科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

（1993 年创刊 · 旬刊）

2026 年 4 月 第 12 期（总第 637 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 4 月 25 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

001 建筑工程管理中的信息孤岛成因分析与协同治理策略研究 …… 蓝方芳，宾艳贤

004 装配式框架结构“钢牛腿支承 + 免支撑”快速施工工法研究 …… 李　翔，姜首杰

007 全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控体系研究 …… 朱豫秦

010 市政道路沥青路面施工平整度控制技术优化与耐久性提升研究 …… 刘　过

013 有限元分析模型与无线应变测试系统在连续刚构桥成桥检测中的应用 …… 吴　君

智能科技

016 电力工程数字孪生应用系统架构设计 …… 程正逢，李红明，罗壮强，付江缺，王　林

019 基于深度学习的监控视频异常行为检测方法 …… 崔旭龙，张力文，刘　铠，赵哲宇，朱晓程

022 智能传感与物联网技术在地震监测中的应用研究 …… 邱　淑

025 基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨 …… 张子豪

028 发电厂集控运行模式下主辅设备协同控制优化策略研究 …… 崔　亮

031 基于多策略改进鲸鱼优化算法的无线传感器网络布设研究 …… 闫　东

034 数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工全过程管控中的实践 …… 刘颖超，刘元鑫，王梦思

目录 Contents

应用技术

037 建筑结构抗震设计及施工技术研究 ..... 李传晓
040 高寒硬岩地区人工挖孔桩质量控制技术 ..... 王龙涛
043 土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点 ..... 张文学
046 水利工程施工中高边坡稳定控制技术研究 ..... 杨永铭
049 大型商业综合体深基坑施工数值模拟分析研究 ..... 李军平
052 水利工程渠道衬砌施工技术要点分析及质量控制 ..... 舒 玲
055 水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化研究 ..... 李 程，朱玉晓，张 阁
058 高海拔大埋深隧道混凝土病害处治技术研究 ..... 余 强

科创产业

061 基于 BOM 管理的单一数据源应用研究 ..... 白 杨
064 全生命周期视角下建筑工程成本管控 ..... 陈凯丽
067 VDI 桌面云服务质量评价指标体系构建研究 ..... 龚泽滢
070 EPC 模式下建筑工程总承包项目管理问题及对策 ..... 徐 倩，谷 帅
073 城市公交燃油发动机关键零部件机械制造工艺技术研究 ..... 刘连红
076 水利工程全生命周期质量检测体系构建与关键指标标准化研究 ..... 赵中亚，党安华，湛晓颖
079 废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术创新与实践 ..... 张 力

技术管理

082 给排水机电设备节能参数优化分析 ..... 郝彦博
085 装配式建筑全生命周期碳排放问题分析 ..... 刘晓彤
088 交通道桥施工质量问题及控制措施研究 ..... 南国领，于海洋，纪长卫
091 市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺 ..... 叶立山
094 建筑机电设备安装施工中常见问题及对策探析 ..... 王志超
097 冬季小型建筑混凝土施工的简易保温养护方法 ..... 石艳斌，刘兴臣
100 钢混组合桥梁在交通工程中的应用与性能分析 ..... 张 帅，白 飞

科学论坛

103 布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计 ..... 武树明，王 弘，张洪玮
106 高密度聚乙烯反应影响因素及控制路径 ..... 刘佳伟
109 高层建筑给排水系统优化设计与施工要点 ..... 马士玉
112 市政工程供热管网施工改造节能设计分析 ..... 张敦国
115 基于 PLC 的二氧化碳增压设备的控制系统设计 ..... 谢鑫磊
118 电解水制氢项目电气设计思路及专业配合分析 ..... 王 统
121 基于冷热负荷联动的建筑暖通空调系统节能设计 ..... 孙晨明，刘 娟，周 军
124 工民建施工中绿色节能技术应用现状与优化策略研究 ..... 张书学

建筑工程管理中的信息孤岛成因分析与协同治理策略研究

蓝方芳，宾艳贤

（广西安全工程职业技术学院，广西 南宁 530100）

摘 要 本研究聚焦建筑工程管理信息孤岛，从技术、组织、文化、管理多维度剖析成因。技术上数据格式不统一、接口不兼容影响显著，管理上协同机制缺失为主要问题。实施技术集成、组织协同与文化培育策略后，信息共享与跨部门协作效率提升，项目变更处理加快，利益相关者满意度提高。协同治理有效打破信息孤岛，提升项目管理效率与质量，实现成本节约与工期缩短。研究证实，综合治理是消除信息孤岛、提升建筑工程管理整体水平的关键。

关键词 信息孤岛；技术集成；协同治理；建筑工程管理

基金项目：广西安全工程职业技术学院2025年度校级科研项目《安全应急工程中临时设施工程造价动态管控研究》研究成果（项目编号：GAZY2025KYB002）。

中图分类号：TU71 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.001

0 引言

在建筑工程管理中，信息孤岛成为阻碍项目高效推进、高质量交付的关键难题。信息孤岛本质上是项目管理中信息系统间因技术壁垒、组织壁垒及文化壁垒导致的“数据割裂”现象，表现为信息流通阻塞、资源协同失效，最终引发项目成本超支、工期延误及质量隐患等连锁反应[1]。现有研究表明，BIM技术虽能通过三维模型实现设计、施工阶段的局部信息整合，但受限于各参与方系统异构性，仍难以突破全生命周期的信息孤岛困境；而传统信息化管理模式因缺乏统一数据标准与协同机制，进一步加剧了信息碎片化程度。因此，系统地剖析信息孤岛现象背后深层次的原因，并提出融合技术集成、组织协同以及文化培育等多方面因素的多维治理策略是提升建筑工程管理效能的迫切需要。

1 信息孤岛的定义与特征

1.1 信息孤岛的定义

在建筑工程管理中，信息孤岛的特殊现象由技术、组织、文化等多方面因素相互交织影响，最终造成信息系统之间难以实现有效的信息交换与共享。这种状态如同无形的壁垒，极大地阻碍了项目管理中各部门协同合作的顺畅推进，让不同部门或环节在信息的获取与传递过程中困难重重，最终致使整体工作效率明显降低。若从系统论的视角来审视，会发现信息孤岛这一现象严重破坏了建筑工程管理系统的完整性，使得系统内部各个子系统之间的信息流通出现阻碍，难以形成一个有机的整体，进而无法实现高效运作[2]。信息孤岛现象的出现和建筑工程管理系统所具备的复杂性有着密不可分的联系。建筑工程管理囊括了多个参与方、众多专业领域，还涉及大量信息数据，不同参与方和专业领域常常各自使用独立的信息系统，这些系统在技术标准、数据格式等方面存在不同，很难达到无缝对接。

1.2 信息孤岛的特征

信息孤岛呈现出隐蔽、顽固且易扩散等特征。隐蔽性表现为在项目管理初期，信息孤岛往往难以被察觉，随着项目推进，其影响才慢慢显现，当出现信息传递不顺畅、决策出现失误等情况时，人们才会意识到信息孤岛已然存在。顽固性具体体现为，当信息孤岛形成后，因其涉及技术、组织、文化等诸多深层次问题，想要消除会面临较大困难。技术层面存在不兼容情况，组织结构呈现出僵化态势，文化观念也陷入固化状态，这些因素共同作用，让信息孤岛具备很强的稳定性，很难在短期之内被彻底消除[3]。扩散性是建筑工程项目持续推进时，新的信息需求接连涌现，若信息孤岛问题没能得到妥善解决，其影响范围会慢

作者简介：蓝方芳（1993-），女，本科，工程师，研究方向：工程造价管理。

慢拓展，波及更多部门与环节，致使整个项目管理系统效率再度降低。

1.3 信息孤岛的影响

信息孤岛给建筑工程管理带来的影响呈现为项目管理效率降低、资源出现浪费、风险有所增加等状况。在项目管理的效率层面，信息孤岛现象致使信息流通受阻，各部门间难以及时获取必要信息，决策流程因此被拖延，工作协调也变得困难重重，最终导致整体工作效率下滑。以项目成本管理为例，财务部门和采购部门之间一旦形成信息孤岛，财务部门便不能及时知晓采购价格信息，成本预算的准确性以及成本控制的有效性都会受到波及。信息孤岛会引发一个重要问题，即资源浪费[4]。信息无法共享，使得各部门在资源调配与使用方面欠缺统筹规划，进而容易引发重复采购、资源闲置等情况，最终造成项目成本上升。信息孤岛现象的出现，往往会给项目带来诸多潜在风险。

2 信息孤岛的成因分析

2.1 技术因素

技术因素是建筑工程管理中信息孤岛形成的诱发因素。不同信息系统间存在的技术标准差异直接对数据交换与共享的顺畅程度造成了阻碍。详细来说，数据格式存在差异，使得不同系统之间难以直接对彼此的数据进行解析；接口不匹配，限制了系统间物理连接的建立以及数据的传输；系统架构有所不同，增加了系统集成的难度；技术更新速度存在差异，可能导致部分系统因技术落后，难以与其他系统协同运作。根据行业调研数据，技术因素导致的信息孤岛问题在建筑工程管理中占比高达65%[5]。这些技术方面的阻碍，使得信息处理更为复杂，成本也随之攀升，同时还让项目管理的效率大打折扣，准确性也难以保证。故而，让技术标准达到统一、增强系统间的兼容性，是解决因技术因素引发信息孤岛问题的首要举措。

2.2 组织因素

部门间存在的壁垒以及利益方面的冲突是组织内部信息难以顺畅共享的关键因素。在建筑工程管理过程中，各部门常因自身利益考量与职责划分，逐渐构建相对独立的信息体系，进而使得信息在部门之间的流通遭遇阻碍。除此之外，由于缺少行之有效的跨部门沟通机制以及协同工作的流程，信息孤岛的情况愈发严重。组织因素所引发的信息孤岛难题，不仅对项目管理的整体效能产生了不良影响，还极有可能在部门间激起矛盾与冲突。要化解部门壁垒带来的阻碍，就得搭建起跨部门的信息共享平台，同时构建协同工作机制，界定各部门在信息共享里的职责与权益，推动信息自由且高效地流通与利用。

2.3 文化因素

文化因素在信息孤岛的形成过程中有着不可忽视的影响。在建筑工程管理中，开放、合作组织文化氛围的缺失，常常致使员工不愿主动分享信息，甚至会刻意隐瞒关键信息来维护自身利益。这种文化方面的障碍，不仅对信息的顺畅流通与广泛共享造成了阻碍，还使得团队的凝聚力有所下降，协作效率也大打折扣。想要培育一个有助于信息共享的组织文化氛围，就要强化对员工信息共享意识的教育，借助培训、激励等手段来增强员工共享信息的意愿与能力。

2.4 管理因素

管理因素是建筑工程管理中信息孤岛问题难以消除的重要原因。项目管理缺乏有效的协同机制，导致各部门在信息共享和协同工作中缺乏统一指导和协调，容易出现信息孤岛现象。此外，责任划分不清、监督机制不完善和激励机制不足等管理问题，也进一步加剧了信息孤岛现象。

由表1可知，协同机制缺失是管理因素里引发信息孤岛的关键问题。要解决协同机制缺失带来的问题，需构建行之有效的项目管理协同机制，界定各部门在信息共享与协同工作中的职责和权益，强化跨部门间的沟通与协作。

3 协同治理策略研究

3.1 技术集成深化路径

深化技术集成的关键是推动云计算与物联网深度融合，依托边缘计算架构搭建项目级数据中台，实现施工现场传感器数据实时采集与高效预处理，降低传

表1 管理因素对信息孤岛的影响

序号	管理因素	具体表现	影响程度
1	协同机制缺失	项目管理中缺乏跨部门协同机制	高
2	责任划分不清	项目任务责任不明确，导致信息共享动力不足	中
3	监督机制不完善	对信息共享情况缺乏有效监督	中
4	激励机制不足	缺乏鼓励信息共享的激励机制	低

输延迟、提升响应速度，为工程管理提供稳定的数据支撑。在数据治理方面，建立完善主数据管理系统，通过规范化数据清洗、自动匹配、合并等操作，保障数据唯一性与一致性，夯实分析决策的数据基础。技术集成需强化安全防护，采用零信任安全模型，通过动态身份认证、最小权限访问等机制，保障数据全流程安全。技术选型优先开放标准框架，如 OPC UA 协议，提升设备兼容性与互联互通能力；实施阶段建立统一版本控制系统，规范接口文档、数据字典等关键资产管理，确保技术集成可追溯、可管控、可迭代，为建筑工程管理数字化转型提供持续的技术保障。

3.2 组织协同机制创新

构建“平台加应用”模式的协同生态，以企业微信、钉钉等通用平台为基础，结合工程管理实际需求开发定制化项目管理模块，实现沟通、审批、进度、资料等工作的一体化运行。实践表明，采用定制化协同平台能够显著增强部门间联动效果，提升跨部门协作效率。在流程设计层面，应建立端到端的全流程业务模型，梳理并优化从任务发起至闭环完成的各项环节。同时，引入机器人流程自动化技术，对报表统计、数据录入、文件归档等重复性工作实现自动化处理，有效减少人工失误，提高事务处理速度。在组织协同推进过程中，搭建统一的项目知识库，通过标签分类、智能检索、权限管理等功能，实现技术方案、施工经验、典型问题等知识资产的沉淀与共享，促进团队整体能力提升。在监督与保障机制上，借助区块链技术建立信息共享日志，利用其不可篡改特性确保记录真实可信。结合智能合约自动执行奖惩规定，实现协同行为的透明化监管，推动组织协同机制稳定落地、长效运行。

3.3 文化培育策略

文化培育策略以组织文化理论为支撑，通过构建开放包容的价值体系，破除信息共享中的心理壁垒，为建筑工程管理协同治理提供内在动力。霍夫斯泰德文化维度理论表明，权力距离较高的组织环境更容易形成信息垄断与封闭沟通氛围，制约团队协作效率。想要实现组织文化转型，需要从领导示范、制度约束和培训引导三条路径同步发力，推动文化理念真正落地。在领导示范层面，管理层应主动发挥带头作用，在项目例会、专题研讨等正式场合主动公开关键信息，分享决策依据，营造透明化沟通氛围，降低团队成员信息保留倾向。在制度层面，应制定完善的信息共享管理办法，明确信息分类标准、共享权限、流转流程与责任要求，将信息共享从倡导性要求转化为强制性规范。在培训方面，应构建系统化课程体系，强化信息素养、协作沟通与团队信任训练，提升员工共享意愿与协作能力。文化培育效果可通过员工满意度、沟通频率、信息更新速度、非正式沟通占比等指标进行量化评估。实践证明，持续推进文化培育能够显著提升团队信息流通效率与协作默契。

3.4 管理措施的治理策略

管理措施优化需以协同机制构建为核心，构建跨部门信息共享责任体系，明确各参与方在数据采集、传输、共享中的职责边界与考核标准。建立动态监督机制，通过定期巡查、数据流转审计等方式，跟踪信息共享落实情况，及时发现并整改协同漏洞。完善激励约束机制，将信息共享成效与绩效考评、评优评先挂钩，对主动共享关键信息、推动协同高效的团队或个人给予表彰，对隐瞒信息、阻碍流通的行为予以约束。同时，优化项目管理流程，简化冗余审批环节，建立信息共享快速响应通道，确保管理措施与技术集成、组织协同、文化培育形成合力，从制度层面筑牢协同治理基础。

4 结束语

信息孤岛是制约建筑工程管理效能提升的关键障碍，由技术、组织、文化和管理等多维壁垒共同导致。技术上数据标准不统一、接口不兼容阻碍了信息流通，组织上部门利益冲突与协同机制缺失固化数据孤岛，文化上封闭氛围削弱协同意愿，使问题演变为管理危机，管理缺乏有效的协同机制，引发信息孤岛现象。通过统一数据标准构建交换平台可实现系统整合，建立跨部门协作与利益协调机制能打破组织壁垒，塑造开放文化可增强信息共享内生动力，构建行之有效的项目管理协同机制，强化构图协作。实证表明，协同治理可显著提升信息共享与协作效率，缩短项目处理时间，提升满意度。智能化管理手段可为工程管理提供参考，未来应加强技术标准与组织文化适配研究，推动信息孤岛治理向全生命周期动态协同发展。

参考文献：

[1] 汪鸿飞.BIM 技术赋能建筑工程消防检测的协同管理策略研究 [J]. 消防界（电子版）,2025(08):150-152.
[2] 林鑫泽. 基于信息化的建筑工程施工进度协同管理研究 [J]. 建设机械技术与管理 ,2025,38(06):108-110.
[3] 李阳. 基于建筑工程管理信息化的现状以及解决策略的研究 [J]. 门窗 ,2025(24):25-27.
[4] 王欢欢. 建筑工程管理与造价控制的深度协同策略分析 [J]. 中国厨卫 ,2025,24(12):398-400.
[5] 严炜炜 , 宋佳慧 , 王妍妍 . 基于制度文本分析的网络信息内容生态协同治理研究 [J]. 图书情报知识 ,2024,41(05):115-127.

装配式框架结构“钢牛腿支承+免支撑”快速施工工法研究

李 翔，姜首杰

（上海华新智慧装备科技有限公司，上海 201799）

摘 要 装配式框架结构领域的“钢牛腿支承+免支撑”快速施工工法属于创新建造技术，这种工法将钢牛腿用作预制梁的临时支座，可完成楼盖系统的免支撑施工，提高施工效率。本文依托华新·中交数字智造港二期项目展开梳理，分析该工法应用过程中的关键技术要点，旨在减少传统支撑系统投入的材料和人工，压缩项目工期，保障施工质量和安全，为类似装配式框架结构项目提供参考。

关键词 装配式框架结构；钢牛腿支承；免支撑施工；吊装工艺；精度控制

中图分类号：TU767 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.002

0 引言

在建筑工业化发展过程中，装配式建筑拥有节能环保、施工高效等特点，逐步成为建筑行业重要发展方向。在传统装配式框架结构楼板施工时，往往需要搭设大量模板支撑模式，伴随材料消耗大、工序复杂、工期较长等问题。华新·中交数字智造港二期项目针对这些情况，创新采用“钢牛腿支承+免支撑”快速施工工法。该工法优化节点设计，调整吊装工艺，完成预制梁板快速安装，省去传统支撑系统。本文结合该项目实践，梳理该工法的技术原理、施工流程以及实际应用效益，为同类工程积累理论参考与实践经验。

1 “钢牛腿支承+免支撑”快速施工工法体系概述

1.1 工程概况

华新·中交数字智造港二期项目坐落于上海市青浦区，总建筑面积63 007.58平方米，包括10栋研发楼和生产楼，项目地下室使用框架—剪力墙结构，地上主体为框架和框架—剪力墙混合模式，各个单体均按装配式建筑标准施工，预制率不低于40%，核心预制构件有预制梁、预应力混凝土双T板和预制楼梯，双T板最大跨度24.9米，单件最大吊重7.49吨。工程规模和结构特点，让“钢牛腿支承+免支撑”工法得到实际应用的典型场景。

1.2 基本原理

该工法核心是利用预先固定在现浇柱上的钢牛腿，承受预制梁荷载，可以作为永久支座，也可以作为临时支座，取消传统楼板施工中使用的满堂支撑架。预制梁吊装完成后，直接搁置在钢牛腿上，接下来施工预应力双T板，让板材直接支承在预制梁的挑耳上方，最终形成完整的水平受力模式。这种支承方式传力路径清晰，各个节点受力明确，能完成楼盖结构施工的“免支撑”作业，简化现场工序。

1.3 适用范围与特点

此工法适用范围明确，可用于柱网布置规整、竖向荷载清晰的工业厂房、停车场、各类公共建筑框架结构，施工过程省去支模与拆模环节，整体施工速度提高，工期压缩幅度大，施工过程可节约脚手架、模板类材料，也可减少对应人工投入。项目整体投入更低，现场作业空间更为开阔整洁，支撑模式带来的空间拥挤问题消除，安全隐患数量降低。预制构件由工厂完成生产，工程质量可保持均匀统一，生产与安装环节均可管控。

2 钢牛腿节点设计与施工关键技术

2.1 钢牛腿节点设计

深化设计阶段，钢牛腿选用Q235B钢材制作，构造由20毫米厚正立面板、16毫米厚上平面板、12毫米厚竖向加劲板焊接而成，焊缝高度不低于10毫米，具体尺寸及形状如图1所示。钢牛腿通过 Φ22 对拉螺栓和混凝土柱连接，螺栓两端使用双螺帽防松，设计过程中，钢牛腿顶面标高要和预制梁底标高完全对应，是保证预制梁平稳安装的首要条件。钢牛腿的平面定位和标高定位都要依照审核完成的深化设计图纸展开，

作者简介：李翔（1987-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：道路桥梁。

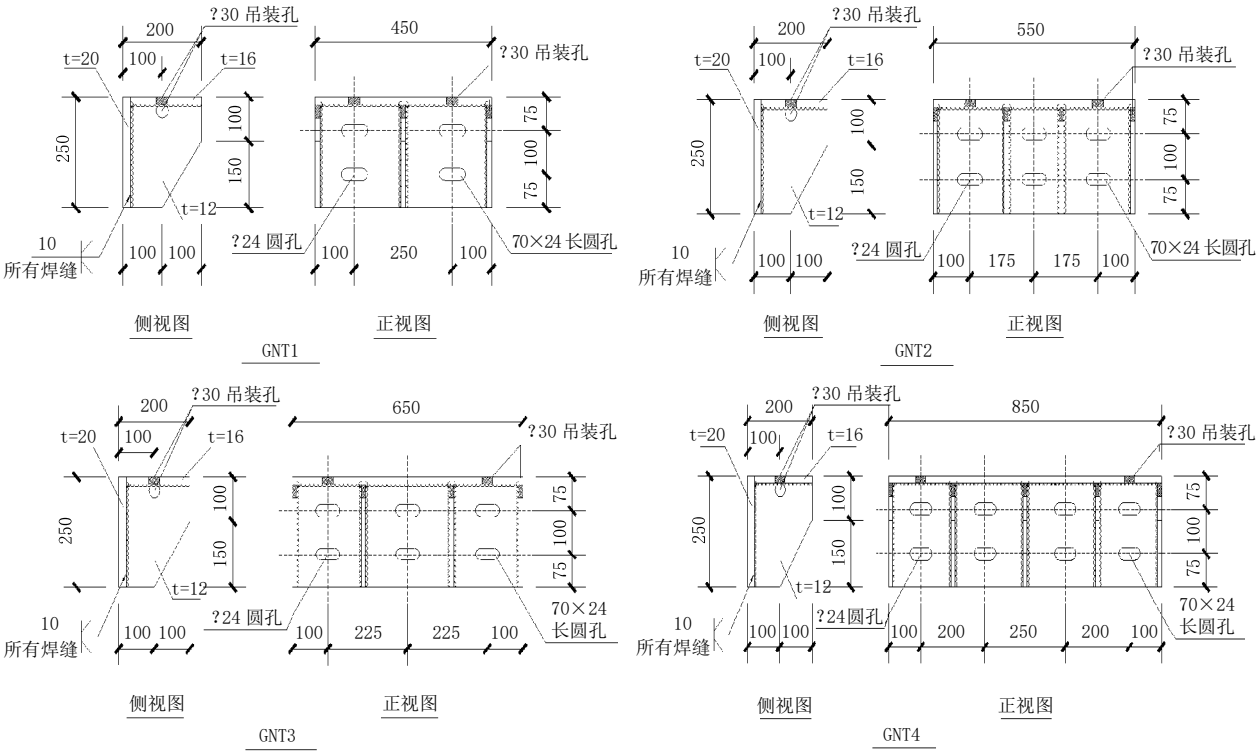

图 1　钢牛腿节点尺寸及形状图

微小偏差都会改变后续构件安装质量，危及结构安全，以钢牛腿为核心的节点设计，可提供可靠竖向支承，为快速施工留出技术空间[1]。

2.2　钢牛腿精准预埋与安装技术

现浇柱模板安装校正完成后，施工人员参照预制梁定位图，在柱模板上精确放出钢牛腿安装位置和对拉螺栓孔位，再用专业工具钻孔，穿入 φ25PVC 套管，柱体混凝土浇筑完成，模板拆除后，立刻进行钢牛腿安装作业。安装阶段，需要二次核对定位线，调整不同厚度垫片，保障牛腿顶面标高契合设计要求。最后用专用工具拧紧 φ22 对拉螺栓，加装双螺帽锁定，规避螺栓松动。在整个作业流程中，测量作业和现场施工需配合到位，将每个钢牛腿的位置误差控制在规定区间以内，楼层后浇混凝土强度达到设计值的 75% 以上，才可依照预定顺序拆除钢牛腿，拆除作业保持缓慢平稳，防止冲击楼面结构。

2.3　质量控制与验收标准

钢牛腿安装完成后，要检测平面位置和顶面标高，检测为专项内容，各项偏差值必须符合现行规范要求。在实际施工过程中，质检人员借助精密仪器测量牛腿安装精度，重点核对和设计标高的吻合程度，装配式混凝土结构技术规程中有明确规定，预制构件安装时，中心线位置偏差控制范围在 5 毫米以内，该标准可直接用于钢牛腿的安装验收[2]。对拉螺栓的紧固程度、双螺帽防松措施的实际效果、焊缝质量，都属于必须检查的关键项目，每完成一道工序，相关人员都要及时填写质量记录，整理出可追溯的验收文件，使工程质量始终处于可控范围[3]。

3　预制梁、板免支撑吊装工艺与精度控制

3.1　施工流程

预制梁板免支撑吊装工艺落地，需遵循严谨施工流程，流程从基层清理测量放线开始，施工人员在完工的结构层上，精准弹出轴线和控制线。进入钢牛腿复核阶段，要确认前期安装的支承系统位置符合设计要求[4-5]，接下来进行预制梁吊装作业，把预制梁平稳放置在钢牛腿上方，完成初步校正。进行双 T 板吊装工序，让双 T 板两端板肋准确落在预制梁挑耳位置，主要水平构件全部就位后，立刻绑扎梁柱节点区域钢筋，封堵模板，最后铺设叠合层钢筋，浇筑节点混凝土，形成完整受力模式，整个流程各环节衔接紧密，任意环节施工质量，都会直接改变整体结构安装精度和结构安全性能。

3.2　预制梁吊装与就位

预制梁吊装作业需采用专业吊装方案，使用 2 根直径 26 毫米的钢丝绳分别挂设于预制梁预埋的吊环上。

起吊时应保证钢丝绳与水平面的夹角控制在45度至60度之间，以确保受力合理。当预制梁缓慢起吊离开地面50厘米至100厘米时，需暂停上升检查构件稳定状态，确认无异常后方可继续提升。吊装过程中应由专人统一指挥，做到缓起匀升慢落，保持构件稳定不偏斜。当预制梁吊装至安装位置上方时，操作人员需利用牵引绳调整方位，缓慢降落使梁端准确对准钢牛腿支承点。就位后立即检查支座接触情况，必要时通过微调垫片保证梁体平稳。

3.3 双T板吊装与搁置

双T板采用4根6米长、直径26毫米的钢丝绳吊装，吊点按设计布置，水平夹角不小于45°。起吊前检查吊具与预埋吊环连接，确认四点均匀受力，防止偏载。构件缓慢离地，观察平稳后匀速提升，吊装全程塔吊运行平稳。就位时，在距作业层50厘米处暂停，用牵引绳调整方向，使纵肋对准预制梁挑耳并避开竖向钢筋，缓慢下落确保板肋准确搁置，实测搁置长度符合设计要求。跨度超4米的板在运输堆放时增设中间支点防变形，板缝采用8毫米厚钢板焊接，焊缝宽不小于6毫米，保证结构刚度，体现对构件保护与连接质量的重视。

3.4 安装精度控制系统

每层施工前，用全站仪、水准仪放线，弹出轴线、边线及标高控制线。竖向构件如墙板安装后，立即设置可调节斜支撑（调节范围±100毫米），配合水准仪、吊线锤和靠尺检测。以墙边线为基准，先调短支撑对齐平面位置，再调长支撑校正垂直度，确保偏差符合规范。每层完工后，用激光水平仪复测外墙板垂直度，防止误差累积。依据《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ1-2014），中心线偏差≤5毫米，标高及接缝宽度偏差≤±5毫米，通过测量、调整、复核的闭环管理，保障结构安装质量与整体性能。

4 工程应用与效益分析——以华新·中交项目为例

4.1 工法应用实施

华新·中交数字智造港二期项目，应用钢牛腿支承结合免支撑吊装工法时，各项操作符合专项施工方案提出的组织要求。吊装作业启动前，项目团队完成详尽的施工技术交底、安全交底，管理人员、作业人员均可充分理解工艺流程、质量控制要点。施工阶段，现场投入4台塔吊，完成全部10栋单体的全部吊装作业。项目团队依照构件进场规划，依次安排预制梁，双T板的运输、安装。在吊装作业推进过程中，项目团队重点确认钢牛腿标高复核结果，核对预制构件进场验收信息，校正构件就位位置，每一项关键环节都有专人跟进，构件吊装完成后，项目团队检测安装精度，调整偏差数值，保障每一片预制梁、每一块双T板均可准确定位，节点区域后浇混凝土浇筑前，完成隐蔽工程验收，这套工法可在实际操作中平稳推进，结构安全也获得保障。

4.2 效益对比分析

免支撑工艺采用可重复使用的钢牛腿替代传统满堂支架，虽需增加钢牛腿的预制（含钢材采购、焊接及防腐）与安装成本，但该投入通过多次周转摊销后，其费用远低于传统支撑体系的租赁及人工支出，显著降低了措施项目总成本。施工阶段应用该工艺，可省去支撑搭设拆除环节，加快标准层施工节奏，压缩项目整体施工时长，作业空间得到优化，场地拥挤情况减少，安全文明施工管理可顺利推进。此外，工厂批量生产预制构件，构件质量稳定。现场安装环节，平整度、尺寸偏差均可控制在规范允许范围内（中心线偏差≤5毫米），工程整体质量得到保障，工业化建造的技术经济优势得到清晰展现。

5 结束语

装配式框架结构“钢牛腿支承+免支撑”快速施工工法通过创新的节点设计与精细化的吊装工艺，有效解决了传统施工中支撑系统复杂、工期长等问题。华新·中交项目的成功应用表明，该工法在提升施工效率、降低成本、保障工程质量方面具有显著优势。未来，可进一步结合BIM技术深化施工模拟与精度控制，推动该工法在更广泛工程项目中的应用。同时，针对复杂结构形式及高抗震设防要求，仍需加强相关节点的力学性能研究，以提升工法的适用性与可靠性。

参考文献：

[1] 钱斌,毛小勇.装配式钢牛腿偏心受压力学性能试验与有限元分析[J].科学技术与工程,2021,21(21):9050-9058.
[2] 李龙,李军军,尹倩倩,等.新型摩擦基钢牛腿支撑系统在柱置换中的应用研究[J].城市建筑,2025,22(10):206-209.
[3] 刘伟.钢牛腿+贝雷桁架支撑体系的设计及应用[J].云南水力发电,2023,39(03):164-169.
[4] 钱斌.装配式钢牛腿抗震性能研究[J].江苏建筑,2021(02):36-38.
[5] 吴钊毓.改进型装配式钢牛腿抗火性能研究[D].苏州:苏州科技大学,2021.

全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控体系研究

朱豫秦

（中国核电工程有限公司，北京 100840）

摘 要 重大工程安全风险管控是保障工程建设与运营安全的核心，针对传统分段式管控模式存在的责任碎片化、信息不对称等问题，本文立足于全生命周期视角，选取港珠澳大桥主体工程作为案例开展应用研究，结合重大工程风险动态演化特征，系统梳理决策、设计、施工阶段安全风险现状及协同管控短板，构建动态协同管控体系并明确实施路径，以期为重大工程安全风险全流程动态协同管控提供实践参考。研究结果表明，应用动态协同管控体系后，案例工程施工阶段安全风险发生率较传统管控模式下降 62.3%，隐患整改效率提升 58.7%，各参与主体协同响应时间缩短至 4.2 小时，有效解决了全生命周期内风险管控协同不足、响应滞后等问题。

关键词 全生命周期；重大工程；安全风险；动态协同管控；管控体系

中图分类号：TU714 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.003

0 引言

重大工程作为国家基础设施建设与社会经济发展的核心载体，具有投资规模大、建设周期长、技术复杂度高、涉及主体多的典型特征，其安全管控直接关系到人民群众的生命财产安全、公共利益保障及国家战略实施成效。当前，我国重大工程建设进入高质量发展阶段，各类新型工程技术工艺的应用以及复杂建设环境的影响，使得安全风险呈现出动态性、关联性、传导性的新特征，传统分段式孤立式的管控模式已难以适应全流程风险防控需求。全生命周期视角强调从工程决策设计施工运营直至报废的全流程覆盖，将安全风险管控融入各阶段、各环节，打破阶段壁垒，实现风险的提前预判、精准管控和闭环治理。动态协同管控则聚焦风险的动态演化规律，通过整合各参与主体的资源与职责，构建协同联动的管控机制，破解当前重大工程安全管控中存在的责任碎片化信息不对称、管控滞后性等突出问题。

1 全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控理论基础

1.1 全生命周期理论

“全生命周期”是在实践探索中形成的交易理念与理论，核心内涵为：在市场经济条件下，经济创新服务体系是以市场为基础的资源配置系统[1]。

将全生命周期理论应用于重大工程安全风险管控，需将工程生命周期划分为决策、设计、施工、运营四个核心阶段，各阶段既具有独立的风险特征和管控重点，又存在紧密的风险传导关系。决策阶段的风险会通过设计施工环节逐步放大，运营阶段的风险则可能源于前期各阶段的管控疏漏，需基于全生命周期视角实现风险的全流程溯源与管控。

1.2 重大工程安全风险理论

重大工程安全风险是指在工程全生命周期内，由于自然环境、人为因素、技术缺陷、管理疏漏等各类不确定因素的影响，可能导致工程结构损坏、人员伤亡、财产损失、环境破坏等安全事故的可能性及其损失程度[2]。其核心特征体现为复杂性、动态性、关联性和危害性，与普通工程相比，重大工程安全风险的影响范围更广、损失程度更大、防控难度更高。

1.3 动态协同管理模式内涵

动态协同管理模式是一种组织管理思想，它强调通过跨部门、跨团队的合作和协作来达到组织的目的，其目的是为了提升组织的创新能力、反应能力和竞争力，从而更好地应对瞬息万变的市场环境。它的中心思想是营造一个开放、透明、高效的交流沟通环境，让组织内部的各成员可以充分地进行信息交流，共享资源与知识，以提升组织的总体工作效率。在工程建设中，从决策、设计、施工到运营维护等多个方面，

作者简介：朱豫秦（1981-），男，本科，高级工程师，研究方向：质量安全管理。

都可以将这种动态协同管理模式应用到工程的每一个环节，让各主体之间实现实时信息共享和协同合作。

2 全生命周期视角下重大工程安全风险现状及协同管控问题

2.1 重大工程全生命周期各阶段安全风险现状

决策阶段重大工程安全风险主要集中在项目可行性论证不充分。部分项目为追求建设进度和投资效益，忽视选址区域的地质水文条件、环境承载力等核心因素，导致项目建设面临先天性安全隐患。决策阶段技术方案论证不深入，对新型技术工艺的适用性评估不足，易引发后续设计施工阶段的风险传导。设计阶段安全风险主要体现为设计方案的安全性不足。部分设计单位未充分结合工程实际场景，存在结构设计不合理、荷载取值偏差等问题，导致工程结构承载能力不足。设计阶段各专业协同不足，建筑结构机电安装等专业设计脱节，易出现设计冲突，为施工阶段的安全风险埋下隐患[3]。

2.2 全生命周期安全风险协同管控现存问题

协同管控责任体系不健全，重大工程参与主体包括建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等，各主体之间存在责任划分不清晰、权责交叉或空白的问题，出现风险后相互推诿，难以形成管控合力。部分主体过度关注自身利益，忽视整体安全管控目标，导致协同管控流于形式。风险信息协同共享机制缺失，各阶段各主体之间的风险信息处于碎片化状态，决策阶段的风险信息未及时传递至设计施工阶段，施工阶段的风险隐患未反馈至设计单位进行优化调整[4]。

3 全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控体系构建

3.1 管控体系构建原则

系统性原则要求管控体系覆盖重大工程全生命周期各阶段各环节，整合各参与主体的资源与职责，实现风险管控的全流程全覆盖，避免出现管控盲区。注重各阶段各主体之间的协同联动，构建全方位多层次的协同管控格局，确保管控体系的系统性和完整性。

3.2 管控体系总体框架

全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控体系总体框架以风险管控为主线，以协同联动为核心，涵盖风险识别、评估、预警、处置四个核心环节，整合组织体系、信息体系、机制体系三个支撑体系，形成全流程闭环管控格局。框架贯穿工程决策设计施工运营全阶段，实现各阶段、各主体、各环节的协同联动。

核心管控环节构成体系的核心内容，风险识别环节负责全生命周期各阶段风险的全面排查，建立风险清单；风险评估环节对识别的风险进行等级划分，明确风险的影响范围和损失程度；风险预警环节构建动态预警模型，实时监测风险演化趋势，及时发出预警信号[5]。

3.3 动态协同管控机制设计

风险信息协同共享机制是动态协同管控的基础，通过构建统一的风险信息共享平台，整合各阶段、各主体的风险信息，实现风险信息的实时采集传递分析和共享。明确信息共享的内容范围和流程，确保决策设计施工等各阶段的风险信息能够及时互通，为风险预判和管控决策提供数据支撑[6]。协同沟通机制主要解决各参与主体之间的沟通壁垒问题，建立定期沟通会议制度和应急沟通机制，针对全生命周期各阶段的风险管控重点，组织各主体开展沟通交流，协调解决跨阶段、跨主体的风险管控问题。明确沟通责任和流程，确保沟通高效顺畅，形成管控合力。

4 全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控实施路径

4.1 决策阶段

决策阶段动态协同管控的核心是做好风险前置防控，组建由建设单位、设计单位、咨询单位等多方参与的协同决策团队，明确各主体的决策职责，开展协同论证。重点对项目选址技术方案投资规模等进行全面论证，结合区域地质水文环境等条件，识别决策阶段潜在安全风险，形成风险评估报告。建立决策阶段风险动态评估机制，结合项目进展和外部环境变化，实时更新风险清单和风险等级，及时调整决策方案。针对决策过程中发现的高风险问题，组织多方协同研讨[7]。

4.2 设计阶段

设计阶段动态协同管控重点是提升设计方案的安全性和协同性，建立设计单位、建设单位、施工单位、监理单位协同设计机制，明确各主体在设计环节的职责，开展跨专业协同设计，避免设计冲突。结合决策阶段的风险评估结果，将风险防控要求融入设计全过程，优化设计方案。构建设计阶段风险动态识别与优化机制，定期组织各主体开展设计风险排查，重点识别结构设计材料选型施工可行性等方面的风险，针对发现的问题及时优化设计方案。建立设计变更协同管控机制，设计变更需经各方协同论证，评估变更可能带来的安全风险，确保设计变更的安全性和合理性。

4.3 施工阶段

施工阶段动态协同管控核心是强化现场风险管控和协同联动，建立施工单位、建设单位、监理单位、设计单位协同管控小组，明确各方现场管控职责，实

现现场风险的实时协同管控。重点加强对高空作业地下作业等危险环节的管控，落实安全防护措施，规范人员操作行为。构建施工阶段风险动态监测与预警机制，利用物联网大数据等技术，对施工机械设备施工环境人员操作等进行实时监测，实时采集风险数据，建立风险预警模型，对异常情况及时发出预警信号，相关主体协同开展处置工作，避免风险升级引发安全事故。

5 案例分析

5.1 案例概况

本次案例选取港珠澳大桥主体工程，该工程是连接香港珠海澳门三地的重大跨海交通基础设施工程，总投资约 1 269 亿元，建设周期为 8 年，工程全长 55 公里，涵盖桥梁隧道人工岛等多个核心构筑物，涉及建设单位、设计单位、施工单位、监理单位等 20 余家参与主体，技术复杂度高施工环境复杂，全生命周期内面临多种安全风险，是典型的重大工程，与本文研究对象高度契合，具备良好的案例应用价值[8]。

该工程决策阶段面临伶仃洋航道繁忙、地质条件复杂等风险，设计阶段需兼顾抗风、抗震、抗腐蚀等多重要求，施工阶段涉及高空作业、水下作业、海上施工等多种危险场景，易发生人员伤亡、设备故障、结构损坏等安全事故，传统管控模式下曾出现风险响应滞后、各主体协同不畅等问题，亟需应用全生命周期动态协同管控体系提升风险管控水平。

5.2 应用效果

将本文构建的全生命周期视角下重大工程安全风险动态协同管控体系应用于港珠澳大桥主体工程，聚焦决策、设计、施工三个核心阶段，严格落实管控体系的各项原则、框架及机制，通过协同管控小组、信息共享平台、动态监测预警等措施，有效提升了工程安全风险管控效能，各项管控指标均得到显著优化（见表 1）。

表 1 管控指标优化数据

管控指标	传统管控模式	本文管控体系应用后	提升 / 下降幅度
施工阶段安全风险发生率	8.7%	3.3%	下降 62.3%
隐患整改效率	平均 10.1 小时 / 项	平均 4.2 小时 / 项	提升 58.7%
各主体协同响应时间	平均 10.5 小时	平均 4.2 小时	缩短 60.0%
设计变更风险评估准确率	75.3%	94.8%	提升 25.9%
决策阶段风险预判准确率	78.6%	95.2%	提升 21.1%

从表 1 数据可以看出，本文构建的管控体系应用效果显著，施工阶段安全风险发生率从 8.7% 下降至 3.3%，大幅降低了安全事故发生概率，有效保障了施工人员的生命财产安全；隐患整改效率提升 58.7%，协同响应时间缩短 60%，解决了传统管控中响应滞后、协同不畅的突出问题；设计变更风险评估准确率和决策阶段风险预判准确率分别提升 25.9% 和 21.1%，实现了风险的提前预判和精准管控，充分验证了本文构建的全生命周期动态协同管控体系的科学性和实用性，能够为同类重大工程安全风险管控提供借鉴。

6 结束语

本文立足于全生命周期视角，围绕重大工程安全风险动态协同管控展开研究，通过梳理相关理论、分析风险现状与管控问题，构建了涵盖原则、框架、机制的动态协同管控体系，明确了决策、设计、施工阶段的实施路径，并以港珠澳大桥主体工程为案例开展应用验证。研究表明，该管控体系可使重大工程施工阶段安全风险发生率下降 62.3%、隐患整改效率提升 58.7%、协同响应时间缩短 60.0%，能够有效弥补传统管控模式的短板。

参考文献：

[1] 王婷，黄天熠，陈小燕. 全生命周期视角下的重大基础设施工程技术协同创新驱动因素研究：以港珠澳大桥为例 [J]. 工程管理学报，2025,39(04):108-114.
[2] 刘俊. 基于数字孪生技术的建筑工程全生命周期安全风险动态管控研究 [J]. 中国地名，2025(12):265-267.
[3] 邓思. 基于全生命周期理论的金属矿露天转地下开采安全风险管理研究 [D]. 长沙：中南大学，2023.
[4] 党峰. 全生命周期视角下神池南中心站联维施工的安全风险管理与控制策略 [J]. 高铁速递，2025(07):179-182.
[5] 李继磊. 基于风险评估的化工工程全生命周期应急管理体系设计与实践 [J]. 大众标准化，2025(14):135-138.
[6] 马海波，肖波，李琳，等. 煤矿全生命周期生态环境风险管控体系构建及模型应用 [J]. 煤炭经济研究，2025(09):145-153.
[7] 黄训奕. 基于“六项机制”协同的水利安全风险动态管控体系构建 [J]. 大众标准化，2025(19):122-124.
[8] 吴洋. 基于全生命周期的工程项目成本控制体系研究 [J]. 品牌研究，2025(36):145-147.

市政道路沥青路面施工平整度控制技术优化与耐久性提升研究

刘 过

（山东开创公路工程有限公司，山东 滨州 256600）

摘 要 本文以市政道路沥青路面施工为核心，针对传统工艺存在的平整度偏差超标、耐久性不足等质量难点，结合城市道路高交通流量、复杂环境条件下的使用特性，系统探究平整度控制技术优化与耐久性提升的协同实现路径。通过文献研究法、试验对比法与工程案例分析法，从材料体系改良、施工工艺精细化、智能监测管控、养护机制完善四个维度构建全流程技术体系，重点分析新型沥青混合料应用、摊铺碾压工艺优化、智能监测技术对平整度与耐久性的协同提升机理，旨在为解决市政道路沥青路面施工质量难题提供参考，进而提升城市道路建设品质。研究结果表明，优化后的超大粒径沥青混合料+智能摊铺压实体系，配合全过程质量管控方案，可将路面使用寿命延长至15年以上，较传统工艺耐久性提升60%，养护成本降低50%。

关键词 市政道路；沥青路面；平整度控制；耐久性提升；超大粒径混合料

中图分类号：U416 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.004

0 引言

市政道路作为城市交通网络的核心载体，其沥青路面的平整度与耐久性直接关系到行车舒适性、安全性与工程服役寿命。随着我国新型城镇化建设加速，城市交通流量持续激增，重载车辆占比提升，加之高温、降雨、冻融等复杂环境因素影响，传统沥青路面施工技术逐渐暴露出诸多短板：平整度控制精度不足导致车辆行驶颠簸、噪声增大；路面抗车辙、抗开裂、抗水损害能力薄弱，易出现早期破损、车辙、裂缝等病害，不仅增加养护成本，还影响城市交通通行效率。本文结合行业研究成果与工程实践经验，从材料、工艺、监测、养护全流程开展技术优化研究，构建平整度与耐久性协同提升的技术体系，为同类工程施工提供技术参考。

1 市政道路沥青路面施工的核心问题与影响因素

1.1 平整度与耐久性的核心技术难点

市政道路沥青路面施工受材料性能、施工工艺、环境条件等多重因素影响，现阶段主要面临三大核心痛点。其一为平整度控制精准度低，传统施工依赖人工经验调控摊铺碾压参数，易导致基层沉降不均、面层摊铺厚度偏差，加之混合料离析现象，使路面平整度偏差常超5 mm/3 m，远超规范允许的3 mm/3 m限值[1]。其二为耐久性与平整度协同性不足，传统工艺多侧重单一指标优化，如为提升平整度盲目提高压实度，易导致路面脆性增加，抗裂性能下降。其三为早期病害防控滞后，传统质量管控依赖事后检测，难以实时发现施工过程中的混合料离析、压实不足等问题，导致路面投入使用后短期内出现车辙、水损害、裂缝等病害。据统计，传统工艺施工的沥青路面平均使用寿命仅8～10年，远低于设计预期。

1.2 平整度与耐久性的关键影响因素

市政道路沥青路面平整度与耐久性的提升是材料、施工、环境、管理等多因素协同作用的结果，核心影响因素可归纳为四类。材料性能是基础，沥青的标号、针入度、延度等指标直接影响混合料的粘聚性与稳定性，集料级配不合理易导致混合料离析，粗集料富集区易产生松散、麻面，细集料富集区易形成壅包，既影响平整度，又降低耐久性。施工工艺是核心，摊铺速度不均匀、碾压温度与遍数控制不当，易导致路面密实度不均，形成局部沉降；基层处理不彻底、平整度偏差超标，会直接传递至面层，引发连锁性平整度问题；接缝施工工艺粗放，易出现冷缝、错台等缺陷[2]。环境条件是重要的外部变量，高温天气易引发车辙病害，低温环境易导致路面开裂，降雨与冻融循环会加剧水损害，降低路面结构整体性；城市道路施工多为

作者简介：刘过（1988-），男，本科，工程师，研究方向：城市道路与交通工程。

露天作业，环境因素对施工质量的影响更为显著。管理与监测是保障，传统施工依赖人工巡检与经验判断，缺乏实时监测手段，难以精准把控施工过程中的平整度偏差与压实质量，导致质量缺陷发现滞后，修复成本高。

2 平整度控制与耐久性提升的技术优化路径

2.1 材料体系改良与适配优化

材料体系改良是实现平整度与耐久性协同提升的基础，核心目标是研发“高稳定性、高抗损性、良好施工和易性”的新型沥青混合料[3]，具体优化措施围绕混合料类型、级配设计、外加剂适配三个方面开展。在混合料类型选择方面，推广应用超大粒径沥青混合料（LSAM-50），该混合料采用强嵌挤骨架密实级配，基于垂直振动成型工艺设计，动稳定度可达 10 000 次 /mm 以上，20 ℃抗压强度≥ 4 MPa，兼具优异的抗车辙性能与承载能力，可替代传统水泥稳定碎石作为柔性基层，有效减少基层沉降对平整度的影响；表面层采用改性沥青 SMA-13 混合料，提升路面抗滑性与抗开裂能力。在级配设计优化方面，采用连续密级配设计，严格控制集料粒径分布，确保粗集料形成稳固骨架，细集料与沥青胶浆充分填充空隙，减少混合料离析现象。在外加剂适配方面，掺加 0.3% ～ 0.5% 的抗车辙剂与 0.1% ～ 0.2% 的纤维稳定剂，提升混合料的高温稳定性与抗裂性能。

2.2 施工工艺精细化优化

施工工艺精细化是保障平整度与耐久性的核心，通过对摊铺、碾压、接缝处理等关键工序的优化，实现施工过程的精准管控。在摊铺工艺优化方面，采用智能摊铺机进行作业，配备超声波平整度监测模块，实时调整摊铺速度，确保摊铺速度均匀一致；严格控制沥青混合料摊铺温度，改性沥青混合料出厂温度控制在 170 ～ 185 ℃，摊铺温度不低于 160 ℃，避免因温度过低导致摊铺困难、压实不足。在碾压工艺优化方面，采用“紧跟、慢压、高频、低幅”的碾压原则，配置双钢轮压路机 + 胶轮压路机的组合碾压设备；初压采用双钢轮压路机静压 2 遍，碾压温度控制在 150 ～ 160 ℃；复压采用胶轮压路机揉搓碾压 4 ～ 6 遍，结合双钢轮压路机振动碾压，确保路面密实度≥ 96%；终压采用双钢轮压路机静压 2 遍，消除轮迹，碾压温度不低于 110 ℃。在接缝处理工艺优化方面，采用热接缝施工技术，相邻摊铺带搭接宽度控制在 10 ～ 15 cm，搭接部位采用熨平板加热处理，确保接缝粘结紧密；横向接缝采用垂直切割方式，切除不平整部分，涂刷粘层油后进行摊铺碾压，确保接缝平顺，无台阶高差。

2.3 智能监测与质量管控体系构建

构建“施工过程实时监测 + 质量数据追溯”的智能管控体系，提升平整度与耐久性的管控精准度[4]。在施工过程监测方面，采用北斗定位 + 激光测距的智能监测系统，实时采集摊铺机摊铺厚度、平整度数据，数据采样频率达 10 Hz，确保摊铺精度偏差≤ 1 mm；在压路机上安装压实度实时监测模块，通过振动频率与振幅变化反馈压实效果，当压实度未达设计要求时，系统自动报警，提醒操作人员调整碾压参数；采用无人机巡检技术，对摊铺后的路面进行全景扫描，快速识别混合料离析、表面缺陷等问题，及时进行整改。在质量数据追溯方面，建立施工全过程数据库，记录沥青混合料配合比、摊铺碾压参数、温度数据、监测结果等信息，实现质量问题可追溯。在风险预警方面，通过大数据分析技术，建立路面质量预测模型，根据施工数据与环境参数，预判路面可能出现的病害风险，提前采取防控措施。

2.4 养护机制完善与耐久性保障

完善的养护机制是延长路面使用寿命、维持平整度的重要保障，构建“预防为主、防治结合”的全生命周期养护体系。在施工后养护方面，沥青路面施工完成后，设置养护围挡，禁止车辆通行，养护时间不少于 24 小时，确保路面强度充分发展；采用智能喷淋系统，在高温天气对路面进行降温养护，避免温度过高导致路面早期损坏。在日常养护方面，建立定期检测制度，每年对路面平整度、车辙深度、裂缝状况等进行全面检测，形成养护评估报告；对重度破损路段，采用铣刨重铺、加铺罩面等方式进行大修，恢复路面平整度与使用性能[5]。

3 工程案例验证与优化效果分析

3.1 工程案例概况

以济南市经十东路市政道路改扩建工程为研究对象，该项目全长 8.5 km，为城市主干路，设计时速 60 km/h，双向八车道，沥青路面总面积约 42 万 m^2。项目所处区域交通流量大，重载车辆占比达 30%，且夏季高温多雨、冬季寒冷多雪，对路面平整度与耐久性要求极高。项目采用本文优化的技术体系，包括超大粒径沥青混合料（LSAM-50）柔性基层、智能摊铺压实系统、全过程智能监测与养护方案，重点监测路面平整度、车辙深度、病害发生率等指标。

3.2 优化效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统工艺对比，优化技术体系取得显著成效。在平整度方面，完工路面平整

度偏差平均为1.8 mm/3 m，远低于规范限值3 mm/3 m，较传统工艺提升60%，行车舒适性显著改善；路面接缝平顺，无台阶高差，车辆行驶噪声降低15 dB以上。在耐久性方面，项目通车3年后监测数据显示，路面车辙深度平均为2.5 mm，无明显裂缝与水损害现象，病害发生率仅为3%，较传统工艺降低83.3%；路面压实度均匀性良好，平均压实度达97.5%，抗车辙性能、抗裂性能均优于设计要求，预计使用寿命可延长至18年，较传统工艺提升80%。在施工效率与经济性方面，超大粒径沥青混合料单次摊铺厚度达20 cm，减少了分层施工层数，施工效率提升30%，工期缩短25%；虽然新型材料与智能设备增加了10%的前期投入，但路面耐久性提升使养护周期从3年延长至8年，养护成本降低50%，全生命周期成本降低35%，实现了质量效益与经济效益的双赢。

4 技术优化落地的保障机制与应用推广建议

4.1 技术优化落地的保障机制

为确保市政道路沥青路面平整度控制与耐久性提升技术有效落地，需从组织、制度、人才三个维度构建保障体系。在组织保障方面，成立专项技术领导小组，由建设、设计、施工、监理单位核心技术人员组成，明确各方职责分工，建立“总部—项目部—施工班组”三级推进机制，定期召开技术交底会与进度推进会，及时解决施工过程中的技术难题；强化各参建方协同配合，形成“方案共研、过程共管、成果共享”的工作格局。在制度保障方面，对超大粒径沥青混合料等新型材料进行进场复检，确保材料性能符合设计要求[6]；建立技术交底制度，将材料配比、施工工艺、智能监测等优化措施的操作细节精准传递至施工人员；完善质量考核制度，将路面平整度、耐久性相关指标纳入施工班组绩效考核，实行奖惩分明的考核机制。在人才保障方面，吸纳道路材料、智能监测等领域专业人才，组建技术研发团队，针对复杂环境下的施工技术难题开展专项攻关；与科研院校合作，建立人才培养基地，培养复合型技术人才。

4.2 技术应用推广建议

结合市政道路的地域差异、交通特性，提出针对性的应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案，针对大城市核心区高流量道路，优先采用超大粒径沥青混合料+智能摊铺体系，提升平整度与耐久性；针对中小城市道路，推出轻量化技术方案，在保证质量的前提下降低施工成本；针对高温、严寒、多雨等特殊气候区域，调整材料配比与养护措施，增强路面环境适应性。二是推动技术标准化与产业链协同，加强施工企业与材料供应商、设备制造商的协同合作，研发适配市政道路施工的专用材料与设备，提升技术体系的集成性与稳定性。三是强化示范引领与政策支持，选择典型市政道路项目打造示范工程，总结可复制、可推广的经验做法，通过现场观摩、技术交流等方式推广应用。四是加强技术创新与成果转化，持续开展新型沥青材料、智能监测技术的研发，重点攻克平整度与耐久性协同提升的关键技术；建立科研成果转化机制，加速实验室技术向工程实践转化，不断拓展技术应用范围。

5 结束语

市政道路沥青路面施工平整度控制与耐久性提升是一项系统性工程，需立足于“材料改良、工艺优化、智能管控、养护保障”的全流程思路，实现两大核心质量指标的协同提升。本文通过整合超大粒径沥青混合料、智能摊铺监测等创新技术，构建了科学高效的技术优化体系，工程案例验证表明，该体系可显著提升路面平整度与耐久性，延长服役寿命，降低养护成本。随着城市道路建设高质量发展需求的提升，沥青路面施工技术将朝着智能化、绿色化、长寿命方向发展。未来应进一步推动新型材料与数字技术的深度融合，开发智能决策、自动调控等高级功能；加强绿色低碳技术研发，降低施工能耗与碳排放；完善技术标准与人才培养体系，推动优化技术在市政道路工程中规模化、标准化应用，为我国城市交通基础设施高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献：

[1] 刘子文.薄层罩面技术及其在沥青路面中的应用[J].科学技术创新,2023(21):145-148.
[2] 卢玲.公路工程中的薄层罩面养护工艺[J].中华建设,2024(08):109-111.
[3] 王震.沥青路面加铺彩色薄层罩面工艺技术研究[J].越野世界,2023,18(08):61-63.
[4] 诸葛飞.公路工程沥青路面施工技术与质量控制策略分析[J].运输经理世界,2024(27):25-27.
[5] 杨林楠.公路工程沥青路面施工技术及质量控制策略[J].智能建筑与工程机械,2024,06(04):7-9.
[6] 刘勇.公路工程沥青路面施工技术与质量控制策略分析[J].河南科技,2023,42(08):73-76.

有限元分析模型与无线应变测试系统在连续刚构桥成桥检测中的应用

吴 君

（中国核工业第二二建设有限公司，湖北 武汉 443101）

摘 要 检测桥梁施工质量、判断新建桥梁荷载能力的有效手段是成桥荷载试验。为准确评价新建桥梁实际技术状况，评定其承载能力，对连续梁桥开展成桥荷载试验研究。试验加载工况的荷载效应理论值数据计算使用有限元分析软件 Midas/Civil；用等效车辆荷载，测试计算出静、动载工况下各控制截面的应力与挠度，保证桥梁承载能力和刚度满足设计要求，确保桥梁安全投入使用。

关键词 成桥荷载试验；有限元分析；无线应变测试系统；等效车辆荷载；静、动载

中图分类号：TP3；U446 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.005

0 引言

检验新建桥梁的工程结构、实际工作状态、评估新建桥梁的承载能力和桥梁使用性能的有效手段是对该桥梁进行荷载试验。连续刚构桥成桥检测采用模拟设计的荷载工况，通过可操控的方式对桥梁施加荷载，采集结构受荷载作用时静动力响应的实测数值，对实验采集得来的数据和模型计算结果进行交叉验证。这是针对桥梁结构设计、施工流程及质量控制的整体评判，而且为桥梁交（竣）工验收及后期运营健康监测工作提供了关键的科学凭据与数据支撑[1]。

1 有限元分析模型与无线应变测试系统成桥检测技术原理

检测试验针对桥跨结构在静力荷载作用下的应力与变形开展测量，验证其实际力学状况，按照设计承载等级在桥面上布置若干加载车辆，对桥跨结构的力学响应实施检测，主要针对挠度、应力、沉降与裂缝发展等参数实施实测，获取桥跨结构整体的变形样式及受力特性，以此得到桥梁结构在荷载作用下的实际受力情形与运行状态，分析是否符合检验荷载的要求。动载试验重点探究结构的振动特性与抵抗外部动荷载的综合能力，进而对结构现实的工作状态加以分析，还可为结构服役阶段的安全评估留存原始的资料。掌握结构分别在静力、动力两类不同荷载作用下的响应特性，综合评估桥梁结构的荷载承受力以及功能特性，作为试验桥运营阶段对结构性能评估的参考依据[2]。

2 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术分析

根据设计图纸和规范，凭借 Midas/Civil 等有限元软件搭建全桥的空间计算模型，实施设计荷载效应分析工作，明确试验的控制荷载及最不利加载工况。制定科学全面的静、动载试验规划，涉及加载车辆的分布、测试截面及测点的布置、测试举措等。现场实施荷载方面的试验，采集结构在静载作用期间的应变、挠度数据，以及动载施加于结构时的振动响应数据。处理分析所获取的试验数据，把关键指标（应力、挠度、频率、振型等）的实际测量数值与理论计算值对比，综合评判结构的实际工作状态、刚度表现、强度表现及承载能力，并对该桥的服役性能做出合理的科学评价，目的是为连续刚构桥成桥的特大桥的竣工验收提供直接凭据，也为同类型桥梁的荷载试验实施与安全评估积累相关经验。

3 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术应用分析

3.1 桥梁工程资料收集

（1）设计相关的各类文档，含有设计图稿、变更记录以及计算依据等相关材料；（2）施工阶段的监理文件，含有材料检测数据、施工记录材料、隐蔽工程验收资料、分部工程验收报告及质量事故处理记载等内容[3]。

作者简介：吴君（1973-），男，本科，高级工程师，研究方向：工程技术及项目管理。

3.2 桥梁检测试验跨的选择

（1）根据本桥梁设计文件及相关规范选择有代表性的桥跨进行成桥荷载试验；（2）筛选受力性能不佳、缺陷明显或病害严重的桥跨结构；（3）结构独立联被选作试验跨段。

3.3 检测内容

1.静载试验。（1）各静载试验加载工况下梁控制断面的挠度；（2）各静载试验加载工况下梁控制断面的应变；（3）试验过程中裂缝观察；（4）测试截面附近结构外观检查。

2.动载试验。（1）自振特性测试：实际测量得到该桥梁结构的阻尼比、自振频率和振型数据；（2）动力响应测试：无干扰行车试验，以测定试验桥跨的正弯矩最大截面为目标，对运行车辆荷载下桥梁结构的动力行为进行仿真。令满载卡车沿桥梁中线以10～30 km/h的梯度速度行驶至对应位置急刹，获取桥跨在运行车辆荷载作用下的冲击系数与动力数据[4]。

3.4 有限元软件理论分析

1.有限元理论静载试验。遵照《城市桥梁检测与评定技术规范》（CJJ/T 233-2015）规范对城市桥梁检测评定的要求，依据项目真实数据加以核算：

$$\eta_s=\frac{S_{stat}}{S_k^{'}\times(1+\mu)} \quad (1)$$

式（1）中：η_s是静力测试的荷载效率，就验收试验而言，要求数值≥0.85，且1.05为最高值，就鉴定性检测而言，取值需满足≥0.95的要求，且1.05为上限值；S_{stat}是基于静力测试的实际工作载荷状态，指定截面的内力极值或位移量算值；$S_k^{'}$是受控荷载条件作用时，关键断面在极端工况中的内力或位移量值；μ是动力冲击系数取值[5]。

2.有限元理论动载试验。遵照《城市桥梁检测与评定技术规范》（CJJ/T 233-2015），考虑到试验车辆吨位较大，并结合现场实际情况，所有试验工况对左、右幅桥梁均进行试验。

3.有限元模型理论自振频率、振型分析。利用Midas/civil有限元分析程序对桥梁仿真模拟计算进行动力特性分析，求解其自振频率、振型等。

4 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术应用实践要点

4.1 成桥荷载试验注意事项

（1）检测前需做好资料收集及研究：对桥梁的结构状况、受力状况、关键部件、易破坏部位、设计荷载等进行全面研究，同时制定切实可行的检测方案；（2）选出有代表性的试验跨：设计文件有具体规定，按设计文件执行，若设计文件未作出明确要求，按规范执行。边跨和中间跨一定要选，并且选择正弯和负弯最大的跨中、支点以及四分之一跨等位置处；（3）试验时间和环境的恰当选取：试验时要挑选昼夜温差小的阴天、傍晚或者夜间时段开展，避开中午这类温差大的时间段，同时要杜绝在汛期或雷雨天开展试验，削减温度等外部条件对应变等数据的影响及干扰，保障数据精准度；（4）感应片安装位置开展清理及打磨工作：感应片跟桥身的接触是否牢固又紧密，直接关系到数据传输的准确性和可靠性，应确保安装面光滑、安装稳固，接触可靠；（5）数据录入要准确无误：Midas/civil有限元分析建模时数据录入较多，包括混凝土强度、弹性模量、跨度、摩擦系数、设计荷载、冲击系数、张拉控制应力等诸多数据，一旦数据录入有误，理论计算数据就会失去对比意义，因此数据要求专人录入，并至少要有2人对录入数据进行复核和检查；（6）确保数据传输稳定和可靠：采用无线动态应变测试系统，要确保现场信号稳定，周边避免有振动源和其它无线信号源，最大限度减少外部干扰；（7）异常情况的处理：试验过程中如果数据异常，要第一时间停止加载和试验，找出并分析原因，确保桥梁安全后再进行试验；试验过程中要按要求留影像资料，以备日后查看，试验后要及时整理、分析数据并出具试验报告[6]。

4.2 控制截面与测点布置

试验跨横断面为现浇箱梁及钢箱梁。应变测试截面选择试验跨最大正弯矩截面具体布置；挠度测试选择试验跨最大正弯矩截面。

4.3 现场静载试验

静载试验过程：

1.选择昼夜温差小的阴天或温差小的时段进行试验。

2.结合现场实际布置适当数量的测温点，未加载时采集结构温度场的梯度数据，并监测温度变化引起的测点应变与位移变化。

3.设计控制内力按照《城市桥梁设计规范》（CJJ 11-2011）中的相关要求，以城-A级荷载作为桥梁控制荷载，其中汽车荷载按照规范计入冲击效应。

4.结合设计荷载等级安排试验荷载，采用等效荷载原则实施加载，采用载重汽车实施荷载试验。

5.试验工况及荷载效率控制截面弯矩影响线并考虑横向分布进行等效布置。

6.静载试验结果评定：

第一，结构变位、应变校验系数需按下列公式进行计算：

$$\xi = \frac{S_{e,m}}{S_{e,e}} \quad (2)$$

式（2）中：ξ 是变形及应变检验系数；$S_{e,m}$ 是在试验工况中荷载的作用下，控制测点的应变实测值或是弹性变位；$S_{e,e}$ 是在试验工况中荷载的作用下，控制测点的应变计算值或是弹性变位。当应变校验系数或结构变位＞1，且结果准确无误时，该桥梁结构的承载能力即为不满足要求。

第二，测点的相对残余变位或相对残余应变应按下式计算：

$$S_p^{'} = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (3)$$

式（3）中：$S_p^{'}$ 是测点的相对残余应变或是相对残余变位（%）；S_p 是试验载荷作用下监测点的弹性变形或应变实测数值；S_t 是测试荷载下关键位置的弹性变形或应变分析值。若测点记录的相对残余变形或应变逾 20%，需分析原因；若分析结果无误，应判定该桥梁结构承载力不足。

4.4 现场动载试验

（1）清理桥面，按照试验方案要求标记测点布设位置，设置相应测试仪器与传感器，连接导线，联机调试仪器，检查各个动应变测点及拾振器测点的电路是否畅通；（2）核心测量数据为临界阻尼比及桥跨结构固有模态频率的自振特性试验，采用脉动法测定结构的自振特性参数，桥面未受交通荷载且邻近区域无固定振源时，测量桥跨结构在风载、地脉动或水流等随机激励作用下产生的微小振幅振动响应；（3）若桥面未设置任何障碍物，采用载重汽车沿车道中央行进，采用 10 km/h/20 km/h/30 km/h 三级速度（最高值参照设计行车速度，结合场地条件优化调整）的速度往返通行主桥，量化移动车辆荷载对桥跨结构的动力作用及冲击指标；（4）桥面未布置任何障碍设施时，采用单辆重载车辆沿道路中线行驶，采用 10 ～ 30 km/h 速度梯度（含突发制动，测试截面随车辆后轴锁死通过桥跨结构），获取车辆行驶过程中桥梁结构的动力响应及冲击系数。

5 有限元分析模型与无线应变测试系统检测技术结果分析

5.1 动力放大系数

应根据跑车试验中不同速度下所记录的动应变或动变位曲线进行分析，并应按下列公式计算：

$$\mu_{dyn} = \frac{S_{\max}}{S_{ds}} - 1 \text{ 或 } \mu_{dyn} = \frac{S_{\max}}{S_{mean}} - 1;\ S_{mean} = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad (4)$$

式（4）中：μ_{dyn} 是荷载动力放大系数；S_{ds} 是车辆停止运行期间，停驶车辆荷载引发的测点最大变位或应变读数；$S_{\max}$ 是在车辆行进阶段，动态行车荷载作用下测点位移 / 应变的极值；$S_{\min}$ 是车辆行进期间，动态行车荷载引起的测点最小位移或应变。

5.2 冲击系数

当计算可变作用所引起的结构效应时，需要考虑冲击系数。依照《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2015）中的相关规定，冲击系数确定方法如下：当结构基频 f＜1.5 Hz 时，μ＜0.05；当结构基频 1.5 Hz≤f≤14 Hz 时，μ=0.1767ln f-0.0157；当结构基频 f＞14 Hz 时，μ=0.45；计算得到本桥理论冲击系数 1+μ=1.127。

6 结束语

本研究试验中加载工况的荷载效应理论值利用 Midas/Civil 进行计算，用现场等效车辆荷载实施静力加载，测试计算出静载工况下各控制截面的应变、挠度以及动载工况下实测值。有限元理论分析得到的结果与现场实测数据进行辅证，得出桥梁成桥试验合格，为桥梁的运营使用提供有效的技术安全支撑，值得在桥梁工程中推广应用。无线动态应变测试系统在人力成本与时间效率、监测精度与实时性、全面性与整体性、适应性与灵活性以及长期监测与数据积累等方面均展现出显著优势。同时，传统成桥检测方法虽然具有一定的操作性和实用性，但在精度、效率、全面性和长期监测等方面存在局限性。因此，在桥梁结构健康监测领域，无线动态应变测试系统具有更广泛的应用前景。

参考文献：

[1] 朱江华，张晨，万正华，等．基于成桥荷载试验的武汉青山长江公路大桥主桥有限元模型修正 [J]. 世界桥梁，2021,49(06):85-89.
[2] 何少阳．基于成桥荷载试验的连续刚构桥梁状态评估 [J]. 工程技术研究，2022,07(04):5-7.
[3] 陈强，刘前瑞，刘胜强．基于有限元分析方法的连续刚构桥施工监控 [J]. 城市道桥与防洪，2020(03):150-152,21.
[4] 姜震宇，解会兵．基于建筑信息模型技术的刚构桥检测分析一体化研究 [J]. 工业建筑，2022,52(02):180-185.
[5] 鹿俊杰，赵青．某连续刚构桥荷载试验分析 [J]. 兰州工业学院学报，2021,28(03):47-50.
[6] 夏靖．连续刚构桥荷载试验研究 [J]. 四川建筑，2023,43(04):180-182.

