突发停水时高层住户断水超 6 小时比例达 40%。这种“硬件—机制—保障”短板, 使老旧城区更易陷入系统性瘫痪风险。

2 老旧城区市政给排水设计方案优化原则与思路

2.1 优化原则

在老旧城区市政给排水设计方案的优化过程中, 应遵循四大原则: 首先是安全性原则, 确保系统稳定运行, 加强监测预警, 防范安全事故; 其次是经济性原则, 合理控制投资, 选择性价比高的技术和设备, 保证方案可行可持续; 再者是可持续性原则, 注重水资源节约保护, 推动节水型社会建设, 考虑长期运行维护成本; 最后是适应性原则, 优化方案需适应城市发展需求, 与城市规划和建设相协调, 具备灵活性和可扩展性。通过遵循这些原则, 确保给排水系统既满

足当前需求,又适应未来发展,为老旧城区的居民提供更加安全、经济、可持续和适应性的给排水服务。

2.2 优化思路

2.2.1 整体性规划与分步实施相结合

制定“三阶段改造计划”:第一阶段(1~2年)聚焦高风险区域,优先实施管网分流与修复,针对雨污合流占比超80%、管网漏损率超20%的片区,采用非开挖修复技术(如紫外光固化CIPP)对DN300以下管段进行改造,减少施工对交通的影响,同步完成局部泵站扩容;第二阶段(3~4年)推进泵站智能化升级,增设分布式调蓄池(单池容积500~1000 m³),同步部署SCADA系统实现管网压力、流量、水质实时监测,建立管网爆裂风险预警模型;第三阶段(5~6年)构建全域雨洪管理体系,通过LID设施(如下沉式绿地、透水铺装)削减30%年径流总量,形成“源头减排—管网输送—末端调蓄”一体化系统^[1]。

2.2.2 技术改造与管理创新并重

技术层面聚焦管网、泵站及智慧化三大方向:淘汰铸铁/混凝土管材,全面采用球墨铸铁管(K9级)或HDPE缠绕增强管,确保管网耐压 ≥ 1.0 MPa、设计寿命 ≥ 50 年;替换老旧水泵为永磁同步电机,效率提升15%~20%,增设备用电源(EPS)保障停电时高层供水;部署管网监测节点(间距 ≤ 500 m),集成流量计、水质传感器,通过AI算法预测管网爆裂风险。管理层面建立“巡检—养护—应急”三级体系,制定《老旧管网分级养护标准》,明确不同材质管道的清洗周期(如球墨铸铁管每3年1次,混凝土管每2年1次),推行“管网健康档案”电子化管理,实现从“被动抢修”到“主动预防”的转变^[2]。

2.2.3 资源化利用与环境保护相协调

核心目标包括污水和雨洪资源化、生态修复和绿色施工。通过在污水处理厂安装反渗透膜系统,达到城市污水再生利用标准,优先用于道路和绿化。雨水花园和蓄水模块的建设将实现雨水滞蓄率超过60%,处理后的雨水用于景观补水。氮氮超标河道将采用曝气复氧和人工湿地技术,减少污染物负荷30%~50%。使用非开挖技术进行管网改造,弃土资源化利用,确保施工符合环境噪声标准。这些措施将促进系统从末端治理向资源循环转型,提升安全韧性30%,降低漏损率至10%以下,实现污水资源化率至少25%。

3 老旧城区市政给水系统优化策略

3.1 水源多元化选择与保护

老旧城区市政给水系统优化需聚焦水源多元化开发与近域协同保护。当前老旧城区多依赖单一水源,

存在供水风险^[3]。为此,需实施“近郊联动”策略:一是开发近域非常规水源,利用郊区水源周边雨水资源(建设调蓄池容积 ≥ 3000 m³)及中水回用设施(处理规模 ≥ 5000 m³/d),通过管网延伸覆盖老旧城区;二是强化水源生态缓冲区建设,在郊区水源外围划定1~2公里生态涵养带,限制农药化肥使用量(较现状降低30%),采用生物滞留设施削减面源污染;三是构建“三级预警”监测体系,在近郊水源设置常规指标监测点(每日1次)、特征污染物监测点(每周1次)及应急监测点(实时在线),配套无人机巡检(每月覆盖全域),实现水质异常2小时内响应。通过上述措施,推动水源结构从“远郊单点”向“近域多源”转型,降低单一水源断供风险60%以上。

3.2 供水网络优化

供水网络优化需以管材升级与压力调控为核心。一方面,全面更换老旧管网,采用球墨铸铁管(K9级,耐压 ≥ 1.0 MPa,设计寿命 ≥ 50 年)或钢丝网骨架聚乙烯复合管(耐腐蚀性提升3倍),配套非开挖修复技术(如紫外光固化CIPP),减少施工扰民;同步优化管网拓扑结构,通过水力模型模拟调整管径(DN300~800 mm)与水流方向,降低水头损失15%~20%。另一方面,构建智能压力调控系统,在管网关键节点增设压力传感器(精度 ± 0.01 MPa)与变频调速泵组,结合SCADA系统实现压力实时监测与动态调节,消除供水压力波动(± 0.02 MPa内),保障末端服务水压 ≥ 0.28 MPa。

3.3 节水措施与水资源高效利用

节水措施与水资源高效利用是老旧城区市政给水系统优化的重要目标。首先,推广与应用节水器具。鼓励居民和企业使用节水型洗涤设备、卫生洁具等,减少水资源的浪费。同时,加强对节水器具的宣传和推广,提高公众的节水意识。其次,设计水资源循环利用系统。在老旧城区中,存在大量的废水可以经过处理后循环利用。建立废水收集、处理和回用系统,将处理后的废水用于冲厕、浇洒道路、绿化等,实现水资源的循环利用。同时,加强对废水处理技术的研发和应用,提高废水处理的效率和质量,确保循环利用的水资源符合相关标准。

4 老旧城区市政排水系统优化策略

4.1 排水系统改造与升级

老旧城区的排水系统往往存在着雨污不分流、管道老化堵塞等问题,严重影响了排水效率和水质。因此,需对排水系统进行改造与升级。首先,实施雨污分流改造方案。通过新建或改造排水管道,将雨水和污水

分别收集、输送和处理,避免雨水与污水混合排放对污水处理厂造成冲击,同时减少污水对自然水体的污染^[4]。改造时,需考虑城区规划和未来需求,确保雨污分流系统的合理性和可持续性。应用管道扩容和疏通技术,对老旧、狭窄的排水管道进行改造,提升其过流能力和排水效率。同时,定期疏通和维护管道,清除淤积物和障碍物,保证管道畅通。

