科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 · 旬刊）

2026 年 7 月 第 20 期（总第 645 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　罂　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 7 月 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

001　低能耗反渗透海水过滤系统集成与控制优化 …… 杨浩然

004　水利工程帷幕灌浆施工技术及防渗效果分析 …… 代峻儒

007　高性能复合材料在压力容器封头中的应用研究 …… 庞　可，杨　倩

010　回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的应用研究 …… 胡　进

013　预制机电组件在装配式建筑中的安装协同技术研究 …… 玉东梅，黄修奖

016　分布式能源站与集中供热系统联合运行优化策略探讨 …… 李　峰

智能科技

019　移动作业终端智能充电管理柜技术研究 …… 闫　冰

022　面向建筑施工深化的道桥 BIM 设计信息集成研究 …… 夏良波

025　智能化工程管理新技术在建筑工程管理中的应用 …… 林聪聪

028　风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复策略研究 …… 赵映泽

031　面向电梯安全钳生产的自动折弯机器人关键技术研究 …… 王　青

034　基于机器学习的水电厂泵站设备运行状态监测与故障预警方法 …… 黄利平

应用技术

037　滑模技术在水利水电施工中的应用 …… 潘曦阳

040　导流施工技术在水利工程中的应用 …… 刘　静，陈　浚

目录 Contents

043 房建工程绿色施工扬尘污染防控技术应用……吴 琪
046 后浇带施工技术在房建施工中的运用研究……李 丹
049 高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术探讨……张 圣
052 高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术应用探究……谢 航
055 交通工程路桥连接处的设计要点与施工管控分析……尤洪耐
058 高速公路超薄磨耗层养护工艺的材料与施工技术研究……郭 枭，李榆成

科创产业

061 水利工程混凝土强度检测技术研究……彭治都
064 装配式建筑保温隔热系统的创新设计……赵松涛，王 磊
067 水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计及应用……李正伟
070 无砟轨道道床板混凝土性能试验与检测分析……乔凤武
073 建筑工程用砂石骨料质量检测方法与控制要点研究……张荃荃
076 水胶比对高性能混凝土工作性及力学性能影响试验……王 震
079 基于全过程造价控制的建筑工程成本优化方法分析……孔维立，赵延臣

技术管理

082 公路工程质量检测常见问题及对策研究……侯茜敏
085 高速隧道软弱围岩开挖支护施工技术研究……朱 健
088 既有建筑物周边深基坑支护技术与监理分析……房仁河
091 建筑工程监理全过程质量控制要点与实践研究……曲翔宇
094 智慧工地技术在建筑工程施工中的应用探析……李根龙
097 高速公路隧道机械化施工下二次衬砌施工技术探析……姚顺治
100 水利工程加固项目施工质量管理关键环节与优化策略……李荣北，王涌潭

科学论坛

103 绿色施工技术在水利工程中的推广实践……王聚超，李艳红
106 变压器局部放电试验抗干扰技术应用研究……程 海，吴 滔，王城良
109 机械设计与工业设计制造技术的联系与应用……朱宜科
112 面向零排放的工业园区高盐水综合利用技术研究……浦钱东
115 建筑给排水管道防渗漏施工技术与验收标准研究……高广杰，刘建国，张 鹏
118 隧道工程喷射混凝土超耗原因分析及管控措施探讨……芦长顺
121 国土空间规划动态维护中的底线管控与弹性调整研究……邓发廷
124 基于 GIS 的工业源空间分布特征分析——以广安市前锋区为例……蒋乾成

低能耗反渗透海水过滤系统集成与控制优化

杨浩然

（德州海纳祺环保科技有限公司，山东 德州 253000）

摘 要 水资源短缺与海水淡化高能耗矛盾日益突出，现有反渗透海水过滤系统存在集成不合理、控制精度不足、能量利用率偏低等问题。本文结合反渗透膜分离技术与能量回收原理，开展系统集成设计与控制策略优化，优化预处理、核心过滤与能量回收单元的匹配关系，构建动态自适应控制模型，优化运行参数调控逻辑，旨在有效降低能耗，提升运行稳定性与产水品质，为低能耗海水淡化工程应用提供参考。

关键词 低能耗；反渗透；海水过滤；系统集成

中图分类号：TQ028.8；TP273 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.001

0 引言

全球淡水资源匮乏问题愈发严峻，海水淡化成为缓解水资源短缺的重要途径。反渗透技术因脱盐效率高、操作简便等优势，成为海水淡化主流技术，但现有系统普遍存在集成架构不合理、控制方式粗放等问题，导致能耗偏高、运行稳定性不足，限制其规模化推广[1]。针对这一现状，本文聚焦低能耗目标，开展反渗透海水过滤系统集成设计，优化各单元协同运行模式，创新控制策略[2]，解决系统能耗与产水效率的平衡难题，提升系统综合性能，推动海水淡化技术向高效节能方向发展。

1 反渗透海水过滤相关理论与技术发展

1.1 反渗透海水过滤核心理论

反渗透技术基于膜分离原理，通过在海水侧施加高于渗透压的压力，使水分子穿透半透膜进入产水侧，截留海水中的盐类、胶体等杂质，实现海水淡化。渗透压 π 遵循范特霍夫方程 π=iCRT，其中 i 为范特霍夫系数，C 为溶液浓度，R 为气体常数，T 为绝对温度[3]。反渗透膜的分离性能取决于膜孔径、表面电荷与亲水性，优质膜元件可实现 99% 以上的脱盐率，其运行效率与操作压力、进水水质、通量控制密切相关，是低能耗系统设计的核心理论基础。

1.2 反渗透膜技术发展现状

反渗透膜材料已从早期醋酸纤维素膜发展为芳香族聚酰胺复合材料，国产膜元件性能逐步接近国际先进水平，脱盐率稳定在 99.8% 以上，有效膜面积可达 40.8 776 m^2，单支膜元件产水量最高可达 45.4 m^3/d。膜元件操作压力逐步降低，低压膜操作压力可降低至 0.7 MPa，较传统高压膜能耗降低 15% ～ 20%。抗污染膜通过表面改性处理，可有效减少胶体、有机物吸附，延长膜使用寿命至 3 年～ 5 年，较常规膜延长 50%，为低能耗系统提供核心技术支撑。

1.3 能量回收技术发展现状

能量回收装置是降低反渗透系统能耗的关键，主流技术分为正位移式与涡轮式两类。正位移式能量回收装置效率可达 92% ～ 99%，通过双向活塞将浓水余压直接传递给进水，无需中间能量转换，在大型海水淡化项目中应用广泛[4]。涡轮式装置效率为 60% ～ 80%，结构紧凑、成本较低，适合中小型系统。当前全球先进海水淡化项目通过能量回收技术，已将系统能耗降至 1.794 kWh/m^3，较传统系统节能 20% ～ 25%，推动反渗透技术向低能耗方向突破。

2 低能耗反渗透海水过滤系统集成设计

2.1 预处理系统集成设计

预处理系统作为反渗透膜的保护屏障，集成石英砂过滤、超滤与活性炭吸附单元，实现进水水质精准控制。石英砂过滤器采用 1 mm ～ 2 mm 与 0.5 mm ～ 1 mm 梯度滤料，空床接触时间控制在 12 min，反洗强度 10 L/m^2·s，反洗时间 6 min，可将进水浊度降低至 1 NTU 以下。超滤系统控制膜通量 65 LMH，每 30 min 反洗 1 次，每周化学清洗 1 次，截留 99% 以上胶体与细菌。活性炭过滤器选用碘值≥ 1 000 mg/g 的椰壳活性炭，空床接触时间 18 min，确保进水余氯≤ 0.05 mg/L、SDI ≤ 5，满足反渗透膜进水要求。

作者简介：杨浩然（1999-），男，本科，研究方向：海水过滤系统。

2.2 核心过滤单元集成设计

核心过滤单元集成低压反渗透膜组件与高效能量回收装置，构建“膜组件—能量回收—高压泵”协同架构。通过优化膜组件排列方式与能量回收装置的匹配关系，形成多种集成方案。不同方案在运行性能上存在差异，通过性能对比，明确适配低能耗目标的最优集成模式（见表1）。

表1 不同核心过滤单元集成方案性能对比

集成方案	膜排列方式	能量回收效率	系统能耗（kWh/m³）
方案1	2-1串联并联	80%	3.5
方案2	3-2分段排列	90%	2.8
方案3	4-3分段排列	95%	2.2

表1数据分析显示，方案1采用2-1串联并联膜排列方式，搭配80%效率的能量回收装置，系统能耗3.5 kWh/m³；方案2选用3-2分段排列，能量回收效率90%，系统能耗降至2.8 kWh/m³，较方案1降低20%；方案3采用4-3分段排列，匹配95%效率的能量回收装置，系统能耗低至2.2 kWh/m³，较方案1降低37.1%、较方案2降低21.4%。4-3分段排列使膜元件通量均匀，减少浓差极化，降低膜污染风险，延长运行周期。高效率能量回收装置可最大化回收浓水余压，降低高压泵负荷，减少电能消耗，综合性能最优，确定为核心过滤单元集成方案。

2.3 辅助系统集成设计

辅助系统集成阻垢、清洗与产水后处理单元，保障系统长期稳定运行。阻垢单元采用自动投加系统，投加阻垢剂浓度为2 mg/L，控制进水硬度≤0.1 mg/L，防止膜表面结垢[5]。清洗单元配备化学清洗装置，采用柠檬酸与氢氧化钠混合清洗液，清洗温度控制在30 ℃，清洗时间30 min，可有效去除膜表面污染物，恢复膜通量至初始值的95%以上。产水后处理单元集成紫外线消毒与活性炭深度吸附，紫外线照射强度为30 mJ/cm²，确保产水细菌总数≤10 CFU/mL，总溶解性固体≤500 mg/L，满足生活饮用水标准。

3 低能耗反渗透海水过滤系统控制优化

3.1 进水参数自适应控制

针对海水水质波动大的问题，构建进水参数自适应控制逻辑，实时监测进水浊度、SDI值、含盐量与温度，自动调整预处理单元运行参数。当进水浊度＞5 NTU时，自动延长石英砂过滤器反洗时间至8 min，增加超滤系统反洗频率至每20 min1次；当进水SDI ＞5时，启动精密过滤单元，确保进水水质达标[6]。通过温度补偿算法，当进水温度变化 ±5 ℃时，自动调整操作压力 ±0.1 MPa，维持膜通量稳定，避免因水质波动导致的能耗增加与膜污染。

3.2 膜运行参数优化控制

膜运行参数控制以“低能耗、长膜寿命”为目标，优化压力、通量与回收率的协同控制逻辑。通过动态调控模型，实时优化操作压力与膜通量，避免通量过高导致膜污染或压力不足影响脱盐率。通过膜运行参数优化前后对比，明确优化效果（见表2）。

表2 膜运行参数优化前后对比

控制阶段	操作压力（MPa）	膜通量（LMH）	脱盐率（%）
优化前	1.2	85	99.3
优化后	1.0	65	99.6

表2数据分析表明，优化前系统操作压力为1.2 MPa，膜通量维持在85 LMH，脱盐率为99.3%；优化后操作压力降至1.0 MPa，降低幅度达16.7%，膜通量调整为65 LMH，脱盐率提升至99.6%，提升0.3%。操作压力的合理降低，直接减少高压泵运行能耗，实现系统节能目标。膜通量的适度下调，可减少膜表面剪切力，降低胶体、有机物等污染物的吸附速率，减缓膜污染进程[7]。脱盐率的小幅提升，使产水总溶解性固体含量更易达到饮用水标准，实现能耗、膜寿命与产水品质的协同优化，为系统长期稳定运行提供保障。

3.3 能耗动态调控控制

构建能耗动态调控系统，实时监测高压泵功率、能量回收装置效率与系统产水量，动态调整运行参数。当系统负荷低于50%时，自动关闭1组膜组件与对应的高压泵，降低空载能耗；当能量回收装置效率低于90%时，自动启动清洗程序，恢复回收效率。通过负荷匹配算法，使系统能耗随产水负荷动态调整，在保证产水量的前提下，最小化单位产水能耗，实现系统全工况低能耗运行。

3.4 系统工况协同匹配控制

预处理单元运行工况与核心过滤单元接收工况形成稳定适配关系。预处理单元出水浊度控制在1 NTU以下，SDI值维持≤5，为反渗透膜组件提供合规进水条件。核心过滤单元内膜组件操作压力稳定在1.0 MPa，膜通量保持65 LMH，能量回收装置回收效率维持 95%。高压泵输出功率与膜组件运行压力需求精准对应，浓水余压回收量与系统进水增压需求形成闭环适配。各单元运行参数无偏差衔接，规避单元间运行参数冲突引发的无效能耗损耗。系统各部件工况始终处于设计最优区间，产水流程连续无间断，产水水质指标稳定

契合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)标准要求，单位产水能耗稳定在 2.2 kWh/m^3，实现系统全工况下运行状态与核心性能指标的稳定契合。

4 系统性能测试与验证

4.1 测试方案设计

搭建低能耗反渗透海水过滤系统试验平台，平台集成预处理、核心过滤与辅助控制单元，与实际工程应用场景保持一致。选取实际海水作为进水，进水含盐量 35 000 mg/L，浊度 8 NTU，温度 25 ℃。测试指标包括单位产水能耗、脱盐率、产水流量、膜污染速率与系统稳定性，全面反映系统综合性能[8]。测试周期为 72 h，每 12 h 记录 1 次数据。设置传统反渗透系统作为对照组，采用相同进水条件，对比优化后系统的综合性能，验证集成设计与控制优化的有效性。

4.2 测试结果分析

测试过程中系统运行平稳，各单元协同有序，无故障停机现象，各项测试指标均符合预设设计标准，未出现异常工况。为直观呈现集成设计与控制优化策略的实际作用，通过对比优化后系统与传统反渗透系统（对照组）的关键性能指标，清晰反映优化措施带来的成效，具体对比数据见表 3。

表 3 优化后系统与对照组性能对比

测试指标	优化后系统	对照组	优化提升率
单位产水能耗（kWh/m^3）	2.2	3.5	37.1%
脱盐率（%）	99.6	99.0	0.61%
产水流量（m^3/h）	0.5	0.45	11.1%
膜污染速率（MPa/d）	0.012	0.025	52.0%

由表 3 可知，优化后系统单位产水能耗为 2.2 kWh/m^3，对照组为 3.5 kWh/m^3，优化提升率达 37.1%，依据对照组能耗数据计算，每生产 1 m^3 淡水可节约 1.3 kWh 电能。脱盐率从对照组的 99.0% 提升至 99.6%，提升 0.61%，有效降低产水含盐量；产水流量从 0.45 m^3/h 提升至 0.5 m^3/h，提升 11.1%，增强系统产水能力；膜污染速率从 0.025 MPa/d 降至 0.012 MPa/d，降低 52.0%，大幅减缓膜性能衰减速度[9]。各项指标的优化，证明集成设计与控制策略的科学性，系统在降低能耗的同时，显著提升产水效率、产水品质与运行稳定性，为低能耗海水淡化技术的工程应用提供可靠数据支撑。

4.3 优化效果验证

长期运行验证显示，优化后系统连续运行 72 h 无故障，产水水质稳定，总溶解性固体≤ 500 mg/L，细菌总数≤ 10 CFU（Colony-Forming Unit，CFU）/mL，完全满足《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2022）生活饮用水卫生标准。膜元件运行 72 h 后通量衰减率仅 3.2%，对照组同期为 7.8%，可有效减缓膜污染，延长膜元件更换周期，降低运维成本[10]。系统单位产水能耗稳定在 2.2 kWh/m^3 ～ 2.3 kWh/m^3，接近全球先进海水淡化系统能耗水平，节能效果显著。该系统适配多种中小型海水淡化场景，具备良好工程应用价值与推广前景，可有效缓解沿海地区及海岛水资源短缺问题。

5 结束语

针对反渗透海水过滤系统能耗高、集成不合理、控制精度不足等问题，完成系统集成设计与控制策略优化，构建预处理、核心过滤与辅助系统协同集成架构，创新自适应控制与能耗动态调控逻辑。通过性能测试验证，优化后的系统能有效降低单位产水能耗，提升脱盐率与产水效率，减缓膜污染，解决了能耗与产水品质的平衡难题。本文的研究存在测试范围较窄、长期运行数据不足等局限，后续将扩大测试场景，结合可再生能源耦合技术，进一步优化系统能耗，推动低能耗海水淡化技术的规模化、智能化发展。

参考文献：

[1] 贾龙萍.基于四级过滤与智能联控的市政道路排水系统优化探究 [J]. 建材发展导向 ,2026,24(05):70-72.
[2] 孙东祥,闫贞,韩冲,等.低位水池自动过滤系统的优化方案 [J]. 自动化应用 ,2026,67(03):253-255.
[3] 刘欢欣.简述膜过滤技术在重金属污水治理中的应用 [J]. 皮革制作与环保科技 ,2025,06(24):26-28.
[4] 许康,冷俊昭,沈明,等.智能海水悬浮物真空过滤系统设计 [J]. 粘接 ,2025,52(07):117-120.
[5] 郭洲,鞠文杰,李岩,等.自动反冲洗过滤器在海水系统中的应用 [J]. 石油和化工设备 ,2024,27(09):115-116.
[6] 魏阳,张勇,曹明勇,等.巧用微型水下机器人解决海水提升泵滤网堵塞难题 [J]. 石油和化工设备 ,2024,27(08):90-92,85.
[7] 林海.核电厂海水过滤系统常见故障分析及应对措施 [J]. 中国设备工程 ,2023(S2):66-68.
[8] 李飞宇,陈星星.百万吨级费托合成石蜡过滤分离设备创新与应用 [J]. 石化技术 ,2023,30(11):31-33.
[9] 何俊杰.人员走动对室内颗粒物场扰量与控制策略研究 [D]. 河北工业大学 ,2023.
[10] 李金泽.大型海水淡化厂中气浮（DAF）- 双介质过滤（DMGF）系统预处理工艺应用 [J]. 机电信息 ,2022(15):87-89.

水利工程帷幕灌浆施工技术及防渗效果分析

代峻儒

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 四川盆地广泛分布的红层软硬互层岩体，具有裂隙发育不均、遇水软化、透水性差异大的特征，坝基渗漏是该区域水利工程建设与运营的核心病害，帷幕灌浆是坝基防渗处理的技术手段。本文结合四川地区某中型水库枢纽工程实例，系统剖析红层地层帷幕灌浆施工的核心技术难点，构建了“勘察设计—工艺优化—质量管控—效果验证”的全流程施工技术体系，针对性优化关键施工参数，以期为四川及西南红层地区同类水利工程帷幕灌浆施工提供实践参考。工程应用结果表明，该技术体系可有效降低坝基岩体透水率，防渗效果满足设计要求。

关键词 水利工程；帷幕灌浆；前期勘察；参数设计；防渗效果

中图分类号：TV543 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.002

0 引言

四川是我国的水利大省，境内江河纵横，水库枢纽工程众多，是保障区域防洪安全、供水灌溉、农村饮水的核心基础设施。四川盆地广泛分布侏罗系、白垩系红层砂岩与泥岩互层岩体，受区域构造运动与多雨气候影响，岩体节理裂隙发育、局部存在溶蚀裂隙与软弱夹层，坝基渗漏、绕坝渗流问题突出，严重威胁水利工程的运行安全[1]。帷幕灌浆通过高压灌注水泥浆液填充岩体裂隙，形成连续防渗帷幕，是当前水利工程坝基防渗处理的主流技术。但红层地层岩体性质不均、可灌性差异大，传统灌浆工艺与地层适配性不足，易出现漏浆、串浆、灌浆效果不达标的问题[2]。本文结合四川地区水利工程实例，剖析帷幕灌浆施工核心难点，研究关键施工技术，开展防渗效果分析。

1 工程概况

本项目为四川川中丘陵区某中型水库枢纽工程，工程任务以农业灌溉、乡镇供水为主，兼顾防洪与生态补水，水库总库容1 280万m^3，枢纽主体为碾压混凝土重力坝，最大坝高38.6 m，坝顶长度225 m，共分为8个坝段。坝基岩体为侏罗系遂宁组红层，以砂岩与泥岩互层为主，岩层倾角3°～5°，其中砂岩岩体节理裂隙发育，透水性强，泥岩遇水易软化崩解，局部存在泥化软弱夹层与溶蚀裂隙；坝址区地下水位埋深1.2 m～3.5 m，存在承压水层，承压水头最高达8.2 m。坝基防渗采用垂直帷幕灌浆方案，防渗标准为坝基岩体透水率$q \leqslant 5$ Lu，帷幕灌浆沿坝轴线单排布置，灌浆孔孔距2 m，孔深穿透强透水层进入相对隔水层不小于5 m，最大孔深42 m，灌浆总进尺8 620 m[3]。

2 水利工程帷幕灌浆施工核心技术难点

2.1 红层地质条件复杂，地层可灌性差异大

四川红层砂岩与泥岩互层的地质特征，是帷幕灌浆施工的首要难点。坝基岩体软硬不均，砂岩质地坚硬，节理裂隙发育，透水性强，浆液扩散性好；而泥岩质地软弱，裂隙不发育，透水性极差，遇水易软化崩解，可灌性差，同一灌浆孔内不同地层的可灌性差异悬殊，统一的灌浆参数无法适配所有地层，易出现砂岩段灌浆量过大、泥岩段无法灌进的问题。同时，局部存在的泥化软弱夹层与溶蚀裂隙，会导致浆液扩散失控，出现无限制漏浆，无法形成连续的防渗帷幕，严重影响防渗效果。

2.2 特殊工况频发，施工过程管控难度大

四川红层地区高地下水位、高承压水的水文特征，导致帷幕灌浆施工过程中特殊工况频发，管控难度极大。高承压水会抵消部分灌浆压力，导致浆液无法有效填充裂隙，甚至出现浆液倒灌的问题；砂岩段裂隙连通性好，易出现跨孔串浆、坝面冒浆、沿裂隙大面积漏浆等问题，若处理不及时，会导致灌浆饱满度不足，帷幕出现断点。同时，在钻孔过程中，泥岩遇水软化易引发孔壁坍塌、缩径，导致成孔质量不达标，甚至出现卡钻、埋钻等事故；灌浆压力控制不当，会导致岩体

作者简介：代峻儒（1986-），男，本科，研究方向：水利水电工程。

劈裂，破坏原有岩体完整性，反而加剧坝基渗漏风险。

2.3 隐蔽工程施工质量管控体系不完善

帷幕灌浆属于地下隐蔽工程，施工工序多、技术要求高，质量管控难度大，是施工过程中的核心难点。帷幕灌浆施工涵盖钻孔、洗孔、压水试验、灌浆、封孔等多道工序，每一道工序的质量都会直接影响最终防渗效果，尤其是灌浆压力、浆液配比、灌浆量、结束标准等关键参数，需全程精准管控。但四川地区中小型水利工程多位于偏远乡村，施工单位技术力量薄弱，一线作业人员专业水平参差不齐，普遍存在“重进度、轻质量”的误区，未建立完善的三检制度，过程管控流于形式，易出现钻孔偏斜、洗孔不彻底、灌浆参数控制不当等问题，导致帷幕灌浆质量不达标，防渗效果无法满足设计要求。

2.4 防渗效果精准评价与验证难度大

帷幕灌浆防渗效果的精准评价，是验证工程质量的核心环节，也是当前施工中的重要难点。传统的防渗效果评价主要依靠检查孔压水试验，仅能反映单点的岩体透水性，而四川红层地层透水性不均，检查孔的代表性有限，无法全面反映帷幕整体的连续性与防渗性能。同时，坝基渗流量监测易受降雨、地下水位波动等因素影响，难以精准区分帷幕防渗效果与自然水文变化的影响。

3 帷幕灌浆关键施工技术及防渗效果分析

3.1 前期勘察与灌浆参数精细化设计技术

前期勘察与参数设计是帷幕灌浆施工的前提，需结合四川红层地层特征，通过先导孔勘察精细化划分地层，优化灌浆设计参数，从源头保障防渗效果。首先，沿坝轴线每 20 m 布置一个先导孔，采用取芯钻进，详细查明坝基岩体的岩性分布、裂隙发育情况、透水率、地下水位与承压水头等核心参数，将坝基岩体划分为强透水层、中等透水层、弱透水层与相对隔水层，针对不同地层制定差异化的灌浆方案。

帷幕灌浆防渗控制的核心指标为岩体透水率，其计算公式为：

$$q=\frac{Q}{p\cdot L} \tag{1}$$

式（1）中：q 为岩体透水率，单位 Lu；Q 为压水试验稳定流量，单位 L/min；P 为试验段压水压力，单位 MPa；L 为试验段长度，单位 m。

基于公式与先导孔勘察结果，优化灌浆设计核心参数，针对不同透水率地层确定灌浆压力、浆液配比、灌浆段长等关键参数，具体设计参数见表 1。同时，采用分序加密的灌浆原则，将灌浆孔分为Ⅰ序、Ⅱ序、Ⅲ序，依次施工，通过先序孔灌浆填充大裂隙，逐步提升地层密实度，控制后序孔浆液扩散范围，确保帷幕连续均匀。

表 1 不同地层帷幕灌浆核心设计参数

地层透水率分级	岩体特征	灌浆段长（m）	设计灌浆压力（MPa）	水灰比分级	结束标准
强透水层（q ≥ 30 Lu）	强风化砂岩、溶蚀裂隙发育段	2 ～ 3	1.0 ～ 1.5	3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.5:1	注入率≤ 1 L/min，持续 30 min
中等透水层（5 Lu ＜ q ＜ 30 Lu）	中风化砂岩、裂隙发育段	3 ～ 5	1.5 ～ 2.0	3:1、2:1、1:1、0.8:1	注入率≤ 1 L/min，持续 60 min
弱透水层（q ≤ 5 Lu）	完整泥岩、微风化砂岩段	5 ～ 8	2.0 ～ 2.5	2:1、1:1	注入率≤ 0.5 L/min，持续 30 min

3.2 适配红层地层的灌浆施工工艺优化技术

针对四川红层地层特点，对帷幕灌浆全工序进行工艺优化，解决施工过程中的各类特殊工况，确保灌浆质量。钻孔施工采用地质钻机回转取芯钻进，针对泥岩段采用干钻或低转速、小给进量钻进，减少清水对泥岩的浸泡，避免孔壁坍塌；钻孔完成后采用测斜仪检测孔斜，确保孔底偏差不大于 1/100 孔深，避免钻孔偏斜导致帷幕搭接失效。洗孔采用高压水脉动冲洗，冲洗压力为灌浆压力的 80%，冲洗至回水清澈为止，彻底清除孔内岩粉与裂隙内的充填物，确保浆液与岩体裂隙有效黏结[4]。

灌浆施工采用自上而下分段卡塞灌浆法，每段灌浆完成后待凝 24 h，再进行下一段钻孔与灌浆，避免承压水顶托导致浆液流失。针对施工过程中常见的漏浆、串浆、冒浆等特殊工况，制定专项处理措施，具体见表 2。

3.3 全流程施工质量管控技术

针对帷幕灌浆隐蔽工程的特点，构建“事前控制—事中管控—事后验收”的全流程质量管控体系，确保施工全过程质量可控。

在事前控制方面，开工前开展灌浆试验段施工，

表2 帷幕灌浆施工常见特殊工况处理措施

特殊工况类型	诱因	针对性处理措施
大面积漏浆	裂隙连通性好、溶蚀裂隙发育	降低灌浆压力，采用浓浆、间歇灌浆；漏浆严重时掺入速凝剂、砂料，待凝后复灌
跨孔串浆	岩体裂隙连通性好，浆液扩散至相邻钻孔	串浆孔为未灌浆孔，封堵孔口待灌；串浆孔为已灌浆孔，待凝后扫孔复灌
孔口冒浆	表层岩体裂隙发育、灌浆压力过大	降低灌浆压力，采用低压浓浆，孔口封堵待凝，间歇式灌浆
孔壁坍塌	泥岩遇水软化崩解	缩短灌浆段长，采用跟管钻进，坍塌段灌注水泥砂浆待凝后，重新扫孔钻进
浆液倒灌	高承压水顶托	提高灌浆初始压力，采用浓浆灌注，待凝后复灌，确保浆液有效填充裂隙

验证灌浆参数与工艺的适配性，优化施工方案；对水泥、外加剂等原材料进行进场复检，确保原材料质量符合规范要求；对一线作业人员开展技术交底与专业培训，明确施工工艺与质量标准，提升作业人员专业水平。

在事中管控方面，建立“班组自检、项目部复检、监理抽检”的三级质量管理制度，每道工序完成后，必须经检验合格后方可进入下一道工序；灌浆施工全过程实行旁站监理，实时监控灌浆压力、注入率、浆液水灰比等关键参数，详细记录灌浆全过程数据，确保施工过程可追溯；严禁擅自调整灌浆参数、缩短灌浆时间、违规结束灌浆等行为，对不合格的灌浆段，必须扫孔复灌，直至合格。

在事后验收方面，每序孔灌浆完成后，对灌浆资料进行全面整理分析，针对灌浆量异常、压水试验不合格的孔段，加密布置检查孔，开展补充灌浆；雨季施工时，制定专项施工方案，做好钻孔与灌浆孔的防雨封堵，避免雨水进入孔内浸泡泥岩，同时根据地下水位变化动态调整灌浆压力，确保灌浆质量[5]。

3.4 防渗效果检测与分析

本项目帷幕灌浆施工完成后，采用检查孔压水试验、坝基渗流量监测、钻孔取芯检测三种方式，全面评价防渗效果。首先，按照规范要求，沿坝轴线共布置42个检查孔，检查孔数量为总灌浆孔数的10%，重点布置在灌浆量异常、透水率大的坝段，检查孔压水试验结果显示，所有检查孔段岩体透水率均≤5 Lu，合格率100%，远优于试验段72%的合格率，满足设计防渗标准。

钻孔取芯检测结果显示，岩体裂隙内水泥结石填充饱满，结石与岩体黏结紧密，泥岩段无软化崩解现象，岩体完整性显著提升，形成了连续、均匀的防渗帷幕。

坝体蓄水后，通过坝基渗压计与量水堰持续监测，坝基总渗流量为0.82 L/s，远小于设计允许值5 L/s，坝基渗压系数小于0.3，防渗效果显著。对比施工前后，坝基岩体平均透水率从32.6 Lu降至2.1 Lu，降幅达93.6%，验证了本次优化后的帷幕灌浆施工技术的有效性，可有效解决四川红层地层坝基渗漏问题。

4 结束语

本文结合四川地区某中型水库工程实例，针对红层软硬互层岩体的工程特性，系统剖析了水利工程帷幕灌浆施工的核心技术难点，构建了涵盖勘察设计、工艺优化、质量管控、效果验证的全流程施工技术体系，针对性解决了红层地层可灌性差异大、特殊工况频发、质量管控难等问题。工程应用结果表明，该技术体系可有效降低坝基岩体透水率，形成连续稳定的防渗帷幕，防渗效果满足设计要求。未来，可进一步结合物探检测技术，实现帷幕灌浆防渗效果的全域可视化评价，持续提升水利工程防渗处理的精细化水平。

参考文献：

[1] 张祷婷.帷幕灌浆施工技术在水工建筑工程施工中的应用研究[J].水上安全,2025(19):184-186.
[2] 杨晓旋.防渗加固目标下帷幕灌浆施工技术在水利工程中的应用[J].工程技术研究,2025,10(19):82-84.
[3] 张兴龙.水利水电工程施工阶段帷幕灌浆施工技术的应用研究[J].石河子科技,2025(05):42-43.
[4] 刘茜茜.水利工程施工中的防渗技术分析[J].工程技术研究,2025,10(18):62-64.
[5] 吴周.水利水电工程中的帷幕灌浆施工技术[J].科学技术创新,2025(17):149-152.

高性能复合材料在压力容器封头中的应用研究

庞　可，杨　倩

（河南九天封头制造有限公司，河南 商丘 476300）

摘　要　压力容器作为能源和化工等领域的核心设备，其安全可靠与否直接关系到安全性能。鉴于传统金属封头在轻质、抗腐蚀等方面的局限性，本文以高性能复合材料封头为研究对象，选取三种不同的碳纤维 / 环氧树脂铺设方式，以模压成形为主要研究手段，研究不同铺层方式对其力学性能的影响。结果表明，采用环形和纵向交错铺设方式，配合最佳养护工艺，可以获得 28.6 MPa 的冲击压力，并能得到较为均匀的应力分布。

关键词　高性能复合材料；压力容器封头；铺层设计；水压爆破；成型工艺

中图分类号：TH49；TB33　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.003

0　引言

压力容器在石油、化工和航空航天等行业具有重要的应用价值，其安全运行对人身和财产的安全起着至关重要的作用。封头是压力容器的主要承载构件，其结构的完整性和耐久性是设计的首要问题[1]。随着工业向大型化、高参数化方向发展，传统金属封头在轻质、抗腐蚀等领域的应用越来越突出，对新材料提出了更高的要求。高性能纤维增强复合材料因其高比强度和高可设计性等优点而被广泛用于各类结构件，是打破传统技术瓶颈，实现压力容器轻质、高性能化的一条重要途径，具有重大的理论和实际意义。

1　试验方法和设计

1.1　原材料与规格

本研究选用 T700 级碳纤维作为增强材料，其具有拉伸强度高、弹性模量适中、断裂延伸率大等特点，适用于压力容器类承压结构的制造。基体材料选用耐热性能和韧性良好的双酚 A 型环氧树脂体系，该树脂体系具有粘度适中、浸润性好、固化收缩率低以及与碳纤维匹配性好等优点。为改善树脂与纤维的界面结合性能，在树脂体系中添加了适量的硅烷偶联剂作为界面改性剂[2]。

1.2　封头试样制备工艺

对复合材料封头样品进行模压成形，使其具有较好的成形精度，并能有效地控制纤维含量。该模具由冲模、凹模及定位引导机构构成，其型面粗糙度 Ra ≤ 0.4 μm，以保证成形后的封头表面平滑。根据封头的受力特点，在封头的极孔边、过渡弧等应力集中部位，对其进行局部加固。本研究拟采用三种铺层方案，即方案 A（全环向铺层为主）、方案 B（环向与纵向交替铺层）和方案 C（准各向同性铺层），如表 1 所示。

表 1　复合材料封头铺层方案设计

铺层方案	铺层角度	铺层比例 /%	总层数	设计厚度 /mm
方案 A	90°（环向）为主	75% 环向，25% 轴向	24	6.0
方案 B	环向 / 纵向交替	55% 环向，45% 轴向	24	6.2
方案 C	0° /+45° /-45° /90°	各方向各 25%	24	6.1

铺装作业是在清洁的环境下进行的，根据预先设定的铺铺次序，将预浸料切割成薄片，然后铺入模腔内，并在 2 ～ 3 层铺片后再进行预压，以减小层间空隙。铺装完毕后，将模具合上，放入油压机内加热、加压。将其硫化过程分为三个阶段：升温、保温、保压及冷却。采用 1.5 ℃ /min 的升温速度，130 ℃的硫化温度，0.8 MPa 的硫化压力，120 min 的保温时间，冷却到低于 60 ℃，脱模。为了考察硫化过程中封头性能的变化，设计三个不同的硫化工艺参数，如表 2 所示。

1.3　试验方案设计

采用非破坏性测试（超声波 C 扫描）、水压爆破（加载速度 0.5 MPa/min）、电阻—应变测试和显微组织等

作者简介：庞可（1995-），男，专科，工程师，研究方向：机械工程。

表 2 复合材料封头固化工艺参数

工艺编号	固化温度 /℃	固化压力 /MPa	保温时间 /min	升温速率 /（℃ /min）
工艺Ⅰ	120	0.6	90	2.0
工艺Ⅱ	130	0.8	120	1.5
工艺Ⅲ	140	1.0	150	1.0

手段，全面评价其机械性能[3]。每一组采用 3 个平行样品，平均测试结果。检查封头的内部缺陷和壁厚分布情况，并对其进行爆破实验。在试验过程中，采用三个方向的应变花片，以 10 Hz 的频率进行数据采集，并对各应力状态下的应变和应变计进行测试。

在爆破实验结束后，对破损部位进行切削采样，利用 SEM 对断口进行显微观测，分析纤维断裂、基体断裂和界面剥离等失效形式。利用金相显微镜对其横断面进行了显微组织分析，并测定了纤维的体积含量及孔隙度。根据相关标准对纤维的体积含量进行测定，采用图象分析方法对其进行检测[4-5]。表 3 总结了测试的内容，测试条件和使用的准则。

1.4 试验质量控制与数据处理

为保障实验数据的可靠性，采用全流程质控措施：原材料入厂复验性能，预浸料树脂含量萃取法检测控制 ±2% 偏差；激光投影辅助铺层定位，固化过程温压实时监测；爆破试验前对试样外观、尺寸进行检测（见表 4）。

表 3 复合材料封头性能测试项目及方法

测试项目	试验方法 / 仪器	试样数量	测试标准 / 条件
超声 C 扫描	Omniscan MX2	全数	5 MHz 聚焦探头
水压爆破试验	爆破试验台	3 件 / 组	加压速率 0.5 MPa/min
应力应变测试	DH3820 静态应变仪	3 件 / 组	采样频率 10 Hz
纤维体积含量	硝酸消化法	5 个 / 组	GB/T 3366-2021
孔隙率测定	图像分析法	5 个 / 组	放大 200 倍
微观形貌观察	扫描电镜	5 个 / 组	加速电压 15 kV

2 结果分析

2.1 无损检测与成型质量分析

超声波 C 扫描测试结果显示（见表 5），三种组合封头的总体内部整体良好，没有明显的致命缺陷。从缺陷的分布来看，环形纵向交错铺设（方案 B）的成形质量最好，其缺陷率为 3.2%；其次是方案 A（4.8%），最大的是方案 C（6.5%）。试验结果表明，适当的铺层角改变有利于树脂的流动性和密实性。

如表 5 所示，方案 B 封头实测厚度与设计值偏差最小（2.8%）且精度最高。厚度分布呈顶部薄、边缘厚特征，此现象与树脂成型时向边缘流动相关。工艺Ⅱ（130 ℃ /0.8 MPa/120 min）制备的封头孔隙率最低（1.2%），优于工艺Ⅰ（2.1%）和工艺Ⅲ（1.8%），表明适宜温压条件可提高固化密实度。

表 4 复合材料封头试样几何尺寸测量结果

试样组别	封头高度 /mm	极孔直径 /mm	直边段高度 /mm	平均厚度 /mm	厚度偏差 /%
方案 A	152.3	80.1	30.2	5.92	3.5
方案 B	151.8	79.8	30.5	6.15	2.8
方案 C	152.5	80.2	29.8	6.08	3.1
工艺Ⅰ组	152.1	80.0	30.3	6.12	4.2
工艺Ⅱ组	151.8	79.8	30.5	6.15	2.8
工艺Ⅲ组	151.5	80.3	30.0	6.05	3.8

2.2 水压爆破性能分析

水力爆破实验结果显示（见表 6），铺层方式和养护方式对复合材料封头的承载性能有较大的影响。其中，环向和纵向环向交错铺设方式的最大爆破压力为 28.6 MPa，分别比 A 和 C 分别增加 13.0% 和 25.4%，说明在双向应力条件下，合理的环向纤维配比可以有效地提高承载能力。爆炸压力与纤维体积分数成正比，

表 5 复合材料封头无损检测与质量参数

试样组别	缺陷面积比例 /%	平均孔隙率 /%	纤维体积含量 /%	玻璃化转变温度 /℃
方案 A	4.8	1.8	58.3	128.5
方案 B	3.2	1.3	62.1	131.2
方案 C	6.5	2.2	55.6	125.8
工艺Ⅰ组	5.3	2.1	59.2	122.6
工艺Ⅱ组	3.2	1.3	62.1	131.2
工艺Ⅲ组	4.1	1.8	60.5	133.5

表 6 不同铺层方案与固化工艺的爆破性能对比

试样组别	平均爆破压力 /MPa	标准差 /MPa	变异系数 /%	破坏起始位置	破坏模式特征
方案 A	25.3	1.2	4.7	极孔边缘	裂纹沿环向扩展，突发性破坏
方案 B	28.6	0.9	3.1	过渡圆弧区	局部纤维断裂后逐步扩展，有预兆
方案 C	22.8	1.5	6.6	多处同时	多裂纹同时扩展，破坏突然
工艺Ⅰ组	24.5	1.4	5.7	极孔边缘 / 过渡圆弧	混合模式，无明显规律
工艺Ⅱ组	28.6	0.9	3.1	过渡圆弧区	局部纤维断裂后逐步扩展
工艺Ⅲ组	27.2	1.1	4.0	过渡圆弧外侧	纤维断裂为主，伴有分层

而过高（＞ 65%）则会降低材料的力学性能。在破坏形态方面，A 方案从圆弧区开始，B 方案从过渡段逐渐发展，而 C 方案则是同时在多个位置发生裂纹，情况更加复杂。在固化工艺中，工艺Ⅱ的封头爆破压力最高（28.6 MPa），工艺Ⅲ为 27.2 MPa，工艺Ⅰ最低（24.5 MPa）。工艺Ⅰ因固化不足导致基体与界面性能差；工艺Ⅲ升温过慢，可能引起纤维屈曲。

2.3 应力应变发展规律

试验结果显示（见表 7），复合材料封头的变形可以划分为线性和非线性两个阶段。在压强比不超过 0.3 的情况下，所有点的应变均呈直线上升趋势，表明该结构已进入弹性变形阶段；当应变大于 0.3 时，局部区域的应变呈现非线性增长，显示局部存在的微裂缝，而在过渡弧的外侧及极孔的周边，由于应力的集中，导致较弱的区域。在应力比为 0.7 ～ 0.8 时，应变增长速度明显增加，预示着接近失效。

对比不同铺层方案，方案 B 应变分布最均匀（最大 / 最小应变比为 1.8），方案 A 为 2.3，方案 C 最不均匀（达 2.7），显示合理铺层可有效优化应力分布。环向与经向应变比值差异亦与铺层中纤维方向配置相符。

表 7 不同压力阶段各测点应变特征对比（方案 B，工艺Ⅱ）

测点编号	弹性阶段终点应变 / με	非线性起始压力比	破坏前最大应变 / με	环向 / 经向应变比 *	失效预警特征
S-01	2 850	0.42	8 650	1.32	应变增长平缓，无明显拐点
S-02	3 120	0.38	9 430	1.45	压力比 0.65 后增长加速
S-03	4 250	0.32	12 860	1.28	早期非线性，持续稳定增长
S-04	2 680	0.45	7 920	1.63	线性段长，后期快速增长
S-05	4 580	0.30	14 250	1.19	早期非线性，后期增速明显

（注：* 环向 / 经向应变比取压力比为 0.5 时的数值。）

通过对两种工艺的对比研究，在同等压力下，处理Ⅱ制备的头材料具有更高的力学强度，同时具有更高的纤维体积含量和更好的界面黏结性能，可以更有效地传递载荷，发挥纤维增强效应。

3 结论

针对高性能复合材料在压力容器封头中的应用，通过系统实验研究发现：铺层结构是影响密封性能的关键因素，环形和纵向交错铺设可以提高其承载力，优化其应力分布。结果表明，在 130 ℃、0.8 MPa 范围内，可以得到较小的孔隙率和较高的纤维体积分数。

参考文献：

[1] 刘汉邦.压力容器封头几何结构对其极限承载能力的影响机制分析 [J]. 内燃机与配件 ,2025(24):66-68.
[2] 卢长安.压力容器用封头制造工艺设计分析 [J]. 机械管理开发 ,2024,39(12):292-294.
[3] 丘铭军,李新强,范淑琴,等.大直径薄壁压力容器封头成形工艺与设备合理性的探讨 [J]. 重型机械 ,2023(05):1-7.
[4] 王冰冰,林木,孟祥瑞.复合材料压力容器封头连接的建模及失效分析 [J]. 机械制造与自动化 ,2022,51(05):88-90.
[5] 蔡强,赵晓宁,李新田,等.纤维缠绕复合材料压力容器多型封头对比分析 [J]. 火箭推进 ,2020,46(06):90-96.

回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的应用研究

胡 进

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路三分公司，四川 成都 610200）

摘 要 隧道衬砌混凝土强度是决定隧道结构长期服役安全与耐久性的核心指标，回弹法因无损、便捷、高效的特点，已成为隧道工程现场混凝土强度检测的主流技术手段。本文结合隧道衬砌结构的工况特殊性，系统阐述了回弹法检测的核心原理与应用优势，梳理了检测全流程的关键实施要点，深入分析了影响检测精度的核心因素，并提出了针对性的精度优化与质量控制策略，以期为回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的规范化应用提供技术参考，助力隧道工程质量精细化管控。

关键词 回弹法；隧道衬砌；混凝土强度；无损检测

中图分类号：TU528.07；U456.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.004

0 引言

在我国交通基础设施建设高速发展的背景下，隧道工程已成为公路、铁路等线性工程的重要组成部分。二次衬砌作为隧道主体结构的核心受力与防护单元，其混凝土抗压强度直接关系到隧道的结构安全、服役寿命与运营稳定性。在工程现场检测中，钻芯法等破损检测手段存在破坏结构、效率低下、成本较高等局限，难以满足隧道衬砌大面积、常态化的强度检测需求[1]。回弹法作为成熟的无损检测技术，适配隧道受限空间作业场景，在工程中得到广泛应用。本文针对隧道衬砌的特殊工况，系统研究回弹法检测的应用要点与精度控制策略，为现场检测实践提供理论与技术支撑。

1 回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的核心原理与应用优势

1.1 回弹法检测的基本原理

回弹法检测是基于混凝土表面硬度与抗压强度之间的正相关统计关系。通过回弹仪内的弹性机构驱动弹击锤，以恒定的冲击能量冲击混凝土表面，弹击锤回弹的距离与混凝土表面硬度直接相关，该比值即为回弹值。结合预先建立的回弹值—混凝土抗压强度测强曲线，可通过实测回弹值、碳化深度等参数，换算得到混凝土的抗压强度换算值。目前，我国回弹法检测的核心技术依据为《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》（JGJ/T 23-2011），同时需适配公路、铁路行业隧道工程的专项检测规范要求。

1.2 隧道衬砌混凝土检测的工况特殊性

相较于房屋建筑等平面结构混凝土检测，隧道衬砌混凝土检测存在显著的工况特殊性，对回弹法的应用提出了更高要求。一是结构形态特殊，隧道衬砌为弧形曲面结构，拱顶、拱腰部位检测面曲率大，回弹角度控制难度高，易引入操作误差；二是作业空间受限，隧道内断面空间有限，拱顶等部位操作平台搭设难度大，检测作业的便捷性与规范性受到制约；三是混凝土服役环境特殊，隧道内相对湿度高、通风条件有限，混凝土碳化发展规律与室外环境存在显著差异，同时衬砌混凝土多采用泵送施工工艺，常掺加大比例矿物掺合料，表面硬度与内部强度的匹配性与普通混凝土不同；四是检测面状态复杂，衬砌混凝土受模板工艺、脱模剂、浮浆层等影响，表面状态离散性大，易对检测结果造成干扰。

1.3 回弹法在隧道衬砌检测中的应用优势

在隧道衬砌混凝土强度检测场景中，回弹法相较于其他检测技术具备不可替代的应用优势。其一为无损性，检测过程仅对混凝土表面进行轻微打磨与弹击，不会对衬砌结构造成任何损伤，完全适配隧道主体结构不允许随意破损的管控要求；其二为便捷高效，回弹仪设备便携易操作，无需复杂配套设备，可适配隧道内受限空间作业，单测区检测耗时短，可实现衬砌

作者简介：胡进（1976-），男，专科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁。

结构大面积、多段落的批量检测；其三为经济性强，检测过程无耗材消耗，无需后续结构修补工序，检测成本远低于钻芯法等破损检测手段；其四为数据反馈及时，现场可快速完成回弹值采集与初步分析，能第一时间发现混凝土强度异常问题，适配工程现场质量管控的时效性要求。

2 回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的关键实施要点

2.1 检测前的准备工作

首先针对仪器设备管控，回弹仪必须经法定计量部门检定合格且在有效期内，现场检测前需在洛氏硬度 HRC 为 60±2 的钢砧上完成率定，率定回弹值应稳定在 80±2 范围内，同时需清理仪器机芯粉尘，保证弹击机构运行顺畅。其次是技术资料收集，需全面获取衬砌混凝土的设计强度等级、配合比参数、原材料种类、矿物掺合料掺量、养护方式、施工日期与实际龄期等核心信息，为测强曲线选择与数据修正提供依据。最后是现场检测面处理，需采用砂轮打磨清除检测面的浮浆、脱模剂、油污、抹灰层与松散表层，露出混凝土密实原生面，保证检测面平整清洁 [2]。

2.2 测区布置与测点布设要求

测区与测点的规范布设是检测工作的核心环节，需严格贴合隧道衬砌的结构特点执行。隧道衬砌检测应按施工段、结构部位划分检测单元，单个构件的测区数量应符合规范要求，对于长度小于 10 m 的构件，测区数量不应少于 5 个；对于长度大于 10 m 的构件，测区间距不宜大于 2 m。单个测区应布置在衬砌混凝土浇筑侧面，面积控制为 0.04 m^2（200 mm×200 mm），测区应避开蜂窝、麻面、裂缝与预埋件部位，保证测区范围内混凝土均匀密实。每个测区内均匀布设 16 个测点，测点间距不应小于 20 mm，测点距构件边缘不应小于 30 mm，避免测点集中或临近边界造成数据失真（见表 1）。

2.3 回弹值的规范采集与数据处理

现场回弹法检测数据的采集必须严格遵循规范化的操作流程。在实际操作中，回弹仪的轴线应始终与被测表面保持垂直关系；当检测对象位于隧道拱部、侧墙或其他非水平位置时，还需准确记录倾斜角度，并按相关规定执行相应的角度修正计算。为确保测试结果的准确性，在加载过程中要求施加力的速度均匀且稳定，同时复位动作需平稳进行，以防外力冲击引发设备震动或偏移现象。每次测量仅限进行一次回弹试验，不得重复施加载荷。数据分析阶段，首先应对单个测区内获得的 16 个回弹值进行异常值剔除处理，随后结合碳化深度均值，通过适用的测强关系曲线推算测区混凝土的实际抗压强度 [3]。

表 1 隧道衬砌回弹法检测技术参数控制要求

控制项目	规范技术要求	隧道工况特殊管控要点
回弹仪率定	钢砧率定回弹值应为 80±2，检定有效期不超过 6 个月	隧道多粉尘环境下，每日检测前后均需进行率定校验，机芯定期清理维护
测区设置	单个测区面积宜为 200 mm×200 mm，常规构件测区数量不少于 10 个	弧形衬砌测区应优先选在边墙、拱腰部位，保证测区平整度，拱顶部位测区需加密操作质控
测点布设	单测区布设 16 个测点，测点间距≥ 20 mm，距构件边缘≥ 30 mm	避开衬砌表面气泡、模板拼缝、振捣不密实区域，测点需落在混凝土密实基体上
回弹操作	回弹仪轴线始终垂直于检测面，匀速施压、平稳复位	弧形面需精准控制回弹角度，按规范要求进行角度修正，杜绝斜向弹击
碳化深度测量	单测区碳化测点不少于 3 个，读数精度≥ 0.25 mm	隧道高湿环境下需保证孔洞干燥，酚酞溶液显色稳定后再读数，碳化值离散性大时需逐点修正
数据修正	根据回弹角度、浇筑面、含水率等情况完成规范修正	优先采用地区或专用测强曲线，全国统一曲线需验证适配性

2.4 碳化深度测量的关键控制

碳化深度作为核心参数直接影响检测结果的准确性，为确保数据的真实可靠，建议在同一测区内设置不少于三个典型观测点同时开展回弹值与碳化深度测试。当单个测区各点间的碳化深度差异超过 2.0 mm 时，应对相应的回弹测点分别按照实际测定的碳化深度进行独立修正处理。具体操作步骤如下：一是采用冲击钻在拟测部位随机制备直径约为 15 mm 的标准圆形孔洞，其深度需超出预计的混凝土碳化层厚度；二是钻孔完成后不得使用清水冲洗内壁以防变色现象消失，从而可能干扰后续判断；三是向孔腔滴注浓度为 1% 的酚酞指示剂溶液，并静置直至颜色变化趋于稳定；四是借助专业工具精确量取从混凝土表面至新鲜显色界面的实际垂直距离，确保读数精度达到 0.25 mm；五是基于所有有效记录计算平均值作为该测区的统一碳化深度参考指标。

3 回弹法检测精度的主要影响因素与优化控制策略

3.1 原材料与配合比的影响及控制

混凝土原材料与配合比参数，是决定回弹值与抗压强度相关性的核心内在因素。隧道衬砌混凝土普遍采用泵送配合比，掺加大量粉煤灰、矿粉等矿物掺合料，会改变混凝土的水化产物与表面硬度发展规律，若直接采用全国统一测强曲线，易出现强度换算偏差。同时，水泥品种、骨料种类与级配、外加剂类型等，也会对测强曲线的适配性造成影响。针对该问题，核心控制策略为优先采用专用测强曲线，工程开工前应结合本项目所用的原材料、配合比，制作同条件试块，建立适配项目的专用测强曲线；无专用曲线时，应优先选用工程所在地区的地方测强曲线，减少全国统一曲线的适配性误差。对于矿物掺合料掺量超出规范适用范围的混凝土，应通过钻芯对比试验完成强度修正，保障检测结果的可靠性[4]。

3.2 施工与养护工况的影响及控制

隧道衬砌混凝土的施工工艺与养护条件，会显著影响混凝土表面与内部的强度均匀性，进而造成回弹检测偏差。在泵送混凝土浇筑过程中，若振捣不密实、模板漏浆，易导致混凝土表面出现浮浆层、蜂窝麻面，回弹值无法反映混凝土真实强度；隧道内养护环境湿度大，但部分工程存在养护不及时、养护周期不足的问题，会导致混凝土表面强度发展滞后，与内部强度形成差异。此外，混凝土检测龄期过早或过长，也会超出测强曲线的适用范围，引入换算误差。对应的控制策略为：检测前必须对检测面进行彻底打磨，完全去除表面浮浆层与不密实表层，确保回弹测点落在混凝土密实基体上；严格把控检测龄期，优先选择混凝土龄期28 d～60 d的阶段开展检测，早龄期检测需确认混凝土强度已达到规范适用要求，超长龄期混凝土应结合钻芯法进行结果验证[5]。

3.3 检测操作不规范的误差及控制

人为操作的规范性是影响检测数据精度的关键可控因素，也是隧道现场检测中最易出现偏差的环节。常见的不规范操作包括：回弹仪未垂直于检测面、角度修正错误、检测面打磨不到位、测点选在石子或气孔上、碳化深度测量读数偏差、仪器未按要求率定等。同时，隧道内粉尘、光线不足等环境因素，也会加剧操作误差的产生。针对该问题，需建立全流程的操作质控体系：检测人员必须持证上岗，定期开展规范培训与技能考核，强化隧道特殊工况下的操作能力；严格执行仪器设备的日常管控流程，每日检测前后完成率定校验，定期维护保养仪器；现场检测实行双人复核制度，一人操作、一人记录，对检测面处理、回弹操作、碳化深度测量等关键环节全程监督，杜绝不规范操作，最大限度降低人为误差。

3.4 隧道特殊结构与环境的影响及控制

隧道衬砌的弧形曲面结构、受限作业空间与特殊服役环境，是回弹法应用中特有的影响因素。弧形检测面易导致回弹仪与混凝土表面接触不充分、弹击角度偏差，进而造成回弹值偏低；拱顶部位作业空间狭小，人员操作稳定性差，易引入随机误差；隧道内高湿环境导致混凝土表面含水率高，会降低混凝土表面硬度，造成回弹值系统性偏低。对应的优化控制策略为：弧形衬砌部位的测区应尽量选择曲率平缓的区域，通过精细打磨保证测区平整度，操作时严格控制回弹仪与检测面的垂直度，精准执行角度修正；拱顶等操作难度大的部位，应搭设稳定的操作平台，保证人员操作姿态稳定，避免悬空作业带来的操作偏差；对于表面潮湿的混凝土，应提前进行通风晾干，待检测面处于自然干燥状态后再开展检测，避免含水率对回弹值的干扰。

4 结束语

本文系统梳理了回弹法在隧道衬砌混凝土强度检测中的应用原理、全流程实施要点，深入剖析了原材料、施工工艺、操作规范、隧道特殊工况四大类核心影响因素，并提出了针对性的精度控制策略，明确了规范化、精细化管控是保障回弹检测结果可靠的核心。当前回弹法在隧道高掺量矿物掺合料混凝土适配、早龄期衬砌精准检测、曲面结构自动化检测等方面仍有优化空间，后续应加强专用测强曲线与智能化检测技术的研究，进一步提升检测精度与效率，为隧道结构质量安全管控提供更坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 饶雪兰.基于回弹法的隧道混凝土强度检测研究[J].价值工程,2024,43(19):125-127.
[2] 于婷婷.某高速公路隧道专项病害检测与加固处治分析[J].四川水泥,2024(02):264-267.
[3] 吴铭芳,曾仲毅,黄义雄,等.运营高速公路隧道衬砌裂损处治方案研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(S2):942-954.
[4] 张敬雷.钻芯法和回弹法检测隧道衬砌混凝土强度的相关性[J].铁道建筑,2022,62(09):108-110.
[5] 安先国.隧道衬砌混凝土振动性能及二衬振动特性分析[D].西安：长安大学,2021.

预制机电组件在装配式建筑中的安装协同技术研究

玉东梅[1]，黄修奖[2]

（1. 广西荣普特装建筑工程有限公司，广西 南宁 530200；
2. 广西理工职业技术学校，广西 南宁 530031）

摘 要 针对装配式建筑预制机电组件安装协同不足及雨季施工组织困难等问题，本研究以广西某高装配率住宅项目为依托，构建了一套涵盖设计、生产、运输与安装全过程的协同技术体系。采用 BIM 技术构建参数化族库与协同平台，实现多专业前置校核与信息贯通；通过物联网打通 MES 与 TMS 数据链路，建立基于气象与运输时窗的柔性调度机制；围绕模块化单元优化现场作业流程，引入节拍化编组与动态施工窗口管理，以期为同类地区装配式建筑机电安装提供系统性的技术路径与实践参考。应用结果表明，该技术体系有效削减了工序等待与切换损失，显著提升了安装效率与一次合格率。

关键词 BIM 协同设计；预制机电；安装协同；MES-TMS 贯通；雨季施工

中图分类号：TU85；TU741 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.005

0 引言

随着装配式建筑向高集成度与高装配率发展，预制机电组件的安装协同逐渐成为影响工程品质与工期的关键环节[1]。传统安装方式依赖现场二次加工与多专业逐次作业，在设计、生产、运输与安装各阶段之间存在信息断层，导致碰撞返工、接口错位、物料脱节等问题频发，尤其在高温多雨地区，施工窗口受限进一步放大了组织难度[2]。信息化技术的引入为破解上述协同困境提供了可能，但现有研究多聚焦单一环节优化，缺乏面向全过程的系统性技术集成[3]。基于此，本研究从全过程协同视角出发，构建以 BIM 为驱动、MES-TMS 数据贯通为基础、动态施工窗口管理为保障的安装协同技术体系，并通过实际工程应用验证其可行性与实施效果。

1 工程概况

1.1 地域装配式建筑项目基本情况

本研究选取位于广西某市某城区南侧的装配式住宅项目，总建筑面积约 85 000 m^2，由 3 栋 33 层住宅塔楼及 1 座 2 层配套公建组成，地下 2 层。结构体系为 PC 剪力墙，装配率达 65%，即以预制构件计量的工程量占比为 65%。机电系统覆盖给排水、强弱电、新风与分户式多联机空调，并把卫生间与厨房支管、竖向管井、综合支吊架等集成为可吊装单元。鉴于南部季风气候高温多雨的现实情境，年均降雨量约 1 700 mm、夏季相对湿度常态超过 80%，需把预制机电组件的防腐蚀、防凝露与防渗漏控制前置到深化设计和工厂端，并对构件运输时窗、塔吊周转与场内周转路线开展协同组织，以满足安装精度和多专业交叉作业的协同性。

1.2 预制机电组件安装协同需求分析

鉴于项目装配式特点与高温高湿多雨工况，预制机电组件安装面临多重协同约束。设计端：多专业在竖向管井与走廊吊顶等受限空间内高密度布设，传统二维转三维的转换误差导致碰撞率约 12%，亟须在 BIM 环境中前置校核标高基准与预留预埋接口[4]。生产与运输端：工厂节拍与雨季道路限行叠加，运输延误率约 8%，塔吊节拍与到货窗口失配，须建立 JIT 到货与气象风险缓冲机制。现场作业端：PC 套筒偏差叠加模块管段连接误差，走廊与户内并行冲突率约 15%，防腐涂层固化与吊装节拍失配加剧工序等待[5]。综合上述约束，需从设计、生产、运输、安装全流程出发，构建 BIM 协同设计、标准化接口编码、塔吊—物流联动及雨季施工窗口管理的一体化技术体系。

作者简介：玉东梅（1993-），女，本科，工程师，研究方向：建筑机电施工。

2 预制机电组件安装协同技术体系构建

2.1 BIM技术驱动的协同设计方法

鉴于该项目在竖向管井与走廊吊顶内的高密度机电布置，本研究把BIM作为协同设计核心，构建可复用的预制机电参数化族库，涵盖综合支吊架、竖井成组支架、分户多联机联接段以及厨卫成品支管。族参数与标高基准、PC墙体套筒坐标和净高控制线建立约束，并把保温厚度、防腐体系与防渗节点写入可校核属性，支撑跨专业一致性校对（见图1）。

围绕设计、生产、安装一体化需求，搭建基于CDE的BIM协同平台，设置模型版本治理、编码准则与信息权限，借助IFC与自定义属性集把构件编码、吊装接口与预留预埋点位映射至工厂MES与现场工序计划。平台配置碰撞规则集，包含最小净距、坡度与检修通道边界，并把防凝露包络与风雨环境参数嵌入规则以进行前置校核，将高风险区域在深化阶段化解。

2.2 预制组件生产与运输协同管理机制

鉴于该项目在雨季高湿环境下存在工厂节拍与道路限行叠加的约束，本研究以物联网为底座，打通CDE协同平台与工厂MES、运输管理TMS的数据链路，构建从构件编码、工序完工、养护达标到车辆到位的闭环管理。预制机电构件配置唯一编码，绑定RFID与二维码双通道标识，采集防腐涂层固化程度、保温层表面含水率及库位环境湿度，将合格判定与出库授权联动至运输排程。结合广西丘陵山地路网特征及进城拥堵时段，采用分段时窗组织与山区路段限速参数化建模，实现吊装窗口与到货窗口时序对齐。

运输阶段的柔性调度将北斗定位、道路通行事件与短临气象预报纳入统一界面，采用滚动时窗重排策略应对突发积水与事故拥堵。为减少塔吊闲置与场内拥堵，设置近场中转堆场，将整车到货拆分为小批量波次作业，并对关键构件实施防振托盘与防渗包材的标准化装箱。项目部将运输协同匹配度、塔吊小时产出与雨天停吊阈值纳入滚动计划联审，当短时强降雨预警触发时，系统自动切换外环绕行与堆场夜间入场策略，从而在高温多雨工况下维持构件到位的节拍稳定性与装卸安全边界。

2.3 现场多专业安装协同作业流程优化

以模块化单元为基本颗粒，围绕竖向管井、走廊吊顶与户内支管三类作业面开展节拍化编组，将塔吊、到货与检验三条节拍耦合，并以气象阈值作为动态约束。针对竖井成组支架、综合支吊架与分户多联机联

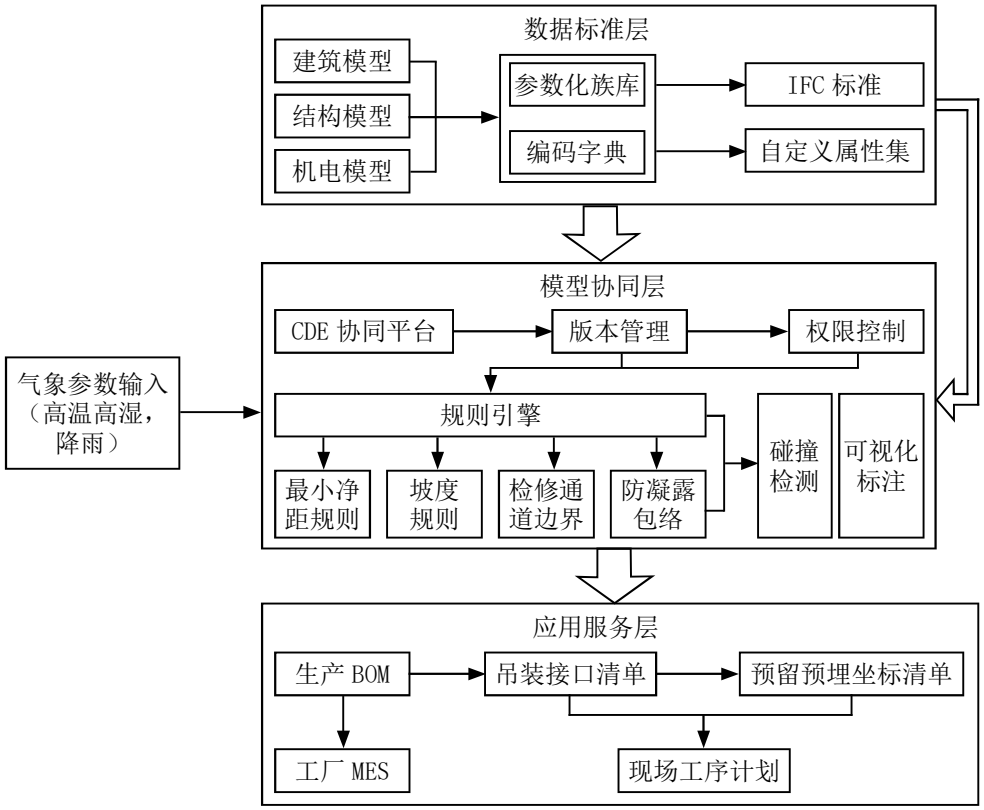

图1 BIM协同设计架构图

接段在空间受限、净高敏感区叠加的情况，在中转堆场设置到货检核工位，吊装前完成 RFID 核销、尺寸复核与防腐涂层外观判定。

作业流程以天气窗口为入口，根据短临降雨、地面含水率与风速分级，实现吊装与室内拼装的动态切换；强降雨预警时，快速部署可伸缩雨棚与临时排水沟，优先推进室内拼装与电缆桥架预制段对位。跨专业交叉时序以走廊吊顶为主线，依次完成综合支吊架定位、通风与排水模块落位，再按波次嵌入强弱电桥架与铜管保温段，管井层间接口与户内支管安排在夜间低温时段错峰施工。质量控制嵌入每个波次末的检核环节，扭矩、坡度与点位影像回传至 CDE 平台，偏差超阈构件回退堆场返修。现场指挥采用塔吊作业时隙与场内物流双重看板，滚动更新至 3h 时窗；当塔吊节拍与到货窗口失配时，将整车货拆分为小批次波次，联动竖井与户内流水线平衡，形成对雨季不稳定条件的吸收能力，提升协同作业的稳定性与安全边界。

3 安装协同技术应用效果评估

3.1 安装效率提升效果分析

针对高温多雨工况对节拍稳定性的刚性需求，将 BIM 协同设计、MES-TMS 贯通与塔吊时窗联动整合为统一安装组织。以主体标准层为统计单元，协同应用后安装周期由 120 d 缩短至 90 d，日均安装预制机电组件由 15 套提升至 22 套。

效率提升主要归因于碰撞前置化解、JIT 到货与波次化吊装对等待时间的同步削减。量化数据表明，塔吊有效作业小时由 6.5 h/d 提高至 7.8 h/d，吊装等待时间由 95 min/d 降至 40 min/d，降幅达 57.9%；运输协同匹配度由 90% 升至 97%，作业切换损失由 60 min/d 缩减至 25 min/d，降幅达 58.3%。上述指标的系统性改善，共同支撑了总安装周期缩短 25.0% 与日均产出提升 46.7% 的显著成效，验证了全过程协同组织对效率提升的叠加效应。

3.2 安装质量控制效果评估

针对高温高湿多雨交替环境对耐久性与密封性的冲击，将质量控制前置至 BIM 深化与工厂放行两端，并耦合安装节拍。通过参数化属性写入形成质量清单，在中转堆场完成 RFID 身份核验与尺寸复核；楼层装配阶段以扭矩、坡度、标高作为工序放行门，辅以影像回传与编码追溯；对保温黏结与防腐涂层固化设置夜间低温窗口，偏差构件回退堆场再标定，实现源头与过程双重处置。质量结果方面，得益于碰撞前置化解与标准化接口管理，总体一次合格率由 88% 提升至 96%，给排水、电气、暖通系统分别由 90%、85%、87% 提升至 97%、95%、96%。过程控制有效收敛了接驳错位与凝露隐患，形成了设计、生产、运输、安装四段质量闭环。

3.3 经济效益与社会效益分析

该项目在 BIM 协同与 MES-TMS 贯通条件下，将成本与周期优势转化为可计量收益。依托参数化族与标准化接口，材料浪费率由 10% 降至 5%，节约材料成本约 120 万元；塔吊时窗联动与波次化组织削减班组投入与加班峰值，人工成本下降 20%，节约人工费用约 80 万元；JIT 到货与近场中转同步压降间接费用。社会效益方面，安装周期缩短 30 天，围挡与占道时间压缩，降低对周边区域的通行与噪声影响；工厂预制替代现场切割，将扬尘与噪声源外移，施工现场环境扰动明显收敛。上述协同将资源节约、环境友好与安全文明施工要求统一于同一框架，为广西雨季条件下同类住宅项目提供了可复用的组织范式。

4 结束语

本研究围绕预制机电组件在装配式建筑中的安装协同难题，构建了以 BIM 协同设计为牵引、MES-TMS 数据贯通为支撑、动态施工窗口管理为保障的全过程技术体系，并通过实际工程验证了其在提升安装效率与质量、降低资源消耗与施工干扰方面的有效性。受项目地域与工程类型限制，所提方法在普适性与成本量化方面仍有待进一步拓展。未来研究将聚焦不同气候区与结构体系下的适应性调整，并结合智能化调度算法与数字孪生平台，推动安装协同向更高层次的预测与自优化方向发展。

参考文献：

[1] 顾景景，刘静静，俞超，等. 基于 DfMA 的半永久性装配式建筑机电设计策略分析 [J]. 建筑科技，2024,08(11):61-65.

[2] 周德元. 装配式安装在管道阀组预制方面应用探讨 [J]. 现代工程项目管理，2024,03(10):95-97.

[3] 中建二局安装工程有限公司 . 一种机电设备机房预制组件及其装配式施工工法 :CN202110607150.9[P].2023-11-10.

[4] 张保平，贾德登，王基业，等. 大型海水化淡厂逆渗透机组安装应用及施工方法 [J]. 中国高新科技，2025(06):142-146,155.

[5] 刘仙萍，田东，雷豫豪，等. 光伏 / 光热 - 地源热泵联合供热系统运行性能研究 [J]. 太阳能学报，2022,43(09):88-97.

