

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 5 月 第 15 期 (总第 640 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 5 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 高支模施工技术在建筑土建工程中的应用
..... 丁 睿
- 004 隧道二衬台车洞内狭小空间拼装施工技术研究
..... 符家铖, 胡 锐, 李硕贵, 陈松松
- 007 基于红外热成像的水运工程混凝土裂缝检测研究
..... 胡庆闯
- 010 AE94.3A 型燃气—蒸汽联合循环机组启动控制优化研究
..... 冯鹏飞, 吴公宝
- 013 新型阴极保护系统在海上风电基础防护中的研发与应用
..... 张敬涵, 黄国香, 茆明钰
- 016 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工关键技术研究
..... 王培懿, 袁 涛, 杨金宜, 张焯彬

智能科技

- 019 智能控制技术在煤矿机电设备中的运用研究
..... 郭林刚
- 022 三维激光扫描技术在工程测绘中的应用探析
..... 岳晨晨
- 025 BIM 技术在复杂形态建筑设计中的优化应用研究
..... 黄泽俊
- 028 建筑工程管理中的数字化转型与智能化应用探索
..... 张 印
- 031 面向船体壁面清洗的智能水下机器人控制系统优化
..... 王浦勋, 逢雨婷
- 034 大功率光伏设备在工业场景中的集成安装与并网性能评估
..... 徐超华

应用技术

- 037 公路路基施工中的压实度控制方法
..... 唐钊城

目录 Contents

040	公路路基软基换填施工关键技术应用	林梓康
043	公路工程路基防护施工技术要点分析	陈宣任
046	公路桥梁施工中钢纤维混凝土施工技术应用	刘 祎
049	注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用分析	宋茂锋, 刘增龙
052	高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施	郝旭鹏
055	高速公路后张法预应力混凝土桥梁施工技术应用分析	刘 纲
058	大跨度公路连续刚构桥悬臂浇筑施工线形控制技术研究	吴 飞

科创产业

061	高品质冶金材料制备工艺改进与性能提升	史衍厂
064	压力容器整体设备法兰结构优化设计与分析	徐皓明, 张龙生, 张朝增
067	建筑材料价格波动对工程造价的影响及应对	黄海明
070	新能源接入对输配电系统的影响及应对策略研究	孙海峰, 陈 涛, 梁 培
073	城市轨道交通工程变更对造价的影响及控制措施分析	刘 杨
076	新型保温建筑材料在暖通空调系统中的节能应用研究	孙超军, 刘富强
079	全生命周期视角下工程管理与技术服务的协同机制及价值增值路径研究	崔静芳

技术管理

082	BIM 技术在建筑工程管理中的应用探析	朱晓通
085	信息化技术在水利工程施工管理中的应用	魏丽娜
088	轨道交通工程建设多方协同管理机制优化	王 刚
091	水库坝基帷幕灌浆施工监理质量控制要点	罗婷婷
094	复杂地质条件下桩基检测难点与应对策略	江玉龙
097	港航工程岸坡开挖中钢板桩围堰施工技术	梁 秋
100	基于流水施工技术的建筑施工管理要点分析	周胜兵
103	基于水泥搅拌桩的市政道路软弱地基加固施工	薛 宇

科学论坛

106	建筑工程绿色施工技术体系构建与实践分析	丁 天
109	地质工程施工过程的斜坡特性及防治技术研究	余 超
112	高层建筑大体积混凝土施工裂缝控制技术研究	周志东
115	房建工程高空大尺寸现浇梁板支架施工技术研究	刘凯昌
118	桩基础施工技术在建筑工程土建施工中的应用研究	刘 军
121	住宅深基坑施工技术在特殊地质条件下的优化研究	郭 旭
124	基于超声相控阵三维成像的水工混凝土结构内部缺陷量化评估方法	党安华, 湛晓颖, 赵中亚

高支模施工技术在建筑土建工程中的应用

丁睿

(铜陵有色金属集团铜冠建筑安装股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要 高支模施工技术是建筑土建工程中的关键支撑性技术, 对提升结构稳定性、加快施工效率具有不可替代的作用。本文从高支模施工技术的核心特点入手, 系统梳理模板设计、安装、拆除等全流程管控要点, 深入剖析施工过程中的质量控制与安全防护措施, 全面展现其在保障工程质量、压缩建设周期方面的显著优势, 旨在为建筑土建工程的高效推进提供参考。

关键词 高支模施工技术; 建筑土建工程; 模板安装; 安全管理

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.001

0 引言

在建筑土建工程向超高层、大跨度、大空间方向快速发展的当下, 高支模施工技术的应用场景愈发广泛, 已成为复杂结构施工不可或缺的核心支撑技术。高支模施工技术凭借其对复杂工况的适配性, 能够有效满足各类特殊结构的施工需求, 在保障工程质量、筑牢安全防线方面发挥着不可替代的作用。本文围绕高支模施工技术在建筑土建工程中的应用展开系统论述, 为相关工程实践提供可借鉴的技术参考与实操指引。

1 高支模施工技术概述

1.1 技术定义与特点

高支模施工技术是在建筑土建工程中对高度大于一定标准、荷载大的混凝土结构构件采用搭设式模板支撑体系进行施工的专项技术, 主要应用于高大空间建筑的梁板柱结构施工。核心特点是高度高、荷载大、风险高, 不但对支撑体系的承载能力、刚度、稳定性要求高, 而且对施工操作的精细化程度也有极高的要求。该技术具有系统性和复杂性, 需要结合结构力学、施工组织学等多学科的知识进行施工, 施工时要严格控制搭设精度和施工参数, 保证模板支撑体系可以可靠地承受新浇筑混凝土的重量和施工荷载, 保证施工人员的安全, 是体现土建工程施工技术水平和安全管理能力的重要专项技术之一。

1.2 应用范围与优势

高支模施工技术被广泛地应用到各类建筑土建工程的关键部位施工当中, 包括商业综合体、体育馆、会展中心、高层和超高层建筑的裙楼结构、工业厂房

的大跨度空间等, 特别适合于不能用手脚手架常规搭设、需要大空间净空的混凝土结构施工区域。其优势有: 一是可以灵活地适应各种结构形式和施工空间, 满足多样化的设计要求, 解决大跨度、大荷载结构施工难题; 二是能保证混凝土结构成型质量, 用准确的模板定位和支撑控制来减少结构变形和尺寸偏差; 三是比传统的施工工艺更有利于施工流程的优化、空间利用率的提高、减少现场材料堆放和施工干扰, 提高整体施工效率, 降低对周围施工区域的影响, 是完成复杂结构高质量施工的主要技术手段^[1]。技术发展趋势有三个方向: 一是智能化升级, 用传感器对支撑体系的应力、位移等进行实时监测, 从而达到施工过程动态预警、安全管控的目的; 二是绿色化转型, 使用可循环利用的环保支撑材料和节能施工工艺来减少施工过程中的资源消耗和废弃物排放; 三是装配化发展, 使用标准化、模块化的支撑构件来提高施工效率和搭设精度, 逐步实现高支模施工的工业化、集约化发展, 助力建筑土建工程高质量、绿色化建设。

2 高支模施工准备工作

2.1 施工方案设计

施工方案设计是高支模施工的前提, 应由专业技术人员根据工程结构特点、施工环境及有关规范标准编制, 保证施工方案的科学性、可行性。方案编制前要进行详细的现场勘查, 确定建筑结构尺寸、荷载参数、地质情况等基础数据, 主要对支撑体系的受力点、传力路径、薄弱部位做进一步分析。方案内容应包括支撑体系选型、构件规格确定、搭设参数设计、混凝土

作者简介: 丁睿(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工技术。

浇筑顺序、施工监测方案、安全应急措施等内容,对各个施工环节的技术要求和质量标准做出明确的规定。编制完成后需依照规定的程序组织专家论证,依据论证意见对方案加以优化和改进,经审批通过后方可实施,对施工人员展开施工方案的技术交底,让施工人员充分知晓施工要点与安全要求,为后续施工提供明确、规范的技术引领。

2.2 材料与设备准备

材料、设备进场必须严格按照施工方案要求执行,严把质量关,保证所有进场材料、设备满足设计标准及规范要求。材料准备时需要采购规格相匹配的钢管、扣件、顶托、模板、方木等主要材料,对钢管壁厚、平直度、扣件紧固性、防滑性、模板强度、平整度等进行进场检验,并核对材料合格证明文件、检测报告,防止不合格材料进入施工现场。设备准备要配备塔吊、电焊机、扭矩扳手、水平仪、卷尺、应力监测设备等施工机具和检测设备,对设备进行全面的调试和检修,保证设备性能良好、运行正常。建立材料及设备台账,对采购、验收、保管、使用等环节的管理责任进行明确,使材料和设备得到规范的管理,为高支模施工的顺利进行提供强有力的物质和设备保障。

2.3 现场场地规划

现场场地规划要根据高支模施工范围、施工流程和人员设备作业要求来合理安排施工区域,改善场地布置。首先,要对施工场地进行平整处理,清除施工场地内的杂物、淤泥等,对松软地基进行夯实加固,铺设碎石垫层或者混凝土垫层,保证地基承载力满足支撑体系的承载要求,防止因地基沉降造成支撑体系失稳^[2]。其次,要划分材料堆放区、设备作业区、人员通行区和施工操作区。材料堆放区应设围挡,分类堆放整齐,防止材料乱放影响施工通道和作业安全。设备作业区应留出足够操作空间,保证塔吊、电焊机等设备正常运转。人员通行区应设安全通道,有明显的标识。同时,要规划施工排水系统,设置排水沟,及时排除场地积水,防止场地积水浸泡地基,保证施工场地整洁、安全、高效利用。

3 高支模施工要点

3.1 模板安装要点

模板安装必须按照施工方案设计要求进行,遵循先下后上、先支后拆、精准定位的原则,保证模板安装精度和稳定性。安装前要对模板表面进行清理,涂刷均匀的脱模剂,防止模板粘连混凝土造成成型质量

不合格。模板安装前要先确定基准线,按照设计图纸准确调节模板位置、标高和垂直度,用水平仪、卷尺等工具反复校正,保证模板尺寸偏差、表面平整度满足规范要求。模板拼接处应做密封处理,防止浇筑时漏浆造成混凝土结构外观质量及结构强度下降。安装时要及时设置临时支撑固定模板,防止模板移动,加强模板与支撑体系的连接固定,保证模板整体稳定性,给混凝土浇筑提供可靠的成型载体^[3]。

3.2 支撑体系搭建

支撑体系搭建是高支模施工的关键工序,必须依照施工方案所规定的搭设参数,由专业施工人员按照规范流程执行,保证支撑体系的承载能力和稳定性。搭建前要再次复核地基承载力和垫层质量,满足要求后才能进行搭设。搭设时应按先立杆、后横杆、再斜杆的顺序进行,立杆间距、横杆步距、斜杆设置等参数必须符合设计要求,立杆底部应设置垫板,防止局部荷载过大造成立杆沉降。横杆与立杆之间应使用专用扣件固定,扣件拧紧力矩要达到标准,斜杆要全部设置,并且连接可靠,形成稳定的支撑结构体系。搭建过程中要同时进行垂直度、水平度检测,及时调整偏差,搭建完成后要组织专项验收,验收合格后才能进入下一道工序,严禁未经验收合格就投入使用。

3.3 混凝土浇筑注意事项

混凝土浇筑是高支模施工的重要部分,必须严格把控浇筑工艺、浇筑顺序和浇筑速度,防止对支撑体系产生冲击破坏。浇筑前再次检查支撑体系、模板和连接节点的牢固情况,保证支撑体系不松动、模板不漏浆,并将模板内杂物和积水清除干净。混凝土浇筑应遵循分层浇筑、对称浇筑、缓慢推进的原则,分层厚度要符合规范要求,防止一次性浇筑过高造成支撑体系荷载突然增大^[4]。浇筑顺序由支撑体系受力小的部位向受力大的部位推进,或者采用对称浇筑的方式,使支撑体系受力均匀,防止单侧受力过大造成支撑体系变形、失稳。浇筑过程中要安排专人对支撑体系的位移、变形等进行监测,发现异常立即停止浇筑,采取加固措施,控制混凝土浇筑速度,防止混凝土冲击模板和支撑体系,保证混凝土浇筑过程安全、有序,保证结构成型质量。

4 高支模施工质量与安全控制

4.1 质量检测标准

质量检测要贯穿高支模施工全过程,严格按照国家和行业有关规范和标准进行,保证施工质量满足设

计要求。支撑体系搭建完毕后,要检测立杆间距、横杆步距、斜杆设置等搭设参数,核对构件规格和连接方式,检查扣件拧紧力矩、模板安装的标高、尺寸、垂直度、平整度,检测地基垫层的承载力和平整度。混凝土浇筑时要观测混凝土的坍落度、浇筑顺序、分层厚度,查看模板拼接处的密封状况,及时解决漏浆、模板移位等状况。混凝土浇筑完后要检测混凝土强度、外观质量、结构尺寸偏差,发现蜂窝、麻面、裂缝等质量缺陷时,及时进行修补。建立质量检测台账,对检测数据、检测结果、处理情况进行详细的记录,保证质量检测工作有条不紊地开展,为高支模施工质量控制提供依据。

4.2 安全管理措施

安全管理是高支模施工的重中之重,要建立全员参与、全程控制、预防为主的安全生产管理体系,防止安全事故的发生。施工前应对所有施工人员进行安全技术交底和安全教育培训,经考核合格后方可上岗作业,明确各岗位安全责任及操作规程。施工现场应设置明显安全警示标志,划分危险作业区,设置防护栏杆、安全网,禁止非施工人员进入施工区域。施工过程中必须要有专人负责现场巡视,监督施工人员按安全规范操作,及时制止违章作业行为,检查支撑体系、

临时用电、消防设施等安全情况,发现安全隐患立即要求整改。配备足够的消防器材、急救设备,制定安全应急救援预案,定期开展应急演练,发生突发安全事故时可以迅速、有效地进行处置,保证施工人员的生命和财产安全^[5]。

4.3 常见问题及解决方法

高支模施工过程中存在的主要问题有支撑体系松动变形、模板漏浆、混凝土浇筑偏差等,应根据问题性质有针对性地采取相应的解决措施(见表1)。支撑体系松动变形多由于扣件拧紧力矩不够、立杆间距过大引起,解决时应重新检查扣件紧固情况,补充拧紧力矩,调整立杆间距到标准范围内,增设斜杆提高支撑体系的稳定性;模板漏浆主要是因为模板拼接不严密、密封措施不到位造成的,需要清理模板拼接处的杂物,使用密封胶、密封条等加强密封,对漏浆严重的部位及时拆除重新安装模板;混凝土浇筑偏差是由浇筑顺序不合理、浇筑速度过快引起的,应调整浇筑顺序为对称、分层浇筑,控制浇筑速度,安排专人监测支撑体系受力情况,及时调整浇筑节奏。针对常见的问题要建立问题排查制度,在施工前、施工中、施工后定期检查隐患,提前采取预防措施,保证高支模施工质量和安全。

表1 高支模施工过程中常见问题及解决方法

主要问题	主要成因	解决措施
支撑体系松动变形	扣件拧紧力矩不足、立杆间距过大	检查紧固扣件、调整立杆间距至标准,增设斜杆增强稳定性
模板漏浆	模板拼接不严密、密封措施不到位	清理拼接杂物,用密封胶/密封条加强密封,严重处拆改重装
混凝土浇筑偏差	浇筑顺序不合理、浇筑速度过快	采用对称分层浇筑,控制速度,专人监测并调整浇筑节奏
通用要求	隐患排查不到位	建立排查制度,施工前、中、后定期检查,提前预防

5 结束语

在高支模施工中需以科学合理的方案设计为先导,结合项目结构特点、荷载分布及现场工况,精准计算模板体系的承载力、刚度与稳定性,从源头筑牢安全基础。在施工过程中,必须严格落实质量管控与安全防护措施,确保每一道工序符合规范要求。随着建筑行业向超高层、大跨度、异形化方向发展,高支模技术的迭代需求日益迫切。未来需依托数字化技术,推动BIM建模、智能监测、AI风险预警与高支模施工的深度融合,为建筑土建工程的高质量发展提供更坚实、更高效的技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄慧强.高支模施工技术在房建土建工程中的应用研究[J].现代工程科技,2024,03(22):91-94.
- [2] 洪建强.高支模施工技术在建筑工程中的应用研究[J].中国住宅设施,2023(12):118-120.
- [3] 李文洋.高支模施工技术在建筑工程中的应用探析[J].居业,2023(06):118-120.
- [4] 邵鲁现.高支模施工技术在建筑工程中的应用探析[J].中国建筑装饰装修,2023(01):67-69.
- [5] 李光泉.高支模施工技术在建筑工程中的应用[J].中国建筑装饰装修,2022(05):114-116.

隧道二衬台车洞内狭小空间拼装施工技术研究

符家铖, 胡 锐, 李硕贵, 陈松松

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘 要 为解决隧道内部净空有限的条件下二衬台车传统拼装方法存在的空间受限、精度控制难度大以及作业效率偏低等问题, 本研究着力探索一种适宜洞内狭小空间使用的高效、精准的拼装施工技术。凭借两个隧道工程项目实例, 提出了台车模块化拆分以及减重的设计方法, 引入 BIM 技术来开展虚拟拼装以及测设工作, 同时对自下而上的连续流拼装工艺进行优化, 还要辅以严格的测控以及过程管控的相关工作。狭小空间内台车的快速、精准拼装得以实现, 拼装效率得到极大程度上的提升, 模板垂直度以及环缝错台等关键质量指标都契合甚至优于既定的控制标准。研究结果显示, 这项技术切实解决了洞内拼装的空间与精度之间的矛盾, 为类似条件下的隧道二衬施工工作提供了技术参考。

关键词 二衬台车; 模块化拼装; 狭小空间施工; BIM 测设

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.002

0 引言

随着山区高速公路建设向纵深发展, 隧道工程常面临洞内净空受限、作业空间狭小的挑战^[1]。当二衬台车因运输条件限制必须在洞内拼装时, 传统工艺常遇到构件就位难、轴线控制精度低、施工干扰大等瓶颈, 严重影响施工质量与进度^[2]。为解决上述问题, 本研究依托实际工程, 引入模块化设计理念对台车进行结构优化, 并借助 BIM 技术进行施工模拟与精准测设。通过重构一套涵盖模块拆分、流程优化与精细管控的洞内拼装施工技术, 旨在实现台车在狭小空间下的高效、安全、高质量拼装。

1 工程概况

1.1 工程背景与隧道基本参数

本研究依托两大工程实践: 一是广西百色市田林至西林高速公路 K42+100 ~ K43+300 段隧道, 二是 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标的斜井工区^[3]。田西高速隧道位于低中山地形, 围岩为弱风化砂岩与泥岩互层, 设计单洞双车道, 全长约 1 200 m, 洞内净宽 10.5 m、净高 7.8 m, 复合衬砌使施工净空进一步压缩, 构成典型狭小空间, 断面关键尺寸见图 1。而西香高速 TJ3 标斜井工区则更具代表性, 该工区二衬台车必须通过斜井运输至主洞后进行拼装, 这直接决定了洞内拼装工艺的必然性^[4]。鉴于工期与交通转换节点约束, 项目把二衬台车在洞内实施模块化拼装作为主要路径, 在

有限净空内组织模板支立、台车行走与连续浇筑的衔接。需重点关注的是, 轴线控制、拱墙至仰拱线形一致性与模板拼缝严密度直接影响衬砌成型质量; 同时, 混凝土供应节拍与台车循环步距要与洞内运输组织耦合, 以获得稳定的周转效率^[5]。结合 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标斜井工区 6 人拼装班组耗时 9 天完成台车拼装的实地管理经验, 本节界定工程尺寸边界与施工精度需求, 为后续工艺与质量控制提供参数依据。

1.2 洞内狭小空间拼装施工难点分析

鉴于洞内净宽 10.5 m、净高 7.8 m 且复合衬砌压缩净空, 将二衬台车在洞内实施模块化拼装面临空间、环境与精度叠加制约。空间限制集中在拱脚与仰拱钢筋、管线占道, 导致起重机回转半径不足; 构件在纵坡下就位易失稳, 对位与销接受变截面约束。尤其在西香高速斜井工区, 台车构件需经狭长斜井运输至洞内, 进一步限制了单次运输构件的尺寸与重量。在环境方面, 照度不足与通风受限叠加车辆排放; 盲区与粉尘干扰并存, 电缆与风筒交叉压缩通行与指挥空间; 运输波动打断拼装节拍。在精度方面, 轴线、线形与拼缝严密度需在受限工位同步控制; 台车轨距误差累积放大, 模板垂直度误差应 ≤ 5 mm, 否则易出现环缝错台、漏浆与拱背不圆顺^[6]。结合 G7611 西昌至香格里拉高速 TJ3 标斜井工区经验, 上述难点把吊装组织、测设复核与混凝土供应节拍耦合到同一路径, 协调不到位将转化为周转效率与衬砌质量的损失。

作者简介: 符家铖 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道施工技术。

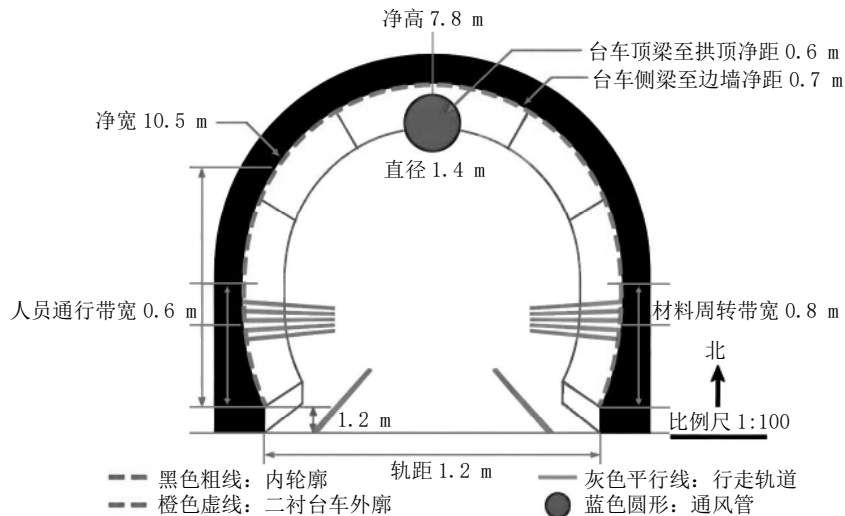


图 1 隧道洞内空间尺寸示意图

2 隧道二衬台车洞内狭小空间拼装关键技术

2.1 台车模块化拆分与优化设计

鉴于田林至西林高速 K42+100 ~ K43+300 段隧道净空与运输组织的双重约束，并充分考虑西香高速 TJ3 标斜井运输对构件尺寸的限制，本研究把二衬台车进行五单元模块化拆分与构件减重设计，分别为左侧模单元、右侧模单元、顶模单元、门架与行走支撑单元、端模与封堵单元，单元最大外廓宽度控制至 3.0 m，单元长度优先取 4.0 m 以适配弯道掉头需求，单元自重限定不高于 8 t 以匹配洞内 16 t 级车载起重机的额定工况。侧模与顶模采用 12 mm 钢板面叠合纵肋—横肋布置，肋高 100 mm 且间距 300 mm，门架采用箱形截面并把行走机构与液压系统进行一体化布置，轨距取 2.0 m 以让出施工通道。结合 TJ3 标图纸与孔位布置经验，吊点采用四点对称可调耳板布局，预留 ±20 mm 柔性调整量。

为在吊装选型约束下把单元自重控制在 8 t 以内，提出基于体积与材料密度的快速估算方法，公式如下：

$$W = V \times \rho \quad (1)$$

式 (1) 中， W 表示单元自重 (单位: t)； V 为单元构件的实体体积总和 (单位: m^3)； ρ 为所选材料的名义密度取值，钢材取 $7.85 \text{ t}/m^3$ ，复合部位按等效密度折算 (单位: t/m^3)。

从连接与对位角度来看，模块连接界面选用楔块快锁与定位锥套的复合构造，并将锁扣中心距统一到 500 mm 以实现工装标准化；锁扣承载能力设计为不低于 120 kN，同时在纵坡条件下增设燕尾导向滑块以抑制就位侧向摆动。为提高轴线控制精度，门架跨向设置双联可调拉杆，顶模节段间引入凸榫—沉孔的环向

定位单元，使模板环缝错台控制在 5 mm 以内；行走支撑选用双液压同步顶升系统，提供 ±15 mm 高程微调能力并兼顾纵坡补偿。

2.2 狭小空间内台车拼装工艺流程优化

针对田西高速隧道净空受限与西香高速斜井运输工况，将二衬台车拼装重构为由下至上、由主及次的连续流路径，设置单元进场、定位放线、门架与行走支撑安装、顶模吊装、侧模拼装、附属结构安装、精度微调与工序验收八个节点。进场采用车队化编组与倒序入洞策略，优先落位门架以形成稳定作业面；定位放线结合 BIM 模型与实测轴线，输出吊点与轨距坐标，现场采用激光投线与棱镜复核闭合，减小累计误差。

顶模安装是拼装环节的瓶颈，把其吊装工作纳入 BIM 模拟环节，借助预设吊孔、钢棒、拱顶滑轮以及挖掘机组成起吊系统，来实现精准就位的目标。精度调整阶段依靠双液压同步顶升以及拉杆相互配合，对轨距、高程以及环缝开展三向微调工作，让高差以及错台在同一工位完成闭合。为量化优化的效果，选用提升率公式：

$$\eta = \frac{T_{pre} - T_{opt}}{T_{pre}} \times 100\% \quad (2)$$

式 (2) 中， η 表示拼装效率提升率，单位: %； T_{pre} 表示优化前单台车拼装总时长，单位: h； T_{opt} 表示优化后单台车拼装总时长，单位: h。优化后的流程节拍十分稳定，为后续的浇筑作业开展创造了有利条件。

2.3 拼装过程中的质量管控要点

针对 K42+100 ~ K43+300 段的净空以及线形双重约束，开展拼装质量管控的相关工作时，把测设控制、连接可靠性、过程停检三条主线当作核心来协同推进。测设控制选用全站仪以及激光定位仪联用的方式，沿

拱墙以及顶模每2 m布置测点来开展复测工作,垂直度误差借助下式进行计算:

$$\Delta v = |v_{act} - v_{des}| \quad (3)$$

式(3)中, Δv 表示模板垂直度误差(单位: mm); v_{act} 为实测垂直度读数(单位: mm); v_{des} 为设计垂直度控制值(单位: mm)。

控制要求 $\Delta v \leq 5$ mm,把轨距控制在 $2.0 \text{ m} \pm 3$ mm 以内,轴线误差要在单节段内完成闭合。开展连接可靠性的管控工作时,把楔块快锁以及定位锥套扭矩管理当作核心,高强螺栓终拧扭矩 $\geq 300 \text{ N} \cdot \text{m}$,按照对角交替的方式施拧并且进行复核。导向滑块接触率 $\geq 70\%$,对吊点耳板以及关键焊缝开展磁粉或者超声抽检工作。

3 洞内狭小空间样装施工技术应用效果分析

3.1 施工效率对比分析

针对 K42+100 ~ K43+300 段的狭小空间约束,把二衬台车拼装作业进行重构,调整为连续流模式,以

模块标准化以及节点节拍控制为核心,有效开展非生产等待时长的压缩工作。完成优化后,单台车拼装总时长从 72 h 降至 48 h,月均二衬施工长度从 150 m 提升至 220 m。效率提升的主要缘由囊括侧模对位和顶模就位的耗时缩短,以及快插接口减少接驳停顿、车队化倒序入洞降低倒运干扰。该结果与西香高速 TJ3 标 6 人 9 天完成拼装的实践高度契合。

吊装设备利用率随短节拍作业提高至 78%,借助调度耦合供应以及运输节律,拼装波动可以得到有效控制。线形一致性控制以及激光投线复核减少了返工时间,班组切换以及纵坡段穿插施工的过程中,循环节拍更趋稳定。当前施工能力上限已由装配组织环节转移至供料以及浇筑环节,拼装对全线周转的牵制效应在极大程度上显著减弱(见表 1)。

3.2 质量验收结果评估

针对 K42+100 ~ K43+300 段,在统一验收口径下对二衬成型质量开展系统评估。在几何精度方面,模板

表 1 施工效率对比表

指标	统计口径	优化前	优化后	变化幅度
单台车拼装总时长	从进场至工序验收完成	72 h	48 h	降低 33.3%
月均完成二衬施工长度	按单洞双车道计	150 m	220 m	提升 46.7%
侧模拼装工序时长	侧模对位至锁扣封闭	18 h	12 h	降低 33.3%
顶模单元吊装时长	顶模起吊至合拢到位	16 h	10 h	降低 37.5%
吊装设备有效利用率	吊装作业占设备开机时间比例	62%	78%	提高 16%

垂直度误差 ≤ 4 mm(控制目标 5 mm),轨距偏差控制在 $2.0 \text{ m} \pm 2$ mm(目标 ± 3 mm),轴线偏移 ≤ 3 mm,环缝错台 ≤ 3 mm(目标 5 mm),各项指标均优于控制目标,形成可靠裕度空间。在外观与致密性方面,二衬混凝土表面平整度合格率达 98%,无蜂窝麻面、漏浆等缺陷,端模封堵与环缝密封连续完整,接茬搭接 ≥ 100 mm。得益于软搭接技术,传统刚性搭接引发的漏浆与错台通病得到有效治理。楔块快锁与定位锥套复合连接收敛拼缝间隙,双液压同步顶升与拉杆联动实现三向微调,激光投线与棱镜闭合将轴线误差截断于节段内,形成从装配界面到线形控制的闭环。快插接口功能试通后浇筑,从源头抑制渗漏与错台风险,拆模后无二次校正,成型质量与线形一致性契合控制目标。

4 结束语

本研究系统阐述了隧道二衬台车在洞内狭小空间的模块化拼装施工技术,通过将台车合理拆分、优化拼装流程并引入 BIM 等数字化测控手段,有效破解了空间限制与精度控制的双重难题,实现了施工效率与成型质量的同步提升。实践证明,该技术方案具备良

好的可行性与推广价值。限于工程个案差异,后续研究可进一步探索不同断面类型下模块化设计的通用性,以及基于智能化监测的动态拼装精度调控方法,以持续推动隧道施工技术的精细化发展。

参考文献:

- [1] 任裕廷,朱宇,管文博.组合式模板台车在隧道衬砌施工中的应用[J].砖瓦,2022(05):155-157,160.
- [2] 中铁五局集团路桥工程有限责任公司.一种用于洞桩法隧道二衬施工的多用途分离式台车:CN20221153040.2.3[P].2023-04-18.
- [3] 王怀杰,梁立凯.山区高速公路隧道二衬台车洞内组装技术探讨[J].城市建筑与发展,2024,05(08):76-80.
- [4] 姚研究.智能衬砌台车在超大断面二衬施工中的应用[J].山西建筑,2024,50(11):160-163,175.
- [5] 陕西路桥集团有限公司.一种隧道洞内二衬台车断面改装方法:CN202210227530.4[P].2024-10-29.
- [6] 滨海锋,秦鲜卓,黄祯尹.山区公路隧道机械化施工技术效果分析[J].西部交通科技,2025(08):172-175.

基于红外热成像的水运工程 混凝土裂缝检测研究

胡庆闯

(舟山市水运工程检测中心有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要 针对水运工程混凝土裂缝传统检测方法效率低、覆盖范围有限且环境适应性不足的问题, 本研究构建了一种基于红外热成像技术的高效、非接触式裂缝识别体系。通过提取裂缝区域的红外热像特征, 融合图像处理与深度学习算法, 建立了从特征增强到智能识别的完整方法链条, 并针对温湿度、风速等现场干扰因素提出了系统校正策略, 旨在为水运工程混凝土结构的智能化巡检与数字化运维提供技术参考。研究表明, 该方法可显著提升裂缝检测的效率与识别精度, 有效克服复杂环境下的干扰, 实现了对微裂缝的可靠辨识。

关键词 红外热成像; 混凝土裂缝; 水运工程; 裂缝检测; 算法优化

中图分类号: TV36

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.003

0 引言

水运工程混凝土结构长期处于高盐、高湿与干湿交替的侵蚀环境中, 裂缝的萌生与发展直接影响结构的耐久性与服役安全。传统检测方法(目视检查与超声波探测等)普遍存在效率低、覆盖范围小、对运营干扰大等问题, 难以适应当前“不停航、少干扰”的工程维护需求^[1]。红外热成像技术基于物体表面的红外辐射差异成像, 能够非接触、大面积地捕捉混凝土裂缝与完好区域之间的温差特征, 具有显著的技术优势^[2]。基于此, 本研究聚焦红外热成像技术在水运工程特殊环境下的适用性提升, 通过系统研究裂缝红外特征提取方法、构建抗干扰识别算法, 并建立现场环境校正体系, 以期形成一套可靠、高效的混凝土裂缝检测方法, 为结构早期损伤识别与预防性维护提供技术支持。

1 水运工程混凝土裂缝检测现状与红外热成像技术基础

1.1 水运工程混凝土裂缝的危害及传统检测方法分析

水运工程混凝土裂缝具有隐蔽性与渐进性, 对结构服役安全构成长期威胁。裂缝贯通保护层后, 氯离子扩散系数可提高 2~3 个数量级, 显著加速钢筋锈蚀进程; 在干湿交替的潮汐区, 缝内静水压力峰值可达 0.15 MPa, 易诱发局部剥落^[3]。单条长 0.5 m、宽 0.3 mm

的裂缝即可使面板有效截面惯性矩降低 4.7%, 极限承载力下降 6% 以上^[4]。在传统检测方法中, 目视法仅能识别开口宽度大于 0.2 mm 的表面裂缝, 且受环境光照与视角影响显著; 超声波法对浅层微裂缝的反射信号信噪比常低于 6 dB, 需耦合剂辅助, 在潮差较大的码头面作业效率低下; 冲击回波法虽可定量裂缝深度, 但需钻孔布设传感器, 对结构表面造成破坏。上述方法在检测效率、覆盖范围及环境适应性方面存在明显不足, 难以满足水运工程“不停航”维护需求。因此, 引入非接触、高效率的红外热成像技术以提升裂缝早期识别能力具有重要的工程意义。

1.2 红外热成像技术的原理及其在结构检测中的应用特性

红外热成像技术基于普朗克辐射定律, 通过接收物体表面在 0.9~14 μm 波段的红外辐射, 将其转换为温度分布图像。混凝土裂缝因内部空气填充导致热扩散系数降低, 在主动或被动热激励下, 裂缝区域与周围健康混凝土之间形成可检测的温差 ΔT 。该温差与裂缝深度 d 、宽度 w 呈负指数关系, 即使温差低至 0.05 K, 也可被现代非制冷型微测辐射热计(320×256 像素)可靠识别。在水运工程现场, 可利用太阳辐射作为天然热源, 配合手持式热像仪, 在 20 m 视距内实现快速大面积扫描, 空间分辨率可达 1.5 mm, 满足规范对 0.1 mm 级裂缝的检出要求^[5]。与超声波等接触式方法相比,

作者简介: 胡庆闯(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水运工程检测。

红外热成像无需耦合剂,避免了高盐雾环境对探头的腐蚀;与目视检查相比,其不受潮汐、光照变化影响,显著提升了检测效率与安全性。此外,长波红外对水汽的穿透能力较强,在高湿环境中仍能稳定成像,为水运工程不停航检测提供了可行的技术路径。

2 红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的关键技术

2.1 水运工程混凝土裂缝的红外热成像特征提取方法

水运工程混凝土结构在红外热像中展现出独特的裂缝特征,这主要源于裂缝内部空气的热阻效应与外部环境的耦合作用。裂缝区域由于热扩散系数降低,在自然或主动热激励下常表现为连续的线状低温带,其两侧因热流聚集而形成环状热斑,横向热流密度 q 可达背景区域的2.8倍,这为裂缝的初步定位提供了显著的热信号依据。尤其在昼夜温差显著的潮汐区,裂缝尖端因热弹性效应可能引发局部温升异常,该现象对于识别尚未完全张开的隐性微裂纹具有重要指示价值。

为系统、可靠地提取上述特征,本研究构建了一套层次化的图像处理流程。首先,采用自适应高斯滤波对原始红外热像进行预处理,以抑制由海面反射、盐雾附着等引起的随机噪声,提升图像信噪比。在此基础上,依据傅里叶热传导定律计算热流密度矢量场:

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1)$$

式(1)中, \vec{q} 为热流密度矢量(单位: W/m^2); k 是混凝土导热系数(单位: $W/(m \cdot K)$); ∇T 表示温度梯度(单位: K/m)。结合Canny边缘检测算法与形态学闭运算,实现对裂缝轮廓的精细化提取与连接,增强断续裂缝的连续性表达。为有效区分结构性裂缝与非结构性的温度缝或表面纹理,本研究建立了基于热斑分布与几何形态的识别模型。当提取出的低温带长宽比大于5且两侧伴有对称性热斑时,判定其为结构性裂缝。该方法在盐雾侵蚀、表面粗糙的实际工程场景中,仍保持86%以上的检出率,单幅图像处理时间低于0.8 s,具有良好的鲁棒性与实时性,为后续移动巡检与智能诊断奠定了坚实的基础。

2.2 基于红外热像的混凝土裂缝识别算法优化

针对水运工程复杂环境(盐雾、海面反光、温湿度波动等)给红外热像带来的显著噪声干扰,本研究设计了一种多层次、渐进优化的裂缝智能识别算法。算法以U-Net分割网络为基本框架,通过引入自适应预处理、轻量化结构与注意力增强机制,系统提升其

在噪声环境下的识别精度与实时性。首先,在编码器前端嵌入自适应形态学滤波层,其数学表达为:

$$g(x, y) = \bigcup_{s \in S} \{f \ominus s\} \oplus s \quad (2)$$

式(2)中, $g(x, y)$ 为去噪后图像; f 为原始热像; S 为结构元素集合; \ominus 和 \oplus 分别表示形态学腐蚀与膨胀运算。这一层可以结合图像局部的特性动态选用结构元素,很好地抑制盐雾附着以及海面镜面反射带来的散斑噪声,把图像信噪比提高到12 dB以上,为后续开展特征提取的相关工作奠定清晰的数据基础。接下来,在解码路径中运用深度可分离卷积模块替代标准卷积,在保持特征提取能力的前提下,极大程度上降低参数量以及计算复杂度,让模型推理速度提升约3.2倍,契合移动巡检设备的实时处理要求。

为了进一步强化网络对裂缝边缘以及细微特征的感知能力,在跳跃连接处集成通道注意力机制,该机制借助自适应权重调整工作,增强对裂缝相关特征的响应,把边缘特征的提取强度提高40%。最后,借助多特征融合模块,把经过上述步骤处理后的热像数据以及热流梯度场、纹理结构信息开展层级融合工作,来实现信息互补,从而把宽度为0.1 mm级微裂缝的检出率从78%显著提升至93%。优化后的模型总参数量仅有1.7 M,在嵌入式硬件平台上得以实现每秒25帧的实时处理效能,完全适配搭载在码头巡检机器人等移动平台的部署场景,为水运工程现场快速、智能化的裂缝检测工作提供了可靠的算法支撑。

2.3 现场检测环境因素对红外热成像结果的影响及校正策略

水运工程现场的环境因素复杂多变,尤其是温湿度以及风速,会对红外热成像检测结果的可靠性以及准确性产生显著的影响。高湿度的环境会增强大气里水分子对长波红外辐射的吸收作用,导致热像仪接收到的辐射信号出现衰减,测温的偏差也会随之增大。其借助大气透射率经验公式来对这一过程开展量化描述:

$$\tau = e^{-\alpha RH \cdot d} \quad (3)$$

式(3)中, RH 为相对湿度(单位:%); d 为检测距离(单位:m); α 为水汽吸收系数(单位: $\%^{-1} \cdot m^{-1}$)。实测的数据表明,在相对湿度高于85%的夏季工况下,由湿度引发的测温误差可以达到1.8 K,极大程度上干扰裂缝与背景温差的识别工作。同时,持续的海风会借助对流换热效应加速混凝土表面的散热工作,弱化裂缝因热阻效应形成的温差。相关数据显示,6 m/s的风速可把该温差降低约0.6 K,进一步提升微裂缝的漏检风险。

为了有效抑制上述的环境干扰,本研究构建了一套系统化的三级校正策略:首先,在检测现场开展移动黑体参考板的布设工作,借助实时比对测量值,动态补偿因大气衰减引起的辐射偏差;其次,在构件的迎风侧开展高精度温度传感器阵列的部署工作,实时监测风致温漂,并且据此对热像图进行梯度校正;最后,结合现场的气象数据以及日照轨迹,合理开展检测时间窗口的规划工作,避免因阴影或直射光造成的局部温差假象。经实际验证,该综合校正体系可把环境因素导致的温度测量不确定度从 $\pm 1.5\text{ K}$ 显著降低至 $\pm 0.3\text{ K}$,不仅契合了规范对检测精度的要求,也为复杂环境下的裂缝可靠识别提供了关键的技术支持。

3 红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的实践应用与效果评估

3.1 某港口码头混凝土结构裂缝检测的现场试验设计

试验在华东某集装箱码头 3 号泊位进行,该高桩梁板结构已服役 12 年,潮差达 3.8 m,具有典型的氯盐侵蚀与机械冲击耦合特征。检测区域为 $120\text{ m}\times 18\text{ m}$ 的连续面板,划分为 6 条纵向测线。采用 640×512 像素非制冷热像仪,搭配 $19\text{ mm f}/1.0$ 镜头,在 15 m 距离内可实现 1 mm 的空间分辨率。热激励采用自然日照辅以人工卤素灯阵列,确保混凝土表面温升速率平缓($< 2\text{ K}/\text{min}$)。数据采集遵循“三同步”原则:热像仪与可见光相机同步触发,同步记录环境参数与黑体参考温度,并采用 GNSS-RTK 为每帧热像赋予精确坐标。整个检测过程在退潮后 45min 内完成,覆盖面积 $2\ 160\text{ m}^2$,高效满足了码头“即检即离”的运营要求,并为后续算法验证提供了高质量数据集。

3.2 红外热成像检测结果与传统检测方法的对比分析

在相同检测面积($2\ 160\text{ m}^2$)下,红外热成像耗时 45 min,而传统超声波 A 扫耗时 320 分钟,效率提升约 7.1 倍。红外法对宽度 $\geq 0.1\text{ mm}$ 裂缝的识别率达到 93%,高于超声法的 76%;经环境校正后,其误报率与超声法处于同一水平(约每 235 米一处)。在空间分辨率方面,红外法在 15 m 视距下可分辨 1 mm 裂缝,优于超声法的检测极限(约 0.3 mm)。经济性对比分析显示,红外法的现场直接检测成本(主要包括设备能耗与人工工时)约为 $0.8\text{ 元}/\text{m}^2$,仅为超声法现场检测成本(约 $1.9\text{ 元}/\text{m}^2$)的 42%。此外,红外检测无需搭设脚手架或使用耦合剂,作业安全性显著提高。差异根源在于红外技术基于辐射传热成像,对表面及近

表面缺陷极为敏感,而超声法则受材料不均匀性与界面水分的影响较大。

3.3 红外热成像技术在水运工程裂缝检测中的应用价值与推广建议

红外热成像技术在水运工程裂缝检测中展现出突出的经济、安全与技术价值。在经济性方面,即使考虑设备折旧、数据处理、人员培训等全周期成本,单次检测的综合成本亦可控制在 $4.8\text{ 元}/\text{m}^2$ 左右,相较于传统方法仍具有明显优势。大规模年度巡检可节约费用百万元以上。在安全效益方面,非接触检测使人员暴露于高危环境的时间缩短 70%。在技术方面,其高识别率与实时处理能力为结构数字化运维与数字孪生模型构建提供了数据基础。为促进该技术的推广应用,建议如下:一是建立行业培训体系,将红外检测技术纳入检测人员继续教育课程;二是编制专项检测规程,明确设备、环境与判读标准;三是推动设备国产化与智能化升级,集成 5G 与 AI 技术以进一步降低成本、提升性能。通过政策、标准与产业协同,红外热成像有望在五年内成为水运基础设施智能巡检的主流手段。

4 结束语

本研究系统阐述了红外热成像技术在水运工程混凝土裂缝检测中的基本原理、关键方法与实施策略,通过算法优化与环境校正,显著提升了复杂条件下裂缝识别的准确性与鲁棒性,验证了该技术在工程实际中的可行性与有效性。然而,目前该技术在推广中仍面临标准规范缺乏、专业人才不足等挑战。未来研究可进一步围绕智能检测装备的集成化开发、行业标准体系的建立,以及与数字孪生、物联网等技术的深度融合展开,以推动红外热成像技术在水运基础设施运维中的规模化、智能化应用,为工程结构的长寿命安全服役提供持续技术支撑。

参考文献:

- [1] 徐国栋. 水运工程混凝土结构抗冻性能监测方法设计研究[J]. 智能城市, 2025, 11(05): 158-160.
- [2] 何健, 张佳, 王航, 等. 基于红外热成像的钢管混凝土脱空缺陷检测研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(07): 73-80.
- [3] 周其国. 水运工程混凝土实体检测分析[J]. 汽车博览, 2023(08): 215-217.
- [4] 倪兰妹. 水运工程混凝土中水泥氯离子检测与耐久性评估[J]. 电脑应用文粹, 2024(04): 202-204.
- [5] 倪晓飞, 檀佩佩, 杨玉俊, 等. 钢管梁积水的红外热成像检测[J]. 无损检测, 2025, 47(09): 38-43.

AE94.3A 型燃气—蒸汽联合循环机组 启动控制优化研究

冯鹏飞, 吴公宝

(珠海市钰海电力有限公司, 广东 珠海 519055)

摘要 AE94.3A型燃气—蒸汽联合循环机组在冷态启动阶段存在耗时较长、部分控制方案不够完善等问题,难以充分适配电网调峰运行的实际需求。通过优化燃气轮机清吹方式、燃气轮机排气管道可燃气体实时在线监测、汽轮机冷态启动中速暖机、设置汽轮机冷态预暖系统、增加轴封自动暖管等措施,机组冷态启动时长能够从8小时缩减至5小时,有效降低启动成本,提高机组启动效率,更灵活地契合电网负荷调峰需求,创造了较为可观的经济效益。

关键词 燃气—蒸汽联合循环机组; 电网调峰; 冷态启动; 清吹方式; 中速暖机

中图分类号: TK47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.004

0 引言

燃气—蒸汽联合循环机组具备起停便捷、调峰性能优良的特点,是电网调峰任务中的核心装备之一^[1]。AE94.3A型燃气—蒸汽联合循环机组受到运维经验不足、控制策略不完善等因素影响,机组冷态启动时间长、APS人工确认断点较多,造成了能源的无谓损耗与发电成本的增加^[2]。广东某电厂配置两套465 MW单轴“一拖一”燃气—蒸汽联合循环机组, TCS采用ABB SYMPHONY PLUS系统, DCS采用南京科远NT6000控制系统, 2020年10月投产以来通过冷态启动中速暖机、冷态预暖快速启动、轴封自动暖管、缩短燃气轮机清吹时间等方式逐步解决以上问题。

1 冷态启动中速暖机

根据设备设计特性,燃气轮机可在20 min内达到满负荷运行状态,而汽轮机启动过程中需完成锅炉升温、管道暖管、阀门预热、转速提升等一系列工序,如何实现两者的协调运行成为机组启动控制中的关键难题^[3]。在传统的汽轮机870 r/min暖机工艺中,仅有少量蒸汽进入汽缸以维持转速,这些蒸汽轴向进入高压缸后在转子区域流动并向下一级流通,导致转子温升速率高于汽缸,难以快速满足3 000 r/min的冲转要求;同时,高压缸正胀差的升高,进一步制约了后续机组升负荷的速率。基于此,需通过提高汽轮机暖

机转速的方式,增加蒸汽与汽缸的接触面积和接触时间,加快汽缸温升速率,缩小高压缸胀差^[4-5]。经现场试验与理论分析,最终确定采用870/1 500 r/min分段暖机结合的方式。2023年7月24日,1号机组首次1 500 r/min中速暖机。启动前机组累计停运216 h,汽轮机高压缸内缸温度为74℃。03:15,发电机并网后燃机负荷由10 MW升至18 MW。04:33,汽轮机冲转并加速至870 r/min暖机,40 min后再加速至1 500 r/min中速暖机;06:01,汽轮机中、低压转子温度 ≥ 200 ℃,汽轮机加速至3 000 r/min与发电机成功啮合;09:24,联合循环负荷270 MW,此次启动总耗时369 min,启动耗时最大缩短99 min。

2 冷态预暖启动

冷态预暖启动即在机组动前,利用邻机蒸汽或辅助蒸汽对汽轮机进行提前预热处理,待汽轮机缸体温度提升至预设标准后,再按照温态模式启动。此举可避免机组进入冷态启动模式,大幅提升调峰响应效率。

暖机蒸汽分两路进入汽缸。高压支路在高压进汽阀组前方与高压主蒸汽管道连通,相继流过高压阀组、高压缸,然后从高排通风阀排入凝汽器。中压支路从再热管道接入,经再热阀组进入中压缸后排入凝汽器(详见图1)。暖机蒸汽参数为300~380℃,1.2~3 MPa,过热度 > 56 ℃。暖机转速为600~800 r/min,

作者简介:冯鹏飞(1988-),男,硕士研究生,工程师,研究方向:热能动力工程。

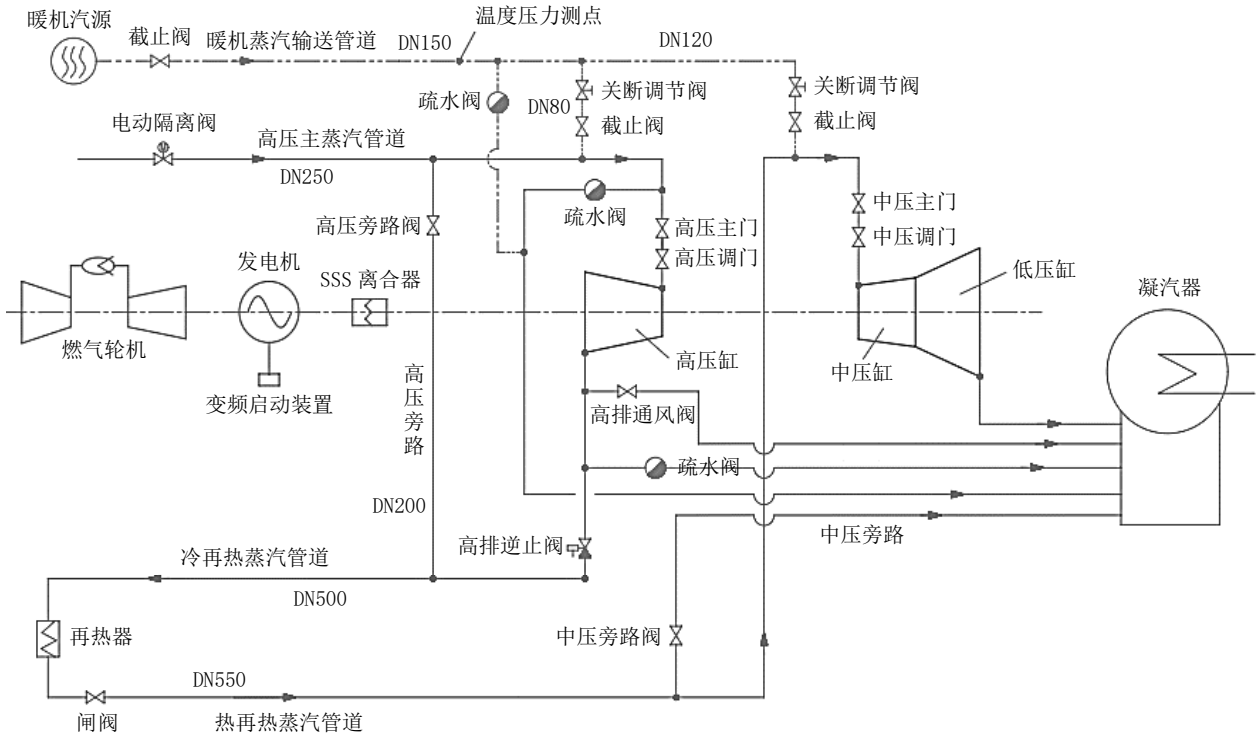


图 1 冷态预暖系统图

蒸汽动力要求能克服阻力矩，保证整个轴系能维持暖机转速，同时能把汽轮机预暖至较高温度。

3 轴封自动暖管

优化轴封暖管控制策略，明确区分手动与自动两种控制模式。手动控制模式下，轴封供汽阀与轴封溢流阀不受系统限制，操作人员可直接控制阀门的全开、全关操作，便于应对突发故障及特殊启动场景。自动控制模式下，系统可实现超驰控制、自动调节及阀位限制三大功能，无需人工干预即可完成轴封暖管的全过程控制。轴封自动暖管控制策略如下。

3.1 动作条件（“与”逻辑）

(1) 汽轮机顺控停进行中；(2) 汽轮机转速 ≥ 47.5 Hz；(3) 溢流阀位 $\geq 3\%$ ；(4) 负荷 < 40 MW 且 低压轴封压力 < 5 kPa。动作情况：溢流阀全关，供汽阀保留全关位，延时 120 s，期间延时 9 s 后，当轴封压力再下降到 8.0 kPa 后，供汽调门超驰 2 min 快开到 46%，之后超驰消失，供汽阀进入正常控制模式。

3.2 轴封暖管逻辑（轴封启动顺控）

(1) 供汽调门前温度二取二 ≥ 276 °C，启动轴抽风机，真空破坏阀未关闭，轴封供汽调阀控制低压轴封供汽压力 1.0 kPa；(2) 轴封进汽支管温度三取二 \geq

150 °C，自动调节轴封供汽调阀跟踪 3.0 kPa，或者轴封母管温度达到 180 °C，自动调节轴封供汽调阀跟踪 3.0 kPa；(3) 支管温度三取二 ≥ 160 °C，轴封供汽调阀设定自动跟踪低压轴封 8.5 kPa，延时 30 min，开始抽真空。

3.3 轴封启动顺控步骤

第一步：指令：TURBINE DRAIN SLC ON 开真空破坏阀。反馈：(1) 加热器后疏水阀开 OR 阀位限制 OK；(2) TURBINE DRAIN SLC ON；(3) 凝结水系统 OK；(4) 轴封冷却器水位不高；(5) 轴封供汽压力 ≥ 0.2 MPa；(6) 真空破坏阀开；(7) 轴封供汽阀前温度 ≥ 276 °C。

第二步：指令：轴封供汽调阀、低压汽封减温水调阀自动投入、投入轴抽风机。反馈：(1) 轴封供汽调阀、低压汽封减温水调阀自动投入；(2) 轴抽风机运行；(3) 支管温度 ≥ 160 °C 延时 30 min。

第三步：指令：启动真空泵，延时 5S 关真空破坏阀，退解锁。反馈：(1) 汽轮机转速 ≥ 1 r/min；(2) 真空 < 80 ，延时 10 min；(3) 真空破坏阀关；(4) 真空破坏阀连锁退出。

第四步：指令：关所有轴封系统疏水阀。反馈：轴封系统疏水阀全关。

第五步：完成。

4 燃气轮机启动吹扫优化

燃气轮机正常启动时,需启动 SFC 变频装置升速至 770 r/min 持续吹扫,确保烟道内无天然气聚集。依据 NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) 2015 版 8.8.4.6.4 条款相关规定,若天然气浓度符合安全标准,正常停机后短时间内启动机组时,可省略吹扫程序,且省略吹扫的最长间隔时间不超过 8 天。结合该标准及电厂运行经验,对燃气轮机启动吹扫策略进行优化。

根据测算,AE94.3A 型燃气轮机正常停机灭火后,机组转速仍处于较高水平,轴系惰走过程中产生的气流体积约为 36 302 m³,远超标准规定的 34 725 m³ 安全吹扫体积。为精准监测排气扩散段天然气浓度,每台机组增设两套天然气在线监测装置,对烟道内天然气浓度进行连续实时监测,为启动吹扫优化提供精准依据。为进一步提升安全性,当出现以下任一情况时,必须执行吹扫程序:(1)燃气轮机负荷 ≥ 30 MW 跳机;(2)排气扩散段天然气浓度检测值 $\geq 10\%$;(3)ESV 阀开启后 15 s 内关闭且燃机跳闸,点火未成功;(4)累计停机时间 ≥ 192 h;(5)火焰检测失败燃机跳闸;(6)手动吹扫按钮。

基于上述分析,将燃气轮机主顺控 SFC 模式优化为“吹扫模式”与“无吹扫模式”两种可选模式(详见图 2)。当机组启动时,系统将自动综合判断三项关键指标:烟道内天然气浓度、燃气轮机停机类型(正常/异常)、停机持续时间;若无强制吹扫条件,自动选择“无吹扫模式”,直接由 SFC 变频装置带动燃气轮机升至点火转速,完成点火启动,带动燃气轮机快速升速至 3 000 r/min;否则将选择“吹扫模式”。

5 结束语

广东某电厂两套 AE94.3A 型燃气-蒸汽联合循环机组自 2020 年 10 月投产以来,围绕缩短机组冷态启动时间、提升运行经济性这一核心目标,开展了一系列启动控制优化工作。通过技术改造与策略优化,燃气轮机清吹时间由原来的 12 min 缩短至 4 min,热态与温态启动采用无清吹直接启动模式;汽轮机冷态与温态启动过程中应用中速暖机工艺,优化轴封自动暖管控制逻辑,并计划增设冷态预暖启动系统。上述优化措施在确保机组及相关设备运行安全的前提下,大幅缩短了机组启动耗时,有效减少了天然气消耗量与厂

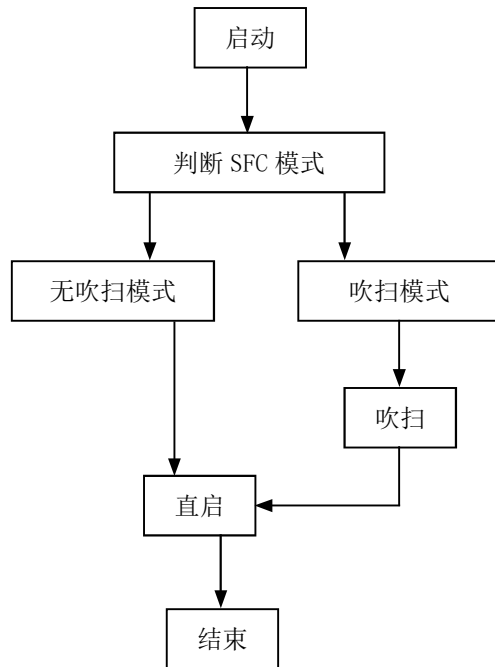


图 2 优化后燃气轮机启动吹扫过程

用电率,显著提升了机组运行经济性。同时,通过增设燃气轮机排气扩散段可燃气体实时在线监测装置,实现了对烟道内天然气浓度的全程精准监测,有效防范了炉膛爆燃等安全事故的发生,消除了机组原设计中存在的安全隐患。此次启动控制优化工作进一步提升了该型联合循环机组启动过程的灵活性与可靠性,实现了安全运行、节能降耗与经济效益提升的多重目标,优化效果显著,可为同类型燃气-蒸汽联合循环机组的启动控制优化提供现场实践经验与技术参考。

参考文献:

- [1] 王哮江,刘鹏,李荣春,等.“双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J].热力发电,2022,51(01):52-59.
- [2] 万安平,杨浩,王景霖,等.燃气蒸汽联合循环机组运行优化调控系统[J].热力发电,2021,50(12):21-29.
- [3] 朱宪然,张清峰,赵振宁.700 MW 级多轴燃气-蒸汽联合循环机组调峰和启动特性[J].中国电力,2009,42(06):1-5.
- [4] 梁朝,吴恒运,张晓邦,等.燃气-蒸汽联合循环机组自动起停控制系统(APS)的应用[J].热力发电,2009,38(10):58-60.
- [5] 宋兆星,李卫华,王立.双轴燃气-蒸汽联合循环机组协调控制策略[J].中国电力,2009,42(07):64-67.

新型阴极保护系统在海上风电基础防护中的研发与应用

张敬涵¹, 黄国香², 茆明钰²

(1. 中电建(温州)绿色能源开发有限公司, 浙江 温州 325800;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要 在全球能源转型与“双碳”战略深入推进的背景下, 海上风电作为清洁能源的重要组成部分, 其装机规模持续扩大。然而, 海上风机基础长期处于高盐度、高湿度、干湿交替与海水浸泡等恶劣海洋环境中, 导致钢结构面临严重的腐蚀风险。传统牺牲阳极保护方式存在电流不可调、阳极消耗快、维护困难等问题, 尤其对深水导管架基础的结构受力和波浪荷载影响显著。基于此, 本研究系统对比了牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方式的原理、设计、施工与运维特点, 并结合实际工程案例, 提出适用于深水导管架基础的外加电流阴极保护系统方案。该方案具备输出电流可调、保护电位自动恒定、远程智能监控、对结构影响小等优势, 旨在为保障海上风电基础的长寿命安全运行提供参考。

关键词 阴极保护; 海上风电基础; 牺牲阳极; 外加电流

中图分类号: TM62

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.005

0 引言

能源是人类生存与发展的重要物质基础, 随着全球能源向清洁低碳转型, 海上风电迎来快速发展期。我国海域广、海上风能资源丰富, 具备大规模开发潜力。但海上风机基础长期处于复杂海洋腐蚀环境, 如高盐高湿、干湿交替、海水浸泡及海生物附着等, 导致钢结构腐蚀, 影响其耐久性与安全性^[1]。海上风机基础承受着巨大荷载, 需抵抗环境力, 其腐蚀问题与交变应力、疲劳损伤耦合, 加剧安全风险。因此, 采取有效防腐措施是保障风电机组稳定运行的关键。目前, 海上风机基础常采用海工重防腐涂层与阴极保护联合防护, 阴极保护能有效抑制金属腐蚀^[2]。

阴极保护有牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法连接更负电位金属作阳极, 保护钢结构阴极, 具有系统简单、无需外接电源等优点, 但在深水导管架基础应用时, 会增加结构重量与波浪荷载, 后期维护困难。外加电流法通过外部电源施加保护电流, 辅助阳极用惰性材料, 具备输出电流可调等特点, 适用于复杂海洋工程。

近年来, 海上风电向深水、规模化发展, 传统牺牲阳极方案局限性凸显^[3]。因此, 开展阴极保护技术对比研究与优化设计, 对提升基础防护水平、保障风电场安全意义重大。

1 研究内容与方法

本研究以浙江海风苍南示范项目为工程背景, 针对深水导管架基础防腐需求, 系统开展了牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方案的对比研究。研究内容包括项目概况介绍、阴极保护系统原理分析、方案设计、施工安装工艺、运维要求以及全生命周期经济性评估, 旨在为深远海上风电基础防护提供优化方案。

1.1 项目概况

浙江海风苍南示范项目位于浙江省苍南外海, 总装机规模 200 万千瓦级, 海域面积约 271 km², 场址中心离岸直线距离约 105 km, 水深约 55 ~ 67 m。本项目总装机规模 2015.8 MW。其中, 固定式风电机组共布置 115 台, 包含 61 台 16.7 MW、27 台 16 MW 和 27 台 16.6 MW 机组, 基础采用四桩导管架结构型式, 如图 1 所示。阴极保护系统设计寿命为 25 年, 考虑到 3 年工程建设期, 总设计寿命不低于 28 年。考虑到项目面临恶劣海洋环境, 需采用防腐涂层与阴极保护联合防护措施。

1.2 阴极保护系统原理与技术构成

阴极保护基于电化学原理抑制金属腐蚀, 分为牺牲阳极法和外加电流法。牺牲阳极法连接电位更负金属(铝合金阳极), 在电解质中形成腐蚀电池, 以阳极

作者简介: 张敬涵(1980-), 男, 本科, 高级经济师、系统分析师, 研究方向: 海上风电建设管理。

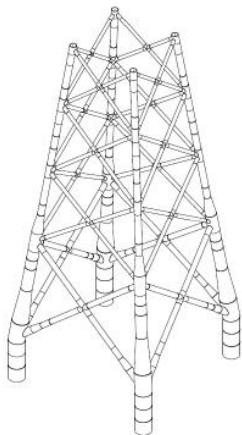


图1 四桩导管架基础模型

消耗提供保护电流；外加电流法通过外部直流电源系统（恒电位仪等）向结构施加可调电流实现阴极极化^[4]。本研究依据《海上风电场工程防腐设计规范》（NB/T10626-2021）等规范明确系统构成。牺牲阳极系统用铝—锌—铟系合金阳极，其电化学性能为工作电位 -1.05 至 -1.12 V、实际电容量不低于 $2\ 600$ Ah/kg、电流效率超 90% 。阳极块焊接于导管架，输出电流不可调，系统简单无需外部电源。外加电流系统由恒电位仪、钛基混合贵金属氧化物辅助阳极、高纯锌参比电极及电缆组成^[5]。恒电位仪输入电流 380 V/50 Hz，输出电流可调范围 0 A至 200 A，系统能自动调节，依电位反馈维持保护电位在 -0.80 V至 -1.05 V间。

1.3 牺牲阳极保护方案设计与计算

针对本项目深水导管架基础，牺牲阳极方案通过三维软件 Prostructure 建立模型，计算保护面积。全浸区面积为 $4\ 050$ m²，考虑附属构件后暂取 200 m²，泥下区面积为 $4\ 500$ m²。依据规范选取保护电流密度，全浸区初期为 3 mA/m²、维持期为 15 mA/m²、末期为 48 mA/m²，泥下区统一为 20 mA/m²。计算所得保护电流需求为初期 82.75 A、维持期 133.75 A、末期 274 A。选用 A11D-1 型铝合金牺牲阳极，单块净重 311 kg，经公式计算单台基础需阳极 80 块，总重约 27 t。阳极布置于导管架水下区，需避开电缆管等位置，但大量焊接会增加局部应力及波浪荷载。

1.4 外加电流保护方案设计与优化

外加电流方案采用智能恒电位仪、8组支架式混合贵金属氧化物辅助阳极和4支高纯锌参比电极，辅助阳极布置于 -17 m和 -55 m高程，参比电极布置于 -42 m高程。保护电流计算考虑涂层破损率，浸水区初期破损系数 2% ，每年增 1% ；泥下区初期 10% ，每年增 1% 。系

统输出电流自动调整，确保全寿命周期保护效果稳定。设计预留 20% 阳极冗余，单台基础设备含恒电位仪 1 台、辅助阳极 8 个、参比电极 4 个及配套电缆。施工期配备 10 t辅助牺牲阳极作临时保护措施。系统集成远程监控功能，可实时采集电位数据并通过云平台管理。

1.5 施工安装与运维工艺对比

两种保护方案的施工安装均以陆上为主、海上为辅。牺牲阳极安装主要在加工厂完成，阳极块焊接固定于导管架主体，随结构一同吊装，安装后需测量保护电位，要求相对于 Ag/AgCl 电极为 -0.80 至 -1.05 V。运维中需定期水下检查阳极消耗情况，若阳极耗尽则需进行复杂的水下焊接更换。外加电流系统安装包括陆上电极与电缆敷设、恒电位仪就位及海上调试，安装流程强调水密性和绝缘测试。系统具备远程监控功能，可实时监测设备状态，短期停电依赖极化膜保护，长期停电需备用电源。

1.6 全生命周期经济性分析

经济性分析基于单台基础工程量与成本计算。牺牲阳极方案的主要成本包括阳极材料费 86.4 万元，但阳极重量导致导管架主体增量成本 195.2 万元和桩基增量 78 万元，总一次性成本约 359.6 万元，未包含主机载荷增加可能带来的额外费用。外加电流方案设备费为 40 万元，施工期辅助阳极 32 万元，运营期电费 13.3 万元，基于 30 年总耗电量 $265\ 454$ 千瓦时及电价 0.50 元每千瓦时计算，总成本 85.3 万元。分析表明，外加电流系统在全生命周期内具有显著优势

2 阴极保护系统技术性能与工程应用成果

本研究依靠对系统的原理分析、方案设计、工艺对比及经济性评估，在海上风电深水导管架基础阴极保护技术方案的选择与优化上取得的主要成果为以下几个方面。

2.1 两种阴极保护系统的技术特性得以明确

研究中对牺牲阳极与外加电流两套技术体系的核心差异展开分析。牺牲阳极依靠活性金属材料的电化学溶解提供保护电流，其输出电流不可调节，可能导致保护不足。该系统结构简单、无需外接电源，但所需阳极数量较多，单台深水导管架基础约需 80 块铝合金阳极，总重量达 27 t，会增加结构荷载与阻水面积。

此外，外加电流系统通过恒电位仪供电，借助惰性辅助阳极（MMO/Ti）传递电流。该系统的优势在于输出电流可根据实时电位信号自动调节，使结构电位维持在最佳保护区间，且具备远程监控与数据采集功

能, 实现智能化与可视化^[6]。在满足相同保护需求的情况下, 仅需 8 个辅助阳极与 4 个参比电极, 对结构自重与流体动力的影响远小于牺牲阳极系统。

2.2 设计方案与施工运维要点形成完整体系

本研究所形成的两种方案的完整设计体系均给予具体工程项目参数。牺牲阳极方案需要针对保护面积、设计寿命及电流密度进行阳极选型与数量计算, 该方案的安装包括了大量陆上焊接工作, 且与主体结构一同吊装。在运维期间内, 需要人员定期进行水下巡检以检查消耗情况, 更换作业难度大、成本极高。

外加电流的设计涵盖了恒电位仪选型、辅助阳极与参比电极布置、电缆敷设及监控系统集成。在施工中, 主要设备与管线在陆上安装, 海上仅进行最终调试。运维通过远程监控平台实现, 实时掌握系统状态与保护效果, 日常需对水上电气设备定期维护。短期停电可由极化膜提供暂时保护, 但长期停电则需启动备用电源。

2.3 全生命周期经济性对比结论显著

研究对两种方案的全生命周期成本进行了定量分析与对比。牺牲阳极方案的单台基础一次性材料与安装费用较高。此外, 因其附加重量导致的导管架主体及桩基结构增量成本估算超过 200 万元, 且可能引发主机载荷的进一步增加。包含设备及施工期辅助阳极, 外加电流方案单台基础一次性投入较低, 按现行电价估算, 结合 28 年运营期电费支出不足百万元。经对比, 外加电流系统虽需运营期电费支出, 但避免了因附加巨大重量产生的显著结构增量成本, 全生命周期总成本优势明显。

2.4 深水导管架项目推荐方案得以确立

综合技术性能、施工可行性、运维便利性及经济性分析, 研究成果明确指出, 本深水导管架海上风电项目建议采用外加电流阴极保护方案。该结论依据如下: 外加电流系统电流可调、保护效果稳定、智能化程度高、对结构受力影响小, 更适应深水复杂环境与长寿命设计要求; 计入结构影响后, 其经济性显著优于牺牲阳极方案; 国内外工程实践, 尤其是近年来深水导管架项目, 已普遍采用并验证了该系统的可靠性。研究还建议, 风机并网前的施工期, 采用临时性牺牲阳极作为过渡保护措施。

3 结论

本项目通过原理分析、方案设计、施工运维对比及全生命周期经济性评估, 深入研究海上风电深水导管架基础应用的牺牲阳极与外加电流两种阴极保护方式, 主要结论如下:

第一, 合理设计与有效维护下, 两种阴极保护方案均能为海上风机基础钢结构提供腐蚀防护, 但技术适应性差异显著。牺牲阳极系统结构简单, 但保护参数不可调, 阳极块焊接安装使局部应力集中, 增加导管架自重与阻水面积, 恶化受力与服役性能, 对深水导管架基础影响更突出。外加电流系统输出电流可自动调节、保护电位恒定、可远程智能监控, 辅助阳极少且轻, 对结构整体性能影响小, 更适用于深水、复杂、长寿命工程场景。

第二, 已明确具体深水导管架工程项目的外加电流阴极保护设计方案。单台基础配置智能恒电位仪、8 组钛基复合贵金属氧化物辅助阳极、4 支高纯锌参比电极及配套电缆与远程监控系统, 施工期配套约 10 t 辅助牺牲阳极临时保护, 该方案可与风机载荷协同迭代, 设计闭环度高。

第三, 经济性分析显示, 牺牲阳极方案成本除材料与安装费外, 还有阳极附加重量导致的主体结构增量成本, 总额显著。外加电流方案虽有运营期电费, 但避免了巨额结构增量成本, 全生命周期总成本优势明显。

第四, 综合技术先进性、结构适应性、运维便利性及全生命周期经济性, 本研究涉及的深水导管架海上风电项目, 推荐外加电流阴极保护方案作永久防护措施, 施工期采用临时性牺牲阳极过渡保护。该结论与国内外普遍选择趋势一致, 可为类似工程提供决策参考与实践指导。

参考文献:

- [1] 杨道武, 李景禄, 朱志平. 接地网防腐工程中的阴极保护设计 [J]. 电瓷避雷器, 2004(01):36-38,43.
- [2] 回世翔, 张冉, 徐亚茜, 等. 海上风电机组桩基腐蚀防护研究进展 [J]. 全面腐蚀控制, 2023,37(09):8-13.
- [3] 陈亚林, 黄卫国, 盛家程, 等. 高温低氧环境下铝、锌阳极在高盐度海水中的性能研究 [J]. 环境技术, 2023,41(10):76-81.
- [4] 黄家坪. 牺牲阳极的阴极保护在港工钢管桩防腐中的应用 [J]. 中国水运: 下半月, 2020(06):152-153,155.
- [5] 栾媛, 马长江, 胡校革. 自升式平台外加电流阴极保护技术 [J]. 全面腐蚀控制, 2015(10):33-37.
- [6] 任伟, 陈有登, 谢志猛, 等. 海上风电防腐蚀研究现状与前景 [J]. 应用能源技术, 2022(02):49-52.

