



www.viserdata.com

# 工程建设

ENGINEERING CONSTRUCTION

月刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 2630-5283(online) 2717-5375(print)

万方数据库收录

RCCSE权威核心学术期刊

2025 9

第8卷 总第79期

## COMPANY INTRODUCTION

# 公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd. )成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



# 工程建设

## Engineering Construction

2025年·第8卷·第9期(总第79期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 2630-5283 (online)

2717-5375 (print)

发行周期: 月刊

出版时间: 9月

数据库收录: 万方数据库收录

RCCSE权威核心学术期刊

期刊网址: www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱: viser-tech@outlook.com

地 址: 195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,  
Singapore 168976

学术主编: 吴 萌

责任编辑: 张健美

学术编委: 严心军 王志甲  
程俊儒 张高德  
刘庆功 肖 泳

美工编辑: 李 亚 Anson Chee

印 制: 北京建宏印刷有限公司

定 价: SGD 20.00

## 本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点;作者文责自负,如有侵犯他人版权或者其他权利的行为,本刊概不负连带责任。

版权所有,未经许可,不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人: 稿件凡经本刊使用,如无电子版或书面的特殊声明,即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

## 目 录

### CONTENTS

#### 工程管理

- 大型复杂工程绿色建造绩效评价体系构建与低碳管理措施整合研究 ..... 张 鑫 寻 阳 1  
基于数字化技术的工程监理流程优化分析 ..... 陈 杰 4  
新旧道路衔接处差异沉降控制技术研究——基于一种新型应力拉筋复合结构的力学性能与工程应用分析 .....  
..... 罗 丹 林 雄 8  
装配式建筑的工程项目管理及发展问题研究 .... 王 曦 13  
浅析绿色施工管理在建筑施工中的应用 ..... 谢文华 16  
建筑工程质量控制的关键因素与优化措施 .....  
..... 王 力 李 月 19

#### 建筑工程

- 建设工程技术管理与节能减排实施策略 ..... 朱统霖 22  
  
**市政工程**  
市政工程道路中排水管道的施工技术要点探析 .....  
..... 武 鑫 25  
道路工程设计施工综合管理系统设计研究 .....  
..... 唐守涛 席启凯 赵 桥 万 里 张云超 29

#### 机械工程

- 离心压缩机转子检修中常见故障诊断与修复技术研究 .....  
..... 董华奇 王福新 江文佳 周英博 王 帅 33  
烧结机械设备维护管理工作研究 ..... 尹 毅 杨志峰 37  
基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统 .....  
..... 于文泽 葛嘉卿 张 寅 40

#### 石油工程

- 浅析石油化工项目管道车间预制质量管理的研究 .....  
..... 李晓鹏 陈 崇 44  
提高化工设备运行安全性管理措施研究 ..... 刘水云 48

#### 矿山工程

- 浮选柱在细粒有色金属矿分选中的优势与挑战 .....  
..... 侯君一 51

智能拣选装备在矿物加工中的应用现状与发展趋势 .....	杨富强	54
------------------------------	-----	----

## 冶金工程

热处理对铝合金低压铸造轮毂综合性能的影响 .....	郑艳银	57
高炉煤气流量测量仪表的误差分析与校正方法研究 .....	李文浩 张光勇 丁亚洲	60

## 路桥交通

基于图像处理的桥梁缺陷自动检测技术研究 .... 郭嘉成	63
基于大数据的桥梁检测信息管理系统研究 ..... 姜安乐	66
基于机器学习的桥梁健康监测数据分析方法 .... 姜义海	69
基于智慧交通理念的城市道路设计思路分析 .... 吴小冬	72
桥梁检测工作中的安全管理与风险评估研究 .... 邵玉炜	75
BIM 技术在路桥设计中的运用与实践探讨 .....	周艳玲 78
基于智能传感技术的桥梁实时监测与健康评估研究 .....	宋泰毅 81
城市桥梁的定期检测及维护策略研究..... 杨文元	84
道路桥梁施工中混凝土裂缝成因以及应对措施 .....	刘世兵 87
多种检测技术结合的桥梁综合评估方法研究.... 张 谦	90

基于传感器技术的桥梁结构健康监测与检测方法研究 .....	孙希大	93
-------------------------------	-----	----

## 施工技术

城市道路与交通工程道路沥青路面施工技术研究 .....	张 超	96
路基沉陷注浆技术在高速公路施工中的应用.. 丁 伟	100	
大跨度钢桁架安装过程中的变形控制技术实践探讨 .....	黄晓锋	104

## 建筑设计

城市老旧小区改造中微空间设计的优化策略研究 .....	赵 厦	108
生态建筑理念在高层建筑设计中的应用研究 ... 黄琰君	112	
大跨度桥梁设计要点及优化措施研究..... 贾培栋	116	

## 节能环保

一种综合场站废水多级过滤处理装置及工艺研究与应用 .....	杨 锐	120
寒冷低区被动式技术结合暖通设计的节能优化研究 .....	冯 探	125

# 大型复杂工程绿色建造绩效评价体系构建与低碳管理措施整合研究

张 鑫 寻 阳

陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司，陕西 西安 713700

[摘要] 大型复杂工程施工期间能耗高、环境影响显著，绿色建造和低碳管理成为增强工程可持续性的关键方式。依托对绿色建造核心指标和低碳管理措施的系统研究，搭建了面向大型复杂工程的绿色建造绩效评估体系，涉及能源利用效率、资源循环利用、施工环境影响以及低碳减排等指标，还给出了低碳管理措施的整合策略。借助绩效指标体系和低碳管理的协同实施，能切实增强工程项目的环境绩效、资源利用效率与可持续发展能力，为绿色施工和低碳运营提供科学依据与管理借鉴。

[关键词] 大型复杂工程；绿色建造；低碳管理；绩效评价体系；可持续发展

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18014 中图分类号: TU17 文献标识码: A

## Research on the Construction of Performance Evaluation System for Green Construction of Large and Complex Projects and the Integration of Low Carbon Management Measures

ZHANG Xin, XUN Yang

Shaanxi Xixian New Area Jinghe New City Urban Construction Investment Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 713700, China

**Abstract:** During the construction of large and complex projects, energy consumption is high and environmental impact is significant. Green construction and low-carbon management have become key ways to enhance the sustainability of the project. Based on the systematic research on the core indicators of green construction and low-carbon management measures, a green construction performance evaluation system for large and complex projects has been established, involving indicators such as energy utilization efficiency, resource recycling, construction environmental impact, and low-carbon emission reduction. An integration strategy for low-carbon management measures has also been proposed. Through the collaborative implementation of performance indicator system and low-carbon management, the environmental performance, resource utilization efficiency, and sustainable development capability of engineering projects can be effectively enhanced, providing scientific basis and management reference for green construction and low-carbon operation.

**Keywords:** large and complex engineering projects; green construction; low-carbon management; performance evaluation system; sustainable development

### 引言

伴随城市化进程加快以及基础设施建设持续拓展，大型复杂工程施工时遭遇能源高消耗、材料大量浪费、施工环境负荷重等难题。传统聚焦成本与进度的施工模式，难以同时达成生态效益与碳减排目标，迫切需要引入绿色建造理念和低碳管理策略。绿色建造注重在设计、施工及运营环节降低资源损耗与环境危害，低碳管理聚焦于施工全流程的碳排放管控和能效提高。构建科学绩效评价体系能对绿色建造的成效予以量化评估，为工程决策提供支撑，还能引导低碳管理措施高效整合。本文聚焦于研究大型复杂工程绿色建造绩效评价体系的搭建方式，同时给出低碳管理措施的整合途径，为工程的可持续发展提供借鉴。

### 1 绿色建造绩效评价体系构建

绿色建造绩效评价体系构建要从工程全生命周期切入，全面考量资源利用、能源消耗、环境影响和施工管理四个维度。首先，能源利用效率的衡量指标涵盖施工设备能效、可再生能源使用占比以及单位工程能耗；其次，资源循环利用指标聚焦于建筑材料再生利用比例、施工废弃

物回收比例以及水资源管理成效；环境影响指标包含施工噪声、扬尘排放、生态干扰以及施工现场污染管控；施工管理指标涵盖施工组织的优化、绿色施工技术的运用以及安全管理的效果。运用多指标量化评估方式，可全面展现大型复杂工程绿色建造的实际水平，为后续低碳管理供给数据支撑<sup>[1]</sup>。

### 2 低碳管理措施整合策略

#### 2.1 施工设备优化与能源监测

在大型复杂工程里，施工设备常见的有塔吊、挖掘机、混凝土泵送设备及各类运输车辆，施工时这些设备能耗颇高，是能源消耗与碳排放的重要源头。施工阶段开展低碳管理时，要对施工设备实施系统优化与能源监测。设备优化可从选型、维护、运行模式等多方面开展。例如，在挑选设备时，需优先选取高效节能的设备，如选用电动或混合动力的施工机械，削减燃油消耗与尾气排放。当设备处于运行状态，科学规划作业时间与施工次序，防止设备空转与重复操作，提升能源利用效率。同时，针对关键设备实施定期保养与技术改进，像调节发动机参数、改良液压

系统、更换驱动装置等，既可以提升施工效能，又能减少能耗。

针对能源监测，要搭建施工现场能源管理体系，对电力、燃油、压缩空气以及水资源等实施实时监控。通过智能传感器和能源计量仪表的安装，可精准统计每台设备的能耗，实现数据化管理。采集数据后，依托能源管理平台开展分析，找出高能耗环节与潜在浪费之处，为施工管理提供科学凭据。同时，能源监测可依据施工规划和作业进展，做动态的调整优化，保证各设备在施工全程达成最低能耗运行。此外，监测数据可作为绩效评定指标，与绿色建造指标体系相衔接，完成节能效果的量化评定，为低碳管理提供可验证的凭据。

凭借施工设备的优化以及能源监测，施工单位既能大幅减少碳排放，又可节省施工开支，提升资源利用效能。此外，该措施可与其他低碳管理策略相互配合，像优化施工组织、运用绿色材料等，达成综合效益的最大化。长期来看，此设备优化和能源监测体系会推动施工单位培育节能意识和绿色施工文化，为大型复杂工程的可持续发展筑牢根基<sup>[2]</sup>。

## 2.2 绿色材料及循环利用策略

在低碳施工管理里，材料管理是达成资源节省和降低碳排放的核心部分。大型复杂工程运用的建筑材料品类众多，有钢筋、混凝土、砂石、模板和装饰材料等，然而传统施工存在较高的材料浪费情况，引发资源浪费与环境压力问题。绿色材料管理策略核心包含优化材料选取、增强材料利用率以及推进建筑废弃物的循环再用。优化材料选择时需考量材料全生命周期的碳排放与环境效应。例如，采用高性能混凝土、再生骨料混凝土、低碳水泥以及环保型涂料，既能满足结构与功能需求，又可减少施工阶段的碳足迹。针对钢材这类可回收材料，应优先选购再生钢材，且借助标准化加工降低切割损耗。

施工场地需精准把控材料的消耗与损耗，借助精准测算材料需求、改进切割和运输方法、规划专门存放空间，可削减材料浪费。施工过程中，可借助数字化管理手段对材料的入库、领用和剩余量开展实时追踪，实现材料使用的透明化与可追溯性。针对施工期间产生的废弃物，如模板、混凝土边角料、废钢筋等，要构建分类收集与循环再利用体系，把可回收材料送回工厂重新加工或用于别的工程项目，减轻资源浪费和填埋压力。

绿色材料管理有待与低碳绩效评价体系实现对接。例如，把再生材料利用率、废弃物回收比例、单位工程碳排放数值等列为绩效考核的指标，引导施工单位在实际施工中自发落实低碳行动。借助这一系列绿色材料及循环利用举措，能切实削减施工碳排放，节约资源开支，同时增进项目的环境效益，强化社会责任感，为大型复杂工程实现绿色建造目标筑牢根基。

## 2.3 施工全流程信息化监控体系

对于低碳施工管理而言，运用信息化手段是达成全流程控制与绩效量化的核心。通过搭建施工全流程信息化监控体系，可对能源消耗、材料使用、施工进度和碳排放等数据进行实时采集、分析和反馈，为绿色建造和低碳管理供给数据支撑。利用在施工现场设置物联网传感器、智能仪表和施工管理软件，实现对设备运行情况、能源使用量、材料使用量及施工流程的实时管控。例如，安装于塔吊、混凝土泵、运输车辆的能耗传感器可获取电力和燃油的使用状况，系统自动产出能耗报表与分析曲线，协助管理人员察觉高耗能环节<sup>[3]</sup>。

借助信息化平台，可开展施工进度与低碳指标的关联分析，达成精细化管控。系统可实时对各施工环节的能源消耗、材料使用和碳排放量进行匹配，当发现偏差时迅速调整施工计划和资源分配，保障低碳管理措施切实落地。信息系统还能整合项目文档、施工日志以及安全管理记录，促成多维度数据的共享，为施工单位提供科学决策的支撑。

此外，可将信息化监控体系与绩效评价体系相融合，借助构建低碳施工评价模型，实现对措施效果的量化。例如，可以测算每立方米混凝土的碳排放量、每吨钢材使用的循环再利用率、每阶段施工的能耗指标等，把这些数据用作绩效考核与奖惩的依据。凭借信息化、数据化的管理办法，既提升了施工效率和质量管控水准，又让低碳管理达成可视化、可追溯、可评价，实现绿色建造与低碳管理的深度交融。

## 3 指标与管理措施协同作用分析

### 3.1 能源利用效率指标与施工设备节能措施联动

大型复杂工程开展低碳管理时，能源利用效率成为衡量施工阶段节能减排成果的核心指标。能源消耗既关乎施工成本，又直接左右着工程的碳排放水平，故而将能源利用效率指标与施工设备节能措施深度结合，是构建闭环管理体系的关键一步。施工单位可优化施工设备的选型、运行模式、调度方案以及维护保养工作，使能源消耗降至最低。例如，优先挑选高效节能的塔吊、挖掘机及混凝土泵送设备，用电动或混合动力替换传统燃油动力，同时经由合理规划作业时间和施工次序，防止设备空转和重复作业，从而进一步减少能耗。

在指标关联环节，能源利用效率指标借助信息化监测系统实时收集每台设备的能耗数据，包含电力、燃油的消耗以及压缩空气、水资源等相关能源的使用情形。系统可产出动态报表和分析曲线，呈现设备能耗的变化趋向，为施工管理供给数据支撑，若检测到某类设备存在能耗异常或者处于低效率运行状态，应马上开展调度调整、设备检修或技术改造工作，实现能源消耗的优化。凭借能源利用效率指标和设备节能措施的协同，既能量化节能成效，而且能引

领施工单位不断改进低碳施工方案，达成闭环管理<sup>[4]</sup>。

此外，把该指标融入绩效评价体系，可针对施工班组或设备操作人员进行考核与激励，以绩效奖励激励能源消耗低、工作效率高的班组，构建激励体系，使节能行为常态化。这种指标和措施协同发力，既提升了能源利用效率，又削减了施工过程中的碳排放，为工程绿色建造水平提升给予了科学依据。

### 3.2 施工废弃物回收率指标与绿色材料管理措施联动

施工废弃物管理是大型工程开展绿色建造与低碳管理的关键要素。施工期间产生的建筑废料、模板边角料、混凝土残留物、废钢筋及包装材料等，若未得到有效回收利用，既造成资源浪费，又加重碳排放与环境压力。因此，使施工废弃物回收率指标与绿色材料管理措施深度关联，是达成低碳闭环管理的关键举措。

绿色材料管理可通过精准规划材料用量、改良施工工艺、严控损耗以及构建废弃物回收循环系统来实施。例如，在选用模板时，选用可循环利用的钢模板或者竹木模板，待施工结束后开展拆除、清理并循环利用；在开展混凝土施工时，回收利用边角料，减少填埋处理与资源浪费；对废旧钢材分类回收，送厂加工后再度加以利用。通过实施这一系列举措，可有效提高材料利用程度和施工废弃物回收水平。

信息化管理系统可对施工废弃物回收率指标进行实时记录与分析，包含废弃物总量、回收量、利用率和再生材料使用量等要素。指标与绿色材料管理措施相互联动之际，管理人员可凭借数据对材料采购、施工工艺及回收流程作出调整。例如，若某一工序的废弃物利用率低于预设目标，应迅速优化操作方案或添设回收设施，以保障施工废弃物充分利用<sup>[5]</sup>。

这一指标和措施相互配合，既可降低施工成本，又可大幅削减碳排放，增强工程绿色建造水准。同时，利用纳入绩效考核体系这一手段，驱动施工班组自发落实绿色材料管理办法，达成闭环管理动态优化，为工程可持续发展筑牢可靠根基。

### 3.3 施工环境影响指标与污染控制措施联动

施工环境所产生的影响是衡量大型工程绿色建造水准的关键要素，包含施工扬尘、噪声、水污染以及土壤扰动等情况。污染控制措施借助施工组织的优化、设备的管理、材料的选择以及施工工艺的改进，达成对环境影响的有效管控。若施工环境影响指标和污染控制措施形成联动，可构建起低碳闭环管理体系，让施工活动既符合质量要求，又最大程度减少环境负荷。

污染控制办法包含诸多方面内容。首先，借助对施工

现场管理的优化，例如设置围挡、使作业面湿润、安装除尘设备和噪声屏障等手段，降低扬尘与噪声给周边环境造成的影响。其次，科学规划施工的时间与顺序，杜绝高污染作业处于敏感时间段；收集处理废水废气，让排放契合环保标准。再次，利用信息化手段，实时监控环境参数，使数据与施工环境影响指标相对接，要是出现超标或异常情形，马上采取纠正行动。

指标与措施的联动性在施工决策层面同样有所体现。施工单位可依照环境影响指标剖析施工方案的可优化程度，如改变材料运输路径、改进设备运用与作业布局等，降低对环境的干扰。依托搭建动态反馈机制，污染控制举措能够依据指标结果实施调整与优化，实现闭环管理模式。这既提升了施工环境管理效能，又为低碳施工提供科学支撑，让工程在保证施工质量的同时，达成绿色、低碳与可持续发展目的<sup>[6]</sup>。

## 4 结语

构建大型复杂工程绿色建造绩效评价体系并整合低碳管理措施，能提高工程项目环境表现、资源利用效能与可持续发展水平。构建科学的绩效评价体系能够对绿色建造成效进行量化评估，为工程决策提供依据，同时指导低碳管理措施的有效整合。借助指标体系对绿色建造成效进行量化评定，将低碳管理办法融入施工各环节，达成施工全生命周期节能减排以及环境保护目标。未来，需进一步调整评价指标权重，结合不同工程类型与地区特征，促进绿色建造与低碳管理在工程实践里深度结合，为大型复杂工程可持续发展提供科学支撑与管理借鉴。

## 【参考文献】

- [1]蒋勇进.绿色建造技术在土木工程结构设计中运用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(20):73-75.
  - [2]陈刚,张帅,吴超杰,等.零碳建筑关键绿色建造技术研究——以全国零碳建筑首批示范工程绍兴龙山书院项目为例[J].建筑经济,2025,46(4):82-89.
  - [3]胡亚洲,刘昊,于韵,等.“双碳”目标下路桥工程绿色建造技术体系研究[J].中关村,2025(3):156-158.
  - [4]张红标.绿色建造下的工程造价管理：价值定位与功能适配[J].工程造价管理,2025,36(1):17-21.
  - [5]郭晓晓.绿色建造技术在施工中的研究与应用[J].陶瓷,2025(1):169-171.
  - [6]吴哲伟.基于绿色建造理念的办公楼宇建造技术探讨与思考[J].建筑施工,2024,46(12):1963-1966.
- 作者简介：张鑫（1991.7—），毕业院校：山东交通学院，所学专业：安全工程，当前就职单位：陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司，职称级别：工程师。

# 基于数字化技术的工程监理流程优化分析

陈杰

江西江南工程管理咨询有限公司，江西 赣州 402288

**[摘要]**当下，随着工程项目规模以及复杂程度的不断增大，传统工程监理模式暴露出诸多问题，像是效率不高、信息传递存在滞后情况、现场管理以及文档管理不够规范等，这些问题使得施工的质量、安全以及进度都难以得到有效的保障。与此监理团队在专业水平方面以及经验积累上都有所欠缺，知识共享做得也不够充分，其整体的管理能力还有待进一步提升。数字化技术不断发展，像BIM建模、物联网监测以及云端管理等，给工程监理带来了实时信息采集、可视化管理以及智能分析的途径，然而在实际的应用当中，这些技术还仅仅处于初步的阶段，监理流程在标准化以及信息化水平方面依旧有很大的提升余地。

**[关键词]**数字化技术；工程监理；工作流程；优化分析

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18008

中图分类号：TU712

文献标识码：A

## Optimization Analysis of Engineering Supervision Process Based on Digital Technology

CHEN Jie

Jiangxi Jiangnan Engineering Management Consulting Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 402288, China

**Abstract:** Currently, with the continuous increase in the scale and complexity of engineering projects, the traditional engineering supervision mode has exposed many problems, such as low efficiency, lagging information transmission, inadequate on-site management and document management, etc. These problems make it difficult to effectively guarantee the quality, safety, and progress of construction. The supervision team lacks professional expertise and accumulated experience, and knowledge sharing is not sufficient. Their overall management ability still needs further improvement. The continuous development of digital technology, such as BIM modeling, Internet of Things monitoring, and cloud management, has brought real-time information collection, visual management, and intelligent analysis to engineering supervision. However, in practical applications, these technologies are still in the preliminary stage, and there is still a lot of room for improvement in the standardization and informatization level of supervision processes.

**Keywords:** digital technology; engineering supervision; workflow; optimization analysis

### 引言

随着建筑工程规模变得越来越大，项目管理复杂程度也在不断提升，传统工程监理模式在施工质量、进度控制以及安全管理等方面碰到了不少挑战。传统监理通常依靠人工巡检还有经验来做出判断，如此一来，信息传递就会出现滞后的状况，在现场管理、文档管理以及团队协作这些方面都存在着相当大的局限性，很容易造成施工质量不够稳定、安全隐患有所增加、进度出现延误以及成本管理存在困难等情况。近些年来，数字化技术发展得十分迅速，这给工程监理带来了全新的发展机遇。像BIM（建筑信息模型）、物联网传感、云计算、大数据分析以及移动端管理平台这类技术，可以达成施工信息的实时采集、可视化管理以及智能分析，能够让监理部门在整个设计、施工以及验收等过程里开展高效且精准的管理和决策工作。依据数字化技术所开展的工程监理流程优化，不但能够处理传统监理里存在的流程繁琐、信息滞后以及标准化水平偏低等一系列问题，而且还能提高监理团队的专业能力、工作效率以及管理透明度，以此来保障工程的质量、安全以及进度。这篇文章会围绕数字化技术在工程监理流程中的

应用实际状况、优化办法以及效果分析等方面展开相关研究，目的在于提出系统的流程优化方案，为工程项目管理给予理论方面的支撑以及实践方面的参考，达成监理工作的数字化、智能化以及高效化目标。

### 1 传统流程存在的问题与挑战

在传统的工程监理流程里面，存在着不少会对监理效率以及项目质量产生影响的问题与挑战。一开始，监理流程呈现出环节较为繁琐且信息传递不太顺畅的情况，不同部门之间进行数据交流时，通常要依靠人工汇报或者纸质文件，如此一来便使得信息出现滞后的状况，很难做到及时察觉施工当中潜在的质量以及安全隐患。传统监理对于个人经验有着极高的依赖程度，其标准化管理水平并不高，监理人员在施工现场所开展的检查以及记录工作存在着主观性的差异，很容易出现疏漏或者是判断方面的偏差，进而对工程质量的统一性与规范性造成影响。除此之外，传统流程在文档管理方面同样存在着较为明显的不足之处，工程资料大多是以纸质的形式来进行存档的，这样一来，查找、更新以及归档的效率都会比较低，档案的完整性以及可追溯性也难以得到有效的保障。施工进度的监控

以及反馈机制不够及时，等到问题积累到一定程度之后才会被发现，这无疑增加了纠正成本以及安全风险。与此在监理过程里还缺乏系统化的绩效考核以及知识积累机制，很难形成经验沉淀以及能力提升的闭环，从某种程度上进一步对监理团队整体水平的提升形成了制约。

## 2 基于数字化技术的工程监理流程优化

### 2.1 工程监理部标准化管理

#### 2.1.1 “形象” 标准化管理

在工程监理流程得以优化的过程中，“形象” 标准化管理属于提升监理部门整体专业水准以及公信力的关键构成部分，其关键之处就在于凭借统一且规范的行为举止、着装样式、言语表达以及办公环境与现场环境等方面，塑造出专业且严谨的监理形象。在传统的管理模式当中，监理人员的职业形象常常缺少统一的标准，现场管理也存在着较大的随意性，办公环境以及标识标牌不够规范，这很容易使得施工单位以及业主对于监理工作的认可程度出现下滑的情况，与此同时还会对团队内部的规范化运作产生影响。在引入数字化技术之后，监理部门能够通过构建统一的形象管理规范以及数字化监督系统，针对员工的职业行为、出勤状况、岗位职责履行情况以及现场文明施工事宜展开实时的监控并进行数据化的记录。比如说，借助移动端考勤以及行为记录系统，便能够精准地掌握现场人员的出勤状况以及岗位执行的具体情况，借助数字化拍照以及档案系统，可对办公环境、施工标识以及安全提示加以统一的记录与管理，以此来保证现场形象与规范所提出的要求保持一致。

#### 2.1.2 “现场” 标准化管理

在工程监理流程得以优化的过程中，“现场” 的标准化管理属于极为重要的一环，它是保证施工安全、工程质量以及施工效率的关键所在。其最为关键之处就在于运用系统化且规范化的各类手段来针对施工现场的各项活动展开全方位的管理操作。就传统模式来讲，现场管理往往主要是依靠监理人员所积累的经验以及人工开展的巡查工作来进行，如此一来，信息反馈就会出现滞后的状况，很难做到及时地去发现施工当中存在的安全隐患或者施工质量问题，进而致使施工风险处于比较高的态势，而且施工效率也不够稳定。不过借助数字化技术之后，现场管理便实现了可视化、智能化以及数据化的转变<sup>[1]</sup>。比如说，凭借 BIM 也就是建筑信息模型技术，能够把施工现场的三维模型和施工进度、施工质量、材料使用等相关数据实时地关联起来，进而让监理人员可以直观地知晓各个分项工程的进展情况以及潜在可能出现的问题；利用物联网传感器，可以实时对塔吊、起重设备、支撑结构等这些关键设施的运行状态加以监测，并且能够对危险区域人员的进

出情况进行定位管理，如此便能够在一定程度上提前对安全风险发出预警；与此移动端巡检系统可以把现场检查、隐患记录、整改措施以及验收流程都进行数字化的处理，相关数据会实时上传到云端，进而达成信息的即时共享以及具备可追溯性的目的。

#### 2.1.3 “文档” 标准化管理

在工程监理流程优化进程中，“文档”的标准化管理属于极为关键的一个环节，其对于保证工程资料具备完整性、可追溯性，进而促使监理工作能够高效地运行有着十分重要的作用。在传统的监理模式之下，工程文档大多是以纸质的形式来予以存储的，而且在归档方面也缺少统一明确的标准，信息的传递往往依靠人工录入以及线下的方式来进行，如此一来就很容易会出现诸如资料丢失、出现重复记录或者版本混乱等一系列的问题，这些问题的存在无疑会对工程质量的评估、进度的控制以及审计管理等方面产生一定的影响。借助数字化技术手段，监理部门便能够搭建起统一的文档管理平台，从而达成对工程设计图纸、施工记录、监理日志、验收报告以及会议纪要等诸多资料实施电子化以及集中化的管理目标。凭借着云存储以及权限控制的相关举措，所有的文档都能够实现分类归档，同时还能够在多个终端上实现实时的访问以及协作共享，以此来确保信息能够得到及时的更新，并且具备可追溯的特性。与此智能检索以及标签分类所具备的功能还能够让人快速地定位到所需要的资料，进而提升查阅的效率以及决策的速度。

### 2.2 构建学习型项目监理部

在依托数字化技术来对工程监理流程予以优化的进程里，着手构建学习型项目监理部，这无疑是一项极为重要的举措，其目的在于提升监理团队的整体能力，并且能够有效应对复杂多变的工程管理方面的诸多需求。学习型监理部着重于对知识展开系统化的管理，注重经验的积淀以及相互间的共享，而且还强调要持续不断地提升自身能力，借助数字化技术相关手段，从而达成信息化以及智能化的有效支撑。在传统的监理模式之下，监理人员所积累的经验往往仅仅局限于个人层面，在知识的传递方面，大多依靠口头交流的方式，或者凭借那些较为零散的文档来进行，由于缺少一个统一的平台以及相应的标准，这就使得团队整体能力的提升速度变得颇为缓慢，各类重复出现的问题也频繁发生，管理效率以及项目的质量都很难实现持续性的优化。在引入数字化技术之后，监理部门便能够着手建立起集中化的知识管理系统，把诸如项目经验、施工规范、质量标准、安全案例以及问题解决方案等一系列内容，都以结构化数据的形式去进行存储，并且开展分类管理工作，进而能够让信息具备可查询、可复用以及可追

溯的特性。借助移动端的应用程序以及云平台，监理人员就可以随时获取到最新的技术资料、培训内容以及操作指南，如此一来，既能够提升他们在现场做出决策的能力，又能够提高他们的执行效率<sup>[2]</sup>。与此该系统还能够记录下个人以及团队的操作数据以及绩效表现情况，再结合智能分析工具来开展能力评估工作，从而为制定培训计划以及分配工作任务提供科学合理的依据。

### 2.3 增加整体薪资待遇水平

在依靠数字化技术来对工程监理流程加以优化的时候，提升整体薪资待遇水准是一项十分重要的举措，其对于增强监理团队的稳定性、激发员工的积极性以及确保监理工作能够高效推进都极为关键。工程监理工作有着专业性颇为突出、肩负的责任十分重大、所要完成的任务也格外繁重等诸多特点，特别是在那些大型或者复杂的工程项目当中，监理人员一方面得拥有丰富且扎实的专业知识，另一方面还要具备相当程度的现场管理经验，与此他们还必须担负起施工安全方面的相关事宜、质量控制的工作、进度管理的职责以及协调沟通等多方面的重任。不过，传统的薪酬体系通常很难完整地体现出监理人员实际的工作强度以及他们所具备的专业价值，如此一来便使得员工的积极性有所欠缺，人员的流动性也变得频繁起来，而且经验的积累更是难以持续下去，最终对监理工作的连续性以及整个项目的整体质量都产生了影响。要是能够提高整体的薪资待遇水平，并且与数字化绩效考核系统相互结合起来，把薪酬和监理人员的实际工作量、质量检查的情况、发现问题以及整改的效率还有项目目标完成的程度关联起来，那么就能够构建起一套科学合理、公平公正且透明清晰的薪酬激励机制了。

### 2.4 工程档案数字化管理

基于先进的数字库技术，实现工程档案的数字化管理，为工程项目的快速检索与应用提供有力支持。用户可通过关键词搜索功能，输入关键信息即可快速定位所需档案；对于档案信息记忆模糊的情况，模糊搜索功能能够扩大搜索范围，帮助用户找到相关档案；日期搜索功能则方便用户按时间顺序筛选档案，便于查询特定时段的工程资料；而部位工序搜索功能则能够精准定位到特定工程部位或工序的档案，为工程监理提供准确可靠的依据。

### 2.5 参与到图纸会审阶段的管理

在依托数字化技术展开的工程监理流程优化进程中，参与到图纸会审这一阶段的管理工作，属于保障工程设计质量、施工具备可行性以及后续监理工作能高效对接的关键环节。在传统的监理模式当中，监理部门常常是在设计工作完成之后才会介入到施工阶段，如此一来，便使得设计方面存在的缺陷、施工过程中出现的难点亦或是潜在的

安全隐患没办法在初始阶段就被察觉并加以解决，进而使得施工变更、返工以及成本方面的风险有所增加。借助数字化技术的应用，监理部门能够在图纸会审阶段便充分介入设计评审以及协调相关的工作，达成全过程的提前管理<sup>[3]</sup>。比如说，运用 BIM（建筑信息模型）技术，可以把设计图纸转变为三维可视化的模型，清晰地呈现出建筑构件、结构节点以及施工流程等内容，而且还能借助碰撞检测、施工模拟以及可行性分析等方式，及时察觉设计当中存在的结构冲突、施工难点或者安全隐患。与此数字化协作平台能够促成设计单位、监理单位以及施工单位之间的信息实时共享，监理人员可以凭借在线评论、标注以及审批等功能来提出修改的意见以及优化的建议，并且完整地记录下所有讨论以及决策的数据，以此来确保信息具备可追溯性以及透明度。

## 3 优化方案的应用与效果分析

在工程监理流程的优化进程里，优化方案的实际应用情况以及效果分析，这无疑属于验证数字化管理举措所具有的实际价值以及改进成果的关键环节。当把像标准化管理这样的举措、着力去建设学习型监理部、施行薪酬激励机制、开展数字化档案管理以及提前参与到图纸会审等一系列优化措施实实在在地在具体工程项目当中予以落实并加以实施的时候，监理部门便能够较为系统地促使管理效率得以提升、施工质量获得改善、安全水平有所提高。在整个实施的这个过程当中，数字化技术起到了极为关键的支撑作用，就好比 BIM 模型、物联网传感器、移动巡检系统还有云端文档管理平台这些，它们可以让各项相关数据做到实时的记录下来、实现共享并且展开分析，进而为后续的决策给予科学且合理的依据<sup>[4]</sup>。要是对优化之前的各项指标和优化之后的各项指标进行一番对比分析的话，那么就会发现优化方案在不少方面都收获了颇为显著的效果：其一，施工现场管理的规范化程度以及可视化程度均有明显的提升，现场巡检的效率以及发现问题的及时率也都大幅度提高了，这样一来，安全隐患以及施工质量问题就能够得到及时且有效的处置；其二，文档管理以及信息传递达成了高效的状态，而且具备可追溯性以及共享的特性，如此一来便减少了重复的劳动以及信息方面的遗漏情况，使得项目团队之间的协作也变得更加顺畅了；与此监理人员的职业素养、工作的积极性以及团队的凝聚力均有了显著的增强，人员的流动率也降低了，相应的经验以及知识也得以较为系统地沉淀下来。

## 4 结语

基于数字化技术对工程监理流程予以优化，具体是通过引入 BIM 建模、物联网监测、云端文档管理以及移动端巡检等举措，从而达成了监理工作的数字化、标准化与

智能化目标。这些优化举措一方面提高了现场管理的效率，另一方面也让施工质量以及安全水平得以提升，同时还强化了监理团队的专业能力以及协作水平。从实践情况来看，在监理流程当中运用数字化技术，切实有效地解决了传统管理里存在的信息传递滞后、标准化程度不够以及效率不高等一系列问题，给工程项目高效推进以及科学管理给予了稳固有力的保障，同时也为工程监理后续的持续改进以及智能化发展提供了可供参考借鉴的经验与实践途径。

#### [参考文献]

[1]左宇龙.基于数字化技术的工程监理流程优化分析[J].

中国建筑金属结构,2025,24(6):175-177.

[2]安良伦.工程监理信息化与数字化转型的实践与效果研究[J].科技资讯,2025,23(6):53-55.

[3]赵峰.构建数字化监理模式的探究[C].河南:《建筑科技与管理》组委会.2015年5月建筑科技与管理学术交流会论文集.漯河市公路管理局,2015.

[4]梁少勇,刘添荣.监理咨询企业数字化转型探索与实践[J].建设监理,2025(8):86-90.

作者简介：陈杰（1992.3—），毕业院校：江西理工大学，所学专业：工程管理，当前就职单位：江西江南工程管理咨询有限公司，职称级别：中级工程师。

# 新旧道路衔接处差异沉降控制技术研究

## ——基于一种新型应力拉筋复合结构的力学性能与工程应用分析

罗丹 林雄

中铁二十二局集团第五工程有限公司，重庆 400711

**[摘要]**随着我国交通基础设施建设的飞速发展，既有道路的改扩建工程日益增多。新旧路基衔接处的差异沉降问题一直是道路工程领域的难点和痛点，它直接导致路面产生纵向裂缝、错台等病害，严重影响行车安全、舒适性和道路使用寿命。传统采用土工格栅等加筋材料的方法，在长期荷载作用下仍难以有效抵抗差异变形。本篇文章针对上述技术瓶颈，深入分析了一种新型新旧道路路面衔接结构。该结构创新性地引入了一种可旋转、带弹性限位件的应力拉筋系统，与传统的路基辅助材料层（钢塑格栅、防渗土工布）协同工作，形成了一套刚柔并济、主动约束与被动加固相结合的复合加固体系。本篇文章详细阐述了该衔接结构的构造组成、核心部件应力拉筋的工作机理，并通过力学分析揭示了其如何通过“锚固锁死应力传递”机制有效抑制新旧路基的相对位移。同时，本篇文章系统梳理了该结构的施工工艺流程，并从抗分离、抗裂性能、施工便捷性、长期耐久性等方面与传统技术进行了对比分析。研究结果表明，该新型衔接结构能够显著提升新旧路基的整体性和协同工作能力，有效控制差异沉降，为解决道路改扩建工程中的关键技术难题提供了可靠的技术方案，具有广阔的应用前景。

**[关键词]**道路改扩建；新旧路基衔接；差异沉降；应力拉筋；土工格栅；复合加固；路面裂缝

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18007 中图分类号: TU41 文献标识码: A

### Research on Differential Settlement Control Technology at the Junction of New and Old Roads — Mechanical Properties and Engineering Application Analysis Based on a New Type of Stress Tension Reinforcement Composite Structure

LUO Dan; LIN Xiong

Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 22nd Bureau Group Corporation Limited, Chongqing, 400711, China

**Abstract:** With the rapid development of transportation infrastructure construction in China, the number of renovation and expansion projects on existing roads is increasing. The differential settlement problem at the junction of old and new roadbeds has always been a difficult and painful point in the field of road engineering. It directly leads to longitudinal cracks, misalignment and other diseases on the road surface, seriously affecting driving safety, comfort and road service life. The traditional method of using reinforced materials such as geogrids is still difficult to effectively resist differential deformation under long-term loads. This article provides an in-depth analysis of a new type of road surface connection structure for new and old roads, targeting the aforementioned technical bottlenecks. This structure innovatively introduces a stress reinforcement system that is rotatable and equipped with elastic limiters, which works in conjunction with traditional subgrade auxiliary material layers (steel plastic grids, anti-seepage geotextiles) to form a composite reinforcement system that combines rigidity and flexibility, active restraint, and passive reinforcement. This article elaborates on the structural composition of the connecting structure, the working mechanism of the core component stress reinforcement, and reveals through mechanical analysis how it effectively suppresses the relative displacement of the new and old roadbeds through the mechanism of "anchoring and locking stress transmission". At the same time, this article systematically reviews the construction process of the structure and compares it with traditional techniques in terms of anti separation, crack resistance, construction convenience, and long-term durability. The research results indicate that the new connection structure can significantly improve the overall integrity and collaborative working ability of the new and old roadbeds, effectively control differential settlement, and provide a reliable technical solution for solving key technical problems in road reconstruction and expansion projects, with broad prospects for promotion and application.

**Keywords:** road renovation and expansion; connection between new and old roadbeds; differential settlement; stress reinforcement; geogrid; composite reinforcement; road crack

#### 1 概述

##### 1.1 研究背景与意义

进入 21 世纪以来，中国公路交通网络建设取得了举

世瞩目的成就，路网密度和通达深度持续提升。然而，随着社会经济的快速发展和机动车保有量的激增，早期建设的许多道路已无法满足日益增长的交通需求，其通行能力、

服务水平均面临严峻挑战。因此,对既有道路进行拓宽改造,成为提升路网整体效能、缓解交通压力的主要手段。道路改扩建工程相较于新建工程,其技术复杂性更高,尤其是在新旧路基的衔接处理上。

新旧路基由于修建年代、施工工艺、地基条件、固结时间、荷载历史等方面的显著差异,导致其在物理力学性质上存在本质区别。旧路基经过多年的车辆荷载作用和自然固结,其沉降已基本趋于稳定,密实度和承载力较高。而新路基则是在旧路基侧旁填筑而成,其填料性质、压实状态均与旧路基不同,且在自身重力和未来交通荷载作用下,必然会产生新的固结沉降。这种新旧路基之间不可避免的不均匀沉降,即“差异沉降”,是引发路面结构破坏的根本原因。当差异沉降超过路面结构所能承受的极限拉应变时,就会在衔接处产生纵向裂缝,严重时形成错台,不仅破坏了路面的平整度和美观性,更对行车安全构成直接威胁,雨水通过裂缝下渗还会进一步侵蚀路基,加速病害的扩展,形成恶性循环,大大缩短道路的使用寿命。

因此,如何有效控制新旧路基衔接处的差异沉降,增强衔接部位的整体性和抗变形能力,是道路改扩建工程中亟待解决的核心技术问题。研究和开发高效、可靠、经济的新旧路基衔接技术,对于保障改扩建工程质量、延长道路服务年限、降低全生命周期养护成本、提升公众出行体验具有重大的理论价值和现实意义。

## 1.2 国内外研究现状

针对新旧路基差异沉降问题,国内外学者和工程技术人员进行了大量的研究与实践,形成了多种处理技术。总体上可分为地基处理、路基填筑优化和衔接部位加筋三大类。

在地基处理方面,常采用强夯法、置换法、桩基(如CFG桩、PHC管桩)等方法对新路基下的软弱地基进行加固,以减小新路基自身的总沉降量。这类方法效果显著,但往往成本高昂,施工周期长,且对周边环境影响较大,适用于地质条件特别差的路段。

在路基填筑优化方面,主要通过选择轻质填料(如泡沫轻质土、EPS块)、控制填筑速率、提高压实标准、设置过渡段等措施来减小新路基的附加应力和不均匀性。轻质填料能有效降低新路基自重,从而减小沉降,但其材料成本相对较高。设置过渡段(如采用台阶式开挖)则旨在实现新旧路基刚度的平顺过渡,缓解应力集中。

在衔接部位加筋方面,应用最为广泛的是铺设土工合成材料,如土工格栅、土工格室、高强度土工布等。其原理是利用筋材的抗拉强度,通过筋土界面摩擦咬合作用,将新路基的部分荷载传递到旧路基,约束新路基的侧向变形,从而提高衔接处的整体稳定性。钢塑格栅因其高抗拉强度、低蠕变、耐腐蚀等优点,成为主流选择。同时,常配合铺设防渗土工布,以防止水分侵入,保持路基土的强度。

然而,实践表明,单纯依赖土工格栅等平面加筋材料仍存在局限性。首先,其加固效果依赖于筋材与土体之间的有效摩擦,若施工中压实不足或界面处理不当,加固效果会大打折扣。其次,土工格栅主要提供二维平面内的约束,对于新旧路基界面可能发生的剪切错动和竖向分离的抵抗能力相对有限。正如本实用新型专利背景技术中指出的,即便采用了钢塑格栅和防渗土工布,路面在使用一年左右仍可能出现裂缝,这说明传统加筋体系在长期循环荷载和复杂应力状态下,其抗分离、抗裂性能仍有待提升。

近年来,一些三维加筋技术和植筋、打设锚杆等主动加固技术也开始被探索。例如,在旧路基中钻孔植入钢筋或型钢,再与新路基填料结合,形成强有力的连接。这类方法能提供更强的抗剪和抗拔能力,但施工工艺复杂,对旧路基结构有一定损伤,且成本较高,难以大规模推广。

## 1.3 本文研究内容

基于上述背景,本文旨在对一种创新性的新旧道路路面衔接结构进行系统性的理论分析与工程应用研究。该结构在传统路基辅助材料层的基础上,独创性地设计了一种可安装于路堤侧面的“应力拉筋”系统。本文将围绕该结构展开以下几方面的研究:

(1) 结构组成与原理分析:详细介绍该新型衔接结构的各个组成部分,重点剖析核心部件——应力拉筋的构造设计,包括连接盘、旋转套、内杆、弹性限位件等,并阐明其协同工作原理。

(2) 力学机理与性能优势:从力学角度深入分析该结构如何通过应力拉筋的“锚固锁死”机制,实现对新旧路基的主动连接和应力传递,并与传统土工格栅的加固机理进行对比,突出其在抗分离、抗裂方面的独特优势。

(3) 施工工艺与关键技术:系统梳理该衔接结构的完整施工流程,从旧路基台阶开挖、应力拉筋安装定位,到路基辅助材料层铺设、新路基填筑,直至路面层施工,明确各环节的技术要点和质量控制标准。

(4) 综合效益与应用前景:结合技术性能、施工效率、经济成本和长期耐久性等方面,对该新型衔接结构的综合效益进行评价,并探讨其在不同类型道路改扩建工程中的应用前景。

通过以上研究,以期为该新技术的推广应用提供坚实的理论支撑和实践指导,为解决新旧路基差异沉降这一行业难题贡献一份力量。

## 2 新型新旧道路路面衔接结构构造与原理

### 2.1 总体结构设计

本实用新型所提出的新旧道路路面衔接结构,是一个多层次、多维度的复合加固体系。其总体构造自下而上主要包括:旧路基(1)、新路基(2)、设置于二者之间的路堤(3)、铺设于路堤(3)之上的路基辅助材料层(4),以及贯穿新旧路基的应力拉筋(6),最终顶部统一铺设路

面层（5）。其整体结构剖面如图1所示。

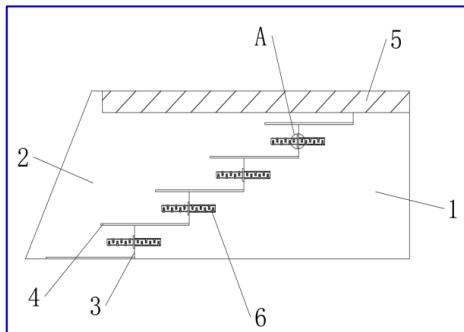


图1 新型新旧道路路面衔接结构主视剖面图

该设计的核心理念在于“刚柔并济，主被动结合”。 “柔”体现在路基辅助材料层（4），它通过大面积的平面约束，协调新旧路基的变形，起到被动加固和过渡作用。 “刚”则体现在应力拉筋（6），它作为一种点状、高强度的连接件，主动将新旧路基“锁死”在一起，直接抵抗二者间的分离和错动趋势。二者协同作用，形成一个整体性强、变形协调的复合路基结构。

## 2.2 核心部件：应力拉筋的构造与功能

应力拉筋（6）是本衔接结构最关键的创新点，其设计精巧，功能强大。它主要由连接盘（61）、旋转套（62）、内杆（63）以及弹性限位件四部分构成，其结构如图2所示。

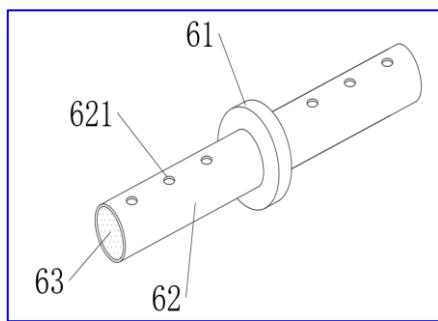


图2 应力拉筋结构图

### 2.2.1 内杆与连接盘

内杆（63）是应力拉筋的主体承载构件，通常采用高强度钢材制成，以保证其足够的抗拉、抗剪强度。两根内杆（63）对称地固定焊接于一个中央连接盘（61）的两侧，形成一个“H”形或“工”字形的基本骨架。连接盘（61）不仅起到连接和固定两侧内杆的作用，更重要的是，它为旋转套（62）提供了旋转的基准和限位。连接盘（61）两侧开设有环形滑槽，旋转套（62）的内端嵌入该滑槽内，使得旋转套（62）既能绕内杆（63）轴线自由旋转，又不会发生轴向窜动，保证了结构的稳定性和可操作性。

### 2.2.2 弹性限位件

弹性限位件是实现应力拉筋“锁死”功能的核心执行单元。它由限位块（631）和弹簧（633）组成。在内杆（63）

的杆身上，沿周向和轴向均匀开设有若干个安装孔一（632）。弹簧（633）安装于安装孔一（632）的底部，其一端与孔底固定，另一端则连接着限位块（631）。在自然状态下，弹簧（633）处于压缩或自由状态，具有向外弹出的趋势。限位块（631）的外端部还焊接有若干块防滑块（6311），这些防滑块（6311）通常采用高硬度合金或硬质塑料制成，其作用是在限位块（631）弹出后，增大其与锚固材料（8）或土体之间的摩擦力和机械咬合力，防止滑移。

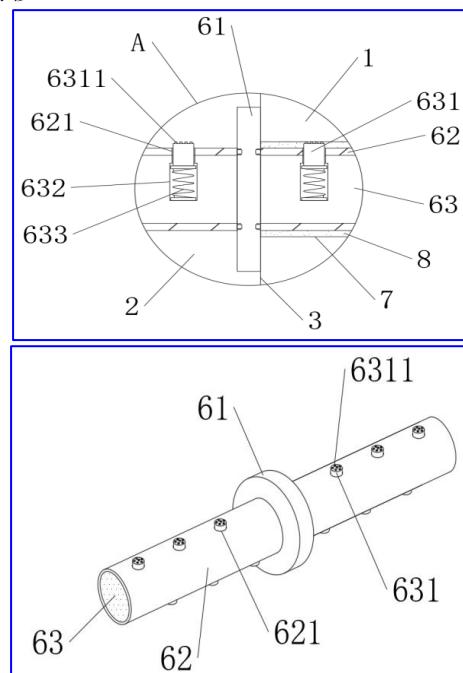


图3 应力拉筋与弹性限位件结合构造图

### 2.2.3 旋转套

旋转套（62）是一个套设在内杆（63）外部的圆筒状构件，它相当于一个“保险开关”。在旋转套（62）的筒壁上，开设有与内杆（63）上预留孔（632）数量相等且位置可对应的通孔（621）。在初始安装状态下，旋转套（62）被转动至一个特定角度，使其通孔（621）与内杆预留孔（632）完全错开。此时，限位块（631）被旋转套（62）的内壁完全约束在安装孔一（632）内部，弹簧（633）被压缩，整个应力拉筋（6）的外表面是光滑的，没有任何凸起，便于插入路堤预先钻好的（7）中。

## 2.3 工作原理详解

应力拉筋（6）的工作过程可分为“安装就位”“旋转解锁”“锚固锁死”三个阶段，其工作状态变化如图3和图4所示。

第一阶段：安装就位。施工前，将旋转套（62）旋转至锁定位置，即通孔（621）与内杆预留孔（632）错位。此时，应力拉筋（6）整体直径最小，可以轻松地横向插入路堤（3）侧壁预先钻好的安装孔（7）中。

第二阶段：旋转解锁。当应力拉筋（6）被推送到安装孔（7）内的预定位置后，施工人员使用专用工具或直接手动转动旋转套（62）。由于旋转套（62）与连接盘（61）之间通过环形滑槽连接，转动操作十分省力。当旋转套（62）上的通孔（621）与内杆（63）上的预留孔（632）精确对齐时，约束被瞬间解除。

第三阶段：锚固锁死。解除约束后，内杆预留孔（632）内的弹簧（633）迅速释放储存的弹性势能，将限位块（631）及其端部的防滑块（6311）强力弹出。限位块（631）深深地扎入预先灌注在安装孔（7）内壁的、尚未完全凝固的锚固材料（8）层中。限位块（631）的楔入作用，配合防滑块（6311）的机械咬合，使得应力拉筋（6）的一端被牢固地锚固在旧路基的路堤（3）之中。随后，在新路基（2）的填筑过程中，应力拉筋（6）的另一端被完全包裹和压实在新路基填料中。通过这种方式，一根应力拉筋（6）就如同一颗巨大的“铆钉”，将新旧路基紧密地连接成一个整体。

### 3 力学机理与性能优势分析

#### 3.1 传统土工格栅加固机理的局限性

传统的钢塑格栅加固机理主要基于“准黏聚力”理论。当路基土体受到竖向荷载时，会产生侧向膨胀变形。铺设的格栅通过与土体的摩擦和咬合，为土体提供了一个侧向约束力，相当于给土体施加了一个“围压”，从而提高了土体的抗剪强度和整体刚度。在新旧路基衔接处，格栅横跨新旧路基，能将新路基的部分应力传递给刚度更大的旧路基，起到协调变形、减缓差异沉降的作用。

然而，这种加固方式存在以下局限性：

(1) 被动性：格栅的加固作用是在土体发生变形后才被动发挥的，它无法从根本上阻止差异沉降的发生，只能在一定程度上延缓和减小其影响。

(2) 二维性：格栅主要提供平面内的约束力，对于新旧路基界面处可能发生的剪切错动和竖向剥离（即“抗分离”能力），其抵抗能力相对较弱。裂缝的产生往往是由于拉应变超过了极限，而格栅对界面直接抗拉的贡献有限。

(3) 依赖性：加固效果高度依赖于施工质量，如格栅的张紧度、搭接长度、填料的压实度等。任何一个环节的疏漏都可能导致加固效果大打折扣。

#### 3.2 新型复合结构的协同力学机理

本新型衔接结构通过应力拉筋（6）与路基辅助材料层（4）的协同作用，构建了一个更为强大的力学体系。

##### 3.2.1 应力拉筋的主动锚固与抗剪机理

应力拉筋（6）的力学作用是主动和直接的。一旦安装完成，它就立即成为连接新旧路基的刚性纽带。

抗拉拔作用：当新路基发生沉降，试图与旧路基分离时，埋设在新路基中的内杆（63）会受到巨大的拔出力。这个力通过连接盘（61）传递给另一侧的内杆（63），最终由锚固在旧路基锚固材料（8）中的限位块（631）承担。

限位块（631）的楔入式设计，使其抗拔出能力远超普通的光圆钢筋，能有效抵抗竖向差异沉降。

抗剪切作用：当新旧路基发生水平方向的错动趋势时，应力拉筋（6）相当于一个强大的剪力键。其圆形截面的内杆（63）和坚固的连接盘（61）能够提供强大的抗剪刚度，直接抵抗界面剪切应力，防止路基发生错台破坏。

应力重分布：多根应力拉筋（6）沿道路纵向分布，形成一个空间桁架体系。它们能将新路基的局部集中荷载有效地传递和分散到旧路基的深部稳定区域，避免了应力在衔接界面的过度集中，从而保护了路面结构。

##### 3.2.2 路基辅助材料层的补充与协调作用

路基辅助材料层（4）在此体系中扮演着不可或缺的补充角色。

钢塑格栅：它在应力拉筋（6）之间形成了一个连续的加固平面，弥补了点状加固可能存在的“空白区”。它约束了新旧路基之间广大区域的土体变形，与应力拉筋（6）形成“点面结合”的立体加固网络，使得整个衔接区域的刚度分布更加均匀。

防渗土工布：它的主要功能是防水。通过隔断地表水和地下水向衔接界面的渗透，保持了路基土的含水率稳定，从而确保了土体的强度和应力拉筋（6）与土体之间的摩擦力不被削弱。这对于结构的长期耐久性至关重要。

#### 3.3 性能优势综合对比

相较于传统技术，本新型衔接结构具有以下显著优势：

(1) 卓越的抗分离、抗裂性能：应力拉筋的主动锚固机制从根本上解决了新旧路基的分离问题，其强大的抗拉拔能力是传统土工格栅无法比拟的，能从源头上杜绝纵向裂缝的产生。

(2) 刚柔并济，变形协调能力强：刚性的应力拉筋保证了连接的可靠性，柔性的土工格栅则允许一定的变形协调，避免了刚性连接可能导致的应力集中和二次破坏，结构体系更加合理。

(3) 施工便捷，质量可控：应力拉筋的“旋转解锁”设计，使得安装过程简单快捷，对施工人员的技能要求不高。其锚固效果由机械结构保证，受人为因素影响小，工程质量更容易控制。

(4) 长期耐久性好：应力拉筋采用高强度钢材，限位块锚固在混凝土中，整个系统抗腐蚀、抗老化能力强。配合防渗土工布，能有效隔绝水分侵蚀，确保了结构在设计年限内的长期稳定性。

### 4 施工工艺与关键技术

该新型衔接结构的施工需要遵循严格的工艺流程，以确保其性能得到充分发挥。

#### 4.1 施工准备与旧路基处理

(1) 交通组织与场地清理：对施工路段进行交通管制，清除旧路基边坡的植被、浮土等杂物。

(2) 旧路基台阶开挖：按照设计要求（如 100cm 宽 ×30cm 高的台阶），对旧路基边坡进行挖台阶处理，形成若干个路堤（3）。开挖过程中应尽量减少对旧路基主体的扰动。开挖后对台阶面进行压实，压实度不低于 95%。

#### 4.2 应力拉筋安装

(1) 钻孔：在每个路堤（3）的侧面，按设计间距和位置，使用钻孔机钻取安装孔（7）。孔径应与应力拉筋（6）的外径相匹配，孔深需满足锚固长度要求。

(2) 清孔与注浆准备：用高压风或水清理孔内杂物，保持孔壁清洁。

(3) 注入混凝土：向安装孔（7）内注入流动性好、早期强度高的锚固材料（8），灌注量约为孔深的 2/3 至 3/4。

(4) 插入应力拉筋：将处于锁定状态的应力拉筋（6）对准安装孔（7），平稳地推入至设计深度。

(5) 旋转解锁：立即使用专用扳手或工具转动旋转套（62），直至通孔（621）与内杆预留孔（632）对齐，听到或感觉到弹簧弹出的“咔哒”声，确认限位块（631）已成功嵌入锚固材料中。

(6) 补浆与养护：对孔口进行补浆，确保孔内密实无空隙，并对锚固点进行初步养护。

#### 4.3 路基辅助材料层铺设与新路基填筑

(1) 铺设钢塑格栅：在路堤（3）顶部及新路基基底，铺设钢塑格栅。格栅应保持平整、张紧，其主受力方向（即强度最高的方向）应与道路横断面方向一致，以最大程度抵抗差异沉降。用 U 型钉将格栅两端固定，并在新旧路基衔接处打入短锚杆进行锚固。

(2) 铺设防渗土工布：在钢塑格栅之上覆盖防渗土工布，搭接宽度需满足规范要求，确保防水效果。

(3) 新路基填筑：分层填筑新路基填料，每层松铺厚度控制在 20~30cm。使用小型压实机具靠近应力拉筋区域进行压实，避免大型机械碰撞拉筋，确保压实度达到设计要求。填筑过程中，应力拉筋（6）被逐层埋入新路基中。

#### 4.4 路面层施工

在新路基填筑完成并经过足够的预压期（或沉降稳定期）后，按照标准工艺进行基层、底基层和面层的施工。在衔接处的面层施工中，可考虑铺设玻璃纤维格栅等抗裂材料，形成双重保险。

### 5 结论与展望

#### 5.1 结论

本文对一种基于新型应力拉筋的新旧道路路面衔接结构进行了全面的分析。研究表明：

(1) 该结构通过创新性的应力拉筋设计，实现了对新旧路基的主动、高强度的机械连接，其“锚固锁死”机制能有效抵抗界面处的拉、剪应力，从根本上解决了传统

技术难以克服的抗分离、抗裂性能不足的问题。

(2) 应力拉筋与路基辅助材料层（钢塑格栅、防渗土工布）的有机结合，形成了“点面结合、刚柔并济”的复合加固体系，能够协同工作，高效地控制新旧路基的差异沉降，提升衔接区域的整体稳定性和耐久性。

(3) 该结构设计合理，施工工艺相对简便，质量易于控制，综合性能优越，为道路改扩建工程提供了一种高效、可靠的技术解决方案，具有显著的技术经济优势。

#### 5.2 展望

尽管该新型衔接结构优势明显，但在未来的研究和应用中，仍有进一步深化的空间：

(1) 精细化设计理论：可通过数值模拟（如有限元分析）和室内模型试验，进一步研究应力拉筋的合理布设间距、锚固长度、极限承载力等关键设计参数，建立更为精确的设计计算方法。

(2) 材料与工艺优化：可探索使用更高强度的复合材料、耐腐蚀合金等来制造应力拉筋，以适应更恶劣的工程环境。同时，研发更高效的自动化安装设备，进一步提高施工效率。

(3) 长期性能监测：在实际工程中布设监测设备，对采用该结构的路段进行长期跟踪观测，收集沉降、应变、裂缝等数据，验证其长期性能，并为后续的技术改进提供依据。

综上所述，该新型新旧道路路面衔接结构代表了路基加固技术的一个重要发展方向，随着其理论的不断完善和工程实践的积累，必将在未来的交通基础设施建设中发挥越来越重要的作用。

基金项目：中铁二十二局集团有限公司科技研究开发计划项目（22-04A）。

#### 参考文献

- [1] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
  - [2] 刘松玉, 钱国超. 公路路基工程中差异沉降研究进展[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 18.
  - [3] JTGD302015, 公路路基设计规范[S].
  - [4] 包承纲. 土工合成材料在工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
  - [5] 陈云敏, 柯瀚, 陈仁朋. 软土地基上拓宽工程差异沉降机理与控制研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 714.
  - [6] 周顺华, 冯忠居, 余天庆. 拓宽路基差异沉降对路面结构附加应力的影响分析[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 16.
  - [7] 孙钧, 周健, 赵明华. 土工格栅加筋拓宽路基性状的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 10811085.
- 作者简介：罗丹（1982.8—），男，石家庄铁道学院，中铁二十二局集团第五工程有限公司，项目总工，工程师。

## 装配式建筑的工程项目管理及发展问题研究

王 眇

中国建筑设计研究院有限公司，北京 100044

[摘要]随着建筑行业持续不断地转型升级，装配式建筑作为一种全新的建造方式，已然成为推动建筑业朝着工业化方向发展的一条极为关键的路径。文中依据装配式建筑项目的全过程管理实际操作情况，全面且细致地剖析了装配式建筑的定义方面的特征以及其发展历程中的脉络走向，并且深入且详尽地探讨了在设计管理阶段、构件生产与运输阶段以及现场装配阶段各自的核心管理要点所在。与此针对当下存在的技术体系不够完善、项目管理效率不高、专业人才较为匮乏以及产业链协同程度不足等一系列较为突出的问题，还给出了具备实践价值的优化对策。

[关键词]装配式建筑；工程项目管理；发展问题；产业链协同

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17989

中图分类号：TU712

文献标识码：A

## Research on Project Management and Development Problems of Prefabricated Buildings

WANG Xi

China Architectural Design & Research Group, Beijing, 100044, China

**Abstract:** With the continuous transformation and upgrading of the construction industry, prefabricated buildings, as a new construction method, have become an extremely critical path to promote the development of the construction industry towards industrialization. Based on the actual operation of the whole process management of prefabricated building projects, this article comprehensively and meticulously analyzes the characteristics of the definition of prefabricated buildings and their development process, and deeply and thoroughly explores the core management points in the design management stage, component production and transportation stage, and on-site assembly stage. In response to a series of prominent problems such as inadequate technological system, low project management efficiency, shortage of professional talents, and insufficient synergy in the industrial chain, practical optimization measures have been proposed.

**Keywords:** prefabricated building; engineering project management; development problems; industrial chain collaboration

装配式建筑的出现和兴起充分彰显我国建筑行业已跨入一个新的发展里程。开展装配式建筑工程建设可有效改善传统建筑施工中的高能耗和高污染问题，具有比较优越的社会效益和环境效益，与我国提出的环境和生态建设战略要求相契合，因而得到快速发展。装配式建筑是一种新型建筑，必须借助科学合理的项目管理促进各项施工作业的顺利进行，但是，我国的装配式建筑还处于初步发展阶段，所以，仍需要加强装配式建筑项目管理措施研究。

### 1 装配式建筑概述

#### 1.1 装配式建筑的定义与特征

装配式建筑说到底就是把传统建造方式里大量需要现场操作的工作挪到工厂去做，在工厂把建筑用的各种构件和配件都加工制作好之后，再把这些东西运送到建筑施工现场，随后依靠可靠的连接方式在施工现场完成装配安装，最终形成建筑。这种建造方式是现代工业化生产方式典型的应用体现，它的核心特点主要在标准化设计、工厂化生产、装配化施工以及信息化管理等诸多方面都有所呈现。装配式建筑当下主要包含预制装配式混凝土结构、钢

结构还有现代木结构建筑这三种类型，而这其中预制装配式混凝土结构在市场当中是处于主流位置的。

#### 1.2 装配式建筑的发展历程

我国装配式建筑的发展历程大致可以分为四个主要阶段。创建和起步期从 20 世纪 50 年代开始，在第一个五年计划期间我国就开始探索工业化建设经验，提出了设计标准化与工业化模数化的方针。困难停滞期出现在 20 世纪 80 年代后期至 90 年代末，由于现浇施工技术迅速发展以及大板房存在连接与防水等质量问题，导致预制装配施工技术陷入停滞状态。新探索期从 20 世纪 90 年代末延续至 21 世纪初，国家开始建设住宅产业化基地，大力发展战略省地型住宅。近年来装配式建筑进入快速发展期，国家相关部门陆续发布推动建筑工业化的指导文件。

### 2 装配式建筑工程项目管理的主要内容

#### 2.1 设计阶段的管理要点

设计阶段乃是装配式建筑项目管理的开端所在，其标准化以及一体化达成的水准，会直接对后续的生产环节以及施工环节的效率和质量起到决定性作用。装配式建筑在

设计管理方面务必要秉持标准化设计的原则，借助推广统一的模数以及协调标准的方式，达成构件生产具备规模化的特点以及呈现出系列化的状态。并且，装配式建筑规定要采用建筑装修一体化的设计与施工模式，如此一来便要求在设计刚开始的时候，就需要全面且周全地去考量建筑结构、内外装修以及设备管线之间相互协调的那种关系。基于信息技术所构建起来的信息化管理系统，在设计管理当中占据着颇为重要的位置，通过搭建起涵盖设计、生产以及施工整个过程的信息共享平台，是能够切实有效地去处理好各个专业之间存在的信息孤岛这类问题的。

## 2.2 构件生产与运输管理

构件生产以及运输环节，这是装配式建筑和传统现浇建筑不一样的关键阶段，同时也是实现质量可控制还有效率提升的重要核心部分<sup>[1]</sup>。在构件生产的时候，工厂化的生产环境让构件机械化的程度比较高，产品质量也更容易得到有效的把控，借助严格的质量控制流程以及规范的养护工艺，可以保证构件强度符合规定的标准。在运输管理这块，得综合考量构件尺寸、重量、运输路线以及现场存储条件等诸多因素，去制定出科学合理的运输方案。因为预制构件工厂化生产会受到模具的限制以及运输条件的约束，所以构件尺寸得控制在合理的范围之内，这样的特性就要求在设计阶段就要充分考虑到运输条件所带来的影响。

## 2.3 现场装配与施工协调

现场装配以及施工协调属于装配式建筑项目管理当中的最后一道关键关卡，其管理水平在很大程度上直接决定了整个项目最终所能达成的质量状况以及所能获取的效益情况。装配式建筑在开展现场施工相关工作的时候，得采用大型起重机械来完成构件吊装事宜，而针对现场垂直运输机械方面的要求是比较高的，所以这就意味着在现场布局以及施工组织设计环节当中，务必要全面且细致地去考量吊装设备所具备的工作半径以及承载能力这两方面的因素。在装配式建筑现场装配的过程里面，节点连接以及板缝处理这些事项是关乎到结构安全性与整体性的极为重要的技术环节，构件彼此之间具体的连接方法应当依据结构实际的需要以及施工的具体条件，经过相应的计算之后再进行合理的设计与恰当的选择。并且要着重指出的是，装配式建筑项目有必要建立起一套高效能的多方协调机制，借助定期举办协调会议的方式，能够及时有效地去处理诸如设计变更、进度调整以及技术衔接等各类各样的问题。

## 3 装配式建筑发展中的主要问题

### 3.1 技术体系尚不完善

装配式建筑在发展进程里碰到技术体系不完善这一突出难题，在设计规范以及标准衔接这块有着十分明显的不足之处。当下装配式建筑设计复杂程度提升了不少，得

把预制构件的标准化还有模数化给考虑进去，然而相关的验收规范在施工技术发展上却慢了一拍。技术体系里的节点连接、防水构造这些关键部分还不够成熟，虽说预制构件在工厂里有严格的质量把控，其混凝土性能指标通常比现场浇筑要好，可在现场装配期间怎样保证构件连接的整体性以及接缝处的防水性能，依旧得靠后续的技术突破来解决。装配式装修技术体系的发展同样比较滞后，对标准化设计的要求颇高，要是达不到这个要求，就会造成建材大量浪费，装修成本也会大大增加。

### 3.2 项目管理效率有待提高

装配式建筑项目在管理效率方面存在的不足，主要聚焦在产业链协同不够充分以及信息流出现断裂这两个层面，这对项目的整体效益产生了颇为严重的影响。虽说从理论层面来讲，装配式建筑能够大幅缩减施工所耗费的时间，然而实际上，因为设计环节、生产环节以及施工环节之间缺少有效的协同配合，在实际开展的项目当中，常常会出现诸如构件生产进度和现场施工进度无法很好匹配起来、设计变更频繁发生致使构件得重新加工这类效率方面的损失情况。有一部分装配式建筑项目，由于没有得到信息化管理平台的有效助力，进而使得信息传递不够及时，决策也出现滞后的状况。而且现场装配对于精度的要求是比较高的，需要对施工误差予以严格的把控，如此一来，便对设计、生产以及施工的管理水平提出了更高的要求。装配式建筑项目的全过程管理机制还不是很完善，尤其是在工程总承包管理模式的应用这块，当下依旧处在探索尝试的阶段之中。

### 3.3 专业人才与技能短缺

装配式建筑领域里专业人才短缺的情况已然成为限制其实现高质量发展的一大瓶颈，在设计以及施工环节，那种兼具多种能力的复合型人才更是极其稀缺。当下，装配式建筑的设计和施工管理对技术人员有着这样的要求，那就是他们得同时把控建筑工业化应用以及信息技术等诸多学科方面的知识，然而高校所构建的人才培养体系跟企业实际所需之间存在着颇为明显的不匹配情况<sup>[2]</sup>。与此传统建筑工人朝着装配式建筑产业工人转变的速度颇为缓慢，在现有的从业人员当中，拥有预制构件装配技能并且具备现场管理能力的人所占比例是比较低的。装配式建筑专业人才的培养机制并不是特别完善，虽说相关机构已经开始着手开展专业技术人员培训以及等级考试方面的工作了，可是培训所能覆盖的范围以及培训的质量依旧很难跟上行业快速发展的节奏。

### 3.4 产业链协同程度不足

装配式建筑的发展离不开设计、生产、施工以及物流等上下游企业的密切配合。然而当下产业链各个环节之间的协同程度明显有所欠缺，很难构建起高效运转的产业生态系统。就供应链协同而言，预制构件生产企业和施工

企业之间信息共享机制并不完善，这使得构件供应常常与现场施工进度出现脱节情况。并且装配式建筑项目一体化协作水平不高，设计单位通常没有充分考量生产工艺与施工条件，生产企业对于施工安装的技术要求理解不够透彻，施工单位对构件特点与安装要领掌握得也不够到位。产业链协同不足还突出地体现在技术标准体系不够统一，不同企业所采用的技术标准与接口规范存在差异，进而导致构件的通用性与互换性受到限制。

#### 4 提升装配式建筑项目管理水平的对策

##### 4.1 推动技术标准化与创新

针对技术体系存在不完善这一情况，当下最为紧迫的事情便是加快推动装配式建筑技术标准朝着统一的方向发展，并且积极推进创新体系的构建工作。相关部门需要及时对装配式建筑的设计验收规范予以更新与完善，借此消除那些对技术发展起到制约作用的制度性障碍，进而为装配式建筑的创新应用给予更为完善的技术标准方面的有力支撑。与此还要全力推动模数协调以及接口标准的统一化进程向前推进，通过制定出通用的部品部件标准目录与尺寸指南，以此来提升构件所具有的通用性以及互换性。在像节点连接、防水构造这类关键技术领域当中，应当鼓励企业以及科研机构增加在研发投入上的力度，依靠技术攻关的方式来解决那些对建筑质量与安全产生影响的核心问题<sup>[3]</sup>。在技术创新层面，要积极地去推动信息技术以及智能建造在装配式建筑整个过程当中的深度应用，从而达成从设计环节、生产环节一直到施工运维环节的数据能够实现贯通以及信息能够达成共享这样的目标。

##### 4.2 优化全过程项目管理机制

提升装配式建筑项目管理水平，关键是要构建起贯穿设计、生产、施工整个过程的一体化管理机制以及协同工作的平台。需要进一步完善装配式建筑工程项目的综合管理的相关规范，明确预制构件生产运输管理、现场施工管理、项目资料管理等各个环节的具体要求。积极去推行工程总承包模式，借助设计施工一体化管理，有效解决传统模式下设计、生产、施工出现脱节的状况。在实际的操作进程里，能够建立起由项目各参建方一同参与的生产计划协调机制，凭借定期召开的会议以及现场的巡查，及时处理构件供应和施工进度不相匹配的难题。项目管理机制的优化，还得重视精益建造理念和信息化管理工具的有机结合，通过引入准时化生产以及精准化配送的方式，减少现场库存，缩短等待时间。

##### 4.3 加强人才队伍建设

应对专业人才短缺的情况，需构建多元协同的人才培养体系以及技能提升机制，以此给装配式建筑的发展给予充足的人力资源方面的保障。教育部门需要支持高校和职业院校开设与装配式建筑相关的专业，依据行业的实际需求去培养那些具备建筑设计、构件生产以及施工管理等复

合知识的新型人才。与此要充分挖掘高校、企业以及社会机构这三个主体的作用，建立起政校企协同培养的机制，助力院校开设与装配式建筑相关的专业。对于在职人员而言，得积极开展继续教育以及岗位技能培训工作，借助专业认证来提高从业人员的专业水准和技术能力。人才队伍建设在人才培养方面，还需着重关注产业工人转型以及专业技能认证这两个层面，要鼓励建筑装饰企业与院校一同共建实训基地，定向去培养技术人才，推动传统装修工人的技能实现升级。

##### 4.4 促进信息协同与资源共享

存在产业链协同程度不足的困境，需积极推动信息协同平台建设，完善资源共享机制，达成产业链各环节高效衔接。借助信息技术手段，打造涵盖设计、生产、施工全过程的协同工作平台，实现项目参建各方数据共享及业务协同。构建统一的部品部件库与产品编码体系，推动构件标准化、系列化发展，探索建立区域性装配式建筑产业联盟，整合上下游企业资源，形成协同发展优势<sup>[4]</sup>。在资源共享方面，推动区域性构件生产基地合理布局与公共资源平台建设，防止重复投资与资源浪费。鼓励符合条件的企业建立开放共享的构件生产线，满足中小型项目构件需求，提高设备利用率。

#### 5 结语

装配式建筑属于建筑业生产方式方面的重大变革，已然变成推动该行业转型升级以及达成高质量发展目标的关键途径。本文经由对装配式建筑的项目管理内容以及发展所存在问题展开系统分析，从中揭示出其在技术体系层面、项目管理层面、人才队伍层面以及产业链协同层面所面临的一系列挑战，同时也相应地给出了优化的对策。相关研究说明，推进技术标准化以及开展技术创新、对全过程项目管理机制予以优化、强化人才队伍建设并且促使信息协同以及资源共享，这些都属于提升装配式建筑项目管理水平行之有效的途径。伴随智能建造和建筑工业化协同发展程度的持续加深，装配式建筑会依靠自身颇为突出的综合优势，在提高建筑品质、推动绿色发展以及促进行业进步等诸多方面发挥出更为重要的作用。

#### 【参考文献】

- [1]刘译霞.BIM5D 在装配式建筑工程管理中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(16):157-160.
- [2]赖荣东.装配式住宅施工技术与质量管理应用研究[J].江西建材,2022(12):221-222.
- [3]刘铭汉.简析装配式建筑工程项目管理及发展问题[J].散装水泥,2022(4):74-76.
- [4]杨晖.装配式建筑工程项目管理存在的问题及优化策略分析[J].房地产世界,2023(21):73-75.

作者简介：王曦（1983—），男，中国建筑设计研究院有限公司。

## 浅析绿色施工管理在建筑施工中的应用

谢文华

江西江南工程管理咨询有限公司，江西 赣州 341000

[摘要]随着人们环保意识持续增强，建筑行业节能与环保问题近些年愈发受关注。建筑企业为达成可持续发展，也更看重把绿色施工管理理念融入施工全程。这关乎环境保护、资源节约，且能提高施工质量，为建筑行业可持续发展打下坚实根基。文章剖析了它在建筑施工管理应用时碰到的问题，还全面阐述了绿色施工管理在实际施工的具体运用情况。

[关键词]绿色施工管理；建筑施工；技术应用

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17980

中图分类号: TU71

文献标识码: A

## Brief Analysis of Application of Green Construction Management in Building Construction

XIE Wenhua

Jiangxi Jiangnan Engineering Management Consulting Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

**Abstract:** With the continuous enhancement of people's environmental awareness, energy conservation and environmental protection issues in the construction industry have received increasing attention in recent years. In order to achieve sustainable development, construction companies also place greater emphasis on integrating green construction management concepts into the entire construction process. This is related to environmental protection, resource conservation, and can improve construction quality, laying a solid foundation for the sustainable development of the construction industry. The article analyzes the problems encountered in its application in construction management and comprehensively elaborates on the specific application of green construction management in actual construction.