分布式能源站与集中供热系统联合运行优化策略探讨

李 峰

（青岛能源设计研究院有限公司，山东 青岛 266011）

摘 要 随着城市供热规模持续扩大，单一集中供热模式在调峰灵活性与末端供热品质方面的不足日益显现，分布式能源站与集中供热系统的联合运行成为提升区域供热综合能效的重要途径。本文围绕联合运行的优化调度问题，提出了基于负荷预测的动态调度策略、源—网—荷协同优化控制策略、多能互补与储热系统耦合调峰策略以及经济性与节能性多目标协调优化策略，构建了以运行费用与管网热损失率为目标函数的多目标优化模型，并采用NSGA-Ⅱ算法求解Pareto最优方案集。以北方某12万m^2居住小区为对象开展仿真验证，结果表明：在典型寒冷日工况下，优化策略使集中锅炉房负荷率稳定在85%～95%的高效区间，分布式能源站启停频次降低约40%，蓄热罐有效平抑了日内峰谷波动，末端室内温度均满足供热达标要求。

关键词 集中供热；分布式能源站；负荷预测；动态调度

中图分类号：TK02；TM61 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.006

0 引言

我国北方地区城镇集中供热面积已超过150亿m^2，供热管网规模与热源装机容量在过去十年间持续增长。天然气分布式能源技术在热电联产效率、快速启停响应及就近供能等方面展现出显著优势，为缓解集中供热系统的上述瓶颈提供了可行的技术路径。在此背景下，如何将分布式能源站有机融入既有集中供热管网，建立兼顾经济性与节能性的联合运行调度框架，已成为供热行业亟待解决的关键问题。

1 分布式能源站与集中供热系统联合运行流程概述

分布式能源站一般由燃气轮机、余热锅炉、吸收式热泵等设备组成，布局紧邻用户侧，能够就近满足区域供热需求。集中供热系统则依托大型热电联产机组或区域锅炉房，经由长距离管网向城市各片区输送热量[1]。两者在供热能力、响应速度与覆盖范围上各有侧重，联合运行的核心在于将二者纳入统一调度框架，形成“集中为主、分布为辅”或“分布优先、集中补峰”的梯级供热模式。在物理连接层面，分布式能源站多以支线接入集中供热管网，设置水力隔离装置与热量计量节点，确保两侧系统在压力与温度上互不干扰，同时实现热量的双向调节与精确结算，联合运行的典型流程可划分为负荷采集、供热分配与反馈调节三个阶段。

2 分布式能源站与集中供热系统联合运行优化策略

2.1 基于负荷预测的动态调度策略

热负荷的时变特征构成联合供热调度的核心输入。供热季内，室外温度、风速、太阳辐射强度及建筑围护结构的蓄热效应共同塑造了末端热需求的波动曲线。为准确把握这一波动规律，可建立融合气象参数与历史运行数据的短期负荷预测模型[2]。该模型以前若干时步的供回水温度、室外气象要素及节假日标识作为输入特征，经长短期记忆（LSTM）网络提取时序依赖关系后，其网络结构如图1所示，输出未来数小时的逐时热负荷预测值，其数学表达为：

$$\hat{Q}(t+k)=f_{LSTM}(X(t),X(t-1),\cdots,X(t-n+1);\theta) \quad (1)$$

式（1）中，$\hat{Q}(t+k)$为第t+k时步的热负荷预测值；$X(t)$为第t时步的输入特征向量，涵盖室外温度，风速、供水温度等变量；n为历史回溯窗口长度；θ为网络待训练参数集合。

获得逐时热负荷曲线后，调度平台对集中热源与分布式能源站的出力进行滚动分配。每一调度周期起始时刻，平台将预测负荷与当前管网运行状态进行比对，按照基荷—调峰分层逻辑确定各热源目标出力。当预测负荷低于集中热源经济运行下限时，分布式能源站退出运行以规避低效工况；当预测负荷逼近集中

作者简介：李峰（1981-），女，本科，工程师，研究方向：供热、能源。

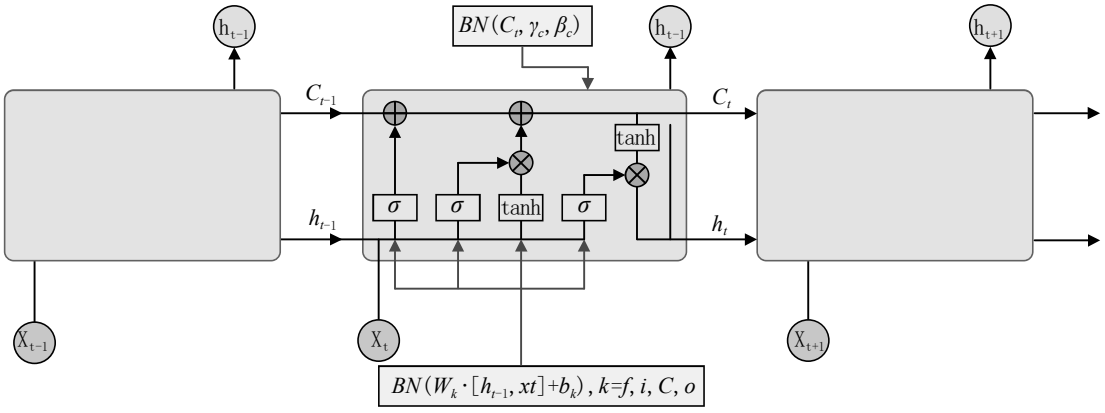

图 1 LSTM 网络结构图

热源额定容量时，分布式能源站按需启动并逐步加载。滚动预测与梯级分配相结合的调度架构，有效缓解了因负荷突变引发的供热品质波动，也为管网水力工况的平稳过渡预留了调节裕度[3]。

2.2 源—网—荷协同优化控制策略

供热系统的运行品质取决于热源侧出力、管网侧输配与用户侧用热三个环节的实时匹配程度。源—网—荷协同控制策略将三个环节的关键可调参数纳入统一优化框架，以管网节点温度与压力作为状态约束，以供热达标与输配能耗最低为双重目标，实现跨环节的全局协调。在具体实施中，热源侧根据末端负荷反馈动态调整供水温度，并引入管网热延迟补偿环节，将热水在管道中的输运时滞纳入温度设定的修正量。管网侧采用变频泵组调节循环流量，在保证各换热站最不利环路压差满足要求的条件下压缩泵组能耗，用户侧换热站配置电动调节阀与室温反馈回路，依据室内实测温度与设定温度的偏差信号自动调节二次侧流量。

2.3 多能互补与储热系统耦合调峰策略

分布式能源站内配置的燃气轮机、余热锅炉与吸收式热泵分别对应不同的能量转换路径，对这些路径加以耦合调配，能够释放系统层面的调峰潜力。燃气轮机运行时产生的高温烟气经余热锅炉回收后可直接供热，吸收式热泵则可利用城市污水或地表水中的低品位热能实现热量提质。在用热高峰时段，燃气轮机满负荷运行产出的电力可部分驱动电热泵或电锅炉，将电能转化为热能注入管网，由此形成“气—电—热”梯级利用格局。用热低谷时段，富余电力上网售出或驱动蓄冷设备为夏季供冷预做储备，有助于在全年运行尺度上提升设备利用小时数与综合能效水平[4]。储热系统在调峰运行中扮演着“时间搬移”的角色。大容量水蓄热罐或相变蓄热装置可安装于集中热源出口或分布式能源站侧，在负荷低谷期蓄存富余热量，在高峰期释放所蓄热量以弥补供热缺口。这一“削峰填谷”过程使集中热源与分布式能源站均能在接近额定负荷率的高效区间内稳定运行，规避频繁启停与深度变负荷导致的设备磨损及效率衰减。储热容量与充放热功率的选取需兼顾典型日负荷峰谷差、管网允许温度波动幅度以及投资回收周期等约束条件。

2.4 经济性与节能性多目标协调优化策略

联合运行系统的优化目标呈现多维度特征：运营方关注天然气消耗与电力购售成本等经济指标，管理部门侧重一次能源利用率与碳排放强度等节能环保指标。两类目标之间存在结构性矛盾——分布式能源站在部分负荷下运行可降低集中管网的输配热损，但其单位供热的燃气成本可能高于大型热电联产机组。为在二者之间寻求合理平衡，可构建如下多目标优化模型：

$$\min F=[F_{cost}, F_{loss}]^T \quad (2)$$

$$F_{cost}=\sum_{t=1}^{T}(c_{gas}G(t)+c_eE_{pump}(t)-c_sE_{sell}(t)) \quad (3)$$

$$F_{loss}=\sum_{t=1}^{T}\frac{Q_{loss}(t)}{Q_{total}(t)} \quad (4)$$

式（2）、（3）、（4）中，F_{cost} 为调度周期内的总运行费用；F_{loss} 为管网累计输配热损失率；c_{gas}、c_e、c_s 分别为天然气气价、购电单价与上网售电单价；$G(t)$ 为第 t 时步天然气消耗量；$E_{pump}(t)$ 为循环泵耗电量；$E_{sell}(t)$ 为分布式能源站上网电量；$Q_{loss}(t)$ 与 $Q_{total}(t)$ 分别为管网热损失量与总供热量。

该模型在各热源出力上下限、管网水力平衡约束及末端供热温度达标等条件下求解。由于两个目标函数之间的非劣解集构成 Pareto 前沿，可采用带精英策略的非支配排序遗传算法（NSGA- Ⅱ）在一次运算中获取多组折中方案。在实际运行中，调度人员依据当日天然气价格、分时电价信号以及环保约束等级，在

Pareto前沿上择取对应运行方案，实现经济效益与能源效率的动态均衡。

3 联合运行优化策略仿真实验与分析

3.1 实验模型搭建与参数设置

为验证上述优化策略的有效性，以北方某居住小区冬季供热系统为对象搭建仿真模型。该小区供热面积约12万m^2，由一座集中锅炉房与两座分布式能源站联合承担供热任务。集中锅炉房内设一台额定热功率20 MW的燃气热水锅炉，经一次管网向6座换热站送热；两座分布式能源站分置于小区东、西两侧，各配备1.2 MW燃气轮机及配套余热锅炉，以支线并入一次管网。仿真平台基于TRNSYS与MATLAB联合搭建，供热季为11月15日至次年3月15日，仿真步长1 h，末端达标判据为室内温度≥18 ℃。系统另配置一座有效容积200 m^3的常压水蓄热罐，安装于集中锅炉房出口侧。主要设备与管网参数如表1所示。

表1 仿真模型主要参数

参数名称	数值	单位
集中锅炉额定热功率	20	MW
燃气轮机额定电功率（单台）	1.2	MW
余热锅炉回收热功率（单台）	1.5	MW
蓄热罐有效容积	200	M^3
一次管网总长度	3.6	km
设计供水温度/回水温度	85/60	℃
循环泵额定流量	450	M^3/h
天然气低位热值	35.88	MJ/Nm^3
天然气单价	3.2	元/Nm^3
购电单价（平段）	0.65	元/kWh
上网售电单价	0.42	元/kWh
建筑总供热面积	12	万m^2

3.2 典型工况下的仿真结果与分析

选取供热季中的一个典型寒冷日（室外日均温度-15.3 ℃）与一个典型过渡日（室外日均温度-2.8 ℃）作为仿真工况，分别考察优化调度策略在极端低温与一般负荷条件下的运行表现。典型寒冷日的逐时热负荷在凌晨4:00-6:00达到峰值约23.5 MW，午间12:00-14:00降至谷值约16.8 MW，日内峰谷差达6.7 MW。在优化调度模式下，集中锅炉房承担18 MW～20 MW的基础负荷区间，两座分布式能源站合计出力在0.8 MW～3.2 MW之间动态调节，蓄热罐于22:00至次日2:00以约1.5 MW功率蓄热，在早高峰5:00-7:00以约2.0 MW功率放热。仿真结果显示蓄热罐的充放热过程有效平抑了集中锅炉房的出力波动幅度，使其负荷率始终维持在85%～95%的高效运行区间。分布式能源站在峰值时段快速响应，补充集中热源的出力缺口，其启停频次相较于未优化方案减少约40%。典型过渡日的日均负荷降至14.2 MW，集中锅炉房即可独立覆盖全部热需求，分布式能源站全天处于热备用状态，蓄热罐未参与充放热循环。两种工况的仿真结果表明，优化调度策略能够依据负荷水平自适应切换运行模式：高负荷日充分调动分布式热源与储热设备协同补峰，低负荷日则将集中热源控制在经济运行区间内独立供热，避免小热源在低效工况下的燃料浪费。末端各换热站的二次侧供水温度在两种工况下均稳定在50 ℃±1.5 ℃范围内，室内温度维持在18.5 ℃～21.0 ℃之间，满足供热达标要求[5]。

4 结束语

本文针对分布式能源站与集中供热系统联合运行的优化调度问题，从负荷预测驱动的动态调度、源—网—荷协同控制、多能互补与储热耦合调峰以及多目标协调优化四个层面构建了完整的策略体系。仿真结果验证了所提策略在典型寒冷日与过渡日两种工况下的适用性：在极端低温条件下，分布式能源站与蓄热罐协同补峰可将集中锅炉房负荷率稳定在高效区间，显著降低启停频次与设备磨损；在一般负荷条件下，系统自适应切换为集中热源独立运行模式，避免小容量机组低效工况下的能源浪费。未来研究可进一步引入可再生能源热源接入与碳交易成本约束，拓展优化模型的适用边界，并结合实际供热管网开展现场验证，推动联合运行策略从仿真走向工程落地。

参考文献：

[1] 岳中帅.供热系统施工中节能技术应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(18):175-177.
[2] 冯晓龙.基于能量流法的分布式能源系统规划及并网调度优化研究[D].北京:华北电力大学,2025.
[3] 段洁仪.热泵助力能源低碳转型的机遇与路径[J].可持续发展经济导刊,2024(08):16-18.
[4] 石海洋,别舒,倪龙,等.燃气分布式能源各阶段技术发展分析[J].煤气与热力,2023,43(12):37-42.
[5] 顾舒.分布式能源智能监控终端通信链路故障定位方法[J].网络安全技术与应用,2026(03):13-14.

移动作业终端智能充电管理柜技术研究

闫 冰

（国网北京市电力公司海淀供电公司，北京 100085）

摘 要 移动作业终端数量迅速增加，集中充电、安全监控、数据贯通成了供电单位现场管理的重点工作。本文围绕智能充电管理柜的软件体系，研究在端、管、云架构下创建统一充电控制、实时监测、数据治理能力，用协议识别、自适应策略、安全模型来实现多类设备的精准适配和全过程风险防护。依靠 PMS3.0、物资管理系统的对接，整合作业、资产、充电记录，形成闭环的数据链。结果表明，软件系统可以明显提高充电效率和使用安全性，有利于创建以数据为驱动的移动终端精细化管理模式。

关键词 移动作业终端；智能充电管理柜；自适应充电；安全监控；数据融通

中图分类号：TM910.6；TP273 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.007

0 引言

移动作业装备在供电现场的覆盖度不断增大，设备分散充电、状态不可视、安全风险难以提前识别等问题也逐渐暴露出来。创建统一、智能、可追溯的充电管理体系，成为改善现场作业规范化和装备保障能力的重要走向。依靠智能充电管理柜的软件平台，利用协议解析、自适应策略、安全模型、数据贯通技术，达到多设备精准匹配、实时监测和全生命周期管理的目的。本文主要从系统架构和关键软件能力两个方面进行技术分析，给移动作业终端的数字化管理提供参考。

1 移动作业终端智能充电管理柜技术概述

移动作业终端智能充电管理柜是为解决一线作业设备集中充电、安全管控、数据追溯问题而部署的智能化装备。该系统依靠软硬件的配合，对手持 PDA、检测仪器、执法记录仪等各类移动终端实行统一充电、状态监测、全生命周期追踪[1]。

软件系统采用的是端、管、云三层架构，终端层集成智能充电控制器，可以识别多种协议并且进行动态功率分配，传输层采用 4G 或者 5G 通信网络来实现充电数据的实时上传，平台层部署集中管理平台，可以提供设备状态可视化、充电策略优化、异常预警等功能。系统有自适应充电算法，能根据设备类型、电池状态、电网负荷等参数智能调节充电策略，在保证充电效率的同时延长设备使用寿命。

系统和现有的 PMS3.0、物资管理系统无缝对接，实现设备入库、领用、充电、维护闭环管理，并提供数据驱动的决策支持。

2 移动作业终端智能充电管理柜软件技术难点

2.1 多协议智能适配

移动作业终端种类繁多，有 PDA、检测仪器、执法记录仪等设备，不同设备的充电协议、电压需求、电池类型有很大差异。传统的充电柜使用标准化的接口，不能准确地识别设备的类型，容易造成过充、欠充等。软件系统要实时识别接入设备的型号、电池状态、充电协议，动态调节充电参数，这就存在协议解析准确率、识别响应速度、多设备并发处理的难题。为了解决以上问题，可以增加一个多协议自适应识别模块以及智能充电管理算法，在建立设备指纹库及通信握手的基础上进行快速准确的识别，再配合边缘计算提高响应速度，采用负载均衡的方法增强对多个设备同时工作的支持程度并且通过对充电状态的监控以及反馈调节保证充电的安全可靠，延长设备电池寿命。

2.2 安全监控实时预警

充电安全是终端管理的重中之重。系统要实时监测电压、电流、温度等主要参数，一旦出现异常就要立即切断电源并发出报警。但是，传统的方案依靠阈值报警，不能预测潜在的风险。软件系统要加入机器学习算法，创建充电过程的安全模型，从而实现从“被动防御”到“主动预判”的转变，但是算法模型的训练需要大量的历史数据支撑，误报率控制是技术难点，

作者简介：闫冰（1991-），男，本科，工程师，研究方向：电气自动化研究与管理。

既不能漏掉真实的隐患，也不能频繁误报影响正常使用。因此，可以建立多种来源的数据融合方法，结合设备运行日志、环境参数以及过往发生的故障等进行不断改进模型的效果。另外，还可以加入在线学习以及模型自动更新的方法提高对于新异常的检测能力，在此基础上采用分层次报警以及阈值自适应调整的方法来保证安全性，同时尽量减少假阳性的情况发生，使该系统更加可靠和实用。

2.3 数据融合智能决策

充电数据、作业数据、设备管理数据之间互相独立，彼此间没有联系，形成了各自为政的局面。软件系统要打通多源数据，创建起统一的数字底座，从而实现充电行为同设备使用、运维管理之间的关联分析。但是，不同系统数据格式，接口标准不同，数据清洗和融合工程量大。同时，从海量数据中提取出有用的信息，为运维决策提供支持，要建立智能分析模型，这就对算法设计和算力资源提出了较高的要求。为解决以上问题，可以建立一套统一的数据标准及接口规范，利用数据中台对不同来源的数据进行融合处理；基于数据标签以及知识图谱建立起各方面的联系，提高数据利用率，在此基础上应用分布式计算以及智能化算法发现重要的信息以及隐藏在其中的趋势，从而更好地服务于运维工作，使系统从数据整合到创造价值[2]。

3 移动作业终端智能充电管理柜软件技术应用

3.1 自适应充电策略

软件系统用AI驱动的自适应充电策略来解决多协议适配问题。构建设备指纹库，把手持PDA、检测仪器、执法记录仪等各种终端的充电协议、电压曲线、电池容量、充电倍率等关键参数信息整合起来，用深度学习算法建立设备特征识别模型，实现设备接入后毫秒级精准识别。系统内置动态功率分配算法，根据设备类型、电池SOC状态、当前电网负荷、环境温度等多维度参数，实时计算出最优充电电流和电压组合，在保证充电速度的同时有效避免过充对电池寿命的损害。边缘计算模块在本地完成协议解析、功率分配决策、充电过程控制，云端平台完成设备指纹库持续更新、充电策略全局优化。该策略支持USB-A、USB-C、DC等不同的物理接口，支持PD、QC、私有协议等多种充电协议，可以兼容不同的品牌、型号的移动终端，通过机器学习不断优化充电曲线，达到智能充电和电池保护的平衡。

自适应充电策略通过电池管理系统实时传输过来的荷电状态、健康状况以及温度等主要参数，借助二阶等效电路模型来对电池的行为进行模拟，并且会依照动态调整充电电流和电压曲线。研究数据表明，用基于庞特里亚金最小值原理或者强化学习的自适应充电策略，在满足指定充电时间约束的情况下，可以有效地降低充电过程中产生的总热量。以相同的充电时间为例，标准的8C-3.6C两步恒流恒压协议比自适应策略产生的热量要多出27.3%。另外，一些先进的自适应充电管理柜可以兼容电网互动的需求，在实现电网到车辆充电的同时也为车辆到电网模式提供支持。采用集成比例积分控制和自适应控制器相结合的方式，系统在电网到车辆模式下将总谐波失真控制在1.33%以下，在车辆到电网模式下将总谐波失真控制在1.7%以下，同时实现98.3%的系统效率，20%至80%荷电状态的充电时间较传统方法缩短约30%。将荷电状态模式切换、热降额保护和谐波抑制结合起来，使智能充电管理柜可以适应复杂的电网环境，为规模化移动作业终端的能源集约管理奠定了技术基础。

3.2 预测性安全防护

部署预测性安全防护机制，用机器学习模型实现主动风险识别和预警。根据海量的历史充电数据训练异常检测模型，使用时间序列分析技术深度学习电压、电流、温度、充电功率等多维参数时序变化特征和关联关系，提前精准地发现热失控、短路、过压、过温、电池老化等潜在风险征兆。系统采用边缘计算结构，在柜端控制器上部署轻量化预警模型，使用本地算力达到毫秒级响应速度，保证预警和处置的及时性。当出现异常趋势的时候，系统就立刻开始智能分级处置程序，轻微异常自动缩减充电功率并继续观察，中度异常马上终止充电并且把警报信息发送给管理平台，严重异常直接物理断电并触发本地声光报警。同时，系统会建立安全事件知识库，不断收集新出现的案例来改进预警算法，调整检测阈值以减少误报率，从而实现从被动防御到主动预判的安全防护全面升级。

预测性安全防护并不是简单的被动式保护，而是一种用人工智能的主动防御和异常预警。移动作业终端以及充电过程中存在诸多安全问题，既有电池热失控等物理层面的安全隐患，也有数据被窃取、非法控制等网络层面的攻击风险。就物理安全而言，软件系统通过对充电过程中电压、电流、温度以及内部气压等时序数据展开持续监测，借助长短期记忆网络、随机森林或者自动编码器等机器学习算法，创建起设备正常运作的基线模型。一旦实时数据流出现微小的偏

离基线的变化，系统就能提前发现热失控、内短路等故障的早期征兆。根据实验数据可知，以机器学习为基础的异常检测框架在智能电网环境下对充电站进行应用时，异常检测准确率可以达到 96.8%，并且可以将系统的响应时间控制在 15 ms 以内，在故障恶化之前就触发熔断或者降流保护，大大降低了设备损坏和火灾的风险。智能充电柜是物理设备和信息网络之间的节点，很容易成为网络攻击的对象。预测性安全防护机制就是软件层面嵌入入侵检测和防御模块，对网络流量进行实时的分析，发现分布式拒绝服务、中间人攻击、欺骗、数据篡改等恶意行为。使用深度置信网络等先进的人工智能模型，可以从大量的网络数据中学习攻击模式，使得网络攻击检测率达到 98.9%，保证充电过程中的数据完整性和用户隐私的安全。多层次的、端边云协同的预测性防护体系可以对数百台充电柜以及移动作业终端进行集中安全态势感知，保证整个能源补给基础设施的可靠运行 [3]。

3.3 全链路数据融通

系统创建全链路数据融通平台，把充电柜同 PMS3.0 生产管理系统、物资管理系统、运维平台的数据孤岛全部打通。首先建立统一的数据接口规范和标准化的数据字典，使用 RESTful API 协议、消息队列中间件等多种技术手段实现跨系统数据实时互通、可靠传输。平台使用 Apache Kafka 实时流处理技术，将充电数据同作业任务单、设备台账信息、巡检维护记录等多方面关联起来进行深度分析，形成设备全生命周期数字画像。部署数据清洗、去重、标准化处理模块，解决多源异构数据格式不一致、质量参差不齐的问题，保证数据分析的准确性。运用大数据分析和挖掘技术，系统可以对充电资源进行调配，对设备故障进行预测，并且能自动生成维护建议，为管理者提供准确的决策支持，实现数据可视化大屏的展示，实时呈现设备状态、充电效率、安全指标、资源利用率等关键信息，实现由被动维护向主动管理的战略转型 [4]。

该技术的应用首先表现在多源异构数据的采集和融合上。智能充电柜内置各种传感器、通信模块，可以采集充电电压、电流、功率等电气量数据，也可以获取环境温湿度、柜门状态、地理位置、操作日志等信息。经过 4G、以太网或者 HPLC 等通信方式将数据汇聚到物联平台，得到一个实时数据库、历史数据库以及基础数据仓库的综合数据层。在此基础上，软件平台用多模态数据分层融合框架，把各个终端、各种协议的数据清洗、对齐、标准化处理。对于车网互动场景来说，系统要对电网调度指令、充电桩状态、用户行为数据以及电池健康数据等多方面信息实施时空配准，借助大模型或者博弈强化模型达成“动态定价—资源优化—无感调控”的协同决策。全链路数据融通的又一重要方面就是支撑运维管理的闭环。通过将移动作业终端和后台管理系统绑定起来，巡检人员可以利用手持终端实时接收到充电柜的故障预警信息，在现场处理完毕后直接把结果上传到云平台，从而形成故障发现、派单、处理、验收的闭环。该机制彻底改变了传统依靠纸质记录的巡检方式，使运维管理人员可以依靠数据分析准确把握设备维修和更换周期，经测算可以明显缩短充电设施维护维修周期，大幅度降低运维成本。另外，数据全链路贯通还可以为能源运营优化提供决策支持，对大量的充电数据进行统计分析后可以准确预测各个站点的负荷需求，进而改善充电资源的分配情况，提高充电桩利用率和电网运行稳定性 [5-6]。

4 结束语

智能充电管理柜的软件系统，为移动作业装备管理提供了充电控制以及数据治理的全部技术链路。多协议识别、预测性安全模型、全链路数据融通一起组成了系统能力的主要部分，使得设备充电更加高效、安全、透明。整合 PMS3.0、物资管理等平台之后，移动终端入库、领用、充电、运维就形成了闭环的数字管理。整体技术框架可以为开展装备精细化管理、智能化安全管控提供持续支持，具备向更大范围推广的条件。

参考文献：

[1] 韦雅曼.基于HPLC+HRF双模通信的新能源汽车智能充电终端技术研究[J].装备制造技术,2024(01):28-32,46.
[2] 袁亦凡.电动汽车智能充电桩控制系统的研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(05):124-126.
[3] 陈煜宏,武朝平,贾盼龙,等.智能充电桩的设计要求及技术分析[J].城市建筑空间,2022,29(S2):278-279.
[4] 文家林,莫海锋.车联网技术在新能源汽车充电管理中的应用模式与挑战对策[J].汽车维修技师,2025(20):26-28.
[5] 刘家斌.一种锂离子电池充电管理技术[J].中国新技术新产品,2021(19):43-46.
[6] 沈海军,许少伦,蒋鑫磊.配电网内电动汽车充电管理技术研究[J].上海节能,2020(05):407-414.

面向建筑施工深化的道桥BIM设计信息集成研究

夏良波

（云南天指道建设有限公司，云南 昆明 650221）

摘 要 在我国交通基础设施建设升级与智能建造发展的背景下，道桥工程对设计与施工阶段的信息协同、数据贯通提出更高要求。传统道桥工程设计信息分散、传递效率低、模型与施工脱节等问题，严重制约施工深化质量。BIM技术凭借三维可视化、信息集成化等优势，为解决上述问题提供了可行路径。本文针对当前道桥BIM信息集成的现存问题，从标准体系、数据架构、协同平台及支撑技术四个维度，构建面向施工深化的道桥BIM设计信息集成体系，以期为道桥工程施工深化的数字化、精细化管理提供技术参考。

关键词 道桥工程；BIM设计；施工深化；信息集成；数据协同

中图分类号：U412.6；U442.5-39；TU17 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.008

0 引言

我国道桥及市政基础设施建设规模持续扩大，工程结构日趋复杂、施工环境多样，对设计成果的可施工性与协同管理能力提出严格标准。施工深化设计作为连接设计意图与现场施工的关键环节，承担节点细化、碰撞排查、工程量核算等核心任务，其信息质量直接影响工程质量、进度与成本。BIM技术以三维数字化模型为核心，可集成工程全生命周期的多维度数据，已在建筑、轨道交通等领域广泛应用，但道桥工程领域的BIM技术应用仍存在“重建模、轻应用”“重设计、轻施工”的现象。多数项目仅将BIM技术用于简单可视化与碰撞检查，模型信息深度不足、多专业数据割裂、标准不统一等问题突出，设计信息难以顺畅传递至施工环节，造成信息重复录入、变更频繁，制约了BIM技术价值的充分发挥。基于此，本文围绕施工深化需求，开展道桥BIM设计信息集成研究，旨在破解信息壁垒，提升道桥工程施工深化的效率与质量。

1 当前道桥BIM信息集成存在的主要问题

1.1 专业专属信息标准缺失，体系衔接性不足

国内现行BIM相关标准多面向建筑工程，道桥工程专用标准不完善、针对性弱，未结合道桥工程线形化、构件标准化程度低的特点制定规范。不同设计、施工单位的建模规则、信息分类及编码体系差异显著，如桥梁主梁编码，部分单位采用“桥梁—主梁—材质”三级编码，部分采用“结构类型—构件名称—规格”编码方式，导致跨项目、跨专业模型整合时，构件信息无法精准关联，信息集成效率大幅降低，形成“数据互通难”的行业痛点。

1.2 多专业信息碎片化，信息孤岛现象突出

道桥工程涉及道路、桥梁、给排水、交通工程等多个专业，各专业通常由独立团队建模、分散存储数据，缺乏统一的信息管理平台进行整合。设计阶段的模型与信息仅在专业内部流转，跨专业信息共享与协同不足，施工深化时工作人员需从多渠道获取信息并重复整理，不仅耗时耗力，还易出现信息错漏、数据不一致问题。例如：道路专业的线形数据与桥梁专业的桥墩位置数据未联动，易导致桥路衔接处线形偏差，影响施工精度，增加现场返工成本。

1.3 软件数据格式不兼容，信息转换损耗严重

道桥BIM设计常用Civil 3D、Revit、Bentley、Tekla等软件，各软件原生数据格式无法直接互通，行业内主要依靠IFC通用格式进行数据转换。但IFC格式在转换过程中易出现几何变形、属性丢失、关联关系断裂等问题，信息损耗率可达15%～20%。例如：Revit模型转换为IFC格式后，构件的钢筋属性、施工工艺等关键信息易丢失；Civil 3D的道路线形数据导入Bentley时，易出现坐标偏移，无法满足施工深化对数据精度的要求[1]。

作者简介：夏良波（1986-），男，本科，工程师，研究方向：道桥设计。

1.4 模型信息深度不足，与施工深化需求脱节

多数道桥项目的BIM模型仅实现外观可视化，属于“空心模型”，未覆盖施工深化所需的细节信息与关联数据。模型仅包含构件基本几何尺寸，缺少节点详图、钢筋明细、预埋件位置等构造信息，未嵌入施工工艺、验收标准、成本数据等非几何信息，且与施工进度、现场管控等业务数据脱节。此类模型无法支撑施工深化设计、工艺模拟、工程量精准核算等实际工作，最终沦为“可视化摆设”，难以发挥BIM技术的实际价值。

1.5 协同管理机制不完善，信息传递效率低下

设计、施工、监理、业主等参与方缺乏统一的协同工作平台，信息传递仍依赖线下会议、邮件、纸质文件等传统方式，存在信息滞后、错传漏传、沟通成本高等问题。设计变更无法及时同步至各参与方，施工方发现的设计问题也难以快速反馈给设计方，导致变更响应慢、问题处理不及时。同时，各参与方权限划分不清晰，缺乏有效的信息安全管理机制，易出现信息泄露、数据篡改等风险，影响信息集成的安全性与可靠性[2]。

2 面向施工深化的道桥BIM设计信息集成体系构建

2.1 统一信息标准体系建设

标准化是道桥BIM设计信息集成的基础，结合道桥工程专业特点，从信息分类编码、模型精度、数据格式、交付管理四个方面，构建道桥BIM专用标准体系，确保信息集成的规范性与高效性。

1. 统一信息分类与编码标准：在《建筑信息模型分类和编码标准》（GB/T 51269-2017）基础上，补充道桥工程专属分类，形成“大类—中类—小类—细类”四级分类体系，涵盖道路工程、桥梁工程、交通工程、附属设施、施工资源、管理信息6个大类。采用8位层级编码方式，为每个构件、每项信息赋予唯一识别码（大类2位—中类2位—小类2位—细类2位），如预制简支梁编码为“02-01-01-01”，实现构件信息的可定位、可检索、可关联。

2. 规范模型精度与信息深度标准：按施工深化阶段制定BIM模型LOD分级标准，施工深化初步阶段（方案优化、碰撞检测）模型精度达LOD300，包含构件详细尺寸、主要构造及基础材料属性；施工深化详细阶段（节点深化、构件加工）精度达LOD400，细化钢筋布置、预埋件位置、施工工艺等信息；复杂节点、预制构件加工场景精度提升至LOD500，确保直接指导现场作业。同时明确各精度等级的信息交付清单，避免设计向施工阶段传递时的关键信息丢失。

3. 统一数据交换与格式标准：以IFC4.3为基础交互格式，扩展道桥工程专属属性集，补充道路桩号、桥梁跨径、支座参数、预应力参数等专用信息；开发Civil 3D、Revit、Bentley等软件的针对性数据转换插件，实现原生数据与IFC格式的无损转换，减少信息损耗，确保道路线形与桥梁结构模型、钢结构深化模型与协同模型的无缝对接。

4. 制定交付标准与管理流程：明确交付内容（三维BIM模型、属性数据表、碰撞检测报告、工程量清单等）、统一交付格式（IFC4.3版本模型、PDF图纸、Excel数据表）；建立模型版本管理机制，记录修改人、时间及内容，确保版本可追溯；制定多方审核流程，设计、施工、监理方按职责审核交付成果，审核通过后方可用于施工深化[3]。

2.2 多层级数据集成架构设计

构建“数据层—融合层—应用层”三级数据集成架构，实现多源信息的有序整合、高效传递与深度应用，各层级独立且协同，形成完整的信息集成闭环。

1. 数据层：作为信息集成基础，汇集道桥工程全生命周期多源原始数据，采用分布式数据库分类存储，建立数据索引实现快速查询。数据源分为四类：基础地理与勘察信息（地形地貌、地质勘察、地下管线等）、设计模型数据（多专业BIM模型的几何与材料属性）、施工相关数据（工艺参数、进度计划、质量检测记录等）、管理与标准数据（工程定额、造价数据、验收标准等），为后续信息融合提供全面数据支撑。

2. 融合层：作为核心处理层，通过数据融合引擎对数据层的异构数据进行标准化处理、关联性构建与融合整合。一是数据清洗、格式转换与语义统一，消除数据冗余与不一致；二是通过语义关联、属性映射，建立构件几何与非几何信息、设计与施工信息的关联关系，实现“一处修改、处处同步”；三是将标准化数据融合为统一的道桥工程数字化信息集，为应用层提供规范数据源。

3. 应用层：面向施工深化实际业务需求，将融合后的数据转化为可直接应用的功能模块，覆盖施工深化全流程。核心模块包括：碰撞检测模块（多专业模型冲突识别与优化）、施工模拟模块（4D/5D工序模拟与场地规划）、工程量计算模块（自动提量与成本分析）、深化设计模块（节点与预制构件深化出图）、现场管控模块（移动端质量与进度管控）、变更管理模块（设计变更审核与追溯），各模块数据实时互通，确保集成信息服务于施工实践。

2.3 多参与方协同集成平台搭建

依托云计算、大数据、物联网技术，搭建“云端服务器+客户端+移动端”的道桥BIM多参与方协同集成平台，打破信息壁垒，实现多方在线协同、信息实时共享。平台核心功能与运行流程如下：

1.核心功能：一是多专业模型在线集成与管理，支持模型上传、整合、可视化展示及在线批注、测量，实现模型实时更新与版本管理；二是权限分级管理，按设计、施工、监理、业主的职责划分操作权限，搭配数据备份与恢复机制，保障信息安全；三是协同沟通与变更管理，内置即时通信、问题反馈功能，建立标准化设计变更流程，变更信息审核通过后自动同步至所有参与方；四是移动端适配，开发平台APP，支持现场人员查看模型、调取构件信息、上传施工数据、反馈现场问题，实现“模型指导施工、施工反馈模型”的闭环管理。

2.运行流程：设计方完成多专业建模后，将模型与信息上传至平台；施工方结合现场条件提出深化需求与问题；设计方优化模型并同步更新；监理方审核深化成果，审核通过后施工方依模型开展施工；施工过程中，施工方上传现场数据，监理方实时核查、业主方监控进展；若发生设计变更，设计方发起申请，经审核后同步至各方，确保协同推进施工深化[4]。

2.4 关键支撑技术

道桥BIM设计信息集成的落地，需依托针对性的关键技术，保障信息集成的高效性、准确性与实用性，核心采用四项技术：

1.参数化建模技术：以Grasshopper、Dynamo为工具，结合道桥构件特征构建标准构件库（梁、柱、墩、支座等），为每个构件设置可修改参数（尺寸、材料、规格）。设计人员调用构件库并修改参数，即可快速生成模型，且构件参数与几何形态、属性信息联动，参数修改时相关信息自动更新，大幅提升建模效率与模型一致性。例如：在桥梁连续梁建模中，修改梁长、梁高参数后，混凝土用量、钢筋重量等信息可自动计算并关联至模型。

2.多软件数据互通技术：针对软件格式不兼容问题，开发专用数据转换插件，实现Civil 3D与Revit、Tekla与Navisworks等软件的原生数据无损互通，确保道路线形与桥梁结构模型的衔接精度、钢结构深化模型的信息完整性。同时，采用API接口开发技术，实现协同平台与各BIM软件的实时对接，减少人工重复处理工作。

3.数据库关联技术：将BIM模型与MySQL、SQL Server等关系型数据库连接，实现模型信息与数据库数据的双向关联、同步更新。将材料价格、施工工艺、进度计划等非几何信息批量导入数据库，与模型构件一一对应，实现信息的批量查询、统计与更新。例如：材料价格变动时，仅更新数据库数据，模型中的成本信息即可自动同步，确保信息时效性。

4.4D/5D集成技术：4D技术将三维BIM模型与施工进度结合，构建施工模拟模型，实现工序可视化模拟与动态跟踪；5D技术在4D基础上集成成本数据，实现进度与成本的协同管控。通过该技术可直观展示施工工序、进度推进及成本消耗，为方案优化、进度管控提供依据。例如：在桥梁主跨吊装施工中，4D模拟可优化吊装机械站位与路径，5D集成可实时统计吊装阶段成本，动态调整施工计划[5]。

3 结束语

面向施工深化的道桥BIM设计信息集成体系，从标准、架构、平台、技术四个维度破解了道桥工程信息分散、标准不统一、协同不足等问题，有效打破专业壁垒与阶段隔阂，减少设计变更与现场返工，提升施工深化质量与效率，降低工程成本，为道桥工程数字化转型提供了核心支撑。随着大数据、人工智能与数字孪生技术的深度融合，道桥BIM信息集成将向智能监测、自动化施工、全生命周期管理方向拓展。未来需加强政产学研用协同，加快道桥BIM专用标准的制定与落地，强化关键技术研发与工程实践的结合，培养兼具道桥专业知识与BIM技术能力的复合型人才，推动BIM信息集成技术在道桥工程全生命周期的深度应用，为我国交通基础设施高质量发展提供更有力的技术保障。

参考文献：

[1] 周健,郑刚.基于BIM的桥梁工程全生命周期信息集成管理研究[J].中国公路学报,2025,38(07):123-131.
[2] 马涛,赵亮.建筑工程施工深化中BIM信息集成的应用流程与实践[J].施工技术,2025,54(11):89-93.
[3] 刘浩,陈晨.BIM技术在大型桥梁施工深化中的应用研究[J].铁道工程学报,2025,42(05):78-83.
[4] 赵阳,周宇.智能建造背景下道路桥梁工程BIM信息集成技术探讨[J].建筑经济,2025,46(12):112-116.
[5] 吴迪,孙明.智慧交通下路桥协同设计BIM信息整合方法研究[J].交通标准化,2025,49(08):76-81.

智能化工程管理新技术在建筑工程管理中的应用

林聪聪

（甘肃省粮油科技信息中心，甘肃 兰州 730030）

摘 要 建筑工程规模不断扩大、施工流程日趋复杂，传统管理方式已难以满足现场管控、进度把控、安全监督与质量核验的实际需求。智能化工程管理新技术的普及，为建筑行业提质增效提供了可行路径。本文结合施工现场实际工况，围绕BIM技术、物联网监测、数字化平台、智能安防等新技术展开分析，说明其在进度、成本、安全、质量管控中的应用场景与实操价值，指出当前推广过程中存在的设备兼容不足、人员操作能力有限、数据整合不畅等问题，并提出针对性改进措施，以期为建筑企业推进智能化管理、提升工程效益提供参考。

关键词 建筑工程管理；智能化技术；BIM技术；物联网；工程管控

中图分类号：TU71-39；TP399 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.009

0 引言

在城镇化建设持续推进、建筑行业转型升级的背景下，工程管理向着精细化、数字化、智能化方向发展已成趋势。传统管理依赖人工巡查、纸质记录、经验判断，存在信息传递慢、问题发现滞后、数据追溯困难等短板，容易造成进度延误、成本超支、安全隐患等情况。BIM、物联网、大数据、智能监测等新技术进入工程现场后，有效提升了管理效率与管控精度。但在实际落地中，受人员水平、设备条件、系统整合等因素影响，新技术应用仍不够充分。基于此，本文对智能化技术在建筑工程管理中的应用展开研究，为行业高质量发展提供实践参考。

1 智能化工程管理新技术在建筑工程中的应用现状

1.1 BIM技术在设计与施工协同中的应用

BIM技术在建筑工程中多用于三维建模、碰撞检查与施工模拟，但在多数项目中仍停留在设计阶段，施工阶段的深度应用不足[1]。在实际工程中，BIM模型可提前呈现管线排布、结构节点、空间布局等内容，减少图纸错漏碰缺问题，降低现场返工概率。部分项目利用BIM进行进度模拟、材料算量与方案优化，提升了交底效率与施工准确性。但在现场落地时，模型与现场实体匹配度不高，变更信息更新不及时，导致模型指导性减弱。一线施工人员对BIM技术的理解有限，多按经验施工，模型数据未能真正融入作业流程。同时，不同参建方使用的软件版本不一致，模型传递与协同不畅，影响整体应用效果。BIM技术若要发挥更大作用，仍需加强现场落地、数据同步与人员实操培训，让技术真正服务于施工全过程。

1.2 物联网监测技术在施工现场的应用

物联网技术在建筑工程中主要用于塔吊、升降机、深基坑、高支模、用电用水等关键部位的实时监测，能够采集运行参数、环境数据、位置信息等，实现异常预警。在实际项目中，塔吊防碰撞、吊钩可视化、基坑沉降监测、扬尘噪声在线上传等设备已逐步普及，减少人工巡查盲区，提升安全管控力度。但物联网设备存在安装不规范、信号不稳定、数据传输延迟等问题，尤其在地下室、楼栋密集区域，信号遮挡较为明显。部分设备长期运行后出现老化、漂移，维护不及时导致数据失真。现场管理人员对监测数据重视不够，只看数值不做分析，预警信息处置不及时，使得技术作用大打折扣。此外，不同设备数据标准不统一，难以整合到同一平台，无法形成全局监控，影响智能化管理水平提升。

1.3 数字化管理平台在工程全过程中的应用

数字化管理平台旨在打通进度、质量、安全、成本、资料等环节，实现数据集中展示、流程线上办理、问题闭环跟踪。在不少项目中，平台可实现日志填报、隐患上报、验收签批、进度对比、合同管理等功能，减少纸质单据，提高流转效率。但在实际应用中，平

作者简介：林聪聪（1989-），女，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

台功能与现场需求匹配度不高，模块复杂、操作烦琐，一线人员不愿使用。很多数据仍靠人工补录，准确性与及时性难以保证，平台变成“应付检查工具”。各部门之间数据不互通，进度、成本、安全各自独立，无法联动分析。项目管理层更关注结果，对平台运行、数据质量、流程优化投入不足，导致平台使用率偏低。数字化平台要真正发挥作用，必须简化操作、贴合现场、强化培训，让管理人员愿意用、用得上、用得好。

1.4 智能安防与智能设备在现场管控中的应用

智能安防包括人脸识别门禁、AI视频监控、危险区域预警、人员定位、智能用电等设备，在工地安全管理中作用明显。人脸识别可规范人员进出，AI监控能识别不戴安全帽、不系安全带、烟火、违规攀爬等行为，及时提醒整改。人员定位系统可掌握作业人员位置，在危险区域闯入、遇险求救时发挥作用。但在实际应用中，AI监控识别准确率受光线、遮挡、角度影响，误报较多，久而久之，管理人员关注度下降。部分项目只安装不运维，设备损坏后长期不维修，形同虚设。智能设备投入成本偏高，中小型项目积极性不足。同时，智能设备产生的数据分散存储，没有与管理平台结合，无法形成安全管理闭环。企业应从实用性出发，合理配置设备、加强运维、完善处置流程，让智能安防真正提升现场安全水平。

2 智能化工程管理新技术应用中存在的现实问题

尽管智能化技术优势明显，但在建筑工程现场推广时仍面临硬件、软件、人员、管理等多方面制约，整体推进速度较慢。

2.1 技术应用层次较浅，未能实现全流程覆盖

多数建筑项目对智能化技术的应用停留在单点功能，如BIM建模、视频监控、扬尘监测等，未形成从设计、施工到竣工交付的全流程一体化应用。很多项目只在前期建模，施工阶段不更新、不应用，造成“建完不用”。智能化手段多集中在安全、监测环节，进度管控、成本分析、质量验评、变更签证等核心业务数字化程度偏低。参建各方协同机制不完善，设计、施工、监理、建设单位数据不打通，信息壁垒明显。项目更重视“展示型”应用，对能真正降本增效的实用功能投入不足[2]。此外，项目周期短、人员流动性大，企业不愿长期投入系统建设与维护，导致智能化应用碎片化、表面化，难以持续提升管理效能。

2.2 软硬件兼容不足，系统整合难度较大

建筑工程现场设备种类多、品牌杂，不同监测设备、软件系统、智能终端之间标准不统一，兼容度较差。物联网设备数据格式不一致，无法接入同一平台；BIM软件与管理系统数据不通，模型与现场业务脱节；视频监控、门禁、扬尘监测等系统各自独立，形成多个“数据孤岛”。部分项目为了满足检查要求，同时使用多套系统，管理人员需要重复登录、重复录入，工作量反而增加。在硬件方面，老旧设备不支持数据上传，新购设备接口不开放，改造难度大、成本高。企业在选择系统时缺乏整体规划，重采购、轻整合，重功能、轻实操，导致上线后难以落地。软硬件不兼容直接影响数据准确性与管理效率，是智能化推进中的突出障碍。

2.3 人员实操能力不足，专业人才较为短缺

智能化技术落地依赖人员操作，但施工现场管理人员、技术人员、一线作业人员整体数字化水平有限，难以有效使用新技术。部分老员工习惯传统方式，对智能设备、平台操作存在抵触情绪，学习积极性不高。年轻员工虽熟悉电子设备，但对建筑业务流程不熟悉，无法将技术与现场结合。项目培训多为一次性讲解，缺少实操演练与持续指导，遇到问题无法及时解决。企业缺少既懂建筑工程、又懂数字化技术的复合型人才，系统运维、数据处理、模型优化等工作跟不上。项目流动性强，人员刚学会就可能转场，造成培训效果持续减弱。人员能力不足直接导致设备使用率低、数据质量差、系统运行效果不佳，影响智能化技术推广。

2.4 投入成本偏高，效益回报不够直观

智能化改造需要投入软件、硬件、安装、运维、培训等多项费用，对中小型建筑企业压力较大。智能设备、监测终端、平台开发等前期投入高，而效益更多体现在安全风险降低、返工减少、效率提升等隐性方面，短期收益不明显。部分项目追求高标准配置，功能过剩、浪费明显，与实际需求不匹配[3]。项目管理层更关注工期、产值、利润，对长期管理提升重视不够，资金投入意愿不强。此外，设备运维、流量费用、软件升级等持续支出，也让项目存在“重建设、轻维护”现象。部分企业担心投入后效果不达预期，持观望态度。只有建立合理投入产出机制，优先上线低成本、高实效的功能，才能推动智能化技术稳步落地。

3 智能化工程管理新技术应用效果提升策略

结合施工现场实际情况，建筑企业应从应用深化、系统整合、人才培养、成本管控等方面完善措施，推动智能化管理走深走实。

3.1 深化技术应用，推动全流程一体化管理

企业应制定智能化建设整体方案，从单一功能应用向全流程一体化转变（见表1）。推动BIM技术从设

表 1 常用智能化技术应用对比

技术类型	主要应用场景	实际使用效果	存在常见问题
BIM 技术	三维建模、碰撞检查、施工模拟	减少返工，提升交底准确性	模型更新不及时，现场落地不足
物联网监测	塔吊、基坑、扬尘、用电监测	实时预警，降低人工巡查压力	信号不稳，设备维护不到位
数字化平台	进度、安全、质量、资料管理	流程线上化，提高流转效率	操作复杂，数据录入不及时
AI 智能安防	人脸识别、行为识别、区域预警	提升安全管控，减少违规行为	误报较多，依赖现场处置

计向施工、进度、成本、变更、竣工交付延伸，做到模型与现场同步更新。将进度计划、质量验评、安全隐患、签证变更、资料管理等业务全部纳入数字化平台，实现线上留痕、闭环管理。建立参建方协同机制，统一数据入口与流程标准，实现设计、施工、监理、建设单位信息共享[4]。优先推广落地性强、见效快的应用，如 AI 安全监控、人员定位、塔吊监测、基坑监测等，逐步扩大覆盖范围。将智能化应用纳入项目考核，推动管理人员主动使用、持续优化。通过全流程贯通、全业务上线、全人员参与，让智能化技术真正融入日常管理，提升整体管控水平。

3.2 推进软硬件整合，构建统一管理平台

企业应优先选择兼容性强、接口开放、操作简便的平台与设备，减少多系统并行带来的负担。统一数据标准，将 BIM、物联网、视频监控、智能安防、业务管理等数据整合到同一平台，实现“一屏总览、一网统管”。对现有设备进行改造升级，通过加装模块、更换终端等方式实现数据上传，避免重复投入。简化平台操作界面，贴合现场岗位需求，减少人工录入，提高自动采集比例。建立平台运维机制，明确责任人，及时处理故障、优化功能、更新流程。加强数据治理，确保数据真实、准确、完整，为分析决策提供支撑。通过软硬件深度整合，打破信息孤岛，提升管理效率与决策科学性。

3.3 加强人才培养，提升全员实操能力

企业应建立分层分类培训体系，针对管理人员、技术人员、一线员工开展实操培训。对管理人员重点培训平台使用、数据分析、问题研判；对技术人员重点培训 BIM 应用、设备调试、系统维护；对一线员工重点培训智能设备操作、数据上报、隐患上报。采用现场教学、案例讲解、实操演练等方式，提高培训实用性。鼓励员工持证上岗，对熟练使用智能化工具的人员给予激励。引进复合型数字化人才，负责系统建设、数据管理、技术支持。建立内部帮扶机制，以老带新、以熟带生，快速提升整体水平。定期开展技能评比与经验交流，推广优秀做法。通过持续培训与人才建设，解决“不会用、不愿用、用不好”的问题，为智能化落地提供人才保障。

3.4 合理控制投入，提升应用实效与收益

企业应坚持“实用、够用、好用”原则，合理规划智能化投入，避免盲目高配。优先选择成本低、见效快、易落地的模块，如 AI 视频监控、人员定位、在线监测、轻量化平台等，快速形成效益。分阶段推进建设，先试点后推广，降低一次性投入压力。将设备运维、流量、升级等费用纳入预算，保障长期稳定运行[5]。建立效益评估机制，从安全事故下降、返工减少、工期缩短、成本节约等方面测算收益，增强投入信心。通过规模化采购、统一选型降低成本，提升性价比。引导项目转变观念，重视长期管理效益，推动智能化从“被动应付”转向“主动应用”。以合理投入换取更高安全水平、管理效率与经济效益，实现可持续发展。

4 结束语

智能化工程管理新技术是建筑行业转型升级的重要支撑，在提升效率、防控风险、降低成本、保障质量等方面作用显著。当前 BIM、物联网、数字化平台、智能安防等技术已在工程中逐步应用，但仍存在应用不深、整合不足、人才短缺、成本偏高等问题。建筑企业应立足于项目实际，深化技术应用、整合软硬件系统、加强人才培养、合理控制投入，推动智能化管理从局部试点走向全面落地。只有坚持实用导向、强化现场实操、持续优化改进，才能真正发挥新技术的价值，提升工程管理水平，推动建筑行业向安全、高效、绿色、智能化方向高质量发展。

参考文献：

[1] 池小龙.智能化工程管理技术在建筑工程管理中的应用研究 [J]. 企业改革与管理 ,2025(21):12-14.
[2] 陈钊.智能化工程管理新技术在住宅工程管理中的运用 [J]. 居舍 ,2025(30):169-172.
[3] 邱文杰.智能化工程管理技术在建筑工程管理中的应用探析 [J]. 城市建设 ,2025(23):39-41.
[4] 席阁 . 智能化工程管理技术在建筑工程管理中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2025(27):43-45.
[5] 李诚勤.智能化工程管理技术在建筑工程管理中的应用探析 [J]. 张江科技评论 ,2025(06):99-101.

风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复策略研究

赵映泽

（河北龙源新能源有限公司，河北 承德 067000）

摘 要 本文针对风电场柔性直流并网系统的故障保护与恢复问题，深入剖析了直流侧故障电流骤升、换流器过压过流的产生机理，以及交流侧故障向直流侧传播引发的功率振荡、电压频率偏移等故障特性。系统综述了直流线路纵差保护、行波保护、阻抗保护、直流断路器保护、换流站过压保护、低电压穿越等主流保护技术的应用现状。研究发现，噪声干扰与通信时延会影响故障快速识别与定位精度，同时系统存在保护动作与恢复策略协同性不足等问题。基于此，本文提出基于行波、相量、开关量的多源信息融合故障快速检测方法，结合物理机理与数据驱动算法提升检测鲁棒性；构建站内快速处置、区域协同配合、广域统筹恢复的分层协同控制架构，实现故障选择性隔离、电网柔性拓扑重构与功率平稳重分配。仿真结果表明，所提方法故障检测时长小于5 ms、定位误差低于1%，系统故障恢复时间缩短约30%，可有效提升风电并网运行稳定性与电力输送可靠性。

关键词 风电场柔性直流并网；模块化多电平换流器；多源信息融合检测

中图分类号：TM721 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.010

0 引言

随着新能源大规模并网与远距离电力送出需求持续增长，基于模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter，MMC）的柔性直流并网技术已成为风电场并网的重要技术方案。柔性直流并网系统的故障机理较为复杂，直流侧故障易引发故障电流骤升、换流器承压过流，且交流侧故障会向直流侧耦合传播，给系统故障保护与恢复工作带来极大挑战。当前，直流线路纵差保护、行波保护、阻抗保护、直流断路器保护、换流站过压过流保护、低电压穿越等技术策略虽已取得一定研究进展，但在复杂工况环境下，系统仍存在诸多短板：故障快速识别与定位精度易受噪声干扰与通信时延影响，保护动作与系统恢复策略协同性不足，极易引发保护误动、停电范围扩大等问题。基于此，针对风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复策略的研究意义重大。

1 柔性直流系统故障类型与机理分析

1.1 直流侧故障特性

柔性直流系统普遍采用MMC拓扑结构，其直流侧典型故障类型包括极间短路、单极接地、电缆绝缘击穿及线路断线等，故障演化过程具备多源激励、多阶段动态响应的特征。在0 ms～1 ms的超快速故障阶段，子模块电容与电缆分布电容将通过桥臂电感快速放电，导致直流电压瞬时骤降，故障电流以极高的电流变化率快速攀升。该阶段结束后，换流器进入二极管不控整流工作状态，交流侧经变压器与系统电源持续向故障点馈入能量，使故障电流持续上升并形成稳定低阻故障通道。故障电流幅值由直流侧电容、交流侧电源与线路电感共同决定，故障回流路径受双极接线、金属回线、海底回线等接地方式的制约。其中，单极接地故障会引发极间运行失衡与直流电位偏移问题[1]。故障发生后，行波沿电缆高速传播，线路端部反射与分支节点折射不匹配会造成局部过电压与电流峰值叠加，再叠加护层耦合效应与屏蔽电容的影响，进一步加剧设备暂态冲击应力。不同故障类型的电气特性存在明显差异：在低阻故障工况下，直流电压近似归零、故障电流趋于饱和，故障演化的时间常数主要由桥臂电感与线路电感主导；在高阻故障工况下，直流电压无法完全跌落，系统谐波含量显著升高，同时伴随持续性功率脉动。

1.2 交流侧故障传播特性

风电场柔性直流并网系统交流侧常见故障主要包括三相短路、单相接地、不平衡电压骤降及频率偏移

作者简介：赵映泽（1984-），男，本科，工程师，研究方向：电气工程。

等。故障发生后，换流站并网点交流电压会出现骤降、相角跃变，并通过锁相环（PLL）与电流环耦合作用传入控制系统。控制系统会优先响应无功支撑与电流限幅控制策略，进而导致有功功率输送能力大幅下降[2]，造成交、直流两侧功率传输失衡。

此时，子模块电容将承担系统瞬态过剩或缺失的能量，引发直流母线电压抬升、跌落及振荡现象。同时，交流侧故障带来的系统三相不平衡会引入负序分量，产生二倍频（2ω）功率脉动；基于交直流功率近似平衡的耦合关系（Pdc ≈ Pac），该功率脉动会进一步诱发直流侧电压、电流产生二次谐波波动。

在弱电网工况下，锁相环与外环控制的动态交互作用，还可能引发系统低频振荡，造成能量在交流侧与直流侧之间反复吞吐、交替传递。若故障程度加剧致使换流器闭锁，MMC 桥臂将切换为二极管导通工作状态，交流侧电源会通过整流通路向直流侧充、释能，极易引发直流侧暂态过电压问题，与电缆原有应力叠加，加剧系统运行风险。而系统并联配置的直流限流装置、子模块去使能策略及直流断路器，可有效改变故障能量的传递方向与波形，抑制故障劣化。

2 风电场柔性直流并网系统保护现状

2.1 直流线路保护策略

风电场柔性直流（VSC-HVDC）线路保护以“快速、选择性、可靠”为核心运行目标，构建主备协同的多判据保护体系。工程中通常采用双端电流纵差保护作为主保护，通过光纤同步传输线路两端的高采样率直流电流数据，依托差流与制动系数完成故障判别，具备优异的区内故障选择能力，保护动作时间稳定在 2 ms ～ 5 ms，是目前海上柔直电缆线路的主流主保护配置方案。

为进一步提升保护首跳可靠性，系统配套部署基于行波原理的超高速保护与故障定位技术。该技术依托故障初始电流行波的首波特征，通过双端测距或单端特征识别方式，实现毫秒级的故障判别与精准定位，同时可作为电流纵差保护的加速辅助判据，大幅提升故障响应速度。

区段化分区保护与多装置协同配合是柔性直流保护的核心技术特征。多站柔性直流系统依托直流断路器（DCCB）实现故障的选择性精准切除，不同类型断路器性能各有优劣：混合式断路器融合功率电子旁路与机械主断结构，可在 3 ms ～ 5 ms 内完成故障开断，并有效约束故障能量扩散；固态式断路器动作速度更快，但运行损耗相对偏高；机械式断路器损耗更低，通过整合限流电抗、快速隔离开关与金属氧化物避雷器（MOV）能量吸收支路，形成完备的故障处置能力[3]。

2.2 换流站保护策略

风电场柔性直流换流站保护以快速抑制故障能量、保障阀侧与直流母线安全为核心目标，构建“装置级—站级—系统级”分层配合的保护架构。装置级保护覆盖 MMC 子模块与桥臂回路，包含子模块电容过压、欠压，器件过流、过温，桥臂电流速断与差动保护、桥臂电感 dt 限值控制及子模块旁路策略；阀侧配置避雷器（MOV）与匝间过压监测装置，规避暂态能量集中导致的器件失效问题。站级保护依托直流母线及极间差动保护，结合母线分段与金属回线实现选择性故障切除，可快速隔离极间短路与极地接地故障。

直流故障处置过程中，优先执行换流器阻断操作，再投入直流能量吸收支路耗散过剩能量，通过限流电抗与直流断路器（DCCB）协同配合，实现毫秒级故障切除与故障能量约束。交流侧保护涵盖变压器差动、母线差动、过压保护及空分断路器联跳功能，配合低电压穿越（LVRT）与电流限幅控制，保障交流系统平稳稳定。控制层面通过引入 PLL 弱化、负序抑制及直流电压优先策略，降低故障耦合引发的二次冲击。在多端柔直场景中，各换流站依托直流下垂控制与主从切换机制，实现电压功率的平稳接管与合理均分。

3 故障保护与恢复存在的问题

3.1 故障快速识别与定位精度不足

柔性直流系统保护需满足毫秒级响应要求，但现有检测测距链路在设备、算法、通信层面存在瓶颈，易造成故障识别滞后、定位偏差。海缆高电容与频率相关参数会导致行波传播衰减、色散，出现首波边沿钝化、反射波重叠现象，单双端行波测距易受波速误差、分段接头及支路失配影响，显著增大定位误差。温湿度与载流工况变化会引发介电常数、电阻率漂移，难以长期保证波速与阻抗阈值精度；纵差保护高度依赖高精度时钟同步与对称通信，光纤链路不对称、GPS 失锁会降低保护灵敏度，引发保护误判。

在测量传感层面，直流电流带宽与动态范围受限，易造成超高速暂态信号被滤波、饱和；霍尔元件与分流器的温漂、零漂会抬高噪声基底，导致高阶导数、斜率类判据易发生误动。换流器阻断、子模块去使能及直流断路器动作，会改变故障等效电路与波形特征，造成固定模板识别算法适配失效。弱电网下 PLL 失稳叠加负序、二次谐波脉动，易使交流侧扰动误判为直流故障。高阻接地、护层绝缘劣化及间歇性弧光故障信号幅值低、间断性强，传统电流阈值与方向元件灵敏度不足；预充电投入、电容投切与雷击干扰产生的大幅暂态，易与真实故障特征混淆。

3.2 保护动作与系统恢复的协调性欠缺

风电场柔性直流并网系统的故障保护与系统恢复并非独立过程，而是紧密耦合的动态整体。当前相关研究与工程实践中，二者在时序配合、控制逻辑、运行目标三个方面存在显著协调短板，严重制约了故障后系统安全、快速、稳定恢复。

在时序配合上，保护速动性与恢复渐进性存在固有矛盾。现有直流故障保护依靠闭锁、降压、断路器跳闸等毫秒级操作快速隔离故障、防护设备，但后续换流站解锁、功率回升、机组重启等恢复流程需秒至分钟级调控[4]。因缺乏统一时序框架与协同指令，易出现恢复时序错位问题，引发故障复现、设备反复受冲击等隐患。

在控制逻辑上，保护与恢复系统采用独立架构，信息交互与协同能力不足。保护仅依托本地电气量阈值判别故障，而恢复工作需结合电网工况、风电出力等多源信息全局决策。信息共享与协同判别机制的缺失，易造成故障隔离范围过度、黑启动困难、功率振荡等问题，难以实现最小故障隔离、最优系统恢复的运行目标。

4 故障保护与恢复优化策略

4.1 基于多源信息融合的快速故障检测方法

针对风电场柔直系统毫秒级保护需求，搭建“多源感知—特征提取—自适应融合—快速决策—精确定位”一体化检测架构。多源感知环节引入多端高带宽电压、电流及其导数、MMC臂电流、子模块电容电压、母线MOV能量、DCCB线圈电流、海缆护层电流分布式振动信号，以及交流侧PMU相量与负序分量，实现跨频段、跨设备的事件全覆盖捕获；依托PTP时间同步、本地恒温晶振保压及Savitzky-Golay与VMD小波去噪算法，提取具备强抗噪性的暂态特征。特征提取层面，依托行波首波到达时标、极性及峰值完成方向判别与双端测距，基于自适应反射测量实现海缆波速在线估计；融合直流电压塌陷率、臂电流斜率与子模块电压不平衡特征，辨识低阻、高阻及接地故障类型；结合交流侧2ω功率脉动与PLL状态区分交流侧扰动。融合决策采用证据理论与置信度评估，实现特征级与决策级并行研判，通信受限场景下可降级为单端混合阈值策略；通过异常值剔除与阀阻断、DCCB状态一致性校验，规避控制介入引发的保护误判。

4.2 分层协同的保护与恢复控制架构

搭建“站内快速—区域协调—广域恢复”分层协同体系，实现故障的选择性隔离、能量约束与电网有序再接入。站内快速层以毫秒级响应为目标，核心包含换流器阻断与电流限幅、母线差动及直流电压优先控制；依托直流断路器（DCCB）、限流电抗与制动支路实现能量约束；通过子模块去使能与受控预充电的安全流程，基于边缘计算平台构建“故障察觉—阻断实施—能量吸收—绝缘评估—缓升重并网”的事件驱动状态机，并借助本地联锁保障阀臂、母线与DCCB动作的一致性与选择性。

广域恢复层聚焦跨系统安全快速复原，基于统一对时体系（GPSPTP+本地守时）与事件时间戳，制定直流母线缓升、阀控解锁、风电机组功率斜坡与桨距无功协同的再并网序列，设置速率限值与涌流约束，规避再并网二次冲击。引入海缆护层电流、绝缘电阻、DCCB状态、子模块温升、MOV能量等健康评估与准入判据，满足条件方可重新投运。通过广域协调优化功率重分配与潮流路径，规避端口过载与功率振荡问题[5]。

5 结束语

本文针对风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复问题，开展从原理解析、现状评估、问题剖析到方案构建的闭环研究。针对直流侧高幅快速故障电流与交流侧耦合传播特性，本文提出基于多源信息融合的快速检测方法与分层协同保护恢复架构，实现毫秒级故障识别、选择性隔离与有序重投，缩短停电时长、降低弃风损失与二次扰动，有效提升系统韧性与供电可靠性。该策略在复杂工况与通信时延场景下具备良好鲁棒性，工程适用性与推广价值突出。未来将面向多端柔直、混合交直流及海上风电场场景，深化直流断路器协同、广域时同步与网络安全防护技术落地，结合数字孪生与硬件在环验证，构建自适应、可扩展的故障保护恢复体系，为高比例新能源安全高效并网提供支撑。

参考文献：

[1] 郑秀娴,田云峰,吴林林,等.新能源与柔性直流换流站间模式谐振与迁移概率评估方法[J].电力系统自动化,2026,50(06):201-212.

[2] 张少华.高压柔性直流输电系统故障穿越控制策略研究[J].科技资讯,2025,23(24):99-101.

[3] 王琦,丁芮,成硕,等.基于盈余功率分配的海上风电经柔直送出系统故障穿越策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(24):165-175.

[4] 顾文,郑超航,杨宏宇,等.海上风电场经交流海缆并网谐波谐振放大分析[J].现代电力,2024,41(02):380-391.

[5] 季柯,阳岳希,周啸,等.柔性直流输电工程振荡案例分析与抑制技术[J].电气工程学报,2025,20(03):116-135.