电力工程数字孪生应用系统架构设计

程正逢，李红明，罗壮强，付江缺，王　林

（中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司，湖北 武汉 430060）

摘　要　随着电力工程向着大型化、智慧化、精细化的方向发展，传统的管理和控制方式已无法适应工程建设全寿命周期下的管理要求。数字孪生作为物理世界和虚拟世界的桥梁纽带，对于推动数字技术应用于电力工程建设具有重要意义。本文基于电力工程施工及运维现场的需求背景，明晰数字孪生的概念及其核心特征，梳理出电力工程数字孪生应用场景的核心需求，在此基础上，围绕数据管理、算力建设、建模仿真、业务融合四个方面，提出针对性的应用系统架构方案，搭建适配电力工程全流程的数字孪生应用场景，助力电力工程建设行业的数字化转型进程，强化工程建设管理能力及辅助决策能力。

关键词　电力工程；数字孪生；系统架构；数据治理

基金项目：中国电力工程顾问集团有限公司集中开发科研项目“基于BIM/GIM+GIS的数字孪生底座构建及应用关键技术研究”（项目编号：DG2-L01-2024）。

中图分类号：TP31；TM7　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.006

0　引言

数字孪生技术借助虚拟仿真、数据投影、实时互动等核心功能，实现电力工程实物与其数字孪生体的同频共振，有效解决了当前电力工程建设管理中存在的信息断层、难以直观展示、决策延迟等难点问题。但目前，针对电力工程场景的数字孪生技术应用仍存在数据管理混乱、算力分配不合理、模型与业务脱节等诸多不足，导致数字孪生技术的优势未能充分发挥。因此，有必要结合电力工程建设的实际情况，规划合理有效的数字孪生应用体系框架，规范数字孪生应用模式，推动数字孪生与电力工程建设全链条的深度融合，从而更好地服务于电力工程建设高质量发展。

1　数字孪生定义与核心特征

数字孪生是以集成感知采集、建模仿真、信息交互、决策优化等多种技术为一体的综合技术概念，其本质是在物理实体全生命周期过程中，建立涵盖其几何尺寸、物理特性、运行机理等方面的高度镜像化虚拟孪生体，通过虚拟孪生体与物理实体之间的实时数据交互、信息反馈，实现对物理实体全寿命周期的监测评估、仿真预测及精确控制[1]。

数字孪生具有四大核心特征：一是多要素集成性，可集成电力工程项目设计、建设、运维等多个阶段的数据信息资源，消除各阶段之间的数据隔阂，实现物理空间与虚拟环境的协同工作；二是高精度映射，能够高度还原电力工程项目各类设备装置的物理性能、运行机制及原理规律，为后续仿真模拟和决策分析提供精准参考；三是实时即时性，通过实时采集信息的快速传递，实现虚拟孪生体与物理实体工作状态的同步更新，精准捕捉物理实体的工作异变；四是辅助决策性，可利用虚拟孪生体开展多种工况条件下的仿真模拟实验，验证不同控制方案的应用效果，为电力工程项目精确实策提供指导。

2　电力工程数字孪生应用系统需求分析

2.1　数据采集与融合需求

电力建设数字孪生的应用需以海量、精确、及时的数据为支撑，完整、准确、实时的数据采集及融合是搭建该系统的基本前提，也是物理实体与孪生体之间精准映射的核心需求。在电力工程建设过程中，存在设计图档、设备参数、施工信息、维护数据、环境信息等多种类型的数据，这些数据来源于各管控环节的不同设备终端，不仅数据格式、标准各异，还存在信息重复、遗漏、错误等问题，给电力工程数字孪生体模型建设带来了巨大挑战，同时制约着整个系统的决策水平。因此，系统需具备全方位的大数据采集与分析功能，针对电力建设工程全过程的多种数据源，通过传感器、物联网节点、数据端口等采集模式，全面收

作者简介：程正逢（1969-），男，硕士研究生，正高级工程师，研究方向：摄影测量，地理信息系统、数字化。

集工程施工设备参数指标、施工进度、周边环境、潜在风险等动态信息，确保采集信息的全面性与及时性。

2.2 全流程可视化管控需求

电力工程项目施工周期长、管理节点多、涉及专业领域广，传统管理模式多采用人工巡查、纸质记录、点位分段监测等方式，无法实现对工程项目全过程的立体化管控，易出现管控死角和管理不到位的情况，难以第一时间发现并处置工程项目建设及后期运维过程中的各类问题。因此，电力工程数字孪生应用系统需具备全过程可视化管理功能，基于工程虚拟模型，实现从设计、施工到运维全过程的立体化呈现。在工程设计阶段，可通过工程虚拟孪生体直观呈现设计方案，清晰展示各类设备、结构的分布及连接关系，便于设计师排查设计缺陷、优化设计方案；在工程施工阶段，可实时映射施工进度、施工质量、施工现场安全状况，直观呈现施工工序进展、各类施工设备工作状态等信息，方便管理者实时掌握项目进展、及时调整施工方案。

2.3 高保真仿真与决策支持需求

高保真仿真与决策支持是电力工程数字孪生应用系统的核心功能诉求，更是发挥数字孪生技术价值、提升电力工程管理水平的重要手段。在电力工程项目建设及运维过程中，存在设计优化、施工工艺、设备维修、应急管理等多种决策需求，这些决策直接关系到工程建设质量、后期运行的安全性、稳定性及经济效益，均需通过精细、准确的仿真模拟进行论证研究。因此，系统需具备高精度仿真功能，以虚拟孪生体和优质数据资源为基础，精准模拟电力工程各类设备的运行机理、结构承载能力和环境适应性能，仿真不同运行条件、不同管控措施下工程项目的运行状态，实现“仿真即实景”的效果[2]。

3 电力工程数字孪生应用系统架构设计策略

3.1 多模态时空数据一体化治理

为解决电力工程施工数字孪生应用中存在的数据杂乱、格式多样、质量参差不齐等问题，保障虚拟孪生体模型的准确性及系统的可靠运行，需建立多模态时空数据一体化治理体系，对数据采集、清洗转换、存储管理、服务提供等环节进行全流程、标准化治理。在数据获取阶段，基于电力工程全生命周期视角，明确不同类别数据的采集范围、采集周期及采集要求，打通传感器、物联网终端、设计软件、施工管理系统、运维平台等多个数据采集源头，实现几何数据、物理属性数据、工作状态数据、环境数据、管理流程数据等多模态数据的全覆盖采集。其中，几何数据主要采集工程设施的尺寸、形状及位置关系等信息；物理特性数据主要采集设备设施的材料种类、物理性质、型号等指标；工作状态数据主要采集设备的电压、电流、温度等实时参数，确保获取的数据能够满足虚拟孪生体构建与系统运行的全部需求[3]。

此外，在数据整理过程中，采用层次化、类目化的治理方法，针对不同类型、不同形态的异构数据，开展针对性的清洗、转化与融合工作，统一数据编码、数据格式及数据标准，剔除数据冗余、矛盾与错误，确保数据的准确性与完整性，将数据误差严格控制在 ±0.5% 以内。在时空数据处理中，可引入时空索引机制，关联数据的时间属性与空间属性，制定 100 ms 级别的数据同步频率，实现数据在时间与空间上的精准对齐，确保数字孪生体能够真实反映物理实体在不同时间段、不同位置的状态变化。在数据存储环节，应根据不同类型数据的特点及用途，设计混合式数据库架构：采用关系型数据库存储结构化的业务数据、设备参数等信息；采用非关系型数据库存储非结构化的设计蓝图、视频图像、设施维护日志等数据；采用时序数据库存储海量实时的设备运行状态时序数据，确保时序数据存入速率不低于 10 万条 / 秒。

3.2 云边端协同算力调度部署

在电力工程数字孪生应用场景中，虚拟孪生体建模、实时数据传输、高保真仿真、全过程可视化等环节均需大量算力支撑，且各环节对算力的需求差异显著。边缘侧侧重实时数据采集、本地即时处理及快速反馈；云端侧重海量数据存储、大规模仿真运算及全局性决策计算。单点算力布局无法满足系统多样化的算力需求，因此，需建立云边端协同算力调度架构，明确云边端各级职能分工，实现算力资源的优化配置。在边缘侧，部署轻量化算力节点，承担电力工程施工现场数据的实时采集、本地初步处理及简单分析任务，可快速对现场采集的数据进行分类、编码与分析，及时捕捉设备运行异常并发出报警，有效减轻数据向云端传输的压力，提升系统实时反馈速度。同时，应承担本地简单虚拟孪生体渲染与交互任务，保障一线管理者能够即时监控现场情况。

在云端，需部署大规模算力集群，承担海量数据存储、深度解析、大规模仿真运算及全局决策优化等核心任务，确保集群总算力不低于 512TOPS。云端需完成高精度数字孪生体模型的构建、渲染与更新，实现整个电力工程建设过程的全方位三维可视化展示及复杂场景仿真模拟，满足管理人员全局把控与决策优化的需求。此外，需设置智能化算力调度策略，实时监测云端与边缘侧各算力节点的负载状态，当单个节点

负载超过 80% 时，自动启动算力调度流程，根据系统运行状态及算力需求，灵活分配算力资源：当边缘侧算力不足时，云端快速下发算力予以支援；当云端算力富余时，将响应时效性要求较低的任务下放至边缘侧处理，提升算力利用率。

3.3 孪生体建模与仿真引擎优化

高保真虚拟孪生体是电力工程数字孪生应用系统发挥作用的基础，而仿真引擎的性能直接决定仿真精度与速度。因此，需重点推进孪生体建模优化与仿真引擎升级，建立适配电力工程项目需求的高精度建模与快速仿真机制。在孪生体建模方面，应当采用分层建模、协同建模的思路，结合电力工程项目的结构特性与管理需求，分层构建虚拟孪生体，从整体项目到单个零部件，逐步细化模型颗粒度，确保虚拟孪生体能够真实映射物理实体的空间形态、物质特性、动态行为及交互关系。在建模过程中，需充分利用电力工程设计图纸、设备信息、现场记录等各类数据资源，综合运用参数化建模、三维激光扫描建模等多种建模技术，提升建模效率与质量 [4]。

在此基础上，还应构建虚拟孪生体与物理实体的对比校验体系，通过对比物理实体运行状态的实测数据与虚拟孪生体的仿真数据，将建模仿真误差控制在 ±1% 以内，及时排查建模过程中的问题并修正建模参数，提升虚拟孪生体的还原度。此外，还需建立虚拟孪生体动态更新机制，根据电力工程项目建设进展、设备维护情况及相关数据变动，制定 5 分钟级的动态更新间隔，实时更新虚拟孪生体的几何形态、物理参数，确保虚拟孪生体与物理实体运行状态保持一致。在仿真引擎优化的过程中，应结合电力工程仿真需求，对仿真引擎进行个性化改进，优化仿真算法，将仿真时间间隔提升至毫秒级别，增强仿真计算的准确性与速度；支持多物理场仿真、多场景并联仿真，能够真实模拟电力工程设施的运行模式、结构承重、故障演变过程等。

3.4 工程全流程业务闭环集成

随着数字孪生技术与电力工程建设的深度融合，仅实现建模仿真与数据可视化已无法满足工程全流程管理需求。在实践中，需推进数字孪生应用系统与电力工程建设全流程业务的闭环集成，将数字孪生技术嵌入各业务流程与环节，全面提升电力工程管理水平。基于电力工程设计、施工、运维、安全管理等全流程业务需求，明确系统与各业务节点的集成关键点，打破各业务系统之间的壁垒，实现数字孪生应用系统与工程设计系统、施工管理系统、运维管理系统、安全监控系统等各类业务系统的高效交互，保证业务数据互通、流程衔接顺畅。在设计环节，应将数字孪生建模与工程设计流程深度融合，设计完成后，直接将设计成果导入虚拟孪生体，通过虚拟孪生体开展方案仿真校验，排查设计缺陷并优化设计方案，确保设计方案合理可行。

在实际施工过程中，需将虚拟孪生体全面融入项目施工管理流程，通过虚拟孪生体动态反映施工进度、施工质量及施工现场安全状况；结合施工实测数据与设计方案数据、计划数据的对比分析，及时掌握施工过程中的偏差与问题，快速调整优化施工方案与方法，保障工程质量与施工进度。同时，应将施工全过程数据实时上传至系统平台，丰富完善数字孪生体，实现施工全过程的可追溯、可管控。在运维时，可将虚拟孪生体深度嵌入运维管理流程，借助虚拟孪生体对设备运行状态进行实时监控，通过在线仿真模拟推演设备运行趋势，据此制定科学合理的运维方案，实现设备预知检修，降低故障发生率；当设备出现故障时，可通过虚拟孪生体开展故障仿真模拟分析，排查故障原因，制定最优处置方案并应用于现场故障解决，提升运维效率与效果 [5]。

4 结束语

数字孪生技术为电力工程建设数字化转型提供了全新的技术路径，能够有效破解传统电力工程建设管理面临的各类难题，提升工程建设管理的精准化、精细化与科学化水平。未来，可针对具体电力工程建设场景，进一步细化总体架构设计内容，完善相关技术应用，积极解决架构落地过程中的各类具体问题，实现电力工程建设全过程与数字孪生成长性、动态性、交互性的深度对接融合，充分发挥数字孪生技术的价值优势，为新形势下电力工程建设高质量发展提供更加强有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 徐开浪 . 电力工程全生命周期技术应用及成本控制 [J]. 中国招标 ,2025(S2):106-107.

[2] 戴杰 . 电力工程低压配电系统安装调试要点及质量管控措施研究 [J]. 电力设备管理 ,2025(19):205-207.

[3] 孙伟 . 基于数字孪生的电力工程二次设备运行状态自动监测技术 [J]. 电力设备管理 ,2025(18):213-215.

[4] 韩斌 , 高文成 , 常建 . 数字孪生技术在电力工程设备全生命周期管理中的应用 [J]. 自动化应用 ,2025,66(18):83-85.

[5] 孙楠 . 基于数字孪生的新能源电力工程二次设备运行状态自动监测方法 [J]. 自动化应用 ,2024,65(14):50-51,55.

基于深度学习的监控视频异常行为检测方法

崔旭龙，张力文，刘　铠，赵哲宇，朱晓程

（齐鲁理工学院，山东 济南 250200）

摘　要　监控视频异常行为检测是智能安防技术持续演进中的关键研究方向，其核心任务在于依托视频数据识别偏离常态行为模式的异常事件。受监控场景复杂、目标遮挡频繁、行为边界模糊及异常样本稀缺等因素影响，传统依赖人工规则和浅层特征的方法已较难适应真实环境中的检测需求。深度学习方法依托对图像外观信息、时序运动信息及时空关联特征的联合建模，为异常行为识别提供了新的技术支撑。本文围绕监控视频异常行为检测中的空间特征学习、时序建模、三维卷积与双流结构、重构预测与弱监督学习、注意力机制与Transformer等方法展开分析，有助于进一步梳理该领域的主要技术路径，并为后续模型优化和工程应用提供参考。

关键词　深度学习；监控视频；异常行为检测；时空建模；智能安防

中图分类号：TN948.6　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.007

0　引言

视频监控已深度嵌入校园、社区、交通枢纽及商业场所等多类公共空间，海量监控画面的持续累积，使异常行为的快速识别逐渐成为安防管理中的现实需求。相较于普通行为分类，异常行为往往具有突发性、低频性和开放性，实际场景中还常伴随光照变化、背景干扰、遮挡重叠及视角偏移等情况，这使传统检测方式很难稳定应对复杂环境。深度学习技术在视觉表征和时序关系建模方面表现出较强的适配性，因而为监控视频异常行为检测提供了更具延展性的研究空间。

1　监控视频异常行为检测的研究基础

1.1　监控视频异常行为检测的任务特点

监控视频异常行为检测与一般行为识别并不相同。一般行为识别多建立在既定类别上，识别目标较明确，模型只需判断目标属于哪一类动作；异常行为检测面对的则是大量正常视频中的少量偏离事件，判断重点不只是动作名称，更在于行为状态是否脱离场景常态[1]。打斗、跌倒、闯入、异常聚集、可疑徘徊等行为在监控画面中往往出现突然、持续时间不固定，且容易受到拍摄角度、背景运动、遮挡重叠和光照波动干扰，致使检测过程带有较强的不确定性。从任务属性看，异常行为检测通常具有四个突出特点：其一，异常样本占比低，正常视频远多于异常视频，模型训练容易向正常模式偏移；其二，异常类别具有开放性，不同场所对异常的判定标准并不一致，校园、车站、商场和工业区域的风险触发条件存在明显差异；其三，异常行为边界不够清晰，很多事件并非在某一帧突然形成，而是由局部异常逐渐发展为完整事件；其四，场景依赖性较强，同一动作放在不同空间环境中，风险含义可能完全不同。

1.2　监控视频异常行为检测的主要任务形式

从研究和应用的结合方式来看，监控视频异常行为检测通常可分为视频级判别、时间定位和时空定位三类任务。视频级判别侧重对整段视频作出总体判断，即识别其中是否存在异常事件。这一形式标注成本相对较低，适宜用于海量视频的初筛，但输出结果较粗，只能说明“有无异常”，难以直接支撑实时预警。时间定位是在视频级判别基础上的进一步细化，其目标是找出异常出现的具体时间片段。对于值守监控、事件回放和报警触发而言，这一任务更具应用意义，因为系统不再停留在整体判断，而是能够指出异常大致发生于哪一时段。若要继续增强检测精度，就需要进入时空定位层面，即在识别异常片段的同时，进一步标出异常目标所在区域或异常发生位置。三类任务之间存在清晰递进关系，视频级判别解决“是否异常”，时间定位解决“何时异常”，时空定位解决“何处异常”。

2　基于深度学习的监控视频异常行为检测核心方法

2.1　基于空间特征学习的异常检测方法

深度学习具有出色的特征提取效果及强大的数据拟合能力，检测精度较高，是异常行为检测领域中的

作者简介：崔旭龙（1998-），男，本科，助教，研究方向：计算机视觉。

主流研究算法[2]。监控视频进入智能识别阶段后，较早被广泛采用的是空间特征学习方法，这一路径通常以单帧图像或短片段关键帧为输入，依托卷积神经网络对人物外观、目标姿态、场景结构和局部异常线索进行编码，进而完成异常判别。其任务起点在于，许多异常行为在空间层面往往会先表现出可观测差异，如人员突然倒地、多人近距离扭打、目标翻越围栏、可疑物体异常滞留，这些变化在画面形态、轮廓分布和区域纹理上都具有一定偏离特征。模型在提取特征时，通常会把边缘信息、局部姿态、人体与背景的相对位置一并纳入表征过程，使原本依赖人工描述的视觉线索转化为高维特征表示，此类方法的优势在于结构清晰、训练过程相对稳定，尤其适宜处理静态异常较显著的场景。

空间特征学习存在一个明显边界，即模型更擅长识别“异常状态已经形成”的画面，却难以准确把握行为从正常向异常过渡的动态过程。换句话说，若只依靠单帧外观判断，模型看到的是某一时刻的结果，而不是事件演化链条本身，像追逐、推搡升级、缓慢聚集后突然冲突等连续性行为，就容易因时序信息缺失而被弱化。

2.2 基于时序建模的异常检测方法

异常行为并非始终依靠某一帧图像就能清晰识别，很多风险事件本质上属于动态过程，前后帧之间的动作演变往往比单帧外观更具判别价值[3]。基于这一认识，时序建模方法逐渐成为异常行为检测的重要技术方向，此类方法通常会把连续视频片段看作时间序列，把每一时刻提取到的特征依次送入循环结构之中，由模型学习动作变化的顺序关系、状态转移规律及长短期依赖信息。常见网络包括RNN、LSTM和GRU，其中LSTM与GRU因门控机制更适合处理较长时段的视频动态，因而在异常检测研究中更常出现。

时序建模方法的价值在于它能够把异常行为从“静态结果识别”推进为“动态轨迹分析”，比如人员突然奔跑，单帧画面未必足以说明风险，但若结合前后数秒画面，模型便能感知目标速度变化、方向切换及与周边人群的互动关系；又如跌倒行为，前一阶段可能只是身体重心倾斜，真正的异常信号往往形成于连续姿态失衡与落地停滞的组合过程中，若缺少时间序列分析，模型很难稳定区分正常弯腰与真实跌倒。也正因如此，时序建模在监控场景中往往承担“识别行为演化过程”的任务，能够增强对持续性异常、渐进式异常和突发性异常的辨识能力[4]。

2.3 基于三维卷积与双流结构的异常检测方法

异常行为并不是“空间特征+时间特征”的简单叠加，而是两者在连续视频流中的同步耦合结果。基于这一逻辑，三维卷积和双流结构逐渐成为监控视频异常检测中的关键方法。三维卷积网络在传统二维卷积的基础上引入时间维度，卷积核不再只在图像平面内滑动，还会沿着时间轴同步提取片段级动态信息。模型输入通常为连续若干帧画面，其输出特征既包含目标外观，又包含局部动作变化趋势，因而更适合描述奔跑、追逐、冲突、跌倒这类具有明显动态形态的异常事件。

三维卷积的优势在于时空特征能够在同一编码框架内被统一提取，模型不需要先独立分析空间内容，再单独叠加时间信息，而是直接从片段中学习事件的整体演化模式。对于异常检测而言，这一结构更接近视频本身的表达方式，也更容易捕捉短时突变动作带来的风险信号。不过，三维卷积对算力和存储资源的要求相对较高，片段长度、采样间隔和网络深度一旦设定不当，训练成本就会明显上升，边缘部署场景中的实时响应也可能受到影响。

双流结构则是另一条被广泛采用的路径。它通常设置两条并行通道，一条负责处理RGB图像中的外观信息，另一条负责处理光流等运动信息，随后在特征融合阶段形成统一判别结果，这样做的直接优势是把“画面里有什么”和“画面在怎么动”分开建模，再在更高层完成关联分析。对于监控视频而言，光流特征往往能够更敏感地反映局部运动异常，比如短时间内的人群方向紊乱、目标快速靠近、局部肢体剧烈摆动等，RGB分支则更适合保留场景布局、人体轮廓和目标语义。两路信息融合之后，模型对动态异常的识别边界会更清晰，对复杂背景下的误判也会形成一定抑制。

2.4 基于重构预测与弱监督学习的异常检测方法

监控视频异常行为检测面临的一个长期难题在于异常事件本身数量有限，且精细标注成本很高。要把每段视频中的异常起止时刻、异常区域和异常目标全部逐帧标出，不仅工作量巨大，还容易出现人为标注偏差。因此，研究者逐渐把关注点转向重构预测方法与弱监督学习方法，希望在标注不足条件下依旧保持较强的检测能力。重构预测方法的基本思路是先学习正常行为分布，再利用模型对正常样本的重建能力或

未来状态预测能力进行异常识别。换句话说，模型若长期只接触正常视频，它便会逐渐掌握正常场景中的运动规律和空间结构。

这一逻辑与传统分类方法明显不同，它并不要求模型提前见过所有异常类型，而是依托“正常学习”间接发现未知异常。对于开放场景下的监控任务而言，这种思路具有较强适配性，因为现实中的异常往往无法被完整列举，模型若一味依赖已知异常标签，面对新型风险事件时反而容易失效。重构类方法通常更关注输入画面与输出画面之间的差异，预测类方法则更强调下一时刻或后续片段的生成偏差，两者本质上都在利用偏离程度完成异常判别[5]。在重构预测类异常检测中，异常得分通常可依托输入帧与重构帧之间的差异进行计算，其表达式可写为：

$$S(x_t)=\|x_t-\hat{x}_t\|_2^2 \quad (1)$$

式（1）中，x_t 表示第 t 时刻的原始视频帧，$\hat{x}_t$ 表示模型生成的重构帧，$S(x_t)$ 表示对应时刻的异常得分。该值越大，说明当前帧与正常模式之间的偏离程度越明显，进而更可能被判定为异常片段。若将这一得分沿时间轴连续统计，还可进一步生成视频片段级异常变化曲线，为后续异常定位提供依据。

弱监督学习则从另一个角度回应了标注成本问题。它通常不要求逐帧精细标签，而是借助视频级标签完成训练，即只告诉模型某段视频中“是否包含异常”，至于异常具体出现在哪一时刻，则由模型在训练过程中自行挖掘。为了完成这一任务，研究中较多采用多实例学习框架，把一段长视频拆分为多个片段，再依照片段得分排序、注意力加权或伪标签更新，逐步逼近真正异常区域。这类方法的现实意义较强，一方面降低了数据集构建难度，另一方面也更接近工程环境中的数据获取方式。

2.5 基于注意力机制与 Transformer 的异常检测方法

伴随监控场景复杂度持续上升，传统卷积与循环结构在长距离依赖建模方面的限制逐渐显现。很多异常行为并非集中出现在单一目标或短时间窗口内，而是分散在长时段上下文之中，前后线索之间甚至相隔较远，比如局部人群先出现缓慢聚集，随后某一区域突然扰动扩大，若模型只依赖局部时序片段，很难把这些分散信号串联起来[6]。基于这一背景，注意力机制和 Transformer 结构开始被大量引入异常行为检测任务。注意力机制的核心作用在于让模型从复杂输入中主动聚焦更具判别价值的区域、目标或时间片段，把有限计算资源优先分配给关键异常线索，从而减轻背景噪声对最终判断的干扰。

在监控视频中，关键异常往往只占据局部区域或短暂时间窗口，若模型对整段视频平均处理，异常信号很容易被大量正常内容淹没。注意力机制的加入，使模型能够在特征编码阶段生成权重分布，把疑似异常区域、异常动作发生时段或目标交互密集区域突出出来，由此增强异常表征的集中度。相比之下，Transformer 的价值更体现在全局建模能力上，它依托自注意力机制直接建立远距离片段之间的关联，不再像传统循环网络那样严格依赖顺序传播，因而在长视频分析中更容易捕捉跨时间的上下文关系。

3 结束语

监控视频异常行为检测的研究价值已不再停留在单一技术识别层面，更深一层的意义在于让安防系统从被动留痕逐步转向主动感知与前置研判。深度学习的引入，使异常识别由依赖固定规则的静态判断转入面向复杂场景的动态分析，模型关注点也由表层动作捕捉延展到时空关系、环境语义与风险演化过程，这一变化既增强了监控数据的利用深度，又推动了视频智能分析向实战化方向靠近。未来，监控视频异常行为检测仍将围绕复杂场景适配、多源信息协同、轻量部署与智能预警联动持续深化，进而为智慧安防体系提供更强的支撑。

参考文献：

[1] 曾婷,黄东军.智能视频监控系统异常行为检测算法研究综述[J].计算机测量与控制,2021,29(07):1-6,20.
[2] 彭嘉丽,赵英亮,王黎明.基于深度学习的视频异常行为检测研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(06):51-61.
[3] 徐涛,田崇阳,刘才华.基于深度学习的人群异常行为检测综述[J].计算机科学,2021,48(09):125-134.
[4] 张扬,刘泫梓,孙文婷.基于深度学习的视频监控异常行为检测技术研究[J].中国新通信,2025,27(17):29-31.
[5] 汪洋,周脚根,严俊,等.基于深度学习的监控视频异常检测方法综述[J].中国图象图形学报,2025,30(03):615-640.
[6] 郑凯东,江怡.基于改进C3D的视频监控异常行为检测算法[J].信息技术与信息化,2024(06):131-134.

智能传感与物联网技术在地震监测中的应用研究

邱 淑

（成武县防震减灾中心，山东 菏泽 274200）

摘 要 针对地震突发性、强非平稳的显著特征，本文提出面向校园建筑群、水库大坝及城市轨道区段的智能传感与物联网协同监测方案，构建高灵敏感知、异构回传、在线分析的完整监测闭环。该系统以高动态MEMS和24位模数转换为核心模块，融合GNSS与PTP毫秒级授时、节点侧信号处理技术，依托LTE等多网络组网实现灵活部署与拓展。实验测试表明，系统时间同步误差仅0.8 ms，PGA幅值中位误差为1.8%；试点应用中，监测误报率从3.9%降至1.2%，事件召回率提升至97%，监测性能显著优化。

关键词 智能传感；物联网；地震监测；边缘计算；早期预警

中图分类号：TP2；P315.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.008

0 引言

传统强震仪加有线回传模式在站点建设周期、网络韧性与跨场景适配方面存在不足，尤其难以兼顾低功耗长距覆盖与高频数据上行。基于此，本文面向校园建筑群、水库大坝与城市轨道交通等差异化场景，构建智能传感与物联网协同方案，围绕高动态三向加速度感知、毫秒级时钟对齐、节点侧稳健预处理与消息队列化回传等关键环节展开系统设计，并以流式引擎与多站关联支撑早期预警与结构响应分析。通过实验评估与多场景连续运行对照，量化验证方案在误触发控制、响应时延、到时稳定性、数据连续性与运维成本上的综合效益，为地震监测的工程化部署与规模化应用提供可参考的技术路线与实证依据。

1 智能传感与物联网地震监测的技术原理

地震动具有突发且非平稳特征，监测系统一般依托智能传感和物联网结构组织感知、传输与分析链路。节点以力平衡或高动态MEMS加速度计采集三向加速度信号，根据24 bit模数转换与温度补偿削弱低频漂移，让量程覆盖微震至强震区间，同时引入高采样GNSS或光纤光栅记录结构位移[1]。

采集端由微控制器或嵌入式Linux节点承担时间同步与触发识别任务，借助GNSS授时或PTP精密时钟保持毫秒级时间一致，并在本地开展去趋势、带通滤波与STA/LTA触发计算，提取PGA、PGV等特征以减少回传数据量。传输环节结合部署环境组织异构网络，平台侧再对震相到时进行初步判读。

2 智能传感与物联网地震监测系统的构建

2.1 地震监测智能传感节点的硬件设计

地震监测节点设计通常根据低功耗与工程可靠展开，整体结构见图1。对于校园建筑群与坝体等固定站点，控制单元一般用具备DSP指令和多级休眠能力的32位微控制器承担时序管理和边缘特征计算，并配置硬件看门狗与掉电数据保持功能[2]。

感知层用三向高动态MEMS加速度计采集地震动信号，依据24 bit增量型模数转换与低噪声前端电路削弱低频漂移，让量程覆盖弱震至强震区间；部分关键站点预留力平衡传感器差分接口，在成本与精度之间保持灵活配置。时间同步环节借助GNSS模块输出秒脉冲校准本地晶振，在信号受阻情形下仍能维持小时级稳定度。通信部分结合LTE Cat1、NB-IoT与LoRaWAN构建异构链路，并在主控端组织MQTT消息回传。电源系统接入太阳能与市电双通道，外壳用IP66防护结构适应户外环境。

2.2 物联网地震数据传输网络的搭建

由于校园建筑群、峡谷水库与城市轨道区段的差异化通信环境，传输网络搭建采取分层异构架构，将低功耗广域与蜂窝回传进行耦合。LoRaWAN作为低功耗长距组网方案，运用星状接入和网关汇聚，由节点在

作者简介：邱淑（1995-），女，硕士研究生，助理工程师，研究方向：电子信息。

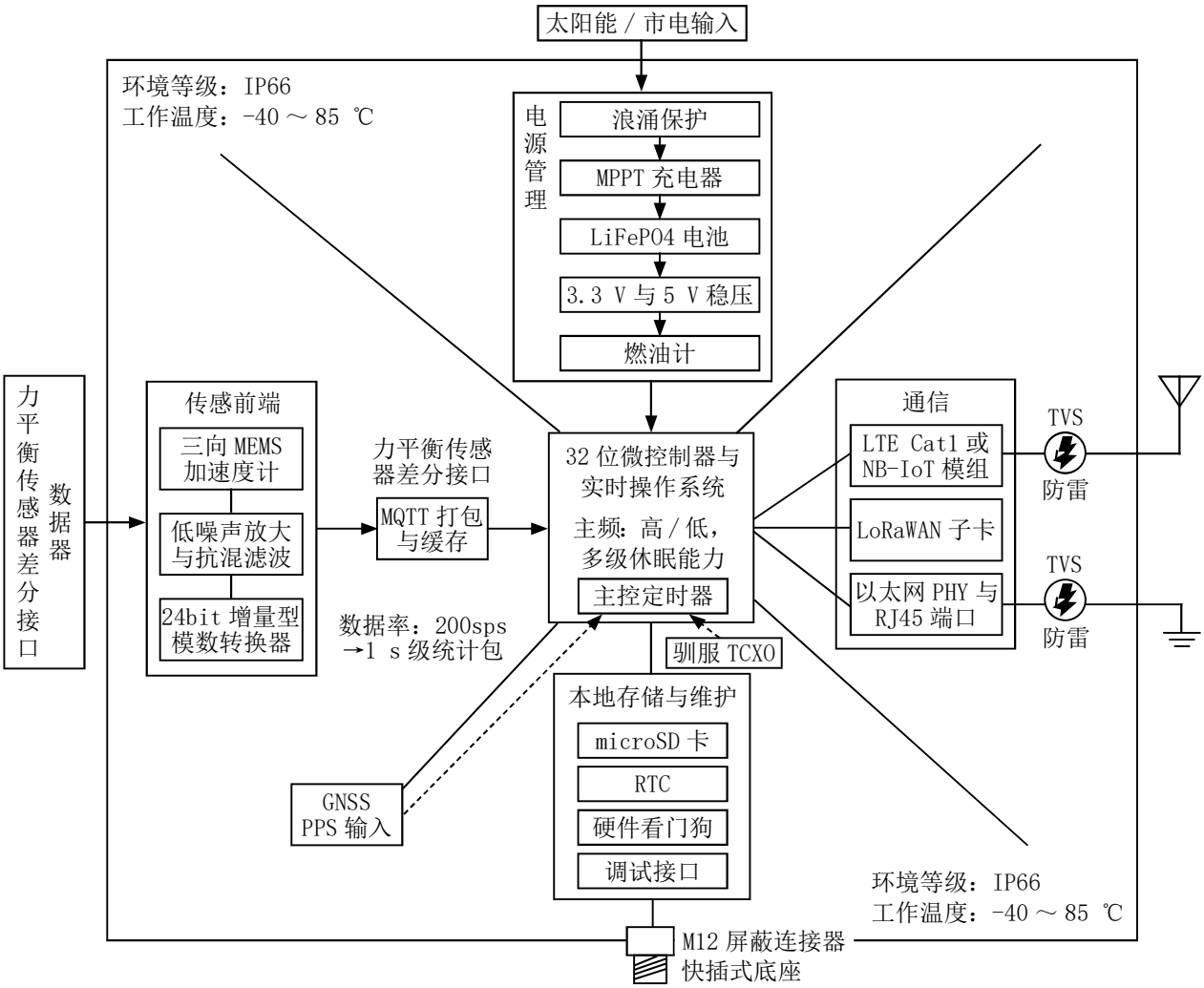

图 1 智能传感节点硬件架构图

本地完成去趋势与触发后，将带有 UTC 时间戳的特征包与事件窗以低占空比上行至楼顶或山脊网关，网关再以以太网或 LTE 将流量汇入平台消息队列。NB-IoT 作为运营商承载的蜂窝物联通道，由节点直连核心网并接入 MQTT 队列，适用于坝体、山谷与地面覆盖稳定的城区稀疏站[3]。

传输流程运用心跳、特征、事件三层负载策略，常态发送秒级健康与噪声指标，触发期提升采样并打包短时窗，空闲期仅保留心跳，以将链路占用压低到可控水平。从部署角度来看，在某地 3 所校园屋顶配置 2 台多通道 LoRa 网关叠加覆盖，将教学楼与体育馆下方节点纳入单跳上行；在某水库坝肩设置 NB-IoT 节点群，并且加装 5 dBi 天线以穿越峡谷遮挡，必要时在山脊增设一体化 LoRa-LTE 中继。需重点关注的是，节点侧维护序列号与窗口重传并启用断点续传，平台侧进行时序校核与去重合并，借此将链路波动对连续波形和到时判读的影响控制在工程可接受范围，同时开放远程参数下发与分片 OTA，使网络在不中断监测的条件下进行配置与固件更新，链路加密与访问控制在网关与平台侧同步启用。

2.3 地震监测数据的预处理算法设计

立足于校园楼宇、峡谷水库与轨道区段噪声机理差异，将预处理链路构建为时间对齐—去趋势—滤波—异常抑制—稳健特征估计的阶段流程。节点侧在 GNSS 或 PTP 校时后，将不规则到达的样本对齐到统一采样频率，对插值长度小于 2 点的间隙进行线性补齐，对超阈值断裂直接打标缺测以避免伪波形外推。从设备误差抑制角度来看，为削弱 24 bit 模数转换的零点漂移与温度缓变影响，在 3 ～ 10 s 滑动窗内进行中位数去直流并施加一阶线性去趋势，让低频缓变项被压低

到触发判据以下，同时把时域统计特性保持在与后续特征估计一致的尺度上。

$$y[n]=\alpha(y[n-1]+x[n]-x[n-1]) \quad (1)$$

式（1）中，$x[n]$ 表示去趋势后的输入序列，$y[n]$ 表示高通后的输出序列，α 为一阶高通系数，f_c 为高通截止频率，f_s 为采样频率；α 取值按 $\exp(-2\pi f_c/f_s)$ 计算以获得稳定的单极点实现。

从场景适配性出发，上式作为一阶高通环节被部署在边缘节点中，用来抑制微重力偏置与传感器低频漂移；在结构响应关注带宽位于0.1～40 Hz的校园建筑群，设置为0.1 Hz，在坝体缓滑监测中，下调至0.05 Hz以保留超低频慢变信息[4]。要重点关注电磁环境复杂的配电间与区间隧道更易出现的短脉冲毛刺，在高通输出后叠加3点中值滤波以压制孤立尖峰，并将Hampel判别嵌入31样本滑动窗内，采用中位—MAD的稳健统计阈值对离群样本进行替换，同时记录质量标识位，保证后续谱与能量估计不受污染。

异常识别还覆盖饱和与卡死两类故障：一方面运用幅值导数的固定阈值监测来识别突变跃迁；另一方面以恒值时长判别来发现长时间无变化的通道。二者均采取区段掩蔽而非全段丢弃，从而保留震相到时信息。计数值与物理量之间的换算按标定灵敏度执行，并在强震段采用分段不漂移积分法来获取PGV的稳健估计，避免低频误差累积。预处理产物、短窗能量以及PGA/PGV计算结果保持同一时间轴输出，为平台侧的多站触发关联与烈度场推断提供一致、低复杂度且工程可部署的数据基础。

3 智能传感与物联网地震监测系统的应用效果分析

3.1 实验性能测试

面向校园建筑群、水库坝体与轨道区段的部署条件，实验在振动台环境中对监测节点的时延、幅值精度和运行稳定性开展评估。测试平台由六自由度振动台、GNSS与PTP授时源、温控箱及网络仿真设备构成，节点采样、触发识别和MQTT上行保持连续运行；硬件时标记录激励注入时刻，并和平台入库时间进行对齐计算，以获得端到端延迟结果。测试显示，在LTE、NB-IoT以及LoRaWAN叠加LTE回传条件下，端到端延迟维持在百毫秒量级；振动台扫频覆盖0.2～25 Hz与0.01～0.4 g区间时，节点输出与标准加速度计对比后，PGA与PGV幅值误差保持在较低水平。温控箱在-10～45 ℃连续运行72 h，节点时钟漂移与丢包率保持稳定。

3.2 试点场景的监测效果验证

以成都高新南区3所校园楼宇群、贵州黔北水库坝肩以及成都市区轨道交通区段的连续运行作为试点，研究将智能传感与物联网协同方案与既有强震仪加有线以太网回传方案进行对照评估，围绕误触发控制、响应时延以及定位可靠性展开。

对照设计将相同节点密度与相同阈值配置作为前提，采用台阵内共模地震与近场施工扰动两类事件作为比较对象，并将平台入库时间与毫秒级授时时标对齐到一条时间轴上。观察发现，在校园屋顶到教学楼层的传播路径中，边缘去趋势与一阶高通加稳健异常抑制使环境电磁扰动触发概率维持在低水平，轨道区段的电机电流耦合干扰被有效抑制，坝肩场景在阴影覆盖导致的链路摆动条件下仍然维持事件窗完整回传[5]。

此外，多站触发关联在三类场景下均将单站误判削弱为台阵一致性判定，配合断点续传与序列窗口重传将数据缺口压缩到分钟量级以下，使早期预警的起报时刻和结构响应的峰值参数提取同步稳定下来。误报率与平均响应时间的下降与到时误差的收敛在三类试点中保持一致性，事件召回与数据连续性的增益表明该系统在复杂传播与异构链路条件下具备更强的工程适配能力，同时维保指标的收敛体现了远程参数下发与模块化电源管理对日常运维负担的缓解。

4 结束语

根据地震监测协同需求，研究依托智能传感和物联网架构组织感知、传输与分析链路。节点侧结合高动态MEMS采集、24位数据转换与温度补偿，并引入GNSS与PTP授时保持毫秒级时间一致，同时嵌入去趋势处理、一阶高通与Hampel抑制算法；通信环节结合蜂窝网络与低功耗广域组网完成MQTT流式回传，让采集、传输与预警在统一时基下连续衔接。实验与试点运行表明，系统在时间同步、端到端延迟与幅值误差控制方面保持稳定，误报率与数据缺失明显减少，后续将结合多源传感与协同组网，对复杂环境中的监测稳定性开展进一步优化。

参考文献：

[1] 张健.大坝强震监测技术与预警方法研究[D].林芝:西藏农牧学院,2025.
[2] 文天宇.地下综合管廊性态智能监测与评估研究[D].南京:东南大学,2024.
[3] 杨士科.物联网框架下的建筑结构健康监测系统搭建[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
[4] 张芙蓉.分布式结构地震响应监测系统设计[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2023.
[5] 倪泰山,张惠菊,张增旺,等.基于态势感知及物联网技术的地震台站运维管理系统设计[J].地震地磁观测与研究,2022,43(05):213-219.

基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨

张子豪

（湖北第二师范学院，湖北 武汉 430205）

摘 要 机械电子工程是融合机械、电子、控制、计算机与传感技术的交叉学科，是现代装备制造业与工业自动化的核心支撑。智能控制工程以人工智能、自适应算法、模糊逻辑、神经网络与深度学习为技术内核，能够在非线性、强扰动、时变参数与复杂约束场景下实现传统 PID 控制难以完成的高精度、高鲁棒性与自主决策控制。本文围绕智能控制工程与机械电子工程的技术融合机理，系统阐述智能控制的技术特征，并分析基于智能控制工程在机械电子工程中的应用，旨在为相关工作人员提供参考。

关键词 智能控制工程；机械电子工程；自适应控制；神经网络；数字孪生

中图分类号：TP273 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.009

0 引言

机械电子工程(Mechatronic Engineering)以“机—电—控—算”一体化为核心，面向高端制造、航空航天、新能源装备、智能物流与服务机器人等关键领域，承担着装备设计、系统集成、运动控制与运维保障的重要任务。随着工业 4.0 与智能制造的深入推进，传统机电系统在复杂工况、高精度任务与动态环境中的适应性不足、响应滞后、容错性弱等问题日益突出，依赖精确数学模型的经典控制理论已难以满足现代工程需求。智能控制工程突破模型依赖局限，以数据驱动、自主学习、在线优化与分布式协同为特征，为机械电子工程提供了全新的技术范式。将智能控制嵌入机电系统的感知、决策、执行与运维全流程，可显著提升系统的动态性能、抗干扰能力与自主化水平，推动机电装备从自动化向智能化、柔性化、网络化升级。

1 智能控制工程与机械电子工程的融合基础

智能控制工程是现代自动控制理论与人工智能技术深度交叉融合形成的高级控制技术体系，其核心价值在于突破传统控制方法对精确数学模型的过度依赖，面向非线性、强耦合、时变参数以及复杂扰动环境，实现系统的自主决策、自适应调节与优化运行[1]。与依赖固定参数与线性模型的经典控制不同，智能控制以模糊逻辑、神经网络、专家系统、模型预测控制以及强化学习等技术为核心支撑，能够通过数据驱动与在线学习不断优化控制策略，在动态工况下保持稳定可靠的运行效果。这种技术特性恰好与机械电子工程不断升级的发展需求高度契合，也为二者深度融合奠定了坚实的理论与技术基础。

机械电子工程是集机械结构、电子电路、控制技术、计算机技术与传感检测技术为一体的综合性交叉学科，是高端装备、智能制造、机器人及自动化产线的核心技术载体。随着工业制造向高速化、精密化、集成化与柔性化方向发展，传统机电控制系统在面对复杂作业任务、多变工况干扰以及微米、亚微米级精度要求时，逐渐暴露出响应滞后、抗干扰能力弱、容错性不足以及难以自主调节等局限。现代机电系统不仅需要完成指定动作，更要在温度漂移、机械磨损、负载波动以及外部振动等不确定因素下，持续保持高精度、高稳定性与高可靠性，这就对控制系统的智能化水平提出了更为迫切的现实需求。

智能控制工程与机械电子工程的深度融合并非简单的技术叠加，而是从感知、决策、执行到运维全流程的系统性重构，在实际工程体系中，多模态传感器通过采集设备状态、环境参数与运行信息为智能控制提供实时数据输入。智能控制算法依托边缘计算或嵌入式芯片完成在线辨识、故障诊断与控制指令生成，高性能伺服、液压或气动执行机构通过精准执行控制指令实现动作优化。同时，通过数字孪生与工业互联技术实现远程监控、迭代优化与全生命周期管理，这

作者简介：张子豪（2004-），男，本科，研究方向：机械电子工程。

种闭环式融合路径，通过有效提升机电装备的加工精度、运行效率与作业一致性，降低能耗与故障率，减少人工干预，推动传统自动化机电系统向自主化、智能化、柔性化的现代机电系统升级，为智能制造与高端装备发展提供核心动力[2]。

2 智能控制在机械电子工程中的关键技术支撑

2.1 基于神经网络的高精度运动控制技术

凭借独特非线性映射与自学习核心能力成为解决机械电子系统控制难题关键技术之一的神经网络，针对机电系统运行过程中摩擦损耗、机械间隙、惯量波动等影响系统控制精度与动态响应性能且传统控制方法难以精准补偿的不确定性因素。通过实时采集系统运行数据自主学习其变化规律以实现在线动态补偿，有效提升机电系统的轨迹跟踪精度与动态响应速度；在多轴联动加工、高速切削、精密定位等对控制精度要求极高的场景中，将RBF神经网络、BP神经网络与PID控制复合应用，通过充分发挥各类算法优势，实现将系统定位误差精准压缩至微米级、显著提升响应带宽、大幅降低超调量，确保机电设备在高精度作业场景中保持稳定可靠运行状态以满足现代机械电子工程精密控制需求。

2.2 模糊自适应与鲁棒控制技术

模糊控制所具备的无需依赖精确数学模型这一特性，使其能够借助模糊规则推理的方式来达成动态调节的效果，这种特性特别适合应用于具有时变特性、存在滞后现象以及受到强扰动的系统之中。而当把模糊算法与自适应控制以及滑模控制进行有机结合之后，便可以有效地对负载的突变情况、外部产生的振动影响以及参数出现的漂移现象起到抑制作用，进而能够确保机电系统在较为恶劣的工况条件下依然可以保持稳定运行的状态。另外，在数控机床领域以及机器人柔顺控制方面，模糊自适应控制的应用能够显著提升系统的抗干扰能力，同时也有助于提高作业的一致性水平。

2.3 数字孪生与模型预测控制（MPC）协同技术

数字孪生通过构建物理装备与虚拟模型的实时映射实现状态可视化、仿真预演与远程调试，模型预测控制基于滚动优化与反馈校正对多变量、强耦合系统进行全局最优控制。二者结合在实现加工过程仿真、误差预补偿、能耗优化与故障溯源的同时也在航空发动机、新能源汽车电驱动系统等复杂机电装备中获得广泛应用。

2.4 边缘智能与分布式协同控制技术

边缘计算通过在现场控制器部署智能算法以降低云端延迟、满足实时控制需求，分布式协同控制借助工业以太网与高速总线实现多设备、多轴、多机器人协同动作以支持柔性产线、集群作业与全域调度。边缘智能与分布式控制共同以提升机电系统的实时性、可靠性与扩展性的方式支撑智能制造车间级与工厂级智能化运行[3]。

3 智能控制工程在机械电子工程中的典型应用

3.1 精密加工装备：智能误差补偿与动态最优控制

精密数控装备是机械电子工程的核心载体，也是高端制造领域中实现高精度加工的关键支撑，其加工精度直接决定产品核心性能和质量等级。在实际加工过程中，它的加工精度很容易受到多种因素的影响，其中温度变化造成地主轴和横梁等关键部件热变形，切削力波动引发地刀具振动，还有长期作业带来的刀具磨损以及设备自身几何偏差，都会明显地影响加工精度，而且传统控制方法很难实现全面又实时的误差补偿[4]。但是，智能控制技术的投入使用，借助多传感器融合感知技术实时采集温度、切削力、振动等多维度运行数据，再结合神经网络在线建模能力，可以很准确地捕捉各类误差产生规律，实现热误差、几何误差与动态误差的实时补偿，很好地突破传统控制技术的精度瓶颈。在五轴联动加工中心实际应用当中，LSTM神经网络凭借很强的时序预测能力对主轴温升、横梁变形还有刀具磨损情况进行准确预判，再结合模型预测控制技术实时动态地调整进给量、主轴转速以及刀具姿态，保证装备在长时间连续作业过程里一直保持稳定的加工精度。同时，针对复杂曲面这类高难度加工任务，基于强化学习的轨迹优化算法可以自主地平滑加工路径，减少空行程和加工冲击，不仅可改善工件表面粗糙度，还能有效地提升加工效率。另外，智能控制还可以按照加工材质、刀具类型等参数实现切削参数的自寻优，在保障加工质量的前提下有效地降低设备能耗和刀具损耗，延长精密加工装备的使用寿命，提升整体加工的经济性和稳定性。

3.2 智能机器人系统：自主感知决策与柔顺协同控制

机械电子工程朝着智能化方向不断地推进，主要地体现在工业机器人服务机器人以及特种机器人这几大类上，这些设备的作业表现能够直接地反映出机电系统整体的智能化水平，传统机器人大多采用示教再现这类工作方式，所以作业时灵活程度较低，对现场环境地适应能力也不够好，很难满足复杂场景下的工作要求，但是将智能控制技术深度地融入机器人系统后，可以为机器人赋予环境感知自主定位动态避障柔

顺操作以及多机协同这些核心能力，从根本上打破传统示教再现模式带来的限制，让机器人可以灵活地应对更多样更复杂的工作场景[5]。在工业生产环节当中，焊接装配分拣等对操作精度和灵活度要求很高的场景里，借助机器视觉和力觉传感器的融合使用，再搭配模糊控制以及神经网络相关算法，机器人可以实时地识别工件位置和姿态上存在的偏差，并且自主地自适应调整运动路线和接触时的力度，既可以完成高精度地装配工作，又能够实现无损伤地抓取夹持，很好地避免工件出现损伤，同时提高整体地作业质量。在仓储物流和无人搬运这类场景中，针对要应对环境实时变化的智能机器人，采用深度强化学习的 AGV 路径规划技术可以很快地响应环境改变，就算现场存在动态障碍物也能自主地规划出最合理的搬运路线，显著地提高整体作业效率。

3.3 高端机电装备：健康诊断与预测性智能维护

高端机电装备作为广泛应用于新能源、工程机械、航空航天、石油化工等关键领域且因结构复杂、集成度高而多运行在高温、高压、强振动、强电磁等恶劣工况下的设备，其运行可靠性直接关系到生产安全与经济效益。传统定期维护模式因存在易出现过度维修以增加维护成本、难以发现潜在故障隐患而导致故障漏检并引发非计划停机造成巨大经济损失等明显局限性，被智能控制技术与大数据、深度学习技术相结合构建的完整状态监测、故障诊断、寿命预测、主动维护闭环系统改变。该系统通过部署在装备关键部位的传感器实时采集振动、温度、电流、压力等多源时序运行数据，采用 CNN-LSTM 混合模型深度分析处理数据，能在故障早期精准识别轴承磨损、齿轮点蚀、电机匝间短路等典型故障以争取充足故障排查处理时间。同时，依托边缘计算技术实时评估装备健康状态、精准预测设备剩余使用寿命并自动生成科学合理的维护策略与备件建议，达到有效减少非计划停机次数、降低维护成本的效果，尤其在风电、光伏与储能等新能源机电系统中，这种预测性智能维护模式可显著提升设备可用率、保障能源输出稳定性，助力绿色制造与低碳运行目标的实现。

3.4 工业机电系统：分布式协同与全域能效优化

随着智能制造的深入推进，由多台机电设备、物流装置与检测单元组成并呈现多变量、强耦合、大滞后显著特征的现代工业生产线复杂系统，因不再是单一机电设备的独立作业而使传统单机控制模式难以满足整线高效运行需求。智能控制技术则通过构建基于工业物联网与边缘智能技术、采用 EtherCAT 与 Profinet 等高速工业总线实现设备间毫秒级数据交互的车间级分布式协同控制系统，突破单机控制局限以实现多设备多单元协同联动与全域能效优化，为智能制造与绿色生产提供有力支撑。该系统还通过多智能体强化学习算法对生产节拍、物料流转与能源消耗进行全局协同优化，实现生产资源合理配置以避免生产瓶颈与资源浪费，在汽车零部件、3C 电子与锂电等规模化生产场景中有效提升整线生产协调性、优化生产流程并提升产品合格率。同时，智能控制技术针对泵、风机、压缩机等高耗能通用机电设备，通过负载感知实现自适应变频控制与运行模式智能切换，在严格满足生产工艺要求前提下合理调节设备运行参数，有效降低设备电耗，实现工业机电系统高效、稳定、低碳运行，既能提升生产效益，又践行绿色发展理念。

4 结束语

智能控制工程为机械电子工程应对复杂工况、高精度需求与智能化升级提供了核心技术支撑，是推动装备制造业向高端化、智能化、绿色化转型的关键力量。从精密加工的微米级控制，到机器人的自主决策，再到高端装备的预测性维护与工业系统的全域协同，智能控制已深度融入机械电子工程的全场景与全生命周期。未来，随着轻量化 AI、数字孪生、边缘计算与工业互联网的持续突破，智能控制将进一步解放机电系统的性能潜力，降低工程应用门槛，推动机械电子工程从自动化单体装备向自主化、网络化、集群化、服务化智能系统发展。面向智能制造与工业强国建设需求，持续深化智能控制与机械电子工程的交叉融合，开展关键技术攻关与工程化验证，对提升我国高端装备核心竞争力、促进产业升级具有重要的意义。

参考文献：

[1] 倪绍凯 . 智能控制技术在机械电子工程中的集成应用与效能评估 [J]. 电子元器件与信息技术 ,2025,09(08):240-242.
[2] 徐小娟 . 智能控制工程在机械电子工程中的运用探讨 [J]. 中国设备工程 ,2024(14):33-35.
[3] 周建鹏 . 基于智能控制工程在机械电子工程中的应用探讨 [J]. 中国设备工程 ,2024(09):40-42.
[4] 陈建军 . 智能控制工程在机械电子工程中的运用分析 [J]. 仪器仪表用户 ,2024,31(04):23-25,28.
[5] 赵玉斌 . 智能控制工程在机械电子工程中的应用 [J]. 电子元器件与信息技术 ,2021,05(08):87-88.

发电厂集控运行模式下主辅设备协同控制优化策略研究

崔 亮

（内蒙古鄂尔多斯煤炭有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 016064）

摘 要 针对集中控制运行中主要设备与辅助设备响应不一致、相互干扰严重等状况，建立主辅设备多输入多输出的状态空间数学模型，提出了分层次协同控制的优化方法，其中协调层级主要负责负荷指令的科学分配工作，执行层级则确保风烟给水系统与主机的动态配合情况，同时采用前馈补偿与反馈修正相结合的复合调控机制。仿真验证显示该方法能有效加快负荷响应的速度、减弱主辅设备之间的耦合影响、优化机组热效率以及调节性能。

关键词 集控运行；主辅设备；协同控制；分层优化；动态耦合

中图分类号：TM62 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.010

0 引言

火电机组采用集中控制运行方式借助统一监控平台对锅炉、汽轮机及相关辅助设备系统开展一体化管理，具备信息共享度高、操作界面一致与人员配置精简等特点，然而因主机与辅机之间存在紧密的能量与物质交互关系，负荷指令的变动会引发风烟系统、给水系统、制粉系统等多个子系统连锁反应，各环节动态响应特性存在差异导致时序配合失调，进而产生相互干扰并影响整体控制效果。传统单回路控制方法难以有效协调多变量间的复杂关联，迫切需要从全局角度出发设计协同控制优化方案以增强集中控制模式下机组整体运行效能。

1 集控运行模式下主辅设备动态耦合特性与建模

在火电机组集控系统中，锅炉、汽轮机等主机与送风机、给水泵等辅机通过能量与物质传递紧密联系。由于各子系统响应时间差异明显——锅炉热惯性120～200 s，给水系统30～60 s，风烟系统仅10～25 s——负荷变化时易引发压力波动、负压偏离与水位震荡等耦合问题[1]。针对这一特性，建立多输入多输出状态空间模型：

$$\begin{aligned}\dot{x}(t)&=Ax(t)+Bu(t)\\ y(t)&=Cx(t)+Du(t)\end{aligned}\tag{1}$$

式（1）中，$x(t)$ 为状态向量；$u(t)$ 为控制输入向量；$y(t)$ 为输出向量；A、B、C、D 分别为系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵与前馈矩阵。该模型将分散的单回路对象整合为多变量耦合系统，为协同控制优化提供理论基础。

2 主辅设备协同控制优化策略的分层架构与核心算法

2.1 集控框架下协调层与执行层的功能划分

分层协同控制体系将集控系统划分为协调层与执行层两个逻辑层，各层级承担着不同控制职能。协调层作为上层决策机构，依据电网调度指令以及机组运行状态，制定负荷分配策略并设定各子系统参数，其运算间隔通常是5～10 s，主要聚焦全局优化与多目标平衡；执行层分布在各辅机子系统的分散控制单元，将协调层下发的参数转化为具体的阀门开度、转速或者挡板位置指令，运算周期一般为50～200 ms，侧重于快速响应与局部干扰抑制[2]。两层通过标准化接口实现双向数据交互，协调层专注负荷调配与能量流优化，执行层保障各回路参数稳定。

2.2 稳态运行阶段辅机群优化配置的节能导向机制

在机组稳定运行期间，机组负荷基本保持不变，此时辅助设备运行方式对厂用电消耗及全厂能效起决定性作用，节能优化策略旨在降低辅助设备系统总能耗，在保证工艺要求的前提下确定各类辅机最佳工作状态。通过构建风机性能曲线与管网阻力特性表达式，利用遗传算法优化辅机启停组合及转速设定值，可使风机群功耗降低2%～4%。给水泵组采用与上述类似策略，按照负荷变化在汽动给水泵与电动给水泵之间进

作者简介：崔亮（1987-），男，本科，工程师，研究方向：电力系统及其自动化。

行智能切换，在中低负荷阶段优先使用电动泵，在高负荷时则切换到汽动泵以有效降低厂用电率[3]。辅机群优化配置的目标函数可表示为：

$$J=\min\sum_{i=1}^{n}P_i(Q_i,H_i,\eta_i) \tag{2}$$

式（2）中，J 为辅机群总耗功；n 为参与优化的辅机台数；P_i 为第 i 台辅机的轴功率；Q_i 为该辅机的流量；H_i 为扬程或全压；η_i 为运行效率。该目标函数在流量平衡约束与设备能力约束下求解，从而确定各台辅机的最优运行工况点。

2.3　变负荷过程中主机指令与风烟给水系统的动态匹配方法

变负荷过程中主机侧燃烧率与蒸汽流量的调整将引发风烟、给水等系统产生联动反应，若各子系统的响应速度不匹配则会造成主蒸汽压力异常波动、炉膛负压不稳以及汽包水位震荡等问题。动态匹配技术的关键在于依据主机负荷的变化趋势，提前规划各辅助设备的响应路径，保证其在时间上与主机需求实现同步协调[4]。当协调层在获取负荷增减指令后，首先根据锅炉热惯性特点确定燃料量提前投入的时机与大小，随后按照燃料—风量匹配比例同步调节送风机的转速，给水流量则按照蒸汽流量的波动情况进行跟踪调节。以一台 300 MW 亚临界机组为例，当负荷变动率为 3% Pe/min 时，燃料指令会比汽机阀门动作提前 8 ～ 12 s 发出，送风量在燃料加入后 2 ～ 4 s 内完成匹配，给水流量比蒸汽流量延迟约 5 ～ 8 s 以保障汽包水位稳定，这一情况如图 1 所示。

2.4　负荷扰动条件下前馈补偿与反馈校正的复合调节逻辑

当机组负荷出现波动情况时，单纯反馈控制响应迟缓，纯前馈控制难以处理模型误差，因此需构建复合控制策略。前馈补偿模块依据扰动信息预先调整控制量，反馈修正部分采用 PID 算法消除剩余误差及未建模干扰影响。复合调节的控制输出可表示为：

$$u(t)=K_{ff}\cdot d(t)+K_p\cdot e(t)+K_i\int_0^t e(\tau)\,d\tau+K_d\frac{de(t)}{dt} \tag{3}$$

式（3）中，$u(t)$ 为控制器输出；K_{ff} 为前馈增益；$d(t)$ 为可测扰动量；K_p、K_i、K_d 分别为比例、积分、微分系数；$e(t)$ 为被控参数偏差。前馈通道能够迅速应对干扰变化以抑制动态偏差最大值，反馈通道保证稳态无静差，二者相互配合可将主汽压力偏差控制在 ±0.15 MPa 范围以内，炉膛负压波动维持在 ±80 Pa 范围之内，显著改善机组在受到干扰时的调节性能[5]。

3　协同控制优化策略的仿真测试与性能评价

3.1　仿真测试平台构建与多工况实验方案

仿真测试平台在 MATLAB/Simulink 框架下构建而成，针对某 300 MW 亚临界汽包炉机组开发出全范围动态仿真模型，此模型整合了锅炉燃烧、汽水循环、风烟流动及汽轮机调节等子系统，各模块参数均依据现场阶跃响应测试数据进行标定。平台设置协同控制与传统分散控制两种运行模式，为对比优化策略的实施成效提供分析基础。多工况实验方案涵盖稳态运行、负荷阶跃、连续变负荷以及负荷扰动四类典型场景，其中负荷阶跃试验特地设置两组变化幅度，分别是 ±5% Pe

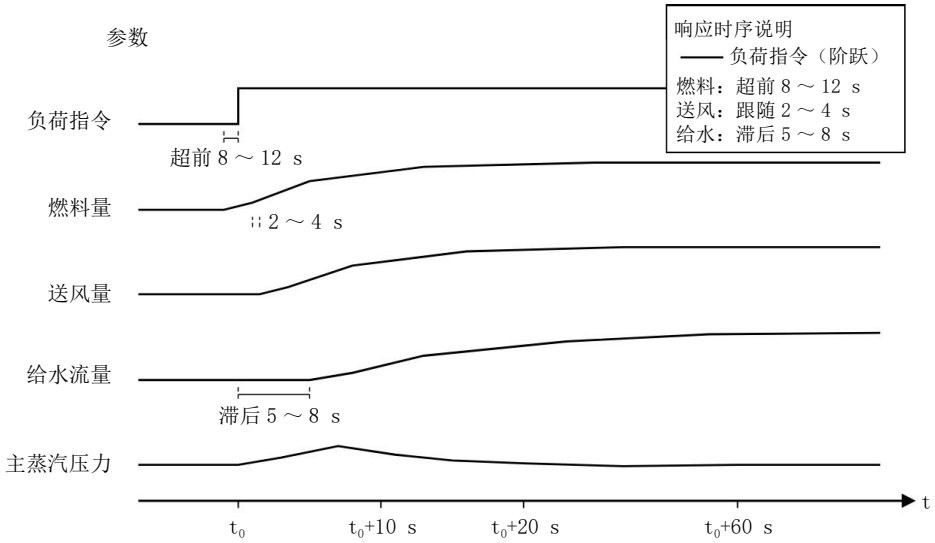

图 1　变负荷过程主辅设备动态匹配时序图

和 ±10% Pe，连续变负荷试验以特定速率在负荷区间循环升降，按 2% Pe/min 和 3% Pe/min 的速率在 50% ～ 90% 负荷区间进行，负荷扰动试验通过施加信号模拟波动情况，借助外部施加阶跃与正弦干扰信号模拟电网频率波动。为确保数据具有可靠性，各工况均重复运行 3 次后取平均值，仿真步长设为 0.01 s 以确保数值稳定性与计算精度。

3.2 负荷阶跃响应速度与超调量的对比分析

负荷阶跃响应试验重点评估机组从初始稳定状态过渡到新稳定状态时动态特性，主要考察响应速度、超调幅度以及调节时间等方面指标，试验选取 ±5% Pe 与 ±10% Pe 四种工况，对主蒸汽压力、实际负荷等核心参数的动态变化特征进行监测。测试数据表明，协同控制策略在各类工况下都呈现出更优的响应特性，体现为响应速度有所提升且超调量有所降低，这得益于协调层对燃料与风量的预先控制以及前馈补偿对耦合扰动的有效抑制。在负荷下降工况当中，该策略仍然保持着良好的跟踪效果，调节时间相比传统方法缩短了 22% ～ 25%，以 +10% Pe 工况为例，协同控制策略响应时间为 48 s、压力超调量 0.13 MPa、调节时间 85 s，而传统控制分别为 65 s、0.22 MPa、112 s，性能提升显著。

3.3 主辅设备间耦合干扰抑制能力的量化表征

主辅设备间的耦合干扰主要体现为某子系统操作变量变化引起其他被控参数的波动，其抑制效果通过耦合干扰抑制比进行量化评估。在燃料量阶跃扰动测试中，采用协同控制策略使汽包水位最大偏差降至 20 mm、炉膛负压偏差降至 70 Pa，较传统控制提升约 45%。进一步开展供水流量的阶跃扰动测试工作，主蒸汽压力的扰动传递增益降低约 38%，这表明协调层的解耦补偿手段可有效隔离扰动在各回路间相互影响，在送风量出现突变的试验中，过热蒸汽温度波动范围从传统控制的 ±9 ℃缩小到协同控制的 ±5 ℃，进一步证实复合调节逻辑在抑制多变量耦合干扰上具有显著效果。

3.4 机组热耗率与调节品质的综合效益评估

机组热耗率与调节品质是评判协同控制策略整体性能的关键标准，热力性能测试选取 70%、80%、90% 三种典型工况开展，各工况稳定运行半小时后记录数据并求取均值。测试数据表明，协同控制策略在所有工况下都能够同时提升能耗指标与控制性能，辅机系统优化配置带来的厂用电下降与主辅系统协同运行增强的稳定性产生了协同增益，这为机组经济性运行与负荷灵活调节奠定了坚实的基础。表 1 给出了综合效益评估的主要结果。

表 1 机组热耗率与调节品质综合评估

负荷水平	控制策略	热耗率 /（kJ•kWh^{-1}）	厂用电率 /%	压力 IAE/（MPa • s）	水位 IAE/（mm • s）
70% Pe	协同控制	8 486	5.15	13.2	88
	传统控制	8 558	5.38	22.5	148
80% Pe	协同控制	8 425	4.98	11.5	75
	传统控制	8 492	5.22	19.8	130
90% Pe	协同控制	8 378	4.85	10.2	68
	传统控制	8 438	5.08	17.5	112

4 结束语

分层协同控制优化策略通过明确协调层与执行层职责分工，确保负荷指令在主辅设备间的高效传递与动态平衡，稳定运行阶段辅助机组群遵循节能原则实现优化配置，负荷变化过程中风烟及给水系统根据主机需求实时调整运行参数，负荷扰动条件下前馈补偿与反馈校正机制的协同作用有效抑制了设备间的耦合干扰。仿真结果显示，该策略在响应速度、抗扰动能力及热耗率优化方面表现良好，不同工况下可显著提升主辅设备协调性能，该成果为集控运行模式下机组控制性能改进提供了理论依据与算法支持，也为更复杂多变量耦合系统的协同控制研究奠定了基础。

参考文献：

[1] 孙勇 . 满负荷工况下 1000 MW 多机组间协调优化控制方法 [J]. 电工技术 ,2026(01):198-200.
[2] 刘吉臻 , 王庆华 , 张效宁 , 等 . 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术 : 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报 ,2024,44(17):6855-6883.
[3] 洪文荣 . 加强电厂集控运行与机组协调控制探析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2022(29):1-3.
[4] 许文强 . 电厂集控运行与机组协调控制应用 [J]. 中国高新科技 ,2021(09):98-99.
[5] 胡正 . 火电厂机组集控运行技术管理 [J]. 技术与市场 ,2021,28(01):112-113.

