

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(旬刊·1993年创刊)

2025年5月 第13期(总第602期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

社长、总编：万江心

社长助理：秦 强

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 翌 官慧琪 吴彩云

美术编辑：王 敏

运营：李瑞鹏

外联：张娅玲

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路26号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

广告经营许可证：5300004000063

运营总代理：云南华泽文化传播有限公司

印刷单位：昆明滇印彩印有限责任公司

邮政发行：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2025年5月5日

定价：人民币15元

## 版权声明：

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

# 目录 Contents

## 科技博览

- 001 法标项目桩底压浆施工技术分析  
..... 张学斌
- 004 基于PLC的工程机械电气控制系统设计  
..... 魏耀轲, 宋 维, 黄 春
- 007 机械电气设备能效评估与节能技术研究  
..... 李兆瑞, 孙中顺
- 010 仓式泵气力输送设备在长距离物料输送中的应用研究  
..... 张付栋
- 013 高分子材料在真空压缩袋中的应用及其气密性能研究  
..... 徐伟鑫
- 016 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构力学性能分析  
..... 冯立峰, 温 平, 蒋天伙

## 智能科技

- 019 金属非金属地下矿山监测监控系统研究  
..... 程生楷
- 022 有色金属矿山电气自动化的通信网络构建  
..... 张 壮
- 025 机械设备管理中信息化系统的应用与发展趋势  
..... 钟 霞
- 028 电子技术仪器仪表系统中的智能化控制技术研究  
..... 刘建杰
- 031 基于人工智能技术的配网电力设备运维检修系统研究  
..... 马晨昶
- 034 精密铜管自动化生产过程中智能化控制技术的应用研究  
..... 代吉伟
- 037 数智安环理论在“物联网+”模块化中水调度系统研发中的应用  
..... 杨 浩, 李 培, 吴 磊, 程 丽

# 目录 *Contents*

## 应用技术

- 040 市政雨水泵站深基坑支护施工技术.....徐汉橙, 宋坤, 王钊
- 043 降水技术在建筑深基坑施工中的应用.....姚培超
- 046 大跨度采光顶施工技术难点与应对策略.....关奇, 顾松华, 华正滨
- 049 桥梁跨越复杂地形问题及技术应对措施.....胡文明
- 052 房建工程地下结构无缝防水施工技术分析.....程前
- 055 房屋建筑工程中钢管混凝土施工技术研究.....齐菁
- 058 填充墙砌体工程施工技术在建筑工程中的应用.....刘化芝, 田雪皎
- 061 建筑工程施工中钢筋混凝土质量通病及控制措施分析.....姜辉, 常明迁

## 科创产业

- 064 NQI 信息化平台建设探索与实践研究.....王剑, 张泽峰, 郭樱萍
- 067 电气自动化技术在有色金属矿山开采中的应用.....朝鲁门
- 070 冷凝法回收石脑油卸车尾气的工艺改进探究.....王洋
- 073 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用探析.....杨云江
- 076 建筑结构优化对工程造价及电气系统的影响分析.....张海洋, 张传帅, 庄永培
- 079 BIM 技术在施工总承包项目管理中的应用价值研究.....杨雨濛
- 082 建筑项目施工阶段工程变更对工程造价的影响分析.....姜华伟

## 技术管理

- 085 市政污水管网工程施工技术探讨.....徐川
- 088 机械设备管理与故障诊断技术分析.....崔振庆, 王海申, 张春风
- 091 渔光互补光伏项目施工安全管理研究.....尹亮
- 094 公路桥梁建设中施工质量问题及防范对策.....陈雁雁
- 097 建筑工程施工安全管理问题与防范对策探讨.....李向新
- 100 建筑工程施工质量管理的关键要点与控制策略.....江国庆
- 103 建筑工程项目中施工进度管理的影响因素与解决方案.....马亚

## 科学论坛

- 106 高速公路桥梁的荷载问题与增强对策.....笪良宝
- 109 现代桥梁结构设计中的关键技术分析.....陈宝
- 112 道路施工质量控制关键技术要点探讨.....常艳茹
- 115 道路桥梁在极端气候条件下的耐久性研究.....沙建
- 118 桥梁设计中的抗震能力不足问题及技术对策.....张天宇
- 121 建筑工程供热通风与空调系统故障诊断及预防.....蔡辉, 李位清, 郑志远, 李全年
- 124 非饱和和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度探讨.....晏权

# 法标项目桩底压浆施工技术分析

张学斌

(中交路桥建设有限公司, 北京 101100)

**摘要** 科特迪瓦阿比让 Cocody 桥(建成后以现任总统名字命名为瓦塔拉大桥)项目采用法国规范设计。法标区压浆施工中的相关控制参数是通过本地区类似项目的经验和现场压浆试验的采集数据获取。以法标压浆规范的相关规定为依据,以本地区类似项目的经验为参考,在现场开展土层渗透系数、土层标贯值(SPT)、地勘报告、现场压浆试验等现场测试工作,法标认为现场测试试验和压浆试验可以验证类似项目经验值是否适合本项目,或对经验值进行修正以满足本项目的压浆施工要求。法标的压浆控制指标的侧重点与中国标准不同,主要以压浆压力值为主要控制要素,压浆流量值和压浆量作为辅助参考值进行控制。压浆试验除了验证压浆方法外,也可以测试压浆水泥浆的性能和压浆设备的性能是否能满足压浆需求。

**关键词** 压浆; 渗透系数; 标贯值

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.001

## 0 引言

瓦塔拉桥项目前期桩基荷载试验证明桩基的桩侧承载力较低,为了有效控制桩基工程数量,经过反复论证,桩端承载能力取值最小值达到了 4 MPa,最大值达到了 5.005 MPa,远超过中国标准的中、粗砂层的桩端承载力(1 450 kPa),业主综合各方意见,最终采用法国标准的取值,同时为了保证结构安全,确定采用桩底压浆技术来保证桩基结构受力安全。

## 1 测试试验

按照法国标准 NF EN 12715-2000 特殊岩土工程施工一注浆中规定,在开始压浆前期应进行现场勘查,主要勘查项目包括土层渗透系数、土层标贯值(SPT)、地勘报告、现场压浆试验等。

## 2 压浆材料

### 2.1 水泥浆配置

法国标准 NF EN 12715-2000 规定压浆水泥浆的使用,应以压浆试验期间获取的经验为依据或以本地区类似项目的经验为依据,确定拟用水泥浆性能的极限标准。所用水泥浆的性能应符合相关规范和环境要求。应根据测试试验数据评估水泥浆的使用性能,并选择性掺入外加剂来改善水泥浆的性能。

外加剂为搅拌工序中少量加入的有机产品或无机产品,以改良水泥浆的性能,可控制拌制后水泥浆的参数,如粘度、凝固时间、稳定性、强度、抗力、粘聚力和渗透性。

### 2.2 水泥浆检测

现场进行压浆作业前需要先检测制备的水泥浆是否满足设计要求,以保证水泥浆能顺利压入桩底并起到加固地层的作用。水泥浆的检测项目主要包括黏度和比重,黏度测量使用马氏漏斗,漏斗孔直径为 4.75 mm,测试的粘度为 946 mL 的浆液流过漏斗孔的时间,比重测量使用比重计<sup>[1]</sup>。

浸润压浆采用灰水比 C/E=1.0 的浆液,添加 2% 的膨润土,用于提高水泥浆的稳定性,理论黏度控制在 30~40 s,比重控制在 1.47~1.53 g/cm<sup>3</sup>,膨润土提前两天进行拌制,以便完全膨化。收紧压浆采用灰水比 C/E=1.67 的浆液,添加 0.1% 的 Tempo12 型减水剂,用于提高水泥浆的流动性,改善水泥浆的工作性能,配比为水泥:水:外加剂=1 060:636:1.066,理论黏度为 36~45 s,比重为 1.67~1.73 g/cm<sup>3</sup>。

## 3 压浆设备

压浆设备一般包括压浆泵、制浆机、储浆筒、灌浆记录仪、压力和流量传感系统等,本项目根据监理要求压力和流量需要定量输出,对已有的压浆泵进行现场改良,增加一台小型变频器,可满足定速输出的要求。

### 3.1 压浆设备配置

法国标准 NF EN 12715-2000 规定应根据拟用压浆技术选择压浆泵和压浆系统。应在距压浆点尽可能近的地方测量压浆压力损失。压浆系统应能抵抗可能发生的最大压力冲击波。

一般情况下,在水泥浆压浆泵和钻孔口处测试压浆压力。然而,输送系统中水头的变化、摩擦损耗会使此“工作压力”与作用于地层的“有效压力”不同,需要进行现场测试压力损失情况,准确掌握最大压力的取值范围(见表1)。

泥浆输送管应具有足够的安全系数,且可承受最大预期泵压力。该管道直径应容许足够大的压浆流量,以避免搅拌好的水泥浆在管道中堵塞。在压浆过程中应对储浆容器中的浆液进行不间断的搅动,直到水泥浆压注完成,以防沉降<sup>[2]</sup>。

### 3.2 压浆设备测试

在开始压浆前要提前进行压浆设备标定,主要为压力值和压浆流量。采用清水进行,按照压浆方案的流量值将清水注入100 L的量桶内,然后对比压浆记录仪显示的流量值和量桶内的水量是否相同;再进行压力测试,将压浆管(可承受22.5 MPa的压力)一端与压浆机相连,另外一端与控制阀相连,测试时将控制阀关闭,进行加压,缓慢连续加压,对比压浆记录仪显示的压力值和压力表显示的实时压力值是否相同。如果标定时发现设备异常,需要更换设备重新标定。完成压力和压浆量的测试后,才可进行正常的压浆施工。

## 4 压浆施工

桩底压浆工程是在钻孔灌注桩成桩后,通过预设于桩身内的压浆导管及与之相连的桩端压浆器向土层中压入浆液的技术,一般通过控制压浆压力、压浆流量、压浆量可将泵送的水泥浆压入桩底岩土层,对桩底一

定范围的砂层及桩底沉渣进行挤密及固结,从而能有效地修复桩基固结的工艺缺陷,并能有效地提高桩基的承载能力<sup>[3]</sup>。

### 4.1 压浆施工方法的选取

根据阿比让地区类似压浆项目的经验,采用浸润压浆(Injection D'imprégration)和收紧压浆(Injection D'Serrage)两个阶段。浸润压浆是用水泥浆填充渗透性土层颗粒间的可进入孔隙,而不破坏地层的完整性。收紧压浆是验证浸润压浆的压浆效果,同时进一步对桩端砂层孔隙进行封堵,使桩端承载能力满足设计要求。

### 4.2 工艺原理

该工艺的基本原理是在混凝土灌注桩的基础上进行桩底压浆工序,在混凝土灌注桩成桩后通过预埋于桩身的取芯管和声测管压入纯水泥浆或其他特制的水泥浆,改善和固化桩端砂层,使桩底一定范围的砂层得到强化,从而提高桩基的整体承载力<sup>[4]</sup>。

### 4.3 施工工艺流程

桩基桩底压浆工艺流程主要包括压浆设备调试→地质钻机就位、水泥浆配置→钻孔→安装注浆塞→浸润压浆→洗孔→第二次钻孔→收紧压浆<sup>[5]</sup>(见图1)。

### 4.4 单桩压浆施工顺序

本项目共有4种不同直径的桩基,采用已有声波探测管作为压浆管道,根据法标NF P94-160-1超声波检测规定,不同桩径的声波探测管的数量也不同,1 200 mm的桩设置3根声测管(内径80 mm/外径90 mm)和1根取芯管(内径102 mm/外径114 mm),1 600 mm

表1 压力损失测量数据

记录时间	流量(L/min)	压浆泵压力 P1 (MPa)	压浆点压力 P2 (MPa)	压力损失 (%)
0:00:00	40.00	1.14	1.13	0.9
0:00:10	40.00	1.17	1.16	0.9
0:00:20	40.00	1.07	1.05	1.9
0:00:30	40.00	1.13	1.11	1.8
0:00:40	40.00	1.44	1.41	2.1
0:00:50	40.00	1.89	1.86	1.6
0:01:00	40.00	1.86	1.85	0.5
0:01:10	40.00	2.03	2.01	1.0
0:01:20	40.00	2.05	2.04	0.5
0:01:30	40.00	3.13	3.11	0.6

(注:在现场压浆压力损失测量,在压浆泵和压浆点处各安装一个压力计,压浆管路采用50 m长的耐磨高压胶管,压浆管可承受的最大压力是22.5 MPa,选择设计压浆的最大流量进行试验,同时采集两点的压力值。)

的桩设置 4 根声测管 (80/90) 和 1 根取芯管 (102/114), 2 000 mm 和 2 200 mm 的桩设置 5 根声测管 (80/90) 和 1 根取芯管 (102/114)。

按照现场压浆试验情况和类似压浆项目的经验可知, 每根桩基要严格按照顺序进行压浆, 采用 S 形的顺序可以减少因压浆固结砂层而对周围未压浆管道的压浆量的影响, 也可以对桩侧沉渣起到较好的改善效果。

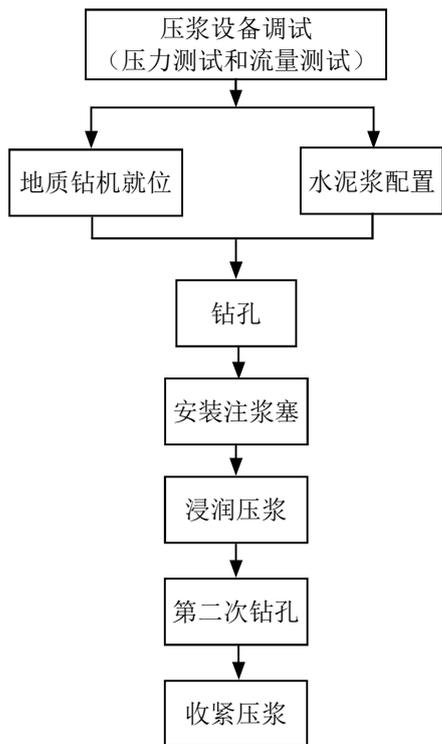


图 1 压浆施工工艺流程图

#### 4.5 浸润压浆

浸润压浆的结束标准根据压浆量和压力值来判断, 压浆过程中进行流量控制, 达到 1 MPa, 或者设计压浆量, 即可停止压浆。

浸润压浆按照 40 L/min 的速度和 1 MPa 的控制压力开始压浆, 如果以 40 L/min 的速度压浆时, 压力达到 1 MPa, 但是压浆量距离理论压浆量很远时, 则将流量调到 60 L/min, 直到压力达到 4 MPa, 如果未出现上述情况, 则: (1) 如果 V 达到 300 L, 且压力等于 1 MPa, 则停止压浆; (2) 如果在未达到 1 MPa 压力的情况下压浆量达到 V=300, 则将流量降低至 20 L/min, 总共注入 400 L, 并尝试达到 1 MPa 的压力, 如果达到 1 MPa, 则停止压浆; (3) 如果未达到 1 MPa 的压力, 则停止压浆一小时, 以 20 L/分钟的速度恢复并尝试达到 1 MPa 的压力, 但总压浆量不大于 500 L。

单根压浆管压浆结束后, 使用注浆塞关闭注浆管,

防止其他管路压浆时浆液从已压浆管溢出, 其他管按照同样的方法进行。单个管子浸润压浆结束 1 个小时后, 用清水将声测管底部 5 m 以上的水泥浆进行置换。

#### 4.6 收紧压浆的控制标准

收紧压浆的结束标准按照压浆量和压力值来综合判断, 压浆过程中进行流量控制, 在浆量达到设计值和压力大于 4 MPa 时, 即可停止压浆。

收紧压浆按照 20 L/min 的速度开始注浆, 压力值控制在 4 ~ 6 MPa, 具体操作如下:

1. 如果压力达到 4 MPa, 但是未压入水泥浆, 则将流速增加到 60 L/min, 并将压力控制在 4 ~ 6 MPa, 持续稳压 5 min, 即可停止压浆。

2. 如果能够压入水泥浆 (并接近 V), 则: (1) 达到 4 MPa 的压力且未达到体积 V, 则保持压力 5 min 后停止注浆; (2) 如果达到 V 并且压力大于 4 MPa, 则停止注浆; (3) 如果达到 V 却未达到 4 MPa 的压力, 则将流量降低至 15 L/分钟, 并尝试达到 4 MPa 的压力; (4) 如果未达到 4 MPa 的压力但浆量达到 1.5 V, 则停止注浆一小时, 以 15 L/min 的速度恢复注浆, 并尝试达到 4 MPa 的压力; (5) 如果达到 2 V 并达到 4 MPa 的压力, 则停止注浆; (6) 如果达到 2 V 而未达到 4 MPa 的压力, 则停止注浆一小时, 以 15 L/min 的速度恢复注浆, 并尝试达到 4 MPa 的压力 (不超过 3 V), 并停止注浆。

#### 5 结束语

法国压浆规范 NF EN 12715-2000 与欧标压浆规范 EN 12715:2000 具有等同性, 关于压浆没有规定详细的参数和指标, 只提供了如何获得这些参数和指标的方法, 基本是通过施工地区类似项目的经验值和现场试验的数据来确定最终的压浆方案及相关参数。法标区压浆施工是以法标为依据, 在现场反复试验的情况下, 由监理工程师最终确认压浆施工的方法和各项指标。

#### 参考文献:

- [1] 吴善印. 桥梁工程大直径超深钻孔桩桩底压浆施工技术 [J]. 智能城市, 2021(10):35-36.
- [2] 许志伟. 建筑工程灌注桩后注浆施工技术研究 [J]. 工程技术研究, 2024,09(18):85-87.
- [3] 罗康权. 坝基固结灌浆施工技术研究 [J]. 广东建材, 2024,40(04):119-121.
- [4] 张勇. 建筑工程后注浆施工技术要点 [J]. 砖瓦世界, 2024(18):52-54.
- [5] 尹坤文. 建筑工程施工中灌注桩后注浆施工技术 [J]. 科学技术创新, 2024(09):166-169.

# 基于 PLC 的工程机械电气控制系统设计

魏耀轲<sup>1</sup>, 宋维<sup>2</sup>, 黄春<sup>3</sup>

- (1. 北京牧晨机电有限公司, 北京 102308;  
2. 中国汽车工业配件销售有限公司, 北京 100142;  
3. 北京神舟天辰物业服务有限公司, 北京 100081)

**摘要** 本文针对工程机械电气控制系统提出了一种基于 PLC 的设计方案, 并详细阐述了 PLC 在工程机械控制领域的应用优势, 从硬件架构、软件设计等方面给出了系统总体设计思路, 重点研究了 PLC 的选型与硬件配置、传感器与执行器的选型及接口设计、人机界面设计、通信网络设计等关键技术, 并对 PLC 程序的总体设计、主控程序流程、关键控制功能模块化设计、故障诊断等进行了深入探讨, 以期对相关人员进行参考。

**关键词** 工程机械; PLC; 电气控制; 总体设计方案

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.002

## 0 引言

随着工程机械行业的快速发展和智能化需求的不断提升, 传统的继电器控制方式已难以满足日益复杂的控制要求。可编程逻辑控制器 (PLC) 以其良好的可靠性、灵活性和功能性, 在工程机械电气控制领域得到了广泛应用。基于 PLC 技术的工程机械电气控制系统设计, 已成为学术界和工业界普遍关注的研究课题。

## 1 PLC 的基本原理

PLC (可编程逻辑控制器) 是一种专门为工业控制设计的数字运算控制装置, 它采用可编程的存储器来存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等功能的指令, 通过数字或模拟式输入 / 输出来控制各种类型的机械设备或生产过程。

PLC 的基本工作原理是: 首先通过编程设备将控制程序写入 PLC 内存, 然后 PLC 按照程序指令周期性地从输入端获取现场信号, 经过用户编写的程序逻辑运算处理后, 将控制结果信号输出到输出端, 实现对被控对象的自动控制<sup>[1]</sup>。与传统的继电器控制系统相比, PLC 具有以下特点: (1) 采用标准化的硬件结构和模块化设计, 具有很强的通用性和灵活性; (2) 控制程序易于编写、修改、调试和维护, 软件设计较为简单; (3) 运行可靠性高, 能够适应恶劣的工业环境; (4) 体积小、集成度高、功耗低, 可显著节省安装空间和成本; (5) 具有较强的通信功能, 支持多种现场总线和以太网协议; (6) 丰富的逻辑运算和数据处理指令, 编程语言规范, 功能不断丰富; (7) 诊断和监控功能完善, 可实现远程编程、调试与维护。

## 2 PLC 在工程机械电气控制系统中的优势

### 2.1 灵活性与可编程性的完美结合

对于复杂多变的工程机械控制需求, PLC 可以通过梯形图、指令表等多种编程语言, 将设计者的控制思路转化为具体的控制程序。这种可编程性使得控制系统能够随着需求的变化而灵活调整, 无需更改硬件结构<sup>[2]</sup>。同时, PLC 还支持模块化编程, 可将复杂的控制任务分解为多个独立的功能模块, 提高程序的可读性和可维护性。

### 2.2 卓越的可靠性与环境适应性

工程机械往往需要在恶劣的环境条件下长时间连续作业, 这对控制系统的可靠性提出了极高要求。PLC 采用高度集成的硬件设计和严格的生产工艺, 具有极强的抗干扰能力和环境适应性。它可以在振动、冲击、高低温、潮湿等极端条件下稳定运行, 有效避免了因环境因素导致的控制失效。PLC 内置了多种故障诊断和容错机制, 能够实时监测系统状态, 及时发现和隔离故障, 确保控制系统的高可用性。

### 2.3 强大的通信与网络化能力

随着工程机械智能化水平的不断提升, 设备之间的协同作业和远程管理已成为必然趋势。PLC 凭借其强大的通信接口和网络化能力, 在这一趋势中扮演着关键角色。现代 PLC 支持多种工业以太网协议和现场总线标准, 可以方便地实现设备间的数据共享和实时通信<sup>[3]</sup>。基于 PLC 的控制系统还可以与上位机、SCADA、MES 等高层系统无缝集成, 实现生产数据的采集、分析和优化。通过网络化的 PLC 控制系统, 工程机械的作

业状态和健康情况可以实时上传至云端平台,便于远程诊断和预测性维护,大幅提升设备管理的智能化水平。

### 3 基于 PLC 的工程机械电气控制系统总体设计方案

#### 3.1 控制系统需求分析

在基于 PLC 的工程机械电气控制系统设计中,控制系统需求分析是至关重要的第一步。只有深入理解工程机械的功能需求和性能指标,才能够设计出满足实际应用的控制方案。

首先,需要明确工程机械的作业工况和技术参数,如载荷容量、行驶速度、动作频率等,这些参数直接决定了控制系统的硬件配置和性能要求。其次,要分析工程机械的动力系统特点,如采用液压、电液混合还是纯电驱动,不同的驱动方式对控制精度、响应速度等有不同要求。

此外,还需考虑工程机械的操作模式和人机交互需求。例如:是采用手动操作杆、遥控器,还是触摸屏等操作方式,不同的操作模式对于 PLC 输入输出接口的类型和数量有不同要求。同时,还要分析控制系统的安全性和可靠性需求,如紧急停机、故障诊断、冗余保护等功能。

最后,不可忽视的是控制系统的可扩展性和互联互通性需求。随着工程机械的智能化发展,控制系统需要预留足够的接口和协议支持,以便与其他系统实现数据交换和远程管理。

只有通过全面细致的需求分析,才能以此为基础,合理地规划 PLC 硬件选型、I/O 配置、软件架构等总体设计方案,从而实现高效可靠、智能协同的工程机械电气控制系统。

#### 3.2 硬件架构设计

##### 3.2.1 PLC 选型与硬件配置

PLC 选型需全面评估控制对象的 I/O 点数、处理速度、存储容量、通信接口、可靠性等多方面需求。对于大型工程机械,宜选用高性能的模块化 PLC,如西门子 S7-1500 系列,其卓越的运算能力、丰富的功能模块和灵活的扩展能力,能够满足复杂的控制需求。PLC 硬件配置需合理规划机柜布局,综合考虑电磁兼容性、散热、维护等因素。电源模块应选用冗余设计,确保系统可靠运行<sup>[4]</sup>。根据现场设备分布情况,合理配置数字量、模拟量、特殊功能等 I/O 模块,并预留足够的余量。对于一些关键部件,如行走机构、回转平台等,可考虑配置独立的控制单元,提高系统的可维护性和可靠性。科学合理的 PLC 选型与硬件配置是实现高性能控制系统的基础。

##### 3.2.2 传感器与执行器选型及接口设计

工程机械电气控制系统通过各类传感器采集机械的位置、速度、压力等状态信号,并通过执行器如比例阀、伺服电机等实现运动控制。传感器选型需根据测量对象的物理特性、量程、精度、响应速度、工作环境等因素综合确定。常用的传感器包括编码器、压力传感器、倾角传感器等。执行器选型需匹配负载的额定功率、调速范围、控制精度等参数,并满足防爆、防护等特殊要求。液压比例阀、伺服阀是工程机械常用的执行器。传感器与执行器的接口设计需考虑信号类型、电平标准、屏蔽接地等细节,确保信号完整性和抗干扰性。对于一些特殊传感器和执行器,可能需要设计专用的信号调理电路或驱动电路,以满足 PLC 的接口要求。合理的传感器与执行器选型及接口设计是实现精确可靠控制的关键。

##### 3.2.3 人机界面设计

人机界面(HMI)是操作人员与控制系统交互的重要媒介,直接影响到设备的操控性和信息查询的便利性。工程机械的 HMI 通常采用嵌入式触摸屏,并根据操作人员的习惯和机械特点进行定制化设计。界面布局应清晰直观,重要信息醒目,并支持多语言显示。交互方式应简洁高效,提供多级菜单、快捷键、手势等操作方式。HMI 还应具备数据记录、故障诊断、参数设置等实用功能,并提供必要的安全访问机制<sup>[5]</sup>。为适应恶劣环境,HMI 需选用高亮度、宽温、全密封的工业级产品,并合理设计面板开孔和安装方式。

##### 3.2.4 通信网络设计

工程机械电气控制系统通常采用分层分布式的网络架构,不同层级和功能单元之间需要通过可靠高效的通信网络实现数据交换和指令传输。现场层宜采用工业以太网,如 PROFINET、EtherCAT 等,连接 PLC、I/O 模块、智能传感器等现场设备,提供实时的数据采集和设备协同。控制层则采用 PROFIBUS-DP 等现场总线,连接各个功能部件的控制单元,实现机械动作的同步控制。车载网络方面,可选用 CAN 总线连接发动机、变速箱等核心部件。考虑到工程机械的移动作业特点,还需合理规划无线通信网络,如 WiFi、5G 等,以实现远程监控和大数据分析。通信电缆选型和布线敷设需满足机械布局 and 运动特性,必要时采取耐油、屏蔽等措施。

#### 3.3 软件架构设计

##### 3.3.1 PLC 程序总体设计

PLC 控制系统的程序设计应遵循模块化、结构化的原则。首先需要根据工程机械的功能需求和工艺流程,

合理划分控制任务，确定程序的总体架构。一般采用主程序+子程序的结构，主程序负责调和协调，子程序负责具体的控制功能。子程序宜根据功能进行模块化设计，提高程序的可重用性和可维护性。在程序设计过程中，还需统筹考虑任务的执行周期、优先级、数据依赖等因素，合理安排程序的执行顺序和流程。对于一些实时性要求高的任务，如伺服控制，可采用中断或定时器机制。为提高程序的可靠性，应充分利用PLC的诊断和容错功能，并设计合理的异常处理逻辑。程序总体设计为后续的详细编码和调试奠定了基础。

### 3.3.2 主控程序流程设计

主控程序是PLC控制系统的核心，其流程设计直接影响系统的运行效率和逻辑正确性。主控程序通常采用循环扫描方式，按照固定的周期执行I/O刷新、逻辑运算、数据处理等任务。程序开始时，应进行必要的初始化，如变量清零、参数设置等。然后进入主循环，依次执行各个控制子程序，如顺序控制、PID调节、安全监控等。在每个循环末尾，需进行I/O刷新，将运算结果输出到执行器，并读取传感器的最新状态。主程序还需处理通信任务，如从SCADA接收指令，向MES上报数据等。为确保实时性，主循环的执行时间应控制在固定范围内，必要时可采用看门狗机制防止程序死循环。

### 3.3.3 关键控制功能模块化设计

1. 动作控制模块。工程机械的动作控制是PLC程序的重要组成部分。动作控制模块负责协调各个执行机构，完成装载、行走、转向等复杂操作。设计时需充分考虑机械结构和液压系统的特点，合理规划动作序列和逻辑条件。对于一些关键动作，如起重臂伸缩，需实现平稳过渡和速度控制，避免冲击和振动<sup>[6]</sup>。此外，还需考虑动作的安全保护，如限位、超载等异常情况的检测和处理。动作控制的模块化设计可提高程序的可读性和可维护性。

2. 速度控制模块。工程机械的速度控制直接影响作业效率和操作精度。速度控制模块通过调节执行器如比例阀、伺服电机等的输出，实现对机械运动速度的精确控制。常用的控制算法包括PID、模糊控制、自适应控制等。在设计速度控制模块时，需合理设置控制参数，如采样周期、积分限幅等，以获得最佳的动态响应和稳态精度。此外，还需考虑速度与位置、力矩等其他物理量的协调控制，实现机械运动的平稳性和可重复性。速度控制模块的优化设计是提高工程机械自动化水平的关键。

3. 位置控制模块。位置控制是工程机械实现精确

作业的基础。位置控制模块根据目标位置和反馈位置，通过闭环控制实现机械部件的精确定位。常用的位置反馈传感器包括编码器、位移传感器等。控制算法一般采用PID控制，并结合前馈补偿、死区处理等措施提高动态性能。为实现复杂轨迹的跟踪控制，还需进行插值运算和平滑处理。位置控制精度的提高对机械设计和传感器选型也提出了更高要求。模块化的位置控制程序可显著提高系统的灵活性和可扩展性。

### 3.4 故障诊断程序设计

可靠的故障诊断是确保工程机械安全高效运行的关键。PLC控制系统需配备完善的故障诊断程序，实现对系统硬件、软件以及机械部件的实时监测和故障判断。诊断程序通过采集各类传感器信号，并与预设的阈值或模型进行比较，及时发现异常状况。常见的故障类型包括传感器失效、执行器卡死、通信中断、程序错误等。诊断程序需采用合理的故障判别逻辑和容错算法，提高诊断的准确率和可靠性。在故障发生时，诊断程序应及时向操作员发出警报，并根据故障严重程度采取相应的保护措施，如切断电源、停止运动等。此外，诊断程序还应具备故障记录和溯源的功能，为事后的故障分析和维修提供依据。完善的故障诊断程序可显著提高工程机械的可用性和安全性。

## 4 结束语

基于PLC的工程机械电气控制系统设计，可从硬件架构、软件设计等多个方面入手，显著提升系统性能。PLC卓越的可靠性、灵活的编程性和强大的通信能力，使其成为工程机械控制的理想选择。未来，随着大数据、人工智能等新技术的发展，基于PLC的控制系统必将向着更加智能化、网络化的方向发展，为工程机械的自动化和信息化水平的全面提升做出更大贡献。

### 参考文献：

- [1] 丁振山, 乔金师. 基于PLC技术的工程机械电气设备自动化控制系统设计[J]. 中国机械, 2024(36):28-31.
- [2] 史耕田. PLC技术在工程机械电气控制装置中的运用[J]. 模具制造, 2024, 24(03):194-196, 199.
- [3] 郝振亮. 工程机械电气控制系统的基础构造分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(03):181.
- [4] 钟磊. 工程机械电气控制系统故障研究[J]. 内燃机与配件, 2022(01):79-81.
- [5] 陈鼎洪. 基于PLC工程的机械电气设备安全控制系统研究分析[J]. 科学技术创新, 2021(31):8-10.
- [6] 李建刚. 工程机械电气设备施工技术与质量控制分析与探讨[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(08):34-35.

# 机械电气设备能效评估与节能技术研究

李兆瑞<sup>1</sup>, 孙中顺<sup>2</sup>

(1. 青岛国骐光电科技有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东浩华建设集团有限公司, 山东 青岛 266200)

**摘要** 随着全球能源问题的日益突出, 机械电气设备的能效评估与节能技术研究变得愈发重要。本文详细阐述了机械电气设备能效评估的相关概念、方法及指标体系, 探讨了当前常见的节能技术, 分析了节能技术在实际应用中面临的问题, 并对未来的发展趋势进行了展望。研究表明, 完善能效评估方法、推广节能技术, 对促进机械电气设备领域的可持续发展、实现节能减排目标具有重大意义, 也为相关企业降低运营成本提供了有效途径, 有利于提高机械电气设备能源利用效率、降低能源消耗。

**关键词** 机械电气设备; 能效评估; 节能技术; 能源效率

中图分类号: TM3; TM4; TM92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.003

## 0 引言

能源是推动经济发展和社会进步的重要物质基础, 然而, 能源的有限性以及过度消耗所带来的环境问题, 使得节能成为全球关注的焦点。机械电气设备作为工业生产和日常生活中广泛应用的设备, 其能源消耗占据相当大的比例。传统的机械电气设备侧重于功能实现, 而对能源利用效率关注不足, 增加企业的运营成本和环境负担。随着能源价格的波动和环保要求的日益严格, 提升机械电气设备能效、探索节能技术变得刻不容缓。因此, 开展机械电气设备的能效评估与节能技术研究, 对于提高能源利用效率、缓解能源危机、减少环境污染具有重要的现实意义。

## 1 机械电气设备能效评估

### 1.1 能效评估的概念

机械电气设备的能效评估是指利用一系列科学合理的方法和手段, 对设备在运行过程中的能源利用效率进行量化评价, 以确定设备能源利用状况的优劣, 并找出影响能源效率的因素。

### 1.2 能效评估方法

1. 测试法。使用专业的测试仪器, 直接对机械电气设备的各项运行参数进行测量, 如功率、电流、电压、转速等, 然后根据相关的计算公式计算出设备的能效指标。这种方法测量结果较为准确, 但对测试条件和测试仪器要求较高, 且测试过程较为复杂, 需要专业技术人员操作<sup>[1]</sup>。

2. 模型法。基于设备的工作原理和物理特性, 建立数学模型模拟设备的运行过程, 从而预测设备的能

效。模型法在设备设计阶段或无法进行实际测试时使用, 能快速评估不同设计方案或运行条件下设备的能效情况。但模型的准确性依赖于对设备特性的准确描述和假设条件的合理性。

3. 统计分析法。收集大量同类机械电气设备的运行数据和能效信息, 运用统计学方法进行分析和处理, 得出设备的能效分布规律和平均能效水平。统计分析法适用于对大规模设备群体的能效评估, 能够为制定能效标准和政策提供参考依据, 但无法针对具体某一设备进行精确评估<sup>[2]</sup>。

### 1.3 能效评估指标体系

能效评估指标体系主要包含如下内容: (1) 能源效率指标, 是衡量机械电气设备能源利用效率最直接的指标, 如电机的效率、变压器的效率等。能源效率通常定义为设备输出的有用能量与输入的总能量之比, 用百分数表示; (2) 功率因数, 反映了气设备对电网功率的有效利用程度。功率因数越低, 说明设备从电网中吸收的无功功率越多, 造成电网传输效率降低和线路损耗增加。提高功率因数可减少电网的负担, 提高能源利用效率<sup>[3]</sup>; (3) 单位产品能耗, 对于一些生产型机械电气设备, 如机床、注塑机等, 单位产品能耗是衡量其能效的重要指标。表示生产单位产品所消耗的能源量, 单位产品能耗越低, 说明设备在生产过程中的能源利用效率越高; (4) 待机能耗, 随着自动化程度的提高, 许多机械电气设备在待机状态下仍会消耗一定的能量。待机能耗虽然单个设备的数值可能较小, 但由于设备数量众多, 总体待机能耗不容忽视。降低待机能耗也是提高机械电气设备能效的一个重要方面。

## 2 机械电气设备节能技术

### 2.1 电机节能技术

一方面, 高效电机采用先进的设计和制造工艺, 如优化的电磁设计、高性能的磁性材料、精密的制造工艺等, 相比普通电机具有更高的效率。在相同的负载条件下, 高效电机可降低电能消耗, 提高能源利用效率。一般而言, 高效电机的效率比普通电机高出 2% ~ 8%; 另一方面, 许多机械电气设备在运行过程中, 其负载需求是不断变化的。传统的电机采用恒速运行方式, 当负载低于额定负载时, 电机的效率会大幅下降, 造成能源浪费。电机调速技术根据负载的变化实时调节电机的转速, 使电机始终运行在高效区。常见的电机调速技术有变频调速、电磁调速、液力耦合调速等, 其中变频调速技术应用最为广泛。通过变频调速改变电机电源的频率来调节电机转速, 具有调速范围广、精度高、节能效果显著等优点, 一般可节能 20% ~ 50%<sup>[4]</sup>。

### 2.2 变压器节能技术

变压器作为电力系统中关键的电气设备, 在电能传输与分配过程中发挥着重要作用, 其能耗水平对整个电力系统的能源效率有着重要影响。因此, 变压器节能技术成为提升能源利用效率、降低电力损耗的关键。传统变压器铁芯多采用硅钢片, 在运行时会产生磁滞和涡流损耗。而低损耗变压器, 尤其是非晶合金铁芯变压器, 为节能带来了新突破。非晶合金材料具备特殊的原子结构, 磁导率高、矫顽力低, 这使得非晶合金铁芯变压器空载损耗大幅降低, 相比传统硅钢片铁芯变压器, 可降低 70% ~ 80%。这意味着在变压器空载或轻载运行时, 能极大地减少不必要的电能消耗。尽管非晶合金铁芯变压器初期购置成本相对较高, 但长远来看, 其在长期运行中节省的电费远超购置成本增加部分, 节能效益显著, 在电网改造和新建变电站中被广泛应用; 同时, 根据实际用电负荷合理选择变压器容量, 当变压器容量过大, 而实际负荷较小时, 就会出现“大马拉小车”现象, 导致变压器运行效率低下, 空载损耗占比增大, 造成能源浪费。相反, 若容量过小, 又无法满足用电需求, 会影响正常生产生活。因此, 在选择变压器容量前, 需对用电负荷进行精准预测和详细分析。可以通过收集历史用电数据, 运用科学的负荷预测方法, 如时间序列法、回归分析法等, 准确预估未来一段时间内的负荷变化情况。同时, 考虑用电设备的同时使用系数、负载率等因素, 以此确定合适的变压器容量。并且, 在运行过程中, 可根据负荷变化调整变压器的运行方式, 如采用并列运行、经济运行等策略, 确保变压器始终处于高效运行状态, 提高能源利用效率。此外, 变压器节能技术采用低损

耗变压器和合理配置容量, 在降低能源消耗、提高电力系统运行效率方面效果显著。随着技术的不断发展和创新, 未来变压器节能技术将朝着更高效、智能的方向迈进, 为构建绿色低碳的能源体系发挥更大作用<sup>[5]</sup>。

### 2.3 照明节能技术

传统的白炽灯发光效率低, 大部分电能都转化为热能而浪费掉。目前, 高效照明灯具如荧光灯、节能灯、LED 灯等得到了广泛应用。荧光灯的发光效率比白炽灯高 3 ~ 4 倍, 节能灯的发光效率比荧光灯还要高 20% ~ 30%, 而 LED 灯则具有更高的发光效率和更长的使用寿命, 其能耗仅为白炽灯的 1/10, 荧光灯的 1/2 ~ 1/3。在机械电气设备的工作场所, 采用高效照明灯具可显著降低照明能耗; 此外, 安装照明智能控制系统, 如光控开关、时控开关、智能调光系统等, 可以根据环境光线的变化和人员活动情况自动控制照明灯具的开关和亮度, 实现照明系统的节能运行。例如: 在白天光线充足时, 自动关闭部分或全部照明灯具; 在人员离开工作区域一段时间后, 自动关闭照明灯具等。照明智能控制系统的应用, 可进一步提高照明节能效果, 节能率可达 30% ~ 50%。

### 2.4 余热回收利用技术

在机械电气设备运行中, 大量余热被白白浪费, 余热回收利用技术则是改变这一现状的关键, 能将废弃余热转化为可利用能源, 显著提升能源利用效率。在工业生产中, 许多设备会产生余热, 如工业锅炉、冶炼炉、内燃机等。以工业锅炉为例, 其排烟温度常达数百度, 蕴含大量热能。传统做法是直接排放, 不仅浪费能源, 还可能造成热污染。结合余热回收利用技术, 就能回收这些余热。常见的余热回收方式多样。余热锅炉是其中之一, 利用高温烟气的热量产生蒸汽, 这些蒸汽可用于工业生产流程, 比如在化工、造纸行业, 为化学反应、烘干等环节提供热能; 也能用于区域供暖, 满足周边居民或企业的取暖需求。此外, 热泵技术同样发挥着重要作用, 把低品位余热提升为高品位热能, 就是利用少量电能作为驱动力, 将原本难以直接利用的低温余热, 转化为可用于加热、制冷的高品位热能, 实现余热的高效利用, 广泛应用于建筑供暖、制冷系统中。余热发电装置则是将余热转化为电能, 实现能源的二次利用<sup>[6]</sup>。一些大型钢铁厂利用高炉余热发电, 产生的电能可满足部分厂区用电需求, 减少对外部电网的依赖, 降低用电成本, 还能提高能源自给率。

## 3 节能技术应用中存在的问题

### 3.1 成本问题

节能技术和设备的初期投资成本通常较高, 如高效电机、低损耗变压器、LED 灯等的价格都比普通设备

高。对于一些企业而言,尤其是中小企业,较高的投资成本可能成为推广应用节能技术的障碍。此外,节能技术的研发和应用还需要投入大量的人力、物力和财力进行技术研发、设备改造、运行维护等,这些成本也会影响企业实施节能措施的积极性。

### 3.2 技术兼容性问题

在对现有机电设备进行节能改造时,会遇到节能技术与原有设备不兼容的问题。某些电机调速系统与原有的机械设备连接后,出现振动、噪声过大、控制不稳定等问题;一些余热回收装置与现有生产工艺系统的集成难度较大,需对整个系统进行较大的改动。技术兼容性问题不仅会增加节能改造的难度和成本,还影响设备的正常运行和生产效率。

### 3.3 标准和规范不完善

目前,我国在机械电气设备能效评估和节能技术方面的标准和规范还不够完善,存在标准不统一、更新不及时等问题,使得企业在进行能效评估和节能改造时缺乏明确的依据和指导,不同企业之间的评估结果和节能效果难以进行比较和衡量。同时,标准和规范的不完善,也不利于节能技术的推广和应用,限制节能产业的发展。

### 3.4 人员意识和技术水平不足

部分企业管理人员和操作人员对能源节约和环境保护的意识淡薄,缺乏对节能技术的了解和认识,认为节能工作会增加企业的成本和管理难度,对节能改造工作不够重视。此外,一些企业的技术人员缺乏节能技术方面的专业知识和技能,无法有效实施节能措施和对节能设备进行维护管理,影响节能技术的应用效果。

## 4 机械电气设备节能技术发展趋势

### 4.1 智能化节能技术的发展

随着人工智能、物联网、大数据等信息技术的飞速发展,机械电气设备的智能化节能技术将成为未来的发展趋势。在设备中安装传感器、智能控制器等设备,实现对设备运行状态的实时监测和数据分析,利用智能算法自动优化设备的运行参数和控制策略,实现设备的智能化节能运行。智能电机控制系统根据负载变化自动调整电机的转速和转矩,使电机始终保持最佳的运行效率;智能照明系统根据人员活动和环境光线变化自动调节照明亮度和开关状态,实现照明系统的智能化节能控制。

### 4.2 多能互补与综合能源利用

机械电气设备的节能技术未来将更加注重多能互补与综合能源利用,整合多种能源形式,如电能、热能、

太阳能、风能等,实现能源的梯级利用和优化配置,提高能源利用效率。在一些工业企业中,将余热回收利用与太阳能光伏发电、风力发电相结合,建立综合能源系统,实现能源的自给自足和高效利用;在建筑物中,采用地源热泵、空气源热泵等技术,实现供热、制冷、热水供应等多种功能的一体化,提高能源利用效率和建筑的节能水平。

### 4.3 绿色设计与制造

从源头上提高机械电气设备的能源效率,绿色设计与制造将成为未来的重要发展方向。在设备设计阶段,充分考虑能源效率、材料选择、可回收性等因素,采用优化的结构设计和节能技术,使设备在整个生命周期内都具有较低的能源消耗和环境影响。采用轻量化设计技术,减少设备的材料用量和运行能耗;选用环保、可回收的材料,降低设备报废后的环境污染;在制造过程中,采用先进的制造工艺和节能设备,降低生产过程中的能源消耗。

## 5 结束语

对机械电气设备的能效评估与节能技术进行研究,有利于提高能源利用效率、实现可持续发展。通过科学合理的能效评估方法和指标体系,可准确评价设备的能源利用状况,为节能技术的应用提供依据。目前,电机节能技术、变压器节能技术、照明节能技术、余热回收利用技术等已在实际中得到了广泛应用,并取得显著的节能效果。未来,智能化节能技术、多能互补与综合能源利用、绿色设计与制造,将成为机械电气设备能效评估与节能技术的发展趋势。我们应紧跟时代发展步伐,加大研发投入,积极推广应用节能技术,为实现能源的高效利用和经济社会的可持续发展做出贡献。

### 参考文献:

- [1] 贺宁.发电厂电气设备能效管理与节能措施研究[J].现代工程科技,2024,03(10):17-20.
- [2] 李卫国.基于自适应控制算法的电气设备能效优化研究[J].电气技术与经济,2024(09):11-13.
- [3] 胡二奎.市政工程电气设备能效管理与节能控制技术研究[J].建筑与施工,2024,03(04):35-36.
- [4] 郭志勇,常少波.电气设备能效管理与节能技术研究[J].数字化用户,2024(12):229-230.
- [5] 万欣荣.低压电气设备维护中的能效管理与优化[J].建筑与施工,2024,03(11):141-142.
- [6] 张文康.发电厂电气设备运行效率提升策略研究[J].模型世界,2024(34):109-111.

# 仓式泵气力输送设备在长距离物料输送中的应用研究

张付栋

(山东龙诚气力输送工程设备有限公司, 山东 济南 250200)

**摘要** 仓式泵气力输送设备作为一种高效、环保的物料输送方式,在长距离输送领域展现出巨大潜力。本文概述了仓式泵气力输送设备的工作原理、结构特点和设备分类,并分析了影响其长距离输送性能的关键因素,包括物料特性、输送参数、管道布置和设备选型,综述了仓式泵气力输送技术的研究进展,重点介绍了新型仓式泵结构设计、输送过程数值模拟和智能控制系统开发等方面的最新成果,并探讨了仓式泵气力输送设备在长距离物料输送中的应用现状和发展趋势,以期对相关领域的研究和应用提供参考。

**关键词** 仓式泵; 气力输送; 长距离输送; 物料特性

中图分类号: TH3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.004

## 0 引言

在工业技术不断进步和物料输送需求越来越多样化的背景下,仓式泵气力输送技术以其高效、环保的输送方式逐渐引起了人们的普遍重视。该技术利用气流的力使物料悬浮和传输于管道内,布置灵活、传输距离远、耗能少、环保效果佳。尤其在长距离物料输送方面,仓式泵气力输送技术表现出了明显的技术优势和应用前景。为此,文章将对仓式泵气力输送技术研究进展及其在远距离物料输送方面的应用进行深入研究,以期能够对相关产业起到有益借鉴和指导作用。

## 1 仓式泵气力输送设备概述

### 1.1 工作原理

仓式泵气力输送设备工作原理是根据压力差引起的气流动力来实现对物料进行连续或者间歇运输。具体地说,装置主要包括泵体、进气阀、排气阀、料斗和控制系统等关键部件<sup>[1]</sup>。在工作过程中,通过控制系统启动进气阀,使得高压气体(通常是压缩空气)迅速进入泵体内部,形成高压区域。当高压气体源源不断地流入泵体内时,泵体内压力逐渐增大,使物料由料斗压到管道中。同时,排气阀始终处于闭合状态,保证了高压气体不被预先泄漏,进而保障了材料的高效运输。泵体中物料全部压入管道时,控制系统将进气阀关闭、排气阀随即开启。这时泵体内高压气体被快速排出并形成低压区域,同时管道内物料在气压差影响下不断前移<sup>[2]</sup>。

### 1.2 结构特点

仓式泵气力输送装置的结构特点主要表现为它的巧妙设计和对物料的高效处理。一是在泵体设计方面,仓式泵一般为圆柱形或者圆锥形,此种设计既方便了材料的加载和运输,又有效地降低了材料在泵体中的残留量,提高了运输效率。泵体的选材也很关键,一般都是耐磨、耐腐蚀材料,这样才能保证设备长时间工作时稳定可靠<sup>[3]</sup>。二是进气阀和排气阀是仓式泵气力输送设备中的关键零件,它们在结构设计上也一样重要。进气阀一般采用响应快、密封性能好的设计来保证高压气体能快速稳定地进入泵体。但排气阀强调快速启闭能力和密封性能好,防止高压气体传输时泄漏,确保材料高效传输。

### 1.3 设备分类

仓式泵气力输送设备根据结构特性、工作原理和应用场景可以详细地分为很多类型。一是仓式泵气力输送设备按结构特性分为单仓泵和双仓泵两类。单仓泵具有设计简单、适合加工流动性比较好且不容易卡死的材料等特点,其原理是采用单个泵体来进行材料的持续或者间歇运输。双仓泵的设计相对更为复杂,它由两个独立的泵体组成,并通过交替操作来实现物料的高效传输,特别适用于处理黏性较高和容易堵塞的物料,有效地避免单一泵体运输该类材料过程中可能发生的失效问题<sup>[4]</sup>。二是仓式泵气力输送设备按其工作原理又分为正压式和负压式。正压式仓式泵是在泵体中通入高压气体形成正压环境来带动物料沿着管

道前进。这类装置适合远距离、大流量物料输送场景。负压式仓式泵的工作原理是抽取管道中的气体，从而创造一个负压的环境，这样可以吸引物料进入管道并完成物料的传输。负压式设备对易挥发和有毒有害物料的处理有显著优点，可有效地防止物料泄漏，保障操作人员的安全。

## 2 影响长距离输送性能的关键因素

### 2.1 物料特性

材料的粒度、密度、形状、湿度、摩擦系数和磨蚀性都会显著影响输送过程。一是材料的粒度和密度直接决定着材料在管道内的流动性能。粒度过大或者密度过大的物料在运输过程中容易发生堵塞、增大运输阻力、降低运输效率等。反之，粒度中等、密度小的材料流动性更好，利于实现远距离、高效率运输。二是材料的外形对输送性能亦有着显著的影响<sup>[5]</sup>。外形不规则材料在运输过程中容易相互卡阻造成运输不畅等问题，且形状规则材料对管道形状有较好的适应性，降低了输送时的阻力。另外，材料的湿度亦是不可忽视的影响因素。湿度过大的材料容易在管道中黏附和结块而造成运输困难，且湿度中等的材料能够较好地维持流动性，利于输送过程平稳进行。

### 2.2 输送参数

输送参数又是影响仓式泵气力输送设备远距离输送性能的关键因素，它涉及气流速度、压力、输送量及输送时间诸多方面。一是气流速度对输送效率和能耗有着至关重要的作用。适当增大气流速度能强化物料悬浮和输送能力，但是气流速度过大会造成能耗增大和管道磨损，甚至有可能诱发管道中物料激烈碰撞磨损，所以需要根据材料的性质和输送距离合理地设置气流速度才能使输送效率和能耗达到均衡。二是压力参数对于输送性能的影响也是显著的。正压输送能提供充足的驱动力以保证管道内物料的平稳运输，适合长距离大流量运输场景。且负压输送适合于材料密封性要求高、易挥发或者有毒有害材料的运输，通过提取管道中气体产生负压有效避免材料泄漏。

### 2.3 管道布置

管道布置是决定仓式泵气力输送设备长距离输送性能好坏的关键因素，管道布置是否合理直接影响着输送效率、能耗和设备维护成本。一是管道长度和直径需要根据输送距离和物料特性合理地设计。太长的管道将使输送阻力增大，造成能耗上升；而且太短的管道不一定能适应长距离输送。同时管道直径选择还需要综合考虑物料流量和输送速度等因素，才能保证

管道中物料稳定悬浮和运输。二是管道弯曲程度和角度对于输送性能也有显著影响。弯曲过大会使输送阻力增大、输送效率下降，甚至会造成管道中材料的阻塞。所以，在管道布置中，要尽可能减少不必要的弯曲和维持管道直线性来减小输送阻力。另外，管道在材质和连接方式上还需要依据物料特性和输送环境来选择。对容易磨损或者腐蚀性较强的材料，需要选择耐磨耐腐蚀管道材质来提高其使用寿命。

### 2.4 设备选型

设备选型是保证仓式泵气力输送设备长距离输送高效平稳运行的关键环节，需要考虑物料特性，输送距离、输送量、能耗和维护成本等诸多因素。一是根据材料的粒度、密度、湿度和磨蚀性特点选择适合仓式泵型号。对粒度和密度都比较大的材料，选择破碎和输送能力比较强的仓式泵是比较合适的；对易挥发、有毒有害或者湿度大的材料，需要选择密封性能好，能有效阻止材料泄漏的负压仓式泵。二是综合考虑输送距离和输送量确定仓式泵规格和数量。长距离输送一般要求输送压力大和输送效率高，所以，需要选择规格比较大、性能比较平稳的仓式泵。同时根据输送量要求合理分配仓式泵数量，保证输送过程连续稳定。

## 3 仓式泵气力输送技术研究进展

### 3.1 新型仓式泵结构设计

近年来，随着工业技术不断进步和物料输送需求越来越多样化，新型仓式泵结构设计已经成为仓式泵气力输送技术的一个重要研究方向。该领域研究的进展主要表现为仓泵结构优化和创新，其目的是提高输送效率、降低能耗、提高设备适应性和可靠性。一方面，研究人员引进先进流体力学仿真技术对仓泵内部流场做出准确仿真和分析以指导仓泵结构优化设计。如通过调节进气口和排气口位置和形状来优化泵体内流道设计以降低气流阻力、增加物料悬浮和输送能力等。另外，使用耐磨、耐腐蚀等高性能材料和优化仓泵密封结构是增强设备耐久性和稳定性的重点举措。另一方面，新型仓式泵在结构设计上也着眼于提升设备智能化和自动化程度。通过集成传感器、控制器和执行机构实现对仓泵运行状态进行实时监控和智能调控。根据物料特性和输送需求自动调整进气量和排气量来维持输送时压力和流量平稳。

### 3.2 输送过程数值模拟

在对仓式泵气力输送技术进行研究时，对输送过程进行数值模拟已经成为一个重要的研究方法。研究者利用计算流体力学（CFD）等前沿的数值技术，成

功地模拟和分析了物料在管道内的浮动、流动以及与管道壁面的互动等复杂行为,从而对输送机制有了深刻的认识,实现了输送参数的优化和输送效率的提升。在数值模拟中,关键是建立精确的数学模型及边界条件。对仓式泵气力输送过程进行数值模拟时,需要考虑物料颗粒大小分布、密度、形状、气流速度、压力、温度等多种因素共同作用。通过构建合适的颗粒与流体互动模型,例如曳力模型和碰撞模型,可以更准确地描述物料颗粒在气流中的动态行为。另外,通过数值模拟可以对运输过程中压力损失、物料沉积和管道磨损进行预测。研究人员对上述现象进行仿真分析后,可优化管道布局、调整输送参数从而达到降低能耗,预防堵塞和磨损以及提高输送系统稳定可靠性的目的。

### 3.3 智能控制系统开发

研制智能控制系统是仓式泵气力输送技术向自动化、智能化方向发展的关键一步。本系统的目标是通过融合先进传感器技术、数据处理算法和自动控制策略来实现输送过程实时监控、精准调控和故障预警,从而显著提高输送效率,降低能耗,提高系统稳定性和安全性。研制智能控制系统时,最重要的任务就是建设一个综合监测网络。通过对仓式泵、管道和关键部件设置高精度传感器对运输过程中压力、流量、温度和振动等关键参数进行实时采集,并对系统提供详细的数据支撑。然后,利用大数据处理和机器学习算法对其进行深度挖掘和分析,从而揭示出传输过程中潜在的规律和异常模式。依据监测和分析的数据,智能控制系统具备自动调节输送参数的能力,例如气流的速度和进气量等,目的是提升输送效能。同时该系统具有故障预警和自我修复功能。该系统对历史故障数据进行学习和分析,可以预测出可能出现的故障点、提前发出报警信号、试图采取调整运行策略等自我修复措施、启动备用设备等来尽可能减少因故障而给输送过程造成的损失。另外,该智能控制系统支持远程监控和故障诊断功能。操作人员可以在远程终端上实时观察输送系统运行情况、接收故障预警信息、远程进行故障诊断和排除操作等,使系统可维护性和灵活性大大提高。

### 4 仓式泵气力输送设备在长距离物料输送中的应用

仓式泵气力输送设备已在远距离物料输送领域显示出广阔的应用前景和明显的技术优势。该类设备以高效、环保、灵活等输送特性成为许多工业领域中物料输送的优先选择。远距离物料输送时,采用仓式泵气力输送设备可以克服传统输送方式的许多局限性。

如仓式泵气力输送和机械输送方式相比较不需要复杂传动机构来降低设备故障点和维护成本。同时,其输送管道布置灵活,可跨越复杂地形和建筑结构实现材料远距离连续运输。另外,仓式泵气力输送设备对环保有明显的优越性。本装置通过封闭管道进行运输,有效避免了物料泄漏和粉尘污染等问题,满足了现代工业中绿色、环保生产需求。通过对输送参数,例如气流速度和压力等进行精准地调节,可以极大地降低能源消耗和排放量,从而达到节能和减少排放的目的。从应用领域来看,仓式泵气力输送设备已经被广泛地应用到煤炭、电力、化工、建材等众多行业中。本装置应用于煤炭行业煤粉长距离输送以提高生产效率和能源利用率;在电力行业,它又被用来运输和再利用粉煤灰、脱硫石膏和其他废弃物,有利于资源循环和节约;在化工和建材行业,仓式泵气力输送设备又被用来输送和处理多种粉粒状物料,以适应生产过程多样化的需要。

### 5 结束语

本文通过深入探究仓式泵气力输送技术研究进展及其在远距离物料输送方面的应用,认为新型仓式泵结构设计优化和创新,可提升输送效率和设备适应性;对输送过程进行数值模拟,可为优化输送参数和预测输送性能等方面提供强有力的支撑;该智能控制系统可实现输送过程实时监控,精准调控及故障预警等功能,能显著提高输送系统运行稳定性和安全性。从应用角度来看,仓式泵气力输送设备对于远距离物料输送表现出广阔的应用前景和明显的技术优势,从而为相关产业提供更高效、更环保和更经济的物料运输解决方案。

### 参考文献:

- [1] 潘自力,郭凌坤,白岑,等.一种墙面用腻子粉生产线气力输送仓式泵:CN202310298034.2[P].2025-03-06.
- [2] 吕鑫宽,张叶新,申健,等.仓式泵气力输送设备在长距离物料输送的研究与应用[J].有色设备,2023,37(04):61-65.
- [3] 夏朝阳,李永祥,徐雪萌,等.仓式泵气力输送小麦颗粒流化特性数值模拟[J].包装与食品机械,2023,41(02):69-73.
- [4] 贺关丽,王秦越,许宇翔,等.基于正负压一体式的粉体仓泵气力输送系统[J].湖州师范学院学报,2023,45(04):27-32.
- [5] 夏朝阳,李永祥,徐雪萌,等.小麦气力输送流场颗粒流化特性数值模拟[J].包装工程,2023,44(13):188-196.