面向电梯安全钳生产的自动折弯机器人关键技术研究

王 青

（中山职业技术学院，广东 中山 528400）

摘 要 本文针对电梯安全钳厚板折弯易出现回弹、干涉等缺陷，以及多品种中批量生产的柔性需求，系统性开展自动折弯机器人关键技术研究。综合运用有限元分析、三维扫描、路径优化算法等多种技术方法，重点围绕机械结构优化、折弯路径智能规划、折弯精度控制、系统集成与协同控制四大核心方向精准发力，优化机器人机械参数与末端执行器结构，构建路径动态调整机制与精度实时控制体系，旨在对顺利完成多模块系统集成与调试工作有所裨益。

关键词 电梯安全钳；自动折弯机器人；机器人机械结构优化技术；折弯路径智能规划技术；精度控制

基金项目：广东省普通高校特色创新项目（自然科学）“基于电梯安全钳本体自动折弯机器人的研究”（项目编号：2023KTSCX366）。

中图分类号：TP242.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.011

0 引言

电梯安全钳作为电梯核心安全部件，其钣金件折弯精度与运行稳定性直接决定电梯运行的安全系数，但其加工过程存在诸多难点：不仅采用高强度厚板进行加工，且多弯角不规则结构极易引发折弯缺陷，同时多品种、中批量的生产模式对加工柔性提出了更高要求。当前通用折弯机器人普遍存在结构适配性差、路径规划不够智能、精度控制能力不足等问题，难以满足安全钳严格的加工标准。基于此，本文聚焦电梯安全钳生产中的核心痛点，针对性开展自动折弯机器人关键技术研究，着力破解厚板折弯精度控制与柔性生产两大难题。

1 电梯安全钳折弯工艺特点

电梯安全钳钣金件的加工工艺具有鲜明特殊性，其多采用 Q235、Q355 系列高强度钢板，板材厚度介于 3 mm～8 mm 之间，属于典型的厚板折弯范畴，与普通钣金件折弯工艺差异显著。一方面，厚板折弯需克服较大的塑性变形阻力，加工过程中极易出现回弹、褶皱等质量缺陷，这就对机器人的负载能力与折弯力控制精度提出了较高要求；另一方面，钳体、制动块等核心零件均为不规则多弯角结构，折弯作业时极易发生机器人与工件、模具之间的干涉现象。作为电梯核心安全部件，安全钳折弯精度要求极为严格，折弯角度公差需控制在≤ ±0.2° 范围内，折弯半径则需严格把控在 0.4 t～0.8 t 之间。

2 面向电梯安全钳生产的自动折弯机器人关键技术

2.1 机器人机械结构优化技术

2.1.1 机械结构参数优化

第一步，技术人员应先完成机器人机械结构核心参数的测算，确定关节臂尺寸、关节转动角度范围、末端执行器承载极限等关键参数的适宜取值区间。第二步，借助有限元仿真分析手段，针对机器人机身、关节臂及各类连接构件开展系统性力学模拟，精准还原折弯作业过程中不同载荷作用下结构的应力分布规律与形变特征，并依据仿真分析结果对结构参数进行定向优化。在该结构分析流程中，可利用材料力学中的弯曲正应力计算公式，求解关节臂受载后的应力分布情况，具体公式如下：

$$\sigma = \frac{My}{I_z} \tag{1}$$

式（1）中，σ 为弯曲正应力，M 为关节臂所受弯矩，y 为所求应力点到中性轴的距离，I_z 为截面惯性矩，通过该公式可精准判断应力集中位置。

作者简介：王青（1976-），男，本科，讲师，研究方向：机电一体化。

2.1.2 末端执行器与辅助机构优化

针对末端执行器，技术人员需首先依据安全钳板材的外形轮廓及折弯受力特性，明确适宜的夹持方式与夹持力度区间，对夹持爪的结构造型进行优化设计[1]。与此同时，在执行器末端集成压力传感元件与位移传感元件，对夹持过程中的压力及位移数据进行实时采集，并将采集到的数据及时反馈至控制系统。对于辅助机构，需重点对板材抓取机构、板材分张及厚度检测机构、后挡块定位装置等核心组件进行优化：调整抓取机构的运动轨迹及抓取时序；提升分张与厚度检测机构的检测精度，实现板材厚度的实时监控与分张精准控制；优化后挡块定位装置的定位精度，采用机械限位与电子定位相融合的方式[2]。折弯机器人末端执行器结构示意图如图1所示。

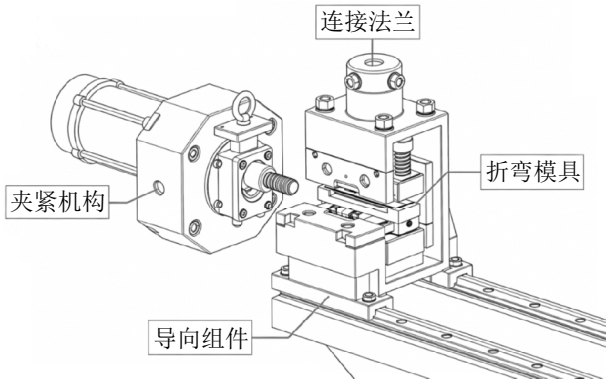

图1 折弯机器人末端执行器结构示意图

2.2 折弯路径智能规划技术

2.2.1 折弯路径前期规划

折弯路径前期规划需以精准化、合理化为目标，首先，通过三维扫描技术可获取电梯安全钳待折弯工件的精准三维模型，精准提取工件的折弯轮廓、折弯角度、折弯半径等核心特征参数，建立标准化的折弯特征数据库。其次，工作人员需结合电梯安全钳的加工工艺要求，明确折弯的先后顺序原则与工艺约束条件。再次，工作人员需采用专业路径规划算法对折弯轨迹进行初步规划，将三维模型中的折弯特征转化为机器人可识别的运动坐标，划分折弯路径的关键节点[3]。最后，工作人员需结合板材的力学性能参数，精准计算不同折弯阶段的折弯力需求，将力参数融入路径规划过程中。折弯力的计算可采用材料力学中的折弯力计算公式：

$$F=\frac{2KBt^2\sigma_s}{W} \tag{2}$$

式(2)中，F为折弯力，K为安全系数(通常取1.2～1.5)，B为板材宽度，t为板材厚度，σ_s为板材屈服强度，W为折弯宽度，该公式可精准量化折弯过程中的力需求。

2.2.2 折弯路径动态调整

折弯路径动态调整旨在应对折弯过程中的动态变化。在前期路径规划的基础上，工作人员需搭建完善的实时反馈调整机制，通过机器人末端的传感器，实时采集折弯过程中的板材变形量、折弯角度偏差、运动轨迹偏差等关键数据[4]。同时，将采集到的数据与预设的标准参数进行对比分析，精准计算偏差值并判断偏差类型，基于偏差分析结果，通过路径优化算法对折弯路径进行动态调整。

2.3 折弯精度控制技术

2.3.1 折弯前精度预设与校准

折弯前精度预设与校准是保障折弯精度的基础环节。折弯作业开始前，工作人员需首先对机器人折弯系统进行全面的精度校准，重点校准机器人关节运动精度、末端执行器定位精度、折弯模具安装精度，采用高精度测量仪器检测关节转角误差、定位误差与模具对中性偏差，根据检测结果及时调整机器人的运动参数与模具安装位置。其次，需根据电梯安全钳的折弯精度要求，预设折弯角度、折弯半径、板材定位精度等标准参数，将参数录入控制系统并进行严格的参数校验。

2.3.2 折弯过程精度实时控制

在正式折弯过程中，工作人员需启动实时精度监测系统，通过安装在折弯模具与末端执行器上的传感器，实时采集折弯角度、板材变形量、折弯力、模具温度等关键数据，将数据实时传输至控制系统进行快速分析处理，通过专业算法计算实时精度偏差[5]，精准判断偏差产生的原因并制定针对性的调整策略。在此过程中，精度偏差的量化分析可采用均方根误差公式，用于评估实时检测值与标准值的偏差程度：

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\hat{x}_i)^2} \tag{3}$$

式(3)中，$RMSE$为均方根误差，n为检测样本数量，x_i为第i次检测的实际值，$\hat{x}_i$为第i次检测的标准值，通过该公式可精准量化精度偏差。折弯精度实时控制闭环系统框图如图2所示。

2.4 系统集成与协同控制技术

2.4.1 系统集成与接口调试

首先，技术人员需明确电梯安全钳自动折弯生产的全流程作业需求，将机器人折弯系统、板材输送系统、

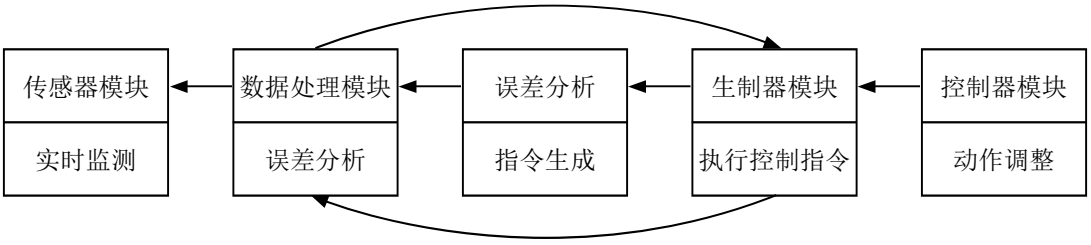

图 2 折弯精度实时控制闭环系统框图

定位系统、检测系统、控制系统等核心模块进行一体化整合集成，明确各模块的功能划分及数据交互标准，构建标准化的系统集成体系[6]。其次，技术人员需推进全面的接口调试工作，重点对各模块间的数据传输接口、控制接口进行调试，并对数据传输协议进行优化完善。

2.4.2 多模块协同控制

系统集成调试工作全部完成后，技术人员需快速启用协同控制机制，通过主控制系统对各核心模块进行集中调度，明确各模块的运行时序规划与协同工作逻辑。在协同控制实施过程中，主控制系统实时采集并接收各模块的运行数据，根据实际运行情况动态调控各模块的运行参数：当板材输送系统将板材运送至预设位置时，定位系统迅速完成板材定位操作并反馈定位信号，主控制系统随即向机器人折弯系统下发启动折弯作业的指令。

3 实验验证

3.1 实验方案设计

实验以某型号电梯安全钳钳体钣金件为实验对象，该工件采用 Q355 材质，板材厚度 6 mm，折弯角度 90°，折弯半径 3 mm；搭建由优化后六轴自动折弯机器人、数控折弯机、自动上料机、在线检测设备及协同控制平台组成的实验平台。实验采用分组对比模式，对照组采用通用未优化折弯机器人，实验组采用本文优化后自动折弯机器人，每组均加工 100 件工件；设定统一实验参数，机器人重复定位精度 ±0.01 mm、折弯速度5 mm/s、夹持力800 N～1 000 N、回弹补偿系数0.4，重点对比两组实验的折弯精度、生产效率及产品合格率三项核心指标。

3.2 实验结果与分析

实验结果清晰显示，实验组较对照组各项性能指标均实现显著提升，优化效果十分明显。为直观展示对比效果，将核心性能指标整理如表 1 所示。

由表 1 可知：该实验结果充分证明，本文研究的机械结构优化、路径智能规划、精度控制、系统协同控制四大关键技术，能够有效解决电梯安全钳折弯过程中的核心痛点，完全满足安全钳规模化、高精度的生产需求。

表 1 实验组与对照组性能指标对比

对比指标	对照组（通用机器人）	实验组（优化后机器人）	提升幅度
折弯角度偏差平均值	±0.32°	±0.15°	53.1%
单件加工周期	45 s	28 s	37.8%
产品合格率	88%	98.5%	10.5%

4 结束语

本文围绕电梯安全钳自动折弯生产的实际需求，系统研究并成功实现了自动折弯机器人的四大关键技术：通过机械结构优化，有效解决了厚板折弯稳定性不足的问题；借助路径智能规划技术，成功规避了加工过程中的干涉隐患；依托精度控制技术，全面保障了折弯精度达标；通过系统协同控制，实现了折弯生产全流程自动化。实验验证结果表明，本研究成果能够有效提升电梯安全钳折弯生产效率与产品质量，完美适配多品种、中批量的生产模式。

参考文献：

[1] 冯经纬.依托智慧监管升级电梯安全水平:莆田市推动特种设备安全生产专项整治三年行动 [J].安全与健康,2022(12):36-37.

[2] 温冬宝.电梯安全钳楔块用 SiC/Al 复合材料的性能研究 [D].广州:华南理工大学,2020.

[3] 谈伟荣.直驱电梯安全钳防坠装置的结构设计与仿真分析 [D].兰州:兰州理工大学,2020.

[4] 杨晟杰.电梯安全钳本体自动折弯的研究 [D].上海:上海大学,2020.

[5] 刘玮琪.液压驱动电梯更新改造安全生产施工方案探究 [J].劳动保护,2024(10):75-77.

[6] 纪广东,游有鹏,王鹏宇,等.基于知识和改进 PRM 算法的钣金折弯机器人路径自动规划与优化 [J].机械与电子,2024,42(06):38-44,49.

基于机器学习的水电厂泵站设备运行状态监测与故障预警方法

黄利平

（大唐雅安电力开发有限公司，四川 雅安 625000）

摘 要 水电厂泵站设备作为保障水电厂正常运作的核心设施，其稳定运行对于保证电力供应和水资源调度具有重要意义。随着水电行业对设备监控需求的不断提升，传统的设备运行状态监测方法已无法满足实时性、准确性和预警功能的要求。近年来，机器学习技术在设备状态监测和故障预警中展现出了巨大潜力，通过数据驱动的智能分析与预测手段，能够有效提升泵站设备的运行安全性和可靠性。本文探讨了机器学习在水电厂泵站设备监测中的应用背景，分析了机器学习在故障预警中的基本原理，提出了基于机器学习的故障预警优化措施，以期为相关人员提供参考。

关键词 水电厂；泵站设备；机器学习；运行状态监测；故障预警

中图分类号：TV738；TP181 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.012

0 引言

水电厂泵站设备在系统运行中发挥至关重要的作用，承担水流调度与能量转换的核心功能，其运行稳定性直接决定水电厂供电可靠性与整体运行效益。传统设备状态监测与故障预警方法多依靠人工经验与定期检查，该方法具有实时性不强、预测能力受限、故障反应落后等缺点[1]。在如今智能化、自动化飞速发展的时代背景下，机器学习这种可以自动从数据中提取出规律及特征的技术已成为增强水电厂设备监测及故障预警能力的主要途径。在水电行业数字化转型背景下，泵站设备监测逐渐从“事后检修”提升为“状态检修”“预测性维护”。通过在已有监控系统中嵌入机器学习，可将分散于SCADA、振动监测、视频监控及检修记录等多源数据整合为一个涵盖“设备—运行条件”的整体数据链条。一方面提供运行人员可视化健康指数及风险等级以协助制定最佳运行方式；另一方面为设备选型优化、寿命评估及备品备件管理等提供了量化依据，使其由单台装备安全过渡到全寿命周期及全站系统级的安全与经济运行。

1 水电厂泵站设备运行状态监测技术

1.1 数据采集与预处理技术

对水电厂泵站设备进行监控时，数据采集为智能化管理及故障预测提供了依据。设备运行状态取决于海量传感器数据，涉及温度、压力、振动、流量和转速等众多关键参数[2]。该装置的工作环境通常比较复杂和动态变化，在进行数据采集时可能会受到传感器故障和环境干扰的干扰，必须采取有效措施对数据进行预处理。数据预处理环节主要包括数据清洗、去噪以及异常值检测和修复，其目的是剔除不相关或者不正确的信息以保证后续的分析结果。优质的预处理既有利于改善故障检测及预测模型性能，又可以减少噪声对模型预测结果的扰动，增强系统可靠性和精度[3]。在数据采集环节，可采用多类型传感器结合方式，包括温度传感器、振动传感器、压力传感器及流量计等，实现关键运行参数的全方位采集。

1.2 特征选择与特征提取方法

特征选择的核心目标是从大量传感器采集的多维数据中，筛选出与设备运行状态变化高度相关的变量，从而降低维度、减少冗余信息并提升模型训练效率。常见的方法包括相关性分析、互信息、方差筛选、LASSO回归以及基于树模型的重要性排序等[4]。同时，还需结合设备历史故障数据与专家经验，确保所选特征具备实际工程意义，能够真实反映设备健康状态。特征提取则是在原始数据基础上构造新的、更具判别力的特征。例如：可通过傅里叶变换提取频域特征，揭示周期性故障模式；或利用小波变换提取多尺度下的瞬时信息，以捕捉运行中微小但关键的变化。

作者简介：黄利平（1982-），男，本科，工程师，研究方向：电力生产设备智能监测。

1.3 模型训练与验证方法

模型训练和验证是保证水电厂泵站装置运行状态监控系统正确性的核心步骤。在模型训练过程中，训练集及测试集需先对历史数据进行抽取，以保证数据具有代表性和多样性。针对各种不同的任务要求，常见的机器学习方法有支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、神经网络（NN）以及决策树（DT）等技术[5]。对于设备故障分类，模型训练要注意优化分类准确率和避免过拟合现象。交叉验证通过将原始数据集划分为若干个子集，轮流将其中一个子集作为验证集，其余作为训练集，反复进行训练与测试，不仅能够最大程度地利用有限数据，还能有效防止模型因过拟合而导致在实际应用中的性能下降。在实际工程应用中，为进一步提升模型在不同运行条件下的泛化能力，常采用增量学习与在线训练策略。通过持续更新模型参数和引入新的运行数据，能够实时适应泵站运行环境变化，提高故障预测的准确性和可靠性。同时，结合模型不确定性评估，可对预测结果进行置信度判断，为运维人员提供更具参考价值的决策依据。

2 水电厂泵站设备运行状态监测中的故障分析

2.1 泵轴振动异常

泵轴振动异常在水电厂泵站设备故障当中属于一种常见故障，一般由设备内各零件磨损、变形或者失衡造成。泵轴出现异常振动情况下，不但影响泵站正常工作，而且有可能造成设备长时间工作存在隐患。泵轴振动异常一般是指振动幅度增大或者频率不正常，这可能会影响泵站效率及设备寿命。通过泵轴振动信号的频谱分析可确定设备在工作过程中是否出现异常情况。但在实际使用过程中因设备状态动态变化及环境因素干扰等原因，振动信号常受噪声影响而造成故障模式不易准确辨识。对水电厂泵站设备而言，发现泵轴振动异常现象并加以分析，可以有效地降低对设备损伤，减少维修成本，促进设备运行稳定安全。

2.2 管道泄漏与水流异常

管道泄漏和水流不正常是泵站设备常见的严重故障类型，出现泄漏一般会造成水流量改变、泵站效率降低和能源浪费等。管道泄漏在影响泵站正常工作的同时，也会造成环境污染和资源浪费等一系列负面后果。泄漏一般出现在管道接头，连接部位或因管道老化而开裂。水流异常对泄漏发生有密切关系，水流急剧波动、流量减小往往预示着泄漏或者堵塞。传统监测方法主要依靠人工巡检、水流测量等手段对管道状态进行判断，既消耗了大量人力物力，又不能实时检测出可能出现的故障。但是，现代传感器的提出可以实时地监测水流量和压力，并且与机器学习算法相结合进行数据分析，有利于及时发现管道泄漏和准确定位泄漏发生部位。除泵轴振动异常与管道泄漏外，泵站设备常见故障还包括轴承磨损、叶轮腐蚀及阀门卡滞等问题。如轴承磨损会导致泵轴偏心振动，进而引起机械疲劳；叶轮腐蚀则影响泵站效率，增加能耗；阀门卡滞可能造成水流异常，威胁系统安全。针对这些故障，可结合多传感器融合与机器学习算法进行实时监控与预测分析，通过异常特征识别实现早期预警。

2.3 数据噪声与异常值处理

水电厂泵站设备运行时，受传感器精度、环境干扰、设备震动等因素的影响，其采集数据常包含噪声及异常值，这些噪声及异常值若没有得到很好的处理就有可能造成后续的分析及故障诊断错误。数据噪声会在信号上呈现波动，突变等特征，异常值就是数据中与正常范围显著背离的值。对设备进行监控时，出现异常值通常会和设备故障、传感器故障或者外界干扰等因素相关（见表 1）。

3 水电厂泵站设备故障优化与预警措施

3.1 基于模型的实时监控与异常检测

在对水电厂泵站设备进行实时监测时，利用机器学习模型对其进行异常检测，可以有效识别出设备运行过程中可能出现的故障。通过历史运行数据训练得到的故障预测模型能够对设备振动、温度和压力等多种参数进行实时分析，及时发现设备异常状态。当该装置某一参数超过正常值范围后，监控系统立即报警，提醒维护人员及时排查。为提高监控系统运行的实时性与准确性，监控平台要具有高效数据处理能力与精确异常检测算法。实践中需综合考虑数据传输实时性、传感器精度和数据采集频率，以保证系统能对设备状态迅速做出反应和精确判断。将实时监控和异常检测相结合，既能提高设备故障早期发现率，又能在故障早期介入，避免设备损坏和较大的停机事故。

3.2 强化设备维护和预防性保养机制

传统维护方式通常依靠经验判断与定期检查，但该方法通常不能满足设备状态动态变化的要求。基于机器学习故障预警系统可以对设备运行状态进行实时监测，依据设备历史数据及预测模型有针对性地给出维修建议。通过数据驱动设备健康评估使管理人员能够预先制定维护计划并执行预防性保养。进一步结合机器学

表 1　水电厂泵站设备监测中的数据噪声与异常值类型及来源

噪声 / 异常值类型	描述	可能的来源
信号波动噪声	传感器输出信号在正常运行情况下的随机波动	传感器本身的精度限制、环境温度波动、电磁干扰
突变噪声	短时间内的异常数据波动，通常表现为极值或剧烈波动	外部因素（雷电、环境振动）、传感器突然故障
偏离正常范围的异常值	数据显著偏离预设正常工作范围，可能为异常的大幅波动	设备故障（泵轴磨损）、传感器老化、操作不当
重复性异常值	相同数值多次出现在数据中，通常是系统错误或故障的表现	传感器故障（死点）、通信延迟或错误、数据采集系统问题
漂移异常值	数据随时间逐渐偏离正常值，通常为缓慢变化的趋势	设备磨损、传感器老化、长期运行引起的机械偏移
外部干扰噪声	设备数据中出现由于外部环境干扰造成的信号误差	电磁干扰、机械振动、天气变化等环境因素

习算法对保养策略进行优化，并通过对设备保养周期的不断调整与改进，能够保证设备始终处于最佳运行状态，从而避免由于设备故障而造成生产中断与亏损。

3.3　引入自适应算法，提高噪声过滤能力

水电厂泵站设备监测数据常伴有大量噪声，其可能源于传感器误差、环境变化和其他诸多因素。机器学习模型训练时，噪声严重地影响了模型精度与可靠性。为增强监测系统鲁棒性及预测准确度，自适应算法的引入可有效增强噪声过滤。自适应算法对实时数据进行分析并动态地调整模型参数，使其能够适应各种环境情况下的数据特征。常用的自适应算法有卡尔曼滤波和自适应噪声滤波等，这些算法能显著降低噪声对数据的影响，从而提升数据的稳定性和可靠性。通过与自适应算法相结合，水电厂泵站设备监测系统能更准确地对设备故障进行识别与预测，并提供更多的可靠预警信息。实际项目实施时，可以根据“感知层—传输层—平台层—应用层”体系结构构建基于机器学习的泵站监控系统。感知层采用智能传感器与在线检测装置相结合的方式，实现对关键部件运行参数综合采集；传输层在工业以太网或者 5G 专网的支持下，实现了现场数据向数据平台的稳定和安全传输；平台层完成数据清洗、特征计算以及模型的在线更新；应用层通过故障预警、运行优化建议以及检修决策支持的方式，通过图表、告警信息向调度及运维人员推送模型的输出结果。采用闭环应用的方式，可以不断地利用新的现场数据对模型进行校正，从而使得系统能够在长时间的运行过程中维持很高的预测精度，具有一定的工程适用性。同时，可以结合企业安全生产考核指标量化评估预警效果并不断完善。

4　结束语

水电厂泵站设备的运行状态监测与故障预警技术在提升设备运行可靠性和保障电力生产安全方面发挥了重要作用。结合机器学习技术的监测系统，能够有效解决传统监控方式中的局限，提升故障预测的精度和实时性。设备数据的采集、特征提取及模型训练和验证是确保监测系统准确有效的关键环节，通过分析泵轴振动异常、管道泄漏及数据噪声等常见故障，能够针对性地优化故障检测与预警机制。实时监控、预防性保养和自适应噪声处理等措施为泵站设备的安全高效运行提供了坚实保障。综上所述，基于机器学习的水电厂泵站设备运行状态监测与故障预警技术，不仅能够提高设备运行安全性，还能有效提升泵站运行效率，实现能源节约和成本降低。

参考文献：

[1]　胡瑞东 . 新能源发电系统中的智能监测与故障诊断方法研究 [J]. 家电维修 ,2025(02):140-142.
[2]　唐万菲 . 基于一次设备的油浸式变压器状态监测与故障预警研究 [J]. 电脑编程技巧与维护 ,2024(11):61-63.
[3]　朱建成 . 基于机器学习的立式离心泵典型故障诊断方法研究及实现 [D]. 镇江 : 江苏大学 ,2021.
[4]　付恩强 , 黎天双 , 杨佳林 , 等 . 基于机器学习的风机发电机绕组温度故障诊断与预警分析 [J]. 计算机时代 ,2023(01):4-7.
[5]　张凤仪 . 配电电气设备状态监测与故障诊断的智能化方法研究 [J]. 电气时代 ,2024(06):95-97.

滑模技术在水利水电施工中的应用

潘曦阳

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610036）

摘 要 滑模技术具有整体成型、施工连续的特点，能有效减少施工缝、提升结构稳定性，在水利水电工程建设中展现出施工速度快、结构整体性强、成本投入低等明显优势。本文从应用意义、技术体系及优化措施三个方面对滑模施工中所涉及的主要问题进行了梳理，重点对滑升速度控制、混凝土配合比匹配及变形监测等关键工艺环节进行了分析，并结合水利水电工程环境复杂的特点，提出了相应的技术优化建议，以期为类似工程的施工管理提供有益参考。

关键词 滑模技术；水利水电；混凝土施工；连续浇筑；变形监测

中图分类号：TV53 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.013

0 引言

水利水电工程涉及薄壁或截面规则的混凝土构筑物，传统翻模施工在这类结构中存在施工工序烦琐、施工缝多、施工效率低等问题，难以满足现代水工结构对整体性和耐久性的严格要求。滑模技术的引入，从根本上改变了这类结构的建造逻辑，其可以随混凝土连续浇筑而持续滑升，实现结构一次性整体成型，在提升施工质量的同时大幅压缩工期，成为推动水利水电工程高质量发展的关键施工技术之一。

1 滑模技术在水利水电施工中的应用意义

《水工建筑物滑动模板施工技术规范》是依据国家发展和改革委员会相关计划要求制定的水利行业标准，其制定背景源于对水电工程滑动模板施工经验的系统性总结，旨在将施工过程中涌现的“新技术、新工艺、新材料和新设备”纳入标准化管理轨道。该规范从总则、施工准备、滑动模板设计、滑动模板施工、质量控制到安全技术等九大板块，构建了完整的施工技术体系。

1.1 提升施工效率

水利水电工程中闸墩、调压井、溢洪道边墙等构筑物，一般都存在平面尺寸相对固定、竖向高度大的特点，传统分层支模方式在这些结构上反复拆装模板，不但浪费了大量的机械台班和人工，而且使施工节奏经常受到干扰。滑模技术将模板、操作平台和提升装置合成一个整体滑动系统，使浇筑作业可以在不间断的情况下持续进行，从根本上消除了因换模造成的工序等待时间[1]。连续性并非只是速度的提高，而是施工组织逻辑的根本性改变，从“浇一段等一段、再浇一段”的间歇式施工转变为以混凝土凝结速度为基准的持续施工，施工效率的提高才具有结构上的意义。

1.2 保障结构质量

水利水电工程对于混凝土结构的抗渗性、整体性要求比一般的工业民用建筑高，根本原因是水工结构长期受水头压力和干湿交替侵蚀，任何一个施工冷缝或者层间结合不好都会成为渗漏通道，从而危及结构的安全。滑模施工的核心工艺逻辑是将原本需要多次立模、多次浇筑才能完成的构筑物，用模板连续滑升一次整体完成，从工艺上消除了传统施工中难以避免的水平施工缝。该特点在高水头闸墩、压力管道外包混凝土等对抗渗要求极高的部位尤为重要，整体成型带来的质量保证不是靠施工人员技术水平和个体差异来实现的，而是工艺本身连续性的内在体现，也是滑模技术在水工领域不能被取代的根本原因。

1.3 降低水利水电工程建设成本

水利水电工程的建设周期一般受汛期窗口、水库蓄水计划和电力并网时序等外部条件的严格限制，工期延误会使整个项目的社会效益和经济效益受到影响。滑模技术在工期方面所具有的价值，不单是单个构筑物浇筑速度的提升，更在于它能有效缩短整个施工流程关键线路上的时间节点[2]。以调压井或竖井类结构为例，采用滑模工艺后，原本需要数月才能完成的结构施工可以大幅缩短，释放出的工期余量可用于后续机电安装和联合调试的提前介入，对整个项目竣工投

作者简介：潘曦阳（1991-），男，本科，研究方向：水利水电工程。

产时间的影响是系统性的。同时，连续作业模式减少了模板周转和劳动力重复配置，直接降低了施工成本，为滑模技术在经济上提供了明显的量化比较优势。

2 滑模施工技术体系及关键工艺解析

2.1 滑模系统的整体构成逻辑

随着工程建设标准体系更新，2022年10月31日发布、2023年6月1日实施的全文强制性国家标准《建筑与市政施工现场安全卫生与职业健康通用规范》（GB 55034-2022），明确废止了行业标准《液压滑动模板施工安全技术规程》（JGJ 65-2013）中的第5.0.5条、第12.0.7条两项强制性条文，标志着滑模施工安全管理已纳入统一的施工现场安全卫生与职业健康强制管控体系。现行工程建设相关规定与本规范不一致的，一律以本规范为准，充分体现了国家对施工现场安全要求的统一与升级。滑模系统不是单一的设备，而是由模板体系、支撑体系、操作平台和液压提升装置四个功能模块共同组成的集成化施工系统，四者之间的协调配合是整个系统稳定运行的前提。模板体系是直接形成混凝土表面的，一般由内、外两层钢模板组成，为了便于脱模，模板沿高度方向设有一定的收分锥度，该设计细节影响脱模阻力和混凝土表面质量。支承体系是以穿入混凝土结构中的支承杆为主，液压千斤顶沿着支承杆向上爬升，将整套模板系统逐步提升[3]。操作平台是施工人员连续工作的场所，其刚度及荷载设计要考虑浇筑时动荷载的叠加影响。理解滑模系统内在的构成逻辑，是后续工艺控制的前提——任何一个模块出现故障，都会导致滑升失稳或混凝土成型质量下降，而且往往是多种问题叠加的开始。

2.2 混凝土连续浇筑中的滑升节奏控制

滑模施工中最为核心的工艺矛盾是混凝土的凝结速率和模板滑升速度之间的动态平衡。混凝土在模板内必须达到一定的强度才能在脱模后自立，如果滑升过快，脱模时混凝土还处在塑性状态，出模后极易在自重作用下发生坍塌或者表面拉裂；如果滑升过慢，混凝土与模板之间黏结力由于强度的增长而急剧增大，造成提升阻力过大，轻则造成表面拉毛，重则造成整体滑升系统卡顿甚至损坏。因此，混凝土浇筑分层厚度、每层浇筑时间间隔和外加剂缓凝效果都要与预定的滑升速度相匹配。匹配不是一次性的设计，可以固定不变，必须根据施工现场温度变化及混凝土实测强度发展情况做动态调整。

2.3 滑升速度均匀性对结构几何精度的决定性影响

多点液压提升系统中各个千斤顶的实际出力并不相同，支撑杆刚度不同、地基局部沉降等都会造成不同位置的模板出现滑升速度不同步的情况。不同步一旦积累起来，会直接导致模板平台倾斜，从而引起构筑物竖向轴线偏移。水利水电工程中竖井、闸墩等结构对轴线精度有严格的工艺要求，轴线偏差过大不但会影响结构受力，还会使闸门等机械设备安装精度受到影响[4]。因此，滑升速度的同步控制不是简单的匀速推进，而是在施工过程中建立连续的监测反馈系统，通过各测点高差的实时对比，通过自动控制系统或者人工干预各组千斤顶油压进行差异调节，使累计偏差始终在允许范围内。

2.4 变形监测在滑模质量控制中的核心地位

滑模施工是动态推进的，结构几何形态的偏差在施工过程中会不断累积，而且随着高度的增加而增大，仅靠施工人员的目测判断不能有效地控制这种累积效应。系统性的变形监测就成为滑模质量控制的刚性要求，而不是可以随意选择的辅助手段。监测内容一般包含模板平台水平度、结构轴线垂直度、支撑杆受力状态这三个方面，三者之间存在着内在联系，任何一个指标超出标准范围，都会成为其他两个指标问题的征兆。监测数据的价值不是在于记录，而是要触发纠偏动作的及时性——当某一个测点的数据出现趋势性的偏移时，必须在偏差还小时进行调整，如果等到偏差已经非常明显时再处理，纠偏的难度会以非线性的方式增大。

3 滑模技术在水利水电施工中的应用优化措施

3.1 将安装精度控制作为系统稳定运行的前置条件

滑模系统诸多施工问题大多是由初始安装时精度出现偏差所引发的。支撑杆垂直度、千斤顶安装位置、模板拼装平整度，一起形成了整套系统几何精度的初始条件，这些初始误差在后续滑升过程中会不断被放大，而不会自然消解。因此，安装阶段不能以大致到位为验收标准，而应建立基于测量控制网的精度复核制度，对每一根支撑杆的垂直度、每一组千斤顶的安装标高进行逐一测量记录，并将超差点位在系统启动前彻底整改[5]。将质量控制前移到安装阶段，远比在滑升过程中不断纠偏更经济有效，越接近工艺源头的控制措施，纠错成本越低，效果越好，同样适用于滑模施工全过程的管理。另外，在安装完毕之后还要进行整体系统联动校核，模拟滑升初期的受力情况来检验支撑体系和模板系统是否协调。关键节点可以用复测和交叉测量来保证数据的可靠性。同时还要建立安装偏差档案，为后续施工过程中趋势判断提供基础依据，从源头上降低系统运行不稳定风险。

3.2 针对性设计混凝土配合比

水利水电工程的施工环境温差大、湿度变化大，对滑模施工用混凝土的凝结性能有更高的适应性要求。通用配合比设计不能满足这样的环境变化，必须进行滑模工艺的专项配合比设计，其主要目的是在保证结构强度和耐久性的同时，使混凝土的凝结时间与设计滑升速度形成稳定的匹配区间。缓凝剂掺量要依照现场温度实测结果做阶段性的调节，而不是全程使用固定的掺量，骨料级配优化可以降低混凝土内摩擦阻力，减少滑升过程中脱模阻力，改善表面成型质量。高海拔或者严寒地区施工时，混凝土早期强度发展缓慢的效应更加明显，配合比设计要将此因素考虑进去，防止因为脱模时间判断失误而造成质量事故。应根据试拌试验结果对不同环境区间形成配合比调整曲线，使材料参数具有动态响应的能力。还可以采用外加剂复配技术来改善和易性和保水性，减少离析、泌水现象的发生，利用建立起来的材料性能同滑升参数之间的联系模型，可以改善配合比设计的针对性和可预测性。在配合比优化过程中，要严格控制胶凝材料用量与水胶比，在满足强度指标的前提下适当降低水化热峰值，避免滑模施工中因水化热集中释放导致表面裂缝。结合水利工程抗渗、抗冻要求，合理掺入粉煤灰、矿粉等矿物掺合料，提升混凝土体积稳定性与耐久性能。针对仓面暴露时间长及水分蒸发快的特点，配合比中需兼顾保塑性与初凝节奏，防止滑升过程中出现黏膜、拉裂等问题。

3.3 进行动态环境管理

水利水电工程的施工现场大多处在山区河谷地带，地形复杂、风力多变、昼夜温差大，这些环境因素对滑模施工的影响是持续的、动态的，静态的施工方案不能很好地应对这种变化。以风荷载为例，施工高度超过某个限值之后，操作平台的风振效应会对支承体系造成附加偏心荷载，如果施工方案中没有对不同高度阶段的风速限制以及临时加固措施做出明确规定，遇到突发大风时系统安全会面临严峻考验。温度对混凝土凝结有影响，夏季高温使混凝土凝结速度加快，若不及时调整滑升速度，容易造成混凝土带模过长、脱模困难。冬季施工时保温措施的好坏直接决定着混凝土能否在脱模前达到足够的强度。施工环境适应性管理的本质是将现场监测的数据变成即时的工艺调整指令，使施工决策一直和现场的实际状况相匹配。施工过程中需布设环境监测点位，实时采集风速、气温、湿度及日照强度等数据，建立环境参数与施工参数的联动控制机制。遇大风天气及时降低滑升速率并加固模板体系，防止模板偏移与混凝土外观缺陷；高温时段采取仓面喷雾保湿、调整缓凝组分等措施，延缓混凝土初凝速度。低温环境下增设保温棚、覆盖保温被等防护设施，严控混凝土内外温差。

3.4 提升建设工艺水平

滑模施工对于操作人员的技术要求比常规模板施工高得多，它不单是设备操作规程的熟悉程度问题，更是对混凝土凝结过程、滑升力学机制以及质量偏差原因有系统认识的问题。在实际工程中，很多滑模质量问题并不是由于设备本身存在故障，而是由于施工人员对于关键控制节点的判断出现失误所导致的，即错误地估计脱模时间、忽略早期测量数据中的偏移趋势、在遇到异常情况时采取了错误的应急处置方法等都是能力短板的直接反映。因此，技术能力建设不能只是在岗前培训的形式上进行，而应建立起施工全过程的技术交底和问题复盘机制，重点针对施工的关键工序操作人员和现场技术负责人展开模拟工况训练及历史案例剖析活动，从而促使其具备较强的工艺判断能力，将技术规程转化为施工队伍的行动习惯而不仅停留在纸面的参考文献中。

4 结论

滑模技术在水利水电施工中的应用价值，从根本上取决于其固有工艺逻辑能否在复杂工程环境下得到完整落地执行。连续滑升带来的质量优势并非自动生成，需依托多环节协同管控方能实现。本文所论述的技术要点与优化思路，核心指向一个关键结论：滑模施工的核心竞争力并非单纯依赖设备硬件实现，而是建立在对工艺过程的深度理解之上。随着自动控制技术在建筑施工领域的应用不断深化，滑模系统的信息化集成度将持续提升，既可为水利水电工程复杂结构的施工提供更可靠的技术支撑，也对现场从业人员的综合技术素养提出了更高要求。

参考文献：

[1] 陆景威.水利水电工程施工中的滑模技术应用[J].中国科技纵横,2025(22):143-145.
[2] 刘卓宇.基于滑模技术在水利水电工程施工中的应用研究[J].水上安全,2023(10):175-177.
[3] 吴宝阁.水利水电工程施工中的滑模技术应用[J].低碳世界,2022,12(05):61-63.
[4] 马晓琳.浅析滑模技术在水利水电施工中运用[J].新型工业化,2022,12(04):107-110.
[5] 杨立兵.滑模技术在水利水电工程施工中的应用[J].工程建设与设计,2022(05):120-122.

导流施工技术在水利工程中的应用

刘 静[1]，陈 浚[2*]

（1. 恩施市水利事业发展中心，湖北 恩施 445000；
2. 湖北路达胜工程技术咨询有限公司，湖北 武汉 430070）

摘 要 水利工程是重要的民生工程，对周边群众的生产生活有着关键性影响。导流施工技术属于水利工程建设中的一项核心技术，直接影响工程施工质量、进度及安全。此项技术通过科学布设导流建筑物，对水流进行合理的疏导与控制，从而为主体工程施工创造干地作业条件。本文概述了导流施工技术的概念与常见影响因素，分析了导流施工技术的常见类型，并对该技术的实施和应用要点进行了深入探讨，以期为提升水利工程建设质量提供有益参考。

关键词 水利工程；导流施工技术；导流建筑物；干地作业环境

中图分类号：TV551.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.014

0 引言

水利工程作为重要的民生基础工程，其工程质量与建设效率都受到公众的高度重视。导流施工技术作为水利工程建设中的常见技术，是解决施工过程中水流干扰、确保主体工程顺利施工的关键手段。导流方案的科学性关乎水利工程的工期进度、工程安全与质量。近年来，水利工程规模越来越大，施工难度也更大，这对导流施工技术提出了更加严格的要求。基于此，本文主要就该技术在水利工程中的应用进行探讨，以期为有关工程建设提供参考。

1 导流施工技术概述

1.1 导流施工技术的概念

导流施工技术是指在水利工程项目实施过程中，为防止水流对主体工程建设造成干扰，通过设置各种导流建筑物，将水流进行定向疏导、拦截或改道，从而为大坝、闸室等主体建筑物的施工营造干地作业环境的一类主要技术体系[1]。其核心目标是在保障施工安全的前提下，统筹协调水流管控与工程进度、成本之间的关系，进而影响项目的整体建设成效。

1.2 导流施工的影响因素

导流施工技术的应用受到诸多因素的影响，大致包括以下三类：第一，水文与气候因素。流域内年均径流量、汛期洪峰流量、枯水期水量、降水时空分布等均会影响到施工时间与顺序、导流建筑物的规模及泄洪能力。遇到暴雨、凌汛等极端天气，还要专门预留导流冗余，防止突发水情导致的安全隐患。第二，地形与地质条件。山区水利工程的地形多狭窄，通常会选择隧洞导流，而平原地区多采用明渠导流。地质稳定性将对导流建筑物的基础承载力及抗渗性产生明显影响，遇到软基、岩溶等特殊地质条件需优化施工方案。第三，工程自身因素。工程规模、核心建筑物类型（拱坝、重力坝）、总工期、投资预算等因素将影响导流方案的最终选择[2]。例如：大型水利工程可能选择分期导流，而中小型水利工程可能选择涵管等简单导流方式，从而确保技术可行性与经济合理性的统一。

2 导流施工技术的常见类型

2.1 全段围堰法导流

全段围堰法导流也被称为一次拦断法导流，在河道全断面上设置围堰，把河道水流全部拦截，通过预设的导流建筑物（明渠、隧洞、涵管等）将水流疏导至下游。它的典型优势是为主体工程施工创设完整的干地作业环境，便于统筹施工布局，特别适合主体结构复杂的水利工程或河谷狭窄的水利工程[3]。

2.1.1 隧洞导流

隧洞导流是在河道两岸山体或地下挖出隧道，使水流绕过施工现场所在区域，经过隧洞流至下流。通常来说，峡谷、河道比较窄，同时，两岸山体陡峭、

作者简介：刘静（1985-），女，本科，工程师，研究方向：水利工程。
***通信作者**：陈浚（1986-），男，本科，工程师，研究方向：水利水电。E-mail：zsrsj@163.com

山体比较厚实，具备成洞条件的场景可选择此法，如山区水库、峡谷型水电站。它的优点是河道水位涨落对其影响较小，故导流稳定性好，也不会占用河道地表空间，对附近植被及农地的破坏较小。但是此法施工周期较长，成本较高，而洞内水流条件、洞径、长度等直接影响到实际的泄水效果。在设计与施工过程中最核心的内容是隧洞的断面尺寸、衬砌形式与进出口布置。利用水力计算得出断面大小，需满足施工期最大洪峰流量的宣泄要求。衬砌一般选择混凝土或钢筋混凝土结构，遇到破碎地质还应采取锚杆、锚索等支护措施，确保隧洞的抗渗性与结构稳定性[4]。进出口必须与上下游河道能够平顺衔接，布局渐变段与消能设施，防止高速水流冲刷河道。

2.1.2 明渠导流

明渠导流方式是在河道岸边或滩地开挖明渠，并配合全段围堰拦截水流，让水流通过明渠下泄。此法的优点包括成本低、施工工艺简单、工期短，适合平原地区或河谷宽阔地带的水利工程。它的劣势在于容易受气候与水文条件影响，汛期必须重视渠道巡视与防护，避免洪水漫渠。另外，明渠占用土地面积较大，要做好征地拆迁与生态保护工作。

明渠导流的设计核心是明渠的线路选址与断面设计。就线路选址而言，需最大限度压缩长度，并绕开软基、沼泽等地质不佳区域，确保进出口与原河道能顺畅衔接，从而减少水流绕流与淤积。关于断面形式，一般选择矩形或梯形，参考设计流量、渠道比降与糙率等因素算出断面大小，保证水流流速始终位于安全区间，防止渠道冲刷与淤积[5]。这种导流方式的适用场景较广，除了用于中小型水库、水闸等工程中，也可在大型水利工程前期施工中作为临时导流方式。例如：某平原地区农田灌溉工程，由于河谷宽阔、地势平坦，采用梯形明渠导流法，渠道底部宽 15 m，边坡比为 1:2，铺设土工膜以防渗，极大地降低了施工难度，也节省了建设成本，明渠施工只用了 3 个月，为主体工程的开工创造了有利条件。

2.1.3 涵管导流

涵管导流是通过预设涵管作为导流通道，其优点包括施工方便、结构紧凑、占用空间少等。它适合中小型水利工程、河道闸坝改造工程，也常用于大型水利工程的辅助导流。它的不足之处是泄洪能力不强，不适用于流量大的河流或汛期易发洪水的区域，且涵管长时间面临水流冲刷，必须定期查看与维护，保证结构的安全性。应用此导流方式的关键在于涵管的布置地点与数量。一般来说，涵管分布于围堰底端或岸边堤身内，必须确保涵管轴线与水流方向相同，以减少水流阻力。通过导流流量算出涵管数量及管径大小，若单根涵管流量偏少时，可选择多根涵管并联布设方式。涵管导流的施工要点是处理好涵管基础及防渗衔接。基础部分选择换填垫层或桩基加固，防止涵管不均匀沉降导致破损。在涵管与堤身、围堰的衔接位置运用密封胶、止水带等防渗材料，避免渗漏发生。

2.2 分段围堰法导流

分段围堰法导流也被称为分期围堰导流法，是把河床分成数个干燥的施工区域（称为“基坑”），并分阶段逐步施工的方法。

2.2.1 束窄河床导流

这种导流法多用于河床宽大、流量大且工期长的河流水利工程中。从河床中打造纵向围堰，将河床变窄，然后河水从中经过，在此期间工作人员可开展有关分部工程的施工。后续可搭配其它导流措施一起进行整个工程的施工建设。此法是依靠河床本身的一部分实现泄水目的，不用搭建诸多临时泄水建筑物，不过它会对河床原来的水流形态产生较大的影响。故施工前需做好准备措施，计算水力学，并分析水流模拟情况，确定精准的狭窄程度，同时要评判此法对附近环境产生的具体影响[6]。

2.2.2 依靠已建、在建建筑物导流

针对水利工程中已有建好或正在建设的建筑物，且这些建筑物具备泄水功能，可选用此法进行导流。例如：借助大坝的底孔、预留缺口等处达到泄水目的。此法无需建设过多临时导流建筑，可以节省相关建设经费。同时，也能与工程其他施工环节做好衔接。注意必须全面评估建筑物的结构安全与泄流能力，并做好全程监控，防止水流冲刷破坏这些建筑物。

3 导流施工技术在水利工程中的实施要点

3.1 施工前的准备工作

做好施工前的充分准备是确保导流施工成功完成的基础，应从以下三个维度抓起：第一，技术准备维度，全面做好现场勘察，准确获取施工区域的地形地质、水文气象等关键信息，着重核查汛期洪峰流量、地下水位变化、不良地质分布等情况。根据勘察报告优化导流方案，确定导流建筑物的类型、规模、所在位置，并开展水力计算、结构稳定性分析、应急预案编制等工作。然后安排专家评审方案，保证技术的可行性。第二，现场准备维度。提前将施工场地的杂物、植被清理干净，平整场地，规划好材料输送通道与临时设施布置。对于导流建筑物基础施工区域要重点完成排

水降渍工作，对软基区域提前完成加固处理，防止沉降发生。另外，做好施工测量放样、准确标记围堰、导流隧洞、明渠等核心构筑物的轴线、高程控制点。第三，物资与设备准备维度。参考施工方案完成周详的采购与调配计划，着重确保围堰防渗材料、混凝土、钢筋等关键材料的供应与质量。对挖掘机、混凝土搅拌机等设备要提前检修与调试，备足相关零配件，防止设备故障拖慢施工速度。另外，还需备足防汛物品，以应对突发水情。

3.2 施工阶段的关键点

3.2.1 围堰施工

围堰属于非常重要的一类临时构筑物，作用是拦截水流，它的施工质量关乎干地作业环境的安全性。施工前参考水文地质条件挑选围堰类型。土石围堰多用于地形开阔、材料易得的场景；混凝土围堰主要用于防渗标准高、工期长的水利项目。施工过程中必须控制好填料质量与压实度。对于土石围堰而言，采用分层填筑、分层压实的方法，压实度至少达到设计标准，以防引起渗透变形。对于混凝土围堰而言，关键是模板支护、混凝土浇筑振捣的质量控制，并做好施工缝的防渗衔接处理。此外，围堰迎水侧应配备防渗层，如防渗墙、土工膜，同时，配备排水棱体或反滤层，避免渗流破坏。预留围堰超高，应对汛期突发洪峰，并同步配备监测器材，实时获取围堰位移、沉降、渗流量等数据。

3.2.2 泄水建筑物施工

施工时对各种泄水建筑物都提出了非常严格的质量要求，如涵管、隧洞、明渠等。以隧洞建设为例，在开挖作业时需注意围堰是否稳定，同时，做好通风、排水、支护等方面的工作，方能有效确保施工安全，保障隧洞结构不受损。关于明渠建设，关键是确保渠道的衬砌施工质量，让渠道有良好的抗冲刷能力。关于涵管施工，重点是做好涵管安装作业，保障接口具备良好的密封性，避免漏水。

3.2.3 重视导流设施的衔接与调试

不同设施的准确衔接与调试是导流系统实现高效运作的重要前提。施工过程中应确保围堰与泄水建筑物进出口的平顺衔接，减少水流阻力及冲刷。为防止导流建筑物与主体工程施工区域相互干扰，应做好明晰的隔离措施。调试环节应分步实施试水试验，先作小流量通水，观察设施是否渗漏、变形，然后陆续增加到设计流量，验证泄洪性能与水流状态。另外，调试导流配套的闸门、启闭设备，就调试中的问题及时整改，保证操控精准灵活。

3.3 导流工程拆除施工

水利工程收尾阶段需拆除导流工程，要考虑安全、环保与主体工程运行方面的需求。选好拆除时机，在大坝、闸室等主体工程具有正常挡水、泄洪功能后，参考水文条件在枯水期内拆除，注意避开暴雨、大风、汛期。拆除顺序一般为“先非核心后核心，先上游后下游”，优先拆除临时辅助设施，然后陆续拆除泄水建筑物、围堰等关键设施，防止拆除期间出现水流紊乱或地质灾害。在拆除作业时做好防护措施，保护好主体工程及附近生态环境。就拆除措施来看，应考虑导流设施的具体结构、材料特点来确定适宜的拆除方法。通常选用机械开挖、爆破等方法拆除土石围堰，在拆除作业时一定要做好全方位的安全措施，确保人员、设备、环境的安全。针对混凝土围堰，一般会采用破碎、切割的措施来拆除。禁止将拆除垃圾随意丢弃，及时清运到指定地点处理。另外，针对施工作业时受损的河床与河岸，应尽快加以修复，最大限度地将它们恢复到原来的自然状态，从而保护附近生态环境。

4 结束语

导流技术在水利工程建设领域占有非常重要的地位。科学合理地选用导流施工技术，是保障施工安全、施工质量可靠及施工进度顺利推进的关键。导流施工技术的类型有多种，它们有各自的优劣点，也有具体的适用场景与施工关键点，在实际工程建设中应结合工程情况合理选用，以确保获得预期的施工效果。随着信息技术的高速发展，导流施工技术在未来也会迈向智能化、信息化、多学科融合发展的新阶段，为我国水利工程建设实现高质量发展提供有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 张亚松.导流施工技术在水利工程施工中的运用要点分析[J].水利电力技术与应用,2025,07(01):145-147.
[2] 王文喜.导流施工技术在水利工程施工中的运用要点探研[J].水上安全,2024(08):179-181.
[3] 项登飞.浅谈导流施工技术在水利工程施工中的应用[J].信息周刊,2020(11):1.
[4] 徐泽明.水利工程施工中导流施工技术的实践[J].黑龙江水利科技,2019,47(05):138-140.
[5] 白云.导流施工技术在水利工程施工中的应用研究[J].现代工程科技,2025,04(10):45-48.
[6] 郑亚莲.导流施工技术在水利工程施工中的应用[J].工程学研究与实用,2025,06(15):202-204.

房建工程绿色施工扬尘污染防控技术应用

吴 琪

（安徽建工公路桥梁建设集团有限公司，安徽 合肥 230031）

摘 要 现代城市化发展速度加快，房屋建筑工程规模日益扩大，现场施工扬尘问题日益严重，已经成为影响人们生命健康以及城市空气质量的重要因素。在房建工程中，制定绿色施工技术方案，能实现现场扬尘污染的有效防控，符合绿色施工理念需求，为建筑领域实现可持续发展做出贡献。本文主要分析房建工程绿色施工扬尘污染防控技术，从源头上进行扬尘污染有效控制，从而构建完善的扬尘污染防控体系，以期为确保房建工程项目施工达到绿色发展要求提供参考。

关键词 房建工程；绿色施工；扬尘污染；源头控制技术；环境保护

中图分类号：TU74 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.015

0 引言

房建工程施工扬尘污染日益突出，不仅影响城市空气质量，更对居民生命健康造成极大威胁，已成为现代建筑工程领域关注的重点问题。在此背景下，建筑领域提出绿色发展理念，将可持续发展策略融入工程建设全流程，这一转型方向已成为国家与社会层面的聚焦重点。近年来，《绿色施工导则》《建筑施工现场环境与卫生标准》等一系列法律法规持续落地实施，房建工程施工现场扬尘防控方面重视度显著提升。2022 年，住建部发布《“十四五”建筑业发展规划》，进一步明确当前建筑领域需遵循绿色发展理念，加强施工现场扬尘管控力度，为行业绿色转型明确实施路径。

1 扬尘污染主要来源

房建工程施工过程中扬尘污染发生率较高，贯穿整个建筑周期，具体扬尘来源包含如下几个层面：（1）土方作业扬尘。这是房建施工现场扬尘的主要来源，其占项目施工现场扬尘总量的 50% 以上。在房建工程施工过程中，基坑开挖、土方回填、场地平整为核心工序，其对地下土壤产生过大扰动，尤其是机械作用下导致粉尘颗粒搅动到空气环境中，尤其在干旱多风季节造成现场扬尘污染加剧。（2）物料运输扬尘。建筑施工所用材料中，水泥、砂石、石灰、渣土等用量较大，其在装卸、运输时扬尘污染发生率较高。建筑施工材料运输时，由于车轮带泥上路，路面散落物料经过车辆碾压与风力作用，导致二次扬尘的污染。根据测算分析，物料运输扬尘约占施工现场扬尘总量 20% ～ 30%。（3）施工作业扬尘。在房建工程施工中，砂浆拌制、混凝土搅拌、木材加工、石材切割等会产生大量粉尘，尤其是装修时打磨、钻孔、切割等都会引发颗粒扬尘污染。（4）裸露场地扬尘。房建工程施工现场未覆盖土堆、未硬化道路、长期闲置裸露地面等，在机械与车辆扰动下造成扬尘污染，特别是在春季多风天气扬尘危害加剧。（5）拆除作业扬尘。房建施工现场旧建筑拆除作业时，砖石、混凝土等建筑材料产生大量粉尘，若未能采取降尘措施，必然会导致局部空气污染加剧[1]。

2 绿色施工理念与扬尘防控要求

2.1 绿色施工内涵

房建工程落实绿色施工理念，在项目建设阶段保证质量、安全符合要求的基础下，通过科学管理措施以降低现场污染危害。在目前房建工程绿色施工理念应用中，需落实节能、节地、节水、节材、环境保护策略，使整个过程落实环境保护方案，并将环保理念融入施工策划、材料采购、现场施工、工程验收等各个环节。

2.2 扬尘防控政策要求

国家就房建工程绿色施工发布一系列的法律法规，如下：（1）国家标准要求。《建设工程施工现场环境与卫生标准》规定施工现场需落实扬尘控制策略，如土方堆放区域覆盖或固化处理，现场建设垃圾处理站，并及时进行垃圾清运和处理。（2）“六个百分之百”要求。房建施工现场需做到如下要求：施工工地周边 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、

作者简介：吴琪（1986-），男，本科，高级工程师，研究方向：土木工程施工。

渣土车辆100%密闭运输。（3）根据在线监测的要求，在重点地区及大型工地要安装扬尘在线监测系统，对PM10、PM2.5等指标予以实时监测，同时与监管部门联网，确保数据实时传输、超标即时预警。（4）提出差异化管控要求，即按空气质量状况实行施工扬尘差异化管控，在重污染天气预警时暂停土石方、拆除作业[2]。

3 扬尘污染防控技术

3.1 源头控制技术

房建工程绿色施工理念需从源头控制，这是降低扬尘污染危害的重要举措。（1）优化施工方案。根据房建工程建设要求，在施工组织阶段落实扬尘控制措施应用，能减少土方开挖量与裸露时间。而在房建工程中选用装配式施工技术，能减少现场湿作业与材料切割工作量，并采用预拌混凝土和预拌砂浆降低现场搅拌量，以减少粉尘产生量。（2）选择环保材料。首先，强制推行湿法作业工艺，钻孔环节统一采用水钻施工，切割作业严格使用水切割设备，建筑拆除全过程实施持续喷水降尘，从源头抑制粉尘产生。所有切割、打磨机械均须标配专用除尘装置，并建立“作业前检查安装、作业中监控运行、作业后清理残留”的闭环管理机制，确保设备效能最大化。其次，严格优选环保建筑材料。依据工程设计方案，优先选用低尘或无尘建材，全面推广袋装水泥替代散装水泥，有效减少拆包与搅拌环节的粉尘逸散；同时，强制使用高品质环保型切割片，从工具层面降低切割粉尘排放量。此外，强化现场物料堆放管理，砂石、土方等易扬尘物料必须采取严密覆盖或入库存放措施，裸露地面实施绿化或固化处理。（3）改进施工工艺。房建施工全面推行湿法作业工艺：钻孔作业统一采用水钻，切割作业强制使用水切割设备，建筑拆除全程实施持续喷水降尘。所有切割、打磨设备必须标配专用除尘装置。严格执行“作业前检查安装到位、作业中确保正常运行、作业后及时清理残留”的闭环管理，规范操作流程，明确人员标准，确保湿法作业与除尘措施落实到每一道施工工序[3]。

3.2 过程控制技术

房建工程施工阶段需落实过程控制措施，这是降低扬尘危害的重要举措。（1）围挡封闭技术。房建施工现场设置围挡设施，采取密闭、连续布置方式，保证主要路段高度2.5 m以下、一般路段1.8 m以下。围挡达到坚固、美观、整洁的效果，一般选择使用金属板材、砌体等硬质材料。围挡需设置喷淋装置，并在现场形成水幕防尘。（2）洒水降尘技术。房建施工现场需配置洒水车、雾炮机等降尘设备，在施工现场扬尘发生率较高的部位及时喷淋降尘处理。通常来说，每日洒水次数4次以上，干燥大风天气需适当增加洒水频率。雾炮机布设覆盖现场作业面，雾粒直径为50 μm～150 μm，从而使降尘效果达到要求。（3）物料覆盖技术。房建施工现场土方、砂石、水泥等材料容易产生粉尘释放的情况，需采取现场覆盖措施。通常来说，在房建现场布置防尘网、防尘布、土工布等，防尘网目数应超过800目/100 cm^2。（4）车辆冲洗技术。房建施工现场出入口设置车辆冲洗装置，禁止车辆带粉尘进入作业现场[4]。

3.3 末端治理技术

房建施工现场需落实扬尘收集与处理工作，从而实现末端扬尘有效治理。（1）除尘设备应用。混凝土搅拌站、砂浆搅拌站、木材加工区等扬尘发生概率较高点位，需选择使用布袋除尘器、湿式除尘器、静电除尘器等除尘设备，从而使扬尘有效控制。布袋除尘器除尘效率超过99%，能实现细颗粒物有效治理；湿式处理器投资少、结构简单，能实现房建工程施工现场的扬尘有效控制。（2）绿化降尘技术。房建施工现场裸露空地、施工周边、围挡内侧等采取绿化措施，通过种植草坪、灌木等方式有效吸收粉尘。植物能吸收空气中的颗粒物降低施工现场扬尘浓度，并且使房建作业现场绿化率超过80%。此外，此外，需定期对施工现场绿化植被进行养护，及时浇水、修剪，确保植被长势良好，保障降尘效果。同时，在施工现场主要出入口、材料运输道路铺设洒水设施，安排专人定时洒水保湿，抑制车辆行驶过程中产生的扬尘。对于建筑材料装卸、建筑垃圾清运等易产生扬尘的环节，需采取密闭作业方式，配备防尘罩、防尘网等防护设施，减少扬尘扩散。

3.4 监测与信息化技术

（1）扬尘在线监测。在施工现场主要出入口、作业区等扬尘敏感区域布设扬尘在线监测设备，对PM10、PM2.5、噪声、风速、风向诸种参数进行实时监测，所测数据及时、可靠地上传至监管部门平台，便于远程监控。一旦监测数据超过预警阈值时，系统即自动报警并自动联动喷淋、雾炮等降尘设备。（2）视频监控技术。在施工现场安装高清视频监控设备，对土方作业、物料运输、车辆冲洗等重点环节予以全天候、无死角监控，视频资料保存期不少于30天，有利于事后追溯监管。宜主动采用无人机巡查，对施工现场扬尘防控情况做系统巡查。（3）信息化管理平台。建设施工扬尘信息化管理平台，将在线监测、视频监控、设备控制、数据分析诸种功能自然、合理地集成在一起，厘清扬

尘污染规律，从而能够有针对性地科学制定、优化防控措施[5]。

4 工程实践

4.1 工程案例概况

以华中地区某住宅项目为案例，其建筑面积 25 万 m^2，包含 8 栋高层及地下车库，采用框架—剪力墙结构，工期 24 个月，土方量 30 万 m^3。本项目位于城市核心区域，周边分布大量居民建筑，对环境敏感性要求较高。该项目周边分布大量居民区、学校以及主干道，并且建设单位确立“省级绿色施工示范工程”目标，组建专项小组编制《扬尘防控专项方案》，确定扬尘防控指标以及考核标准。

4.2 防控技术具体应用

通过对本项目实际情况进行分析发现，在扬尘防控技术应用中确定源头控制、过程控制、末端治理、监测信息化等技术，从而构建完善扬尘防控体系。（1）源头控制措施应用。本项目土方施工开始前，施工单位制定土方平衡方案，确保现场土方回填作业达到平衡性。而在建筑主体结构施工中，采用装配式建筑施工技术，能减少因为混凝土浇筑、模板切割等产生大量扬尘污染。钢筋加工采用数控加工中心，避免分散切割造成粉尘污染危害。（2）过程控制措施应用。本项目施工现场配置高度 2.5 m 的装配式金属围挡，围挡顶部间隔 3 m，设置高压微雾喷淋头，从而在施工现场周边形成连续水幕。该项目基坑开挖配置 2 台大型雾炮机和 1 台洒水车，使现场作业能有效降低扬尘量。施工现场裸露土方以及物料采取防尘网覆盖方式，并在周边播撒草籽进行临时绿化，以防闲置区域出现扬尘污染危害。（3）末端治理与绿化应用。本项目施工中木工加工棚、钢筋加工棚等扬尘产生量较大，需在现场布置布袋除尘装置，集中进行扬尘的收集。而在施工周边种植常青灌木与草坪，且围挡内侧设置垂直绿化墙能有效吸收粉尘。（4）项目部对施工现场大门、基坑作业区、办公区及敏感点安装 4 套扬尘在线监测设备，对 PM10、PM2.5、噪声、温度、风速诸参数作连续监测，所测数据经 4G 网络及时上传到当地住建局监管平台及项目部智慧工地管理平台。系统设定预警阈值，超标时即自动触发现场喷淋系统、雾炮机的联动降尘措施。此外，在主要作业面布置了 10 个高清视频监控点，管理人员可用手机 APP 任意时间、任意地点查看现场情况。

4.3 应用效果分析

本项目扬尘污染防控措施落实到位，主要应用价值体现在环境、经济、社会三个方面。（1）环境效益：施工期间施工现场边界所测 PM10 平均浓度为 65 μg/m^3，PM2.5 平均浓度为 35 μg/m^3，都严格低于国家及地方现行的施工扬尘排放限值（PM10 ≤ 80 μg/m^3），与周边未采取严格防控措施的同类工地相比，本项目颗粒物浓度降低了约 40%。土方施工高峰期采用了湿法作业、主动喷雾降尘的措施，真正确保扬尘的有效控制。项目配套了水资源循环利用系统，冲洗废水经沉淀后直接用于洒水降尘、绿化灌溉，累计节约用水量达 5 000 吨。（2）经济效益：虽然初期扬尘防控设施建设投入了约 150 万元（围挡喷淋、洗车台、监测设备诸种设施），但是扬尘防控措施落实到位，项目施工全过程未被环保部门予以行政处罚，避免停工损失及各种罚款风险。若因扬尘污染被责令停工整改，每天的直接经济损失即达 10 万元。而预制装配式技术又天然地减少材料浪费，实际节约材料成本约 80 万元。扬尘防控投入的产出比十分合理，确保环保、经济两者的兼顾共赢。（3）社会效益：项目实施中周边居民对施工扬尘、噪声都没有提出投诉，企地关系融洽。项目先后荣获“省级绿色施工示范工程”“安全文明标准化示范工地”诸种称号，极大地提升了企业形象。

5 结束语

房建工程的扬尘污染管控是建筑领域推进绿色发展、改善城市环境空气质量的核心任务，具有极高的现实必要性。结合本文工程实践经验来看，房建施工阶段的扬尘污染精准防控价值突出，通过多维度、体系化的管控措施实现扬尘全流程闭环治理，可有效规避严重的环境污染风险。未来，随着建筑行业向智能化、工业化方向高速转型，装配式建造、BIM 技术、智慧工地等新技术的深度落地应用，将进一步推动房建工程施工扬尘管控效能升级，为建设美丽中国、助力碳达峰碳中和目标落地提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 刘曾.浅析建筑工程扬尘污染防治管理[J].中国设备工程,2021(15):218-219.
[2] 刘松云.城市可持续发展中的细颗粒物(PM2.5)污染防控策略[J].皮革制作与环保科技,2025,06(04):105-107.
[3] 张政.建筑工程施工现场扬尘污染治理措施与效果评估[J].陶瓷,2025(06):176-178.
[4] 王滢,蒲海洋,李洋,等.城市建筑工地扬尘污染扩散特征分析及污染治理措施研究[J].环境科学与管理,2025,50(02):37-40.
[5] 朱红志.桩基土方施工阶段扬尘、噪音污染控制措施[J].石材,2024(09):119-121.

后浇带施工技术在房建施工中的运用研究

李 丹

（山东滕发投资控股有限公司，山东 滕州 277599）

摘 要 后浇带施工技术是现代房建工程中控制混凝土裂缝、解决结构不均匀沉降和温度收缩应力的重要技术手段。随着高层建筑、大跨度结构及超长混凝土结构的广泛应用，混凝土收缩开裂和差异沉降问题日益突出，后浇带技术的科学运用直接关系到工程质量和结构安全。本文阐述了后浇带施工技术的基本原理与技术要点，分析该技术在房建施工中的运用价值，重点从后浇带位置的精准定位与构造设计、模板支设与钢筋隔离技术、混凝土浇筑与养护质量控制、二次浇筑前的处理与封闭施工四个方面深入探讨了具体运用策略，以期为相关人员提供参考。

关键词 后浇带施工技术；房建施工；裂缝控制；模板支设；钢筋隔离

中图分类号：TU74 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.016

0 引言

近年来，我国城镇化建设持续推进，房屋建筑工程规模不断扩大，高层建筑、超长结构及复杂体形建筑日益增多。这类工程在施工过程中面临一个普遍而棘手的技术问题——混凝土裂缝。混凝土材料在硬化过程中会产生收缩变形，同时结构在使用阶段还会受到温度变化和地基不均匀沉降的影响，当这些变形受到约束时，结构中就会产生拉应力，一旦拉应力超过混凝土的抗拉强度，裂缝便随之产生。由于裂缝问题既影响建筑外观，又破坏结构的整体性，降低耐久性，甚至危及结构安全，传统设置永久变形缝的方法有其明显的局限性：防水处理困难，建筑使用功能受限。后浇带技术是在此背景下得到充分发展并广泛应用的方案。其基本思路是在结构施工时预留临时施工缝，待混凝土大部分收缩完成后再进行第二次浇筑，释放收缩应力及沉降差，从而有效地控制裂缝。

1 后浇带施工技术概述

后浇带施工技术是指在现浇钢筋混凝土结构施工过程中，按照设计或规范要求在预定位置临时留设的、具有一定宽度的施工缝带，待两侧结构混凝土浇筑完成并经过一定时间（通常为40天至60天），使其大部分收缩变形和沉降变形基本完成后，再用补偿收缩混凝土进行二次浇筑，使结构连成整体的施工方法。从技术原理来看，后浇带主要解决两大问题：一是混凝土收缩应力问题。混凝土在硬化过程中会发生化学收缩、干燥收缩和温度收缩，这些收缩变形如果受到地基、模板或相邻结构的约束，就会产生拉应力。后浇带的设置相当于将超长结构“切断”成若干较小的区段，每个区段的收缩变形相对较小，产生的约束应力也相应减小，待各区段混凝土的大部分收缩完成后，再用后浇带将各区段连接起来，此时后续收缩量已经很小，产生的拉应力不足以导致开裂。二是结构差异沉降问题。在高层建筑或体型复杂的建筑中，不同部位的高度、荷载和地基条件往往不同，由此产生的沉降差异如果不加控制，会导致结构产生附加内力和裂缝。后浇带可以将不同沉降单元临时分开，待各单元沉降基本稳定后再连成整体，从而避免差异沉降对结构的不利影响[1]。

2 后浇带施工技术在房建施工中的运用价值

后浇带施工技术虽然在施工流程上增加了工序、延长了工期，但从工程综合效益角度考量，其运用价值显著，主要体现在以下四个方面。

2.1 有效控制结构裂缝，保障工程质量

在超长混凝土结构中，如果不在适当位置设置后浇带，混凝土收缩产生的拉应力很容易使结构出现贯穿性裂缝或严重表面裂缝，这些裂缝一旦形成，不仅影响美观，更会降低结构的承载能力和耐久性能。后浇带通过分段浇筑、分期连接的方式，将收缩应力分散释放，使最终形成的整体结构内部应力水平远低于混凝土的抗裂强度。

作者简介：李丹（1989-），女，本科，工程师，研究方向：建设工程。

大量工程实践表明，合理设置后浇带的工程，其裂缝数量比未设置后浇带的同类工程减少 70% 以上，尤其是有害的贯穿性裂缝基本可以避免。

2.2 协调差异沉降，保证结构整体安全

在高层建筑与裙房连接部位、地基条件变化处以及荷载突变部位，差异沉降是难以完全避免的。如果强行采用刚性连接，差异沉降产生的剪切力和弯矩会导致梁、板、墙等构件开裂甚至破坏。后浇带技术允许不同沉降单元在施工期间独立沉降，待各单元沉降基本稳定后再进行连接，使结构在最终状态下能够协调工作。这种“先分后合”的思路，既保证了结构的整体性，又避免了因强制约束导致的破坏性内力。

2.3 提升结构防水性能，延长建筑寿命

地下室、屋面、卫生间等部位对防水要求较高，而这些部位恰恰是裂缝的高发区。一旦混凝土开裂形成渗水通道，水就会渗入结构内部，引起钢筋锈蚀、混凝土冻融破坏、装饰层起鼓脱落等一系列次生问题。后浇带技术通过控制裂缝产生，从源头上减少了渗漏隐患。同时，后浇带二次浇筑时使用的膨胀混凝土能够产生适度膨胀，对两侧混凝土形成挤压，使接缝更加密实，进一步提高了防水可靠性。对于地下室等长期处于水压力作用下的结构，合理设置后浇带是保证防水效果的关键措施之一。

2.4 优化施工组织，降低综合成本

虽然设置后浇带会增加模板、钢筋、混凝土等直接费用，还会延长工期、增加管理成本，但从整体工程来看，后浇带技术的运用反而具有成本优势。一方面，不设后浇带就需要设置永久变形缝，变形缝处的双墙、双柱构造以及复杂的防水处理将大幅增加工程造价。后浇带技术用相对较小的投入换取了可靠的质量保障，从全寿命周期来看，其综合经济效益十分突出[2]。

3 后浇带施工技术在房建施工中的运用策略

3.1 科学确定后浇带位置与构造参数

后浇带运用效果的根本前提在于位置选择及参数设计的合理性，因此首先要明确位置选择的原则：避让应力集中区、充分利用变形协调区。具体而言，收缩后浇带宜设置于结构收缩应力最小的部位，即梁、板跨度的三分之一处附近，因为连续梁板在三分之一跨处弯矩极小，相应的收缩应力也最低，不将后浇带设置于跨中或支座等弯矩较大部位，否则会对结构受力造成直接不利影响。沉降后浇带宜设置于高低跨交界处、主楼与裙房连接处等沉降差异明显的部位，但其具体位置宜由沉降计算结果予以严格确定。对于平面形状复杂、有凹凸转角或刚度突变的结构，在各薄弱部位适当增设后浇带。在构造参数设计上，后浇带的标准宽度一般取 800 毫米至 1 000 毫米，若所考虑的底板或墙体厚度很大，宽度可合理加大到 1 200 毫米，以保证施工操作的可行性及混凝土浇筑的质量。后浇带内钢筋的处理方式宜优先采用钢筋连续通过方案，即后浇带范围内钢筋不断开，仅混凝土留待后浇，保证钢筋受力的连续性，避免搭接时可能出现的应力集中问题。当确有必要采用钢筋断开方案时，严格保证搭接长度符合规范要求（一般不小于 45 倍钢筋直径），采用可靠的焊接或机械连接方式予以连接。最后，后浇带两侧的混凝土界面应处理成粗糙面，可采用快易收口网或密目钢丝网作为隔离模板，这种材料既能够阻挡混凝土浆料外流，又能形成粗糙的骨料外露面，有利于新旧混凝土的良好结合。

3.2 精细化模板支设与钢筋隔离技术

模板支设和钢筋隔离是后浇带施工中的基础性工序，也是容易被忽视但影响深远的环节。后浇带两侧的模板不同于普通模板，它要承受混凝土浇筑时的侧压力，要在后浇带留置期间保持稳定，保证拆模后两侧混凝土界面规则、清洁。因此，后浇带处的模板应采用独立支撑体系，与两侧大面积模板分开设置，这样当两侧模板拆除时，后浇带处的模板能够保留不动，形成独立支撑，避免因过早拆除后浇带支撑导致结构变形或开裂。后浇带模板的保留时间一般不应少于 60 天，对于沉降后浇带，待两侧结构沉降稳定后方可拆除。在钢筋隔离方面，目前较为成熟的做法是采用快易收口网作为隔离模板[3]。

快易收口网是以薄钢板冲压成型的网状材料，因而有较好的强度和刚度，能可靠地承受混凝土浇筑时的侧压力，又由于其网孔尺寸控制得恰到其分，水泥浆可少量渗透而粗骨料不能通过，接缝处形成的骨料外露面凹凸分明，与传统木板、钢板隔离所形成的平整面相比，咬合效果极佳。安装快易收口网时可将其牢固固定于后浇带边缘线处，上下端及两侧都与模板或钢筋可靠连接，避免浇筑混凝土时发生位移。更重要的是，收口网的安装宜在钢筋绑扎完成、混凝土浇筑之前进行，保证钢筋的位置准确。对于钢筋密集的后浇带部位，适当设置定位钢筋或撑筋，防止钢筋在混凝土浇筑过程中发生位移或变形。但后浇带留置期

间钢筋暴露于空气中极易生锈，尤其是底板、墙体下层钢筋，长期处于潮湿环境更易锈蚀。在后浇带留置期间要主动、充分地对钢筋采取防护措施：先涂刷水泥浆或防锈剂，再在后浇带上方覆盖防水布或模板，防止施工用水及雨水进入后浇带内[4]。

3.3 严格控制混凝土浇筑与养护质量

后浇带两侧的混凝土浇筑时，应特别注意后浇带边缘处的振捣质量。由于后浇带边缘有隔离模板（快易收口网）的存在，混凝土振捣时振动棒不宜直接接触隔离网，以免造成网片破损或位移，但又要保证边缘处混凝土的密实度。正确的做法是将振动棒置于距隔离网150毫米至200毫米处，通过混凝土的流动和振动波的传递使边缘混凝土得以密实。对于钢筋密集、空间狭窄的后浇带两侧，可采用小直径振动棒或人工插捣辅助密实。后浇带留置期间，应对两侧已完成混凝土进行正常养护，尤其是后浇带边缘部位，应保持湿润状态不少于14天，防止边缘混凝土因干燥收缩产生微裂缝。后浇带自身的二次浇筑是技术的关键所在。首先，浇筑时间必须严格控制。收缩后浇带应在两侧混凝土浇筑完成后40天至60天进行，此时混凝土的收缩量已完成约60%至80%，后续收缩已趋于平缓；沉降后浇带则应根据沉降观测结果确定浇筑时间，通常要求高层建筑主体结构封顶且沉降速率连续一周小于0.01毫米/天后方可浇筑。过早浇筑会使后浇带失去释放变形的作用，过晚浇筑则会影响后续工序的开展。其次，后浇带混凝土的配合比设计至关重要。后浇带混凝土应采用比两侧混凝土强度等级高一级的补偿收缩混凝土，膨胀剂的掺量应根据试验确定，一般控制在8%至12%之间，限制膨胀率应达到2.0×10^{-4}以上。混凝土的坍落度应控制在160毫米至200毫米范围内，不宜过大也不宜过小，过大容易导致离析，过小则不利于填充密实。浇筑前，应彻底清理后浇带内部的杂物、积水、浮浆和松动颗粒，用压力水冲洗干净并充分湿润两侧混凝土界面，但不得留有明水。浇筑时，应采用分层浇筑、逐层振捣的方法，每层厚度不超过300毫米，振捣应均匀密实，尤其要注意新旧混凝土接合面的振捣，使浆料能够充分渗入两侧混凝土的粗糙表面。浇筑完成后应立即覆盖塑料薄膜或湿麻袋进行保湿养护，养护时间不应少于14天，对于有抗渗要求的后浇带，养护时间应延长至28天。养护期间应保持混凝土表面始终处于湿润状态，避免因干燥收缩产生新的裂缝。

3.4 周密实施二次浇筑前处理与封闭施工

二次浇筑前的界面处理和封闭施工是保证后浇带最终质量的收尾环节，也是技术要求较高的工序。在正式浇筑后浇带混凝土之前，必须对留置期间形成的界面状态进行认真处理。后浇带混凝土浇筑完成后，应在其达到终凝时及时进行二次压面，以消除表面塑性裂缝。养护措施应严格到位，除了常规的覆盖保湿养护外，对于地下室外墙等有防水要求的后浇带，还应在迎水面增加一道柔性防水附加层，防水层的宽度应超出后浇带两侧各300毫米以上。封闭施工后，应在后浇带位置做明显标记，并在一段时间内（建议不少于28天）避免在后浇带区域施加较大的施工荷载，尤其是冲击荷载和集中荷载，以免扰动新浇混凝土的内部结构。对于有较高平整度要求的地面或楼面后浇带，应在养护期结束后进行适当的打磨或找平处理，使后浇带区域与两侧原混凝土面平齐，避免因高差影响后续装饰层施工[5]。

4 结束语

随着建筑行业向绿色化、工业化方向转型，后浇带技术也在不断发展演进。新型快易收口网、高性能膨胀剂、智能养护监测系统等新材料新技术的应用，正在使后浇带施工变得更加可靠和高效。未来，结合BIM技术进行后浇带位置优化和施工过程模拟，利用物联网传感器实时监测后浇带两侧的沉降差和收缩应变，实现数据驱动的精准浇筑决策，将是后浇带技术发展的重要方向。对于工程技术人员而言，既要熟练掌握传统后浇带施工的技术要点，也要保持对新材料新工艺的学习敏感度，在实践中不断总结提升，使后浇带技术在新时期继续发挥其应有的质量保障作用。

参考文献：

[1] 郭金涛.房建工程后浇带施工质量控制与BIM技术的融合应用[J].价值工程,2026,45(10):158-161.
[2] 陈林,李杰文,刘剑,等.地下室顶板沉降后浇带提前封闭施工技术研究[J].城市建筑,2026,23(06):214-217.
[3] 柏雄杰.建筑工程混凝土后浇带施工技术的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2026(08):103-105.
[4] 游化彪.房屋建筑工程中的混凝土后浇带施工管理措施[J].中国建筑金属结构,2025,24(24):130-132.
[5] 李杰.后浇带施工技术在高层住宅建筑工程中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2025(24):165-167.