**Keywords:** green construction management; building construction; technology application

### 引言

建筑行业正快速发展，城市化进程也在加快，建筑工程规模变得越来越大，施工活动对资源的消耗以及对环境的影响也越来越明显。在这样的情况之下，绿色施工管理慢慢变成了现代建筑施工管理的关键方向。它能推动建筑可持续发展，还能提升工程质量，降低环境负荷。绿色施工管理看重施工过程中的节能减排、资源高效利用以及环境保护，同时也关注施工组织优化、施工技术创新以及安全文明施工的综合实施效果。在实际施工当中，传统管理模式存在着资源浪费严重、施工污染比较突出、施工安全与环保意识也比较薄弱等问题，这些问题一方面影响了工程的可持续发展，另一方面也阻碍了建筑企业履行社会责任以及提升行业形象。所以，深入分析绿色施工管理在建筑施工中的应用状况、存在的问题以及优化策略，有着很重要的理论价值和实践意义。这篇文章会从施工人员管理、现场管理、技术措施以及制度建设等方面，去探讨绿色施工管理在建筑施工中的具体应用方式，剖析它在提高资源利用效率、降低环境影响、提升施工质量以及保障施工安全等方面的实际成效，并且给出有针对性的改进办法，希望能够给建筑施工企业开展绿色施工管理提供科学依据以及实践指引，推动建筑行业朝着高效、环保以及可持续发展的方向前进。

### 1 在建筑施工中应用绿色建筑施工管理的重要性

在建筑施工环节运用绿色建筑施工管理有着极为重要的意义。其一，它可切实有效地降低施工活动给环境所带来的负面影响；其二，它能够提升工程对于资源的利用效率，同时也促使可持续发展水平得以提高。借助绿色施工管理这一手段，在整个施工过程之中，能够对能源的消耗情况、水资源的使用状况以及建筑材料可能出现的浪费情形予以合理的把控。并且积极去推广那些环保材料以及清洁施工技术，以此来削减施工期间产生的扬尘、噪声以及废弃物排放量，进而对施工现场及其周边的生态环境起到保护的作用。与此绿色施工管理着重于施工组织以及工艺方面的优化事宜，通过科学且合理的安排工序，调配机械设备以及人力资源，进而提高施工的效率，减少资源的浪费以及成本的开支。除此之外，绿色施工理念还驱动着施工单位进一步强化自身在安全文明施工以及环境保护方面的意识，推动企业的管理制度以及操作规范朝着更加完善的方面发展，最终形成一种既注重安全又兼顾环保、节能以及高效的施工管理模式。在当下节能减排以及可持续发展已然成为社会普遍共识的大背景之下，绿色建筑施工管理所呈现出来的重要性不仅仅是在环境效益以及经济效益层面有所体现，更是为提升建筑工程的品质以及履行社会责任给予了稳固有力的保障。

## 2 绿色施工管理在建筑工程中应用存在的问题

### 2.1 环境保护、资源节约意识淡薄

在当下建筑工程施工进程中，绿色施工管理的切实推行依旧碰到不少问题，其中环境保护与资源节约方面的意识较为薄弱的情况格外凸显出来。部分施工单位还有施工人员对于绿色施工的重要意义了解不够充分，常常会把施工进度以及成本控制当作首要追求的目标，然而却对施工进程中所产生的环境方面的影响以及资源利用的效率缺乏应有的关注。在实际的操作环节里，施工现场广泛存在着建筑垃圾随意地堆放着、施工期间产生的扬尘以及噪声污染没有得到有效的控制、像水电这类资源出现较为严重的浪费现象，还有环保材料的使用率偏低等诸多问题<sup>[1]</sup>。与此施工人员普遍缺少系统性的环保相关知识以及节约资源的意识，在施工过程当中的节能减排各项措施执行起来不够严谨，很难把绿色施工的理念真正落实到具体的操作层面当中去。

### 2.2 绿色施工管理机制不完善，缺乏必要监督

建筑工程施工是一项系统化、复杂化、庞大化的工程，在这项工作开展的过程中会牵扯到比较多的内容，管理起来十分复杂。因此在建筑工程中落实绿色施工理念时，如果没有完善的管理机制和管理制度约束，就无法在真正意义上发挥出绿色施工管理理念的重要作用，最终会严重限制建筑工程的绿色发展。在建筑工程施工过程中，如果缺乏科学有效的监督管理机制，建筑工程施工现场就会出现资源和能源浪费的现象。而工程施工过程中产生的一系列废弃物如果得不到有效处理，就会影响整个工程的施工水平。

### 2.3 缺乏相关政策支持

在建筑工程推进绿色施工管理期间，缺政策支持是制约其有效施行的重要问题之一。当下，尽管国家与地方层面相继出台了一些节能减排、绿色施工的指导文件，可在具体操作规范、激励举措、监管制度方面依旧不够完备，致使施工企业在实际执行时缺乏清晰标准和政策指引。针对绿色施工的推广运用，缺少有效财政补贴、税收优惠或奖励机制，让企业在成本效益衡量里常常没法把绿色施工作为优先选项。并且，监管力度有限，相关政策在施工现场执行、监督检查中落实不到位，也使得企业难以形成持续性的绿色施工行为。

## 3 绿色施工管理在建筑工程中应用问题的解决对策

### 3.1 提高工程施工人员和管理人员对绿色施工的认识

在建筑工程当中推动绿色施工管理，最初得从提高施工人员以及管理人员对于绿色施工的认知着手。这不但是确保各项绿色举措能够落实的基础，而且是达成施工可持续发展的重要环节。施工管理者需充分意识到绿色施工既牵涉到节能减排以及环境保护，也直截了当地关联着工程质量、施工效率还有企业社会责任的践行。所以应当把绿

色施工理念融入到项目管理目标、绩效考核以及日常管理体系里，构建起自上而下的推动力量。与此要借助系统化且持续性的培训以及教育，一方面把绿色施工的政策法规、技术标准以及管理方法传授给管理人员，另一方面还要让施工人员了解节能环保操作技能、材料资源高效利用的方法、施工废弃物分类管理、施工现场扬尘与噪声控制以及能源与水资源节约措施等具体的要求。培训的方式应当多种多样，把课堂讲授、现场演示、案例分析、模拟演练以及信息化教学手段相结合起来，提升学习的针对性以及实践性，让人能够在实际施工当中准确运用绿色施工措施<sup>[2]</sup>。并且应当构建起有效的考核与激励机制，把绿色施工理念转变成具体的行为，凭借定期评估、奖惩激励以及责任追溯，推动全员自发参与到绿色施工当中，形成主动发现问题、及时优化施工方法的良性循环。

### 3.2 强化对施工人员的培训

在建筑工程开展绿色施工管理期间，强化针对施工人员的培训属于提升施工质量以及环境管理水平的关键举措，同时也是保证绿色施工措施得以有效施行的重要保障。施工人员于实际操作环节会直接对工程的节能减排成效、资源利用效率以及施工安全产生影响，所以务必要借助系统化且具有很强针对性的培训，全方位提升他们的专业能力以及绿色施工意识。培训内容需包含绿色施工的基本理念、相关政策法规、施工技术规范、资源节约与环境保护措施，还有施工过程中有可能出现的环境风险和安全隐患处理办法，与此同时要结合具体的工序以及施工环节，给出操作技能方面的指导以及案例剖析，让施工人员可以在实际操作中掌握绿色施工的具体操作标准以及应对策略。培训方式应当重视理论与实践相结合，不能仅仅依靠课堂讲解以及教材学习来传授基础知识，而且还要通过现场示范、模拟演练、情景教学以及多媒体互动等途径，提升培训的直观性以及实效性，使得施工人员可以把理论知识转化为实际操作能力。

### 3.3 加强对施工现场的管理力度

在建筑工程推进绿色施工管理期间，强化施工现场管理的力度属于关键环节，它是促使各项绿色施工举措有效施行的重要保障，也是达成施工过程环境保护、资源节约以及质量控制目标的有力支撑。施工现场作为绿色施工理念得以落实的第一线，唯有借助科学、严格且系统的现场管理方式，才能够把节能减排、资源高效利用以及环境保护相关措施切实融入到每一项工序与每一个环节当中。具体来讲，应当从施工计划制定、工序安排部署、人员调度安排、材料管理把控、机械使用规范以及施工废弃物处置等方面全方位地强化现场管理，把绿色施工的要求融入到日常管理流程以及检查标准里。管理者需要构建清晰明确的职责分工体系以及监督机制，以此确保施工班组、劳务队伍以及外协单位能够严格遵循绿色施工规范，与此凭借

现场巡查、实时监控以及定期检查等手段，及时察觉并纠正那些不符合环保以及节能要求的行为<sup>[3]</sup>。施工现场管理还应当充分借助信息化手段，像施工管理平台、物联网监测设备以及数据分析系统等等，达成对施工进度、资源使用状况、能耗情况以及环境指标的动态监控，从而让管理决策变得更加科学、及时且精准。

### 3.4 制定科学合理的绿色施工管理制度

在建筑工程推进绿色施工管理期间，制定科学合理的绿色施工管理制度是保障各项措施规范施行、施工过程处于可控状态以及工程实现可持续发展的关键基础。科学的管理制度要把绿色施工理念同企业管理体系、施工组织设计、操作规范以及绩效考核紧密结合起来，构建起制度化、标准化且具备可执行性的管理框架。具体来讲，制度设计需要覆盖施工的整个过程，像材料采购环节、运输与存放方面、施工工序安排情况、施工机械与能源管理事项、施工废弃物处理工作、扬尘和噪声控制事宜、水资源和能源节约等方面都要涉及，要清晰明确各个环节的操作标准、责任主体以及管理要求。与此应当建立起绿色施工责任体系，把项目管理人员、技术人员、班组长以及作业人员的责任一层层分解开来，保证“谁管理、谁负责”的原则切实落地执行，并且要配套相应的考核与激励机制，把绿色施工执行的情况纳入到绩效评估当中，推动各方积极主动地去落实制度规定。制度还要重视可操作性以及动态调整的能力，借助定期对施工现场实际执行情况以及制度执行效果展开评估的方式，及时对那些不适应或者存在漏洞的条款加以修订，使得制度能够随着施工进程、技术发展以及政策要求不断地得到优化升级。

### 3.5 强化对绿色建筑工程施工的多方支持

在建筑工程推进绿色施工管理期间，强化针对绿色建筑工程施工的多方扶持，乃是保证绿色施工举措切实落实并实现可持续发展的关键保障。多方扶持既涉及施工企业内部的管理与技术方面的支撑，也包含政府政策方面的引导、行业标准层面的规范、社会层面的监督，还有相关科研机构所给予的技术支持等诸多层面。施工企业需要在资金投入、技术运用、管理制度以及人员培训等方面给予充足保障，以此确保绿色施工举措可得到切实执行；从技术层面来讲，可以借助引进先进的环保施工工艺、节能设备以及信息化管理系统，提升施工流程的资源利用效能以及环境保护水准。政府要充分发挥政策引导与激励的作用，去制定并完善有关绿色施工的法规标准，采取提供财政补贴、税收优惠或者项目评优奖励等办法，减轻企业在实施

绿色施工时面临的经济压力，与此同时强化监管与考核工作，促使政策得以真正落地施行。

### 3.6 采取科学的绿色施工工艺技术

在建筑工程中实施绿色施工管理时，采取科学的绿色施工工艺技术是实现节能、减排和资源高效利用的关键措施，也是保障施工质量和环境可持续发展的重要手段。通过合理优化施工工序、施工方法和机械设备的使用，可以在提高施工效率的同时有效降低能源消耗和材料浪费。例如，推广装配式施工、模块化施工和机械化操作，不仅减少了材料切割、搬运和加工过程中的浪费，还能降低施工扬尘和噪声污染<sup>[4]</sup>。同时，应优先使用节能环保型建材，如高性能混凝土、可再生材料和低能耗材料，并结合BIM技术和施工模拟优化施工方案，使施工过程在保证工程质量、结构安全的前提下实现资源利用最大化和能耗最小化。在施工关键环节，如高处作业、模板安装、混凝土浇筑及施工废弃物处理等，应制定科学操作规范，配合先进设备和智能监测系统，实现工艺标准化和流程优化。

## 4 结语

绿色施工管理于建筑施工领域有着颇为重要的应用价值，其可有效减少施工给环境所带来的影响，达成资源的高效利用，与此还能提高施工质量，优化施工组织以及管理水平。通过强化施工人员的绿色意识与技能培训，强化施工现场管理，制定科学合理的管理制度，并且争取多方政策与技术支持，绿色施工管理的各项举措便可得以切实落实，促使施工全过程朝着节能、环保以及可持续的方向去发展。在未来，伴随绿色建筑理念持续深化以及技术手段不断推陈出新，绿色施工管理将会在建筑行业当中发挥出更加重要的作用，为实现建筑施工的高效、安全、环保以及可持续发展给予强有力的保障。

### 【参考文献】

- [1]梁旭登.绿色建筑施工管理在建筑施工管理中的应用研究[J].陶瓷,2020(7):120-122.
- [2]杨世峰,王与义.绿色建筑施工技术在建筑工程中的应用分析[J].陶瓷,2024(5):231-233.
- [3]赵萧涵,庄甲林.绿色建筑施工管理在建筑施工中的应用[J].绿色中国,2025(7):166-168.
- [4]黄丽娜.绿色建筑理念在建筑施工管理中的应用[J].乡镇企业导报,2024(19):246-248.

作者简介：谢文华（1983.2—），毕业院校：国家开放大学，所学专业：土木工程，当前就职单位：江西江南工程管理咨询有限公司，职称级别：工程师。

## 建筑工程质量控制的关键因素与优化措施

王力 李月

陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司，陕西 西安 713700

**[摘要]**提升我国建筑工程质量，这既关乎经济发展速度，又直接影响人民生活质量，所以务必高度重视建筑工程的质量管理。要提高工程质量，需借助科学管理手段，对施工全过程予以有效把控，抓住建筑工程质量管理的关键环节，保证各项管理目标能在预期时间内顺利达成，进而提升公众对建筑质量的满意度。文章着重探讨我国建筑工程质量管理中影响工程质量的关键因素，同时分析可采取的优化措施，达成建筑工程质量的持续提升以及管理水平的全面提升。

**[关键词]**建筑工程；质量控制；关键因素；优化措施

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18013

中图分类号: TU7

文献标识码: A

## Key Factors and Optimization Measures for Quality Control in Construction Engineering

WANG Li, LI Yue

Shaanxi Xixian New Area Jinghe New City Urban Construction Investment Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 713700, China

**Abstract:** Improving the quality of construction projects in China is not only related to the speed of economic development, but also directly affects the quality of people's lives. Therefore, it is necessary to attach great importance to the quality management of construction projects. In order to improve the quality of engineering, it is necessary to use scientific management methods to effectively control the entire construction process, grasp the key links of construction quality management, ensure that various management goals can be achieved smoothly within the expected time, and thereby enhance public satisfaction with building quality. The article focuses on exploring the key factors that affect the quality of construction projects in China, while analyzing the optimization measures that can be taken to achieve sustained improvement in construction project quality and comprehensive enhancement of management level.

**Keywords:** construction engineering; quality control; key factors; optimization measures

### 引言

随着城市化快速推进以及建筑工程规模不断扩大，建筑工程质量问题日益成为行业聚焦点。高质量的建筑工程关乎公共安全、使用功能以及结构耐久性，还直接牵动项目投资经济效益和企业市场信誉。不过在实际施工进程中，因人员素质存在差异、建筑材料性能不够稳定、施工技术运用不当、管理制度有欠缺以及受环境因素影响等诸多缘由，工程质量很难得到充分保障，甚至会出现结构缺陷、安全隐患以及使用功能未达标的状况。所以全面且细致地探究建筑工程质量控制的关键要素及其优化办法，对于提高工程质量水准、确保施工安全以及提升施工效率有着不容小觑的重要意义。本文尝试剖析建筑工程质量控制所涉及的核心要素，像人员素质、建筑材料、施工技术、施工管理以及环境因素等，深入且细致地研讨它们对工程质量产生的影响机制，并且参照实际施工管理情形，给出诸如强化人员培训与管理、严格把关建筑材料质量、优化施工技术方案、完善施工管理制度以及妥善应对环境因素影响等相关优化举措。经由对这些关键要素和优化策略展开系统探究，可为建筑工程管理给予科学依据与实践指引，促使工程质量控制水平得以提升，达成安全、经济、可靠并

且可持续的建筑工程目标。

### 1 建筑工程质量控制的重要性

建筑工程质量控制在建设全过程里有着极为关键的作用，其直接同工程的安全性、耐久性、使用功能还有经济效益紧密相关。高质量的建筑工程不但可满足设计与使用方面的要求，还可延长建筑物的使用寿命，而且能有效压低维修及改造的成本，提升工程投资所获得的经济回报。与此严格的质量控制有利于保障施工的安全，减少安全事故的发生几率，保护施工人员以及使用者的生命财产安全。在市场竞争变得愈发激烈的情形下，工程质量已然成为建筑企业信誉与品牌的重要呈现形式，高质量的工程项目能够提高企业在市场上的竞争力以及在社会中的影响力。随着国家针对建筑工程质量标准以及法规要求的持续提升，工程质量控制不单单是施工管理的技术层面要求，还是法律以及社会责任的一种体现。所以，重视建筑工程质量控制并建立起科学且有效的质量管理体系，对于达成工程目标、保障公共安全以及推动建筑行业可持续发展而言，有着无可取代的重要意义。

### 2 建筑工程质量控制的关键因素

#### 2.1 人员素质

在建筑工程质量控制方面，人员素质属于影响工程质

量的关键要素之一。其中，施工管理人员、技术人员以及一线施工人员的专业技能、经验水平还有责任心，都与施工过程的规范性以及工程质量的稳定性有着直接关联。就管理人员而言，其决策能力、协调能力以及监督水平，会对施工方案的执行成效以及工程进度产生影响；而技术人员的设计理解程度、施工技术掌握情况以及现场指导能力，则会影响到施工操作的准确性以及施工质量；至于一线施工人员，他们的操作技能、责任心以及安全意识，会直接决定每一个施工环节的施工质量。人员的团队协作能力、沟通能力以及遵守规章制度的意识，同样会对工程质量带来较为明显的影响。倘若施工队伍人员素质偏低或者缺少必备的技术经验，那么就有可能出现施工操作不规范、质量标准执行不到位以及施工误差增加等情况，最终对整个建筑工程的整体质量水平造成影响。

## 2.2 建筑材料

在建筑工程质量控制方面，建筑材料的质量会对工程的安全性、耐久性以及使用性能产生直接的影响。材料的物理性能、化学性能还有规格尺寸是否符合设计要求，这将决定建筑构件的承载能力、稳定性和耐久性。劣质或者不符合标准的建筑材料可能会出现结构强度不够、开裂、渗漏、腐蚀等一系列问题，进而对整个工程的使用寿命和安全性造成影响<sup>[1]</sup>。而且不同材料之间的兼容性以及施工适应性同样会对施工过程和工程质量产生影响，比如材料的施工性能、养护要求以及环境适应能力等等，都有可能在施工过程中引发质量问题。

## 2.3 施工技术

在建筑工程的质量控制方面，施工技术算得上是影响工程质量的关键要素之一。施工技术涵盖诸多方面，像施工工艺的选择情况、施工方法的实际应用状况以及操作流程的规范程度等等，而这些都直接左右着施工进程中各个不同环节的施工质量，也关乎着工程成品所具有的可靠性。只有那些合理且科学的施工技术，才能够切实保证结构尺寸方面的准确性、构造细部的精确性以及施工节点的精准性，以此来促使材料性能得以充分地发挥出来，与此同时还能有效减少施工误差以及各种缺陷的出现。反过来说，要是施工技术运用得不恰当，或者操作流程不够规范，那就极有可能致使出现结构发生变形、出现裂缝、存在渗漏现象以及连接部位不够牢固等一系列的质量问题，如此一来便会对建筑工程的安全性以及使用寿命产生不利的影响。

## 2.4 施工管理

施工管理是确保建筑工程质量的重要保障。完善的施工管理制度和科学的管理方法能够对工程建设的各个环节进行有效的组织、协调和控制，保证工程按照预定的计划和质量标准顺利进行。施工管理包括施工进度管理、质量管理、安全管理、成本管理等方面。如果施工管理不善，如施工进度安排不合理，导致赶工期现象发生，就可能会

忽视质量问题；质量管理体系不完善，质量检验不严格，就无法及时发现和纠正质量缺陷；安全管理不到位，发生安全事故也会对工程质量产生负面影响。

## 2.5 环境因素

在建筑工程质量控制方面，环境因素对于施工过程以及工程质量有着颇为重要的影响。施工现场的自然环境条件，像温度、湿度、降雨情况、风力状况以及地质条件等等，都会直接作用于材料性能、施工工艺的适用程度以及施工安全层面。比如说，处于高温或者低温的环境下，可能会使得混凝土浇筑以及养护出现不均匀的情况，进而对结构强度与耐久性造成影响；在多雨或者高湿度的环境当中，有可能引发施工材料吸水而发生膨胀、湿润程度不一，又或者施工设备出现故障等问题，使得质量风险有所增加；地质条件比较复杂亦或是施工场地受到限制，同样可能致使施工操作的难度增大、施工误差有所扩大，最终对整体工程质量产生影响<sup>[2]</sup>。施工环境中存在的噪声、灰尘以及其他一些外部干扰因素，也极有可能给施工人员的操作精度以及施工进度带来影响。

# 3 建筑工程质量控制的优化措施

## 3.1 加强人员培训与管理

在建筑工程质量控制方面，强化人员培训以及管理工作，这可是保证工程能够高质量竣工并且施工过程安全无虞的关键根基所在。其发挥的作用可不只是单纯体现在技能方面的提升这一点上，还和施工组织、管理效率以及质量文化建设都有着紧密关联。借助系统且有层次的培训方式，施工管理人员便能够掌握科学合理的项目管理方法，同时也能够具备编制施工计划以及开展现场调度的能力，进而提升其对于施工进度、成本以及质量所进行的整体把控程度，而且还能有效处理施工进程中有可能会出现的各类突发状况。技术人员经过细致专业的技能培训以及对施工工艺的学习，能够在施工现场精准地给予操作指导，以此来确保施工工序能够契合设计方面的要求以及技术规范的规定，同时还能够察觉到潜在的质量风险并且及时采取相应措施去应对。一线施工人员凭借操作规范、技能实训以及安全教育等方面的努力，不但能够熟练掌握施工工艺，提高操作的精准度以及施工的效率，而且还能强化自身的责任意识以及安全意识，从而使得人为失误出现的概率得以降低。除此之外，构建起科学合理的人员管理制度，把岗位职责、绩效考核以及奖惩机制都明确界定清楚，这对于激发员工自觉遵守操作规程有着积极作用，进而促使形成全员共同参与的质量管理良好氛围。

## 3.2 严格把控建筑材料质量

在建筑工程质量控制方面，对建筑材料质量予以严格把控，这可是保障工程具备安全性、耐久性以及良好使用性能的重要环节。建筑材料乃是构成建筑物的根基所在，它的物理性能、化学性能、规格尺寸以及加工质量这些方

面，会直接对结构承载能力、耐久性还有施工工序能否顺利推进产生影响。要是使用了劣质或者不符合标准的材料，那可就容易出现结构强度不够、出现开裂情况、发生渗漏问题亦或是耐久性有所下降等状况，如此一来便会影响到整个工程的整体质量以及使用寿命。严格把控材料质量，这不单单涉及到材料采购环节里的供应商资质审核以及入场检测这两项工作，而且还涵盖了施工过程中材料验收、存储、运输以及使用等各个环节的全程监管，以此来保证材料在各个阶段都能够维持其性能并且符合相应的标准<sup>[3]</sup>。不同材料之间相互间的兼容性、施工时的适应性以及对环境的适应能力这些因素同样需要充分去考量，避免在施工或者后期使用期间出现性能失衡或者施工存在困难的情况。

### 3.3 优化施工技术方案

在建筑工程质量控制方面，优化施工技术方案属于极为重要的一种手段，它对于确保工程质量、提升施工效率以及降低风险均有着不容忽视的作用。施工技术方案涵盖诸多环节，像施工工艺的选择、施工方法的设计、施工顺序的安排以及施工过程的控制等等，其科学性与合理性会直接对工程的施工质量以及整体成效产生影响。借助优化施工技术方案这一方式，依据工程所呈现出的特点、材料具备的性能、施工所处的环境以及施工所面临的难度等情况，去制定出最为契合实际需求的施工方法以及工序安排，进而达成对结构尺寸精度予以保障、让构造细部质量得以保证并且确保施工节点可靠性的目的。与此优化方案还能够在很大程度上对各施工环节加以有效协调，以此来削减施工误差以及返工率，促使施工效率得以提高，并且降低资源出现浪费的情况以及施工成本。在处于复杂环境或者针对特殊结构展开施工的时候，优化技术方案还能有效应对可能出现的外部条件方面的变化以及施工风险，从而实现让施工过程处于安全且可控的状态。

### 3.4 完善施工管理制度

在建筑工程质量控制方面，完善施工管理制度乃是提升工程整体质量、保障施工安全以及达成高效运作的关键环节。施工管理制度包含项目组织架构、岗位职责分工、施工流程规范、质量检查与验收标准、施工记录管理还有奖惩考核机制等诸多方面，其科学性以及规范性会直接影响施工过程的有序开展以及工程质量的稳定情况。完善的管理制度可明确各级管理人员以及施工人员的职责权限，保证施工环节严格依照设计要求和施工规范来执行，降低人为失误以及管理漏洞出现的可能性；并且，借助制度化的质量检查和验收流程，能够及时察觉施工过程中存在的问题并采取纠正举措，保障施工质量的可控性以及可追溯性。健全的施工管理制度可协调施工计划、资源调配以及施工进度，实现施工过程的高效运行，还能够凭借奖惩机制激励员工严格遵循操作规程和质量标准，营造出全员参与的质量管理氛围。

### 3.5 合理应对环境因素影响

在建筑工程的质量控制环节当中，对环境因素的影响做出合理的应对举措，这无疑是保障工程施工能够顺利推进并且确保工程质量保持稳定的极为关键的一项措施。施工现场所处的自然环境条件，像温度状况、湿度情况、降雨情形、风力大小以及地质方面的条件等等，均会对施工材料所具备的性能、施工工艺与之相适应的程度以及施工过程中的安全性等方面产生直接的作用影响。就好比说，混凝土在处于高温或者低温这样的条件之下进行浇筑以及养护操作的时候，要是处理不当的话，那么很可能会致使结构强度出现不足的情况，或者是引发裂缝的产生。在高湿或者多雨的这种环境状况下，就有可能会致使材料发生吸水而膨胀的现象，进而使得施工工序出现延误的状况，又或者会导致施工设备出现故障问题<sup>[4]</sup>。倘若地质条件比较复杂，亦或是施工场地受到限制，那么这种情况往往会产生增加施工的难度，使得施工误差有所增大，同时安全风险也会随之升高。所以，要合理地去应对环境因素所带来的影响，一方面在施工方案进行设计的阶段就需要充分地将施工环境的具体条件考量进去，通过调整工艺以及施工顺序的方式来适应环境所发生的各种变化；另一方面在施工实施的过程之中，还得采取科学且有效的监测手段、调控办法以及保护举措，以此来确保施工操作能够保持稳定的态势，并且让材料所具备的性能得以充分发挥出来。

## 4 结语

建筑工程的质量控制涉及到工程的安全性、耐久性以及使用功能等方面，其中的关键因素包含了人员素质、建筑材料、施工技术、施工管理以及环境因素等。通过强化人员培训工作、严格对材料质量加以把控、对施工技术予以优化、完善管理制度并且合理地去应对环境影响等一系列举措，能够有效地提升工程质量，减少施工风险，确保工程能够依照设计要求顺利地完成，进而推动建筑工程实现高质量以及可持续的发展态势。

### 【参考文献】

- [1]段诗哲.建筑工程质量控制的关键因素与优化措施[J].中华建设,2025(6):52-54.
- [2]程宁.建筑工程管理中质量安全控制的关键因素分析[C].中国智慧工程研究会.2024 新技术与新方法学术研讨会论文集:德清县恒达建设发展有限公司,2024.
- [3]朱德斌.建筑工程质量控制的关键因素与实践策略[J].中国品牌与防伪,2025(1):202-204.
- [4]刘艳.建筑工程质量控制与管理 [J].散装水泥,2023(4):42-44.

作者简介：王力（1989.4—），毕业院校：西安建筑科技大学华清学院，所学专业：工程管理，当前就职单位：陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司，职称级别：工程师。

## 建设工程技术管理与节能减排实施策略

朱统霖

江西嵩辉建设工程有限公司，江西 赣州 341000

**[摘要]**建设工程技术管理以及节能减排实施策略在当下建设行业的发展进程中占据着极为关键的地位，这既关乎工程质量的提高，还对环境保护以及资源的可持续利用有着不容忽视的影响。文中先对建设工程技术管理的定义、目标还有主要内容加以概述，接着深入剖析技术管理的实施途径，像技术标准与规范体系建设、施工组织设计与技术方案管理、技术交底与过程控制等等方面都要涉及。之后，进一步探究节能减排在建设工程里的政策背景、所具有的意义、设定的目标以及遵循的基本原则，同时给出了一些具体的实施策略，比如节能材料与设备的选用、能源的管理与优化利用、废弃物的减排与资源的循环利用、技术方面的创新与工艺的改进等。

**[关键词]**建设工程；技术管理；节能减排；实施策略；可持续发展

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17998

中图分类号：TU712

文献标识码：A

## Construction Engineering Technology Management and Energy-saving and Emission Reduction Implementation Strategies

ZHU Tonglin

Jiangxi Songhui Construction Engineering Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

**Abstract:** Construction engineering technology management and energy-saving and emission reduction implementation strategies play a crucial role in the current development process of the construction industry. This not only concerns the improvement of engineering quality, but also has an undeniable impact on environmental protection and sustainable utilization of resources. The article first provides an overview of the definition, objectives, and main content of construction engineering technology management, and then delves into the implementation methods of technology management, such as the construction of technical standards and specification systems, construction organization design and technical scheme management, technical disclosure and process control, etc. Afterwards, further exploration was conducted on the policy background, significance, set goals, and basic principles of energy-saving and emission reduction in construction projects. At the same time, some specific implementation strategies were provided, such as the selection of energy-saving materials and equipment, energy management and optimization utilization, waste reduction and resource recycling, technological innovation and process improvement, etc.

**Keywords:** construction project; technical management; energy-saving and emission reduction; implementation strategy; sustainable development

建设行业作为国民经济发展的基础产业，在社会发展中占有重要的地位。但建设行业的发展也造成了能源消耗以及对生态环境的影响，这就要求建设行业加强建设工程技术管理，同时促进节能减排理念融入相关具体工作中，以实现资源利用高效循环、节能措施综合高效，达到环境与科技的和谐统一。

### 1 建设工程技术管理概述

#### 1.1 技术管理的定义与目标

技术管理的定义能够被理解成对工程建设里技术要素展开的全方位管理，这其中囊括了技术标准的制定工作、技术方案的优化事宜以及技术过程的监控方面。它的主要目的就在于借助规范化的管理举措，促使工程的技术水平得以提升，尽力削减资源方面的浪费情况，并且切实保障工程的安全状况以及工程质量。具体来讲，技术管理着重于达成工程进度的合理安排状况、成本的合理把控情形以

及技术的持续创新状态，进而充分满足社会对于高质量建设工程所提出的种种需求。与此技术管理还竭力推动行业技术向前发展，通过引入先进的技术以及相应的方法，提高整体的竞争力水平，并且为长期的发展筑牢根基。

#### 1.2 技术管理的主要内容

技术管理所涵盖的主要内容包含了技术标准的建立以及其后续执行情况、施工组织设计的编制流程与实际实施状况、技术交底的具体开展情形与相应监督举措，还有对过程控制予以强化以及展开评估的相关事宜。技术标准以及规范体系方面的建设属于技术管理当中的基础部分，其能够保证工程活动始终是有章可循的，如此一来便降低了随意性出现的可能性，同时也让错误率得以减少。接着，施工组织设计和技术方案管理牵涉到工程从整体层面的规划一直到具体细节方面的安排，这其中就涵盖了对施工方法做出合理选择、对资源配置加以优化处理，另外还有

制定相应的风险预防措施等内容。技术交底以及过程控制着重在于工程实施期间，借助及时有效的沟通以及持续不断的监控手段，以此来确保技术要求能够切实得到落实，并且能够让相关问题得以迅速妥善地解决。

## 2 建设工程技术管理的实施路径

### 2.1 技术标准与规范体系建设

技术标准与规范体系建设属于技术管理实施环节中的第一步，它是通过制定统一的技术准则以及操作规范，以此来给工程活动给予清晰的指导。这一套体系应当涵盖对国家标准、行业标准还有企业标准加以整合，务必要保证从设计一直到施工的所有环节都能够有依据可循<sup>[1]</sup>。就好比在材料选用以及施工工艺这块，标准体系可以明确地规定性能指标以及安全要求，如此一来便能降低出现质量隐患的风险。与此规范体系建设还得重视更新与完善事宜，伴随技术不断取得进展以及法规发生改变，要及时对标准内容做出修订，进而维持其适用性以及先进性。

### 2.2 施工组织设计与技术方案管理

施工组织设计以及技术方案管理，其涉及到工程的实际规划与具体执行事宜，其中的关键点就在于借助科学合理的设计方式，对资源配置以及施工流程加以优化。施工组织设计应当涵盖工程进度方面的安排情况、劳动力的分配状况、设备的调度安排还有现场的布局安排等诸多方面，以此来保证各项相关工作能够有条不紊地推进开展。而技术方案管理，则把重点放在具体技术方法的选择以及实施操作上，就好比在较为复杂的工程当中，去采用模块化的施工方式或者预制构件技术，从而实现提升工作效率并且降低资源浪费的目的。在管理实施的过程中，还得着重关注方案是否具备可行性以及经济性，通过对各种方案展开评估以及相互比选，进而确定出最为优质的方案，并且要结合实际所处的情况来进行动态化的调整操作。

### 2.3 技术交底与过程控制

技术交底以及过程控制属于技术管理得以实施的极为关键的环节，其主要目的在于借助信息的传递以及实时的监控手段，切实保证技术要求能够得以准确地执行。技术交底应当在工程正式启动之前便着手开展，要将设计方面的意图、相关的技术标准以及需要注意的各项事项都清晰明确地传达给从事施工的人员，以此来尽力削减可能出现的误解以及错误情况。而过程控制则是贯穿于整个工程始终的，它涵盖了质量方面的检查工作、对进度的跟踪情况以及针对风险所展开的防控举措等，依靠定期实施的评估以及反馈机制，可以及时地对出现的偏差予以纠正。就好比在施工的具体过程当中，运用数字化的工具去开展数据的采集以及后续的分析工作，如此一来便能够让控制工作的精确性以及效率都得到一定程度的提升。

## 3 建设工程中节能减排的意义与要求

### 3.1 节能减排对工程建设的意义

在经济层面来讲，借助节能技术以及相关材料的应用，

工程在长期运营过程中所耗费的能源呈现出明显下降的态势，如此一来，便使得投资回报率得以提升。从环境的角度去看，采取减排方面的举措，是能够有效地对温室气体以及各类污染物的排放加以控制的，进而能够在一定程度上缓解气候变化以及生态退化的状况。就社会意义而言，节能减排对于提升工程的社会形象以及提高公众对其的接受程度都是很有帮助的，同时也有助于推动绿色消费理念以及可持续发展观念的广泛普及。事实上，在工程建设当中融入节能减排的相关内容，已然成为衡量一个企业或者工程项目在行业里竞争力的重要标志之一，并且也为未来城市的发展打下了坚实的基础。

### 3.2 节能减排的主要目标

节能减排所着重追求的主要目标涵盖了多个方面，其一是要把单位工程的能耗降下来，其二是要让资源的循环利用率得以提高，其三则是要尽力减少废弃物所产生的量。而这些目标倘若要想达成，那就得依靠具体的量化指标以及切实可行的相关措施才行。就比如说，在能源消耗这个层面上来讲，目标很可能会被设定成要在某个基准年的情况下，把能耗强度降低百分之十到二十这样的幅度；在资源利用这方面，目标或许就会涉及到去建设垃圾回收率能够达到一定的比例等情况<sup>[2]</sup>。并且这些目标一方面是有政策方面的相关要求作为依据的，另一方面也是根据工程实际的具体需求来确定的，如此一来便能够保证其具备可操作性以及实实在在的效果。与此目标在设定的时候还得把短期跟长期的平衡给兼顾到，通过采取分阶段的方式来加以实施，从而一步步地提升节能减排的水平，并且还能为工程在整个生命周期当中的管理工作指出明确的方向。

### 3.3 实施节能减排的基本原则

实施节能减排所秉持的基本原则涵盖了整体性、经济性以及可持续性这几个方面，而这些原则对于具体策略的制定以及后续的执行有着重要的指导意义。其中，整体性原则着重指出，节能减排这一理念应当贯穿于工程从规划到设计、再到施工直至运营的各个不同阶段，进而形成一个完整的全流程管理模式。经济性原则则提出，所采取的各项措施的成本需要和其产生的效益相互匹配起来，切忌出现过度投资的情况，以免造成资源的无谓浪费。可持续性原则更是把关注点放在了生态平衡以及社会公平之上，务必要确保节能减排的相关行动不会对未来的各种需求产生损害。除此之外，这些原则还涉及到将技术创新和制度保障加以结合这一点，借助于研发活动以及政策层面的支持，有力地推动节能减排举措得以进一步深入且有效地实施下去。

## 4 建设工程节能减排实施策略

建设工程项目在实施节能减排相关策略的时候，得从多个不同维度去着手，要把节能减排的理念实实在在地落实到行动当中。具体来讲，这涉及到诸多方面，像是对节能材料以及设备加以选用，针对能源展开管理并且要努力去优化其利用方式，还要注重废弃物的减排工作以及资源

的循环利用事宜，技术创新以及工艺方面的改进也是极为重要的。这些策略实施的目的在于借助技术层面以及管理层面的创新举措，达成节能减排的预定目标，与此促使整个工程的整体性能得以进一步提升。

#### 4.1 节能材料与设备选用

节能材料与设备选用算得上是节能减排的一项基础策略，其中最为关键之处就在于要去挑选那些高效且环保的材料以及设备，如此一来便能够使得能源消耗得以降低，进而减小对环境所造成的影响。比如说，要是采用那种保温性能特别出色的建设外墙材料，那么就能让采暖以及制冷方面的能耗有所减少；倘若使用的是高效率的照明还有空调系统，那便可以直接促使运行成本降下来。在进行选用操作的过程中，务必要全面且细致地去考量材料的生命周期评估情况以及设备的能效标准状况，以此来保证其在整个使用阶段都能够具备节能的优势。与此这一策略还牵涉到供应链管理方面的事情，借助于优先去采购经过绿色认证的产品，进而推动市场朝着可持续发展的方向实现转型。如此这般，既能让工程的技术水平得到提升，又能为整个行业树立起良好的示范效应。

#### 4.2 能源管理与优化利用

能源管理与优化利用策略着重于借助系统化的办法来提升能源使用的效率，同时把不必要的浪费给削减掉。此策略涵盖能源审计、监控系统的构建以及智能控制技术的应用等层面。就好比在工程现场去安装实时能耗监测设备，如此一来便能够实时察觉到异常情况并且对运行模式做出相应调整<sup>[3]</sup>。优化利用还牵涉到能源梯级利用以及可再生能源集成等方面，比如依靠太阳能光伏系统来为工程给予部分电力供应，进而减少对传统能源的依靠程度。从管理的角度来讲，需要制定出详尽的能源计划以及行为规范，凭借培训以及教育的方式，促使人员的节能意识得以提升。通过这样的一种策略，工程不但能够使运营成本得以降低，而且还可以让碳足迹大幅减少，以此来支撑起长期的可持续发展进程。

#### 4.3 废弃物减排与资源循环

废弃物减排以及资源循环方面的策略，其主要意图在于借助削减废弃物的产生量并且提升回收再利用的效率，以此来把工程给环境所带来的负面作用尽可能地减小到最低限度。这一策略涵盖着废弃物的分类工作、回收系统的构建事宜，还有循环利用技术的广泛推行等内容。比如说，在开展施工活动的过程当中，针对建设垃圾要实施分类处置的操作，要把其中那些能够回收利用的材料，像是金属以及混凝土等，转而应用于其他的工程项目当中。在减排措施上，还牵涉到在设计阶段去加以优化的相关事宜，通过采用模块化的形式以及预制化的方式，来促使现场产生的数量得以减少。资源循环着重于强调一种闭环式的管理模式，也就是要把废弃物转变成为可以再度利用的资源，

举例来讲，可以凭借废弃建材来开展再生骨料的生产工作。在落实这一策略的时候，务必要综合考量当地的资源实际状况以及相关法规方面的要求，以此来保证其具备经济上的可行性以及能够取得环境方面的良好效益，进而达成废物的最小化以及资源的最大化利用这样一个目标。

#### 4.4 技术创新与工艺改进

技术创新以及工艺改进策略乃是推动节能减排的关键驱动力量。它借助研发并且应用新技术的方式，一方面提升工程的效率，另一方面降低对环境所产生的影响。就好比说，引入建设信息模型技术，在设计阶段能够对能源布局以及材料使用加以优化，如此一来便能在后续环节有效减少修改情况以及资源浪费现象的发生。改进施工工艺，像是采用干式施工的方法，那么就可以使工期得以缩短，并且让能耗也有所降低。技术创新还涉及到跨领域的合作事宜，比如与科研机构携手合作去开发新型的节能材料或者智能管理系统<sup>[4]</sup>。而工艺改进则把重点放在实践当中的持续优化方面，凭借反馈机制以及实验验证等手段，一步步地提升技术的适用程度。这样的一种策略，不但解决了当下工程所面临的诸多挑战，而且还为行业的长远发展准备了相应的技术储备，切实彰显出创新在节能减排当中所起到的极为关键的作用。

### 5 结语

关于建设工程技术管理以及节能减排实施策略展开的研究显示，技术管理给工程质量还有效率给予了基础性的保障，而节能减排无疑是对环境方面所面临挑战的一种必不可少的应对方式。通过对技术管理的定义、实施路径加以分析，同时对节能减排的意义与策略进行剖析，本文着重指出了二者在工程建设当中所发挥出来的协同作用。在未来的发展进程中，相关行业应当进一步对技术标准予以强化，积极推动创新举措，促使节能减排的各项措施切实落地，并且要将政策支持和市场机制结合起来，以此来达成可持续发展的目标。

#### 【参考文献】

- [1] 勾海年.“双碳”目标下电力工程技术管理降低碳排放的探讨[C].广西:广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第三届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会论文集.国网金昌供电公司,2025.
- [2] 王凤.欠发达地区城乡建设领域碳排放测算及碳减排策略研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2024.
- [3] 王伟.建设工程技术管理及节能减排实施策略探究[J].绿色中国,2025(1):157-159.
- [4] 王尤强.建筑工程技术管理及节能减排实施策略[J].新城建科技,2023,32(23):31-33.

作者简介：朱统霖（1997.4—），毕业院校：江西理工大学，所学专业：土木工程，当前就职单位：江西嵩辉建设工程有限公司。

## 市政工程道路中排水管道的施工技术要点探析

武 鑫

太原市政建设集团有限公司，山西 太原 030000

**[摘要]**市政道路排水管道工程作为城市基础设施的重要组成部分，直接关系到城市的正常运转、居民的生活质量以及道路的使用寿命。其施工质量不仅影响排水系统的功能发挥，还可能引发道路沉降、积水内涝等一系列问题。文中围绕市政工程道路中排水管道的施工技术展开研究，从施工前的准备工作入手，详细分析了测量放线、沟槽开挖、管道安装、接口处理、沟槽回填以及闭水试验等关键施工环节的技术要点，同时探讨了施工过程中的质量控制与管理措施，旨在为提升市政道路排水管道工程施工质量提供理论参考与实践指导。

**[关键词]**市政工程；道路排水管道；施工技术；质量控制

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18005

中图分类号：TU99

文献标识码：A

## Analysis of Construction Technical Points for Drainage Pipelines in Municipal Engineering Roads

WU Xin

Taiyuan Municipal Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

**Abstract:** Municipal road drainage pipeline engineering, as an important component of urban infrastructure, directly affects the normal operation of the city, the quality of life of residents, and the service life of roads. The construction quality not only affects the functionality of the drainage system, but may also cause a series of problems such as road settlement and waterlogging. The article focuses on the construction technology of drainage pipelines in municipal engineering roads. Starting from the preparation work before construction, it analyzes in detail the technical points of key construction links such as measurement and laying out, trench excavation, pipeline installation, interface treatment, trench backfilling, and closed water testing. At the same time, it explores the quality control and management measures during the construction process, aiming to provide theoretical reference and practical guidance for improving the construction quality of municipal road drainage pipeline engineering.

**Keywords:** municipal engineering; road drainage pipeline; construction technology; quality control

### 引言

随着我国城市化进程的不断加快，城市人口与机动车数量持续增长，对市政道路的通行能力和承载能力提出了更高要求，同时也对道路排水系统的可靠性和高效性寄予厚望。市政道路排水管道承担着收集和排除道路路面雨水、生活污水以及工业废水的重要职责，是保障城市防洪排涝、改善城市水环境的关键设施。然而，在实际施工过程中，由于受到地质条件复杂、施工环境恶劣、技术水平不足以及管理不到位等因素的影响，排水管道工程常常出现管道渗漏、接口破裂、沟槽坍塌、道路沉降等质量问题，不仅增加了工程的维修成本，还对城市交通和居民生活造成了严重困扰。因此，深入研究市政道路排水管道的施工技术要点，加强施工全过程的质量控制，具有重要的现实意义。

### 1 施工前准备工作

施工前的准备工作是确保排水管道工程顺利开展、保证施工质量的基础，主要包括技术准备、物资准备、现场准备以及人员准备四个方面。

#### 1.1 技术准备

技术准备是施工前准备工作的核心，直接影响施工方

案的合理性和施工技术的可行性。首先，施工单位应组织技术人员深入学习设计图纸，熟悉设计意图、管道走向、管径大小、坡度要求、接口形式以及检查井的位置和数量等关键信息，并与设计单位、监理单位共同进行图纸会审，及时发现并解决图纸中存在的问题，如管道与其他地下管线的冲突、设计坡度不符合实际地形等。其次，根据工程实际情况编制详细的施工组织设计，明确施工流程、施工方法、技术参数、质量标准以及安全保障措施，合理安排施工人员、机械设备和材料的使用计划，确保施工过程有序进行。

#### 1.2 物资准备

物资准备主要包括排水管道、管件、防水材料、砂石料、水泥等材料的采购与检验，以及挖掘机、起重机、压路机、管道铺设机等机械设备的调配与检修。在材料采购过程中，应选择具有相应资质和良好信誉的供应商，严格按照设计要求和质量标准采购材料，并对采购的材料进行抽样检验，确保材料的质量符合要求，如管道的外观应无裂缝、凹陷、变形等缺陷，管径、壁厚应符合设计规定，防水材料的性能应达到相关标准。对于机械设备，应提前

进行调配，确保设备的数量和性能满足施工需求，并在施工前对设备进行全面检修和调试，消除设备故障隐患，保证设备正常运行。

### 1.3 现场准备

现场准备主要包括施工现场的清理、平整、临时设施的搭建以及施工用水、用电、排水系统的布置。首先，应清除施工现场内的障碍物，如树木、杂草、建筑物废墟等，对施工现场进行平整，为后续的施工创造良好条件。其次，搭建临时办公用房、宿舍、材料仓库、机械设备停放场地等临时设施，并确保临时设施的安全、卫生和环保。同时，合理布置施工用水、用电系统，安装临时供水管道和供电线路，确保施工用水、用电的稳定供应；设置临时排水系统，及时排除施工现场的雨水和积水，防止施工现场积水影响施工进度和质量。

### 1.4 人员准备

人员准备主要包括施工管理人员、技术人员、操作人员的配备与培训。施工单位应根据工程规模和施工要求，配备足够数量的具有相应资质和丰富经验的施工管理人员，如项目经理、施工员、质检员、安全员等，负责施工现场的组织、协调、管理和监督工作。同时，配备专业的技术人员，负责施工技术指导、技术交底和技术难题的解决。对于操作人员，应选择经过专业培训、具有相应技能证书和实践经验的人员，并在施工前对其进行岗前培训，使其熟悉施工流程、施工方法、技术要求和安全操作规程，提高操作人员的技术水平和安全意识，确保施工过程的质量和安全。

## 2 关键施工环节技术要点

### 2.1 测量放线

测量放线是排水管道施工的首要环节，其精度直接影响管道的位置、坡度和高程，进而影响排水系统的功能发挥。在测量放线前，应根据设计图纸和现场勘察资料，建立施工测量控制网，设置永久性水准点和平面控制点，并对测量仪器进行校验和标定，确保测量仪器的精度符合要求。测量放线时，首先应根据设计图纸确定管道的中心线和检查井的位置，并用白灰或木桩在地面上标出管道中心线和检查井的轮廓线。然后，按照设计坡度计算出各检查井的高程和管道的管底高程，并使用水准仪和经纬仪进行测量放线，在沟槽两侧的边坡上设置高程控制桩，标注出管底高程和沟槽开挖深度，作为沟槽开挖和管道安装的依据。在测量放线过程中，应多次进行复核测量，确保测量数据的准确性，避免因测量误差导致管道位置偏移、坡度不符等问题。

### 2.2 沟槽开挖

沟槽开挖是排水管道施工中的关键环节之一，其质量直接影响沟槽的稳定性和后续管道安装的质量。在沟槽开挖前，应根据施工现场的地质条件、管道埋深、管径大小

以及周边环境等因素，确定沟槽的开挖形式、开挖深度、边坡坡度和支护方式。对于地质条件较好、地下水位较低、管道埋深较浅的情况，可采用放坡开挖的方式；对于地质条件较差、地下水位较高、管道埋深较深或周边有建筑物、地下管线等障碍物的情况，应采用支护开挖的方式，如钢板桩支护、排桩支护、地下连续墙支护等，以确保沟槽的稳定，防止沟槽坍塌。

在沟槽开挖过程中，应严格按照测量放线确定的开挖深度和边坡坡度进行开挖，避免超挖或欠挖。当沟槽开挖至设计高程以上 20~30cm 时，应停止机械开挖，改用人工开挖至设计高程，以防止机械开挖对沟槽底部土壤造成扰动，影响管道基础的稳定性。同时，应及时清除沟槽内的积水和淤泥，保持沟槽底部干燥、平整。对于沟槽底部土壤承载力不足的情况，应根据设计要求采取换填、夯实、加固等处理措施，提高土壤承载力，确保管道基础符合设计要求。此外，在沟槽开挖过程中，应加强对周边环境的监测，如监测周边建筑物的沉降、地下管线的位移等，一旦发现异常情况，应及时采取措施进行处理，防止事故发生。

### 2.3 管道安装

管道安装是排水管道施工的核心环节，其安装质量直接决定了排水管道的使用寿命和排水效果。在管道安装前，应再次对管道的外观质量进行检查，确保管道无裂缝、凹陷、变形等缺陷，管径、壁厚符合设计要求，并对管道进行清洗和消毒处理，去除管道内的杂物和污垢。同时，应检查沟槽底部的高程和平整度，确保沟槽底部符合管道安装要求。

管道安装时，应根据管道的材质和接口形式选择合适的安装方法。目前，市政道路排水管道常用的材质有混凝土管、钢筋混凝土管、塑料管（如 UPVC 管、HDPE 管）等，常用的接口形式有刚性接口（如水泥砂浆抹带接口、钢丝网水泥砂浆抹带接口）和柔性接口（如橡胶圈接口、法兰接口）等。对于混凝土管和钢筋混凝土管，若采用刚性接口，在安装过程中应确保管道轴线对齐、管口平整，涂抹的水泥砂浆应饱满、均匀，钢丝网应固定牢固；若采用柔性接口，应选择质量合格的橡胶圈，并确保橡胶圈的安装位置正确、密封良好。对于塑料管，由于其重量轻、强度高、耐腐蚀等特点，通常采用橡胶圈接口或热熔连接、电熔连接等方式进行安装。在安装过程中，应严格按照操作规程进行操作，确保管道连接牢固、密封严密，避免出现渗漏现象。

### 2.4 接口处理

接口处理是确保排水管道密封性能的关键，若接口处理不当，极易导致管道渗漏，影响排水系统的正常运行。不同材质和接口形式的管道，其接口处理方法也有所不同。

对于刚性接口的混凝土管和钢筋混凝土管，接口处理主要包括水泥砂浆抹带和钢丝网水泥砂浆抹带两种方式。

在进行水泥砂浆抹带接口处理时，首先应将管口表面凿毛，清除管口表面的杂物和灰尘，然后涂抹一层水泥浆作为结合层，再用水泥砂浆分层进行抹带，抹带的厚度和宽度应符合设计要求，抹带完成后应及时进行养护，养护时间不少于 7d，以确保抹带的强度和耐久性。对于钢丝网水泥砂浆抹带接口，除了按照上述水泥砂浆抹带的步骤进行操作外，还应在抹带中间铺设一层钢丝网，钢丝网的宽度和间距应符合设计要求，钢丝网应与管道壁固定牢固，防止在抹带过程中钢丝网移位。

## 2.5 沟槽回填

沟槽回填是排水管道施工的最后环节之一，其质量直接影响道路的承载能力和稳定性，若回填不当，极易导致道路沉降、开裂等问题。在沟槽回填前，应先对沟槽底部和管道进行检查，确保管道安装牢固、接口密封严密，沟槽内无积水、淤泥和杂物。同时，应根据设计要求和土壤性质选择合适的回填材料，回填材料应具有良好的透水性、压实性和稳定性，常用的回填材料有砂石料、素土、灰土等。

沟槽回填应分层进行，分层厚度应根据回填材料的性质和压实机械的性能确定，一般情况下，人工夯实的分层厚度不大于 20cm，机械夯实的分层厚度不大于 30cm。在回填过程中，应从沟槽两侧对称进行回填，避免单侧回填导致管道移位或损坏。对于管道两侧和管顶以上 50cm 范围内的回填材料，应采用人工夯实或轻型压实机械进行压实，不得采用重型压实机械直接压实管道，以免损坏管道。管顶以上 50cm 范围以外的回填材料，可采用重型压实机械进行压实，压实度应符合设计要求，一般情况下，道路基层以下的回填压实度不小于 95%，路基以下的回填压实度不小于 90%。

## 2.6 闭水试验

闭水试验是检验排水管道严密性的重要手段，通过闭水试验可以及时发现管道接口和管道本身的渗漏问题，确保排水管道的使用功能。闭水试验应在管道安装完成、接口处理完毕且沟槽回填至管顶以上 50cm 后进行，对于管径较大或埋深较深的管道，也可在沟槽回填前进行闭水试验，但应采取相应的防护措施，防止管道在试验过程中受到损坏。

在进行闭水试验前，应先将管道内的杂物清理干净，关闭管道两端的阀门，在管道上游端设置封堵装置，如砖砌封堵或橡胶气囊封堵，并在封堵装置外侧设置支撑，防止封堵装置在水压作用下移位或损坏。然后，向管道内注水，注水高度应符合设计要求，一般情况下，注水高度应为管道内顶以上 2m，若管道埋深较浅，注水高度也可至地面高度。注水过程中，应缓慢注水，避免水流过快导致管道内产生气泡，影响试验结果。

注水完成后，应静置 24 小时，使管道充分浸泡，然后观察管道接口和管道本身是否有渗漏现象，并记录渗漏量。若在规定时间内，管道无明显渗漏，且渗漏量符合设

计要求和相关规范规定，则闭水试验合格；若发现管道有渗漏现象，应及时查找渗漏原因，并采取相应的修补措施，修补完成后重新进行闭水试验，直至试验合格。

## 3 施工质量控制与管理措施

### 3.1 建立健全质量控制体系

施工单位应建立健全完善的质量控制体系，明确各部门和各岗位的质量职责，制定严格的质量管理制度和操作规程，将质量控制贯穿于施工全过程。同时，应加强对施工人员的质量教育和培训，提高施工人员的质量意识和责任心，确保施工人员严格按照设计要求和质量标准进行施工。此外，还应配备专业的质量检验人员，加强对施工过程的质量检验和监督，及时发现并解决施工中存在的质量问题，确保工程质量符合要求。

### 3.2 加强原材料和构配件的质量控制

原材料和构配件的质量是保证工程质量的基础，施工单位应加强对原材料和构配件的采购、检验、储存和使用等环节的质量控制。在采购过程中，应选择具有相应资质和良好信誉的供应商，严格按照设计要求和质量标准签订采购合同，并在合同中明确质量要求和验收标准。在原材料和构配件进场时，应进行严格的检验验收，核对产品的质量证明文件、规格型号、数量等信息，并进行抽样检验，确保原材料和构配件的质量符合要求。对于不合格的原材料和构配件，应坚决予以退货，不得用于工程施工。同时，应加强对原材料和构配件的储存管理，采取相应的防潮、防晒、防腐等措施，防止原材料和构配件在储存过程中受到损坏或变质。

### 3.3 强化施工过程的质量控制

施工过程的质量控制是确保工程质量的关键，施工单位应加强对施工过程中各个环节的质量控制，制定详细的质量控制计划和检查制度，明确质量控制的重点和难点。在测量放线环节，应多次进行复核测量，确保测量数据的准确性；在沟槽开挖环节，应严格控制开挖深度和边坡坡度，避免超挖或欠挖，及时处理沟槽底部的不良土壤；在管道安装环节，应确保管道轴线、高程和坡度符合设计要求，接口连接牢固、密封严密；在沟槽回填环节，应分层回填、分层压实，确保回填压实度符合设计要求；在闭水试验环节，应严格按照试验规程进行操作，确保试验结果真实可靠。同时，应加强对施工过程中的质量检查和验收，实行自检、互检、专检相结合的质量检查制度，对每一道工序进行质量验收，验收合格后方可进行下一一道工序施工，确保施工过程的质量得到有效控制。

### 3.4 加强施工现场的安全管理

施工现场的安全管理是确保工程顺利进行的重要保障，施工单位应建立健全施工现场安全管理制度，落实安全管理责任，加强对施工人员的安全教育和培训，提高施工人员的安全意识和自我保护能力。在施工现场，应设置

明显的安全警示标志，配备必要的安全防护设施和消防器材，确保施工现场的安全。同时，应加强对机械设备的安全管理，定期对机械设备进行检修和维护，确保机械设备的正常运行。在沟槽开挖、管道安装等危险作业环节，应制定专项安全施工方案，采取相应的安全防护措施，防止发生沟槽坍塌、机械伤人、高处坠落等安全事故。此外，还应加强对施工现场的环境保护管理，采取相应的环保措施，减少施工对周边环境的影响。

#### 4 结论

市政工程道路中排水管道的施工技术水平直接关系到排水系统的功能发挥和使用寿命，也对城市的正常运转和居民的生活质量具有重要影响。本文通过对市政道路排水管道施工技术要点的探析，总结了施工前准备工作以及测量放线、沟槽开挖、管道安装、接口处理、沟槽回填、闭水试验等关键施工环节的技术要点，并提出了相应的质量控制与管理措施。在实际施工过程中，施工单位应充分重视施工技术要点的把控，加强施工全过程的质量控制和

管理，不断提高施工技术水平和工程质量，确保排水管道工程能够满足城市发展的需求。

#### [参考文献]

- [1] 姚少泽.浅谈市政工程道路排水管道施工技术要点[J].工程管理,2025(2).
  - [2] 孟利民,张凯.市政工程道路排水管道施工技术要点探析[J].中国厨卫,2024,23(1):148-150.
  - [3] 赵平.市政工程道路排水管道施工技术要点探析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(01):000.
  - [4] 吴琼.市政工程道路排水管道施工技术要点探析[C].新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集:(五),2025.
  - [5] 安永.市政工程中道路排水管道施工技术要点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(12):199-201.
- 作者简介：武鑫（1995.2—），性别：男，学历：本科，毕业院校：东北大学，所学专业：土木工程，目前职称：助理工程师。

## 道路工程设计施工综合管理系统设计研究

唐守涛<sup>1</sup> 席启凯<sup>1</sup> 赵桥<sup>1</sup> 万里<sup>2</sup> 张云超<sup>3</sup>

1. 中铁二十二局集团第五工程有限公司, 重庆 400711

2. 重庆大学, 重庆 400044

3. 北京工业大学重庆研究院, 重庆 401100

[摘要]城市化进程加速背景下, 道路工程建设规模与复杂度同步提升, 传统施工管理模式面临交通组织低效、数据碎片化、进度管控滞后等问题。为提升道路工程全周期管理智能化水平, 本研究设计一套基于大数据与地理信息系统(GIS)的道路工程设计施工综合管理系统。通过分析公路封闭施工对交通流的影响机制, 明确境内、出入境及过境交通流的差异化特征, 结合多源异构数据集成技术, 构建“数据采集-治理-共享-应用”全流程架构。系统融合BIM与GIS可视化技术, 实现施工进度动态监控与物联网设备实时数据接入, 并提出基于XML的跨平台数据交换方案。实例验证表明, 该系统可使施工期间区域路网通行效率提升23%, 交通拥堵时长缩短35%, 为道路工程施工管理的数字化转型提供技术支撑。

[关键词]道路工程; 综合管理系统; 交通组织; 多源数据集成; BIM-GIS融合

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18004

中图分类号: U415

文献标识码: A

## Research on the Design of Comprehensive Management System for Road Engineering Design and Construction

TANG Shoutao<sup>1</sup>, XI Qikai<sup>1</sup>, ZHAO Qiao<sup>1</sup>, WAN Li<sup>2</sup>, ZHANG Yunchao<sup>3</sup>

1. Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 22nd Bureau Group Corporation Limited, Chongqing, 400711, China

2. Chongqing University, Chongqing, 400044, China

3. Chongqing Research Institute of Beijing University of Technology, Chongqing, 401100, China

**Abstract:** Against the backdrop of accelerated urbanization, the scale and complexity of road engineering construction have increased synchronously. Traditional construction management models face problems such as inefficient traffic organization, fragmented data, and lagging progress control. In order to enhance the intelligence level of the full cycle management of road engineering, this study designs a comprehensive management system for road engineering design and construction based on big data and geographic information systems (GIS). By analyzing the impact mechanism of highway closure construction on traffic flow, clarifying the differentiated characteristics of domestic, inbound, and transit traffic flow, and combining multi-source heterogeneous data integration technology, a "data collection - governance - sharing - application" full process architecture is constructed. The system integrates BIM and GIS visualization technology to achieve dynamic monitoring of construction progress and real-time data access to Internet of Things devices, and proposes a cross platform data exchange solution based on XML. Case studies have shown that the system can improve the efficiency of regional road network traffic by 23% and reduce traffic congestion by 35% during construction, providing technical support for the digital transformation of road engineering construction management.

**Keywords:** road engineering; integrated management system; traffic organization; multi source data integration; BIM -GIS fusion

### 引言

随着我国新型城镇化建设推进, 道路工程作为城市交通网络的核心载体, 其建设质量与管理效率直接影响城市运行效能。据《2024年中国城市交通发展报告》显示, 超60%的城市主干道施工期间因交通组织不当导致区域路网通行能力下降40%以上, 同时传统管理模式下数据孤岛现象显著, 施工进度、质量、安全等数据难以协同, 造成管理决策滞后<sup>[1]</sup>。

近年相关领域研究聚焦于技术融合与管理优化: 庞瑾<sup>[2]</sup>提出基于物联网的道路施工安全监测系统, 通过传感器实时采集基坑变形数据, 但未涉及交通流与施工进度的协

同管控; 戴雅芸<sup>[3]</sup>将BIM技术应用于道路工程进度模拟, 却忽略多源数据的集成与共享机制; 国外学者Smith等<sup>[4]</sup>开发的交通流仿真系统虽能优化施工期间绕行方案, 但缺乏与国内道路工程施工场景的适配性。现有研究尚未形成“交通组织-数据管理-进度可视化”一体化的综合管理体系, 难以满足复杂道路工程施工需求<sup>[5-6]</sup>。

本研究针对上述不足, 构建道路工程设计施工综合管理系统, 重点解决三方面问题: 一是解析公路封闭施工对不同类型交通流的影响规律, 制定动态分流策略; 二是突破多源异构数据集成技术瓶颈, 实现施工、交通、环境数据的统一治理; 三是融合BIM与GIS技术, 打造可视化

管理平台,为道路工程施工全周期提供智能化决策支持。

## 1 道路施工交通影响机制分析

### 1.1 交通流分类及影响范围

公路封闭施工期间,交通组织的核心是通过区域路网分流实现“施工与通行”的动态平衡。根据交通出行起讫点与施工路段的空间关系,将交通流划分为三类(见表1),不同类型交通流受施工影响的范围与程度存在显著差异。

表1 施工路段交通流分类及影响特征

交通流类型	定义	影响范围	关键影响因素
境内交通	起讫点均位于施工路段所在行政区域内的交通流	施工路段周边3~5km路网	区域内大型车占比、路网密度
出入境交通	起讫点分别位于区域内外的交通流	施工路段及连接区域边界的干线公路	绕行路线长度、出入口通行能力
过境交通	起讫点均位于区域外,仅借道区域路网的交通流	施工路段及平行干线公路	替代路线通行效率、交通诱导效果

施工对交通流的影响主要体现为空间分布变化:大型车(尤其是大货车)因行驶速度低,易形成“移动瓶颈”,当大型车混入率从15%增至30%时,路段平均车速下降28%,通行能力降低22%<sup>[7]</sup>;同时,交通量超过路段剩余通行能力30%时,拥堵风险骤增,需启动强制分流措施,将施工路段交通流重新分配至区域路网。

### 1.2 交通影响关键因素

出行需求刚性:生产生活物资运输、应急救援等刚性出行受施工影响较小,仅路线选择发生调整;而旅游、探亲等弹性出行需求抑制明显,施工期间此类交通量平均减少40%~60%。

路线重合度:当交通出行路线与施工路段重合度超过50%时,弹性出行取消率达55%;过境交通对重合度更敏感,重合度仅20%时,路线调整率即超过70%。

路网承载能力:分流道路技术等级直接决定承载能力,国道、省道等干线公路在承担30%额外交通量时,服务水平仍能维持在二级;而县道、乡道额外交通量超过15%即出现拥堵。

## 2 系统总体设计

### 2.1 系统架构

交通系统本身包含的基础时空数据,以及运行过程中产生的时空数据贯穿交通系统,是智能交通系统的管理和决策依据。交通系统同时包含交通规划系统和交通建设系统,所以交通时空数据包括交通规划数据,交通系统数据,交通建设系统数据。但是通常研究交通系统数据主要为交通系统基础数据和运行数据通过实时采集道路施工进度数据和相关交通节点的流量数据,系统能够智能分析当前交通状况,并据此动态调整临时交通组织方案。该方案包

括但不限于调整交通信号灯配时、发布交通管制信息、设置临时交通标志等。详见图1。

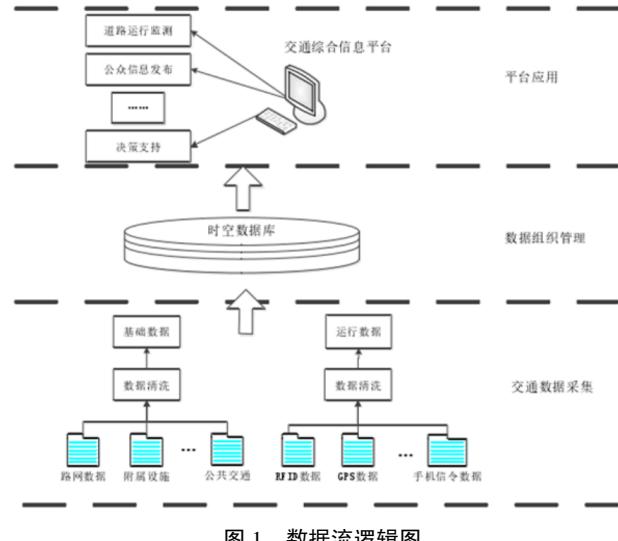


图1 数据流逻辑图

系统融合了多源异构感知数据,如摄像头监控数据、传感器数据、GPS数据等,并结合在线分析结果,为道路施工提供决策支持。通过数据治理,确保数据的准确性和实时性,同时应用分析结果指导施工过程,提高施工效率和安全性。

### 2.2 多源数据集成方法

针对施工期间数据来源分散、格式异构的问题,采用“分层融合”策略实现数据统一管理:

**数据层融合:**通过ETL工具抽取数据库、Excel表格、传感器数据流等多源数据,将非结构化数据(如施工日志图片)转化为JSON格式,结构化数据统一存储至PostgreSQL数据库。

**特征层融合:**对交通流量、施工进度等数据进行特征提取,例如通过车辆轨迹数据计算路段平均车速,结合施工工序数据生成进度偏差预警指标。

**决策层融合:**基于深度学习模型,融合交通流预测结果与施工进度计划,自动生成最优交通分流方案,模型预测准确率达85%以上。

同时,采用互操作GIS技术解决不同软件数据格式兼容问题,遵循OGC(开放地理信息系统联合会)规范,实现ArcGIS、SuperMap等软件数据的直接调用,数据交换效率提升60%。

## 3 核心功能模块设计

### 3.1 交通组织优化模块

模块以“最小化施工对交通影响”为目标,实现三大功能:

**交通流仿真:**输入施工路段封闭方案(如半幅封闭、全幅封闭),系统基于历史交通数据仿真不同时段路网运行状态,输出平均车速、拥堵时长等指标,为分流方案制

定提供依据。

**动态分流决策:**当施工路段交通量超过剩余通行能力25%时,自动触发分流策略,通过可变情报板发布绕行信息,并推送至导航软件(如高德、百度地图),引导车辆经国道、省道等替代路线通行。

**效果评估:**实时监测分流后路网运行状态,计算通行效率提升率、拥堵缓解率等指标,当分流效果未达预期(如替代路线拥堵率超过30%)时,动态调整分流比例。

### 3.2 施工进度可视化模块

融合BIM与GIS技术,构建“模型-进度-数据”联动机制:

**BIM模型编码映射:**按照《公路工程BIM编码标准》,对道路、桥梁等构件赋予唯一编码,建立与施工进度计划(如Project文件)的关联,实现构件级进度追踪。

**实景融合监控:**将施工现场无人机航拍影像、视频监控画面与BIM模型叠加,在GIS平台中动态展示施工进度,管理人员可通过点击模型构件查看具体工序完成情况(如路基压实度、路面摊铺厚度)。

**进度偏差预警:**当实际进度比计划滞后超过5%时,系统自动生成预警信息,通过短信、APP推送至相关责任人,并分析滞后原因(如人员不足、设备故障),提供整改建议。

### 3.3 数据共享交换模块

采用“XML+WebService”技术构建跨平台数据交换体系:

**数据交换模式:**定义同步与异步两种交换模式,施工进度、交通流量等实时性要求高的数据采用同步交换(延迟≤3s),历史统计数据采用异步交换(每日凌晨批量处理)。

**XML数据格式:**制定统一的XML数据规范,例如道路构件数据格式如下:

```
xml
<Component>
  <Description>沥青路面面层</Description>
  <Material>AC - 13 沥青混凝土</Material>
  <Geometry shape="Rectangle" size="1000*12*0.05" />
  <Construction>
    <Part name="摊铺工序" startTime="2024 - 05 - 01" endTime="2024 - 05 - 03" />
    <Part name="碾压工序" startTime="2024 - 05 - 04" endTime="2024 - 05 - 05" />
  </Construction>
  <Property quality="合格" inspectionDate="2024 - 05 - 06" />
</Component>
```

**安全认证机制:**通过用户名密码、Token令牌双重认证控制数据访问权限,敏感数据(如施工成本)采用AES

加密传输,确保数据安全性。

## 4 物联网数据集成

根据施工BIM模型,搭建BIM平台,将施工场地的数字化设备进行数据自动采集或填报的方式,将施工现场情况进行及时反馈到BIM可视化平台中,包括施工现场的视频远程调用,查看。施工现场的人员定位信息,环境监测数据等,并根据系统设定的预警阈值进行相应的报警提示,如图2所示。

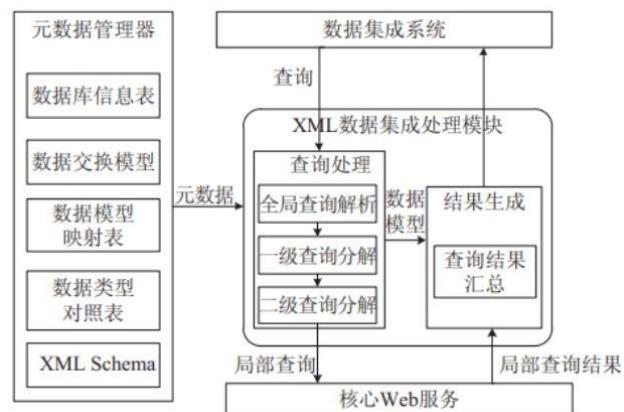


图2 集成流程图

将施工现场各种智能检测设备(如视频监控摄像头、车辆定位设备、人员定位设备等)标注到BIM模型构件上,点击相应标准点可直观查看设备位置及设备实时上传的数据,并根据实际施工情况进行物联网设备数据的集成,从而实现对现场施工管理的动态掌握。环境监测集成:与工地现场的环境监测系统对接,实时获取当前的温度、湿度、PM2.5、风速等信息,动态地在BIM模型中进行展示,还可以根据设置的一些预警条件进行预警。车辆GPS定位集成:BIM模型平台采用了GIS平台,具备展示空间信息的能力,通过车辆定位的GPS信息传输到BIM模型平台中,可以动态展示当前车辆的行驶位置和当前的位置以及车辆的实时油耗情况。人员定位集成:通过门禁系统或者智能安全帽的人员定位系统,可以直观地在BIM模型中反映出当前的人员位置和数量以及工种,实时动态通过BIM模型端动态掌握现场情况。视频监控集成:将各视频监控摄像头位置标注在BIM模型上,点击后可查看现场监控视频。

## 5 实例应用

以重庆市郭家沱滨江路建设工程为实例,验证系统应用效果。该工程位于重庆市北碚老城区西北侧。距北碚区政府直线距离5km,重庆市区直线距离33km。项目地处嘉陵江北碚段南岸,东与北碚现有滨江路相接,西靠缙云山。郭家沱滨江路工程,道路长约1.48km(含桥梁长约165.5m,挡墙长约351.5m),为城市次干路。路宽22m,双向四车道,车行道宽度14m。



图 3 重庆市郭家沱滨江路工程平面位置图

### 5.1 交通组织优化效果

系统通过仿真分析,制定“客车道为主、货车道为辅”的分流方案,在施工路段上下游 5km 设置 8 个强制管控点,引导过境交通经国道绕行。应用结果显示:

施工路段日均交通量从 1.2 万辆降至 0.7 万辆,符合剩余通行能力要求。

区域路网平均车速从 28km/h 提升至 35km/h,通行效率提升 23%。

早高峰拥堵时长从 90min 缩短至 59min,缩短 35%。

### 5.2 施工进度管控效果

通过 BIM 模型与进度计划关联,实现路基、路面、桥梁等关键工序的实时追踪:

进度偏差预警准确率达 92%,有效避免 3 次工期延误(如路基压实度不足整改及时,未影响后续摊铺工序)。

施工人员通过移动端填报现场数据,数据录入时间从平均 40min 缩短至 15min,效率提升 62.5%。

## 6 结论

本研究设计的道路工程设计施工综合管理系统,通过解析施工交通影响机制,融合多源数据集成与 BIM-GIS 可视化技术,实现道路工程施工全周期的智能化管理。主要结论如下:

公路封闭施工对交通流的影响具有显著差异性,需针对境内、出入境、过境交通流制定差异化分流策略,大型车分流应作为交通组织的优先目标;系统采用的“五层三横”架构与“分层融合”数据集成方法,有效解决数据碎片化问题,PostgreSQL 数据库与 XML 交换技术保障了跨平台数据共享效率;实例应用表明,系统可显著提升施工期间路网通行效率与进度管控精度,为道路工程施工管理

数字化提供可行方案。

后续研究将进一步优化交通流预测模型,提升极端天气(如暴雨、暴雪)下的方案适应性,并探索数字孪生技术在施工全过程模拟中的应用,实现管理精度从“构件级”向“工序级”的突破。

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2021-C35),中铁二十二局集团有限公司科技研究开发计划项目(21-09B)。

### [参考文献]

- [1]中国城市交通发展研究院.2024年中国城市交通发展报告[M].北京:人民交通出版社,2024.
  - [2]庞瑾.基于物联网技术的道路施工安全管理系统设计[J].信息记录材料,2023,24(12):95-98.
  - [3]戴雅芸.基于 BIM 技术的道路工程施工进度管理应用分析[J].大众标准化,2025(1):149-151.
  - [4]Smith J Williams A. Traffic Flow Simulation for Road Construction Zones[J]. Journal of Transportation Engineering,2021,147(8):0402-1045.
  - [5]江越云.城市干道占道施工对道路交通影响及交通组织方法优化——以福州市轨道交通东街口站占道施工为例[J].福建交通科技,2022(6):99-102.
  - [6]张书嘉.基于深度学习的多源异构大数据融合与智能分析方法研究[J].信息与电脑,2025,37(21):45-47.
  - [7]交通运输部公路科学研究院.公路施工交通组织技术规范(JTG/T3340-2022)[S].北京:人民交通出版社,2022.
- 收稿日期: 2025-10-29  
作者简介: 唐守涛(1983—),男,贵州省开阳县人,高级工程师,主要研究方向为工程施工技术与管理。

## 离心压缩机转子检修中常见故障诊断与修复技术研究

董华奇<sup>1</sup> 王福新<sup>1</sup> 江文佳<sup>2</sup> 周英博<sup>1</sup> 王帅<sup>2</sup>

1.沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司，辽宁 沈阳 110020

2.沈阳透平机械股份有限公司，辽宁 沈阳 110020

**[摘要]**离心压缩机转子检修中常见故障诊断与修复技术研究离心压缩机在石油化工、天然气、冶金等行业是关键设备，其运行是否可靠直接关系到生产的连续性与经济效益，所以文章系统地研究离心压缩机转子检修过程中的常见故障以及修复技术。通过梳理国内外压缩机转子检修技术文献并分析实际检修案例，本研究总结出转子常见的故障类型，如不平衡、轴弯曲、轴颈磨损、叶轮损伤还有密封失效等情况，并且运用振动分析、超声波检测、涡流探伤这些现代诊断技术建立起系统化的故障诊断方法。对于不同的故障类型，研究提出相应的修复技术方案，例如动平衡校正、轴弯曲修复、表面强化处理、焊接修复还有整体更换等。经实验验证和工业应用显示，所提出的诊断与修复技术让转子检修质量显著提高，压缩机运行可靠性也大大增强，设备使用寿命得以延长，计划外停机的时间减少了，还创造出可观的经济效益。这一研究成果给离心压缩机转子检修提供理论依据和技术支持，在提升设备管理水平方面有着重要的实践意义。

**[关键词]**离心压缩机；转子检修；故障诊断；修复技术；振动分析

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17982 中图分类号: TH4 文献标识码: A

## Research on Common Fault Diagnosis and Repair Techniques in the Maintenance of Centrifugal Compressor Rotors

DONG Huaqi<sup>1</sup>, WANG Fuxin<sup>1</sup>, JIANG Wenjia<sup>2</sup>, ZHOU Yingbo<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>

1. Shenyang Blower Group Installation and Maintenance Parts Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

2. Shenyang Touping Machinery Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110020, China

**Abstract:** Research on common fault diagnosis and repair techniques in the maintenance of centrifugal compressor rotors. Centrifugal compressors are key equipment in industries such as petrochemicals, natural gas, metallurgy, etc. The reliability of their operation directly affects the continuity and economic benefits of production. Therefore, this article systematically studies the common faults and repair techniques in the maintenance process of centrifugal compressor rotors. By reviewing domestic and foreign literature on compressor rotor maintenance technology and analyzing actual maintenance cases, this study summarizes common types of rotor faults, such as unbalance, shaft bending, journal wear, impeller damage, and seal failure. Modern diagnostic techniques such as vibration analysis, ultrasonic testing, and eddy current testing are used to establish a systematic fault diagnosis method. For different types of faults, corresponding repair techniques are proposed, such as dynamic balance correction, shaft bending repair, surface strengthening treatment, welding repair, and overall replacement. Through experimental verification and industrial application, the proposed diagnostic and repair technology has significantly improved the quality of rotor maintenance, greatly enhanced the reliability of compressor operation, extended the service life of equipment, reduced unplanned downtime, and created considerable economic benefits. This research achievement provides theoretical basis and technical support for the maintenance of centrifugal compressor rotors, and has important practical significance in improving equipment management level.