4.2 防洪排涝能力提升

老旧城区排水系统需提升内涝防控。首先,根据《室外排水设计标准》和 50 年一遇降雨特征,动态设定排水管网重现期,确保系统与极端降雨匹配。其次,升级设施,新建大流量排水泵站和分布式调蓄池,改造低洼区排水系统,采用“点线面”策略:增设线性排水沟和坡面导流槽,对低洼地块进行微地形改造,形成立体防控体系,降低内涝风险。

4.3 雨水径流控制与资源化利用

老旧城区市政排水系统优化需强化雨水源头减排与循环利用。实施“海绵化”改造工程,在公共空间铺设透水铺装(透水性 $\geq 1.5\text{ mm/s}$),建设下沉式绿地(滞蓄容积 $\geq 30\text{ L/m}^2$),改造建筑立面为垂直绿化(雨水滞留率提升 20%),形成“渗、滞、蓄、净”综合体系,削减年径流总量 $\geq 30\%$ 。同步构建雨水收集回用系统,设置蓄水模块(单模块容积 $50\sim 100\text{ m}^3$),配套处理设备(水质达《城市杂用水水质》标准),优先用于绿化灌溉、道路冲洗及景观补水,减少市政供水依赖,实现雨水资源化率 $\geq 20\%$ 目标。

5 老旧城区市政给排水系统管理与维护优化

5.1 管理制度完善

建立健全给排水系统管理制度。针对老旧城区的特殊情况,制定详细、全面的管理制度,明确各级管理部门的职责和权限,确保管理工作的有序进行。管理制度应涵盖给排水系统的规划、设计、建设、运行、维护等各个环节,形成完整的管理链条。同时,要明确管理责任与考核机制。将给排水系统的管理工作纳入相关部门的绩效考核范围,建立科学合理的考核指标体系,对管理工作的成效进行定期评估。对于管理不善、工作不力的部门和个人,要严肃追究责任,确保管理制度的有效执行。

5.2 智能化管理技术应用

积极应用智能化管理技术,提升给排水系统的管理水平和效率。建设智能化监测与控制系统,通过安装传感器、监控设备等,实时监测给排水系统的运行状态和水质情况,及时发现并处理异常情况。同时,

利用远程控制技术,实现对给排水系统的远程操控和管理,提高系统的响应速度和处理能力。此外,还要开发数据分析与决策支持系统。通过收集、整理给排水系统的运行数据,运用数据分析技术,挖掘数据中的有价值信息,为管理决策提供科学依据^[5]。决策支持系统应具备预测、分析、评估等功能,帮助管理人员更好地掌握系统状况,制定合理的管理策略。

5.3 应急响应机制构建

构建完善的应急响应机制,提高给排水系统应对突发事件的能力。制定详细的应急预案,明确应急响应的流程、措施和责任分工,确保在突发事件发生时能够迅速、有效地进行应对。同时,定期组织应急预案的演练实施,提高应急人员的反应速度和处置能力。此外,还要加强应急物资储备与调配机制的建设。根据应急预案的需求,储备必要的应急物资和设备,如抢修工具、备件、防护用品等。建立应急物资的调配机制,确保在突发事件发生时能够迅速调配物资到位,保障应急工作的顺利进行。

6 结束语

通过对老旧城区市政给排水系统的深入研究,提出了一系列针对性的优化策略。这些策略既考虑了系统的当前状况,又兼顾了未来的发展需求,具有前瞻性和可操作性。这些策略旨在有效提升给排水系统的运行效率、保障水质安全、增强防洪排涝能力,并实现水资源的高效利用和循环利用。同时,通过完善管理制度、应用智能化管理技术和构建应急响应机制,将进一步提升系统的管理水平和维护效率。未来,我们将继续关注老旧城区市政给排水系统的发展动态,不断探索新的优化策略和技术手段,为城市的可持续发展贡献更多力量。

参考文献:

- [1] 刘旭. 老旧建筑改造中给排水系统的设计与施工策略[J]. 大众标准化, 2024(14):57-59.
- [2] 吴江涛, 秦晓梅, 胡颖慧, 等. 老旧小区室外给排水管网提升改造设计分析[J]. 中国建筑金属结构, 2023(S2): 168-171.
- [3] 罗磊. 老旧小区给排水系统改造相关问题分析[J]. 建材发展导向, 2023(16):143-145.
- [4] 宋张驰, 陈霞. 城镇老旧小区给排水专项改造设计与实践研究[J]. 给水排水, 2023(S1):757-762.
- [5] 何曦. 市政给排水设计中的常见问题与解决办法[J]. 价值工程, 2020(33):48-49.

水利工程中的工程地质和水文地质勘测方法研究

杨世通, 丁荣武

(广东珠荣工程设计有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 水利工程建设不仅可以解决区域用水问题, 还能为当地的农业生产和畜牧业发展创造良好的条件, 属于重要的基础设施建设项目。在经济不断发展的背景下, 对水利工程建设投入也随之增多, 逐渐形成了较为完善的水利施工体系, 并且明确了前期工程地质勘测和水文地质勘测的必要性。基于此, 本文梳理了工程地质和水文地质的勘测要点, 结合已有的水文地质勘测方法, 以具体的水利工程项目为例, 研究工程地质和水文地质勘测技术的应用方法, 旨在充分发挥地质勘测技术优势, 为提高水利工程施工质量提供有益参考。

关键词 水利工程; 工程地质; 水文地质勘测

中图分类号: TV22; P64

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.040

0 引言

水利工程施工前的工程地质和水文地质勘测是了解和掌握施工风险点的重要途径。相关施工单位要结合勘测结果来优化施工方案, 合理利用区域内的资源, 制定针对性的风险应对预案, 进行有效的施工风险管控。水利工程施工的场地条件较为特殊, 只有全面掌握现场地质条件和水文条件才能保障方案设计的可行性。因此, 各施工单位要重视工程地质和水文地质勘测工作。现阶段的地质勘测方法众多, 每种勘测方法的原理不同, 适用范围也有所不同, 要想提升水利工程的工程地质和水文地质勘测效果, 需要结合工程实际情况积极应用科学合理的地质勘测方法。

1 水利工程中的工程地质和水文地质勘测要点

1.1 工程地质勘测要点

1. 地质构造。地质构造往往决定了区域地质地貌与岩石特性, 对于水利工程项目的建设质量具有直接影响。在水利工程建设前, 必须全面进行地质勘查工作, 在了解地质构造的基本特征后设计科学可行的施工方案, 从根本上保障水利工程施工质量。常见的地质构造类型有地块、褶皱、火山和断层四种, 地质构造不同地形和地貌形态也存在较大的差异, 对于地质构造类型的准确判断可以明确地质构造的演化规律, 为接下来的水利工程项目提供可靠的参考。部分施工区域内的地质构造较为特殊, 需要对相关的控制因素加以明确, 并将其分为不同的构造单元, 分别分析其对水利工程施工的影响。对于地质构造的勘测是一项