高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术探讨

张 圣

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路二分公司，四川 成都 610200）

摘 要 在高速公路桥梁工程的基础施工体系中，人工挖孔桩凭借施工设备简便、对场地要求低、适配多种复杂地质条件等独特优势，成为桥梁基础施工的核心工艺。本文结合高速公路桥梁施工实际情况，分析了人工挖孔桩施工中的各类挑战，重点探究地质适配型成孔、孔壁支护及桩身混凝土浇筑等核心技术的实际应用，以期为同类工程施工提供实践参考，推动高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术向规范化方向发展。

关键词 高速公路桥梁；人工挖孔桩；地质适配型成孔技术；孔壁支护技术；桩身混凝土浇筑技术

中图分类号：TU753.3 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.017

0 引言

我国高速公路建设事业飞速推进，桥梁工程作为保障线路畅通的关键结构，施工质量愈发受到行业关注。人工挖孔桩依靠人工开挖形成桩孔，后续完成钢筋笼安装与混凝土浇筑，最终打造出承载性能优良的桥梁基础。当前，高速公路桥梁建设对基础施工质量提出了更高标准，深入探究人工挖孔桩施工技术的实际应用具有重要意义。

1 高速公路桥梁人工挖孔桩施工面临的挑战

地质条件复杂是施工首要面对的问题，高速公路线路跨度大，途经区域地质类型多样，不同路段的土层、岩层性质差异明显。部分区域存在软土层，这类土层稳定性欠佳，开挖时易出现沉降，进而加大孔壁坍塌风险；部分区域岩层硬度较高，人工开挖难度陡增，既消耗大量人力物力，也会延误施工进度。与此同时，有些施工区域地下水位偏高，开挖过程中易出现涌水、涌砂现象，处理不当会破坏孔壁稳定性，甚至造成桩孔报废，增加施工成本与工期压力。人工挖孔桩作业空间狭窄，作业人员需在井下开展开挖，易引发缺氧、中毒等安全隐患。除此之外，开挖过程中可能遭遇地下管线、孤石等障碍物，未提前探测清楚极易引发安全事故，阻碍施工顺利推进。施工精度控制难度较高也不容忽视，人工挖孔桩的孔径、孔深、垂直度等参数直接影响桩体承载性能，人工开挖时易出现孔径偏差、孔壁不平整、垂直度超标等问题，不及时纠正会降低桩体质量，进而影响桥梁基础稳定性。

2 高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术的具体应用

2.1 地质适配型成孔技术

施工前，施工人员需开展详细地质勘察，全面掌握施工区域土层、岩层分布情况、地下水位高度及不良地质隐患等信息，依据勘察结果制定针对性成孔方案，杜绝盲目开挖。粉质黏土、砂土层等稳定性较好的地质区域，可采用人工直接开挖方式。开挖前先在桩位做好标记，按照设计孔径放线，借助洛阳铲、铁锹等工具分层开挖，每层开挖深度控制在 1.0 米～ 1.5 米。开挖过程中要及时清理孔内渣土，通过提升设备将渣土运至地面指定位置，切勿堆积在桩孔周边，防止渣土坠落引发安全事故[1]。开挖时要随时检查孔壁平整度与垂直度，发现偏差立即纠正，确保孔径符合设计要求，孔壁无坍塌、鼓包等现象。软土层地质稳定性较差，单纯人工开挖易出现孔壁坍塌，因此需采用分层开挖、及时支护的方式。

每层开挖深度控制在 0.5 米～ 0.8 米，开挖完成后立即开展孔壁支护，待支护结构达到设计强度，再进行下一层开挖。同时可在孔壁表面喷洒水泥浆，增强土层凝聚力，进一步提升孔壁稳定性。地下水位较高的软土层区域，需先采取降水措施，待地下水位降低后再开展开挖作业，防止涌水、涌砂问题影响成孔质量。岩层地质人工开挖可以结合机械辅助施工，采用风镐、电钻等工具破碎岩层，破碎过程中控制力度，避免破坏孔壁完整性。硬度较高的岩层，可采用静态爆破技术，合理配置爆破药剂，在不破坏周边环境的

作者简介：张圣（1996-），男，本科，研究方向：公路工程。

前提下将岩层破碎，再进行人工清理。破碎后的岩石碎片通过提升设备运至地面，清理时注意保持孔壁平整，避免尖锐岩石划伤孔壁，影响后续支护与混凝土浇筑质量。成孔过程中需做好孔内通风工作，通风可以采用鼓风机向孔内持续送风，保障孔内空气流通，降低有害气体浓度，守护作业人员人身安全。

2.2 孔壁支护技术

支护技术需结合地质条件、桩孔深度等因素，遵循“因地制宜、及时支护、安全可靠”的原则，确保支护结构能够承受孔壁压力，满足施工安全需求。粉质黏土、黏土层等稳定性较好的区域，可采用喷射混凝土支护方式。喷射混凝土选用C20混凝土，搭配速凝剂使用，加快混凝土凝结速度，缩短支护成型时间。喷射前需清理孔壁表面浮土、杂物，保证孔壁平整、干净，喷射过程中控制喷射压力与厚度，厚度控制在8厘米～10厘米，喷射顺序从下往上，做到均匀喷射，杜绝漏喷、空鼓等现象。喷射完成后，对混凝土表面进行养护，养护时间不低于7天，确保混凝土强度达到设计要求，切实发挥保护孔壁的作用。砂土层、软土层等稳定性较差的地质区域，可采用钢套管支护方式。钢套管采用厚度6毫米～8毫米的钢板制作，根据设计孔径加工成圆柱形，套管长度结合桩孔深度与地质条件确定，每节套管长度通常为1.5米～2.0米。

施工时，施工人员可以先将第一节套管放入桩孔内，调整套管垂直度，确保其与桩孔中心线重合，再通过人工或机械方式将套管压入土层，压入深度控制在1.0米～1.5米，随后进行下一节套管安装，直至达到设计深度。套管连接部位采用焊接方式，焊接必须牢固，避免出现缝隙，防止泥土、地下水渗入孔内。岩层地质若孔壁稳定性较好，可采用锚杆支护方式。锚杆选用HRB400级钢筋制作，直径根据设计要求确定，一般为22毫米～25毫米，锚杆长度结合岩层厚度与稳定性确定，通常为3米～5米。施工时，在孔壁钻孔，钻孔深度略大于锚杆长度，将锚杆插入孔内后，向孔内注入水泥砂浆，水泥砂浆强度等级不低于M15，确保锚杆与岩层紧密结合，提升孔壁稳定性。锚杆安装完成后，需进行拉拔试验，检验其承载力是否符合设计要求，合格后方可继续施工。施工人员应定期检查支护结构的完整性与牢固性，发现裂缝、变形、松动等问题时，及时采取加固措施，防止问题扩大[2]。

2.3 桩身混凝土浇筑技术

混凝土浇筑需严格遵循设计要求与施工规范，精准控制配合比、浇筑速度、振捣质量等关键参数，确保混凝土浇筑密实、强度达标，杜绝蜂窝、麻面、空洞等质量隐患。施工人员可以结合桩体设计强度等级，兼顾施工环境、地质条件等因素，合理确定配合比，选用强度等级不低于42.5级的普通硅酸盐水泥，骨料选用级配良好的碎石与中砂，碎石粒径控制在5毫米～25毫米，含泥量不超过1%，中砂含泥量不超过3%。水胶比控制在0.5～0.6之间，掺入适量外加剂，改善混凝土和易性与流动性，提升密实度。配合比设计完成后，需进行试配试验，检验坍落度、抗压强度等指标，达标后才可用于实际施工。混凝土浇筑前需做好充分准备工作，施工人员可以对桩孔进行再次清理，清除浮土、杂物与积水，确保孔底干净、无积水。检查钢筋笼安装位置、垂直度，确保其与桩孔中心线重合且固定牢固，防止浇筑过程中出现偏移。同时检查浇筑设备，确保混凝土输送泵、导管等运行正常，导管连接牢固、无渗漏。导管直径根据桩孔直径确定，一般为200毫米～300毫米，导管底部距离孔底控制在30厘米～50厘米，方便混凝土顺利下落[3]。

混凝土浇筑可以采用导管法，浇筑过程中合理控制浇筑速度，避免速度过快导致混凝土离析，同时确保浇筑连续性，中途不得随意停顿。浇筑时需随时观察导管内混凝土高度，及时调整导管埋入深度，埋入深度控制在2米～6米，防止导管拔出混凝土面，造成断桩隐患。振捣工作由专业人员操作，采用插入式振捣器，振捣时插入深度适中，振捣时间控制在20秒～30秒，直至混凝土表面不再下沉、无气泡冒出、呈现泛浆状态，确保振捣密实，避免出现振捣不足或过度振捣的情况。在混凝土浇筑过程中，施工人员要做好现场取样工作，每浇筑一定数量的混凝土，抽取一组试块，用于后期强度检测，确保混凝土强度符合设计要求。浇筑至桩顶设计标高时，需适当超灌，超灌高度控制在0.5米～1.0米，待混凝土凝固后，剔除超灌部分，保证桩顶平整、密实，符合设计标准。根据施工环境温度，施工人员要选择合适的养护方式，在常温环境下，浇筑完成后12小时内覆盖保湿材料，定期洒水养护，养护时间不少于14天。

2.4 钢筋笼制作及安装技术

钢筋笼制作要在施工现场设置专门的加工场地，场地需平整、干净，配备必要的加工设备与工具，确保制作工作有序开展。施工人员要对所用钢筋进行严格检查，核对钢筋的规格、型号、数量，确保与设计要求一致，同时检查钢筋外观质量，剔除表面锈蚀、弯曲、裂纹等不合格钢筋。钢筋加工前需进行调直处理，

调直后的钢筋表面无明显弯曲、锈蚀，直线度符合规范要求。钢筋切断需采用切断机，切断长度精准控制，误差不超过规范允许范围，切断后的钢筋需分类堆放，做好标记，避免混用[4]。钢筋笼绑扎要按照设计图纸进行，先绑扎主筋，再绑扎箍筋，绑扎过程中确保钢筋间距、数量符合设计要求。主筋连接采用焊接方式，焊接需由专业焊工操作，焊接接头需符合规范要求，接头位置错开布置，同一截面内焊接接头数量不超过主筋总数的 50%，焊接质量需严格把控，杜绝夹渣、气孔、裂纹等焊接缺陷，确保接头牢固。箍筋与主筋绑扎需紧密，绑扎点均匀分布，每间隔 20 厘米～ 30 厘米设置一个绑扎点，防止箍筋松动、移位。

钢筋笼制作完成后，进行全面检查，检查钢筋规格、型号、数量、间距，焊接接头质量，钢筋笼长度、直径等参数，确保符合设计要求与施工规范。检查合格后，在钢筋笼表面涂刷防锈涂层，防止钢筋锈蚀，延长桩体使用寿命。同时，在钢筋笼上设置定位垫块，垫块采用混凝土制作，垫块厚度与保护层厚度一致，每隔 1.5 米～ 2.0 米设置一组，每组不少于 4 块，均匀分布在钢筋笼四周，确保钢筋笼安装后与桩孔壁之间的保护层厚度达标。钢筋笼安装需结合桩孔深度与现场施工条件，采用起重机配合人工安装。安装前，再次检查桩孔内情况，确保孔底干净、无积水，孔壁无坍塌现象。将钢筋笼吊装至桩孔上方，调整钢筋笼垂直度，确保其与桩孔中心线重合，缓慢将钢筋笼放入桩孔内，放入过程中避免钢筋笼碰撞孔壁，防止孔壁坍塌、钢筋笼变形。钢筋笼放入指定位置后，施工人员要及时固定，采用型钢支架将钢筋笼固定在桩孔口，支架需牢固可靠，能够承受钢筋笼重量，防止浇筑过程中钢筋笼下沉、偏移。

2.5 应急处置技术

孔壁坍塌是施工中常见的突发情况，施工企业应急处置需遵循“快速响应、及时加固”的原则。一旦发现孔壁出现坍塌迹象，立即停止井下作业，组织作业人员快速撤离至安全区域，严禁冒险作业。坍塌范围较小时，待坍塌稳定后，采用钢套管、喷射混凝土等方式对坍塌区域进行加固，加固完成后检查孔壁稳定性，确认安全后再恢复施工。坍塌范围较大时，需重新清理桩孔，调整支护方案，加强支护强度，确保孔壁稳定后再继续开挖。涌水、涌砂突发情况多发生在地下水位较高的区域，处置核心是快速控制水位、封堵涌水涌砂通道。发现涌水、涌砂时，立即停止开挖作业，组织作业人员撤离，同时启动潜水泵、井点降水等设备，加快孔内积水排出，降低地下水位[5]。若涌水、涌砂较为严重，可在桩孔周边设置止水帷幕，采用水泥浆注浆封堵，形成止水屏障，控制涌水涌砂现象，待水位稳定、涌水涌砂得到控制后，再恢复施工。

施工过程中若出现作业人员缺氧、中毒等安全事故，需立即启动应急救援流程。停止孔内作业，加大鼓风机通风力度，向孔内输送新鲜空气，同时组织专业救援人员佩戴防护装备进入孔内，将受伤人员转移至地面安全区域。对受伤人员进行初步急救处理，如吸氧、心肺复苏等，同时拨打急救电话，将受伤人员送往医院进行进一步治疗，确保人员生命安全。出现断桩迹象时，立即停止浇筑，清理孔内已浇筑的不合格混凝土，检查导管状态，调整浇筑方案，重新进行浇筑，确保混凝土浇筑连续、密实。出现混凝土离析时，停止浇筑，对离析的混凝土进行清理，重新搅拌合格的混凝土后再继续浇筑，同时加强振捣，确保混凝土密实度。应急处置工作中，需加强应急物资储备，配备足够的潜水泵及急救药品等应急物资，定期检查应急物资的完好性，及时更换损坏的物资，确保突发情况发生时能够正常使用。

3 结束语

高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术的合理应用，是保障桥梁基础质量的关键。人工挖孔桩施工需兼顾地质条件及施工环境等多重因素，严格遵循设计要求与施工规范，强化质量控制与安全管理，不断优化施工技术，提升技术应用水平。随着高速公路桥梁建设向偏远复杂区域延伸，人工挖孔桩施工技术需紧跟行业发展步伐，朝着智能化方向迭代升级。未来可结合数字化技术，将地质勘察数据与施工过程精准对接，实现成孔及支护等环节的智能化监测，减少人工操作误差。

参考文献：

[1] 侯青科 . 高速公路桥梁人工挖孔桩施工技术 [J]. 交通世界 ,2025(21):116-118,122.
[2] 严昌虎 . 高速公路桥梁工程中人工挖孔桩施工安全管理研究 [J]. 运输经理世界 ,2025(10):109-111.
[3] 仲亚洲 . 桥梁人工挖孔桩通风技术改进分析 [J]. 运输经理世界 ,2023(14):80-82.
[4] 罗公贵 . 岩溶发育地段高速公路桥梁桩基施工技术 [J]. 企业科技与发展 ,2023(03):57-59,67.
[5] 杜承志 . 高速公路桥梁施工中人工挖孔桩技术的应用分析 [J]. 运输经理世界 ,2022(35):86-88.

高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术应用探究

谢 航

（四川公路桥梁建设集团有限公司三分公司，四川 成都 610200）

摘 要 钻孔灌注桩技术凭借对黏性土、砂土、砾卵石乃至基岩等各类复杂地质的强适配性，以及单桩承载力高、施工对周边环境干扰小等优势，成为高速公路桥梁基础施工的核心技术手段。本文结合高速公路桥梁施工实际需求，系统探究钻孔灌注桩技术的应用价值，详细阐述该技术在施工各环节的具体应用策略，以期对提升高速公路桥梁基础施工质量、保障工程结构安全有所裨益，进而助力高速公路桥梁工程实现长效稳定运行。

关键词 高速公路桥梁；钻孔灌注桩技术；循环泥浆；钢筋笼；混凝土浇筑

中图分类号：U445.551 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.018

0 引言

我国交通基础设施建设正处于高质量发展的关键阶段，高速公路网络持续向山区、水域、冻土区等复杂地域延伸，高速公路桥梁工程的建设规模不断扩大，结构形式日益复杂，对施工技术的专业性、适应性和精细化水平提出了更高要求。桥梁基础是工程结构的承载核心，施工质量直接关系整个桥梁工程的使用寿命。施工人员应用钻孔灌注桩技术，可以有效解决复杂地质环境下桥梁基础施工的难题，提升工程结构的承载能力。

1 高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术的作用

钻孔灌注桩技术可以深入地下岩层的桩体结构，将桥梁上部结构的荷载均匀传递至地下深层稳定地层，有效分散荷载压力，规避基础结构因受力不均出现的沉降与开裂问题，显著提升桥梁基础的承载性能，为桥梁结构长期稳定运行筑牢根基。相较于传统基础施工技术，钻孔灌注桩技术对地质条件的适配范围更广，软土地层、砂卵石地层或是岩层地质，都能通过合理调整施工工艺实现高效施工，解决不同地质环境下基础施工的技术难题，减轻地质条件对施工进度与质量的影响[1]。在高速公路桥梁施工中，施工安全性与稳定性始终处于核心地位。钻孔灌注桩技术施工过程中，桩体成型后与周围土体、岩层紧密结合，可有效增强基础结构的抗倾覆与抗滑移能力，抵御地震、暴雨等自然灾害带来的影响，降低施工过程中的安全风险，保障施工人员与工程结构的安全。该技术施工过程相对隐蔽，施工扰动较小，不会对周边土体造成大面积破坏，能够减少施工对周边环境的影响，特别适用于城市周边、农田区域等对施工扰动敏感的区域，兼顾施工质量与环境保护的双重需求。采用钻孔灌注桩技术开展基础施工，可有效提升施工效率，缩短施工周期。该技术施工流程成熟，能够实现机械化连续作业，减少人工操作量，降低人为因素对施工质量的影响，同时可快速完成桩体成型，避免因基础施工滞后拖累整个桥梁工程的施工进度[2]。

2 高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术的应用方法

2.1 做好钻孔前技术准备，优化场地布设

施工人员要开展全面的现场勘察工作，对施工区域的地质条件、地下水水位、周边环境等进行详细排查，收集相关地质资料，明确施工区域内的岩层分布、土壤性质、地下管线位置等关键信息。基于勘察结果，结合桥梁设计要求，可确定钻孔灌注桩的桩位、桩长、桩径等核心参数，制定科学合理的施工方案。地质勘察过程中，施工人员应采用专业的勘察设备，对不同深度的地层进行取样分析，准确判断地层的承载能力、渗透系数等关键指标，然后对施工区域的地下水进行检测，明确地下水的水位高度。施工人员可以提前制定针对性的防护措施，规避后续施工中桩体腐蚀、混凝土强度下降等问题。

勘察完成后，整理完善勘察资料，形成详细的勘察报告，为施工方案的优化提供支撑。施工人员应清理施工场地内的杂物、植被、障碍物等，平整场地表面，

作者简介：谢航（1997-），男，专科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁。

确保场地坡度符合施工要求，规避场地不平导致钻孔设备倾斜、影响钻孔精度的问题。对于软土地质的施工场地，应采取换填、夯实等处理措施，增强场地的承载力，防止施工过程中场地沉降，保障钻孔设备的稳定运行。同时，需合理划分施工区域，明确钻孔作业区、材料堆放区、设备停放区、泥浆循环区等功能区域，确保各区域布局合理、互不干扰，提升施工效率。施工人员需严格把控材料质量，对混凝土、钢筋、泥浆原材料等开展严格检验。

2.2 规范钻孔操作流程，强化钻孔质量管控

钻孔施工前，施工人员要再次检查钻孔设备的运行状态，确认设备各项参数正常，同时检查桩位标记是否清晰、准确，确保钻孔位置无误。根据勘察资料确定的地质条件，可选择合适的钻孔工艺与钻头类型，软土地层可选用螺旋钻、冲击钻，岩层地质可选用冲击钻、回旋钻，确保钻孔效率与钻孔质量[3]。钻孔作业开始后，施工人员需控制好钻孔速度与钻进深度，根据不同地层的性质，合理调整钻进参数。在软土地层钻进时，要放慢钻进速度，避免因钻进过快导致孔壁坍塌，同时应及时排出孔内泥土，确保钻孔顺利推进；在砂卵石地层钻进时，可适当加快钻进速度，选用耐磨性能好的钻头，减少钻头磨损，同时要加强孔壁防护，防止砂卵石坍塌堵塞钻孔。钻进过程中，需做好钻进记录，详细记录钻进时间、钻进深度、地层变化、设备运行情况等信息，便于后续质量追溯与问题排查。

在钻孔过程中，施工人员要全程监控孔位偏差，采用专业的测量仪器，定期对钻孔的垂直度、孔位进行检测。每钻进一定深度，应进行一次垂直度检测，若发现钻孔垂直度偏差超过规范要求，需及时调整钻孔设备的角度，进行纠偏处理，避免偏差过大影响桩体质量。孔位偏差要控制在设计允许范围内，确保桩体能够准确承载上部结构荷载。同时，应监控孔内水位变化，保持孔内水位高于地下水位一定高度，形成水头差，增强孔壁稳定性，防止孔壁坍塌。当钻孔达到设计深度后，施工人员应停止钻进，对钻孔深度、孔径、孔壁垂直度等指标进行全面检测，检测合格后，应及时清理孔内沉渣，沉渣厚度要控制在设计允许范围内，需避免沉渣过多影响桩体与地层的结合力，降低桩体承载能力。

2.3 科学制备循环泥浆，精准调控泥浆性能

选择泥浆原材料时要严格把控质量，优先选用优质膨润土作为主要原料，搭配纯碱、CMC 等外加剂，提升泥浆的黏度、比重、含砂率等性能指标。膨润土要选用纯度高、膨胀性能好的产品，确保泥浆具有良好的护壁效果；纯碱能够调节泥浆的 pH 值，改善泥浆的稳定性，减少泥浆分层、沉淀现象；CMC 能够增加泥浆的黏度，提高泥浆的携渣能力，防止沉渣在孔内堆积。原材料进场后，要进行性能检测，确保各项指标达标，方可投入使用。施工人员要按照制定的配合比，准确称量膨润土、纯碱、CMC 等原材料的用量，将原材料依次投入搅拌设备中，加入适量清水，进行充分搅拌。搅拌时间要足够，确保原材料完全溶解、混合均匀，形成质地均匀、性能稳定的泥浆。搅拌完成后，要对泥浆的性能指标进行检测，主要检测泥浆的黏度、比重、含砂率、pH 值等，确保各项指标符合设计要求与施工规范。若检测结果不达标，要及时调整配合比，添加相应的外加剂，重新搅拌检测，直至泥浆性能达标。

泥浆循环系统的布设要科学合理，确保泥浆能够顺畅循环，实现携渣、护壁的效果。施工人员要合理设置泥浆池、沉淀池、循环管道等设施，泥浆池要设置在钻孔作业区附近，便于泥浆输送，同时要做好泥浆池的防护措施，防止泥浆泄漏污染环境；沉淀池要用于沉淀泥浆中的沉渣，定期清理沉淀的沉渣，确保泥浆循环顺畅；循环管道要连接紧密，无泄漏，确保泥浆能够在钻孔与泥浆池之间顺畅循环。泥浆循环过程中，要安排专人监控，及时补充新的泥浆，确保泥浆量充足，同时要检测循环泥浆的性能指标，根据检测结果及时调整，保持泥浆性能稳定。在不同地层施工过程中，施工人员要根据地层性质，精准调控泥浆性能。在软土地层施工时，要适当提高泥浆的黏度与比重，增强泥浆的护壁能力，防止孔壁坍塌，同时提高泥浆的携渣能力，及时将孔内泥土带出孔外[4]。

2.4 精准制作钢筋笼，规范完成安装定位

钢筋笼制作前，施工人员要熟悉设计图纸，明确钢筋笼的规格、型号、长度、直径、钢筋间距、箍筋间距等核心参数，结合施工实际情况，制定详细的钢筋笼制作方案，明确制作流程、技术标准与质量控制要点。钢筋加工是钢筋笼制作的基础环节，施工人员要根据设计要求，对钢筋进行切割、弯曲、焊接等加工处理。钢筋切割要精准控制长度，采用专业的切割设备，确保切割尺寸误差在规范允许范围内，避免因长度偏差影响钢筋笼的整体精度。钢筋弯曲要按照设计图纸的要求，采用弯曲机进行弯曲处理，确保弯曲角度、弯曲半径符合设计标准，弯曲后的钢筋表面要

平整，无裂纹、褶皱等缺陷。钢筋焊接要选用合适的焊接工艺与焊条，焊接前要清理钢筋焊接部位的铁锈、油污等杂物，确保焊接质量。在钢筋笼焊接过程中，施工人员应控制好焊接电流、焊接速度与焊接温度，确保焊缝饱满、牢固，无夹渣、气孔、裂纹等焊接缺陷。主筋与箍筋的焊接要紧密贴合，焊接点要均匀分布，避免出现漏焊、虚焊等问题。

对于钢筋笼的接头部位，要采用搭接焊接或机械连接方式，接头位置要避开桩体受力最大的区域，接头数量要控制在规范允许范围内，接头质量要符合设计要求。焊接完成后，要对焊缝进行全面检查，发现缺陷及时进行修补处理，确保钢筋笼焊接质量达标。钢筋加工完成后，及时对其表面进行除锈处理，采用喷砂、酸洗等方式，去除钢筋表面的铁锈、氧化皮等杂物，确保钢筋表面洁净。除锈完成后，要及时涂刷防锈漆，涂刷要均匀、饱满，无漏涂、气泡等现象，增强钢筋的抗腐蚀能力，延长钢筋笼的使用寿命。同时，做好钢筋笼的尺寸复核工作，每制作完成一段钢筋笼，就要对其长度、直径、钢筋间距、箍筋间距等指标进行检测，确保符合设计要求，若发现偏差，及时进行调整修正。钢筋笼制作完成后，要进行分类存放，做好标识，标明钢筋笼的规格、型号、长度、使用桩位等信息，避免混淆。存放场地要平整、干燥，做好防潮、防雨、防污染措施，避免钢筋笼受到雨水浸泡、阳光暴晒或杂物污染，防止钢筋生锈、钢筋笼变形。在安装时，施工人员要对钻孔进行再次检查，确认钻孔深度、孔径、孔壁垂直度、沉渣厚度等指标符合设计要求，孔内无杂物、积水等影响安装的因素。钢筋笼安装可采用起重机吊装的方式，吊装前要检查起重机的运行状态，确保起重机性能稳定，吊装绳索要选用符合要求的钢丝绳，捆绑牢固，避免吊装过程中钢筋笼脱落、变形。钢筋笼下放至设计位置后，要及时进行定位固定，防止钢筋笼在混凝土浇筑过程中发生偏移。

2.5 规范混凝土浇筑工序，防控施工质量缺陷

混凝土浇筑前，施工人员要提前对导管进行检查、清洗与试拼。导管要选用强度足够、无破损、无泄漏的钢管，导管内壁要光滑，避免混凝土黏结在导管内壁，影响浇筑顺畅性。在试拼过程中，要检查导管的连接密封性，进行水密性试验，确保导管无泄漏。试拼合格后，要将导管按顺序安装在钻孔内，导管底部距离钻孔底部的距离要控制在合理范围内，确保混凝土能够顺利流出导管，避免出现堵管现象。浇筑前，应再次检查钻孔内的沉渣厚度，若沉渣厚度超过设计允许范围，要重新进行沉渣清理，确保沉渣厚度达标。同时，要检查钢筋笼的位置与固定情况，确认钢筋笼无偏移、上浮等问题[5]。浇筑开始后，要缓慢向导管内注入混凝土，首次浇筑的混凝土量要足够，确保导管底部被混凝土完全覆盖，形成隔水层，防止泥浆进入导管内，影响混凝土质量。在混凝土浇筑过程中，需控制好浇筑速度，浇筑速度要均匀、连续，避免浇筑速度过快导致混凝土离析、导管上浮，或浇筑速度过慢导致混凝土初凝，造成堵管。导管提升速度要与浇筑速度相匹配，确保导管底部始终埋入混凝土内一定深度，避免导管拔出混凝土面，导致泥浆进入混凝土内，形成夹泥、断桩等质量缺陷。导管埋入深度要控制在设计允许范围内，定期对导管埋入深度进行检测，及时调整提升速度。在浇筑过程中，施工人员要做好混凝土浇筑记录，详细记录浇筑时间、浇筑量、导管埋入深度、混凝土性能检测结果等信息，便于后续质量追溯与问题排查。混凝土浇筑要连续进行，尽量缩短浇筑间隔时间，避免因间隔时间过长导致混凝土初凝，影响桩体整体性。若因特殊情况必须中断浇筑，中断时间要控制在混凝土初凝时间以内，中断期间，要每隔一定时间上下活动导管，防止混凝土凝固堵塞导管。

3 结束语

钻孔灌注桩技术作为高速公路桥梁基础施工的核心技术，凭借适配性强的优势，在高速公路桥梁工程中得到广泛应用。在实际施工过程中，施工人员应结合工程地质条件，灵活运用各项应用策略，规范操作流程，强化质量管控。未来，随着高速公路桥梁施工技术的不断发展，钻孔灌注桩技术也将不断优化完善，施工人员需不断积累施工经验，提升专业技能，为我国高速公路桥梁工程的安全运行提供更有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 屈直.钻孔灌注桩技术在公路桥梁施工中的应用[J].汽车画刊,2025(12):98-100.
[2] 袁月娥.钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的应用分析[J].汽车周刊,2025(11):104-106.
[3] 张理智.钻孔灌注桩施工技术在公路桥梁施工中的运用分析[J].时代汽车,2025(20):189-191.
[4] 陈廷一.高速公路施工中钻孔灌注桩施工技术解析[J].汽车周刊,2025(10):253-255.
[5] 冯杭杭.高速公路桥梁施工中钻孔灌注桩技术研究[J].交通科技与管理,2025,06(16):32-34.

交通工程路桥连接处的设计要点与施工管控分析

尤洪耐

（山东沂蒙交通发展集团有限公司，山东 临沂 276000）

摘 要 路桥衔接部位的规划建设品质直接关乎交通项目整体运行稳定性与使用年限，是交通基建构筑进程中的核心部分，科学的规划思路与标准的建设工序可规避衔接区域产生沉降开裂衔接不畅等状况，确保车流平稳过渡。本文围绕该衔接部位的规划关键内容与建设重要步骤，探究规划建设环节的主要问题，提出适配的改进策略，以期为强化路桥衔接部位工程品质提供参考。

关键词 道路与桥梁；连接处；结构衔接体系；排水系统；荷载传递

中图分类号：U445；U412.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.019

0 引言

路桥为交通工程核心构成部分，二者衔接部位为衔接各异结构与受力体系的重要节点，其设计科学性与施工标准化程度直接决定交通通行的安全舒适及耐久特性。衔接部位结构受力繁杂，受地质状况车辆荷载环境条件等多类因素作用，易产生沉降偏差衔接错位路面损伤等状况，影响通行体验并诱发交通运行风险，抬高后期运维投入。明晰衔接部位设计施工核心准则，攻克建设进程内技术难点，完善设计施工工序，可增强工程整体品质，延长交通基建使用周期，为交通工程平稳运转筑牢根基。

1 道路与桥梁连接处设计施工存在的核心问题

1.1 连接处结构设计不合理

路桥衔接部位结构设计需兼顾二者受力区别刚度适配及变形协同，设计阶段考量片面会诱发多样质量隐患。部分设计未结合衔接区域地质环境与行车荷载特征，造成结构刚度衔接失衡，桥体构造与路面刚度差距偏大，车辆通行形成较强冲击作用，长期作用下衔接区域路面易出现下沉开裂等状况[1]。部分设计对排水体系规划欠缺，未布设适配排水装置，雨水渗入衔接结构内部侵蚀钢筋破坏路基，弱化结构耐久性能。部分设计未预留充足变形余量，温度变动地基沉降等因素引发结构收缩或拉伸形变，进而造成衔接部位错位破损，干扰通行安全与舒适程度。

1.2 施工材料选择与搭配不当

施工材料品质与配比科学程度是维系路桥衔接部位工程质量的根基，材料选用或配比失当会直接影响部位结构稳定性与耐久性，部分施工选用的路面原料与桥梁伸缩缝原料性能不相契合，路面原料强度偏低，耐磨性能薄弱，伸缩缝原料弹性欠缺，抗老化能力不足，长期受行车荷载与环境因素作用出现磨损老化开裂等状况，造成衔接部位产生缝隙破损问题。部分施工原料与质量规范不符，路基填料级配紊乱，压实效果欠缺，混凝土强度未达设计标准，造成衔接部位路基承载能力偏弱，引发沉降不均问题。材料存储与应用流程不规范会改变原料自身性能，加重衔接部位各类质量隐患。

1.3 施工工艺不规范且流程混乱

标准施工工艺与有序施工流程是保障路桥衔接部位建设质量的核心，工艺执行混乱、流程管控缺失会引发多重质量问题。路基施工阶段未依照设计标准开展分层压实作业，压实方式不当，压实效果未达规范要求，造成路基承载能力不足，后期易产生沉降现象。伸缩缝施工阶段安装精度偏低，缝隙预留不当，填充原料铺设密实度不足，造成伸缩缝松动渗漏等问题，弱化结构伸缩适配能力，施工各工序衔接缺乏统筹，工序交接验收工作落实不到位，前置工序未达质量要求便开展后续作业，造成质量隐患持续叠加，降低衔接部位工程质量，干扰交通工程整体稳定状态。

2 道路与桥梁连接处设计的核心要点

2.1 合理设计结构衔接体系

路桥衔接体系设计需聚焦刚度适配与变形协同，保障衔接状态稳定受力、传递合理。设计阶段结合区域地质环境行车荷载等级及外部环境条件，选取适配

作者简介：尤洪耐（1972-），男，专科，工程师，研究方向：道路、桥梁工程施工。

的衔接构造形式，调整结构刚度分布，缩减路桥间刚度差距，降低车辆通行形成的冲击作用[2]。预留适宜的变形余量，依据温度波动地基沉降等影响因素，配置适配的伸缩构件与沉降缓冲构造，规避结构形变引发的开裂错位等状况。优化结构断面规划，保障路面与桥面平顺对接，提升通行过程中的舒适程度，减轻车辆颠簸对衔接构造造成的损耗。

2.2 优化排水系统设计

路桥衔接区域排水体系设计可抵御雨水侵蚀维系结构耐久性能，结合结构特征与场地地形制定完整排水方案。设计时规划合理排水坡度，保障路面积水快速疏导，避免雨水在衔接部位长时间滞留。在伸缩缝及路面衔接位置布设专用排水构件，快速导出渗入结构内部的雨水，防范雨水对路基钢筋混凝土造成侵蚀，杜绝结构锈蚀破损沉降等问题。兼顾排水体系后期运维便捷性，采用可拆装易清洁的排水部件，简化检修流程，维持排水系统长效稳定运转，为衔接构造提供全面防护。

2.3 完善荷载传递设计

路桥衔接部位荷载传递设计需保障行车荷载平稳均匀传递，减轻荷载集中对结构造成的破坏。设计环节依据行车荷载标准，规划科学的荷载传递构造，优化钢筋配置方案，强化衔接部位承载与抗冲击性能。兼顾车辆制动加速产生的附加荷载，制定专项加固方案，防止荷载集中引发结构开裂破损。结合地质状况优化地基处置方式，提升地基承载水平，保障荷载传递时地基沉降均匀，避免因地基沉降不均造成结构形变错位，维护交通运行的安全与稳定。

3 道路与桥梁连接处施工的关键技术措施

3.1 规范路基施工技术

路基施工作为路桥衔接部位建设的基础环节，规范其施工工艺可有效提升路基承载能力，从根源上规避后期沉降不均等质量隐患，施工前期需对衔接区域地质状况开展全面勘察，结合勘察数据筛选适配的路基填料，确保填料级配合理、强度达标，杜绝采用含水量超标、稳定性不足的填料。施工过程中严格遵循分层压实规范，精准控制每层填料厚度与压实度，选用适配的压实机械，保障路基压实均匀密实，全面达到设计规定的承载标准。路基施工结束后需执行严格质量检测，只有检测合格后方可推进下一道工序，严防路基质量隐患影响衔接部位整体稳定，为后续施工筑牢基础。

3.2 优化伸缩缝施工技术

伸缩缝作为路桥衔接部位的核心构件，其施工品质直接决定结构伸缩性能与耐久程度，优化施工技术是确保质量达标的关键。施工前需对伸缩缝安装位置、尺寸进行精准量测，确保符合设计标准，彻底清理安装区域杂物与浮浆，保证安装面平整洁净。施工过程中严格依照设计要求安装伸缩缝构件，严控安装精度，确保伸缩缝与路面、桥梁桥面衔接顺畅，缝隙预留科学合理。同时，选用性能优良的填充材料，保证填充材料铺设密实饱满，与伸缩缝构件紧密贴合，具备良好弹性与抗老化性能。施工完成后对伸缩缝进行专项养护，严禁车辆碾压，确保填充材料充分固化，有效延长伸缩缝使用寿命，保障衔接部位结构稳定。

3.3 强化路面衔接施工技术

路面衔接施工品质直接关系到路桥衔接部位的通行舒适性与结构稳定性，强化施工技术可确保衔接部位顺畅平整，施工前期需对桥梁桥面与道路路面衔接区域进行专项处理，清理表面杂物与浮尘，对破损部位及时修补，保障衔接面平整坚实[3]。施工过程中合理选用路面铺设材料，确保材料性能与桥梁结构适配，精准控制路面铺设厚度与平整度，采用适宜的铺设工艺，保证路面与桥梁桥面衔接紧密，无台阶、缝隙等影响通行的问题。路面铺设完成后及时开展养护作业，严格控制养护时间与养护质量，避免路面出现开裂、起砂等隐患，确保衔接部位路面的平整度与耐久性，切实提升通行体验。

4 道路与桥梁连接处设计施工的质量控制策略

4.1 建立完善的质量管控体系

质量管控体系是维系路桥衔接部位设计施工品质的核心支撑，需构建覆盖设计、施工、验收全流程的完善管控体系。设计环节建立专项审核机制，组建专业技术团队对设计方案开展全面核查，重点把控结构衔接、排水系统、荷载传递等核心设计内容，及时排查并整改设计中存在的不合理之处，确保设计方案兼具科学性、合理性与可操作性[4]。施工环节推行质量责任到人制度，明确各岗位人员职责分工，强化施工全过程监督管控，聚焦施工材料品质、施工工艺规范度、施工流程合理性等关键环节，全程把控施工质量，确保各项施工指标符合设计标准。验收环节制定严格统一的验收规范，对衔接部位结构质量、路面平整度、路基承载力等核心指标实施全面检测，只有验收合格后，方可投入实际使用，从全流程保障工程质量。

4.2 加强施工过程的现场管控

施工过程的现场管控是提升路桥衔接部位施工质量的关键举措，需强化施工现场管控力度，及时排查并化解施工中的各类质量隐患。配备专业现场管理人员，对施工全过程实施实时监督管控，重点核查施工材料质量达标情况、施工工艺规范执行情况、施工流程合

理与否，对不符合设计及规范要求的施工环节立即叫停，责令相关人员限期整改，确保施工质量全面达标。强化施工人员技术培训工作，提升施工人员专业操作技能与质量责任意识，确保施工人员严格遵循设计要求与施工规范开展作业，杜绝因操作不规范引发质量问题。做好施工现场环境管控，规避恶劣天气对施工质量的不利影响，科学规划施工进度，合理调配人力物力，保障施工工作有序高效推进，筑牢施工质量防线。

4.3 强化后期养护与维护工作

后期养护与维护是延长路桥衔接部位使用寿命、保障结构长期稳定的重要举措，需加大养护维护力度，建立常态化养护管理机制。定期对衔接部位结构开展全面排查检测，重点检查伸缩缝完好性、路面平整状况、路基稳定程度等关键部位，及时发现裂缝、破损、沉降等各类隐患并快速处理，防止小问题扩大为重大质量隐患。定期对排水系统进行全面清理，清除管道及排水槽内杂物，确保排水系统畅通无阻，避免雨水渗入结构内部造成侵蚀损坏。结合衔接部位实际使用情况与周边环境因素，制定针对性养护方案，合理选用适配的养护材料与工艺，提升养护工作质量，保障衔接部位结构长期稳定运行，有效降低后期维护成本，延长工程使用寿命。

5 道路与桥梁连接处设计施工的优化路径

5.1 结合实际工况优化设计方案

道路与桥梁连接处作为关键节点，直接影响着交通安全和工程使用寿命。基于此，剖析道路与桥梁连接处的工程特点、常见问题及成因，研究设计优化与施工关键技术，重点关注地基处理、台背回填和搭板施工等核心环节，为提高道路桥梁连接处的工程质量和使用安全性提供理论指导和实践参考[5]。设计方案优化需立足于实际工况，紧密结合衔接部位地质条件、行车荷载、环境因素等实际情况，杜绝设计与现场实际脱节。设计前期对施工现场开展全面勘察，详细掌握地质地貌、水文条件、交通流量等相关信息，为设计方案制定提供可靠支撑。针对不同工况优化结构衔接形式、排水系统及荷载传递设计，确保方案具备针对性与可操作性。借鉴成熟设计经验，融入新型设计理念与技术，细化设计细节，提升方案科学性与合理性，从源头规避设计层面质量隐患，为施工质量筑牢基础。

5.2 推广应用新型施工材料与技术

新型施工材料与技术的应用可有效提升路桥衔接部位施工质量与耐久性能，需积极推动其普及应用。材料选用上优先挑选强度高、耐磨性能优、抗老化能力强且弹性佳的新型材料，如新型伸缩缝材料、高性能混凝土、复合路面材料等，通过提升材料自身性能，延长衔接部位使用寿命。施工技术层面推广精准测量技术、分层压实技术、无缝衔接技术等新型工艺，提升施工精度与作业效率，确保施工工艺规范达标、施工质量符合设计要求。加强新型材料与技术的研发及应用研究，结合现场施工实际需求，优化材料配比与施工流程，充分发挥新型材料与技术的优势，为衔接部位工程质量提供有力支撑。

5.3 健全技术保障与人员培养机制

技术保障与人员培养是提升路桥衔接部位设计施工质量的重要支撑，需不断完善相关机制建设。组建专业技术研发团队，聚焦衔接部位设计施工关键技术开展深入研究，针对施工过程中出现的技术难题开展专项攻关，制定切实可行的解决办法，为设计施工工作提供坚实技术支撑。加强对设计人员、施工人员、管理人员的专业培训，定期组织技术交流研讨活动，提升相关人员专业技能、质量意识与责任意识，确保设计人员能制定科学合理的设计方案，施工人员能规范开展作业，管理人员能高效落实质量管控职责。建立健全激励机制，鼓励相关人员主动创新，不断提升设计施工技术水平，推动衔接部位工程质量持续提升。

6 结束语

本文围绕交通工程路桥衔接部位设计施工展开全面分析，明确其设计施工核心问题，阐述设计要点与施工关键技术，提出质量控制策略及优化路径。路桥衔接部位作为交通工程关键节点，其设计施工品质直接关联通行安全与工程耐久性能，优化设计方案、规范施工工艺、强化质量管控、推广新型技术材料，可有效破解各类难题、提升工程质量，对完善交通基建功能、延长工程寿命、保障通行顺畅意义重大，为交通工程高质量发展提供有力支撑。

参考文献：

[1] 袁洋.交通工程中道路与桥梁连接处设计及施工[J].运输经理世界,2025(11):106-108.
[2] 李国晨.交通工程中的道路排水系统设计与管理研究[J].中国储运,2025(02):109-110.
[3] 刘波旺.交通工程中道路与桥梁连接处设计施工探析[J].工程建设与设计,2024(08):203-205.
[4] 刘广成.交通工程中道路与桥梁连接处设计及施工[J].科技资讯,2023,21(24):133-135.
[5] 刘广魁.交通工程中道路与桥梁连接处设计施工分析[J].运输经理世界,2023(24):94-96.

高速公路超薄磨耗层养护工艺的材料与施工技术研究

郭 枭，李榆成

（陕西交通建设养护工程有限公司，陕西 西安 710065）

摘 要 现代社会经济建设对交通网络提出了更高要求，施工单位在开展高速公路施工时，为了保障道路工程的安全性与稳定性，需要科学设置超薄磨耗层。本文首先分析项目施工的材料管理，然后分析项目施工技术和强化策略，旨在为高速公路养护提供参考，进而为公众带来相对舒适的行车环境，确保公路运输安全，推动公路事业的良好发展。

关键词 高速公路；超薄磨耗层；材料管理；路面处理；摊铺施工

中图分类号：U418.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.020

0 引言

在经济快速发展的背景下，高速公路建设规模持续扩大，超薄磨耗层作为不可或缺的重要组成部分，施工单位必须结合项目需求设置超薄磨耗层，对高速公路路面做好养护作业，使路面具有更高的耐久性。为了更好地提升公路运行效率与安全，施工单位在实际开展工作时，可以从材料、技术等方面入手强化管控，降低施工安全隐患，提升项目施工效果。

1 超薄磨耗层施工材料管理

1.1 原材料管理

在超薄磨耗层施工时，优质原材料是保证项目工程质量的重要基础，科学选择沥青材料，可以提升路面耐久性，保证路面应用性能。施工单位在选择沥青时，必须综合考虑其黏度、耐久性和黏结性。优质沥青的粘附性和流动性较强，将其用于施工作业，可以使路面底层有效黏合其他材料，形成覆盖层。同时，需要保障沥青材料的抗老化性，确保高速公路可以应对车辆运行中产生的磨损，使超薄磨耗层具有更高的耐久性与稳定性。在选择沥青材料时，还需要确保其能够适应多种气候条件。与此同时，施工单位需要科学选择集料。在超薄磨耗层开展施工作业时，集料是与沥青材料有效混合的颗粒状物，材料质量会对超薄磨耗层的耐久性、强度和密实性造成很大影响[1]。在选择集料时，需要保证其强度与硬度，确保路面可以有效应对车辆运行中产生的磨损与压力，提升路面的耐久性与稳定性。同时，需要保障集料颗粒分布，确保集料可以和沥青材料有效混合，实现超薄磨耗层形成，提升路面的耐久性与平整度。在选择集料时，还需要保证其表面性质与清洁度，尽量减少粉尘和杂质，施工单位在进行集料选择时，还需要对其采集方法和来源进行综合分析，确保沥青材料可以高度符合最新标准和施工规范，使项目施工要求得到充分满足。

1.2 混合料拌和

在拌和混合料时，可以使用间歇式拌和机。在施工前，施工单位必须严格检查现场设备，结合施工要求检查各项参数。在选择拌和场地时，需要有效结合国家在消防、安全、环保等方面的标准。在拌和之前，需要在施工现场分类存放相关集料，在划分存储场地时，需要搭建防雨棚，避免材料被污染或雨淋。同时，需要根据相关规定进行取样工作，保证取样的代表性。在拌和时，需要注重投料顺序，对其加强控制，先拌和粗细集料，然后拌和沥青和矿粉，使沥青更为充分地接触集料，提升二者黏结性，最后掺入矿粉，并将其拌和均匀。在开展施工作业时，需要注重温度控制，对于沥青材料，需要确保其加热温度始终在165 ℃～175 ℃之间；而对于集料，则必须控制其温度始终在190 ℃～21 ℃；对于混合料，需要控制其温度始终在170 ℃～185 ℃[2]。与此同时，还需要控制拌和时间，在拌和混合料时，需要保证其均匀性，使沥青结合料完全包裹集料表面。在搬货施工结束后，必须对其混合料情况进行严格检查。如果发现存在离析、花白料等异常现象，必须及时采取应对措施。

作者简介：郭枭（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路桥梁工程。

1.3 混合料运输

在建设超薄磨耗层时，有效运输混合料是非常重要的工作环节，需要保证其安全性和流畅性，避免项目施工质量和施工进度出现问题。首先，需要结合工作要求检查车辆的稳定性、密封性和载重能力，避免材料在运输中出现污染或泄漏。其次，在进行混合料装载前，需对运输车辆进行严格检查和及时清洁，使车辆内部保持干净，避免混合料中混入杂质，保障施工质量。在装载和运输混合料时，需对装载的均匀性和载重量加强控制，保证混合料运输的均匀性与稳定性。在车辆运行时，需尽量避免急刹车或急转弯等行为，避免混合料损坏和倾倒。施工单位在设计运输路线时，需要有效结合路况和现场距离，科学选择装载方式和运输工具，严格把控运输成本。最后，在混合料入厂后，需及时卸载，根据施工要求和施工计划堆放，确保可以顺利完成后续施工。

2 超薄磨耗层技术

2.1 路面处理

在为高速公路设置超薄磨耗层时，需要做好路面清理工作，确保路面可以牢固黏附超薄磨耗层，使超薄磨耗层具有更长的使用期限。一般情况下，在公路长时间运行时，其导流表层会出现粉尘、叶子、泥沙等各种污垢，对路面粘附性造成很大影响，进而影响公路使用效果。

在清理泥沙等颗粒物时，可以利用吸尘器和高压水枪，在进行油渍污垢的清理工作时，需要配备专业清洗剂。在清理路面时，需及时识别问题，详细记录路面的坑洼、裂缝和破损等问题，及时修补路面，避免安全问题进一步扩大。在清理路面时，需要合理设置检查点，对其清洗效果进行严格检查，避免影响项目施工质量，使超薄磨耗层具有更高的持久性[3]。施工单位在清理路面前，需确定污垢类型，结合具体情况设置清洁方式，详细记录路面问题，使路面清洗质量得到有效控制，进而保证超薄磨耗层可以发挥更大应用优势，提升路面安全性。

2.2 摊铺施工

在摊铺混合料时，需要做好准备工作，保障设备有序运转。结合项目需求调试摊铺机和滚压机等设备，然后结合项目设计要求和施工图纸确定摊铺工作的起点与终点，合理设置摊铺计划和施工方案。在正式摊铺前，需精准测量施工路段，做好标线工作，确定摊铺的方向与位置，保证项目施工的一致性与准确性。然后摊铺混合料，严格把控摊铺厚度和速度，使混合料的平整度和均匀性得到有效保障[4]。在使用摊铺机时，还需要对其工作参数进行科学调整，保证混合料的质量与密实度。在摊铺时，需科学处理接缝位置，保证混合料层的一致性与连续性。在摊铺完成后，需做好整形处理，利用辊压机压实路面，使路面的密实度和平整度满足设计要求。

2.3 碾压施工

在建设超薄磨耗层时，碾压混合料对路面的稳定性和密实性具有很大影响。在碾压前，需做好准备工作，对机械设备进行科学调试，保证其有序运转，随后，需要结合项目设计要求和现场施工要求设计碾压工作的具体路线和工作计划，确定碾压的次数与顺序，保证路面的一致性与均匀性。在碾压前，需清理施工路段的碎石与杂物，保证路面的干净度与平整度。在碾压混合料时，需对碾压机的重量与速度加强控制，确保碾压机的一致性与均匀性，避免路面因碾压机过度振动或重压出现损坏变形[5]。在使用碾压机时，需要结合路面情况调整其工作参数，保证碾压质量。在碾压结束后，需严格检查碾压效果，检测路面的平整度、密实性等各项指标，使碾压效果达到设计标准和施工要求。

2.4 接缝处理

在建设超薄磨耗层时，需要科学处理接缝位置，做好养护工作，保证路面完整性，将其使用寿命适度延长。在进行接缝处理时，首先需要填充与封闭接缝位置，避免路面因化学物质、杂质或水分渗入出现损坏。在处理接缝时，需要科学选择密封材料或填缝剂，确保路面可以和填充物有效结合，保证接缝处的紧密性和平整度，提升路面的耐久性与密封性。在处理完接缝后，需定期检查路面，并做好清洁工作，及时修复接缝处，补充填充物。其次，需要定期洗刷路面，将路面的污垢与杂物及时清除，使路面保持光滑清洁[6]。最后，需定期检查路面，当发现路面存在损伤、坑洼或裂缝时，需及时处理，避免裂缝进一步扩大。根据路面环境条件和使用条件定期修复路面，做好加固工作，提升路面的稳定性和平整度。

2.5 施工效果检验

在项目施工结束后，需做好效果检测工作，综合评估路面性能和施工质量，使高速公路质量符合设计标准。首先，需严格检查路面的颜色、光泽度、平整度等各项指标，检查路面是否有变形、坑洼、裂缝等问题存在。其次，需要检测其密实性，利用检测仪器测试路面，对比分析设计标准和检测结果。再次，需要测试其摩擦系数，利用相关仪器设备测试路面摩擦系数，综合评估路面的安全性与抗滑性。最后，需要

检查路面的耐久性，通过现实实验或加速老化实验测试超薄磨耗层，评估其抗老化性能与耐久性。在完成检测工作后，需综合评估检测结果，使路面性能与施工要求达到设计标准，合理设置改进措施。

3 超薄磨耗层施工强化策略

3.1 强化原材料控制

在建设超薄磨耗层时，需要为原材料设置完善的质控体系。首先，需要为供应商构建筛选机制，综合考量供应商的信誉、供货能力、质控体系、工艺和生产设备，选出合适的供应商，保证原材料质量，同时，需要和供应商签订供货合同，确保可以稳定供应原材料。其次，需要对原材料做好进场检验，结合相关标准严格检测各项原材料，及时退回不合格原材料，确保现场材料高度符合项目需求。最后，需要对原材料做好储存管理，对其储存场地进行合理规划，分类存放不同规格和种类的原材料，并对其进行科学防护[7]。例如：在存放沥青混合料时，需要选择密封储罐，维持储存温度。而在存放急料时，需要保证存放场地的平整度和坚实性，科学配备排水设施和防雨棚，避免原材料，出现混料、污染或受潮等问题。

3.2 优化施工工艺

在建设超薄磨耗层时，为了进一步提升施工质量，需要优化施工工艺。首先，需要科学选择摊铺机，保障摊铺系统的先进性，精准把控摊铺的横坡度、平整度和厚度。在摊铺之前，需全面调试摊铺机，使各项性能满足施工要求。其次，需要结合现场实际情况、摊铺机性能等情况设置摊铺速度，并使摊铺机匀速行驶。在摊铺过程中，需要合理设置监测人员，严格检测摊铺质量，确保检测人员可以及时发现离析、平整度不足、厚度偏差等问题，并对其进行科学处理，人工修补局部缺陷，使摊铺质量得到有效保障。在优化碾压工艺时，需要合理设置碾压方案，对施工温度、摊铺厚度、混合料类型等因素进行综合分析，明确碾压的温度、速度、次数等各项参数。同时，需要注重碾压温度控制，利用红外测温仪实时检测现场温度，将碾压温度控制在规定范围内，如果施工现场温度过低，必须立即停止碾压，并对施工现场进行加热处理。最后，需要对重叠宽度和碾压顺序加强重视，从边到中、由低到高开展碾压作业，并为相邻碾压带设置对应宽度。

3.3 应对施工环境

在建设超薄磨耗层时，施工单位需科学应对施工环境。在项目施工之前，可以通过观看天气预报了解施工现场未来一段时间的天气情况，并以此规划施工时间，尽量避免在大风、潮湿、低温、高温等天气开展施工作业，并为不利天气设置应急预案[8]。施工单位在高温天气开展施工作业时，需要对混合料配比进行科学调整，根据施工需求增加适量的黏度调节剂，而在摊铺碾压作业时，需要进行洒水降温处理。在大风、潮湿或低温天气开展施工作业时，需要对混合料进行保温处理，利用保温材料覆盖沥青混合料，并将其出厂温度适度提升，使不同工序的衔接时间适度缩短，减少项目成本投入。在项目施工时，还需要科学应对道路环境，封闭施工路段，科学配备警示设施和交通标志，对通行车辆进行科学引导，确保车辆可以安全通行，并根据交通流量和施工进度选择全封闭施工或半封闭施工，尽量避免项目施工影响道路通行，和交通管理部门加强沟通。在弯道、道路纵坡等特殊路段，需要针对具体情况设置施工方案，如果施工路段纵坡较大，则需要合理增加摊铺机和压路机的配重，并对其参数进行科学调整，避免混合料下滑，而在弯道处，则需要对摊铺机熨平板的角度与宽度进行科学调整，使摊铺质量得到有效保障。

4 结束语

科学设置超薄磨耗层能够在很大程度上提升公路运行寿命，保证公路运行安全，为了更好地发挥超薄磨耗层的作用，应当对项目工程进行科学养护。在具体开展施工作业时，需要强化原材料管理，在拌和完混合料后及时运输。施工单位在开展具体工作时，需要科学处理路面，对混合料进行摊铺碾压，科学处理接缝处，严格检验施工效果，保障整体施工质量。未来，伴随现代科学技术的发展与进步，会给超薄磨耗层养护工作的开展带来更大机遇，延长公路的使用寿命。

参考文献：

[1] 王翔 . 大空隙超薄磨耗层在公路路面养护处治中的应用 [J]. 交通世界 ,2025(29):91-93.
[2] 陈达 . 基于农村公路养护工程的超薄磨耗层加铺技术分析 [J]. 交通科技与管理 ,2025,06(19):126-128.
[3] 刘琦 . 超薄磨耗层技术在沥青路面病害处治中的应用 [J]. 工程技术研究 ,2025,10(24):56-58.
[4] 黄培钊 . 桥梁施工养护中超薄磨耗层技术的应用探讨 [J]. 建设机械技术与管理 ,2025,38(06):123-125.
[5] 刘智勇 . 道路养护中超薄沥青磨耗层技术的应用 [J]. 交通世界 ,2025(33):66-68.
[6] 陈斌 . 高速公路沥青路面超薄磨耗层施工关键技术 [J]. 交通世界 ,2025(23):48-50.
[7] 王茂健 . 桥梁养护中超薄磨耗层施工技术应用探析 [J]. 交通世界 ,2025(17):153-155.
[8] 李正林 . 公路隧道养护工程中超薄磨耗层的应用分析 [J]. 汽车周刊 ,2025(06):39-41.

水利工程混凝土强度检测技术研究

彭治都

（四川南充水利电力建筑勘察设计研究院，四川 南充 637500）

摘 要 水利工程体量与结构复杂度持续提升，对混凝土强度检测技术的系统性、精准性和时效性提出了更高要求。本文梳理了混凝土强度检测在水利工程中的重要意义，系统介绍了回弹法和钻芯取样法检测技术的原理与适用特点，并从标准体系建设、多技术综合运用、设备维护管理及引入智能化技术四个维度提出优化对策，旨在为水利工程混凝土检测提供更系统、更精准的技术方案，助力提升检测技术水平，从源头把控工程质量，为我国水利工程的安全运行和高质量发展提供坚实的保障。

关键词 水利工程；混凝土强度；检测技术；回弹法；钻芯取样法

中图分类号：TV41 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.021

0 引言

随着我国水利建设向高质量迈进，对混凝土强度检测的技术要求日趋严格。准确评估在役及新建工程混凝土的实体强度，既是验收把关的刚性要求，也是运行期安全监测的重要内容。因此，开展水利工程混凝土强度检测技术研究，优化检测方法，可为工程质量评定提供科学依据，对推动水利工程高质量发展具有重要意义。

1 混凝土强度检测在水利工程中的重要性

1.1 混凝土强度直接决定水利工程结构安全与稳定

水利工程长期受到水压、渗流、冻融、地基沉降等多方面荷载的共同影响，结构所处的受力环境比一般的建筑工程要复杂得多。混凝土抗压强度属于结构承受复合荷载的保证参数，是工程设计承载力计算的主要依据，也是判定结构能否在极端工况下保持完整性的基本指标。以混凝土重力坝为例，坝体要同时承受库区静水压力、地震动荷载、温度应力，三者叠加形成的复合受力状态对混凝土强度提出了很高的要求，任何一个局部区域的强度不足，都会造成裂缝的萌生和蔓延，进而引发整体失稳的连锁风险。风险不是线性累积的，在强度薄弱的地方会出现突然性的破坏，一旦达到临界值就无法逆转，这是强度检测不可替代的原因。强度检测的价值在于，对实体混凝土强度进行量化评价，为结构承载力验算提供可靠的依据，从而判断工程是否满足设计要求，保证安全评价有据可依。忽略检测或者检测数据失准，会造成工程安全评价主观化，结构隐患不能被提前发现，风险没有预警就持续累积起来，最后变成不可控的安全威胁。因此，将强度检测纳入工程建设、运维全过程，不是程序上的安排，而是保证水利工程结构安全的第一道实质性防线。

1.2 强度检测是保障水利工程长期运行质量的关键

水利工程的服役年限一般为几十年甚至上百年，混凝土在长期使用过程中由于碳化、硫酸盐侵蚀、碱骨料反应等劣化作用而使强度不断下降，这个过程是不可避免的物理化学规律，只是劣化速度的快慢和分布的均匀程度不同而已。因此，竣工验收时所取的强度数据只能体现工程初始阶段的性能水平，随着时间的推移，这种数据同结构实际状态之间的差别会越来越明显，依靠这个数据来进行安全判定，其可信度将会逐年降低。定期开展强度检测，可及时掌握混凝土性能变化的趋势，在劣化程度还没有达到危险阈值的时候发现异常区域，为养护加固方案的制定提供有针对性的数据支撑，进而将被动应急处置转变为主动预防管理。特别是对建成年代早、设计标准低的老旧水利工程来说，原始设计所依据的规范已经远远低于现在的标准，材料性能在长期使用过程中也发生了不可忽视的退化，系统强度检测是进行安全风险评价、制定除险加固方案的前提条件，没有可靠的检测数据，加固方案的针对性和经济性都难以保证。可以说强度检测贯穿于工程的全生命周期，是保证水利工程持续安全运行、实现精细化管理的基础性工作，其重要性不会因为工程建成而减弱，反而会随着运行年限的增加而更加明显[1]。

作者简介：彭治都（1988-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程检测。

1.3 提升检测技术水平是推动水利建设高质量发展的必然要求

目前，水利工程建设正处在由规模扩张向质量提升转变的关键阶段，国家对全过程质量控制的要求也越来越严格，检测技术是质量保证体系的重要组成，检测技术水平的好坏直接影响到工程质量评价的准确性、可信度。检测数据是工程质量判定的根基，如果检测手段自身存在精度欠缺或者适用范围受限的情况，那么质量评定就无法得到可靠的依据，再好的管理流程也无法弥补这种根本性的缺失。传统的检测方法一直以回弹法、取芯法为主，在条件规范的环境下可以满足基本的需求，但是对于复杂工况、异形结构、大规模施工现场等实际情况来说，检测精度低、适用范围窄、检测效率低等问题会集中暴露出来，不能覆盖大体量结构的全部检测部位，也不能及时准确地识别出局部薄弱区域。这些技术局限性在工程体量小、结构简单的建设阶段可能还可以接受，但是当大型水利枢纽、引调水工程大量兴建时，成为制约工程质量控制水平提高的明显短板。推进检测技术系统性更新，采用综合检测手段和智能技术相结合的方式，才是破解以上难题的出路。只有将技术创新成果转化为检测能力的实质性提高，才能从根本上保证工程质量可靠，推动水利建设高质量发展。提高检测技术水准既是行业自身发展的内在需求，也是国家水利建设战略部署的现实要求[2]。

2 水利工程混凝土强度检测的主要技术类别

2.1 回弹法检测技术的基本原理

回弹法是目前水利工程现场检测中使用最广的无损检测方法之一。基本原理就是用弹击锤以一定的初速度冲击混凝土表面，测量锤体自由回弹时的回弹值，以此间接推算混凝土表面的硬度指标，再根据事先建立起来的经验回归相关关系，换算出混凝土抗压强度的估算值。回弹仪自身结构紧凑、操作过程简单快捷、设备轻巧便于随身携带，整个测试过程对被测结构不会造成任何物理损伤，特别适合大面积、大体量构件的普查性初步检测筛查工作。检测人员在短时间内就可以得到大量的测点强度分布数据信息，为工程整体质量状况的宏观评价和初步判断提供重要的参考依据。但是回弹法自身存在的不足也不能忽视，回弹法检测结果只能反映混凝土表层约 30 mm 深度范围内质量状况和力学性能，当混凝土表层出现碳化加深、冻融循环破坏、表面受潮或者施工振捣不均造成质量差异较大等情况时，回弹值与混凝土内部实际强度的相关性就会明显下降，检测精度也会受到影响[3]。

2.2 钻芯取样法检测技术的操作流程

钻芯取样法是目前工程界公认的获得混凝土实体强度最直接、结果最可靠的方法。其具体操作过程就是用配备金刚石薄壁钻头的专用钻芯机在选定的检测部位垂直钻取一定直径的圆柱形混凝土芯样，然后将芯样送到具有资质的试验室中，经过切割端面、研磨整平等工序加工成符合规范要求的标准试件，再按照规定的加载速率进行单轴抗压试验，从而直接测定并得到混凝土的实际抗压强度数值。该方法最突出的优点是试验结果不受混凝土表层碳化深度、含水饱和状态、表面处理工艺等外界因素的影响，可以真实、客观地反映混凝土内部整体的力学性能，其准确度和可信度比依靠间接推算的各类无损检测方法要高得多。水利工程中对关键承重部位的强度复核验证、质量事故原因调查分析、结构加固补强方案的制定论证等工作环节，钻芯取样法始终是不能取代的最后的验证手段和仲裁方法。其主要缺点就是操作过程中不可避免地会对被检测结构造成一定程度的局部破坏，因此钻孔数量和布置位置受到严格的限制，使得检测的覆盖范围小、代表性差，后期还需要对每一个取芯孔用高强度材料认真细致地修补封堵[4]。

3 水利工程混凝土强度检测技术的优化对策

3.1 建立健全检测标准体系，确保各类方法规范有效执行

检测工作是否规范直接关系到数据是否有法律效力以及工程应用价值。目前，水利工程混凝土检测涉及国标、行业标准和地方规程，条文之间存在交叉甚至冲突，部分操作细节的规定不明确，对一线检测人员造成理解与执行上的困难。关键之处在于促使形成层次分明、彼此衔接的标准体系，即以行业技术规范为主导，确定各个检测办法的适用情况、操作流程、数据处理准则以及成果表达要求，削减模糊之处。对水利工程特有的环境（水下结构、高湿环境、大体积混凝土）进行专门的技术规定，以弥补通用标准在水工方面适用性不强的缺陷。还应建立相应的检测人员资质管理及岗位培训制度，将标准学习、操作规范作为上岗考试内容，从执行层面上保证标准真正落实，而不能只停留在文件层面。操作人员可以构建“普查、复核、验证”的梯次检测逻辑，先采用回弹法或超声波法开展大范围构件检测，快速完成全面排查，精准锁定强度异常区域。对工程关键控制点以及综合检测结果存在争议的部位，实施钻芯取样检测，以实测强度数据作为最终判定依据。

3.2 推进多种检测技术综合运用，提升检测结果准确性

单一检测方法的不足已经通过工程实践得到证实，采用多种技术综合使用的方式是提高检测结论可靠性的主要途径。不同的方法可以互相检验，当结果有明显差异时，要查找原因并扩大抽检范围，防止局部问题被忽略。多技术综合运用不是简单地叠加，而是在工程特点的基础上进行有机整合，在检测方案的设计阶段就应加以统筹考虑，形成完整的检测逻辑链[5]。操作人员要严格落实设备定期校准制度，按照检定周期将仪器送至法定计量机构开展检定，每次检测作业前进行现场率定，及时发现并修正设备参数偏差，保障设备处于有效运行状态。将超声仪探头耦合剂使用、回弹仪钢砧率定等细节操作纳入标准作业规程，要求操作人员严格遵照执行，规范操作流程。

3.3 强化检测设备的日常维护与定期校准保障数据可靠

检测数据的准确性以设备良好的状态为前提，而这一基础性的前提常常被忽视。回弹仪的弹击能量、超声仪的探头频率、测距精度等重要参数一旦出现漂移，就会造成检测数据出现系统性的失真，操作人员如果缺少识别的能力，这样的误差很难被察觉到。优化设备管理首先要建立日常保养制度，规范仪器的存储、运输、使用条件，防止仪器受到碰撞、受潮等物理损伤；其次要落实定期校准要求，按照检定周期送法定计量机构检定，在每次使用前进行现场率定，保证设备处于有效状态。操作人员可以对超声仪探头的耦合剂使用、回弹仪的钢砧率定等细节操作要纳入标准作业规程，并严格遵守。另外，检测机构要建立设备档案，对每台仪器的使用情况、维修记录、历次校准数据进行详细的记载，从而为数据质量的可追溯提供依据。仪器设备精细化管理，就是把规范标准变成高质量的检测数据的最后一道保障。

3.4 加大智能化检测技术引入力度，提升检测效率与精度

数字图像分析、机器学习、无人机搭载检测等新兴技术已经在土木工程检测中显示出巨大的应用前景，将它们应用于水利工程混凝土强度检测，是打破传统检测方法瓶颈的一种方式。用机器学习对大量的历史检测数据进行训练，可以得到更加精确的数据驱动型强度预测模型，克服传统测强曲线泛化能力差的缺点。无人机搭载回弹仪或者图像采集装置，可以对大坝坝面、溢洪道边墙等人工无法到达的地方进行高效的检测，很好地解决了高空、水上构件检测作业的安全风险高、效率低的问题。在数据处理方面，操作人员应加入自动报告生成系统、检测数据管理平台，减少人工录入错误，实现检测信息及时汇总分析的目的，支持工程质量动态控制。智能化技术的加入并不是对传统方法的全面取代，而是在关键环节上起到增强和补充的作用，从而整体提高水利工程混凝土强度检测的效率和精度。操作人员可以依托无人机搭载回弹仪或图像采集装置，开展大坝坝面、溢洪道边墙等高空、水上构件检测作业，有效降低人工检测的安全风险，大幅提升检测效率。搭建检测数据管理平台，引入自动报告生成系统，减少人工录入环节，降低数据录入错误率，实现检测信息的实时汇总、分析与共享，为工程质量动态控制提供数据支撑。结合工程实际需求，合理整合智能化技术与传统检测方法，在关键检测环节发挥智能化技术的补充增强作用，全面提升水利工程混凝土强度检测的效率与精度。

4 结束语

混凝土强度检测是水利工程质量管理体系中不可或缺的技术支撑。回弹法和钻芯取样法各有其适用场景与技术边界，工程实践中应根据现场条件灵活选用，在多技术的协同运用中取长补短，形成完整可靠的检测结论链。面向水利建设高质量发展的目标，操作人员需持续深化检测技术，为工程结构安全的全生命周期保障打下更坚实的技术基础。

参考文献：

[1] 涂文斌,陈雯,吴骞.水利工程混凝土强度检测中超声回弹综合法运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2026(06):208-210.