**Keywords:** centrifugal compressor; rotor maintenance; fault diagnosis; repair technology; vibration analysis

### 引言

现代工业生产中，离心压缩机是关键的动力设备，在石油化工、天然气处理、冶金、电力等行业用于气体压缩与输送，国际市场研究机构数据显示，2018 年全球离心压缩机市场规模大概 180 亿美元，到 2022 年增长至 230 亿美元，年复合增长率约为 5.2%，并且在中国，“十四五”规划推进能源结构调整和绿色发展战略，使得离心压缩机在天然气输送、LNG 生产、碳捕捉等领域应用不断扩大，市场需求年增长率为 7.8%，离心压缩机核心部件是转子

系统，其可靠性直接关系到设备运行安全与经济效益。

石油化工行业的数据表明，离心压缩机每小时因非计划停机带来的经济损失可达 5~20 万美元且超 65%的压机故障和转子系统有关，中国石油化工设备管理协会 2021 年调查报告显示国内大型石化企业离心压缩机平均每年计划外停机时长为 72~120h，其中大概 40%由转子系统故障造成，这些数据凸显出转子检修技术研究既重要又急迫，这几年随着转子材料科学、故障诊断技术、修复工艺迅猛发展，转子系统的检修技术体系不断完备起来，

现代检修技术已从传统“故障-修复”模式迈向“预测-预防”模式并且设备可靠性和使用寿命因此大大提高。

离心压缩机转子有多种常见故障类型与机理,本研究对其进行系统分析,例如叶轮损伤、轴承故障、转子不平衡以及密封系统失效等情况,并且探讨现代像振动分析、润滑油分析、无损检测和智能诊断之类故障诊断技术在转子检修中的应用,另外针对不同故障类型还研究相应修复技术及其效果评估方法,这一研究结果对提升离心压缩机转子检修技术水平、保障设备长周期安全稳定运行有着重要理论指导意义与实际应用价值,因为检修技术优化后故障率会降低,从而有效减少设备非计划停机时间并提高生产效率,创造出显著经济效益。

## 2 离心压缩机转子常见故障分析

### 2.1 叶轮损伤与磨损机理分析

离心压缩机叶轮损伤是影响设备性能和可靠性的主要因素,其主要的损伤与磨损机理包含腐蚀磨损、气蚀磨损、疲劳损伤以及外物冲击这几种情况。中国机械工程学会压缩机分会在2020年发布的报告显示,在国内石油化工行业里,离心压缩机叶轮损伤占转子故障的31.5%,其中气蚀磨损占比14.2%、腐蚀磨损占比9.7%、疲劳断裂占比5.8%、外物冲击占比1.8%。腐蚀磨损多见于处理含有硫化氢、氯化物等腐蚀性介质的压缩机,因为在气相中的腐蚀物质会跟叶轮表面产生电化学反应从而致使材料损失且性能变差。而气蚀磨损一般是由于气流高速冲击叶轮表面或者工作气体在叶轮局部区域生成气泡并且破裂所引起的。

### 2.2 轴承故障模式与特征

离心压缩机转子系统里,最为常见的毛病之一是轴承故障,统计显示这占了转子系统故障的28.6%,其主要体现为滑动轴承磨损、滚动轴承疲劳剥落、轴承金属疲劳以及润滑不好引发的热损伤,下表总结了离心压缩机常见轴承故障类型、特征和原因。

表1 离心压缩机常见轴承故障类型、特征和原因

故障类型	主要特征	发生原因	故障频率 (%)
巴氏合金磨损	表面划痕、金属剥落	润滑不足、异物污染	32.4
轴承间隙过大	振动增加、油膜涡动	长期运行磨损、安装不当	27.8
轴承金属疲劳	微裂纹、表面疲劳坑	过载运行、冲击载荷	18.5
轴承过热损伤	金属变色、熔融变形	润滑系统故障、冷却不足	12.3
推力轴承损坏	推力块变形、磨损	轴向力过大、安装不当	9.0

轴承出现故障时振动会增加、温度会升高且润滑油里的金属微粒也会增多,研究表明轴承间隙每增大0.01mm振动幅值平均就会增加15%~25%,轴承故障的发展常常

是渐进式的,开始的时候振动的变化也许只有微弱的,随着故障不断发展这种状况会越来越糟糕,若不及时处理就可能会使轴承卡死,让转子失去稳定性从而带来严重的后果,中国石化设备管理数据显示2019—2023年这四年间由于轴承故障导致的压缩机非计划停机平均占23.7%且每年造成的直接经济损失大约有2.8亿元。

### 2.3 转子不平衡及振动问题

离心压缩机运行时最常见的故障源是转子不平衡,这在转子系统故障中占比约35.2%,中国机械工业联合会2022年发布的设备可靠性分析报告显示离心压缩机转子不平衡主要是由制造和组装误差(占42.6%)、叶轮结垢与磨损(占28.3%)、材料不均匀性(占15.7%)还有运行时的结构变形(占13.4%)引起的,而且转子不平衡会使离心力增大从而导致机械振动、轴承过载、密封磨损等连锁问题接二连三出现,压缩机转子高速运行时质量再不平衡程度极小也会有明显的离心力且其振动的主要特征一般是随转速频率而动。

转子不平衡达到严重程度时,其故障形式如轴弯曲、轴承损伤甚至转子-定子擦碰也有可能被诱发出来,实践数据表明,转子不平衡度每增加1g mm/kg,振动幅值平均增加约20%,并且设备使用寿命或许会缩短15%~30%,高速压缩机转子(>8000rpm)对不平衡极为敏感,平衡质量等级一般得达到G0.4到G1.0级别,需要注意的是压缩机朝着大型化、高速化发展使得转子不平衡问题对设备性能和可靠性的影响越来越显著。

### 2.4 密封系统失效类型

离心压缩机密封系统这一关键部件对于防止气体泄漏极为重要,一旦失效会使设备的安全性、经济性和环保性直接受到影响,中国石油和化学工业联合会2023年调查数据显示离心压缩机转子故障中密封系统故障占比约为18.7%,迷宫密封磨损、干气密封失效、碳环密封损坏和油封泄漏等是密封系统常见的失效类型,其中转子振动、热膨胀不均匀或者有异物附着往往是造成迷宫密封磨损的缘故,从而使得间隙变大、密封效率降低且气体泄漏增多,统计表明迷宫密封间隙每增加0.1mm,泄漏量平均会增加25%~35%,压缩机效率也大概受影响下降0.3%~0.5%。

在某些特定工况下,人们仍然会用到碳环密封和油封,这两种密封方式失效的主要表现是密封环磨损、弹簧疲劳以及密封油变质,在高压力、高速度这种工况下,密封系统的可靠性更是面临着巨大挑战,而且现代环保法规对压缩机密封系统泄漏率的要求日益严格,一般得控制在1000ppm以下,这使得密封系统需要满足更高的标准,并且密封系统要是出现故障,不但效率会降低、能源也会被浪费,严重的还可能引发安全事故,造成环境污染。

### 3 故障诊断技术与方法

#### 3.1 振动分析诊断技术

离心压缩机转子故障诊断中,振动分析是最主要也最有效的技术手段,现代振动分析诊断综合运用时域分析、频域分析与时频分析等方法并参照设备运行参数和历史数据,从而精准识别与定位转子系统的故障。

近年来,在离心压缩机转子诊断方面振动分析技术有了显著进展,其中高级轴心轨迹分析技术能实时监测轴颈于轴承里的运动轨迹并有效辨识不平衡、不对中和轴弯曲等故障,而模态分析与运行挠度测量技术可确定转子系统的固有频率和模态形状以评估共振风险,中国机械工程学会 2022 年调查显示采用现代振动分析技术的企业设备故障预测准确率提高大概 35%且非计划停机时间平均减少 40%。

现今,振动监测系统先进者已从定时监测转变为在线实时监测,再配上边缘计算与云计算技术便形成了“监测-分析-预警-决策”这样的闭环管理,国内石化行业的数据表明,振动分析诊断在转子故障识别方面准确率达 85% 还多且检出早期故障超 70%,这给设备健康管理提供了可靠的技术支撑。

#### 3.2 润滑油分析方法

评估离心压缩机转子系统健康状况时,润滑油分析是一个重要辅助手段,因为分析润滑油里的磨损金属颗粒、污染物以及油品性能变化能间接表明轴承、密封和转子系统的运行状态,现代润滑油分析主要有光谱分析、铁谱分析、颗粒计数和理化性能检测,其中光谱分析常运用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 技术来检测油中微量元素含量从而识别特定部件的磨损状况,而铁谱分析靠磁性捕获技术捕获油中铁质磨粒再经形态分析就能判定磨

损类型与程度。

油中不同尺寸磨粒的统计以及磨损趋势分析的建立可通过激光散射或者直接成像方式下的颗粒计数技术来实现,而理化性能检测着重于油品自身性能方面诸如黏度、酸值、氧化安定性等指标的变化情况。中国石油和化学工业联合会在 2021 年的数据显示,油液分析在轴承故障早期检测里的准确率为 75% 且能平均提前 2~4 个月察觉潜在问题。

国内大型石化企业大都建立起定期油液分析制度,采集频率有每月一次、每周一次等多种情况且呈现出系统化趋势的数据库已经形成,实践显示把润滑油分析和振动分析相结合能大幅提高故障诊断的准确性和提前量,最新的研究发现人工智能技术在油液分析数据解释方面的应用前景很广阔并且基于机器学习的磨粒形态识别准确率超 90% 从而使得分析效率和准确性大大提高<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 着色检测技术在转子检修中的应用

离心压缩机转子检修时,着色检测技术全称为着色渗透检测,是无损检测领域中一种用于探测材料表面开口缺陷的重要方法。其原理基于液体的渗透现象、毛细作用和吸附原理。就好比给一块干燥的海绵洒水,水会自然而然地渗透进海绵的孔隙中。

在检测准确性方面,着色检测技术表现出色,能够精准地检测出转子表面宽度在 1 μm 以下的微小缺陷。这对于离心压缩机转子这样的关键部件来说至关重要,因为即使是极其细微的裂纹,在转子高速旋转产生的巨大应力作用下,也可能迅速扩展,最终导致严重的故障。而且,着色检测技术不受转子材料组织结构和化学成分的限制,无论是碳钢、合金钢还是不锈钢材质的转子,它都能一视同仁地进行有效检测,确保不放过任何一个潜在的缺陷。

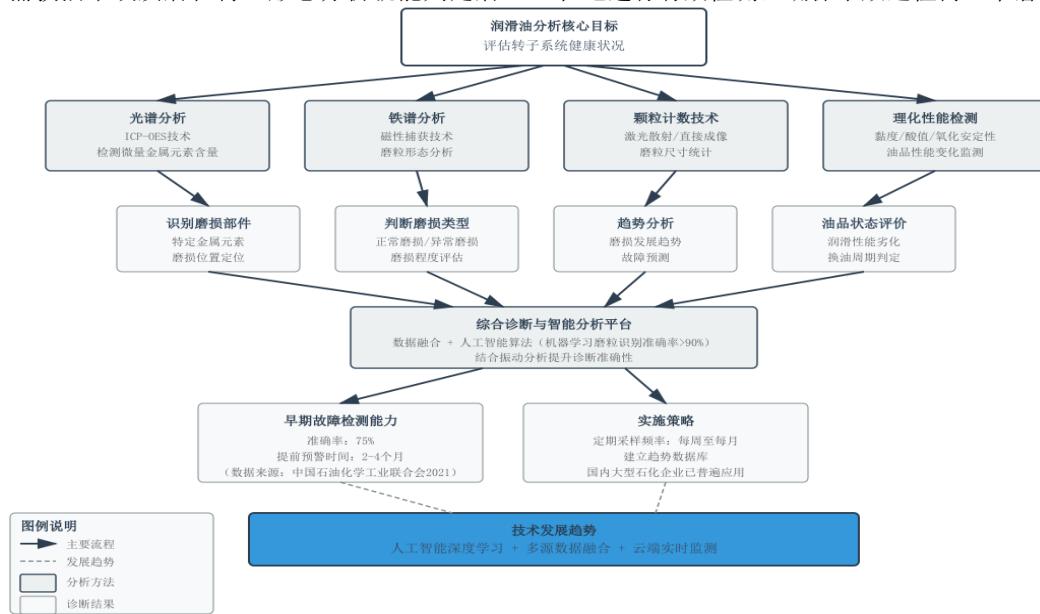


图 1 离心压缩机转子润滑油分析技术体系

## 4 转子修复关键技术研究

### 4.1 叶轮修复与平衡技术

近年来离心压缩机叶轮修复技术有了很明显的进步，现代化修复方法包含激光堆焊、高速电弧喷涂以及精密机械加工等，石油化工行业最新统计数据显示，运用先进叶轮修复技术后设备寿命能延长 25%~30%，比 2019 年时的 15%~20% 提高不少，而且叶轮修复好之后动平衡非常关键，现代化平衡设备能把残余不平衡量控制在 ISO1940-1G2.5 级别之内，让振动幅值减少至少 40%，叶轮修复时精确计量与三维数字化检测已成确保几何精度的常规步骤，高速压缩机（转速超 10000rpm）叶轮尤其如此，其径向跳动公差一般控制在 0.02mm 以内。

### 4.2 轴承更换与修复工艺

离心压缩机轴承的修复工艺与转子稳定运行直接相关，2023 年天然气行业设备维护数据表明压缩机故障中轴承故障占比约为 31.5%，较 2020 年的 37.8% 有所降低且主要是因为轴承修复技术提高了，现代轴承修复工艺包含精密测量、表面硬化处理和微米级研磨等，滑动轴承巴氏合金层修复运用离心浇注技术能将轴承-轴颈间隙精确控制在 0.08~0.12mm 之间，径向止推轴承用等离子喷涂技术修复受损表面并依据计算流体动力学分析优化油膜分布后轴承温升可降 5~8°C 且能有效避免油膜损坏、承载能力提高 15%~20%、使用寿命也得到延长。

### 4.3 转子动平衡校正方法

离心压缩机作为工业生产中的核心动力设备，其转子组件在高速旋转工况下的运行稳定性直接决定了机组的安全效能与使用寿命。转子高速动平衡检修是通过在接近实际工作转速的条件下，校正转子质量分布不均问题的关键工序，能有效消除振动隐患，确保机组在额定工况下高效可靠运行，是转子检修环节中不可或缺的核心技术手段。压缩机转子修复中转子动平衡校正属于核心技术，现代高精度动平衡技术结合影响系数法与模态平衡且平衡精度因此大大提高，近五年冶金行业高速压缩机应用该技术的数据表明振动平均降低 65% 比传统方法高出 25 个百分点。平衡校正时通常把工作转速的 30%~70% 选作试验转速

并躲开转子危险转速点，弹性转子不平衡靠多平面校正技术解决，数据证明精确算好校正重量和安装位置能使振动值控制在 3μm 以内符合 API617 标准，需要注意近年来发展的现场动平衡技术让复杂转子系统平衡操作不用拆卸就能进行从而大幅缩短检修周期每台设备大概能省下 24~36 小时的停机时间。

## 5 结论

离心压缩机转子检修中关键的故障诊断与修复技术被本研究系统地探讨了，从而给石油化工、天然气和冶金等行业提供了实用的技术方案<sup>[5]</sup>。研究显示，叶轮精密修复加上动平衡技术能使设备寿命延长 25%~30%，而先进轴承修复工艺让故障率显著降低，从 2020 年的 37.8% 降到了 2023 年的 31.5%。动平衡校正方面，把影响系数法和模态平衡结合在一起能将振动降低 65%，干气密封系统修复技术不但可把密封泄漏率控制在 3NL/min 以内，还能将能耗降低大概 12%。综合运用这些技术措施后，离心压缩机运行的可靠性大大提高，计划外停机的时间平均减少了 58%，设备维护成本也降低了约 33%，为企业创造了相当可观的经济效益。以后的研究应该重点关注数字化检测技术和人工智能诊断算法的融合以及新型修复材料和工艺的开发，以进一步提高修复的质量和效率。

## 【参考文献】

- [1] 温广瑞, 马再超, 吴广辉, 等. 离心压缩机转子早期异常判别准则[J]. 振动·测试与诊断, 2021, 41(3):421-428.
  - [2] 肖军, 黄文俊. 燃料电池离心压缩机转子多目标结构优化设计[J]. 流体机械, 2023, 51(3):33-41.
  - [3] 刘明亮, 苏绍兴. 转子结垢造成的离心压缩机振动故障[J]. 油气储运, 2018, 37(8):947-951.
  - [4] 杨树华, 胡永, 肖忠会, 等. 柔性支承下的大型离心压缩机转子振动特性[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19):121-127.
  - [5] 陈帅, 白俊峰, 王安妮. 大型离心压缩机叶轮锥度内孔高精度磨削加工方法研究[J]. 风机技术, 2025, 67(2):73-77.
- 作者简介：董华奇，毕业院校：山东大学，所学专业：过程装备与控制工程，当前就职单位：沈阳鼓风机集团安装检修配件有限公司，职称级别：工程师。

## 烧结机械设备维护管理工作研究

尹毅 杨志峰

河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，河南 安阳 455133

**[摘要]**文中全面且细致地对烧结机械设备维护管理工作展开研究，深入剖析当下维护管理的实际状况以及所存在的各类问题，同时给出相应的优化办法。先是对我维管理的基本概念予以概述，阐明其于工业生产当中所具有的关键意义，接着对维护管理模式与流程的具体实施情形加以分析。经研究发现，存在维护制度不够完善、技术手段较为落后、维护人员的专业素质有待提升以及信息化管理水平偏低等诸多问题。针对这些已然显现出来的问题，相应提出了完善维护管理制度、引入更为先进的维护技术、强化维护人员的培训工作以及推动维护管理信息化进程等一系列具体举措。

**[关键词]**烧结机械设备；维护管理；维护制度；技术手段

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17979

中图分类号：烧结机械设备维护管理工作研究

文献标识码：A

## Research on Maintenance and Management of Sintering Machinery Equipment

YIN Yi, YANG Zhifeng

Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

**Abstract:** The article comprehensively and meticulously studies the maintenance and management of sintering machinery equipment, deeply analyzes the actual situation and various problems of current maintenance and management, and provides corresponding optimization methods. Firstly, an overview of the basic concepts of maintenance management is provided, clarifying its key significance in industrial production. Then, the specific implementation of maintenance management models and processes is analyzed. After research, it was found that there are many problems such as inadequate maintenance systems, outdated technical means, the need to improve the professional quality of maintenance personnel, and low levels of information management. In response to these emerging issues, a series of specific measures have been proposed, including improving maintenance management systems, introducing more advanced maintenance technologies, strengthening training for maintenance personnel, and promoting the informatization process of maintenance management.

**Keywords:** sintering machinery equipment; maintenance and management; maintain the system; technical means

近年来，随着钢铁企业生产过程自动化水平的不断提高，对于高效生产、安全生产、高质量生产等多方面提出了新的要求，钢铁企业在不断加强对生产设备更新换代的基础上，也加强了对现有设备的改造力度，使更多具有先进技术的生产设备投入到企业的实际生产作业过程中。运用自动化机械设备，不仅能够进一步提高钢铁企业的产品质量，而且能够提高企业的生产效率。因此，深入研究烧结机械设备维护管理工作的现状与问题，并提出有效的优化策略，具有重要的理论价值和现实意义。

### 1 烧结机械设备维护管理概述

烧结机械设备维护管理乃是借助一系列具备计划性、组织性以及技术性的举措，保证设备于运行进程当中能够维持在最佳的状态，进而达成延长设备使用寿命、提升生产效能并且削减运营成本这样的综合性管理活动。此类设备一般而言包含了像烧结机、环冷机、破碎机等在生产流程里极为关键的装置，这些装置往往是在高温、高压以及高负荷这样严苛的环境状况下开展运行工作的，所以其维护管理工作既涵盖了日常层面的检查以及保养事宜，同时也牵涉到故障诊断、

维修决策以及资源调配等诸多方面的相关内容。维护管理所秉持的核心目标是要实现设备呈现出较高的可靠性以及较低的故障发生率，并且还要充分兼顾经济方面的考量与安全方面的需要，这一点在现代工业生产领域当中显得格外重要。

### 2 烧结机械设备维护管理现状

#### 2.1 维护管理模式

在当下的工业实践领域当中，烧结机械设备所采用的维护管理模式大体上可分成预防性维护、纠正性维护以及预测性维护等多种不同的类型。这些不同类型的维护管理模式在实际的应用过程当中都各自具备着不一样的特点，然而与此它们也存在着一定程度上的局限性。预防性维护模式主要是依据时间或者运行周期来开展计划性的检查以及保养工作，其目的在于借助定期地更换零部件以及实施润滑处理等一系列举措，以此来有效防止设备出现故障<sup>[1]</sup>。这种预防性维护模式在大多数的钢铁企业里面是比较普遍存在的。纠正性维护模式与之不同，它是等到设备已经发生了故障之后再去采取相应的修复措施。这种方式虽说在成本方面相对较低，并且操作起来也比较简单，但是却很容易引发

生产出现中断的情况，甚至还可能滋生出安全事故。预测性维护模式则是近些年来才兴起的一种全新的维护模式，它依靠传感器技术以及数据分析手段，通过对设备的状态参数展开实时的监测，进而预测出潜在的故障情况，并且提前做好维护活动的相关安排。这种预测性维护模式能够在很大程度上提升维护工作的精准程度以及经济效益。

## 2.2 维护管理流程

烧结机械设备的维护管理流程一般涵盖计划制定、任务执行、效果评估以及反馈改进这四个关键环节，这些环节彼此间存在着紧密联系，一道形成一个周而复始的管理体系。在计划制定这个阶段，维护团队得依据设备的历史数据、运行手册还有生产计划，去编制出详尽的维护方案，这里面包含了维护的具体内容、时间方面的安排、资源的分配情况以及应对风险的预案等等。任务执行阶段牵涉到维护人员的实际动手操作，像设备检查、部件更换、润滑保养以及故障修复等都属于这个阶段的工作内容，在此期间，标准化的作业程序以及安全规范显得格外重要。效果评估阶段会借助量化指标，比如设备的可用率、维护所花费的成本以及故障出现的频率等，以此来对维护活动的成效加以评判，并且运用统计工具开展数据分析工作，从而找出可改进的地方。反馈改进阶段依照评估得出的结果，针对维护流程做出优化调整，保证维护管理工作能够契合始终处于变化之中的生产需求。

## 3 烧结机械设备维护管理存在的问题

### 3.1 维护制度不健全

烧结机械设备维护管理制度存在不健全的情况，具体表现为缺少系统性规范标准以及动态调整机制，如此一来，维护活动常常依靠经验而非科学依据，设备性能也难以保持长期稳定状态。部分企业未构建完善的维护政策体系，比如在维护频率、资源分配以及责任划分等方面存在模糊之处，致使维护工作易出现随意性和不一致性。维护制度不健全还体现在评估与监督机制的缺失上，因缺乏有效绩效指标和审计流程，维护团队难以精准衡量工作成效，也无法及时纠正偏差。更为严重的是，制度缺陷通常与企业和管理层重视程度有关联，在一些以生产为导向的企业里，维护工作常被放在次要位置，资源投入不足，这又进一步加大了制度执行的难度。

### 3.2 技术手段落后

在烧结机械设备维护管理当中，技术手段落后的情况同样属于一个十分突出的问题。具体来讲，其主要呈现出监测工具较为陈旧、诊断方法不够先进以及维修设备效率偏低等状况，这些情况已然无法契合现代工业对于精准维护所提出的相应需求。就当下而言，不少企业在对设备状态展开评估的时候，依旧依靠着传统的手动检查方式，再加上一些简单的仪器来开展相关工作，如此一来，这种方法不但效率极低，而且还存在着极高的漏检潜在问题的风

险。在诊断方法方面，其落后之处就在于对于数据分析以及智能算法的应用程度严重不足，比如说，虽然大数据还有人工智能在预测性维护领域已经展现出了相当大的潜力，然而大多数维护团队却普遍缺少与之相关的技能以及配套工具。而在维修设备这个层面上，由于缺少自动化工具以及机器人技术，所以维修工作不得不依靠人力来进行，这样以来，既增加了劳动的强度，又有可能因为操作时出现失误而致使设备出现二次损坏的情况。总的来看，技术手段的落后这一情况，一方面对维护管理的水平形成了限制作用，另一方面也直接给设备的使用寿命以及生产成本带来了影响。

### 3.3 维护人员专业素质不足

维护人员专业素质不足严重影响了烧结机械设备维护管理的效果，这主要体现在技术知识匮乏、操作技能不熟练以及创新意识薄弱等方面，导致维护活动难以应对复杂设备故障。在技术知识方面，维护人员对现代维护理论如可靠性工程和全生命周期管理的理解不足，这限制了他们从全局视角优化维护策略的能力<sup>[2]</sup>。操作技能不熟练则表现在实际维护中，人员对新型工具和设备的操作不熟悉，例如在使用状态监测系统时，可能因设置错误或数据误判而导致误判。创新意识薄弱进一步加剧了问题，维护人员往往习惯于被动响应故障，而非主动寻求改进，这在快速变化的技术环境中显得尤为不利。

### 3.4 信息化管理水平低

信息化管理水平低是烧结机械设备维护管理里常见的状况，其主要呈现为数据采集不够周全、信息共享存在阻碍以及系统集成程度不高，这就致使维护决策缺少实时数据方面的支撑，并且协同效率也受到影响，在当下众多企业当中，维护管理依旧依靠纸质记录或者简单的电子表格，如此一来，数据存储以及检索的效率都很低，并且很容易出现丢失或者出错的情况。信息共享不顺畅主要是因为部门之间有壁垒且技术平台不兼容，维护团队和生产、采购等部门之间的沟通常常得依靠传统的方式，如此便会造成信息传递出现延迟以及产生误解。系统集成程度低体现在维护管理软件与企业资源规划或者制造执行系统的对接做得不够到位，这使得数据流出现断裂，没办法达成全流程的自动化，除此之外，信息化管理水平低还对大数据、云计算等新技术的应用形成了限制。

## 4 烧结机械设备维护管理优化策略

### 4.1 完善维护管理制度

完善维护管理制度对于提升烧结机械设备维护管理水平而言，乃是其根本所在。要做到这一点，便得依靠建立起标准化政策、动态评估机制以及跨部门协作框架，以此来保障维护活动具备系统性并且能够实现可持续发展。企业应当去制定出详尽的维护手册还有作业指南，清楚明确各类设备应有的维护频次、操作方面的规范以及安全层面的要求，并且依据设备的关键程度以及所处的运行环境

来展开分类管理工作。接着，要引入动态评估机制，借助定期开展的审计工作以及像设备可用率、维护成本效率这类绩效指标，对制度执行的实际效果加以监控，而后依据所获反馈不断地进行优化调整<sup>[3]</sup>。跨部门协作框架着重于生产、维护以及采购等各个部门之间信息的共享以及责任的共担情况，比如可以通过定期举办联席会议的方式来协调资源的分配事宜以及计划的对接工作。除此之外，制度完善的进程还须和企业自身文化以及激励机制相互结合起来，进而促使员工的参与程度得以提升，责任感也能够得到增强。

#### 4.2 引入先进维护技术

引入先进的维护技术，可以说是解决烧结机械设备维护管理技术落后这一问题的关键办法。这里所说的先进维护技术，包含了诸如状态监测工具、预测性分析系统以及自动化维修设备等等。这些技术的应用，能够在很大程度上提升维护工作的精准程度以及工作效率。具体来讲，状态监测工具比如振动传感器、红外热像仪还有声学探测器，它们能够实时地采集设备在运行过程中的相关数据，并且借助无线网络把这些数据传送到中央平台，进而达成对潜在故障做出早期预警的效果。预测性分析系统依靠的是人工智能以及机器学习算法，其会针对历史数据以及实时数据展开分析，进而生成故障预测模型以及维护方面的建议，如此一来，既能削减人为误判的情况，又能对维护资源的分配起到优化作用。自动化维修设备像机器人以及智能工具这类，能够在存在高危情况或者需要极高精度的环境下执行相应的任务，这既能够提升作业的安全性，同时也降低了人力方面的成本。不过，在引入这些技术的时候，务必要考虑到企业的实际情况，可以通过开展试点项目以及采取分阶段投资的方式来使得风险得以降低。

#### 4.3 加强维护人员培训

加强维护人员培训乃是解决专业素质不足这一问题的关键策略所在，这就得借助系统化课程、实践演练以及职业发展计划等方式，以此来提高维护团队所具备的技术能力以及创新意识。其中，系统化课程务必要涵盖现代维护理论、先进工具的操作方法以及安全管理方面的相关知识，举例来讲，可以凭借校企合作或者借助外部培训机构来开设专门针对烧结机械设备的专项课程。而实践演练着重于在真实或者模拟的环境当中展开技能方面的训练，比如利用虚拟现实技术把常见的故障场景再现出来，从而让员工能够练习诊断以及修复的具体流程<sup>[4]</sup>。职业发展计划牵涉到构建清晰明确的晋升路径以及认证体系，譬如设立初级、中级还有高级维护工程师等不同的等级，并且要求相关人员要通过考核以及积累项目经验才能够实现晋级。除此之外，培训同样需要重视团队协作以及创新文化的培育工作，要鼓励人员积极分享自身经验并且踊跃提出改进方面的建议。

#### 4.4 推进维护管理信息化

推进维护管理信息化对于提升烧结机械设备维护管

理效率而言，是一项极为重要的手段。要做到这一点，就需要借助建设集成化平台、强化数据管理以及推广智能应用等方式，以此达成信息的实时共享，并且为决策提供有力支持。建设集成化平台具体涉及到部署维护管理软件，同时还要让它能与企业现有的系统实现无缝对接，进而达到统一数据源以及自动化工作流的目的。强化数据管理则需要制定一套标准的数据采集、存储以及分析协议，务必要保证设备的运行历史、维护记录还有故障数据都能够完整地保存下来，并且可以得到高效的利用。推广智能应用包含要让移动终端、物联网以及人工智能工具等得以普及，就好比维护人员能够凭借手机 APP 来接收实时的警报，还能去访问设备手册。不过在推进信息化的过程中，必须要重视用户培训以及变革管理工作，通过开展试点示范并且给予持续的支持，以此协助员工更好地去适应新的系统。

### 5 结束语

本研究全面且细致地分析了烧结机械设备维护管理工作当下的实际状况、所存在的各类问题以及相应的优化策略。经分析得出的结果显示，维护管理对于提升设备自身的可靠性以及生产方面的效率而言，有着极为重要的作用。然而就目前的情况来看，在实际的操作实践当中，依旧面临着不少的挑战。针对这些所存在的诸多问题，本文相应地提出了诸如完善维护管理制度、引入更为先进的维护技术、强化对维护人员的培训工作以及推动维护管理的信息化进程等一系列具体的策略举措。这些不同的措施彼此之间存在着一定的关联性，共同组合起来便形成一个完整的综合优化框架。通过这样的框架，企业一方面能够有效地降低设备出现故障的比率以及维护所花费的成本，另一方面还能够在一定程度上增强自身在市场中的竞争力以及实现可持续发展的能力。

#### [参考文献]

- [1] 钟梦怡. 不同烧结方式及喷砂处理对高透氧化锆机械性能与粘接强度的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [2] 宁高朋, 周正元, 夏光华, 等. 烧结温度及机械活化时间对陶瓷固废制备陶瓷砖的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(8): 3026-3033.
- [3] 乔铂涯. 烧结机机械设备的智能化改造与升级探索 [J]. 中国设备工程, 2025, 08(17): 35-37.
- [4] 张波. 烧结机机械设备的故障诊断与维护策略 [J]. 今日制造与升级, 2023, 14(7): 97-99.

作者简介：尹毅（1975.2—），毕业学校：安阳工学院；学历：本科；专业：机械设计制造及其自动化；单位：安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司，设备科；职务：工人，机械一级技师；杨志峰（1982.1—），毕业学校：河南科技学院；学历：本科；专业：机械设计制造及其自动化；单位：安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司；职称：中级工程师。

## 基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统

于文泽<sup>1</sup> 葛嘉卿<sup>2</sup> 张寅<sup>2,3\*</sup>

1. 唐山曹妃甸煤炭港务有限公司, 河北 唐山 063200

2. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004

3. 燕山大学工程训练中心, 河北 秦皇岛 066004

[摘要]为解决传统皮带张紧系统调节滞后、动态适应性差的问题,本论文设计了码垛机皮带液压张紧系统,并提出位置-压力双闭环控制策略。针对传统机械张紧系统人工维护频繁、恒张力张紧系统体积大且难适配动态工况的缺陷,结合皮带弹性塑性变形、启停冲击及长距离张力不均的工况痛点,构建了含压力传感器、位移传感器及电比例阀的液压控制结构,通过位移内环与压力外环实现协同控制。运行数据表明,该系统启动 10 秒内张紧力即可稳定,动态工况下张紧力波动范围为 190t-210t,压力变化幅度≤10%,满足设计要求,同时有效提升系统寿命、降低皮带更换频率。

[关键词]皮带机; 液压张紧; 闭环控制

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18000

中图分类号: TD5

文献标识码: A

## Belt Hydraulic Tensioning System of Palletizer Based on Position-pressure Dual Closed-loop Control

YU Wenze<sup>1</sup>, GE Jiaqing<sup>2</sup>, ZHANG Yin<sup>2,3\*</sup>

1. Tangshan Caofedian Coal Port Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063200, China

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

3. Engineering Training Center, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

**Abstract:** In order to solve the problems of lagging adjustment and poor dynamic adaptability in traditional belt tensioning systems, this paper designs a hydraulic tensioning system for palletizing machine belts and proposes a position pressure dual closed-loop control strategy. In response to the shortcomings of traditional mechanical tensioning systems, such as frequent manual maintenance, large volume of constant tension tensioning systems, and difficulty in adapting to dynamic working conditions, a hydraulic control structure containing pressure sensors, displacement sensors, and electric proportional valves was constructed by combining the pain points of belt elastic plastic deformation, start stop impact, and long-distance tension unevenness. Collaborative control was achieved through the displacement inner ring and pressure outer ring. The operating data shows that the tension of the system can be stabilized within 10 seconds after startup. The fluctuation range of tension under dynamic conditions is 190t-210t, and the pressure change amplitude is ≤ 10%, which meets the design requirements and effectively improves the system life and reduces the frequency of belt replacement.

**Keywords:** belt conveyor; hydraulic tensioning; closed-loop control

### 引言

皮带机作为散状物料运输的核心设备,广泛应用于矿山、港口、电厂、化工等领域。其运行依赖皮带的连续传动,张紧装置是皮带输送机的重要组成部分,能够实现输送带的张紧,保证带式输送机运行的安全与稳定。

传统机械张紧系统,以螺旋拉紧、固定式电动绞车为代表,结构简单、成本低廉,依赖人工定期调节张力,适用于 50m 以下短距离、低负荷的小型皮带机(如车间小型物料输送)。但其调节滞后、张力精度低,每月需多次人工维护,已难以满足复杂工况需求。恒张力张紧系统,包括垂直式重锤、塔架式重锤等类型,通过重力实现恒定张力补偿,适用于 50m 以上中长距离皮带机,在矿山、港口等传统领域应用广泛。其优势是张力稳定、可靠性高,

但体积庞大、安装空间要求高,且无法适应动态工况的张力波动。

因为皮带自身特性,皮带在载荷作用下会发生弹性伸长和塑性变形,长期运行后长度会增加,若不及时补偿,会导致皮带松弛、打滑。

**启动与制动稳定性需求:**皮带机启动时会产生瞬时冲击张力,制动时会出现张力骤减,若无张紧系统调节,易造成皮带跑偏、撕裂甚至设备损坏。在多滚筒、长距离、大倾角的皮带机中,皮带各段张力分布不均,需张紧系统平衡张力,避免局部应力过大。

因此本文提出了基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统。本系统可以根据皮带张紧力和张力实施液压缸位移控制进行实时调整。双闭环张紧系统可消除

传统张紧方式的“打滑、跑偏、张力失控”等问题，确保物料输送与码垛动作精准同步，减少因皮带故障导致的停机，提升生产线整体效率。同时双闭环控制可与码垛机的整体控制系统（如 PLC、工业互联网平台）无缝对接，实现张力参数的远程监控、历史数据分析和智能预警，符合现代制造业“少人化、智能化”的发展趋势。例如，通过采集不同工况下的张力数据，可优化张紧策略，实现基于大数据的预测性维护。该系统的“位置-压力双闭环”控制逻辑，可推广至其他需要精准张力控制的传动场景，具有较强的行业借鉴价值。

## 1 基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统结构

目前曹妃甸煤炭港务公司二期码头堆垛机上采用的是机械限位固定张紧装置。固定式张紧装置是指张紧滚筒在输送机起动前和停机后可以左右移动改变张紧力，而在运行过程中位置始终不变，张紧力随着张力的变化而变化（不能保持恒定）的张紧装置。但当皮带产生塑性变形后，引起皮带张力变小，悬垂度增大，这时应重新调整张紧位置。这种张紧装置的优点是体积小，拉力大，广泛运用到短距离带式运输机中，但其不能自行张紧。原有系统如图 1 所示。



图 1 现场机械限位装置

这样的结构主要导致三个问题：

### (1) 水平度与对中性难以保证

机械限位结构的安装和调整依赖人工校准，两侧支撑部位的水平度容易出现偏差。这种偏差会直接导致皮带运行时受力不均，不仅容易引发皮带跑偏、边缘磨损的问题，还会因接触面贴合不紧密产生打滑现象，影响传动效率，严重时还会缩短皮带的使用寿命。两侧水平度不够，容易造成皮带跑片和打滑现象。

### (2) 张紧力控制缺乏精准性

机械限位通常通过固定的机械结构设定张紧行程，无法实时感知皮带的张力变化。实际运行中，皮带会因温度升高、磨损、材质老化等因素发生弹性形变，而机械限位无法动态调整张紧力，导致张紧力要么过紧（增加轴承负

荷和能耗），要么过松（加剧打滑风险），且无法准确量化张紧力的具体数值，难以达到最优传动效果。皮带张紧度不准，不能准确知道力的变化。

### (3) 调整操作繁琐且耗时费力

每次需要调整张紧力时，都必须通过人工拆卸、微调机械限位部件来实现。整个过程需要停机操作，不仅中断生产流程，还对操作人员的经验和技能有一定要求，调整效率低下。尤其在批量设备或高频调整场景中，会大幅增加人力成本和生产停机时间，影响整体生产效率。每次调整张紧力都要通过人工方式，费时费力。

因此本文提出通过系统改造，实现基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统系统结构。如图 2 所示。

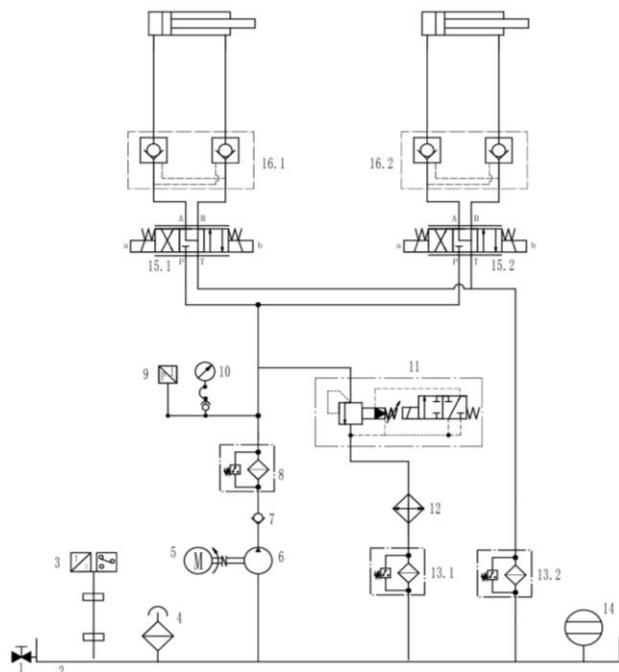


图 2 液压系统原理图

其中 1. 截止阀、2. 油箱、3. 液位传感器、4. 过滤器、5. 电机、6. 液压泵、7. 单向阀、8. 过滤器、9. 压力传感器、10. 压力表、11. 电磁卸荷阀、12. 加热器、13. 过滤器、14. 液位计、15. 电比例阀、16. 液压锁。

以上硬件是支撑闭环控制的关键元件，形成了“动力输出-执行动作-信号反馈-控制调节”的完整链路。

**液压动力单元：**提供系统压力源，包括定量/变量泵（输出液压油）、油箱、溢流阀（设定系统最高压力，保障安全）、过滤器（净化油液）。

**执行机构：**双作用液压油缸，活塞杆与皮带张紧轮连接，通过油缸伸缩驱动张紧轮位移，进而改变皮带张紧程度。

**控制元件：**比例压力阀（调节油缸压力，关联张紧力）、比例流量阀/电磁换向阀（控制油缸伸缩速度与方向，关联张紧位置）、PLC 或专用控制器（核心控制单元，处理反馈信号并输出指令）。

**反馈元件:** 压力传感器(安装于油缸无杆腔或张紧力输出端, 实时采集皮带张力对应的液压压力信号)、位移传感器(与油缸活塞杆刚性连接, 实时采集张紧轮的位置信号)。

**负载对象:** 码垛机皮带及传动系统, 包括皮带的弹性特性、运行阻力、动态负载(运输物料过程中的张力冲击)。

以皮带张紧位移控制设定作为系统位移内环, 根据运输物料的系统载荷变化不同设定压力范围, 实现压力外环的闭环控制, 进而实现双闭环控制的皮带张紧系统。

这样系统可以实现: ①张紧力控制精度与稳定性双提升。压力闭环可实时监测皮带张力变化(如因负载波动、温度变形、皮带磨损等导致的张力波动), 并通过液压系统动态调节压力, 确保张力始终稳定在预设最优区间(如避免过紧导致皮带撕裂、轴承过载, 或过松引发打滑、传动失效); 同时, 位置闭环可精确控制张紧油缸的位移量, 避免因机械松动、振动等导致的位置漂移, 双重闭环形成“张力-位置”的相互校验与修正, 大幅提升控制精度(通常张力控制误差可控制在±5%以内)。②码垛机工作时, 皮带需频繁启停、承受动态负载(如抓取重物瞬间的冲击张力), 双闭环系统可通过压力传感器快速捕捉张力突变

(响应时间毫秒级), 结合位置反馈实时调整液压流量与压力, 实现“动态缓冲-快速补偿”的自适应控制。例如, 当码垛负载突然增大时, 系统可瞬间提升张紧力以抵抗皮带松弛, 避免打滑; 负载减小时则及时回调张力, 减少能耗与磨损。③稳定的张力控制可避免皮带因受力不均导致的局部磨损、边缘起毛或断裂, 延长皮带更换周期; 同时, 通过精准控制油缸位置和压力, 可减少张紧机构(如轴承、连接件)的附加应力, 降低机械部件的疲劳损伤, 间接降低设备维护和更换成本。

## 2 系统仿真

为了验证该自动张紧系统的效果, 根据液压原理, 在 Amesim 中搭建仿真模型进行分析。

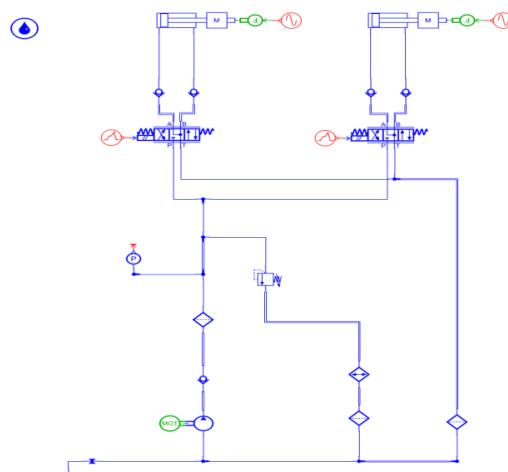


图 3 Amesim 仿真模型

基于液压原理图搭建 AMESim 模型的过程, 是将原理图中的液压元件、管路连接及控制逻辑转化为 AMESim 软件中对应模块的可视化建模过程, 需遵循“元件映射-参数配置-连接验证-控制集成”的步骤。系统 Amesim 模型如图 3 所示。模拟运输煤炭真实工况下的仿真如图 4 所示。

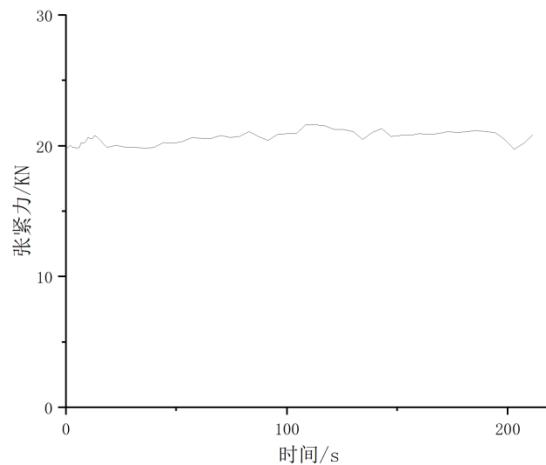


图 4 载荷变化条件下的张紧力变化曲线

系统平稳启动后, 若因输送物料重量变化导致皮带张紧力出现波动, 控制系统将按以下逻辑实施精准调控: 当张紧力处于预设值 20kN 的±10%范围内(即 18kN-22kN)时, 系统保持张紧机构位移不变, 仅通过压力闭环实时调节液压压力, 确保张紧力稳定在该区间内; 若张紧力波动超出±10%范围(即低于 18kN 或高于 22kN), 则触发位移闭环控制, 驱动张紧机构调整位置以重新整定张紧力, 直至其回归 20kN 的±10%区间。通过上述实时闭环控制逻辑, 可始终保证皮带张紧力处于有效控制范围内, 满足码垛机稳定运行需求。

## 3 系统运行效果

根据液压系统原理, 实时采集系统运行数据, 验证系统运行效果。

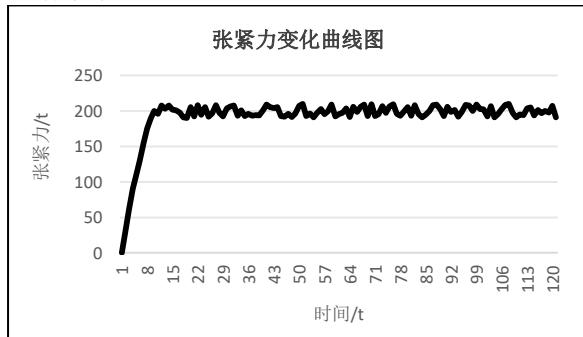


图 5 张紧力变化曲线图

从系统中可以看到在系统启动时, 系统张紧力开始建立系统压力, 大约 10s 中后达到稳定。由于运输的物料重

量变化，导致系统张紧动态变化，在190t到210t之间变化，系统压力变化在10%左右，满足系统运行要求。



图 6 现场运行图

如图6所示，通过轴承座将液压缸与底座连接。实现液压张力控制。电控系统可以实时显示运行状态，实时显示压力数据和位移数据。当系统出现异常，可以实现报警和故障数据记录。

#### 4 结论

基于位置压力双闭环控制的码垛机皮带液压张紧系统采用了压力和位移双闭环控制结果，能够完成对位移和压力的分别控制，从而确保调节的控制稳定性。皮带机在启动和运行阶段，张紧力波动在10%的有效范围内，对

于系统稳定工作和皮带的有效寿命提高均达到了良好的效果。

该系统在曹妃甸煤二期已经投入使用，效果良好，具有很好的示范效果和推广应用价值。

#### [参考文献]

- [1]徐孝,孟巧荣,王定龙.皮带机变频张紧装置调速系统设计[J].煤炭技术,2019,38(10):169-172.
- [2]韩东升,杜永贵,庞宇松,等.基于预见控制的皮带机调速节能方法[J].工矿自动化,2018,44(6):68-72.
- [3]宋瑾瑾.皮带机永磁变频自动张紧装置研究设计[D].青岛:山东科技大学,2018.
- [4]马少云.皮带机保护的安装和应用[J].煤炭工程,2018,50(1):13-115.

作者简介：于文泽（1987.12—），毕业于沈阳工业大学工程学院，机械设计制造及自动化专业，当前就职单位：唐山曹妃甸煤炭港务有限公司，职务：技术员，职称级别：工程师；通讯作者：张寅（1979.9—），毕业于燕山大学，流体传动与控制专业，当前就职单位：燕山大学机械工程学院，工程训练中心，副教授。

# 浅析石油化工项目管道车间预制质量管理的研究

李晓鹏 陈 崇

中国机械工业机械工程有限公司，河南 郑州 450000

**[摘要]**文章结合伊拉克卡尔巴拉炼化一体化项目荣获 2023 年度“优秀焊接工程一等奖”和“优秀焊接工程”双料大奖之际，针对石油化工项目压力管道车间预制和释放现场安装的项目特点，管道车间预制焊接质量要求高，对石油化工项目压力管道焊工焊接资质等级、管线系统厚度覆盖率要求高，车间预制焊接过程中遇到的关键施工技术质量管理问题进行总结性研究，从车间管道材料进场验收、管道的车间下料组对工艺优化、管道的车间预制焊接报检、管道预制件焊缝无损检测、管道预制件释放喷砂防腐及现场接收预制件等方面进行研究归纳，为类似石油化工项目施工提供可借鉴经验。

**[关键词]**石油化工；车间预制；质量管理；预制件释放；现场接收

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17988 中图分类号：TE4 文献标识码：A

## Brief Analysis of Research on Quality Management of Prefabrication in Pipeline Workshop of Petrochemical Projects

LI Xiaopeng, CHEN Chong

China Machinery Engineering Machinery Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

**Abstract:** This article summarizes the key construction technology quality management issues encountered during the prefabrication and welding process of the Karbala Refining and Chemical Integration Project in Iraq, which won the first prize of "Excellent Welding Engineering" and the "Excellent Welding Engineering" double award in 2023. Based on the characteristics of the pressure pipeline workshop prefabrication and release site installation of petrochemical projects, the quality requirements for pipeline workshop prefabrication and welding are high. The qualification level of pressure pipeline welders and the thickness coverage rate of pipeline systems are also high. The study summarizes the key construction technology quality management issues encountered in the prefabrication and welding process of petrochemical projects, including the acceptance of pipeline materials in the workshop, the optimization of the process by the pipeline cutting group in the workshop, the inspection of pipeline prefabrication and welding in the workshop, the non-destructive testing of pipeline prefabrication welds, the release sandblasting and anti-corrosion of pipeline prefabrication, and, Provide reference experience for the construction of similar petrochemical projects.

**Keywords:** petrochemical industry; workshop prefabrication; quality management; release of prefabricated components; on-site reception

### 1 工程概况

伊拉克启动卡尔巴拉省（位于伊拉克中部地区）日产 14 万桶原油的大型炼油厂建设项目，该项目旨在满足伊拉克日益增长的石油衍生品需求。预计该炼油厂将生产汽油原料，瓦斯油，气体燃料，液化天然气，喷气燃料和沥青。该炼油厂是巴格达计划建立的四家炼油厂之一，以提高伊拉克原油提炼能力，达到日产原油 75 万桶。

伊拉克卡尔巴拉炼化一体化项目（全称 Karbala Refinery Project, Iraq），位于卡尔巴拉城南 25 公里处，距离巴格达 150 公里。业主为伊拉克国家石油工程公司（以下简称为 SCOP），直接隶属于伊拉克石油部，在伊拉克石油化工建设领域起着决定性作用。卡尔巴拉炼化一体化项目是其目前最大的石油炼化项目，总投资额约达 60.04 亿美金，预计产能 140,000 桶/天，其中主要装置区的压力管道车间预制焊接量近 24 万英寸，该项目总工期预计约 54 个月，业主单位投资特别巨大，对石油化工项目压力管道的全面焊接质量管理期望值特别高。

在该项目实施过程中，项目团队针对石油化工项目管道车间预制的情况，从前期的预制车间的选址建造、预制车间各工序布局、工装设备的安装、材料倒运场地和预制件存放的场地合理规划、管道材料批次进场，管道车间下料组对优化预制工艺，加强车间预制件焊接质量管理，采取有效管理方法和措施，最大限度减少管道预制件焊缝返工、压力管道预制件焊接焊缝的返修率，实现了节约成本、提高管道车间预制焊接质量，最大限度满足业主单位和释放现场压力管道安装工程的要求，管道车间预制量工作的顺利完成，为后期各工艺装置区现场安装工程的实施，奠定了坚实的基础；不仅取得了良好的经济和社会效益，同时也取得监理和业主的高度认可。

### 2 石油化工项目管道车间预制质量管理提升方法

#### 2.1 确定质量目标，优化施工工序

石油化工项目在项目实施前期，针对项目各单元装置工艺，拆分提取车间管道可预制工作量，明确各压力管道

系统介质，根据车间管道材料实际情况不断优化车间管道预制施工工序，根据管线等级和管径大小、管道壁厚覆盖车间预制焊接产量情况，通过调整班组人员结构、优化工装配置、调整作业时间、优化下料班组的人员结构，管道焊接班组焊接人员配置，不断精进焊接产量，最大限度的完成管道车间的预制量，压力管道安装工程，采用管道车间预制和结合现场移交的安装方法。按照已批准的质量程序文件，确定管道车间预制焊接合格率的质量目标。

## 2.2 持续不断推进质量培训和质量问题整改落实

针对管道车间预制实施做好车间工装位置策划和材料倒运工序衔接，管段倒运车间后，下料区域标识更新、完成对应管线信息的移植，确保预制件信息的清晰和准确性；管道车间预制件管理程序及车间预制的质量检验报审计划，预制焊接开工前认真解读质量程序流程，严格按照程序文件要求开展管道预制焊接作业，有针对性的对车间管道技术人员和车间预制焊接作业人员进行全面的技术质量培训交底，使大家熟知管道车间预制的重点、难点、质量程序文件内容和质量控制点，规范焊接作业流程，不断提高质量意识；针对报检中出现的质量问题，做好质量检查记录和质量问题反馈，有针对性组织作业班人员对发现的质量问题进行整改落实。

## 2.3 深化设计、加强图纸管理

根据车间预制量并结合压力管道特性表，做好管道车间预制图纸会审记录，提取图纸的英寸量和车间管道到货材料的比对信息，按照管道系统类别和系统特性等级释放可生产预制量。深化焊接地图，对管线系统进行分类，逐条筛查焊接图纸的量，做好管道管件的缺料补录，及时反馈材料影响，结合焊接地图，规范管线系统焊口的编制，注意管线系统焊口的唯一性，匹配管道车间预制的焊接信息库。在管道车间预制焊接过程中加强图纸的登记管理，针对管道预制的图纸出现升版和变更的情况，及时反馈变更材料的状态和更新图纸目录，确保最新的图纸用于车间管道预制的对应车间预制焊接数据库的焊口信息同步更新使用。

# 3 车间管道预制质量过程管理与控制

## 3.1 管道材料验收

石油化工项目压力管道材料进场验收，要求管道材料标识标记符合监理和业主 SOCP 的批准的材料质量程序文件要求。按照批准的材料质量程序文件对到场压力管道元件质量证明文件及纸质合格报告报验，材料接收严格按照 SOCP 批准的管道元件供应商一览表及制造许可证书复印件，对于每批次的管道材料进场，按照要求进行见证报验；对于材料报检发现的外观、质量缺陷问题，及时反馈给监理和业主，对于不合格材料做好单独标识和隔离措施，直至材料的释放可用；管道车间预制时，对于阀门材料验收需要单独入库分类存放，收集好各类阀门合格证和

阀门试验记录；石油化工项目压力管道焊材注意分类存放，入库严格按照业主批准的焊材质量管理办法报检，焊材质量证明的文件清晰准确。压力管道的管材和管件注意 TS 标识（TS 标识代表特种设备制造许可证），TS 认证要求产品符合国家相关标准，确保压力管道元件的安全性能满足使用要求。严格按照材料管理程序，进行验收报验合格后，管道车间预制班组方能领用，石油化工压力管道材料做好材料的炉批号信息移植，防止材料混用，预防质量问题出现。

## 3.2 管道焊工持证上岗

石油化工项目压力管道焊工持双证上岗（特种作业人员证和进场考试资格证），严格审查压力管道焊工有效资质，管道车间预制焊工正式施焊前，进行焊工作业人员培训考试，培训及考前练习联系情况，记录焊工考试备忘录，考试严格按照业主批准的质量程序进行，正式考试前注意对考试件的准备和考试报审；考试试件按照要求，覆盖焊工施焊管径和壁厚要求，考试试件与考试焊工相对应编号记录，考试试件报检监理和业主代表外观验收合格后，申请进行无损检测；做好焊工考试的质量反馈。对于压力管道焊工目录（含焊工姓名、照片、焊工资质项目、焊工钢印、进场离场时间、资格证复印件等）递交监理单位与业主审核批准，确保管道车间预制施焊的每道焊缝都是已批准的合格焊工。对于车间预制现场抽查发现无证焊工或超资质焊接焊工一律按无证焊工处理。优化预制车间压力管道焊接信息管理系统，每天更新完成报检焊口信息。追溯每个焊工在车间预制现场施焊的焊口和焊接质量，定期反馈车间预制焊接合格率，确保压力管道质量保证体系正常运行。

## 3.3 管道车间现场焊接

压力管道焊接工艺评定报告编制和报审，结合石油化工项目安装工程焊接特点优化设计的要求进行对比覆盖，特别是在管道车间预制实际施工过程中，优化压力管道各类型焊材的使用，不锈钢管道焊接在单独预制车间的焊接和报检，注意不锈钢焊材的色标和不锈钢预制件的防污染措施，焊缝的酸洗钝化处理；针对超大管径和超壁厚的预制焊接，做好焊接质量监控，质检人员跟踪监控特殊材质焊接作业，涉及热处理作业焊口，注意监控热处理报告和焊缝硬度检测记录；制作方便查看的焊接工艺卡片。做好焊接工艺卡质量的宣贯和培训，严肃车间预制现场焊接工艺的执行纪律，安排专人规范焊材库的管理、加强对压力管道焊材的烘烤、发放、回收、保管并做好记录，管道车间预制焊接必须严格按照报审批准的焊接工艺进行施焊作业，否则不予质量报检验收。焊口焊接记录（含返修记录）、焊缝外观质量检查报告也应完好保存。

## 3.4 管道车间预制焊缝无损检测

压力管道车间预制的焊缝的无损检测严格按照管道

特性表和业主批准的质量程序文件要求执行,根据车间预制结合释放现场,并按照车间的实际情况,车间预制件焊接完成后,报检焊缝外观合格后,预制件无损检测合格后才能释放现场安装,车间预制焊接完成的焊缝外观报检完成后,释放无损检测作业;车间预制件和现场焊接的焊缝一定做好区别标识。针对无损检测出现的不合格焊缝,安排专人找出预制件对应的焊缝,按照反修条要求标识出焊缝不合格的具体对应焊道位置;三方见证后,开始进行返修作业,找出焊道具体缺陷所在,做好焊缝返修质量记录;严格按照质量返修处理程序执行,满足施焊焊工和压力管道管线系统应按检验比例的要求进行无损检测作业,确保车间预制的压力管道无损检测的焊缝都合格释放,预制件移交给后续工序。

### 3.5 管道车间预制件释放

压力管道车间预制件的管理对后续现场安装工程开展非常重要,其中对预制件的释放移交工序尤为关键,管道车间预制焊接作业开始前,车间下料班组收到匹配的焊接图纸,采用便携式管段打码机标识结合使预制件信息炉批号同步信息移植,对预制件进行挂牌跟踪,预制件需要经过组对班组确认、焊接施焊作业人员确认、预制件涉及焊缝报检确认、无损检测人员确认、释放合格预制件同步更新管道车间焊接数据库,匹配对应预制件确认,预制管道释放清单和对应报检批次,三方预制车间现场检查无误后签字移交后续喷砂防腐工序作业,同步更新数据库释放移交记录,方便后续预制件的可追溯性。

### 3.6 管道车间油漆防腐

压力管道预制件预制结束后再进行车间补漆作业。要使用喷涂完面漆的管子和管件进行车间预制,在倒运和组对、焊接过程中成品的保护,其次面漆颜色的区分使选择材料下料时受制约,要增加材料储备和增加作业场地;再次业主选用环氧富锌漆的特点是底漆干涸时间短,喷涂后40分钟就可进行下一道工序,而中漆和面漆的漆膜干涸时间都要24小时以上,如果冬天气温低的时候干涸时间更长,如果漆膜不干进行下道工序很容易漆膜受损破坏,要想使用喷涂好面漆的管子周期在4到5天时间。所以根据上面三点分析选择最合理的工序,管子等材料送到油漆车间后先进行喷砂除锈,完成报检后进行底漆喷涂。做完防锈处理过的材料进入预制或安装环节。

### 3.7 压力管道阀门试压报验

石油化工项目压力管道阀门试压严格控制过程资料进度与现场安装进度的一致性。按照阀门到货清单和顺序,分批次对阀门试压进行报检验收;阀门试压过程资料及试压的阀门:阀门名牌(含阀门号、单元号、编号、阀门位置、生产厂家、质量证明文件、对应挂牌标识及阀门出厂合格证),阀门出厂试压记录;阀门车间试压资料提前报审监理单位和业主车间预制现场代表见证报检,车间现场

阀门试压工作三方见证拍照记录。车间现场阀门试压合格释放后,车间现场做好阀门试压吹扫、保存记录;各类阀门泄漏(严密)性试验报告和车间现场阀门壳体的强度检测;试压合格阀门注意标识,做好各类阀门的试压检测记录及释放现场安装反馈。

## 4 重视专业技术支持

石油化工项目管道车间预制及安装工程压力管道实施过程中,加强专业技术的支持,与监理和业主代表多沟通交流,充分了解各单元装置工艺和压力管道管线介质系统的基本性能参数,方便后期优化车间预制施工方案,划分检验报审批次;定期与车间管道作业焊工沟通交流,多听取车间预制焊工的合理建议,充分理解车间预制的管道系统类别,充分利用业主的先进建模资源,通过模型系统特点,及时更新车间焊接数据库信息,创新车间预制关键技术方案,不断深化车间预制的施工工序;关注监理和业主代表提出的问题,及时解决车间预制出现的问题,做好问题处理反馈。

## 5 结语

石油化工项目压力管道车间预制质量管理在机电安装工程中的地位举足轻重,以圆满完成该项目任务目标,获得监理单位和业主代表的高度认可,顺利取得竣工验收和压力管道安装工程竣工报告。本文通过工程实践进行总结性研究的关键质量管理方法与措施是:

(1) 充分了解业主单位各单元装置工艺,提取各专业系统装置基本参数,不断优化管道车间预制施工方案和强化车间预制现场施工技术质量培训,不断精进车间预制节点控制,确定车间预制质量管理目标。

(2) 重视车间预制压力管道质量过程管理控制,通过有效的管理方法和保证措施,找到预制关键工作,抓住车间预制施工重点,优化预制件焊缝报检批次,积极跟踪推进无损检测工作,为压力管道车间预制焊接预制件释放提供有利条件。

(3) 重视细节,在石油化工项目中,压力管道车间预制前、预制实施过程中、预制件释放现场安装完成后,通过现场不断的质量反馈,持续推进的质检培训,全面焊接质量管理活动;主动联系业主单位代表和监理代表,有预见性的进行管道车间预制焊接作业,不断完善深化设计、合理安排车间预制压力管道焊接作业施工工序,尽早发现问题尽早处理。车间预制压力管道工程的实施,不断提高作业人员成品保护意识,从而实现压力管道质量管理与控制。编制简明扼要的压力管道预制手册使用说明,用最浅显的语言和预制件查询系统告知监理代表和业主单位代表,方便业主代表进行查阅使用,以获得业主单位的认可。

## [参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家标准.输送流体用无缝钢管 [S].2018-05-14.

- [2] 中华人民共和国国家标准.流体输送用不锈钢无缝钢管 [S].2012-05-11.
- [3] 中华人民共和国石油化工行业标准.石油化工管道工厂化预制加工及验收规范[S].2017-04-12.
- [4] 中华人民共和国石油化行业标准.石油化工管道无损检测标准[S].2011-05-18.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部.石油化工设备和管道涂料防腐蚀设计标准[S].2019-12-24.
- [6] 中华人民共和国石油化行业标准.油气长输管道工程施工及验收规范[S].2014-05-29.
- [7] 中华人民共和国国家标准.焊缝无损检测 磁粉检测 [S].2011-09-29.
- [8] 中华人民共和国国家标准.工业金属管道工程施工质量验收规范[S].2011-12-01.
- [9] 中华人民共和国国家标准.现场设备、工业管道焊接工程施工质量验收规范[S].2011-02-18.
- [10] 中华人民共和国国家标准.工业金属管道工程施工规范[S].2010-08-18.

作者简介：李晓鹏（1987.7—），男，汉族，本科，毕业院校：南京工业大学，专业：工程管理；陈崇（1988.6—），男，汉族，研究生，毕业院校：英国考文垂大学，专业：汽车工程。

## 提高化工设备运行安全性管理措施研究

刘水云

陕西延长中煤榆林能源化工股份有限公司，陕西 榆林 718500

[摘要]化工设备属于化工生产系统里的关键部分，其运行是否安全和生产效率、产品质量以及企业安全管理水平紧密相关。随着化工工业持续向前发展，设备种类变得越来越复杂，运行环境也在不停地发生变化，安全事故所存在的潜在风险也明显增加了。文章会剖析设备老化、设计存在缺陷、操作不妥当、维护不够到位以及管理体系不够完善等因素给设备运行安全带来的影响，同时结合安全管理方面的理论与实际操作情况，提出从完善管理体系、强化运行监控、优化维护检修、提升人员素质、推动设备更新以及构建安全文化等多个不同维度出发的措施，以此给化工企业提升设备安全管理水平给予一定的参考。

[关键词]化工设备；运行安全；设备管理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17987

中图分类号: TQ086

文献标识码: A

## Research on Measures to Improve the Safety Management of Chemical Equipment Operation

LIU Shuiyun

Shaanxi Yanchang Coal Yulin Energy and Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 718500, China

**Abstract:** Chemical equipment is a key part of the chemical production system, and its operation safety is closely related to production efficiency, product quality, and enterprise safety management level. With the continuous development of the chemical industry, the types of equipment are becoming increasingly complex, and the operating environment is constantly changing. The potential risks of safety accidents have also significantly increased. The article will analyze the impact of factors such as equipment aging, design defects, improper operation, inadequate maintenance, and incomplete management system on equipment operation safety. At the same time, based on the theory and practical operation of safety management, measures will be proposed from multiple dimensions, including improving management system, strengthening operation monitoring, optimizing maintenance and repair, enhancing personnel quality, promoting equipment updates, and building a safety culture. This will provide some reference for chemical enterprises to improve their equipment safety management level.

**Keywords:** chemical equipment; operational safety; equipment management

### 引言

化工企业生产期间，设备能够安全运转这一点，可说是保证企业能正常开展生产以及实现可持续发展的重要保障所在。近些年来，随着生产规模变得越来越大，同时工艺流程也愈发复杂起来，化工设备在运行方面的安全状况便面临着前所未有的严峻挑战。传统意义上的设备管理，大多时候只是注重在被动检修以及定期维护这些方面，然而对于系统化的风险分析以及预防性措施却有所欠缺，如此一来便很难契合现代化生产对于安全管理方面的需求了。本文围绕着那些会对设备运行安全产生主要影响的因素，再结合实际的管理情况，给出了具有针对性的提升举措，从而为企业构建起高效且科学的设备安全管理体系给予相应的理论以及实践层面的支持。

### 1 设备安全性管理意义及现状

化工设备是化工产品生产的核心保障，只有化工设备不断的革新优化，才能提升化工产品的生产效率与质量，在此情况下，化工设备的正常运行是一切的基础。在生产过程中，由于各种因素的影响，化工设备极易受到影响，

导致出现问题甚至损坏，对化工生产的安全造成极大的威胁，由此可见，化工设备管理工作的顺利开展，是安全生产保障的有效途径，将安全维护体系纳入化工设备管制中，不仅可以确保相关数据的精准，保证化工设施的正常运行、提高相关技术的综合质量，同时通过缩减化学工艺的时间成本、提升化工产品的生产效率、增加化工技术的品质保障，提高相关化工企业的市场竞争力，还能切实降低设备出现故障的几率以及发生事故的概率，对生产流程予以优化，提升能源的利用效率，同时给企业的可持续发展以及安全管理制度的完善给予稳固有力的保障，进而达成技术创新与经济效益双双提升的良好局面。

### 2 影响化工设备运行安全的主要因素

#### 2.1 设备老化与腐蚀问题

化工设备于长期的运行进程当中，材料出现疲劳状况、遭受磨损以及产生腐蚀等老化方面的问题是难以避免的。而这些老化的相关问题一旦出现，将会致使设备的强度有所降低，其密封性能也会失灵，甚至可能出现管道发生泄漏或者反应釜压力出现异常等一系列的隐患情况，进而对

整个生产系统能够安全地运行产生影响。尤其是在那种温度较高、压力较强并且存在强腐蚀介质的工况环境下，设备的老化速度往往回明显地加快起来。要是缺少科学且有效的检测以及预防的相关手段，那么老化的问题就极有可能进一步演变为较为严重的安全事故。设备老化不但会对运行的安全性造成影响，而且还会使得维护的成本有所增加，同时也会让生产效率得以降低。所以说，化工企业务必要建立起一套系统的针对老化情况进行监测以及开展维护工作的策略，将定期进行检验的方法和对寿命加以评估的方式相结合起来，以此来对设备的使用寿命展开科学且合理的管理，从而防止潜在的各类事故风险出现。

## 2.2 设备设计与制造缺陷

设备设计是否合理以及制造质量如何，这两者是保障运行安全的基础条件。不过，因为存在设计参数不够完善、选用材料不太合适或者制造工艺有所偏差等情况，化工设备在实际运行的时候，有可能会出现局部应力过于集中、密封效果不好、强度不够等状况，如此一来，发生事故的可能性就会增大。特别是在复杂的工艺条件之下，设备的安全裕度务必要充分考虑到长期负荷以及环境方面的影响，要是不充分考虑这些因素，那么即便是在正常的操作流程当中，也极有可能会出现安全隐患。化工企业在设备采购环节、设计审核阶段以及制造检验时期，都必须要严格按照相关标准规范来执行，针对关键设备要开展可靠性方面的分析，并且做好验收检测工作，以此尽可能地降低设计以及制造缺陷所带来的风险。

## 2.3 运行操作不当与人员因素

设备运行的安全与否，一方面依靠设备自身所具备的性能状况，另一方面则和操作人员所具有的素质以及其具体的操作行为有着极为紧密的关联。要是出现操作不够规范的情况，或者操作人员经验有所欠缺，又或者是对异常状况做出错误的判断，再或者说在操作过程中存在疏忽大意的现象，那么这些都有可能致使设备发生故障，甚至还极有可能引发安全事故。化工生产的环境本身是复杂且多变的，在这样的环境下，操作人员必须要拥有系统的技术知识，同时还要具备较强的安全意识，这样才能精准地去理解设备运行时的各项参数以及各类警报信息。在实际的管理工作当中，操作规程倘若不够完善，又或者相关的培训工作做得不到位，那么这往往就会成为导致安全隐患产生的一个重要因素。所以说，要想确保设备能够安全地运行，那么提升操作人员的操作技能、强化针对他们的安全培训工作，以及建立起行之有效的监督与考核机制，这些无疑都是其中必不可少的关键环节。

## 2.4 检修维护不到位

设备在运行期间，难免会出现磨损、泄漏或者性能下滑等状况，要是检修维护不够及时，又或者维护办法不太科学，那么设备故障率以及事故风险便会大大增加。定期

维护、预防性检修还有故障分析这些举措，是保证设备安全运行的重要手段。不过部分企业在制定检修计划、执行相关操作以及管理记录等方面存在一些漏洞，使得关键设备的潜在故障没有能够及时察觉并处理。而且检修人员专业技能有所欠缺，亦或是维护流程不够标准化，同样会致使维护效果大打折扣。所以科学合理地规划检修周期、对检修流程加以优化以及提高维护人员的技术能力，对于提升设备的可靠性与安全性而言，属于极为关键的环节。

## 2.5 生产环境与介质变化的影响

化工生产环境里，温度、压力、湿度以及介质成分出现变化时，会对设备的运行状态和安全性能产生直接影响。当生产工艺做出调整、原料性质发生变化或者外界环境条件出现波动的情况下，都有可能使得设备负荷增加、腐蚀情况加剧或者出现运行异常等问题，进而引发安全事故。尤其是在那些存在多个反应环节且连续操作的生产流程当中，哪怕环境因素发生极为细微的变化，也有可能给设备带来影响。所以，企业应当建立起完善的环境监控以及预警系统，保证设备能够在合适的条件之下稳定地运行，并且对于异常的环境变化可以迅速做出响应并及时调整操作参数，以此来降低潜在的风险。

## 2.6 安全管理体系与制度缺陷

完善的安全管理体系以及相关制度，对于保障化工设备能够长期安全地运行而言，无疑是极为重要的支撑所在。就当下情况来讲，部分企业在开展制度建设工作的时候，存在着这样或那样的缺陷，像是责任分工不够清晰明确、操作规程缺乏规范性、监督检查也做得不到位等等。而这些所存在的问题，在设备实际运行的过程当中，往往是比較容易被放大的，进而使得事故发生概率也随之增加了不少。除此之外，倘若企业的安全文化较为薄弱，那么相应的管理措施在落实执行的时候就会面临诸多困难，员工对于风险的认识程度也不够充分，操作起来的随意性便会大大增强。所以说，构建起一套科学且系统的设备安全管理体系，把各个环节的责任都明确界定清楚，同时进一步完善监督以及考核方面的机制，并且借助培训以及文化建设等途径来强化员工的安全意识，这才是减少设备事故发生以及提升整体安全水平最为根本的保障举措。

# 3 提高化工设备运行安全性的管理措施研究

## 3.1 完善设备安全管理体系

构建起系统化的设备安全管理体系，这是保证化工设备能够稳定运行的根基所在。这一设备安全管理体系得涵盖设备从诞生到消亡的整个生命周期，具体来讲，要囊括设计环节、采购环节、安装环节、运行环节、检修环节以及报废环节等各个阶段，而且要清晰界定各个环节各自的责任分工情况，制定出相应操作规程，确立好管理标准<sup>[1]</sup>。借助于建立起完善的管理制度、操作流程以及监督机制，企业在源头方面就能够对风险加以防范，达成设备运行的

科学化管理目标。与此还得结合行业所规定的标准以及企业自身的实际情况，定期去评估该体系的实际有效性，并且依据运行过程中所反馈回来的情况不断地对管理流程予以优化，进而提升整体的管理水平。

### 3.2 加强设备运行监控与数据管理

现代化设备的安全管理，少不了精确的数据监控与分析。企业要是安装了在线监测系统、传感器以及数据采集装置，那就能实时知晓设备的运行状况，像压力、温度、振动、流量这些关键参数都能掌握，而且设备的能耗情况、润滑状态还有腐蚀程度等潜在风险指标也能监测到<sup>[2]</sup>。数据管理可不光是日常监控用得上，它还能给设备状态评估、故障诊断以及寿命预测当依据，能帮着制定科学的检修计划，优化运行参数。配合信息化管理平台以及智能分析工具，就能达成异常预警、趋势分析还有决策支持，如此一来，潜在风险能及时被发现，事故发生的几率也减少了，设备运行的可靠性与安全性都提升了，还给企业的安全管理决策、生产效率优化以及资源合理配置提供了重要的依据，让整个生产系统的安全管理变得更有条理、更科学且更有效率。

### 3.3 优化设备维护与检修制度

设备能够实现长期安全运行，科学且合理的维护以及检修制度无疑是极为重要的保障因素。企业需要依据设备所处的不同重要程度、特定的运行环境以及过往的历史故障数据等具体情况，去制定出具有差异化特点的检修计划。要把预防性维护与预测性维护这两种策略相互结合起来运用，以此来尽力减少突发故障出现的几率。在开展维护工作的整个过程当中，务必要严格依照操作规程以及标准化流程来行事，从而切实保证检修的质量能够得以落实。要定期针对故障展开细致分析，并且对相关技术进行总结归纳，持续不断地对维护策略以及方法做出优化调整，进而提升检修的工作效率，让设备的使用寿命得以延长，与此同时还要降低因生产中断而带来的风险，给企业的安全生产给予强有力的支撑。

### 3.4 提升人员安全素质与操作能力

设备安全管理的关键在于操作人员的素质以及技能水平。借助系统化的培训、岗位方面的考核还有应急演练等方式，企业是能够全方位提升员工的技术能力以及安全意识的，让员工可精准判断设备的运行状态，识别出潜在的风险，并且能及时对异常情况做出应对，以此有效降低因人为因素而引发的安全事故。人员培训应当涵盖操作规程、设备特性、风险识别、应急处理以及安全文化等诸多内容，要保证员工在各类复杂的环境下都有快速反应以及科学决策的能力。与此需要建立起完善的激励以及考核机制，把安全操作和绩效关联起来，鼓励员工积极主动地参与到安全管理以及风险防控当中，进而形成持续改进的人才培养体系，以此为设备安全运行给予坚实的人力保障，推动企业整体的安全管理水平不断得到提升，达成设备可

靠性与生产效率的同步优化。

### 3.5 强化设备更新与技术改造推动

随着工艺技术不断向前发展以及设备逐渐老化的因素影响，更新设备以及对设备加以改造便成了确保安全运行的关键举措。企业需要针对关键设备展开定期的评估工作，对于那些性能存在欠缺、老化情况较为严重或者安全风险相对较高的设备，要实施更新操作或者开展技术改造方面的相关事宜<sup>[3]</sup>。具体而言，可引入更为先进的材料，对结构设计予以优化，并且对自动化控制系统进行升级处理，借此方式来提高设备的安全性能以及生产效率。技术改造这一做法，一方面能够使设备的可靠性得以改善，另一方面也能够在一定程度上降低能耗以及维护成本，进而强化企业在所处市场当中的竞争力，达成安全与效益同时提升的良好效果。

### 3.6 建设安全文化与持续改进机制

安全文化在设备安全管理方面起着极为重要的支撑作用，其对企业员工的风险意识以及操作行为均会产生影响。借助开展安全宣传、经验交流以及安全考核等举措，企业便能够在全体员工当中营造出高度重视安全并且主动去防范风险的良好氛围。与此还应当建立起持续改进的相关机制，定期对管理体系所具有的有效性展开评估，仔细分析事故隐患以及设备运行方面的数据，从而及时地对管理措施加以优化。将安全文化与持续改进机制相互结合起来，能够促使企业形成那种科学、系统且具备可持续性的设备安全管理模式，进而为企业实现长期稳定运行给予有力的保障。

## 4 结语

化工设备运行安全跟企业生产效率、产品质量以及社会安全紧密相关。本文全面剖析了设备老化、设计与制造存在缺陷、操作不妥当、检修不够充分、环境发生变化以及管理制度有缺陷等因素，还提出了完善管理体系、强化监控数据管理、优化维护检修工作、提升人员素质水平、推动设备更新换代以及建设安全文化等多种举措。借助把理论和实践融合起来的管理策略，企业可以有效降低设备故障率以及事故风险，优化生产流程，提高能源利用效率，促使技术创新和经济效益双双提升。以后，随着智能化、信息化技术得到广泛运用，化工企业设备安全管理会变得更加科学且精细，给行业可持续发展给予稳固保障。

## 【参考文献】

- [1]傅海涛.论如何提高化工设备运行安全性[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(7):33-34.
- [2]陈凯,袁福涛.提高化工设备运行安全性的管理措施[J].化工管理,2021(13):103-104.
- [3]陈恺.提高化工设备运行安全性管理措施研究[J].中国设备工程,2024(16):70-72.