# 高分子材料在真空压缩袋中的应用及其气密性能研究

徐伟鑫

(宁波华寅包装科技有限公司, 浙江 余姚 315400)

**摘要** 本研究系统考察了高分子材料在真空压缩袋中的气密性能及影响因素, 采用 ASTM D1434 标准测试方法, 比较分析了 PE、PP、PA 和 EVOH 等材料单层及多层复合结构的气体透过特性。结果表明, PA/EVOH/PE 三层结构复合材料在氧气阻隔性方面表现最优, 透过率为  $0.5 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$ 。通过 DSC、FTIR 和 SEM 分析揭示了材料微观结构与气密性关联机制。温湿度环境参数(263~363 K, RH 30%~90%)影响实验表明, 温度每升高  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 气体透过率增加 30%, 湿度对 EVOH 材料影响显著。基于分子动力学模拟和 Arrhenius 方程构建的气密性能预测模型误差低于 7%。通过优化 EVOH 层厚度分布和调控 PA 分子取向, 实现了气密性能提升 15%, 同时兼顾了材料成本效益。

**关键词** 高分子材料; 真空压缩袋; 气密性能; 阻隔性; 多层复合材料

中图分类号: TB7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.005

## 0 引言

真空压缩袋作为储存与运输领域的关键包装形式, 其性能主要取决于高分子材料的气密特性。真空压缩袋通过抽取内部空气并维持负压状态实现体积减小和内容物保护, 而气密性直接影响其功能性和使用寿命。目前市场采用的 PE、PP 等热塑性薄膜虽具有良好加工性和成本优势, 但单一材料难以同时满足气密性、机械强度和热封性等综合需求。分子结构和结晶度是决定气体扩散系数(D)和溶解系数(S)的核心因素, 而温度、湿度和机械应力等外部条件会显著改变气体传输动力学参数。现有研究主要集中于食品包装领域, 对真空压缩袋中高分子材料的传质机理和长期性能变化缺乏系统分析。

## 1 气密性高分子材料分析与表征

### 1.1 高阻隔性高分子材料分子结构与气体传输机理

高阻隔性高分子材料的气密性主要取决于其分子结构特征。结晶度高、分子链排列紧密的高分子材料通常具有更低的气体透过率。气体传输机理可分为溶解-扩散机制和毛细管渗透机制。在溶解-扩散机制中, 气体分子首先溶解于高分子表面, 然后在浓度梯度驱动下扩散穿过材料, 最后从另一侧解吸。材料的自由体积、链段柔性和极性基团含量都会影响气体溶解度和扩散系数。对于半结晶高分子, 气体主要通过无定形区域传输, 结晶区域几乎不透气。分子链间的

氢键、极性相互作用和堆积作用增强了链间作用力, 减少了自由体积, 从而提高了气密性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 真空压缩袋多层复合膜结构设计原理

真空压缩袋多层复合膜的结构设计基于功能互补和协同效应原理。典型的多层膜结构包括外保护层、阻隔层、增强层和热封层等功能层。外保护层通常采用耐磨、耐候性好的 PET 或 PA, 提供机械保护和印刷基材。阻隔层是核心功能层, 常用 EVOH、PVDC 或金属化膜, 能有效阻隔氧气、水蒸气等小分子气体。由于阻隔材料往往较脆或对湿度敏感, 需要通过结构设计保护阻隔层的完整性。增强层采用 PE、PP 等材料, 提供机械强度和缓冲作用。热封层通常选用 LDPE、EVA 等低熔点聚合物, 确保良好的封合性能<sup>[2]</sup>。

### 1.3 气体透过率测定方法与评价体系 (ASTM D1434, ISO 15105)

气体透过率测定主要采用等压法和差压法。ASTM D1434 标准中, A 法(等压法)在膜两侧维持相同压力, 测量透过气体体积; B 法(差压法)则建立压差, 测量压力变化率。ISO 15105 标准分为 ISO 15105-1(差压法)和 ISO 15105-2(等压库仑法), 后者利用电化学传感器测量氧气, 灵敏度更高。气密性评价采用透过系数(P)、扩散系数(D)和溶解系数(S), 满足  $P=D \times S$  关系。标准测试条件为  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 、50% 相对湿度和 1 atm 压差。低透过率材料可采用同位素标记法或质谱法等高灵敏度技术。

## 2 高分子材料气密性能实验研究与数据分析

### 2.1 实验材料制备与表征 (FTIR, XRD, DSC, TGA)

高分子气密材料的制备通常采用溶液浇铸、熔融挤出或流延等方法。在材料制备过程中,分子量、添加剂比例和加工工艺参数对最终性能有显著影响。为全面表征材料结构与性能,需进行多种表征分析。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 用于确定材料的化学组成和官能团分布,特别是能识别影响气密性的极性基团和交联结构。X射线衍射 (XRD) 分析可获取材料的结晶度、晶体结构和取向度等信息,这些参数与气体扩散路径密切相关。差示扫描量热法 (DSC) 用于测定玻璃化转变温度 ( $T_g$ )、熔融温度 ( $T_m$ ) 和结晶度,这些热力学参数反映了分子链的运动性和排列状态,直接影响气体传输性能。

### 2.2 单层薄膜气体传输系数测定 ( $O_2$ , $N_2$ , $CO_2$ , $H_2O$ )

单层薄膜气体传输系数测定是评估气密性能的基础工作。对于  $O_2$ 、 $N_2$  和  $CO_2$  等永久性气体,主要采用等压法或差压法测试,将样品固定在测试池中,一侧通入测试气体,另一侧连接检测系统。测试前需进行干燥、脱气等预处理以确保条件一致。水蒸气透过率 (WVTR) 常用重量法、红外传感法或电解质传感法测定。不同气体分子因尺寸和极性差异表现出不同透过行为,通常  $CO_2$  透过率高于  $O_2$ ,  $O_2$  高于  $N_2$ 。气体透过系数  $P$  由扩散系数  $D$  和溶解系数  $S$  的乘积表示,可通过透过曲线的滞后时间和稳态斜率计算。

### 2.3 多层复合材料界面结构与气体传输路径分析 (SEM, AFM)

多层复合材料的界面结构对气体传输路径具有决定性影响。SEM 可用于观察不同功能层的厚度分布、界面结合状态和微观缺陷,特别是断面分析可检测层间剥离、界面裂纹等气体传输通道。SEM 结合 EDS 能确定界面元素分布,揭示化学反应情况。AFM 提供纳米级表面形貌和力学性能信息,可测量界面粗糙度和局部硬度,通过相位成像模式区分不同组分分布,识别气体传输优势路径。样品制备可采用超薄切片技术和冷冻断裂技术,保持界面原始状态。其他辅助技术如 TEM 和 FIB 也用于高精度界面分析。

## 3 环境参数对气密性能影响的定量研究

### 3.1 温度依赖性分析与模型拟合

气体透过率的温度依赖性反映高分子材料中气体传输的热激活特性。在 263 ~ 363 K 温度范围内,大多数气体透过率随温度升高而增加,源于分子链热运

动增强和自由体积增大促进气体分子扩散。Arrhenius 模型描述此依赖性:

$$P = P_0 \exp(-Ea/RT)$$

其中  $P$  为透过系数,  $P_0$  为指前因子,  $Ea$  为透过活化能,  $R$  为气体常数,  $T$  为绝对温度。通过绘制  $\ln P$  对  $1/T$  关系图可获得线性关系,计算透过活化能。极性气体 ( $CO_2$ 、 $H_2O$ ) 的透过活化能通常高于非极性气体 ( $O_2$ 、 $N_2$ )。

在玻璃化转变温度 ( $T_g$ ) 附近,透过率—温度关系出现明显变化,表现为 Arrhenius 曲线斜率改变,反映分子链段运动状态转变。温度依赖性分析有助于预测材料在不同温度下的气密性能。

### 3.2 相对湿度 (RH 30% ~ 90%) 对氧气透过率影响机制

相对湿度对氧气透过率的影响机制主要通过水分子与高分子材料的相互作用体现。在 RH 30% ~ 90% 范围内,不同结构的高分子材料表现出截然不同的响应。对于亲水性材料 (如 PA、EVOH 等),随着湿度增加,水分子可渗入高分子网络,引起以下变化:水分子作为增塑剂增加分子链的柔性,提高链段运动性,增大自由体积,导致氧气透过率上升;水分子可与极性基团形成氢键,破坏原有的分子间相互作用,降低材料的氧气阻隔性;在高湿度条件下,某些亲水材料可能发生溶胀或结构重排,创造新的气体传输通道。对于多层复合材料,湿度梯度可能导致层间应力和界面失效,进一步降低气密性 (见图 1)。

### 3.3 机械应力—应变与 UV 辐照老化对气密性能的综合影响

机械应力—应变和 UV 辐照老化对气密性能的影响通常表现为协同效应。机械应力作用下,高分子材料发生取向和变形,微观上表现为分子链重排和自由体积变化。在弹性变形区域内,适度拉伸可能导致分子链平行排列,降低气体透过率;但超过屈服点后,材料中会形成微裂纹和空洞,显著增加气体传输通道<sup>[3]</sup>。循环应力尤其会导致疲劳损伤,形成永久透气路径。UV 辐照老化过程中,高能光子破坏分子键,引发自由基反应,导致交联或链断裂。对于 PE、PP 等易氧化材料,UV 辐照主要导致降解和链断裂,形成低分子量产物和微孔结构,增加气体透过率;而对某些含芳香结构的材料,UV 可能诱导交联,反而降低气体透过率。

## 4 气密性能建模与材料结构优化

### 4.1 基于分子模拟的气体扩散系数预测

基于分子动力学 (MD) 模拟的气体扩散系数预测提供了微观尺度理解气体传输机理的有力工具。MD 模拟

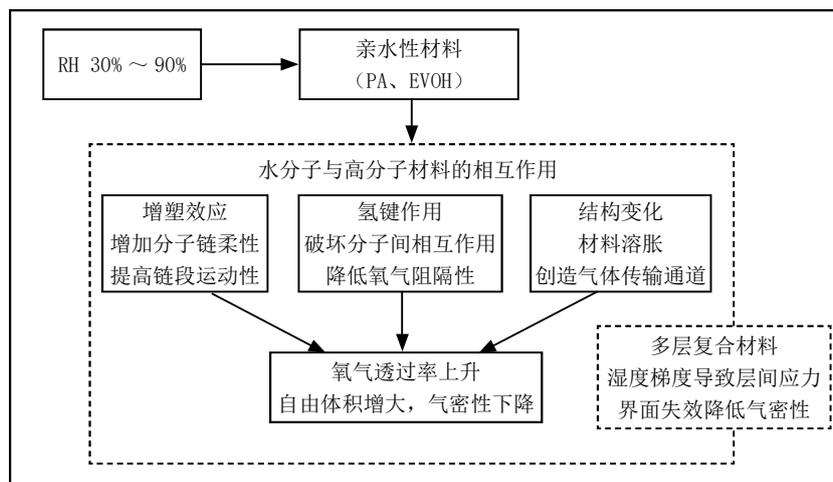


图 1 相对湿度对氧气透过率的影响机制框架图

通过求解牛顿运动方程，追踪高分子链段和气体分子的运动轨迹，计算气体分子的均方位移 (MSD)，进而根据 Einstein 关系预测扩散系数。关键在于构建准确的原子模型和选择合适的力场参数。通常采用 COMPASS、PCFF 或 AMBER 等力场描述分子间相互作用。模拟过程首先构建高分子链的初始构象，经能量最小化和平衡化后，插入气体分子，在 NPT 或 NVT 系综下进行长时间模拟（通常 1 ~ 10 ns）。通过分析自由体积分布、气体分子在材料中的溶解位置和扩散路径，可揭示气体传输的微观机制<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 多层膜气体透过的数学模型与有限元分析

多层膜气体透过的数学模型基于各层材料特性与界面行为。基础模型采用理想层合理论，假设层间完美结合，总传输电阻为各层电阻串联和： $1/P = \sum (L_i/P_i)$ 。在实际中，界面扩散、层间渗透和缺陷显著影响传输行为，改进模型引入界面传输系数和浓度不连续函数。有限元分析 (FEA) 通过离散化扩散方程，模拟复杂几何形状中的气体传输，特别适用于边缘扩散、界面缺陷和局部应力影响分析。FEA 采用非线性偏微分方程组描述溶解—扩散过程，结合移动网格技术模拟动态变化<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 气密性能—成本效益分析与结构参数优化

气密性能—成本效益分析是多层阻隔材料结构优化的核心依据。该分析权衡材料成本、加工成本、性能指标和使用寿命，通常采用性能—成本比值评估经济性。结构参数优化主要通过响应面法或正交试验，研究各层厚度比例、界面处理工艺和添加剂配方对气密性的影响，确定关键参数最佳水平。对特定应用，可建立加权目标函数，同时考虑多种气体的阻隔性能。

优化过程需评估实际环境中温度、湿度和机械应力等因素对材料长期稳定性的影响。

## 5 结束语

高分子材料在真空压缩袋中的应用研究取得了显著进展。通过系统分析 PA/EVOH/PE 三层结构复合材料的气密性能优势及影响因素，建立了温湿度环境参数对气体透过率的定量关系模型。微观结构与气密性关联机制研究表明，分子链取向与结晶度是影响气体传输的关键因素。基于分子动力学模拟的气密性能预测模型为材料优化提供了理论指导，通过调控 EVOH 层厚度分布和 PA 分子取向，实现了气密性能与成本效益的平衡。本研究成果为新一代高性能真空压缩袋设计提供了科学依据与工程应用指南。未来，研究应聚焦于环境友好型高阻隔材料开发和老化机制研究，以延长使用寿命并降低环境影响。

## 参考文献:

- [1] 王永贵, 王攀, 高利苹, 等. 应用型本科高校“专创融合”教育的有机融合: 以滁州学院高分子材料与工程专业为例 [J]. 喀什大学学报, 2024, 45(06): 94-99.
- [2] 林海慧, 钟鸣, 陈水亮. 高分子化学“聚合物的化学反应”项目式教学: 芯片制造中的关键材料: 光刻胶 [J]. 化学教育 (中英文), 2024, 45(24): 21-29.
- [3] 谢绪英. 填充低密度高分子材料拦漂排制作安装关键技术分析 [J]. 工程技术研究, 2024, 09(23): 128-130.
- [4] 白文峰. 导电高分子材料对金属防腐作用 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11): 99-101.
- [5] 李海洋, 申惠莹, 孙其忠, 等. 高分子材料用于改善微孔层结构的应用研究 [J]. 化工技术与开发, 2024, 53(11): 1-6.

# 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构力学性能分析

冯立峰, 温平, 蒋天伙

(宁波可可磁业股份有限公司, 浙江 宁波 330200)

**摘要** 本研究运用动态仿真技术分析并优化新型锻造操作机主运动机构的力学性能。通过建立三维模型并采用多体动力学仿真, 研究了机构在不同工况下的运动学、静力学与动力学行为, 评估了各部件的动态响应、驱动力需求及应力分布。结果表明, 优化后的机构在高负载条件下可保持高稳定性与高工作效率; 液压驱动系统优化提升了响应性与传动效率, 降低了能量损耗; 精确的运动规划减少了应力集中, 延长了设备寿命。本研究旨在为锻造操作机的设计与应用提供理论支持与实践依据, 有助于进一步提升设备性能。

**关键词** 锻造操作机; 主运动机构; 力学性能; 动态仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.006

## 0 引言

锻造机技术不断革新, 尤其在高负载、高精度与高效率工况下, 主运动机构的力学性能成为关键。研究表明, 锻造操作机主运动机构需具备优异的动态响应、承载能力与结构稳定性, 以完成复杂运动轨迹与精密锻造任务<sup>[1]</sup>。随着多体动力学仿真技术的广泛应用, 机构设计与优化获得显著提升。通过对运动学、静力学与动力学性能的全面分析, 可为设计改进提供有力支持<sup>[2]</sup>。液压驱动系统作为关键驱动源, 其性能直接影响机构稳定性与效率, 优化液压系统成为提升整体性能的重要方向<sup>[3]</sup>。本研究基于动态仿真技术分析锻造操作机主运动机构力学性能, 为其设计与应用提供理论指导。

## 1 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构的主要创新

基于动态仿真机新型锻造操作机主运动机构通过三个关键创新显著提升了性能表现。该机构在高负载与复杂工况下能保持高精度高效率运转, 多体动力学仿真证实其在高速高精度应用场合依然稳定, 满足现代锻造行业需求。精确的运动规划优化了机构的运行稳定性, 通过合理分配各部件负载, 减少应力集中与能量损耗, 有效控制驱动部件工作范围, 避免高负载或高频操作中的过度冲击与振动, 降低驱动力波动与摩擦磨损, 延长设备寿命。液压驱动系统的优化提升了整体工作效率与稳定性, 作为核心动力来源, 优化后的液压系统提高了传动效率, 通过流量调节、压力控制与油温管

理确保复杂工况下的稳定运行, 有效提升响应性能与系统安全系数。

## 2 基于动态仿真的新型锻造操作机主运动机构力学理论及公式原理

### 2.1 运动学分析

在锻造操作机主运动机构的运动学分析中, 需重点关注各运动部件的相对运动关系以及整体机构的工作性能。通过建立机构的数学模型并结合多体动力学理论, 可以精确描述各部件在工作过程中的位置、速度、加速度等动态特性。运动学分析的核心目标是揭示各部件之间的传动规律并推导出它们之间的相互作用关系。设定各运动部件的初始条件后, 采用运动学方程进行求解, 进而获得主运动机构的运动轨迹。设定某一时间点的位置向量为 $r(t)$ , 则运动学模型可通过如下公式表示:

$$r(t) = r_0 + \int_0^t v(\tau) d\tau \quad (1)$$

其中 $r_0$ 为初始位置,  $v(\tau)$ 为速度向量,  $\tau$ 为时间变量。通过对速度和加速度的进一步推导, 可以深入分析各部件的运动规律, 揭示其不同工况下的响应特性。

### 2.2 设计原理

锻造操作机主运动机构的设计原理结合力学与运动学原理, 致力于确保工作过程中的高效传动与稳定性。设计关键在于合理选择传动方式, 优化机构布局及确保驱动部件协同作用<sup>[4]</sup>。为实现理想运动轨迹, 各部件的运动范围与相对位置必须满足特定工况需求, 同时避免过度摩擦与能量损失。机构设计需满足足够

刚度, 确保高负载下有效承受应力而不产生过度变形。通过数学模型结合力学分析与动力学计算, 设计能在各种工况下保持稳定运行<sup>[5]</sup>。以力学行为为例, 可用胡克定律描述材料性能。

$$F = k \cdot \delta \quad (2)$$

其中  $k$  为弹性系数,  $\delta$  为相对位移。通过合理选取各部件的材料、尺寸及形状, 设计能够最大程度降低能量损失, 提升机构的工作效率。

### 3 本次新型锻造操作机研究载体简介

#### 3.1 新型锻造操作机主运动机构的正向位置解析

图 1 展示了一种新型锻造操作机的主运动机构设计, 其独特之处在于将俯仰缸与同步杆 LK 安装于提升臂的顶端, 这与传统机构布局存在显著差异。

与传统锻造机机构相比, 该机构的唯一差异在于其 AK 和 BL 与 x 轴正方向所形成的夹角为:

$$\theta_6 = \theta_7 = \angle CAK + \theta_1 \quad (3)$$

#### 3.2 锻造操作机主运动机构受力分析

在锻造操作机中, 升降运动占据主导地位, 因此, 本分析仅聚焦于升降过程中的力学考量。为简化受力对比, 除钳杆 FE 的重力外, 其余所有部件的重力均不予考虑。

分析流程遵循传统锻造机的路径, 即通过建立钳杆与前吊杆的力学平衡方程组, 直接求解出 FF、FE、

FC 及 FG 各力<sup>[6]</sup>。随后, 将研究焦点转向后臂, 其受力状况详见图 2 所示。

对于前臂的受力来说, 根据受力平衡方程可列出(见图 3):

$$\begin{cases} F_A + F_K + F_J - F_C = 0 \\ \overline{AK} \times F_K + \overline{AJ} \times F_J - \overline{AC} \times F_C = 0 \end{cases} \quad (4)$$

## 4 实验结果与指标评估

### 4.1 运动学仿真测试与结果分析

运动学仿真测试是评估锻造操作机主运动机构性能的重要手段, 通过仿真分析揭示其在不同工况下的运动特性。仿真测试主要关注各部件的运动轨迹, 速度与加速度等动态参数。

$$\alpha = \frac{v(t) - v_0}{t} \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为加速度,  $v(t)$  为时刻  $t$  的速度,  $v_0$  为初始速度,  $t$  为时间。仿真结果显示, 空载状态下部件速度达 1.5 m/s, 加速度约 2 m/s<sup>2</sup>; 低负载时速度降至 1.2 m/s, 加速度为 1.8 m/s<sup>2</sup>; 高负载条件下速度进一步降至 0.8 m/s, 而加速度却增至 3.5 m/s<sup>2</sup>。这表明在正常工况下机构运行平稳, 但高负载时加速度波动较大, 暴露出设计中的潜在问题。

### 4.2 驱动力分析与评估

驱动力分析是锻造操作机主运动机构力学性能评

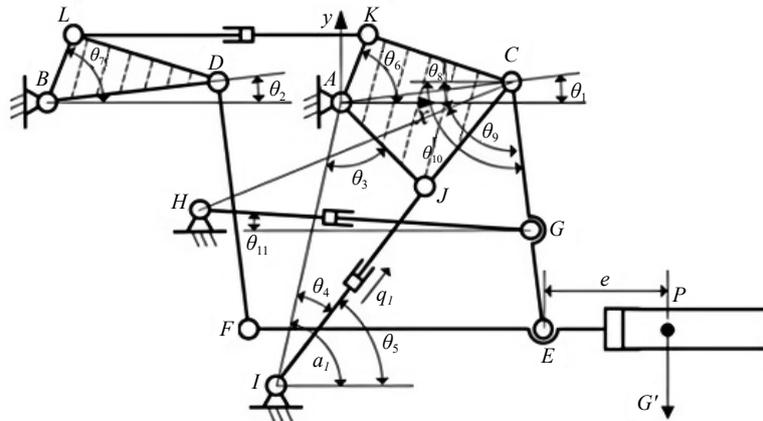


图 1 主运动机构设计图

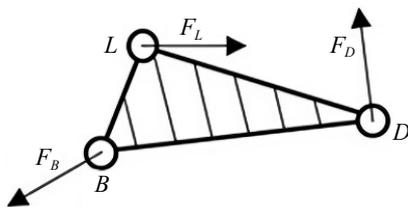


图 2 机构后臂受力分析图

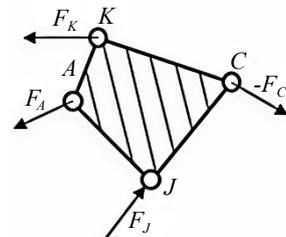


图 3 机构前臂受力分析图

估的关键环节,旨在了解各部件在不同工况下的驱动需求及变化规律。通过多体动力学仿真,计算机构所需驱动力,分析驱动系统的响应能力<sup>[7]</sup>。驱动力由负载力、摩擦力及惯性力共同决定,计算得出系统的总驱动力 $F_{total}$ ,并通过以下公式描述驱动力的变化:

$$F_{total}=F_{load}+F_{friction}+F_{inertia} \quad (6)$$

其中 $F_{load}$ 为负载力, $F_{friction}$ 为摩擦力, $F_{inertia}$ 为惯性力。仿真结果显示,随着负载增加,各力值明显上升。空载状态下,驱动力为50 N,摩擦力10 N,惯性力5 N;低负载时分别增至75 N,15 N与10 N;高负载条件下则大幅上升至120 N,25 N与20 N。这表明高负载状态下驱动力需求显著增大,且摩擦力与惯性力对总驱动力的影响逐渐增强,需要对传动系统进行进一步优化,以提高高负载条件下的工作稳定性与效率。

#### 4.3 静力学分析与结果

静力学分析在锻造操作机主运动机构设计中至关重要,通过分析各部件在静态负载条件下的受力状态,能够评估机构的结构稳定性与抗变形能力。该分析关注各连接部件的受力分布、应力集中情况及承载能力<sup>[8]</sup>。通过有限元分析,计算不同工况下的应力与变形,确保长期使用的可靠性。关键参数包括最大应力与最大变形量,通常采用下式计算应力与变形:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

其中 $\sigma$ 为材料的应力, $F$ 为施加的外力, $A$ 为受力面积。仿真结果显示,负载增加导致应力与变形明显上升,安全系数下降。空载状态下最大应力为50 MPa,最大变形0.02 mm,安全系数4;低负载时分别变为80 MPa,0.05 mm与3.5;高负载条件下则达到120 MPa,0.1 mm,安全系数降至2.5。在高负载工况下,部分部件的应力接近设计极限,显示出潜在的结构问题,需要进一步优化设计<sup>[9]</sup>。

#### 4.4 力学性能综合评估

力学性能综合评估通过系统分析锻造操作机主运动机构的运动学、静力学及动力学性能,全面评估其在不同工况下的工作稳定性与效率<sup>[10]</sup>。该评估综合考虑各部件在静态与动态负载下的响应,以及摩擦、惯性力及应力分布等因素对整体性能的影响。关键参数包括最大载荷承载能力、动态响应时间、应力集中现象及结构变形情况。根据各项力学指标,采用综合评价公式进行综合评估:

$$Rerforomance\ Index = \frac{F_{max}}{\sigma_{max}} \times \frac{1}{\delta_{max}} \quad (8)$$

其中 $F_{max}$ 为最大负载力, $\sigma_{max}$ 为最大应力, $\delta_{max}$ 为

最大变形。分析结果显示,随着负载增加,性能指数明显下降。空载状态下,最大负载力100 N,最大应力50 MPa,最大变形0.02 mm,性能指数为4;低负载时为150 N,80 MPa,0.05 mm与3.2;高负载条件下为200 N,120 MPa,0.1 mm与2。这表明高负载工况下机构力学性能显著降低,存在潜在的结构不稳定风险,为进一步设计优化提供了重要理论依据。

## 5 结论

通过对新型锻造操作机主运动机构的力学性能分析与优化研究,揭示了其在不同工况下的动态响应、驱动力需求以及静力学表现。运动学仿真、静力学分析和力学性能评估结果表明,优化后的机构在高负载和复杂工况下仍能保持较高的稳定性和工作效率。液压驱动系统的优化设计进一步提升了机构的动态响应能力与能效,减少了能量损耗并显著提高了负载承载能力。运动规划的精确设计有助于降低应力集中与不必要的摩擦,延长设备使用寿命。综合分析表明该机构具有广阔的应用前景,经过进一步优化后,可在精密锻造及高要求工业领域中发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] NicolaeC, AdrianI, ValentinaC, etal. ExperimentalResearchfortheEstablishmentoftheOptimalForgingandHeatTreatmentTechnicalParametersforSpecialPurposeForgedSemi-Finishes[J]. Materials, 2023, 16(06): 2432.
- [2] 陈柏金.高性能锻造操作机液压控制系统技术原理[J]. 锻压装备与制造技术, 2023,58(05):53-57.
- [3] 马志刚,杨志怀,张晓丽,等.锻造操作机行走系统性能仿真分析[J]. 锻压技术, 2022,47(10):203-207.
- [4] 陈柯杰,刘艳妍,张起樑,等.锻造操作机液压缓冲装置的性能研究[J]. 锻压技术, 2023,48(09):142-148,183.
- [5] 王生金,张晓丽,马志刚,等.锻造操作机升降系统性能仿真分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2022,57(03):28-31.
- [6] 王飞宇.重载锻造操作机设计机理及动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [7] 王怀彬.锻造操作机运动学与逆运动学分析[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- [8] 李刚,刘德时.锻造操作机大范围顺应运动的动力学行为分析[J]. 机械工程学报, 2010,46(11):22-28.
- [9] 关立文,程宁波.锻造操作机相似模型逆动力学建模与非线性控制器设计[J]. 机械工程学报, 2010,46(11):56-57.
- [10] CHEUNG J, HUNG Y S. Modelling and control of a 2-DOF planar parallel manipulator for semiconductor packaging systems[C]//2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 24-28, 2005, Monterey. CA: ASME, 2005.

# 金属非金属地下矿山监测监控系统研究

程生楷

(四川铸创安全科技有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要** 为了提高金属非金属地下矿山的开采效率和安全性, 本研究按国家相关标准与矿山实际设计金属非金属地下矿山监测监控系统。首先对矿山监测监控系统的组成及功能进行深入分析, 探讨各个子系统的构成与工作原理, 明确各子系统在整个监测监控系统中的作用和功能; 其次通过对监测监控系统的设计研究, 从系统架构设计、传感器选型与布局、数据传输与处理等方面入手, 提出科学合理的设计方案, 旨在为确保系统能够实现实时、准确地监测和有效地控制提供借鉴。

**关键词** 金属非金属矿山; 地下矿山; 监测监控; 系统设计

中图分类号: TD7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.007

## 0 引言

在现代矿山地下开采工程不断发展的背景下, 地下开采的深度也在不断增加, 监测监控系统对于金属非金属地下矿山的安全与发展具有关键作用。它能够实时、准确地监测矿山开采过程中的各种参数和状态, 系统在出现异常情况的时候能够及时报警, 提醒工作人员解决问题, 预防事故。另外, 还能够为矿山企业的生产提供相应的数据支持, 利用监测数据对生产流程进行优化, 降低成本, 提高效率, 促进矿产企业的发展。

## 1 监测监控系统概述

### 1.1 系统构成

通过主机、传输接口、分站、传输线缆、传感器等设备及管理软件构成监测监控系统。

监测设备作为系统的感知层, 负责采集各类数据。

传输网络是连接监测设备与控制中心的纽带, 常见的传输方式包括有线传输和无线传输。有线传输主要采用光缆或电缆, 常见的无线传输技术有 Wi-Fi、ZigBee 等。

监测系统的核心内容就是控制中心, 承担着数据处理、分析决策和控制指令下达等重要任务, 它主要由服务器、监控主机、管理软件等组成。

### 1.2 系统分类及功能

监测监控系统按监测内容可分为有毒有害气体监测、视频监控、通风监测、地压监测等系统, 以及集成了以上多种监测功能的综合监测监控系统。

监测监控系统具备多种重要功能。监测功能是通

过各类传感器, 能够实时、准确地采集矿山井下的各种参数, 并将这些数据传输到控制中心进行处理和分析。预警功能是当系统监测数据超过预设的安全阈值时发送声光报警信号, 要求工作人员及时使用相应的措施, 避免发生事故。利用控制功能对数据进行监测, 系统可以对矿山的通风设备、排水设备、提升设备等进行远程控制。数据存储与分析功能是系统能够将监测数据进行存储, 形成历史数据库, 方便后续查询和分析。通过对历史数据的深入挖掘, 可以发现矿山生产过程中的潜在规律和趋势, 为安全生产决策提供科学依据<sup>[1]</sup>。

## 2 监测监控系统关键技术

### 2.1 传感器技术

传感器技术是监测监控系统的基础, 对系统监测可靠性与精度有直接的影响。在金属非金属地下矿山复杂的环境中, 需要多种类型的传感器来实现对不同参数的精确监测。

1. 气体传感器主要用于检测井下空气中的有毒有害气体浓度。例如: 一氧化碳传感器多采用电化学原理, 其内部有两个电极, 工作电极上一氧化碳会发生氧化反应, 产生与一氧化碳浓度成正比的电流信号。当井下二氧化碳浓度发生变化时, 传感器会及时捕捉到这一变化, 并将其转化为电信号输出。

2. 压力传感器用于监测矿山中的各种压力参数, 压阻式压力传感器是较为常用的一种, 其基于压阻效应工作, 当受到压力作用时会改变传感器内部的电阻值, 利用电阻值的变化得出压力大小。

3. 位移传感器主要用于监测矿山巷道、采场等部

位的位移情况，以判断其稳定性。例如：激光位移传感器利用激光的反射原理，发射激光束到被测物体表面，通过测量反射光的时间或相位变化来确定传感器与物体之间的距离，从而计算出物体的位移。

4. 温湿度传感器的主要功能就是对井下环境的温度和湿度进行监测。电阻式湿度传感器通过湿度对电阻的影响来检测湿度，在环境温度改变时，也会改变传感器电阻值，利用电阻值的测量就能够得出温度信息。半导体温湿度传感器则利用半导体材料的温度和湿度特性来实现对温湿度的监测。

5. 粉尘传感器用于监测矿山井下空气中的粉尘浓度。光学粉尘传感器通过光的吸收和散射原理来检测粉尘浓度，当光线照射到粉尘颗粒上时，会出现散射和吸收的情况，传感器通过检测散射光或透射光的强度变化来计算粉尘浓度<sup>[2]</sup>。

## 2.2 数据传输技术

在监测监控系统中，数据传输技术是确保监测数据及时、准确传输的关键环节，它直接影响着系统的实时性和可靠性。目前，矿山监测监控系统中常用的数据传输技术主要包括有线传输和无线传输，它们各自具有独特的特点和适用场景。

有线传输技术在矿山监测监控系统中应用广泛，其中以太网是一种常见的有线传输方式。它基 IEEE 802.3 标准，传输介质一般使用光缆或者双绞线，具有传输速率高、稳定性好、抗干扰能力强等优点。通过铺设光缆，可实现千兆甚至万兆的传输速率，确保各类传感器采集的海量数据能够及时、准确地传输，为矿山的安全生产提供有力的数据支持<sup>[3]</sup>。

RS-485 总线也是一种常用的有线传输技术，它采用差分信号传输方式，具有传输距离远、抗干扰能力较强等特点。在矿山环境中，一些监测设备分布较为分散，且对传输速率要求不是特别高，RS-485 总线就可以发挥其优势。它的传输距离可达 1 200 米左右，能够满足大多数矿山井下监测设备的布线需求。RS-485 总线通常采用半双工通信方式，在同一时刻只能进行单向数据传输。为了实现多个设备之间的通信，它采用了总线式拓扑结构，所有设备都连接在同一条总线上，但需要通过地址编码来区分不同的设备。这种结构简单、成本较低，但也存在一定的局限性，如总线上的设备数量有限，且当总线出现故障时，可能会影响整个系统的通信。

ZigBee 技术是一种低功耗、低速率、低成本的无线通信技术，主要适用于短距离、低数据量的传输场景。

在金属非金属地下矿山中，它常用于构建无线传感器网络，实现对井下环境参数、设备状态等的实时监测。ZigBee 技术具有自组网能力，节点之间可以自动建立通信链路，形成一个多跳的无线网络。ZigBee 技术的传输速率相对较低，一般在 250 kbps 左右，但它的功耗非常低，节点设备可以采用电池供电，使用寿命较长<sup>[4]</sup>。

## 2.3 数据处理与分析技术

在监测监控系统中，数据处理与分析技术是实现矿山安全生产和高效管理的核心环节。通过对传感器采集的大量数据进行科学处理和深入分析，能够及时发现潜在的安全隐患，为矿山的安全生产提供有力支持。

数据处理首先要进行数据清洗，矿山监测数据可能受到多种因素干扰，如传感器故障、电磁干扰、传输噪声等，导致数据出现缺失值、异常值和噪声。如在监测一氧化碳浓度时，由于传感器受到瞬间强电磁干扰，出现了异常高值。此时，采用基于统计学的方法，如  $3\sigma$  准则，对数据进行清洗。通过这一方法，成功识别并剔除了该异常值，保证了数据的准确性。对于缺失值，可采用插值法进行处理。如在监测地压数据时，某段时间内出现了数据缺失，利用线性插值法，根据相邻时间点的地压数据，按照线性关系计算出缺失值，从而保证了数据的连续性。

数据融合也是重要的处理环节，矿山监测监控系统通常包含多个类型的传感器，不同传感器采集的数据可能存在互补或冗余信息。使用数据融合技术，能够使数据的准确性与可靠性得到提高。如根据风速和风量传感器的精度和可靠性为其分配不同的权重，将它们采集的数据进行融合处理，得到更准确的通风状态信息。

利用大量的数据发现潜在的知识与模式，此过程就是数据挖掘流程，在矿山监测监控系统中具有重要应用。关联规则挖掘可以发现不同监测参数之间的关联关系。聚类分析则可以将相似的数据对象归为一类，从而发现数据的分布规律。通过对每类设备的数据分析，能够及时发现设备的异常运行状态，提前进行维护保养，减少设备故障率。

实时监测和预警是通过建立实时数据监测平台，将处理后的数据实时展示给矿山管理人员，一旦发现数据异常，能够及时采取措施。预警功能则基于阈值预警和趋势预警两种方式实现。阈值预警是根据矿山安全生产标准和经验，为每个监测参数设定安全阈值。当监测数据超过阈值的时候，系统立刻发送预警信号。趋势预警则是通过对监测数据的趋势分析，预测参数的变化趋势，提前发出预警<sup>[5]</sup>。

### 3 系统设计与实现

#### 3.1 系统架构设计

监测监控系统采用分层分布式架构,这种架构模式能够有效提高系统的可靠性、可扩展性和灵活性,整个系统主要由感知层、传输层、数据层和应用层构成。

1. 感知层是监测监控系统的基础,其主要功能是采集矿山井下的各种物理量信息,这一层分布着大量的传感器,如一氧化碳、风速、风压、温度、烟雾、地压等传感器,这些传感器根据各自的工作原理,将采集到的物理量转换为电信号或数字信号。

2. 传输层采用有线和无线相结合的传输方式,将感知层采集到的数据快速、准确地传输到数据层和应用层,能够支持系统实时控制与监测。

3. 数据层负责对传输层传输过来的数据进行存储、处理和分析。它采用分布式数据库技术,在多服务器节点中存储数据信息,提高了数据的存储容量和可靠性。

4. 应用层是监测监控系统与用户交互的界面,为矿山管理人员和操作人员提供了直观、便捷的操作平台。它主要包括实时监测界面、报警管理、数据分析与报表生成、设备控制等功能模块。实时监测界面以图形化的方式展示矿山井下各个监测点的实时数据,使管理人员能够及时掌握矿山生产实际情况。报警管理模块实时分析监测数据,当数据超过预设的阈值时,及时发出短信报警、声光报警、邮件报警等,提醒工作人员使用针对性的措施。数据分析与报表生成模块能够对历史数据进行分析,生成各种报表和图表,如日报表、月报表、趋势图等,为矿山的生产和管理决策提供数据支持。设备控制模块则实现了对矿山通风设备、排水设备、提升设备等远程控制,根据监测数据和预设的控制策略,对设备运行情况手动或者自动调节,确保矿山生产的安全和高效。

#### 3.2 硬件选型与配置

在金属非金属地下矿山监测监控系统中,硬件设备的选型与配置至关重要,直接关系到系统的性能和监测效果。以下是系统所需的主要硬件设备,包括传感器、分站、服务器等。

1. 传感器选型与配置。传感器作为监测监控系统的前端感知设备,其选型应根据矿山的实际监测需求和环境条件进行综合考虑,选择测量范围和精度合适的各类传感器。

2. 分站选型与配置。分站作为连接传感器和传输接口的关键设备,应具备兼容性强、可靠性高、数据

处理能力强等特点。选用的分站应具有多个信号输入接口,可连接多种类型的传感器,同时具备 RS485、CAN 等通信接口,便于与传输接口进行数据传输。

3. 服务器选型与配置。服务器是监测监控系统的数据处理和存储中心,应选用高性能的服务器,配备多核处理器、大容量内存和高速硬盘,能够快速处理大量的监测数据,确保系统在运行过程中能够快速读取和处理数据,数据存储的可靠性与安全性得到提高。

#### 3.3 软件功能设计与开发

监测监控系统的软件功能设计与开发是整个系统的核心环节,直接关系到系统的实用性和可靠性。通过开发功能齐全(应具备实时监测、数据存储与管理、报警、设备控制、用户管理等功能)、操作便捷的软件,能够实现对矿山生产过程的全面监控和有效管理,为矿山安全生产提供有力支持<sup>[6]</sup>。

### 4 结束语

金属非金属地下矿山监测监控系统为矿山提供了安全避险的主要系统,应用该系统可提高矿山生产的安全性。本文对金属非金属地下矿山监测监控系统的特点进行了分析,并进行了系统设计与实现。采用分层分布式架构,包括传输层、感知层、数据层和应用层,各层协同工作,确保系统的高效运行。在硬件选型与配置上,对传感器、分站、服务器等硬件设备进行了合理选型和配置,保证了系统的性能和监测效果。软件功能设计与开发实现了实时监测、报警、数据存储与管理、设备控制和用户管理等功能,为矿山管理人员提供了高效、方便的操作平台。

#### 参考文献:

- [1] 冯亮. 基于互联网通信的矿井供电智能监控系统设计[J]. 通信电源技术, 2024, 41(23): 16-18.
- [2] 张齐盛. 基于矿山模型和管控系统的采矿自动化设计[J]. 中国科技成果, 2024, 25(23): 20-22.
- [3] 官平, 赵艳, 周明涵. 基于模糊 PID 控制的矿井智能通风控制系统设计[J]. 矿山机械, 2024, 52(12): 58-62.
- [4] 申晓良, 胡澜夕, 高炎旭, 等. 基于 TDLAS 技术的井下多组分气体浓度监测(特邀)[J]. 光子学报, 2024, 53(10): 107-116.
- [5] 申斌学. 基于矿山工业互联网的选煤厂智能管控体系设计与关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(09): 210-219.
- [6] 陈自新, 李栋, 董佳, 等. 多维可视化智能巡检虚实协同技术研究及其在金凤煤矿的应用[J]. 中国煤炭, 2024, 50(10): 115-122.

# 有色金属矿山电气自动化的通信网络构建

张 壮

(新巴尔虎右旗荣达矿业有限责任公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021300)

**摘 要** 有色金属矿山电气自动化系统需要高速率、大容量的数据传输能力, 以及强大的抗干扰能力和稳定性。本文从有色金属矿山电气自动化的通信需求出发, 分析了高速率数据传输、抗干扰性和多协议支持的重要性, 并在此基础上提出了一套完整的通信网络构建方案, 包括分层分区的网络架构设计、光纤和无线相结合的混合组网、性能可靠的设备选型配置, 以及加密和访问控制等安全防护措施, 最后通过网络性能测试、故障排查和网络优化, 保证通信网络稳定高效运行, 旨在为有色金属矿山电气自动化系统提供可靠的通信支撑。

**关键词** 有色金属矿山; 电气自动化; 通信网络; 网络架构; 网络安全

中图分类号: TD65

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.008

## 0 引言

有色金属矿山生产过程自动化是现代化矿山建设的重要内容和标志。自动化系统涉及采矿、选矿、冶炼等生产环节和设备, 功能复杂、数据量大。高效、可靠的通信网络是支撑自动化系统运行的关键基础设施。网络需要满足高速率、大容量的数据传输, 同时确保在恶劣工况下的抗干扰能力和稳定性。此外, 还需兼容不同厂商的设备和通信协议。因此, 如何针对有色金属矿山电气自动化的特点, 构建一套合理、完善的通信网络方案, 对推动矿山自动化进程具有重要意义。

## 1 有色金属矿山电气自动化的通信需求分析

### 1.1 高速率、大容量的数据传输能力

有色金属矿山电气自动化系统涉及大量实时数据的采集、传输和处理。井下各类传感器不断产生海量监测数据, 视频监控系统也会占用大量带宽资源。此外, 自动化设备的远程控制、生产调度指令的下达, 都对通信网络的传输能力提出了更高要求。一旦出现网络堵塞或延迟, 将直接影响生产控制的实时性和有效性<sup>[1]</sup>。因此, 自动化通信网络必须具备足够的带宽和吞吐量, 以满足高速率、大容量的数据传输需求。同时, 网络还需支持未来数据量增长和新业务接入的需要, 在设计之初就应考虑良好的可扩展性。只有构建高性能的通信网络, 才能确保生产控制数据的实时、准确传输, 为自动化系统的可靠运行提供有力保障。

### 1.2 强大的抗干扰能力和稳定性

有色金属矿山环境恶劣, 电磁干扰严重, 给通信

网络的稳定运行带来巨大挑战。矿区范围广、地形复杂, 存在大量电力设备、变频器等强电磁辐射源, 加之矿用设备振动大、粉尘多。各种干扰因素交织, 很容易引起通信信号的衰减、失真乃至中断。一旦关键数据传输出现延迟或错误, 就会影响自动化系统的控制精度和安全性, 造成设备故障甚至威胁作业人员的生命安全。因此, 矿山自动化通信网络必须具备超强的抗干扰能力, 尤其是对电磁干扰和物理破坏的防护。应从设备选型、拓扑设计、线缆铺设等多方面综合考虑, 确保通信系统能免受各类干扰的侵袭, 保证数据传输的高度稳定和可靠。同时, 还需采取冗余备份等容错机制, 在极端情况下也能维持通信系统的基本运转。只有如此, 才能为矿山电气自动化提供稳如磐石的通信支撑。

### 1.3 支持多种通信协议和设备接入

在现代化大型有色金属矿山自动化系统中, 通常集成了多个子系统和众多不同类型的现场设备, 这些设备和子系统来自不同厂商, 采用各自的通信协议和接口标准。要实现全矿统一的生产调度与管理, 必须打破设备和协议之间的壁垒, 构建起互联互通的统一通信平台。因此, 矿山自动化通信网络需要支持多种主流工业通信协议, 如Modbus、Profibus、EtherNet/IP等, 同时兼容不同厂商的设备接入。一方面, 需要在网络的汇聚层和核心层部署多协议交换机和协议网关, 实现不同协议网段之间的无缝连接<sup>[2]</sup>。另一方面, 在网络边缘部署智能化的接入网关, 将现场设备的各类私有协议或总线接口转换为标准的工业以太网接口, 通过构建开放、融合的多协议通信网络, 才能最大限度

地集成各类自动化设备资源,充分发挥系统整体效能,实现生产过程的全局优化控制。

## 2 有色金属矿山电气自动化通信网络构建方案

### 2.1 网络架构设计

矿山电气自动化通信网络的架构设计是整个系统的骨架,直接关系到网络性能与稳定性。通信架构应采用分层分区的设计理念,将矿山按照地理位置和功能划分为多个区域,每个区域内再按照核心层、汇聚层、接入层三层架构进行网络部署。核心层负责区域间高速数据交换,汇聚层连接各功能区域内的多个接入层设备,接入层则直接与现场设备相连,这种层次化架构便于系统管理和维护,当某个区域出现故障时,可迅速定位并隔离,避免影响整个系统运行。同时,关键节点和链路均应采用冗余设计,核心交换机、关键路由器双机热备,重要通信链路建立备用路径,确保在设备故障或链路中断时,系统能够自动切换,保持网络畅通。在具体实施过程中,可通过虚拟局域网(VLAN)技术对网络流量进行逻辑隔离,为不同类型的业务分配独立的 VLAN,避免广播风暴和数据冲突;通过链路聚合技术提高带宽利用率,增强网络连接的可靠性;利用生成树协议预防网络环路,避免广播风暴,这种科学合理的网络架构设计,为矿山电气自动化系统提供了稳定高效的通信基础。

### 2.2 通信技术选择

在有色金属矿山电气自动化通信网络建设中,通信技术的选择至关重要,必须结合矿山环境特点与业务需求,合理选用有线与无线技术,构建高效可靠的综合通信网络。光纤通信技术是有线通信的首选,具有传输距离远、带宽大、抗电磁干扰能力强等显著优势,适合作为矿山通信网络主干。在矿区核心层与汇聚层间,可采用单模光纤构建 10 Gbps 或更高速率的主干网络,确保数据高速传输;在汇聚层与接入层间,可选用多模光纤构建 1 Gbps 的二级网络,满足区域内数据汇聚需求。对于电磁干扰特别严重的区域,如高压变电站、大型电机附近,应优先采用全光网络方案,避免铜缆传输易受干扰的问题。同时,无线通信技术在某些场景下也具有独特优势,特别是在移动设备接入、临时通信需求、布线困难区域,可灵活部署工业级 Wi-Fi、ZigBee 等无线网络。例如:在矿山采掘工作面,可利用工业级 Wi-Fi 实现采掘设备的移动接入;在矿区环境监测点众多、布线困难的区域,可利用 ZigBee 组建低功耗传感器网络。在实际应用中,常采用有线与无

线技术相结合的混合组网方式,以有线光纤网络作为骨干,无线网络作为补充,实现全面覆盖、灵活接入的通信系统,为矿山电气自动化提供强大的通信支撑。

### 2.3 设备选型与配置

有色金属矿山环境恶劣,对通信设备的可靠性和稳定性提出了严峻考验,因此设备选型与配置必须慎之又慎,确保系统长期稳定运行。

在设备选型方面,矿山通信网络应优先选择具有工业级标准的专业设备,如工业级交换机、工业路由器等,这些设备具有宽温设计、防尘防震、抗电磁干扰等特性,能够适应矿山恶劣环境。具体而言,核心层宜选用高性能模块化交换机,支持热插拔和不间断供电,保证网络核心稳定运行;汇聚层宜选用工业级三层交换机,具备路由能力和虚拟局域网划分功能;接入层则根据现场环境条件,选择相应防护等级的工业以太网交换机,特别是井下或潮湿环境,应选用 IP67 防护等级以上的设备。设备配置方面,需根据实际业务需求进行合理配置,例如根据数据流量预估合理配置端口速率和交换容量,确保网络不会因流量激增而拥塞;设置服务质量参数,为关键控制数据提供优先传输保障;配置 VLAN 隔离生产控制流量与管理流量,提高网络安全性;启用 RSTP/MSTP 等快速生成树协议,保证链路冗余切换效率。同时,各类通信设备应当实现统一网管,支持 SNMP 协议,便于集中监控和维护,这些精心选型与科学配置的设备将共同构成矿山电气自动化的可靠通信基础设施。

### 2.4 网络安全与防护

有色金属矿山电气自动化通信网络承载着生产控制数据和关键信息,其安全性直接关系到矿山生产的连续性和安全性,因此必须建立全方位、多层次的网络安全防护体系。首先,应强化通信数据加密保护,关键控制数据传输采用 SSL/TLS 等安全协议,确保数据传输过程不被窃听和篡改;敏感信息存储使用高强度加密算法,防止在存储环节发生信息泄露。其次,应当实施严格的访问控制策略,通过防火墙建立网络边界防护,限制不必要的网络访问;采用 802.1X 认证、RADIUS 服务器等技术,对网络接入设备进行身份认证;实施最小特权原则,根据用户角色分配不同的访问权限,确保生产系统仅能被授权人员操作。此外,还需建立完善的入侵检测系统,通过部署网络入侵检测设备,实时监控网络流量,识别可疑行为和攻击模式;定期进行漏洞扫描和安全评估,及时发现并修补系统

安全漏洞。在日常运维中,要建立安全事件响应机制,制定详细的应急预案,明确安全事件的报告、处置和恢复流程,最大限度降低安全事件的影响<sup>[3]</sup>。同时,对操作人员进行安全意识培训,提高全员安全防范能力,通过这些综合性的安全防护措施,构建起坚固的矿山电气自动化通信网络安全屏障,保障矿山生产系统的安全稳定运行。

### 3 有色金属矿山电气自动化通信网络测试与优化

#### 3.1 网络性能测试

为了确保有色金属矿山电气自动化通信网络能够满足实际生产需求,必须对网络性能进行全面的测试和评估。首先,应测试网络的数据传输速率、时延、丢包率等关键指标,分析网络的实时性和可靠性,通过模拟不同的数据流量和负载场景,评估网络的承载能力和稳定性。其次,应测试网络的覆盖范围和信号强度,特别是在一些较为复杂的矿区环境中,如地下巷道、露天采场等,确保网络能够实现全覆盖、无盲区。再次,还应测试网络的兼容性和互操作性,验证不同厂家的设备能否顺利接入并正常通信,不同子系统之间能否实现数据的无缝交换和共享。最后,根据测试结果,对网络进行优化和改进,如调整网络拓扑、优化设备配置、消除通信瓶颈等,确保网络性能满足甚至超出实际需求,为矿山电气自动化系统的稳定运行提供有力保障。

#### 3.2 故障排查与修复

通信网络故障是影响有色金属矿山电气自动化系统正常运行的重要因素之一。为了及时发现和解决网络故障,必须建立完善的故障排查和修复机制。首先,应建立网络故障监测和报警系统,对网络关键节点和链路进行实时监控,一旦发生异常情况,能够第一时间发出警报,通知运维人员进行处理。其次,应制定详细的故障排查流程和方案,明确各级人员的职责和权限,确保故障排查工作有序、高效地开展。针对常见的网络故障类型,如设备故障、链路中断、配置错误等,应总结故障特征和处理经验,形成标准化的排查和修复方法,指导一线运维人员快速定位和解决问题<sup>[4]</sup>。再次,应加强备品备件的管理,储备充足的备用设备和器件,确保在发生故障时能够及时更换和恢复。最后,还应做好故障分析和总结工作,通过对典型故障案例的深入剖析,找出故障发生的根本原因,制定针对性的预防和改进措施,不断提高网络的稳定性和可靠性。

#### 3.3 网络优化与升级

随着有色金属矿山电气自动化系统的不断发展和应用深化,对通信网络的需求也在不断变化。因此,必须根据实际需求和网络性能,对通信网络进行持续的优化和升级。首先,应定期评估网络的使用情况和性能指标,分析网络中的瓶颈和不足之处,制定优化方案和改进措施。如调整网络结构、优化设备配置、升级传输介质等,提高网络的传输效率和可靠性。其次,应紧跟通信技术的发展趋势,适时引入新技术和新设备,如采用更高速的光纤传输技术、更智能的网络管理系统等,提升网络的整体性能和智能化水平。再次,还应重视网络的扩展性和灵活性,在网络规划和设计时预留足够的接口和带宽资源,满足未来业务发展和系统扩容的需要<sup>[5]</sup>。最后,优化和升级过程中要注重与现有系统的平滑过渡和兼容,避免对生产运行造成影响,通过持续不断的网络优化与升级,可使有色金属矿山电气自动化通信网络始终保持先进性和适用性,为矿山的智能化、信息化发展提供有力支撑。

### 4 结束语

有色金属矿山电气自动化对通信网络提出了高速率、大容量、高可靠的要求。构建一套高性能、高可用的自动化通信系统,需要从需求分析、方案设计、实施优化等环节,进行系统性的考虑和规划。分层分区的网络架构、光无混合组网技术、可靠稳定的设备选型、完备的安全防护措施,是通信网络构建方案的关键要素。此外,还需建立科学的性能测试评估和故障处理机制,并紧跟技术发展趋势,适时开展网络优化升级。只有进行全方位、体系化的顶层设计,才能真正构建起满足矿山自动化生产需要的新型通信网络,为实现矿山的本质安全、清洁高效、智能环保的运行提供坚实支撑。

#### 参考文献:

- [1] 周莉. 电气自动化通信网络信道数据低时延传输方法[J]. 长江信息通信, 2024, 37(12): 176-178.
- [2] 杨燕妮, 孟乐. 矿山通信的网络信息安全问题及无线网络构建研究[J]. 数字通信世界, 2024(04): 17-21.
- [3] 袁斌华, 薛彪. 矿山电气自动化控制中智能化技术的应用[J]. 世界有色金属, 2023(21): 1-3.
- [4] 刘海鹏, 周淑秋. 网络切片技术在矿山通信网络中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(08): 28-31, 57.
- [5] 张爵明. 基于矿山电气自动化控制中PLC技术应用的探究[J]. 中国金属通报, 2020(04): 65, 67.