基于多策略改进鲸鱼优化算法的无线传感器网络布设研究

闫 东

（绿能慧充数字技术有限公司，陕西 西安 710086）

摘 要 针对无线传感器网络（WSN）布设覆盖性能不均匀的问题，本文提出了一种面向 WSN 优化分布的改进型鲸鱼优化算法（MSWOA）。该算法的改进包括利用 Sobol 算子优化种群初始化分布；利用基于指数变化的收敛因子替代传统线性递减方式，并引入惯性权重机制平衡全局与局部搜索过程；强化了算法在局部开发阶段的性能；同时，借助随机学习机制，丰富了种群行为的多样性，提升了个体在迭代过程中的差异性。仿真实验表明，本文所提出的 MSWOA 算法在提升传感器节点覆盖率与空间分布均匀性方面具有显著优势。

关键词 无线传感器网络；鲸鱼优化算法；随机性学习

中图分类号：TP301.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.011

0 引言

无线传感器网络（WSN）是依托无线通信技术，由多种类型和数量的传感器所搭建的一种多节点网络系统[1]。作为关键的基础设施，WSN 在物联网、智慧城市及精准农业等领域扮演着重要角色。目前，在无线传感器网络的研究中，节点优化部署是热点研究方向之一，而群智能算法（粒子群优化、人工鱼群优化及灰狼优化等）已被广泛研究并应用于该领域[2]。

鲸鱼优化算法（WOA）[3] 是澳大利亚学者 Mirjalili 依据座头鲸捕猎行为提出的一种优化方法。近年来，研究人员针对 WOA 在易陷入局部最优、优化速度慢等方面中提出了多种改进策略并得到了实际应用。例如：周亚琴等[4] 提出了一种结合 Levy 飞行的改进型鲸鱼优化算法，有效提升了种群在迭代前期的全局搜索与跳出局部最优的能力。郭佳欣等[5] 融合了多种策略以克服原模型求解中的非线性、多极值困难，解决了光伏模型参数辨识这一具体工程问题。严志鹏等[6] 设计了一种非线性自适应权重来增强鲸鱼优化算法的性能，特别是在高维复杂函数优化问题上优势明显。

针对基础鲸鱼优化算法（WOA）在无线传感器网络（WSN）优化中收敛精度低、覆盖均匀度差等问题，本文提出一种改进的鲸鱼优化算法（MSWOA）。WSN 覆盖优化旨在通过调整节点位置实现区域有效监控。传统 WOA 种群初始化随机性强，收敛因子线性递减难以平衡探索与开发，且后期种群多样性下降。为此，MSWOA 引入 Sobol 序列初始化，使初始解分布更均匀；设计指数规律收敛因子，前期强化全局搜索，后期加速收敛；采用惯性权重与随机性学习策略，调节步长并增加种群多样性，平衡勘探与开发；最后利用柯西长尾扰动和高斯局部聚焦，提高全局收敛性能。将 MSWOA 应用于 WSN 覆盖优化，构建覆盖率适应度函数。仿真实验在 100×100 和 200×200 的区域部署，与 PSO、GWO、SSA、FA 及标准 WOA 对比。结果表明，MSWOA 的平均覆盖率最高，较标准 WOA 提升约 8.5%，节点分布更均匀，有效减少覆盖空洞，验证了其在 WSN 覆盖优化中的有效性与优越性。

1 改进鲸鱼优化算法

1.1 种群初始化改进

针对鲸鱼优化算法因种群初始化随机性强而导致的解空间分布不均、求解精度下降的问题，本文引入 Sobol 序列进行种群初始化。该序列在每一维度上基于底数为 2 的 Radical Inversion 生成，各维度通过独立的矩阵运算产生低偏差、高均匀性的准随机序列，确保初始个体在搜索空间中分布更加均衡，为后续寻优奠定良好的基础。

1.2 基于指数规律收敛因子调整策略

在 WOA 中，收敛因子 a 随迭代的更新方式采用一种线性递减策略进行计算，重要参量的不同更新策略会极大地影响算法的性能，而线性策略往往不是最有效的。

作者简介：闫东（1981-），男，本科，工程师，研究方向：新能源产业。

本文采用了基于指数规律变化的收敛因子更新方式：

$$a=2e^{-t/T_{\max}} \tag{1}$$

式（1）中，t 为种群代数，$T_{\max}$ 为最大的迭代次数。

1.3 自适应惯性权重策略

本文引入自适应权值解决猎物目标对鲸鱼群位置更新的影响，公式如下：

$$w(t)=\frac{2}{\pi}\cdot\tan(\frac{t}{T_{\max}}) \tag{2}$$

传统 WOA 的位置更新公式变为：

$$X(t+1)=X_{rand}(t)\cdot w(t)-A\cdot D_{rand},p<0.5,|A|>1 \tag{3}$$

$$X(t+1)=X^*(t)\cdot w(t)-A\cdot D,p<0.5,|A|\le 1 \tag{4}$$

$$X(t+1)=X^*(t)\cdot(1-w(t))+D'\cdot e^{bl}\cdot\cos(2\pi l),p\ge 0.5 \tag{5}$$

$$D=|C\cdot X^*(t)-X(t)| \tag{6}$$

以上公式中，$X^*(t)$ 是第 t 代种群内全局最优解个体位置，X_{rand} 是从当前随机个体位置，D 包围表示步长，D_{rand} 为搜寻猎物的步长，D' 为鲸鱼和猎物的距离，A 和 C 为系数向量，b 是螺旋形状的对数常数，l 是 -1 到 1 之间的随机数，p 为更新鲸鱼的位置的概率。

该策略初期权值较小，有利于种群广泛探索，维持多样性以避免早熟；后期权值非线性增大，强化最优解引导，加速局部收敛。

1.4 随机性学习策略

本文采用随机性学习策略，模拟鲸鱼之间的交流模式，通过比较适应度值来评价两个个体的优秀程度，次优的学习优秀个体的信息更细自身位置。

$$X_{new}=\begin{cases}X+rand(0,1)\cdot(X-X_p),f(X_p)<f(X)\\X+rand(0,1)\cdot(X_p-X),f(X_p)>f(X)\end{cases} \tag{7}$$

本文用 $rand(0,1)$ 产生 $(0,1)$ 间的随机数来表示个体学习差异。如果 $f(X_{new})<f(X)$，种群就接受新个体 X_{new} 并取代个体 X，否则拒绝劣个体 X_{new}。

1.5 柯西高斯混合变异策略

为了提升算法跳出局部最优的性能，本文为最优个体施加柯西高斯混合变异算子扰动。柯西高斯混合算子能产生不同的步长，使算法有效避免陷入局部最优。加入混合变异算子的个体更新公式为：

$$X^*_{new}(t)=X^*(t)\cdot(1+\lambda_1 cauchy(0,1)+\lambda_2 Gauss(0,1)) \tag{8}$$

$$\lambda_1=1-\frac{t^2}{T^2_{\max}} \tag{9}$$

$$\lambda_2=\frac{t^2}{T^2_{\max}} \tag{10}$$

式（8）中，$X^*_{new}(t)$ 为经过柯西高斯混合变异扰动后得到的新个体值；$cauchy(0,1)$ 为柯西算子，$Gauss(0,1)$ 为高斯算子。

2 WSN覆盖优化模型的建立与评价

2.1 WSN节点感知模型

在二维空间内，设有一个感知半径为 R_c 的传感器节点 p_m。若它与空间内任意一目标点 p_n 之间的欧氏距离满足 $d(p_m,p_n)\le R_c$，则该目标点被传感器节点所覆盖。则传感器节点对于目标点的感知概率为：

$$p_{(m,n)}=\begin{cases}1 & d(p_m,p_n)\le R_c\\0 & otherwise\end{cases} \tag{11}$$

式（11）中，$p_{(m,n)}$ 表示传感器节点 p_m 对目标节点 p_n 的感知概率。$d(p_m,p_n)$ 表示节点 p_m 与节点 p_n 之间的欧氏距离。

2.2 WSN覆盖优化模型

假设WSN由 N 个传感器节点构成，可表示为 $S=\{S_1,S_2,\mathrm{L},S_N\}$。二维空间监测区域内所有目标节点的集合为 $M=\{m_1,m_2,\mathrm{L},m_N\}$。若集合 S 和集合 M 的二维空间坐标值分别为 (x_i,y_i) 和 (x_j,y_j)，那么监测目标节点之间的距离的计算公式为：

$$d(S,M)=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2} \tag{12}$$

那么传感器节点集合 S 对于目标节点集合 M 的感知概率为：

$$P_{\mathrm{cov}}(S,M)=\begin{cases}1 & d(S,M)\le R_c\\0 & otherwise\end{cases} \tag{13}$$

被监测节点的联合感知概率为：

$$C_p(S_{all},m_j)=1-\prod_{i=1}^{n}\left[1-P_{\mathrm{cov}}(S,M)\right] \tag{14}$$

式（14）中，S_{all} 是二维空间监测区域中的全部传感器节点。

假设需要监测的区域是长w为 L，宽为 W 的矩形区域，则监测区域的面积为 $H=L\times W$。通过计算监测节点的感知概率，可得到覆盖率 C_r 为：

$$C_r=\sum_{x=1}^{L}\sum_{y=1}^{W}C_p(S_{all},M)/H \tag{15}$$

2.3 覆盖率指标

WSN覆盖优化的核心是在监测区域内寻求传感器节点最优布设方案以实现覆盖率最大化。需指出的是，提高节点密度或扩大感知范围同样能提升覆盖率。但为保证评估的客观性，本文所有对比实验均在统一设定的感知区域内、给定传感器节点规模及感知半径下进行，并严格控制参数条件一致。因此，本文以覆盖率作为核心指标，对各类算法的优化性能展开评估，覆盖率模型为：

$$f(i)=Max[C_r(i)] \quad (16)$$

3 实验与分析

为了验证本文算法的有效性和鲁棒性，在不同规模监测区域中开展 WSN 覆盖优化实验。实验设置 100×100 与 200×200 两种监测区域，采用网格点法计算覆盖率。为了保证实验结果的客观性，本文算法与对比算法都独立运行了 30 次并分别统计均值与标准差。实验的对比算法包括鲸鱼优化算法、遗传算法、灰狼优化算法、粒子群优化算法以及麻雀搜索算法。实验平台为 CPU i5-12400，16G 内存，软件版本为 MATLAB R2024a。

3.1 监测区域为 100×100 实验

在二维空间中设置 100×100 的监测区域，并在区域内随机布设 20 个感知半径为 13 m 的同构传感器节点。初始传感器位置为 Sobol 算子随机分布，通过本文所提出来的优化算法，在迭代过程中，传感器位置通过学习鲸鱼捕猎行为，自适应调整了捕猎路径，通过最优解的评价逐步更新传感器位置，提升了覆盖率。为了保证实验的公平性，所有优化算法的初始种群规模均设为 30，最大迭代次数设为 500。不同算法的覆盖率如表 1 所示。

从表 1 的统计数据可知，在相同的实验条件和迭代次数下，基于 MSWOA 的覆盖优化方法取得了最高的覆盖率指标。相较于鲸鱼优化算法、遗传算法、灰狼优化算法、粒子群优化算法以及麻雀搜索算法，本文 MSWOA 的覆盖率分别提升了 4.45%、1.7%、10.69%、5.95% 和 13.11%。说明在 WSN 覆盖优化问题中，本文算法具有更高的寻优性能。

3.2 监测区域为 200×200 实验

为检验 MSWOA 算法在更大规模场景下的覆盖优化能力，本节进一步扩大实验范围。将监测区域拓展为 200×200 的矩形平面，并在该区域内布设 40 个感知半径为 20 m 的同构传感器节点。基于 MSWOA 的覆盖优化方法再次与上述五种对比算法进行横向比较。表 2 记录了六种方法在该实验场景下的覆盖率统计结果。

从表 2 列出的数据可以看出，在相同的参数配置下完成 500 次迭代寻优后，基于 MSWOA 的策略依然表现最佳，其覆盖率达到最高值。相较于上述五种对比优化方法，MSWOA 的覆盖率分别领先了 4.09%、13.54%、10.4%、3.33% 及 15.56%。

表 1 监测区域 100×100 的不同算法覆盖率比较

算法	鲸鱼算法	遗传算法	灰狼算法	粒子群算法	麻雀算法	改进鲸鱼算法
覆盖率	81.71%	84.46%	75.47%	80.21%	73.05%	86.16%

表 2 监测区域 200×200 不同算法覆盖率比较

算法	鲸鱼算法	遗传算法	灰狼算法	粒子群算法	麻雀算法	改进鲸鱼算法
覆盖率	80.77%	76.32%	79.46%	86.53%	74.30%	83.11%

4 结束语

针对无线传感器网络布设中存在的覆盖率不均匀的问题，本文提出了一种多改进策略的鲸鱼优化算法（MSWOA）。该算法优化了种群初始化的方式，提升了初始解的分布均匀性。同时，加入了自适应惯性权重调节机制与随机性学习策略，增强了迭代中的种群多样性及全局搜索能力，有效平衡了算法前期探索与后期开发的权重，避免了早熟收敛；通过引入柯西高斯混合变异，提升了算法的全局搜索能力。为验证本文算法的性能，分别在 100×100 及 200×200 两种监测区域内进行了传感器布设优化实验，并与五种常见优化算法进行对比。实验结果表明，本文提出的 MSWOA 比传统 WOA 更有优势，且在 WSN 布设覆盖率和节点分布均匀性上表现更优。

参考文献：

[1] 陈晓明,张洪伟,刘志强.基于微控制器单元的无线传感器网络节点设计与优化综述[J].传感技术学报,2023,36(05):673-682.
[2] 秋兴国,王瑞知,张卫国,等.基于混合策略改进的鲸鱼优化算法[J].计算机工程与应用,2022,58(01):70-78.
[3] 米尔贾利利·S,刘易斯·A.鲸鱼优化算法[J].工程软件进展,2016(95):51-67.
[4] 周亚琴,罗庆凤.基于莱维飞行的混合鲸鱼优化算法[J].计算机科学,2023,50(06):254-261.
[5] 郭佳欣,张军,史丹阳.基于多策略鲸鱼优化算法的光伏模型参数辨识[J].太阳能学报,2022,43(07):118-125.
[6] 严志鹏,唐建林.融合自适应权重的增强鲸鱼优化算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(04):1122-1131.

数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工全过程管控中的实践

刘颖超，刘元鑫，王梦思

（山东开创公路工程有限公司，山东 滨州 256600）

摘 要 本文以城市道路改扩建工程施工全过程管控为核心，针对传统管控模式存在的信息割裂、协同低效、风险预判滞后等问题，结合城市道路“边施工、边通行”的复杂特性与数字化转型要求，系统探究数字孪生技术的融合应用路径与实践方法。通过文献研究法、案例分析法与技术验证法，构建“GIS+BIM+物联网”三位一体的数字孪生管控体系，重点分析数字孪生体构建、实时数据交互、施工模拟优化、智能预警管控四大核心模块的技术实现与应用效果，以期为推动道路工程智慧建造发展提供借鉴。研究结果表明，该管控体系可实现施工进度偏差≤3%、成本超支率控制在5%以内，安全风险预警响应时间缩短至5分钟，交通通行影响范围缩减40%，较传统管控模式综合管控效率提升60%以上。

关键词 数字孪生；城市道路改扩建；施工全过程管控；BIM技术；GIS融合

中图分类号：U415；TP3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.012

0 引言

随着我国新型城镇化建设持续推进，既有城市道路因交通流量激增、设施老化等问题，改扩建工程成为完善交通网络、提升通行能力的重要举措。城市道路改扩建工程施工具有显著复杂性：施工区域多位于城市建成区，涉铁涉河、交叉并行道路多，空间边界受限；需在保障既有道路通行的前提下实施“边施工、边通行”模式，交通组织难度大；施工过程涉及拆迁、管线迁改、结构加宽等多个环节，参建方多、协同需求高。传统施工管控模式依赖人工巡检、纸质记录与经验决策，存在信息传递滞后、协同效率低下、风险预判不足等问题，易导致工期延误、成本超支、安全事故与交通拥堵等连锁反应，难以满足现代城市道路建设的高质量要求。数字孪生技术作为实现工程全生命周期数字化管控的核心手段，通过构建与实体工程同生共长的虚拟镜像，整合地理信息、施工数据、监测数据等多源信息，实现施工过程可视化、协同化、智能化管控。

本文结合近年来数字孪生技术在道路工程中的创新应用成果，从施工全过程管控角度出发，构建科学高效的数字孪生应用体系，通过工程案例验证其实际应用效果，为同类工程提供技术参考。

1 城市道路改扩建工程施工管控的核心问题与技术需求

1.1 传统管控模式面临的核心难点

城市道路改扩建工程施工管控受环境、交通、技术等多重因素影响，传统模式主要面临四大核心难点。一是信息割裂导致协同低效，设计、施工、监理、交通管理等参建方数据格式不统一，设计图纸、施工计划、现场监测等信息分散存储，缺乏实时共享渠道，易出现施工与设计脱节、各工序衔接不畅等问题。二是交通组织与施工冲突突出，城市道路改扩建需在保障既有道路通行能力的前提下施工，传统交通组织方案依赖静态仿真与人工预判，难以动态适配施工进度与交通流量变化，易导致施工区域拥堵指数飙升。据统计，传统模式下施工路段通行效率下降50%以上，交通事故发生率提升2～3倍。三是风险预判与管控滞后，施工过程中地质条件变化、结构变形、管线碰撞等风险多依赖人工巡检发现，存在“事后补救”现象。四是进度与成本管控精准度低，传统模式采用“月度核算+经验预判”方式，难以实时掌握施工资源消耗、工序推进情况，进度偏差率常超10%，成本超支率普遍在8%～15%之间，管控效率低下。

作者简介：刘颖超（1985-），男，专科，工程师，研究方向：道路机场与桥隧工程。

1.2 数字孪生技术的核心适配需求

针对传统管控难点，城市道路改扩建工程施工全过程管控对数字孪生技术提出三大核心需求。一是多源数据融合需求，需整合 GIS 地理信息、BIM 设计模型、物联网监测数据、交通流量数据等多类型数据，实现设计、施工、交通、养护等全链条数据互通，打破信息壁垒[1]。二是动态模拟与优化需求，需具备施工工序模拟、交通流仿真、风险场景推演等功能，能够提前预判施工与交通冲突、工序衔接问题，为施工方案优化提供数据支撑；模拟精度需达到毫米级，确保优化方案的可行性。三是智能预警与管控需求，需实时采集施工设备运行状态、结构变形、环境参数等数据，通过算法模型识别异常情况，实现安全风险、质量隐患的超前预警。

2 数字孪生技术在施工全过程管控中的应用体系构建

2.1 数字孪生体构建技术

数字孪生体是施工全过程管控的核心载体，构建过程需实现多源数据融合与高精度建模，具体包括三个关键环节。在基础数据整合方面，采用“GIS+BIM”融合技术，将 GIS 的宏观地理信息与 BIM 的微观结构信息深度融合，统一数据格式为 IFC 标准，确保数据互通；同时采集既有道路检测数据、地下管线探测数据、交通流量历史数据等，构建涵盖“地上—地下—周边环境”的全要素数据库[2]。在高精度建模方面，采用倾斜摄影测量、三维激光扫描等技术，对施工区域既有建筑物、道路、管线进行实景建模，建模精度达 ±3 mm；结合 BIM 参数化建模技术，构建施工工序、设备、材料等动态模型，实现虚拟镜像与实体工程的几何一致、属性一致、行为一致。在模型动态更新方面，建立“实时数据驱动”的模型更新机制，通过物联网传感器、无人机巡检、移动终端采集等方式，实时获取施工进度、结构变形、交通流量等数据，自动更新数字孪生体的状态参数，确保虚拟镜像能够精准反映实体工程的实时状态，实现“实体施工—数据采集—模型更新”的闭环联动。

2.2 施工全过程数字化管控模块设计

基于数字孪生体，构建覆盖“施工准备—施工实施—竣工验收”全阶段的管控模块，实现各环节智能化管控。施工准备阶段聚焦方案优化，通过数字孪生体进行施工工序模拟、交通组织仿真与风险场景推演，优化施工分区、流水作业计划与交通导改方案。例如：针对涉铁涉河施工路段，模拟不同施工时段的交通流量变化，确定最优交通转序时机，避免施工与交通冲突。施工实施阶段重点实现实时管控，通过物联网传感器实时采集路基沉降、桥梁结构变形、施工设备运行参数等数据，上传至数字孪生平台，平台自动对比分析设计值与实测值，当数据超出阈值时，自动触发声光预警，并推送应急处置方案。竣工验收阶段注重数据追溯与精准评估，数字孪生体自动记录施工全过程数据，形成完整的工程档案，包括隐蔽工程影像资料、质量检测数据、工序验收记录等，实现质量问题可追溯[3]；采用三维激光扫描技术对完工实体进行扫描，生成点云模型，与数字孪生体设计模型对比，自动计算垂直度、平整度等偏差值，实现竣工验收数字化、精准化，验收效率提升 40% 以上。

2.3 多参建方协同与交通联动管控机制

构建基于数字孪生平台的多参建方协同体系与交通联动管控机制，打破协同壁垒与施工—交通冲突。在多参建方协同方面，数字孪生平台设置不同权限的访问端口，设计、施工、监理、交通管理等单位可通过平台实时共享数据，在线进行设计交底、方案评审、问题反馈。在交通联动管控方面，将数字孪生平台与城市交通管控系统对接，实时获取施工区域及周边道路的交通流量、拥堵指数等数据，通过交通流仿真模型动态优化交通导改方案；当施工区域突发拥堵或事故时，平台自动生成最优绕行路线，通过交通诱导屏、导航 APP 实时推送至车主，同时调整施工计划，实现施工与交通的动态协同，最大限度降低施工对交通的影响[4]。

3 工程案例验证与应用效果分析

3.1 工程案例概况

以京台高速齐济段“六改十二车道”改扩建工程为研究对象，该项目是全国首个“六改十二车道”高速公路改扩建项目，途经济南都市圈核心区域，跨越黄河，与 4 条铁路、4 条地铁、11 条国省道及城市道路交叉并行，全长约 53 公里，总投资超 120 亿元。项目面临“生态保护与质量要求高、桥梁结构占比高，涉铁涉河施工组织难、行车安全保障难”的“两高两难”挑战，需在保障既有高速日均 8 万辆通行量的前提下实施施工，管控难度极大。项目采用本文构建的数字孪生施工管控体系，整合 GIS+BIM+ 物联网技术，搭建数字化协同管控平台，实现施工全过程智能化管控。

3.2 应用效果量化分析

通过项目现场监测数据与传统管控模式对比，数字孪生技术的应用取得显著成效。在协同管控方面，多参建方通过数字孪生平台实现数据实时共享，工程变

更响应时间从传统的3～5天缩短至4小时以内，施工工序衔接等待时间减少70%，项目整体协同效率提升65%。在交通与施工协同方面，通过动态交通流仿真与实时联动管控，施工区域拥堵指数控制在1.3以内，较传统模式下降48%，通行效率提升40%，顺利完成6次交通转序，未发生因施工导致的重大交通拥堵事件。在风险与质量管控方面，数字孪生平台实现对路基沉降、桥梁变形等12类风险的实时监测与预警，累计发出预警32次，均及时处置，未发生安全事故；工程质量一次验收合格率达100%，桥梁结构垂直度偏差≤2 mm，路面平整度偏差≤1.5 mm，较传统模式质量缺陷发生率降低85%。在进度与成本管控方面，通过实时数据驱动的进度跟踪与资源调配，项目实际工期较计划缩短20%，进度偏差率控制在2.8%以内；成本超支率仅为4.2%，较传统模式降低65%，通过资源优化配置节约成本约8.6亿元，实现了质量、进度、成本的协同优化。

4 技术落地保障机制与应用推广建议

4.1 技术落地的保障机制

为确保数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工管控中有效落地，需从组织、制度、技术三个维度构建保障体系。在组织保障方面，成立由建设单位牵头，设计、施工、监理、交通管理、技术服务商参与的数字孪生专项工作组，明确各方职责分工，建立“平台统一管理、数据分级共享、问题协同处置”的工作机制；定期召开线上线下结合的协同会议，及时解决技术应用过程中的问题，确保管控体系顺畅运行。在制度保障方面，制定数字孪生技术应用管理制度，明确数据采集的责任主体、采集频率、精度要求，确保数据质量；建立考核评价机制，将数字孪生技术应用效果纳入参建单位绩效考核，强化执行力度[5]。在技术保障方面，组建专业技术团队，负责数字孪生平台的搭建、维护与升级，提供技术支持与操作培训；针对施工人员开展平台操作、数据采集等专项培训，通过理论教学、实操演练、案例讲解等方式，提升施工人员的技术应用能力。

4.2 技术应用推广建议

结合城市道路改扩建工程的地域差异、项目规模特点，提出针对性的应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案，针对大城市核心区改扩建工程，重点强化交通联动管控与微空间施工模拟功能；针对跨河跨江、涉铁等复杂工况项目，加强地质条件动态监测与结构安全预警模块。二是推动技术标准化与产业链协同，联合行业协会、科研院校制定数字孪生技术在道路改扩建工程中应用的标准规范，统一数据格式、建模精度、接口协议等技术要求；加强施工企业与技术服务商、设备供应商的协同合作，研发适配道路改扩建工程的专用传感器、数据采集设备与平台软件，提升技术体系的集成性与稳定性[6]。三是强化政策支持与示范引领，建议地方交通运输部门出台数字孪生技术应用激励政策，对采用该技术的项目给予资金补贴或评优加分；选择典型项目打造示范工程，总结可复制、可推广的经验做法，通过现场观摩、技术交流等方式，推动数字孪生技术在行业内广泛应用。

5 结束语

数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工全过程管控中的应用，是道路工程智慧建造发展的必然趋势，通过构建“虚拟镜像—实时监测—智能管控—协同联动”的全流程体系，从根本上解决了传统管控模式的信息割裂、协同低效、风险滞后等难点。本文通过整合GIS、BIM、物联网等技术，构建了适配城市道路改扩建工程特点的数字孪生管控体系，工程案例验证表明，该体系可显著提升施工协同效率、质量安全管控水平与交通适配能力，实现工程全要素、全流程的智能化管控。随着数字化转型的深入推进，数字孪生技术在道路工程中的应用将朝着更精准、更智能、更融合的方向发展。未来应进一步推动数字孪生与人工智能、大数据、5G等技术的深度融合，开发施工风险自动识别、工序智能优化、资源动态调配等高级功能；拓展数字孪生技术在工程运营养护阶段的应用，实现从施工管控到全生命周期管控的延伸；完善技术标准与人才培养体系，降低技术应用门槛，推动数字孪生技术在城市道路改扩建工程中规模化、标准化应用，为我国智慧交通建设提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 赵杰,陈伟,潘相材,等.路基内部坑洞作用下道路力学响应及塌陷机理研究[J].四川建材,2025,51(06):188-191.
[2] 刘思源,朱星哲,刘志财.高速公路扩建路基结合部开挖台阶数量对路基沉降的影响研究[J].科技与创新,2025(04):30-35.
[3] 凌侨锋.市政道路改扩建工程中新老路基沉降差异性研究[J].江西建材,2024(09):234-236.
[4] 李栋浩.某扩建高速公路路基沉降控制研究[J].交通世界,2024(28):78-80.
[5] 李烁,董继星,吕若丹.基于BIM+GIS三维协同设计的道路保通设计研究应用[J].价值工程,2024,43(21):94-96.
[6] 毕小勇.软土地区市政道路拓宽工程中的新老路基差异沉降处治问题分析[J].交通世界,2024(19):61-63.

建筑结构抗震设计及施工技术研究

李传晓

（山东华麟建筑装饰有限公司，山东 泰安 271000）

摘 要 针对复杂高层建筑抗震设计中高强材料延性有限和承载力要求难兼顾的难题，提出基于预设屈服模式的性能化抗震设计思路，借助刚度折减系数对构件损伤程度进行量化，以此实现对结构破坏形态的有效调控。选取体型收进的高层建筑作为案例，对比规范方法与预设屈服模式方法在中等地震和强烈地震作用下的结构响应特性，验证新方法对薄弱环节的优化效果，同时构建高强高性能混凝土框架—核心筒结构的分析模型，系统研究高强混凝土对结构抗震性能的影响机制。依托高性能装配式框架结构体系，详细说明预制构件的生产工艺、梁柱节点的安装技术以及消能减震装置的施工方法，最终形成一套完整的抗震设计与施工技术体系。

关键词 抗震设计；刚度折减系数；高强混凝土；消能减震；装配式结构

中图分类号：TU318 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.013

0 引言

城市化快速发展使高层建筑在结构形态和塔楼高度上不断突破以往设计标准。现有的抗震设计规范主要是针对规整结构制定的，对于竖向布置不连续、外轮廓内缩等复杂形态特征的超高层建筑而言，其适用性存在明显局限且无法准确模拟地震发生时实际倒塌过程，高强度高性能建材广泛应用引发了材料延性不足的问题，使得结构既要保证足够强度，又要具备良好的柔韧性，二者协调尤为困难。另外，预制化建造政策全面实施要求，结构体系必须兼顾现场拼装简易度和抗震性能可靠性，这些问题迫切需要依靠抗震设计理论革新和建筑施工工艺整体进步共同应对。

1 预设屈服模式的性能化抗震设计方法

1.1 基本设计流程与刚度折减系数确定

这种方法依据“三水准”抗震目标来构建设计框架，把结构在小震、中震以及大震下的性能表现纳入一体化设计流程。小震时要求所有构件都处于弹性工作状态，依靠弹性反应谱法来完成配筋计算，中震阶段预先设定好可发生屈服的构件类型，通过动力弹塑性分析确定其刚度退化程度，采用刚度折减系数量化损伤程度，接着考虑刚度和阻尼变化对整体结构进行反应谱分析，直接求出需保持弹性的构件配筋量。大震阶段沿用类似的思路，以“大震不倒”作为最低性能要求完成结构整体校核[1]。刚度折减系数定义为：

$$\beta=\frac{K_d}{K_0} \quad (1)$$

式（1）中：β 为刚度折减系数；K_d 为构件塑性状态下的割线刚度（kN/m）；K_0 为构件初始弹性刚度（kN/m）。β 值越小，构件损伤程度越深，刚度退化越显著。

1.2 算例模型建立与中震反应谱设计对比

选取一栋顶部体型有收进的高层建筑作为分析案例，此建筑结构高度达到 149 m，共 32 层，抗震设防烈度设定为 8 度（0.2 g），场地类别属于Ⅱ类且特征周期为 0.4 秒，其核心筒高宽比达到 8.2，8 属于典型复杂高层结构。分别按照规范方法和预设屈服模式方法对该结构开展中震作用下的反应谱分析，规范方法把连梁刚度统一折减成 0.3，预设屈服模式方法基于弹塑性计算结果给折减系数赋予差异化数值，对比分析发现，采用规范方法计算得出的墙体拉应力水平整体偏高，在结构收进部位，预设屈服模式方法得出的拉应力分布范围更大，波及邻近四个楼层[2]。

1.3 规范方法与预设屈服模式方法的抗震性能差异

对规范普通方法、规范性能化方法和预设屈服模式方法所设计结构，在大震（400 gal）和超烈度大震（510 gal）作用下的损伤特征进行系统比较，着重考察不同设计策略对结构关键部位损伤控制能力的影响。在大震条件下，采用规范普通方法的结构在底部剪力墙及框架柱区域产生较广泛损伤，而采用规范性能化方法与预设屈服模式方法的结构均未出现明显损伤，显示出优异抗震性能。

作者简介：李传晓（1988-），男，本科，工程师，研究方向：建设工程施工技术。

2 高强高性能混凝土高层建筑结构性能验证

2.1 高强混凝土框架核心筒结构体系建立

以钢筋混凝土框架核心筒结构为验证载体，选取平面尺寸为44 m×44 m的建筑作为分析对象，此建筑里核心筒平面尺寸是22 m×20 m。首层层高设定成5 m，标准层层高确定为4.2 m。依照结构高度的不同情况，分别建立两种计算模型，一种是140 m高33层的模型，其平面高宽比为3.2，核心筒高宽比为7.0；另一种是200 m高49层的模型，平面高宽比为4.7，核心筒高宽比为10.3。针对每种高度的模型，分别设计出C60和C100两个优化方案。C100优化模型的优化目标是在保持和C60模型相近的多遇地震层间位移角响应的前提下，系统地减小竖向抗侧力构件的截面尺寸[3]。框架柱采用矩形截面，框架梁采用矩形钢筋混凝土梁，楼板厚度统一设定为120 mm。抗震设防烈度按照8度（0.2 g）来考虑，场地类别为三类，设计地震分组为第一组，以这些条件为基础开展后续多遇地震与罕遇地震工况的对比分析。

2.2 多遇地震下结构整体反应谱分析

采用SATWE软件对分析模型开展振型分解反应谱法的计算工作，设定整体结构的阻尼比为0.05，设定水平地震影响系数 α_{max} 为0.16，设定特征周期 T_g 为0.45 s，周期折减系数选取0.85，把框架抗震等级确定为一级，将剪力墙抗震等级采用特一级。C100混凝土在弹性模量、抗压强度设计值以及抗拉强度设计值这些方面都要优于C60混凝土，这就为C100优化模型在减小构件截面的同时维持和C60模型相当的侧向刚度提供了材料支持。计算结果显示，在140 m高的结构当中，C60与C100优化模型的最大层间位移角分别是1/813和1/817，在200 m高的结构当中分别为1/614和1/622，这些数值均符合规范要求。两类模型的前三阶自振周期差异不是很大，层间位移角曲线的趋势保持一致，这证实了C100优化模型的截面方案是可行的。在质量方面，C100优化模型和C60模型相比，140 m结构减轻了3.7%，200 m结构减轻了14.5%，这表明结构高度越高，高强混凝土的减重效果就越明显。

2.3 罕遇地震下结构弹塑性损伤分布规律

随着结构高度不断增加，高强混凝土强度等级对结构损伤集中程度的影响更为明显，这种特点在两种不同高度模型的对比当中尤为突出。在140 m高的结构，C60和C100优化模型的损伤均主要集中于连梁，框架柱与剪力墙的整体塑性发展程度比较低，两者的损伤分布形态差异相对较小。而在200 m高的结构当中，C60模型在底层剪力墙、框架柱及顶层柱出现严重塑性破坏，底部损伤集中现象表现得十分明显，结构存在着较大的安全隐患，相比之下，C100优化模型的框架柱塑性发展程度显著降低，弹塑性附加阻尼比从5.3%降到了2.2%，损伤集中程度得到了明显的改善，竖向构件在罕遇地震下的受力状态更为安全。上述定量规律表明，混凝土强度等级的提高能有效抑制高度较大结构在罕遇地震时的损伤集中效应，对竖向抗侧力构件的保护作用会随着结构高度增加而更加突出，是高强混凝土高层结构抗震性能比普通混凝土结构更好的重要机理之一[4]。

3 高性能装配式结构施工技术体系

3.1 预制构件制作工艺与质量控制要点

高性能装配式框架结构的预制构件体系包含高强混凝土预制梁、高强混凝土预制柱以及预应力构件。其中，柱体混凝土强度设定为C80，梁体混凝土强度设定为C40，钢筋全部选用HRB500级。与普通预制构件相比较而言，高强混凝土构件的制作工艺要求更高，其原料配比设计需要特别关注早期收缩变形特性，在养护期间必须执行标准湿养护制度并且精准控制温湿度，以此确保构件强度能够达到标准，预制柱的节点连接部位需要预埋钢套管，这个套管的定位精度会直接影响现场高强螺栓的安装质量，生产的时候应该借助专用定位模具进行精确控制。预制梁端部需要设置扩大加宽段，其几何尺寸以及侧面预埋件位置必须严格按照设计图纸来执行，出厂之前需要逐件检验尺寸与外观，从而确保构件制作精度能够符合干式装配连接的公差标准[5]。

3.2 大变形能力梁柱节点现场安装施工技术

高强螺栓干式连接梁柱节点现场安装是高性能装配式框架施工的关键。节点存在无牛腿与带牛腿这两种构造形式。带牛腿节点里高强螺栓主要承受梁端弯矩，其受力状态明确且节点刚度退化较为缓慢，变形性能表现良好，安装时要优先确保牛腿标高与水平位置精准无误（见图1）。安装流程是预制柱就位校正后吊装预制梁至设计位置，让梁端扩大段侧面与预制柱预埋钢套管对齐，穿入高强螺栓后分级施加规定的预紧力，终拧之后要逐一进行扭矩复检以保证各螺栓预紧力均匀。高强螺栓与套筒采用无粘结构造，可使节点在罕遇地震下适应较大层间变形，并且具备震后可替换修复的功能。

3.3 消能减震装置施工工艺与安装质量控制

高性能装配式框架体系在四个转角处配置剪切型阻尼器当作主要耗能装置，此装置通过辅助支撑墙体和主体结构相互连接。剪切型阻尼器的安装工艺需和

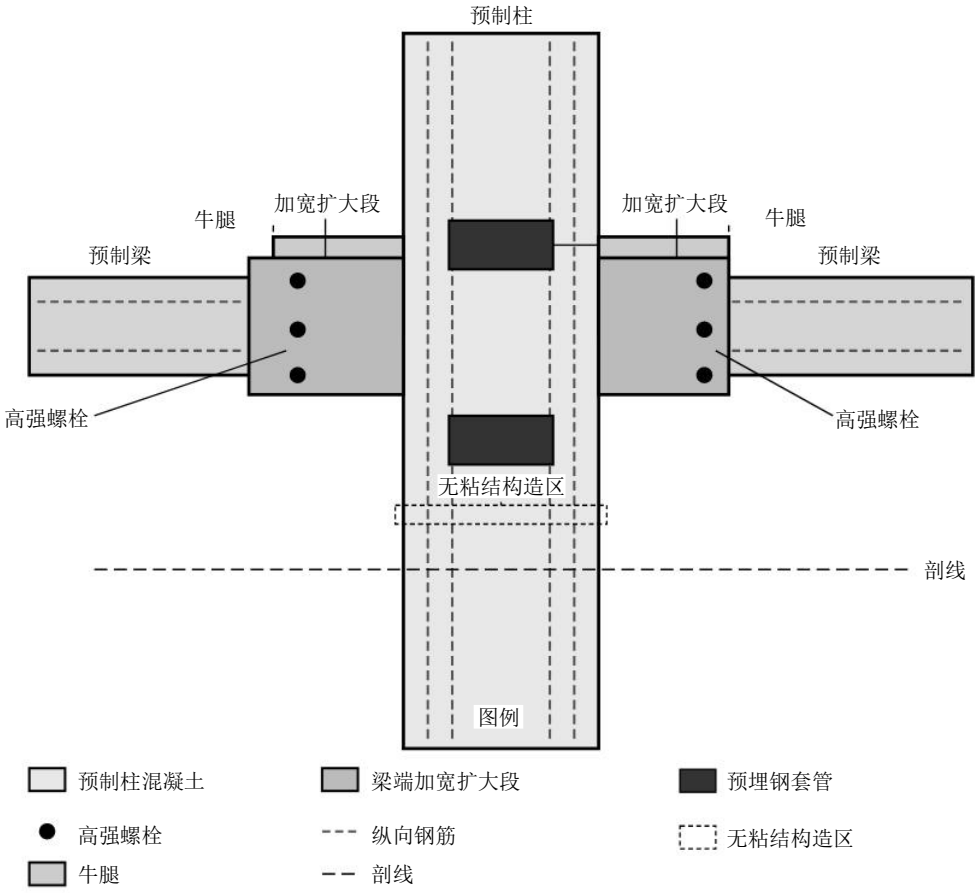

图 1　带牛腿梁柱节点构造示意图

主体结构施工进度同步衔接。支撑墙体内预埋件安装精度会直接影响阻尼器最终安装位置误差，所以在浇筑墙体混凝土之前要完成预埋件精确定位和牢固固定。阻尼器安装过程中需要严格把控其水平度和垂直度，任何超出规范范围的安装误差都会影响阻尼器在地震时剪切变形均匀性，进而削弱其能量耗散效果。阻尼器的设计屈服承载力应依据整体结构计算分析来确定，施工时要检查其出厂时的性能检测文件，保证屈服强度、极限位移等核心指标符合设计标准。安装完毕之后必须对整体结构开展施工质量验收检测，尤其要重点检查阻尼器连接部位焊接质量和螺栓紧固程度，确保该减震体系在遭遇设计地震时能够有效发挥其耗能作用。

4　结束语

基于预定屈服机制的性能化抗震设计策略，通过引入刚度折减系数把构件损伤状态融入整体分析体系，以此实现对破坏形态的预先调控。与常规性能化方法相比，该方案能让钢材总消耗量降低 9%，还可使最大层间位移角减小 5%，从而显著增强结构的安全冗余度。高强高性能混凝土结构在缩小构件截面尺寸并减轻结构自重的作用下能有效缓解罕遇地震局部损伤集中的现象，并且结构高度越高抗震性能提升效果越显著。高性能装配式框架体系通过协同高强预制构件、大变形干式连接节点以及消能减震装置，让实际屈服机制与预设目标高度一致，为充分发挥高强预制混凝土的性能优势提供坚实的技术保障。

参考文献：

[1]　徐茂鹏，刘柯柯 . 高层混凝土建筑结构抗震设计探讨 [J]. 居舍 ,2025(26):113-116.
[2]　刘玉宇 . 建筑结构抗震设计存在的问题及其对策 [J]. 居舍 ,2025(11):110-113.
[3]　李铁军 . 基于新型材料的建筑结构抗震设计优化研究 [J]. 新城建科技 ,2025,34(02):110-112.
[4]　孙广宇，刘伟，国秀英 . 现代建筑结构抗震设计的要点研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2024(35):40-42.
[5]　邢栋 . 结构抗震设计理论及其在建筑工程中的应用研究 [J]. 居舍 ,2023(36):103-106.

高寒硬岩地区人工挖孔桩质量控制技术

王龙涛

（四川二滩建设咨询有限公司，四川 成都 610051）

摘 要 本文以川西南某项目高寒硬岩地区人工挖孔桩施工中存在的岩层开挖效率低、低温混凝土养护难等问题为背景，提出一次性致裂管开挖与“提标+保温”养护相结合的质量控制技术。通过优化一次性致裂管参数，实现岩体裂解可控调控；采用“混凝土强度提升+薄膜+双层棉被”保温工艺，有效预防混凝土冻害。工程实践表明，该技术体系显著提高了开挖效率与桩基质量，可为类似环境下的桩基施工提供参考。

关键词 人工挖孔桩；一次性致裂管；坚硬岩石；高寒地区；低温养护

中图分类号：TU473.1+4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.014

0 引言

在“双碳”目标下，新能源建设迎来高峰期。桩基作为电力输送的基石，施工质量直接关系到线路的运行安全。人工挖孔桩凭借对地形的强适应性、机械设备依赖性低等优点，在山区桩基施工中被广泛使用。但是，复杂地质条件与极端气候环境对施工质量的把控提出了严峻的挑战。传统施工工艺在质量、安全、进度等要求下难以协同。现有研究多聚焦人工挖孔桩单一应用场景的技术优化：针对高海拔低温、低氧等复杂环境，通过材料性能优化等方式提升施工质量；路基边坡施工中则重点构建了以地质评估、安全交底为核心的坍塌风险防控体系[1]。一次性致裂管技术凭借安全可控、施工便捷等特点已在岩石爆破中得到有效应用，但在输变电工程桩基施工中的适配性研究相对较少，目前仍以电镐、风镐、水磨钻等传统开挖方式为主。

1 项目概况与施工难点分析

1.1 项目概况与施工条件

本项目处于四川省木里县境内，该地区为地貌复杂的山地。作为集中式光伏电力送出的关键通道，工程对基础施工的质量要求高。因项目全线所有塔基均处在山地，山高坡陡，大型机械设备无法施工，现场施工均采用人工挖孔桩基础形式，桩径范围为1.0 m至1.8 m，桩长分布为6.5 m至16.5 m，工期紧、任务重，需要在有限的施工窗口期内高质量完成全部施工。

1.2 地质与气候特征分析

根据地勘数据显示，本项目岩石覆盖率超过60%，主要为中风化砂岩与花岗岩。此类地质条件下进行施工，传统的人工开挖方式效率低、设备损耗大，且经济造价高，难以满足现代化工程的高效与经济性要求。

气候方面，本项目位于20 mm以上重冰区桩基占比达35.5%，冬春季施工期间，昼夜温差超20 ℃，夜间最低气温可降至-5 ℃，甚至更低，使混凝土初期养护遇到很大的困难和严峻的挑战，极易引发冻害、强度不足等质量问题，严重影响结构的耐久性与安全性。相关研究已指出，高边坡山地超深桩基施工的核心挑战在于地质条件与气候环境的双重制约，本项目岩石覆盖率超60%且部分地处重冰区，面临的地质与气候更为复杂。

1.3 施工质量风险与挑战

1. 在坚硬岩层段施工过程中，采用电镐、风镐、水磨钻等常规机械开挖，日平均开挖进尺≤0.3 m。若盲目追求施工进度，极易对孔壁岩土体造成过度扰动，导致孔壁出现坍塌，增加施工难度与安全风险，对桩基的承载力与结构完整性构成潜在的威胁。2. 在低温环境段进行混凝土浇筑时，若新浇筑的混凝土在初凝期内遭遇低温冻结，其内部自由水结冰膨胀将引发微裂纹，易导致混凝土强度损失超过30%，严重危及结构的耐久性。高寒硬岩地区人工挖孔桩施工中，安全与质量风险具有高度的隐蔽性与突发性，必须采取前置性的安全、质量预防措施。现场风险若未能得到有效管控，将直接引发桩基缺陷，严重时甚至可能引发结构失效等安全、质量事故[2]。

2 坚硬岩层开挖质量控制技术

2.1 传统局限性与技术选型

传统的电镐、风镐、水磨钻等开挖机械在坚硬岩层中效率低、成本高；而采用民爆物品进行爆破虽能

作者简介：王龙涛（1989-），男，本科，工程师，研究方向：土木工程施工与管理。

提升施工效率，但却面临繁杂的审批流程及强烈的扰动等问题，易损伤岩体完整性并危及升压站、变电站等邻近建（构）筑物结构安全。经多方案比选与专题讨论研究，本项目最终选定一次性致裂管技术[3]。

致裂管主要利用混合粉末在高温密闭空间内产生气体致裂岩石，属物理性致裂范畴，无需公安管理部门审批，减少了繁杂的手续办理，节约了施工时间。现场通过优化致裂管规格、钻孔等参数，可精准调控裂解范围与破碎程度，且施工中噪声、粉尘排放量低，无飞石风险，高度契合节能减排、绿色施工理念，适配山地生态敏感区施工需求。

2.2 致裂管原理与优势

致裂管内充装混合粉末状材料（主要成分：高氯酸钾、水杨酸、草铵膦等），通过瞬间高温使高氯酸钾快速分解释放氧气，同时使水杨酸与草铵膦迅速气化，两者在分子级别混合并发生极速、自持的放热链式反应，在密闭空间内产生高温高压气体，体积瞬间膨胀数百倍，致使岩体顺着天然节理平稳裂解。相较于传统的爆破手段，该技术有以下显著优势：

（1）能量释放可控，通过致裂参数的优化可实现“裂而不碎”的效果，有效地保护孔壁的完整性，以及周边岩体及毗邻建（构）筑物结构的稳定性。（2）施工中不产生明火、冲击波及有毒有害气体，对邻近建（构）筑物的扰动控制在安全范围内。（3）流程简单易操作，单次作业的钻孔、填装时间可较传统施工时间缩短 70% 以上，施工效率显著提升。（4）施工产生的噪声、粉尘等排放符合环保标准，对生态敏感区及环境影响程度较小，符合绿色施工要求。（5）致裂的石块成块率高，便于后续人工清理，可同步提升施工效率与作业安全性。

2.3 质量控制关键措施

（1）参数设计：依据岩体强度试验与致裂能量理论分析，确定致裂孔深 0.8 m 至 1.0 m、孔距 0.5 m 至 1.0 m、单孔充装量为 1.0 kg 至 1.5 kg，并通过小范围的试验致裂验证其参数的合理性和稳定性，确保致裂效果与孔壁稳定达到预期。（2）施工流程：项目执行的致裂施工工艺流程，具体包括：定位与钻孔→清孔检查→安放致裂管→连接起爆装置→人员撤离与安全警戒→启动致裂→致裂后强制通风与有害气体检测→同步进行振动与噪声监测→清渣→孔壁检查与修整→最终成孔质量验收，该流程确保了各环节质量受控。（3）动态监控：桩基护壁与开挖质量是人工挖孔桩成孔的关键把控点，为确保现场一次性致裂管施工安全，采用振动监测仪将单次致裂振动速率严格地控制在 2.5 cm/s 以下，分别使用全站仪、激光铅垂仪进一步复核孔径偏差（≤ 50 mm）与垂直度偏差（< 0.5%）。同时，对产生的噪声与粉尘数据进行记录，以验证绿色施工对环境的影响和成效。

本项目通过对一次性致裂管的参数进行系统调整和优化，并结合实时监测技术的应用，从源头上严格控制成孔过程中的施工质量与作业安全，进一步提升了成孔工艺的精准性与稳定性，有效预防施工风险，保障工程整体质量的可靠性。

2.4 应用成效

技术应用后，坚硬岩层段单桩日均开挖进尺跃升至 1.0 m 至 1.5 m，施工效率较机械开挖有了大幅度的提高；成孔质量验收显示，孔壁完整基本无松动、无超挖等现象；现场施工环境监测数据表明，施工作业面噪声值稳定控制在 80 dB 以下，粉尘浓度也符合环保标准，有效地降低了对周边生态的影响，基本实现了安全与环保、质量与效率的预期目标。

综合成效表明，相较于传统机械开挖，一次性致裂管技术实现了日均开挖进尺从 0.3 m 到 1.0 m 至 1.2 m 的跨越，效率提升 300% 以上；同时，在孔壁完整性、噪声与粉尘控制、环保性及综合成本（降低约 10%）等方面均展现出显著优势，且避免了民爆物品的繁杂审批流程。

3 低温下混凝土质量控制技术

3.1 低温对混凝土性能影响

当环境温度低于 5 ℃时，水泥的水化反应会明显减缓；若新浇筑混凝土在初凝时期受冻，内部自由水结冰膨胀将产生裂纹，导致混凝土后期强度上升受阻、耐久性下降。鉴于本项目冬春季施工时夜间温度低、昼夜温差大等影响，必须采取加强养护的措施阻断冻害风险。

3.2 “材料 + 工艺”双重保障

（1）材料优化：参考高海拔地区混凝土材料优化经验，为确保桩基础混凝土强度满足设计要求，经参建各方商议决定，将混凝土强度由“原设计的 C25 提高至 C30”。经对混凝土试块强度检测，28 天强度系数≥ 1.15，从材料上提升了混凝土的早期抗冻性与抗裂性能。（2）工艺设计：桩基浇筑完混凝土后，安排人员立即在桩顶覆盖“保水薄膜 + 双层棉被”构成的三层保温养护结构，及时形成密闭的保温养护空间，为混凝土后续养护提供坚实的物理环境。根据实测数据显示，该保温养护结构使桩顶混凝土表面温度较环境温度高出 10 ℃至 15 ℃，有效地维持了水化反应所需的适宜环境温度达 72 h 以上，这与低温环境下密闭保温是混凝土养护关键工艺研究结论相符[4]。

3.3 养护质量监控

（1）实时监测：为确保混凝土养护期间温度监控，在每根桩埋设2个温度传感器（分别位于芯部与表层），连续记录养护期内的温度曲线，确保混凝土内外温差控制在20 ℃以内，避免温度应力导致混凝土产生裂缝。（2）强度验证：根据留置的同条件混凝土养护试块强度检测，其7天、28天的抗压强度检测均满足设计要求，且未见任何受冻迹象，进一步验证了现场养护条件的适宜性与桩身实体混凝土强度的可靠性。（3）外观检查：混凝土养护是桩基后期成桩质量控制的关键环节，每日检查保温层的完好性，一经发现破损及时进行修补更换，经过“监测、验证、修正”的闭环管理方式，实现了养护过程的精准可控[5]。

3.4 效果验证

对全线桩基础进行低应变法检测，结果表明：桩身完整性Ⅰ类桩占比98.5%，其余均为Ⅱ类桩，无Ⅲ、Ⅳ类桩出现。回弹法及同条件养护试块检测混凝土强度值均大于28 MPa；现场未发现因冻害导致的开裂现象。养护温度监测曲线清晰表明，保温措施成功将混凝土初期温度维持在5 ℃以上，充分保障了水化反应的正常进行。检测结果验证了该开挖工艺及混凝土养护措施对桩基完整性的有效保障。

4 质量控制体系与工程应用

4.1 质量控制流程

本项目构建了“成孔→验孔→钢筋笼→验收→浇筑→养护”六个阶段的闭环管理体系[6]：

（1）成孔阶段：根据岩层地质条件的复杂性和变化情况，实时动态调整钻孔致裂的相关工艺参数，在土层段施工，需加强护壁混凝土的厚度控制及强度检测，确保施工质量和安全。（2）浇筑阶段：严格控制混凝土自由下落高度（≤2 m）、坍落度（160 mm至180 mm）与灌注速度（≤2 m/h），以避免混凝土产生离析及钢筋笼上浮。（3）养护阶段：执行保温养护措施检查表，并由监理人员签字确认。现场精细化的过程控制是提升施工可靠性的核心，项目通过标准化流程，有效地将各项技术措施转化为切实的质量技术成果。

4.2 综合效益分析

（1）质量效益：824根桩基检测一次性验收合格率达到100%，桩身完整性与混凝土强度均满足设计及规范要求。（2）进度效益：通过制定质量管控措施实施要求，项目施工时间较原计划提前了20余天完成，为后续施工赢得了宝贵的施工窗口期。（3）综合效益：全面地规避了民爆物品审批周期长及安全风险，施工综合成本降低了约10%，顺利地实现了质量与安全、进度与经济目标。

实践表明，通过合理的技术优化，可实现人工挖孔桩在质量、安全、进度与经济性方面的协同提升。

4.3 技术要点

（1）借鉴岩土工程领域成熟技术原理，将一次性致裂管技术应用于输电线路桩基坚硬岩层开挖施工中，经过调控孔深、孔距等致裂参数，实现了“致裂可控、扰动最小”的预期效果，成功突破了传统施工工艺效率低、扰动大等瓶颈。（2）结合高海拔地区混凝土材料优化经验与低温保温养护工艺要点，因地制宜地提出“强度提升+物理保温”的双保险模式，形成了适用于高寒重冰区的混凝土施工技术，有效地避免了混凝土冻害后的返工损失。（3）整合工艺梳理、风险防控、质量管控等现有研究核心思路，建立了“技术优化、过程监控、多方协同”的施工质量控制体系，为高寒硬岩等复杂环境下的桩基施工提供了施工新模式。

5 结束语

本文围绕“坚硬岩层高效开挖技术”与“低温环境下混凝土养护工艺”两大核心难题，系统融合了一次性致裂管精准开挖技术与基于“强度提升+物理保温”双重策略的养护方法，构建并实践了“技术实施—过程控制—系统协同”三位一体的高寒硬岩地区人工挖孔桩全面质量控制体系。该体系在有效保障桩体结构完整性与混凝土长期强度可靠性的基础上，显著提升了工程施工的整体质量水平、进度控制能力与经济效益，实现了三者的有机统一与协同优化。相关经验和技术路径为岩层覆盖广泛、气候条件极端恶劣地区的新能源基础设施、道路桥梁及房屋建筑等各类工程项目中的人工挖孔桩施工提供了科学合理、可操作性强的技术解决方案与管理支撑，具有重要的工程借鉴与推广价值。

参考文献：

[1] 李刚.路基边坡人工挖孔桩施工安全管理研究[J].交通科技与管理,2025,06(14):155-157.
[2] 董菊花.人工挖孔灌注桩施工技术及质量控制研究[J].交通科技与管理,2024,05(17):92-94.
[3] 隆腾.人工挖孔桩施工技术及质量控制[J].交通科技与管理,2024,05(14):62-64.
[4] 魏兴.基于高海拔地区人工挖孔桩的施工工艺研究[J].人民珠江,2024,45(S2):89-91.
[5] 王子一,贾诗雨.输变电工程人工挖孔桩施工技术探究[J].科技与创新,2024(15):111-114.
[6] 朱宽,钟冬望,周桂松.二氧化碳膨胀爆破一次性致裂管性能研究与应用[J].爆破,2022,39(02):133-139.

土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点

张文学

（天津市亨祥建筑安装工程有限公司，天津 301509）

摘 要 混凝土结构作为土木工程中关键的承重体系，其施工质量对工程整体性能、安全标准及使用周期具有重要影响。本文从施工全过程出发，论述混凝土结构施工技术要点的主要内涵和实践意义，从原材料控制、配合比设计、模板工程、钢筋安装、浇筑振捣、养护及缺陷控制等方面分析关键技术及操作规范，构建全流程管控、精细化施工、质量保证的技术体系，推进混凝土结构综合性能的改善，以期为工程高质量施工提供理论参考，促进行业施工技术标准化发展。

关键词 混凝土结构；材料质量；配合比优化设计；耐久性

中图分类号：TU755 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.015

0 引言

在土木工程领域，混凝土结构因其高强度、高整体性、优异耐久性及经济性等显著优势，在各类建筑与基础设施项目中得到广泛应用，成为保障工程安全稳定运行的核心承重体系。随着现代土木工程向大型化、高层化及复杂化方向快速发展，混凝土结构施工对精度控制、工艺规范与技术创新提出了更高要求。在此背景下，施工技术要点的科学管控与严格执行，成为预防裂缝、强度不足及耐久性衰退等问题的重要手段，对确保工程质量与延长使用寿命具有决定性影响。本文主要研究土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点，从概述和实践两方面展开系统的探究，将行业先进的施工经验及相关的技术标准融合起来，形成具备学术性与可操作性的技术要点体系，为工程技术人员提供专业的参考，推动混凝土结构施工技术水平的持续提高。

1 土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点概述

1.1 核心内涵与技术特征

土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点，其主要内涵是根据工程设计要求和行业技术标准，从混凝土结构施工全过程出发，对混凝土结构施工各个环节的技术参数、操作规范及质量控制要求进行明确界定和系统整合，从而形成科学合理的施工技术指导。随着“双碳战略”和绿色建造理念的提出，交通运输行业也开始体现出由原来的粗放型模式向绿色、高效、智能发展模式转变的趋势。其技术特征是科学性、规范性、适应性三者的统一，科学性即技术要点依据材料力学、结构工程学等理论基础，符合混凝土凝结硬化规律和结构受力特点；规范性即施工操作标准化、流程化，保证各个环节的技术执行符合设计要求和行业规范；适应性即根据工程类型、结构形式、施工环境等实际情况，灵活调整技术参数和施工方法，实现技术要点与工程实践的精准匹配，体现“理论指导实践、实践优化技术”的核心导向。

1.2 实践价值与工程意义

从工程质量角度来看，严格按施工技术要点执行是保证工程质量的主要途径，通过原材料质量排查、配合比精确改良、浇筑振捣规范操作等重要环节的管控，可以有效控制混凝土结构的强度、平整度、垂直度等主要指标，减少裂缝、蜂窝、孔洞、露筋等常见质量缺陷，改善结构的密实程度、抗渗性能和整体性，提高结构的承载能力及持久耐久性，从根本上保证工程在复杂环境下长期稳定运行。从施工安全的角度来说，技术要点的规范执行是防范施工风险的第一道防线，模板工程中支架体系的科学设计和加固技术可以避免模板坍塌、支架失稳，钢筋安装的标准化操作可以防止钢筋移位造成结构隐患，混凝土浇筑的分层控制和振捣规范可以避免施工冷缝和结构失稳，全方位保障施工人员的安全。从行业发展角度看，对技术要点进行系统的整理与推广，有利于混凝土结构施工技术向着标准化、规范化方向发展，较好地解决了行业内施工水平参差不齐的问题，提高了整个行业施工效率和工程质量控制水平，减少了由于质量返工和安全事故造成的经济损失。

作者简介：张文学（1992-），男，本科，工程师，研究方向：土木建筑。

1.3 理论基础与技术逻辑

混凝土结构施工技术要点的产生和应用并不是孤立操作规范的叠加，而是以材料科学、结构工程学、施工组织学、流体力学、质量管理学等诸多学科理论为依托，实现理论与工程实践的深度融合。材料科学给原材料性能的优化提供核心依据，通过对水泥水化机理、骨料级配规律、外加剂及掺合料的改性途径进行研究，明确各种材料的匹配情况及性能改善的方向，从而给原材料的选择和品质控制提供理论基础，结构工程学按照构件受力分析、结构安全理论的要求，指导模板支撑体系设计、钢筋布设、混凝土强度等级的选择，确保施工技术措施满足结构承载和稳定的需要，施工组织学给施工流程改进、资源分配、进度调控赋予方法论支撑，推动技术执行与施工速度同步提升，流体力学原理应用于混凝土浇筑振捣过程，给予混凝土流动性能控制、骨料分离防止、振捣不足的科学指引，质量管理学搭建施工全流程质量管控的理论框架，让技术要点有序落实，并且能实现动态改善。其技术逻辑主要体现在基础保障、核心实施、质量控制这三个方面构成一个三维结构，层层递进又有机地连接在一起，形成完整的科技应用体系。基础保障维度主要是对原材料质量和配合比设计进行保证，利用材料科学理论指导，经过对原材料性能的仔细检测、合理的配合比计算和试拌调节，改善水胶比、外加剂掺量等关键参数，从物质上给混凝土结构的强度和耐久性奠定坚实的基础。

2 土木工程建筑中混凝土结构施工技术要点

2.1 原材料质量管控：奠定结构质量基础

混凝土开裂会降低混凝土结构的强度，在漫滩富水区更易导致渗水，危及地铁的运营和设备安全[1]。原材料质量控制是混凝土结构施工的第一项技术要求，需要对水泥、骨料、外加剂、掺合料、拌合用水等主要原材料进行严格挑选并做质量检测。水泥的选择要根据工程结构类型、强度等级和施工环境来选择符合国家标准的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥等品种，重点检查水泥的强度等级、安定性、凝结时间等主要指标，保证其性能满足设计要求；骨料应选用级配良好、颗粒均匀、杂质含量低的砂石材料，石子应控制粒径和含泥量，砂子应检测细度模数和泥块含量，防止骨料质量导致混凝土强度和耐久性降低；外加剂的选择要根据混凝土性能需求，减水剂、缓凝剂、早强剂等，严格控制外加剂的掺量和兼容性，防止与水泥发生不良反应；掺合料如粉煤灰、矿渣粉等，应保证其活性指数和细度符合标准，合理掺加改善混凝土工作性和耐久性；拌合用水应采用洁净无杂质的饮用水或者符合标准的工业用水，不得使用含有有害物质的废水，以免影响混凝土凝结硬化及结构性能。

2.2 配合比优化设计：保障混凝土工作性与力学性能

配合比优化设计是实现混凝土性能全面提升的核心技术手段，其关键在于基于工程需求与施工条件进行精确计算并开展试验验证。在锚碇结构施工中，若地基土质以黏土或淤泥为主，因土体变形效应及主缆拉力作用，锚碇主体将面临水平位移与沉降变形等问题，进而对引桥连续梁的受力状态产生显著影响[2]。根据不同强度等级、耐久性和施工工艺的不同来综合运用体积法和质量法来建立科学的混凝土配合比设计。在调配过程中要对水泥、骨料、水、外加剂、掺合料之间的工作性能进行系统的评价，保证所用材料符合设计要求。试拌阶段重点对坍落度、粘聚性、保水性等主要指标进行控制，然后根据现场施工情况来调节。在达到强度目标的基础上，采用高性能减水剂或者矿物掺合料可以减小水胶比，提高混凝土内部结构的致密性以及抗渗性，促进绿色低碳技术的推广和成本的降低。对大体积、超高强或者泵送等特殊类型混凝土还要根据具体的工程需要做进一步的研究，即加入缓凝组分控制大体积混凝土的温升，优化骨料分级和复合外加剂体系来提高高强混凝土的力学性能，准确调节流动性参数来保证泵送施工的顺利进行，从各个方面达到复杂的工况下的性能要求。

2.3 模板工程施工：确保结构成型精度

近年来，由于我国综合国力的稳步增长和建筑技术的持续创新，凭借优越的力学性能而受到关注的劲性混凝土结构，在超高层及大跨度建筑中被大量使用。由于具有不同的受力机理，因此它在工程上具有明显的技术优点。模板施工是混凝土结构成型过程中的一项重要环节，它直接关系到构件几何尺寸是否准确，表面平整度是否符合要求，外观效果是否达到预期目的。模板选型时，要按照结构类型、荷载情况及施工方案需求，选取钢制、木质或者铝合金等材质，保证所选模板的承载能力、刚度和稳定性符合设计规范。施工准备中必须严格按准确放样程序执行，准确地对模板安装位置及标高参数进行确定，还要对接缝处加以处理，防止由于渗漏或者偏移等原因造成质量上的问题。模板支撑体系的建立一般采用钢管框架、对拉

螺栓、斜撑等组合固定的方法来加强整体的稳定性和施工的安全性。模板的拆除工作应坚持先支设后拆除的原则，根据混凝土强度增长曲线来制定计划，对大跨度构件需要经过强度检验并获得相关单位批准之后才能进行拆除操作，以防止因拆模过早而造成安全隐患。

2.4 钢筋绑扎与安装：保障结构承载能力

钢筋绑扎与安装属于影响混凝土结构承载能力的重要工序，必须遵照设计规范和行业技术标准进行操作。在操作中必须严格控制好钢筋规格、数量、间距、搭接方法和接头质量等主要方面[3]。进场的钢筋要先做外观质量和力学性能试验，检查其直径、抗拉强度、屈服强度等几何参数和力学性能是否符合工程要求；接着到加工厂进行加工处理，对钢筋进行精确切割和弯曲成型，保证钢筋的形位公差和角度偏差达到相关精度要求。现场安装中“主次分明”的原则得到了广泛的采用，在主体框架钢筋布设之前先用双十字交叉方式对整体结构加以加固，然后再查看受力筋的准确度，然后调节箍筋加密区的大小和步距间隔，保证各方面的指标都符合标准。根据不同的工况环境可以使用手工绑扎、电弧焊接或者机械锚固等多种方式来实现钢筋的集成，对焊接部位的完整性和机械接头的抗力系数进行全方面的检测。为防止保护层过薄造成的锈蚀问题，在构造层上设置垫块来定位中间支撑节点，从而保证最终产品质量及安全性。

2.5 混凝土浇筑振捣：确保结构密实性

混凝土浇筑、振捣工序是决定结构实体质量的重要工序，该工序操作过程要符合有关技术规范。施工前对模板安装、钢筋布置、预埋件固定等前期工作进行全面检查，清除模板内杂物、积水，保证模板表面均匀潮湿[4]；分层浇筑时，各层厚度要按照工程特点和机械参数合理确定，一般控制在 300 ～ 500 毫米。整体浇筑顺序应由低区或边缘处向高处、由边缘向中间方向浇筑，减小冷缝产生概率。

对振捣作业采用插入式振捣棒与表面振动器相结合的方式进行，其间距不能大于设备的有效半径的 1.5 倍，并且要根据拌合物的状态来判断是否需要暂停振捣，防止出现骨料分离或者局部薄弱的情况。对大规模的混凝土浇筑工作来说还要采用分区分段的施工方法、设置临时隔离缝和配备降温冷却管路系统等方式来控制温度效应，防止有害收缩裂缝出现。整个施工期间要及时清理多余的浮浆，配合二次抹面工艺改善表面光洁度和致密度，从总体上减少各类裂缝出现的概率。

2.6 养护与缺陷控制：提升结构耐久性与完整性

构建起系统的质量管理体系，依托施工监测技术，用优化配合比设计、分段分层浇筑、设置冷却管道、“早期”和“后期”相结合的养护等方式，达到对混凝土水化热效应及温度裂缝的有效控制。养护和缺陷修补是工程的核心环节之一，对结构耐久性和整体性能有直接影响，需要严格按照有关的技术规范执行：浇筑后应立即开始养护工作，根据环境参数和材料特性来选择不同的养护方式，在常温下采用覆盖保湿法，高温或者干燥的地方加大防水保湿力度，在寒冷的季节采取保温措施防止冻融损坏；养护时长要符合行业标准，普通混凝土不低于 7 天，高强、大体积或有特殊耐久性要求的混凝土应延长到 14 天以上，有利于水泥充分水化提高构件的承载能力和抗裂性。同时，应及时对成型构件进行质量检验，针对表面缺陷（蜂窝、麻面、露筋等）实施分类处理，轻微损伤可通过涂抹修补砂浆修复平整，严重损伤则需剔除松散部位后选用高强度等级细石混凝土或专用材料重新浇筑；对于裂缝问题还需结合实际情况选用密封剂填充或高压灌注等方式进行针对性治理，从而保障整体结构的安全性与可靠性[5]。

3 结束语

混凝土结构施工技术要点的科学控制与规范执行，是保证工程质量、提高结构安全与耐久性的重要途径。本文从概述、实践两个方面阐述其核心内涵、价值和技术逻辑，从原材料控制、配合比设计等主要环节入手，构建全流程精细化的技术体系，强调专业性、实操性。实践表明，依照技术要点来避免质量缺陷、改善工程效益，可为工程安全运行提供保证。通过新型材料、新技术的不断更新，使行业向高质量、绿色化、智能化发展，从而推进基础设施建设。

参考文献：

[1] 胡亮亮 . 湘江浸滩富水地质条件下地铁车站结构抗裂技术研究 [D]. 长沙 : 中南大学 ,2023.
[2] 胡光晓 . 瓯江北口大桥主桥加劲梁吊装对锚碇 - 引桥系统力学性能影响研究 [D]. 杭州 : 浙江理工大学 ,2023.
[3] 刘倩倩 . 装配式水泥混凝土路面板块结构与施工关键技术优化研究 [D]. 西安 : 长安大学 ,2023.
[4] 时继伟 . 天汉大剧院高大空间劲性混凝土结构施工技术研究与监测 [D]. 阜新 : 辽宁工程技术大学 ,2023.
[5] 姜宜翰 . 土木工程大体积混凝土结构施工技术应用研究 [J]. 工程机械与维修 ,2025(12):149-151.

水利工程施工中高边坡稳定控制技术研究

杨永铭

（安徽水安建设集团股份有限公司，安徽 合肥 230000）

摘 要 水利工程建设常面临复杂地质条件下高边坡开挖与加固的严峻挑战，高边坡的稳定性直接关系到工程安全、施工进度及长期运行可靠。因此，对其稳定控制技术进行系统性研究具有至关重要的现实意义。本研究聚焦高边坡失稳机理与控制策略，旨在探索科学有效的分析方法和加固技术，为提升水利工程施工安全水平与风险防控能力提供有益参考。

关键词 水利工程施工；高边坡；稳定控制技术

中图分类号：TV5 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.016

0 引言

随着我国大型水利工程向复杂地形地质区域延伸，高边坡稳定问题日益凸显，成为制约工程顺利推进的核心技术难题之一。传统的经验性控制手段已难以满足现代工程对安全与效率的更高要求。因此，深入探究高边坡在施工扰动下的动态响应规律，并集成创新监测技术与智能控制方法，对于实现安全、经济、高效的边坡治理，保障水利工程全生命周期安全具有紧迫而深远的战略价值。

1 高边坡稳定控制的重要性

1.1 保障工程施工安全与进度

高边坡处于水利工程施工的开挖或填筑阶段时，岩土体原有应力遭到破坏，高边坡易出现滑坡、崩塌失稳现象。一旦出现失稳现象将损坏设备、阻断施工区、造成人身伤亡事故、影响工期和造成严重的直接经济损失。在施工中通过实施稳定控制技术提前加强稳定、排水，减小施工期中的风险，保证各个施工单项工程按计划推进，为全部水利枢纽工程的顺利进展提供前期保障。

1.2 维护工程运行期结构安全

水利工程投入运行后，高边坡长期承受水压力、渗透力及自重荷载的耦合作用，若施工阶段未做好稳定控制，运行期可能因库水位变化、雨水入渗等触发深层滑动。这类失稳会直接威胁大坝、溢洪道、引水渠等主体结构的安全，甚至引发溃坝等重大灾害。施工期的稳定控制是源头性防线，能减少运行期维护成本，延长工程寿命，保障下游人民生命财产与区域生态安全[1]。

1.3 支撑区域生态与经济社会稳定

高边坡多位于山区河谷，其失稳不仅破坏工程本身，还会引发水土流失、河道淤塞、农田掩埋等次生灾害，影响区域生态平衡与农业生产。水利工程作为区域发展的重要基础设施，施工期的高边坡稳定控制能避免此类连锁反应，保护水土资源与生态环境，维护库区移民安置区及下游居民的生产生活秩序，为区域经济社会可持续发展提供可靠的水利支撑。

2 水利工程施工中高边坡稳定的影响因素分析

2.1 地质条件复杂性与隐蔽性

高边坡所在区域的地质条件往往具有高度复杂性，岩土体类型多样，软硬夹层、断层破碎带分布不均，这些隐患在施工前难以完全探明。部分区域存在古滑坡体或强烈风化带，岩体完整性差，自稳能力弱。施工开挖打破了原有平衡状态，使隐伏的软弱结构面暴露，易成为滑动通道。若前期勘察精度不足，对这些地质风险认识不清，就可能在施工中突发失稳，给工程带来严重安全隐患。

2.2 水文作用诱发坡体软化

施工期与运行期的水文作用是高边坡失稳的重要诱因。降雨入渗使坡体含水量增加，岩土体强度显著降低，尤其对粉质黏土、风化岩层影响明显。库区水位变动或地下水位上升，会产生浮托力和动水压力，改变坡体应力场。部分工程排水系统设计不合理，截水沟、排水孔堵塞或数量不足，导致渗水无法及时排出，长期浸泡使坡脚软化，抗剪强度下降，最终诱发滑移或坍塌。

作者简介：杨永铭（1996-），男，专科，助理工程师，研究方向：水利工程。

2.3 施工扰动与工艺不当

施工过程中的机械开挖、爆破作业、堆载加载等会直接扰动坡体。超挖、欠挖或分层厚度过大，破坏了坡体的自然休止角；爆破产生的振动波会损伤岩体结构，形成松动圈。施工材料堆放位置不当，在坡顶或坡面附近集中堆载，会增加附加下滑力。此外，支护措施滞后于开挖进度，或锚杆、抗滑桩施工质量不达标，使坡体在尚未形成有效支挡时就已失稳，增加了风险发生的概率。

3 高边坡稳定控制关键技术

3.1 锚固支护技术

锚固支护技术是水利工程中高边坡稳定控制的手段之一，通常是通过预应力锚杆、锚索等将不稳定坡体与深层相对稳定的岩土体相连而成为整体，施工时首先要考虑地质条件确认潜在滑裂层面，再按照设置角度钻孔，清孔后下挂钢筋或钢绞线，注浆固定，对于破碎地层还要考虑跟管钻进等工艺确保成孔质量。张拉锁定时的预应力值要严格控制，确保预应力能抵抗下滑力。锚固支护可大幅提高坡体抗剪强度，限制变形发展，尤其对于岩质高边坡，处理施工质量时须尤其注意，注意对锚固系统采取有效防腐、耐久性能的处理措施，防止因变锈、膨胀、浆体老化而支护体失去支撑力，还要将锚固的预应力动态地受注浆体的变化进行调整，保证长期的稳定等[2]。

3.2 抗滑桩技术

抗滑桩通过在坡体滑动方向设置大型桩体，直接阻挡滑体位移，是治理深层滑动的有效手段。桩体通常深入稳定地层一定深度，依靠自身刚度与锚固力抵抗滑动力。施工需先进行桩位放样与孔口加固，再采用人工挖孔或机械成孔，遇流砂、涌水等不良地质时需采取降水或护壁措施。钢筋笼制作与安装需严格符合设计要求，混凝土浇筑应连续进行以保证密实度。抗滑桩的优势在于承载力高、适应性强，可用于多种岩土组合边坡。但其施工周期长、成本高，且对桩身完整性要求严格，需加强成孔质量检测与桩身无损探伤，防止因缩径、断桩等问题削弱支护效果[3]。

3.3 挡土墙技术

挡土墙通过自身重量或结构强度抵抗坡体侧向压力，常用于浅层或坡脚防护。常见类型包括重力式、衡重式、悬臂式等，需根据边坡高度、地基承载力及材料来源选择。施工时需先平整基底，确保承载力满足设计要求，再进行墙体砌筑或浇筑。重力式挡土墙靠圬工自身重量保证自身稳定，砌筑砂浆要塞实、沉降缝要设置合理；钢筋混凝土挡土墙支模、绑钢筋要压实，保证尺寸等。挡土墙施工方便、见效快，占地大，而且又长时间承受水的压力而开裂、倾倒，所以挡土墙要配备一种好的排水设施，防止墙背积水冲刷土基[4]。

3.4 坡面防护技术

坡面防护是避免坡面表层岩土风化剥落及冲刷破坏，分为工程防护与生态防护两种形式。工程防护的方法有喷混凝土、浆砌石护面、土工格栅护坡等，对坡面进行封闭，可以隔绝雨水和大气对岩土体的影响，保持其强度。喷混凝土的作法需要控制速凝剂用量、喷射厚度和厚度都要控制好，保证喷浆与坡面粘结牢固；土工格栅要求铺设时张拉展平平整，不要褶皱折曲，影响加筋效果。生态防护通过植被护坡，种植一些根系发达的草本、灌木或草袋栽种防护，铺设三维网垫等，起到护坡固土与生态修复[5]。生态防护比较环保，固土作用初期弱些，一般需工程保护措施配合使用，暴雨地表径流量大的还要配套临时雨水预排水措施防止植被冲刷、流失。

3.5 排水防渗技术

排水防渗才是解决高边坡水害最可靠的途径，通过截断和疏导地表水和地下水，排出孔隙水。地表排水有截水沟、急流槽、平台排水沟等，边坡开挖前需提前做好地表排水，使雨水远离坡面。地下排水可为仰斜式排水孔、深层排水隧洞、土工布反滤层等，及时排出漏水和承压水。水库边坡还要做防渗帷幕或高压旋喷桩，防止库水灌入坡体。排孔施工时需避免排孔角度、深度、间距偏差，确保能排水；防渗帷幕要做灌浆结石率、渗透系数检测。排水系统的通畅关乎于坡体稳定，排水堵塞或疏漏都会使水压突然蹿高造成失稳事端[6]。

4 技术应用优化策略

4.1 基于地质条件的技术精准选型

高边坡稳定控制技术的选择应首先以详实的地质勘察成果为依据，避免一刀切式应用。对于岩体完整、节理发育的硬质边坡，应优先采用锚固支护与抗滑桩组合，利用结构力学原理直接锁固滑体；对于松散堆积体或土质边坡，则应侧重坡面防护与排水系统，辅以轻型挡土墙。需建立地质参数与技术方案的对应矩阵，明确不同岩土组合下的最优解，防止技术错配导致资源浪费或控制失效。通过精准选型，可使各项技术措施与坡体特性高度契合，从源头上提升控制效果的稳定性与经济性。

4.2 多技术协同的集成化应用

单一技术往往难以应对高边坡复杂的失稳模式，需推动多技术协同的集成化应用。例如：在强风化岩质边坡，可将锚固支护、坡面喷护与深层排水系统结合，形成“内固外封、阻水减载”的综合体系。施工顺序上应遵循“先排水、后支护、再防护”的原则，确保

各技术措施发挥叠加效应而非相互干扰。需制定技术接口标准，明确不同工艺的衔接要求，如锚杆钻孔与排水孔布设的空间避让规则，避免施工冲突。集成化应用能覆盖从内部应力调整到外部侵蚀防护的全链条，显著提升系统抗风险能力。

4.3 施工工艺的精细化管控

技术效果的发挥程度依赖施工工艺的精细化执行。需建立从材料进场检验到工序验收的全过程质量控制体系，如锚杆注浆水灰比、抗滑桩混凝土坍落度、喷混凝土厚度的实时监测。针对复杂地质段，应制定专项施工方案，如破碎带注浆加固、富水区管井降水等，并加强施工过程旁站监督。推行首件工程认可制，通过样板引路统一操作标准，减少人为误差。同时，应利用数字化施工设备，如自动张拉锚索、智能喷浆机，提高工艺精度，确保每一项技术措施都能达到设计预期的力学与耐久性能。

4.4 监测反馈的动态优化机制

建立监测数据与工程措施的动态反馈机制，是实现技术持续优化关键。需将自动化监测系统的实时数据接入管理平台，通过数值模型反演分析坡体稳定性状态，及时评估现有控制措施的有效性。当监测值接近预警阈值时，应迅速启动预案，如增加临时支撑、补打排水孔或调整开挖步序。这种以数据驱动的优化模式，能变被动应对为主动调控，避免小问题积累成大事故。同时，应定期复盘监测数据与工程效果，修正设计参数与施工工艺，形成“监测—分析—调整—验证”的闭环管理，持续提升高边坡控制水平。

5 未来发展趋势

5.1 智能化监测与预警深度融合

未来高边坡稳定控制将更多地依靠智能传感技术和人工智能技术的互动。新型光纤光栅、微机电传感器等设备进行位移、应力、渗压等参数的密集、连续监测，并将监测数据通过物联网传送到云平台上，借助机器学习手段自动识别边坡变形特点、判断变形风险，可实现由“被人控”向“人控机”的转变。智能化在于提高信息利用率和决策执行的效率，通过边缘计算和数字“孪生”等技术，可以有效地在虚拟模型中同步反映高边坡的状态，在设计和施工方面提出决策依据。全天候、高速率的感监测模式，可极大地缩短人巡时的盲区和滞后性，为保障高边坡安全提供坚强科技之盾。

5.2 绿色低碳防护技术广泛应用

在生态文明背景下，高边坡防护向绿色低碳发展，传统的刚性措施所占比重将越来越低，将更多应用以植被建设为主体的生态防护技术。如培育适于干旱、瘠薄环境的植物物种及微生物固土物种与技术，配以三维网垫、植生袋等构建工程辅助措施可使坡面快速复绿并长期稳定。绿色建材应用如再生混凝土、生物基土工材料等应用，对施工现场碳排放、污染物排放皆有很大缓解作用。未来的防护理念是不仅力学稳定，还重建生态系统服务理念，重视生态过程、保持水土、丰富生物多样性、美化景观效果的实现统一，最终体现水利工程高边坡是一个人与自然和谐共生绿色界面。

5.3 多学科交叉融合的技术创新

解决高边坡稳定难题将越来越靠跨学科的碰撞与融合。地质学、岩土力学、信息科学、生态学等相关知识和方法将融入高边坡稳定控制思想和方法之中，产生新理论、新技术。如利用大数据探寻历史失稳案例，数值模拟来寻找高边坡合理支护参数；或是利用仿生学原理模拟植物根状结构、动物巢状结构而研发新的辅助和加固材料。但不是仅限于技术层面，也不仅限于管理模式层面，如系统工程的学科理念带来的综合设计、动态风险管理等。互相关注将无限制拓展人们的学科视野，以跨学科研究形式来寻找应对复杂地质条件高边坡稳定这一难题的全新统一综合的解决方案。

6 结束语

水利高边坡的稳定控制是一项复杂的综合性工程科学命题。对失稳机理的认知深化、防控技术的持续创新，不仅能为工程实践提供系统应对方案，还能推动现行设计与施工规范的迭代完善。未来，主动与智能感知、精确控制智能技术将逐渐成为高边坡稳定控制的研究与发展主流，为水利基建的安全与长久治本提供更加强大的保障与技术支撑，这也需要不断加强地质、力学、材料、信息等科学的交叉、融合与创新研究，通过智能化、绿色化发展技术观念来引领新技术的创新，不断提高我国高边坡灾害防控综合治理现代化水平和保障安全能力。

参考文献：

[1] 辛华伟.影响水利工程边坡稳定的因素及处理措施[J].科技资讯,2022,20(16):65-67.
[2] 胡韩臣,赵成南,易思远.水利工程中高边坡加固与治理措施[J].中国高新科技,2022(11):149-151.
[3] 刘尚武.影响水利工程边坡稳定的因素及处理方法[J].内蒙古水利,2021(10):49-51.
[4] 吴贵军.水利工程高边坡勘察设计质量控制措施[J].四川建材,2021,47(04):81-82.
[5] 狄瑞.水利工程高边坡勘察设计质量控制管理[J].水利技术监督,2020(04):21-22,198.
[6] 康佳辉.反倾高边坡破坏模式及.稳定性影响因素分析[D].成都:西华大学,2020.