作者简介：刘水云（1986.6—），男，汉族，本科，毕业院校：榆林学院，专业：油气储运工程。

## 浮选柱在细粒有色金属矿分选中的优势与挑战

侯君一

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，新疆 哈密 839000

**[摘要]**面对易选矿产资源的日益枯竭，复杂细粒嵌布的有色金属矿成为开发重点，浮选柱凭借其高富集比和微泡矿化等特性，在提升细粒矿物回收率与精矿品位方面优势显著。数据显示，其可使精矿品位平均提高 2%~5%，回收率增加 1%~3%。本文进一步分析了浮选柱在泡沫稳定性控制、矿浆短路及沉砂处理等方面的技术挑战，并展望了智能控制与复合力场等发展方向，为其高效应用提供参考。

**[关键词]**浮选柱；细粒分选；有色金属矿；优势；挑战；气泡矿化

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18012 中图分类号: TD6 文献标识码: A

### The Advantages and Challenges of Flotation Columns in the Separation of Fine-grained Non-ferrous Metal Ores

HOU Junyi

Hami Geological Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Hami, Xinjiang, 839000, China

**Abstract:** Faced with the increasing depletion of easily selectable mineral resources, complex fine-grained embedded non-ferrous metal ores have become a development focus. Flotation columns, with their high enrichment ratio and microbubble mineralization characteristics, have significant advantages in improving the recovery rate of fine-grained minerals and concentrate grade. The data shows that it can increase the average grade of concentrate by ~ and the recovery rate by 1%~3%. This paper further analyzes the technical challenges of flotation column in foam stability control, pulp short circuit and sand settling treatment, and looks forward to the development direction of intelligent control and composite force field, providing a reference for its efficient application.

**Keywords:** flotation column; fine-grained sorting; non-ferrous metal ores; advantages; challenge; bubble mineralization

### 引言

有色金属作为国民经济发展以及国防建设重要基础材料，其矿石常常呈现出细粒、嵌布等特征，传统浮选机在去处理这类矿石时会面临回收率低、选择性差以及能耗高这些问题。浮选柱依靠逆流矿化以及深厚泡沫层结构，在细粒分选这一方面取得了显著成效，不但有助于提高精矿品位，而且还能降低能耗以及药剂用量，事实上，它的稳定运行是基于精密的过程控制以及深入机理研究。本文对浮选柱在细粒分选中技术优势、当前挑战以及未来发展方向进行了系统分析。

### 1 浮选柱在细粒矿分选中的核心优势

#### 1.1 具有优越特性分离选择性以及高富集比

浮选柱作为一种能够实现高效分选设备，其核心特性在于内部不存在机械搅拌装置，进而在整个矿浆区域范围内形成相对稳定且紊动程度较低流态环境，这样一种宁静流体条件为微细粒矿物与气泡之间碰撞以及吸附构建了理想界面，避免了因强烈湍流致使已附着颗粒出现脱落问题，尤其适宜于微细粒级以及难选矿物分选作业，浮选柱另外一个关键结构是其具备深厚泡沫层，该泡沫层高度通常能够稳定维持在 1~2m，这一高度远远高于传统浮选机，这层泡沫并非仅仅是简单气泡堆积，而是一个具有精细分选作用“动态精选区”，矿化气泡在缓慢上升并穿越这一厚泡

沫层过程当中，经历了类似于“过滤”物理分选过程<sup>[1]</sup>。

在泡沫层当中，由于气泡兼并以及破裂，同时重力沉降作用持续进行，那些机械夹带或者弱吸附亲水性脉石颗粒会从气泡表面有效剥离，并返回下方矿浆区域重新参与分选流程，疏水性强目标矿物则能够牢固附着于气泡之上，最终进入精矿溜槽，大量工业实践数据表明，相较于传统机械搅拌式浮选机，浮选柱在分选铜钼铅锌等有色金属硫化矿时，能够把最终精矿品位平均提高 2 至 5 个百分点，并且其富集比（也就是原矿品位与精矿品位之比）显著增高，这一优势使浮选柱在追求高品位精矿以及降低后续冶炼成本现代选矿流程中扮演着不可或缺角色。

#### 1.2 具备高效能力细粒与微细粒回收

细粒矿物由于质量较小表面能较高，在传统机械搅拌式浮选机中分选效率普遍偏低，强烈湍流容易致使已吸附于气泡颗粒发生脱落，同时矿浆流态不稳定也容易引发短路现象，造成细粒有用矿物随着尾矿过早流失，浮选柱则借助其独特结构有效应对这一难题：它选用文丘里管或发泡陶瓷等微细气泡发生系统，能够产生大量直径处于 0.5~2mm 之间均匀微气泡，显著增大气液界面面积，为细粒矿物提供更多与气泡接触以及吸附机会，极大程度上改善了矿化条件。

此外浮选柱内矿浆自上而下气泡自下而上逆流接触模式，创造出了更长矿化路径以及更为稳定分选环境，矿

物与气泡以在相对静止柱体内充分碰撞并实现黏附，有效延长了停留时间，提高了细粒级捕收概率，生产数据表明，对于 $-20\mu\text{m}$  细粒级有色金属矿物，浮选柱能够使其回收率相较于传统浮选机提高 1%~3%，在某些极细粒级或难浮矿物体系当中，则回收率提升幅度更为显著，这一优势使浮选柱成为细粒和微细粒矿产资源高效回收核心设备之一<sup>[2]</sup>。

### 1.3 拥有较低运营成本以及较小占地面积

浮选柱在结构设计方面具有显著优势，其主体通常呈现为高大塔式结构，垂直空间利用率较高，使单位处理量占面积远远小于由多台浮选机所组成机组，特别适合选厂空间受限或者希望紧凑布置现代化生产线，不仅如此浮选柱依靠其内部形成显著静压头，能够自然把富集泡沫精矿从柱顶排出，在大多数工况下无需额外配置故障率较高泡沫泵或中矿泵，这不仅简化了工艺流程，同时还减少了设备投资以及维护复杂性，提高了整个浮选回路运行可靠性。

浮选柱经济性以及节能效果更为突出，其逆流矿化模式以及深厚泡沫层带来了极高分选选择性，这种高效分离能力意味着在达到相同分选指标时候，所需捕收剂和起泡剂用量更少，实践表明药剂消耗可比传统浮选机降低 10%~20%。同时，由于没有大型叶轮定子等机械搅拌部件，驱动能耗以大幅降低，普遍能够实现 15%~30% 节能效果。

## 2 浮选柱应用面临的主要挑战

### 2.1 泡沫稳定性以及矿浆液面控制方面敏感性

浮选柱分选效率其核心要点在于开展维持一个稳定且足够深厚泡沫层这样工作，而这一泡沫层物理化学状态极其容易受到矿浆环境细微变化影响，关键影响因素囊括矿浆 pH 值溶液中各种离子浓度以及起泡剂和调整剂等药剂用量，pH 值出现波动会去改变矿物表面电性以及药剂吸附形态，离子强度则会影响气泡兼并速率与液膜强度，而起泡剂类型与用量更是直接决定了气泡尺寸分布与韧性，泡沫稳定性必须要被精确控制在适度范围之内：过稳泡沫虽然能够形成厚实泡沫层，但是会导致气泡兼并困难精矿流动性变差，甚至还会造成排放口堵塞；而过脆泡沫则无法支撑有效二次富集过程，大量已经吸附矿物在到达溢流堰之前便会发生脱落，导致选择性下降和回收率损失，矿浆液面高度稳定同样也是保证泡沫层正常工作关键物理因素，液面哪怕发生微小波动，也会打破泡沫与矿浆交界处动态平衡，轻则会引起泡沫层厚度变化和精矿品位波动，重则会导致“翻床”事故，也就是泡沫层结构彻底崩溃，大量矿浆直接涌入精矿，造成生产中断和产品质量严重恶化，这种对操作参数极端敏感特性，对自动控制系统提出了极为苛刻要求<sup>[3]</sup>。

### 2.2 矿浆短路以及沉砂处理方面问题

在大型浮选柱运行过程当中，矿浆短路是一个不容忽视技术难题，部分给矿浆，尤其是包含细粒级有用矿物流股，可能会因为布料器分布不均或者内部流场扰动，未能与上升气泡群发生充分有效碰撞和吸附，便迅速穿过气泡“沸腾区”，直接经由底部尾矿管排出系统，这种短路现象致使本应回收有价值细粒矿物未经矿化就过早损失，不

但降低了整机回收率，还造成了资源浪费，短路流失矿物通常以解离度好可浮性优良微细粒级为主，这使回收率下降尤为显著，底部沉砂堆积是另一大操作挑战，部分密度较大矿粒或者未能成功附着气泡中间颗粒，在重力作用下会逐渐沉降并在柱体底部区域形成高浓度沉砂，这些沉积物倘若不能及时通过尾矿排放系统排出，就会持续积聚，改变柱内预设流场状态和压力分布，破坏逆流矿化所需稳定环境。

### 2.3 给矿性质波动适应性

浮选柱作为一个高度连续稳态分选系统，其运行效率是建立在各操作参数动态平衡基础之上，然而这种稳态特性也意味着它对给矿波动适应性相对较差，当给矿浓度粒度组成或者原矿品位发生较大起伏时，浮选柱内部流态气泡矿化行为以及泡沫层稳定性都会受到显著干扰，举例来说，给矿浓度突然升高会致使矿浆黏度增加，恶化气泡分散与矿化条件；而入料粒度变粗则会加剧颗粒沉降趋势，增加底部沉砂风险，这与搅拌强烈能够灵活调整操作参数传统间歇式浮选机形成鲜明对比，后者能够通过即时改变药剂添加搅拌强度或者浮选时间来快速响应原矿变化，由于浮选柱是一个巨大“缓冲容器”，矿浆在其中停留时间较长，从调整操作参数到系统重新建立新的平衡存在明显的滞后性。操作人员即便根据当前精矿和尾矿指标及时调整了气量液位或者药剂用量，系统也需要更长时间才能逐步过渡到新稳定状态。这种滞后性对前序的碎磨、分级等作业稳定性提出了极高要求。

## 3 未来发展趋势与展望

### 3.1 智能化检测与过程控制

现代浮选柱实施智能化升级工作高度依赖于对先进传感技术运用，诸如泡沫图像分析仪在线激光粒度仪以及基于 XRF/LIBS 来开展实时矿浆品位分析仪等核心传感器，能够实现 7×24 小时不间断对关键参数进行连续监测，以某大型铜矿作为示例，泡沫图像分析仪借助非接触方式去分析泡沫特性，把精矿品位推断误差控制在  $\pm 0.3\%$  以内，其效率相较于人工提高了 30 倍；在线粒度仪对于 $-74\mu\text{m}$  粒级检测精度达到了  $\pm 1.2\%$ ，可以提前发出沉砂风险预警，从而保障分级效率；XRF 矿浆品位分析仪每秒进行一次检测，元素品位误差仅为  $\pm 0.15\%$ ，这些具备高频率以及高精度特点实时数据为智能决策提供了坚实基础<sup>[4]</sup>。不同核心传感器的具体性能参数对比如表 1 所示，可清晰体现各设备在浮选柱智能化检测中的技术优势：

海量实时数据只有结合大数据以及 AI 算法才能够创造出价值，某镍矿选厂（日处理量为 2000t）运用深度学习模型，基于 5 年历史数据开展了精矿品位回收率与气量液位药剂用量之间动态预测模型建立工作，其准确率达到了 92.5%，该系统实现了实时闭环以及预测性调控，能够在给矿品位出现波动前 3~5min 马上进行参数调整，把控制滞后从 15min 缩短至 3min 以内，精矿品位月波动由  $\pm 1.2\%$  降低至  $\pm 0.4\%$ ，每年增加效益约为 1200 万元，该系统具备自学习以及优化能力，即便在原矿品位出现大幅波动（0.3%~1.1%）情况下也能够保持分选指标稳定。

表1 浮选柱核心传感器性能参数对比

传感器类型	检测参数	检测频率	检测精度	应用场景	实际应用效果（某铜矿）
泡沫图像分析仪	泡沫尺寸、纹理、流速	10帧/s	尺寸±5%、流速±3%	精矿品位、回收率推断	品位推断误差±0.3%，效率提升30倍
在线激光粒度仪	给矿/产品粒度分布	1次/2min	-74μm粒级±1.2%	沉砂预警、分级效率优化	分级效率稳定≥85%，预警提前20min
XRF矿浆品位分析仪	铜、铁等元素含量	1次/s	品位±0.15%	元素瞬时含量监测	品位波动范围缩小40%

表2 某铁矿选厂不同分选流程指标对比

分选流程类型	处理能力(t/d)	原矿铁品位(%)	精矿铁品位(%)	铁回收率(%)	吨矿运营成本(元/t)	精矿杂质含量(SiO <sub>2</sub> , %)
单一机械浮选机流程	3000	28.5~32.0	62.5~64.0	88.2~89.5	128	5.2~6.0
单一浮选柱流程	2500	28.5~32.0	65.0~66.5	85.1~86.3	115	2.5~3.0
浮选机+浮选柱联合流程	3000	28.5~32.0	66.8~68.2	90.5~91.8	112	1.8~2.2

### 3.2 复合力场与新型内部构件开发

传统浮选柱在处理-10μm极细粒或者胶体矿物时候回收率常常低于60%，为了提高效率，复合力场浮选柱借助引入离心力或者磁场等外部物理场，极大程度改善了微细粒矿物回收效果，某铅锌选厂选用离心-重力复合浮选柱，使-10μm铅矿物表观粒径增大3~5倍，碰撞概率以及黏附强度分别提高了45%和30，回收率从58.2%提升至82.6%；某铁矿选厂依靠外加0.2~0.5T磁场，强化了磁性矿物疏水性与选择性，分离效率提升了28%，有效分选粒度下限拓展至5μm<sup>[5]</sup>。

浮选柱内部结构优化也取得了显著进展，比如某金矿选厂把微孔陶瓷充气器当作充气设备来使用，气泡直径缩小了60%~70%、密度提高了2~3倍，矿化效率提升了35%；在柱内加设规整填料以及导流挡板，有效改善了流场稳定性，使“短路”率从18%降低至5%，容积利用效率从75%提升至92%，结构优化带来了流速更加稳定矿物停留时间延长效果，最终实现了分选选择性回收率以及处理能力全面提高。当气泡直径缩小密度提高时，矿化效率得以提升，同时流场稳定性到改善，“短路”率降低，容积利用效率提高，进而全面提升了分选选择性回收率和处理能力。

### 3.3 工艺流程优化与集成

在选矿流程设计方面，浮选柱与机械浮选机互补集成是提高分选效益重要策略之一，尤其是“浮选机粗扫选—浮选柱精选”联合流程应用较为广泛，某大型铜选厂（日处理量为10 000t）采用了这种配置：前段运用8台XCF-II型浮选机进行粗扫选，利用其强搅拌以及抗干扰能力，在原矿铜品位0.45%~0.65%条件下实现了93%~95%回收率，尾矿品位控制在0.03%以下；所到粗精矿（铜品位8%~10%）再进入4台Φ3.2×12m浮选柱进行精选，凭借其稳定流态以及泡沫层有效剔除连生体与脉石，最终精矿铜品位达到25%~26.5%，相较于单一浮选机流程提高

了3~4个百分点<sup>[6]</sup>。不同分选流程的实际应用指标对比如表2所示，可直观体现联合流程的优势：

### 4 结语

浮选柱借助其具备优异选择性高效细粒回收能力以及较低运营成本，在细粒有色金属矿分选中展现出重要价值，事实上其后续进一步发展进程中，仍然面临着诸如对自动控制系统要求较高、沉砂排放存在困难、矿浆短路现象频繁发生以及对给矿波动较为敏感等一系列技术瓶颈。在未来，通过智能控制算法运用设备结构创新性设计以及全流程系统集成优化等多个方面协同突破，浮选柱有希望在复杂细粒矿产资源高效且绿色开发过程中扮演更为核心角色，从而为矿产资源可持续利用提供关键技术以及装备方面支撑。

### 参考文献

- [1] 杨凯志,邱显扬,李汉文,等.某锡多金属矿浮—重—反浮选中矿中铜锌锡的分离回收试验[J].金属矿山,2025(3):78-84.
  - [2] 马淑贤,王成林.高效电化学浮选技术在金属矿浮选工艺中的应用研究[J].世界有色金属,2024(17):76-78.
  - [3] 刘国蓉,张福亚,高自然,等.浮选柱在微细粒矿物浮选中的研究进展[J].有色设备,2024,38(3):19-23.
  - [4] 孙吕,陈艳平,蒋太国,等.云南某多金属矿铜铅混合浮选工艺试验研究[J].现代矿业,2024,40(3):160-162.
  - [5] 周利华.西藏某铜钼多金属矿浮选工艺流程优化实验[J].矿产综合利用,2025,46(1):125-131.
  - [6] 何买高.浮选柱在大宝山选铜精选的应用研究[D].长沙:中南大学,2022.
- 作者简介：侯君一（1976.5—），毕业院校：南方冶金学院（江西理工大学）所学专业：选矿，当前就职单位名称：新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，就职单位职务：矿业公司副总经理（地质矿产开发院副院长），职称级别：副高。

## 智能拣选装备在矿物加工中的应用现状与发展趋势

杨富强

中稀（凉山）稀土有限公司，四川 凉山 615601

**[摘要]**随着矿业资源开发程度的不断加深，矿物加工对于分选效率以及精度的要求变得越来越高，传统的人工以及半自动化的拣选方法已经很难满足高效且精细化加工方面的需求了。智能拣选装备把先进的传感器技术、视觉识别技术、人工智能算法以及自动化控制系统整合到一起，达成了矿石和废石的高精度且快速的分离效果，大幅度提升了矿物加工的效率、产品的质量以及资源的利用率。文中全面地对智能拣选装备的构成以及原理、在有色金属、黑色金属以及非金属矿物当中的应用情况、关键的技术以及未来的发展趋势展开梳理，并且对智能拣选装备在未来于智慧矿山建设以及绿色矿业方面的应用前景予以展望。

**[关键词]**智能拣选；矿物加工；人工智能；发展趋势

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18003

中图分类号：TD92

文献标识码：A

## The Current Application Status and Development Trend of Intelligent Picking Equipment in Mineral Processing

YANG Fuqiang

Zhongxi (Liangshan) Rare Earth Co., Ltd., Liangshan, Sichuan, 615601, China

**Abstract:** With the continuous deepening of mining resource development, the requirements for sorting efficiency and accuracy in mineral processing have become increasingly high. Traditional manual and semi-automatic sorting methods are no longer able to meet the needs of efficient and refined processing. Intelligent picking equipment integrates advanced sensor technology, visual recognition technology, artificial intelligence algorithms, and automation control systems to achieve high-precision and fast separation of ore and waste rock, greatly improving the efficiency of mineral processing, product quality, and resource utilization. The article comprehensively summarizes the composition and principles of intelligent picking equipment, its application in non-ferrous metals, ferrous metals, and non-metallic minerals, key technologies, and future development trends. It also looks forward to the application prospects of intelligent picking equipment in smart mining construction and green mining in the future.

**Keywords:** intelligent picking; mineral processing; artificial intelligence; development trend

### 引言

矿物加工属于资源开发里的关键环节，其主要目的在于借助有效的分选手段把矿石跟废石、不同品位的矿物切实分开，以此提升资源的利用效率并获取良好的经济效益。随着矿山开采规模变得越来越大，再加上矿石品位呈现出的不均匀情况愈发严重，传统的依靠人工来进行拣选以及初级的机械分选方式便出现了诸如效率不高、劳动强度颇大以及分选精度有一定限制等诸多问题。在这样的情况之下，针对智能拣选装备展开的研究以及其实际应用已然成为矿物加工领域极为重要的一个发展方向。这种装备把先进的传感器技术、计算机视觉、人工智能算法还有自动化执行系统相互融合起来，可以达成对矿物颗粒进行高精度且快速地识别以及分类分选的目的，进而让矿物加工流程得以优化，促使产品质量以及经济效益都得到提升。从国内外相关的研究情况来看，智能拣选技术在提升矿物分选精度、降低能耗以及劳动成本、推动绿色矿业发展等各个方面都有着十分突出的优势，已经渐渐地成为了现代矿物加工当中的重要技术支撑力量。

### 1 智能拣选装备概述

智能拣选装备属于装备系统，它是依靠先进检测以及

控制技术来运作的。该装备能够对矿物颗粒的物理特性、化学成分还有光学特性等相关信息展开实时分析，进而达成自动化识别、分类以及分选的目的。它的核心理念是借助高速传感器、精密图像处理系统以及智能算法，针对矿物颗粒开展无损检测，再凭借执行机构把不同类别的矿物高效地分离出来。这类装备一般是由检测系统、数据处理系统、执行系统以及控制系统组成的，在这些组成部分当中，检测系统负责采集信息，数据处理系统承担识别以及分类的任务，执行系统完成实际的分选动作，而控制系统则实现整个流程的协调与优化工作。智能拣选装备可以依据矿物特性以及分选需求来进行模块化配置，以此实现对不同矿石类型、粒度以及加工环境的灵活应用。与此伴随人工智能以及大数据技术的不断发展，装备的识别精度以及分选速度也在持续提升，从而为矿物加工给予了更为高效且更为智能的解决方案。

### 2 智能拣选装备的应用现状

#### 2.1 有色金属、黑色金属及非金属矿物加工中的应用

在有色金属矿物加工领域当中，智能拣选装备已然广泛地在铜、铅、锌、镍等多种矿石的分选环节得以运用了。

其借助对矿物的密度、颜色、光谱特征以及化学成分加以识别的方式,进而达成高精度的将矿石同废石予以分离的目的。如此一来,既提升了精矿的品位,同时也降低了能源的消耗以及冶炼的成本。而在黑色金属矿物加工方面,比如说铁矿石的分选工作,智能拣选装备运用诸如X射线透射、近红外以及磁性识别等技术方面的手段,有效地把低品位的矿物以及杂质给剔除掉了,由此提高了铁精矿的质量,并且也提升了冶炼的效率。对于非金属矿物加工的情况,像是石英、滑石还有萤石等这些矿物,装备会采用颜色识别、光谱分析以及微波红外热成像等一系列的方法,可以快速地将杂质矿物剔除出去,从而确保最终产品具备良好的纯度以及均匀性。智能拣选装备在不同种类矿物加工当中的应用情况,已经从最初的实验阶段慢慢地朝着工业化的应用方向转变了,并且还收获了颇为可观的经济以及环境方面的效益。

## 2.2 常见智能拣选装备及其应用

### 2.2.1 X射线透射(XRT)

X射线透射(XRT)拣选装备借助不同矿物对X射线吸收能力的不同之处,达成对颗粒的精准分选目的。其可在高速流水线的环境状况下,针对矿物颗粒展开实时的识别操作、细致的分类工作以及有效的杂质剔除举措,进而大幅提升分选的精度以及生产的效率。此项技术于金属矿物比如铜、铅、锌等精矿的提取环节,还有部分非金属矿物的分选流程当中,表现得格外出色。因为它具备识别精度颇高、处理能力颇为强大、分选速度较快并且能适应较广的矿物粒度范围等诸多优势,所以被广泛地应用起来。XRT设备能够凭借灵活地去调整X射线的强度、探测器的灵敏度以及数据采集的相关参数,实现对不同矿物类别做出快速的响应并开展高效的分选活动。与此它还能够和自动化执行机构以及智能控制系统协同一致地开展工作,进而圆满完成连续不断、稳定可靠且高效能的矿物加工流程。如此一来,在确保精矿品质得以维持的情况下,还能提高整条矿山生产线的运行效率以及获取良好的经济效益。

### 2.2.2 X射线荧光(XRF)

X射线荧光拣选装备借助检测矿物表面或者颗粒所发出的荧光信号,进而达成对元素组成的分析以及分类分选的目的。此项技术特别适用于那些需要针对矿物化学成分实施高精度把控的场合,像铜、铅、锌这类有色金属精矿的提取工作便属于此类情况。XRF拣选装备可实时对矿物的元素含量予以识别,同时凭借智能算法来开展分类操作,以此达成对低品位矿物以及杂质的高效剔除效果,进而促使精矿质量得以提升,生产效率也获得提高。XRF拣选装备能够直接反映矿石内部信息,避免矿石大小、湿度或表面污染程度的影响,从而保持较高的识别精度<sup>[1]</sup>。在实际应用中,XRF与其他分选技术结合,可显著降低能源、水量和药剂消耗,同时提升矿石的处理量和资源利

用效率。

### 2.2.3 近红外(NIR)

近红外拣选技术是依据矿物针对近红外光所呈现出的反射或者吸收方面的特性来展开分类识别工作的,这项技术特别适合用于有机物以及非金属矿物的快速分选操作当中。NIR装备具备对矿石的水分含量、内部结构状况以及化学组成成分实施无损检测的能力,进而达成精确分选的目的。此技术在石英、滑石、萤石等多种非金属矿物的加工环节里有着颇为重要的应用价值,并且还能够同XRT、XRF等相关技术相互融合起来,以此来实现从多个不同维度层面去开展矿物分选作业。NIR技术主要基于非谐振性分子振动,能够记录分子中单个化学键的基频振动及其倍频和合频信息,其检测性能优于常规的表面检测方法<sup>[2]</sup>。在实际应用中,NIR智能拣选装备可通过不同矿物的光谱响应与元素含量的间接关系,有效预测矿石中有价值金属的品位,从而实现高精度的分选和资源优化利用。

### 2.2.4 颜色拣选(色选)

颜色拣选装备借助高分辨率相机以及图像处理算法来识别矿物颗粒存在的颜色方面的差异,进而达成快速分选的目的。此方法在操作上较为简单,且所花费的成本也相对较低,它在铝土矿、锰矿、石英砂等多种矿物的加工环节当中有着广泛的运用。颜色拣选装备一般都会配备智能算法,能够依据矿物呈现出的颜色分布情况,在实时的状态下对分选参数做出相应的调整,以此提升分选的精度以及生产的效率。色选装备所用光源多为漫反射光源,不同光源的光谱特征存在差异,因此需要根据矿石表面的光学性质选择合适的光源和滤光片,并在必要时对光源进行合理设计<sup>[3]</sup>。在实际应用中,针对特定矿种如钾长石或钨矿,色选装备可以通过优化光源和图像处理算法显著提高矿物在图像中的识别度,从而有效降低误拣率并提升拣选效率。

### 2.2.5 其他类型拣选

放射性拣选依据矿物天然放射性的差异(如含铀的矿石和废石)实现分离,主要用于放射性矿物,具有识别精度高、处理量大、分选效率高等优点。红外线热成像特性拣选(IRT)是利用物料不同组分受热后红外线辐射强度差异进行分选,此类拣选装备无需额外照射,但在分选前需对矿石加热,微波-热红外成像技术(WM-IRT)可以有效改善难处理斑铜矿的分拣效果。

## 2.3 应用效果与性能评价

智能拣选装备在实际矿物加工里的应用效果十分突出,其优势主要体现在分选精度高、处理能力强大、自动化程度高以及劳动强度低等方面,在对不同矿石类型和粒度进行处理时,该装备可有效剔除低品位矿物和杂质矿石,提高精矿品位与回收率,还可减少能源消耗和废料排放,提升矿山生产的经济效益。对设备性能评价时,一般会综

合考虑识别精度、分选效率、处理能力、能耗水平以及系统稳定性等指标，并结合生产线实际运行数据来全面分析，从各方面评价结果来看，智能拣选装备在经济效益方面表现优异，对于推动绿色矿业发展、优化矿山资源利用以及降低环境影响都有重要作用，为矿物加工技术的现代化、智能化发展奠定了基础。

### 3 智能拣选装备的关键技术

#### 3.1 视觉识别与图像处理

视觉识别以及图像处理技术算得上是智能拣选装备的关键核心技术当中的一种。借助高速摄像机来对矿物颗粒的图像加以采集，而后凭借图像处理算法将颜色、形状、纹理等一系列的特征提取出来，进而达成对矿物的快速识别以及分类操作。伴随计算机视觉还有深度学习技术的不断发展，矿物图像识别所具备的精度以及速度都在持续不断地得以提升，这无疑为装备在高速流水线上的分选工作给予了稳固且可靠的支撑。

#### 3.2 传感器与检测技术

传感器乃是智能拣选装备达成矿物识别这一目的的基础所在，其中囊括了诸如X射线探测器、红外传感器、光学相机以及电磁传感器等多种类型。这些各式各样的传感器可实时对矿物的物理特性、化学特性以及光学特性等相关信息予以采集，并且会把这些所采集到的数据传送到相应的处理系统当中去展开分析操作。而具备高灵敏度以及高稳定性的传感器技术，则切实保障了该装备在那种复杂多变的矿物环境之下所能够实现的分选精度，同时也确保了其应有的可靠性程度。

#### 3.3 人工智能与机器学习在拣选中的应用

人工智能以及机器学习技术在智能拣选装备方面的应用较为普遍，借助训练算法针对矿物特征数据展开模式识别操作，进而达成分类以及优化决策的目的。以深度学习为基础构建的矿物识别系统具备处理复杂矿石样本的能力，能够提升分选精度，而且还能依据不同矿山环境进行自适应调整，实现动态优化效果。将智能算法加以应用，还能够实现设备故障预测以及生产流程优化，以此提高生产效率并增强系统的稳定性。

#### 3.4 自动化控制与机器人技术

自动化控制以及机器人技术在智能拣选装备达成高效分选方面占据着极为关键的地位。其执行系统借助气动方式、液压方式或者机械机构，能够把经过识别之后的矿物予以精确的分离处理，并且还会同控制系统携手一道顺利完成分选相关的各项任务。而采用机器人化的方式来进行分拣操作，一方面使得分选的速度以及精度都得到了有效的提升，另一方面也大幅削减了人工的操作环节，进而促使设备自身的稳定性以及可维护性均获得了进一步的

提高。

#### 3.5 数据集成与智能决策系统

数据集成与智能决策系统把传感器数据、识别结果以及控制指令加以统一管理，以此达成对装备运行的实时监控以及优化调度。此系统可分析生产数据、调整分选参数并做出智能决策，从而确保分选效率以及产品质量。并且，数据集成系统给矿山数字化以及智慧矿山建设给予了基础数据方面的支撑，实现了矿物加工全流程的智能化管理。

### 4 智能拣选装备的发展趋势与前景

未来智能拣选装备的发展态势呈现出硬件以及软件两方面的升级情况。就硬件来讲，该装备会向着高精度、高速度以及多传感器融合这样的方向去发展，以此来契合不同矿物类型还有粒度方面的要求，达成更为高效的分选效果。在软件层面，人工智能算法、深度学习以及大数据分析等手段会进一步提升识别精度以及决策能力，并且能够让设备具备自适应以及自优化的功能。绿色智能化这一趋势同样也会成为关键点，借助降低能耗以及减少废料的方式，达成可持续的矿物加工状态。除此之外，智能拣选装备将会与智慧矿山、数字矿山紧密融合起来，进而形成由数据所驱动的矿山生产管理体系，实现矿物加工全流程的智能化以及精细化操作，从而为矿业的绿色、高效发展给予技术层面的有力支撑。

### 5 结语

智能拣选装备属于现代矿物加工范畴内的一项重要技术手段，其在有色金属、黑色金属还有非金属矿物加工方面均获得了较为广泛的运用，由此使得分选精度以及生产效率都得到了颇为显著的提升。该装备将视觉识别、传感器检测、人工智能算法以及自动化控制技术加以集成，进而达成了高效、智能且绿色的矿物加工效果。在未来的发展进程中，伴随硬件性能不断得以提升、软件算法持续获得优化并且与智慧矿山实现更为紧密的融合，智能拣选装备于矿物加工领域势必会发挥出愈加重要的作用，从而促使矿业生产朝着高效、环保以及智能化的方向不断向前发展。

### [参考文献]

- [1]王龙,林兴浩,王彬.智能拣选装备在矿物加工中的应用现状与发展趋势[J].金属矿山,2022(10):113-121.
- [2]谭明,沈政昌,杨义红.矿物分选装备技术研究进展[J].绿色矿山,2024,2(1):85-93.
- [3]王泽雷.光电拣选设备研究与应用进展[J].化工矿物与加工,2023,52(5):51-57.

作者简介：杨富强，(1991.01—)，男，四川成都，现就职于中稀（凉山）稀土有限公司，选矿工程师，长期从事矿山选矿方面工作。

## 热处理对铝合金低压铸造轮毂综合性能的影响

郑艳银<sup>1,2</sup>

1. 秦皇岛戴卡兴龙轮毂有限公司, 河北 秦皇岛 066000

2. 河北省轻合金车轮技术创新中心, 河北 秦皇岛 066000

[摘要]随着汽车轻量化趋势的发展, 铝合金低压铸造轮毂得到了广泛应用, 热处理对于轮毂的综合性能有着显著影响。热处理是以改变铝合金的组织结构来增强其性能的, 主要有退火、固溶以及时效处理。在固溶处理参数方面, 需要对温度、保温时间和冷却方式等参数进行精细调控; 时效处理时, 时效温度、时间以及多级时效工艺对于强化相析出以及性能优化非常重要。同时热处理配合低压铸造、表面处理及后续加工工艺的配合能够减少缺陷, 增强耐蚀性及耐磨性, 保证了加工质量和轮毂性能满足设计要求。

[关键词]热处理; 低压铸造; 轮毂; 综合性能

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18011

中图分类号: TG249

文献标识码: A

### The Effect of Heat Treatment on the Comprehensive Performance of Aluminum Alloy Low Pressure Casting Wheel Hubs

ZHENG Yanyin<sup>1,2</sup>

1. Qinhuangdao Daika Xinglong Wheel Hub Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

2. Hebei Province Light Alloy Wheel Technology Innovation Center, Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

**Abstract:** With the development of automotive lightweighting trend, aluminum alloy low-pressure casting wheels have been widely used, and heat treatment has a significant impact on the comprehensive performance of the wheels. Heat treatment is used to enhance the properties of aluminum alloys by changing their microstructure, mainly including annealing, solid solution treatment, and aging treatment. In terms of solid solution treatment parameters, it is necessary to finely control parameters such as temperature, holding time, and cooling method; During aging treatment, the aging temperature, time, and multi-stage aging process are crucial for strengthening phase precipitation and optimizing performance. Simultaneously, heat treatment combined with low-pressure casting, surface treatment, and subsequent processing techniques can reduce defects, enhance corrosion resistance and wear resistance, and ensure that processing quality and wheel hub performance meet design requirements.

**Keywords:** heat treatment; low pressure casting; hub; comprehensive performance

#### 引言

汽车行业飞速发展的今天, 轻量化设计已经成为提高车辆性能和降低能耗的一个关键趋势。铝合金具有优良的轻质高特性而被广泛地应用于轮毂制造中。低压铸造是轮毂成型的先进工艺之一, 它能使铝合金溶液在模具中得到均匀充填, 从而制造出组织紧密、气孔小、强度好的轮毂。单纯采用低压铸造工艺还需要进一步提高铝合金轮毂性能, 热处理作为材料改性的有效方法, 对加热、保温及冷却工艺参数的准确调控可以显著改变铝合金组织结构进而增强综合性能。所以深入研究热处理对于铝合金低压铸造轮毂综合性能影响有一定理论意义与实际应用价值。

#### 1 热处理工艺原理及其对轮毂性能的基础影响

##### 1.1 热处理基本原理概述

热处理作为关键工艺方法之一, 通过仔细控制金属材料的升温、保温和后续冷却操作以改变金属材料内部组织结构进而得到符合具体应用要求的特性。铝合金加工中热

处理显得格外重要, 其主要由退火、固溶处理及时效等核心工序组成。退火处理主要是为了消除加工时材料内应力的影响, 经过这一环节, 能够显著改善材料塑性及后续加工性能, 从而更加容易成形及加工。固溶处理的目的是确保合金元素在铝基体中得到充分的溶解, 从而形成一个过饱和的固溶体, 这为之后的性能增强提供了坚实的基础<sup>[1]</sup>。但时效处理发生于固溶处理后, 促进过饱和固溶体内弥散相析出, 这些微小弥散相可以有效地阻碍位错运动以进一步提高材料强度与硬度。

##### 1.2 热处理对轮毂力学性能的基础作用

以力学性能为核心指标的轮毂质量涉及强度、硬度及韧性等诸多重点内容, 对轮毂实际应用可靠性与耐久性有直接影响。热处理作为材料改性的有效方法, 通过准确调节铝合金内部组织结构对铝合金力学性能具有深远影响。固溶处理是热处理过程中的第一步, 它的作用是使合金元素在铝基体中均匀而完全的溶解, 从而形成过饱和的稳定

固溶体并为以后时效处理打下坚实的基础。在后续时效处理过程中，弥散相在基体中逐步析出且分布均匀，这些微小弥散相粒子能有效地阻碍位错移动，进而显著增强材料强度与硬度。

### 1.3 热处理对轮毂微观组织结构的初步改变

微观组织结构是材料性能发挥的基石，在其宏观表现过程中起着决定作用。铝合金轮毂制造中热处理起着关键作用，可精准调控铝合金第二相粒子的行为并促进溶解、析出和再分布的一系列转变又深刻地改变了材料微观组织结构。固溶处理这一关键工序后，合金元素在铝基体上得到完全溶解和均匀分布，并以过饱和状态稳定下来，这时材料微观组织表现的比较均一。然后过饱和固溶体经时效处理后逐步分解，弥散相在基体中均匀分布并细化，生成大量细小强化相。这些强化相在有效地细化晶粒的同时也显著地改善了强度、硬度等力学性能。

## 2 固溶处理参数对铝合金低压铸造轮毂性能的深度影响

### 2.1 固溶温度对轮毂性能的精细调控

固溶温度是整个固溶处理环节的核心参数之一，在轮毂性能优化过程中起着精细而又至关重要的调节作用。固溶处理过程中，设定固溶温度较低时合金元素进入铝基体的溶解进程有限，不能完全溶解形成均一而稳定的过饱和固溶体。这种未完全溶解状态将使随后时效处理过程中析出相数量不足且分布不均匀，继而使强化效果大大降低，轮毂强度与硬度也难以获得理想<sup>[2]</sup>。随着固溶温度的逐渐提高，铝基体上合金元素的溶解度显著增大，能更加完全溶解，生成过饱和固溶体。时效处理为析出相提供了大量来源，使时效处理析出强化相增多且分布更均匀，有效地改善了材料强度与硬度。但固溶温度并不是尽可能高，温度过高会引起晶粒异常生长，造成晶粒粗大化现象，严重降低了材料塑性与韧性，从而影响轮毂综合性能。因此准确地选择适宜的固溶温度是轮毂强度与韧性达到完美兼顾的关键。

### 2.2 保温时间对轮毂组织均匀性的影响

保温时间是固溶处理不可忽略的关键参数之一，它对于轮毂组织均匀性具有直接而深刻的影响。固溶处理阶段合金元素向铝基体扩散溶解过程与保温时间密切相关，只有给以合适的保温时间才能使合金元素得到充分的扩散和溶出，继而形成均一、稳定的过饱和固溶体状态，从而为以后时效处理打下良好的基础。如若保温时间太短，合金元素就不可能完全溶出，材料内部就形成了溶出程度不同的部位，从而使组织均匀性大大降低。该不均匀组织经随后时效处理后，析出相分布亦变得不均，极大地影响了时效处理效果，不能有效改善轮毂性能<sup>[3]</sup>。相反，如果保温时间太长，不但会导致能源过度消耗、生产周期延长、生产成本提高，而且有可能诱发晶粒非正常长大、材料微

观结构损伤、综合性能下降等。因此需要根据铝合金具体组成及轮毂实际服役要求对保温时间进行准确控制，从而达到组织均匀化、性能最优化。

### 2.3 冷却方式对轮毂残余应力及性能的作用

冷却方式是固溶处理流程承前启后的关键环节，对于轮毂残余应力状态及最终性能表现具有重要影响。固溶处理结束时常用的冷却方式有水冷、油冷和空气冷却这些。水冷因冷却速度异常快而崭露头角，在高温时可快速“冻结”过饱和固溶体，有效地阻止合金元素过早沉淀，从而为高强度轮毂材料的获得创造良好的条件。但冷却速度过快就像一把双刃剑一样，可能诱发轮毂内产生巨大残余应力，使轮毂后续加工或者服役时，发生变形、开裂等现象的几率大大增加。油冷与空气冷却速度比较平缓，所引起的残余应力也比较低，有利于维持轮毂尺寸稳定。但是“慢工出来的细活”也造成了一定的成本，在两种冷却方式中物料的强度、硬度都可能比水冷处理稍差一些。所以实际生产中在选用冷却方式时，需要综合权衡轮毂的性能、形状尺寸特点和生产效率等方面的需求，争取达到性能和质量之间的最佳平衡。

## 3 时效处理工艺对铝合金低压铸造轮毂性能的优化作用

### 3.1 时效温度对轮毂强化相析出的影响

时效温度是时效处理工艺的关键因素，在轮毂强化相析出过程中起决定作用。在时效温度比较低的环境中，原子活动能力有限，扩散速度比较慢，直接造成强化相析出过程慢。在这种条件下要获得理想的强化效果必须延长时效处理时间，使强化相具有充分的逐步析出和分布时间。当时效温度逐渐升高时，原子能量增大，扩散速度明显加快，强化相析出速度增大。在合适的温度范围内能在较短时间内生成大量小而分散的强化相，它们就像无数个小“钉子”一样，有效地阻碍了位错移动，使材料强度与硬度显著增加。但时效温度并不是尽可能高，温度过高，强化相粗化严重，本来细小分散的强化相变粗，强化效果大减，甚至会诱发材料产生过时效，造成材料性能显著降低。因此准确地选择适宜的时效温度是优化轮毂性能的一个重要保证。

### 3.2 时效时间对轮毂性能稳定性的作用

时效时间是轮毂热处理工艺中影响轮毂性能稳定的一个关键环节，时效处理初期，过饱和固溶体内合金元素开始持续析出并生成细小弥散强化相。这些强化相就像“强化剂”一样，使材料强度、硬度在短期内快速提高，轮毂性能明显提高。当时效时间继续进行时，强化相析出量逐步达到动态平衡且析出量呈饱和状态，这时材料性能亦攀升到峰值状态并表现出优异的综合力学性能<sup>[4]</sup>。但是如果再一味地延长时效，这种局面就会出现反转。强化相由于长期在高温环境下会出现粗化现象，使原来细小均匀的强化相粗大而且分布不均匀，大大减弱了它们对位错运

动产生的障碍，致使材料强度、硬度降低，破坏了性能稳定性。因此需要经过严格的试验才能确定最佳时效，使轮毂性能能够稳定地处于理想状态，既要考虑生产效率又要考虑成本以达到效益最大化。

### 3.3 多级时效处理对轮毂综合性能的提升

多级时效处理这一先进时效工艺为增强轮毂综合性能提供了一种新途径。本发明打破了常规单一时效处理方式的限制，把时效全过程巧妙分为若干阶段，在各种温度下进行有序时效处理。多级时效处理过程中，第一级时效通常是在比较低温度环境下完成。这时原子扩散速度相对较慢，可以为强化相的生成创造良好的条件，并促使铝基体上滋生出大量微小弥散强化相的核心，这些细小的核就像种子，为随后强化相的生长打下基础。然后执行的第二级时效被选择更高温执行，温度越高，原子扩散速度越快，从而使强化相充分生长并在铝基体上达到更均匀分布。通过该分级时效处理充分发掘强化相在不同温度条件下析出的潜能，最终得到组织更细小且分布更均匀的强化相结构，然后从各方面提高了材料强度、硬度及韧性等综合性能使轮毂能够在复杂使用环境下发挥优异性能。

## 4 热处理与其他工艺协同对铝合金低压铸造轮毂性能的综合影响

### 4.1 热处理与低压铸造工艺的协同优化

热处理和低压铸造工艺协同优化是高性能铝合金轮毂创建的核心，低压铸造工艺以其本身的优点为热处理打下高质量的基础。低压铸造时对工艺参数进行精准控制可以使轮毂得到致密内部结构且成分分布更加均匀，从而有效降低内部缺陷，并为后续热处理提供有利条件。热处理又使轮毂的性能得到了进一步升华，它具有深度调整轮毂微观结构的能力，从而明显增强了其机械性质。在对低压铸造过程中浇注温度，压力及冷却速度几个关键参数进行优化后，轮毂内气孔及缩松缺陷可以得到最大限度地降低，使组织变得更均匀、更细致。配合科学合理的热处理工艺可以充分发掘材料内在潜力，从而有效提升轮毂强度与硬度，达到两种工艺协同作用，达到高性能轮毂制造要求。

### 4.2 热处理与表面处理工艺的协同增强

热处理和表面处理工艺协同作用为轮毂性能的整体改善提供一种有效方法。表面处理工艺就像是为轮毂披上

“防护衣”，可以显著增强轮毂的耐腐蚀性，使得轮毂不容易生锈和腐蚀，也可以优化轮毂的外观质量使轮毂更美观鲜艳。但热处理重点是深度提升轮毂内部性能，通过精准调控组织结构来降低内部缺陷、提高材料强度、韧性及其他力学性能，把两种过程有机地结合起来可以达到性能协同强化的目的。如热处理之后进行阳极氧化处理可以使轮毂表面形成一层紧密而牢固的氧化膜像牢固的盾牌一样有效地阻隔腐蚀介质入侵。并且经过热处理优化的内部组织

为表面处理奠定了更为稳固的基础，从而使表面处理的效果更为持久。此外微弧氧化等新型表面处理工艺配合热处理，可进一步提高轮毂耐磨性、耐蚀性、延长使用寿命<sup>[5]</sup>。

### 4.3 热处理与后续加工工艺的协同适配

整个轮毂生产链条上，热处理和后续加工工艺之间的配合适配是确保产品质量的关键一环。随后的加工工艺如机加工中的精细雕琢，旋压中的塑性变形处理等等均对轮毂组织结构及性能提出了具体的要求。热处理在这一工艺中起着“组织调教”作用，能准确地调节轮毂内部组织结构并使之具有优良加工性能。经适当热处理后的轮毂可有效地降低后续加工过程中的变形、裂纹及其他缺陷，确保加工精度及表面质量。但随后的加工工艺并不是被动地接受的，还会反作用于轮毂的性能。如在机加工过程中所引起的切削力会在轮毂内形成残余应力而影响尺寸稳定性及力学性能。因此需要根据后续加工工艺具体需求，对热处理工艺参数进行科学、合理选择，以达到二者协同适配的目的，进而保证轮毂最终性能能够完全达到设计标准并能够在多种使用场景中稳定、可靠工作。

## 5 结语

随着汽车轻量化趋势的发展，铝合金低压铸造轮毂得到了广泛应用，而热处理对于轮毂的综合性能有很大的影响。热处理以组织结构的变化来促进性能的提高，固溶、时效等处理参数的变化对轮毂的性能产生了深度的影响。另外热处理和低压铸造工艺的协同优化可以减少缺陷和增强性能；配合表面处理工艺可以提高耐蚀性及耐磨性；配合后续的加工工艺可以保证加工的质量。总之通过合理地应用热处理技术并与其他制造工艺进行协同，可以确保轮毂的性能满足设计规范。

## 【参考文献】

- [1] 莫兆敢,张冬寒,李小东.热处理工艺在模具制造中的应用——以铝合金轮毂低压铸造为例[J].汽车画刊,2023(3):45-56.
  - [2] 夏鹏.热处理对7046铝合金组织与性能的影响研究[J].材料工程,2023(4):56-57.
  - [3] 冯恩浪,罗礼营,卢叶,等.低压铸造铝合金轮毂在不同环境中的腐蚀分析及防护[J].全面腐蚀控制,2024,38(4):60-62.
  - [4] 王金业.金属材料热处理工艺与技术研究[J].新材料,2025,8(4):36-47.
  - [5] 童心.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集[C].江西:中国建筑工业出版社,2025.
- 作者简介：郑艳银（1990.3—），男，毕业院校：河北科技大学，学历：硕士研究生，所学专业：材料工程，当前就职单位：秦皇岛戴卡兴龙轮毂有限公司、河北省轻合金车轮技术创新中心，职称级别：工程师。

# 高炉煤气流量测量仪表的误差分析与校正方法研究

李文浩 张光勇 丁亚洲

日照钢铁控股集团有限公司, 山东 日照 276800

[摘要] 近些年来, 伴随着钢铁行业的不断发展, 对于高炉煤气流量测量的精度以及可靠性方面所受到的关注程度日益增加。就当下情况来看, 差压式流量计、孔板流量计还有质量流量计这类仪表, 依旧占据着主要的测量手段的地位。然而在那种高温、存在高腐蚀情况以及出现压力波动等等工况环境之下, 其测量所存在的误差是比较显著的。并且现有的校正工作大多是以周期性的离线操作形式来进行的, 如此一来便很难做到及时地去反映出生产方面的变化状况, 进而使得所获取的数据在稳定性与准确性这两方面都显得有所欠缺。所以说, 针对高炉煤气流量测量技术而言, 还是需要在误差分析以及校正方法这两个层面去做出相应的改进举措, 以此来促使测量精度以及可靠性得以提升。

[关键词] 高炉煤气流量; 测量仪表; 误差分析; 校正方法

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18010

中图分类号: TF05

文献标识码: A

## Research on Error Analysis and Calibration Method of Blast Furnace Gas Flow Measurement Instrument

LI Wenhao, ZHANG Guangyong, DING Yazhou

Rizhao Steel Holding Group Co., Ltd., Rizhao, Shandong, 276800, China

**Abstract:** In recent years, with the continuous development of the steel industry, the accuracy and reliability of blast furnace gas flow measurement have received increasing attention. From the current situation, instruments such as differential pressure flow meters, orifice flow meters, and mass flow meters still occupy the main position of measurement methods. However, under working conditions such as high temperature, high corrosion, and pressure fluctuations, the measurement errors are quite significant. Moreover, most of the existing calibration work is carried out in the form of periodic offline operations, which makes it difficult to reflect changes in production in a timely manner, resulting in a lack of stability and accuracy in the obtained data. So, for the measurement technology of blast furnace gas flow, it is still necessary to make corresponding improvement measures in error analysis and correction methods to promote the improvement of measurement accuracy and reliability.

**Keywords:** blast furnace gas flow rate; measuring instruments; error analysis; correction method

### 引言

高炉煤气是高炉炼铁时产生的关键副产品, 其流量测量在冶金生产里有着非同小可的意义。精准的流量测量和高炉工艺参数的优化控制息息相关, 同时也对燃烧效率、能源利用率以及生产安全产生直接的影响。随着高炉产量的不断增加以及自动化控制水平的逐步提高, 以往那种单纯依靠经验以及简单仪表来进行流量测量的方法, 已经没办法满足现代高炉对于测量精度以及数据可靠性方面的要求了。在高炉煤气流量测量的过程当中, 仪表自身的一些因素、外界工况出现的变化以及流体特性呈现出的复杂性等情况, 都有可能致使测量出现误差。要是这些误差没有得到有效的分析以及校正处理, 那么就会对生产调控以及工艺优化产生直接的影响。常用的高炉煤气流量测量仪表有差压式流量计、质量流量计、孔板流量计以及超声波流量计等等, 不同类型的仪表, 其测量原理以及应用条件都不一样, 它们的误差特性也存在着十分明显的差异。所以说, 针对高炉煤气流量测量仪表的误差展开系统的分析, 并且去研究科学合理的校正方法, 这已然成为了确保测量

精度、实现生产控制的优化以及提升能源利用效率的一个极为重要的环节。本文会围绕着高炉煤气流量测量仪表的误差来源、影响因素以及校正方法来开展相关的研究工作, 把理论分析和实际工况结合起来, 深入探讨误差优化以及改进的策略, 从而为高炉煤气测量朝着更加精确化、稳定化的方向发展给予技术层面的支持以及理论方面的依据。

### 1 高炉煤气的特性与流量测量的重要性

高炉煤气流量的精准测量对于生产效率、能源管理和安全生产具有重要意义。通过实时监测流量, 可及时调整燃烧参数, 保持炼铁炉内化学反应的稳定性, 从而提高生铁产量和质量, 同时避免因测量不准确导致的煤气浪费和生产成本增加。在能源管理方面, 流量数据可用于优化煤气分配策略, 防止过度供气或供气不足, 降低能源损耗, 例如某钢铁厂因流量计误差每月多浪费 20 万  $m^3$  煤气, 造成约 16 万元损失<sup>[1]</sup>。此外, 由于煤气中含有一氧化碳等有毒气体, 流量异常波动可能引发泄漏或爆炸, 精确测量为安全预警系统提供可靠依据, 及时发现和处理潜在安全隐患, 保障高炉生产的安全稳定运行。

## 2 高炉煤气流量测量仪表的误差分析

### 2.1 仪表类型及其误差来源

高炉煤气流量测量仪表产生的误差，主要是因为不同类型的仪表有着不一样的工作原理。常常用到的仪表种类有差压式流量计、孔板流量计、皮托管还有质量流量计等等，每一种仪表在开展测量工作的过程中，都有可能出现特定的系统误差以及随机误差。就好比差压式流量计，它是依靠压差来测量流量的，所以它的精度就很容易受到流体压力出现变化、密度发生改变以及安装位置不够恰当等诸多因素的影响；而孔板流量计的误差，大多是从孔板加工的精度方面、流速分布得不均匀之处以及管道直管段长度不够充足等方面产生的；质量流量计在测量那种温度特别高或者具有很强腐蚀性的气体的时候，其传感器所具备的特性、响应的灵敏程度以及由于长时间使用而出现的漂移等情况，同样会致使测量出现偏差。除此之外，仪表自身存在的制造误差、装配时候的精度问题、出现的磨损情况以及老化的状况等因素，在实际进行测量操作的时候，也都会引入相应的误差。

### 2.2 外界因素对流量测量误差的影响

在高炉煤气流量展开测量工作的过程当中，外界诸多因素对于测量误差有着不容忽视的影响，这些影响往往体现为温度、压力、流体特性以及管道条件等多个不同方面的因素共同作用所形成的结果。就温度而言，其发生的变化会致使煤气的密度以及粘度都随之产生变化，进而对流体在管道内部的流速分布状况以及压力差情况造成影响，使得差压式流量计或者孔板流量计的测量精度受到一定程度的影响；与此压力出现波动的情况或者管道内部瞬时压力发生变化的情形同样也会引发测量信号出现偏移的状况，最终导致流量数据出现误差。煤气成分发生的变化以及其中存在着的杂质，像灰尘、焦油颗粒或者是水分这类物质，会使得流体的物理性质发生改变，进而让仪表的响应出现偏差的情况，在那种高温、高腐蚀性或者工况不稳定的环境下，这种影响更是显得格外突出。除此之外，管道布置得不够合理、存在弯头、阀门以及出现局部收缩或者扩张等结构方面的因素，会致使局部出现湍流、旋涡或者处于非理想流动的状态，如此一来便引起了测量信号出现波动以及随机误差的情况。

### 2.3 仪表自身因素引起的误差

在开展高炉煤气流量测量相关工作的时候，仪表自身的一些因素往往成为引发测量出现误差的关键源头所在。这些因素具体来讲，涵盖了制造精度方面的情况、安装方面的实际状况、因长期使用而产生的磨损情况，还有电子元件性能方面所产生的影响等等诸多方面。就制造精度而言，在仪表的生产制造进程当中，所存在的加工环节出现的误差情况、零件在装配时出现的偏差状况，以及标定精度所受到的限制等因素，会直接致使初始阶段所获取到的测量数据和实际的真实流量之间存在着一定的偏差。从安装的角度来看，仪表所采用的安装方式以及具体的安

装位置，对于测量所能达到的精度同样有着颇为显著的影响。比如说，要是安装时未能保持垂直状态，或者管道的支撑不够稳固，又或者是存在偏心等情况，那么这将会使得流体的流态发生改变，进而促使流量计出现具有系统性的误差<sup>[2]</sup>。除此之外，随着仪表使用时间的不断推移，其内部的机械结构很可能会出现磨损的现象，同时传感器的性能也会有所下降，又或者是电子元件出现漂移的情况，这些都是会导致测量信号出现偏移的，从而使得随机误差发生的可能性不断增加。而且，仪表自身所存在的这些因素还很有可能会和环境条件相互之间产生作用，就好比振动、温度发生的变化以及电磁干扰等情况，它们会进一步将测量误差给放大开来。

## 3 高炉煤气流量测量误差的校正方法

### 3.1 仪表校验与标定原理

高炉煤气流量测量仪表的校验以及标定工作，属于保证测量精度以及可靠性的关键环节。其核心原理是借助标准流量或者在已知条件之下的参考值，针对仪表所输出的信号展开比对操作并加以调整，进而确定该仪表的测量误差，并且对其进行相应的修正处理。校验的过程一般涵盖静态校验以及动态校验这两种不同的方式。其中静态校验主要是凭借实验室环境下所设定的标准流量或者是标准气体，来对仪表实施精准的测量，以此来评定其线性误差、零点偏差还有灵敏度偏差等方面的情况。而动态校验则是处在模拟实际生产工况或者现场条件的状态下开展的，重点考察仪表在不同流速、压力以及温度等各类条件之下的响应特性以及输出稳定性的情况。在标定的过程当中，通过对仪表的校正系数、零点亦或是增益做出调整，促使它的测量输出能够和标准参考值达成匹配的状态，进而实现测量结果的准确性。

### 3.2 差压式流量计校正方法

差压式流量计在高炉煤气流量测量方面的应用较为常见，其校正办法主要是把仪表输出和标准参考流量二者之间的差异拿来比较，以此确定其误差规律并加以修正，从而确保测量能够准确无误。差压式流量计的测量原理是依据流体在管道里经过收缩装置（像孔板或者文丘里管这类）所产生的压差和流量之间的关联来确定的，所以其误差既有可能源自仪表自身，同时也受到流体密度、粘度以及流态分布等诸多因素的作用。在开展校正工作的过程当中，一般要先建立起标准流量条件，这能够借助高精度的标准流量装置或者参考管段达成，并且得保证实验环境当中的温度、压力还有流体成分都和实际工况较为接近<sup>[3]</sup>。在静态校正环节，通过施加已知的流量，让仪表输出处于稳定状态之后再记录下读数，对零点偏移、满量程误差以及非线性特性展开分析；而在动态校正环节，则需要在不同的流速以及压力条件下去进行测量，对仪表响应的线性度、滞后性还有瞬态误差做出评估。在进行校正的过程当中，还需要考虑到差压传感器的灵敏度漂移以及安装误差给测

量结果所带来的影响，通过调整校正系数或者是修改计算公式的方式，促使仪表输出值和标准流量能够高度吻合。

### 3.3 质量流量计及其他仪表的校正方法

质量流量计以及其他各类仪表在高炉煤气流量测量方面有着极为重要的应用，而其校正方法同样属于保证测量精度的关键环节。质量流量计主要是依靠直接测量流体的质量流量这一方式来获取相关数据，其误差产生的源头涵盖了传感器灵敏度、温度以及压力补偿精度还有仪表电子信号处理等诸多方面。在开展校正工作的过程当中，往往需要去建立起精确的标准质量流量条件，而这便能够借助高精度的校准装置或者已知质量流量的参考系统来达成。在静态校准的操作流程里，会施加标准流量，等到仪表输出趋于稳定之后再记录下相应的读数，进而对零点漂移、量程误差以及非线性特性展开分析；而在动态校准环节，则是在不同的流速、温度以及压力条件之下依次进行测量操作，以此来评估仪表的响应速度、线性度以及瞬态误差特性。对于像涡街流量计、电磁流量计或者超声波流量计这类其他类型的流量仪表而言，它们的校正方法同样是遵循着类似的原理，也就是通过标准流量或者已知的参考条件来进行比对，仔细分析误差分布情况以及仪表的各项特性，并且通过调整校正系数、修正信号处理算法又或者是更新补偿参数等一系列举措，最终实现测量输出与标准值达到一致性的情况。

### 3.4 在线校正与动态补偿技术

在高炉煤气流量测量工作当中，在线校正以及动态补偿技术算得上是提高测量精度并且增强其实时性的重要举措。和传统的离线校正不一样，在线校正可于仪表处于正常运转的工况之下，针对测量数据展开实时的比对操作并加以修正，如此一来便能够降低由于工况出现波动、环境产生变化又或者是仪表发生漂移等情况所引发的误差。动态补偿技术主要是借助对流体的温度、压力、成分还有流态等一系列变量实施实时的监测手段，再运用数学模型或者智能算法来对流量测量信号做出修正处理，进而达成对瞬态变化以及非理想流动状态予以补偿的目的。就好比在差压式流量计里，所实时采集到的温度和压力数据能够用来修正流体密度发生变化给测量结果所带来的影响；而在质量流量计以及超声波流量计当中，凭借动态补偿算法是可以修正传感器出现漂移、流速剖面不够均匀以及管道产生振动等原因引起的误差的。在线校正与动态补偿一方面能够确保仪表在复杂的生产环境之中维持一定的测量精度，另一方面还能够实现较长时间的连续监测，如此一来就能削减停机检修给生产所造成的影响，并且还能为高炉工艺控制以及安全运行给予较为可靠且及时的数据支撑。

## 4 流量测量误差优化与改进策略

在高炉煤气流量测量方面，对误差加以优化以及对测量策略予以改进，这对于提升测量精度、确保生产安全以及提高工艺控制水平而言，有着十分重要的意义。要从流

量测量系统的设计环节着手去开展工作，合理地去挑选仪表类型、确定安装位置以及规划管道布置，以此来尽力削减因局部出现湍流、流速存在不均情况以及管道结构不够合理而引发的各类误差；得针对流体的温度、压力还有成分方面的变化展开有效的监控举措，并且要结合仪表的具体特性来对相关数据做出修正处理，进而降低外界诸多因素给测量精度所带来的影响<sup>[4]</sup>。在对仪表进行使用的过程当中，应当建立起一套科学合理的维护以及校验方面的制度安排，定期去实施校准操作以及开展性能检查工作，借此方式来减少因长期使用而产生的漂移误差以及老化误差；与此还要强化对操作人员的培训力度，促使他们能够更为透彻地理解仪表原理、掌握安装要求并且知晓测量时需要注意的各项事项，如此便能有效地将人为操作误差降下来。除此之外，随着智能化以及信息化技术不断向前发展，可以考虑引入数据采集与分析系统，借助实时监测、动态补偿以及对异常数据展开分析等方式，来对流量测量数据进行优化方面的处理，进而达成对高炉煤气流量实现精确测量以及长期稳定控制的目标。

## 5 结语

经对高炉煤气流量测量仪表的误差展开分析并研究其校正方法后可发现，仪表自身方面的情况、外界工况所发生的种种变化以及流体呈现出的各类特性等因素，都会对测量精度起到颇为重要的影响作用。就差压式流量计、质量流量计以及其他不同类型仪表而言，在实际使用进程中均存在着程度不一的系统误差以及随机误差。不过，借助科学且合理的校正办法，再加上在线校正手段以及动态补偿相关技术，是能够切实有效地提升测量工作的准确性以及实时性的。凭借较为合理的误差分析方式以及相应的优化策略，一方面可以促使高炉煤气流量测量的可靠性与稳定性得以提高，另一方面也为高炉生产工艺方面的控制工作、能源管理事宜以及安全运行情况给予了可靠的数据支撑。在未来，伴随智能化技术以及信息化技术不断向前发展，高炉煤气流量测量有希望达成更高精度以及更高效率的在线监测状态，进而为钢铁工业的精细化管理工作筑牢坚实的技术保障基础。

## 【参考文献】

- [1]简捷.高炉煤气环缝洗涤器结构参数的优化研究[D].河北:燕山大学,2024.
- [2]朱勇.钢铁企业高炉煤气产耗及柜位预测方法研究[D].江苏:江南大学,2023.
- [3]宋皎.威力巴流量计在高炉煤气流量测量上的运用研究[J].冶金与材料,2020,40(5):18-19.
- [4]刘晓兵.莱钢炼铁厂新型煤气计量仪表的应用[J].山东冶金,2017,39(6):69-70.

作者简介：李文浩（1988.10—），毕业院校：武汉纺织大学，专业：电子信息工程，单位：日照钢铁控股集团有限公司，职务：仪表工程师，职称级别：中级。

## 基于图像处理的桥梁缺陷自动检测技术研究

郭嘉成

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

[摘要]随着我国基础设施的快速发展，桥梁安全问题日益受到关注。传统桥梁缺陷检测方法依赖人工巡检，不仅效率低下且易受主观因素影响，难以满足现代桥梁管理对高效、精准监测的需求。文中围绕桥梁自动检测技术展开研究，基于图像处理理论，通过合理设计桥梁图像采集与预处理流程，实现对桥梁表面裂缝、剥落等典型缺陷的识别。研究采用多角度图像获取与特征分析方法，针对桥梁结构复杂和缺陷种类多样的问题，提出了一整套自动化检测框架，有效提升了缺陷定位的准确性和检测效率。实验结果表明，该自动检测技术具有良好的可靠性和通用性，能够较好地适应工程现场桥梁检测需求。该研究为桥梁维护决策和生命周期延长提供了技术支撑，有助于实现桥梁结构的健康管理和公共安全保障，推动桥梁养护管理方式向智能化、自动化方向发展。

[关键词]桥梁缺陷检测；图像处理；自动化技术；结构健康监测；裂缝识别

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17997 中图分类号: U216 文献标识码: A

### Research on Automatic Detection Technology of Bridge Defects Based on Image Processing

GUO Jiacheng

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** With the rapid development of infrastructure in China, bridge safety issues have received increasing attention. Traditional bridge defect detection methods rely on manual inspections, which are not only inefficient but also susceptible to subjective factors, making it difficult to meet the needs of modern bridge management for efficient and accurate monitoring. The article focuses on the research of automatic detection technology for bridges. Based on image processing theory, by designing a reasonable process for bridge image acquisition and preprocessing, typical defects such as cracks and peeling on the surface of bridges can be identified. The research adopts multi angle image acquisition and feature analysis methods, and proposes a complete set of automated detection framework to address the problems of complex bridge structures and diverse types of defects, effectively improving the accuracy and detection efficiency of defect localization. The experimental results show that the automatic detection technology has good reliability and universality, and can adapt well to the requirements of bridge detection in engineering sites. This study provides technical support for bridge maintenance decision-making and life cycle extension, which helps to achieve health management and public safety protection of bridge structures, and promotes the development of intelligent and automated bridge maintenance management methods.