# 机械设备管理中信息化系统的应用与发展趋势

钟 霞

(中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121)

**摘 要** 随着信息技术的迅猛发展, 机械设备管理也逐步走向信息化, 通过智能化系统的应用, 提升设备管理的效率与精度, 降低设备维护成本, 增强企业的竞争力。本文基于机械设备管理中信息化系统的应用实践, 结合智能化、云计算与大数据等先进技术, 探讨了信息化系统在设备采购、维护保养、风险监控等方面的具体应用, 分析了其发展趋势以及面临的挑战, 并提出未来的技术创新与解决方案, 通过对实际案例的分析, 展示了信息化系统在机械设备管理中的巨大潜力与实际效益, 以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 机械设备管理; 信息化系统; 智能化; 大数据

**中图分类号**: TP3; F425

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.009

## 0 引言

随着全球工业化进程的不断推进, 机械设备在现代企业生产中的地位愈加重要。根据住建部《2023 年智能建造试点城市发展报告》, 我国建筑业机械设备资产规模已突破 4.2 万亿元, 但行业平均设备利用率仅为 62.3%, 显著低于发达国家 78% 的水平。传统的设备管理模式依赖人工操作和纸质记录, 存在信息传递慢、管理效率低、数据不准确、整理困难等问题, 无法满足高效发展的生产需求。信息化系统的引入, 打破了传统管理方式的局限, 通过先进的技术手段实现对设备的全面监控、精细管理和智能管控, 不仅能够提高设备管理效率, 延长设备使用寿命, 还能显著降低维修成本。

## 1 机械设备管理中的信息化系统技术

### 1.1 信息化系统的基本概念

信息化系统借助当前阶段的信息技术手段, 把传统管理过程过渡到数字化、自动化状态, 构建具有对数据集中管理、实时分析以及智能决策功能的系统。

该系统依靠硬件设备、软件系统和通信网络的恰当整合, 实现信息流的快速流通及资源的合理分配, 以机械设备管理领域为焦点, 设备从采购到报废的各个环节都在信息化系统的覆盖范围内, 能实现设备状态的实时检视、故障预警及智能调配, 增进管理成效, 增强决策的科学性及正确性<sup>[1]</sup>, 企业凭借实施信息化系统实现更精细的管理资源, 标准化审批流程, 提升整体工作规范和作业效能, 拉高生产水平。

### 1.2 机械设备管理中的核心技术与工具

在实施机械装置管理期间, 采用核心技术与相关

工具意义十分重大, 主要由物联网 (IoT) 技术、云计算、大数据分析、人工智能 (AI) 以及设备管理系统 (EAM) 等组合搭建, 物联网技术凭借安装在设备上的传感器实时采集装置运行数据, 如温度、振动、压力等属性, 为设备状态监控提供数据上的辅助; 云计算平台赋予强大的数据存储与高效计算能力, 让设备信息在全球范围内实现实时共享与处理; 大数据分析技术通过统计、处理采集到的数据, 诊断出设备的现状, 预估设备的下一状态, 识别出暗藏的故障风险<sup>[2]</sup>; 人工智能技术采用机器学习算法, 针对预测到的设备潜藏故障, 对维修方案及管理策略自动进行优化; 设备管理系统 (EAM) 把这些技术聚合起来, 赋予设备全面的生命周期管理, 从采购起始的那一步, 到运营维护的中间阶段, 直至设备报废的最后一步, 帮助企业实现设备管理的精细化与智能化。

### 1.3 信息化系统的实现路径与技术要求

信息化系统的实现路径包括需求分析、技术选型、系统设计和实施等关键步骤。

首先, 企业需要通过调研现有设备管理状况, 明确信息化系统的核心功能需求。然后, 选择适合的硬件设备, 如传感器和数据采集器, 确保数据的准确采集; 同时, 选择具备集成能力的软件平台, 支持设备信息的集中存储与分析。技术要求方面, 系统应具备高可用性与可扩展性, 确保设备数据能够实时传输、处理和共享。还需要确保系统间的兼容性, 以避免信息孤岛问题<sup>[3]</sup>。此外, 系统的安全性也至关重要, 必须采取有效的数据加密和防护措施, 以保障信息的安全传输和存储。

## 2 信息化系统在机械设备管理中的应用实践

### 2.1 信息化系统在设备采购与管理中的应用

设备采购的核心是需求与资源的匹配，设备本身的功能与施工现场需求的匹配，以及设备使用时间与项目进度需求的匹配。在传统模式中，需求转化是从工程技术人员解析出相关参数后传递给采购人员，采购人员再与供应商进行交涉，设备参数选择的精准度和传递的准确性都因人而异，加之获取资源方信息的范围不广、信息的及时率不够，都让采购的质量和时长很受限。信息化系统的应用，精确了参数、扩大了匹配范围、标准化采购流程，让采购更加高效，显著降低了采购成本，也让采购更加公平，有利于建立更稳定的供应关系。

以某大型制造企业为例，该公司在引入信息化系统后，通过集成ERP和EAM系统，对设备采购管理进行了全面优化。信息化系统自动化生成采购订单，减少了人工干预，确保了订单的准确性与及时性。同时，系统通过与库存管理模块的联动，实时更新设备库存信息，避免了设备过剩或短缺的情况发生。此外，该系统还整合了供应商管理功能，能够根据历史供应商的交付质量、价格波动等数据，智能推荐最优供应商，从而显著降低了采购成本，提高了供应链的稳定性和可预测性。

### 2.2 信息化系统在设备维护与保养中的应用

信息化系统在设备维护及日常保养工作方面的应用突出呈现为提升维护效率、降低设备停机的时间跨度、优化保养计划的设计以及达成成本管理的预期，凭借让设备的实时运行数据与维护管理系统（CMMS）联合在一起，企业能实时巡检设备的状态，发觉潜在的故障苗头，于是按照设备的使用情况安排有针对性的维护计划。信息化系统可自动生成周期性的维护任务，提供设备维护历史记录，助力维护人员迅速定位故障地点，杜绝盲目操作及人为干预情形<sup>[4]</sup>。凭借精准的数据梳理，系统还可预测设备的剩余使用寿命，协助企业提前针对设备实施更替或升级，保证设备始终维持在最优工作模式，减轻突发性故障对生产的负面干扰。

此外，信息化系统还通过智能化诊断和优化建议，帮助企业进一步提升设备管理水平。例如：系统根据设备的运行数据，能够自动识别出某一设备出现过载或不正常磨损的迹象，提前提示维护人员采取相应的处理措施。通过这种精准的故障预测与维护建议，企业能够减少设备在故障后的恢复时间，避免了传统维

护方式中由人工经验和时间延迟导致的问题。

### 2.3 信息化系统在设备性能监控中的应用

信息化系统在设备性能监测阶段的应用，主要凭借着实时数据的采集和分析，实现对设备运行情况的持续筛查及性能判断，依靠部署物联网（IoT）传感器，设备各个关键参数，如温度、压力、转速、限位，包括所处环境的风速等重要影响因素，可实时上传到云端平台上，也可查看实时画面，让管理人员能实时监控设备的运行情况<sup>[5]</sup>。系统凭借将历史数据与实时数据联合起来分析，可探测出设备性能的变化趋势，还能借助智能算法估算设备的潜在故障，这种借助数据的监控模式，既能减小突发故障的潜在风险，又能在故障发生前采取防范手段，以提高设备工作效率，延长设备使用期限。

以三一重工为例，该公司在其生产设施中引入了基于IoT的设备性能监控系统，对关键设备进行实时监控。通过在设备上安装各类传感器，实时采集设备的运行数据并上传至云平台，系统能够自动分析设备的工作状态，检测到设备出现性能下降或异常波动时，立即触发预警并提供维护建议。例如：系统在监测到某台挖掘机的发动机温度持续偏高时，提前预警维护人员进行检查，避免了因过热导致的发动机故障。通过这一监控系统，三一重工显著提高了设备的运行效率，减少了设备的停机时间，并降低了维修成本，保障了生产线的持续稳定运行。

## 3 机械设备管理信息化系统的发展趋势与挑战

### 3.1 发展趋势：智能化、云计算与大数据

机械设备管理的信息化系统正朝着智能化、云计算与大数据技术深度融合的方向积极发展，引导设备管理从传统的被动响应向主动预防和智能决策方向转变，智能化技术主要借助如机器学习、深度学习及预测分析等算法，实现对设备运行状态的自主钻研与优化，如加装传感器感知混凝土的状态，泵车通过系统算法自动调整泵送压力。借助对设备运行的历史数据与实时数据做深度分析，智能化系统能够预测设备故障的可能性、优化维护计划并自动调整操作参数，设备故障诊断算法运用深度学习，对设备振动、温度等传感器所采集的数据做实时分析，可自动察觉设备潜在的故障模式，提前实施维修工作，阻止设备出现非计划性停机，实现智能运维管理，极大地增进设备运作的效率<sup>[6]</sup>。

云计算与大数据融合在一起，能给设备管理赋予强大的数据处理与存储能力，比如存储工地现场采集

的机械部件图像,形成专用数据集,方便取用。企业可借助大数据分析的技术,把设备全生命周期的成本,包含购置成本、运维成本、处置成本以及隐性成本,进行全面分析,通过优化选型、集中采购、智能运维等方式,实现设备成本的降低;把历史维护记录、环境数据等多维度数据联结在一起,构建起设备性能预测模型,实现精确预估设备剩余使用寿命的目的,通过精准评估设备状态,延长设备的经济寿命,提高设备残值率。

### 3.2 面临的挑战与问题分析

尽管信息化系统在机械设备管理实际情形中的应用前景不错,然而在实际推广阶段依然碰到一些棘手的困难挑战,企业在部署信息化系统的时候,面临的主要难题是技术集成与系统兼容性问题,现有的设备管理系统大多与企业其他信息系统存在较大的技术偏离,造成数据交换陷入困局、信息孤岛现象恶化。诸多企业在进行信息化系统集成的操作阶段,缺少统一的技术实施规程,引起不同模块之间的沟通出现不畅,由此对整体系统运行效率和数据分析能力形成干扰,设备数据的采集在维持精准性、稳定性方面也面临挑战,尤其是在设备处于极端工作环境的阶段,有的传感器或许没办法实现平稳运行,造成采集的数据存在差错或缺失,这对设备故障预测及维护计划的制定起到妨碍作用。

信息安全与隐私保护问题也成为信息化系统面临的重大挑战,伴随大批设备数据上传至云平台,企业碰到的数据泄露、网络攻击及系统安全问题愈发严峻棘手,尤其是在云计算与大数据广泛进入应用阶段的背景下,企业的数据存储及处理正渐渐向外部平台转移,这引起外部攻击风险的进一步攀升。企业需要采取更严格的安全防护手段,如加密技术、身份认证与权限控制这般,保障数据的安全性,企业在数据管理相关工作上依旧面临人才短缺的问题,缺乏专业的技术人员以及数据分析师去让信息化系统正常运行并做好数据分析,这进一步加大了系统实施与运维的难度。

### 3.3 未来的技术创新与解决方案

未来,在机械设备管理中,信息化系统的技术创新探索会把精力聚焦于提升系统的智能化程度、增强数据处理能力以及排除安全隐患,采用人工智能(AI)与机器学习技术相融合的手段,未来的设备管理系统会进一步深挖智能化潜力,结合施工方案参数、地理环境影响、气候挑战、政策要求等相关数据,自动匹配设备型号,采用自学习算法优化设备的作业路径。基于深度学习的故障诊断模型可持续分析设备运行数

据及故障历史,稳步加大预测的精准水平,预先察觉潜在故障然后自动制定维修指引,较大幅度地减少设备停机的时长,机器学习算法可与实时数据流相结合,实时掌握设备的运行状态,若设备过载或性能减退就自动修正工作参数,让设备维持最优状态,再结合边缘计算技术,企业得以做到数据的本地处理,进而实现实时响应,弱化对网络的依赖,提高系统响应速度及实时性。

未来设备管理系统中,云计算与大数据技术深度融合的作用会愈发突显,企业会借助分布式计算及云平台,进一步强化自身数据存储和分析能力,逐步解决数据孤岛问题。通过物联网(IoT)传感器采集的大批设备数据,借助大数据分析平台针对数据展开深度挖掘,做到设备全生命周期的智能管理。而在系统的安全性问题方面,企业能借助更先进的区块链技术保证数据既安全又完整,区块链技术可提供去中心化的数据存储办法,保障每笔数据的不可篡改性,而且在设备数据共享的阶段保障信息隐私安全,采用有关区块链的智能合约技术,能简化设备维护相关的合约流程,实现提高供应链效率及透明度的目标。

## 4 结束语

信息化系统在机械设备管理中的应用已成为提升设备运行效率、减少维护成本、延长设备使用寿命的重要工具。随着智能化、云计算与大数据等技术的不断发展,设备管理将迈向更加精准、高效和智能的新时代。然而,在技术集成、数据安全等方面仍面临一定挑战,需要通过创新的技术方案和持续的系统优化来应对。未来,信息化系统将推动机械设备管理向更加智能化、自动化的方向发展,为企业创造更大的经济效益与市场竞争力。

### 参考文献:

- [1] 张虎.机械设备信息化管理策略研究[J].模型世界,2024(29):214-216.
- [2] 邹文联.机械设备管理信息化建设探析[J].中国设备工程,2022(17):66-68.
- [3] 田嘉毅,翟国正.机械设备管理信息化建设探析[J].机械与电子控制工程,2023,05(02):115.
- [4] 郑明明.施工机械设备信息化管理系统研究与应用[J].科海故事博览,2024(09):16-18.
- [5] 马子萍,白新迪,张昌勇.信息化技术在机械电气设备管理的应用[J].百科论坛电子杂志,2020(09):13.
- [6] 刘佳.基于物联网的工程机械设备综合管理系统研究[J].工程技术研究,2024,09(08):96-99.

# 电子技术仪器仪表系统中的 智能化控制技术研究

刘建杰

(托克托县市场监管综合行政执法大队, 内蒙古 呼和浩特 010200)

**摘要** 在工业制造领域, 仪器仪表的重要性不容忽视, 特别是当建立生产管理体系时需要依赖这些设备与工具确保生产的平稳运行并提升其可靠度。科技的发展日新月异, 使得测量装置的技术水平日益精进, 向智能化迈进, 这导致了它们的应用范围逐渐扩大。鉴于这一情况, 本文认为应进一步研究和开发这些仪器仪表, 利用电子技术增强它们的性能, 以充分发挥它们的最大潜力。同时, 工程师也需加强对于这项工作的投入, 优化仪器仪表的功能模块, 从而推动工业领域的长期稳健发展。

**关键词** 智能化控制技术; 工业生产; 仪器仪表系统

**中图分类号**: TN0; TP2

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.010

## 0 引言

智能化控制方法主要是利用内置的微型计算机系统来优化和升级电子设备的技术装备, 以提升其智能程度。借助计算机屏幕上的交互式操作, 可以帮助工作人员迅速识别出数据的不正常情况并执行高效的数据储存、处理及分析任务。在新阶段里, 为了促进电子设备技术的长期进步, 适应其工用需求, 把智能化控制方式融入电子技术仪器仪表中至关重要。

### 1 智能化技术的概述

智能化控制技术作为一种新兴的技术, 伴随着我国社会的稳步进步而逐渐普及开来。这种新颖的方法基于传统管理的升级和改良, 为制造业带来了革命性的变革。它结合了各种高科技手段, 利用这些先进工具的优点, 在实施过程中, 其能模仿人的思考和行动, 实现对系统的自动化调控。此外, 此种管理方法具有自我学习的特性, 能够不断地增强系统的性能。以前的数据分析主要依赖于人工操作, 容易出错, 但现在, 由于采用了智能化管理方法, 大大减少了误差的发生, 并加快了数据处理的速度, 使之更精确、高效, 这对工业制造产生了深远的影响, 成为推动行业发展的关键因素<sup>[1]</sup>。

## 2 智能自动化仪器仪表的应用优势

### 2.1 简化控制流程

利用智能自动化仪器仪表能有效减少控制过程中的烦琐步骤, 由于制造行业的复杂性和高度自动化, 其控制系统同样变得更加复杂且难以掌控。随着制造

业的稳步增长, 对于产品质量的要求也在不断提高, 一旦生产过程中出现的运行参数失准, 就可能会导致产品质量无法达到标准。以往的大部分控制任务都是由人工执行的, 为了确保工厂运作正常, 需要投入大量的劳动力。然而, 通过人工监控并调整运行参数的方法存在明显的时间延迟问题。此外, 制造业中隐藏的风险较多, 使用此种方法可能增加员工的健康风险, 所以传统的手工控制手段对员工责任感和技能水平有较高的要求。智能化控制技术已经广泛运用到各个领域当中, 这使得工厂制造过程变得更加简洁和高效。在这个过程中, 设备能够准确无误、直观明晰地表现出系统的运作状态及各种相关数据等重要信息给操作者们参考与利用。同时根据这些实时反馈的数据来分析, 并调整整个机器的工作状况, 以达到更高的效率水平, 这也是非常重要的环节之一。这样不仅能有效改善产品的质量, 还能进一步优化整体的产品性能表现, 从而为企业带来更多的经济效益和社会价值。

### 2.2 提高生产安全性

由于在工业制造过程中存在许多可能导致危险的情况, 所以需要确保所有操作都在适当的限制内。如果未被有效管理, 这些条件可能会触发意外事件。为了解决这个问题, 应该加大对于利用智能化控制技术的关注程度, 并根据工厂设备的具体结构来安置相应的智能自动化检测器和传感器。当这些仪器和设备开始工作时, 它们能够自动发现隐藏的风险点, 并且通过深入研究其原因, 提供详细的报告。智能化仪器仪表的使用对制造业产生了显著的影响, 推动了自动化

的进程。通过依据产品制造的需求设定系统的工作参数，并随之做出相应调整，同时适应环境的变化来修改这些参数，这样大大提升了产品的自制率，也大幅度地增强了工厂的产能。另外，这种实时的特性使得这一技术能够减少潜在的风险<sup>[2]</sup>。

### 3 智能自动化仪器仪表的主要构成

相较于传统制造设施，智能自动化仪器仪表功能更为丰富，其结构也发生了显著变化，这主要是基于现代产业进步而逐渐演变的。早期的工业测量器具构架较为简易，并缺乏高科技成分，大多数的操控任务都依赖人工执行，这种方式很容易引发各种问题。然而，智能自动化仪器仪表则是对原始设备进行升级和改良的结果，它引入了一系列先进的控制技术以整合至控制体系内，并对硬件及软件做了有效结合，以此提升测量器的自动化水平。与此同时，智能化控制系统建立过程中融入了很多高新技术，如大数据技术、计算机处理技术和传感器技术等，这些技术的正确使用极大地增强了测量器的运作稳健度和安全性，减少了安全隐患的发生概率。另外，在建设测量器材系统期间，工程师还对保护措施做出了改善，他们对常发故障点进行了梳理，通过对保护措施的调整，进一步减小了类似问题的产生可能性。

## 4 仪器仪表系统的主要控制技术

### 4.1 传感技术

工业仪器仪表系统构建时，所采用的技术种类繁杂且多样化，而其中的感知技巧是常见的智能化手段之一，它能确保机器能够平稳、可靠地工作并避免故障的发生。在这个过程中，常常使用这个方法收集大量的资料以供进一步的数据管理及分析之用。为此，需要依赖软硬件结合的方式：首先通过各种接口把不同类型的电子元件相互联接在一起形成网络结构，然后根据预先设定的程序向这些部件发送命令使其执行相应的动作或任务，如采集环境参数等。一般而言，工程师会在开始之前就针对整个体系的状态做出详细的研究，以便确定合适的装配点位，以此提高获取真实有效数据的可能性。一旦收到来自外部的输入讯号以后就可以将其转换成数字形式，并将结果传递给中央单元，这样一来就能实现在线监控的功能。

### 4.2 智能技术

在仪器仪表系统运行的过程中，智能技术是常用的一种手段，其高效应用能显著提升系统多功能性和自动化管理能力。将智能技术融入设备和装置系统中，能够确保系统的平稳可靠运作，减少发生故障的风险。

通过使用智能技术，工作人员可以在工业制造过程中的各个环节精确测定各种参数，并对其进行准确处理，从而大大减少了系统运转时可能发生的故障。随着工业领域稳步增长且不断发展，智能技术的使用范畴也在扩展，人们对智能技术研究深度也在增加，并将智能科技与设备和装置系统紧密结合起来，以充分发挥智能技术的作用<sup>[3]</sup>。

### 4.3 人机界面技术

在仪器仪表系统的建设中，人机界面技术是经常被采用的技术之一，它在系统中扮演着重要的角色。人机界面技术有助于实现工作人员和仪器仪表之间的有效互动，使工作人员能够及时了解仪器仪表的运行参数变化情况。

此外，利用人机交互界面的方式，工作人员能够撰写命令操控数据以调控设备的工作流程。随着工业行业持续稳定发展，这种技术的使用范围也在逐渐扩大，当管理工作人员在仪器设备系统的管理过程中将手动指示输入到系统内部时，该系统会自动执行相应的功能来达成对仪器设备系统远端管理的目标。然而，从现有的情况分析，目前的人机界面技术在使用上还存在许多问题和缺点，其实施体系的不完整性和缺陷需要引起人们的注意并加强研究工作，以便能够提升这项科技的技术效用，并推进工业行业的长期、稳定发展。

## 5 智能化控制在电子技术仪器仪表系统中的应用策略

### 5.1 医疗器械

在疾病确诊过程中，需要利用大量医学仪器以确保更精确的结果。因此，提升这些仪器的精确性和自动操作能力是至关重要的。当前，单片机满足了这一需求，因为它具有高度智能化的特性并能达到快速测量数据的目的，这对于医生的工作来说非常有利。借助单片机的力量，可以对医疗器械实施精确操控，这样一来，医生就能迅速获得所需的诊断信息，从而显著改善医疗服务的质量。

### 5.2 在生命体征监测器械中的应用

传统的生命体征监控工具较为原始，通常是佩戴式的装置，这使得其操作不便且易出错。然而，现在已经出现了新的生命体征监控器具。受益于不断发展的电子技术，这些新一代的生命体征监控仪器如智能手环、手表等应运而生，它们收集到的数据更为详尽，同时便于病人随身携带。伴随着对这类器械的研究的深入，它们的类型也在日益增多，特别是在心病诊断

方面,能达到早期的预示效果。随着医学健康的进步,可穿戴装置的使用范畴正在不断扩大。这些主要由一种或者多种传感器组成,它们能够有效地预先警告患者任何潜在的健康问题并对其身体的运作状态做出评价。举例来说,如果把MEMS压电传感器放在心脏附近,它就能实时检测到呼吸与心跳的数据,这使得单个传感器具备了双重的生理指标监控能力。另外,MEMS压电传感器也可以嵌入口罩内,利用其来检测呼吸节奏并评价用户的活动水平,还能揭示他们的肺功能状态。如果把适量的MEMS压阻传感器安装在用户的鞋子底部,就能追踪和记录他们走路的方式及身体重量变动等情况。此外,可穿戴式的电子产品能让人们与计算机之间建立人机交流关系,如把手套内的MEMS传感器调整好位置后,即使是轻微的手指动作也能被识别,从而达到操控键盘等输入设备的目标<sup>[4]</sup>。

### 5.3 单片机技术在医疗电子设备中的应用

随着医疗行业稳步增长并不断进步,医疗电子设备的研发速度也日益加快,而单片机技术的使用领域亦逐渐扩展至如呼吸机、检测仪及监控仪等。由于对医疗器械的研究深度增加,其智能性和自动化的程度也不断提高。从目前的状况来看,主要使用的医疗机器设备中大部分是由单片机构成,这也符合了医疗电子设备的发展方向。所以,在医疗电子设备应用推广的过程中应进一步加强单片机的运用,如X光机和监测仪等,并且根据病人的具体情况,也可以利用肌肉活动记录器和光谱测量仪等检验设备,这样可以大大提升医疗诊断的效果和准确率。

由于其高度准确性和高速性能,单片机逐渐成为医疗电子设备的重要组成部分。在使用之前,医生需先评估并确定医疗器械的需求,然后编写相应的单片机程序,以避免潜在的风险。新的规范和要求推动了设计师利用硬件平台来多次测试,根据实际需求构建合适的体系结构,从而提升医疗电子设备的耐用性,减缓其更迭速率。通过将数字技术融入医疗仪器的核心部件,能增强检测设备的功能效果,同时优化数据保存的品质及完整性。医疗设备可通过链接至数据存储服务器、接口软件等方式接入,使得单片机的运用能够提升仪器的工作效能,缓解现有的医疗诊断缓慢问题。

### 5.4 通信控制技术在医疗电子设备中的应用

近些年,医学领域的进步相当迅速,尤其是在对设备操作方式研究上取得了很多突破。随着医疗器械自动化的提升与智能化的加强,如通信管理系统等技术的应用,通过把传感器放置到合适的地点来监测并

及时反映出设备的工作状态,以此数据作为参考,确保其品质合理化。伴随着对自动化控制技术的深入探索和研究,其已逐渐被广泛运用到医疗器械领域,这大大提升了医疗器械的工作效能。在此之前,为了达到自动检测的目的,我们需要先把相关的参数数据输入医疗电子设备里。为提升医疗电子设备的监控数据信息完整度,科技工作者们开发并实施了一套基于互联网的应用程序,并在其中广泛运用无线传感器网络技术。随着医疗行业的进步和发展,对无线传感器的利用也日益增多,这对于建立基本医疗监视体系起到了重要的推动作用。此外,这个体系的结构相对简易,主要包括医疗设备单元及个人医疗终端。

第一,该技术在医疗机构中的使用具有显著优点:医生可以利用医院的信息平台和平板计算机来监控病人的状况。同时,他们也可以借助医疗器械终端实时收集患者的生命体征,并经过数据分析系统的处理后,大大提升了数据处理的效果与准确度。

第二,观察到在家庭的实际运用环境下,医疗电子终端设备能够全方位收集病人的生物体征数据并实时呈现出这些数据。现阶段主要的无线通信协议类型繁多且广泛使用,每种协议的功能特性各异,如Zigbee协议因其覆盖面宽和技术成熟而被大量采用<sup>[5]</sup>。

## 6 结束语

在制造过程中,仪器仪表系统的功能至关重要。在建立这些系统的过程中,工程师需要充分应用智能控制技术,并深入研究现有的设备和测量的运作状况,以找出可能的问题所在,然后对其进行优化调整,结合先进的科技技术,持续提升整个制造业的产能水平,减少因设备或测量系统出现的故障率。

## 参考文献:

- [1] 张悦,周晚,帖兰,等.数字智能控制在机电一体化系统建模技术中的应用[J].自动化与仪器仪表,2023(01):100-105.
- [2] 刘明,顿书君,胡顺勇.智能集中控制技术在屯宝煤矿智能化建设中的应用[J].工矿自动化,2022(增刊2):33-36.
- [3] 谢志文,吴晖.应用机器人轨迹跟踪技术的电力线路无人机智能化巡检系统设计[J].自动化与仪表,2022(02):44-49.
- [4] 孙新佳,田宏哲,杨政厚.基于LiDAR技术的斗轮机智能化控制系统[J].冶金自动化,2020(增刊1):278-281.
- [5] 苏赐民,李春杏.智能控制技术在机电控制系统中的应用探析:评《机电控制技术导论》[J].电镀与精饰,2020(01):52.

# 基于人工智能技术的配网电力设备 运维检修系统研究

马晨昶

(国网陕西省电力有限公司周至县供电公司, 陕西 西安 710400)

**摘要** 随着电力系统的不断发展, 配网电力设备不管是数量还是复杂度都逐渐上升, 传统运维检修方式已难以满足实际需求。人工智能技术的兴起给配网电力设备运维检修工作创造出不一样的机遇。本文围绕基于人工智能技术的配网电力设备运维检修系统展开研究, 分析了传统运维检修存在的问题, 阐述了人工智能技术在该系统中的应用, 以期增加配网电力设备运维检修的效率和可靠性提供理论支持和实践参考。

**关键词** 人工智能技术; 配网电力设备; 运维检修

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.011

## 0 引言

随着人工智能技术的快速发展, 包括机器学习、深度学习、大数据分析等在内的先进技术, 为配网电力设备运维检修提供了新的思路和方法。利用人工智能技术可以对配网电力设备的运行数据进行实时监测、分析和处理, 实现设备故障的智能诊断和预测, 从而提高运维检修的效率和准确性, 降低运维成本, 保障配网电力设备的安全稳定运行。因此, 开展基于人工智能技术的配网电力设备运维检修系统研究具有重要的现实意义。

## 1 传统运维检修存在的问题

### 1.1 故障发现滞后

传统运维检修主要依赖定期巡检, 这种方式具有固定的时间间隔。在两次巡检之间, 设备可能已经出现了故障隐患, 但由于还没有到巡检时间, 无法及时发现。例如: 一些电气设备内部的绝缘老化问题, 在初期往往不会表现出明显的外在特征, 巡检人员很难在日常检查中察觉。等到故障发展到一定程度, 影响到设备正常运行甚至导致停电事故时才被发现, 此时往往已经造成了较大的损失。而且, 人工巡检受限于巡检人员的技能水平和工作经验, 对于一些隐蔽性故障或早期轻微故障容易漏检。再加上不同巡检人员的判断标准也会存在差异, 导致对设备状态的评估不够准确和客观<sup>[1]</sup>。

### 1.2 运维效率低下

传统运维检修通常按照预先制定的计划进行, 没

有对设备具体的运行状态给予一定的调整。即使某些设备处于一个比较正常的运行情况下, 同样会根据计划实施检修工作, 造成不必要的人力、物力和时间浪费。而对于一些已经出现异常但未到计划检修时间的设备, 却不能及时进行处理。同时, 传统检修工作中的信息传递主要依靠人工记录和口头传达, 过程烦琐且容易出现信息误差。在处理紧急故障时, 这种低效的信息传递方式会导致故障处理时间延长, 进一步影响电力供应的稳定性。

### 1.3 成本居高不下

传统运维检修需要投入大量的人力。为了保证设备的定期巡检和维护, 需要组建一支规模较大的运维检修队伍, 这不仅增加了人员招聘、培训和管理的成本, 还涉及员工的薪酬、福利等费用。此外, 由于故障发现不及时, 导致设备损坏程度加重, 维修成本也相应增加。为了应对可能出现的各种故障, 还需要储备大量的备品备件, 占用了大量的资金和仓储空间。而且, 传统运维检修方式缺乏对设备全生命周期的综合管理, 不能根据设备的实际运行状况和剩余寿命进行合理规划, 进一步增加了运维成本<sup>[2]</sup>。

## 2 人工智能技术在配网电力设备运维检修中的应用优势

### 2.1 故障精准诊断

人工智能技术具备强大的数据处理和分析能力。通过对配网电力设备的历史运行数据、实时监测数据进行深度挖掘和学习, 能够建立起精准的故障诊断模型。

例如：利用机器学习算法可以分析设备在不同工况下的电气参数、温度变化等数据特征，当设备出现异常时，系统可以在第一时间明确故障的种类以及具体的发生地点。与传统的依靠人工经验进行故障诊断相比，人工智能不受主观因素和经验水平的限制，大大提高了故障诊断的准确性和效率。即使是一些隐蔽性较强、难以察觉的早期故障，人工智能也能通过对细微数据变化的分析及时发现问题，为设备的及时维修提供依据。

## 2.2 故障提前预测

借助深度学习算法，人工智能可以对配网电力设备的运行状态进行实时监测和动态评估。通过对大量历史数据的学习，系统能够识别设备运行中的潜在风险因素，并建立故障预测模型。例如：对于变压器等关键设备，人工智能可以根据其油温、绕组温度、局部放电等参数的变化趋势，预测设备可能出现故障的时间和概率。这种提前预测功能使得运维人员能够在故障发生前采取预防性措施，如提前安排检修计划、储备备品备件等，从而避免设备故障的发生，减少停电时间，提高供电可靠性。

## 2.3 智能运维决策

人工智能技术能够根据设备的实时运行状态和故障预测结果，智能生成最优的运维检修策略。系统会综合考虑设备的重要性、故障影响范围、维修成本等因素，为运维人员提供详细的检修方案。例如，当某台设备出现轻微故障时，系统会基于设备应用期限以及运行情况来判断是进行即时维修还是采取暂时观察的策略。此外，人工智能还可以对不同的运维方案进行模拟和评估，帮助运维人员选择最经济、高效的方案，对资源进行优化，最大限度节省运维成本的支出<sup>[3]</sup>。

## 2.4 运维效率提升

人工智能可以实现对配网电力设备的自动化监测和诊断，减少了人工巡检的工作量。运维人员能够借助远程监控系统不断得到设备运行数据及其变化情况，及时发现异常情况并进行处理。同时，人工智能系统还可以对设备的运行数据进行自动分析和报告生成，大大提高了信息传递和处理的效率。此外，利用智能机器人和无人机等设备，还可以实现对一些难以到达或危险区域的设备进行巡检和维护，使得运维工作质量达到预期。

# 3 人工智能技术在配网电力设备运维检修系统中的应用

## 3.1 设备故障预测

在配网电力设备运维检修中，构建基于机器学习算法的设备故障预测模型是实现设备状态精准预测与

故障提前预警的关键，该模型的核心原理是基于机器学习中的监督学习和无监督学习技术，通过对大量历史数据的学习和分析，挖掘设备运行数据中的潜在模式和规律，从而建立起设备运行状态与故障之间的关联关系。以变压器故障预测为例，采用支持向量机(SVM)算法构建故障预测模型。SVM是一种基于统计学习理论的分类算法，其基本思想是在高维空间中寻找一个最优的分类超平面，将不同类别的数据样本进行有效区分。在变压器故障预测中，将变压器的油温、绕组温度、负载率、油中溶解气体含量等多个运行参数作为输入特征向量，将变压器的故障状态(正常、轻微故障、严重故障等)作为输出标签。通过对历史数据的训练，SVM模型能够学习到这些输入特征与输出标签之间的复杂映射关系，从而构建起故障预测模型。当有新的变压器运行数据输入时，模型能够根据已学习到的映射关系，判断变压器当前的运行状态，并预测其未来一段时间内是否可能发生故障以及故障的类型和严重程度<sup>[4]</sup>。

## 3.2 故障诊断与定位

### 3.2.1 智能诊断算法

在配网电力设备运维检修系统中，智能诊断算法借助机器学习、深度学习等人工智能技术，可实现对设备故障的精准识别与诊断。以变压器故障诊断为例，深度学习中的卷积神经网络(CNN)算法具有独特优势。CNN通过构建多个卷积层和池化层，能够自动提取图像或信号中的局部特征和全局特征。在变压器故障诊断时，将变压器的振动信号、油色谱数据、电气参数等转化为特定格式的数据输入到CNN模型中。模型首先借助卷积层来掌握并处理这些输入的数据，然后用卷积核获得数据里面包含的局部特征，因为局部特征涵盖着设备运行情况的一系列重要信息。随后，对于卷积后呈现出的特征图，可以使用池化层对其展开下采样处理，在保留主要特征的同时降低数据维度，尽可能降低计算量。经过多层卷积和池化操作后，模型就可以明确设备良好状态以及异常情况下的模式。再应用全连接层把获得的特点投射到故障类别空间，输出故障诊断结果。例如：当输入的数据特征与预先学习到的绕组短路故障特征模式相匹配时，模型即可判断变压器存在绕组短路故障。

### 3.2.2 故障定位技术

基于机器学习的故障定位方法，通过对配电网的拓扑结构、电气参数及设备运行信息的全方位分析，能构建出故障定位模型。以支持向量机(SVM)在故障定位中的应用为例，将配电网中各个节点的电压、电流等电气量作为特征向量，将故障发生的位置作为标

签,对 SVM 模型进行训练。在训练过程中,SVM 通过寻找一个最优的分类超平面,将不同故障位置的数据样本进行有效区分。当配电网发生故障时,将实时采集到的电气量数据输入到训练好的 SVM 模型中,模型会根据已学习到的特征和分类超平面,判断故障发生的位置。深度学习在故障定位方面同样表现出色。例如:循环神经网络(RNN)及其变体长短期记忆网络(LSTM)能够有效处理时间序列数据,对于配电网故障确定来说是不可或缺的。配电网的故障信号往往是随时间变化的时间序列数据,LSTM 在引进行记忆单元以及门控机制之后,能够捕捉数据理存在的相互依存关系,学习到故障信号在不同时间点的特征变化。在故障定位时,将故障发生前后一段时间内的电气量时间序列数据输入到 LSTM 模型中,模型对时间序列信息进行分析,确定故障出现的实际位置。同时,结合配电网的拓扑信息,进一步精确故障定位结果。利用图神经网络(GNN)将配电网的拓扑结构转化为图结构,节点表示配电网中的设备或线路,边表示设备之间的连接关系,通过 GNN 对图结构数据进行学习和分析,就能够更准确地定位故障位置<sup>[5]</sup>。

### 3.3 优化检修策略

在配网电力设备运维检修系统中,利用智能算法制定检修计划是实现设备高效维护和可靠运行的关键。智能算法通过对设备运行数据、故障历史、检修资源等多方面信息的综合分析,能够制定出更加科学、合理、优化的检修计划。以遗传算法为例,它模拟生物进化过程中的遗传、变异和选择机制,在搜索空间中寻找最优解。在检修计划制定中,将检修任务、检修时间、检修人员等因素作为基因,组成染色体。

首先,随机生成一组初始染色体,代表不同的检修计划方案。然后,根据一定的适应度函数评估每个染色体的优劣。适应度函数要综合考虑设备的重要性、故障风险、检修成本、停电时间等因素,例如:对于重要性高且故障风险大的设备,给予更高的权重,优先安排检修;同时,尽量减少检修成本和停电时间。借助选择操作,留下具备良好适应能力的染色体,淘汰适应度较低的染色体,模拟自然选择过程。接着,对保留的染色体进行交叉和变异操作,生成新的染色体,其中,交叉操作指的就是把两个染色体一些基因展开交换,产生新的组合;变异操作就是随意变化染色体里面的基因,带来各种各样的可能。经过多轮迭代,遗传算法逐渐收敛到最优解,即得到最佳的检修计划方案。

### 3.4 无人机智能巡检

无人机搭载了高清摄像头、红外热像仪、激光雷达等多种先进的传感器设备,这些设备能够全方位、多角度地采集配网电力设备的运行信息。在巡检过程中,无人机依据预先规划好的航线,沿着配网线路进行飞行,其飞行路径经过精心设计,充分考虑了设备的分布位置、地形地貌以及周边环境等因素,确保能够覆盖所有需要检测的设备区域,实现无死角巡检。应用高精度的定位系统和先进的导航算法,无人机能够在复杂的环境中保持稳定的飞行姿态,准确地抵达各个巡检点,对杆塔、绝缘子、导线、变压器等设备进行近距离的拍摄和数据采集。人工智能技术在无人机巡检中发挥着核心作用。利用计算机视觉技术,无人机采集到的图像和视频数据能够被快速、准确地分析。通过对图像中设备的外观特征、形状、颜色等信息进行识别和比对,系统可以自动判断设备是否存在异常,如杆塔是否倾斜、绝缘子是否破损、导线是否断股等。例如:基于深度学习的卷积神经网络(CNN)算法,能够对无人机拍摄的大量设备图像进行学习和训练,建立起设备正常状态和故障状态的图像特征模型。当新的图像输入时,CNN 模型可以根据已学习到的特征模型,快速准确地识别出图像中的设备是否存在故障以及故障的类型和位置。

## 4 结束语

基于人工智能技术的配网电力设备运维检修系统能够有效解决传统运维检修方式存在的问题,提高运维检修的效率和可靠性。在未来的发展中,应进一步加强人工智能技术与配网电力设备运维检修的深度融合,不断优化系统的性能和功能,为电力系统的可持续运行提供有利的基础条件。

### 参考文献:

- [1] 李鹏.基于红外测温技术的农村配网设备运行监测研究[J].中国新技术新产品,2025(03):127-129.
- [2] 牛向阳.农村配网电力设备的运行维护与故障处理技术研究[J].仪器仪表用户,2024,31(08):7-9.
- [3] 吴春吉.基于人工智能的配网自动化故障诊断与处理技术研究[J].光源与照明,2024(02):97-99.
- [4] 王晓.供电公司配网管理信息系统设计与实现分析[J].江西电力职业技术学院学报,2023,36(10):4-7.
- [5] 郇铁锋,吴欣,丁翔,等.基于无人机的配网电力设备自动巡检方法[J].信息与电脑(理论版),2023,35(19):10-12.

# 精密铜管自动化生产过程中智能化控制技术的应用研究

代吉伟

(龙口市龙蓬精密铜管有限公司, 山东 烟台 265701)

**摘要** 在精密铜管自动化生产中, 智能化控制技术通过高精度传感器和智能算法的结合, 实现了对熔炼温度、轧制速度与压力、拉拔力等关键工艺参数的精准调控。该项技术不仅提升了生产效率, 还显著改善了产品的尺寸精度和表面质量, 同时大幅降低了废品率。研究表明, 智能化系统能够实时监测并动态调整生产过程中的各项参数, 可减少人工干预, 优化设备运行状态, 为精密铜管制造业提供高效、稳定且高质量的解决方案。

**关键词** 精密铜管; 自动化生产; 智能化控制技术; 生产效率; 产品质量

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.012

## 0 引言

随着现代工业对材料性能要求的不断提高, 精密铜管作为重要基础材料, 在制冷、电子等领域的需求日益增加。传统生产工艺在精度控制和稳定性方面存在诸多不足, 难以满足当前市场对高质量产品的需求。智能化控制技术的引入, 为解决这些问题提供了新的可能。通过对生产流程中各个环节的精确控制, 不仅可以提高产品的尺寸一致性和表面光洁度, 还能有效降低生产成本, 提升整体效益。这一技术的应用正在推动精密铜管制造业向更高水平迈进。

## 1 精密铜管自动化生产概述

### 1.1 生产流程

精密铜管的自动化生产涵盖原材料准备、熔炼、铸坯、轧制、拉拔、退火及精整等多个环节, 需精准控制工艺参数以确保产品质量<sup>[1]</sup>。选用纯度 $\geq 99.95\%$ 的电解铜, 经清理、预热后送入感应熔炼炉, 控制熔炼温度在 $1\ 083 \sim 1\ 180\ ^\circ\text{C}$ 之间, 确保铜液成分均匀。铜液通过连续铸造工艺制成铸坯(规格示例: 直径 $92\ \text{mm}$ , 长度 $20\ 000\ \text{mm}$ ), 经冷却后进入多道次轧制阶段, 轧制速度由 $12\ \text{m/min}$ 逐步提升至 $20\ \text{m/min}$ , 并配合动态压力调整优化壁厚均匀性。拉拔工序进一步调整尺寸精度, 使外径公差控制在 $\pm 0.02\ \text{mm}$ 以内。管材经退火(温度 $450 \sim 700\ ^\circ\text{C}$ )、酸洗、超声波检测等精整工序, 形成符合标准的精密铜管产品。

### 1.2 自动化生产现状

当前, 精密铜管行业已广泛采用高度自动化的生产

设备, 如德国 SMS Meer 公司的 PQF (Premium Quality Finishing) 连轧机、美国 Southwire 公司的 SCR (Southwire Continuous Rod) 连续铸轧系统, 以及国内某些品牌的智能拉拔与退火设备。整体自动化程度较高, 自动化操作占比可达 $85\%$ 以上, 但仍存在精度波动问题, 如壁厚公差波动范围 $\pm 0.02\ \text{mm}$ , 影响成品一致性。目前, 自动化生产的质量控制水平相对稳定, 废品率一般维持在 $1.2\% \sim 2.0\%$ 之间, 日产量可达 $150 \sim 300$ 吨。部分工序(如拉拔和在线检测)仍依赖人工干预, 影响连续生产效率。优化智能化控制系统以提升精度稳定性和减少人工干预仍是行业重点方向。

## 2 智能化控制技术基础

### 2.1 技术原理

智能化控制技术在精密铜管自动化生产中依赖高精度传感器进行实时数据采集。温度传感器(精度 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ )用于监测熔炼温度(控制范围 $1\ 083 \sim 1\ 180\ ^\circ\text{C}$ ), 确保铜液成分均匀性; 压力传感器(精度 $\pm 0.01\ \text{MPa}$ )用于检测轧制、拉拔过程中管材受力情况, 实现精准压力调节。光电传感器与激光测厚仪结合, 可实时监测管材尺寸(测量精度 $\pm 0.005\ \text{mm}$ ), 反馈至控制系统, 确保产品公差符合标准要求。自动化控制算法在生产过程中起关键调节作用, 其中 PID 控制算法广泛用于温度、压力和速度控制, 其数学模型如下:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中,  $u(t)$  为控制器输出,  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为

积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数,  $e(t)$  为误差值。该算法通过调节比例、积分和微分参数, 实现温度稳定、压力均匀及速度优化, 提高生产过程的稳定性和精度。

智能决策系统依托大数据分析机器学习算法(如随机森林、BP 神经网络)对实时采集的生产数据进行分析, 预测设备状态、优化参数设定。如基于生产数据的回归分析模型, 可调整轧制速度与温度参数, 使废品率降低 10% 以上。同时, 深度学习算法可识别缺陷模式, 优化生产工艺, 提高整体生产效率与质量控制水平。

## 2.2 技术优势

相较于传统控制技术, 智能化控制技术在生产精度、稳定性和效率方面具有显著优势。传统控制依赖人工经验调整, 存在滞后性和误差, 而智能控制系统可实时采集数据并动态优化参数, 使尺寸精度提升至  $\pm 0.05$  mm 以内。智能算法结合闭环控制可减少生产波动幅度 15% ~ 20%, 确保工艺稳定性。智能化系统可优化生产节拍, 提高设备运行效率, 使整体生产效率提升 10% ~ 25%, 有效降低能耗和人工干预成本。以某大型铜管制造企业为例, 在引入智能化控制技术前, 生产废品率约为 2.5%, 尺寸偏差  $\pm 0.08$  mm, 日产量 180 吨。应用智能传感监测与自适应控制后, 废品率降至 1.2%, 尺寸偏差控制在  $\pm 0.05$  mm, 日产量提升至 225 吨, 综合生产效率提高约 25%。该案例充分证明智能化控制技术能显著提升产品质量、降低损耗, 并优化企业生产效益。

## 3 智能化控制在精密铜管自动化生产中的应用

### 3.1 熔炼环节

在精密铜管生产的熔炼环节, 智能化控制技术主要用于精准调控熔炼温度和优化熔炼时间, 以确保生产过程的高效性和铜液的高纯度。通过高精度温度传感器(精度  $\pm 0.1$  °C)实时监测铜液温度, 并结合 PID 控制算法, 系统能够精确控制温度波动, 使其保持在  $\pm 3$  °C 范围内, 从而确保熔炼温度稳定在  $1\ 083 \sim 1\ 180$  °C<sup>[2]</sup>。根据温度反馈, 智能控制系统能够自动调整电磁感应加热功率或天然气燃烧器的火焰强度, 避免过热或过冷现象, 进一步提高铜液的纯净度, 减少氧化夹杂的发生, 确保铜液质量达到生产要求。

智能化系统还基于铜液成分检测数据进行动态调整。每 10 分钟进行一次铜液成分检测, 确保铜液成分符合标准( $\text{Cu} \geq 99.95\%$ 、 $0 \leq 0.002\%$ 、 $\text{P} \leq 0.040\%$ )。根据实时检测结果, 智能分析系统优化脱氧剂、合金

元素的补充或调整加料速率, 确保成分的均匀性。智能决策算法结合历史数据分析, 预测最佳熔炼时间, 并根据生产实际情况进行调整, 使熔炼周期缩短 8% ~ 12%。这一过程不仅提高了生产效率, 还降低了能耗, 确保了整个生产环节的节能降耗, 进一步提升了精密铜管的生产质量和效益。

### 3.2 轧制环节

在精密铜管的轧制环节, 智能化控制技术通过协同调节轧制速度与轧制力, 有效提高管材表面质量和尺寸精度。智能系统根据铜材的材质(如 Cu-DHP、Cu-ETP)和目标规格(如外径  $\varphi 8$  mm ~  $\varphi 50$  mm, 壁厚 0.3 ~ 2.0 mm), 通过自适应控制算法动态调整轧制速度(12 ~ 20 m/min), 和轧制力(50 ~ 500 kN), 确保在不同生产条件下, 轧制过程的稳定性和精度<sup>[3]</sup>。系统结合实时监测数据, 优化轧制过程中的应变分布, 减少管材表面缺陷及壁厚偏差, 从而确保管材的尺寸精度控制在  $\pm 0.05$  mm 以内, 显著提升了成品率和生产效率。

智能传感系统还可实时监测轧辊的磨损情况, 采用高精度测量( $\pm 0.01$  mm)和大数据分析技术, 建立轧辊磨损量与使用时间的关系模型。通过监测轧辊的磨损速率(如 0.002 ~ 0.005 mm/h), 系统能够精准预测轧辊的更换时间, 从而避免因过度磨损导致尺寸超差或表面缺陷。这样的智能化监控不仅提升了轧制过程的连续性与稳定性, 还优化了设备的维护周期, 降低了停机时间和维护成本, 优化幅度达到 15% ~ 20%。这一技术的应用使得精密铜管的生产更加高效、稳定, 并减少了生产过程中可能出现的故障和资源浪费。

### 3.3 拉拔环节

在精密铜管的拉拔环节, 智能化控制技术通过实时监测拉拔力并进行优化调节, 显著提高了成品质量并降低了表面缺陷率。系统每秒监测拉拔力数据 100 次, 根据实时数据自动调整拉拔速度(50 ~ 150 m/min)和模具润滑条件, 确保拉拔力的均匀分布。通过优化控制, 防止管材出现拉裂或尺寸偏差, 有效提高了铜管的表面质量, 降低了缺陷率, 铜管表面缺陷率可降至 0.3% 以内, 从而提升了产品的一致性和质量稳定性<sup>[4]</sup>。

基于机器视觉的铜管表面质量检测系统能够在拉拔过程中实时监测产品表面缺陷, 如划痕、裂纹和氧化斑点。系统采用高分辨率工业相机(检测精度  $\pm 0.01$  mm)与深度学习算法, 精确分析管材表面图像, 识别微小缺陷。检测数据实时传输至控制系统, 实现缺陷分类

与自动剔除,确保不合格产品被及时移除。与此同时,系统反馈信息至生产控制系统,优化拉拔参数,确保最终产品的表面光洁度达到 $Ra \leq 0.2 \mu m$ ,进一步提高了成品合格率。通过这一系列智能化控制技术的应用,精密铜管生产过程更加精细化、高效化,质量控制更加严格,从而显著提升了生产效率和产品质量。

## 4 智能化控制技术应用效果评估

### 4.1 生产效率提升

通过引入智能化控制技术,生产线的有效生产时间得到了显著提升。智能化控制技术应用前,每日有效生产时间为18小时,而应用后,通过智能调节和优化控制,生产时间提升至22小时,生产效率提升约22%。这一提升主要得益于自动化调节生产参数、减少人工干预与操作时间。智能化控制技术通过实时监测与调节各环节参数,显著减少了设备调整与故障排查的时间。例如:在熔炼过程中,智能系统能够根据温度数据实时调整加热炉温度,避免了人工干预带来的延误;在轧制环节,系统通过自动控制轧制力和速度,减少了操作人员的调节时间。拉拔过程中,智能化调整拉拔力与速度的系统进一步减少了设备的停机时间。通过全流程优化,整个生产周期缩短,操作效率显著提高<sup>[5]</sup>。

### 4.2 产品质量改善

在应用智能化控制技术前,生产过程中的废品率为4.5%,而经过智能化优化后,废品率降至1.2%,显著降低了73.3%。废品产生的主要原因在于温度波动、轧制力不稳定以及拉拔速度的不均匀。智能化系统通过实时监测与自动调节,消除了这些波动,保证了每一生产环节的稳定性,有效减少了不合格品的产生。同时,产品质量指标也得到了显著提升。应用前,铜管的尺寸精度波动范围为 $\pm 0.15 \text{ mm}$ ,表面粗糙度为 $Ra 0.45 \mu m$ ,而应用智能化控制后,尺寸精度提升至 $\pm 0.05 \text{ mm}$ ,表面粗糙度降低至 $Ra 0.20 \mu m$ 。通过智能化技术,生产过程中的关键参数得以精确控制,表面质量与尺寸精度的提升不仅减少了废品率,也使得生产的铜管满足更高的工业标准,确保了产品的一致性与稳定性。

### 4.3 成本效益分析

引入智能化控制技术后的设备投资成本包括设备采购、安装调试及人员培训等,总计约350万元。每年运行维护成本约为50万元,主要包括系统的维护、软件升级及设备检查等费用。虽然初期投资较高,但

长期来看,智能化控制技术通过提升生产效率和产品质量,显著降低了整体成本。智能化控制技术带来的生产效率提升和废品率降低直接影响了成本节约。生产效率提升22%后,每年可增加生产量约1000吨,节约的人工成本及能源消耗为200万元。废品率降低后,每年可节省原材料费用约150万元。综合来看,智能化控制技术的应用不仅提高了生产能力,还带来了明显的经济效益(见表1)。

表1 智能化控制技术应用成本效益分析表

项目	数值
初期投资成本	350万元
年运行维护成本	50万元
每年节约人工及能源	200万元
每年节约原材料费用	150万元
总年度节约成本	350万元
投资回收期	1年

根据上述数据,智能化控制技术的回报期为1年,经济效益明显。

## 5 结束语

智能化控制技术在精密铜管自动化生产中的应用取得了显著成效。通过对生产过程中各环节的精准调控,不仅大幅提升了产品的质量和一致性,还显著优化了生产效率。该技术减少了人工干预,提高了设备运行的稳定性,延长了设备使用寿命。同时,智能化系统的应用为企业带来了明显的经济效益,降低了生产成本。未来,随着技术的进一步发展和完善,智能化控制将在精密铜管制造领域发挥更加重要的作用,助力行业实现更高水平的自动化与智能化发展。

## 参考文献:

- [1] 谢福胜.精密铜管生产线在线质量控制系统研究[J].移动信息,2024,46(8):364-366,373.
- [2] 汤宝春.无缝内螺纹铜管生产与其过程质量控制[J].建筑工程技术与设计,2021(18):327.
- [3] 郭闻政,吴晓,祝焱,等.铜管生产在线退火工序节能降耗的探讨[J].机电工程技术,2022,51(12):99-103.
- [4] 程颜.现代铜及铜合金管材的发展方向[J].中国金属通报,2021(09):225-226.
- [5] 郑佳依,刘劲松,陈大勇,等.精密铜管拉拔智能化配模系统的设计研究[J].铜业工程,2022(03):81-85,91.

# 数智安环理论在“物联网+”模块化中水调度系统研发中的应用

杨浩, 李培, 吴磊, 程丽

(湖北中烟广水卷烟厂, 湖北随州 432700)

**摘要** 为响应国家绿色发展政策, 实现工业废水零排放目标, 某厂从实际需求出发, 运用数智安环 QC 理论和方法, 研发了一套“物联网+”构建下的模块化中水调度系统。通过对中水输送管道、灌溉喷头、控制阀门、供能方案和网络通信等关键环节的分析和优化, 实现了中水的高效利用和自动化调度。实践表明, 该系统能够显著提高中水回用率, 降低单箱化学需氧量排放量, 同时具有良好的经济效益和社会效益, 为烟草行业的绿色发展提供了新的思路和方法, 也为工业领域废水治理提供了可推广的解决方案。

**关键词** 数智安环理论; 物联网; 中水回用; 模块化; 调度系统

中图分类号: TP3; X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.013

## 0 引言

在日益严格的环保政策背景下, 工业废水治理已成为企业绿色发展的核心议题。中水回用作为一种有效的节水措施, 在工业、农业和城市绿化等领域得到了广泛应用。行业内主要通过将污水处理达标后进行回用, 即中水回用, 来实现排水量的减少<sup>[1]</sup>。某厂污水处理站出水水质能够满足中水回用要求, 但限制中水回用的主要原因是未找到合适的用水途径。本研究基于数智安环 QC 理论, 将物联网技术与模块化设计结合, 构建智能化中水调度系统, 实现该厂中水回用率的最大化, 达到污水零排放的目标。这一系统的实施不仅有效减少企业对新鲜水资源的依赖, 降低生产成本, 还显著提升企业的环保形象和社会责任感, 同时为行业乃至其他工业领域提供可复制的绿色转型范例。

## 1 “物联网+”模块化中水调度系统研发思路

### 1.1 参考借鉴

在调研其他单位成功案例的基础上, 发现以下技术可供借鉴:

(1) 按植物类型、面积分区灌溉: 如同行业单位按绿化区域划分, 每 300 ~ 500 m<sup>2</sup> 设置 5 ~ 10 喷头进行分区灌溉。(2) 远程控制/定时定量的阀门: 如农业供水每日定时喷灌, 在水量临时增多减少时通过联网阀门远程控制。(3) 太阳能供能等清洁能源: 易部署且环保, 如某地临时增加路灯采用太阳能供电。

### 1.2 研究确定

某厂立足实际, 在借鉴成功经验的基础上, 提出

**创新思路:** 通过设置分区灌溉, 运用物联网阀门控制管道供水, 采取太阳能面板给阀门供能, 实现绿化区域的自动化喷灌, 解决加强中水回用的问题, 明确提出“物联网+”下的模块化中水调度系统研发构想。

## 2 “物联网+”模块化中水调度系统研究方法与设计

### 2.1 数智安环 QC 理论框架

数智安环 QC 理论是一种集成了信息技术、网络技术和现代管理学原理的先进理论, 它强调通过信息化手段实现环境监测、分析、预警和决策的自动化, 从而提高系统的整体性能和运行效率<sup>[2]</sup>。首先, 数智安环 QC 理论的基础是对环境数据的收集与分析。这一过程中, 通过传感器、监测站点等多种手段收集环境数据, 利用大数据分析技术对这些数据进行处理和解读, 以获取环境质量、污染物排放、资源消耗等方面的关键信息。数据的准确性和实时性是该理论实施的前提, 因此, 数据采集的技术和设备的先进性、数据管理的系统性是理论实施的基础要素。其次, 数智安环 QC 理论强调的是智能化的决策支持系统。基于对收集到的环境数据的深入分析, 构建智能决策支持系统, 为环境保护的决策提供科学依据。该系统能够模拟不同的环境保护策略的实施效果, 预测未来的环境变化趋势, 从而为决策者提供最优的决策方案。最后, 数智安环 QC 理论强调的是持续地改进和优化。环境问题具有复杂性和动态变化性的特点, 通过不断地监测、分析、决策和反馈, 不断优化环境保护的策略和措施, 实现环境质量的持续改善和可持续发展的目标。

通过这一理论的实施,可以有效提升环境管理的效率和效果,为实现可持续发展的目标提供有力支撑。本研究采用QC活动七步骤:选题(数据采集与分析)→目标设定(智能预测与量化)→方案制定(系统架构与模块化)→对策实施(设备部署与预测)→效果验证(实时监控与数据分析)→标准化(规范化与数字孪生)→总结改进(迭代优化),结合物联网技术构建系统化解决方案。

## 2.2 物联网技术在中水调度中的应用

物联网技术在提升水资源智能化管理和调度方面的优势显著,尤其在中水调度领域,其应用极大地提高水资源的利用效率和管理智能化水平。通过深入研究发现:首先,物联网技术能够实现对水资源状态的实时监控。通过在各关键点部署传感器,可以实时收集关于水质、水量、水位和流量等数据。这些数据的实时性对于中水调度至关重要,因为它直接关系到调度的及时性和准确性。其次,物联网技术的应用使得水资源管理更加精准和智能化。通过收集到的数据,结合先进的数据分析和处理技术,可以对水资源的使用进行精准预测和合理调度。在中水调度中这意味着可以根据实时数据和预测模型,优化水资源的分配方案,实现精准调控,避免资源的浪费<sup>[3]</sup>。最后,物联网技术支持的远程监控和远程控制功能,极大提升了中水调度的灵活性和响应速度。管理者可以在远程监控中心对整个水资源系统进行监控和调控,及时调整调度策略,以应对不同的环境变化和需求变化<sup>[4]</sup>。这种远程操作的便利性大大提高了中水调度的效率和可靠性。

综上所述,物联网技术在中水调度中的应用不仅可以提高水资源的利用效率,还可以提升管理的智能化水平,实现更加精准和智能化的水资源管理和调度。

## 2.3 系统设计目标

(1)核心目标:中水回用率100%,污水零排放。(2)技术指标:一是喷灌覆盖面积 $\geq 58\ 000\ \text{m}^2$ ;二是阀门供能稳定性 $> 99\%$ ;三是单箱COD排放量 $\leq 2.0\ \text{g/箱}$ 。

## 2.4 模块化系统架构

系统由四大模块构成:(1)输水模块:PPR管道(DN25)与耐腐蚀阀门;(2)灌溉模块:大射程旋转式喷头(覆盖 $50\sim 100\ \text{m}^2/\text{个}$ );(3)控制模块:NB-IoT无线通信+太阳能供能阀门;(4)监测模块:云端数据平台实时监控水量与水质。

## 2.5 模块化中水调度系统的实施步骤

第一步,实施模块化中水调度系统前,进行全面的需求分析。这包括对当前水资源状况的评估、系统的功能需求、预期的技术要求以及经济预算的制定。需求分析的目的在于确保所设计和实施的系统能够满

足实际需求,同时在预算范围内最大化效益。第二步,根据需求分析的结果,设计系统的模块化结构。模块化设计的优势在于其灵活性和可扩展性,能够根据需要进行扩展或升级。设计时,考虑各模块之间的接口、数据传递机制以及整体系统的可靠性和安全性。第三步,系统设计阶段主要是将模块化设计的概念具体化,转化为详细的技术方案和设计图纸。设计阶段需要考虑的因素包括但不限于:系统的物理布局、设备选型、材料选择、系统的能源效率和环境影响。同时,还需要对系统的运行维护进行规划,确保系统的长期稳定运行。第四步,设计确认后,进入系统开发与制造阶段。这一阶段的主要任务是根据设计图纸制造出各个模块,并进行系统集成。在这个过程中,需要严格按照设计规范和标准执行,确保每个模块的质量符合要求。此外,还需要进行模块的测试,包括但不限于功能测试、性能测试和安全测试,确保每个模块在集成后能够稳定运行。第五步,系统集成完成后,进入系统测试阶段。这一阶段主要是对整个系统进行全面的测试,包括系统的功能测试、性能测试、兼容性测试和稳定性测试。第六步,系统的部署与运行阶段。这一阶段主要包括系统的安装、调试、培训和交付使用。在安装和调试过程中,需严格按照设计和施工标准执行,以确保系统的正确安装和配置。

模块化中水调度系统的实施是一个系统而复杂的工程,项目团队从需求分析到设计、开发、测试,直至部署运行的每一个环节都严格把关,以确保系统能够顺利部署与运行。通过科学的规划、合理的设计和严格的执行,模块化中水调度系统为水资源的可持续管理提供强有力的支持<sup>[5]</sup>。

## 3 “物联网+”模块化中水调度系统研究方案制定

### 3.1 提出总体方案

研制一套高效、精准、自动化的中水调度系统,并绘制总体方案图。

### 3.2 技术指标需求分析

(1)中水输送管道:公称压力应大于或等于灌溉管道系统分段灌溉的工作压力;具备抗腐蚀能力;根据水源流量和压力选择合适的管径;采取加固措施或基础找平,埋深至少 $10\ \text{cm}$ 以下。(2)灌溉喷头:根据草坪面积选择大射程、中射程、小射程喷头;以固定式、旋转式喷头为主;故障率较少,易于设置和维护。(3)控制阀门:采用球阀、闸阀、截止阀等类型;选择不锈钢、黄铜、塑料或内衬耐腐蚀材料的阀门;尽量减少压力损失。(4)阀门供能方案:采用电力驱动或太阳能及其他可再生能源;避免大范围电路铺设,实现本地化部署。(5)阀门网络通信:采用无线通信

技术 (NB-IoT 或 Wi-Fi) 或有线通信技术架设网线、光纤; 网络控制器防护等级不小于 IP65。

### 3.3 方案分解

将总体方案细化为新增中水输送管道、灌溉喷头、控制阀门、阀门供能方案、阀门网络通信等分级方案。

### 3.4 确定最佳方案

(1) 中水输送管道材质: 选择 PPR 给水管, 因其耐压耐腐蚀且成本适中。(2) 中水输送管道管径: 选择 DN25 管径, 因其压力损失较小且适宜地下施工埋管。

(3) 喷头覆盖范围: 主要选用大喷射的旋转式喷头, 在面积较小的区域可选用中喷射旋转式喷头、小喷射旋转式喷头及固定式喷头。(4) 喷头类型: 以旋转式喷头为主, 固定式喷头用于绿化边缘区域。(5) 阀门类型: 采用铜制球阀, 因其便于开启和关闭且能准确控制灌溉流量。(6) 阀门材质: 选择不锈钢阀门或黄铜阀门, 因其耐腐蚀且适合长期埋地或露天使用。(7) 供能方案: 采用太阳能 + 蓄电池供能方案, 因其稳定且符合电气安全标准。(8) 网络通信: 采用 NB-IoT 无线通信技术, 因其传输距离远且稳定性高。

## 4 “物联网+”模块化中水调度系统研究成果

### 4.1 预期目标实现

项目目标实现了工厂废水零排放, 中水调度 / 利用率达到 100%。

### 4.2 综合效益凸显

(1) 指标提升: 2024 年 8-10 月, 该厂中水回用率达到 83.4%, 中水使用量 7 221 吨, 外排废水量同比减少 76.8%, 单箱化学需氧量排放量指标为 0.3 g/箱, 同比减少 88.4%, 达到行业先进水平。(2) 经济效益: 充分利用中水灌溉和自动喷洒, 减少了绿化用水和用工费用, 有效平衡了绿植养护和节约成本两项重要工作, 对推动工厂绿色发展具有深远意义。(3) 社会效益: 贯彻工厂“特色化、高端化、绿色化”发展目标, 充分落实国有企业社会责任。(4) 数智效益: 数据驱动决策是“数字化”的核心, 智能阀门加联网控制模式, 实现有效节水、减少排水、充分用水的良好循环, 通过进一步对数据进行挖掘和分析, 从而更精准地预测潜在的环境风险和安全隐患, 推动工厂高质量发展<sup>[6]</sup>。

## 5 “物联网+”模块化中水调度系统研究发现

通过实践研究发现, 该厂实现了工厂废水零排放, 中水调度 / 利用率达到 100% 的预期目标。模块化中水调度系统的有效性 & 物联网技术在水质监测系统中的应用价值得以充分发挥: 一是模块化中水调度系统在提高水质监测效率和准确性方面展现出显著的有效性。

模块化系统可以根据不同的监测需求进行灵活配置和扩展, 这不仅降低了系统的复杂性, 还显著提高了监测的灵活性和扩展能力。二是物联网技术在水质监测系统中的应用大大提升了监测的实时性和远程管理能力。物联网技术的引入使得水质监测数据可以实时传输并进行远程监控, 这对于及时发现水质问题、迅速响应处理具有重要意义<sup>[7]</sup>。此外, 物联网技术还能够支持远程实时数据分析和云存储, 为水质数据分析提供了强大的数据处理能力, 极大地提高了数据处理的效率和准确性。模块化中水调度系统的有效性和物联网技术的应用价值是本次研究的两大主要发现。

## 6 结论与展望

在现有项目成功经验的基础上, 探索“物联网+”下的模块化中水调度系统, 能够适应不同的环境条件和应用场景, 将是未来持续努力的方向。一是针对模块化中水调度系统的优化, 进一步研究如何提高系统的灵活性和可扩展性。模块化设计可以让中水调度系统更加灵活地适应不同规模 and 不同处理要求的场景, 同时也便于未来技术的整合和升级。例如, 可以研究如何通过智能控制系统实现对不同模块的自动控制和优化调度, 以减少能耗和运行成本。二是物联网技术的应用范围拓展也是未来研究的重点。物联网技术可以实现数据的实时采集、传输和处理, 对于提高水质监测系统的实时性和准确性至关重要。未来项目团队将研究如何将物联网技术与现有的水质监测系统相结合, 以实现更广泛的应用。

本研究通过数智安环 QC 理论与物联网技术相结合, 成功研发模块化中水调度系统, 以工业废水循环利用为抓手, 推动水资源节约集约利用, 实现废水零排放目标。

### 参考文献:

- [1] 种达. 烟草企业污水处理技术改造的思考与实践[J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 09(04): 42-43.
- [2] 楼小茜. 基于挣值法的 QC 污水处理厂提级改造工程成本控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [3] 周迎迎. 中水回用技术的研究与应用[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(15): 22-24.
- [4] 郭杰, 张俊杰, 赵建威. 中水回用技术的研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(06): 150-152.
- [5] 周国成, 凌建军主编. 水处理新技术与案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [6] 刘放平, 李烈岳. 基于物联网的智慧水务系统在污水处理中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2020(13): 90-91.
- [7] 何鹏, 周旭. 基于物联网的新型水质监测系统的研究[J]. 设备管理与维修, 2021(22): 98-99.