山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工关键技术研究

王培懿, 袁 涛, 杨金宜, 张焯桁

(四川路桥桥梁工程有限责任公司, 四川 成都 610071)

摘要 在山区高烈度地质复杂条件下, 悬索桥隧道锚开挖施工在保障安全与精度的基础上, 仍面临技术适配不足、能耗较高、生态影响较大等现实难题, 亟须拓展研究方向以完善施工技术体系。本文以山区高烈度复杂地质下悬索桥隧道锚开挖施工拓展方向为研究对象, 深入分析技术优化与节能降耗、施工设备适配与智能化升级、环保管控与生态保护三大核心方向, 在此基础上提出工艺优化、设备改造、环保管控的具体实施方法, 旨在丰富隧道锚开挖施工研究内容, 为同类工程拓展施工思路、提升施工综合水平提供技术参考与实践借鉴, 助力山区悬索桥建设高质量发展。

关键词 山区高烈度地质复杂条件; 隧道锚开挖; 设备智能化

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.006

0 引言

随着山区悬索桥建设向高烈度、地质更复杂区域延伸, 隧道锚开挖施工的综合要求不断提升, 仅关注核心施工技术已难以满足工程节能、高效、环保的发展需求。当前施工技术适配性不足、设备智能化水平低、生态保护与施工推进难以平衡等问题, 制约着隧道锚开挖施工的综合效益。基于此, 开展相关拓展方向研究, 不仅能完善山区高烈度复杂地质下隧道锚开挖技术体系, 还能实现施工安全、效率、效益与生态保护的协同发展。

1 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖的施工要点

1.1 地质勘察与风险预判要点

隧道锚开挖施工的首要要点是全面、精准开展地质勘察, 结合高烈度地质特性进行风险预判, 为施工方案制定提供科学依据。地质勘察需覆盖隧道锚全断面及周边一定范围, 重点查明不良地质分布、围岩等级、地下水情况及地震动参数, 同步预判开挖过程中可能出现的坍塌、涌水、突泥等风险, 确保施工方案与地质条件高度适配。

地质勘察应采用“现场踏勘+钻孔探测+物探检测+室内试验”相结合的综合方式, 避免单一勘察手段的局限性。现场踏勘重点排查隧道锚区域的地形地

貌、地表裂缝、不良地质露头, 初步判断围岩稳定性, 而钻孔探测需按规范布置钻孔, 深度覆盖隧道锚设计深度以下不少于 5 m, 采集岩芯样本进行室内试验, 确定围岩的抗压强度、抗剪强度、弹性模量等力学参数, 明确断层破碎带、软弱夹层的分布范围、厚度及力学特性。针对高烈度地震区域, 需结合当地地震动参数, 通过 Midas NX 数值模拟软件, 对围岩在地震作用下的应力应变分布进行模拟分析, 预判围岩坍塌、锚塞体变形等风险, 划分风险等级, 制定分级防控措施。

1.2 开挖精度与受力匹配要点

隧道锚作为悬索桥主缆拉力的承载核心, 其开挖精度直接影响锚塞体的受力性能与整体稳定性, 因此开挖精度控制与锚塞体受力匹配是施工核心要点之一。开挖精度控制需贯穿施工全过程, 采用“精准测量+分层控制+实时修正”的模式。施工前, 采用高精度全站仪、水准仪进行平面定位与高程控制, 建立完善的测量控制网, 对隧道锚的轴线、断面尺寸进行精准放线, 标注开挖轮廓线; 在施工过程中, 每开挖一层, 及时进行测量复核, 重点检查断面尺寸、轴线偏差、坡度偏差, 确保隧道锚前导洞、前锚室、锚塞体段的尺寸偏差控制在设计允许范围内。针对高烈度地质条件, 需充分考虑地震作用下围岩的变形特性, 在开挖过程中预留合理的变形量, 避免后期围岩变形导致锚塞体受力不均。

作者简介: 王培懿 (1996-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程 (含隧道)。

1.3 施工安全与动态管控要点

隧道锚开挖施工环境恶劣、风险因素多，施工安全与动态管控是保障施工顺利开展的关键要点，需建立全方位、全过程的安全管控体系，重点防控围岩坍塌、涌水突泥、地震扰动等风险。安全管控体系需明确各级岗位职责，建立“全员参与、全程管控、分级负责”的安全管理机制，加强对施工人员的安全培训与技术交底，增强施工人员的安全意识与应急处置能力。针对高风险工序，需制定专项安全施工方案，设置专职安全员现场监护，实行“一人一机一监护”制度。在动态管控方面，采用“实时监测+数据分析+方案调整”的模式，在隧道锚开挖区域布置围岩位移、应力应变等监测点，实时采集监测数据，通过数据分析判断围岩稳定性与施工安全状态。当监测数据超出预警值时，立即停止施工，分析原因并采取针对性的防控措施，同时还需结合施工过程中揭露的地质情况，及时优化开挖方案、支护参数，确保施工方案与实际地质条件适配。

2 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工关键技术

2.1 高烈度复杂地质精准勘察与参数优化技术

地质勘察的精准度直接决定施工方案的科学性与可行性，因此研发高烈度复杂地质精准勘察与参数优化技术，是隧道锚开挖施工的关键核心技术之一。针对山区高烈度复杂地质的特殊性，优化勘察技术方案，采用“钻孔探测+地质雷达+地震波法+原位试验”的综合勘察模式，弥补单一勘察手段的不足^[1]。钻孔探测采用定向钻孔技术，精准控制钻孔角度与深度，重点探测断层破碎带、软弱夹层、岩溶等不良地质的分布范围与力学特性，采集岩芯样本进行室内试验，同时针对高烈度地震区域，结合当地地震动参数，对围岩在地震作用下的应力应变分布进行模拟分析，确保参数取值符合高烈度地震工况的实际需求。

2.2 复杂围岩分级开挖与控振爆破技术

在山区高烈度地质复杂条件下，隧道锚开挖面临围岩稳定性差、地震扰动风险高的问题。复杂围岩分级开挖与控振爆破技术，能够有效控制开挖过程中围岩的扰动，避免围岩坍塌，确保开挖施工安全，是隧道锚开挖的关键核心技术^[2]。针对不同等级围岩制定差异化的开挖方案，I~II级围岩采用全断面开挖法，开挖循环进尺控制在3~5m，提高施工效率；III级围岩采用台阶法开挖，上台阶开挖循环进尺控制在2~3m，下台阶滞后上台阶不少于5m，及时施做初期支护；IV~V级围岩采用三台阶预留核心土法开挖，循环进尺控制在1~1.5m，核心土预留比例不小于30%，确保掌子面稳定性。

2.3 高烈度工况下围岩支护加固关键技术

高烈度地质作用下，围岩易发生塑性变形、坍塌等破坏，因此，高烈度工况下围岩支护加固关键技术，是保障隧道锚开挖施工安全与结构稳定性的核心技术^[3]。针对山区高烈度复杂围岩条件，采用“初期支护+二次衬砌+超前支护”的复合支护体系，结合围岩等级优化支护参数，具体支护参数见表1。

2.4 开挖施工动态监测与风险预警技术

在隧道锚开挖施工过程中，围岩变形、应力应变及地下水变化等因素易引发安全风险。因此，开挖施工动态监测与风险预警技术，是实现施工安全动态管控的关键核心技术。建立全方位的动态监测体系，监测内容涵盖围岩位移、围岩应力应变、支护结构应力、地下水水位及流量等，监测点布置结合隧道锚开挖断面特点与地质条件，确保监测数据的全面性与代表性。围岩位移监测采用全站仪、测缝计，在隧道锚前导洞、前锚室、锚塞体段每隔5~10m布置一个监测断面，每个断面布置3~5个监测点，实时监测围岩的水平

表1 不同围岩等级支护参数表

围岩等级	超前支护	初期支护	二次衬砌
I~II级	无	C25喷射混凝土，厚度15cm；Φ22锚杆，长度2.5m，间距100cm	C30钢筋混凝土，厚度30cm
III级	Φ42小导管，长度4.5m	C25喷射混凝土，厚度20cm；Φ22锚杆，长度3m，间距90cm	C30钢筋混凝土，厚度40cm
IV~V级	Φ42小导管，长度4.5m	C25喷射混凝土，厚度25cm；Φ22锚杆，长度3.5m，间距80cm	C40钢筋混凝土，厚度50cm

位移与垂直位移,当监测数据超出预警值时,系统自动发出预警信号,提醒施工人员及时采取防控措施,

同时建立监测数据反馈机制,将监测结果及时反馈给施工技术部门,监测预警指标见表2。

表2 隧道锚开挖施工监测预警指标表

监测项目	监测仪器	预警值	监测频率
围岩水平位移	全站仪、测缝计	≥ 5 mm/d	开挖后1~3天2次/天,3~7天1次/天,7天后1次/3天
围岩垂直位移	全站仪、测缝计	≥ 3 mm/d	同水平位移
围岩应力	应力计	$\geq 80\%$ 设计应力	1次/天
地下水涌水量	流量计	≥ 50 m ³ /h	2次/天

3 山区高烈度地质复杂条件下悬索桥隧道锚开挖施工相关拓展方向研究

3.1 隧道锚开挖施工技术优化与节能降耗方向

隧道锚开挖施工不仅要保障安全与精度,还需注重技术优化与节能降耗,通过工艺改进、参数调整,在提升施工效率的同时,降低能源消耗与施工成本,实现工程建设与节能理念的协同发展^[4]。针对现有开挖与支护工艺的不足,结合高烈度复杂地质特点,优化施工流程,实现各工序的高效衔接,减少工序等待时间,将控振爆破与喷锚支护工序进行协同优化,采用“爆破后即时喷护”的作业模式,缩短围岩暴露时间,既提升支护效果,又减少重复作业,降低人力与材料消耗。

3.2 高烈度复杂工况下施工设备适配与智能化升级方向

施工设备的适配性直接影响隧道锚开挖施工的效率与质量,传统施工设备存在操作难度大、适配性差、智能化水平低等问题,施工设备的适配优化与智能化升级已成为推进隧道锚开挖技术发展的重要支撑方向^[5]。在设备适配方面,针对山区地形复杂、地质多变、地震风险高的特点,对现有施工设备进行针对性改造,提升设备的稳定性与适配性。例如:对钻机进行改造,配备可调节角度的钻臂与精准定位系统,适应隧道锚不同断面的开挖需求,提升钻孔精度与效率。在智能化升级方面,引入智能化监测设备与自动化施工设备,构建智能化施工体系,如采用无人钻机进行钻孔作业,通过远程控制实现精准钻孔,减少人工操作,降低施工人员安全风险,还可利用物联网技术,实现施工设备的实时监控与故障预警,及时发现设备故障并进行维修,确保施工顺利推进。

3.3 隧道锚开挖施工环保管控与生态保护方向

山区生态环境脆弱,高烈度地质复杂条件下的隧道锚开挖施工易对周边环境造成破坏,如植被破坏、水土流失、地下水污染等,加强施工环保管控,

实现施工与生态保护协同发展已成为隧道锚开挖施工的重要研究方向。在环保管控方面,建立完善的环保施工管理制度,明确环保管控责任,将环保要求融入施工全过程。施工前应对隧道锚周边环境进行全面调查,制定针对性的生态保护方案,对施工区域周边的植被进行移栽保护,划定施工禁区,避免破坏原有生态植被。在施工过程中,加强对施工扬尘、噪声、废水、废渣的管控,还可采用洒水降尘、密闭运输等措施,控制施工扬尘污染。施工完成后,对施工区域进行生态修复,清理施工痕迹,补种植被,恢复周边生态环境,确保工程建设对生态环境的影响降至最低,实现山区交通建设与生态保护的协调发展。

4 结束语

本文明确了技术优化与节能降耗、设备适配与智能化升级、环保管控与生态保护三大研究方向,分析了各方向的实施方法与核心要点,旨在有效解决施工中能耗、效率、生态等方面的突出问题,丰富隧道锚开挖施工的研究内涵。未来还需结合工程实践进一步优化各方向技术细节,推进技术集成应用,强化智能化与环保技术的深度融合,为山区高烈度复杂地质下悬索桥隧道锚开挖施工提供更全面、高效的支撑。

参考文献:

- [1] 朱弘扬,吉星刚.悬索桥软质岩隧道锚开挖施工方法及质控措施[J].江苏建材,2024(03):99-101.
- [2] 刘新荣,罗维邦,肖宇,等.悬索桥隧道锚工程应用与研究现状分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(01):207-219.
- [3] 许登根,周昌栋,赵航.悬索桥软质岩隧道锚开挖施工关键技术[J].世界桥梁,2022,50(03):45-51.
- [4] 刘志远.山区铁路悬索桥隧道锚开挖、支护施工经济分析[J].铁路工程技术与经济,2021,36(04):49-53.
- [5] 李铁儒.关于悬索桥隧道锚的技术研究[J].北方交通,2020(05):21-24.

智能控制技术在煤矿机电设备中的运用研究

郭林刚

(陕西彬长胡家河矿业有限公司, 陕西 咸阳 713600)

摘要 为解决过往煤矿机电设备运行效率不足、安全性较差、能耗严重的问题, 本文结合电工高级技师工作视角, 分析智能控制技术在煤矿机电设备中的具体运用形式, 旨在促进煤矿机电设备向智能化方向转型。结合案例分析, 系统梳理与电气内容相关的智能控制技术, 探究此类技术在井内监测提升机、采煤机等设备中的具体应用情况。结果表明, 在煤矿机电设备中融入智能控制技术, 可进一步缩短煤矿机电设备故障时间, 降低 30% 左右的能源损耗, 提高 20% 以上的采煤效率, 在削减成本的基础上保障生产安全, 为煤矿产业实现高质量发展提供有力支持。

关键词 智能控制技术; 煤矿; 机电设备

中图分类号: TD67

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.007

0 引言

在“双碳”工作的持续推进下, 煤矿产业正从原有的规模扩张转向高质量发展。在转型中可发现, 过往煤矿机电设备在运行时存在严重的效率不足、能耗偏高等问题, 制约行业的整体建设。所以, 从电工高级技师的视角探究智能控制技术在煤矿机电设备中的具体应用意义重大, 可改变传统电气控制模式下设备故障排查滞后、能源损耗严重、井下作业风险较高的问题。智能控制技术利用技术赋能, 融合自动化、AI 等形式, 有效破解设备运行难点, 为煤矿机电设备自动化、智能化转型提供充分的实践指导, 助推煤矿产业绿色高效发展。

1 智能控制技术的内涵

智能控制技术融合了 AI、自动化、计算机等多个领域内容, 以实现复杂系统的智能化控制。从定义的角度来看, 智能控制是利用智能机器自主或与人交互的形式完成规定性任务, 其会模拟人类思维和决策, 使控制系统能充分感知、分析和决策周边环境, 进而对目标对象完成智能控制。智能控制技术之所以能实现智能调节和控制, 主要基于数据学习掌握被控对象的特性与规律。例如: 神经网络包含大量神经元, 能依据样本数据的研究控制神经元连接网络, 进而打造出不同的映射关系, 实现系统控制。对于煤矿机电设备运行而言, 智能控制技术会借助传感器实时分析设备运行的温度、压力以及振动参数, 然后将其传递给控

制系统。控制系统则会根据预定算法和模型进行深度分析和处理, 并基于其结果作出决策, 发出指令, 实现设备的有效控制, 使其能在复杂工况下平稳运行^[1]。

2 智能控制技术在煤矿机电设备中的重要性

2.1 提高煤矿产业生产效率

煤矿生产期间可借助智能控制技术, 有效实现生产效率提升的目标。以某煤矿企业为例, 在智能化综采系统运行下, 所有工作面上的液压支架均可自动上传数据, 完成信息交互, 工作人员只需要在移动端便可控制地下 400 m 深处的采煤作业, 不仅能简化操作流程, 而且还可强化生产效率。相关数据显示, 与传统人工形式相比, 其生产效率提高约 20%。此外, 智能控制技术还可对煤矿机电设备的运行数据加以把控, 将实时数据与预设算法中的信息一一对比, 不断实现智能调节, 使设备一直以最佳工况的状态运行^[2]。

2.2 保障全过程生产安全性

煤矿行业工作特殊, 受生产环境的影响, 经常产生各种风险隐患, 而智能控制技术具有强大的动态监测和预警能力, 能保障生产安全性。例如: 某地区煤矿生产设置了完善的 5G 网络, 安装了 45 套 5G 基站, 能为井下作业提供有效的通信支持。在智能化场景中, AI 智能分析系统以及智能报警系统会实时感知机电设备运行情况, 一旦参数超出设计阈值, 便会发出预警, 并以 5G 网络将信息传递给有关人员。其中, AI 智能分析系统还会对采集到的数据展开深入研究, 判断其可

作者简介: 郭林刚 (1978-), 男, 本科, 电工高级技师, 研究方向: 矿山机电设备运维与技术管理。

能带来的影响状况以及影响范围,为后续针对性故障处理提供建议,以便及时修复,从根本上规避安全事故。在瓦斯监测方面,智能控制技术也可通过布置高精度瓦斯传感器,监测井内瓦斯浓度的具体数值,一旦临近安全阈值,系统便会发出声光警报,并智能打开通风设备,增加通风量,控制瓦斯浓度。与此同时,还会同步切断所有区域内的电源,以免受火花影响出现瓦斯爆炸。据不完全统计,在智能控制技术运用下,瓦斯事故发生率减少约40%。

2.3 控制成本与能源消耗

在物联网、大数据、AI技术融入下,可对机电设备全应用周期进行数据监测与故障预警。在设备产生异常时,便会立即发出预警信息,帮助工作人员有效定位,制定维修方案,提高检修效率。此种环境下,可进一步控制设备维修成本,减少额外支出。在能源消耗层面,煤矿机电设备类型较多,传统设备运行期间经常存在设备空转等资源浪费问题,而智能控制技术则可通过变频调速等手段,结合实际工况调整设备运行,从根本上控制能源消耗,保障企业效益^[3]。

3 智能控制在煤矿机电设备中的具体运用

3.1 智能控制在井内监测中的运用

煤矿产业有很多作业需要在井下完成,为保障井下工作人员安全,需要实时分析周围环境。智能控制技术可对瓦斯、温度等核心参数实现动态监测。瓦斯一般聚集在掘进工作面,回风巷采煤工作面等区域,此类区域周围要布置大量瓦斯传感器,该传感器能敏锐感知细小的浓度变化,其精准度约为 $\pm 0.1\%$ 。考虑到不同矿井内环境情况有所差异,可结合具体工况,运用催化燃烧式、热导式等不同类型的传感器,以适应实际应用所需。例如:某煤矿在井内部署智能监测体系,针对瓦斯聚集点设置大量传感器,在某日监测时发现,该区域瓦斯浓度从原有正常的0.5%上升,在短时间内上升至1.2%,超出了安全阈值1%。为此,智能系统快速捕捉参数异常,展开智能分析,确认浓度超标后,启动预警装置,其中声光报警器会发出尖锐的爆鸣声,同时,井下工作人员的定位设备也会收到警报,提醒其有效撤离。地面控制中心会重点标注瓦斯浓度较高的区域,并弹出应急处理建议^[4]。

3.2 智能控制在提升机中的运用

井下作业是一项专业性极强且危险性较高的工作。提升机作为生产中不可缺少的设备形式,不仅是保障工作人员人身安全的重要通道,而且还要在日常输送

各种生产物资,为开采作业营造有利条件。由于此类设备需要在地表地下进行移动,因此对性能稳定性方面要求较高。在其中引入智能控制技术,可实现动态监测与调节,在保障矿井安全的基础上提升工作效率。例如:数控提升机便融入了CNC系统以及各种类型的控制器,既能对设备运行展开动态控制,又可结合实际工况灵活调节参数。此种升降机还具备监测功能,可将监测到的数据实时传递给总线。在智能控制技术运用下,工作人员可随时掌握设备的运行工况,在控制成本的基础上提升生产效率。图1为煤矿提升机智能控制系统示意图^[5]。

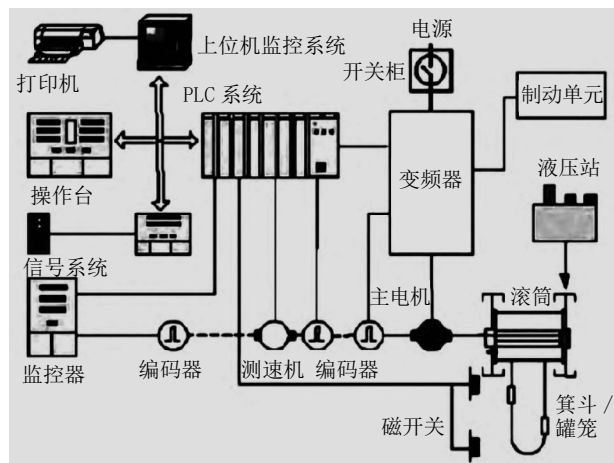


图1 煤矿提升机智能控制系统示意图

3.3 智能控制在采煤机中的运用

采煤机运行期间要结合煤层厚度,硬度不断调整截割参数,在过去其运行效率一直较低,甚至会带来严重的资源浪费。而智能采煤机则借助智能控制算法和传感器有效调节截割控制参数。其设备截割部分设置激光测距、超声波等不同类型的传感器,此类传感器会快速分析煤层厚度、硬度以及倾角,然后结合智能控制系统以及机器学习算法进行参数分析,调节设备截割参数,包括截割速度、深度、牵引力度等。若煤层较薄,则会降低截割深度,而若煤层较硬,则会增加截割速度,提高截割功率。例如:某煤矿企业引入了智能采煤机,在遇到2 m厚度、硬度较大的煤层时,其根据传感器所收集到的数据,实现智能参数调节,将截割速度从原有的5 m/min增加到7 m/min,牵引速度从原有的3 m/min增加到4 m/min,确保设备能良好地完成截割任务。在技术引入下,该煤矿的整体开采效率提高30%^[6]。

智能控制技术运用下,采煤机还可完成远程操控。

其中，地面控制中心会为工作人员提供实时的采煤机设备信息，如具体位置、各部件运行工况等，工作人员可运用监控系统所捕捉到的工作画面与设备参数，了解当前的开采状况，并利用远程控制终端完成设备远程操控。例如：当设备故障时，工作人员无需下井，通过地面远程控制便可调节截割参数或者关闭设备，避免因环境危险引发安全事故。与此同时，远程操控还可实现多设备协同，进一步增强生产的协调性，使各设备能在自身的采煤区域有效作业，减少互相干扰，保障煤矿开采的有序推进^[7]。

3.4 智能控制技术在煤矿带式输送机中的运用

带式输送机是煤矿生产的重要设备，其主要工作是将煤炭资源从采区运输到地表或者加工厂，其核心参数如表 1 所示。现阶段，随着采矿产业现代化的持续推进，煤炭开采亟需借助智能控制技术的引入，完成皮带转速张紧度智能化调节，以此保障开采的连续性，提高煤炭运输成效。现阶段市面上的智能带式输送机，其以 PLC 控制系统为核心，融入变频驱动装置以及各类传感元件。该系统会有效探测输送设备的参数情况，然后将数据传递给 PLC 处理模块，PLC 处理模块则会结合实际工况得出最佳参数设定值。当驱动电机变频装置得到此参数设定值时，便会有效更改变频输出信号，进而调整输送带的运行数据。此种智能技术的融入既可实现有效调控，又能保障工作效率，减少设备运行所引发的额外支出。

表 1 带式输送机核心技术参数

项目	参数数据
输送材料内容	箱子
输送材料规格 (L*B*H) /mm	max600*540*270
单个材料的重量 /kg	max25
运行噪声 /dB (A)	≤ 70
输送带宽度 /mm	520
输送带设置高度 /mm	1 200

3.5 智能控制技术在掘进机中的运用

智能控制技术可为掘进机运行提供精准的导航和定位，从而使其能更好地完成掘进操作。其原理是将惯性导航系统与卫星定位融合在一起，借助卡尔曼滤波算法去除干扰信号，精准地确认掘进机位置和姿态。然后结合前期巷道设计参数，包括中心线、坡度等，有效计算掘进机的运行方向和轨迹，实现驱动控制，使掘进机可沿着预设方向自动前进。在掘进期间，当遇

到地质变化或其他干扰因素时，控制系统也会快速分析设备运行偏差，有效控制运行参数，使其能保持原有设计轨迹运行，保障施工精度。例如：某巷道掘进作业期间，受外在因素干扰，智能掘进机出现了巷道偏差，但受智能控制影响，其偏差一直在 ±50 mm 以内，能满足高精度施工需要。

智能控制技术在煤矿产业中发挥着重要作用，具有重要的应用价值。企业要继续创新技术应用形式，将技术运用在不同的工作场景中，以此强化设备运行管控水准，在降低设备故障产生概率的基础上，打造更为安全稳定的施工环境，为产业智能化升级与转型奠定有利基础^[8]。

4 结束语

智能控制技术可在技术赋能下解决过往煤矿机电设备运行效率不足、能耗高的问题。从实践来看，智能控制技术可有效控制故障停机时间，在缩减能耗的基础上提高生产运行效率，尤其是在井内监测，提升机、采煤机、煤矿带式输送机、掘进机等设备运用中具有显著成效。煤矿产业要积极引入智能控制技术，将其作为转型升级的有力支撑，并将视角放在技术集成、标准完善等方面，以此助推智能控制在煤矿产业的广泛应用。

参考文献:

- [1] 聂猛猛,宗宪生.基于智能控制技术的煤矿机电设备效率提升方法研究[J].信息与电脑,2026,38(05):111-113.
- [2] 马西广,张振,王永刚.基于数字孪生的煤矿机电设备智能监控与预测性故障诊断研究[J].山东煤炭科技,2026,44(01):110-115.
- [3] 魏巍.煤矿机电设备供电安全智能监控系统设计及实践研究:基于“近场通信(NFC)”[J].中国煤炭,2025,51(S1):575-579.
- [4] 张阳,李超,符立梅,等.基于物联网技术的煤矿机电设备运行状态智能监测系统研究与应用[J].中国煤炭,2025,51(07):164-169.
- [5] 葛忠林.基于智能感知技术的煤矿机电设备故障诊断方法研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):82-84.
- [6] 王豪杰,刘宇飞,张帅.智能控制技术在煤矿机电设备中的应用分析[J].煤炭新视界,2024(01):134-136.
- [7] 高锋,闫文.智能控制技术在煤矿机电设备中的运用研究[J].中国设备工程,2023(08):28-30.
- [8] 张元虎,王文星.关于智能控制技术在煤矿机电设备中的应用分析[J].内蒙古煤炭经济,2022(09):51-53.

三维激光扫描技术在工程测绘中的应用探析

岳晨晨

(东营市金海海洋工程技术咨询有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 本文聚焦工程测绘向高精度、高效率、智能化转型的核心需求, 针对传统测绘技术在复杂场景下数据采集效率低、细节还原度不足等问题, 系统分析该技术在工程测绘中的应用路径、技术优化方法及质量控制要点。通过技术适配分析、工程案例验证与多场景应用对比, 梳理适配不同领域的三维激光扫描作业流程, 优化点云数据处理、多源数据融合、精度校正等关键技术环节, 以高速公路隧道测绘与矿山巷道监测工程为案例验证, 以期对提升工程建设与运维阶段的测绘数据精准度和应用效率有所裨益。结果表明: 优化后的三维激光扫描作业模式可将平面测量中误差控制在 ± 1.5 cm 以内, 数据采集效率较传统全站仪测量提升 8 倍, 复杂区域测量覆盖率达 100%, 成果一次验收合格率 99%。

关键词 三维激光扫描; 工程测绘; 点云数据处理; 精度控制; 多场景应用

中图分类号: P21; TN24

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.008

0 引言

工程测绘作为工程建设全生命周期的基础环节, 直接决定工程设计的科学性、施工的精准性与运维的安全性。当前工程建设向大型化、复杂化、精细化方向快速发展, 山地隧道、超高层建筑、矿山巷道等复杂场景对测绘技术的精度、效率和全域覆盖能力提出更高要求。传统测绘技术以单点测量为主, 存在作业周期长、复杂区域数据缺失等问题, 难以满足现代工程测绘的多元需求。三维激光扫描技术作为非接触式空间数据采集的核心技术, 突破了传统测绘的单点测量模式, 可实现毫米级精度的全空间数据快速采集, 形成完整的点云数据体系, 为工程测绘提供全新技术路径。结合近三年工程测绘行业创新实践, 本文从技术应用适配、关键技术优化、质量控制机制、工程案例验证等方面, 系统探析三维激光扫描技术在工程测绘中的应用体系, 为该技术在不同工程领域的标准化、规模化应用提供可参考的解决方案。

1 三维激光扫描技术在工程测绘中的应用体系构建

1.1 应用体系整体框架

基于工程测绘“基准建立—数据采集—处理分析—成果应用”的全流程特性, 结合三维激光扫描技术的技术优势, 构建“基准适配—精准采集—智能处理—多元应用”四级闭环应用体系, 各层级数据双向贯通、技术深度协同。基准适配层以工程测量统一基准为核

心, 实现三维激光扫描数据与工程施工、设计基准的无缝对接, 破解坐标系统不统一、数据无法直接应用的难题; 智能处理层通过点云数据去噪、分割、融合与建模, 提升数据的有效性与可用性, 形成适配工程应用的三维模型与二维成果; 多元应用层将处理后的成果应用于工程设计、施工监测、运维管理等环节, 实现测绘数据的全生命周期价值挖掘, 形成技术与工程应用的深度融合模式^[1]。

1.2 多场景技术适配方案

针对不同工程领域的场景特点与测绘需求, 制定差异化的三维激光扫描技术适配方案, 实现技术与场景的精准匹配。交通工程中的高速公路隧道、桥梁等结构, 采用车载三维激光扫描系统, 结合惯性测量单元 (IMU) 与 GPS 定位, 实现移动状态下的快速数据采集, 扫描速率达 120 万点/秒, 适配隧道内光线不足、空间狭窄的作业环境, 单站扫描覆盖半径可达 3 km; 建筑工程中的超高层建筑、古建筑等, 采用地面式高精度三维激光扫描仪, 相位差扫描模式实现亚毫米级精度测量, 精准捕捉建筑外立面、构件细节的三维信息, 点云密度可达 50 点/m² 以上, 满足建筑变形监测、构件检测的需求; 矿山工程中的巷道、采场等区域, 采用便携式三维激光扫描设备, 设备重量控制在 5 kg 以内, 适配矿山巷道复杂地形与恶劣环境, 实现巷道轮廓、采场形态的快速扫描, 数据采集效率较传统测量提升 8 倍以上^[2]。

作者简介: 岳晨晨 (1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程测绘。

1.3 点云数据智能处理技术

构建“去噪—分割—融合—建模”的点云数据全流程智能处理体系,提升数据处理的效率与精度。采用基于深度学习的自适应去噪算法,自动识别并过滤扫描过程中产生的噪声点、干扰点,噪声过滤准确率达 95% 以上,有效解决粉尘、遮挡等因素导致的数据失真问题;针对多站扫描数据的拼接融合,采用标靶定位与特征点匹配相结合的方式,标靶中心定位精度达 1~3 cm,残缺标靶定位精度较传统质心法提升 1~4 cm,实现多源点云数据的无缝拼接,拼接误差控制在 ± 2 mm 以内;结合 BIM 技术,将处理后的点云数据转化为参数化三维模型,实现与工程设计模型的精准对比,生成可视化偏差分析报告,为工程质量检测与整改提供明确方向^[3]。

1.4 多源数据融合处理技术

推动三维激光扫描点云数据与全站仪、GPS、机载 LiDAR 等多源测绘数据的深度融合,构建全域、高精度的工程测绘数据体系。统一多源数据的坐标系统与高程基准,采用 1985 国家高程基准与 2000 国家大地坐标系,实现数据的空间基准统一;将三维激光扫描数据与机载 LiDAR 数据融合,实现工程区域宏观地形与微观结构的一体化测绘,满足工程设计与施工的多元数据需求;融合后的测绘数据可直接应用于工程数字孪生模型构建,实现工程结构的三维可视化展示与动态监测,为工程运维管理提供数据支撑。

2 三维激光扫描技术应用的质量控制机制

2.1 三维质量评价指标体系

基于工程测绘行业标准与三维激光扫描技术应用实践,建立涵盖精度、完整性、实用性的三维量化质量评价指标体系^[4]。在精度指标方面,地面式扫描平面中误差 $\leq \pm 1.5$ cm、高程中误差 $\leq \pm 2$ cm,车载式扫描平面中误差 $\leq \pm 3$ cm、高程中误差 $\leq \pm 4$ cm,构件细节测量精度 $\leq \pm 0.5$ mm;实用性指标规定处理后的成果可直接对接 BIM、CAD 等工程设计软件,技术文档与原始数据齐全率 100%,满足工程设计、施工、验收的多元应用需求。

2.2 事前预防阶段质控措施

编制专项三维激光扫描作业技术设计书,明确作业依据、设备参数、扫描路线与质量要求,结合工程场景特点制定差异化作业方案;对扫描设备、定位设备等进行全面校准,包括激光发射器精度、角度编码器、GPS 接收机等,误差超标的设备禁止入场,关键设备配

备备用装置;开展技术交底与实操培训,重点讲解复杂场景扫描方法、点云数据处理技巧与精度控制要点;对工程现场进行实地踏勘,清理扫描区域的遮挡物,布设高精度标靶与控制点,控制点间距根据工程规模设定为 50~200 m,确保扫描数据的拼接精度^[5]。

2.3 事中控制阶段质控措施

建立动态质量巡查机制,对扫描作业过程进行全程监控,及时纠正不规范作业行为;数据采集阶段随机抽取 10% 的扫描区域进行重复扫描,核查数据的稳定性与一致性,发现数据异常及时停机排查,分析原因并调整作业参数;点云数据处理采用“双人双机”平行计算模式,对去噪、拼接、建模等关键环节进行双重校验,数据处理差异率超 0.2% 时重新处理;搭建实时质量监控平台,将扫描数据与工程设计值动态对比,超限数据自动预警并追溯原因,通过调整扫描参数、优化处理算法等措施及时纠偏。

2.4 事后验收阶段质控措施

按《测绘成果质量检查与验收》(GB/T 24356-2023)要求开展全要素检查,内业核查成果格式、数据精度与元数据完整性,采用专业软件进行精度分析与逻辑校验;外业随机抽查不低于 10% 的关键部位,重点核验测量精度与成果一致性。验收合格出具质量检查报告,明确成果等级与使用范围;不合格成果限期整改并重新验收,建立整改台账,跟踪整改进度,确保成果质量符合规范要求^[6]。

2.5 典型质量风险防控措施

针对复杂环境下的扫描精度偏差问题,采用标靶加密布设与实时定位校正相结合的方式,提升扫描数据的拼接精度,隧道、巷道等封闭场景标靶布设间距不大于 50 m;针对数据融合误差问题,统一多源数据的处理标准,对融合区域进行人工复核修正,确保数据的一致性;针对成果应用适配性问题,根据工程需求输出多样化成果,满足不同环节的应用需求。

3 工程案例验证与效果分析

3.1 案例概况

选取高速公路隧道测绘工程与矿山巷道监测工程两个典型案例,验证三维激光扫描技术在工程测绘中的应用效果。高速公路隧道工程全长 3.5 km,隧道内空间狭窄、光线不足,测绘需求为隧道轮廓精准测量与变形监测,采用车载三维激光扫描系统开展作业;矿山巷道监测工程为某金属矿地下巷道,巷道断面不规则、地形复杂,测绘需求为巷道轮廓测量与围岩变

形监测,采用便携式三维激光扫描设备实施作业。两个项目均采用本文构建的应用体系与质量控制机制,重点监测测量精度、作业效率、成果合格率等核心指标,验证技术方案的实操性与可靠性。

3.2 应用效果量化分析

对比传统测绘技术,三维激光扫描技术在工程测绘中的应用成效显著。在精度方面,高速公路隧道测绘平面中误差1.2 cm、高程中误差1.8 cm,矿山巷道测绘平面中误差1.5 cm、高程中误差2.0 cm,均优于质量评价指标要求,较传统全站仪测量精度提升50%以上;在效率方面,高速公路隧道测绘作业周期从传统模式的15天缩短至2天,矿山巷道测绘作业周期从7天缩短至1天,数据采集效率提升8~10倍,数据处理自动化率达90%,大幅减少人工干预;在覆盖完整性方面,两个项目均实现复杂区域100%覆盖,有效解决传统测绘无法进入的狭窄区域、遮挡区域数据缺失问题;在成果质量方面,两个项目成果一次验收合格率均达99%,整改率100%,成果数据直接应用于工程施工与变形监测,为工程安全建设提供精准数据支撑;在经济效益方面,通过减少人工投入、缩短作业周期、降低返工率,高速公路隧道工程节约测绘成本60%,矿山巷道工程节约测绘成本55%,综合效益显著。

4 三维激光扫描技术应用推广与优化建议

4.1 技术应用推广策略

结合不同工程领域与场景特点,优化三维激光扫描技术应用方案,推动技术的标准化、规模化应用。针对交通、建筑、矿山等不同工程领域,制定行业专属的三维激光扫描作业规程,明确设备选型、作业流程、质量控制等要求;针对大型工程与中小型工程的不同需求,推出差异化技术方案,大型工程采用高端高精度扫描设备,实现精细化测绘,中小型工程采用经济型设备与简化作业流程,降低应用成本。强化示范引领作用,选择典型工程打造三维激光扫描技术应用标杆项目,通过现场观摩会、技术交流会、行业期刊等形式,分享技术应用经验与成效;加强政策支持,建议行业主管部门出台技术推广激励政策,对采用三维激光扫描技术且成果质量优良的测绘项目给予资金补贴或评优加分,引导测绘单位主动应用新技术、新方法。

4.2 技术优化发展建议

推动三维激光扫描技术的智能化升级,融合人工智能、大数据、5G等前沿技术,开发全自动扫描路径规划系统,实现设备自主避障、自主扫描,减少人工

干预;优化点云数据处理算法,研发轻量化点云数据处理软件,提升数据处理效率,降低软件使用门槛,满足基层测绘单位的应用需求。加强多技术融合应用,推动三维激光扫描技术与BIM、数字孪生、物联网等技术的深度融合,构建工程测绘与工程建设、运维一体化的技术体系,实现测绘数据的全生命周期应用;加强海洋、极地等特殊工程场景的技术适配研究,研发适用于特殊环境的防水、防腐蚀、抗低温扫描设备,拓展技术应用范围。

5 结束语

三维激光扫描技术作为现代工程测绘的核心技术之一,有效解决了传统测绘技术在复杂场景下的应用难点,为工程测绘高质量发展提供了全新技术路径。本文构建的“四级闭环应用体系+三维质量评价指标+全流程质量控制”模式,通过多场景技术适配、点云数据智能处理、多源数据融合、全流程质量防控等关键技术创新,实现了三维激光扫描技术在工程测绘中的标准化、精准化应用。高速公路隧道与矿山巷道监测工程的案例验证表明,三维激光扫描技术应用体系可将平面测量中误差控制在 ± 1.5 cm以内,作业效率较传统测绘技术提升8倍以上,成果一次验收合格率达99%,兼具精度优势、效率优势与经济效益。未来,应进一步推动三维激光扫描技术的智能化、小型化、低成本化发展,加强与BIM、数字孪生等技术的融合应用,完善行业应用标准与人才培养体系,推动技术在更多工程领域的规模化、标准化应用。通过持续的技术创新与实践优化,不断提升三维激光扫描技术在工程测绘中的应用水平,为我国工程建设高质量发展提供更坚实的测绘技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘甄文,赵子龙,李国柱,等.一种基于三维激光扫描仪和激光水准仪的建筑物形变检测方法[J].城市勘测,2024(03):152-156,160.
- [2] 连文峰.三维激光扫描技术在建筑测绘中的应用研究[J].居舍,2023(32):165-168.
- [3] 周枫,朱丹.建筑测绘中三维激光扫描技术的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(22):95-97.
- [4] 何宁杉,李俊,罗军.三维激光扫描技术在大中型航站楼不停航改造中的应用[J].安装,2025(07):88-90.
- [5] 邓杰.SLAM三维激光扫描技术在房产测绘中的应用[J].消费电子,2025(15):209-211.
- [6] 杨晓东.三维激光扫描技术在桥梁工程测绘过程的应用研究[J].模具制造,2025,25(07):153-155.

BIM 技术在复杂形态建筑设计中的优化应用研究

黄泽俊

(潜山市潜润城建勘察设计有限公司, 安徽 潜山 246300)

摘要 为解决复杂形态建筑传统设计模式下建模低效、专业协同脱节、方案落地性差、细节管控缺失等行业难题,以 BIM 技术全流程应用为核心,针对复杂形态建筑前期构思、中期深化、后期落地三大核心阶段展开系统性研究。依托 BIM 参数化建模、三维可视化、多专业协同、性能模拟等核心特性,细化前期造型优化与可行性预判、中期专业协同与构件精细化设计、后期施工适配与信息传递的实操路径,搭配完善的技术体系与人才队伍双重保障,破解异形造型设计与实施的各类瓶颈,兼顾建筑艺术创意与工程落地性,提升复杂形态建筑设计的整体精度、效率与质量,旨在为同类异形建筑项目设计提供可借鉴的技术思路。

关键词 BIM 技术; 复杂形态建筑; 参数化建模; 施工适配性; 多专业协同

中图分类号: TP3; TU2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.009

0 引言

当前建筑设计行业朝着多元化、艺术化方向发展,曲面、异形、非线性等复杂形态建筑层出不穷,成为彰显城市特色、表达设计创意的重要载体。这类建筑造型独特、结构复杂、专业交叉密集,传统二维设计模式存在可视化不足、信息传递滞后、修改成本高、落地风险大等短板,难以满足精细化设计与高效化实施的需求。BIM 技术以数字化建模、全周期信息管理为核心优势,打破传统设计的技术壁垒,贯穿建筑设计全流程,为复杂形态建筑的创意落地、质量管控、效率提升提供全新解决方案。深入探究 BIM 技术在复杂形态建筑设计中的优化路径,对推动异形建筑设计行业提质升级具有重要的现实意义。

1 BIM 技术赋能复杂形态建筑前期设计优化

1.1 复杂形态参数化建模优化

复杂形态建筑往往以曲面、异形、非线性造型为核心特征,传统二维绘图与常规三维建模软件难以承载这类造型的构建需求,不仅操作繁琐,更无法实现造型的动态调控。BIM 参数化特性恰好直击这一核心痛点,依托参数驱动的建模逻辑,彻底破解复杂形态建模难题,同步实现造型精准化与设计高效化双重目标。BIM 建模平台打破了传统软件对几何形态的束缚,能够灵活适配双曲面、扭曲形体、不规则肌理等各类复杂

造型的构建需求,摆脱了手工建模的刻板限制,让设计师的创意构想得以完整落地。同时,参数化建模将复杂形体拆解为可调控的参数模块,设计师只需调整关键参数数值,就能快速生成不同造型方案,省去反复修改、重新建模的冗余工作量,大幅压缩前期造型设计周期^[1]。此外,参数化建模依托精准的数字逻辑构建形体,每一处线条、曲面、节点都有明确的参数依据,能最大限度保障复杂形体的几何精度,杜绝传统建模中出现的造型扭曲、尺寸偏差、细节失真等问题,为后续设计深化筑牢基础,让复杂形态的前期构思既具备艺术美感,又拥有数字层面的严谨性。

1.2 前期方案可行性预判优化

复杂形态建筑的前期方案不仅要照顾造型创意,还要考虑落地可行性,单纯依靠二维图纸难以完整展现方案全貌,很容易出现设计构想和实际场景脱节的问题。BIM 借助三维可视化和动态模拟能力,建立起全方位的方案研判体系,提前找出风险、验证合理性,打牢复杂形态方案的落地基础。BIM 三维模型能够立体化呈现建筑造型、空间尺度、外部肌理,完全消除二维图纸带来的视觉偏差、信息遗漏问题,不管是设计团队内部沟通,还是跟建设方、规划部门对接,都能直接传递设计意图,明显提升方案沟通效率,减少因理解偏差带来的方案返工。这样能够联动基础分析模块,对复杂形态的结构受力、内部空间布局进行初步

作者简介: 黄泽俊(1990-),男,本科,工程师,研究方向:建筑学。

模拟,快速发现方案中存在的受力不合理、空间拥堵、功能缺失等先天缺陷,及时改动造型与布局设计,避免问题留到后期环节。BIM技术可以整合场地地形、周边建筑、环境气候、规划红线等多维数据,将复杂建筑模型放到真实场景中进行适配性分析,判断造型高度、体量、外观和周边环境的协调性,确保方案既符合场地限制条件,又能融入整体城市风貌,让前期设计方案脱离纯创意层面,真正具备落地实施的基础条件。

2 BIM技术支撑复杂形态建筑中期设计优化

2.1 多专业协同设计优化

复杂形态建筑涉及建筑、结构、机电、装饰等多个专业,各专业设计逻辑相互交织,传统分散式设计模式极易引发信息断层、专业冲突等问题,严重影响设计进度与质量。搭建BIM协同设计平台,能够整合全专业设计资源,破解复杂形态下多专业设计冲突与脱节的行业难点。BIM协同平台打破了各专业独立建模、分散作业的壁垒,建筑、结构、机电等专业设计师可在同一数字模型中同步开展设计工作,所有设计数据实时更新、共享互通,无需反复传递文件、核对信息,消除专业间的信息差。协同平台自带碰撞检测功能,能够自动筛查结构构件与机电管线、建筑造型与内部设施、不同专业管线之间的交叉冲突,精准定位冲突点位,设计师可在深化阶段及时调整设计方案,提前消除各类设计漏洞,避免施工阶段因碰撞问题引发大规模变更。此外,平台可统一各专业的建模标准、信息编码、图纸规范,确保全专业设计口径一致,让复杂形态的建筑外观、内部结构、管线布局形成有机整体,杜绝因标准不统一导致的设计割裂,保障复杂形态建筑设计的完整性与连贯性。

2.2 复杂构件精细化设计优化

复杂形态建筑的异形构件构成设计与落地的关键难点,这种构件造型比较独特、规格也不一样、连接复杂,传统粗放型设计无法满足施工需要。BIM技术借助精细化建模,深入拆解构件细部,做到复杂异形构件的标准化管控和可落地化设计。BIM精细化建模能够准确刻画异形构件的尺寸参数、材质特性、连接节点、受力断面等详细信息,结合复杂建筑的整体受力逻辑同造型需求,改进构件的形态与构造设计,保证每一个构件既贴合建筑整体造型风格,又可以满足结构承重、安全稳固的核心要求^[2]。BIM技术还能搭建专门的异形构件信息库,把各类常用异形构件的参数、规格、工艺都放进库里,做到同类构件的参数化复用与快速调用,降低重复设计工作量,统一构件设计标准,提高异形构件的设计效率,这样有助于让BIM模拟异形

构件的工厂加工、现场拼装逻辑,结合施工吊装、拼接工艺,改进构件的拆分方式与组合方案,让构件拆分更合理、拼装更便捷,解决复杂构件加工难、安装难的问题,让精细化设计成果真正适应后续施工环节,实现设计与施工的无缝衔接。

2.3 性能化设计模拟优化

复杂形态建筑不能只追求外观造型的独特,还要平衡好看和好用,BIM技术通过专业性能分析工具,建立全维度性能模拟体系,针对复杂形态的特点做专门优化,让建筑既有艺术质感又有实用价值。BIM模型可以结合采光、通风、能耗分析软件,进行精细模拟运算,根据复杂建筑的曲面造型、开窗位置、空间安排,优化采光面设计、通风路线规划、围护结构参数,减少建筑能耗损失,提升室内空间舒适度,实现复杂形态下的绿色节能设计。BIM技术还能对接结构分析模块,就异形结构开展抗震、抗风、抗荷载性能模拟,准确分析复杂形体的受力薄弱位置,调整结构布置、构件厚度和支撑体系,确保复杂建筑在极端工况下的结构安全与稳定。BIM技术可以结合复杂建筑的空间形态,模拟内部人流走向、消防疏散路线、空间使用效率,针对异形空间的死角、拥堵点做布局优化,完善疏散通道、功能分区设计,让复杂形态的空间安排更符合人体工学和使用需要,解决造型独特和功能实用难以兼顾的问题。

3 BIM技术助力复杂形态建筑后期设计落地优化

3.1 施工适配性设计优化

复杂形态的建筑在施工上遇到的困难程度要远远超过普通建筑,设计方案一旦离开施工的现实情况,很容易造成工期延误、预算超支、质量问题,应将施工需要作为中心来改进设计上的具体内容。借助BIM技术建立起设计和施工之间的连接通道,能够有效减少复杂形态建筑的施工困难以及造价成本,BIM可以做动态的施工流程模拟,把复杂构件从生产、运输、吊装到安装的整个过程进行模拟,结合施工现场的实际状况、机械设备的性能参数、施工队伍的实际能力,优化异形构件的安装先后顺序、吊装行走路线、拼接的具体时间点,避开施工中可能出现的工序互相打架、空间不够用的问题,使得施工流程更为顺畅和高效。BIM模型还能实时对接施工工艺的具体要求,设计人员可以结合现场施工条件、现有技术水平,调整构件之间的连接方法、造型上的细微之处、构造的具体做法,把复杂的施工节点尽量简化,减少现场施工的技术难度和操作上的风险,最大程度地降低施工过程中需要变更的次数^[3]。

3.2 设计信息传递优化

复杂形态的建筑设计内容信息量大,传统二维图纸传递方式很容易出现信息丢失、理解偏差,造成设计内容不能完整实现。BIM 技术依靠信息整合和数字化传递的特点,建立完整链条的信息传递系统,做到复杂形态设计信息的全面、准确传递。BIM 模型集合了建筑外形、结构数据、部件信息、机电排布、施工需求等所有维度的设计资料,全部信息集中存放、统一处理,避开了传统图纸零散、信息不完整的情况,让施工、监督等各方掌握的设计内容没有缺漏。在这个基础之上,BIM 技术能够制作出三维可视化的施工图纸、节点详细图、部件加工图,取代传统的二维平面图、立面图、剖面图,用直观的立体形式展示复杂造型和部件细节,降低施工人员对异形设计的理解难度,减少由于图纸认识偏差带来的施工错误^[4]。BIM 技术还架设起设计和施工之间的信息交流通道,施工方可以随时反馈现场遇到的问题,设计师能够迅速修改模型并同时更新信息,打通设计和施工的信息阻隔,让每一个设计改动都能准确传达到施工阶段,保证建筑造型、细节、功能完全符合最初的设计思路,实现设计成果的完全落实。

4 BIM 技术优化应用的保障策略

4.1 技术应用体系搭建

BIM 技术在复杂形态建筑设计中的应用并非简单的软件操作,需要配套完善的技术体系支撑,构建适配复杂形态建筑的专属 BIM 应用体系。规范全流程应用标准,才能让技术价值充分释放。针对复杂形态建筑的异形建模、参数调控、协同设计需求,制定专属的 BIM 建模标准、信息交付标准、模型精度标准,明确不同设计阶段的模型要求、参数编码规则、信息录入规范,避免因标准混乱导致模型质量参差不齐。同时,整合适配异形设计的 BIM 软件与专业插件,打通建模、模拟、分析、出图各环节的软件壁垒,形成覆盖设计全流程的软件工具链,满足复杂形态参数化建模、性能模拟、构件深化等专项需求^[5]。此外,建立设计全流程 BIM 应用管控机制,从前期方案建模、中期专业协同,到后期设计交付,明确各阶段的应用要点、责任主体、管控流程,实时监控模型质量与应用进度,及时解决技术应用中的卡点问题,让 BIM 技术应用有章可循、有序推进,杜绝技术应用流于形式,真正为复杂形态设计提质增效。

4.2 设计团队能力升级

BIM 技术和复杂形态设计这两个方面进行深度结合,对设计团队的专业素质提出更加严格的标准。增

强团队的 BIM 实际操作技能和异形设计融合能力,筑牢技术应用根基,能够确保 BIM 技术优化效果真正落到实处。加强设计师在 BIM 专项实操技能上的训练,着重围绕参数化建模、协同设计、性能模拟、精细化出图等核心操作展开培训,使设计师能够熟练把握异形造型构建、参数调整、模型优化的具体方法,突破传统设计思维的框架,灵活运用 BIM 工具来完成复杂形态设计任务。培养设计师跨专业协同设计思维也很关键,打破单一专业带来的设计限制,引导设计师从建筑整体出发,同时考虑结构、机电、施工等多方面需求,借助 BIM 协同平台实现多专业之间的配合设计,从而提升团队整体协同效率。积累复杂形态 BIM 设计实战经验,建立项目案例库,整理不同类型异形建筑的设计要点、技术难点、优化思路,让团队在案例复盘和实战演练中归纳总结方法,持续提升 BIM 技术与复杂形态设计的融合水平,打造既有创意能力又具备技术实力的专业设计团队,为 BIM 技术的深度应用提供人才支撑。

5 结束语

BIM 技术重构了复杂形态建筑的设计逻辑与实施路径,贯穿前期、中期、后期全设计周期,化解了异形建筑创意表达与工程实施的核心矛盾,实现艺术创意、技术管控、工程落地的有机统一。依托 BIM 数字化特性,既能释放复杂形态建筑的设计创意,又能严控设计精度、规避实施风险、压缩冗余成本,推动复杂建筑设计从粗放式向精细化、从分散式向协同化转型。搭建专属技术体系、强化设计团队素养,能进一步挖掘 BIM 技术应用潜力,助力复杂形态建筑设计提质增效。随着 BIM 技术与参数化设计、智能分析深度融合,必将为复杂形态建筑设计提供更强大的技术支撑,推动建筑设计行业朝着数字化、高品质方向持续迈进。

参考文献:

- [1] 姚旭. BIM 技术在土木建筑能耗分析与节能优化中的实践探究[J]. 陶瓷, 2025(10):146-149.
- [2] 周永, 吕梁, 潘建云, 等. 超高层建筑框支梁设计与施工 BIM 技术应用[J]. 工程建设与设计, 2025(19):199-202.
- [3] 赵家敏, 刘亚基, 黄杨彬. 建筑机电安装 BIM 中间件融合技术分析[J]. 四川建材, 2025, 51(10):234-237.
- [4] 穆康. 基于专创融合的“BIM”课程教学设计与实践[J]. 教育教学论坛, 2025(41):49-52.
- [5] 王廷先. BIM 技术在建筑工程全生命周期的应用价值[J]. 中国招标, 2025(10):168-171.

建筑工程管理中的数字化转型与智能化应用探索

张 印

(安徽省宣城市泾县住房和城乡建设局, 安徽 宣城 242500)

摘 要 在数字经济时代,传统的建筑工程管理模式已难以满足现代复杂工程项目的需求,因此,数字化转型与智能化应用是建筑行业突破瓶颈、实现高质量发展的必然选择。基于此,本文对数字化转型的核心技术与关键领域进行了系统梳理,深入探讨了其在设计、施工、运维全生命周期的智能化应用场景,并提出了建筑产业现代化升级的可行思路,以期建筑行业变革提供实践参考,进而推动建筑产业现代化升级。

关键词 建筑工程管理;数字化转型;BIM;云计算;物联网

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.010

0 引言

建筑工程管理逐渐朝着以建筑信息模型(BIM)、云计算、物联网为核心的数字化方向转型,这一过程要求相关工作人员、工程机械以及材料等要素同步实现数字化。与此同时,建筑工程设计、施工、运维各阶段,通过生成式设计、智慧工地、数字孪生等技术的全面渗透应用,有助于进一步实现流程优化、效率提高以及成本控制。然而,转型过程中也必然会遇到初始投入高、数据标准缺失、复合型人才短缺等问题,所以应该以战略规划加以引导,统筹协调,从而真正推动建筑工程高质量、智能化发展。

1 建筑工程管理数字化转型的核心技术与关键领域

1.1 核心驱动技术

1. BIM。BIM是数字化转型最坚实、最核心的基础,其用三维数字化模型替代传统二维图纸,把几何信息、物理属性、功能特征都完整、有序地表达出来,又自然地贯穿于建筑设计、施工、运维全生命周期,能实现信息无损传递、实时共享。更难得的是,BIM在管理中支持碰撞检测、施工模拟、工程量自动统计等应用,因此大大提高了各参与方协同工作的效率,也让项目从“经验驱动”真正转向“数据驱动”,由此解决信息孤岛、错漏碰缺等方面问题,也为之后的智能化应用打下良好基础^[1]。

2. 云计算与大数据。云计算为海量建筑数据提供了弹性、低成本的计算及存储平台,因此项目各方都可随时、随地通过互联网访问统一的数据及应用,协

同工作更加高效。大数据技术能对多源、异构的建筑数据加以采集、整合、分析,挖掘数据中隐含的价值。例如:从历史成本、进度数据中预测未来项目的资金流及工期风险,实现从“事后补救”转向“事前预测”,也由此真正支撑起精细化管理的理念。

3. 物联网。物联网技术把施工现场所布置的各种传感器与人员、机械、材料、环境等物理实体以及数字世界连接在一起,因而能对施工现场全要素状态做到实时、自动、可靠的感知,又与BIM模型、业务系统联动,为管理决策提供数据支撑。塔吊防碰撞、人员精准定位、材料自动盘点等功能的实现都运用了物联网技术,也让管理从静态、滞后真正转变为动态、实时,施工现场的管控能力及安全水平都因此大大提升^[2]。

1.2 关键转型领域

1. 人员管理数字化。人员管理数字化以实名制为基础,可以通过物联网卡、生物识别、智能安全帽等方式实现人员精准考勤、进出场管理及实时定位,既提高了考勤效率,又有利于工资结算的准确性,还能与岗位技能数据库充分地联动,保证特殊工种持证上岗,人力资源调配更加合理。一旦发生异常情况,系统能自动报警,切实保护人员安全,由此真正从“粗放式”转向“精细化、人性化”的管理。

2. 机械设备管理数字化。该领域致力于推动机械设备全生命周期智能化管理目标的实现。在工程施工过程中,通过在塔吊、施工电梯上加装传感器及物联网模块,可实现对设备运行状态的实时监测,为智能

作者简介:张印(1984-),男,本科,工程师,研究方向:房屋建筑工程。

调度打下良好基础。数字化系统还能自动、可靠地采集设备运行时间、油耗等数据,据此准确预判保养周期,做到真正的预防性维护。另外,设备具备自动预警和限位保护功能,塔吊防碰撞、群塔作业干涉回避等措施,可以有效避免因设备操作不当而引发的重大安全事故。

3. 材料管理数字化。材料管理数字化涉及采购、进场、验收、入库、领用、消耗等各个环节。通过为重要构件及各批次材料贴上二维码或 RFID 电子标签,使每一件材料都具备唯一的“数字身份证”^[3]。进场时用地磅系统配合二维码扫描即能自动完成称重、验收、库存更新等工作;施工过程中可以完成领用、安装信息的实时、准确记录,从而使材料追溯变得十分便捷,消耗核算更加简便。这种方式解决了传统管理中账物不符、损耗不明、追溯困难等问题,在一定程度上减少了材料浪费与丢失现象,实现库存最优控制与降低成本的目标。

4. 环境管理数字化。环境管理数字化是以物联网传感网络为基础,对施工现场各类环境要素实行 7×24 小时不间断、高频率的实时监测。数字化管理系统能自动、可靠地采集扬尘、噪声、风速、温湿度等数据,并在现场大屏及远程管理平台及时显示。当监测数据超过设定阈值时,系统即自动联动喷淋降尘、雾炮等降尘设备及时处置。同时,还能够对施工能耗进行分项计量与动态监控,从而推进绿色施工及节能减排。

5. 质量管理数字化。质量管理数字化摒弃了传统的纸质记录方式,转而利用移动端 APP 和云平台。质量检查人员可在现场通过手机或平板,直接进行检验批的验收、拍照、记录数据,并利用电子签名进行确认,数据实时同步至云端,确保真实性与时效性。发现质量问题时,可通过系统立即发起整改流程,明确责任人、限时整改并闭环追踪。所有质量数据和影像资料均与 BIM 模型构件关联,形成完整的、可追溯的电子质量档案,为后续运维和问题复盘提供数据支持,极大地提升了质量管理效率和标准化水平。

6. 安全管理数字化。安全管理数字化以 AI 计算机视觉技术为核心,通过分析部署在工地关键区域的摄像头视频流,自动识别各类安全隐患并进行预警。系统能够精准识别人员未佩戴安全帽、未系安全带、区域入侵、明火烟雾等危险行为与状态。一旦识别到风险,系统会立即在后台报警,并可通过现场音柱进行语音提醒,通知安全管理人员及时干预。这种“机器不停巡检”的模式,改变了过去依赖人力巡查、易有疏漏的被动局面,实现了从事后处理到事前预警的转变,构筑了一道坚实的、智能化的安全防护网^[4]。

2 建筑工程管理中的智能化应用场景

2.1 设计阶段的智能化

设计阶段的智能化应用,核心在于利用先进技术实现从“人工设计”到“智能生成与优化”的跨越。首先,生成式设计在人工智能的驱动下大放异彩。设计师只需输入设计目标、约束条件和性能要求, AI 算法便能自动生成成百上千个可行的设计方案供选择,极大地拓展了设计创意的边界。其次,基于 BIM 的自动化审查将设计规范代码化,系统能自动检查设计模型是否符合消防、节能、无障碍等法规要求,快速定位不合规之处,将审查工作从数天缩短至数小时,显著提升效率和准确性。最后,性能模拟的前置与集成至关重要。在设计早期,设计方案便可与 BIM 模型结合,进行实时的能耗、光照、人流疏散、结构应力等模拟分析,并根据结果自动优化设计参数,实现“性能驱动设计”,从源头保障建筑的安全性、舒适性与绿色低碳,有效避免施工阶段的返工,降低成本与风险。

2.2 施工阶段的智能化

1. 进度智能管控。进度智能管控通过将三维 BIM 模型与时间维度乃至成本维度深度绑定,实现施工进度可视化模拟。管理者可以直观地预览整个项目的建造过程,提前发现潜在冲突与工序不合理之处。在施工过程中,定期使用无人机进行航拍,通过实景建模技术生成与 BIM 模型可对比的现场三维现状模型,系统能自动计算实际工程量与计划完成量,精准、客观地评估进度偏差,为决策提供远超传统甘特图的直观、数据化支持,从而实现进度的精准管理与动态调控。

2. 成本智能管控。成本智能管控建立在 BIM、大数据和云计算技术之上。通过 5D BIM 模型,将工程量清单、施工进度与成本信息自动关联。现场完成的每一项工程产值都能被实时或自动计算,并同步更新到云端成本数据库中。系统通过对比计划成本与实际成本,对材料超支、人力成本异常等风险进行自动预警。这种“动态成本”管理模式,改变了传统事后记账的被动局面,实现了对项目资金的实时监控与预测,让管理者能够及时采取纠偏措施,有效保障项目的经济效益。

3. 安全智能监控。安全智能监控以物联网和 AI 视频分析技术为核心,构筑了全天候的“电子安全员”体系。部署在工地关键区域的摄像头,通过计算机视觉算法,能够 7×24 小时不间断地自动识别(未佩戴安全帽、未系安全带、危险区域入侵、明火烟雾等)安全隐患。一旦识别到风险,系统就会立即在管理平台触发报警,并联动现场音柱进行语音提醒,直接将预警信息推送至安全管理人员手机端。这种智能监控模式,实现了从“人防”到“技防”的转变,从事后

追溯变为事前预警，极大地提升了安全管理的效率和响应速度。

4. 物料智能管理。物料智能管理通过物联网技术赋予每一批甚至每一个重要构件唯一的“数字身份证”。从供应商发货到进场验收，通过地磅无人值守系统和手持终端扫描，即可自动完成称重、收货与库存信息更新，数据实时同步。在施工过程中，物料的领用、安装部位和时间均可被扫描记录，实现从宏观库存到微观安装位置的全过程精准追踪。这不仅有效避免了材料丢失和浪费，实现了精益化库存管理，更能为后续的进度款支付和运维阶段的产品溯源提供精确的数据支撑。

5. 协同智能管理。协同智能管理基于统一的云平台，打破了项目参与各方之间的时空和信息壁垒。所有文档、图纸、模型和流程均在该平台上集中管理和共享。无论是设计变更、工序报验还是问题整改，均可通过PC或移动端发起线上流程，实现任务自动流转、审批线上签名、信息实时同步。这种模式确保了所有成员始终基于唯一、最新的信息进行协同工作，极大地减少了因沟通不畅导致的返工和延误，提升了整体管理效率与决策速度。

2.3 运维阶段的智能化

运维阶段的智能化是在设计、施工阶段形成的BIM模型基础上融合物联网实时数据所创建的一个与实体建筑完全同步、虚实映射的虚拟模型^[5]。首先，设施设备管理从事后维修变为预测性维护，通过分析设备运行数据，系统能提前预警故障，自动生成维修工单，显著降低停机风险。其次，能源管理更加精细高效，数字孪生平台能实时监测并分析全楼的能耗数据，自动优化空调、照明等系统的运行策略，实现节能降耗。最后，在安全应急与空间管理方面，系统能实时显示人员分布，在火灾等紧急情况下规划最佳疏散路径，并能动态监控空间使用率，为优化空间布局提供数据支持。

3 数字化转型与智能化应用面临的挑战

3.1 初始投入大，回报周期长

数字化转型需要在硬件、软件、网络基础设施以及系统集成等方面进行一次性高额投资，对于利润普遍偏薄、现金流紧张的施工企业而言构成显著财务压力。更为棘手的是，智能化应用的效益往往呈现“滞后释放”特征。BIM协同对返工率的降低、物联网对材料损耗的节约、AI安全监控对事故赔偿的规避，这些收益需要在项目中期甚至竣工结算后才能体现，而短期内的成本增加却立竿见影。破解这一困境需要探索分阶段部署策略、政府补贴引导以及“云服务+按需付费”的轻资产模式，降低转型门槛并加速正向现金流回馈。

3.2 数据标准不统一

当前建筑工程领域涉及设计、施工、运维等众多阶段，每个阶段又有不同专业软件和数据格式，彼此之间缺乏统一的数据交换标准与接口规范，导致“信息孤岛”现象突出。即便同一企业内部，BIM模型中的构件命名、分类编码、计量单位也可能因项目团队不同而存在差异，使得数据在传递过程中频繁出现丢失、错位或歧义。因此，需要推动行业级数据标准化，鼓励主流软件厂商开放接口、并在企业内部建立严格的BIM执行计划。

3.3 人才缺口严重

数字化转型要求从业人员不仅要懂传统工程管理知识，还需掌握BIM建模、数据分析、物联网运维、AI工具应用等跨学科技能，而目前建筑行业的人才培养体系尚未跟上这一复合型需求。具体表现为：一方面，资深项目经理、施工员等一线骨干虽经验丰富，但普遍对数字化工具存在畏难情绪或操作不熟练，难以将系统功能与实际业务深度结合；另一方面，高校培养的BIM或信息化专业毕业生往往缺乏现场实践，对施工工艺、成本构成等底层逻辑理解不足，输出的分析结果容易出现“纸上谈兵”。因此，需要构建“内部培训+校企合作+外部顾问”的多层次人才体系，将数字化能力纳入岗位晋升与绩效考核体系，同时推动职业院校增设智能建造相关专业，从源头缓解人才供需失衡。

4 结束语

数字化转型与智能化应用正深刻重塑建筑工程管理的面貌，为行业带来前所未有的效率提升与价值创造。从BIM技术的全生命周期协同，到云计算与大数据技术的精准管控，再到物联网设备对施工现场的实时感知，技术的深度融合正将传统建筑工程从粗放式管理推向精细化、智能化的新高度。随着技术的持续发展与行业生态的不断完善，建筑行业必将迈向一个更加精益、绿色、安全的智能化新时代。

参考文献：

- [1] 宋佩佩. 数字化背景下建筑工程造价管理创新措施研究[J]. 房地产世界, 2024(17):86-88.
- [2] 张小吉. 智慧工地建筑工程数字化管理的模式创新[J]. 陶瓷, 2024(05):216-218.
- [3] 韩苗苗. 数字化技术在建筑工程成本管理中的应用研究[J]. 房地产世界, 2024(17):155-157.
- [4] 颜家乐. 建筑工程管理模式的数字化转型研究[J]. 房地产世界, 2024(16):94-96.
- [5] 王兴晨. 房屋建筑工程质量数字化监督管理研究[J]. 工程建设与设计, 2024(15):216-218.