**Keywords:** bridge defect detection; image processing; automation technology; structural health monitoring; crack identification

#### 引言

伴随着我国高速公路和城市道路建设规模持续增加，桥梁变成连接各地最重要交通枢纽，桥梁能不能稳稳当当工作，直接关系到国家经济发展快慢和老百姓生命财产会不会受到损失。交通运输部公布数据，2023年底全国桥梁数量已突破一百万座以上，很多桥梁因为使用年限太久、周围环境腐蚀严重、来往车辆越来越重这些原因，导致裂缝、混凝土掉块、钢筋生锈这些毛病频发，这已经变成威胁大家安全必须马上解决的大问题。现在发现这些毛病基本靠工人拿着工具一点一点人工检查，可是这种老办法检查一次要花很长时间、人员工资花费太大、每个人看问题的标准还不一样，结果经常不准，所以很难做到及时发现所有隐患、全面掌握每座桥梁到底健不健康。国内外学者早已研究将数字图像处理、机器视觉以及人工智能算法应用于桥梁检测领域，在很大程度上提升了检测自动化水平和准确度，但是面对大规模桥梁

结构复杂、缺陷种类多且环境干扰大的真实情况，自动检测技术仍然面临识别精度低、适应能力弱等难题。探究工作集中桥梁缺陷自动探测领域，系统探讨了运用图像处理技术来辨识和解析桥梁表面各种缺陷的方法，目标是构建一个速度快速、运行可靠的自动化探测系统，用来克服传统探测方法的不足。通过仔细解析桥梁缺陷种类繁多、表现形式繁杂等特点，结合多角度图像采集技术以及缺陷特征提取和辨识技术，努力实现桥梁缺陷探测的智能化和规范化操作，为实际工程中桥梁健康管理和养护决策提供全新的技术支撑。

#### 1 桥梁缺陷检测的现状与发展趋势

##### 1.1 行业背景及安全需求

桥梁属于现在交通设施当中最关键的部分，桥梁安全直接影响到经济发展和老百姓生命财产安全。随着我国桥梁总数和规模快速增长，很多桥梁使用年限越来越长，老化情况变得越来越严重，一些桥梁结构开始出现缺陷问题，

这些缺陷可能让桥梁扛不住重压，甚至发生严重事故。桥梁常年暴露在室外，会受到温度高低变化、风吹雨打、车辆反复碾压这些因素影响，表面经常出现裂缝、混凝土掉块、钢筋生锈这些毛病。过去检查桥梁主要靠工人拿着工具到处看，速度慢而且不够准确，很难把桥梁整体健康状况完全查清楚，经常会漏掉问题或者看错情况。现代桥梁管理对安全性监测提出了更高要求，亟需依靠前沿技术实现高效、智能化的自动检测。满足桥梁缺陷检测的实时性、精确性和全面性是促进桥梁健康管理与安全保障的重要环节。

### 1.2 当前检测技术面临的挑战

现在桥梁缺陷检测技术用起来问题特别多。人工巡检一直是主要方法，速度慢、浪费大量人力，检查结果还特别容易被个人主观想法影响，难以保证每次精度都稳定一致。在桥梁内部结构特别复杂的地方，人根本去不了所有位置，导致很多缺陷直接漏掉或者被错判，概率很高。桥梁本身形状千差万别，不同缺陷长得又不一样，这就大大加大了用老方法识别缺陷的难度。因为老设备技术水平有限，加上现场环境条件差，根本做不到随时随地、一点不落进行实时监测，根本达不到现在桥梁管理需要的又快又聪明的标准。这些问题严重阻碍桥梁检测技术往更精细、更自动化的方向发展，亟需赶紧研发出先进技术来大幅提高检测效率和准确率，才能给桥梁结构健康管理提供真正放心的保障。

### 1.3 图像处理技术在桥梁检测中的应用价值

图像处理技术桥梁缺陷检测领域具有重要应用价值，工程师通过采集桥梁结构表面高清图像信息，可以快速准确识别裂缝、混凝土剥落、钢筋锈蚀等多种缺陷，显著提升检测速度跟准确程度。先进融合算法结合特征分析技术已经实现全自动处理流程，大幅减少人工巡检带来的人为误差跟对人员的依赖程度。图像处理技术非常适合桥梁结构复杂、类型多样的实际情况，能够给现代桥梁智能化管理提供稳定可靠的技术手段。这种技术广泛使用大大推动桥梁养护向科技化方向发展，为桥梁日常安全保障跟长期健康监测奠定非常坚实的技术基础。

## 2 图像采集与预处理流程

### 2.1 多角度图像采集策略

桥梁缺陷自动识别技术想要准确找出所有问题，采集多角度照片充当最重要的环节，作用至关重要。因为每座桥梁形状千差万别，同一个缺陷在不同部位看起来差别明显，要想彻底识别所有缺陷，就必须从多个角度、多个距离采集照片。可以提前布置好位置灵活的传感器，配备清晰度很高的高分辨率相机，再利用无人机帮忙，从前前后左右、远近不同位置，以及早上中午晚上不同光线条件下拍摄照片，这样才能保证拍到的信息足够完整不遗漏。采用多角度拍摄方式能够消除因为东西挡住或者角度太单一造成的看不见区域，大幅提升缺陷识别能覆盖到的范围。根据每座桥梁具体的结构特点，随时灵活调节无人机或者相机的拍摄角度，保证梁底、桥墩、缆索这些重点部位都能拍得特别清楚。这

些多角度拍出来的高质量照片，会直接供给后面的图像处理和缺陷特征提取使用，有利于最终达成又快又准的缺陷识别目标，最终维护桥梁始终处于安全运行状态。

### 2.2 图像去噪与增强技术

图像去噪和增强技术桥梁缺陷检测具有重要作用。桥梁检测图像采集过程容易出现噪声问题，通过去噪处理可以大大提高图像质量。常见方法包括使用空间域中值滤波和使用频率域小波去噪技术，中值滤波可以去除图像脉冲噪声，小波变换技术擅长去除复杂背景随机噪声。来突出桥梁缺陷特征，应用图像增强技术改善视觉效果。通过对对比度增强方法，可以清晰显示裂缝剥落部位细节信息。使用直方图均衡化技术，就能改善图像灰度分布，突出缺陷区域数字图像明显程度。这些技术一起使用，给后面缺陷识别分类工作提供高质量干净清晰图像数据支持。

### 2.3 缺陷区域的初步分割

缺陷区域分割是桥梁图像处理当中最关键步骤之一。技术人员借助分析采集到图像里面每个像素具体特征，就能准确找出哪些位置最常发生裂缝或者剥落问题。工作人员综合运用灰度变换方法、边缘检测方法、再加上纹理分析这些手段，来完成强化特征区域筛选任务，从而大幅提升分割准确程度。桥梁结构本身很复杂，所以必须采用适合处理大跨度图像算法，例如区域生长分割技术，这样才能完成裂缝和剥落区域快速精准识别。在整个分割过程当中加入动态阈值调整策略，用来适应各种现场光线和天气环境变化，加强缺陷边界定位能力，最终得到准确可靠初步检测结果。

## 3 缺陷特征识别与分类技术

### 3.1 裂缝与剥落特征提取

裂缝跟剥落属于桥梁缺陷检测里面两种特别常见的类型，这些特征提取工作直接决定自动化检测技术能不能做到又准又稳。裂缝往往呈现出一条一条明显线条形状，宽度有多宽、长度有多长、整体弯曲样子都属于关键判断依据。采用图像处理技术，借助边缘检测算法加上形态学操作，就能够快速准确地把裂缝几何形状全部抓取出来。实际使用过程中，为了应对桥梁表面材料不同、光线强弱不一这些复杂情况，必须再融合纹理分析方法以及灰度变化规律，来更加提升识别准确度。剥落缺陷最主要特点就是表面本来完整结构被破坏掉了，损坏区域大多显示出颜色偏暗、亮度偏低而且明暗分布特别乱。采用图像局部梯度计算结合区域分割算法，可以完成剥落区域准确位置确定。借助裂缝跟剥落特征携带的不同信息，工程师能够清楚评估缺陷当前严重程度，还能预测缺陷未来扩大趋势。整个特征提取流程给缺陷智能识别模型构建奠定了非常可靠基础，显著提高桥梁自动化检测系统在日常工程中的使用效率和实际效果。

### 3.2 缺陷智能识别模型

缺陷智能识别模型依靠图像处理和深度学习技术完成训练，搭建完整端到端特征提取和分类结构，达成桥梁缺陷高效精准检测。模型选择卷积神经网络 CNN 当作核

心骨干网络，融合多尺度特征学习模块，对于裂缝、剥落这类复杂缺陷形态完成高精度检测。使用迁移学习技术改善网络参数，显著提升模型训练效率以及各种场景适应能力，引入注意力机制模块着重关注缺陷关键区域，明显改善检测准确率。为了应对桥梁结构复杂造成的检测困难，模型专门开发多种优化策略，极大提高不同材质和结构缺陷检测稳定性与鲁棒性。经过大量实验证明，这套模型具备极高检测精度和优秀泛化能力，完全满足各种桥梁缺陷检测的实际需求，为桥梁智能化检测技术研发带来可靠技术支持。

### 3.3 识别结果的准确性提升

旨在提高识别结果的准确性，面对桥梁缺陷特征的复杂性和多样性，使用高效的深度学习算法改进特征匹配过程，运用多源图像数据融合技术强化缺陷信息表达，并且融合精细化的后处理方法减少误检率和漏检率，从而达成桥梁缺陷的精准识别与分类。

## 4 自动化检测框架与系统实现

### 4.1 检测流程的自动化集成

自动化检测框架整合起来是实现桥梁缺陷检测技术快速落地最关键一步。通过把图像采集模块、预处理模块和特征识别模块互相连接在一起，构建出一套完整检测工作流程，这样大大提高了整个系统各个部分配合默契程度和运行速度。在实际检测过程中，桥梁图像采集模块负责从多个角度拍下桥梁表面所有区域，确保缺陷位置不会被漏掉。图像预处理模块使用去噪技术、增强技术来优化输入图片质量，给后面步骤提供清晰可靠特征信息支持。缺陷识别模块使用智能算法对处理完图片进行分析，完成缺陷种类判断和具体位置标记。各模块借自动化接口实现数据高效流转，减少人工干预，大幅提升信息传递速度与处理稳定性，检测流程集成设计兼顾桥梁结构复杂特性，针对不同形态灵活调整，保障技术适用与普遍，此框架为桥梁缺陷检测规模化应用筑牢了坚实技术根基。

### 4.2 桥梁结构复杂性适应方案

旨在更好适应桥梁结构十分复杂的特点，检测框架专门设计出能够适应各种结构形式以及各种材料特点的完整检测方法。检测过程通过结合多角度拍照采集图片加上人工智能识别模型，成功实现对桥梁所有复杂部位进行全面监控。图像处理算法大幅提升了对不同材料表面反光特点的识别能力，同时能够非常准确地把相邻两个结构之间的边界清楚分开。通过建立一个灵活多变的特征分析数据库，检测参数可以随时自动调整，从而轻松应对桥梁结构随时可能出现的变化，也能准确识别出各种各样的缺陷类型。这种高度适应的检测方法为大幅提高检测效率和检测准确率奠定了非常坚实的基础。

### 4.3 系统适用性与扩展性评估

桥梁缺陷自动检测技术要想真正用到实际工程中，必须先认真评估这个系统到底好不好用、能不能扩展。桥梁

种类非常多，结构复杂程度不一样，检测要求也不相同，所以要专门做适用性测试，看这个系统能不能检测各种不同类型的桥梁、不同材质的桥梁，以及在各种天气和环境条件下是否都能正常工作。通过把核心检测算法做成一个个独立模块的方式，大大增强系统扩展能力，这样以后不管遇到哪个地区特有的环境，还是未来出现了新材料、新结构形式的桥梁，系统都能轻松调整满足要求。实际评估结果表明，这个检测系统在面对不同桥梁类型、不同结构形式、不同缺陷种类时，都能稳定可靠地工作，而且只要稍微改动框架就能增加新功能，实用价值很高，能给桥梁日常健康监测和智能化养护管理提供非常可靠的技术支持。

## 5 结束语

研究人员专门针对桥梁缺陷自动检测技术做了大量工作，成功建立起一套完整的图像处理检测系统，完全克服了过去靠人眼巡检效率低下、判断结果容易受到个人主观影响很大的问题。研究人员采用多角度拍照方式，再配合智能特征分析技术，准确快速识别出裂缝和剥落等桥梁表面常见损伤。大量真实工程现场实验充分证明这套方法运行稳定、适应能力强，能为日常桥梁维护决策、结构安全监测以及延长桥梁使用寿命带来可靠技术支持，有力推动桥梁养护工作朝着智能化和自动化方向快速发展。现在这套技术仍然存在几处可以继续完善提高的地方。当前桥梁检测存在一些不足：部分微小缺陷在复杂环境光照，表面污染等干扰下检出率低，检测框架多聚焦表面视觉缺陷，对内部结构隐患及多源数据融合关注不足；检测系统实时性与跨桥梁类型的通用适应性也有待优化，未来研究可从三方面拓展：引入深度学习及多模态数据融合技术，增强对复杂环境和内部隐患的识别；研究实时处理性能与端云协同模式，兼容更多桥梁类型，完善缺陷评估与预警机制，让检测结果与桥梁健康管理决策深度联动，推动桥梁结构安全管理向智能化、精细化迈进。

## [参考文献]

- [1]余铨.高速桥梁底部表面缺陷自动检测应用技术研究[J].科学技术创新,2022(27):144-147.
- [2]娄联堂,何慧玲,石胜平.基于局部处理的 X 射线图像裂纹缺陷自动检测 [J].中南民族大学学报：自然科学版,2020,39(1):98-102.
- [3]张书芬.基于图像处理的桥梁裂缝自动检测技术研究[J].中国科技纵横,2020(13):104-105.
- [4]黄阿童姚山.基于图像处理的增材制造铺粉缺陷自动检测[J].工业控制计算机,2020,33(10):7-10.
- [5]李冰李坤福.基于数字图像处理的砂纸缺陷自动检测系统设计[J].河南科技,2021,40(11):8-10.

作者简介：郭嘉成（1998.3—），性别：男，民族：汉，籍贯：河南省焦作市人，学历：硕士研究生，研究方向：土木水利。

# 基于大数据的桥梁检测信息管理系统研究

姜安乐

中公路安（大连）技术检测服务有限公司，辽宁 大连 116023

**[摘要]**随着城市基础设施的快速发展，桥梁安全管理面临着越来越高的技术和数据挑战。传统检测信息管理存在数据分散、处理效率低和信息更新滞后的问题，难以满足现代桥梁运营与养护的需求。文中提出了基于大数据技术的桥梁检测信息管理系统设计思路，通过整合多源检测数据，实现桥梁结构健康信息的统一管理与实时更新。系统架构充分利用云存储与智能分析手段，提升了检测数据的采集、存储及检索能力，并确保信息的精准性与完整性。研究结果表明，该系统能够有效支撑桥梁的日常检测、健康评估及维护决策，提高了管理效率与数据利用水平，促进了桥梁运行安全与数字化管理水平的提升。相关技术和方法的应用为我国桥梁信息化管理提供了重要参考，对推动基础设施智能运维具有现实意义与广阔前景。

**[关键词]**大数据；桥梁检测；信息管理系统；结构健康监测；智能运维

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17996

中图分类号: U445

文献标识码: A

## Research on Bridge Inspection Information Management System Based on Big Data

JIANG Anle

Zhonggong Luan (Dalian) Technical Testing Service Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116023, China

**Abstract:** With the rapid development of urban infrastructure, bridge safety management is facing increasingly high technological and data challenges. Traditional detection information management suffers from problems such as data dispersion, low processing efficiency, and lagging information updates, making it difficult to meet the needs of modern bridge operation and maintenance. The article proposes a design concept for a bridge detection information management system based on big data technology, which integrates multi-source detection data to achieve unified management and real-time updates of bridge structural health information. The system architecture fully utilizes cloud storage and intelligent analysis methods to enhance the collection, storage, and retrieval capabilities of detection data, while ensuring the accuracy and integrity of information. The research results indicate that the system can effectively support the daily inspection, health assessment, and maintenance decision-making of bridges, improve management efficiency and data utilization level, and promote the improvement of bridge operation safety and digital management level. The application of relevant technologies and methods provides important references for the information management of bridges in China, and has practical significance and broad prospects for promoting intelligent operation and maintenance of infrastructure.

**Keywords:** big data; bridge inspection; information management system; structural health monitoring; intelligent operation and maintenance

### 引言

伴随我国城市化进程的加快和交通基础设施规模的持续扩展，桥梁成为城市交通体系之内的关键枢纽，它们的结构安全与健康状态越来越引起社会各界的普遍关注。根据住房和城乡建设部数据表明，到 2023 年底，全国在役桥梁数量已经超过百万座之上，桥梁检测与管理的复杂性明显提高。于常规桥梁检测信息管理模式之中，经常存在着数据零散、信息孤立、处理效率低效以及动态更新不及时等瓶颈，难以适应现代桥梁运营维护对于信息的即时性、精确性和全面性的要求。依托大数据、云计算、人工智能等新技术，研究人员已经着手研究采用多源数据融合、智能分析、可视化监控等方式，目的在于打破传统管理方式带来的各种局限，促进桥梁运维顺利迈入智能化和数字化新时代。过去很多研究都聚焦单一检测数据类型或者局

部信息处理，还没有建立起系统化、多维度、长周期的信息管理机制。面对现在存在的问题，团队准备研发一套依托大数据技术的桥梁检测信息管理系统，借助融合多个渠道采集到的各种数据源，达成桥梁结构健康信息统一管理、即时更新和智能分析的目标，大幅提高桥梁检测数据从采集到存储再到管理的整体效率。这项研究就是要为桥梁的安全管理和智能运维供给可靠的技术支撑以及理论依据，同时提出实用的方案，来促进基础设施数字化管理实现更深层次的发展。

### 1 大数据驱动下桥梁检测信息管理的现状与需求

#### 1.1 城市桥梁安全管理面临的挑战

城市桥梁安全管理已经成为现代城市基础设施管理中的一个关键问题。伴随城市化进程的加速，桥梁数量持续增多，其结构繁杂性与设计要求也相应提高，这对于桥

梁的检测和维护带来了更严的技术需求。桥梁的设计与运行通常需要兼顾诸多因素，涵盖交通负荷的变动、环境因素的作用以及材料老化等，均是作用于桥梁结构安全的重要因素。因为桥梁结构繁杂并且特性不同，传统的检测手段往往很难完整体现其健康状态。近几年自然灾害多发、不良天气增加与交通压力加剧，促使对于桥梁安全的升级管理与实时监测提出了更加严苛的要求，而恰好是大数据技术能够大显身手的领域。系统性的安全保障措施对桥梁的健康与安全运行十分关键，迫切需要借助先进技术手段达成。

### 1.2 检测信息管理现有模式及局限

以前桥梁检测信息管理方式完全依靠人工记录加上分散的数据处理办法，这种办法存在不少问题。数据通常分散在各种来源和格式里面，难以实现融合和统一管理。处理效率低下，阻碍检测信息得到分析和决策，无法支持桥梁结构健康评估。信息更新滞后导致桥梁状态变化未反映出来，增加了运营安全风险。数据存储和检索能力不足，限制历史检测数据得到有效利用，阻碍桥梁健康趋势预测以及科学管理。以前的管理办法无法满足现在桥梁运营和养护的智能化需求。

### 1.3 基于大数据的信息化管理需求分析

依托海量数据开展智能化管理，已经成为当今桥梁检测信息管理的关键发展方向。伴随传感器技术快速发展加上数据采集能力显著增强，桥梁检测产生的数据量急剧膨胀，亟需一套高效能管理解决方案。过去那种传统信息管理方式完全无法满足数据实时更新和复杂分析的要求，造成信息传递严重滞后、决策支持明显跟不上。大数据技术赋予了桥梁检测领域数据整合、智慧分析和快速反应的强大能力，让智能化管理既大幅提高数据处理速度和效率，同时有力保障桥梁日常运营安全。借助整合各种来源的数据，桥梁管理部门能够做到全方位状态监控和及时预警，充分满足现在桥梁养护工作对效率高、精度高的实际需求。

## 2 桥梁检测数据的多源采集与集成

### 2.1 检测数据类型及数据流特点

桥梁检测数据的多源采集跟融合阶段，数据种类跟数据流特性直接影响系统怎么设计以及能做到哪些功能。检测数据种类主要包括结构应力应变数据、位移振动数据、环境因素数据还有视觉图像数据，所有数据都可以通过物联网设备跟传感器网络实时获取。数据流特性表现出高频率、连续不断、来自不同平台的特点，促使系统必须具备快速响应跟处理海量数据的能力。数据流连续不断加上实时性的要求，让多源数据融合平台需要拥有极强的数据并行处理能力，才能实现桥梁状态的实时动态监控。不同数据源之间兼容跟协同的能力体现出跨平台特性，这给系统设计提出更高难度要求。保证数据准确并且全面覆盖的情况下，必须完成数据流的不间断接入跟传输，这样才能大幅提高桥梁检测信息管理的效率。

### 2.2 数据采集技术及系统接入模式

数据采集技术在桥梁检测信息管理系统中具有重要地位。桥梁检测数据来源涵盖视觉监测、传感器采集、无人机巡检及地面检测设备等多种形式，通过这些技术手段能够全面覆盖结构健康检测的多维度信息。在系统接入模式方面，需要构建基于物联网技术的接入框架，使多源数据能够以实时、安全的方式传输至数据中心。边缘计算技术在桥梁传感器部署中具有关键作用，可实现对原始数据的预处理与筛选，降低数据冗余对系统性能的影响。网络架构设计应确保高效传输与接入稳定性，支持云端存储及动态扩展功能，提升数据融合与管理能力。这种集成方式不仅提高了检测数据的采集效率，在桥梁健康评估及维护决策环节也发挥了重要技术保障作用。

### 2.3 多源数据融合方法与应用场景

桥梁检测数据的多源融合就是要全面利用统计分析、机器学习、人工智能这些技术，来实现不同来源数据之间的互相校验和错误纠正。通过把时间和空间对齐、把各种特征关联起来这些方法，建立出一个统一的桥梁健康信息总视图，使所有数据用在结构健康监测和安全评估的时候变得更准确、更高效。

## 3 信息管理系统架构与关键技术要素

### 3.1 云存储平台与数据管理机制

云存储平台属于桥梁检测信息管理系统的中心部分，拥有超大容量数据存放、整理和计算功能。最大好处就是可以快速分析处理海量检测产生的数据，达成资源自动调配和日常管理目标，这样整个系统就能随时响应最新情况并完成数据更新。数据管理功能依靠支持很多人同时访问以及设置好自动备份方式，来确保所有检测数据绝对安全并且长期保存不会丢失。云平台里面实际运行的数据库使用多个服务器一起工作的架构，这样查找数据和做分析就变得特别快，还能把不同格式的数据全都放在一起方便查看和管理。系统采用先进的数据压缩方法加上随时调整存储空间的优化办法，在完全不损坏任何数据内容的情况下，大大提高硬盘空间的使用效率。把云计算技术和聪明的数据管理方式彻底融合到一起，这个平台给整个桥梁检测信息管理系统带来非常可靠的技术基础和持续稳定的运行保障。

### 3.2 智能分析与结构健康监测模型

桥梁检测信息管理系统里面有个非常核心的部分，就是智能解析加结构健康监测模型。这个模型利用大数据技术，把桥梁每天产生的大量监测数据拿来深入挖掘和仔细分析，目的是尽早发现结构可能出现的损伤或者任何异常状况。整个数据处理流程包括信号处理、模式识别还有机器学习算法的应用，这些技术加在一起大大提高了分析结果的准确程度和处理速度。模型可以随时判断桥梁现在的健康状况，还能提前预测结构性能未来会怎么变化，这样就能更好支持管理人员做决策、安排养护维修工作。整个

智能解析完全靠数据驱动来实现，给桥梁长期安全运行给出可靠的科学支持。随着相关技术不断向前发展，也给监测系统实现更高程度的自动化和智能化带来更多可能性。这项研究给出了一条真实可行、操作性很强的路子，来帮助桥梁健康监测变得更加智能、更加自动化。

### 3.3 系统安全保障与信息完整性控制

桥梁检测信息管理系统必须把数据安全和信息完整性放在第一位。系统使用多层加密技术和严格的访问权限控制，彻底防止别人未经允许进入系统或随意改动数据。系统还加入自动数据校验功能，一旦发现数据出错就能马上发现并自动修复。通过设置多份数据备份存储和定期备份的方式，让数据更加可靠不出问题。这些做法一起保护桥梁检测数据从上传、处理到保存的每一个环节都安全完整，让桥梁实现智能化运维变得又快又稳。

## 4 桥梁运维管理的智能化应用

### 4.1 检测数据驱动的健康状态评估流程

桥梁运维管理实现智能化以后，最重要的环节就是用检测数据来判断桥梁健康状况。这个环节必须把来自不同设备的数据全部整合到一起，才能对桥梁结构做出全面而且及时的状况判断。传感器网络一刻不停地监测桥梁的振动、应力、变形这些物理指标，一旦桥梁状态发生变化就能立刻获取最新信息。所有数据都会传到云端存储，再由智能分析技术把数据集中处理，最终生成一份清楚显示桥梁当前健康状况的报告。健康评估模型会把大量历史数据跟现在监测到的数据进行对比，从而发现那些肉眼看不见的结构问题和潜在风险，直接为管理人员提供准确可靠的决策依据。健康评估结果可以清楚告诉人们这座桥到底哪里需要修、哪里需要保养，从而保证桥梁一直安全运行，还能让桥梁多用很多年，这一点非常重要。这个评估流程让整个信息管理变得更加自动、更加聪明，能真正做到对桥梁进行全天候、全方位的安全监测。

### 4.2 辅助决策与维护管理优化路径

辅助决策与维护管理的优化路径在桥梁检测信息管理系统中至关重要。通过大数据分析技术，系统可实时评估桥梁健康状态，识别潜在风险，提供精准维护建议。系统利用历史数据与实时监测数据进行趋势分析，协助识别关键结构部位的潜在损坏趋势。优化的维护策略不仅基于当前检测信息，更结合桥梁的运营环境和历史养护记录，支持复杂条件下的决策制定。决策支持工具结合智能算法，实现养护方案的动态调整，提升运维效率，有效延长桥梁使用寿命，保障桥梁运行的安全性与经济性。

### 4.3 运行安全与数字化协同管理实践

在桥梁日常养护管理过程中，运行安全加上数字化团队协作管理属于最核心最重要的一环。这种管理方式利用大数据技术来实现桥梁健康状况的实时监测和深度分析，

从而确保桥梁主体结构一直保持稳定和安全。整个信息管理系统整合了目前最先进的传感器技术和智能分析算法，可以随时采集并详细分析桥梁结构受力数据以及周围环境的变化情况，最后自动形成一份非常全面的安全评估报告。通过数字化平台提供强大的决策支持功能，管理人员就能更加合理地分配资源、更加科学地安排维修计划，大大提高日常养护工作的效率和准确程度。这种团队协作管理模式能够切实提升桥梁整体安全水平，保障城市所有基础设施都可以长期稳定可靠地运行。

## 5 结束语

这份研究主要解决传统桥梁检测信息管理里面数据互相不通、处理速度慢这些实际麻烦，开发完成一套使用大数据技术的桥梁检测信息管理系统。这套系统把来自不同设备、不同时间的检测数据全部整理到一起，利用云端存储、人工智能分析、数据图表展示这些核心技术，成功做到桥梁结构健康数据的快速收集、集中管理、随时更新。实际测试证明，这套系统在保持数据完整、加快处理速度、帮助管理人员做决定这些方面表现特别优秀，大大提高桥梁安全运行水平和数字化管理能力。虽然系统整体框架和功能已经基本做好，但真正在工地使用时还碰到一些问题，比如不同来源数据真正深度融合的技术还要继续完善，超大量数据实时处理时速度会卡顿，人工智能识别某些特殊桥梁损伤的准确度还需要继续改进。同时，系统的数据安全与隐私保护机制还需持续完善，以应对未来更为复杂的应用场景与合规需求。基于上述分析，后续工作可从以下几个方向展开：一是深化多源大数据融合与处理技术，实现更高效、更智能的数据集成与分析；二是引入人工智能与机器学习方法，提升结构健康评估与损伤预测的准确性；三是加强系统的数据安全与隐私保护研究，完善桥梁检测信息全生命周期管理。上述方向的持续探索将为桥梁智能运维与基础设施数字化转型提供坚实技术支撑。

## [参考文献]

- [1]王彦平.大数据时代的信息管理与信息系统研究[J].商业 2.0(经济管理),2021(10):0194-0194.
- [2]于望军.大数据时代物流信息管理系统研究[J].中国科技投资,2020(17):99-100.
- [3]杨梦玮.大数据时代下信息管理与信息系统研究[J].中国新通信,2022,24(13):110-112.
- [4]雷林林,葛智君,罗剑武,李浩波.基于大数据的产品质量信息管理系统研究 [J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(5):17-21.
- [5]庞敏.基于大数据算法的高校信息管理系统设计[J].数字通信世界,2023(10):54-56.

作者简介：姜安乐（2000.7—），性别：男，民族：汉，籍贯：辽宁省大连市，学历：研究生，研究方向：水利工程。

## 基于机器学习的桥梁健康监测数据分析方法

姜义海

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**桥梁作为重要的基础设施，其安全运行关系重大。近年来，随着传感技术的进步，大量桥梁健康监测数据得以实时采集，为结构安全评估和养护决策提供了重要依据。然而，传统数据分析方法在处理庞杂、多源的数据时存在效率低、精度有限等问题，难以满足现代桥梁智能管理的需求。本研究围绕桥梁健康监测数据的特点与挑战，系统探讨了机器学习在数据处理、特征提取及异常识别等环节的优势与应用。具体而言，将基于机器学习的方法引入健康监测数据分析流程，实现对数据中的潜在模式与变化的自动识别和有效预测。研究结果显示，机器学习方法能够提升桥梁健康状态识别的准确率，并在早期故障诊断及趋势预测方面表现出良好的适应性。文中的研究为桥梁运维管理机制的升级提供了理论支持，对推动结构健康监测领域的智能化转型具有积极意义。

**[关键词]**桥梁健康监测；机器学习；数据分析；故障诊断；智能管理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17995 中图分类号: U45 文献标识码: A

## Machine Learning based Bridge Health Monitoring Data Analysis Method

JIANG Yihai

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** As an important infrastructure, the safe operation of bridges is of great importance. In recent years, with the advancement of sensing technology, a large amount of bridge health monitoring data can be collected in real-time, providing important basis for structural safety assessment and maintenance decision-making. However, traditional data analysis methods suffer from low efficiency and limited accuracy in handling complex and multi-source data, making it difficult to meet the needs of modern bridge intelligent management. This study focuses on the characteristics and challenges of bridge health monitoring data, and systematically explores the advantages and applications of machine learning in data processing, feature extraction, and anomaly recognition. Specifically, machine learning based methods will be introduced into the health monitoring data analysis process to achieve automatic recognition and effective prediction of potential patterns and changes in the data. The research results show that machine learning methods can improve the accuracy of bridge health status recognition and demonstrate good adaptability in early fault diagnosis and trend prediction. The research in the article provides theoretical support for the upgrading of bridge operation and maintenance management mechanisms, and has positive significance for promoting the intelligent transformation of the field of structural health monitoring.

**Keywords:** bridge health monitoring; machine learning; data analysis; fault diagnosis; intelligent management

### 引言

伴随交通网络的迅猛扩展和城市基础设施的日趋复杂，桥梁身为联结区域经济和社会发展的关键枢纽，它的结构安全与稳定运行转为工程界关注的重点。据《桥梁技术发展白皮书》中国公路学会，2022 统计，目前我国在役桥梁数量已经突破百万座，桥梁病害及安全隐患事件依然时有出现，对交通畅通与社会安全形成潜在威胁。桥梁健康监测体系逐渐完善，分布式、无线传感器技术大量应用，做到了跨结构多源参数的实时采集，对数据驱动型养护管理奠定了丰富基础。海量、多维度、不同来源的监测数据给传统分析方法造成了很大困难，过去常用的统计模型和信号处理方法遇到数据不断变化、各种因素互相影响的情况，往往造成特征提取速度慢、异常判断不够准等问题。没有智能处理手段很难发现数据背后桥梁结构损伤慢

慢发展的规律，这样就限制了桥梁养护决策做到真正科学。机器学习技术依靠强大数据驱动建模能力、处理复杂关系能力和自动提取特征能力，成为结构健康监测领域新的研究热点。现在已经有的研究在异常检测、趋势预测、多源数据融合这些方向获得了不错进展，但还需继续研究机器学习技术用到真实桥梁工程时的适用性和泛化能力。本文以期提高桥梁健康监测数据分析效能为目标，深入研究机器学习方法于数据处理、特征工程和故障诊断内的策略以及作用，意在为桥梁智能养护管理体系的建设与升级给予理论基础和技术支持。

### 1 桥梁健康监测数据概述

#### 1.1 传感器技术发展与数据特点

桥梁健康监测系统能不能做好，主要依靠传感器技术水平有没有跟上步伐。现在微机电系统 MEMS 技术已经

越来越成熟，所以很多精度很高、耗电又很低的传感器已经被大量用到了桥梁监测工作里面，这些传感器种类很多，比如加速度计、倾角仪、应变计、温湿度传感器等等全都有。这些传感器可以长时间可靠运行，一刻不停地即时采集桥梁结构在受力时的各种振动情况以及周围环境温度湿度的变化数据。随着技术一点点往前发展，传感器个头变得越来越小，但是测得准不准、稳不稳却变得越来越好，正是因为这样才给后面拿到准确可靠的监测数据提供了坚实保障。桥梁监测数据最明显的特点就是来源非常多、种类非常杂，而且必须做到随时更新随时都有。桥梁结构非常复杂，包含材料受力情况和周围环境等大量不同种类数据，各种传感器能够实时采集全部数据，把不同传感器采集到的数据融合在一起使用，从而提供一个完整全面的监测视角。采集到的数据具有高频率和大容量的特点，这给数据处理能力提出严峻挑战。数据里面通常包含很多噪声，这些噪声由传感器自身误差或者周围环境干扰造成，会直接影响后面进行的数据分析和模式识别工作。所有这些情况都需要使用更高级的分析方法，才能够快速准确提取出最关键的特征，从而确保桥梁一直处于安全运行状态，做好健康管理工作。

## 1.2 桥梁监测数据的类型与挑战

桥梁监测数据的类型与挑战在桥梁健康监测中极为重要。桥梁结构通过多种传感器采集的大规模、复杂数据，包括加速度、应变、温湿度等数据流，这些数据类型各异、数据量庞大且来源多样。不同传感器采集的数据频率和精度存在差异，造成数据的异构性和不一致性。在进行数据分析时，如何有效整合和协调这些多源数据以形成一个统一的评估框架是一大挑战。传感器数据中的噪声干扰不可避免，部分设备在极端天气或恶劣环境下可能表现不稳定，导致数据质量下降。高频实时数据流需要的存储与计算能力强，并且识别特定桥梁健康状况模式且达成实时响应同样对于数据处理技术带来了更高要求。应对如此严峻的环境，传统的数据分析技术于效率和准确性上表现得捉襟见肘，急需必须借助前沿的算法和分析方法解决此类挑战，以确保桥梁的长久可靠运行。

## 2 机器学习理论基础及相关技术

### 2.1 常用机器学习算法简介

机器学习已经变成现在数据分析最核心的工具，里面算法类型非常多，广泛应用在桥梁健康监测数据的处理和分析工作当中。监督学习算法属于最常用的一类，包括支持向量机 SVM、决策树还有随机森林这些算法。支持向量机在处理高维度数据时表现出来非常强的能力，通过寻找数据之间那条最好的分割超平面，来提高分类的准确程度。决策树用树状结构把整个决策过程清楚展示出来，让人很容易理解和实际使用。随机森林属于决策树的组合方法，通过建立很多棵决策树然后大家一起投票决定答案，这样明显增强模型的稳定程度和准确程度。无监督学习算

法模式识别和聚类分析发挥重要作用。常见算法比如 K 均值聚类和主成分分析 PCA 用来挖掘数据内在结构以及实现降维操作。K 均值聚类通过把数据点分配到 K 个簇方式，识别数据当中隐含模式。主成分分析通过降维方式减少数据复杂程度。最近几年深度学习算法尤其卷积神经网络 CNN 和递归神经网络 RNN，由于出色自主特征提取和学习能力，赢得广泛关注。CNN 图像数据分析领域表现突出，RNN 擅长处理序列数据。机器学习算法能够大幅度提高桥梁健康监测过程中对各种数据的分析能力和精确程度，实际应用效果已经证明它们拥有非常强的潜力以及广阔的发展前景。

### 2.2 特征提取与数据预处理方法

特征提取和数据预处理在机器学习用来做桥梁健康监测数据分析时特别关键。特征提取目的就是从海量数据里挑出最有用的信息，把复杂数据变得简单清楚，这样后面分析起来就不费力。常用的好方法有主成分分析 PCA、线性判别分析 LDA 和独立成分分析 ICA，这几种方法都能挖出数据深层的规律和各个部分之间的关联性。数据预处理主要负责把原始数据收拾干净，确保质量过硬，具体会做去噪、填补缺失值、把数据尺度调均匀这些工作。去噪就是用滤波器或者信号处理技术把那些乱七八糟的随机噪音去掉，让有用信号变得更平滑更可靠。填补缺失值可以采用插值或者其他聪明办法，把数据补得整整齐齐，避免因为缺东少西导致分析出错。归一化就是把所有特征的数值范围调整到差不多水平，避免某些特征太大或太小影响公平，这样后面训练模型的时候每项特征都能公平发挥作用，模型学得更好。通过把上面这些技术一步步做好，就能让数据变得更干净更有代表性，最后模型分析得更准，预测结果也更加靠谱准确。

## 3 桥梁健康监测数据中的模式识别与异常检测

### 3.1 数据驱动的模式识别流程

桥梁健康监测工作中，模式识别是分析和解读传感器数据最核心的部分。整个数据驱动的模式识别过程主要包括数据采集、数据预处理、特征提取和模式分类四个大步骤。技术人员通过提前安装桥梁结构上面的各种传感器，实时收集桥梁健康状态数据。这些传感器记录下来来源多样、维度很高的数据，必须先进行预处理，把噪声和异常值全部去除干净，这样才能大大提高数据的干净程度和可信程度。完成数据预处理以后，特征提取就成为整个模式识别过程中非常关键的一步。技术人员只要使用适宜的特征提取方法，就可以从海量数据里面提炼出最能代表桥梁状态的核心特征，这样就能显著提升模型准确识别桥梁问题的能力。常见特征提取技术包含时域分析和频域分析，还有利用小波变换或者傅里叶变换更复杂方法。把提取完特征数据直接送入已经训练好机器学习模型里面去做模式分类，这个步骤目的就是要把数据里面隐藏模式全部找

出来,这样就能清楚体现桥梁现在健康状况。机器学习算法比如支持向量机、随机森林还有深度学习这些工具在做模式分类时候都表现出来色性能和适用能力。靠这些算法就能完成对桥梁健康状况准确判断,进而给桥梁日常维护管理给出充分数据支持和科学根据。这种完全靠数据驱动模式识别流程明显提升桥梁健康监测自动化程度和决策速度。

### 3.2 异常状态自动识别机制

异常状态自动检测功能在桥梁健康监测数据分析过程中起到非常重要的作用。工程师使用机器学习算法,能够快速清楚地区分桥梁正常运行时候的状态和出现问题时候的状态,还可以通过已经训练好的数据模型提前预测将来可能会出现的异常情况。这个功能主要依靠对大量复杂监测数据里面的各种特征模式进行深入分析,从而快速发现异常情况。现在大家经常使用的方法包括支持向量机、随机森林和神经网络这些算法。工程师运用这些算法建立起专门用来检测异常的模型,然后对海量桥梁监测数据进行深度挖掘,发现隐藏的异常特征,同时立刻进行评估,这样就能很好地保证桥梁整体结构一直保持安全。这个功能既大大提升了异常检测的准确程度,又显著加强了提前发现桥梁结构可能存在隐患的能力,为桥梁日常维护保养提供了非常可靠的数据依据,有力促进了整个桥梁检测工作向智能化方向快速发展。

## 4 状态趋势预测与早期故障预警应用

### 4.1 健康状态趋势建模

桥梁健康监测最重要的是能提前准确预测桥梁状态变化趋势,这样才能更好提升管理效率和桥梁安全。通过认真分析过去积累的大量监测数据,可以清楚发现桥梁结构性能随时间变化的规律,从而对桥梁未来的健康状况做出靠谱预测。使用机器学习技术可以快速处理来自不同传感器的大量复杂数据,大大提高预测结果的准确度。整个预测建模过程主要包括以下几个环节,先把传感器采集到的原始数据彻底清理干净,去除干扰噪声和明显错误的异常数值,确保剩下数据干净可靠。接着通过特征选择方法,从众多数据指标里面挑出那些真正能反映桥梁结构健康状况的关键指标,这样既减少了计算量,又能让后续模型训练和计算速度变得更快更高效。应用的机器学习算法如时间序列分析、神经网络和支持向量机等,可以识别数据里的非线性关系,实现多步预测。训练好的模型借助导入新的监测数据,能产生桥梁健康状态的趋势预测结果,有利于及早发现潜在风险。这种预测方法不但提升了故障预警的及时性,而且对桥梁维护策略的优化给予了科学依据,有利于降低由于突发事件引发的维护成本与安全隐患,促进桥梁管理的智能化发展。

### 4.2 早期故障识别机制

桥梁健康监测里边,最重要的工作就是提前发现问题

并且预测可能出现的隐患,这样才能避免出现大的事故。机器学习技术给这个工作提供了非常好用的工具,它能够快速分析海量的传感器实时数据,从里面找出真正有用的异常信号。这一节主要给大家讲清楚怎么用机器学习算法来完成高效的故障识别过程。具体的做法是,先拿过去积累的大量桥梁健康数据去训练模型,让模型学会哪些情况属于正常、哪些情况属于异常。一旦现在采集到的传感器数据突然偏离正常范围,模型就会立刻发出警报,及时通知维护人员赶快去检查处理。在这个过程中,异常检测算法发挥了特别关键的作用,它能准确抓住那些还没有被标记出来、但已经暗示早期故障的风险模式和数据里的明显突变情况。具体方法包含采用监督学习和无监督学习技术,以便迅速检测数据中的异常情况。质量预测模型可以预先识别结构性问题的发生,依据分析结果拟定的预警计划,能明显减少桥梁故障对公共安全的影响。机器学习方法不但提升了早期故障识别的准确性,而且加强了系统的响应速度,促进桥梁管理从被动维护向主动预防转型。

## 5 结束语

本文针对桥梁健康监测数据分析领域,系统引入并验证了基于机器学习的方法,从数据处理、特征提取到异常识别等环节,显著提升了结构健康状态的识别准确率。研究证明,机器学习技术能够深入挖掘海量、多源监测数据中的潜在模式,在早期故障诊断和趋势预测方面表现出优异的适应性与预警能力,为桥梁运维管理提供了科学、智能的决策依据。该方法有效解决了传统分析手段在效率与精度上的不足,推动了桥梁健康监测向自动化与智能化方向迈进。然而,目前研究仍存在若干局限性。例如,机器学习模型对传感器数据完整性与质量较为敏感,极端环境下的鲁棒性亟待加强;算法性能在不同桥型及非结构性数据中的泛化能力有待进一步考察。

## [参考文献]

- [1]龙跃飞,李泽滔.基于机器学习的医疗数据分析[J].智能计算机与应用,2020,10(12):18-20.
- [2]李建荣,王胜.基于机器学习的油藏生产监测数据分析与预警方法[J].油气井测试,2023,32(5):8-13.
- [3]魏鑫.基于 COM GIS 的桥梁健康监测数据分析[J].铁道勘测与设计,2023(4):29-33.
- [4]杜强,李冬冬,解峰.基于监测数据分析的大跨度桥梁健康状态评估方法研究[J].科学技术创新,2023(27):153-156.
- [5]李特,张家驹,赵炜,侯泽鹏.基于机器学习的用电数据分析[J].河北电力技术,2020,39(5):17-21.

作者简介:姜义海(2000.8—),男,汉族,辽宁省大连市人,学历本科,研究方向:桥梁检测

## 基于智慧交通理念的城市道路设计思路分析

吴小冬

中都工程设计有限公司黄石分公司，湖北 黄石 435000

**[摘要]**文章着重探讨黄石市经济技术开发区铁山区太子镇黄太公路维修改造工程，该项目路线全长 6.457 公里，原有路面宽 5m，路基宽 6m，设计行车速度为 15 公里/小时，改造后将路面拓宽至 6.5m，路基升级至 7.5m，以此推动四好农村公路建设，改善居民基本通行条件。文章深入剖析智慧交通理念的内涵以及关键技术体系，研究传统城市道路设计在病害频发、排水不畅、安全设施不足等挑战下的现状，提出以感知层、网络层、平台层、应用层为核心的的整体设计思路，详细说明智慧交通安全保障、效率提升、基础设施管养、出行服务等关键子系统的具体设计方案，借助智能化手段优化道路服务水平，推动沿线农村经济发展。

**[关键词]**智慧交通；城市道路设计；农村公路；智能化升级；数据驱动

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18009

中图分类号：U491.26

文献标识码：A

## Analysis of Urban Road Design Ideas Based on the Concept of Intelligent Transportation

WU Xiaodong

Huangshi Branch of Zhongdu Engineering Design Co., Ltd., Huangshi, Hubei, 435000, China

**Abstract:** This article focuses on the maintenance and renovation project of Huangtai Highway in Taizi Town, Tieshan District, Huangshi Economic and Technological Development Zone. The project has a total length of 6.457 kilometers, with an original road width of 5 meters and a roadbed width of 6 meters. The designed driving speed is 15 kilometers per hour. After the renovation, the road surface will be widened to 6.5 meters and the roadbed will be upgraded to 7.5 meters, in order to promote the construction of four good rural roads and improve the basic traffic conditions for residents. The article deeply analyzes the connotation and key technical system of the concept of smart transportation, studies the current situation of traditional urban road design under challenges such as frequent diseases, poor drainage, and insufficient safety facilities, and proposes an overall design concept with perception layer, network layer, platform layer, and application layer as the core. It elaborates on the specific design schemes of key subsystems such as smart transportation safety guarantee, efficiency improvement, infrastructure management and maintenance, and travel services, and optimizes road service level through intelligent means to promote rural economic development along the route.

**Keywords:** smart transportation; urban road design; rural roads; intelligent upgrade; data-driven

当前我国农村公路建设正从基本通行功能向高质量服务转型，黄石市太子镇黄太公路维修改造工程作为典型项目，其路线编码为 X306 且全长 6.457 公里，原有路面结构为 20cm 厚水泥砼面板与煤研石基层，但经过多年运营已出现破碎板、错台和接缝损坏等多种病害，严重影响行车安全与舒适性；这一现状凸显传统设计在应对复杂交通需求时的不足。智能交通是人工智能与互联网技术迅猛发展的必然产物，通过交通与信息管理无缝集成，可以显著提升交通建设与运营信息使用效率，最终达到对基础设施交通设施的全面管理，从而为类似项目提供创新设计方向。

### 1 智慧交通理念的内涵与关键技术

#### 1.1 智慧交通的基本概念

智慧交通属于一种现代化的管理方式，它是借助信息技术和交通系统相互融合来达成的，其能够促使道路设施、车辆以及行人在协同方面变得更为高效。它的关键之处就在于运用数据采集以及智能分析这两项举措来提高交通

运行的效率并且增强其安全性。就黄太公路项目而言，智慧交通的理念能够在一定程度上解决原有平面交叉口数量较多且视距不好的问题，依靠实时监测以及预警机制来降低交通事故的发生概率，与此凭借智能化的相关手段对道路排水以及防护设施加以改进，从而实现完善区域公路网并且推动农村经济发展的目的。

#### 1.2 核心关键技术体系

智慧交通所涉及的关键技术，像物联网传感器、云计算平台、人工智能算法以及多模式通信网络等，这些技术一起形成了从数据采集到决策应用完整的体系<sup>[1]</sup>。就好比物联网传感器能够布置在道路沿线去监测路面状况以及交通流量，云计算平台可以处理大量的数据并且生成优化方案，人工智能算法也能够预测病害的发展趋势并且自动调度养护资源。在黄太公路这类农村公路项目当中，这些技术能够有效地解决原有排水设施不完善以及交通安全设施缺失的难题，进而提升道路的整体服务水平。

## 2 传统城市道路设计的现状与挑战

### 2.1 现状分析

传统城市道路设计在黄太公路项目里呈现出一些特点，其路基宽度仅仅只有 6m，而路面宽度也只有 5m，在平面曲线方面，最小半径为 50m 的地方共有四处，在纵断面情况下，最大纵坡达到了 9.31%，并且最小坡长为 45m，这些指标虽说符合四级公路 I 类标准，然而在长期运用的过程当中，路面损坏状况指数 PCI 出现了较为明显的下降情况，依照公路技术状况评价标准 JTG5210—2018 来计算，由于破损率有所增加，PCI 值不断呈现恶化的态势。与此原有的道路排水方式主要以散排为主，并且有一部分路段存在严重的积水状况，交通安全设施仅仅设置了 3280m 的 A 级波形护栏，而且标志标牌并不完整，再加上沿线分布着大量的居民点以及 34 处平面交叉口，使得视距不佳以及超速行驶的问题变得格外突出，对居民出行安全以及道路服务功能产生了极为严重的影响。

### 2.2 面临的挑战与不足

传统设计方法在应对复杂环境的时候，展现出了比较明显的不足之处。就好比黄太公路原本所采取的防护措施，主要是以灌木作为主体，并且还缺少系统的排水方面的设计。如此一来，就致使路基在遭遇暴雨季节的时候，特别容易受到冲刷，进而出现损坏的情况。并且，像路面结构层当中的材料，比如煤矸石基层，已经没有办法再承受住一天天不断增加的交通负荷了<sup>[2]</sup>。除此之外，在交通安全方面，由于交叉口的设置并不合理，而且还有警告标志存在缺失的情况，这就使得事故的风险不断升高。这些诸多的因素综合到一起，对道路的长期使用效益形成了制约作用，迫切需要借助智能化升级的方式来应对设计固化以及维护滞后所带来的各种挑战。

## 3 智慧交通理念下的城市道路设计思路

### 3.1 总体架构与设计原则

在智慧交通理念指导下的道路设计，应当把数据驱动当作核心要素来着力构建起一个包含感知层、网络层、平台层以及应用层这四个层次的架构体系，而且要严格依照安全性、经济性还有可持续性这些原则来开展相关工作。就黄太公路改造这一具体案例而言，在设计方面充分地利用了原有老路的路基，尽力避免出现大面积的填方和挖方情况。通过在路面加铺相应的结构层，以此来提升其纵断面的标高。与此还将平面线型做出局部性的调整，目的是为了进一步优化行车视距。这样的做法一方面能够有效降低整个工程的造价成本，另一方面又借助集成智能传感器以及通信设备的方式实现了对道路状态的实时动态监控，进而使得路网的整体效益得以充分发挥出来，同时也切实改善了乡村地区的出行条件。

### 3.2 感知层设计：全要素状态实时监测

感知层的设计需要部署多种多样的传感器，以此来采

集道路环境以及交通流方面的数据。在黄太公路这个项目当中，可以安装路面温度传感器、湿度传感器以及应变传感器，借助这些传感器来监测板块出现破损的情况以及积水的情况，并且还要利用视频监控设备去跟踪交叉口处车流还有人流动的动态变化。这些传感器应当把整条线路都覆盖起来，其总长度是 6.457 公里，在此期间要着重把这些传感器布置在那些关键的地段，比如最小半径达到 50m 的曲线段以及最大纵坡为 9.31% 的路段。通过对 PCI 相关指标展开连续不断的监测，像是对破损率等指标进行监测，进而能够及时地发出关于病害发展的预警信息，同时也能够为养护决策给出相应的依据，如此一来便能够有效地去应对原来存在的排水不顺畅以及路面抗滑能力有所下降等诸多问题。

### 3.3 网络层设计：多模式融合通信体系

网络层的设计是把有线方式和无线方式相结合起来，以此来保证感知数据能够稳稳当当地传送到处理中心。黄太公路沿线的地形主要是村落和农田，针对这样的特点，可以将光纤通信和 5G 无线网络融合起来，进而构建起一条带宽比较高的链路<sup>[3]</sup>。这一整套体系是要把所有的传感器以及控制系统都连在一起的。比如说在 K7+698 到 K13+385 这段排水比较薄弱的地方，要强化网络的覆盖程度，这样才能够支持实时数据的传输以及远程指令的下发，进而达成对道路状况的快速响应以及智能管理，防止因为通信出现延迟而产生的安全隐患。

### 3.4 平台层与应用层设计：数据驱动与智慧服务

平台层借助云计算来整合感知数据并且运行分析模型，应用层会为管理部门以及用户给予智能服务，在黄太公路项目当中，该平台能够计算路面使用状况指数 PCI 并且制定养护计划，与此同时还能通过移动应用向驾驶员传达实时路况以及警示信息，这样的设计能够对原有安全设施存在不完备的情况加以优化，比如在视距不佳的交叉口推送减速提醒信息，或者依据气象数据来调整排水泵站的运行状态，以此最终提高道路的服务水平并且推动沿线地区的经济发展。

## 4 智慧道路系统关键子系统设计

### 4.1 智慧交通安全保障系统设计

智慧交通安全保障系统的关键在于把原先的被动防护转变成主动预警，力求从源头上降低交通事故的发生概率，此系统需要综合运用感知、通信以及控制方面的技术。就黄太公路而言，其平面交叉口数量达到了 34 处，而且部分路段还存在着视距不佳的情况，针对这一突出的问题，一定要在这些重要的节点安排具备物体识别功能的视频监控单元以及雷达传感器，以此来实时抓取交通参与者的行信息。当系统凭借算法判定存在碰撞的风险时，就会立刻启动路侧的智能发光警示标志以及声光报警装置，给驾驶员和行人发出不容忽视的强烈预警信号。对于全线原

本存在的 3280m A 级波形梁护栏，在对其展开改造的过程中应当融入智慧化的考量，将护栏升级成为具备压力感知功能的智能护栏，要是发生了碰撞事件，系统可以自动获取事故发生的具体位置并且第一时间向管理中心发出警报，如此一来便能大幅度缩短应急救援的响应时间。考虑到本项目沿线分布着大量的居民点这一特点，在行人密集的路段设置智能人行横道系统显得格外有必要，该系统借助地磁感应或者热成像技术来检测等待通行的行人，并且自动点亮嵌入式的地面灯光与警告信号，借此来大幅提升夜间以及恶劣天气条件下行人过街的安全性，有效地填补原有设计中警告与防护措施的欠缺之处。

#### 4.2 智慧交通效率提升系统设计

智慧交通效率提升系统旨在优化道路时空资源的利用情况，缓解由于线形条件以及交叉口密集所引发的通行阻力，其主要是借助动态管理和协同控制的方式来达成这一目标。鉴于黄太公路全线存在着 4 处最小半径为 50m 的平曲线以及 1 处最大纵坡达到 9.31% 的纵坡路段，这些几何线形方面的劣势从客观层面限制了通行效率，所以该系统能够依据实时采集所得的车流速度与密度数据，凭借可变信息标志给驾驶员提供具有建议性质的安全车速，以此实现交通流的顺畅过渡。针对全线 34 处平面交叉口而言，系统需要摒弃传统的固定优先通行规则，转而采用根据实时交通需求所设定的自适应控制策略，借助安装在路口的感知设备来判断各个方向的车流状态，动态地对通行权加以分配，进而有效地降低车辆在交叉口的无效等待时间。再进一步来讲，系统还能够构建起一个区域级的协同控制模型，把多个连续的交叉口当作一个整体来开展联动优化工作，依靠算法计算得出最佳的信号配时方案与相位差，让车辆能够在最大程度上遇到绿灯，形成所谓的“绿波带”，这特别适用于 K13+400 至 K14+154 段这类已经埋设雨水管道且路况相对不错的段落，通过提高平均行程速度来充分释放该段落的示范效应。

#### 4.3 智慧基础设施与管养系统设计

智慧基础设施和管养系统对于确保道路能长时间良好运行以及降低其整个生命周期里的成本而言极为关键，其设计主要围绕着状态感知、数据分析以及预测性维护等方面展开。在黄太公路路基拓宽至 7.5m 并且加铺新的结构层的施工期间，需提前在关键部位埋设一系列传感器，像是用来监测路基沉降的静力水准仪、用于感知路面结构应变的光纤传感器，还有用于检测基层含水量的湿度传感器等。这些传感器就像一个隐形的神经网络，会持续不断地把基础设施的健康状态数据传送到管理平台。平台层依照公路技术状况评价标准来构建专门针对路面损坏状况指数 PCI 的自动计算模型，以此对传回来的数据加以分析，

不但可以客观地评估当前路面状况，而且还能依据历史数据的趋势去预测未来一段时间内 PCI 指数的衰减状况以及各类病害的发展概率<sup>[4]</sup>。这种预测性维护的能力让养护部门能够从容不迫地制定出既科学又经济的养护计划，提前安排资源对潜在病害进行干预，而不是等到路面出现严重破碎板或者错台之后才进行被动修复，进而达成从“坏了再修”到“未坏先防”的重大转变，这对延长采用新路面结构层的道路使用寿命有着极为重要的意义。

#### 4.4 智慧出行服务系统设计

智慧出行服务系统直接面向道路使用者，目的是让出行体验变得更为便捷、更加舒适且更具可预见性，其设计着重于信息的实时性、准确性以及服务的个性化。系统得把感知层的实时道路状态信息、气象部门的气候数据，还有交通效率提升系统的动态控制信息整合起来，再借助统一且用户友好的移动应用或者车载终端界面推送给用户。对于行驶在黄太公路上的驾驶员来讲，他们能提前知晓前方哪个交叉口正在开展动态优先控制、哪个路段因暴雨出现临时积水需谨慎驾驶、哪个区域正在进行基于预测性维护决策的养护作业需要绕行<sup>[5]</sup>。系统还能给出个性化的出行路线与速度建议，帮用户规避风险、节省时间。该系统可服务于更广泛的社会经济目标，比如向沿线居民和游客推送太子镇周边的农副产品信息或旅游景点介绍，把交通出行和区域经济发展紧密关联起来，切实体现四好农村公路建设里“运营好”的核心理念，让这条焕然一新的道路变成推动沿线农村经济发展的智慧走廊。

#### 5 结束语

智慧交通理念给城市道路设计带来了创新的方向，在黄太公路维修改造工程里，借助集成感知监测、智能通信以及数据平台，可有效地处理传统设计于排水、安全以及维护方面存在的不足之处；未来需要进一步对技术应用加以优化，以便适应复杂的地形与气候条件，促使农村公路朝着智能化、可持续化方向发展，达成完善区域路网以及提升服务水平的目的。

#### 【参考文献】

- [1] 刘艳辉,张晓梅.基于绿色环保理念的城市道路优化设计及工程应用[J].绿色中国,2025(4):46-48.
  - [2] 杨国辉,尚增辉,刘中庆.关于绿色交通理念的道路交通改善规划设计[J].人民公交,2025(5):76-78.
  - [3] 张庆霞.公路市政化改造中交通工程技术应用研究[J].现代工程科技,2025,4(9):161-164.
  - [4] 陈超.城市道路交叉口提升改造方案研究[J].工程技术研究,2025,10(15):184-186.
- 作者简介：吴小冬（1990.11—），男，汉族，本科，毕业院校：武汉工程大学，专业：交通土建。

## 桥梁检测工作中的安全管理与风险评估研究

邵玉炜

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**随着我国基础设施建设的不断发展，桥梁在交通运输领域中的地位日益提升，其安全运行关系到社会经济和公众生命财产安全。桥梁检测工作作为确保结构安全与延长使用寿命的重要环节，正面临着作业环境复杂、技术要求高以及风险隐患多发等挑战。文中基于桥梁检测工作的实际需求，系统梳理了当前检测环节中存在的主要风险类型，包括作业人员安全、设备故障、外部环境影响等方面，从管理组织、技术手段、流程规范等角度提出了健全安全管理体系的策略。同时，结合风险评估理论，明确了风险识别、分析、控制和应急预案等关键环节，强化了科学评估体系的建立。研究结果表明，规范管理流程、完善培训机制以及强化风险预警和处置能力，能够有效提高桥梁检测工作的安全保障水平，降低事故发生概率。该研究对提升桥梁检测的安全管理能力、促进风险科学管控具有重要理论价值和实践指导意义。

**[关键词]**桥梁检测；安全管理；风险评估；风险控制；管理体系

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17994

中图分类号: U45

文献标识码: A

## Research on Safety Management and Risk Assessment in Bridge Inspection Work

SHAO Yuwei

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** With the continuous development of infrastructure construction in China, the status of bridges in the field of transportation is increasingly elevated, and their safe operation is related to the social economy and the safety of public life and property. Bridge inspection work, as an important part of ensuring structural safety and extending service life, is facing challenges such as complex operating environments, high technical requirements, and frequent risks and hidden dangers. Based on the actual needs of bridge inspection work, the article systematically summarizes the main types of risks that exist in the current inspection process, including the safety of operators, equipment failures, external environmental impacts, etc. Strategies for improving the safety management system are proposed from the perspectives of management organization, technical means, and process specifications. At the same time, combined with risk assessment theory, key links such as risk identification, analysis, control, and emergency plans have been clarified, strengthening the establishment of a scientific assessment system. The research results indicate that standardizing management processes, improving training mechanisms, and enhancing risk warning and disposal capabilities can effectively improve the safety level of bridge inspection work and reduce the probability of accidents. This study has important theoretical value and practical guidance significance for improving the safety management capability of bridge inspection and promoting scientific risk control.

**Keywords:** bridge inspection; safety management; risk assessment; risk control; management system

### 引言

伴随我国基础设施建设的迅猛发展，桥梁身为交通运输体系的重要枢纽，对社会经济发展和公众安全起着至关重要的作用。根据交通运输部数据表明，至 2023 年底，全国桥梁数量和通行总量不断增长，覆盖区域广袤，惠及人口众多。桥梁结构长时间暴露于复杂的自然与人为环境中，遭受荷载变化、气候作用以及材料老化等多种因素作用，安全隐患越来越严峻，桥梁检测工作的重要性越来越凸显。桥梁检测不只是确保结构安全、杜绝事故出现的关键措施，更是有效延展设施使用寿命的基础环节。桥梁检测真正干活的时候，工人随时可能遇到人身安全问题、设备突然坏掉、天气或者周边环境干扰等很多麻烦，工作环境和条件变化特别大，这就要求管理和技术的水平必须达到更高标准。现在大部分研

究都把注意力放在新技术新设备上面，却很少完整系统地研究怎么搭建一套完整的安全管理制度以及怎么把风险评估流程做规范。很多检测步骤的管理规定还不健全，危险往往发现得慢、处理办法也不够有力，所以事故发生次数一直降不下来。针对这些实际情况，这项研究打算把安全管理方面的理论和风险评估的具体办法结合在一起，把桥梁检测过程中所有重要的风险点都一条一条找出来讲清楚，再仔细分析管理队伍、技术手段、操作规范这三者怎么配合才能发挥最大作用，最后研究并提出具体可行的办法，来建立一套更加完善的安全管理制度。目标就是要搭建一套科学完善的风险评估体系，通过持续提升过程管理水平、预警能力和应急处置能力，来为桥梁检测工作的安全保障和风险防控工作提供坚实的理论基础和具体的操作指引。

## 1 桥梁检测工作的基本现状

### 1.1 桥梁检测的重要性及发展趋势

桥梁检测工作主要负责两件大事，一是守护桥梁安全，二是让桥梁使用年限变得更长。桥梁稳不稳固会直接决定整个交通网络能不能顺利通行，也会直接决定老百姓的生命和财产能不能得到保障，因此检测工作特别关键。随着城市建设速度越来越快，路上跑的车也越来越多，全国各地建的桥梁数量一下子猛增，人们对检测质量的要求也变得越来越高。现在的发展方向已经很清楚，各种智能化、信息化技术正一步步用到桥梁检测里面，这样做能明显提高检测结果的准确程度和工作完成速度。靠着传感器设备、无人机空中检查、大数据分析系统这些先进工具，桥梁检测正朝着全自动、智能化方向稳健前进。把这些新技术组合起来使用，就能帮助工作人员很快找出肉眼看不到的安全问题，同时给出精确可靠的数据报告，让每一座桥梁都能保持安全状态正常使用。将来，桥梁检测领域只要保持不断创新和技术升级，就一定会成为提高桥梁安全管理的最强助力。

### 1.2 检测工作中的主要挑战

桥梁检测工作会遇到很多困难，最麻烦的就是作业环境特别恶劣。尤其在山区、大河或者地形很复杂的地区，工作人员想要做检测，就得想办法翻山越岭、克服各种地形障碍，把检测仪器稳稳当当放好位置，还要确保采集到的数据完全可靠。技术难度也非常大，检测人员必须同时用上超声波、激光测距等多种先进方法，才能把桥梁结构从头到尾检查得清清楚楚、一点不差。危险情况还特别容易出现，突如其来的大风大雨、地震滑坡这些自然状况，随时可能让检测工作停下来或者出问题。检测队伍里有些人技术好有些人经验少，再加上仪器保养做得不好，这些都会悄悄影响最终数据的可信度。上面这些问题加在一起，桥梁检测工作现在非常需要想出新的办法，来大大提升整个过程的安全程度和检测效果。

### 1.3 行业内安全管理现状

桥梁检测这个行业现在安全管理存在不少问题。桥梁检测任务越来越复杂，检测环境也变得五花八门，这就给安全管理工作带来更高难度。不少公司建立安全管理制度的时候还有明显短板，各种规章制度和具体措施没有完全落到实处。整个管理过程缺乏系统性和规范性，造成安全风险不能及时被发现，也不能快速得到控制。员工安全培训体系还不够完善，现场作业人员的安全意识和专业操作能力都急需大幅度加强。检测设备老旧、技术手段更新慢，这些情况都直接制约安全管理效果。虽然整个行业对安全风险的关注程度正在逐渐提高，但是还必须拿出更加系统、更加全面的改进办法，才能真正适应现在复杂多变的检测环境，彻底扭转目前比较严峻的安全形势。

## 2 桥梁检测风险类型及影响因素

### 2.1 作业人员安全风险

作业人员于桥梁检测工作中的安全风险为制约整体

检测质量和效率的重要因素之一。因为检测工作的空中作业特点，架设平台或者使用专业设备开展桥梁检查时，人员常常面对较高的坠落风险。桥梁检测必须于复杂的环境条件下开展，包含恶劣天气、交通流量密集区域的施工干扰等，这些因素均有可能对于作业人员的安全造成明显影响。人员素质和技能的不够同样是风险的潜在来源，不掌握检测设备操作或者应急处理流程有可能引发事故出现。上述情况下，强化人员安全培训、提高操作技能和应急处理能力，和完善劳动防护装备使用，能够显著减少事故出现的可能。借助有效的管理措施和技术支持，保障作业人员的安全，从而提升桥梁检测工作的效率和质量。

### 2.2 检测设备故障风险

桥梁检测设备故障风险主要影响检测工作的可靠性与准确性。设备故障可能源于设备老化、维护不足或设计缺陷等因素。老化的检测设备在长时间使用后，其性能可能逐渐下降，故障频率增加，导致数据偏差和误判的风险。维护不善会使设备处于亚健康状态，进一步加剧故障发生的概率。设计缺陷可能导致设备在特定环境条件下无法正常运行，例如在高湿度或高温环境中出现不稳定工作状态。另外，操作人员对设备使用不当也可能诱发故障，损害检测过程的稳定性和安全性。定期维护、更新设备、培训操作人员以及优化设备设计是降低检测设备故障风险的有效措施。

### 2.3 外部环境对检测安全的影响

外部环境会对桥梁检测安全产生显著影响，重点表现在自然环境、交通条件还有社会因素这些方面。大风、暴雨、极端温度这些天气情况，会直接导致检测设备出现故障，还会让作业人员面临更大安全风险。交通拥堵加上施工干扰，会大大增加危险程度，同时严重影响检测效率和人员安全。社会因素比如当地治安好坏、老百姓配合程度高低，这些也绝对不容忽视。一旦外部环境因素没有得到全面评估和有效管理，就很容易造成检测工作拖延时间，甚至发生安全事故。所以，一定要充分评估所有外部环境风险，并且快速调整优化管理措施，这一点非常关键。

## 3 安全管理体系的构建

### 3.1 管理组织架构与职责分工

构建桥梁检测安全管理体系，组织架构和岗位责任分工属于提高检测过程安全水平最重要基础部分。合理组织架构能够确保所有部门之间配合顺畅、重要信息随时共享，这样就能更好分配人力物力资源，大幅度提升大家工作效率。实施明确岗位责任分工以后，每个人都能清楚知道自己到底要对哪些安全事项负责，完全杜绝以前安全管理存在死角和漏洞情况。负责管理桥梁检测单位需要根据实际检测工作特点，专门组建一支常设安全管理团队，这支团队里一定要安排技术人员、管理人员还有应急处理专家。团队每个人都要非常清楚自己具体工作内容，主要包括每天到现场检查安全隐患、定期保养检测设备、一旦出事马上指挥应急救援这些事项。还要定期组织所有相关部门一

起开协调会，保证各种安全信息能够准确快速传递下去，并且马上得到妥善处理。这种组织安排方式能够促进各部门增强互相配合，共同处理桥梁检测过程中可能出现的安全问题。通过明确每个岗位的具体责任和建立顺畅的沟通渠道，就能显著提高整个桥梁检测工作的安全管理能力和风险控制能力，让隐患得到更快更有效的防控。

### 3.2 工作流程与标准化建设

桥梁检测工作的安全管理体系里面，工作流程和标准化建设非常重要。通过使用清楚的工作流程，可以有效防止工作人员操作失误导致的安全事故。标准化建设可以给整个检测工作提供牢固的操作规则，保证不管环境多么复杂，所做事情都保持一致。整个管理体系通过把每一个流程步骤都写得清清楚楚，来制定标准作业要求，再编写简单易懂的操作指导书，把检测前的准备、实际检测过程、数据记录、最后结果评估这些环节全部覆盖进去。这样做到的流程化和规范化管理，既大大提高了检测工作效率，又给每一位工作人员提供了清楚的安全操作指导，有效减少了因为人犯错造成的问题。使用统一的标准技术文件，还能让设备少出故障，保障每次检测的结果都既准确又可靠。通过制定严格的工作流程和标准要求，桥梁检测工作的安全水平和准确程度都得到了显著提高。

### 3.3 培训机制与技能提升

培训机制与技能提升在安全管理中至关重要。通过定期组织专业技术培训，提升检测人员的专业知识和操作技能，确保其能够熟练应对复杂的检测环境与突发状况。建立考核制度，评价和反馈培训效果，以持续优化培训内容和方法。通过多层次的培训体系，不仅增强人员业务能力，还提高其安全意识，有效降低检测工作中人员风险，进而保障桥梁检测环节的整体安全性。

## 4 风险控制措施与预警机制

### 4.1 风险识别与分级策略

桥梁检测工作过程中，风险识别加上分级策略属于确保人员安全、降低事故发生概率的关键步骤。风险识别主要包含彻底找出检测过程中所有可能出现危险的地方，具体覆盖工作人员操作失误、设备运行故障、天气环境变化等多个方面。精准识别出这些风险以后，必须立刻进行合理分级，清楚确定每种风险到底有多严重、需要多快处理。分级方法一般把数字计算跟实际判断结合在一起，同时评估这种风险到底有多大可能发生、发生以后会造成多大损失，据此划分出高中低不同等级。这样做有利于先处理最危险的情况，也能给管理者优化分配人力物力资源给出可靠依据。采取有效风险识别加分级策略，就能主动监控桥梁检测所有风险，实现精准管理，显著提升整体工作安全效率。

### 4.2 预防与应急处置流程

预防与应急处置流程是有效减少桥梁检测工作中风

险的关键环节。在预防方面，应当建立完善的风险识别体系，借助定时评价和剖析桥梁检测任务潜在遭遇的风险源，事先拟定具体的风险防控措施。必须优化设备维护规程，保证检测仪器的良好运行，来降低技术故障引发的安全隐患。在应急处置流程方面，须拟定具体的应急预案，清晰各类突发事件的处置措施及权限分工。桥梁检测团队应当开展定时演练，提升迅速响应和配合处置能力，来保障在事故出现时可以及时处理。建立实时的信息分享渠道，建立即时风险预警与反馈机制，从而保障现场操作人员尽快获取必要信息，降低事故损失。

### 4.3 技术手段在风险控制中的应用

桥梁检测工作当中，技术手段发挥关键作用来管控风险。先进检测设备和技术可以显著提高检测精度跟效率，大幅减少人为失误出现。传感器技术、无人机这类新设备可以直接采集监控桥梁当前状态信息，进而迅速发现潜在隐患。数据分析软件可以开展信息处理分析工作，给出科学危险评估预警，给决策人员拿出可靠依据。依靠上面技术应用，风险辨识管控变得更为精确高效，进而极大提高桥梁检测工作整体安全水平跟可靠程度。

## 5 结束语

本文聚焦桥梁检测工作中的安全管理与风险评估开展了系统研究，对于现阶段复杂作业环境和多元安全隐患，深入剖析了作业人员安全、设备故障和外部环境诸主要风险类型，制定了自管理组织、技术措施至流程规范的多层次完善安全管理体系策略。借助建立科学的风险评估体系，厘清了风险识别、风险分析、风险控制与应急预案诸关键环节，有力提高了桥梁检测工作的风险预警与处置能力。本研究显示，规范操作流程、完善人员培训和强化应急处置，能明显减少安全事故的发生，对桥梁检测工作安全管理水平的提升给予了有力支撑。另外加强行业之间的协作配合、实施标准化管理流程、健全实时数据共享和预警体系，同样会给桥梁检测安全管理带来更加可靠的技术支持和理论基础。

### [参考文献]

- [1]刘凡笛李博.公路桥梁施工安全管理体系与风险管理[J].名城绘,2020(11):0066-0066.
- [2]孙艳.桥梁施工安全风险评估与控制研究[J].门窗,2022(4):130-132.
- [3]余代翔.桥梁施工安全风险评估和管理[J].砖瓦世界,2021(23):152-153.
- [4]李梦晗.桥梁施工的风险评估与风险管理对策[J].交通世界,2021(31):147-148.
- [5]易鸣.桥梁施工中的安全风险评估与控制[J].中国科技期刊数据库 工业 A,2023(9):119-122.

作者简介：邵玉炜（2000.6—），性别：女，民族：汉，籍贯：辽宁省盘锦市，学历：研究生，研究方向：土木工程。

# BIM 技术在路桥设计中的运用与实践探讨

周艳玲

中南勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430070

**[摘要]**随着国内道路数量持续增多，路桥建设已然成为和诸多行业紧密相关的一项重要工程，而其设计质量也渐渐地变成了社会所重点关注的焦点所在。把 BIM 技术运用到路桥设计当中，可大幅提升设计水准，借助构建起三维模型的方式，把传统的二维设计模式转变成更为立体化且可视化的全新设计方式。如此一来，不但能让设计人员更为直观地察觉到设计方案里存在的不足之处，还能及时地对这些不足做出相应的调整，切实有效地提高设计效率及精度，进而为高质量且高效率的路桥工程建设筑牢了稳固的技术根基。

**[关键词]**BIM 技术；路桥设计；技术运用；实践探讨

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17999

中图分类号：TU997

文献标识码：A

## Application and Practice of BIM Technology in Road and Bridge Design

ZHOU Yanling

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430070, China

**Abstract:** With the continuous increase in the number of domestic roads, road and bridge construction has become an important project closely related to many industries, and its design quality has gradually become a focus of social attention. Applying BIM technology to road and bridge design can significantly improve the design level. By constructing three-dimensional models, traditional two-dimensional design patterns can be transformed into a more three-dimensional and visual new design approach. In this way, not only can designers more intuitively perceive the shortcomings in the design scheme, but they can also make corresponding adjustments to these shortcomings in a timely manner, effectively improving design efficiency and accuracy, and thus laying a solid technical foundation for high-quality and efficient road and bridge engineering construction.

**Keywords:** BIM technology; road and bridge design; technology application; practical exploration

### 引言

随着现代基础设施建设进程不断加快，路桥工程于城市交通网络以及区域经济发展方面占据着极为重要的位置。传统二维设计方法在应对复杂桥梁结构、多专业相互交叉以及施工组织协调等情形时，往往会出现信息不够完整、设计冲突频发及沟通效率低下的诸多问题，很难契合现代工程对于高精度、高效率以及高安全性的相关要求。BIM（建筑信息模型）技术属于一种具备集成特性的数字化设计与管理工具，其借助三维建模、数据集成以及信息共享等方式，把设计、施工及运维整个过程中的各类信息都整合至统一的平台之上，进而给路桥工程带来了全新的设计理念以及相应的技术手段。在实际的应用环节当中，BIM 技术不但可以达成精确的三维可视化呈现效果以及参数化设计目的，而且还能凭借多专业协作、冲突检测、施工模拟以及进度管理等诸多功能，提升设计的精度、优化施工方案、减少资源的浪费，并且切实有效地保障工程的质量与安全性。鉴于此，本文将会对 BIM 技术在路桥设计方面的应用优势、设计实践里的难点以及其在实际工程中的具体运用展开较为系统的探讨，期望能为路桥工程设计给予科学方面的参考依据以及技术层面的指导，推动现代路桥工程朝着智能化、信息化以及高效化方向不断发展。

### 1 BIM 技术在路桥设计中的应用优势

#### 1.1 BIM 软件的应用

BIM 软件在路桥设计中的应用，给工程设计赋予了颇为明显的效率以及精度方面的提升。其借助构建起的三维数字化模型，把路桥的结构、所用材料、施工工艺还有相关联的信息都集中起来加以管理，进而达成信息的可视化以及实现信息共享。设计人员能够在虚拟的环境当中，直观且清晰地去观察设计的实际效果，能够及时察觉并处理潜在的冲突以及各类问题，有效防止传统二维图纸里常常会出现的误差以及信息遗漏的情况。同时 BIM 软件还支持参数化设计以及智能分析，可以依据工程的具体需求来自动对结构尺寸、负荷参数以及施工方案做出相应的调整，以此提高设计所具有的科学性与合理性。除此之外，BIM 软件对于各相关方之间开展协同工作而言是比较便利的，能够实现对设计、施工、造价以及进度等方面的综合管理，为路桥工程的整体规划、施工组织及运维管理给予可靠的可供参考的数据支撑，最终使得路桥工程设计的效率、安全性以及经济性均得以显著提升。

#### 1.2 极强的分析能力

BIM 技术拥有极强的分析能力，并能够通过设计做出模拟，从而帮助设计人员在设计的同时就能够观测到路

桥完工之后的模型，并通过对模型的细致分析，查验出其中可能存在的问题，并及时对其进行更正。如此便可以将各类隐患消除在萌芽之中，防止其造成更多的不良影响。另外，此项技术生成的三维立体模型，与固有的平面模型相比，其自动化程度更高。在 BIM 技术之中，还涵盖了非常多的路桥信息，可为后期分析提供更多的参考数据，有助于保证结论的准确性。

### 1.3 创建模型

在路桥设计环节当中，创建 BIM 模型称得上是达成数字化设计以及智能化管理的关键所在。借助构建起的三维模型，设计人员便能够把桥梁的结构情况、各个构件的状态、所用材料的信息以及施工工艺方面的详情完整且直观地展示出来，进而实现对设计方案较为详尽的掌握与细致的分析。BIM 模型不但可精准地呈现出路桥各部分间的空间关联以及结构尺寸的具体状况，还具备参数化设计的功能，这使得模型在契合设计要求的基础之上，能够依据工程的实际情况自动做出相应的调整，如此一来便提升了设计工作的灵活性以及精确程度。除此之外，BIM 模型还拥有信息集成以及共享的功能，各个专业的团队能够在同一个统一的平台上展开协同设计以及优化，有效地降低设计过程中出现冲突以及信息有所遗漏的情况发生<sup>[1]</sup>。到了施工阶段，BIM 模型能够应用于施工模拟、进度管理以及成本控制等方面，给施工方案的优化以及施工过程的监控予直观且有力的依据，同时也有利于后期的运维管理工作，进而达成路桥工程在整个生命周期里都能实现信息化的管理目标。

## 2 路桥设计实践中的难点

### 2.1 无法精准地表达设计意图

在路桥设计的实际操作进程中，无法清晰且准确地传达设计意图的情况属于普遍存在的一个问题，这一情况在设计信息的传递以及理解这两个环节方面表现得尤为突出。传统的二维图纸，在对复杂结构、几何关联以及施工工艺予以表达的时候，存在着一定的限制。设计人员所绘制出来的平面图、剖面图及施工图，常常很难做到将桥梁的整体空间构造以及各个细节特征完整且直观地展现出来，如此一来，就很容易致使施工单位、监理单位以及其他相关的专业领域对于设计意图的理解出现偏差的情况发生。除此之外，路桥设计牵涉到多种多样的专业知识，像结构、岩土、交通以及水利等诸多领域均包含在内，而不同专业之间所使用的术语、符号以及标准存在着差异，这就使得设计信息在进行跨专业的交流过程当中，极易出现被误解或者被遗漏的情形。这些问题，不但会对设计方案的准确传达产生影响，而且在后续的施工阶段、监理阶段以及运维阶段，还极有可能引发不必要的修改以及返工等情况，进而增加工程的费用及时间成本，同时也会对工程的质量以及安全性形成潜在的影响。

### 2.2 关联技术内容多

在路桥设计的实际操作当中，所涉及的关联技术相关

内容颇多，这无疑是一个较为棘手的难点。具体而言，在设计进程里，得同时把结构、地质、交通、排水、环境还有施工工艺等诸多方面的因素都考量进去。每一处环节都蕴含着数量可观的技术参数以及专业知识，并且这些环节彼此间还存在着颇为复杂的相互依赖关系。就好比桥梁结构的受力分析工作，就得结合地质条件、材料性能以及施工工序等方面来展开综合性的评估；而排水设计以及道路设计又得和桥梁的整体布局达成协调统一的状态<sup>[2]</sup>。如此多技术、多学科交织在一起的特性，致使设计信息量变得极为庞大，其内在的逻辑关系也相当复杂，设计人员必须在限定的时间范围内把各个方面的要求都兼顾到，从而保证设计方案具备科学性及可行性。

## 3 路桥设计中 BIM 技术的实践运用

### 3.1 各个领域的协作

在现代路桥设计环节当中，BIM 技术的应用在各个领域的协作方面起到了极为关键的作用，其核心就在于达成多专业以及跨学科的信息整合与同步管理这一目标。路桥工程涵盖结构、岩土、道路、排水、交通还有环境等众多专业，每一个领域都蕴含着数量众多且复杂的各类设计参数以及规范要求，并且彼此之间存在着紧密的逻辑以及空间关联。就传统而言，二维图纸以及人工沟通模式常常很难确保各专业间信息保持一致性与准确性，进而容易引发设计冲突、产生误解以及出现返工等情况。BIM 技术凭借构建起统一的三维数字模型，把各专业的设计数据、施工信息、材料参数以及施工工艺流程集中起来加以管理，以此来实现信息的实时共享以及动态更新，促使各专业团队能够在同一个平台上直观地去查看、分析并调整设计方案。该平台内部的参数化设计以及智能分析功能可自动检测出空间冲突、逻辑矛盾以及施工顺序方面的问题，进而为设计团队给予可视化的反馈以及科学的决策依据，如此便可再设计阶段提前对潜在问题予以解决，降低施工阶段出现返工以及资源浪费的情况。除此之外，BIM 技术还能够支持跨区域以及多团队的协作，使得设计单位、施工单位、监理单位以及业主即便处于不同的地点也能够开展高效的沟通与同步管理，进一步提升了协作的透明程度以及决策的效率。

### 3.2 三维立体处理

在路桥设计的实际操作当中，BIM 技术所具备的三维立体处理功能给工程设计带来了全新的观察视角以及强有力的技术支撑，让设计流程从以往传统的二维平面表述转变成了高度可视化、极为精确且充满智能化特性的三维空间管理模式。借助三维立体模型这一手段，设计人员便能够完整且细致地呈现出桥梁的结构状况、各个构件的具体情况、所使用的材料信息以及相关的施工工艺详情，达成各类设计元素在空间维度上精准无误的定位，并且能够将这些设计元素之间存在的逻辑关联以可视化的形式清晰地表达出来，从而彻底解决了在二维图纸当中信息往往不够完整、表达方式也不够直观等一系列的问题。与此

三维立体处理功能不但可以直观地展示出桥梁的几何形状以及其在空间当中的布局安排,而且还能够对参数化设计予以支持,同时也允许进行动态的调整操作,这就使得设计方案可以根据实际的地质条件、结构所承受力的要求以及施工方面的各种约束情况来实现自动化的优化处理,进而提升设计工作的科学性与合理性水平<sup>[3]</sup>。在协作这个层面上来讲,三维模型能够让不同专业的各个团队在同一个统一的平台之上同步查看并且分析设计成果,如此一来便有利于及时发现并妥善解决跨专业领域所存在的冲突方面的问题,从而促使多专业协作的效率切实提高。

### 3.3 设计验证

在路桥设计环节当中,BIM技术所具备的设计验证功能称得上是保证工程方案具备科学性、可行性以及安全性的一项极为重要的手段。把桥梁的结构情况、各个构件的相关信息、所采用的材料详情以及施工工艺方面的信息都整合进三维数字模型里,BIM技术便可在设计阶段针对方案展开全面且细致的分析,并且能够实施仿真验证操作,像对结构受力状况、荷载分布情况、施工工序流程以及环境适应性等诸多关键参数均要开展检测与评估工作。设计验证这一过程不但可自动去识别出潜在的设计冲突、可能出现的尺寸偏差以及施工过程中存在的难点,还可以借助可视化的方式直观地将这些问题呈现出来,进而给设计团队提供科学合理的调整依据,防止在施工阶段因为设计方面存在缺陷而出现返工的情况以及造成成本方面的浪费。除此之外,BIM平台还能够联合有限元分析技术、动态模拟技术以及虚拟施工技术一道,针对复杂桥梁结构的稳定性状况、耐久性表现以及施工可行性情况展开模拟操作并做出预测,以此来促进设计方案的优化,提升结构的安全性以及工程的整体可靠性。

### 3.4 设计规划

在路桥设计环节,BIM技术所具备的设计规划功能,在工程项目的前期策划阶段以及整个过程的管理当中,都发挥着极为关键的作用。借助BIM平台,设计人员能够把桥梁的结构方面、道路相关、排水事宜、交通状况以及环境等各个专业的设计信息整合到同一个三维数字模型里,进而达成对整体工程方案予以系统化规划并且加以优化的目的。设计规划涵盖的内容不只是空间布局方面的安排、结构参数的设定以及施工工序的科学筹划,而且还能在模型当中对不同设计方案于施工条件层面、工期安排方面以及资源配置方面的可行性展开模拟,以此来给设计决策予量化的依据<sup>[4]</sup>。凭借BIM技术的参数化分析功能以及智能化计算功能,设计团队可针对桥梁各个构件的尺寸情况、受力状况以及施工顺序实施动态的调整与优化操作,借此提升设计方案的合理性并提高工程效率。同时BIM技术能够支持多专业的协同设计,能够让结构领域、岩土方面、交通范畴、排水事宜以及环境等相关领域在同一个

统一的模型里面开展信息的交互活动以及方案的比对工作,及时察觉潜在的冲突以及设计存在的不足之处,进而提升跨专业规划的精度以及一致性程度。

### 3.5 工地现场探析

在路桥设计的实际操作过程中,BIM技术在工地现场的应用给施工管理以及现场决策起到了关键性的支撑,达成了设计和施工紧密无间的衔接状态。把BIM三维模型同现场的实际情况相互融合起来之后,施工团队便可以在虚拟的环境当中针对桥梁构件、道路的布置情况、排水系统还有施工工序展开可视化的分析以及模拟操作,进而提前察觉到在施工环节里有可能会出现的空间冲突状况、材料出现短缺的情况或者施工顺序安排不合理等诸多问题。BIM技术不但能够给出精准的施工定位方面的指引以及尺寸方面的指导,而且还能够对施工进度、资源调配事宜以及安全风险管理方面予以实时的监控,使得现场的管理人员能够在工地上借助移动终端或者是可视化平台即刻获取到模型的相关信息,达成远程的指导以及决策的优化效果。除此之外,BIM平台还能够联合无人机、激光扫描以及物联网传感技术一道,对施工现场展开动态的监测工作,把实际施工所产生的数据和设计模型加以比对并进行校验处理,以此来确保施工的整个过程严格依照设计方案去切实执行,从而促使施工的精度以及安全性得以提升。

## 4 结语

BIM技术于路桥设计方面的运用已然成为提升设计品质、优化施工流程以及强化多专业协作的关键手段。凭借三维建模、设计验证、规划管理还有在施工现场的实际应用,BIM技术不但能够直观地呈现出复杂结构以及空间关系,降低设计冲突与施工风险,而且可以提升设计效率与工程精度,达成设计、施工以及运维的全流程信息化管理。与此BIM技术推动了各专业团队展开协同工作并实现信息共享,让路桥工程设计变得更为科学、合理且具备可操作性。随着BIM技术同现代信息化手段持续不断地融合,其在路桥设计与施工当中的应用前景将会变得更加宽广,为推进高效、智能且可持续的现代路桥工程建设给予稳固的技术保障。

### 【参考文献】

- [1] 汪洋.路桥设计中BIM技术的实践运用分析[J].工程技术研究,2020,5(14):222-223.
- [2] 游元兴,邓悦.路桥设计中BIM技术的实践运用分析[J].江西建材,2019(7):106-107.
- [3] 白小波.BIM技术在市政路桥设计中的运用与实践探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024(8):190-192.
- [4] 王潇.市政路桥设计中BIM技术的应用[J].科技创新与应用,2020(15):84-85.