大型商业综合体深基坑施工数值模拟分析研究

李军平

（中国核工业华兴建设有限公司，江苏 南京 210019）

摘 要 本文以某大型商业综合体深基坑工程为研究对象。该工程深基坑开挖面积较大、深度较深，并且周边环境较复杂，支护安全等级为一级。基坑西北角区域为代表性的基坑单元，采用MIDAS/GTS软件，基于莫尔—库伦模型完成建模与网格划分，确定土体及支护结构相关参数，将开挖过程分为五种工况开展数值模拟。分析各工况下地连墙位移、内力及周边土体沉降规律，发现地连墙位移和弯矩随开挖深度增大而增加，最大位移与弯矩点逐步下移，支撑梁可有效约束墙体变形。本文通过数值模拟揭示了复杂环境下深基坑开挖的力学演化规律，以期为同类工程的支护设计与施工提供技术参考。

关键词 商业综合体；深基坑；数值模拟

中图分类号：TU47；TP3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.017

0 引言

商业综合体大都建设在城市核心地区，周边建筑物密集、交通较复杂，因此对项目的基坑支护安全的等级要求高。在开挖过程中，由于土体卸载，容易造成周边土体沉降、支护结构变形等问题。数值模拟技术可以有效帮助分析土体和支护结构的相互作用，是沉基坑工程中重要的技术手段。本文通过MIDAS/GTS软件进行数值模拟，分析不同开挖工况下支护结构的变形与内力特征，为工程安全施工提供数据参考。

1 工程概况

某大型商业综合体项目，工程基坑开挖面积约为37 700 m^2，周长约650 m，基坑平面呈“刀把”形状，南北向全长约250 m，东西向宽度约150 m，基坑开挖深度约为18.6～20.4 m。本工程设防烈度为7度，地基基础设计等级甲级，基坑支护安全等级为一级。项目周边环境较为复杂，项目北侧距在建项目地下室外墙最近约4.2 m（共用临时施工围墙），距离地铁车站最近约19.8 m。东侧距离地铁区间距离最近约13.2 m；西侧商业区道路距离地下室外墙最近约为6.5 m；南临住宅楼，距地下室外墙最近仅为7.4 m。

2 深基坑数值模拟分析研究

在深基坑施工过程中，基坑土方开挖卸载，支护结构与周边土体形成新的应力平衡状态，应力发生重分布，基坑支护将发生一定范围的变形，当支护结构超荷，会引起支护破坏造成基坑变形甚至造成基坑坍塌，造成损失，因此在基坑开挖前，有必要通过计算和数值模拟手段，掌握基坑开挖过程中的薄弱部位和薄弱环节，并加以控制，从而保证基坑工程的安全有序进行[1]。在本项目中，采用了MIDAS/GTS岩土工程有限元分析软件，通过计算机对深基坑进行了可视化建模与数值模拟分析，利用模型信息及有限元分析结果，有效对施工过程安全性进行验算。

2.1 数值模拟单元的选取

因本项目深基坑规模较大，为了分析过程的数值简化，在进行数值模拟分析时，选取基坑有代表性的一部分基坑单元的方式进行模拟分析，根据基坑的实际情况，选择截取了基坑西北角区域具有一定的代表性的基坑单元，所截取部分基坑单元南北方向长度宽度为64 m，东西方向长度为84 m，北侧为弧形道路，开挖深度19.5 m。

2.2 基坑假设

由于基坑开挖面积大、开挖深度大，划分的单元多且复杂，为简化分析过程，采用莫尔—库伦模型在对基坑单元进行数值模拟时，基于以下假设进行：（1）假设基坑四周土层分布均匀，所选取基坑单元受到的土体作用代表整个基坑效应；（2）假设地下连续墙的

作者简介：李军平（1975-），男，硕士研究生，高级工程师，研究方向：建筑工程。

深度、墙厚都相同，混凝土构件采用弹性模型；（3）将临近建筑物、构筑物、地下管网、支护结构及土体离散化，不考虑周边建筑及管网对支护结构的影响；（4）假定基坑内土体为排水状态，不考虑地下水对土体的耦合作用；（5）假定基坑周围的土体为实体，土体泊松比和弹性模量不发生改变，均为弹塑性材料，且各向同性。

2.3 基坑网格划分

数值模拟软件建模时，由于有限元体系由每个单元按变形协调条件相互作用组成，基坑边界条件对基坑产生一定的影响[2]，在通常情况下，基坑对土体影响范围约为基坑开挖深度数值的3～5倍，因此本次建模选取土层深度为51 m，基坑平面影响边界取基坑周边向外延伸80 m，将东西方向设为X向、南北方向设为Y向、基坑深度方向为Z向，基坑内网格边长按照8 m进行划分，基坑外网格边长按照12 m进行划分，共生成61 498个单元。

2.4 基坑支护结构相关参数

2.4.1 土体参数

为了保证模拟的准确性，根据工程地质勘察报告的数据，基坑范围内各土层的主要参数如表1所示。

表1 各土层土体主要参数表

土层名称	容重 γ（kN/m³）	粘聚力C（kPa）	摩擦角 φ（°）	弹性模量E（kN/m²）	泊松比 ν
素填土	18.1	10	15	6	0.3
粉质黏土1	17.4	11	14.1	10.8	0.3
粉质黏土2	18.9	20	18.1	16	0.3
粉土	18.6	10	24.2	25	0.3
粉砂加粉土	18.7	9	24.1	27	0.25
粉土夹粉质粘土1	18.2	14	24.4	18	0.25
粉土夹粉质粘土2	19.5	17	22.7	25	0.25
含砾粉砂	24	0	35	80	0.25
强风化泥质砂岩	25	20	37	100	0.25
中风化泥质砂岩	25	450	40	100	0.2

2.4.2 支护参数

基坑支护结构混凝土强度等级为C35，地下连续墙、支撑梁、圈梁、立柱等基坑支护结构构件相关参数见表2。

表2 基坑支护结构构件相关参数表

材料名称	模型类型	材料类型	单元类型	截面尺寸（mm）
地下连续墙	弹性	结构	板单元	800
支撑梁			梁单元	800×800
圈梁			梁单元	800×800
立柱			梁单元	1 100

将基坑支护结构的圈梁、支撑梁均视为一维杆，根据前述的模型定义，支护结构均采用弹性材料模型来考虑，基坑支护结构相关构件材料参数见表3。

表3 基坑支护结构相关构件材料参数表

材料名称	容重 γ（kN/m³）	弹性模量E（kN/m²）	泊松比
地下连续墙	25.0	2.0×10^6	0.3
混凝土内支撑	25.0	2.4×10^6	0.2
圈梁	25.0	2.4×10^6	0.2
立柱	25.0	2.4×10^6	0.2

2.5 基坑开挖过程模拟

数值模拟过程采用MIDAS/GTS软件进行计算分析，将基坑开挖施工过程分为以下5种工况，基坑施工各工况条件见表4。

表4 基坑施工各工况条件表

工况	坑内土方开挖标高	支撑状态描述	备注
工况Ⅰ	-2.70 m	第一道混凝土支撑梁及栈桥施工完成	/
工况Ⅱ	-8.65 m	第二道混凝土支撑梁施工完成	/
工况Ⅲ	-12.75 m	第三道混凝土支撑梁施工完成	/
工况Ⅳ	-16.45 m	第四道混凝土支撑梁施工完成	/
工况Ⅴ	-19.50 m	开挖至基底	底板施工

土方开挖前初始状态，基坑周土体处于静态平衡状态，坑周土体位移为零，此时各层土体主要承受土体自重所形成的荷载。由于基坑土方开挖卸载影响，在地下连续墙及混凝土支撑的作用下，支护结构受力

形成新的应力平衡状态，土体应力释放并重分布。

地连墙变形与基坑开挖深度、地连墙强度及刚度等因素相关联，随着土体的不断卸载，坑周土体在侧向土压力的作用下产生应力变化[3]。土体卸载与各层支撑的增加相互制约，使周围侧向土压力和支护作用力相互抵消，达到动态平衡状态，同时地连墙在动态受土体的侧向压力作用下，X 和 Y 方向均出现位移。

2.6 不同工况间模拟结果分析

随着基坑开挖地连墙受到的土压力增加在 X 和 Y 方向位移有逐渐变大的趋势，地连墙最大位移部位出现在地连墙中部，在支撑梁作用下抵消了部分侧向土压力，对减少地连墙变形起到了良好的作用，云图反应的现象与地连墙实际受力变形规律一致。

2.6.1 地连墙墙体位移分析

地连墙在背面土体侧向压力作用下出现变形，若变形过大超过一定的范围，可能会发生整体失稳或支护结构破坏，导致安全事故发生，因此，对各工况条件下地连墙进行变形分析对深基坑支护变形研究有着极为重要的意义。

通过对五种工况阶段的地连墙支护内力及位移图的情况进行汇总：（1）工况Ⅰ时，由于开挖深度尚浅，地连墙受到的侧压力也很小，地连墙的变形较小，最大位移为 2.71 mm，出现在地连墙顶部；（2）工况Ⅱ时，基坑开挖到 -8.65 m，随着开挖深度加大，地连墙受到的侧向土压力也在增加，由于第一道支撑梁约束作用，使得地连墙位移依然较小，最大位移为 3.74 mm，仍然在地连墙顶部；（3）工况Ⅲ时，基坑开挖深度到 -12.75 m，由于第一道和第二道内支撑梁的约束，地连墙最大位移部位发生改变，由墙顶向下偏移，最大位移量增加到 7.09 mm；（4）工况Ⅳ时，基坑开挖深度到 -16.45 m，随着开挖深度增加地连墙侧向压力明显大幅增大，第一至三道支撑梁完全发挥作用，但由于地连墙侧压力增幅较大，地连墙位移也大幅增加，并且位移拐点下移，最大位移发生在地连墙 -15 m 标高左右，最大位移值 30.5 mm；（5）工况Ⅴ时，基坑开挖到底部，四道支撑梁全部发挥作用，最大位移仍发生在地连墙中部，最大位移值达到 36.77 mm，地连墙的位移值与土压力情况基本一致。

分析发现，随着基坑开挖深度增大，地下连续墙位移不断增大，位移曲线最大值发生点向下移动，地连墙的墙顶位移变化较小，开挖到基坑底部时，由于坑周土体沉降等共同作用，墙顶出现向基坑外侧的反向位移。

2.6.2 地连墙墙体内力分析

在基坑开挖过程中，各工况下地下连续墙墙身受到弯矩。工况Ⅰ至工况Ⅲ条件下，地连墙弯矩值很小，随着基坑深度加深弯矩逐步增加，地连墙上最大弯矩发生点随着深度的增加在向下移动，其趋势与位移图变化趋势基本相同。当基坑土方开挖到坑底时，地连墙弯矩出现两次反弯点，其部位与地连墙的墙体位移最大位置相吻合。在第四到第五道支撑梁位置，由于支撑梁作用抵消了地连墙所受的部分侧向土压力，使地连墙墙体承受的弯矩相应减少。

2.6.3 基坑周边土体的沉降分析

在开挖过程中，由于基坑产生向内的位移，土体随着支护结构位移位置方向移动，基坑周围土体会产生沉降，最大沉降的部位一般为基坑边长的中点附近[4]。

在 MIDAS/GTS 软件中，根据节点单元大小划分的不同，所呈现的细致程度也有所不同，一般呈现线性关系。通过数据分析，随着距离基坑边缘距离变化，越远点沉降数值递减，当距离足够远时沉降值趋近于零，其中支护结构约束支护变形对沉降起到了关键性的作用[5]。

3 结束语

本文通过 MIDAS/GTS 建模进行数值模拟分析，通过截取典型区域作为分析对象，模拟划分网格，利用软件建立三维模型，利用模型进行开挖过程基坑不同工况条件下的模拟，并通过模拟结果对支护结构位移、内力进行分析，最终得出随基坑土方开挖深度增加、支护地连墙结构弯矩增加的趋势、最大弯矩的发生点规律，从而分析处支护中地连墙与支撑梁相互作用的程度，从基坑安全的角度起到控制效果，同时也对基坑中各部分结构的经济合理性起到参考作用。

参考文献：

[1] 林华明,张盛滨,吴林涛,等.软土区地铁工程深基坑降水施工数值模拟分析[J].河南科技,2025,52(06):66-70.
[2] 杨少飞,刘保平,杨雷,等.董志塬黄土深基坑复合土钉墙变形监测与数值分析[J].水利与建筑工程学报,2025,23(06):184-191.
[3] 曹宇飞.咬合桩支护基坑对邻近地铁隧道的变形影响实测与数值模拟[J].工程技术研究,2025,10(22):17-19.
[4] 王路乾,李小争.复杂环境下深基坑支护方案设计与数值模拟验证[J].四川水泥,2025(11):25-27.
[5] 马利锋.深基坑开挖方式优化数值模拟研究[J].江西建材,2025(10):349-351.

水利工程渠道衬砌施工技术要点分析及质量控制

舒 玲

（深圳市水务规划设计院股份有限公司，广东 深圳 518100）

摘 要 渠道衬砌是水利工程建设中的重要内容，其施工质量与效率关系着水利工程运行效率、质量与安全。渠道衬砌技术作为一项关键施工技术，具有防渗好、强度高和寿命长等显著优势，可以提升渠道整体输水能力，延长水利工程使用寿命，要求施工单位牢牢把握技术应用要点并实施质量控制，才能发挥技术应用优势。本文阐述了水利工程渠道衬砌施工技术应用及质量控制的重要意义，分析了渠道衬砌施工技术要点，并提出技术应用质量控制措施，以期为相关工程提供有益参考。

关键词 水利工程；渠道衬砌；地基处理施工技术；保温板铺设技术；复合土工膜铺设技术

中图分类号：TV5 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.018

0 引言

水利工程是重要的基础设施，是推进水利高质量发展的重中之重。水利工程建设易受内外部诸多因素的影响而出现裂缝与渗漏等质量问题，降低工程整体质量与安全。渠道衬砌施工技术的应用能够保障通水安全，发挥防渗截渗等关键作用，但其应用较为复杂，需要施工单位根据水利工程项目具体要求，明确渠道衬砌施工技术要点，通过原材料控制、技术指标控制与质量缺陷防范措施，保证施工整体质量，充分发挥渠道衬砌施工技术优势，打造高质量的水利工程项目。

1 渠道衬砌施工质量控制意义

1.1 提升工程施工效率

水利工程渠道衬砌施工技术的合理应用，强调施工流程的精细化，可以将渠道衬砌施工划分为标准模块，通过预制生产与现场拼装方式减少传统施工中烦琐的工序，切实有效地缩短施工时间。在技术应用过程中，先进施工设备与技术的选择应用，能够帮助施工人员快速完成保温板铺设、混凝土浇筑等，同时自动化控制系统的引入对施工参数进行精准控制，最大限度减少人工操作过程中产生的误差，既保证施工质量与效率，又提升施工机械化水平。

1.2 保障水资源高效利用

渠道衬砌施工技术要求使用具有极强防渗性能的混凝土和复合土工膜等材料，从而有效预防水分渗漏问题，也在一定程度上减少渗漏带来的损失。与此同时，科学与合理的防渗结构设计能够为水资源高效利用带来有力保障，而渠道衬砌技术采用的是由保护层、土工膜与混凝土等组成的多层复合防渗结构，进一步增强渠道整体防治效果。在渠道衬砌施工技术应用中，还重视渠道底板与边坡的特殊处理，通过排水孔、截水墙的设置，将地下水对水利工程渠道使用安全的影响降低，达到减少水资源浪费的目的。

1.3 增强结构整体稳定性

在水利工程运行过程中，水流会不断冲刷渠道边坡，若渠道施工质量存在问题则无法有效抵抗水流冲刷。高质量的渠道施工要求使用性能良好的混凝土和抗冲磨剂，以此增强混凝土结构所具有的抗冲刷性能，使渠道能够承受较大水流冲击，不会因水流持续冲刷而过早损坏。在施工技术应用质量控制前提下，施工单位会充分考虑渠道周围土壤结构特点，严控衬砌结构设计与技术应用，对渠道变形与破坏情况进行最大限度地防范，使渠道具有极强稳定性[1]。

2 水利工程渠道衬砌施工技术要点

2.1 地基处理施工技术

在水利工程渠道衬砌施工开始之前，组织全方位的现场勘察工作，便于施工单位对现场水文地质等条件做到全面掌握，根据地质结构特点选择排水固结法、换填法等地基处理技术进行基底预先性处理，确保现场施工与工程使用过程中不会出现地基沉降问题。在此基础上需要施工单位组织施工场地清理，确定最大

作者简介：舒玲（1995-），女，硕士研究生，助理工程师，研究方向：水文资源。

开挖线向外延伸 5 m 左右的清理范围，随后清除地面植被与各种障碍物，再结合施工需要采取平整压实技术处理施工场地，使基础结构所具有的密实度符合水利工程施工标准。在完成上述处理工作后，施工单位要通过复测对渠道中心线与边线等加以确定，继而完成渠道底脚线与渠道口的测量放样，注意严格控制测量误差，为后续渠道衬砌施工的开展提供基准。施工单位还要根据渠道地形与环境条件，选择合适规格的挖掘机、平地机等机械设备进行土方开挖与回填。施工单位可以使用分层开挖方式，一般分层开挖厚度控制在 30 cm，注意开挖深度应控制在 30 cm 内，同时分析和明确土壤含水量，借助洒水与排水等方式将土壤含水量控制在适宜范围内，还应认真检查底部位置的平稳性，既提高渠道衬砌施工规范性，也可保证结构牢固性与安全性。在开挖回填完成后及时组织地层夯实作业，采用分层夯实方式，使基础结构整体具有一定强度与承载力。

2.2 保温板铺设技术要点

保温板铺设是水利工程渠道衬砌施工中的重要环节，用于防止或减轻土基冻胀破坏，可以使渠道结构耐久性与稳定性同步增强。在渠道衬砌施工技术应用过程中，需要施工单位把握好相应的技术要点，优化考虑选择符合设计要求的材料，如聚苯乙烯保温板，要求保温板外观完整无缺损，颜色与厚度相对均匀，同时保温板表面要平整无异物。在保温板铺设环节要求操作人员沿渠道轴方向进行错缝铺设，将接缝高差控制在 2 mm 内，保证接缝位置平顺且紧密，注意不可随意踩踏已完成铺设的保温板，避免其损坏而影响保温成效。保温板铺设结束后应当进行固定，选择 10～15 cm 的竹签或者木楔子，将其布置为梅花状，注意每块保温板固定点至少为 3 个，才能确保固定效果。施工单位在固定保温层时要将固定材料钉入基面，使保温层与基面位置呈紧密贴合状，做到不下滑和无架空。在齿槽与渠坡等位置铺设保温层时，根据设计尺寸切割坡脚和齿槽处保温板的接触面，使之形成适宜角度，实现保温板密贴铺设。在施工过程中如遇保温板意外折断时，要选择密齿锯等工具裁剪边缘，保证其符合铺设要求[2]。

2.3 复合土工膜铺设技术

在渠道衬砌施工中铺设复合土工膜可以增强渠道防渗性能，但需要施工人员牢牢把握铺设技术要点，才能真正发挥出复合土工膜的优势与作用。在铺设过程中施工人员要认真检查复合土工膜的规格与质量，使用性能指标达标的复合土工膜，避免因两布一膜性能问题导致渠道渗漏水。完成材料检验后需要清理基础面位置的杂物与积水，使用整平技术对铺设面进行处理，再沿渠道轴线方向进行复合土工膜的铺设，注意渠道底部位置采用水平滚铺方式，而坡面位置要根据顺坡面方向进行滚铺，要求控制好土工膜松弛度，以免出现膜拉扯过紧的问题。针对复合土工膜铺设搭接处理，搭接长度至少 10 cm，横缝错开宽度不可超过 0.5 m，优先考虑使用大尺寸土工膜完成渠道内铺设，以此减少铺设面的接缝数量，进一步增强渠道防水效果。在复合土工膜铺设环节，施工人员要重视拼拉处理，其中包括土工膜焊接与土工布缝接，一般选择热熔焊接法，需要专业焊接人员进行规范操作，以提高焊接质量与安全。在焊接环节控制两条焊缝宽度，单条焊缝宽度不可超过 10 mm，还应在焊缝之间提前预留 10 mm 空腔，为后续焊缝质量检查提供辅助。此外，已铺设好的土工膜要及时覆盖保护层，减少人为与自然因素带来的损坏。

2.4 模板施工技术要点

在模板施工环节，根据工艺技术要求选择木模板、定型钢模板、铝模板等模板类型，要求使用的模板应具有极高强度与刚度，可承受混凝土浇筑与振捣等作业过程中产生的较强侧压力。在后续安装环节根据提前设置的顶面线、面板横缝位置线，按顺序安装侧模板与端头模板，通过模板背面加焊钢筋的方式起到固定作用，注意渠底衬砌施工需要将一定重量的沙袋固定在模板背面。在模板安装时保证安装位置精准无误，模板支撑要牢固且可靠，不会在混凝土浇筑全过程中出现变形和位移情况，注意安装前应将脱模剂均匀涂刷在模板内部，为后续拆模作业带来有力保障。在模板安装完成后，由专业人员检查模板位置、尺寸、标准及支撑稳定性，待各项检查达标后安排开展下一环节的施工。在混凝土施工结束之后，确定混凝土强度达标，再按先支后拆的原则完成科学拆模，禁止硬撬硬砸，确保拆模行为规范，避免给混凝土结构造成损伤。模板拆除后清除表面残留的混凝土砂浆，分类归置与存放模板及其配件，方便再次使用模板[3]。

2.5 混凝土衬砌施工技术

在水利工程渠道衬砌施工中混凝土衬砌施工技术的应用，关系着渠道整体耐久性与牢固性，也影响着渠道防渗效果。在混凝土衬砌施工技术应用中，施工单位要严格按照科学的配合比进行配料，要求所使用的原材料质量达标、计量准确。在混凝土拌合时要控制拌合时间，使各种拌合料能够充分融合，从而形成极强和易性。待完成拌合后要采用最短路线进行运输，避免混凝土在运输中过早离析或出现泌水等现象，还应注意运输过程中搅拌运输车辆要保持罐体持续缓慢

旋转，防止混凝土初凝。在混凝土浇筑与振捣环节，浇筑宜从低向高进行，特别是分层浇筑要控制每层浇筑厚度，一般不可超过30 cm，注意要从一端向另一端匀速浇筑。在混凝土振捣时坚持快插慢拔原则，振捣棒移动间距不可超过其实际作用半径的1.5倍，振捣棒插入深度应控制在5～10 cm，确保进行充分振捣，要求在混凝土表面出现浮浆且无气泡时停止振捣，以免出现过振或者漏振，此外钢筋密集区与边角等位置要考虑采用加强振捣方式，保证混凝土整体性能。在完成混凝土浇筑作业后，安排专业人员进行抹面处理，要在初凝前抹面消除水波纹，在终凝前抹面压光，提高混凝土表面光洁度与密实度，最大限度地预防表面裂缝问题。在混凝土衬砌施工中，根据设计要求完成伸缩缝、沉降缝的设置，待混凝土达到规定强度后进行切缝，深度为衬砌厚度的1/3至1/2。施工人员要认真清理缝内杂物，使用聚氯乙烯胶泥、橡胶止水带等填塞密封材料进行填缝，增强整体密封性能与防渗漏效果。

3 渠道衬砌施工质量控制措施

3.1 原材料与配合比控制

为保证水利工程渠道衬砌施工技术应用质量，施工单位要重视原材料与配合比控制。其中，砂石骨料、水泥、水、粉煤灰等原材料的选择必须与相关规范要求相符合，水泥应注意水泥品种与强度等级的选择，按要求完成取样复试，待达标后投入使用，禁止混用不同标号水泥；砂石骨料质地坚硬且级配良好，重点检测其细度模数、含泥量、逊径等数据；水要优先选择饮用水，以满足渠道衬砌施工对拌和水纯净度的要求，不可使用沼泽水与污水等水源。施工单位要根据设计强度等级与施工条件对配合比进行设计，通过多次试验验证完成最佳配合比的确定，如遇低温季节要适当减少坍落度，反之则适当增加，以保证渠道衬砌混凝土施工质量[4]。

3.2 施工技术指标控制

在水利工程渠道衬砌施工管理中，质量控制是核心所在，应通过系统化方式实现施工技术应用质量的提升。在具体的质量控制环节，施工单位要从过程入手开展现场工况监督检查，测量技术参数并将其与额定标准进行认真对比，根据对比结果制定针对性纠偏措施。以某水利工程复合土工膜铺为例，铺设600 g/m^{2}的复合土工膜，规定实际铺设厚度至少为2.7 mm，耐静水压力不小于0.6 MPa，同时BR顶破强度要大于2.8 kN，明确技术应用参数与控制标准，通过技术指标控制来减少偏差问题，从细节入手提升渠道衬砌施工质量。

3.3 质量缺陷预防处理

水利工程渠道衬砌施工技术的应用容易受内外部诸多因素影响，有可能产生混凝土裂缝、面板质量缺陷等问题，影响渠道衬砌结构整体性能。在渠道衬砌质量控制中施工单位要重点预防质量缺陷，制定针对性的质量缺陷处理措施。例如，在裂缝防范环节要考虑裂缝类型与成因，表层裂缝无需特殊处理，但塑性及贯穿类型的裂缝必须通过局部处理的方法，凿除裂缝范围混凝土并进行重新浇筑，同时采用保温保湿、排水等措施预防混凝土裂缝。在处理混凝土平整度缺陷时要凿毛处理有缺陷位置，待清理完作业面后使用高一强度等级的混凝土进行修补，使修补后的混凝土更加密实与平整，妥善处理相应的质量缺陷。针对渗流缺陷预防与处理，施工单位要聚焦渗漏原因，如复合土膜破坏或焊接质量差。为解决和防范渗漏问题，一方面需要通过加强复合土工膜质量检验的方式，确保材料性能达到设计要求，并且严格控制操作规范，禁止在铺设中过度拉扯，避免因材料破坏而引导渗漏；另一方面则要控制焊接质量，可以在焊接前进行试焊，待合格后方可大面积施工，还应通过开展抽样检查，减少质量隐患。除此之外，建立起健全的质量检验制度，定期检测渠道衬砌施工技术应用质量，及时发现和处理其中潜在质量问题，打造出高质量的水利工程[5-6]。

4 结束语

水利工程渠道衬砌施工技术应用及质量控制，能够保证施工技术全过程的规范性与标准性，提高技术应用水平。因此，在水利工程建设中要把握地基处理、保温板与复合土工膜铺设、模板施工与混凝土衬砌施工要点，同步开展全过程质量控制，使工程项目建设如期优质完成。未来要进一步优化渠道衬砌施工技术工艺，深度融合智能化与数字化技术，广泛应用高性能混凝土材料，使渠道衬砌施工技术向绿色化、高效化方向发展。

参考文献：

[1] 王晶晶,许彩芸,徐盼盼.衬砌混凝土技术在水利工程渠道施工中的应用[J].科学技术创新,2026(04):176-179.
[2] 史剑侠.水利工程渠道衬砌施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2026(01):214-216.
[3] 牛丽霞.水利工程渠道衬砌混凝土技术研究[J].水上安全,2025(22):190-192.
[4] 索学贤,索涛春.基于工程实践的水利工程渠道衬砌施工技术研究[J].建筑工人,2025,46(11):4-6.
[5] 赵吉生.水利工程渠道衬砌施工裂缝控制的关键技术研究[J].水上安全,2025(20):172-174.
[6] 吴祖弦.水利工程渠道施工中衬砌混凝土技术[J].中国住宅设施,2024(09):142-144.

水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化研究

李　程，朱玉晓，张　阁

（山东开创公路工程有限公司，山东 滨州 256600）

摘　要　本文以水利工程大体积混凝土施工中的温控防裂技术为研究对象，针对工程实践中因水化热积聚、温度场分布不均引发的裂缝问题，结合水利工程结构体型大、施工环境复杂、耐久性要求高的特点，系统探究温控防裂技术的优化路径与实施方法。通过文献研究法、数值模拟法与工程案例分析法，分析各优化措施对混凝土温度场、应力场的调控机理与实际应用效果，以期为提升水利工程结构的耐久性与运行安全性提供参考。研究结果表明，经优化的低热胶凝材料配比、精细化浇筑工艺、分布式智能监测系统与全周期养护方案，可有效将混凝土核心温升峰值控制在 47 ℃以内，内外温差稳定在 25 ℃设计阈值以下，裂缝发生率较传统施工工艺降低 80% 以上。

关键词　水利工程；大体积混凝土；温控防裂；技术优化；水化热控制

中图分类号：TV5　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.019

0　引言

我国水利基础设施建设正朝着大型化、复杂化、高标准化方向发展，大坝、船闸、泵站、渡槽等核心构筑物均采用大体积混凝土施工技术，其结构施工质量直接关系到工程的服役寿命与防洪、供水、发电等核心功能的发挥。当前水利工程大体积混凝土施工中，传统温控防裂技术仍存在诸多短板，难以适应复杂自然环境与高标准工程质量要求，温度裂缝成为制约水利工程大体积混凝土施工质量提升的关键瓶颈。在建筑业高质量发展的背景下，针对水利工程的结构特性与施工需求，开展大体积混凝土施工温控防裂技术优化研究，构建科学、系统、高效的温控防裂技术体系，成为解决工程质量难点、提升水利工程建设品质的必然要求。本文结合近三年水利工程施工技术研究成果与工程实践经验，从全流程质量管控角度出发，探究温控防裂技术的优化路径与保障机制，为水利工程大体积混凝土施工提供技术参考。

1　水利工程大体积混凝土温控防裂的核心问题与影响因素

1.1　温控防裂面临的核心技术痛点

水利工程大体积混凝土施工多处于露天环境，受自然气候、水文地质、结构体型等因素影响显著，温控防裂工作相较于建筑工程具有更高的难度与更严格的要求，现阶段施工中主要面临三大核心技术难点[1]。其一为水化热调控难度大，常规硅酸盐水泥水化热峰值高、放热速率快，而水利工程大体积混凝土结构厚度大、浇筑方量大，热量难以快速通过表面散发，易造成内部温度持续升高，形成较大的内外温差；其二为温度场管控精准度低，传统温度监测多采用热电偶定点、定时人工测量方式，存在监测点少、数据反馈滞后等问题，导致温控措施的调整缺乏实时、全面的数据支撑，难以实现对温度应力的精准管控；其三为施工与养护协同性不足，浇筑工艺设计不合理，易造成层间冷缝与热量集中。

1.2　温控防裂的关键影响因素

水利工程大体积混凝土温度裂缝的产生是材料、施工、环境、管理等多因素共同作用的结果，各因素相互关联、相互影响，从施工实践层面可将核心影响因素归纳为四类。材料特性因素是温控防裂的基础，胶凝材料的类型、掺合料的配比、骨料的级配与品质、外加剂的选用直接决定了混凝土水化热释放规律与抗裂性能。施工工艺因素是温控防裂的核心，浇筑分层厚度、间歇时间、振捣质量直接影响混凝土的散热效率与结构密实度，分层过厚会导致内部热量难以散发，振捣不密实则易形成内部孔隙，成为裂缝萌生的起点。环境条件因素是温控防裂的重要外部变量，施工期的环境温度、风速、湿度直接影响混凝土表面散热速率，

作者简介：李程（1980-），男，本科，助理工程师，研究方向：水利水电工程施工。

夏季高温浇筑会提高混凝土入模温度，冬季低温则会增大内外温差，大风天气会加速混凝土表面水分蒸发。监测与养护因素是温控防裂的保障，温度监测系统的布设密度、数据反馈效率决定了温控措施的及时性与有效性[2]。

2 水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化路径

2.1 材料体系优化

材料体系优化是从源头降低水化热积聚、提升混凝土抗裂性能的关键，具体优化措施围绕胶凝材料、外加剂、骨料与拌和水三个方面开展。在胶凝材料配比优化方面，采用“低热硅酸盐水泥+粉煤灰+磨细矿渣粉”三元胶凝体系，利用粉煤灰的火山灰效应与矿渣粉的微集料效应，延缓水泥水化反应速率，降低水化热峰值与总放热量。在外加剂精准适配方面，选用缓凝型高效减水剂，减水率≥25%，将水胶比严格控制在0.45～0.55，掺加8%～12%的UEA膨胀剂，利用混凝土硬化过程中的微膨胀效应抵消收缩应力，补偿温度裂缝的产生。在骨料与拌和水优化方面，粗骨料选用5～31.5 mm连续级配碎石，细骨料选用细度模数2.3～3.0的中砂，通过优化骨料级配提高骨料堆积密度，减少胶凝材料用量，进一步降低水化热。

2.2 施工工艺优化

施工工艺优化的核心是提升混凝土散热效率、分散温度应力，实现混凝土温度场的均匀分布，通过对浇筑、冷却、振捣等关键工序的精细化设计，构建与水利工程结构特性相适配的施工工艺体系，从施工过程中管控温度裂缝的萌生[3]。在浇筑工艺优化方面，采用斜面分层推进浇筑法，浇筑顺序遵循“从远到近、对称推进、分层分段”的原则，禁止单点集中卸料，防止混凝土堆积导致局部水化热集中。在冷却水管系统优化方面，对于厚度≥1.5 m的大体积混凝土结构，预埋Φ40～50 mm镀锌钢管，按1.5～2.0 m的间距呈网格状布设，冷却水管的布设深度与位置根据结构厚度进行调整，确保冷却范围覆盖混凝土核心高温区。在振捣工艺精细化方面，采用插入式振捣器进行振捣作业，振捣间距≤50 cm，振捣时间控制在15～20 s/点，直至混凝土表面泛浆、无气泡逸出为止，杜绝漏振、过振现象；振捣完成后及时用长刮杆进行平仓处理，消除表面早期收缩裂缝，提高混凝土表面密实度，增强表面抗裂性能。

2.3 智能监测系统优化

针对传统温度监测手段的短板，构建以分布式光纤测温为核心、结合无线传输技术的智能监测系统。在测温点与光纤布设方面，按“梅花形”原则布设测温点，测点间距控制在1.5～2.0 m，全面反映混凝土不同部位的温度变化；同时沿混凝土结构的长度、高度、宽度方向埋设分布式光纤，实现对混凝土内部温度场的连续、全域监测，弥补传统定点监测的局限性，精准掌握温度场的分布规律与变化趋势。在监测频率与数据反馈方面，制定差异化的监测频率方案，监测数据通过无线传输模块实时上传至云端监控平台，平台自动生成温度变化曲线、温度场云图，直观反映混凝土温度变化情况。

2.4 养护管理优化

养护管理优化的核心是延缓混凝土表面散热速率、保持表面湿度稳定，减少温度应力与干缩应力的叠加，结合水利工程不同施工季节、不同服役区域的特点，构建全周期、差异化、智能化的养护管理体系，强化混凝土后期抗裂性能提升。在常规保温保湿养护方面，混凝土初凝后即浇筑完成4～6 h后，立即在表面覆盖“土工布+塑料薄膜+保温被”三层防护结构，形成密闭的保温保湿层，确保塑料薄膜内始终有凝结水，防止混凝土表面水分快速蒸发引发干缩裂缝。在智能养护系统应用方面，引入集温度、湿度监测与自动喷淋、自动加热于一体的智能养护系统，系统实时采集环境温度、湿度与混凝土表面温度、湿度数据，根据预设的养护参数，自动调节喷淋水量、喷淋频率与加热功率，将混凝土养护环境的湿度控制在90%以上，确保混凝土早期强度稳步发展[4]。

3 工程案例验证与优化效果分析

3.1 工程案例概况

以某大型水库重力坝工程为研究对象，该工程坝体最大高度78 m，坝顶长度320 m，混凝土浇筑总量约32万m^3，属于典型的大体积混凝土结构，工程功能以防洪、供水、发电为主，对混凝土结构的抗裂性、耐久性与整体性要求极高。为解决传统施工工艺的温控短板，该项目采用本文研究的温控防裂优化技术体系，从材料体系、施工工艺、智能监测、养护管理四个维度实施全流程质量管控，重点监测混凝土核心温升峰值、内外温差、降温速率、裂缝发生率等关键指标，验证优化技术的实际应用效果。

3.2 优化效果量化分析

通过对该水库重力坝工程施工现场监测数据的整理分析，并与传统施工工艺的管控效果进行对比，本文提出的温控防裂优化技术体系取得了显著的应用效果，各核心管控指标均达到设计要求，有效降低了温度裂缝隐患。在温度场调控方面，坝体混凝土核心温

升峰值控制在 45 ℃，低于 47 ℃的预设控制阈值，混凝土内外温差始终稳定在 20 ～ 25 ℃之间，降温速率控制在 1.5 ℃ /d 以内，避免了因降温过快引发的温度应力突变，实现了混凝土温度场的均匀、缓慢变化。在裂缝防控方面，该工程大体积混凝土结构表面未出现贯穿性裂缝，仅在局部区域出现少量的微裂缝，微裂缝发生率仅为 8%，较传统施工工艺的裂缝发生率降低 81.4%，且所有微裂缝宽度均≤ 0.2 mm，可通过混凝土的自愈合能力完成修复，无需进行人工修补，有效保证了混凝土结构的整体性。在工程质量与施工效率方面，通过优化浇筑工艺与智能监测系统的应用，施工效率提升 20%，有效缩短了施工工期，避免了因温控问题导致的工期延误，实现了质量与进度的协同管控。在经济性方面，虽然温控防裂优化技术的应用使前期施工成本增加 6%，但因裂缝发生率大幅降低，工程裂缝修复费用减少 70% 以上，同时混凝土结构耐久性的提升使工程后期运维成本降低 32%，预计可使坝体结构的服役寿命延长 15 年以上，实现了工程全生命周期成本的降低，达成了质量效益与经济效益的双赢。

4 温控防裂技术优化的保障机制与应用建议

4.1 技术优化落地的保障机制

为确保水利工程大体积混凝土温控防裂优化技术能够在工程实践中有效落地、发挥实效，需从组织、制度、人才三个维度构建完善的保障体系，为技术优化措施的实施提供全方位支撑。在组织保障方面，设立专项温控防裂领导小组，统筹推进温控防裂技术优化工作，明确各方职责与分工，建立“总部—项目部—施工班组”三级推进机制，确保技术优化措施层层落实、执行到位。在制度保障方面，制定完善的温控防裂技术管理制度体系，针对温控防裂优化技术方案，组织行业专家进行严格的可行性、先进性与经济性评审，确保方案与工程实际相适配；完善质量考核制度，将混凝土温度控制指标、裂缝发生率纳入施工班组与管理人员的绩效考核体系，实行奖惩分明的考核机制，强化施工人员的质量意识与执行力度。在人才保障方面，加强施工技术人员的专业培训，定期组织开展大体积混凝土温控防裂技术、智能监测设备操作、精细化施工工艺等方面的培训课程与实操演练，提升施工人员的专业技能与实操能力，使其能够熟练掌握优化技术的操作要点[5]。

4.2 技术优化的工程应用建议

为使温控防裂优化技术体系能够在更多同类工程中得到推广应用，充分发挥技术优化对工程质量的提升作用，提出针对性的工程应用建议。一是因地制宜制定技术方案，根据工程所处区域的气候条件、水文地质特征与结构体型，灵活调整温控防裂技术方案的具体参数。二是推动技术与管理深度融合，将温控防裂优化技术纳入水利工程施工全过程质量管理体系，强化施工前的方案论证、施工中的过程管控与施工后的效果评估[6]。三是加强产学研协同创新，施工企业应与科研院校、材料生产企业、设备研发企业建立长期的合作关系，开展低热胶凝材料、智能监测设备、新型保温保湿材料等方面的联合研发，加速前沿技术与科研成果的工程转化。

5 结束语

水利工程大体积混凝土施工温控防裂技术优化是一项系统性、全流程的工作，其核心目标是通过技术革新与工艺优化，提升混凝土结构的耐久性与安全性。工程案例验证表明，优化后的温控防裂技术体系能够将混凝土核心温升峰值、内外温差控制在设计阈值以内，大幅降低裂缝发生率，同时兼顾施工效率与工程全生命周期经济性，实现了质量效益、经济效益与社会效益的统一。随着数字技术、新材料技术、智能化技术在水利工程领域的深入应用，大体积混凝土施工温控防裂技术正朝着智能化、精准化、绿色化的方向发展。未来，应进一步推动 BIM、物联网、大数据、人工智能与温控防裂技术的深度融合，构建集温度场数值模拟、实时监测、智能调控于一体的数字化温控平台，实现对混凝土温度场的预判与精准管控；同时加强极端环境下温控防裂技术的研究与应用，持续优化低热、高抗裂、高耐久性混凝土材料体系，不断完善温控防裂技术体系。水利工程建设企业应高度重视温控防裂技术的研发与应用，通过技术创新与管理升级，破解工程质量瓶颈，提升水利工程建设品质，为我国水利基础设施高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 肖洪. 大体积混凝土施工中温控与裂缝控制一体化技术研究 [J]. 水泥 ,2025(12):83-85.
[2] 白体新. 大体积混凝土工程施工裂缝控制技术研究 [J]. 水泥 ,2025(08):76-80.
[3] 田种香. 水利施工中混凝土裂缝的防治施工技术探讨 [J]. 全面腐蚀控制 ,2024,38(07):138-141.
[4] 刘小龙. 大体积混凝土温控防裂技术在水利水电工程中的应用 [J]. 中国高新科技 ,2025(22):121-123.
[5] 张春海. 水库大坝大体积混凝土的裂缝成因及防治对策 [J]. 水利技术监督 ,2025(10):319-323.
[6] 李柯. 重力坝大体积混凝土温控防裂施工技术研究 [J]. 水泥 ,2025(07):140-142.

高海拔大埋深隧道混凝土病害处治技术研究

余 强

（四川二滩建设咨询有限公司，四川 成都 610051）

摘 要 本文针对高海拔、大埋深条件下特长隧道素混凝土衬砌易出现的裂缝、渗漏水、脱空及厚度不足等病害问题，以某建筑工程对外交通专用公路大梁子隧道为背景，通过专项检测明确病害类型与分布特征，系统分析病害成因机制，提出“注浆填充—钢带加固—裂缝封堵—渗漏水引排”的综合处治技术体系。该研究成果旨在为类似高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害处治提供技术参考与工程示范，具有重要的学术价值与推广应用前景。

关键词 特长隧道；素混凝土衬砌；病害处治；W钢带加固；注浆技术

中图分类号：U45 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.020

0 引言

随着我国建筑、交通基础设施建设向西部高海拔地区延伸，特长隧道在跨山越岭交通线路中得到广泛应用。素混凝土衬砌因施工便捷、成本可控等优势，成为中低围岩级别隧道二次衬砌的常用形式。但高海拔地区特殊的地质环境（强烈构造应力、复杂地下水系统、较大温差变化）及大埋深带来的高应力作用，导致素混凝土衬砌易产生裂缝、渗漏水、脱空等病害，严重影响隧道结构耐久性与运营安全[1]。目前，国内外关于隧道衬砌病害的研究多集中于平原地区或常规埋深隧道，针对高海拔大埋深条件下素混凝土衬砌病害的系统性研究较少，缺乏成熟的处治技术体系。本文以大梁子隧道为研究对象，通过专项检测揭示素混凝土衬砌病害特征，从地质、施工、材料等维度分析病害成因，优化设计综合处治技术方案，开展现场工程应用与效果验证，为同类工程提供技术支撑，对完善高海拔隧道病害处治理论与技术体系具有重要意义。

1 工程概况

大梁子隧道为单洞双向行车特长隧道，起止桩号K0+131～K5+458，建筑限界10.5 m×5.3 m，设计速度30 km/h，由检修道与行车道组成。采用新奥法施工原理设计，复合式衬砌结构，Ⅱ～Ⅲ级围岩区段采用C20素混凝土二次衬砌，Ⅳ～Ⅴ级围岩区段采用钢筋混凝土衬砌。

隧址区位于雅砻江与左岸支流小河沟切割形成的“半岛”形山脊两侧，属川西高山区地貌，地表横坡较陡，山脊最高点高程3 950 m，河谷高程2 570～2 640 m。隧道沿线岩层以第三段绢云板岩夹薄～中厚层石英粉砂岩为主，岩层走向与隧道轴向夹角约35°，围岩结构面发育三组节理，间距30～300 cm，部分区段存在节理切割形成的不利块体。

隧道工程区域最大水平构造应力场方向为近东西向，与隧道轴线夹角约55°，中段最大埋深1 200 m处，最大垂直地应力超过30 MPa，最大水平地应力达15 MPa，坚硬变质砂岩区段开挖时出现弱岩爆与片帮现象。地下水补给源丰富，包括大气降水与远近距离地下水补给，地下水类型为基岩裂隙水，隧道开挖时以裂隙渗水形式呈现，拱顶部位多为滴水状。

衬砌结构由初期支护与二次衬砌组成，初期支护根据围岩级别采用喷混凝土、锚杆、钢筋网、钢架等组合形式。其中素混凝土衬砌主要应用于Ⅱ、Ⅲ级围岩区段，拱墙厚度分别为30 cm、40 cm，采用C20混凝土浇筑；Ⅳ～Ⅴ级围岩区段采用C25钢筋混凝土衬砌，厚度40～80 cm。

2 隧道素混凝土衬砌病害检测与成因分析

2.1 专项检测方案

采用“外观普查+仪器检测+室内试验”相结合的专项检测方案，全面排查素混凝土衬砌病害情况。（1）外观普查：采用人工巡查方式，记录裂缝位置、长度、宽度，渗漏水范围、形式及砂浆、瓷砖脱落等表观病害。（2）仪器检测：选用地质雷达（GPR）对7条测线（左右侧墙、拱腰、拱肩及拱顶）进行扫描，检测衬砌厚度与脱空情况；采用回弹仪检测混凝土强度。（3）室内试验：采集衬砌混凝土芯样，进行抗压强度与弹性模量测试。

2.2 病害检测结果

1. 裂缝病害。共检测出各类裂缝41条，总长为452.7 m。其中环向贯通裂缝21条（348.6 m），宽度0.48～

作者简介：余强（1988-），男，本科，工程师，研究方向：土建工程管理。

5 mm；纵向裂缝 15 条（92.7 m），宽度 0.3 ～ 5 mm；竖向裂缝 3 条（3.4 m），宽度 1 ～ 2.3 mm；斜向裂缝 2 条（8 m），宽度 1 ～ 3 mm。网状裂缝 2 处，总面积 17.53 m^2；裂缝泛碱 1 条（2.2 m）。中段大埋深区段裂缝密度显著高于进出口浅埋区段[2]。

2. 渗漏水病害。共检测出渗漏水病害 97 处，总面积为 199.02 m^2。其中浸渗 61 处（181.48 m^2），渗水泛碱 36 处（17.54 m^2）。瓷砖外鼓 2 处，混凝土剥落 2 处（0.92 m^2），坑洞 1 处（0.4 m^2）。渗漏水形式以拱顶滴水、边墙面渗为主，集中分布于节理发育密集区段。

3. 衬砌结构缺陷。地质雷达检测结果显示，衬砌总体厚度缺陷率 35.93%，欠厚范围 29 ～ 147 mm；衬砌背后脱空及与初期支护结合不紧密区域总长 2 303.6 m，占测线总长的 7.92%，其中拱顶、左右拱肩测线缺陷占比最高。混凝土强度检测结果表明，二次衬砌强度均达到 C20 设计标准，满足强度要求[3]。

2.3 病害成因分析

1. 裂缝病害成因。（1）施工期因素：混凝土水化热与干缩作用产生横向毛裂缝，灌注速度过快导致边墙、拱腰部位出现水平裂缝，此类裂缝多为施工期原生裂缝，后期在围岩压力作用下逐步扩展。（2）结构缺陷影响：衬砌厚度不足导致承载力下降，脱空区域引发应力集中，使衬砌受拉区产生纵向、环向及网状裂缝。（3）环境与应力作用：高海拔地区昼夜温差大，混凝土热胀冷缩反复作用加剧裂缝发育；大埋深带来的高构造应力与自重应力叠加，超出素混凝土抗拉强度极限，导致贯通性裂缝产生。

2. 渗漏水病害成因。（1）地质条件：隧址区节理裂隙发育，地下水补给充足，基岩裂隙水易沿结构面渗透。（2）施工质量：光面爆破效果不佳导致开挖轮廓凹凸不平，喷射混凝土厚度与密实度不达标；引流盲管安装偏移、防水层施工缺陷（施工缝、变形缝防水构造失效）；混凝土灌注不饱满，内部存在孔隙通道。（3）结构裂缝：贯通性裂缝成为地下水渗透的主要通道，加剧渗漏水病害[4]。

3. 衬砌脱空与厚度不足成因。（1）施工控制不严：爆破施工超挖部分未有效回填，导致拱部大范围脱空；衬砌模板安装精度不足、混凝土浇筑不规范，造成厚度不足。（2）围岩特性：开挖后易崩解、掉块，形成拱部空洞与不密实区域，间接导致衬砌厚度不足与脱空。

3 病害综合处治技术方案设计

3.1 设计原则

一是针对性原则：根据不同病害类型、严重程度及成因，采用差异化处治措施；二是技术可行性原则：结合隧道施工条件与现有技术水平，选择成熟可靠、操作便捷的处治技术；三是经济合理性原则：在保证处治效果的前提下，优化方案设计，控制工程成本；四是安全环保原则：施工过程中保障作业安全，减少对隧道运营与周边环境的影响；五是动态调整原则：施工期间加强监测，根据病害变化与检测结果实时优化处治方案。

3.2 核心处治技术方案

1. 衬砌脱空与厚度不足处治技术。（1）注浆填充技术：拱部 150° 范围采用泡沫混凝土回填，其余部位采用 M20 水泥砂浆进行注浆填充。注浆压力 0.5 ～ 1.2 MPa，浆液水灰比 1:0.8 ～ 1:1.2，单孔注浆量根据脱空体积计算确定。（2）W 钢带加固技术：针对衬砌厚度＜ 30 cm、拱部脱空高度＞ 50 cm 或网状裂缝发育区段，采用 WD300/3.0 型钢带全环加固。钢带标准厚度 3 mm，宽度 300 mm，通过 M20 高强化学锚栓及复合粘钢胶与衬砌连接成整体。脱空高度 50 ～ 100 cm 区段钢带间距 90 cm；脱空高度＞ 100 cm 或网状裂缝发育区段钢带间距 70 cm；脱空高度＞ 200 cm 时，现场研判后专项处理。

2. 裂缝处治技术。（1）表面封闭法：适用于缝宽 $w \leqslant 0.2$ mm 的裂缝、无明水点渗、面渗及衬砌表面剥落、麻面。施工流程：缺陷调查→界面处理（刻槽 / 凿毛）→涂抹改性环氧胶泥（裂缝）或预缩砂浆（剥落 / 麻面）。（2）压力灌浆法：适用于缝宽 $w > 0.2$ mm 的裂缝及有明水的点渗、面渗。采用高渗透性环氧树脂灌浆材料，施工流程：裂缝调查→钻孔→清孔→安装注浆头→表面封闭→试压→注浆→质量检查→表面处理。

3. 渗漏水处治技术。（1）引排法：针对变形缝、施工缝集中渗漏水及裂缝大流量漏水，采用环向凿槽埋管引排。施工流程：凿除表面装饰层→凿槽→安装注浆管灌浆→敷设 PVC 半圆管→连接至排水沟→环氧砂浆封闭→恢复装饰层。（2）联合处治：渗漏水与裂缝并存时，先采用压力灌浆法封堵裂缝，再结合引排法疏导集中水流，实现“堵排结合”。

3.3 技术参数优化

注浆参数：通过室内试验确定泡沫混凝土干密度 600 ～ 800 kg/m^3，抗压强度≥ 0.8 MPa；M20 水泥砂浆凝结时间控制在 4 ～ 6 h，抗压强度≥ 20 MPa。钢带加固参数：化学锚栓钻孔直径 14 mm，深度 115 mm，环向间距 50 cm，单根锚固力≥ 41.8 kN；钢带接头采用焊接，纵向用平钢带连接，环向间距 100 cm。灌浆材料：环氧树脂灌浆材料粘度≤ 50 MPa·s（25 ℃），抗压强度≥ 50 MPa，粘结强度≥ 3.5 MPa。

4 施工工艺与质量控制

4.1 关键施工工艺

1.注浆填充施工。（1）施工准备：清理衬砌表面杂物，采用地质雷达精确定位脱空范围，标记注浆孔位置。（2）钻孔作业：注浆孔布置采用梅花形，间距1.5～2 m，拱顶部位加密至1～1.5 m，钻孔深度穿透衬砌至脱空区域。（3）浆液制备：严格按照配合比搅拌浆液，泡沫混凝土采用机械发泡工艺，确保气泡均匀分布。（4）注浆作业：采用分段注浆法，从低海拔向高海拔、从边墙向拱顶依次注浆，注浆压力达到设计终压且稳定30 min后停止。（5）孔口封闭：注浆完成后，待浆液初凝后采用环氧砂浆封堵注浆孔。

2.W钢带加固施工。（1）表面处理：清除衬砌表面浮尘、油污，打磨平整，裂缝区先进行封堵处理。（2）钢带加工：根据断面曲率预制钢带，确保与衬砌表面密贴。（3）钻孔安装：按设计间距钻孔，清孔后植入化学锚栓，固化时间≥24 h。（4）粘钢施工：在衬砌表面与钢带接触面涂抹改性环氧树脂胶粘剂，采用压力注胶工艺确保胶层饱满，然后安装钢带并紧固锚栓。（5）接头处理：钢带环向接头焊接，纵向采用平钢带连接，焊接长度≥10 cm，焊缝厚度≥3 mm。（6）防腐处理：钢带与锚栓表面除锈后涂刷防腐涂层，确保无锈蚀死角[5]。

3.裂缝与渗漏水处治施工。（1）表面封闭法施工：裂缝处刻槽（宽2 cm、深1 cm），清理干燥后分层涂抹环氧胶泥，宽度覆盖裂缝两侧各5 cm；剥落、麻面处凿毛后涂刷水泥净浆，分层填补预缩砂浆，边缘切割垂直边缘（深度≥5 mm）。（2）压力灌浆法施工：沿裂缝中心凿V型槽（宽50 mm、深30 mm），清理后按300 mm间距钻孔（深度200 mm、孔径14 mm），安装注浆头并封闭槽口；采用“跳孔注浆、由下至上”的顺序注浆，邻孔反浆后切换至并灌模式，注浆压力0.3～0.8 MPa。（3）引排法施工：沿渗漏水裂缝凿环向槽，安装PVC半圆管，连接至电缆沟与排水沟，采用环氧砂浆封闭槽口，恢复瓷砖与防火涂料。

4.2 质量控制措施

原材料控制：注浆材料、胶粘剂、钢带、锚栓等进场时需提供合格证书与检测报告，进场后抽样复检，不合格材料严禁使用。施工过程控制：建立“三检制”，重点检查注浆压力、浆液流量、钢带安装精度、锚栓锚固力等；加强施工监测，布置围岩收敛计、应变计监测应力与变形，异常时及时调整施工参数。成品检测：注浆后采用地质雷达复查脱空填充情况，锚栓抗拔承载力现场抽样检验，裂缝处治后观测裂缝闭合度，渗漏水处治后检查无渗漏现象。

5 处治效果评价

5.1 评价结果

一是结构完整性：地质雷达复查结果显示，衬砌脱空填充密实度达96.3%，仅局部区段存在微小空隙（＜5 cm），满足设计要求；衬砌厚度缺陷率降至8.7%，欠厚最大值≤50 mm，结构完整性显著提升。二是裂缝控制效果：共观测38条主要裂缝，平均闭合度82.4%，其中缝宽≤0.2 mm的裂缝完全闭合，缝宽0.2～5mm的裂缝闭合度75%～90%，无新增裂缝产生。三是渗漏水治理效果：97处渗漏水病害全部得到有效治理，检测结果显示无滴水、面渗现象，渗漏水治理合格率100%。四是承载能力：衬砌结构应力测试表明，钢带加固段衬砌最大拉应力降至1.2 MPa，小于C20混凝土抗拉强度设计值（1.54 MPa）；数值模拟分析显示，衬砌结构承载能力较处治前提升42.6%，满足大埋深高应力条件下的承载要求。

5.2 工程应用效益

一是安全效益：处治后隧道素混凝土衬砌病害得到有效控制，结构稳定性与耐久性显著提升，消除了运营安全隐患，保障了工程大件运输的连续安全通行。二是经济效益：综合处治技术方案较传统方案成本降低15%～20%，施工工期缩短25%，且后期养护成本显著降低。三是技术效益：形成了针对高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害的综合处治技术体系，为类似工程提供了技术参考与工程示范。

6 结束语

针对高海拔大埋深隧道素混凝土衬砌病害提出的“注浆填充—钢带加固—裂缝封堵—渗漏水引排”综合处治技术体系，能有效提升衬砌结构完整性、裂缝闭合度与承载能力。其中，W钢带与注浆联合加固技术有效解决了衬砌脱空与厚度不足问题，分级裂缝处治与“堵排结合”的渗漏水治理技术显著提升了处治效果，满足高海拔大埋深隧道运营安全要求，具有良好的技术可行性与经济合理性。

参考文献：

[1] 陈生玲.高海拔地区隧道衬砌渗水成因分析及处治技术研究[J].汽车周刊,2025(01):243-245.
[2] 姚湘静,彭张涛,等.隧道二次衬砌裂缝病害成因重要性多元统计分析评价[J].隧道与轨道交通,2025(02):6-13,72.
[3] 住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构加固设计规范(GB 50367-2013)[S].2014-06-01.
[4] 白元涛.公路隧道衬砌渗漏水修复技术研究及应用[J].建筑施工,2025(03):467-471.
[5] 迟作强,邵帅,等.公路隧道二次衬砌脱空病害钢带加固整治技术与应用[J].山东交通科技,2025(01):117-119,123.

基于 BOM 管理的单一数据源应用研究

白 杨

（中航沈飞民用飞机有限责任公司，辽宁 沈阳 110170）

摘 要 在制造业数字化转型背景下，物料清单（BOM）作为贯穿产品全生命周期的核心数据载体，其一致性与高效管理是企业竞争力的关键。传统分散式 BOM 管理模式导致设计 BOM（EBOM）与制造 BOM（MBOM）间数据割裂、转化低效、变更不同步。本文提出以产品数据管理（PDM）系统为统一平台，构建基于 BOM 的单一数据源的解决方案。首先阐述了单一数据源与 BOM 多视图映射的理论基础；其次设计了一个以 XBOM 为核心、通过映射规则与变更引擎驱动数据自动流转的 PDM 系统架构；最后结合行业实践，分析了该模式在提升数据一致性、优化工程变更闭环管理以及支持服务型制造转型方面的关键价值与实施路径。实践表明，构建基于 BOM 的单一数据源是企业实现研发制造一体化、迈向智能协同的必由之路。

关键词 物料清单；单一数据源；产品数据管理；XBOM；工程变更管理

中图分类号：TP399 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.021

0 引言

随着全球制造业竞争加剧与客户需求日益个性化，产品开发与生产模式面临严峻挑战。在汽车、航空等复杂产品制造中，从 EBOM 向 MBOM 转化的漫长流程中普遍存在“数据孤岛”[1]。研发、工艺、生产部门常使用独立系统维护各自的 BOM 数据，导致数据重复录入、一致性差、工程变更响应滞后，进而引发物料错误、项目延期与成本失控。产业界与学术界均将目光投向以单一数据源为核心的产品数据治理理念，其核心是在产品全生命周期内，所有相关方基于一个权威、一致的数据源开展工作。BOM 作为整合产品零部件、工艺、制造、服务等信息的结构化清单，天然成为构建这一数据源的最佳载体。通过 PDM 系统实现以 BOM 为核心的单一数据源管理，确保从 EBOM 到 MBOM 的高效、准确、自动流转与协同，已成为企业数字化建设的核心目标。本文系统研究基于 BOM 的单一数据源构建方法与实践，解析其理论基础，提出具体技术架构与实现路径，并结合案例探讨其实施价值。

1 从 BOM 多视图到单一数据源

1.1 BOM 的多视图本质与流转挑战

在产品生命周期不同阶段，因业务视角和需求差异，BOM 衍生出多种视图。EBOM 反映设计结构，MBOM 体现制造顺序和资源安排，以及 PBOM、TBOM 等[2]。这些视图本质上是同一产品数据在不同业务语境下的投影。传统“双 BOM”或“多 BOM”模式将不同视图存储于独立系统中，虽优化了局部视图，却导致了全局数据断裂与高昂协同成本。

1.2 单一数据源的构建逻辑

构建基于 BOM 的单一数据源，并非指在整个企业内只存在一个物理上的 BOM 表，而是建立一个逻辑统一、物理关联的数据管理范式。其核心逻辑包含两个层次：（1）单一物料项源：为每个物料分配唯一标识，在 PDM 系统中管理其属性（零件号、名称、材料等），确保物料数据的唯一性。（2）多视图结构映射与关联：在单一数据源的基础上，通过定义明确的映射规则和算法，在不同业务视图（EBOM 结构与 MBOM 结构）间建立可追溯的关联关系。当设计发生变更时，系统能自动识别影响范围，并驱动下游视图的同步更新，从而形成各种“物料项关系源”[3]。两者共同构成支持全生命周期的单一数据源。

传统 BOM 管理与基于单一数据源的 BOM 管理存在根本性差异，对比如表 1 所示。

2 核心架构：基于 PDM 的单一数据源系统构建

核心思想是将 PDM 系统定位为企业产品定义数据的唯一权威来源，不仅管理 EBOM，更在统一的平台内拓展 MBOM 的管理能力，并通过标准服务与下游系统集成，其总体架构为实现上述逻辑，需要一个以 PDM 系

作者简介：白杨（1983-），女，本科，工程师，研究方向：飞机装配、数字化转型。

表1 传统BOM管理与基于单一数据源的BOM管理对比

对比维度	传统分散式BOM管理	基于单一数据源的BOM管理
核心理念	各部门维护“我的BOM”，数据所有权分散	企业维护“XBOM”，数据为共享资产，所有权集中治理
数据存储	多系统、多版本并存（CAD/PDM/ERP/Excel）	统一平台（PDM系统）内逻辑集中管理，物理可分布式
一致性保障	依靠人工定期同步与核对，错误率高	通过系统规则自动映射与同步，实时一致
变更流程	串行、部门间手动传递变更单，周期长，易遗漏	在线协同、集成变更流程，自动影响分析，闭环管理
系统集成	点对点文件接口（Excel导入导出），脆弱且低效	基于服务的API集成，数据实时、单向受控流动
可追溯性	困难，需跨系统人工拼接历史记录	完整，所有操作在统一平台内留有审计追踪

统为核心、具备多视图BOM管理能力的集成平台。其核心架构包含以下关键层次与模块。

2.1 统一数据层：XBOM与主数据管理

这是单一数据源的物理基础。系统引入“XBOM”概念，作为调和设计与制造视角的中间载体[4]。同时，建立企业级的标准物料库，对所有物料进行规范化、分类编码管理，从根源上杜绝“一物多码”现象，为单一数据源奠定基础。

2.2 核心引擎层：映射、转换与变更驱动

这是实现数据自动流转的“大脑”。多视图映射引擎是基于装配关系等数学模型，预定义EBOM节点到制造工序、工位的转换规则。当EBOM发布后，系统可依据规则半自动或全自动地生成初始的MBOM框架。当EBOM变更时，系统自动创建工程变更请求并基于BOM结构进行影响分析。变更批准后，引擎不仅更新EBOM，还自动触发关联的MBOM、工艺路线等下游数据的同步更新通知，并反馈至采购、计划系统，形成完整的变更闭环。

2.3 应用视图层与集成接口层

基于角色的协同工作台，为设计、工艺、制造、采购等不同部门的用户提供与其职能相匹配的BOM视图和应用界面。所有视图均实时源自底层的统一数据层，确保用户看到的数据始终是最新、一致的。通过标准接口与ERP、MES、WMS等系统集成，确保BOM数据顺畅延伸至产品生命周期各环节[5]。

2.4 数据集成层

基于PDM的单一数据源架构通过实时共享BOM数据，支持制造执行系统数字化转型，实现设计到生产的全生命周期管理，所有PDM数据通过数据中台进行数据分析与应用，为各部门提供财务分析、成本归集等数据贯通条件（见表2）。

3 实践应用、关键能力与价值分析

基于上述架构的实践，能够显著提升企业在数据一致性、变更管理、工艺集成等维度的能力。成功实施单一数据源BOM管理，能为企业带来可量化的显著价值（见表3）。

表2 基于PDM的单一数据源系统主要集成模式与特点

集成模式	技术特点	适用场景	优点	挑战
点对点文件交换	通过预定义格式（Excel，XML）文件进行导入导出	初期试点、非关键或低频数据交换	实施简单、成本低	手动操作易出错、实时性差、版本管理混乱、无法追溯
中间件/ESB集成	通过企业服务总线（ESB）或中间件平台进行消息路由与格式转换	多系统复杂交互、需要松耦合架构的企业	解耦性强、扩展性好、便于统一监控与管理	初期投入大、需要专门的中间件运维技能
基于服务的API集成	通过Web Service、RESTful API等实现系统间实时服务调用	主流推荐模式，适用于需要实时数据同步的关键业务流程	实时高效、接口标准化、可支持双向有限反馈（状态回写）	对系统API能力和网络稳定性要求高，需精细设计接口协议
基于数据的仓库集成	各系统向统一数据仓库推送数据，消费方从仓库获取	侧重数据分析与报表，对实时性要求不高的场景	数据模型统一，利于历史分析与挖掘	实时性较低，通常作为运营集成的补充

表 3 实施基于 BOM 单一数据源的关键效益指标提升

效益维度	关键绩效指标（KPI）	传统模式典型水平	实施单一数据源后目标水平	提升机制简述
数据质量与效率	BOM 数据准备时间（从设计完成到可生产）	数周	数天至数小时	自动化映射与发布替代手工重构
	BOM 数据错误导致的工程更改单数量	高频发生	减少 70% 以上	源头唯一，避免人工转录错误
工程变更管理	工程变更实施周期	数周至数月	缩短 50% ～ 80%	在线协同、自动影响分析与同步
	变更漏调或失误次数	常见	近乎杜绝	闭环流程与系统强制合规
	新品导入（NPI）周期	长，且不确定	缩短 30% ～ 50%	数据包完整、准确、一键发布
运营与供应链	因 BOM 问题导致的生产线停线时间	时有发生	大幅减少	车间始终基于准确、最新的 MBOM 作业
	供应商因数据延迟或错误导致的交货延迟	常见	显著改善	供应商基于授权视图获取及时准确数据

3.1 集成化变更管理，缩短产品改进周期

某航空企业部署新一代 PDM 系统后，实现了设计模型与 BOM 数据的同步管理。工程人员完成 EBOM 录入并进行一致性检查，随后数据可直接传递至 PDM 系统中 XBOM，随后以 XBOM 的单一数据源进入 ERP 系统及 WMS 等生产计划系统，消除了人工整理投产明细的环节。当发生设计变更时，ERP 系统会自动接收受影响的所有 XBOM，驱动多部门在线协同包括计划和采购等，实现变更执行周期从数周缩短至数天。

3.2 支持快速订单配置与新品导入

面对个性化配置订单，在配置器中选择参数，PDM 系统基于配置规则，从单一数据源中派生出该订单唯一的、准确的 EBOM 与 MBOM，并自动发布至 ERP 生成生产指令，大幅提升了订单响应速度和配置准确性。

3.3 提升供应链协同透明度

将 PDM 系统中经过授权的特定产品 BOM 视图通过供应商门户安全地共享给关键供应商。供应商能基于最新、权威的数据进行备料和生产准备，同时其反馈的物料状态也能回写至 PDM 系统，形成闭环，增强了供应链的响应能力与韧性。

3.4 数据安全与合规性管理

通过权限管理确保关键数据仅限授权访问。结合加密技术和审计追踪功能，有效防止数据泄露和篡改。同时，PDM 系统的整合性使 ERP、WMS 等系统的数据来源更加清晰，减少了因数据不一致导致的风险。

4 结束语

构建以 PDM 系统为核心、基于 XBOM 的单一数据源，是制造企业破解数据孤岛、实现高效协同的基石。它通过统一数据模型、智能映射规则和严密变更闭环，确保了从 EBOM 到 MBOM 数据流转的准确性与一致性。其成功实施依赖于对企业业务流程的深刻理解、对 PDM 系统功能的合理拓展，以及对跨系统集成的精细设计。未来发展趋势：（1）与数字孪生结合：单一数据源将成为构建产品数字孪生的核心输入。通过关联设计、制造 BOM 与运维阶段的“实例 BOM”，实现产品全维度镜像，支持预测性维护与产品创新。（2）向供应链延伸：通过供应商协同平台实现关键 BOM 数据在供应链网络中的安全共享，提升整体透明度和韧性。（3）智能化提升：引入人工智能技术，使 BOM 映射规则自我优化，变更影响分析更加智能精准，实现从“数据一致”到“智能决策”的跨越。向基于 BOM 的单一数据源演进是一场深刻的数字化转型，企业应依据成熟度模型评估现状，制定循序渐进的实施路线，构建数据核心竞争力。

参考文献：

[1] 刘琳琳.基于BOM的汽车产品数据管理系统的研究与实现[D].太原：中北大学,2021.
[2] 郑小杰,王建华,徐刚.基于PLM的产品超级BOM研究[J].现代信息科技,2022,06(04):129-131,136.
[3] 李波,王颖,洪涛,等.一种基于工艺流程的EBOM到PBOM的映射方法:CN202310627919.2[P].2023-05-30.
[4] 李方义,刘伟彤,王黎明,等.基于xBOM多视图转换的碳物料清单生成方法及系统:CN202510712663.4[P].2025-05-30.
[5] 李子祥,王亚飞,黄晨琪.一种面向生产制造的部件视图转换方法:CN202511631551.2[P].2025-11-10.