面向船体壁面清洗的智能水下机器人控制系统优化

王浦勋¹, 逢雨婷²

(1. 青岛炬荣工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东科技大学, 山东 青岛 266555)

摘要 针对船体壁面污染物人工清洗效率低、能耗高的问题, 本研究设计了一款面向船体壁面清洗的智能水下机器人控制系统。该系统采用分布式架构, 集成主控制器、推进控制、清洗执行、环境感知和通信模块, 通过硬件系统优化、软件分层设计和能量管理策略实现高效清洗。基于刷毛与壁面作用机理建立清洗率模型, 提出自适应控制算法动态调整刷盘参数, 并采用改进 A* 算法优化路径规划, 以期为水下机器人清洗性能优化提供理论参考。实验结果表明, 当机器人移动速度 0.2 m/s、刷盘转速 200 r/min 时, 清洗效率达 388 m²/h, 能耗 163 J/m², 姿态控制精度 $\pm 2.5^\circ$, 满足船体壁面清洗的实际工况需求。

关键词 船体壁面清洗; 水下机器人; 控制系统; 清洗性能优化

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.011

0 引言

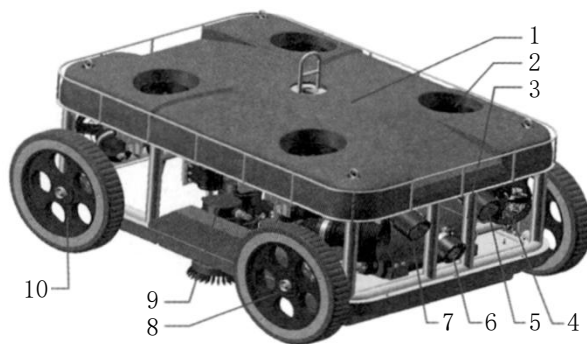
随着水产养殖工船和大型船舶不断发展, 船体壁面附着的藻类、贝类等污染物极大地影响航行效率, 也破坏养殖环境, 传统人工清洗方式存在诸多问题, 如劳动强度大、作业风险高、清洗效率低等, 亟需自动化清洗装备。当下的水下清洗机器人还存在不足, 如控制系统整合度低、清洗参数适配性差、能耗控制不到位等情况, 无法应对复杂壁面的高效清洗需求。本文依托 STM32H743IGH6 主控制器创建分布式控制系统, 通过硬件模块化设计, 软件分层架构以及多算法融合改良, 实现机器人贴壁稳定性、清洗效率和能耗的协同提升, 从而为船体壁面自动化清洗提供解决办法。

1 机器人控制系统总体设计

1.1 硬件系统架构

面向船体壁面清洗的智能水下机器人采用分布式控制系统架构, 主要由主控制器、推进控制模块、清洗执行模块、环境感知模块和通信模块组成(见图 1)。主控制器选用 STM32H743IGH6 微处理器, 集成浮点运算单元和高速外设接口, 可实现多任务实时调度。推进系统配置 8 个无刷直流推进器, 其中水平方向 4 个负责机器人姿态调整, 垂直方向 4 个提供贴壁吸附力, 单个推进器最大功率为 150 W, 额定转速 3 000 r/min。

清洗执行模块包含 4 个独立驱动的刷盘单元, 每个单元由 24 V 直流减速电机驱动, 通过增量式编码器实现转速闭环控制, 控制精度可达 ± 1 r/min。环境感知模块集成深度传感器(量程 0~100 m, 精度 ± 0.1 m)、姿态传感器(航向精度 $\pm 0.5^\circ$, 倾角范围 $\pm 180^\circ$)和双目视觉系统, 采样频率均配置为 100 Hz。通信采用脐带缆传输方式, 集成 2 芯电源线(300VDC)和 4 芯屏蔽网线(100 Mbps), 实现控制指令与视频数据的双向传输^[1]。



(注: 1-浮力材; 2-垂直推动器; 3-框架; 4-水平推进器; 5-照明灯; 6-摄像机; 7-驱动部件; 8-主动轮; 9-清洗部件; 10-从动轮)

图 1 清洗机器人

作者简介: 王浦勋(1989-), 男, 本科, 研究方向: 水下机器人。

1.2 软件分层设计

控制系统软件采用分层架构设计,分为感知层、决策层和执行层。感知层负责环境数据采集与预处理,通过卡尔曼滤波融合多传感器数据,实现机器人位姿估计,状态估计更新频率为50 Hz。决策层基于模型预测控制(MPC)算法生成运动轨迹,根据壁面污染物分布特征动态调整清洗路径,路径规划周期为200 ms^[2]。执行层采用PID控制算法实现推进器和刷盘的精确控制,其中推进器速度环PID参数为:比例系数0.8、积分时间常数0.1 s、微分时间常数0.02 s;刷盘转速环PID参数为:比例系数0.5、积分时间常数0.05 s、微分时间常数0.01 s。系统软件基于ROS2平台开发,核心功能模块包括设备驱动包、状态估计算法包、路径规划包和控制算法包,各模块间通过话题(Topic)机制实现数据交互,消息传输延迟控制在10 ms以内。

1.3 能量管理策略

为延长水下作业时间,系统设计了多模式能量管理策略。采用24 V/100 Ah磷酸铁锂电池组作为主电源,通过DC-DC转换器为各模块供电,转换效率达92%。能量管理系统实时监测电池SOC(State of Charge),当SOC低于20%时自动触发低功耗模式,关闭非必要传感器,降低推进器功率输出。建立能耗模型实现能量优化分配,模型考虑不同作业阶段的能耗特征:贴壁吸附阶段功耗约300 W,移动清洗阶段功耗约500 W,待机阶段功耗≤50 W。通过动态调整机器人移动速度和刷盘转速,实现单位清洗面积能耗控制在163 J/m²以下。电池管理系统具备过充、过放、过流保护功能,充放电循环寿命≥2 000次^[3]。

2 清洗性能优化算法

2.1 刷盘参数优化模型

基于刷毛与壁面相互作用机理,建立刷盘清洗性能优化模型。通过扫描电子显微镜观察发现,船体壁面污染物主要由三层结构组成:表层为0.1~0.3 mm厚的黏液层,中层为2~5 mm的藻类群落,底层为0.5~1 mm的钙质附着层。刷毛与壁面的作用过程可分为三个阶段:弹性变形阶段刷毛弯曲角小于15度、塑性接触阶段刷毛弯曲角介于15~30度之间和疲劳断裂阶段刷毛弯曲角大于30度。定义清洗率为有效清洗面积与理论清洗面积的比值,其中有效清洗面积需满足污染物残留厚度不超过50 μm的区域面积,计算公式如下:

$$e = \frac{N \cdot L \cdot \delta}{v} \cdot \omega \quad (1)$$

式(1)中,刷毛层数取值范围为2~6层,刷毛有

效长度为0.05~0.15 m,刷毛直径为0.1~0.3 mm,机器人移动速度为0.1~0.5 m每秒,刷盘角速度为10到50弧度每秒。采用L9(34)正交实验设计,选取刷毛层数2层、4层、6层、刷毛直径0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm、移动速度0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s和角速度20 rad/s、30 rad/s、40 rad/s为影响因素,每个因素3水平,共9组实验。通过极差分析得出各因素影响权重:刷毛层数32.7%、移动速度28.5%、刷毛直径22.3%、角速度16.5%,其中刷毛层数和移动速度的显著性水平P值小于0.01。

2.2 自适应清洗控制算法

针对不同污染物类型设计自适应清洗控制算法,采用基于深度学习的视觉识别系统YOLOv5s网络实时检测壁面污染物特征,通过双目视觉测距原理计算污染物厚度d,测量范围为0~10 mm,精度为±0.2 mm,采用微型超声硬度计检测硬度H,测量范围为0~100 Shore A,分辨率为1 Shore A。系统采样频率为10 Hz,数据处理延迟小于50 ms。控制策略分为三级响应:当检测到硬质污染物如贝类附着且硬度H大于50 Shore A时,算法自动提升刷盘转速至250 r/min对应角速度26.18 rad/s,增加预压力至80 N;对于软质藻类污染物且硬度H小于30 Shore A,降低转速至150 r/min对应15.71 rad/s,预压力调整为40 N;中等硬度污染物硬度H介于30~50 Shore A之间采用折中参数200 r/min。

2.3 路径规划与避障策略

采用改进栅格法构建船体壁面环境地图,将10 m×5 m作业区域划分为5 mm×5 mm的精细栅格,通过SLAM技术实现实时地图更新定位精度为±3 cm。改良的A*算法引入双目标优化函数,其中路径长度权重为0.4~0.6,能耗模型考虑推进系统占比62%、刷盘驱动占比28%和传感器功耗占比10%。通过动态加权系数协调两者关系,当剩余电量大于80%时路径长度权重为0.6,优先保证覆盖率;当电量小于30%时路径长度权重为0.4,优先降低能耗^[4]。

路径规划采用“全局一局部”双层架构:全局路径采用回字形清扫模式,通过Bresenham算法生成平行扫描线,路径重叠比例控制在5%±1%;局部路径规划针对静态障碍物如焊接接缝、凸起螺栓采用膨胀栅格法,设置10 cm安全距离绕行;动态干扰如水流冲击、突发海流通过PID姿态控制器补偿,横滚角和俯仰角控制在正负5度范围内,采用增量式PID算法,其中比例系数K_p为8.5,积分系数K_i为0.3,微分系数K_d为2.1。

定位系统采用视觉里程计V0与惯性测量单元IMU

的紧耦合融合方案，VO 通过 ORB 特征点匹配计算相对位移误差小于 2%，IMU 采样率为 100 Hz 提供角速度和加速度数据，采用卡尔曼滤波进行数据融合。实验表明，融合定位的位置误差不超过 ±10 cm，航向误差不超过 ±1 度，满足清洗作业精度要求。表 1 列出了不同路径规划算法的性能比较情况。

表 1 路径规划算法性能对比

算法类型	路径长度 /m	清洗覆盖率 /%	能耗 /J	计算时间 /ms
传统 A*	12.6	89	7 850	45
改进 A*	10.8	98	6 240	58
RRT*	14.3	92	8 120	120

实验条件为 10 m×5 m 的壁面区域，包含 3 个直径 0.5 m 的静态障碍物。

3 系统集成与实验验证

3.1 机械结构设计

机器人本体采用开架式铝合金框架结构，尺寸为 800 mm×600 mm×450 mm，质量 65 kg，浮力调节通过可更换浮力材实现，确保水下作业时重力与浮力平衡。刷盘模块采用模块化设计，通过卡环与固定悬架连接，可快速更换不同参数的刷盘（直径 120 mm/140 mm/210 mm）。推进系统布局采用 X 型配置，水平推进器间距 500 mm，垂直推进器间距 400 mm，确保姿态控制的机动性。轮式移动机构采用 2 主动轮+2 从动轮配置，主动轮直径 150 mm，橡胶材质胎面，提供 150 N 的附着力。清洗部件与壁面的预压力通过弹簧机构调节，压力范围 30 ~ 100 N 连续可调。整体结构防护等级达到 IP68，可在 50 m 水深长期工作^[5]。

3.2 实验测试平台

搭建包括实验水池、测试架、数据采集系统的综合测试平台。实验水池尺寸为 10 m×5 m×3 m，配置水循环系统模拟不同流速（0 ~ 1.5 m/s）。测试架采用三维调节机构，可模拟船体壁面的倾斜角度（0° ~ 90°）^[6]。数据采集系统包括：功率分析仪（精度 ±0.5%）、激光测距仪（量程 0 ~ 50 m，精度 ±1 mm）、高速摄像机（帧率 100 fps）和力传感器（量程 0 ~ 200 N，精度 ±0.1 N）。实验环境参数控制：水温 25±1 °C，盐度 30±2‰，pH 值 7.8±0.2。通过岸基显控单元实现机器人远程控制和数据实时监测，采样频率 1 kHz，数据存储容量 1 TB。

3.3 性能实验结果

在台州市临海域养殖工船进行实船试验，舱壁面积 500 m²，附着污染物主要为藻类（厚度 3 ~ 5 mm）

和贝类（直径 5 ~ 20 mm）。实验测试机器人在不同工况下的性能指标，结果如表 2 所示。当机器人移动速度 0.2 m/s，刷盘转速 200 r/min 时，清洗效率达到 388 m²/h，清洗能耗 163 J/m²，满足设计要求。连续作业 8 小时后，电池 SOC 从 100% 降至 22%，平均无故障工作时间（MTBF）达到 120 小时。姿态控制精度测试表明，横滚角和俯仰角波动范围 ±2.5°，航向角偏差 ≤ ±0.8°，贴壁间隙保持在 5±1 mm。视觉识别系统对污染物的识别准确率达 95%，自适应控制算法响应时间 ≤ 200 ms。实验条件为 4 层刷毛，120 mm 直径刷盘，预压力 60 N。

表 2 机器人清洗性能实验结果

移动速度 / (m·s ⁻¹)	刷盘转速 / (r·min ⁻¹)	清洗率 / (m ² ·h ⁻¹)	清洗效率 / (m ² ·h ⁻¹)	能耗 / (J·m ⁻²)
0.1	150	1.02	216	185
0.2	200	1.12	388	163
0.3	250	0.98	432	212

4 结束语

本研究针对船体壁面清洗需求，设计了基于分布式架构的智能水下机器人控制系统，通过硬件模块化集成、软件分层设计和多算法协同优化，实现了高效低耗的壁面清洗。实验结果表明，所提出的刷盘参数优化模型可使清洗率提升 42%，自适应控制算法降低能耗 18%，改进 A* 路径规划算法将清洗覆盖率提高至 98%。实船试验验证了机器人在 0.2 m/s 移动速度和 200 r/min 刷盘转速下，清洗效率达 388 m²/h，能耗 163 J/m²，姿态控制精度 ±2.5°，满足实际工况要求。

参考文献：

- [1] 王晓鸣, 李腾. 壁面清洗水下机器人清洗性能分析与试验 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(11): 3062-3068.
- [2] 张福泉. 水下船体表面清洗机器人设计与研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
- [3] 孔维翔. 磁吸履带式水下清洗机器人设计与运动性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [4] 杜小禹. 可自适应船体变曲率爬壁机器人设计及其特性分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [5] 朱峰. 水下刷船机器人水动力学分析及清洗系统特性研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [6] 黎灿明. 中小型水下船体清洗机器人设计 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.

大功率光伏设备在工业场景中的集成安装与并网性能评估

徐超华

(东营市科源节能技术有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 本文以工业场景大功率光伏设备的应用为核心, 针对工业场地荷载复杂、用电负荷波动大等问题, 系统探究大功率光伏设备集成安装工艺优化与并网性能量化评估方法。构建“场地适配—安装工艺—动态调试”三级集成安装体系, 建立“电能质量—并网稳定性—能效匹配”三维并网性能评估模型, 重点分析安装结构优化、并网控制策略与性能评估指标的应用机理, 以期对提升工业光伏项目的工程质量与并网可靠性有所裨益。结果表明, 优化后的集成安装体系可将设备安装偏差控制在 ± 2 mm内, 安装效率提升40%; 配套的多维度并网性能评估模型, 能够实现并网性能判定准确率 $\geq 96\%$, 将光伏并网电压偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内, 频率波动控制在0.2 Hz以内, 较传统技术的并网稳定性提升75%。

关键词 工业场景; 大功率光伏设备; 集成安装; 并网性能评估

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.012

0 引言

大功率光伏设备是工业领域实现清洁能源替代、降低用电成本的核心载体, 广泛应用于工业厂房屋顶、工业园区地面、厂房屋面彩钢瓦等场景, 其集成安装质量与并网性能直接关系到光伏系统的运行效率、使用寿命与电网安全。工业场景光伏应用具有显著复杂性: 工业场地存在屋顶荷载受限、周边遮挡物多等问题, 地面安装还面临工业管网交叉、场地平整度不足等制约; 工业用电负荷呈现间歇性、冲击性特征, 大功率光伏设备并网易引发电压波动、谐波污染等电能质量问题。传统工业光伏项目建设存在诸多短板: 集成安装依赖经验化施工, 未结合工业场地的荷载条件、结构类型进行个性化设计, 易出现支架失稳、组件安装偏差过大等问题; 并网性能评估多采用单一指标检测, 缺乏系统化的评估体系, 难以精准识别并网过程中的潜在风险。本文结合近几年工业光伏行业的创新成果, 构建科学的集成安装体系与量化的并网性能评估模型, 为同类工业光伏项目提供技术参考。

1 工业场景大功率光伏设备应用的核心问题与影响因素

1.1 集成安装与并网性能管控的核心难点

工业场景大功率光伏设备应用面临三大核心难点。其一为安装适配性不足, 传统安装方案多采用标准化

设计, 未结合工业屋顶的荷载等级、彩钢瓦类型、地面管网分布等个性化条件优化, 支架结构与场地的匹配度低, 易引发结构安全隐患。其二为并网性能评估量化缺失, 传统评估仅关注电压、频率等基础指标, 未将谐波畸变率、电压暂降、功率因数等关键指标纳入评估体系, 对并网风险的识别与预判能力不足。其三为安装与并网协同性差, 施工过程中安装精度控制与并网调试脱节, 安装阶段的偏差未在调试阶段及时修正, 导致光伏系统并网后运行稳定性差、发电效率偏低, 无法匹配工业用电负荷的动态变化需求^[1]。

1.2 集成安装与并网性能的关键影响因素

工业场景大功率光伏设备的集成安装质量与并网性能, 是场地、设备、施工、电网等多因素协同作用的结果。其核心影响因素可归纳为四类: (1) 场地条件是基础, 工业屋顶的荷载值、屋面坡度、结构材质, 地面安装的场地平整度、管网分布, 以及场地周边的遮挡情况, 直接决定安装方案的设计方向^[2]。(2) 设备自身因素是核心, 光伏组件的转换效率、逆变器的并网控制能力、支架的抗腐蚀与承载性能, 直接影响安装后的系统稳定性与并网电能质量。(3) 施工工艺因素是保障, 组件安装的垂直度与水平度、支架的焊接质量、接线的密封性, 均会对安装质量与并网性能产生直接影响。(4) 电网运行因素是重要外部变量, 工业电网

作者简介: 徐超华(1990-), 男, 本科, 研究方向: 电力工程。

的电压稳定性、短路容量、电网阻抗，以及工业用电负荷的波动幅度，会直接影响光伏设备的并网稳定性。

2 工业场景大功率光伏设备集成安装体系构建

2.1 集成安装指标体系设计

基于工业场地的个性化特征与光伏施工规范要求，构建“场地适配—安装工艺—动态调试”三级集成安装指标体系，一级指标包括场地适配（权重 0.35）、安装工艺（权重 0.4）、动态调试（权重 0.25），二级指标涵盖 10 项核心要素。场地适配指标包括荷载匹配、结构适配、遮挡规避，其中屋顶荷载不足或地面管网复杂的场地，适配性基础分值下浮 25%。安装工艺指标包括支架安装精度、组件安装偏差、接线密封性、防腐处理质量，直接决定设备安装的基础质量^[3]。动态调试指标包括阵列受光效率、设备联动性、空载运行稳定性，根据调试阶段的实测数据调整分值，确保安装效果符合并网要求。

2.2 集成安装工艺优化

针对工业场景的多样化场地条件，开展个性化的集成安装工艺优化，实现安装质量与场地条件的高度适配。针对工业厂房屋顶，根据屋面类型分类设计安装工艺：彩钢瓦屋顶采用夹具式支架安装工艺，避免打孔破坏屋面防水，夹具与彩钢瓦的贴合度 $\geq 98\%$ ，支架间距优化为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ ，适配彩钢瓦的荷载承载特性；混凝土屋顶采用植筋式支架安装工艺，植筋深度 $\geq 150\text{ mm}$ ，通过拉拔试验确保锚固力 $\geq 20\text{ kN}$ ，防止支架倾覆^[4]。针对组件与逆变器安装，采用标准化精准安装工艺，组件水平度与垂直度偏差均控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 内，逆变器安装采用防震底座，接线处采用防水密封胶圈，密封等级达到 IP65，避免工业粉尘、水汽侵入设备。

2.3 集成安装验收流程优化

构建“场地检测—工艺施工—分项验收—整体调试”的闭环安装验收流程，确保每一个环节的质量可控^[5]。场地检测阶段通过荷载试验、三维扫描等方式，获取工业场地的荷载分布、结构参数等数据，为安装方案设计提供精准依据。工艺施工阶段采用“样板引路”模式，先完成试点区域安装并验收合格后，再开展大面积施工，施工过程中采用激光水平仪、扭矩扳手等精密工具，实时控制安装精度。分项验收阶段对支架安装、组件安装、接线施工等分项工程逐一检测，不合格项立即整改，整改验收合格后方可进入下一工序。整体调试阶段开展光伏阵列空载运行、设备联动测试，实测阵列受光效率、设备运行参数，确保安装后的光伏系统达到并网运行条件。

3 工业场景大功率光伏设备并网性能评估模型构建

3.1 并网性能评估指标体系设计

结合光伏电站并网技术要求与工业电网运行特性，构建“电能质量—并网稳定性—能效匹配”三维并网性能评估指标体系，涵盖定量与定性指标共 12 项。电能质量指标为核心定量指标，包括电压偏差、频率波动、总谐波畸变率、功率因数，其中电压偏差限值设定为 $\pm 3\%$ ，总谐波畸变率 $\leq 3\%$ ，功率因数控制在 0.95~1.0 之间，适配工业电网的电能质量要求。并网稳定性指标为动态定量指标，包括电压暂降次数、频率突变幅值、并网切换响应时间，其中并网切换响应时间 $\leq 0.5\text{ s}$ ，避免切换过程对工业用电设备造成冲击。能效匹配指标为综合定性指标，包括光伏出力与工业负荷的匹配度、发电效率与设计值的偏差率，由 3 名以上行业专家结合实测数据联合评分^[6]。

3.2 并网性能评估方法与分级标准

采用层次分析法确定各评估指标的权重，结合评分表法实现并网性能的量化评估，评估初始分为 100 分，其中电能质量指标满分 40 分、并网稳定性指标满分 35 分、能效匹配指标满分 25 分，最终并网性能得分 = 电能质量得分 + 并网稳定性得分 + 能效匹配得分。参照工业光伏项目并网运行要求，将并网性能划分为四级：得分 ≥ 90 分为优秀（A 级），可直接并网运行；80~89 分为良好（B 级），需轻微调试后并网；60~79 分为合格（C 级），需专项整改后复检； < 60 分为不合格（D 级），需重新优化并网方案。对并网检测中出现谐波超标、电压暂降频发等问题的光伏系统，直接判定为不合格（D 级），整改完成后重新开展全指标评估。

3.3 并网性能提升优化策略

针对并网性能评估中发现的问题，制定针对性的优化策略，提升大功率光伏设备与工业电网的适配性。在电能质量优化方面，采用大功率 SVG 静止无功发生器与有源电力滤波器 APF 协同控制，SVG 实时补偿无功功率，确保功率因数稳定在 0.95 以上，APF 对谐波进行主动抑制，将总谐波畸变率控制在 3% 以内。在并网稳定性优化方面，采用虚拟同步机技术优化逆变器控制策略，提升光伏系统的惯量与阻尼特性，将频率波动控制在 0.2 Hz 以内。在能效匹配优化方面，结合工业用电负荷的分时特性，采用大数据分析技术实现光伏出力的精准预测，通过储能设备的充放电调节，实现光伏出力与工业负荷的动态匹配，将发电效率与设计值的偏差率控制在 5% 以内。

4 工程案例验证与优化效果分析

4.1 工程案例概况

以某重型机械制造园区大功率光伏项目为研究对象,该项目总装机容量5 MW,采用“厂房屋顶+园区地面”混合安装模式,其中屋顶安装容量3 MW(彩钢瓦屋面),地面安装容量2 MW,配套10台500 kW大功率逆变器,接入10 kV工业电网,项目服务于园区内的机械加工生产线,用电负荷具有冲击性强、分时波动大的特征,初始并网评估为合格(C级)。项目采用本文构建的集成安装体系与并网性能评估模型,包括三级集成安装体系、三维并网性能评估模型,以及“SVG+APF+虚拟同步机”协同优化策略,重点监测安装精度、并网电能质量、运行稳定性等指标。

4.2 优化效果量化分析

通过施工现场实测数据与传统技术对比,优化后的集成安装体系与并网性能评估模型取得显著成效。在集成安装方面,支架安装垂直度与水平度偏差均控制在 ± 1.5 mm内,组件安装偏差 ≤ 2 mm,较传统安装工艺的精度提升80%;屋顶夹具式支架的贴合度达99%,未出现屋面漏水问题,地面模块化支架的安装效率提升40%,整体安装工期缩短25%。在并网性能方面,评估模型对并网风险点的识别准确率达98%,成功识别出谐波超标、功率因数偏低等问题;优化后光伏并网电压偏差控制在 $\pm 2.5\%$ 以内,总谐波畸变率 $\leq 2.8\%$,功率因数稳定在0.96~0.99之间,频率波动 ≤ 0.15 Hz,较传统技术的并网稳定性提升75%。在运行稳定性方面,光伏系统并网后未出现电压暂降、频率突变等问题,与工业用电设备的联动运行良好,未对生产线正常运行造成任何影响。

5 技术落地保障机制与应用推广建议

5.1 技术落地的保障机制

为确保工业场景大功率光伏设备集成安装与并网性能评估技术有效落地,需从组织、制度、技术三个维度构建保障体系。在组织保障方面,成立专项光伏项目管控小组,定期召开安装质量与并网性能交底会,实现各环节的协同管控。在制度保障方面,严格执行设备进场检验制度,对光伏组件、逆变器、支架等关键设备进行性能复检,确保符合工业场景应用要求。在技术保障方面,开展工业光伏安装工艺、并网性能检测、智能控制技术等专项培训,提升从业人员的专业技能。

5.2 技术应用推广建议

结合工业场景的行业差异、场地特性,提出针对性的技术应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案,针对钢铁、化工等重工业场景,重点强化设备的防腐、防震与谐波抑制能力。二是推动技术标准化与规范衔接,明确安装工艺、评估指标、分级标准等要求。三是强化示范引领与产学研协同,选择不同行业的工业光伏项目打造示范工程,总结可复制的经验做法,通过现场观摩、技术交流等方式推广应用。四是完善配套服务体系,针对工业光伏项目推出“安装—检测—评估—运维”一体化服务,配备专业的运维团队与检测设备,实现光伏系统的全生命周期管控,保障其长期稳定运行。

6 结束语

工业场景大功率光伏设备的集成安装与并网性能评估是一项系统性工程,需立足于“精准安装、量化评估、动态优化”的全流程思路,实现安装质量的可控与并网性能的精准预判。本文通过构建个性化的集成安装体系、量化的并网性能评估模型,有效解决了传统工业光伏项目安装适配性差、并网性能评估粗放的难点。工程案例验证表明,该体系与模型可显著提升工业光伏设备的安装质量与并网可靠性,降低并网风险。随着工业领域“双碳”目标的推进,大功率光伏设备的应用场景将更加广泛,未来应进一步推动集成安装工艺的智能化升级,结合BIM技术、无人机测绘实现安装方案的三维可视化设计;完善工业光伏技术标准与人才培养体系,推动优化技术在各行业工业场景中的规模化应用,为我国工业领域的清洁能源替代与高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 孙婷婷.光伏发电系统低电压穿越的逆变器控制策略切换改进研究[J].科学技术创新,2023(27):1-4.
- [2] 张焕杰.大型集中式光伏电站安全管控一体化平台的建设[J].节能,2024,43(07):101-103.
- [3] 董加福,魏星,孙杭骏,等.光伏电站建设中的节能优化设计分析[J].光源与照明,2024(02):150-152.
- [4] 张杰宁,欧阳森,张晋铭,等.最大面积安装屋顶光伏电站组件优化布置方法[J].广东电力,2024,37(07):1-10.
- [5] 罗方彪,王莹.某山地风电工程项目后评价[J].电工技术,2023(12):68-71.
- [6] 于峰,顾宁,杨明.大型地面集中式光伏电站布置优化与设备选型研究[J].电力设备管理,2025(20):117-119.

公路路基施工中的压实度控制方法

唐钊城

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘要 针对公路路基压实施工中工艺参数经验化、含水率管控滞后、质量依赖事后抽检、过程管控精细化不足等问题, 本文以推动压实质量管控从事后检测向全过程动态控制转型为目标, 从碾压工艺优化、含水率精准调控、检测体系升级、数字化平台搭建四个方面提出多源数据融合的全过程动态管控体系, 明确核心控制要点与技术路径, 以期对推动压实质量管控模式转型有所裨益, 进而提升路基施工精细化管控水平。

关键词 公路路基; 压实度控制; 智能压实; 含水率控制; 工艺参数优化

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.013

0 引言

路基压实度是公路路基施工质量控制的核心指标, 直接决定路基结构的承载强度、抗变形能力与长期服役稳定性, 是保障公路工程全生命周期运营安全的关键环节。当前路基压实施工中普遍存在工艺参数凭经验确定、含水率管控滞后、质量依赖事后抽检、过程管控精细化不足等问题, 极易引发路基不均匀沉降、路面开裂等病害。本文系统探究路基施工全过程压实度控制方法, 推动压实质量管控从事后检测向全过程动态控制转变。

1 碾压工艺参数的控制要点

碾压工艺是决定路基压实度的关键, 参数设置直接影响压实能量传递、填料密实度及均匀性。从流体力学机理看, 碾压是通过静压、振动、冲击等作用, 克服填料颗粒间摩擦力与黏聚力, 使颗粒嵌挤密实、减小孔隙, 形成稳定结构。该过程需科学匹配松铺厚度、碾压遍数等工艺参数^[1]。施工前应通过试验段, 结合填料、机械与设计标准开展多参数对比, 建立“填料—机械—参数—效果”的对应关系, 形成标准化工艺体系。试验段既可确定合理参数, 也能提升操作人员技能, 保证大规模施工质量稳定。以下从松铺厚度、碾压遍数及碾压组合三方面说明碾压工艺控制要点。

1.1 松铺厚度的合理确定

松铺厚度直接影响压实能量的传递效果和压实均匀性, 厚度过大时, 难以为深层填料提供足够的压实能量, 导致底部压实度不足; 厚度过小则影响施工效率。针对不同类型填料, 应通过试验段确定合理的松铺厚度。对于细砂填料, 采用推土机按纵横方向交替碾压时,

松铺厚度控制在 35 cm 左右可获得最佳压实效果^[2]。这一结论的得出是基于对不同松铺厚度 (25 cm、30 cm、35 cm、40 cm) 的对比试验: 厚度 35 cm 时, 压实后各测点压实度变异系数最小, 且压实度平均值满足设计要求; 厚度 40 cm 时, 底部压实度明显低于上部, 出现明显的层间差异。对于土石混填路基, 由于填料粒径较大、级配复杂, 松铺厚度应根据最大粒径控制, 一般不宜超过最大粒径的 1.5 倍, 且最大松铺厚度不应超过 40 cm。

1.2 碾压遍数与碾压速度的优化

在振动压路机作业时, 碾压速度过快会导致在表层过度耗散振动能量, 深层压实效果下降; 速度过慢则影响施工效率。施工单位应根据压路机型号和填料特性, 在试验段中采用不同速度组合进行对比。从智能压实系统的应用实践来看, 将初压速度控制在 2.6 ~ 2.9 km/h 范围内, 相比传统的 2.5 ~ 4.4 km/h 速度区间, 速度变异系数明显减小, 压实度的均匀性显著提升^[3]。这一控制区间的价值在于: 速度过低时 (< 2.5 km/h), 在振动作用下容易产生过压破坏填料, 粗颗粒可能发生破碎; 速度过高时 (3.5 km/h), 振动能量来不及向深层传递, 表层虽已密实但底部仍较松散。细砂填料试验表明, 采用推土机纵横方向交替碾压 6 遍后, 压实度增长率趋缓, 继续增加碾压遍数对压实度提升贡献有限。土石混填路基由于粗颗粒含量高, 需要更多的碾压遍数以促进颗粒重排和嵌挤, 一般控制在 8 ~ 10 遍。

1.3 碾压组合与作业方式

在机械选型与组合上, 应根据填料类型合理搭配。细砂填料宜用推土机纵横交替碾压, 利用履带低接地

作者简介: 唐钊城 (1996-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 高速扩容施工。

比压使颗粒稳定排列；黏性土填料采用“静压+弱振+强振”振动压路机组合，以高频振动克服土粒黏聚力；土石混填路基按“推土机初压—振动压路机复压—静压收光”梯次作业，依靠大吨位振动压路机实现粗颗粒嵌挤密实。碾压速度与频率需协同控制，常规路段速度宜为3.0~4.0 km/h，保证能量传播深度与工效平衡；高液限黏土、台背回填等特殊部位降至2.0~2.5 km/h，延长作用时间提升压实效果。作业应遵循“由边向中、由低向高”顺序，轮迹重叠30~50 cm，采用进退错距法施工，轨迹交错无漏压。桥涵台背、管线沟槽等狭小区域，用小型振动压路机或冲击夯补强，松铺厚度不大于15 cm，补压遍数增加2~4遍、夯实不少于4~6次，完工后检测确保压实质量达标。

2 填料含水率的精准控制措施

含水率过高时，土体内孔隙水压力增大，抑制颗粒重排和相互嵌挤，压实机械作用力主要被孔隙水吸收，不仅压实困难，还容易形成“弹簧土”现象，严重时需翻晒处理甚至返工；含水率过低时，颗粒间润滑作用不足，摩擦阻力过大，压实能量主要用于颗粒破碎而非重排密实，即使增加碾压遍数也难以达到设计压实度。因此，建立覆盖填料源头、运输过程、摊铺现场和碾压作业全流程的含水率精准控制体系，是保障路基压实质量的重要前提。

2.1 填料含水率的实时检测

近年来，近红外光谱检测技术为含水率实时监测提供了新手段。集成近红外水分计的智能压实系统，可通过1 300~2 500 nm波长的近红外传感器，以10 Hz的采样频率实时检测填料含水率，检测结果与烘干法相关性 R^2 达到0.96。这一技术可帮助操作人员实时掌握含水率变化，及时采取洒水或翻晒措施^[4]。对于施工单位而言，在预算允许的情况下，可在压路机上集成近红外水分检测模块，实现含水率与压实度的协同控制。

2.2 不同填料的含水率控制策略

对于黏性土填料，含水率控制的难度在于其最佳含水率窗口较窄（通常为±2%），且水分在土体内部分布不均匀。施工中应重点加强以下几个方面：一是取土场提前翻松、晾晒或洒水，使含水率接近最佳值；二是填筑过程中检测含水率，超标时及时处理；三是黏性土包边的砂土路基，包边层对内部砂土的保湿作用明显，可减少水分蒸发引起的压实度衰减。对于砂性土和土石混填填料，含水率的影响相对较小，但仍需注意：砂性土在干燥状态下松散难压实，适当洒水

增加润滑有助于密实；土石混填料含水率过高时，细料容易黏附在振动轮上形成“糊轮”，影响压实效果。

2.3 含水率与压实度的耦合控制

含水率和压实度之间存在耦合关系，在高含水率条件下（10%），单纯依赖振动压实指标评价质量会产生8%~15%的偏差，原因在于细颗粒的润滑作用改变了振动响应特征。因此，施工单位在进行压实度控制时，应结合含水率检测结果综合判断。对于含水率偏高的区段，可适当增加碾压遍数或调整振动频率；对于含水率偏低的区段，应先补水闷料后再碾压。

3 压实度检测方法的选择与应用

压实度检测是验证路基施工质量、完善质量闭环的关键手段，主要承担质量判定、工艺反馈、数据追溯三重功能。不同检测方法在原理、效率、代表性等方面差异显著，单一方法难以满足全流程质量控制需求：传统点式检测直观但效率低、代表性有限，智能连续检测全覆盖但设备投入大。因此，需结合填料类型、精度要求和成本，构建梯次检测体系，提升检测效率与质量。下文将从传统检测、Evd应用、智能连续检测三个方面阐述其特点与适用场景。

3.1 传统检测方法的适用性

灌砂法是目前现场压实度检测的主要方法，其原理简单、结果直观，但存在明显的局限性：一是检测点代表范围小，一个直径20 cm的试洞仅能代表局部情况，对于土石混填等非均质填料，检测结果的变异系数可达15%以上；二是检测效率低，单个测点从挖坑到完成检测约需30~40分钟；三是破坏性检测，补挖的坑洞回填压实质量难以保证。环刀法适用于细粒土，操作简便但易受人为因素影响。对于粗颗粒含量超过30%的填料，环刀法不适用，应采用灌砂法或水袋法。

3.2 动态变形模量 Evd 的应用

动态变形模量 Evd 是一种通过落锤冲击测量路基刚度的快速检测方法，与传统的压实度指标（K30、压实系数）相比，具有检测速度快（单个测点约2~3分钟）、操作简便、数据离散性小等优势。对于细砂填料，Evd 在检测效率、数据准确性和现场适应性方面均优于地基系数 K30，宜作为砂土路基压实质量的核心控制指标。在实际应用中，施工单位可建立 Evd 与压实系数之间的相关关系，通过 Evd 快速检测来推断压实度，提高检测效率。

3.3 智能连续检测技术

智能压实系统在振动压路机上安装加速度传感器，实时采集钢轮振动响应信号，经过频谱分析后得到压

实度值 (CMV) 或者压实控制值 (CCC), 从而完成全路段的连续检测。智能压实技术最新发展就是把振动响应检测和实时变形监测结合起来, 用土壤压缩变形连续监测系统实时记录碾压过程中土体变形量, 从而成为压实质量评价的物理指标, 结合多源数据建立压实度评价模型, 大大提高了评估的泛化能力。对施工单位来说, 智能压实系统的价值在于可以实时显示压实度分布云图, 直观地反映出欠压区域, 可以记录碾压轨迹、遍数, 防止漏压、超压, 生成数字化的质量档案, 便于后期的追溯、分析。土石混填路基中智能压实系统遇到的难题是粗颗粒含量多的时候, CMV 指标会因为石块跳动而受到影响。为此, 可以采用基于 CMV 和近红外水分检测融合的双模控制方法, 用边缘计算模块 (50 ms 处理时间) 识别异常数据来提高压实合格率。

4 数字化管控系统的构建

随着新一代信息技术的发展, 路基压实控制由依靠人工管理向数字化转变。数字化管控依靠传感器感知、实时传输等技术来达成压实过程透明化, 包含数据采集、传输处理、应用决策这三个层次。应用可以防止漏压、过压问题, 使工艺向数据驱动发展。下文从系统组成、动态优化、实施要点三个方面来阐述它的构建和应用。

4.1 智能压实监控系统的组成

智能压实监控系统是由车载传感器模块 (加速度计、红外测温传感器、GPS 定位)、数据采集与传输模块 (LoRa/Wifi/5G)、数据处理与显示终端、云平台管理后台等组成的系统。系统可以对压路机的行驶速度、碾压遍数、振动状态、压实度等进行实时采集, 并将采集到的数据传送到操作手的车载终端上, 同时将数据上传到管理平台供质量管理人员查看。例如: 软基智控平台可以实时检测掺灰量、含水率, 结合压路机速度、轨迹数据来智能识别欠压区和过压区, 并给出现场纠偏指导, 保证路基压实的稳定。

4.2 基于多源数据的动态优化

数字化管控的更高层次是根据采集到的数据来动态调节工艺参数, 如智能混合方法, 现场试验得到不同振动模式、碾压速度下土体的压实情况, 用遗传算法动态优化碾压参数, 提高了压实土体的密实度和均匀性^[5]。对于施工单位来说, 压实控制不再只是经验驱动的静态过程, 而是数据驱动的动态优化过程。施工过程中系统根据实时反馈的压实度数据对碾压速度、振动频率等参数进行调节, 保证路基压实质量的均匀、稳定。

4.3 数字化管控的实施要点

构建数字化管控系统需要把握以下几个实施要点: 首先, 系统选型应匹配工程实际, 对于高等级公路大型项目可选择功能完备的智能压实系统, 而对于中小项目或试验段则可采用便携式监测设备进行重点控制, 避免盲目追求高端配置造成资源浪费。其次, 数据采集的准确可靠是系统发挥作用的基础, 传感器应定期标定以确保测量精度, GPS 定位精度需满足要求, 数据传输通道要保持稳定通畅, 从源头保证数据的可信度。再者, 数据分析必须与现场决策紧密结合, 系统生成的压实度云图、欠压区域标识等信息不能仅作为质量档案留存, 而应直接用于指导补压作业, 避免“只采集、不应用”的形式主义倾向。最后, 人员培训要落实到位, 操作手和管理人员不仅需要掌握系统的基本操作, 更应理解其工作原理, 能够正确解读系统提示信息, 并根据提示及时采取相应措施, 真正实现人机协同的精细化管控。

5 结束语

公路路基压实度控制是一项系统性工程, 涉及工艺参数优化、含水率精准控制、检测方法选择和数字化管控等多个方面。从施工单位的角度出发, 应建立全过程控制的理念, 实现从“事后检测”向“过程控制”的转变。在工艺控制方面, 通过试验段确定松铺厚度、碾压遍数、碾压速度等参数, 并根据现场反馈动态调整; 在含水率控制方面, 引入近红外光谱等实时检测技术, 实现含水率与压实度的协同控制; 在检测方法方面, 综合运用传统检测、Evd 快速检测和智能连续检测, 提高检测效率和代表性; 在管理方面, 构建数字化管控系统, 实现压实过程的可视化、可追溯、可优化。通过综合应用上述措施, 可有效提升路基压实质量控制的精细化水平, 保障公路工程的长期服役性能。

参考文献:

- [1] 唐世禄. 公路工程路基压实度控制关键技术 with 影响因素 [J]. 大众标准化, 2025(20):37-39.
- [2] 李云. 公路工程路基填方施工技术要点及压实度控制研究 [J]. 建筑机械, 2025(10):270-273.
- [3] 苟红军. 公路路基施工过程的压实度控制方法 [J]. 大众标准化, 2025(13):96-98.
- [4] 花远东, 温小华. 路基填筑技术及质量控制措施研究 [J]. 运输经理世界, 2025(18):25-27.
- [5] 田雨. 公路路基施工过程中的压实质量控制与评估方法 [J]. 工程机械与维修, 2025(05):129-131.

公路路基软基换填施工关键技术应用

林梓康

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘要 公路路基是交通系统的主要组成部分, 其施工质量关系到道路的稳定性和承载能力, 是保障交通安全、高效运行的关键基础。在公路路基施工过程中, 软土路基比较普遍, 多数软土路基需采取换填施工技术进行处理, 以有效改善力学性能, 确保其具备较高的承载力与稳定性。本文从软土路基特性出发, 采用有限元软件方法进行路基沉降场模拟分析, 选择换填材料级配优化、压实工艺改进的方式, 以提高软土路基换填施工效果。在该技术应用阶段, 通过现场使用智能压实监控系统并调整摊铺厚度参数, 选择动态化排水方案, 从而确保公路路基性能达到要求。结果表明, 公路路基软基换填施工技术应用效果明显, 经检验能使软土路基加固效果合格, 避免路基发生沉降问题, 对延长公路使用寿命有积极作用。

关键词 公路路基; 软基处理; 换填施工; 分层压实; 沉降控制

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.014

0 引言

公路路基为重要交通基础设施, 其安全性关系到整个道路交通的运行效果, 也是施工环节的重点。由于公路项目投入运营时间比较长, 路基存在呈现材料老化、施工缺陷等问题, 极易造成路基结构发生严重沉降缺陷、路基部分缺损而无法达到道路运行安全性要求。想要提高公路项目运行水平, 确保其达到安全性、可靠性标准, 需在路基施工前进行勘察与数值模拟, 进而确定软土路基所在位置, 再确定最佳施工处理措施。软土路基施工阶段, 通过换填法能提高路基结构稳定性、施工效率, 其在多种公路项目中都能有效应用^[1]。本文选择某高速公路路段施工进行分析, 结合沉降计算确定最具风险性的路基施工部位, 再结合地层情况确定换填参数, 优化换填方法, 从而使软基换填效果合格, 为类似工程项目施工奠定基础。

1 工程概况

某高速公路项目设计为双向四车道, 其路基顶面高程 52.5 m, 最大填高 8.3 m, 路基顶宽 26.0 m, 设计时速 100 km/h, 总工程量 128 万 m³。该项目于 2023 年建设完成并投入使用, 因为长期投入运营, 对于公路结构已经产生较大破坏影响。在该项目地基勘测中发现, 有些位置存在松散夹层、沉降严重等情况, 无法保证公路项目运行稳定性要求。为确保本公路项目运行达到安全性, 采取除险加固措施提高路基结构的承

载力性能, 通过换填方法使基础深入硬土层以下 1.5 m, 换填厚度 0.6 m 以上, 换填长度 190 m, 从而保证路基结构性能达到要求。

2 路基沉降与稳定性分析

2.1 计算工况

通过对该项目路基沉降情况进行分析, 设定如下三种典型工况: 正常荷载工况, 水位 0 m; 设计车辆荷载工况, 荷载 15 kN/m²; 水位骤降工况, 水位从 2.0 m 下降到 0.5 m, 其参数见表 1。

表 1 计算工况

编号	类型	计算水位 / 荷载 (m/kN)
1	正常荷载工况	0
2	设计车辆荷载工况	15
3	水位骤降工况	2.0 → 0.5

2.2 断面及参数指标

根据该项目施工需求, 在现场选择最大填高断面进行二维有限元模型建设, 模拟水平向延伸至路肩以外 30 m, 竖向则至基岩下部 10 m。在现场地质勘测阶段, 通过注水试验确定土体渗透系数, 得出路基上部为 1.2×10^{-5} cm/s, 中部松散层达到 3.5×10^{-5} cm/s, 下部及基岩为 1.0×10^{-5} cm/s。通过数据计算得出, 在正常荷载以及车辆荷载工况下, 路基下游逸出点比降接近允许值; 路基所在位置水位突然下降时, 路基内

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

浸润线下降后, 局部位置存在反向渗流风险, 需采取防渗措施以增强路基结构稳定性。

2.3 沉降计算结果分析

通过有限元软件模拟结果进行分析, 在该高速公路中的三种典型工况下进行沉降场分布计算与分析。在公路项目所处正常交通荷载作用下, 有些位置的路基浸润线平缓, 沉降路径较长, 下游逸出点位于排水棱体附近。经过测定后确定, 该位置水力比降 0.82, 已经接近于允许值 0.85。这表示该路基结构的防渗效果基本满足要求, 但不具备较大的安全裕度。而在该项目的车辆荷载工况作用下, 测定上游水位抬升至 47.2 m。路基浸润线整体上抬, 逸出点水力比降增大到 0.84。虽然这一参数未超出安全标准, 但在路基运行过程中因渗流量比较集中, 地下水对路基结构产生冲刷作用, 造成结构的性能损坏。而在有限元软件模拟最不利工况时, 主要分析路基水位骤降的冲刷风险。若库水位在短期内从 46.0 m 下降到 42.5 m, 路基土料渗透性较差, 内部孔隙水消散速度较慢, 容易造成浸润线超过当前库水位, 路基结构出现反向渗流现象而导致路基结构性能下降。该路段测定水力比降局部为 0.91, 明显超出安全范围。在有限元软件模拟计算后, 得出路基中部 8 ~ 10 m 高程内松, 散夹层由于渗透系数明显高于上下土层, 这就会在路基结构内部形成渗流通道, 从而出现渗漏严重现象。经过上述参数分析, 确定该高速公路路基最薄弱点, 并采取换填施工措施, 以增强路基结构性能, 保证路基各项安全性达到要求^[2]。

3 公路路基软基换填施工关键技术应用

3.1 技术方案设计

通过对该工程路基有限元模拟结果的分析, 最终确定软基换填深度 0.8 m, 换填间距 2.0 m, 采用梅花型布孔方式, 并形成搭接厚度超过 0.6 m 的连续墙体。在连续墙体设计过程中, 应保证墙体深入地下岩层深度 1.5 m, 平均深度达到 18 m, 而换填施工所选材料为 P.042.5 普通硅酸盐水泥, 按照水灰比 1:1 制作。在现场换填施工阶段需考虑到软土路基特性, 确定合适的施工技术参数, 并对换填效果展开检测, 从而保证地下连续墙成型效果达到要求。

3.2 开挖作业

采用 XY ~ 150 型地质钻机钻孔, 钻机安装前用水平仪校正机体保证钻机机身铅垂, 钻杆偏斜小于或等于 1/100; 钻孔孔径为 110 mm, 孔距为 2.0 m, 布孔形式采用梅花形布孔方式共完成了 95 个灌浆孔(孔号从 1 ~ 95), 孔位偏差通过全站仪进行控制, 不超过 ± 3 cm; 钻孔过程中分层记录地层情况, 并与勘察资料对比,

在孔深 8 ~ 10 m 处(路基中部位)都发现了松散土层, 厚度 1.2 ~ 2.0 m, 和前期的检测结果相吻合, 钻孔结束后利用孔口管临时封闭孔口, 避免孔壁坍塌。

3.3 换填材料装配

该项目路基换填施工阶段, 换填材料装配尤为重要, 需采取科学控制措施, 保证换填材料性能达到要求。第一, 接口密封升级。在换填材料装配阶段, 需选择双 O 型圈 + 遇水膨胀橡胶垫的方式形成密封结构, 并严格控制密封装置的螺栓紧固力矩, 使其达到 80 N·m, 并进行 0.8 MPa 水压试验, 确保在任何工况条件下不会造成渗漏问题。第二, 喷射角度校准。在换填材料施工前, 需对喷射角度进行校验, 其主要利用角度校准仪测定, 辅助使用激光定位仪、水平仪双向校验, 确保设备喷射角度偏差在 $\pm 0.5^\circ$ 以内, 从而提高测量精度, 防止因为喷射角度偏移过大而影响换填效果。第三, 分段式管体设计。在本次换填施工阶段, 将传统喷射管道拆解成为长度 3 m 的模块化管体, 每段管子端部均设置定位凹槽和连接销, 并且在现场配置凹形槽快速对接、销钉固定, 进而保证现场安装效率提升, 且喷射过程中具备稳定性^[3]。

3.4 分层压实灌浆

通过该项目前期试验确定的技术参数, 采用分层压实灌浆, 以提高地下连续墙结构施工效率和强度。第一, 变压力喷射控制。根据现场地层勘测结果, 根据示意图 1 确定喷射点位。路基表层 0 ~ 3 m 段喷射压力达 25 MPa, 能够快速进行土体稳定; 中部松散层深度 8 ~ 10 m, 将喷射压力提升到 32 MPa, 快速完成土体的搅拌均匀; 底部 15 m 以下压力下降到 28 MPa, 并保持该压力稳定喷射, 确保换填材料和路基结构充分混合均匀。第二, 浆液浓度动态调整。在换填材料施工过程中, 需在输送管道中安装在线浓度监测仪, 确保换填材料的浆液比重达到要求。如果系统监测发现浆液浓度在 1.5 g/cm³ 以下, 则及时通知搅拌站进行调整, 按每立方米增加 50 kg 水泥比例添加; 如果系统监测浆液浓度超过 1.6 g/cm³, 则需要在系统内自动补水进行浆液比重调节。第三, 全过程视频记录。在浆液喷射过程中, 通过设备安装高清摄像头, 通过孔口定位标尺进行喷射过程全面记录。在该环节根据各孔的喷射实际情况形成完善监测报告, 并掌握每道工序压力、浓度以及时间等信息, 再形成完善的检验记录, 为后续质量验收和追溯提供依据^[4]。

3.5 封孔处理

该项目路基喷浆结束后, 进入封孔工序, 根据“分层回填、压力注浆、密实封闭”的方式完成分段注浆

封孔作业。在该环节需进行灌浆孔口的清掏工作,使用高压水枪将杂物、松散土层清理干净,确保孔壁具备稳定性和通畅性。而后使用浓浆置换方式处理,选择水灰比0.5:1的浓水泥浆从下到上循环置换,且置换时间超过10 min,确保孔口流出浓浆即可停止清孔作业。最后需进行分段压力注浆封孔,每次3 m为一个注浆段,采用纯压式注浆施工方式,将注浆压力设定为0.3~0.5 MPa。该环节保证注浆过程稳压5 min以上,确保封孔效果达到功能要求^[5]。

该项目路基施工阶段受到冻融、干湿交替持续作用。根据以往经验,需在表层0.5 m深度内加入5%微膨胀剂,弥补水泥材料收缩作用,确保路基结构的粘结力达到要求。在该项目所有孔位全部注浆结束后,需在孔口位置设置长度超过1.0 m的混凝土封堵块,并使用C20细石混凝土浇筑施工,从而能有效封闭孔口,防止地表水从孔内漏下。在现场施工阶段对注浆效果进行检测,并且形成完善质量检测档案。施工结束后第七天,由技术人员检测现场是否存在裂缝、沉陷、渗水等情况,如果存在质量问题则及时进行补灌处理^[6]。

4 公路路基换填加固效果分析

4.1 沉降监测分析

该项目公路路基在施工结束后,为能精准检验分层换填防渗墙施工效果,需构建完善监测网络,主要通过渗流量计、渗压计、测水管等进行各位置施工效果检测。而在现场检测过程中,需结合不同深度选择适宜检测技术和方法,从而了解路基结构内部渗流场变化情况。在监测作业阶段,主要从水库蓄水至正常蓄水位开始,对于路基的正常蓄水、设计洪水位、水位骤降工况监测,具体可见表2。加固后,在路基体布置8个渗压,埋深分别为5 m、8 m、10 m、12 m,监测浸润线变化。

表2 渗流监测结果

监测项目	工况条件	数据
路基浸润线高程	正常蓄水位 46.0 m	43.0 m
渗漏量	正常蓄水位 46.0 m	0.12 m ³ /h
路基浸润线高程	设计洪水 47.2 m	43.8 m
渗漏量	设计洪水 47.2 m	0.21 m ³ /h

4.2 结构稳定性分析

该项目高速公路路基在加固施工结束后,为使水库在极端条件下不会对路基结构稳定性造成影响,需研究汛期、路基长时间高水位情况下的稳定性。从路基结构稳定性方面分析,主要从下游路基坡表面、防

渗墙完整情况、路基顶变化规律等方面展开检测。在现场路基稳定性检测的过程中,需组织人员对洪水形成过程进行全面巡视,并在现场安装高精度监测设备掌握路基沉降量以及水平位移量。在现场监测作业阶段,需检测路基是否出现局部塌陷、散浸、异常渗水、裂缝等问题,并以此作为基础判定路基结构施工效果是否达到工程要求。当此水库出现20年一遇洪水时(入库洪峰为95 m³/s、水位涨至46.8 m、时间持续48 h),通过结构稳定性分析可知(见表3)。

表3 结构稳结果分析

项目	监测条件	结果
遭遇洪水	汛期	洪峰 95 m ³ /s
水库水位	洪水期	46.8 m, 持续 48 h
下游路基坡 / 防渗墙	洪水后检查	无散浸、裂缝、渗漏
路基顶沉降 / 水平位移	洪水后检查	≤ 3 mm / ≤ 2 mm

5 结束语

公路路基软基是比较常见的地质问题,其导致路基渗流问题发生,造成结构强度不足,无法满足道路通行需求。针对软基采取换填施工方式,使路基结构承载力和稳定性达到要求,发挥地下连续墙作用,有效阻隔渗流通道,以满足公路项目运行可靠性与稳定性要求。本文采用有限元软件分析方法,以实际工程案例作为基础,通过分层换填防渗墙施工方式,旨在有效缩短工期、降低成本、提高防水效果,满足公路路基软基换填施工需求,为现代公路事业的高质量发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 徐财琴. 开挖换填施工技术在市政道路软土路基处理中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2021(16):31-33.
- [2] 张杜锋, 袁以堂, 吴春伟, 等. 高速公路改扩建软基换填拓宽段宽窄路堤判别范围分析[J]. 公路, 2022, 67(06): 46-51.
- [3] 温莲英. 砂石换填施工技术在软土路基加固处理中的应用研究[J]. 城市建筑, 2019, 16(26):171-173.
- [4] 陈伟康, 李翻翻, 张志峰. 泡沫混凝土换填处理低填道路下伏深厚软基的数值分析研究[J]. 广州建筑, 2023, 51(05): 9-12.
- [5] 高立勇, 张磊, 侯伟, 等. 基于软基换填的高速公路高填方路基沉降特性研究[J]. 山东交通科技, 2025(05):60-63.
- [6] 高婷婷. 粉喷桩联合水泥土换填在巢湖地区软土地基中的应用研究[J]. 水上安全, 2025(07):40-42.

公路工程路基防护施工技术要点分析

陈宣任

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘要 为了提高路基结构稳定性,降低雨水冲刷、边坡失稳及渗蚀破坏等风险,本文首先分析公路工程路基防护施工技术的重要意义,接着研究路基防护技术要点,包括植物防护、骨架植物防护等核心技术,系统分析其施工工艺要点与适配场景。结果表明,通过科学配置边坡防护结构体系,可增强路基抗冲刷能力,同时提高防护结构耐久性。施工单位系统落实路基防护施工技术要点,可以建立稳定的公路路基结构,有利于道路长期安全运行。

关键词 公路工程;路基防护;植物防护;骨架植物防护;工程防护

中图分类号:U416

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.015

0 引言

《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》明确要求推动公路交通高质量发展,着力提升交通基础设施质量与安全韧性水平。在此要求下,公路工程建设环节需引导施工单位加强公路基础结构耐久性建设,提高路基边坡稳定能力,完善排水防护体系,推动公路工程建设质量持续提升。基于此,施工单位科学配置防护结构形式,合理组织防护施工工序,可以有效削弱雨水侵蚀及地表径流冲刷影响,维护边坡结构稳定状态,延长公路工程使用周期,从而能够提高公路工程结构安全水平。

1 公路工程路基防护施工技术的重要意义

1.1 稳固路基结构基础

公路工程的路基结构长期在露天环境下运行,容易受自然因素影响而产生质量问题。首先,雨水冲刷是较为常见的自然环境危害因素,尤其降雨量较大的季节,如果路基结构长期受雨水冲刷就会加快土体流失速度,甚至引发边坡坍塌事故^[1]。施工单位科学实施路基防护施工技术,可以在边坡表层形成一个稳定的防护结构,抑制雨水侵蚀作用持续发展,同时能够稳定坡体表层土体结构,有利于路基承载基础保持完整状态。同时,施工单位利用浆砌片石防护等结构形式,建立稳定的表层覆盖体系,能够增强边坡抗冲刷能力,减少径流剥离坡体表层颗粒的影响,保证坡体结构维持稳定受力状态。完善的防护层结构可以减弱降雨入渗深度,控制水分在土体内部的迁移路径,如此便能够避免含水量快速升高致使土体抗剪强度下降。施工

单位布设边沟、截水沟及排水盲沟等排水设施,可以有效调控坡体内部水压,维持稳定的路基结构。结构稳定性提升之后,路基承载体系便会更加均衡,有利于路基内部应力分布保持连续稳定,从而持续增强整体结构承载能力。

1.2 抵御雨水冲刷侵蚀

雨水沿坡面汇流时会形成具有一定冲击力的径流通道,逐渐剥离坡体表层土粒,致使局部区域出现细沟状冲蚀形态,而且冲刷过程持续发展后将会形成更深的冲沟结构,进而削弱坡体的整体稳定状态^[2]。施工单位在坡面建立稳定的防护层结构,让坡面表层形成具有抗冲蚀能力的保护体系,从而有效削减雨水冲击能量。浆砌片石护坡结构借助石材密实拼砌形成连续防护面层,能够承受坡面径流的冲击作用,避免雨水直接接触土体颗粒,有利于坡面保持稳定状态。混凝土预制块护坡凭借块体咬合结构形成规则稳定面层,能够保证结构表面具有较高的抗冲刷能力,同时可以促使坡面水流均匀分散,减少集中汇流冲击局部坡面的压力。与此同时,施工单位利用表层结构强化坡面稳定,还借助完善排水体系控制雨水运动路径,其中截水沟沿坡顶布设后可以及时拦截上部汇水,减弱坡面水流规模,而坡脚排水沟与盲沟结构则承担水流导排功能,有利于雨水沿既定通道迅速排出路基结构区域,避免水流滞留坡体内部,降低降雨条件侵蚀路基结构的影响。

1.3 优化排水防护体系

鉴于路基结构长期处于自然降雨、地下水活动及地表径流影响环境,雨水沿坡面渗入土体后,会逐渐

作者简介:陈宣任(1990-),男,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁。

改变土体内部含水率,若水分持续聚集,就会明显减弱土颗粒之间的摩阻力,降低抗剪强度,进而影响坡体稳定条件^[3]。通过建立排水防护体系,沿坡顶布设截水沟,能够有效控制上部汇水方向,避免大量降雨直接进入坡体结构区域,有利于从源头减弱水流冲击坡面的压力。施工单位布置坡面急流槽顺坡,沿专用导流通道迅速向下排泄雨水,可以有效调控水流速度,保持坡面的稳定结构。同时,施工单位布设坡脚排水沟,可以沿稳定沟槽系统将雨水持续排出路基范围,防止水流长期滞留坡脚部位而引发坡体软化现象。施工单位设置盲沟结构的透水材料层与反滤层结构,有利于地下水顺利进入排水通道并沿既定方向导出路基结构区域,从而持续调节土体内部孔隙水压力。除此之外,排水设施与防护结构之间形成连续稳定体系,可以利用预留排水孔顺利排出浆砌片石护坡结构表面水流,保证混凝土框格防护结构内部植被根系与土体形成稳定结合层,能够沿排水路径释放坡面水分。

1.4 提高运行安全水平

建立稳定可靠的边坡保护体系,能够保持稳定的坡体结构,为公路交通运行提供安全基础条件^[4]。边坡防护结构覆盖坡面后,坡体表层可以形成具有较高强度的保护层,避免坡面结构直接承受雨水冲刷作用,有利于土体结构保持紧密状态,如此车辆荷载可以在路基内部形成稳定传递路径,从而维持安全的公路运行环境。防护结构稳定存在后,可以有效控制边坡区域潜在失稳因素,增强路基结构整体稳定性。其中,浆砌片石护坡结构凭借石材拼砌会形成连续刚性面层,可以有效抵御外界环境冲击,保持稳定的坡体表层形态。混凝土框格护坡利用规则框架结构锁定坡面土体,能够让边坡形成稳定结构单元,减少坡体表层土体松散现象。另外,生态防护体系在植被根系与土体之间形成加筋结构,可以稳固坡体内部结构,增强抗剪能力,提高公路工程整体安全水平。

2 公路工程路基防护施工技术要点

2.1 植物防护

整形压实坡面后,需要改良处理表层土体,掺入腐殖质土壤及有机基质来增强土壤肥力,让坡面土壤形成较为稳定的团粒结构,为植被生长创造良好条件。为保证植物根系顺利穿透表层并进入坡体内部,应将坡面表层土壤厚度控制在10~15 cm范围之内,保持土体含水率在适宜区间,促使坡面表层形成具有加筋效应的稳定结构体系,从而提高边坡抗剪能力^[5]。同时,需要将草本植物根系密集控制在0~20 cm土层

范围内,如此可有效固定表层土体结构,减弱雨滴冲击产生的土粒剥离现象,其中坡面植被覆盖率达到85%以上时,能够降低雨水径流速度,减少坡面土壤侵蚀量。除此之外,植物防护施工阶段需要严格控制播种密度,控制播种密度在30~40 g/m²范围,维持适宜土壤湿度,保证草籽在坡面均匀分布并快速发芽,常用护坡草种包括狗牙根、早熟禾等耐旱型草本植物,此类植物根系发达,且生长周期稳定,可以短期内形成连续植被层。

2.2 骨架植物防护

整形处理坡面后,施工单位需要依据边坡坡率布设骨架结构,将骨架框格间距控制在2.0~3.0 m范围,保持框格梁宽度在30~40 cm之间,把骨架梁高度维持在25~30 cm区间,且常见结构形式包括混凝土框格骨架及浆砌片石骨架,如此可保持稳定坡面表层的结构状态,减少坡面土体出现整体转移现象。骨架结构施工后,应回填改良土壤来满足植被生长条件,将回填土层厚度保持在10~15 cm范围,并在土壤中适量加入腐殖质基质以增加土体肥力,以保证草本植物能够快速生长。为促进坡面植被能够在较短周期内形成连续覆盖结构,可以在框格区域播撒耐旱型草本植物种子,控制播种密度在30~40 g/m²范围,常见草种包括高羊茅、黑麦草及狗牙根等,植被根系逐渐延伸进入坡体内部后,土体颗粒之间便可形成稳定结合结构。另外,骨架结构在坡面形成稳定支撑后,可以调控降雨产生的地表径流,水流分散流动,减弱冲刷能量,让坡面土体结构保持稳定形态。

2.3 工程防护

施工单位需按照坡率与地质条件选择合适的防护结构形式,借助浆砌片石护坡、混凝土预制块护坡及重力式挡土结构构建稳定的支护体系,压实平整表层土体,让坡面结构形成均匀受力基础,同时需要保证基础承载能力满足防护结构稳定要求。为了让护坡结构形成整体稳定结构层,施工单位应将浆砌片石护坡结构设置在坡率较缓区域,把石材尺寸控制在20~30 cm范围,保持砌筑厚度在30~40 cm区间,如此石材结构便可形成紧密稳定面层。同时,鉴于混凝土预制块护坡结构适用于坡率较陡区域,可以控制预制块厚度在10~15 cm范围,保持块体之间的稳定咬合关系,并在护坡结构底部设置碎石垫层,把垫层厚度控制在10~15 cm区间,以此增强坡面排水能力,避免雨水在护坡结构内部形成滞水现象。如此一来,防护结构可以承受外界环境冲击,避免坡体表层受雨水冲刷影响进而维持边坡结构的长期可靠形态,持续增强路基整体承载能力。

2.4 沿河路基防护

由于沿河路基长期处于水流冲刷与水位变化交互影响环境中,坡脚区域承受持续水动力作用,易侵蚀破坏土体结构,影响路基稳定条件,施工单位需要建立稳定防护结构,削弱河流冲刷能量,保持稳定的路基边坡形态。为保证坡脚区域具备较强抗冲刷能力,坡脚区域可以设置浆砌片石护坡结构,将石料粒径控制在 20~40 cm 范围,把砌筑厚度保持在 40~50 cm 区间,并采用水泥砂浆填充石料,形成整体稳固结构层。与此同时,施工单位可以采用干砌块石或混凝土护坡体系,利用连续铺设方式覆盖坡面区域,防止河水冲击作用直接接触土体结构,期间干砌块石结构依靠石料之间形成稳定嵌挤关系,能够让坡面结构稳定。需要注意的是,块石粒径应控制在 25~35 cm 范围,保持护坡厚度在 35~45 cm 区间,并在坡脚区域设置抛石防冲结构,在河床范围铺设粒径 30~50 cm 块石,以减弱水流冲击能量。另外,沿河路基防护体系需要与排水设施形成协同结构,以顺利排出坡体内部水分,同时布设反滤层结构,保持反滤材料粒径在 5~20 mm 范围,促使坡体内部水分能够顺利凭借反滤层排出结构外部,避免细颗粒土体随水流流失。

2.5 柔性防护

柔性防护技术是利用高强度柔性材料与锚固体系协同作用,对路基边坡形成具有延展性能的稳定防护结构,以保持坡体的稳定形态,这需要施工单位依据坡面高度与坡率布设柔性防护体系,常见结构形式包括主动防护网及被动防护网。其中,主动防护系统利用钢丝绳网与高强度钢丝网覆盖坡面区域,采用直径 8~10 mm 高强度镀锌钢丝绳编织钢丝绳网结构,将网格尺寸保持在 300~350 mm 范围,如此可保证坡体表层形成连续稳定防护层。这样一来,钢丝绳控制锚杆长度在 2.0~3.5 m 区间,借助锚杆体系与坡体内部形成稳定连接关系,促使锚固深度进入稳定岩土层。钢丝绳网覆盖坡面后,岩土体与网体之间会形成紧密接触关系,能够避免坡面颗粒发生滑移,当坡面局部结构出现轻微位移时,网体结构可以随坡面形态变化而调整张力分布,促使坡面结构保持稳定受力状态。值得注意的是,施工单位要热镀锌防腐处理钢丝绳表面,保持镀锌层厚度在 80 μm 以上,以保证材料维持长期稳定性能。除此之外,柔性防护系统施工过程需要保证锚杆布设密度符合设计要求,把锚杆间距控制在 2.0~2.5 m 范围,利用专用卡具固定钢丝绳在锚杆的

连接点位置,并借助张拉装置调节整体张力,促使网体紧密贴合坡面结构。

2.6 抗滑桩防护

分析边坡稳定性后,施工单位需要依据滑坡体规模与滑移面深度确定抗滑桩布设位置,利用桩体结构对滑体形成横向阻挡作用,采用钢筋混凝土结构,把桩径控制在 1.2~1.8 m 范围,保持桩间距在 3.0~5.0 m 区间,如此桩体结构便可以形成连续稳定支撑体系。为了有效抑制滑移趋势,施工单位需要让桩体长度穿越潜在滑移面并进入稳定岩层区域,且埋入深度一般达到 3.0~6.0 m,保证桩体底部具备可靠锚固条件。同时,桩体截面应采用矩形或圆形结构,保持混凝土强度等级在 C30 以上,并在桩体内部配置纵向钢筋与箍筋结构,将纵筋直径控制在 20~28 mm 区间,这样有利于桩体在承受侧向推力时能够维持结构稳定形态。另外,施工单位可让桩体上部与冠梁结构连接,冠梁宽度控制在 1.0~1.5 m 范围,促使各桩之间形成整体稳定体系,从而均匀分散坡体滑动力,保持路基边坡的可靠稳定结构,为公路工程运行基础提供坚实的支撑。

3 结束语

构建完善的公路工程路基防护施工体系,有利于让边坡结构保持稳定状态,维护公路工程运行安全。施工单位需要进一步强化防护技术精细化应用,利用智能监测手段提高防护结构设计精度,同时协同发展生态型防护技术与工程结构,保证路基防护体系兼具稳定性能与环境适应能力,从而推动现代公路工程安全运行。同时,施工单位还应创新防护材料,选择高性能的防护材料,降低施工成本,提高工程的可持续性,并定期维护防护设施,保证防护体系长期稳定运行,避免自然灾害或突发事件威胁公路工程安全。

参考文献:

- [1] 苏信辉.公路工程路基防护工程施工技术要点分析[J].汽车周刊,2025(07):149-151.
- [2] 郭强.公路工程路基防护施工技术要点分析[J].建筑机械,2025(05):92-94,100.
- [3] 李晓亮.公路工程路基与路面施工技术核心要点分析[J].交通建设与管理,2025(02):153-155.
- [4] 南海涛.路基防护与排水施工技术在高速公路工程中的运用分析[J].科技资讯,2024,22(14):151-153.
- [5] 孙美华.公路工程路基防护施工技术分析[J].中国高科技,2023(02):62-63,66.

公路桥梁施工中钢纤维混凝土施工技术应用

刘 祎

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 随着公路桥梁服役年限延长, 传统混凝土结构逐渐暴露出抗裂性能不足、耐久性下降等问题。本文探讨钢纤维混凝土施工技术在桥梁工程中的应用方法。采用文献研究与归纳分析法, 总结了钢纤维混凝土施工参数与工艺控制, 梳理钢纤维混凝土应用要点。结果表明, 合理控制钢纤维混凝土处理可提升混凝土拌合物结构性能, 进而在应用中显著提高结构抗裂能力。钢纤维混凝土应用能够显著提高公路桥梁的结构抗裂能力。

关键词 公路桥梁施工; 钢纤维混凝土; 桥面铺装; 桥梁接缝; 桥梁加固

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.016

0 引言

钢纤维混凝土(英文为 Steel fiber reinforced concrete, 简称 SFRC)是在普通混凝土中掺入乱向分布短钢纤维形成的多相复合材料, 能够依托纤维的桥接作用提高混凝土抗裂性能。随着公路桥梁工程规模不断扩大, 传统混凝土在桥面铺装、接缝及局部受力部位易出现裂缝问题。而具有良好的力学性能和耐久性能的钢纤维混凝土正逐渐应用在桥梁施工与加固工程中。因此, 对钢纤维混凝土施工技术应用的研究尤为重要。

1 钢纤维混凝土处理技术要点

1.1 原材料控制

1. 钢纤维。钢纤维混凝土中的钢纤维是增强材料性能的重要组成部分, 直接关系到混凝土抗裂性能。钢纤维混凝土中的钢纤维分为圆直型、熔抽型、剪切型与端钩型, 其中端钩型钢纤维应用最为普遍, 其端部结构更易形成机械锚固, 增强与水泥基体间的握裹力。同时, 施工人员在处理钢纤维混凝土时, 需严格控制钢纤维长度在 25 ~ 60 mm 范围内, 等效直径为 0.4 ~ 0.9 mm, 长径比在 40 ~ 80 之间, 以兼顾增强与施工分散性。同时, 保证钢纤维抗拉强度不低于 380 MPa, 并在桥梁关键受力部位选用抗拉强度超过 1 000 MPa 的冷拔钢丝型钢纤维, 以提高结构整体抗冲击能力^[1]。

2. 水泥与骨料。水泥与骨料是钢纤维混凝土的主要基体材料, 多选择强度等级 42.5 或 52.5 的普通硅酸盐水泥, 以维持钢纤维混凝土的早期强度发展能力,

更好地满足桥梁结构所需抗压强度要求。施工人员在制作钢纤维混凝土过程中要合理控制其骨料级配, 选择粒径不大于钢纤维长度的 2/3, 且最大粒径在 20 mm 以内的粗骨料, 以减少纤维在骨料间架桥聚集的可能, 保证混合料密实性^[2]。同时, 选用中粗砂细骨料, 控制细度模数在 2.3 ~ 3.0 间, 且严格控制钢纤维混凝土中的含泥量, 保证其不超过 3%, 避免出现过多泥质颗粒削弱水泥浆体与骨料黏结性能的情况, 保障混凝土的整体强度。

3. 外加剂与掺合料。为改善钢纤维混凝土的结构性能, 施工人员在拌合钢纤维混凝土时, 合理使用外加剂与矿物掺合料。钢纤维混凝土中的钢纤维会增加混凝土内部摩阻, 降低拌合物流动性, 因此施工人员需要掺入相应的高效减水剂, 降低钢纤维混凝土的水胶比, 提高混凝土和易性, 保证混合料的可泵性。同时, 适量加入引气剂, 以在钢纤维混凝土内部形成均匀微小气泡结构, 提高混凝土抗冻性能。若公路桥梁对耐久性要求较高, 施工人员还可在拌合过程中掺入硅灰、粉煤灰等活性矿物掺合料, 填充水泥浆体中的孔隙, 提高混凝土密实度, 改善拌合物流动性能, 提升混凝土长期强度, 进一步增强桥梁结构耐久性。

1.2 配合比设计要点

1. 钢纤维掺量。钢纤维混凝土性能在一定程度上受钢纤维掺量控制, 合理的体积掺量能提升钢纤维混凝土抗裂性能与抗冲击性能。公路桥梁结构施工中, 一般会将钢纤维混凝土中的钢纤维体积掺率控制在 1.0% ~ 2.0%, 对应质量掺量约为 78 ~ 156 kg/m³, 进而防止

作者简介: 刘祎(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

掺量过低所导致的空间分布结构不良问题,减少出现掺量过高所增加的拌合物内部摩擦,防止出现纤维团聚现象。针对桥面铺装及其他薄壁结构构件,施工人员还要调整钢纤维掺量到 1.2%~1.5%,使混凝土基体中的钢纤维形成均匀稳定的分布状态^[3]。

2. 砂率。钢纤维混凝土相较一般的混凝土,在内部比表面积方面更大,在拌合物包裹砂浆能力方面也提出了更高要求。因此,施工人员需要在配制钢纤维混凝土时有意识地控制砂率,适当提高砂率以增加浆体含量,使砂浆充分包裹钢纤维与骨料颗粒,改善混凝土拌合物的黏聚性。在公路桥梁施工中,通常会控制钢纤维混凝土砂率在 45%~55% 之间,以协调混凝土工作性能与结构性能。

3. 水胶比。水胶比是影响钢纤维混凝土强度发展的重要指标,也会直接影响钢纤维与水泥基体间的界面结合性能。较低水胶比有助于提高钢纤维混凝土的水泥浆体密度,提高基体内部钢纤维的握裹作用,提升混凝土抗拉强度。在公路桥梁工程中,一般会将钢纤维混凝土水胶比控制在 0.40~0.50 范围内,以兼顾混凝土强度要求与施工可操作性。若施工工程对桥梁结构的耐久性要求较高,施工人员可进一步降低水胶比至 0.20 以下,配合高效减水剂,提高混凝土密实度。

1.3 搅拌工艺要点

1. 搅拌设备。在制备钢纤维混凝土的过程中,施工人员要选择高性能搅拌设备,以更好地适应掺入钢纤维后的混凝土内部摩擦,防止出现纤维局部聚集情况。在工程施工中,通常会采用强制式搅拌机进行拌制,借助其搅拌叶片产生的较强剪切、搅动作用,充分混合骨料、浆体与钢纤维,提高混凝土均匀性。若工程要求的钢纤维掺量较高,施工人员还能进一步结合“干拌一湿拌”搅拌工艺,分阶段进行搅拌,增强材料间的混合效果。

2. 投料顺序。为保证钢纤维混凝土中的钢纤维均匀分散,施工人员要注重搅拌的投料顺序,采用“先干后湿”投料方式,即在搅拌机内加入砂、石、水泥以及钢纤维进行 1.5 分钟以上的干拌,使钢纤维初步分散在骨料与水泥颗粒间。完成干拌后,施工人员还要加入水与外加剂进行湿拌,控制时间在普通混凝土基础上增加 1~2 分钟,保证水泥浆体充分包裹骨料、钢纤维。在工程实践中,施工人员也可先湿拌砂、石、水泥与水,并在搅拌过程中借助纤维分散布料设备均匀加入钢纤维,实现逐步分散纤维,提高混凝土均匀性^[4]。

3. 防止结团措施。在搅拌过程中,钢纤维易在混凝土中发生团聚现象,施工人员需要采取针对性预防措施。施工人员要合理控制粗骨料粒径,保证其不超过钢纤维长度 1/2,减少骨料阻碍纤维分散的作用。在材料选择方面,施工人员可采用胶粘成排的钢纤维产品,有效降低结团风险。同时,严格控制搅拌机装料量,保证每次搅拌量在搅拌机公称容量的 1/3 以内,保证拌合物具有足够翻动空间。

2 钢纤维混凝土技术在公路桥梁施工中的应用

2.1 在桥面铺装工程中的应用

桥面铺装层在公路桥梁中长期承受车辆荷载、温度变化及环境侵蚀等作用,易出现收缩裂缝、疲劳裂缝等问题,影响桥梁行车安全。施工单位在该工程中应用钢纤维混凝土技术,可在混凝土基体中掺入端钩型钢纤维,进而使钢纤维在基体内部形成三维随机分布结构,与水泥浆体形成机械咬合作用,桥接约束混凝土内部微裂缝,从而延缓裂缝扩展,提高铺装层的抗裂性能。在此过程中,施工人员还要注意控制钢纤维掺量在 1.2%~1.5% 范围内,保障增强效果,维持混凝土拌合物施工性能。在桥面铺装浇筑过程中,施工人员要结合桥梁结构的纵坡与横坡特点组织施工,基于桥面所具有的复合坡度结构,组合振动梁与平板振动器进行振捣施工,有效控制桥面整体标高与平整度,并补充振实局部区域,提高混凝土内部密实程度。这种组合振捣方式也有助于减少桥面结构的气泡孔隙,避免钢纤维在振动过程中沿振动方向产生定向排列,从而维持钢纤维混凝土的增强效果。为降低混凝土收缩应力,防止桥面铺装结构后续出现裂隙,施工人员还要在施工中选择分仓跳格法进行分块浇筑,合理划分施工区域,为各区块混凝土的硬化提供变形空间,以减少温度收缩引起的约束应力集中现象。随后,及时平整与压实处理浇筑桥梁的表面,开展保湿养护,保持混凝土内部水化反应。在养护过程中,施工人员则要在钢纤维混凝土抗压强度达到约 12 MPa 时进行切缝处理,控制切缝深度在板厚的 1/4~1/3 范围内,并填嵌柔性防水密封材料,以使接缝具有良好的防水性能,释放早期收缩应力并控制裂缝发展方向,提高公路桥梁的长期服役性能。

2.2 钢纤维混凝土桥面施工

桥面结构在公路桥梁工程中多受复杂荷载与环境共同作用,在重载交通条件下,易产生开裂、剥落等问题。基于此,施工单位在桥面施工中应用钢纤维混

凝土,能有效优化施工材料组成,提高桥面结构的整体性能。针对桥面密集钢筋网布设的结构特点,施工人员多选用直径为0.18~0.20 mm的超细钢纤维,以提高钢纤维混凝土的分散性能与界面结合能力,进而在混凝土基体中形成稳定的空间增强网络,提高混凝土抗拉性能。同时,采用多级颗粒级配体系,在骨料选择方面,使用毫米级细骨料,减少骨料颗粒对纤维分布的影响,配合硅灰等微米级活性矿物掺合料,借助二次水化反应提高混凝土内部结构密实度。在此基础上,合理调整特种钢纤维的长度、掺量以及颗粒级配,可形成稳定的纤维增强体系。在此基础上,施工人员还需加入新型改性触变组分,增加钢纤维混凝土的流动稳定性及结构稳定性,形成“高纤维掺量、自流平、良触变、微膨胀”的综合性能组合,更好地满足桥面铺装对流动性、抗裂性以及结构密实性的要求^[5]。在施工组织过程中,施工人员要采用“分次施工、补偿收缩、保湿养护”技术措施,减少大面积连续浇筑产生的温度收缩变形集中现象,并合理规划施工区域,控制结构应力分布。完成施工后,施工人员还需及时覆盖保湿养护,维持混凝土内部水化反应条件,提升桥面的强度,提高结构密实度,显著提升桥面结构的耐久性。

2.3 在桥梁接缝工程中的应用

公路桥梁结构体系的接缝部位受力复杂,易在车辆荷载、温度变化等多因素共同作用下出现裂缝、剥落等问题。施工人员在部分应用钢纤维混凝土技术,能够借助纤维增强作用提高混凝土的抗疲劳能力,使接缝区域形成稳定可靠的整体结构。该技术在工程实践中主要应用于维修加固桥梁伸缩缝及预制构件间的湿接缝施工。桥梁伸缩缝维修加固施工过程中,施工人员需全面清理伸缩缝区域的原有损坏结构,凿除表层松散、破损的混凝土,直至露出坚实基层,保证新旧混凝土的结合基础。随后,在既有结构中植入连接钢筋,以机械锚固方式增强新旧混凝土的界面粘结能力。之后,施工人员还要选用钢纤维细石混凝土进行浇筑施工,抑制该区域裂缝发展,提高接缝区域的抗裂能力。浇筑施工阶段,则采用分层浇筑方式,逐层填充接缝空间,避免产生空洞现象。在振捣作业中,施工人员要采用分层振捣工艺,充分密实混凝土内部结构,避免过度振动造成钢纤维局部定向排列,以减少裂缝问题。在装配式桥梁结构施工中,施工人员需在预制构件间预留接缝空间,并使用钢筋进行连接,进而浇筑钢纤维混凝土,增强预制构件的结构连续性,提

高桥梁整体刚度,为桥梁长期稳定运行提供可靠保障。

2.4 在桥梁加固工程中的应用

在既有公路桥梁服役过程中,受交通荷载增长及结构老化等因素影响,部分桥梁结构易出现承载能力下降与局部刚度不足等问题。因此,施工单位需进行桥梁加固,应用钢纤维混凝土技术,改善桥梁的结构受力性能,提高桥梁整体耐久性。该技术能够在混凝土基体形成均匀的纤维增强网络,进而在桥梁产生微裂缝时,桥接作用裂缝,分散应力集中,延缓裂缝扩展,提高结构整体抗拉性能。在桥面补强加固施工中,施工人员需系统处理原有桥面结构,凿除桥面劣化层,并在原混凝土表面进行凿毛处理,均匀涂刷界面剂,增强界面粘结性能。同时,在原桥面结构中植入抗剪钢筋,浇筑40~80 mm范围内的钢纤维混凝土补强层,提升桥面结构的整体承载能力。在桥梁负弯矩区、梁端区域以及横隔板连接部位等桥梁结构局部薄弱部位补强施工中,施工单位也可采用钢纤维混凝土进行局部补强,提高结构局部刚度,改善受力状态,提高桥梁结构的承载能力,延长结构的服役寿命。

3 结束语

公路桥梁结构在长期服役过程中承受着复杂荷载与环境因素共同作用,对材料性能提出更高要求。钢纤维混凝土能够在水泥基体中形成均匀分布的纤维增强体系,改善混凝土的抗裂能力,并广泛应用于桥面铺装、桥面结构施工等工程环节中。在公路桥梁施工过程中,掌握钢纤维混凝土施工技术要点可提高建设工作的稳定性,对保证其安全质量具有重要意义。随着相关施工技术不断创新,施工过程的各种难点也在不断被突破,钢纤维混凝土在公路桥梁施工中的应用将更加成熟规范。

参考文献:

- [1] 王瑞菊.公路路面施工中钢纤维混凝土技术的应用[J].工程机械与维修,2025(06):128-130.
- [2] 柯志林.市政桥梁施工中钢纤维混凝土施工技术应用[J].居业,2025(05):70-72.
- [3] 宋勇军.钢纤维混凝土技术在道路桥梁施工中的应用研究[J].四川水泥,2024(06):250-252.
- [4] 胡晓露.钢纤维混凝土技术在道路桥梁施工中的应用[J].工程技术研究,2024,09(09):59-61.
- [5] 吴丽霞,闫中焕.钢纤维混凝土技术在道路桥梁施工中的应用分析[J].科技与创新,2024(07):173-175.