# 市政雨水泵站深基坑支护施工技术

徐汉橙, 宋 坤, 王 钊

(济南城建集团有限公司, 山东 济南 250000)

**摘 要** 市政雨水泵站深基坑支护施工技术的应用, 能提升泵站基坑工程稳定性, 确保水泵系统稳定运行。本文以某市政雨水泵站深基坑支护工程项目为例, 通过深基坑支护施工方案选择, 从施工准备、测量放样、三轴水搅拌桩施工、钻孔灌注桩施工、高压旋喷桩施工、深基坑土方开挖及支撑施工以及深基坑降水施工等方面对雨水泵站深基坑支护施工工艺进行了研究, 提出了通过执行施工工艺和加强现场监测, 确保深基坑支护的稳定性, 满足城市排水系统功能性需求, 以期对提高城市防洪排涝功能具有积极的作用。

**关键词** 市政雨水泵站; 深基坑支护; 钻孔灌注桩; 三轴搅拌桩; 高压旋喷桩

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.014

## 0 引言

市政雨水泵站深基坑施工技术对其运行效果有直接影响, 并且关系到市政工程的运行水平以及城市发展。随着现代工程技术水平不断提高, 深基坑支护技术全面发展并构建完善技术体系, 使得市政雨水泵站建设效果全面提升, 保证其各项性能不受影响。而在市政雨水泵站深基坑支护施工阶段有多方面因素会对深基坑支护的强度、稳定性、使用效果产生不利影响, 还关系到市政雨水泵站的使用效果, 对周边居民生命安全以及城市排水通畅性有着直接影响<sup>[1]</sup>。基于此, 深入分析市政雨水泵站深基坑支护施工技术, 优化改进施工工艺方案保证雨水泵站深基坑支护效果合格, 满足城市排水系统功能性需求, 对提高城市防洪排涝功能产生积极作用。

## 1 工程概况

某市政雨水泵站位于城市核心地带, 其建设目的是提高区域内雨水排放能力, 避免造成严重城市内涝保证居民出行不受影响。该泵站建设规模为单日处理水量 10 万吨, 占地面积 3 000 m<sup>2</sup>, 基坑开挖深度最大 12 m。经过现场地质勘察发现, 本项目所在地区地质条件复杂性较高, 包含细砂、粗砂、粉质土等土质条件, 地下水位较高, 并且极易受到季节性降雨影响导致水位波动变化剧烈。此外, 该项目处于城市核心地带, 周边分布着大量城市道路和既有建筑, 居民数量较多, 对施工计划安排以及环境保护方面有更高要求, 需落实各项安全、文明施工措施。为确保该项目具备较高的稳定性和安全性, 需选择适宜的深基坑支护施工技术措施保证雨水泵站建设运营效果合格。

## 2 施工方案选择

通过对本项目设计方案以及现场情况调查, 综合分析多方面的因素, 组织专家展开论证, 并对比多种深基坑支护方案。本项目方案对比时, 主要从如下几个方面展开: (1) 钻孔灌注桩: 钻孔灌注桩为工程领域中常见的深基坑支护措施, 其优势为承载力高、抗渗性好。该技术应用阶段需根据现场勘测作业结果确定钻孔灌注桩施工位置, 明确长度、直径、间距等参数, 使其支撑具备稳定性, 抗侧力能力达到标准要求。(2) 三轴搅拌桩: 该技术应用时利用设备在基坑内部形成止水帷幕有效阻隔地下水的影响, 确保支护结构的强度和稳定性合格且能降低风险发生概率。此外, 三轴搅拌桩施工过程中利用设备搅拌使其形成整体结构, 可确保周边土体的稳定性合格。(3) 高压旋喷桩: 由于本项目地质条件较差, 且周围土质条件不良, 所以选择使用高压旋喷桩方式加固处理, 确保土体结构承载力、抗变形能力达到目标。(4) 钢筋混凝土内支撑: 根据本项目施工需求, 基坑支护阶段选用钢筋混凝土内支撑方式以提高基层结构强度以及稳定性。内支撑体系设计时需考虑到深基坑尺寸以及现场地质条件确定适宜支撑方式, 并加强受力分析提高结构稳定性。(5) 降水管井技术: 根据本项目现场施工需求, 在合适位置布置降水管井, 将影响基坑稳定性的水抽出, 保持地下水位在合理范围内, 基坑内部处于干燥度状态以提高结构的稳定性<sup>[2]</sup>。

## 3 市政雨水泵站深基坑支护关键技术

### 3.1 施工准备

根据本项目设计方案和现场勘测结果加强图纸会审, 及时修正图纸设计中存在的缺陷问题。同时, 图

纸会审时做好细节方面处理,并由施工单位积极参与保证图纸设计效果达到标准。施工设计规划极为关键,明确现场施工任务和具体标准,编制项目专项方案,尤其针对施工难点制定针对性措施。此外,根据现场施工标准准备人员、材料、机械设备,并加强各项性能参数检测工作使现场施工作业顺利开展。

### 3.2 测量放样

测量放样为准备阶段的关键工作,按照设计方案选择经纬仪、水准仪、全站仪作为主要设备构建完善控制网络。测量放样阶段对各结构尺寸展开检测,尤其是支撑结构的高程、控制点等加强复核检测以保证测量放样的精度合格。同时,由技术人员提供基桩轴线、控制点、高程基准点的关键位置,并且设置围栏,做好防护措施。加强现场检测和数据记录,提高施工精准性。根据提供的数据信息构建控制网,使得测量控制网精度合格,且控制点数量在 3 个以上。控制点确定后保证其达到坚固、稳固性效果,不能受到打桩施工作业的影响,采取相应防护措施保护其完整性不受损害。为确保市政雨水泵站深基坑支护现场施工作业顺利开展,施工阶段需要设置临时控制点。临时控制点布置完成后需要在现场设置相应的防护装置,以免因为操作不当或者人员管理不善而引发偏差问题。如果操作过程中出现控制点偏移,需要进行复核检测,精度合格后再继续开展后续施工。测量控制网设置结束后,经过监理工程师复核检测各项指标,合格后再开展现场施工。

### 3.3 三轴水泥搅拌桩施工

本项目深基坑支护施工中选用三轴水泥搅拌桩制作止水帷幕,有效隔绝地下水的干扰影响高深基坑的稳定性和强度。该技术应用阶段结合本项目支护施工需求,选择直径 850 mm 的桩体,间隔 600 mm 布置,以普通硅酸盐水泥为主要施工材料制作,整体长度 15 m。施工开始前对混凝土材料配比方案展开检测,确定各种材料加入比例,水灰比为 1.2~1.5,水泥加入量 20% 以上。本项目施工中选用 JB-160A 三轴桩机开展施工作业,并对施工工艺和各项技术参数展开检测,使得三轴水泥搅拌桩的性能合格提高深基坑支护强度<sup>[3]</sup>。三轴水泥搅拌桩止水帷幕施工阶段对支护效果展开监测,实时掌握桩体直径、深度、土质条件等参数。按照本项目施工工艺方案采用套接一孔法成桩方式,通过二喷二搅使得三轴水泥搅拌桩的强度合格。而施工阶段加强泥浆配置极为关键,选择膨润土和水充分混合以保证止水效果达到标准。施工阶段,水泥浆液直

接注入支护作业位置,并按照工艺方案进行下沉和提升。下沉时速度为 0.5~1.0 m/min,提升时速度为 1.0~2.0 m/min,使得注浆搅拌加固效果达到目标。

### 3.4 钻孔灌注桩施工技术要点

钻孔灌注桩是工程领域深基坑支护的主要技术类型,需按照现场地质条件和设计方案确定钻孔灌注桩布置方案,以提高深基坑支护强度。由于本项目粘土、淤泥质土分布范围广、厚度大,结构强度不足,所以在钻孔灌注桩施工中选择直径 800 mm 和 1 000 mm 的桩体,应用 C30 混凝土制作钻孔灌注桩提高支护稳定性。钻孔灌注桩技术应用的阶段,选择 GPS-15 钻机钻进作业,再将水泥混凝土灌入到孔内形成质量合格的桩体。而在钻孔灌注桩施工阶段选择跳孔方式避免相邻孔位造成影响<sup>[4]</sup>。

钻孔灌注桩施工开始前加强试验分析极为关键,至少选择 2 根以上的桩体展开试验检测,明确工艺方案和技术参数以提高钻孔灌注桩施工水平。钻孔灌注桩施工中钢筋笼作为主要支撑结构部件,加强钢筋笼尺寸、规格控制并落实保护性措施,避免损坏而影响结构强度。钢筋笼运输到现场后使用设备吊装到孔内,确保其安装的位置精度合格。同时,对孔内泥浆沉渣全面清理处理,防止厚度过大而给灌注桩强度产生不利影响。通常来说,清理结束后检测底部沉渣厚度,不超过 50 cm 为合格标准。

钻孔灌注桩施工中,当现场准备结束后即可进行混凝土浇筑作业。本项目选用 C30 混凝土浇筑施工,以导管法浇筑为主,先将导管插入到距离底部 0.5 m 左右位置再进行浇筑作业。浇筑施工保持连续进行,现场准备充足的混凝土施工材料,并且确保导管理设深度始终在 2~6 m 之间。混凝土浇筑施工中随着混凝土液面上升,逐步向外拔出导管,但要保持动作均匀,且始终保持导管理设深度在 2 m 以上,以免发生断桩现象影响灌注桩结构强度。根据本项目技术标准,钻孔灌注桩施工中混凝土充盈系数达到 1~1.3,并且比原定设计方案灌注长度超过 0.5~1.0 m,从而确保桩头位置的强度和密实度达标。此外,灌注桩施工完成后进行各项性能参数检测,符合技术标准再投入使用。

### 3.5 高压旋喷桩施工技术要点

高压旋喷桩进行深基坑支护施工时,按本项目设计方案使用直径 800 mm 的高压旋喷桩,以 42.5 普通硅酸盐水泥为主要材料,利用二重管方式完成支护作业。施工开始前对混凝土材料进行配比设计,本项目水灰比设计为 1.0,水泥加入比例 25% 以上。而在施工阶

段需遵循工艺方案,浆液流量70 L/min以内,喷射提升速度15~20 cm/min,旋转速度10~15 r/min。高压旋喷桩施工阶段加强现场施工参数控制极为关键,以全站仪作为主要测量设备确保高压旋喷桩安装位置精度合格,且高度超过设计标高。高压旋喷桩施工时喷入混凝土浆液极为关键,选择高压泵作为输送设备,不仅能保证喷射量,还能确保混凝土各部位的强度合格。在混凝土喷入施工中同时搅拌处理,可使施工材料和原有土质充分混合形成强度较高的桩体结构。高压旋喷桩施工完成后,最为关键的是28 d后检测,一般采用取芯检测方式,保证加固强度在1.2 MPa以上才能投入使用<sup>[5]</sup>。

### 3.6 深基坑土方开挖及支撑施工技术要点

深基坑支护施工阶段土方开挖和支撑施工作为重点工序,需按照技术标准进行开挖作业,明确开挖范围。本市政雨水泵站施工现场地质条件复杂性较高,选择土方车辆配合抓斗挖机联合施工,将开挖后弃土运输到规定地点存放。基坑开挖过程中加强支护处理,选择性能优越的混凝土在支护位置浇筑施工,取代原有土质,提高基坑结构的支撑强度和稳定性。冠梁、腰梁及钢筋混凝土内支撑作为主要支撑结构部件,需要通过合理组合设计使其支撑体系强度合格,并且具备较高的防护性能,预防施工阶段发生基坑变形以及坍塌风险。冠梁、腰梁按照设计方案进行加工制作,尺寸、强度、位置符合技术标准,支撑效果合格。钢筋混凝土内支撑作为主要结构部件,需要考虑到深基坑的深度、形状制作,使其在开挖阶段有足够的支撑力保证深基坑的稳定性。按本项目设计方案,施工阶段采取预降水措施,确保整个深基坑支护施工过程中地下水位始终保持在开挖面以下0.5 m深度。而在土方开挖作业阶段以分层方式为主,单层开挖深度2~3 m,防止开挖深度过大引发变形现象。此外,现场准备足够的开挖机械设备和土方运输车辆,及时运输土质以免表面堆放过多而给基坑结构稳定性产生不利影响。

### 3.7 土方开挖

土方开挖施工先开展首层开挖作业,其深度从首道支撑底部到第二道钢筋混凝土支撑底部为止。该环节开挖施工中以人工联合机械设备方式为主,对开挖尺寸、深度全面监控,避免超挖而导致深基坑稳定性下降。开挖阶段将挖掘机均匀布置,采取对称开挖措施使各位置受力达到均衡性以免因为失衡而导致结构稳定性下降。根据本项目更新方案,开挖过程中预留30 cm左右厚度,采取人工开挖方式防止机械操作不当

引发超挖或者地层扰动过大的现象。开挖完成后及时进行钢筋混凝土支撑设置提高支撑结构稳定性,预防发生变形问题。首层开挖完成后,并且支撑具备稳定性即可开展第二层开挖作业,其需要开挖到下一层钢筋混凝土支撑的底部。该阶段与首层土方开挖作业基本相同,但由于其开挖深度不断增加,所以要实时关注基坑支护状态以及稳定性以免出现严重变形问题。对于其他结构层来说,执行该工艺方案保证开挖效果合格且避免出现基坑变形、损坏现象。

### 3.8 深基坑降水施工技术

根据本市政雨水泵站施工技术方案,深基坑施工阶段采取降水施工措施确保地下水位始终保持在合理范围内,避免给基坑冲刷导致稳定性下降。本项目开挖深度较大,其最大深度已经达到12 m,所以对深基坑结构稳定性产生一定影响。施工阶段采取必要降水措施,及时排除地下水并监控地下水位波动变化情况,预防地下水对深基坑产生过大的冲击力作用。同时,根据本项目设计方案现场布置疏干降水井,将其作为观测井使用。降水井中安装多级滤管,选用直径273 mm的钢管制作,壁厚4 mm以上,成孔直径650 mm以上。滤料选择中粗砂材料,保证其过滤效果合格。此外,现场基坑周边开挖排水沟宽度300 mm以上,深度200 mm以上,并设置坡度以提高排水效果。

## 4 结束语

市政雨水泵站作为排水设施中重要组成部分,尤其在深基坑支护阶段施工难度较高,受到周边环境的干扰影响。结合市政雨水泵站深基坑支护施工需求,对现场展开勘察分析确定深基坑支护施工方案,保证施工效果合格。此外,在支护阶段加强监测,实时掌握地下水位以及基坑变形状态,能及时采取合理应对措施,提高深基坑支护水平,保证雨水泵站功能不受影响。

### 参考文献:

- [1] 赖爱平,罗凯,罗家杰.大型泵站施工过程中基坑监测及支护结构受力分析[J].特种结构,2024,41(04):89-93.
- [2] 杨自龙.提水泵站工程中深基坑开挖与降水的施工方法[J].珠江水运,2023(05):94-96.
- [3] 杨以亮,雷朝生.引江济淮二期涡阳泵站深基坑设计分析[J].治淮,2024(11):21-23.
- [4] 曾小燕.浅谈某雨水泵站工程深基坑支护形式[J].四川水泥,2020(08):52,54.
- [5] 李阳.给水泵站大口径给水管道深基坑开挖支护施工技术研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(07):85-87.

# 降水技术在建筑深基坑施工中的应用

姚培超

(中交一公局厦门工程有限公司, 福建 厦门 361021)

**摘 要** 地下水位高是影响建筑深基坑施工效果和建筑稳定性的关键因素, 为解决建筑深基坑施工中地下水位高导致的基坑施工强度不足问题, 可采用管井降水技术的方法进行深基坑降水施工。研究表明, 降水工程开展过程中通过计算基坑涌水量、选择水泵和布置降水井点, 可将地下水位降低到适宜范围内, 降水技术能避免流沙、管涌等情况, 保证深基坑施工的干燥状态和提高建筑工程基础强度。

**关键词** 建筑深基坑; 降水技术; 管井降水; 基坑涌水量; 地下水位

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.015

## 0 引言

建筑工程项目施工中的基坑作为重要辅助设施, 关系到建筑工程基础的强度以及建筑工程稳定性。但很多建筑项目施工阶段地质条件复杂性较高、地下水位高, 造成基坑施工强度不足, 尤其是深基坑情况下极大危害整个建筑工程的运行效果。而在建筑深基坑施工阶段采用科学合理的降水施工方式, 发挥管井降水的优势, 避免地下水对深基坑施工造成不利影响, 对提高建筑工程结构强度和稳定性有积极作用。同时, 建筑深基坑施工阶段采取先进抽水措施使得地下水位降低到适宜范围内, 以免发生流沙、管涌等情况, 保证地质条件达到运行需求, 对建筑工程运营效果提升产生积极意义。本文深入分析管井降水技术在建筑工程深基坑施工的技术措施并落实各项施工技术方案, 保证建筑深基坑施工效果合格, 也能为今后类似项目施工奠定基础。

## 1 降水技术分析

建筑深基坑施工中采用降水技术使得地下水位处于合理范围内, 防止深基坑开挖结束后导致结构强度不足或者失稳的情况发生。降水技术应用过程中应对深基坑情况展开分析, 保证施工后深基坑处于干燥状态, 确保边坡稳定性合格, 也能避免发生承载力不足、坑底隆起、管涌等情况。降水技术在深基坑施工中发挥着应有的作用, 其施工方式较多, 包含明沟加集水井降水、轻型井点降水、喷射井点降水等方式, 结合实际情况选择降水施工方案, 确保深基坑施工效果达到目标。

此外, 深基坑施工中合理使用降水技术, 使得地下水位处于安全区间内, 提高基坑开挖以及支护水平,

营造出深基坑施工的安全性环境, 使建筑工程周边的建筑达到安全、稳定、可靠的效果<sup>[1]</sup>。

## 2 建筑深基坑工程概况

某建筑工程项目位于城市核心地带, 周边分布着多条交通干线以及商业建筑, 所以现场施工复杂性高、难度大。本工程需要建设商业综合体, 总建筑面积达 10 万 m<sup>2</sup>。其中, 地下建筑为 3 层, 开挖深度 15 m, 开挖面积 5 000 m<sup>2</sup>。同时, 经过技术人员现场勘测发现本项目所在地区地质条件复杂性较高, 多种因素共同影响导致地下水位较高, 和基坑底面有 3 m 左右的距离。为使得本项目深基坑开挖施工效果合格, 提高建筑工程基础强度、稳定性, 保证建筑运营安全性, 且防止给周边建筑和交通设施造成不利影响, 决定采用综合降水技术以控制地下水, 保证建筑基坑施工效果合格。

## 3 管井降水设计

### 3.1 基坑涌水量计算

根据本项目的现场实际情况, 采用下穿地道基坑开挖措施, 由于现场岩溶裂隙、溶洞水含量较大, 容易发生透水性事故, 并且具备一定的承压性。基于此, 施工前进行基坑涌水量的精准计算。按照国家标准以及本项目的实际情况选择适宜的基坑涌水量计算公式, 如下:

$$Q=1.366K \frac{(2H-s)s}{lgR-lgr_0}$$

公式中:  $Q$  为基坑涌水量 (m<sup>3</sup>/d);  $K$  为渗透系数 (m/d);  $H$  为潜水含水层厚度 (m), 指从潜水含水层底板到潜水面的垂直距离;  $s$  为水位降深 (m), 即基坑内外的水位差;  $R$  为影响半径 (m), 表示抽水影响所及的范围;  $r_0$  为基坑等效半径 (m), 对于矩形基坑。

### 3.2 水泵的选择

为确保深基坑施工效果合格,降水技术应用阶段先选择水泵,确保现场施工时降水达到目标。水泵选择时精准计算现场出水量,并对管井展开综合计算分析。通过现场的勘测和数据计算,最终选择使用200QJ40-39/3型潜水泵进行现场抽水作业,使其排水量合格满足现场施工需求。该水泵的特点是抽水效率高、速度快,其流量可达到 $43\text{ m}^3/\text{d}$ ,快速完成地下水抽出;水泵扬程 $39\text{ m}$ ,符合深基坑开挖施工需求;电机功率 $55\text{ kW}$ ,保证动力供应充足,潜水泵运行的稳定性合格;出口管道直径DN80,和降水井管能够紧密连接,减小水流阻力保证抽水效率达到目标;采用深井水泵抽水作业,计算确定最适宜的抽水量参数。根据上述参数,计算每日抽水量: $40 \times 24 \times 75\% = 720\text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 3.3 降水井施工布置

根据本建筑工程项目设计方案,分析现场基坑施工需求,合理布置降水井点,将其设置在坡顶外 $5\text{ m}$ ,间隔 $20\text{ m}$ 布置以保证降水效果达标。观测井布置也必不可少,设置在降水井周边 $5\text{ m}$ 范围内。但考虑到本项目在基础施工过程中内部填充土石量较大,所以降水井设置阶段观测井间隔 $100\text{ m}$ 设置。同时,降水作业开始前加强试验分析并对各项参数展开检测,保证其满足现场施工需求。因为本项目基坑开挖作业深度大,所以施工过程中应加强降水参数检测并落实试验和数据计算,明确降水井的布置数量进而提高降水作业效果。

## 4 工艺流程及操作要求

### 4.1 管井降水工艺流程

本项目应用管井降水作业前,需加强现场测量放样,确定管井的布置位置,使其数据精度达标。管井施工过程中旋挖钻机作为主要施工设备,确保其钻进作业效果合格,再填充滤料使其密实度合格,符合技术标准。基坑开挖阶段对其深度展开检测,并结合实际情况明确降水施工方案,使得降水效果合格,地下水水位线处于安全区间。管井降水施工时按照要求采取回收水泵、封闭降水井等措施,确保降水井投入使用后功能合格。

### 4.2 管井降水施工要点

1. 钻孔。本项目钻孔施工中采用旋挖钻成孔施工方式,并且现场准备充足且性能合格的泥浆作为护壁材料使用,确保管井壁达到稳定性,避免施工阶段引发塌孔问题。钻进阶段准备充足泥浆材料,并加强各项性能参数检测,使其比重处于 $1.1 \sim 1.15$ 之间,并且每项参数符合技术标准再投入使用。钻机作为管井

施工的主要设备,对钻机设备性能展开检测,并且运输到现场后定位精度达标。钻机安装时确保其基础位置具备平稳性,安装位置精度合格,且避免钻机作业阶段出现晃动、偏移等情况影响成孔精度。同时,组织施工人员选择合适护壁管,并且按照工艺方案在现场进行埋设作业。护壁管安装完成并且检验达到技术要求,即可开展现场钻进施工。而施工阶段应保证底部不能存在沉渣,以免因为沉渣厚度过大影响管井施工效果。此外,钻井阶段加强垂直度检测,保证其不超过 $1\%$ ,否则需要重新施工<sup>[2]</sup>。

2. 井管安装。本项目井管安装前先进行底部沉渣厚度检测,将沉渣抽出且沉渣厚度在合理范围内,清孔质量达标再进行井管安装。井管安装以吊车作为辅助设备,将其吊装到安装位置,保证安装的精度达标。井管安装阶段在井口位置包裹三层 $40$ 目尼龙网,各位置连接具备较高的强度和密封性。井管连接时以焊接方式为主,采用坡口焊接方式,并对焊接质量展开检测,使其施工效果合格。井管安装结束后按照工艺方案进行固定性检测,并采取封闭措施以免杂物进入到内部造成施工效果不合格。

3. 填充滤料。井管吊放到作业位置后,在管道周边填充滤料。本项目选择使用碎石材料填充,其粒径为 $20 \sim 40\text{ mm}$ ,并且进行密实度检测使其强度合格。滤料填充作业结束后,现场操控设备夯实处理,使各位置填充的稳定性达到技术标准。滤料填充结束后在现场灌入足量泥浆稀释处理,并从井口周边向中心位置逐步回填。此外,现场压实过程中进行施工效果检测,防止压实度过高造成井管偏斜、变形、损坏等情况,也不能出现滤料破碎的现象,否则会对井管施工效果造成不利影响。

4. 洗井。井管安装完成后开展洗井工序,以空压机、活塞作为主要设备完成洗井作业,为后续管井降水措施顺利开展提供基础。在洗井时反复操作,最终出水含砂率在 $1/50\ 000$ 内为合格。井管安装结束且填充材料完成,需及时进行洗井操作,通常两者之间时间间隔不超过 $8\text{ h}$ 。现场施工阶段如果采用常规洗井方法无法达到技术标准,则需现场使用洗井剂浸泡处理完成洗井作业,确保洗井效果达到技术标准再开展后续施工<sup>[3]</sup>。

5. 井点拆除。根据本建筑工程项目施工工艺方案,基础结构施工完成并且回填作业结束后,即可将井点系统全部拆除。该阶段进行井点管拔出时,采用倒链或杠杆式起重机辅助完成,确保井点拔出顺利进行,且不会造成井管损坏。该阶段完成井管拔出后在孔洞位置使用土、砂作为材料填充处理,并进行压实作业使其密实度合格。

## 5 基坑监测

根据本项目深基坑施工需求加强基坑监测,提高施工质量保证,确保施工效果合格。基坑施工时对降水效果进行实时监控,掌握降水技术参数,为后续施工作业顺利开展提供基础。降水作业达到连续性标准,并采取防腐性措施保证降水性能达标。分析本项目监测结果,了解深基坑施工具体情况以便为后续建筑项目施工作业顺利开展提供基础。而在基坑开挖以及降水作业时,监测地下水水位变动情况极为关键,并观察现场是否存在管涌、冒水、渗漏等缺陷。首先是监测警戒值。本工程监测警戒值见表 1 所示;其次是应急措施。本项目的降水效果监测时,如果发现参数超出预警值应及时停止降水作业,分析形成原因,再对周边建筑物、管线以及各项基础设施检测,如果没有任何影响后再继续施工。根据本项目设计方案和工艺措施进行边坡加固处理,可提高边坡结构稳定性,保证深基坑施工效果达到目标。

表 1 监测警戒值

监测项目	最大位移 (mm)	警戒值 (mm)	相对沉降 (如适用)	每天发展不 超过 (mm)
基坑顶位移	50	45	-	5
地下管线 竖向位移	50	45	-	4
周边建筑物 沉降	60	50	2/1 000	3

## 6 管井降水技术应用需要注意的事项

1. 本项目管井安装结束后立即开展洗井作业,两者间隔时间不能超出标准,否则将会影响洗井效果。同时,洗井作业阶段将泥沙清理掉,防止过滤孔出现堵塞现象影响降水效果。

2. 本项目深基坑降水施工作业保持连续进行,确保降水系统达到通畅性以免出现管路堵塞而影响降水效果。同时,现场配置供电设施,保证电能供应充足,确保降水作业持续开展。

3. 本项目施工时加强用电安全管理,确保现场有完善的用电安全设施及保护装置的功能合格。同时,加强人员培训教育,使其对安全用电有所了解,并且对线路、设备定期展开检查,一旦存在任何安全隐患立即采取排查处理措施<sup>[4]</sup>。

4. 本项目降水施工阶段组织专人进行抽水处理,落实人员操作和安全教育,并加强现场施工记录工作。如果施工时存在任何问题立即组织技术团队解决处理,防止给后续施工安全性和顺利进行造成不利影响。

5. 由于本项目降水施工中涌水量呈现出下降的趋势,但每口管井的涌水量有很大差异,所以抽水的过程中应根据现场实际情况选择最适宜的措施。基坑施工阶段需设置观测井,由工作人员实时掌握管井降水的实际情况,并且做好现场记录工作。为使施工作业顺利开展,还需要观察基坑底部排水沟、集水井水位下降情况,并间隔 1 h 进行 1 次抽水。

6. 本项目管井降水阶段采用抽检措施检测降水效果是否合格,并且验证基坑的安全性是否达标。在该阶段,需要对整个排水系统展开检测,避免存在堵塞现象影响排水性能。还要在试抽结束后对各项工艺参数进行检查,并组织人员降水处理使得基坑具备安全性。该项目施工中从开挖到地下水标高监测前的超前出水时间在 10 天以上,并且水位并未超出设计标准参数。本项目监测时每日检测 3 次,测量水位并和设计参数对比,记录水位变动情况。现场监测过程中对水位、流量、含砂率参数展开检测,并保证电动机、传动轴、电流、电压等各项数据满足施工需求,形成完善的质量检验记录。此外,开挖基坑前进行抽水试验,根据试验结果和参数调整降水工艺方案使其效果合格,并在现场设置备用井以保证降水效果达到目标<sup>[5]</sup>。

## 7 结束语

建筑深基坑施工难度较大,尤其是地下水位较高的情况下,无法满足深基坑施工的安全性、稳定性要求,甚至对整个建筑项目的运营效果造成不利影响。建筑深基坑施工中采用降水技术,使得地下水位处于合理范围内,防止地下水侵蚀给建筑地基施工造成不利影响。管井降水施工技术作为先进的降水施工措施,在深基坑施工中能够提高降水效果,保证深基坑的可靠性、稳定性、安全性。在管井降水技术应用时对各环节进行检验分析,并落实工艺方案和质量控制措施,提高管井降水效果,以满足建筑工程施工和运营需求。

## 参考文献:

- [1] 林金发. 综合降水施工技术 in 高层建筑深基坑工程中的应用探讨 [J]. 河南建材, 2019(06):9-11.
- [2] 胡祥锋. 建筑深基坑降水施工技术分析 [J]. 建设监理, 2022(12):77-78.
- [3] 陈六超. 土钉墙结合管井降水技术在建筑深基坑施工中的应用 [J]. 四川建材, 2021,47(05):88-89.
- [4] 聂至波. 高层建筑深基坑支护及降水施工技术应用分析 [J]. 中国住宅设施, 2021(11):146-147.
- [5] 袁腾. 管井降水技术在建筑深基坑施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024,22(06):8-10.

# 大跨度采光顶施工技术难点与应对策略

关 奇, 顾松华, 华正滨

(青岛万科房地产有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘 要** 大跨度采光顶在现代建筑中得到广泛应用, 但其施工面临众多技术挑战。本文针对大跨度采光顶施工中的结构设计、高空作业安全、钢结构安装精度、防水密封、材料设备选择及质量检查验收等技术难点进行了深入分析, 并提出了相应的优化结构设计、强化安全管理、提高安装精度等应对策略, 旨在为大跨度采光顶施工提供技术支持与指导, 从而确保工程质量与安全。

**关键词** 大跨度采光顶; 施工技术难点; 结构设计; 高空作业安全

**中图分类号:** TU74

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.016

## 0 引言

大跨度采光顶是现代建筑的重要组成部分, 不仅为建筑内部提供了丰富的自然光, 增强了空间的透明度和舒适性, 还在建筑审美上发挥着关键作用。它是展现建筑风格和设计理念的核心元素。近年来, 随着建筑技术的不断进步, 大跨度采光顶在机场、体育馆、展览中心及其他大型公共设施和高端商业中心的应用日益广泛。然而, 考虑到其跨度较大且结构复杂, 施工涉及多个专业领域和技术细节, 因此面临诸多技术挑战。如果这些问题未能妥善解决, 将直接影响工程的质量、安全性和进展。因此, 深入研究大跨度采光顶的施工技术难题及解决方案具有重要的现实意义。

## 1 大跨度采光顶概述

大跨度采光顶通常指跨度超过 20 m 的采光结构, 主要由钢制支撑系统、采光面板及其他连接部件组成。作为采光顶的基础框架, 钢结构支撑体系需要承受自重、风荷载、雪荷载以及施工和使用过程中产生的其他荷载。因此, 钢结构需具备足够的强度、刚度和稳定性。根据设计需求, 采光面板可采用玻璃、阳光板等多种材料。这些面板不仅要满足采光要求, 还必须具备良好的保温、隔热、防水和抗冲击特性。在设计和施工大跨度采光顶时, 需全面考虑建筑功能、审美、结构力学、材料属性及周围环境等多方面因素, 是一个复杂的系统工程。

## 2 大跨度采光顶施工技术难点分析

### 2.1 结构与荷载计算难题

大跨度采光顶的结构设计不仅需满足采光和建筑美学需求, 还要确保在各种荷载作用下的安全性。以某

大型展览馆的圆形采光顶为例, 其直径达 35 m。在设计过程中, 需要精确计算恒荷载。对于钢结构部分, 选用了 Q345 钢材, 并根据其密度 ( $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$ ) 和构件尺寸确定重量, 而采光玻璃的每平方米重量约为  $30\ \text{kg}^{[1]}$ 。此外, 还需计算活荷载、风荷载和雪荷载等可变荷载。风荷载的标准值基于以下公式计算:

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0$$

其中,  $\beta_z$  为高度处的风振系数,  $\mu_s$  为风荷载体型系数,  $\mu_z$  为风压高度变化系数,  $\omega_0$  为基本风压。

考虑到该地区的基础风压为  $0.5\ \text{kN}/\text{m}^2$ , 并结合建筑的高度和体型系数, 经过专业软件模拟, 风荷载的标准值为  $0.7\ \text{kN}/\text{m}^2$ 。雪荷载的计算需参考当地的多年积雪深度和密度, 并结合采光顶坡度。由于荷载之间存在不确定性和相互影响, 设计阶段需进行大量模拟和分析, 任何计算误差可能引发结构安全隐患。

### 2.2 高空作业安全风险

大跨度采光顶施工通常在高空进行, 导致高空作业的安全风险成为施工中的重要问题。以某体育馆采光顶的建设为例, 施工团队常在 20 m 以上的高度进行工作。在这种高度下, 一旦发生坠落, 后果不堪设想。此外, 高空环境复杂, 极易受到恶劣天气的影响。当风速达到 6 级 ( $10.8 \sim 13.8\ \text{m}/\text{s}$ ) 及以上时, 强风会大幅削弱施工人员的稳定性, 增加操作难度并提高工具掉落风险<sup>[2]</sup>。在高空搬运材料和设备时, 吊具故障(如钢丝绳断裂或吊钩脱钩)可能导致重物坠落, 危及下方人员和设备。

### 2.3 钢结构安装精度控制

在制造和运输过程中, 钢结构部件容易发生变形, 增加了安装的复杂性, 尤其是在穿越钢丝绳网格时,

经常出现问题。特别是在椭圆形或圆形采光顶上进行反梁钻孔时, 需要确保与顶面保持 300 mm 的距离, 且孔间距应控制在 800 ~ 1 000 mm 之间。如果位置或间距存在微小偏差, 钢丝绳的受力将不均匀, 进而影响整体结构的稳定性。在安装过程中, 如果 4 个钢丝卡扣的固定不稳, 或小木方位置不精确, 钢丝绳在张拉过程中容易发生滑移和偏移。此外, 使用 2 吨手拉葫芦进行对称张拉时, 若控制力度不当, 可能导致钢丝绳受力不均, 进而引发钢结构扭曲变形, 严重威胁安装精度和结构安全。

#### 2.4 防水与密封处理

采光顶长期暴露在自然环境中, 容易受到雨水、沙尘等因素的侵蚀。一旦防水密封功能失效, 就可能出现渗漏问题。以某商业综合体为例, 由于采光面板之间的密封胶老化及裂缝, 每当雨季来临, 室内便会出现渗水现象, 导致吊顶破损和电气设备故障。采光顶的防水密封涉及多个关键区域, 包括面板接缝、与钢结构的连接部位以及与建筑主体的交接位置等。每个区域的防水需求和密封方法不同。接缝通常采用密封胶处理, 要求其具有良好的耐候性和粘结力; 与钢结构连接处则需要使用橡胶密封带。防水密封材料的质量差异较大, 若选择不当, 容易导致渗漏, 从而增加施工难度和后期维护成本。

#### 2.5 施工材料与设备选择

在大跨度采光顶施工过程中, 材料和设备的选择至关重要, 因为它直接影响到工程质量、进度和成本。钢结构材料的选择尤其重要。例如, 在沿海高湿度、腐蚀性强的环境中, 需选用具有良好耐腐蚀性能的钢材, 如 Q345NH 耐候钢, 其合金成分可提高抗腐蚀性<sup>[3]</sup>。在选择采光面板材料时, 应综合考虑采光、保温和隔热性能。例如: 某博物馆采光顶采用多层中空夹胶玻璃, 透光率高达 80%, 且具备较好的保温效果。在设备选择上, 应根据工程规模和施工技术要求来确定。大型采光顶项目可能需要使用大型起重设备, 如某机场项目中, 使用 120 吨塔式起重机以满足 60 m 吊装高度的需求。然而, 选择材料和设备时, 必须综合考虑性能、成本和供应稳定性等因素, 避免不当选择影响工程效果。

#### 2.6 施工过程中的质量检查与验收

施工中的质量检查涵盖钢结构制造与安装、采光面板铺设、防水与密封等关键环节。在钢结构制造过程中, 钢材材料要进行随机抽检, 并使用光谱分析仪检测其化学成分; 焊接质量需按规定进行探伤检查, 一级焊缝全面检查, 二级焊缝抽查比例不少于 20%。在

安装过程中, 使用全站仪等工具测量钢柱垂直度和钢梁挠度, 确保其符合设计要求。采光面板的安装需检查平整度和接缝质量。防水密封完成后, 需进行至少 2 小时的淋水测试, 检查是否存在渗漏。在实际施工过程中, 由于涉及多个专业领域的交叉作业, 工作人员技术水平参差不齐, 这可能导致质量检查出现遗漏, 进而影响工程质量。

### 3 大跨度采光顶施工技术难点的应对策略

#### 3.1 优化结构设计与精确荷载计算

在设计初期, 利用 ANSYS、MIDAS 等先进结构分析工具, 建立了精确的三维模型, 以全面模拟采光顶在各种荷载条件下的机械反应。以某大型体育场馆的采光顶为例, 模型构建过程中, 详细记录了钢结构的材料特性、部件尺寸和连接方式等关键信息, 精确模拟了恒定荷载、活动荷载、风荷载和雪荷载的组合效应。在风荷载方面, 通过气象数据和地形分析, 结合风洞实验或专业软件模拟, 精确计算了风荷载。在雪荷载的计算中, 参考了当地积雪深度和密度数据, 考虑了采光顶坡度对积雪分布的影响。荷载计算完成后, 进行了多次结构优化, 调整了构件截面尺寸和布局策略, 确保结构安全性并提高材料使用效率, 进而降低了工程成本。

#### 3.2 强化高空作业安全管理

在施工前, 所有参与高空作业的人员接受了全面的安全培训, 培训内容包括安全法规、操作流程和应急响应等, 并进行严格考核, 确保合格后, 人员方可上岗。施工队伍配备了符合国家标准的个人防护设备, 如安全带、安全帽和防滑鞋, 并定期检查设备的安全性。在建设现场, 搭建了坚固可靠的高空作业平台, 并在平台四周设置了 1.2 m 高的防护栏, 栏杆底部还安装了 18 cm 的挡脚板, 防止人员和物品坠落。针对恶劣气候, 制定了应急预案。当风速超过 6 级、降雨或大雾影响视线时, 立即暂停高空作业, 并对未固定的材料和设备进行加固。现场还专门安排人员进行安全巡查, 及时排查和消除安全隐患, 确保高空作业安全进行。

#### 3.3 提高钢结构安装精度的技术措施

在钻孔过程中, 采用精确的钻孔工具并严格遵守设计规范, 确保孔位置和间距准确。在距离顶部 300 mm 的位置进行钻孔操作, 确保孔之间的距离在 800 ~ 1 000 mm 范围内。在施工过程中, 通过持续测量和校准, 保证钻孔精度, 为钢丝绳的平稳安装提供可靠保障。

安装钢丝绳时, 严格检查钢丝卡扣的质量, 确保其满足承载标准。将钢丝绳穿过钻孔后, 使用四个钢

丝卡扣固定,并确保小木方稳固地放置在结构梁外侧,防止钢丝绳在受力时发生位移或松动。

钢丝绳的张拉操作是关键步骤。开始张拉前,对2吨手拉葫芦进行检查和调整,确保其稳定性。张拉操作从中心开始,向两侧对称展开。通过专业操作人员精准控制张拉力度,确保钢丝绳均匀承受压力。以某项目为例,通过应力监测装置实时监控钢丝绳各部分的应力变化,并根据数据调整张拉力度,确保钢丝绳应力均匀分布,提高钢结构安装精度。此外,钢丝绳的承重能力需精确估算并严格管理。以 $\phi 11\text{ mm}$ (6×19-FC)钢丝绳为例,其最小破断拉力为72.1 kN。经过计算,确定设计拉力为 $72.1\text{ kN} \div 1.8 = 40.056\text{ kN}$ ,实际最大轴向拉力为36.725 kN,符合安全要求<sup>[4]</sup>。

### 3.4 防水与密封技术解决方案

在材料选择上,优先考虑耐候性良好、粘结强度高的密封材料,例如硅酮结构密封胶,其位移能力应不低于25%,并且需通过相容性测试方可使用。在施工开始前,需要对采光面板与钢制结构的封闭区域进行全面清洁,去除油渍、灰尘及其他杂质,确保表面干燥。处理采光面板之间接缝时,首先在缝隙两侧粘贴双面胶条,实现初步密封和定位。接着,注入密封胶,确保胶缝饱满且均匀分布。胶缝的宽度和深度应符合设计要求,通常宽度不小于8 mm,深度不小于6 mm。在采光面板与钢制结构的连接区域,使用橡胶密封条进行密封,确保密封条贴合紧密,避免松动或扭曲,且其压缩程度控制在15%~25%的范围内。防水密封施工完成后,应进行全面的淋水测试,持续至少2小时,检查是否存在渗水现象。如发现渗漏,需立即修复,直至满足防水标准。

### 3.5 合理选择施工材料与设备

在材料选择过程中,根据工程实际使用环境和设计标准,全面评估材料的性质、品质、定价及供应状况。选择钢结构材料时,优先考虑高强度、良好韧性及优异耐腐蚀性能的钢材。例如,在沿海地区或湿度较高的环境中,推荐使用耐候钢或经过热浸镀锌处理的钢材。采光面板的选择需综合考虑采光、保温、隔热与安全性等多重性能要求。以大型商业综合体的采光顶为例,中空Low-E玻璃是理想的选择,不仅能够满足采光需求,还具备出色的保温和隔热性能<sup>[5]</sup>。

在设备选择上,应根据工程规模和施工方法,选择合适的起重、焊接及高空作业设备。对于大型采光顶施工,塔式起重机或履带式起重机是常见选择,其起重能力和作业半径应满足施工要求。为了保证焊接

质量,选择性能稳定、焊接质量优良的设备,并聘请经验丰富的焊接专家。与此同时,设备需定期进行维护和保养,确保其正常运作。

### 3.6 完善质量检查与验收体系

建立了从原材料进场到施工完工的完整质量检查流程,并对每个环节进行严格监控。原材料进场时,需对钢材、采光面板、密封材料等进行严格检查,验证其质量证明文件和规格型号是否符合要求,并按照规定进行抽样复试。在钢结构制造过程中,对焊接和涂装质量进行实时检验,采用超声波探伤和磁粉探伤技术检查焊缝,确保其符合设计和相关规范要求。在钢结构安装过程中,对钢柱的垂直度、钢梁的挠度以及构件连接的牢固性进行详细检查,确保偏差控制在可接受范围内。采光面板安装后,需检查面板的平整度、拼接缝质量及其密封效果。在防水密封施工完成后,需进行淋水和闭水实验,确认是否存在渗漏现象。每完成一个工序,施工单位需进行自检,监理单位验收合格后,方可进入下一个工序,以确保整个工程质量达到优良标准。

## 4 结束语

大跨度采光顶施工技术难点涉及结构设计、高空作业安全、钢结构安装精度、防水与密封处理、施工材料与设备选择以及质量检查与验收等多个方面。通过优化结构与精确荷载计算、强化高空作业安全管理、提高钢结构安装精度的技术措施、采用有效的防水与密封技术解决方案、合理选择施工材料与设备以及完善质量检查与验收体系等应对策略,可以有效地解决这些技术难点,确保大跨度采光顶的施工质量和安全。

## 参考文献:

- [1] 万运帅,何磊,袁伟,等.大跨度圆形采光顶施工中钢丝绳软平台的应用研究[J].建筑技术,2024,55(S2):33-35.
- [2] 叶小斌.大跨度玻璃采光屋面钢结构工程滑移施工技术[J].建筑技术,2024,55(10):1162-1164.
- [3] 谭小聪,姜舟,仝全,等.绿色建造技术在大跨度弧形玻璃采光顶设计中的应用[J].中国建筑装饰装修,2024(15):89-91.
- [4] 邵楨,韩文杰,张余.大跨度圆形采光顶钢丝绳软平台施工技术[J].建筑施工,2023,45(05):913-916.
- [5] 张田,赵影,马涛.大跨度操作平台在采光顶施工中的应用[J].中国住宅设施,2022(10):124-126.

# 桥梁跨越复杂地形问题及技术应对措施

胡文明

(安徽昌达路桥工程集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 为了有效解决桥梁跨越复杂地形面临的诸多问题,保障桥梁建设的安全性和可行性,本文通过对桥梁跨越复杂地形存在的问题进行分析发现,桥梁跨越复杂地形主要存在地形不稳定性影响基础施工、设计受地形空间和环境限制、施工难度与技术要求高、受自然灾害长期影响以及存在环境保护与资源利用冲突等问题,并针对这些问题提出了可采用先进地质勘察技术、设计多功能结构桥梁、采用模块化施工技术、引入抗灾害设计理念以及实施绿色环保施工以减少生态破坏等技术应对措施,旨在对提升桥梁建设质量和安全性有所裨益。

**关键词** 桥梁;复杂地形;自然灾害;环境保护;地质勘察技术

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.017

## 0 引言

随着交通基础设施建设的不断推进,桥梁作为关键的交通枢纽,在跨越江河、山谷、山脉等复杂地形时面临着诸多难题。复杂地形的不稳定性给桥梁基础施工带来极大风险,如地基沉降、山体滑坡等,严重威胁桥梁安全。同时,有限的地形空间和复杂的周边环境对桥梁设计提出了严苛要求,限制了常规设计方案的应用。此外,恶劣的施工条件导致施工难度剧增,技术要求远超普通桥梁建设。自然灾害频发也对桥梁长期稳定性构成威胁,且桥梁建设过程中还需平衡环境保护与资源利用的关系。因此,深入研究桥梁跨越复杂地形的问题及技术应对措施,对于保障桥梁建设质量与安全、促进交通事业可持续发展具有重要意义。

## 1 桥梁跨越复杂地形的主要问题

### 1.1 地形不稳定性对基础施工的影响

在复杂地形中,地质构造往往错综复杂,岩土体性质差异显著。例如在山区,岩石节理裂隙发育,山体岩土体完整性差,易受风化、雨水冲刷等作用影响,导致地基承载能力不足。在河流、湖泊等水域附近,地下水位变化频繁,软土地基广泛分布,地基土的压缩性高、抗剪强度低,基础施工时极易出现沉降、不均匀沉降甚至滑移现象。像我国西南地区的一些峡谷地带,地震活动较为频繁,地震引发的山体震动会使地基土的工程性质恶化,原本稳定的地基可能瞬间失去承载能力,严重危及桥梁基础的稳定性。而且,在地形起伏较大的区域,进行基础施工时,材料运输和施工设备就位困难,施工过程中还需频繁调整施工工

艺以适应不同地段的地形条件,这不仅增加了施工难度,还极大地影响了施工进度和基础施工质量。

### 1.2 桥梁设计受限于地形空间和环境

复杂地形的空间条件对桥梁设计有着严格的约束。在狭窄的山谷中,桥梁跨度选择受限,难以采用常规的大跨度设计方案,因为过大的跨度可能超出地形空间承载能力,且会增加建设成本。而在城市密集区域,周边建筑物林立,桥梁设计需要考虑与既有建筑的空间关系,避免施工过程中对周边建筑造成破坏,同时要满足交通流线的合理组织,这使得桥梁的平面和立面设计变得极为复杂。此外,周边环境因素也不容忽视。在自然保护区、风景名胜区等对生态环境要求极高的区域,桥梁设计要充分考虑景观协调性,不能破坏当地的自然风貌。例如在一些有珍稀动植物栖息地的区域,桥梁选址和结构形式的确定需经过大量的生态评估,以减少对动植物生存环境的干扰,这在很大程度上限制了桥梁设计的灵活性,要求设计师在满足交通功能的同时,兼顾生态与美学需求。

### 1.3 施工难度大,技术要求高

在地势险峻的山区,如高山峡谷,施工现场交通不便,施工材料及大型设备运输困难。例如在崇山峻岭间修筑大桥时,必须先挖出一条临时通道,由于地势险峻、地质不稳及路途艰险等问题,比较耗时耗力<sup>[1]</sup>。同时,由于地质条件复杂,对地基的施工提出了特殊的要求。对于深厚软土地基,为了提高地基承载力,必须采用搅拌桩和CFG桩复合地基处理工艺;当遇到硬岩时,常规钻孔灌注桩很难进行施工,需采用爆破

成孔等特殊工艺，但施工安全及周边环境控制要求较高。在高空作业方面，如高桥跨越深壑，桥墩高度大，施工过程中高空作业的安全风险非常高，必须要有先进的施工设备和健全的安全防护措施，这对施工人员的技术水平和心理素质提出了很高的要求。

#### 1.4 自然灾害对桥梁的长期影响

自然灾害是威胁桥梁长期稳定性的重要因素。地震发生时，地震波会使桥梁结构产生强烈震动，导致桥梁墩台位移、基础破坏、梁体脱落等严重病害。尤其是在地震频发的区域，桥梁遭受多次地震作用后，结构损伤不断累积，其抗震性能逐渐下降。强风也是影响桥梁安全的关键因素之一，对于大跨度桥梁，如悬索桥、斜拉桥，风荷载可能引发桥梁的振动，包括涡激振动、颤振等，长期的振动作用会使桥梁结构疲劳损伤，降低结构寿命。暴雨引发的洪水对桥梁下部结构影响巨大，洪水携带的大量泥沙、杂物会对桥墩产生冲刷作用，削弱桥墩基础的稳定性。此外，泥石流、山体滑坡等地质灾害一旦发生，可能直接掩埋桥梁、冲毁桥墩，对桥梁造成毁灭性破坏。这些自然灾害的发生具有不确定性和突发性，给桥梁的长期维护和安全运营带来了极大挑战。

#### 1.5 环境保护与资源利用冲突

在桥梁建设过程中，环境保护与资源利用之间的矛盾较为突出。一方面，桥梁施工需要占用大量土地资源，在一些生态脆弱地区，如湿地、森林等，大规模的土地占用会破坏原有的生态系统，导致动植物栖息地减少，生物多样性降低。施工过程中产生的弃渣、废水若处理不当，会污染周边土壤和水体环境。例如，桥梁基础施工产生的泥浆若直接排入河流，会使河流水质恶化，影响水生生物的生存<sup>[2]</sup>。另一方面，为了满足桥梁建设对材料的需求，过度开采砂石、石材等资源，可能引发山体滑坡、水土流失等地质灾害。同时，在资源运输过程中，也会增加能源消耗和碳排放，对环境造成负面影响。因此，如何在桥梁建设中平衡环境保护与资源利用的关系，实现可持续发展，是亟待解决的重要问题。

## 2 桥梁跨越复杂地形问题的技术应对措施

### 2.1 采用先进的地质勘察技术

在跨江大桥施工前期，准确地地质调查是桥梁穿越复杂地形的重要环节。先进的地质勘探技术可以对地下地质情况进行全面、深入地认识。例如，利用地质雷达技术，利用高频电磁波探测地下不同介质的界

面，可以清楚地显示地下岩土体的分层结构、空洞位置和断层分布情况，为桥梁基础的设计提供详细的依据。另外，利用人工激发地震波在不同层位的传播特征差异，对地层埋深、厚度及岩土力学参数进行准确分析。在山区复杂地形勘测中，可以利用航空物探技术，从空中获取大范围的地质信息，迅速确定可能存在的不良地质区，并有针对性地开展详细的地面调查。在此基础上，综合运用多种技术手段，精确掌握岩体风化程度、土体物理力学特性、地下水水位变化等不稳定因素，提前制定合理的地基施工方案，减少因地质问题引起的施工风险，保证桥梁地基的稳固性与耐久性。

### 2.2 设计多功能结构桥梁

面对复杂地形的空间限制和环境要求，设计多功能结构桥梁是有效途径。在狭窄山谷，可采用刚构—连续梁组合体系桥梁。这种结构结合了刚构桥的受力特点和连续梁桥的跨越能力，减少了桥墩数量，降低了对地形空间的占用，同时其良好的整体性和稳定性能适应山谷复杂的地质条件。在城市密集区域，双层桥梁结构较为适用<sup>[3]</sup>。上层用于快速交通，下层可设置慢行系统或市政管线通道，既满足了交通流量需求，又合理利用了空间，还减少了对周边既有建筑的影响。在生态敏感区域，采用景观桥梁设计理念，将桥梁结构与当地自然景观相融合。例如，采用仿生学设计，让桥梁外形模仿当地的自然元素，如在有鸟类栖息地的区域，设计成类似飞鸟展翅造型的桥梁，不仅满足交通功能，还能最大程度减少对生态环境的视觉冲击，实现交通功能、空间利用和生态景观的有机统一。

### 2.3 采用模块化施工技术

复杂地形的施工难题可通过模块化施工技术有效缓解。在高山峡谷这类地形复杂、交通极为不便的区域，模块化施工的优势极为显著。其核心在于将桥梁整体结构拆解为多个标准模块，利用工厂环境进行预制生产。比如在桥墩施工环节，提前预制混凝土墩柱模块，随后借助直升机吊运或特制运输设备，将其快速运送至施工现场指定位置进行安装，这一过程极大地缩短了现场施工所需时间，同时大幅减少了材料运输量<sup>[4]</sup>。梁体施工同样可采用节段预制拼装技术，每个节段在工厂内依照高精度标准制造，从源头上保证质量与精度。在现场拼装时，运用先进的定位及连接技术，使各模块之间紧密相连，确保连接的牢固可靠性。模块化施工还降低了对现场施工场地规模的要求，减少施

工期间对周边环境的干扰。恶劣天气条件下,工厂预制工作不受影响,能有效保障施工进度,整体上极大提高了施工效率,缩短工期,降低施工成本,有力推动复杂地形下的桥梁建设稳步开展。

#### 2.4 引入抗灾害设计理念

自然灾害严重威胁着桥梁的长期安全,引入防灾设计理念已成为当务之急。地震波可引起桥梁结构的强烈振动,引起墩台位移,破坏基础,甚至破坏梁体。为了有效地解决这一问题,可以采取隔震、减震等设计方法。橡胶隔震支座可以延长桥梁的自振周期,减小地震输入。同时设置粘滞阻尼器,使其在地震作用下能有效地降低结构的自振反应,减少地震损伤。大跨径桥梁在强风作用下会产生涡激振动、颤振等现象,长期运行可导致结构的疲劳损伤。采用风洞试验技术,对不同风速和风向条件下的桥梁气动性能进行模拟,并对其进行优化设计,以提高其抗风稳定性。为应对洪涝灾害,在桥梁下部结构设计中增加了桥墩的抗冲击性。如涂上保护涂料,可以减少泥沙和杂物对桥墩的磨蚀;为了提高桥墩抗流稳定性,扩大基础尺寸<sup>[5]</sup>。滑坡、泥石流等地质灾害也不可忽视,应合理选址,避开易发区,加强周边防护设计。全面引入防灾设计理念,从设计源头上提升桥梁抗自然灾害能力,保障桥梁的长期安全运行。

#### 2.5 绿色环保施工,减少生态破坏

在桥梁建设中,绿色环保施工是实现可持续发展的必然要求。在土地利用环节,通过精心规划桥梁选址与设计,尽可能降低土地占用。优先选用大跨度桥梁方案,减少桥墩数量,缩小对周边土地的扰动范围。尤其在生态敏感区域,借助详细的地形分析,巧妙避开珍稀动植物栖息地,最大程度保护生态环境<sup>[6]</sup>。施工产生的弃渣若处理不当,易造成环境污染。为此,需建立完善的分类处理机制。将可利用弃渣加工成建筑骨料,用于临时工程或周边道路铺设,实现资源循环利用<sup>[7]</sup>。对于不可利用弃渣,依据地形与水文条件,选定合适的堆放场地,并设置挡土墙、截排水沟等防护设施,防止水土流失。废水处理同样关键。搭建专业污水处理系统,针对基础施工泥浆水、机械冲洗废水等,依次进行沉淀、过滤与净化处理。运用化学沉淀法去除重金属,生物处理技术降解有机物,确保废水达标排放,避免污染周边水体。在资源开采方面,严格遵循可持续原则,采用绿色开采技术<sup>[8]</sup>。利用先进设备精准控制开采范围,减少对山体植被的破坏。

同时,加强生态监测,及时对开采区域进行生态修复,种植本土植被,恢复生态平衡。通过这些绿色环保施工措施,在推进桥梁建设的同时,最大程度减轻对生态环境的破坏,推动桥梁建设与环境保护协同发展。

### 3 结束语

桥梁跨越复杂地形面临着诸多严峻问题,地形的不稳定性、空间环境限制、施工难题、自然灾害威胁以及环保与资源利用的冲突,都给桥梁建设带来巨大挑战。然而,通过采用先进的地质勘察技术、设计多功能结构桥梁、运用模块化施工技术、引入抗灾害设计理念以及实施绿色环保施工等一系列有效措施,能够针对性地化解这些难题。这些技术应对措施不仅能确保桥梁基础稳固、结构安全,提升其抵御自然灾害的能力,还能最大程度降低对生态环境的破坏,实现桥梁建设与自然环境的和谐共生,为复杂地形条件下的桥梁建设提供坚实保障。

#### 参考文献:

- [1] 康周科.徐盐铁路跨越郟庐断裂带桥梁抗震设计[J].铁道建筑技术,2025(01):102-104.
- [2] 曹永煌.跨越敏感水体公路桥梁排水系统设计[J].工程技术研究,2024,09(19):177-179.
- [3] 李成杰,王洪洲,谢超.连续跨越多层城市运营道路匝道桥梁施工技术[C]//中国建筑金属结构协会.2023年全国建筑钢结构科技创新大会论文集.金环建设集团有限公司,2023.
- [4] 蒋丽忠,李伟,江力强.复杂地形处高速铁路轨道-桥梁系统地震响应放大效应[J/OL].铁道科学与工程学报,1-13[2025-03-03].<https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-CSTD20250114002.htm>.
- [5] 龙培.复杂地形地质条件下桥梁桩基的动态设计[J].公路交通技术,2024,40(03):55-61.
- [6] 陈杰.跨越繁忙运营铁路转体桥梁设计[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2021年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(下册).中铁上海设计院集团有限公司,2021.
- [7] 王勇,王玉斌,马锐,等.上跨既有桥梁或跨越V字形沟谷现浇箱梁组合支架应用施工技术研究[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2020年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册).云南省建设投资控股集团有限公司,2020.
- [8] 胡晓斌.地形复杂山区桥梁总体设计要点分析[J].山西建筑,2024,50(04):164-166.