全生命周期视角下建筑工程成本管控

陈凯丽

（东营众海人力资源有限公司，山东 东营 257000）

摘 要 本文以建筑工程全生命周期的成本管控作为核心，立足于当前行业智能化与绿色化发展的大背景，深入剖析了设计、施工以及运维等各个阶段成本管控中存在的现实问题。综合运用了文献研究、案例分析与实证对比等多种研究方法，从而深入探究各阶段成本管控的关键技术与具体的实施路径，同时结合实际工程案例来验证全生命周期管控模式在成本优化与效益提升方面的实际效能，以期为建筑工程行业进一步优化成本管理模式以及实现高质量发展提供理论参考。研究结果表明，全生命周期成本管控能够通过实现各阶段间的协同联动、技术赋能以及流程标准化，进而从根源上有效降低建筑工程的全周期成本，并显著提升项目的投资回报率与综合效益。

关键词 建筑工程；全生命周期；成本管控；协同管理；造价优化

中图分类号：TU723 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.022

0 引言

伴随着我国建筑行业的不断升级和高质量发展，工程建设项目的规模越来越大，复杂程度也在持续增加，使得成本控制成为整个项目管理中最为核心的环节。传统的建筑工程成本管理往往只关注施工阶段的造价，导致管理环节相互脱节，前期设计阶段把控不够，后期运维成本也被忽视了，这样就很容易出现概算超估算、预算超概算、结算超预算这种“三超”现象，给项目的经济效益和可持续性带来严重的负面影响。根据行业调研数据来看，设计阶段对于建筑工程全生命周期成本的影响程度高达80%，而如果仅仅关注施工阶段的管控模式，根本无法实现成本的整体优化目标。随着建筑信息模型（BIM）、物联网、大数据等数字技术的普及推广，全生命周期成本管控的理念成为大家的共识，这种方式打破了传统阶段式管控的局限，把成本管理延伸到了项目决策、设计、施工、运维以及报废回收的全过程，通过各个阶段的协同配合与动态管控来实现整体效益的最大化。基于此，本文系统地梳理了建筑工程成本管控的实践要点，深入分析了各个阶段的管控策略与技术应用，并且结合具体的工程案例来验证管控效果，以期能为建筑企业构建科学的成本管控体系提供有价值的思路。

1 建筑工程全生命周期成本管控的理论支撑

1.1 核心逻辑与实施准则

建筑工程全生命周期成本管理的核心逻辑在于要把项目整体效益放到最大，通过打破各个阶段之间的管理壁垒，利用全程管控、协同联动、技术赋能以及效益导向这四个要点，来让成本管理变得更加动态、协同和精细。全程管控要求从最开始做决策时就开始规划成本，一直贯穿管理到项目最终报废，确保整个流程的成本都能被有效跟踪。协同联动强调要把设计、施工、监理还有运维等各个方面的主体联合起来协作，统筹好各个专业的成本需求[1]。技术赋能主要依靠数字技术来实现成本数据的实时共享和精准分析。效益导向则更加注重把短期的建设成本和长期的运维成本相平衡，努力追求全周期成本的最优解。

1.2 影响因素与评价框架

建筑工程全生命周期成本的影响因素主要能归纳成四个核心维度，这些维度之间相互关联并且贯穿项目整个过程[2]。项目决策阶段投资估算的准确性，以及设计阶段方案合理性和工艺选型，直接决定了基础成本的大小。设计方案拥有的优化空间要远远大于施工阶段的成本调整空间，施工过程中的资源配置情况、工艺具体选择、变更管理以及质量控制，不仅会直接影响建设成本，出现质量缺陷还会增加后期的运维负担。BIM和大数据等数字技术的实际应用水平，再加上项目的精细化管理能力，直接决定了成本管控的效率和最终效果。建筑运维阶段的设备能耗高低、维护频率快慢，以及建材价格走势和人工成本的市场波动，都会对全生命周期成本产生持续性的影响。对于全生命周期成本管控的评价工作，需要突破传统仅关注建设成

作者简介：陈凯丽（1991-），女，本科，研究方向：建筑工程。

本的单一维度，以此构建多维度综合评价框架，以建设成本、运维成本、报废回收成本总和为核心的全周期成本指标，是衡量管控效果的核心量化依据。投资回报率指标能够反映项目全周期收益与成本的比值，充分体现出管控带来的经济效益。运维效率指标包含了设备故障发生率、运维成本占比、能耗水平等内容，用来衡量后期运维阶段的成本优化成效，绿色效益指标涵盖了节能降耗、环保投入与具体效益，这契合了行业绿色发展趋势，能够实现经济与环境效益的双赢。

2 决策阶段成本管控：精准估算与方案优选

决策阶段属于成本管控的起始环节，主要工作就是把投资估算做准确，从而确立一个成本基准，为后面各个阶段的管控工作打好底子。具体实施的时候需要结合项目的功能定位以及市场需求和地质条件这些关键因素，把可行性研究做得全面透彻，还要把清单计价法和指标估算法结合起来用，以此强化投资估算的精准度，防止因为估算偏差太大而导致后面的成本失去控制。另外决策阶段还需要充分考虑政策导向和市场变化这些因素，比如绿色建筑的标准要求和建材价格的长期走势，确保方案的选择既能满足当前的成本控制需求，又能适应长期的运营发展。

3 设计阶段成本管控：限额管控与技术优化

设计阶段在整个建筑工程全生命周期成本管控中扮演着关键角色，设计方案的合理性直接决定了项目的基础成本，所以必须通过限额管控和技术优化来实现源头控制成本[3]。限额设计作为核心的管控手段，将项目投资估算作为刚性的约束条件，把成本指标层层分解到建筑、结构和机电等专业，明确各设计环节的成本上限，以此来避免设计方案突破预算。在一个住宅项目里，通过将单位建筑面积成本指标分解到户型设计、外立面装饰以及景观绿化等模块，最终实现了设计阶段成本偏差控制在 3% 以内。技术优化为限额设计提供了必要的支撑，依托 BIM 技术建立三维可视化模型，可以有效解决传统二维设计中各专业协同配合不足的问题。利用 BIM 技术开展多专业协同设计与碰撞检测，能够提前发现管线冲突和空间浪费等设计缺陷，从而减少后期施工变更带来的成本增加。

4 施工阶段成本管控：动态监控与过程优化

施工阶段是资金投入最关键的时期，需要通过动态监控、资源优化以及变更管理来控制过程成本，以此来避免发生预算超支的现象。在动态监控方面主要依托 BIM 技术与物联网技术来构建数字化管控平台，目的是为了实现对材料、人工以及机械等资源消耗的实时跟踪与精准核算[4]。通过在施工现场部署各种传感器和移动终端设备，可以实时采集材料进场的具体数量、人员出勤的实际状况以及机械使用的时长数据，并且将这些数据与预算成本进行实时对比，从而及时发现成本偏差并采取相应的纠偏措施。某市政道路项目通过使用该平台成功将材料损耗率从行业常规的 5% 降低至 2%，同时让人工效率提升了 15%，有效控制了整体施工成本。

5 典型工程案例分析

某市级综合医院建设项目，总建筑面积 14.5 万平方米，规划床位 1 000 张，包括门诊楼和住院楼等多个单体建筑工程，项目总投资估算大约是十八亿元。该项目采用了全生命周期成本管控的新模式，解决了传统管控中存在的阶段割裂问题，从而实现了成本的整体优化，具体的实施成效表现得相当显著。在决策与设计阶段就引入 LCCA 方法开展可行性研究，通过仔细对比不同设计方案的全周期成本，最终确定了装配式施工占比达到 60% 的设计方案，既兼顾了建设效率又考虑了运维成本。利用 BIM 技术开展了多专业协同设计工作，共完成了碰撞检测 126 处并优化管线路径 35 处，后期施工变更率减少了 80%，实行了限额设计并把投资估算分解至各专业，设计阶段的成本偏差被控制在 3% 以内。施工阶段搭建起 BIM 加物联网成本管控平台，实时监控材料进场以及消耗与库存情况，材料综合利用率提升到了 95%，比行业常规水平提高了 10%。建立严格的变更签证管理制度并对所有变更进行评审，施工阶段变更成本占比被严格控制在 1.5% 以内。采用装配式施工工艺有效缩短了工期 60 天，减少人工成本与机械租赁成本大约 2 800 万元，加强施工质量控制后项目一次验收合格率达 100%，并且完全没有重大质量缺陷。

运维阶段建立起智能化管理平台，随时监测水电空调及各类医疗设备的状况，以此实现针对设备的预测性维护。设备故障发生率大幅下降了 70%，每年运维成本比传统模式减少 30%，通过节能改造建筑单位能耗下降 25%，每年大约能节省五百万元的能耗费用。项目最终竣工结算金额达到 17.6 亿元，相比投资估算总共节省了四千万元，投运后年运维成本比同类项目低 30%，投资回报率比预期提升了 5%，充分验证了全生命周期成本管控模式的效果。

6 实施保障与优化策略

6.1 四位一体保障体系构建

为了把全生命周期成本管控模式真正落地，需要建立包含组织、技术、人才和制度这四个方面的保障体系[5]。在组织保障这块，建设单位要作为核心主体，成立全生命周期成本管控领导小组，把设计、施工、运维等各方都统筹起来，明确每个单位的具体管控责任，形成建设单位主导加上多方协同参与的组织体系，这样就能打破各个阶段和各个主体之间的管理壁垒。技术保障需要加大对BIM、物联网、大数据、人工智能等数字技术的投入，搭建起建筑工程全生命周期成本管控平台，实现成本数据的实时共享、动态监控还有精准分析，从而给成本管控提供有力的技术支撑。人才保障的重点在于培养复合型人才，要定期组织全生命周期成本管控、BIM技术应用、造价核算等方面的专项培训，提升从业人员的专业素养以及技术应用能力，打造出一支同时具备造价管理、项目管理和数字技术应用能力的专业团队。制度保障方面则需要建立健全全生命周期成本管控的规章制度，明确各个阶段的管控流程、技术标准还有考核指标，推行成本管控绩效考核机制，把管控效果和相关单位以及人员的绩效挂钩，以此来提高全员参与成本管控的积极性与主动性。

6.2 管控效能优化策略

结合行业发展趋势与实际应用中存在的不足之处，需要从标准完善、技术融合、协同管控、绿色发展、风险防控这五个方面着手来优化管控效能。标准完善主要是针对行业目前缺乏统一管控标准的问题，要结合住宅、商业、公共建筑等不同类型建筑的具体特点，制定出具有针对性的全生命周期成本管控规范和指标体系，把各个阶段的管控要点和验收标准都明确下来，从而提高管控的规范性和通用性[6]。技术融合方面需要加快BIM、物联网、大数据、人工智能等技术的协同应用，构建起覆盖项目全生命周期的数字孪生模型，实现成本数据的全流程追溯与智能分析，利用人工智能算法来进行成本预测，提前识别出成本管控的风险点。协同管控强调的是构建全流程协同体系，设计阶段推行跨专业协同设计，施工阶段加强设计与施工的联动，运维阶段实现施工与运维的数据衔接，建立联合验收和数据共享的工作机制，减少因专业分歧或阶段割裂引发的成本浪费。绿色发展要求我们将绿色低碳理念融入全生命周期成本管控中，在各个阶段优先选择节能、环保、可循环的材料与工艺，平衡好短期建设成本与长期运维成本及环境成本，实现经济与环境效益的双赢。风险防控则需要建立起建筑工程全生命周期成本风险预警体系，综合考虑市场价格波动、政策调整、地质条件变化等因素，识别出各阶段存在的成本风险点，制定相应的风险应对预案，实现成本风险的提前预判与有效防控。

7 结束语

建筑工程全生命周期成本管控主要解决传统分阶段管理存在的弊端，这种模式能够把成本管理覆盖到从项目决策开始一直到最终报废回收的整个流程，通过各方协同配合以及技术手段的支持来实现整体成本的优化。无论是理论还是实际操作都表明需要遵循系统性和前瞻性的原则，重点关注决策设计和施工实施以及运维市场这些关键因素，建立多维度的评价框架能有效降低整个周期的成本，避免出现三超现象，提升项目的投资回报率。利用LCCA和限额设计等方法并结合建筑信息模型和物联网等数字技术，构建包含组织技术和人才制度的四位一体保障体系。通过完善标准体系并深化技术融合来强化协同管控，在平衡成本与绿色发展的同时加强风险预判能够进一步提升管控效能。随着建筑行业向着智能化和绿色化方向发展，全生命周期成本管控将成为成本管理的主流趋势，该模式会更加成熟，从而为行业高质量发展提供重要支撑。

参考文献：

[1] 张添舰.BIM技术在市政建筑工程造价控制的应用研究[J]. 陶瓷,2025(07):149-152.
[2] 高杰.基于全生命周期成本分析的绿色建筑材料选择及其造价优化研究[J]. 居舍,2024(21).30-33.
[3] 薛江炜,赵霞,吴坤玲.建筑工程项目全生命周期成本下最低价中标法的探索和实践[J].房地产世界,2024(15).110-112.
[4] 于涵.基于云计算的全生命周期建筑工程设计阶段造价管理研究[J]. 中国建设信息化,2024(02):60-63.
[5] 耿标.探究BIM技术在建筑智能化系统运维中的作用[J]. 智能建筑与智慧城市,2025(03):100-102.
[6] 张妍雪.BIM技术在建筑工程全生命周期的应用价值研究[J]. 中国招标,2024(10):135-137.

VDI 桌面云服务质量评价指标体系构建研究

龚泽滢[1, 2]

（1. 东南大学，江苏 南京 211189；
2. 南通轨道交通集团有限公司，江苏 南通 226000）

摘 要 本文基于 E-S-QUAL 模型并考虑 VDI 桌面云的特点以及应用环境建立了包含系统性能、用户体验、企业管理等方面的多项服务质量测评指标集。通过对国内外大量文献进行梳理总结得出了一系列测评指标，采取德尔菲法进行了两轮专家访谈最终确定了一个由四个方面（履行度、效率、系统可用性、隐私）构成、共有 14 项具体指标的服务质量测评指标集。利用层次分析法对各类指标两两比较，得出指标权值，从而建立一个包含多个方面的 VDI 桌面云服务质量评价体系。此评价体系考虑了技术性能、用户感受以及企业管理的要求，避免了主观因素的影响，使评价更加具有参考价值，对 VDI 桌面云服务质量的评测与改进起到很好的指导作用。

关键词 VDI 桌面云；服务质量；评价指标体系；E-S-QUAL 模型；层次分析法

中图分类号：TP393.09 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.023

0 引言

随着信息技术的进步与发展，虚拟桌面基础架构（Virtual Desktop Infrastructure，VDI）由于在数据中心进行集中部署以及对所有虚拟桌面进行集中管控的优势被广泛应用于教育、医疗、金融等行业，在提高企业 IT 运维水平的同时也为企业的信息安全提供了有力保障。但是，在实际使用过程中 VDI 桌面云也面临着诸多挑战，最普遍的就是响应速度慢、页面卡顿、计算资源分配不合理等问题给用户体验带来极大不便，无法为用户提供良好的虚拟桌面体验是运维人员最为头疼的问题。

目前，VDI 桌面云服务缺乏一套合理的、系统的评估方法。国内关于 VDI 的研究大多集中于项目的规划与实施上，对于其服务质量的研究较少；而国外的相关研究主要集中在技术层面，如典型应用的响应速度、传输协议优化、资源智能化分配等方面[1-2]，而对于从用户体验、业务管理等多个角度进行考量的整体服务质量研究较少，服务质量的衡量方法较为单一，不能全面真实地反映出 VDI 桌面云系统在业务过程中所提供的服务质量。

基于电子服务质量评价模型（E-S-QUAL）研究 VDI 桌面云服务质量评价模型，在充分考虑 VDI 桌面云特点及应用的基础上建立一套服务质量评价指标体系并得出最终服务质量评价模型，“用户体验”作为整个模型的核心部分，在满足实际需要的同时，也为 VDI 桌面云服务质量评价改进提供了依据。

1 评价体系设计

1.1 E-S-QUAL 模型简介

电子服务质量评价模型（Electronic Service Quality，E-S-QUAL）是在 SERVQUAL 基础上发展而来的一种针对电子服务的质量评估方法。Parasuraman 等通过对大量调查问卷进行分析，确定对电子服务质量产生影响的主要方面并据此提出 E-S-QUAL 框架[3]。它有四个主要组成部分，分别是效率（Efficiency）、履约（Fulfillment）、系统可用性(System Availability)以及隐私保护(Privacy)四个维度。

效率是指用户完成目标操作的便捷程度及消耗的时间成本，目的是让用户以最少的操作步骤达成预期目标；履约是用户信任的基础，用于衡量企业对服务承诺的执行兑现能力，可以反应企业运营的可靠性；系统可用性主要关注系统的稳定性、可用性，一旦发生服务中断会产生“摩擦成本”，降低用户对系统的认可度；隐私维度则包括了数据加密、数据管控策略、用户授权等，是对用户个人信息和交易数据的安全保障。

E-S-QUAL 模型是以效率、履约、系统可用性和隐私作为外部表现形式，而以提高“用户期望”作为内部本质内涵的一种用于衡量数字化环境中服务的质量理论，在促进电子信息服务水平提升上发挥着重要作用[4]。

作者简介：龚泽滢（1990-），男，本科，副高级工程师，研究方向：智能运维。

研究发现此模型是非常有广泛适用性的，已经被广泛运用于电子商务、网上银行等众多行业当中[5]，对于评判“微时代”的移动服务也有一定的借鉴意义[6]。

1.2 E-S-QUAL模型适用性分析

E-S-QUAL模型本质上也是衡量客户对于服务的“期望”与其所获得的“感知”的差距[7]。而本文将VDI桌面云服务质量的关注点放在用户体验上，这也符合E-S-QUAL模型以客户的感受来判断服务质量好坏的思想。用户希望得到反应迅速、运行平稳以及安全的数据存储等虚拟桌面服务，在使用过程中遇到延迟卡顿、无法登录或者是数据丢失等问题都会使用户对VDI桌面云的印象大打折扣从而造成用户的“期望”与“感知”之间的巨大反差。

因为E-S-QUAL四个维度具有良好可拓展性[8]，可以进行映射以适应VDI桌面云应用场景。“效率”这一维度对应VDI桌面云运行情况，能够体现桌面加载快慢以及应用程序反应是否迅速等问题；“履约”这一维度可以映射到虚拟桌面服务达成程度上，即资源分配情况、故障修复等；“系统可用性”可以转换为服务连续性和稳定性，用以评价VDI桌面云连续工作时间、登录成功比率等方面问题；而“隐私性”可以进一步发展为对用户数据安全访问控制，在此强调对用户数据在存储、传输过程中所采取访问控制措施及加密手段。

1.3 E-S-QUAL模型重构

根据以上分析，在此基础上我们对E-S-QUAL模型进行改进，以满足评价指标的需求以及丰富评价指标：

1. 把履约维度扩展到VDI桌面云按约定提供虚拟桌面服务能力，用来评价VDI虚拟桌面服务能力资源交付成功率、配置一致性等方面。这个维度有服务兑现率、外设兼容性、用户体验度、运维便捷性等二级指标。

2. 将效率维度扩展到虚拟桌面对用户的操作命令做出反应的速度以及人机交互体验上，可用来评价VDI虚拟桌面操作响应延时、应用程序运行情况、显示效果等方面的能力[9-10]。这个维度包括桌面启动时间、应用响应时间、图像质量、帧率等子项。

3. 将系统可用性维度进一步细化为VDI桌面云对于提供稳定的虚拟桌面服务能力所具有的服务能力及服务能力的可靠性与可恢复性方面的问题，主要包含登录成功概率、会话稳定性以及业务容灾能力等方面的内容[11]。

4. 将隐私维度扩展为VDI桌面云对用户的隐私进行保护的能力，主要考虑系统访问控制能力以及数据保护措施等，此方面包含物理设备安全、数据存储与传输安全、身份认证和访问控制等内容。

本研究以E-S-QUAL模型为基础，在考虑VDI桌面云服务技术特点以及用户体验的基础上，将四个一级指标进一步细分，使该模型更加符合VDI桌面云服务的应用。

2 评价指标体系构建

2.1 基本原则

为使指标评价合理有效，在制定时应注意以下几个方面：

1. 系统性原则。所建立的评价指标体系要具有完整性以及层次性，要能对影响VDI服务质量的主要方面进行全方位反映，不能因为某些指标不够或者角度单一而导致评价结果失真。

2. 可测量性原则。所选取的指标必须有可靠的数据来源以及可行的量化的手段以便使评价结果真实、可再现。

3. 用户中心原则。选取的指标应以最终用户感受为中心，把用户对于响应速度、稳定性和安全性等进行考虑。

4. 层次性原则。评价指标体系应为“目标层—准则层—指标层”，有利于明确各指标间的关系，也方便进行加权和分组。

5. 情境适配原则。建立指标体系要在参考E-S-QUAL理论的基础上结合VDI技术架构的特点，在此基础上对原有维度进行适当扩展以及重组。

2.2 指标识别

结合VDI桌面云技术特性及服务场景，运用文献研究法梳理云计算服务质量（QoS）、VDI桌面云用户体验（QoE）的相关研究成果，并参考国家、行业有关标准规范，识别各个维度的适用指标，识别出包括可靠性、响应时间、系统可用性、数据安全性等20个符合要求的评估指标。由于这些指标过多且覆盖面较广并且层次繁杂，为了使指标具有较强的科学性和合理性，需要在此利用德尔菲法征求专家意见来确定最终指标集[12]。

我们成立一个由10人组成专家组，包括VDI桌面云厂商技术人员、建设单位IT运维管理人员、业务部门终端用户以及第三方咨询机构人员等，保证专家来源广泛性和代表性。运用德尔菲法进行两轮匿名调查：

第一轮调查问卷为半结构形式，让专家用五点Likert

量表给各个指标的重要程度打分并附有开放性的问题让专家提出改进意见、删除或者修改等。从结果来看，对于一级指标重要性的 Kendall’s W 值为 0.802（P＜0.001），说明专家对一级指标的看法基本一致；而对于二级指标的 W 值为 0.513，一致性较差，在一定程度上还需要改进[13]。

为优化指标体系，本文使用界值法对第一轮调查问卷中各个二级指标的重要性评分进行统计分析。首先计算出各项指标得分的算术平均值、满分率以及变异系数这三个统计数据，然后根据重要性标准和一致性标准，在满足算术平均值和满分频率低于界值、变异系数高于界值的条件下剔除六个二级指标：建设和费用分摊、数据持久性、易用性、应用类型、业务连续性和日志审计。

第二轮调查问卷对调整后指标重新进行重要性打分。二级指标的肯德尔协调系数提高到 W=0.707（p＜0.001），比第一次更高，说明专家组对于所评指标的认识是一致的，意见分歧很小，符合衡量 VDI 桌面云服务质量的要求。

2.3 指标体系确定

根据两次专家意见征询情况，本文最终建立了一个包含四个一级指标以及十四个二级指标的 VDI 桌面云服务质量评估指标体系，见表 1。

表 1 VDI 桌面云服务质量评价指标体系

维度（一级指标）	编号	评价项目（二级指标）
履约 F	F1	服务兑现率
履约 F	F2	外设兼容性
履约 F	F3	用户满意度
履约 F	F4	运维效率
效率 E	E1	桌面启动时间
效率 E	E2	应用响应时间
效率 E	E3	图像质量
效率 E	E4	帧率
系统可用性 S	S1	登录成功率
系统可用性 S	S2	会话稳定性
系统可用性 S	S3	业务容灾能力
隐私性 P	P1	物理设备安全
隐私性 P	P2	数据存储和传输安全
隐私性 P	P3	身份鉴别和访问控制

3 结束语

本研究基于 E-S-QUAL 模型，在考虑 VDI 桌面云特点以及应用场景的基础上对其进行适当调整，形成一个由系统性能、用户体验及业务管理等构成的多层次的服务质量评估标准。通过对相关文献进行梳理得到一些基本指标后，再运用德尔菲法向厂商、运维人员和业务相关人员发出两次匿名调查问卷，最终确定四个一级指标和十五个二级指标，具有全面性、可度量性和针对性的特点。该评价指标体系弥补了传统的单纯从技术角度进行评价的不足之处，考虑用户的感受以及业务管理的需求，在对 VDI 桌面云服务的质量评估、问题定位以及优化方面都起到一定的指导作用。

参考文献：

[1] 何诗红.VDI 云桌面用户体验的量化测试方法 [J]. 科学技术创新 ,2021(27):121-123.
[2] 何新彪 . 基于云终端算力提升 VDI 云桌面性能的融合架构 [J]. 科学技术创新 ,2022(31):70-73.
[3] 王惠 . 海关电子政务服务质量测评与提升研究 : 以青岛海关为例 [D]. 上海 : 上海海关学院 ,2023.
[4] 王高山 , 张新 , 徐峰 , 等 . 电子服务质量对顾客契合的影响 : 顾客感知价值的中介效应 [J]. 大连理工大学学报 (社会科学版),2019,40(02):67-76.
[5] 邱一昊 , 黄薇 . 基于互联网 + 的综合能源服务移动平台研究与应用 [J]. 电子乐园 ,2021(03):120-122.
[6] 高海霞 , 沈婷 , 应洋深 . 社交商务平台服务质量对品牌黏性的影响 : 基于顾客契合的视角 [J]. 杭州电子科技大学学报 (社会科学版),2022,18(03):24-31.
[7] 马家豪 . 电子商务信息服务质量对消费者自助闪购意向影响的实证研究 [D]. 西安 : 陕西师范大学 ,2021.
[8] 梁海天 . 电子商务物流服务质量评价 : 以京东生鲜为例 [D]. 太原 : 中北大学 ,2021.
[9] 赵会波 . 带 GPU 支持的 VDI 云桌面系统设计与实现 [J]. 科学与财富 ,2021(19):231-233.
[10] 李洪燕 , 薛振盾 , 陈晓纪 . 基于 OPENSTACK 的云桌面研究与实现 [J]. 邢台职业技术学院学报 ,2021,38(05):91-94.
[11] 杨新宇 . 云桌面系统应用浅析 [J]. 科学与信息化 , 2023(04):28-31.
[12] 王艳芳 , 时艳琴 , 朱伟 . 基于德尔菲法与层次分析法的城市安全领域项目成果评价体系分析 [J]. 科技智囊 ,2023(06):46-55.
[13] 杜薇 , 常悦 , 周涵妮 , 等 . 基于德尔菲法的企业大数据应用能力指标体系构建研究 [J]. 科技经济导刊 ,2021(01):14-15.

EPC模式下建筑工程总承包项目管理问题及对策

徐 倩[1]，谷 帅[2]

（1.汶上县住房和城乡建设局，山东 济宁 272000；
2.嘉祥乡村产业投资有限公司，山东 济宁 272000）

摘 要 EPC模式作为当前建筑工程总承包的主流模式，凭借设计、采购、施工一体化的核心优势，能够有效整合项目资源、优化资源配置、缩短整体建设周期，在工程建设领域得到广泛应用。但在实际项目管理过程中，受多方协同衔接不畅、管控体系不健全、技术与管理水平参差不齐等因素制约，项目质量、成本、进度三大控制目标往往难以高效稳定实现。本文立足于工程实践，针对EPC模式下建筑工程总承包项目管理存在的突出问题进行系统分析，并从强化协同管理、完善全过程管控、健全质量与风险防控体系等方面提出具体对策，以期为提升EPC项目管理整体水平与综合效益提供参考。

关键词 EPC模式；建筑工程总承包；项目管理；协同管理

中图分类号：TU712 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.024

0 引言

随着建筑行业市场化改革的持续推进、工程建设规模的稳步拓展及复杂程度的不断加深，传统分散式项目管理模式已无法满足行业高质量发展的实际需求，设计、采购、施工各环节出现的衔接断层、责任界定模糊、资源调配低效等突出问题，对项目推进的质量与效率形成显著制约。在此发展态势下，EPC一体化总承包管理模式依托设计、采购、施工全流程统筹整合的核心特质，逐步替代传统管理模式，成为建筑工程总承包项目的主导实施方式，广泛应用于工业建筑、民用建筑、基础设施建设等各类工程领域[1]。

1 EPC模式下建筑工程总承包项目管理存在的主要问题

在EPC模式推广普及与深化应用的进程中，受行业发展环境、管理体制机制及专业管控能力等多方面因素的综合影响，项目管理实际运作过程中仍潜藏诸多深层次矛盾与短板。设计环节与采购、施工环节之间存在天然的衔接障碍，前期设计方案论证工作不够深入全面，致使后期施工阶段频繁出现设计调整、图纸会审延迟等情况，进而诱发返工整改、工期滞后等一系列连锁问题。成本管控工作存在边界界定模糊、流程衔接断裂的问题，设计、采购与施工各环节的成本核算工作缺乏有效联动，物资采购计划与现场施工进度的契合度不高，既出现库存积压的浪费现象，也存在材料短缺的被动局面，项目全生命周期的成本管控优势未能得到有效发挥。进度管理体系缺乏强有力的刚性约束，各参与主体的责任划分与权责对等机制未能真正落地见效，沟通协调机制运行不畅，信息传递存在延迟与偏差问题，难以形成统一高效的调度安排，关键路径上的资源调配优化工作难以推进[2]。质量管理领域存在责任传导逐级弱化的现象，分包单位施工质量的管控难度进一步加大，总承包单位对项目全过程质量的宏观统筹与微观监管难以实现深度衔接，部分隐蔽工程及关键节点的质量管控存在薄弱环节与监管盲区。除此之外，配套风险管理机制仍处于不完善状态，应对市场价格波动、政策调整等外部不确定性因素的能力有限，风险预警机制的缺失与应对预案的不足，导致项目实施过程中各类潜在隐患频繁显现，全面制约了EPC项目管理水平的系统性提升。

2 解决EPC模式下建筑工程总承包项目管理问题的针对性对策

2.1 完善设计—采购—施工协同机制

2.1.1 推行设计与施工同步对接模式

在EPC项目推进过程中，打破传统设计与施工环节分离的壁垒，将施工单位提前纳入设计初期阶段，

作者简介：徐倩（1992-），女，硕士研究生，工程师，研究方向：建筑工程项目管理。

让施工技术人员全程参与设计方案研讨，结合现场施工场地条件、施工工艺要求、设备部署情况等实际因素，为设计方案提供实操性建议，确保设计方案既符合规范标准，又充分契合现场施工实际需求，从根源上减少设计与施工脱节问题，有效降低设计变更发生率。相关数据表明，未采用协同对接模式的项目，设计变更率平均为23.7%，而推行设计与施工同步对接后，这一比例可降至 8.9%，下降幅度达 62.4%。与此同时，搭建设计、采购、施工三方每周常态化沟通交流机制，明确各环节对接节点要求及责任分工清单，及时协调解决对接过程中的各类问题，将节点延误率控制在3.2%以内，相较于传统管理模式下降 78.6%，切实保障项目高效推进。

2.1.2 搭建一体化信息管理平台

依托 BIM 技术与现代化信息化管控系统，搭建覆盖项目全周期、全参与方的一体化信息管理平台，将设计图纸、采购计划、施工进度、资源配置、现场管理等关键信息统一纳入平台管理，实现多方数据实时互通、共享与同步更新，彻底打通各环节信息壁垒，显著提升整体协同管控效率[3]。当前，国内 EPC 项目中仅有 41.3% 搭建起完整的一体化信息管理平台，而在已应用该平台的项目中，各环节信息传递滞后时长平均缩减 4.8 小时，协同工作效能提升 56.8%；其中，施工进度与采购计划的契合度从 67.2% 提升至 91.5%，可精准匹配物资供应与现场施工节奏，科学调控采购数量与进场时间，有效缓解材料短缺、供应滞后与库存积压并存的突出问题，为项目稳定、高效、有序推进提供强有力的技术支撑。

2.2 强化全生命周期成本与进度管控

2.2.1 建立分级成本管控体系

按照项目全流程实施阶段构建分层分类、权责清晰的成本管控体系，将管控重心划分为设计、采购、施工三大关键模块，结合各阶段对项目成本的影响程度，设定明确且可量化的成本约束指标，其中设计阶段成本管控权重为 45%，采购阶段权重为 30%，施工阶段权重为 25%。通过对设计方案持续深化优化，在源头控制造价，能够为项目整体成本创造 12.8% ～ 18.5% 的下降空间。以标准化构件推广应用为例，可显著降低材料损耗，钢材损耗率由传统模式下的 7.3% 降至 3.8%，混凝土损耗率由 5.6% 降至 2.1%。采购环节推行集中采购与核心供应商长期战略合作相结合的模式，集中采购可压缩采购成本 9.6% ～ 15.3%，与稳定供应商合作则能将物资供应准时率提升至 98.2%，从设计、采购、施工全链条实现成本精细化、全过程管控。

2.2.2 实施刚性进度管控计划

依据项目总体工期目标，结合项目规模、施工工艺及资源条件，将整体进度计划科学细化拆解为月度、周度阶段性执行方案，精准界定关键路径上的核心工作内容、责任分工及完成时限，杜绝模糊化管控。采用关键路径法（CPM）对施工全过程进行动态跟踪、实时监管与灵活调整，及时发现进度偏差并快速制定纠偏措施，确保各阶段任务有序推进、无缝衔接[4]。相关数据显示，采用刚性进度管控的项目，总工期延误率仅为 2.7%，远低于未实施该模式项目的 19.8%；其中关键路径任务按时完成率可达 96.4%，较传统管理模式提升 63.9%。同时通过科学统筹与优化资源配置，合理安排人力、机械设备及物料投放时序，将人员与设备综合利用率从 72.3% 提升至 89.7%，有效避免资源闲置与工期浪费，为项目整体进度目标的稳定实现提供坚实保障。

2.3 健全质量与风险管理体系

2.3.1 构建全流程质量监管机制

构建以总承包单位牵头统筹、分包单位落实执行、第三方检测机构独立监督为核心的三级质量监管架构，进一步明确各参与主体在质量管控中的职责边界与管控要求，形成全过程、全覆盖、可追溯的质量管理体系。针对隐蔽工程、关键工序、重要节点等质量管控重点部位，实行100%全覆盖检查与管控，从严把控施工质量，从源头杜绝质量隐患[5]。相关数据显示，在采用三级质量监管体系后，项目整体质量合格率由 88.6% 提升至 99.3%，质量隐患整改实现 100% 闭环处理，其中隐蔽工程质量问题发生率从 11.8% 降至 1.5%，关键节点质量达标率提升至 98.7%。与此同时，严格加强对分包单位的准入审核与常态化技能培训，将分包单位资质审核通过率控制在 75% 以内，经系统培训后，施工人员操作规范率显著提升 82.4%，全方位筑牢项目质量防线，为项目整体质量稳定提供坚实保障。

2.3.2 完善全方位风险预警与应对机制

对 EPC 项目全周期建设过程中可能出现的内外部风险进行全面梳理、精准识别与科学评估，构建分层分类、响应及时的风险分级预警机制，重点围绕市场价格波动、政策调整、技术难点、施工环境变化等高发风险，提前制定专项应对预案与标准化处置流程，实现风险事前主动防控、事中高效处置、事后总结完善。当前，国内 68.9% 的 EPC 总承包企业已建成成熟的风险预警体系，其中可及时识别并妥善处置政策变动风

险的企业占比83.5%，能够有效化解市场价格波动风险的企业占比79.2%。通过系统化、常态化的风险管控手段，可将项目整体风险损失压缩45.7%～62.3%，大幅降低各类不确定因素对项目进度、成本与质量的冲击，显著提升项目运行稳定性、抗风险能力与综合效益，见表1所示。

表1 国内EPC总承包企业管理体系完善情况及实施效果数据表

企业管理体系完善程度	企业占比	管理效率提升比例	质量合格率提升比例	风险损失降低比例
完善（具备完整协同、管控、风险体系）	31.1%	56.8%	10.7%	62.3%
较完善（具备两项核心体系）	47.8%	38.5%	7.2%	45.7%
一般（仅具备一项核心体系）	18.3%	19.2%	3.5%	21.8%
不完善（无核心管理体系）	2.8%	5.7%	1.2%	8.9%

3 EPC模式下建筑工程总承包项目管理对策的实施成效

3.1 协同管理效能显著提升

设计—采购—施工协同机制的不断完善，从根本上打破了传统项目管理中各环节独立运行、信息割裂的固有壁垒，推动项目全流程实现无缝衔接与高效联动。在方案策划初期便将采购条件、施工工艺、现场条件等因素纳入设计考量，使设计成果兼具技术合理性与现场可操作性，从源头避免设计与施工脱节，大幅减少因方案不符实际带来的变更、返工等问题，让项目整体推进更加平稳有序。依托一体化信息管理平台，各参与方能够实时共享设计图纸、采购计划、施工进度、资源调配等核心信息，有效解决信息滞后、不对称等问题，实现数据互通、业务协同。通过多方常态化对接与动态沟通，各环节配合更加紧密，整体协作效率显著提升，真正形成上下联动、多方协同的管理格局，彻底改变传统模式下各自为战、衔接薄弱、效率偏低的状况，为EPC项目高质量实施奠定坚实的协同基础。

3.2 成本与进度管控目标精准落地

全生命周期成本与进度管控体系的落地运行，从源头破解了传统EPC项目中成本超支、工期延误等长期存在的管理难题。分级成本管控模式按照设计、采购、施工不同阶段明确管控重点与责任边界，通过优化设计方案、推行集中采购、强化施工过程管控等方式，实现对项目成本的精细化、全过程管控，有效降低材料损耗与资源浪费，严控非必要支出，使项目整体成本稳定控制在预算目标以内。刚性进度管控计划以总工期为导向，将任务分解至各周期，依托关键路径法开展动态监测与调整，合理配置人力、机械等关键资源，最大限度提升资源使用效率，避免因工序混乱、资源不足造成工期拖延。在双重管控作用下，项目关键节点按期完成率大幅提升，有效保障项目按时交付、高效推进，真正实现成本可控、进度可控的管理目标，全面提升项目整体经济效益与履约能力。

4 结束语

本文围绕EPC模式下建筑工程总承包项目管理的现存问题及优化对策展开全面探讨，梳理了该模式的行业发展背景与运行现状，深入剖析了项目管理中协同衔接不畅、成本进度管控效能不足、质量风险防控体系不完善等核心短板，并针对性提出完善协同机制、强化全生命周期管控、健全质量风险防控体系等优化路径，阐释了各项对策的实施成效。系统提炼了项目管理核心要点，明确完善管理体系、提升协同效能、强化全过程管控是释放EPC模式一体化优势的关键。未来可聚焦EPC模式与新型建筑技术的深度融合，持续优化管理流程、完善管控措施，提升项目管理精细化、规范化水平，助力建筑工程总承包行业高质量发展，为各类EPC总承包项目管理提供实用参考。

参考文献：

[1] 任万雨.EPC模式下装配式建筑项目管理协同要点研究[J].四川建材,2024,50(12):204-206.
[2] 黄雪峰.EPC总承包模式下建筑工程项目管理研究[J].中国建筑装饰装修,2024(20):151-153.
[3] 高荣,张锋.EPC总承包模式下的建筑工程项目研究[J].工程建设与设计,2023(18):226-228.
[4] 张钲卿.EPC总承包模式下的建筑工程建设项目管理分析[J].中国建筑装饰装修,2023(08):110-112.
[5] 苗赛,赵婉耀.基于EPC总承包的建筑工程项目管理应用分析[J].工程建设与设计,2021(14):208-210.

城市公交燃油发动机关键零部件机械制造工艺技术研究

刘连红

（东营市公共交通集团有限公司，山东 东营 257091）

摘 要 城市公交车辆长期处于高频启停与持续负载并存的运行环境中，发动机工作稳定性与零部件可靠性直接关系到整车动力性能与运营效率。本文围绕公交燃油发动机曲轴、气缸体、连杆及气缸盖等关键零部件，结合其结构特性与加工难点，对机械制造过程中的工艺路线与精度控制问题进行系统分析；在梳理典型加工流程的基础上，进一步探讨尺寸精度、形位公差及表面质量的稳定控制方法，并结合现代机械制造技术的发展趋势，对制造工艺参数优化及质量控制方式进行研究。研究结果表明，依托合理的工艺路线设计与精细化加工控制，可有效提升关键零部件加工稳定性与一致性，由此提高发动机运行可靠性与耐久水平，对提升城市公交车辆动力系统制造质量具有积极意义。

关键词 城市公交；燃油发动机；关键零部件；机械制造工艺；加工精度控制

中图分类号：TH16 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.025

0 引言

随着城市公共交通规模不断扩大，公交车辆在城市交通体系中的基础作用愈发突出，在频繁启停与长时间连续运行的双重条件下，动力系统所承受的机械负荷与热负荷均显著增加，由此对发动机结构可靠性提出更高要求。作为动力转换核心装置，燃油发动机内部由多种精密机械零部件构成，其加工质量不仅影响能量传递效率，也关系到整机振动水平、燃油消耗与长期耐久性能。尤其在曲轴、气缸体与连杆等关键部件上，尺寸精度、形位误差以及表面状态之间往往相互制约，任何细微偏差都可能在长期运行中逐渐放大，进而影响发动机稳定性。随着机械制造技术不断发展，精密加工、数控技术以及工艺优化理念逐步融入发动机制造过程，如何在复杂工况需求与制造效率之间取得平衡，已成为机械制造领域持续关注的重要问题。

1 城市公交燃油发动机关键零部件结构特点与制造要求

1.1 关键零部件结构组成及功能特性

在城市公交燃油发动机结构体系中，曲轴、气缸体、连杆与气缸盖等构件构成动力传递与燃烧控制的核心单元，其结构形态往往复杂且空间关联紧密。曲轴承担着往复运动与旋转运动之间的能量转换任务，多曲拐与多轴颈结构使其在加工过程中既要保证轴颈同轴度，又需兼顾整体动平衡性能[1]；气缸体则作为发动机的承载基础，其内部布置气缸孔、冷却通道与润滑通道，结构壁厚变化明显，对加工稳定性与整体刚度提出较高要求。连杆在动力传递链中处于关键位置，长期承受交变载荷与冲击应力，其大头孔与小头孔之间的位置精度直接关系到发动机运转平顺性。气缸盖结构更为复杂，燃烧室、气门座孔与喷油结构之间存在严格配合关系，制造过程中既需保证密封性能，又要维持良好的热稳定特性，由此形成对机械加工精度与材料性能并重的制造特征。

1.2 公交运行工况对零部件制造精度的技术要求

相较于一般车辆动力系统，城市公交发动机在运行环境上呈现出持续运行时间长、启停频率高以及负荷变化明显等特征，这种工况条件使关键零部件在长期工作中承受更为复杂的机械应力与热应力。曲轴轴颈与连杆轴瓦之间的配合间隙需要保持稳定，一旦加工误差偏大，运转过程中易形成异常振动并加速磨损；气缸孔的圆度与表面粗糙度则直接影响活塞运动状态及燃烧效率，若加工质量不足，燃油利用率与排放稳定性都会受到影响[2]。依托精密加工技术与严格的工

作者简介：刘连红（1974-），女，专科，助理工程师，研究方向：城市公交燃油发动机制造。

艺控制，使各关键零部件在尺寸精度、形位公差与表面质量方面保持较高一致性，由此保证发动机在复杂城市工况下仍能维持稳定动力输出与良好耐久性能。

2 城市公交燃油发动机关键零部件机械制造工艺流程

2.1 关键零部件毛坯成形与材料性能控制

在发动机关键零部件制造体系中，毛坯质量往往决定后续加工稳定性，因此材料选择与成形方式需要与零部件受力特征保持一致。曲轴毛坯多采用锻造成形结构，在高温塑性变形过程中形成连续纤维组织，使材料内部晶粒沿受力方向重新排列，由此增强抗疲劳能力与抗冲击性能；气缸体则常见铸造结构，依托高强度铸铁或合金材料形成整体框架结构，在保证刚度的同时兼顾减振特性。连杆毛坯同样多采用模锻工艺，组织致密度与纤维流线方向直接影响其承载能力。随着材料冶金技术不断发展，组织均匀化处理与热处理工艺逐渐融入毛坯制造阶段，使材料内部应力分布更加稳定，为后续精密加工提供可靠基础，也为发动机长期稳定运行创造良好条件。

2.2 粗加工与半精加工工艺体系构建

毛坯完成后进入机械加工阶段，合理的工艺路线安排对于提升加工效率与精度稳定性具有重要意义。粗加工阶段主要完成结构基准的建立与余量去除，借助数控车削、铣削及镗削设备，使零部件形成较为稳定的几何形态，同时保证主要加工基准面之间的相对关系。随着加工阶段逐步推进，半精加工开始承担尺寸精度控制任务，在保持结构稳定的前提下逐渐接近设计尺寸。对于曲轴等旋转类零件而言，轴颈加工与平衡结构调整需要保持较高一致性；气缸体孔系加工则更加关注孔间距与垂直度关系。借助合理的工艺分段安排，使加工应力逐步释放，既保证尺寸稳定性，也避免结构变形问题，为后续精加工奠定可靠基础。

2.3 精加工与表面质量控制技术

进入精加工阶段后，制造重点逐渐转向尺寸精度与表面状态的稳定控制。曲轴轴颈通常采用精密磨削工艺，在高精度砂轮与稳定切削参数配合下，使轴颈表面粗糙度保持在较低水平，同时保证圆度与同轴度精度；气缸孔加工则更多依托精镗与珩磨技术，形成交叉网纹结构，这种表面形态能够有效储存润滑油膜，使活塞运动更加平稳。连杆孔加工需要保证两孔之间的平行关系与尺寸一致性，因此在精加工过程中常结合专用夹具与高精度机床，以减少装夹误差带来的影响。随着精密加工设备不断升级，加工稳定性与重复精度明显提升，关键零部件的表面质量与几何精度也随之得到有效保障。

2.4 装配匹配与制造质量检测控制

在关键零部件完成精加工后，装配匹配与质量检测成为确保制造效果的重要环节[3]。曲轴与连杆组件之间需要保持稳定配合间隙，既要避免运转阻力过大，也需确保润滑油膜形成条件；气缸体与气缸盖之间的装配精度则直接影响燃烧室密封性能。借助三坐标测量设备与精密检测仪器，对零部件尺寸偏差与形位误差进行系统检测，可以及时发现加工过程中可能存在的问题。随着自动化检测技术逐渐融入制造体系，数据化质量管理模式逐步形成，使制造过程中的质量信息能够得到持续跟踪与分析，由此提高整体生产稳定性，也为发动机关键零部件制造质量的长期提升提供可靠技术支撑。

3 城市公交燃油发动机关键零部件先进制造工艺技术应用

3.1 高精度数控加工技术在关键零部件制造中的应用

随着数控技术不断成熟，高精度数控加工设备逐渐成为发动机关键零部件制造的重要支撑平台，在曲轴、连杆以及气缸体等结构复杂零件的加工过程中，数控系统能够依托多轴联动与程序化控制，使刀具轨迹保持稳定，从而保证关键尺寸与形位精度的统一。对于曲轴轴颈、连杆孔等关键部位而言，加工精度不仅关系到零部件装配质量，也影响发动机整体运转平顺性，因此在数控加工过程中需要综合考虑切削参数、刀具磨损状态以及机床刚度等多方面因素，在保持加工效率的同时维持稳定精度。

在工程实践中，一些制造企业在曲轴加工环节引入多轴联动数控车磨复合机床，使粗加工与精加工能够在同一平台上完成，由此减少重复装夹所带来的定位误差。某发动机制造企业在曲轴加工过程中，借助在线刀具补偿系统与自动测量装置，对轴颈直径与圆度进行实时修正，使加工过程始终处于稳定状态；设备运行数据反馈到数控系统后，可自动调整切削参数，从而保持加工质量的一致性。经过连续生产验证，该技术使曲轴轴颈尺寸波动明显减小，加工效率与稳定性同步提升，为城市公交发动机关键零部件制造提供了更加可靠的技术路径。

3.2 精密表面加工与强化技术

在发动机长期运行过程中，零部件表面状态对耐磨性能与润滑条件具有重要影响，因此精密表面加工

与强化技术逐渐成为制造工艺的重要组成部分[4]。对于气缸孔、曲轴轴颈以及连杆孔等关键部位，常见的加工方式包括精密磨削、珩磨以及滚压强化等技术，这些工艺能够在保证尺寸精度的基础上改善表面微观结构，使零部件具备更好的耐磨性能与疲劳强度。

例如在气缸孔加工环节中，珩磨技术可在孔壁形成均匀交叉网纹结构，这种微观纹理既能够储存润滑油膜，也能够在活塞运动过程中形成稳定润滑状态，从而减少摩擦损耗。某公交发动机制造单位在气缸孔加工过程中，将传统精镗工艺与精密珩磨技术结合，依托高精度珩磨设备对孔壁表面进行二次加工，使表面粗糙度显著降低，同时改善润滑条件。经过长期运行测试发现，该工艺能够有效降低气缸磨损速度，使发动机运转更加平稳，同时延长关键部件的使用寿命，这种表面强化技术在现代发动机制造中已逐渐形成成熟应用模式。

3.3 数字化检测与加工精度控制技术

随着精密制造水平不断提升，传统依赖人工经验的质量检测方式已难以满足高精度加工需求，因此数字化检测技术逐渐融入发动机零部件制造体系。三坐标测量设备、激光测量系统以及在线检测装置能够对零部件尺寸、形位公差以及表面状态进行高精度测量，在生产过程中形成完整的质量数据链，为工艺调整提供可靠依据[5]。

在关键零部件加工阶段，检测数据往往能够反映加工状态变化趋势，由此为工艺控制提供重要参考。例如在曲轴加工过程中，三坐标检测系统能够对轴颈圆度、同轴度及位置度进行系统检测，当检测结果出现微小偏差时，可及时调整机床加工参数，使加工精度保持稳定。为更直观地体现关键零部件加工质量控制重点，可将典型检测指标进行整理，如表 1 所示。

表 1 城市公交燃油发动机关键零部件典型加工精度指标

零部件名称	关键加工部位	主要控制指标	技术要求
曲轴	轴颈	圆度、同轴度	高精度控制
气缸体	气缸孔	圆度、粗糙度	表面稳定
连杆	大头孔、小头孔	平行度、尺寸精度	配合稳定
气缸盖	气门座孔	位置精度	密封可靠

在实际生产实践中，一些制造企业在发动机生产线上建立数字化检测系统，使关键零部件加工完成后能够即时完成尺寸扫描与误差分析，检测结果自动反馈至制造管理系统，由此形成闭环质量控制模式。某公交发动机生产企业依托数字检测平台建立质量数据数据库，对曲轴与气缸体加工数据进行持续跟踪分析，在数据积累基础上逐步优化工艺参数，使加工稳定性得到明显提升，这种数字化质量控制模式为发动机零部件制造带来了更加可靠的技术保障。

3.4 智能制造技术在发动机零部件生产中的应用

随着制造业数字化水平不断提升，智能制造技术逐渐融入发动机关键零部件生产环节，在生产组织与工艺执行层面发挥着越来越重要的作用。借助自动化加工单元、智能物流系统以及制造执行系统，零部件加工流程能够实现连续化与信息化管理，从而减少人为因素对加工质量的影响。

在现代发动机生产线上，数控机床、自动检测设备以及智能搬运系统之间形成协同运行关系，零部件从毛坯加工到精密加工再到质量检测，整个流程均在统一控制系统下运行。某动力系统制造企业在曲轴加工生产线中引入智能制造平台，将多台数控机床组成自动化加工单元，并配备机器人完成装夹与转运任务，使生产节奏保持稳定。与此同时，制造执行系统实时记录设备运行状态与加工数据，当设备运行状态出现波动时系统能够及时发出预警，由此保障生产过程持续稳定。

4 结束语

城市公交运行环境对动力系统可靠性提出更高的技术要求，关键零部件制造质量由此成为发动机性能稳定的重要基础。依托精密加工技术、数字化检测手段以及逐渐成熟的智能制造体系，机械制造工艺正不断向高精度与高稳定性方向发展；制造过程与技术应用之间形成良性协同，使关键零部件在长期复杂工况下仍能保持可靠性能，为城市公交动力装备的持续稳定运行提供坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 徐娟.基于智能制造的汽车发动机零部件高效加工策略分析[J].汽车维修技师,2025(18):104-105.
[2] 何辉.基于机械加工技术的汽车零部件制造工艺优化[J].汽车维修技师,2025(16):117-118.
[3] 罗达.数控技术在汽车机械制造中的应用[J].汽车测试报告,2025(11):61-63.
[4] 吴海彬,黄玉婷.数控技术在汽车零部件加工中的应用研究[J].汽车维修技师,2025(08):99-101.
[5] 钱文广,伊斯哈·阿布力米提.汽车发动机关键零部件精密制造与检测研究[J].汽车测试报告,2024(21):80-82.

水利工程全生命周期质量检测体系构建与关键指标标准化研究

赵中亚[1]，党安华[2]，湛晓颖[1*]

（1. 山东汇科检测技术服务有限公司，山东 东营 257000；
2. 山东禹科检测技术有限公司，山东 东营 257000）

摘 要 水利工程是支撑国民经济发展和生态环境保护的基础性工程，其质量安全直接影响到工程的功能正常发挥、人民的生命财产安全、水资源的合理利用和生态平衡的维护。目前，水利工程质量检测工作还存在碎片化、阶段性脱节、指标不统一、标准不规范等现象，不能满足全生命周期管理一体化的要求，也制约工程质量控制水平的提高。本文以全生命周期管理理念为基础，结合水利工程的特点，对水利工程全生命周期质量检测体系的构建逻辑和实施路径进行研究，构建一个科学合理、适用性强、可操作的质量检测指标分级和阈值标准体系，以期为水利工程全生命周期质量控制提供参考，促进水利工程质量检测工作的规范化、系统化、标准化发展，保证水利工程长期稳定运行。

关键词 水利工程；全生命周期；质量检测体系；关键指标；标准化

中图分类号：TV5 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.026

0 引言

水利工程是调节水资源调配、抵御水旱灾害、改善生态环境、保证农业灌溉和工业用水的重要基础设施，其质量安全有长期性、基础性、公益性特点，关系到社会经济的可持续发展和生态环境的稳定。随着水利工程建设规模的不断增大，工程种类越来越多，对工程质量的要求也越来越高，传统的阶段性、碎片化的质量检测方式已经不能适应工程全生命周期的质量保障需要，存在着检测流程衔接不畅、检测指标不一致、标准不统一、各参与方协同不够等问题，容易造成工程建设、运行、维护各个阶段出现质量隐患，影响工程寿命和功能发挥。质量检测是水利工程质量控制的中心手段，也是发现质量隐患、评价工程质量、保证工程安全的有效方式，建立全生命周期的质量检测体系、实现检测关键指标标准化，是解决目前存在的问题、提高质量控制水平的重要途径。因此，本文从水利工程全生命周期质量检测体系的建立以及关键指标标准化入手进行系统的探究，梳理相关的理论基础，设计体系框架和运行机制，制定标准化指标体系及应用方法，为水利工程全生命周期质量控制提供科学依据，促进水利工程质量检测工作高质量发展。

1 水利工程全生命周期质量检测理论基础

1.1 全生命周期管理理念与水利工程适配性

全生命周期管理理念的核心就是把工程从规划设计到报废处置的全过程当作有机整体，统筹各个阶段的管理目标、管理流程和管理资源，达到工程全流程、全方位高效的管控目的，其根本目的在于系统的、整体性的、持续性的，打破各个阶段之间的管理壁垒，使各个环节之间形成良好的衔接与闭环。水利工程具有建设周期长、涉及环节多、使用时间长、受自然条件影响大的特点，它的质量控制不是单一阶段的任务，而是在规划设计、施工建设、运行维护、报废处置等各个环节上都要进行质量控制，每个阶段的质量状况都会对整个工程的总体质量以及长期运行的安全产生影响，这就符合全生命周期管理理念中系统性、整体性的要求。

1.2 质量检测体系的核心理论与构建逻辑

水利工程质量检测体系的核心理论来源于质量管理理论、系统工程理论和过程控制理论，质量管理理

作者简介：赵中亚（1994-），男，本科，工程师，研究方向：水利工程质量检测。
*通信作者：湛晓颖（1991-），女，本科，工程师，研究方向：水利工程质量检测。E-mail：dyhkjc@126.com

论给体系建立提供的是质量管控的主要思路，即依靠标准、规范化的流程来提高质量；系统工程理论认为质量检测体系是有机整体，要统筹考虑各个部分之间的功能及联系，达到系统整体效率最大化的目的；过程控制理论重视对整个水利工程全周期各阶段检测工作实施精确管理，保证检测工作规范化、有效率。

1.3 检测指标标准化的核心内涵与原则

水利工程质量检测指标标准化的核心内涵是把水利工程全生命周期各个阶段质量检测的重要内容、检测方法、评价标准统一规范起来，形成科学、系统、通用的标准化体系，使各个阶段、各种情况下的质量检测工作具有一致性、可比性和规范性，防止由于检测指标不统一、标准不清造成检测结果偏差、质量评价失真的问题。检测指标标准化的主要目的就是通过统一的标准来提高质量检测工作科学性和规范性，保证检测出的结果可以真实地反映出工程的质量情况，给质量控制的决策提供可靠的信息，同时减少检测成本，提高检测效率，促进质量检测工作规范化、专业化的发展。

2 水利工程全生命周期质量检测体系构建

2.1 体系构建的总体目标与核心原则

水利工程全生命周期质量检测体系建立的总体目标就是根据水利工程全生命周期质量控制要求，创建包含检测模块、流程规范、保障机制、协同模式在内的科学、系统、高效的检测体系，实现对工程质量检测全过程、全方位、全链条的覆盖，保证检测数据的真实可靠、检测流程的规范有序、检测结果的科学公正，为水利工程质量安全决策提供支持，促进水利工程质量管控水平的全面提高，保证工程长期稳定地发挥其功能[1]。体系建构的主要原则以总体目标为中心，系统性原则规定体系包含工程全生命周期各个阶段，综合考虑到各个阶段检测需要和流程对接，保证各个模块、各个环节相互配合；规范性原则要求体系内检测流程、检测方法、指标标准、操作规范等都符合有关要求，使检测工作做到标准化、规范化；实用性原则要求体系的设计要贴近工程实际情况，检测流程简捷高效，检测方法易学易用，可以满足各类水利工程的质量检测需求；协同性原则要求明确建设、设计、施工、检测、运维等各方面责任分工，创建协同治理模式，达成资源共享、信息共享、协同发力的目的；动态性原则要求体系在水利工程技术进步、质量控制要求改变、工程实践反馈等方面作出相应的调整，从而保持体系的适应性和持续性。

2.2 各阶段检测模块设计与流程衔接

水利工程全生命周期质量检测体系各阶段检测模块的设计以工程全生命周期为依据，根据各个阶段的质量控制重点设定相应的检测模块，并且注意各个模块之间流程的衔接，形成闭环管理。规划设计阶段检测模块主要是对工程设计方案的质量可行性和设计参数的合理性进行检测，重点检测设计方案是否符合相关规范要求、是否考虑工程质量与安全、是否适应自然环境和使用需求，为工程设计优化提供依据；施工建设阶段检测模块属于质量检测的重点部分，主要检测原材料质量、施工工序质量、分项分部工程质量，检测施工过程是否达到设计要求及施工规范的要求，及时发现施工过程中出现的质量问题并予以纠正，保证施工质量满足标准；运行维护阶段检测模块主要针对工程运行状态、结构完整性、功能发挥情况开展检测工作，定期开展常态化的检测和专项检测，在工程运行期间实时监控工程的状态，并及时发现工程运行过程中存在的质量问题，为后续的运维决策提供支持；报废处置阶段检测模块以工程报废前的质量状况、安全风险、环境影响为对象，对工程结构的完整性、安全性做出评价，预测工程报废后可能产生的环境影响，给报废处置方案的确定给予科学依据。

2.3 体系运行保障机制与协同管理模式

水利工程全生命周期质量检测体系高效运转需要完备的保障机制和科学的协同管理方式，两者互相支撑、互相促进，一起保证体系发挥出应有的效果[2]。体系运行保障机制包括组织保障、制度保障、技术保障和人员保障，组织保障即成立专门的检测管理机构，明确各个参与方的职责分工，统筹安排检测工作开展，制度保障就是制订完整的检测管理制度、操作规程、质量评价标准等，对检测工作的各个方面进行规范，保证检测工作有章可循，技术保障是采用先进的检测技术和设备，改进检测方法，提高检测精度和效率，建立检测信息管理系统，实现检测数据的信息化管理以及共享，人员保障是加强检测人员的职业技能培训和职业道德教育，提高检测人员的专业素质和服务意识，保证检测工作的专业性和公正性。

3 质量检测关键指标标准化设计与应用验证

3.1 关键指标筛选与分级标准制定

水利工程质量检测关键指标筛选和分级标准的确定属于实现检测指标标准化的重要环节，筛选过程要以工程全生命周期各阶段的质量控制重点为依据，遵

循科学性、系统性、适用性的原则，根据质量检测体系的建立需要，在规划设计、施工建设、运行维护、报废处置等阶段的检测内容中，选出可以直接反映工程质量主要特征、影响工程安全及功能发挥的主要指标，剔除不必要的指标，从而形成简洁、高效、针对性强的关键指标体系[3]。选择的关键指标既要考虑到共性又要重视个性，既有工程结构、材料性能、施工工艺、运行状态等各方面的关键因素，又有根据不同的水利工程项目特点添加的一些个性指标，保证指标体系的适应性。经过关键指标筛选之后，根据工程质量控制的要求来制定指标分级标准，按照指标对于工程质量安全的影响程度把关键指标分成不同的等级，并规定各等级的关键指标的主要管控要求，分出重点管控指标和一般管控指标，依照不同的等级分别制订差别化的检测频率、检测方式以及评价准则，对影响工程质量安全大的主要指标进行重点监控，保证质量控制的针对性和有效性，为后面指标量化和阈值确定打下基础。

3.2 标准化指标的量化方法与阈值确定

标准化指标的量化方法和阈值的确定是实现检测指标标准化、保证检测结果可比可评的重要环节，要根据关键指标的特点和性质来选择合适的量化方法，把定性的指标转换成量化的指标，把模糊的指标转化成具体的指标，使指标的量化结果能真实地、准确地反映出工程质量的好坏[4]。对可以直接用检测手段得到的数据指标，根据检测技术和规范要求来确定统一的量化检测方法，明确检测步骤、检测仪器、操作规范，保证不同的检测主体使用相同的检测方法可以得到一致的检测结果；对于不能直接量化的定性指标，用分类描述、等级评分等方法进行量化，规定各个评分等级的判别标准，保证定性指标量化的科学性和一致性。在指标量化方法确定之后，根据水利工程质量控制要求、相关规范标准和工程实践经验来确定各个标准化指标的阈值，指标阈值是判断工程质量是否符合标准的重要依据，要考虑到科学性和适用性，既需要满足有关规范最低的要求，又要考虑工程长期运行的质量需求，对指标的合格阈值、预警阈值、不合格阈值做出规定，把合格、基本合格、不合格分为三个质量等级，并规定不同的阈值所对应的质量状况及相应的处置办法。

3.3 标准化体系的工程应用与有效性验证

标准化体系的工程应用和有效性验证是检验关键指标标准化体系科学性、适用性和可行性的过程，把建立起来的关键指标标准化体系应用到水利工程全生命周期的质量检测实践中，在不同的工程阶段对检测提出的要求下，按照标准化的检测方法、指标分级、阈值要求来开展质量检测工作，收集检测数据，分析检测结果，检验标准化体系在实际应用中是否有效[5]。按照标准体系要求开展各个阶段的检测工作，规范检测流程，统一检测方法，保证检测数据的真实、准确、一致。同时，对标准化体系的应用过程中的问题和不足进行整理总结，并不断改进和完善标准化体系。有效性验证从检测效率、检测质量、质量管控效果这三个方面展开，比较标准化体系实施前后检测工作的情况，检验标准化体系是否可以提高检测工作效率和规范性，是否可以准确发现工程质量隐患，是否可以有效地提高工程质量管控水平。

4 结束语

本文以水利工程全生命周期质量检测体系的创建及关键指标标准化为研究重点，整理出全生命周期质量检测相关理论基础，分析全生命周期管理理念和水利工程的契合度、质量检测体系的创建逻辑以及检测指标标准化的核心内涵和原则，形成包含总体目标、检测模块、保障机制和协同模式在内的水利工程全生命周期质量检测体系，设计出关键指标筛选、分级、量化、阈值确定的标准化流程，并通过工程实践证明标准化体系的有效性。研究结果表明，创建全生命周期的质量检测体系可以冲破传统阶段性的检测限制，完成工程质量的全过程、全方位控制，关键指标标准化可以提高检测工作规范化、科学化水平，保证检测结果的可比性可评性，为水利工程质量管控提供可靠支持。

参考文献：

[1] 王涛，唐忠刚．水利工程技术管理痛点识别与系统化对策研究[J]．价值工程，2025,44(35):109-112.
[2] 夏冬晨，林海卫，周梦阳．水利工程施工与后期运行管理衔接机制研究[J]．水上安全，2025(21):185-187.
[3] 葛震，邢栋，祝晓迪．水利工程建设施工过程中的质量管理措施[J]．城市建设理论研究(电子版),2025(31):196-198.
[4] 钟海平．水利水电工程项目档案管理标准化体系构建研究[J]．兰台内外，2025(28):67-69.
[5] 唐云清．重大水利水电工程全生命周期质量管理探索与实践[J]．中国水利，2025(09):42-49,27.