注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用分析

宋茂锋, 刘增龙

(山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250100)

摘 要 注浆技术是公路桥梁隧道施工中应用最广的加固和防渗技术, 具有针对性强、适应复杂地质环境等优势, 在工程质量保障及施工安全防控中起着不可替代的作用。本文立足于公路桥梁隧道施工实际难点, 以实操技术上的技术突破为依托, 对注浆技术的核心应用理念、适用场景、科学的应用途径进行剖析, 突出科技创新和实际操作难度, 避免出现只强调理论而忽略实际的弊端, 以期为同类型工程注浆施工提供可以借鉴的操作思路, 促进公路桥梁隧道工程注浆技术的规范化、精细化、创新化发展。

关键词 注浆技术; 公路桥梁; 隧道施工; 注浆方案; 注浆质量管控

中图分类号: U445; U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.017

0 引言

公路桥梁隧道工程施工常常会遭遇复杂的地质状况, 高水压、断层破碎带、软弱围岩、结构脱空等状况时有发生, 既影响施工进度, 又给工程结构稳定及耐久带来很大危险。注浆技术是用特制浆液向地层或者结构缝隙内注入, 以达到填充、胶结、加固、防渗等多方面作用的技术方法, 是解决这类施工难题的主要手段。由于公路桥梁隧道工程向着深部、复杂地质区域延伸, 传统的注浆技术存在着明显的不足之处, 对于注浆技术的要求也越来越高, 即注入注浆技术的创新性、技术性以及适用性均需得到提高。因此, 针对公路桥梁隧道施工中的注浆技术应用逻辑、适用场景和改进途径展开研究, 解决施工过程中的技术难题, 提高注浆施工质量和效率, 对推动公路桥梁隧道工程高质量发展具有重大的现实意义。

1 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的核心应用理念

注浆技术在公路桥梁隧道施工中的主要应用理念是立足于工程地质实际操作的难点, 以“精准适配、按需注浆、刚柔并济、长效防控”为主要方向, 摒弃传统的注浆“一刀切”的粗放方式, 突出技术的新颖性以及实操的困难程度。其主要意义并不是单纯的浆液注入, 而是在工程实际情况结合工程地质情况, 准确判断围岩裂隙、结构缺陷的分布及受力状况, 依靠浆液配比及施工工艺的革新来达成注浆效果同工程需求的有效契合, 攻克高水压、复杂断层、软弱地层

等施工禁区的技术难题^[1]。不同于纯粹的理论加固思想, 该技术思想更倾向于实际操作和针对性, 既要依靠超前注浆形成坚固的防护体系, 抵御地层变形和地下水侵蚀, 还要考虑施工效率和成本控制, 避免浆液浪费、注浆不密实等问题出现, 并加入智能监测与动态调节的考量, 依照施工过程中出现的地质信息及时调整注浆参数, 实现由“被动补救”到“主动防控”的转变, 凸显注浆技术对于复杂工程的重要支撑作用。其技术难点主要体现在地质精确判断、浆液匹配改良以及动态调节的有机融合之中, 对于施工技术水平有着极高的标准。

2 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的适配应用场景

2.1 公路桥梁施工中的注浆场景

公路桥梁施工中的注浆场景主要关注结构病害控制和承载能力提高, 打破了传统注浆只做基础加固的限制, 契合桥梁桩基、墩台、桥面以及伸缩缝等各种部位复杂施工的需要, 体现出科技创新性和实践上的困难。对于岩溶地区、砂卵石地层等复杂地质造成的桩底沉渣、桩侧泥皮等, 采用高压旋喷注浆加超细水泥注浆的方法, 将桩底空隙、破除桩侧泥皮、提高桩基与周边地层的结合, 解决桩基承载力不够、沉降大的问题, 防止传统注浆易出现的串浆、漏浆现象^[2]。在墩台施工中, 对软土地基引发的墩台不均匀沉降、裂缝隐患, 创新使用复合高强聚合物注浆工艺, 经由精准调配浆液的凝结时间和粘结强度, 针对墩台基础

作者简介: 宋茂锋 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路、桥梁、隧道。

及其周边的地层开展分层注浆加固工作，力求达到加固的效果并且保持结构的韧性，防止注浆过程中对墩台结构带来第二次损害。桥面养护施工时，在路面裂缝、层间脱空等病害处用智能注浆设备把浆液准确注入进去，填充裂缝和脱空的地方，使桥面结构完整，克服传统人工注浆配比不均、注浆不饱满的技术难题，达到注浆施工的精细化、高效化目的，满足不同等级公路桥梁的施工和养护需求。

2.2 隧道施工中的注浆场景

隧道施工中注浆场景大多用来增强围岩、阻止漏水堵漏等，对高水压、断层破碎带、强风化岩层这类地质情况的地区来讲，有着较强的新奇性和施工操作难度。在隧道超前支护上，对断层破碎带、软弱围岩容易坍塌的问题，提出超前小导管注浆与帷幕注浆相结合的施工方法，在隧道开挖之前形成稳定的防护帷幕，封堵围岩裂隙、加固软弱地层，防止地下水渗透和围岩变形，克服了隧道开挖过程中坍塌、突水突泥等重大安全隐患。在海底隧道等特殊环境里，利用海上注浆平台搭建和快凝胶材料前置封堵技术，解决了高压海水冲释浆液、浆液难渗入深层裂隙的技术难题。在隧道衬砌施工阶段发现隧道衬砌有裂缝、管片间隙等缺陷的时候，利用智能二次注浆技术对注浆浆液的比例及注浆压力实施精确控制，可填充衬砌内的空隙，堵住漏缝之处，杜绝了传统注浆方法引发的管片错位、注浆管被堵塞等情况。对全断面硬岩、软硬不均地层等复杂工况下的隧道掌子面加固，用分段前进式注浆工艺加间歇注浆法，使浆液均匀填充裂隙，提高掌子面的稳定性，解决盾构掘进过程中刀具磨损、掌子面溃口等技术难题，保证隧道施工的安全和进度。

2.3 公路桥梁隧道衔接段注浆场景

公路桥梁隧道衔接段注浆场景是注浆技术应用难点和创新之处。该区域受力复杂，地质状况多样，衔接部位容易产生沉降差、裂缝、渗漏等问题，传统注浆技术很难实现精准匹配，须依照衔接段的结构属性和受力规律来革新运用。衔接段注浆是解决桥梁和隧道过渡区刚度突然变化、地层不均匀下沉、防渗薄弱等问题的重要手段，采用分层注浆、分区控制、刚柔结合的创新工艺，兼顾衔接部位的结构韧性与整体性。在衔接段地基处理中，针对桥梁桩基和隧道围岩衔接处的地层不同，采用渐变式注浆工艺，改变浆液强度、注浆压力来达到地基刚度平缓变化的目的，防止因为刚度突然变化而造成结构开裂^[3]。衔接段衬砌与桥台

衔接处，用柔性注浆材料和刚性注浆材料相结合的方法来填充衔接缝隙，封堵渗漏通道，又能适应衔接段的微小变形，防止注浆层开裂失效。对衔接段地下水分布不均、渗漏隐患严重的地段，用超前探孔注浆与同步注浆相结合的办法，准确封堵地下水渗透途径，克服衔接段因为渗漏引发的结构腐蚀、强度下降等问题，达成公路桥梁和隧道衔接部分的无缝衔接，保证整个工程结构的稳定与耐用。

3 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用路径

3.1 精准化注浆方案设计路径

精准化注浆方案设计是注浆技术高效应用的基础，关键在于冲破传统方案设计地质研判不准、参数设定不妥的束缚，创建起“地质精确探查—参数科学匹配—方案不断改进”的全部过程设计线路，突出技术创新性以及实践操作难易程度。方案设计之前使用二维探地雷达、超前钻探等多种检测手段联合起来，对施工区域的地质情况展开全方位排查工作，精确找出围岩裂隙的分布情况，同时查明地下水含量及结构上的瑕疵等内容，从而防止因为只依靠经验来规划而出现的设计同实际情况相偏离的问题。摒弃传统固定参数模式，在施工部位、地质类型的基础上，精准调配浆液配比、注浆压力、注浆速度等核心参数，根据不同的地层孔隙率、渗透性来优化注浆量分配方案，防止出现“一刀切”的现象而造成浆液浪费或者注浆不密实的情况发生。同时，把数字化设计的理念渗透进去，创建注浆方案的数字化模型，模拟浆液扩散途径及填充情形，预见施工期间可能会浮现的难题，预先制订出对应的解决办法，借助施工过程中所得地质回馈以及监测数据，及时对注浆方案加以调整，保证方案的设计同实际施工相契合，破解复杂地质条件下的注浆方案设计技术难题，为注浆施工提供科学引领。

3.2 标准化注浆施工实施路径

标准化注浆施工实施路径，就是冲破传统注浆施工操作不规范、流程杂乱的困局，塑造起“设备标准化—操作规范化—过程精细化”的运作架构，突出技术创新性以及实操难易度，保证注浆施工品质的稳定。抛弃传统的人工注浆设备，采用智能注浆设备来完成浆液的自动配比、注浆压力的智能调节、注浆量的准确计量等工作，从而消除由于人工操作而产生的配比偏差、压力失控等问题，并且定期对注浆设备的计量器具进行检定、校核，保证设备性能与施工需求相匹配^[4]。施工操作上制定标准化操作程序，对钻孔、封孔、注浆、

凝固等各个环节的操作方法作出规定, 钻孔结束后用高强度水泥砂浆封孔, 静置达到要求再进行注浆作业, 注浆过程中以“慢注慢压”为原则, 根据地质情况调节注浆速度, 大孔隙、宽裂隙采用间歇注浆法, 防止跑浆、串浆。分区控制、分层注浆, 明确各个施工环节的责任分工, 做好施工记录, 保证每一个工序都符合规范要求, 根据现场实际情况的变化情况灵活地调整施工工艺来解决复杂施工环境下的注浆施工操作难题, 实现注浆施工的标准化、规范化和高效化。

3.3 精细化注浆质量管控路径

精细化注浆质量管控途径, 就是冲破传统质量把控“重结果, 轻过程”的束缚, 创建起一个由事前防范、事中监督、事后检验所构成的全流程管控架构, 突出技术革新性和实操性, 从而保证注浆成果符合设计要求。事前防控阶段严格把控注浆材料质量, 对进场的注浆材料做严格的检测, 核查质量合格证和检测报告, 保证材料性能符合要求, 对施工人员进行专业培训, 提高操作技能和质量意识, 防止因材料不合格、操作不规范造成质量隐患。事中监测阶段用智能监测设备, 实时观测注浆压力、注浆量、浆液扩散速度等主要参数, 并且创建监测数据台账, 一旦出现参数异常, 立刻改变施工方案, 同时留意周边地层及结构的变动状况, 迅速找出坍塌、渗漏等危险问题, 实现注浆进程的动态管理。事后验收阶段, 放弃传统的单一验收方式, 采用钻孔取芯、无损检测等多手段相结合的方式对注浆饱满度、芯样完好率、抗压强度恢复率等进行检查, 保证注浆效果达到要求, 对不合格的部位制定出相应的返工方案, 实施补注浆处理, 并且创建起质量追溯体系, 使注浆质量可以实现全过程追溯, 解决注浆质量管控难度大、效果无法保障的技术难题。

3.4 创新化注浆技术升级路径

创新化注浆技术升级路径, 就是针对公路桥梁隧道施工复杂的需求, 从材料、工艺、设备、理念四个方面入手, 对传统注浆技术进行革新, 形成具有全面性的技术升级模式, 强调技术创新性和实践操作难度, 促使注浆技术向着精细化、智能化、长效化迈进。研发复合高强聚合物、快凝胶等新型注浆材料, 优化材料配比, 提高材料的粘结强度、抗渗性、耐久性, 适应不同的复杂地质工况要求, 重视材料的环保性, 不给周围环境带来污染。工艺上采用超前注浆、同步注浆、二次注浆等多种方式, 在高水压、复杂断层等困难地质条件中, 提出渐变式注浆、围封注浆等多种新注浆

工艺, 提高注浆效果。就设备而言, 采用智能注浆设备, 并且融入物联网、大数据技术, 在注浆过程中对注浆情况进行自动化、智能化的监管, 注浆参数的调节更加准确, 减少了人工操作, 施工难度得到下降。在理念上确立“主动防控、长效运维”的观念, 把注浆技术同工程运维结合起来, 创建起注浆效果的长期监测体系, 迅速察觉并处理注浆层的老化、开裂等状况, 实现注浆技术由施工阶段向运维阶段的延伸, 助力注浆技术在公路桥梁隧道中应用的不断更新, 契合工程高质量发展的要求^[5]。

4 结束语

注浆技术是公路桥梁隧道施工的关键技术之一, 其应用直接影响到工程结构稳定性、耐久程度以及施工安全性, 适应复杂地质环境, 可破解施工技术难题。通过对注浆技术主要应用理念、应用场合、应用路径进行分析, 得出注浆技术要从实际操作出发, 体现创新思维和技术难度, 实现精准化、标准化、精细化、创新化的应用。随着公路桥梁隧道工程向着复杂的地质、深部区域扩展, 在注浆技术发展过程中, 需要不断地克服传统的不足之处, 并且通过材料、工艺、设备、理念全方位的升级来满足不同的施工环境需求, 从而解决高水压、断层破碎带、衔接段沉降等技术难题。未来要结合工程实操不断积累经验, 促使注浆技术规范应用和持续创新发展, 把注浆技术与数字化、智能化技术深度融合起来, 提高施工效率和质量, 为公路桥梁隧道工程高质量发展提供有力的支撑, 充分发挥注浆技术在工程安全控制与质量保证中的关键作用。

参考文献:

- [1] 王建国. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用[J]. 汽车周刊, 2026(03):73-75.
- [2] 杨振雷. 灌浆加固技术在公路桥梁隧道施工中的应用研究[J]. 汽车周刊, 2025(12):77-79.
- [3] 谢志丹. 灌浆加固技术在公路桥梁隧道施工中的应用[J]. 工程技术研究, 2025,10(20):59-61.
- [4] 许晓天. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的应用研究[J]. 科技资讯, 2025,23(14):119-121.
- [5] 达姜维. 注浆技术在公路桥梁隧道施工中的具体应用探究[J]. 产业创新研究, 2024(02):106-108.

高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施

郝旭鹏

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘要 高速公路隧道工程作为交通路网的关键控制性节点, 其洞身开挖与初期支护的施工质量直接决定隧道结构安全、施工效率及运营耐久性。本文结合新奥法施工原理, 针对高速公路隧道施工的复杂性和高安全性要求, 系统探讨洞身开挖施工技术的选择与应用、钻爆工艺优化、出渣运输流程, 详细阐述钢筋网铺设、喷射混凝土、锚杆支护、钢架支护等初期支护技术的实操要点并分析开挖与初期支护的协调施工策略, 以期在高速公路隧道洞身施工提供参考。

关键词 高速公路隧道; 洞身开挖; 初期支护; 钻爆工艺; 协调施工

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.018

0 引言

随着我国高速公路路网向山区、丘陵地带延伸, 隧道工程的建设规模不断扩大, 施工难度也随之提升。洞身开挖作为隧道施工的核心工序, 直接扰动围岩原有应力平衡, 若施工方法选择不当或操作不规范很容易引发围岩坍塌、变形等安全隐患; 初期支护作为隧道结构的第一道安全屏障, 承担着传递围岩压力、约束围岩变形的重要作用, 其施工质量直接影响隧道后续衬砌施工及长期运营安全。在此背景下, 深入研究高速公路隧道洞身开挖施工技术 with 初期支护措施, 优化施工流程, 强化各工序的协同配合, 对提升隧道施工质量、保障施工安全、缩短施工工期具有重要的现实意义, 也能为同类隧道工程施工提供实践借鉴。

1 高速公路隧道洞身开挖施工技术

1.1 开挖方法的选择与应用

1.1.1 全断面开挖法

高速公路隧道洞身开挖施工前, 施工单位需结合围岩完整性与力学性能选择适配的全断面开挖模式, 从而最大限度减少对围岩的多次扰动, 提升施工连续性^[1]。施工单位需先对隧道断面进行精准放线, 采用全站仪确定开挖轮廓线, 误差控制在 ± 5 cm以内, 再搭配多功能台架凿岩机进行全断面钻孔作业, 钻孔深度控制在 $3 \sim 5$ m, 循环进尺与围岩级别适配, I~II级围岩可按 $3 \sim 5$ m控制, III级围岩采用预加固措施后可按 $2 \sim 3$ m控制。

1.1.2 台阶开挖法

对于围岩稳定性中等、断面跨度较大的隧道段落

来说, 台阶开挖法能通过分层开挖、分层支护等措施有效控制围岩变形, 兼顾施工安全与效率(见图1)。施工单位需先划分上下台阶, 上台阶高度控制在 $3 \sim 4$ m, 宽度为隧道断面宽度的 $1/2 \sim 2/3$, 采用短进尺开挖, 每次进尺 $1.5 \sim 2.5$ m, 开挖后及时施作初期支护, 形成临时受力体系。下台阶开挖滞后上台阶 $3 \sim 5$ m, 避免上下台阶施工相互干扰, 开挖过程中严格控制台阶坡度, 一般为 $1:0.5 \sim 1:1$, 防止台阶坍塌。施工单位需安排专人负责台阶开挖的高程与坡度控制, 采用水平仪实时监测, 确保台阶尺寸符合设计要求。

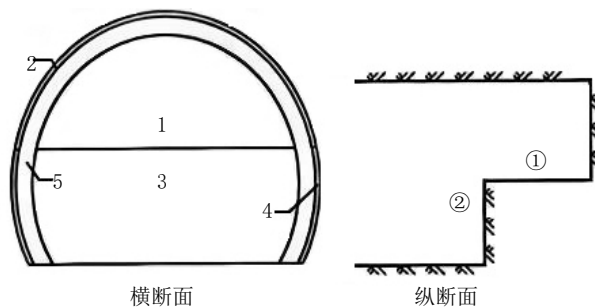


图1 台阶法开挖示意图

1.1.3 分部开挖法

面对软弱松散、稳定性较差的IV~V级围岩, 分部开挖法可凭借分块开挖、逐步封闭等措施降低围岩坍塌风险, 适配大跨度隧道施工需求。施工单位可采用单侧壁导坑法实施分部开挖, 先开挖侧壁导坑, 导坑宽度不宜超过0.5倍洞宽, 高度至起拱线为宜, 开挖后立即施作锚喷支护及中壁墙临时支撑, 尽快实现导坑支护闭合。随后开挖上台阶, 使其一侧支撑在导

作者简介: 郝旭鹏(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高速公路建设。

坑支护上,另一侧支撑在下台阶预留岩体上,上台阶开挖完成后及时施作拱部初期支护,最后开挖下台阶并完成边墙初期支护,尽快实现全断面闭合。

1.2 钻爆施工工艺

1.2.1 掏槽技术

掏槽技术作为钻爆施工的首要环节,施工单位需根据围岩硬度与整体性优化掏槽方式及参数。施工单位优先采用直眼掏槽或斜眼掏槽,硬岩地段选用直眼掏槽,掏槽孔深度比周边孔深 10~20 cm,孔间距控制在 15~25 cm,孔数设置为 6~8 个,呈对称布置;软岩地段选用斜眼掏槽,掏槽孔倾角控制在 60°~75°,孔深 2.5~3.5 m,确保掏槽效果。钻孔过程中需保证掏槽孔垂直度,误差不超过 1°,孔内无岩粉、积水,采用高压风吹洗清理孔内杂物。装药时选用适配的炸药,掏槽孔装药量比周边孔增加 20%~30%,采用连续装药结构,药卷之间紧密接触,起爆时优先引爆掏槽孔,为后续爆破创造自由面。

1.2.2 光面爆破技术

光面爆破技术能有效控制隧道开挖轮廓,减少超挖、欠挖,保护围岩完整性,降低初期支护工程量^[2]。施工单位需根据围岩级别确定光面爆破参数,周边孔间距控制在 40~60 cm,抵抗线为 50~70 cm,炮孔偏斜度不超过 0.5%,孔深与开挖循环进尺一致。周边孔采用间隔装药结构,药卷直径选用 25~32 mm,装药集中度控制在 0.15~0.25 kg/m,采用导爆索起爆,确保周边孔同时起爆。炮孔堵塞选用可塑性好的黏土炮泥或水炮泥,堵塞长度不小于 20 cm,分层捣实,防止炸药爆炸时高压气体过早逸出。爆破完成后,施工单位需及时检查开挖轮廓,超挖部分及时采用喷射混凝土填补,欠挖部分进行补钻爆破,确保开挖断面符合设计要求,同时减少对围岩的扰动。

1.3 出渣运输

出渣运输作为洞身开挖的衔接工序,施工单位可采用“挖掘机+装载机+自卸汽车”的出渣运输模式,挖掘机负责掌子面渣体清理,装载机配合将渣体装入自卸汽车,自卸汽车选用载重 15~20 t 的车型,运输路线沿隧道一侧布置,预留另一侧作为施工通道。出渣前需清理运输路线,确保路面平整、无障碍物,运输过程中控制行车速度,隧道内行车速度不超过 5 km/h。施工单位还可在隧道出口设置渣体堆放场,对渣体进行分类堆放,可回收利用的渣体用于隧道回填,剩余渣体按环保要求妥善处置,确保出渣运输高效、有序、环保。

2 隧道初期支护施工技术

2.1 钢筋网铺设

钢筋网铺设作为初期支护的重要组成部分,能有效分散围岩压力,增强喷射混凝土的整体性与抗裂性能^[3]。施工单位需选用 HPB300 级 $\Phi 8$ 钢筋加工钢筋网,网格尺寸控制在 20 cm \times 20 cm~25 cm \times 25 cm,钢筋调直后采用数控切断机精准下料,切断长度偏差不超过 ± 5 mm,调直后的钢筋直线度偏差不超过全长的 1%。钢筋网采用网片排焊机焊接成型,焊接电流、电压根据钢筋直径设定,焊点牢固,无虚焊、漏焊现象,焊缝长度不小于 10d (d 为钢筋直径)。铺设前清理岩面浮石、灰尘,采用高压风枪吹扫干净,钢筋网铺设紧贴岩面,间距控制在 3~5 cm,搭接长度不小于 30d 且不小于 1 个网格长边尺寸,搭接处采用焊接固定。

2.2 喷射混凝土施工

喷射混凝土施工需兼顾强度与密实度,依托快速凝结形成支护层及时约束围岩变形,施工单位需从材料、工艺、操作等多方面把控质量^[4]。施工单位可选用 C25 喷射混凝土,水泥采用 P.042.5 级普通硅酸盐水泥,骨料选用粒径不超过 15 mm 的碎石,砂采用中砂,含泥量不超过 3%,水灰比控制在 0.45~0.55,添加速凝剂,掺量为水泥用量的 2%~4%,确保混凝土初凝时间不超过 5 min、终凝时间不超过 10 min。采用湿喷法施工,喷射机工作压力控制在 0.3~0.5 MPa,喷头与岩面保持 1~1.5 m 距离,喷射角度垂直于岩面,分层喷射,每层喷射厚度控制在 5~8 cm,前一层混凝土达到设计强度 70% 后再进行下一层喷射,总厚度符合设计要求(一般为 10~15 cm)。喷射过程中及时清理回弹料,回弹率控制在 15% 以内,施工完成后对喷射混凝土表面进行修整,确保表面平整,无裂缝、空鼓现象。

2.3 锚杆支护施工

锚杆支护凭借将锚杆植入围岩内部实现围岩与支护体系的协同受力,从而增强围岩稳定性。施工单位需严格控制锚杆选型、钻孔、注浆等关键工序^[5]。选用 HRB400 级 $\Phi 22$ ~ $\Phi 25$ 螺纹钢锚杆,长度根据围岩级别确定,IV 级围岩锚杆长度为 2.5~3.5 m,V 级围岩为 3.5~4.5 m,锚杆间距控制在 1.0~1.2 m,呈梅花形布置。采用潜孔钻钻孔,钻孔直径比锚杆直径大 10~15 mm,钻孔深度比锚杆长度大 10~20 cm,钻孔垂直度误差不超过 1°,钻孔完成后采用高压风吹洗孔内岩粉、积水。注浆采用水泥砂浆,水灰比为 0.5~0.6,注浆压力控制在 0.3~0.5 MPa,采用压力注浆法,

确保注浆饱满,注浆量不小于设计值,锚杆植入后及时固定,待砂浆强度达到设计强度70%以上,方可施加预应力。

2.4 钢架支护施工

钢架支护适用于围岩稳定性较差的段落,能有效承受围岩压力,控制围岩大变形。施工单位需严格控制钢架加工、安装及固定质量。选用I16~I20型钢加工钢架,根据隧道断面尺寸在专用工装台上进行胎模焊接,工装台采用20mm厚钢板制作,主筋冷弯成型后检查弧度,沿隧道周边轮廓误差 $\leq \pm 3$ mm,平面翘曲 ≤ 2 cm。钢架节段端部焊接连接板,连接板平面与钢架轴线垂直,采用三面焊,焊缝高度 ≥ 10 mm,连接板上钻孔孔径比螺栓直径大1mm,孔眼中心间距误差 $\leq \pm 0.5$ mm。安装时采用全站仪定位,每隔1m标注一个控制点,钢架安装间距误差 $\leq \pm 100$ mm,同一榀钢架左右、上下偏差 $\leq \pm 50$ mm,倾斜度 $\leq \pm 1^\circ$,拱脚位于稳固基岩上,若地质较差可增设槽钢垫块。相邻钢架采用 $\Phi 22$ 螺纹钢作为纵向连接筋,环向间距50cm,焊接牢固,每侧拱脚施作 $\Phi 25$ 中空注浆锁脚锚杆,长度3~4m,与钢架焊接牢固,确保钢架与锚杆、喷射混凝土协同受力。

3 开挖与初期支护的协调施工

3.1 步距控制

按照新奥法原理,开挖后应尽早支护,缩短围岩暴露时间。初期支护应紧跟开挖面,仰拱应及时施作以实现封闭成环。初期支护至掌子面的距离一般不宜大于1倍洞径;仰拱与掌子面的距离,IV级围岩不得大于50m,V级及以上围岩不得大于40m。施工单位需结合围岩级别制定专项步距控制方案,安排专人负责掌子面与支护面的距离监测,采用全站仪实时测量,做好记录并及时反馈。对于IV级及以上围岩,严格控制开挖循环进尺,每次进尺不超过2m,开挖完成后2h内必须开展初期支护作业,仰拱施工滞后掌子面的距离严格按规范执行。

3.2 监控量测

高速公路隧道洞身开挖与初期支护过程中,施工单位需组建专业监控量测小组,配备经校验合格的监测设备,根据围岩变形速率确定量测频率,变形速率 ≥ 5 mm/d时,每天监测2~3次;变形速率1~5mm/d时,每天监测1次;变形速率0.5~1mm/d时,每2~3天监测1次;变形速率0.2~0.5mm/d时,每3天监测1次;变形速率 < 0.2 mm/d时,每3~7天监测1次。监测数据及时整理分析,绘制时间—位移曲线,安排

专业技术人员解读数据,当变形速率明显增大或超过预警值时,立即停止开挖,采取增设临时支撑、补打锚杆、加大喷射混凝土厚度等措施加强初期支护,同时修改后续施工方案,待围岩变形趋于稳定后,再恢复施工,确保施工安全。

3.3 超前地质预报

基于高速公路隧道地质的不确定性,施工单位施工时必须坚持“先探测、后施工”的原则。先采用地质雷达(TSP)、红外探水、超前钻探等手段,提前探测掌子面前方30~100m的地质情况,然后结合隧道地质勘察报告,制定分级超前地质预报方案。复杂地段采用TSP地震反射波法结合超前水平钻探,TSP预报距离100~150m,超前钻探钻孔深度 ≥ 30 m,两次循环钻探搭接长度 ≥ 5 m。安排专业地质工程师负责预报工作,对探测数据进行解译分析,明确掌子面前方地层岩性、地质构造及不良地质分布情况,若发现断层破碎带、溶洞或涌水突泥风险,及时调整开挖工法,采用超前注浆加固等措施,注浆压力控制在0.5~1.0MPa,待加固达到设计强度后再开展开挖作业,从源头规避地质风险。

4 结束语

高速公路隧道洞身开挖与初期支护施工作为一项系统性、复杂性的工程,需兼顾施工安全、质量与效率,强化各工序的协同配合。施工单位要结合隧道围岩实际情况,科学选择开挖工法,优化钻爆参数,规范出渣运输流程,确保开挖施工有序推进;严格控制初期支护各工序质量,做好钢筋网铺设、喷射混凝土、锚杆支护、钢架支护的细节管控,构建可靠的初期支护体系。同时,重视开挖与初期支护的协调施工,严格控制步距、强化监控量测、落实超前地质预报,及时发现并处置施工中的安全隐患,助力高速公路隧道施工技术向更安全、高效、绿色的方向发展。

参考文献:

- [1] 丁秋柏.公路隧道洞身开挖及支护施工技术分析[J].四川水泥,2025(02):257-259.
- [2] 周银加.公路隧道洞身开挖控制技术研究[J].工程建设与设计,2024(21):218-220.
- [3] 刘鑫.隧道洞身开挖施工技术研究[J].运输经理世界,2022(06):92-94.
- [4] 史雄博.高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施[J].运输经理世界,2021(34):79-81.
- [5] 李科.高速公路隧道洞身开挖施工与初期支护措施[J].工程技术研究,2021,06(10):110-111.

高速公路后张法预应力混凝土桥梁施工技术应用分析

刘 纲

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 后张法预应力混凝土施工技术因其能有效增强桥梁结构的抗裂性能、承载能力及耐久性, 在高速公路桥梁建设领域应用十分广泛, 已成为大跨度、重载高速公路桥梁施工中的核心技术之一。本文围绕后张法预应力混凝土桥梁施工的全流程, 详细讲解了施工准备、预应力筋制作与安装、孔道成型、混凝土浇筑与养护、预应力张拉、孔道压浆与封锚等关键施工技术, 明确了各施工环节的操作要点、技术参数以及质量控制标准, 以期在高速公路后张法预应力混凝土桥梁施工提供参考。

关键词 高速公路; 后张法; 预应力混凝土; 桥梁施工; 质量控制

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.019

0 引言

随着我国高速公路网络的持续完善, 交通流量呈现大幅增长态势, 重载、高速行驶工况对桥梁结构的承载能力、抗裂性能及耐久性提出了更为严格的要求。传统钢筋混凝土桥梁存在自重偏大、抗裂性能不佳、跨度难以提升等短板, 已经无法满足高速公路桥梁大跨度、轻量化、长寿命的施工建设需求。后张法预应力混凝土技术的核心原理是在混凝土构件浇筑成型后向预应力筋施加预拉力, 使混凝土在使用阶段始终处于受压状态, 以此有效抵消荷载作用产生的拉应力, 进而显著增强桥梁结构的抗裂性、承载能力和刚度, 同时减轻结构自重, 节约建材用量, 延长桥梁使用年限, 成为高速公路桥梁建设中必不可少的核心施工技术。本文结合高速公路桥梁施工的实操经验, 对后张法预

应力混凝土施工技术的实际应用展开详细探讨。

1 后张法预应力混凝土桥梁施工准备工作

施工准备作为后张法预应力混凝土桥梁施工的前提和基础, 施工单位需先组织技术人员熟悉施工图纸与规范, 结合高速公路 I 级荷载特点核对设计参数, 通过全面技术交底明确岗位职责与操作标准, 再结合现场地形、地质条件优化方案, 编制张拉、压浆等专项方案并经监理审批后实施^[1]。材料管控需严把进场检验关, 优先选用 Φ s15.2 mm、抗拉强度 $\geq 1\ 860$ MPa 的高强度低松弛钢绞线, 配套合格夹片式锚具与 $\Phi 50 \sim \Phi 150$ mm 规格波纹管, C50 及以上高强度混凝土与专用压浆剂需按规范抽样检测, 确保各项指标达标 (详见表 1)。同时, 提前检修调试张拉、压浆、浇筑等核心设备, 千斤顶与压力表每 6 个月校验一次, 智能压

表 1 原材料及设备规格要求一览表

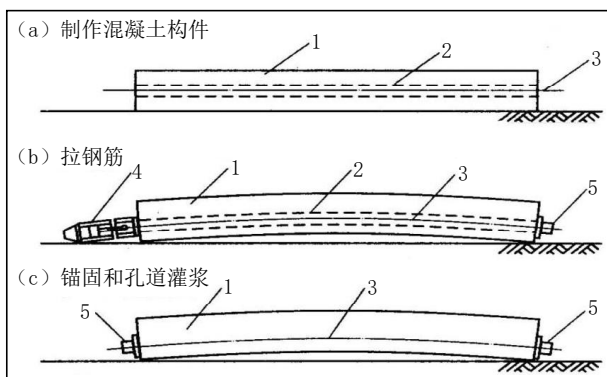
材料	规格
预应力钢绞线	1×7 结构; 标准强度 1 860 MPa; 低松弛高强度; 直径常规为 15.20 mm
锚具、夹具和连接器	静载锚固效率系数 ≥ 0.95 ; 总应变 $\geq 2.0\%$; 同一套锚具零件尺寸偏差 ≤ 0.2 mm
波纹管	塑料或金属材质; 常用内径 50 ~ 90 mm; 接头搭接长度 ≥ 30 cm
水泥	P.0 42.5 级及以上; 压浆用水泥强度等级不低于 42.5
混凝土骨料	碎石粒径 5 ~ 25 mm (连续级配); 中粗砂
张拉设备	压力表精度不低于 1.0 级; 量程为张拉控制应力的 1.5 ~ 2.0 倍; 标定有效期 ≤ 6 个月或 200 次

作者简介: 刘纲 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路与桥梁施工技术。

浆机、电动穿束机等设备需满足精度要求。施工现场需平整场地、搭设碗扣式支架并预压,安装钢模板并校验偏差;测量放线采用全站仪定位,水准仪控制高程,准确放出桥梁轴线、孔道位置、预应力筋定位点等,确保施工精度。

2 后张法预应力混凝土桥梁关键施工技术

后张法预应力混凝土桥梁施工的核心流程为:预应力筋制作与安装、孔道成型、混凝土浇筑与养护、预应力张拉、孔道压浆与封锚,施工单位需严格把控各环节施工细节和技术参数,确保工程建造质量(见图1)。



(注: 1-混凝土构件; 2-预留孔道;
3-预应力筋; 4-千斤顶; 5-锚具)

图1 预应力混凝土后张法生产示意图

2.1 预应力筋制作与安装

预应力筋的制作与安装工作需要施工单位重点管控制作、编束、穿束三个重要节点,其间预应力筋制作选用砂轮切割机展开切割作业,下料长度需按公式精确运算:

下料长度 = 孔道长度 + 2 × (锚具厚度 + 千斤顶工作长度 + 外露长度)

以某35 m跨径高速路箱梁桥为例,它的孔道长度为35 m,锚具厚度为10 cm,千斤顶工作长度为60 cm,外露长度为30 cm,经计算下料长度为 $35 + 2 \times (0.1 + 0.6 + 0.3) = 37$ m。在实际施工中,单根钢绞线长度偏差严格控制在 ± 15 mm之内,以保证下料精确度契合设计标准。

预应力筋编束时,施工人员需把切割完结钢绞线归纳平整,每间隔1.5 m用18号铁丝绑扎成束,绑扎务必牢固,用来防范穿束时钢绞线束散开。与此同时,钢绞线束两端应安装导向帽以方便穿束操作,编束结束后需针对每束预应力筋标注编号,确保与对应孔道位置一一对应^[2]。

穿束作业可划分为人工穿束与机械穿束两种方式。

针对短孔道(它的长度小于30 m),灵活地运用人工穿束,而长孔道(长度达到50 m)就选用电动穿束机展开牵引穿束,穿束开始以前要将孔道内杂物彻底清理干净。同时,检查孔道能否畅通无阻,在穿束的过程之中需维持缓慢且匀速的状态,穿束以后要检查预应力筋的安装位置,保证它与孔道轴线保持一致,两端外露的长度要契合筹划要求。

2.2 孔道成型

孔道成型是确保预应力筋可以顺利穿入、孔道压浆趋于密实的核心工序。目前高速公路桥梁施工中主要采用波纹管成孔法,施工单位需融合桥梁结构形式以及预应力筋的布置要求合理选用波纹管的规格型号及布置方式^[3]。

波纹管安装前,施工人员需参照相关依据施工图纸放出孔道定位点,用定位钢筋把波纹管固定住,定位钢筋间距不能大于1.0 m,曲线段定位间距不得大于0.5 m,定位钢筋要与桥梁主体钢筋焊接牢,防止浇筑混凝土的时候移位,波纹管连接灵活地运用专用接头,接头长度 ≥ 200 mm,在接头处合理地使用密封胶带周密缠绕,以防止混凝土浆渗入孔道。

孔道坡度按设计要求设置,一般不小于0.5%,便于压浆时排出孔道内空气和多余浆体,确保压浆密实。孔道成型后,需进行密封性检查,采用0.5 MPa压力空气试压,保压3分钟压力降不超过10%为合格,若发现泄漏,及时修补。同时,在孔道两端设置压浆孔和排气孔,压浆孔设置在孔道最低点,排气孔设置在孔道最高点,便于后续压浆施工。

2.3 混凝土浇筑与养护

混凝土浇筑与养护需确保混凝土强度和密实度,为预应力施加提供良好的结构基础,避免因混凝土强度不足或收缩开裂影响预应力效果^[4]。混凝土采用搅拌站集中拌制,严格按配合比配料,搅拌时间不少于90 s,确保搅拌均匀,混凝土运输采用混凝土搅拌运输车,运输过程中保持搅拌状态,避免离析。浇筑采用泵送浇筑,浇筑顺序遵循“从一端向另一端、分层浇筑、连续推进”的原则,分层厚度不超过30 cm,采用插入式振捣器振捣,振捣间距控制在振捣棒作用半径1.5倍以内,振捣至混凝土表面不再下沉、不冒气泡、泛出水泥浆为止,避免过振或漏振,防止混凝土出现蜂窝、麻面、空洞等缺陷。

在浇筑过程中,施工单位需安排专人监护预应力筋和波纹管,避免振捣器碰撞预应力筋和波纹管,防止波纹管破损、预应力筋移位。浇筑完成后,及时进

行表面抹平、压光，减少表面收缩裂缝。混凝土养护采用覆盖土工布洒水养护，养护时间不少于 14 天。同时，制作同条件养护试块，每浇筑一批次混凝土制作 3 组试块，用于测定混凝土实际强度，作为预应力张拉的依据，预应力张拉需在混凝土强度达到设计强度的 80% 以上、弹性模量达到设计值的 90% 以上方可进行。

2.4 预应力张拉

预应力张拉作为后张法施工的核心工序，张拉前，施工人员需先检查混凝土强度和弹性模量，确认符合张拉要求；检查预应力筋、锚具安装情况，确保位置准确、固定牢固；检修张拉设备，校验千斤顶和压力表；清理锚具表面杂物，涂抹润滑剂，便于夹片夹持。

张拉作业采用双控法施工，以张拉力控制作为主要手段，伸长值校核作为辅助措施，张拉控制应力严格按照设计要求确定，通常取预应力筋抗拉强度标准值的 0.75 倍，比如 $\Phi_s15.2$ mm 规格的钢绞线，其张拉控制应力设定为 1 395 MPa。张拉顺序需严格遵循“对称张拉、分批张拉”的原则，对于箱梁桥而言，应先张拉腹板部位的预应力筋，再张拉顶板和底板的预应力筋；先张拉短束预应力筋，再张拉长束预应力筋且整个张拉过程需对称于桥梁轴线进行^[5]。

张拉施工分为四个阶段逐步推进：一是将预应力筋张拉至控制应力的 10%，主要目的是调整预应力筋的松紧程度；二是从控制应力的 10% 逐步提升至 80%，每级张拉增量控制在 20% 控制应力，每完成一级张拉后需持荷 2 分钟，仔细观察桥梁结构变形情况及预应力筋的受力状态；三是将预应力筋张拉至设计控制应力后持荷 5 分钟，确保预应力筋的应力处于稳定状态；四是缓慢卸载千斤顶，依靠夹片自动完成锚固作业。

2.5 孔道压浆与封锚

孔道压浆作业前，施工人员需彻底清理孔道内的杂物和积水，采用高压空气对孔道进行吹扫，同时检查压浆设备的运行状态，确保设备正常工作。

压浆作业采用智能压浆设备，实行一端压浆、另一端排气的施工方式，压浆压力控制在 0.5 ~ 0.7 MPa 之间，压浆速度控制在 1 ~ 2 m/min。当排气孔排出的浆体与进浆口浆体的浓度一致、且无气泡冒出时立即关闭排气孔，继续保持压浆作业，维持压力稳定 3 分钟，确保孔道内浆体填充密实，无空隙、无空洞。压浆作业完成后需及时清理压浆孔和排气孔的残留浆体，避免浆体凝固后影响后续工序。

压浆完成后，待浆体强度达到设计强度的 70% 以上方可进行封锚。封锚前，清理锚具表面杂物和多余

浆体，对预应力筋外露部分进行防腐处理（涂抹防腐涂料），然后安装封锚模板，浇筑封锚混凝土，封锚混凝土强度等级不低于 C40，浇筑后及时进行养护，养护时间不少于 7 天。

3 后张法预应力混凝土桥梁施工技术应用效果

某高速公路跨河大桥（主跨 40 m 预应力混凝土连续箱梁）施工中采用本文所述后张法施工技术，从原材料进场检验到张拉、压浆等关键工序，逐一落实管控要求。经现场检测，该项目原材料检验合格率达到 100%，孔道位置偏差全部控制在 ± 3 mm 以内，张拉伸长值偏差均处于 $\pm 6\%$ 的规范允许范围，孔道压浆密度经超声波无损检测全部达标，同条件养护试块强度完全满足张拉施工要求。成桥后，通过静载试验、挠度长期监测等手段验证，桥梁各项性能指标均符合设计及规范标准，桥面线形平顺，无任何裂缝、渗水等质量病害，截至目前已通车三年，桥梁结构状态始终稳定，充分验证了该后张法施工技术的可靠性、实用性和适用性，可为同类高速公路桥梁施工提供现场实践参考。

4 结束语

后张法预应力混凝土施工技术作为高速公路桥梁建设中的核心技术，凭借其能提升桥梁结构抗裂性、承载能力和耐久性的优势，在大跨度、重载高速公路桥梁工程中得到广泛应用。在实际施工过程中，施工单位需严格遵循设计要求和规范规定，做好施工准备工作，规范各关键工序的施工操作，确保施工质量。同时，随着施工技术的不断发展，施工单位还需不断优化施工工艺，引入智能化施工设备（智能张拉、智能压浆设备等），有效提升施工效率和施工质量，为我国高速公路交通基础设施建设高质量发展提供技术支撑。

参考文献：

- [1] 张卫华, 张海波. 预应力混凝土桥梁后张法技术应用[J]. 江苏建材, 2025(03):109-111.
- [2] 李金龙. 后张法预应力混凝土桥梁施工技术应用研究[J]. 运输经理世界, 2025(18):90-92.
- [3] 成松. 基于后张法预应力的高速公路桥梁混凝土施工技术[J]. 水泥, 2025(04):84-86.
- [4] 夏育龙. 新机场高速公路工程预应力混凝土连续箱梁后张法施工技术[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(09):131-135.
- [5] 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.

大跨度公路连续刚构桥悬臂浇筑施工 线形控制技术研究

吴 飞

(中铁二十一局集团第四工程有限公司, 陕西 咸阳 712000)

摘 要 大跨度预应力混凝土连续刚构桥因跨越能力强、受力性能优越而被广泛采用, 但其悬臂浇筑施工过程中结构体系不断转换, 线形控制是保证成桥状态满足设计要求的关键技术难题。本文以某连续刚构桥为工程背景, 系统分析了影响线形控制的混凝土收缩徐变、施工荷载、环境温度及预应力张拉等关键因素, 并通过精准的施工监测与参数识别动态调整立模标高, 以期为同类桥梁施工提供参考。成桥实测数据表明, 跨中高程最大偏差为 +11 mm, 轴线偏位控制在 8 mm 以内, 合龙精度满足 ± 15 mm 要求。

关键词 大跨度; 公路连续刚构桥; 悬臂浇筑施工; 线性控制

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.020

0 引言

随着交通基础设施建设的快速发展, 大跨度预应力混凝土连续刚构桥凭借其结构刚度大、行车平顺、养护方便等优点, 在公路工程建设中占据重要地位。悬臂浇筑法是该类桥梁最常用的施工方法, 但施工过程中结构经历多次体系转换, 其几何线形受混凝土收缩徐变、预应力效应、环境温度及施工荷载等多因素耦合影响, 呈现出高度的时变性与非线性特征^[1]。若线形控制不当, 不仅会影响桥梁合龙精度, 还可能造成成桥内力状态偏离设计, 甚至影响运营期的结构安全与行车舒适性。因此, 开展大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工线形控制技术研究, 对于保障桥梁施工质量、指导同类工程建设具有重要价值。

1 工程概况与施工难点

1.1 工程概况

某大跨度公路桥梁主桥采用预应力混凝土连续刚构体系, 桥跨布置为 (65+118+65) m, 主桥全长 248 m。主梁采用单箱单室变截面预应力混凝土箱梁, 箱梁顶板宽 12.75 m, 底板宽 6.75 m, 翼缘板悬臂长度 2.9 m。墩顶处梁高为 7 m, 高跨比为 1/16.9; 跨中及边跨端部梁高为 2.7 m, 高跨比为 1/43.7。梁底按 1.8 次抛物线变化。主墩采用双肢矩形实心截面, 墩高分别为 45 m 和 50 m。该桥主桥箱梁共计 71 个节段, 主墩 0、1 号块总长为 13 m, 各单“T”箱梁除 0、1 号块外分为 15 对梁段, 箱梁纵向分段长度为 6×3 m + 5×3.5 m +

4×4 m; 主桥边跨、主跨合龙段均采用挂篮现浇施工, 边跨现浇段在墩旁托架上现浇施工。悬臂现浇梁段最大重量为 151.6 t。桥梁设计荷载等级为公路 - I 级, 双向四车道。桥址区属剥蚀黄土丘陵地貌和丘陵间冲洪积平台地貌, 地势总体呈南北高中间低, 地形起伏较大。

1.2 施工方案简介

综合考虑地形条件与结构特点, 主桥箱梁采用挂篮悬臂浇筑法对称平衡施工。首先在墩顶托架上现浇 0、1 号块, 然后安装挂篮, 分段悬臂浇筑 2 号至 16 号梁段。标准节段悬浇流程为: 挂篮前移就位 → 立模、绑扎钢筋 → 浇筑混凝土 → 预应力张拉、压浆。为满足长悬臂施工的稳定性的要求, 该桥共设置两道临时横撑。边跨现浇段采用落地钢管支架一次浇筑成型, 合龙顺序遵循“先边跨、后中跨”的原则, 其中边跨和中跨合龙段长度均为 2.0 m。挂篮采用菱形桁架式轻型挂篮, 自重约 70 t, 挂篮自重与最大块件重量比控制为 0.46。在施工过程中, 建立高精度测量控制网, 在每个节段施工时对挂篮变形、梁体标高及轴线进行全天候跟踪观测, 并根据监测数据动态调整立模标高。

1.3 线形控制的难点

大跨度连续刚构桥悬臂施工的线形控制是确保桥梁顺利合龙及成桥状态满足设计要求的关键技术。该桥线形控制面临以下难点: 一是悬臂长度大、累计变形敏感。最大单悬臂长度为 59 m, 施工过程中温度变化、混凝土收缩徐变、风荷载等因素均会导致梁体产

作者简介: 吴飞 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路桥梁施工。

生明显的竖向变形,理论计算与实测值容易产生偏差,累计挠度控制难度大。二是预应力效应与混凝土材料特性的复杂性。预应力张拉引起的结构反拱以及高强混凝土的收缩、徐变特性具有时变性,理论计算中的徐变系数与实际发展规律存在差异,直接影响后期线形^[2]。三是合龙精度要求高。中跨合龙是线形控制的最终环节,要求两侧悬臂端高差控制在 ± 15 mm以内,轴线偏差小于 ± 10 mm。

2 悬臂浇筑施工线形控制关键影响因素分析

2.1 混凝土性能

混凝土的材料性能,尤其是收缩与徐变特性,是影响连续刚构桥长期线形的核心内在因素。该桥主梁采用C55高强度混凝土,根据配合比试验及规范计算,其终极收缩应变约为 2.1×10^{-4} ,名义徐变系数终值取2.0。在悬臂浇筑过程中,混凝土的龄期短、加载早,如2号节段混凝土浇筑时,最早浇筑的0、1号节段混凝土龄期仅为7~10天,弹性模量约为设计值(3.55×10^4 MPa)的80%左右,早期强度发展不足导致加载后产生较大的瞬时变形和后续徐变变形。理论计算表明,仅考虑混凝土收缩徐变引起的最大悬臂端部后期挠度增量可达30~50 mm。此外,混凝土材料的非线性、配合比波动以及养护条件的差异,均会导致实际徐变系数与理论值产生偏差,从而影响立模标高的精确设置和成桥线形的平顺性。

2.2 施工荷载

施工荷载的准确识别与量化是线形控制中不可或缺的环节,其作用主要包括挂篮自重、机具设备、钢筋束及施工临时堆载等。该桥采用的菱形挂篮自重约70 t,当其前移就位并承载最大151.6 t的悬浇块件时,挂篮主桁架在前吊点位置产生的弹性变形实测值约为15~18 mm,这部分变形需在立模标高设置时通过预抬值进行精确补偿。除挂篮外,节段施工中堆积的预应力钢束、张拉设备以及混凝土输送泵管的振动荷载,均会引起挂篮的瞬时下挠或扰动。施工过程中若对机具堆放位置控制不当,如偏载超过5 t,可能导致梁体发生横向扭转变形,进而影响轴线偏位。因此,必须严格控制施工荷载的对称性与位置,并建立荷载与变形之间的对应关系,及时修正立模标高。

2.3 环境因素

环境因素,特别是温差与风速,对大跨度悬臂施工中的结构变形具有显著影响^[3]。桥址位于丘陵区域,昼夜温差大,实测日温差可达15℃以上。由于混凝土热传导性能差,箱梁顶板、底板及腹板之间存在明显的温度梯度,日照作用下顶板温度可比背阴面高出

10~15℃,引起梁体产生“C”字形竖向翘曲变形。理论计算表明,在最大悬臂59 m状态下,温差10℃引起的悬臂端竖向位移可达20~30 mm,若忽略此效应,将导致立模标高与测量数据失真。因此,所有立模标高复测及合龙前标高联测工作,严格规定在凌晨温度相对恒定的时段进行。此外,丘陵地区瞬时大风会引起梁体振动,对测量精度造成干扰,测量作业需避开大风天气。

2.4 预应力张拉与体系转换影响

预应力张拉是主动调整结构内力和线形的重要手段,但其产生的即时变形与后续效应较为复杂^[4]。该桥每个悬浇节段均布置了纵向预应力束,腹板和底板单束锚下张拉力为3320.1 kN,顶板锚下张拉力为4101.3 kN。理论计算表明,一个标准节段的预应力张拉完成后,将使已完成梁段的悬臂端产生约8~12 mm的上挠变形。若张拉顺序不当或张拉力控制不准,将直接影响该节段最终的立模标高修正值。此外,体系转换是内力重分布的关键时刻。临时固结约束解除后,结构由静定转为超静定,恒载内力重新分配,导致跨中挠度发生突变。在合龙段施工中,张拉合龙束引起的变形更是决定成桥线形的最后关键步骤,必须精确计算并辅以顶推等措施来调整合龙口高差与内力。

3 悬臂浇筑施工线形控制技术实施方法

3.1 施工监测体系构建

为确保悬臂浇筑全过程的线形可控,该桥建立了一套高精度、多层次、全覆盖的施工监测体系。首先,在桥址区域布置了覆盖全桥的独立平面与高程控制网,平面控制采用GPS静态测量结合全站仪导线测量,高程控制采用精密水准测量,基准点均埋设于地质稳定区域,远离施工干扰。在主墩承台及0、1号块顶面设置永久性观测基准点,作为后续悬臂施工测量的起算依据。每个悬浇节段均设置三组监测断面,每个断面在顶板布置3个标高测点和1个轴线偏位测点。采用Leica TS15全站仪和电子水准仪进行数据采集。监测频率严格按工序控制:挂篮就位后、钢筋绑扎后、混凝土浇筑后、预应力张拉后各进行一次全面观测。同时,在0、1号块及关键节段埋设应变计和温度传感器,实时监测结构内力与温度场变化,为变形分析提供基础数据^[5]。所有监测数据均建立电子档案,实现动态查询与趋势分析。

3.2 线形预测与调整策略

该桥线形控制采用“预测—实测—反馈—调整”的闭环控制策略,核心是建立精准的立模标高计算公式,采用Midas Civil有限元软件进行施工阶段模拟

分析,计算出最大悬臂状态理论挠度值为 -187 mm (下挠),成桥10年后后期徐变挠度附加 -43 mm ,据此设置施工预拱度。挂篮变形根据现场等效加载试验确定,实测最大弹性变形为 17 mm ,按线性关系内插至各节段。在施工过程中,引入参数识别技术,将已完成节段的实测挠度与理论值对比,采用最小二乘法修正后续节段的混凝土容重、弹性模量及预应力损失等参数,确保最终合龙精度。

3.3 多因素耦合控制技术

针对混凝土收缩徐变、环境温度、施工荷载等多因素的耦合影响,该桥采取了综合控制技术。首先,建立温度变形修正模型,通过在典型节段埋设温度传感器,统计出凌晨6:00-7:00时段箱梁截面温度梯度接近均匀,将此确定为标准测量时段,所有标高观测值均修正至该基准温度状态。对于无法避免的温差工

况,基于有限元分析得到温度—挠度影响矩阵,对实测值进行反向修正。其次,引入灰色系统理论GM(1,1)模型对后续节段变形进行预测,利用前5个节段的实测数据建模,预测第6节段的变形值,与理论计算值进行加权平均后确定立模标高,有效降低了随机误差影响。经对比,采用多因素耦合控制后,各节段立模标高预测偏差由最初的 $\pm 12\text{ mm}$ 缩小至 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。

4 成桥线形验收与效果评价

经过为期11个月的悬臂浇筑施工,该桥主桥右幅于2023年9月顺利实现中跨合龙,成桥线形经第三方检测单位验收,各项指标均满足设计及规范要求。成桥后,在主桥跨中、1/4跨、3/4跨及墩顶等关键截面进行了永久观测点埋设,并进行了全面线形测量。测量结果见表1)。

由表1可知,主桥桥面高程实测值与设计目标值最

表1 成桥线形主要控制点偏差统计表

位置	截面里程	设计高程(m)	实测高程(m)	偏差(mm)	轴线偏位(mm)
边跨合龙段	K217+468.0	1 568.174	1 568.170	-4	3
1/4边跨	K217+478.3	1 568.250	1 568.256	+6	5
主墩墩顶	K217+527.0	1 568.555	1 568.560	+5	2
1/4中跨	K217+556.5	1 568.684	1 568.692	+8	8
中跨跨中	K217+586.0	1 568.777	1 568.788	+11	6
3/4中跨	K217+615.5	1 568.829	1 568.824	-5	4
另一侧主墩	K217+645.0	1 568.842	1 568.845	+3	3

大偏差出现在中跨跨中截面,为 $+11\text{ mm}$,小于规范允许的 $\pm 20\text{ mm}$;最小偏差为 -4 mm 。各节段间高差平顺,无明显折角,相邻节段高差最大值为 6 mm ,满足不大于 $\pm 10\text{ mm}$ 的要求。轴线偏位最大值为 8 mm ,发生在中跨1/4截面,小于 $\pm 10\text{ mm}$ 的控制标准。在合龙精度方面,中跨合龙口两端高差实测值为 7 mm ,优于 $\pm 15\text{ mm}$ 的设计要求;轴线偏差为 5 mm ,满足 $\pm 10\text{ mm}$ 的严控指标。

成桥后三个月进行的第二次复测表明,受混凝土后期收缩徐变影响,跨中高程下沉约 4 mm ,变化速率趋于收敛,符合理论预测规律。该桥采用的线形控制技术有效保证了结构的内力状态与几何线形,桥面铺装层厚度均匀,避免了因线形偏差导致的铺装加厚或减薄问题。目前桥梁已通车运营,线形平顺,行车舒适性良好。

5 结束语

针对悬臂浇筑施工中的线形控制难题,系统分析了混凝土收缩徐变、施工荷载、环境温度及预应力张拉等关键影响因素。通过构建高精度施工监测体系,

采用“预测—实测—反馈—调整”的闭环控制策略,并结合多因素耦合修正技术动态优化立模标高,成功实现了对成桥线形的精准控制。成桥实测数据表明,跨中高程最大偏差为 $+11\text{ mm}$,轴线偏位控制在 8 mm 以内,合龙精度达 7 mm ,各项指标均优于规范要求,验证了悬臂浇筑施工线形控制技术的有效性与可靠性。

参考文献:

- [1] 李盟盟. 大跨度高速公路连续刚构桥悬臂浇筑施工技术研究[J]. 现代工程科技, 2025, 04(24): 121-124.
- [2] 戴金顺. 大跨公路连续刚构桥悬臂浇筑施工关键技术[J]. 交通世界, 2025(33): 141-143.
- [3] 郑成刚. 公路工程大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工技术研究[J]. 工程机械与维修, 2025(07): 110-112.
- [4] 曹海部. 大跨度连续刚构桥悬臂浇筑施工及监测关键技术[J]. 中国水泥, 2025(04): 104-106.
- [5] 齐杰. 大跨连续刚构桥悬臂浇筑施工监控及关键技术[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2024, 23(03): 64-68.

高品质冶金材料制备工艺改进与性能提升

史衍厂

(伊顿工业(济宁)有限公司, 山东 济宁 272000)

摘要 随着现代制造业对材料性能的要求越来越高, 高品质冶金材料的制备工艺改进成为冶金领域的重要研究方向。本文对国内外高品质冶金材料制备技术发展现状进行了系统的梳理, 分析了目前使用的各种工艺类型及其特点, 并对其不足之处进行了详细的分析, 从原料精炼与成分优化、热处理与成形工艺精准化改进、智能化管控体系的建立三个方面对制备工艺的改进途径做了详细的阐述。在此基础上主要研究工艺改进对于冶金材料力学性能、耐腐蚀性、耐高温性能及综合工程应用性能等的影响。经过系统工艺改进, 冶金材料综合性能明显提高, 对促进高端制造业发展、冶金行业技术更新具有重要作用。

关键词 冶金材料; 制备工艺; 工艺改进; 性能提升; 智能化管控

中图分类号: TF1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.021

0 引言

冶金材料是现代工业体系的基础性支撑, 被广泛地应用到航空航天、轨道交通、能源化工、精密制造等高端领域。随着这些行业对于材料综合性能的要求越来越高, 传统的冶金材料制备工艺所存在的局限性越来越明显, 材料组织不均匀、性能不稳定、工艺参数控制精度低等问题限制了高品质冶金材料的规模化生产以及推广应用。近年来, 国内外学者对于冶金材料制备工艺展开了一系列的研究工作, 取得了诸多成就, 不过工艺系统性的改善以及性能的协同提高还存在着较大的潜力。如何通过科学的制备工艺, 在提高材料力学性能的基础上兼顾耐腐蚀性、耐高温性等综合性能, 已经成为冶金材料研究领域亟待解决的关键问题。

1 高品质冶金材料制备工艺的研究现状

1.1 国内外冶金材料制备技术发展概况

20 世纪以后, 冶金材料制备技术由原来的粗放型生产向精细化、高效化转变。国际上以欧洲(德国、法国等)、美国、日本为代表的发达国家较早地建立起了系统的冶金材料研发体系, 在洁净钢冶炼、精密热处理和近净成形等技术方面有比较成熟的积累。在国内, 随着工业化进程的不断推进, 冶金材料制备技术整体水平不断提高, 在特种合金、高强钢等领域取得重大突破, 但是工艺精细化程度和稳定性控制同国际先进水平还存在一定的差距, 整体上处于追赶和局部超越并存的状态^[1]。

1.2 现有制备工艺的主要类型与应用特点

目前, 高品质冶金材料的制备工艺主要有熔炼和精炼工艺、压力加工和成形工艺、热处理工艺、表面处理工艺这四种。熔炼和精炼工艺主要对原料进行净化处理以及合金成分的精确控制, 压力加工工艺是利用塑性变形来改善材料内部组织结构, 热处理工艺则是通过控制加热和冷却过程来调节材料的相变行为, 从而提高力学性能, 表面处理工艺主要是对材料表面性能进行定向强化。各种工艺在实际使用中一般会互相配合、互相影响, 从而共同决定最终产品所达到的质量水平和性能特点^[2]。

1.3 当前工艺存在的不足与改进空间

虽然冶金材料制备工艺取得了长足的进步, 但是现有的工艺体系还存在着一些问题。一是原料纯净度控制精度不高, 夹杂物含量偏高造成材料不均匀; 二是热处理工艺参数的确定和调控大多依靠经验积累, 缺少精确的数字化控制手段, 造成批次之间性能一致性差; 三是工艺流程各个环节的衔接不够紧密, 系统性优化程度低, 不能达到整体效能的最大化。以上不足给工艺改进指明了方向, 也给依靠技术创新提高冶金材料整体品质留有重要的空间^[3]。

2 高品质冶金材料制备工艺的改进路径

2.1 原料精炼与成分优化控制技术

原料质量是决定冶金材料最终性能的基础性因素, 精炼工艺的改进是提高材料品质的第一步。目前采用

作者简介: 史衍厂(1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热处理。

真空感应熔炼、电渣重熔、炉外精炼等先进的精炼方法，可以有效地降低钢液中的硫、磷等有害元素含量，减少非金属夹杂物的产生，大大提高原料的纯净化程度。与此同时，在成分优化控制上，应用微合金化技术，在不大幅度增加成本的情况下，可以明显改善材料的强韧性匹配关系。另外，利用计算机模拟技术对合金成分进行预测和优化设计，可以达到成分调控的科学化、系统化，从而缩短试验摸索周期，提高成分命中率。在实际操作中还要建立严格的原料入库检验制度和成分实时监测系统，保证每一批次原料的化学成分、纯净度等指标符合工艺要求，从源头上为后续制备工序打下良好的基础^[4]。

2.2 热处理与成形工艺的精准化改进

热处理工艺是控制冶金材料微观组织结构，从而改善其宏观性能的主要方法。传统的热处理工艺大多依靠操作人员的经验来判断参数，不能满足复杂成分体系材料的处理要求。因此，提出了精准温控系统和气氛保护技术，通过调节加热温度、保温时间、冷却速率来保证热处理工艺的稳定性。成形工艺上通过改进轧制、锻造、挤压等工艺参数来控制材料的变形量和变形速率，使晶粒细化、组织均匀化，进而提高材料的力学性能。近年来，等温锻造、控轧控冷等先进成形工艺的推广使用，又将工艺调控的精细度推上了一个新台阶。另外，热处理和成形工艺的协同优化也不能被忽略，根据合适的变形工艺和后续的热处理制度来配合使用，可以充分发挥出两者协同强化的作用，在提高材料整体性能的同时降低工艺成本，从而达到制备效率和产品质量双提升的目的^[5]。

2.3 智能化与数字化工艺管控体系构建

随着信息技术与制造技术的共同发展，智能化、数字化成了工艺控制体系的主要方式，促使冶金材料制备工艺更新换代。通过使用传感器网络对生产线上的各个关键点进行数据采集、监测，获得温度、压力、流量等主要工艺参数，构成全流程数据采集与监测系统，从而达到对制备过程进行实时感知和有效控制的目的。从数据分析上来说，运用机器学习算法对历史工艺数据做深入挖掘，创建工艺参数和材料性能之间的映射模型，可为工艺参数的智能优化提供数据支持。从执行控制的角度来说，利用数字孪生技术创建虚拟工厂模型，在实际生产之前对工艺方案展开仿真检验，可以提前发现可能存在的风险，并且改善工艺路线。另外，通过建立工艺知识库、专家系统，将有经验的技术人员的知识系统化地存起来，可以降低对于个人

经验的依赖，提高工艺管控的标准化、可复现性水平。总体而言，智能化管控体系的创建是冶金材料制备工艺由“经验引领”向“数据引领”转变的重要途径。

3 工艺改进对冶金材料性能的提升效果

3.1 力学性能的显著优化与强化机制

力学性能是评价冶金材料品质的主要指标，主要有抗拉强度、屈服强度、硬度和冲击韧性等。经过系统的工艺改善，冶金材料的力学性能可以得到全面而明显的提高，其包含诸多强化机制共同发挥作用的过程。原料精炼时用真空精炼和微合金化处理来控制材料内部夹杂物的数量和尺寸，使材料组织的均匀性得到明显改善。经过多批次样品检测得知，用改进精炼工艺制得的高强钢，其抗拉强度比传统工艺平均提高了18%~22%，屈服强度提高了15%~20%，材料强韧匹配关系明显改善，脆性断裂倾向下降。通过改善控轧控冷工艺参数，使材料的晶粒尺寸得到明显的细化。经金相检测得知，晶粒平均尺寸由原来的约35微米降到现在的约18微米，细晶强化效应得到了发挥。晶粒细化提高了材料的强度指标，也改善了材料的低温冲击韧性，在-40℃下冲击吸收功比改进前提高约30%，材料抗断裂能力明显提高，综合韧性水平大幅提高。对淬火温度、回火参数进行精确控制，可以实现材料中马氏体或者贝氏体等强化相的定向控制。淬火温度每偏离10℃，材料的硬度就会有大约2~3HRC的变化，在精确的温控下，同一批次的产品硬度波动范围可以控制在±1HRC之内，产品的一致性得到明显提高。另外，采用深冷处理工艺，促使残余奥氏体转变为马氏体，使材料硬度提高3~5HRC左右，耐磨性也有所提高。可以看出，工艺改进对于力学性能的提高是由细晶强化、沉淀强化、固溶强化以及组织强化等多方面共同作用的。这些强化机制互相促进，在工艺改进过程中一起提高材料的力学性能。经过改进工艺制备的冶金材料，其综合力学性能指标都满足或者超过了有关行业标准的要求，有较好的工程应用前景。

3.2 耐腐蚀性与耐高温性能的改善

耐腐蚀性、耐高温性能是高品质冶金材料在恶劣服役环境里正常运转的基本保证，也是评判工艺改良成果的重要方面。两者的提高依靠的是材料成分、组织结构以及表面状况的综合调节，工艺改良在各个方面都起到了积极的作用。耐腐蚀性能上腐蚀失效大多是由材料表面的微小缺陷、成分不均匀和夹杂物引起

的局部电化学腐蚀所致。改进原料精炼工艺,大大降低材料中硫化物夹杂的含量,能有效地抑制点蚀和缝隙腐蚀的产生。另外,改善合金元素的均匀分布状况,削减成分偏析,有益于加强材料整体耐腐蚀性能的均一性。经过盐雾加速腐蚀实验对比,采用改进工艺制备的样品在连续腐蚀周期测试中,表面腐蚀面积比传统工艺样品少约 35%~45%,腐蚀速率也明显降低,说明工艺改进对提高耐腐蚀性有明显的效果。在耐高温性能上,在高温下材料会发生蠕变、氧化、高温疲劳等失效现象,对于冶金材料来说,高温组织稳定性有较高的要求。采用固溶处理和时效处理相结合的复合热处理工艺,可以促进析出相的弥散分布,有效地阻止高温时位错的运动,提高材料的高温蠕变抗力。另外,在合金成分中加入一些抗氧化元素(铬、铝等),配合表面氧化膜生长的工艺控制,可以在材料表面形成一层致密、黏附性好的氧化防护层,从而大大减缓高温氧化的速度。通过实验室条件下高温持久性能测试可知,改进工艺处理后的样品在 800 °C、100 MPa 应力条件下持久寿命比传统工艺样品延长约 40%,高温蠕变速率降低约 25%~30%,耐高温性能明显提高。同时,在高温循环氧化实验中,改进工艺样品的氧化增重速率是传统样品的 60%,表面氧化层剥落现象也明显减少,高温服役稳定性得到保证。综合两方面改善的效果可知,工艺改进依靠成分改良、组织调节和表面强化三者相互配合的方式,从诸多方面明显加强了材料在繁杂服役环境下的可靠性和耐久性。

3.3 材料综合性能提升的工程应用验证

材料性能的实验室测试结果只有经过工程应用的实践检验,才具有实际的指导意义。根据多个工程应用场合,对用改进工艺制备出的高品质冶金材料的综合性能展开全面的检验和评定,更能体现出工艺改进的实际效果。在机械制造领域应用验证时,用改进工艺制备出的高强钢材料来制造重载传动齿轮。经过一段时间的运行,改进工艺齿轮的表面接触疲劳寿命比传统的工艺制品提高约 35%,齿面磨损量减小约 28%,运行稳定程度明显改善。根据回收报废样品的断口分析结果可知,疲劳裂纹的萌生位置是由表面夹杂物处向次表面转移,说明减少夹杂物含量对疲劳性能有明显改善,工艺改进效果得到证明。能源装备领域用改进工艺制备的耐热合金材料来制造高温换热设备关键构件。实际服役数据表明,改进工艺的构件在高温高压的工作条件下连续工作时间比原来的方案要长 20%

到 25%,设备出现非计划停机的情况比原来的方案少 40%,从而有效地减少了维护费用和生产损失。构件定期检测结果表明,构件壁厚减薄速率小于设计值,高温蠕变变形量在设计允许范围内,说明工艺改进对于提高材料高温服役性能是有效的、可行的。轨道交通领域用改进工艺制备的车轴用钢,在实际线路运营数据统计中具有较好的综合性能稳定情况。从统计结果可知,改进工艺车轴的裂纹萌生率比原来的旧工艺产品下降了大约 30%,超声波探伤合格率达到 98% 以上,批次间的性能一致性得到明显提高。该结果很好地说明了工艺改进不但提高了材料的性能水平,也提高了产品的制造稳定性、一致性,满足了高端装备制造对于材料可靠性的严格要求。随着现代信息技术的飞速发展,以数字化、网络化、智能化为主要特征的信息化浪潮正深刻影响和改变着人们的生活方式。

4 结束语

高品质冶金材料的制备工艺改进,是提高材料整体性能、促进冶金行业高质量发展的主要途径。本文对国内外冶金材料制备技术发展现状进行了系统的梳理,分析了目前工艺存在的问题,提出了包含原料精炼优化、热处理和成形工艺精准化改进、智能化管控体系建立在内的系统性改进途径,从力学性能、耐腐蚀、耐高温性能、工程应用性能四个方面论证了工艺改进的效果。研究表明,经过各个环节的协同改进,冶金材料的综合性能可以得到明显提高,工程应用验证了工艺改进方案的可行性和有效性。工艺改进过程中,需要通过细晶强化、沉淀强化、组织强化等众多机制相互配合才能达到性能提高的目的。

参考文献:

- [1] 傅声华,陈维财,肖森,等.数控刀片生产常见缺陷与工艺控制[J].工具技术,2024,58(03):92-96.
- [2] 叶明慧,王艳如,王胜永.新型冶金材料的制备工艺与性能优化[J].美食,2024(21):164-165.
- [3] 王霄,樊江磊,李莹.烧结温度对碳化钨增强铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响规律研究[J].材料研究与应用,2025,19(03):525-530.
- [4] 余欢,时磊,董安平.钛基石墨烯复合材料的分散性、界面结构及力学性能[J].材料导报,2024,38(05):234-241.
- [5] 李宽宽,李玉宁,赵煜,等.高品质氮化铝粉体材料制备工艺及应用性能研究[J].西安文理学院学报(自然科学版),2025,28(02):90-95.