# 房建工程地下结构无缝防水施工技术分析

程 前

(武汉建工集团股份有限公司, 湖北 武汉 430058)

**摘 要** 地下结构防水施工是房屋建筑工程的关键环节之一。传统的防水施工存在施工缝渗漏、防水层老化失效等诸多缺陷,严重影响建筑物的使用寿命和安全性。无缝防水施工技术通过采用高分子防水卷材、聚合物改性沥青等新型防水材料,结合合理的设计和精细化施工,能够有效规避传统工艺的弊端,实现防水层的无缝衔接和整体性密封,从而最大限度地保障地下结构的防水性能。本文基于工程实践,重点探讨了无缝防水施工的基本原理、关键工艺以及质量控制措施,旨在为业内同仁提供参考。

**关键词** 房建工程; 地下结构; 无缝防水施工技术

中图分类号: TU94

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.018

## 0 引言

随着城市化进程的快速推进,地下空间的开发利用日益受到重视。地下结构防水施工作为地下工程建设的核心内容,对于保障建筑物安全、延长使用寿命具有至关重要的作用。受材料性能、设计规范、施工工艺等多重因素的影响和制约,当前地下防水施工仍存在诸多亟待解决的问题,如施工缝渗漏、防水层开裂脱落、穿透件渗漏等。为有效规避上述质量隐患,提升整体防水性能,施工企业通过长期的技术攻关与工程实践,探索出一套切实可行的无缝防水施工技术体系。该技术以高分子防水卷材等新型材料为基础,通过合理的设计、精细化管理和创新工艺,最大限度减少接缝和薄弱部位,实现防水层的无缝化施工,有力保证了工程质量。

## 1 无缝防水施工的基本原理

无缝防水施工技术是采用新型高分子防水卷材、聚合物改性沥青等材料,通过热熔、热粘等连续成膜工艺,在基层结构表面形成一道密实、均匀、柔性的防水隔离层,从而实现防水的一种先进施工技术。与传统的刚性防水层不同,高分子防水卷材具有优异的延展性、柔韧性和自粘性,能够有效吸收和缓冲基层变形,防止防水层开裂。同时,采用热熔焊接等特殊工艺进行搭接,可杜绝接缝渗漏的风险,实现无缝化密封,通过合理设计排水坡度,并在穿越构筑物等薄弱部位增设附加防水层,形成“纵向无缝、横向无缝、整体无缝”的全方位立体防水系统,最终达到永久性防渗漏的目的<sup>[1]</sup>。

## 2 关键工艺技术

### 2.1 防水材料选择

防水材料的选择是屋面防水工程成败的关键,必须要全面考虑建筑物的防水等级、荷载条件以及使用环境等因素,从而选用性能优异、经济合理的防水材料。目前,EVA高分子防水卷材、自粘聚合物改性沥青防水卷材、TPO热塑性聚烯烃防水卷材等新型材料凭借其出色的综合性能,在建筑防水领域得到广泛应用。这些材料普遍具有优异的耐根穿刺性、抗老化性、抗寒抗冻性等特点,且接缝强度高,收缩性小,能够有效保证防水层的持久稳定。同时,在选择主体防水材料的同时,还应根据工程需要合理选配配套的胶粘剂、嵌缝密封材料等,确保整个防水体系的相容性和协调性,发挥出最佳的防水效果。只有切实贯彻因地制宜、因需制宜的原则,选用优质适用的材料,才能为工程质量提供坚实的物质基础<sup>[2]</sup>。

### 2.2 基层处理

基层处理是影响防水层性能发挥的重要环节。防水施工前,必须对基层进行细致入微的检查和处理,为防水材料的黏结打下良好基础。对于常见的混凝土等无机非金属基层,应先用磨平机打磨,去除表面浮浆和尖锐突起,并用吸尘器清理浮尘,必要时可以酸洗处理,使其达到平整、洁净、干燥的要求。针对基层存在的裂缝、蜂窝、麻面等缺陷,应采用专用的聚合物修补砂浆或防水砂浆进行找平处理,并压光表面,切实消除薄弱环节,保证阻断层的完整性。此外,变形缝等非设防缝应提前用嵌缝密封膏填实,防止形成

应力集中区域。只有在基层处理环节严把质量关,才能为后续工序创造有利条件,最终确保整个屋面的防水安全。

### 2.3 卷材铺贴

在材料选择和基层处理等前期准备工作就绪后,卷材铺贴就成为防水施工的核心环节。铺贴操作的规范性和细致程度,对于防水效果有着直接影响。在铺贴正式开始前,应先在处理好的基层表面涂刷配套的冷底子油,以增强面层卷材与基层的粘结力。铺设时需采用满粘法,确保卷材背面与基层充分粘接。铺贴顺序应自下而上,由里向外进行,减少搭接缝。相邻两幅卷材的搭接宽度不应小于 100 mm,搭接处的厚度应调整一致。在搭接缝处,应使用专用热风焊枪加热熔化,再用橡胶压辊仔仔细碾压密封。针对上下层交接部位,应错开接缝,防止上下层接缝对齐而产生薄弱区域。在管道等穿墙部位,可先做附加防水层,采用配套胶粘剂黏结,再在其上铺贴面层卷材。阴阳角等异形部位,则应采用预制的异型附件进行热熔焊接,待卷材铺贴完成后,仍需仔细检查表面的平整度和接缝密封情况,发现问题应及时进行修补,只有精益求精地完成每一道铺贴工序,才能确保防水层的整体性能,经久耐用<sup>[3]</sup>。

### 2.4 细部节点构造

防水的成败往往取决于细节,门窗洞口、变形缝、施工缝、管线穿墙等部位作为渗漏的重灾区,必须引起高度重视,进行特殊设计和精细施工。针对门窗洞口,应在洞口周边预留出足够的卷材搭接返包长度,做成倒角,便于卷材紧密贴合。洞口侧墙与过梁间的缝隙,用聚氨酯填缝后,还需上贴附加防水层进行加强密封。在变形缝部位,先在缝内嵌填发泡聚乙烯实心棒作为衬垫,再在缝口用聚硫密封胶嵌缝。在缝两侧各铺贴宽 500 mm 的卷材,交叉搭接,提高该部位的防水等级。对于施工缝,应先嵌填膨胀止水条,然后在缝两侧各铺贴宽 200 mm 卷材,并在缝口涂刷柔性防水涂料,多重设防。管道井处可在穿墙管根部包裹环向卷材,做成高出地面的倒茬,并用带状卷材固定密封,只有在细部节点精雕细琢,才能构筑起周全的防水体系,不留死角隐患,经受住时间和环境的考验<sup>[4]</sup>。

### 3 质量控制要点

质量控制是无缝防水施工成败的关键,在实际操作中,需严格把关每一个环节。施工前,应组织设计、施工、监理等相关单位进行图纸会审,深入研读图纸,

吃透设计意图,掌握规范标准,对影响防水质量的问题提出整改意见,并落实到施工方案中。材料进场后,应该认真查验出厂合格证和性能检测报告,并按规定进行平行检验。对于胶粘剂、嵌缝密封膏等易漏验的配套产品,更要严格查验,确保与卷材相匹配。基层是防水层的载体,处理得是否规范直接关系到防水效果。施工前必须对基层进行细致验收,尤其要重点检查平整度、裂缝、蜂窝、起壳等缺陷。对不合格部位,要用聚合物修补砂浆找平、封堵,并留足养护时间,经专业人员复核合格后方可铺贴。

在正式施工前,还应选择隐蔽部位制作样板间,对卷材铺贴的工艺参数如粘结层涂刷厚度、卷材搭接宽度、热熔温度等进行反复试验,找出最佳工艺组合,确保卷材与基层充分黏结,待样板验收合格后再铺开施工。在铺贴过程中,应严格执行工序交接检查制,上道工序不合格,坚决不允许进行下道工序施工。铺贴时应分段进行涂层检测,采用真空仪或变频检漏仪对每一卷材的搭接部位逐一进行检查,发现渗漏点必须及时处理。卷材铺贴完成后,还应在隐蔽前采用有压注浆或蓄水试验的方法,对防水层的整体性能进行检验。注浆试验的压力不应低于工作压力的 1.2 倍,且稳压时间不少于 30 min。蓄水试验的水深应超过有效房高的 2/3,持续时间不少于 168 h。在试验过程中,要密切关注水位变化和渗漏情况,发现问题及时排查原因,并制定相应的对策,直至完全合格后再组织各方进行联合验收,形成隐蔽工程验收记录<sup>[5]</sup>。

## 4 工程实践

### 4.1 项目概况

本文介绍了一个大型商业综合体地下室的防水工程案例。该地下室总建筑面积达 6.5 万 m<sup>2</sup>,共有三层。室内外墙体均采用 C35 混凝土浇筑,抗渗等级要求为 P10,防水等级为一级。鉴于建筑物的使用功能需求较高,传统的刚性防水层方案难以完全满足建设单位的要求。经过反复论证和优化,设计团队最终决定采用 EVA 高分子自粘胶膜防水卷材作为主体防水层,通过对卷材的无缝化施工,形成柔韧、高效、持久的防水整体。该材料具有优异的耐根穿刺性、抗老化性、延展性和自愈合性,能够适应地下室的复杂受力状况,对混凝土基层的微小裂缝有着很好的桥接作用,是解决地下工程渗漏问题的理想选择<sup>[6]</sup>。本项目的实施对于探索新型防水材料在大体量地下建筑中的综合应用具有示范意义,为同类工程提供了宝贵的经验。

## 4.2 技术方案

方案确定前,技术负责人需带领各专业人员反复研究图纸,熟悉设计意图,并结合工程特点、环境条件、业主需求等因素,反复权衡论证,最终拍板定案。本工程采用的是EA高分子自粘胶膜防水卷材,相比传统的沥青基卷材,它具有更优异的延展性、粘结性和耐久性,且施工工艺更加简便高效,尤其适用于地下防水。卷材厚度选用1.5 mm,能够满足地下三层的防水等级,与之配套的冷粘结层和嵌缝密封材料,则可进一步增强防水体系的一体化性能。技术方案中对基层处理提出了明确要求,混凝土表面必须用磨平机打磨至无明显凸起,并彻底清理浮浆和杂物,确保平整、洁净、干燥。对于墙体蜂窝、麻面、接缝等缺陷,必须用聚合物防水砂浆分层找平,每层厚度不宜超过20 mm,并用木抹子压光。铺贴是方案的核心部分,先要在基层涂刷一道冷粘结层,提高卷材的粘结强度。然后从阴阳角开始,采用满粘法,自下而上进行铺贴。搭接宽度控制在100 mm以上,纵向接缝要相互错开,防止上下层对齐。在门窗洞口、管道根部等部位还要设置附加增强层,卷材收头收尾时要做倒包,阴阳角必须用预制好的异型件进行补强,采用热风焊接。细部节点的精细设计和施工,则是无缝防水的重中之重,变形缝作为渗漏的重灾区,内部先嵌填发泡聚乙烯实心棒,再用聚氨酯嵌缝膏填实,确保密封,加之缝两侧铺贴附加防水层形成三重防线。为检验整个防水层的严密性,除了要对涂层逐一进行真空检漏外,施工后还须进行蓄水试验。按500 m<sup>2</sup>一个分区,蓄水深度2 m,连续监测14天,一旦发现渗漏,必须查明原因并修补至完全合格。卷材铺贴完毕后必须及时采取隔离保护措施,防止后续施工时被机械损伤,在回填时设置隔离层或采用刚性保护层,都是行之有效的做法<sup>[7]</sup>。

## 4.3 质量检验

工程完工后,委托有资质的第三方检测机构对防水工程的质量进行了全面检验。检验内容涵盖了防水材料性能、施工工艺、整体效果等各个方面。首先是防水卷材的各项理化指标。从生产厂家提供的出厂检测报告看,EA自粘胶膜防水卷材的拉伸强度、断裂延伸率、剥离强度、不透水性、抗根穿刺性等关键指标都达到了设计要求和国家标准。为了更加客观公正,又从工地现场随机抽取了若干卷材样品送检,经权威机构检测,各项指标也都完全合格,这为卷材质量提供了双重保证。其次是铺贴施工的检验。在施工过程

中,采用真空电检法,对每一个铺贴区段的防水涂层进行了100%全面检测。这是一项非常细致烦琐的工作,需要在防水层上均匀涂刷肥皂水,再用真空检漏仪在其上反复吸排,一点一点排查可能存在的细小针孔。检测中发现,所有区段的涂层都严丝合缝,未发现任何漏点,合格率达100%,这充分说明了施工工艺严谨规范,操作方法娴熟到位。最后对整个防水系统进行蓄水试验,按500 m<sup>2</sup>划分成若干个检验分区,每个分区蓄水深度2 m,连续检测14天。在此期间,对渗漏点进行持续观察记录,并用标准玻璃量筒测量渗水量。可以发现,试验过程中各分区均未发现有渗漏现象,表明防水层的整体性能优异,抗渗能力极强。质量检验的一系列结果有力地证明,本工程采用的无缝防水施工技术是成功的,达到了预期的防水目标。可以预见,在科学设计、精心施工、严格检验的共同保障下,这一防水系统必将经久耐用,全面满足地下空间的使用需求。

## 5 结束语

无缝防水施工技术具有防渗性能好、施工效率高、综合成本低等优点,是目前地下工程防水的首选。但其对施工工艺要求较高,需根据工程特点合理选材,周密设计,精心施工,以最大限度发挥其防渗漏的功效。在材料选型、基层处理、卷材铺贴、细部节点构造、质量检验等每一个细节,都需全心投入,严格管控,只有建立全员参与的质量保障体系,才能确保万无一失。随着新产品、新技术的不断成熟完善,无缝防水必将在地下工程建设中发挥越来越重要的作用。

## 参考文献:

- [1] 林进寿.地下室混凝土结构自防水及无缝施工技术研究[J].居业,2024(09):16-18.
- [2] 孙生辉.房建工程地下结构无缝防水施工技术[J].湖南工业职业技术学院学报,2024,24(02):11-15.
- [3] 赵德秀.房建工程中地下室防水施工工艺研究[J].房地产世界,2024(04):122-124.
- [4] 苗俊志.房建施工中地下防水施工技术重难点探讨[J].居业,2024(02):37-39.
- [5] 张博灿.房建施工中地下防水施工技术研究[J].四川建材,2024,50(02):146-147,168.
- [6] 侯亚娟.房建施工中地下室防水施工技术要点探析[J].散装水泥,2023(02):91-93.
- [7] 李家辉.建筑工程中防水防渗混凝土无缝施工技术[J].建筑技术开发,2021,48(21):55-57.

# 房屋建筑工程中钢管混凝土施工技术研究

齐 菁

(天津港物流发展有限公司, 天津 300456)

**摘 要** 钢管混凝土近年来在房屋建筑工程等项目中的应用日渐频繁, 这项施工技术具有承载力强、抗变形能力强等诸多优势, 能够充分满足建筑层、跨径日渐增大的房屋建筑工程的建设需求。深入探索钢管混凝土的施工技术要点, 对于充分发挥这项技术的优势, 提升房屋建筑工程质量有重要意义。本文首先简要叙述了钢管混凝土施工技术在房屋建筑工程中的应用优势, 然后详细阐述了钢管混凝土施工技术的要点, 旨在为相关建设施工单位提供参考。

**关键词** 房屋建筑工程; 钢管混凝土; 钢管材料; 混凝土材料; 施工验收

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.019

## 0 引言

随着城市化进程的逐步推进, 房屋建筑工程的层数、规模越来越大, 施工作业难度也不断攀升。在房屋建筑工程中应用先进的技术手段, 能够有效提升结构的稳定性和强度, 让房屋建筑的质量更加契合市场需求。钢管混凝土技术糅合了钢管和混凝土在抗弯强度和抗压强度上的优势, 且具有良好的抗震、耐腐蚀、耐火特性, 将其应用在房屋建筑工程之上, 能够有效发挥技术价值, 提高房屋建筑的质量。本文深入探讨了房屋建筑工程中钢管混凝土施工技术的优势和应用要点, 旨在为类似项目提供参考。

## 1 房屋建筑工程中钢管混凝土施工技术优势

### 1.1 提升结构抗压和抗弯强度

从材料性能来看, 普通的混凝土材料具有较强的抗压强度, 但抗弯性能有所不足; 而钢材具有良好的弹塑性, 抗弯性能较为突出, 但受压时轴向抗压能力偏弱。混凝土和钢材二者之间的优势结合能够有效帮助房屋建筑的结构实现抗压能力和抗弯强度的提高。钢管混凝土制成的结构构件, 一方面借助钢管的约束作用, 使内部的混凝土处于侧向受压状态, 能够充分提高混凝土的抗压强度; 另一方面依靠内部的混凝土, 又能够有效提高钢管的刚度, 改善钢管出现局部屈曲问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 增强房屋建筑工程的性能

钢管混凝土依托钢材和混凝土材料的双重优势, 不仅能够有效提高房屋建筑的强度, 也能够能在性能提升上发挥很大的作用。第一, 提升抗震性能。钢管和混凝土之间的相互作用有效提升了房屋建筑结构构件的延性和吸能性能, 从而为房屋抗震性能的提高奠定

了良好基础; 第二, 提升耐腐蚀性能。在钢管中浇筑混凝土能够减少钢管暴露在空气中的表面积, 这对于提升钢管的耐腐蚀性能有重要帮助; 第三, 提升耐火性能。在钢管内部填充的混凝土有效提升了钢管本身的防火、耐火性能, 能够在火灾来临时吸收大量的热能, 延长钢管混凝土柱的耐火时间。同时, 即使随着火灾的持续出现钢柱屈服问题, 内部的混凝土仍然能够承担一定的荷载, 保证房屋结构的稳定性。

### 1.3 提升效率, 压缩施工周期

钢管混凝土施工技术具有施工便捷、工期短、成本投入少等优势, 对于提升房屋建筑工程的施工效益十分有利。第一, 钢管混凝土施工流程较为简单, 相较于传统的钢筋混凝土工艺, 省略了钢筋下料、钢筋绑扎、支模拆模等一系列工序, 加之钢管混凝土技术的不断优化, 新型的浇筑工艺甚至能够省略振捣环节, 施工作业的工序明显减少。第二, 工艺流程的精简必然伴随着工期的压缩, 钢管混凝土不仅前期工艺较为精简, 后期的混凝土养护流程也因为钢管内部的稳定环境而变得十分简单, 无需额外留出太多的养护时间。第三, 钢管混凝土技术能够有效节约材料成本和人工成本, 例如钢管本身就是混凝土浇筑的模板, 因此不需要进行支模和拆模工作, 就能够省下对应的模具材料费用和人工费用。

## 2 房屋建筑工程中钢管混凝土施工技术要点

### 2.1 施工前的准备工作

1. 钢管材料的选择和制作。钢管材料既可以直接购买直焊缝钢管、螺旋焊缝钢管等成品, 也可自行制作卷制钢管。如采用自行制作的方式, 则需要重点注

意钢管的制作要求。第一，钢管内径。下料时应当以钢管的中径进行周长计算，预留2 mm的余量以便焊接；第二，卷管流程。在卷制之前，需要开好板端的坡口以便卷制。坡口开制需使用切割机进行切割，并做好坡口合格度的检查。钢板卷管通常采用卷板机来完成，卷制时应当与钢板压延方向垂直，且管端垂直于管轴线<sup>[2]</sup>；第三，钢管焊接。焊接一般采取点焊的形式，需提前去除焊接部位的锈渍和杂质，焊缝长度控制在8~10 cm左右。焊接时可在管内设置衬管，提升焊接质量。衬管长度控制在20 mm以内，厚度3 mm，做好焊接变形的控制工作。焊接完成后需进行探伤检验，如果出现微裂缝等情况，需铲除重焊。

2. 混凝土材料的选择和制作。混凝土材料选择的关键主要包括水泥、骨料和外加剂。根据强度要求的差异，要选择合适强度的水泥。常规情况下，钢管混凝土所选择的水泥可选择C30强度，如果需要高强的钢管混凝土，可以选择C50乃至C80强度的水泥。粗细骨料需选择质量高、强度好、不含杂质的优质骨料，其中粗骨料可选用连续级配碎石，并做好直径控制；细骨料则可采用中等粗砂。外加剂可选用减水剂、微膨胀剂以达到防止混凝土泌水、开裂以及混凝土与钢管剥离的效果。

混凝土制作的关键在于拌料配合比的设计。在设计配合比时，首先要考虑工程所要求的基本强度以及其他性能指标，如坍落度不小于150 mm，水灰比控制在0.45以内等。在满足基本要求后，再进一步考虑水化热等问题的优化。

3. 其他准备工作。施工单位一是要做好人员准备，包括开展技术交底和分工工作，讲解和培训工艺技术要求和设备工具的应用方法。二是要做好工具准备，要准备好吊装所用的起重设备、缆风绳等机械设备以及测量所需的各类仪器和工具，如经纬仪、水平仪等。三是要做好测试准备，包括悬吊荷载测试、混凝土坍落度测试、钢管焊接检验等。

## 2.2 施工工艺流程

1. 钢管柱的安装。钢管柱在起吊之前需要对管端的焊接区域进行预处理，一是要做好打磨除锈工作，提升焊接质量；二是要做好测量标记，包括柱轴线、标高等。钢管柱安装的关键在于安装位置的整齐对接，吊装前必须做好各项参数的测量工作，包括底部标高、底部平整度、位置坐标相位线等，提前做好放样和弹线工作；同时对垂直度、标高、轴线位置进行校正。首先，利用起重机吊起钢管，将钢管吊在预留杯口位置之上约30~40 cm，将钢管伸直后落下，放入杯中<sup>[3]</sup>。

然后二次测量位置、标高、垂直度等相关参数，进行校准，误差控制在1~2 cm范围内。位置校准并确认无误后，需在钢管的0°、90°、180°、270°四个位置拉设缆风绳将其固定好，拉索与地面角度控制在30°，拉结点为钢管高度的1/4。如轴线位置、垂直度、标高等参数需校正，应当使用测量工具对校正度进行测量，然后用千斤顶顶起钢管后移动，同步使用测量工具进行测量，直至校正完成。

钢管柱焊接采用水平焊的方式，分段分向进行焊接，焊接完成后需进行探伤检测，如果不符合要求，需铲除重焊，直至其符合《钢结构工程施工质量验收规范》的要求。

2. 节点构造。节点构造主要是指对钢管混凝土重要节点进行处理和构造的过程，钢管柱的主要节点有两处，一是柱脚节点，二是柱梁节点。柱脚节点根据受力的差异可以分为埋入式柱脚和非埋入式柱脚两种，一般根据钢管柱的类型进行选择，例如偏心受拉柱应当采用埋入式的方法进行节点处理。

柱梁节点是指将钢管与混凝土梁进行刚性连接的过程。节点构造的方法很多，施工时可根据框架梁的实际情况进行选择。框架梁根据材料可以分为钢梁、混凝土梁、钢管混凝土梁三种，其中钢梁可采用加强环的方式进行节点连接；混凝土梁、钢管混凝土梁则可以采用环梁连接、加强环连接等方式进行处理。以环梁连接为例，环梁连接即是指在钢管外浇筑一道环形的钢筋混凝土梁来达到传递弯矩的目的。环梁连接法具有施工简单、适应性强等优点，但节点的刚度相对较差<sup>[4]</sup>。

3. 混凝土的浇筑和养护。在钢管混凝土施工中，混凝土的浇筑方法多种多样，其中较为常见的有：振捣浇筑法、泵送顶升浇筑法、高位抛落无振捣法。

(1) 振捣浇筑法。振捣浇筑法的流程与其他施工技术中的混凝土浇筑流程较为类似，即首先将混凝土从钢管顶端灌入，然后利用振捣器进行振捣。根据管径的差异，可选择不同类型的振捣器。当管径不超过35 cm时，可使用外部振捣器在钢管外部进行振捣，振捣时长应当在1 min以上；当管径大于35 cm时，则使用内部振捣器进行振捣，振捣时长应当在30 s以上。

(2) 泵送顶升浇筑法。泵送顶升浇筑法顾名思义，就是利用输送泵将混凝土输送到钢管内部，并借助输送泵的压力让混凝土密实，从而省略振捣这一环节。泵送顶升浇筑法需在钢管底部靠近地面的位置预留进料孔，并安装一截短钢管以便进料。短钢管的直径应当与输送泵直径一致，其上应当配置止回阀门防止混凝土在输送过程中回流，进入钢管内的长度不少于钢管柱管内直径的1/2，内端需向上倾斜45°。短钢管需通

过焊接的方式固定在钢管柱上。浇筑完成后，当混凝土强度达到设计强度的 50% 时，将短钢管割除，并安装封堵板，用焊接方式固定好<sup>[5]</sup>。泵送顶升浇筑法适用于管径大于 35 cm 的钢管柱，其施工流程如图 1 所示。

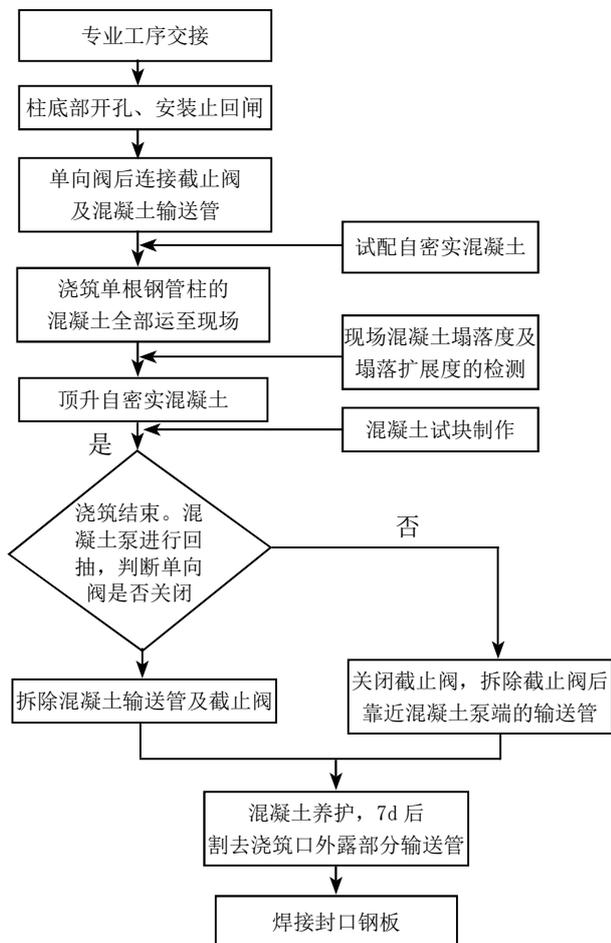


图 1 泵送顶升浇筑法的施工流程

(3) 高位抛落无振捣法。高位抛落无振捣法同样是一种无需振捣的工艺技术，其利用的是混凝土的自重和流动性来达到密实的效果。这一方法同样适用于管径大于 35 cm 的钢管柱，且其浇筑的高度应当大于 4 m，如果高度不足，混凝土下落的动能就不足，很难保证密实效果。浇筑时会应用到料斗，料斗尺寸应当比钢管柱的内直径至少小 10 cm，以避免浇筑时空气的混入。单次浇筑的混凝土量应当在 0.5 m<sup>3</sup> 以上，以积蓄一定的重力势能。浇筑最好连续完成，如果中断，中断时间不可超过混凝土的初凝时间。中断后如果再次浇筑，需先浇筑一层 5 ~ 10 cm 的水泥砂浆来黏结前后两次的混凝土。

钢管混凝土施工技术下，混凝土的养护工作相对简单，这是由于钢管环境特殊，具有一定的保湿能力，能

够有效避免混凝土水分的快速流失，减少开裂概率。但在前 7 天的初养护阶段，仍然需要做好必要的保湿工作，包括喷水、覆盖等。初养护结束后的 3 周，需要进行定位养护。定位养护首先是要注意温度控制，避免过大的温度变化造成顶部开裂等问题；其次是要注意防止渗漏，避免水分渗透导致混凝土的龟裂，或与钢管分离。

### 2.3 施工验收

钢管混凝土的验收应当遵循《钢管混凝土混合结构技术标准》(GB/T 51446-2021) 的相关规定，做好施工过程验收和质量检测。一方面，要确保钢管混凝土施工的每个环节均符合技术标准和规范，混凝土浇筑是否存在空洞、裂缝问题等。另一方面，要做好钢管混凝土的质量检测，包括材料质量检测和施工质量检测。材料质量检测的关键在于检测钢管和混凝土的原材料质量和力学性能是否符合房屋建筑工程的技术要求。施工质量检测则需要通过超声波检测、X 射线检测等方式对混凝土质量进行检查，确定混凝土的密实度，是否存在空洞、裂缝等问题。一旦发现存在问题，需立刻采取修复措施进行补强，此后再度进行检测，直至符合要求。

### 3 结束语

随着房屋建筑工程质量要求的逐步提高，钢管混凝土施工技术在房屋建筑工程施工中表现出突出的应用价值，不仅能够提升结构的强度和稳定性，还能够提升房屋建筑的整体性能，因此受到了越来越广泛的重视。施工单位在应用钢管混凝土施工技术的过程中，要牢牢把握此项技术的要点和难点，严格遵循工艺流程开展作业，确保钢管混凝土符合房屋建筑结构要求和质量要求。同时，要做好相应的质量控制工作，加强施工组织动态化管理，设计严谨的技术保障措施，有效规避施工中存在的质量问题和安全问题，科学有序地推进施工作业。

### 参考文献:

[1] 史明伟,刘宇,张展祎.钢管混凝土施工技术要点[J].四川建材,2023,49(10):138-140.  
 [2] 吴婷.超高层建筑钢管混凝土柱-核心筒结构施工技术[J].砖瓦,2024(09):163-165.  
 [3] 崔昌文.钢管混凝土柱在工程施工中的应用[J].建筑机械化,2024,45(04):77-79.  
 [4] 裴宝伦.房屋建筑工程中钢管混凝土的施工技术研究[J].建筑技术开发,2025,52(02):49-51.  
 [5] 向群.钢管混凝土组合结构施工技术探究[J].中国建筑装饰装修,2023(12):168-170.

# 填充墙砌体工程施工技术在建筑工程中的应用

刘化芝<sup>1</sup>，田雪皎<sup>2</sup>

(1. 山东中泰鼎信项目管理咨询有限公司，山东 济南 250000；

2. 济南市建设监理有限公司，山东 济南 250000)

**摘要** 在建筑工程建设阶段，填充墙砌体工程作为较为重要的一部分，通过规范化的技术操作，可全面提升建筑结构的质量与安全，满足人们对建筑物的高标准要求，最大化发挥建筑物的使用功能。目前填充墙砌体工程在建筑施工中的占比量不断上升，其技术操作也更为成熟化，为了充分发挥填充墙砌体的隔音、保温等作用，就必然要明确该技术高效应用的重要性，通过加强施工阶段的质量控制，提高其技术效果，满足建筑工程高标准的施工要求。本文围绕填充墙砌体工程施工技术的应用展开了深入探讨与分析，以期对相关人士提供参考。

**关键词** 填充墙砌体工程；建筑工程；砌筑技术；构造技术

中图分类号：TU74

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.020

## 0 引言

随着建筑工程的大量建设，质量要求不断提高，加强对技术的优化选择及控制，逐步成为提高施工质量的关键所在。尤其是在新技术、新材料得到广泛应用的背景下，填充墙砌体工程施工技术作为常用技术，要想推动建筑工程建设目标的实现，就必然要优化技术流程，通过加强各环节的施工控制，提高填充墙砌体工程的技术效果，以满足高质量建筑的施工要求。

### 1 填充墙砌体工程施工技术高效应用的重要性

随着城市建筑工程的规模化建设，土地资源短缺已经成为制约建筑行业发展的主要因素，为了满足建筑需求，高层建、大跨度建筑的建设比重逐步上升，在技术及质量要求更高的情况下，衍生出了更多新型的结构系统，如钢混凝土组合结构、预应力混凝土以及框架剪力墙等，填充隔墙成为主要模式。填充墙砌体工程通过合理的施工技术，可确保墙体在承受各种荷载时保持稳定，保障整个建筑的结构安全，而且填充墙砌体不仅具有结构支撑作用，还兼具隔音、隔热以及保温等多重性能，有效提升建筑物的舒适度<sup>[1]</sup>。因此，在建筑工程中应用填充墙砌体施工技术时，需先做好实地勘察及调研分析工作，结合当地自然环境、建筑用途及施工环境，因地制宜地选择最为适合的材料与技术，在做到节能、节约土地的同时，对废弃物进行高效应用，减少材料及能源消耗，保护环境，促进建筑材料的可持续发展。通过加强对填充墙砌体的

应用，可满足新趋势下墙体材料改造需求，减少对黏土砖的使用，减少耕地破坏。将矿渣、粉煤灰以及建筑垃圾等作为填充墙砌体施工的主要原料，可基于较高的掺量及空隙率，形成高性能的墙体材料，实现资源化利用目标。

### 2 填充墙砌体工程施工技术在建筑工程中的应用

在填充墙砌体工程施工阶段，经过特殊工艺进行加工制作相应废弃料，可在资源化利用的基础上，形成符合施工要求的墙体砌块，如蒸汽加压的混凝土水泥砌体的应用，能够提高填充墙砌体施工的便捷性，推动填充墙砌体施工技术的进一步创新，降低建筑构件承载重量，提高建筑结构的可靠性及稳定性，体现出砌筑施工技术的优势。在建筑填充墙砌体施工环节，无需大量使用钢材或水泥，转而应用砌体，减轻结构重量，充填墙体还能够作为承重墙的辅助结构，增强结构整体稳固性，形成良好的施工作用，提高建筑工程的质量安全水平。

#### 2.1 施工准备

在填充墙砌体工程施工前，应加深对设计图纸的分析及研究，明确各环节的技术要点，尤其是图纸上所标注的各类关键信息，都要提前核实，以保证施工技术操作的合理性、规范性<sup>[2]</sup>。图纸研究完毕后，在组织开展技术交底工作，确保施工人员能够熟练掌握施工要点，严格依照图纸规划开展施工作业。在制作皮数杆时，应以图纸及现场实际情况为基准，砌块高度、

墙体预埋件的具体位置,都要在杆上进行准确标注。通常情况下,皮数杆需安装于纵横墙交接处,施工中不仅要保证其位置精准,更要严格控制皮数杆的间距。为了保证上下工序的衔接性,提高各环节的施工质量,应在填充墙砌体的前期准备工作中,先验收基层施工质量,针对发现的问题进行修补及处理,横向控制线以及高程控制线需准确设置在基层上,将之作为后续砌筑施工的标准。与此同时,还应全面检查填充墙砌体的拉结筋位置,确保拉结筋与原始结构保持紧密连接,预留位置应与砌体灰缝一致,减少弯折情况。因此,需针对拉结筋末端设置垂直弯钩,依照设计标准及要求,开展机械能抗拔试验。砌体底部可根据设计要求,选择应用多孔砖或烧结砖,按要求设置混凝土坎,确保其高度控制在 20 mm 以上<sup>[3]</sup>。另外,在砌筑施工前的两天时间内,应提前对砌筑表面及砌块均匀洒水,确保水分完全渗透,促使砌块的含水量处于标准区间内,若砌块表面存在浮水,则不可直接施工。因此,在实际洒水过程中,需保证均匀性,既要增加砌块、砌筑表面的含水量,也需增强砌体粘结性,保证砌筑施工质量,减少因水分流失而出现的开裂问题。

## 2.2 加强材料的优化选择

在建筑工程的填充墙砌体工程施工阶段,需根据设计要求优选各类建材,如钢筋、混凝土等材料,都要在入场时出具质量合格证书,并由专人对材料进行检查,确保其性能、规格及质量等情况都符合施工要求,不合格材料禁止入场,更不能应用到施工作业中。墙体砌筑中使用的粉煤灰砖、轻集料混凝土小型空心砌块以及加气混凝土砌块等的材料规格,都要与设计图纸的标识一致,砌块龄期不能少于二十八天。其中的轻集料混凝土小型空心砌块、加气混凝土空心砌块使用时,都要保证独立性,不可与其他类型的砌块混合应用。在选择砌块时,应检查其外观的整体性,若砌块表面存在裂缝,则不能用于施工阶段。另外,在制备砌块砂浆的过程中,需严格依照工程建设标准,对材料进行准确计量,对搅拌时间及速度加以控制,提高混合料搅拌的均匀性。因此,拌合前应结合设计要求,准确计量水泥、砂浆与水,拌合中做到对配料数量的精准控制<sup>[4]</sup>。

## 2.3 砌筑技术

在填充墙砌体的砌筑施工中,需根据砌块的大小及规格,对砌筑结构进行优化设计,减少施工人员的作业量,快速完成整体砌筑作业。涉及砌块切割工作时,需使用专用的切割工具,确保其长度符合要求,一般应以完整砌块为主导,对最小的砌块长度进行控制,

确保不少于完整砌块的万分之一,以免影响砌筑结构的稳固性。墙体上的门窗高度需根据设计图纸进行规划,找准位置预留出门窗孔洞,提高后续门窗施工效率,缩减施工成本。在填充墙砌体的砌筑施工中,可选择应用铺浆砌筑法或刮浆砌筑法,前者的在铺浆长度普遍低于 700 mm,而后者更适合在特殊部位等位置应用,以形成符合预期的砌筑效果<sup>[5]</sup>。与此同时,当前的部分填充墙砌体的砌筑施工中,还会应用到“三一砌筑法”其关键在于铲灰、挤揉的相互配合,可显著增强砌体粘结性,促使灰缝更为饱满。在空心砌块的砌筑施工中,涉及应用对孔、错缝等技术,在保证砌筑质量的基础上,实现对垂直向荷载的有效传递,提高建筑砌体的整体性。需要注意的是,在砌筑施工阶段,应确保内外墙同步作业,依照墙体砌块大小,对搭接长度进行严格控制,墙体转角处也要加强管控,增强咬合能力,提高砌体结构的稳固性及完整性。另外,在构造柱位置施工中,可将其设计为马牙槎形状,操作中需采取先退后进的方式,每次退进长度都要大于 60 mm。在砌筑施工过程中,需确保单日砌筑高度处于 1.8 m 的范围内,施工完毕后及时进行砂浆养护,以保证砌筑质量,减少缺陷及问题<sup>[6]</sup>。

## 2.4 构造技术

为了提高建筑工程结构的稳固性、安全性,需在填充墙砌体工程建设中,加强对构造技术的高效运用,以保证填充墙砌体工程的质量效果。首先,在建筑砌筑结构施工中,需加强对钢混构造柱的合理应用,根据填充墙长度,规范设置构造柱的间隔参数,一般可选择接近于墙体的位置安装构造柱,通过拉结筋,将之与墙体相连接。因此,需将拉结筋结构设置在墙体结构内部,依照规定间隔设置砂浆袋;其次,由于小型空心砌块本身存在边肋,当砌块受到较大的纵向压力时,将形成对边肋的挤压作用,增加破损的可能性。因此,需运用混凝土技术,将结构填实,特别是底层窗口标高等位置,需增设现浇式钢混梁;再次,在填充墙砌体施工阶段,若预留洞口的宽度较大时,应经过梁结构设置在洞口上方,卫生间墙体洞口宽度超出 300 mm 时,则要结合设计要求设置钢筋砖过梁结构,具体可根据设计要求,采取预制或现浇等方式,提高过梁结构的稳固性,确保其设置位置准确<sup>[7]</sup>。实际安装过梁时,需确保门窗洞口的过梁都能满足设计要求,保持较强的一致性,避免因偏差的出现而影响过梁质量;最后,在设置砌体构造柱结构时,需根据设计图纸做好预留工作,按顺序对构造柱钢筋进行绑扎处理,构造柱的马牙槎,需采取先退后进的施工方式,保证

其位置准确。在构造柱施工阶段,应依照要求准确搭接纵向钢筋,更需做好加密区的箍筋搭接工作,确保搭接完毕无质量缺陷后,再进行封模处理。

### 3 填充墙砌体工程施工质量控制措施

#### 3.1 基底处理

在建筑工程的填充墙砌体施工前,应先对基层进行全面清理,为后续砌筑作业的高效推进提供优良的基础条件,增强墙体与基层之间的粘结力,促使墙体始终维持稳定状态,减少裂缝等质量缺陷。因此,当基层上的灰尘及杂物清理干净后,应及时浇水湿润,按规定配置砂浆,确保其强度达标。如果基层表面存在凹凸不平的情况,应进行找平处理,确保基层表面平整、无起伏。找平处理后,等待水泥砂浆完全干燥并达到设计强度后,方可进行后续的砌筑工作。在砌筑施工过程中,应遵循由下至上的顺序进行操作,不可直接将墙体、结构梁以及板底连接到一起,施工过程中使用机械设备切割砌块时,需确保砌块切割面能够对接基础层,砌筑中需着重控制垂直度及水平度,将横向灰缝厚度控制在20 mm范围内。填充墙与柱体之间、承重梁的接缝位置以及转角位置都要按要求进行规范处理,采用丁字搭接方式,减少通缝。

#### 3.2 抗裂处理

在填充墙砌体工程施工阶段,墙体裂缝出现的可能性较高,导致此类情况出现的原因较多,如结构设计不合理、地基不均匀下沉等,当相关环节的施工过程中出现不规范情况时,结构裂缝出现的可能性都会随之增加,裂缝若不能得到及时处理及修复,还会继续蔓延,最终降低建筑物结构的稳固性及安全性。因此,应采取高效可行的抗裂措施,减少结构裂缝:首先,应选用质地均匀、强度适中、吸水率低的砌块材料,减少因材料性能不符合要求而出现的裂缝问题。在蒸压加气混凝土砌块制作中,需将加工时间适当延长,确保超出五十天以上,以免出现干缩问题。砌筑施工到达结构顶端时,需进行不少于七天的留置工作,再衔接封堵处理工序;其次,为了提高墙体结构的稳固性,需根据设计要求,做好孔洞预留工作,避免因位置偏差、预留参数偏差,而增加凿除等处理工序,引起结构损伤,在墙体不完整的情况下,产生裂缝问题;再次,根据实际情况,采用更为合理的砌筑方法,如“三一砌砖法”(即一块砖、一铲灰、一揉挤),确保灰缝饱满、均匀。每日砌筑高度不宜过高,以免墙体因自重过大而产生裂缝;最后,当结构已经出现裂缝问题时,应第一时间组织开展修补工作,需先分析引起裂缝问题的原因,

再制定修补方案。一般应先处理裂缝位置,再将按比例配制的水泥浆填充到缝隙中,形成对裂缝的封堵作用。当裂缝较宽时,需采取墙体配筋封闭修补措施,可在缝隙处埋置钢筋,并将弯钩设置在钢筋双端,构建起稳定性强的嵌入结构。

#### 3.3 提高预埋预留工作的准确性

在填充墙砌体工程施工阶段,应严格依照现场情况及设计图纸,准确定位预留沟槽及孔洞的位置,保证水电安装、门窗连接效率,若预留预埋工作存在误差,则会产生凿除甚至是返工情况,延长施工进度,埋下结构不稳的隐患。预埋预留工作可与砌筑进度同步进行,在砌筑过程中,应根据预埋预留的位置与数量,合理安排施工工序,确保在砌筑到相应位置时,能够及时、准确地进行预埋预留工作。填充墙砌体工程施工前,还需将防裂防渗施工重视起来,通过在材料表面的交接处抹灰,增设加强网,从整体上减少砌体破裂、膨胀问题。

### 4 结束语

在建筑工程的高标准建设中,质量安全要求明显提升,这就需根据现场情况以及工程建设目标,针对不同的环节优选更便于操作的施工技术,提高技术效果,促进建筑工程的现代化建设。在应用填充墙砌体工程施工技术时,应结合实际情况优化技术流程及方案,提高上下环节的衔接性,严格依照技术标准进行操作,提高施工技术及质量的可控性及填充墙砌体工程建设项目的达标率,满足建筑工程的施工要求,基于稳定的结构体系,延长建筑工程的使用寿命,将填充墙砌体施工技术的优势最大化发挥。

### 参考文献:

- [1] 邹淑萍. 填充墙砌体工程施工技术在建筑工程中的应用[J]. 中国厨卫, 2024, 23(05): 78-80.
- [2] 朱效凤. 房屋建筑工程中填充墙砌体工艺技术研究[J]. 门窗, 2023(03): 75-77.
- [3] 夏国章. 建筑工程中填充墙砌体施工质量控制措施[J]. 住宅与房地产, 2020, 568(09): 135, 177.
- [4] 刘芸. 建筑工程中填充墙砌体工程施工技术分析[J]. 幸福生活指南, 2020(41): 56.
- [5] 王松山. 研究砌体填充墙施工技术在建筑工程中的应用[J]. 中国地名, 2023(01): 116-118.
- [6] 李建伟. 填充墙砌体结构施工技术在建筑工程中的应用[J]. 河南建材, 2024(06): 98-100.
- [7] 张军. 建筑工程中填充墙砌体工程施工技术分析[J]. 门窗, 2023(02): 79-81.

# 建筑工程施工中钢筋混凝土质量通病及控制措施分析

姜 辉, 常明迁

(北京建工集团(厦门)建设有限公司, 北京 053400)

**摘 要** 钢筋混凝土作为现代建筑工程中应用最为广泛的结构材料, 其施工质量直接关系到建筑物的安全性、耐久性与使用功能, 在整个建筑工程中占据着不可替代的核心地位。随着我国城市化进程加速推进, 大量高层建筑、超高层建筑以及特种工程结构不断涌现, 对钢筋混凝土结构质量提出了更高要求。本文通过分析钢筋混凝土施工中的典型质量通病, 从材料选择、配合比设计、施工工艺等多角度提出针对性控制措施, 旨在为提升建筑工程钢筋混凝土结构质量提供实用参考, 从而促进工程建设质量水平整体提升。

**关键词** 钢筋混凝土; 质量通病; 施工质量控制; 配合比设计; 振捣工艺

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.021

## 0 引言

在实际施工过程中, 尽管技术规范日趋完善, 施工机械装备不断更新, 但钢筋混凝土结构依然频繁出现各类质量问题, 据住建部 2023 年统计数据, 全国工程质量安全监督抽查中, 钢筋混凝土结构质量问题占比高达 37.8%, 成为建筑工程质量通病的“重灾区”。就工程现场实际情况而言, 钢筋混凝土构件经常出现蜂窝麻面、孔洞凹陷、钢筋外露、保护层不足、表面裂缝等常见缺陷, 这些问题若得不到及时处理, 长期暴露在复杂环境中, 会导致结构使用寿命明显缩短, 增加后期维护成本。

## 1 钢筋混凝土质量通病分析

### 1.1 蜂窝与孔洞问题

蜂窝与孔洞问题作为钢筋混凝土结构最为常见的表面缺陷, 主要表现为构件表面呈现大小不等的凹坑或孔洞, 混凝土骨料裸露于表面, 严重时甚至形成贯通性空洞。造成此类问题的主要原因包括: 混凝土配合比设计不合理, 水灰比控制不当导致坍落度过小, 增加了混凝土流动难度; 粗骨料粒径偏大 ( $\geq 31.5$  mm) 或含泥量超标 ( $> 1.5\%$ ), 影响混凝土工作性; 模板接缝不严密, 漏浆现象严重; 钢筋间距过小 (小于骨料最大粒径的 1.5 倍), 形成“窗帘效应”阻碍混凝土充分填充; 振捣工作不到位, 特别是构件转角处、钢筋密集区振捣不充分, 留下气泡未能排出<sup>[1]</sup>。

### 1.2 漏筋问题

漏筋问题指钢筋裸露于混凝土表面或保护层厚度

严重不足的现象, 主要原因包括: 钢筋定位措施不当, 垫块数量不足或分布不均 (每平方米少于 4 个), 导致浇筑过程中钢筋位移; 混凝土浇筑高度过大 (超过 2 m 自由倾落), 冲击力导致钢筋变形位移; 模板支撑系统刚度不足, 在混凝土侧压力作用下发生变形<sup>[2]</sup>; 施工人员操作不当, 踩踏钢筋造成变形下沉。

### 1.3 裂缝问题

裂缝作为钢筋混凝土结构最常见且危害最大的质量通病之一, 根据其成因与特征可分为塑性裂缝、收缩裂缝、温度裂缝与结构裂缝等多种类型。塑性裂缝主要出现在混凝土初凝前, 通常呈现不规则网状分布, 深度可达构件厚度的 1/3, 多由混凝土表面失水速率过快 (蒸发速率  $> 1$  kg/m<sup>2</sup>·h) 引起; 干缩裂缝则因水泥水化热释放与环境温差 ( $\geq 20$  °C) 导致温度应力超过混凝土抗拉强度而形成, 多呈现贯通性、规则性特征; 温度裂缝在大体积混凝土结构中尤为常见, 内外温差达 25 °C 时即可诱发严重裂缝; 结构裂缝则与荷载作用直接相关, 常出现在受力集中区域, 呈现规律性分布特征。

## 2 钢筋混凝土质量通病控制措施

### 2.1 施工前期质量控制

施工前期质量控制对预防钢筋混凝土质量通病具有奠基性作用, 应当从设计审核、材料把关、工艺策划等多方面入手进行系统管控。其一, 组织专业技术人员对施工图纸进行全面审核, 重点关注构件截面尺寸与钢筋配筋情况, 发现钢筋密集区域 (净距小于 25 mm) 及时提出优化建议, 必要时可采用三维可视化技术进

行节点复杂部位的碰撞检查,确保设计的可施工性。其二,建立完善材料进场检验制度,水泥需进行标准稠度测试(稠度要求26%~30%),强度检验符合设计要求。其三,制定详细的施工方案与技术交底文件,明确关键工序控制点,针对钢筋绑扎、混凝土浇筑等环节制定具体技术参数与验收标准<sup>[3]</sup>。

## 2.2 钢筋施工质量控制

1. 钢筋加工与安装规范。钢筋工程质量直接影响混凝土结构的整体性能,加工安装环节必须严格控制技术参数与操作规范。钢筋下料应严格按照施工图纸要求进行,误差控制在 $\pm 10$  mm以内;在弯曲加工中,弯钩角度控制在 $135^\circ \pm 5^\circ$ ,弯钩直线段长度不小于钢筋直径的10倍;弯折半径满足规范要求(受力钢筋不小于 $3d$ ,非受力钢筋不小于 $2d$ ),避免应力集中引发开裂。安装定位阶段,必须采用足够数量的垫块确保钢筋位置稳定,柱类构件每平方米不少于5个,板类构件每平方米不少于4个,垫块强度等级应高于混凝土设计强度一个等级;对于复杂节点区域可采用定型卡具固定钢筋,确保浇筑过程中不发生位移;保护层厚度控制尤为关键,应根据环境等级确定合理厚度(一般环境25~40 mm,腐蚀环境40~50 mm),通过塑料垫块或混凝土垫块准确定位。

2. 钢筋绑扎与焊接要求。钢筋连接质量对确保结构整体性能至关重要,绑扎与焊接工艺必须符合规范要求。绑扎连接应采用22#镀锌铁丝,绑扎点数量满足规定(梁柱钢筋交叉点不少于50%,且均匀分布),绑扎方式根据受力情况选择“八”字形或“十”字形,确保紧固牢靠;对于剪力墙、梁板类构件,相邻两根受力钢筋的接头应错开,错开距离不小于钢筋搭接长度的1.5倍,避免应力集中。采用焊接连接时,电渣压力焊接头抗拉强度不应低于钢筋抗拉强度的95%,闪光对焊接头强度不低于90%;焊接工艺参数必须经过试验确定,焊接电流控制在320~480 A,电压控制在22~32 V,焊接速度3~7 cm/min;焊后必须进行外观检查与力学性能检验,确保接头质量。钢筋连接区域需设置在低应力区,避开构件最大弯矩区域<sup>[4]</sup>;同一截面钢筋接头百分率严格控制,受拉区不超过50%,受压区不超过25%。施工中特别注意避免小直径钢筋与大直径钢筋直接焊接(直径比不宜超过1:1.7),防止热影响区脆性断裂;焊接完成后进行必要的保温养护,确保接头区域缓慢冷却,减少残余应力。

## 2.3 混凝土材料选择与配合比设计

1. 粗骨料选择。粗骨料质量对混凝土工作性与耐久性有重大影响,选择应符合工程特性需求。针对不

同构件特点,选择合适粒径范围的粗骨料,一般柱墙等构件宜选用5~25 mm连续级配骨料,对于特别密集钢筋区域,最大粒径不宜超过20 mm;骨料针片状颗粒含量严格控制在15%以下,过高会降低混凝土流动性,增加蜂窝麻面风险;骨料表面清洁度直接影响粘结性能,泥土含量必须控制在0.5%以下,石粉含量不超过1%;对于高强混凝土工程,骨料压碎指标不应超过12%,确保有足够的力学性能。实际应用中,优先选择机制碎石作为粗骨料,其棱角性有利于提高混凝土整体强度(可提高5%~10%);在低温环境施工时,应检测骨料含水率(控制在4%~6%)并适当调整用水量,避免因含水率波动导致混凝土性能不稳定。

2. 细骨料选择。细骨料品质对混凝土和易性与表观质量影响显著,选择标准应满足工程技术需求。细度模数控制在2.3~3.0之间,粒径分布均匀,过细或过粗都会影响混凝土性能;含泥量严格控制在3%以下,云母含量不超过2%,以免显著降低混凝土强度;对于泵送混凝土工程,细骨料需含有适量0.315 mm以下颗粒(8%~15%),增强混凝土粘聚性,防止离析泌水。在实际应用中,优先选用天然河砂作为细骨料,其圆滑表面有利于提高混凝土流动性;对于高强度混凝土,可采用细度模数较大(2.8~3.0)的中粗砂,降低用水量,提高强度;针对外露混凝土表面,宜选用颗粒级配良好的中砂(细度模数2.5~2.8),减少表面缺陷。在砂源紧缺地区,可考虑使用机制砂替代天然砂,但应注意控制石粉含量(不超过7%),必要时通过筛分或水洗方式降低石粉含量,并通过增加外加剂用量(增加0.2%~0.4%)补偿其对混凝土流动性的不利影响。

3. 外加剂选择。外加剂作为现代混凝土不可或缺的组成部分,合理选择对提高混凝土性能至关重要。减水剂类型应根据工程特点确定,一般工程可选用普通减水剂(减水率15%~25%),对于高强度、高流动性要求的混凝土宜选用高效减水剂(减水率25%~35%);缓凝组分含量需根据季节气温调整,夏季高温( $\geq 30^\circ\text{C}$ )时,掺入0.2%~0.3%缓凝型组分,延缓凝结时间2~4小时;冬季低温( $\leq 5^\circ\text{C}$ )时,选用早强型减水剂,配合1%~2%的氯化钙(非钢筋区域),加速硬化进程。对于大体积混凝土,应选用低热水泥配合适量粉煤灰(15%~30%)与缓凝型减水剂,控制水化热峰值温度不超过 $70^\circ\text{C}$ ,内外温差控制在 $25^\circ\text{C}$ 以内<sup>[5]</sup>。针对高流态自密实混凝土,需选用聚羧酸系高性能减水剂(用量0.8%~1.5%)配合粘度调节剂(0.05%~0.2%),确保高流动性(坍落度扩展度60~70 cm)与不离析性能兼具。外加剂使用前必须进行相容性试验,特别

是不同品牌或不同类型外加剂混用时,防止因不良反应导致混凝土性能劣化。

4. 配合比设计调整。混凝土配合比设计是确保质量的核心环节,必须根据工程特点进行针对性优化。水胶比应根据强度等级与耐久性要求确定,一般 C30 混凝土控制在 0.50~0.55, C40 混凝土控制在 0.40~0.45, 高强混凝土( $\geq$ C50)控制在 0.35 以下;单位用水量严格控制,泵送混凝土不超过  $185 \text{ kg/m}^3$ ,普通混凝土不超过  $175 \text{ kg/m}^3$ ,过高用水量将显著增加收缩开裂风险。胶凝材料总量应适度控制,通常 C30 混凝土胶凝材料用量  $380 \sim 420 \text{ kg/m}^3$ , C40 混凝土  $420 \sim 460 \text{ kg/m}^3$ ,过高将增加水化热与收缩量;砂率根据骨料特性与施工条件确定,一般泵送混凝土控制在 36%~40%,普通混凝土 33%~38%,过高或过低都会影响和易性。

#### 2.4 混凝土浇筑施工质量控制

1. 浇筑工艺控制。混凝土运输时间应严格控制,从拌合到卸料时间夏季不超过 90 分钟,冬季不超过 120 分钟,确保混凝土不发生离析与初凝;浇筑前必须再次检查混凝土坍落度( $\pm 20 \text{ mm}$ )、含气量(4%~6%)等关键性能指标,确保符合设计要求;浇筑速度要科学控制,墙柱类构件宜控制在  $0.5 \sim 1 \text{ m/h}$ ,防止侧压力过大导致模板变形,楼板类构件宜控制在  $80 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ ,与振捣能力相匹配。混凝土倾落高度是控制离析的关键因素,直接倾落高度不应超过 2 m,超过时应采用串筒、溜管或泵送方式,减小冲击力;浇筑时应避免移动钢筋,必要时设置临时支架,确保钢筋位置稳定;雨天浇筑需搭设临时防雨棚,防止雨水冲刷导致水灰比增大;高温环境( $\geq 32 \text{ }^\circ\text{C}$ )下浇筑应采取降温措施(如使用冰水拌合、遮阳养护等),控制混凝土入模温度不超过  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,降低温度应力开裂风险。

2. 分层分段浇筑方法。分层分段浇筑是确保混凝土质量均匀性的重要技术措施,应根据结构特点科学划分。分层厚度应与振捣系统性能匹配,一般内部振捣器作用半径为  $10 \sim 15 \text{ mm}$ ,分层厚度控制在振捣器作用长度的 0.7~0.8 倍,通常不超过 30 cm;大体积混凝土基础可控制在  $40 \sim 50 \text{ cm}$ ,确保下层混凝土在上层浇筑前仍处于可塑状态(间隔时间控制在 2 小时内),避免形成施工冷缝。分段长度根据结构类型确定,连续墙体宜采用“跳仓法”施工,单段长度控制在 12 m 以内;柱类构件宜一次连续浇筑完成;大面积楼板宜划分为  $10 \times 10 \text{ m}$  左右的小区块,按照棋盘格顺序进行浇筑。接缝处理必须规范,水平施工缝表面应清理至露出骨料,保持粗糙度;竖向施工缝需采用钢丝刷清理或凿毛处理,新浇混凝土前涂刷水泥浆或界面剂,

确保新旧混凝土紧密结合。特殊结构如转换层、大跨度梁等,可采用后浇带技术,留设宽度  $300 \sim 500 \text{ mm}$  的后浇段,待主体结构收缩变形基本稳定后(一般 28 天以上)再进行封闭,有效减少收缩裂缝。

3. 混凝土振捣要求。混凝土振捣工艺直接决定了混凝土的密实度,是防止蜂窝孔洞的关键环节。振捣器选型应与结构特点匹配,一般构件宜选用  $\Phi 50 \text{ mm}$  振捣棒,振动频率  $8000 \sim 12000$  次/分钟;对于密集钢筋区域可选用  $\Phi 30 \sim 40 \text{ mm}$  小直径振捣棒,振动频率  $12000 \sim 16000$  次/分钟;大体积混凝土可配合使用插入式振捣器与平板振捣器联合作业。振捣方法必须规范,插点间距控制在振捣器作用半径的 1.5 倍(约  $30 \sim 50 \text{ cm}$ ),形成作用圈重叠;振捣时间根据混凝土流动性确定,一般持续  $15 \sim 30$  秒,以混凝土表面不再出现大气泡、表面平整呈现浮浆为准;振捣过程应避免触碰钢筋与模板,防止产生“窗帘效应”或离析现象。复杂节点区域如梁柱连接处,应重点加强振捣,可采用“二次振捣”技术,即首次振捣后  $15 \sim 30$  分钟进行二次补充振捣,消除因沉降引起的空隙;墙柱类构件应采用分层斜插法振捣,振捣棒插入下层混凝土  $5 \sim 10 \text{ cm}$ ,确保层间结合紧密。大面积混凝土可结合人工振捣与机械振捣,形成有效互补,确保振捣质量均匀可靠。

### 3 结束语

钢筋混凝土质量通病治理是一项系统工程,需要从设计、材料、施工工艺等多方面综合考量,建立全过程质量控制体系。实践表明,提高施工人员技术水平与质量意识,落实各项技术标准与操作规程,才能从根本上提升钢筋混凝土工程质量。随着新材料、新工艺、新技术在建筑工程中的广泛应用,钢筋混凝土结构质量控制水平将不断提高,为打造安全耐久的建筑工程奠定坚实基础。

#### 参考文献:

- [1] 林国清. 建筑钢筋混凝土主体结构检测技术[J]. 质量与认证, 2025(02):97-99.
- [2] 刘聪莹. 钢筋混凝土结构无损检测技术应用[J]. 建筑机械, 2025(01):137-140.
- [3] 叶公平. 住宅建筑工程中的钢筋混凝土质量监督管理措施[J]. 居舍, 2024(35):166-169.
- [4] 俞传熙. 建筑工程中钢筋混凝土工程施工关键技术分析[J]. 中国水泥, 2024(12):110-112.
- [5] 吴祥高. 建筑房屋工程钢筋混凝土灌注桩施工技术分析[J]. 中国建筑金属结构, 2024,23(11):78-80.