废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术创新与实践

张 力

（陕西交通控股集团有限公司宜富分公司，陕西 延安 727500）

摘 要 随着我国高速公路路网逐步进入大规模养护周期，废旧路面材料的处置与资源循环利用成为行业发展的核心课题。传统填埋与堆放方式易造成资源浪费、土壤污染及土地占用，与绿色低碳、可持续发展理念相悖。本文系统分析废旧路面材料的核心特性，阐述其在高速公路养护工程中再生利用的多元价值，重点梳理厂拌热再生、就地热再生、冷再生等技术的创新方向与工程实践成果，以期为高速公路绿色养护技术的推广应用提供参考。

关键词 废旧路面材料；高速公路养护；再生利用技术；厂拌热再生技术；就地热再生技术

中图分类号：U418 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.027

0 引言

我国高速公路总里程已稳居世界首位，超过八成的已建成路网进入养护周期，每年铣刨产生的废旧路面材料体量持续增长。传统填埋处置方式不仅造成大量不可再生资源的浪费，还带来一系列生态环境风险，与我国绿色交通发展与双碳战略目标相悖。废旧路面材料的再生利用，是破解高速公路养护工程资源与环境双重约束的核心路径。本文围绕废旧路面材料的特性、应用价值、技术创新与实践展开系统分析，为行业高质量发展提供参考。

1 废旧路面材料的特性

1.1 废旧路面材料的物理力学特性

高速公路废旧路面材料主要来自路面铣刨作业，核心由长期服役后的矿质集料与老化沥青组成。经过多年重载交通与自然环境的耦合作用，铣刨后的材料呈现出特定的粒径分布特征，集料存在不同程度的破碎与磨耗，但其主体骨架强度与硬度仍能满足高等级路面材料的使用要求[1]。附着在集料表面的老化沥青，随着服役年限的增长出现组分迁移与性能劣化，沥青的延度与黏结性下降，高温稳定性相对提升，不同路段的材料老化程度存在明显差异，需通过针对性的性能调控实现再生利用。

1.2 废旧路面材料的材料组分稳定性

废旧路面材料的核心组分具有极强的化学与物理稳定性，矿质集料的主要成分为玄武岩、石灰岩等硬质岩石，经过长期服役不会出现有害化学组分的溶出，也不会发生结构性的化学分解，仅存在物理形态的破碎与磨损。老化沥青的组分变化以轻质组分挥发与沥青质聚合为主，整体化学结构保持稳定，不会产生有毒有害的次生污染物，仅需通过再生剂的组分调节即可恢复部分核心性能[2]。高速公路路面施工过程中执行严格的材料准入标准，不同路段的原材料品质与级配设计差异较小，使得废旧路面材料的组分波动范围可控，具备规模化、标准化再生利用的基础条件。

1.3 废旧路面材料的环境影响特性

废旧路面材料的传统处置方式以露天堆存与填埋为主，不仅占用大量土地资源，还可能因雨水冲刷导致沥青组分渗入土壤与地下水，造成周边生态环境的污染，铣刨与运输过程中产生的粉尘与尾气也会加剧大气环境负担。再生利用可从源头规避这些环境风险，通过对废旧材料的循环使用，大幅减少石料开采活动对山体植被与水土保持的破坏，降低新沥青生产与运输带来的能源消耗与碳排放。相较于传统新料铺筑工艺，废旧路面材料的再生利用可显著降低公路养护工程的全周期环境影响，契合绿色公路建设的核心要求。

2 废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术应用的价值

2.1 全生命周期的经济成本优化价值

废旧路面材料的再生利用可从多个维度实现高速公路养护工程全生命周期的经济成本优化。再生技术可实现废旧材料的就地或就近循环利用，大幅减少新集料与新沥青的采购量，同时规避废旧材料的运输与

作者简介：张力（1985-），男，本科，工程师，研究方向：高速公路养护。

填埋处置费用，直接压缩工程的直接建设成本。针对高速公路半幅封闭施工的特点，再生技术尤其是就地再生工艺可实现一体化连续作业，大幅缩短施工工期，减少交通管制带来的通行效率损失与社会经济成本。通过精准的配合比设计与工艺控制，再生路面的服役性能可达到甚至超过传统新料路面，有效延长路面的大修周期，降低全生命周期内的养护频次与后续处置成本，实现长期的经济效益[3]。

2.2 生态环境保护与双碳目标落地价值

废旧路面材料的再生利用是公路交通领域落实双碳战略目标的核心抓手之一。规模化应用再生技术，可大幅降低不可再生矿产资源的消耗，减少开山采石对区域生态系统的破坏，从源头保护山体植被与水土保持体系，规避废旧材料填埋带来的土壤与地下水污染风险。再生技术可显著降低公路养护工程的能源消耗与碳排放，相较于传统新料铺筑工艺，冷再生技术可减少九成以上的燃油消耗，热再生技术可减少半数以上的沥青生产碳排放，高比例再生混合料的应用可进一步放大减排效应。高速公路养护工程的体量大、标准化程度高，再生技术的规模化推广可形成显著的碳减排规模效应，助力绿色低碳交通体系的构建。

2.3 高速公路养护工程的质量提升价值

再生利用技术可针对性解决传统高速公路养护工艺的质量难点，全面提升养护工程的建设质量与长期服役性能。传统铣刨重铺工艺中，新铺层与旧路面的结合面易出现粘结不良、应力集中等问题，是路面反射裂缝、层间滑移等病害的主要诱因，而再生技术尤其是就地再生工艺可实现旧路面材料的原位活化与连续铺筑，消除新旧路面的界面薄弱点，大幅提升路面结构的整体性与连续性。针对高速公路重载、高流量的服役特点，再生技术可通过精准的配合比设计与材料改性，定制再生混合料的抗车辙、抗疲劳、抗水损害等核心性能，适配不同路段的养护需求，有效延长路面的服役寿命，保障高速公路的通行安全与通行效率。

2.4 公路建设行业可持续发展的推动价值

废旧路面材料再生利用技术的创新与推广，可推动公路建设行业实现从线性发展模式向循环可持续发展模式的转型[4]。随着我国高速公路路网全面进入养护周期，每年产生的废旧路面材料超过亿吨，传统处置方式已无法适配行业高质量发展的要求，再生利用技术的成熟应用，可构建公路建设领域生产—使用—再生—再使用的闭环资源循环体系，破解行业发展的资源与环境双重约束。再生技术的创新发展还可带动再生剂研发、专用施工设备制造、再生材料检测等相关产业链的升级，提升我国公路养护技术的整体水平与国际竞争力，为全球同类型工程的绿色低碳发展提供可复制的中国方案与实践经验。

3 废旧路面材料在高速公路养护工程中的再生利用技术创新实践

3.1 厂拌热再生技术的配方优化与工艺创新

厂拌热再生是当前高速公路养护工程中应用最广泛的再生技术，近年来的创新重点集中在高掺量再生混合料的性能优化与施工工艺的标准化升级。传统厂拌热再生工艺受旧沥青活化效果与混合料性能限制，废旧路面材料的掺量通常控制在较低水平，行业通过基于旧沥青老化程度的精准分级再生技术，对不同来源、不同老化程度的废旧路面材料进行筛分与性能检测，建立老化程度与再生剂掺量的对应模型，实现旧沥青黏结性能的精准恢复，同时通过优化矿料级配设计，引入高性能改性剂与抗老化助剂，构建骨架密实结构的再生混合料，大幅提升材料的高温稳定性、低温抗裂性与抗疲劳性能，成功突破高掺量再生混合料的应用层级限制。目前该技术已在国内多条高速公路的上面层、中面层大修养护工程中实现规模化应用，废旧路面材料掺量最高可达到五成以上，再生路面的各项性能指标均满足高等级公路的规范要求，经过多年重载交通考验，未出现明显病害，充分验证了技术的可靠性与适用性。

3.2 就地热再生技术的智能化升级与场景拓展

就地热再生技术可实现废旧路面材料的100%就地利用，是高速公路预防性养护与中修工程的核心技术之一，近年来的创新重点集中在施工过程的智能化控制与应用场景的精准拓展。传统就地热再生工艺存在路面加热不均匀、旧沥青活化不充分、施工参数可控性差等问题，易导致再生混合料性能波动，行业通过研发红外与微波复合加热系统，实现路面深度方向的梯度均匀加热，避免表层沥青过热二次老化，同时搭载智能化施工控制系统，实时采集路面温度、铣刨深度、再生剂掺量、摊铺速度等核心参数，通过算法优化实现施工过程的闭环自动控制，保障再生混合料的性能均匀性与稳定性[5]。针对高速公路不同类型的路面病害，行业还拓展了表层再生、复拌再生、重铺再生等多种工艺模式，可精准处置车辙、裂缝、松散、推移等常见病害，在国内多条高速公路的预防性养护工程中，智能化就地热再生技术实现了当日施工当日开放交通，大幅缩短了交通管制时间，再生路面的平整度、抗滑性能与抗车辙性能均满足高速公路的服役要求，取得了良好的应用效果。

3.3 厂拌冷再生技术的高性能改性与规模化应用

厂拌冷再生技术具有能源消耗低、碳排放少、施工环境友好等优势，近年来通过材料改性与工艺创新，突破了传统应用场景的限制，在高速公路养护工程中实现规模化推广。传统厂拌冷再生混合料存在早期强度低、成型速度慢、耐水损害性能不足等问题，通常仅能用于路面下面层或基层，行业通过研发高性能交联改性乳化沥青，优化乳化沥青的破乳特性与粘结强度，同时搭配活性填料复合体系，精准调控水泥、矿粉等填料的掺配比例，构建乳化沥青—水泥复合胶凝体系，大幅提升冷再生混合料的早期强度、水稳定性与抗变形能力，成功突破了冷再生材料的应用层级限制。目前改性厂拌冷再生技术已在国内多条高速公路的下面层、中面层大修工程中实现规模化应用，再生混合料的 7 天无侧限抗压强度、动稳定度、冻融劈裂强度比等核心指标均满足高等级路面的设计要求，相较于传统热再生技术，可大幅降低施工过程中的能源消耗与碳排放，同时可在较低温度环境下正常施工，有效拓展了高速公路养护工程的施工窗口期。

3.4 就地冷再生技术的结构适配性创新与工程实践

就地冷再生技术可实现旧路面材料的全量就地利用，是高速公路路面基层与下面层结构性病害处置的核心技术，近年来的创新重点集中在结构适配性设计与施工质量的精准控制。传统就地冷再生工艺存在结构设计与病害诊断脱节、施工均匀性不足、质量可控性差等问题，行业通过构建基于路面结构全深度诊断的再生设计方法，采用路面雷达检测、钻芯取样、承载能力测试等手段，精准识别路面结构的破损深度、病害类型与承载能力短板，针对性设计再生层厚度、材料配合比与结构组合形式，实现再生结构与病害处置需求的精准适配。同时行业研发了智能化铣刨拌合一体化设备，实现铣刨、破碎、拌合、摊铺、压实的全流程连续作业，通过实时控制铣刨深度、拌合均匀性与添加剂掺量，保障再生结构的均匀性与密实度，针对高速公路重载交通的特点，优化再生混合料的骨架密实结构，提升再生基层的承载能力与抗永久变形能力。目前该技术已在国内多条高速公路的基层翻修工程中实现规模化应用，废旧路面材料的利用率达到 100%，无需长距离运输废旧材料与新集料，大幅降低了工程成本与施工周期，再生后的路面结构承载能力满足高速公路的设计要求，经过多年重载交通考验，未出现结构性病害，应用效果显著。

3.5 全再生路面结构体系的创新探索与工程验证

全再生路面结构体系是近年来废旧路面材料再生利用技术的前沿创新方向，核心是实现高速公路路面从面层到基层的全结构层再生利用，最大化发挥废旧材料的资源价值。传统再生技术大多局限于单一结构层的再生应用，不同结构层之间的性能适配性不足，废旧材料的整体利用率受限，行业通过构建全再生路面结构的设计理论与方法，针对高速公路路面不同结构层的功能需求，分层设计对应的再生材料与再生工艺，上面层采用高掺量改性厂拌热再生混合料，满足抗滑、抗车辙、抗疲劳的表面功能要求，中下面层采用高性能改性厂拌冷再生混合料，满足结构承载与抗变形的核心要求，基层与底基层采用就地冷再生混合料，满足路基承载过渡的功能要求，实现整个路面结构废旧材料的最大化利用。同时行业研发了适配全再生结构的层间粘结处理技术，优化不同再生层之间的粘结材料与施工工艺，提升全再生结构的整体性与连续性，规避不同再生层之间的界面病害。目前国内已在多条高速公路的大修工程中开展了全再生路面结构的试验段铺筑，经过长期跟踪监测，全再生路面的各项性能指标均满足高速公路的设计与服役要求，废旧路面材料的整体利用率达到 95% 以上，全周期碳排放较传统养护方案降低 60% 以上，充分验证了全再生路面结构体系的可行性、先进性与经济性，为废旧路面材料的高值化、全量化利用提供了全新的技术路径。

4 结束语

废旧路面材料的再生利用，是我国高速公路养护行业实现绿色低碳、循环可持续发展的必然选择。本文系统分析了废旧路面材料的核心特性，阐述了其再生利用的多元价值，梳理了各类再生技术的创新方向与工程实践成果。当前我国废旧路面材料再生利用技术已逐步成熟，形成了多场景、多层级的技术体系，未来需进一步推动再生技术的智能化升级、材料性能的持续优化与全结构再生体系的规模化推广，全面提升废旧路面材料的利用效率与价值，助力我国交通强国建设与双碳战略目标的落地。

参考文献：

[1] 王晓东，张洪韬，李瑞杰，等. 公路废旧材料再生循环利用的宁夏探索 [J]. 中国公路，2024(23):46-49.
[2] 王志新，李作钰，田霞，等. 废旧路面材料综合利用研究综述 [J]. 山东交通科技，2024(04):31-34.
[3] 王哲. 沥青路面废旧材料循环利用技术及应用研究 [J]. 上海建材，2024(02):61-64.
[4] 刘欢，林杰. 废旧沥青路面材料的再生利用研究 [J]. 科技创新与应用，2022,12(26):89-92.
[5] 李东辰. 废旧路面材料在湿陷性黄土地区公路改建工程中的应用 [J]. 黑龙江交通科技，2022,45(04):19-20,24.

给排水机电设备节能参数优化分析

郝彦博

（秦皇岛排水有限责任公司，河北 秦皇岛 066000）

摘 要 在能源结构不断调整的背景下，给排水系统的节能优化问题备受重视。传统的给排水系统中，水泵始终保持全速运转，采用阀门控制水量，用水较少时，水泵面临的压力较多，造成电能浪费。本文以某住宅小区的供水系统为研究对象，探讨使用变频调速技术构建一套水泵与管网相关联的数学模型，提出一种全新的控制方案：根据不同阶段控制水压，将控制参数调节至省电模式，结合用水量大小，将其划分为不同区域和时段，对目标水压进行自动调整，确保水泵扬程与负荷高度匹配，结合真实用水数据，对运行效果进行测试。结果显示，采用新方案以后，系统每天节省能源消耗超过 16%，有效提高了整个供水系统的效率。

关键词 给排水系统；机电设备；节能参数

中图分类号：TU85 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.028

0 引言

给排水系统长期运行，保障着人们日常生产生活的用水需求。以生活供水系统为例，为满足全天候不间断的用水供给，系统需全天持续运转，其中水泵更是长期处于工作状态。而由于居民用水需求随时段、场景动态发生变化，水泵负荷也会发生改变，因此，其耗电量同样不容忽视。在传统供水系统中，水泵始终保持一个固定转速，管道出口压力不变。一旦用水量下降，水泵依然高速运转，系统压力很高，需将阀门调小，或者促进多余的水流入旁边管道之中。这种调节方法并未从根源上解决问题，还会诱发一系列问题，如在低流量时段，压力过高，造成大量的电能浪费。因此，有必要对系统的运行参数进行调整，优化设备的运行状态，达到理想的节能效果。

1 案例概况

本文以某小区的二次供水系统为案例，该小区的运行时间超过 15 年，共计 16 栋住宅楼，总户数 768 户，常住人口约为 2 300 人。小区供水方式如下：先通过市政管网将水输送到小区，再利用小区内部设备进行二次加压，将水输送到高层住户家中。在地下设备间设置水泵房，安装 CDL20-3 型立式多级离心泵，在日常工作模式，两台水泵工作，一台作为备用。原有的控制方式以出口恒压控制为主，压力始终保持在 0.42 MPa。为了分析系统真实运行情况，将 2024 年 8 月 17 日作为代表性的一天展开研究，当天是暑期周末，居民在家时间较长，用水需求集中，用水量很大。根据实际监测数据可知，当日最大瞬间用水量为 36.85 立方米 / 小时，最小瞬间用水量为 6.12 立方米 / 小时，用水量存在较大波动，一天用水量变化曲线为典型的早晚两个高峰，早高峰时段为 6:30 到 8:30，晚高峰时段为 17:30 到 20:30。其余时段的用水量较少，凌晨 0:00 到 5:00 用水量长期小于 10 立方米 / 小时。

统计结果表明，系统当日共耗电为 49.76 度，每供水 1 立方米，每 1 MPa 压力消耗 0.417 度电，系统综合效率平均值为 61.5%。这说明，在用水很少时，水泵依然保持很高的压力，水泵提供的扬程远高于实际需要。

根据现场测试和数据计算结果可知，能耗偏高的主要原因如下：一是水泵出口压力值固定，并未结合用水量大小的变化，对压力进行自动化调整，当用水量较少时，水泵依然保持高压运行状态；二是小区管道运行时间较长，面临较大的阻力，在水泵提供的总压力中，超过 60% 用于克服管道阻力，真正输送到用户家的压力并不多，存在较大的能量损耗；三是在低流量运行阶段，水泵的运行状态远离其最高效工作点，消耗更多能量，运行效率降低；四是在有些时间段，水泵面临频繁启动和停止，不仅对设备造成损伤，消耗大量的电能，还会导致水压和系统运行不稳定。

综上所述，该供水系统的控制方式和运行参数匹配方面并未达到最优，还有改进空间。利用变频调速和压力分段控制策略可以保证系统的实际运行状态充分满足居民的用水需求，实现精准化调整，进一步降低单位供水能耗，提高系统运行效率。

作者简介：郝彦博（1985-），男，本科，工程师，研究方向：机电工程。

2 机电设备节能参数优化

2.1 变频调速技术概述

变频调速技术的关键在于改变电源频率，使电机转速得到连续调节。当电机转速发生变化，水泵的出水量、出水压力、高度也会随之发生变化，确保水泵充分满足实际用水需求[1]。

电机转速表达式为：

$$n=(60f/p)(1-s) \quad (1)$$

式（1）中，n 代表电机转速（r/min），f 代表电源频率（Hz），p 代表极对数，s 转差率。

f 可以人为调节，当 f 变小，转速 n 降低；当转速降低，水泵流量、扬程都会变小。因此，通过降低频率，降低转速，可以降低水泵的输出能力。

对于离心式水泵，根据相似定律，可以得出以下三个关键关系：

$$Q \propto n$$

水泵流量 Q 与电机转速 n 呈正比关系，转速越快，出水量越大，反之，出水量会同步减少。

$$H \propto n^2$$

水泵扬程 H 与电机转速 n 的平方呈正比关系，转速变化对扬程有更大的影响。

$$P \propto n^3$$

水泵的轴功率 P 与电机转速 n 的立方呈正比关系，当转速稍微下降，功率会大幅度下降。

其中，Q 代表流量，H 代表扬程，P 代表轴功率。

根据小区实际情况，供水系统在大部分时间处于低负荷运行状态，水泵无需高速运行，只需利用变频技术降低其转速，就能进一步减少电量消耗，达到明显的节能效果。

2.2 能耗模型构建

给排水机电系统传递能量时，首先通过电网满足供电需求，电经变频器调节后驱动电机转动，利用联轴器传递动力，带动水泵实现抽水加压，最后将水压进管网，输送给用户。

系统总有效率为每一阶段效率的乘积，表示如下：

$$\eta_{总}=\eta_{变频器}\times\eta_{电机}\times\eta_{联轴器}\times\eta_{水泵}\times\eta_{管网}$$

只要其中某一效率下降，总有效率会立刻下降。

只要变频器的电机转速调的不会低于正常转速的 70%，其自身耗电比较有限，转换效率能够保持在 95% 左右，由于变频器自身不会产生较大的损耗，因此，不会降低节能效果。一旦水泵不再处于最佳工作状态，其工作效率会明显下降。管网的运行效率与有静扬程与动扬程占比有关，管道运行时间越长，面临的阻力越大，动扬程占比越高，就会面临更严重的能量损耗，管网运行效率越低[2]。

2.2.1 管网特性模型

管网特性模型如下：

$$H=Hst+SQ^2 \quad (2)$$

式（2）中，H 代表水泵总扬程，Hst 代表静扬程，S 代表管路阻力系数，Q^2 代表流量的平方，SQ^2 代表动扬程。

在本案例中，静扬程占比为 35%，动扬程占比为 65%，后者与 Q^2 成正比，说明只要对流量和压力进行有效控制，就能达到理想的节能效果。

2.2.2 水泵特性曲线修正

变频修正模型如下：

$$H=k^2(A_0+A_1Q/k+A_2(Q/k)^2) \quad (3)$$

式（3）中，H 代表水泵扬程，Q 代表流量，k 代表调速比，A_0、A_1、A_2 代表水泵额定转速下的性能曲线系数。

这个公式准确展示了变频后的水泵性能曲线，采用水泵曲线和管网曲线交点可确定不同流量和不同调速比下的最佳运行状态。

2.2.3 阶梯恒压控制优化

在本案例中，结合小区实际用水流量范围与计算结果，将一天之中的用水情况划分为三段，实现对压力的有效控制，如表 1 所示。

表 1 阶梯恒压控制优化数值

流量区间	优化设定压力
0 ～ 12 m^3/h	0.30 MPa
12 ～ 25 m^3/h	0.35 MPa
＞ 25 m^3/h	0.39 MPa

与原有固定压力 0.42 MPa 相比，对系统进行优化后，可有效避免水压始终过高，将多余的压力去掉，从根源上达到节能目的。

其控制目标函数为：

$$\min\Sigma SiPi(Qi) \quad (4)$$

式（4）中，Si 代表水泵运行状态，Pi(Qi) 代表对应流量下功率。

采用流量传感器对当前用水量进行监测，再将信号传递给 PLC。PLC 根据前面设定的流量区间，对目标压力进行自动切换。这一策略可有效保证现有扬程曲线与管网真正需求贴近。

3 机电设备节能参数优化结果与验证

3.1 搭建仿真平台

结合本案例真实的用水数据，搭建动态仿真模型。使用工业控制计算机满足模型的计算需求，利用专门

的变频器对水泵转速进行控制；采用电磁流量计对管网流量进行精准测量；采用专业的仿真软件对水泵、管网和控制策略的联动效果进行精准模拟。将当天流量数据输入到模型之中，对两种控制方式下的运行状态分别模拟：一是原恒压控制，二是优化后的阶梯恒压控制[3]。

3.2 优化结果

优化后系统运行参数如表 2 所示。

表 2 优化前后系统运行参数对比

指标项目	优化前	优化后	变化情况
峰值流量（m^3/h）	36.85	36.40	满足设计需求
日累计耗电量（kW·h）	49.76	41.58	↓ 8.18 kW·h
日节电量（kW·h）	—	8.18	—
节能率（%）	—	16.4	显著降低能耗
单位供水能耗［kW·h/（m^3·MPa）］	0.417	0.348	↓ 16.6%
系统综合效率（%）	61.5	70.2	↑ 8.7%

3.2.1 高峰运行分析

早晨和晚上是用水最多的时段，在这两个时段，系统会将压力自动调节至 0.39 MPa，确保所有住户的水压充足，避免出现缺水等问题。同时，压力非常稳定，上下浮动不超过 0.02 MPa。

3.2.2 低负荷阶段分析

深夜的用水量很少，流量很低，系统会自动将压力调节至 0.30 MPa，电机的转速明显下降。根据水泵功率和转速的立方关系，当转速稍微下降时，系统耗电会明显下降，在夜间，系统长时间低负荷运行，可节省大量电能[4]。

3.3 运行稳定性

对系统进行优化后，水泵无需进行频繁启停，可有效减少电流对系统造成的冲击与设备磨损；水压更加平稳，供水质量有所提升，给住户带来更好的用水体验；设备转速更加合理，运行速度放缓，水泵和管道等设备的振动幅度变小，噪声降低。这充分说明，通过对参数进行优化，不仅可以提高节能效果，还能保证整个供水系统运行更加平稳[5]。

4 机电设备节能参数优化经济与工程价值

优化后的节能效益测算结果如表 3 所示。

4.1 改造难度和成本低

本优化方案无需对现有的水泵设备进行更换，也无需改造泵体结构，只需对水泵的控制方式进行调整，改造难度和成本较低。改造期间，只需针对变频器和控制模块加大资金投入力度。

4.2 耗时较短，适应范围广泛

整个改造过程耗时较短，不会造成长时间供水中断，不会对居民用水造成严重的影响。该方案既适合针对老旧小区进行改造，又适合新建小区，具有广泛的应用价值。

4.3 智慧与远程控制

这一方法可与智慧水务系统对接，实现对供水数据和设备运行情况的远程查看和控制，工作人员通过对数据进行分析，结合分析结果，就可以优化系统运行状态[6]。

表 3 节能效益测算结果

指标项目	数值	计算依据 / 说明
日节电量（kW·h）	8.18	优化前后日耗电量差值
年运行天数（d）	365	按全年运行计算
年节电量（kW·h）	2 986	8.18×365
电价（元 /kW·h）	0.85	当地居民电价水平
年节约电费（元）	2 538	2 986.85

5 结束语

采用固定出口恒压控制模式很难适应用水量过大或过小的变化需求，一旦用水量变小，压力会增高，水泵在低负荷运行状态时，会消耗更多电能。采用变频调速技术构建专门的数学模型，将水泵和管道相结合，并通过这一模型对不同用水量下的水泵运行策略进行优化，达到节能效果。采用阶梯横压控制策略，可将用水量划分为不同区间，针对区间设置相应压力，确保系统输出压力与实际需求更加贴近，避免产生较大的浪费。

参考文献：

[1] 梁耀绅 . 给排水机电设备节能运行参数调控优化研究 [J]. 粘接 ,2026,53(02):522-525.
[2] 倪信仙,洪宗玮,万吉,等 . 工业污水处理厂机电设备节能改造 [J]. 设备管理与维修 ,2025(18):135-137.
[3] 文建为,毛晶 . 机电系统能效管理与节能技术分析 [J]. 中国机械 ,2025(20):121-124.
[4] 杨刚 . 机电设备协同控制技术在煤矿节能降耗中的应用 [J]. 能源与节能 ,2026(01):78-81,225.
[5] 吴哲峰 . 变频节能技术在煤矿机电设备中的应用研究 [J]. 能源与节能 ,2025(12):98-100,196.
[6] 朱志如 . 煤矿机电设备节能技术的应用与发展 [J]. 能源与节能 ,2025(11):119-122.

装配式建筑全生命周期碳排放问题分析

刘晓彤

（宁波绿城房地产投资有限公司，浙江 宁波 315000）

摘 要 装配式建筑作为建筑业绿色转型的重要路径，其在提高建造效率、改善施工环境方面具有显著优势。然而，装配式建筑全生命周期涵盖的设计、构件生产、安装施工、运行维护、拆除处置等各阶段，碳排放来源复杂且相互关联。基于此，本文以装配式建筑全生命周期各阶段为研究框架，系统梳理各环节碳排放存在的主要问题，继而提出兼具针对性和可行性的低碳策略，旨在为建筑行业低碳发展提供实践参考，推动建筑领域碳减排从局部优化走向全流程协同管控升级。

关键词 装配式建筑；全生命周期；碳排放问题

中图分类号：TU767；X51 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.029

0 引言

全球气候变暖趋势不断加剧，建筑行业作为能源消耗、温室气体排放的重要源头，面临前所未有的减排压力。传统现浇建筑模式资源浪费严重、施工现场污染大、能耗高，难以满足可持续发展的要求。装配式建筑以工厂预制、现场装配的方式，缩短工期、减少现场作业，被公认为建筑业绿色升级的关键方向。尽管装配式建筑在施工阶段展现出显著减排潜力，但仅关注该阶段易忽视全生命周期内其他环节的高碳排放风险，如设计缺陷、构件运输低效、运维能耗过高等问题，仍是其碳减排的主要短板。因此，需以全生命周期为框架，系统解析各阶段碳排放特征，识别关键制约瓶颈，进而提出科学可行的全过程减碳策略，以支撑建筑行业真正迈向低碳化、集约化和高质量发展。

1 装配式建筑全生命周期碳排放相关概念

1.1 装配式建筑

装配式建筑指将建筑结构系统、外围护系统、设备管线系统及内装系统各部分的主要部品部件在工厂预制完成，再运至现场装配集成的方式进行建造。典型构件包括墙板、楼板、梁柱、楼梯、阳台等，采用标准化设计、高精度连接的技术手段实现现场快速安装。减少现场湿作业及传统现浇施工，大幅降低扬尘、噪声、建筑垃圾，提高施工效率，也更有利于保证工程质量。工厂化生产环境便于质量控制与资源集约利用，有利于实现节能、节材与环保目标[1]。装配式建筑目前已有混凝土、钢结构、木结构等多种体系，适用于住宅、学校、医院、保障房、应急工程等场景，其核心特征包括设计标准化、生产工厂化、施工装配化、装修一体化、管理信息化，设计、生产与施工协同更加紧密，推动建筑业向工业化与智能化转型。

1.2 建筑碳排放

建筑碳排放是指建筑物从材料生产、运输、施工、运行到拆除各阶段直接或间接产生的二氧化碳排放。建材制造阶段因水泥、钢材等高耗能材料而产生大量隐含碳，施工阶段有机械设备运行时燃料燃烧的排放，运行阶段供暖、空调、照明、热水等使用行为是主要排放源，拆除阶段若没有充分回收资源会增加末端碳负担。碳排放计算的原理是将各活动量与相应排放因子相乘，且目前已有《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）明确指导。当前建筑碳排放管控的重点已从单一运行能耗转向全周期碳足迹评估，故而优化结构形式、选用低碳建材、提高围护性能、集成光伏系统、推行智能用能管理，可有效削减各阶段排放。新建项目需在可行性研究及设计阶段开展碳排放分析，将其作为方案比选、绿色决策的可靠依据，支撑建筑领域低碳转型实践。

1.3 建筑全生命周期

建筑全生命周期涵盖项目从前期策划、设计、施工、运营维护、拆除及资源再生等阶段，且各阶段彼此衔接、互为因果，对建筑的功能表现、经济指标、环境负荷共同影响。策划阶段确定建设目标及约束条件，设计阶段确定技术路线及材料方案，奠定性能基础，施工阶段通过精细化管理实现高效建造；运营阶段持续时间最长，关注设施运行效率、空间适应性及用户舒适度，

作者简介：刘晓彤（1988-），女，本科，工程师，研究方向：土木工程。

拆除阶段强调有序解体与建材循环利用，减少废弃物。全生命周期管理依托BIM、物联网等技术手段打通数据链条，支持跨阶段协同决策，管理重心从初期投资转向长期综合效益，切实降低运维支出，延长使用年限，提高资产价值。

2 装配式建筑全生命周期碳排放问题分析

2.1 设计阶段

设计阶段对装配式建筑全生命周期碳排放具有决定性影响。标准化、模块化的设计理念可减少构件种类与连接复杂度，提升工厂生产效率并降低材料损耗。结构体系选型直接关联碳排放强度，钢结构体系由于自重轻、可回收性好，在部分项目中展现出优于混凝土体系的减碳潜力。围护系统设计若能合理地整合高性能保温材料及气密构造，可显著降低后续使用阶段能耗。设备管线、内装一体化协同设计能避免后期拆改，减少资源浪费[2]。BIM技术在设计阶段的应用有利于多专业协同，准确统计材料用量，优化运输、装配方案，为碳排放测算提供可靠的数据基础。绿色建材的选用宜在设计初期就确定，优先采用再生骨料、低碳水泥或生物基材料，从源头削减隐含碳。设计深度不够极易导致现场返工或构件替换，从而增加无效碳排放，因此深化设计及预制率控制成为关键环节。

2.2 构件生产阶段

构件生产阶段碳排放主要源于原材料获取、加工制造及厂内能源消耗。其中混凝土预制件因水泥熟料煅烧过程释放大量二氧化碳，构成该阶段主要排放源，而钢材构件则依赖电炉或高炉冶炼，电力结构直接影响碳足迹。工厂化生产虽集中能耗，但通过规模化作业、余热回收、自动化设备可提高能效。使用再生骨料或粉煤灰替代部分水泥可降低单位构件碳排放。从碳排放因子的角度看，能源结构清洁化是减排的可靠路径，引入光伏、地源热泵等可再生能源供电可大幅削减间接排放。但生产计划不合理造成的库存积压或重复运输会增加隐含碳负担，碳排放因子数据缺失或不统一影响核算准确性，亟需建立覆盖主流预制构件的本地化数据库。

2.3 安装施工阶段

安装施工阶段碳排放集中于现场吊装、临时支撑、节点连接及少量现浇作业。与传统现浇建筑相比，装配式方式大大减少了湿作业时间，因而能减少模板支设、混凝土搅拌、养护等高碳活动。大型起重机械燃油消耗构成主要排放源，其使用频次及作业效率受构件尺寸、吊装顺序、场地组织影响。运输距离过长或路线规划不当，导致构件进场过程中柴油车排放增大。现场管理若不精细，构件破损或安装错误会造成返工及额外材料浪费。干式连接技术的推广应用可减少后浇混凝土用量，直接降低碳排放。施工组织设计需统筹物流、吊装与工序衔接，实现“一次就位、精准装配”，避免无效移动及等待。现场临时设施如围挡、办公用房若采用可周转模块，亦有助于降低整体碳足迹。

2.4 运行维护阶段

运行维护阶段是装配式建筑全生命周期中碳排放占比最高的环节，主要来自采暖、制冷、照明、通风及生活热水系统的长期能源消耗，建筑气密性、保温性能直接决定热损失水平，因此高性能外窗配合连续保温层能降低负荷需求。设备系统能效等级、智能控制策略及用户行为共同影响实际用能强度。部分项目在设计阶段已集成太阳能、光伏、空气源热泵等可再生能源系统，形成运行期碳抵消[3]。定期检修、及时更换滤网、主动调适系统等精细化运维措施可维持低能耗状态。屋顶绿化、垂直植被等碳汇设计也具有辅助减碳功能。该阶段的减排潜力高度依赖于前期设计质量及后期管理能力，且有极强的长期持续性。

2.5 拆除处置阶段

拆除处置阶段碳排相对较低，但资源回收水平对全周期环境性能有直接影响，装配式建筑因采用标准化连接节点，具备良好的可拆解性，有利于构件完整回收再利用。混凝土构件破碎后用作路基材料或低标号混凝土的再生骨料，减少天然砂石开采及填埋过程中的碳排放。钢材构件除锈后可直接回炉再生，形成材料闭环循环，体现显著负碳效应。不当的拆除方式如爆破、重型机械碾压，必然造成材料损毁，失去再利用价值。缺乏分类收集及逆向物流体系，可回收物就会混入建筑垃圾，增加处理能耗。因此，拆除前进行构件评估并制定合理拆解方案，可最大化保留高价值可回收物。

3 装配式建筑全生命周期碳排放问题的应对策略

3.1 设计阶段策略

设计阶段是装配式建筑碳排放控制的源头环节，通过融入绿色设计理念，降低后续各阶段的环境负荷。采用模块化、标准化的设计方法，减少构件种类及连接节点的复杂度，有利于提高工厂预制效率、保证现场装配精度。在材料选用上优先采用低碳或再生建材，如高炉矿渣水泥、再生骨料混凝土等，从源头削减隐含碳。结构体系优化亦是关键，借助BIM技术对多种方案做严谨比选，在满足功能、安全的前提下减少材料用量。同时，建筑朝向、窗墙比及遮阳系统的设计都应结合当地气候特征，尽量减少对机械通风及空调

系统的依赖。集成自然采光引导、被动式隔热构造、屋顶绿化等，可有效降低建筑运行能耗。设计时要前瞻性地统筹未来维护、改造、拆除的便利性，预留构件更换通道及拆解接口，为全生命周期末端阶段的资源回收创造条件。

3.2 构件生产阶段策略

构件生产阶段的碳减排聚焦于工艺优化与资源高效利用。预制工厂宜建立精细化的生产管理体系，从图纸会审、模具准备、钢筋加工、混凝土浇筑、养护脱模等环节实施全过程控制。优化混凝土配合比，掺入粉煤灰、硅灰等工业副产品替代部分水泥，减少高碳排原材料的使用。同时推广蒸汽养护余热回收系统，精细调控升温、恒温、降温各阶段的速率，避免能源浪费，防止构件开裂。钢筋加工采用数控设备精确下料，减少边角废料，模具重复使用率提高摊薄单位构件的制造碳足迹[4]。原材料进场后严格检验、规范分类存储，杜绝不合格品进入生产线造成返工。引入信息化管理系统对物料流、能源流进行实时监测，及时发现高耗能工序予以改进。应用自动化布料、智能振捣、机器人焊接等技术，提高产品一致性，降低人为因素造成的废品率。

3.3 安装施工阶段策略

安装施工阶段减碳核心在于缩短工期、减少现场作业及废弃物产生。依托 BIM 模型做施工模拟，查找管线碰撞及安装冲突，避免现场切割、返工。采用模块化吊装策略，把若干构件及设备机房在工厂集成大型单元，现场一次就位，大幅压缩高空作业时间及机械台班消耗。运输环节实施集中配送、路径优化，选用新能源或低排放货运车辆，合理装载提高单次运量。施工现场实行“无尘化”管理，预制构件精确对接，湿作业大大减少，杜绝传统现浇过程中产生的建筑垃圾。设备吊装前专门制定吊装方案，明确吊点、路径、应急预案，力求一次吊装成功，杜绝重复起吊造成的能源浪费。施工人员接受专项技术交底，熟练掌握装配式节点连接工艺，保证安装质量一次成优，避免因安装缺陷而导致后期维修时的碳排放。

3.4 运行维护阶段策略

运行维护阶段碳排放主要源于建筑使用过程中的能源消耗，需通过系统性措施实现长期节能。建筑交付后应建立智能运维平台，将照明、暖通、电梯诸子系统数据有机集成，实现用能动态监测、实时优化调控。同时大力推广太阳能光伏板、空气源热泵等可再生能源设备，替代部分电网电力及化石燃料。外墙、屋面、门窗的保温隔热性能在使用期宜定期检测，及时修补破损密封处、重做脱落保温层，保持围护结构热工性能的稳定。鼓励用户行为节能，如设置分户计量及用能反馈系统，潜移默化地提高居住者节能意识。维护策略以预防性保养为主，避免事后维修，延长设备寿命、降低更换频率[5]。公共区域照明及水泵等设施宜采用感应控制、高效电机，降低待机及运行时的能耗。定期开展建筑能效评估，据评估结果调整运行参数或进行局部改造，持续挖掘节能潜力。

3.5 拆除处置阶段策略

拆除处置阶段的明确目标是最大化资源回收与最小化填埋焚烧。建筑拆除前应编制构件拆解方案，充分利用设计阶段所预留的拆解信息，以非破坏性或低损伤方式将主体结构与连接件可靠分离。混凝土构件破碎筛分后所得骨料可直接用于路基或再生混凝土，钢材、铝材等金属材料熔炼回炉，实现闭环循环。木材、石膏板等有机及轻质材料分类收集后送交专业处理厂进行能源回收或再制造。拆除过程中尽量避免使用高冲击力机械，而采用液压剪、绳锯等精细施工工具保护材料完整性。建立建筑“身份证”制度，记录各构件材料成分与连接方式，为今后高效拆解提供数据支持。回收材料的质量检测及分级标准也宜统一，确保再生产品符合工程应用要求。

4 结束语

装配式建筑的低碳潜力不能仅停留在施工便捷性的表面优势，必须深入其全生命周期各环节，系统识别并解决碳排放问题。从设计阶段主动控制材料及构造选择，到生产阶段提高能效、优化资源利用，再到施工、运行、拆除等阶段的精细化管理，每个阶段都需嵌入减碳思维。唯有打破阶段壁垒，构建覆盖“生—产—用—废”全过程的协同减排机制，装配式建筑才能真正成为建筑业实现绿色低碳转型的坚实载体，为国家“双碳”战略提供有力支撑。

参考文献：

[1] 王辉，张程哲．超低能耗装配式建筑碳减排驱动因素研究 [J]. 四川建筑科学研究，2025,51(01):90-96.
[2] 梁春峰，王一飞，岳琳，等．全生命周期视角下装配式建筑减排有效路径研究 [J]. 四川建材，2025,51(02):45-47.
[3] 李军辉．装配式建筑全生命周期碳排放及减碳策略分析 [J]. 建筑安全，2024,39(11):30-35.
[4] 王彤云．全生命周期下装配式建筑减少碳排放的路径分析 [J]. 中国建筑装饰装修，2024(21):90-92.
[5] 干申启，高洁．装配式建筑全生命周期碳排放问题分析 [J]. 建筑与文化，2024(06):27-30.

交通道桥施工质量问题及控制措施研究

南国领[1]，于海洋[2*]，纪长卫[3]

（1. 山东浩然人力资源管理有限公司，河南 郑州 450000;
2. 青岛千福建筑工程有限公司，山东 青岛 266000;
3. 华安国建项目管理咨询（北京）有限公司，山东 德州 253100）

摘 要 本文围绕交通道桥施工质量问题与控制措施思路展开研究，分析了设计、施工技术、管理、环境等诸多方面的因素对施工质量产生的作用，深度剖析了设计阶段图纸不规范、施工工艺落后、现场管理松懈等问题，提出了加强设计审核、引进现代施工技术、改良施工管理、增进施工人员技能等质量控制措施，以期为交通道桥施工质量控制提供实践参考。研究证实，严格的质量控制体系、先进技术应用与人员培训，可以有效地加强施工质量的实际作用。

关键词 交通道桥；设计审核；施工质量；施工管理；设备管理

中图分类号：U415；U445 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.030

0 引言

交通道桥是交通基础设施的重点构成要素，直接关系到道路的通行能力和安全性，实际施工过程中却经常出现质量控制不到位的问题，影响项目建设质量与进度。本研究从分析交通道桥施工质量问题出发，讨论造成这些问题的原因，提出相应的质量控制措施。通过整合设计、施工技术、管理、环境等多个要素，提出综合性的解决方案，并结合实际案例，就BIM技术、现代施工工艺以及人员培训等手段应用到施工质量控制当中进行研究，旨在为提高交通道桥工程施工质量提供参考，进而保障工程施工安全。

1 交通道桥施工中的质量问题分析

1.1 设计阶段的质量问题

交通道桥项目设计阶段质量问题常来自设计图纸不够规范或者设计人员工作的疏漏。项目实行时，施工图与设计图不符的情况比较常见，容易造成施工的偏差，加大返工的风险。材料与结构设计方案的合理性不足也是交通道桥施工中较为常见的问题，大多由于缺少对现场实际情况的开展考量，无法切实满足工程的功能需求，严重时甚至造成项目中途停工[1]。这类问题会直接妨碍后续施工的正常推进，造成建设成本上升，还会对项目整体进度产生不利的影响。

1.2 施工技术与工艺问题

交通道桥施工技术与工艺问题突出，施工队伍的技能水平参差不齐，部分技术人员未按规范实行施工，出现操作不当或者技术标准执行不到位的现象，从而导致施工的质量得不到保障，部分项目的传统施工工艺过时且能力低下，难以满足现代化、高效化的施工需求，这直接影响了施工的进度以及质量，造成了资源的浪费以及时间的延误。一些繁复的工程没能有效地引入创新工艺或者使用高效设备，也使得施工能力无法得到有效增强，制约了工程的整体质量与效益。

1.3 施工管理与监督问题

交通道桥施工中的管理与监督问题通常表现在现场管理松懈和沟通不畅，导致施工人员对施工标准的理解存在差异，进而影响质量控制的有效性。质量检测与验收标准执行不到位，一些项目对质量检查重视不足，未能及时发现施工中的问题。管理上的疏漏不断积累，最终严重影响了整体工程质量的稳定性和安全性。尤其是在施工阶段，缺乏高效的质量监控机制和标准化管理流程，导致了部分施工人员和管理层对质量要求认识不足，未能形成有效的质量控制文化，造成隐患累积。

1.4 环境与设备因素的影响

环境与设备因素这两者对交通道桥施工质量有着不可忽视的影响。施工环境的变化，如气候的变化或

作者简介：南国领（1991-），男，本科，研究方向：高速公路试验检测。
*通信作者：于海洋（1989-），男，本科，研究方向：土木工程、道路桥梁工程。E-mail：86175020@qq.com

者复杂的地质条件，可能导致施工进度延误，甚至影响施工质量的稳定性，如恶劣天气或者土壤的不稳定性可能使得施工现场无法按计划推进，增加了施工的难度与成本。设备的故障或者性能的不足也是交通道桥施工当中的重要问题。设备老化、调度不当或者维修不到位，往往导致施工精度不达标，最终影响工程的整体质量以及安全性；施工设备的管理不到位，可能使得设备使用能力减少，进而影响项目的整体进度[2]。

2 交通道桥施工质量问题的成因分析

2.1 内部管理因素

交通道桥施工中的内部管理因素是影响施工质量的关键之一。项目管理不完善通常表现为缺乏有效的前期规划和资源调配，进而导致施工过程中出现滞后和失误。施工团队的协同合作常因管理层沟通不畅而受到影响，进一步加剧了质量隐患的积累。施工队伍素质参差不齐的问题则在于，一些施工人员未接受足够的培训，缺乏必要的技术知识和操作规范，这使得施工过程中出现了较高的操作失误率。由于技术交流不畅，施工过程中技术问题未能及时得到解决，影响了施工质量的控制。

2.2 外部环境因素

外部环境因素对交通道桥施工质量的影响不可忽视。尤其是气候和地质条件的变化，可能导致不可预见的施工困难。例如：施工现场突遇恶劣天气，或者遇到复杂的地质状况，都可能打乱施工部署，从而影响施工质量。在项目外在环境中，资金压力以及施工周期紧张同样是重要的制约因素。资金不足使得物资采购延误，质量控制环节削减，施工时无法使用高标准的材料以及设备，施工周期紧张，则容易导致工期内质量管理的忽视，造成后期无法修复的质量缺陷。

2.3 技术与工艺因素

交通道桥施工的技术和工艺因素，尤其是在引入新技术的过程中，往往伴随较高的不确定性和潜在风险。新技术的应用虽然能够提升施工效率，但技术成熟度较低时容易在实施过程中出现问题，导致施工质量未能达到预期水平。传统工艺以及现代技术的融合问题，同样制约了施工质量的提升。就施工方法这一点，一些项目过度依赖传统做法，没有很好地利用现代技术手段，使得施工进度拖沓、质量波动较大，传统工艺与现代技术融合不到位，缺乏标准化以及规范化管理，也会使施工质量控制难度明显加强。

3 交通道桥施工质量控制措施

3.1 加强设计与规划阶段的质量控制

交通道桥施工中的设计与规划阶段的质量控制十分重要，确保设计图纸以及实际施工图纸一致，不仅可以减少施工中的返工，还能保证施工质量的稳定性。交通道桥施工的设计方案中，材料与结构设计的合理性审查同样不可忽视。设计团队需要根据工程的实际需求，合理地选择材料以及结构形式，防止因设计缺陷引发施工难题，这样可以保障施工的顺利进行，也能提高工程的安全性和可靠性[3]。

交通道桥施工中的风险评估与预防措施也不可忽视。在设计阶段，应该对可能出现的工程风险进行详细评估，并制定应对策略。此类风险包含地质环境的变化、施工材料的问题等，通过提前识别潜在风险，施工团队可针对性地采取防范措施，避免不可控的因素干扰施工进程，保证工程质量与工期目标的实现。

3.2 提升施工技术与工艺水平

交通道桥施工的技术与工艺水平直接影响工程质量，引进与推广现代施工技术有利于加强施工效率以及施工质量，减少因技术落后导致的质量偏差。例如：使用 BIM 技术、3D 建模等新兴的技术，可以准确地模拟施工流程，提前发现潜在的问题并加以解决。借助上述技术手段，交通道桥施工不仅增加了设计的准确性，又可以保证施工时的高效运转，减少施工时的误差和资源的浪费。

工艺流程的改良，也是确保交通道桥施工质量提升的重要环节。改良各施工环节的流程，合理地配置人力、物力以及时间，可以有效地减少施工误差，减少材料的浪费，施工团队需严格地按照改良流程操作，保证各环节达到质量标准。加强施工人员的技术培训，使他们掌握高标准的操作技能，这是保证施工质量稳定的关键所在。通过持续开展技术交流与技能培训，交通道桥施工人员可以更好地适应新技术的应用，保证质量管理得到严格执行。

3.3 强化施工管理与监督机制

交通道桥施工的管理与监督机制是保证施工质量的基础。完善质量检测体系，可以实时地监控施工的各个环节，保证施工材料、工艺以及设备等均符合设计要求，质量检测不只限于材料进场与施工过程，还应包含各个施工环节的实际操作。交通道桥施工中的全程监控可以及时地发现问题并做出调控，有效地避免质量事故的发生，保证工程按计划顺利地完成。

交通道桥施工现场的日常管理以及质量巡查同样十分重要。管理人员应保证施工现场按照规定的施工流程操作，及时地发现施工可能出现的质量隐患，需设立专职的质量监督人员，专门负责质量检查与执行，保证所有的施工操作都严格地按照质量标准实行[4]。质量监督人员定期地检查和跟踪管理，可以防止施工时因监管缺失引发的质量问题，保证整体工程质量稳定。

3.4 强化环境与设备管理

在交通道桥施工当中，环境与设备管理对工程质量有着深远的作用。合理地调度施工设备，可以保证设备的合理使用，提高施工效率。设备调度必须根据施工需求实行精确地安排，避免因设备不足或者故障而延误施工进度。定期地检查和维护施工设备，可以最大限度地减少设备故障给施工质量带来的影响，保证施工过程的高效性与精确度。

交通道桥施工中的环境因素同样需要重视。特别是在面对恶劣气候或复杂地质条件时，施工团队必须提前制定应急预案。通过防护措施，如雨季施工时的排水系统、寒冷天气中的防冻措施等，交通道桥施工团队能够有效应对外部环境对施工质量的影响。这些应急预案能够帮助施工团队在极端天气或复杂地质条件下确保工程的安全与质量，降低环境对施工进度和质量的干扰。

3.5 强化施工人员的培训与素质提升

交通道桥施工人员的技能水平直接决定了施工质量的高低，定期地开展技术培训与技术交流，可以有效地提高施工人员的操作水平，使他们掌握最新的施工技术和操作规范。施工人员技能的提升，能够提高施工效率，还能减少因操作不当或者技术不熟练导致的施工质量问题。通过持续的技术培训，交通道桥施工人员可以适应不停变化的施工要求，保持高效稳定的工作状态。

建立施工质量责任制是提升施工质量的另一关键措施。通过明确每个施工环节的责任人，确保每位施工人员都对自己的操作负责，能够有效提升施工质量。责任制的落实能够加强施工人员的质量意识，避免因疏忽大意而导致质量问题的发生。通过责任制，施工质量得到了有效保障，施工人员对质量控制的参与度和重视度大大提高，从而确保了交通道桥施工的质量和安全[5]。

4 案例分析

京沪高速公路桥梁建设项目中，项目团队采取了一系列精细化的质量控制措施，从设计到施工的各个阶段均严格地把关。在设计阶段，项目团队对所有设计图纸实行了多次审查以及校对，保证施工图与设计图完全一致，避免了因设计不符引起的施工偏差。在施工过程中，项目引入BIM技术实行三维建模与施工模拟，针对每个施工环节进行了详细预演，提前发现并解决了设计和施工里的潜在冲突，特别是桥梁钢筋以及混凝土浇筑阶段，项目实行严格的材料检测标准，确保了混凝土的强度与钢筋的合规性，保证桥梁结构的稳固以及安全。

项目团队对施工人员的技术素养进行了重点培养。定期开展技术培训，确保所有施工人员熟练掌握现代施工技术和操作规范。施工现场的质量监督人员定期巡查，确保每个施工环节都按照标准流程进行。在施工过程中加强了对设备的管理和调度，确保了施工设备的良好状态和高效运转。在面对极端天气和复杂地质环境时，项目团队提前制定了应急预案，确保了施工过程中气候因素对施工进度和质量的影响降到最低[6]。最终，京沪高速公路桥梁建设项目顺利完成，项目按时交付，还在质量验收中得到了业主方的高度评价，成为业内典范，充分展示了现代化质量控制手段的有效性。

5 结束语

交通道桥施工质量问题多源于设计不规范、施工技术落后、管理松懈以及环境变化等因素，通过加强设计图纸审核、引入先进施工技术、强化现场管理以及设备调度等可以有效地提高施工质量。实践经验表明，建立完善的质量控制体系并准确运用相关技术，是确保项目高效优质完成的关键。未来，交通道桥施工将更加依赖信息化与智能化技术，如BIM和物联网，加强质量监控以及预测能力，通过加强管理层与施工人员的协作与培训，施工质量将持续提升，确保工程的长期稳定性和安全性。

参考文献：

[1] 余黎明.新型道桥施工技术与材料在改进行车安全中的应用[J].四川建材,2025,51(07):201-203.
[2] 王大伟.市政道桥施工质量控制要点研究[J].现代工程科技,2025,04(04):185-188.
[3] 胡丽娟,谢晖,高兵.道桥施工中路面病害的类型及维修技术研究[J].重庆建筑,2024,23(07):82-84.
[4] 张志林.道路桥梁施工技术与施工管理若干建议[J].散装水泥,2024(03):207-209.
[5] 甘剑剑.市政工程道桥施工管理中的问题与质量管理措施探寻[J].中国设备工程,2023(07):243-245.
[6] 李敏.道桥工程监理中施工质量问题的处理与控制措施探析[J].城市建筑空间,2022,29(S2):416-417.

市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺

叶立山

（莱州市恒通园林绿化工程有限公司，山东 烟台 261400）

摘 要 本文围绕市政道路桥梁裂缝这一高频病害，构建微创注浆快速修补工艺体系。立足于裂缝类型、空间分布和劣化链条，指出传统填缝、挖补创伤大、封闭时间长且难触及深部隐患。提出以小孔径定向钻孔为载体的微创注浆路径，将高流动浆材引入裂缝及板底脱空区，恢复受力连续性，并形成“病害识别—分级处治—精细布孔—过程管控—效果追踪”的工艺框架。青岛S310躬崔线大修实践表明，环氧树脂液注浆配合裂缝封闭和层次化翻修，在77 d内完成通车，在耐久性能、工期控制和交通组织之间取得较为稳健的平衡，验证该工艺在国省干线及城市桥梁上的工程适用性。

关键词 市政道路桥梁；裂缝；微创注浆；快速修补

中图分类号：U418；U445 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.031

0 引言

市政道路桥梁工程的正常使用在城市交通中发挥着至关重要的作用，但是其常见病害的出现对城市的交通带来诸多不便。市政道路桥梁工程的常见病害主要包括桥面路面不均匀沉降、桥梁道路出现裂缝、桥梁道路内部钢筋腐蚀以及桥面路面剥蚀等[1]。在诸多病害之中，裂缝既是最常见的表层缺陷，又是内部劣化的主要通道，传统填缝挖补难以阻断劣化链条，亟需构建以微创注浆为核心、兼顾快速封闭与结构加固的修补工艺体系。

1 市政道路桥梁裂缝病害特征与修补需求分析

1.1 裂缝类型与空间分布特征

市政道路桥梁裂缝在构件层次和空间分布上呈现复合特征。桥面铺装多见纵向、横向、网状及块状裂缝，常沿行车轨迹和轮迹带集中，反映面层与基层受力不协同。主梁腹板、横隔板及支座附近易出现斜裂缝和贯通裂缝，顺应主拉应力方向扩展，对承载性能影响更直接。城市桥梁处于高频启停环境，伸缩缝附近、梁端和桥头搭接处裂缝密集，这些部位共同构成若干易损带，需要在工艺设计阶段单独识别并实行分区治理。

1.2 裂缝发展机理与服役工况耦合作用

裂缝演化受材料内在缺陷与服役工况叠加驱动。早期干缩和温度收缩在混凝土内部形成微裂隙，后续车轮反复荷载使这些弱面逐渐贯通，疲劳主裂缝由此形成。地基差异沉降、支座错动以及施工阶段遗留的空鼓和离缝改变局部内力路径，使一些次要裂缝在高周荷载下加剧开展[2]。城市桥梁长期暴露在雨水、融雪剂和尾气环境中，裂缝一旦产生，渗水穿透保护层引发钢筋锈胀，化学侵蚀和力学损伤交织，使表层病象升级为整体耐久隐患[3]。

1.3 传统修补方式适用边界与局限性

常用裂缝处置多采用填缝、贴缝、开槽灌缝以及小范围挖补等工艺，适合宽度较小、深度有限或位移较稳定的裂缝，在一定时期内能够改善行车舒适性并强化表面防水。对存在板底脱空、钢筋锈蚀和内部空洞的构件，这类方式难以触及病害根部，表层观感恢复之后，裂缝附近依然残留应力集中区，后期极易在原缝位置或邻近区域再次开裂[4]。挖补和开槽作业占道面积较大，施工噪声明显，还会削弱原有结构整体性，维护周期偏短、交通影响偏重的矛盾始终难以缓解。

1.4 微创、快速、耐久一体化修补需求的提出

在上述矛盾背景下，道路桥梁裂缝处置逐渐转向对微创、快速、耐久一体化方案的期待。微创注浆技术依托小孔径定向钻孔，把高性能浆材送入裂缝深部及板底脱空区，一次作业同步完成裂缝封闭、脱空填充和局部刚度恢复，桥面外观保持连续完整。高早强、湿粘结性能优良的材料配合夜间封闭，可在短时间内恢复开放通行，将交通干扰压缩在可控窗口。重载改扩建工程的经验表明，此类注浆工艺在成本节约、施工效率和使用寿命延长方面表现突出，为市政桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺的系统应用提供了现实基础。

作者简介：叶立山（1971-），男，本科，工程师，研究方向：市政工程。

2 裂缝微创注浆快速修补工艺的理论基础与技术内核

2.1 微创注浆对结构性能的作用机理

微创注浆依托小孔径定向钻孔，将高流动浆体引入裂缝及板底脱空区，在硬化阶段形成与原结构密贴的“补强结石体”，重建损伤部位的受力连续性。板底接触状态改善后，弯沉曲线趋于平缓，轮载引起的拉应力峰值降低，疲劳损伤累积速率随之减小，桥面铺装和主梁局部刚度得到实质恢复[5]。相关高聚物注浆技术实践表明，经注浆加固的路面或路基在动刚度、沉降控制方面表现出较好的稳定性，为市政道路桥梁裂缝微创修补提供了明确的力学支撑路径。

2.2 注浆材料性能需求与配比思路

面向桥梁裂缝微创注浆，浆材既承担填充和粘结角色，又参与长期受力，性能要求远高于一般堵漏材料。低黏度和适度渗透性有利于进入细小裂隙和板底缝隙，早期强度形成速度需契合夜间封闭时长，体积稳定性与柔韧性决定修补区后续开裂风险，耐水和耐介质侵蚀性能关系到耐久水平。聚氨酯、高性能水泥基、地聚合物浆材在配比上可围绕“流动性—膨胀度—强度形成速率”三组参数进行权衡，通过调节多元醇、异氰酸酯或碱激发体系组分比例，实现适用于市政道路桥梁裂缝修补的综合性能组合。

2.3 微创注浆与传统注浆工艺的区别

传统注浆更偏向结构加固或地基处理，孔径较大、孔数较多，注入体积和压力水平较高，施工扰动明显，难以在城市高密度路网中频繁采用。微创注浆强调“小孔、小量、定向”，依托雷达等无损检测结果布孔，注重对裂缝及其背后脱空区的精准覆盖，尽量保持桥面铺装和构件外观完整。采用高聚物或地聚合物材质后，注浆孔直径可控制在厘米级，固化时间缩短，施工队伍以移动作业点的方式推进，道路封闭范围和时长大幅压缩，在功能上更贴近“外科手术式”病害治理。

2.4 “快速修补”的时间尺度与控制要点

市政道路桥梁多采用夜间短时封闭，微创注浆要真正称得上“快速”，关键在于把握时间尺度和控制指标，而不是简单强调固化速度。实践表明，高聚物注浆材料在30～90 min内可形成可观承载能力，但开放交通前仍需核查弯沉、挠度和板底充填度等指标，将早期刚度恢复到安全阈值以上。在施工组织方面，检测、钻孔、注浆、封孔和验收需编排成紧凑工序链，避免等待时间相互叠加；材料配方则应针对当地气温和构件厚度进行微调，使凝结与强度增长曲线贴合交通放行节点，形成“诊断—修补—通行”一气呵成的节奏。

3 市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补工艺体系构建

3.1 病害识别与分级处治决策框架

微创注浆要真正发挥结构修复作用，前提是将裂缝从“表象损伤”还原为“结构病灶”。近年来，沥青路面裂缝注浆处置多采用三维探地雷达、弯沉检测、取芯等组合手段，建立“表层开裂—基层脱空—路基软弱”多层次画像，进而判断裂缝是否伴随脱空、唧浆、渗水等隐患。在此基础上，可构建以受力性质和病害深度为主线的分级框架：表层疲劳微裂缝以表面封闭与薄层罩面为主；反射裂缝与温度裂缝中，若无明显脱空，可采用开槽灌缝配合封层；一旦探测结果显示半刚性基层或混凝土构件存在空洞、界面剥离，则划入“结构型裂缝”，列入微创注浆处治清单，优先安排在交通量大、结构安全储备偏低路段。

青岛市S310躬崔线龙青高速至莱西平度界段大修工程体现了这种分级思路。该项目全长12.765 km，在常规铣刨、基层重构基础上，针对不同病害设置“水稳基层开V型槽灌缝147 m、热沥青灌缝202 m、混凝土裂缝环氧树脂封闭350.4 m^2、环氧树脂液注浆139.9 m”等差异化工序，将适宜表层整饰的裂缝与需要注浆加固的混凝土裂缝区分处理，既避免“大拆大建”，又给注浆工艺留出明确边界，最终实现大修工程77天完工、交工质量评定合格。决策链条从“识别—分级—配匹工法”一气呵成，为微创注浆嵌入国省干线路网养护提供了可复制的决策模板。

3.2 布孔策略与注浆路径设计原则

微创注浆强调“少扰动、深嵌合”，布孔策略决定浆液能否精准抵达目标缺陷区域。近年来工程实践中，将“微孔”注浆界定为在直径约2 cm的小孔内实施自下而上的注浆作业，以减小对既有结构和行车安全的影响。在裂缝处治场景下，布孔宜遵循三条主线：一是孔位随裂缝走向布设，优先覆盖裂缝交汇点和弯折处；二是孔深匹配结构层次，对沥青面层—半刚性基层—混凝土构件等不同组合设置分层目标深度，避免浆液在上部过早扩散；三是结合雷达和弯沉检测结果，对脱空集中区、桥头搭接区、伸缩缝附近适度加密，以形成连续的注浆“骨架通道”。

从S310躬崔线大修工程的工程量配置可以看出，注浆主要服务于“点状+线状”混凝土裂缝集中区：工程量清单中环氧树脂液注浆仅为139.9 m，却配套

350.4 ㎡ 裂缝封闭与大规模面层、基层重构，说明注浆区段高度聚焦，优先投向对整体耐久性影响较大的关键构造部位。在该类项目中，设计和施工单位普遍采用“裂缝定位—结构判别—局部加密”的布孔思路，由现场病害详查确定注浆段起终点，再依照构件几何形态和钢筋布置情况，细化孔距和孔深；这种以“少孔精准”替代“密孔铺排”的策略，降低钻孔干扰，压缩封闭时间，同时为后续封层、罩面等工序预留连续作业面，符合城市通行压力下的现场组织需求。

3.3 施工过程关键控制环节

微创注浆修补虽带有“微创”二字，却对施工组织和细节控制提出了更高要求。从工艺链条看，关键环节至少包括裂缝及构件表面处理、钻孔与清孔、注浆压力与流量控制、封孔整饰四个阶段。裂缝处治类工程中，清除松散材料和水分是注浆前的首要任务；高聚物注浆工程常采用钢钎自重贯入法检验孔内残渣清理程度，以能在约 1 s 内自由贯通孔深为合格标准，确保浆液在预定通道内扩散。注浆阶段需要兼顾“充盈度”和“控升量”，一方面根据实时压力变化判断空腔填充情况，另一方面严格控制抬升量，避免桥面板、盖板沟等轻薄构件产生翘曲。高聚物类材料常见凝胶时间约 5 min、30 min 左右可承受行车荷载，为夜间封闭、白天放行提供条件。

S310 躬崔线大修工程的时间表凸显了施工组织的紧凑性。项目合同价约 5.11 亿元，施工段长 12.765 km，实际工期仅 77 天，需同时完成大规模铣刨、基层重建、沥青面层摊铺和桥涵构造物修复等多专业交叉作业。在这种条件下，环氧树脂液注浆工序通常被安排在交通封闭窗口期靠前位置，先完成钻孔和注浆，再依次推进裂缝封闭、混凝土修补和面层铺筑，以避免交叉工序污染孔口或破坏注浆体。现场经验表明，能够把控好“窗口长度—材料凝固时间—工序衔接”三者之间的平衡，是微创注浆从技术方案转化为工程实绩的关键；一旦注浆固化时间与铣刨、摊铺节奏匹配不佳，就容易形成工点窝工或反复返修，弱化该工艺在“快速修补”上的优势[6]。

3.4 质量评价与效果追踪机制

微创注浆修补强调“结构性修复”，质量评价不能停留在视觉效果层面，而需形成从施工过程控制到服役期监测的闭环。现行实践中，施工期质量评价一般分为两类指标：一类为过程性指标，关注注浆量、压力曲线、孔内残渣清理程度、施工温湿度等记录；另一类为实体性指标，依托弯沉测试、钻芯检测、雷达成像等手段评判结构恢复情况。高聚物裂缝注浆工程的试验资料显示，注浆后裂缝处弯沉可降低约 20%，两侧弯沉差明显收敛，三维探地雷达图像中内部灰度均匀、振幅无异常增强，说明浆液在裂缝及脱空区形成连续“浆脉”，结构整体刚度得到恢复。

青岛地区的道路养护管理将这种实体评价纳入路网绩效考核。青岛公路事业发展中心提出国省道 MQI 和 PQI 优良路率保持在 99% 以上，同时在“路面裂缝处治、桥梁结构加固、拌合料管理”三大主题治理中，把裂缝处治质量视作长寿命路面的关键支点。S310 躬崔线大修工程交工验收结论为“合格”，在常规技术状况考核基础上，还叠加了对混凝土裂缝封闭面积和环氧树脂注浆长度的计量与外观检查，确保注浆部位无渗漏、无二次开裂。后续养护阶段，结合省级科技成果中提出的“病害识别—靶向注浆—结构修复”一体化工艺，可围绕注浆区段布设重点观测点，定期复测弯沉、裂缝宽度和路面技术状况指数，将微创注浆的短期补强效果转化为可量化的中长期性能曲线，为后续优化材料配比、注浆压力和施工窗口提供反馈，形成“修补—评价—再优化”的闭环机制。

4 结束语

综合裂缝劣化机理、浆材性能需求和施工组织条件来看，微创注浆为市政道路桥梁裂缝处置提供了一条兼顾效率与耐久的修补路径。青岛 S310 躬崔线大修工程显示，当病害识别、分级处治、布孔策略以及质量追踪形成闭环时，该工艺能够在有限时间窗内实现结构补强与交通恢复的统一。未来仍需围绕浆材长期性能、现场快速检测和标准体系完善持续深挖潜力，使市政道路桥梁裂缝微创注浆快速修补在更多城市场景中形成可复制、可评价的常规做法。

参考文献：

[1] 胡延涛，李元庆 . 市政道路桥梁工程的常见病害与施工处理技术探究 [J]. 居业 ,2021(10):54-55.
[2] 陈丽萍 . 高架交通荷载对下穿轨道交通沉降影响研究 [J]. 城市轨道交通研究 ,2025,28(05):312-314.
[3] 岳鹏威 . 市政工程桥梁设计与施工中的裂缝成因及预防措施 [J]. 工程抗震与加固改造 ,2024,46(06):200.
[4] 黄正明 . 关于灌浆法在市政道路桥梁隧道施工中的应用 [J]. 中国科技投资 ,2021(06):118-119.
[5] 张霄雷 . 探析市政道路桥梁加固设计的方法 [J]. 林业科技情报 ,2021,53(01):99-100,103.
[6] 郝明 . 市政道路桥梁混凝土裂缝成因分析及处理措施 [J]. 中国高新科技 ,2025(09):116-118.