系统性的任务, 其中复杂的结构体系是影响水利工程施工效果的关键性因素, 可以通过对地质构造的勘测了解各个构造单元在地下的空间分布形式, 保障水利工程施工方案设计的科学性^[1]。

2. 土体性质。针对土体性质的勘测是为了了解其力学特征, 这直接决定了水利工程的施工难度。在实际工程中, 如果土体性质不佳则需提前做好地基处理工作, 通过预处理增强地基承载性能。土体性质勘测涉及如下内容: 一是土体物理性质勘测, 指的是针对土体质地、颜色和孔隙度等的勘测, 针对土体物理性质的勘测能够帮助水利工程优化施工方案, 有助于提升水利建筑结构的稳定性; 二是土体力学性质勘测, 指的是对土体压缩性能、抗剪强度和固结水平等的勘测, 基于上述勘测结果往往能够明确土体结构的承力性能、抗剪性能以及沉降变形规律等; 三是土体含水率勘测, 能够帮助水利工程施工人员了解土体中的含水量以及分布状况, 为水利工程施工和后期维护提供可靠的参考。

1.2 水文地质勘测要点

1. 地下水位测量。在地下水位测量中, 可以实现对区域内地下水位高度和空间分布特点的测量, 地下水位测量的要点包括: (1) 设置地下水位监测点。可以基于工程建设区域水文地质条件合理设置地下水位监测井, 用于对典型地下水层的监测。地下水位监测井设置完毕后, 在内部安装好水位计, 水位计可以选用能够监测水位变化的传感器, 也可以选用人工读数的仪器。其中传感器的应用支持对水位监测数据的实

时更新; (3) 结合水利工程的施工需求定期测量地下水位; (4) 综合考虑降雨因素和地下水位空间分布特点等明确水位变化的规律, 为水利工程施工创造良好的条件^[2]。

2. 水文地质特征勘测。通过对水文地质特征的勘测可以了解地下水资源的补给、分布状况以及水利条件。水文地质勘测的流程如下: 首先, 围绕地质剖面进行分析, 基于地质构造、岩性特点和土层厚度等信息, 能够分析出地下水层的空间分布特点; 其次, 进行钻孔勘测。通过钻探的手段掌握地下水层的垂直分布特点, 并且了解各个土层中的含水率; 再次, 使用地球物理探测法对地下水的分布特点以及分布量进行分析; 最后, 采取水文地质试验措施对地下水的补给能力和水力条件进行分别评估, 为水利工程的水利计算提供依据。

2 水利工程中的工程地质和水文地质常用勘测方法

2.1 地球物理勘探法

地球物理勘探法的勘测原理是基于各种地层结构在物理性质上的差异来明确地质结构特点, 即当波形遇到阻碍后所发生的变化会直接反馈地层分布特点, 通过与物探标准的对比便可得出水文地质特征。如地层中分布有岩层空隙时, 物探波形接触空隙后便会发生波形上的变化, 此时可以根据波形特点来判断地质构造情况。地球物理勘探法的常见探测手段有电磁勘探、地震勘探和重力勘探等。在电磁勘探中, 主要是根据不同地质构造的磁场差异来分析地层结构, 在矿产勘测和地下水勘测中较为常用。地震勘探是通过人工制造地震波的方式分析地震波在地层中的传播状况, 用于揭示地层分布特点与构造情况, 能够为地下活断层的确定提供依据。此外, 由于地球物理勘探法在实际应用中不会对地层结构造成破坏, 并具有准确、高效的特征, 在工程地质勘测中得到广泛应用。特别是在水利工程建设项目的水文地质勘测中发挥着突出的作用, 但在实际的勘测活动中, 需要根据勘测目标的不同选择对应的物探法, 以保障勘测结果的准确性, 获取相关的技术参数。现如今物探技术中集合了多种现代化技术, 使得物探效率和准确性得到显著提升。例如: 超声波仪器的使用能够准确获得用于表现地质结构的波形, 通过分析地质结构的波形曲线可以掌握勘测区域的地质构成情况。

2.2 钻探法

钻探法有别于地球物理勘探法, 在实际应用中, 需要使用钻探设备取样后, 分析地层构造和物理力学特征, 其应用优势表现为探测结果直观、准确, 能够

真实反馈地层构成情况和土体特性。此外, 钻探法还支持原位测试, 即采取贯入试验和旁压试验的手段分析岩层的力学性质。此种方法很少单独使用, 一般是与物探法或者遥感技术联合使用, 可以显著提升地质勘测的效率和质量, 同时也可降低地层勘测成本。需要特别注意的是, 钻探法对环境会产生一定的影响, 实际应用中应坚持环境影响最小化的作业原则^[3]。

2.3 水文地质试验法

水利工程施工条件的复杂性, 使得相关的技术体系也呈现出多元化的发展趋势。水文地质试验法作为了解水文地质特性和水力条件的关键技术手段, 随着水利工程建设数量的增大, 衍生出了多种试验法, 较为常见的有抽水试验法和注水试验法。前者是通过水利施工过程中抽水过程的模拟来分析水位变化, 可以有效了解地下水的渗透特点以及地层储水能力, 该试验方法可以用于对地层渗水系数和含水层特征的了解。后者是通过将水注入地下含水层的方式了解地下水位的上升状况, 能够实现地下水渗透速度和补给来源的分析, 此种试验方法在地下水位变化预测中发挥着重要的作用^[4]。除上述两种试验方法以外, 还有水质分析和水位观测法等, 其中的水质分析法可以对地下水的成分和污染情况进行具体了解, 而水位观测法则能持续监测地下水位变化情况, 相关施工人员可以根据水位变化特点制定对应的施工方案, 降低地下水位变化对水利施工的不利影响。

3 水利工程中的工程地质和水文地质勘测方法实践应用

3.1 工程概况

某水利工程项目建设目标是解决周边乡镇的人畜饮水问题, 同时为当地 $0.5753 \times 10^4 \text{ m}^3$ 耕地农田提供灌溉用水, 预计年供水量达 $2365 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为能保障水利建设项目的顺利实施, 需提前做好施工区域水文地质的勘测工作, 结合区域工程地质和水文地质条件优化设计水利施工方案, 确保整个施工过程均能按计划落实, 从根本上保障水利项目的建设质量。

3.2 工程地质和水文地质勘测方案设计

为准确掌握水利工程的工程地质和水文地质条件, 在项目工程中利用遥感技术与地理信息技术建立了工程地质和水文地质勘测系统, 其中的主要功能模块涉及数据采集、数据传输、场景控制、数据成像和图像储存管理几个部分。在针对坝基工程施工之前, 可以利用该系统完成工程地质和水文地质勘测工作, 以便提升坝基施工设计的可靠性。主要勘测流程为, 先借助航拍技术和卫星技术等获取分辨率较高的图像信息,