# NQI 信息化平台建设探索与实践研究

王 剑，张泽峰，郭樱萍

(高质标准化研究院(山东)有限公司, 山东 济南 250101)

**摘 要** NQI 信息化平台打通了企业与政府、行业协会、检测机构等之间的信息通道, 促进了产业协同发展, 该平台有助于解决企业质量供给与需求之间的难题。本文通过研究和剖析目前国家质量基础设施(NQI)信息化平台的发展和建设情况, 对该平台的设计思想、平台数据的构建及功能的实施进行了详细的论述, 归纳出了目前NQI 信息化平台发展和建设中存在的一些问题, 并根据NQI 平台的需求和实际情况提出了相关创新实践探索, 以期NQI 信息化平台建设提供有益参考。

**关键词** NQI; 信息化平台; 云平台; 基础设施

**中图分类号:** F20

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.022

## 0 引言

测量、标准化和合格评估被誉为NQI的三个主要组成部分, 这三个部分组成一个完善的技术链条, 是推进质量强国战略的技术支撑, 确保质量和民生改善的基石。目前, 质量指数已成为衡量一国核心能力的根本标准, 它对调节我国的经济与社会发展具有重大意义, 并起到了战略性支持的作用, 它已经完全融合到了经济和社会发展的方方面面, 是我国治理系统的一个主要组成部分, 也是我国素质和能力现代化的支柱。“十四五”期间, 国家明确了要构建完善区域标准化的社会保障机制。NQI有助于企业发现产品的主要品质元素。NQI的信息化建设并不只是将NQI的有关各方信息化, 而是将它进行横向和纵向的连接, 用这些数据进行比较, 对提高产品质量的各个方面进行重点的研究和改进, 并利用其他的技术手段来进行攻关和提高, 从而使产品的质量问得到彻底的解决。

## 1 NQI 信息化平台建设瓶颈

### 1.1 偏重于硬件投入

在推进NQI建设的进程中, 各地普遍倾向于加大对硬件设施的投资力度, 普遍将NQI信息化平台建设简单等同于硬件设施的完善, 比如国家和省级检测中心的构建, 高端精密检测设备的购置, 以及各类检验基地的环境与设施升级扩建等。这种认识往往忽略将NQI与信息化建设相结合的重要性, 导致在NQI信息化平台方面的投入及项目设立相对较少<sup>[1]</sup>。

### 1.2 平台多元化能力不足

在国内, NQI信息化建设方面的项目数量虽然逐年

上升, 但这些项目往往聚焦于单一领域, 仅仅关注与日常工作紧密相关或便于工作执行的部分, 呈现出关注点分散、单一的特点。项目之间缺乏横向联系, 未能形成全局性的规划与协调, 各自为战, 功能集成度不高, 难以给人留下深刻印象<sup>[2]</sup>。这种情况限制了平台应用的范围和深度, 使其受众和使用范围变得较为有限。

### 1.3 功能层面较为保守

众多NQI信息化平台倾向于强调传统的信息传递和业务流程处理, 却往往忽略用户实际应用中的便捷性、互动性以及使用体验, 其核心目标并非在于促进用户的广泛使用, 而是更多地关注于提升用户的满意度和忠诚度作为设计核心。这导致用户通常处于一种被动接受和使用的状态, 缺乏主动使用的动机。鉴于此, 打造一个集功能性、实用性与互动性于一体的NQI信息化平台, 成为质量标准化从业者亟待探索和深入研究的课题。

## 2 NQI 信息化平台建设实践探索

NQI信息化平台助力地区核心产业及崭露头角的领域实现优化与提升, 导入全球领先的技术规范作为依托, 将尖端技术规范作为引领, 贯穿产品研发、生产、分销、应用、审核及监管等各个环节, 从而为地区经济的优质增长奠定坚实而高效的技术基础。

### 2.1 信息化平台设计总体思路

构建全面覆盖品质管控的综合性服务平台, 旨在为用户提供便捷的一站式服务体验, 这是项目构建的基本指导思想。具体而言, 该平台的设计理念包括:

汇聚各类质量标准、检测检验、认证审核、计量校准及 WTO/TBT 等相关质量信息资源<sup>[3]</sup>。用户可通过相应功能进行检索，从而在区域内获取到最全面的质量领域资讯，实现高效的一站式检索与全方位服务。

## 2.2 信息化平台数据库构建

根据 ISO/IEC25012 来确定数据质量需求，并定位在计量、标准、认证与测试验证领域。设计上根据数据使用频率选择范式+非范式存储结构。对于高访问频度的数据类型选择宽表设计，对于属性动态扩展的存储要求，可以使用 JSONB 或 XML 字段来存储，实现半结构化存储。使用支持 ACID 事务的 NewSQL 分布数据库横向扩展的数据模式。对于海量数据的存储，使用分库分表的存储形式来实现<sup>[4]</sup>。

同时，使用时序数据库存储检测仪器实时的监控信息流。在数据集成方面，依托 ApacheNiFi 来设计 ETL 流程来完成多元和异型数据源的统一清洗和数据规范化工作。针对元数据的管理部分，通过使用 ApacheAtlas 建立数据元关系网络，构建数据目录（DataCatalog）以便跟踪数据的生命周期过程。最后配合 OpenPolicyAgent 来实现精准的数据权限管控<sup>[5]</sup>。

对系统进行性能优化，实现分析查询引入列式存储加速、RedisCluster 构建两层缓存减轻 OLTP 负载、向量化计算引擎加速 AI 质检模型推理引擎。安全设计遵循等保 2.0 要求，采用国家机密级 SM4 算法字段加密、基于 TEE（Trusted Execution Environment）实现敏感信息处理、区块链技术实现检测结果证明链。

数据库运维层面，采用 Prometheus 和 Grafana 进行了全面监控。使用逻辑拷贝和物化备份相结合的方式实现小于 15 秒的数据恢复目标。

## 2.3 功能的拓展与完善

构建一个多功能集成的平台，确保功能的多元化和实用性是关键所在，NQI 的信息化平台同样需遵循此原则。需要在现有数据检索功能之上，进一步整合一系列实用性的工具或功能，旨在提升用户体验。例如，引入标准制定辅助、标准更新监控、电子文档浏览、标准审核确认以及知识普及等功能，让用户在获取 NQI 信息的同时，也能享受到更加贴心和人性化的质量标准化服务。

## 2.4 总体应用前景

NQI 信息化平台作为全球认可的技术交流媒介，依托海量数据构建的质量基础设施云端服务平台，极大促进了产业链各环节间的合作效率与品质，同时缩减

了生产与交易的成本。该平台为地方主导产业及成长型产业的转型升级注入了活力，提供了国际前沿的技术规范支持。借助这些成熟的技术规范，指导产品从设计到生产、销售、应用、检验以及监管的各个环节，从而为地区经济的优质增长奠定了坚实的技术基础。企业能够实时获取区域内质量基础的最新资讯，深入分析质量基础工作如标准制定、计量、检测以及认证等领域在推动企业发展过程中遇到的挑战，进而有的放矢地出台相应政策与解决方案，以增强质量发展的核心竞争力。利用高质量的基础设施云端服务体系，全面提升标准化、测量、检测、审核及认证等领域的专业服务效能，确保实现统一规划布局、打造通用资源共享平台、设立统一服务接入窗口、提供一站式综合服务方案、确保结果互认通用，从而优化商业环境，激活市场发展动力，为不同类型的市场参与者带来更优质的保障与支持。

## 3 NQI 信息化建设的功能实践

### 3.1 实践准则

（1）领先性。系统架构需具备超前的视野，预留空间以适应未来功能升级与技术革新。（2）可用性。系统功能需注重实际应用，界面需易于操作，确保用户操作的便捷性。（3）规范化。遵循制定的相关系统设计准则、接口规范、通信约定及数据加工标准，确保数据交流符合既定标准。（4）保障机制。系统需实现强有力的数据保护措施，通过结合物理安全设备，确保有健全的认证体系。（5）稳定性。设计过程中应重视系统的稳定运行，采取措施减少安全风险，防止系统故障，增强系统的自我修复能力，并优化故障应对策略。（6）灵活性。在系统构建时，应考虑到未来功能、数据及业务量的增加，维持开放式系统架构以支持灵活扩展<sup>[6]</sup>。

### 3.2 实践细节

融合先进的信息技术，如海量数据挖掘、网络云服务、智能算法以及边缘数据处理，依托实地考察、数据架构设计、系统平台搭建等手段，打造全新的 NQI 综合服务系统。该系统旨在强化一站式、全方位智能服务功能，构建全面的质量基础设施效能评估体系，促进计量、标准化、认证与认可、检测检验、质量管控等多个环节的有机配合与高效联动。

#### 3.2.1 服务平台端

核心系统的技术实施路径选择了 Python 语言搭配 Flask（或 Django）框架，辅以 Uwsgi 和 Nginx 作为后

端服务技术。具体来说, Python 被选用作为后端开发语言, 负责编写服务器代码和实现业务逻辑, 同时通过三元组的模式从文本资料中抽取关键信息, 进而搭建知识图谱, 并实施自然语言处理算法, 打造全功能的 AI 服务。Python 作为一种面向对象的脚本语言, 其丰富的库和工具为开发提供了强有力的支持, 同时, 其在混合架构中作为连接各部分的“粘合剂”, 极大地提升了系统的灵活性和扩展能力。此外, 采用 WSGI 这一 Python 网络应用的基础协议, 构建了服务端的路由和模板等功能。本项目采用 flask 框架和 uWSGI 服务器的组合以满足技术需求, flask 因其简洁的 WSGI 封装和轻量级特性被选中, 更重要的是其提供的蓝图机制和 Python 风格的设计, 为构建微服务架构的组件系统提供了坚实的基础和支撑。

### 3.2.2 Web 前端

在综合考虑整个平台架构的基础上, 将前端设计为基于微服务的独立模块, 技术选型的出发点是确保其跨平台兼容性和互联互通性。多端适配技术并非指某一项孤立的创新技术, 而是一个包含代码解析、语法处理、语言转换、结构优化等功能的工具群。因此, 在本平台中, Web 前端采纳了 Vue.js 作为核心框架, 这是一种逐步增强的界面构建框架。Vue.js 区别于其他重量级框架的特点在于, 它支持从底层逐步向上构建应用的灵活性。Vue.js 的核心仅专注于视图层面, 易于学习和使用, 并且可以轻松地与现有项目或第三方库融合。同时, 当 Vue.js 与当代开发工具链及相关支持库配合使用时, 它同样能够高效地支持复杂单页应用的开发。在实现 MVVM 模式方面, Vue.js 至少满足了以下技术要求。

1. 数据驱动模式: 在此模式中, 避免了直接操作复杂的 DOM 元素, 转而集中精力管理前端的数据模型。一旦数据模型发生变化, 与之相关的界面元素将自动刷新, 这大大减轻了处理 DOM 结构的烦琐任务。页面上的所有显示内容都直接受数据控制, 与其他页面元素无直接联系。因此, 模块之间的依赖关系变得极为简洁。关键在于, 即便交互逻辑持续增加, 这种关系的复杂性也不会随之上升, 因为每个模块仅与其对应的数据模型绑定。

2. 模块化设计: 只要有用户界面元素展现, 就有模块化的可能。模块化就是将一组 UI 元素及其功能封装为一个独立的单元, 无论该单元被放置在页面的任何位置, 都能保持其功能和外观的一致性, 实现跨页

面复用。这种将 UI 和功能视为一个整体的思路, 便是模块化的核心。显然, 模块化设计旨在提升代码的复用性和灵活性, 优化系统架构, 进而提高开发效率。

### 3.2.3 运营与维护方面

该平台采纳了集 Docker、Docker Compose、Jenkins 及 Git 于一体的综合技术架构。在 Docker 容器技术的虚拟化基础上, 利用 Linux 系统固有的用户隔离特性, 容器管理方面完全依赖 Python 脚本对 Docker Compose 进行操作以实现编排。同时, 结合 Jenkins 与 Git, 形成了一套完整的持续集成与持续部署 (CI/CD) 流程。

## 4 结束语

本研究初步探索和剖析了我国 NQI 信息化平台建设的现状、思路规划、效能落实和今后研究的发展趋势, 并为建立一个集成资源集成、实用应用和科研能力为一体的高水平的国家级质检平台提供对策和思路。该平台可以帮助企业快速获取所在地区的国家质量体系动态, 减少收集数据所需的时间和代价, 为企业的政策制定提供强大的信息支撑。不论是当地的支柱产业, 或是新产业的转型, 都需要有国际、国内先进的技术标准作为支撑。只有依托尖端技术标准来规范产品从设计到制造、再到流通使用及质量监管的各个环节, 才能打造出高品质的产品。国家质量信息化基础设施的建立, 无疑将为地方经济的高品质增长提供坚实的技术保障。

## 参考文献:

- [1] 魏頔, 单薇, 李苏恩. 标准化管理体系推动质量基础设施“一站式”服务平台规范运行研究[J]. 品牌与标准化, 2024(06):124-126.
- [2] 黄勇. 打造质量基础设施“一站式”服务平台助力企业高质量发展[J]. 中国质量监管, 2022(10):90-93.
- [3] 李宏伟, 龙刚, 熊艳芳, 等. 杨凌示范区质量基础设施(NQI)服务平台建设研究项目可行性的探讨[J]. 轻工标准与质量, 2023(01):78-79, 105.
- [4] 刘士妍, 李辉. 把质量服务站建成质量提升“加油站”安徽省加强质量基础设施“一站式”服务平台和协同服务体系研究[J]. 中国质量监管, 2021(12):28-29.
- [5] 金鑫, 谭敏清, 杨立远. 质量基础设施服务平台研究与实践经验分享[J]. 中国标准化, 2024(03):182-190.
- [6] 陈全旺, 王帅, 高勇, 等. 省级质量基础设施“一站式”服务平台基础标准体系研究[J]. 中国标准化, 2024(19):241-245.

# 电气自动化技术在有色金属矿山开采中的应用

朝鲁门

(新巴尔虎右旗荣达矿业有限责任公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021300)

**摘要** 电气自动化技术在有色金属矿山开采中的应用日益广泛, 极大地提高了矿山生产效率与安全水平。本文从矿山开采全流程电气自动化系统集成优化、工业物联网技术在矿山电气设备远程运维中的应用、矿山供配电系统智能化改造以及矿山人员定位与安全管控信息系统构建等方面系统阐述了电气自动化技术在现代化矿山建设中的关键作用, 重点分析了采矿、选矿、尾矿库等环节的自动化系统架构、设备智能化改造、故障诊断、能源优化管理以及安全监控等关键技术, 以期为推动矿山开采过程的数字化、网络化、智能化提供理论参考与实践指导。

**关键词** 电气自动化技术; 有色金属矿山; 系统集成; 工业物联网; 智能化改造

中图分类号: TD85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.023

## 0 引言

有色金属矿产资源是国民经济和社会发展的重要物质基础。随着矿山开采强度的不断加大, 矿石品位下降, 开采条件日益复杂, 传统的矿山开采模式已难以适应高效、绿色、安全生产的要求。电气自动化技术的发展为矿山开采领域的技术进步提供了新的契机。将现代电气自动化技术与信息技术深度融合, 应用于矿山开采的全流程管控, 可显著提升矿山生产的智能化水平, 实现资源利用效率最大化、能耗最优化、安全事故最小化, 对于推动矿业高质量发展具有重要意义。

## 1 电气自动化技术在矿山开采全流程中的系统集成与优化

### 1.1 矿山开采生产系统的电气自动化总体架构设计

在矿山开采生产系统电气自动化总体架构设计中, 需要综合考虑矿山开采的特点、生产工艺流程、设备布局、管理需求等多方面因素, 采用先进的系统工程理念和方法, 构建一个高度集成、灵活可扩展、安全可靠的自动化系统架构<sup>[1]</sup>。该架构应包括现场设备层、过程控制层、管理决策层等不同层次, 实现数据采集、过程控制、优化决策、安全监测等各项功能。同时要重视系统分层设计和各子系统间的无缝集成, 采用标准化的通信协议和接口规范, 确保整个生产系统的高效协同运转和信息共享, 最终实现矿山开采过程的智能化管控和优化决策, 提升矿山的整体运行效率和经济效益。

### 1.2 采矿设备的智能化改造与集成

针对采矿设备的智能化改造与集成, 需要充分考虑

设备的工作特性、矿山环境条件、生产工艺要求等因素, 因地制宜地制定智能化升级方案。一方面要对传统采矿设备进行电气传动与控制系统的升级改造, 引入高效节能的电机、变频调速装置、PLC 等控制单元, 实现设备运行状态的实时监测和精确控制。另一方面要推进采矿设备的网络化和信息化, 通过传感器、工业以太网、无线通信等技术, 采集和传输设备运行参数, 并结合智能算法和大数据分析, 对设备性能进行优化控制和预测性维护。同时, 还要重视不同采矿设备间的互联互通和协同工作, 构建一个高度集成的采矿自动化系统, 最大限度地发挥设备效能, 提高采矿作业的效率和质量。

### 1.3 选矿厂电气自动化系统的优化

选矿厂电气自动化系统的优化要全面分析选矿工艺流程的特点和控制需求, 合理规划自动化系统的架构和功能, 实现从原矿破碎、磨矿、浮选、脱水等各工序的精准控制和实时监视。要重点加强对关键工艺参数如矿浆浓度、药剂添加量、pH 值等的自动检测和闭环控制, 确保选矿指标的稳定达标。同时, 要建立完善的设备状态监测和故障诊断体系, 采用振动、温度、电流等多参数综合分析, 及时发现设备的异常状况, 开展预防性维护, 减少非计划停机时间。此外, 应用现代信息技术手段如三维可视化、虚拟仿真等, 构建选矿厂全流程数字孪生模型, 为生产优化决策提供依据, 不断提升选矿自动化水平和管理效益。

### 1.4 尾矿库电气自动化系统的安全监控

尾矿库作为矿山开采的关键配套设施, 其安全稳定运行至关重要。建立完善的尾矿库电气自动化安全监

控系统，是防范尾矿事故、保护生态环境的重要举措。要从尾矿坝的变形、渗流、干滩面积等多个维度，布设各类传感器和监测设备，实现对坝体的全方位实时监测。采用光纤、振弦等先进的数据采集技术，保证监测数据的准确性和可靠性。在监测数据分析方面，要充分运用大数据挖掘、智能算法等手段，及时发现尾矿坝的异常状况并预警，为尾矿库的安全评估和风险管控提供科学依据<sup>[2]</sup>。同时，要构建完备的尾矿库视频监控和人员定位系统，加强现场巡查和应急管理，最大限度地降低尾矿事故风险，确保矿区和周边环境的安全。

## 2 基于工业物联网的矿山电气设备远程运维技术

工业物联网技术正开启矿山电气设备智能化运维新时代。通过构建物联网平台，实现设备状态监测、故障诊断和预测性维护，推动设备管理向全生命周期、精细化、自适应方向发展。

### 2.1 矿山电气设备物联网平台的搭建

基于工业物联网技术构建矿山电气设备远程运维平台，是实现设备全生命周期智能管理的关键举措。其一，要科学规划传感器布设方案，综合考虑矿山环境特点、设备运行工况等因素，选用适配性强、可靠性高的传感器，对设备的温度、振动、电气参数等关键状态量进行全面采集。其二，要合理设计数据传输网络架构，充分利用无线通信技术如WIFI、ZigBee、LoRa等，构建一个覆盖全矿区、稳定可靠的物联网网络，实现海量设备数据的高效汇聚和远程传输。同时，要搭建一个高可用、易扩展的物联网平台，提供设备接入、数据存储、边缘计算、可视化展示等服务，为后续的设备监测诊断和智能运维奠定坚实基础。

### 2.2 电气设备状态监测与故障诊断

针对变压器、电动机、开关柜等典型矿用电气设备，要研究其故障机理和退化规律，构建多源异构的状态监测数据融合模型，实现设备健康状态的精准评估。在监测方法上，要综合运用振动分析、红外热成像、局部放电检测等先进技术手段，捕捉设备潜在的早期故障征兆。在数据分析方面，要充分发挥机器学习算法的优势，训练和优化故障诊断模型，对设备的老化程度、剩余寿命等进行智能预测<sup>[3]</sup>。同时，要借鉴专家经验知识，建立设备故障案例库和知识图谱，形成一套集状态监测、故障诊断、原因分析、决策指导于一体的智能化运维体系，最大限度地减少电气设备非计划停运时间，提高矿山生产效率。

### 2.3 电气设备预测性维护决策优化

电气设备预测性维护决策优化旨在通过数据驱动的方法，精准预估设备健康状态和失效风险，动态优化维修策略和资源配置。这需要深入分析海量设备监测数据，刻画设备退化关键影响因素和演化规律，构建多尺度、跨领域的设备退化预测模型。在兼顾设备可靠性和经济性基础上，开展维修策略多目标优化求解，平衡检修成本、备件管理、故障风险等多维度，形成最优状态维修触发阈值和检修周期。挖掘设备历史大数据价值，分析总结设备故障共性规律和群体特征，持续优化维修标准和作业规程，再借助移动互联、可视化等新技术，为一线维修人员提供精准检修指导和辅助决策，提升预测性维护时效性和科学性，最终实现矿山电气设备全生命周期精细化管理。

## 3 矿山供电系统的智能化改造

智能电网技术成为保障矿山用能安全、推动绿色发展的利器。电力需求预测、新能源并网、微网控制和自愈式供配电等技术应用，能重塑矿山能源模式，助力“双碳”目标和高质量发展。

### 3.1 矿山电力负荷需求预测

智能化矿山供电系统建设的重要一环是精准预测未来电力负荷需求。传统的负荷预测方法已难以适应复杂多变的矿山生产环境，亟须创新。可充分挖掘历史负荷数据，通过时序分解、相关性分析等数据挖掘技术，深入分析矿山负荷的时间规律、影响因素等，构建多维度负荷特征库。在此基础上，可结合机器学习算法如支持向量机、长短期记忆神经网络等，充分考虑气象、生产计划等外部因素，建立多时间尺度、自学习自适应的负荷预测模型。通过该模型实现矿山电力需求的动态滚动预测，及时响应电网调度需求<sup>[4]</sup>。同时，还可应用蒙特卡洛仿真等方法，开展负荷预测不确定性分析，提高预测可信度，为智能化电网优化运行提供精准的负荷数据支撑。

### 3.2 新能源接入与微电网优化控制

面对“双碳”目标和能源革命挑战，推进矿山新能源开发利用和微电网建设势在必行。应因地制宜规划分布式光伏发电系统，合理配置矿区屋顶光伏、山地光伏电站，提高能源自给率。在并网方面，要重点解决新能源出力波动性和间歇性问题，优化逆变器控制策略，采用低压穿越、无功补偿等技术，实现分布式电源的平滑并网。针对矿山负荷分散、供电可靠性要求高等特点，微电网是理想的供电模式。在微电网中，

可合理配置磷酸铁锂、飞轮等储能装置,构建源—网—荷—储协调的能量管理系统。采用多目标优化算法,在保障电能质量的同时最大化新能源利用率,提高微网经济性<sup>[5]</sup>。

### 3.3 供配电系统的自愈控制

供配电可靠性直接关系矿山生产安全,因此亟须创新自愈控制技术提升供电可靠性。首要任务是构建实时感知、快速分析、灵活调控的智能配电网。可大规模部署配电自动化终端,实现配网运行状态的全面在线监测。在拓扑分析方面,采用大数据技术准确识别网络拓扑结构,并实时评估供电可靠性,及时发现薄弱环节。当配网发生故障时,自愈控制系统可根据故障定位快速隔离故障区域,通过备用开关自动切换恢复非故障区供电,最大限度减小停电范围。同时针对重要负荷,可合理配置不间断电源、应急发电机等设备,构建分级可靠供电体系。此外,在配网规划阶段引入人工智能技术优化网架,提高系统可重构能力。

## 4 矿山人员定位与安全管控信息系统

### 4.1 矿山人员精确定位技术

矿山井下环境复杂多变,传统单一定位技术难以满足实时精准定位需求。创新研究 RFID 无线射频识别与 UWB 超宽带组合定位方案,构建多层次、全覆盖定位系统十分必要。RFID 负责人员身份识别与粗略定位,UWB 实现亚米级精确定位,双技术优势互补。定位算法上,融合粒子滤波、卡尔曼滤波等算法,综合处理多源异构传感器数据,考虑巷道等复杂地形对信号影响,提升定位精度与可靠性。采用模块化系统集成,实现与矿山其他系统的无缝对接。最终形成“定位—GIS—BIM”一体化解决方案,为安全生产提供坚实的时空数据支撑<sup>[6]</sup>。

### 4.2 采矿作业人员行为安全分析

在复杂的矿山作业环境中,人员的不安全行为往往是引发事故的主要诱因。运用信息化手段智能分析预警人员行为,对提升矿山本质安全至关重要。首要任务是全面采集行为数据,通过视频、可穿戴设备等获取人员位置、动作、生理特征等多维信息。对海量异构数据进行清洗、特征提取,形成标准化行为数据集。在此基础上,利用卷积神经网络、LSTM 等深度学习算法,构建行为识别与风险评估模型。通过深度特征学习,智能识别野蛮操作、违规作业等违章行为,量化评估行为风险级别<sup>[7]</sup>。挖掘群体行为异常模式,及时发现违章苗头。最终形成行为大数据智能分析决策系统,精准刻画人员行为风险,提高事故防范有效性。

### 4.3 智能安全帽与远程管控系统开发

智能安全帽作为矿工配备的重要个人防护装备,其智能化改造与功能拓展已成为矿山安全管理的新趋势。要在传统安全帽基础上集成多传感器模块,如防碰撞、气体检测、生命体征监测等,实时采集人员作业环境与健康状态信息。内置高精度定位和音视频模块,实现与调度中心的双向交互。系统采用模块化设计,兼顾不同安全帽个性化需求。开发一体化智慧安全管控平台是核心。平台采用微服务和大数据分布式计算框架,支撑海量异构数据高效存储和实时分析。通过数据可视化、虚拟仿真等技术,实现人员全生命周期管理、危险区域告警、应急救援指挥等多种应用。利用数据挖掘分析,洞察人员行为规律,优化作业流程。最终打造“端—边—云”一体化、闭环式的智慧安全管控体系。

## 5 结束语

电气自动化技术在有色金属矿山开采中的应用已成为行业发展的必然趋势。矿山开采流程的系统集成优化、设备智能化升级改造、供配电系统的智慧化管理、安全生产的信息化监控等,都对矿山电气自动化系统提出了更高要求。未来,以 5G、人工智能、大数据等为代表的新一代信息技术将与电气自动化技术加速融合,在矿山生产过程优化控制、资产健康管理、能源需求侧响应、多场景安全协同等方面发挥更大作用,为实现矿业高质量可持续发展提供强大技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 程智鹏.智能化技术在矿山电气工程自动化控制中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2023(08):112-114.
- [2] 尹晓峰.矿山电气自动化控制技术中单片机的应用探讨[J].世界有色金属,2021(20):169-170.
- [3] 朱立刚.电气自动化在金属矿山中的应用[J].世界有色金属,2021(09):189-190.
- [4] 谭铮.电气自动化控制技术在矿山生产中的应用[J].世界有色金属,2020(19):23-24.
- [5] 王敏.电气自动化在金属矿山中的应用[J].世界有色金属,2020(11):15-16.
- [6] 刘强.浅论电气工程及其自动化控制中 PLC 技术的应用[J].中国设备工程,2019(13):143-144.
- [7] 刘大欣.矿山自动化的现状及未来发展趋势[J].世界有色金属,2022(20):50-52.

# 冷凝法回收石脑油卸车尾气的工艺改进探究

王洋

(中石化(天津)石油化工有限公司, 天津 300270)

**摘要** 在石油化工行业, 石脑油运输卸载过程中尾气的治理是降低环境污染与恢复资源的关键。本研究通过冷凝法对石脑油卸车尾气进行回收, 探究了不同冷凝温度和压缩过程对回收效率的影响。改进的工艺采用多级冷凝系统, 并结合适度的压缩策略, 实现了对尾气中石脑油组分的高效分离与回收。研究结果表明, 在优化后的参数条件下, 尾气回收率显著提升, 同时减少了运行成本与能耗。本研究旨在为减轻环境压力、为企业带来良好的经济效益提供参考。

**关键词** 石脑油尾气; 冷凝法; 回收效率; 多级冷凝系统; 环境治理

中图分类号: X73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.024

## 0 引言

随着石油化工产业的快速发展, 与其相关的环境问题也随之凸显。其中, 石脑油作为一种重要的化工原料, 在运输卸载过程中产生的尾气, 常含有大量挥发性有机化合物(VOCs), 不仅造成资源浪费, 也给环境带来了严重的污染问题。石油化工行业对于减少VOC排放的需求日益紧迫, 急需寻求有效的尾气回收与治理技术。传统的尾气回收方法往往存在效率低下或成本过高的问题, 难以在大规模工业应用中取得满意效果。为此, 本研究提出一种通过冷凝法改进石脑油卸车尾气回收的新工艺, 旨在研究冷凝温度和压缩过程对尾气回收效率的具体影响。通过优化冷凝条件, 我们构建了一个高效的多级冷凝系统, 结合合理的压缩策略, 以期实现石脑油组分的高效分离与回收。实验结果验证了改进的工艺在提升尾气回收效率方面的显著效果, 不仅大幅度降低了环境污染, 还降低了操作过程中的能耗与成本, 具有明显的经济效益与环保价值。此外, 该工艺的实施与优化, 为石油化工行业提供了一种既经济又环保的解决方案, 同时也为相关领域提供了新的研究思路与实践参考。总之, 本研究的目标是为石脑油卸车尾气的回收与治理技术的改进, 提供科学依据和技术支持, 以应对当前化工行业面临的环境与资源挑战。

## 1 背景与挑战

### 1.1 石脑油尾气排放现状与环境影响

石脑油作为石油化工生产中的重要原料, 其在运输和卸载过程中产生的尾气, 成为环境污染的一大源头<sup>[1]</sup>。尾气中含有挥发性有机化合物(VOCs), 这些

化合物一旦释放大气中, 不仅容易参与光化学反应生成臭氧, 还会导致PM2.5等大气细颗粒物的生成, 对空气质量构成严重威胁。石脑油尾气的逸散, 代表着宝贵资源的损失, 直接影响企业的经济效益。在尾气排放未得到有效控制的情况下, 石化企业常面临环保合规压力和可能的法律惩罚。对石脑油卸车尾气的高效回收已成为迫切需求, 既有助于减少大气污染负荷, 也为企业提供了一种资源回收的途径, 实现经济和环保双赢。目前市场上现行的尾气治理技术在效率和稳定性方面存在不足, 难以满足日益严苛的环保要求, 亟需技术创新和工艺改进。

### 1.2 现有尾气回收技术的局限性

现有的石脑油卸车尾气回收技术主要包括吸附法、吸收法和膜分离法。这些方法存在一定局限性。吸附法容易导致吸附剂饱和, 需要频繁更换和再生, 增加了运行成本; 吸收法常用溶剂自身易挥发, 且再生过程复杂, 能耗较高; 膜分离法尽管技术先进, 但对膜材料要求高, 易出现膜污染和通量下降现象。这些方法在实际应用中未能实现高效且经济的尾气回收。为此, 需要探索新的回收方法或对现有技术加以改进, 以解决上述不足并提升回收效率。

### 1.3 冷凝法在尾气回收中的应用与改进需求

冷凝法作为一种物理分离技术, 已在石脑油尾气回收中得到了初步应用。该方法通过降低温度使气态组分凝结成液态, 从而实现尾气中可回收物质的分离。传统的单级冷凝工艺在处理复杂成分的石脑油尾气时, 回收效率常受到限制。不同组分的冷凝温度差异性, 以及气体流速的不确定性, 导致部分轻质组分难以有效回收。冷凝法的应用需要进一步的改进, 以提高分

离效率。这包括优化冷凝温度的控制和分级压缩策略的实施, 需要结合先进的多级冷凝系统设计, 以应对回收过程中的技术挑战并提高经济效益。

## 2 冷凝法回收工艺原理

### 2.1 冷凝法基础理论与原理

冷凝法是基于相变过程的一种分离与回收技术, 广泛应用于液体混合物中的组分分离。其基本理论是利用冷凝过程将气体状态的物质转变为液体状态, 以实现物质的回收与分离<sup>[2]</sup>。在冷凝过程中, 当混合气体通过冷却装置时, 气体中的易挥发物质由气态转化为液态, 由于不同物质在不同温度下的饱和蒸气压差异, 能够实现物质的分级分离。采用冷凝法进行石脑油尾气回收的关键在于控制冷凝温度与压缩比, 通过调控这些参数, 可以确保最大程度地回收目标组分, 降低能耗与成本。冷凝效率的提升不仅依赖于物理设备的先进性, 还与冷凝过程的优化策略紧密相连。通过精确的温度控制和多级系统设计, 冷凝法能够有效增强对石脑油挥发性组分的捕获, 实现高效的资源回收。

### 2.2 多级冷凝系统工作原理

多级冷凝系统是通过逐步降低温度的方式实现气态石脑油组分的冷凝分离。每级冷凝器对尾气的温度进行阶梯式降温, 使气态组分依次在不同温度下转化为液态, 被分离出来。初级冷凝器处理尾气中较高沸点的组分, 通过适度冷却, 使这部分组分先行冷凝<sup>[3]</sup>。尾气进入下一冷凝级, 进一步降低温度, 使中等沸点组分进一步凝结。低沸点组分在一级冷凝器中分离, 以达到最大限度的回收效率。冷凝过程不仅依赖于冷却温度, 还需结合适当的压力调节, 以确保冷凝效果的优化。各级冷凝器协同工作, 不仅提高回收效率, 且降低能耗, 是石脑油尾气处理的关键环节。

### 2.3 压缩过程与冷凝效率的关系

压缩过程与冷凝效率密切相关。在冷凝过程中, 气体压力的增大会提高冷凝效率, 因为高压条件下, 气体的饱和蒸汽压降低, 促使更多的石脑油组分转化为液态。过高的压缩可能导致系统能耗增加和设备磨损。在改进的工艺中, 采用适度的分级压缩策略, 使压缩阶段与冷凝匹配, 达到平衡能耗与回收率的目的。通过优化压缩比和冷凝温度的组合, 能够有效提高石脑油的回收效率, 有助于实现经济与环境效益的双赢。

## 3 冷凝法回收石脑油卸车尾气工艺改进策略

### 3.1 冷凝温度优化

在石脑油卸车尾气回收过程中, 冷凝温度的优化对于提高回收效率至关重要。冷凝温度的选择直接影

响冷凝系统的能耗和石脑油组分的分离效果。较低的冷凝温度能显著增加气态组分转化为液态, 从而提高回收率。过低的冷凝温度可能会导致系统能耗增加, 需要在效率与能耗之间取得平衡。研究表明, 适宜的冷凝温度设置能够在保证石脑油组分充分冷凝的减少压缩过程中的能量损耗。通过对不同冷凝温度下的回收效率数据进行分析, 发现温度范围在特定区间时, 回收效果优于其他条件。这种优化的冷凝温度策略, 为尾气中石脑油的高效回收提供了技术支撑, 并且在实际应用中展示了显著的节能效果, 为工艺的持续改进打下基础。

### 3.2 分级压缩策略研究

分级压缩策略在冷凝法回收石脑油卸车尾气中扮演着关键角色。通过合理设计压缩级数和压缩比, 可以有效提升尾气中的石脑油组分冷凝效率。压缩过程的主要作用在于提高气体的部分压力, 从而促进冷凝分离的发生。在分级压缩策略中, 每一级压缩均针对不同组分的物理特性进行设计, 使得不同沸点的组分能够依次冷凝<sup>[4]</sup>。在应用过程中, 需根据实际操作条件选择适宜的压缩级数和压缩比, 避免过度压缩导致的设备磨损和能耗增加。通过优化分级压缩策略, 可实现更高的资源回收率和经济性, 确保尾气排放达标, 为环境保护贡献力量。

### 3.3 多级冷凝系统设计参数调整

在多级冷凝系统的设计中, 合理调整参数是提升系统效率的关键。冷凝器数量和冷凝面积的设置直接影响气体冷凝效率, 通过增加系统中冷凝器的级数可实现更细致的分段冷凝过程, 从而提高目标成分的回收效率。冷凝温度分布需根据石脑油组分的不同沸点进行精细化调整, 确保每一级冷凝器在最佳温度下运行。采用变截面设计的管道结构, 可以有效控制气体流速, 促进冷凝效果。各冷凝器之间的连接方式和管路长度需进行优化, 以减少压降和能量损耗, 进一步提高系统的整体回收效果。设计参数的调整不仅提升了冷凝系统的运行效率, 也为实现节能减排提供了保障。

## 4 冷凝法回收石脑油卸车尾气工艺改进的实验验证

### 4.1 实验装置与测试方法

在实验装置与测试方法中, 采用了一套专门设计的多级冷凝系统, 用于石脑油卸车尾气的回收实验。实验装置包括多个冷凝单元, 每个单元配置不同温度控制, 以便研究温度梯度对冷凝效果的影响。为调节尾气的初始状态, 系统中引入了压缩模块, 以确保进入冷凝单元的尾气达到所需的压缩比。尾气通过管道依次通过整个冷凝系统, 实时监测温度、压力及流量

参数。为保证数据的精确性，实验过程中采用了高精度的温度传感器和压力计。回收后的石脑油组分通过气相色谱分析，以评估不同冷凝条件下的回收率与纯度。这一实验设置及方法确保了结果的可靠性与可重复性，为冷凝法工艺的改进提供了坚实的数据基础<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 冷凝温度与压缩比对回收率的影响

重点分析了冷凝温度与压缩比对石脑油尾气回收率的影响。实验采用不同的冷凝温度和压缩比组合，以观察这些参数对尾气中石脑油组分回收效率的具体作用。结果显示，较低的冷凝温度显著提高了回收率，这是由于在低温条件下，更多的石脑油蒸气能够被冷凝成液态并回收。优化后的压缩策略同样对回收过程产生积极影响，适度的压缩提高了气体液化的效率，从而增强了冷凝效果。这种双重优化的方法不仅提升了资源回收的效率，还在能耗控制方面展示出优势，有助于实现工艺改进目标。通过调整冷凝温度和压缩比，能够针对不同尾气处理需求灵活应用，为工业实践提供了具参考价值的指导。

#### 4.3 冷凝系统改进效果分析

通过实验验证，冷凝系统的改进显著提高了石脑油尾气的回收效率。调整后的多级冷凝系统针对不同温度区间进行精细化操作，使尾气中不同沸点的组分得到有效分离。实验数据显示，在优化冷凝温度与压缩比条件下，回收率相比传统工艺提升了15%以上。这一优化还带来了能耗的降低，经测算，冷凝系统的总能耗减少了约10%。改进效果充分证明了新工艺在实际应用中的可操作性与经济性，为进一步推广打下了坚实的基础。

### 5 冷凝法回收石脑油卸车尾气工艺改进的环境与经济效益

#### 5.1 回收率提升对环境的影响评估

冷凝法工艺改进显著提升了石脑油卸车尾气的回收率，对环境影响进行评估尤为重要。改进后的工艺通过多级冷凝系统与分级压缩策略，实现了尾气中石脑油组分的高效分离与回收。这一提升有效降低了石脑油挥发性有机化合物（VOCs）的排放，是减少空气污染的重要贡献。尾气中石脑油组分的有效回收，减少了资源的浪费，对石油化工企业的可持续发展具有推动作用。环境监测数据显示，改进后工艺运行期间，VOCs浓度显著降低，空气质量得到改善，不仅符合国家环境排放标准，亦为全球环保目标作出贡献。在环境保护压力日益增大的当下，该冷凝技术的进步提供了具有广泛应用潜力的绿色解决方案，助力石化行业向低污染与高效资源利用的方向发展。由此可见，工艺

改进的环保价值显著，对促进绿色经济具有重要意义。

#### 5.2 运行成本及能耗分析

对石脑油卸车尾气的冷凝回收工艺进行改进，显著降低了运行成本和能耗。在优化后的工艺中，多级冷凝系统和合理的压缩策略减少了冷凝过程中的能量耗损。实验数据显示，新的工艺减少了冷却介质的使用量，通过适当的压缩过程提高了设备的利用效率。回收率的提升使得石脑油在尾气中的浓度降低，从而减轻了尾气处理设备的负荷，进一步降低了整体能耗。在经济效益方面，尾气中的石脑油成分被高效回收后，投入生产或销售，增加了企业的经济收益，并减轻了废气排放导致的环境负担。新工艺在环境保护与经济效益上表现出明显优势。

### 6 结束语

本研究针对石脑油卸车尾气治理中的尾气回收与资源恢复问题，提出了一种基于冷凝法的回收工艺改进方案。通过优化冷凝温度和压缩过程，改进后的多级冷凝系统显著提高了回收效率，实现了石脑油组分的高效分离与回收。实验结果表明，优化后的工艺不仅有效提升了尾气回收率，还降低了运行成本与能耗，具有较高的经济性与环保价值。然而，研究仍存在一些局限性。首先，实验中的工艺参数和操作条件仅适用于特定范围，实际工业应用可能会受到原料特性、环境因素和设备性能的影响，因此需要在实际生产中进一步验证与调整。其次，尾气回收过程中可能存在未完全分离的微量组分，这部分组分的回收与处理仍需解决。未来研究方向包括探索低浓度组分的回收与资源化利用、优化冷凝系统设计、提高操作稳定性与自动化水平，结合吸附法或膜分离法等技术提升整体回收效率，降低能耗。通过这些优化与改进，预计能为石油化工行业提供更加高效、经济的尾气治理技术，推动环保与资源回收领域的可持续发展。

#### 参考文献：

- [1] 周凯利. 谈挥发性有机物冷凝回收效率[J]. 区域治理, 2020(50):92.
- [2] 罗梁, 白小利, 张国奇. 氯乙烯精馏系统尾气冷凝工艺的改进[J]. 聚氯乙烯, 2022, 50(03):10-11.
- [3] 梁高远, 陈灿驹, 邱程建. 生产中蒸汽尾气及冷凝水回收循环利用[J]. 今日自动化, 2021(03):127-128.
- [4] 张丽丽, 郭峰, 杨凯. 多回路冷凝法技术在聚丙烯装置尾气回收中的应用[J]. 石化技术与应用, 2023, 41(03):220-222.
- [5] 李敬辉. 煅烧工序排放尾气中蒸汽冷凝水的回收[J]. 纯碱工业, 2020(06):33-34.

# 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用探析

杨云江

(山东洋纳环保科技有限公司, 山东 德州 253000)

**摘要** 随着工业化的快速发展, 工业污水处理成为环境保护的重要一环。反渗透水处理设备作为一种高效、节能的水处理技术, 在工业污水处理中发挥着越来越重要的作用。本文介绍了反渗透水处理设备及其工作原理, 详细分析了该设备在钢铁工业、造纸工业、印染工业和电子工业等各类工业生产废水处理中的应用情况, 并提出了确保资料收集的精确性、科学选择与设计设备类型及方案、规范操作方法、优化操作流程、延长反渗透膜使用寿命和改进密封胶圈设计等综合措施, 以期提升反渗透水处理设备的应用效果提供借鉴, 从而进一步提高工业污水处理的效率和质量。

**关键词** 反渗透水处理设备; 工业污水处理; 钢铁工业; 造纸工业; 印染工业

**中图分类号:** X7

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.025

## 0 引言

在水资源短缺和环境污染问题日益严重的情况下, 有效、稳定和经济的废水处理技术已成为目前的一个研究热点。反渗透水处理技术作为废水处理行业的一个关键子领域, 因其在脱盐和净化方面的高效性能而受到广泛关注。但在实践中反渗透水处理设备经常会遇到膜污染、密封泄漏、运行不规范等现象, 极大地影响设备性能和出水水质。因此, 探讨提高反渗透水处理设备运行性能和稳定运行关键策略对废水资源化利用和环境保护至关重要。

## 1 反渗透水处理设备及其工作原理

反渗透水处理设备作为现代水处理技术中的翘楚, 具有高效性与广泛应用性, 在工业与民用领域中都显示出不凡价值。这种装置是根据反渗透原理(见图 1)来工作的, 这种原理就是渗透现象中的逆过程<sup>[1]</sup>。自然状态时, 渗透作用促使水分子由低浓度溶液转移到高浓度溶液中, 直到两边的浓度趋于平衡。但反渗透通过外加压力迫使水分子反向穿过半透膜并由高浓度侧向低浓度侧流动, 以有效地拦截溶解固体、有机物、胶体、微生物和其他杂质达到深度净化水质。高效的反渗透膜是反渗透水处理设备的关键组成部分, 这种膜的孔径非常小, 可以有效地阻挡大量的溶解盐和分子量超过 100 的有机物, 同时允许水分子自由流动。该装置运行时, 先通过预处理系统对原水进行预处理, 除去悬浮物、大颗粒杂质及余氯, 保护反渗透膜不被

污染破坏。然后, 经过预处理的水会流入反渗透膜组件中, 并在高压泵作用下迫使水分子穿过半透膜同时将杂质拦截于膜侧, 从而产生浓水。最后经反渗透膜处理后水质有了明显改善, 变成了可供工业生产使用或者饮用纯净水<sup>[2]</sup>。

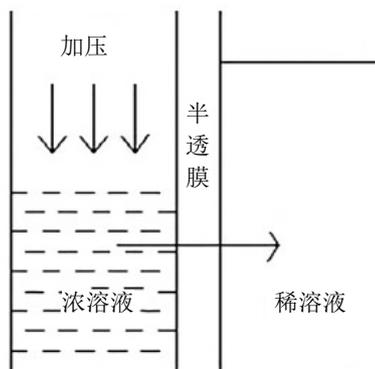


图 1 反渗透原理

## 2 反渗透水处理设备在各类工业生产废水处理中的应用

### 2.1 钢铁工业

钢铁工业是国民经济的主要支柱, 在生产中所排放的污水不仅数量多, 且组成复杂、含高浓度悬浮物和油类、重金属离子及各种有机物, 对环境及生态系统造成严重的威胁。因此, 对钢铁工业废水进行有效治理和回用对实现节能减排和推动可持续发展有着十分重要的作用。反渗透水处理设备处理钢铁工业废水

已显示出其明显的优越性<sup>[3]</sup>。对于钢铁废水中所含高浓度悬浮物及油类而言，在预处理阶段一般都会使用混凝、沉淀、过滤及气浮技术来对其进行有效的清除，从而达到保护反渗透膜不被污染的目的。然后将预处理后的水体送入反渗透系统中，水分子在高压泵作用下被迫穿过半透膜同时将重金属离子、有机物和其他杂质拦截于浓水侧达到废水深度净化目的。

## 2.2 造纸工业

造纸工业作为传统高污染行业，对废水的处理一直以来都是环保领域研究的热点和难点。造纸产生的废水中包含了大量的悬浮物、纤维、化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)和各种添加剂的残余。如果这些废水没有得到适当的处理而被直接排放，它们将对整个水体生态系统带来巨大的损害。反渗透水处理设备处理造纸工业废水为破解这一困境提供了一条有效途径。造纸废水处理流程一般以反渗透设备为深度处理单元处于混凝沉淀和生物处理的预处理工序后面<sup>[4]</sup>。预处理阶段的目的是除去污水中绝大部分悬浮物、胶体和某些有机物，使反渗透膜进水环境比较干净，从而延长其使用寿命，提高处理效率。进入反渗透系统，污水由高压推动经过精密半透膜时，薄膜选择透过性使水分子顺利透过，同时污水中溶解有固体、胶体和色素、并对残留添加剂等进行高效截留以达到废水深度净化目的。

## 2.3 印染工业

印染废水中一般含有高浓度有机物、色素、重金属离子和大量悬浮物等污染物，它们不但很难被降解，还会给环境造成很大危害。将反渗透水处理设备应用于印染工业废水处理为解决该困境提供了一种创新的方法。印染废水处理流程一般以反渗透设备为核心单元进行深度处理阶段，处于混凝沉淀和生物处理的初级处理工艺后面。预处理阶段的目的是将废水中悬浮物、胶体和一些易降解有机物除去，从而为随后反渗透处理创造良好的条件。进入反渗透系统，污水经高压泵强制流经精密半透膜。该膜具有选择透过性，使水分子和一些小分子物质能够透过，同时对污水中绝大部分有机物、色素和重金属离子进行有效拦截，达到对污水深度净化目的<sup>[5]</sup>。

## 2.4 电子工业

电子工业是高新技术产业中的一个重要部分，它在学习中所排放的污水成分复杂，含重金属离子与有机污染物，给环境与人体健康带来了潜在的威胁。反渗透水处理设备应用于电子工业废水处理为这一环保难题的解决提供了一种有效而又经济的方法。在处理

电子工业废水的过程中，反渗透设备一般是深度处理的一环，处于酸碱中和、混凝沉淀、活性炭吸附或者离子交换的预处理过程后。预处理阶段以去除污水中悬浮物、胶体、某些重金属离子和易降解有机物等为主要目的，并为随后反渗透处理创造条件。

## 3 提升反渗透水处理设备应用效果的综合措施

### 3.1 确保资料收集的精确性与全面性

在增强反渗透水处理设备的使用效果时，数据采集范围要涉及原水水质特性、设备选型参数、运行维护记录和历史处理数据。一是对原水水质进行精确分析，是设备选型和设计的依据，其中包括对水中溶解性固体、有机物含量、pH值、温度和悬浮物浓度等主要指标进行精确测量，有利于对装置进行有针对性预处理方案以降低膜污染风险。二是设备选型参数是否准确直接影响处理效率和费用，需要从处理规模、进水水质、出水水质需求、膜材料特性和操作压力等方面进行考虑，经过科学的计算和仿真，保证了选用的装置在满足处理需要的同时，还具有经济合理性。三是运行维护记录是否全面和准确对及时发现问题和解决问题非常重要，主要涉及设备运行状态、清洗周期和药剂消耗等方面。膜性能监测和其他资料，要定期采集和分析，以便优化操作流程和提高设备寿命。

### 3.2 科学选择与设计反渗透水处理设备类型及方案

在增强反渗透水处理设备使用效果过程当中，对反渗透水处理设备种类和方案进行科学选择和设计是其中的核心环节。这一步需要考虑原水的水质特征、处理规模、出水的水质要求、运行成本、环境影响和经济效益等诸多因素。一是对于不同种类原水水质应选择合适的膜材料和组件种类，如对于含盐量较高或者难降解有机物废水可以选择抗污染性能好、脱盐率较高等特殊膜材料。二是确定处理规模需要以实际需求为依据，在保证处理量符合生产需求的前提下，避免因设备闲置而浪费资源。出水水质要求决定着装置的处理深度和工艺流程，需要按照特定的标准或者使用情况严格把关。

### 3.3 保障反渗透水处理设备操作方法的规范性与准确性

在促进反渗透水处理设备使用效果不断提高的同时，确保操作方法规范性和准确性，是保证该装置高效平稳运行的重点。一是设备启动和停机都要按照设定的步骤进行，如启动之前需要对各个零件的状态进行检查，以保证压力、温度和流量都处于正常的范围；停机时需要做必要的清理和维护，才能延长设备寿命。

二是日常操作的监控和调控非常关键，主要是对进水水质、产水水质、膜压差和回收率等主要指标进行实时监控，发现异常情况后立即采取调整措施，以免问题扩大化。三是定期的维护和保养对保证设备性能至关重要，其中膜组件清洗、药剂补充和更换以及过滤器反冲洗都需要严格按设定方案进行。同时对操作人员要定期进行专业培训并不断提高操作技能和应急处理能力以保证遇到突发状况时能做出快速准确的反应。

### 3.4 结合水力学特性，优化反渗透水处理操作流程

在增强反渗透水处理设备使用效果的同时，综合考虑水力学特性并对操作流程进行优化，是提高处理效率和降低能耗的重要途径。水力学特性如流速、压力和流量分布对反渗透膜性能和寿命有直接的影响。一是合理的流速设计可以保证水流在膜表面均匀地流动，降低了膜污染和阻塞的危险，也就提高了产水效率。二是以压力控制为中心进行优化操作，压力过高会使膜负荷增大，加快膜老化和破损速度，压力太低又会造成产水量不足，从而影响处理效率。所以，需要结合原水水质、膜材料特性和处理目标，准确地计算和设置合适的操作压力。三是流量分配是否均匀是优化运行的一个重要方面，管道布局和流量分配的合理设计保证了各个膜组件进水流量平衡，避免了局部过载或者欠载的情况发生，进而延长了膜使用寿命，提高了整体处理效率。

### 3.5 延长反渗透膜的使用寿命，减少污染积累

反渗透水处理系统连续运行时，提高反渗透膜使用寿命，降低污染积累，是促进整体处理效率和经济效益提高的关键。反渗透膜是系统核心组件，反渗透膜性能的好坏决定着出水水质和处理效率。一是预处理工艺的优化是提高膜寿命的根本，经过有效地混凝、沉淀、过滤和杀菌等处理后，进入反渗透系统中的悬浮物、胶体、有机物和微生物等可以显著减少，使膜污染负荷下降。二是实行定期化学清洗和物理清洗对保持膜性能至关重要，化学清洗可除去膜表面有机物、无机盐和微生物等污染，但物理清洗是利用高压水流或者气水混合流对膜面进行冲刷，以除去附着力弱的污染物。三是适当的操作压力、流量及温度等合理操作条件可降低膜物理损伤和化学降解并延长其寿命。同时对膜压差、产水量及脱盐率这些关键参数进行监测，及时发现和治理膜污染也是提高膜寿命的一个重要途径。

### 3.6 改进密封胶圈设计，提升设备整体性能

反渗透水处理设备运行和检修过程中，密封胶圈

是连接各个构件和防止液体漏出的关键构件，密封胶圈设计的合理性和性能的稳定性对于设备整体性能有着至关重要的影响。传统密封胶圈由于材质老化、压力波动和温度变化容易造成密封性能降低，继而诱发液体泄漏和膜组件损坏，从而严重影响装置稳定运行及出水水质。所以，完善密封胶圈设计、增强密封胶圈耐用性和密封性能是提高设备整体性能至关重要的措施。一是选择高性能密封材料如耐化学腐蚀、耐高温、耐磨损等特种橡胶或者合成材料能有效地抵御恶劣工况老化和变形，提高密封胶圈寿命。二是对密封胶圈结构设计进行了优化，例如加大密封面宽度和接触面积、使用弹性补偿结构、设计合理安装和拆卸等，可增强密封效果、降低泄漏风险。三是充分考虑到设备运行过程中可能会碰到的压力波动和温度变化等因素，开展了密封胶圈压力-温度适应性试验，以保证其能够在多种工况下能稳定密封。四是建立密封胶圈保养和更换的完善机制，定期对密封胶圈状态进行检查，并对老化或者破损胶圈进行及时替换，防止可能发生泄漏的风险。

## 4 结束语

本文在对反渗透水处理设备的性能改善和稳定运行策略进行系统研究的基础上，提出了保证数据收集精确性和全面性、科学选择和设计设备、确保操作规范、结合水力学特性对工艺进行优化、延长膜的使用寿命、对密封胶圈的设计进行完善等一系列措施。实施上述措施既可以有效地提高反渗透水处理装置整体性能、降低膜污染和泄漏风险，又可以保证装置长期平稳运行和出水水质持续合格。本研究结果对促进反渗透水处理技术广泛应用和持续发展有积极指导作用。

## 参考文献：

- [1] 冬志裕. 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用实践 [J]. 清洗世界, 2023, 39(10): 131-133.
- [2] 何佳. 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用 [J]. 中华建设, 2023: 105-107.
- [3] 林洁婷. 反渗透水处理设备在工业污水处理中的应用 [J]. 资源节约与环保, 2023(04): 87-90.
- [4] 陈世金, 孙理密, 刘圣东, 等. 用地紧张条件下工业污水处理工程集约化低碳化设计案例 [J]. 工业水处理, 2023, 43(09): 195-200.
- [5] 巫进. “超滤+反渗透”工艺在污水厂再生水处理中的应用 [J]. 城市道桥与防洪, 2023(06): 147-150.