建筑机电设备安装施工中常见问题及对策探析

王志超

（山东省禹城市新园热电有限公司，山东 禹城 251200）

摘 要 随着建筑行业的发展与进步，建筑的功能也更加多样和复杂，机电设备是建筑正常使用功能中的一个重要组成部分，其安装质量关系到建筑整体的安全、使用功能、使用寿命。建筑机电设备安装是建筑工程的核心组成部分，直接关系到建筑使用功能和安全性能。本文结合建筑机电设备安装施工全流程，分析施工准备、预埋预留、设备安装等环节的核心要点，主要分析设备安装偏差、管线排布不协调、电气系统有隐患以及施工监管有疏忽等典型问题，明确问题存在的主要原因，并提出针对性的解决措施，旨在为提升建筑机电设备安装施工质量、减少安全隐患提供理论参考，进而保障机电系统稳定运行，促进建筑工程高质量发展。

关键词 建筑机电设备；安装施工；管线布置；电气系统安装

中图分类号：TU85 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.032

0 引言

随着建筑行业向智能化、绿色化转型，建筑机电设备的种类不断丰富，安装施工复杂度大幅提升，其施工质量直接影响建筑的使用体验、安全性能和使用寿命。建筑机电设备安装包含给排水、电气、暖通等系统，包含工程前期筹备以及结构预留等关键步骤，专项作业存在失误会产生安全系统的薄弱部位，妨碍施工综合发展。当前，部分建筑机电安装施工中仍存在工艺不规范、管线冲突、管理不到位等问题，不仅增加施工成本和后期维修难度，还可能威胁人员安全。因此，系统梳理建筑机电设备安装施工流程，全方位探究常见故障及其引发原因，构造科学实用的解决办法，对使施工行为规范和保障机电设备长期正常运行具有切实的指导意义，也是推动建筑工程行业高质量发展的关键举措。

1 建筑机电设备安装施工流程

1.1 施工准备阶段

施工准备阶段是建筑机电设备安装施工的基础环节，直接影响后续施工的顺利推进和工程质量。该阶段需完成多项核心工作，首先要组织专业技术团队熟悉施工图纸，围绕建筑的整体面貌及功能定位，提炼机电设备安装的技术标准、工艺指标及安全要求，查看图纸内潜在的规划矛盾或缺陷毛病，即时反馈设计单位使其实施改良。其次，做好设备与材料的采购和验收工作，严格筛选符合设计标准和质量要求的机电设备、管线及配件，对进场材料进行抽样检测，杜绝不合格产品投入使用。同时，开展有效的施工管理措施，界定现场人员岗位所承担的义务，规划具体的工程阶段目标、安全实施计划与质量保障办法，完成工地清表与整平以及临时设施的建设，配备齐全施工所需的机械设备和工具，开展施工人员的技术培训和安全交底，确保施工人员熟练掌握施工流程和操作规范，为后续施工奠定坚实的基础。

1.2 预埋与预留阶段

预埋与预留阶段是建筑机电安装与主体结构施工衔接的关键环节，核心是为后续设备安装和管线铺设预留必要的空间和接口。该阶段需配合主体结构施工进度，严格按照施工图纸确定预埋位置、尺寸和标高，确保预埋构件的位置偏差控制在规范允许范围内。施工操作开展的时期，要增大预埋构件的紧固程度，规避混凝土浇捣时发生挪动扭曲或破坏问题，并且开展预埋区域的保护办法，阻止碎末进入套管与预留孔洞造成堵塞。对于给排水、电气、暖通等不同系统的预埋管线，要做好区分标识，避免后续施工出现混淆[1]。此外，需同步检查预埋构件的材质和安装质量，集中查看管线衔接的部位密封质量和预埋件的紧固情况，对施工偏差现象做到查出来就整改，保证预埋预留结果跟设计相符合，为后续设备就位以及管线施工做好铺垫，避免因预埋失误导致主体结构二次凿改，影响工程质量和施工进度。

作者简介：王志超（1983-），男，专科，工程师，研究方向：设备工程。

1.3 设备安装阶段

设备安装阶段是建筑机电施工的核心环节，需严格遵循施工工艺标准，确保设备安装精度和稳定性。施工前，需给到货设备做二次审核，审查设备规格是否满足图纸的要求，检查设备外观是否有破损以及配件数量是否齐全，对待调试的设备开展前期试车试验，排查设备自身故障。在安装过程中，根据设备类型和安装要求，采用合适的安装方法和工具，确保设备安装位置精准。对于大型机电设备，需制定专项吊装方案，合适配置吊具与承重点位，强化起吊过程安全方面的管理，防止器械碰撞毁坏和人员受到伤害，工程建设时要加大现场检查的次数，及时发现并整改安装过程中的偏差和质量隐患，严格执行质量验收标准，每完成一道安装工序都需进行验收，合格后方可进入下一道工序，保障设备安装质量符合规范要求。

1.4 系统调试与验收阶段

系统调试与验收阶段是检验建筑机电设备安装质量和使用性能的关键环节，直接决定机电系统能否正常运行。系统调试需按照先单机调试、后联动调试的顺序开展，单机调试重点检查单台设备的运行状态、性能参数，及时调整设备参数，确保单台设备运行正常。联动调试以机电系统整体作为要实施的对象，模仿实际工作的模式，对各设备和各系统的联动运行效率进行评估，排查系统过渡阶段的运行问题，订正系统运行参数的数字，使机电系统整体运转稳定且高效。调试完成后，进入验收阶段，验收需依据设计图纸、施工规范和质量验收标准，对设备安装质量、管线铺设质量、系统运行性能等进行全面检测，核查施工资料的完整性和规范性。

2 建筑机电设备安装施工常见问题分析

2.1 设备安装问题

设备安装环节是建筑机电施工中问题频发的环节，主要集中在安装精度不足、设备固定不牢固和设备与管线衔接不当三个方面。安装精度不足主要表现为设备标高、水平度和垂直度超出规范允许范围，大多是操作人员作业未达标准、量具测量精度不精准或施工流程校准有失误造成的，这类情况会造成设备运转可靠程度降低，要是使用年限过长会造成零部件磨损率提高以及噪声量增多，甚至引发设备故障。设备固定不牢固多是由于预埋件安装不合格、固定螺栓规格不符或紧固力度不足，在设备运行过程中易产生振动，不仅会影响设备自身使用寿命，还可能导致周边管线松动、接口渗漏[2]。设备与管线结合问题体现出接头密闭程度不好和衔接角度有差错，易造成给排水设施漏水以及暖通装置跑风等故障，造成机电设备运行产生阻碍，可能会造成未来养护费用增加，严重时还会引发安全隐患，如电气接触不良可能导致短路、火灾等事故。

2.2 管线布置问题

管线布置不合理是建筑机电安装施工中的常见问题，主要体现在管线布局混乱、管线冲突和管线敷设不符合规范三个方面。管线布局混乱多因施工前未做好管线综合规划，各类建筑的给排水、电气等管线有交叉重叠及布局失序状况，还占去了过多空间，给建筑整个生命周期的维护造成隐患，甚至给建筑立面的协调性带来损害。管线冲突是管线布置中最突出的问题，多因设计阶段未充分考虑各系统管线的布局，或施工过程中未严格按照施工图纸施工，导致不同系统管线在同一位置碰撞，无法正常敷设，需进行二次整改，延误施工进度，增加施工成本。管线布设存在的问题是坡度偏窄、固定间隔超限、接口操作不规范操作，这些施工的问题会造成排水系统运行不良好且产生淤堵，电气管线易受外力损坏，暖通管线漏风漏热，影响机电系统的使用性能，同时可能降低建筑的使用舒适度。

2.3 电气系统安装问题

电气系统安装直接关系到建筑用电安全，常见问题主要包括线路敷设不规范、电气设备接线错误和接地保护不到位。线路敷设不规范主要表现为导线敷设过程中未按要求穿管，线管转弯的空间过小，接线端处理技术方面不足，一些导线没有做绝缘包裹，这类隐患很容易造成线路绝缘能力变差，造成短路、漏电之类的安全隐患，同时可能造成线路的可靠期限被破坏。电气设备接线错误多因施工人员专业素养不足，未严格按照电气原理图接线，导致设备无法正常运行，甚至烧毁设备，如电机正反转接线错误会导致电机损坏，配电箱接线混乱可能引发电路故障。接地保护的不足属于电气工程施工里的高危隐患，具体呈现为接地电阻值超出标准所设定的范围、接地装置固定不够牢固以及接地线接线方式不符合规定标准，要是电力装置发生漏电问题，无法及时将电流导入地下，易造成人员触电事故，同时可能损坏电气设备，影响整个电气系统的稳定运行，不符合建筑用电安全规范要求。

3 建筑机电设备安装施工常见问题的解决对策

3.1 针对设备安装问题的对策

针对设备安装过程中出现的精度不足、固定不牢、衔接不当等问题，需从人员、技术、管理三方面制定针对性对策。首先，强化施工人员专业培训，提升操

作规范性，要求施工人员严格按照施工工艺标准作业，确保测量精度，避免因操作失误或工具误差导致安装偏差。其次，完善设备安装之前的审核流程，对接收设备开展综合性的审查，主要比对设备型号规格跟设计参数的相符程度、零件完好状况及设备运行质量，对损坏设备尽快采取更换或者维护的手段，于最初时期消除安装风险。针对设备固定不牢问题，严格把控预埋件安装质量，选用符合设计要求的固定螺栓，规范螺栓紧固流程并进行二次复核，防止设备运行中产生振动。对于设备与管线衔接问题，采用标准化接口连接工艺，加强接口密封处理，安装后进行压力试验或密封性检测，确保设备与管线衔接牢固、运行稳定[3]。

3.2 针对管线布置问题的对策

在施工之前组织所有专业的施工人员进行图纸会审，便于各专业间的相互沟通、协调。采用BIM技术搭建平台，对机电管线进行三维建模和碰撞检查，提早发现并处理管线交叉碰撞的问题，合理规划各系统管线的敷设位置和顺序，避免后期施工出现冲突。同时，制定管线敷设专项方案，明确管线排布的倾斜比例、固定间隔长度和接合处理的规定，实施阶段严格把控现场，要求作业人员将方案内容落实到位，对给排水、暖通、电气等系统的管线做类别标识，确保管线排列有序。此外，加强管线敷设后的验收工作，重点检查管线坡度、固定牢固性及接口密封性，及时整改敷设过程中出现的不规范问题，提升管线敷设质量。

3.3 针对电气系统安装问题的对策

针对电气系统安装中的线路敷设不规范、接线错误、接地保护不到位等安全隐患，需严格落实安全规范，强化全流程管控。首先，规范线路敷设工艺，全面把导线穿管措施落实到位，正确把控管线弯曲半径，把导线连接操作步骤做成标准样式，避免线缆有暴露的问题，加大导体的绝缘力度，从根本上降低短路漏电产生的概率。其次，加强电气设备接线管理，要求施工人员必须熟悉电气原理图，接线前进行技术交底，接线后进行双人复核，确保接线准确无误，避免因接线错误导致设备损坏或电路故障。对接地防护装置施工工艺加以优化，按照施工标准对接地导体进行设置，采用依照行业标准的接地配件，让接地电阻满足规范的要求，加大对接地线连接质量的控制，达成接地回路可靠的连接，确保电气设备漏电时能及时将电流导入地下，保障人员和设备安全[4]。同时，定期开展电气系统检测，及时排查安全隐患，确保电气系统稳定运行。

3.4 针对施工管理问题的对策

解决建筑机电设备安装施工管理问题，需构建完善的管理体系，强化人员、进度、质量、安全全维度管控。首先，健全施工管理制度，明确各岗位人员职责，建立权责清晰的管理机制，避免出现管理漏洞和责任推诿现象。进行施工人员管理强化操作，有序开展准入资格审核，挑选录用持有专业证书且实践经验丰富的施工人员，定时开展技能相关学习及安全宣传工作，使施工人员的职业素养与业务能力有所提高。其次，优化施工进度管理，结合工程实际制定科学合理的进度计划，明确各工序的施工节点，加强各专业、各工序的协同配合，避免施工脱节导致进度延误。强化施工质量管控，落实从开工到工程竣工的质量审查制度，对施工准备事项、设备安装、管线敷设等阶段做系统全面的验收，及时开展质量补救工作，保证施工质量契合规范的要求[5]。同时，加强施工现场安全管理，落实安全防护措施，定期开展安全巡查，排查安全隐患，杜绝安全事故发生，保障施工顺利推进。

4 结束语

建筑机电设备安装施工质量是建筑工程高质量发展的重要保障。本文通过梳理建筑机电设备安装施工全流程，认真研究器材组装、管道敷设、电力设施及建设管理的常规难点，提出了针对性的整改措施，同时采用BIM等创新技术将施工操作流程简化。未来，需结合建筑行业智能化发展趋势，持续优化施工技术和管理模式，推动建筑机电设备安装施工向精细化、标准化、智能化转型，为建筑工程的安全稳定运行提供更有力的支撑。

参考文献：

[1] 金一鸣.探析建筑机电设备安装施工中常见问题及对策[C]//中国智慧工程研究会.2024工程技术应用与施工管理交流会论文集(上).苏州崇越工程有限公司,2024.

[2] 游丹.浅谈建筑机电设备安装施工常见问题及对策[J].建材发展导向,2024,22(20):121-123.

[3] 孙宏鹏.建筑项目施工中机电设备安装常见问题及处理方法[J].砖瓦,2021(08):164-165.

[4] 徐金国.建筑机电设备安装施工中常见问题及对策分析[J].中国建筑金属结构,2021(06):136-137.

[5] 张欢庄.建筑机电设备安装施工常见问题及应对策略[J].大众标准化,2023(23):79-81.

冬季小型建筑混凝土施工的简易保温养护方法

石艳斌[1]，刘兴臣[2]

（1. 山东颢洲建筑工程有限公司，山东 德州 251200；
2. 山东峻豪建材有限公司，山东 德州 251200）

摘 要 冬季施工条件对混凝土性能影响显著，尤其在小型建筑工程中，常因资源有限、管理粗放，导致养护环节质量难以控制。低温延缓水化进程，早期强度无法达到结构所需承载，极端情况下甚至发生冻裂。本文围绕这一现实问题，基于简易操作思路，提出适用于小规模施工场景的保温养护技术体系。从拌合温控、覆盖保温、温度监测与组织管理四个角度切入，构建了具有可实施性的低成本操作框架。措施不依赖大型设备，重在材料搭配与过程控制，强调工艺完整性与节奏协调，提升冬季施工的技术可控性。研究内容紧贴施工实际，具有工程实用价值。

关键词 冬季混凝土施工；小型建筑；保温措施；养护技术

中图分类号：TU755 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.033

0 引言

在温度持续低于 5 ℃的冬季，混凝土的早期强度发展受阻极为常见。对于以人工操作为主、施工周期短、技术人员配置不足的小型建筑项目，情况尤为明显。现场普遍存在保温措施简单、覆盖不全、技术交底不到位等现象，往往导致混凝土在尚未形成有效强度前遭遇低温侵蚀，出现开裂、脱皮、抗压性能不足等问题。传统的集中加热、自动控温等技术手段虽在大型项目中有效，但在小工程中难以落地。面对这一困境，提升操作流程的针对性、细化保温材料的组合方式、强化温度跟踪手段成为关键路径。本文从技术环节出发，分析影响冬季施工混凝土质量的关键节点，并围绕材料选型、操作顺序与过程管理进行系统梳理，提出一套适合于基层现场使用的简易养护技术方案。

1 冬季小型建筑混凝土施工中存在的技术性问题分析

1.1 混凝土初始温度控制不足导致水化反应迟滞

在冬季施工现场，混凝土一旦失去初始温度的基本控制，就意味着整个水化过程从起点开始就处于低效状态。常见的情况是，拌合所用的骨料与水未经任何加热处理，直接暴露于寒冷环境下；而搅拌设备本身也未作隔热封闭，致使拌合物在出机时温度即处于临界边缘。其后，长时间的转运或等待入模进一步削弱热量积蓄，在模板尚未达到环境平衡前便进行浇筑，导致热量在接触瞬间即被基底吸收，形成急剧降温。在此背景下，混凝土的初凝与终凝时间明显延长，部分结构甚至超过常规时限数小时仍处于可扰动状态。强度增长曲线被整体拉长，后续工序不得不推迟，而推迟又恰恰加大了混凝土暴露时间与环境交换的风险。水化反应的延迟，不仅影响早期抗压性能的形成，更打乱了施工节奏，使技术与管理两端同时失衡。若此环节未被及时识别并干预，后续所有的保温措施都可能变为事后补救[1]。

1.2 早期养护失效引发混凝土冻结损伤风险

冬季混凝土的早期阶段并不具备抵御冻结的天然能力，其临界强度往往在 5 MPa 左右。若未达到此界限即暴露于 0 ℃以下的气温，水分即在毛细孔道中结冰，从而诱发体积膨胀。这种膨胀直接作用于尚未形成强韧结构的水泥石体内部，压裂微结构，削弱粘结面，最终引发早期冻害。在常见施工实践中，混凝土表面覆盖虽已完成，但养护时间极短或夜间未持续覆盖，热量迅速流失，造成温差快速反转。冻结过程多发生在结构薄弱区域，如梁底、板边、交接处等，这些部

作者简介：石艳斌（1988-），男，本科，工程师，研究方向：工程技术。

位虽不明显，却易成为后期裂缝发展的起点。更深层次的问题在于，表层可视的损伤与内部微裂并不总是同步发生，裂隙可能在结构内部缓慢扩展，待混凝土进入荷载期后才显现为性能衰退或剥落问题[2]。

1.3 保温措施随意化、形式化导致热量快速散失

混凝土保温不等于覆盖。在不少现场，覆盖操作虽然存在，但方式单一、执行粗放，导致名为养护、实则失控的现象屡见不鲜。常见方式如：单层塑料薄膜随意搭盖，边缘未压实；草袋使用年久破损，形同虚设；甚至局部未覆盖，仅靠室外温度“勉强应对”。一旦夜间温度骤降，这类措施形同摆设，内部热量迅速外泄，混凝土失温严重。特别是在风力作用下，热量流失呈数倍加速。热交换最强烈之处往往在模板转角与结构薄层部位，这些部位的温度梯度迅速增大，局部冻结极易发生。即便次日采取加热或补盖手段，也无法逆转前一晚形成的微裂与收缩应力[3]。

1.4 施工组织与技术管理不到位引发系统性失控

施工不是单点操作，而是环环相扣的链条管理。冬季混凝土施工若无合理的计划安排作为前提，任何技术动作都只能临时应对。常见现场问题如：未查阅气象预报即安排浇筑，导致结构尚未养护完成便遭遇降温；调度排布混乱，出现混凝土运抵现场却覆盖材料尚未准备的尴尬局面。更深的问题在于技术交底流于形式。冬季施工存在高度专业性，拌合、浇筑、覆盖、测温、养护各环节均有严格操作要求，然而不少项目现场仅以口头传达代替图纸交底，施工人员对工艺流程理解不足，技术要求无法贯彻，甚至对“临界强度”“持续保温时间”等毫无概念。职责划分模糊是另一个高频问题。常见现象如：测温仪器形同摆设、无人定时记录；夜间保温交班无序，责任人不明确；出现质量问题后相互推诿，原因无法查清。这类技术管理松散并非个别现象，而是系统性失控的具体表现[4]。

2 冬季小型建筑混凝土简易保温养护的技术实施体系

2.1 拌合与浇筑阶段的基础温控技术措施

拌合前，现场应先对骨料进行集中堆放，并搭设简易封闭结构以减少热量流失。选用电热风机或红外加热灯对骨料进行间歇式加热，控制骨料温度维持在10 ℃至20 ℃之间。不得使用含冰或结冻的砂石，不得将加热后的骨料长期露置。拌合用水单独设热水箱，温度控制在50 ℃至60 ℃之间，掺水前需人工检测水温并记录，避免直接使用过冷或过热水引发温度波动。混凝土拌合过程须在封闭或半封闭搅拌站中完成，避免冷风对初始温度的干扰。各批次混凝土出机时，应设专人以红外测温仪检测温度，要求控制在15 ℃以上，低于12 ℃需立即返工。在运输过程中，搅拌罐外应覆保温层或草垫，同时控制运输时间不超过30分钟，途中不得开启出料口。拌合站与施工点之间距离超过300 m时，应安排现场搅拌或设置中转保温罐。模板进场前对模板进行检查，检查是否有水分，若含有水分或是带霜、结冰的模板禁止直接接触新拌混凝土，采用钢模板区域应将模板提前用水煮沸加热或用电加热器使其温度达到5 ℃以上，采用木模板的区域可以将模板放入室内加温后使用；基底温度由测温人员提前1小时测定，基底温度低于5 ℃则停止浇筑，并对其进行加热处理达到要求之后再行施工，同时根据所处地理位置每日气温变化情况决定最适宜的浇筑时间，尽量安排每天气温最高的时段施工（以每天10:00-15:00为宜），浇筑前30分钟内准备完毕所有的保温措施[5]。

2.2 施工完成后的简易多层保温覆盖技术

完成浇筑后的混凝土表面不要长时间暴露，要在30分钟内一次性完全覆盖，覆盖材料为内层塑料膜（PE透明膜，不小于0.08 mm厚）、中间层为复合型保温被（厚度3～5 cm，毯体搭接不应有空隙）、最外层为稻草（菌类保护），并逐片铺设、错缝拼接，每边要压于下方不小于30 cm。最外层应为草袋，草袋要平铺密实、交叉叠置不少于10 cm、边缘处需拍实以免夜间风吹掀起。转弯、阴角、阳角、柱脚、梁侧、杯口等易热量交换的部位应该增加保温垫或用棉被折叠包裹，其角部适当加厚一层棉被。薄壁构件如悬挑板、梯步面等位置采用双层覆盖法，内侧增加挤塑板条或泡沫夹层以增加蓄热量。如果天气下雨下雪，则必须在保温层外面加设一层防水帆布，防止水渗进保温材料里，使保温材料失去作用或者结冻。同样需要对外侧模板加以覆盖，在木模板上加装保温毡沿模板满铺，在钢模板上可用聚乙烯泡棉条缠绕，再用铁丝或塑带绑扎牢固；柱模、墙模顶端可以用“袋套式”的方法封顶，袋内填充泡沫颗粒或者干的棉布，通过这种方式来提高上面的密封效果；高度高的结构件可以采用简易钢管搭设保温棚，制造局部可控小气候；如果晚上气温可能会低于-5 ℃，则应当在保温层外面提前放置加热源。

2.3 夜间及低温时段的辅助保温与加热控制

气温往往在夜间降低，容易导致混凝土早期强度的发展不足。因此，应该提前组成立岗人员于凌晨进行结构覆膜工作。根据现场的实际情况选取风速，根据最低温度以及结构的复杂程度选取相应的热源方式。

一般用到的有热风、电热毯、燃煤暖炉等。采取热风机的话尽量采用低噪声型，并且不能对着混凝土裸露的表面出风，出风口距离模板要大于 1.5 m，不能造成局部过热引起表皮干缩开裂。使用电热毯的时候应该加隔层，不能把电热毯放在靠近模板或者保温层内侧的位置，敷设的时候必须平放，不能出现多层叠加的情况。3 ℃以下就对所有准备启动的加热装置开始预热。夜间通电周期按“一控一巡”模式进行，即设备控制员负责设定温区温度，巡查员每 2 小时巡视保温范围内的温度点，核对数据记录表。控制目标温度以混凝土内部不低于 10 ℃为限，模板表面温度维持在 5 ℃上下浮动。风速超过四级时，需搭设围护棚或临时封闭装置，控制室内空气对流，防止热量快速散失。为防止温度梯度在结构内部拉大，应注意热源分布的均匀性。长条形结构或局部突出的异形部位容易因热源覆盖不足而形成冷点，易在热胀冷缩作用下形成微裂。布设方案可对薄壁段增设部分局部热源补强，并调整好风机的送风角度形成交叉送暖，在热源开启后不能停止，日间自然升温即可结束，交接时间比规定提前 30 分钟以上交接完毕即可，并做好记录和存档。还需要注意控制湿度过大容易导致混凝土表层缺水现象的发生，可以考虑在热风机出口处安装湿度自动调节器或者通过蒸汽管道间歇性地向混凝土内补充水分来保持湿度处于合理范围之内，不能把明火炉灶直接放在下面。每班加热线阶段完毕以后需要对热源的位置、保温的完整性、温度的变化趋势再次检查一遍，并且由负责的技术人员签字后才能撤离现场。

2.4 养护过程中的温度监测与质量控制措施

温度监测是混凝土养护全过程的重点控制内容。测点布置应在浇筑前完成，经技术人员复核后确定测点位置正确；构件结构面积大于 20 m^2 以上的构造，设置 3 个以上测点，布置在中心、边角、模板接缝处，有利于体现整体受热状况；使用数字温度计或者电子数据采集器为宜，埋设在距混凝土截面中心 ±20 mm 位置上，朝向垂直于受力方向；6 小时记录一次，在记录本上由专人巡查记录《混凝土养护温控记录表》，遇降温天，每 3 小时记录一次；若温差波动大于 ±3 ℃，应及时上报项目部；夜间记录双签，当日签名并在双签后签名时间不同；数据同步上传至现场信息平台，由项目技术负责人每日整理分析；重要结构（承重梁、基础板等）的混凝土强度试块同测点同步检查，并结合强度发展变化趋势同步做出“温度—强度”检查、验算及评定，并加入相应验证检测数据和证据链，实施结构工程质量“温度—强度”动态监控闭环管控。拆模前需先检测其温度稳定性，选取连续 48 小时昼夜温差最小的区间进行检测，如果温度相差值超过 5 ℃，则应延迟拆模时间，并加大保温层的厚度。达到以下条件时方可拆模：（1）结构核心部位温度须连续高于 10 ℃；（2）边角部位不能低于 7 ℃；（3）混凝土强度要到达设计 28 d 强度的 70% 以上。以上三个条件同时满足才能拆模。未达到要求之前进行拆除模板属于违章施工；质量不能仅以某一项指标来判定，除强度及温度外，还需要根据养护过程中混凝土表面颜色的变化、模板表面是否有结露的现象以及保温层外表面湿化程度等加以判断，如果保温层表面出现明显的结霜，则说明有热量外泄的现象，如果是一侧或者两侧出现，在旁侧时应及时考虑增加覆盖层的厚度或者关闭蒸汽输出口，保压期满后，由项目质检组出具《养护完成评估单》（附测温图、记录表、试块检测报告及责任人签字），作为后续工序过渡交接凭证。

3 结束语

冬季施工之所以比较麻烦，并不是因为工艺本身有多难，而是由于冬季施工中存在操作连续性较差、温度控制不到位等问题。就小型的建筑工程项目而言，虽然采取的保温养护措施比较简单，但往往会影响到混凝土结构的早期质量以及后序节点正常的工作进度，即出机口的温度管控、覆盖材料的铺设顺序、夜间热源的分布位置等，均要在操作时做到符合实际施工的需求，管理工作要配合着相应的方法来进行，只有如此才能保证施工的质量。经验和错误都是来源于工作过程中的一些细节疏忽之处，因此把过程量化、把步骤细化能够有效地提升冬季施工质量。针对小型项目的使用特点，保温养护技术仍然要不断地在实践中修正和完善，直至最终形成稳定的工艺方式。

参考文献：

[1] 张清定.冬季混凝土施工保温养护技术的应用[J].建材发展导向,2025,23(19):91-93.
[2] 仲金磊.冬季房建工程混凝土施工养护技术[J].中国水泥,2025(03):115-117.
[3] 袁爱灵.高寒地区冬季混凝土施工技术及养护研究[J].陶瓷,2024(12):228-230.
[4] 张明奎.高寒地区冬季混凝土施工技术及养护研究[J].居舍,2023(17):37-39,42.
[5] 邹祖花.寒冷地区冬季混凝土施工技术研究[J].陶瓷,2025(09):194-197.

钢混组合桥梁在交通工程中的应用与性能分析

张 帅，白 飞*

（泰安市泰山路桥建设有限公司，山东 泰安 271000）

摘 要 钢混组合桥梁融合了钢材高强度、大跨度优势与混凝土刚度大、耐久性强、造价经济的特点，在交通工程领域应用日益广泛。本文结合交通工程建设实际，系统分析钢混组合桥梁的核心类型与应用场景，深入研究其力学性能、耐久性能及施工性能，重点探讨钢混组合结构设计要点、施工关键环节控制及性能检测方法，结合工程实践数据验证其应用价值。研究结果表明，钢混组合桥梁在承载能力、抗裂性能、经济性等方面优于传统单一材料桥梁，适配高速公路、城市主干道、跨江跨海等多种交通场景，能够满足重载交通、复杂地质及大跨度建设需求，符合现代交通工程绿色低碳、高效耐久的发展理念，具有极高的推广应用价值。

关键词 钢混组合桥梁；交通工程；应用场景；力学性能；耐久性能

中图分类号：U445 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.034

0 引言

随着我国交通工程建设的快速发展，高速公路、城市快速路及跨江跨海通道的建设需求日益增长，对桥梁结构的跨度、承载能力、耐久性及经济性提出了更高要求。传统纯钢结构桥梁存在刚度不足、后期维护成本高的问题，纯混凝土桥梁则受自重限制，难以满足大跨度、重载交通的使用需求。钢混组合桥梁通过合理搭配钢材与混凝土材料，实现优势互补，有效解决了单一材料桥梁的短板，在工程实践中得到广泛应用，推动钢混组合桥梁技术的进一步发展，对国内交通工程的建设意义重大。

1 钢混组合桥梁的核心类型及特点

1.1 核心结构类型

钢混组合桥梁的结构类型主要根据钢材与混凝土的组合方式划分，主要有钢混组合梁桥、钢混组合拱桥、钢混组合刚构桥三大类。其中，钢混组合梁桥应用最为广泛，分为叠合梁、结合梁两种形式：叠合梁由钢梁与预制混凝土板叠合而成，施工便捷、工期较短，适用于中小跨度桥梁；结合梁通过剪力连接件将钢梁与现浇混凝土板牢固连接，整体性强，适用于大跨度、重载交通路段。钢混组合拱桥结合了拱桥的承重优势与钢混组合结构的经济性，跨度可达百米以上，多用于跨江、跨河及城市景观桥梁；钢混组合刚构桥则兼具刚构桥的稳定性与组合结构的轻量化特点，适用于复杂地形条件下的桥梁建设。

1.2 核心结构特点

钢混组合桥梁的核心优势在于材料性能的互补性：钢材具有高强度、高韧性、重量轻的特点，能够有效减小桥梁自重，提升跨度能力，适应大跨度建设需求；混凝土具有刚度大、抗腐蚀性强、造价低廉的优势，能够提升桥梁的整体刚度，减少结构变形，降低后期维护成本。同时，钢混组合结构通过剪力连接件实现钢材与混凝土的协同工作，避免两种材料因变形差异产生分离，确保结构整体性。此外，钢混组合桥梁施工便捷，可采用预制拼装与现浇结合的方式，缩短施工工期，减少对周边交通及环境的影响，符合现代交通工程高效、绿色建设的要求。

1.3 交通工程中的应用优势

钢混组合桥梁的应用优势集中体现在四大方面，且均有具体工程数据支撑。一是材料协同优势显著，相较于纯钢结构桥梁，钢混组合结构整体刚度提升40%左右，后期维护成本降低35%以上；相较于纯混凝土桥梁，自重减轻25%～30%，大跨度施工难度大幅降低，可减少基础工程投入15%～20%。二是适配场景广泛，可灵活适配高速公路、城市交通、跨江跨海、软土地基及旧桥改造等多种场景，既能满足中小跨度常规通行需求，也能适配大跨度、重载交通、复杂海洋/地质环境的建设要求，兼顾实用性与美观性。三是综合性能优越，力学性能、耐久性能及施工性能均优于传统单一材料桥梁。例如：河南安罗高速公路钢混组合

作者简介：张帅（1989-），男，专科，助理工程师，研究方向：交通工程。
*通信作者：白飞（1999-），男，本科，助理工程师，研究方向：交通工程。E-mail：2350598769@qq.com

桥梁，通过智能化施工优化，顶推工效提升 45% 以上，预制桥面板人力投入减少 70% 以上，单节钢壳混凝土索塔建造工期较传统混凝土桥塔缩短 50%。四是经济性与环保性兼顾，轻量化结构可降低基础工程造价，预制拼装施工减少现场工作量与建筑垃圾，符合绿色施工理念，且设计使用寿命可达 100 年，长期运营性价比突出，相较于纯钢结构桥梁，全生命周期成本降低 20% ～ 28%[1]。

2 钢混组合桥梁在交通工程中的应用场景及实践

2.1 高速公路桥梁应用

高速公路桥梁对承载能力、通行效率及耐久性要求极高，钢混组合梁桥因其轻量化、大跨度、抗疲劳性能强的特点，成为高速公路桥梁的优选方案。在高速公路互通立交、跨线桥及连续梁桥建设中，钢混组合梁桥可有效减小桥梁自重，降低基础工程造价，同时具备良好的抗车辙、抗开裂能力，能够适应高速公路重载交通、高频次通行的使用需求。例如：某高速公路跨线桥采用钢混组合叠合梁结构，跨度 30 m，钢梁采用 Q355qD 钢材，混凝土板采用 C50 高性能混凝土，通过栓钉连接件实现协同工作，经检测，桥梁承载能力满足公路－Ⅰ级荷载要求，运营期间结构变形量控制在 2 mm 以内，有效保障了高速公路的安全畅通。

2.2 城市交通桥梁应用

钢混组合桥梁是一种可根据城市规划需求，设计成多样化的结构形式，兼顾实用性与美观性，同时采用预制拼装施工，缩短现场施工工期，减少对城市交通的干扰。在城市主干道跨河桥、高架桥建设中，钢混组合刚构桥与组合拱桥应用广泛，既能满足大跨度跨越需求，又能与城市景观相融合。例如：某城市跨河景观桥采用钢混组合拱桥结构，主跨 80 m，钢梁与混凝土拱肋协同受力，桥梁外观简洁大气，既解决了跨河通行问题，又成为城市标志性景观，同时通过优化施工方案，仅用 6 个月完成主体结构施工，最大限度减少了对周边居民生活及交通的影响[2]。

2.3 特殊场景桥梁应用

在跨江跨海、复杂地质等特殊场景中，钢混组合桥梁的优势更为突出。跨江跨海桥梁要求结构具备良好的抗风、抗浪、抗腐蚀性能，钢混组合结构中，混凝土可有效保护钢材免受海水侵蚀，钢材则提升结构的抗风稳定性与跨度能力，能够适应复杂的海洋环境。在软土地基区域，钢混组合桥梁自重轻的特点可有效减小地基承载力要求，降低基础沉降风险，避免因地基变形导致桥梁结构损坏。例如：某跨海大桥引桥采用钢混组合梁结构，针对海洋高腐蚀环境，对钢梁进行防腐处理，混凝土采用海工高性能混凝土，经长期运营检测，桥梁结构无明显腐蚀、变形现象，满足跨海通行的长期使用需求。

3 钢混组合桥梁的核心性能分析

3.1 力学性能

钢混组合桥梁的力学性能主要体现在承载能力、抗裂性能及刚度三个方面。在承载能力方面，钢混组合结构协同受力，钢材承担拉力，混凝土承担压力，有效发挥两种材料的力学性能，与同跨度纯混凝土桥梁相比，承载能力提升 30% 以上，与纯钢结构桥梁相比，整体刚度提升 40% 左右。在抗裂性能方面，混凝土板的受压状态可有效抑制钢材的拉伸变形，减少结构裂缝产生，通过合理设置预应力，可实现桥梁全截面无裂缝工作。试验数据表明，钢混组合梁桥在正常使用荷载下，裂缝宽度可控制在 0.1 mm 以内，远低于规范限值。在刚度方面，钢混组合结构的整体刚度较大，结构变形量小，某 30 m 跨度钢混组合梁桥在满载状态下，最大挠度为 1.8 mm，挠度比为 1/1 667，满足规范要求，能够有效保障通行舒适性。

3.2 耐久性能

钢混组合桥梁的耐久性能主要取决于钢材防腐、混凝土抗腐蚀及剪力连接件的可靠性。钢材的防腐处理是提升桥梁耐久性的关键，常用的防腐方式有热镀锌、防腐涂料喷涂等，可有效抵御大气、雨水及海洋环境的侵蚀，延长钢材使用寿命；混凝土采用高性能混凝土，添加矿物掺合料，提升混凝土的抗渗、抗冻、抗腐蚀性能，避免混凝土开裂导致钢材暴露腐蚀。剪力连接件的可靠性直接影响结构整体性，栓钉连接件经试验验证，抗剪强度可达 150 kN 以上，能够有效传递剪力，确保钢材与混凝土协同工作，避免因连接件失效导致结构破坏。

3.3 施工性能

钢混组合桥梁的施工性能主要体现在施工便捷性、工期可控性及施工安全性三个方面。与纯混凝土桥梁相比，钢混组合桥梁的钢梁可在工厂预制，现场拼装，减少现场现浇工作量，缩短施工工期，通常比同跨度纯混凝土桥梁工期缩短 20% ～ 30%；与纯钢结构桥梁相比，钢混组合桥梁无需复杂的焊接工艺，施工难度降低，且混凝土板的浇筑可采用满堂支架或挂篮施工，施工安全性更高。例如：大跨钢混组合梁桥采用挂篮悬浇施工，钢梁预制完成后吊装至挂篮，再现浇混凝土板，施工过程中可通过实时监测结构变形，调整施工参数，确保施工质量[3]。

4 钢混组合桥梁设计与施工关键控制要点

4.1 设计关键要点

钢混组合桥梁的设计核心是实现钢材与混凝土的协同工作，关键控制要点包括结构选型、材料配比及剪力连接件设计。结构选型需结合工程场景、跨度需求及造价预算，中小跨度优先选用叠合梁结构，大跨度选用结合梁或组合拱桥结构；在材料配比方面，钢材选用高强度低合金结构钢，确保高强度与韧性，混凝土选用高性能混凝土，根据使用环境调整配合比，海洋环境需提升抗腐蚀性能，寒冷地区需提升抗冻性能；剪力连接件设计需根据结构受力特点，合理选择栓钉、槽钢等连接件类型，确定连接件间距与数量，确保剪力传递可靠，避免出现连接件剪切破坏。

4.2 施工关键控制要点

钢混组合桥梁的施工关键在于确保钢梁预制精度、混凝土浇筑质量及剪力连接件施工质量。钢梁预制需严格控制尺寸偏差，翼缘板、腹板的焊接质量需符合规范要求，焊接后进行无损检测，避免焊接缺陷导致结构强度下降；混凝土浇筑前，需清理钢梁表面杂物，确保混凝土与钢梁粘结紧密，浇筑过程中采用分层浇筑、振捣密实，避免出现蜂窝、麻面等缺陷，浇筑完成后及时进行养护，养护时间不少于14天，确保混凝土强度达到设计要求；剪力连接件施工中，栓钉焊接需控制焊接温度与时间，确保焊接牢固，焊接后进行拉拔试验，合格率需达到100%[4]。

4.3 性能检测要点

钢混组合桥梁的性能检测分为施工阶段检测与运营阶段检测，确保结构性能满足设计与使用要求。施工阶段检测主要包括钢梁焊接质量检测、混凝土强度检测、剪力连接件抗剪强度检测及结构变形检测。焊接质量采用超声波检测，混凝土强度采用回弹法或钻芯法检测，剪力连接件采用拉拔试验检测，结构变形采用全站仪监测；运营阶段检测主要包括结构挠度、应变监测，钢材防腐层检测，混凝土裂缝检测及支座性能检测，定期对桥梁结构进行全面检测，及时发现隐患并进行处理[5]。

5 工程案例实践

为进一步验证钢混组合桥梁在交通工程中的应用价值、综合性能及施工控制效果，结合河南安罗高速公路钢混组合桥梁典型工程案例，详细阐述其应用实践过程、技术要点及检测成效。

该项目为交通运输部智能交通先导应用试点项目，主要涉及高速公路主线跨线桥及互通立交桥梁，采用钢混组合梁、钢混组合索塔结构，总桥梁长度2.8 km，其中钢混组合梁段总长1.6 km，设计荷载为公路-Ⅰ级，设计使用寿命100年。项目核心难点在于需实现智能化施工与重载交通适配，同时控制施工对现有交通的干扰。

在施工过程中，该项目优化钢混组合结构设计，钢梁选用Q355qD高强度低合金结构钢，混凝土板采用C50高性能混凝土，剪力连接件采用栓钉连接，间距控制在150 mm，确保钢材与混凝土协同受力。施工阶段引入150余台智能化步履式顶推设备，实现80台以上设备同步控制，有效控制钢梁拼装偏差在3 mm以内；预制桥面板采用自动化智能生产线，人力投入减少70%以上，钢壳混凝土索塔单节建造工期较传统混凝土桥塔缩短50%，较带纵筋的钢壳塔施工工效提升20%以上。

经施工阶段及运营初期检测，该项目钢混组合梁焊接无损检测合格率达100%，混凝土28天强度达设计强度的105%，栓钉拉拔试验平均抗剪强度达162 kN，合格率100%；钢壳钢板脱空率低于0.6%，结构变形量控制在2 mm以内，顶推工效提升45%以上，完全满足高速公路重载交通、高效施工的需求，同时大幅降低了施工成本与环境影响，验证了钢混组合桥梁在高速公路场景的应用优势与智能化施工的可行性。

6 结束语

钢混组合桥梁凭借钢材与混凝土的优势互补，在承载能力、耐久性、经济性及施工便捷性等方面表现突出，已成为交通工程建设中的核心结构形式之一，有效解决了传统单一材料桥梁在大跨度、重载交通、复杂环境下的应用难题。本文通过对钢混组合桥梁的类型、应用场景及核心性能的深入分析，明确了其设计与施工的关键控制要点，结合工程实践验证了其应用价值。实践表明，钢混组合桥梁能够满足现代交通工程绿色低碳、高效耐久、大跨度的建设需求，不仅可以降低工程造价、缩短施工工期，还能提升桥梁的使用寿命与运营安全性。

参考文献：

[1] 魏科,冯霄暘,刘黎,等.钢混组合梁高性能桥面板湿接缝界面强化方式[J].铁道建筑,2024,64(12):39-43.
[2] 王一博,刘世忠,栗振锋,等.钢-混组合结构桥梁连接件发展趋势研究[J].公路交通技术,2021,37(02):45-52.
[3] 陈发杨.钢-混组合结构栓钉剪力连接件综述[J].广东建材,2022,38(04):66-68.
[4] 李维维,安小军,王旭.激光清洗技术在钢结构桥梁制造中的应用探讨[J].中国建筑金属结构,2024,23(07):50-52.
[5] 柴战军,栗明亮,齐敦平,等.桥面板徐变对大跨径钢混组合梁桥力学性能的影响[J].中原工学院学报,2024,35(04):43-52.

布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计

武树明，王　弘，张洪玮

（本溪钢铁（集团）设备工程有限公司，辽宁 本溪 117000）

摘　要　为了提升布袋除尘器在复杂工况下的运行稳定性与过滤效率，本文分析了滤袋框架易发生的变形失效问题，并且就布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计要点展开研究。通过分析整体屈曲、局部凹陷及疲劳断裂等失效机理，确立刚度匹配、应力均匀分布及动态稳定性原则。同时，从异形截面纵筋、螺旋连续支撑环、节点焊接工艺优化等方面提出布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设重点，以期为相关设计人员提供有益参考。

关键词　滤袋框架；抗变形设计；结构优化；疲劳寿命

中图分类号：X701.2　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.035

0　引言

工业烟气净化是改善生态环境的关键，尤其使用布袋除尘器实现空气净化质量提升。布袋除尘器组成相对复杂，而内部滤袋框架是重要结构，其作用是引导气流分布、支撑滤袋形态、传递清灰动力。在布袋除尘器运行过程中，滤袋框架极易受到过滤压差、径向挤压、高温烟气热冲击、脉冲喷吹的高频次交变载荷影响。滤袋框架长期受到复杂地区环境影响，一旦发生断裂或变形极易导致其发生破损、脱落、褶皱、磨损，进而造成烟气净化效果不合格，对生态环境造成一定破坏影响。目前，布袋除尘技术发展速度加快，除尘系统逐步向大型化、长袋化的方向发展，使滤袋框架长细比增大，这对结构稳定性产生一定影响。基于此，深入研究布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计方案，能保证滤袋框架结构运行具备稳定性，以满足布袋除尘器运行功能性需求，也能实现工业烟气净化效果提升。

1　滤袋框架的失效模式

1.1　整体屈曲失稳

滤袋框架在设计过程中整体屈曲失稳，其作为长尺寸滤袋框架失效形式之一，需重点进行分析。如果滤袋框架长度较长，并且其结构轴向刚度未能达到技术标准，在过滤过程中产生负压作用，极易造成结构存在轴向压缩分量过大而导致损坏。如果轴向压力严重超出滤袋框架的临界载荷，滤袋框架在瞬时就会失去直线平衡状态，进而出现宏观弯曲变形。这种失稳情况导致滤袋框架结构严重改变，使滤袋形成 S 型扭曲或弓形。滤袋框架出现整体屈曲失稳现象，会造成滤袋发生严重折叠导致过滤面积减小，特别是大型工业生产中烟气净化未能达到标准。同时，滤袋框架失稳后无法承受冲击作用力影响，在后续过滤过程中形成振动或轻微无力现象，这会导致工况继续恶化[1]。

1.2　局部屈曲与凹陷

布袋除尘器滤袋框架局部屈曲与凹陷问题发生率较高，其主要是因为两根支撑管之间纵筋段或支撑环薄弱位置发生变形。因为支撑环受到侧向约束影响，其纵筋在两环之间形成受压杆件。如果滤袋受到局部压力过大或者支撑环间距超出临界值，单根纵筋在两环之间存在向外鼓曲或向内凹陷。这种变形虽然影响范围比较小，但对滤袋框架的功能性产生较大影响。滤袋框架出现凹陷的部位，其纵筋直接刺破滤袋内壁，进而出现烟气泄漏现象，它所产生的危害性较大。而滤袋框架发生变形时，其鼓曲的纵筋导致滤袋表面形成硬性凸起，在清灰、振动气流冲刷等作用下产生滤袋结构严重损坏。同时，滤袋框架局部屈曲导致其圆度出现较大偏差，相邻纵筋受力不均匀而产生严重连锁反应，从而出现多纵筋变形严重问题。

1.3　疲劳断裂

布袋除尘器滤袋框架疲劳断裂是长期载荷作用下的结果，尤其是交变载荷持续作用导致其疲劳断裂而无法满足过滤要求。布袋除尘器运行过程中脉冲喷灰清灰时，滤袋框架每秒需承受几十次的瞬时冲击荷载，尤其是循环应力的形成造成滤袋框架结构损坏。滤袋框架焊接存在一定质量缺陷，或者局部位置有残余应力，其出现应力集中现象，进而对滤袋结构的可靠性

作者简介：武树明（1973-），男，本科，工程师，研究方向：机械工程类。

与稳定性造成不利影响。此外，滤袋框架长期受到高温环境影响，如果温度超出标准，其造成滤袋框架降低疲劳极限，腐蚀性烟气导致裂纹尖端扩展速率升高，进而出现裂纹快速扩展情况造成滤袋失效。

2 滤袋框架抗变形结构设计原则

2.1 刚度匹配与冗余度原则

在布袋除尘器滤袋框架设计中，需保证其整体刚度、局部刚度和工况载荷保持匹配，避免因为刚度过低导致过大变形，也防止刚度过高出现应力集中以及材料浪费。滤袋框架设计需综合分析布袋除尘器运行过程中弹性变形量，保证滤袋框架始终处于最佳形态。同时，滤袋框架设计时需按照适度刚度冗余度的标准，防止滤袋框架存在材料老化、腐蚀、减薄或意外超载等因素影响结构性能，并保证滤袋框架安全系数处于合理范围内。在滤袋框架设计中，通过配置纵筋数量调整、截面尺寸设置、支撑环密度控制等方式形成多层次刚度体系，从而保证其具备较强的抗载荷储备能力[2]。

2.2 应力均匀分布原则

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中，需按照应力均匀分布原则进行设计，以防应力集中造成结构损坏。滤袋框架设计时避免尖锐缺口、截面突变、不合理焊缝布置等，其利用平滑过渡方法降低应力集中系数。滤袋框架纵筋与支撑环连接点是薄弱部位，其采用增加过渡圆角、优化焊缝形状、合理布置焊点等方式，确保应力能均匀扩散，从而提高滤袋框架的稳定性。如果滤袋框架顶部结构受到拉拔力较大，或者底部的剪切力较大，需采取局部加强措施，主要是通过增大截面积、安装加强板等方式，确保结构的承载力达到工程运行需求。此外，滤袋框架设计时各位置达到受力均衡性要求，预防因为制造误差或者应力集中而引发结构损坏。滤袋框架设计以有限元软件分析方法为主，需根据布袋除尘器运行工况做出优化调整，使滤袋框架整体处于最佳状态，也能实现制造成本降低。

2.3 动态稳定性原则

布袋除尘器滤袋框架长期受到交变荷载冲击影响，需保证其动态稳定性达到要求。滤袋框架设计满足净强度标准，还要确保滤袋框架材料的固有频率和阻尼特性合格，防止在布袋除尘器运行过程中出现共振现象。滤袋框架一阶固有频率远离清灰脉冲的主频以及倍频，避免因为振幅过大而造成滤袋框架结构破坏。同时，滤袋框架具备较高的抗弯刚度与抗扭刚度，防止在清灰过程中出现螺旋状扭曲和横向摆动。在滤袋框架设计时，将原有的连续螺旋支撑环代替离散平面环，能保证滤袋框架具备较高的动态稳定性与整体性。此外，在滤袋框架设计阶段，需综合分析气流诱导振动的发生概率，防止因为振动作用造成滤袋框架结构损坏。滤袋框架材料具备耐疲劳性，并考虑到长期运行过程中交变荷载持续作用。

3 布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计分析

3.1 异形截面纵筋优化设计

布袋除尘器滤袋框架设计确定适宜纵筋截面形状，这样能保证滤袋框架惯性距、抗弯刚度达到要求。以往滤袋框架纵筋使用圆形钢丝方式，其特点是加工便捷，然而在相同截面下截面惯性距较小、抗弯性能不足。为保证滤袋框架钢筋抗变形能力达到要求，需选择梯形或八字形异形截面纵筋方式。梯形纵筋截面上宽下窄设计方式，能保证滤袋框架有较高的惯性距，从而抵抗外部作用力产生的弯曲变形。八字形截面使两个主轴方向有较大惯性距，从而平衡滤袋框架所受到的多向弯曲以及扭转力矩。在滤袋框架设计过程中，需根据技术标准精准计算纵筋截面尺寸，从而提高滤袋框架结构承载力和稳定性。通常来说，滤袋框架纵筋数量需考虑到滤袋直径与长度配置，一般为10～24根，超长框架可增加到28根[3]。

3.2 螺旋连续支撑环布局策略

滤袋框架在支撑结构设计时，采用螺旋连续支撑环布局策略，能保证滤袋框架圆度保持与抗扭性合格。以往滤袋框架采用离散式平面支撑环方式，其存在支撑盲区且抗扭强度不足，无法满足滤袋框架交变荷载影响。而在滤袋框架支撑体系设计中，使用螺旋连续支撑环方式取代平面环方式，能保证滤袋框架具备较高稳定性。螺旋环按照恒定螺距连续缠绕在纵筋外侧，这样能对滤袋框架形成良好的侧向约束，从而消除离散支撑点之间的薄弱区域。在滤袋框架设计阶段，需综合考虑到纵筋临界区长度，明确最佳螺距为200～300 mm，并在滤袋框架两端受力集中区域加密到150 mm。螺旋环截面选择扁平矩形或椭圆形，这样能增大接触面积并提高框架刚度。而螺旋结构能够改变气流状态，并利用有限元软件模拟后能提高滤袋框架扭转固有频率提升40%，保证滤袋框架动态稳定性达到标准。螺旋连续支撑环的布局设计需与滤袋框架纵筋体系形成协同受力结构，通过满焊工艺将螺旋环与纵筋固定，杜绝交变荷载下出现脱焊、松动问题，进一步强化框架整体刚度。针对滤袋运行中频繁承受的清灰脉冲荷载与

气流冲击荷载，螺旋环的连续约束结构可有效分散局部应力，避免纵筋在薄弱区域发生屈曲变形，延长框架使用寿命。同时，在材料选择的过程中，采用高强度镀锌钢丝作为螺旋环与纵筋均的基础材料，因为此类材料能够兼顾耐腐蚀性与力学性能，并且也具备适高温、高湿防护功能。而在有限元分析中除扭转固有频率外，还须重点模拟不同螺距下框架的静刚度与疲劳寿命，从而能够验证加密螺距区域，可使端部受力集中系数，如此才能够规避框架端部开裂风险。

3.3 节点焊接工艺与应力控制

在布袋除尘器滤袋框架设计中，纵筋与支撑环焊接极为重要，这也是应力集中区域。焊接质量对于滤袋框架寿命存在直接影响。以往滤袋框架焊接以手工点焊方式为主，这就容易受到焊接人员的专业技能影响。随着现代焊接技术不断发展，滤袋框架焊接以数控自动焊接技术为主，选择二氧化碳气体保护焊或激光焊工艺，以消除焊接缺陷问题。在滤袋框架焊接中，要保证各焊接点位均匀布置，各位置的焊点达到强度要求。而纵筋与环圈交接位置设置微小过渡圆弧，从而防止在后续投入使用过程中产生几何突变造成应力集中。滤袋框架需要承受拉拔力的顶部文氏管连接位置，需通过加强板结构或多道角焊缝实现结构补强，并且增加过度圆角半径。滤袋框架焊接结束后，需按照要求进行振动时效或退货处理，从而消除残余应力，避免残余应力和工作荷载叠加而导致疲劳破坏[4]。

3.4 基于有限元的拓扑优化分析

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中，根据有限元软件的拓扑优化分析，构建三维模型模拟多种工况条件下滤袋框架静力学、屈曲以及瞬态动力学仿真。在该模型建设中，通过构建纵筋与支撑环的梁单元模拟，节点区域进行细化处理，从而保证滤袋框架结构设计达到要求。而在模型设计过程中，根据滤袋框架的运行工况，通过施加过滤压差、脉冲冲击、自重以及热荷载的多种边界条件计算框架的 Von Mises 应力云图与位移矢量场。在模拟完成后识别高应力区域、大变形区，将其作为拓扑优化的目标区域。在对滤袋框架拓扑化分析中，利用变密度法或水平集方法进行材料分布迭代优化，从而去除低应力区冗余材料，使高应力区增加材料密度或改变截面形状。而在该优化过程中使最大位移量控制在 5 mm 内，最大等效应力则低于材料屈服强度 60%。在设计阶段进行多轮迭代优化，从而总结出最佳的滤袋结构形式以及材料分布方案。在模型优化完成后，使滤袋框架重量减轻 10%，并且最大位移量降低 25%，临界屈曲载荷提升 35%，使滤袋框架达到轻量化与高刚度[5]。

3.5 表面防腐涂层与界面相容性

在布袋除尘器滤袋框架抗变形结构设计中，需进行表面防腐处理，从而保证滤袋框架运行达到安全性。在滤袋框架表面防腐处理时，结合烟气成分与温度确定适宜的图层结构体系。中高温工况使用耐高温有机硅树脂涂层，其耐温极限达 260 ℃，具有较优异的附着力和柔韧性，并且随框架热胀冷缩不会发生开裂。而滤袋框架处于强腐蚀环境下，选择使用聚四氟乙烯浸渍工艺，利用其化学惰性和不粘性建设致密防护层。滤袋框架的涂层厚度一般为 30 ～ 50 μm，厚度过大容易造成脆性剥落，弧度过小则无法满足防护性要求。滤袋框架表面涂层的润滑性合格，其摩擦系数不足 0.3，防止在清灰阶段造成滤袋与框架磨损。同时，根据滤袋框架防腐施工要求，保证防腐蚀涂料与界面具备较高的相容性，避免出现静电吸附和化学反应引发一系列危害。在滤袋框架防腐设计结束后及时进行盐雾试验与冷热冲击试验，检测防腐涂层结构耐久性，进而为后续方案优化与施工提供基础。

4 结束语

在布袋除尘器中，滤袋框架属于系统的部件，滤袋框架结构是否稳定关系到除尘系统的运行效能和经济寿命。本文分析了布袋除尘器滤袋框架变形结构的设计要点，可以看出，采用异形截面纵筋、螺旋连续支撑环、精密焊接工艺、有限元拓扑优化及高性能防腐涂层等系统化抗变形设计方案，能够提升框架的临界屈曲载荷与抗疲劳性能，抑制变形，延长滤袋使用寿命。

参考文献：

[1] 张洪超,贾金鑫.风力干法选煤除尘新工艺设计与应用[J].选煤技术,2023,51(04):33-36.
[2] 孙凤玲.布袋式自动除尘系统的设计与调试[J].集成电路应用,2020,37(08):110-111.
[3] 汪炳音.冶金原料场布袋除尘器的节能设计与实践[J].山西冶金,2025,48(08):238-241.
[4] 王建全.基于多物理场耦合的布袋除尘器滤袋结构优化分析[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):110-112.
[5] 申延凯.选煤厂布袋除尘器系统阻力优化设计及节能效果评估[J].煤炭新视界,2025(01):47-48.

高密度聚乙烯反应影响因素及控制路径

刘佳伟

（中石化英力士（天津）石化有限公司，天津 300450）

摘 要 高密度聚乙烯（HDPE）具备结晶度高、力学性能优异、化学稳定性强等特性，在多个领域应用广泛。其聚合反应复杂，受多重因素影响，这些因素共同决定了产物的关键性能。本文深入剖析了各影响因素的作用机制，并结合理论研究提出了优化催化剂体系、精准调控反应条件、严格控制原料纯度、优化反应体系的控制路径，旨在为HDPE的工业化生产提供参考。

关键词 高密度聚乙烯；聚合反应；催化剂体系；反应条件；原料纯度

中图分类号：TQ31 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.036

0 引言

高密度聚乙烯是通过乙烯单体在催化剂的作用之下完成聚合操作而形成的，它的分子结构当中所含有的支链数量是比较低的，其结晶度通常处于70%～90%的区间范围之内，而且它的密度则是在0.940～0.965 g/cm^{3}这个范围浮动。与低密度聚乙烯（LDPE）和线性低密度聚乙烯（LLDPE）相比，HDPE在拉伸强度、刚性、耐热性还有耐化学腐蚀性等诸多方面都有着更为优异的表现，并且拥有不错的加工成型性能，在合成树脂这一行业当中，它无论是生产规模还是应用范围都稳稳地占据着靠前的位置。

HDPE的聚合反应包含单体活化、链引发、链增长、链转移以及链终止等诸多环节，反应的稳定性和可控性同产品的性能紧密相关。在工业化的生产进程中，淤浆法、溶液法以及气相法均属于常用聚合工艺，并且都需要对反应参数加以严格把控[1]。近些年来，随着催化剂技术的更新换代以及聚合工艺的不断优化，HDPE朝着高性能、专用化的方向不断发展。本文针对影响HDPE聚合反应的各项因素展开系统梳理，对其作用机制展开深入剖析，并且提出具有针对性的控制策略，以此为聚合反应的精准调控提供相应依据，进而推动产业实现高质量的发展。

1 高密度聚乙烯聚合反应基本原理

HDPE的聚合反应主要存在配位聚合以及自由基聚合这两种方式。在工业生产的范畴当中，超过90%的情况都是采用配位聚合工艺。在配位聚合的具体过程中，催化剂与助催化剂相互之间产生作用，进而形成活性中心，乙烯单体所具有的双键会和这个活性中心进行配位活化操作，接着依靠插入反应达成链的增长目的。典型的催化剂体系包含齐格勒—纳塔（Ziegler-Natta）催化剂、铬系催化剂等。Ziegler-Natta催化剂使用较为普遍，主要以钛系为主。铬系催化剂也是重要的配位聚合催化剂，常见的有硅胶负载的氧化铬催化剂等。在聚合反应中，铬系催化剂具有独特的活性中心结构，其活性中心能够在反应过程中保持相对稳定，对乙烯单体的插入具有较好的定向性，能有效控制产物分子链的线性结构，减少支链的生成，从而使HDPE具有较高的结晶度和密度。

自由基聚合得在高温高压条件下才能够开展，借助引发剂的分解来产生自由基，以此引发聚合反应的发生。不过因为其反应条件颇为苛刻，并且产物所含的支链含量相对较高，所以仅仅只是应用于部分特殊规格HDPE的生产环节当中[2]。HDPE聚合反应最为关键之处就在于线性链结构的形成，而支链含量较低这一情况恰恰是其具备高密度以及高结晶度的本质原因所在。

2 高密度聚乙烯反应的主要影响因素及作用机制

2.1 催化剂体系

催化剂体系在HDPE聚合反应当中占据着极为关键的地位，其对反应活性、定向性、链增长以及终止速率均有决定性的影响，而这些因素又会进一步作用于产物的微观结构与宏观性能方面。具体来讲，其影响主要表现在主催化剂类型、助催化剂用量及其配比情况以及催化剂活性等诸多方面。

不同类型主催化剂的活性中心结构、催化活性以及定向性存在明显区别。Ziegler-Natta催化剂使用较为普遍，在以$TiCl_4$作为主催化剂的情况下，其活性不

作者简介：刘佳伟（1999-），男，本科，助理工程师，研究方向：材料化学。

算高，所需助催化剂的量较多，而负载型钛系催化剂活性有所提高，而且可对支链含量加以控制。铬系催化剂活性中心稳定，在高温下活性保持较好，对乙烯单体插入定向性高，能有效控制产物分子链结构，减少支链，使 HDPE 结晶度和密度较高。但其制备复杂，对反应条件要求苛刻，需精确控制温度、压力和助催化剂用量等。助催化剂的关键作用在于活化主催化剂，进而形成稳定的活性中心，还能对活性中心的数量以及活性加以调节。在工业领域，烷基铝化合物常常被当作助催化剂来使用，其具体的用量以及和主催化剂的配比情况，会对催化效率以及产物性能产生颇为重要的影响[3]。要是助催化剂的用量不够，那么就会使得催化活性有所下降，反应速率变缓，产物分子量也会处于偏低的水平；而倘若用量过多，又会变成链转移剂，致使产物分子量降低，与此同时还会增加成本并且引入杂质。

催化剂活性对反应速率以及生产效率有着直接的影响，它会受到制备工艺、载体性质、杂质含量等诸多因素的作用。就负载型催化剂而言，其载体的比表面积越大，那么该催化剂的分散性就会越好，活性中心的数量也会更多，进而其活性也就越高。然而，在反应体系当中存在的杂质，是会与活性中心相结合的，如此一来便会导致催化剂出现失活的情况。

2.2 反应条件

反应条件，如温度、压力以及反应时间这些方面，会对反应动力学速率产生影响，进而对产物性能起到调控作用，并且不同的聚合工艺其最优条件也会存在差异。

反应温度属于一个颇为敏感的因素，其对于催化活性、链反应速率以及链转移速率皆会产生相应的影响。在特定的一个温度区间范围当中（这个范围通常是在 60 ～ 110 ℃之间），当温度出现升高的情况时，催化活性便会得到一定程度的提升，链引发以及增长的速率也会变得更快，然而与此链转移以及终止的速率同样会加快，如此一来便致使产物的分子量有所降低，分布情况变得更为宽泛，并且支链的含量也会增加，结晶度也随之出现下降的情况[4]。

反应压力这一因素会对乙烯单体的浓度以及活性中心的数量产生影响，而这种影响又会进一步作用于反应速率以及产物性能方面。在某个特定的压力区间范围之内（一般而言这个范围是 0.1 ～ 5 MPa），当压力出现升高的情况时，乙烯单体的浓度就会有所增加，与此链增长的速率也会变快，产物的分子量则会有略微上升的情况；然而，要是压力过高的话，就会使得反应速率变得过快，放热的情况也会十分剧烈，如此一来就很难对温度加以控制了，这不仅会让设备的负荷增大，还会导致成本有所增加，除此之外，还会致使产物的支链含量增多。不同的聚合工艺对应的压力范围各不相同，其中淤浆法所对应的压力范围是 0.5 ～ 1.5 MPa，气相法大约是 2 MPa 左右，溶液法则处于 4 ～ 5 MPa 这个区间，传统的自由基聚合法则需要较高的压力（其范围大概是 100 ～ 300 MPa）。

反应时间对乙烯单体的转化率以及产物分子量皆会产生影响。在反应刚开始的时候，单体转化率还有产物分子量都会随着反应时间的不断延长而呈现出增长的态势。等到反应推进到某个特定阶段之后，单体转化率便逐渐趋于稳定状态，此时产物分子量也会达到其峰值水平。要是再继续把反应时间拉长，那么产物分子量就会出现一定程度的下降情况，甚至还有可能致使产物发生降解现象。在工业生产的实际操作当中，反应时间一般都会被控制在 1 ～ 5 个小时的范围之内，以此来保证单体转化率能够达到 90% 以上的程度。

2.3 原料纯度

原料主要是乙烯单体，其中的水分、氧气、二氧化碳、乙炔、丙烯、甲烷等杂质都会对聚合反应产生不利影响。水分和氧气会破坏活性中心，致使催化剂失去活性，引发链终止反应；二氧化碳会抑制链增长反应，引入杂质；乙炔会优先与活性中心结合，形成支链结构，使催化剂迅速失活；丙烯等 α－烯烃杂质会改变产物分子结构，降低 HDPE 的密度和结晶度。在工业生产中，要求乙烯单体纯度不低于 99.9%，水分含量不超过 10 ppm，氧气含量不超过 5 ppm，乙炔含量不超过 1 ppm。

2.4 反应体系环境

在淤浆法和溶液法聚合工艺中，反应体系环境会对反应进程和产物性能产生影响。

溶剂以及分散剂在反应过程当中占据着极为关键的地位。就淤浆法而言，其中所使用的溶剂能够促使催化剂还有产物实现均匀的分散状态；而在溶液法中，溶剂会将乙烯单体以及 HDPE 产物溶解掉，进而形成一个均相的反应体系。溶剂自身的纯度、所具备的极性以及其沸点这些因素，会对反应的稳定性以及产物的性能产生影响作用，并且溶剂里存在的杂质还极有可能致使催化剂出现失活的情况。

链转移剂在产物分子量以及分布的调控方面有着重要作用，在工业领域当中，常常会选用氢气作为链转移剂。当氢气的用量有所增加的时候，链转移反应的速率便会随之加快，进而使得产物的分子量出现降低的情况；而倘若氢气的用量减少，那么产物的分子

量就会相应地增加。不仅如此，氢气还能够对催化活性起到提升的作用，然而要是用量过多的话，就会致使产物分子量的分布变得较为狭窄。除了氢气之外，有一些有机化合物同样是可以充当链转移剂的，不过其效果相较于氢气而言就没有那么明显了。在淤浆法的生产流程当中，只要加入少量的氢气，便可以对产物的分子量加以控制[5]。

3 高密度聚乙烯反应的控制路径

3.1 优化催化剂体系，提升催化性能

要依据目标产品所具备的性能要求来挑选合适的主催化剂类型。就通用型HDPE产品而言，可以选择负载型Ziegler-Natta催化剂。对于一些对结晶度和密度要求较高，且需要在较高温度下进行聚合反应的产品，可考虑选用铬系催化剂。同时，要不断研发新型的铬系催化剂，改进其制备工艺，降低制备难度和成本，提高其催化性能的稳定性。除此之外，还可以借助对催化剂加以改性的途径，以此来促使它的性能得以进一步提升。

依据主催化剂所属类型来精准地对助催化剂与主催化剂的摩尔比加以调控，要使主催化剂得到充分的活化，同时要防止助催化剂出现过量的情况。例如：在Ziegler-Natta催化剂体系当中，需要将三乙基铝与$TiCl_4$的摩尔比控制在10～50的范围之内。除此之外，还可以通过添加催化剂调节剂的方式来对活性中心的数量以及活性实施调控。

为了降低催化剂出现失活的情况，需要对反应体系里的杂质含量加以严格把控，同时要对催化剂的加入方式予以优化，并且挑选出适宜的反应温度以及压力，倘若有必要的话，还可以在反应体系当中适量地加入一些催化剂、稳定剂。

3.2 精准调控反应条件，优化反应动力学

采用分段控温的办法，依据反应的具体进程来对温度加以调控，并且配备上高效的换热设备，以便能够及时地将反应过程中所产生的热量移除掉，进而维持温度的稳定状态。不同的聚合工艺都必须严格依照与之相适宜的温度范围来操作。

采用恒压控制的策略，依照聚合工艺以及目标产品的性能来设定合适的压力，凭借对乙烯单体进料速率的调节来保持压力处于稳定状态，同时定期检查反应设备的密封性能。

依据反应温度、压力以及催化剂活性来确定最为适宜的反应时间，并且凭借在线监测乙烯单体转化率与产物分子量的方式对反应时间展开动态调节，在工业生产的实际操作当中可以运用在线检测技术。

3.3 严格控制原料纯度，保障反应稳定

对乙烯单体展开多级提纯方面的处理工作，要使其纯度能够契合相关要求，还需定期针对原料纯度予以检测，并且建立质量追溯体系。

采用密封式的储存以及输送设备，能够防止原料和空气、水分有所接触。并且要定期针对储存设备展开清洗与干燥工作，同时也要定期对输送管道进行吹扫操作，在整个输送的过程当中还需采用惰性气体来给予保护。

3.4 优化反应体系，提升反应可控性

选用高纯度且具备适宜极性与沸点的溶剂以及分散剂，对其用量予以严格把控，同时要对溶剂实施回收利用方面的相关操作。

采用氢气当作主要的链转移剂，依据目标产物所具有的分子量来对氢气的用量加以精准调控，构建相应的关联模型，对反应进程当中的氢气浓度予以监测，并且要动态地调整进料的速率，在有必要的时候还可以与少量的辅助链转移剂相互搭配使用。

定期对反应设备展开清洗工作，对于辅助原料要严格实施提纯操作，在反应进行的过程中采用惰性气体作为保护手段，并且强化在线监测举措。

4 结束语

高密度聚乙烯的聚合反应受到催化剂体系、反应条件、原料纯度以及反应体系环境四大类因素的协同影响，这些因素共同决定了产品的性能和生产效率。本文提出的控制路径，包括优化催化剂体系、精准调控反应条件、严格控制原料纯度以及优化反应体系环境，能够实现反应的稳定可控，提升产品质量的稳定性，并降低生产成本。未来，HDPE反应控制技术将朝着精准化、智能化、绿色化的方向发展。

参考文献：

[1] 段钰.高密度聚乙烯聚合反应器外部冷却系统管道设计要点[J].上海塑料,2025,53(03):53-57.
[2] 刘志强,朱维权,刘晓亮.高密度聚乙烯生产工艺对比[J].化工设计通讯,2025,51(03):27-29.
[3] 曾少敏,田奇超,解利军,等.高密度聚乙烯装置系统结块的原因分析及优化措施[J].石化技术与应用,2024,42(04):279-282.
[4] 范殿钊.负载金属催化剂催化共热解微藻与高密度聚乙烯制备富烃生物油的研究[D].南宁:广西大学,2023.
[5] 邢国伟.三峰高密度聚乙烯的合成及其管材料的制备与工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2023.

高层建筑给排水系统优化设计与施工要点

马士玉

（山东省滕州市中润供水有限公司，山东 滕州 277599）

摘 要 随着城市化进程的加快，高层和超高层建筑成为城市空间的主体，给排水系统的复杂度和运行要求也明显提高。传统的给排水设计和施工模式不能满足当前建筑严格的规范要求，系统优化是必然的趋势。本文对高层建筑给排水系统优化设计的原则、要点以及施工路径进行研究，摒弃空洞的理论和孤立的案例，从系统的整体逻辑出发，把技术落实到具体的施工中。首先确定以安全为基础、高效为中心、经济为约束的原则，从供水压力分区、排水通气效能、消防联动、智慧化管控等角度分析设计要点，提出材料选择、工艺控制、BIM 技术融合、全过程质量监管等施工途径。创建技术逻辑链条，为高层建筑给排水工程提供前瞻性且具有操作性的系统解决办法，旨在对保证建筑整个生命周期的水务运作稳定可靠有所裨益。

关键词 高层建筑；给排水系统；优化设计；施工管理；压力分区

中图分类号：TU972 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.037

0 引言

高层建筑给排水系统是保证建筑功能正常运转、保证建筑安全、提高建筑品质的重要基础设施。由于竖向高度跨度大，它存在着静水压力不均匀、排水气流波动大、火灾救援难等特有的问题，这就决定了系统的结构设计要突破常规。当前建筑行业正向着精细化、绿色化、智能化方向发展，给排水系统优化水平决定着建筑能耗、运维成本和应急能力。但是，在实际的工程中，一些项目存在着设计理念滞后、系统匹配度低、施工工艺粗糙等问题，从而造成噪声、水压不稳定、管道渗漏、消防失效等隐患。因此，对系统的运行机理进行分析，建立优化的设计和施工体系已成为工程技术领域亟需解决的问题。

1 高层建筑给排水系统优化设计原则

1.1 安全性原则

安全性是高层建筑给排水设计的最低标准，包含结构安全、水质安全、消防安全、应急避险等各方面。在竖向高压环境下，管道和附件应有足够的承压、抗疲劳性能，防止爆管造成水浸或者结构损坏，这就需要设计阶段准确模拟管网压力分布，保证系统在任何情况下都处在安全范围内。水质安全要严防二次污染，改善水箱材质、管路走向和配置消毒装置，创建全程纯净屏障，在生活和消防用水共用时要建立严格的隔离措施。消防安全是生命线，系统在火灾发生时要立即响应，消火栓、喷淋系统布置要覆盖所有的防火分区并且没有死角，还需考虑极端情况下备用电源和应急供水[1]。抗震设计、防洪排涝能力也不能忽略，管道连接要用柔性接口来适应主体变形，地下室排水要备有冗余泵组防暴雨倒灌，只有把安全理念贯穿到每一个环节中去，才能构筑起一道坚不可摧的防线。

1.2 高效性原则

高效性原则在于依靠科学的架构和先进的技术来达到水资源利用最大化、能源消耗最小化的目的。供水系统要抛弃传统的高位水箱重力供水方式，采用变频调速恒压供水技术，根据实时用水量自动调节水泵的转速，消除无效扬程，采用分区分压的方式防止低区超压浪费。排水系统具有通畅性和自洁性，改善立管管径、管件结构以及合理设置通气管道，达到平衡管内气压的目的，避免水封被破坏、气流噪声，保证污水快速排出。雨水收集和中水回用系统集成起来可以起到重要的作用，将屋面雨水和生活杂排水处理之后用于绿化、冲洗、冲厕等，大大降低市政自来水的使用量，减轻城市管网的负担。系统高效运转还需依靠智能化监测，利用高精度传感器持续收集数据并加以分析反馈，进而自动调节参数并发出警报信号，从而把被动保养变为主动管理，保证系统一直处在最佳状况中。

1.3 经济性原则

经济性原则是以全生命周期成本为视角，综合考虑初投资、运行费、维护费和残值来实现最佳的经济

作者简介：马士玉（1979-），女，本科，工程师，研究方向：给排水工程。

效益。设计阶段不能由于过于保守而造成材料浪费，准确进行水力计算得到最合理的管径，保证流速符合要求，同时防止管径过大造成成本上升。空间布局的经济性在于合理的管线布置减小管井的尺寸，释放出宝贵的建筑面积。施工和运维阶段用预制装配式构件缩短工期、降低人工成本，利用大数据进行预测性维护防止出现突发性的大修理费用。更重要的是，设计者要有长远的眼光，考虑能源价格的波动和新技术的更新，留有扩展接口和改造的空间，使系统具有良好的适应性，避免由于短期节约而造成长期功能僵化或者重复建设，真正实现“一次投资，长期受益”。

2 高层建筑给排水系统优化设计要点

2.1 科学合理的供水压力分区策略

高层建筑巨大的竖向高差使得静水压力成为主要矛盾，科学的压力分区是优化设计的第一步。分区策略要依照建筑高度、市政压力、器具额定压力以及水泵性能曲线综合计算，一般每十到十二层划分成一个独立的区域，保证各个分区最低点的压力不大于允许值，最高点的压力能够满足出水要求。分区内部优先采用减压阀组调节，比减压水箱占地面积小、无二次污染、调节灵活，但是需要设置旁通和备用阀组来应对故障。超高层建筑需要设置中间转输水箱，把垂直链路分成若干个独立的子系统，降低单台水泵扬程的要求，提高效率，增加冗余度，保证某一区段发生故障不会影响整个系统，这是实现平稳高效运行的基础[2]。

2.2 强化排水系统通气效能与水封保护

高层建筑排水立管长、落差大，容易产生剧烈的压力波动，不通气会破坏水封，影响居住健康，所以加强通气效果是关键。优化设计要推广使用特殊单立管或者双立管系统，利用特殊管件将水流引导成螺旋状下落，在立管中心形成稳定的空气柱来减小气流阻力。通气管道的布置应符合“高处引出、低处连通”的原则，顶端高出屋面加装风帽，底端与排水立管可靠连接，必要时设置环形通气管形成网络化的通气系统。在水封保护方面，除了严格控制存水弯深度之外，地漏选型应选择深水封或者机械密封产品，并设置补水装置防止干涸。底部几层排水由于受力最大，应单独排除或者加设防护。

2.3 构建智能联动的消防给水保障体系

高层建筑火灾扑救困难，要创建反应灵敏、供水可靠、智能联动的消防保障体系。系统设计采用双重水源、双重动力、双重控制的冗余设计思想，市政供水之外还需保证一定的消防水量，并且设置足够的消防水池，配备主备消防泵，实现自动切换。管网布置成环状以提高可靠性，重要节点装设检修阀和压力表。智能化是提高效率的重要手段，利用物联网技术把水位、压力和泵状态数据传送到控制中心，一旦出现异常或者报警，系统则会立刻启动并联动阀门，实现秒级响应。对于超高层建筑要设置中间转输泵和高位消防水箱，依靠重力和加压相结合的方式保证顶层和底层的水量水压充足，定期对系统进行自动化检测，保证系统完整，为人员疏散和火灾扑救争取时间。

2.4 深化智慧水务与全生命周期管理平台

高层建筑给排水系统已经发展成一个感知、传输、分析、决策的智慧水务生态系统。优化设计应该在前端大量安装智能水表、传感器和漏水检测探头，形成一个全覆盖的感知网络，把数据汇总到云端平台上。依靠大数据以及人工智能算法，平台可以对用水规律进行深入的学习，从而预估出高峰时段的用水量，并且对水泵的操作策略加以调整，达成按需供水和节能降耗的目的，而且还能找出管道老化及渗漏的早期迹象，发出警报并给出维修建议，促使运维由“事后抢修”转向“事前预防”。全生命周期管理平台冲破信息壁垒，让BIM模型同运行数据深度结合，管理人员借助三维界面得知管网状况，加快应急处理速率。平台还需具有开放接口，同楼宇自控和智慧城市平台对接，共享资源、协同联动，实现数字化、网络化、智能化升级[3]。

3 高层建筑给排水系统优化施工有效路径

3.1 严控高性能管材选型与进场验收

管材和配件的质量是决定高层建筑给排水系统使用寿命和安全性能的物理基础，施工过程中必须制定严格的选型标准和进场验收制度，从源头上杜绝不合格材料进入工地。选型时要根据设计要求和系统工况，优先选用耐腐蚀、耐高压、内壁光滑、环保性能好的管材，生活给水管宜用不锈钢管或优质PPR管，消防管宜用内外涂塑钢管，排水管宜用高密度聚乙烯（HDPE）静音管，保证材料性能与系统需求相匹配。

进场验收环节要实行“三证齐全、外观检查、抽样复检”这一标准程序，查验产品的质量合格证、检测报告和出厂证明，仔细查看管材表面有无裂纹、凹陷、色泽不均等缺陷，按照规范的比例截取样品送到具备资质的第三方检测机构做物理力学性能和卫生指标的检测，只有各项指标都达到国家标准和设计要求才能入库使用。施工现场应建立完善的材料存储保管制度，

分类堆放，防晒、防雨、防潮，防止材料存放期间发生变形、性能退化，精密阀门和仪表更要设专用库房专人管理，保证每颗螺丝、每一个垫片都能经受住时间的考验，为百年工程打下坚实的物质基础。

3.2 推行标准化预制装配与精细化安装工艺

传统的现场切割焊接施工方式效率低、质量不稳定、会产生大量的建筑垃圾，推行标准化预制装配和精细化安装工艺是提高高层建筑给排水施工质量的根本方法。施工前要利用 BIM 技术做详细的管线综合排布和碰撞检测，生成准确的三维加工图，将管道在工厂或者现场预制加工区定尺切割、坡口处理、法兰焊接、支吊架组装，形成标准化的模块单元，然后运送到作业面进行整体吊装和连接，该种“像造汽车一样造房子”的方式大大减少了高空作业量和现场动火作业，提高了施工精度和速度[4]。

安装时必须严格按照工艺标准执行，螺纹连接要保证丝扣完整、填料均匀，沟槽连接要保证卡箍紧固到位、橡胶圈无扭曲，热熔连接要精确控制加热时间和插入深度，严禁虚焊、过焊。支吊架设置要进行力学计算，间距合理、固定牢固，在穿越沉降缝、伸缩缝处必须按设计要求安装柔性补偿装置，以适应建筑结构的变形。每道工序结束后均要进行自检、互检和专检，形成完整的质量追溯记录，保证管道横平竖直、标识清楚、接口严密，用工匠精神铸造出高品质的安装工程。

3.3 深度融合 BIM 技术赋能全过程施工管理

建筑信息模型（BIM）技术已经不再只是辅助工具，而是高层建筑给排水施工全过程中的核心驱动力。深度融合 BIM 技术可以实现施工管理的可视化、协同化、智能化。在施工准备阶段用 BIM 模型做虚拟预演，提前发现并解决管线碰撞、净高不够、预留孔洞偏移等问题，优化施工方案和工序安排，防止返工浪费。施工实施阶段用移动端设备把 BIM 模型和现场实况实时对比，指导工人准确找到管道走向和标高，保证安装误差在毫米级以内，依靠模型关联施工进度、材料信息、质量数据，实现施工过程的动态监控和精细化管理。对复杂的节点如泵房、管井等制作详细的三维交底视频，直观地反映安装的细节和技术要求，降低沟通成本，提高作业人员技术的理解程度。调试与验收环节可以将 BIM 模型当作数字化交付成果，将设备参数、维护手册以及操作指南等全部纳入其中，给后期的运维管理提供丰富的数据支撑，推动施工管理由“蓝图施工”向“数字建造”迈进，大幅提升了施工管理的科技含量和总体成效。

3.4 实施全方位压力测试与系统性调试验收

压力测试和系统调试是检验高层建筑给排水施工质量及功能的最后一道关卡，必须做全方位、多层次的测试和验收工作，保证系统交付即合格。水压试验要按照规范要求分段、分区进行，逐步升压到试验压力并保持规定时间，仔细观察压力表读数的变化以及管道接口、配件处是否有渗漏、变形的现象，隐蔽工程必须在覆土或者封闭之前完成试压并签署验收文件，严禁带病隐蔽。排水系统应做通球试验和灌水试验，检验管道的畅通程度及接口的密封情况，保证无堵塞、无渗漏，对卫生器具做满水试验，检测溢流功能及排水速度[5]。系统联动调试是验收的关键环节，要模拟各种运行工况，测试水泵启停、阀门开关、液位控制、报警联动等功能是否正常，尤其是消防系统，必须进行实地喷水试验，检验最不利点的压力和流量是否符合设计要求，保证火灾时能够及时响应。

4 结束语

高层建筑给排水系统优化设计及施工属于综合性、实践性和艺术性并存的系统工程，直接关系到城市运转和居民生活。本文根据安全性、高效性、经济性原则来建立逻辑框架，分析压力分区、通气效能、消防联动、智慧水务的设计要点，提出材料控制、预制装配、BIM 融合、系统调试施工路径。这些措施互相联系，要在设计、施工、运维阶段分别做好前瞻规划、细致落实、智能控制，才能得到最佳的方案。面对未来建筑技术革新与用户需求多样化的情况，从业者的视野要宽广，创新意识要强，努力探究新材料、新工艺、新技术的运用，推动给排水行业向前发展，为城市人居环境做出贡献。

参考文献：

[1] 王德龙.新型复合管材在高层建筑给排水系统中的应用研究 [J]. 居舍 ,2025(25):60-62.
[2] 方立忠.高层建筑给排水系统消防联动设计与运行研究 [J]. 消防界 (电子版),2025,11(15):58-60.
[3] 程冰如.超高层住宅建筑给排水系统同层水力性能研究 [J]. 城市开发 ,2025(15):138-140.
[4] 方洪伟.超高层建筑给排水系统精细化设计 [J]. 工程建设与设计 ,2025(13):72-74.
[5] 唐颖.关于高层建筑给排水系统及消防系统的设置探讨 [J]. 给水排水 ,2025,61(S1):444-448.