作者简介:周艳玲(1992—),女,汉族,湖北武汉市人,本科,路桥工程师,从事公路路线互通设计工作。

## 基于智能传感技术的桥梁实时监测与健康评估研究

宋泰毅

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**随着我国基础设施建设的快速发展，桥梁安全与健康已成为交通运输领域亟需关注的重点问题。传统桥梁监测手段存在数据获取滞后、评估效率较低等局限，难以满足现代桥梁运行管理的实际需求。近年来，智能传感技术的兴起为桥梁实时监测与健康评估提供了新的解决方案。文中聚焦智能传感器在桥梁结构监测中的应用，通过布置多类型传感器，实现对桥梁关键参数的连续、实时采集，包括荷载响应、应变、振动、位移及温度等。基于采集的数据，运用智能分析方法，对桥梁运行状态进行动态评估，及时发现结构潜在损伤与异常。研究结果表明，智能传感系统具备数据采集全面、传输高效、响应迅速等优势，可大幅提升桥梁健康评估的准确性和及时性，为桥梁安全运行和维护决策提供科学依据。该研究对于推动桥梁智能化管理、延长结构服役寿命及保障交通安全具有重要意义。

**[关键词]**智能传感技术；桥梁监测；健康评估；结构安全；实时数据采集

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17993 中图分类号: U446 文献标识码: A

## Research on Real time Monitoring and Health Assessment of Bridges Based on Intelligent Sensor Technology

SONG Taiyi

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** With the rapid development of infrastructure construction in China, bridge safety and health have become key issues that urgently need attention in the field of transportation. Traditional bridge monitoring methods have limitations such as lagging data acquisition and low evaluation efficiency, making it difficult to meet the practical needs of modern bridge operation and management. In recent years, the rise of intelligent sensing technology has provided new solutions for real-time monitoring and health assessment of bridges. The article focuses on the application of intelligent sensors in bridge structure monitoring, by arranging multiple types of sensors to achieve continuous and real-time collection of key parameters of bridges, including load response, strain, vibration, displacement, and temperature. Based on collected data, intelligent analysis methods are used to dynamically evaluate the operational status of bridges and promptly detect potential structural damage and abnormalities. The research results indicate that intelligent sensing systems have the advantages of comprehensive data collection, efficient transmission, and rapid response, which can greatly improve the accuracy and timeliness of bridge health assessment, and provide scientific basis for bridge safety operation and maintenance decision-making. This study is of great significance for promoting intelligent management of bridges, extending the service life of structures, and ensuring traffic safety.

**Keywords:** intelligent sensing technology; bridge monitoring; health assessment; structural safety; real time data collection

### 引言

随着我国经济的稳步增长和城市化进程的加速，桥梁作为重要交通枢纽，其结构安全与健康状况密切关系到社会经济发展和公众生命财产安全。据交通运输部相关统计，截至 2023 年底，全国公路桥梁数量已经突破百万座，桥梁病害率出现年年上升趋势，结构损伤隐患日益显现，迫切需要高效率、精确的健康监测与评估手段。传统桥梁监测方法主要依赖人工巡查与少量的仪器检测，具有数据获取周期过长、信息不完整、诊断延迟等不足，无法满足现代桥梁长期运营管理对突发事件应对的需求。快速发展的智能传感器技术给桥梁结构健康监测带来重要进展。各种智能传感器可以完成桥梁承受荷载时的反应、应力变化、振动情况、位移大小还有温度变化这些参数的全天候不间断

采集，大大提高数据采集的覆盖范围和详细程度。依靠大数据分析加上人工智能算法，桥梁当前运行状况以及可能出现的损伤能够做到随时自动判断并且提前发出警告，这直接促进桥梁养护方式从过去靠人定期检查转变成为全面依靠信息技术和智能化管理。虽然国内已经有很多实际工程案例，比如武汉长江大桥、杭州湾跨海大桥这些项目都安装了智能监测系统，但是目前传感器小型化程度、数据处理速度、损伤判断准确率这些关键地方还有进一步提升空间。本文以智能传感技术为重点，全面探讨其于桥梁实时监测与健康评估中的实际应用，达成对桥梁结构状态和安全性能的实时掌控，目的在于为我国桥梁智慧管理体系的构建、结构服役寿命的延长以及交通安全保障给予理论依据和技术支持。

## 1 智能传感技术在桥梁监测中的发展现状

### 1.1 智能传感器系统的技术演进

桥梁健康监测技术发展过程中,智能传感器系统发挥极其关键作用。过去桥梁检查基本依赖人工定期静态检测,没办法随时掌握桥梁结构变化情况。后来微机电系统MEMS、无线通信、大数据分析技术持续进步,智能传感器性能因此能够快速提高。MEMS传感器出现之后,传感器对微小变形的捕捉能力显著提升,精度更高了。无线传输技术进步让数据发送变得更为方便快捷,明显降低布线麻烦和后期维护费用。现在智能传感器系统可以把多种传感器组合起来,构建复杂监测网络,完成桥梁温度、应变、振动等关键参数全天候持续监控。先进算法装在监测系统里面,可以一刻不停地解析和剖析巨量数据,马上就能发现桥梁可能出现的安全隐患并且提前发出警报提醒工作人员。现在越来越聪明的传感器技术,让整个桥梁健康监测变得随时随地都能进行,而且测得特别准特别细,这给桥梁安全管理带来了非常关键的技术支持。

### 1.2 国内外桥梁监控实践概述

国内外桥梁监控实践已经获得明显进展。西方国家于桥梁监测领域积累起充足的经验,大量用于长大桥梁和关键交通枢纽上,借助布置领先传感器网络,做到了对桥梁状态的全时段监控,很大提升了安全管理水。中国近几年桥梁建设规模快速扩张,对高效监测技术的需求越来越急切。借助采用智能传感技术,一些重点桥梁达到了实时数据采集和分析,建立了初始的智能监测体系。从总体而言,全球范围内桥梁监测技术的成熟应用仍需深入探索。

### 1.3 关键监测参数及技术需求分析

桥梁监测的关键参数包括荷载响应、应变、振动、位移和温度。这些参数给予了对桥梁结构性能的全面评估,成为保证桥梁安全运行的基础。智能传感技术的核心需求是达成高效的实时数据采集和传输,保证数据的准确性和可靠性。以符合现代桥梁管理的严苛要求,传感器系统必须拥有于复杂环境中稳定工作的能力,实现多类型数据的融合与处理,从而提高监测系统的综合评估水平。此技术需求的达成对桥梁维持长期服役拥有重要意义。

## 2 多类型智能传感器的集成应用

### 2.1 各类传感器在桥梁中的布置策略

在桥梁结构健康监测过程中,传感器种类、安装位置还有数量直接影响整个监测效果好不好。荷载响应检测用的传感器通常都装在桥梁最吃力的地方,比如主梁、桥塔、索等关键受力区域,这样就能清楚采集到车辆通过或者风吹等动态荷载作用下桥梁产生的各种反应数据。应变传感器大多安装在大悬臂段或者跨度很大的桥梁关键部位,目的是随时掌握结构因为受力产生的变形大小和变化趋势。振动传感器和位移传感器主要集中布置在桥梁的重要节点位置,尤其是那些容易出现明显晃动的区域,这样做可以确保测量数

据足够精确。温度传感器必须布置在能够真实反映桥梁整体和局部环境温度变化的位置,这样才能更好地分析温度对钢材、混凝土等材料性能带来的影响。整个传感器网络布局需要同时考虑桥梁本身的结构特点、当地气候环境条件,还要保证数据传输线路稳定通畅,只有这样才能真正实现对全桥各个部位的不间断监测。各种不同类型传感器一起协同工作,能够大幅提升整个智能监测系统的运行效率,给桥梁日常运营管理提供更加精确、更加及时的数据支持。

### 2.2 数据采集与传输流程优化

改进数据采集和传输过程已经构成提升桥梁监测效率最关键办法。传感器节点用一体化布局办法达成桥梁每个部位都被覆盖到并且采集信息精度很高要求。运用传感器网络加上云计算技术让数据传输速度更快更可靠。经常采样技术搭配省电设计有利于减少数据传输时延明显加快系统反应速度。应用先进数据压缩处理算法可以明显压缩传输数据总量确保监测保持实时状态。通过改进传输过程既加强数据安全和完整性又供给后面桥梁健康评估工作稳定可靠数据基础。

### 2.3 系统集成的技术难点与解决思路

智能传感器在桥梁监测的集成应用存在不少技术难点。各类传感器数据格式与通信协议不同,让系统集成复杂度大增,为此,要采用统一数据标准和协议,保障多源数据兼容集成,传输时,实时性与可靠性不可或缺,需搭建稳定通信网络,优化传输路径与节点布局,降低数据延迟和丢失风险,此外,传感器能耗控制与耐久性也是关键,得研发低能耗、高耐久设备,确保长期监测稳定运行。

## 3 桥梁运行关键参数的动态检测

### 3.1 荷载响应与结构应变的连续监测

荷载响应与结构应变的连续监测为桥梁动态检测中十分关键的环节,目的供给关键的基础数据,来保障桥梁结构的安全和稳定。智能传感器于此领域的应用,可以精确捕获桥梁承担的荷载变化以及引起的结构应变。借助于桥梁的关键部位,例如主梁、桥墩等等,安装应变计和荷载传感器,达成对于荷载影响时桥梁结构变形的即时监测。这些传感器可连续采集数据,记载桥梁于各种载荷情况时的响应情况。采集的数据通过优化的传输系统开展即时处理和分析,保证信息的准确性和及时性。这些技术方法让桥梁管理人员能够随时清楚知道桥梁当前到底承受了多大力量,能快速准确判断桥梁结构是不是还健康,这样就能提前发现并防止可能出现的问题,保障桥梁不管遇到多恶劣的天气或者多重的载重都能一直安全正常运行。这种24h不间断的监测方式给桥梁未来的保养和健康管理带来了非常可靠的技术支持。

### 3.2 振动位移与温度的实时采集

桥梁监测工作里,把桥梁振动位移和温度数据实时采集上来,对保障整座桥梁结构安全起着非常关键的作用。

振动传感器通过持续测量桥梁受到各种外力时的动态反应，为及时发现结构异常情况提供最核心的数据支持。工作人员使用高精度加速度计和激光雷达这些先进设备，能够清楚完整地捕捉到桥梁承受车辆或其他荷载时产生的每一点位移变化，这些数据对于长期分析桥梁是否保持稳定具有重要参考价值。温度传感器被均匀布置在桥梁各个关键部位，这样就能实现一年 365d、一天 24h 不间断地监测温度变化，清楚反映周围环境温度升高或降低会对桥梁结构产生哪些具体影响。现代化的数据采集技术确保所有监测信息都能立刻传输到监控中心并快速处理，从而大幅提升整个监测系统的运行效率，为管理人员快速判断桥梁健康状况和及时发出预警提供最为可靠的数据依据。

### 3.3 数据实时性与精度保障措施

为了保障桥梁运行关键参数数据的实时性与精度，应采用高频采样率的传感器和优化的数据传输协议，确保信息的快速捕捉与传递。传感器的校准与定期维护对于提高数据准确性至关重要。多节点数据同步技术的应用可以避免时间偏移带来的误差。在数据分析阶段，需应用先进的算法滤除噪声，提高信号的可靠性。通过这些措施，可显著提升桥梁监测系统的数据实时性和精度，为结构健康评估提供坚实基础。

## 4 智能系统对桥梁健康状态的判识能力

### 4.1 智能数据处理流程

智能数据处理流程在桥梁健康监测过程中起到重要作用。这个流程主要包括数据收集、传输、存储和分析四个阶段。传感器负责收集桥梁运行时的各种实时数据，比如荷载应力、振动频率等。收集到的数据通过无线网络传送到云端服务器或者本地存储设备，整个传输过程必须保证又快又稳。数据存储环节特别强调安全性跟完整性，这样后面分析的时候才能用得上。到了分析阶段，就使用机器学习和人工智能技术，对海量来自不同来源的数据进行处理，从中提取出真正有用的信息。通过建立数学模型来判断桥梁当前到底健不健康，能不能早就识别出结构可能出现的问题和异常情况。整个流程如果运行得又快又好，就能帮助人们随时掌握桥梁的运行状态，出现问题马上就能预警，这样就给桥梁的日常健康管理提供了非常稳定的技术支持。

### 4.2 异常预警与损伤识别机制

异常预警和损伤识别功能属于桥梁健康评估最核心的部分之一，主要依托智能传感系统来完成。通过对荷载响应、应变、振动、位移、温度这些关键数据进行持续采集和智能分析，可以及时发现桥梁运行过程隐藏的风险信号。异常预警功能主要基于大数据分析和机器学习算法，把当前采集到的数据跟过去积累的正常基准值进行比较，一旦发现明显偏差就能快速判断出异常情况并立刻发出预警信号。损伤识别功能则采用动态特征提取和状态指标比较的方式，对桥梁可能出现的裂缝、疲劳损伤或者结构变形进行精确位置定位和损伤类型识别。结合多种物理参数互

相交叉验证的技术，有效提高了损伤识别的准确程度和可信程度，给桥梁长期安全运行提供了非常可靠的安全保障。

### 4.3 健康状态评价指标体系

健康状态评价指标体系在桥梁智能监测系统里，是实现结构状态高效评估的关键，它借助对监测数据的智能剖析，构建起涵盖荷载响应系数，应变量超限率等多项内容的综合评价指标，以反映桥梁结构安全与性能<sup>[5]</sup>，这些指标会根据桥梁类型、结构特点及运行环境合理分配权重，形成适用性强，准确性高的评价体系，其动态评估结果可实时呈现桥梁健康状况，为潜在损伤预警和养护决策提供科学依据，该体系结构清晰、反应敏捷，能有效提升桥梁智能管理水平，增强桥梁运行安全保障能力。

## 5 结束语

本文围绕智能传感技术在桥梁实时监测与健康评估中的应用开展了系统性研究，对于传统监测手段具有的数据滞后与评估效率低等问题，设计了多类型智能传感器联合布局的技术方案，并且融合智能分析方法，达成了桥梁关键参数的不间断、实时采集和精确评估。研究结果证明，智能传感系统能显著提高数据采集的全面性、传输的高效性以及响应的实时性，从而大幅提升桥梁健康状况评估的准确性与及时性，为桥梁安全维护与运行管理给予了坚实的数据支撑和决策依据。这项技术能够有力推动桥梁实现智能化管理，大幅增加桥梁结构使用年限，同时切实保障交通运输安全，效果非常显著，未来应用空间也十分广泛。现在阶段，智能传感系统用在桥梁监测领域还存在三个主要问题，传感器使用寿命不够长、多种数据融合和处理算法急需大幅改进、整体布置成本仍然过高。在极端天气或环境条件下，传感器能不能稳定工作、整个系统靠不靠谱，这些方面还需要继续深入研究。未来主要发展方向包括四个方面，开发性能更好、功耗更低的新一代传感器，不断改进多源数据智能融合算法，大力促进价格低廉的传感系统普及开来，最后构建覆盖桥梁从建造到报废全生命周期的智能化管理平台，最终实现桥梁健康监测、评估和维护达到更高水平和更智能程度。

## 【参考文献】

- [1] 望远福.桥梁智能健康监测技术与应用现状研究[J].交通世界,2023(25):147-149.
  - [2] 王文强.市政桥梁结构健康监测与评估技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(5):134-137.
  - [3] 陈小璐.桥梁结构健康监测的传感器技术与数据分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):95-98.
  - [4] 庄志凯,陈勇,张伟,谢琪.基于健康监测数据的桥梁状态评估[J].四川水泥,2020(6):37-38.
  - [5] 谢崇洪,张彦昌,李文.基于无线传感技术的桥梁结构健康监测研究[J].智能建筑与智慧城市,2021(11):172-173.
- 作者简介：宋泰毅（1996.10—），性别：男，民族：汉，籍贯：河北省衡水人，学历：硕士，研究方向：桥梁检测。

## 城市桥梁的定期检测及维护策略研究

杨文元

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**随着城市化进程加快，桥梁作为城市交通的重要基础设施，其安全与稳定运行对于保障市民出行与城市整体发展具有重要意义。城市桥梁由于长期承受交通荷载和环境影响，容易产生结构老化、损伤等问题，增大安全隐患。针对这一现状，本研究梳理了城市桥梁定期检测的必要性，探讨了规范化检测流程和科学维护策略。首先，通过明确桥梁检测频率、项目与标准，提出建立系统的桥梁健康监测体系，有效掌控桥梁运行状态。其次，根据检测结果分类，对不同程度的损伤制定针对性的维护与修复措施，优化维修资源分配，提高养护效率。此外，强调预防性维护理念，建议建立动态数据库，实现信息化管理与预测性养护。研究显示，科学合理的桥梁检测与维护策略不仅能延长桥梁使用寿命，降低运行风险，也对提升城市基础设施管理水平起到积极推动作用。该研究对于完善城市桥梁管理体系、确保桥梁安全可靠运营以及提升城市交通可持续发展具有重要参考价值。

**[关键词]**城市桥梁；定期检测；维护策略；结构健康监测；信息化管理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17992 中图分类号: U446 文献标识码: A

## Research on Regular Inspection and Maintenance Strategies for Urban Bridges

YANG Wenyuan

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** With the acceleration of urbanization, bridges, as important infrastructure for urban transportation, have significant importance in ensuring the safe and stable operation of citizens' travel and the overall development of the city. Due to long-term exposure to traffic loads and environmental impacts, urban bridges are prone to structural aging, damage, and other issues, increasing safety hazards. In response to this situation, this study has sorted out the necessity of regular inspections of urban bridges, explored standardized inspection processes and scientific maintenance strategies. Firstly, by clarifying the frequency, items, and standards of bridge inspection, it is proposed to establish a systematic bridge health monitoring system to effectively control the operation status of bridges. Secondly, based on the classification of detection results, targeted maintenance and repair measures are formulated for different degrees of damage, optimizing the allocation of maintenance resources and improving maintenance efficiency. In addition, emphasizing the concept of preventive maintenance, it is recommended to establish a dynamic database to achieve information-based management and predictive maintenance. Research shows that scientifically reasonable bridge inspection and maintenance strategies can not only extend the service life of bridges and reduce operational risks, but also play a positive role in improving the level of urban infrastructure management. This study has important reference value for improving the urban bridge management system, ensuring the safe and reliable operation of bridges, and enhancing the sustainable development of urban transportation.

**Keywords:** urban bridges; regular testing; maintenance strategy; structural health monitoring; information management

### 引言

伴随全球城市化进程的持续加速，桥梁作为城市交通体系的节点性基础设施，担负着连通城市空间、确保交通流畅的关键使命。根据住房和城乡建设部 2023 年数据显示，中国城市桥梁总数已经超过 50 万座，并且桥梁通行量不断上升。桥梁长时间经受复杂交通荷载与多变环境因素，包含车辆冲击、气候变化、腐蚀及人为损伤等，这些作用造成桥梁结构逐步老化、损伤积累，容易诱发安全隐患和运营风险。城市桥梁出现突发损坏和结构失效的案例屡有报道，引发经济损失以及交通中断，突出桥梁健康检测与科学养护的紧迫性。国内外研究者对于桥梁安全管理，已经进行定期检测技术体系的探索，例如采用结构健康监

测、无损检测、高精度传感器等手段，促进检测方法和养护模式的创新。目前我国部分城市桥梁仍然存在检测标准未统一、维护策略缺少系统性、信息化水平需要提高等问题，极大制约桥梁全生命周期管理。以提高城市桥梁管理效能、减少运营风险、确保市民安全出行，亟需系统梳理定期检测的流程规范，依据损伤评估构建分级维护体系，加强预防性养护和数据信息化支持。本文着重于城市桥梁的定期检查及养护策略，以期完善桥梁管理制度，提高基础设施运行安全性与城市交通可持续发展的水平。

### 1 城市桥梁管理维护的现存问题

伴随全球城镇化步伐的加快，城市桥梁身为城市交通基础设施的关键组成部分，肩负着连通区域交通网络、确

保交通畅通运行的关键职责。城市桥梁长时间处在复杂的使用环境中，经受着交通荷载、气候变化和化学腐蚀等多种挑战，其结构性能在服役过程中逐步衰退，安全隐患日渐增大。桥梁结构老化和损伤的累积导致其稳定运行遭到威胁，此种现象不但制约桥梁的使用寿命和维护成本，而且对全体城市交通体系的安全性、顺畅性形成重大威胁。桥梁身为城市发展的关键设施之一，保持其安全可靠运行为保证城市运行秩序的关键环节。于现代化城市建设越来越复杂的大背景下，怎样借助高效的管理措施预判桥梁潜在出现的结构问题，采取科学的维护策略，化为打造智能交通和城市可持续发展的重要课题。桥梁若干运行过程中发生重大结构破坏或者服务能力降低，不但可能引发交通中断，乃至可能酿成重大的生命财产损失。保障桥梁于服役周期中的安全性与耐久性为一个迫切需要深入研究的关键议题。目前，城市桥梁管理领域的发展尚存不足，许多城市对桥梁的检测频率、过程规范以及健康状态掌控未建立系统化方案，与交通安全管理水平的高要求尚有明显差距。这一问题的解决对于城市交通基础设施管理水平的提升具有重要意义，亦是实现城市交通可持续发展目标的关键所在<sup>[3]</sup>。

## 2 城市桥梁现状及安全运行的重要性

### 2.1 城市桥梁在交通体系中的作用

城市桥梁属于城市交通体系当中最关键的部分，承担连接城市各个区域、支撑整个交通网络正常运转的重要任务。桥梁通过不断优化道路布局，显著提升了货物和人员的运输速度，大大促进城市土地和其他资源得到更加合理充分的使用。现在的城市里，桥梁不只是单纯的过河通道或者高架路，更成为火车、汽车、地铁、公交等多种交通工具能够顺利换乘的核心地点。无论是送货的物流车队、每天上下班的客车，还是突发灾害时的救护车和消防车，桥梁能不能正常通行，会直接决定这些车辆跑得快不快、跑得安不安全。桥梁建得好不好、管得好不好，跟城市经济能不能更快发展、居民生活方不方便，有着非常密切的关系，起到实实在在的基础支撑作用。把桥梁规划好、建设好、养护好，能够帮助城市建立起更加快速便利的交通网络，加快周边区域连成一片，真正实现长期绿色可持续发展。城市桥梁作为交通基础设施中最核心的组成部分，在整个城市化快速发展过程中，发挥着任何时候都不能缺少的关键作用。

### 2.2 城市桥梁面临的主要安全隐患

城市桥梁运行很多年后会隐藏大量安全问题。车辆重量和流量不断增加会导致桥梁钢筋混凝土出现疲劳损伤，慢慢长出裂缝、发生变形等毛病。周围环境像温度忽高忽低、酸雨盐分侵蚀都会严重损害桥梁所用钢筋和混凝土的强度和耐久性。有些桥梁当初设计要求偏低或者施工过程中偷工减料，就埋下了看不见的安全风险。司机开车超重

超宽、运输部门管理不严、日常检查维修跟不上，都会进一步恶化桥梁健康状况。所有这些问题累积到一起，就可能让桥梁突然垮掉或者承载能力大幅下降，严重威胁来往车辆和行人的生命安全，也会直接拖累整个城市的正常运行和发展。

### 2.3 桥梁安全运行对城市发展的影响

桥梁的安全运行能够有效提升城市交通效率，保障市民出行安全，降低交通事故发生频率，为城市经济发展提供稳定的运输基础，促进社会各领域协同发展，增强城市整体竞争力与可持续发展能力。

## 3 定期检测体系的构建与规范化要求

### 3.1 检测频率与内容标准制定

建立检查频率和检查内容的具体标准属于城市桥梁定期检查制度最关键的部分，这个标准好不好直接决定整个检查工作做得科学不科学、全面不全面。确定检查频率的时候必须全面考虑桥梁用了多少年、结构有什么特点、周围环境有多恶劣、每天经过多少车辆这些情况，给不同风险等级的桥梁安排不同的检查时间间隔，保证那些风险高的桥梁检查得更加频繁。检查内容必须包含桥梁所有重要位置，比如主梁、桥墩桥台、支座、伸缩缝这些地方，要做外观仔细看、结构性能认真测、材料老化程度仔细评这些项目。一定要严格按照国家和地方的技术规范来规定检查要查多深、查多宽，这样才能保证每次得到的数据既准确又能跟别的地方的数据拿来比较。把这些标准定好定清楚，就能给后面判断桥梁哪里坏了、该怎么修怎么管提供可靠依据，也能让整个桥梁健康监测工作变得更加规范、更加有章法。

### 3.2 桥梁健康监测技术应用

桥梁健康监测技术现在到处都在用，明显让原来那种定期检查变得更加靠谱。各种传感器负责收集数据，发挥了最核心的作用，比如应变传感器、加速度传感器、位移传感器这几类，可以随时清楚知道桥梁结构到底怎么样。无线传感网络把数据传得特别快，好几个地方的数据能同时收集上来。无损检测技术用超声波、激光、红外成像这些方式，能精准看出桥梁内部有没有毛病，提前发现问题，防止结构真的坏掉。无人机去检查那些很高很危险的地方，效果特别好，既能把画面看得清清楚楚，又能让工作人员更快完成任务，还不用冒险爬高。借助大数据和人工智能，把收集来的数据好好分析一遍，就能准确判断哪里已经受伤，还能预测以后会怎么发展，给出科学可信的结论。所有这些技术加到一起，就搭建起了一个标准又精细的桥梁健康监测体系，让桥梁管养变得更加安全可靠。

## 4 损伤识别与分级维护措施

### 4.1 损伤类型及损伤分级

桥梁在长期服役中，受交通荷载，环境侵蚀，材料老化等因素作用，损伤类型多样，常见有裂缝、钢筋锈蚀、

混凝土剥落，支座移位和构件变形等，为制定科学养护方案，需依据损伤严重程度分级，一类是轻微损伤，对桥梁整体性能影响小，常规维修即可；二类为中等损伤，会降低构件局部承载能力，要及时修复；三类属严重损伤，直接威胁桥梁结构安全，需立即加固或更换，损伤分级要结合现场检测数据，考量损伤范围、深度及对结构性能的实际影响，为决策提供依据，建立系统化的损伤识别与分级机制，能精准定位问题，有效提升桥梁维护工作的针对性与效率，保障桥梁安全运行。

#### 4.2 针对性修复与加固方法

桥梁出现不同程度的损坏时，要根据损坏轻重和桥梁每个部位的具体情况，来挑选最合适的技术进行修复和加固。损坏比较轻的时候，可以直接用局部修补的方法，比如把裂缝里灌满专用胶、把表面破损的地方重新抹平补好，这样就能很快让桥梁重新正常使用。损坏达到中等程度的时候，就必须给桥梁结构做加固处理，比如在梁体表面牢牢贴上碳纤维布、增加新的钢支撑或者把原来截面做得更大更厚，这样整个桥梁的扛重能力就能明显提升。碰到损坏特别严重的情况，就得大动干戈了，比如把彻底坏掉的部件全部换成新的，甚至重新设计和施工最重要的承重部位，只有这样才能彻底确保桥梁以后安全通行。无论做哪种修复加固，都一定要充分考虑施工现场的环境和桥梁现在的通行状况，让所有措施既好施工又能用得长久可靠。

### 5 信息化管理与预测性养护机制

#### 5.1 动态数据库建立

动态数据库的建立是城市桥梁信息化管理与预测性养护的重要组成部分。其通过整合桥梁历史检测数据、实时监测结果及环境影响因素，实现数据的全面性与动态更新。动态数据库应具备灵活的结构，以适应不同桥梁类型及管理需求。在数据采集环节，需确保数据的准确性与完整性，以支持后续分析与决策。数据库的搭建过程中，应注意数据存储的安全性和访问的便捷性，为管理部门提供快速响应和实时决策的依据。通过有效数据挖掘与分析，动态数据库可为桥梁健康状况的预测提供科学支撑，促使养护计划更具针对性与预见性。

#### 5.2 信息化管理平台建设

信息化管理平台建设为提高城市桥梁维护效率和管理水平的重要手段。依托物联网、大数据与云计算技术，可以达成桥梁检测和维护数据的即时采集、上传与分析，推动桥梁运行状态的实时监测与评估。平台需融合多源数据处理功能，支撑多方面数据的可视化展示与预测模型的应用，有利于对于潜在风险实施预防性措施。借助建立统一的数据信息共享机制，各相关单位可以高效协同作业，优化资源配置与决策流程，进而保证桥梁运行的可靠性和

城市交通的可持续发展。

#### 5.3 预测性养护与风险预控

预测性养护机制依靠深入分析桥梁结构每次检测得到的数据，依据环境变化情况和交通荷载增加减少的趋势，准确识别桥梁未来可能出现损伤的具体风险。技术人员结合大数据技术和人工智能算法，一起建立一套非常精准的风险预警模型，从而实现科学安排养护计划的目的。风险预控措施主要包括对桥梁关键部位进行实时动态监测，发现隐患马上组织人员处理消除，还通过调整车辆通行方式来优化交通荷载分布，这样就能确保桥梁结构一直维持安全稳定的状态。这种养护机制大大提高了日常养护工作效率和整体安全水平，同时也推动城市桥梁维护管理工作向着智能化方向不断前进。

### 6 结束语

本文全面分析了城市桥梁常态化检测和维护的核心问题，提出了依托规范化流程与科学管理的检测以及养护策略，详尽论证了构建桥梁健康监测体系与实施信息化管理的实际意义。研究结果显示，借助科学规划检测频率以及项目，实时了解桥梁结构健康状况，可以有力减少安全隐患，自源头上增强桥梁运营的可靠性。对于损伤分级与精准维护措施的拟定，改善了维修资源分配，明显提升了养护效率与经济性。预防性维护同动态数据库建立促进信息化管理，以达成桥梁全生命周期管理给予了坚强保障，有利于促进城市交通基础设施的可持续发展。当前研究还存在一些不足之处，比如桥梁监测数据智能分析技术还需进一步完善，多源信息融合技术应用范围还不够广，有些维护决策方法目前还不能完全适应复杂城市交通的真实情况。桥梁检测跟维护相关的规范标准实际落地时，常常受到当地技术水平跟资金条件的限制，急需推动这些标准真正统一起来，并且尽快转化为实际能用的东西。

#### [参考文献]

- [1] 张亚楠. 城市桥梁定期检测技术研究 [J]. 交通世界, 2022(13):38-40.
- [2] 李武王建军. 城市桥梁检测的信息化管理 [J]. 住宅与房地产, 2020(3):228-228.
- [3] 冯源. 城市桥梁检测与维护的规范化研究 [J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2020(7):87.
- [4] 张泽茜何广华. 海洋平台设备定期智能检测及维护保养 [J]. 船舶物资与市场, 2022,30(7):65-67.
- [5] 尤泽萌, 葛颂, 张风丽, 贺江, 王华洁. 海洋平台设备定期智能化检测及维护保养措施研究 [J]. 自动化应用, 2023,64(1):66-68.

作者简介：杨文元（1997.10—），性别：男，民族汉，籍贯：山西省晋中市人，研究生学历，道路桥梁。

## 道路桥梁施工中混凝土裂缝成因以及应对措施

刘世兵

江西江南工程管理咨询有限公司，江西 赣州 341000

**[摘要]**道路桥梁属于城市交通以及区域经济发展的关键基础设施范畴，其结构所具备的安全性以及耐久性状况，会对交通是否顺畅以及公共安全起到决定性作用。在桥梁展开施工活动期间，混凝土出现裂缝的情况，不但会对其结构的美观程度造成影响，而且还极有可能致使承载力有所削弱，耐久性出现降低。文中针对道路桥梁施工环节里混凝土裂缝产生的主要成因展开了较为系统的分析，这些成因涵盖设计方面的因素、荷载相关的因素、材料层面的因素，以及温度与环境方面的影响因素。在对这些成因分析完毕之后，还相应地提出了一系列防控措施，像是对设计方案予以优化、加强荷载管理、对材料进行优化处理、改进施工工艺以及强化养护管理工作，另外还有对温度裂缝加以预防的相关举措。希望能够为道路桥梁施工当中混凝土裂缝的控制事宜，给出科学合理的依据以及切实可行的工程指导。

**[关键词]**混凝土裂缝；道路桥梁施工；成因分析；防控措施

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17986

中图分类号: TU4

文献标识码: A

## Causes and Countermeasures of Concrete Cracks in Road and Bridge Construction

LIU Shibing

Jiangxi Jiangnan Engineering Management Consulting Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

**Abstract:** Road bridges belong to the key infrastructure category of urban transportation and regional economic development. The safety and durability of their structures will play a decisive role in the smoothness of traffic and public safety. During the construction of bridges, the occurrence of cracks in concrete not only affects the aesthetic appearance of the structure, but also has a high possibility of weakening the bearing capacity and reducing durability. The article provides a systematic analysis of the main causes of concrete cracks in road and bridge construction, including design factors, load related factors, material level factors, as well as temperature and environmental factors. After analyzing these causes, a series of prevention and control measures were proposed accordingly, such as optimizing the design scheme, strengthening load management, optimizing materials, improving construction technology, and enhancing maintenance management. In addition, measures were taken to prevent temperature cracks. I hope to provide scientific and reasonable basis as well as practical engineering guidance for the control of concrete cracks in road and bridge construction.

**Keywords:** concrete cracks; road and bridge construction; cause analysis; prevention and control measures

### 引言

随着城市交通网络持续拓展以及经济社会发展需求逐步增长，道路桥梁工程在确保交通顺畅和提高区域连通性方面有着不可或缺的作用。不过，在桥梁施工以及使用期间，混凝土裂缝问题屡屡出现，这已然成为影响结构安全与耐久性的极为关键的因素。混凝土裂缝有可能会削弱桥梁的承载能力以及抗裂性能，并且还会加快钢筋腐蚀的速度，进而使得桥梁耐久性降低，最终增加维护以及修复的成本。混凝土裂缝产生的原因呈现出多样性以及复杂性的特点，它既与设计阶段的科学性有关，还和施工工艺、材料质量、荷载作用以及环境条件存在着紧密的关联。本文综合道路桥梁施工的实际状况，针对混凝土裂缝的类型、成因以及防控措施展开系统的分析，目的是为工程实践给予理论方面的参考以及操作层面的指导。

### 1 混凝土裂缝概述

混凝土裂缝属于混凝土结构里常见的一种缺陷呈现形式，其一般是以混凝土表面或者内部出现线性或者网状

裂缝的形式表现出来的。依据裂缝产生的具体原因以及所具有的特征来看，混凝土裂缝能够划分出多种不同类型，像是结构裂缝、收缩裂缝、温度裂缝还有施工裂缝等等。结构裂缝主要是因为设计方面存在不合理之处，或者是荷载作用超出设计所规定的承载力而形成的，而且常常会伴随着混凝土结构承载性能的下降情况出现。收缩裂缝是在混凝土硬化期间，由于水分不断蒸发以及体积发生收缩而引发的微裂缝，这种类型的裂缝往往会在早期养护工作做得不够充分，又或者水灰比过大的时候形成。温度裂缝则主要和混凝土内部存在的温度梯度、日温差以及季节性的温度变化有着密切关联，特别是在进行大体积混凝土浇筑的时候，是比较容易出现这种情况的。施工裂缝是因为浇筑工艺操作不恰当、振捣不够均匀、模板支撑不够稳定亦或是施工缝处理方式不妥当而产生的裂缝。这些不同的裂缝，虽说它们呈现出的形态不一样，产生的成因也各不相同，但是它们共同会对桥梁的结构性能以及耐久性带来潜在的影响作用。所以说，针对混凝土裂缝的成因展开科学

严谨的分析，并且采取行之有效的防控举措，这对于保障道路桥梁工程的质量水平、让结构使用寿命得以延长以及促使维护成本有所降低而言，都有着十分重要的意义所在。

## 2 道路桥梁施工中混凝土裂缝的成因分析

### 2.1 设计因素

施工设计对道路桥梁的施工质量有着较大影响，若是施工设计缺乏合理性，势必会影响到工程质量，加大混凝土裂缝的发生率。有些设计人员在施工设计的时候，未能严格做好工程的实地考察，不了解工程的水文地质情况，比较依赖自身的经验，导致施工设计的内容不够合理。同时，设计过程缺乏明确要求，设计图纸中的标识不明确，使得工程施工中的数据存在误差，加大了工程裂缝的发生率。为解决这一问题，必须对工程的地质地貌、自然环境等因素进行分析，制定出科学合理的施工方案，并做好设计过程的监督，使设计中的问题得到及时解决。

### 2.2 荷载因素

荷载的作用属于混凝土出现裂缝的关键外部因素范畴。就道路桥梁而言，在其施工以及后续使用进程里，会面临诸如恒载、活载还有施工阶段临时荷载等诸多不同作用情况。其中，恒载所涵盖的主要有桥梁自身的重量以及结构方面额外增加的重量。要是结构截面在设计环节存在欠缺，或者配筋安排得不够合理，那么在长时间处于受力状态之下，极有可能催生出微裂缝，甚至进一步发展成结构裂缝。而像车辆通行时候的荷载，或者是施工机械荷载出现集中情形的时候，很可能会致使局部应力超出混凝土原本具备的承载能力，这种情况在桥面板所在的位置、支座以及悬臂梁部位表现得尤为突出。除此之外，在施工阶段要是荷载分布呈现出不均匀的状态，又或者是出现了超载施工的情况，再加上振动以及不均匀沉降等因素的影响，同样是比较容易形成裂缝的。在桥梁施工的相关事宜当中，荷载方面的因素和结构设计是密切关联在一起的。倘若没有充分全面地去考量施工阶段荷载组合的具体状况以及使用荷载可能出现的变化情况，那么混凝土在受力整个过程中就会出现不可预估的应力集中情况，进而引发裂缝的产生。所以说，在开展设计以及施工工作的过程当中，对荷载分布予以合理的把控，清晰明确施工的先后顺序，并且对施工阶段的荷载加以限制，这些举措都属于防止混凝土裂缝产生的极为重要的手段。

### 2.3 材料因素

混凝土材料的质量对结构整体性能以及裂缝敏感性有着直接影响，如果在选择水泥、骨料以及外加剂的时候不够严谨，那么就有可能致使混凝土早期出现过大的收缩情况，使得其抗裂性能有所下降，甚至在硬化之后强度也达不到标准，要是骨料级配不合理或者颗粒过大的话，那么就容易让混凝土内部的孔隙率升高，进而增加出现干缩裂缝的风险，水灰比过高的情况下会降低混凝土的抗拉强

度，使得混凝土更容易产生塑性收缩裂缝，并且如果掺合料使用得当，那么就有可能对水化过程产生影响，导致混凝土硬化不均匀，除此之外，原材料要是受潮了、含有杂质或者温度过高的情况，那么同样有可能引发局部裂缝，施工单位倘若对材料质量缺乏严格的检测与管理，那么在浇筑的过程中就容易形成不均匀应力，最终诱发裂缝。所以严格把控材料质量、科学确定混凝土配合比以及合理使用外加剂，对于减少道路桥梁混凝土裂缝的发生率而言，是有着极为重要的意义的。

### 2.4 温度与环境因素

混凝土裂缝受温度以及环境条件的影响较为明显，在进行大体积混凝土浇筑的时候，因为水泥水化会产生热量并且存在温度梯度，所以内部温度常常比外部要高，这就产生了热应力，当温差过大的时候，就容易在混凝土内部或者表面形成裂缝，日温差比较大或者出现季节性的温度变化，同样会引起混凝土体积出现膨胀和收缩的情况，经过反复的作用之后，就容易形成温度裂缝。除此之外，干湿循环、风力、降雨还有湿度变化等因素，都会加速混凝土的收缩或者膨胀，使得裂缝的敏感性增加，在道路桥梁施工当中，如果没有结合环境因素来采取相应的养护以及施工控制措施，那么混凝土在早期硬化阶段就有可能会出现裂缝，所以说，对温度与环境因素展开科学分析并做出合理的应对，是防控混凝土裂缝必不可少的一个环节。

## 3 道路桥梁施工中混凝土裂缝的防控措施

### 3.1 优化设计方案

优化设计方案乃是预防道路桥梁混凝土出现裂缝的关键起始环节，科学且合理的施工设计可有效分散混凝土应力，进而降低裂缝发生的几率，在设计阶段要充分考量桥梁结构所处的地质环境、荷载条件还有温湿度变化等情况，合理确定截面尺寸、钢筋配筋以及结构形式，以此确保混凝土在受力过程中承载能力与抗裂能力相匹配，施工缝和伸缩缝的布置得科学规划，让混凝土内部应力能够得到释放，防止应力集中而引发裂缝，设计图纸需要标识清晰、数据准确，并且经过严格审核与优化，确保施工单位能依据科学规范来执行施工方案，借助优化设计方案，可从源头把控混凝土裂缝的产生，给后续施工与养护营造良好的条件。

### 3.2 荷载管理

合理的荷载管理在防控混凝土出现裂缝方面有着不容忽视的重要意义，在施工的时候，得严格把控施工机械以及材料堆放所产生的荷载，防止出现局部超载的情况，进而致使结构应力过于集中，施工顺序怎么安排也很关键，要依据桥梁结构的具体特点来合理地分配施工荷载，避免在桥面板、悬臂梁还有支座这些容易开裂的部位形成应力集中。在施工期间，要对活载和恒载展开全面且细致的分析，保证混凝土在硬化的整个过程当中所受到的力处于安全的范围之内，以此来减少结构裂缝出现的可能性。借助

荷载管理这种方式，能够在施工阶段有效降低外部因素给混凝土结构带来的应力作用，进而起到预防裂缝产生的重要作用。

### 3.3 材料优化

材料优化对于降低混凝土出现裂缝的敏感性而言，属于极为关键的一项举措。在实际操作过程中，需要去选用高性能混凝土以及低收缩混凝土，同时还要挑选与之相匹配的掺合料，以此来促使混凝土的强度得以提升，其密实度也能获得增强，抗裂性能同样会有所改善。就骨料的选择方面来讲，务必要保证其级配是合理的，颗粒分布要均匀，并且得对水灰比予以严格的把控，如此一来便能够减小早期出现收缩裂缝的那种可能性。至于外加剂的运用，必须要契合相关的规范要求，从而确保混凝土在施工时所呈现出的性能以及硬化之后的均匀性都能够得到保障。针对材料的质量，应当全程展开检测工作，这其中涵盖了水泥强度等级、骨料含水率、外加剂掺量以及混合均匀性等诸多环节，唯有如此才能避免因为材料本身不合格或者配比出现失误等情况而引发的裂缝问题。通过实施材料优化这一系列的操作，是能够大幅提升混凝土的整体性能的，进而可为道路桥梁结构实现长期的稳定性给予有力的保障。

### 3.4 施工工艺改进

施工工艺的改进在防控混凝土裂缝方面极为关键。在浇筑的时候，得采用连续浇筑以及分层振捣的办法，以此来保证混凝土可以密实且分布均匀，防止出现蜂窝、麻面或者局部裂缝等情况<sup>[1]</sup>。模板支撑务必要稳固可靠，要保障混凝土在硬化期间形状是稳定的，不会出现变形或者应力集中的情况。施工缝的处理需要依据设计要求去做切割、清理以及加固等工作，要确保缝隙处的混凝土能够充分地结合到一起，避免缝处的裂缝进一步扩展。通过对施工工艺加以严格的把控，一方面能够提升混凝土结构的整体质量，另一方面也能够有效地减少裂缝出现的频次，进而为道路桥梁实现长期的安全使用筑牢根基。

### 3.5 养护管理

养护管理对于混凝土裂缝的防控来讲，属于是必不可少的一个环节。混凝土在刚开始硬化的那个阶段，是比较容易受到水分蒸发以及温度变化方面的影响的，进而就可能会出现塑性收缩裂缝的情况<sup>[2]</sup>。所以，在施工结束之后，应当及时地去采取诸如覆盖、洒水又或者是蒸汽养护等一系列的措施，以此来让混凝土维持在一个较为适宜的湿度状态，并且对温度梯度加以控制。在养护所持续的这段时间里，需要针对气候条件展开监测工作，特别是在那种高温、干燥或者有强风的环境之下，得采取像加厚覆盖或者喷雾养护这样的措施，从而保证混凝土可以缓慢而且均匀

地完成硬化过程。科学合理的养护管理，不但能够让早期裂缝发生的概率有所降低，而且还能使得混凝土的抗压强度以及耐久性都得到提升，进而给桥梁结构给予长期的性能方面的保障。

### 3.6 温度裂缝预防

温度裂缝的预防工作需要将设计、材料以及施工等諸多方面的措施综合起来考虑。在对大体积混凝土进行浇筑的时候，应当合理地去布置冷却管，或者采用分段浇筑的方式，以此来使得内部的温度梯度能够有所降低。伸缩缝的设计务必要做到科学且合理，要让混凝土在经历热胀冷缩这样的过程之时，其内部的应力能够得到有效的释放，进而防止裂缝在桥梁的表面或者是结构的内部出现<sup>[3]</sup>。在施工以及养护的阶段，一定要留心对温湿度变化加以监控，并且采取诸如覆盖保温、洒水或者控温等一系列的措施，以此来减缓日温差给混凝土所带来的影响。通过实施综合的温度控制举措以及对结构进行优化处理，是能够有效地减少温度裂缝产生的，同时也有助于提升桥梁混凝土结构在长时间内的稳定性以及耐久性。

## 4 结语

在道路桥梁施工环节当中，混凝土裂缝这一问题呈现出成因颇为复杂且影响范围较为广泛的特性，其涉及到诸如设计方面、荷载情况、所用材料、钢筋状况以及所处环境等多种多样的因素。通过对裂缝成因展开科学且细致的分析，并且采取行之有效的防控举措，像对设计方案予以优化、对荷载加以合理的管理、对材料进行优化处理、对施工工艺做出改进、针对钢筋开展防腐工作以及实施裂缝修复操作、加强养护管理工作，同时做好温度裂缝的预防工作等，如此便能够大幅度地降低裂缝出现的概率，进而使得桥梁结构的承载能力得以提升，耐久性也获得增强。在未来，伴随着施工技术以及材料科学的不断发展进步，针对混凝土裂缝的控制将会朝着更为精细化以及更加科学化的方向去发展，进而进一步促使道路桥梁工程的质量得以提升，结构的使用寿命也能得到延长。

## 【参考文献】

- [1]董飞.道路桥梁施工中混凝土裂缝成因分析及应对措施[J].运输经理世界,2023(13):80-82.
- [2]曹洪梅.道路桥梁施工中混凝土裂缝成因以及应对措施探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2023(20):148-150.
- [3]史继成.道路桥梁沉降施工中混凝土裂缝成因分析及应对措施[J].运输经理世界,2022(17):104-106.

作者简介：刘世兵（1989.9—），毕业院校：河海大学，所学专业：交通工程，当前就职单位：江西江南工程管理咨询有限公司，职称级别：工程师。

## 多种检测技术结合的桥梁综合评估方法研究

张 谦

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

**[摘要]**随着我国交通基础设施的快速发展，桥梁作为重要的交通枢纽，其结构安全和耐久性日益受到关注。传统桥梁检测评估方法在复杂工况下难以满足全面精准的诊断需求。为此，文中提出了一种多种检测技术结合的桥梁综合评估方法，通过融合目测、声波检测、光学影像分析及电磁检测等多项技术，实现对桥梁结构的多维度、高效率监测。研究过程中，各检测技术优势互补，能够有效识别桥梁结构中的损伤、裂缝、腐蚀等病害，并对桥梁健康状态作出科学评价。结果表明，综合检测方法不仅提升了评估的准确性和可靠性，还大幅提高了检测效率，显著优化了桥梁养护决策。该方法为桥梁安全管理和生命周期维护提供了有力的技术支撑，具有广泛的工程应用价值，有助于保障桥梁结构的长期安全运行和交通运输的可持续发展。

**[关键词]**桥梁检测；综合评估方法；多技术融合；结构健康监测；养护决策

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17991

中图分类号: U446

文献标识码: A

## Research on Bridge Comprehensive Evaluation Method Combining Multiple Detection Technologies

ZHANG Qian

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** With the rapid development of transportation infrastructure in China, bridges, as important transportation hubs, have increasingly attracted attention to their structural safety and durability. Traditional bridge inspection and evaluation methods are difficult to meet the comprehensive and accurate diagnostic requirements under complex working conditions. Therefore, a comprehensive evaluation method for bridges combining multiple detection techniques is proposed in the article, which achieves multi-dimensional and efficient monitoring of bridge structures by integrating visual inspection, acoustic detection, optical image analysis, and electromagnetic detection technologies. During the research process, each detection technology has complementary advantages and can effectively identify damages, cracks, corrosion and other diseases in bridge structures, and make scientific evaluations of the health status of bridges. The results indicate that the comprehensive detection method not only improves the accuracy and reliability of the evaluation, but also significantly enhances the detection efficiency and significantly optimizes bridge maintenance decisions. This method provides strong technical support for bridge safety management and lifecycle maintenance, and has broad engineering application value, helping to ensure the long-term safe operation of bridge structures and the sustainable development of transportation.

**Keywords:** bridge inspection; comprehensive evaluation method; multi technology integration; structural health monitoring; maintenance decision

### 引言

伴随我国交通基础设施建设的不断加快，桥梁身为公路与铁路网络的重要组成部分，于确保交通运输畅通和区域经济发展内起着至关重要的作用。根据交通运输部数据表明，截至 2023 年，全国在役桥梁数量已经超过百万座，桥梁安全与耐久性问题越来越严峻，已成为基础设施管理领域迫切需要攻克的关键课题。常规的桥梁检测评估方法，例如目测、局部抽检等，因为局限于技术手段有限和工作环境多变，常常难以做到对于桥梁结构的全面诊断，容易造成损伤识别延迟和养护决策不合理，加剧隐性安全隐患。国内外学者已经探索把声波检测、光学影像分析、电磁检测等新兴技术运用于桥梁健康监测，并且获得一定成果，例如提升微裂缝识别率、改善腐蚀病害定位精度等方面。

各检测技术于工程实践应用中面临数据类型未一致、检测结果碎片化等问题，很难建立科学有效的综合评估体系。怎样整合多种检测技术，体现各自优势互补作用，达成对于桥梁结构状态的高效、准确评价，已成为现阶段桥梁工程领域研究的热点和难点。

### 1 桥梁结构诊断现状与技术发展

#### 1.1 我国桥梁结构安全需求及现有挑战

伴随我国交通事业的快速的发展，桥梁身为关键的基础设施，其结构安全显得格外关键。桥梁不只是交通网络的关键组成部分，而且对于国家经济发展发挥着极其关键的作用。伴随桥梁服役年限的增加，桥梁结构的安全性遭遇严重挑战。主要问题涵盖材料老化、疲劳损伤、环境腐蚀和超负荷使用等。这些因素不但加剧了桥梁结构的劣化，

而且有可能引发突发性结构失效。传统的桥梁检测方法，例如定时人工检查、常规光学仪器测量等，在繁杂的工况条件下很难做到迅速、精确的全面诊断，造成潜在风险很难及时发现与处理。开发精准、高效的桥梁检测技术，满足桥梁结构安全需求，已经成为工程界和管理部门一起关注的热点问题。借助先进技术加强桥梁检测和养护的能力，对于确保桥梁的长期安全运行十分关键。

### 1.2 检测技术分类与发展趋势

桥梁检测技术主要分成目测技术、无损检测技术和半破坏性检测技术三大类。目测技术需要经验丰富的检测人员直接用眼睛仔细观察桥梁外表，最容易发现肉眼看得见的明显损伤。无损检测技术包括声波检测、光学影像分析和电磁检测等多种方法，因为速度快而且完全不会伤害桥梁结构，所以现在到处都在广泛使用。半破坏性检测技术只在桥梁局部很小区域内进行操作，却能够提供非常详细的内部损伤情况。目前检测技术正朝着自动化、智能化、综合化的方向快速演进，目的是大幅提高检测的准确度和工作效率，从而更好满足各种复杂环境下的全面检查要求。

### 1.3 各类检测方法的应用局限分析

各种桥梁检测办法用在实际工程里都会碰到不少麻烦。光靠人眼看完全取决于检查人员积累了多少经验，根本没办法把损伤的具体程度用数字清楚表达出来。使用声波检测的时候，周围任何噪音都会严重干扰信号，结果导致检测出来的数据不够准。采用光学影像分析必须配备特别清晰的相机，还要花大量时间跑很复杂的图像处理程序，所以几乎做不到现场马上出结果。电磁波检测方法只能用在导磁性能好的材料上，而且稍微有点电磁干扰就完全失效。当前这些检测办法基本都是单独拿来用，彼此之间没有实现很好的结合与互补，这就直接限制了我们对桥梁结构损伤判断得是否全面和可靠。所有这些问题都清楚表明，现在非常有必要尽快研发出一种能够把多种技术有效融合在一起、同时又能保持很高准确度的全新桥梁健康评估办法。

## 2 多种检测技术融合的理论基础

### 2.1 微观与宏观结构损伤识别机理

微观跟宏观结构损坏识别方式属于桥梁整体健康评估方法研究当中最核心的理论内容之一。微观损坏重点包含材料里面各种缺陷的发现，比如裂纹慢慢扩展、孔洞逐渐出现还有微小锈蚀这些物理化学变化，分析过程完全依靠声波探测设备跟电磁检测设备这些高精度仪器，可以清楚发现桥梁材料内部那些特别容易聚集应力的区域。宏观损坏重点关注桥梁整个结构出现的变形、开裂跟倾斜这些肉眼明显看得见的外部大问题，采用光学图像分析技术跟直接用眼睛观察的方式就能做出清楚判断，清楚反映整个结构受到力量后的反应规律跟外形变化情况。微观损坏跟宏观损坏两种识别方式之间既存在明显区别，也有着密切联系，微观损坏不断积累就会导致宏观缺陷出现，宏观结

构状态发生变化也可以清楚揭示微观损坏正在如何发展。从理论层面来看，利用多种检测技术互相验证结果，就能建立起从材料内部损伤一直发展到整个结构性能受损的完整损伤演变规律，这样就能为桥梁健康状况实现精确实时监测并且做到早期发现问题提供关键技术支撑。

### 2.2 技术协同性原理与优势互补

桥梁检测需要把好几种不同方法组合起来使用，因为每种方法都能特别擅长发现某一种损伤。肉眼观察能马上看出裂缝和表面损坏情况。声波检测可以精准找到混凝土里面的空洞和断裂，把隐藏问题暴露出来。光学影像分析能拍出超级清晰照片，帮助发现肉眼看不见的微小变化。电磁检测专门用来详细判断钢筋是否生锈以及锈蚀程度。把这些方法联合起来工作，互相弥补各自短板，就能大大提高检测准确率，再用数据融合办法把所有信息整合到一起，保证结果既全面又不会自相矛盾，这样就能更好判断桥梁到底有多健康，给出准确诊断结论，也能及时安排维修保养，留下可靠支撑。

### 2.3 融合框架下的数据互通机制

在整合多种桥梁检测技术的整体框架里面，数据互通机制起到了关键作用。这个机制通过把各种检测技术得到的数据全部进行标准化处理，让这些数据能够在不同平台之间顺利共享，一起进行协同分析。信号处理技术跟数据整合技术结合起来，保证检测数据能够准确传输并且随时更新。依靠统一的数据格式和接口协议，促进不同来源数据之间快速顺畅交流，大大提升数据分析的深度和可靠性。这个机制不仅明显增强桥梁评估的全面程度和准确程度，同时为后面智能化决策提供了非常扎实可靠的数据基础。

## 3 主要桥梁检测技术体系构建

### 3.1 视觉与光学影像监测技术构成

视觉与光学影像监测技术在桥梁检测中发挥着关键作用，通过高分辨率摄像设备获取桥梁结构的图像数据，能够直观识别表面损伤、裂缝等显性病害。先进的图像处理算法被应用于自动识别和量化这些损伤特征，提高检测的效率与精确度。在影像分析中，支持向量机及神经网络等机器学习技术的引入，进一步增强对微小损伤的识别能力。除此之外，光学影像监测技术还引入了全景影像分析，通过全方位、多角度获取桥梁结构图像，为全面诊断提供了有力的支持。把清晰全面视觉信息完全整合进桥梁检测整个系统里面，这样就给桥梁整体健康状况全面评估工作奠定非常坚实可靠基础，让后面做养护维修决策变得更加科学准确。这种全新技术系统搭建完成以后，明显大幅度提升桥梁检测智能化程度，大力保障桥梁能够长期保持安全运行状态。

### 3.2 声波与电磁检测技术应用流程

声波检测和电磁检测技术用在桥梁健康监测的时候，主要利用高频信号和电磁场分析来实现对桥梁内部细小

结构的检查评估。声波检测利用声音在混凝土里面的传播特点，发现混凝土里边的裂缝、空洞这些缺陷，通过仔细分析波形的各种变化就能准确确定损伤到底出现在什么位置、严重到什么程度。电磁检测利用感应电流和磁场的变化情况，清楚识别出钢筋生锈或者预应力钢筋松弛这些问题，而且具有不用直接接触桥梁、精度特别高的优点。这两种技术使用的时候必须提前调整好合适的频率和传感器灵敏度，这样才能确保采集到的数据足够准确可靠。最后再结合专门的可视化软件工具，就能让工程师非常直观、清楚地了解桥梁当前的健康状态，做出精准可靠的评价。

### 3.3 多源检测结果集成模式

多种检测结果融合在一起，在桥梁整体健康评估过程中非常重要，采用科学方法，把视觉光学影像、声波检测、电磁检测这些不同技术得到的数据进行协调融合，这样就能大大提升整个评估准确度和工作效率。必须建立一个统一数据库，用来存储和管理来自各种不同检测设备产生的数据，实现所有信息高效互相连接。通过数据融合算法，比如特征提取技术和模式识别技术，对所有来源信息进行全面分析，最终实现对桥梁结构损伤位置判断和损伤程度评估更加精确准确。建立多层次评估体系，能够完整清晰反映桥梁当前健康状况，为桥梁日常检测和后期养护维护工作提供可靠科学依据。

## 4 综合评估流程与健康状态判定

### 4.1 损伤特征提取与分类原则

损伤特征提取跟分类工作对桥梁整体健康评价至关重要。提取损伤特征时把多种检测技术组合起来使用，就能高效精识别并详细刻画桥梁结构中出现的各种病害。声波检测重点捕捉桥梁内部深层裂缝跟空洞发出声音特征，光学影像分析负责测量表面裂纹精确尺寸宽度跟分布状况，电磁检测技术能够精准识别钢筋锈蚀情况以及锈蚀严重程度。每种损伤特征都要建立明确分类标准，才能正确归类损伤类型以及严重等级。需要全面分析损伤物理特性、形状大小、位置分布还有未来发展趋势等多方面因素，形成完整损伤诊断模型。损伤诊断模型把各种检测数据融合以后，就能实现桥梁从建成一直到老化全寿命周期健康状态精准评估，给后期结构安全评价跟维修养护决策给出有力科学依据。

### 4.2 结构健康监测指标体系建立

建立结构健康监测指标体系属于达成桥梁综合评估最核心一步。指标体系必须包含能够完整体现桥梁健康状况各项参数，这样才能保证评估结果既精准又完整。内容涉及物理指标和化学指标，比如结构变形量、裂缝具体宽度、钢筋腐蚀电位大小，这些参数有利于及早识别结构可能出现问题。环境因素包括湿度高低、温度变化、车辆载

荷大小，这些因素会对桥梁产生影响，也必须加入监测范围，用来供给必要背景数据。动态指标比如应力应变实时变化、桥梁振动频率特征，能够真实体现结构当前工作状态，这一点对于精准评估桥梁健康程度极其关键。借助多项指标一起综合分析，就能高效判定桥梁还能安全使用多少年、存在哪些风险，从而给出养护维修最合理决策依据。

### 4.3 评估结果在养护决策中的应用

桥梁评估结论能起到非常重要作用。管理人员采用多种检测技术整合在一起形成的综合评估方法，就可以清楚识别出桥梁结构出现的损伤、裂缝、腐蚀等各种问题，从而给后面养护维修工作给出可靠而且科学的参考依据。有了这份清楚判断，管理人员就能不断优化日常维护计划，同时完全避免出现不必要维修而造成资源浪费的情况。评估数据转化为具体数字之后，管理人员马上就能判断出哪些部位最需要优先处理，接着选用最合适修缮方案，这样操作不仅能够明显延长桥梁使用寿命，还能显著减少安全事故发生的风险。在资金不够充足的时候，依据评估结论构建出的决策支持系统，能够大幅提高桥梁管理工作的整体效率，保证整个交通网络一直保持安全稳定的运行状态。

## 5 结束语

传统桥梁检测评估遇到复杂环境时容易出错、漏判，准确率不高，为了解决这些问题，研究人员开发出一种把多种检测技术组合在一起的综合评估办法。具体做法是把人工目测、声波检测、光学影像分析、电磁检测这些不同技术全部用起来，这样就能从多个角度、全面仔细地检查桥梁结构的每一个部位。这种办法可以清楚准确地发现桥梁出现的各种问题，比如结构损伤、裂缝、生锈腐蚀等等，然后根据检查结果科学系统地判断桥梁到底有多健康，检测又准又快，比以前老方法准确度和效率都提升了很多，给桥梁日常维修决策和安全管理带来非常可靠的技术支持，让整个桥梁评估工作变得更加可信、更加好用。

### [参考文献]

- [1]王斌陈双庆.模糊综合法桥梁评估方法研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(9):111-112.
  - [2]李鹏.桥梁结构健康监测评估及预防性养护方法研究[J].江西建材,2023(6):78.
  - [3]崔译丹左婷.钢结构桥梁检测及评估研究[J].产业创新研究,2023(12):130-132.
  - [4]王军威,罗春明,姜涛.桥梁健康监测技术及结构损伤评估算法[J].建筑安全,2023,38(6):34-37.
  - [5]王文强.市政桥梁结构健康监测与评估技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(5):0134-0137.
- 作者简介：张谦（1998.8—），性别：男，民族汉族，籍贯：辽宁省朝阳市人，硕士学历，研究方向：土木工程。

## 基于传感器技术的桥梁结构健康监测与检测方法研究

孙希大

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

[摘要]桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，其结构安全性对社会经济发展和人民生命财产安全具有重要影响。随着城市化进程加快和交通负荷不断增大，桥梁结构健康监测成为保障桥梁运行安全和延长使用寿命的关键手段。文中围绕传感器技术在桥梁结构健康监测领域中的应用展开研究，系统梳理了当前主要的监测技术，包括应变、加速度、位移、温度等多类型传感器的配置方式及工作原理。结合实际桥梁工程需求，探讨了信息采集、数据传输、实时分析等关键环节的优化设计。研究结果显示，基于智能传感器技术的桥梁健康监测不仅能够实现结构的状态感知和异常预警，还提升了检测的自动化和精准度，显著促进了桥梁维护管理的科学化和智能化。通过分析传感器布局优化和数据融合处理的有效方法，文中为桥梁健康监测系统的持续完善提供了理论支撑，对提高桥梁安全运行水平与维护效率具有积极意义。

[关键词]传感器技术；桥梁结构健康监测；信息采集与数据分析；智能传感器；数据融合处理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17990

中图分类号: U446

文献标识码: A

## Research on Bridge Structure Health Monitoring and Detection Method Based on Sensor Technology

SUN Xida

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

**Abstract:** As an important component of transportation infrastructure, the structural safety of bridges has a significant impact on social and economic development as well as the safety of people's lives and property. With the acceleration of urbanization and the continuous increase of traffic load, bridge structural health monitoring has become a key means to ensure the safe operation and prolong the service life of bridges. The article focuses on the application of sensor technology in the field of bridge structural health monitoring, and systematically summarizes the current main monitoring technologies, including the configuration and working principles of multiple types of sensors such as strain, acceleration, displacement, and temperature. Based on the actual requirements of bridge engineering, the optimization design of key links such as information collection, data transmission, and real-time analysis was discussed. The research results show that bridge health monitoring based on intelligent sensor technology can not only achieve structural state perception and abnormal warning, but also improve the automation and accuracy of detection, significantly promoting the scientific and intelligent maintenance and management of bridges. By analyzing effective methods for optimizing sensor layout and data fusion processing, this article provides theoretical support for the continuous improvement of bridge health monitoring systems, which has positive significance for improving the level of safe operation and maintenance efficiency of bridges.

**Keywords:** sensor technology; bridge structure health monitoring; information collection and data analysis; intelligent sensors; data fusion processing

### 引言

桥梁是连接城市跟城市、城市跟地区之间最主要的交通设施，桥梁好不好、结不结实，直接关系到整个社会经济能不能稳得住，老百姓的生命财产安不安全。随着全国各地城市越建越大、越建越多，新桥梁一座接一座出现，种类也五花八门，上面跑的车越来越多、越来越重，桥梁本身承受的压力一天比一天大，安全隐患也越来越突出。交通运输部的数据显示，因为桥梁钢筋混凝土老化、裂缝、承载力下降等问题导致的事故，这几年明显越来越多，严重威胁老百姓生命安全，也严重堵塞交通秩序。在这种情况下，装上传感器实时盯着桥梁有没有裂、有没有变形、有没有危险，已经成了最有效的方法，能及早发现问题、快速判断病害、合理安排维修养护，现在全国工程行业都

越来越重视这件事，把它当成保障桥梁安全最关键的一招。字数，223字传统桥梁检测依赖人工巡查与定期检测，存在效率低，信息滞后，易受主观判断影响等问题，难以达成全生命周期健康管理，近年来，传感器技术发展迅猛，以应变、加速度等多类型传感器为核心的信息采集技术，给桥梁结构健康监测带来巨大变革，不少学者虽已探索传感器布置优化与数据融合分析平台建设，但环境适应性差、实时性欠佳、数据处理智能化水平有限等挑战依旧存在，鉴于此，本研究以实际桥梁工程需求为指引，系统梳理各类传感器在桥梁健康监测中的配置方法与关键技术，探讨智能化数据融合和自动化预警机制的可行性，为桥梁结构健康监测系统的理论完善和工程应用筑牢基础、提供参考。

## 1 传感器技术在桥梁健康监测中的应用现状

### 1.1 桥梁结构健康监测的基本需求

桥梁结构健康监测就是要通过实时检测桥梁周围环境和自身状态,来保障桥梁一直都能安全使用并且使用年限更长。随着全国交通道路越修越多,过往车辆越来越重,桥梁承受的压力越来越大,所以必须重点关注桥梁内部应力变化、振动情况、形状变形以及材料老化这些问题。常见的桥梁损坏比如出现裂缝、材料疲劳、形状歪斜等,不仅会大幅缩短桥梁能用多少年,严重时还可能直接导致桥梁垮塌或者发生重大安全事故,因此监测系统需要能够快速发现这些异常情况并马上发出警报。桥梁所在的环境非常复杂,而且要常年承受车辆重量,所以监测设备必须做到多年连续工作并且测量非常精准,才能适应天气变化、车流量忽多忽少等各种情况。整个桥梁健康监测工作需要做到覆盖全面、数据可靠、反应快速,依靠温度、振动、位移、应力等多方面数据,准确掌握桥梁关键部位的实时状况,从而为管理者科学安排维修保养提供最可靠的依据。

### 1.2 主要传感器类型及性能特点

桥梁结构健康监测需求的增长推动了多类型传感器的广泛应用。应变传感器能够精确测量结构受力状态及应变分布,具有高灵敏度与抗干扰能力。加速度传感器用于记录振动响应,帮助分析桥梁动力特性及疲劳状态,优势在于响应速度快与测量准确性高。位移传感器以检测结构变形和位移变化为目标,可实现高定位精度与动态监测能力。温度传感器实时捕捉环境及结构温度的变化,适用于结构温度效应的综合评估。不同传感器类型满足桥梁健康监测的多样化需求,与桥梁使用特点高度契合,为状态感知与异常检测提供了多层次数据支撑,提升了监测系统的可靠性与先进性。

### 1.3 国内外技术发展现状

国内外桥梁健康监测技术迅猛进步,传感器技术在该领域的应用获得了明显成效。国外已经构建比较完善的监测体系,以欧美国家为主,借助布置领先传感器阵列达成对桥梁结构状态的精准监测。人工智能与大数据技术的融入提高了监测的智能水平。国内桥梁健康监测技术正在快速赶超阶段,以基于传感器的监测系统为中心,逐渐形成了国产化设备研发与应用体系,在重大桥梁工程中获得大范围应用。

## 2 多类型传感器的配置原理与布设方式

### 2.1 应变加速度位移等关键传感器配置

应变传感器、加速度传感器和位移传感器属于桥梁结构健康监测系统最关键的三个部件,安装方式和位置选择会直接影响最终监测效果和数据是否靠谱。应变传感器专门负责捕捉桥梁各个构件遇到静态荷载或者动态荷载时产生的应力变化,可以通过粘贴或者埋入的方式固定到构件表面或者内部,这样就能精确捕捉关键区域的应力分布

情况。加速度传感器主要负责获取桥梁振动时的响应数据,通过捕捉各个测点加速度变化来分析整个结构的动力特性,是识别桥梁振动频率和模态必不可少的核心设备。位移传感器通过实时跟踪桥梁不同位置之间的相对位移变化,帮助工程师评估结构变形程度和累计位移量,从而提供判断桥梁整体稳定性的重要依据。这三类传感器布置位置必须充分适应桥梁自身的结构特点,遵循测点分布均匀、重要部位重点覆盖的基本原则,同时结合一定的冗余设计,确保即使个别传感器出现问题,整个监测数据仍然保持稳定和完整。

### 2.2 传感器布局优化原则

桥梁结构健康监测系统设计里,最重要的环节之一就是把传感器放在合适的位置,这直接影响到采集到的数据到底准不准、稳不稳、能不能覆盖到所有需要关注的地方。需要在桥梁不同位置尤其是容易出现应力集中的地方,根据桥梁受力后的实际反应情况,合理放置传感器,这样才能确保每个关键部位的监测数据都不会漏掉。传感器之间的距离要全面考虑桥梁整体长度大小、每个传感器能监测到的有效范围、以及我们最想重点关注哪些数据,最终实现既能把监测效果做到最好,又不会浪费太多传感器和成本。布置传感器的时候一定要避免同一地方放太多重复的传感器,也要避免出现任何监测不到的死角,这样整个监测系统的效率才能最高。还要充分考虑桥梁实际所处的环境,比如风吹雨淋、温度变化、车辆振动等,选择那些抗干扰能力强、质量可靠、不容易坏的传感器,才能保证系统长期运行过程中数据一直保持稳定和准确。

### 2.3 典型布设方案对比

在各种典型布设方案相互对比过程中,不同使用场景下面的传感器布置必须同时兼顾监测达到的精度高低、花费的经济成本多少以及实际施工是不是方便这些因素。对于普通常见的桥梁结构,应变传感器通常都要布置在主梁最关键受力的位置,这样做目的就是实时掌握主梁承受力量的具体情况。加速度传感器主要用于检测桥面振动的剧烈程度,可采取分布式方式直接安装到桥面板各个位置。位移传感器通常都要布置到支座附近区域,专门用来测量桥梁水平方向产生的变形大小。对于悬索桥或者斜拉桥这类特殊桥梁,传感器布置必须重点加强主缆或者拉索的应力监测工作,同时还要深入分析这些部位的受力分布状况,这样才能更好保障桥梁的安全评估工作顺利进行。对于结构特别复杂的桥梁,传感器布置方案进行优化时可以采用多种不同类型传感器一起协同工作的布置方式,并且配合使用数据融合技术,从而明显提升整个监测系统的效率和结果可靠性。

## 3 信息采集与数据实时传输技术

### 3.1 采集系统构成及信号处理

采集系统组成和信号处理属于桥梁结构健康监测非

常关键的部分，最重要的目标就是确保每次采集到的数据既准确又稳定。整个采集系统主要由三个部分搭建起来，分别是传感器模块、数据采集器还有信号处理单元。传感器模块负责实时获取桥梁结构的各种物理变化，比如应力大小、振动情况、变形程度这些参数，然后把这些变化全部转换成方便电脑分析的电信号。数据采集器负责接收传感器传过来的信号，先把里面的噪声和干扰彻底滤掉，让数据变得更加干净可靠。信号处理单元采用目前最先进的算法，从这些干净的原始数据里面提取出关键特征，再进行分类分析，最后生成一套完整清晰的结构健康评估报告，方便后续专业人员直接使用判断桥梁是否安全。以便满足即时监测需求，系统必须具有较高采样率与数据稳定性，保证硬件设备和软件模块协调运作。借助改进采集系统的架构设计和信号处理技术，能明显提高监测数据的准确度和桥梁状态评估的可靠性，给健康监测奠定可靠基础。

### 3.2 数据传输网络架构

数据传输网络架构在桥梁结构健康监测系统里面起到关键作用。通过科学合理布置传感器网络，能够实现各种类型传感器数据快速采集和可靠传输。现在常用网络架构主要包括无线传输网络和有线传输网络两种方式，无线网络具有布置灵活、施工安装简单的优点，特别适用于地形复杂或者跨度很大的桥梁进行远程监控，有线网络因为抗干扰能力强、数据传输可靠性高的特点，更适用于环境相对稳定、不容易受到外界干扰的桥梁区域，设计网络架构时候，需要根据桥梁实际规模和传感器安装数量，选择最匹配的传输协议和数据处理平台，这样才能保障数据传递延迟小、准确度高，同时不断优化传输节点的具体位置布置，有效减少信号衰减损耗，从而大幅提升整个监测系统的运行效率和长期可靠性。

### 3.3 通信稳定性与数据完整性保障技术

通信稳定性和数据完整性为桥梁结构健康监测系统高效运行的至关重要保证。传感器网络必须具有优秀的抗干扰能力，来降低外界环境对数据传输质量的干扰。借助使用误码校正、数据加密及冗余存储技术，有效地提高通信期间数据的完整性和安全性。可以使用高可靠的无线或光纤网络架构，可以减少数据丢包率，保障监测系统即时、稳定运行，于恶劣桥梁环境中达成精确的数据传输与监控目标。

## 4 智能化监测与异常预警机制

### 4.1 数据实时分析方法

数据实时分析办法就是桥梁健康监测系统里面实现状态感知和异常识别最关键的一步，核心内容就是把各种传感器采集来的数据快速处理干净并且准确理解清楚。在处理数据的时候，实时分析办法主要依靠目前最先进的信

号处理算法，给数据做滤波去掉噪音、提取重要特征、进行时间域和频率域分析，这样才能保证数据信息完整又准确。在使用算法这块，现在已经大量使用机器学习和深度学习技术，专门用来搭建预测桥梁健康状态的模型和分类器，实现异常情况自动识别。加入动态数据融合技术能够很好地把不同种类传感器的信息综合到一起分析，这样就能更全面准确地评估整座桥梁的健康状况。把边缘计算跟云计算技术好好融合到一起，就能显著提高数据处理速度和运算能力，给建设智能监测和预警系统带来非常强劲的技术支持力量。

### 4.2 状态感知与异常识别流程

状态感知与异常识别在桥梁结构健康监测系统中至关重要，其核心是借助传感器采集的数据，对结构状态实时分析，精准识别潜在安全风险，状态感知通过实时监测桥梁的应变、振动、位移、温度等关键参数，结合机理模型与数据算法，评估桥梁运行状态和承载能力，异常识别流程则提取数据异常特征，与算法模型比对，判断结构有无超限变化，损伤或潜在故障，动态阈值调整与多源信息融合技术的应用，大幅提升了异常识别效率和准确率，为预警机制提供有力支撑，智能化分析方法的引入，增强了系统对桥梁运行风险的快速响应能力，为桥梁安全运行筑牢了可靠的技术防线。

## 5 结束语

本文针对桥梁结构健康监测的实际需求，系统研讨了多类型传感器在桥梁监测中的配置方式、工作原理及数据采集与处理的关键技术，重点分析了智能传感器应用对桥梁状态感知与异常预警的提升作用。研究表明，基于现代传感器技术的监测体系不仅实现了桥梁结构健康状态的实时检测与自动预警，还在数据融合处理与布局优化方面取得了显著进展，有效提升了维护管理的科学化及智能化水平。

## [参考文献]

- [1]胡柏铭,吴永红,许蔚,等.混凝土光纤传感器结构健康监测研究综述[J].现代物业:新建设,2020(6):18-20.
  - [2]陈小璐.桥梁结构健康监测的传感器技术与数据分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):95-98.
  - [3]杨斌.基于传感器数据的长江大桥结构健康监测与评估研究[J].中国科技期刊数据库 工业 A,2023(9):190-193.
  - [4]陈果杨益.基于无线传感器网络的桥梁结构健康监测设计研究[J].工程技术研究,2020,5(3):226-227.
  - [5]李新,邵开丽,靳宗信.基于传感器融合的车载健康监测综述[J].物联网技术,2020,10(1):13-15.
- 作者简介：孙希大（1986.2—），性别：男，民族：汉，籍贯：山东省滕州市人，学历：本科，研究方向：桥梁检测。

# 城市道路与交通工程道路沥青路面施工技术研究

张超

太原市政建设集团有限公司，山西 太原 030000

**[摘要]**在城市化进程持续推进的背景下，城市道路作为交通网络的核心载体，其通行效率与耐久性直接影响城市运转效率。沥青路面因具备行车舒适、噪声低、养护便捷等优势，成为城市道路建设的主流选择。然而，受施工技术、原材料质量、环境因素等影响，沥青路面易出现裂缝、车辙、松散等早期病害。文中结合城市道路交通工程特点，系统研究沥青路面施工技术，涵盖施工前准备、核心施工环节技术要点、质量控制体系、常见病害防治及技术发展趋势，旨在为提升城市道路沥青路面施工质量、延长使用寿命提供理论支撑与实践指导。

**[关键词]**城市道路；交通工程；沥青路面；施工技术；质量控制；病害防治

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18006

中图分类号：U415

文献标识码：A

## Research on Asphalt Pavement Construction Technology for Urban Roads and Transportation Engineering Roads

ZHANG Chao

Taiyuan Municipal Construction Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

**Abstract:** Against the backdrop of continuous urbanization, urban roads, as the core carrier of the transportation network, have a direct impact on the efficiency and durability of urban operation. Asphalt pavement has become the mainstream choice for urban road construction due to its advantages of comfortable driving, low noise, and convenient maintenance. However, due to the influence of construction technology, raw material quality, environmental factors, etc., asphalt pavement is prone to early diseases such as cracks, ruts, and looseness. Based on the characteristics of urban road traffic engineering, this article systematically studies the construction technology of asphalt pavement, covering pre-construction preparation, core construction process technical points, quality control system, common disease prevention and control, and technological development trends. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for improving the construction quality and extending the service life of urban road asphalt pavement.