# 建筑结构优化对工程造价及电气系统的影响分析

张海洋<sup>1</sup>, 张传帅<sup>2</sup>, 庄永培<sup>3</sup>

(1. 山东交工建设集团有限公司, 山东 日照 276800;

2. 山东益通项目管理有限公司, 山东 日照 276500;

3. 厦门市住宅设计院有限公司, 福建 厦门 361021)

**摘要** 建筑结构优化通过合理调整结构形式、材料选择与施工工艺, 显著降低工程造价并提升建筑性能。在结构形式优化方面, 采用轻量化设计与高效结构体系, 如空间桁架与薄壳结构, 可减少材料用量与施工成本。在材料选择方面, 高性能混凝土与高强度钢材的应用, 不仅提高了结构承载力, 还降低了材料消耗。施工工艺优化则通过预制装配与模块化施工, 缩短工期并减少现场作业量。结构优化还改善了建筑的抗震性能与耐久性, 为电气系统的稳定运行提供了可靠保障。本文对建筑结构优化对工程造价及电气系统的影响进行了研究, 以期对相关人员进行借鉴。

**关键词** 建筑结构优化; 施工工艺; 工程造价; 电气系统

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.026

## 0 引言

建筑结构优化对工程造价与电气系统的影响主要体现在空间利用与荷载分布方面。通过优化结构布局, 如采用大跨度设计与灵活隔断, 可提高空间利用率, 减少建筑体积与材料用量。荷载分布优化则通过合理布置承重构件, 降低结构自重与基础成本, 为电气设备的安装与维护提供了便利。结构优化还减少了建筑的热桥效应与能耗, 为电气系统的节能设计创造了条件<sup>[1]</sup>。优化外墙保温结构与屋面设计, 可降低空调与照明系统的负荷, 进一步提高能源利用效率<sup>[2]</sup>。

## 1 建筑结构优化概述

### 1.1 结构优化的定义

建筑结构优化是通过科学分析与设计方法, 对建筑结构形式、材料选择、荷载分布及施工工艺进行系统性调整, 以实现建筑性能与经济效益的最大化。其核心在于运用数学模型与计算机技术, 对结构参数进行多目标优化, 包括强度、刚度、稳定性及经济性等。结构优化不仅涉及传统结构形式的改进, 还包括新材料与新技术的应用, 如高性能混凝土、高强度钢材及预制装配技术。优化过程需综合考虑建筑功能、环境条件与施工可行性, 确保优化方案的可实施性与长期效益。

### 1.2 优化的主要目标

建筑结构优化的主要目标包括提升结构性能、降低工程造价与缩短施工周期。在结构性能方面, 优化

旨在提高建筑的强度、刚度与稳定性, 确保其在不同荷载条件下的安全性与可靠性。例如: 通过优化荷载分布与结构形式, 可有效降低结构应力集中与变形风险。在工程造价方面, 通过减少材料用量、简化施工工艺与提高施工效率等优化措施, 显著降低了建设成本。例如: 采用轻量化设计与高效结构体系, 可减少材料消耗与施工费用。在施工周期方面, 通过优化预制装配与模块化施工, 缩短工期并提高了施工效率<sup>[3]</sup>。

## 2 建筑结构优化对工程造价及电气系统的影响

### 2.1 基础结构优化对造价的影响

基础结构优化通过调整基础形式、尺寸与材料, 降低工程造价。优化过程中可能因设计复杂性与施工难度增加, 导致成本上升。例如: 采用深基础或桩基础时, 需进行详细地质勘察与复杂施工工艺, 增加了勘察费用与施工成本。基础优化还需考虑地基承载力与沉降控制, 可能需引入加固措施或特殊材料, 进一步增加造价。在软土地基或复杂地质条件下, 基础优化的成本影响尤为显著。例如: 采用桩基础或地下连续墙时, 需进行大量土方开挖与支护施工, 增加了施工难度与费用。

### 2.2 主体结构优化对造价的影响

主体结构优化通过调整结构形式、材料选择与荷载分布, 降低工程造价。然而, 优化过程中可能因设计复杂性与施工难度增加, 导致成本上升。例如: 采用大跨度或复杂结构形式时, 需进行详细结构分析与

复杂施工工艺,增加了设计费用与施工成本<sup>[4]</sup>。主体优化还需考虑建筑功能与环境条件,可能需引入高强度材料或特殊结构形式,进一步增加造价。在高层建筑或大跨度结构中,主体优化的成本影响尤为显著。例如:采用钢结构或空间桁架时,需进行大量焊接与吊装施工,增加了施工难度与费用。

### 2.3 结构形式改变对造价的影响

结构形式改变通过优化结构布局与荷载分布,降低工程造价。优化过程中可能因设计复杂性与施工难度增加,导致成本上升。例如:采用大跨度或复杂结构形式时,需进行详细结构分析与复杂施工工艺,增加了设计费用与施工成本。此外,结构形式改变还需考虑建筑功能与环境条件,可能需引入特殊结构形式或构造形式,进一步增加造价。在高层建筑或大跨度结构中,结构形式改变的成本影响尤为显著<sup>[5]</sup>。例如:采用空间桁架或薄壳结构时,需进行大量焊接与吊装施工,增加了施工难度与费用。

### 2.4 空间布局优化对电气线路的影响

空间布局优化通过调整建筑内部空间分布,降低工程造价。优化过程中可能因电气线路布置复杂性与施工难度增加,导致成本上升。例如:采用大跨度或复杂空间布局时,需进行详细电气线路设计与复杂施工工艺,增加了设计费用与施工成本。空间布局优化还需考虑建筑功能与环境条件,可能需引入特殊电气线路布置形式,进一步增加造价。在高层建筑或大跨度结构中,空间布局优化的成本影响尤为显著。例如:采用集中配电或复杂线路布置时,需进行大量电缆采购与复杂施工,增加了施工难度与费用。

### 2.5 荷载分布优化对电气设备的影响

荷载分布优化通过调整建筑荷载分布,降低工程造价。优化过程中可能因电气设备布置复杂性与施工难度增加,导致成本上升。例如:采用大跨度或复杂荷载分布时,需进行详细电气设备设计与复杂施工工艺,增加了设计费用与施工成本。荷载分布优化还需考虑建筑功能与环境条件,可能需引入特殊电气设备布置形式,进一步增加造价。在高层建筑或大跨度结构中,荷载分布优化的成本影响尤为显著。例如:采用集中配电或复杂设备布置时,需进行大量设备采购与复杂施工,增加了施工难度与费用<sup>[6]</sup>。

## 3 应对建筑结构优化对工程造价影响的对策

### 3.1 合理规划基础结构降低造价

合理规划基础结构是降低工程造价的关键措施,通过详细的地质勘察与数据分析,选择适合的基础形

式,如浅基础、深基础或桩基础,以减少不必要的材料消耗与施工费用。优化基础尺寸与布置,采用标准化设计,减少施工难度与工期。例如:在软土地基中,采用桩基础或地下连续墙,可有效提高地基承载力,同时减少土方开挖与支护费用。引入预制装配技术,如预制桩或预制基础板,可显著提高施工效率,降低人工成本。通过合理规划基础结构,能够在不影响建筑安全性与稳定性的前提下,有效降低工程造价。

### 3.2 科学设计主体结构控制成本

科学设计主体结构是控制工程造价的重要手段,采用高效结构体系,如框架结构、剪力墙结构或空间桁架结构,以减少材料用量与施工费用。优化荷载分布与结构布局,采用轻量化设计,降低结构应力集中与变形风险。例如:在大跨度建筑中,采用预应力混凝土或钢结构,可显著减少材料消耗与施工难度。引入模块化设计与预制装配技术,如预制墙板或预制梁柱,可提高施工效率,缩短工期。通过科学设计主体结构,能够在确保建筑安全性与功能性的同时,有效控制工程造价。

### 3.3 优化围护结构减少费用支出

优化围护结构是减少工程造价的重要措施,采用高性能保温材料与节能构造形式,如双层幕墙或复合墙体,以减少能源消耗与运行费用。优化墙体、屋面与门窗的设计,采用标准化构造,减少施工难度与材料浪费。例如:在寒冷地区,采用高性能保温系统或断桥铝合金门窗,可显著提高建筑保温性能,同时降低材料成本。引入预制装配技术,如预制外墙板或预制屋面系统,可提高施工效率,缩短工期。通过优化围护结构,能够在提升建筑节能性能与耐久性的同时,有效减少费用支出。

### 3.4 精准选择结构材料节约资金

精准选择结构材料是节约工程造价的关键措施,根据建筑功能与环境条件,选择适合的材料,如高强度钢材、高性能混凝土或复合材料,以减少材料用量与施工费用。优化材料性能与用量,采用轻量化设计,降低结构应力集中与变形风险<sup>[7]</sup>。例如:在高层建筑中,采用高强度钢材或预应力混凝土,可显著减少材料消耗与施工难度。引入新型材料与技术,如碳纤维增强复合材料或自密实混凝土,可提高施工效率,缩短工期。通过精准选择结构材料,能够在确保建筑安全性与功能性的同时,有效节约资金。

### 3.5 慎重改变结构形式确保效益

慎重改变结构形式是确保工程造价效益的重要措

施,根据建筑功能与环境条件,选择合适的结构形式,如框架结构、剪力墙结构或空间桁架结构,以减少材料用量与施工费用。优化结构布局与荷载分布,采用轻量化设计,降低结构应力集中与变形风险。例如:在大跨度建筑中,采用空间桁架或薄壳结构,可显著减少材料消耗与施工难度。引入模块化设计与预制装配技术,如预制墙板或预制梁柱,可提高施工效率,缩短工期。通过慎重改变结构形式,能够在确保建筑安全性与功能性的同时,有效确保工程造价效益。

#### 4 应对建筑结构优化对电气系统影响的对策

##### 4.1 优化空间布局保障电气线路合理

优化空间布局是保障电气线路合理布置的关键措施,根据建筑功能与使用需求,合理规划电气线路走向与布置,减少线路长度与材料消耗。采用集中配电与模块化设计,可简化线路布置,降低施工难度与费用。例如:在高层建筑中,采用竖向集中配电与水平模块化布置,可显著减少线路长度与施工难度。引入智能化设计与预制装配技术,如预制电缆桥架或预制配电箱,可提高施工效率,缩短工期。通过优化空间布局,能够在确保电气线路合理布置的同时,有效降低工程造价。

##### 4.2 调整荷载分布确保电气设备安全

调整荷载分布是确保电气设备安全运行的重要措施,根据建筑功能与使用需求,合理规划电气设备布置,减少设备数量与材料消耗。采用集中配电与模块化设计,可简化设备布置,降低施工难度与费用。例如:在大跨度建筑中,采用集中配电与模块化布置,可显著减少设备数量与施工难度。引入智能化设计与预制装配技术,如预制配电箱或预制电缆桥架,可提高施工效率,缩短工期。通过调整荷载分布,能够在确保电气设备安全运行的同时,有效降低工程造价。

##### 4.3 强化防火设计提升电气安全性能

强化防火设计是提升电气安全性能的关键措施,根据建筑功能与环境条件,合理规划防火分区与电气线路布置,减少火灾风险与材料消耗。采用高性能防火材料与构造形式,如防火电缆桥架或防火配电箱,提高电气设备防火性能。例如:在高层建筑中,采用防火电缆桥架与防火配电箱,可显著提高电气设备防火性能,同时降低材料成本。引入智能化设计与预制装配技术,如预制防火电缆桥架或预制防火配电箱,可提高施工效率,缩短工期。通过强化防火设计,能够在提升电气安全性能的同时,有效降低工程造价。

##### 4.4 加强抗震措施维护电气系统稳定

加强抗震措施是维护电气系统稳定的重要措施,

根据建筑功能与环境条件,合理规划抗震分区与电气线路布置,减少地震风险与材料消耗。采用高性能抗震材料与构造形式,如抗震电缆桥架或抗震配电箱,提高电气设备抗震性能。例如:在高层建筑中,采用抗震电缆桥架与抗震配电箱,可显著提高电气设备抗震性能,同时降低材料成本。引入智能化设计与预制装配技术,如预制抗震电缆桥架或预制抗震配电箱,可提高施工效率,缩短工期。通过加强抗震措施,能够在维护电气系统稳定的同时,有效降低工程造价。

##### 4.5 深化节能设计降低电气能耗水平

深化节能设计是降低电气能耗水平的关键措施,根据建筑功能与环境条件,合理规划节能分区与电气线路布置,减少能源消耗与材料消耗。采用高性能节能材料与构造形式,如节能灯具或节能配电箱,提高电气设备节能性能。例如:在高层建筑中,采用节能灯具与节能配电箱,可显著降低电气能耗水平,同时降低材料成本。引入智能化设计与预制装配技术,如预制节能灯具或预制节能配电箱,可提高施工效率,缩短工期。通过深化节能设计,能够在降低电气能耗水平的同时,有效降低工程造价。

#### 5 结束语

建筑结构优化通过科学的设计与施工方法,显著降低了工程造价并提升了建筑性能。其在材料选择、结构形式与施工工艺方面的优化,不仅减少了资源消耗与施工成本,还改善了建筑的抗震性能与耐久性。结构优化为电气系统的稳定运行与节能设计提供了可靠保障。通过合理优化建筑结构,能够实现建筑与电气系统的高效协同,为城市可持续发展提供重要支持。

#### 参考文献:

- [1] 王亚丽,张军.建筑工程结构设计对工程造价的影响[J].建设科技,2024(S1):213-216.
- [2] 李泽林.建筑电气系统的自适应控制与节能分析[J].电气技术与经济,2024(11):354-355,358.
- [3] 赵少红.不同结构设计方案对工程造价的影响分析[J].江西建材,2024(10):455-456,463.
- [4] 苗磊.建筑施工中电气系统的优化设计原理研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(28):4-6.
- [5] 曾巍巍.建筑结构设计过程中造价控制[J].居业,2024(09):206-208.
- [6] 苏巍.建筑工程结构设计对工程造价的影响[J].中国建筑装饰装修,2024(11):146-148.
- [7] 王忠柱,臧传波,高明利.建筑结构设计中的工程造价的控制分析[J].中国质量监管,2024(04):150-151.

# BIM 技术在施工总承包项目管理中的应用价值研究

杨雨濛

(西安富阎城市建设有限公司, 陕西 西安 711700)

**摘要** 在国家对建筑工程提出更高要求的背景下, 项目管理在施工总承包项目中至关重要。BIM 技术是一种全新的智能化、数字化的设计和管理软件, 将 BIM 技术融入施工总承包项目管理中, 能使项目管理更高效, 实现对总承包项目的全过程管理。在实际开展施工总承包项目管理工作中, 采用传统的管理模式和方法虽能达到一定的管理效果, 但达不到预期效果, 还会造成施工成本的过度浪费, 需将 BIM 技术与施工总承包项目管理充分融合, 打造虚拟的建筑模型, 对现有的模型不断优化, 提高施工质量, 并做好全周期的工程造价工作, 减少施工成本。本文从 BIM 技术的概述及特征入手, 结合 BIM 技术在施工总承包项目管理中的应用价值, 对 BIM 技术应用案例进行全面阐述, 以期对相关人员进行参考。

**关键词** BIM 技术; 施工总承包项目管理; 设计质量; 项目成本

**中图分类号**: TU712; TP3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.027

## 0 引言

随着新时代的发展, 民众的生活水平不断提升, 对建筑工程质量的要求日益提高, 这给建筑行业带来了新的挑战。与此同时, 在互联网技术快速发展的背景下, BIM 技术在建筑工程领域得到了广泛应用。该技术在施工总承包项目中具有显著的应用价值和优势, 为项目管理工作的顺利实施提供了有力支撑。工程总承包项目 (Engineering Procurement Construction, 简称 EPC) 是指由建设单位委托建筑企业承担工程设计、材料采购及施工勘察等全流程工作。若其中任一环节出现疏漏, 将直接影响工程建设的质量与进度, 导致无法达到业主方的预期要求。为此, 通过有效应用 BIM 技术, 可强化各部门间的协同配合, 实现施工全过程的可视化管理。该技术不仅能提升施工图纸的设计精度, 还可自动生成施工模拟动画, 优化工序安排, 实现各类资源的合理调配。

## 1 BIM 技术概述和特征

### 1.1 BIM 技术的概述

BIM 技术 (建筑信息模型) 是一种基于三维数字模型的信息化技术。该技术通过整合工程项目的各类相关信息, 构建出包含几何数据、物理特性和功能属性等多维信息的虚拟建筑模型。作为现代建筑工程领域的重要工具, BIM 技术广泛应用于项目的设计、施工及运营维护等各个阶段, 有效提升了工程项目的管理水

平。其核心价值在于促进各部门间的协同工作, 实现项目全生命周期的信息共享, 推动建筑工程管理向数字化、智能化的方向发展<sup>[1]</sup>。

### 1.2 BIM 技术的特征

1. 应用范围广。通过将 BIM 技术应用在总承包项目工程中, 可以覆盖整个施工项目的生命周期, 包括建筑工程项目的前期准备、方案设计、施工建设、竣工验收及运营维护等各个阶段, 通过建立 3D 模型和实施项目管理, BIM 技术能够充分发挥其技术优势, 有效提升了建筑工程的施工质量和效率。由此可见, BIM 技术在建筑工程领域的应用范围十分广泛<sup>[2]</sup>。

2. 可视化。通过将 BIM 技术应用在总承包工程中的设计阶段和施工管理阶段, 特别是设计阶段, 将平面的施工图纸以立体化、直观化的形式呈现出来, 便于施工人员和设计人员掌握整个建筑工程的空间结构, 也能及时发现设计存在不科学的区域, 及时做好施工图纸的调整和优化。

3. 模拟性。在广泛采集了项目数据的前提下, 可以依托 BIM 技术开展工程项目的模拟试验, 以 4D、5D 的形式模拟工程项目进度、造价控制的动态演示, 为工程施工计划提供有效参考, 并能够很好地规避项目实施过程的管理问题和缺陷。

4. 信息化。BIM 技术在实际应用中最显著的特征在于其信息化特性。这一特性源于建筑数字化的发展

进程，通过整合多学科知识形成复合型技术体系。该技术运用先进的信息可视化手段获取项目数据，从而为提升项目运营质量奠定坚实基础。

## 2 BIM技术在施工总承包项目管理中的应用价值

BIM技术在施工总承包项目管理中的应用，能够有效转变传统的粗放式管理模式，实现更加精细化的项目管理。通过将BIM技术与其他先进技术相结合，可以显著提升施工总承包项目的实施效率，为建筑企业创造更大的经济效益。下文将重点阐述BIM技术在施工总承包项目管理中的具体应用价值。

### 2.1 保障设计质量

BIM技术在建筑设计领域发挥着重要作用。通过构建三维建筑信息模型，设计人员得以更直观地分析和评估各种设计方案的性能及可行性。首先，设计人员根据项目需求和设计意图，在BIM软件中搭建初步的建筑模型，参数化建模技术让设计人员可以灵活调整建筑形态、空间布局及材料属性，生成多种备选方案。其次，利用BIM软件进行各种性能模拟分析，如日照分析、结构分析、能耗分析等。设计人员根据分析结果，反复调整和优化初步方案，直至满足设计要求<sup>[3]</sup>。

例如：在日照分析中，BIM软件可根据地理位置、朝向和窗户布置等参数，自动生成全年的日照数据，计算不同房间的采光指标，通过对比各方案的日照效果，可优化窗户尺寸与布置，改善室内采光。在结构设计中，BIM技术与结构分析软件无缝集成，并进行数据交换。设计人员可以在BIM软件中定义材料属性、规格、尺寸等参数，即可自动生成分析模型，传导至结构分析软件中进行计算，设计人员据此优化结构布置和构件参数，提升稳定性、安全性和经济性。在机电管线设计领域，BIM技术的应用可实现管线综合与碰撞检查的自动化处理。设计人员利用BIM软件独立完成成本专业的设计建模工作后，系统能够自动识别管线间的空间冲突问题，辅助设计人员优化管线排布方案。通过合理规划管线走向，有效减少不必要的弯折与交叉，不仅提升了安装维护的便利性，同时显著降低了项目成本。实践证明，BIM技术的全面应用对提升设计效率与质量具有显著成效。

### 2.2 控制项目成本

在建筑工程项目的成本管控过程中，BIM技术发挥了重要作用。在项目设计初期，成本管理人员可借助BIM技术自动提取模型构件数据，构建基于BIM的成本分析模型。该模型能够实现多方案成本对比分析，自动生成成本比选报告，为设计方案优化提供决策支持，从而在确保项目功能性和美观性的同时，实现经济效

益最大化。该技术能够精确测算工程量，有效整合人工、材料及机械台班等造价数据，自动生成工程量清单与成本估算报告，不仅降低了人工计算误差，同时显著提升了计算效率<sup>[4]</sup>。

在施工过程中，项目成本管理人员可通过BIM技术实现成本动态的可视化管理。通过将BIM施工模型与项目成本目标及管控计划进行关联，能够实时监测施工进度相关的成本变化情况，及时预警潜在的超支风险，为成本控制决策提供有力支持。此外，BIM技术能够高效评估设计变更对成本的影响，并自动生成相应的工程量清单和造价数据，显著减少人工核算的工作量。同时，该技术在竣工结算阶段可快速完成工程量核对，有效降低结算争议的发生。总之，BIM技术在建筑工程成本管理各阶段发挥了重要作用，提高了成本统计、预算、监控的效率和精度，为项目经济性管控提供有力支撑。

### 2.3 施工过程规划协调

在建筑工程施工过程中，施工准备阶段是BIM技术进行规划协调的初始应用环节。施工管理团队将临时设施、施工设备、安全防护等要素模拟于BIM软件中，形成完整的三维施工场景，可直观地展示施工过程。借助此模型，项目管理人员能够开展施工进度模拟与优化工作，在施工前期即可识别并解决潜在的碰撞问题。系统可自动生成施工进度动画，实现施工工序的优化调整，并科学配置人力、材料、机械及资金等各类资源需求。

在确定施工方案的过程中，技术人员可在BIM软件中模拟比较不同施工方案和工艺，清晰地分析不同方案之间工期、安全、质量、成本等不同指标的优劣性，生成相关的评估报告，可供项目管理人员根据现场实际情况和项目特征选择最优的施工方案，为现场施工提供依据。在施工方案确定后，现场管理人员需要对各参建方及施工人员进行详细的交底，凭借BIM技术，能够更加直观、清晰地传达技术要求和施工细节，提醒施工人员提前注意潜在的施工重点、难点<sup>[5]</sup>。

同时，在施工过程中，BIM技术与监测设备的联动，能够实时采集并分析施工数据，实现工程可视化管控。该系统可对潜在风险进行预警，并动态调整项目进度计划与成本目标，确保施工过程的有效管理。此外，在基于BIM模型的现场平面布置优化方面，管理人员能够通过模拟多种布置方案，从中选取用地面积和运输距离最优的方案来指导实际施工。BIM技术在建筑施工全过程中具有重要作用，可显著提升施工管理效率与工程质量。

### 3 BIM 技术的实际案例运用

#### 3.1 项目概况

A 研发中心项目规划用地面积 170 亩,总建筑面积 234 740 m<sup>2</sup>,项目包含 01、02 两个地块。其中,01 地块总用地面积约 52 709 m<sup>2</sup>,总建筑面积约 93 476 m<sup>2</sup>,主要建设研发办公楼、综合试验楼、铁鸟试验楼、行政办公楼等 4 幢建筑单体及地下室等相关的附属设施。02 地块总用地面积约 59 564 m<sup>2</sup>,总建筑面积约 141 264 m<sup>2</sup>,主要建设客户服务办公楼、客户实训楼、青年楼、专家楼(A-F)、预留办公楼等 10 幢建筑单体及地下室。项目安装系统满足大型研发中心的使用需求,包含中央空调系统、电气系统、通风系统、消防系统、给排水系统、智能化系统等,规模大、接口多、协调难度极高。

#### 3.2 BIM 技术应用过程

在 A 研发中心项目的实施过程中,BIM 技术得到了全面应用,覆盖了项目管理的各个关键环节。在设计阶段,设计人员利用 Revit 软件搭建各专业的 BIM 模型,通过可视化的 3D 模型进行方案比选和优化。基于该模型,同步开展了日照模拟分析与建筑能耗计算,从而优化了建筑平面布局及外围护结构设计,有效提升了建筑整体性能。同时,BIM 技术还支撑了工程量的统计和不同设计方案的造价评估,最终选择了满足功能和性能要求且造价最低的方案。在施工图设计阶段,充分运用 BIM 技术检查和排除建筑、结构、机电等专业存在的各专业碰撞、打架等设计问题,极大的保障项目设计工作质量,为项目顺利实施奠定坚实基础。

在施工准备阶段,施工团队采用 BIM 技术,制定了周密的施工进度计划,并模拟了施工过程,提前发现并解决了管线碰撞等问题。在项目实施阶段,项目团队通过应用 BIM 技术开展材料管理和现场规划等工作,显著降低了材料损耗和工程返工率,同时提升了工厂化预制和精细化施工水平。同时,团队还运用移动终端设备,实现了质量管控、安全监督和进度管理的数字化与可视化。

### 4 BIM 技术在项目实践中存在的问题

#### 4.1 工程量核算能力

尽管 BIM 模型具备工程量计算功能,但在建模过程中普遍存在忽视计量规范的问题,致使最终提取的工程量数据仅能作为参考依据。工程造价领域主要采用工程量清单计价和定额计价两种模式。其中,工程量清单计价以模型计算的工程量为核心依据,其准确性取决于计量规则与计价规则的匹配程度。为确保工程造价计算的精确性,在 BIM 模型构建过程中必须融入专业的造价知识体系。若忽视这一关键环节,将难以充分发挥 BIM 技术在工程造价领域的应用价值。

#### 4.2 人才培养的重点

人才培养的核心在于准确把握行业对人才的需求定位。近年来,综合性人才需求不断增加,主要包括:(1)掌握丰富专业经验的 BIM 技术工程师,既精通 BIM 技术操作,又熟悉建筑专业知识;(2)具有项目管理经验的 BIM 技术人员,能够全程控制 BIM 技术的应用;(3)数据分析师,大型项目中同样需要此类人才;(4)行业 BIM 技术专家,可以预测发展趋势,优化行业标准<sup>[6]</sup>。目前市场上集 BIM 技术、建筑专业技术、项目管理经验、数据分析能力等于一身的人才较为匮乏,一定程度上影响了 BIM 技术在实践中的应用。

#### 4.3 实时沟通与协作

BIM 技术的实际应用应贯穿在项目参与各方的实时沟通与协作中。设计和施工单位应建立有效的信息沟通机制,实时更新并反馈施工变更情况,及时解决问题。施工团队、供应商、分包商也应该通过 BIM 技术了解材料清单和规格说明,进行现场管理和进度跟踪,协调各分部分项工程的完成情况。而在实践中往往相关方各自为战,没有将 BIM 技术真正贯穿于项目全过程的沟通协作环节,致使应用效果显著降低。

### 5 结束语

在新时代背景下,施工总承包项目管理应当充分重视 BIM 技术的应用价值。通过系统掌握 BIM 技术在各实施阶段的应用要点,将其贯穿于工程设计、施工及后期运维全过程,可显著提升施工图纸设计质量,优化工程进度管理与质量控制。这种技术应用模式不仅能够保障总承包项目的顺利实施,更能为建筑企业创造更好的经济效益与社会效益,从而促进建筑行业的健康可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 卢新峰.施工总承包模式下建筑工程项目管理研究[J].江西建材,2022(12):453-454,457.
- [2] 龚仕伟,常飞飞,党鹏,等.变电工程施工总承包模式下的项目管理要点研究[J].工程建设与设计,2022(05):219-221.
- [3] 师磊,徐纲,朱晨.BIM 在施工总承包项目管理中的应用价值分析[J].居舍,2022(03):124-126.
- [4] 段超龙,周晓帆,戴路.总承包项目中 BIM 技术实施过程管理分析[J].施工技术(中英文),2021,50(24):128-131,146.
- [5] 宋文博.化工工程或施工总承包模式下的项目管理特点及应对措施[J].化工管理,2021(25):187-188.
- [6] 张金军.BIM 技术在施工总承包项目管理中的应用研究[J].建筑技术开发,2021,48(06):39-40.

# 建筑项目施工阶段工程变更对工程造价的影响分析

姜华伟

(安徽金泉工程管理咨询有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 施工阶段工程变更是项目建设过程中常见的动态调整行为, 其发生频率与管控效果直接影响工程造价及项目整体效益。本文从施工阶段工程变更的主要类型出发, 系统分析了其对工程造价的综合影响, 提出了针对性的管理建议: 工程变更通过增加成本、改变计价方式、产生额外费用以及影响投资控制目标等途径显著作用于工程造价, 需通过完善制度设计、强化过程管理等措施提升变更管控水平, 以期优化工程造价控制提供理论参考。

**关键词** 工程施工; 工程变更; 工程造价; 成本控制

中图分类号: TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.028

## 0 引言

在工程建设过程中, 施工阶段因环境变化、设计调整、业主需求变动等因素引发的工程变更难以完全避免。工程变更不仅影响施工进度与质量, 更直接作用于工程造价, 成为项目成本失控的重要诱因。当前, 随着建筑行业精细化管理的推进, 如何科学分析施工阶段工程变更的造价影响并提出有效应对策略, 成为亟待解决的关键问题。本文结合工程变更的典型类型, 探讨其对工程造价的作用机制, 以期项目管理实践提供理论支持。

## 1 施工阶段工程变更的主要类型

### 1.1 工程量变更

工程量变更的具体表现形式为实际施工中工程数量的增减超出原设计或合同约定范围。此类变更通常由设计文件中的计算误差引发, 例如结构构件配筋量或土方开挖量的初始测算偏差, 导致施工过程中需额外补充或削减相应工程量。地质条件的不确定性是另一重要诱因, 如勘察阶段未探明的软土层或地下障碍物, 迫使土方回填或地基处理的工程量被动调整<sup>[1]</sup>。施工误差亦可能直接导致工程量变化。例如: 混凝土浇筑时的模板位移引发构件尺寸偏差, 需通过局部剔凿或补浇修正, 从而改变材料实际用量。此外, 业主或使用单位在施工中提出的功能性调整, 如增加隔墙数量、扩大大窗洞口尺寸等, 均会直接引起墙体砌筑、门窗安装等分项工程的工程量显著波动。在机电安装工程中, 管线走向的优化调整可能导致电缆敷设长度或管件数量的增减, 此类变更往往通过设计变更单或

现场签证予以确认, 形成书面记录作为结算依据。

### 1.2 工程内容变更

工程内容变更的核心表现为施工范围内具体工作内容或技术要求的实质性调整。设计图纸的修改是最典型的表现形式。例如: 建筑平面布局的重新规划导致墙体位置偏移、梁柱截面尺寸变更, 进而影响后续装饰面层的施工范围与节点处理方式。材料规格或品牌的替换亦是常见类型, 如将原设计的普通砌块变更为加气混凝土砌块, 或基于防火要求将木质装饰板替换为金属复合板, 此类变更需重新制定材料采购计划并调整施工工艺参数。施工工艺的强制性更新则多源于技术规范修订。例如: 地基处理中由传统强夯法变更为高压旋喷桩加固, 或钢结构焊接中采用新型无损检测技术替代原有检验方法<sup>[2]</sup>。此外, 新增分项工程的实施构成特殊类型的内容变更。例如: 为满足节能验收要求增设外墙保温层, 或根据消防审查意见补充应急照明系统, 此类调整需重新划分施工界面并协调各专业交叉作业流程。

### 1.3 施工顺序或时间安排变更

施工顺序或时间安排的变更主要表现为工序逻辑关系与进度计划的非预期调整。外部环境干扰是主要触发因素, 例如极端天气导致室外工程暂停, 迫使施工单位将室内装饰工程提前实施, 打破原有工序衔接逻辑。资源供应失衡同样可能引发顺序调整, 如混凝土供应中断时, 施工单位需临时将结构施工转为砌体工程, 造成工序倒置。业主或监理单位提出的阶段性验收时间压缩, 则可能要求多个作业面并行施工。例如: 在主体结构未完全封顶时同步开展设备基础施工,

形成非常规作业模式。此外，施工机械故障或劳动力短缺等突发事件，常迫使关键线路上的工序延后，后续非关键工序被迫提前插入，例如因塔吊维修延误导致预制构件吊装暂停，转而优先进行地下管线敷设。此类变更往往通过进度计划横道图的动态修订予以体现，形成新的里程碑节点与资源分配方案。

#### 1.4 工程质量标准变更

工程质量标准变更的直观表现形式为验收指标或技术要求的层级性提升。规范体系的更新是主要驱动因素。例如：新版抗震设计规范实施后，对钢筋连接接头的力学性能提出更高检测频率要求，或对混凝土耐久性指标增加氯离子含量限值。合同履行过程中的条款补充亦可能引发标准调整。例如：业主在施工中追加 LEED 认证要求，迫使材料环保等级、能源效率等参数全面升级。功能性需求的迭代升级则表现为验收项目的增补，例如商业综合体项目中，为提升用户体验追加室内空气质量实时监测系统，或要求幕墙工程增加风压变形性能现场试验。

### 2 施工阶段工程变更对工程造价的影响

#### 2.1 增加工程成本

施工阶段工程变更对工程造价的直接影响表现为工程成本的显著增加。此类成本增加既包含显性资源的额外投入，也涉及隐性管理成本的上升。显性成本增加主要体现在人工、材料与机械设备的直接消耗上。例如：工程量变更导致混凝土浇筑量超出原计划，需补充采购水泥、骨料等原材料并延长施工周期；工程内容变更若涉及材料替换，可能因高性能材料单价较高或采购周期延长增加成本。此外，施工顺序调整可能导致机械设备的二次进场或闲置，增加台班费用与折旧损耗。隐性成本则表现为管理资源的非预期消耗。例如：频繁变更需技术人员反复核算工程量、重新编制施工方案，导致项目管理团队工时成本攀升。同时，变更引发的进度波动可能打乱资源调配计划，加剧人力与设备的低效周转，进一步放大边际成本。

#### 2.2 改变计价方式

工程变更可能触发合同计价规则的实质性调整，从而改变工程造价的计算逻辑与风险分配机制。在单价合同模式下，工程量变更超出合同约定幅度时，可能引发单价的重组或修正。例如：土方工程中超额开挖部分按合同约定比例下调单价，导致单位产值的利润空间压缩。对于总价合同，工程内容变更若超出原招标范围，需通过补充协议重新确定新增分项工程的计价标准，这一过程往往伴随施工单位与业主的博弈，可能因计价依据不明确导致争议性成本增加。计价方

式的变化还可能影响工程款的支付节奏。例如：新增工程内容需重新申报进度款支付节点，导致施工单位资金回笼周期延长，加剧现金流压力。

#### 2.3 产生额外费用

工程变更衍生的额外费用构成工程造价超支的重要诱因，其表现形式多样且具有不可预见性。停工与复工费用是典型类型。例如：设计图纸修改导致施工中断，需承担机械租赁延期的违约金及现场看护的人工成本；返工费用则多由施工顺序调整或质量标准提升引发，如已完工程因工艺变更需拆除重建，造成材料浪费与重复施工投入。间接费用方面，工期延长可能导致财务成本攀升。例如：贷款利息的持续累积或履约保函期限延长产生的担保费用<sup>[3]</sup>。此外，工程变更可能触发合同索赔。例如：因业主指令滞后导致的窝工损失或赶工措施费，此类费用需通过复杂的索赔程序确认，其时间成本与法律咨询费用进一步加重了造价负担。

#### 2.4 影响投资控制目标

工程变更对投资控制目标的冲击表现为预算约束力的削弱与资金配置效率的降低。首先，频繁变更导致原合同价与最终结算价产生显著偏差，打破投资计划的确定性。例如：工程量变更使分部分项工程费用超支，迫使业主挪用预备费或申请追加投资。其次，变更引发的资金需求波动可能打乱资金筹措计划。例如：突发性材料替换需短期调用大额应急款项，导致其他工程段的支付延迟或融资成本上升<sup>[4]</sup>。长期影响层面，投资失控可能降低项目的整体经济效益。例如：因标准变更增加的建设成本无法通过运营收益补偿，导致投资回收期延长或内部收益率下降。此外，变更导致的资源错配可能引发资金沉淀。例如：为应对潜在变更而过度采购的材料形成库存积压，占用流动资金并产生仓储管理成本。

### 3 提高施工阶段工程变更管理水平以控制工程造价的建议

#### 3.1 健全工程变更管理制度

提升施工阶段工程变更管理水平需首先构建系统化、标准化的变更管理制度体系。应明确变更审批的层级权限与流程规范，界定业主、设计、施工及监理各方在变更提出、评估、审批与实施中的责任边界。通过制定变更分类标准，将变更按影响范围、技术复杂程度与造价波动幅度分级管理，对重大变更引入专家论证机制，确保决策的科学性与风险可控性<sup>[5]</sup>。同时，需完善变更文件的标准化模板，规范变更申请单、技术核定单及签证单的填写要求，强化变更依据的完整性与可追溯性。此外，可建立变更风险预警机制，

结合项目特点预设变更触发阈值，当变更频次或累计金额超出预设范围时，自动启动专项审计或成本复盘，防止变更失控。

### 3.2 加强设计阶段的管理

设计深度不足是施工阶段被动变更的主要诱因，需在设计阶段前置管控以减少后期变更风险。应强化设计任务书的编制质量，明确业主需求与技术标准，避免因需求模糊导致设计反复调整。推行设计—施工一体化协同模式，鼓励施工单位早期介入设计评审，从可施工性角度提出优化建议，减少因设计脱离现场实际引发的变更。采用BIM技术进行多专业协同设计，通过碰撞检查与虚拟建造提前发现管线冲突、空间布局不合理等问题，降低施工阶段的设计纠错成本<sup>[6]</sup>。此外，需建立设计变更的严格审查机制，对施工过程中提出的设计修改申请，需追溯原始设计条件变化原因，评估其对造价与工期的影响，避免非必要变更的随意通过。

### 3.3 强化施工过程中的监控

施工阶段需建立全周期、多维度的变更动态监控体系。通过构建变更台账管理系统，实时记录变更提出时间、内容、审批状态及费用增减数据，实现变更信息的透明化与共享化。采用进度—成本联合分析法，将变更影响嵌入更新的进度计划与成本预算中，动态预测整体造价走势<sup>[7]</sup>。强化现场技术管理人员的巡检职责，对可能引发变更的施工偏差或条件变化早发现、早预警。例如：通过每日工程例会汇总现场问题，组织各方快速会商解决方案，避免问题累积演变为大规模变更。此外，可借助物联网技术对关键工序进行实时监测。例如：利用传感器跟踪混凝土养护环境参数，及时调整施工措施以减少质量缺陷引发的返工变更。

### 3.4 合理确定和控制工程变更价款

工程变更价款的有效控制对保障项目成本可控意义重大，需从计价依据标准化与审核机制精细化两方面精准发力。在计价依据标准化上，合同条款中务必清晰界定变更工程的计价原则。当遇到新增项目时，要紧密参照原投标单价体系来确定综合单价，使价格具备连贯性与合理性。对于原投标单价体系中无适用单价的项目，必须详细约定组价方法，比如明确人工、材料、机械费用的取费标准以及利润、管理费的计算方式，从根源上杜绝结算时可能出现的争议。构建变更价款的双重审核机制也极为关键。施工单位在申报变更费用时，需同步呈上工料分析表，详细罗列人工、材料、机械的用量及价格，同时附上能直观反映变更实施过程的影像资料。监理单位先依据现场实际情况，

对申报内容进行实地核实，确认变更的真实性与工程量的准确性<sup>[8]</sup>。之后，造价咨询机构再对变更价款进行合规性审查，严格把控费用计算是否符合既定计价规则，确保费用计算既合理又透明。对于涉及金额大、技术复杂的变更，适时引入第三方审价机构进行独立评估，以专业、客观的视角平衡建设单位、施工单位等各方的利益诉求。并且，要强化变更价款的动态累计控制，定期将已发生的变更费用与风险预备费对比分析，一旦发现超支趋势，立即发出预警，并迅速启动限额管控措施，如限制某些非关键变更的实施，全力保障项目成本处于可控范围。

## 4 结束语

施工阶段的工程变更以多种形式存在，且对工程造价有着全方位、深层次的影响。而强化工程变更管理，是把控工程造价的关键路径。未来，随着数字化技术在工程建设领域的深度渗透，工程变更的可视化模拟与精准分析将成为现实。这不仅能在变更发生前预判其对造价的影响，还能辅助决策，选择最优变更方案，极大地提升变更管理效率与造价控制精度。同时，全过程工程咨询服务模式的推广，将促使各参与方协同合作，从项目规划、设计直至施工阶段，形成一体化的变更管理体系，有效减少变更的随意性，保障造价处于可控范围。此外，行业标准与规范也将持续完善，为工程变更价款的合理确定与支付提供更为坚实的依据。随着这些创新举措与管理优化的逐步落地，施工阶段工程造价控制必将迎来全新的局面，助力工程建设项目实现更高质量、更具效益的发展。

## 参考文献：

- [1] 王淑文. 施工阶段工程造价影响因素及控制策略探析[J]. 商讯, 2022(13):167-170.
- [2] 周艳丽. 建筑工程施工阶段的工程造价管理要点分析[J]. 居业, 2022(05):191-194.
- [3] 王瑛. 建筑工程施工阶段工程造价控制方法分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(05):144-146.
- [4] 刘雪斌. 市政工程变更对工程造价的影响分析[J]. 居业, 2024(09):191-193.
- [5] 孙娜娜. 工程变更对工程造价管理的影响分析[J]. 大众标准化, 2024(10):85-86, 89.
- [6] 黄东. 工程变更管理与造价控制策略研究[J]. 江西建材, 2023(06):382-383, 386.
- [7] 宋阳. 进度、质量、投资：工程变更对建筑工程造价的影响[J]. 建筑结构, 2023, 53(07):155.
- [8] 王小龙, 夏征勇, 龙维. 工程量变更对建筑工程造价的影响及控制策略[J]. 中国住宅设施, 2022(10):160-162.

# 市政污水管网工程施工技术探讨

徐 川

(济南城建集团有限公司, 山东 济南 250000)

**摘 要** 为提升市政污水管网工程施工效果, 本文深入探讨了老旧管道拆除、挖掘管槽、铺设管道基础打底、安装雨污水管道、浇筑混凝土基础、检查井施工、闭水试验及回填沟槽等关键技术, 设计了一套完整的施工技术方

**关键词** 市政工程; 污水管网; 管网改造; 管网安装

**中图分类号**: TU990.3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.029

## 0 引言

随着现代城市化发展速度不断加快, 市政污水管网作为重要基础设施, 其建设规模不断扩大、数量急剧增多, 对施工技术也有更高要求。市政污水管网工程中施工技术关系到施工效果和运营水平, 需要从设计、施工、运维等多个方面展开, 选择合理的施工材料, 保证市政污水管网的运行效果合格, 延长使用寿命。基于此, 深入探讨市政污水管网工程的施工技术, 将先进技术应用到实际中, 能保证功能性合格, 也能优化流程, 提高施工效率, 满足市政工程和运营需求, 对我国现代市政工程领域的发展和进步有积极作用。

## 1 工程概况

某市政污水管网改造工程位于城市核心地带, 项目长 20 km, 需穿越住宅区、商业区、工业区, 主要改造内容为新建污水管网、老旧管网修复与更换、雨污分流改造等内容。本市政污水管网施工时结合设计方案和运营需求, 选择 PVC-U 管道材料制作, 组合形成整个污水管网体系, 保证污水排放效果达到目标。该项目管道安装时, 特别是阳台污水管道安装采取必要的屋面防水措施提高防水效果, 以免投入使用后发生阳台渗漏现象。

## 2 市政污水管网工程的施工关键技术

### 2.1 老旧管道拆除

该项目老旧管道拆除时采用雷达探测的方式精准确定老旧管网的具体位置, 确保后续拆除作业达到精准性。根据本项目管道拆除施工需求, 拆除前对土壤含水量展开检测, 掌握承载力参数。经过勘测结果分析, 该项目土壤含水量 25%、承载力 120 kPa 左右。污水管

网拆除的过程中以人工联合机械方式进行, 通过机械完成管道切割, 再使用人工方式将连接位置破碎完成使其密封性合格, 连接达到强度标准。为使得本项目污水管道运营具备安全性, 施工阶段需加强土壤条件监测, 掌握变形、沉降等数据信息, 使其最大沉降量不超过 5 mm, 以免在投入使用过程中引发地质塌陷等问题。此外, 现场施工阶段采取废弃物回收利用措施, 降低对周边自然环境产生的不利影响<sup>[1]</sup>。

### 2.2 挖掘管槽

#### 2.2.1 挖掘放坡

经过该项目现场地质勘测以及土壤力学分析, 确定适宜的放坡系数。该项目在土壤含水量 25%, 承载力 120 kPa 的条件下将放坡系数设定为 1:0.75, 提高土壤边坡的稳定性, 确保市政污水管网的运营效果合格。该项目开挖作业阶段采用分层方式进行, 每层深度 1.5 m, 防止因为土壤压力过大而引发边坡失稳现象。同时, 现场设置监测点位, 安装测斜仪、沉降观测点及时掌握边坡变形数据, 指导后续施工顺利开展。经过该项目监测结果分析, 边坡位移量在 30 mm 以下, 垂直沉降量 10 mm 以下, 并未超出预警值, 说明项目施工达到安全、可靠的标准。该项目挖掘结束后进行管槽支护处理, 选择钢板桩土钉墙作为支护装置提高边坡结构稳定性。

#### 2.2.2 挖掘边坡防护段

根据该项目施工方案, 开挖深度超过 4 m 时流沙、泥土现象比较普遍。为提高该位置边坡稳定性, 选择钢板桩支护方式, 并对支护结构强度、稳定性展开检测, 使支护效果达到技术标准。同时, 基坑开挖时采用植草方式辅助进行, 使基坑开挖各项任务顺利完成。

具体包含如下几个方面的内容：（1）现场基坑开挖时以机械设备开挖为主，并且在底部预留 30 cm 厚度空间调整为人工开挖方式，防止机械开挖出现超挖、欠挖等情况，也能避免机械设备操作不当引发边坡失稳；

（2）机械开挖阶段对设备性能展开检测，并严格控制机械设备工作状态，预防操作不当引发桩体结构损坏。同时，现场设置必要的排水设施，采用集水井排水方式，其直径为 1 m，间隔 50 m 设置以提高排水性能；（3）开挖沟槽时加强各项参数检测，满足污水管道铺设要求且现场操作便捷<sup>[2]</sup>。

### 2.3 铺设管道基础打底

按照该项目设计方案在管道底部铺设砂石垫层，结构厚度符合设计标准以提高管道运行的稳固性、安全性。管道铺设阶段以中粗砂材料为主，粒径在 10 cm 左右，具体参数值结合管道规格、地基条件调整。中粗砂材料准备完成后，检测参数合格即可将其铺设在沟槽底部，采用人工操作工具方式完成底部摊平、压实处理，使其平整度合格且没有空洞、松散等情况。管槽底部铺设阶段对垫层标高进行控制，间隔 5 m 设置一条标高控制桩，使垫层标高、尺寸精度达标。此外，垫层铺设完成后确保和污水管道紧密接触，防止存在缝隙导致受力不均匀而引发管道损坏现象。铺设结束后由技术人员展开检验检测，使垫层性能合格满足污水管道运行需求。

### 2.4 安装雨污水管道

市政污水管道安装施工时管道连接极为关键，应加强接口处理，使其密封性、强度合格，以满足水管道运行需求。该项目污水管道施工中以承插式接口为主，采用橡胶圈密封方式，确保橡胶圈和管道内径相匹配。在橡胶圈安装的过程中，橡胶圈与承口内壁表面涂抹

润滑剂以确保安装过程中顺畅进行，且防止润滑剂进入管道内部影响水质。同时，使用专用吊车将污水管道吊升，缓慢下放到沟槽内部，水平度、垂直度达到技术标，具体施工要求见表 1 所示。按照该标准，如果污水管道长度为 20 m，则轴线偏差不超过 10 cm。污水管道对接连接是主要施工方式，采用专用工具进行，加强管道对接间隙控制，使其处于 2~5 mm 之间。如果污水管道长度长，特别是该项目施工时现场条件复杂，采用分段安装、逐段连接方式使各管道连接的强度合格。管道连接时以沙袋或临时支架作为支撑装置，确保管道具备稳定性且安装不受影响。管道安装到检查井位置时和检查井紧密衔接，管道和井壁之间缝隙均匀并填充柔性密封材料<sup>[3]</sup>。

### 2.5 浇筑混凝土基础

混凝土基础浇筑施工是保证市政污水管网运营安全性的关键，需执行设计方案进行混凝土材料配比制作，并确保浇筑效果合格。而在市政管道的连接施工时需加强密封性处理，防止管道出现泄漏现象，影响污水管道运行效果。根据该项目管道设计尺寸以及地基条件，明确混凝土基础厚度、宽度等参数。按照以往工程经验，混凝土基础厚度在 100 mm 以上，宽度则根据管道直径、地基承载力方面计算确定。混凝土基础浇筑阶段选择 C15 以上的混凝土材料，并通过专用设备搅拌均匀，再通过泵车、吊车等方式浇筑作业。混凝土基础浇筑施工中需加强塌落度检测，使混凝土材料流动性、密实度达到技术标准。同时，基础浇筑完成后插入振捣器或使用平板振捣器振捣处理，确保混凝土内部没有气泡、孔隙，密实度、强度达到设计标准。此外，混凝土浇筑完成后及时进行养护处理，时间为 7~14 天，保证表面湿润度合格，防止水分流失严重引发混凝土结构开裂或强度不足。

表 1 安装雨污水管道要求

序号	指标类别	指标内容	要求
1	接口类型	承插式接口	-
2	密封方式	橡胶圈密封	-
3	管道材质	雨污水管道	钢筋混凝土等
4	橡胶圈规格	圆形直径	承插口间隙的 1.4~1.6 倍
5	橡胶圈直径	内环直径	管子外径的 85%~90% (管子直径 ≤ 300 mm 时为 85%，直径 > 300 mm 时为 90%)
6	橡胶圈直径	内环厚度	根据管径确定 (Φ300~Φ1350 管径，厚度为 20~22 mm)
7	承插口要求	承口、插口	无气孔、无裂缝、无露筋、无麻面，光滑、圆顺
8	安装要求	胶圈安装	胶圈外缘不翻转、不拧麻花，位置正确，均匀进入承插口

## 2.6 检查井施工

根据本市政污水管网施工需求,检查井作为重要基础设施,按照设计方案施工建设。井筒砌筑施工阶段以红砖、预制模块作为主要材料,保证每一层砌筑高度差处于 5~10 cm 之间,并且每一层砌筑时需加强水平度检测,确保井筒垂直度达到技术标准。井筒和管道连接时以承插式接口为主,采用 1:2 防水砂浆封堵处理使管道的密封性合格。检查井采用现浇钢筋混凝土方式施工,在浇筑过程中确保两侧对称,浇筑高度差不超过 30 cm,再使用振捣棒振捣处理。井筒混凝土浇筑工作结束后开展流槽施工,需采取分层压实、抹光的方式,使用 1:2 防水砂浆,施工厚度为 20 mm。检查井壁和外壁表面,采取防水砂浆磨面处理,厚度达到 20 mm,使井筒的防水性能达到技术标准。上述工作结束后按照工艺方案安装井盖,井盖与井座配合具备紧密性,安装达到平稳性,并且高差设定在 1 cm 以下<sup>[4]</sup>。

## 2.7 开展闭水试验

市政污水管道安装后开展闭水试验,该阶段需加强管道检查,确保没有积水、杂物且管道处于良好状态再开展。闭水试验执行《给水排水管道工程施工质量验收规范》与设计方 案,设计水头通常按照(上下游高差+管径)×T 充满度(取 0.5~0.6)来计算。按照该项目设计方案,其上下游高差为 2 m,充满度取 0.5,则设计水头为 $(2+0.6 \times 600/1000) \times 0.5 = 1.6$  m。如果设计水头没有到达管项内壁,则水头增加 2 m,即 $1.6+2=3.6$  m;如果上游超出管项内壁,则根据设计水头加 2 m 确定设计水头,但不能超出检查井高度。闭水试验阶段实时观察水位变化,并及时补水确保水充足,进而检测渗水量。例如:若恒压时间为 30 min,补入水量为 1 m<sup>3</sup>,管道长度为 50 m,则实测渗水量为 $1/30 \times 50 = 0.17$  L/(min·m)。如果渗水量超标,需检查、调整、维修后再次检测,直到合格为止。

## 2.8 回填沟槽

市政污水管道现场铺设结束后对管道展开闭水试验,验证管道施工效果,主要从强度、密封性等方面展开,确保投入使用后具备较高的稳定性、可靠性。闭水试验是重要的检验措施,各项指标检验完成后即可开展回填沟槽作业。该阶段考虑到和其他结构部分的差异,确保积水处理合格并且沟槽回填施工效果达到技术标准。根据技术标准分析管道运行状况,沟槽回填的稳定性合格,避免超负荷状态导致管道损坏。回填沟槽作业阶段需加强防护处理,避免外部杂质进入

管道内部引发堵塞影响管道的运行效果。该项目施工过程中按照沟槽回填执行技术标准确定施工方式,保证现场施工效果达到技术标准。沟槽排水作业阶段对排水效果进行检测,保证后续管道运营过程中不会存在任何影响。而回填沟槽施工阶段以分段施工方式应用较为广泛,按照从高到低逐步完成各位置回填作业,防止单一位置回填量过大对管道产生冲击损害。沟槽回填采取对称方式处理,做好管道以及防护作业以免回填作业阶段引发偏移、损坏等情况。此外,回填作业开始前要重视沟槽内部杂物清理工作,使接口位置具备密封性,且没有任何杂物影响管道连接强度。按照以往工程经验,施工阶段对检查井周边展开全面检验检测,确保回填沟槽作业按照技术标准顺利完成<sup>[5]</sup>。

根据本市政污水管道工程回填沟槽施工要求,选择适宜回填材料保证回填效果合格且不会给管道造成任何损坏影响。回填完成后使用专用机械设备压实处理,确保回填沟槽压实度合格。

## 3 结束语

市政污水管网作为城市内部重要的基础设施,关系到人们的生活以及社会发展。针对市政污水管网建设施工要求选择适宜的工程施工技术,可确保污水管网建设效果达到目标,进而提高市政污水管网的建设水平。同时,市政污水管网工程施工过程中应加强各环节检测,尤其要重视新材料、新工艺、新技术研发,不断应用到工程实践中,保证市政污水管网建设效果达标。此外,市政污水管网建设阶段要落实监督检查措施,完善检验报告,及时进行缺陷问题改进,以确保市政污水管网运行效果不受影响。

## 参考文献:

- [1] 曹飞,张虎东.市政道路雨污水管网施工关键技术分析[J].运输经理世界,2022(04):30-32.
- [2] 叶文广.市政道路工程污水管道预防渗漏施工技术[J].居舍,2021(02):59-60.
- [3] 马万俊.市政工程污水管网施工要点及优化策略[J].中国住宅设施,2023(04):76-78.
- [4] 林建忠.关于污水管网在市政施工中的技术探讨[J].四川水泥,2021(11):167-168.
- [5] 李绪兴,刁目爽,孟燕.市政道路的雨污水管网施工关键技术探究[J].城市建设理论研究(电子版),2023(20):187-189.