经过预处理后将图像中的阴影和云图去除得到清晰图像,可以获得较为精度的地表信息。

1. 岩石类型识别。在进行岩石类型识别时,可以根据岩石光谱特征的差异借助卫星多波段的影像和特征参数来准确识别岩石性质。这里使用 TM5 波段来识别岩性,这主要是由于 TM5 波段在红外光谱范围内的灵敏度较高,可以很好地区分岩性特征。在 TM5 波段中,各种岩石的反射率不同,因此呈现出了不同的光谱特征。此外,还可使用 TM2 波段对于坝基部位的植被加以识别,在该波段中植被的反射率明显超出岩石和土壤的发射率,因此很好区分。对于水体的识别则可应用 TM1 波段,这主要是由于水体在该波段内的反射率极低,能够与岩石、植被和土壤等产生强烈的对比。通过对不同波段的应用可以准确区分岩石、土壤、水体与植物,提高图像标注的准确性。

2. 坝基地形分析。坝基地形分析的方法为,使用激光雷达全面扫描坝基结构,获取地表信息后做降噪处理,此后可以采取数据转换的方式将其形成离散式的三维坐标数据集,这里的每个坐标点都对应着激光扫描时的地理位置坐标。为能处理好建筑物和植被等地上结构,还可采取地面提取算法来正确区分地面点与非地面点。将地面点筛选出来后,便可将地面点的云数据转换成网格数据,通过将离散数据变为规则网络结构的方式,能够为勘测结果的可视化创造条件,最终生成数字地面模型,以供水利施工人员参考。

3. 数字地面模型。该模型可以还原坝基地表高程的栅格数据,用于表现地表高程、形态和起伏状况等。通过对该模型的剖面分析、曲率计算和坡度分析可以实现对坝基地形的准确评估。尤其在剖面分析中,从视觉上分析地形的垂直剖面,能够直观地展现坝基部位的地形变化特点。坡度则用来表现坝基地面的倾斜状况,如果坡度较大,则地形较为险峻,会严重威胁坝基结构的稳定性。此外,还可利用 GIS 技术来生成等高线图,基于等高线图对坝基地形的均匀性进行准确判断^[5]。

3.3 工程地质和水文地质勘测结果

静态工程水文地图和动态地图的绘制中分别进行了两次数据采集,对于采集到的数据进行频谱分析后的结果显示,两次测量结果的差异较小,究其原因,坝基地质环境可能会受到云层厚度的影响产生变化。该水利工程中坝基的亮度范围是 0~0.8,而频率范围是 0.6~8.6 Hz,水利工程坝基区域亮度和频率符合预期,无异常表现。地质岩层的勘测结果显示,本次研究的水利工程施工区域内的地层结构主要以砾岩、

花岗岩、石灰岩和沉积物为主,而在水库建设区域的岩层为砾岩与砂页岩,通过爆破开挖的手段开采之后可以直接被用于围堰施工。在水库周边分布的花岗岩结构稳定性较好,具备较强的抗水流冲刷能力,而石灰岩则可被作为透水层,确保地下水得以自然流动^[6]。沉积物则主要分布在河流的下游位置,对其进行收集后可以用于修筑河道与填筑基坑,起到增强水利设施容量的重要作用。对于勘测结果的分析,可为水利工程的建设施工奠定良好的基础。

通过分析工程地质和水文地质勘测结果可以明确水利施工区域的地形特点。结果显示,除一个位置上的等高线范围在 560~750 m 之间以外,其余等高线均处于 520~580 m 之间,地势相对平坦,可以有效降低滑坡与坍塌等问题的发生率。与此同时,也在一定程度上降低了土方开挖的作业量。尤其是岩层结构的分布,起到了稳固地基的作用,基本无需加固处理便可满足上层荷载所需。另外,地下水位的变化幅度较小,很少会威胁水利工程施工,符合水利工程建设需求^[7]。

4 结束语

水利工程建设期间,获得全面准确的工程地质和水文地质勘测数据是保证工程建设质量的重要依据,可以为水利工程施工提供明确的指导。从早期建设的水利工程来看,因地质勘测不到位造成的施工缺陷十分常见,为水利工程的长期安全稳定运行埋下隐患,且工程使用寿命也难以保障。因此,水利工程施工单位应重点关注工程地质和水文地质勘测工作,为水利项目设计与规划提供有益的参考,为确保水利工程施工质量保驾护航。

参考文献:

- [1] 范艺荣.水文地质勘察分析与研究讨论[J].城市建设理论研究(电子版),2023(01):124-126.
- [2] 李艳龙.水文地质勘察中地下水的问题及解决方法研究[J].当代化工研究,2022(20):81-83.
- [3] 李维欣.水文地质勘察中压水试验方法及存在的问题研究[J].世界有色金属,2020(02):117-118.
- [4] 孙瑞.试论地下水环境影响评价中水文地质勘察工作的内容和方法[J].世界有色金属,2020(17):186-187.
- [5] 史林浩.地下水环境影响评价中水文地质勘察工作的内容和方法[J].河南建材,2019(06):50-51.
- [6] 吴凡.面向地质勘测的可视化绘图软件的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [7] 段函.基于 Flutter 的地质勘测数据采集 APP 的设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2022.

面向复杂地质条件的煤矿采煤掘进支护技术分析

秦利明

(中国华能华亭煤业集团大柳煤矿公司, 甘肃 平凉 744201)

摘要 我国煤炭资源开采逐渐向深部以及地质构造复杂的区域深入, 煤层的赋存条件逐渐复杂, 对采煤掘进工作产生严重的安全威胁。由于复杂的地质条件会对煤矿采煤掘进产生影响, 因此需要采用锚杆支护技术、喷射混凝土支护技术、复合支护技术等掘进支护技术, 保证煤矿采煤过程更加安全。本文通过案例分析, 提出掘进支护的优化方案, 以期为保障复杂地质条件的煤矿采煤安全提供有益参考。

关键词 复杂地质条件; 煤矿采煤; 掘进支护技术

中图分类号: TD82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.041

0 引言

在煤矿采煤过程中, 断层带、裂隙发育区等复杂的地质构造, 会使围岩自稳能力显著降低, 同时也会存在富水层、溶洞等复杂的水文地质, 影响了支护结构的耐久性能。根据复杂地质条件, 采用掘进支护技术, 通过优化支护效果, 可以有效降低冒顶、片帮事故的发生率, 同时也能抑制采动应力诱发的冲击地压连锁反应, 在保证采煤安全的同时, 也能实现煤炭资源的深度开发。基于此, 探讨复杂地质条件的煤矿采煤掘进支护技术具有重要的现实意义。