[2] 陈雯,涂文斌,吴骞.基于钻芯法的水利工程预制薄壁构件混凝土强度检测技术[J].城市建设理论研究(电子版),2026(03):220-222.

[3] 张飞,张世豪,马亮.基于回弹法的输水工程混凝土质量检测研究[J].工程技术研究,2025,10(22):151-153.

[4] 田延翔,吴帅峰,骆亚生.回弹法在水利工程混凝土强度检测中的优化与应用研究[J].水利建设与管理,2025,45(06):35-41,34.

[5] 何远鹏,颜少莲,古今用.钻孔取芯法在水库工程实体质量检测中的应用研究[J].水上安全,2025(04):127-129.

装配式建筑保温隔热系统的创新设计

赵松涛，王 磊

（济南四建（集团）有限责任公司，山东 济南 250000）

摘 要 装配式建筑保温隔热系统的创新设计是推动建筑节能降碳、提升居住舒适度的核心路径，其核心在于通过材料选型革新、结构形式优化、施工工艺升级与功能集成创新，构建兼具高效保温、隔热降噪、安全耐久与绿色环保的一体化系统。本文立足于装配式建筑工业化、模块化发展特征，系统梳理保温隔热系统创新设计的核心要义与价值逻辑，从保温材料创新选型、复合结构优化设计、施工工艺集成创新、功能协同拓展设计四个维度，深入探析创新设计的实施路径与技术要点，结合典型设计方案对比阐释创新设计对提升建筑节能效率、降低碳排放、增强系统稳定性的核心作用，以期为装配式建筑保温隔热系统的优化升级与绿色发展提供理论参考。

关键词 装配式建筑；保温隔热系统；保温材料创新选型；复合结构优化；建筑节能

中图分类号：TU111.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.022

0 引言

在“双碳”目标和新型建筑工业化战略的双重推动下，装配式建筑已经成为建筑行业转型升级的主要方向，保温隔热系统是决定建筑节能性能和居住品质的重要部分，它的创新设计水平直接影响装配式建筑的综合效益。传统保温隔热系统存在材料保温效能低、结构衔接不紧密、施工适应性差等缺陷，已经不能满足装配式建筑工业化生产、模块化安装、绿色化发展的需要。2022年我国发布的《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》中提出，推进装配式建筑同绿色建材、节能技术的深度融合，提高建筑的保温隔热性能和能源利用率，为保温隔热系统创新设计提供重要的政策指引。装配式建筑保温隔热系统的创新设计，本质上就是从装配式建筑“工厂预制、现场装配”的核心特点出发，冲破传统保温隔热设计的固有思维，经由材料、结构、工艺、功能等各方面的革新，达成保温隔热系统同装配式建筑的高度契合，既保证系统的节能性能和安全稳定性，又符合工业化生产以及模块化施工的要求，为装配式建筑的绿色低碳发展提供关键动力。

1 装配式建筑保温隔热系统的创新设计要义

1.1 核心内涵与本质特征

装配式建筑保温隔热系统的创新设计，主要以节能高效、安全耐久、适配集成、绿色低碳为原则，以装配式建筑工业化生产、模块化安装为前提，通过保温材料创新选型、复合结构优化组合、施工工艺集成适配、功能模块协同拓展来构建与装配式建筑全生命周期相适应的一体化保温隔热系统[1]。从材料、结构、工艺、功能四个维度共同创新的角度出发，装配式建筑保温隔热系统本质特征表现为三个方面。在材料创新的基础上，以结构优化为核心，工艺适配为基础，功能拓展为延伸，形成全方位多层次的创新体系；在适配性上，突出工业化、模块化的方向，设计要考虑工厂预制的生产效率、构件运输的便捷性、现场装配的精确性，使系统和装配式建筑的生产、施工流程相适应；在价值导向上，重视节能效益和综合效益的统一，既要最大化提高保温隔热性能，又要保证系统安全稳定、绿色环保和经济合理，从而推动装配式建筑实现节能降碳、提质增效的双重目标，体现新型建筑工业化背景下保温隔热系统创新发展的本质。

1.2 价值逻辑与核心作用

装配式建筑保温隔热系统创新设计的价值逻辑是以提高建筑节能性能为根本目的，从全方位的创新入手实现节能降碳、安全耐久、提质增效的递进式发展[2]。其主要作用表现在四个方面：从建筑节能来说，创新设计依靠高效保温材料的使用和复合结构的改善，大幅提高系统的保温隔热效果，缩减建筑室内外热量交换，削减空调、供暖等能源耗费，助力建筑达成超低能耗或者近零能耗目的；从绿色低碳角度讲，挑选环保型、可循环利用的保温材料，改良生产及施工过程，

作者简介：赵松涛（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：工程管理。

缩减材料浪费和碳排放，契合“双碳”目标下的建筑行业绿色发展要求；从系统性能角度出发，重视结构衔接的密封性与稳定性，加强系统的抗风载、抗老化、防火防水性能，延长系统使用寿命，削减后期维护费用；从产业发展角度来讲，创新设计促使保温隔热技术同装配式建筑技术深度结合，推进绿色建材、节能技术的研发和应用，推动相关产业链的更新升级，为新型建筑工业化的全面推行提供强劲支撑。

1.3 实践基础与理论支撑

装配式建筑保温隔热系统创新设计有坚实的基础，有深厚的理论依据。从实践基础角度来讲，国内众多企业及科研机构进行了大量的研究工作。例如：利用真空绝热板、气凝胶等新型高效的保温材料研发复合保温构件，对保温、结构、装饰进行一体化的设计以达到系统集成的目的，使用模块化施工工艺来提高安装速度，并且积累了许多创新设计的经验；北京、上海、江苏等地的超低能耗装配式建筑项目，由于保温隔热系统的设计创新，取得了很好的节能效果，给创新设计提供很多的参考[3]。从理论支撑上来说，建筑节能理论为创新设计指明了主要的目标方向，确定了保温隔热系统节能指标和技术途径。例如：材料科学理论给保温材料创新选型提供了科学的依据，指引高性能、环保型保温材料研发和应用；结构工程理论为复合结构优化设计提供了技术支撑，保证系统结构稳定且安全；工业化生产理论给施工工艺集成创新赋予方法论引领，促使保温隔热系统同装配式建筑生产施工流程实现高效匹配，为创新设计的落实执行提供结实的理论支撑。

2 装配式建筑保温隔热系统的创新设计

2.1 保温材料创新选型设计

保温材料创新选型属于保温隔热系统创新设计的基础，核心就是根据装配式建筑的生产施工特点和节能需求，选择出具有高性能、环保型、适配性好的保温材料，同时还要考虑保温效能、安全性能以及工业化生产的要求。在材料选择上，打破传统保温材料的限制，优先选用真空绝热板（VIP）、气凝胶毡、石墨改性聚苯板（SEPS）、挤塑聚苯板（XPS）等新型高效保温材料，这些材料导热系数低、保温效果好、体积小，可以减少构件的保温空间，提高保温效果，符合装配式建筑构件轻量化、薄型化的设计要求；同时重视材料的环保性、安全性，选用低VOC排放、难燃或者不燃、无有害物质释放的保温材料，减小对环境和人体健康的危害，符合绿色建筑的发展理念[4]。另外，考虑到材料的工业化适应性，选择尺寸稳定、易于切割加工、耐运输磨损的保温材料，保证材料在工厂预制时能准确加工，在运输和现场安装时不容易损坏，保证系统施工质量及保温效果。材料选型要根据建筑所在气候分区、节能目标、构件种类等实际情况有针对性地选择，使保温性能、安全性能、经济性能达到最佳。

2.2 复合结构优化设计

复合结构优化设计属于保温隔热系统创新设计的关键部分，依靠不同材料的复合组合以及结构形式的革新，改善系统的保温隔热性能，加强结构稳定性和适用范围。常见的创新复合结构有“芯材—面板”复合结构、“多层保温材料”复合结构、“保温—承重”一体化结构等。“芯材—面板”复合结构用新型高效保温材料做芯材，用混凝土、金属板、防火板等做面板，工厂预制成复合保温构件，既能保证保温效果，又能提高系统的机械强度和防火性能；预制混凝土夹心保温外墙板采用混凝土面板、保温芯材、混凝土背板三明治结构，保温芯材采用石墨聚苯板或挤塑聚苯板，面板和背板用连接件固定在一起，形成保温、承重、防火一体化构件；多层保温材料复合结构根据不同材料的保温特点及功能优势，进行分层组合设计，外层使用耐候性好的挤塑聚苯板，中间层使用保温性能好的真空绝热板，内层使用防火性能好的岩棉板[5]；保温—承重一体化结构把保温材料和承重构件结合起来，在预制梁、柱等承重构件里嵌入保温芯材，既能保证构件的承重能力，又能达成保温隔热的目的，缩减建筑构造层次，加快施工速度。为了清晰地展现不同的复合结构设计方案特点，下面给出了典型的创新复合结构设计方案对比，如表 1 所示。

2.3 施工工艺集成创新设计

施工工艺集成创新设计是保证保温隔热系统与装配式建筑相适应的重要环节，其核心就是根据装配式建筑“工厂预制、现场装配”的施工特点，对系统生产及安装工艺进行改进，提高施工效率和工程质量[6]。工厂预制工艺上使用“构件一体化预制”技术，把保温隔热系统同装配式建筑构件（外墙板、内墙板、楼板）在工厂同时预制生产，依靠精确的模具设计和自动化生产设备，保证保温材料的定位准确、固定牢固，防止现场施工时保温层出现破损或者移位的情况发生；采用模块化拼接设计，把保温隔热系统分成标准化的模块单元，工厂预制完毕之后，现场用专用连接件迅速拼接起来，加快安装速度，缩减现场湿作业时间；在施工现场装配工艺上，研发出适合装配式建筑的专

表 1　复合结构要素表

复合结构类型	核心构成	主要优势	适配场景
三明治夹心复合结构	外层面板 + 保温芯材 + 内层背板 + 连接件	保温效能高、结构稳定、防火性好、一体化预制	装配式外墙板、内墙板
多层梯度复合结构	耐候层 + 高效保温层 + 防火层 + 防潮层	功能协同性强、适配复杂气候、安全性能优	严寒地区装配式建筑外墙
保温—承重一体化结构	承重构件（混凝土 / 钢材）+ 嵌入式保温芯材	构造简洁、施工高效、空间利用率高	预制梁、柱、楼板等承重构件
超薄高效复合结构	气凝胶毡 + 真空绝热板 + 防护面层	保温效率极高、厚度薄、轻量化	装配式钢结构建筑、既有建筑改造

用安装工具和连接节点，如卡扣式、插槽式等快速连接方式，保证保温模块与建筑构件紧密贴合，提升系统的密封性和稳定性；采用无热桥设计工艺，在门窗洞口、构件拼接处等容易产生热桥的地方，通过优化节点构造、增加保温垫块、密封处理等方式来减少热桥效应，提高整个保温效果；重视施工过程的质量控制，制订标准化的预制和安装操作规程，保证各个环节施工符合设计要求，保证保温隔热系统施工质量。

2.4　功能协同拓展设计

功能协同拓展设计是保温隔热系统创新设计的延伸，主要在于突破单一保温隔热功能的束缚，达成保温隔热同防火、防水、隔音、装饰等功用的协同集成，改善装配式建筑的综合性能[7]。从防火功能协同角度出发，选用防火性能好的保温材料、设置防火隔离带、改善复合结构的防火构造等手段来提高系统的防火性能，如在保温层里每隔一段距离设置岩棉防火隔离带，在保温系统外侧加设防火面板，从而构建起完整的防火体系，保证建筑的安全性；从防水功能协同角度出发，采用“保温—防水”一体化的设计方式，在保温层外面设置防水卷材或者防水涂料，改善节点防水构造，保证系统的防水密封性，防止雨水渗透造成保温材料受潮失效，延长系统的使用寿命；从隔音功能协同角度出发，选用具有保温和隔音双重性能的复合保温材料，或者在保温结构内增设隔音层，利用材料的阻尼作用和结构的隔声设计，减少室内外噪声传递，提高居住舒适度；从装饰功能协同角度出发，采用保温与装饰一体化的设计理念，把保温层和装饰面层在工厂预制集成起来，装饰面层可以选用仿石材、仿瓷砖、涂料等不同的形式[8]。

3　结束语

装配式建筑保温隔热系统创新设计，是装配式建筑绿色低碳发展、提高建筑节能性能和居住品质的重要手段，它的主要价值是从材料、结构、工艺、功能等各方面进行全方位的创新，形成与装配式建筑高度匹配的一体化保温隔热系统，达到节能降碳、安全耐久、提质增效的目的。从保温材料的创新选型、复合结构的优化设计、施工工艺的集成创新、功能协同的拓展这四个方面入手，创建一套完善的创新设计体系，适应装配式建筑工业化、模块化的要求，契合绿色建筑和双碳目标的需求。未来实践过程中要不断加深保温隔热系统创新设计，加强高性能保温材料研发和应用，改善复合结构及节点构造，革新工业化施工工艺，推动保温隔热系统朝着更加高效、安全、绿色、集成的方向发展，重视创新设计经验的归纳和推广，健全有关的设计标准和规范，加强产学研用的合作，为装配式建筑保温隔热系统改良升级提供有力支撑，助力新型建筑工业化与绿色建筑产业的高质量发展，为达成“双碳”目标贡献力量。

参考文献：

[1]　陈岩 . 装配式建筑外墙保温一体化施工技术要点研究 [J]. 砖瓦 ,2025(12):122-124.
[2]　刘丽芳 , 赵佳龙 , 周紫云 , 等 . 新型保温材料对轻钢装配式建筑热工性能的影响 [J]. 科学技术与工程 ,2025,25(33):14277-14286.
[3]　路康康 . 装配式建筑外墙保温板防脱落加固施工技术研究 [J]. 建设机械技术与管理 ,2025,38(05):74-76.
[4]　时晓静 . 装配式建筑中保温隔热建筑材料的创新与性能提升 [J]. 中国品牌与防伪 ,2025(09):184-186.
[5]　李曙光 , 刘丙花 . 高性能混凝土复合外墙在装配式建筑中的应用 [J]. 佛山陶瓷 ,2025,35(08):173-175.
[6]　薛琳婧 , 高行行 . 一种用于装配式建筑保温材料的制备及节能效果研究 [J]. 化学工程师 ,2025,39(02):97-101.
[7]　李亚坤 . 生物质基保温材料与轻钢装配式建筑耦合应用研究 [D]. 湘潭 : 湖南科技大学 ,2024.
[8]　梁凯 . 保温胶泥隔热涂料保温系统在装配式建筑中的应用研究 [J]. 科技与创新 ,2024(02):175-177,180.

水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计及应用

李正伟

（浙江翰达工程检测有限公司，浙江 杭州 311199）

摘 要 在“双碳”目标背景下，工业固废资源化利用已成为产业绿色转型的重要方向，水泥稳定灰渣碎石作为绿色环保型半刚性道路基层材料，兼具强度高、耐久性好、成本低廉、固废利用率高等优势，可有效替代传统水泥稳定碎石与石灰稳定土。本文阐述了水泥稳定灰渣碎石的原材料组成与核心性能特点，从目标强度确定、配合比设计、生产配合比优化三个方面构建完整的材料设计方法，结合材料特性提出拌和、运输、摊铺、碾压及养护全流程精细化施工工艺，旨在实现工业废渣资源化利用，为提升道路基层结构耐久性与工程综合效益提供借鉴。

关键词 工业固废；固废利用；水泥稳定灰渣碎石；道路基层；材料设计

中图分类号：U416.214 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.023

0 引言

近年来，我国公路建设事业快速发展，积极响应“双碳”目标和绿色可持续发展战略，推广使用以工业废渣为主要掺合料的水泥稳定灰渣碎石，替换水泥稳定碎石、石灰稳定土作为道路基层材料，对保护生态环境、减轻工业生产负担有着重要现实意义。与此同时，随着路基材料的更换，明显改变了工程建设形势，施工中需精准适配水泥稳定灰渣碎石材料特性，优化配合比设计方法与施工工艺，推动新型绿色基层材料规范化、规模化应用，为高性能、长寿命、低碳型道路基层建设提供技术支撑。

1 水泥稳定灰渣碎石概述

1.1 主要成分

水泥稳定灰渣碎石材料和传统水泥稳定碎石二者成分相似，使用灰渣作为掺合料，搭配水泥、碎石和水拌和制成，并按照工程建设需求掺加少量外加剂，最终形成半刚性道路基层材料。其中，灰渣作为掺合料，普遍使用工业废渣，如冶金矿渣，以二氧化硅和氧化钙为主要成分，具备一定的活性，和水化产物相互接触进行二次反应，负责保障道路基层材料具备足够强度和耐久性。水泥作为胶结材料，按照道路等级来选择水泥强度，水化反应进行期间，持续形成胶凝体作为反应产物，把松散骨料胶结形成稳定整体结构。碎石作为骨料，选用级配良好和质地坚硬碎石，碎石粒径取值范围为 4.75 mm～31.5 mm，保持骨料相互咬合状态，从而形成稳定骨架结构。拌和水则作为拌和介质，必须达到饮用水标准，不含有泥质等无关成分，按照配比方案和现场环境条件，灵活调整拌和水用量[1]。

1.2 性能特点

与传统道路基层材料相比，水泥稳定灰渣碎石材料兼具水泥胶结性、碎石骨架作用和灰渣活性，具备突出性能优势，主要体现在力学性能、耐久性能、施工性能三方面，有助于强化路基结构使用性能和保障交通行车安全。其一，力学性能。水泥稳定灰渣碎石具备较高强度水平，以抗压强度为例，标准条件下养护龄期达到7 d后的抗压强度达到3 MPa～5 MPa水准，满足高等级公路基层强度要求，有效抵抗动态交通荷载，基本不会出现剪切破坏等问题。其二，耐久性能。水泥稳定灰渣碎石展现出优异抗渗性能和抗冻性能，可以充分适应低温严寒环境，冻融循环试验后的强度损失比例小于 20%，并凭借内部致密结构来阻挡外部水分渗透。其三，施工性能。水泥稳定灰渣碎石具备均匀性好的性能优点，便于开展摊铺碾压作业，无需配备重型压路机等特殊施工机械。

2 水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计方法

2.1 确定目标强度

目标强度是水泥稳定灰渣碎石材料最为重要的性能参数，需综合分析道路等级、交通流量、基层类型、外部环境条件等多项因素，合理确定路基材料目标强度，再根据强度等级来制定配合比方案，同步明确原材料选型标准。具体来讲，以道路等级、使用环境作为目标强度设计依据。对于道路等级，道路等级和路基材料

作者简介：李正伟（1995-），男，本科，工程师，研究方向：道路桥梁。

强度等级呈现正比例关系，面向高速公路，路基结构承受较大竖向压力和剪切应力，要求7 d龄期时的基层抗压强度超过4 MPa，底基层抗压强度超过3 MPa；面向一级公路，要求7 d龄期时的基层抗压强度超过3.5 MPa，底基层抗压强度超过2.5 MPa。对于使用环境，大致分为普通环境和复杂环境，复杂环境包括软基路段、寒冷地区和潮湿多雨地区，目标强度适当提高5%～10%，环境条件越差，提高比例越大[2]。

2.2 配合比设计

配合比设计即为确定各类原材料的用量比例，用量情况直接关乎材料强度、耐久性以及施工性能，需提前确认目标强度，初步制定配合比方案，拌制少量水泥稳定灰渣碎石，全面检测各项性能，基于性能偏差方向与大小，针对性调整配合比方案，最终确定最佳配合比方案。具体来讲，要求设计人员直接锁定水泥剂量、灰渣掺量、含水量、碎石级配四项核心参数，按照道路等级、基层类型和目标强度值，确认核心参数取值范围，制定3～4套配合比方案，细微调整核心参数。通常情况下，水泥剂量标准值为3%～6%，灰渣掺量标准值为10%～20%，含水量标准值为5%～8%，碎石最大粒径设定为31.5 mm，按照9.5 mm～31.5 mm、4.75～9.5 mm、0 mm～4.75 mm三档进行备料。后续以混合料试验检测报告作为配合比方案优化依据，重点检测7 d龄期和28 d龄期时的抗压强度。例如：在某公路工程中，公路等级为高速公路，路基材料目标强度为4 MPa，最终以“4.5%水泥+15%灰渣+68%碎石+7.5%拌和水”作为配合比方案，碎石粒径为4.75 mm～31.5 mm，7 d实测抗压强度达到4.2 MPa，28 d抗压强度达到5.8 MPa，完美满足目标强度要求。

2.3 生产配合比设计

生产配合比是设计成果转化施工成果的关键环节，暂定配合比方案主要面向实验室环境，实验室环境和现场施工环境有着明显差别，如果忽略施工场地条件，全面执行配合比方案，会导致水泥稳定灰渣碎石性能发生波动。因此，要求设计人员综合分析原材料实际特性、拌和设备参数等多项因素，把配合比参数转换为指导拌和作业进行的实操参数。确定生产配合比方案后，必须试拌3锅及以上的水泥稳定灰渣碎石，单锅拌和量超过80%拌和楼额定产量，开展重型击实试验和无侧限抗压强度试验，目视观察混合料拌和均匀性，要求实测强度不低于设计强度，最大干密度误差小于±0.03 g/cm^3，不存在水泥团和集料离析问题。如果实测强度低于设计值，酌情增加水泥剂量，增加比例控制在0.3%～0.5%。

3 水泥稳定灰渣碎石道路基层材料的工程应用方法

3.1 混合料拌和

与传统路基材料相比，水泥稳定灰渣碎石具备灰渣质地细腻和碎石级配多的材料特性，一旦拌和质量达不到要求，就可能会出现灰渣团聚、水泥分布不均、骨料离析等问题，导致道路基层结构强度下降，甚至出现裂缝等质量病害。因此，在混合料拌和环节，必须采取集中厂拌方式，配备强制式拌和机作为拌和楼，利用自带计量系统精准称取原材料用量，要求水泥剂量误差小于±0.5%，含水量、灰渣、碎石用量误差小于±1%。准备工作完成后，按顺序依次投加碎石、灰渣、水泥与拌和水，率先投入碎石与灰渣，干拌时间控制在60 s～120 s，直至碎石、灰渣混合均匀后，继续投加水泥并干拌60 s，骨料表面完整覆盖水泥，最终加入拌和水，湿拌时间控制在3 min～5 min，总体拌和时间控制在5 min～8 min，以混合料颜色均匀、手握成团、无离析干料问题作为合格标准[3]。此外，各批次混合料制备结束后，不得立即投入使用，随机抽样检测配合比、均匀性和含水量是否合格，重新拌和不合格混合料。

3.2 混合料运输

水泥稳定灰渣碎石混合料对使用时限提出严格要求，自身持续进行水化反应，呈现流动性逐渐下滑和强度逐渐增长趋势，如果混合料制备结束后未能按时投入使用，将提前出现混合料结硬现象，无法正常铺筑形成道路基层结构。因此，在混合料运输环节，精准适配材料时效性要求，拌合阶段同步准备运输车辆，优先使用密闭式自卸车辆，清理车厢内部杂质，内壁均匀涂刷隔离剂，车厢顶部全覆盖篷布。混合料拌和结束并通过质量检验后，立即装车运往施工现场，常温环境下的运输时长不得超过2 h，低温环境下的运输时长进一步缩短至1.5 h以内。运输车辆抵达施工场地后，配合开展卸料、摊铺作业，以摊铺机前端1 m～2 m位置作为卸料点位，卸料后立即把混合料虚铺成型。

3.3 混合料摊铺

水泥稳定灰渣碎石材料具备易离析的施工特点，施工精度达不到要求，可能会出现基层表面起砂、平整度误差超标、局部骨料集中等问题。因此，在混合料摊铺环节，必须推行精细化施工模式，重点掌握基准控制、设备调试、连续摊铺、接缝处理四个方面的技术要点。第一，基准控制。道路沿线连续挂设基准线，即为导向控制线，具体挂设高强度钢丝绳，每隔5 m等距设置若干基准桩，按照基层厚度和虚铺系数来确认基准线高程，如果灰渣掺量达到18%～20%区间，把虚铺系数从1.05～1.10调整为1.10～1.15。同步

检查下承层质量，使用相同级配混合料填补修复坑槽、松散等缺陷部位，以压实度高于 95%、平整度误差小于 3 mm/2 m 作为合格标准。第二，设备调试。优先配备多功能稳定土摊铺机，有效摊铺宽度不小于路面设计宽度，采取整幅摊铺方式。摊铺机部署就位后，全面开展调试检查作业，找平系统灵敏度控制在 ±1 mm、熨平板预热至60 ℃～80 ℃,熨平板仰角调节在0.5°～1°，振捣器频率设定为250 次 /min ～ 300 次 /min[4]。第三，连续摊铺。要求连贯完成道路基层摊铺作业，保持 2 m/min ～ 2.5 m/min 恒定速度，中途不得随意停止作业、调整摊铺速度和变更摊铺方向。同步开展人工修整作业，摊铺机两侧安排施工人员辅助作业，使用铁锹等工具清理布料器内部灰渣结块和大颗粒碎石，均匀耙散局部离析混合料。第四，接缝处理。如果必须采取分幅摊铺方式时，接缝数量大幅增多，施工方案内补充接缝处理内容。尽量把相邻两幅摊铺间隔时间控制在 2 h 以内，搭接宽度保持在 100 mm ～ 150 mm，补料找平搭接部位，后续重点开展碾压作业，消除路基结构薄弱环节。

3.4 混合料碾压

考虑到水泥稳定灰渣碎石混合料具备灰渣颗粒细腻的材料特性，如果碾压时间延误或碾压方式错误，灰渣和水泥水化产物形成胶结层，致使基层压实度不达标。为实现均匀压实目标，在混合料碾压环节，重点掌握碾压组合、分阶段碾压、基层养生三个方面的技术要点。第一，碾压组合。单一种类压路机并无法满足水泥稳定灰渣碎石基层的压实需求，需要组合使用多种类型压路机，同时支持高频低幅和低频高幅两种碾压模式。从实操角度来看，推荐采取“振动压路机 + 光轮压路机”组合方案，配备 18 t ～ 21 t 单钢轮振动压路机和 22 t ～ 25 t 光轮压路机，全面调试检查压路机振动系统和制动系统，以碾压轮无变形磨损、振动频率 / 振幅灵活可调作为合格标准。同步测定混合料含水量，要求含水量误差小于 ±1%，误差超标时以自然蒸发晾干、喷雾洒水作为调整措施[5]。第二，分阶段碾压。以“先轻后重、先边后中”作为施工准则，分诸多阶段连贯开展碾压作业，明确各阶段的碾压重心，单独设置碾压参数。在正常工况下，道路基层碾压过程分为轻压稳定、中压振压、重压振压、静压收光四个阶段。以轻压稳定阶段为例，操控光轮压路机保持 1.5 km/h ～ 2 km/h 速度开展作业，关闭振动功能，碾压遍数控制在 2 遍，以道路两侧作为起始点，向中间部位重叠碾压，初步压实混合料和平整基层表面，碾压结束后的基层压实度达到 85% ～ 90%。第三，基层养护。路基碾压结束后，衔接开展养生作业，以基层表面初凝、用手按压无明显痕迹作为养生条件，路基表面全覆盖土工布，定期洒水，保持表面湿润无积水状态。按照现场环境温度来确定养护时间，常温环境下养生时间超过 7 d，5 ℃～ 15 ℃低温环境下把养护时间延长到 10 d ～ 14 d，酌情减少洒水频率。

3.5 质量检测

为保证水泥稳定灰渣碎石基层的施工质量达标和长期稳定，必须建立起进场检验、过程监测和成型复检的三级质量监管体系。在原材料进场时，对灰渣活性指数、水泥安定性、碎石压碎值和含水量进行检查，以防止不合格的原材料进入生产；在拌和过程中，对现场含水量、水泥用量和灰配比例进行实时检测，严格控制计量误差和搅拌均匀性，避免灰块、骨料离析等常见病害。在施工结束后，利用无侧限抗压强度测试、压实度检测、平整度检测和钻芯取样等手段，检验基层的密实度和整体性，保证 7 d、28 d 强度都满足设计要求。并对检测记录、图像和样品进行保存，实现施工全过程的可追溯性，对细微的质量问题进行及时修正，从源头上控制基层的成型质量，从而提高路面的耐久性和使用寿命。

4 结束语

水泥稳定灰渣碎石作为新型路基优质材料，展现出成分环保、成本低廉的突出优势，高度适配现代公路工程建设需求。施工单位要认识到水泥稳定灰渣碎石材料的重要价值，围绕材料特性，全方位重新构建路基材料设计体系，针对性改良施工工艺，为道路建设高质量发展提供有力支撑。未来，可进一步结合数字化、智能化技术开展材料性能仿真模拟与施工过程动态监测，优化灰渣种类、掺量与外加剂适配性，提升材料在极端气候与复杂地质条件下的适用性，推动水泥稳定灰渣碎石基层材料的规模化、标准化应用，为绿色交通基础设施建设注入持续动力。

参考文献：

[1] 尤晓颖.垃圾焚烧炉渣用于水泥稳定碎石混合料的研究 [D]. 扬州 : 扬州大学 ,2020.

[2] 霍畅维.道路基层水泥稳定碎石材料配比设计对强度的影响 [J]. 城市建设 ,2025(14):38-40.

[3] 高凤钤.生活垃圾焚烧灰渣掺入水泥稳定碎石的性能研究 [D]. 长沙 : 湖南大学 ,2019.

[4] 胡向宇,吴鹏,康雷,等.垃圾焚烧灰渣在水泥稳定基层中的工程应用研究 [J]. 湖北文理学院学报 ,2024,45(11):11-15.

[5] 于晓淯.水泥稳定灰渣碎石道路基层材料设计及应用 [J]. 交通节能与环保 ,2025,21(06):101-106.

无砟轨道道床板混凝土性能试验与检测分析

乔凤武

（中铁十二局集团第三工程有限公司，陕西 太原 030024）

摘 要 针对铁路无砟轨道道床板混凝土性能管控的核心需求，本文系统构建了覆盖材料性能、试验室标准试验、现场实体检测的全流程分析体系，明确了道床板混凝土工作性能、力学性能、耐久性能的核心控制指标与检测评定方法，厘清了各施工环节对混凝土性能的影响机制，提出了全流程质量优化路径。结果表明，通过源头配合比精细化设计、生产过程精准化管控、现场施工标准化作业与闭环式检测评定，可有效保障道床板混凝土各项性能满足高速铁路建设标准，该试验检测体系可为同类无砟轨道工程的混凝土质量管控提供技术支撑。

关键词 无砟轨道；道床板；混凝土性能；性能试验；实体检测

中图分类号：U214.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.024

0 引言

无砟轨道道床板是轨道结构中直接承受并传递列车动荷载的核心上部构件，其混凝土性能的稳定性与合规性直接决定轨道几何形位的保持能力、结构耐久性与列车运营安全性。本文围绕无砟轨道道床板混凝土的核心性能要求，系统阐述其质量控制的技术基准，构建试验室标准性能试验与现场实体检测相结合的完整分析体系，明确各检测项目的技术方法与评定规则，分析混凝土性能的关键影响因素并提出全流程优化措施，为铁路无砟轨道道床板混凝土工程的性能管控与质量验收提供系统性的技术依据。

1 无砟轨道道床板混凝土的核心性能要求与控制基准

1.1 核心性能技术指标

道床板混凝土需同时满足力学性能、工作性能、耐久性能与施工适配性四大核心维度的技术要求。在力学性能方面，设计强度等级不应低于C40，需同时满足规范规定的抗压强度、抗折强度与弹性模量指标，保障结构的承载能力与抗变形能力；在工作性能方面，需具备高流动性、高黏聚性与良好的保水性，无离析、无泌水，满足长距离泵送与现场振捣密实的施工要求；在耐久性能方面，需具备优异的抗渗、抗冻、抗碳化、抗氯离子侵蚀性能，同时具备低收缩、高抗裂特性，满足高速铁路结构长期服役的设计要求；在施工适配性方面，需适配长距离运输、连续浇筑的施工工况，保证早期强度增长稳定，养护工艺具备现场可操作性[1]。

1.2 质量控制的规范依据

道床板混凝土的施工、试验与检测工作需严格执行现行铁路行业标准与规范，核心依据包括《高速铁路无砟轨道工程施工质量验收标准》《铁路混凝土工程施工质量验收标准》《铁路混凝土结构耐久性设计标准》等，所有技术指标需以规范强制性条文为底线，以精细化管控为目标，确保各项性能指标满足设计与规范的双重要求。

1.3 全流程管控的核心原则

道床板混凝土的性能管控需坚持“源头控制、过程管控、检测闭环”的三位一体核心原则。源头控制以原材料优选与配合比精细化设计为核心，从根本上保障混凝土的基础性能；过程管控覆盖工厂化搅拌生产、运输、现场浇筑、振捣与养护全施工环节，确保混凝土性能的稳定性；检测闭环以试验室标准试验与现场实体检测为依据，实现质量的科学评定、问题溯源与持续优化，形成全流程的质量管控闭环[2]。

2 道床板混凝土性能的试验室标准试验体系

试验室标准试验是混凝土配合比选定、性能评定与质量溯源的核心依据，需构建覆盖工作性能、力学性能、耐久性能与变形性能的完整试验体系。

2.1 试验试件制备基准

试验试件的制备必须严格执行铁路行业现行混凝土试验规程，所用原材料应与现场实际施工用料完全一致，配合比采用经监理单位审批通过的生产基准配合比。试件采用标准振动台振捣成型，标准养护试件

作者简介：乔凤武（1988-），男，专科，工程师，研究方向：铁路轨道。

应置于温度 20 ℃ ±2 ℃、相对湿度不低于 95% 的标准养护室内养护；同条件养护试件需与现场结构同环境放置、同制度养护，以此保证试验数据能够准确反映实体结构的真实性能状态。

2.2 工作性能试验

混凝土工作性能试验主要用于评价其施工适配性，核心检测指标涵盖坍落度、扩展度、含气量、凝结时间及泌水率五项。其中，坍落度与扩展度用于评价混凝土的流动性能，其控制区间应根据泵送距离、现场施工环境温度综合确定；含气量需严格控制在规范规定的范围内，以保证混凝土的抗冻性能与和易性；凝结时间用于匹配现场浇筑与收光作业的时间窗口；泌水率用于评价混凝土的保水性能，混凝土拌合物严禁出现泌水、离析等影响工程质量的现象[3]。工作性能试验应分别在混凝土出机口和浇筑入模前两个节点进行，以此验证混凝土在运输过程中的性能稳定性。

2.3 力学性能试验

力学性能试验是评定混凝土结构承载能力的核心依据，核心检测项目包括抗压强度、抗折强度与弹性模量。抗压强度试验需分别检测 7 d、28 d 标准养护试件与同条件养护试件的强度值，其中 28 d 标养强度为混凝土强度合格评定的核心依据，同条件养护试件强度用于判定结构实体拆模、张拉等工序的强度条件。强度评定需采用方差未知统计方法，按规范要求进行批量统计与合格判定。抗折强度与弹性模量试验需同步开展，用于验证混凝土的抗变形能力与结构受力适配性，确保满足轨道结构的设计受力要求。

2.4 耐久性能与变形性能试验

耐久性能是保障道床板混凝土长期服役性能的核心指标，核心试验项目包括抗渗等级、抗冻等级、碳化性能、氯离子渗透性能检测。其中，抗渗等级需满足设计要求，评定混凝土的防水渗透能力；抗冻等级需根据项目所处环境类别确定，保障混凝土在温度循环作用下的性能稳定性；碳化性能与氯离子渗透性能试验，用于评定混凝土对钢筋的保护能力，避免钢筋锈蚀引发的结构耐久性失效。变形性能试验主要包括水化热、干缩与温缩试验，用于明确混凝土的体积变形规律，为现场防裂管控提供数据支撑，从源头控制早期裂缝的产生[4]。

3 道床板混凝土现场实体检测技术与评定方法

道床板混凝土现场实体检测是核验结构实体质量、评定施工实施效果的关键环节，必须建立涵盖外观质量、几何尺寸、实体强度、内部完整性的全维度检测评价体系。

3.1 外观与几何尺寸检测

外观质量检测采用全数目测结合尺量的方法，重点检查表面裂缝、蜂窝、麻面、露筋、错台、棱角缺损等常见缺陷，其中需重点复核表面裂缝的长度、宽度及分布特征，绝对禁止出现影响结构受力性能的有害裂缝。几何尺寸检测采用高精度测量仪器实施，主要检测项目包括道床板宽度、厚度、顶面高程、中线偏移量及预埋件安装位置，所有检测项目的偏差值必须控制在现行规范允许范围内，以满足轨道结构的线形精度及后续轨道部件安装要求。

3.2 强度无损检测与验证性检测

混凝土实体强度无损检测优先选用回弹法，按照批量抽样的原则组织实施，主要用于评价结构实体强度的均匀性及设计符合性。回弹检测必须严格执行《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》的相关规定，按规范要求布置测区，检测数据需经角度、浇筑面等修正后进行计算，最终出具批量强度评定报告。对于回弹检测结果存疑的区域，应采用钻芯取样法进行验证性检测，钻取的芯样试件需进行抗压强度试验，芯样强度值作为该区域实体强度判定的最终依据，以此保证强度评定结果的准确可靠。

3.3 内部密实度与完整性检测

道床板混凝土内部密实度及完整性检测采用超声波检测技术，通过分析超声波在混凝土内部传播的声速、波幅及频率变化特征，判断混凝土内部是否存在空洞、不密实区域、裂缝等内部缺陷。检测时应按网格状布置测线，对钢筋密集区域、混凝土浇筑下料口、施工缝等质量薄弱部位进行重点检测，精准确定缺陷的位置、范围及严重程度，为后续质量问题的处置提供科学依据。

3.4 不合格项的处置流程

对于检测发现的实体强度不足、裂缝宽度超限、内部密实度不达标等不合格项，必须立即启动质量问题闭环处置程序：首先，依据检测数据开展成因分析，明确质量问题发生的具体环节及根本原因；其次，组织专业技术人员制定专项处置方案，经审批通过后实施返工或修补处理；最后，处置完成后进行二次复检，复检合格后方可办理闭环销号手续，严禁不合格工序流转至下一施工环节。

4 道床板混凝土性能的影响因素与全流程优化路径

4.1 核心性能的关键影响因素

道床板混凝土的性能受全流程各环节的协同影响，核心影响因素可分为四大类：一是原材料与配合比因

素，原材料的质量波动、配合比参数的不合理设计，是影响混凝土基础性能的核心源头，水胶比偏高、胶凝材料体系适配性差、外加剂与水泥相容性不足，会直接导致混凝土强度不足、抗裂性能下降、工作性能不稳定。二是搅拌生产与运输因素，计量系统偏差、搅拌时间不合理、运输过程中性能管控不当，会导致混凝土均匀性差、坍落度损失过快，甚至出现离析、泌水等问题。三是现场施工工艺因素，浇筑下料方式不合理、振捣作业不规范、收光时机不当、早期养护不及时，是引发外观缺陷、内部不密实、早期裂缝的主要诱因。四是环境因素，环境温度、湿度、风速的剧烈变化，会加剧混凝土的温缩与干缩变形，提升早期开裂风险[5]。

4.2 全流程质量优化措施

针对上述影响因素，需从源头到终端实施全流程的质量优化措施。一是配合比优化，遵循低水胶比、低水化热、低收缩、高密实、高耐久的设计原则，严格控制水胶比在0.35以内，采用粉煤灰与矿粉双掺的胶凝材料体系，优化外加剂保坍组分，提升混凝土的抗裂性能与工作性能稳定性。二是生产过程优化，强化搅拌站计量系统的定期校验与日常校核，严控各组分计量误差在规范允许范围内，优化投料顺序与搅拌时间，确保混凝土搅拌均匀，严控出机混凝土的工作性能与温度，严禁不合格混凝土出厂；原材料进场后实行分区储存、统一标识管理，水泥入罐温度严格控制在60 ℃以下，避免高温影响胶凝材料活性。夏季施工时骨料堆场搭设遮阳棚并定时喷淋降温，冬季对粗细骨料、拌和水采取覆盖保温与加热措施，从原料环节稳定混凝土初始温度。根据当日环境温度、运输距离及道路状况，动态调整外加剂掺量与保坍组分比例，每2小时测定一次混凝土出机坍落度，确保入模坍落度稳定在160 mm～200 mm区间。混凝土运输采用带保温层的专用罐车，运输途中保持2 r/min～3 r/min低速搅拌，严禁运输途中加水调整工作性，运输时间超过90 min的混凝土一律做报废处理，不得进入道床板浇筑工序。三是施工工艺优化，推行标准化的浇筑、振捣、收光与养护作业，严格控制混凝土入模温度，采用分层连续匀速浇筑工艺，规范振捣作业参数，避免漏振、过振，初凝后及时开展多次收光作业，初凝后立即启动保湿养护，养护期不少于14 d，采取温控措施降低混凝土内外温差，严控早期裂缝产生；道床板施工缝须按设计与规范要求位置留置，二次浇筑前对施工缝界面进行人工凿毛处理，凿毛深度不小于10 mm，彻底清除浮浆、松动骨料与杂物，并用高压水枪冲洗干净。浇筑新混凝土前，先在界面均匀铺设一层10 mm～15 mm厚同配合比无粗骨料水泥砂浆，再进行后续混凝土浇筑，保证新旧混凝土结合面密实无空隙。同时在钢筋密集区域、预埋件周边及模板转角位置增设辅助振捣点，采用小直径振捣器精细化振捣，避免漏振、欠振导致内部不密实，进一步提升道床板混凝土整体均匀性与结构耐久性。四是检测体系优化，增加关键工序的检测频次，推行试验室试验与现场实体检测的联动机制，通过检测数据反向优化施工参数，形成“施工—检测—反馈—优化”的动态提升机制。五是管理体系优化，落实班组质量责任制，推行样板引路制度与可视化技术交底，实现全过程施工影像留存，确保各工序作业的标准化与可追溯性。

5 结束语

无砟轨道道床板混凝土的性能管控是一项系统性工程，原材料优选与精细化配合比设计是保障混凝土性能的基础，工厂化精准生产与标准化现场施工是性能稳定的关键，闭环式的试验检测与数据反馈是质量持续优化的核心支撑。本文针对铁路无砟轨道道床板混凝土的性能管控需求，系统构建了试验室标准性能试验与现场实体检测相结合的完整分析体系，明确了道床板混凝土四大核心性能的控制指标，规范了各试验检测项目的方法与评定规则，厘清了全流程各环节对混凝土性能的影响机制，提出了针对性的全流程质量优化措施。通过全流程的协同管控，可有效保障道床板混凝土的力学性能、工作性能、耐久性能满足高速铁路无砟轨道的建设标准，有效控制早期裂缝、密实度不足等常见质量缺陷。本文研究的性能试验与检测分析体系，可为铁路无砟轨道道床板混凝土工程的质量管控、性能评定与验收工作提供系统性的技术参考，也可为同类轨道交通工程的混凝土性能管控提供借鉴。

参考文献：

[1] 刘佳.湿度影响下双块式无砟轨道道床板新旧混凝土界面力学特性研究[J].铁道标准设计,2023,67(01):115-112.
[2] 刘栗军.无砟轨道结构横向温度裂缝成因与质量控制研究[J].中国品牌与防伪,2025(04):122-124.
[3] 林祖东,毕澜潇.基于CFD的双块式无砟轨道道床板混凝土浇筑模拟分析[J].四川建筑,2019,39(03):83-86.
[4] 曾志平,申石文,涂勤明,等.桥上双块式无砟轨道道床板防裂优化设计研究[J].铁道工程学报,2019,36(07):19-26.
[5] 李建伟.高原地区铁路无砟轨道道床板裂纹控制技术[J].山西建筑,2022,48(05):99-101,104.

建筑工程用砂石骨料质量检测方法与控制要点研究

张荃荃

（威海宏成建筑工程质量检测有限公司，山东 威海 264210）

摘　要　本研究以《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）为合规基准，系统构建了建筑工程用砂石骨料的核心质量技术指标体系，明确了全项指标的标准化检测操作规范、数据处理规则与合格性评定方法；建立了覆盖源头管控、进场验收、存储防护、施工使用全流程的质量控制体系；界定了检测过程的误差来源与管控边界；明确了颗粒级配、含泥量、针片状含量、压碎指标为核心管控指标。结果表明，严格遵循标准规范的检测方法与全流程管控可实现砂石骨料质量合规性精准判定，为建筑工程混凝土结构安全提供基础材料的质量管控支撑。

关键词　建筑工程；砂石骨料；质量检测；进场验收；存储

中图分类号：TU521.2　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.025

0　引言

本研究以《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）为合规基准，聚焦建筑工程普通混凝土用砂石骨料的质量检测方法与全流程控制要点，系统解析标准框架内细骨料、粗骨料的核心技术指标体系，明确全项指标的标准化检测操作规范与合格性评定规则，构建覆盖骨料生产源头、进场验收、现场存储、施工使用全环节的质量控制体系，界定检测过程的误差管控边界与操作规范。

1　砂石骨料核心质量技术指标体系

1.1　细骨料（砂）核心技术指标

细骨料指公称粒径小于 4.75 mm 的岩石颗粒，其核心技术指标严格遵循《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的分级限值要求，按混凝土强度等级形成差异化管控阈值。颗粒级配为首要管控指标，标准规定砂按 0.60 mm 筛孔的累计筛余量划分为Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区三个级配区，除 5.00 mm 和 0.60 mm 筛孔外，其余筛孔的累计筛余允许超出分区界限，但超出总量不得大于 5%；混凝土用砂优先选用Ⅱ区砂[1]。

含泥量与泥块含量为核心耐久性指标，按混凝土强度等级分级管控：强度等级≥ C60 时，含泥量≤ 2.0%、泥块含量≤ 0.5%；强度等级 C30 ～ C55 时，含泥量≤ 3.0%、泥块含量≤ 1.0%；强度等级≤ C25 时，含泥量≤ 5.0%、泥块含量≤ 2.0%。有害物质含量严格执行标准限值，云母含量≤ 2.0%，轻物质含量≤ 1.0%，硫化物及硫酸盐含量（按 SO_3 质量计）≤ 1.0%，氯化物总量（以氯离子质量计）对于预应力混凝土用砂≤ 0.02%、钢筋混凝土用砂≤ 0.06%、素混凝土用砂≤ 0.10%。

1.2　粗骨料（石）核心技术指标

粗骨料是公称粒径超出 4.75 mm 的岩石颗粒，核心技术指标严格遵循《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的分级要求，可依据混凝土性能需求搭建管控体系。其颗粒级配分为连续粒级和单粒级两类，规范明确了 5 mm ～ 10 mm、5 mm ～ 16 mm、5 mm ～ 20 mm、5 mm ～ 25 mm、5 mm ～ 31.5 mm、5 mm ～ 40 mm 共 6 类连续粒级的筛余限值，单粒级骨料仅适用于组合级配或特殊工程，禁止单粒级单独用于普通混凝土配制。

针片状颗粒含量为核心工作性管控指标，按混凝土强度等级分级：强度等级≥ C60 时≤ 8%，C30 ～ C55 时≤ 15%，≤ C25 时≤ 25%。含泥量与泥块含量限值与细骨料分级逻辑一致：≥ C60 时含泥量≤ 0.5%、泥块含量≤ 0.2%；C30 ～ C55 时含泥量≤ 1.0%、泥块含量≤ 0.5%；≤ C25 时含泥量≤ 2.0%、泥块含量≤ 0.7%。

力学性能指标是决定混凝土强度的核心管控项，水饱和状态下 C60 及以上混凝土用粗骨料的岩石母材抗

作者简介：张荃荃（1984-），女，本科，助理工程师，研究方向：建筑工程砂石材料检测。

压强度，火成岩应≥80 MPa，变质岩应≥60 MPa，沉积岩应≥30 MPa；压碎指标值按岩石类型与混凝土强度等级分级管控，需严格符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的分级限值要求。

2 标准化质量检测方法

2.1 取样与试样制备规范

取样为检测结果准确性的基础，严格执行《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的批量与取样规则：砂石骨料验收批按同产地、同规格、同进场批次划分，每400 m^3或600 t为一验收批，不足上述数量的按一批计。料堆取样时，取样部位应均匀分布在料堆的顶部、中部、底部，砂取样不少于8个部位，石取样不少于15个部位，先铲除取样部位表层，再抽取等量试样组成一组混合样；皮带运输机、汽车、火车运输取样时，应在卸料过程中按不同部位随机抽取，取样频次与数量符合标准要求。试样制备严格执行标准缩分规定，砂试样采用人工四分法或机械缩分器缩分，石试样采用人工四分法缩分，缩分后试样数量满足对应试验项目的最小取样量要求，严禁随意缩减取样量。试样烘干处理严格控制温度为105 ℃ ±5 ℃，烘干至恒重后置于干燥器内冷却至室温备用，确保试样状态符合试验要求。

2.2 核心指标标准化检测方法

细骨料核心指标检测严格遵照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）规定的操作流程：筛分析试验选用公称直径为9.50 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.60 mm、0.30 mm、0.15 mm的标准方孔筛，烘干试样1 000 g，机械筛分10 min后人工补筛至每分钟通过量不超出试样总量的0.1%，核算各筛孔累计筛余，确定级配区与细度模数，平行试验细度模数差值不得超出0.2。含泥量试验选用筛洗法，烘干试样放入公称直径为1.25 mm和0.08 mm方孔套筛（1.25 mm筛放置于上面）淘洗至水清澈，烘干后称试样的质量，平行试验结果差值不得超出0.5%。泥块含量试验选用公称直径1.25 mm筛的烘干试样，浸泡24 h后捏碎泥块，过0.63 mm筛烘干称重，核算试样的含量。

粗骨料核心指标检测严格落实标准操作规范：筛分析试验选用对应粒级的标准方孔筛，按试样最大粒径核定取样量，筛分后核算分计筛余与累计筛余，核验颗粒级配是否符合要求。针片状颗粒含量试验选用标准规准仪法，按试样粒级对应规准孔与间距，核验并称重针片状颗粒质量，核算占比。压碎指标值试验选用粒径10.0 mm～20.0 mm的风干试样，筛除针片状颗粒后分2层填入压碎值试验仪，每层振实25次，压力机在160 s～300 s内均匀地加荷到200 kN，稳荷5 s后卸荷，过公称直径为2.50 mm的方孔筛称重，核算压碎指标值，平行试验3次取平均值。辅助指标检测均严格遵照标准规范执行，坚固性、有害物质含量、表观密度等项目按标准规定的方法与参数开展操作，确保试验条件与数据处理符合精度要求。

2.3 检测数据评定规则

检测数据评定严格遵循《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的合格性判定规则：所有检测项目的试验结果均需符合标准对应技术指标要求（颗粒级配除外），方可判定该批骨料合格。单项指标检测结果不符合要求时，应从同一批骨料中加倍抽取试样，对不合格项目进行复检，复检结果符合标准要求时，该批骨料可判定为合格；复检结果仍不符合要求时，该批骨料直接判定为不合格。检测数据的修约规则符合《数值修约规则与极限数值的表示和判定》（GB/T 8170）要求，平行试验结果超出允许误差范围的，应重新取样试验。

3 砂石骨料全流程质量控制要点

3.1 进场前源头质量控制

源头控制为质量管控的首要环节，严格对标《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的技术要求，骨料采购前需核对生产单位的岩性检测报告、出厂检验报告，确认骨料的颗粒级配、含泥量、力学性能等核心指标符合工程混凝土设计强度等级对应的标准限值。对长期合作的骨料供应源，应定期开展全项指标型式检验，检验周期不超过6个月，确保生产工艺稳定、骨料质量持续符合标准要求[2]。严禁采购岩性不合格、风化严重、级配缺失的骨料，从源头规避质量风险。

3.2 进场验收环节合规控制

进场验收严格执行《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的验收批规则，骨料进场时先核对供货单、出厂检验报告，确认产地、规格、批次与供货信息一致，随后开展外观质量检查，排查骨料混料、风化、泥团超标等外观缺陷，外观检查合格后按标准规定的验收批划分规则取样送检。未经检验或检验不合格的骨料，严禁进场入库，严禁用于工程施工。对不同强度等级混凝土用骨料，按对应标准限值分级验收，高标号混凝土用骨料执行更严格的验收标准。

3.3 存储过程质量防护控制

骨料存储严格执行分级隔离、防污染、防离析的管控要求，不同产地、规格、等级的骨料分别堆放，设置高度不低于 0.5 m 的刚性隔离墙，严禁混料堆放。堆放场地采用混凝土硬化处理，设置不小于 2% 的排水坡度与周边排水设施，避免场地积水、泥土污染骨料[3]。骨料堆料高度控制在 3 m 以内，卸料时采取分层卸料方式，严禁高空卸料造成骨料离析，细骨料堆放应采取防风、防雨覆盖措施，避免含水率大幅波动。存储周期超过 3 个月的骨料，使用前应重新取样检验，确认指标符合标准要求后方可使用。

3.4 施工使用环节动态控制

施工使用环节严格执行《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的配合比适配要求，骨料使用前必须检测含水率，正常施工条件下每班检测不少于 1 次，雨天施工或含水率波动较大时增加检测频次，根据实测含水率调整混凝土施工配合比，确保水胶比符合设计要求。泵送混凝土、大体积混凝土等特殊工况用骨料，使用前应复核颗粒级配、针片状含量等核心指标，确保符合混凝土工作性要求。严禁将不同规格、不同批次的骨料混用，严禁使用检验不合格、受潮结块、污染严重的骨料[4]。

3.5 不合格品闭环处置控制

不合格品处置建立闭环管控机制，对检验判定为不合格的骨料，立即设置不合格标识，严禁与合格骨料混放，严禁用于工程施工。对复检仍不合格的骨料，24 h 内完成清退出场，留存清退影像资料、处置台账，明确处置责任人、处置方式、处置时间，形成完整的处置闭环。对已进场的不合格骨料，严禁降级使用或擅自调整配合比使用，严格执行标准的合格性判定规则，确保工程用骨料 100% 符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的要求。

4 检测过程误差管控与合规性保障

4.1 检测误差来源与管控边界

检测误差主要分为系统误差与随机误差，核心来源包括取样代表性不足、仪器设备精度不达标、环境条件不符合要求、操作流程不规范、数据处理不当五大类。管控边界严格对标《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的要求，取样环节必须保证取样部位、取样数量符合标准，确保试样具有完整的批量代表性；仪器设备必须满足试验要求的精度等级，如天平分度值不大于试样质量的 0.1%，标准筛必须定期校准，筛孔尺寸符合标准要求[5]；环境条件严格控制，烘干箱温度稳定在 105 ℃ ±5 ℃，试验室温度控制在 20 ℃ ±5 ℃，避免环境因素对试验结果的影响。

4.2 操作规范与人员管控

检测操作必须严格遵循《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）规定的步骤与参数，严禁擅自简化操作流程、调整试验参数，如筛分时间、加荷速度、烘干时长等核心参数必须严格执行标准要求。检测人员必须熟悉标准规范，掌握对应试验项目的操作流程，持证上岗，试验过程执行双人复核制度，平行试验、数据计算、结果评定均需经第二人复核，确保检测数据真实、准确、合规。建立检测全过程溯源台账，留存取样记录、试验原始记录、仪器设备校准记录、检测报告，实现检测全流程可追溯。

5 结束语

本研究以《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）为合规基准，系统构建了建筑工程用砂石骨料的核心技术指标体系、标准化检测操作规范、全流程质量控制体系，明确了检测误差管控边界与合格性评定规则。研究结果表明，颗粒级配、含泥量、针片状含量、压碎指标为砂石骨料质量的核心管控指标，严格遵循标准规范的检测方法可实现骨料质量的精准合规判定，覆盖源头、进场、存储、使用全流程的管控体系可从根本上规避骨料质量风险。本研究提出的检测方法与控制要点，完全符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》（JGJ 52-2006）的规范要求，可为建筑工程砂石骨料的质量管控提供标准化的技术支撑，为混凝土结构工程的质量安全提供基础保障。

参考文献：

[1] 方歆.关于JGJ 52-2006《普通混凝土用砂,石质量及检验方法标准》若干试验方法问题的思考 [J]. 江西建材 ,2021(11):45-46.

[2] 王涵 , 朱爱萍 , 余少乐 , 等 . 高强钢筋轻骨料混凝土梁短期受弯刚度计算方法研究 [J]. 建筑结构 ,2021,51(23):103-110,7.

[3] 潘钻峰 , 葛雄 , 曾滨 , 等 . 预应力混凝土梁 - 型钢混凝土柱新型框架节点受剪承载力计算方法 [J]. 工程力学 ,2024,41(04):29-38.

[4] 熊伟 , 徐丽沙 . 一卡通装车称重管理系统在砂石骨料行业应用 [J]. 工业控制计算机 ,2023,36(03):117-118.

[5] 刘东丽 . 高层住宅水泥混凝土检测技术体系构建研究 [J]. 房地产导刊 ,2025(22):25-27.

水胶比对高性能混凝土工作性及力学性能影响试验

王 震

（济南华东材料有限公司，山东 济南 250200）

摘 要 水胶比是决定高性能混凝土工作性及力学性能的重要因素。本文通过对不同水胶比下高性能混凝土拌合物工作性变化规律的试验研究，探究水胶比对坍落度、扩展度、流动性经时损失的影响机理。在此基础上，分析水胶比对混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量等力学性能的影响规律，厘清水胶比和强度发展之间的内在联系。结果表明，水胶比降低可以明显提高混凝土的力学性能，但是过低的水胶比会造成混凝土工作性变差，需要高效减水剂和矿物掺合料协同优化来达到工作性和力学性能的平衡。

关键词 水胶比；高性能混凝土；工作性；力学性能

中图分类号：TU528.31 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.026

0 引言

高性能混凝土具有良好的耐久性、力学性能，在重大工程中被广泛使用，水胶比是配合比设计的主要参数，影响着混凝土的流变性和硬化后的性能。水胶比过低虽然可以提高强度，但是会使得拌合物变得黏稠，施工困难；水胶比过高则强度降低，耐久性变差。如何通过试验来确定合适的水胶比范围，使高性能混凝土既具有良好的工作性，又满足力学性能要求，这是工程技术人员所关注的重点问题，对优化配合比设计、保证工程质量有着十分重要的意义。

1 高性能混凝土水胶比设计原理与试验方案

1.1 水胶比的内涵及其对混凝土性能的作用机制

水胶比是混凝土性能的重要影响因素，其内涵清楚而作用机理繁杂。它准确地反映了混凝土中水和胶凝材料质量的关系，胶凝材料种类繁多，包括水泥以及各种矿物掺合料。水胶比对强度及渗透性有较大影响，低水胶比时水化产物密实，强度大、渗透性小，但水胶比过低会阻碍水泥充分水化。水有润滑作用，对拌合物流动性、黏聚性都有影响。高性能混凝土依靠高效减水剂、矿物掺合料，在低水胶比的情况下也能得到良好的工作性。对水胶比的作用机理有深刻的认识，有利于科学配制混凝土来满足各种工程的要求[1]。

1.2 试验原材料与配合比设计

试验原材料及配合比设计属于混凝土试验的基础工作，决定着试验是否成功。原材料的选择十分重要。水泥强度等级要稳定，粗细骨料的级配要好，矿物掺合料和高效减水剂也有相应的标准，保证试验结果的可靠性。配合比设计采用固定胶凝材料总量、砂率，只改变水胶比的方法，可以有效地排除其他因素的干扰，准确地观察到水胶比对混凝土性能的影响。设置合理的水胶比梯度，根据目标坍落度调节减水剂掺量，保证拌合物工作性。科学合理的原材料选择、配合比设计给后续试验打下了良好的基础。

1.3 试验方法与测试标准

试验方法和测试标准是得到正确混凝土性能数据的重要途径。严格按照现行国家标准、行业规程执行，可以保证数据的可比性、重现性。工作性试验包括坍落度、扩展度、坍落度经时损失等方面，从不同的角度反映拌合物的性能。力学性能测试项目齐全，有多种强度、弹性模量的测试项目，试件成型、养护、试验过程均有严格要求，保证结果准确[2]。记录环境温度、湿度，控制振捣时间、频率，排除外界因素的干扰，防止由于操作不当造成试验结果的偏差。只有采用科学的试验方法、测试标准，才能给混凝土性能研究提供可靠的依据。

2 水胶比对高性能混凝土工作性的影响

2.1 水胶比对坍落度与扩展度的作用规律

水胶比对混凝土坍落度、扩展度的影响规律，属于混凝土工作性研究的重要部分。不同的水胶比区间内，坍落度、扩展度的变化不是线性的。低水胶比时

作者简介：王震（1998-），男，本科，研究方向：土木工程。

流动性差，高水胶比虽然流动性好，但是容易产生离析泌水。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料的加入，又使这一作用规律更加丰富。根据其特点，在不同的水胶比下对流动性产生不同的影响。同时，减水剂起到调节的作用，可以弥补低水胶比下流动性的不足。深入认识这一规律，有利于准确控制混凝土的流动性，满足各种施工环境对混凝土工作性不同的需求，保证施工质量。

2.2 水胶比对黏聚性与保水性的影响

水胶比对高性能混凝土的黏聚性、保水性影响较大，进而影响到混凝土质量及耐久性。水胶比的大小对混凝土的黏聚性、保水性起决定性的作用。水胶比过低或者过高都会造成离析、泌水等现象，影响混凝土的均匀性以及表层的质量，降低耐久性。矿物掺合料对改善保水性有积极的作用，粉煤灰、矿渣粉通过不同的方式减小泌水。水胶比的设计在泵送施工等特殊情况下更应该慎重考虑。只有正确把握水胶比和黏聚性、保水性的关系，才能配制出符合施工要求的高性能混凝土，保证工程结构的长期稳定性、安全性。

2.3 水胶比对流动性经时损失的影响

水胶比对混凝土流动性、经时损失的影响，是评价混凝土可施工时间的重要指标。水泥水化进程、水分蒸发是造成经时损失的主要因素，水胶比起着关键的调节作用。低水胶比混凝土流动性损失快，高水胶比虽然损失缓，但是容易产生泌水硬壳现象。高效减水剂、矿物掺合料可以有效地控制经时损失，不同的品种、掺量的减水剂以及不同的矿物掺合料的效果也不一样。经时损失曲线可以直观地评价混凝土的工作性保持能力。长距离运输或者复杂的施工工程当中，合理选择水胶比以及材料组合，可以保证混凝土抵达现场之后仍然具有较好的可施工性，进而提升施工效率和质量[3]。

3 水胶比对高性能混凝土力学性能的影响

3.1 水胶比对混凝土抗压强度的影响

抗压强度是高性能混凝土最基本的一种力学性能指标，和水胶比有明显的负相关关系。随着水胶比的降低，混凝土的抗压强度不断提高，但是提高的幅度随着水胶比的减小而逐渐变小。水胶比对于强度的影响，可以从孔隙率的变化来解释。较低水胶比时，水泥水化产物填充到原充水空间里，形成致密结构，毛细孔隙率减小，有效承载面积增大，抗压强度提高。低水胶比可以改善水泥石和骨料的界面过渡区，界面黏结力增大，有利于强度发挥。当水胶比太低的时候，部分水泥颗粒由于缺水不能充分水化，未水化的水泥颗粒可以填充到微集料中，但是整体的水化产物减少，强度增长受到限制。矿物掺合料的掺入会对水胶比和强度的关系造成影响。粉煤灰的火山灰反应消耗氢氧化钙生成水化硅酸钙，填充孔隙，改善孔结构，在低水胶比条件下起到后期强度的作用。矿渣粉有潜在的水硬性，和水泥协同水化，提高浆体密实度。硅灰的超细颗粒填充到水泥颗粒之间，大大降低孔隙率，使低水胶比混凝土得到超高强度。养护龄期对水胶比和强度的关系也有影响。

3.2 水胶比对混凝土抗折强度的影响

抗折强度体现混凝土抵抗弯曲拉伸的能力，路面、桥面等承受弯拉荷载的结构更需要它。水胶比对于混凝土的抗折强度影响规律和抗压强度大体上一致，但是敏感程度不一样。随着水胶比的减小，抗折强度也呈上升趋势，但是上升的幅度小于抗压强度。抗折强度不但和基体密实度有关，而且和骨料性质、界面过渡区以及纤维增强等有关。低水胶比改善界面过渡区结构，减少微裂缝，提高骨料和水泥石的黏结力，有利于抗折强度发挥。但是抗折强度对于缺陷的敏感度比抗压强度高，微小的孔隙、微裂缝都会造成应力集中，明显降低抗折强度。水胶比对抗折强度的影响一般存在一个阈值，低于这个阈值时强度提高有限，甚至因为脆性增大而降低。矿物掺合料的加入对抗折强度的影响要具体分析。粉煤灰能改善工作性，减小泌水，降低内部缺陷，有利于抗折强度，但是粉煤灰早期活性低，早期抗折强度可能偏低。硅灰能明显改善界面密实度，提高抗折强度，但是掺量过多会增大脆性。在道路混凝土的设计中，在保证抗压强度的基础上，主要考虑水胶比对抗折强度的影响，通过试验来确定最佳的水胶比[4]。

3.3 水胶比对混凝土弹性模量的影响

弹性模量属于混凝土应力应变关系的关键参数，体现材料抵抗变形的性能。水胶比对弹性模量的影响与对强度的影响规律相同，但是作用机理不同。弹性模量主要是由混凝土组成、孔隙率决定的，骨料的弹性模量远远大于水泥石，所以骨料体积分数对弹性模量的影响较大。水胶比降低会使水泥石的孔隙率变小，水泥石自身的弹性模量增大，从而提高混凝土的整体弹性模量。低水胶比可以改善界面过渡区的应力传递，也可以提高弹性模量。但是弹性模量的变化幅度一般小于抗压强度，因为骨料对弹性模量的贡献大，水胶比的变化只影响水泥石部分。养护龄期对弹性模量的影响是通过水泥水化程度、产物结构来体现的，随着

龄期的增长，水化产物增多，孔隙率降低，弹性模量不断增大。矿物掺合料对弹性模量的影响和对强度的影响相同，火山灰反应生成的水化产物填充孔隙，提高浆体刚度，但是粉煤灰早期反应慢，早期弹性模量可能偏低。在高层建筑、大跨度结构中，弹性模量影响结构的变形及稳定性，必须按刚度要求合理地选择水胶比。

4 水胶比优化与高性能混凝土综合性能平衡

4.1 水胶比与工作性、力学性能的协调关系

水胶比对于高性能混凝土的工作性及力学性能存在矛盾关系，降低水胶比可以提高强度但是会破坏工作性，提高水胶比可以改善工作性但是会降低强度。协调二者的关系就是配合比设计的主要任务。水胶比低时，即使用高效减水剂得到一定的流动性，混凝土的黏度仍然很高，泵送、振捣困难，容易出现施工缺陷，反而影响实际强度发挥。水胶比较高时虽然施工方便，但是强度低、耐久性差，同样影响工程质量。所以有一个合理的水胶比区间，在这个区间内，混凝土既满足施工要求的工作性，又达到设计要求的强度。该区间受原材料品质、减水剂效果、施工工艺等各方面的影响。选用优质骨料、高效减水剂可以扩大合理的水胶比区间，使低水胶比的混凝土仍然具有可施工性。矿物掺合料合理搭配可以调节工作性和强度之间的平衡，粉煤灰改善流动性，矿渣粉和硅灰贡献强度，多元复合使混凝土在较宽水胶比范围内保持良好的综合性能。试验时应根据具体的工程条件，通过系统的试验来确定最佳的水胶比，达到工作性和力学性能的最佳平衡。

4.2 基于水胶比优化的配合比设计方法

根据水胶比优化的配合比设计要综合考虑强度等级、施工条件、原材料特性等各方面因素，采用系统试验和数理统计的方法。设计步骤有确定目标强度和坍落度、选择原材料、设定水胶比梯度、试配调整、性能验证等。目标强度按照结构设计要求和施工变异水平来确定，一般大于设计强度等级以保证合格率。目标坍落度按施工方式而定，泵送混凝土流动性要求高，普通浇筑可放宽。原材料的选择要考虑水泥和外加剂的相容性，做适应性试验。设定水胶比梯度时，应该以经验公式计算出的基准水胶比为中心，向两边延伸，包含工作性及强度范围。试配时要检测新拌混凝土的工作性，调节减水剂的掺量使坍落度符合要求，记录达到目标坍落度所需减水剂的用量。成型试件养护到规定龄期后做力学性能试验，得到强度和水胶比的关系曲线。根据目标强度在曲线上确定所需水胶比，验证该水胶比下工作性是否满足要求，必要时微调配比。对具有抗渗、抗冻等特殊性能的材料还要做耐久性试验来验证。优化后的配合比在满足强度要求的基础上，尽量提高工作性，保证施工质量与效率。

4.3 矿物掺合料对水胶比效应的调节作用

矿物掺合料在高性能混凝土中不仅可以降低水泥用量来节约成本，更重要的是可以调节水胶比效应，提高混凝土的综合性能。粉煤灰的形态效应使球形颗粒在浆体中起到润滑作用，减少需水量，在相同的水胶比下提高流动性，在保持流动性不变的情况下可以降低水胶比，间接提高强度。粉煤灰的微集料效应填充在水泥颗粒间，使浆体结构更加紧密，界面过渡区得到改善，后期强度提高。矿渣粉的活性高、水化速度快，早期贡献强度大，微填充效应也提高了密实度。硅灰的超细颗粒填充到亚微米级孔隙中，使低水胶比混凝土密实度大大提高，从而大大提高了混凝土的强度和耐久性[5]。多元复合掺合料产生协同作用，粉煤灰改善工作性，矿渣粉贡献中期强度，硅灰强化界面，使得混凝土在较低水胶比下同时具有良好的工作性和超高强度。

5 结束语

水胶比对高性能混凝土的影响是复杂的，降低水胶比虽然可以提高强度和弹性模量，但是会使工作性变差；提高水胶比虽然可以改善流动性、保水性，但是会损失强度、损害耐久性，而且它的影响还会和其他许多因素相互耦合。但是，矿物掺合料为其调节提供了可能，使低水胶比混凝土具有良好的工作性和高强度。工程中水胶比控制是全过程的。随着工程结构的发展，对它的性能要求越来越高，水胶比的研究也变得越来越精细、系统。未来将研究超低水胶比下混凝土微结构变化，建立性能预测模型，研制新型外加剂、掺合料，为重大工程提供更可靠的依据。

参考文献：

[1] 王恒惠，高文龙，万晋荣.C80高强高性能混凝土的配制与施工技术[J].中国水泥，2025(08):135-138.

[2] 吴梦恩，李建军.高性能混凝土在水工结构中的应用[J].水运工程，2025(03):190-195.

[3] 王双飞，柯国军，彭勃，等.水胶比对超高性能混凝土强度的影响[J].中国粉体技术，2023,29(02):139-148.

[4] 李世华，郑倩，梁丽敏，等.超高性能混凝土工作性和力学性能的影响因素研究[J].混凝土与水泥制品，2022(12):53-57.