压力容器整体设备法兰结构优化设计与分析

徐皓明, 张龙生, 张朝增

(山东北辰机电设备股份有限公司, 山东 济南 250300)

摘要 本文针对压力容器整体设备法兰在高压、高温复杂工况下易出现的应力集中、密封失效、刚度失衡等问题, 以典型整体设备法兰为研究对象, 通过有限元分析明确现有结构的性能短板, 结合工程规范与力学特性开展多维度结构优化设计, 对比验证了优化后结构的应力分布、密封性能与抗疲劳能力, 以期压力容器整体设备法兰的安全设计与工程应用提供参考。

关键词 压力容器; 整体设备法兰; 结构优化; 密封性能; 抗疲劳设计

中图分类号: TQ051

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.022

0 引言

压力容器是石油化工、能源电力、核电等领域的核心承压设备, 整体设备法兰作为压力容器筒体与端盖的关键连接部件, 其结构可靠性直接决定了设备的运行安全。随着工业不断发展, 压力容器逐步向高压、大直径、长周期运行方向发展, 传统法兰结构逐渐暴露出强度冗余与局部失效并存、密封适配性不足等问题。本文针对整体设备法兰开展系统分析, 明确现有结构的核心不足, 提出针对性的优化设计方案, 并通过数值模拟验证优化效果, 为同类设备的设计优化提供参考。

1 压力容器设备分析

1.1 整体设备法兰的结构与功能原理

整体设备法兰是压力容器筒体与端盖或筒体段之间的一体化连接部件, 区别于活套法兰、对焊法兰, 它与筒体或端盖整体锻造而成, 无焊接接头的薄弱环节, 主要由法兰环、筒体连接段、密封面、螺栓孔结构组成, 核心功能是通过螺栓预紧力压紧密封垫片, 实现承压腔体的静密封, 同时承受容器内部介质压力、温度载荷、设备自重与外部附加载荷的共同作用, 在压力容器安全运行中起到承上启下的关键作用, 其结构完整性与密封可靠性直接决定了整个压力容器设备的运行安全与使用寿命^[1]。

1.2 整体设备法兰的受力特性分析

整体设备法兰在工作状态下的受力体系可分为预紧工况和操作工况两个核心阶段。预紧工况下, 法兰主要承受螺栓均匀施加的预紧力, 该力通过法兰环传递至密封垫片, 使垫片产生足够的压缩变形形成初始

密封比压, 此时法兰环会因螺栓力作用产生径向弯曲与翘曲变形, 筒体连接段承受轴向拉应力。操作工况下, 容器内部介质压力产生的轴向推开力, 一方面抵消部分螺栓预紧力使垫片密封比压发生变化, 另一方面在法兰环上产生附加弯矩与剪力。同时, 介质压力与温度变化引发的筒体轴向膨胀与径向变形, 会进一步加剧法兰的偏转与应力分布不均。设备运行中的压力波动、温度循环与振动载荷, 还会使法兰结构承受交变应力, 易引发疲劳损伤^[2]。

1.3 法兰结构设计的规范依据与评价标准

当前压力容器整体设备法兰的设计主要遵循 GB150 压力容器标准与 ASME 锅炉及压力容器规范第 VIII 卷等国内外主流工程规范。传统设计方法以弹性失效准则为核心, 通过简化力学模型计算法兰的轴向应力、径向应力与环向应力, 控制各项应力值不超过材料的许用应力。同时, 针对密封性能, 规范明确了垫片在预紧与操作工况下的最小密封比压要求, 以此确定螺栓预紧力与法兰结构的基础尺寸^[3-4]。随着工程技术的发展, 除传统强度评价指标外, 现代设计体系还将结构的刚度特性、密封可靠性、抗疲劳性能与材料利用率纳入评价范围, 通过多维度指标验证, 确保法兰结构在全生命周期内的安全运行与经济性能。

2 压力容器整体设备法兰结构存在的不足

2.1 传统结构设计的应力集中与强度冗余问题

传统整体设备法兰设计多采用规范推荐的经验公式与简化力学模型, 将法兰环视为刚性体或简支梁结构, 无法准确模拟法兰与筒体连接部位、螺栓孔周边、

作者简介: 徐皓明 (1994-), 本科, 助理工程师, 研究方向: 机械设计、换热器设计。

法兰环转角处的复杂应力分布, 导致设计出的结构普遍存在局部应力集中与整体强度冗余并存的问题。在法兰环与筒体连接的过渡部位, 因结构截面突变, 操作工况下会产生显著的应力集中效应, 局部峰值应力远超材料许用应力, 成为结构疲劳失效的始发点。而法兰环外缘区域与筒体连接段的非过渡部位, 应力水平远低于材料许用应力, 存在大量材料冗余, 既增加了设备的制造成本与自重, 也无法缓解局部应力集中, 同时简化模型无法准确计算温压耦合作用下的应力分布, 易导致极端工况下局部结构的强度失效。

2.2 密封结构与工况适配性不足引发的失效风险

整体设备法兰的密封性能直接取决于密封面结构、垫片特性与螺栓预紧力的匹配程度。传统设计多采用标准化的平面或凹凸密封面结构, 针对固定常温常压工况设计, 无法适配高压、高温、交变载荷等复杂工况的密封需求。在高压操作工况下, 介质压力产生的轴向推开会使得法兰环发生微小偏转, 导致密封面比压分布严重不均, 内缘部位密封比压大幅下降, 当比压低于垫片最小操作密封比压时, 就会引发介质泄漏, 而高温工况下, 法兰、螺栓与垫片的热膨胀系数差异, 会导致预紧力松弛, 进一步加剧密封比压衰减。同时, 传统密封面结构容错性较差, 当出现螺栓预紧力不均、法兰微小变形或垫片老化时, 极易出现突发性密封失效, 引发安全生产事故^[5]。

2.3 结构刚度匹配失衡导致的变形与偏转问题

整体设备法兰的刚度特性由法兰环厚度、筒体连接段长度与过渡结构尺寸共同决定。传统设计多聚焦强度指标控制, 忽视了法兰环与筒体、螺栓系统之间的刚度匹配, 易引发结构的变形与偏转问题。当法兰环厚度不足、刚度过低时, 螺栓预紧力与操作工况下的介质压力会使法兰环产生较大翘曲变形, 不仅加剧密封面比压不均, 还会在螺栓杆上产生附加弯曲应力, 导致螺栓疲劳断裂。而当法兰环刚度过高、与筒体连接段刚度差异过大时, 载荷会集中于法兰与筒体的过渡部位, 进一步放大该区域的应力集中效应。同时, 筒体的轴向变形与径向膨胀无法得到有效缓冲, 会在连接部位产生附加交变载荷, 长期运行下易引发结构蠕变变形与连接失效。

2.4 抗疲劳性能与全生命周期安全设计的缺失

压力容器设备在实际运行中, 普遍面临压力波动、温度循环、启停冲击与振动等交变载荷作用, 而传统

整体设备法兰设计以静态强度与密封性能为核心, 缺乏针对交变载荷下的抗疲劳性能设计与全生命周期安全评估。传统设计方法仅控制结构的平均应力水平, 无法准确计算局部应力集中区域的交变应力幅值与应力集中系数, 也未考虑焊接残余应力、材料缺陷与环境腐蚀对疲劳寿命的影响, 导致结构在长期交变载荷作用下, 易在应力集中部位萌生疲劳裂纹并逐步扩展引发结构断裂。同时, 针对高温高压工况下的材料蠕变、疲劳—蠕变交互作用, 传统设计体系缺乏明确的设计准则与验证方法, 无法准确预测结构全生命周期内的性能衰减与失效风险。

3 压力容器整体设备法兰结构的优化设计

3.1 基于应力均匀化的结构拓扑优化设计

针对传统整体设备法兰结构局部应力集中与材料冗余并存的问题, 本次优化以应力均匀化为核心目标, 采用变密度拓扑优化方法, 以法兰结构的设计空间为优化域, 以材料许用应力为约束条件, 以结构整体柔度最小化与应力标准差最小化为双优化目标, 开展结构拓扑优化设计。在优化过程中, 首先基于实际工况建立法兰结构的参数化有限元模型, 准确施加预紧与操作工况下的螺栓预紧力、介质压力、温度载荷与边界条件, 通过有限元计算获取结构的初始应力分布与变形情况。随后以法兰环的厚度分布、过渡区域的轮廓形状为设计变量, 迭代优化材料的分布形式, 剔除应力水平极低区域的冗余材料。同时, 通过调整过渡区域的轮廓曲线, 缓解截面突变引发的应力集中, 最终得到兼具高强度与轻量化的拓扑优化结构, 大幅降低局部峰值应力, 提升材料利用率。

3.2 适配复杂工况的密封结构优化

针对传统密封结构适配性差、易出现密封失效的问题, 本次优化以提升复杂工况下的密封可靠性为核心, 结合法兰的变形特性与垫片的力学性能, 开展密封结构的优化设计。

首先, 将传统的平面密封面优化为带径向补偿槽的榫槽密封面结构, 通过榫槽结构的限位作用限制垫片的径向滑移。同时, 在密封面内缘设置均匀分布的径向补偿槽, 当法兰环发生偏转变形时, 补偿槽可通过微小的弹性变形补偿密封面的间隙变化, 维持密封面比压的均匀分布, 避免内缘部位比压下降引发的泄漏。

其次, 结合工况参数优化垫片选型与螺栓布置方

式, 缩小螺栓中心圆与密封面的距离, 减少法兰环的弯矩臂长度, 降低法兰偏转变形。

此外, 通过建立螺栓—法兰—垫片耦合的密封分析模型, 优化螺栓预紧力取值, 确保密封面比压始终处于垫片的最佳密封区间, 全面提升密封可靠性。

3.3 基于刚度匹配的法兰与筒体连接结构优化

针对传统结构刚度匹配失衡引发的变形与偏转问题, 本次优化以法兰环、筒体连接段与螺栓系统的刚度协同为目标, 开展连接结构的优化设计。

首先, 通过有限元参数化分析, 明确法兰环厚度、筒体连接段长度、过渡圆角半径对结构刚度分布的影响规律, 建立法兰环与筒体连接段的刚度匹配方程, 避免因刚度差异过大引发的载荷集中。在优化过程中, 在满足强度与密封要求的前提下, 合理调整法兰环厚度, 控制法兰环的最大偏转量不超过规范允许限值。同时, 优化筒体连接段的长度与壁厚, 使筒体的轴向刚度与法兰环的弯曲刚度形成良好协同, 有效缓冲筒体变形对法兰密封面的影响。

其次, 针对法兰与筒体连接的过渡区域, 采用多段平滑相切的圆弧过渡结构替代传统单圆角过渡, 通过渐变的截面变化分散集中载荷, 平衡结构刚度分布, 降低应力集中系数, 全面提升结构的刚度稳定性。

3.4 抗疲劳性能的结构细节优化

针对传统结构抗疲劳性能不足、全生命周期安全设计缺失的问题, 本次优化以提升结构的疲劳寿命为核心, 针对交变载荷下的疲劳薄弱部位开展细节优化设计。

首先, 针对螺栓孔周边的应力集中问题, 将传统的直孔结构优化为带倒角的阶梯孔结构, 通过孔口倒角分散螺栓拧紧过程中产生的局部应力, 降低螺栓孔周边的应力集中系数。同时, 优化螺栓孔的周向分布精度, 避免因孔位偏差导致的螺栓附加弯曲应力。

其次, 针对法兰与筒体连接的过渡区域, 采用精磨加工工艺提升表面光洁度, 消除加工刀痕等易引发疲劳裂纹萌生的表面缺陷。同时, 通过局部喷丸强化处理, 在材料表面形成残余压应力层, 抵消部分交变拉应力, 提升结构的疲劳极限。

此外, 结合疲劳损伤累积理论, 建立结构的全生命周期疲劳寿命预测模型, 对优化后的结构进行疲劳寿命校核, 确保结构在设计寿命周期内的安全运行。

3.5 优化结构的有限元验证与性能对比

为验证本次优化设计的有效性, 采用 ANSYS 有限元分析软件, 建立优化前后的整体设备法兰三维参数化模型, 选用与实际工况一致的材料性能参数, 分别对预紧工况、常温操作工况、高温高压极端工况下的结构进行力学分析与密封性能验证, 同时将分析结果与传统设计结构进行全面对比。验证结果表明, 优化后的结构在各工况下的应力分布更为均匀, 法兰与筒体过渡区域的局部峰值应力较优化前降低了 32%, 螺栓孔周边的应力集中系数降低了 26%, 所有区域的应力值均控制在材料的许用应力范围内, 无超应力现象, 结构的整体重量较优化前降低了 18%, 实现了良好的轻量化效果。同时, 优化后的法兰环最大偏转量较优化前降低了 41%, 密封面比压分布均匀性显著提升, 在极端工况下仍能满足密封要求, 结构的疲劳寿命较优化前提升了 2 倍以上, 全面验证了优化方案的科学性与工程实用性。

4 结束语

本文针对压力容器整体设备法兰传统结构存在的应力集中、密封失效、刚度失衡与抗疲劳性能不足等核心问题, 开展了系统的结构分析与优化设计, 通过拓扑优化实现了应力均匀化与轻量化, 通过密封结构改进提升了复杂工况下的密封可靠性, 通过刚度匹配设计与细节优化强化了结构的抗疲劳性能。本文提出的优化方案符合国内外工程规范要求, 具有良好的可实施性与工程实用性, 可为压力容器整体设备法兰的设计优化与安全运行提供参考。未来可结合智能优化算法开展多工况多目标的全局优化, 进一步提升结构的综合性能与全生命周期经济性。

参考文献:

- [1] 王佳喜. 超临界二氧化碳储能压力容器的选材与设计研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026, 46(03): 102-104.
- [2] 齐琪, 惠虎, 黄淞, 等. 固态储氢容器管板结构的应力分析与结构优化 [J]. 化工设备与管道, 2026, 63(01): 1-6.
- [3] 黄佳敏. 压力容器法兰-筒体连接结构优化: 基于密封性能提升的视角 [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(03): 103-105.
- [4] 刘艳杰. 压力容器设备法兰螺栓疲劳影响因素与控制分析 [J]. 设备监理, 2025(04): 29-33.
- [5] 范科, 刘崇义, 邓祥鑫. 华龙一号压力容器法兰面液位自动控制技术 [J]. 价值工程, 2025, 44(16): 109-114.

建筑材料价格波动对工程造价的影响及应对

黄海明

(安徽振兴工程咨询有限公司, 安徽 宣城 242500)

摘要 建筑材料价格波动是影响工程造价的核心风险因素之一, 其不确定性贯穿项目全生命周期。本文系统分析了主要建材价格波动的驱动因素, 并从项目投资决策、招投标与合同签订、施工实施、竣工结算四个阶段深入剖析了价格波动对工程造价产生的多维影响。针对上述影响, 构建了一个涵盖超前预控、动态管控、规范结算及行业支撑的全过程、多层次策略体系, 旨在推动行业从粗放对抗向精细协同转型, 进而实现工程造价的有效控制与建筑市场的可持续发展。

关键词 建筑材料; 价格波动; 工程造价; 需求侧

中图分类号: TU5; TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.023

0 引言

近年来, 受国际地缘政治冲突、国内“双碳”目标下环保限产政策、能源与物流成本攀升以及金融市场投机行为等多重因素的交织影响, 建材价格波动呈现出频率加快、幅度加大、传导链条复杂化的新特征。这种剧烈且频繁的价格波动, 打破了传统工程造价管理基于静态价格假设的确定性框架, 给项目投资控制带来了前所未有的挑战。因此, 系统揭示建筑材料价格波动的内在机理, 全面评估其对工程造价的多维冲击, 并据此构建覆盖项目全生命周期的应对策略体系, 对于保障项目综合效益具有重要意义。

1 建筑材料价格波动的现状与成因分析

1.1 主要建筑材料价格波动的特征性描述

近年来, 主要建筑材料价格呈现出剧烈波动、周期性减弱、普涨与结构性分化并存的复杂特征。以钢材、水泥、商品混凝土等为核心的建工材料, 其价格运行已脱离传统的平稳周期, 转而表现为高频、大幅的震荡^[1]。从趋势上看, 多种材料价格波动的中枢整体上移, 呈现“涨多跌少、易涨难跌”的态势。同时, 不同材料间的波动并非孤立, 而是具有显著的传导性与联动性。例如: 作为上游的钢材价格上涨, 会通过机械使用费、钢结构成本等途径推高整体建筑成本。这种广泛而剧烈的波动, 极大地破坏了工程造价的稳定性和可预测性, 使成本管控面临前所未有的挑战。

1.2 建筑材料价格波动的主要驱动因素

建筑材料价格波动是多重因素交织作用的结果。首先, 供给侧因素占据主导。国内严格的环保政策持

续压缩高耗能建材行业的落后产能, 而全球范围内的地缘政治冲突与贸易保护主义则扰乱了铁矿石、煤炭、石油等关键原材料的稳定供应, 从源头上推高了生产成本。其次, 需求侧因素提供了基础支撑。宏观经济的周期性波动以及“新基建”、重大工程项目集中开工所带来的阶段性需求增长, 对建材价格形成强力拉动^[2]。再次, 成本推动效应显著。国际能源价格的波动直接转化为生产过程中的电力、燃料成本, 而近年来不断上涨的物流运输费用也直接叠加到建材的最终价格上。最后, 金融市场与预期管理也扮演了重要角色。资本在期货市场的投机行为会放大现货市场的价格波动, 而市场参与者对于通货膨胀或供应短缺的恐慌心理, 会导致囤积、抢购等行为, 进一步加剧价格的短期失衡。

2 材料价格波动对工程造价的多维度影响

2.1 对项目投资决策阶段的影响

材料价格波动在项目源头——投资决策阶段, 便埋下了巨大的不确定性风险。在此阶段, 项目的可行性及投资估算是基于对未来市场情况的预测。当建材价格剧烈波动时, 投资估算的准确性与科学性将受到严重挑战。决策者依据历史数据或静态价格编制的投资估算, 很可能在项目实际启动时便已偏离市场实际, 导致“估算失准”。若估算过于保守, 会高估项目成本, 可能使一个原本可行的优质项目因看似经济效益不足而被否决, 错失发展机遇; 反之, 若基于低估的乐观预测进行决策, 则会导致项目在启动之初就面临“先天资金不足”的困境, 为后续的建设实施埋下超概算

作者简介: 黄海明 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程造价。

的隐患。这种不确定性极大地动摇了项目决策的根基，迫使建设单位在决策时不得不采取大幅提高不可预见费的方式来应对，这不仅占用了宝贵的资金成本，也可能影响决策层对项目投资的信心与决心，从而延缓甚至中断项目的推进进程，对整个投资计划产生深远的负面影响。

2.2 对项目招投标与合同签订阶段的影响

材料价格波动使招投标与合同签订阶段演变为发承包双方之间的一场高风险博弈。对于投标方而言，若为中标而忽略价格波动风险报出低价，将独自承担未来成本超支的巨大风险；若在报价中充分计入价格风险预备费，又可能导致报价偏高而丧失竞争力。对于发包方（建设单位），则面临信任与成本的双重考验：一方面，不合理的低价中标可能引来后续索赔、责任推诿，危及工程质量和安全；另一方面，若所有投标报价均因包含高风险溢价而居高不下，将直接导致项目流标，延误工期。这一阶段的焦点最终汇聚于合同条款。固定总价合同在波动市场下难以维系，发承包双方必须就价格调整范围、风险分担比例、调价公式等条款进行艰苦的谈判。合同因此成为风险分配的载体，其签订的艰难与条款的复杂性，正是材料价格波动直接导致的后果。

2.3 对项目施工阶段的影响

施工阶段是材料价格波动风险集中爆发、对工程造价产生直接冲击的核心环节。首先，最直接的表现是成本失控。项目中标后，若主要材料价格大幅上涨，其产生的价差将远超施工单位在投标时预留的微薄利润空间，导致项目实际成本急剧攀升，严重侵蚀利润，甚至造成巨额亏损^[3]。其次，巨大的成本压力会引发连锁反应。施工单位可能因材料款支付困难而影响对供应商和分包商的结算，进而冲击整个项目的资金流，轻则影响施工进度，重则导致工期延误甚至项目停工。再次，项目管理重心被迫偏移。项目管理层需要耗费大量精力与建设单位进行频繁的调价申请、价格确认和商务谈判，而非专注于工程质量、安全与进度，导致内部管理成本增加、效率下降。更为严重的是，在极端成本压力下，个别施工单位可能铤而走险，通过偷工减料、以次充好等方式来压缩成本，这为工程质量和施工安全埋下了巨大的隐患，使项目的最终价值大打折扣。

2.4 对项目竣工结算阶段的影响

材料价格波动的影响最终会在竣工结算阶段全面显现，使得这一本应是项目收官的关键环节变得漫长

而充满争议。由于施工过程中经历了多次的材料价格调整、索赔与反索赔，结算工作变得异常复杂。发承包双方需要耗费大量时间对每一笔价差调整进行核对、确认，追溯历史价格凭证，争论合同条款的理解与适用性，这无疑会显著延长结算周期，影响施工单位的资金回笼和建设单位的固定资产结转。结算金额远超预算这是这一阶段的常态。经过一系列的价格调整与索赔，最终的结算价往往显著高于合同初始价格，甚至突破最初的工程预算，使项目投资控制的目标落空。更为深远的影响是，这种漫长且充满争执的结算过程，严重损害了发承包双方的合作关系与互信，为未来的再次合作设置了障碍，同时也积累了大量的合同纠纷案例，对整个行业的健康生态产生了消极影响。

3 应对建筑材料价格波动的策略体系构建

3.1 针对投资决策与招投标阶段的超前预控策略

在项目源头建立风险防线至关重要。投资决策阶段，必须摒弃依赖历史价格的静态估算，转而推行“动态投资估算”方法^[4]。这意味着需进行专业的市场研判，对未来建设期内的主要材料价格走势进行多情景预测，并基于此测算项目成本。同时，应科学、足额地计取“价格风险预备费”，将其从笼统的不可预见费中独立出来，作为一项有明确计算依据的专项成本，为项目应对潜在的价格上涨提供资金缓冲，从根本上避免因“先天资金不足”而导致的后续一系列问题。

招投标与合同策划阶段的核心在于建立公平合理的风险分担机制。发包方应主动优化合同模式，摒弃将风险单向转移给承包方的传统思维。大力推广可调价合同，在招标文件中明确约定可调价的主要材料种类、基准价格、调价公式以及风险分摊幅度（约定±5%以内的价格波动由承包方承担，超出部分由发包方承担或双方按比例分担）。对于大型复杂项目，可探索目标成本激励合同，设定双方认可的目标成本，若因材料涨价导致成本超支，按约定比例分担；若有结余，则按比例分享。这种模式能有效激励承包商通过优化管理来控制成本，将双方利益绑定，形成共赢格局。

3.2 针对施工阶段的动态管控与成本控制策略

施工阶段是价格波动风险由潜在转为现实的集中爆发期，必须建立动态、主动的管控机制^[5]。首要任务是构建材料价格的动态监测与预警系统。项目管理层应联合采购部门，每周或每半月采集主要建材的实时市场价格，并与投标基准价、合同调价阈值进行对比分析。当价格逼近或突破预警线时，系统自动触发

预警,提示管理层提前研判应对方案。例如:在价格低位时适当增加采购库存,或在价格持续上涨趋势下加快关键工序的施工进度以锁定用量。同时,推行“按需采购+锁价合约”的组合策略:对于钢材、水泥等用量大、价格波动频繁的材料,可与信誉良好的供应商签订一定比例的锁价供货协议,将未来3~6个月的部分需求量以固定价格锁定,从而在时间维度上平滑价格风险。

另一个关键举措是实施精益化施工与价值工程。当材料价格大幅上涨导致原设计方案成本严重超支时,应及时启动价值工程分析,在不损害结构安全与使用功能的前提下,探索替代材料或优化设计参数的可能性。例如:在钢筋价格高企时,审查结构配筋率是否存在优化空间;在铜价飙升时,评估铝导体材料在特定场景下的适用性。此外,强化施工现场的材料管理同样不容忽视。通过精确的限额领料、减少返工浪费、优化切割方案提高出材率,从“节流”端消化部分价格上涨带来的成本增量。这些动态管控措施均需与建设单位保持及时沟通,将技术经济比选方案提前报备并获得书面确认,避免事后产生调价争议。

3.3 针对竣工结算阶段的规范与协同策略

竣工结算阶段是化解前期累积风险、确保项目顺利收官的最后关口。为避免结算周期漫长、争议频发的局面,关键在于加强过程资料的管理与规范。整个施工过程中,发承包双方必须高度重视所有与材料调价相关的过程文件管理,包括书面调价申请、价格确认单、供需发票、会议纪要等,确保每一项调价索赔都做到证据齐全、手续完备、签字确认清晰。这为结算阶段快速、准确地核定调整费用奠定了坚实的基础,能有效避免无谓的“扯皮”。

在结算对账过程中,双方应秉持合作共赢、实事求是的原则。建设单位应尊重市场波动的客观事实,对合同约定范围内的合理调价申请予以确认;施工单位也应恪守契约精神,不提出无依据的索赔要求。为提升结算效率与公正性,可引入第三方造价咨询机构进行审计,利用其专业性与中立性,协助双方快速厘清争议焦点,依法依规完成结算审定。这不仅能显著缩短结算周期,加速施工单位的资金回笼和建设单位的固定资产结转,更有助于修复和维持健康的合作关系,为未来合作保留可能性。

3.4 构建行业与宏观层面的支撑保障体系

单个项目的合同风险分担机制无法完全对冲系统性市场风险,亟需从行业与宏观层面构建更具韧性的

支撑保障体系。首先,建立全国性或区域性的建筑材料价格信息预警平台。该平台应由行业协会或政府造价管理部门牵头,整合期货市场数据、重点企业出厂价、大宗商品港口库存、国际航运指数等多源信息,利用大数据模型对短期价格走势进行预测,并定期发布价格风险等级,能够为发承包双方在投资决策、投标报价和合同谈判时提供权威、及时的参考依据,减少因信息不对称导致的风险误判。其次,探索发展建筑工程材料价格保险或期权等金融衍生工具。由建设单位或施工单位向保险公司支付保费,当主要材料价格超过合同约定的触发水平时,保险公司对超出部分予以一定比例的补偿。这种市场化风险转移机制,将分散的、难以预测的价格巨幅波动风险,转化为可量化的、固定成本的保费支出,能够从根本上改变发承包双方零和博弈的风险分配困境。

4 结束语

建筑材料价格波动已成为现代工程管理中不可回避的系统性风险。想要有效应对建筑材料价格波动风险,绝非依靠任何单一措施就能奏效,必须从理念、方法、技术乃至行业生态层面进行系统性革新。通过实施涵盖“投资决策—招投标—施工—结算”全过程的超前预控、动态管控与协同策略,并积极构建行业与宏观层面的支撑保障体系,方能将不可控的市场风险转化为可管理、可分担的项目内在成本。最终,推动建筑行业从传统的粗放式、对抗式管理,向精细化、协同化、共赢化的新模式转型,从而实现工程造价的有效控制与建筑市场的可持续发展。

参考文献:

- [1] 赵冰丽. 材料价格波动对建筑工程造价的影响及控制措施[J]. 建材发展导向, 2024, 22(21): 55-57.
- [2] 薛盛群. 建筑材料价格波动对建筑经济活动影响分析[J]. 江西建材, 2023(03): 455-457.
- [3] 姚帆, 曾晖, 刘通飞. 基于扎根理论的建筑材料价格波动影响因素研究[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2022, 36(04): 57-65.
- [4] 江西省住房和城乡建设厅. 江西防范化解建筑材料价格波动风险[J]. 工程建设与设计, 2022(07): 123-126.
- [5] 周跃林. 大宗建筑材料价格波动的影响及强化项目成本管控对策[J]. 建筑, 2021(13): 65-67.

新能源接入对输配电系统的影响及应对策略研究

孙海峰¹, 陈涛², 梁培¹

(1. 陕西北原建设工程有限公司, 陕西 西安 710000;

2. 陕西铭方智慧电力有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 新能源发电出力具有间歇性、波动性与随机性的特征, 其规模化并网打破了传统输配电系统的运行格局, 给输配电系统的安全高效运行带来多维度挑战。本文围绕新能源接入对输配电系统的核心影响展开分析, 结合当前输配电系统运行实际与新能源发展趋势, 重点从潮流调度、电压调控、稳定支撑、谐波治理、消纳保障五个维度提出适配新能源发展的系统性应对策略, 以期为推动输配电系统转型升级、保障高比例新能源场景下电网安全高效运行提供理论参考。

关键词 新能源; 输配电系统; 潮流分布; 电压调控; 能源消纳

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.024

0 引言

“双碳”目标的落地实施, 推动我国能源结构进入深度转型阶段, 风电、光伏等新能源已成为电力供应体系中的重要组成部分。新能源装机规模的持续扩大, 使得其接入输配电系统的比例不断提升, 电网运行的底层逻辑发生深刻转变。传统输配电系统以单向潮流、集中式供电为核心特征, 规划设计与运行管理均围绕传统同步发电机组展开, 难以完全适配新能源发电的出力特性与并网需求。新能源规模化接入后, 输配电系统的运行边界持续拓展, 源网荷储多环节的互动关系更加复杂, 电网运行面临的不确定性显著提升。输配电系统作为电力传输与分配的核心载体, 其安全稳定运行直接关系到电力供应的可靠性与能源转型的推进成效。如何化解新能源接入带来的各类运行挑战, 构建适配高比例新能源发展的输配电系统运行体系, 已成为当前电力行业发展过程中需要解决的核心问题。

1 新能源接入对输配电系统的主要影响

1.1 改变系统潮流分布, 增加调度管控难度

传统输配电系统潮流呈现单向流动特征, 电能从集中式电源侧经输电网向配电网逐级传递, 潮流分布可通过负荷预测精准预判, 调度计划具备稳定的执行基础。新能源以集中式与分布式两种形式接入后, 分布式电源直接接入配电网末端, 使电能可从负荷侧反

向注入电网, 系统潮流转为双向流动, 分布路径与传输规模发生根本性改变。新能源出力受自然环境因素影响显著, 无法按照传统电源模式实现精准调控, 使系统潮流变化规律与负荷预测结果出现偏差, 传统调度模式难以适配潮流的动态变化, 调度计划执行偏差持续扩大, 电网调度管控难度显著提升。

1.2 影响节点电压水平, 降低供电质量标准

输配电系统节点电压水平与线路传输的有功功率、无功功率密切相关。在传统运行模式下, 电源出力与负荷需求变化相对平稳, 节点电压可通过固定调压装置维持在合理区间, 供电质量具备稳定保障^[1]。新能源接入后, 有功出力的随机波动会引发线路功率传输的持续变化, 进而导致各节点电压出现同步波动, 打破原有电压水平的稳定状态。新能源场站通过电力电子设备并网, 无功调节能力与传统同步发电机组存在显著差异, 无法为系统提供持续稳定的无功支撑, 节点电压易出现大幅偏移, 供电电压偏差持续超出规范要求, 供电质量稳定水平显著降低。

1.3 加剧系统运行波动, 削弱整体稳定性

传统输配电系统依托同步发电机组的运行特性, 为系统提供充足的惯量支撑与阻尼特性, 能够有效平抑负荷波动带来的频率与功率变化, 保障系统运行稳定。新能源发电机组通过电力电子变流器实现并网, 与系统之间实现电气隔离, 无法像同步发电机组一样

作者简介: 孙海峰 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输配电及用电工程。

为系统提供转动惯量支撑，高比例新能源接入会直接导致系统整体惯量水平下降。系统惯量降低使其抵御功率波动的能力大幅减弱，新能源出力波动会引发系统频率快速偏移，功率平衡的实时匹配难度大幅提升，系统运行波动幅度与频次显著增加，原有稳定控制策略适配性下降，整体运行稳定性被持续削弱。

1.4 产生电力谐波污染，干扰设备正常运行

风电、光伏等新能源发电设备，必须通过电力电子变流器实现电能的变换与并网，电力电子器件的开关动作，会在并网过程中产生大量谐波电流，这些谐波电流会随着新能源出力的变化注入输配电系统，引发电网谐波污染问题。新能源规模化接入后，谐波源从用户侧延伸至电源侧，集中式新能源场站向输电网注入大量谐波，分布式新能源在配电网全环节形成分散式谐波源，谐波分布范围更广，治理难度显著提升。谐波电流会增加线路与变压器的附加损耗，加速设备绝缘老化，还会引发电网电压波形畸变，干扰继电保护与自动装置的正常工作，给电网安全运行埋下隐患^[2]。

1.5 加大能源消纳压力，制约高效利用效率

新能源发电出力具有显著的反调峰特性，光伏出力集中在白天负荷平稳时段，夜间负荷高峰时段无出力，风电出力多呈现夜间大白天小的特征，与用电负荷峰谷变化规律呈现反向匹配状态，新能源出力与负荷需求之间出现显著的时间错配。传统输电通道的传输容量与布局，难以完全适配新能源规模化外送的需求，部分新能源富集区域外送通道容量不足，无法将富余电力输送至负荷中心，出现显著的空间错配问题。系统调峰资源规模有限，当新能源出力超出系统调峰能力时，只能通过限制新能源出力保障系统运行安全，进而出现弃风弃光情况，制约了新能源的高效利用。

2 新能源接入下输配电系统的应对策略

2.1 优化潮流调度模式，提升系统管控能力

新能源接入带来的潮流分布变化，需要调度模式从传统的固定计划模式向动态适配模式转型，贴合电网运行的实时状态调整管控逻辑。首先，构建源网荷储全维度协同的调度框架，整合电源侧可调机组、电网侧传输资源、负荷侧可调节负荷与储能侧充放电资源，实现多类型资源的统筹调配与联动响应，快速平抑新能源出力波动引发的潮流失衡问题，打破传统调度模式的资源壁垒^[3]。其次，建立分时分区的精细化调度机制，结合不同区域新能源出力特性、负荷分布特征与线路传输能力，划分差异化的调度管控单元，针对各单元的潮流变化特征制定专属调度策略，实现潮流

的分区分平衡与精准管控，有效缓解局部线路的潮流传输压力，规避线路重载过载风险。最后，搭建多时间尺度联动的动态调度体系，衔接年度月度的中长期调度计划、日/日前调度计划与小时/分钟级的实时调度，基于新能源出力的实时监测数据动态调整调度方案，持续缩小调度计划与实际运行状态的偏差，全面提升输配电系统的潮流管控能力。在调度体系升级的过程中，需同步搭建基于人工智能的潮流智能决策平台，依托大数据技术整合新能源场站、电网设备、负荷终端的全量运行数据，通过深度学习算法精准预判新能源出力与负荷需求的变化趋势，提前生成最优调度预案。

2.2 完善电压调控机制，保障供电质量稳定

新能源接入引发的节点电压波动问题，需要构建全流程覆盖的电压调控机制，适配输配电系统全环节的电压管控需求，维持电压水平的平稳运行。首先，构建分层分区的协同电压调控体系，明确输电网与配电网不同层级的电压调控职责，划定各层级的调压范围与管控目标，建立上下级电网的调压联动机制，实现输配电网各节点电压的协同管控，化解不同区域电压调控的衔接不畅问题，形成全电网覆盖的电压管控闭环。其次，优化无功功率的动态调配路径，统筹新能源场站的无功调节能力、电网侧固定与动态无功补偿装置的调节潜力，基于节点电压的实时变化情况，动态调整各无功源的出力规模，实现无功功率的就地平衡与灵活流转，为各节点电压的稳定提供持续充足的无功支撑，规避电压大幅偏移的风险^[4]。最后，健全电压异常的分级响应流程，基于电压偏移的幅度与持续时长，划分不同的响应等级，针对各等级制定对应的调压处置方案，实现电压异常的快速识别与精准处置，将电压偏差持续控制在规范允许的区间内，全程保障供电质量的稳定达标。针对分布式新能源高比例接入配电网带来的电压双向波动难题，需在配电网台区层面搭建网格化电压监测网络，实现低压节点电压数据的实时采集与全域感知，精准捕捉分布式电源出力波动引发的局部电压异常。同时，推动调压装置智能化升级，赋予无功补偿设备、有载调压变压器自主调压与协同联动能力，实现低压配电网电压就地快速调节，填补传统调压体系的低压侧管控盲区。

2.3 强化调频调压配置，增强系统稳定性

高比例新能源接入引发的系统惯量下降与稳定性削弱问题，需要从资源配置层面入手，补齐系统调频调压与惯量支撑的能力短板，强化系统运行的抗扰动能力。首先，优化系统调频资源的布局结构，在新能源高占比区域合理配置规模化的快速调频资源，结

合区域新能源出力的波动特征，匹配对应的调频响应速度与调节容量，补充系统频率调节的能力缺口，快速平抑新能源出力波动引发的系统频率偏移，维持系统频率的稳定运行。其次，完善全电网调压资源的协同配置模式，在输电网关键枢纽节点配置大容量动态调压装置，在配电网分布式新能源集中接入区域配置分布式调压设备，实现不同类型、不同区域调压资源的联动配合，快速响应节点电压的波动变化，化解电压扰动带来的运行风险，提升系统电压稳定水平^[5]。最后，构建全网协同的惯量支撑补充体系，在新能源场站配置具备虚拟惯量响应能力的并网设备，在电网关键节点配置构网型储能装置，模拟同步发电机组的惯量响应特性，弥补新能源接入带来的系统惯量缺口，提升系统抵御功率突变与故障冲击的能力，全面强化系统整体的运行稳定性能。

2.4 加装谐波治理设备，减少电力污染干扰

新能源并网带来的谐波污染问题，需要从源头、传输、末端全环节配置谐波治理设备，实现谐波的全流程管控，降低谐波污染对电网与设备的不良影响。首先，在新能源场站并网节点配置集中式有源滤波装置，结合新能源发电设备的谐波输出特性，针对性设置滤波参数，实时跟踪并抵消新能源并网产生的谐波电流，从源头减少谐波注入输配电系统的规模，实现谐波污染的源头管控。其次，在输配电线路的关键枢纽节点与变压器低压侧，配置匹配线路谐波特征的无源滤波支路，针对电网运行过程中占比最高的谐波频次，设置对应的滤波通道，滤除线路中流转的谐波分量，降低谐波电流对输电线路、变压器等核心设备的附加损耗，延缓设备绝缘老化，延长设备使用寿命。最后，在配电网负荷集中区域与分布式新能源高密接入区域，配置谐波监测与治理一体化装置，实现区域内谐波含量的实时跟踪与动态治理，阻断谐波污染向用户侧的扩散路径，避免谐波对用户侧精密用电设备的干扰，保障各类用电设备的正常稳定运行。在此基础上，同步搭建覆盖源网荷全环节的谐波在线监测网络，实现各节点谐波含量、频次与流向的实时采集与溯源分析，精准定位谐波污染的核心源头与扩散路径。同时，针对不同类型新能源设备的谐波输出特性，制定差异化治理方案，结合电网工况动态优化滤波设备运行参数，实现治理效果的动态优化，进一步提升全系统谐波管控的精准度。

2.5 构建消纳保障体系，提升能源利用效率

新能源规模化接入带来的消纳压力，需要打通源网荷储各环节的壁垒，构建全链条的消纳保障体系，

化解新能源出力与负荷需求的时空错配问题，全面提升新能源利用效率。首先，完善跨区域输电通道的建设布局，结合我国新能源资源分布与负荷中心的空间分布特征，优化特高压与区域联络线的建设规划，提升新能源电力的跨区域跨省份流转能力，化解新能源富集区域与负荷中心的空间错配问题，大幅拓展新能源消纳的空间范围，缓解本地电网的消纳压力。其次，推动可调节负荷资源的规模化市场化应用，完善需求侧响应的市场化激励机制，引导工业可调负荷、商业楼宇负荷、居民可调节负荷等各类资源，适配新能源出力曲线调整用电行为，在新能源大发时段增加用电负荷，在新能源出力低谷时段减少用电需求，提升新能源电力的就地就近消纳能力，有效缓解系统的调峰压力。最后，优化储能资源的全网配置与运行模式，结合新能源出力特性与区域消纳需求，在新能源场站侧、电网关键节点、负荷侧配置差异化类型与规模的储能设备，依托储能设备的充放电调节能力，平抑新能源出力的短期波动，存储新能源大发时段的富余电力，在负荷高峰时段释放，化解新能源出力与负荷需求的时间错配问题，大幅减少新能源弃电情况，全面提升能源整体利用效率。

3 结束语

高比例新能源接入是我国输配电系统发展的必然趋势，其给电网安全高效运行带来的影响贯穿于规划、运行、管理的全环节。本文梳理的多维度影响与应对策略，能够为输配电系统适配新能源发展提供可参考的实施路径。随着新能源装机规模的持续扩大，输配电系统仍需持续推进技术创新与模式优化，不断提升对新能源的适配能力，助力能源结构转型的稳步推进与“双碳”目标的顺利实现。

参考文献：

- [1] 罗卿,张伟. 新能源接入下的输配电系统适应性研究[J]. 电子制作,2024,32(22):105-107,33.
- [2] 周瑶,杨畅. 电网输配电系统过载问题的成因分析与缓解措施[J]. 电力设备管理,2025(07):26-28.
- [3] 吕守国. 输配电系统电力设计优化与智能电网技术应用研究[J]. 张江科技评论,2025(02):45-47.
- [4] 王雅强. 光伏发电并网对输配电系统的影响及对策分析[J]. 低碳世界,2025,15(10):47-49.
- [5] 颜炯,卢生炜,张涛,等. 高比例新能源接入下电网输配电成本多主体分摊模型[J]. 电力建设,2024,45(01):138-146.

城市轨道交通工程变更对造价的影响及控制措施分析

刘 杨

(合肥市轨道交通集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 城市轨道交通工程建设周期长、地质条件复杂, 工程变更频发易导致造价失控, 影响项目顺利推进。本文聚焦城市轨道交通工程变更, 梳理其核心类型与主要成因, 分析变更对造价的直接与间接影响, 结合工程建设全流程提出针对性控制策略, 涵盖前期阶段变更预防与造价前置控制、变更实施阶段动态管控、后期阶段复盘优化, 以期降低工程变更发生率、减少造价波动、实现项目造价精准管控提供实践参考, 助力城市轨道交通工程高质量、低成本推进。

关键词 城市轨道交通; 工程变更; 造价影响; 前置控制; 动态控制

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.025

0 引言

当前城市轨道交通建设迈入提质增效新阶段, 行业聚焦财政承受能力与全生命周期效益, 严控投资规模与建设标准。工程变更作为影响造价波动的关键因素, 在复杂地质、市场价格变动与政策更新的多重约束下, 更易引发成本偏离与工期风险。行业对变更管理的规范化、造价管控的精细化提出更高要求, 传统被动应对模式难以适配新形势下的管理需求。本文立足于行业发展导向, 围绕工程变更的成因、影响展开系统分析, 构建覆盖项目全流程的造价控制体系, 以期稳定项目投资、提升建设效益、推动轨道交通可持续发展提供理论参考。

1 城市轨道交通工程变更现状分析

1.1 工程变更的核心类型

城市轨道交通工程变更的核心类型是围绕项目建设整个流程的实际需求调整来展开的, 不同种类的变更对应建设环节的具体场景, 其本质是对最初建设方案的完善与优化, 清晰地界定各类变更形态, 能为后续精准分析变更对造价的作用路径提供明确依据。设计变更是工程变更中最基础、最常遇到的类型, 核心是基于地质勘察结果调整、行业规范更新或者设计方案优化, 对最初设计文件进行的修改完善, 既包含线路走向、车站布局等核心方案的调整, 也涉及结构形式、施工细节的优化, 目的是让设计方案更贴合现场

实际条件与工程建设要求。施工变更来源于现场施工条件的动态变化, 当实际施工环境与设计预设存在差异, 或者施工过程中出现无法按原工艺推进的情况时, 需要对施工工艺、作业流程、施工顺序加以调整, 此类变更直接关系到现场施工效率和施工安全性, 是保障工程顺利推进的必要调整。材料设备变更聚焦主材与核心设备的调整, 涉及型号、规格、技术参数以及供应商的变更, 多因材料设备供应短缺、技术升级或者性价比优化产生, 直接关系到工程建设的质量标准与成本投入。其他变更则涵盖政策法规调整、业主功能需求优化等非工程技术层面的调整, 政策调整包括环保、安全等相关规范的更新, 业主需求调整则围绕项目使用功能、运营需求的优化展开, 此类变更虽然不直接涉及施工技术, 但对工程整体方案与造价仍会产生显著影响。

1.2 工程变更的主要成因

城市轨道交通工程变更的出现不是偶然, 它是多重因素共同作用带来的结果, 从多个角度去分析变更出现的原因, 既可以厘清每一种变更出现的原因, 也可以区分变更中必然存在的部分和能够人为控制的部分, 这能够为后续制定专门的控制办法打好基础。前期勘察工作做得不仔细是导致变更的一个关键原因。城市轨道交通工程经常要穿过城市中心地带, 地质状况非常复杂多变, 如果在勘察期间没有把施工区域的地质情况全都掌握清楚, 或者勘察的细致程度达不到

作者简介: 刘杨(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程造价。

工程需要,就会让最开始的设计方案与现场实际的地质条件对不上号,后面的施工就要借助设计变更来改动方案,从而避开施工可能遇到的风险。设计本身存在不合理的地方同样会带来大量变更,城市轨道交通工程建设时间长、技术上的挑战也很大,在开始做设计的时候如果没有充分地考虑施工能不能顺利推进、以后运营的实际需要以及周围环境会受到什么影响,就会让设计方案留下一些漏洞,如结构设计和施工用的方法不配套、功能设计没有考虑到后期运营的需求等,这些都得上在施工过程中借助变更来补上^[1]。外部环境出现变动是无法完全避免的客观原因,政策法规更新会对工程建设标准提出新的要求,周边建筑物、地下管线的实际情况和前期调查得到的信息有出入,或者在施工期间突然遇到极端天气、交通管制等意外状况,都会促使工程变更发生。业主需求出现调整是基于项目功能优化的主观原因,工程建设过程中,城市发展规划有了改动或者业主对项目运营功能的理解加深,会对工程的功能定位、使用标准提出新的要求,这样一来就引发了相关的工程变更,这一类变更带有一定的人为可控性,能够借助前期充分的交流来减少出现的次数。

2 城市轨道交通工程变更对造价的核心影响

2.1 直接影响分析

工程变更对造价的直接影响,核心是作用于造价构成的核心要素,通过改变各要素的投入量与投入标准,引发造价总额的增减波动。这种影响直接体现在工程费用的核算与控制中,是造价管理需重点关注的核心环节。工程量增减是变更对造价最直接的影响形式,设计变更或施工变更都会直接调整施工范围与施工量,工程量增加会直接导致人工、材料、机械等各类资源投入增加,推动造价总额上升;工程量减少虽可能降低部分直接成本,但往往伴随已投入资源的浪费,同样会对造价控制产生不利影响。材料设备费用变化是变更引发造价波动的重要载体,材料设备变更会直接调整主材与设备的用量、价格及供应成本,若变更后选用的材料设备单价高于原方案,或用量增加,会直接推高材料设备费用总额;即便选用性价比更高的材料设备,也可能因规格调整、更换供应商产生额外的运输、安装费用,间接影响造价^[2]。施工成本变动源于施工工艺与工期的调整,施工变更导致的工艺优化或调整,会改变人工投入强度、机械使用效率,进而影响人工费用与机械使用费;工期调整则会直接影响人工、机械的投入时长,若工艺变更导致施工效率下降,

或工期延长,都会增加人工、机械的额外投入,最终体现为施工成本的变动,直接影响项目造价总额的控制。

2.2 间接影响分析

工程变更带给造价的间接影响,是借助变更带出来的衍生效应进行传递。这些影响虽然不会直接算进工程直接成本里,但是会加大造价控制的困难程度,甚至抬高项目整体成本。这种影响常常带有隐蔽性特点,容易被忽略掉,会对造价控制效果起到决定性作用。工期延误带来的开销是变更最核心的间接影响,工程变更会打乱原本的施工进度安排,造成施工工序连接不顺,引发工期延长,会出现额外开销,包含现场管理员工资、临时设施租用费用的增多,还有窝工、机械闲置带来的损耗费用,这些都会间接算进项目造价,加大造价控制负担。索赔费用增多是变更衍生出来的另一项间接成本,工程变更造成施工方的施工范围、施工工艺或者工期出现变动,如变更没有事先明确责任归属,或者没有及时商量调整费用,施工方会根据合同规定提出索赔,索赔内容包括人工窝工、机械闲置、材料损耗等各类额外支出,此类费用的产生会进一步抬高项目造价,加重造价失控危险。后续维护费用的增多是变更带来的长期间接影响,部分工程变更为了赶进度或者降低短期成本,没有充分考虑到工程后期运维需要,造成工程质量存在潜在问题,或者设备、结构的运维难度加大,后续运营过程中需要投入更多的维修、保养费用,这种长期成本的累积,会明显提高项目全生命周期造价,进一步加大造价管理的难度。

3 城市轨道交通工程变更及造价控制策略

3.1 工程前期阶段变更预防与造价前置控制

在项目开始之前的准备阶段,做好变更的预防和造价控制,关键点在于加强各环节管理,从工程伊始就降低变更出现的可能,并且提早将造价方面的风险固定下来,为整个项目造价的稳定管理打下牢固基础。这个时期的管理重心放在“预防放在第一位、提早介入管理”上面,借助完善前期各项事务来降低后面发生变更的概率。提高前期勘察的准确程度是防止变更的根本办法,城市轨道交通工程面对的地质状况往往很复杂,有必要扩大勘察涉及的地域,增加勘察的次数,运用更先进的勘察手段来完整把握施工区域的地质特点、水文条件以及地下管线布局,保证勘察得到的数据是真实有效、准确全面的,为最初的设计方案提供可信赖的参考,从而在根本上降低因为勘察数据不准所导致的设计上的改动^[3]。初始设计方案质量是减少变更的重要步骤,需要建立健全的设计审查流程,

召集设计方、施工方、运营方等多个领域的专业人员一起参加评审，重点检查设计方案可行性、功能安排是否合理以及造价是否合理，尽早发现并纠正设计上的疏忽，防止设计方案跟实际施工情况、后期运营需要出现脱节，同时借助优化设计方案，提早确定核心的造价因素，减少后续变更带来的造价起伏。明确业主需求是避开主观类变更的主要方式，前期要通过深入交流，全面整理业主对项目的功能定位、使用上的要求以及后期运营的期望，将业主需求清楚地写进设计文件里面，形成书面上的约定，避免在工程建设过程中业主需求频繁变动，从源头上减少由于需求更改引发的工程调整和造价变化。

3.2 工程变更实施阶段造价动态控制

变更实施阶段的造价动态管理，关键点在于借助规范化的变更流程、加强过程管控，实时监测变更给造价造成的影响，及时调整管理方案，避免造价出现失控状况。这个阶段的管控重心在于“流程要规范、动态要跟踪”，确保变更过程能够被有效控制、造价也能够被加以控制。建立严格的变更审批流程是规范变更管理工作的基础，需要明确变更申请、审核、审批的具体步骤与权限划分。变更申请必须详细说明变更的原因、变更的内容以及给造价、工期带来的影响，审核环节要组织专业人手核查变更的必要性与合理性，审批环节则依据变更的规模与影响大小，由相应级别的负责人进行审批，从而防止没有依据、没有审批的随意变更行为。加强变更造价的核算是控制造价波动的关键点，变更审批通过之后，需要组织造价专业人员准确计算变更带来的造价增减情况，结合市场价格、施工方案等各种因素，提前预估变更对造价的影响程度，明确变更费用的承担主体与支付办法，防止后期由于费用核算方面的争议引发索赔问题。动态跟踪变更实施是保证造价控制效果的重要措施，变更实施过程中，关注变更的执行进展，核查变更内容是否与审批方案保持一致，监测人工、材料、机械等费用的实际投入情况，如发现变更实施过程中出现造价超支的情况，需尽快分析超支原因并调整管理方案，确保变更带来的造价波动处在可以控制的范围之内^[4]。

3.3 工程后期阶段变更复盘与造价优化

在项目后期阶段进行变更复盘和造价优化操作，核心思路是汇总变更管理中的经验，完善和优化管控体系，形成一套长期有效的机制，提高项目的变更管理和造价控制能力。这个时期的管控主要放在“总结提高、长期优化”上，将以前项目的经验转变成后面管控的支撑点。对变更案例做全面复盘是优化管控的

基础，要把项目整个周期里出现的所有变更案例都梳理一遍，分门别类地分析各种变更的原因、执行过程以及对造价带来的影响，汇总变更管理中的优点和不足，提炼出不同类型变更的管控规律，厘清哪些变更能够借助前期管控来避免，哪些变更需要优化执行流程，为后续项目提供参考^[5]。完善变更管理细则是构建长效机制的关键点，结合复盘得出的结果，优化变更申请、审核、审批、核算等各个环节的管理流程，明确各参与方的责任和义务，把变更造价核算标准做得更细致，规范变更执行过程中的管控要求，减少变更管理中的漏洞，提高变更管理的规范化程度。建立变更风险预警机制是提前避开造价风险的重要手段，结合复盘汇总出的变更规律，识别后续项目可能出现的常见变更类型和诱因，建立风险预警指标体系，提前准备好应对方案，当出现风险预警信号的时候，及时采取防控手段，提前避开变更发生，或者降低变更对造价的影响，持续提高项目造价控制的整体水平。

4 结束语

城市轨道交通工程变更贯穿项目建设全流程，其对造价的影响兼具直接性与隐蔽性，既关联项目建设阶段的成本管控，也影响运营阶段的长期效益。梳理工程变更类型与成因，剖析其对造价的多重影响，是实现造价精准管控的前提。全流程控制策略的落地，能有效降低变更发生率，化解造价波动风险，平衡工程质量、进度与成本三者关系。城市轨道交通工程建设复杂度持续提升，变更管理与造价控制需立足于实际、动态优化，结合项目特点完善管控机制，积累实操经验。未来，可进一步结合新技术提升造价管控精准度，推动变更管理规范化、造价控制精细化，为城市轨道交通工程可持续发展提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 单昱桥.城市轨道交通工程施工质量控制技术研究[J].建筑机械,2025(09):312-316.
- [2] 王清凌,陆莹,吕晓峰,等.基于多源信息融合的城市轨道交通施工安全风险评价[J].吉林建筑大学学报,2025,42(04):1-10.
- [3] 孙亮.虚拟仿真技术在城市轨道交通工程实训中的应用[J].电子技术,2025,54(07):410-411.
- [4] 杨刚.城市轨道交通工程中的施工成本控制措施[J].工程造价管理,2025,36(03):62-66.
- [5] 周晓燕.城市轨道交通土建工程中盾构区间施工技术研究[J].城市建设,2025(09):86-88.

新型保温建筑材料在暖通空调系统中的节能应用研究

孙超军, 刘富强

(临沂市新城热力集团有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 本文聚焦建筑节能与暖通空调系统高效运行的核心需求, 针对传统保温材料导热系数高、防火性能差等问题, 系统构建涵盖材料选型、系统集成、施工管控、能效评估的全流程节能应用体系。通过整合多腔孔陶瓷复合绝热材料、真空绝热板、改性聚氨酯等新型材料的核心优势, 建立“材料特性—系统需求—节能目标”的精准适配机制, 重点突破材料与管道/设备界面贴合性、复杂工况下保温稳定性等技术瓶颈。以北京某超高层写字楼暖通空调系统改造项目为案例验证, 结果表明: 优化后的节能应用体系可使暖通系统能耗降低32%, 管道散热损失减少45%, 室内温度波动控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 材料使用寿命延长至30年以上, 综合节能效益较传统模式提升60%。

关键词 新型保温建筑材料; 暖通空调系统; 节能应用; 保温适配; 绿色建筑

中图分类号: TU5; TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.026

0 引言

暖通空调系统作为建筑能耗的核心组成部分, 其能耗占建筑总能耗的40%~60%, 是建筑节能改造的关键领域。保温材料作为暖通空调系统能耗控制的核心载体, 直接影响管道、设备的散热损失与系统运行效率。随着“双碳”目标与绿色建筑政策的深入推进, 传统保温材料(岩棉、普通聚氨酯等)面临严峻挑战: 导热系数偏高(通常在 $0.035\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上)导致散热损失大; 部分材料燃烧性能未达A1级, 存在消防安全隐患; 长期使用易出现老化、变形、脱落等问题, 保温效果衰减严重; 与暖通系统管道、设备的适配性不足, 界面缝隙导致额外能耗损失。近年来, 《建筑节能工程施工质量验收标准》(GB 50411-2019)、《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)等标准陆续实施, 明确要求提升建筑保温材料的节能性能与安全性能。同时, 多腔孔陶瓷复合绝热材料、真空绝热板(VIP)、改性聚氨酯等新型保温材料的技术突破, 为暖通空调系统节能升级提供了技术支撑。本文结合近三年行业创新实践, 整合新型保温材料的性能优势与暖通系统的运行需求, 构建全流程节能应用体系, 通过工程案例验证应用效果, 提出落地保障措施, 为同类建筑暖通工程节能改造提供可复制的解决方案。

1 新型保温建筑材料核心性能与适配技术体系

1.1 节能应用体系整体架构

基于暖通空调系统“材料选型—系统集成—施工管控—能效评估”的全流程特性, 构建四级闭环节能应用体系, 各环节深度协同、数据双向贯通。材料选型层聚焦新型保温材料的性能筛选与优化组合, 筑牢节能基础; 系统集成层实现保温材料与管道、设备、末端装置的精准适配, 降低能耗损失; 施工管控层通过标准化施工与质量控制, 确保保温效果稳定; 能效评估层建立多维度节能指标体系, 动态监测应用成效, 形成“选型—集成—施工—评估”的全链条节能管控模式^[1]。

1.2 核心新型保温材料性能特征

多腔孔陶瓷复合绝热材料采用微米及纳米陶瓷颗粒复合成型, 形成蜂巢结构, 导热系数低至 $0.018\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 燃烧性能达A1级不燃标准, 适用温度范围为 $-40\sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期使用无老化变形, 使用寿命超30年。真空绝热板(VIP)通过芯材真空封装技术, 导热系数可低至 $0.008\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 保温性能是传统材料的4~5倍, 且厚度仅为传统材料的 $1/3\sim 1/2$, 适用于空间受限的暖通设备保温^[2]。改性聚氨酯材料通过添加阻燃剂与抗氧化剂, 优化配方工艺, 导热系数控制在 $0.022\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,

作者简介: 孙超军(1984-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程建筑材料。

燃烧性能提升至 A2 级，同时具备良好的柔韧性与粘结性，适配复杂形状管道的保温需求。

1.3 材料与暖通系统精准适配技术

针对暖通空调系统的管道、设备、末端装置等不同部位，建立“性能需求—材料特性”的精准适配机制。管道保温采用“改性聚氨酯+真空绝热板”复合结构，内层改性聚氨酯确保与管道壁紧密贴合，外层真空绝热板强化保温效果，管道外径 ≤ 100 mm 时保温厚度控制在 30~50 mm，外径 > 100 mm 时采用分层保温设计，散热损失降低 45% 以上^[3]。暖通设备（冷水机组、换热器等）保温选用多腔孔陶瓷复合绝热材料，采用模块化定制设计，根据设备形状精准切割，界面贴合度达 99% 以上，避免缝隙散热；设备接口处采用柔性密封保温材料，防止局部热桥效应。末端装置（风机盘管、空调机组等）保温采用轻量化改性聚氨酯材料，兼顾保温性能与安装便捷性，减少设备运行噪声。

1.4 复合保温结构优化技术

针对不同建筑场景与气候区域，优化复合保温结构设计。严寒地区（东北、西北）采用“多腔孔陶瓷复合绝热材料+真空绝热板”双重保温结构，导热系数控制在 0.015 W/(m·K) 以下，满足低温环境下的深度节能需求；夏热冬冷地区（长江流域）采用“改性聚氨酯+反射隔热层”复合结构，既减少冬季散热损失，又降低夏季太阳辐射热传入，实现冬夏双季节能^[4]。针对暖通系统的阀门、法兰等易散热部位，采用定制化保温套，内置弹性保温材料与密封层，确保保温完整性，局部散热损失降低 60%。

1.5 节能监测与动态优化技术

搭建暖通空调系统节能监测平台，整合温度传感器、流量传感器、能耗计量仪表等设备，实时采集管道表面温度、环境温度、系统能耗等数据。采用大数据分析技术，建立能耗损失预测模型，动态评估保温材料的节能效果；当管道散热损失超允许值（ ≤ 5 W/m²）时，自动预警并分析原因，通过调整保温结构或更换材料等方式优化节能方案。结合建筑用能需求变化，动态调整保温系统运行参数，实现节能效果与使用需求的精准匹配。

2 新型保温建筑材料核心应用场景与实施路径

2.1 新建建筑暖通系统节能应用

在新建建筑暖通工程设计阶段，将新型保温材料性能参数纳入设计指标，结合建筑能耗目标优化保温方案。采用 BIM 技术构建暖通系统三维模型，模拟保

温材料的覆盖范围与适配效果，提前规避管道交叉、空间受限等导致的保温难题^[5]。施工阶段严格按照《建筑节能工程施工质量验收标准》（GB 50411-2019）要求，执行保温材料进场检验制度，重点核查导热系数、燃烧性能、尺寸稳定性等指标；管道保温采用机械固定与粘结结合的方式，确保保温层平整、无空鼓，接缝处采用密封胶密封，缝隙宽度 ≤ 2 mm。例如：某新建超高层住宅项目应用表明，采用新型保温材料后，暖通系统能耗较传统方案降低 30%，室内温度均匀性提升 40%。

2.2 既有建筑暖通系统节能改造

针对既有建筑暖通系统保温老化、节能效果差的问题，制定“检测—评估—改造”的分步实施路径。首先对原有保温材料进行性能检测，评估散热损失与安全隐患；然后根据检测结果选择适配的新型保温材料，对老化严重的部位进行整体更换，对局部破损部位进行修补加固；改造过程中采用“微创施工”技术，减少对建筑正常使用的影响。例如：北京某老旧写字楼改造项目中，采用多腔孔陶瓷复合绝热材料替换传统岩棉，管道散热损失从 12 W/m² 降至 5.5 W/m²，暖通系统能耗降低 28%，改造投资回收期仅 2.3 年。

2.3 特殊场景暖通系统节能应用

针对数据中心、医院、工业厂房等特殊场景的暖通需求，定制差异化节能应用方案。数据中心暖通系统重点强化设备散热控制，采用真空绝热板对精密空调管道与机房墙体进行保温，确保室内温度稳定在 $18 \sim 24$ °C，同时降低空调运行负荷；医院手术室、ICU 等区域采用抗菌型改性聚氨酯保温材料，既满足保温节能需求，又具备抗菌防霉性能，符合医疗环境卫生要求；工业厂房高温管道采用多腔孔陶瓷复合绝热材料，耐受高温可达 800 °C 以上，有效减少高温散热损失，提升能源利用效率。

2.4 全流程质量控制措施

事前预防阶段，制定新型保温材料准入标准，对供应商进行资质审核与样品检测，合格材料纳入合格供应商名录；编制专项施工技术方案，明确材料存储、切割、安装等关键环节的操作要求^[6]。事中控制阶段，建立“三级巡检”机制，班组每道工序自检，技术人员每日巡查，监理单位定期抽检；重点检查保温层厚度、粘结强度、接缝密封等指标，保温层厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内，粘结强度 ≥ 0.3 MPa。事后验收阶段，按《建筑节能工程施工质量验收标准》（GB 50411-2019）标准开展全项目检测，采用红外热成像仪检测管道表面温

度,评估散热损失;通过系统能耗监测数据,验证节能效果;验收合格后出具质量验收报告,建立保温系统运维档案。

3 工程案例验证与应用效果

3.1 案例概况

以北京某超高层写字楼暖通空调系统改造项目为研究对象,该建筑总建筑面积12万m²,地下3层,地上45层,原暖通系统采用传统岩棉保温材料,存在散热损失大、能耗偏高、局部保温层脱落等问题。项目采用本文构建的节能应用体系,对空调水系统管道、冷水机组、风机盘管等部位进行全面节能改造,选用多腔孔陶瓷复合绝热材料与改性聚氨酯材料组合方案,改造总面积达8000m²,重点监测系统能耗、管道散热损失、室内温度稳定性等核心指标。

3.2 应用效果量化分析

对比改造前传统保温模式,优化后的节能应用体系成效显著。在节能效益方面,暖通系统年耗电量从改造前的186万kWh降至126万kWh,能耗降低32%;管道表面温度从改造前的28℃降至15℃,散热损失减少45%,达到《公共建筑节能设计标准》(GB 50189-2015)一级节能要求。在运行稳定性方面,室内温度波动控制在±0.5℃以内,较改造前(±1.2℃)显著提升,舒适度满意度达95%;保温材料界面贴合紧密,无空鼓、脱落现象,经过2年运行,保温性能衰减率仅2%,远低于传统材料的15%。在经济效益方面,每年节约电费约48万元,减少二氧化碳排放量128吨;材料使用寿命延长至30年以上,较传统材料(8~10年)延长3倍,运维成本降低75%,综合投资回收期仅2.5年。

4 技术落地保障机制与推广建议

4.1 落地保障机制

在组织保障层面,成立由设计、施工、监理、材料供应商组成的专项工作组,明确职责分工,建立定期沟通协调机制,解决应用过程中的技术难题。在制度保障层面,制定《新型保温材料暖通系统应用技术规范》《质量控制细则》等制度文件,将节能效果、施工质量纳入绩效考核;执行材料进场“双检测”制度(供应商自检+第三方复检),确保材料性能达标。在人才保障层面,开展新型保温材料性能、安装工艺、节能监测等专项培训,邀请行业专家进行技术指导;与哈尔滨工业大学、同济大学等高校合作建立产学研基地,联合开展技术研发与人才培养,提升技术应用水平。

4.2 应用推广建议

针对不同建筑类型优化技术方案,新建绿色建筑推广“全流程一体化节能”模式,从设计阶段融入新型保温材料应用;既有建筑改造推出“轻量化、低成本”方案,优先改造高能耗部位,降低改造门槛。推动行业标准化建设,联合中国建筑节能协会制定《新型保温材料暖通空调系统应用技术规程》,统一材料选型、施工工艺、能效评估等标准要求。强化示范引领作用,选择大型公共建筑、保障性住房等项目打造标杆工程,通过现场观摩会、技术交流会等形式推广经验;建议政府出台政策支持,对采用新型保温材料的节能项目给予资金补贴或税收优惠,将节能效果纳入绿色建筑评价加分项,鼓励企业主动应用新技术。

5 结束语

新型保温建筑材料在暖通空调系统中的节能应用是推动建筑节能降碳的关键路径。本文构建的“四级节能应用体系+精准适配机制+全流程质控措施”模式,有效解决了传统保温材料节能不足、适配性差、使用寿命短等难点。工程案例验证表明,该体系可显著降低暖通系统能耗,提升运行稳定性与舒适度,延长材料使用寿命,综合效益显著。未来应进一步推动技术创新,研发导热系数更低、环保性能更优的新型保温材料,加强材料与暖通系统的智能化融合,开发节能监测与预测性维护系统;完善行业标准与人才培养体系,推动新型保温材料在建筑暖通行业的规模化、标准化应用,为我国“双碳”目标实现与绿色建筑高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 赵远.提高绿色建筑项目施工效率的关键技术研究[J].陶瓷,2024(04):55-57.
- [2] 王伟军,李雯喆.基于绿色建筑评价标准和绿色建材评价体系的建筑低碳选材研究[J].浙江建筑,2024,41(02):91-94.
- [3] 曹鑫.建筑工程中绿色节能施工技术研究[J].新城建科技,2024,33(03):53-55.
- [4] 李龙飞.绿色建筑保温材料应用技术分析[J].居舍,2024(15):41-43.
- [5] 王富丽.绿色建筑材料及施工技术在建筑节能工程中的应用[J].居舍,2024(11):58-60.
- [6] 路学明.新能源与可再生能源在暖通空调系统中的实践探究[J].居业,2022(01):180-182.