1 复杂地质条件对煤矿采煤掘进产生的影响

1.1 复杂的地质构造

在复杂地质条件下进行煤矿采煤掘进, 由于地质构造复杂, 而且相互作用, 对采煤掘进作业造成严重的影响, 降低了采煤的效果。一般复杂的地质构造主要包括褶皱、断层、陷落柱等类型, 它们呈现出密集分布的现象, 而且相互叠加, 显著增加了煤炭开采的难度。同时, 褶皱还会导致煤层产状出现剧烈的变化, 使其走向和倾角都极不稳定, 从而影响了煤炭采掘作业的连续性, 并降低了采煤的安全性^[1]。对于断层这一地质构造来说, 其不仅会破坏煤层自身的完整性, 还会诱发巷道顶板垮塌、瓦斯突出等重大的安全隐患。尤其是在断层带的附近, 围岩经常会出现破碎且裂隙发育等现象, 这些复杂的现象都会增加采煤掘进支护难度。此外, 复杂的地质构造还会造成煤层厚度出现剧烈的波动。在掘进的过程中, 会遭遇煤层急剧变薄甚至是完全消失等紧急情况, 这样就会导致作业人员频繁地调整掘进的方向以及采煤掘进的工艺参数, 严

重影响了采煤施工的效率。同时, 褶皱和断层等复杂地质构造也会严重干扰矿井通风系统的布置, 使得矿井内的通风效果大幅下降, 进而增加了瓦斯聚集和火灾等隐患, 进一步威胁了采煤掘进的安全性, 影响煤矿开采的效率及安全性。

1.2 围岩稳定性较差

在复杂地质条件下, 煤矿采煤掘进作业也存在围岩稳定性差的问题。由于围岩是由泥岩、页岩等软弱的岩层所构成, 这类岩石不仅强度比较低, 而且还存在着遇水软化、膨胀等特性, 在风化的作用下, 围岩的承载能力也会进一步降低。在巷道掘进的过程中, 这类不稳定的围岩就会容易出现塑性变形, 甚至发生突发性垮塌等安全危害, 给掘进支护工作和日常的安全维护带来了较大的压力。尤其是复杂的地质构造, 往往会导致围岩应力场呈现出非均匀分布的特征, 在某些区域中还会出现显著的应力集中等现象, 这种局部的高应力状态, 则会加速围岩自身的破坏进程, 导致围岩稳定性大幅下降。围岩应力分布不均, 会导致工程人员无法准确地预测出围岩变形的实际趋势, 这会给后续围岩稳定性控制工作增加难度, 也会影响煤矿采煤掘进工作的有序、安全开展。

1.3 地应力变化大

地壳中的原始应力场在复杂地质环境中, 往往会呈现显著的空间变异等特征。这种天然应力分布的状态及其动态变化, 会对煤层及其围岩系统的稳定性产生决定性的影响。在煤矿采煤掘进的过程中, 当工作面推进到高应力异常区域的时候, 往往会诱发剧烈的矿山压力显现现象, 导致巷道顶板快速地下沉, 底板

也呈现出显著的隆起现象,巷道侧帮则出现了严重的内挤,这些变形现象一旦严重,就会引发整体性巷道失稳的情况,导致采煤掘进工作更加危险^[2]。更为关键的是,一旦地应力场出现非均匀分布现象,就会显著改变支护体系的受力状态,如果在设计支护方案时,没有充分考虑应力重分布的效应,则会导致支护结构承载能力不足,进而丧失对围岩的有效控制,围岩会出现塌陷等现象,导致煤矿开采发生生产安全事故。

2 复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术要点

在复杂的地质构造、围岩的条件下,煤矿采煤掘进效率大幅下降,降低了采煤的安全性,需要采用科学合理的支护技术,通过锚杆、混凝土等支护技术,提升煤矿采煤掘进效果,增加采煤作业的安全性。

2.1 锚杆支护技术

锚杆支护技术主要是通过锚固系统,将围岩与支护体系形成协同承载结构,保证加固效果得到提升。锚杆支护技术主要是由锚杆体、锚固介质以及承压组件构成,并通过钻孔安装、注浆锚固等工艺,实现对巷道的充分支护。该技术适用于一些软弱的岩层或者是层状岩体等复杂地质条件,实现围岩加固的效果。锚杆支护技术的核心优势是施工更加便捷,支护安全可靠、高效且经济。

在锚杆支护技术实施过程中,要进行科学的选型,规范施工的流程,需要依据巷道围岩的特性以及地质条件,合理地确定锚杆的具体型号及技术的参数。锚杆在具体支护中,能显著抑制巷道变形情况,有效提升围岩的整体性以及承载性能,同时大幅度减少后期维护的次数。在具体实施中,必须严格控制锚杆的预应力以及锚固强度,保证锚固系统能够具备足够的抗拉性能。此外,还需要结合煤矿的实际地质特征以及具体开采要求,科学设计锚杆的排布方式以及间距参数。在一些岩体破碎带或极软弱的地层,锚固支护技术需要与其他的支护技术结合使用,其支护效果才能得到显著提升。

2.2 喷射混凝土支护技术

喷射混凝土支护技术是煤矿巷道支护中的一项重要工艺,适用于围岩风化严重的地质条件中。此支护技术主要是通过高压喷射混凝土的方式,形成连续的

支护层,能显著地增强巷道自身的稳定性,还能有效控制围岩变形现象,为后续的采煤掘进作业提供更加可靠的安全保障^[3]。在具体支护实施过程中,必须结合巷道围岩的特性以及采煤掘进的需求,配置合理的混凝土,优化喷射混凝土的厚度以及配筋方式,以充分地发挥其支护效能。同时,需要严格把控材料质量以及施工工艺标准,保证支护结构能够达到预期的效果。

2.3 复合支护技术

除了使用锚杆支护以及喷射混凝土支护技术以外,还可以采用复合支护技术,主要是煤矿巷道掘进过程中,通过协同运用多种支护手段,科学地配置不同支护方式形式,来维持围岩的稳定性。在面对复杂多变的地质环境时,单一的支护形式已经无法达到理想的支护效果,需要采用集成化的支护方案。组合支护技术主要分为锚杆与锚索协同支护、锚杆与金属网联合支护、锚杆与喷射混凝土组合支护等类型。这些组合方案能充分地发挥出各类支护的技术优势,并实现对煤矿巷道围岩的多层次控制,提升支护效果。以锚杆、锚索协同支护为例,它既保留了锚杆自身局部锚固的特性,又兼具了锚索整体悬吊的功能,能够构建出更稳固的支护网络。采用混合的支护方法,能够让支护效果更加显著,适应多种复杂的地质条件,为煤矿安全生产提供可靠的保障。