[5] 聂洁.超高性能混凝土力学性能及扩展度关键影响因素研究[D].长沙：长沙理工大学，2020.

基于全过程造价控制的建筑工程成本优化方法分析

孔维立，赵延臣

（青岛佳恒工程造价咨询有限公司，山东 青岛 266071）

摘 要 随着建筑行业对精细化成本管理的需求日益增加，全过程造价控制作为一种系统性、全生命周期的成本管理方法，逐渐成为工程项目中不可或缺的一部分。本文探讨了全过程造价控制的实施策略，重点分析了项目规划、设计、施工和运营各阶段的成本优化措施，并阐述了信息化技术在全过程造价控制中的重要作用。结果表明，通过科学的预算编制、设计优化、智能化施工管理与后期运营控制，建筑项目可以实现显著的成本节约，提高经济效益和可持续性。

关键词 全过程造价控制；建筑工程成本；信息化技术；BIM 技术；成本优化

中图分类号：TU723.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.027

0 引言

建筑工程项目中成本控制是决定项目能否成功的决定性因素。由于技术发展、市场环境的改变，传统的成本控制手段已经不能满足日益复杂的工程需要。全过程造价控制应运而生，它是对项目的各个阶段进行系统的成本管理，在项目初期规划阶段、项目中期施工阶段、项目后期运营阶段等各个阶段，对成本进行全方位的优化，从而达到提高效益的目的。本文对全过程造价控制的核心策略和方法进行了分析，研究了精细化管理以及信息化技术应用如何使建筑工程项目的经济效益最大化，给行业提供实践经验及理论依据。

1 全过程造价控制概述

全过程造价控制是从建筑工程项目的初步设计开始，直到工程竣工验收，并在工程投入使用后进行运营管理的全部成本控制，其目的是尽可能地降低工程成本，保证工程质量。与传统的成本控制方法不同的是，全过程造价控制更重视项目初期和设计阶段的预防性控制，在项目开始之前或者设计阶段就识别出成本风险并加以消除，从而保证预算的合理性以及高效执行[1]。

全过程造价控制是项目从策划、设计、施工到竣工验收及运营维护的各个阶段所进行的造价控制，各阶段成本控制的重点也不同。项目启动阶段主要是预算编制、风险评估，设计阶段主要是优化设计方案、成本评估，施工阶段主要是资源调配、成本控制，竣工验收阶段主要是结算准确、运营维护成本可控。全过程造价控制可以提高项目经济效益、保证项目质量、降低风险，使项目在全生命周期内达到最优成本配置的目的，从而保证项目在整个过程中财务的可持续性、竞争力。

2 建筑工程成本管理现状与挑战

建筑工程成本管理包含传统成本管理、工程造价管理以及信息化管理等几种方式，各有利弊。传统的管理依靠人工经验、手工核算，不能应对复杂的项目以及市场的变化；工程造价管理重预算轻控制，存在信息不对称、沟通不畅的问题；信息化管理采用建筑信息模型（BIM）、企业资源计划（ERP）等技术进行实时监控，但是会遇到技术更新和人员培训的困难[2]。目前存在的管理方面预算超支、设计变更频繁、施工不透明等问题，由于材料价格变化、劳动力短缺等造成成本控制变得更加困难。因此，只有对全过程的成本进行准确有效的控制，并且具有良好的调节性，才能达到提高工作效率的目的。

3 全过程造价控制方法与策略

3.1 项目规划阶段的成本控制方法

项目规划阶段的成本控制是从开始的预算编制和可行性分析入手。预算编制准确与否直接影响到后面项目成本是否合理，所以要根据项目规模、性质、市场状况来制定详细的预算方案。同时用可行性分析来评价项目的技术可行、资金可行和市场可行，保证项目在实

作者简介：孔维立（1991），男，本科，工程师，研究方向：工程造价。

际操作中具有经济性、可持续性。本阶段识别并确定可能存在的成本风险，是做好全过程造价控制的前提。

风险评估与规避措施属于项目规划阶段工作。对项目所面临的风险因素做详细的分析之后，得出设计变更、材料价格变动等成本超支风险。因此，需要制定出相应的规避措施，如采用灵活的合同条款、合理安排工期等方式，在项目推进过程中及时对预算进行调整，降低由于预算调整所造成的成本波动风险。这一阶段的工作为项目的顺利进行奠定了坚实的基础。

3.2 设计阶段的成本控制方法

设计阶段属于建筑项目成本控制的重要时期。经过设计优化和成本评价之后，可以有效地控制项目总体成本。设计方案的选择要兼顾成本、功能和可行性，通过对比不同的设计方案成本来选择性价比最高的方案，防止设计阶段出现浪费的情况。利用BIM等技术，可以在设计阶段对各项成本进行准确的预估并作出及时的调整，从而降低设计变更以及预算超支的风险。

设计变更控制和成本的有效管理属于设计阶段的又一重要工作。建筑项目在设计阶段由于各方面的需要，常常会出现设计变更的情况。每一个变更都会对成本产生影响。因此必须建立严格的变更设计变更管理程序，对变更进行逐项审核，保证变更的合理性、必要性。经过对设计方案的改进，控制好设计变更可以减少设计变更造成的成本增加，保证项目设计阶段的成本可控[3]。

3.3 施工阶段的成本控制方法

施工阶段成本控制主要是对资源进行调度、对成本进行监控。施工过程中各种资源（人力、物资、设备等）得到合理配置之后，可以提升施工速度，削减资源的损耗。建立完善的成本监控系统，对施工过程中所有的支出进行跟踪管理，保证每一分钱都花得正确合理。该阶段的成本控制要依靠项目管理人员有较强的协调能力、敏捷的决策能力来保证项目按计划顺利开展。

信息化技术应用，特别是智能化施工管理、物联网技术在施工阶段的成本控制中起到了非常大的作用。利用物联网技术对施工现场的施工进度、成本进行实时监测，可以达到精确控制的目的。智能化施工管理系统可以依据现场数据自动生成资源配置方案，从而达到动态优化的目的。该类技术的应用可以提高施工速度、减少人工费用和材料浪费，降低施工成本。

3.4 竣工验收阶段的成本控制方法

竣工验收阶段项目成本控制主要是成本结算、运营维护的管理。项目竣工之后，对所有的支出进行详细的结算，保证所有的支出都被准确地记录下来并加以核算。竣工验收阶段对成本进行核验，及时发现成本存在的偏差并作出相应的调整和修正。还要根据项目运营期的费用预算来保证项目投入后所产生的经济效益，防止后期出现无序的成本增加。

通过改善后期的运营管理来降低全生命周期成本，这是竣工验收阶段又一主要目的。项目交付之后，运营阶段的成本管理就显得十分重要。依靠创建有效的维护和管理机制，定时开展设备检修、能源管理等工作，能大幅度削减运行期间的能耗和保养开支。并且通过技术创新、节能措施来降低运营成本，使项目的整个生命周期都获得较高的成本效益。

4 基于全过程造价控制的建筑工程成本优化策略与方法

4.1 全生命周期视角的成本优化策略

全生命周期视角的成本优化策略就是建筑项目的各个阶段，即设计、施工和运营维护等阶段的协同优化。这就意味着项目各个阶段要通过改善设计方案、合理安排施工资源、高效运营管理来达到全方位成本控制的目的。在设计阶段，根据功能需求和成本之间的关系来选择性价比高的材料、设计方案，保证项目初期的预算合理、可行；施工阶段，采取合理的资源调配和工期安排，缩减工期延误和资源浪费，削减施工阶段的成本风险。后期运营阶段依靠创建有效的设施保养管理体系，缩减能耗，增长设备寿命，削减运营费用，从而达成项目全生命周期成本最优化的目的[4]。

节能、环保措施属于全生命周期成本优化中不能被忽略的因素，在目前绿色建筑的背景下，节能、环保不但是提高建筑品质的要求，也是成本优化的一种方式。设计阶段采用节能设计理念，高效建筑围护结构、智能温控系统等都可以大幅度降低建筑物使用期间的能源消耗，也可以减少维护和运营阶段的长期成本。施工阶段可选用环保型建筑材料，削减建筑垃圾，采用节能施工设备等办法来削减项目的环境成本。同时，项目在运营阶段用智能化管理系统对能源进行实时监控和优化管理，不断改善能源利用效率，降低运行成本，在整个生命周期内实现可持续的成本优化。

4.2 信息化与数字化技术在成本控制中的应用

信息化、数字化技术在全过程成本优化方面越来越重要，在现代建筑工程中，BIM、大数据、云计算、人工智能等技术被采用以后，传统成本控制方式发生了翻天覆地的变化。BIM技术可以利用三维建模给出项目全部信息，在设计时就能察觉到可能存在的冲突，从而防止由于设计变更而产生的额外开支，并且在施工期间也能对项目进展及成本进行即时掌控，保证预算同实际支出达成一致。大数据技术可以对施工现场的人员调度、物料采购、使用等进行实时分析，从而

对资源进行及时调整，防止出现资源浪费或者不足的情况，进而提高成本控制的效果。

云计算以及人工智能技术的加入，让建筑工程项目的成本管控变得越发透明、准确并且具有动态性。云计算给项目各方提供一个集中化的数据存储与共享平台，各参与方可以随时对项目的进度、成本等进行访问，保证信息透明及时更新，防止由于信息不对称而造成的决策失误。人工智能通过历史数据的深入学习可以预测项目中会出现的成本波动或者风险，给项目团队发出预警并提出改进意见。采用这些技术之后，不但可以提高成本控制的准确性，还可以提高动态调整的能力，使成本控制更加灵活高效。

4.3 成本优化的创新管理模式

成本优化不能只依靠技术手段，还要有新的管理模式。建筑项目全过程造价控制中，精益管理、六西格玛方法等跨行业最佳实践被引入建筑行业当中，给建筑行业带来了新的思路。精益管理就是去除所有的非增值活动，减少浪费，改善流程，提高效率，达到降低成本的目的。在建筑项目当中，利用精益管理的方法，在设计及施工阶段使用模块化设计、预制构件等手段来缩短工期，削减现场浪费，加强供应链管理，保证物料准时到达，缩减库存占用和浪费，进而降低成本[5]。

六西格玛方法就是对项目的各个阶段过程加以控制，保证项目质量的同时降低缺陷和返工，从而达到降低成本的目的。六西格玛方法在建筑工程中可以用来改善施工质量控制，依靠准确的质量管理体系来防止由于质量问题而造成的额外开支。在实际操作中，根据六西格玛 DMAIC（定义、测量、分析、改进、控制）的过程，对项目各个环节进行不断的优化和改善，以达到成本效益最大化的目的。创新管理模式的运用可以冲破传统管理手段的束缚，凭借灵活、高效的管理形式，在繁杂的环境里维持项目的高效运转，达成成本削减的目的。

5 案例分析

以青岛市某大型商业综合体项目为例，该项目使用 BIM 技术、智能化施工管理系统、信息化技术等对设计、施工、竣工验收、运营全过程的成本进行控制。项目总造价 10 亿元，改造面积 15 万平方米，工期 2 年。在设计阶段，BIM 技术对建筑设计进行精准建模，解决了结构设计和机电设备布置的矛盾，防止设计变更造成成本增加。根据项目管理系统来模拟施工进度和资源的消耗情况，从而保证预算控制的偏差率在 ±3% 以内，比传统的项目高出 5% ～ 10%。该种精准的预算控制为后续项目顺利进行打下了基础。

施工期间项目使用智能化施工管理系统，利用物联网技术、大数据分析手段对施工现场的资源调配情况、设备运转状况、进度掌控进行监测。系统依靠传感器、RFID 技术和实时数据统计来全面掌控材料使用状况、设备运行状况和施工进程，从而达到资源的合理调度。通过改善物料采购和资源调配，减少由于材料供应不及时或者过剩所造成的浪费。从数据可知，施工阶段材料浪费率比传统项目少 15%，人工成本比传统项目少 12%，施工期间总成本比预算少 8%。系统对进度进行准确的把控，对项目的完成时间进行了严格的安排，没有因为延误而产生额外的费用。

竣工验收及后期运营期间，项目创建起智能化建筑管理系统，从而实现建筑能效的实时监测以及自动调节。系统装有先进的传感器，对建筑内电力、供热、照明等能源消耗数据进行实时采集，用大数据分析来预测和优化能源使用模式。利用机器学习算法，系统可以按照建筑使用情况自动调节空调、照明、供暖等设备的运行方式，从而达到节能的目的。运营阶段的年能耗比原来计划降低 18%，维修费降低了 15%。智能化管理提高了设施的维护效率，降低了设备故障率，减少了突发维修事件的发生，使建筑全生命周期内高效运行，提高了项目经济性、可持续性。

6 结束语

本文主要研究全过程造价控制在建筑工程中的应用以及效果，主要分析了从项目前期规划、中期施工、后期运营维护等各个阶段的成本控制方法。采用全面的成本控制方法，即预算编制法、设计优化法、施工管理法和运营监控法，使项目从开始到结束的整个生命周期中都达到了成本效益最大化的目的。信息化技术（BIM、大数据分析等）使成本控制的准确性、及时性大大提高。结果表明，全过程造价控制对提高建筑工程的经济性、质量、可持续性有重大意义，并且有广阔的前景。

参考文献：

[1] 李芸利 . 房建工程造价管理迎来全过程成本控制新方案 [J]. 中国商界 ,2025(23):233-235.
[2] 李玉雯 . 建筑工程造价管理中项目全过程造价控制分析 [J]. 居业 ,2025(09):163-165.
[3] 闫晓凤 . 建筑工程成本控制与预算管理的优化策略研究 [J]. 城市开发 ,2025(17):137-139.
[4] 伍静静 . 建筑工程造价的动态管理与成本优化控制 [J]. 中国住宅设施 ,2025(08):206-208.
[5] 谢惊礼 . 预结算视角下的房建工程成本控制优化研究 [J]. 城市开发 ,2025(08):135-137.

公路工程质量检测常见问题及对策研究

侯茜敏

（安徽国顺交通建设试验检测有限公司，安徽 合肥 230601）

摘 要 公路工程质量检测是保障工程安全、规范施工的核心环节，直接关系到工程使用寿命与通行安全。当前公路工程质量检测工作中存在检测人员专业能力不足、设备配置不合理、流程不规范、管理制度不完善及检测标准与技术滞后等问题，严重影响检测结果的准确性与可靠性。本文梳理了检测工作各环节的常见问题，结合公路工程建设实际，从人员队伍、设备管理、流程规范、制度监管、标准技术五个维度提出针对性解决对策，以期为提升公路工程质量检测水平、强化工程质量管控提供实践参考，助力公路工程行业高质量发展。

关键词 公路工程；质量检测；检测人员；检测设备检；测管理制度

中图分类号：U415 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.028

0 引言

公路工程作为交通运输体系的核心载体，其质量安全直接关系到公众出行福祉与行业高质量发展。当前，随着新型工程结构、建筑材料的广泛应用，以及智能化检测技术的快速迭代，交通运输部不断更新行业规范，对质量检测的精准度、规范性提出更高要求。但在实践中，检测队伍素养、设备配置、流程管控等方面仍存在短板，部分检测标准与新技术适配不足，制约检测效能发挥。梳理当前检测领域突出问题，结合最新行业形势提出优化对策，筑牢工程质量防线，助力公路工程向智能化、精细化管控转型，具有重要的现实意义与实践价值。

1 公路工程质量检测常见问题梳理

1.1 检测人员相关问题

检测人员的专业能力与职业素养直接决定公路工程质量检测结果的准确性与可靠性。当前，该领域人员层面的问题已成为制约检测工作质量的关键瓶颈。部分检测人员缺乏系统的专业训练，对公路工程检测相关的国家标准、行业规范掌握不够扎实，无法精准地解读检测指标要求，在实际操作中难以准确把握检测要点，进而导致检测过程出现偏差。

同时，少数检测人员职业素养缺失，受利益驱动或责任意识淡薄，存在操作流程不规范、人为篡改检测数据等违规行为，严重破坏检测工作的公正性与严肃性。

1.2 检测设备配置不合理与运维管理不到位

检测设备是开展质量检测工作的硬件基础，设备精度、稳定性与配置合理性直接影响检测结果的可靠性。当前设备管理存在明显短板：一是设备配置不科学，部分检测机构为降低前期投入，未结合检测资质范围、项目类型与检测需求合理配置设备，存在关键设备缺失、设备型号老旧、精度不达标等问题，无法满足现行规范对检测精度与检测范围的要求；部分大型检测设备闲置率高，小型便携设备配备不足，设备资源利用效率低下。二是设备运维机制不健全，多数机构未建立全生命周期设备管理制度，缺乏专职设备维护与校准人员，日常仅开展简单清洁，未按规范周期进行检修、保养与计量校准，设备长期高负荷、带病运行，测量误差持续扩大，数据准确性难以保障。三是设备更新不及时，部分超期服役、性能衰减、技术落后的设备未及时淘汰更新，仍用于正式检测工作；部分机构未配备智能化、自动化检测设备，仍依赖人工读数、手动记录，效率低且易产生人为误差。

1.3 检测流程不规范与全过程管控缺失

标准化、闭环化的检测流程是保障检测工作有序开展、结果真实可靠的关键。当前检测流程管控存在诸多漏洞：一是检测方案编制流于形式，未结合公路工程等级、地质条件、施工工艺、质量控制重点进行专项设计，机械套用通用模板，检测内容、检测频率、取样位置、检测方法与判定标准不明确，导致检测工作无章可循，重点不突出、覆盖不全面。二是取样与

作者简介：侯茜敏（1988-），女，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

制样环节不规范，取样人员未严格按照规范要求选取取样点位，样本数量不足、取样方法错误、取样时间与施工工序不匹配，样本代表性不足；制样过程未控制温湿度、压实度等条件，样本加工精度不达标；样本标识、封存、流转、保管流程混乱，易出现混淆、损坏、失效等问题，从源头降低检测结果可信度[1]。三是现场检测与试验操作不严谨，检测人员未按规范步骤执行操作，随意简化流程、更改参数；检测环境（温度、湿度、粉尘、振动）不满足试验要求，影响数据稳定性；数据记录不及时、不完整，存在漏记、错记、事后补记等现象。

1.4 检测管理制度不完善与监管力度不足

健全的管理制度与高效的监管体系是规范检测行为、保障工作质量的制度保障。当前管理与监管存在明显缺陷：一是内部管理制度体系不健全，未建立覆盖人员、设备、流程、档案、安全的全要素管理制度，岗位职责划分模糊，检测机构、施工单位、监理单位、建设单位权责边界不清，出现质量问题后相互推诿、追责困难。二是考核与奖惩机制缺失，未将检测数据真实性、操作规范性、报告及时率、客户满意度等核心指标纳入绩效考核，对违规检测行为处罚力度不足，对优质高效完成检测任务的激励不足，难以调动人员积极性与责任心。三是外部监管效能偏低，政府监管部门存在监管力量不足、监管频次低、检查方式单一等问题，多以事后核查为主，缺乏事前预防、事中控制的常态化监管手段；对检测机构资质动态管理不到位，部分机构超资质范围开展检测工作[2]。

1.5 检测标准更新滞后与先进技术应用不足

检测标准与检测技术的先进性决定了检测工作对行业发展的适配性。当前标准与技术层面存在突出问题：一是检测标准更新不及时，随着公路工程新材料、新结构、新工艺快速推广，部分现行检测标准仍停留在传统技术层面，针对高性能材料、新型结构、特殊施工工艺的检测指标、检测方法、判定规则缺失或滞后，导致部分新型检测项目无标可依、检测结果判定混乱。二是标准执行不到位，部分检测人员对新标准、新规范学习不深入，仍沿用旧标准开展检测，检测结果不符合现行要求；不同机构对标准理解存在偏差，同一检测项目结果差异较大，数据可比性差。三是先进检测技术推广缓慢，无损检测、智能检测、遥感检测、大数据分析等高效、精准技术在公路工程检测中应用普及率低，多数机构仍采用传统破损检测、人工检测方法，存在对结构造成损伤、检测效率低、覆盖面小、数据离散性大等问题。

2 解决公路工程质量检测常见问题的解决对策

2.1 强化检测人员队伍建设

打造高素质检测队伍是保障公路工程质量检测工作质量的核心举措，核心在于提升检测人员的专业能力与职业素养，构建一支专业、诚信、高效的检测队伍。构建完善的检测人员培训体系，结合公路工程检测行业发展趋势和工程实际检测需求，制定针对性的培训计划，培训内容聚焦检测标准规范、新型检测技术、操作技能等核心要点，摒弃形式化培训，采用理论讲解与实操演练相结合的方式，定期组织检测人员开展培训，确保检测人员熟练掌握最新的检测标准和操作方法，持续提升专业能力[3]。加强检测人员职业道德教育，通过案例警示、专题宣讲等方式，强化检测人员的责任意识和诚信意识，引导检测人员坚守职业底线，自觉规范操作行为。健全考核约束机制，将检测人员的操作规范性、数据真实性、工作效率等纳入考核范围，考核结果与薪酬、晋升直接挂钩，对违规操作、数据造假等行为严肃处理，形成鲜明的奖惩导向。完善人员准入与退出机制，严格审核检测人员的资质条件，确保上岗人员具备相应的专业能力和职业素养，对不符合岗位要求、存在违规行为的人员及时清退，保障检测队伍的整体质量。

2.2 推进检测设备精细化、信息化管理

以全生命周期管理为抓手，保障检测设备精准可靠、高效运行。一是科学优化设备配置，依据检测资质、业务范围与工程需求，制定设备配置规划，合理选型采购，配齐配强关键检测设备，淘汰落后、超期、精度不达标设备；适度配置智能化、自动化检测设备，提升检测效率与精度。二是建立标准化运维体系，明确设备维护、保养、校准责任主体，制定设备操作规程与运维手册，定期开展清洁、润滑、调试、检修，严格按照计量法规要求开展周期校准，确保设备量值准确、状态可控；对故障设备及时维修，无法修复的按程序报废更新[4]。三是搭建设备信息化管理平台，利用物联网、大数据技术，对设备采购、验收、使用、维护、校准、报废等全流程信息进行数字化记录与动态管理，实时监控设备运行状态，自动提醒校准与维护时间，实现设备管理可追溯、可视化、精细化。四是规范设备使用环境，按照试验要求控制检测场所温度、湿度、防尘、防震条件，为设备稳定运行提供保障。

2.3 实施检测全流程标准化、闭环化管控

以流程规范为重点，实现检测工作全过程可控、可追溯、可核查。一是精细化编制检测方案，针对具体公路工程特点，明确检测依据、项目、频率、方法、取样要求、判定标准与质量控制点，杜绝模板化方案，确保方案针对性、可操作性。二是严格规范取样制样流程，培训专职取样人员，严格按规范选取取样点位、控制样本数量与质量，规范样本标识、封存、流转、保管流程，建立样本台账，确保样本全程可追溯；标准化制样流程，保证样本加工精度与有效性。三是强化现场检测与试验过程管控，严格执行操作规程与环境要求，实行一人操作、一人复核制度，实时准确记录原始数据，严禁涂改、编造数据；采用电子记录替代手工记录，减少人为误差。四是严格检测报告审核签发制度，规范报告内容、格式与判定依据，执行编制、审核、批准三级审核程序，对数据准确性、结论合理性、依据合规性全面把关，不合格报告坚决不予签发，确保报告权威可靠。

2.4 健全管理制度体系与全方位监管机制

以制度完善与监管强化为保障，构建权责清晰、管控有力的管理格局。一是完善内部管理制度，制定人员管理、设备管理、流程管理、档案管理、安全管理、质量控制等全套规章制度，清晰界定检测机构、施工、监理、建设等各方职责，形成权责对等、分工明确、协同高效的管理体系[5]。二是建立严格考核与奖惩机制，细化量化考核指标，对规范操作、数据真实、业绩优秀的人员与团队予以表彰奖励；对违规操作、数据造假、出具虚假报告的行为严肃追责，情节严重的吊销从业资格、纳入行业黑名单。三是强化政府常态化监管，监管部门加大抽查、飞行检查、专项督查力度，实现检测机构全覆盖、检测全流程监管，严格查处超资质检测、虚假检测等违法行为；加强检测机构资质动态管理，对不符合条件的机构及时清退。四是构建多元协同监督体系，发挥行业协会作用，制定行业自律准则，开展信用评价；畅通社会监督渠道，公布举报电话、邮箱，鼓励公众、媒体参与监督，形成政府监管、行业自律、社会监督三位一体的监管格局。

2.5 加快标准更新与先进检测技术推广创新

以标准升级与技术创新为驱动，提升检测工作科学性与先进性。一是加快检测标准迭代更新，行业主管部门组织专家团队，结合新材料、新结构、新工艺发展需求，及时修订完善检测标准，补充新型项目检测指标与方法，废止滞后条款，保障标准与工程实践同步；加强标准宣贯培训，确保检测人员准确理解、严格执行现行标准。二是大力推广先进适用技术，全面普及无损检测、智能检测、超声检测、雷达检测等技术，减少结构破损，提高检测效率与覆盖面；应用数字化、智能化检测系统，实现数据自动采集、传输、分析、判定，提升检测精准度与智能化水平。三是加强产学研协同创新，鼓励检测机构与高校、科研院所联合攻关，针对复杂地质、特殊环境、新型结构开展专项检测技术研发，推出一批实用化、高效化检测技术与设备；搭建技术交流平台，推广先进检测成果与应用经验。四是推进检测数字化转型，构建公路工程质量检测大数据平台，整合检测数据、工程信息、质量隐患等资源，实现数据共享、智能分析、预警预判，为工程质量管控提供科学决策支撑。

3 结束语

公路工程质量检测是工程质量管控的关键环节，其工作质量直接关系到公路工程的安全稳定性与长期适用性，对行业高质量发展具有重要意义。当前公路工程质量检测领域的各类问题相互关联、相互影响，制约了检测工作效能的发挥，也给工程质量埋下安全隐患。本文梳理的人员、设备、流程、管理、标准技术五大类问题，覆盖检测工作全流程，提出的针对性对策贴合工程实际，可有效破解当前检测工作瓶颈。未来，随着公路工程技术的持续升级，检测工作需动态优化完善，持续强化队伍建设、更新检测标准、推广先进技术，健全全方位监管体系，推动检测工作提质增效，充分发挥检测工作的监督、预警和指导作用，为公路工程质量筑牢防线，助力公路工程行业实现可持续发展。

参考文献：

[1] 郭芮君，辛永强.公路工程质量检测尺直线度误差的测量不确定度评估[J].工业计量，2022,32(06):59-61.
[2] 刘强.瑞雷面波法在公路工程质量检测中的应用研究[J].工程与建设，2022,36(05):1376-1378.
[3] 张善华，郭春伶.公路工程质量检测监督信息化发展研究[J].中国建设信息化，2022(10):62-64.
[4] 管竹青.浅层地震勘探在公路工程质量检测中的应用[J].资源信息与工程，2022,37(02):63-65,69.
[5] 李海圆.公路工程质量检测评定及公路养护研究[J].四川水泥，2021(04):244-245.

高速隧道软弱围岩开挖支护施工技术研究

朱 健

（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 针对川西北高原山区软弱围岩隧道施工易出现坍塌、大变形、涌水突泥等技术难题，依托川汶高速 TJ9 标段隧道工程，分析了项目软弱围岩段的工程地质特征与施工风险，系统研究了上下台阶预留核心土开挖工法、初期支护体系、二次衬砌及防排水等关键施工技术，明确了各工序的质量控制要点与安全保障措施。工程实践表明，该技术体系有效控制了围岩变形，保障了隧道施工安全与结构质量，可为同类山区软弱围岩隧道工程提供参考。

关键词 川汶高速；软弱围岩；隧道开挖；支护施工；光面爆破

中图分类号：U455.7 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.029

0 引言

隧道是穿越复杂地形地质条件的核心构筑物。川西北地区地质构造复杂，断裂带发育，隧道工程多穿越Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩，岩体破碎、自稳能力差，施工中极易发生拱顶坍塌、围岩大变形、涌水突泥等工程灾害，开挖与支护施工成为控制隧道工程安全与质量的关键。本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道工程，针对软弱围岩段的工程特点，开展开挖支护施工技术研究，总结形成适配于该类地质条件的施工工艺与控制措施，为同类工程提供实践参考。

1 工程概况

川汶高速 TJ9 标段位于四川省阿坝州茂县境内，标段核心工程为大店隧道与穆肃堡隧道，两座隧道均为公路双线隧道，设计行车速度 80 km/h。隧道施工严格遵循新奥法原理，针对软弱围岩段采用台阶法、上下台阶预留核心土法开挖，配套复合式衬砌支护体系[1]。

隧道施工内容涵盖洞身开挖、初期支护、仰拱与填充、二次衬砌、防排水、洞门及附属工程等全流程工序，其中Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩段占隧道总长度的 60% 以上，洞口浅埋段、断层破碎带、富水软岩段为项目施工的重难点，对开挖支护的精细化施工提出了极高要求。

2 软弱围岩隧道开挖施工关键技术

2.1 开挖工法选型与核心原则

结合本项目隧道软弱围岩的工程地质特征，为最大限度降低开挖作业对围岩的扰动影响，摒弃全断面开挖等围岩扰动程度高的施工工法，针对不同围岩等级实施差异化工法选型：主洞软弱围岩段优先采用台阶法施工，围岩条件极差的Ⅴ级围岩段，采用上下台阶预留核心土法组织施工。

本次工法选型与施工全过程，核心遵循“减少围岩扰动、严控开挖进尺、及时封闭成环”三大基本原则[2]。其中，台阶法将隧道断面划分为上台阶、下台阶及仰拱三部分实施分步开挖，通过分步作业减小单次开挖临空面，严格将上台阶长度控制在 3 m～5 m，避免因台阶过长造成围岩暴露时间超标、扰动范围扩大的问题；上下台阶预留核心土法则采用拱部环形开挖、预留核心土的作业方式，依托核心土对掌子面的反压作用实现掌子面自稳，施工中严格控制核心土面积不小于隧道开挖断面总面积的 50%，可显著降低软弱围岩段掌子面失稳、坍塌的施工风险[3]。

2.2 上下台阶预留核心土法施工工艺

上下台阶预留核心土法标准化施工流程如下：施工准备→上台阶拱部环形开挖→拱部初期支护施作→上台阶核心土开挖→下台阶左右侧交错开挖→下台阶边墙初期支护施作→仰拱开挖与支护封闭→仰拱填充与二次衬砌施作。

施工全过程执行严格的工序管控与参数约束，核心控制要点如下：（1）循环进尺刚性管控：Ⅳ级围岩段单循环开挖进尺不得大于 3 榀钢架设计间距，Ⅴ级围岩段单循环开挖进尺不得大于 2 榀钢架设计间距，严禁超进尺开挖。（2）上台阶作业时效管控：上台阶拱部环形开挖完成后，第一时间开展找顶排险作业，彻底消除拱部及掌子面危石风险，并必须在 4 小时内完成工字钢架设、锁脚锚杆打设、钢筋网铺设及喷射

作者简介：朱健（1989-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

混凝土封闭的全流程初期支护作业；上台阶核心土及下台阶开挖作业，必须待上台阶初期支护喷射混凝土强度达到设计强度的70%后方可启动[4]，杜绝超前开挖、支护未达标即进入下道工序的违规作业。（3）下台阶作业与支护闭合管控：下台阶严格采用左右侧交错开挖、交错支护的作业方式，严禁两侧同时落底开挖，单次开挖进尺不得超过3榀钢架设计间距；单段开挖完成后立即同步施作边墙初期支护，确保支护结构快速闭合成环，最大限度缩短围岩无支护裸露时长，充分发挥初期支护的承载作用，有效控制围岩变形。

2.3 光面爆破精细化控制

隧道岩石段软弱围岩开挖采用预裂光面爆破技术，最大限度降低爆破作业对围岩的扰动。炮眼布置根据围岩岩性动态调整，周边眼间距控制在40 cm～50 cm，周边眼与隧道轮廓线的距离根据岩层水平情况优化，避免炮孔直接破碎岩体。钻眼作业选用经验丰富的专业人员施工，严格控制钻孔角度与深度，周边眼开眼误差不大于3 cm，角度偏差不大于5°。此外，爆破参数采用“多打眼、少装药”的弱爆破原则，周边眼采用不耦合装药结构，严格控制单段装药量，降低爆破振动速度。

2.4 开挖施工防坍塌控制措施

针对软弱围岩坍塌风险，施工中采取四项核心防控技术措施：一是通过部署超前地质探测设备，在掌子面前方30 m～100 m区域采用TSP地震波反射法、地质雷达以及超前水平钻孔等综合监测手段，全面排查潜在的不良地质状况；对存在断层破碎带或富水区段的区域，则需实施超前小导管注浆加固等针对性工程防护举措；二是及时初喷封闭围岩，隧道开挖后立即喷射4 cm厚混凝土封闭岩面，防止围岩风化与掉块，填充围岩裂隙，提升围岩自稳能力[5]；三是增强锁脚锚管支护效果，弱化系统锚杆设置，针对软弱围岩锚杆锚固效果差的问题，重点强化锁脚锚管施工，严控锚管长度、角度与注浆质量，与钢架可靠焊接；四是加快循环施工速度，优化各工序衔接，严格控制开挖、支护、衬砌各工序的步距，尽早实现支护结构封闭成环。

3 软弱围岩隧道支护施工关键技术

3.1 初期支护体系施工技术

本项目隧道软弱地层区域的初期支护体系，采用“喷射混凝土结合钢筋网片、钢构件支撑及锚杆（或锁脚锚杆）”协同作用的综合防护技术，各工序施工严格遵循设计与规范要求，核心支护参数见表1。

表1 隧道软弱围岩段主要支护设计参数

支护项目	Ⅳ级围岩段	Ⅴ级围岩段
喷射混凝土	C25湿喷混凝土，厚度22 cm	C25湿喷混凝土，厚度25 cm
钢筋网	Φ8钢筋，网格间距20 cm×20 cm，单层	Φ8钢筋，网格间距20 cm×20 cm，双层
型钢钢架	I20b工字钢，间距1.0 m	I22b工字钢，间距0.6 m
系统锚杆	Φ22药卷锚杆，长度3.0 m，间距1.2 m×1.0 m	Φ22药卷锚杆，长度3.5 m，间距1.0 m×0.6 m
锁脚锚管	Φ42无缝钢管，长度3.0 m，每榀4根	Φ42无缝钢管，长度3.5 m，每榀4根
超前支护	Φ42超前小导管，长度3.5 m，环距40 cm	Φ42双层超前小导管，长度4.5 m，环距40 cm

喷射混凝土采用湿喷工艺，优先选用混凝土湿喷台车作业，受限地段采用小型湿喷机。原材料严格控制，水泥选用P.042.5普通硅酸盐水泥，粗集料最大粒径不大于12 mm，速凝剂采用液体型。喷嘴与岩面保持垂直，距离控制在0.8 m～1.2 m，确保混凝土密实，与围岩密贴，钢架背后必须喷射饱满，严禁出现空洞[6]。

型钢钢架在洞外加工厂分节加工，1:1放样试拼合格后运至洞内安装，节段间采用高强螺栓连接，安装时严格控制中线、高程与垂直度，相邻钢架采用Φ22纵向连接筋焊接，环向间距1.0 m，内外交错布置。钢筋网应依据受喷表面的几何形态进行灵活布局，确保其与锚杆及初支钢架的有效连接，并满足搭接长度不小于一个网格间距的技术规范。在实施系统锚杆和锁脚锚管作业时，需重点保证钻孔精确度，同时优化注浆工艺的质量，达到密实饱满的效果。仅当锁脚锚管内砂浆强度达到设计值70%以上时，方可推进下一工序的爆破开挖操作。

3.2 二次衬砌施工控制要点

本工程二次衬砌施工选用C35等级防水混凝土材料，并确保抗渗性能不低于P8标准。为保障工程质量与工艺连贯性，采用全液压整体式衬砌台车进行连续化作业，设备全长设计为12 m，模板最小厚度须达到10 mm及以上。依据围岩监控量测数据判定最佳施作时机：在围岩位移趋于稳定时及时开展；对于软弱地层，则应优先封闭结构以提升整体稳定性。

钢筋在加工车间完成批量预制后运输至现场，主

筋间距的偏差值须严格控制在 ±10 mm 范围内，两层钢筋间距离的允许误差应维持在 ±5 mm 以内。为保证保护层厚度准确无误并符合设计规范，采用专用定型模具进行定位固定，并按照梅花状均匀布置垫块，其最大间距不宜超过 1.5 m。在混凝土浇筑阶段，借助泵送机械将料浆导入模板内部，依据“分层分区、对称同步、逐步推进”的工艺流程实施操作，每层摊铺高度不得超过 40 cm，相邻区域表面高程差应控制在 1.0 m 之内。施工期间结合使用插入式与附着式振捣器，以全面提升新拌混凝土的密实度及力学性能。

拱顶浇筑作业建议运用分段推进式压注法施工，并设置不少于三个纵向浇筑分区及四个内置注浆孔。为有效防控拱顶空洞缺陷，应在构件脱模前完成预设带模注浆工序。根据规范要求，混凝土终凝后应立即开展保湿养护操作，其中主体结构养护期须达到 7 天以上，而洞口区域则需延长至 14 天及以上；在此期间，务必保证混凝土表面持续保持充分湿润状态以维持最佳性能指标。

3.3 防排水系统施工技术

隧道防排水采用“防水板 + 止水带 + 排水盲管”的复合防排水体系。拱墙背后设置 FH50 环向软式透水管，纵向间距 10 m，集中出水点加密设置；边墙脚设置 DN100 纵向打孔双壁波纹管，外裹无纺布；横向排水管采用 DN100 双壁波纹管，间距 10 m，将汇水引入中央排水沟。

本项目防水系统采用 1.5 mm 厚 EVA 高分子材料，搭配 350 g/m^2 无纺布，运用无钉搭接配合双焊缝热熔焊接技术进行施工。施工过程中严格控制搭接区域与焊缝宽度，并通过充气测试验证其性能是否达标；对于施工缝及变形缝等特殊节点，则选用中埋式与背贴式复合橡胶止水带，利用热熔对接工艺实施精准安装，以增强结构的整体防渗效果并确保可靠性。

3.4 支护施工质量控制措施

针对软弱围岩隧道支护施工的质量通病，项目建立全过程质量管控体系，明确各工序质量验收标准，核心实测项目及允许偏差见表 2。

表 2 隧道初期支护施工实测项目及允许偏差

项次	检查项目	规定值或允许偏差	检查方法与频率
1	喷射混凝土强度	在合格标准内	每 10 m 留置 1 组试块，抗压强度试验
2	喷射混凝土厚度	90% 检查点≥设计厚度， 最小厚度≥ 0.5 设计厚度	每 10 m 一个断面，地质雷达连续检测
3	钢架间距	±50 mm	尺量，每榀钢架检查
4	钢架保护层厚度	≥ 20 mm	尺量，每 20 m 检查 3 处
5	锚杆孔位	±150 mm	尺量，抽查 10%
6	锚杆孔深	±50 mm	尺量，抽查 10%

施工中一定要实行“三检制”，班组自检、工区复检、项目部专检合格后报监理验收，未经验收严禁进入下一道工序。针对喷射混凝土厚度不足、背后空洞、锚杆注浆不饱满、钢架安装偏差等质量通病，制定专项防治措施，加强过程管控。同时，通过监控量测动态反馈支护效果，关键监控参数涵盖隧道内外的地质状况、围岩位移、拱顶沉降及地表形变等重要指标。量测频率根据变形速率动态调整，当变形速率超过 5 mm/d 时启动预警，及时采取补强支护措施，确保支护体系安全稳定。

4 结束语

本文依托川汶高速隧道工程，针对高原山区软弱围岩的工程特性，系统研究了隧道开挖与支护施工的关键技术，通过优化开挖工法、强化初期支护体系、严控二次衬砌与防排水施工，形成了适配于该类地质条件的成套施工工艺。该工程案例实践有效控制了围岩变形，杜绝了坍塌、突泥等灾害，保障了施工安全与结构质量。针对软岩大变形的长期演化规律、支护参数动态优化等问题，仍需结合现场监测数据开展进一步研究，持续完善软弱围岩隧道施工技术体系。

参考文献：

[1] 毛立厦.软弱围岩隧道开挖支护优化与施工安全风险管理 [J].科技创新与生产力 ,2025,46(10):81-84.
[2] 梁亚东.高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析 [J].交通科技与管理 ,2025,06(09):61-63.
[3] 王磊.隧道软弱围岩大断面开挖支护施工工艺研究 [J].中华建设 ,2025(02):163-165.
[4] 焦治豪.富水软弱围岩浅埋小净距隧道开挖稳定性及方案优化研究 [D].洛阳 : 河南科技大学 ,2024.
[5] 林航.软弱围岩大断面隧道开挖支护施工技术及应用 [J].运输经理世界 ,2023(33):89-91.
[6] 熊安正.隧道软弱围岩大断面开挖支护施工工艺研究 [J].工程技术研究 ,2023,08(17):23-25.

既有建筑物周边深基坑支护技术与监理分析

房仁河

（安徽汇鼎项目管理有限公司，安徽 宣城 242300）

摘 要 既有建筑物周边深基坑工程受环境约束强、风险集中，支护技术适配性不足、施工管理不到位，监理体系不完善、人员专业素养不足等问题，易威胁既有建筑安全。本文结合既有建筑物周边深基坑工程的核心特征，针对支护技术选择不合理、施工质量管控缺失及监理流程不健全等突出问题，优化支护技术选择原则与场景化应用方案，强化支护结构施工全流程管控，同时完善监理前期策划、聚焦施工过程关键环节管控，构建监理质量保障与长效优化机制，以期为既有建筑物周边深基坑支护工程安全、高效实施提供参考，保障既有建筑与基坑工程双重安全，提升工程整体施工与监理水平。

关键词 既有建筑；深基坑；支护技术；施工监理；安全管控

中图分类号：TU753.3 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.030

0 引言

城市更新与老旧城区改造持续推进，既有建筑物周边深基坑工程数量不断增多，工程环境愈发复杂。此类工程紧邻既有建筑，场地空间狭小、地质条件多变，施工扰动极易引发建筑沉降、开裂等安全事故，对支护技术与监理工作提出更高要求。当前部分工程仍存在支护方案适配性不足、施工管控粗放、监理体系针对性不强等问题，难以满足新时期建筑安全与工程质量管控标准。立足于工程建设高质量发展背景，结合既有建筑保护与基坑工程管控需求，开展支护技术优化与监理体系完善研究，可为同类工程提供技术支撑与管理参考，切实保障既有建筑与基坑工程双重安全，推动城市地下空间开发建设安全有序开展。

1 既有建筑物周边深基坑工程核心基础要素

1.1 既有建筑物周边深基坑工程核心特征

既有建筑物周边深基坑受周边环境约束强、风险点集中，与普通基坑存在显著差异，其核心特征围绕周边既有建筑的安全影响形成鲜明指向。周边建筑物荷载呈现多元复杂特征，既有老旧建筑的不均匀荷载，也有新建建筑的集中荷载，这类荷载直接作用于基坑周边土体，对基坑变形控制提出极高标准，细微的位移或沉降都可能引发既有建筑墙体开裂、基础沉降等安全问题，远超普通基坑的变形控制阈值。施工空间受既有建筑布局限制，多数工程需在建筑间隙开展作业，大型支护设备难以全面展开，设备操作半径和作业效率受到严格制约，增加了施工组织的难度。基坑与既有建筑基础衔接紧密，部分基坑边线与既有建筑基础距离不足5米，基坑开挖过程中土体应力的变化会直接传递至既有建筑基础，而既有建筑基础的荷载反作用也会影响基坑边坡的稳定性，二者形成相互影响、相互制约的联动关系。

1.2 既有建筑物周边深基坑支护现存突出问题

当下支护技术适用性不够好、施工管理没有做到位，造成支护成效无法确保已有建筑安全，各种问题在现实工程中表现出明显的针对性不足，支护技术挑选缺乏对既有建筑实际状况的充分思考，一些工程随便搬用普通基坑的支护办法，没有结合已有建筑的结构种类、基础样式、使用年头等关键指标制定专门方案，出现支护种类与建筑负荷不相符、支护强度与基坑深度不适应的状况，不能有效控制基坑变形，不容易抵抗施工干扰带来的安全威胁[1]。支护结构施工质量管控存在明显缺失，部分施工团队为了节省开支、赶工期，存在材料省用现象，如支护桩混凝土强度不够、钢筋设置密度不足，而且施工方法不规范问题显著，支护桩成孔误差太大、注浆不充分、墙体接头处理马虎，这些问题直接降低支护结构的承受能力和抗变形能力。

1.3 既有建筑物周边深基坑监理现存突出问题

监理体系不够完善、监管重点不够清楚，造成工程安全风险管控存在薄弱环节，直接影响到支护工程

作者简介：房仁河（1973-），男，专科，工程师，研究方向：工程监理—建筑工程。

的施工品质和既有建筑的安全，监理流程不够健全，缺少针对既有建筑物周边深基坑的专项监理流程，对支护方案审核、材料检验、施工工序监管、监测数据核查等关键环节的管控缺乏明确标准，出现监管缺位、流程脱节现象，部分关键工序没有经过监理验收就进入下一环节，留下安全风险。监理人员专业素养不够，多数监理人员缺少既有建筑保护、基坑支护技术、监测数据解读等相关专业知识，对复杂场景下的监管重点把握不准，不能及时识别支护施工中的违规操作和品质隐患，难以适配既有建筑物周边深基坑复杂的监管需求。

2 既有建筑物周边深基坑支护技术优化与实施策略

2.1 支护技术选择的核心原则与适配策略

支护技术选择需以保障既有建筑安全为核心，结合工程地质、环境条件实现精准适配，这一原则贯穿技术选择的全过程，也是规避支护风险、提升支护效果的关键。选择支护技术时，需优先选用对既有建筑扰动小、变形控制能力强的类型，优先考虑排桩支护、地下连续墙等刚性支护形式，这类支护结构承载能力强、变形量小，能有效减少施工过程中对周边土体的扰动，降低对既有建筑基础的影响，避免柔性支护因变形过大引发的安全隐患[2]。支护参数的确定需结合多方面因素综合考量，根据基坑开挖深度、工程地质条件、周边建筑荷载大小等核心参数，科学设定支护结构的尺寸、间距、嵌固深度等指标，确保支护结构的承载能力与基坑受力需求相匹配，既满足抗滑动、抗倾覆要求，又能有效控制基坑变形，契合既有建筑的安全防护标准。技术选择需兼顾可行性、经济性与施工便捷性，在保障安全的前提下，结合施工空间、设备条件等实际情况，避免过度支护造成的成本浪费，同时杜绝支护不足带来的安全风险，实现安全、经济与施工便捷的有机统一，让支护技术真正适配既有建筑物周边深基坑的工程特点。

2.2 常用支护技术的场景化应用优化

对不同支护类型各自的特点加以审视，与既有建筑周围场景结合来优化应用方法，这有助于提升支护效果，让各种支护技术把自身优势充分发挥出来，适配不同场景的安全需求。排桩支护用在大多数既有建筑物周边深基坑工程中，应用过程中要重点优化桩体间距、直径和嵌固深度，依照既有建筑基础分布情况合理调整桩体间距，避开建筑基础关键部位，同时借助基坑深度和土体承载力确定桩体直径与嵌固深度，保证桩体能有效抵御土体压力，减少基坑变形，适配既有建筑基础的避让需求，避免桩体施工对建筑基础造成破坏。地下连续墙支护适合基坑与既有建筑距离较近的场景，应用时需强化墙体接头施工质量，采用刚性接头处理工艺，加强接头处注浆加固，减少墙体渗漏和变形，避免因墙体渗漏造成周边土体软化、沉降，进而影响既有建筑安全，把其整体性强、抗渗性好的优势充分发挥出来[3]。土钉墙与喷锚支护则用在浅基坑且周边建筑荷载较小的场景里，应用过程中要严格控制土钉长度、间距和注浆质量，依照土体性质确定土钉长度和间距，保证土钉能与周边土体有效结合，提升土体整体性。

2.3 支护结构施工全流程管控策略

加强施工整个流程的管控，减少施工带来的干扰，是确保支护结构施工品质和原有建筑安全的关键手段，需要从施工前、施工中、施工辅助这些环节一起落实管控要求。施工前要做好原有建筑基础的调查和保护工作，借助专业调查明确原有建筑基础的位置、埋藏深度、结构类型等主要参数，画出详细的基础分布图，按照调查结果划出施工禁止区域，严禁在禁止区域内进行重型机械操作、土方挖掘等可能影响建筑基础的活动。另外，对原有建筑开展预先处理，采取加固方法，减少施工干扰带来的影响。施工过程中要严格控制支护结构施工的准确度，建立精确的测量放线系统，确保支护桩、连续墙这些构件的位置、标高、垂直度达到设计标准，避免因为施工偏差损坏原有建筑基础。同时，加强施工工艺的管理，规范桩体成孔、注浆、混凝土浇筑等关键工序的操作步骤，防止工艺不规范引起的质量风险。基坑降水、排水管理是施工管控的重要辅助部分，需要结合工程地质和水文条件，制定科学的降水、排水计划，合理设置降水井的间距和深度，控制降水速度和降水量，防止降水太快引起周围土体下沉，同时及时排出基坑内积水，避免积水浸泡支护结构，降低支护结构承载能力，确保施工整个流程既保证支护品质，又不影响原有建筑安全。

3 既有建筑物周边深基坑监理强化与保障体系构建

3.1 监理工作前期准备与策划优化

前期充分策划的监理工作，能为后续支护工程安全管控奠定坚实基础，需从方案审核、施工单位核查、监理流程明确三个核心方面优化准备工作。监理人员需严格审核支护设计方案的合理性与适配性，重点核查方案中针对既有建筑的保护措施，判断方案是否结

合既有建筑的结构特点、基础形式制定针对性防护策略，是否明确支护结构的参数、施工工艺及扰动控制要求，对方案中存在的不合理之处提出修改意见，确保方案能有效保障既有建筑安全，符合工程实际需求。施工单位资质、施工方案及安全保障体系的核查是前期准备的关键环节，监理人员需核查施工单位的资质等级、过往类似工程施工经验，确认其具备承接既有建筑物周边深基坑支护工程的能力[4]。同时，审核施工单位制定的施工方案，核查方案的可行性和安全性，检查安全保障体系是否完善，包括安全管理制度、应急处置方案、人员安全培训等，确保施工单位具备相应的安全施工能力。监理流程、关键监管节点及责任分工需进一步明确，结合既有建筑物周边深基坑的工程特点，制定专项监理流程，明确材料检验、工序验收、监测核查等关键监管节点，划分监理人员的责任分工，确保每个监管环节都有专人负责，避免监管缺位，为后续监理工作的有序开展提供保障。

3.2 施工过程监理关键环节管控

对施工关键工序实施全过程旁站监理，是及时排查质量和安全隐患、保障支护工程质量及既有建筑安全的核心监理手段。支护结构材料进场检验构成第一道质量防线，监理人员要对进场的钢筋、混凝土、注浆材料等进行严格检验，核对材料的出厂合格证、检测报告，对材料进行抽样检查，阻止不合格材料流入施工环节，防止因材料质量问题引起支护结构承载能力不够，埋下安全风险。支护桩、连续墙等核心构件施工需要展开全过程旁站监理，监理人员全程在场监督施工过程，严格把控施工工艺与质量，检查桩体成孔质量、钢筋布设情况、混凝土浇筑质量及墙体接头处理工艺，及时改正施工中的违规操作，确保核心构件施工质量满足设计要求，能够有效抵抗土体压力和施工扰动[5]。基坑降水、土方开挖工序的监理同样重要，监理人员要监督降水方案的落实情况，核对降水井的布设、降水速度是否满足设计要求，同时监控土方开挖的速度、分层厚度及开挖顺序，防止违规开挖引起周边土体受力失衡，带来基坑变形和已有建筑安全隐患，确保施工过程符合安全管控要求。

3.3 监理质量保障与长效优化机制

完善监理保障体系、加强人员管理与复盘优化机制，是持续提升监理工作质量、构建既有建筑周边深基坑监理长效管控模式的核心路径。其中，监理人员专业素养的提升是筑牢监理质量防线的根本所在。因此，有必要强化针对监理人员的专业培训，着重训练既有建筑保护、基坑支护技术、监测数据解读、应急处置这些相关专业知识，结合既有建筑物周围深基坑的工程特点，开展一些有针对性的培训，帮助监理人员提升识别质量隐患、解读监测数据、处理突发情况的能力，确保监理人员可以适应复杂场景的监管需要。建立起监理责任追究机制，明确监理人员的岗位职责，对监理过程中出现的监管缺位、审核不严、隐瞒隐患等行为进行严肃追责，倒逼监理人员履行好监管职责，规范监理行为，保障监理工作的严肃性和规范性。工程完工之后需要及时对监理工作做一次复盘，梳理监理过程中发现的问题、积累的经验，分析问题产生的原因，总结那些有效的监管方法和管控措施，形成一套监理案例库，为后续同类既有建筑物周围深基坑工程的监理工作提供参考，实现监理工作的持续优化，构建长效监管机制，进而提升整体监理管控水平。

4 结束语

既有建筑物周边深基坑支护与监理工作直接关系到既有建筑结构安全和基坑工程施工成效，是工程安全管控的核心环节。此类工程场景复杂、风险点突出，需兼顾支护技术的适配性与施工监理的专业性，摒弃照搬普通基坑施工模式的做法，立足于工程实际优化技术方案与监理流程。支护技术的场景化优化的施工全流程管控，能够有效控制基坑变形，减少对既有建筑的扰动；监理体系的完善与人员素养的提升，可筑牢工程质量安全防线，防范各类安全隐患。未来需结合更多工程实践，总结优化经验，持续完善支护技术与监理机制，推动既有建筑物周边深基坑工程朝着更安全、更规范、更经济的方向发展。

参考文献：

[1] 杨晓岚.高层住宅建筑深基坑支护变形监测与控制策略[J].居舍,2025(17):166-169.
[2] 丁军明.建筑工程施工中深基坑支护的施工技术管理[J].居业,2025(02):171-174.
[3] 武帅,周宝木,刘帅帅.基于多维计算的紧邻建筑物深基坑支护方案研究[J].市政技术,2024,42(08):175-182.
[4] 禹泽云.高层建筑施工深基坑支护加固技术研究[J].建筑技术,2024,55(05):542-546.
[5] 邵明伟,王旻.深基坑支护体系施工技术及监测研究[J].建筑机械,2023(09):134-138.

建筑工程监理全过程质量控制要点与实践研究

曲翔宇

（山东港通工程管理咨询有限公司，山东 青岛 266000）

摘 要 本文针对传统监理模式局限于施工阶段的弊端，从理论内涵、实施要点和实践路径三个方面对建筑工程监理全过程质量控制进行系统的探究。首先，对从决策、设计到保修的全生命周期管理进行了界定，提出了预防为主、动态控制、系统协调三个主要原则。其次，对勘察设计源头控制、施工准备预控、实施过程动态监管和竣工验收收尾四个主要阶段的质量控制要点进行了详细的分析，并提出了建立全过程质量管理体系、加强队伍专业化建设、推进智慧监理技术应用和优化外部协同机制等建议。结果表明，依靠技术赋能和机制革新实现质量管理的系统化、智能化，是改善建筑工程品质的必由之路。

关键词 建筑工程；全过程质量控制；BIM 技术；智慧监管

中图分类号：TU712 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.031

0 引言

随着建筑工业化与数字化技术的深度融合，现代建筑工程的复杂性、系统性明显提升，传统的阶段化、碎片化的监理模式已经不能满足高质量建设的要求[1]。建筑工程质量与结构安全、使用功能有关，也与社会资源的配置效率、城市可持续发展能力有关。基于此，将监理工作从施工阶段的监管扩展到包含决策、勘察、设计、施工、保修在内的全过程，是行业转型升级的必然要求。全过程质量控制不是时间上的简单延长，而是管理理念、技术手段、责任体系的系统性重塑，用前置的风险识别、动态的过程纠偏、闭环的结果评价来实现工程质量从事后补救到事前预防的根本性转变。

1 建筑工程全过程质量控制的理论基础与原则

1.1 全过程质量控制的内涵界定

全过程质量控制在于监理单位按照法律法规、技术标准和合同约定，对工程项目建设从投资决策、勘察设计、施工准备、施工实施到竣工验收、保修服务的全过程、连续的监督和管理活动[2]。其时间跨度贯穿项目建设全过程，重视各个阶段质量目标的有机衔接和协同控制，而不能孤立地看待某一个环节的质量问题。全过程质量控制是系统工程管理的主要特点之一，它要冲破传统分段管理的障碍，建立起跨阶段的信息共享机制和责任追溯体系，从而保证质量管理的连续性、完整性以及一致性。该概念既包含实体工程质量形成的过程，也包含影响质量形成的各种管理行为、技术措施和环境因素的全面控制，是质量管理从“点状控制”到“链式治理”的范式转变。

1.2 全过程质量控制的核心原则

全过程质量控制坚持预防为主、动态控制、系统协调这三个主要原则。预防为主原则主张在质量问题出现之前采取前瞻性的措施，从改善设计方案、严格控制材料的来源、加强施工工艺等方面入手，把可能存在的隐患消灭在萌芽状态之中，进而减少返工费用和安全风险。动态控制原则在于监理人员在工程实施过程中，根据环境变量、技术变更、资源调配等的变化情况，及时调整控制措施，用反馈机制及时纠正偏差，保证质量目标一直处在受控状态。系统协调原则是从质量、进度、投资三个目标之间辩证统一的角度出发，防止由于片面追求某一个指标而牺牲整体效益，统筹规划、科学调度来实现项目整体最优解。这些原则一起成为全过程质量控制的理论基础，指导监理工作科学开展。

2 建筑工程各阶段监理质量控制要点

2.1 勘察设计阶段的源头控制

勘察设计是保证工程质量的基础，勘察设计成果的好坏直接影响到建筑物的安全性、适用性和耐久性。监理介入该阶段的第一项工作在于加强勘察成果的审核，主要对地质数据的真实性、准确性、适用性进行核查，防止由于地质条件判断错误造成基础设计缺陷或者施工重大变更。还需积极参与设计图纸会审和设

作者简介：曲翔宇（1990-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

计优化工作，从可施工性、经济性和全生命周期维护的角度来审查设计文件的规范性和完整性，提前发现并消除设计冲突和错漏。利用价值工程分析和BIM正向设计技术，在设计源头上有效地规避质量通病，把质量隐患控制在最小的范围内，真正实现“质量源于设计”的核心理念[3]。

2.2 施工准备阶段的预控措施

施工准备阶段是质量控制的奠基期，关键在于建立严密的预控体系。施工组织设计审查是重中之重，必须对施工方案的技术可行性、质量保证措施落实情况、应急预案完备性进行严格审查，保证施工流程科学有序。进场材料、设备的管控要实行严格的报验制度，执行见证取样和平行检验程序，杜绝不合格材料进入施工现场，从源头上切断质量风险链。人员资质核查和技术交底制度的落实也不能忽略，必须对施工单位管理人员和特种作业人员的执业资格进行严格的审查，保证关键岗位人员具有相应的能力，通过多层次、全覆盖的技术交底，使作业人员充分理解设计意图和工艺标准，为后续施工打下坚实的基础。

2.3 施工实施过程的动态监管

施工实施过程是质量控制的重要环节，监理工作要对关键工序、隐蔽工程进行动态监管。严格执行三检制（自检、互检、专检），加强基础工程、钢筋绑扎、防水节点等重要部位的旁站监理，保证每一个工序都符合规范要求。现场巡视和平行检验要采用科学的检测手段，回弹仪检测混凝土强度、超声波探伤检测焊缝质量等，独立获取真实数据，及时发现并纠正施工偏差。就可能发生的质量事故而言，要创建规范化的上报、调查、处理和整改闭环体系，从而保证问题被彻底解决，避免同类问题再次出现。利用信息化手段实时采集施工数据，创建质量动态监控模型，从而达到对施工过程精准控制的目的。

2.4 竣工验收与保修阶段的收尾管理

竣工验收和保修阶段是质量控制的收尾工作，它同工程交付后的使用性能和社会评价有着直接联系。竣工预验收和正式验收要组织分部分项工程逐层验收，协助建设单位完成整体竣工验收备案，保证工程实体和档案资料双重合格。质量保修期内监理方要定期进行回访检查，督促施工单位履行保修责任，对出现的质量缺陷及时组织修复，形成质量闭环管理。该阶段还需总结分析，提炼出质量通病防治的经验，为以后的工程提供借鉴。通过创建质量终身责任制档案，确定各方主体责任，保证工程质量在全生命周期内可以追溯、可以问责。

3 提升建筑工程监理全过程质量控制水平的实践对策

3.1 构建全过程质量管理体系

创建科学严谨的全过程质量管理体系，首先要冲破传统监理阶段割裂的壁垒，创建起涵盖项目全生命周期的标准化作业指导书。这就要求监理单位由原来的只根据施工规范进行事后验收，转变为根据全生命周期的逻辑来制定前置性的策划方案，把质量控制的触角伸到投资决策和勘察设计环节。编制精细化的全过程监理作业指导手册，对各阶段工作界面、输入输出标准、关键控制节点做出明确的规定，保证设计变更、材料选型等跨阶段信息的无缝对接，防止由于信息断层造成质量隐患。在设计阶段加入施工可行性评价，竣工验收时再反向追踪到设计源头，从而创建起一个“策划先行、过程受控、结果闭环”的立体化结构，从根本上消除由于阶段脱节造成的管理真空[4]。

另外，推行“策划先行”模式是落实体系运行的主要手段，旨在用顶层设计来实现质量目标的动态预控。项目开始时，监理单位要主导编制有针对性的《全过程质量控制规划大纲》，根据工程特点找出可能存在的风险源，制定出不同的管控措施。该规划要确定各个参建方的责任范围，建立跨部门协调机制，保证设计、施工、采购等环节处在同样的标准之下共同推进。采用PDCA循环管理思想，把质量目标拆解成可以量化的阶段性指标，创建实时监测预警体系，一旦出现偏差马上启动纠偏程序。系统化模式提高了监理工作的主动性，也保证了工程质量在复杂环境中一直处在受控的状态，由原来的被动应对转变成为现在的主动治理。

3.2 强化监理队伍专业化建设

由于全过程质量控制的要求越来越高，传统的单一技能型人员已经不能满足需要，必须建立一个具有复合型知识结构的专业团队。当前存在的主要问题在于监理人员普遍缺少设计审查、造价控制和数字化管理的能力，造成前期不能及时发现缺陷，后期也无法统筹关系。因此必须建立系统的全员培训体系，重点加强人员在BIM技术、法律法规、合同管理、绿色建造等各方面的素质，鼓励考取多项执业资格。通过案例研讨、实操演练以及跨企业交流，推动知识共享，使监理人员熟练掌握地质勘察到竣工结算全过程的业务技能，成为懂技术、善管理的复合型人才[5]。

此外，建立科学的绩效考核和激励机制也是调动队伍内生动力的一种方式。应该抛弃只依靠考勤来管理的粗放式管理模式，建立以质量管控成效为评价导向的多元化评价体系。把关键工序一次合格率、质量事故零发生、设计优化贡献度等指标纳入考评，与薪酬待遇直接挂钩，对表现优异的骨干实行专项奖励或者荣誉表彰，营造出典型的氛围。另外，完善职业发展规划通道，打通技术与晋升的双向通道，提高人员的归属感和责任感，有效防止人才流失，打造一支稳定、高效、有高度责任心的现代化监理铁军，为全过程质量管理提供强有力的支撑。

3.3 推进智慧监理技术应用

数字化转型是推动监理工作提质增效的引擎，积极采用BIM技术是全过程质量可视化预控的重要手段。传统的模式依靠二维图纸和人工经验，不能直观地发现复杂的冲突，但是BIM技术可以在虚拟环境中全方位地模拟工程的设计，提前发现并解决几何冲突和施工难点。监理单位要主导创建基于BIM的全生命周期质量信息平台，将模型与进度、成本数据融合起来，实现从设计交底到实体施工的数字化映射。采用碰撞检查功能，可以消除绝大部分设计上的错误，在施工前就可完成；利用4D、5D模拟技术对重要工艺进行预演并加以优化资源配置，从而发挥出数字孪生技术在质量预控方面的作用。

除了BIM之外，物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）三者结合使用也是提高监管效率的一种方式。在施工现场设置智能传感器和高清监控，对混凝土温度、钢筋间距等主要参数进行实时采集和传输，建立全天候感知网络。依靠大数据平台对海量数据加以分析，利用AI算法创建预测模型，自动察觉到异常趋向并发出警报，使监理人员能专心于高风险环节的精确干预。利用区块链技术保证检测数据和验收记录的真实性、可信性，解决数据造假、追溯难的问题。由“人海战术”向“数据驱动”转变，使监理的智能化水平得到了极大的提高，给工程质量全生命周期可追溯提供强有力的支撑。

3.4 优化外部协同机制

全过程质量控制属于一项系统工程，仅靠监理孤军奋战是无法完成的，必须创建多方主体深度合作的外部协作机制。长期以来，由于各方面的信息孤岛和利益博弈，造成责任链条的断裂。因此，应该建立常态化的四方联席会议制度和信息共享平台，打破专业壁垒，实现设计意图和施工需求的实时互通。监理单位要发挥枢纽作用，组织设计单位到现场进行交底，协助施工单位优化方案，督促建设单位及时决策，形成设计引领、施工落实、监理监督、业主统筹的共管合力。通过确定各方的权责清单以及联合奖惩机制，使各方由“各自为政”转变为“命运共同体”，一起努力提高品质。

此外，推动行业信用体系建设是倒逼各方重视质量履约的制度保障。应把各方质量行为全部纳入建筑市场信用评价体系，创建“红黑名单”，对弄虚作假的予以联合惩戒，限制其招投标；对信誉好的予以政策倾斜。加强信用信息公开、社会监督，提高违约成本，使参建各方自觉履行主体责任，杜绝低价中标后偷工减料。探索建立工程质量保险和担保制度，引入第三方独立评估，分散风险，形成政府监管、行业自律、社会监督、市场调节共同参与的现代化质量治理新格局，为全过程质量控制的长效运行创造良好的环境。

4 结束语

建筑工程监理全过程质量控制属于复杂系统工程，涉及多个阶段、多种主体和技术，其效果与建筑行业的可持续发展以及群众的生命财产安全息息相关。当前，传统监理模式在复杂的工程环境和高标准要求下存在着不足，需要通过理念、技术和机制的创新来实现转型。全过程质量控制要求监理工作前后延伸，建立阶段间逻辑联系和数据流转机制，形成闭环管理。未来，BIM等先进技术的应用会使得智慧监理成为行业的趋势，可以准确预测并智能处理质量风险。行业标准、法规的完善为全过程监理提供制度保障，促使建筑行业向专业化、规范化、高端化发展。在“双碳”和城镇化的背景下，全过程质量控制更加重视绿色建造以及全生命周期成本的管理，促使建筑业高质量发展。只有依靠创新驱动、协同共治才能创建现代化工程质量治理体系，为强国建设作出贡献。

参考文献：

[1] 丁海涛.全过程管理在建筑工程管理中运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2026(07):52-54.
[2] 朱涛.建筑工程管理中的施工质量控制问题及解决措施探讨[J].居业,2026(02):171-173.
[3] 张明宇.建筑工程施工质量管理控制技术探讨[J].中国房地产业,2026(05):74-77.
[4] 韩相琴,马丽.建筑工程施工阶段质量控制要点与改进措施分析[J].中国房地产业,2026(04):186-189.
[5] 赵小非.建筑工程质量控制体系构建与实施研究[J].城市开发,2025(24):148-150.