全生命周期视角下工程管理与技术服务的协同机制及价值增值路径研究

崔静芳

(桐城市审计局, 安徽 安庆 231400)

摘要 随着工程建设行业从高速增长转向高质量发展, 传统割裂的工程管理模式已难以应对日益复杂的项目需求。本文从全生命周期的角度出发, 对工程管理和服务技术的耦合逻辑进行分析, 建立起组织融合、数据驱动、激励相容三个方面的协同机制, 并提出制度规范、人才培养、文化营造和数字化工具链等保障措施, 以期为工程建设行业提供一套具有参考价值的增值途径, 进而促使工程项目由单向度交付转向全生命周期价值创造。结果表明, 打破管理和技术之间的壁垒, 融合信息流、业务流、价值流, 可以大大降低决策成本, 提高建造质量, 促进长效运营, 推动绿色创新。

关键词 全生命周期; 工程管理; 技术服务; 协同机制; 价值增值

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.027

0 引言

当前, 中国建筑业正处于数字化转型与绿色低碳发展的关键交汇期。《“十四五”建筑业发展规划》明确提出, 要加快智能建造与新型建筑工业化协同发展, 推动行业实现高质量转型。2023 年 11 月国家发改委等五部门联合印发《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》, 2024 年多部门接续发布配套实施方案、试点安排及细分领域绿色标准, 由此将建筑全生命周期碳管理提升到行业绿色转型的战略高度。住建部推行的工程总承包 (EPC) 深化和全过程工程咨询试点, 本质上在于对管理要素和技术要素进行深度重组。但是实践中管理重在刚性约束, 技术服务重在离散环节, 两者之间存在着孤岛效应, 造成决策失控、施工返工、运维断层。这样既浪费资源又不能达到价值最大化。因此, 在全生命周期的视角下, 探究两者耦合机理, 建立高效协同机制, 梳理出价值增值路径, 就成为响应政策导向、破解行业瓶颈、实现高质量发展的紧迫课题。

1 全生命周期视角下工程管理与技术服务

1.1 核心内涵界定与阶段特征

全生命周期视域下的工程管理已延伸至投资决策到运营维护全流程, 具有集成化和精细化的特点。决策阶段重战略和技术匹配, 设计阶段重数字化映射, 施工阶段重资源动态平衡, 运维阶段重效能持续优化^[1]。

工程技术服务正向着数据驱动、多学科融合的方向发展, 数字化建模、智能化监测是主要的手段。在决策、设计阶段, 技术服务通过多方案比选、性能模拟为管理提供科学的依据和成本的边界; 在施工、运维阶段, 智能装备、预测算法为进度安全、资产管理注入动力。两者职能虽然各有侧重, 但实际上相互补充、相互影响。管理为技术落地赋予场景和约束, 技术为管理决策提供数据支撑和优化方案, 二者一起形成价值创造的底层逻辑^[2]。

1.2 管理与技术的动态交互机理

工程管理与技术服务相融合, 在于以信息流、业务流和价值流的全面融合为基础的化学反应。工程管理通过目标体系和风险阈值为技术应用赋予具体的场景和约束, 防止出现成本溢出的情况; 技术服务依靠高精度的分析以及智能的推演, 为管理提供科学的决策支撑, 冲破经验主义的盲目性。交互在时间上是全链条衔接的, 在空间上是多专业融合的。技术参数调整必须和管理指令下达时的技术即时反馈同步, 技术参数调整之后需要管理同步更新模型。两者依靠共同的数据环境达成信息的实时共享以及无损传递, 消除信息不对称的摩擦, 产生“1+1>2”的系统协同效果, 把潜在的风险变成可控的变量, 把资源整合成高效的合力, 最终达到项目目标的最佳解。

作者简介: 崔静芳 (1986-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

2 全生命周期多维协同机制构建

2.1 组织融合与流程再造机制

构建基于集成项目交付（IPD）理念的矩阵式组织架构是打破部门墙的基石。该架构组建业主、管理、技术三者共同参与的联合项目团队，实现利益共享、风险共担。需要建立贯穿全生命周期的标准化协同 workflow，对各个关键节点的交互界面以及输入输出标准做出规定，如设计阶段必须提交的工程量清单精度、施工阶段必须反馈的技术变更影响分析。建立联合决策程序，重大方案变更或者成本预警要经过管理与技术负责人共同确认，杜绝单方决策的风险。此外，需使管理指令迅速转化为技术行动，技术难题及时转化为管理问题，从而形成上下贯通、左右协同的高效运行机制^[3]。

2.2 数据驱动与信息交互机制

数据是连接管理与技术的核心纽带。依靠 BIM、数字孪生、云计算创建统一项目数据环境（CDE），是实现信息实时共享的重要途径。该机制要创建管理数据（进度、成本、合同）和技术参数（模型、工艺、监测）的标准化映射，消除数据异构成本。利用物联网、边缘计算技术，把物理状态即时映射到数字空间里，管理者可以获取任意构件的属性，技术人员依靠实时数据来改善方案。该机制可以实现信息的动态更新和无损传输，并且能够从大数据中挖掘隐藏的规律，为决策提供量化的支撑，使双方在同一语境中开展对话，从而大幅提高协同的精确度和效率。

2.3 激励相容与风险共担机制

协同持久运行要依靠合理的利益分配和风险分担。应该设计以全生命周期价值贡献度为考核依据的绩效考核，把技术指标（节能率、合格率）和管理效益（工期、成本节约）结合起来，打破重结果轻技术的惯性。建立风险共担契约，技术创新风险由双方共同承担，促进新技术的应用。制定超额收益分享制度，协同优化产生超预期收益的，按照比例在管理、技术团队之间分配。该机制把各方变成利益共同体，调动起各方的内生动力，使各方主动去寻求全局最优，从制度上保证协同可持续性^[4]。

3 基于协同效应的价值增值路径

3.1 源头控制路径：决策与设计阶段的成本最优增值

价值增值的源头在于决策与设计阶段，此阶段虽仅占项目全生命周期成本的极小部分，却决定了70%以上的

最终造价。通过早期技术介入（Early Involvement）、管理前置，用价值工程（VE）原理和多方案比选技术，在项目开始的时候就确定成本和功能目标。

管理和技术的深度融合，使设计方案不再只是艺术的呈现或者技术的堆砌，而是在经过成本敏感性分析和全生命周期运营成本测算之后得到的最佳方案。在设计阶段采用结构优化算法和限额设计管理，可以有效地消除由于过度配筋、无效空间等造成的隐性浪费。同时，通过模拟不同围护结构方案的能耗数据和初期投入来选择全生命周期成本最低的组合。可见，源头控制路径将“事后算账”变成“事前算赢”，从源头上剔除了无效成本，实现了功能最大化和成本最小化的双重增值，为后续价值创造打下了坚实的基础。

3.2 过程精益路径：施工建造阶段的质效双优增值

施工建造阶段是实物量形成的重要时期，也是资源消耗和风险多发的阶段。本阶段依靠技术方案的改善与管理流程的精益化相融合，能大幅度提升建造速度和工程质量。一方面，推广装配式建筑、3D打印、机器人施工等智能建造技术，大大减少人工依赖和现场湿作业，提高施工精度和速度；另一方面，用精益建造理念，进行穿插施工、流水段优化、智慧工地管理来消除工序等待和物料积压。

在管理与技术协同上，依靠塔吊黑匣子、环境监测仪等实时数据的监控来发现和纠正偏差，减少返工和材料浪费。同时，利用 BIM5D 平台对施工进度和资源需求进行模拟，从而达到物资准时制（JIT）配送的目的，降低库存成本的同时保证工期。该种过程精益路径，依靠技术手段解决质量通病，依靠管理手段提高资源配置效率，实现了时间与质量维度的双重增值，保证项目按时高品质交付。

3.3 运营赋能路径：运维管理阶段的效能长效增值

竣工交付不是工程的终点，而是资产运营的起点。聚焦竣工交付到运营阶段，用建设期积累起来的数字资产（竣工 BIM 模型、设备参数库等）无缝对接到运维平台，才是实现效能长效增值的关键。因此，可以利用数字孪生体把物理实体和虚拟模型实时映射起来，采用预测性维护算法和能源管理系统，可以对设备故障进行提前预警，并且可以对能耗进行动态优化。

在管理和技术协同上，将运营需求提前到建设阶段，保证预留接口、选型配置满足长期运维的高效性、便捷性。以大数据分析为依托，对空调机组的运行策略进行优化，在保证舒适度的基础上可以大幅度降低

能耗;采用可视化运维平台,大幅缩短了故障响应时间,降低了维修成本。运营赋能路径使资产使用寿命得到延长,全生命周期运维能耗得到降低,挖掘出资产运营的长尾价值,实现了从“建好”到“用好”的价值跃迁^[5]。

3.4 创新驱动路径:绿色低碳与衍生服务的新值增值

在“双碳”目标之下,管理与技术协同既是一种降本增效的途径,又是产生新价值的源泉。采用绿色建筑技术、可再生能源系统、碳足迹追踪平台等,工程项目可以大大减少碳排放,产生环境效益,还可以通过碳交易市场获得额外收益。技术升级也拓宽了工程的衍生服务功能,把传统的园区升级成智慧园区,提供数据安全、空间运营、能源托管等高附加值的服务。

管理和技术的协同表现为商业模式的创新,即由原来的单一的建造产品向综合的运营服务转变。同时,采用光伏建筑一体化(BIPV)技术和能源合同管理(EMC)模式相结合的方式,项目方可以分享长期的能源收益,利用积累的建筑大数据开展行业咨询或者数据资产运营,开辟新的盈利增长点。

4 协同机制运行的保障体系与实施策略

4.1 制度规范与标准体系建设

协同机制的有效落实要依靠强有力的制度保障。建议行业协会领军企业同科研机构一起制订工程管理与技术服务协同的作业指南和评价标准,规定协同的流程、接口以及交付物的要求。完善合同范本体系,把协同义务、数据交付标准、知识产权归属、价值分享等条款加入法律契约当中,使协同行为有法可依、有章可循。特别是在推行全过程工程咨询和EPC模式时,应该在招标文件中明确协同能力的考核权重,促使市场主体由价格竞争转向价值竞争。依靠制度规范的硬性约束和标准体系的柔性引导,给协同机制的常态化运转创造良好的法治环境和行业生态。

4.2 复合型人才队伍培育策略

人才是协同机制中最活跃的因素。就当前而言,企业存在着管理人员懂技术但不懂管理,技术人员懂管理却不懂技术的结构性矛盾,应该创建起“管理+技术”双通道职业发展通道,冲破职业天花板。创建跨专业培训体系,定期组织管理人员参加前沿建造技术的学习,技术人员参加项目管理、商务法务的学习,通过轮岗的方式使人员在不同的岗位上锻炼,培养出具有全生命周期视野的复合型项目经理和技术总监。同

时,引进外部的智库、高校等资源,开展联合培养和课题研究,形成一支既懂工程技术又会管理艺术的高素质人才队伍,为协同机制的深入实施提供智力支持。

4.3 协同文化与信任生态营造

技术可以购买,制度可以制定,但是文化需要培育。因此,倡导打破本位主义的协同文化,建立透明沟通、互相尊重的信任生态,是减少协同摩擦成本的重要途径。企业可以通过设立联合创新基金、组织跨部门技术管理沙龙、表彰协同典型案例等方法来增强团队的凝聚力和归属感。项目内部,实行开放式办公、信息共享会议,各专业背景的人员可以自由交流思想,容忍试错,营造出敢于创新、乐于分享的氛围。只有当管理与技术人员的心理达成一致,建立起深厚的信任关系之后,协同机制才能由形式上的结合上升为精神上的融合,从而释放出最大的创新活力。

5 结束语

全生命周期视角下工程管理与技术服务的协同,是建筑行业应对复杂挑战、实现高质量发展的必由之路。本文从分析两者的耦合逻辑入手,提出了组织、数据、激励三个方面的协同机制,并且提出了从源头控制到创新驱动的四种价值增值途径。只有冲破管理和技术之间的壁垒,达成深层次的融合和互动,才能挖掘出工程项目巨大的潜力。随着数字技术不断更新、政策环境不断改善,工程管理与技术服务的协同会越来越紧密、智能、高效。行业从业者要积极拥抱变革,健全保障体系,培养复合型人才,营造协同文化,依靠技术与管理双轮驱动,推动中国工程建设向价值链高端迈进,为建设数字中国、绿色中国做出贡献。

参考文献:

- [1] 张博达.工程管理全周期下混凝土预制构件质量检测标准与实施路径[J].产品可靠性报告,2025(12):129-131.
- [2] 王波.全景测绘技术在市政道路工程全周期管理中的应用效能分析[J].智能建筑与智慧城市,2025(09):47-49.
- [3] 王天胜.全周期视角下房地产工程管理要点研究[J].住宅与房地产,2025(02):80-82.
- [4] 张建,王永骏,周建如,等.大数据背景下的广电工程全周期数智管理平台建设实践[J].广播电视网络,2024,31(10):66-70.
- [5] 李伟.全周期管理理念在电子信息工程质量中的应用[J].质量与市场,2022(17):130-132.

BIM技术在建筑工程管理中的应用探析

朱晓通

(山东丰升启建设工程有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 本文以建筑工程管理数字化转型为核心, 针对传统工程管理中信息不对称、协同效率低、管控精度不足等问题, 结合BIM技术可视化、参数化、全流程数据联动的技术特性, 系统探究其在工程设计、施工、成本、安全及运维全周期管理中的应用路径与优化策略。通过案例分析法与实践验证法, 梳理BIM技术在各管理环节的应用机理, 构建“模型驱动+数据协同+动态管控”的工程管理新模式, 重点分析BIM技术在碰撞检测、进度模拟、成本核算、安全预警中的实操应用方法, 旨在为解决建筑工程管理精细化不足的难题提供参考。结果表明, 该模式可将设计阶段错漏碰缺问题减少85%以上, 施工进度偏差控制在5%以内, 工程成本管控精度提升至90%以上, 较传统管理模式综合效率提升60%。

关键词 BIM技术; 建筑工程管理; 数字化管控; 全生命周期; 协同管理

中图分类号: TU71; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.028

0 引言

建筑工程管理贯穿设计、施工、运维全流程, 涉及多专业、多主体、多环节的协同作业, 其管理效率与精度直接决定工程建设质量、工期与成本。随着建筑工程向超高层、大跨度、复杂业态发展, 传统管理模式暴露出显著短板: 设计阶段各专业图纸独立绘制, 易出现空间冲突与数据矛盾, 导致施工阶段频繁返工; 施工阶段进度、成本、安全管理依赖人工统计, 数据反馈滞后, 难以实现动态调控; 各参建单位信息传递依靠纸质文件与线下沟通, 信息不对称问题突出, 协同效率低下。BIM技术作为建工行业数字化升级的核心工具, 可实现工程信息的三维可视化建模与全流程数据联动, 打破各阶段、各专业之间的信息壁垒。近年来, 国内多地已出台政策推动BIM技术在建筑业中的强制应用, 要求新建大型房屋市政工程全面落地BIM全周期管理。本文结合近三年行业应用实践, 系统分析BIM技术在工程项目各管理环节的应用要点, 通过工程案例验证应用效果, 提出技术落地的保障措施, 为BIM技术在工程项目管理中的规模化应用提供参考。

1 建筑工程管理现存问题与BIM技术的适配性

1.1 传统建筑工程管理的核心难点

传统建筑工程管理面临三大核心问题, 成为制约行业高水平发展的关键因素。其一, 信息协同效率低

下, 设计、施工、监理、建设单位之间缺乏统一的信息交互平台, 各专业数据标准不统一, 信息传递过程中易出现失真、滞后, 导致施工阶段设计变更频繁, 平均返工率居高不下。其二, 管控过程缺乏量化支撑, 进度管理依赖甘特图等传统工具, 难以直观反映施工工序与资源配置的匹配关系; 成本管理依靠人工算量, 误差率较高, 无法实现对施工过程的动态成本监控。其三, 全生命周期管理脱节, 设计、施工、运维阶段的数据相互割裂, 施工阶段的工程数据无法有效传递至运维阶段, 导致建筑运维阶段的设备管理、能耗管控缺乏精准数据支撑, 全生命周期价值难以发挥^[1]。

1.2 BIM技术与工程管理的适配性

BIM技术的技术特性与建筑工程管理的精细化、协同化、动态化需求高度适配, 可从根源上解决传统管理模式的难点。其一, 三维可视化建模可将二维图纸转化为1:1的三维模型, 直观呈现建筑构件的空间关系, 提前发现设计阶段的各类问题, 从源头减少施工返工。其二, 参数化数据联动使模型中各构件的几何参数、材料信息、工艺要求实现实时关联, 任意环节的参数调整可自动同步至全模型, 确保各专业、各阶段数据的一致性。其三, 全流程信息集成可整合设计、施工、运维各阶段的工程数据, 形成统一的信息数据库, 为各参建单位提供协同作业平台, 实现信息的高效传递与共享。其四, 动态模拟与分析可对施工进度、资源

作者简介: 朱晓通(1990-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程。

配置、工艺方案进行仿真模拟,为进度优化、成本核算、安全防控提供量化依据,实现工程事前预测、事中调控、事后复盘^[2]。

2 BIM 技术在建筑工程各管理环节的应用要点

2.1 设计阶段管理: 碰撞检测与方案优化

设计阶段是工程管理的源头, BIM 技术的应用重点在于实现各专业协同设计与方案优化, 从根源上消除设计缺陷。在建筑、结构、机电各专业建模完成后, 通过 BIM 碰撞检测技术对模型进行全专业空间冲突检测, 精准识别管线与结构、管线与管线之间的碰撞点, 针对冲突问题进行方案优化, 确定管线最优排布路径^[3]。对于超高层、大跨度等复杂工程, 可通过 BIM 模型进行结构受力模拟与空间性能分析, 优化结构设计方案, 提升结构安全性与经济性。设计阶段形成的 BIM 模型可作为后续施工、造价、运维的基础数据载体, 确保设计数据向后续阶段的无缝传递, 实现设计与施工的深度融合。

2.2 施工阶段管理: 进度、质量与安全的动态管控

施工阶段是项目管理的关键环节, BIM 技术通过“模型+现场”的联动模式, 实现进度、质量、安全的精细化动态管控。

在工程进度方面, BIM 模型与施工进度计划进行关联, 构建 4D 施工模拟模型, 直观呈现各施工工序的时间与空间排布关系, 通过模拟施工过程, 优化施工工序与资源配置, 提前发现进度瓶颈。在施工过程中, 将现场实际进度数据实时录入模型, 实现实际进度与计划进度的动态对比, 对进度偏差及时预警并调整施工计划, 确保工程准时完工。

在质量管理方面, 将 BIM 技术与现场质量检测数据关联, 在模型中标注质量问题位置、整改要求与整改结果, 实现质量问题的可视化追溯。通过 BIM 模型记录各施工环节的质量验收数据、材料检测报告, 形成完整的质量档案, 为工程验收与后期维护提供数据支撑^[4]。对于复杂施工工艺, 可通过 BIM 三维可视化交底, 替代传统纸质交底, 使施工人员快速掌握工艺要点, 降低操作误差。

在安全管理方面, 利用 BIM 模型进行项目现场危险源识别与安全方案策划, 对深基坑、高大模板等危险性较大的分部分项工程进行施工模拟, 优化安全防护方案。通过 BIM+ 智慧工地平台, 将现场监控数据、人员定位数据与模型联动, 实现对高处作业、临边作业等危险区域的实时监控, 对安全隐患自动预警。

2.3 成本管理: 精准算量与动态成本监控

BIM 技术为工程成本管理提供了精准的量化工具, 实现从预算编制到施工结算的全流程成本管控。在预算编制阶段, 依托 BIM 模型参数化特性, 可快速提取各构件的工程量数据, 结合市场价格信息自动生成工程量清单与工程预算, 相比传统人工算量, 效率提升 80% 以上, 算量误差控制在 3% 以内。在施工阶段, 将现场实际施工进度、材料消耗数据实时录入 BIM 模型, 实现实际成本与预算成本的动态比对, 及时分析成本偏差原因, 采取针对性控制措施。工程竣工阶段, 基于 BIM 模型的完整工程数据, 可快速完成竣工结算审核, 缩短结算周期, 提高结算精度, 实现工程成本的全流程闭环管控^[5]。

2.4 运维阶段管理: 数字化资产与高效运维

BIM 技术的应用延伸至工程运维阶段, 实现建筑项目全过程的数字化管理。工程竣工后, 将施工阶段的工程数据、设备参数、质量档案等全部集成至 BIM 竣工模型, 形成建筑数字化资产档案, 为运维管理提供精准的数据支撑。

在设备管理方面, 通过 BIM 模型可快速查询设备的安装位置、技术参数、维护记录, 实现设备的全过程管理, 提前制定设备维护计划, 降低设备故障风险。

在能耗管控方面, 将 BIM 模型与建筑能耗监测系统联动, 实时采集建筑水电能耗数据, 通过模型分析能耗分布规律, 优化建筑能耗管控方案, 降低建筑运营成本。

在空间管理方面, 依托 BIM 模型的三维可视化特性, 实现建筑空间的精细化管理, 合理规划空间使用, 提升空间利用率。当建筑需要进行改造、翻新时, BIM 模型可提供精准的工程基础数据, 为改造方案设计提供依据, 降低改造工程的难度与成本。

3 工程案例验证与应用效果分析

3.1 工程案例概况

以雄商高铁雄安枢纽工程为研究对象, 该工程涵盖路基、桥涵、轨道、房建等多个专业, 总建筑面积超 10 万 m^2 , 施工工艺复杂, 多专业交叉协调难度大, 属于大型复杂建筑工程。项目全面应用 BIM 技术, 构建全专业 1:1 三维模型, 搭建“BIM+ 智慧工地”协同管理平台, 将 BIM 技术深度融入设计、施工、成本、安全全周期管理, 重点监测设计错漏碰缺消除率、施工进度偏差、成本管控精度、安全事故发生率等指标, 验证 BIM 技术在项目管理中的应用效果。

3.2 应用效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统管理模式对比, BIM 技术在该项目管理中的应用取得显著成效。在设计阶段, 通过 BIM 全专业碰撞检测, 共识别出 300 余项空间冲突隐患, 全部在施工前完成优化整改, 设计阶段错漏碰缺问题消除率达 98%, 避免了施工阶段的返工, 直接减少返工成本超 500 万元。在施工阶段, 依托 4D 施工模拟模型优化施工工序, 工程整体建设周期较传统模式缩短 20%, 施工进度偏差控制在 3% 以内; 通过 BIM 三维可视化交底, 施工操作误差率降低 70%, 工程质量验收一次合格率达 100%; 通过 BIM+ 智慧工地安全管控, 实现危险源实时预警与隐患闭环管理, 施工期间未发生任何安全事故, 安全事故发生率为 0。在成本管理方面, 利用 BIM 模型精准算量, 预算编制效率提升 85%, 算量误差控制在 2% 以内; 通过动态成本调控, 及时发现并解决成本偏差问题, 工程实际成本较预算成本降低 8%, 成本管控精度提升至 95%。在协同管理方面, 依托 BIM 协同平台, 各参建单位实现信息实时共享, 沟通效率提升 90%, 设计变更审批周期缩短 60%, 多专业交叉作业协调效率显著提升。项目通过 BIM 技术的应用累计创造直接经济效益 800 万元, 综合管理效率较传统模式提升 65%, 成为 BIM 技术在大型复杂工程项目管理中应用的标杆案例。

4 BIM 技术应用落地的保障机制与优化建议

4.1 技术应用落地的保障机制

为确保 BIM 技术在工程项目管理中有效落地, 需从组织、制度、人才三个维度构建完善的保障体系。

在组织保障方面, 成立由建设单位牵头, 设计、施工、监理单位参与的 BIM 技术应用专项小组, 明确各单位相应职责, 建立定期沟通协调机制, 统筹推进 BIM 技术在各管理环节的应用。

在制度保障方面, 制定 BIM 技术推广应用管理细则, 明确模型建模标准、数据传递规范, 将 BIM 技术应用效果纳入各参建单位的绩效考核, 实行奖惩分明。

在人才保障方面, 开展 BIM 技术专项培训, 针对设计人员、施工管理人员、造价人员开展差异化培训, 提升从业人员的 BIM 操作能力与应用水平; 加强与高校、科研院所的合作, 开展 BIM 技术应用研究, 培养兼具工程管理能力和 BIM 技术能力的复合型人才^[6]。

4.2 技术应用优化建议

结合建工行业特性与 BIM 技术推广应用现状, 提出针对性的优化建议, 推动 BIM 技术在工程管理中的

深度应用。一是推动技术融合创新, 加强 BIM 与 GIS、北斗定位、物联网、人工智能等技术的集成应用, 构建“BIM+”智慧工程管理体系, 实现工程管理的智能化、自动化。二是统一数据标准与平台, 由行业主管部门牵头, 制定全国统一的 BIM 模型建模标准、数据交换标准, 搭建区域性 BIM 协同管理平台, 实现各参建单位、各阶段的数据无缝对接与共享, 解决信息孤岛问题。三是因地制宜分级应用, 针对大型复杂工程, 全面推行 BIM 全生命周期管理。四是强化政策引导与支持, 行业主管部门进一步完善 BIM 技术应用相关政策, 扩大 BIM 技术强制应用范围, 对 BIM 技术应用示范项目给予政策扶持与资金奖励。

5 结束语

BIM 技术在建筑项目管理中的应用是推动建筑行业数字化、精细化发展的必然趋势, 其核心价值在于通过模型驱动与数据协同, 打破传统工程管理的信息壁垒, 实现设计、施工、成本、安全、运维全周期的一体化管控。本文通过系统分析 BIM 技术在工程项目中的应用要点, 结合工程案例验证其应用效果, 构建了 BIM 技术应用的保障体系与优化策略, 有效解决了传统工程管理中协同效率低、管控精度不足、全生命周期脱节等难点。随着建筑行业数字化转型进程的推进, BIM 技术的应用将向更智能、更深度、更广泛的方向发展。未来, 应进一步推动 BIM 技术与新兴技术的融合创新, 完善行业标准与应用体系, 加强复合型人才培养, 推动 BIM 技术在工程项目管理中的规模化、标准化应用。通过 BIM 技术的深度应用, 持续提升建筑工程管理的效率与精度, 降低成本, 提升质量, 为我国建筑业高质量发展提供强有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 雷传富. 现代建筑工程项目智慧工地安全管理应用[J]. 智能建筑与工程机械, 2025, 07(01): 47-49.
- [2] 朱金波. 基于 AI 的居住建筑 BIM 设计[J]. 中国建设信息化, 2024(22): 48-51.
- [3] 刘力. 基于智慧工地管理系统的建筑工程安全管理研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(04): 31-33.
- [4] 吴东晋. 探究智慧工地在建筑工程安全管理和质量管理中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(05): 137-139.
- [5] 黄文俊, 刘曦, 张立群, 等. 广州市某施工工程智慧工地方案及关键技术研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(02): 95-98.
- [6] 苏志斌. BIM 技术结合智慧工地提升项目管理效能的研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(12): 168-172.

信息化技术在水利工程施工管理中的应用

魏丽娜

(衡宇建设集团有限公司, 安徽 六安 237200)

摘要 水利工程施工管理存在进度管控滞后、现场监管盲区、资料管理低效等难点, 传统模式难以适配复杂施工场景与精细化管理需求。本文围绕信息化技术在水利工程施工进度管控、现场监管、资料管理三大核心场景的应用价值展开剖析, 梳理出基础设施薄弱、人员素养不足、系统整合度低等三类现实短板, 并针对性提出完善硬件配套、强化人员培训、推进系统一体化整合的优化路径, 旨在助力水利工程施工管理破除传统桎梏, 实现数字化、规范化、高效化转型, 为提升工程全周期管控质量与综合效益提供借鉴。

关键词 信息化技术; 水利工程; 施工管理; 数字化管控; 系统整合

中图分类号: TV512

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.029

0 引言

水利工程作为民生基建的核心组成部分, 兼具施工周期长、作业环境复杂、管控环节繁多等特性, 传统人工管控模式已无法满足现代工程高质量建设需求。随着数字化、智能化技术的快速普及, 信息化手段与水利施工管理的深度融合成为行业发展大势, 既能破解传统管理的各类难点, 也能推动施工管控向精准化、智能化升级。基于此, 深入探究信息化技术在水利工程施工管理中的落地场景、现存问题与优化策略, 对提升工程管理效率、保障施工安全与质量、推动水利行业数字化转型具有重要的现实意义。

1 信息化技术在水利工程施工管理中的核心应用场景

1.1 施工进度信息化管控

信息化管控模式可实现水利工程施工进度的数字化追踪与动态调控, 破解传统进度管控滞后性难题, 保障工程严格按照工期计划推进, 有效规避工期延误风险。水利工程施工周期长、分项工程繁杂, 传统进度上报依赖人工统计、逐级汇报, 数据更新不及时易导致管理层无法掌握真实推进状态, 搭建专属进度管控平台后, 各作业班组可实时上传分项工程施工进度数据, 打破时间与空间限制, 让管理人员同步掌握全线施工动态。平台可自动比对计划进度与实际进度数据, 精准识别进度滞后的分项工程与关键节点, 结合现场施工条件、资源储备情况快速分析滞后原因, 针对性调整施工方案、调配资源力量, 及时弥补进度缺口,

避免局部滞后影响整体工期。此外, 进度管控平台可依托可视化技术, 将抽象的进度数据转化为直观的图表、模型, 清晰呈现各工序推进状态、交叉作业衔接情况, 管理层无需深入一线即可全面把控工程推进节奏, 针对重难点工序提前部署管控措施, 协调多方资源保障关键节点按期完成, 让进度管控更具针对性与实效性。

1.2 施工现场数字化监管

智能信息化手段能够带进水利工程施工现场的全面监管体系, 做到全天候、无死角管控, 让现场作业秩序变得规范, 消除现场管理上的盲点。水利施工现场人员数量多、机械流转快、环境变数大, 传统人工监管方式很难做到全面覆盖值守。借助高清视频监控、智能传感装置、移动巡检终端等工具, 可以实时监控现场施工操作、机械运行、人员作业等行为, 及时纠正违规操作、无序作业等乱象, 保障施工流程规范推进。数字化管理系统还能对现场人员、车辆进出进行登记、识别、追踪, 规范人员作业权限与车辆流转路线, 避免无关人员、车辆进入作业区域带来安全隐患, 提升现场秩序管控力度^[1]。水利工程施工受水文、地质环境影响明显, 数字化监管设备可以实时监测现场水位、地质沉降、土壤湿度等关键指标, 动态捕捉环境变化信号, 为施工方案调整、工序优化提供真实数据支撑, 让现场施工更贴合环境条件, 降低自然环境因素对施工进度与安全的影响, 筑牢现场管控防线。

1.3 工程资料信息化管理

信息化管理模式对水利工程资料管控体系进行了重新构建, 使得各类工程资料完成数字化归档, 走向

作者简介: 魏丽娜 (1995-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

规范化管理,实现高效化共享,从而破解过去以纸质资料管理为主的多种难点。水利工程施工过程涉及施工图纸、技术方案、合同文件、检测报告、验收记录等大量资料,纸质资料容易破损、丢失、发生霉变,并且归档、调取过程烦琐,信息化管理能够把各类纸质资料转成电子文档,通过分类整合建设专门电子档案库,让资料做到集中化、系统化存储。依托云端存储技术,资料能够长期保存,配合权限管控功能,为不同岗位人员分别设定资料查阅、修改、下载权限,这样既避免不相关人员接触核心资料,保障工程资料的安全性 with 完整性,又能防止资料遭到篡改、丢失。信息化系统还配备智能检索功能,管理人员可借助关键词、文档类型迅速找到目标资料,省去过去人工翻阅档案的烦琐流程,简化资料交接、审核、流转过程,提升资料调取效率以及管理规范性,为工程施工、验收、运维工作提供完整资料支撑。

2 水利工程施工管理信息化应用现存短板

2.1 信息化基础设施配套不足

硬件设备与网络条件的滞后性,成为水利工程施工管理信息化落地的核心阻碍,直接制约信息化技术效能的充分释放。水利工程多选址于偏远山区、河湖沿岸等区域,这类地区网络基站建设不完善,移动网络、宽带网络覆盖不全,且信号稳定性较差,导致现场数据无法实时上传、云端指令无法及时下达,数据传输断层问题频发,信息化系统难以正常运转^[2]。同时,部分水利项目仍沿用老旧监测设备、传统硬件系统,这类设备技术参数落后、数据传输协议不兼容,无法与新型信息化管理平台对接,即便搭建数字化管控体系,也难以实现数据精准采集、高效传输,形成硬件与软件不匹配的矛盾。此外,部分项目对信息化建设重视程度不足,基础设施资金投入有限,无力购置高性能感知设备、搭建专用网络线路、建设云端存储服务器,难以满足大规模数字化管控的硬件需求,导致信息化应用仅停留在表面,无法实现全流程、深层次的数字化转型,降低整体管理效能。

2.2 管理人员信息化素养薄弱

水利工程从业者自身信息化技能存在明显不足,这使得信息化工具难以充分体现其本来价值,直接削弱了施工管理信息化在实际应用中的效果。水利工程施工管理团队大多由传统工程背景人员构成,基层管理工作者长期习惯于依赖经验和人工处理问题的管理方式,对于数字化平台以及智能设备的运行逻辑不够了解,缺少必要的信息化操作基础。部分工作者甚至

对新的管理模式抱有抵触情绪,不肯放弃原有的工作习惯,造成信息化系统最终变成一种摆设。水利行业内部缺少兼具工程技术和信息技术的复合型人才,既熟悉水利施工管理流程,又擅长信息化系统运维工作的专业人员数量不足,难以进行系统日常维护、功能调试和故障排查等任务,遇到系统运行缓慢或数据出现异常等情况时无法及时应对,这会影响信息化管控的持续稳定高效运行。

2.3 信息化系统整合度偏低

信息化管理系统各自独立运作,数据之间彼此割裂,难以形成协同管控的整体力量,这构成水利工程施工管理信息化的明显短板。目前,多数水利项目采取分模块建设信息化系统,将进度控制、安全监督、成本计算、质量检查等系统分别部署在不同平台上,各平台开发规范、数据格式互不匹配,数据不能互通共享,形成一个个数据孤岛,管理人员需要在多个平台之间来回切换操作,不仅加重工作负担,还容易产生数据偏差^[3]。现有信息化系统大多属于通用型管理软件,没有结合水利工程施工周期长、环境复杂、工序特殊等具体特点进行定制开发,功能模块和实际管控需求存在脱节,针对水文监测、临水施工、防汛应急等特殊场景的适应能力不足,难以满足专业化管控需要。行业内缺少统一的数据标准规范,不同系统采集的数据口径不一致,跨平台数据整合、分析、利用面临较大困难,难以挖掘数据背后蕴含的管理价值,无法达成全流程一体化管控,削弱信息化技术对施工管理的支撑作用。

3 水利工程施工管理信息化应用优化策略

3.1 完善信息化基础设施建设

补齐硬件与网络短板,搭建稳定、高效、适配、安全的信息化管控基础环境,为水利工程施工管理数字化转型筑牢硬件支撑。针对偏远地区水利工程现场网络覆盖不全、信号不稳定的问题,加大专用网络建设专项投入,因地制宜搭建5G基站、卫星网络、局域无线网络等通信设施,实现全作业区域网络全覆盖,提升网络传输稳定性与速率,保障现场数据实时、高效、稳定传输,消除数据传输壁垒。同时,全面排查梳理现有硬件设备,淘汰技术落后、兼容性差、精准度低的老旧监测设备与硬件系统,统一购置适配新型信息化平台的智能传感器、高清监控、移动巡检终端、定位装置、数据采集器等专用设备,提升数据采集精准度、传输效率与设备运行稳定性,实现硬件设备与信息化系统的无缝对接、协同运行^[4]。此外,搭建项目专用

云端服务器与数据存储中心,优化数据传输通道与存储架构,采用加密技术、防火墙技术保障工程数据存储、传输的安全性,严防数据泄露、丢失、篡改,同时提升服务器承载能力与运算速度,满足大规模数据存储、处理、分析、共享的需求,为信息化系统全天候稳定运行提供坚实硬件保障,让信息化技术真正落地于施工管理全流程、各环节。

3.2 提升从业人员信息化素养

建立覆盖范围广、层次多、常态化的人才培养体系,形成既了解水利业务、又掌握技术细节、还能做好管理工作的综合性信息化管理队伍,从而激发水利工程施工管理信息化的内部驱动力。针对各个岗位、不同级别人员实施分层分类的针对性培训,基层人员重点放在信息化工具实际操作、数据填写、现场信息报送、简单问题处理等关键能力上,结合水利施工具体情境进行深入实操训练,消除操作障碍、减轻心理抵触;管理层则偏向数据理解、决策判断、整体协调等培训内容,增强基于数字信息的决策能力和全面管控水平,让培训项目更贴合职位实际需要,避免采用统一模式的培训做法。通过校企合作、公开招聘、内部岗位调整培养等途径,引进熟悉系统构建、运行维护、数据挖掘的复合型人才,补充工程管理和技术运维团队力量,缓解专业人才不足问题,确保信息化系统稳定运行、功能改进与版本更新^[5]。在此基础上,逐步完善考核激励与监督机制,将信息化工具使用效果、操作熟练程度、数据报送准确性纳入职位评价体系,与绩效收入、评优奖励、职务晋升直接关联,促使管理人员自觉学习信息化技能、放弃传统管理不良习惯,同时树立应用典型、推广成功做法,调动全体人员使用信息化工具的积极性和主动性,营造人人参与、人人使用的数字化管理良好环境,促进信息化思想深度融合到施工管理各个环节。

3.3 推进信息化系统一体化整合

打通数据流通里存在的障碍、整合原先分散在不同系统的功能,建立覆盖全流程的水利施工管理信息化平台,做到数据能够共享、各个功能之间可以协同工作、管控形成闭环,让信息化技术带来的赋能效果得到最大程度的发挥。统一水利行业在数据采集、传输、存储、共享方面的标准,规范数据口径、分类方式以及格式要求,把进度、安全、质量、成本、物资、资料等各个管控模块的数据整合起来,破除系统间存在的技术阻隔和数据壁垒,实现数据跨平台、跨部门互

通共享、同步调用,彻底消除数据孤岛现象,让零散的数据汇聚起来形成管控上的合力,发挥出协同管控的价值。结合水利工程施工管理所具有的特殊需求和行业特点,进行平台定制化开发和功能优化,增设水文地质监测、防汛应急管控、临水作业监管、隐蔽工程追踪等专属功能模块,优化系统功能布局和业务流程,让平台更贴合水利施工实际场景,提升管控的针对性和专业性。简化系统操作流程、优化交互界面设计,摒弃复杂的操作步骤,降低操作门槛,让基层管理人员能够快速上手、熟练应用,提升系统实用性和便捷性。搭建数据智能分析和预警模块,深度挖掘共享数据里蕴含的管理价值,自动生成分析报表、识别管控风险、提出优化建议,为进度调整、风险防控、决策制定提供科学支撑,实现从单一模块分散管控到全流程一体化、智能化管控的转型,全面提升水利工程施工管理数字化水平。

4 结束语

信息化技术为水利工程施工管理注入了全新动能,改变了传统人工管控的粗放模式,推动工程管理朝着精准、高效、智能的方向迈进。尽管当前信息化落地仍面临硬件、人才、系统整合等多重阻碍,但随着行业对数字化转型重视度的提升、配套设施的完善以及人才体系的健全,这些短板将逐步补齐。水利工程施工管理信息化并非单一技术的堆砌,而是管理模式与数字技术的深度融合,后续需持续贴合行业特性优化应用路径,深挖数据价值,强化全流程协同管控,让信息化技术真正贯穿施工全周期,持续提升工程建设质量、安全管控水平与综合效益,助力水利行业实现高质量、可持续的数字化发展。

参考文献:

- [1] 陈广兵.水利工程施工管理信息化技术探析[J].现代工程科技,2025,04(22):153-156.
- [2] 张合生.信息化技术在农田水利工程施工管理中的应用[J].农机市场,2025(04):89-91.
- [3] 汤磊,徐晖.基于信息化技术的水利工程施工质量安全管理方法[J].大众标准化,2025(03):170-172.
- [4] 袁礼伟.新时代信息化技术与水利工程施工管理的融合研究[J].水上安全,2024(21):70-72.
- [5] 李吉鹏,张生宝.信息化技术在水利工程施工中的应用[J].水上安全,2024(16):47-49.

轨道交通工程建设多方协同管理机制优化

王 刚

(合肥城市轨道交通资源开发有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘 要 轨道交通工程建设参建主体多元、周期长、风险高, 多方协同管理效能直接影响工程进度、质量与效益。当前协同管理中存在权责边界模糊、信息流通壁垒、利益分配失衡等核心问题, 制约协同效率与长期稳定性。本文聚焦轨道交通工程建设全生命周期, 梳理各参建主体协同难点, 结合工程实际构建针对性优化方案, 重构标准化权责体系、搭建一体化信息协同平台、建立合理化利益分配机制, 同时优化组织架构、制度体系与资源配置等配套体系, 摆脱协同困境, 激发各主体协同积极性, 构建稳定高效的多方协同生态, 以期轨道交通工程建设协同管理实践提供参考, 助力工程高质量推进。

关键词 轨道交通工程; 多方协同; 管理机制; 权责体系; 信息协同

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.030

0 引言

轨道交通工程参建主体多元、周期漫长、风险突出, 多方协同效能直接决定工程进度、质量与效益, 更是适配行业新规、防范债务风险、实现可持续发展的关键。当前协同管理中, 权责边界模糊、信息流通壁垒、利益分配失衡等问题仍未破解, 制约协同效率与长期稳定性。本文立足于工程全生命周期, 结合行业最新政策导向与数智化发展趋势, 梳理协同难点、构建优化方案, 为提高轨道交通工程建设协同管理水平提供参考。

1 协同管理现存核心问题梳理

1.1 权责边界划分模糊, 责任追溯体系缺失

权责界定不清是贯穿轨道交通工程全生命周期的首要协同管理瓶颈, 直接引发协同决策滞后、责任推诿扯皮等管理乱象。轨道交通工程参建主体涵盖建设单位、设计单位、施工单位、监理单位、后期运维单位以及政府行业监管部门, 目前国内轨道交通行业尚未出台统一、标准化的全域权责划分规范, 各参建方权责约束仅依托项目零散合同条款约定, 未形成覆盖项目全流程的系统化权责管理体系。一方面, 项目各环节责任链条存在衔接断点, 设计交底、施工方案优化、现场工序衔接等关键交叉环节权责划分模糊, 极易出现设计方案与现场施工工况不匹配时, 设计单位与施工单位双向推诿责任的现象; 同时, 监理现场监督权

限与建设单位统筹管理权限界定重叠, 要么出现监理监督流于形式、现场管控缺位, 要么出现建设单位过度干预现场施工流程, 扰乱正常施工秩序^[1]。另一方面, 突发应急场景权责归属空白问题突出, 轨道交通工程沿线地质条件复杂, 施工期间易遭遇地质灾害、基坑坍塌、高空作业安全事故等突发险情, 由于缺乏应急场景专项权责指引, 各参建方应急决策迟疑、应急行动不同步, 不仅错失最佳险情处置窗口期, 还会进一步激化多方协同矛盾, 最终影响项目整体施工进度与工程建设质量。

1.2 信息系统互不兼容, 全域信息孤岛现象显著

跨主体信息流通壁垒是制约多方协同管理实时性、精准性的核心难点, 也是当前轨道交通工程协同管理亟须解决的关键问题。轨道交通工程建设链路长、细分施工环节多、参与部门繁杂, 各参建主体均根据自身内部管理需求搭建独立的信息化管理系统, 各类系统在底层技术架构、数据存储格式、外部接口标准方面不统一, 无法实现跨平台数据互联互通。其一, 核心工程数据分散管理、同步滞后。施工进度台账、现场质量检测数据、项目成本核算资料、施工现场安全隐患台账等关键信息由各参建方独立存储、独立维护, 缺乏统一的数据共享端口与定时同步机制。例如: 施工单位现场实时施工进度无法同步至设计管理端, 设计单位无法根据现场工况动态优化施工图纸, 直接造成图纸变更滞后、施工返工率上升。其二, 多层次信

作者简介: 王刚(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理—市政公用工程。

息传递存在失真风险。工程信息经过多主体、多环节逐层传递后,易受人工解读偏差、人为信息删减、层级传递损耗等因素影响,出现数据遗漏、内容误传等问题。若监理单位提交的现场质量检测数据出现偏差并传递至建设单位,会直接误导项目整体管理决策,破坏全域协同管理的有效性。

1.3 利益分配模式固化,风险收益匹配度不足

粗放单一的利益分配模式会大幅降低各参建主体协同参与意愿,破坏多方协同合作的长效稳定性。轨道交通工程建设资金投入规模大、建设周期长、全域风险等级高,但现有行业利益分摊机制缺乏量化科学依据,多数项目采用固定利润分成比例、平均成本分摊的粗放模式,未结合各参建方资源投入体量、实际运营成本、风险承担等级、技术贡献价值进行差异化核算。从风险与收益匹配角度来看,施工单位直面现场施工安全风险、工期履约风险、材料价格波动风险,人力、物资、设备投入体量最大,却无法获得与风险、投入相匹配的收益回报,长期偏低的收益水平直接挫伤其协同配合积极性;反观设计单位、监理单位以技术服务、现场监督为主,现场直面风险较低,却可获得稳定无波动的服务收益,行业风险收益失衡问题愈发明显。与此同时,项目缺乏长效利益共享机制,各参建方普遍聚焦短期单体利益最大化,忽视项目整体全域效益,部分主体甚至通过损害合作方利益实现自身降本增效,彻底破坏多方协同合作生态。

2 多方协同管理机制核心优化策略

2.1 重构全域标准化权责体系,厘清跨主体权责边界

针对现有权责边界模糊、责任追溯困难的问题,依托项目全生命周期流程重构标准化权责管理体系,夯实多方协同管理基础。第一,编制全流程细分权责清单。覆盖项目立项、方案设计、现场施工、全过程监理、竣工验收、后期运维六大阶段,明确每一个阶段各参建主体的管理权限、工作职责与履约义务,同步配套闭环责任追溯机制,针对权责缺位、履职不到位、恶意推诿责任的主体开展精准追责,保障权责清单落地执行^[2]。第二,细化交叉环节权责划分标准。针对设计与施工衔接、监理与现场施工配合、建设单位统筹协调等高频矛盾环节,消除权责交叉区域与管理空白区域,明确设计单位施工阶段现场技术答疑、图纸动态优化的固定职责,界定施工单位现场方案执行、现场工况反馈的硬性义务,实现交叉工序无缝衔

接。第三,搭建权责冲突快速裁决机制。组建由建设、设计、施工、监理多方管理人员共同构成的专项协同协调小组,制定标准化权责争议裁决流程与判定依据,快速化解日常协同权责纠纷,避免权责争议延误项目施工进度,推动协同管理规范化、标准化运转。

2.2 搭建一体化数字信息平台,破除全域信息孤岛

依托数字化信息技术搭建全域统一的轨道交通工程协同管理信息平台,打通跨主体数据传输链路,从根源上解决信息滞后、信息失真问题。首先,完成异构系统整合兼容。统一全域信息平台底层技术标准、数据格式与外部接口,对接各参建方原有独立管理系统,实现全主体系统互联互通,将施工进度、质量检测、成本管控、安全巡检等核心工程数据统一归集、云端管理,实现全域数据一键共享。其次,完善数据安全与权限管控体系。区分项目公开基础数据与涉密核心数据,对造价核心数据、基坑安全监测数据等敏感信息进行加密防护,分级设置平台访问、下载、修改权限,规避数据篡改、信息泄露等安全风险,保障数据共享全程合规安全^[3]。最后,建立数据实时更新与双层校验机制。要求各参建方安排专人实时上传现场动态数据,实现工程数据同步更新。同时,增设系统自动校验+人工复核双层审核流程,过滤错误、残缺数据,降低人工传递带来的信息偏差,以数字化信息协同全面提升多方协作效率。

2.3 构建量化动态利益分配机制,平衡风险与收益关系

立足于风险共担、收益共享的核心原则,搭建差异化、可动态调整的利益协同保障体系,提升各主体协同黏性。一是建立基于贡献度的量化收益分配模型。综合考量各参建方资金投入、人力设备成本、风险承担等级、技术创新贡献、工期履约表现五大核心指标,构建可量化的协同贡献评价体系,按照实际贡献度分配项目收益,实现投入、风险与收益精准匹配。二是完善风险收益联动机制。根据各主体工作内容划定差异化风险承担比例,同步联动收益分配方案,实现高风险高回报、低风险稳收益;结合项目工期履约情况、质量验收结果、成本管控成效动态调整收益分成比例,兼顾利益分配的公平性与灵活性。三是增设协同奖惩约束机制。设立专项协同激励基金,对主动配合全域协同工作、助力项目提质增效的参建方给予专项奖励;对恶意阻碍协同流程、损害项目整体利益的主体进行收益扣罚,倒逼各参建方树立全域协同意识,摒弃短期利己思维。

3 协同管理配套体系优化路径

3.1 扁平化协同组织架构优化,提升决策执行效率

针对传统多层级组织架构决策滞后、指令传导缓慢的问题,优化跨主体协同组织架构,为管理机制落地提供组织保障。首先,明确跨方协同常设机构职能。升级原有项目协调小组,固定小组人员编制与岗位职责,赋予小组全域资源统筹、现场矛盾协调、协同决策审批三大权限,常态化解决跨主体协作难题,补齐以往协调工作缺位的短板^[4]。其次,精简管理层级,搭建扁平化决策架构。压缩多层级审批流程,明确各岗位分级决策权限,缩短决策指令传导链条,实现协同问题快速上报、快速审批、快速落地,解决传统架构决策滞后的痛点。最后,推动参建方内部组织适配升级。要求各参建单位单独设立专职协同管理岗位,专人对接跨主体沟通工作,打通企业内部部门与外部合作单位的沟通渠道,实现内部管理与外部协同工作同频同步。

3.2 闭环协同管理制度优化,完善全域管理规范

补齐现有协同管理制度笼统、可操作性不足的短板,构建覆盖协同全流程的标准化制度体系,实现协同管理有章可循。第一,细化专项协同管理细则。结合轨道交通工程施工特点,补充工序衔接、信息上报、应急联动、多方沟通等专项管理细则,明确各项协同工作的操作流程、时效要求与履职标准,解决原有制度内容宽泛、无法落地的问题。第二,完善协同绩效考核制度。搭建全覆盖多方协同绩效评价指标体系,从配合响应速度、岗位职责落实质量、协同问题整改成效、项目整体贡献度四个维度开展月度、季度常态化考评,将考评结果直接与收益分配、评优评级挂钩,发挥绩效考评的正向引导作用^[5]。第三,健全争议处置与追责制度。明确协同纠纷多元处置流程、办理时限与追责标准,快速化解合作矛盾;针对违规违约、破坏协同秩序的主体执行标准化追责流程,维护管理制度的强制性与权威性。

3.3 全域资源配置协同优化,夯实协同管理底层支撑

围绕人力、技术、数字化三大核心资源开展统筹优化,提升全域资源利用效率,筑牢协同管理落地根基。在人力与技术资源层面,结合项目设计、施工、运维不同阶段的协同需求,动态调配各方优质技术与人力资源,建立设计技术团队与现场施工团队常态化联动机制,实现图纸问题现场答疑、施工工况实时反

馈,避免资源闲置或人力短缺问题。在人才培养层面,定期开展专项协同管理培训,覆盖沟通协调、跨方对接、数字化平台操作等核心内容,培养兼具专业工程能力与全局协同思维的复合型管理人员。在数字化赋能层面,全面落地BIM建模、大数据工况分析、物联网安全监测等数字化工具,对项目进度、质量、成本、安全进行全维度精细化管控,依托数字化技术减少人工协同误差,进一步强化多方协同管理落地效果。

4 结束语

轨道交通工程建设多方协同管理是一项系统性、长期性工程,其机制优化需立足于工程全生命周期,兼顾各参建主体的核心诉求,破解协同痛点、补齐管理短板。本文梳理的权责模糊、信息壁垒、利益失衡等问题,是行业内普遍存在且制约工程高质量推进的关键症结,对应的优化策略与配套路径,围绕协同核心需求构建全方位、多层次的管理体系,既聚焦核心机制的优化完善,也注重组织、制度、资源等配套体系的协同发力,为破解协同困境提供可行思路。协同管理机制的优化并非一蹴而就,需结合工程实际动态调整,持续细化权责划分、完善信息协同、优化利益分配,引导各参建主体树立全局意识,主动参与协同配合。未来可结合数字化技术发展,进一步强化协同管理的智能化水平,推动多方协同管理模式持续完善,为轨道交通工程建设提质增效、安全有序推进提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 刘秋燕,刘映池.城市轨道交通工程建设管理过程风险因素分析[J].运输经理世界,2025(13):16-18.
- [2] 谭绍玉,丁伟.信息化技术在城市轨道交通工程建设安全管理中的应用[J].中国安全生产科学技术,2021,17(S2):117-123.
- [3] 刘建军,黄毅,邱波.城市轨道交通工程建设“一圆三环”管理模型构建研究[J].城市轨道交通,2025(11):63-65.
- [4] 潘彦楠,郭猛,王猛,等.建设管理平台在城市轨道交通工程建设项目管理中的应用[J].智能城市,2025,11(05):101-105.
- [5] 夏海燕.基于一体化信息管理平台的档案管理系统:城市轨道交通工程档案信息化建设的实践和探索[J].兰台世界,2023(S1):175-177.

水库坝基帷幕灌浆施工监理质量控制要点

罗婷婷

(安徽省江河水利水电工程监理咨询有限公司, 安徽 合肥 230094)

摘要 近年来,我国对水资源的需求不断增加,水库坝基帷幕灌浆是防控坝基渗漏、保障大坝结构安全与长期稳定的核心隐蔽工程,其施工质量直接决定水库的抗渗能力与运行寿命。由于帷幕灌浆施工工艺复杂、隐蔽性强、受地质条件影响显著,施工过程中的质量波动易引发坝基渗漏、不均匀沉降等安全隐患,因此施工监理作为质量管控的关键环节,需贯穿施工全流程。本文首先分析水库坝基帷幕灌浆施工监理的核心依据,其次探讨水库坝基帷幕灌浆施工全流程监理质量控制要点,以期水库坝基帷幕灌浆施工监理工作提供参考,进而保障帷幕灌浆工程质量达到设计标准,提升水库大坝的安全韧性。

关键词 水库坝基;帷幕灌浆;施工监理

中图分类号:TV543

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.031

0 引言

水库大坝坝基的渗透稳定性是确保工程长期安全运行的关键。帷幕灌浆通过在坝基岩体中钻孔灌注水泥浆液,形成连续的地下防渗幕体,以降低坝基渗漏压力、提高岩体整体性,是水利水电工程中最常用的基础处理技术之一。坝基渗漏若处理不当,会导致坝基扬压力升高、土体渗透变形,甚至引发大坝滑坡、溃坝等重大安全事故。帷幕灌浆通过在坝基岩体中灌注水泥浆或其他浆液,形成连续的抗渗帷幕,阻断地下水渗透通道,降低渗透压力,是水库坝基渗漏防控的核心技术手段,广泛应用于各类水库大坝的地基处理工程中。

1 工程概况

本项目为安徽省广德市凤凰山水库工程。灌浆正式施工前,施工单位应根据监理人指示进行现场灌浆试验,以验证灌浆参数、施工工艺,调试运行钻孔灌浆施工系统,验证合理的机械设备与人员配置。试验方案实施前应报监理人批准,并根据试验成果相应调整施工组织设计。灌浆试验成果和调整后的施工组织设计报监理人批准认可后,方可进行灌浆正式施工。

2 水库坝基帷幕灌浆施工监理的重要价值

(1) 保障帷幕灌浆施工质量,防范渗漏隐患。帷幕灌浆作为隐蔽工程,施工质量难以直观判断,监理工作通过全过程监督、精准管控,能够及时发现施工过程中的质量问题,督促施工单位整改,确保灌浆工

序规范、参数达标、灌浆密实,有效防范灌浆不密实、渗漏通道未阻断等质量隐患,保障防渗帷幕的防渗效果^[1]。(2) 规范施工行为,确保施工符合规范要求。监理单位依据行业规范和设计文件,对施工单位的施工工艺、施工流程、施工参数进行监督核查,制止违规施工行为,督促施工单位严格按照规范和设计要求施工,确保帷幕灌浆施工的标准化、规范化。(3) 降低工程风险,保障水库工程安全。通过监理全流程质量管控,能够有效规避因帷幕灌浆质量不达标导致的坝基渗漏、坝体变形等安全风险,保障水库坝体结构稳定,避免重大安全事故发生,维护人民群众生命财产安全。(4) 控制工程成本,提升工程经济效益。监理工作通过严格管控施工质量,减少施工返工、缺陷整改等额外支出;同时,通过优化施工工艺、核查施工参数,提升灌浆效率,降低材料浪费和施工成本,确保工程按期竣工交付,提升工程建设的经济效益和社会效益。(5) 强化质量追溯,为后期运维提供依据。监理单位全程记录施工过程中的监理日志、检测数据、验收记录等资料,形成完整的质量追溯体系,为工程后期的运维、检修和质量评估提供准确的技术依据,延长水库工程使用寿命。

3 施工准备阶段的监理控制

3.1 设计文件与施工方案审查

灌浆工程施工前,监理应系统收集并审查下列设计文件:施工详图及设计说明书、灌浆地区工程地质

作者简介:罗婷婷(1994-),女,专科,助理工程师,研究方向:水利水电建筑工程。

和水文地质资料、灌浆试验报告、灌浆施工组织设计、灌浆施工技术要求及质量标准。重点核查帷幕布置轴线、孔距排距、灌浆深度、灌浆压力、透水率控制标准等核心设计参数是否明确。施工方案审查应重点关注：钻孔与灌浆设备选型的合理性、分序加密原则的落实措施、特殊地质地段的处理预案、施工记录与成果整理的技术要求等^[2]。

3.2 灌浆材料与设备质量控制

(1) 材料控制。监理应对进场的灌浆材料进行严格核验。水泥品种、强度等级应符合设计要求，应查验出厂合格证及质量检测报告，并按规范要求抽样复检。对于需要添加的外加剂（水玻璃、膨润土等），应审查其性能指标是否符合相关标准。(2) 设备控制。灌浆设备主要包括钻机、灌浆泵、制浆机、自动记录仪等。监理应核查设备性能是否满足工程要求：钻机应能保证钻孔精度；灌浆泵的压力和流量应稳定可调；自动记录仪应能实时监测并记录灌浆压力、注入率等关键参数，精度应符合规范要求。关键设备宜要求施工单位配备备用机具，防止施工中断。

3.3 现场灌浆试验监督

对于地质条件复杂或大型水利枢纽工程，施工前应进行现场灌浆试验。监理应监督试验孔的选择、施工参数的设计、试验过程的记录，并参与试验成果的分析。通过试验确定合理的灌浆压力、浆液配比、结束标准等施工参数，为全面施工提供技术依据。

4 水库坝基帷幕灌浆施工全流程监理质量控制要点

4.1 浆液制备监督

浆液质量直接决定灌浆结石的强度与抗渗性能，监理人员需重点管控浆液制备过程，实行全过程旁站监督。一是浆液配比控制，严格按照现场试验确定的浆液配比进行制备，监督施工人员准确计量水泥、砂、外加剂及水的用量，采用电子秤进行计量，计量偏差不得超过设计要求（水泥用量偏差不得超过 $\pm 2\%$ ）；二是搅拌控制，浆液搅拌采用机械搅拌，确保浆液搅拌均匀，无结块、沉淀等现象，搅拌完成后需在规定时间内使用（一般不超过4 h），避免浆液凝结失效；三是浆液质量检测，每批次浆液需抽样检测其密度、黏度、凝结时间等性能指标，确保符合设计要求，不合格的浆液严禁使用，需及时废弃并重新制备^[3]。

4.2 钻孔质量控制

(1) 孔位与孔斜：监理应复核开孔孔位，偏差应符合设计要求（一般不大于10 cm）。对于深孔帷幕，

应监督施工单位采用测斜仪进行孔斜测量，孔底偏差不得超过规范允许值^[4]。(2) 孔深控制：终孔孔径应满足灌浆要求，一般不小于 $\phi 56$ mm。孔深应达到设计深度，监理可通过丈量钻杆、核对岩芯等方式进行确认。(3) 孔口管镶铸：孔口管必须栽牢并待凝，以保证后续灌浆压力施加。三峡工程的经验表明，改进后的孔口管镶铸工艺（第一段灌浆完成后扫孔至段底，下入孔口管并注入浓浆，待凝3~5天后再扫孔钻进）可显著提高镶铸质量^[5]。

4.3 灌浆设备

(1) 灌浆应配备与灌浆方式、工艺、灌浆压力、浆材相适应的、能正常灌浆的设备与器材，包括高速搅拌机、普通搅拌机、灌浆泵、砂浆泵（必要时）、自动记录仪、压力表、抬动变形观测仪、灌浆管路、耐蚀阀门、孔口封闭器、孔内阻塞器、流量计、比重计、温度计、电子称、压力软管、供水管及阀门等，并有充足的备用量。(2) 孔口封闭器应具有良好的密封性能，并能使灌浆管灵活转动。(3) 抬动变形观测采用位移传感器自动记录，监测应连续进行，并设置抬动限制报警。抬动变形观测使用的千分表须有产品鉴定证书或经国家认可的计量部门率定并出具率定报告。已率定的仪表在运输、安装、使用、拆卸、保管中应采取可靠措施，严防碰撞、损坏，在使用过程中应经常校对，确保其灵敏度和准确性，在非观测期间亦应妥善保护，防止损坏。(4) 所有钻灌设备、仪器、仪表等应注意维护保养，保证其正常的工作状态，并应有充足的备用量。特别是自动记录仪等电子产品，应配备厂家或经厂家培训的专业维修人员，定期对自动记录仪进行维修、维护，以保证现场灌浆施工需要。

4.4 灌浆工序监理要点

灌浆是帷幕灌浆施工的关键工序，监理人员需实行全过程旁站监督，重点管控灌浆压力、灌浆速度、浆液浓度、灌浆顺序等参数。一是灌浆压力，严格按照设计要求控制灌浆压力，避免压力过高导致岩体裂隙扩大，或压力过低影响灌浆密实度；二是灌浆速度，控制灌浆速度均匀，避免速度过快导致浆液扩散不均，或速度过慢影响施工效率；三是浆液浓度，根据钻孔地质情况和灌浆压力，按照设计要求调整浆液浓度，确保浆液能够充分填充岩体裂隙；四是灌浆顺序，督促施工单位按照“自下而上、分段灌浆”的原则进行施工，分段长度需符合设计要求，每段灌浆完成后需进行封孔处理，确保灌浆段之间衔接紧密；五是灌浆终止标准，严格按照设计要求控制灌浆终止条件，当

灌浆压力达到设计值、浆液注入量小于规范规定值且持续一定时间后,方可终止灌浆,监理人员需核查灌浆终止条件是否达标,确认合格后签署记录^[6]。

4.5 封孔工序监理要点

封孔质量直接影响帷幕灌浆的整体防渗效果,监理人员需监督施工单位采用设计规定的封孔材料和封孔工艺进行封孔;在封孔过程中,督促施工单位分层灌注封孔材料,确保封孔密实,无空隙、无渗漏;封孔完成后,监理人员需核查封孔质量,采用钻孔检测等方式验证封孔效果,不合格的需重新封孔。

4.6 竣工验收阶段监理质量控制要点

(1) 施工资料审核。监理人员需全面审核施工单位提交的竣工资料,重点审核资料的完整性、真实性、准确性,核心资料包括:施工方案、原材料出厂合格证与检测报告、灌浆试验报告、钻孔记录、灌浆记录、封孔记录、质量检测报告等。若资料存在缺失、虚假、涂改等问题,要求施工单位补充完善、整改到位,直至资料符合要求。同时,审核施工单位提交的质量评定资料,核查各工序、各单元工程的质量评定结果,确保评定标准符合规范要求。(2) 现场质量检测监理。竣工阶段的现场质量检测是验证帷幕灌浆效果的核心手段,监理人员需监督施工单位开展现场检测,同时参与检测过程,确保检测结果真实可靠。常用的检测方法包括压水试验、钻孔取芯检测等。一是压水试验,在帷幕灌浆完成后,选取一定比例的灌浆孔进行压水试验,检测帷幕的渗透系数,渗透系数需符合设计要求(一般不大于 1×10^{-6} cm/s),监理人员需现场监督压水试验的过程,核查试验设备、试验方法、数据记录是否规范,确保试验结果准确;二是钻孔取芯检测,选取关键部位的灌浆孔进行钻孔取芯,检查灌浆结石的密实度、强度及帷幕的连续性,芯样的结石率需不低于设计要求(一般不低于85%),监理人员需现场查看芯样,记录芯样情况,对不合格的部位,要求施工单位进行补灌处理。(3) 质量评定与验收。监理人员根据施工资料审核结果与现场检测结果,对帷幕灌浆工程质量进行综合评定,划分质量等级(合格、优良)。若工程质量符合设计与规范要求,资料齐全、检测合格,可出具监理评估报告,同意验收;若存在质量问题,要求施工单位限期整改,整改完成后重新进行检测与评定,直至验收合格。同时,参与建设单位组织的竣工验收,如实汇报监理工作情况与工程质量情况,提出验收意见。

4.7 监理控制体系构建

(1) “三检一验”制度落实。监理机构应督促施工单位严格执行“三检一验”制:机组内部班组自检、施工机组质检员二检、项目部质检员三检,合格后报监理工程师检查验收。通过细化考评,加强施工单位质检和机组人员的责任感。(2) 关键工序旁站监理。对于造孔终孔、孔口管镶铸、浆液配制、灌浆压力控制、特殊情况处理等关键工序,监理人员应采取全程旁站监督和即时检测。隐蔽工程重在过程监控,监理的“家常便饭”就是施工过程的控制。(3) 记录与档案管理。监理人员应规范工程建设质量安全资料的管理工作。灌浆施工记录、检查孔压水试验数据、质量评定表等均应完整归档,确保质量可追溯。

5 结束语

水库坝基帷幕灌浆施工监理是保障帷幕灌浆工程质量、防控坝基渗漏、确保水库大坝安全运行的关键环节。帷幕灌浆工程具有隐蔽性强、工艺复杂、受地质条件影响显著等特点,监理质量控制需贯穿施工准备、施工过程、竣工验收全流程,重点管控原材料质量、钻孔精度、浆液制备、灌浆参数、封孔质量等关键点。针对岩溶地区等复杂地质条件,应根据灌浆试验成果优化分段灌浆压力,细化特殊情况处理措施,加强抬动与变形监测。本文的研究成果可为水库坝基帷幕灌浆施工监理工作提供实践参考,但复杂地质条件(深层断层、大型溶洞等)下的监理质量控制技术仍需进一步深入研究,结合更多工程实践,不断优化监理流程与方法,构建更加完善的全流程监理质量控制体系,为水库大坝的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献:

- [1] 刘树国,梁金松.水电站大坝帷幕补强灌浆技术在涌水孔段的改进[J].四川水力发电,2016,05(38):141-143.
- [2] 王宗强.开普太希水利枢纽帷幕灌浆施工存在问题及处理措施[J].水利规划与设计,2015(01):68-72.
- [3] 熊海滨,彭文祥,周晓明.富水水库大坝防渗加固对策研究[J].工程建设与管理,2023(18):53-58.
- [4] 王海东,李舒文.白鹤滩水电站拱坝19号坝段基础帷幕复合灌浆试验研究[J].湖南水利水电,2022(06):39-42,46.
- [5] 肖伟,刘烁楠,李洪斌,等.金沙水电站大坝基础帷幕灌浆设计与施工[J].水利水电快报,2022,43(03):32-36.
- [6] 朱先文,唐瑜,郜永勤.两河口水电站大坝岸坡三角区帷幕灌浆设计加强方案及效果研究[J].水电站设计,2021,37(02):13-14,20.

复杂地质条件下桩基检测难点与应对策略

江玉龙

(安徽省建控建设工程质量检测有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要 在复杂地质条件下, 桩基检测易受环境干扰, 而且存在技术适配性不足、施工与检测协同不畅、结果解读难度大等问题。本文以岩溶、裂隙发育、软硬夹层等典型复杂地质为例, 对桩基检测核心难点与应对路径展开系统研究。通过梳理地质条件干扰、检测技术局限、现场协同矛盾、结果多解性四大关键问题, 从地质勘察、技术应用、施工管控、结果解读四个维度提出对应策略, 即推进地质勘察精细化前置、优化检测技术组合应用、建立施工与检测协同机制、构建科学的检测结果判定体系, 以期为复杂地质场景下桩基检测方案制定、技术选型与质量控制提供参考, 助力提升桩基检测精度与工程可靠性。

关键词 复杂地质; 桩基检测; 检测技术; 协同管控; 结果解读

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.032

0 引言

桩基作为工程“地下生命线”, 质量直接决定结构安全。当前基建向海上风电、深层地下工程延伸, 岩溶、大溶腔等复杂地质场景日益增多。行业新规对检测精度、全程管控的要求更高, 传统检测模式面临诸多挑战。智能监测技术推广与产学研创新成果落地, 为破解难题提供新路径。本文立足于最新行业形势与工程实践, 聚焦复杂地质带来的检测干扰、技术适配等核心问题, 探索贴合实际的应对方案, 助力提升桩基检测规范化水平, 为质量强国战略下建设工程安全筑牢保障。

1 工程概况

滁州至南京城际铁路(滁州段)二期工程, 线路全长 13.28 km, 含地下段 5.791 km (含地下车站), 路基段 0.168 km, 高架段 7.321 km, 设站 6 座(预留 2 座), 其中高架站 4 座, 分别为滁州高铁站(建筑面积 7 053 m²)、滁阳路南站(预留, 建筑面积 7 961 m², 预留车站仅含车站主体及外部装修)、技术学院站(建筑面积 8 759 m²)、凤阳北路站(预留, 建筑面积 8 020 m², 预留车站仅含车站主体及外部装修), 地下站 2 座, 分别为龙蟠大道站(地下, 建筑面积 13 048 m²)、市政府站(地下, 建筑面积 13 030 m²), 在技术学院站附近设置牵引变电所一座。

2 复杂地质条件下桩基检测核心难点

2.1 地质条件复杂性导致的检测干扰

复杂地质构造与不良地质体直接影响检测数据的真实性与准确性。该影响贯穿桩基检测全流程, 在滁

州至南京城际铁路(滁州段)二期工程地下段、高架段均有显著体现。岩溶、裂隙发育是工程沿线常见的地质干扰源, 此类地质结构打破了岩土体的均一性, 使声波、应力波等检测信号在传播过程中易发生折射、反射或衰减, 无法按预设路径传递, 最终导致信号失真, 难以准确捕捉桩基实际性状。例如: 工程地下段龙蟠大道站、市政府站周边存在岩溶空洞, 检测信号易出现异常跳转, 裂隙中的泥质填充物会改变信号传导速度, 极易误导检测人员对桩基完整性的判断。

2.2 检测技术适配性不足的局限

传统检测技术难以满足复杂地质的多样化检测需求, 这种适配性上的欠缺成为影响桩基检测质量的一个关键因素。单一检测方法在应用过程中存在显著局限, 不同复杂地质场景对检测技术提出的要求也有所不同。例如: 低应变反射波法比较适合浅层桩基完整性检测, 但在岩溶、裂隙发育地带, 其检测深度和精度会大幅降低, 不能全面覆盖复杂地质条件下的检测需要。检测设备在极端地质条件下稳定性不够, 复杂地质往往伴随着高地下水位、强风化岩层、深厚软土等恶劣环境, 传统检测设备的防水、抗干扰、抗压性能达不到现场作业要求, 容易出现设备故障、数据采集中断等情况, 影响检测工作的连续进行。

2.3 现场施工与检测的协同矛盾

施工干扰与检测需求往往存在冲突, 导致检测工作难以顺利开展。这种协作不畅的局面, 主要源于施工与检测的核心诉求差异, 且在地质条件复杂的场景

作者简介: 江玉龙(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 勘察技术与工程。

中, 此类矛盾会表现得更为突出。施工留下的残渣以及现场积水, 对检测来说就是摆在眼前的干扰, 当地质条件变得复杂, 桩基施工的难度也会上升。在钻孔过程中容易带出大量岩土碎屑, 要是不及时清理, 就会挡住检测设备的正常摆放和操作, 进而对检测操作规范造成影响。地下水位偏高的时候, 桩孔里面很容易存水, 这不但会加速检测设备的腐蚀, 还会让检测介质的物理性质发生变化, 最后造成检测数据不够准。桩基施工出现的位置偏差让检测点位没办法准确布置, 复杂地质条件本身就让桩基施工变得更难, 容易出现桩位跑偏、桩身歪斜这类施工偏差, 而检测点位的布置又必须严格按规范操作, 需要和桩基设计位置完全对准, 施工出现的偏差直接导致检测点位不能按照预设方案布置, 从而影响检测的全面性和代表性^[1]。

2.4 检测结果解读的难度提升

在复杂地质条件下, 检测数据存在多解性, 加大了对结果进行判断的难度。这种困难来源于地质条件的复杂性和检测数据之间的关联性, 给检测人员带来专业判断上的挑战。地质异常与桩基缺陷的检测信号不容易区分, 复杂地质里的岩溶、裂隙、软硬夹层等地质异常, 它们产生的检测信号和桩基断桩、缩颈等缺陷信号具有相似性, 缺乏明确的区分特征, 检测人员难以借助单一信号判断是地质异常引起还是桩基本身出现缺陷, 容易造成判断错误。缺乏针对复杂地质的检测结果判断标准, 现行桩基检测判断标准多数基于常规地质条件制定, 没有充分考虑到复杂地质对检测数据带来的影响, 无法为复杂地质条件下的检测结果提供精准判断依据, 这样就会导致检测人员在解读数据时缺少统一标准, 判断结果主观性变得更强。检测数据的关联性分析比较困难, 复杂地质条件下, 检测数据受到多种因素影响, 不同检测指标之间的关联性复杂, 并且存在相互干扰的情形, 检测人员难以借助多组数据的关联性分析, 精准提炼出桩基质量信息, 无法形成全面、客观的检测结论, 进一步增加了检测结果解读的难度。

3 复杂地质条件下桩基检测难点的应对策略

3.1 地质勘察精细化前置策略

开展精准的勘察工作, 充分掌握地质方面的信息, 为检测任务提供前置性的支撑, 成为化解复杂地质检测难点的基本条件。其关键点在于借助精细化的勘察手段, 达成地质信息的完整收集、系统化整理与准确应用。从检测开始阶段减少检测受到的干扰, 运用多

种检测技术融合起来的综合勘察方式, 明确复杂地质分布的具体特点, 摆脱单一勘察方法带来的限制, 把钻探、物探、坑探等不同勘察方法加以整合, 从各个方向、多种角度排查岩溶、裂隙、软硬夹层等不良地质体的分布范围、具体形态、规模大小以及物理力学性质, 准确掌握地下水位变化的具体规律、岩土体分层特征及其力学参数, 为后续检测任务提供详尽、准确的地质基础资料, 使检测任务更有针对性^[2]。构建地质信息数据库, 准确预判检测中的重点和难点, 将勘察得到的各类地质数据加以系统化整理、分类归档, 建立涵盖地质构造、岩土体特性、地下水位、不良地质体分布等信息的专门数据库, 借助数据梳理与深入分析, 预判不同区域桩基检测可能遇到的干扰因素、潜在问题以及重点难点环节, 为检测方案的制定提供科学的数据支撑。提前避开检测风险, 结合勘察结果制定个性化的检测方案, 放弃统一化、模板化的检测模式, 依据不同区域的地质特征、不良地质分布情况, 有针对性选择适合的检测方法、合理确定检测点位和检测流程, 充分考虑到地质干扰因素。优化检测技术参数, 确保检测方案与复杂地质条件高度匹配, 提升检测任务的针对性和有效性, 为后续检测任务的有序、高效开展打下坚实的基础。

3.2 检测技术优化与组合应用策略

技术层面的升级和多种方法搭配使用, 能够提升检测的适配性和精度, 成为应对复杂地质环境下检测技术本身局限的主要技术路线。其关键在于借助技术创新和模式上的优化, 突破传统检测技术的应用限制, 达成复杂地质条件下桩基检测的精准化和高效化, 以适应复杂地质的检测需要。结合复杂地质里存在的检测难点, 有针对性引入超声波透射法、钻孔雷达法、分布式光纤传感法等新技术, 这些技术拥有抗干扰能力强、检测精度高、适用面宽的优势, 可以有效处理岩溶、裂隙、深层桩基等复杂检测场合, 准确捕捉桩基的细微缺陷信息, 弥补传统检测技术在复杂地质场景里存在的不足, 提升检测数据的真实度和准确度。采用“主检测加上辅助检测”的组合方式, 提升结果的可靠性, 按照检测需求和地质条件, 选择一种核心检测方法当作主检测手段, 集中关注桩基核心质量指标的检测, 同时配合一种到两种辅助检测方法, 弥补主检测方法存在的局限, 借助不同检测方法的互相补充和验证, 让检测结果彼此印证, 降低单一检测方法受到地质干扰而产生的检测偏差, 提升检测结果的可靠性和权威性^[3]。优化检测设备的性能, 加强极端条

件下的稳定表现,针对复杂地质的极端环境,对检测设备做针对性的技术升级,强化设备的防水、抗干扰、抗压、耐低温性能,优化设备的数据采集和传输系统,提升设备在高地下水水位、强风化岩层、深厚软土等极端条件下的持续正常运行能力,确保能够不间断采集到准确的检测数据,为检测结果的科学性奠定设备基础。

3.3 施工与检测协同管控策略

建立施工与检测协同管控机制,化解施工与检测之间的矛盾冲突,是保障复杂地质条件下桩基检测质量的一个重要手段。借助流程优化与协同管控,推进施工与检测的高效连接、协同前进,同时兼到施工效率和检测质量。制定施工与检测协同流程,将二者责任边界划分清楚,结合桩基施工整个流程以及检测规范要求,制定详细、可以落地执行的协同工作流程。明晰施工单位与检测单位各自的工作职责、工作节点、沟通方式和衔接条件,细化施工环节与检测环节的配合重点,防止出现工作断开、责任推脱、流程乱套的局面,让检测工作能够有序地进入施工过程中,实现施工与检测协同推进^[4]。加强对施工过程的管控,降低对检测工作的干扰,施工单位需要严格依照施工规范和协同流程开展作业,及时清理桩基施工过程中出现的岩土残渣,做好桩孔排水、防护动作,防止施工残渣以及积水对检测设备、检测操作带来的干扰。同时,加强桩基施工精度的管控,强化桩位、桩身、桩径的施工质量,减少桩位偏移、桩身倾斜这类施工偏差,让检测点位能够精准地布置下去,为检测工作的规范开展创造有利条件^[5]。合理规划工期,保证检测工作按标准开展,建设单位需要结合复杂地质条件下桩基施工与检测的实际需求,科学地规划工程工期,摒弃“重施工、轻检测”的想法,留出足够的检测时间,杜绝为了赶工期压缩检测流程、降低检测标准的行为,确保检测工作可以按照规范要求全面、细致地开展,充分体现检测工作的质量管控作用,保障桩基工程质量安全。

3.4 检测结果科学解读与判定策略

建立一套科学合理的解读体系,是提升复杂地质条件下桩基检测结果解读准确性的核心环节。借助多维度分析、标准规范完善以及技术手段赋能,来破解检测结果在解读过程中遇到的难点,实现检测结论的科学性、客观性和精准度。检测人员在对检测数据进行解读时,需要充分结合前期地质勘察资料,清晰把握检测区域的地质特征、不良地质分布情况以及岩土体特性,对检测数据和地质信息做深度的关联分析,

准确区分地质异常与桩基缺陷所产生的信号差异。避免单纯依赖检测数据进行判断的模式,应当结合地质条件来做综合判断,这样能够提升检测结果解读的准确性,减少误判和漏判的发生。结合复杂地质条件的检测特点和实际需求,针对不同地质场景和不同检测方法,补充并完善检测结果的判定指标和标准,明确地质异常对检测数据的影响范围、影响程度以及判定依据,细化不同地质条件下桩基质量的判定阈值,为检测人员提供统一、精准的判定规范,减少主观判定带来的偏差,提升检测工作的规范性和权威性。借助大数据、人工智能等先进技术,引入智能化分析工具,提升数据解读的效率和精度,开发针对性的检测数据智能化分析工具,实现检测数据的快速梳理、关联分析、异常识别和趋势预判,精准提取桩基质量的核心信息,辅助检测人员完成结果判定,既能够提升数据解读的效率,又能够进一步提升检测结果的科学性和准确性,为工程安全评估提供可靠的检测依据。

4 结束语

复杂地质条件下桩基检测是保障桩基工程质量与结构安全的关键环节,其技术实施与结果判定直接关系到工程整体稳定性。面对地质环境复杂、信号干扰显著、传统方法适用性有限等现实问题,仅依靠单一检测手段或常规管理模式难以满足工程要求,唯有将精细化地质勘察作为前置基础,以技术优化与组合应用提升检测精度,以协同管控理顺施工与检测关系,以科学解读体系降低误判漏判风险,才能形成全流程、多维度的解决方案。随着勘察技术、智能分析手段与工程管理水平的持续提升,复杂地质桩基检测的可靠性与规范性将不断增强,为各类复杂地质条件下的桩基工程安全建设与长期运营提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 郭绍猛. 路桥工程混凝土桩基施工检测技术优化与应用[J]. 中国水泥, 2025(09):90-92.
- [2] 王双双, 贺吉祥, 王磊. 自平衡法在桩基承载力试验检测中的应用分析[J]. 工程机械与维修, 2025(08):119-121.
- [3] 张聪, 周政, 霍玉龙. 复杂地质条件下钻孔灌注桩桩底沉渣分析处理[J]. 科学技术创新, 2024(24):164-167.
- [4] 郭壮. 桩基检测技术在高层建筑中的运用[J]. 江苏建材, 2024(04):126-127.
- [5] 江辉. 复杂地质条件下大直径嵌岩桩检测分析[J]. 福建建筑, 2021(05):71-74.