3 采煤掘进支护技术应用案例分析

3.1 案例概述

以某矿区1号井为例,其东部运输中巷的断层间接底板施工中,地质勘察显示了该区域底板主要是由含砾粉砂岩、砂质泥岩等地质所构成,局部区域还含有厚度为10 m的泥岩和炭质泥岩层,地质条件复杂。而且部分区段的岩层厚度具有明显的差异,有的厚度已经超过10 m,有的厚度则不足2 m。从岩体力学的特性进行分析,这类岩层的结构相对软弱,其抗压强度和刚度也比较低,会出现底板破碎失稳等现象,其具体参数详见表1^[4]。

从表1的数据中可以发现,矿区1号井内由岩层构成的巷道底板存在显著的结构缺陷,在掘进扰动的作用下,容易出现岩体破裂、局部垮落等现象,降低了围岩的稳定性,给巷道支护带来严峻的挑战。

表1 底板岩石物理性能参数

底板	名称	取样深度(m)	物理实验(%)			力学实验(MPa)		
			固定性	吸水率	饱和吸水率	抗压强度	抗拉强度	抗剪强度
直接底板	粗砂岩	441.17 ~ 455.98	—	5.12	5.51	18.64	—	1.38
间接底板	粉砂岩	472.47 ~ 491.82	1.28	0.57	0.81	38.94	1.97	8.42

3.2 支护技术的优化方案

根据上述案例的分析,需要采用采煤掘进支护技术,保证巷道底板得到有效防治,提升采煤的安全性。在设计的过程中,应详细地分析诱发底板灾害的各类因素,尤其是针对含膨胀性矿物的底板岩层,需要重

点考虑矿区内水文地质情况,确定水文地质构造是否正常。目前,已经建立了煤矿开采地质信息管理系统,具体如图 1 所示^[5]。

在进行地质勘察后发现,由于地下水侵蚀,导致岩体膨胀问题,需要铺设防水材料,以有效阻断水分

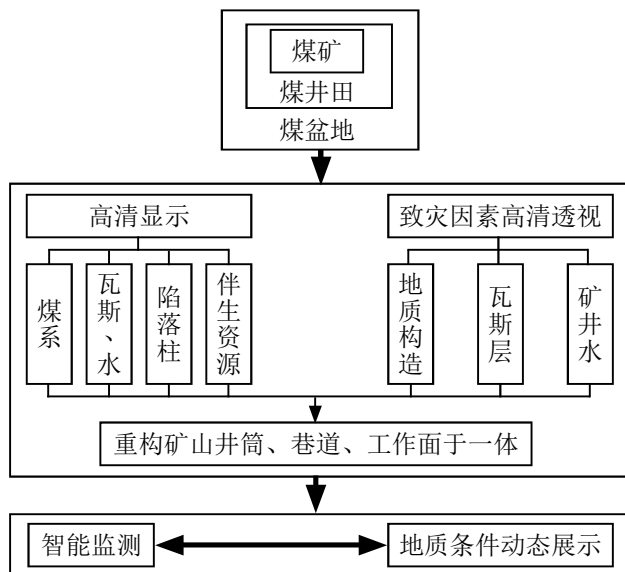


图 1 煤矿开采地质信息管理系统示意图

渗透到巷道中,保证采煤更安全。同时,还要开展底角锚杆支护、帮角加固等支护技术,有效增强底板的结构强度,形成立体的防护体系。结合该矿区 1 号井巷道的实际情况,一方面需要在巷道底部增设补强锚杆,另一方面则要在底板铺设专业的隔水层。这一综合的治理方法,既能抑制岩体膨胀变形等现象,又能提升围岩整体的稳定性。

当掘进工作面穿越断层破碎带的时候,可以采用复合支护技术,保证采煤施工更加安全^[6]。针对 1 号井的断层地质条件,可以采用“注浆+管棚”的组合支护技术。主要是在距离断层前缘 28 m 的位置,布设双模管棚系统,并选用直径为 31 mm 的钢管,按照 170 mm 的间距,呈长短交替的形式进行排列,通过这种差异化的布置,实现围岩压力的梯度转移。在管棚就位后,就要实施精准的注浆加固,通过岩体参数,计算出实际的注浆量以及工作压力,使浆液能够充分地渗透在破碎岩体当中,形成复合的承载体。同时也要采用“注浆加固+壁后充填”的二次支护技术,主要是通过 1.5×1.4 m 的矩阵来布置注浆管,实现分层注浆的效果。在注浆前,需进行深度不小于 1 m 的清孔作业,保证后续注浆更高效。对于高落差的断层带,则可以增设 U 型钢拱架,并与锚杆组成临时支护体系,加强顶板的支护,以维持围岩结构的整体性,最终实现了巷道支护的优化。

4 结束语

在复杂地质条件下,对煤矿采煤掘进支护技术进行优化分析,明晰各类支护技术的技术特点、应用场景,可以有效延长巷道服务周期,提升采煤作业的安全性,降低采煤的成本。在掘进支护过程中,主要是采用锚杆支护、喷射混凝土支护以及复合支护等技术,通过合理选择应用不同的支护技术,保证掘进支护效果得到优化,提升煤炭的回采率,促进煤矿企业可持续发展。

参考文献:

- [1] 吴磊.复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术的运用[J].内蒙古煤炭经济,2025(03):114-116.
- [2] 王超,苏超,宋延德.复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术[J].内蒙古煤炭经济,2024(19):49-51.
- [3] 李鑫.关于复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术及其运用探讨[J].内蒙古煤炭经济,2024(21):178-180.
- [4] 侯静涛.复杂地质条件下煤矿掘进支护技术的应用探析[J].西部探矿工程,2024,36(07):107-109.
- [5] 陶彦名,杨宏宇,王冬冬,等.复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术探究[J].内蒙古煤炭经济,2024(24):40-42.
- [6] 张有福.复杂地质条件下的煤矿采煤掘进支护技术[J].矿业装备,2024(08):88-90.