智慧工地技术在建筑工程施工中的应用探析

李根龙

（安徽德邦建设有限公司，安徽 明光 239400）

摘 要 为解决传统建筑工程施工中安全防控被动、进度管控粗放、质量管控依赖经验及成本管控精度不足等问题，本文以智慧工地技术在建筑工程施工中的应用为研究对象，梳理其在施工安全、进度、质量、成本四大维度的应用现状，剖析技术应用碎片化与适配性不足、管理模式滞后与人员能力欠缺、资金人才资源保障薄弱等核心痛点，提出推动技术融合适配、创新管理模式机制、强化资源保障体系等优化策略，旨在推动施工模式从传统粗放向智能化、精细化、科学化转型，为提升建筑工程施工整体效能与质量水平提供参考。

关键词 智慧工地技术；建筑工程施工；BIM技术；施工质量管控；施工成本

中图分类号：TU71；TU17 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.032

0 引言

当前建筑行业正处于数字化转型与高质量发展的关键阶段，传统施工模式在安全防控、进度统筹、质量监管与成本控制等方面的短板日益凸显，已难以适配现代工程建设的高标准要求。智慧工地技术依托物联网、人工智能、大数据与BIM等新一代信息技术，为施工全流程赋能，成为破解行业发展瓶颈的重要路径。行业发展形势对施工的智能化、精细化、科学化水平提出了更高要求，推动智慧工地技术深度落地，既是建筑企业提升核心竞争力的现实需要，也是建筑行业实现绿色低碳与安全高效发展的必然选择。本文立足于工程实践需求，探析智慧工地技术在施工中的应用现状与现存问题，提出针对性优化策略，以期为相关人员提供参考。

1 智慧工地技术在建筑工程施工中的应用现状

1.1 施工安全中的技术应用

智慧工地技术可精准弥补传统建筑施工安全管理的固有短板，推动安全防控从被动应对风险转向主动预判、实时管控，全面提升防控的全面性与及时性。视频监控系统依托高清摄像头与全域覆盖布局，实现对施工现场各作业区域、关键工序的实时监管，可快速识别高空抛物、临边防护缺失等安全隐患，避免隐患累积引发安全事故。AI智能识别技术通过算法训练，能精准辨识未佩戴安全帽、违规动火、高空违规作业等违章行为，无需人工实时盯防即可完成自动预警，从源头降低人为操作引发的安全风险。智能安全帽集成定位、心率监测、声光报警等功能，可实时采集作业人员的位置信息与身体状态，一旦出现人员进入危险区域、身体指标异常等情况，就会立即触发报警并同步反馈至管理终端，为作业人员人身安全筑牢防护屏障。各类技术协同配合，构建起全方位、无死角的安全防控网络，切实提升建筑施工安全的智能化管控水平。

1.2 施工进度中的技术应用

智慧工地技术打破了传统进度管控的粗放模式，推动进度管控向精细化、动态化方向升级，有效提升进度管控的效率与精准度，保障施工项目按计划有序推进。BIM技术以三维可视化模型为核心，清晰呈现施工全流程的工序衔接、资源配置等细节，便于管理人员提前优化施工方案，合理规划各阶段施工进度，规避工序冲突、资源浪费等问题。进度管理系统可实时采集施工各环节的进度数据，自动对比计划进度与实际进度，精准识别进度偏差并及时发出预警，为管理人员调整施工计划、优化资源调配提供数据支撑。物联网技术通过对施工设备、作业人员的实时定位与状态监测，实现资源的动态调度；当某一工序出现人员短缺、设备故障时，能够快速调配相关资源补位，保障施工进度不受影响。智慧技术的应用使进度管控从传统的事后补救转变为事前规划、事中管控，切实提升施工进度管控的科学性与高效性。

作者简介：李根龙（1989-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

1.3 施工质量管控中的技术应用

智慧工地技术构建起覆盖施工全流程的质量监管体系，推动施工质量管控由经验驱动向科学驱动转型，提升管控的科学性与规范性，保障建筑工程质量达标。智能质量检测设备替代传统手工检测方式，可精准采集混凝土强度、钢筋间距、墙体平整度等关键施工参数，将数据偏差控制在合理区间，有效减少手工检测的主观偏差与漏检问题[1]。BIM 模型比对技术将施工实际数据与设计模型进行实时比对，可快速发现构件安装偏差、浇筑质量缺陷等问题，便于管理人员及时下达整改指令，防止质量问题扩大化，保障施工成果与设计要求高度一致。质量追溯系统借助物联网与大数据技术，记录施工原材料进场、工序施工、质量检测等全环节信息，实现施工质量的全程可追溯；一旦发生质量问题，能够快速定位问题源头、明确责任主体，强化各环节质量责任落实，推动施工质量管控水平持续提升。

1.4 施工成本中的技术应用

智慧工地技术推动施工成本管控向精细化、智能化方向升级，通过精准管控成本损耗、优化资源配置，有效降低施工成本，提升建筑工程项目的经济效益。智能计量装置可对施工过程中原材料用量、机械使用时长等进行精准统计，实时反馈材料消耗、机械损耗信息，规避传统人工计量存在的漏记、错记问题，减少原材料浪费与机械闲置损耗。成本管理系统整合施工各环节的成本信息，实时分析人工、材料、机械等成本构成的变动趋势，精准识别成本管控薄弱环节，为管理人员优化成本控制方案、调整资源配置提供可靠依据。物联网技术对施工设备的能耗进行实时监测，精准统计设备运行过程中的能耗数据，便于管理人员优化设备运行方案、合理安排设备使用时段，降低设备运营能耗成本。智慧技术的应用使成本管控贯穿施工全过程，实现成本的动态监控与精准调节，切实提升成本管控实效。

2 智慧工地技术在建筑工程施工应用中存在的问题

2.1 技术应用层面的问题

智慧工地技术在建筑工程施工中的应用存在碎片化、适配性不足等突出问题，导致技术价值未能充分发挥，难以实现对施工管理的全面赋能。各类智慧技术多为独立引进、单独应用，缺乏统一的技术接口与数据标准，视频监控系统、BIM 技术、进度管理系统等之间无法实现有效联动，形成相互割裂的信息孤岛，数据难以互通共享；管理人员需在多个系统间切换操作，管控效率大幅降低。部分智慧技术研发与施工现场实际需求脱节，适配性不足：部分高科技设备在复杂施工环境中易出现故障，部分系统功能过于繁杂，超出施工现场的实际使用需求，实用性大打折扣[2]。同时，技术应用深度不足，多数企业仅将智慧技术用于基础监测、数据采集层面，未能将其深度融入施工方案优化、风险预判、决策制定等核心环节，未能充分释放智慧技术的协同赋能价值，难以实现施工管理的全方位智能化升级。

2.2 管理模式与人员层面的问题

施工管理模式滞后、从业人员能力不足，严重制约智慧工地技术的应用实效，导致技术与施工管理融合度不高，难以充分发挥技术的赋能作用。传统建筑施工模式以层级化、粗放式管理为主要特征，流程繁琐、决策缓慢，无法匹配智慧技术的实时性、智能化特性；部分管理流程与智慧技术应用存在冲突，导致技术应用流于表面，无法真正发挥效用。从业人员对智慧技术的掌握程度不足，多数人员长期适应传统管理模式，对 BIM 技术、物联网、AI 智能识别等技术缺乏系统认知，难以熟练操作相关设备与系统，无法全面挖掘技术的应用价值，甚至出现因操作失误导致技术应用失效的问题[3]。智慧工地管理机制尚不健全，缺乏明确的岗位职责划分、操作规范与评价指标，未建立覆盖技术应用全过程的制度框架，导致智慧技术应用缺乏制度保障，难以实现规范化、常态化推进。

2.3 资源保障层面的问题

资金、人才与技术支撑不足，是制约智慧工地技术推广应用的核心障碍，导致多数建筑企业难以实现智慧技术的全面覆盖与深度应用。智慧工地建设需投入大量资金用于设备采购、系统搭建、技术引入，前期投入成本较高；部分建筑企业尤其是中小型企业受资金实力限制，投入力度不足，仅能引入少量基础智慧设备，无法构建完整的智慧管控体系，技术应用效果大打折扣。专业技术人才缺口较大，当前建筑行业缺乏既熟悉建筑施工管理，又掌握物联网、大数据、AI 等智慧技术的复合型人才；现有技术人员大多仅精通单一领域，无法满足智慧技术融合应用的需求，导致技术应用过程中出现的问题难以得到快速解决。技术服务支撑也不到位，设备供应商提供的运维服务响

应不及时、系统更新迭代缓慢，部分智慧设备出现故障后无法快速修复，影响技术应用的连续性，进一步制约了智慧技术的推广应用。

3 优化智慧工地技术在建筑工程施工中应用的策略

3.1 推动技术融合与优化适配

打破智慧技术应用的壁垒，提升技术与施工现场的适配性，推动各类技术协同发力，充分释放智慧技术的协同赋能价值，实现施工管理的智能化升级。

构建一体化智慧管控平台，统一技术接口与数据标准，整合视频监控、BIM技术、进度管理、成本管控等各类智慧技术与系统，实现数据互通共享；管理人员可通过单一平台完成全流程管控操作，提升管理效率。

结合施工现场的环境条件、工序特点、实际需求等，优化技术应用方案，剔除冗余功能，优化设备配置，选用适配性强、操作简便、故障率低的智慧技术与设备，提升技术应用的实用性，保障技术真正落地见效[4]。

深化技术应用深度，推动智慧技术贯穿施工方案优化、安全防控、进度管控、质量监管、成本控制等全流程，将技术应用与施工管理核心环节深度融合，充分挖掘技术应用价值，实现对施工管理的全方位、深层次赋能。

3.2 创新施工管理模式与机制

构建适配智慧技术应用的施工管理模式，完善配套管理机制，优化管理流程，提升技术应用实效，推动智慧技术与施工管理深度融合、协同发展。

优化施工管理流程，剔除传统管理模式中的冗余环节，简化决策流程，构建扁平化、高效率的管理架构，缩短决策与响应周期，确保智慧技术输出的实时数据能够快速转化为管理行动，提升管控的及时性与高效性。

建立健全智慧工地管理制度，明确各部门、各岗位在智慧技术应用中的职责分工，制定完善的设备操作规范、数据管理标准、考核评价指标等，使智慧技术应用有章可循、有据可依，实现规范化推进[5]。

强化考核激励，将智慧技术应用成效、数据运用能力、问题整改效率等纳入人员考核体系，通过考核倒逼从业人员提升智慧技术应用能力，主动推动技术落地，保障智慧技术应用取得实效，真正发挥赋能施工管理的作用。

3.3 强化资源保障体系建设

加大资金、人才与技术领域的支撑力度，构建完善的资源保障体系，为智慧工地技术的推广应用夯实基础，突破技术应用过程中的资源瓶颈。合理配置企业资金，提高智慧工地建设的资金投入占比，优先保障核心设备采购、一体化平台建设、技术升级等关键环节的资金需求；同时提升资金使用效率，避免资金不合理损耗，确保资金投入实现效益最大化。强化人才培养与引进，针对现有从业人员开展智慧技术专项培训，提升其技术操作水平与数据解读能力，使其能够熟练运用智慧技术开展管理工作；同时引进兼具施工管理经验与智慧技术能力的复合型人才，填补人才缺口，组建专业的技术运维队伍。健全技术服务支撑体系，与设备供应商、科研机构建立长期稳定的合作机制，制定快速响应的设备运维方案，及时解决设备故障、系统运行不畅等问题；同时推动技术迭代升级，结合施工需求与行业技术发展趋势，适时更新智慧设备与系统，保障技术应用的先进性与适用性。

4 结束语

智慧工地技术作为建筑工程施工数字化转型的核心载体，其应用深度与广度直接决定行业智能化升级的进程。本文围绕技术落地全流程，从技术融合、模式创新、资源保障三大维度梳理优化路径，印证了智慧技术与施工管理深度融合的可行性与必要性。在实践中，需摒弃“重设备轻应用、重建设轻运维”的误区，以一体化平台为纽带打通数据壁垒，以扁平化管理机制适配技术运行节奏，以复合型人才队伍与充足资金支撑技术落地，让智慧技术真正嵌入施工各环节。唯有如此，才能持续释放智慧工地的赋能价值，推动建筑工程施工实现质的飞跃，为行业高质量发展筑牢技术根基，助力建筑企业在行业竞争中占据主动地位。

参考文献：

[1] 庞青.浅谈智慧工地视角下建筑工程中BIM技术的创新应用[J].居业,2026(02):186-188.
[2] 刘雯.智慧工地系统在建筑工程中的运用研究[J].中国信息化,2025,28(10):130-132.
[3] 李伟娟.智能化工程技术在建筑工程中的应用[J].大众标准化,2023(21):143-145.
[4] 高珊珊.建筑工程中智慧工地系统的应用研究[J].信息记录材料,2022,23(01):140-142.
[5] 厉正坤.智慧工地系统在建筑工程中的应用[J].智能城市,2021,07(23):97-98.

高速公路隧道机械化施工下二次衬砌施工技术探析

姚顺治

（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 在隧道工程“机械化换人、智能化减人”的发展趋势下，全工序机械化配套施工已成为山区公路隧道建设的主流模式。二次衬砌作为隧道结构承载与防水体系的核心环节，其施工质量与开挖、支护等机械化工序的协同适配性直接决定隧道运营安全与使用寿命。本文以具体案例工程为依托，系统梳理了机械开挖模式下二次衬砌施工全流程协同管控要求与工序质量控制要点，分析了机械化施工中衬砌厚度不足、背后空洞、混凝土开裂等常见病害的成因，提出针对性防治措施，旨在为同类公路隧道机械化施工条件下的二次衬砌质量管控提供参考。

关键词 公路隧道；机械化施工；机械开挖；二次衬砌

中图分类号：U455.91 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.033

0 引言

随着我国西南山区高等级公路建设的快速推进，深埋长隧道已成为穿越复杂地形地质条件的关键构筑物。为提升隧道施工本质安全水平，破解传统劳动密集型施工工效低、安全风险高、质量管控难等痛点[1]，以双臂凿岩台车、智能二衬台车为核心的全工序机械化施工，已成为公路隧道建设的核心发展方向。二次衬砌作为隧道复合式衬砌的最终安全储备，是工程质量管控的核心环节[2]。在全机械化施工体系下，传统质量管控模式难以适配新的工序节奏与设备特性，易引发衬砌厚度不足、背后空洞等病害，威胁隧道运营安全。本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道工程，系统阐述机械开挖模式下二次衬砌施工的协同管控要求与质量控制要点。

1 工程概况

川汶高速 TJ9 标段有大店隧道、穆肃堡隧道两座全线控制性特长隧道，是标段施工管控的重点区段。大店隧道左线全长 6 749 m，右线全长 6 738 m，最大埋深 722 m；穆肃堡隧道左线全长 6 829 m，施工阶段配套 1# 施工支洞和 1 座施工斜井辅助掘进，隧道最大埋深达 1 168 m。两座隧道穿越地层均为Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩，局部穿越断层破碎带，存在岩溶裂隙水，属于微瓦斯隧道，施工过程中存在软岩大变形、涌水突泥、有害气体溢出等安全风险[3]。

项目严格按照四川省交通运输厅公路隧道机械钻爆法施工相关要求，以“机械化换人，智能化减人”建设为导向，推行全工序机械化配套施工模式。开挖、二次衬砌各工序均配备专用设备，二次衬砌采用 12 m 长全液压智能二衬台车，防排水工序配置自动铺挂台车，仰拱施工采用 24 m 自行式仰拱栈桥，可实现多工序平行作业，提高衬砌施工效率和成型质量，保证施工全过程标准化推进。

2 机械开挖模式下二次衬砌施工协同管控核心要求

2.1 机械开挖与衬砌施工的步距协同管控

针对双臂凿岩台车机械化开挖的工效特点，项目建立了开挖进尺与衬砌施工的动态联动机制，严格遵循《公路隧道机械钻爆法设计与施工指南》管控要求，结合围岩级别动态调整开挖循环进尺：Ⅴ级围岩开挖循环进尺不超过 2 榀钢架间距，Ⅳ级围岩不超过 3 榀钢架间距，同步控制仰拱单次开挖长度不超过 6 m，确保仰拱初支快速封闭成环，为二次衬砌施工创造前置条件[4]。

针对软岩大变形段，以机械开挖过程中的监控量测数据为核心，确定二次衬砌合理施作时机。通过自动化监测系统实时采集围岩收敛、拱顶下沉数据，当围岩收敛速率小于 0.2 mm/d、变形趋于稳定后，方可启动二次衬砌施工；针对断层破碎带等不良地质段，需缩短开挖进尺、加强初期支护，必要时提前施作二

作者简介：姚顺治（1988-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁。

次衬砌，避免围岩持续变形引发衬砌结构开裂。同时，严格控制机械开挖超欠挖，采用凿岩台车精准控制开挖轮廓，拱部180°范围平均超挖值控制在25 cm以内，最大超挖值不大于35 cm，从源头避免因欠挖侵占衬砌断面、超挖回填不密实引发的衬砌厚度不足、背后空洞等病害。

2.2 全工序机械化作业的流水衔接管控

依托全机械化配套设备优势，构建“开挖—支护—仰拱—防水—衬砌”五步流水作业体系，明确各工序机械化作业的时间节点与衔接要求。自行式仰拱栈桥实现仰拱施工与掌子面机械开挖的平行作业，确保仰拱封闭成环与掌子面开挖同步推进；防水板自动铺挂台车单循环作业时间控制在8 h以内，与仰拱施工形成紧密衔接；智能二衬台车单循环浇筑、养护周期与开挖支护循环进尺精准匹配，避免因工序脱节导致衬砌安全步距超标，同时杜绝为追赶开挖进度压缩衬砌施工养护时间的违规作业。

针对微瓦斯隧道施工特点，机械化作业各工序严格执行洞内动火审批、瓦斯浓度实时监测制度，衬砌施工电气设备全部采用矿用防爆型，防水板焊接、钢筋焊接等动火作业与掌子面机械开挖实施错峰作业，瓦斯浓度超标时立即停止所有作业、撤离人员，确保衬砌施工全过程安全可控。

3 机械化配套下二次衬砌核心工序质量控制要点

3.1 防水板机械化铺挂施工质量控制

防水板施工是二次衬砌防水体系的核心环节，采用自动铺挂台车替代传统人工铺挂，重点管控基面处理、土工布安装、防水板铺挂与焊接四大关键工序。衬砌施工前，采用三维激光扫描仪对初期支护断面进行全断面检测，欠挖部位彻底处理，切除锚杆头、钢筋露头，对基面凹凸部位采用喷射混凝土找平，确保基面平整度满足D/L＜1/6的规范要求。

采用台车自动铺挂系统实现土工布与防水板的机械化展铺，土工布采用射钉加热熔垫固定，热熔垫片拱部间距0.5 m～0.7 m，边墙间距0.7 m～1.0 m；防水板通过台车液压顶升系统紧贴土工布，采用超声波焊机完成热熔垫圈与防水板的焊接，相邻防水板搭接宽度不小于100 mm，采用自动爬焊机进行双缝焊接。焊接完成后采用充气法进行焊缝密实性检测，充气压力0.25 MPa，保持15 min后压力下降小于10%为合格，杜绝焊缝漏焊、假焊引发的渗漏水病害。

3.2 钢筋工程机械化施工质量控制

钢筋采用洞外标准化加工厂集中数控加工，通过数控弯箍机、钢筋切断机实现钢筋下料、弯制成型的机械化作业，加工精度偏差控制在±5 mm以内，严禁人工热弯作业。钢筋运输至现场后，采用台车作业平台辅助安装，遵循“先架立筋、后主筋、再分布筋”的顺序，环向主筋搭接位置错开布置，相邻主筋搭接错开距离不小于1 m。

采用定制定位卡具、“L”型限位钢筋精准控制钢筋层距与间距，纵环向偏差不大于10 mm；采用梅花形布置的定制混凝土垫块控制钢筋保护层厚度，垫块间距不大于1.5 m。钢筋焊接作业严格执行动火审批制度，设置接火盘与防火棉，焊接完成后全面检查防水板完整性，发现破损及时修补。

3.3 智能二衬台车安装与定位质量控制

台车进场前完成厂内试拼与刚度校验，进场后参照《公路隧道施工技术规范》完成整机验收，重点检查模板平整度、接缝错台、液压系统、行走系统与附着式振捣器性能，验收合格后方可投入使用。台车累计完成1.2 km衬砌施工后，由厂家专业团队完成全面检查、校正与模板抛光，确保设备性能持续稳定。

台车就位前，完成上循环二衬环向施工缝凿毛、高压水清洗与界面剂涂抹，采用专用卡具固定中埋式止水带，确保中心线与施工缝重合。采用全站仪与激光定位装置精准控制台车中线与高程，衬砌断面轮廓较设计内轮廓增加50 mm～80 mm的预留变形量，抵消施工过程中的结构变形。台车就位后，按“先底部、后两侧、再拱部”的顺序对称紧固丝杆千斤顶，松开液压油缸，避免混凝土浇筑过程中油缸受力失稳；轨道基面坚实平整，两侧轨道设置夹轨器与防溜块，斜井段额外增设手拉葫芦限位。就位完成后逐一检查振捣窗、浇筑孔、注浆孔，确保启闭灵活、密封严密。

3.4 混凝土机械化浇筑与养护质量控制

混凝土采用拌和站集中拌制，罐车运输至现场，通过混凝土输送泵配合智能二衬台车分仓布料系统泵送入模，入模温度严格控制在5 ℃～32 ℃。浇筑过程严格执行“自下而上、左右对称、分层逐窗”的原则，从两侧边墙向拱顶依次浇筑，分层厚度不大于40 cm，左右两侧混凝土浇筑面高差不大于1.0 m，避免单侧浇筑导致台车偏压移位。

混凝土振捣采用插入式振捣器与台车附着式振捣器结合的方式，插入式振捣棒移动间距不大于作用半

径的 1.5 倍，振捣时间控制在 10 s ～ 30 s，以混凝土不再沉落、不出现气泡、表面泛浆为度，严禁漏振、过振；振捣窗浇筑至下沿 0.2 m 时及时关闭，严禁从振捣窗跨层下料。拱顶浇筑采用从低到高逐孔缓慢压注的方式，适当减缓泵送速度，每个浇筑孔压注不少于 3 次，同步启动附着式振捣器辅助振捣，浇筑完成后在混凝土初凝前完成拱顶带模注浆，通过预埋注浆管充填拱顶背后空隙，确保拱顶衬砌密实[5]。

混凝土养护采用专用喷淋养护台车，在终凝 2 h 后启动喷淋养护，洞口 100 m 段养护期不少于 14 d，洞身段养护期不少于 7 d，洞内相对湿度大于 90% 时可停止洒水养护，低温环境采取保温保湿措施。

4 机械化施工中二次衬砌常见质量通病与防治措施

结合项目机械化施工实践，梳理出二次衬砌施工五大类常见质量通病，其核心成因与针对性防治措施详见表 1。

表 1 机械化施工下二次衬砌常见质量通病、成因及防治措施

序号	质量通病	核心成因	针对性防治措施
1	衬砌厚度不足	1. 机械开挖轮廓控制不当，欠挖处理不到位；2. 台车定位偏差，预留变形量不足；3. 初期支护变形侵占衬砌断面	1. 严控凿岩台车钻孔精度，衬砌前全断面扫描，彻底处理欠挖；2. 精准复核台车定位，预留合理变形量；3. 初支变形段先注浆加固，再开展衬砌施工
2	拱顶背后空洞	1. 拱顶浇筑顺序不当，内部空气无法排出；2. 混凝土和易性差，自流填充性不足；3. 带模注浆工艺落实不到位	1. 优化拱顶混凝土配合比，提升和易性；2. 采用逐孔压注浇筑工艺，设置排气管与溢浆孔；3. 严格落实混凝土初凝前拱顶带模注浆
3	混凝土开裂	1. 水泥水化热温差大，养护不到位；2. 围岩变形未稳定即施作二衬；3. 拆模时间过早，混凝土强度不足；4. 单侧浇筑导致台车偏压变形	1. 优化配合比降低水化热，严格执行养护制度；2. 以监控量测数据确定二衬施作时机；3. 严控拆模强度，非承重结构强度不低于 5 MPa；4. 严格执行左右对称浇筑工艺，杜绝单侧偏压
4	施工缝渗漏水	1. 止水带安装偏位、固定不牢；2. 施工缝凿毛、清洗不到位；3. 新旧混凝土结合不密实	1. 采用专用卡具固定止水带，确保位置居中顺直；2. 施工缝严格凿毛清渣，浇筑前涂刷界面剂；3. 优化接缝处浇筑工艺，加强振捣密实度
5	外观蜂窝麻面、错台	1. 混凝土振捣不当，漏振、过振；2. 模板清理、脱模剂涂刷不到位；3. 模板接缝密封不严，出现漏浆；4. 台车模板刚度不足，浇筑变形	1. 定人定岗负责振捣，明确作业标准；2. 模板使用前彻底打磨，均匀涂刷脱模剂；3. 模板接缝用密封条密封，错台控制在 1 mm 以内；4. 定期校验台车模板刚度，紧固连接件

为实现衬砌施工质量闭环管控，项目建立“班组自检、项目部复检、监理终检”的三检制度，明确各岗位质量职责，对防水板焊接、钢筋安装、混凝土浇筑等关键工序实行质检工程师全程旁站。二次衬砌施工完成后，采用地质雷达沿隧道纵向 7 条测线开展背部密实度与厚度检测，对检测发现的缺陷制定专项处理方案，严禁擅自修补，确保衬砌结构质量满足设计与规范要求。

5 结束语

本文依托川汶高速大店隧道、穆肃堡隧道全工序机械化施工实践，系统梳理了机械开挖模式下二次衬砌施工的协同管控要求，明确了防水板机械化铺挂、钢筋数控加工、智能台车定位、混凝土机械化浇筑全流程的质量控制技术要点，分析了机械化施工中常见质量病害的成因并提出了针对性防治措施。未来需进一步研究智能化监测技术与衬砌施工的实时联动体系，探索隧道衬砌全生命周期智能化质量管控模式，持续提升公路隧道二次衬砌施工质量与结构长期安全性。

参考文献：

[1] 王德呈.隧道施工过程质量控制与工艺优化：以隧道二次衬砌施工为例 [J].中国品牌与防伪,2025(04):116-118.
[2] 王法雁,袁斌,孟小军,等.隧道二次衬砌混凝土施工质量控制措施研究 [J].工程建设与设计,2024(22):226-228.
[3] 赵一轩.公路隧道二衬施工质量控制研究 [J].交通科技与管理,2024,05(14):173-175.
[4] 林鑫隆.高速公路隧道施工技术与质量控制研究 [J].散装水泥,2024(03):136-138.
[5] 牟金猛.高速铁路隧道二次衬砌质量控制及缺陷预防施工技术研究 [J].居业,2024(05):80-82.

水利工程加固项目施工质量管理关键环节与优化策略

李荣北，王涌潭

（山东海川工程技术有限公司，山东 德州 253000）

摘 要 本文以德州杨庄水库小（1）型水利加固工程为研究对象，聚焦坝体防渗修复、闸涵结构检修、土方填筑压实等关键施工工序，系统剖析现场质量管控中存在的实际痛点与薄弱环节。基于工程实际工况，从技术管控、检测监管、流程闭环三个维度制定针对性优化对策，并通过全周期跟踪验证质量管控的落地成效，最终形成可复制、可推广的经验体系，以期为国内同类型小型水库加固工程的质量管控实施提供实践参考。

关键词 水利工程加固；水库质量管控；防渗体系施工

中图分类号：TV698.2 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.034

0 引言

小型水利水库是区域供水保障、雨洪资源调蓄的核心基础设施，长期运行过程中易出现防渗体系破损、坝体结构密实度不足等病害，加固施工质量直接决定工程长效运行稳定性与安全性。当前，部分水利加固项目存在质量管控环节割裂、隐患处置不彻底等问题，本文以德州杨庄水库小（1）型水利加固项目为研究载体，剖析质量管控关键节点，探索适配的管控对策。

1 案例简介

1.1 工程基本概况

德州市中心城区及农业食品创新产业园长期面临供水缺口，雨洪资源利用率偏低，杨庄水库作为区域核心供水保障工程，承担马颊河雨洪引蓄与常态、应急供水双重职能，工程核心参数详见表1。该工程为小（1）型Ⅳ等水利工程，采用砂壤土均质坝+全库铺塑防渗设计，质量检测二标覆盖围坝中段、各类闸涵、渠道改道及电源工程，防渗失效防控与坝体结构安全是本次加固的核心管控导向。

表1 德州市杨庄水库工程核心技术参数

工程指标	参数值	功能备注
总库容	920万m^3	雨洪调蓄总容量
有效供水库容	756万m^3	常规供水有效库容
围坝全长	4 160 m	坝体主体防护范围
日均常规供水	4.4万m^3	日常供水保障规模

1.2 工程加固核心任务

围坝坝体填筑密实度提升、全库防渗体系修复优化同步实施，泄水闸、马颊河引水闸结构检修与精度调校有序推进，同时完成截碱沟疏浚、平陵河改道开挖及引水渠道隐患治理，并且兼顾供水管道穿堤衔接段质量补强，全方位消除工程渗漏、结构失稳隐患，保障水库供水与调蓄功能长效稳定[1]。

1.3 项目管理基础条件

项目依托具备CMA资质的专业水利检测机构实施质量管控，配置专职检测、技术复核人员组建专项专班，同时配齐土工试验、混凝土检测、无损探伤等全套仪器设备，所有计量器具定期完成检定校准。此外，建立现场驻检机制，为全周期质量检测与管控筑牢硬件、人员双重保障。

2 水利工程加固项目施工质量管理关键环节及对策

2.1 防渗工程质量管控

2.1.1 防渗技术体系构建

杨庄水库加固工程搭建“水平铺塑+截渗沟+坝体压实”三维防渗体系，完全适配砂壤土均质坝的土质特性与全库防渗修复需求，针对性破解原有防渗层破损、坝体渗流通道发育的核心隐患。水平铺塑环节采用库区全域两布两膜复合防渗结构，膜下铺设5 cm粗砂支持层分散上部荷载应力，膜上设置0.95 m厚覆土保护层阻隔施工外力与环境侵蚀，同时搭配坝体分层碾压密实工艺，封堵土料内部孔隙阻断地下渗流路

作者简介：李荣北（1991-），男，本科，工程师，研究方向：水利水电工程。

径。截渗沟沿坝基外围全线布设，同步疏浚原有老化截碱沟，结合平陵河改道开挖工序疏导周边地下水与地表径流，有效降低坝基渗压荷载。与此同时，针对围坝桩号 1+400-3+480 核心加固段，优化防渗结构与坝体填筑的衔接工艺，细化结合部位密封处理措施，彻底消除渗流死角，整套体系兼顾防渗可靠性与坝体结构稳定性，契合小（1）型水库长期安全运行的工况要求[2]。

2.1.2 防渗材料质量管控

防渗材料入场前执行全指标核验流程，从源头杜绝不合格材料投入现场施工。土工布重点核查单位面积质量、断裂强度、渗透系数等核心指标，严控单位面积质量不低于 300 g/cm^2,纵横向断裂强度≥10.0 kN/m，垂直渗透系数锁定在 1×10^{-1} cm/s ～ 1×10^{-3} cm/s 区间内；土工膜选用全新料 PE 材质，密度≥ 900 kg/m^3，破坏拉应力、断裂伸长率、渗透系数分别把控在 12 MPa、300%、10^{-11} cm/s 以上，同步核查材料出厂合格证、性能检测报告与第三方复检资料，重点排查批次性能一致性与材质稳定性。另外，橡胶止水带、复合防渗垫层等配套材料，严格参照《高分子防水材料 第 2 部分：止水带》（GB/T 18173.2-2014）规范开展检测，对拉伸强度、扯断伸长率、撕裂强度等关键参数逐批次抽检，出现性能偏差或参数不达标情况立即责令清场退场，全程筑牢防渗材料质量防线[3]。

2.1.3 防渗施工工艺管控

膜体焊接施工采用双焊缝热熔工艺，预热温度精准锁定 300 ℃～350 ℃，设备行走速度控制在 3 m/min～4 m/min，焊接搭接宽度保持 10 cm 标准值，焊缝间预留 1 cm 空腔用于后续气密性检测，焊接完成后开展气压试验，加压至 0.15 MPa ～ 0.2 MPa 并保持 1 min ～ 5 min，压力无明显衰减且无渗漏判定为合格。坝体压实环节选用羊足碾分层碾压作业，筑坝土料优先采用库区②层砂壤土与③层裂隙黏土，砂壤土压实度不低于 0.96，裂隙黏土严控最优含水量 25% 左右，分层填筑厚度不大于 0.3 m，坝基底部薄弱区域采用小型机械薄层碾压，分层厚度压缩至 0.15 m 以内，土料含水率浮动范围严格控制在最优值 -1% ～ +3%。截渗沟施工精准把控开挖断面尺寸与边坡坡度，沟底整平压实后铺设防渗垫层，同时做好沟体与坝基、闸涵结构的衔接密封处理，并且全程跟踪施工工艺参数，及时纠偏违规操作行为，保障防渗施工工艺落地达标。

2.2 工程实体质量检测管控

2.2.1 检测项目与频率管控

结合杨庄水库加固工程现场施工节奏与分部工程特性，实体检测项目与频次不搞一刀切，而是贴合坝体、防渗、混凝土、金属结构四大核心板块做动态适配。土方填筑环节紧盯压实度核心指标，按每 2 000 m^3 填筑量取样 1 组，堤防段每 2 000 m 布设 1 个检测断面，单层碾压完成后不少于 3 个测点同步核验，遇到雨季土料含水率波动时，还会适当加密抽检频次，规避压实度不达标隐患。混凝土工程按构件重要性分级管控，闸涵、启闭机房等关键部位每个构件留置 1 组标准抗压试块，拌和物坍落度每班次实测 2 次，抗渗、抗冻性能按单位工程同强度等级统一抽检 1 组；护坡砂石垫层每 500 延米设 1 处检测点，土工织物按铺设面积每 20 万 m^2 抽取 3 组样品，金属结构焊缝除按不低于 10% 比例抽检外，受力关键焊缝追加全项核查。原材料进场后逐批次、分规格核验，不同直径、型号的钢筋单独抽检，水泥、骨料同步核对出厂复检报告，全程不留检测盲区[4]。

2.2.2 检测方法与技术规范

现场检测采用无损筛查与试验室核验相结合的方式，兼顾检测效率与数据精准度，全程贴合现行水利规范落地执行。土方压实度检测区分土质类型选用对应方法，黏土用环刀法取样，砾质土换用挖坑灌砂法，检测前先清理测点浮土、校准仪器，减少外界因素干扰。混凝土强度先通过回弹法做现场初步判定，回弹值异常或存在外观缺陷的部位，及时采用钻孔取芯法做复核验证，钢筋位置、保护层厚度用磁感仪定点测量，同一测点反复核验 3 次取均值。水泥土搅拌桩借助探地雷达、高密度电法排查桩体连续性，搭配钻孔取芯核验桩长、桩身强度与均匀性；土工膜焊接质量以气压检测为主，焊缝空腔加压至标准值后稳压观测，人工排查渗漏隐患；金属结构焊缝采用超声探伤仪逐段检测，杜绝内部暗伤。所有操作严格遵循《水利工程质量检测技术规程》（SL 734-2016）、《水工混凝土施工规范》（SL 677-2014）等规范，检测前逐一核查仪器检定状态，确保流程合规、数据可信。

2.2.3 检测数据与结果管控

检测数据实行现场手写记录、双人交叉复核、逐级签字确认的闭环流程，原始数据同步留存纸质台账与现场影像资料，杜绝事后补记、数据篡改等问题。检测结果当场反馈给施工、监理、建设三方，不合格项明确标注问题点位、整改时限与技术标准，原材料出现不合格情况立即启动加倍复检流程，复检仍不达标则强制清场更换。工序施工出现质量缺陷时，要求施工方制定专项整改方案，细化处置措施与技术要求，整改完成后检测人员全程跟踪复检，各项指标达标后

方可推进下道工序。此外，按分部工程建立分类检测台账，详细记录检测时间、测点位置、实测数据、整改情况等信息，所有资料同步归档，实现检测全过程可追溯、问题隐患可核查，避免小缺陷演变成质量隐患，切实守住工程实体质量底线。

2.3 全流程质量管理保障

2.3.1 质量管理体系构建

贴合杨庄水库加固工序零散、隐蔽点位多、交叉作业频繁的现场特点，构建项目法人统筹、监理旁站管控、施工班组落地、第三方检测核验的四级质量管理体系，不搞空泛的层级划分，而是把质量责任细化到每个岗位、每道工序，全程坚守检测独立性、管控闭环性两大核心原则。项目法人牵头组建质量管理专班，每周组织召开质量例会，统筹协调质量、进度与安全管控的衔接冲突，牵头审定重大质量问题整改方案；监理单位实行24小时旁站管控，针对围坝填筑、土工膜焊接等关键工序，建立巡检台账与问题销号表，实时核查施工操作与设计要求的契合度；施工单位明确各班组质量责任人，落实岗前技术交底与班中质量自查，确保每道工序符合施工规范；第三方检测人员驻场开展独立检测，严格按规范取样核验，不参与施工方质量干预，杜绝违规检测、简化流程等问题。同步落实施工班组自检、班组间互检、专职质检员专检的三检制，针对坝基清理、防渗层铺设、泄水闸基础处理等隐蔽工程，必须经建设单位、监理单位、施工单位三方现场实测核验、签字确认后，方可推进下道工序[5]。

2.3.2 人员与设备保障管控

检测人员需持有水利工程质量检测执业资格证书，上岗前开展围坝填筑、防渗施工、闸涵检修等专项技术培训，熟练掌握检测仪器操作、数据采集与处理流程，定期开展技能考核确保实操能力达标。特种作业人员实行持证上岗制度，定期开展技能复核与安全技术交底，保障起重、焊接、电工等岗位操作合规。检测仪器设备实行定期检定校准，土工试验、无损探伤、渗流检测等设备每季度核查精度，计量器具统一送检至具备资质的机构，不合格设备立即停用更换。另外，合理调配现场检测设备资源，建立设备使用、维护、台账管理制度，保障各检测环节仪器适配、数据精准可靠。

2.3.3 质量问题闭环处置

建立质量问题发现—通报—整改—复检—归档的全流程闭环机制，现场巡检、检测过程中发现的质量隐患，当场下达整改通知书，明确整改责任人、技术标准与完成时限。施工单位按要求落实整改后，提交书面复检申请，检测机构开展全覆盖复核检测，复核达标后签署验收意见，未达标项责令返工处置并重新报验。同时，所有质量问题、整改措施、复检结果均纳入工程质量档案，详细记录处置全过程与关键数据，并且定期开展质量隐患复盘工作，总结管控短板与优化方向，调整后续施工管控措施，杜绝同类质量问题重复出现。

3 项目施工质量管理成效

通过全环节精准管控与闭环处置，杨庄水库加固工程各项质量指标均满足设计与规范要求。围坝填筑压实度、防渗膜焊接合格率、混凝土强度合格率均达到100%，坝体渗流压力、表面变形监测数据始终处于安全阈值范围内，金属结构安装精度、机电设备运行参数完全契合设计标准。与此同时，基坑、高支模等危大工程管控全程零安全事故，质量隐患整改闭环率100%，检测数据真实完整、技术资料归档规范有序，彻底解决了水库原有防渗破损、坝体密实度不足、闸涵精度偏差等病害，大幅提升了水库雨洪调蓄与城乡供水保障能力。

4 结束语

本文依托德州杨庄水库小（1）型水利加固工程实践，基于坝体防渗修复、闸涵结构检修、土方填筑压实等核心施工工序的现场需求，搭建了防渗施工、实体检测、全流程保障协同发力的质量管控框架，通过工程全周期的落地应用，验证了分层管控、闭环处置模式的实操价值。现阶段管控工作仍存在现场动态监管精度不足、细微隐患预判能力薄弱的局限。未来，研究应重点融合物联网、大数据等智慧监测技术，针对不同施工工序细化工艺管控细则，构建更具前瞻性、精准性的质量管控体系，为同类型小型水库加固工程的质量管控提供更全面的技术支撑。

参考文献：

[1] 郑轲. 水利工程堤坝加固施工技术及管理的策略分析[J]. 水上安全,2025(01):130-132.
[2] 王靖. 水利工程堤围加固施工技术及管理要点研究[J]. 水上安全,2025(21):161-163.
[3] 陈小平. 水利工程中水库加固工程的施工质量管理措施[J]. 工程建设与技术,2024,02(10):27-31.
[4] 张吉刚. 水利工程中小型水库除险加固施工管理分析[J]. 数字农业与智能农机,2023(01):58-60.
[5] 刘艳珍. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术应用及质量控制[J]. 珠江水运,2021(15):53-54.

绿色施工技术在水利工程中的推广实践

王聚超，李艳红

（费县水利资源开发服务中心，山东 临沂 273400）

摘 要 在全球可持续发展与“双碳”目标背景下，水利工程建设模式的绿色转型日益迫切。水利工程绿色施工技术的推广实践聚焦“四节一环保”核心理念，旨在通过水资源精细化保护、土地全周期修复及废弃物资源化利用等系统性技术与管理创新，最大限度地减少施工活动对生态环境的负面影响。本文深入剖析了当前推广面临的技术、经济与管理障碍，并针对性地提出了完善政策驱动、强化技术融合、培育绿色文化等实施路径，以期为推动水利行业高质量发展与生态环境协同共生提供参考。

关键词 绿色施工；水利工程；节能减排；可持续发展

中图分类号：TV52 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.035

0 引言

水利工程作为国之重器，不仅肩负着维护水安全的责任，而且大规模建设也会给当地生态环境带来很大负担，传统的粗放式施工方式已经不符合当下社会对生态文明建设的要求，推行绿色施工技术的应用势在必行。绿色施工不是一项单独的技术，它是包括规划、建设及恢复整个过程的一个集节约资源和保护环境为一体的整体性生态保护思想的体现。基于此，研究绿色施工在水利工程中的应用现状及其存在的问题和解决方案十分必要。

1 绿色施工技术的核心内涵

绿色施工技术的本质是在保证建设工程质量安全的基础上，依靠合理的施工计划以及全生命周期精细化管控，最大限度降低工程施工活动对资源以及自然环境所带来的不利影响，其本质思想就是实现“四节一环保”，也就是在项目建设过程中落实好节能、节地、节水、节材以及环保工作。“四节一环保”不是简单地采用一些环保装置设备的问题，而是一个集技术创新、管理创新及理念变化于一体的综合性项目。也就是说，必须从项目开工前就开始进行绿色规划，有效利用空间，尽量避免不必要的生态环境破坏。在建设阶段，大力推广使用节电机械、循环使用施工水，实行建筑垃圾分类处理及循环再生等举措，并有效减少施工期产生的扬尘、噪声及固体废弃物污染排放量，在完工之后使临时占地得到绿化复垦，尽可能把项目给周围环境带来的负面影响降到最小限度来达到项目建设与生态环境协调发展的目的，协调经济利益、社会效应及环境保护的关系[1]。

2 水利工程中绿色施工技术的具体实践应用

2.1 水资源的精细化保护与高效循环利用

水利工程就是水资源管理者，在建设的过程中对于水资源的保护和合理使用更是绿色施工的第一要务。这就需要施工单位彻底抛弃“大水漫灌”式的放任态度，建立一条完整封闭式的全过程精细化水资源管理系统。实际运用中要从源头上抓起，在开始施工前先对现场进行全面检测，并采用导排管、截流槽等措施把施工区与周围自然水域完全隔开，避免石油、泥土等有害物质流入河道之中。同时，施工生产和生活污水排放是重点环节，实际中大量使用便携式一体化污水处理设施，针对混凝土搅拌站和车辆清洗过程中的污水开展三级沉淀、混凝、过滤等一系列措施，使处理过的污水能够达到可直接利用的标准并应用于施工现场抑尘作业或者植被浇灌、机械设备清理等方面，大幅度节约了新鲜水资源。而自然降水则通过围挡、硬化区域顶部和四周设置集雨设施，将收集起来的雨水存放在集水池内，用来解决施工过程中的非饮用水需要。

2.2 施工场地的生态化设计与全周期土地保护

水电工程规模巨大，施工过程中对地表植被和土壤的影响程度也非常严重，所以对土地的爱护以及保护一直贯穿整个绿色施工行为的过程之中。在空间方面，施工便道、料场、预制区等各种临时用房布置都不能随心所欲，而是要尽量做到紧凑、节约使用现有

作者简介：王聚超（1992-），男，本科，助理工程师，研究方向：水利工程。

闲置废地或者今后要使用的土地，而且尽可能地选择可以周转使用的一次性的、移动式的临时建筑物来减少对原有地形地貌的占用和损伤。需要注意的是，在表层土保护工程开始之初就需组织相关团队，对施工范围内的富有肥力的表层熟土进行系统的挖掘、整理、保存，并加以保养，在施工完成以后再用作边坡绿化、场地复垦，这样就可以留下宝贵的生态资源。在时间方面，土地保护是一个贯穿整个工程建设过程中的长期责任。在施工阶段，对于裸露出来的边坡以及裸露的土地要及时进行覆盖种植草皮，或者使用防尘网进行临时性的水土保持措施；在项目建设完成后则根据原有的生态环境基础，有针对性地进行临时占地的系统性生态恢复工作，如土壤回填、植被建设等一系列措施，甚至可以植入适合当地生存的动物栖息场所的因素，使土地尽可能回到原来的状态，达到从“借用地面”到“归还地面”的闭合循环[2]。

2.3 建筑废弃物的源头减量与资源化再生

水利工程项目建设会产出大量弃土、废弃混凝土、废旧钢筋等建筑垃圾，传统的外部运输堆放方式既占用了土地空间，也造成了资源损失。而在该领域中应用绿色施工技术的关键就是让建筑垃圾变为“城市矿山”，形成“减量—分类—再生”的资源闭环体系。源头减量是最基础的一环，利用精准化的建筑信息模型(BIM)技术做好工程量计取和材料下料，使用高强度、长寿命的绿色产品，以及使用标准化模板，装配化组件，从最初始的设计及管控上减少废料产出。不可避免的建筑垃圾必须进行严格的现场分类收集，才能达到资源化的目的，在实践中设置不同的密闭暂存坑或者堆放场所，对混凝土块、砖石、金属、木材等进行明确区分。分类后的建筑垃圾迎来了奇妙的“新生之旅”，挖掘出来的符合要求的土石可以直接用于填方或者做造型工作；废旧混凝土、砖头经过专门的破碎、筛选以后成为不同大小的再生骨料，可用于铺设施工便道、制备预制构件及用作路基材料；废钢筋能够被再次冶炼成新钢筋。整个过程大大减少了建筑垃圾的运输和处理的风险及费用支出，同时也节省了天然的砂石料资源的使用量。

3 绿色施工技术在水利工程中的推广路径

3.1 构建“激励与约束并重”的政策与市场驱动体系

实行绿色环保建筑措施，只靠企业自律远远不够，还应该建立一个强有力的外力推动机制，主要是政府“有形之手”和市场“无形之手”。在政策方面，首先要做的就是健全顶层规划，把绿色施工由倡议变成强制性要求，需要加快制定修订水工建设项目领域专门性的绿色施工标准以及相关的技术和评价方法，将其纳入设计、招标、施工、验收等各个过程中的强制性条目之中。其次是财务、税收、信贷等一系列经济手段的应用必不可少。例如：建立水利工程建设绿色施工专项资金或基金，对积极应用新型绿色高效节能环保技术、获得良好生态效益的工程项目予以直接资助。在税收方面，对购置并运用环保设备及可循环材料的企业按一定比例实行企业所得税减税或者免税政策。在金融业方面，鼓励“绿色信贷”，对符合条件的水利建设项目优先给予更低廉的贷款利息以及更加方便快捷的审批等。

强有力的约束机制必不可少，必须大幅提高生态环境违法成本，对工程建设中出现的资源浪费、污染超限等现象进行严惩重罚甚至取消其资质；把绿色施工成效作为水利建设市场竞争主体信用评级的重要内容，把评估结果同企业的招投标资格、资质评审升级、评优评先等紧密结合起来，使之成为影响公司持续经营发展的关键因素之一。通过实现一系列“胡萝卜加大棒”的组合拳，在业内树立起“绿色者获益、污染者受罚”的鲜明价值观，倒逼和引导企业把绿色转型由成本负担转变为竞争优势[3]。

3.2 推动“产学研用”深度融合的技术创新与转化链条

技术和经济效益是绿色建筑实现的前提条件。目前很多绿色技术难以推行的根本原因在于这些技术还不完善或者不配套或者投入太大。所以一定要解决好从技术创新到工程实践的“最后一公里”的问题，建立一个良好的技术创新生态圈。这需要政府、企业和高校以及科研院所等多方来共同推进：政府要起到组织、统筹和引导的作用，在水利工程绿色施工的主要“难点”方面，如深基坑节能环保型预抽水、高边坡绿色防护、大体积混凝土温度控制节能环保、工程内部对施工垃圾的资源化利用等领域设立国家和行业的重大科技专项课题，组织攻关。

作为科技创新主体的施工单位不能消极等待，应积极构建自身研发团队或者与科研院所等开展产学研合作，在实际项目中设立“试验田”，开展新工艺、新技术的应用示范。尤其是要加强技术创新成果推广应用制度建设。建立国家级的绿色施工技术成果库及共享平台，召开现场观摩会、研讨会，编辑通俗易懂的技术手册和工法图册，使技术人员和工人看得懂、学得会、用得上。以“需求推动研发，工程检验技术，

成熟技术定标引领推广”为主线，使创新成果不断释放其强大的绿色生产力。

3.3 培育“全员全过程”的绿色管理能力与企业文化

再好的政策和理念都需要由“人”去落实到具体项目的管理当中，所以加强整个行业的绿色管理软实力建设，培育企业的绿色文化，才是保证推广工作的基础。这条道路的关键之处在于要把绿色的理念渗透到企业的日常管理以及项目的运作当中。从管理体制来讲，要促使企业在公司层面上确定好绿色的发展方向并建立完整的包含总部到分公司再到项目部的三层级绿色管理组织体系以及各自的责任分工并配备相应的负责人进行管理。在项目上需克服传统的“只注重工期和成本投入而忽视环保效率”的观念，在整个项目施工过程中开展全过程的绿色施工过程控制。即要求从投标阶段起就制定有效的《绿色施工专项方案》，在现场施工使用智慧工地、BIM、物联网等信息技术手段对能耗、水耗、材料损耗及噪声、粉尘、排放等环境因素实施在线监测、统计与报警，达到精准化过程管控的目的[4]。

另外，制定与绿色指标联动的企业绩效奖罚机制，把节省下来的资源和创造出来的环境价值转化为工程项目团队的利益。人才教育及企业文化才是更有力的支持，要广泛而深入地做好行业教育，在项目经理、技术人员、劳务队长等相关责任人的岗位上，定期开展绿色施工理念和技术及管理方面的轮训，并作为其继续教育的必修课。在现场，要坚持不懈地开展培训、练兵、评选环保先进典型等活动，把“节约一滴水、一度电、一方料”这种理念渗透到每一个建设者的心中，让绿色施工由一个个硬性手段变成大家日常工作中的自觉行为乃至信仰。只有当绿色施工成为整个行业一致的文化、自觉的行为时，宣传工作任务才算完成[5]。

3.4 搭建“可视可比可溯”的智慧化监管与评价平台

倡导绿色建筑施工技术不仅要有前导的指导，还需要有一整套公正、公开、有效的后续监督评价体系。目前很多绿色建筑施工措施都有“做了没做不易分清、做得越多就越难确定多少、做到不到位又难以衡量好坏”等问题，导致管理考核以及奖惩都没有可靠的依据。因此，要依靠现代信息科技，建立统一行业的贯穿整个建设项目全过程的智能化管理体系。它主要的功能就是实现对建筑项目建设过程中环境影响以及资源消耗信息的自动记录、及时上传以及智能处理等。通过在项目建设现场重点部位大量安放物联网传感设备，实时监控水耗、电耗、大宗物资用量、扬尘、噪声、污水排放等主要参数并连续不断记录下来，保证所获取的数据是准确无误、连续不断的，然后将这些实时性的数据整合进一个数据中心平台，再与项目设定好的绿色施工的目标值以及行业的最优值或者地方的标准限额做对比分析，生成直观的图形和报警提示信息，从而让项目建设者、企业管理层、行政主管部门都了解这个项目的绿色施工达标情况[6]。此外，该平台还可以集成 BIM 等技术，在绿色施工过程数据基础上将其与三维模型绑定起来，做到从“做了什么”到“在哪里做，如何做”的全过程数字化回溯。通过上述平台积累的大量的、客观的数据资料能更合理、科学、严谨地制定水利工程绿色施工评级以及信用制度，使其能够更加直观、真实地反映出企业的管理水平，并以此作为前期所提出的政策鼓励、市场竞争以及技术示范的依据。智能化道路是为了使绿色施工由人工记载、经验总结的“软规定”，转变为有据可循的数据驱动下的“硬限制”“新标准”，进而从根本上保证绿色施工技措施的有效实施及不断发展。

4 结束语

有效的绿色施工技术推广应用是一项包含思想观念转变和技术革新以及管理系统升级与政策引领的复杂的系统工程。实践证明，只有建立“激励与约束相结合”的外在动力机制、打开“产学研用”联动的创新通道，融入整个水利行业的实践中，才是绿色施工发展的长远之路。未来，智能、标准、生态化程度的不断提高将给绿色施工带来更大的发展空间，从而更好地服务于人水协调发展美好蓝图的绘制。

参考文献：

[1] 周明旭.水利工程绿色施工技术与生态环境保护[J].人民黄河,2024,46(S01):60-61.
[2] 张焕爱.水利工程施工中的绿色施工技术与实践研究[J].散装水泥,2025(02):7-9.
[3] 薛金良.绿色施工理念在水利工程建设中的实践与创新[J].城市建设理论研究(电子版),2025(24):214-216.
[4] 刘万德.生态环保背景下水利水电工程施工中的绿色施工技术[J].区域治理,2025(22):109-111.
[5] 齐清,宋灿灿.“双碳”目标下水利工程建设的绿色施工技术与成本控制研究[J].建筑工人,2026,47(04):4-6.
[6] 李旭成,李继军,陈新民.水利工程绿色施工技术与生态环境保护研究[J].中国设备工程,2025(22):213-215.

变压器局部放电试验抗干扰技术应用研究

程 海，吴 滔，王城良

（丽水正阳电力建设有限公司，浙江 丽水 323000）

摘 要 现场试验环境冗杂，变压器局部放电试验是检验绝缘状态的核心手段，但各类电磁干扰常使得测量结果失准，严重地制约了绝缘状态判断的准确性，本文针对现场局部放电试验的抗干扰技术应用，分析了干扰信号的来源、时域特征及传播途径，提出了硬件滤波、时域开窗、脉冲极性鉴别及动态平衡回路的融合抗干扰技术工法。融合某220 kV变电站变压器现场试验的工程实践，详细地说明了技术工法的实行步骤以及参数配置，依托对比试验数据验证了技术应用效果，以期为现场变压器绝缘状态的准确判断提供技术参考。结果表明，本文提出的抗干扰技术工法能有效抑制背景噪声、周期性干扰及随机脉冲干扰，明显地增强了局部放电信号的信噪比以及检测灵敏度。

关键词 变压器；局部放电；试验抗干扰技术

中图分类号：TM41 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.036

0 引言

在电力系统运行可靠性方面，变压器是重点设备，运行可靠性直接关系到电网的安全稳定，局部放电是变压器绝缘劣化的重要征兆，凭借局部放电试验可在设备投运前及运行过程中有效发现绝缘缺陷。但是，现场试验环境一般伴随强烈的电磁干扰，此类干扰信号幅值可能远超真实的局部放电信号，使得测量系统无法准确捕获放电脉冲，甚至得出错误的绝缘状态判断。所以，如何有效抑制以及排除各类干扰，增加局部放电测量的准确性以及可靠性，成为现场试验中的核心技术难题。本文不追求理论模型的创新，而是立足于工程实践，从干扰的本质特征出发，整合出一套系统化、可操作性强的抗干扰技术工法。重点说明干扰信号的诊断识别方法、硬件与软件协同的抑制技术，并结合实际工程实例，详细说明上述技术应用的具体操作、参数选择及效果验证，以期为电力设备现场试验人员提供技术参考。

1 现场局部放电试验干扰信号的来源与特征分析

1.1 试验回路中连续周期性干扰的电磁耦合机理与频域特征

在现场变压器局部放电试验中，连续周期性干扰是最为常见的干扰类型之一，能量大多集中于特定的频带范围内，此类干扰大多来自试验现场周边的带电运行设备，尤其是同变电站内在运行状态的其他电压等级母线、断路器操作机构及高压输电线。此类设备在正常运行时会产生稳定的工频电磁场，基频为50 Hz，同样因设备本身的非线性特性及铁磁元件的磁滞效应，还会衍生出大量的高次谐波分量，谐波频率一般为100 Hz、150 Hz、200 Hz直至数千赫兹[1]。当试验回路，包含高压引线、变压器套管及测量阻抗，在此类变化的电磁场时，回路上会因电磁感应而耦合出对应频率的电压以及电流，形成连续的周期性干扰波形。从频域观点分析，该类干扰呈现出鲜明的离散谱线特征，谱线间隔恰好为50 Hz，干扰素量集中在工频的奇次或者偶次谐波频率点上，幅值相对稳定且有重复性。分析信号特征，此类干扰一旦进入测量系统，会以及真实的局部放电信号叠加，真实的局部放电信号是宽频带、非周期性的瞬态脉冲，而周期性干扰则表现为窄带、持续的波形，两者在时域以及频域均有明显的差异，这种本质差异是后续使用频域滤波以及时域开窗技术实行干扰抑制的物理基础。

1.2 试验电源侧传导干扰的生成机制与波形畸变规律

试验电源系统的作用不仅显现在给予试验能量，还充当传导干扰的核心入口，现场试验一般选用移动式发电机组或者依托变电站用电系统供电，此类电源系统的输出波形不是理想的正弦波，发电机组运行时，

作者简介：程海（1988-），男，本科，助理工程师，研究方向：电力工程。

转子励磁系统的整流环节会产生换向尖峰，此类尖峰以高频脉冲形式叠加在工频电压波形上，经由供电电缆直接传导到试验变压器及被试变压器的低压侧[2]。传导干扰的波形特征显现为与工频电压同步的脉冲串，脉冲宽度多在微秒级，与重复频率以及工频周期相关，观察传导干扰的传播特性，发现传播途径以及试验电压完全一致，且干扰脉冲幅值常随试验电压升高而增大，频谱以及真实局部放电信号高度重叠，使得单纯依托频域滤波比较难有效区分，必须融合时域特征与信号相位关系实行融合判别。

2 基于信号特征差异的局部放电试验综合抗干扰技术工法

2.1 采用宽频带电流互感器与无源滤波器组合的硬件前置抑制工法

与传统铁氧体磁芯互感器相比，纳米晶磁芯拥有更高的磁导率和更低的损耗，低频段衰减工频及谐波干扰的能力更强，高频段还能保持平坦的响应特性，保证真实局部放电信号的无畸变传输，电流互感器输出端使用三级无源滤波网络实行串联配置。第一级是高通滤波器，截止频率设定为 30 kHz，用于衰减试验电源及邻近设备产生的工频及低次谐波干扰，该滤波器使用电容以及电阻的串联结构，电容值选择 0.1 μF，电阻值选择 100 Ω，形成转折频率约 16 kHz 的高通特性，有效滤除 50 Hz 至数千赫兹的周期性干扰素量[3]。电路结构里，第二级是低通滤波器，截止频率设定为 30 MHz，使用电感以及电容构成的 π 型网络，电感量选择 1 μH，电容量选择 100 pF，用来抑制超高频段的电磁辐射干扰，防止高频噪声进入放大器产生互调失真。第三级是陷波滤波器，针对现场实测干扰频谱中能量集中的特定频率点，如某次测量中发现的 1.2 MHz 强广播信号干扰，使用 LC 串联谐振电路构成的陷波网络，实现对该频点干扰的深度衰减，三级滤波器协同工作后，进入放大器的干扰总能量减少约 30 dB 至 40 dB，后续的数字信号处理已获得有利条件。

2.2 基于脉冲时域波形与相位窗口的动态开窗抑制工法

时域开窗技术的应用分析表明，该技术有效地利用局部放电信号与周期性干扰在时间分布上的差异，凭借设定时间窗口实现有效信号段的选择性截取，本工法使用双通道同步采集架构，测量通道连接被试变压器末屏或者套管末屏处的测量阻抗，负责采集包含放电脉冲以及干扰的混合信号；参照通道则连接试验变压器高压侧的电压分压器，用于获取试验电压的相位基准。在信号处理流程方面，先是凭借过零比较电路将相位参照信号转换为工频周期方波，使用锁相环技术实现工频周期的精确锁定，相位误差严格地控制在 ±0.1° 范围内，随后软件系统把完整工频周期离散化为 360 个相位窗口，每个窗口对应 1° 相位宽度。系统依靠连续采集多工频周期信号，自动建立各相位窗口内脉冲出现概率的统计分布，依据局部放电机理特征，真实放电脉冲一般集中在电压波形的特定相位区域，譬如 ± 峰值附近或者过零点附近，相位分布模式以及绝缘缺陷类型有着强相关性。相比之下，电源侧传导的换向尖峰等周期性干扰，出现相位有着严格固定性，且与工频电压特定相位点保持精确同步。统计结果分析表明，系统自动识别出脉冲出现概率异常集中且幅值波动较小的相位区间，判定此为干扰相位窗口。随后，数据处理环节屏蔽了判定为干扰相位窗口内的所有脉冲信号，只保留其余相位窗口内的脉冲用于局部放电分析，这一类动态开窗方法可依据现场实际的干扰分布情况自适应地调节窗口参数，规避了固定窗口可能引发的局部放电漏判或者干扰误判问题，特别适用于干扰源相位分布相对稳定的试验场景。

3 抗干扰技术在 220 kV 变压器现场局部放电试验中的应用

某 220 kV 变电站新建工程安装了一台 240 MVA 三相油浸式电力变压器，需要实行现场局部放电试验，该变压器型号为 SSZ11-240000/220，额定电压为 220 kV/115 kV/10.5 kV，试验现场环境繁复，变电站内部分相邻间隔已带电运行，包含一条 220 kV 出线及两条 110 kV 出线，试验位置以及带电设备的最小直线距离约为 15 m。试验回路使用单边加压方式，试验电源由一台 300 kW 柴油发电机组给予，依托中间变压器升压后施加于被试变压器低压侧，试验环境温度为 28 ℃，相对湿度为 65%，按照国家标准及设备制造厂要求，局部放电试验在 1.5 倍额定电压下持续实行 30 min，允许的最大局部放电量限值为 100 pC。为准确判断变压器绝缘状况，需要采取有效的抗干扰措施以抑制现场各类干扰对测量结果的作用。

3.1 试验回路布置与传感器安装位置的优化选择

试验准备阶段，在试验正式启动前，先对试验回路做了精细的布置，高压引线选用直径 25 mm 的铜管，可减少引线的电晕放电，铜管表面涂抹导电膏可减少接触电阻，引线的走向尽量远离带电运行设备，以及 220 kV 出线构架保持大于 3 m 的间距，同时避免与建筑物钢结构形成闭合环路的空间布局。测量阻抗选用

Rogowski线圈型高频电流传感器，分别安装于变压器高压套管末屏接地线、铁芯接地线还有夹件接地线处，高压套管末屏接地线处的传感器用于测量主绝缘内的局部放电信号，该传感器在10 kHz至20 MHz频带内有着平坦的幅频响应，灵敏度到了1 mV/pC。铁芯接地线以及夹件接地线处的传感器用于辅助辨别干扰信号的来源以及极性，所有传感器均使用双屏蔽同轴电缆连接至测量主机，电缆外层屏蔽在传感器端以及主机端分别接地，形成双端接地方式可抑制地环路干扰，安装调试时，传感器的安装位置经过反复地修正，保证该装置与被测回路紧密地贴合。传感器以及接地线之间使用铜质压接端子实行连接，避免因接触不良产生额外的脉冲噪声[4]。

3.2 基于脉冲极性鉴别的外部辐射干扰信号识别与剔除

试验加压至80 kV后，测量系统读数显示局部放电量约150 pC至200 pC，超过100 pC的限值，脉冲波形上升沿以及衰减阶段较规则，初步判定为可疑放电信号，为确认信号来源，启用双传感器极性鉴别功能，把高压套管末屏传感器与铁芯接地线传感器接入鉴别模块。同步采集两个通道波形发现，幅值较大的脉冲出现时，两个传感器脉冲起始极性均为正向，极性一致，依据极性鉴别原理，脉冲信号源自外部空间辐射耦合，不是变压器内部局部放电，排查现场环境发现，脉冲出现时试验人员在附近使用对讲机通信，对讲机射频信号被测量回路接收形成干扰脉冲[5]。确认干扰源后，要求试验期间停止区域内使用对讲机及其他无线电设备，并把试验设备外壳及屏蔽层接地电阻从2.5 Ω降至0.8 Ω。测试结果证实，经上述处理后再次测试，极性相同的干扰脉冲几乎不见，局部放电读数跌至30 pC以下，说明原测得的150 pC至200 pC信号确实源于外部辐射干扰。

3.3 动态开窗技术对电源侧周期性传导干扰的抑制效果

试验现象分析表明，当试验电压升至140 kV时，局部放电量读数呈现出周期性的波动，数值在40 pC至80 pC之间反复跳变，凭借波形数据实行时域分析发现，干扰脉冲出现在工频电压波形每半周的特定相位点，即电压波形±峰值过后的约30°电路位置，且脉冲幅值相对稳定。该特征以及柴油发电机组励磁系统产生的换向尖峰高度吻合，判定为电源侧的传导干扰，启动动态开窗抑制功能，系统先是采集20个工频周期的波形数据，统计每个1°相位窗口内脉冲出现的次数，统计结果显示，在90° ±5°以及270° ±5°的相位窗口内，脉冲出现概率到了100%，且脉冲幅值变化范围小于10%，远高于其他窗口的脉冲出现概率以及幅值波动特性。据此，系统自动把这两个相位区间设定为干扰屏蔽窗口，窗口宽度各设定为10°，开启开窗抑制后，相位窗口内的干扰脉冲被软件滤除，局部放电读数稳定在25 pC左右，且不再出现周期性波动，屏蔽窗口宽度缩小后，窗口宽度设为5°，局部放电读数保持稳定，说明真实放电信号以及干扰信号在相位上无重叠，开窗抑制未造成有效信号的损失。

4 结束语

在变压器局部放电试验现场环境下，电磁干扰种类繁多，频谱特征、时域波形及传播途径各不相同。本文依据工程实践，详细分析了连续周期性干扰、传导干扰、空间辐射干扰及系统本底噪声的产生机理以及特征规律，据此提出硬件前置滤波、时域动态开窗、双传感器极性鉴别及动态平衡差分对消四项抗干扰技术工法。经某220 kV变压器现场试验应用验证，上述工法能针对性地解决特定类型干扰问题，技术实现参数可依据现场实际干扰特征灵活变动，表现出良好的适应性与可操作性，融合使用多项抗干扰技术，可以把干扰水平有效控制在较低范围，明显加强局部放电测量的信噪比以及检测灵敏度，保障试验结果的真实可靠。本文所述技术工法无需依托繁复设备以及深奥理论，具备较佳的现场可推广性，对增加电力设备绝缘诊断准确性有着实际参考价值。

参考文献：

[1] 赵志刚,刘永军,陈天缘,等.基于贝叶斯优化与CRITIC方法的中压高频变压器绝缘结构优化设计[J/OL].电工技术学报,1-16[2026-03-28].https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250568.

[2] 李梓琦,史睿乾.振荡冲击电压下电力变压器局部放电现场交接试验研究[J].电气技术与经济,2026(02):67-69.

[3] 王清泉.一起500 kV变压器油色谱异常事件分析及防范措施[J].机电信息,2026(04):31-34.

[4] 杨宇翔,李斯盟,卜泽伟,等.YD联结换流变压器阀侧绕组饼间等效电压下的局部放电特性[J].变压器,2026,63(02):14-23.

[5] 宁海波.油浸式电力变压器在线状态监测系统设计与应用研究[J].家电维修,2026(02):135-137.

机械设计与工业设计制造技术的联系与应用

朱宜科

（山东亿力建设工程有限公司，山东 枣庄 277599）

摘 要 数字化变革正在深刻重塑产品开发范式，机械设计与工业设计制造技术的协同已从传统的顺序交接演进为深度融合的并行共创。这一协同体系通过全流程数字化平台实现数据贯通，借助增材制造等先进技术突破传统工艺约束，并在人机工程学与可持续性设计等维度展开系统化创新。这种跨领域的深度整合不仅显著提升了产品开发效率与质量，更在本质上推动了功能性、美学价值与用户体验的统一，为应对个性化需求和可持续发展挑战提供了坚实的方法论基础与实践路径参考。

关键词 机械设计；工业设计；协同设计；增材制造；数字化制造

中图分类号：TH12；TB47 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.037

0 引言

在如今高度竞争的社会环境下，产品的更新越来越离不开工程上的精确性和使用体验。机械设计所体现的工程技术逻辑和工业设计推崇的使用者感受，两者融合才能生产出优秀的产品。随着制造过程信息化、自动化的发展，两者之间的合作也不再只是简单的对接，而是成为贯穿整个产品生命周期的创新主线。从最初的概念融合到最后产品的回收计划，整个融合过程都深深地影响着产品的性能指标、市场接受程度。因此，研究两者的具体协同方式对于我们理解复杂的现代产品系统的设计过程有着重要的理论指导作用。

1 工业设计制造技术概述

工业设计制造技术是工业设计师将想法转变为实际产品的重要手段之一，其范围远远超出了一般的加工作业领域，它涵盖了基于产品造型、构造、材质、体验等各个方面的内容，包括从产品设计初期的快速成型到大批量生产的各种工艺方法和技术。在设计初期，通过使用快速成型技术，特别是 3D 打印，可以将数字化的设计方案立即转换成实物样品，用于设计方案的选择、人机互动实验及市场调查，节省了大量的开发时间并减少了不必要的沟通成本。而在产品制作过程中，制造技术对产品最终的模样和手感有着至关重要的影响。例如：注塑塑料制品时所用的注塑成型工艺特点决定了产品的脱模角度、分模面及壁厚均一程度，在进行外观美观设计的同时也必须遵守相应的制造限制条件。同理，对于各种金属制品来说，冲压、铸造或者 CNC 精密加工也都赋予不同的产品不同的形态可能性以及不同的表面质感效果，如铝镁合金的轻盈质感或者是不锈钢的光滑高亮质感。随着数字化、智能化的发展，为工业设计领域开辟了新的可能，如五轴加工中心可以制作非常复杂的曲面造型，柔性生产线也使得小批量、个性化的设计更具有经济性。因此，好的工业设计一定是有“可制造性”的设计，设计师要清楚地明白材料特性和工艺知识，让好的作品能够在实际的制造业中得以落地生根，做到美观、实用性和可规模化生产相结合[1]。

2 机械设计与工业设计制造技术的联系

2.1 思维融合：逻辑精确与用户感知的共创

机械与工业设计之间的联系，首要的是两者的思维方式存在着本质上的相互补充和交融。机械设计以严密的工程理念为基础，关注产品的内部构成问题，如同搭建生命的身体框架与神经网络一般，必须保证每个齿轮的咬合度、每个结构的坚固程度以及各种传动机构的具体走位准确无误，并按照实际的物理规律和加工工艺的要求执行。这是一种由内向外、以解决问题为目标的量化思考过程。工业设计以人的主观感受为主体，是对产品的外观塑造和个性打造，从人的感情、动作、所处的文化背景等方面进行考量，通过对产品的形状、色调、质感以及人机互动等细节的设计，为冰冷坚硬的机器赋予情感与魅力。这是一种内外兼修、以创造价值为目的的情感化思考方式，如开发一款高端电钻，当机械工程师努力打造一款高性能、

作者简介：朱宜科（1988-），男，专科，工程师，研究方向：机械设备。

安全可靠的无刷电机和传动装置时，工业设计师会运用人体工学理念，在这个强大的“心脏”外面，用符合人体手部线条、具有良好触觉体验和审美体验的外壳包裹起来。工程师们的“严谨计算”赋予了机器强大的动力源泉，工业设计师们的“用户体验”使得产品技术特点能得到用户亲身的体验和喜爱，两者携手创造了产品的最大卖点[2]。

2.2 制造实现：工艺约束下的创意落地与解放

两者联系的最终落脚点深深地扎根在制造技术这片土壤上，制造工艺成为设计灵感能否从蓝图落实为商品的最后一道试金石。对于机械设计来说，良好的制造工艺就是精度、强度及效率的保障，而工业设计中，它直接对应着材质美感、表面质感以及外形复杂程度的表现形式。一方面，工艺起到限制作用。例如：大批量生产的塑料件需要通过注塑模具来进行加工，则工艺特点就要求零件要有脱模斜度、不能有过厚过薄的壁厚结构，并且还要有分形线等。优秀的工业设计不是脱离实际，而是在充分认识到这些约束之后，把分型线转变成造型中的切割线，通过斜度来创造出有弹性的曲面。另一方面，先进的制造技术也在不断解放着工程师的设计能力，如增材制造（3D打印）几乎不考虑传统减材制造的几何制约，让机械工程师能够设计出拓扑优化、极致轻量并且强度高的仿生结构体，而工业设计师也能够制作出传统工业制造技术不能生产的那些充满生命力且复杂的形态和空心结构。因此，机械及工业设计师都要变成“制造的通晓者”，在限制里获得自由，在技术进步的基础上扩大自由的范围，一起保证创新能够在高速度、低成本、高质量的要求下转化成实物产品[3]。

3 机械设计与工业设计制造技术的协同应用

3.1 全流程数字化协同平台的应用

机械设计和工业设计制造技术相结合，在当今新产品的研制中最为明显的表现就是全生命周期数字化协作系统的建立与应用。两者的协同应用是以产品数据管理系统为基础，把工业设计的概念想法、机械设计的技术加工以及生产装配的要求信息全部融合到一个一体化的空间之下进行管理。在新产品开发过程中，工业设计师通过专用软件绘制出的曲面图形以及形状方案可以供机械工程师用作依据，从而让双方始终处于同一3D坐标系中工作。当机械工程师分析了产品的内部之后，仿真模拟的数据也会立即传递到工业设计师那里，让他们了解结构强度、散热要求等工程性限制如何影响产品的外观。例如：在做消费电子产品的时候，天线功能区块以及通风口的排布等原属于工程师层面的要求，通过联动平台被明确地呈现出来，他们就可以提前把这些限制变成产品的造型元素之一，而不是被迫进行后期调整。

这种数字化协作的价值在并发工程中得到了最大的发挥，从前一个步骤未结束，不能开始下一个串联式步骤的情况不再出现。当工业设计师在进行表面效果渲染的时候，机械工程师已经进行机械强度检讨，而模具工程师也开始对零件的脱模性进行分析。所有人都是在同一个数字化的虚拟模型之中进行操作，任何一个变动都会被捕捉到然后传达至各个工程师，而在复杂的组件设计上，这个优势更加明显。汽车内饰设计就是典型的例子：控制面板表面曲线的形状、显示屏镶嵌的方式、出风口的设计由工业设计师主导，内饰件安装骨架、电线路径以及空调通风管道均由机电工程师把控。借助同步平台，二者可以随时对各零部件间的相互干涉情况进行监测，在虚拟空间解决大部分装配问题，从而大大减少实物样车调试次数，节省大量开发时间[4]。

3.2 增材制造技术驱动的设计融合与创新

增材制造技术正在改变着机械设计与工业设计合作的边界以及可能性。传统的加工工艺通常使得设计人员必须在刚开始就做出很多让步，以适应一定的加工方式。但是增材制造尤其是金属3D打印、高端塑料打印等以其“自由成型”的特点，成为跨越这两种设计理念的纽带，在功能性零件的研发上体现得尤为明显。机械工程师可以通过拓扑优化的方法，在受力的地方产生最优材料分布结构，这种结构往往是仿生的形态，既有很好的力学强度，又能减轻产品重量。

对于医疗器材类这种对个人化需求非常苛刻的产品来说，这种联合作业更为密切。例如：对于康复矫形器来说，工业设计师利用三维扫描仪获取病患身体部位准确尺寸，并结合人体工学理念设计出适合人体穿着佩戴且触感舒适的外形；机械工程师在该外形基础上进行生物力学计算，并设计不同硬度梯度分布的支撑件结构等。而3D打印技术可以同时把这样高度个性化的形状以及精细调节好的内部构造打印出来，使其变成一种有温度的人体私人物品的同时也优化了康复治疗的效果。更重要的是，增材制造帮助设计师设计出高度复杂的整体结构，省去很多组装工序。机械工程师可以通过其进行传统制造手段无法实现的随行冷却腔的设计，而工业设计师也可以利用它来获得更

为简洁纯粹的整体形态，两者在数字模型阶段的高度融合也借助增材制造完美地转化为实际的产品，达到了“形式服从功能”与“形式服务于体验”的对立统一。

3.3 人机工程学与仿真技术的深度结合

人因工程是机械工程与工业设计结合最紧密的一个方向，而随着现今模拟仿真技术的发展，使这一结合由定性的讨论转化为了定量的设计，这是协同发展的重要方面之一。在产品的人机接口及控制结构设计上，工业设计者要对如何操作以及看到什么、感受到什么等做出感受上的要求，而机械工程师的任务就是创造出能够达到上述要求的实体结构。这种合作已经不只是大小尺寸上的契合，而是深入运动特性的协调。例如：在进行一种手电钻的设计过程中，通过市场调研得到合适的持握形状、开关位置、用力的程度等。而机械工程师就需要对产品的内部传动系统、电机安装以及按钮的设计进行构思并用多体动力学仿真软件来进行模拟产品使用过程中的振动大小、声音大小以及回馈的力度，使它满足甚至超过设计师所期望的产品体验效果[5]。

VR 及数字人的仿真技术的应用，使这种合作又得到了更深一步的发展。在设计汽车驾驶室、飞机舱室以及巨大生产机器的操作台的时候，工业设计师所制作的三维模型可以同机械工程师所设计的可以活动的部分进行结合（方向盘、踏板、可调节座椅的机构），形成一个全息的仿真模型，试验者戴上 VR 眼镜便可以在其中进行动手体验，感受手柄的力量大小及关节的角度等生理学数据，机械工程师可以获取这些生理数据进而调整杆臂比或者阻尼比，而工业设计师也可以及时看到自己设计上的死角或难以触及的地方，来改变仪表盘或者控制面板的形状。这样的仿真实现的即时同步互动，在物理原型机生产前就能发现很多可能存在的交互隐患，不仅可以节约成本，还可以从根本上保证产品的安全，为“以人为本”的设计理念提供了强大的工程技术保障。

3.4 面向可持续性的系统化协同设计

对于全球性的可持续性发展问题，在机械设计和工业设计的结合方面已经由原来仅为了一个产品的性能提高而转变为对一整类产品周期系统地进行改进。机械设计与工业设计相配合的关键点就是，把工业设计所强调的绿色美学长寿命情感化设计同机械工程中的可拆卸性设计、轻量化设计和新材料相结合。在产品构思的时候就一起确定出可持续的目标：工业设计师选取绿色环保的表面工艺，易看出品质的好材料，以经典的、耐旧的造型语言来避免消费者因为审美疲劳导致的产品丢弃。机械工程师致力于研究如何用更少的材料来达到所要求的强度以及如何设计便于分离处理的单一材质零件或者无需破坏性拆除装置之间的连接[6]。

这种合作在模块化设计上是最全面的体现，如日常家电，工业设计师对产品外形风格以及模块结构进行设计保证了即使某些模块进行替换后依旧可以保持和谐一致的品牌形象；而机械工程师依据这些来设计标准连接件、通用地螺丝以及模块化内部组件让核心部件（电机、控制板等）可单独拆卸更换或者更新，外壳之类的易损件也可以反复多次利用起来。并且，材料选择及加工工艺方面的配合也更加密切，机械工程师可以设计具有高强性能的新式复合材料来达到减重的目的。在此基础上，工业设计要探究该种材料的可塑性能、表面触觉效果，以及能否进行再次回收利用，并根据以上信息对产品形状进行微调。

4 结束语

机械设计与工业设计制造技术的协同，是产品开发从学科独立走向整体协作的一次重要飞跃。这并非简单地将两类技术进行叠加，而是在数字化链路的串联下，在产品性能、外观体验、用户感知与可持续发展等维度，形成相互赋能的开放式创新体系。二者的深度融合，要求设计者与工程师具备跨界认知能力与同理心，共同探索最优化的设计生产路径。随着 AI、生成式设计等技术逐步成熟，这一协同过程将进一步向智能化、自动化升级，但其核心初衷始终未变——始终以人机协同的方式，打造更可靠、更具温度、更有社会责任感的产品，回应复杂多变的时代需求。

参考文献：

[1] 亚森江·加入拉.机械设计与工业设计制造技术的联系与应用研究[J].产品设计,2024(05):107-109.
[2] 姜超,钟秋波.ARDUINO 驱动 AUTOMATA 与工业设计“新工科”专业核心知识能力培养[J].设计,2025(06):98-101.
[3] 王玉鹏.机械设计中计算机辅助工程技术的应用与创新[J].漫科学(科技应用),2025(03):85-87.
[4] 李楠舟,尤田,刘宁.扩招背景下工业设计专业“书证融通”人才培养模式探究[J].天南,2024(01):9-12.
[5] 张楠,张洁.数控加工技术在机械工业设计与制造中的应用研究[J].装备制造技术,2025(01):123-125.
[6] 陈绪伟.机械制图在工业设计中的应用研究[J].造纸装备及材料,2024,53(03):113-115.