市政工程供热管网施工改造节能设计分析

张敦国

（乐陵市城市管理综合服务中心，山东 乐陵 253600）

摘 要 随着我国“双碳”战略目标的深入推进，市政基础设施的绿色低碳转型成为关键环节。供热管网是城市能源系统中重要的一环，它的运行状况直接影响到区域热能的利用情况和碳排放量。当前大量的既有供热管网存在老化、保温性差、水力失调等现象，亟需通过科学的施工改造和节能设计来提高系统的整体效率。本文主要对市政工程供热管网施工改造中节能设计进行论述，系统地分析其重要性，提出三个核心设计原则，从材料选择、水力优化、智能控制和施工工艺四个方面进行详细的阐述，旨在为促进供热管网向高效、稳定、智能化方向发展提供参考，进而促进城市供热系统的节能降耗。

关键词 市政工程；供热管网；节能设计；水力平衡；智能调控

中图分类号：TU990.3 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.038

0 引言

随着国家“碳达峰、碳中和”战略的全面铺开，城市基础设施的绿色低碳转型已经由政策驱动转变为刚性约束。市政供热管网是城市能源输配系统的重要组成部分，具有把热量高效、稳定地输送到千家万户的功能，其运行效率既关系到居民用热的质量，又影响到区域的一次能源消耗和温室气体的排放量。但是当前运行多年的大批供热管网由于设计标准过时、材料老化、施工工艺落后等原因，普遍存在着保温性能下降、水力工况失衡、调控手段简单等问题，导致热损失大、泵耗高、调节反应慢等现象长期存在。在此背景下，以节能为指向的供热管网施工改造不再仅仅是简单地对设备进行更新或者局部维修，而是一种将新材料、新工艺、智能控制和绿色建造理念融入其中的系统性工程重构。

1 市政工程供热管网施工改造节能设计的重要性

市政供热管网是由热源、输配管网和终端用户构成的能量输送系统。市政供热管网的运行状况直接决定整个供热系统的效率及环境效益。当前我国北方地区大量的供热管网建于20世纪80-90年代，都存在管材老化、保温层失效、接口渗漏率高的问题，造成热损失率普遍大于15%，部分老旧区域甚至达到25%以上。这种高耗能不但会造成能源的浪费，还会加大碳排放的压力[1]。另外，传统的管网大多使用定流量运行方式，不能对负荷的变化做出反应，容易造成近端过热、远端不热的水力失调现象，从而降低用户的满意度和系统的调节效率。在国家大力推行新型城镇化和绿色基础设施建设的大背景下，对既有供热管网进行以节能为方向的施工改造，是提高城市能源韧性、降低碳排放强度、保证民生用热质量的重要途径。采用高性能保温材料、优化管网拓扑结构、部署智能调控系统等方式，在不明显提高投资的情况下，可以达到热损降低30%以上、泵耗减少20%以上的一体化节能效果，有明显的经济效益和社会效益。

2 市政工程供热管网施工改造节能设计核心原则

2.1 系统整体性原则

供热管网不是孤立的管道集合，是由热源、输配管网、用户末端和调控系统组成的复杂热力网络。节能设计不能采取头痛医头、脚痛医脚的局部优化方法，而应该采用系统整体性的观点，从热源输出特性、管网输送能力和用户负荷需求三者之间动态匹配的角度来统筹考虑。局部管段更换时，只考虑该段保温性能的提高而不考虑它对下游水力工况的影响，会造成新的不平衡点。因此，改造前要根据全网水力、热力耦合模型做仿真分析，找出瓶颈节点和冗余环节，确保局部改造服务于整个系统的能效提升。系统整体性还表现在多能互补上，即把热网同电、气等其他能源系统进行耦合设计，在谷电时用蓄热或者工业余热来补充，可以提高一次能源的利用率[2]。

作者简介：张敦国（1970-），男，专科，助理工程师，研究方向：市政工程。

2.2 全生命周期经济性原则

节能设计要兼顾运行阶段的能耗降低，并考虑初投资、运维成本以及设备寿命等各方面的因素，实现全生命周期内经济效益最大化。高性能材料或者智能设备虽然初期投资较大，但是由于它们的耐久性好、维护次数少、节能效果明显，在 5 年到 8 年之内就可以收回增量成本。预制直埋保温管代替传统的现场缠绕保温方式，虽然单米造价提高了约 15%，但是接头密封性好、热损率低、寿命可达 30 年，大大降低以后的检修和热能损耗成本。因此，在方案比选时应该采用全生命周期成本（LCC）分析的方法，防止为了达到短期的投资控制目的而忽略了长期的运行效益。另外，需要结合财政补贴政策与碳交易机制来量化外部性收益，为高性价比节能技术的使用提供决策依据。

2.3 技术适配性与可实施性原则

节能技术选择要同既有管网现状、施工条件和运维能力相适应，不能为了追求高端而忽略了落地的可行性，在狭窄的街道或者地下管线密集的地方，大口径非开挖修复技术虽有其优势，但是如果缺乏专业的设备和操作人员，就很难保证施工的质量。因此，改造方案要以现场踏勘的数据为基础，分析地质条件、交通限制、停暖窗口期等因素的影响，在满足安全、环保要求的前提下，选择技术成熟、施工方便、对居民影响小的工艺路线。此外，智能调控系统部署时也要考虑到现有的 SCADA 系统兼容性和运维人员的技术水平，优先使用模块化、易集成的软硬件架构，保证系统上线之后可以稳定运行，并且达到预期的效果。技术适配性可保证节能效果的连续产生[3]。

3 市政工程供热管网施工改造节能有效路径

3.1 高性能保温材料与结构优化应用

供热管网热损失的根本原因是管道外壁和环境之间存在着温度差，导致热传导。保温结构设计的优劣直接影响到热阻的大小。传统的保温方式大多用现场缠绕岩棉或者玻璃棉，再外贴镀锌铁皮，既不能保证施工质量，又容易造成热桥，长期运行时由于吸湿使导热系数增大。现代节能改造重视工厂预制、一体化成型的保温结构，高密度聚氨酯硬泡（PUR）直埋保温管是主要选择。从内到外依次是工作钢管、聚氨酯发泡保温层、高密度聚乙烯（HDPE）外护管，三者用化学交联的方式结合在一起，形成一个密闭的防水体系。在施工改造时，应优先选用散热严重的架空管、地沟管等敷设方式的管段，对弯头、三通、阀门等异形部件采用模压保温壳，以保证保温层连续不断。此外，对穿越道路、河流等特殊路段采用钢套钢复合保温结构，以增加机械强度和耐久性[4]。

具体而言，改造工程要严格按照《城镇供热直埋蒸汽管道技术规程》《高密度聚乙烯外护管聚氨酯泡沫塑料预制直埋保温管》等有关标准来执行。在某大型城区主干线更新工程中，施工队伍先对原有管线做三维激光扫描，得到管位、埋深和周围地下构筑物的信息，再根据热力设计参数计算出各个管段的经济保温厚度，然后按不同的规格定制预制管节。运输到现场之后，用电熔套筒或者热收缩带对接口进行密封处理，保证环向和纵向接缝的气密性。在整个施工过程中，要重视工序衔接和质量控制，保证接头保温的完整性，防止由于施工原因造成后期热损失集中。

3.2 水力工况精细化调控与平衡

水力失调的本质在于管网各个并联支路的阻力特性不一样，造成流量分配不符合设计要求。要解决这一问题不能只依靠末端用户调节，而应从系统上建立分级调控机制。首先，在热力站出口处装设静态平衡阀，按照设计流量预先设定开度，实现一次网与二次网的合理调配；其次，在各个建筑物或者小区入口处装设动态压差控制阀（DPV），该装置依靠感压膜片实时感应用户的供回水压差并自动调节阀芯位置来保持所设定的压差不变，从而消除主管网压力变化给末端造成的干扰。同时，循环水泵要装设变频驱动装置，其转速由回水温度或者温差信号来控制，使系统一直处在“小流量、大温差”的高效运转状态。该种由静态初调、动态稳压、泵频联动组成的三级调节体系，可有效地防止近端过流和远端欠流现象的发生。

基于此，在实际的改造过程中，需要对原有的管网做水力试验，得到各个节点的压力、流量等参数，用专业软件建立数字模型，对其进行仿真校核。以某集中供热区域二次网改造为例，工程团队先关闭所有的用户支路，逐个打开并测量实际的流量，与设计值比较之后来计算需要的平衡阀 Kv 值，然后在每一栋楼的热力入口井内安装一个压差控制阀，其设定值根据建筑的高度和系统使用的压力头来定。循环泵由变频机组代替之后，将它的控制逻辑接入气候补偿控制器之中，即该控制器依据室外实际温度来自动调整供水温度的设定值，再联动变频器来调节水泵的转速。施工期间要注意阀门安装方向和前后直管段的长度，保证阀门调节特性不受干扰。系统调试阶段采用分段平衡法，先调主干管，再调分支管，最后微调末端，逐

级逼近理想的水力工况。整个过程是以参数整定和系统协同为主，而不是简单的设备叠加。

3.3 智能监测与预测性运维体系构建

传统的被动式运维不能适应管网隐蔽性高、故障发生突然的特点，节能改造要融入主动感知和智能决策。其关键在于搭建起“端—边—云”三层结构的监测网络，在管道重要位置装设温度、压力、流量、声波传感器作为感知端，实时采集运行状态；边缘计算网关对原始数据进行滤波、特征提取和异常判断，减少无用的上传；云端平台集合了数字孪生模型以及机器学习算法，实现故障预警和调度优化。根据时间序列分析得到的泄漏检测模型，可通过比较上下游流量差值的变化率来发现微小渗漏；结合气象预报和历史负荷的深度学习模型，可生成未来24小时热需求曲线，从而指导热源厂提前做好燃烧策略调整。

因此，在部署实施上要协调好供电、通信以及防护等级之间的关系。传感器选择要满足IP68防护等级，且工作温度范围在-30 ℃到120 ℃之间。供电方式可以选择锂电池加太阳能板的组合形式，保证长时间使用无需维护。通信链路采用LoRa或者NB-IoT等低功耗广域网技术，适用于地下弱信号环境。以某城市主干网智能化升级为案例，每公里设置1个监测点，监测点包含双冗余的温度压力变送器、超声波流量计，在阀门井中安装防爆型边缘网关。数据经过市政物联网平台后，进入供热调度中心的数字孪生系统。该系统以BIM模型为底图，在其上叠加实时运行参数和设备状态，可进行三维可视化巡检和故障定位。运维人员可以利用移动终端接收到的预警信息，调用相关的历史数据进行辅助诊断。整个体系以数据闭环和人机协同为核心，使运维由经验驱动转向数据驱动。

3.4 绿色施工工艺与资源循环利用

施工环节的节能既关系到运行阶段，又体现在建造过程本身所具有的资源消耗和环境影响上。传统的开挖施工要先破除路面、支护沟槽、外运渣土，工期长、扰民大，而且柴油机械作业会产生大量的碳排放。非开挖修复技术为此提供了一条新的途径。对于内部有腐蚀但是结构还存在的老式金属管，可以使用高密度聚乙烯（HDPE）管穿插法，即先对旧管进行清洗疏通，再将盘卷好的HDPE管加热软化后牵引穿入，冷却后紧贴管壁形成新的内衬。本工艺不需要大面积开挖，适合于交通繁忙的路段。另一种常用的加固方式在于原位固化（CIPP），即把浸渍热固性树脂的软管翻转插入旧管，用热水或者紫外线使其固化成型，适合于混凝土或者陶土管的修复[5]。

另外，拆除的旧管材要进行分类处理。球墨铸铁管、无缝钢管等金属材料经过切割、除锈之后送往钢厂回炉再生；聚氨酯保温废料用醇解工艺分解成多元醇和胺类化合物，再用于保温原料的合成。施工组织上要推行模块化预制的理念，即把阀门组、补偿器、支架等做成标准的单元，在工厂完成焊接、试压和保温的工作，现场只需要吊装对接即可，大大减少了高空狭窄空间作业。以某次干道改造为例，施工方用螺旋缠绕法更新DN400主管，即先用铣刨机清除旧管内壁，然后用带有HDPE板材的旋转头连续缠绕成型，同时打入粘结剂。全过程只占用半幅车道，夜间施工，白天恢复正常通车。旧铸铁管破碎后一部分用作路基回填，另一部分的金属部分统一回收。该种做法把施工对城市运行的影响降到最小，又实现了材料的高效循环利用，体现的是绿色建造的主要价值。

4 结束语

市政工程供热管网的施工改造节能设计是一个系统工程，需要把材料科学、流体力学、自动控制和绿色建造等多门学科的知识结合起来。在日趋严重的能源和气候危机面前，单纯地依靠设备升级已经不能满足深度节能的要求，必须转向以系统集成、智能调控、全生命周期管理为主要内容的综合解决方案。按照整体性、经济性和适配性的原则来推进高性能保温、水力平衡、智能运维和绿色施工这四个方向，可以明显提高供热管网的能效水平，促进城市能源系统的低碳转型。未来的供热管网，依靠数字孪生、人工智能和新型材料技术不断进步，向着更高效、更韧性、更智慧的方向发展，为实现“双碳”目标提供坚实的支撑。

参考文献：

[1] 张洳铭.浅析市政工程供热管网施工改造节能设计[J].中国设备工程,2025(04):134-136.
[2] 罗江涛.室外供热管网工程设计要点探究[J].建筑与预算,2023(07):49-51.
[3] 尤永良.市政集中供热管网的施工工艺及质控方法思考[J].中国住宅设施,2023(05):163-165.
[4] 魏智邦.市政供热管网标准化施工技术研究[J].大众标准化,2023(09):129-130,133.
[5] 何怡枫.集中供热管网工程全过程造价管理对策分析[J].工程建设与设计,2022(10):235-237.

基于 PLC 的二氧化碳增压设备的控制系统设计

谢鑫磊

（中石化石油机械股份有限公司数智装备与材料创新研究分公司，湖北 武汉 430030）

摘　要　为满足油田现场对二氧化碳增压过程精度与效率的当前需求，在某厂现有二氧化碳增压泵车的基础上，针对其信息化集成度低、自动化水平不足等问题，设计了一套控制系统。该系统以西门子罗克韦尔 1756PLC 为核心进行逻辑处理，通过 J1939 协议实现与发动机的通信，并借助压力与温度传感器的实时反馈，完成了对增压泵速度的精确控制以及增压过程中压力与排量的自动调节。同时，利用北尔上位机实现了生产数据的实时可视化。应用结果表明，该控制系统有效提升了二氧化碳增压的效率和精度，进一步提高了设备自动化水平。

关键词　PLC；二氧化碳增压设备；控制系统

中图分类号：TP273；TH87　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.039

0　引言

将二氧化碳注入地层中，二氧化碳可以渗透进入地层之间的微小空隙[1]，并且能够溶解于原油之中，改善原油与水的流度比、降低油水界面张力，降低原油的黏度，增大原油的体积，从而提高提高采收率[2]。并且有一部分二氧化碳还可以永久的保存在底层之中。随着绿色石油的开采需求加强，这种可以增加采收效率的 CCUS 技术得到了广泛的应用[3]，但在使用压裂车向地层中泵送液态二氧化碳的过程中，保证注入的流量和保持二氧化碳的液态状态[4]，必须将储存罐中的液态二氧化碳先进行增压，于是开发了基于 PLC 的二氧化碳增压设备的控制系统。该系统可以控制从罐体到增压出口的管线阀门，并且可以增加液体二氧化碳的压力到设定数值，从而达到运输储存罐中的二氧化碳和增压二氧化碳的双重作用。

1　二氧化碳增压设备控制方案

整体设备分为动力系统、管线控制系统、气液分离系统和增压系统四个部分构成，动力系统通过控制发动机带动液压泵产生液压压力，从而给各个部件提供液压动力。管线控制系统可以控制各个蝶阀的开关，从而控制二氧化碳在整个设备中的流通路径。气液分离系统可以将气态的二氧化碳排出，维持二氧化碳的液态状态。增压系统可以通过离心泵的作用，提高二氧化碳液体的压力，从而达到增压的目的。

2　二氧化碳增压设备控制系统硬件设计

2.1　系统总体架构

本控制系统采用三层分布式架构，确保了控制的实时性、系统的可扩展性以及人机交互的便捷性。

1. 控制层：作为系统的控制核心，由可编程逻辑控制器 PLC 构成，负责执行实时数据采集、逻辑运算、闭环控制算法及安全联锁保护[5]。它直接与现场的传感器和执行机构交互，是确保工艺过程稳定的关键。

2. 监控层：由触摸屏 HMI 组成，运行数据采集与监控软件。它为操作员提供直观的工艺流程图、实时和历史数据趋势、报警管理和参数设置界面[6]，是实现高级监控和数据分析的平台。

3. 设备层：包括所有的现场仪表和执行机构，负责物理信号的转换与动作的执行。各层级之间通过工业以太网进行高速数据通信，形成一个信息集中、控制分散的有机整体，保证了数据流从采集、处理到显示的稳定与高效[7]。

2.2　硬件平台选型

结合二氧化碳增压控制系统的控制需求，通过对燃油液位、液压油温、离心泵 1 的压力和排量、离心泵 2 的压力和排量、分离器的温度和压力、蓄电池充电电流等共计 9 个模拟量输入传感器。为控制离心泵 1 和离心泵 2 的转速和发动机的转速，共需要模拟量输出 4 个。本设备一共有 28 个启动蝶阀和一个电动蝶阀，

作者简介：谢鑫磊（1994-），男，硕士研究生，助理工程师，研究方向：自动化控制。

加上报警系统一共需要数字量输入74个，数字量输出45个。根据所需的要求，设计电气控制硬件（如表1所示）。PLC使用罗克韦尔的1756型号。

表1 控制系统硬件详细配置表

序号	名称	说明
1	电源	1756-PB72
2	CPU	1756-L71
3	终端模块	1756-EN2T
4	模拟量输入模块	1756-IF16
5	开关量输出模块	1756-OB32
6	模拟量输出模块	1756-OF8
7	开关量输入模块	1756-IB32
8	数字量输出模块	1756-OW16I
9	高速开关量输入模块	1756-IB16IF
10	交换机	EDS-508A-T

3 二氧化碳增压设备控制系统软件架构与核心算法设计

3.1 软件分层架构设计

1. 设备驱动层。为全面采集设备运行状态，该控制系统针对不同物理量采用相适应的信号采集方案。压力与温度传感器输出抗干扰能力强的4～20 mA标准模拟电流信号。转速测量则利用磁电式传感器。核心的发动机运行参数，如燃油率、扭矩、故障代码等，严格遵循SAE J1939车辆网络协议，通过CAN总线以参数组（PGN）和特定参数（SPN）的形式进行结构化、高效率的通信。所有数据由控制器实时汇总与处理，最终通过高速的EtherNet/IP工业以太网协议与上位机监控平台集成，实现了数据的高速、可靠传输与系统的集中化智能管理。

2. 控制逻辑层。本系统依据设备关键性与控制复杂度，实施了精细化分级控制策略，以实现安全、稳定与高效的运行。对于工艺流程中的普通阀门，采用基于人机交互屏幕的手动控制模式，为操作人员提供直接、灵活的设备干预能力。气液分离器的排液控制则采用了基于液位阈值的自动逻辑控制：当液位传感器检测到液位达到预设上限时，系统自动开启排液阀；当液位下降至下限时则自动关闭，从而可靠地实现了“上限开阀、下限关阀”的自动循环，保障了分离效果与容器安全。对于出口压力稳定性要求极高的增压泵，系统部署了先进的PID闭环控制。该回路以压力传感器实时监测的出口压力作为反馈值，与系统设定的目标压力值进行持续比较，计算出实时偏差。此偏差信号经过PID控制器的比例、积分、微分三环节综合运算，得到优化的控制量并输到离心泵的液压流量控制阀，形成一个连续的、自我校正的控制闭环。这种策略能够快速抑制系统内外部扰动，实现对出口压力的高精度、自适应稳定控制，显著提升了整个流体输送过程的动态品质与可靠性。

3.2 下位机（PLC）核心控制算法

1. 自适应PID压力控制。为实现对增压泵的精细化控制，本文设计了一套集成转速、流量与压力三重控制目标的智能解耦控制策略。该系统可根据实际工艺需求与用户设定，自动识别并切换至最优控制变量。其核心在于构建了相互解耦的三条独立PID控制回路，分别对应泵的转速、管道流量及出口压力。控制器依据所选模式，实时采集相应传感器数据，与设定值进行比较，并通过PID算法动态调整变频器输出，从而精确调节水泵运行状态。该架构不仅确保了在不同工况下总能维持关键参数的稳定，也通过模式间的无扰切换，显著提升了系统的适应性、控制精度与整体能效。

2. 智能本地远程逻辑。本设备可通过以太网链接设备，在远离井场50 m的范围内对设备进行控制。系统设计实现了本地控制与远程控制模式间的无缝切换，核心在于采用具备“起—保—停”功能的互锁逻辑。该设计不仅能智能维持阀门等执行元件的控制状态，防止意外复位，更通过硬件与软件的双重互锁机制，确保本地与远程两端指令可并行接入且互不干扰，从根本上杜绝了控制权冲突与信号紊乱，保障了控制系统的唯一性与操作安全，提升了整体控制的灵活性与可靠性。

3. 安全联锁保护策略。本系统集成了一套多层次的安全监测与自动保护机制，旨在保障人员与设备安全。系统可实时监测作业环境中的二氧化碳气体密度，一旦检测到浓度超过预设安全阈值，将立即触发声光报警，并自动执行设备急停，从而有效防止人员窒息或中毒风险。同时，系统持续监控发动机冷却水温度，若出现异常高温，将及时报警并可根据设定采取降载或停机等保护措施，避免发动机因过热而损坏。此外，系统还对关键设备的温度和压力运行状态进行实时监控，当任何参数超出正常工作范围时，系统会即刻启动对应的超限报警，提醒操作人员干预，显著提升了整体运行的安全性与可靠性。

3.3 上位机（HMI）监控软件设计

1.HMI整体设计。本系统的人机界面（HMI）采用北尔电子品牌的高可靠性工业级触摸屏进行设计与实

现。HMI 通过 EtherNet/IP 工业以太网协议，直接访问 PLC 中对应的数据地址。系统利用 HMI 平台内置的数据记录器功能，自动、持续地存储关键过程变量的历史数据；同时，借助灵活的曲线控件，能够在屏幕上实时绘制并动态刷新所选变量的趋势曲线，为运行状态监测与工艺分析提供直观依据。通过对按钮、指示灯、输入框、选择开关等多种可视化控件的组合设计与逻辑关联，最终在 HMI 上实现了对现场设备的集中监控、参数设置与流程控制。

2. 信息屏面。系统上电后，主监控信息界面将作为默认首页自动加载并显示。该界面集中呈现了整套动力与流体系统的关键实时运行参数，为操作人员提供最直接、全面的状态总览。核心显示参数包括：发动机的实时转速；环境与工作介质的关键指标，如二氧化碳密度与液压油油温；气液分离单元的运行状态，包括分离器温度与压力；两台增压泵的详细工作数据涵盖每台泵的出口压力、实时排量与运行转速。所有数据通过清晰的数字形式进行可视化，确保系统运行状况一目了然，该界面是进行实时监控与高效操作决策的首要信息枢纽。

3. 操作屏面。操作屏面是二氧化碳增压自动控制系统的操作与监视屏面。主屏面显示设备上的所有管线和阀门以及两个增压泵，二氧化碳分离器。显示的主要参数有发动机转速、二氧化碳密度、液压油温、分离器温度。点击对应的阀门编号，即可完成对阀门的手动开关工作。下方的菜单中点击急停，设备紧急停机，点击计算机 / 手动控制切换选择面板操作或者触摸屏操作。点击远程控制 / 本地控制选择是否在本地进行操作。点击开始 / 停止控制增压泵是否运转。排量模式、压力模式、转速模式可以选择增压泵的控制方式。

4 实验结果

4.1 测试方案

本次系统的验证工作采用了分阶段、由内至外的完整测试策略，即工厂内仿真测试与井场现场实测相结合，全面、递进地考核了系统的可靠性、功能完备性与工况适应性。

首先，在工厂内测试阶段，通过改变工艺流程管路搭建了的二氧化碳内循环试验环境。在此受控环境下，对控制逻辑、安全联锁、数据采集与通信、人机交互等基础功能进行了充分验证与调试，确保系统逻辑正确、响应准确，为现场应用奠定了坚实的基础。

其次，在井场实际测试阶段，系统被部署至真实作业环境，并先后在 2 口试验井上进行了累计 20 个轮次的增压测试。该阶段重点考核了系统在真实压力波动、介质特性变化、环境干扰及长时间连续运行等复杂工况下的长期运行稳定性、环境适应性与控制精度。实测结果系统性地验证了系统设计的有效性，并为进一步优化提供了宝贵的现场数据。

通过这种从实验室到现场、从功能到性能的逐级验证，全面证明了系统满足设计目标与实用化要求。

4.2 现场结果

记录现场得到的数据，得到以下的测试结果：在速度模式下，可以在 10 s 内完成速度控制收敛，转速的波动控制在 ±5 rpm；在压力模式下，可以在 30 s 内完成压力的控制收敛，压力的波动控制在 ±20 psi；在流量模式下，可以在 30 s 内完成流量的控制收敛，流量的波动控制在 ±0.2 L/min。

5 结束语

本文设计的二氧化碳增压泵车控制系统是一款增压泵车的自动控制系统，实现了二氧化碳增压泵自动压力、排量转速控制、底盘发动机控制和二氧化碳浓度报警等功能，对整个设备状态进行了监控。该系统以罗克韦尔 1756PLC 完成数据收集和逻辑处理，以压力传感器和温度传感器的实时数据为反馈，将设备运行状态实时传输到控制端，提高了设备的效率和自动化程度，同时也便于作业过程中的数据分析。目前，该系统在某油田现场投入使用，设备运行稳定，达到了预期效果。

参考文献：

[1] 熊颖，陈鹏飞，蒋锐，等 . 超临界 CO_2 压裂液增稠剂的制备及性能评价 [J]. 石油与天然气化工 ,2025,54(06):77-82.

[2] 党冬红，南炜通，樊柏辰，等 . 干热岩储层超临界 CO_2 压裂缝内动态流动传热特性研究 [J]. 石油钻采工艺 ,2025,47(06):729-738.

[3] 程杰成，孙天一，王刚，等 . 古龙页岩油 CO_2 试注试验 [J]. 大庆石油地质发 ,2025,44(06):21-30.

[4] 季军美，王旭 . 深层常压页岩气前置 CO_2 辅助水力压裂工程实践 [J]. 石化技术 ,2025,32(06):260-263.

[5] 刘景芝 . 基于 PLC 的分布式多变频器同步调速控制方法 [J]. 汽车电器 ,2025(12):133-135.

[6] 蒋炳南 . 基于 PLC 的无负压恒压供水系统设计 [J]. 工业控制计算机 ,2025,38(09):158-159,161.

[7] 刘璐 . 基于 PLC 的无人抓钢机控制系统设计与实现 [J]. 今日制造与升级 ,2025(10):80-83.

电解水制氢项目电气设计思路及专业配合分析

王 统

（洛阳瑞泽石化工程有限公司，河南 洛阳 471000）

摘 要 本文以提升电解水制氢项目设计质量为目标，系统研究电气设计关键技术与跨专业协同模式。通过分析制氢原理与系统构成，明确电气系统设计要点、核心控制环节及专业配合要点，构建“技术要点+协同逻辑”的整体设计框架。研究成果旨在为项目设计优化、施工组织及运维管理提供支撑，有助于推动绿氢项目安全、高效、标准化实施，可为电解水制氢项目的规范化落地提供技术参考。

关键词 电解水制氢；电气设计；专业配合；电解槽；整流器

中图分类号：TQ151 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.040

0 引言

在全球清洁能源需求持续攀升的大背景下，电解水制氢凭借清洁低碳的突出优势，已成为行业重点关注的制氢技术路线。在电解水制氢项目中，电气设计是关键环节之一，涉及供电系统的稳定性、电气设备的选型与布置、安全保护措施等多个方面。同时，电气专业需要与工艺、仪表、储运、总图、土建、配管等专业密切配合，从而保障项目整体建设与运行工作有序开展、高效落地。因此，深入剖析电解水制氢项目电气设计要点、厘清跨专业协同逻辑，对于解决当前部分项目中存在的电气设计针对性不足、专业配合衔接不畅等问题，提升项目整体设计质量与实施效率意义重大，能够为电解水制氢技术的标准化建设与规模化应用提供理论参考。

1 电解水制氢的原理和基本制氢办法以及电解水制氢项目前景

1.1 电解水制氢的原理

电解水制氢的基本工作原理是：在直流电能作用下，水分子在电解槽中被分解成氢气和氧气。当外部电压作用于两个浸入水中的电极时，在阳极区域，水分子通过失去电子完成氧化过程，生成氧气与质子；在阴极一侧，质子则获得电子发生还原反应，最终形成氢气[1]。

1.2 基本制氢办法

常见电解水制氢技术主要有：（1）碱性电解水制氢；（2）质子交换膜电解水制氢；（3）固体氧化物电解水制氢[2]。

1.3 电解水制氢项目前景

在“双碳”战略的大背景下，电解水制氢凭借清洁、高效等优势，成为极具发展潜力的制氢技术，电解水制氢将在能源、交通、工业等多个领域得到广泛应用，对推动碳达峰、碳中和目标落地具有重要支撑作用[3]。

2 电解水制氢项目设计中电气专业设计要点

2.1 供电系统主要设计

1. 电源选择：制氢加氢一体站的供电原则，按照国家现行规范《供配电系统设计规范》（GB 50052-2009）所确定的负荷等级划分要求，除中断加氢将造成较大损失者外，宜为三级负荷。电解水制氢项目需要大量的电能，因此供电系统的可靠性、稳定性和经济性至关重要。应优先选择可再生能源如风能、太阳能等，以降低碳排放，实现绿色制氢。

2. 变配电设备配置：根据项目的规模和用电需求，合理配置变压器、开关柜、配电柜等变配电设备。

3. 电气主设备的间距设计：除《氢气站设计规范》（GB 50177-2005）规定的电解槽等设备的间距要求外，电气专业应对整流变压器、整流柜按照规范进行布置，满足安全间距要求的同时应能节省占地。

2.2 电解槽选型要点

电解槽是实现电解水制氢过程的核心装备，其选型应根据项目的规模、技术路线和运行要求等因素确定。电解槽功率大小是电气设计应关注的问题，需要从工艺需求计算电解槽功率等基本设计参数，才能根据工艺需求制氢规模匹配合适的电解槽[4]。例如：一台1 000 Nm^3/h的碱性电解槽。电流密度取3 000 A/m^2，

作者简介：王统（1984-），男，本科，工程师，研究方向：石化和新能源行业工厂供配电、电信设计。

有效电解面积假定为 2.567 m^2，则电解槽电流为：I=3 000 A/m^2×2.567 m^2≈7 700 A，制取 1 Nm^3 氢气需要的电量为 2 380 A•h/Nm^3H_2；单个小室的产氢量为：V_1=7 700 A/2 380 A•h/Nm^3≈3.24 Nm^3/h；小室数为：N=1 000 Nm^3/h/3.24 Nm^3/h ≈308.6，实际设计中，小室数取 340 个左右。小室电压取 1.85 V，采用“中间正，两边负”的接线方式，相当于 170 个小室串联，则总电压为：E 总 =170×1.9=314.5 V；总电流为：I 总 =7 700×2=15 400 A；电解槽总功率为：P 总 =314.5 V×15 400 A=4 843.3×10^3 kW。电解槽功率的计算有助于在项目中准确选型电解槽以及确定优化电解槽内结构形式，并在整流器及配套整流变压器容量的选型上提供参考，以保证既定目标产能，优化配电设计。

2.3 安全保护设计

1. 电气安全保护：设置完善的电气安全保护措施，如接地系统、漏电保护装置、过电压保护装置等。

2. 氢气安全防护：由于氢气具有易燃易爆的特性，因此在制氢厂房、氢气储存区等场所应做好爆炸危险区域划分，安装氢气泄漏检测报警装置，并配备相应的通风设备和灭火器材。

3. 爆炸危险环境划分设计：做好爆炸危险区域的严密划分，提供给工艺、仪表等专业，方便对工艺设备合理布置，为仪表布置可燃有毒气体探测器提供准确范围。制氢厂房应设置完善的功能分区，独立分区房间的设计可以控制爆炸危险区域，从而在设计中可以将设备布置得更加合理，减少防爆设备的数量，降低项目实施成本[5]。

3 电解水制氢项目中电气专业与相关专业的配合设计要点

3.1 与工艺专业的配合

1. 用电负荷精准核算与适配：电气专业需开展精细化负荷测算，据此优化供电设备、配电线路的选型与配置。同时充分考量工艺设备启停模式对供电网络的扰动，通过加装变频控制器、软启动器等设备，弱化设备启动阶段对电网的冲击，维持供电系统稳定性。

2. 自控系统联动集成：构建制氢全流程集中监控、协同调度的管控体系，依托仪表专业提供的 PLC 控制单元，对电解槽运行电流、槽体电压、反应温度等核心参数进行全天候实时追踪与智能调控，完成机泵启停、转速调节等功能的接口开发，保障制氢工艺连续平稳运行。

3.2 与仪表专业的配合

1. 仪表供电与信号链路规划：仪表专业负责氢气浓度检测仪、压力变送器、温度传感器等检测设备的选型与布局设计，电气专业则结合各类仪表的供电参数，配备专用稳压供电回路，保障仪表供电精度与稳定性。电气专业需统筹规划仪表信号传输方式、电缆敷设路径，采取屏蔽、隔离等抗干扰措施，降低外界环境对信号传输的干扰。

2. 自控接口互联互通设计：搭建电气控制系统与仪表检测设备的稳定通信链路，实现工艺运行参数的实时采集、高速传输。两大专业需联合敲定接口信号制式、通信协议、传输速率等技术标准，确保数据交互过程无延迟、无丢包，具备优异的兼容性与可靠性。

3. 安全联锁报警机制构建：构建仪表检测与电气控制的安全联动体系，当仪表监测到氢气泄漏、浓度超标等安全风险时，检测信号会实时上传至电气控制系统，触发安全联锁与声光报警动作。例如：现场氢气体积浓度超出 0.4% 阈值时，电气系统可自动切断危险区域供电、启动强制通风设备，全方位守护现场人员与设备安全。

3.3 与储运专业的配合

1. 氢气储运设施电气配套设计：电气专业结合氢气储存、转运设施的实际用电负荷与运行要求，定制化设计供电方案、配电点位及电气设备布局，严守氢气储运场景电气安全规范，保障储运全流程供电可靠、运行安全[6]。

2. 装卸作业环节电气安全管控：氢气装卸作业期间，电气与储运专业需联动落实防爆安全要求，在装卸作业区统一布设防爆型电气设备，加装专用防静电接地夹、静电泄放装置，从源头杜绝电气火花、静电积聚引发的燃爆风险。

3.4 与总图专业的配合

1. 厂区总体布局：电气需综合考量电气设施的占地面积、与周边建筑物及道路的间距、风向等各类影响因素，同时明确配电室或变电站建筑所需车行铺砌的具体方位，进而保障厂区布局的合理性、安全性与经济性。

2. 运输道路与电气布线：在厂区交通运输线路的规划过程中，总图专业需与电气专业做好协调对接，防止运输线路与地下电气管线、架空电气线路等电气设施发生位置冲突。

3. 绿化与电气设施防护：避免在爆炸危险区域内，电气设施周围种植高大树木等可能影响电气设备运行和安全的植物。

3.5 与土建专业的配合

1. 建筑物设计与电气设备安装：土建专业负责设计和建造各种建筑物，如制氢厂房、变电站、配电室等。在制氢厂房设计中，除对土建的基本委托外，电气应

根据土建建筑方案门窗的布置，按照规范做爆炸危险区域划分，这时可以对照爆炸危险区域对其它功能分区的影响，对门窗的位置适时调整，可以将爆炸危险区域对其它功能分区的影响降到最低，进而降低成本。

2. 电缆桥架与管线敷设的土建支持：电气专业的电缆桥架等需要在建筑物内或室外进行敷设，土建专业应为其提供相应的支持结构和预留孔洞。在设计阶段，电气专业应详细委托电缆桥架的敷设路径、支架间距等参数。

3. 防雷接地系统的土建配合：在建筑物施工阶段，电气专业需与土建专业配合在建筑物基础施工过程中预留接地极，在屋顶女儿墙等关键部位预埋接闪带支架，以此保障防雷接地系统能够发挥可靠的防护作用。

3.6 与配管专业的配合

1. 管道布置与电气线路敷设的协调：配管专业承担氢气管道、冷却水管、仪表空气管线等各类管线的布置工作，电气专业需与配管专业开展密切协同配合，确保管道布置与电气线路敷设相互适配、协调统一，杜绝出现相互干扰及位置冲突的情况。

2. 氢气管道安全防护管控：针对氢气管道固有的安全隐患，电气专业需联合配管专业共同研讨、编制专项安全防护预案。结合现场布设情况，在氢气管道沿线及周边区域，合理布设防爆类电气设备、氢气泄漏监测报警装置等安防设施，全方位筑牢管道运行安全防线，保障氢气输送环节平稳可控。

4 电解水制氢项目电气设计要点与相关专业密切配合的意义

4.1 确保项目的顺利实施

电解水制氢工程项目具备多专业交叉融合的突出特点，各参与专业在设计策划、现场施工全阶段均存在密切的协同关联。电气设计作为项目核心设计板块，必须与工艺、仪表、储运等上下游专业建立高效联动机制，通过全方位密切配合实现全流程设计管控一体化，最大限度规避专业间设计矛盾、施工衔接障碍，确保项目稳步推进、按期竣工交付。

4.2 提高项目的运行效率和稳定性

依托电气专业与各协作专业的深度融合与联动设计，能够在项目前期精准识别并消解各类设计冲突，同时对施工阶段的工序衔接进行统筹部署，最终实现各系统的优化整合与高效集成。该协作模式不仅能从源头降低项目投产后的运维成本与安全风险，还可通过优化能源配置提升利用效率，从而全面提高项目整体的运行稳定性与长期生产的可靠性。

4.3 保障项目的安全运行

电解水制氢工程项目涵盖氢气制备、储运、使用全流程，作业环节潜藏各类安全管控风险。电气专业联动各相关专业开展一体化安全设计，可全面摸排潜在安全隐患、统筹兼顾各类安全管控要素，针对性制定高效防护举措。具体涵盖氢气泄漏监测报警系统布设、电气设备防爆选型与设计、安全联锁控制回路搭建等内容，同时为后续编制制氢系统整流设备安全作业规范提供详实依据，全方位筑牢项目安全运行防线，实现现场作业人员与核心设备的双重防护，保障项目全周期平稳可靠运转。

4.4 降低项目的建设成本和运行成本

科学完善的电气设计与多专业协同配合，可从源头优化项目总体布局与设备选型，减少冗余投资与资源浪费，有效降低工程建设成本。项目投运后，通过各系统协同运行与节能优化控制，能够显著降低能耗及设备运维费用，提升项目整体经济效益与市场竞争力，为工程长期安全、高效、稳定运行提供有力支撑。

5 结束语

电解水制氢凭借绿色清洁、转化高效的技术特征，以及与可再生能源的良好适配性，在未来能源结构转型与“双碳”目标实现过程中具备广阔的应用前景。在电解水制氢工程中，电气设计既是保障系统稳定供电、提升能源利用效率的核心内容，也是确保项目高效落地与安全运行的重要基础。通过对电气设计要点开展系统性研究，并强化与工艺、仪表、储运、总图、土建及配管等多专业的协同配合，可有效规避设计矛盾、控制工程成本，保障项目顺利建设、安全运维与高效产出，进而为氢能产业的持续健康发展提供坚实的技术支撑与实践保障。

参考文献：

[1] 姚寿文,刘军瑞,李欣欣.电解水制氢理论[M].北京:北京理工大学出版社,2024.
[2] 杨高强.电解水制氢原理与技术[M].北京:机械工业出版社,2025.
[3] 杨少辰,李建明,王雨晴.电解水制氢技术研究进展与发展趋势[J].化工进展,2024,43(08):3456-3467.
[4] 王建国,陈秀丽,刘军.碱性电解水制氢的极化特性分析[J].电化学,2021,27(03):215-223.
[5] 张一凡,林晓静,赵伟.质子交换膜电解水制氢的原理与关键材料[J].电源技术,2023,47(10):1245-1252.
[6] 毛宗强,王诚,余皓,等.绿色制氢技术全景式展现[M].北京:化学工业出版社,2024.

基于冷热负荷联动的建筑暖通空调系统节能设计

孙晨明[1]，刘　娟[2]，周　军[3]

（1. 北京新神新能源科技有限公司，北京 100006；
2. 北京宏宇翔市政工程有限公司，北京 101118；
3. 北京绿都锦绣建设集团有限公司，北京 101299）

摘　要　在“双碳”战略深入推进与建筑能耗持续攀升的背景下，暖通空调系统节能成为建筑绿色发展的关键。本文以建筑冷热负荷联动机制为核心研究对象，深入分析室外环境、建筑自身及使用需求等因素对冷热负荷的影响规律，提出涵盖负荷精准计算优化、联动控制策略制定、节能系统配置的一体化设计方法。通过动态匹配负荷变化与系统运行状态，实现能源利用效率与室内舒适性的平衡。实践表明，该设计可降低系统能耗 10% 以上，为建筑暖通空调系统节能提供科学可行的技术方案。

关键词　冷热负荷联动；暖通空调；节能设计；负荷计算；联动控制

中图分类号：TU83　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.041

0　引言

在社会总能耗中，建筑能耗占比超过三分之一，而在建筑总能耗当中，暖通空调系统能耗占比达到 40% ～ 50%，使其成为节能降耗的核心领域。随着建筑功能朝着多元化方向发展，使用需求也趋向精细化，传统的基于固定负荷的设计模式已经很难适应冷热负荷的动态变化情况，进而造成了能源浪费以及舒适性不足等问题。在“双碳”目标的引领之下，行业迫切需要突破传统设计所面临的瓶颈。本文通过对冷热负荷联动特性及其影响因素进行分析，构建基于负荷联动的节能设计框架，旨在使暖通空调系统能够与负荷需求实现精准匹配，从而为建筑节能提供技术方面的参考。

1　建筑冷热负荷联动特性及影响因素分析

1.1　冷热负荷联动核心内涵

建筑冷热负荷联动呈现的是冷负荷与热负荷在建筑全生命周期运行当中的动态关联和协同响应特征，其本质在于室内外环境变化、功能使用需求波动等因素共同作用下，两种负荷于时间维度的交替演进、空间维度的分布呼应以及强度维度的相互制衡。这种联动并非是简单的此消彼长，而是借助热量传递、湿交换等物理过程所形成的有机整体，冷负荷的增减会对热负荷的调节阈值产生间接影响，热负荷的波动也会使冷负荷的需求强度发生改变[1]。

1.2　冷热负荷主要影响因素分析

1.2.1　室外环境因素

在影响冷热负荷的各类环境变量之中，室外温度是最为核心的一项，其变化幅度会直接对负荷联动的方向与强度起到主导作用。于夏季而言，湿球温度所产生的细微波动，会借助围护结构传热、室内外空气渗透等途径，使冷负荷的变化得以放大；冬季时，干球温度的上升或下降，则会直接使热负荷的需求总量发生改变。室外湿度会对人体热舒适的感知以及建筑围护结构的含湿量产生影响，进而对冷热负荷的实际需求强度进行间接调整。在高湿度环境下，冷负荷需要额外增加除湿负荷，而在低湿度条件中，热负荷的体感权重会得到提升[2]。

1.2.2　建筑自身因素

建筑体型系数与围护结构传热性能共同构成冷热负荷的基础影响框架，体型系数越小，建筑与外界的换热面积越少，冷热负荷的波动幅度越平缓，联动关系也更趋稳定。围护结构的材质选择、构造设计直接决定传热系数大小，高效保温材料的应用能削弱室外温度对室内负荷的干扰，降低冷热负荷的联动敏感度。

作者简介：孙晨明（1991-），男，硕士研究生，助理工程师，研究方向：节能及能源开发与利用。

2 基于冷热负荷联动的暖通空调系统节能设计框架

2.1 冷热负荷精准计算方法优化

冷热负荷精准计算是实现暖通空调系统与负荷联动适配的基础，其核心在于突破传统固定参数计算的局限性，构建贴合实际运行场景的动态计算体系。计算过程需严格遵循建筑节能相关通用规范，结合建筑功能特性与使用规律，科学选取基础参数。引入冷热负荷影响幅度系数，量化室外环境、使用强度等因素对负荷的作用程度，夏季冷负荷计算中，室外湿球温度低于标准值时采用2.3至2.6的系数，高于标准值时采用2.6至2.7的系数；冬季热负荷计算则根据室外干球温度高低，对应选取-0.7至-0.5或-0.8至-0.7的系数。人员密度变化相关系数按夏季减少0.85至1.00、夏季增加0.13、冬季减少1.05至1.25的区间取值。同时，细化围护结构热负荷计算，按外墙、屋面、外窗等不同部位的传热系数与面积，结合室内外温差分步核算，累加得到总围护结构热负荷，为系统设计提供精准数据支撑[3]。

2.2 冷热负荷联动控制策略设计

冷热负荷联动控制策略的核心逻辑围绕负荷动态变化与系统运行参数的实时响应机制展开，通过精细化调控实现能源利用效率的最大化。以气候补偿器为依托构建的温度联动调节体系，把设备布置在供热系统主回路，对室外温度波动进行实时监测，按照预设的气候补偿曲线自动调整供水温度。当室外温度上升时，相应地降低供水温度以削减热量供应；温度下降时，提升供水温度来保障室内舒适，以此避免过度供能或供能不足的情况。所构建的分时分区联动控制模式，根据建筑不同区域的功能重要性和使用时段差异，对运行负荷进行差异化设定。关于新风量联动调节逻辑的优化，在人员密度降低时，新风量按比例递减；人员密度增加时，在满足空气品质要求的前提下，控制新风量的增长幅度。同时结合全热回收技术，回收排风中的热量或冷量用于新风处理，降低新风负荷对系统能耗的影响，实现冷热负荷与新风系统运行的协同节能。

2.3 负荷联动导向的节能系统配置

以负荷动态变化规律作为核心的负荷联动导向节能系统配置，需对设备高效性、系统适配性与运行稳定性加以兼顾。在冷源方面，选用高能效离心式冷水机组，依据总冷量需求对机组台数与型号进行合理确定，使机组在全负荷和部分负荷工况下都能维持良好能效。配置高效变频离心泵，借助频率调节去适配负荷变化，以此降低水泵运行能耗；冷却塔选用超低噪声逆流式类型，将其布置于屋顶，在满足散热需求的同时对噪声污染进行控制；增设多功能全程水处理器，用来保障系统水质稳定，减少结垢与腐蚀对设备效率产生的影响。在风机盘管与新风系统配置的优化上，根据不同房间的负荷状况与使用特点，选取匹配型号的风机盘管，明确电源、水系统、风压噪声等技术要求，保障传热效率与运行稳定性。新风系统采用上送上回的气流组织方式，均匀布置送风口以确保气流合理分布，高大空间采用分层送风与变风量控制，特殊区域设置独立排风系统，同时实现新风系统与空调设备的联动控制，在满足空气品质要求的同时强化节能效果[4]。

3 实例验证与效果分析

3.1 工程概况

本次选取两类具有典型负荷特性的建筑作为实例验证对象，分别为综合医院建筑与超高层多功能建筑。综合医院总建筑面积64 000平方米，按功能划分为行政办公区4 000平方米、门诊医技区20 000平方米、住院区40 000平方米，建筑层数分别为5层、5层、20层，体型系数依次为0.35、0.10、0.10，负荷受人员流量与医疗设备运行影响显著。超高层多功能建筑总建筑面积45 000平方米，地上24层、地下4层，涵盖办公、商业、会议等业态，采用框架剪力墙结构。两类建筑均处于气候波动较大区域，冷热负荷联动变化明显，具备良好的验证代表性。

3.2 设计方案实施

在依据冷热负荷联动特性分析所得结果的情况下，两类建筑均依照优化后的节能设计框架来推进实施工作。在负荷计算阶段，严格以建筑节能通用规范作为参照，结合建筑功能去设定差异化的基础参数，像门诊医技区有着0.3人/平方米的人员密度以及40立方米/（小时·人）的新风量，住院区人员密度为0.2人/平方米、新风量为50立方米/（h·人），行政办公区人员密度是0.1人/平方米、新风量为30立方米/（小时·人），同时引入针对性的影响幅度系数来提升计算的精准度。

在控制策略方面，综合医院将气候补偿器部署于供热主回路，对室外温度进行实时监测并据此对供水温度实施动态调节；超高层建筑则开展分时分区控制工作，依照使用时段和区域重要性的不同，对运行负荷进行差异化设定。于系统配置而言，两类建筑都把高效离心式冷水机组选作冷源，同时搭配变频离心泵与全热回收新风机组，综合医院根据功能分区设置独

立控制系统，超高层建筑采取分层供能模式。

设备选型与参数匹配严格依据负荷计算结果，核心设备参数如表 1 所示，确保设备运行与负荷联动变化精准适配。

表 1　核心空调设备选型及技术参数

设备类型	型号	额定容量 / 性能指标	适用区域
离心式冷水机组	YKCDCQ75CMF	制冷量 5 278 kW，供回水温度 7 ℃ /12 ℃	两类建筑通用
变频离心泵	ZWG250315	流量 350 立方米 / 小时，扬程适配系统阻力	两类建筑通用
全热回收新风机组	—	热回收效率≥ 75%，噪声≤ 40 dB	综合医院住院区
超低噪声冷却塔	CTA340UFWWS	冷却水量 420 立方米 / 小时	超高层建筑屋顶
风机盘管	SP-85	额定风量 650 立方米 / 小时，功率 81 W	超高层建筑办公区

在系统安装调试阶段，重点对负荷联动响应机制进行校验，让气候补偿器与分时分区控制逻辑实现有效衔接，使新风量调节与人员密度变化做到实时同步，使设备运行参数可根据负荷预测结果提前做出调整，实现冷热负荷与系统运行的动态适配 [5]。

3.3　节能效果验证

两种建筑在连续进行三个供暖季和两个制冷季后进行的能耗及舒适性测试中，借助传统设计及当前优化设计进行，从而证明节能效果。从能耗数据可以看出，综合医院暖通空调系统能耗较传统方案减少 12.3%，超高层建筑减少 10.7%，特别是供暖季节燃气节约量分别高达 15 600 立方米和 12 400 立方米，这两个数字加起来超过了 28 000 立方米。

在舒适性方面，两种建筑的室内温度稳定保持在 22 ～ 26 ℃的区间内，相对湿度控制在 60% ～ 65%，噪声低至 40 dB 以下，适应了各功能区域的需求，详细的数据比较可以参考表 2。结果显示，优化的建筑设计能够在减少能源消费的同时，不损害室内舒适性，达到了双重目的，即在保持室内舒适性的前提下实现了较低的能源消耗。

表 2　两类建筑节能与舒适性指标对比

指标类型	综合医院（优化后）	综合医院（传统方案）	超高层建筑（优化后）	超高层建筑（传统方案）
系统能耗降低率	12.3%	—	10.7%	—
供暖季燃气节约量（立方米）	15 600	—	12 400	—
室内平均温度（℃）	24.2	23.8	24.5	24.1
室内平均湿度（%）	59.3	58.7	58.9	57.8
室内平均噪声（dB）	38.6	39.1	37.8	38.5

监测数据充分证明，基于冷热负荷联动的节能设计方案具备显著可行性与应用价值，能有效提升能源利用效率。

4　结束语

本文通过对建筑型式冷热负荷联动特性与影响因素的分析，搭建起一个综合负荷计算、控制策略与系统配置暖通空调节能设计架构，并通过实例加以验证，该架构在显著降低系统能耗的前提下，兼顾舒适性与经济性，这一研究成果对提供符合实际的暖通空调节能技术路线，响应业界绿色、低碳发展需求至关重要。未来可进一步优化负荷连锁的预测算法，在人工智能技术支持下提高控制精度，同时对可再生能源与冷热负荷连锁深度融合问题进行探索，为建筑节能提供更高层次的技术支撑。

参考文献：

[1]　韩鑫.试论高层建筑暖通空调系统节能技术的应用 [J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术 ,2022(07):127-129.

[2]　白庚宇.低能耗超高层住宅建筑暖通空调设计 [J].中国厨卫 ,2025,24(09):283-286.

[3]　刘楠.综合医院建筑暖通空调系统设计问题与对策 [J].现代工程科技 ,2023,02(03):97-100.

[4]　王菲.暖通空调设备安装及调试对策研究 [J].工程设计与施工 ,2023,05(06):93-95.

[5]　周思宇.成都地区医院建筑暖通空调冷热负荷影响因素分析 [J].福建建材 ,2025(04):94-96.

工民建施工中绿色节能技术应用现状与优化策略研究

张书学

（中国核工业华兴建设有限公司，江苏 南京 210019）

摘 要 随着绿色发展理念被广大民众深刻认识与接受，工民建这个行业作为能源大量消耗以及造成环境污染的重点领域，推行绿色节能施工已成为行业实现转型发展的必然趋势。本文以工民建施工的实际场景当作结合点，深入地开展对当下绿色节能技术应用现状的分析，对应用进程中存在的突出问题进行剖析，结合施工实践提出具有针对性的优化策略，以期为工民建施工企业规范绿色节能技术的应用情况、提高施工的绿色化程度提供参考，进而推动工民建行业朝着低碳、环保、高效的方向发展。

关键词 工民建施工；绿色节能技术；绿色施工体系

中图分类号：TU74 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.042

0 引言

在绿色发展战略逐渐推进以及建筑行业追求高质量发展的大背景之下，传统的工民建施工中高消耗能源、高产生污染、低效率的模式已经难以适应时代不断发展的需求，绿色节能技术的运用成为突破行业发展瓶颈的关键。工民建开展施工包含住宅、公共建筑、工业厂房等各类建筑的建设进程，涉及建筑材料的选用、施工的工艺方法、设备的运行情况、现场的管理工作等多个环节，每一个环节都存在着比较大的节能降耗的空间[1]。当前阶段，虽然大多数的工民建施工企业已经认识到绿色节能技术的重要意义，并尝试着把它运用到施工实践之中，但受技术水平、资金力量、管理观念等多种因素的影响，绿色节能技术的运用仍然存在很多的不足之处，无法充分发挥出它节能降耗、环保减排的核心功能。基于这样的情况，深入地研究工民建施工当中绿色节能技术的应用现状，探寻切实可行的优化办法，结合施工的实际状况解决应用过程中的难点，对于推动工民建行业实现绿色转型、可持续发展具有重要的现实价值。

1 工民建施工中绿色节能技术应用现状

1.1 绿色节能技术应用范围较广，但深度不足

目前，在工民建开展施工的时候，绿色节能技术已经渗透到多个重要的施工环节，形成了初步的应用体系。在建筑材料选用方面，越来越多的施工企业开始放弃传统的高消耗能源、高产生污染的建筑材料，选择使用新型的绿色节能建筑材料。例如：在墙体施工的时候，使用保温隔热性能更好一些的新型墙体材料来替换传统的黏土砖，这样既减少了黏土资源的浪费现象，又可以提升建筑后续阶段的保温节能成效；在屋面施工的时候，采用具备保温隔热功能的屋面材料，降低夏季室内温度上升的速度，减少空调使用消耗的能源[2]。在施工工艺方面，部分企业引入了具备节能功能的施工工艺，如在混凝土施工的时候，采用泵送混凝土、预拌混凝土的工艺方法，减少现场进行搅拌所带来的粉尘污染以及能源的浪费情况，同时提高混凝土施工的质量；在墙体保温施工的时候，采用外墙外保温的工艺方法，避免外墙内保温造成的墙面出现开裂、保温效果不够好等问题。

在资源利用方面，有一部分的施工现场推行了针对水资源、建筑垃圾的回收利用操作，如设置雨水收集的相关设施，把雨水用于施工现场开展绿化灌溉工作、进行施工设备清洗工作，从而让自来水消耗得以减少；针对施工过程当中所产生的建筑垃圾开展分类整理工作，把能够进行回收利用的钢筋、混凝土块等进行粉碎之后用于路基回填工作、便道铺设工作，以此提高资源的利用效率[3]。

作者简介：张书学（1985-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程。

1.2 绿色节能技术应用不均衡，区域、企业差异明显

在工民建施工的过程当中，绿色节能技术的应用存在十分明显的不均衡现象，这种不均衡主要在区域和企业这两个层面体现出来。从区域的角度来看，经济发达地区的工民建施工企业，因为受到政策的约束更为严格、资金实力更为雄厚、技术水平更高一些，绿色节能技术的应用就更为广泛以及规范。这些地区的工程项目，尤其是大型公共建筑、高端住宅项目，常常会把绿色节能当作核心要求，投入大量的资金来引入先进的绿色节能技术以及设备，建立完善的绿色施工管理体系，应用的效果也更为显著[4]。然而，在经济欠发达地区，由于政策的执行力度不够、施工企业的资金有限、技术水平比较落后，绿色节能技术的应用就较为滞后。大多数的施工企业仍然以传统施工模式作为主要方式，对绿色节能技术的重视程度不够，甚至为了降低施工成本，特意去规避绿色节能技术的应用，从而使得区域之间绿色施工水平的差距不断地加大。

1.3 绿色节能技术应用存在诸多难点，实用性不足

部分绿色节能技术过于朝着“高端化”方向发展，和工民建施工的实际需求相脱离，并且成本比较高，很难进行推广普及。当前，市场上大部分的绿色节能技术以及设备大多来自国外，价格非常昂贵，而且操作十分复杂、维护成本很高，不符合我国中小型施工企业的资金实力以及技术水平。例如：部分先进的智能节能施工设备，虽然节能的效果十分显著，但是设备的采购成本很高，并且需要专业的技术人员来进行操作以及维护，大多数的中小型施工企业很难承担得起，只能选择放弃。除此之外，部分绿色节能技术的研发过于关注理论创新，忽略了施工实际场景的需求，导致技术在实际应用的过程中存在很多的不便，很难进行落地实施。例如：部分新型保温材料，虽然保温的性能非常优异，但是施工的难度很大、施工的周期很长，和传统建材相比较，会让施工成本以及施工工期增加，所以被施工企业拒绝采用[5]。

1.4 绿色节能理念薄弱，管理体系不完善

绿色节能理念比较薄弱是制约工民建施工当中绿色节能技术应用的一个重要因素。目前，大部分工民建施工企业的核心目标是追求经济效益达到最大化，对绿色节能方面的重视程度不够，缺少长远发展的眼光。部分企业管理层对绿色节能技术的价值认识不足，担心绿色节能技术的应用会带来施工成本增加、工期延长的问题，对企业的经济效益产生影响，所以对绿色节能技术的应用持有消极的态度，甚至故意去规避。施工人员作为绿色节能技术的直接执行者，因为缺少系统的绿色节能培训，绿色节能意识比较淡薄，在施工的过程当中，还是按照传统的施工习惯来做，存在能源浪费、环境污染等方面的问题。在施工的过程当中，水龙头一直流水、电灯一直亮着的现象比较常见；施工现场材料堆放得很混乱，导致建材出现损坏、浪费的情况；施工设备长时间处在空载运行的状态，浪费大量的电能。

2 工民建施工中绿色节能技术应用的优化策略

2.1 深化绿色节能技术应用，构建全过程绿色施工体系

工民建施工企业应当摒弃仅注重表面的绿色节能应用模式，深入地推进技术方面的应用，构建一个全流程的绿色施工体系。这个体系涵盖从施工准备开始，历经施工过程，一直到竣工交付的整个阶段。在施工准备阶段，需要结合工程的类型、工程的规模以及地域所具有的特点，来制定出具有针对性的方案，明确绿色节能的目标、绿色节能的技术清单以及绿色节能的流程，把绿色节能的要求融入施工设计、建材的选用、设备的选型等各个环节之中。例如：在建材选用的时候，要兼顾绿色节能的特性，对不同建材的节能性能、施工的难度以及成本进行对比，选择性价比最为优良的建材；在设备选型方面，优先选择节能类型的设备，淘汰那些高耗能且高污染的老旧设备，合理地规划设备的布置以及设备的运行时间，提升设备的利用率，从而减少浪费。绿色节能技术能够在建筑设计中发挥出作用，通过合理的设计理念以及合理的技术（自然采光、通风等）来降低自然资源的消耗，选用环保的材料来减少废弃物的产生、改善空气质量、提升居住的舒适度，对供暖通风系统进行优化以实现节能并且改善室内的环境，采用节水的技术（低流量水龙头、压力调节器等）来减少用水，应用环保的废弃物处理技术（可回收、可降解材料等）来减少施工废弃物。

2.2 推动绿色节能技术均衡应用，缩小区域、企业差距

绿色节能技术在施工的时候应当注重可持续发展，在建筑项目的设计施工过程当中考虑建筑的使用寿命、

可持续性以及再利用性，减少废弃物的产生以及对环境的污染，在运营维护的阶段采用可持续的节能技术以及精细化的管理来实现长期的发展。为了解决技术应用不平衡的问题，需要政府、行业、企业共同协同来推动绿色节能技术在不同区域、不同企业之间均衡地落地。在政府层面，应当加强政策方面的引导以及政策方面的扶持，完善绿色建筑的政策法规，加大对二三线城市以及欠发达地区的支持力度，扩大绿色建筑标准的覆盖范围，强制落实工民建项目的绿色节能措施；加大资金方面的扶持，设立专项的基金来对积极应用绿色技术的企业进行补贴奖励，降低应用的成本；加强对政策执行的监管，加大对违规企业的处罚力度，确保政策能够落地实施。此外，应该推动区域之间的技术交流与合作，鼓励一线城市和经济发达地区的先进施工企业，向二、三线城市和经济欠发达地区的企业传授绿色节能技术和管理经验，帮助他们提升绿色施工的水平。

2.3 优化绿色节能技术实用性，解决应用难点

在绿色节能技术的施工中，从综合性原则角度进行施工，应该综合考虑地形和环境因素。例如：在建筑的位置和设计上，应该尽量利用地形、气候和光照等因素，减少能源消耗和污染排放。在建筑的朝向和设计上，应该采用可调节的遮阳、隔热和通风设施，以适应不同季节和气候变化。从工民建施工的实际情况出发，对绿色节能技术实用性进行优化，把技术应用进程当中的痛点和难点问题解决掉，让绿色节能技术能够真正符合施工企业的实际需要。要加大对绿色节能技术研发和创新的力度，从我国工民建施工的实际状况出发，研发适合中小型施工企业、成本不高、操作容易、实用性较强的绿色节能技术以及设备，防止技术出现“高端化”“脱离实际”这类情况。例如：开展低成本雨水收集过滤系统的研发工作，把设备操作的流程简化，降低维护方面成本，让中小型施工企业有能力负担、能够使用；开展施工难度不大、工期不长、节能效果不错的新型保温材料的研发工作，把传统施工工艺结合起来进行优化，提升材料的适用程度。与此同时，要加强对现有的绿色节能技术进行优化和升级，对技术和设备加以改进，提升技术的稳定程度以及可靠程度。

2.4 强化绿色节能理念，完善绿色施工管理体系

对绿色节能理念加以强化，完善绿色施工管理体系，是促使绿色节能技术得到深入应用的重要保证。要加强对绿色节能理念进行宣传和普及，政府、行业协会以及施工企业要通过多种渠道，对绿色节能的重要意义、相关政策以及技术知识进行宣传，提高施工企业管理层以及施工人员的绿色节能意识，让企业的发展理念发生转变，使企业明白绿色节能不只是政策方面的要求，更是企业实现长远发展、提高核心竞争力的重要办法。例如：施工企业能够定时组织绿色节能培训、讲座以及交流活动，向管理层以及施工人员普及绿色节能知识和技术，分享先进的应用案例，加强他们应用绿色节能技术的积极态度和主动意愿。

3 结束语

工民建绿色施工是推动建筑行业实现绿色转型、可持续发展的重要部分，也是落实绿色发展战略、实现节能降耗目标的关键。目前，工民建施工中绿色节能技术的应用虽已初步展开，覆盖了多个施工环节，不过依旧存在应用深度不够、区域以及企业之间差异明显、实用性不足、绿色节能理念淡薄等问题，对技术节能降耗、环保减排作用的充分发挥造成了限制。工民建绿色技术优化要从施工实际情况出发，使技术应用得到深化，构建全过程的绿色施工体系；一起发力推动技术均衡应用，缩小区域、企业之间的差距；对技术实用性进行优化，把应用的痛点和难点解决掉；对绿色节能理念进行强化，完善绿色施工管理体系。通过以上这些优化策略，能够推动绿色节能技术在工民建施工中规范、深入地应用，使其核心作用充分发挥出来，帮助施工企业降低施工成本、提高工程质量，实现经济效益、社会效益和环境效益相统一，推动工民建行业朝着低碳、环保、高效的高质量发展方向前进。

参考文献：

[1] 尹国晔.绿色节能技术在工民建工程施工中的应用与效益分析[J].建筑技术开发,2025,52(04):142-144.
[2] 刘志海.浅析绿色节能技术在工民建施工中的应用[J].陶瓷,2023(08):70-72.
[3] 田秀云.探析绿色节能技术在工民建施工中的应用[J].陶瓷,2023(08):79-81.
[4] 喻安贵.节能技术在工民建施工中的应用分析[J].陶瓷,2023(02):131-133.
[5] 孙光.绿色节能技术在工民建施工中的应用[J].散装水泥,2022(02):115-117.