**Keywords:** urban roads; transportation engineering; asphalt pavement; construction technology; quality control; disease prevention and control

### 引言

城市道路承担着城市内部及周边区域的人流、物流运输功能，是城市基础设施的重要组成部分。随着机动车保有量激增，城市道路面临更大的荷载压力与通行需求，对路面性能的要求日益提高。沥青路面凭借其优良的路用性能，在城市主干道、次干道及支路建设中广泛应用。但实际施工中，部分工程因技术把控不到位、管理不规范，导致路面使用年限缩短，不仅增加养护成本，还影响交通安全。因此，深入研究城市道路沥青路面施工技术，优化施工工艺，强化质量管控，对推动城市交通工程高质量发展具有重要现实意义。

### 1 城市道路沥青路面施工前准备工作

施工前准备是保障沥青路面施工质量的基础，需从原材料、机械设备、技术方案、现场条件四个维度开展工作，确保施工环节有序衔接。

#### 1.1 原材料质量管控

原材料是决定沥青路面性能的核心因素，需严格按照设计要求与规范标准筛选、检验，具体如下：

**沥青材料：**根据城市所在区域的气候条件选择适配标号的沥青。高温地区优先选用针入度小、软化点高的沥青（如 70# 沥青），提升抗车辙能力；低温地区选用针入度大、延度高的沥青（如 90# 沥青），增强抗裂性能。同时，需检测沥青的针入度、软化点、延度、闪点等指标，确保符合《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40—2004）要求。

**集料：**粗集料应选用质地坚硬、耐磨、洁净的玄武岩或石灰岩，压碎值需  $\leq 26\%$ ，磨耗值  $\leq 28\%$ ；细集料宜采用天然砂或机制砂，含泥量  $\leq 3\%$ ，砂当量  $\geq 60\%$ 。集料需按粒径分级堆放，避免混杂，且堆放场地需硬化处理，防止雨水浸泡导致集料含水率超标。

**填料：**采用石灰岩磨细的矿粉，要求干燥、洁净，细度模数符合规范，亲水系数  $\leq 1.0$ ，严禁使用粉煤灰等酸性石料磨细的矿粉，避免影响沥青与集料的黏附性。

#### 1.2 施工机械设备配置与调试

沥青路面施工需依赖专业设备，设备性能直接影响施工效率与质量，需做好以下工作：

**设备选型:** 根据工程规模与施工要求, 配置间歇式沥青混合料拌和机(计量精度高、拌和均匀)、大吨位自卸汽车(运力匹配拌和机产量)、沥青摊铺机(具备自动找平、振捣功能)、钢轮压路机与轮胎压路机(组合碾压确保压实度)。

**设备调试与维护:** 施工前需检查拌和机的计量系统、加热系统, 确保沥青、集料计量误差 $\leq 1\%$ ; 摊铺机熨平板需预热至 $100^{\circ}\text{C}$ 以上, 调整振捣频率与振幅, 保证摊铺平整度; 压路机需检查碾压轮表面平整度, 清理残留杂物, 确保制动系统灵敏。

### 1.3 技术方案编制与交底

**施工方案编制:** 结合工程地质条件、设计要求, 编制专项施工方案, 明确施工流程、各环节技术参数(如拌和温度、摊铺速度、碾压遍数)、质量控制标准及应急预案。方案需经监理单位审批后实施, 确保科学性与可操作性。

**技术交底:** 项目技术负责人需向施工班组进行全面技术交底, 涵盖施工工艺、质量要求、安全注意事项等内容。针对特种作业人员(如摊铺机操作员、压路机司机), 需开展专项培训, 考核合格后方可上岗。

### 1.4 施工现场准备

**下承层处理:** 沥青路面下承层(基层或底基层)需满足平整度、压实度、高程要求。若下承层存在松散、裂缝等病害, 需及时修补; 基层表面需喷洒透层油(乳化沥青), 用量控制在 $0.7\sim 1.5\text{L}/\text{m}^2$ , 增强基层与沥青面层的黏结力, 防止雨水渗入。

**测量放线:** 采用全站仪、水准仪进行测量放样, 按 $10\sim 20\text{m}$ 间距设置高程控制点, 标注路面中心线、边缘线及摊铺厚度控制线, 确保摊铺厚度符合设计要求(通常沥青上面层 $4\sim 6\text{cm}$ , 中面层 $6\sim 8\text{cm}$ , 下面层 $8\sim 10\text{cm}$ )。

**交通管制:** 城市道路施工需制定交通导行方案, 设置警示标志、隔离护栏, 安排专人指挥交通, 避免施工与通行冲突, 保障施工安全与交通顺畅。

## 2 城市道路沥青路面核心施工技术要点

沥青路面施工分为沥青混合料拌和、运输、摊铺、碾压四个核心环节, 每个环节需严格把控技术参数, 确保施工质量。

### 2.1 沥青混合料拌和技术

沥青混合料拌和质量直接影响路面强度与耐久性, 需重点控制以下要点:

**配合比设计:** 采用马歇尔试验法进行配合比设计, 分为目标配合比、生产配合比、生产配合比验证三个阶段。目标配合比确定最佳沥青用量(通常 $4.5\%\sim 6.0\%$ )与集料级配; 生产配合比需根据拌和机热料仓筛分结果调整级配; 生产配合比验证通过试拌、试铺, 确保混合料性能达标。

**拌和温度控制:** 沥青加热温度需根据标号调整, 70#沥青加热至 $155\sim 165^{\circ}\text{C}$ , 90#沥青加热至 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$ ; 集

料加热温度比沥青高 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ , 确保混合料出厂温度为 $140\sim 165^{\circ}\text{C}$ , 避免温度过高导致沥青老化, 或温度过低影响摊铺、碾压效果。

**拌和时间与均匀性:** 间歇式拌和机每锅拌和时间为 $30\sim 50\text{s}$ (干拌 $5\sim 10\text{s}$ , 湿拌 $20\sim 30\text{s}$ ), 确保混合料颜色均匀, 无花白料、离析现象。拌和过程中需定期抽检混合料级配与沥青用量, 偏差控制在规范允许范围内。

### 2.2 沥青混合料运输技术

运输环节需防止混合料温度损失与离析, 保障摊铺连续性:

**运输车辆管理:** 选用 $15\sim 20\text{t}$ 自卸汽车, 车厢需清扫干净, 涂刷薄层隔离剂(如肥皂水, 严禁使用柴油); 装料时采用“前-中-后”三次装料法, 减少集料离析; 运输过程中覆盖篷布, 保温、防雨, 确保混合料到场温度不低于 $130^{\circ}\text{C}$ 。

**运输调度:** 根据拌和机产量(通常 $200\sim 300\text{t}/\text{h}$ )与摊铺速度( $2\sim 6\text{m}/\text{min}$ ), 合理配置运输车辆数量(一般 $10\sim 15$ 辆), 确保摊铺机前始终有 $2\sim 3$ 辆车等候, 避免停机待料。

### 2.3 沥青混合料摊铺技术

摊铺是决定路面平整度的关键环节, 需严格控制以下参数:

**摊铺温度与速度:** 混合料摊铺温度需 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ (石油沥青), 摊铺机熨平板预热至 $100^{\circ}\text{C}$ 以上; 摊铺速度保持匀速( $2\sim 4\text{m}/\text{min}$ ), 避免忽快忽慢, 防止路面出现波浪、离析。

**摊铺厚度与平整度:** 通过摊铺机自动找平系统(如平衡梁或钢丝绳引导)控制摊铺厚度, 根据试验段确定的松铺系数(通常 $1.15\sim 1.35$ )调整; 摊铺过程中安排专人检查路面平整度, 采用 $3\text{m}$ 直尺检测, 偏差 $\leq 3\text{mm}/3\text{m}$ 。

**特殊部位处理:** 对于道路交叉口、检查井周边等不规则区域, 需采用人工辅助摊铺, 确保混合料填充密实, 避免出现空洞、凹陷。

### 2.4 沥青混合料碾压技术

碾压的目的是使混合料达到规定压实度(通常 $\geq 96\%$ ), 分为初压、复压、终压三个阶段:

**初压:** 采用钢轮压路机( $8\sim 10\text{t}$ )静压 $1\sim 2$ 遍, 碾压温度 $130\sim 150^{\circ}\text{C}$ , 速度 $1.5\sim 2.0\text{km}/\text{h}$ , 从路面边缘向中心线碾压, 轮迹重叠 $1/3\sim 1/2$ 轮宽, 稳定混合料, 防止推移。

**复压:** 采用轮胎压路机( $20\sim 25\text{t}$ )或振动压路机(开启振动)碾压 $3\sim 4$ 遍, 碾压温度 $110\sim 130^{\circ}\text{C}$ , 速度 $2.0\sim 3.0\text{km}/\text{h}$ , 轮胎压路机通过揉搓作用提高密实度, 振动压路机调整振动频率( $30\sim 50\text{Hz}$ )与振幅( $0.3\sim 0.8\text{mm}$ ), 增强压实效果。

**终压:** 采用钢轮压路机静压 $1\sim 2$ 遍, 碾压温度 $\geq 70^{\circ}\text{C}$ ,

速度 2.5~3.5km/h, 消除复压轮迹, 提高路面平整度。碾压过程中严禁压路机在未成型路面上转向、掉头, 停机时需停放在已成型路面, 轮下铺垫木板, 防止损坏路面。

### 3 城市道路沥青路面施工质量控制体系

建立全流程质量控制体系, 从原材料、施工过程到成品验收, 实现质量闭环管理。

#### 3.1 原材料质量抽检

建立原材料进场验收制度, 沥青每 500t 抽检 1 次, 集料每 2000t 抽检 1 次, 矿粉每 100t 抽检 1 次, 检测指标不合格的原材料严禁进场。同时, 需跟踪原材料存储情况, 沥青罐定期检测温度, 集料堆放防止受潮、污染, 矿粉存储保持干燥。

#### 3.2 施工过程动态监测

**拌和环节:** 实时监测沥青、集料加热温度, 每小时抽检 1 次混合料级配与沥青用量, 记录拌和时间与产量, 确保混合料质量稳定。

**摊铺环节:** 采用红外测温仪检测摊铺温度, 每 100m 检测 1 次; 用 3m 直尺每 50m 检测 1 次平整度, 每 20m 检测 1 次摊铺厚度, 发现偏差及时调整摊铺机参数。

**碾压环节:** 用核子密度仪或钻芯法每 200m 每车道检测 1 次压实度, 每 100m 检测 1 次高程与横坡, 确保压实度、几何尺寸符合设计要求。

#### 3.3 成品质量验收

沥青路面施工完成后, 按规范开展成品验收, 检测项目包括:

**平整度:** 采用连续式平整度仪检测, 标准差  $\leq 1.2\text{mm}$  (主干道)、 $\leq 1.5\text{mm}$  (次干道);

**压实度:** 钻芯法检测, 合格率  $\geq 95\%$ , 单点最小值  $\geq 92\%$ ;

**厚度:** 钻芯法检测, 平均值  $\geq$  设计厚度, 单点最小值  $\geq$  设计厚度的 90%;

**弯沉值:** 采用贝克曼梁检测, 弯沉值  $\leq$  设计允许弯沉值;

**抗滑性能:** 摆式仪检测摆值  $\geq 45\text{BPN}$  (干燥路面), 铺砂法检测构造深度  $\geq 0.5\text{mm}$ 。

#### 3.4 人员与管理保障

**人员管控:** 建立施工人员考核制度, 定期开展技术培训与质量安全教育, 强化质量意识; 特种作业人员持证上岗, 严禁无证操作。

**管理制度:** 制定质量责任追究制度, 明确各岗位质量职责, 对施工质量问题实行“三不放过”(原因未查清不放过、责任人未处理不放过、整改措施未落实不放过), 确保质量管控落到实处。

### 4 城市道路沥青路面常见病害及防治对策

城市道路沥青路面易受荷载、温度、雨水等因素影响, 出现早期病害, 需针对性制定防治措施。

#### 4.1 裂缝

**类型与成因:** 低温裂缝(气温骤降导致混合料收缩)、

反射裂缝(基层裂缝向上反射)、疲劳裂缝(荷载反复作用导致结构破坏)。

**防治对策:** 选用低温延度高的改性沥青, 优化混合料级配(增加细集料用量); 基层施工时设置伸缩缝, 铺设土工格栅或应力吸收层(如沥青碎石); 控制车辆超载, 减少荷载对路面的疲劳损伤。

#### 4.2 车辙

**成因:** 沥青混合料高温稳定性差、压实度不足、车辆超载。

**防治对策:** 采用改性沥青(如 SBS 改性沥青)或添加抗车辙剂(如 PE、纤维); 优化集料级配, 增加粗集料用量, 形成骨架结构; 加强碾压控制, 确保压实度达标; 严格管控车辆超载, 设置称重检测点。

#### 4.3 松散

**成因:** 沥青与集料黏附性差、混合料拌和不均匀、早期通车过早。

**防治对策:** 集料表面喷洒抗剥落剂(如胺类抗剥落剂), 提高黏附性; 加强拌和过程管控, 确保混合料均匀; 路面施工完成后, 待温度降至 50°C 以下再开放交通, 避免早期损伤。

#### 4.4 泛油

**成因:** 沥青用量过多、拌和温度过高、压实度不足。

**防治对策:** 优化配合比, 控制沥青用量; 降低拌和温度, 避免沥青老化; 加强碾压, 提高路面密实度, 减少空隙率(通常 4%~6%)。

### 5 城市道路沥青路面施工技术发展趋势

随着绿色建筑、智能建造理念的推进, 城市道路沥青路面施工技术正朝着环保化、智能化、资源化方向发展。

#### 5.1 绿色环保技术应用

**温拌沥青技术:** 通过添加温拌剂(如有机降黏剂、表面活性剂), 降低沥青混合料拌和温度(比热拌低 30~50°C), 减少能源消耗与有害气体(CO、NOx)排放, 同时延长施工季节, 适用于城市敏感区域(如学校、医院周边)施工。

**再生沥青技术:** 将废旧沥青路面铣刨料(RAP)破碎、筛分后, 按比例(15%~30%)掺入新混合料中, 实现资源循环利用, 减少固废污染。目前, 厂拌热再生、就地热再生技术已在城市道路养护工程中广泛应用。

#### 5.2 智能化施工技术发展

**智能施工设备:** 智能摊铺机配备北斗定位系统与激光找平装置, 实现摊铺厚度、速度的自动调节; 智能压路机搭载物联网传感器, 实时监测碾压温度、压实度, 自动调整碾压参数, 提高施工精度与效率。

**数字孪生管理平台:** 构建沥青路面施工数字孪生模型, 整合原材料检测、施工过程监测、成品验收数据, 实现施工全流程可视化管理, 及时预警质量风险, 优化施工方案。

### 5.3 高性能材料研发

**新型改性沥青:**研发高弹性、高耐久性的改性沥青(如纳米改性沥青、石墨烯改性沥青),提升路面抗裂、抗车辙性能,延长使用寿命;

**功能型集料:**采用轻质高强集料(如陶粒、泡沫玻璃集料)或自修复集料(添加微胶囊修复剂),赋予路面轻量化、自修复功能,降低路面自重,减少病害产生。

## 6 结论

城市道路沥青路面施工技术是一项系统工程,需从施工前准备、核心环节技术把控、质量控制体系构建、病害防治等方面综合发力。本文通过研究得出以下结论:

施工前准备工作需严格管控原材料质量、调试机械设备、编制技术方案、清理现场条件,为施工奠定基础。

拌和、运输、摊铺、碾压四个核心环节需精准控制技术参数(温度、速度、遍数等),是保障路面质量的关键。

建立全流程质量控制体系,通过原材料抽检、过程监测、成品验收,实现质量闭环管理。

针对裂缝、车辙等常见病害,需结合成因制定防治对策,延长路面使用寿命。

未来沥青路面施工技术将向绿色环保、智能高效、高性能方向发展,助力城市交通工程可持续发展。在实际工程中,需结合城市道路特点(如交通流量大、施工空间受限),灵活调整施工方案,不断创新技术与管理模式,推动城市道路沥青路面施工质量再上新台阶。

### [参考文献]

- [1]徐燕,卢立军.城市道路与交通工程沥青路面工程的质量要求及其试验检测研究[J].中国品牌与防伪,2025(7):66.
- [2]马官正,石磊,马相凯.公路交通工程沥青路面施工技术和质量控制[J].汽车周刊,2024(5):33-35.
- [3]张兼,程文斌.市政工程道路沥青路面施工技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(2):55.
- [4]张海港,任义.城市道路与交通工程道路沥青路面施工技术研究[J].越野世界,2025(6):36.
- [5]孔令强.城市道路施工中的沥青混凝土路面技术应用研究[J].安家,2024(3):37-39.

作者简介: 张超 (1996.5—) 性别: 男, 学历: 本科, 毕业院校: 齐鲁理工学院, 所学专业: 土木工程, 目前职称: 助理工程师。

## 路基沉陷注浆技术在高速公路施工中的应用

丁伟

江苏现代路桥有限责任公司，江苏 南京 210000

**[摘要]**在高速公路开展施工以及运营活动期间，倘若没有全面充分地考量诸多影响因素，那么就极有可能致使路基的质量达不到标准要求，进而产生多种多样的工程方面的质量问题，在这些质量问题当中，路基沉降属于最为普遍并且影响颇为突出的一种情况。这种沉降一方面会使得道路的平整程度有所降低，另一方面还有可能对整体结构的安全性造成影响，最终使得高速公路的使用期限得以缩短。要想切实有效地对路基沉陷加以抑制，提升路基所具备的承载能力以及稳定性，那就必须要运用科学且合理的加固技术来对其进行相应的处理操作。

**[关键词]**路基沉陷注浆技术；高速公路；公路施工；技术应用

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18002

中图分类号：U415

文献标识码：A

## Application of Roadbed Subsidence Grouting Technology in Highway Construction

DING Wei

Jiangsu Xiandai Road and Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

**Abstract:** During the construction and operation of highways, if many influencing factors are not fully considered, it is highly likely that the quality of the roadbed will not meet the standard requirements, resulting in various engineering quality problems. Among these quality problems, roadbed settlement is the most common and prominent one. On the one hand, this settlement may reduce the smoothness of the road, and on the other hand, it may also affect the safety of the overall structure, ultimately shortening the service life of the highway. In order to effectively suppress roadbed subsidence, enhance the bearing capacity and stability of the roadbed, it is necessary to use scientific and reasonable reinforcement techniques to carry out corresponding treatment operations.

**Keywords:** grouting technology for roadbed subsidence; highway; highway construction; technology application

### 引言

在高速公路开展建设以及运营活动期间，路基出现沉陷这一情况始终都是对道路平整度、安全性以及使用寿命产生影响的关键要素。伴随交通流量不断地增加，而且重载车辆频繁地在道路上通行，路基在长时间受到荷载作用的情形下，比较容易出现不均匀的沉降状况。特别是在那种土壤属于软土、淤泥质土或者说是填方路基所在的区域，沉陷的情况不但会使得行车的舒适性受到影响，而且还极有可能引发路面出现裂缝、排水系统运行不顺畅乃至造成结构性的破坏等问题，进而给高速公路的安全运营埋下了潜在的风险隐患。传统用于路基加固的方法，像换填、夯实或者是预压处理等，在特定的一些地质条件之下，存在着施工周期偏长、耗费的成本较高亦或是会对交通造成干扰等诸多局限性。然而注浆加固技术作为一种具备高效性、可控制性并且针对性较强的地基处理方式，正逐步变成解决路基沉陷问题的重要途径。此项技术是把浆液注入到路基土体内部的孔隙或者是裂缝当中，以此来填充那些空隙，强化土体的密实程度以及提升其承载能力，进而能够有效地对沉降的发展起到抑制的作用，达成路基加固以及保持稳定的功效。随着材料科学领域、注浆设备以及施工工艺等方面不断地向前发展，路基沉陷注浆技术在施工操作的

精度、加固所取得的效果以及工程的可控性这些方面均获得了颇为显著的提高。本文尝试着对高速公路路基沉陷的主要形成原因展开系统的剖析，针对注浆加固施工技术的关键要点以及具体的操作流程予以深入的探讨，并且结合实际的工程实践对它的应用特点以及技术优势加以总结归纳，从而为高速公路路基沉陷的治理工作给出科学方面的依据以及技术层面的参考。

### 1 引起高速公路路基沉陷的主要原因

#### 1.1 施工设计不合理

在高速公路建设进程里，施工设计阶段要是存在不合理的情况，常常会变成致使路基出现沉陷的关键因素之一。设计人员于前期开展勘察工作的时候，倘若没有全面且细致地掌握地质、水文等相关基础资料，那么就有可能使得设计参数和实际状况存在出入，最终引发路基承载力不够的状况。倘若在设计环节当中没有充分对路基填筑厚度、结构层次以及排水系统布局等这些关键要素加以考量，那就容易致使地基应力分布出现不均匀的现象，进而形成局部的沉降情况。部分设计方案在一味追求施工进度或者是在把控成本方面用力过猛的时候，往往会把软弱地基处理以及沉降预测分析给忽视掉，如此一来便使得路基结构在长期运行过程中的稳定性出现了下降的态势。

## 1.2 公路路基存在裂缝

高速公路工程路基施工阶段会受到较多因素的影响，如外界温度变化幅度较大，运输车辆荷载较重等，都容易导致高速公路路基、路面出现裂缝问题，若没有及时处理，裂缝越来越大，就会造成整体结构不均匀沉陷<sup>[1]</sup>。而且，公路路基施工中作业流程不规范，技术应用不标准，也不能保证路基结构质量和使用期间的稳定性，从而增加裂缝问题的发生率，最后导致路基沉陷，影响高速公路工程整体质量。

## 1.3 回填碾压处理不到位

在高速公路开展施工活动期间，回填碾压处理工作没有落实到位，这已然成为致使路基出现沉陷情况的常见缘由之一。有一部分施工单位在实施填筑相关操作的过程中，并未依照设计方面所提出的要求去严格执行，既没有做到分层开展回填作业，也没有按照分层的方式进行碾压操作，如此一来便致使填土的密实度有所欠缺，进而形成了内部存在空隙的状况，对路基的整体承载方面的性能产生了影响。当车辆荷载或者雨水发生渗入作用的时候，那些原本就处于松散状态的部位特别容易出现压缩变形的情况，进而引发不均匀的沉降现象。除此之外，如果碾压机械的选型不够恰当，又或者是碾压的遍数不够充足，再或者是在碾压速度的控制上不够合理，那么同样会导致局部区域的压实度出现不均等的情况。要是回填材料的含水量偏离了其最佳的范围区间，不论是处于过干的状态还是过湿的情形，都会使得碾压的效果大打折扣，进而形成所谓的隐性软弱层。

## 2 高速公路路基沉陷注浆技术施工要点

### 2.1 勘查放样

在高速公路路基出现沉陷需要开展注浆施工之时，勘查放样并非仅仅是一项形式上的定位工作，它实则是关乎注浆方案精度以及治理效果的关键所在。要实现高质量的勘查，就需要将现场地质钻探所获取的数据、标准贯入试验（SPT）的相关数据、静力触探（CPT）所得数据、土样采集之后在室内开展的力学与物理试验数据、对地下水位及其季节性变动的监测数据，还有像浅反射、电阻率这类浅层地球物理方面的多源数据有机地结合起来。借助交叉验证的方式去获取诸如土体分层情况、含水性状况、剪切强度大小、压缩模量数值以及孔隙比等关键参数，并且要针对沉陷体的线形走势、沉降速率以及不均匀沉降带展开细致的测绘工作。在放样阶段，得在统一的坐标系以及高程基准之下，依照勘查所取得的成果来精准确定注浆孔的具体位置、孔之间的间距、布孔的深度以及在纵向方向上的分布情况，同时还要明确允许存在的孔位偏差范围以及值班校核的相关标准，以此来确保注浆能够达到覆盖连续且均匀的效果。在整个放样过程当中，还得去识别并标注出那些异常地段，像是淤泥层、老管线所在区域、暗

洞或者受既有结构影响的区域，另外也要考虑到可能出现的施工限制情况，并且把这些信息都纳入到地形图以及注浆施工图纸当中，以便于在后续施工过程中进行动态的调整。对于勘查所获得的数据，其处理与解释环节务必要运用统计与概率的方法来对参数的变异性加以评估，从而为注浆量的估算以及风险的判断给出量化的依据。

### 2.2 机械设备

在高速公路路基出现沉陷并开展注浆施工期间，对机械设备予以合理的配置，这无疑是一个极为关键的环节，它对于保障施工能够顺利推进以及加固效果可以稳固且可靠都起着决定性的作用。整个注浆系统一般是由钻孔设备、搅拌设备、储浆罐、高压注浆泵还有监测控制系统等诸多部分组合而成的，而这些设备都得依据地质的具体状况、注浆的深度以及材料的相关性能来展开科学的选型工作。钻孔设备主要负责成孔方面的作业，所以其应当拥有不错的稳定性以及较高的成孔精度，要能够经受住不同土层结构所带来的考验，进而确保实际形成的孔径、孔深都能够和设计要求保持高度的一致。搅拌设备则需要具备较高的转速以及自动计量的功能，唯有如此才能够确保浆液能够实现均匀的混合，而且密度也能够保持稳定状态，如此一来便能够有效防止因为浆液出现离析或者流动性不够充足而致使注浆变得不均匀的情况发生<sup>[2]</sup>。高压注浆泵在整个系统当中占据着核心的地位，它的压力与流量调控性能务必要能够契合不同地层所具有的渗透阻力以及设计方面的要求，以此来保证浆液可以在设定好的压力之下均匀地向加固区域进行扩散。

### 2.3 注浆材料

在高速公路路基出现沉陷情况时，对其展开治理工作，注浆材料的选用情况会直接影响到加固所达成的效果以及工程能够维持的耐久性，这无疑是一个极为关键的核心因素。不同的地质条件以及不一样的沉陷特征，所对应的注浆材料在性能方面的要求存在着较为明显的区别，所以需要全面且细致地去考量诸如流动性、凝固所需的时间、强度的发展状况以及与原本状态下的土壤之间的相容性等诸多方面的情况。常用的注浆材料涵盖了水泥浆、化学浆液、复合型水泥基浆液等多种类型，在这些材料当中，水泥浆因为自身成本相对较低，并且具有较强的适应能力，所以在实际应用中得到了广泛的采用。然而在渗透性表现不佳或者微裂隙发育程度较高的地层环境下，通常就需要掺入像膨润土、粉煤灰或者是硅灰这类外加剂，以此来对流变性能加以改善。而对于细粒土所在的区域或者地下水比较丰富的地区而言，则可以考虑选用如水玻璃、丙烯酰胺、聚氨酯类等化学浆液，通过这种方式能够有效增强渗透性以及防水性能。复合型浆液凭借有机成分和无机成分相互之间所产生的协同作用，不仅拥有较高的强度，而且凝固时间是能够实现可控的，并且还具备良好的黏结性，

所以它特别适合用来处理那种呈现出不均匀沉陷特点以及处于复杂地层的情况。

#### 2.4 注浆孔成孔

在高速公路路基出现沉陷情况并开展注浆施工之时，注浆孔的成孔工艺属于极为关键的一个环节，它能够确保浆液可以精准地进入到预定的目标加固区域，进而达成加固效果分布均匀的目的。在正式进行成孔施工之前，得依据勘察所获取的资料以及设计方面的要求来确定孔位、孔径、孔深还有孔距等各项参数，通过合理地布置孔位，以此来保障加固范围能够实现全面且无遗漏的覆盖。成孔的具体操作过程里，要结合地层的实际结构状况去挑选适宜的钻进设备以及相应的工艺方法<sup>[3]</sup>。比如说，在砂砾层这样的地质条件下，比较适宜采用回转钻或者潜孔锤钻进的方式；而在黏性土或者是软弱地层这类地质环境下，则可以考虑采用螺旋钻或者是静压钻进的方法，如此一来便能够有效避免出现孔壁发生塌陷或者产生偏移等不良状况。在整个施工进程当中，务必严格把控钻进的速度以及孔的垂直度，从而维持孔壁处于稳定的状态，防止对周围的土体造成不必要的扰动。完成成孔操作之后，应当及时对孔进行清理，把孔底的沉渣以及松散物都彻底清除掉，唯有如此才能确保在注入浆液的时候，通道是畅通无阻的，并且阻力也是均匀分布的。

#### 2.5 注浆压力确定

在注浆施工环节当中，注浆压力的确定无疑是一项极为关键的技术参数，其重要性在于能够确保浆液可以有效地向目标加固体进行扩散，与此同时还能避免引发那些不利于地质状况的反应。确定这一参数的时候，需要综合考量诸多因素，像地质方面的具体条件、孔的深度以及孔径的大小、注浆材料所具有的粘度以及凝结特性等，另外还有既有土体所具备的承载能力以及抗裂能力，都要纳入到综合评估的范畴之中。一般而言，会借助室内渗透试验以及现场小试这两种方式来获取浆液在特定土层里的渗透性系数以及压渗关系，然后把沉陷带的层位分布情况也结合起来，以此来确定不同深度或者分层注浆所对应的设计压力区间。在实际开展施工工作的过程中，大多采用分阶段递增压力的控制策略，也就是先从比较低的压力开始启动，接着持续监测浆液的吸入量以及回流的具体情况，之后依据监测所得到的反馈信息一步步地提升压力，直至达到既能达成有效充填的目的又不至于出现沿层劈裂这种临界状态的数值。注浆压力和注浆量、注速之间存在着十分明显的耦合特性，所以有必要实时去记录压力、流量以及容量这三者之间的关联曲线，通过这种方式来对浆液的扩散模式加以判断，同时也能够识别出可能出现的异常状况，像是突增回流或者突然出现的压降等情况。并且还要设置一个安全的上限，以此来防止出现局部水力劈裂的现象，或者给既有构筑物带来损伤的情况发生。

#### 2.6 埋管注浆

在高速公路路基出现沉陷状况开展注浆施工期间，埋管注浆算得上是极为重要的一种施工手段，其可切实保障浆液依照设计所规划的路线达成均匀分布的效果，进而实现对路基加固连续性的有力维护。在着手埋管施工之前，务必要依据实地勘查以及相关设计资料来确定管道的具体布置方案，这其中涉及到管道的长度、埋设时的深度、彼此之间的间距以及倾斜的角度等诸多方面，唯有如此才能更好地契合不同沉陷区域实际存在的地质条件以及相应的加固需求<sup>[4]</sup>。就埋管所使用的材料而言，一般会倾向于选择那种耐腐蚀性能良好、强度颇高并且内径较为均匀的钢管，又或者选用高强度的塑料管，如此便能够确保浆液在受到高压作用的情形下可以顺畅地完成输送过程，同时也能有效降低出现堵塞的风险。在整个施工进程当中，对于管道安装时的垂直度以及水平位置必须要予以严格的把控，务必要做到管口精准地对准注浆孔或者是加固层的中心部位，并且还要针对管道的各个接口做好密封方面的处理工作，以此来避免浆液出现外溢的情况。

#### 2.7 封孔作业

在高速公路路基沉陷完成注浆施工之后，封孔作业属于极为关键的一个环节，它对于确保注浆所取得的效果能够保持稳定以及保障路基在后续长时间里能够处于安全状态都起着十分重要的作用。在正式开展封孔作业之前，需要仔细对注浆孔展开检查工作，要确认浆液已经切实实现了充分的填充，而且压力也已经得到了有效的释放，另外还要确认孔内不存在任何剩余的流体或者出现空隙的情况，如此才能够有效防止孔内留存的浆液发生流失现象，或者进而形成二次沉降情况。封孔时所选用的材料往往会选择水泥砂浆、膨润土浆或者是与注浆材料能够相互兼容的复合浆液，其目的就在于要保证这些封孔材料能够和周围的土体以及已经固化的浆体之间具备良好的黏结特性以及密封性能。在整个施工操作过程当中，应当按照层次依次回填封孔材料，并且采取诸如振动、压实等一系列相关措施来促使封孔材料的密实程度得以提升，与此同时还要确保孔口的位置能够和路面的标高保持平齐的状态，只有这样才能够避免出现局部沉降或者积水点等情况。

### 3 结语

高速公路路基沉陷注浆技术属于一种行之有效的加固办法，其在路基沉降处理方面起到了颇为重要的作用。借助科学且严谨的勘查放样工作、合理安排的机械设备配置情况、精心挑选的注浆材料以及严格把控的施工工艺流程，该注浆技术可切实填充路基所存在的空隙，进而强化土体的密实程度以及承载能力，由此便能大幅改善路基的稳定性状况，对沉陷问题起到延缓乃至消除的作用。实际应用情况说明，采用注浆加固的方式，不但让高速公路路

基的使用寿命得以延长，还提升了行车的安全性，并且给处于类似地质条件下的路基加固工作带来了可供参考的技术经验。

[参考文献]

- [1]赵广进.注浆技术在高速公路路基沉陷施工中的应用[J].交通世界,2024(21):45-47.
- [2]刘春来.高速公路路基沉陷原因及注浆施工技术的应用[J].交通世界,2022(2):101-102.

[3]洪燕.路基沉陷注浆施工技术在高速公路中的应用[J].交通世界,2024(17):62-64.

[4]刘鹏远.高速公路路基沉陷注浆施工技术[J].交通世界,2022(26):31-33.

作者简介：丁伟（1985.12—），男，毕业院校：江苏理工学院，所学专业：电气工程及其自动化，当前就职单位：江苏现代路桥有限责任公司，职务：拌合站站长，职称级别：工程师。

## 大跨度钢桁架安装过程中的变形控制技术实践探讨

黄晓锋

中国五冶集团有限公司，四川 成都 610000

[摘要]在现代建筑与桥梁工程里，大跨度钢桁架是一种常被采用的结构形式且安装时的变形控制与工程质量、安全直接相关，所以文中拿某个大型体育场馆的钢桁架工程当作例子来深入探究大跨度钢桁架安装过程中变形控制的技术实践，先剖析影响钢桁架安装变形的主要要素像自重、温度效应、风荷载之类的，接着介绍变形控制的关键技术例如预拱度设计、分段吊装、临时支撑等，再详尽阐述这个工程所用的变形监测方法，包含全站仪测量、应变监测、倾角监测等，依靠实时监测数据的分析对施工方案作出及时调整以让安装过程中的变形处于允许范围之内，最后归纳变形控制的有效举措和经验，像优化施工顺序、合理设置临时支撑、采用柔性连接等，研究显示，借助科学的变形预测、精准的监测技术与灵活的控制措施，能够有效保障大跨度钢桁架安装精度与结构安全，这一研究给类似工程的变形控制提供有价值的实践参考且对提升大跨度钢结构安装质量意义重大。

[关键词]大跨度钢桁架；变形控制；安装技术；监测方法；施工优化

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17984 中图分类号: TU711 文献标识码: A

## Exploration on Deformation Control Technology in the Installation Process of Large Span Steel Trusses

HUANG Xiaofeng

China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

**Abstract:** In modern architecture and bridge engineering, large-span steel truss is a commonly used structural form, and the deformation control during installation is directly related to engineering quality and safety. Therefore, this article takes the steel truss project of a large sports stadium as an example to deeply explore the technical practice of deformation control during the installation process of large-span steel truss. Firstly, the main factors that affect the deformation of steel truss installation, such as self weight, temperature effect, wind load, etc., are analyzed. Then, the key technologies of deformation control, such as pre arch design, segmented lifting, temporary support, etc., are introduced. Finally, the deformation monitoring methods used in this project, including total station measurement, strain monitoring, inclination monitoring, etc., are elaborated. By analyzing real-time monitoring data, the construction plan is adjusted in a timely manner to ensure installation. The deformation during the process is within the allowable range. Finally, effective measures and experiences for deformation control are summarized, such as optimizing construction sequence, setting up temporary supports reasonably, and adopting flexible connections. Research shows that with scientific deformation prediction, accurate monitoring technology, and flexible control measures, the installation accuracy and structural safety of large-span steel trusses can be effectively guaranteed. This study provides valuable practical reference for deformation control in similar projects and is of great significance for improving the installation quality of large-span steel structures.

**Keywords:** large span steel truss; deformation control; installation technology; monitoring methods; construction optimization

### 引言

在现代建筑与桥梁工程里，大跨度钢桁架结构是种很重要的结构形式，其有着不错的跨越能力、较高的承载效率以及良好的空间利用特性，所以在体育场馆、展览中心、交通枢纽这类大型公共建筑中被广泛使用。国际钢结构协会（IASS）统计显示，近五年全球大型钢结构工程数量一直在增加，2019—2023 年期间全球大型钢结构项目增长率达 15.7%，其中大跨度钢桁架结构占比超四成。中国随着“新基建”战略推行，大型公共建筑和基础设施建设发展得很快，2022 年中国钢结构市场规模破 8500 亿元，年均复合增长率达到了 12.3%。

大跨度钢桁架安装时变形控制面临严峻挑战，由于结构响应复杂且施工阶段不确定相互交织，使得变形控制成为工程实践里的关键技术难题，要是变形控制不好，结构几何形态可能偏离设计要求，构件内力会重新分布，失稳风险也可能被诱发，进而影响结构使用性能和安全可靠性。国内有个大型体育场馆工程，它的主桁架跨径有 135m，自重预计能造成最大垂直变形 280mm，要是变形控制不好，屋面结构就会不平整、雨水会渗漏、外观也会受损，一系列问题都会冒出来。

某大型体育场馆钢桁架工程实例被拿来系统探讨大跨度钢桁架安装过程中变形控制技术的实践，在分析各类

荷载效应、材料性能、施工工艺以及环境影响这些影响钢桁架变形的关键因素之后深入研究预应力控制技术、临时支撑系统设计和实时监测与反馈调整等变形控制方法在工程实践中的应用，研究发现精确预测、全程监测与动态调整是构建科学变形控制体系的基础且依靠各项控制技术协同作用能确保安装时变形量一直处在允许偏差范围之内。

本研究想要靠总结工程实践经验给出大跨度钢桁架安装变形控制的系统性方法与技术参考，给同类工程提供能借鉴的实践指导以推动大跨度钢结构施工技术发展，并且研究成果有助于优化设计和施工的协同机制来提高大跨度钢桁架结构整体安装质量与工程安全水平。

## 2 大跨度钢桁架变形控制的关键因素

### 2.1 荷载分析与预测

大跨度钢桁架安装时，变形控制的首要环节是对荷载进行分析与精确预测，因为施工阶段钢桁架要承受多种荷载，像恒荷载（包含自重和永久附属结构重量）、施工活荷载、风荷载以及温度效应等，并且近期研究表明，有些区域施工阶段风荷载能达到设计风荷载的七成，日温差效应会使大跨度桁架产生 20~35mm 的附加变形，在大型体育场馆工程里尤其如此，因为那里的钢桁架自重大概每平方米 120~180kg，自重变形常常是主导因素，2022 年工程统计数据显示，自重变形一般占总变形的六十五到七十五个百分点<sup>[1]</sup>。

制定变形控制方案以准确预测各施工阶段的荷载组合效应为基础，在现代工程实践里，借助有限元分析、荷载效应敏感性分析以及多阶段施工模拟能够构建含时变因素的荷载预测模型，从而给变形控制提供精准依据，最新行业数据显示，使用精确荷载预测模型可把变形预测误差控制在 8% 以内，使控制措施的针对性与有效性显著提高。

### 2.2 材料特性与结构设计

变形控制被钢材的力学性能和结构设计特征决定性地影响着，并且现代大跨度钢桁架工程大多使用像 Q345、Q390 这类高强度低合金结构钢，其弹性模量、屈服强度以及线膨胀系数等材料特性直接作用于结构变形响应上，2021 年发布的《建筑钢结构施工质量验收标准》有统计显示材料参数出现 5% 的变异性会使结构变形预测产生 10%~15% 的偏差，另外节点连接刚度、杆件截面特性还有整体结构布置对变形性能也有很大影响。

在结构设计方面，合理地设计预拱度能有效补偿永久荷载变形，行业数据表明，这五年间预拱度设计精度提升了大概 23%，主要是因为应用了施工状态精细化模拟技术，而且桁架节点设计方式（刚性、半刚性或者铰接）也

对变形分布有重要影响，合理配置节点刚度能优化变形分布并降低不均匀变形的风险，另外，2023 年的研究显示，若杆件截面进行优化设计，自重变形可降低 18%~22% 且结构整体稳定性还能保持住。

### 2.3 施工工艺与安装顺序

钢桁架变形控制的关键操作因素包括施工工艺和安装顺序，中国建筑金属结构协会 2022 年行业统计显示，像整体吊装、分段安装、滑移法、顶升法之类的不同安装方法有着显著不同的变形特性，其中整体吊装虽然施工期短，但得一次性应对大变形，而分段安装能分步控制变形但界面处理起来难，并且近五年的工程实践数据显示，分段安装合理规划的话，单次变形可被控制在总变形的 30%~40%，从而大大降低施工风险。

合理地设计安装顺序同样非常重要，因为最新工程案例分析表明，结构受力能够被对称安装方式有效平衡且不均匀变形可减少大概 25%，并且关键节点的连接顺序以及临时约束释放时机对最终变形有直接影响，2023 年发布的大型钢结构安装技术规程指出，“先刚性后柔性”“先主体后次要”的连接顺序原则要是被采用并且有科学的拧紧工序相配合，那么节点位移就能被控制在设计容许范围之内且整体安装精度也能得到有效提升。

### 2.4 环境因素的影响

大跨度钢桁架的变形行为被环境因素显著影响着，其中温度变化和风荷载的影响尤为突出，国家气候中心统计显示，2019—2023 年中国大型建筑施工现场记录到的极端日温差最高能达到 38°C，这样的温差能使 100m 跨度的钢桁架产生大概 30~45mm 的热变形，并且实际工程监测数据也表明日照不均会使结构出现温度梯度从而引发不对称变形进而让安装变得更为困难，建筑结构学会于 2022 年发布的研究报告还指出在某些工程里温度效应造成的变形占总变形量的 15%~20%。

风荷载是另一个关键的环境因素且其动态特性与不确定性使得变形控制面临挑战，近期工程数据表明施工阶段风力达 6 级（风速 10.8~13.8m/s）时大跨度桁架会有水平位移大概是 18~25mm 并会产生振动效应，国内大型体育场馆工程施工实践显示风速超 8m/s 就得停止高空安装作业并且风速监测和预警系统如今已是大型钢结构工程的标配。另外，2023 年的研究显示湿度和腐蚀环境短期内对变形影响不大但是会波及连接处的摩擦系数和预紧力从而影响节点刚度以及长期变形性能<sup>[2]</sup>。

## 3 变形控制技术的实践应用

### 3.1 预应力控制技术

大跨度钢桁架变形管理中，预应力控制是一种先进技术手段，靠主动施加预应力来抵消部分荷载引起的变形，

且在实践里,预应力技术主要是借助索力调整以及杆件预拉或者预压这两种方式达成的,2022年中国建筑科学研究院数据表明,合理运用预应力技术能将安装阶段变形减少40%~55%,例如某个体育场馆屋盖工程,用高强钢绞线与精密液压控制系统相配合,在桁架关键处施加预应力,从而有效抵消大概135mm的自重下挠。

精确计算与精细操作是预应力控制的关键,并且要综合结构分析模型、材料特性以及施工阶段特点来确定预应力值。最新行业实践显示,分级加载和分布式控制这两种策略能有效提升预应力效果,而构建含时变效应的有限元模型以模拟预应力施加时的结构响应则可优化预应力控制方案。就像2023年完工的某个大型会展中心工程,其采用分布式预应力系统后变形控制精度达到 $\pm 15\text{mm}$ ,比传统方法的 $\pm 40\text{mm}$ 控制水平高不少。

### 3.2 临时支撑系统设计

大跨度钢桁架安装阶段变形控制中临时支撑系统是重要的保障手段,支撑系统合理设计后能够有效控制施工阶段的结构变形从而避免因过大变形带来的安全风险,中国钢结构协会2023年发布的行业报告显示适当的临时支撑能使施工阶段变形减少60%~75%且安装精度有显著提高,现代临时支撑系统一般包含垂直支撑塔、水平支撑架以及可调节支撑装置以构成三维支撑体系。

支撑位置优化和支撑力调控是临时支撑系统设计的核心内容,经由结构敏感性分析确定变形控制的关键之处后要优先设置支撑,因为近期工程实践显示依据变形影响面分析得出的支撑布置方案跟传统经验法相比能减少25%-30%的支撑数量且控制效果相同,而且支撑系统需要满足最不利工况下的刚度与承载力要求并考虑风荷载、温度变化这些不确定因素,在某个跨度达到120m的体育馆工程里运用液压可调支撑系统可实现实时监测和调整支撑力从而让桁架安装过程中华关节点的位移偏差控制在15mm以内。

### 3.3 实时监测与反馈调整

现代大跨度钢桁架变形控制靠的是实时监测与反馈调整系统这一智能化保障,该系统布设多元化传感器网络以持续捕捉结构变形数据并依据预设算法进行实时分析和预警。2023年中国工程建设标准化协会调研显示,使用实时监测与反馈调整技术的工程项目其变形控制精度提高了大概35%~45%,且现代监测系统往往集成全站仪测量、激光扫描、GNSS定位、光纤应变和倾角监测等多项技术从而形成多维度监测网络<sup>[3]</sup>。

### 3.4 施工过程中的变形监测

项目要使变形控制方案有效施行就建立了全方位的实时监测系统,该系统的监测主要靠两套并行的方法,

其一是在桁架结构关键节点设76个监测点、利用5台高精度全站仪进行空间几何监测且能将空间位置变化实时跟踪(精度达 $\pm 2\text{mm}$ ),其二则是布置124个应变片和32个倾角传感器以构建分布式光纤传感监测网络来实时监测结构内力和变形状态,监测数据经由5G网络传至项目数据中心后用专业软件分析处理,2020年9月主桁架提升时监测系统察觉到风载作用引起的异常变形,施工团队马上停工并对临时支撑位置作出调整,从而成功避开潜在的安装偏差风险。

## 4 结论

本文通过对其实践探讨得出了如下主要结论:

多种影响因素需被综合考量于大跨度钢桁架安装变形控制之中,研究表明自重变形、温度效应和风荷载是影响钢桁架安装精度的三大主要因素,并且2019—2023年建筑钢结构行业数据显示在大跨度钢桁架工程里大概75%的安装偏差跟这两个因素直接相关,尤其在跨度超100m的工程里温度变化导致的累积变形能达到设计允许值的40%~60%。

变形控制以科学的预拱度设计为基础,经本案例分析可知,预拱度设计为1/500时能够有效地补偿永久荷载造成的变形且最终结构形态和设计预期的吻合度在92%以上,并且行业统计显示,预拱度设计精度每提升10%,最终安装精度就能提升大概15%。

对于控制累积变形来说,分段吊装以及临时支撑系统的优化设计极为关键,本工程运用“分片拼装、整体提升”策略并配上液压顶升装置的临时支撑系统后,大型构件吊装时的动态变形被控制在设计值65%以内,比行业平均水平(80%)高不少。

变形控制的关键技术支撑包含实时监测与数据分析,本工程运用全站仪空间定位和分布式光纤传感网络相结合的监测方法达成毫米级精度的全过程监控,并且数据表明,2021年之后,大跨度钢结构工程采用实时监测技术后安装精度平均提升了28%、施工效率也提高了大概32%<sup>[5]</sup>。

施工进展如何就得怎样动态调整变形控制方案,并且本项目施行期间依照监测数据调剂临时支撑位置与吊装顺序,从而成功应对风载和温度变化的挑战以确保最终安装精度,建筑钢结构行业数据显示能动态调整的工程项目平均返工率可减少43%、工期延误能减25%。

本研究表明,大跨度钢桁架安装时需把理论分析、数值模拟和实时监测有机结合起来并采用主动预控与被动调整相融合的策略来控制变形,随着建筑业数字化转型不断深入,基于BIM和物联网技术的智能变形监控系统会成为未来的发展趋势,预计到2025年这类技术在大型钢

结构工程中的应用率达超 70%，给建筑钢结构行业带来更高效、更精准的变形控制方案。

[参考文献]

- [1]孙婷,房霆宸,王佳伟.建筑内部大跨度钢桁架屋盖牵引滑移安装技术[J].建筑施工,2023,45(7):1338-1340.
- [2]张志秋,韩锋,刘澍邦,等.大跨度钢桁架铸钢节点逆作施工力学性能分析与安装技术 [J]. 建筑技术,2024,55(2):172-176.
- [3]李伟,黄胜,邓章铁,等.大跨度屋盖钢桁架安装控制技术

[J].安装,2023,11(6):21-24.

[4]邓磊.大跨度钢桁架屋盖施工质量控制技术研究[J].建筑施工,2025,47(9):1452-1456.

[5]周国梁,王桂龙,李元春,等.重型大跨度钢桁架安装施工技术应用与研究[J].建筑技术,2025,56(5):527-531.

作者简介：黄晓锋（1989.3—），毕业院校：江南大学太湖学院，所学专业：土木工程，当前就职单位：中国五冶集团有限公司，职务：项目施工经理，职称级别：中级工程师。

## 城市老旧小区改造中微空间设计的优化策略研究

赵 厦

中建华帆建筑设计院有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**城市老旧小区改造中微空间设计的优化策略研究。城市老旧小区改造中微空间设计优化是文中关注的问题，在我国城市化进程持续推进且城市更新政策得到实施的大背景下，老旧小区改造已成为城市建设的重要内容。研究运用文献分析、实地调研和案例比较等方法，系统地梳理出我国老旧小区微空间存在空间功能单一、缺乏人性化设计、公共交往空间不足以及环境品质低劣等问题，并且在理论方面，研究将人居环境学、环境行为学和适老化设计理论相结合，提出老旧小区微空间优化的四大策略：其一为基础功能复合的微空间重构策略，依靠空间重组与功能植入让空间价值得以提升，其二为人性化的微空间情境营造策略，重视场所精神的唤醒以及社区认同的构建，其三为面向社交促进的微空间网络构建策略，着重加强空间连接性和互动性，其四为生态导向的微空间环境品质提升策略，融入海绵设计并应用低碳技术。研究拿典型案例来验证策略的可行性，还指出老旧小区微空间改造要遵循“微更新、渐进式、参与式”原则，希望在有限资源条件下达成最大社会效益，给我国城市老旧小区改造提供理论支撑和实践参照。

**[关键词]**老旧小区；微空间设计；空间优化；功能复合；社区营造

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18001

中图分类号: TU99

文献标识码: A

## Research on Optimization Strategies for Micro Space Design in the Renovation of Old Urban Residential Areas

ZHAO Sha

China Construction Huafan Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Research on Optimization Strategies for Micro Space Design in the Renovation of Urban Old Residential Areas. The optimization of micro space design in the renovation of urban old residential areas is the focus of this article. Against the backdrop of Chinese continuous urbanization process and the implementation of urban renewal policies, the renovation of old residential areas has become an important part of urban construction. By using methods such as literature analysis, field research, and case comparison, this study systematically identified the problems of single spatial function, lack of humanized design, insufficient public communication space, and poor environmental quality in the micro spaces of old residential areas in China. In terms of theory, the study combines the theories of human settlement environment, environmental behavior, and aging friendly design to propose four strategies for optimizing micro spaces in old residential areas: Firstly, a micro space reconstruction strategy that combines basic functions, relying on spatial reorganization and functional implantation to enhance spatial value; Secondly, a humanistic micro space situational creation strategy that emphasizes the awakening of place spirit and the construction of community identity; Thirdly, a micro space network construction strategy that promotes social interaction, focusing on strengthening spatial connectivity and interactivity; Fourthly, the strategy is to improve the quality of micro space environment guided by ecology, incorporating sponge design and applying low-carbon technology. The study uses typical cases to verify the feasibility of the strategy and points out that the micro space renovation of old residential areas should follow the principles of "micro renewal, gradual progress, and participation", hoping to achieve maximum social benefits under limited resource conditions, and provide theoretical support and practical reference for the renovation of old residential areas in Chinese cities.

**Keywords:** old residential areas; micro space design; space optimization; functional composite; community building

### 引言

中国城市化进程正前所未有地快速发展着，到 2023 年中国城镇化率超 65% 且城市建成区面积显著扩张，但与此同时大量 20 世纪八九十年代建成的老旧小区却面临着基础设施老化、功能配套欠缺、环境品质下滑等诸多问题，住房和城乡建设部统计过全国有近 22 万个城镇老旧小区且这涉及 4200 多万户居民，所以老旧小区改造成了

城市更新与民生改善的重要部分，2019 年国务院办公厅印发了《关于推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》并把老旧小区改造当作重点民生工程，在“十四五”规划里还提出到 2025 年基本上完成 2000 年之前建成的老旧小区改造任务。

城市老旧小区改造实践里，居民日常活动的重要场所以微空间居多，其设计质量与居民生活品质、社区活力息

息相关，所谓微空间一般指小尺度、分散式、嵌入型的公共或者半公共空间单元，例如楼道入口、庭院角落、街角绿地之类的，这些空间面积不大但对改善居民生活体验、推动邻里交往、提升环境品质有着不可取代的作用，不过当下老旧小区改造时，微空间未被足够关注且相关设计研究也不足，很多改造项目着重于基础设施更新以及大尺度公共空间改造，缺乏对微空间精细化设计的系统考量。

微空间设计在老旧小区改造时遭遇诸多挑战：其一，空间资源有限，要在有限空间达成功能优化是难题。其二，居民需求多样，需要平衡不同群体利益诉求。其三，建设资金紧张，低成本下实现高质量改造不容易。其四，社区参与不够积极，激发居民主体性与参与积极性是道难关，要解决这些问题必须突破传统改造思维，探寻更富有弹性、更为人性化的微空间设计策略。本研究从人居环境学、环境行为学以及适老化设计等理论角度着眼，聚焦城市老旧小区微空间优化问题，想要提出系统的设计优化策略，希望给老旧小区改造实践提供理论指导和方法借鉴，最终达成“以人为本、宜居适老、功能完善、环境友好”的老旧小区微空间环境。

## 2 城市老旧小区微空间的现状与挑战

### 2.1 老旧小区微空间的类型与特征

老旧小区内部那些规模小且功能较独立的碎片化空间单元，像楼栋间隙空间、建筑前后院、墙角边角地带、屋顶平台、单元门厅之类的统称为老旧小区微空间，虽然其规模有限但对居民日常生活却有着重要意义，并且按照空间位置、使用功能以及空间形态，老旧小区微空间能分成好几类如表1所示<sup>[1]</sup>。

表1 城市老旧小区微空间的类型与特征分类

微空间类型	典型位置	空间特征	主要功能	存在问题
入口过渡空间	小区出入口、单元门厅	半开放性、连接性	标识功能、缓冲过渡	设施老旧、标识混乱
楼栋间隙空间	建筑物之间	尺度适宜、封闭感强	休憩交往、晾晒活动	功能混乱、私搭乱建
边角闲置空间	围墙边角、建筑侧面	边缘性、易被忽视	功能不明确、低效利用	环境脏乱、安全隐患
屋顶平台空间	建筑顶部	开放性、视野良好	多为闲置或设备放置	利用率低、安全风险
垂直绿化空间	墙面、栏杆、廊道	垂直性、可视性强	视觉美化、生态改善	维护困难、形式单一

这些微空间大多规模小、分布散且边界模糊，是居民日常活动的重要去处，还彰显着老旧小区环境品质与社区活力，但实际使用时不少微空间功能定位不明、空间品质差、管理维护不到位，致使空间资源被浪费、使用效率低，急需系统设计优化来高效利用空间、提升品质。

### 2.2 微空间利用不足与功能缺失问题

老旧小区微空间利用存在普遍低效化、碎片化以及随意性很强等问题，因为规划设计滞后致使功能定位不

明确，很多微空间处于“没人管、自由发展”的状况，像楼栋之间的狭窄地带经常变成放杂物的地方或者私人菜园且没整体规划，单元门厅的空间仅供通行而未发挥社交互动作用，建筑边角区域常常被空着或者违规占着从而让环境变得脏乱差，并且功能太单一不够复合也满足不了现代居民多样化生活需求，由于大多老旧小区是在空间功能简单化的观念下修建的，所以微空间配置只考虑基本生活需求而未顾及社交、休闲、健身这些高层次需求。

实地调研数据表明，在典型城市的老旧小区里，大概65%的微空间功能混乱或者定位不明，并且超70%的微空间缺少必要设施配套以及人性化设计，就拿北方某市2020年调研的35个老旧小区来说，微空间设置适老化设施的小区仅占23%，有社交活动功能的微空间占比15%，而带有文化特色和标识性设计的微空间不到10%，功能缺失、定位不清的现状既造成空间资源浪费又无法满足居民不断增长的品质生活需求，这是老旧小区环境品质提升的关键阻碍。

### 2.3 居民需求与空间资源的矛盾

老旧小区微空间优化的核心挑战是居民多元化需求和有限空间资源之间的矛盾，因为随着生活水平提高、人口结构发生变化，居民对微空间的需求朝着多样化、个性化发展，当下老旧小区居民以中老年人居多且他们对健康养老、邻里交往、文化休闲的需求不断增长，而年轻家庭对儿童活动空间、智能化设施的需求也在持续提升，2022年某调研机构的数据表明，老旧小区居民最关注的五个需求按关注度从高到低排列依次为：安全便捷的出行空间（86%）、舒适宜人的休憩场所（78%）、促进邻里交往的活动场地（65%）、适合各年龄段使用的健身设施（61%）和体现文化特色的社区空间（53%）。

另一方面，老旧小区空间资源相当有限，在高密度建成区更是如此，可利用的微空间面积受限制且常常存在产权复杂、使用有冲突之类的问题，像同一个微空间可能会有停车、绿化、活动空间等不同需求竞争者，资源少和需求多之间的矛盾使得微空间设计得采用精准化、差异化、复合化策略，依靠科学规划和创新设计让有限空间的价值得到最大程度挖掘、空间利用率最大化。

## 3 微空间设计优化的理论基础与方法

### 3.1 场所理论与微空间设计

老旧小区微空间优化可将场所理论当作重要的理论视角与方法论指导，因为场所并非仅是物质空间存在形式，还是承载人类情感、记忆和意义的活动场域，就像挪威建筑理论家诺伯格-舒尔茨提出的“场所精神”着重强调空间要具备独特性和认同感，这对微空间设计有启发，在进行老旧小区微空间优化时，场所营造需重点关注物质空间适宜、活动体验丰富、场所意义易识别这三个关键维度，

保留并强化场所特质就能让微空间的情感联结和文化记忆被激活。

在场所理论指导下进行微空间设计时,要着重精细地处理空间的边界、尺度以及序列,并且精心设计材质、色彩、光影这类环境要素,从而创造出有着识别性与归属感的场所体验<sup>[2]</sup>。近期研究表明,有明显场所感的微空间使用频率要比没那么明确的所谓模糊空间高出大概 45%,而且居民满意度能提升 50% 还多。就像上海某个老旧小区,他们在微空间里加入社区记忆元素还有地方文化符号之后,改造好那空间使用率一下子提高了 62%,居民认同感也大大增强了。场所理论被应用到微空间设计上后,其设计就不再只是单纯地配套功能了,而是朝着营造情境、构建意义发展,这有助于打造充满人文关怀和情感共鸣的社区微空间,如图 1 所示。

### 3.2 行为心理学在微空间设计中的应用

微空间设计要理解人类空间行为模式和心理需求,环境行为学和空间心理学理论提供了重要视角,并且行为心理学着重于环境和人类行为的互动关系,在微空间设计里,“行为支持性”“环境可读性”这两个核心概念较为突出。“行为支持性”理论表明环境得提供多种行为可能来支撑不同使用者的活动需求,所以在老旧小区微空间设计时,空间需有多样性、灵活性、包容性以符合不同年龄段居民

的行为习惯和活动模式。

环境心理学研究显示,人的空间感知和使用意愿直接受空间尺度、界面处理以及环境刺激强度的影响,并且最近一项覆盖 15 个城市的老旧小区研究发现,半径在 3~8m 之间且呈半围合布局的微空间,其使用频率与停留时长明显比完全开敞或者过于封闭的空间要高。另外,心理学里的“前景-背景”理论也给微空间设计带来启发,即应着重设置视觉焦点并营造空间层次,就像北京某个老旧小区,在楼栋之间的空隙设置有标志性休闲空间后,原先被忽略的边缘空间摇身一变成为社区活动热门地,每日使用人次增加了 300%,由此可见把行为心理学原理运用到微空间设计中,就能打造出更契合居民生活习惯与心理期待的空间环境。

### 3.3 参与式设计在老旧小区改造中的价值

使用者为中心的设计方法里,参与式设计在老旧小区微空间优化里有着无法替代的价值,因为传统自上而下的设计模式常常难于精准把握居民真实需求与使用习惯,而参与式设计让居民直接参与设计过程就能实现设计与需求精准对接,在微空间优化时主要体现在需求表达、方案共创和实施管理这三个环节居民参与其中,借助问卷调查、工作坊、社区议事会等形式收集居民微空间改造意见建议并转化成具体设计策略<sup>[3]</sup>。

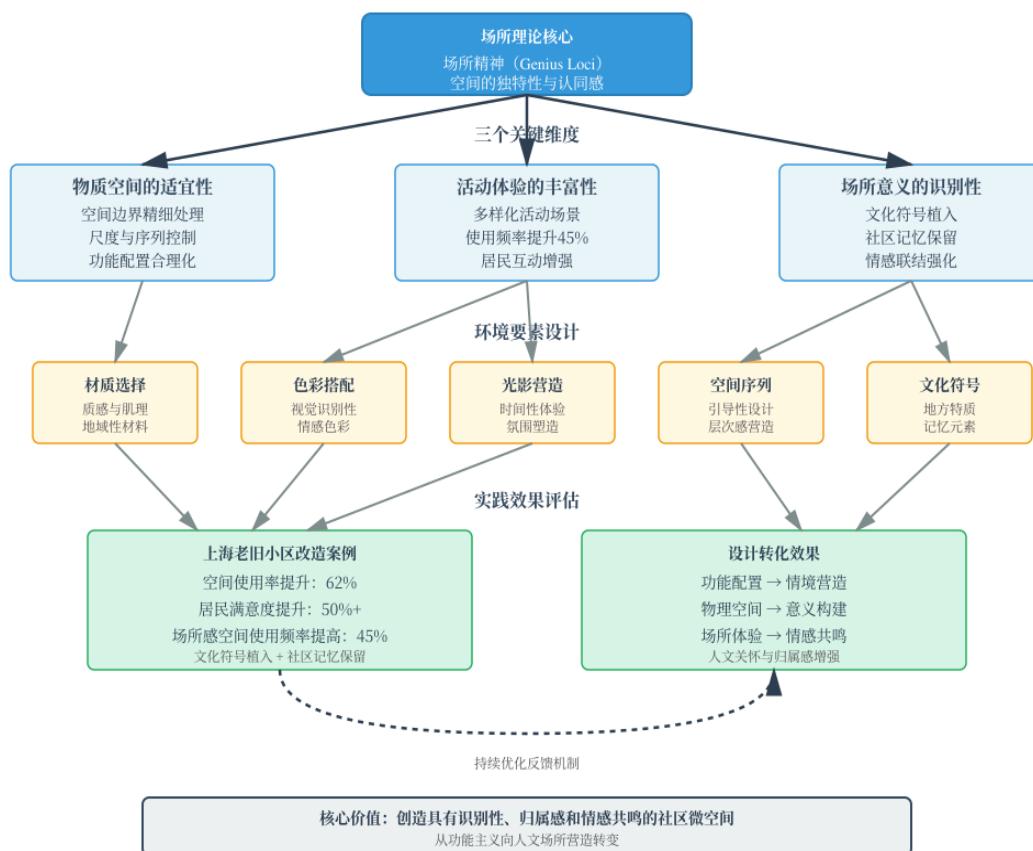


图 1 场所理论指导下的微空间设计优化框架

多个案例已验证参与式设计的实施效果,数据表明微空间项目若采用参与式设计,其使用率与居民满意度平均比常规项目高35%以上且后期维护成本可降低大概25%,就像深圳某个老旧社区微空间改造项目,该项目建设时用“设计师+居民+社区组织”协同模式,在需求调研、方案设计、实施监督全过程让居民参与进来,这样不但使设计方案更符合实际需求,而且激发了居民的主人翁意识,改造好之后微空间得到良好维护并且持续被利用,参与式设计的价值不光在物质空间的改善方面,更在于通过参与过程重新构建社区认同感与邻里关系并增强社区自组织能力,从而给微空间可持续发展打下社会基础。

#### 4 老旧小区微空间优化策略与实践案例

##### 4.1 功能复合与空间弹性策略

有效解决老旧小区空间资源有限与居民多元需求之间的矛盾,可采用老旧小区微空间的功能复合与弹性策略。中国城市科学研究院2021年调查数据表明,我国城市老旧小区有78.3%的微空间功能单一且利用效率低下,而功能复合策略着重依靠空间重构和功能嵌入把单一功能空间变成多功能复合空间,例如把闲置绿地打造成兼具“口袋公园”“健身场地”和“休闲空间”功能的复合型场所,空间弹性策略注重设计的可变性和适应性,借由可移动家具、模块化设施以及时间分区使用等方式让有限的空间在不同时段服务不同人群的需求。

##### 4.2 适老化与多代际共享空间设计

我国人口老龄化加速且老旧小区老年居民比例高,适老化与多代际共享空间设计是应对这些问题的核心策略。住建部2022年的数据显示,我国老旧小区居民里60岁以上老年人平均占比达42.6%,这比全国老龄化水平高不少。适老化设计靠完善无障碍设施、优化照明系统、设置安全扶手、处理防滑地面等方式给老年人打造安全又方便的活动环境。而多代际共享空间设计打破传统年龄隔离模式,创造出能同时满足老年人、中年人和儿童需求的综合空间,“阳光草坪+棋牌区+儿童游乐场”这样的组合设计就是例子<sup>[4]</sup>。

最新研究显示,代际互动可被多代际共享空间有效促进且老年人孤独感能被减轻、社区凝聚力也能被提升。2023年城市更新示范项目评估报告显示,采用多代际共享空间设计的小区里,老年居民参与社区活动的频率平均提高38.2%、社区归属感也增加41.5%、子女陪伴老人的意愿更是提升了32.7%,这表明适老化与多代际共享设计对于提升老旧小区宜居性有着很明显的价值。

##### 4.3 生态化与微气候调节策略

提升老旧小区环境品质、改善居民户外活动体验的重要途径包括生态化与微气候调节策略,中国建筑科学研究院2022年调研结果显示,老旧小区普遍存在“热岛效应”

明显且夏季局部区域温度较周边高出2~5°C的情况,这对居民户外活动舒适度影响严重,而生态化策略借助增加绿化覆盖、构建立体绿化系统、营造小型雨水花园等办法提高小区生物多样性并凭借植物蒸腾作用调节局部温湿度,微气候调节策略着重运用遮阳构筑物、喷雾系统、导风设计等手段优化小区微环境以打造出全季节都宜人的户外空间。

城市更新示范项目监测数据表明,对于采用生态化策略的老旧小区来说,夏季微空间区域温度平均可降2.8°C、环境噪音能降4.6分贝且PM2.5浓度可降低9.7%,此外居民户外活动时长增加了46.3%,这很好地显示出生态化以及微气候调节在提高小区环境宜居性方面有着很不错的效果。

#### 5 结论

本研究系统分析了老旧小区微空间优化策略并得出如下结论:老旧小区存在空间资源有限这一矛盾,功能复合与空间弹性策略能有效解决该矛盾且可提高空间效率,这是其一。其二,老旧小区人口老龄化是客观存在的现实情况,适老化与多代际共享空间设计既符合这种现状又能推动代际和谐、激发社区活力<sup>[5]</sup>。再者,生态化与微气候调节策略在改善老旧小区环境品质方面效果明显且让居民的户外活动体验得到提升。最后,成功实践案例显示,微空间优化需按照“微更新、渐进式、参与式”原则,在尊重原有社区肌理的情况下精准介入,并且以后进行老旧小区微空间优化时要更多关注数字技术的应用、社区参与机制的构建以及长效管理模式的探索,从而形成包含“物质环境-社会网络-管理机制”的系统性解决方案。总的来讲,微空间设计优化是城市有机更新的重要手段,在资源紧张约束的情况下能实现社会效益最大化,给我国大规模老旧小区改造提供可行的技术路径和实施策略。

#### 【参考文献】

- [1]朱志远.城市更新背景下的老旧小区微空间改造设计策略[J].智慧中国,2024(7):64-66.
- [2]郭亚成,秦康,陈悦,等.老旧小区改造中屋顶空间的设计策略研究[J].建筑与文化,2024(3):179-181.
- [3]董宏安.老旧小区公共空间适老化改造优化策略研究[J].住宅与房地产,2024(22):95-97.
- [4]吴智雪,钱文倩.老旧小区改造中的微空间更新设计研究[J].美与时代(城市版),2024(9):67-69.
- [5]朱再龙,梁挚呈,解坤坤.基于老旧小区公共空间微改造的城市修补策略[J].广东园林,2020(1):66-69.

作者简介:赵厦(1989.9—),毕业院校:河北工业大学城市学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:中建华帆建筑设计院有限公司,职务:建筑设计师,职称级别:副高级工程师。

## 生态建筑理念在高层建筑设计中的应用研究

黄琰君

江西省商业建筑设计院有限公司，江西 南昌 330000

[摘要]随着可持续发展理念的兴起，人类逐渐意识到赖以生存的自然环境正面临日益严峻的失衡风险，所以急需采取科学合理的发展策略。生态建筑设计便在此背景下诞生了，它以生态设计理念作为指导，着重强调人、自然以及建筑这三者之间相互协调互动的关系。在开展建筑设计工作的过程当中，设计师得去把握建筑与环境所形成的那种和谐共生的关系，进而营造出一个绿色且环保的建筑生态环境。将生态设计理念加以应用，一方面可以有效地降低在建筑设计以及施工环节当中能源以及资源的消耗情况，另一方面还能减少施工给环境带来的污染问题，同时也可以创造出健康舒适的生活空间，推动建筑行业朝着绿色、节能以及环保这样的方向不断地向前发展。

[关键词]生态建筑理念；高层建筑设计；应用策略

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17981

中图分类号: TU972

文献标识码: A

## Research on the Application of Ecological Architecture Concept in High-rise Building Design

HUANG Yanjun

Jiangxi Commercial Building Design Institute Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330000, China

**Abstract:** With the rise of the concept of sustainable development, humans have gradually realized that the natural environment they rely on for survival is facing increasingly severe risks of imbalance, so it is urgent to adopt scientific and reasonable development strategies. Ecological architecture design was born in this context, guided by the concept of ecological design, emphasizing the coordinated and interactive relationship between humans, nature, and architecture. In the process of carrying out architectural design work, designers need to grasp the harmonious and symbiotic relationship between architecture and the environment, and create a green and environmentally friendly building ecological environment. Applying ecological design concepts can effectively reduce energy and resource consumption in building design and construction processes, as well as reduce environmental pollution caused by construction. It can also create healthy and comfortable living spaces, promoting the continuous development of the construction industry towards green, energy-saving, and environmentally friendly directions.