面向零排放的工业园区高盐水综合利用技术研究

浦钱东

（南京万德斯环保科技股份有限公司，江苏 南京 210000）

摘 要 工业园区高盐水排放量逐年增加，含盐量高、成分复杂，直接排放易造成水体污染。零排放政策推进，对高盐水处理与综合利用提出更高要求。当前，高盐水处理存在技术适配性差、资源回收率低、处理成本偏高、二次污染风险等问题，制约零排放目标落地和资源高效利用。本文立足于工业园区零排放需求，剖析高盐水来源和特性，梳理现有综合利用技术应用现状、困境，探索适配不同工况的高盐水综合利用技术路径，优化技术组合方案，以期为工业园区零排放下高盐水综合利用提供技术参考。

关键词 工业园区；零排放；高盐水综合利用

中图分类号：X703 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.038

0 引言

工业产业不断升级，环保政策日益严格，工业园区零排放成为绿色低碳发展核心要求。高盐水是园区废水处理末端难题，其综合利用水平直接影响零排放目标实现。工业园区高盐水来源多样，包括生产工艺废水、循环冷却水浓水等，它含盐量高、成分复杂，处理难度很大。目前多数工业园区处理高盐水，仍以达标排放为核心目标，综合利用程度比较低，这样既浪费水资源、盐资源，又容易引发二次污染。研究工业园区零排放下高盐水综合利用技术，破解处理与利用面临的困境，优化技术路径，对推动工业园区绿色低碳发展、落实零排放政策具有重要的现实意义。

1 工业园区高盐水概况

1.1 来源与分类

工业园区高盐水来源多样，这和园区产业类型有关，也与生产工艺紧密联系。依照含盐量不同，结合成分差异状况，能够划分成多个类型。其中，循环冷却水浓水占比最大，工业生产中多次蒸发循环冷却水，水分浓缩让含盐量明显上升，因此成为高盐水的核心部分[1]。这类高盐水含盐量不高、成分简单，主要包含氯离子、钠离子等常见离子。其次是工艺废水浓水，来自化工和制药行业，还有电子、印染等生产领域，生产废水先经预处理，再通过生化处理，之后浓缩形成高盐水。该类高盐水含盐量高、成分复杂，含有重金属离子、有机物质，也包含有害杂质，处理难度极大。

1.2 核心特性分析

工业园区高盐水有三个核心特性，它们分别是含盐量高、成分复杂、水质不稳定，这些特性直接决定技术选择和适配性。高盐水最显著的特征是含盐量高，多数园区高盐水含盐量超5 000 mg/L，部分化工、制药行业的可达50 000 mg/L以上，这个数值远超常规废水处理标准，对处理技术耐盐性要求很高。处理高盐水的核心难点是成分复杂，除常规氯离子、钠离子、钙离子外，还含有重金属离子、有机物、悬浮物、难降解杂质等，部分杂质具有毒性和腐蚀性，这不仅会增加处理难度，还可能影响资源回收质量。

2 高盐水综合利用现存困境

2.1 技术适配性较差

当前工业园区高盐水综合利用技术适配性存在明显不足，这种不足使得技术难以满足不同类型高盐水处理、利用需求。部分工业园区未结合高盐水的含盐量、成分差异选择技术，盲目采用单一处理技术，这导致处理效果不佳、资源回收率低。例如：适用于低含盐量高盐水的反渗透技术，若应用于超高盐水处理，易出现膜污染、膜堵塞等问题，膜使用寿命会大幅缩短，处理成本也会增加。并且，现有技术多针对单一杂质、单一资源回收设计，对复杂成分高盐水的协同处理能力缺乏，难以实现多资源同步回收。部分技术处理效率低、操作难度大，这些问题使其难以适配工业园区规模化、连续化的处理需求，制约综合利用水平提升[2]。

作者简介：浦钱东（1981-），男，本科，工程师，研究方向：环境工程。

2.2 资源回收率偏低

工业园区高盐水含有丰富的水资源、盐资源，但目前综合利用时，资源回收率一般较低，造成严重浪费。在水资源回收方面，多数工业园区高盐水经处理后，仅把部分达标水用作循环冷却补水，回收利用率不到50%，大量处理后的水资源直接排放，没能实现循环利用。在盐资源回收方面，现有技术大多以脱盐为核心，对盐资源的分离、提纯不够彻底，回收的盐产品纯度低，多是工业级低品质盐，很难用于高端领域。有些工业园区甚至没开展盐资源回收，直接将脱盐产生的盐泥填埋处理，这样既浪费资源，又可能引发二次污染。

2.3 处理成本居高不下

处理成本偏高是制约工业园区高盐水综合利用推广的核心瓶颈，主要体现在设备投资、运行成本与维护成本三个方面。在设备投资方面，该种技术所需设备多为耐盐、耐腐蚀的专用设备，如特种反渗透膜、蒸发结晶设备等，此类设备造价高昂，大幅增加了工业园区初始投资压力[3]。在运行成本方面，高盐水处理时要消耗大量电能、药剂等，尤其是蒸发结晶、膜分离等技术，能耗较高且药剂消耗量大，长期运行成本很难降低。在维护成本方面，高盐水腐蚀性、杂质含量都比较高，易造成设备磨损、膜污染、管道堵塞等问题，需要定期进行检修设备、更换膜件与清洗管道，这进一步增加了综合处理成本。

2.4 二次污染风险突出

部分工业园区高盐水综合利用时，缺乏有效环保管控措施，易引发二次污染问题，违背零排放与绿色发展理念。在盐资源回收过程中，分离提纯若不够彻底，回收盐产品中便含有重金属离子、有害有机物等杂质，这些杂质可能通过后续使用再次进入环境，造成土壤、水体污染。废水处理会产生大量盐泥、污泥等废弃物，部分园区未规范处理这些废弃物，直接填埋、堆放，易导致有害成分渗透，污染地下水和土壤。部分处理技术运行时，会产生废气、废液，若未做针对性处理，会引发大气、水体污染。

3 高盐水综合利用核心技术

3.1 膜分离回收技术

膜分离回收技术是工业园区高盐水综合利用的核心技术之一，它主要利用膜的选择透过性，把高盐水中的水资源和盐资源分离开来并回收，有处理效率高、能耗较低、操作简便等优势。常用的膜分离技术有反渗透（RO）、纳滤（NF）、电渗析（ED）等，不同技术有不同的适用场景。反渗透技术适合处理中低含盐量的高盐水来回收水资源，在高压作用下，水分子能透过反渗透膜，盐分与杂质则被截留，回收的淡水可用于循环冷却水补水、绿化用水等，水资源回收率能达到 60% ～ 80%。纳滤技术适用于含有机物、重金属离子的高盐水处理，可实现盐资源和有机物、重金属的分离，提升盐资源回收纯度。电渗析技术则适用于高含盐量高盐水的脱盐处理，电场作用下离子定向迁移，以此实现盐与水的分离，该技术可用于盐资源初步回收，且适配性较强。

3.2 蒸发结晶技术

蒸发结晶技术主要用于超高含盐量高盐水的盐资源回收，核心是加热蒸发高盐水，使其达到饱和状态，进而让盐分结晶析出，实现盐资源分离回收，这是高盐水零排放的关键技术[4]。常用的蒸发结晶技术有：多效蒸发（MED）、机械蒸汽再压缩（MVR）、太阳能蒸发等。多效蒸发技术借助多次蒸发冷凝，充分利用热能，降低能耗，适用于规模化高盐水处理，盐资源回收率能达 90% 以上，回收的盐产品纯度较高，可用于工业生产。机械蒸汽再压缩技术将蒸发产生的二次蒸汽压缩升温，重新用于蒸发过程，能耗比多效蒸发更低，运行成本优势更明显，适用于中大型工业园区。太阳能蒸发技术可使高盐水蒸发结晶，该种技术借助太阳能运行，能耗极低，环保且无污染。不过，它易受天气状况影响，其处理效率相对较低，适用场景包括小型工业园区，或者可用于辅助处理。

3.3 高级氧化处理技术

高级氧化处理技术主要用于处理成分复杂、含有机物、难降解杂质的高盐水，其核心是产生强氧化性自由基，这些自由基能降解高盐水中的有机物、有害杂质，同时降低水体毒性，为后续膜分离、蒸发结晶等技术提供支撑，最终提升综合利用效果。常用的高级氧化技术包括臭氧氧化、芬顿氧化、光催化氧化等。臭氧氧化技术依靠臭氧的强氧化性，可以降解高盐水中的有机物、还原性杂质，该技术反应速度快、无二次污染，适用于低浓度有机物高盐水的预处理。芬顿氧化技术适用于高浓度有机物、难降解杂质的高盐水处理，它通过亚铁离子和过氧化氢反应产生羟基自由基，这种自由基能高效降解有害杂质，但会产生少量污泥，所以需要配套污泥处理措施。光催化氧化技术依靠光催化剂，在光照条件下生成自由基，借此降解有机物质，该方法环保且无污染物产生，不过处理效率对光照条件依赖明显，所以更适合作为辅助处理手段。

3.4 资源协同回收技术

资源协同回收技术是破解高盐水资源回收率偏低的关键技术，核心是结合高盐水的成分特性、整合多种处理技术，实现水资源、盐资源、重金属离子等多

资源的协同回收，提升综合利用效益。该技术先预处理去除高盐水中的悬浮物、大分子有机物等杂质，再通过膜分离技术回收水资源，通过蒸发结晶技术回收盐资源，利用吸附、沉淀等技术，回收高盐水中的重金属离子、稀有元素等，实现“一水多用、一盐多收”[5]。例如：化工行业含重金属高盐水，可先采用高级氧化技术降解有机物，再通过膜分离回收水资源，通过蒸发结晶回收盐资源，最后通过吸附技术回收重金属离子，这样既实现资源最大化利用，又降低二次污染风险，适配零排放政策需求。

4 零排放下综合利用技术路径

4.1 中低含盐量技术路径

针对中低含盐量（5 000 mg/L～20 000 mg/L）高盐水，结合成分简单、处理难度小的特性，创建“预处理、膜分离、水资源回收”的综合利用技术路径，兼顾处理效率与成本控制。首先开展预处理工作，采用沉淀、过滤等技术，去除高盐水中的悬浮物、胶体杂质、部分重金属离子，避免杂质引发膜污染，提升后续膜分离技术的处理效果，延长设备使用寿命。预处理完成后，以反渗透技术作为核心处理单元，回收高盐水中的水资源，回收的淡水可用于工业园区循环冷却水补水、绿化用水、生产辅助用水等，实现水资源循环利用。膜分离产生的浓水，可进一步采用纳滤技术深度处理，该技术能回收部分盐资源，剩余浓水则进入后续处理单元，如此可确保达到零排放要求。同时，此技术路径能耗较低，成本可控，能够适配多数工业园区中低含盐量高盐水的处理需求[6]。

4.2 超高含盐量技术路径

对于含盐量超20 000 mg/L的高盐水，结合其盐分高、成分杂的特性，创建“预处理—高级氧化—膜分离—蒸发结晶”的一体化综合利用技术方法，达成资源回收和零排放的双重目的。预处理阶段采用过滤、吸附等方式，去除水中悬浮物、大分子杂质。接着运用高级氧化技术，降解高盐水中的有机物、难降解杂质，降低水体毒性，为后续步骤做好准备。膜分离阶段采用电渗析技术，让盐和水初步分离，回收部分水资源，浓缩盐分，减轻后续蒸发结晶的处理压力。蒸发结晶阶段应用MVR技术，高效回收盐资源，回收盐产品提纯后用于工业生产，蒸发所得冷凝水再次回收利用，剩余少量盐泥规范处理后无害化处置，以此达到高盐水零排放和资源最大化利用。此一体化工艺在实际的工程运用中展现出较高的稳定性，能够有效应对盐分极高的高盐水的水质波动，进而增强系统抵御冲击负荷的能力，通过工程实践验证可知，水资源的回收比例能够达到85%以上，结晶盐的纯净程度符合工业盐的标准，达成了固体废弃物的减量化以及资源化目标，为化工、医药等类型的园区实现高盐水零排放提供可复制的范例。

4.3 复杂成分技术路径

对于成分复杂、含有机物与重金属离子的高盐水，创建“预处理、高级氧化、资源协同回收、深度处置”的综合利用技术路径，可破解成分复杂与二次污染难题。预处理阶段，采用沉淀、混凝等技术，去除高盐水中的悬浮物、部分重金属离子。高级氧化阶段，采用芬顿氧化或臭氧氧化技术，降解有机物、难降解杂质，降低水体毒性、腐蚀性[7]。资源协同回收阶段，整合膜分离、蒸发结晶和吸附技术，同步回收水资源、盐资源、重金属离子，水资源回收用于循环利用，盐资源回收用于工业生产，重金属离子回收实现资源化再利用，提升综合利用效益。在深度处置环节，需要规范处理盐泥、污泥这类废弃物，处理方式可选择固化填埋、资源化利用等，这么做是为了避免二次污染，同时保证处理全程满足零排放及绿色发展的要求，它能够适配化工、制药等行业，处理成分复杂的高盐水。

5 结束语

在工业园区零排放政策下，高盐水综合利用是推动水资源、盐资源循环利用，防范环境污染的关键举措，也是促进工业园区走绿色低碳发展道路的必然要求。目前，该领域面临诸多困境：技术适配性不佳、资源回收率不高、处理成本较高、二次污染风险明显等。这些问题制约着零排放目标的实现和资源的高效利用。膜分离、蒸发结晶、高级氧化、资源协同回收技术是高盐水综合利用的核心技术。依据高盐水的含盐量、成分差异，创建个性化综合利用技术路径，能够有效破解现存难题，提高综合利用水平，为工业园区零排放提供稳固技术支持。

参考文献：

[1] 孙蕊,谢桂龙,郭彦深,等.中和站氯化钙高盐水资源化利用技术[J].冶金设备,2022(S1):72-74,32.
[2] 陈德武.煤制气项目高盐水处理与资源化利用[J].给水排水,2022,58(05):60-64.
[3] 卞卡,柏建彪,赵涛.粉煤灰及高盐水绿色处理技术与应用[J].中国煤炭,2021,47(04):65-69.
[4] 顾雨薇,李雪,陈硕,等.高盐水中硝酸根的电化学去除方法[J].科学通报,2020,65(26):2880-2894.
[5] 刘文,徐学文,纳娟,等.煤化工高盐水回用系统高硅阻垢剂的性能研究[J].冶金动力,2020(08):64-69.
[6] 同[5].
[7] 刘金哲,田京雷,王鑫国,等.钢铁行业高盐水零排放处理技术[J].河北冶金,2020(07):74-78.

建筑给排水管道防渗漏施工技术与验收标准研究

高广杰[1]，刘建国[2]，张　鹏[3]

（1. 青岛荣泰鑫康置业有限公司，山东 青岛 266555；
2. 山东信蓝建设有限公司，山东 泰安 271600；
3. 青岛云发航工程劳务有限公司，山东 青岛 266071）

摘　要　针对建筑给排水管道渗漏防控的核心工程需求，本文系统厘清了材料缺陷、设计适配性不足、施工工艺不规范、环境与运维失当四大类渗漏核心诱因，构建了覆盖施工全流程、适配不同管材特性的标准化防渗漏施工技术体系，建立了分阶段、全维度、可量化的防渗漏工程验收标准与合格评定方法，明确了全过程闭环质量管控的核心实施路径，以期为相关工程的施工管控与质量验收提供技术参考。结果表明，该技术与验收体系可实现管道渗漏隐患识别率提升 90% 以上，渗漏事故发生率降低 85% 以上，有效保障建筑给排水系统的长期服役性能。

关键词　建筑给排水管道；防渗漏施工；渗漏诱因；施工技术体系；质量验收标准

中图分类号：TU82　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.039

0　引言

建筑给排水管道是建筑功能体系中保障用水供给、污废水排放的核心基础设施，其防渗漏性能直接决定建筑的使用安全、功能完整性与结构耐久性。本文围绕建筑给排水管道渗漏的核心影响因素，系统构建全流程、标准化的防渗漏施工技术体系，明确从材料进场到竣工验收的分阶段验收核心项目、量化技术指标与合格判定规则，建立全生命周期闭环质量管控机制，为建筑给排水管道防渗漏工程的施工实施与质量验收提供系统性的技术依据。

1　建筑给排水管道渗漏的核心诱因分析

1.1　材料与构配件先天缺陷

材料性能是防渗漏管控的源头基础，核心渗漏诱因包括：管材管件本体存在壁厚不均、砂眼、裂纹等制造缺陷，力学、耐温、耐腐蚀性不达标，长期服役后出现本体开裂渗漏；密封材料与管材材质、输送介质特性适配性不足，耐老化、弹性变形、粘接强度不符合要求，接口密封失效形成渗漏通道；阀门、洁具等配套设备密封结构设计缺陷，阀芯密封件耐磨性能不足，长期使用后出现滴漏；非承压管材违规用于承压系统，额定压力与系统工作压力不匹配，引发管道爆裂渗漏[1]。

1.2　设计适配性不足

设计环节的缺陷是渗漏问题的先天诱因，核心包括：管道管径、坡度设计与水力工况不匹配，排水管道流速不足引发沉积物淤积，长期使用后堵塞、内压升高引发接口渗漏；立管通气系统设计不合理，管道内压力波动破坏水封，引发排水不畅、接口渗漏；管道伸缩补偿、抗震支吊架设计不到位，温度变形、振动、地基沉降引发管道拉裂、接口脱开；穿结构管道防水节点设计不合理，止水环、套管设置不规范，管道与结构交接处形成渗漏通道；管道系统水锤防护措施不足，水锤冲击导致接口松动、管壁破裂。

1.3　施工工艺管控失当

施工操作不规范是渗漏事故的核心诱因，占工程渗漏问题总量的 80% 以上，核心包括：管道接口施工工艺参数控制不当，热熔连接温度、加热时间、插接深度不符合要求，出现虚焊、过焊导致接口开裂；粘接接口清洁不到位、黏结剂涂刷不均，出现粘接失效；丝接接口螺纹加工不规范、生料带缠绕不当，密封不严；管道支吊架间距过大、固定不牢，管道出现挠度变形、振动位移，长期运行引发接口松动；管道与防水施工交叉作业管控不当，防水层被二次开孔、安装作业破坏，节点防水失效；隐蔽工程未开展功能性试验即封闭，渗漏隐患无法提前处置。

作者简介：高广杰（1993-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：给排水工程。

1.4 环境与运维管控缺失

外部环境与运维管理是渗漏问题的重要诱因，核心包括：环境温度剧烈变化引发管道热胀冷缩变形，未设置补偿装置导致接口拉裂；建筑地基不均匀沉降，管道随结构变形产生剪切应力，引发管道断裂、接口脱开；输送介质腐蚀、管外潮湿环境与腐蚀性介质侵蚀，导致管壁变薄、点蚀穿孔；运维清通作业不规范，机械清通损伤管道内壁与接口，长期缺乏检修导致密封件老化失效未及时更换，最终引发渗漏。值得注意的是，建筑给排水管道渗漏并非单一因素独立作用的结果，工程中绝大多数渗漏事故均为多类诱因耦合叠加引发的连锁式失效。材料先天缺陷会显著放大施工工艺不规范带来的接口密封风险，设计适配性不足会持续加剧环境变形与振动对管道系统的结构性损伤，而运维管控的长期缺失，会导致前期隐蔽的微小隐患持续劣化扩大，最终演变为显性渗漏事故。这一耦合特性决定了防渗漏管控不能局限于单一工序的质量把控，必须建立全流程、全要素的系统性防控体系，才能从根本上遏制渗漏事故的发生。

2 建筑给排水管道防渗漏全流程施工技术体系

2.1 施工准备阶段源头管控技术

施工准备阶段是防渗漏管控的第一道关口，核心技术要点包括：材料进场全指标检验，对管材、管件、密封材料及配套设备的质量证明文件、规格型号、外观质量全数检验，关键材料抽样复检，严禁不合格材料进场；针对不同管材、敷设场景编制专项施工方案，明确接口工艺参数、防水节点做法、支吊架设置及功能性试验标准，开展分级技术交底，确保作业人员掌握核心管控要点[2]；提前复核结构预留孔洞、套管的位置、标高、尺寸，与设计一致，避免后期剔凿结构破坏防水体系；采用BIM技术开展管线综合排布，提前规避管线碰撞、坡度不足等先天隐患。

2.2 差异化管道连接标准化施工技术

根据管材类型选择适配的连接工艺，严格执行标准化作业参数：PPR、PE等热熔连接管材，热熔温度控制在190 ℃～210 ℃，根据管径精准控制加热时间、插接深度与冷却时间，插接到位后自然冷却，严禁强行校正接口，确保接口焊接强度不低于管材本体强度；UPVC排水管道采用粘接连接，黏接前清洁糙化接触面，均匀涂刷适配黏结剂，插接到位后静置固化，固化前严禁施加荷载；镀锌钢管采用丝接连接，螺纹加工精度符合规范，生料带均匀缠绕，拧紧后外露螺纹2牙～3牙，做好防腐密封；柔性接口铸铁排水管道，橡胶圈安装平整无扭曲，压缩量控制在30%～40%，接口固定牢固。

2.3 管道变形与振动防控技术

针对管道变形、振动引发的渗漏，核心技术要点包括：严格按规范设置管道支吊架，控制间距，确保管道固定牢固，避免挠度变形；立管底部、转弯处设置承重支墩，消除管道自重引发的接口拉应力；穿结构沉降缝、伸缩缝的管道，设置专用波纹管补偿装置，消除结构变形的剪切作用；明装塑料管道按长度设置伸缩节，排水管道伸缩节间距不大于4 m，补偿温度变形；水泵出口、阀门前后设置橡胶软接头，消除设备振动对管道接口的影响，避免接口松动渗漏[3]。

2.4 穿结构节点防水防渗核心施工技术

穿楼板、墙体、地下室外墙管道是渗漏高发节点，核心技术要点包括：穿楼板管道设置钢套管，套管顶部高出装饰地面50 mm，有水房间高出20 mm，底部与楼板底面平齐，套管与管道之间采用阻燃密实材料和防水油膏填实，端面平整；管道穿楼板处设置止水环，与管道满焊连接，随管道浇筑于结构楼板内，阻断渗漏通道；有水房间管道根部，防水层施工前进行找平层圆弧处理，防水层沿管道根部上翻不小于300 mm，涂刷均匀无漏涂，完成后开展24 h蓄水试验，无渗漏后再做面层；管道穿地下室外墙时，采用柔性防水套管，严格按照设计要求进行密封与防腐处理，保障结构抗渗性能[4]。

2.5 系统功能性试验与成品保护技术

功能性试验是验证防渗漏效果的核心环节，核心技术要点包括：给水管道安装完成后开展水压试验，试验压力不低于设计工作压力的1.5倍，且不小于0.6 MPa，金属及复合管稳压1 h压降不大于0.05 MPa，塑料管稳压2 h压降不大于0.05 MPa，降至工作压力后稳压24 h无渗漏为合格；隐蔽排水管道隐蔽前开展闭水试验，试验水头不低于上游管顶内壁2 m，浸泡不少于24 h，渗水量不超规范允许值为合格；排水立管完成后开展通球试验，通球直径不小于管径的2/3，通球率100%为合格；管道安装完成后做好成品保护，严禁作为脚手架支撑、重物吊挂点，交叉作业时做好包裹防护，避免管道损伤、接口松动。

3 防渗漏工程分阶段量化验收标准体系

3.1 材料进场验收标准

材料进场验收是防渗漏验收的首要环节，核心验收标准：管材、管件、密封材料、配套设备必须具备

出厂合格证、性能检测报告等质量证明文件，规格型号、性能指标符合设计与规范要求；管材管件外观全数检验，表面无裂纹、砂眼、凹陷、壁厚不均等缺陷，管口平整，壁厚偏差不超公称壁厚的 ±10%；密封橡胶圈邵氏硬度控制在 60±5 Shore A，拉伸强度≥ 10 MPa，与管材适配，生产日期、有效期符合要求；关键材料按规范抽样见证送检，复检合格后方可使用。验收方法为资料核查、外观全数检查、抽样复检，所有项目合格方可进场。

3.2 隐蔽工程验收标准

隐蔽工程验收必须在隐蔽作业前完成，核心验收项目与标准：管道位置、标高、坡度、管径符合设计要求，坡度偏差不超设计值的 ±5%，管道连接牢固，接口工艺符合规范；套管、止水环的规格、位置、固定方式符合设计，安装牢固；支吊架间距、固定方式符合规范，管道无松动、变形；防水节点处理符合设计，防水层厚度、上翻高度符合标准；管道功能性试验合格，无渗漏、堵塞。验收方法为实测实量、资料核查、现场查验，所有项目合格并签署验收记录后，方可进行隐蔽作业。

3.3 分项工程验收标准

分项工程验收针对管道安装、接口施工、防水节点、支吊架安装等分项开展，核心验收标准：管道安装的平面位置、标高、垂直度偏差控制在规范允许范围内；管道接口连接牢固，无虚焊、粘接失效、丝接不严等缺陷，接口平顺无变形；支吊架安装平整牢固，间距符合规范，防腐处理到位；防水节点处理规范，套管填实密封到位，防水层无破损、漏涂；管道系统水压、闭水、通球试验全部合格，无渗漏、堵塞。验收采用抽样检验与全数检查相结合的方式，主控项目必须 100% 合格，一般项目合格率不低于 90%，且最大偏差不超规范允许值的 1.2 倍，方可判定为合格。

3.4 竣工验收标准

竣工验收是防渗漏性能的最终验收环节，核心验收标准：给排水管道系统全部施工完成，各分项工程验收合格；观感质量验收合格，管道安装顺直、固定牢固，接口平整，无破损、锈蚀，标识清晰；系统功能性试验全部合格，给水系统通水试验连续通水 2 h，流量、压力符合设计，各接口无渗漏；排水系统通水试验通畅无堵塞，全系统无渗漏；工程资料完整齐全，符合竣工资料归档要求。所有项目全部合格，方可通过竣工验收[5]。

4 防渗漏全过程闭环质量管控体系

构建覆盖设计、施工、验收、运维全生命周期的闭环质量管控机制，核心包括：落实质量责任制，明确各岗位、各工序的质量管控责任，严格执行班组自检、互检、专职质检员专检的“三检制”，上道工序不合格不得进入下道工序；推行样板引路制度，针对管道接口、防水节点等关键部位制作施工样板，验收合格后作为大面积施工的标准，确保施工工艺统一规范；建立渗漏隐患排查治理闭环机制，对施工中发现的隐患，做到责任、措施、时限、资金、预案“五落实”，整改复检合格后方可销号；搭建 BIM 数字化管控平台，实现管道模型、施工与验收数据全流程可追溯，采用红外热成像、管道内窥检测设备开展智能化隐患排查，精准识别微小渗漏点；强化作业人员技能培训，针对不同管材施工工艺开展专项培训考核，合格后方可上岗，杜绝不规范操作引发的渗漏隐患。

5 结束语

本文针对建筑给排水管道渗漏防控的核心需求，系统厘清了材料、设计、施工、环境四大维度的渗漏核心诱因，构建了覆盖施工全流程、适配不同管材特性的标准化防渗漏施工技术体系，建立了从材料进场、隐蔽工程、分项工程到竣工验收的全维度分阶段量化验收标准体系，明确了全生命周期闭环质量管控的核心路径。该技术与验收体系从源头、过程、验收全流程发力，可有效识别并消除管道渗漏隐患，降低渗漏事故发生率，提升建筑给排水工程的施工质量与长期服役性能。未来研究可进一步深化自修复防渗漏材料、分布式光纤渗漏在线监测技术、数字孪生全生命周期管控在给排水防渗漏工程中的应用，持续完善防渗漏施工技术与验收标准体系，推动建筑给排水工程高质量发展。

参考文献：

[1] 梁伟.建筑给排水管道防渗漏施工控制技术研究[J].工程建设与设计,2025(13):225-227.
[2] 胡宇凡.建筑给排水管道施工中防渗漏施工技术的研究[J].建筑与施工,2025(05):151-152.
[3] 张臣,张珂欣.建筑给排水管道施工中防渗漏施工技术的研究[J].房地产世界,2024(06):125-127.
[4] 孙艳.建筑给排水及暖通管道防渗漏施工技术分析[J].建材与装饰,2025(15):106-108.
[5] 贺建海,胡晓惠,史成波.市政给排水工程管道防渗漏质量控制与技术优化研究[J].中国品牌与防伪,2025(04):113-115.

隧道工程喷射混凝土超耗原因分析及管控措施探讨

芦长顺

（杭州强隧建设工程有限公司，浙江 杭州 310012）

摘 要 喷射混凝土是隧道工程初期支护的主要环节，其施工质量以及材料耗费与隧道施工的安全质量存在密切联系。喷射混凝土超耗问题普遍存在，在实际施工中会增加工程成本，还会由于材料浪费而导致支护结构强度不够、施工效率降低等状况，影响隧道工程顺利进行。本文以隧道工程施工实际为基础，对喷射混凝土超耗的影响因素进行系统的分析，从线性超挖、喷射混凝土回弹、现场组织管理这三个主要方面展开深入的剖析，进而有针对性地提出具有可行性的控制办法，并且用具体的隧道工程实例检验控制措施的效果，以期为隧道工程喷射混凝土施工降耗增效和提高施工质量提供参考。

关键词 隧道工程；喷射混凝土；超耗原因；线性超挖

中图分类号：U455.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.040

0 引言

随着我国交通基础设施建设速度的不断加快，隧道工程在公路、铁路、城市轨道交通等领域中的使用也越来越普遍。喷射混凝土由于施工方便、适应性好、可以迅速形成支护结构等特点，是隧道初期支护的主要工艺之一，主要用以加固围岩、封闭围岩裂隙、防止围岩风化坍塌，为隧道后续施工提供安全保证。喷射混凝土施工质量的好坏是决定初期支护体系稳定性的重要因素。合理控制材料用量，既是对项目成本优化的一种有效手段，又是保证工程质量合格的主要保证。针对喷射混凝土损耗高机理进行深层次的分析，同时提出相应的改进建议，具有十分重要的现实意义。

1 隧道喷射混凝土超耗的主要影响因素

1.1 线性超挖

从地质条件上看，隧道经过的围岩类型直接决定着开挖是否稳定，从而导致线性超挖。在软弱围岩中，由于围岩稳定性差、容易坍塌，在施工过程中为了保证施工的安全性，会增大开挖断面，导致实际的开挖轮廓线超过设计值。

从开挖工艺上看，不同开挖方法对线性超挖影响是不一样的。目前隧道开挖大多采用钻爆法、盾构法等，其中钻爆法使用最多，但是超挖控制难度大。钻爆法施工时，炮孔布置精度、炸药用量、起爆顺序等因素都会对开挖轮廓线的平整度和准确性产生影响，炮孔布置偏移会导致爆破后围岩过度破碎、轮廓线不规则，出现超挖现象，起爆顺序不合理会引发局部围岩坍塌或者过度开挖[1]。

从测量放线精度上看，精度不足是导致线性超挖的主要人为原因。隧道工程开工之前要利用精密测量技术对开挖轮廓线进行标定。如果测量仪器的精度不够、测量方法不对或者测量人员的操作失误，会引起放线误差，导致实际开挖轮廓线与设计轮廓线相偏离，从而产生超挖现象。

1.2 喷射混凝土回弹

在喷射工艺中，喷射压力、喷射距离、喷射角度等参数的设置会直接导致回弹值的变化。喷射压力过大时，会导致混凝土颗粒的冲击力过大，无法很好地与围岩黏结，反弹量增大；喷射压力过小时，混凝土颗粒动能不够，无法有效地附着在围岩上，也会增大回弹量。喷射距离太远，混凝土颗粒在空中飞舞时动能损失太大，碰到围岩表面后很难产生黏附效果，容易出现回弹现象；喷射距离太近，会导致混凝土颗粒的冲击力过大，反弹率增大。

在材料配合比中，混凝土的骨料级配、水胶比、外加剂掺量等都会影响回弹值。骨料级配不合理，粗骨料粒径大于16 mm，会使混凝土流动性变差，黏结力下降，喷射时容易出现回弹现象；细骨料含量不够，

作者简介：芦长顺（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：轨道交通及隧道施工技术。

会导致混凝土浆体含量低，无法很好地包裹住粗骨料，还会增大回弹量[2]。

1.3 组织管理不强

在管理制度上，部分施工单位没有形成完备的喷射混凝土施工管理制度，缺少对喷射混凝土材料消耗、施工工艺、质量控制等方面的具体规定和考核办法，造成施工中无章可依、责任不明。没有明确的超耗控制目标，没有建立超耗统计和分析制度，不能及时发现问题、解决问题，不能对超挖、回弹等现象进行有效控制。

在人员管理上，施工人员、管理人员专业水平低，未能对超耗进行有效的控制。管理人员缺少隧道喷射混凝土施工专业知识，不能及时发现施工过程中出现的超耗隐患，并且管控措施不到位。

从材料管理角度来看，由于材料采购、存储、使用等各方面的管理不善造成材料的浪费和损耗。材料采购时没有严格控制质量，采购的骨料、水泥等原材料不符合设计要求，骨料级配不合理、水泥强度不够会造成喷射混凝土性能下降，增加回弹量和超耗量[3]。

质量管控体系存在系统性漏洞，未能建立“事前预防、事中监控、事后追溯”的全流程管控机制，导致施工过程中的各类问题无法被及时识别、干预和解决。

2 隧道喷射混凝土超耗管控措施

2.1 控制线性超挖

第一，加强地质勘察和预测，改善开挖方案。施工前要对隧道穿过区域的围岩种类、地质构造、地下水状况等做详细的调查工作，编制出详尽的地质勘察报告，确定各个段落的围岩稳定程度。根据地质勘察结果，对不同的围岩类型采取不同的开挖方法，硬质围岩用钻爆法施工，炮孔布置和爆破参数合理选择，减小超挖；软质围岩用台阶法、CD 法等浅埋暗挖法施工，控制开挖进尺，及时做初支，防止围岩变形、塌方，减少超挖。

第二，改善开挖工艺，提高开挖精度。使用钻爆法施工时，严格控制炮孔布置、炸药量和起爆顺序，炮孔布置要准确地按设计轮廓线确定，周边眼间距控制在 30 cm～50 cm之间，眼底偏差不超过 5 cm，保证爆破后的轮廓线平顺，炸药用量应根据围岩类别进行合理调整，周边眼采用不耦合装药，减小爆破对围岩的扰动，防止过度开挖；采用毫秒微差起爆技术，使爆破能量均匀释放，减少局部超挖。

第三，加强测量放线和复核工作，保证开挖误差在允许范围之内。采用精度满足要求的测量仪器，由专业的测量人员进行放线工作，按照设计图纸上所标明的开挖轮廓线进行放线，放线结束后需要经过两人复查确认无误后才能使用。隧道开挖时，每开挖一个环都要做中线、高程复测，及时发现开挖误差并加以修正，防止误差积累[4]。

2.2 控制喷射混凝土回弹量

第一，改变喷射工艺参数以改善喷射效果。按照围岩类型、喷射部位等具体情况，合理调节喷射压力、喷射距离和喷射角度，即喷射压力控制在 0.3 MPa～0.5 MPa 之间，软弱围岩可减小喷射压力，防止冲击破坏围岩；喷射距离控制在 1.0 m～1.5 m，使混凝土颗粒有足够的动能。

第二，改善材料配合比以提高混凝土的性能。按照设计要求和施工实际情况，对喷射混凝土配合比进行调整，保证喷射混凝土有较好的流动性、黏结性及强度。合理控制骨料级配，粗骨料粒径为 5 mm～16 mm，细骨料为中砂，细度模数为 2.3～3.0，保证骨料级配合理；控制水胶比在 0.45～0.55 之间，使混凝土浆体有较好的流动性和黏结性，防止过稀或过干；合理掺入外加剂，速凝剂掺量控制在 3%～5%，加快混凝土凝结速度，减少回弹和流淌，提高混凝土早期强度；减水剂掺量根据试验确定，改善混凝土的流动性，降低水泥用量，降低成本。

第三，规范施工操作，提高操作水平。加强喷射作业人员的技术培训，使喷射工人会使用好喷射工艺、喷射操作规程及参数调节的方法。操作人员要控制喷头移动速度均匀，防止过快或者过慢导致喷射不均；喷头要做螺旋式移动，保证混凝土喷射密实均匀，减少局部过厚或者过薄的现象。为了改善施工现场技术控制水平，必须由专人驻现场予以检查、指挥。对作业人员的不规范操作行为要立刻进行纠正，根据喷射过程中出现的具体情况指导操作人员调节喷射参数，降低回弹量[5]。

第四，提高回弹料的回收利用率，减少材料浪费。喷射施工时及时清除掉掉落的回弹料，挑选出满足标准的回弹料，按一定比例掺入新拌和的混凝土混合料里再利用，削减材料损耗。

2.3 加强现场组织管理

加强现场组织管理是控制喷射混凝土超耗的保证，应建立健全管理制度，对人员、材料、质量进行规范管理，明确各方面的责任分工，使各项管控措施落到实处。

第一，建立完善的管理制度，确定好责任分工。建立完善的喷射混凝土施工管理制度、操作规程和超耗控制考核制度，确定超耗控制目标，将超耗控制的责任落实到个人。建立超耗统计和分析制度，定期统

计喷射混凝土实际消耗量及超耗率，分析超耗原因，及时采取措施；将超耗控制结果与绩效考评相联系，对于超耗控制较好的个人、班组予以嘉奖，对超耗较大的实行惩罚，以此调动施工人员的工作积极性和责任感。

第二，加强人员管理，提高人员素质。加强管理人员及操作人员的专项技术培训工作，管理人员要懂隧道喷射混凝土施工专业知识、超耗控制办法和质量管控要点等，从而提升管理控制水平，操作人员须经系统的技术培训并考核通过方能持证上岗。还要建立人员档案，对施工人员实施继续教育和技能考核制度，从而不断改善施工队伍的专业素质。

第三，对材料进行规范化的管理，避免出现浪费现象。建立健全材料采购、储存、使用的管理制度，严格控制原材料的质量，采购前对供应商进行资质审核，采购过程中对原材料进行抽样检测，保证原材料满足设计要求；材料储存时采取有效的防护措施，水泥存放在干燥、通风的库房里，骨料分批堆放，防止混入杂质和受潮；材料使用时实行限额领料制，按施工进度及设计用量发放材料，不得任意领用。

第四，加强质量控制，及时消除隐患。建立完善的现场质量检查和验收制度，安排专业的质量检查人员到现场进行监督，对开挖轮廓线、喷射混凝土配合比、喷射工艺参数、喷射厚度等进行全过程的检查。开挖完毕后立即检查开挖轮廓线，对于超挖部分应及时处理；喷射时检查喷射压力、距离、角度等参数是否符合要求；喷射完成后检查喷射混凝土厚度、强度等质量指标，用钻孔检测法检测喷射厚度，保证厚度符合设计要求，对厚度不够或者回弹量过大处及时补喷。

3 管控效果验证分析

为了检验以上喷射混凝土超耗控制措施是否有效，本文选取某公路隧道工程作为研究对象，根据该工程的施工特点及超耗情况，采用上述管控措施进行管控，并对管控效果进行分析，以供同类工程参考。

该公路隧道长1 200 m，双向四车道隧道，设计速度80 km/h，隧道穿过围岩主要是Ⅳ级、Ⅴ级软弱围岩，地质情况比较复杂，围岩稳定性不好，施工难度大。本隧道工程初期支护中使用了喷射混凝土工艺，设计厚度为10 cm，材料强度等级设为C25。初期施工时超挖率达到16.8%，超出规范要求的上限，不但加大了工程造价，而且影响到施工进度和支护质量[6]。

施工单位根据本文提出的方法对隧道喷射混凝土超耗严重问题进行了改进，从控制线性超挖、控制回弹量、加强现场组织管理三个方面入手。一是优化开挖方案，对于Ⅳ级、Ⅴ级围岩采用台阶法施工，控制开挖进尺在0.5 m～1.0 m之间，改善炮孔布置和爆破参数，加强地质超前预报及测量复核工作，削减线性超挖；二是改良喷射混凝土配合比，改变骨料级配和水胶比，加入适量的速凝剂和减水剂，改良喷射工艺参数，严格操作人员培训，规范操作程序，加强回弹料回收利用；三是建立完善的管理制度，确定超耗控制的责任人，加强人员管理和材料管理，加强现场的质量控制，建立超耗统计和整改制度。

经过以上控制措施后，该隧道喷射混凝土超耗现象得到很好的控制，超耗率由16.8%下降到4.2%，小于规范规定的5%，管控效果明显。

4 结束语

在隧道工程中，喷射混凝土超耗问题已成为目前亟需解决的重要技术问题。该种现象会导致资源浪费、成本上升，并且会对工程质量、施工安全和工期安排造成不利的影响。本文主要从三个方面提出对策：一是根据开挖设计的优化、施工精细度的提高、测量控制系统升级三个方面来减少线性超挖；二是分析喷射工艺参数设置、材料配比的设计、回弹物料回收利用方案的实施，有效降低回弹损耗；三是建立完善的管理制度，对施工现场的资源配置、质量检验进行专业的管理和有效的监督，提升各项措施的实际应用效果，确保效益最大化。

参考文献：

[1] 陈涛,吴怀娜,文嘉,等.喷射超高性能混凝土-普通混凝土界面剪切性能试验及理论分析[J/OL].中国公路学报,1-15.[2026-03-04][2026-04-01]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=1VJ3acR1kaW_TBc5x4E9yDbBK5d07PzqjegZNzxAsI5WIqP3H4TEGnwB9Bby6tO3-wwHspO_IraB2b3cF-HT_hU-25CoOX_T7lbZge9FJ9OVcMGTHMk8-hx4Fo8G4REKSizWpR6fnft3TR1DQ--UMjuJO9F6L6CCSxnOIg01gUgufEFWS8-yEA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[2] 刘奇.隧道喷射水泥混凝土施工质量控制关键技术[J].水泥,2026(03):106-108.

[3] 方园.喷射混凝土-围岩界面粘结特性对围岩稳定性的影响机制[J].价值工程,2026,45(06):1-4.

[4] 张晓江,杨永超,姬勇刚,等.基于水文地质特征的云贵地区隧道喷射混凝土耐久性研究概述[J].混凝土世界,2025(11):80-85.

[5] 于本田,赵康康,杨玉祥,等.铁路隧道排水盲管结晶堵塞机理及喷射混凝土钙溶蚀研究[J].中国铁道科学,2025,46(06):99-110.

[6] 宋恒祥,戴晓威,周凯.隧道喷射混凝土钙溶蚀抑制技术及其工程应用[J].工程技术研究,2025,10(18):41-44.

国土空间规划动态维护中的底线管控与弹性调整研究

邓发廷

（广东中土城乡规划有限公司，广东 茂名 525000）

摘 要 在国土空间规划由静态编制转向全周期治理的背景下，动态维护已成为连接实施监督、项目准入审查与成果更新的关键技术环节。针对底线校核口径不统一、调整边界模糊、台账闭环不足等问题，本文构建“底线识别—弹性判别—分级处置—成果回写”的技术流程，并以某沿海城区 2023-2025 年 126 个动态维护图斑的示范算例数据为基础，建立五类底线约束库，设置冲突强度、公共服务适配度、功能兼容度、实施紧迫度和修复可逆性等判别指标，形成刚性否决、条件调整、直接维护三类处置规则，以期为市县级国土空间规划动态维护提供技术参考。结果表明，该流程能够前置识别底线冲突，缩短退件链条，提高成果回写一致性和维护闭环效率。

关键词 国土空间规划；动态维护；底线管控；弹性调整；实施监督

中图分类号：TU98 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.041

0 引言

国土空间规划进入实施监督阶段后，规划成果不再是一次性静态文本，而是需要伴随项目建设、用途转换、设施补短和生态修复持续校核、迭代和回写的治理底板。在现实工作中，动态维护常面临两类偏差，一类是底线管控被简化为末端审查，导致冲突发现偏晚、退件频繁；另一类是弹性调整缺乏可量化门槛，容易出现“应调未调”与“可调失序”并存。近年来，CSPON 建设、实施监督体系完善和城市级监测体系探索，为动态维护由经验审批转向规则化维护提供了方法支撑[1]。因此，有必要围绕底线刚性约束和弹性优化需求，建立可直接落地于维护台账、图斑核查和成果回写环节的技术方法。

1 动态维护中底线管控与弹性调整的技术约束

1.1 底线管控对象与维护边界

动态维护的首要任务不是修改图斑本身，而是界定哪些对象原则上不得调整、哪些对象可以在限定条件下优化。结合现行规划实施监督要求，底线管控对象应覆盖耕地保护、生态保护、城镇安全、文化传承和基础设施通道等关键内容[2]。从技术上看，可将维护对象分为三类。第一类为绝对约束对象，包括落入永久基本农田和生态保护红线核心控制区的图斑，此类对象一经识别即进入刚性否决清单。第二类为条件约束对象，包括城镇开发边界边缘区、重要廊道控制区、历史文化风貌协调区及滨水蓝绿空间缓冲带，此类对象允许在不削弱总体功能、不突破指标上限且能够完成等效修复的前提下提出调整。第三类为一般维护对象，主要涉及地类细化、设施落图修正、现状误差纠偏和项目边界优化等事项，可按常规维护流程办理。上述分类有助于将“先判底线、再看需求”固化为维护入口规则，避免无差别进入审查流程。

1.2 弹性调整触发条件

底线管控强调刚性，但动态维护并不意味着一律禁止变化。对处于条件约束区的图斑，应重点识别是否满足弹性调整触发条件。根据实施监督体系中“监测—评估—决策”的逻辑，弹性调整应建立在事实变化已经形成、公共利益确有需求、替代修复措施明确、调整后整体格局不弱化四项前提之上[3]。据此，本文设置五项触发条件。其一，现状偏差条件，即最新调查、遥感判读或审批资料证明图斑边界、用途或设施位置与现行成果存在明显不一致。其二，民生补短条件，即教育、医疗、养老、消防、排涝等公共服务供给存在可量化缺口。其三，功能兼容条件，即拟调整内容与所在分区主导功能保持一致，不产生明显外部负效应。其四，修复可逆条件，即可通过补划、补植、腾退、腾挪、生态修补等方式完成等效或增量修复。其五，程序可追溯条件，即调整理由、空间位置、责任主体、

作者简介：邓发廷（1994-），男，本科，工程师，研究方向：土地资源管理。

审批依据和回写版本均可留痕。只有同时满足前三项并满足后两项之一，方可进入弹性评估。

2 动态维护技术流程与判别模型

2.1 数据底板与维护单元划分

为使动态维护直接嵌入业务系统，本文将维护最小单元统一为图斑，并以“现状数据层—规划控制层—审批监管层—实施反馈层”四层数据构成动态维护底板。现状数据层包括年度国土变更调查、遥感监测成果、基础地理底图和重点项目实测边界；规划控制层包括主体功能分区、用途分区、控制线及专项控制要素；审批监管层包括许可台账、建设时序、用地指标、项目实施状态和违法预警信息；实施反馈层包括维护结果、版本号、责任人、回写时间及修复验收信息。考虑到不同尺度图斑对底线敏感性差异较大，本文采用“图斑—街区—片区”三级关联的维护单元体系。图斑负责定位具体冲突，街区负责识别公共服务与功能兼容，片区负责判断总量平衡与底线稳定，从而避免单图斑调整累积后引发片区性失稳[4]。同时，维护单元编码应与审批编号、监测样本编号和数据库版本号建立一一映射关系，确保同一事项在不同业务模块中可交叉检索、可反向追踪、可自动比对，并为后续审计复核预留接口。

2.2 底线冲突识别与弹性判别模型

在业务实现上，先进行底线冲突识别，再进行弹性判别。底线识别采用空间叠加与缓冲校核结合的方法，计算图斑与各类底线约束区的重叠面积占比R、缓冲敏感距离D和冲突等级C。其中，$R \geq 0.30$ 或进入绝对约束对象的，直接判定为刚性冲突；$0 < R < 0.30$ 且位于条件约束区的，进入弹性评估。弹性判别则以综合得分S为核心，S由公共服务适配度A、功能兼容度B、实施紧迫度E和修复可逆性F构成，即 $S=0.30A+0.25B+0.20E+0.25F$。各指标按100分制评价，阈值设置为 $S \geq 80$ 可直接进入条件调整，$60 \leqslant S < 80$ 需补充论证后再审，$S < 60$ 不予调整。为防止“高分掩盖底线冲突”，模型设置一票否决条款，即凡涉及永久基本农田实质性占用、生态保护红线功能削弱、重大安全设施通道阻断或历史文化资源不可逆损害的，即使综合得分达标也不得进入弹性调整。该做法能够把规则判断前移到申请受理阶段，减少重复退回和人为裁量波动[5]。

2.3 分级处置与成果回写机制

依据底线识别和综合评分结果，动态维护事项可分为三类处置路径。A类为刚性否决事项，处理方式为退件并生成底线冲突清单，同步推送至审批协同模块；B类为条件调整事项，需补充修复方案、总量平衡证明和部门会商意见，经审查通过后方可更新成果；C类为直接维护事项，可按批量维护流程完成图斑更新、属性同步与版本归档。为了保证成果维护不是“改完即止”，还需要建立回写闭环。具体包括四个步骤，即维护前留存原版图斑及属性快照，维护中形成过程台账和会商记录，维护后同步更新“一张图”数据库、审批索引和监测看板，维护完成后纳入下一轮监测样本库。通过版本号、责任链和时间戳绑定，可实现“申请—审查—调整—回写—复核”的全流程可追溯管理。

3 示范算例与结果分析

3.1 样本概况

为验证技术流程的可操作性，本文构建某沿海城区2023-2025年126个动态维护图斑示范算例，覆盖公共服务设施补点、道路与市政廊道修正、用地边界优化、生态修复回写和历史遗留误差纠偏五类事项。样本总面积为214.37 hm^2，其中公共服务补点类38宗、道路与市政廊道修正类27宗、用地边界优化类31宗、生态修复回写类18宗、历史遗留误差纠偏类12宗。在空间分布上，69.84%的图斑位于城镇开发边界内，18.25%的图斑位于边界邻接带，11.91%的图斑与蓝绿空间骨架或历史文化控制区存在交叠关系。底线冲突预判结果显示，126宗样本中有23宗存在刚性冲突风险，有42宗属于条件约束区内的潜在弹性调整事项，其余61宗可进入常规维护流程。年度统计结果见表1。

3.2 底线校核结果

从年度结果看，2023-2025年样本数量分别为36宗、42宗和48宗，呈稳步上升趋势，说明随着动态维护

表1 2023-2025年动态维护样本年度统计

年份	样本数量/宗	刚性否决/宗	条件调整/宗	直接维护/宗	平均审查周期/d	回写一致率/%
2023	36	8	10	18	12.6	94.4
2024	42	8	14	20	11.1	95.2
2025	48	7	18	23	10.0	98.0
合计	126	23	42	61	11.2	96.0

常态化推进，维护需求逐渐由纠偏型事项扩展到优化型事项。三个年度中，刚性冲突占比分别为 22.22%、19.05% 和 14.58%，表现为逐年下降；满足条件调整的占比分别为 27.78%、33.33% 和 37.50%，表现为逐年上升；直接维护占比分别为 50.00%、47.62% 和 47.92%，整体保持稳定。上述变化表明，在底线识别规则前置后，申请主体能够更早识别不可调事项，同时把更多工作转移到可修复、可论证的弹性优化层面。就事项类型而言，公共服务补点与道路廊道修正类事项最能体现弹性调整价值，其共同特征是民生需求明确、功能兼容性较高、修复路径清晰；而涉及永久基本农田边缘蚕食和生态廊道截断的事项则多被纳入刚性否决清单。

3.3 维护效率分析

从审批效率看，采用本文技术流程后，样本平均审查周期由 18.6 d 降至 11.2 d，缩短 39.78%；一次性通过率由 58.73% 提升至 81.75%；成果回写一致率由 86.12% 提升至 96.03%。其中，提升最显著的环节是退件链条缩短和部门会商次数下降。原因在于底线冲突识别由人工复核后置转为系统受理前置，弹性调整事项则通过量化阈值明确了补充论证要求，减少了“资料补一点、口径改一次”的反复循环。从闭环治理角度看，维护事项在完成图斑更新后，同步写入监测样本库，可为下一周期的监测预警提供训练样本和规则校准依据，进而形成动态维护与实施监督的双向反馈。

4 技术实施要点

4.1 维护规则编码与阈值管理

动态维护要从经验审查转向稳定运行，关键是将底线管控与弹性调整规则编码入系统。建议以图斑为核心建立规则库，参数化配置底线类型、冲突等级、触发条件、所需材料、会商部门、审批时限和回写字段。阈值类指标实行“年度评估、滚动校准”。例如：公共服务适配度可依据服务半径缺口、覆盖人口和项目急迫度动态修正；修复可逆性可根据补划落实率、生态修补周期和验收难度调整。通过规则参数化，可适应不同片区治理重点，提升维护稳定性与可迁移性。

此外，生态修复回写类事项虽数量不高，但精度要求最高，既涉及地类变化，也涉及生态控制线内外的功能连续性。历史遗留误差纠偏类事项看似技术难度较低，实际最易造成数据库版本混乱，因此必须采用“原成果锁定、纠偏成果另存、复核通过后替换”的方式处理。

在阈值应用中，注意各片区对同一指标的敏感度差异。老城区更关注公共服务与历史风貌协调，新区更关注廊道连续性、设施时序及用地强度匹配。因此，在综合得分阈值下，应允许分区配置不同指标权重，但底线否决条件必须统一，以兼顾底线管控一致性与空间差异化治理。

4.2 台账闭环与协同审查

技术流程能否真正落地，最终取决于台账闭环与部门协同。建议将动态维护事项统一纳入台账管理，形成唯一事项编码，并与许可审批、项目建设、执法监管和体检评估模块建立关联字段。对条件调整事项，应设置自然资源、住建、生态环境、水务、文保等部门的会商触发规则，避免事项在部门之间多头流转。对完成维护的事项，应同步触发成果回写、指标更新、图斑锁定和后评估任务。同时，可将维护结果与年度体检、用地绩效评价和执法巡查清单联动，形成“发现问题—校核规则—调整成果—复核反馈”的持续改进闭环链条。只有把图斑维护、审批协同和监测反馈纳入同一闭环，底线管控才不会停留在纸面约束，弹性调整也不会演变为无边界放松。

5 结束语

国土空间规划动态维护的难点不在于是否允许调整，而在于如何在底线刚性约束下实现有边界的优化。本文围绕动态维护业务场景，提出“底线识别—弹性判别—分级处置—成果回写”的技术流程，并以示范算例验证了其在冲突前置识别、退件链条压缩、成果回写一致性提升等方面的可行性。结果表明，动态维护只有同时具备规则化入口、量化阈值、分级处置和版本闭环四项机制，才能兼顾底线安全与发展弹性。未来可进一步引入实时监测、事件感知和模型自校正能力，提升动态维护对市县级国土空间治理的支撑效能。

参考文献：

[1] 王伟，柳泽，林俞先，等. 从国土空间规划“一张图”到CSPON“一张网”学术笔谈 [J]. 北京规划建设，2024(01):52-65.

[2] 孙施文. 国土空间规划实施监督体系的基础研究 [J]. 城市规划学刊，2024(02):12-17.

[3] 侯静轩，潘海霞，罗杰. 国土空间规划实施监测网络建设的内涵解析及展望 [J]. 规划师，2024,40(03):1-6.

[4] 黄伊婧，张姗琪，林昀，等. 城市级国土空间规划实施监测体系的构建思路与实践探索：以宁波市为例 [J]. 自然资源学报，2024,39(04):823-841.

[5] 罗杰. 引领国土空间治理“数智化”转型的系统工程：全国国土空间规划实施监测网络建设的方法路径探讨 [J]. 中国土地，2024(05):4-8.

基于GIS的工业源空间分布特征分析
——以广安市前锋区为例

蒋乾成
（西藏国策环保科技股份有限公司，西藏 拉萨 850032）

摘 要 为掌握广安市前锋区工业源大气污染物排放状况及其空间分布规律，本研究收集了该区域2022年各类污染源的活动水平数据，构建了该年度的大气污染物排放清单。结果表明：2022年，前锋区污染物排放量较大的区域集中在代市镇、大佛寺街道和新桥街道一带。基于GIS核密度分析揭示了排放高值区的空间集聚特征，为差异化管控提供了依据。该清单的构建完善了区域污染源数据库，有助于提升环境管理决策的科学化水平。

关键词 排放清单；排放因子；排放特征；前锋区
中图分类号：X501；P208 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.042

0 引言

大气污染物排放清单是一种按污染源类别组织的记录，用于描述某一特定时段和区域内向大气中排放一种或多种污染物的数据集合[1]。这类清单是开展大气环境研究和制定管理政策的关键基础，有助于城市或地区识别其主要污染来源、解析污染形成原因，并制定科学合理的控制措施[2]。目前，针对前锋区这样小尺度的大气污染物排放清单仍较少，陈东、陈军辉、何敏等基于全面的实地调研，获取了广安市2016年各典型污染源的活动水平数据，依据城市排放清单编制手册，采用排放因子法，建立了广安市2016年大气污染源排放清单，并分析了主要污染源排放特征[3]。前锋区未建立完整的排放源清单，无法反映前锋区大气污染物排放特征，不利于开展相关大气研究。本文以前锋区为研究对象，以2022年为基准年，参考大气污染物排放清单编制技术指南，建立前锋区2022年大气污染物排放清单，并利用GIS方法，将清单数据与地理数据结合[4]，分析大气污染物排放的空间分布特征，为区域大气污染物控制决策提供科学依据。

1 排放清单构建材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究基准年为2022年，以广安市前锋区为研究对象，研究区辖4个街道、8个镇，面积合计505.58 km^2[5]。污染物种类有：SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$。参考编制指南划分为工业源、移动源、扬尘源、生活溶剂使用源、居民生活源、餐饮源、秸秆露天焚烧源、农业源、废水处理源、存储运输源、民用锅炉源。

1.2 数据来源

本研究参考编制指南，收集2022年前锋区环境统计数据，结合国家大气污染源排放清单指南推荐的相关排放因子系数库，编制前锋区2022年大气污染物排放清单。

1.3 计算方法

计算方法是按照编制指南的公式以及相应的系数库对污染物排放量进行计算，公示如下：

$$E_i=\sum_p A_p\times EF_{pi}\times(1-\eta_i) \quad (1)$$

式（1）中，E为污染物的年排放量；i为污染物的种类；p为排放源的类别；A为排放源活动水平；EF为污染物排放系数；η为末端去除效率。

2 工业源污染物排放特征及空间分布结果与分析

2.1 排放特征分析

本次研究基于活动水平数据计算得出前锋区SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放量分别为1 617.42 t、7 732.71 t、27 942.02 t、2 658.36 t、1 608.9 t、3 142.71 t、1 897.11 t。

前锋区SO_2共排放1 617.42 t，主要来自工业源，排放量占比达93.30%。NO_x共排放7 732.71 t，主要来自工业源和移动源，排放量占比分别为90.28%和9.19%。CO共排放27 942.02 t，主要来自工业源，占

作者简介：蒋乾成（1991-），男，本科，工程师，研究方向：环境保护、环境影响评价。

比为 93.02%。PM_{10} 共排放 2 658.36 t，主要来自工业源和扬尘源，占比分别为 81.93%、10.25%。一次 $PM_{2.5}$ 共排放 1 608.9 t，主要来自工业源，占比为 87.90%。VOCs 排放 3 142.71 t，主要来自工业源和移动源，占比分别为 67.71%、18.02%。NH_3 共排放 1 897.11 t，绝大部分来自农业源排放，占比为 98.43%。

由表 1 可知，前锋区 2022 年大气污染主要排放来自工业源和移动源。

表 1 2022 年前锋区大气污染物排放清单 单位：t/a

排放源	工业源	移动源	扬尘源	生活溶剂使用源	农业源	秸秆露天焚烧	居民生活源	废物利用	社会餐饮	储存运输源	合计
SO_2	1 509.1	6.1	0	0	0	1.22	101	0	0	0	1 617.42
NO_x	6 981.1	710.3	0	0	0	16.01	25.3	0	0	0	7 732.71
CO	25 992.2	1 381.7	0	0	0	347.62	220.5	0	0	0	27 942.02
PM_{10}	2 178	38.5	272.6	0	0	127.96	30.3	0	11	0	2 658.36
$PM_{2.5}$	1 414.2	35.7	78.3	0	0	49.9	22	0	8.8	0	1 608.9
VOCs	2 127.8	566.2	0	311.7	0	54.01	8.8	1.85	22.72	49.63	3 142.71
NH_3	0	21.6	0	0	1 867.4	3.61	1.2	3.3	0	0	1 897.11

表 2 前锋区各镇污染物排放统计 单位：t/a

位置	代市镇	大佛寺街道	奎阁街道	广兴镇	新桥街道	桂兴镇	观阁镇	龙塘街道	龙滩镇	合计
SO_2	1 343.75	33.68	0.00	0.00	43.41	84.46	0.00	3.81	0.00	1 509.12
NO_x	5 372.45	618.31	1.13	0.00	771.56	207.57	0.02	10.07	0.00	6 981.11
CO	13 094.01	5 516.99	0.70	0.00	6 186.28	1 024.04	0.01	170.16	0.00	25 992.21
PM_{10}	355.04	1 257.23	20.72	95.04	125.07	130.67	0.00	5.47	188.74	2 177.98
$PM_{2.5}$	179.54	857.10	16.33	59.40	100.49	79.04	0.00	4.34	117.96	1 414.20
VOCs	261.92	81.19	0.07	0.00	1 770.39	1.45	0.00	12.76	0.00	2 127.78

2.2 工业源排放空间分布特征

2.2.1 工业源空间分布情况

据前锋区企业涉气企业分布情况来看，大佛寺街道、新桥街道等地工业企业分布相对较多，排放大户主要在代市镇、新桥街道（见表 2）。

2.2.2 工业源空间分布特征

为探究前锋区工业企业大气污染物排放的空间集聚格局，采用核密度估计（KDE）方法进行分析。以企业各污染因子年排放量作为权重，利用核密度分析工具生成排放强度密度表面，采用分位数法将连续的核密度值划分为低、中、高三个等级。

结果显示，高排放区集中于新桥街道和代市镇，主要由广安发电有限责任公司等大型企业驱动；中排放区沿工业带向大佛寺街道延伸；低排放区分布于研究区外围乡镇。该结果直观反映了工业活动对环境压力的空间分异，可为差异化环境管理提供依据。

从点源污染物排放量核密度分布图（见图 1）可以看出，污染物排放有多个集中区域，较为明显的有代市镇、大佛寺街道、新桥街道，特别是大佛寺街道，主要是因为分布了多个建材和机械加工企业，导致污染物排放量大。

代市镇是 SO_2、NO_x、CO 污染物排放的主要区域，由燃煤电厂主导，排放强度大，分别占全市排放量的 89.04%、76.96% 和 50.38%。大佛寺街道是 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排放的主要区域，主要来自大佛寺街道的建材、水泥及机械加工企业，分别占全市排放量的 57.72% 和 60.61%。新桥街道是 VOCs 排放的主要区域，呈现行业集聚特征，占全市排放量的 83.20%。

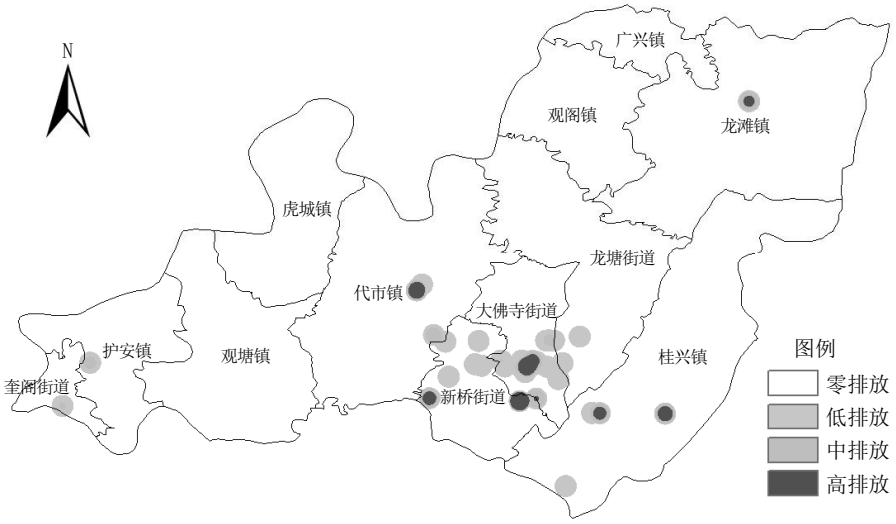

图1 前锋区PM2.5排放量空间分布

2.3 不确定性分析

任何排放清单的编制过程都不可避免地存在一定的不确定性，主要来源于活动水平数据的准确性、核算方法的选择以及排放因子的适用性。

本研究所构建的排放清单在准确性方面受到一定制约，不确定性主要来自估算方法的选择、基础活动数据的获取以及排放因子的本地化程度。在核算环节，虽然遵循了通用的技术指南，但由于不同企业在生产工艺和污染控制设施的运行效率上存在显著差异，特别是末端治理措施的实际去除率难以精确量化，从而给排放量测算引入了偏差。在活动水平数据方面，尽管规模以上工业企业的信息相对完备，但部分小型排放源未纳入常规统计体系，依赖抽样调查或经验估算难以实现全面覆盖。排放因子多采用全国推荐值，未能充分反映区域技术水平和污染控制的具体差异，进一步削弱了估算结果的区域适用性。综合来看，上述因素共同导致了清单结果在精度上存在一定局限。

3 结论

第一，2022年前锋区SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、PM_{10}、$PM_{2.5}$排放量分别为1 617.42 t、7 732.71 t、27 942.02 t、2 658.36 t、1 608.9 t、3 142.71 t、1 897.11 t。

第二，前锋区SO_2共排放1617.42t，主要来自工业源，排放量占比达93.30%。NO_x共排放7 732.71 t，主要来自工业源和移动源，排放量占比分别为90.28%和9.19%。CO共排放27 942.02 t，主要来自工业源，占比为93.02%。PM_{10}共排放2 658.36 t，主要来自工业源和扬尘源，占比分别为81.93%、10.25%。一次$PM_{2.5}$共排放1 608.9 t，主要来自工业源，占比为87.90%。VOCs排放3 142.71 t，主要来自工业源和移动源，占比分别为67.71%、18.02%。NH_3共排放1 897.11 t，绝大部分来自农业源排放，占比为98.43%。

第三，代市镇是SO_2、NO_x、CO污染物排放的主要区域，由燃煤电厂主导，排放强度大，分别占全市排放量的89.04%、76.96%和50.38%。大佛寺街道是PM_{10}、$PM_{2.5}$排放的主要区域，主要来自大佛寺街道的建材、水泥及机械加工企业，分别占全市排放量的57.72%和60.61%。新桥街道是VOCs排放的主要区域，呈现行业集聚特征，占全市排放量的83.20%。

第四，本次研究计算采用的排放因子为全国平均参考数据，排放量计算结果存在一定的不确定性。

参考文献：

[1] 祝胜男,赵帝,李一倬,等.沈阳市人为源大气污染物排放清单研究[J].环境保护科学,2023(02):105-111.
[2] 李燕.江苏省时空高分辨率工业源多污染物排放清单构建及特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2024.
[3] 陈东,陈军辉,何敏,等.广安市大气污染源排放清单研究[J].四川环境,2019,38(03):106-113.
[4] 余乐,杨丹凤,徐留兴.彭州市大气污染排放清单及工业源分布特征研究[J].区域治理,2025(03):70-73.
[5] 前锋区地方志编撰中心.前锋年鉴2024[M].郑州:中州古籍出版社,2024.