薄煤层坚硬顶板工作面“主动承载引导泄压”沿空留巷技术研究与应

尹 岩, 甘 超

(山东能源枣矿集团滨湖煤矿, 山东 枣庄 277500)

摘 要 本研究聚焦沿空留巷技术, 综合运用理论分析、数值模拟、工业性试验和现场观测等多元方法, 结合滨湖矿实际地质条件, 系统开展巷道支护参数与施工工艺的优化研究。在此基础上, 提出了一种“主动支护、导卸”的沿空留巷技术。在沿空留巷中, 采用了锚索梁主动承受、切顶爆破卸压、U型钢腿被动支撑等方法, 主动承担顶板受力, 降低巷侧力。同时, 采用切顶预裂法, 使采空区顶板完全垮落, 解除留巷区的顶板压力, 达到“留得住, 割得开, 放得下”的目的。研究表明, 该沿空留巷技术可有效达成“结构稳定、应力可控、施工高效”的技术目标。

关键词 煤矿; 沿空留巷; 主动承载引导泄压

中图分类号: TD82

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.042

0 引言

薄煤层坚硬顶板工作面的沿空留巷技术是当前煤炭开采领域的关键技术之一, 对于提高煤炭资源回收率、实现矿井可持续发展具有重要意义^[1]。其中, “主动承载引导泄压”沿空留巷技术作为一种创新方法, 旨在通过科学合理的支护设计与顶板管理, 有效控制巷道围岩变形, 确保开采安全^[2]。本研究聚焦该技术的理论分析与现场应用, 以期为同类地质条件下的煤炭开采提供技术参考^[3]。

1 薄煤层坚硬顶板工作面“主动承载引导泄压”沿空留巷技术研究概述

1.1 具体研究内容

本研究针对当前沿空留巷技术难题, 在深入调研的基础上, 创新地提出一套可行的优化方法。其关键是将锚索和钨钢网复合补强支撑技术应用于提高巷道的整体稳定性。同时, 提出一种新型的“集中管预裂爆破”方式, 通过对爆破能量的精准调控, 提高冒落度, 实现留巷工作面卸压减压。

在支撑技术方面, 本研究在对传统支撑材料和支撑方式进行研究的基础上, 对其性能进行了积极的探索。将锚索和W钢条组合在一起, 可以有效地提高巷道的承载力, 降低顶板和底板的变形。该方法的实施, 为实现沿空留巷提供了更加可靠的技术保证。在此基础上, 重点对聚能钢管预裂法的应用效果进行了研究,

提出了一种新的高效破碎方法——聚能管定向爆破技术。该工艺既有利于顶板破断, 又可明显降低留巷区内应力集中, 从而提高巷道的稳定性与安全性^[4]。

1.2 切顶卸压自成巷机理及顶板结构演化力学分析

在矿山施工中, 切顶卸压法是实现自成巷的重要手段。在留巷过程中, 相同部位的巷道因受采动影响, 其力学结构特征也有很大差异。为此, 本项目将材料力学和弹性力学相结合, 对留巷过程中围岩结构进行合理简化, 并提出相应的支护措施。

假设覆岩顶板受力均匀, 切顶与不切顶的力学模式随留巷进行而改变。在初期, 顶板基本不变, 与巷道围岩一起形成了一种“固支梁”结构; 同时, 由于切顶工作的进行, 顶板岩层被切割为简支梁, 其受力状况也随之改变。

为了更好地揭示顶板结构的演变规律, 本项目以留巷期顶板结构为研究对象, 运用力学解析法, 对顶板结构进行细致的力学推演与计算。新型环境保护装备作为近年来的热门研究方向, 其在真实工作环境中的性能表现备受关注。目前, 对于其在连续工作状态下的可靠度、失效率等关键性能指标的评价, 尚需依据大量的实际操作数据进行综合分析^[5]。由于这些数据的缺失, 新型环境保护装备的技术成熟度问题依旧突出, 成为制约其向智能化、自动化方向进一步发展的核心因素之一。

1.2.1 工作面超前未切顶阶段

回采前和回采的临界期是保证巷道围岩稳定的关键期。这一时期,为了实现对顶板的提前控制,保证了巷道结构的稳定,对切顶留巷进行了精细的布置,并对其进行了合理的布置。在顶板未被切掉之前,覆岩顶保持着它的完整性,并和周围的围岩形成一个比较稳定的整体^[6]。尤其是两帮顶面,其顶板可以看作是一种固支梁式结构。这样的结构特点,使巷道顶板既能经受住水平或垂直两个方向的多重力,还能承受一定的弯矩。在不考虑倾斜角度的条件下,将巷道顶板及两帮的受力特性抽象成两端固支梁受力模型。该三阶超静定结构在稳定和承载能力上都有突出的优势,在相同的工况下,它显示出了更好的工作性能。所以,此时的井巷是最平稳的一段时间。为保证这种稳定状态的维持,就必须密切注意巷道围岩的动态变化,并适时采取相应的支护措施,以应对可能发生的地质条件或外部因素的影响。同时,结合科学的监测和分析方法,对围岩的稳定性进行评价,为下一步的回采工作提供可靠的安全保证。

1.2.2 工作面超前切顶阶段

在采煤工程中,最重要的一步就是超前切顶。在这一阶段,要对工作面前面的某一部位进行准确的预裂掏槽。其目的是利用人工构造的结构面,将采空区一端的顶板岩层与顶板分离开来。这一结构面的形成,使得工作面一侧煤壁上部的顶板由原本的固支端状态转变为简支端状态^[7]。

简支端状态的形成,源于切缝所具备的一定角度。这个角度的巧妙设计,使煤壁对顶底板起到一定的支承作用,使顶板承受的载荷得到有效的分摊。该模型可保证顶板岩梁的高稳定度,且无大变形。但是,随着开采深度的增加,超前支承压力的影响也逐步显露出来,这给顶板岩梁的稳定带来了新的挑战。

为了保证板岩梁在超前切顶过程中的稳定性,必须采取一系列的工艺措施,以保证顶板的稳定性^[8]。首先,必须准确地计算预裂掏槽的有关参数,以保证构造面的成形达到所期望的效果。其次,要加大对采场的地质情况的探测和分析,使之能够及时地发现和解决可能存在的问题。在此基础上,进一步加强对顶板梁围岩动力特性的研究,采用科学的监测手段与分析手段,对围岩的稳定状况进行评价,并对支护方案进行相应的调整。

1.2.3 工作面架后动压阶段

工作面架后动压阶段紧跟在采煤工作面后面,是采煤工程中非常重要的一个环节。在煤层开采过程中,由于顶板与工作面液压支架的联合支承,使得工作面端头的基本顶处于悬顶状态。在此期间,采空区顶板在开采过程中发生了明显的破落现象。

采空区的顶板悬顶面积一般都是通过预先的爆破切顶而得到控制的。但是,在冒落的矸石和基本顶的移动还没有达到稳定的条件以前,采空区常在顶板和垮落岩间产生裂隙,裂隙的出现对巷道围岩的稳定产生影响^[9]。此时,采空区顶板岩层间将逐步形成一种“岩—梁”连接结构,这样的构造特征,可以将覆岩的负荷转移到更远处的固体煤体,也可以转移到采空区内。采空区顶板始终在不断移动,这一地带被称作“留巷动压区”。