港航工程岸坡开挖中钢板桩围堰施工技术

梁 秋

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 为提升港航工程岸坡开挖施工质量, 本文探索钢板桩围堰施工全过程的技术应用。利用文献综述及案例分析法, 详细研究钢板桩整理、导向架安装、屏风式插打、围堰布置、基坑开挖以及钢板桩拔除等工序的技术要点, 以为同类工程提供技术参考。结果表明, 科学的分段施工并实时监控质量可防止钢板桩倾斜或围堰渗漏等问题, 保障围堰结构稳定。完善施工技术管理能够达到施工安全及施工效率的统一。

关键词 港航工程; 岸坡开挖; 钢板桩围堰; 导向架安装; 基坑开挖

中图分类号: TV55

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.033

0 引言

我国沿海地区经济建设正处于高速阶段, 这促使港口码头及岸坡开挖施工项目日益增多, 常见地基条件有软土层及粉质黏土互层等复杂土体。若采用传统混凝土围堰或土石围堰, 不仅施工工艺复杂, 而且难以满足码头岸坡开挖施工对防风抗汛及结构稳定的要求。钢板桩围堰施工技术能够应对上述施工问题, 为港航工程岸坡开挖施工提供可靠技术保障。

1 钢板桩围堰施工前准备

工作人员需要先调查施工区域的土层分布、地下水位等地质条件, 结合围堰设计图纸确定沿岸坡轴线的勘察范围, 沿岸坡轴线每 25 m 布置一个勘察孔, 转角部位加密布置, 加密间距控制在 10 m, 保障勘察数据全面准确^[1]。勘察孔采用地质钻机钻进, 孔深钻至钢板桩设计入土深度以下 3 m, 钻进过程中逐段记录土层密实度, 每钻进 1 m 取样一次, 留存土样用于后续试验分析。接下来, 使用水位计分别在早、中、晚各测量一次地下水位埋深, 记录昼夜变化值, 确保数据真实可靠。渗透系数测定应用注水法, 在勘察孔内放入注水装置均匀注水, 每 30 分钟记录一次水位变化, 持续观测 2 小时后, 计算实测渗透系数。同时引入地质雷达探测技术, 全域扫描施工区域, 识别地下 15 m 隐蔽障碍物, 实测数据全部整理归档, 用于钢板桩选型及围堰设计。

材料进场阶段, 工作人员应逐根检查进场的钢板桩, 检查前先清理桩身表面的杂物, 再用 2 m 靠尺紧贴桩身表面测量桩身弯曲矢高, 每米测量 2 个点位, 保持

每米弯曲矢高不超过 5 mm, 然后用塞尺检测锁口缝隙, 每米检测 4 个点位, 最大间隙不超过 2 mm。核查桩身表面状态, 用直尺测量桩身凹陷深度, 不大于 3 mm 的凹陷为合格, 同时采用超声波探伤仪检测桩身内部, 排查隐藏裂纹。检测钢板桩壁厚时, 利用卡尺测量桩身不同部位, 取 3 次结果的平均值, 控制壁厚偏差在 ± 0.5 mm, 锁口不密或桩身弯曲超过规定值的钢板桩不得使用, 并引入智能钢材检测设备, 快速检测钢板桩的力学性能。设备选型要根据勘察得出的地质条件及现场施工要求, 选择合适的打桩设备, 确定振动锤功率 75 kW, 牵引力 200 kN, 振动频率 25 Hz, 配套卷扬机牵引力 15 kN, 导向架使用型钢焊接, 焊接后用激光准直仪检测直线度。

2 钢板桩围堰核心施工技术

2.1 钢板桩整理

钢板桩运至现场并检验合格后, 工作人员需开展整理作业, 先采用塞尺测量锁口间隙, 每米选取 3 个测点, 最大间隙不得超过 2 mm, 再采用 2 m 长平尺紧贴锁口表面, 核查锁口平整度, 偏差控制在 1 mm 以内, 之后采用高压气枪吹扫锁口内部残留的泥沙、铁锈等杂物, 气枪压力调节至 0.8 MPa。同时采用智能锁口检测设备, 利用高清摄像头配合激光测距及时排查锁口隐藏的裂纹及变形隐患^[2]。对于破损的钢板桩可以采用冷弯或热敲方式修复, 冷弯作业采用液压冷弯机操作, 缓慢施加外力, 控制弯曲半径不小于 1 200 mm, 避免桩体产生新的裂纹。热敲作业应用中频感应加热, 加热温度控制在 800 °C 至 1 000 °C 之间, 加热范围集

作者简介: 梁秋 (1992-), 男, 本科, 研究方向: 港口航道工程。

中于弯曲部位,加热长度为500 mm,热敲后自然冷却至室温,再用2 m靠尺检测桩身弯曲矢高,每米弯曲量不超过5 mm。锁口检查合格后,工作人员需要在钢板桩锁口内侧均匀涂抹油膏,按照从锁口顶部至底部的顺序均匀涂抹,涂抹厚度控制在3~5 mm,涂抹过程中用刮板刮平,以全面覆盖锁口内壁。同步采用新型防渗润滑技术,在油膏中添加适量纳米防渗剂,添加量为每10 kg油膏加入200 g纳米防渗剂,提升锁口的防渗及润滑效果。涂抹后,采用红外测温仪检测油膏厚度均匀性,使整体厚度偏差不得超过1 mm,随后将钢板桩放置于平整场地,防止油膏脱落。

2.2 导向架安装

导向架制作要结合钢板桩的实际尺寸选用H型钢或槽钢焊接制作,主梁选用H400×400×13×21型钢,每根主梁长度根据围堰轴线长度切割,切割后打磨端口毛刺,避免焊接时出现缝隙,而横梁选用槽钢16a,横梁间距控制在1 200 mm,保证横梁紧密连接主梁^[3]。焊接时控制焊接电流在180 A至220 A,焊缝厚度不小于8 mm,焊缝宽度控制在12~15 mm,然后用小锤敲击焊缝除渣,并利用超声波探伤仪检测焊缝质量,检测深度达到焊缝厚度的1.5倍,避免焊缝出现裂纹。同时引入BIM建模技术,提前三维建模导向架,匹配钢板桩尺寸及施工点位,避免制作过程中出现尺寸偏差,确保导向架满足钢板桩插打时的垂直度要求。

工作人员安装导向架时应按测量放线的点位清理安装区域的杂物,平整场地后固定导向架基础。基础使用C25混凝土浇筑,浇筑前铺设100 mm厚的碎石垫层,增强基础承载力,混凝土浇筑厚度为200 mm,宽度为500 mm,浇筑后用振捣棒振捣密实,振捣时间控制在20秒至30秒,避免出现蜂窝或麻面等质量问题,养护7天后再安装导向架。导向架间距比钢板桩宽度大8 mm,安装时凭激光导向仪辅助定位,实时校准导向架的轴线偏差,偏差控制在2 mm内,导向架垂直度采用经纬仪双向检测,偏差控制在3 mm/m内。导向架顶部和底部均设置加固拉杆,拉杆使用Φ20螺纹钢,拉杆间距1 500 mm,拉杆两端与导向架应用焊接固定,焊缝长度不小于80 mm,扭矩控制在450 N·m,保持导向架牢固。

2.3 钢板桩插打

钢板桩插打前,工作人员需确认各项准备工作符合要求,作业过程中重点把控桩体定位精度及插打质量。首桩定位可选取围堰转角处钢板桩作为基准桩,吊车将基准桩吊运至预定施工点位,经纬仪从双

向校正桩身垂直度,校正过程中控制桩身偏差不得超过1/200。随后缓慢下放桩体,待桩体入土深度达到1.5 m时停止下放,再次复核桩身垂直度,确认偏差符合施工要求后,继续开展钢板桩插打作业,持续插打至桩体入土深度达到8 m且保持稳定状态后,开展后续钢板桩的打设工作^[4]。在插打基准桩的全过程中,工作人员需观测桩身姿态,若发现桩身出现偏差立即采取调整措施,防止偏差扩大,保障基准桩定位精度,为后续钢板桩插打奠定基础。

钢板桩插打主要采用逐根打设或屏风式打入两种方式,两种方式的适用场景各有不同,其中逐根打设的操作简便,适合围堰周长较小且地质条件相对均匀的区域,具体操作时需要先将单根钢板桩吊至预定桩位,调整桩身垂直度后,缓慢下放至入土一定深度,再启动打桩设备插打,单根钢板桩插打结束后,再依次吊放相邻钢板桩,重复上述操作。屏风式打入应按设计间距将10~15根钢板桩依次插入导向架内,组成一组“屏风”,保持所有桩身顺直且间距均匀后,再启动打桩设备,按1/3至1/2的高差顺序,对整组钢板桩反复插打,直至全部达到设计入土深度。软土地基插打时可使用振动法施工,振动锤频率控制在22 Hz至28 Hz,振幅维持在4 mm至6 mm,而硬土层或夹砂层插打时需采用水冲法辅助下沉,将水压控制在1.2 MPa至1.5 MPa,冲水至桩位下方1.2 m处后停止冲水,再插打。插打作业从上游起始向下游方向合拢,每侧均从一角插打至另一角,待钢板桩插打至设计入土深度后,停止作业,并在桩顶做好标高标记,便于后续施工核对。

2.4 围檩及内支撑安装

围檩及内支撑安装要跟着基坑开挖深度推进,开挖一层即安装一层围檩及支撑,不可一次性开挖过深再安装,避免钢板桩失去支撑发生变形。围檩可选用H型钢制作,型号选用H400×400×13×21,每根长度6 m,拼接时对接焊接,焊缝高度不小于10 mm,拼接处要避开支撑节点。内支撑可选用优化后的合金配比无缝钢管,也可用N+1钢板桩钢管桩组合支护技术的预制构件,管桩直径选用609 mm,壁厚16 mm,管桩高度H及支撑板组高度h控制在1.25~1.5,每根长度根据围堰尺寸切割,切割后要打磨端口毛刺^[5]。支撑间距要根据围堰尺寸及钢板桩强度计算确定,最大间距不超过4 m,相邻两根支撑的间距保持3.5~4 m,组合支护构件可提前预制,预制精度控制在1 mm内,现场模块化拼接,拼接处用高强度螺栓连接配合焊缝加固。

围堰安装要紧贴钢板桩内壁,安装前先清理钢板桩内壁的泥沙,用木楔楔紧围堰及钢板桩间的缝隙,缝隙控制在 2~3 mm,保证围堰紧密贴合钢板桩。安装时可搭配激光导向仪以及双轴倾角传感器,实时校准围堰水平度,确保安装偏差不超过 3 mm/m,发现偏差及时调整。内支撑安装要对准围堰的预定支撑点,支撑两端及围堰的连接可满焊,焊缝长度不小于钢管直径的 1.5 倍,焊完后清理焊渣,检查焊缝是否有夹渣或裂纹。支撑节点处加装尺寸 200 mm×200 mm、厚度 12 mm 的钢板作为加劲板,每侧节点加装 4 块加劲板,同时可在关键节点安装光纤传感监测系统,实时采集结构变形数据,掌握受力情况,以加固节点连接,防止支撑失稳导致围堰变形,复杂地质条件下可利用小型螺旋钻机提前钻设导向孔,减少内支撑安装的地层阻力,避免管桩偏移。

2.5 基坑开挖及封底

基坑开挖作业时,工作人员可采用分层的方式开挖,每层开挖深度控制在 1.5 m,但开挖前需先明确开挖边界,用石灰划出开挖线,避免超挖或欠挖。开挖机械需选用小型挖掘机,作业时挖掘机铲斗要避免钢板桩,防止碰撞造成损坏,并搭配测量机器人实时追踪监测,监测精度控制在 1 mm 内,捕捉钢板桩的微小形变,若发现形变超标立即调整。基坑内布设 23 口降水井,降水井间距控制在 5 m,实行 24 小时不间断抽水,抽水流量控制在 15 m³/h,及时排除基坑内积水,同时搭配“5G+北斗”智能监测网络,实时上传水位数据,随时掌握基坑内水位变化,避免水位过高影响开挖作业。基坑开挖至设计标高后,工作人员需清理坑底浮土,保障坑底平整且无杂物后开展水下封底混凝土施工。施工采用多个直径 300 mm 的无缝钢管作为导管同步浇筑平台,导管间距控制在 2.5 m,导管底部距离坑底 300 mm,浇筑前实施导管水密性试验,试验压力控制在 1.2 MPa。封底混凝土选用 C30 水下混凝土,坍落度控制在 180~220 mm,抗渗等级达到 P8,封底厚度控制在 1.2~1.5 m,浇筑时按从中间向四周的顺序开展,浇筑速度控制在 2 m³/h,浇筑过程中可以引入 BIM 智能应力监测系统,实时追踪混凝土浇筑质量,确保封底混凝土密实无孔隙。

2.6 钢板桩拔除

待围堰内结构施工完成后,施工单位即组织拆除钢板桩围堰。围堰拆除后采用中粗砂回填密实桩孔。在工程中,钢板桩拆除采用振动拔桩法,借助振动锤振动扰动钢板桩和土体,破坏周围土体粘聚力和拔桩

阻力,待振动后静力拔桩。同时搭配沉降监测仪,在围堰转角及中间部位各布设 3 个监测点,实时监测围堰沉降,监测精度控制在 1 mm 内,连续监测 30 分钟无异常后再开始拔桩。拔桩前先连接振动锤及钢板桩顶部,然后使用“振动—提升”交替模式,振动 30 秒后以 0.5 m/min 的拔桩速度提升,过程中应用智能应力监测模块实时反馈拔桩力度,力度超过 350 kN 停止提升,继续振动减阻,避免力度过大损坏钢板桩。钢板桩拔除后,工作人员可以用起重机将桩体平稳转运至指定场地,转运过程中在桩身两侧加装软质护垫,防止转运时碰撞造成二次损坏。到达场地后,采用高压水枪冲洗桩身,从桩顶至桩底均匀冲洗,彻底清理桩身附着的混凝土残渣,之后用 2 m 靠尺检测桩身弯曲度,检测合格后做好标记。对弯曲的桩体冷弯修整,冷弯时控制弯曲速度,缓慢施加外力,冷弯半径控制在 1 200 mm,修整后再次检测。修整后在桩身表面均匀涂抹环氧富锌底漆,底漆厚度控制在 80 μm,底漆干燥 2 小时后再涂刷面漆,面漆厚度控制在 40 μm。

3 结束语

钢板桩围堰施工技术是港航工程岸坡开挖的保障,其应用可解决复杂地质条件下围堰失稳、渗漏等难题,对提升施工质量具有积极作用,同时还能降低施工成本,减少对周边环境的影响。在实际施工中,工作人员需严控各环节质量,注重技术适配并实时监测,强化人员专业素养,保障技术规范落地。未来,还需结合绿色化发展趋势,优化技术工艺并融合新型施工设备,助推钢板桩围堰技术升级,为我国港航工程高质量发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 朱雪飞,严承俊.动水压力作用下承台基础锁口钢板桩围堰设计与施工技术[J].土木工程与绿色建筑,2026,02(01):52-55.
- [2] 兰文斌.深水工况下钢板桩围堰新型防水加固结构的设计与应用[J].青海交通科技,2025,37(04):40-45.
- [3] 杨熠.无内填土双排钢板桩围堰结构的受力特性与适用性研究[J].现代工程科技,2025,04(23):57-60.
- [4] 杨善亮,李洋,李三虎.富水软土深基坑钢板桩围堰隔离拆除废弃箱涵施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(30):132-134.
- [5] 何荣飞.复杂地形条件下公路桥梁超长钢板桩围堰结构优化设计研究[J].交通科技与管理,2025,06(20):70-72.

基于流水施工技术的建筑施工管理要点分析

周胜兵

(杭州滨江房产建设管理有限公司, 浙江 杭州 310016)

摘要 为适应建筑行业转型升级需求, 破解传统施工模式中工期冗长、资源浪费、工序衔接不畅等难点, 提升建筑施工管理精细化水平, 实现工程项目提质增效目标, 本文分析了流水施工技术在建筑施工管理中的管控要点。分析认为, 流水施工技术是实现建筑工程集约化施工、提升管理效能的核心手段, 其应用效果取决于管控要点的落实程度与管理体制的完善性。建议通过完善施工组织设计提升规划精度, 健全现场管理机制强化过程管控, 强化施工人员素养夯实技术基础, 加强多方协同配合提升整体效能, 推动流水施工技术充分发挥应用价值, 为建筑行业高质量发展提供参考。

关键词 流水施工技术; 建筑施工管理; 施工组织设计; 进度管控

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.034

0 引言

建筑行业是国民经济发展的重要支柱产业。随着行业转型升级的持续推进, 工程项目的建设规模不断扩大, 结构形式愈发复杂, 市场对工程建设的工期、质量、成本、安全等维度的管控要求也持续提升。传统依次施工、平行施工模式已难以适配新时期建筑工程项目的管理需求, 极易出现工期延误、资源配置失衡、工序交叉冲突等问题, 制约工程项目综合效益提升。流水施工技术以作业面的合理划分为基础, 通过工序的科学搭接与资源的统筹调配, 实现各专业班组的连续均衡作业, 能够在保障施工质量的前提下有效压缩整体工期, 提升资源利用效率, 降低施工管理成本。精准把握建筑施工管理中流水施工技术应用的核心要点, 持续优化管理体系与实施路径, 能够最大化发挥流水施工技术的应用价值, 推动建筑施工管理向精细化、高效化、标准化方向转型。

1 基于流水施工技术的建筑施工管理要点

1.1 合理划分施工段落

划分施工段落需要紧密结合建筑工程项目的结构形式、功能分区、设计要求, 保障各施工段的工程量与作业难度大致均衡, 避免因不同施工段的作业量差距过大, 出现班组作业等待或工期延误的问题。同时要充分尊重建筑结构的整体性与安全性, 以建筑结构的自然分界、变形缝、沉降缝等为划分依据, 避免因施工段落划分破坏建筑结构的完整性, 保障各施工段

具备独立完整的作业条件。此外要兼顾施工现场的场地条件与作业环境, 结合垂直运输设备的覆盖范围、材料堆放的场地布局、安全文明施工的相关要求, 优化施工段落的划分范围, 保障各作业班组能够顺畅完成工序流转。还要适配流水施工的节拍设定, 保障施工段落数量与规模能够匹配各专业班组的作业节奏, 为后续连续均衡作业筑牢基础。

1.2 科学排布施工工序

排布施工工序需要全面梳理各施工环节的内在逻辑关系, 明确主导工序与辅助工序的优先级, 保障主导工序能够实现连续不间断作业, 避免因辅助工序的干扰打断核心施工节奏。其一, 精准测算各工序的作业时长, 合理设定流水步距, 保障相邻工序、相邻施工段之间能够实现顺畅搭接, 既不会出现工序衔接的空档期, 也不会出现交叉作业的冲突问题^[1]。其二, 统筹不同专业的施工工序, 兼顾土建、安装、装饰等多个专业的作业需求, 提前规划不同专业工序的进场时间与作业范围, 规避不同专业班组交叉作业带来的相互干扰, 保障全专业施工流程的顺畅推进。其三, 提前预判施工过程中的各类潜在影响因素, 在工序排布中预留合理的缓冲空间, 提升施工流程的抗风险能力, 保障整个流水施工体系的稳定性与连贯性。

1.3 精准配置施工资源

配置施工资源需要以划分完成的施工段落与排布确定的施工工序为基础, 精准测算每个施工段、每道

作者简介: 周胜兵 (1984-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 结构工程。

工序对应的劳动力、机械设备、建筑材料的需求规模、需求时间与进场节点,保障资源供给与施工进度计划完全适配,既不会出现资源闲置造成的成本浪费,也不会出现资源短缺造成的工期延误。一方面,建立灵活高效的资源周转机制,统筹不同施工段之间的资源调配,让劳动力、机械设备等可周转资源,能够在各施工段之间实现平稳有序的流转,最大化提升资源的利用效率。另一方面,要建立资源动态跟踪管理体系,实时掌握建筑材料的进场情况、机械设备的运行状态、作业人员的到岗情况,针对资源供给中的异常问题及时调整配置方案,避免资源供给问题打乱流水施工的整体节奏。在此基础上,应兼顾资源配置的经济性与合理性,在保障施工连续推进的前提下,优化资源投入的规模与结构,降低工程项目的综合施工成本。

1.4 动态管控施工进度

管控施工进度需要以流水节拍与流水步距为核心,制定层级清晰、可落地性强的施工进度计划,明确各施工段、各工序的起止时间与关键管控节点,为全流程的进度管控提供明确的参照标准。建立常态化的进度跟踪核对机制,每日统计各工序的实际完成情况,对比分析实际进度与计划进度的偏差,及时识别进度滞后的风险点与诱因,避免局部进度偏差不断累积影响整体工期。针对出现的进度偏差,在不破坏整体流水施工节奏的前提下,通过优化工序搭接方式、补充作业资源、调整作业班次等方式,快速修正进度偏差,保障整体施工进度能够回归计划轨道^[2]。还要充分考虑天气变化、政策调整、市场波动等外部不可控因素的影响,提前制定针对性的应对预案,避免外部突发因素打乱流水施工的整体部署,保障工程项目工期目标的顺利实现。

1.5 全程监管施工质量

监管施工质量需要结合流水施工连续作业的特性,将质量管控要求贯穿施工全流程,避免前道工序的质量隐患传递至后续工序,造成质量问题的累积与扩大。首先,明确各施工工序的质量管控标准与验收要求,结合国家规范、设计文件与项目建设目标,细化各工序的质量管控指标,将质量管控责任落实到具体的管理岗位与作业班组,实现权责清晰的全流程质量管控。其次,建立严格的工序交接验收制度,前道工序完成后,必须经过质量验收确认符合标准要求,方可移交至下道工序的作业班组,未通过验收的工序必须限期完成整改,杜绝带质量问题进入下一道施工环节^[3]。此外,

加强施工过程中的常态化质量巡检,针对流水施工中的关键工序、隐蔽工程、高频作业环节,加大巡检频次与监管力度,及时发现并整改施工过程中的质量隐患,将质量问题消除在萌芽阶段。最后,增强作业人员的质量意识与规范操作能力,将质量管控要求融入日常技术交底与班组培训,从施工源头规避违规操作带来的质量问题,保障流水施工在提升作业效率的同时,牢牢守住工程建设的质量底线。

2 优化流水施工管理的可行建议

2.1 完善施工组织设计,提升管理规划精度

以流水施工技术为核心全面完善施工组织设计的编制与落地流程,提升施工管理前期规划的精准度和可行性。在施工组织设计编制阶段需深入勘察施工现场的实际条件,全面掌握工程的结构特点、建设要求和各类约束条件,将流水施工的段落划分、工序排布、资源配置等核心内容,全面融入施工组织设计的各个环节,保障施工组织设计能够直接指导流水施工的全流程落地实施。同时,细化施工组织设计中的各项管控指标,明确流水节拍、流水步距、资源周转周期等关键参数的设定依据和管控要求,避免规划内容与现场实际作业情况出现脱节^[4]。此外,建立施工组织设计的动态调整机制,当施工过程中出现重大影响因素时,要结合流水施工的实际推进情况,及时优化调整施工组织设计内容,保障规划方案始终能够为现场施工管理提供有效的指引。在此基础上,加强施工组织设计的全层级交底工作,将规划内容和管控要求全面传递给现场管理团队和一线作业班组,保障各项规划要求能够落实到施工的各个环节。

2.2 健全现场管理机制,强化施工过程管控

围绕流水施工的全流程作业特性健全施工现场的全周期管理机制,强化施工过程中的精细化管控力度,保障流水施工的各项要求落地见效。首先,要建立权责清晰的现场管理责任体系,明确各管理岗位在流水施工段落管控、工序衔接、资源调配、进度跟踪、质量监管等环节的具体职责,实现全流程管理的全覆盖,避免出现管理盲区或责任推诿的情况。其次,完善现场施工的常态化管理制度,规范工序交接、资源调配、进度上报、质量验收等各个环节的管理流程,保障流水施工连续作业过程有明确的制度规范作为支撑^[5]。同步建立施工现场的问题快速处置机制,针对流水施工过程中出现的进度偏差、质量隐患、资源供给问题等,明确问题上报、处置、复核的全流程要求,缩短问题

处置的响应时间,避免局部问题影响整个流水施工的节奏。最后,强化现场管理的数字化赋能,借助信息化管理工具,实现施工进度、资源配置、质量验收等信息的实时同步,提升现场管理的效率和精准度。

2.3 强化施工人员素养,夯实技术实施基础

聚焦流水施工技术的落地要求全方位强化施工管理人员和一线作业人员的综合素养,为技术的高效实施筑牢坚实的人才基础。首先,针对现场管理团队开展系统化的流水施工技术专项培训,深化管理人员对流水施工核心逻辑、管控要点、优化方法的理解,提升管理人员在施工段落划分、工序排布、资源调配、动态管控等环节的专业能力,保障管理团队能够精准把控流水施工的全流程管理要求。同时,加强一线作业班组的技能培训和交底,针对流水施工的连续作业要求,明确各工序的作业标准、操作规范和衔接要求,提升作业人员的专业操作能力和工序衔接意识,保障各道工序能够按照计划节奏高质量完成^[6]。此外,建立完善的人员考核与激励机制,将流水施工的进度目标、质量要求、成本控制指标等,与管理人员和作业人员的绩效考核直接挂钩,激发全员参与施工管理优化的主动性和积极性。还要注重专业技术人才的引进和培养,搭建阶梯式的人才培养体系,持续提升施工团队的整体专业水平,适配流水施工技术不断升级的管理要求。

2.4 强化多方协同配合,提升整体管理效能

立足建筑工程项目的全参与方视角强化建设、设计、施工、监理、材料供应等多方主体的协同配合,破除各环节的信息壁垒,提升流水施工管理的整体效能。首先,建立常态化的多方沟通协调机制,固定沟通频次和核心沟通内容,及时同步流水施工的推进计划、进度节点、管控要求,以及施工过程中出现的需要多方协调解决的问题,保障各参与方的工作节奏能够与流水施工的整体计划相适配。可借鉴陶岔管理处防汛加固项目的具体实践,该项目建立“日调度、周研判、月复盘”机制,倒排工期将总体施工任务分解为可量化的节点目标,针对天气等不利因素动态调整施工工序,建立工序衔接机制实现各作业面无缝流转,并采用小型履带式混凝土搅拌车解决狭窄作业面浇筑难题,最终比计划工期提前12天完工^[7]。在此基础上,推动设计环节与施工环节的深度协同,设计单位要结合流水施工的作业要求,优化设计图纸的出图节奏和内容深度,提前解决设计图纸中的潜在矛盾点,避免

因设计变更或图纸问题打乱流水施工的整体部署。此外,加强与材料设备供应单位的协同联动,根据流水施工的进度计划,精准制定材料设备的采购计划和进场时间,保障材料设备能够按时按需进场,避免因材料供应延误影响工序的正常推进。最后,还要强化施工单位与监理单位的协同配合,提前明确各工序的验收标准和验收流程,优化工序交接验收的效率,缩短验收环节的等待时间,保障流水施工的工序衔接更加顺畅。

3 结束语

流水施工技术凭借其连续作业、高效统筹、资源集约等优势成为建筑施工管理提质增效的核心技术之一。施工段落的合理划分、施工工序的科学排布、施工资源的精准配置、施工进度的动态管控、施工质量的全程监管是流水施工技术落地过程中必须牢牢把控的核心要点。在此基础上,通过完善施工组织设计、健全现场管理机制、强化施工人员素养、强化多方协同配合等路径,能够进一步优化流水施工的管理体系,破解施工过程中的各类难点问题。随着建筑行业持续发展,未来建筑施工将对施工管理的精细化、高效化、标准化水平提出更高要求,牢牢把握流水施工技术的核心管理要点,持续优化管理模式与实施路径,能够有效提升建筑工程项目的综合管理水平,为建筑行业的高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 邵冠男. 建筑施工管理中流水施工技术应用措施[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 386-388.
- [2] 王振强. 土建工程中流水施工技术在施工管理中应用的优化措施[J]. 价值工程, 2023, 42(30): 36-38.
- [3] 张田庆, 鹿拓, 李洪, 等. 流水施工技术在建筑工程施工管理中的运用策略试析[J]. 中国住宅设施, 2021(09): 124-125.
- [4] 崔庆贺. 浅析建筑工程管理中流水施工技术的应用与实践[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(04): 14-16.
- [5] 刘帅, 郑建凯. 流水施工技术在土建工程施工管理中的应用[J]. 散装水泥, 2022(03): 91-93.
- [6] 曾云枫. 流水施工技术在建筑工程项目管理中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2021(12): 56-57.
- [7] 中华人民共和国水利部. 以项目之进促工程之稳[EB/OL]. (2025-05-13). http://nsbd.mwr.gov.cn/zw/gcjs/202505/t20250513_1886273.html.

基于水泥搅拌桩的市政道路软弱地基加固施工

薛 宇

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200030)

摘 要 软弱地基具有含水率高、压缩性大、承载力低等特点, 是市政道路工程中常见的工程难题, 易引发路基沉降、路面开裂等病害。水泥搅拌桩凭借施工速度快、加固效果好、对周边环境影响小等优势, 已成为软弱地基加固的主流技术。本文从物理化学反应、力学性能改善、排水固结三个方面阐述水泥搅拌桩加固机理, 论述桩位定位、桩机就位、搅拌下沉、提升搅拌、二次搅拌及桩头处理等全流程施工工艺, 并针对桩体强度不足、桩头松散、桩体垂直度超标等常见质量问题提出控制措施, 以期为市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工提供技术参考。

关键词 市政道路; 软弱地基; 水泥搅拌桩

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.035

0 引言

随着我国城市化进程加快, 为满足日益增长的交通运输需求, 新建大量市政道路工程、城市路网体系愈发完善, 有助于缓解交通拥堵问题和促进国民经济发展。但在工程建设阶段, 常遇到软土分布区域, 软弱地基天然承载力低、压缩性高、稳定性差, 若处理不当, 极易造成路基不均匀沉降、路面破损、结构失稳等问题, 严重影响道路使用寿命与行车安全。水泥搅拌桩凭借工艺成熟、适用范围广、施工经验丰富、技术标准明确的突出优势, 成为软弱地基首选加固技术, 加固效果完全满足市政道路地基质量要求, 对保障道路长期安全稳定运行具备重要的现实意义。

1 软弱地基水泥搅拌桩加固机理

1.1 物理化学反应

软弱地基具有高压缩性, 其由大量松散土体组成, 密集分布孔隙, 实际含水率偏高, 在上部荷载作用下, 持续压缩土层体积, 最终出现整体沉降、局部差异沉降问题。在水泥搅拌桩加固期间, 以水泥干粉或水泥浆作为固化剂, 搅拌成桩后持续喷射固化剂, 强制搅拌土体颗粒与固化剂, 二者进行一系列物理化学反应, 以氢氧化钙、硅酸钙、铝酸钙作为水化产物, 水化产物和土体本身含有活性成分进行二次反应, 最终生成大量稳定胶凝体来填充土层孔隙, 将松散土体颗粒胶结形成整体结构, 带动地基土体强度、抗渗性和稳定性全面提升^[1]。

1.2 改善力学性能

软弱地基力学性能明显差于普通地基, 其抗剪强度不足, 实际承载力普遍低, 在施工荷载作用下, 出

现局部剪切破坏、整体剪切破坏、地基滑动失稳等问题。同时, 软弱地基还存在压缩性大、变形量大、工后沉降超标、稳定性差等问题。水泥搅拌桩加固期间, 通过改善地基力学性质, 彻底解决上述问题, 从源头上消除地基不均匀沉降隐患, 确保地基长期稳定状态。一方面, 水泥土搅拌桩具备较高强度, 包括抗弯强度、抗压强度以及抗剪强度, 作为复合地基体系, 桩体承受绝大多数竖向荷载, 桩间土体仅承受少量荷载, 显著改善地基土体受力状态, 预防剪切破坏和压缩变形问题发生, 进而提升地基承载能力。另一方面, 水泥搅拌桩长效约束周边土体侧向变形, 保证地基整体沉降量和局部差异沉降量不超出允许值。

1.3 排水固结

软弱地基含水率过高, 内部存有大量难排出的孔隙水, 在上部施工荷载与交通荷载长期作用下, 孔隙水与空气被持续挤出, 地基缓慢持续沉降, 最终引发工后沉降超标问题。在水泥搅拌桩加固期间, 可以提前加速完成固结沉降过程, 预计可以减少 80% 以上的工后沉降量。具体来讲, 搅拌桩机运行期间, 搅拌叶片高速切削地基土体, 破坏原状结构, 形成大量排水通道, 叠加桩机自身重量与其他施工荷载, 引导地基孔隙水向外排出, 直至地基土体彻底固化。

2 市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工关键技术

2.1 桩位定位

桩位定位环节, 现场架设全站仪和水准仪, 查阅设计图纸, 确认桩基整体布局方案和已知坐标控制点, 现场建立测量控制网, 逐一测设各处桩位, 桩位中心

作者简介: 薛宇(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政道路。

点插入短钢筋作为施工标志, 周边放置标识牌, 标注桩位编号、桩长、桩径、固化剂用量等施工信息。全部桩位测设完毕后, 对照控制网坐标, 复核确认放线定位成果是否有误, 以桩位偏差、间距、排列形式作为复核内容, 及时调整不合格桩位, 如要求所有桩位的位置偏差小于 50 mm^[2]。

2.2 桩机就位调整

桩位定位完毕后, 现场配备深层搅拌桩机, 按照软弱地基深度来选择桩机型号, 软基厚度不足 15 m 和超出 15 m 时, 分别配备单轴搅拌桩机与双轴搅拌桩机, 并在狭窄路段等特殊位置选用小型搅拌桩机。确认水泥土搅拌桩成桩顺序, 桩机部署在首处桩位, 提前对施工场地进行平整硬化处理, 桩机位置上浇筑混凝土刚性基础或是摆放厚钢板来分散受力, 测量调整桩机位置, 以安装位置、水平度和垂直度作为调整内容, 初步调整支撑腿高度来保持机身水平状态, 桩机两侧架设经纬仪, 继续调整桩架垂直度, 要求桩架和地面相互垂直, 最终复核确认桩机位置是否准确无误。正常工况下, 以搅拌头和桩位中心点完全重合、桩机垂直度误差小于 1%、水平度误差小于 0.3% 作为合格标准。

2.3 搅拌下沉

搅拌下沉环节, 确认各项准备工作完成后, 启动深层搅拌桩机, 向下强制搅拌地基土体, 破坏土体原状结构, 一次性完成单桩搅拌下沉作业, 下沉深度误差不超过 ± 50 mm, 搅拌头彻底穿越软弱土层并抵达设计持力层位置。为实现精细化施工目标, 确保地基土体充分破碎, 严格控制施工参数, 核心参数包括下沉速度、搅拌速度和下沉深度, 控制方法如下。第一, 下沉速度。根据岩土勘察报告来掌握地质构造情况, 确认不同地层分界位置, 按照地层种类, 动态调整桩机下沉速度, 整体下沉速度保持在 0.5 ~ 1.0 m/min, 穿越淤泥层和淤泥质土层时的下沉速度放缓至 0.5 ~ 0.8 m/min, 穿越含砂层时把下沉速度提升至 0.8 ~ 1.0 m/min。如果中途穿越 10 cm 以上厚度硬夹层, 单纯提升下沉速度, 无法有效穿越硬夹层, 暂停下沉作业, 使用小型破碎锤强制破除硬夹层, 搅拌头在硬夹层上方 1 m 位置重新开展旋转下沉作业^[3]。第二, 搅拌速度。搅拌头下沉期间, 始终保持旋转状态, 整体旋转速度保持在 20 ~ 30 r/min, 中途根据土层性质进行调整, 穿越淤泥 / 淤泥质土层和含砂层时, 分别把旋转速度控制在 25 ~ 30 r/min 和 20 ~ 25 r/min, 搅拌转速和地层含水率呈反比例关系。第三, 下沉深度。施工人员提前在桩架上涂刷红色油漆来标记设计桩长刻度, 搅拌下沉过程中, 安排专人跟踪观察刻度变化情况, 周边架设水准仪辅助测量搅拌头下沉深度, 确认实际下沉

深度即将抵达刻度值后, 酌情放缓下沉速度, 深度偏差不得超过 ± 50 mm, 并控制搅拌头在设计持力层位置预停留 30 ~ 60 s, 原位保持旋转状态, 同步向周边土体喷射 1.5 ~ 2 g/cm³ 浓度的水泥浆。

2.4 提升搅拌

提升搅拌环节, 同步控制搅拌头匀速向上提升并连续喷射水泥浆, 强制混合固化剂与土体颗粒, 为二者进行物理化学反应创造良好条件。在正常工况下, 将提升速度精准控制在 0.8 ~ 1.2 m/min, 搅拌转速保持在 20 ~ 30 r/min, 持续提升至桩顶设计标高上方 0.5 ~ 1.0 m, 要求中途不得中断作业, 并把每米桩长水泥浆用量误差限制在 5% 以内。从现场实操角度来看, 确认搅拌头下沉就位并原位搅拌 30 ~ 60 s 后, 衔接开展提升搅拌作业, 水泥浆保持 0.4 m³/min 速度输送至搅拌头, 控制搅拌头向上旋转提升, 提升旋转方向和下沉旋转方向保持一致, 中途定期检查浆液浓度, 要求浓度误差不超过 0.1 g/cm³, 并在搅拌头提升到桩顶上方 0.5 m 位置后暂停提升, 持续输送 30 ~ 60 s 水泥浆, 保证桩顶部分浆液充足, 避免后出现桩顶松散病害。

2.5 二次搅拌

结合往期市政道路工程施工案例来看, 软弱地基加固效果和搅拌成桩速度有着密切联系, 如果采取单次搅拌工艺, 极易出现水泥浆局部富集现象, 未能彻底破碎桩周土体结构, 伴随出现桩身夹泥、局部水泥用量不足等多项缺陷病害, 实际成桩强度和结构整体性达不到设计预期。为解决上述问题, 必须采取二搅二喷工艺, 首次搅拌结束后, 重复操作过程, 再次控制搅拌头旋转下沉至桩底持力层位置, 提升搅拌至桩顶上方 0.5 ~ 1.0 m 位置, 全程连续作业, 严禁中途停止。从现场实操角度来看, 二次下沉搅拌速度、提升搅拌速度和第一次保持一致, 搅拌转速同样保持在 20 ~ 30 r/min, 首次提升搅拌结束后, 立即关闭水泥浆输送泵和开展二次搅拌下沉作业, 前后次搅拌间隔时间不超过 30 min, 并在二次提升步骤再次启动水泥浆输送泵, 输送量保持在 0.3 ~ 0.5 m³/min。如果中途因设备故障等突发情况导致二次搅拌作业中断, 等待问题妥善解决后, 搅拌头保持在中断部位下放 1.5 m 位置, 重新开展二次搅拌作业^[4]。

2.6 桩头处理

二次搅拌结束后, 静置一段时间, 等待水化反应进行, 并在施工结束 24 ~ 48 h、确认桩体强度超过 30% 设计值后, 着手凿除桩头超高部分, 把桩顶修整成光滑、平整和坚实状态。从实操角度来看, 组合采取机械清除和人工清除方式, 现场准备小型破碎锤和风镐作为工器具, 轻轻铲除桩头超高部分, 单次清除厚

度控制在 50 ~ 100 mm, 完整露出内部坚实水泥土。周边架设水平仪, 测量桩头表面平整度, 要求平整度误差小于 5 mm, 使用 1:2 水泥砂浆对偏差部位进行修补找平处理, 以桩头标高误差小于 ± 20 mm 作为合格标准。

3 市政道路软弱地基水泥搅拌桩加固施工控制策略

3.1 桩体强度不足

软弱地基核心问题在于强度水平不足, 如果桩体强度低于设计值, 将会直接影响到软基加固处理效果, 无法稳定承受上部荷载, 最终引发道路不均匀沉降等质量病害发生。根据现场施工情况来看, 桩体强度不足主要由于土体颗粒与固化剂搅拌不均匀, 未能保持混合状态, 不同部位的水泥水化进程存在显著差异, 局部缺少足够胶凝体来胶结土体颗粒, 形成原因包括搅拌速度超标、下沉提升速度不匹配、搅拌时间鼻祖、省略二次搅拌步骤。为预防此项问题发生, 严格控制搅拌参数, 正常工况下, 把搅拌头旋转速度固定保持在 20 ~ 30 r/min, 搅拌下沉速度和提升速度分别保持在 0.5 ~ 1.0 m/min 和 0.8 ~ 1.2 m/min, 要求各根桩身实际搅拌时间必须超过 95% 设计时长^[5]。同时, 强化二次搅拌工序, 以桩体中部、底部作为易搅拌不充分区域, 重点开展二次搅拌作业, 彻底消除蜂窝、离析缺陷。

3.2 桩头松散

桩头松散问题表现为桩头水泥土软弱松散, 伴随出现裂缝、蜂窝等质量病害, 且桩头实际强度水平低于设计值, 后续在上部荷载作用下, 桩头部位破损失效, 致使传力路径中断。此项问题的核心主因在于养护不到位, 形成原因包括养护时间滞后、总体养护时长不足、受外力干扰导致养护措施失效, 因胶凝体形成数量不足而导致桩头强度下滑。为预防桩头松散问题发生, 等待桩头处理完毕后, 要求施工人员即刻开展养护作业, 在桩身外部部位上完整覆盖湿润土工布或是塑料薄膜, 不得存在裸露部位, 顶部覆盖重物压实保湿材料。常温环境和低温环境下的养护时间分别超过 7 d 与 14 d, 如果环境温度超过 30 °C, 中途多次开展洒水作业, 洒水频率保持在 12 h/次。

3.3 桩体垂直度超标

桩体垂直度超标问题表现为桩体向一侧倾斜, 垂直度误差大于 1%, 致使复合地基体系受力失衡, 因局部集中受力而引发桩体断裂等一系列问题。此项问题的核心主因在于桩机就位错误, 随意把深层搅拌桩机摆放在各处桩位上, 未能严格遵循操作规范来校准机身水平度与桩架垂直度, 因机身倾斜、桩架偏移而导致桩体倾斜。针对此项问题, 一方面, 复核确认桩机位置姿态是否正确, 操控水准仪校准机身水平度, 操

控经纬仪校准桩架垂直度, 支撑底部垫设钢板分散受力, 确认桩机位置无误后, 才能开展搅拌成桩作业。另一方面, 优化施工场地条件, 正式开工前, 彻底平整施工场地, 清理淤泥、回填土等易沉降区域, 对桩机摆放位置的表层场地进行夯实处理, 要求场地承载力满足桩机运行要求, 避免后续出现地基沉降、桩机倾斜失稳问题。

3.4 桩身断浆与夹泥

桩身断浆、夹泥是一种典型的连续破坏形式, 其产生的主要原因是桩身承载力急剧下降和整体受力不连续, 且在后期容易发生不均匀沉降。其原因是注浆管路堵塞、浆液供给中断、下沉与提升速度过快、土体搅拌不彻底, 造成桩身出现无浆段、夹泥层、蜂窝松散等现象, 严重影响桩基整体性能。为此, 在注浆之前, 要对注浆泵、管道和搅拌头密封性进行检查, 以保证灌浆顺利进行; 同时严格按照“二搅二喷”流程进行, 不能在施工过程中随意中断; 控制下沉、提升速度与注浆量的配合, 确保浆液和土体的充分混合^[6]。如遇突发情况, 应将其搭接长度控制在 1.5 m 以内, 以保证上下桩段有效连接。通过对注浆的连续性和均匀性的全程控制, 可以有效消除断浆和夹泥的隐患, 确保桩身的完整性和密实度。

4 结束语

水泥搅拌桩技术特征高度契合市政道路软弱地基加固需求, 大幅强化地基承载能力和解决工后沉降问题的同时, 还能缩短工期时间和保护周边环境免遭严重扰动。施工单位应大力推广水泥搅拌桩技术, 主动贴合软弱地基加固需求, 量身定制市政道路软基水泥搅拌桩加固施工方案, 主动采取技术措施来解决桩体强度不足、桩头松散、桩体倾斜等常见问题, 为软基加固效果提供技术保障。

参考文献:

- [1] 刘然. 水泥搅拌桩在城市道路软基处理中的应用分析[J]. 中华建设, 2024(01):111-113.
- [2] 荣伟. 水泥搅拌桩在市政道路软基施工中的标准化应用实践[J]. 中国水泥, 2025(02):106-108.
- [3] 孙国著. 水泥搅拌桩在道路软基施工中的应用实践[J]. 运输经理世界, 2025(15):22-25.
- [4] 林铨. 水泥搅拌桩在道路软基处理中的应用[J]. 大众标准化, 2025(23):146-148.
- [5] 李建辉. 基于水泥搅拌桩的高效市政道路软弱地基加固技术研究[J]. 建筑机械, 2025(12):324-327.
- [6] 赵迪. 水泥搅拌桩在高速公路软土地基处理中的应用与质量检测[J]. 运输经理世界, 2025(35):13-15.

建筑工程绿色施工技术体系构建与实践分析

丁天

(临沂市罗庄区住房和城乡建设局, 山东 临沂 276017)

摘要 在“双碳”目标与建筑业高质量发展双重驱动下,绿色施工已从理念倡导转向系统化实施阶段。本文针对当前施工过程中技术碎片化、管理脱节等问题,提出构建覆盖施工全周期的技术体系,涵盖能源高效利用、水资源循环、材料资源化、污染防控及智慧化管理等关键路径。该体系在某三甲医院综合楼项目中落地应用,通过铝模爬架体系减少木材消耗、雨水与中水回用实现节水23%、建筑垃圾资源化利用率达39.6%,同步降低扬尘与噪声扰民。实践表明,绿色施工在控制环境负荷的同时,可产生显著经济效益与社会认可度,为建筑企业实现绿色建造常态化提供可行范式。

关键词 绿色施工技术体系; 资源节约; 环境保护

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.036

0 引言

建筑业作为资源消耗与碳排放的重点领域,其施工阶段的环境影响长期被低估。传统建造模式重进度、轻生态,导致能源浪费、材料损耗与环境污染问题突出,难以适应生态文明建设与“双碳”战略的新要求。尽管《绿色施工导则》《建筑与市政工程绿色施工评价标准》等制度框架已逐步完善,但多数项目仍停留在标语式宣传或局部技术点缀,缺乏贯穿设计、施工到验收的技术支撑。尤其在城市密集区建设项目中,施工活动与居民生活的空间冲突日益加剧,对降尘、降噪、节水、减废提出更高标准。如何将绿色理念转化为可操作、可量化、可复制的技术路径,成为行业亟需解决的现实课题。

1 绿色施工的内涵要求与政策导向

1.1 绿色施工的基本概念与核心原则

绿色施工是指在确保工程质量安全的前提下,通过科学组织、技术创新与精细化管理,在施工全过程中最大限度地节约资源、减少对环境的负面影响,并实现经济、社会与生态效益协调统一的建造方式。其本质并非简单增加环保投入或增设治理设施,而是将可持续发展理念深度融入施工组织的各个环节,推动建造活动由高消耗、高排放向集约化、低扰动转型^[1]。

绿色施工的核心原则是“四节一环保”,即节能、节地、节水、节材与环境保护。其中,“四节”强调对能源、土地、水和材料等关键资源的高效利用,避免浪费;“环保”则聚焦于控制施工过程中的扬尘、噪声、污水、建筑垃圾及光污染等环境负荷。

1.2 国家及行业相关政策法规演进

我国对绿色施工的制度化推进始于二十一世纪初。2007年原建设部发布《绿色施工导则》,首次系统提出绿色施工的目标、原则与技术要点,标志着该理念从倡导走向规范。此后,《建筑与市政工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640-2023)的出台,为项目实施效果提供了量化评估依据。近年来,伴随生态文明建设纳入国家战略,“双碳”目标对建筑领域提出更高要求,住建部相继印发《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》等文件,明确将施工阶段的碳排放管控、建筑垃圾减量与再生利用、可再生能源应用等纳入重点任务。地方层面亦加快配套政策落地,多地已将绿色施工达标情况作为工程评优、企业信用评价及施工许可的重要参考。政策体系的不断完善,使绿色施工从自愿性实践逐步转变为强制性或半强制性的行业基本要求,为企业开展系统化技术集成提供了制度保障与方向指引^[2]。

1.3 绿色施工与传统施工模式的本质区别

传统施工模式多以工期、成本、质量为单一目标导向,环境影响常被视为外部成本而被忽视。现场管理侧重于进度控制与安全防范,资源使用粗放,废弃物处置随意,环境扰民问题频发。相比之下,绿色施工将环境绩效纳入项目的核心指标,强调全过程、全要素的统筹协调。其区别一是管理逻辑由“末端治理”转向“源头预防”,如通过优化施工方案减少土方开挖,而非仅依赖洒水降尘;二是技术路径由“孤立应用”转向“系统集成”,如将节水、节材、节能措施与信

作者简介: 丁天(1977-),男,本科,工程师,研究方向:建筑工程。

息化平台联动,形成协同效应;三是价值取向由“短期效益”转向“长期责任”,注重项目对社区、生态与气候的长远影响^[3]。

2 建筑工程绿色施工技术体系的构建

2.1 技术体系的总体框架

绿色施工技术体系的构建需立足于系统性、全过程与可实施性三大原则,形成以“目标导向—过程控制—要素集成”为核心的逻辑架构。该体系以资源消耗最小化、环境影响可控化、综合效益最大化为总体目标;覆盖施工准备、地基与基础、主体结构、装饰装修、机电安装及竣工验收等全周期阶段;围绕节能、节水、节材、节地与环境保护五大核心要素,整合设计优化、工艺革新、材料替代、设备升级与管理协同等多维技术路径。体系并非孤立技术的简单叠加,而是通过标准化流程、量化指标与责任分工,将绿色理念嵌入施工组织设计、专项方案编制、现场交底与过程检查等管理环节,确保各项措施落地见效,最终实现建造活动从“被动合规”向“主动创绿”的转变^[4]。

2.2 节能与能源高效利用技术

施工阶段能源消耗主要集中在临时设施运行与机械设备作业两大领域。在临时设施建设方面,办公区、生活区及加工棚照明应全面采用 LED 光源,其光效高、寿命长,较传统灯具节能 50% 以上,并可配套光感或声控开关实现智能启停。部分项目已在围挡顶部或塔吊平台安装太阳能光伏板,为夜间警示灯、监控设备及小型充电站供电;生活区热水供应优先采用空气源热泵系统,其制热效率可达电热水器的 3~4 倍,显著降低电力消耗。在机械设备管理上,逐步淘汰老旧燃油设备,推广电动混凝土搅拌运输车、电动叉车、电动高空作业平台等清洁能源装备。同时,引入施工机械智能调度系统,基于 BIM 模型与进度计划,优化设备进场时间、作业路径与协同顺序,减少空驶、怠速与重复吊装。对于大型综合体项目,可试点建设工地微电网,整合光伏发电、储能电池与智能配电,实现局部能源自给与峰谷调节,为未来零碳工地积累实践经验。

2.3 节水与水资源循环技术

施工现场用水具有集中性强、水质要求差异大的特点,需分类施策、循环利用。首先,应建设雨水收集系统:在办公区屋面、施工道路两侧设置雨水沟,汇流至沉淀池,经简单过滤后储存于地下蓄水池,用于道路洒水降尘、车辆冲洗及绿化灌溉。其次,推行中水回用:生活区盥洗废水经隔油、沉淀处理后,可用于冲厕或场地清洁;混凝土养护用水鼓励采用覆膜保水工艺,减少直接喷淋。针对深基坑工程,降水井

抽出的地下水若无重金属或化学污染,经三级沉淀后可作为施工补充水源,避免直接排入市政管网造成资源浪费。全面采用高效节水器具,如高压雾化喷头、感应式水龙头、脚踏式冲水阀等。绿化区域应摒弃大水漫灌,改用滴灌带或微喷系统,并结合土壤湿度传感器实现按需供水,实测表明此类措施可使施工期总用水量降低 20%~30%^[5]。

2.4 节材与材料资源化技术

材料损耗控制是绿色施工的关键环节。在设计深化阶段,应充分运用建筑信息模型技术进行三维协同与碰撞检查,提前解决管线冲突,减少返工;对钢筋、模板、砌块等大宗材料进行精细化排料模拟,生成最优下料清单,使钢材损耗率控制在 1.5% 以内,木材损耗率低于 3%。结构体系优先采用高强高性能材料,如 HRB600 级钢筋、C60 以上高性能混凝土,可在满足承载力前提下减小构件截面,节省材料用量。大力推广装配式建造方式,如预制楼梯、叠合楼板、蒸压轻质混凝土墙板等,不仅减少现场模板与支撑体系使用,还可缩短工期、降低扬尘。对于不可避免产生的建筑垃圾,必须实施源头分类:混凝土块、砖瓦类经移动式破碎筛分设备处理后,制成粒径 5~20 mm 的再生骨料,可用于场内临时道路基层、回填垫层或压制非承重砌块;金属、木材、塑料等可回收物交由专业再生企业处理;有害垃圾则单独存放、合规处置。

2.5 环境保护与污染防治技术

施工扰民问题主要源于扬尘、噪声、污水及光污染,需采取系统性防控措施。扬尘控制实行“六个百分百”要求:工地周边 100% 围挡、物料堆放 100% 覆盖、出入车辆 100% 冲洗、施工现场地面 100% 硬化、拆迁工地 100% 湿法作业、渣土车辆 100% 密闭运输。具体技术包括:围挡顶部安装自动喷淋系统,作业面配置移动式雾炮机,裸露土方及时覆盖防尘网或播撒速生草种固土。噪声控制从源头入手,选用低噪声桩机、静压桩工艺替代锤击桩;混凝土泵车加装消音器;合理安排高噪声工序在日间进行,夜间禁止非必要高噪作业。光污染防治主要通过调整照明灯具仰角、加装遮光罩,避免强光直射周边居民楼。施工泥浆须经三级沉淀池处理,上清液回用,底泥脱水后外运;生活污水接入化粪池或一体化生物处理设备,达标后用于绿化或排放^[6]。

2.6 智慧化管理支撑技术

当前,越来越多项目部署物联网监测终端,在工地出入口、作业区、堆场等关键点位实时采集 PM10、PM2.5、噪声、温湿度、水电流量等数据,并通过无线网络上传至绿色施工智慧管理平台。平台可自动生成

日报、周报，对超标数据发出预警，管理人员通过手机APP即可远程查看并派发整改任务。同时，平台集成材料进场台账、建筑垃圾清运记录、能耗统计、绿色施工自评打分等功能，实现全过程留痕与动态评估。部分先进项目已尝试将能耗数据与碳排放因子库对接，初步具备施工阶段碳足迹核算能力，为未来纳入建筑全生命周期碳管理奠定基础。智慧化不仅是技术工具，更是推动绿色施工从“经验驱动”向“数据驱动”转型的核心引擎。

3 绿色施工技术体系的工程实践分析

3.1 工程概况与实施背景

某市新建三甲医院综合楼总建筑面积约9.6万 m^2 ，地上18层、地下2层，采用框架—剪力墙结构，建设周期为2023年3月至2025年6月。项目地处城市建成区，周边分布有居民小区、学校及商业设施，对施工噪声、扬尘及交通组织提出较高要求。同时，建设单位明确将创建“省级绿色施工示范工程”列为管理目标，并设定具体指标：建筑垃圾回收利用率不低于35%，施工现场节水率不小于20%，主要材料损耗率控制在定额损耗的80%以内。在此背景下，项目部以绿色施工技术体系为指导，系统制定实施方案，将节能、节水、节材、环保等措施融入施工全过程，形成可复制的实践样本。

3.2 绿色施工技术体系的应用措施

在施工准备阶段，项目优化场地布置，采用模块化集装箱式办公用房，减少临时建筑木材与砖混用量；利用原有硬化道路作为施工主干道，避免重复开挖。主体施工阶段，全面推行铝模+附着式升降脚手架体系，较传统木模减少木材消耗约70%，且周转次数高、成型质量好。混凝土浇筑采用地泵+布料机组合，减少罐车频繁进出造成的尾气排放与道路污染。

在资源节约方面，现场设置容积80 m^3 的雨水收集池，屋面及道路雨水经沉淀后用于车辆冲洗与道路洒水；生活区盥洗废水经隔油沉淀后回用于冲厕，实测节水率达23%。材料管理依托深化设计模型进行钢筋与砌块精准排料，钢材损耗率降至1.3%，加气混凝土砌块损耗控制在2.5%以内。建筑垃圾实行“日产日清”，设置专用分类堆放区，混凝土块由合作单位就地破碎制成再生骨料，用于场内临时道路基层，全年建筑垃圾外运量较同类项目减少42%。

在环境保护方面，工地围挡顶部安装自动喷淋系统，作业面配置两台移动雾炮机，裸露土方100%覆盖防尘网并播撒草籽；夜间禁止高噪工序，混凝土浇筑尽量安排在白天，确需夜间连续作业时提前向社区公

告并设置隔音屏障。施工泥浆经三级沉淀池处理，上清液回用，底泥脱水后合规处置。

3.3 实施成效与综合效益评估

在环境效益方面，第三方监测数据显示，施工高峰期PM10日均浓度较周边常规工地低38%；噪声昼间平均值控制在62分贝以下，满足《建筑施工场界环境噪声排放标准》要求；全年节约自来水约1.8万吨，相当于减少碳排放约110吨；建筑垃圾资源化利用率达39.6%，超额完成既定目标。

在经济效益方面，尽管初期在雨水回收系统、电动设备采购等方面增加投入约85万元，但通过材料损耗降低、水电费用节约及垃圾清运成本减少，累计节省直接成本约132万元。其中，钢材与砌块节约费用约68万元，水电费同比下降18%，垃圾外运费减少27万元。投入产出比表明，绿色施工在中长期具备良好的经济可行性。

在社会效益方面，项目因环境管控到位，未收到一起有效扰民投诉，获得周边社区高度认可；2024年顺利通过省级绿色施工中期验收，并被列为市级观摩工地，提升了企业品牌形象与市场竞争力。

4 结束语

绿色施工的本质是将可持续发展理念深度融入建造全过程，而非附加性环保措施的简单叠加。所构建的技术体系以资源高效利用与环境扰动最小化为目标，通过工艺优化、材料革新与智能管控，在保障工程质量安全的前提下，实现生态、经济与社会效益的协同提升。绿色施工的深化需进一步推动与工业化建造、数字化管理的深度融合，健全激励机制与标准细则，强化分包单位协同与一线工人培训。唯有将绿色要求嵌入项目管理基因，使其成为施工组织的内在逻辑而非外部约束，方能真正支撑建筑业绿色低碳转型的长远目标。

参考文献：

- [1] 姚志超,高玉甲.建筑工程绿色施工技术创新路径研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(14):82-84.
- [2] 高伟,王有利,罗乐.医院建筑工程绿色施工管理策略研究[J].中国建筑装饰装修,2025(05):102-104.
- [3] 刘贵宁,王庆良,霍东阁.建筑工程绿色施工技术的应用探究[J].模型世界,2025(19):173-175.
- [4] 张意.建筑工程绿色施工管理创新策略研究[J].内蒙古科技与经济,2025(24):46-48,56.
- [5] 刘凯.建筑工程绿色施工现状分析及推进建议[J].建设机械技术与管理,2025,38(02):125-127.
- [6] 王红,隋东鸣.建筑工程绿色施工技术的现场实施及动态管理[J].砖瓦世界,2025(03):97-99.

地质工程施工过程的斜坡特性及防治技术研究

余超

(安徽圣合建设工程有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 在地质工程施工过程中, 经常会出现斜坡失稳现象, 进而导致崩塌、滑坡、溜塌、蠕滑等风险, 严重影响地质工程施工安全, 甚至会增加工程造价。基于此, 本文以地质工程施工过程的斜坡特性作为切入点, 简要论述斜坡失稳的演化机制与破坏形式, 并以 A 工程为例, 对开挖防控技术、支护防控技术以及排水防控技术进行分析, 旨在为地质工程施工过程的斜坡失稳防治工作提供参考, 确保地质工程安全施工。

关键词 地质工程施工; 斜坡特性; 防治技术; 力学特性; 几何形态

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.037

0 引言

我国社会经济不断发展, 在进行地质工程建设时, 逐步朝着西部偏远山区地带转移, 各类地质工程所处的自然环境愈加复杂和恶化, 易出现斜坡失稳问题, 严重影响地质工程的安全施工。因此, 在施工过程中, 施工人员需要对其斜坡特性和斜坡失稳防治技术加以研究, 以制定较为详细的防治方案, 有效降低斜坡失稳风险, 确保地质工程安全施工。

1 地质工程施工过程的斜坡特性

1.1 力学特性

斜坡的力学特性主要包括三点: 其一, 含水量变化大。在地质施工过程中, 斜坡岩土体会受到地下水的影响, 进而增加其含水量, 从而导致其孔隙度变大, 岩土体软化, 进而出现溜塌问题。其二, 岩土体密实度下降。在斜坡开挖施工中, 经常会开展爆破、回填等工作, 易对岩土体的原有结构造成破坏, 从而使其密实度下降, 影响其稳定性, 存在斜坡失稳的安全隐患。其三, 岩土体力学参数改变。斜坡开挖会对岩土体造成施工扰动, 进而使其抗剪强度下降, 易造成斜坡失稳问题。岩土体内部的含水量大小对其抗冻性具有较大影响, 尤其在北方地区, 冻融循环会降低斜坡岩土体的性能, 从而影响其稳定性^[1]。

1.2 几何形态特性

斜坡的几何形态特性包括四个方面: 其一, 坡高。随着斜坡开挖深度的不断增加, 其坡高越大, 当其高

度超过 20 m 时, 会造成更大的斜坡失稳风险。其二, 坡角。一般而言, 坡角越大, 斜坡所具有的下滑力越大, 从而影响斜坡稳定性。其三, 坡型。斜坡主要包括直线型、折线型、台阶型三种类型, 施工人员可根据施工区域的地质条件和具体的施工要求合理选择坡型。其四, 坡向。阳坡日照时间长, 会导致其岩土体风化过快, 稳定性差。阴坡含水量高, 稳定性差, 易出现失稳状况。斜坡类型会对其稳定性造成影响, 台阶型斜坡可以分散其下滑力, 直线型斜坡适用于坡高较低的区域。

1.3 变形特性

在地质工程施工初期, 是斜坡初始变形阶段, 由于受到开挖施工扰动而造成岩土体出现微小形变, 其变形速度为 0.1 ~ 1 mm/d, 此时斜坡相对稳定。在施工中期, 为斜坡加速变形阶段, 随着施工扰动的加剧, 使其变形速度达到 1 ~ 10mm/d, 易出现斜坡裂缝与下沉问题。在施工后期, 斜坡处于失稳破坏阶段, 其变形速度不低于 10 mm/d, 会造成斜坡岩土体出现整体滑动或崩塌问题, 引发地质灾害, 严重影响施工安全。在地质工程施工过程中, 施工人员应使用专业设备对斜坡的变形速度加以监控, 在初始阶段, 应重点监控其微小形变情况。在施工中期, 施工人员需要对其裂缝和沉降量进行监测记录。在施工后期, 施工人员应设定预警值, 若是发出警报, 需要立即采取支护方案, 以免造成斜坡失稳问题^[2]。

作者简介: 余超 (1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地质工程。

1.4 稳定性特性

斜坡稳定性具有动态变化的特点,会受到施工活动、施工工艺、气候环境、地质条件等方面的影响,施工剧烈程度会影响斜坡稳定度,同时,南方地区降水量较大,易引发岩土体土质疏松,会存在较高的斜坡失稳风险。对北方地区而言,受到寒冷气候的影响,岩土体会出现冻融破坏问题,严重影响其斜坡稳定性。对山区施工区域而言,因其地质条件较为复杂,而造成其岩体破碎,其斜坡失稳风险更高。此外,斜坡的稳定性还与植被覆盖程度息息相关,植被根系对斜坡岩土体具有一定的固定作用,可以避免雨水对斜坡的直接冲刷,若是当地斜坡植被覆盖率较低,会增加其失稳概率。

2 斜坡失稳的演化机制与破坏形式

2.1 演化机制

斜坡失稳为动态演化过程,主要在三个机制相互作用下发生:其一,应力重力分布机制。在斜坡开挖施工中会影响斜坡岩土体的平衡状态,使其应力重新分布,若是应力集中,会造成土体变形开裂。其二,岩土体软化机制。在地下水渗透和雨水冲刷的影响下,水体会逐步渗入岩土体中,从而使其发生软化,有效降低其黏聚力,使其抗滑力下降,进而出现斜坡失稳问题。其三,施工扰动机制。在地质工程施工过程中,需要进行开挖、爆破、荷载施加等作业,对斜坡岩土体造成扰动,破坏其原本结构,降低其强度,从而造成斜坡失稳问题。

2.2 破坏形式

在地质工程施工过程中,斜坡破坏形式分为四种:其一,崩塌。崩塌指的是斜坡土体在自身重力的作用下,岩土体快速脱离母体而进行快速下落或滚动,具有极强的破坏力。其二,滑坡。滑坡是指岩土体在固定的滑动面上进行滑动,其破坏面较大,会导致停工、场地损毁等风险。其三,溜塌。溜塌指的是在雨水和地下水的作用下沿坡面快速流动,其破坏面较小,但会对斜坡造成缓慢侵蚀。其四,蠕滑。蠕滑指的是岩土体在自身重力下出现形变和滑动,其变形速度一般在 $0.1 \sim 1 \text{ mm/d}$ 之间,初期变化不明显,长期发展会造成斜坡失稳^[3]。

3 地质工程施工过程的斜坡失稳防治技术应用

3.1 工程概况

A工程为某山区公路施工项目,该工程全长12 km,其中,K3+200~K3+500路段为斜坡开挖段,斜坡的长

度为300 m,最大坡高为35 m,坡角处于 $40^\circ \sim 45^\circ$ 之间。该斜坡的岩土体大部分为强风化页岩与粉质黏土,是土石混合类型的斜坡。该施工路段所具有的地下水资源十分丰富,地下水位埋深为2~5 m,该施工区域的年降水量超1 200 mm,在施工期间出现斜坡失稳的风险较高。

3.2 防治技术

3.2.1 开挖防控技术

在A工程斜坡开挖过程中,为了能够防治斜坡出现失稳问题,需要制定相应的技术措施。其一,控制开挖顺序与速度。施工人员可通过自上而下的方式进行斜坡的分层开挖,可将斜坡分为3级台阶进行开挖施工,每一级台阶的高度为10~12 m,其宽度为3~4 m,可以解决应力集中的问题。同时,每日开挖深度应限制在2 m以下,每次开挖一级台阶便需要对其进行支护,并做好排水工作,当其稳定后才能继续进行开挖施工。其二,坡角与坡型的优化。为了有效降低斜坡的下滑力,施工人员可将其坡角由 $40^\circ \sim 45^\circ$ 调整为 $30^\circ \sim 35^\circ$,使其稳定性系数提高至1.15~1.20。同时,施工人员还可将斜坡调整为台阶型,并在每级台阶中设置挡水坎,其高度为0.5~0.8 m,不仅可以使径流速度放缓,还能减少雨水的冲刷。其三,优化开挖工艺。在强风化页岩区域进行斜坡开挖时,施工人员可利用光面爆破技术对岩体加以破坏,一般选取2#岩石乳化炸药,确保药卷直径为32 mm,装药密度在 $0.8 \sim 1.0 \text{ kg/m}$ 之间,炮孔间距设置为1.2~1.5 m,排距设置为1.0~1.2 m,孔深设定在2.5~3.0 m之间,并将其爆破振动速度控制在 $0.5 \sim 0.8 \text{ cm/s}$ 之间,以免爆破施工对岩体造成过度扰动,避免斜坡失稳。其四,清理松动岩土体。在每开挖一个台阶后,施工人员可对坡顶和坡面上松动的岩土体进行清理,并及时将其运送至指定弃土场,以免其坠落造成安全事故^[4]。

3.2.2 支护防控技术

为了避免斜坡出现失稳风险,施工人员可通过“锚杆+挂网喷混凝土+抗滑桩”的复合支护方式加以固定。其一,锚杆支护。为了提高斜坡岩土体的整体性,施工人员可选择 $\Phi 25 \text{ mm}$ HRB400E级钢筋作为锚杆,其长度为4.5~5.0 m,锚固段长度控制在3.0~3.5 m之间,自由段长度为1.5~2.0 m。同时,施工人员选择42.5 MPa硅酸盐水泥作为注浆材料,要求其水灰比为 $0.35 \sim 0.40$,注浆压力控制在 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 之间。当水泥强度超过设计强度的70%时,施工人员可安装垫板与螺母,并对其施加15~20 kN的预应力,进而提高

其抗滑作用。其二,挂网喷混凝土支护。为了对斜坡表层岩土体进行有效保护,防止雨水冲刷问题,施工人员可选择 $\Phi 6$ mm HPB300 级钢筋材料制作钢筋网,其规格为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 。在进行钢筋网铺设时,需要紧贴斜坡表面,要求钢筋网之间的搭接长度不低于 10 cm ,并对其进行绑扎固定。在钢筋网铺设结束后,施工人员可向其喷射混凝土,喷射压力为 $0.2\sim 0.4\text{ MPa}$,每段的喷射长度为 $5\sim 8\text{ m}$ 。混凝土喷射结束后,需要养护 7 d ,确保其混凝土强度满足设计要求,从而在斜坡表面形成防护层,以免受到雨水冲刷。其三,抗滑桩支护。为了阻止斜坡岩土体滑动,施工人员可采用抗滑桩支护技术加以防治。施工人员可选择钢筋混凝土现浇桩作为抗滑桩,要求其桩长为 $15\sim 18\text{ m}$,桩径为 1.2 m ,并使其嵌入岩层 5 m 以上,桩间距为 5.0 m ,主要采用直线型进行抗滑桩布置。施工人员可通过回旋钻机钻开直径为 1.3 m 的孔洞,要求孔洞垂直度不超过 1% 。在此基础上,将钢筋笼放置于孔洞内,并进行混凝土浇筑,通过振捣处理后进行混凝土养护,当其强度高于设计强度的 80% ,才能继续进行斜坡开挖施工^[5]。

3.2.3 排水防控技术

为了确保地质工程斜坡的稳定性,施工人员需要采用排水防控技术加以解决。施工人员可通过地表排水、地下排水以及坡面排水的方式进行综合防治,以免对斜坡岩土体带来影响。其一,地表排水。地表排水主要是将斜坡表面与坡顶的雨水进行排出,以免雨水渗透斜坡岩土体内。施工人员可在斜坡顶外侧 $5\sim 8\text{ m}$ 处打造一条截面尺寸在 $0.6\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的截水沟,主要通过浆砌片石加以砌筑,截水沟的坡度为 $2\%\sim 3\%$,方便雨水排放。同时,施工人员可在每级台阶的边缘设置断面尺寸为 $0.4\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 的排水沟,其坡度为 $3\%\sim 5\%$,并与截水沟之间加以连通,方便对坡面雨水进行收集,统一排放至周边排水系统中。其二,地下排水。地下排水主要是对斜坡内部的地下水进行排放,从而有效降低地下水位,减轻孔隙水压力。施工人员可在斜坡内部打造断面尺寸为 $0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}$ 的排水盲沟,并利用碎石对其进行填充,确保随时粒径在 $20\sim 40\text{ mm}$ 之间,要求其含泥量不超过 3% ,盲沟间距为 10.0 m ,并采用梅花的形状加以布置,排水孔倾角设置为 $5^\circ\sim 10^\circ$ 。施工人员通过地下盲沟将地下水引入地表排水系统,有效实现地下水位控制目标。施工人员还可在斜坡下部打造集水井,要求其深度在 $6.0\sim 8.0\text{ m}$ 之间,其直径为 1.5 m ,间距为 20.0 m ,用于存储排出的地下水,并利用水泵将其抽出至地表

排水系统,进而提高地下水位控制效果,以便确保斜坡的稳定。

3.3 应用效果

在 A 工程中,斜坡防治技术的应用取得了良好成效。其一,有效遏制斜坡变形。在施工 1 个月后,斜坡的水平移动速度和垂直移动速度均有所下降,裂缝扩展速度减慢,表面溜塌问题得以控制。施工 3 个月后,水平移动速度和垂直移动速度稳定,裂缝宽度基本不变,斜坡稳定系数提高至 $1.25\sim 1.30$ 。其二,有效控制地下水。通过对排水防控技术的运用使地下水位降低至滑动面以下的 $0.8\sim 1.0\text{ m}$,孔隙内部的水压力明显下降,斜坡岩土体抗剪强度得以恢复。同时,快速排出雨水,有效控制雨水渗漏问题。其三,施工安全得到保障。在多种斜坡防治技术的综合运用下,斜坡状态一直处于稳定状态,未出现崩塌、滑坡、溜塌、蠕滑等现象,确保地质工程安全施工。

4 结束语

在地质工程施工过程中,斜坡防治技术的应用具有重要意义,不仅可以确保斜坡的稳定,还能确保地质工程顺利开展,实现安全施工目标。斜坡主要以崩塌、滑坡、溜塌、蠕滑等形式对地质工程造成破坏,从而威胁施工安全。施工人员需要对其基本情况加以了解,并通过开挖防控技术、支护防控技术以及排水防控技术进行斜坡失稳的防治,有效实现地质工程安全施工目标。未来,施工人员可将 GIS 技术、BIM 技术以及物联网技术融入斜坡失稳防治工作中,打造斜坡数字孪生体,进而将物理实体和数字模型加以交互,有效提高斜坡失稳防治效果。

参考文献:

- [1] 夏晨皓.自然灾害背景下地质工程中的斜坡稳定性分析与预防措施[J].中国减灾,2024(12):56-57.
- [2] 简鹏,李文彦,郭红东,等.基于拟静力法的不同地震工况斜坡单元危险性评价方法研究[J].甘肃地质,2023,32(01):76-86.
- [3] 王冠,刁丽颖,刘国全,等.黄骅凹陷斜坡区耦合控产规律与有序成藏模式[J].录井工程,2021,32(03):130-135,140.
- [4] 王治平,张庆,刘子平,等.斜坡型强非均质页岩气藏高效开发技术:以川南威远地区龙马溪组页岩气藏为例[J].天然气工业,2021,41(04):72-81.
- [5] 高芳芳.斜坡抗滑结构的地质工程分析[J].世界有色金属,2018(02):267-268.