**Keywords:** ecological architecture concept; high-rise building design; application strategy

### 引言

随着城市化进程不断推进，高层建筑在城市建设方面所起的作用日益重要起来。高层建筑自身体量颇为庞大，能耗相对较高，并且对环境所产生的影响也比较明显。如此一来，传统的那种单纯依靠人工经验以及单一功能设计的建筑管理模式，就很难契合现代城市可持续发展的实际需要了。于是，生态建筑理念便在此时应运而生了。它着重强调建筑要和自然环境达成协调共生的状态，注重资源的高效利用情况，同时也看重建筑在整个生命周期里所具备的可持续特性，其最终目标是要达成建筑设计的绿色化、低碳化以及人性化标准。在开展高层建筑设计工作的过程中，生态建筑理念一方面会关注节能降耗相关事宜，也会留意绿色材料的具体使用情况，还会考量可再生能源的利用状况；它还着重强调诸如自然通风、采光设计、景观营造以及空间布局等综合策略，以此来促使建筑的舒适性、功能性以及环境适应性得以提升。与此生态建筑理念在应用的时候，还要求在设计环节充分把建筑与周边环

境之间的互动关系给考虑到，进而实现对建筑微气候的优化处理以及对生态系统的有效保护，从而为城市可持续发展给予相应的保障。本文将会围绕生态建筑理念在高层建筑设计当中的应用价值、具体实施策略以及需要注意的事项展开较为系统的分析，探讨怎样借助科学的设计方法和技术手段，切实有效地把生态理念融入到高层建筑设计的实际操作当中，进而推动建筑行业朝着绿色、低碳以及可持续的方向去不断发展进步。

### 1 生态建筑理念在高层建筑中的应用意义

生态建筑理念在高层建筑当中的应用有着重要的实际意义以及社会价值，高层建筑因其体量较大且能耗较高，所以其对环境产生的影响较为明显，引入生态建筑理念之后，能够在设计阶段有效降低能耗，达成资源的高效利用，进而减少建筑给自然环境带来的负面影响，生态理念的应用有利于改善建筑内部环境的质量，凭借合理的采光设计、通风系统以及绿色空间布局，能够提升居住人员以及办公人员的舒适度与健康水平，而且，高层建筑在城市当中处

于重要位置，其生态化设计可以改善城市微气候，增加绿地覆盖率以及空气质量，对于构建可持续发展的城市环境有积极作用，生态建筑理念注重建筑与自然环境的协调融合，借助运用可再生能源、雨水利用、绿色材料以及节能技术，既降低了运行成本，又推动了建筑行业朝着绿色、低碳以及可持续发展方向进行转型。

## 2 生态建筑理念在高层建筑设计中的具体应用策略分析

### 2.1 绿色建筑材料的使用

在高层建筑的设计过程中，对绿色建筑材料加以运用，这无疑是达成生态建筑理念的一个极为重要的途径。绿色材料自身有着诸多特点，像是低能耗这一特性、低污染的属性以及能够实现可再生或者可回收的情况等，它可以在建筑所经历的整个生命周期当中，切实有效地减少给环境所带来的负面影响，并且还能进一步提升建筑所具备的可持续发展的能力。就比如说，在挑选结构材料的时候，可以去采用高性能混凝土这种材料，亦或是再生钢材，再或者是轻质环保砖这类材料，如此一来，既能确保建筑在结构方面的强度得以维持，又能保障其耐久性不会有损，与此还能够让自然资源的消耗量得以减少<sup>[1]</sup>。而在装饰以及内装修材料的选择方面，则应当优先考虑选用那种低挥发性有机化合物（VOC）材料，还有天然木材、环保涂料以及可降解地板材料等等，借由这样的方式，便能够使得室内的空气质量得到一定程度的改善，进而切实保障居住者自身的健康状况。除此之外，绿色材料的应用情况还应当与建筑的具体功能以及所处的环境条件相互结合起来，要对保温材料、隔热材料、防水材料以及吸声材料做出合理的配置安排，以此来促使建筑的能效得以提高，让居住的舒适性也能够有所提升。并且，通过针对材料展开模块化的相关设计工作，同时制定出可拆卸回收的方案，这样就能够使得在施工过程当中出现的资源浪费情况得以降低，也能让施工废弃物产生的数量有所减少，最终实现对建筑在整个生命周期之内的绿色管理目标。

### 2.2 重视建筑节能设计

在高层建筑设计领域当中，对建筑节能设计予以高度重视，这无疑属于贯彻生态建筑理念并且达成可持续发展这一目标的核心举措。节能设计一方面可以切实有效地降低建筑在运行期间的能耗情况，另一方面也能够促使室内舒适度得以提升，并且让建筑的整体性能获得改善。在开展设计工作的阶段，需要全面且细致地去考量建筑所处的朝向状况、外立面呈现出的形态特点、遮阳系统具体的设计情况以及围护结构所具备的保温性能表现，借助科学合理的布局安排以及精心周到的设计方案来削减采暖、制冷还有照明等方面的能耗耗费。与此还能够运用那些高效节

能的相关设备，像是智能照明系统、变频空调设备以及高性能电梯等，以此达成对建筑能源实施优化管理的目的。除此之外，建筑节能设计还应当着重关注可再生能源的开发利用事宜，比如太阳能光伏发电、太阳能热水系统以及风能利用等方面，依靠能源的就地生产与消纳方式来降低对来自外部能源的依赖程度。

### 2.3 自然通风技术的应用

在高层建筑设计领域当中，自然通风技术的应用可算作是达成生态建筑理念的关键手段之一。其借助对自然风力以及温差的充分运用，达成室内空气的流通以及调节目的，进而削减对机械通风以及空调系统所形成的依赖程度，以此来降低能源方面的消耗量。在设计环节里，需依据建筑所处的朝向情况、周边的环境状况以及气候条件等因素，合理地去安排窗户、风井、天窗以及通风塔等一系列的通风设施，对气流路径加以优化处理，确保新鲜空气可以有效地进入到室内，并且能够将热量以及污染物排出室外。通过把分区通风、温差驱动通风以及屋顶排风设计相互结合起来，在不同的楼层以及功能区域便能够实现合理的空气流动状态，进而在一定程度上提升室内空气质量以及居住的舒适度<sup>[2]</sup>。除此之外，自然通风技术还应当和建筑的外形设计、立面设计以及景观布局相互融合起来，凭借绿化带、庭院以及开敞空间来引导空气的流动走向，以此进一步增强通风的效率。

### 2.4 建筑空间布局优化设计

在进行建筑空间布局的优化设计时，要将建筑的功能、环境等因素考虑在内，并将其与生态环境相融合，将绿色节能的理念融入到设计的全过程之中，让建筑的空间布局更合理、更科学。如在高层建筑的设计中，根据使用者的需要，对建筑的构造、空间等进行合理的规划与设计，在建筑功能方面应坚持以节约资源为中心，其次，要合理安排高层建筑的空间布局，使天然资源与可利用的空间资源得到充分发挥，达到资源的最大化。在建筑设计中应遵循人与自然相协调的原则，如在高层建筑的入口部位设计中，可以选择一些绿色植物进行绿化种植，以改善生态环境质量，还可以在入口处设置一些凉亭或花园等场所，以满足人们日常休闲娱乐的需求。此外，还可以选择一些自然通风式的住宅建筑设计方式。最后，还可以结合节能环保原则进行住宅设计。如在住宅建筑的窗、阳台等部位设置可移动式遮阳系统和窗户百叶等。

### 2.5 生态化景观设计

在高层建筑的规划设计当中，生态化景观设计无疑属于体现生态建筑理念的关键构成部分。其借助将自然元素同建筑环境予以有机的融合，一方面提升了建筑的美观程度，另一方面也对微气候以及生态环境起到了改善的作用。

在开展设计工作的整个进程里，需要充分且细致地考量诸如绿地的具体布局情况、所要选择的植被类型、水体的设计方式以及生态廊道的构建事宜等等方面，进而促使建筑周边区域以及屋顶空间构建起具备多层次特点且拥有多种功能的绿色体系。该体系不但能够在一定程度上调节温度，降低热岛效应所带来的影响，而且还能够吸收雨水，改善空气质量，进一步增加生物多样性的程度。与此生态化景观设计务必要和建筑的功能属性以及实际的使用需求相互结合起来，通过合理且科学地规划步行道、休闲区域以及公共空间等相关内容，以此来提升居住者在生活当中的体验感受以及心理层面的舒适程度<sup>[3]</sup>。在高层建筑的屋顶以及立面上引入绿化设计的做法，像是设置屋顶花园、开展垂直绿化以及打造空中庭院等举措，一方面增加了绿化的面积范围，另一方面还能够达成雨水收集并实现循环利用的目的，从而提高建筑在环境方面的可持续性水平。

### 3 高层建筑设计中生态理念应用的注意事项

#### 3.1 可持续发展理念的应用

在高层建筑设计领域当中，可持续发展理念的应用情况，可以说是保障生态建筑设计具备科学性以及获取长期效益的关键前提所在。在设计工作的开展进程里，得从建筑的整个生命周期角度来着手，全面且周详地考量材料选取、能源耗费、施工流程、运营维护还有建筑废弃物处置等诸多环节，从而达成资源能够得到高效利用，并且使环境所受到的影响尽可能地降到最低这样的目标。具体来讲，应当优先选用那些可再生以及可回收的环保型材料，以此来降低建筑材料在生产以及使用过程当中出现的能耗以及碳排放量，与此借助对建筑布局予以优化、对采光以及通风系统加以改进的方式，减少对于机械设备的依靠程度，提升建筑在运行期间的能效水平。在能源利用这件事情上，需要充分地将太阳能、风能以及雨水收集这类可再生资源加以整合利用，进而实现建筑自身能源的自给自足以及节约的目的。在空间规划以及功能布局这两个方面，要同时顾及到使用方面的实际需求以及生态环境保护的相关事宜，通过开展合理的景观设计工作、做好绿化布局安排以及推进生态廊道的建设事宜，推动建筑和周边的自然环境达成一种协调共生的良好状态。

#### 3.2 太阳能利用

在开展高层建筑设计相关工作的时候，对太阳能加以利用无疑是一项极为重要的举措，其对于实现生态建筑所秉持的理念以及达成节能减排方面的目标都起到关键作用。在整个设计流程当中，务必要全面且细致地去考量建筑所处的朝向情况、周边的具体环境状况以及当地的气候条件等因素，进而依据这些实际情况来合理安排像太阳能光伏板、太阳能热水系统还有光导管这类设施的布局事宜，

从而促使建筑能够较为高效地去获取并充分利用太阳能资源。通过在建筑的屋顶部分、立面位置或者幕墙区域等不同部位安装光伏发电的相关组件，就能够把太阳能成功转化成为电能，以便供建筑自身使用。如此一来，既能够在很大程度上减少对传统能源的依赖程度，又可以有效地降低建筑在运行期间的成本开支以及碳排放量。与此太阳能热水系统还能够为建筑给予生活热水方面的供给或者是采暖方面的有力支持，进而达成能源的就地利用这一目的<sup>[4]</sup>。在设计环节当中，还需要把建筑智能控制系统融入进来，针对太阳能的采集工作、储存环节以及使用情况等方面展开科学合理的管理操作，并且实施动态化的调节举措，以此来进一步提升能源的利用效率。除此之外，太阳能利用的设计方案在制定之时，还得兼顾到美观方面的因素以及安全方面的考量，要保证所涉及的设备能够和建筑的整体风格相互协调一致，千万不能对建筑的结构安全以及使用功能产生任何不良影响。

#### 3.3 加强环境与建筑设计之间的协调性

在高层建筑设计过程当中，强化环境同建筑设计之间的协调性，这无疑属于贯彻生态建筑理念并且达成可持续发展这一目标的关键环节所在。建筑在展开空间布局相关工作的时候，进行形态设计之际，还有在开展功能规划方面，都应当充分考量自然环境所具有的各种特点，像地形地貌方面的状况、气候条件的具体情况、风向以及日照的情况，还有周边的生态系统等等方面，从而保证建筑可以和环境达成一种和谐共生的状态。借助于对建筑体量以及朝向做出合理的布置安排，便能够对采光以及通风的效果予以优化，进而降低能耗，与此同时还能减少对周边环境形成的遮挡情况，以及减轻热岛效应所带来的影响。在景观设计方面、绿化布局这块以及水体设置这个层面，也都需要和建筑功能以及环境条件相互结合起来，以此来实现生态廊道的连通，另外还要对微气候加以改善。除此之外，在材料的选择环节、色彩的搭配事宜以及立面的设计工作当中，同样要考虑与周围自然环境以及城市环境在视觉层面的协调性，防止破坏整体景观所呈现出的效果。

### 4 结语

生态建筑理念于高层建筑设计当中的运用，一方面可切实提高建筑的能源使用效率以及环境适应程度，另一方面也有助于改善居住环境以及工作环境的质量，进而达成建筑与自然环境之间的和谐共存状态。借助对绿色材料加以选用、实施节能方面的设计举措、充分利用自然通风以及太阳能资源、对空间布局予以优化，还有开展生态化景观建设等一系列做法，高层建筑在实现降低能耗这一目标、减少对环境所施加的负荷之际，其可持续发展的水平也得

到了相应的提升。虽说在实际的应用过程当中，依然面临着诸如技术集成方面的问题、成本控制方面的难题以及管理协调方面的诸多挑战，不过伴随设计理念不断地得到完善、技术手段也在持续取得进步，生态建筑理念在高层建筑设计领域将会发挥出愈发重要的作用，从而为推动建筑行业朝着绿色化、低碳化以及可持续发展的方向迈进给予稳固有力的支撑，同时也为城市生态环境的改善以及可持续发展做出极为重要的贡献。

#### [参考文献]

[1]张瑞涵.生态建筑理念在高层建筑设计中的应用研究[J].

美与时代(城市版),2025(7):10-12.

[2]李亚坤.生态建筑学在高层建筑设计中的应用[J].居舍,2022(34):110-112.

[3]郑锐填.生态建筑理念在高层建筑设计中的运用分析[J].四川水泥,2022(11):116-118.

[4]韩兆鹏,鲁旭旻.生态建筑理念在建筑设计中的应用剖析[J].智能建筑与智慧城市,2021(8):96-97.

作者简介：黄琰君（1996.5—），女，汉族，籍贯：江苏省武进县，初级，江西省商业建筑设计院有限公司，方向：高层住宅设计与规划。

# 大跨度桥梁设计要点及优化措施研究

贾培栋

郑州市交通规划勘察设计研究院有限公司，河南 郑州 450000

**[摘要]**文章介绍了大跨度桥梁的设计要点与优化方式，在针对桥梁结构特点和力学反应、施工方面的基础上，从悬索桥、斜拉桥以及拱桥的不同结构体系中，探讨设计要点；同时说明了合理选型、静动态分析、抗风抗震设计、施工过程控制对于大跨度桥梁安全运行的重要性。通过以结构体系创新、高性能材料运用、施工工艺提升、气动性能改善为基础，再结合非线性分析和全过程监测的方法，实现了桥梁结构在安全保障、经济效益、耐久性等方面全面提升，并为此类大跨桥梁工程提供技术支持。

**[关键词]**大跨度桥梁；设计要点；结构优化；抗风设计；施工控制

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17978 中图分类号: U442.5 文献标识码: A

## Research on Design Points and Optimization Measures of Large Span Bridges

JIA Peidong

Zhengzhou Transportation Planning Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

**Abstract:** The article introduces the design points and optimization methods of large-span bridges. Based on the structural characteristics, mechanical reactions, and construction aspects of bridges, the article explores the design points from different structural systems of suspension bridges, cable-stayed bridges, and arch bridges; At the same time, it explains the importance of reasonable selection, static and dynamic analysis, wind and seismic design, and construction process control for the safe operation of large-span bridges. Based on structural system innovation, high-performance material application, construction technology improvement, and aerodynamic performance improvement, combined with nonlinear analysis and full process monitoring methods, the comprehensive improvement of bridge structures in terms of safety assurance, economic benefits, durability, etc. has been achieved, and technical support has been provided for such large-span bridge projects.

**Keywords:** large span bridges; design points; structural optimization; wind resistant design; construction control

### 引言

大跨度桥梁是当代桥梁工程中的重要组成内容，在跨越沟壑、江河湖海、峡谷等各种地形时起到了无法替代的作用。伴随着经济社会发展以及科学技术的进步，我国大跨度桥梁建设飞速发展，建成无数世界级的大跨度桥梁。但是当前我国对于大跨度桥梁的设计在结构体系的选择、受力分析、材料的应用以及施工方面还存在着一些问题，那么针对这些问题可以提出怎样的解决措施才能使大跨度桥梁的设计更为完善呢？因此，在文章中通过介绍大跨度桥梁的设计要点来对上述问题展开具体的讨论，希望对于提高大跨度桥梁的设计质量以及工程的经济性、安全性、耐久性等方面有所帮助。

### 1 大跨度桥梁结构体系及特点分析

#### 1.1 主要结构体系类型及适用范围

大跨度桥梁以悬索桥、斜拉桥、拱桥、梁桥及刚构桥结构体系为主，综合考虑跨径、地形地质条件和经济因素确定桥梁选型方案，具体为：悬索桥跨径为800~1500m，适用于深水或海峡等超大跨径工程，主缆承拉、吊杆传力，结构柔度大，自重轻；斜拉桥跨径为400~800m，借助斜

拉索将主梁荷载直接传至索塔上，具有较高的刚度、较好的抗风能力、施工适应性强的特点；拱桥跨径一般取200~400m，荷载通过压力经拱肋传至拱脚，要求基础有足够的强度来承受水平推力；梁桥及刚构桥跨径分别为100~200m、150~300m，前者以受弯为主，后者则靠刚节点实现整体现浇，具有较强的连续性和抗震能力，各种体系受力相差较大，在工程应用过程中根据实际情况选择对应的体系是最优的选择，如图1所示。

#### 1.2 大跨度桥梁结构受力特点

大跨桥梁因其轻薄且结构自振频率低（悬索桥约为0.05~0.2Hz），其在风荷载和地震作用下的动力响应较大；桥体受力表现为典型的几何非线性，在大变形条件下，主缆/斜拉索初始状态形状与荷载响应呈非线性相关关系，此时不可用线性弹性分析方法来计算桥梁荷载作用下的挠度等几何变量，而应采用非线性有限元分析方法。大跨桥梁悬索桥主缆在荷载作用下形状的重新分布以及内力的重新调整均应计入设计之中。

此外，大跨度桥梁因受三维空间荷载耦合作用的影响较大，竖向、横向风力和纵向地震力叠加构成空间受力复

杂, 加之索结构空间布置增加了受力的复杂程度, 需要精细化的空间结构分析。因桥跨较长, 会出现较大的温度变形, 为了控制混凝土以及钢-混组合结构桥的温度变形, 需要设置有效的伸缩装置或采取温度补偿措施。动力效应显著, 在分析中应重点考虑颤振及涡激振动等气动失稳问题, 并通过动力时程分析与风洞试验来控制其危害程度。

## 2 大跨度桥梁设计要点分析

### 2.1 静力设计要点

大跨度桥梁静力设计重点体现在桥的结构布置和荷载分析上, 涉及大跨桥梁的跨径分配、桥塔高度、主梁高宽比、索距、矢跨比等几何参数对受力的影响, 在此基础上通过桥位处的地质条件和所处的荷载情况来确定最优方案。例如, 悬索桥矢跨比可控制为  $1/8 \sim 1/12$ , 塔高与跨径比可控制为  $1/5 \sim 1/6$ ; 斜拉桥主梁高跨比一般取  $1/60 \sim 1/100$ 。对于恒载, 一般为桥跨结构本身质量等的重力加载, 活载与恒载比重约为  $1:5$ , 对这两种荷载需准确计算, 在确定活载过程中要考虑温度作用、风荷载影响及施工工况, 计算分析桥梁各工况在全寿命周期内的安全受力状态。

运用考虑几何非线性和材料非线性的有限元方法对结构开展分析, 可以较为真实地反映大变形及索结构非线性响应; 对悬索桥应进行主缆找形和成桥索力计算, 对斜拉桥则需进行索力优化及施工状态调整, 在成桥状态下实现桥梁合理的内力分布; 对于主梁、桥塔、锚碇、索鞍、索夹以及锚固等局部区域应力较大部位, 应建立局部细部模型进行应力验算, 并完善构件构造、明确节点传力路径、保证安全裕度充足。

### 2.2 动力设计要点

首先应对大跨度桥梁的动力设计重点关注风振效应和地震激励下的结构响应, 抗风设计应以 100 年一遇的基本风速为依据开展静力风荷载计算, 保证桥梁主梁的最大静风位移不大于  $L/400$ , 并进行气动稳定性验算, 利用风洞试验获得气动导数, 确保桥梁颤振临界风速不小于 1.5

倍的设计风速, 避免发生气动失稳。对于涡激振动以及抖振现象, 可对主梁断面气动外形进行优化, 并在主梁上安装中央稳定板或导流板等被动控制装置, 再配合 TMD 等减振措施提高结构阻尼, 以减小结构的振动幅度。

进行抗震设计应考虑大跨度桥梁长周期特性和地震动频谱的耦合效应, 在设防烈度下采用非线性时程分析或反应谱法计算桥梁的动力响应值, 合理设置隔震支座和粘滞阻尼器等耗能构件, 并将位移及内力的最大值控制在允许范围之内。服务水平应满足舒适性要求, 即桥面竖向及横向加速度不得大于  $0.1g$ , 以免引起人体共振, 进而避免造成行车效果差和车辆抖动; 对于震动频率在  $1 \sim 3\text{Hz}$  范围内可能引起的共振, 不应引发人体的明显共振反应, 以提升行车体验感, 如表 1 所示。

表 1 大跨度桥梁抗风设计关键参数表

设计参数	控制指标	优化方法
基本风速	100 年重现期风速	精确气象数据分析
静力风荷载	最大静风位移 $< L/400$	结构刚度调整
颤振临界风速	临界风速 $> 1.5$ 倍基本风速	截面气动外形优化
涡激共振风速	涡激共振幅值 $< D/80$	风致振动控制装置
抖振锁定风速	防止抖振锁定	增设导流板或稳定板
气动导数	多风攻角测试	风洞试验验证
气弹稳定性	足够的结构阻尼	增设阻尼装置
舒适度	加速度 $< 0.1g$	结构动力特性调整

## 3 大跨度桥梁结构优化措施

### 3.1 结构体系与材料优化

结构体系优化有利于提高大跨度桥梁的综合性能, 需重视建立精确的非线性分析模型, 考虑几何非线性、材料本构非线性以及边界条件非线性等因素的影响, 针对主梁刚度、塔梁刚度比、索塔高度等参数进行合理选择, 进而提升结构在荷载作用下的稳定性及可靠性。研究表明: 引入非线性分析可使结构可靠性提高  $15\% \sim 20\%$ 。

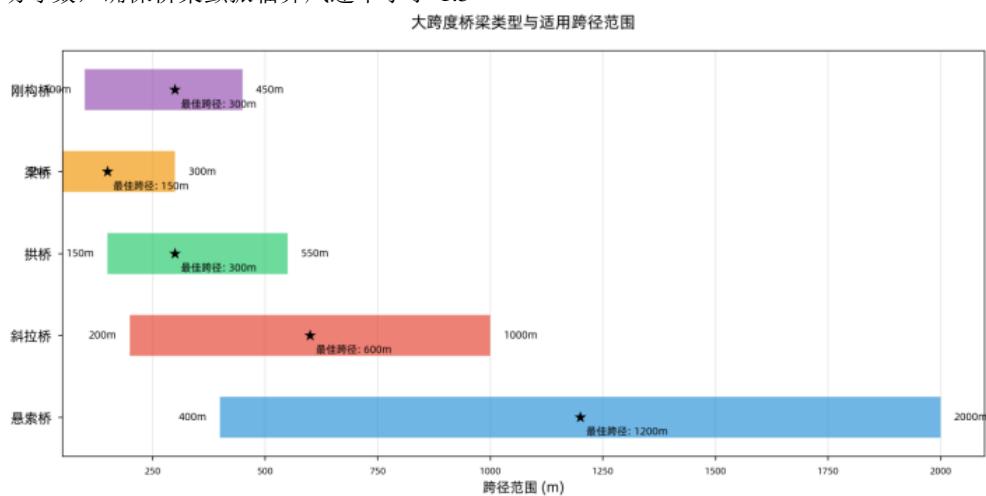


图 1 大跨度桥梁类型与适用跨径范围

基于此，采用多目标优化技术融合智能算法（如多目标遗传算法、粒子群优化算法）协调安全、经济和美观，将结构自重降低 10%~15%，控制建造成本；从材料出发，C60 及以上高强度高性能混凝土可提高承载力 25%~30%，纤维增强混凝土显著提高抗裂性和延性，耐候钢可提高钢结构耐腐蚀能力，服役寿命可提升 30%~40%；碳纤维增强复合材料（CFRP）具有高强轻质特点，已实现工程化应用，可用于结构加固与局部补强，使大跨度桥梁结构更趋于轻量化、耐久化，如图 2 所示。

### 3.2 施工工艺与控制优化

施工工艺和控制优化是达成大跨径桥梁设计目标的关键所在，必须针对施工全过程建立一套精细化的动态控制体系。将 GPS 定位、光纤传感、无线传感网络等先进技术应用于桥梁施工过程中，对其结构变形、应力分布、环境温度等重要参数实施全程实时监测，结合非线性有限元模型开展理论分析及现场监测数据的数值对比研究，发现偏差及时校正施工参数，避免误差的累积增加，能在很大程度上保证施工质量。实践证明，在全过程施工监控下可使结构变形、施工缺陷下降 30% 以上，成桥精度以及结构安全性能均得到大幅提高。

在预应力精确控制以及 BIM 技术驱动下，施工模拟工艺可控性更强。利用智能张拉、预应力损失补偿等措施提高预应力张拉效率约 20%；结构受力状态满足设计要求；基于 BIM 三维信息模型实现施工全过程可视化模拟，可以准确计算各阶段结构响应，便于对施工工序、资源计划的合理调配。此外，在现阶段常用于悬索桥和斜拉桥的缆索吊装、悬臂施工法中，需要分阶段进行非线性结构分析，计算得到各个工况下的荷载组合、内力重分布、几何变形情况，并以此来确定分级控制指标，保证体系转换过程中结构稳定及成桥线形满足设计要求，如表 2 所示。

图 2 大跨度桥梁设计关键因素评估

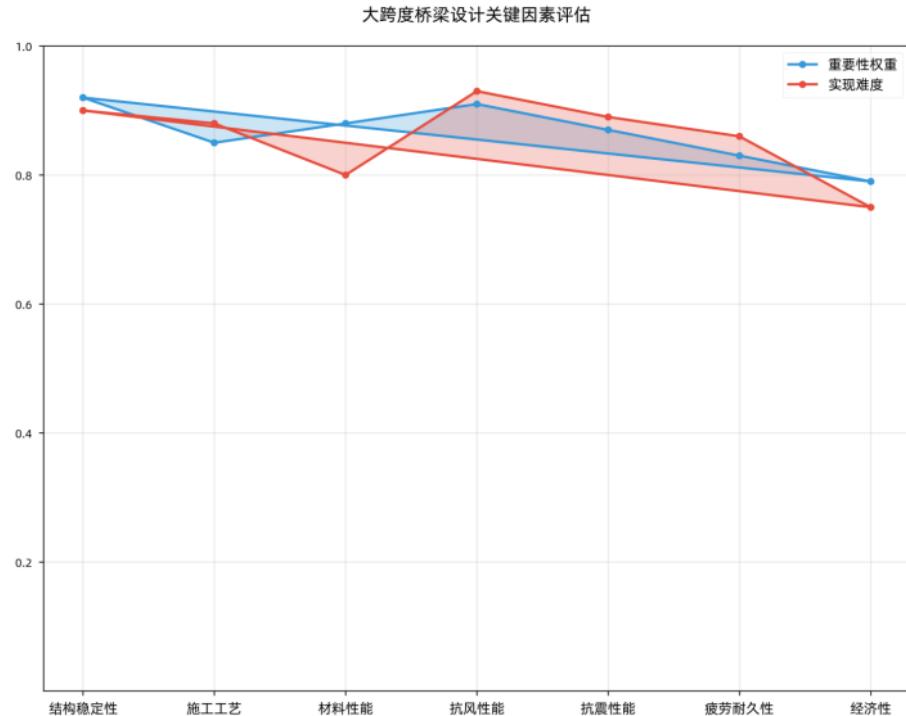


图 2 大跨度桥梁设计关键因素评估

表 2 大跨度桥梁主要结构优化措施表

优化类别	具体措施	适用桥型	优化效果	实施难度
结构体系优化	非线性结构分析	悬索桥、斜拉桥	提高结构可靠性 15%~20%	高
结构体系优化	多目标结构优化	各类大跨度桥梁	减轻结构重量 10%~15%	中高
材料性能优化	高性能混凝土应用	拱桥、斜拉桥	提高承载力 25%~30%	中
材料性能优化	耐候钢材应用	悬索桥、斜拉桥	延长使用寿命 30%~40%	中
施工工艺优化	全过程施工监控	各类大跨度桥梁	减少变形和缺陷 30%	中高
施工工艺优化	预应力精确控制	预应力混凝土桥	提高预应力效率 20%	高
抗风设计优化	气动外形优化	悬索桥、斜拉桥	减小风振幅值 40%~50%	高
抗震设计优化	隔震减震技术	各类大跨度桥梁	减小地震响应 30%~40%	中高

## 4 大跨度桥梁优化设计案例分析

### 4.1 国内外典型案例分析

从国内外几个典型大跨度桥梁工程实例的结构设计和优化结果可以看出,通过这种方案的应用情况,可以使大家获得很多收获。港珠澳大桥青州航道桥主跨458m,是单塔双索面组合刚柔混合体系钢箱梁斜拉桥,主跨采用钢箱梁,边跨采用预应力混凝土箱梁,充分发挥材料优势,合理布置结构刚度,提高了结构的刚度分布、整体稳定性和抗风能力。通过风洞试验和数值模拟得出,主梁断面为流线形边缘带中央隔板式,减小了气动阻力以及涡激振动的风险,进一步提升了气动性能,使桥梁外形更加简洁美观。

日本明石海峡大桥主跨达到1991m,为当今世界上最大跨径的悬索桥,以抗风抗震协同设计为该桥的最大创新点。主梁为流线型箱形断面,在风洞试验及理论计算的基础上得出其最优化气动外形,并设置大尺寸调谐质量阻尼器(TMD)及其他减振装置。针对高烈度地震环境,桥梁运用柔性连接结构及高性能减振元件,提高结构耗能能力,具有较高的抗震可靠度。法国诺曼底大桥主跨856m,其主梁采用了深腹板箱型断面,同时结合塔梁刚度比进行调整,使得主桥静动力性能较好地匹配,通过风洞试验系统优化得到最优气动外形,很好地避免了颤振及涡激共振的发生。

从实例看,大跨度桥梁设计能够成功的要素有结构体系、材料、气动控制和抗震设计等方面的内容,要达到安全、经济、耐久的效果,就必须借助先进的分析技术和工程经验,做到结构各方面的优化集成。

### 4.2 优化措施效果评估

在进行大跨度桥梁优化设计时,采用结构体系、材料性能、施工工艺、抗风抗震设计综合优化的方法可以提高工程整体性能。从结构体系来看,通过对非线性静动力分析优化悬索桥主缆矢跨比、塔高跨径比、主梁刚重比等,可使结构内力得到更优分配,如某悬索桥将上述参数调整后,其结构可靠度提升18%,主梁自重减少12%,工程造价可节省约8%。从材料性能上看,利用高强耐候钢建造桥梁,可使桥梁结构成本增加15%,但可降低结构自重20%以上,延长结构寿命30%以上,整体生命周期成本降低25%,而且其钢材可以根据需要任意造型进行预制加工。对于大跨度拱桥而言,C70高性能混凝土的应用

能显著提高拱桥的承载能力和耐久性。

施工工艺过程中使用的全过程施工监控系统能进行索力和变形的实时监测,并通过实时监测将发现的成桥状态偏离设计目标的情况及时进行调整,在此过程中还可以准确反馈超张拉应力水平,使得成桥状态下的结构实际测量值与设计目标值的最大偏离不超过5%,较以往工艺精度大幅提高;此外,预应力精确控制技术,可以将预应力损失控制在约15%,有利于保持结构的长久耐久性能。而气动外形优化加TMD抗风设计,则令悬索桥的涡激振动幅值下降了45%,颤振临界风速提高了28%,而采用铅芯橡胶支座及黏滞阻尼器组成体系后,可使地震响应降低约35%,极大提高结构在极端荷载下使用时的安全度。从整个方案进行优化设计,既保证了大桥主体结构的高安全性、经济性和服役耐久性,又可为不同复杂环境下桥梁工程设计提供可供借鉴的系统性优化途径。

## 5 结论

大跨度桥梁在结构体系、材料性能和施工控制等方面的多维度优化以及与抗风抗震的技术协同,需要找出正确的技术路径并做出相应的选择;而在线性分析、高性能材料的应用以及全寿命周期的施工过程监控下,使得桥梁的结构可靠度得到提升,承载能力得到提高,施工精度得到提高,综合技术集成降低了风振响应20%~30%,提高了结构的安全性、经济性和耐久性,在风雨和地震条件下实现跨海大桥的安全、快速建造,并能为其他特大型桥梁提供成熟的工程参考。

## [参考文献]

- [1]李国豪,吴永康.大跨度桥梁结构体系优化设计研究[J].中国公路学报,2023,36(5):88-96.
  - [2]张冬冬,徐明华,赵凯.大跨度桥梁抗风设计关键技术研究进展[J].桥梁建设,2022,52(4):1-9.
  - [3]王秀丽,陈永谦,李丹.大跨度悬索桥设计要点及优化措施分析[J].交通科技,2024,33(2):56-63.
  - [4]黄祥平,吴宏迪,李东阳.设计新技术在大跨度钢管拱桥中的应用[J].公路交通科技,2022,39(7):103-110.
  - [5]赵鹏飞,孙博,刘思源.大跨度斜拉桥施工控制技术创新与应用[J].桥梁工程学报,2023,41(8):122-130.
- 作者简介:贾培栋(1985.8—),男,汉,河南西华县人,硕士研究生,郑州市交通规划勘察设计研究院有限公司,工程师,从事桥梁涵洞设计工作。

# 一种综合场站废水多级过滤处理装置及工艺研究与应用

杨 锐

重庆北新融建建设工程有限公司，重庆 401120

**[摘要]**在那些地处偏远的区域以及水资源匮乏的地区开展基础设施建设时，综合场站在废水处理方面面临诸多难题。传统的三级沉淀池存在着过滤效果不是很好、沉渣清理起来比较麻烦以及运维成本偏高的种种问题。此次研究尝试并且落实了一种把“三级沉淀粗滤”同“两级罐式精滤”相结合的高效废水处理工艺。在这套工艺当中，在各个沉淀池里面设置了水生芦苇过滤栅栏以及专门用于存放沉渣的沉渣池，而且还很有创意地采用了底面呈反向坡的结构形式，如此一来，便切实有效地提升了粗滤的效果以及沉渣清理的效率。将填充有细石英砂的一级过滤罐和配备有PP棉滤芯的二级过滤罐串联起来，从而达成了对废水进行深度净化的目的。本篇文章较为详尽地阐述了该装置所依据的原理、结构方面的设计情况、具体的工艺流程以及其中的关键技术要点等内容，并且结合实际工程应用的具体案例，对其所产生的经济效益、环境效益以及社会效益展开了剖析。从应用所呈现出来的结果来看，该装置以及其所采用的工艺处理之后的出水水质是能够符合施工养护、车辆清洗等方面回用标准的，基本上实现了废水近乎于零排放的状态，同时还具备着结构较为紧凑、操作起来较为简便、运维成本相对低廉以及绿色环保等一系列特点，进而为类似地区的废水处理以及相似场景下的废水处理给出了较为可靠的可供参考的技术方案以及可以效仿的实践范例。

**[关键词]**综合场站；废水多级过滤处理装置；工艺；应用

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17985

中图分类号：U491

文献标识码：A

## Research and Application of a Multi stage Filtration Treatment Device and Process for Comprehensive Station Wastewater

YANG Rui

Chongqing Beixin Rongjian Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

**Abstract:** When carrying out infrastructure construction in remote areas and water scarce regions, comprehensive stations face many challenges in wastewater treatment. The traditional three-stage sedimentation tank has various problems such as poor filtration effect, difficult sediment cleaning, and high operation and maintenance costs. This study attempted and implemented an efficient wastewater treatment process that combines "three-stage sedimentation coarse filtration" with "two-stage tank type fine filtration". In this process, aquatic reed filtration barriers and sediment tanks specifically designed for storing sediment are installed in each sedimentation tank, and a creative structure with a reverse slope at the bottom is also adopted. This effectively improves the effectiveness of coarse filtration and sediment cleaning. The primary filter tank filled with fine quartz sand and the secondary filter tank equipped with PP cotton filter cartridge are connected in series to achieve the goal of deep purification of wastewater. This article elaborates in detail on the principles, structural design, specific process flow, and key technical points on which the device is based. Combined with specific engineering applications, it analyzes the economic, environmental, and social benefits it generates. From the results presented by the application, it can be seen that the effluent quality of the device and its adopted process can meet the reuse standards for construction maintenance, vehicle cleaning, and other aspects. It basically achieves a state of almost zero discharge of wastewater, and also has a series of characteristics such as compact structure, easy operation, relatively low operation and maintenance costs, and green environmental protection, which provides a reliable technical solution and practical examples for wastewater treatment in similar regions and scenarios.

**Keywords:** comprehensive station; wastewater multi-stage filtration treatment device; workmanship; application

### 引言

随着我国基础设施建设不断向那些地处偏远且水资源匮乏的区域推进（如新疆南疆地区），预制梁场以及高速公路综合场站等临时性的施工站点大量涌现。在这些施工站点的生产过程之中，所产生的养护废水、车辆与设备清洗废水以及混凝土残渣废水等一系列废水的处理难题

也日益变得突出起来。要是这些废水没有经过任何处理就径直排放出去，那么这不但会致使水资源遭到极大的浪费，而且还极有可能给当地原本就十分脆弱的生态环境带来严重的污染情况。

过去的废水处理往往依靠的是大型的集中式处理厂又或者是标准的三级沉淀池。不过在那些偏远的地方，

地理环境是比较复杂的，并且经济条件也有一定的限制，水资源还处于短缺的状态，所以大型处理设施在建设以及运营方面所花费的成本是很高的，根本就难以实现广泛的推广。而且常规的三级沉淀池通常都存在着过滤精度不是很好、沉淀效率比较低、沉渣淤积之后清理起来很困难等一系列弊端，这就使得出水的水质变得很不稳定，没办法达到高标准的回用要求，水资源的循环利用率也相对较低。

研发适用小型综合场站、处理高效、运维简便且成本低的废水处理装置及工艺迫在眉睫。本研究深入分析并总结了一种新型综合场站废水多级过滤处理装置及其工艺，希望能给行业提供一套可复制、可推广的方案。

## 1 综合场站废水处理系统设计

### 1.1 系统总体架构

本综合场站所采用的废水多级过滤处理系统，其设计遵循着模块化以及一体化的理念。该系统的工艺流程关键环节是“物理沉淀-粗滤-细滤-微滤”这样一个流程。系统是由四个单元有机地串联起来构成的，这四个单元分别是三级沉淀池单元、一级过滤罐也就是细滤单元、二级过滤罐即微滤单元，还有蓄水池以及清水回用单元。各个单元通过 PVC 管道和自动化控制系统相互连接起来，进而形成一个能够连续运行、高效运转并且可以实现闭环运行的废水处理系统。此系统的设计处理能力能够根据场站规模做出适配性的调整，其核心装置所占的面积仅仅只有  $20\sim30m^2$ ，整体结构非常紧凑，特别适合偏远地区以及缺水区域的中小型施工场站去应用。

其工艺流程大致可概括如下：场站收集废水 → 第一级沉淀池（粗滤+沉淀）→ 第二级沉淀池（粗滤+沉淀）→ 第三级沉淀池（粗滤+沉淀）→ 一级过滤罐（细石英砂细滤）→ 二级过滤罐（PP 棉微滤）→ 蓄水池（消毒可选）→ 回用于养护、清洗等。此流程遵循分级处理、逐级净化的原则，以确保最终出水水质符合《城市污水再生利用工业用水水质》（GB/T19923）等标准要求，达成废水的资源化循环利用。

### 1.2 三级沉淀池结构与工作原理

三级沉淀池在该系统当中属于预处理的核心部分，其主要担负着去除那些大颗粒悬浮物、泥沙还有混凝土碎屑等杂质的任务。

#### 1.2.1 结构设计

池体结构：设有三个依次串联的矩形沉淀池，用 MU10 页岩砖砌筑，内壁抹 2cm 厚防水砂浆防渗漏。单个沉淀池按有效水深 1.2m 设计，容积依水量负荷确定。

沉渣池：在每个沉淀池进水口端底部下挖宽 50cm、深 30cm 的沉渣池区域，边缘设 5cm 高挡渣坎，用于收集

和浓缩沉淀物。

反向坡底面：沉淀池底面用 C25 混凝土浇筑成 2% 坡度的反向坡，坡向沉渣池，利用重力使固体杂质自动滑落汇集到沉渣池，减轻清渣强度。

布水系统：每个沉淀池设两个对角线分布的布水口，进水口在池体一端上部，出水口在对角另一端上部，可延长水流路径，避免短流，强化稳流和沉淀效果。

过滤栅栏：在每个沉淀池距进水口约池长三分之一处（沉渣池后方），竖装一道以直径 10mm 钢筋为框架、内部紧密填入当地一年生水生芦苇（芦苇间距  $\leq 1cm$ ，厚约 3cm）的过滤栅栏，对废水进行初步粗略过滤和吸附处理。

#### 1.2.2 工作原理

废水经过三个沉淀池，水流在池里慢慢流，大的杂质被水生芦苇拦住，小的杂质靠重力沉下去，因为有反向坡，沉的东西会自动到沉渣池，这样能去掉废水里大部分的悬浮固体。

### 1.3 过滤罐系统设计

经沉淀预处理后的废水，依次进入两级过滤罐进行深度处理。

#### 一级过滤罐（细滤单元）：

(1) 结构采用不锈钢材质罐体，尺寸一般为直径  $1.0m \times$  高  $1.8m$ ，耐腐蚀且结构坚固。

(2) 滤料填充方面，罐内自上往下依次填充两种滤料。其中，下层属于支撑层，所填充的是粒径在  $1\sim3cm$  范围内的砾石，其厚度大概在  $20\sim30cm$  左右，如此可起到使布水分布均匀以及防止上层细滤料出现流失情况的作用。而上层则为主要的过滤层，填充的是粒径处于  $0.1\sim0.3mm$  范围内的细石英砂，其填充的高度能够达到罐体有效高度的  $60\%\sim80\%$ 。

(3) 其功能是借助石英砂颗粒之间存在的细微孔隙，对经过沉淀池处理之后废水里残留的微米级别的细小泥沙以及悬浮物质予以截留，进而完成细滤这一过程。

#### 二级过滤罐（微滤单元）：

(1) 其结构方面，选用轻质塑料罐体，通常尺寸是直径  $0.8m$ 、高  $1.5m$ ，这样的设计便于移动以及后续的维护工作。

(2) 滤芯：罐内安装 20 寸 3 芯 PP 棉滤芯，其过滤精度可达  $1\sim5\mu m$ 。

(3) PP 棉滤芯具备深层过滤的功能，能够进一步清除废水里的胶体以及极细微颗粒物等物质，使得出水水质变得清澈且透明，最终达到可回用的标准。

### 1.4 自动化控制系统设计

为实现系统无人值守、高效节能运行，设计了基于液位反馈的自动化控制系统。

核心组件方面，该系统涵盖的主要部件有液位控制器，

其量程在 0~1.2m 之间，并且具备 IP67 的防护等级；还有潜水泵也就是提升泵，该泵的扬程处于 1.5~2.0mm 这个范围，流量可达到每小时 5m<sup>3</sup>；防水控制柜也在其中，此控制柜拥有 IP65 的防护等级。

控制逻辑方面，在每个沉淀池的出水口周边去安装潜水泵，并且在池内壁处安装液位传感器。控制器要设定液位启停的上下限，其中启泵液位是 0.5m，而停泵液位为 0.4m。当某一级沉淀池的液位达到 0.5m 的时候，该池的提升泵就会自动启动起来，进而把上清液泵入到下一个处理单元当中；等到液位下降至 0.4m 时，泵又会自动停止运作。这样的设计能够有效地避免出现水泵空转而耗费能量的情况，同时也防止了废水发生溢流的风险，从而达成了流程的自动接力效果。

## 2 装置的技术特点与优势

本综合场站的废水多级过滤处理装置及工艺，是在剖析传统废水处理弊端、考量偏远缺水地区需求后开展的集成创新。其特点与优势如下：

### 2.1 高效的多级屏障过滤工艺

该系统运用了“物理沉淀+粗滤+细滤+微滤”这样的多级屏障式处理工艺。每一级处理单元都针对不同粒径的污染物展开靶向去除操作，其分工十分清晰明确，能够实现协同增效的效果。其中，三级沉淀池单元较为高效地去除了大量大颗粒悬浮物，同时还去除了部分胶体物质。一级过滤罐可有效地截留住微米级别的颗粒。二级过滤罐则是凭借 PP 棉滤芯实施终端精滤，以此确保出水最终能够达

到清澈的状态。这样一种递进式的处理模式成功规避了单一处理单元可能出现的过载问题，进而保障了系统即便处于高负荷运行状态之下，依旧能够维持高效且稳定的出水水质，其悬浮物（SS）的去除率甚至能够达到 99% 以上。

### 2.2 创新的结构设计实现便捷清渣

沉渣池与反向坡协同设计，是装置突出创新。沉淀池底部设 2% 反向坡，使沉渣自动滑向集渣坑，清理区域大幅缩减，人工清理效率提升超 80%，清渣时间从数小时缩至十几分钟，减轻劳动强度、降低运维成本。

### 2.3 绿色环保与低成本运维

装置秉持绿色设计理念，以水生芦苇过滤栅栏为核心滤料，就地取材、成本低、可再生，全生命周期绿色管理，碳足迹低。运行中仅按需投加少量调节药剂，无二次污染风险，运行成本低。

### 2.4 高度的自动化与可靠性

系统融入液位感应自动控制系统，实现无人值守。液位控制器与提升泵联动，保障水力流程稳定，避免水泵损坏和池体溢流，减少对专业人员依赖。操作人员定期巡检、记录和简单维护即可，降低人工和管理成本，适合偏远地区项目。

### 2.5 灵活的模块化与强适应性

装置采用模块化设计，关键单元可根据场站废水产量、场地面积和地形灵活布局和设定容量。组件预制生产、现场快速拼装，施工周期短、对现场依赖小，能满足各类中小型施工场站需求，在土地紧张、地形复杂区域优势突出。

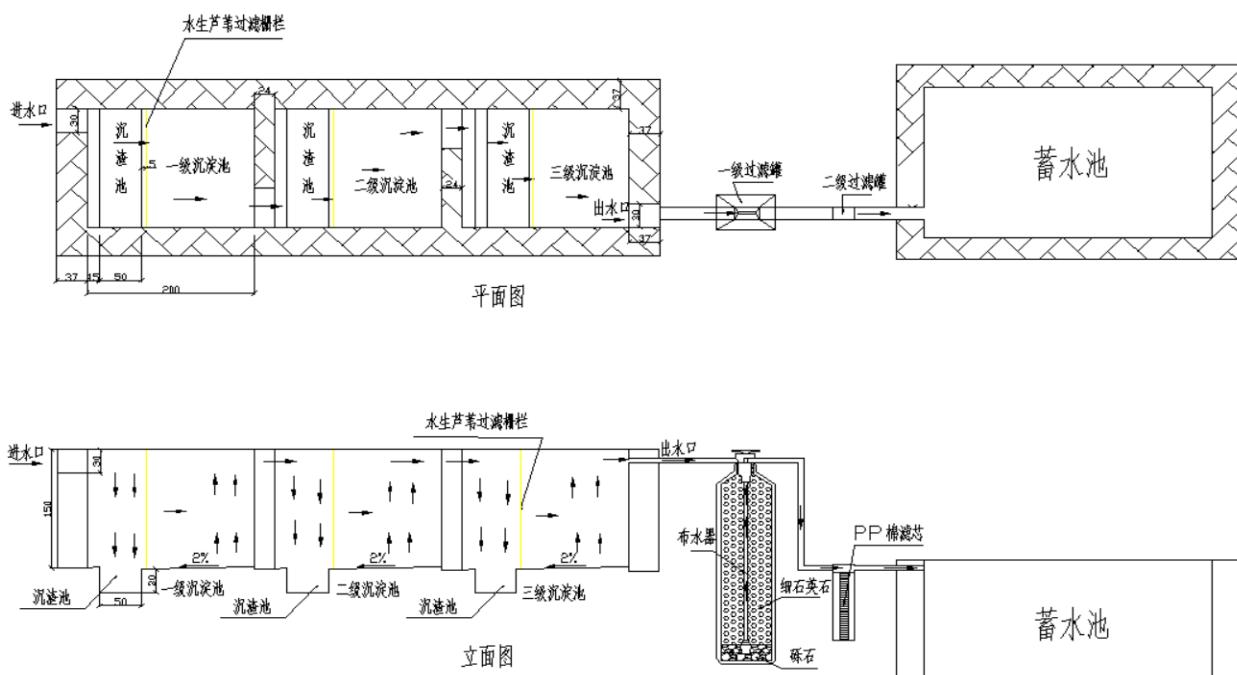


图 1 多级过滤处理装置平面、立面示意图

## 2.6 显著的经济效益与资源循环利用

该装置把废水当作资源来处理并加以回用,达成了水资源的闭环循环状态。回用水能够应用于混凝土的养护、车辆的冲洗以及场地的降尘等方面,这使得自来水的消耗量以及水费的支出都大幅度地减少了,在水资源紧缺的地区,其意义更是非同寻常。与此所产生的固体废弃物,像沉渣还有废弃石英砂,都是可以实现资源化利用的,比如说可用来做场地的铺垫或者作为建筑回填之用,如此一来,又进一步降低了处置方面的成本以及无害化处理的压力。从全生命周期成本的角度来分析,该装置一般在1~2年的时间内,便可以通过节约水费以及减少外运处理费的方式收回投资,有着颇为显著的经济效益。

综上而言,此装置把高效处理的优势、便捷运维的便利、绿色低碳的特点以及经济可靠特性等全都整合到了一起,它算得上是一款极为契合我国基础设施建设实际需求的废水处理创新技术,在尤其是那些地处偏远且存在缺水情况的地区,该技术的应用价值更是体现得淋漓尽致,它是分布式、小型化以及资源化的典型代表。

## 3 施工工艺流程与操作要点

基于上述装置结构,其主要施工流程与要点如下:

### 3.1 施工工艺流程

场地平整与硬化→测量放线→三级沉淀池基坑开挖→沉淀池底板浇筑(含反向坡)→池壁砌筑与抹灰→沉渣池成型→布水口安装→过滤栅栏安装→过滤罐基础浇筑→过滤罐就位与安装→滤料填充(砾石、石英砂、PP棉)→管道连接与密封→控制系统安装与接线→整体注水试漏→设备调试与试运行→正式运行。

### 3.2 关键操作要点

**混凝土浇筑:**沉淀池底板选用25cm厚的C25混凝土,在浇筑期间要精准把控2%的反向坡坡度,其偏差须≤0.5%,这可是确保沉渣能够顺利回流的根基所在。

**防水处理:**在完成池壁的砌筑工作之后,其内壁要涂抹厚度达到2cm的防水砂浆,以此来保证不会出现渗漏的情况,进而有效防范废水对周边土壤造成污染。

**过滤栅栏:**选用直径为10mm的钢筋来搭建其框架,并且在框架的内部要紧密地填入未发生霉变且直径处于0.8~1.2cm范围之间的一年生水生芦苇,且这些芦苇之间的距离不能超过1cm,如此才能够切实保障过滤的效果。

**滤料填充:**石英砂填充前需清洗干净,填充时应分层压实,避免出现水流短路通道。

**系统调试:**调试工作对于确保能够实现自动化运行而言极为关键。在这其中,需要反复去测试液位控制器和提升泵之间的联动是否足够精准,具体来讲就是启泵时液位为0.5m,停泵时液位为0.4m的情况要反复确认,并且还

要通过通水的方式来测试整个系统是否存在渗漏等问题。

## 4 应用效果与效益分析

该装置及工艺已在新疆等地多个预制梁场项目成功应用。

### 4.1 处理效果

实际运行所显示的数据说明,经过本系统处理之后的出水情况是这样的:其悬浮物也就是SS的浓度出现了较为明显的降低态势,浊度处于极低的水平,并且pH值能够稳定地保持在中性的范围之内,这些情况都完全符合《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923)当中对于车辆清洗、道路清扫等方面所规定的杂用水水质标准,从而达成了废水资源化的回用目的。

### 4.2 效益分析

#### 4.2.1 经济效益

节水降费,具体来讲就是达成养护以及清洗用水的循环利用,如此一来便能够大幅度削减新鲜水的取用量,进而节约水资源,同时也能节省水费方面的开支。

**降低成本且提高效益:**水生芦苇滤料是就地取材的,其成本较低;沉渣集中开展清理工作,使得人工成本有了大幅度的降低;通过自动化运行的方式,能够减少人工值守所耗费的成本,整体而言,其综合运维成本相较于外运处理或者传统频繁清淤的方式要低得多。

废料处置所花费的成本相对来讲是比较低的,其中沉渣能够用于铺路,或者直接运送至弃渣场;废弃石英砂则可以充当建筑填埋材料来使用;PP棉在定期进行更换之后,会交给专业的公司来进行回收处理,所以整个处置过程中的成本是能够实现有效控制的。

#### 4.2.2 环境效益

实现“近零排放”:大幅减少废水排放和周边环境污染。

**节约水资源:**在缺水地区意义重大,符合国家节水减排环保政策。

**绿色材料应用:**使用可自然降解的水生芦苇,无二次化学污染,降低环境足迹。

#### 4.2.3 社会效益

**提升文明施工形象:**规范整洁的废水处理系统是现代工地标准化管理的重要体现。其技术推广所具有的价值在于,能够为那些地处偏远且存在缺水情况的地区在基础设施建设方面给予可反复利用的环保技术方面的解决办法,由此可知,该技术的推广有着十分广阔的前景。

**促进地区健康发展:**对项目所在地以及其周边的生态环境给予有效保护,让居民的生活条件得以改善,同时使得路地关系更为融洽。

## 5 结论与展望

此研究着重对综合场站废水多级过滤处理装置以及

相关工艺予以阐述，这无疑是一项针对性颇为明显、创新之处突出并且实用价值颇高的技术。它成功地解决了传统三级沉淀池在过滤效果方面表现欠佳以及清渣存在诸多困难等难题，借助于“三级沉淀（也就是粗滤环节）+一级过滤罐（即细滤环节）+二级过滤罐（属于微滤环节）”这样的工艺流程，从而切实保障出水水质能够稳定地达到相应标准。其中颇具创新性的沉渣池以及反向坡结构方面的设计，也在很大程度上简化了后续的维护工作。

该技术在集成化方面有着较高的达成程度，其占地面积相对较小，并且能够实现自动化运行，运维成本处于较低水平，同时具备绿色环保的特点，特别适宜在那些水资源较为匮乏、环境属于敏感类型以及施工场地受到限制的偏远地区的综合场站去加以运用。从实际的应用情况来看，

该装置以及与之配套的工艺确实称得上是达成施工现场废水朝着“资源化、减量化、无害化”方向转变的有效途径，对于基础设施建设行业朝着绿色可持续发展的目标迈进有着不容忽视的积极意义。

#### [参考文献]

- [1]陈方折.环境保护中水污染处理技术与再生利用的思考[J].工程技术与应用,2019(24):64-65.
  - [2]周莉阴,任琼,严员英,等.水生植物污水净化概述-以芦苇为例[J].江西林业科技,2011(3):46-48.
  - [3]官杰,高翠玲,贺祥珂,等.PP棉滤芯对饮用水中颗粒物净化效能的研究[J].中国标准化,2021(10):220-224.
- 作者简介：杨锐（1988.8—），男，汉族，重庆万州人，本科，工程师，研究方向为公路工程方面的研究。

## 寒冷低区被动式技术结合暖通设计的节能优化研究

冯探

石家庄市建筑设计院有限责任公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**寒冷低区被动式技术结合暖通设计的节能优化研究是此文的研究内容。我国寒冷地区建筑能耗高且舒适度差，本研究针对这一现状深入探究被动式技术和主动式暖通空调系统如何有机融合，采用实验测试加数值模拟的方法，挑选河北、山东等寒冷地区典型城市里的10栋建筑作研究对象并对传统建筑和优化设计建筑在能耗、舒适度上的差别加以对比分析。结果显示，若优化建筑朝向、围护结构以及窗墙比这些被动式设计，建筑热负荷能降15%~22%，使用高效保温材料和三玻两腔气密窗，围护结构传热系数可降45%甚至更多，将地源热泵和低温辐射供暖系统结合起来，与传统采暖方式相比节能30%~40%，智能化控制系统和建筑微气候调节策略的使用，可使室内舒适度PMV指标能提升0.5~0.8。构建寒冷地区建筑节能优化评价体系后，“外围护结构优先、自然能源利用最大化、主动系统高效化、智能控制精细化”这一设计方法论被提出且在实际工程里得到验证，证实该方法可行又经济。这一研究成果能够给寒冷地区绿色建筑设计提供理论支持和实践引导，节能减排效益明显且应用推广价值突出。

**[关键词]**寒冷低区；被动式技术；暖通设计；节能优化；建筑舒适度

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17983

中图分类号: TU201

文献标识码: A

## Research on Energy-saving Optimization of Passive Technology Combined with HVAC Design in Cold Low Zone

FENG Tan

Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The energy-saving optimization research of passive technology combined with HVAC design in cold low zone is the research content of this article. In response to the high energy consumption and poor comfort of buildings in cold regions of China, this study explores how passive technology and active HVAC systems can be organically integrated. Using experimental testing and numerical simulation methods, 10 buildings in typical cities in cold regions such as Hebei and Shandong were selected as research objects, and the differences in energy consumption and comfort between traditional buildings and optimized design buildings were compared and analyzed. The results show that optimizing passive designs such as building orientation, enclosure structure, and window to wall ratio can reduce building heat load by 15% ~22%. By using efficient insulation materials and three glass two chamber airtight windows, the heat transfer coefficient of the enclosure structure can be reduced by 45% or even more. Combining ground source heat pumps with low-temperature radiation heating systems can save energy by 30% ~ 40% compared to traditional heating methods. The use of intelligent control systems and building microclimate regulation strategies can improve indoor comfort PMV indicators by 0.5~0.8. After establishing an energy-saving optimization evaluation system for buildings in cold regions, the design methodology of "prioritizing peripheral protection structures, maximizing natural energy utilization, improving active system efficiency, and refining intelligent control" was proposed and validated in practical engineering, confirming its feasibility and economy. This research achievement can provide theoretical support and practical guidance for green building design in cold regions, with significant energy-saving and emission reduction benefits and outstanding application and promotion value.

**Keywords:** cold low zone; passive technology; HVAC design; energy-saving optimization; building comfort

### 引言

我国寒冷地区建筑能耗问题愈发严重，中国建筑节能协会2022年发布数据表明，寒冷地区建筑能耗约占全国建筑总能耗32%，且建筑能耗里采暖能耗占比达60%~70%，这一比例远远高于国际先进水平，2019—2023年期间，像河北、山东这样的寒冷地区的建筑单位面积采暖能耗平均为 $16.5\text{kgce}/\text{m}^2\text{a}$ 左右，较发达国家相同气候区要高出40%还多，能耗这么高既浪费资源又与我国“双

碳”战略目标相悖，并且寒冷地区建筑大多存在室内温度不均、有冷辐射、出现冷凝结露等舒适度方面的问题，2021年的调查数据显示超62%的用户对现有建筑的热舒适度不满意。

这一挑战面前，必然要选择建筑节能优化，因为传统建筑节能研究常把被动式技术和主动式暖通系统分开来研究而忽视二者间的协同作用，前者靠建筑自身设计如优化朝向、提高围护结构保温性能等削减能源需求，后者借

助机械设备达到室内环境要求。不过近些年国内外学者开始关注二者的融合研究，例如 Passive House 标准用于寒冷地区显示被动式和主动式技术相结合节能率达 70% 以上，但这些研究主要针对欧美地区对中国寒冷低区特殊的气候条件和建筑特点考虑不够，所以本研究着眼于中国寒冷低区的实际探寻被动式技术与暖通设计相结合的节能优化途径想要构建一套符合我国国情的设计方法论，这一研究会从建筑围护结构优化、自然能源利用、高效暖通系统集成以及智能控制策略等多个方面开展以给寒冷低区建筑节能减排和舒适度提升提供科学依据。

## 2 寒冷低区建筑环境特征与节能需求分析

### 2.1 寒冷低区气候特征与建筑热环境分析

建筑热环境直接受寒冷低区气候特征影响且建筑能源消耗模式以及节能技术路径的选择也由此决定。分析河北、山东这些典型寒冷低区 2019—2023 年的气象数据可知，当地年平均温度处于 10~15℃ 区间，采暖期约 120~180d，而夏季比较温和，极端最高温度一般不会超过 35℃，所以制冷需求不大。研究显示，寒冷低区建筑室内热环境存在诸多主要问题，例如冬季热损失严重、围护结构结露、冷桥热桥效应显著、室内空气干燥等，并且实测数据表明，传统建筑采暖期室内相对湿度常年不到 40%、围护结构内表面温度和室内空气温度差值往往超 6℃，从而热舒适度差且能源浪费厉害<sup>[1]</sup>。

### 2.2 传统建筑能耗构成与节能潜力

在寒冷低区，传统建筑能耗构成有明显特性，其中采暖能耗占到建筑总能耗的 60%~70%，这一比例比其他气候区高不少，并且 2021 年《中国建筑能耗研究报告》显示，寒冷低区单位建筑面积采暖能耗平均每平方米每年达 16.5kg 标准煤，是同纬度欧洲国家的 1.8 倍，能源利用率为 45%~55%，能耗这么高的主要原因在于建筑围护结构热工性能差、暖通系统效率低、能源调配不合理等。

寒冷低区 10 栋典型建筑的能耗经分析可知，采暖能耗里围护结构传热损失占比大概 40%、空气渗透与换气热损失占比约为 25%、系统运行效率低导致的浪费占比达 20% 且剩下的 15% 源于控制策略不当和使用行为方面的问题，这意味着优化围护结构性能、提升系统效率、完善运行控制策略是寒冷低区建筑节能的三个关键潜力点，按国际先进标准算，寒冷低区建筑节能潜力能达到 40%~55%，每年可节省标准煤 7.6 亿 t 并减少碳排放约 19.5 亿 t，经济效益和环境效益都很好。

### 2.3 低区建筑节能面临的技术挑战

在寒冷低区，建筑节能实践遭遇诸多技术挑战且这对节能策略的有效施行影响重大。首先，在严酷气候下，保温与气密性技术存在瓶颈，2022 年中国建筑节能协会的数据表明，寒冷低区建筑围护结构平均热工性能只有国际先进水平的六成多，热量流失严重。其次，传统暖通设备

和新型被动式技术协同匹配难，系统整合不好会使能效损失 20%~30%。而且能源结构单一、可再生能源利用率低（2023 年的数据显示寒冷低区可再生能源应用比例才 18.5%）、建筑微气候调控技术不成熟等也让节能改造更加复杂<sup>[2]</sup>。

技术经济性约束这一挑战同样不容小觑，2021—2023 年的调研数据表明，寒冷低区节能建筑初始投资相较于常规建筑要高出 15%~25%，虽然其长期运行成本较低但投资回报周期长，大概在 7 到 10 年之间从而影响了市场的推广热情，并且缺少区域性适用的技术标准，现有的技术规范没有周全考虑到寒冷低区的特殊性使得设计方案只能“一刀切”效果不好，再加上专业人才不够多、设计施工经验不足、智能控制系统成本太高这些问题让寒冷低区建筑节能所面临的系统性技术挑战更加严重，急需多学科交叉研究来取得突破。

## 3 被动式节能技术在寒冷低区的应用适应性研究

### 3.1 围护结构优化设计策略

寒冷低区特殊气候条件下，提高建筑被动式节能效果的关键在于围护结构优化，研究显示在这个地区外墙传热系数需控制在 0.15~0.20W/(m<sup>2</sup> K) 之间且屋顶传热系数要控制在 0.10~0.15W/(m<sup>2</sup> K) 范围内，此外外窗传热系数得低于 0.8W/(m<sup>2</sup> K)，与传统建筑对比这些指标表明围护结构传热性能提高了 65%~80% 从而能有效削减室内外热交换。具体技术措施方面，外保温系统加上中空腔墙体设计值得采用，这既能提升保温效果又可防止冷桥效应，屋顶使用复合保温层并设置防潮层和蓄热层，外窗选三玻两腔低辐射真空或者充惰性气体窗系统且优化窗框断热设计以使气密性达 0.3~0.5ACH50 标准。

### 3.2 自然通风与被动式太阳能利用

寒冷低区中自然通风和被动式太阳能利用得因地制宜且不同季节要采取不一样的策略，夏季时自然通风既能给室内降温又能改善空气质量，研究表明合理设计好的自然通风系统能使制冷需求降低 30%~45%，所以推荐把可控的交叉通风和竖向通风结合起来这种设计方案并且通风口的尺寸和位置要按照主导风向和风压分布来优化，此外还得考虑夏季夜间通风降温的策略以借助昼夜温差实现被动制冷的效果。

在寒冷低区，Passive Solar Utilization（被动式太阳能利用）相当关键，能很好地补足采暖能源需求。研究表明，经优化设计的直接得热系统可供应建筑采暖需求的 25%~35%，其设计策略有：建筑朝向需优化，最佳朝向是南偏东 5°~15°，窗墙比要合理设计，南向为 0.35~0.45，北向为 0.20~0.25，并且使用可调节外遮阳系统以兼顾冬季获取热量与夏季阻挡阳光的需求，同时结合蓄热墙、阳光间或者附加温室等技术来提升太阳能利用效率<sup>[3]</sup>。

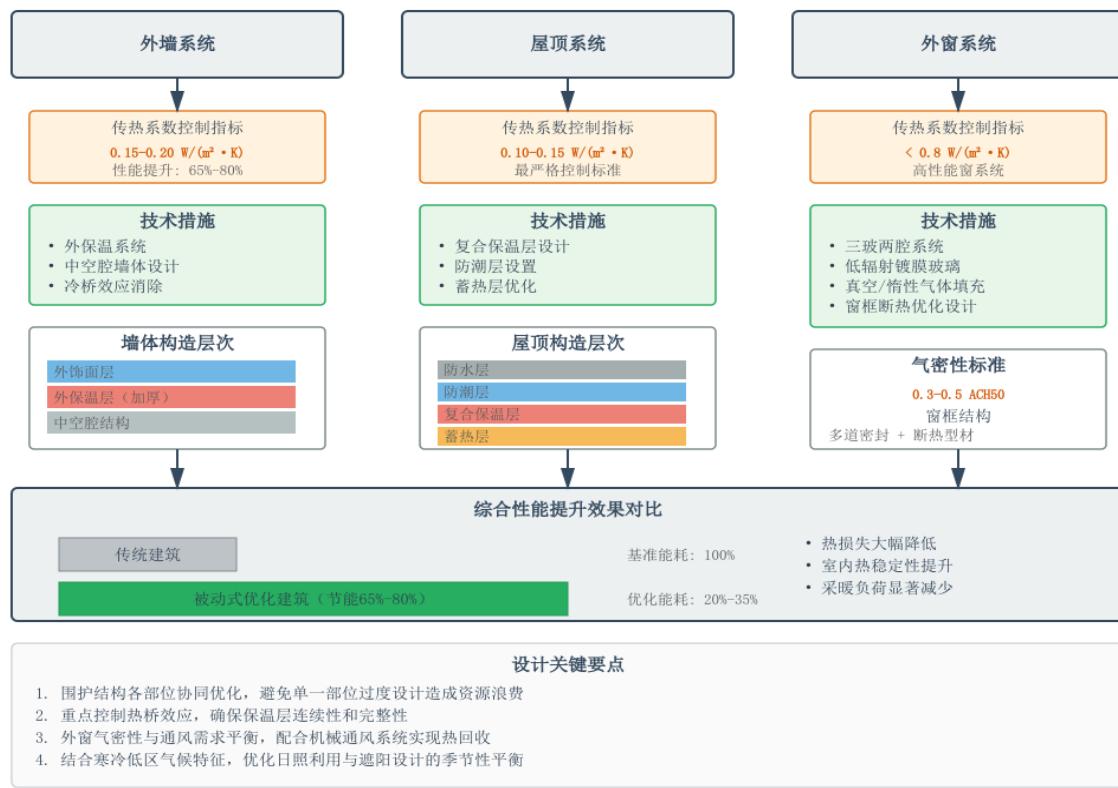


图 1 寒冷低区围护结构优化设计策略

### 3.3 相变材料与蓄热系统在寒冷低区的应用

在寒冷低区建筑里，相变材料（PCM）与蓄热系统有着独特优势，既能平衡昼夜温差又能提升热舒适度，有研究显示，选择相变温度处于  $18\text{--}22^\circ\text{C}$  之间且潜热值超  $150\text{kJ/kg}$  的有机相变材料可有效调控室内温度波动，在寒冷低区实际运用时，地板、墙体或者天花板系统能集成 PCM，按每平方米建筑面积配备  $2\text{--}4\text{kg}$  相变材料算，蓄热能力可达  $0.8\text{--}1.5\text{kWh/m}^2$ ，这不但可使采暖设备容量减少  $15\%\text{--}25\%$  而且能改善室内温度波动情况。

在寒冷低区，蓄热系统特别适宜跟被动式太阳能相结合应用，实验数据表明在河北、山东地区有个示范项目，那项目里用到由高密度混凝土蓄热墙和相变材料组成的复合系统后，太阳能利用率能提升 40% 还多。设计的时候要留意蓄热材料的选择与配置，一般情况下，导热系数处于  $0.8\text{--}1.5\text{W}/(\text{m K})$  且比热容在  $1000\text{--}1500\text{J}/(\text{kg K})$  的材料放在阳光直射的地方比较合适，并且蓄热系统需要和建筑暖通设计相互协调，过渡季节完全可以靠蓄热系统保持室内舒适的温度，从而减少设备启停次数，让系统能效得到进一步提高。

## 4 暖通设计与被动式技术的耦合优化方法

### 4.1 基于被动式设计的暖通系统负荷计算优化

寒冷低区建筑节能的关键在于对暖通系统负荷计算进行基于被动式设计的优化，因为传统负荷计算方法常忽

视被动式技术对建筑热环境的影响从而使系统设计出现过度冗余的情况。经本研究对河北、山东等寒冷低区 10 栋建筑实测数据分析可知，若把建筑朝向优化、围护结构热工性能、窗墙比调整等被动式设计因素纳入负荷计算模型，热负荷计算值会更贴近实际值且误差率能从传统的  $15\%\text{--}25\%$  大幅降至  $5\%\text{--}8\%$ <sup>[4]</sup>。2020—2023 年实测数据显示，暖通系统优化后容量可减少  $15\%\text{--}22\%$ 、初投资约降 12% 并且还能避开设备低负荷运行引发的效率下降问题。建立一个涵盖微 climate 影响、热桥修正、动态热工特性的综合负荷计算模型，就能更精确地体现被动式设计给建筑能耗带来的实际影响，进而给暖通系统精准设计提供科学依据。

### 4.2 暖通系统与被动式技术协同控制策略

要使建筑全年能效达到最大值，暖通系统和被动式技术的协同控制策略是关键，研究人员分析寒冷地区季节性气候特征后构建起依据室内外环境参数的多目标控制算法，这一策略有三个主要层次，其一，利用气象预报和历史数据构建预测模型，让系统运行模式在 24~48h 前就作出调整，其二，参照室内温湿度、 $\text{CO}_2$  浓度、PMV 指数等实时监测参数，动态调节被动通风和机械通风的比例，其三，综合建筑热质量特性与室外温度波动规律，优化供暖系统启停时间以及供水温度曲线，2021—2022 年供暖季实验数据表明，在同样室内舒适度下，运用协同控制策

略，系统能耗能够降低 18%~25%，室内温度波动幅度减少 45%，PMV 指标提升 0.6~0.8，并且协同策略充分借助日间太阳辐射热和建筑蓄热特性，大幅削减夜间能源消耗，给寒冷地区建筑带来新的节能办法。

#### 4.3 能源系统集成与运行模式优化

被动式与主动式技术深度融合中，能源系统集成与运行模式优化是重要一环，由于寒冷地区冬天特别冷且日照时长不足，所以本研究提出以地源热泵为中心并把太阳能热水系统和低温辐射供暖相结合的多能互补系统架构，经对不同能源系统组合方案的经济性、环境效益模拟分析后，确定出不同建筑类型适用的最优配置方案，运行数据表明，和传统燃煤锅炉系统比起来，这个集成系统能减少 35%~42% 的一次能源消耗且碳排放可降低 45% 还多，并且根据建筑能耗监测平台收集 2019—2023 年的数据构建起季节性运行模式转换策略，过渡季节先用自然通风和被动式蓄热技术，严寒时候则采用多种能源协同供暖的模式，从而有效平衡能源效率与舒适度需求。

### 5 结论

本研究深入探究寒冷低区被动式技术和暖通设计后给出一套系统化的节能优化方法论，首先在暖通系统负荷计算时把被动式设计因素加进计算模型能大大提高计算精度并防止系统过度设计从而让初投资和运行成本都降下来，其次暖通系统和被动式技术协同控制策略充分使用建筑自身调节能力与机械系统优势互补让能效和舒适度双双提升，再者以地源热泵和太阳能为基础且季节性运行模式优化过的多能互补系统给寒冷低区建筑提供可持续能源方案，研究数据表明综合运用这些优化方法能使寒冷低区建筑能耗减少 30%~40% 且室内舒适度 PMV 指标提

高 0.5~0.8，节能减排效益相当显著。

我国建筑业是能源消耗的主要领域之一，国家统计局数据显示到 2022 年时全国总能耗中建筑能耗占比约为 27.5% 且寒冷低区建筑采暖能耗特别突出，所以本研究要是有成果对寒冷低区绿色建筑发展就意义重大，后续研究会进一步探寻智能建筑技术和被动式设计深度融合的方式并且像人工智能辅助优化设计、物联网监控系统以及先进材料应用这些方向都会被涵盖进去，另外相关部门最好完善寒冷低区建筑节能标准体系并加大政策激励力度以促使节能技术在市场得到广泛应用，依靠产学研协同创新不断提高寒冷低区建筑节能水平和居住质量从而为达成“双碳”目标以及建筑行业可持续发展作出积极贡献<sup>[5]</sup>。

#### 【参考文献】

- [1] 吴迪, 刘立, 李晓俊, 等. 基于多目标优化的被动式低能耗建筑技术研究——以寒冷地区居住建筑为例[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018(4):104-110.
  - [2] 宋锴. 寒冷地区近零能耗建筑围护结构参数优化研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2024.
  - [3] 王本蓬. 青岛气候特征下中小学校被动式节能技术应用研究——以教学楼为例[D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2019.
  - [4] 周健. 基于高维多目标的建筑被动式设计研究——以寒冷地区村镇住宅为例[D]. 天津: 天津大学, 2022.
  - [5] 胡家磊. 温和地区近零能耗居住建筑热工设计模式与参数优化研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2022.
- 作者简介：冯探（1991.4—），毕业院校：石家庄铁道大学，所学专业：建筑环境与设备工程，当前就职单位：石家庄市建筑设计院有限责任公司，职称级别：高级工程师。

Call for  
Papers

# 征 稿

《工程建设》由新加坡Viser Technology Pte.Ltd.主办, ISSN: 2717-5375 (印刷)。本刊长期以来注重质量, 编排规范, 选稿较严格, 学术水平较高, 深受高校教师及科研院所研究人员青睐。本刊为开源(Open Access)期刊, 出刊的所有文章均可在全球范围内免费下载, 文章被万方数据库、维普网等权威数据库收录。

期刊针对工程项目建设的全过程, 重点报道工程建设过程的科研成果、先进技术、高效设备、新型材料、工程项目管理经验等, 突出工程领域新技术、新工艺、新方法, 反映建筑、市政、交通等工程领域新成果、新进展, 促进工程技术行业的交流与成果展示, 为推动国际工程技术和科学技术发展服务。

《工程建设》期刊的主要栏目有:

工程管理、建筑工程、市政工程、机械工程、石油工程、矿山工程、冶金工程、路桥交通、勘察测绘、施工技术、建筑设计、节能环保、材料科学等。

鼓励工程建设各领域的专业技术人员和管理干部以及大专院校相关专业的师生和科研人员来稿, 有关国家科技计划、自然科学基金和各种部门、地方、院所科技基金资助项目的文章优先发布。

征文格式与要求:

(1) 论文要求: 论点新颖, 论证充分; 设想可行, 结论可靠; 条理分明, 书写清楚, 用字规范, 上交电子文件(word格式)。

(2) 论文格式: 题目、作者姓名、工作单位、省份及邮政编码、中英文内容摘要(150字符-300字符为宜)及关键词(3-5组为宜)、正文、参考文献。(附个人简介、邮箱、联系方式及详细收件地址, 如: 省、市、区、路)。

(3) 论文篇幅: 字符数要求在5000-8000字符之间。

投稿网址: [www.viserdata.com](http://www.viserdata.com)



Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

[www.viserdata.com](http://www.viserdata.com)