为了保证留巷动压区的稳定,提出了相应的技术对策。首先,要加强对采空区顶板岩层断裂垮落的全过程进行监控和分析,从而能够及时地发现和解决可能存在的安全问题。其次,对采场液压支架的支护参数进行优化,使其具有较强的支撑能力,从而保证了主顶悬吊的稳定性。在此基础上,进一步研究采空区与冒落岩体间隙的动态变化规律,并提出相应的注浆加固方法,以降低采空区对巷道围岩稳定性的影响。

1.2.4 工作面架后稳定阶段

工作面架后稳定阶段是保证巷道围岩长期稳定的关键一环。采空区中冒落的矸石,随着开采的进行,会不断地受到压实作用,使其密度增大,承载力增大。同时,采空区上覆岩层的移动也逐渐变得平缓,直到最后趋于平稳。

此时,巷道中的临时支撑结构能够被安全地回收。在这种情况下,切缝一侧的顶板可以看作是一个两端用固体煤体支承的简支梁,另一端用采空区上卸下来的矸石来支承。这样的简支梁结构特点,保证了巷道顶板可以承受覆岩的荷载,并能将大量的荷载高效地转移到深部采空区。

特别要指出的是,将采空区矸石用锚索悬挂在顶板硬岩层中,构成了一个稳固的支护系统。在该系统中,锚索作为一种重要的悬吊功能,将矸石和硬岩紧密结合在一起,提高了整个巷道的稳定性^[10]。简支梁两端用固体煤体及采空区矸石共同分担荷载,使应力进一步分散,降低了围岩变形与破坏的危险性。

为了保证回采场架后稳定期内的围岩稳定,需对其进行维修监控。首先,要加强对采空区矸石的压实状况的监控和分析,以保证其具有一定的承载力;其次,要对锚索悬挂状况进行周期性的检测,对可能出现的松动、损伤等问题进行及时的检测 and 解决。在此基础上,采用科学的监测与分析手段,对隧道围岩的稳定状况进行评价,并提出有针对性的养护维修计划。

2 薄煤层坚硬顶板工作面“主动承载引导泄压”沿空留巷技术研究创新点及应用

1. 本研究创新地提出留巷顶板锚杆主动承载的方法,并在此基础上对其进行研究。本项目拟利用锚杆的强韧化与稳定性,有效地分散、减小巷旁的荷载,以达到简化巷道支护的目的。与常规支护方法相比,锚索支护在沿空留巷中具有明显优势,且可有效降低支架费用,是沿空留巷理念上的重大突破。本项目的创新之处在于将进一步完善矿山支护技术体系,并为其在矿山工程中的应用提供一种全新的思路。

2. 在巷道支护与顶板治理的施工技术上,本文创新性地采用了一种新型的预裂爆破技术,即切顶钻孔与聚能钢管相结合的预裂爆破方法。该技术通过对爆破能量的精准控制以及起爆方向的精确设定,实现了留巷顶板与采空区顶板的有效、安全分离。在爆破过程中,采空区顶板能够得到充分的冒落,从而实现有效的卸压效果,极大地缓解了留巷区域的应力集中问题。实践表明,该新型预裂爆破技术的应用,使得留巷效果得到了显著的改善,不仅提高了巷道的稳定性与安全性,还有效降低了支护成本与维护难度。此外,该技术还为矿山工程中的顶板治理问题开辟了一条崭新的技术途径,具有重要的学术价值与实践意义。随着该技术的不断推广与优化,将在矿山工程中发挥更加重要的作用。

3. 单体支撑在巷道支护中的创新应用。在该巷道支护工程中,为了提高支护结构的整体强度与稳定性,创新性地引入了单体支撑技术。通过对支护结构进行深入的分析与研究,结合巷道地质条件与开采需求,对支护参数及结构布置进行了科学的优化与设计。实践表明,通过合理的单体支撑布置,能够显著提升支护强度,有效防止“无冲程单体”现象的发生,从而确保巷道的稳定与安全。与常规支护方法相比,单体支撑技术的应用不仅提高了支护效果,还降低了支护成本,为巷道支护工程提供了新的技术思路与实践经验。

4. 钢网窝窝法在帮部支护中的创新应用。针对巷

道帮部支护的难题,创新性地提出了钢网窝窝法,并将其成功应用于矸石山中的巷道支护。该方法通过在巷道帮部锚固钢筋网,并利用冒落的废石对钢筋网下部进行挤压,形成定根点,从而有效防止老塘跑矸现象的发生。钢网窝窝法的应用不仅显著改善了巷道的整体稳定性,还提高了支护结构的抗冲击与抗变形能力。此外,该支护技术还具有成本低、施工简便、环保节能等优点,为矿山工程中的巷道支护问题提供了一种新的解决方案与技术思路。

3 结束语

“主动承载引导泄压”沿空留巷技术在煤炭开采领域展现出了显著的理论价值与实践意义。该技术不仅实现了煤矿资源的合理高效开采,有效提高了资源回收率,还大幅度降低了巷道开挖量,对煤炭生产的可持续性发展具有深远影响。从技术层面来看,“主动支承一卸压”技术从根本上解决了煤矿开采过程中连续性不足的问题,通过优化巷道支护结构与顶板管理策略,显著提升了巷道养护条件与开采安全性。此外,该技术在实践应用中表现出良好的适应性 with 稳定性,对同类地质条件下的煤炭开采提供了重要的技术参考与示范,具有较高的推广与应用价值。

参考文献:

- [1] 王智珍.大采深薄煤层坚硬顶板的控制技术与应用[J].矿业装备,2023(03):66-67.
- [2] 赵中伟.基于薄煤层坚硬顶板工作面的沿空留巷技术研究[J].能源与节能,2022(12):136-138,192.
- [3] 郭瑞兵.薄煤层坚硬顶板工作面沿空留巷技术研究[J].能源与节能,2022(03):88-91.
- [4] 曾煜.蒋庄矿薄煤层坚硬顶板回采巷道支护优化及应用[D].徐州:中国矿业大学,2024.
- [5] 孙艳清,房端强,刘森虎.坚硬顶板薄煤层沿空留巷底鼓控制技术研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(02):7-9.
- [6] 赵法森,吴城乐,林科文,等.坚硬顶板薄煤层开采沿空留巷关键技术研究[J].煤炭工程,2023,55(08):6-11.
- [7] 秦玄烨,张英华,黄志安,等.深井薄煤层保护层坚硬顶板破断机理及控制技术[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4010-4020.
- [8] 耿帅康.坚硬顶板薄煤层保护层开采卸压增透及瓦斯灾害治理技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [9] 原少宏.寺河煤矿薄煤层综采面坚硬顶板控制技术研究[J].煤,2022,31(11):106-108.
- [10] 张宪军.薄煤层综采工作面坚硬顶板弱化技术研究[J].中国矿山工程,2021,50(01):36-38.