高层建筑大体积混凝土施工裂缝控制技术研究

周志东

(安徽致畅建设有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 高层建筑大体积混凝土因结构厚重、水化热集中, 施工过程中易出现裂缝, 影响建筑结构安全性与耐久性。针对这一问题, 结合高层建筑施工特点, 对裂缝产生的核心影响因素展开分析, 涵盖材料技术参数、施工核心工艺、环境适配与设计技术三大方面。基于影响因素分析, 优化形成材料优化、施工工艺规范、环境适配与设计改进三类核心控制技术, 配套建立材料质量管控、施工过程管控、应急与长效监测三大保障技术, 实现裂缝从源头控制、过程管控到后期处置的全流程防控, 以为高层建筑大体积混凝土施工裂缝控制提供技术参考, 保障工程施工质量。

关键词 高层建筑; 大体积混凝土; 施工裂缝; 裂缝控制; 全流程防控

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.038

0 引言

当前高层建筑向超高化、大型化发展, 大体积混凝土作为核心承重结构, 其施工质量直接关系到建筑安全与长期服役性能。受结构厚重、水化热集中等固有特性影响, 施工期间裂缝隐患频发, 不仅削弱结构承载力, 还会加速钢筋锈蚀, 缩短建筑使用寿命, 成为制约工程质量提升的关键瓶颈。在“双碳”目标持续推进与智能化施工趋势下, 传统控制技术已难以适配复杂工况需求。本文结合当前工程施工新形势, 聚焦裂缝防控难点, 分析其核心影响因素, 优化形成全流程控制技术与保障体系, 为实际工程提供技术支撑, 助力高层建筑施工向安全、高效、低碳方向发展。

1 高层建筑大体积混凝土施工裂缝的核心技术影响因素

1.1 材料技术参数对施工裂缝的影响

混凝土材料技术参数是裂缝产生的内在根源, 直接决定其抗裂技术性能。高层建筑大体积混凝土自身结构厚重、水化热释放集中, 材料参数的细微偏差都可能诱发裂缝, 且裂缝一旦形成, 会逐步渗透延伸, 影响建筑结构的安全性和耐久性。混凝土配合比设计是核心技术参数, 若水泥用量过高、水胶比不合理, 会导致水化热在短时间内大量释放, 混凝土内部温度急剧升高, 而表面温度受环境影响降温较快, 内外温

差超过 25℃时, 内部膨胀与表面收缩产生的拉应力超过混凝土抗拉强度, 直接引发温度裂缝。骨料与掺合料的质量的优劣直接影响混凝土整体抗裂性能, 骨料级配不合理、颗粒级配间断, 会降低混凝土密实度, 导致内部孔隙率增加, 抗裂能力大幅下降; 掺合料活性不足、杂质含量超标, 不仅无法有效替代部分水泥以降低水化热, 还会破坏混凝土内部结构完整性, 加剧裂缝产生。

1.2 施工核心技术对施工裂缝的影响

施工过程中核心技术操作不规范是造成裂缝形成的主要外部原因, 这一情况在整个施工的完整技术流程里都有体现。高层建筑里大体积混凝土的施工流程本身就比较复杂, 对技术的要求也比较高, 任何一个施工环节里如果出现技术操作上的偏差, 都有可能变成裂缝产生的直接触发点^[1]。浇筑工艺是否合理直接影响到混凝土收缩的均匀程度, 假如没有按照混凝土的浇筑数量、构件的具体尺寸去制定分层分段的浇筑方案, 或者分层厚度太大、分段之间的间隔时间太长, 就会造成下层混凝土已经初步凝结而上层混凝土还在继续浇筑, 两层混凝土之间结合得不够紧密, 形成一个收缩不均匀的接触面, 从而引发裂缝问题; 浇筑速度如果太快会导致混凝土内部的气泡来不及排出, 形成一些孔隙, 降低了混凝土的密实程度, 间接增加了

作者简介: 周志东 (1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

出现裂缝的可能性。振捣操作是保证混凝土密实性的关键步骤，过度的振捣会引起混凝土中骨料下沉、水泥浆向上浮动，出现分层和离析的现象，破坏了混凝土内部结构的连续性，降低了它的抗拉强度，振捣如果不够充分则会让混凝土内部存在空隙、蜂窝之类的缺陷，无法形成一个均匀致密的整体，在外力作用和温度变化影响下就容易产生裂缝。

1.3 环境适配与结构设计对施工裂缝的影响

环境适应性和结构设计本身存在短板，这两方面共同作用使得裂缝更容易产生。高层建筑项目建造时间较长，面对的外界环境复杂且多变，周围条件的起伏波动和设计技术本身存在不合理之处，会把材料还有施工环节里潜藏的问题放大，导致裂缝发生。周围温度湿度和风力的剧烈变动会促使混凝土更快地收缩开裂，温度高的环境会提高混凝土水化反应速度，水化热的释放变得更集中，同时使表面水分蒸发加快，加剧收缩不均匀的现象；温度低的环境则会拖慢混凝土凝结硬化的进程，让它在早期抗拉强度上不去，没有能力去抵抗温度应力带来的裂缝，风力太大会加速混凝土表面失去水分，形成因为干燥收缩造成的裂缝。环境适配方面的技术没有办法根据周围条件的变化来采取有针对性的调控手段，会让环境因素带来的负面效应持续扩大^[2]。结构设计上的不合理会形成应力分布不均匀，高层建筑大体积混凝土构件受力情况本来就复杂，假如在设计过程中没有充分考虑到构件的受力特点，出现截面突然变化、转角过于尖锐等情况，就会导致应力在局部地方过度集中，当应力超过了混凝土能够承受的抗拉强度时，裂缝的隐患就必然会出现。

2 高层建筑大体积混凝土施工裂缝的核心控制措施

2.1 材料优化控制

通过材料技术优化配置，从内在提升混凝土抗裂性能，从源头控制裂缝产生。材料优化是大体积混凝土裂缝控制的基础，核心是通过调整材料技术参数，平衡混凝土强度、工作性与抗裂性，适配高层建筑施工需求。科学设计混凝土配合比是核心优化手段，需结合高层建筑大体积混凝土的受力特点和施工环境，合理控制水泥用量，选用低热矿渣水泥等低热型水泥，减少水化热释放总量；优化水胶比，在保证混凝土流动性的前提下尽量降低水胶比，提升混凝土密实度和抗拉强度，同时掺入适量粉煤灰、矿粉等掺合料，替代部分水泥，不仅能降低水化热，还能改善混凝土和易性，减少收缩变形。选用优质骨料、掺合料是提升抗裂性能的关键，骨料选用级配良好、强度高、吸水

率低的碎石或卵石，控制骨料含泥量和杂质含量，避免因骨料质量问题影响混凝土结构完整性；掺合料选用活性高、性能稳定的工业废渣，经过合理配比掺入混凝土中，可填充内部孔隙，增强混凝土界面粘结力，提升整体抗裂能力。合理选用外加剂能有效调节混凝土凝结收缩特性，根据配合比和施工需求，选用适配的缓凝型减水剂，既能延长混凝土凝结时间，避免浇筑过程中出现初凝现象，又能减少用水量，降低收缩量。

2.2 施工工艺控制

规范整个施工流程的工艺技术，优化各项技术参数，减少施工过程中诱发的裂缝。施工工艺控制是裂缝控制的关键环节，核心是借助标准化、精细化操作，规避施工过程中的技术偏差，确保混凝土施工质量。采用分层分段浇筑工艺，结合高层建筑大体积混凝土构件尺寸和浇筑能力，合理划分浇筑层厚和分段范围。一般分层厚度控制在 500 毫米左右，分段间隔时间控制在混凝土初凝之前，确保上下层混凝土紧密结合；控制浇筑速度，匀速推进浇筑作业，避免因浇筑过快导致内部气泡滞留、骨料离析，这样能够控制浇筑温度；避开高温、低温时段施工，浇筑温度控制在 5 ~ 35 ℃ 之间，避免温度波动过大引发裂缝；规范振捣操作，选用适配的振捣设备，采用“快插慢拔”的振捣方式，振捣时间控制在 20 ~ 30 秒，以混凝土表面泛浆、无气泡冒出为宜，杜绝过度振捣和振捣不足，振捣过程中避免振捣棒触碰钢筋和模板，防止破坏钢筋保护层和模板稳定性，确保混凝土密实均匀，提升抗裂性能^[3]。

2.3 环境适配与结构设计优化

运用环境适应手段、改进构造安排方法，来消除裂缝引发条件。增强抗开裂性能，环境适应与构造改进相互配合，这有助于避开环境条件带来的负面作用，也能强化结构本身抗开裂能力，为裂缝管理打下基础。实施专业的保温保湿作业，面对环境温度湿度变动，管理温差裂缝，混凝土浇筑结束以后，立即铺上保温棉被、塑料薄膜这类保温保湿物品。依据环境气温改动保温层厚度，高温气候增多保湿手段，促进水分挥发；低温气候增多保温层，避免混凝土表层受冻，保证混凝土内外温差维持在 25 ℃ 以内，削减温度应力出现。改进构造安排，削减应力聚集，结合高层建筑大体积混凝土的受力特性，改进构件截面安排，避开截面突然变化、转角太尖，对受力集中地带做圆角加工或增加加强钢筋，分散应力分布，降低裂缝出现概率。合理安排伸缩缝、沉降缝，依据建筑高度、构造类型和施工条件，明确伸缩缝间隔和沉降缝地点，保证伸缩缝、沉降缝宽度达到标准要求，可以高效释放混凝土收缩

应力和建筑沉降应力,防止应力积累导致裂缝。

3 高层建筑大体积混凝土施工裂缝控制技术

3.1 材料质量管控技术

运用材料全流程管控技术,确保材料优化技术落地,保障材料抗裂性能。材料质量是裂缝控制的基础,全流程管控能够从源头杜绝不合格材料投入使用,确保材料优化参数得到有效落实。建立材料进场严格验收机制,明确水泥、骨料、掺合料、外加剂等各类材料的验收标准,进场时核对材料出厂合格证、检测报告,对材料的性能指标进行抽样检测,重点检测水泥强度、水化热、骨料级配、掺合料活性、外加剂适配性等关键参数,检测不合格的材料坚决杜绝投入使用,从源头把控材料质量^[4]。加强材料存储、搅拌过程管控,根据材料特性制定针对性存储方案,水泥、掺合料存储在干燥、通风的库房,避免受潮结块;骨料分类堆放,做好防尘、防雨措施,防止杂质混入。搅拌过程中严格按照优化后的配合比计量投料,控制搅拌时间和搅拌速度,确保材料混合均匀,避免因搅拌不均导致混凝土性能波动,确保材料性能稳定。

3.2 施工过程管控技术

运用施工全流程管理手段,对工艺执行加以规范化,让控制技术能够真正落地。施工过程的管控成为保证裂缝控制技术有效推行的核心环节,借助全链条监督、规范化的操作,避开施工中出现的偏差,使施工质量达到规定标准。构建施工各阶段质量检验体系,明确浇筑、振捣、养护等各个阶段的质量检验标准,安排具备专业知识的技术人员全程跟进监督。浇筑开始前查验模板、钢筋安装情况以及混凝土配合比是否落实;浇筑进行中查验浇筑速度、分层厚度、振捣是否到位,及时对违规行为加以纠正,浇筑结束之后查验保温保湿措施有没有落实到位,对查验过程中发现的违规现象,马上停止施工进行整改,保证每个施工环节都满足技术规范要求。提高施工人员的专业能力,围绕大体积混凝土裂缝控制技术、施工工艺规范等主题组织专门培训,重点讲解材料优化、浇筑振捣、保温养护等关键性技术要点,提升施工人员的技术水准和操作规范程度,加强施工人员的责任观念,把各个岗位人员的职责界定清楚,建立岗位责任制度,对违规操作、应付了事的行为采取严厉处置措施,确保施工人员严格依照技术规定进行操作^[5]。

3.3 应急与长效监测技术

完善应急响应和长期监控方法,防止裂缝扩展,保证控制手段落到实处。应急响应可以快速解决施工

期间出现的裂缝风险,长期监控则能持续观察裂缝变化,确保建筑结构在长时间内保持稳定安全,两者搭配构成一套完整的裂缝控制保护系统。制定裂缝应急响应计划,结合高层建筑大体积混凝土裂缝的常见种类和产生根源,说明不同裂缝类型的应急响应步骤和技术方法,对于轻微裂缝,借助表面封闭方式、压力注浆手段等技术马上处理;对于比较严重的裂缝,则准备专门应对方案,防止裂缝继续变大,准备专业应急人员和应急物资,组建专业应急响应队伍,明确应急人员任务,进行应急演练,提高应急响应能力。备好注浆设备、密封材料、保温材料等应急物资,确保裂缝一旦出现能够迅速调配、立即应对,把裂缝风险控制初始阶段。设立裂缝后期跟踪监控机制,对施工过程中产生的裂缝和潜在裂缝风险进行全程跟踪监控,按时检查裂缝宽度、长度和深度,记录监控数据,分析裂缝发展走向,如果发现裂缝出现扩大趋势,立即采取应对措施,避免裂缝进一步发展。

4 结束语

高层建筑大体积混凝土施工裂缝控制是一项系统性工程,需兼顾内在材料性能、施工过程规范与外在环境适配,任何环节的疏漏都可能诱发裂缝隐患。本文围绕裂缝控制核心需求,梳理裂缝产生的关键影响因素,构建的核心控制技术与保障体系,可有效解决施工中因材料、工艺、环境等引发的裂缝问题,弥补传统控制技术的不足。在实际施工中,需结合工程具体工况,灵活调整各项技术参数,强化全流程管控,及时处置裂缝隐患。未来可结合新型材料与智能化监测技术,进一步优化裂缝控制方案,提升控制精度与效率,推动高层建筑大体积混凝土施工技术向更安全、更可靠的方向发展。

参考文献:

- [1] 郭丽.高层建筑大体积混凝土施工及裂缝控制措施[J].城市建筑,2024,21(24):194-196.
- [2] 刘耀龙.高层建筑工程中大体积混凝土施工裂缝防治技术研究[J].工程机械与维修,2024(03):26-28.
- [3] 张骏首,商和松,李建锋,等.建筑工程中大体积混凝土施工裂缝控制技术[J].水泥,2025(09):155-157.
- [4] 郭炎.高层建筑大体积混凝土施工中裂缝控制技术分析[J].佛山陶瓷,2025,35(03):155-157.
- [5] 张庆兰.超高层建筑地下室底板大体积混凝土施工关键技术[J].工程机械与维修,2022(04):172-174.

房建工程高空大尺寸现浇梁板支架 施工技术研究

刘凯昌

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200030)

摘要 随着现代房建工程向大跨度、高层化方向发展, 高空大尺寸现浇梁板已成为结构受力的关键构件, 其支架施工具有受力复杂、高空风险高、精度要求严等特点, 直接关系到结构安全与工程质量。本文以房建工程高空大尺寸现浇梁板支架施工为研究对象, 系统分析其施工特点, 从支架选型、地基处理、支架搭设、模板固定连接等方面阐述关键施工技术与工艺要点, 并提出全流程施工监测、支架稳定性验算等安全保障措施, 旨在为同类大跨度、高支模梁板工程提供技术参考, 有助于提升施工安全性与结构成型质量。

关键词 房建工程; 高空作业; 大尺寸现浇梁板支架; 支架选型; 地基处理

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.039

0 引言

现代房建工程呈现大跨度、高层化发展趋势, 高空大尺寸现浇梁板构件逐渐成为建筑结构体系的核心构件, 负责承受混凝土自重、施工荷载与风荷载, 施工效果关系着建筑结构成型质量。与普通梁板施工相比, 高空大尺寸现浇梁板支架体系受力复杂、作业风险高、搭设与浇筑精度要求严格, 需全面推行标准化施工模式, 持续优化改进高空大尺寸现浇梁板支架施工体系, 提升房建工程高支模施工水平, 保障施工安全与结构质量。

1 高空大尺寸现浇梁板支架施工特点

1.1 支架受力复杂

高空大尺寸现浇梁板支架受力状况复杂, 梁板跨度普遍达到 18~20 m, 支架高度超过 15 m, 梁板端部荷载集中, 支架立杆局部受力集中, 极易出现立杆弯曲变形、支架整体倾斜失稳等施工问题, 受力复杂特性主要体现在荷载类型多样、受力分布不均、受力状态动态变化三方面。其一, 荷载类型多样, 支架同时承受多种荷载, 大致分为垂直荷载与水平荷载, 梁板跨度越大, 荷载规模越大, 对支架体系承载性能提出严格要求。其二, 受力分布不均, 构件各处部位的荷载分布情况未能保持一致, 梁板端部、主次梁交接处和门窗洞口周边集中分布荷载, 构件中间部位荷载相对较小, 间接引起局部杆件变形受损问题^[1]。其三, 受力状态动态变化, 随着施工进度推进, 支架受力状态持续边变化, 混凝土浇筑阶段达到荷载峰值, 必须围绕

不同阶段受力特点选择工艺做法, 采取专项技术方案。

1.2 高空作业风险高

高空大尺寸现浇梁板支架施工过程中, 除基础处理等少数工序环节外, 大多数工序属于高空作业, 在 10 m 以上高空环境开展作业, 施工风险系数远超普通地面作业, 极易出现高处坠落等安全事故。

一方面, 高空作业空间狭小, 施工人员在有限空间内开展多项作业, 如果人员活动空间超出安全范围, 且未能系上安全带, 易发生坠落事故。

另一方面, 高空作业受外界环境影响, 如果中途出现强风、雨雪、雾霾等恶劣天气, 必须停止高空作业, 并对梁板支架和作业平台上堆放的工器具进行加固处理, 无论是继续作业还是加固处理不到位, 都可能发生坠落事故。

1.3 精度要求严格

高空大尺寸现浇梁板在建筑结构体系内作为主要承重构件与围护构件, 对施工精度提出严格要求, 如果施工误差超出设计容许范围, 将会对建筑外立面造型效果、主体结构承载性能造成实质性影响。根据一线施工情况来看, 施工精度要求包含支架搭设精度、模板安装精度和梁板浇筑精度三部分。对于支架搭设精度, 要求立杆垂直度、横杆水平度与步距、扫地杆离地高度、斜撑间距与地面夹角等各项参数都符合设计要求, 如把立杆垂直度误差限制在 3 mm/m 以内, 横杆水皮高度误差限制在 2 mm/m 以内。对于模板安装精度, 包含

作者简介: 刘凯昌(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

平整度、标高、轴线偏差以及接缝宽度,正常工况下,以平整度误差小于5 mm/m、标高误差小于±5 mm、轴线偏差小于5 mm、接缝宽度小于2 mm作为合格标准。而对于梁板浇筑精度,必须采取分层对称浇筑方式,梁板两侧浇筑进度保持一致,分层交错开展浇筑振捣作业,单层厚度不超过500 mm^[2]。

2 房建工程高空大尺寸现浇梁板支架施工关键技术

2.1 支架选型

高空大尺寸现浇梁板构件可选支架型式众多,主要类型包括扣件式钢管支架、盘扣式钢管支架以及碗扣式钢管支架,必须结合工程实际情况,以高空作业高度、施工荷载规模、构件尺寸作为选择构件的主要依据。其中,扣件式钢管支架由钢管、扣件以及脚手板组成,统一选用焊接钢管作为立杆、横杆等杆件,具备材料易得、通用性强和成本低廉的优势,但支架搭设速度较慢,支架整体稳定性不足,当前主要用于作业高度不足20 m、梁板跨度小于12 m的现浇梁板支架施工场景。盘扣式钢管支架由盘扣接头、可调顶托/底托、钢管等部件组成,接头进行热镀锌处理,具备搭设速度快、承载能力强、整体稳定性好的突出优势,但对施工人员专业素养提出严格要求,当前主要用于作业高度超过30 m、梁板跨度大于18 m的现浇梁板支架施工场景。碗扣式钢管支架由碗扣接头、钢管以及脚手板组成,采取自锁连接方式,立杆横杆规格保持一致,具备连接可靠、标准化搭设、承载能力高的优点,但通用性较差,无法满足特殊尺寸梁板施工需求,当前主要用于作业高度20~30 m、梁板跨度12~18 m的施工场景。

此外,无论选择任何支架体系,都要精准计算现浇梁板支架施工荷载规模,确定支架规格参数,要求支架极限承载能力略高于峰值荷载规模,预防支架晃动失稳问题发生。例如:某房建工程现浇梁板构件跨度为18 m,梁板厚度为250 mm,施工作业高度为15 m,拟定选取盘扣式钢管支架体系,选用 $\phi 60 \times 3.2$ mm焊接钢管作为杆件,把立杆间距控制在1.2 m,步距控制在1.5 m,扫地杆离地高度控制在0.2 m,每隔2跨设置1道斜撑。

2.2 地基处理

考虑到高空大尺寸现浇梁板支架荷载规模较为庞大,对下部地基承载能力提出严格要求,如果地基承载性能不达标,将会引起地基沉降、支架变形失稳、梁体结构缺陷、高处坠落等问题。因此,在支架搭设前,必须对地基进行专项处理,按照施工现场地质条件区分地基类型,可选处理方式包括平整硬化、垫层换填,工艺要点如下。第一,平整硬化。面向地质条件理想、地基承载力基本符合梁板支架施工要求的天然地基,提前标记基础范围,彻底处理地表垃圾杂物,保持地

基表面干净状态,衔接开展平整作业,操控平地机推平地基表面,保持1%~2%表面坡度来改善排水效果,切换压路机连续开展3遍以上碾压作业,碾压速度保持在2~3 km/h,直至地基压实度超过95%。如果地基含水率超标,额外铺设一层石灰,再开展碾压作业,利用生石灰吸收土壤水分与提高地基压实度。第二,垫层换填。面向淤泥、淤泥质土等含水率过高、压缩性强的软弱地基,精准探测软基厚度,彻底挖除软弱土层,原位换填具备较高强度和良好稳定性的材料,推荐使用级配砂石和灰土作为换填材料。分层交错开展换填、夯实作业,单层回填厚度控制在0.3 m以内,持续碾压至垫层压实度超过95%^[3]。

2.3 支架搭设

支架搭设环节,按照从下到上顺序完整搭设支架体系,根据现场施工情况来看,三类梁板支架的搭设流程具备极高相似度,依次铺设垫板、搭设立杆、扫地杆、横杆、设置斜撑剪刀撑与安装可调顶托,工艺要点如下。第一,铺设垫板。确认地基平整度误差和承载能力合格后,对照立杆间距来铺设垫板,垫板和地基紧密贴合,禁止存在松动悬空部位,且垫板中心线和立杆中心线相互重合。同步在垫板上安装可调底托,全部底托顶面标高保持一致,要求实际误差小于5 mm。第二,立杆搭设。以支架一端为起始点,向另一端推进搭设各根立杆,操控经纬仪测量调整立杆垂直度,要求实际误差不超过3 mm/m,总体误差不超过50 mm,按照支架类型选择接头,如扣件式钢管支架选用对接扣件。如果梁板支架总体高度大于20 m,必须分段搭设立杆,分段部位进行可靠连接。第三,扫地杆搭设。立杆底部设置纵横方向扫地杆,全部扫地杆离地高度均控制在200 mm,纵横向扫地杆垂直相交,连接点使用扣件/接头牢固连接。第四,横杆搭设。水平方向连续搭设横杆,要求横杆、立杆相互垂直,禁止存在断点现象,测量调整横杆水平度,要求实际误差不超过2 mm/m^[4]。第五,设置斜撑剪刀撑。为增强支架整体性,以立杆底部作为起始点,向上每隔2~3跨搭设1道斜撑,斜撑和立杆/横杆保持45°~60°夹角,以焊接钢管作为斜撑。同步搭设剪刀撑,沿支架长宽方向连续设置多道剪刀撑,剪刀撑搭设角度同样保持在45°~60°,设置旋转扣件牢固连接剪刀撑与其他杆件。第六,安装可调顶托。顶部立杆上端安装可调顶托,测量调整顶面标高,要求全部可调顶托的标高误差小于±5 mm,并把螺杆伸出立杆长度限制在300 mm以内,长度超标会导致受力状态发生变化。最终在可调顶托上部铺设脚手板,设置安全护栏与挂设安全密目网,即可组成完整支架体系。

2.4 模板固定连接

支架体系搭设成型后,将其作为高空作业平台,立即安装梁板模板,固定连接模板结构和支架体系,保持二者协同受力状态,形成连续传力路径。从现场施工角度来看,可选固定连接方式包括对拉螺栓固定、顶托固定、铁丝绑扎、抱箍固定四种连接方式,结合工程实际情况进行选择。以对拉螺栓固定方法为例,作为侧模固定方法,选用圆钢材质的 12~16 mm 直径对拉螺栓,螺栓长度取决于模板厚度和支架间距,并在模板上预留螺栓孔,核对确认开孔位置和孔径值是否正确。模板安装就位后,立即在预留螺栓孔上穿通过对拉螺栓,两端套设垫片与螺母,彻底拧紧螺母来固定模板,随机抽查螺栓拧紧力矩是否合格,标准力矩为 40~65 N·m。

3 房建工程高空大尺寸现浇梁板支架施工安全保障措施

3.1 专项安全技术交底与现场管控

由于高空大尺寸现浇梁板支架施工过程复杂,风险集中,需建立“专项安全技术交底+现场闭环管理”体系。在施工之前,要对支架搭设、混凝土浇筑、拆模等关键步骤进行全方位的安全技术交底,明确荷载控制、工作流程、防护要求和紧急处理要点,以保证施工人员能熟练地掌握操作规程和风险控制方法。施工现场要严格执行许可制度,对高支模场区实施封闭式管理,闲杂人等不得进入;操作人员应正确穿戴安全设备,并按标准设置安全梯、操作平台和临边保护。与此同时,要强化工地巡查力度,对支架的搭设质量、杆件连接的可靠性以及货物堆置等进行定期检查,并对违章的行为及时纠正,从人员、行为、环境三个层面对现场进行安全控制,从而将高空作业的安全风险降到最低。

3.2 全流程施工监测

高空大尺寸现浇梁板支架施工活动具备极高风险系数,为预防施工问题与工程事故发生,必须全流程开展施工监测作业,第一时间发现异常情况,同步采取整改措施。以混凝土浇筑阶段为例,作为梁板支架荷载峰值阶段,安全隐患突出,同时监测支架竖向沉降量、水平位移量和立杆轴力。对于竖向沉降,立杆顶部、底部地基和主次梁交接位置布设监测点,部署高精度沉降计作为监测设备,周边架设水平仪辅助校核,浇筑期间每隔 20 min 采集监测数据,浇筑结束后的监测频率下调至 1 h/次,以单次沉降量超过 2 mm、累计沉降量超过 10 mm 作为预警值。对于水平位移,支架顶部外侧立杆和转角部位布设监测点,选用位移计作为监测设备,监测频率对照竖向沉降监测项目,以单次水平位移量超过 1 mm、累计水平位移量超过 5 mm

作为预警值。对于立杆轴力,荷载集中部位等距布设多处监测点,选用应变式轴力计作为监测设备,将立杆实际轴力超过 70% 允许值作为预警值^[5]。

3.3 支架稳定性验算

梁板支架搭设前,汇总整理所掌握工程信息,精准统计施工荷载规模,逐一验算支架单体构件和整体结构的承载能力是否满足施工要求,针对性调整支架结构方案,必要时更换支架体系,从源头上消除支架失稳隐患。支架稳定性验算项目众多,包括立杆轴心受压承载力、横杆承载力、支架整体抗倾覆承载力、支架抗滑移承载力和地基承载力。以立杆轴心受压承载力验算方法为例,把立杆作为支架主要承重构件,验算立杆实际轴心压是否超出允许值,整体统计立杆所受轴心压力,包括永久荷载与可变荷载,确认荷载分项系数,永久荷载分项系数设定为 1.2,可变荷载分项系数设定为 1.4。继续计算立杆长度,支架带有连墙件和无连墙件工况下,分别把立杆长度计算系数设定为 0.3~0.5 和 1.0,同步计算立杆截面面积、截面回转半径、长细比等其他参数^[6]。上述工作完成后,即可计算立杆允许轴心受压承载力,计算公式为 $[N]=\phi \cdot A \cdot f$, $[N]$ 是允许轴心受压承载力, ϕ 是轴心受压构件稳定系数, A 是立杆截面积, f 是立杆钢材抗压强度设计值。如果实际轴心受压承载力超出允许值,必须调整立杆规格,适当缩小立杆间距,也可选择增加连墙件。

4 结束语

高空大尺寸现浇梁板支架作为现代房建工程新增施工内容,当下面临复杂施工形势与严格施工要求,成为施工安全隐患突出环节。为营造安全施工环境和长效维持稳定施工秩序,建筑企业需加强对高空大尺寸现浇梁板支架施工技术的应用力度,熟悉掌握施工工艺,全流程监测施工情况,提前验算支架稳定性,推动施工水平稳步提升。

参考文献:

- [1] 黄文学. 建筑工程现浇梁板结构模板支架系统安全对策探讨[J]. 江西建材, 2014(09):98-100.
- [2] 邓兴国, 窦林, 胡立国. 承插型盘扣式支架在现浇梁板中的应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(23):48-49.
- [3] 王亚南. 现浇梁板施工结构混凝土施工质量控制方法[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2023, 22(03):35-40.
- [4] 刘畅. 绿色建筑施工中现浇梁板模板施工技术研究[J]. 新城建科技, 2024, 33(11):127-129.
- [5] 陈东勇. 建筑工程施工中现浇梁板模板施工技术的研究[J]. 中国住宅设施, 2024(04):112-114.
- [6] 潘家伟. 房建施工中现浇梁板模板施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2020(21):92-94.

桩基础施工技术在建筑工程 土建施工中的应用研究

刘 军

(铜陵有色金属集团铜冠建筑安装股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘 要 桩基础施工技术是建筑工程土建施工中的核心技术之一, 它对于提高建筑物的稳定程度、承载能力以及整体安全性有着十分重要的意义。本文对桩基础施工的主要技术种类进行了系统的梳理, 分析了桩基础施工的技术应用重点, 包含前期准备、施工管理、质量检测等各个环节, 并针对桩基础施工技术应用中存在的问题提出相应的解决办法, 以期为促进该领域技术水平不断提高并不断发展提供参考。

关键词 桩基础施工技术; 建筑工程; 土建施工; 地基承载力; 荷载

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.040

0 引言

随着建筑业不断发展, 高层建筑和超高层建筑、大型公共设施等项目的数量越来越多, 对地基承载能力的要求也越来越高。桩基础施工工艺是土木工程的核心技术之一, 在提高地基稳定性、减小不均匀沉降、保证工程质量、改善安全和经济性方面表现突出, 对现代土建工程来说, 其实际应用价值愈加明显, 具有十分重要的研究意义和发展空间。

1 桩基础施工技术概述

1.1 桩基础施工技术定义

桩基础施工技术是建筑土木工程的重要部分, 它把许多桩体布置在建筑物上部结构的荷载上, 使这些荷载一层一层地传递到地下稳定地层或者坚硬岩层, 从而提高基底的承载能力, 也控制住沉降量。利用桩体很好的抗压、抗拉和抗弯性来实现荷载的准确分配和快速传递, 对软弱地基以及沉降大等环境尤为合适。从工艺流程上看, 桩基施工包括方案设计优化、现场施工、最终验收检测在内的全部环节, 广泛应用于高层建筑、大跨桥梁、重型结构设施等各个领域, 对于保证建筑整体安全性、延长使用寿命起着重要的作用。该技术体系已经形成了一套系统的、规范化的专业工程技术, 在国内、外的土木工程建设中起着决定性的作用。

1.2 桩基础施工技术分类

桩基础施工技术可以根据不同的方面分为不同的类别和解析, 主要根据施工工艺、材料性质、力学性

能等主要因素来分类。根据施工工艺的不同, 桩基工程分为预制桩和灌注桩两大类, 前者是用工业化生产的设备进行沉桩作业, 后者是在现场钻孔、浇筑混凝土来形成桩体结构。就材料属性而言, 钢筋混凝土桩由于优异的力学性能和良好的耐久性, 在建筑工程中占据着非常重要的位置, 预应力混凝土桩、钢管桩以及其他复合材料桩也有各自适用的情况。按照承载机制的不同, 桩基技术又可以分为端承型和摩擦型两大类, 前者依靠桩底直接支撑来传递荷载, 后者主要是依靠桩壁与土层之间的摩擦力来分散外加载荷。不同类型的桩基础有各自明显的特点, 在工程实际使用过程中要结合工程条件及要求, 合理选择最佳的方案^[1]。

1.3 桩基础施工技术特点

桩基础施工技术有明显的技术特点, 可以满足建筑领域各种基础的需求, 在土木工程中有着独特的重要意义。其主要特点就是具有很强的承重能力, 能够有效地将上部结构的荷载传递到地基上, 满足高层建筑和超重型构筑物对基础的荷载要求, 而且沉降控制能力较强, 通过改善基底应力分布方式可以大大减少结构的整体沉降和不均匀沉降的风险, 避免建筑物开裂或者倾斜等事故的发生。根据不同的地质条件(软弱地基、砂土层、硬岩地层)设计出相应的方法, 满足各种情况。高度机械化, 用专门的设备进行标准化作业, 不但提高了施工效率, 而且保证了工程质量的统一。环境干扰小, 安全系数高, 适合于城市高密度地区基础设施建设, 给现代化城市建设提供可靠保证。

作者简介: 刘军(1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑施工技术。

2 桩基础施工技术在建筑工程土建施工中的应用

2.1 施工准备阶段应用

桩基工程施工技术前期准备工作对保障后续施工顺利进行及施工质量发挥着重要作用。主要工作包括地质勘探、专项方案设计和资源配置等内容。利用先进的地质调查手段,获得施工场地岩土工程性质、水文条件以及地下构造分布等详实资料,从而给桩体选取和工艺改良赋予科学支撑。根据建筑结构设计规范及地质条件,制定出包含桩径、桩长、承载力要求、施工顺序等内容的完整的桩基础设计方案,确定质量控制标准及安全保障措施。同时要完善施工现场基础设施建设工作,包括场地平整、排水系统建立、机械设备安装调试等各项工作,保证所有的设备能够正常运转,材料达到技术指标要求,从而全面做好施工准备工作的开展,消除前期准备不充分所造成的工期延误或者潜在的风险问题^[2]。

2.2 施工过程中的应用

桩基础工程的关键之处就在于精确安排施工方案和技术标准的严格执行,经由分阶段管理保证工程质量及安全达标。根据所选桩型和工艺特性来依次完成放样定位、成孔(或沉桩)、钢筋笼制作和安装、混凝土灌注(或预制构件拼装)等主要工序。成孔过程中重点对深度精度、直径偏差和垂直度误差进行检测,防止出现塌陷或者缩颈的情况,钢筋笼的加工和布置要严格按照几何尺寸控制,保证钢筋与主体结构的协同受力,混凝土浇筑过程中合理调配浇筑速度,加强振捣作业,防止出现断桩或者夹层缺陷。施工过程中应做好现场数据的实时监控工作,及时处理好各种突发情况,全面检查各个环节的质量是否符合要求,保证桩基构筑整体稳定性和承载力得到充分体现。

2.3 施工后检测与验收应用

桩基础施工完成后检测、验收属于工程项目执行的重要部分,又是保证其满足要求的主要保障手段。施工结束后,要对桩身的完整性、承载力和抗拔性能等进行系统检测,用低应变法、高应变法或者静载试验等专业技术手段获取数据。根据监测结果评价桩基施工是否达到设计规范、行业标准要求,对存在问题的桩体要制订相应加固方案,实施整改。经复查无误后,组织参建各方对桩基工程进行竣工验收,对施工记录、检测报告、影像资料进行综合审查,确定桩基工程合格后方可进入下一道工序,保证桩基具备良好的承载能力来支撑上部结构的安全使用。

3 桩基础施工技术应用中的问题

3.1 施工质量问题的

桩基础施工技术在工程实践中存在着很多主要问题,这些问题直接影响到桩基的承载能力、结构稳定程度,并且也是影响施工质量的主要因素。桩身完整性缺陷是桩基施工中比较突出的问题之一,常见的有断桩、夹泥、缩颈等。其产生的原因主要是由于成孔工艺不当(塌孔)、混凝土灌注控制失灵、钢筋笼定位不准等造成的。桩位偏离规范要求的情况比较普遍,一般是由测量误差、施工设备定位不准造成的,都会影响桩体受力分布的合理性。桩身抗压强度未达标的情况也不能忽视,大多是由混凝土配合比设计不合理、振捣不到位和养护管理缺失等引起^[3]。除了桩底嵌岩深度不够、表面锈蚀等以外,还有许多桩基方面的缺陷,这些缺陷会降低桩基的整体可靠性,还会造成安全隐患,给建筑物的安全和稳定造成隐患。

3.2 施工安全问题

桩基础施工由于作业环境复杂、施工工序专业化等特点,是安全风险较大的主要环节。目前安全隐患多发的原因主要是施工环境复杂、操作不规范、管理不严等各方面原因造成的。塌孔、涌砂、突水等现象会对施工人员的生命安全造成威胁,在成孔阶段,桩机倾覆或者起重机械非标准作业会引发重大机械设备事故;人工挖孔灌注桩施工过程中,缺氧和有毒气体中毒的危险性很大,如果不妥善做好通风系统的管理,会对作业人员的身体健康带来严重危害。现场临时用电违规、高处作业无防护、人员安全意识差等都会增加触电伤害、坠落事故的发生率,严重影响到工程安全及工期目标的完成。

3.3 施工成本问题

桩基础工程施工技术在实际应用中出现的主要问题就是施工成本控制越来越困难,超支风险越来越大。该问题产生的原因十分繁杂且多变,主要从设计阶段的缺陷造成的桩基选型和地质条件的匹配性欠缺、施工过程中的质量安全事故频繁发生或者偶发、施工过程中由于施工质量和施工安全等原因需要投入大量的维修加固费用。施工过程中设备租赁费用上涨、建筑材料价格波动、管理水平不够精细等因素造成综合成本的增加。由于项目延期造成建设周期延长、设备闲置、人工费上涨,造成间接成本压力、现场管理不到位、资源配置失衡等造成的资源浪费等各方面因素造成项目经济价值降低。

4 桩基础施工技术应用问题的解决措施

4.1 质量控制措施

桩基工程施工质量的保障机制要覆盖全生命周期,依靠系统的管控手段来实现(见图1)。施工前要加强地质勘探工作的准确性,制定出专门的施工方案,选择合适的桩型和工艺参数,并做好原材料质量检验工作,保证合格的技术指标。施工期间要创建完善的

现场管理组织架构,对于定位放线、孔壁开挖、钢筋骨架搭设以及混凝土浇筑等重要工作实行标准化施工流程,且必须持续观察潜在导致质量问题出现的因素,从而抑制问题产生。竣工阶段严格按照验收制度执行,采用先进的检测技术对桩基性能进行全方位的评价,对于不合格的项目及时整改,建立完整的追溯体系,从各方面保证工程质量达到相关法规和图纸的要求^[4]。

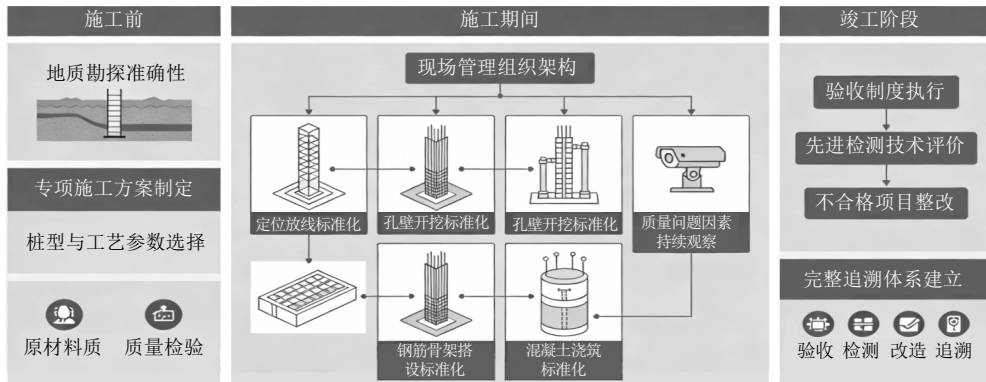


图1 桩基工程施工质量全生命周期保障机制

4.2 安全管理措施

桩基工程施工中保证施工安全的重点是提高安全意识,建立完整的、详细的安全生产体系。应当编制科学合理、系统周密的施工方案和应急预案,针对可能出现的各种风险制定出相应的防范措施,并且定期开展应急演练活动来提高应对突发事件的能力。对所有的参建人员实施系统的安全教育,提高其安全意识和操作水平,重点是特种作业人员必须具备相关的从业资格证书才可以从事特种作业。现场必须严格按照各种安全防护要求进行操作,设置明显的警示标志,完善电力供应和高空作业保护设施等,并且要形成常态化的安全隐患排查体系,及时发现和排除各种隐患,为工程顺利推进奠定基础^[5]。

4.3 成本控制措施

在桩基础工程中贯彻经济性原则要从施工方案的设计、资源配置的优化和进度的控制等多方面入手,制定出系统的措施。根据地质情况、工程需求,在施工过程中选择合适的桩型、施工方法来改善资源利用率、节省建筑材料。加强物资采购环节管理,采取多方询价的办法选择优质的、价格合理的原材料,推行动态库存管理来预防由于堆积造成损失。施工期间要合理安排人力资源和机械设备的配备,用精细的调度来提高作业效率,防止出现设备闲置和人员浪费的现象。健全工期管理体系,保证任务按时完成,防止延期造成的额外费用支出。创建完备的成本监控体系,

按时跟进实际投入和预算的差别,对于出现的偏差立刻作出调整,以此达到对总成本有效掌控和均衡分配的目的。

5 结束语

桩基础施工技术是建筑土建工程中决定结构稳定性的核心环节,直接关系到建筑物的长期稳固与安全性能。尽管其施工过程受地质条件、工艺复杂度等因素制约,面临诸多技术与管理挑战,但通过科学的施工管控与持续的技术革新,不仅能有效提升工程质量、筑牢安全防线,还能优化资源配置效率,实现降本增效的目标。未来,需进一步深化桩基础施工的理论研究与实践探索,推动技术迭代升级,为建筑行业的高质量发展与可持续建设提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 刘俊. 建筑工程土建施工中桩基础施工技术的应用[J]. 中国住宅设施, 2025(04):217-219.
- [2] 武淑萍. 建筑工程土建施工中桩基础技术应用研究[J]. 散装水泥, 2023(03):129-131.
- [3] 杨顺. 建筑工程土建施工中桩基础技术的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2022(35):62-64.
- [4] 田建辉. 桩基础技术在建筑工程土建施工中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2021(10):54-55.
- [5] 郭磊, 潘雷雷, 樊亮亮. 研究桩基础技术在土建工程施工中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2021(09):114-115.

住宅深基坑施工技术在特殊地质条件下的优化研究

郭旭

(郓城县建筑设计院, 山东 菏泽 274700)

摘要 在住宅建设中, 特殊地质条件给深基坑施工带来诸多难题。本研究聚焦住宅深基坑施工技术在特殊地质条件下的优化, 通过系统剖析特殊地质对施工工序、结构安全及作业效率造成的影响, 提出优化施工技术与工艺, 进而提升施工的安全性、稳定性和作业效率。从支护体系、土方开挖等方面给出优化方案, 为特殊地质状况下住宅深基坑施工提供科学参考, 以期为保障工程质量与施工安全提供参考, 进而有效规避施工风险, 推动住宅建设领域深基坑施工技术的迭代升级与高质量发展。

关键词 住宅深基坑; 特殊地质条件; 支护技术优化

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.041

0 引言

城市化不断推进, 住宅建设规模持续扩大, 深基坑工程数量增多, 特殊地质情况, 如软土、岩石、高水位等时常出现, 给深基坑施工带来很大困难。传统施工技术在特殊地质下, 容易产生支护失效、土体变形等状况, 影响工程质量及周边环境安全。所以, 针对住宅深基坑施工技术在特殊地质条件下的优化研究具有十分重要的现实意义, 可以有效解决施工难题, 提升工程建设水平。

1 特殊地质条件分析

1.1 特殊地质类型及特征

我国住宅深基坑施工中常见特殊地质有软土、黄土、岩溶、强风化岩、季节性冻土、填土等, 不同地质差异明显。软土多分布于长江中下游、珠江三角洲等沿海、河湖沉积区, 天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低, 承载力低, 易产生不均匀沉降和侧向变形。黄土分布于华北、西北地区, 粉粒为主, 湿陷性显著, 遇水后结构破坏、强度降低, 深度方向湿陷性差异大。岩溶地质多见于西南、华南地区有溶洞、溶蚀裂隙等不良地质体, 填充物多为黏土、碎石, 稳定性极差。强风化岩地质在全国分布较广, 岩石风化严重, 结构破碎, 岩块强度低, 易坍塌。季节性冻土主要分布于东北、西北及华北北部, 冻融循环易使土体膨胀、收缩, 破坏基坑稳定性。填土地质多存在于城市旧区改造场地, 成分复杂, 含建筑垃圾、生活

垃圾及素填土, 压实度低, 均匀性差, 承载力波动大。

1.2 特殊地质对深基坑施工的影响

特殊地质条件对住宅深基坑施工的影响从开挖到支护、降水全流程都存在, 直接影响施工安全性与经济性。软土地质中基坑开挖后侧向土压力大, 支护结构易过大变形、坑底隆起, 软土渗透系数小降水效率低, 易形成基坑内积水, 加剧土体软化, 黄土湿陷性导致基坑周边地面沉降, 降水过程破坏黄土结构易造成基坑边坡坍塌, 雨季施工风险高。岩溶地质溶洞可能导致基坑突水突泥, 溶洞未填充或填充不密实易导致开挖过程坑底塌陷。岩溶区域地下水系复杂, 降水难度大, 周边地下水位大幅下降, 影响周边建筑物基础。强风化岩地质开挖时, 容易坍塌, 边坡坡度难以控制, 边坡需要经常修整, 岩块磨损开挖机械, 降低施工效率。季节性冻土在冻结期土体强度升高, 但在冻融循环期土体强度反复变化, 容易使支护结构产生附加应力, 引起结构开裂。冻胀力还容易破坏基坑防渗体系, 引起基坑渗漏。填土地质不均匀, 容易造成局部承载力不足, 引起基坑不均匀沉降, 填土中可能有大块杂物, 影响开挖和支护施工, 加大施工难度^[1]。

2 支护技术优化

2.1 新型支护结构应用

面对特殊地质条件, 我国住宅深基坑施工中新型支护结构的应用重点放在提高承载能力, 控制变形, 适应复杂地质环境。软土、填土等软弱地质条件下,

作者简介: 郭旭(1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

广泛采用型钢水泥土搅拌墙（SMW工法桩），这种结构由型钢和水泥土搅拌桩复合而成，水泥土桩体具备防渗功能，型钢承担侧向土压力，相比传统钢板桩，其施工噪声小，对周边环境的影响小，适合城市住宅密集区施工，在软土分布典型区域应用效果良好，能够有效控制支护结构变形。针对黄土、强风化岩地质，推行双排桩支护结构，经由前后排桩与冠梁，连梁构建空间受力体系，优化刚度，相比于单排桩，抗倾覆能力明显加强，可以有效地控制黄土湿陷引起的变形^[2]。在岩溶、地下水丰富的地区，采用地下连续墙支护，既可以防渗，又可以支护，墙身接头采用锁口管或接头箱，防渗效果较好，能有效防止突水事故。在深基坑大跨度区域，采用组合式支护结构，如“地下连续墙+内支撑”“SMW工法桩+锚索”，取长补短，适配不同结构的复杂地质条件，曾在软土、填土复合地质的住宅深基坑工程中应用，有效解决了深基坑支护难题，变形控制满足规范要求。

2.2 支护参数优化调整

支护参数优化调整要根据特殊地质勘察数据，结合基坑深度、周边环境要求，采用数值模拟和现场试验，确定合理的支护参数，保障支护结构安全可靠。软土地质中优化支护桩直径和桩间距，提高桩身抗弯承载力，加大桩身嵌固深度，防止坑底隆起和桩体倾斜。黄土地质中支护结构水平间距根据湿陷系数调整，湿陷性较强的区域适当减小桩间距，优化锚索参数，控制入射角和锚固长度，锚索与黄土土体咬合，提高抗拔能力。在岩溶地质下，依据溶洞分布状况调整支护桩布置，如果遇到大型溶洞区域就避开，要是避开就改良桩体设计，需采用加强配筋之类的方法来改良桩体抗剪和抗折的能力。遇到强风化岩地质时，合理改良支护边坡的坡度，适当放慢边坡以提升其稳定性，而且在边坡表面喷射混凝土并铺上钢筋网，从而加强边坡的整体性，防止岩块脱落。改良支护参数时，要按照《建筑基坑支护技术规程》的要求，利用数值模拟软件做受力和变形分析，保证改良支护参数之后，支护结构符合安全储备要求。

3 土方开挖与降水技术

3.1 土方开挖方式改进

针对特殊地质情况，住宅深基坑土方开挖方式的改进主要是指分层分段开挖、控制开挖速度、减少对土体的扰动、适应不同地质的承载能力。对于软土、填土地质来说，采用“分层开挖、分层支护、限时完成”的开挖方式，分层厚度控制在1.5~2.0 m之间，每层开挖长度控制在20 m以内，开挖后48小时内必须

完成该层的支护施工，防止土体长时间暴露而导致强度降低，同时采用机械开挖和人工清槽相结合的方式，坑底保留300~500 mm厚的土层，由人工清理，防止机械开挖造成超挖，破坏坑底土体结构。对于黄土地质来说，需考虑湿陷性的影响，开挖过程中严禁雨水侵入基坑，采用放坡开挖和分级支护相结合的方式，分级高度控制在2.0~3.0 m之间，每级设置1.0~1.5 m宽的平台，坑壁表面做防渗处理，采用防水卷材和水泥砂浆抹面，防止雨水渗透造成湿陷。强风化岩地质层采取“机械破碎+分层开挖”的办法，用液压破碎锤来破碎岩石，不要用爆破施工，这样会干扰周边住宅建筑，分层厚度为2.0~2.5 m，开挖完之后尽快把破碎的岩块清理掉，防止堆得太多，造成边坡坍塌。岩溶地质开挖之前先对溶洞实施探测和处理，用注浆填充或者换填压实的办法来巩固溶洞区域，开挖的时候顺着基坑周边开挖探沟，探沟深度不低于1.5 m，随时注意地质变化，如果遇到新的溶洞，马上停止开挖，采取加固措施，保证开挖安全^[3]。

3.2 降水方案优化设计

降水方案优化设计要结合特殊地质水文地质条件，关注降水效率的提升、地下水位的控制，避免对降水周边环境造成影响，符合我国住宅基坑施工的环境和安全要求。在软土地质中，土体渗透系数小，采用“轻型井点降水+深层搅拌桩防渗帷幕”的组合方案，轻型井点间距控制在1.0~1.5 m，滤管埋深比基坑底低1.0~1.5 m，同时在基坑周边布置深层搅拌桩防渗帷幕，桩径600~800 mm，桩间距400~600 mm，形成封闭防渗体系，减少地下水补给，降水过程中地下水位控制在基坑底以下0.5~1.0 m，防止过度降水引起周边地面沉降。黄土地质需根据湿陷性与地下水分布特点，采取“管井降水+明沟排水”策略，管井间距8~12 m，井深比基坑底低3~5 m，井内装潜水泵，排水量随地下水位变化而调整，而且设置基坑内明沟与集水井，及时排除雨水和上层滞水，防止黄土因水而湿陷。岩溶地质，地下水系复杂，采取“分区降水+注浆堵水”策略，按照溶洞分布划分降水区域，每个区域设置独立的管井降水系统，管井深度穿过溶洞含水层，而且对溶洞周围土体开展注浆加固，堵住地下水渗漏通道，降水时严格控制地下水位降幅，防止引发溶洞坍塌。

3.3 开挖与降水的协同控制

开挖与降水的协同控制主要是使两者之间实现动态匹配，通过实时监测来调整施工参数，确保基坑的稳定性。在软土地质中，实现“降水先行，分层开挖，同步监测”的机制，降水达标后再进行开挖，同时根据开挖进度动态调整降水强度，同步监测关键指标，

出现问题时立即停工。在黄土地质中,主要是防范雨水侵入和地下水位的波动,开挖前做好防渗排水系统,合理规划开挖顺序,缩短边坡暴露时间,结合开挖进度动态调整降水频率,避免水位骤变导致湿陷。岩溶地质下,采用“分区协同,动态调整”模式,开挖前做好降水和地质探测,施工时同步监测溶洞稳定和水位变化,出现异常马上停工排查,改善降水和注浆方案,防控突水坍塌风险,全程协同控制依照相关规范,保证监测数据可靠和施工安全^[4]。

4 施工监测与风险防控

4.1 监测指标与方法

针对特殊地质条件下住宅深基坑施工特点,优化监测指标与方法时,全面覆盖风险点、提升监测精度、适应国内学术与工程规范是重点,支护结构变形、土体位移、地下水位、周边建筑物沉降、管线变形及应力应变等核心监测指标都被包含在内。支护结构变形监测时,软土、填土地质用测斜仪和水准仪组合监测,测斜仪埋设在支护桩内部,水准仪监测冠梁沉降;黄土、强风化岩地质增加支护结构裂缝监测,用裂缝宽度仪,裂缝发展时加密监测频率。土体位移监测时,软土地质用分层沉降仪监测坑底土体隆起,监测点设在坑底关键位置,岩溶地质用位移计监测溶洞周边土体变形,监测点埋深到溶洞顶部以上合理位置。地下水位监测用到水位计,地质不同就安排监测点,降水和开挖关键时期加大监测频次,数据异常时马上监测。周边建筑物沉降监测用水准仪,重点承重部位设监测点,再用经纬仪监测建筑物倾斜情况。管线变形监测针对燃气、供水、供电等重要管线,用百分表和位移计组合监测,监测频次跟开挖进度同步,保证管线变形控制在规范许可范围,所有监测数据都经由自动化采集系统传输,做到数据实时分析和反馈。

4.2 风险评估与预警机制

风险评估与预警机制必须建立在特殊地质风险的基础上,结合《建筑施工安全检查标准》(JGJ 59-2011),形成分级评估、分级预警体系。风险评估方面采用定性定量相结合的方法;定性评估方面关注特殊地质隐患如软土侧向变形隐患、黄土湿陷隐患、岩溶突水隐患等;定量评估方面利用数值模拟方法计算支护结构安全系数、土体稳定性系数等指标,安全系数小于 1.2 判定为高风险^[5]。首先,支护结构变形量超过规范允许值 120%,坑底隆起量大于 50 mm,周边建筑物沉降量大于 30 mm,地下水位急剧升高等于 1.0 m/d 时发生红色预警;其次,黄色预警规范允许值 10%,坑底隆起量 30 ~ 50 mm,周边建筑物沉降 20 ~ 30 mm 发生黄色预

警;再次,发生蓝色预警规范允许值 120%,坑底隆起量 10 ~ 30 mm,周边建筑物沉降 10 ~ 20 mm 发生蓝色预警。预警信息发布之后,同步开启响应机制,红色预警马上停止施工,黄色预警停止高风险区域施工,蓝色预警加大监测频率,保证风险随时受控,风险评估与预警期间,定期执行风险复盘,依照施工进度与地质改变来调整评估指标和预警阈值。

4.3 应急处理措施制定

制定应急措施需针对特殊地质条件下的典型风险事故,结合住宅深基坑施工场地特点,保证针对性、可操作性,符合相关应急管理规范。软土,填土地质的支护结构变形过大,坑底隆起,应急措施主要包括:立即停止开挖作业,立即在坑底周缘放置反压土袋,而且要进行临时支撑,提升支护结构的刚度,若变形继续发展,则开始实施应急降水方案,从而减小地下水水位,减弱土体变形。黄土地质边坡坍塌和湿陷,应急措施主要是:立即从现场撤离人员和机器,边坡发生坍塌以后,在坍塌地区周围树立起警戒线,并设置起临时防护,以免坍塌地域扩大,对边坡实行注浆加固,加固之后再清除坍塌下来的土体,重新调整边坡,巩固防渗处理。针对岩溶地质的突水、突泥事故,要立即关闭降水,带着水桶围住水流,用双液注浆堵住水,水流减小时,往溶洞里填东西加固。

5 结束语

针对特殊地质条件的住宅深基坑施工技术研究具备极高的实践价值。通过对特殊地质条件的针对性分析,可从支护工艺、土方开挖与降排水施工等核心环节提出优化方案,并在此基础上搭建完善的施工监测与风险防控体系。上述研究成果能够有效提升特殊地质条件下住宅深基坑工程的施工安全性与结构稳定性,保障工程项目顺利推进。未来仍需持续深化相关研究,不断完善深基坑施工技术体系,以应对愈发复杂的地质条件与多样化的工程建设需求。

参考文献:

- [1] 钱坤.城市住宅项目深基坑支护结构施工质量安全控制与优化[J].中国建筑金属结构,2025,24(24):160-162.
- [2] 李扬.高层住宅深基坑工程自动化监测应用[J].居舍,2025(31):66-69.
- [3] 刘峰.浅谈住宅建筑施工项目安全管理控制的有关策略[J].居舍,2024(36):116-119.
- [4] 陈燕坤.高层住宅建筑深基坑支护工程施工技术要点分析[J].中华民居,2024,17(08):172-174.
- [5] 陈真标.住宅建筑深基坑支护工程大直径深层搅拌桩止水施工技术[J].居舍,2024(31):47-50.

基于超声相控阵三维成像的水工混凝土结构内部缺陷量化评估方法

党安华¹, 湛晓颖², 赵中亚^{2*}

(1. 山东禹科检测技术有限公司, 山东 东营 257000;
2. 山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 水工混凝土结构是水利工程的重要部分, 长期在复杂的环境中工作容易产生内部缺陷, 影响工程的安全性、稳定性和耐久性, 因此精准检测和量化评价就显得十分重要。超声相控阵技术依靠声束可控制、检测效率高、成像直观等特点, 成为水工混凝土缺陷检测的主要技术。基于此, 本文以该技术以及三维成像、量化评估为基础, 论述相关的基础内容, 设计相应的检测系统, 确定硬件选择、数据处理和评价算法, 用工程实例证明其可行性与可靠性, 从而达到对缺陷进行精确定位、三维可视化和量化评价的目的, 为结构的运维加固提供技术支持。结果表明, 该方法可以很好地解决检测难题, 准确地识别出缺陷, 并给出评价指标来客观地反映出缺陷的特征, 检测结果可靠且具有工程应用价值。

关键词 超声相控阵; 水工混凝土; 内部缺陷; 三维成像; 量化评价

中图分类号: TV54

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.15.042

0 引言

水工混凝土结构广泛用于各种水利工程中, 并发挥着重要作用, 它的服役性能直接影响到水利工程的安全以及人民的生命财产安全。由于施工复杂并且经常受到水压、温度等不利因素的影响, 结构内部容易出现隐蔽的缺陷, 如果不能及时得到有效的控制, 就很容易导致事故发生, 因此准确检测和定量评价成为工程安全运维的重要工作。传统的检测技术精度低、成像差, 不能实现三维可视化和定量评价, 不能满足精细化检测的要求。超声相控阵技术依靠相位控制来完成声束扫描, 与三维成像一起可以清楚地展现缺陷, 配合评估算法可以准确计算出缺陷的参数, 弥补传统方法的不足。该技术在工业检测上使用较多, 但是由于混凝土的非均匀性等特性, 在水工领域应用还有一定困难。因此, 本文对超声相控阵三维成像技术以及量化评价方法进行研究, 建立完善的检测系统, 经过工程应用来检验其可行性, 为水工混凝土缺陷检测提供技术参考。

1 相关理论与技术基础

1.1 超声相控阵技术基本原理及特性

超声相控阵技术的核心是用多个阵元换能器发出不同的相位激励信号, 利用超声波干涉叠加的原理,

实现声束的聚焦、偏转和扫描控制, 获得被检测物体内部声学信息。相比传统的超声检测, 具有以下优点: 声束可控、可以定制扫描模式提高检测精度; 检测效率高, 适合大体积的水工混凝土结构检测; 成像清晰, 容易发现缺陷; 适应性强, 能适应复杂的检测环境, 给水工混凝土缺陷精准检测赋予了关键的支持。

1.2 水工混凝土结构内部缺陷类型及检测难点

水工混凝土内部缺陷主要有裂缝、疏松、孔洞、结合面脱空四种, 都会影响到结构的性能。其检测存在明显的困难, 混凝土的非均匀性会造成超声信号的识别产生困难, 结构体积大、形状复杂, 不利于探头的布置和扫描, 而且缺陷声学特征重叠、形态不规则, 很难准确地进行识别和量化描述, 给超声相控阵三维成像技术提出更高的要求。

1.3 三维成像与量化评估核心技术支持

超声相控阵三维成像及量化评价需要四个关键技术: 阵列信号处理来改善信号、提取缺陷信息; 三维数据融合把二维数据合并起来, 创建出缺陷三维可视化的模型; 缺陷识别和特征提取区分缺陷和干扰, 得到缺陷参数; 量化评估理论用科学的模型来评定缺陷的严重程度, 给结构维护提供依据^[1]。

作者简介: 党安华 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。

*通信作者: 赵中亚 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。E-mail: 1107522660@qq.com

2 超声相控阵三维成像检测系统构建

2.1 检测系统硬件选型与集成方案

超声相控阵三维成像检测系统硬件选型和集成,直接影响检测的精度及稳定性,要根据水工混凝土检测需要来确定合理的方案。系统硬件由阵列换能器、多通道超声发射/接收模块、数据采集卡、运动控制模块、计算机终端及辅助设备组成。选择时,阵列换能器要符合检测深度和分辨率的要求,具有良好的抗干扰能力;发射/接收模块需要精确控相、稳定传信;数据采集卡需要有高的采样率和高的精度;运动控制模块需要准确定位、灵活扫查;计算机终端需要满足运算及图形处理的要求。在集成的过程中要重视各个模块之间的兼容性和协同性,改善连接方式减小信号干扰,构造紧凑、稳定、方便的现场检测系统。

2.2 三维成像数据采集与预处理流程

三维成像数据采集及预处理属于精准成像和定量化评价的重要环节,要按照规范的流程来开展工作,并用科学的方法。数据采集要先确定检测区域、合理布置探头,再根据混凝土特性确定超声频率、扫查速度等参数,用运动控制模块驱动换能器进行扫查,同时采集并储存多通道声学信号。由于原始信号中含有环境、设备等噪声,需要做预处理:用滤波器去除干扰、增大弱信号的强度、相位校正保证测量结果准确、对数据进行归一化统一尺度、去掉异常数据以保证可靠,最后给之后的三维成像和定量化评价提供高质量的数据支持。

2.3 定量化评估指标与算法设计

定量化评价指标和算法设计是缺陷评价的中心,需要根据缺陷的特点来建立科学体系、设计高效的算法^[2]。评价指标分为几何参数(长度、深度、体积等)和危害程度指标(扩展趋势、强度衰减等),可直观地反映出缺陷的特点及对结构造成的影响。算法设计分三个步骤,即用模式识别法来识别缺陷、用图像处理法提取出缺陷参数、用加权分析法、模糊综合评价法对缺陷进行定量化,并根据定量结果来分级评定缺陷的严重程度并预测发展趋势,给结构运维加固提供科学依据,又兼顾算法的准确性和适用性。

3 水工混凝土结构检测应用与效果验证

3.1 工程实例选取及检测工况设定

为检验超声相控阵三维成像技术和定量化评价方法在水工混凝土结构内部缺陷检测中是否可行、可靠,选择典型的水工混凝土结构作为工程实例进行检测应用,根据结构的服役特点及检测要求来确定检测工况,

保证检测结果能真实地反映出结构内部缺陷的实际状况^[3]。工程实例选择遵照代表性、典型性原则,选择长期处于复杂服役环境中的、存在潜在缺陷风险的水工混凝土结构,此类结构主要起挡水、输水作用,结构尺寸大,施工工艺复杂,长期受水压、温度变化、干湿交替等不利因素的影响,在内部容易产生各种缺陷,有很好的代表性和体现性。在检测工况设定时,要根据结构实际的服役状况、检测要求及现场环境条件来确定检测的目的、检测区域、检测的内容和检测的标准,合理地设置检测工况参数。确定检测的目的就是准确地发现结构内部缺陷的种类、位置、形状和分布情况,对缺陷进行定量评价,判断缺陷的严重程度以及对结构性能的影响,给结构的运维和加固提供技术依据。检测区域选择结构关键受力部位及容易出现缺陷的地方,如结构的浇筑接缝处、应力集中的地方、厚度较大的地方等,保证检测区域可以涵盖结构的薄弱环节。检测内容主要是内部裂缝、疏松、孔洞、结合面脱空等各种缺陷的检测及定量评价。同时,根据现场环境条件,合理确定检测环境温度、湿度等参数,防止环境因素对检测结果造成影响;根据结构表面情况,对检测区域表面做相应的处理,保证探头同结构表面良好接触,减少信号衰减;合理设置扫查路径、扫查速度、超声波参数等检测工况参数,改进检测流程,提高检测效率和检测精度,保证检测工况的合理性与科学性,为后续检测实操实施及结果验证打下基础。

3.2 三维成像与定量化评估实操实施

工程实例检测时严格按照预设的检测工况、检测流程来开展超声相控阵三维成像及定量化评价实操操作工作,保证检测过程规范有序,检测结果准确可靠^[4]。在实操开始之前,对检测系统进行全面的调试与校准,检查各个硬件模块的工作状况,即阵列换能器、多通道超声发射/接收模块、数据采集卡、运动控制模块等,保证所有模块都能正常工作;对超声参数、相位控制参数、数据采集参数等做校准,改善参数设定,使检测系统满足检测要求。另外,对检测区域表面进行清理,清除表面的灰尘、油污、浮浆等杂物,打磨平整,保证探头与结构表面能紧密接触,减少超声波信号的反射和衰减,提高信号采集的质量。在实操过程中,根据预设的检测区域划分及扫查路线,用运动控制模块控制阵列换能器按预定的扫查顺序进行有规律地扫查,多通道超声发射/接收模块按照事先设定好的超声参数发出超声波信号,超声波信号穿过混凝土结构之后,碰到内部缺陷就会发生反射,反射回来的信号被阵列换能器接收到以后,再传送到数据采集卡上进行采集

并保存。数据采集过程中实时监测采集信号的质量,随时调节扫查参数及探头位置,保证采集到的超声信号清楚、有效,可以正确地反映出结构内部缺陷的情况。数据采集完成后,根据事先所设定好的预处理程序来对收集到的原始数据做滤波、放大、相位校正、数据归一化及异常数据剔除等预处理工作,除去噪声干扰,提取出有用的缺陷信号。之后,用三维成像软件以及数据融合算法来对预处理过的多通道数据进行融合处理,得到结构内部的三维成像模型,可以清楚地显示出来内部缺陷的位置、形状和分布情况。最后用设计出的量化评价算法来对三维成像模型中的缺陷进行识别与特征参数提取,代入到量化评价模型里,对缺陷的严重程度进行分级评价,得到量化评价报告,完成整个检测实操实施过程。实操时严格按照操作规程进行,重视每个操作环节,在保证检测结果准确的同时也不允许任何的操作错误给检测带来不利的影响,保证检测过程的规范性以及检测结果的真实性。

3.3 检测结果可靠性与应用价值分析

检测结果的可靠度是超声相控阵三维成像技术和量化评价方法应用的基础,从应用价值也体现出技术的工程实用性的角度上来说,需要对检测结果的可靠性进行全面验证,对技术的应用价值做深入的分析^[5]。检测结果可靠性验证主要是从一致性验证、稳定性验证和合理性验证这三方面入手:一致性验证就是对比同一检测区域不同的扫查次数、不同的检测位置的检测结果,看缺陷识别的结果以及量化评价参数的一致性,如果一致良好,则说明检测系统重复性好,检测结果稳定可靠;稳定性验证是在相同的检测条件下,对多次检测结果进行比较,考察检测结果的波动情况,如果波动小则说明检测系统的稳定性好,可以长时间稳定运行;合理性验证结合水工混凝土结构的施工过程、服役环境及结构性能特点来分析检测结果中的缺陷类型、位置、形态和分布特征是否符合实际,量化评价结果是否与结构实际服役状态相符,如果符合,则说明检测结果有较高的合理性、可靠性。经过多方面验证可知,超声相控阵三维成像技术可以精确识别出水工混凝土结构内部的各种缺陷,三维成像模型能清楚、直观地表现出现象的空间分布特点,量化评价参数可以客观、准确地体现出来缺陷的严重程度,检测结果有很高的可靠性及重复性,能满足水工混凝土结构内部缺陷精细化检测的要求。技术应用价值分析主要是从工程实践价值、技术创新价值和社会经济效益三个方面入手:在工程实践价值方面,该技术可以给水工混凝土结构的运维、加固提供准确的技术支

持,及时发现隐蔽性的缺陷,防止缺陷继续扩大,降低工程安全事故发生的概率,保证水利工程长期安全稳定运行;在技术创新价值方面,该技术弥补了传统检测技术的不足,实现对水工混凝土结构内部缺陷的三维可视化成像与量化评价,推动水利工程建设无损检测技术的发展;在社会效益方面,该技术检测速度快、精度高,能减少检测费用和维护费用,延长水工混凝土结构的使用寿命,避免由于结构缺陷造成的安全事故,保护人民的生命财产安全,有明显的经济和社会效益以及广泛的应用前景。

4 结束语

通过以水工混凝土结构内部缺陷的超声相控阵三维成像技术及量化评价为研究对象,从相关理论和技术基础、检测系统建立、工程应用与效果验证三个方面展开论述,给水工混凝土缺陷检测提供一种高效准确的技术手段,保证水利工程的安全稳定运行。本文首先介绍了超声相控阵技术原理、水工混凝土内部缺陷类型及检测难点、三维成像与量化评估的技术支持,为后续的研究打下理论基础;接着构建适合的超声相控阵三维成像检测系统,确定硬件选择、数据处理流程和评价指标以及算法;最后通过工程实例来证明该技术的可行性与可靠性,并对它的应用价值进行分析。研究表明,超声相控阵三维成像技术可以很好地解决水工混凝土检测的难题,达到缺陷准确定位、三维可视化和量化评价的目的,检测结果可靠且具有工程实用性,能够为水工混凝土结构的运维加固提供科学的技术支持。

参考文献:

- [1] 王禹迪,杨述,崔庆华.探地雷达法与超声相控阵法水工建筑缺陷检测应用研究[J].中国水能及电气化,2025(12):17-23.
- [2] 高昊,曹恩铭.超声相控阵检测技术的应用与发展[J/OL].机械工程师,1-8[2025-10-17][2026-01-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Klkw5nWhgJFd-f4szksqRwn-lbaE2LOX8r65wM28UGFZvUM1mvLjRBH7-WdxlJLE0hOqgs1mEqvoPPiomuWOMQk05wzO7pVeqm6wFnM13hub2NJR01Jk7cLJwlcOCYfUPiQ0uBcfmK5CBAoiG0VQYvc6HCI25eSzBffQ7M7gV_2-UMcuoBT1kw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 王禹迪,杨述,梁梓煜.基于超声横波法的混凝土内部缺陷检测及验证[J].珠江水运,2024(23):94-96.
- [4] 杨君奕.超声雷达综合法检测钢筋混凝土构件内部缺陷研究[J].四川建材,2024,50(08):51-53.
- [5] 徐昆杰,马伟斌,彭旻,等.超声相控阵在隧道衬砌精细化检测中的应用[J].铁道建筑,2024,64(05):13-17.