# 机械设备管理与故障诊断技术分析

崔振庆<sup>1</sup>, 王海申<sup>2</sup>, 张春风<sup>3</sup>

(1. 冠县恒祥轴承制造有限公司, 山东 聊城 252000;

2. 山东三微新材料有限公司, 山东 聊城 252000;

3. 山东冠县恒祥板业有限公司, 山东 聊城 252000)

**摘要** 机械设备的管理与维修措施以及故障诊断分析, 对于确保工业生产的高效运行具有至关重要的作用。随着中国制造 2025 战略和智能制造技术的快速发展, 传统的设备管理方式已难以适应现代工业生产的复杂需求。当前, 物联网 (IoT) 技术、人工智能 (AI) 以及数字孪生等新兴技术正逐渐融入设备管理与故障诊断领域, 展现出广阔的应用前景。这些技术能够推动管理方式向智能化、数据驱动方向转变, 不仅显著提升了设备的可靠性, 还有效降低了维护成本, 为工业生产的可持续发展奠定了坚实的基础。本文深入探讨了这些新技术在机械设备管理与维修领域的应用, 旨在为相关研究与实践提供有价值的参考。

**关键词** 机械设备管理; 维修措施; 故障诊断; 物联网技术; 人工智能

**中图分类号**: TH17; F425

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.030

## 0 引言

机械设备作为工业生产的核心组成部分, 其运行状态对生产效率和经济效益具有直接影响。然而, 设备在长期运行过程中难免会出现磨损、老化或故障, 进而导致停机和生产损失。传统的设备管理方式主要依赖于定期维护和事后维修, 这种方式不仅效率低下, 而且难以有效应对复杂设备的故障诊断需求。近年来, 随着人工智能、物联网和大数据技术的迅猛发展, 机械设备管理和故障诊断领域迎来了崭新的机遇。智能化管理策略, 如预测性维护和智能维修, 能够利用实时数据分析进行故障预警, 从而显著提升设备的可靠性和维护效率, 为相关领域的研究与实践提供了坚实的理论支撑和实践指导。

## 1 机械设备管理与故障诊断技术分析的重要性

### 1.1 保障生产连续性与效率

机械设备作为现代工业生产的核心要素, 其运行状态直接关乎生产线的连续性与效率水平。实施科学的管理与维修措施, 对于延长设备使用寿命、减少故障停机时间具有重要意义。企业采用预防性维护与预测性维护策略, 能够提前识别并处理潜在问题, 有效规避突发故障对生产造成的冲击。同时, 高效的故障诊断技术能够迅速锁定问题根源, 为制定精确维修方案提供依据, 从而缩短维修周期, 确保生产线迅速恢复正常运行<sup>[1]</sup>。这一系列措施不仅显著提升了生产效

率, 还大幅降低了停机所带来的经济损失, 为企业的稳健运营奠定了坚实的基础。

### 1.2 推动智能化与绿色制造发展

随着工业 4.0 和智能制造的不断推进, 机械设备管理与故障诊断技术正朝着智能化、数据驱动的方向迈进。企业积极引入人工智能、大数据及数字孪生等先进技术, 实现设备从设计、制造到运维的全生命周期管理优化。数字孪生技术能够构建设备的虚拟模型, 借助模拟分析来优化设备性能和维护策略。同时, 智能化管理策略的实施有助于降低能源消耗和减少环境污染, 助力绿色制造的发展。具体而言, 优化设备运行参数可有效减少能源浪费, 而预测性维护则能降低设备故障所带来的资源浪费<sup>[2]</sup>。这些技术的应用不仅增强了企业的竞争力, 更为工业的智能化转型与可持续发展注入了强劲动力。

## 2 机械设备管理与故障诊断技术现状

### 2.1 技术应用不均衡与普及率低

尽管人工智能、物联网和大数据等技术在设备管理与故障诊断领域展现出巨大潜力, 但其应用普及却存在不均衡的问题。众多中小企业因资金和技术条件的限制, 难以全面采纳智能化管理工具, 依然依赖于传统的人工维护模式。技术普及率的低下, 使得部分企业无法有效利用先进技术来优化设备管理流程。例如: 一些企业缺乏数据采集和分析的能力, 因此无法

实现预测性维护等先进管理策略。这种技术应用上的滞后,不仅制约了企业效率的提升,还增加了设备故障的风险,进而影响了整体生产的稳定性。

## 2.2 数据质量与整合问题

机械设备管理和故障诊断的智能化依赖于高质量的数据支持,但在实际应用中,数据质量和整合问题成为主要障碍。例如:设备运行数据可能存在噪声、缺失或不一致,影响分析结果的准确性<sup>[3]</sup>。此外,不同设备或系统之间的数据格式不统一,难以实现有效整合,导致信息孤岛现象。这些问题限制了多模态数据融合分析和全面故障诊断的实现。例如:在复杂设备中,振动、温度和声音数据的整合分析往往因数据质量问题而难以进行,影响了故障诊断的全面性和精准性。

## 2.3 专业人才短缺与培训不足

智能化设备管理和故障诊断需要具备跨学科知识的专业人才,但目前行业内相关人才短缺问题突出。许多企业缺乏既懂机械设备又熟悉人工智能和数据分析的复合型人才,导致技术应用效果不佳。此外,现有维修人员的技能培训不足,难以适应智能化管理的新要求。一些维修人员对智能诊断工具的操作不熟练,无法充分发挥其功能。这种人才短缺和培训不足的问题不仅限制了技术应用的深度,还影响了设备管理的整体效率,成为企业智能化转型的主要瓶颈。

## 3 机械设备管理与故障诊断关键技术分析

### 3.1 物联网 (IoT) 技术

物联网技术凭借传感器与网络连接的融合,实现了对机械设备运行状态的实时监测与数据采集。在生产设备中,传感器能够实时捕捉振动、温度、压力等关键数据,并借助网络将其传输至中央系统进行分析处理。这一实时监测能力使企业能够迅速察觉设备异常,有效防止故障进一步恶化<sup>[4]</sup>。同时,物联网技术还支持设备的远程监控与维护,大幅降低了人工巡检的成本。借助物联网技术,企业能够构建起智能化的设备管理体系,显著提升设备管理的效率与精准度。以风力发电设备为例,物联网技术能够实时监测风机的运行状态,预测叶片的磨损情况,并据此提前安排维护工作,有效避免故障导致的停机损失。物联网技术的广泛应用,不仅推动了设备管理的智能化进程,更为工业互联网的发展奠定了坚实的基础。

### 3.2 人工智能 (AI) 与机器学习

人工智能和机器学习技术在设备管理与故障诊断领域发挥着至关重要的作用。利用机器学习模型对设

备历史数据进行深入分析,可以预测设备故障的发生时间及类型。同时,AI技术能够融合多模态数据,如振动、声音、温度等,实现故障诊断的更高精准度。进一步,AI技术还能够优化维修策略,根据设备的实时运行状态动态调整维护计划,有效降低维护成本。借助AI与机器学习的应用,企业得以从被动的维修模式转变为主动的预防模式,显著提升了设备管理的智能化水平。以航空发动机维护为例,AI技术能够分析发动机的运行数据,预测关键部件的使用寿命,并据此制定精确的更换计划,确保飞行安全。随着AI技术的不断发展,其为设备管理提供了更为强大的工具,有力地推动了工业智能化的深入发展。

### 3.3 数字孪生技术

数字孪生技术通过构建设备的虚拟模型,实时模拟其在实际运行环境中的状态与行为。在复杂设备的管理中,数字孪生模型能够准确反映设备的运行状态,并借助模拟分析来优化维护策略。这项技术不仅提高了故障诊断的准确性,还能够预测设备在不同工况下的性能变化趋势,为设备的优化设计提供有力支持<sup>[5]</sup>。同时,数字孪生技术与AI、物联网等技术的结合,实现了设备从设计、制造到运维的全生命周期管理优化。在智能制造领域,数字孪生技术可以模拟生产线的运行状态,优化生产流程,有效降低设备故障率。数字孪生技术的应用,极大地提升了设备管理的科学性,为工业4.0的实现提供了重要的技术支撑。

### 3.4 大数据分析技术

大数据分析技术通过对海量设备运行数据的深入挖掘与分析,能够揭示潜在的规律与故障模式。对历史数据的细致分析,可以捕捉到设备故障的早期征兆,从而实现预测性维护。大数据分析还能优化设备运行参数,进而提升生产效率和能源利用率。在制造设备领域,通过对生产数据的全面分析,可以精细调整设备运行参数,有效降低能源消耗。借助大数据分析技术,企业得以实施数据驱动的设备管理策略,显著提升了设备管理的科学性与精准度。以石油化工设备为例,大数据分析技术能够识别设备运行中的异常模式,预测关键部件的故障风险,并据此制定精确的维护计划。随着大数据分析技术的不断发展,其为设备管理提供了更为深入的洞察力,有力推动了工业智能化的全面升级。

### 3.5 边缘计算技术

边缘计算技术在设备端实现实时数据处理,有效减少了数据传输的延迟,显著提升了故障诊断的响应

速度。在生产设备管理中，边缘计算能够及时分析设备运行数据，迅速识别异常状况并发出预警信号。这一实时分析能力使企业能够及时采取干预措施，有效防止故障进一步扩大。同时，边缘计算技术与5G技术的结合，实现了对大规模设备的高效监控与管理<sup>[6]</sup>。应用边缘计算技术，企业得以实现设备管理的实时化与智能化，大幅提高了设备管理的效率和可靠性。以智能工厂为例，边缘计算设备能够实时处理生产线上数百台设备的运行数据，快速识别潜在故障并立即发出警报，从而确保生产线的持续稳定运行。边缘计算技术的广泛普及，不仅极大地提升了设备管理的响应速度，也为工业互联网的实时化应用提供了坚实的技术支撑。

### 3.6 多模态数据融合技术

多模态数据融合技术将振动、温度、声音、图像等多种数据源有机结合，显著提高了故障诊断的准确性与全面性。在复杂设备的管理中，融合振动和声音数据可以揭示出单一数据源难以察觉的潜在故障。这种多模态分析能力使企业能够在故障早期阶段就发现问题，有效降低故障发生的概率。同时，多模态数据融合技术还可以与AI、数字孪生等技术相结合，实现更精确的故障诊断和优化维护策略。应用多模态数据融合技术，企业能够大幅提升设备管理的全面性与精准度。以航空发动机维护为例，融合振动、温度和声音数据可以更准确地评估发动机的健康状态，预测关键部件的使用寿命，并据此制定精确的维护计划。

### 3.7 增强现实（AR）与虚拟现实（VR）技术

增强现实（AR）和虚拟现实（VR）技术在设备维修领域发挥着至关重要的作用。AR技术能够在实际设备上叠加虚拟信息，使维修人员迅速定位故障点并获取及时的维修指导，这不仅极大地提高了维修效率，还有效降低了操作风险。同时，VR技术被广泛应用于维修人员的培训中，通过模拟真实的维修场景，帮助维修人员熟练掌握设备的拆卸和组装过程等操作技能<sup>[7]</sup>。在复杂设备的维修工作中，AR技术可以实时展示设备的内部结构，引导维修人员快速准确地找到故障点，并依据虚拟指导完成维修操作。而VR技术则能提供一个安全的模拟环境，让维修人员在实践中提升技能。AR与VR技术的结合应用，显著提升了设备维修的效率和安全性，为工业培训和安全操作提供了创新的解决方案。

### 3.8 预防性维护与预测性维护

预防性维护和预测性维护构成了现代设备管理的

核心策略。预防性维护侧重于定期检查、保养以及关键部件的更换，以确保设备持续运行在最佳状态，从而减少突发故障的发生。例如：在制造设备管理中，定期更换润滑油并检查关键部件的磨损状况，能够有效延长设备的使用寿命。而预测性维护则利用实时监测设备运行数据，结合人工智能与大数据分析技术，来预测设备故障的发生时间及类型。具体而言，可以利用振动传感器和温度传感器等设备采集数据，再运用机器学习模型进行分析，从而提前识别潜在问题并采取相应的维护措施<sup>[8]</sup>。这两个维护策略的有机结合，不仅显著降低了设备故障率，还优化了维护资源的配置，提高了设备管理的整体效率。企业实施预防性和预测性维护策略，不仅能减少停机时间和维修成本，还能提升生产效率和产品质量，增强市场竞争力。

## 4 结束语

机械设备管理与故障诊断技术在现代工业生产中扮演着至关重要的角色。它们不仅确保了生产的连续性和高效性，还有效降低了维护成本和资源浪费。同时，这些技术推动了智能化和绿色制造的发展进程，为企业的长期稳定运营和行业的整体进步奠定了坚实的基础。伴随着物联网、大数据以及人工智能技术的不断革新与发展，机械设备的管理与维修将迈向更加智能化、精准化的新阶段，实现从被动维修向主动预防的根本性转变。

## 参考文献：

- [1] 韦凯. 机械设备的管理和维修措施及故障诊断分析[J]. 模具制造, 2024, 24(05): 234-236.
- [2] 张文波. 试论煤矿机械故障诊断技术和维修措施[J]. 矿业装备, 2024(02): 194-196.
- [3] 李奇, 张方辉, 王其锦. 机械电气工程的维护及有效管理措施研究[J]. 中国设备工程, 2023(22): 68-70.
- [4] 鲁建荣. 机械设备维修保养技术及管理措施探析[J]. 中国机械, 2023(30): 80-83.
- [5] 胡子平. 机械设备的管理和维修措施及故障诊断分析[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(10): 46-48.
- [6] 贾金剡. 化工机械设备故障分析及维修管理措施[J]. 当代化工研究, 2023(06): 160-162.
- [7] 李燕飞, 丁园园. 关于化工机械设备的管理和维修保养措施研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(03): 43-45.
- [8] 李海军, 朱伟. 探讨煤矿运输机械设备加强管理及维修[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(24): 124-126.

# 渔光互补光伏项目施工安全管理研究

尹 亮

(华电新能源集团股份有限公司江苏分公司, 江苏 南京 210000)

**摘 要** 渔光互补光伏项目作为新能源开发模式的一种创新实践,主要是在水面布设光伏组件,同时进行水产养殖,实现土地资源的高效利用并促进清洁能源开发。然而,该类项目的施工环境复杂,涉及水上作业、高空作业等多个环节,施工安全管理难度较大。本文围绕渔光互补光伏项目的施工安全管理,重点研究多个方面的管理措施及内容,以期对优化施工技术管理、强化施工现场监督、确保涉网安全合规性有所裨益,为渔光互补光伏项目的高质量建设提供坚实的支撑。

**关键词** 渔光互补; 光伏项目; 安全管理

中图分类号: TM6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.031

## 0 引言

随着全球能源转型速度加快,光伏发电作为重要的清洁能源之一得到了广泛推广。渔光互补光伏项目作为“光伏+”模式的创新应用,可以实现能源开发与渔业生产的协同发展,不仅能提高水域资源的综合利用率,还能减少土地占用,提高新能源的推广效率。然而,由于该类项目施工环境特殊,安全管理的难度较传统地面光伏电站更高,稍有不慎便会导致人员伤害、设备损坏等安全事故。因此,加强渔光互补光伏项目施工安全管理,对降低施工风险并提升工程质量具有重要意义。

## 1 工程概况

本项目规划建设总装机容量为 120.02 634 MWp,其中交流侧额定容量达到 89.92 MW,采用固定式支架安装方式,确保光伏组件稳定运行。本期工程的建设内容涵盖光伏发电系统及其配套的并网设施,旨在提升新能源利用率并优化区域电力结构。在光伏组件选型方面,项目采用 580 Wp 单晶硅 N 型组件,并结合施工与运维需求,合理划分为 45 个光伏子系统。各子系统容量介于 1.28 142 MWp 至 4.2 714 MWp 之间,每个子系统均配置相应规格的箱式变压器(1 000 kVA 至 3 200 kVA 不等),实现逆变后的 0.8 kV 低压电升压至 35 kV,并通过 4 回 35 kV 集电线路接入 110 kV 升压站的 35 kV 母线。最终,整个光伏电站以 110 kV 电压等级接入电网,实现稳定并网发电。

## 2 渔光互补光伏项目施工安全管理措施

### 2.1 建立完善的安全生产责任制

为确保渔光互补光伏项目施工期间的安全可控,需构建完善的安全生产责任体系。各参建单位应深入

学习并贯彻安全生产的重要指示精神,同时结合项目实际,制定符合工程特点的安全管理措施,确保各项要求落地见效<sup>[1]</sup>。建设单位需承担统筹责任,及时传达国家及行业主管部门的最新安全生产要求,并细化分解各项安全生产任务,明确各单位的具体职责,确保安全管理体系高效运行。另外,还需根据项目特性,制定涵盖人员安全、设备管理、施工机械、交通运输、消防防护及生态环境保护等多方面的年度安全生产目标,并确保各项指标具有明确的可执行性。安全生产目标需由工程主要负责人审核批准,并形成正式文件。在责任落实方面,建设单位应与各参建单位签订安全生产目标责任书,建立分级管控机制,确保安全管理责任逐级分解、有效落实。各参建单位需结合工程实际,制定切实可行的安全保障措施,并指定专人负责监督执行,形成可量化、可考核的安全管理体系。施工过程中,各单位需定期开展安全检查,及时发现并消除隐患,确保施工现场始终处于安全受控状态。此外,还应建立安全考核与奖惩机制,对履行安全职责到位的单位和个人给予奖励,对违反安全管理规定的行为进行严肃处理,以强化责任意识,提升安全管理实效。

### 2.2 加强安全教育培训

为有效提升全员安全素养,应建立健全安全教育培训体系,如图 1 所示。

建设单位需保障培训资源投入,提供必要的教材、场地、设备及专业讲师,确保培训内容符合国家及行业安全管理标准。所有培训活动应记录存档,建立培训台账,对参训人员情况进行分级管理,并定期评估培训效果,结合实际情况不断优化培训内容 & 方式。在培训频次上,所有施工人员每年至少应接受一次系

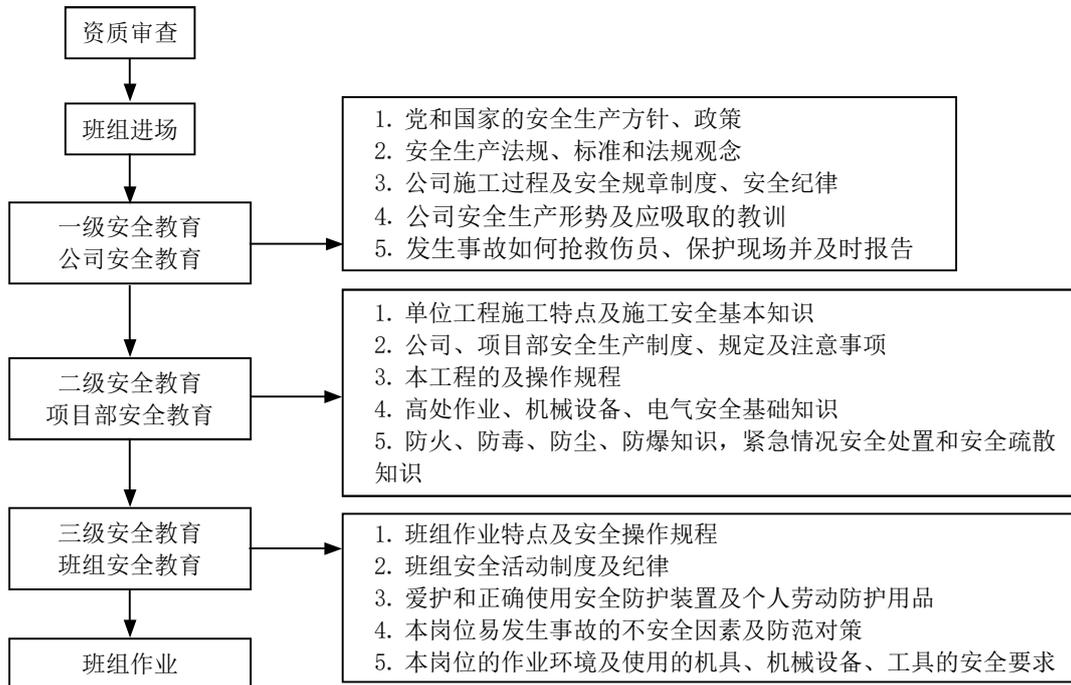


图1 安全教育培训流程体系

统性的安全教育，以强化安全意识，提高应对风险的能力。针对不同岗位职责，采取分类培训方式，确保管理人员、普通作业人员及特种作业人员都能接受符合岗位需求的安全知识培训<sup>[2]</sup>。尤其是工程负责人和安全管理人，必须经相关主管部门培训合格后，方可持证上岗，确保项目安全管理具备专业保障。对于新入职人员，需严格执行“三级安全教育”制度，在正式上岗前完成不少于72学时的安全培训，并通过考核后方可投入工作。特种作业人员及特种设备操作人员必须接受专项培训，并在取得合法资格证书后方可进行作业，还要定期复审资质，确保安全操作能力符合要求。施工现场需落实每日“班前会”制度，由管理人员结合当日作业任务，讲解安全注意事项，分析潜在危险因素，并布置相应防范措施，确保所有工人在进入施工区域前对作业风险有充分认知。

### 2.3 加强隐患排查治理

各参建单位需建立健全隐患排查治理管理制度，明确职责归属，细化排查内容，确保责任落实到具体部门和人员。隐患排查需涵盖施工区域、设备设施、用电安全等多个方面，形成定期检查与不定期抽查相结合的安管理理模式。对于检查发现的安全隐患，应进行分类管理，并严格落实，确保问题得到彻底解决，形成隐患治理闭环管理。针对可能引发严重后果的重大事故隐患，需制定专项治理方案，明确整改目标、技术措施、

责任机构、资金投入及治理时间节点。在隐患未完全消除前，必须采取临时控制措施，并制定详细的应急预案，以降低潜在风险，确保现场安全可控。对于短期内无法彻底排除的隐患，如果存在安全威胁，应立即撤离作业人员，暂停相关施工活动或设备使用，待隐患完全消除并通过验收后方可恢复正常作业。治理完成后，各参建单位需对整改效果进行验证和评估，确保治理措施达标并真正消除安全风险<sup>[3]</sup>。对于重大隐患的治理结果，需经过专人审核，并得到相关管理机构的批准后，方可恢复施工。建设单位和监理单位需定期对各参建单位的隐患排查治理工作进行监督检查，确保管理体系有效运行。若发现隐患整改不到位的情况，监理单位需及时下达整改通知，必要时可采取停工措施，并向上级部门报告，促使相关单位落实整改责任。

### 2.4 加强安全技术管理

对于涉及高风险的关键施工环节，施工单位需编制专项施工方案，尤其是基础施工、吊装作业等危大工程，必须制定详尽的施工组织计划和安全技术措施。施工方案需经施工单位内部技术负责人审核，总监理工程师审查并签署意见，最终由建设单位批准后方可实施。若项目采用专业分包模式，施工单位应组织分包单位进行现场踏勘，结合实际情况制定施工方案，并按相关管理要求报送建设和监理单位审核，以确保方案的可行性。对于大规模水上吊装作业、水下施工

等技术难度更高、风险更大的超危大工程,施工单位需在编制专项施工方案的基础上组织专家进行论证,确保方案的可操作性。该类工程的施工方案需由施工单位技术负责人审核,监理单位总监理工程师复核,并最终由建设单位技术负责人批准。若工程涉及专业分包,施工单位还需联合分包单位进行详细的现场测量,优化施工组织设计,并确保安全技术措施全面落实<sup>[4]</sup>。在施工组织实施过程中,施工方案编制人员或项目技术负责人需向现场管理人员及施工班组详细讲解技术要点和安全要求,使所有人员明确施工流程及潜在风险。班组长需进一步向作业人员进行具体的安全交底,确保施工人员熟悉各项安全操作规程,并能有效应对施工过程中遇到的技术问题。

### 2.5 加强施工现场安全管理

为确保施工现场安全可控,各参建单位需结合施工进度,定期检查专项施工方案及安全技术交底的执行情况,确保各项安全管理要求得到有效落实。实施作业前,施工单位应详细分析地质勘测数据,合理选择施工平台站位,优化作业环境,降低潜在风险。施工现场使用的起重机械、安全防护设施、吊索具等特种设备,需具备完整的检验合格证书,并定期进行维护和检查,确保设备性能良好,避免因设备故障引发安全事故。在机械设备管理方面,需明确专职或兼职管理人员,建立系统化的设备管理制度,涵盖设备进退场管理、日常维护保养、定期检修等内容,确保设备运行处于安全可控状态。起重作业前,必须确认吊装设备的安全条件,并制定防范措施,确保作业安全。对于高风险作业,必须办理安全施工作业票,并经现场负责人审批后方可实施。海上施工平台需配备安全警示标志及必要的防护设施,同时设置临时助航标志,确保作业人员安全。施工现场用电需符合相关标准,船舶电源不得随意改动配电线路或超负荷使用电气设备,以防发生电气安全事故。在个人安全防护方面,所有海上作业人员必须佩戴符合标准的安全装备,并按要求正确使用防护用品。施工过程中需保持安全通道畅通,现场危险区域应设置明显的警示标识,并规范危化品的存放与使用。对于登船及出海人员,施工单位需进行动态管控,确保作业人员安全可追溯。

### 2.6 加强涉网安全管理

涉网安全管理是确保电站稳定并网并保障电力系统安全运行的重要环节,为此,施工单位需按照国家相关并网管理规定,完成并网申请流程,并依法取得并网意见书,确保项目具备安全接入电网的条件。光伏电站的电气一次设备、继电保护系统等均需与所接

入电力系统保持协调,确保电力设备运行参数符合调度要求,保障并网后系统的稳定性。项目还需满足电网对功率调节能力的要求,具备一定的调频、调压、调峰能力,确保光伏电站适应电力系统负荷波动,提高运行可靠性<sup>[5]</sup>。在施工阶段,涉网设备的调试试验工作必须严格按照技术标准进行,对各类关键设备进行功能测试,确保各系统稳定、精准地响应电网指令,避免因设备异常影响电力系统安全。并网前,还需对高压电缆的充电功率、电能质量指标等进行检测,确保光伏电站的输出符合电网标准,避免产生谐波、电压波动等问题影响电网运行。在运行管理方面,光伏电站的值班人员需具备相应的上岗资格,熟悉涉网设备运行要求,并严格执行电网调度机构的指令,确保并网运行的安全可控。电站需建立健全运行管理制度,按要求定期巡视涉网设备,尤其是继电保护及安全自动装置,及时发现并消除异常,确保电力系统的安全稳定。运行数据需按规定上传至电网调度机构,保持信息畅通,确保电站能够及时响应电网调度需求,保障电力供应的稳定性。

## 3 结束语

渔光互补光伏项目的施工安全管理涉及多个层面,施工安全管理的核心在于责任落实及制度保障,明确各参建单位的安全职责,强化施工人员的安全意识,并加强隐患排查治理,方可有效降低事故发生率。未来,随着光伏产业的持续发展,渔光互补模式将得到更广泛的应用,为保障该类项目的安全高效建设,还需不断探索更可靠的安全管理手段,确保工程顺利实施,也为我国清洁能源的发展提供有力支撑。

### 参考文献:

- [1] 张晶. 农光互补光伏发电项目建设期安全管理研究[J]. 新农村, 2024(25):67-69.
- [2] 廖敬文. 山地光伏电站项目施工管理对策研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(20):4-6.
- [3] 杨有, 刘华斌, 张琦, 等. 光伏电站施工中的安全管理与事故防范研究[A]. 2024年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册)[C]. 《施工技术(中英文)》杂志社、亚太建设科技信息研究院有限公司, 施工技术编辑部, 2024.
- [4] 王春. 低碳发展背景下光伏发电项目建设及管理问题[J]. 储能科学与技术, 2023,12(02):635-636.
- [5] 黄锋, 潘正伟, 肖丽丽. 基于故障树的光伏发电项目施工安全管理研究[J]. 建筑经济, 2022,43(S2):212-216.

# 公路桥梁建设中施工质量问题及防范对策

陈雁雁

(安徽昌达路桥工程集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 为了保障公路桥梁建设的质量与安全性,有效解决施工中存在的施工质量问题,需对公路桥梁建设施工质量展开研究。本文通过对公路桥梁建设过程的分析,发现存在材料质量不合格、施工工艺不规范、土建基础不稳固、监理及质量控制不严格以及环境因素影响施工质量等常见问题,并针对这些问题提出了严格材料采购和验收制度、加强施工工艺标准化管理、完善基础工程的勘探与处理、强化监理和质量控制体系以及加强环境适应性施工技术

等防范对策,以期能为有效提升公路桥梁施工质量、增强公路桥梁的安全性和稳定性提供借鉴。

**关键词** 公路桥梁建设;材料质量;土建基础;环境因素

**中图分类号**:U445

**文献标志码**:A

**DOI**:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.032

## 0 引言

公路桥梁是现代运输系统中的关键基础设施,它的施工质量直接影响着交通的安全和效率。近年来,随着城市化进程的加快和交通需求的不断增加,公路桥梁建设规模也在不断扩大。但是,在实际施工中,经常会出现各种质量问题。材料质量差,导致桥梁结构强度不足;施工技术不够规范,影响了桥梁的整体性能;民用建筑地基不牢固,给桥梁带来安全隐患;缺乏监督管理和质量控制,导致问题很难及时发现并纠正;由于环境因素的影响,施工质量风险进一步加剧。因此,对公路桥梁施工过程中出现的质量问题进行深入研究,并提出相应的预防措施,具有重要的现实意义。

## 1 公路桥梁建设中的常见施工质量问题

### 1.1 材料质量不合格

在公路桥梁建设中材料是基础,其质量直接关乎桥梁的安全性与耐久性。材料质量不合格问题频发,主要体现在多个方面。

从采购环节来看,部分施工单位为降低成本,选择价格低廉但质量无保障的供应商,如使用杂质含量超标的钢材,其强度与韧性远达不到设计要求。在水泥方面,劣质水泥的凝结时间异常,导致混凝土浇筑后无法形成足够强度。从存储角度而言,不当的存储方式使材料性能受损。例如:钢筋长期露天堆放,表面严重锈蚀,削弱了钢筋与混凝土之间的握裹力。若砂石料含泥量过高,会降低混凝土的和易性与强度。材料质量不合格,会使桥梁结构强度大打折扣,在后续使用中,易出现裂缝、变形等状况,大幅缩短桥梁

使用寿命,甚至在极端情况下引发桥梁垮塌,造成难以估量的损失。

### 1.2 施工工艺不规范

施工技术是保证公路桥梁质量的一个重要环节,但施工过程中存在着一些不规范的施工方法。混凝土浇筑时,如果振捣不当,混凝土内部会出现孔洞、蜂窝、麻面等缺陷,严重影响了混凝土的密实度和整体性,降低了混凝土的抗压强度。在预应力施工中,如果张拉应力控制不好,就会造成预应力不足,从而导致桥梁在正常使用阶段产生过大的变形;其次,张拉应力过大,会导致预应力筋的断裂。在钢筋连接方面,由于焊接技术不符合规范要求,焊缝长度不够,焊接质量差,受荷时容易出现钢筋连接部位断裂,导致桥梁受力系统破坏。另外,模板安装不牢固,尺寸偏差较大,将导致混凝土浇筑后的结构尺寸达不到设计要求,从而影响桥梁的美观和使用功能。这些不规范的施工方法不仅影响了桥梁的质量,而且对以后的使用也造成了很大的安全隐患。

### 1.3 土建基础不稳固

土建基础是公路桥梁的根基基础不稳固将对桥梁安全构成致命威胁。在基础施工前,若地质勘察工作不细致,未能准确掌握地层结构与岩土特性,会导致基础设计不合理。比如在软土地基上,未采取合适的地基处理措施,直接进行基础施工,随着时间推移,地基会发生不均匀沉降,使桥梁上部结构产生附加应力,进而引发桥面开裂、墩台倾斜等问题。在桩基础施工中,桩身垂直度控制不佳、桩长未达到设计要求,

会削弱桩基础的承载能力<sup>[1]</sup>。此外,在基础施工过程中,若排水措施不到位,基坑长时间积水,会软化地基土,降低地基的承载性能。土建基础不稳固,使得桥梁在运营阶段无法承受设计荷载,严重影响桥梁的正常使用与结构安全。

#### 1.4 监理及质量控制不严格

在公路桥梁施工过程中,监理和质量控制起着至关重要的作用。部分监理人员缺乏专业素养,对施工质量标准 and 规范理解不够,未能及时发现工程质量问题。在原材料检验过程中,如果没有严格按照抽样标准进行检验,就有可能导致不合格的原材料流入工地。在施工过程监管方面,如果监理人员不能在关键工序旁站,则可能会违规操作。例如:在浇筑混凝土时缩短振捣时间等。在质量验收阶段,没有严格按照验收规程进行验收,把有缺陷的部分放出去,造成了问题的遗留。质量管理体系不健全,质量责任制不明确,各部门和岗位职责划分不清,出现质量问题互相推卸责任。由于监理不严、质量管理不严等原因,工程质量问题不断累积,严重影响了公路桥梁施工质量。

#### 1.5 环境因素影响施工质量

环境因素对公路桥梁施工质量的影响不容忽视。在高温天气下进行混凝土施工,水分蒸发过快,易导致混凝土表面干裂,影响混凝土的耐久性。低温环境中,混凝土的水化反应缓慢,强度增长滞后,若未采取有效的保温措施,还可能发生冻害,降低混凝土强度。降雨天气会使施工现场积水,影响地基的稳定性,若在雨中进行混凝土浇筑,雨水会稀释混凝土中的水泥浆,改变混凝土的配合比,降低其强度。强风天气下,对高空作业的安全性构成威胁,同时也会影响一些施工工艺的实施精度,如预应力张拉时,风荷载可能干扰张拉设备的准确性。此外,复杂的地质条件,如岩溶地区、滑坡地段等,增加了基础施工的难度,若处理不当,易引发基础塌陷、桥梁移位等质量问题<sup>[2]</sup>。环境因素的不确定性,给公路桥梁施工质量控制带来了极大的挑战。

## 2 公路桥梁建设施工质量问题的防范对策

### 2.1 严格材料采购和验收制度

在公路桥梁建设中,材料质量是保障工程质量的基石,因此必须严格把控材料采购和验收环节。首先,施工单位应建立健全供应商评估体系,对潜在供应商的资质、生产能力、产品质量历史等进行全面审查。优先选择具有良好信誉、通过质量体系认证且产品质

量稳定的供应商,从源头降低材料质量风险。在采购合同中,明确材料的规格、型号、质量标准以及违约责任等条款,确保供应商按要求供应材料。例如:对于钢材,详细规定其化学成分、力学性能指标等。材料进场时,严格执行验收制度。组建专业的验收团队,成员涵盖材料工程师、试验检测人员等。依据相关标准和合同要求,对材料进行外观检查、尺寸测量以及性能抽检。对于水泥,检查其包装完整性、生产日期,抽样检测凝结时间、强度等指标;对于钢筋,查看外观有无锈蚀、弯曲,进行拉伸试验、冷弯试验等。利用先进的检测设备,如光谱分析仪检测钢材化学成分,确保检测数据准确可靠。同时,建立材料质量追溯机制,一旦发现质量问题,能够迅速追溯到采购源头和相关责任人。通过严格的采购和验收制度,可有效避免不合格材料进入施工现场,为公路桥梁建设提供坚实的材料保障,大幅提升工程质量,减少因材料问题引发的质量隐患。

### 2.2 加强施工工艺标准化管理

施工工艺的标准化是确保公路桥梁质量的关键。施工单位应制定详细且科学的施工工艺标准操作规程(SOP),涵盖桥梁建设的各个环节。以混凝土浇筑为例,明确规定浇筑顺序、振捣方法、振捣时间和振捣设备的选用等。在混凝土浇筑前,对模板进行全面检查,确保其安装牢固、尺寸准确、拼缝严密,防止漏浆现象发生<sup>[3]</sup>。对于预应力施工,精确计算张拉应力,配备高精度的张拉设备,并定期进行校准。在张拉过程中,严格控制张拉速率和伸长量,做好记录。加强施工人员培训,使每位施工人员熟悉并掌握标准化施工工艺。通过举办培训班、现场示范等方式,提高施工人员的技术水平和质量意识。同时,设立施工工艺监督小组,在施工现场进行实时监督。一旦发现施工工艺不规范行为,立即予以纠正,并对相关人员进行教育和处罚。例如:若发现混凝土振捣时间不足,责令施工人员重新振捣,并对其进行批评教育。定期对施工工艺执行情况总结和评估,根据实际施工效果和新技术的发展,对施工工艺标准进行优化和完善。通过加强施工工艺标准化管理,可有效减少因施工工艺不规范导致的质量问题,提高桥梁结构的稳定性和耐久性。

### 2.3 完善基础工程的勘探与处理

基础工程稳定是公路桥梁安全的基础,完善基础工程勘察和处治非常重要。在工程前期,需聘请专业地质勘测单位,利用地质雷达、钻探等先进的勘测技

术与设备,对桥址区进行细致的勘察。为了更好地进行地基设计,必须充分了解地层结构、岩土性质和地下水的情况。在勘察报告中,应详细叙述地质情况,重点分析软弱层、断层等可能出现的不良地质现象,提出合理的处理意见。在基础设计阶段,设计者应根据调查结果,结合桥梁规模及荷载要求,选择适合的基础型式,并对其进行精确的计算与设计<sup>[4]</sup>。对于软土地基,可以采用深层搅拌桩和CFG桩作为基础处理措施。基础施工严格按照设计要求及规范施工。在桩基施工过程中,要保证桩基垂直度,控制桩长、桩径,采用旋挖桩等先进成桩技术,确保成桩质量。同时,要加强基坑开挖过程的监测,如边坡变形和地基沉降等,及时发现异常情况,及时处理。只有加强地基勘察和处理,才能有效地避免因地基不稳而引起的质量问题,保证桥梁的长期稳定运行。

#### 2.4 强化监理和质量控制体系

监理和质量控制体系在公路桥梁建设中起着监督和保障作用。首先,提高监理人员的准入门槛,选拔具备丰富专业知识、实践经验和良好职业道德的监理人员。定期对监理人员进行业务培训,使其熟悉最新的施工质量标准 and 规范,提升其专业素养和监督能力。建立严格的监理旁站制度,要求监理人员对关键工序,如混凝土浇筑、预应力张拉、基础施工等进行全程旁站监督。在旁站过程中,要认真检查施工工艺是否符合规范要求、材料是否合格、施工人员操作是否得当等。同时,加强对施工材料和构配件的平行检验,按照一定比例进行抽样检测,确保检测数据的独立性和准确性。完善质量控制体系,明确建设单位、施工单位、监理单位等各参建方的质量责任。建立质量责任追究制度,一旦出现质量问题,严格追究相关责任人的责任。施工单位应建立内部质量自检体系,加强对施工过程的质量控制,每完成一道工序,先进行自检,合格后再报监理单位验收<sup>[5]</sup>。监理单位要严格执行质量验收程序,对不符合质量要求的部位,坚决不予验收,责令施工单位整改,直至合格为止。通过强化监理和质量控制体系,可及时发现和解决施工中的质量问题,确保公路桥梁建设质量符合标准要求。

#### 2.5 加强环境适应性施工技术

环境因素对公路桥梁施工质量影响显著,因此需加强环境适应性施工技术。在高温天气下,对混凝土施工采取降温措施。如对原材料进行降温,在搅拌水中加入冰块,降低混凝土出机温度;对混凝土运输车

辆进行遮阳覆盖,减少运输过程中的温度升高;在浇筑现场,搭设遮阳棚,降低浇筑温度。同时,调整混凝土配合比,增加缓凝剂,延长混凝土的凝结时间,防止混凝土表面因水分蒸发过快而干裂。在低温环境中,对混凝土施工采取保温措施。对原材料进行加热,如加热水、加热骨料;对混凝土运输车辆进行保温包裹;在浇筑现场,搭建暖棚,采用暖风机、火炉等设备提高环境温度,确保混凝土在适宜的温度下进行水化反应。在降雨天气,提前做好施工现场的排水工作,设置排水系统,及时排除积水。若需在雨中进行混凝土浇筑,应准备防雨布,对新浇筑的混凝土进行覆盖,防止雨水稀释水泥浆。对于强风天气,合理安排施工工序,避免在大风时进行高空作业和对精度要求高的施工工艺,如预应力张拉等。针对复杂地质条件,制定专项施工方案,采用合适的地基处理技术,如在岩溶地区采用注浆填充、在滑坡地段采用抗滑桩等。通过加强环境适应性施工技术,可有效降低环境因素对公路桥梁施工质量的影响,确保工程顺利进行,提高桥梁质量。

### 3 结束语

公路桥梁建设在交通事业的蓬勃发展占据关键地位,然而部分公路桥梁建设项目施工质量现状不容乐观,仍然存在材料、工艺、基础、监理及环境等多方面问题,严重威胁着桥梁安全与使用寿命,阻碍交通运输的高效运行。经研究表明,严格材料采购验收、规范施工工艺、完善基础勘探处理、强化监理与质量控制、提升环境适应性施工技术等防范对策切实可行。通过实施这些对策,有望全面提升公路桥梁施工质量,推动行业的稳健发展,保障交通运输的安全与顺畅。

#### 参考文献:

- [1] 胡少亮.公路桥梁建设施工中的质量及安全管理问题分析[J].交通世界,2021(22):157-158.
- [2] 杜昱.公路桥梁建设施工中的安全管理与质量管理[J].中国建筑装饰装修,2022(09):153-155.
- [3] 刘德辉.公路桥梁建设施工中的质量安全管理探讨[J].江西建材,2021(06):99,101.
- [4] 张庆金.公路桥梁建设项目的施工质量管理探究[J].设备管理与维修,2020(08):38-40.
- [5] 莫霞.公路桥梁建设中施工质量管理研究[J].四川水泥,2019(01):66.

# 建筑工程施工安全管理问题与防范对策探讨

李向新

(肥西县乡村振兴投资集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 建筑工程施工安全管理中存在安全管理体系不完善、施工人员安全意识淡薄、施工设备与安全设施有问题等情况, 其中, 安全管理体系方面存在制度缺失、执行不力等问题; 施工人员存在安全教育培训缺乏、观念落后等现象; 施工设备与安全设施存在老化、配备不足等状况。本文认为可通过完善安全管理体系、提升施工人员安全意识、保障施工设备与安全设施等措施, 有效防范安全风险, 提升建筑工程施工安全管理水平。

**关键词** 建筑工程; 安全管理; 制度缺失; 安全教育培训; 安全观念

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.033

## 0 引言

建筑工程施工环境复杂, 涉及众多环节与大量人员、设备的协同作业, 稍有不慎便易引发安全事故。安全事故不仅会导致人员伤亡, 给家庭带来巨大痛苦, 还会造成经济损失, 延误工程进度, 影响企业声誉及社会稳定。尽管行业内已逐步重视施工安全管理, 但仍存在诸多隐患。在此背景下, 深入剖析建筑工程施工安全管理中现存的问题, 并探寻切实可行的防范对策, 对于保障建筑工程顺利推进、维护人员生命财产安全、促进行业健康可持续发展具有极为重要的现实意义。

## 1 建筑工程施工安全管理现存问题

### 1.1 安全管理体系不完善

#### 1.1.1 制度缺失与漏洞

在建筑工程领域, 部分企业的安全管理制度存在严重的缺失与漏洞。一些小型建筑公司为节省成本, 未针对不同施工阶段、不同作业环境制定详细的安全规范。例如: 在高处作业环节, 没有明确规定脚手架搭建的具体标准、验收流程以及日常检查频次, 导致施工人员在搭建脚手架时随意性大, 容易出现搭建不牢固的情况, 为后续施工埋下巨大安全隐患。同时, 对于一些新型施工工艺和设备的使用, 缺乏相应的安全操作制度。随着建筑行业的发展, 越来越多的智能化设备和新工艺被应用到施工中, 如装配式建筑施工技术、无人机测绘技术等, 但部分企业没有及时更新制度, 使得施工人员在操作时无章可循, 极易引发安全事故。而且, 在事故应急处理制度方面, 很多企业的预案过于笼统, 缺乏针对性和可操作性, 一旦发生事故, 无法迅速有效地进行救援, 导致事故损失扩大。

#### 1.1.2 执行力度不足

虽然有些施工单位有比较完备的安全管理制度, 但是在实际操作中却普遍存在着执行不到位的现象。施工现场管理人员往往把重点放在项目进度、费用控制上, 而忽视了安全管理制度的落实。如要求施工人员戴安全帽和安全带等安全装备进入工地, 但实际工作中, 管理者对不戴安全帽和安全带的人员只给予了口头警告, 没有严格按照规定执行, 这就造成了施工人员缺乏对制度的敬畏, 违规行为屡禁不止。在落实安全检查制度方面, 许多检查流于形式, 对存在的安全隐患未进行深入细致的排查。比如: 在检查施工用电设备时, 仅仅是看一下外观有没有破损, 没有检测到线路连接是否牢固、漏电保护装置是否有效等关键部位, 这就导致了一些安全隐患长期存在, 最后有可能发生触电事故。另外, 部分施工班组对安全整改要求不积极落实, 整改时限一再拖延, 致使安全管理流于形式。

### 1.2 施工人员安全意识淡薄

#### 1.2.1 安全教育培训缺乏

在建筑施工队伍中, 大部分施工人员文化程度相对较低, 且人员流动性大。许多企业为了节省时间和成本, 没有对新入职的施工人员进行全面系统的安全教育培训。新工人往往在对施工现场的安全风险、安全操作规程一知半解的情况下就匆忙上岗作业。例如: 一些农民工从未接受过专业的电气安全知识培训, 在进行电气设备安装或维修作业时, 不清楚如何正确接线、如何避免触电危险, 很容易因操作不当引发触电事故<sup>[1]</sup>。而且, 企业对施工人员的安全教育培训缺乏持续性, 不是定期开展培训, 而是偶尔进行一次, 导致施工

人员对安全知识的记忆模糊,无法将安全知识有效应用到日常施工中。此外,培训内容往往过于理论化,缺乏实际案例分析和现场操作演示,使得施工人员难以理解和掌握,无法真正提高安全意识和操作技能。

### 1.2.2 安全观念落后

由于受传统思想的影响,一些建筑工人的安全意识严重落后,认为一些小的违规行为不会造成严重的后果,抱着侥幸的心态。如从事高空作业的时候,为了图省事而没有系安全带,认为自己有足够的经验可以避免事故的发生。还有一些建筑工人在工地上随便抽烟,对易燃物多的危险环境视而不见,以为一次就不会发生火灾。这一落后的安全意识普遍存在于施工现场并互相影响。一些老职工的坏习惯被新进的工人所模仿,造成了整个施工队伍安全意识的薄弱。同时,一些建筑工人对安全防护装备的重要性认识不深,认为戴安全帽和安全带会影响工作效率,加重身体负担不愿佩戴,这就导致了建筑工地安全事故频发。

### 1.3 施工设备与安全设施问题

#### 1.3.1 设备老化与维护不善

在建筑工程施工中,部分企业为降低成本,长期使用老旧设备,且对设备的维护保养工作不到位。一些塔吊、升降机等大型机械设备,使用年限已久,设备的关键部件如钢丝绳、制动装置等出现严重磨损、老化现象,但企业没有及时更换。例如:塔吊的钢丝绳长期使用后,强度降低,容易出现断丝现象,如果不及时更换,在吊运重物时,钢丝绳可能突然断裂,导致重物坠落,引发严重的安全事故。而且,很多企业没有建立完善的设备维护保养制度,设备维护人员缺乏专业技能,对设备的日常检查和维护只是简单地进行表面清洁,没有对设备的内部结构、关键部件进行深入检查和保养。此外,设备的维修记录不完整,无法准确掌握设备的维修历史和运行状况,使得设备在运行过程中存在诸多安全隐患。

#### 1.3.2 安全设施配备不足

建筑工地安全设施配置不合理,已成为建筑工程建设中的一个突出问题。为了节约成本,部分施工企业在安全设施方面进行了大量的投资。比如:在某些高层建筑施工中,安全网悬挂得不够紧,存在着漏洞,对高处落下的物体不能进行有效地拦截,一旦有物体从高处坠落,就会伤到下面的建筑工人。在一些危险的地方,如楼梯间、升降机井等,未按规定设置防护栏杆或安全门,施工人员通过时极易发生坠亡事故<sup>[2]</sup>。另外,施工现场的消防设施配备往往不够充分,灭火

器数量不足,消防栓水压不够,而且消防通道被任意占用,一旦发生火灾,不能及时、有效地灭火,造成火灾蔓延,导致重大损失。同时,有些临时用电设备没有做好安全保护措施,配电箱没有防雨防尘,电线私拉乱接,很容易发生触电事故。

## 2 建筑工程施工安全管理防范对策

### 2.1 完善安全管理体系

#### 2.1.1 健全安全管理制度

建筑企业应依据国家相关法规、行业标准以及项目实际情况,构建全面且细致的安全管理制度。针对不同施工阶段,如基础施工、主体结构施工、装饰装修施工等,分别制定详细的安全规范。在基础施工阶段,明确规定深基坑支护的类型选择、施工工艺以及监测要求,确保基坑边坡稳定,防止坍塌事故。对于各类施工工艺,如复杂的钢结构焊接工艺,制定严格的操作流程,涵盖焊接前的准备工作、焊接过程中的参数控制以及焊接后的质量检验标准等,让施工人员操作时有章可循。并且,要完善事故应急处理制度,针对火灾、坍塌、触电等不同类型事故,制定详细的应急预案,明确应急救援组织架构、各成员职责、救援流程以及物资储备等内容,确保在事故发生时能够迅速、有序地开展救援工作,将损失降到最低。

#### 2.1.2 强化制度执行与监督

为了保证安全管理体系的落实,企业必须加强实施和监督。施工现场管理者应把安全管理放在与项目进度和成本控制同等重要的位置。对进入工地未佩戴防护装备者,按照有关规定给予罚款、停工培训等处罚,以儆效尤。在安全检查方面,成立专业的安全检查小组,利用专业的检测设备,对施工用电设备进行全面检查,包括线路电阻、绝缘性能、漏电保护装置动作电流等重要指标,保证设备的安全运行<sup>[3]</sup>。与此同时,还建立了安全整改跟踪机制,对发现的安全隐患发布整改通知书,对整改责任人、整改时限和整改要求进行详细说明,定期复查整改情况,确保安全管理制度的有效实施,杜绝安全管理形式上的形式主义。

### 2.2 提升施工人员安全意识

#### 2.2.1 加强安全教育培训

企业应制定系统的安全教育培训计划,针对新入职员工,开展全面的三级安全教育培训,从公司层面的安全法规、企业安全文化,到项目层面的施工现场安全风险、安全管理制度,再到班组层面的具体操作安全规范,进行详细讲解。在培训过程中,增加实际案例分析,通过播放因违规操作导致事故的视频资料,

让施工人员深刻认识到违规行为的严重后果。例如：分析某起因未正确佩戴安全带导致的高处坠落事故，从事故发生的原因、经过到造成的人员伤亡和经济损失进行剖析<sup>[4]</sup>。同时，进行现场操作演示，如正确使用灭火器、搭建脚手架等，让施工人员亲身体验并掌握正确操作方法。并且，定期组织施工人员进行安全知识复训，巩固所学知识，提高施工人员的安全意识和操作技能。

### 2.2.2 营造安全文化氛围

在施工现场营造浓厚的安全文化氛围，有助于提升施工人员的安全意识。通过设置安全宣传栏，张贴安全标语、安全知识海报，展示近期安全事故案例及防范措施等内容，时刻提醒施工人员注意安全。开展安全月活动，组织安全知识竞赛、安全技能比武等活动，对表现优秀的施工人员和班组进行表彰和奖励，激发施工人员参与安全管理的积极性<sup>[5]</sup>。此外，鼓励施工人员之间相互监督、提醒，对于发现并纠正他人安全违规行为的人员给予一定奖励，形成人人关注安全、人人参与安全管理的良好氛围，从根本上改变施工人员的安全观念，减少违规行为的发生。

### 2.3 保障施工设备与安全设施

#### 2.3.1 设备更新与维护管理

施工企业要对设备更新资金做好规划，对使用年限过长、安全性能得不到保障的老旧设备，如塔吊、电梯等，要适时地升级，采用安全性能更高的新型设备。同时，公司建立了健全的设备维修体系，配备了专业的维修人员<sup>[6]</sup>。维修人员按规定的维修周期对设备进行全面的维修保养，包括对设备内部结构的拆卸检查，关键零部件的润滑，易损零件的更换。每一次的维修保养，都要对维修时间、维修内容、更换的零件等进行详细的记录，并建立起设备维修档案，这样才能对设备的运行情况进行精确的掌握，并及时发现和解决可能出现的问题，保证设备一直在良好的工作状态下，减少设备故障引起的安全事故的风险。

#### 2.3.2 规范安全设施配备与管理

在建筑工程施工中，规范安全设施配备与管理是保障施工安全的关键环节。企业务必严格参照国家相关标准和行业规范，精准且足额地配备各类安全设施。在高层建筑施工现场，安全网的张挂需做到严密无疏漏，不仅要确保外立面全封闭，还应每隔特定楼层增设水平安全网，以此形成全方位的防护屏障，有效拦截高处坠落物体，避免对下方人员造成伤害。对于楼梯口、电梯井口、预留洞口及通道口等“四口”部位，

必须按规定安装牢固且高度符合标准的防护栏杆或防护门，并张贴醒目的警示标识，时刻提醒施工人员注意危险<sup>[7]</sup>。在消防设施方面，要依据施工现场的规模、火灾危险性等因素，科学合理地配置灭火器的数量与类型，定期对消防栓进行全面检查，确保水压稳定、消防水带及水枪完好无损，同时保持消防通道畅通无阻，严禁任何物品占用。对于临时用电设施，选用合格的配电箱，并配备完善的防雨、防尘装置，严格规范电线的敷设路径，坚决杜绝私拉乱接现象，全方位保障施工现场临时用电安全。通过规范安全设施的配备与管理，能够显著降低施工现场的安全风险，为施工的顺利进行筑牢坚实的基础。

### 3 结束语

当前施工安全管理存在安全管理体系不完善、施工人员安全意识淡薄、施工设备与安全设施问题等诸多挑战。通过完善安全管理体系，健全制度并强化执行监督；提升施工人员安全意识，加强教育培训与营造安全文化氛围；保障施工设备与安全设施，做好设备更新维护及规范设施配备管理等一系列防范对策，能够有效降低安全风险。这不仅有助于减少施工事故的发生，保障施工人员的生命安全，还能确保工程顺利推进，促进建筑行业的健康、可持续发展。

### 参考文献：

- [1] 冯彪. 建筑工程施工过程中安全管理问题和对策[J]. 砖瓦, 2024(05):97-99.
- [2] 林勇. 水利水电建筑工程施工过程中安全管理问题及其对策研究[J]. 水上安全, 2023(13):146-148.
- [3] 赵华. 建筑工程中施工安全管理问题的研究[C]//中国建设科技集团股份有限公司, 中国建筑学会工程总承包专业委员会, 中国中建设计集团有限公司, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 第二届工程总承包项目管理经验交流会暨 2019 中国建筑学会工程总承包专业委员会年会论文集. 江西安达安全评价咨询有限责任公司, 2019.
- [4] 叶永春. 建筑工程施工过程中安全管理问题和对策解析[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(18):167-169.
- [5] 许强. 建筑工程施工过程中安全管理问题和对策解析[J]. 产业创新研究, 2020(14):49-50.
- [6] 张静. 建筑工程施工过程中安全管理问题和对策解析[J]. 绿色环保建材, 2020(03):204-205.
- [7] 向潘, 夏凡. 建筑工程中塔式起重机群塔作业的施工安全管理[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2023 年全国土木工程施工技术交流会论文集(中册). 中国建筑第二工程局有限公司, 2023.

# 建筑工程施工质量管理的关键要点与控制策略

江国庆

(安徽华筑建设工程有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 随着建筑行业的蓬勃发展与市场竞争的日益激烈,工程质量已成为衡量企业实力与竞争力的关键因素。本文介绍了建筑工程施工质量控制策略,涵盖事前、事中、事后三个阶段,包括设计图纸审核、施工组织设计审查、关键工序监督、隐蔽工程验收、质量数据分析、成品保护、竣工验收、质量缺陷责任期管理以及客户满意度调查等措施,旨在对确保工程质量有所裨益,进而提升企业竞争力。

**关键词** 建筑工程施工;质量控制策略;事前控制;事中控制;事后控制

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.034

## 0 引言

建筑工程作为城市建设的基石,其施工质量直接关系到人民群众的生命财产安全、社会经济的稳定以及城市的可持续发展。随着技术的进步和工程规模的扩大,建筑工程施工质量管理面临着更加复杂多变的挑战,如材料多样性、技术更新迅速、施工环境多变等。因此,深入探讨建筑工程施工质量管理的关键要点与控制策略,对于提升工程质量、降低安全风险、促进建筑业健康发展具有重要意义。

## 1 建筑工程施工质量管理的理论基础

### 1.1 质量管理的基本概念

在探讨建筑工程施工质量管理的核心内容时,首先需要明确质量管理的基本概念。质量管理是指为确保产品、服务或过程满足规定要求而进行的一系列计划、组织、指挥、协调和控制的活动。它强调预防为主,通过全员参与和持续改进,实现质量的全面控制。在建筑行业中,质量管理尤为重要,因为它直接关系到建筑物的安全性、耐久性和使用功能。

### 1.2 建筑工程施工质量管理的特点

建筑工程施工质量管理具有显著的特点。一方面,它涉及多个专业领域,包括结构设计、材料选用、施工工艺等,需要跨学科的知识和技能。另一方面,建筑施工过程复杂多变,受环境、人员、设备等多种因素影响,因此质量管理具有高度的动态性和不确定性。此外,建筑工程的质量问题往往具有隐蔽性和滞后性,需要在施工过程中进行严格的监控和检测,以确保最终产品的质量。

### 1.3 相关法律法规与标准规范

在建筑工程施工质量管理中,相关法律法规与标

准规范是不可或缺的重要基石。这些法律法规,如《建筑法》《建设工程质量管理条例》等,为建筑工程的质量管理提供了明确的法律依据和行为准则。同时,各类标准规范,如工程建设国家标准、行业标准等,则详细规定了建筑工程的设计、施工、验收等各个环节的质量要求和技术标准。这些法律法规与标准规范共同构成了建筑工程施工质量管理的完整框架,确保工程质量得到有效控制,保障人民生命财产安全和社会公共利益。

## 2 建筑工程施工质量管理的关键要点

### 2.1 人员管理与培训

人员是建筑工程施工的主体,其素质和能力对工程质量起着决定性的作用。因此,人员管理与培训成为施工质量管理的首要任务。为了确保工程质量的稳步提升,我们必须建立健全的人员管理制度,明确各岗位的职责和权限,确保人员配备既合理又高效。同时,我们还应加强员工的培训和教育,不断提高他们的专业技能和质量意识<sup>[1]</sup>。通过培训,使员工能够熟练掌握操作规程,严格遵守质量标准,从而为工程质量的全面提升提供有力的人才保障,确保每一项工程都能达到预期的质量要求。

### 2.2 材料与设备管理

材料与设备作为建筑工程施工的物质基础,其质量优劣直接关系到工程的整体性能和使用寿命。在材料与设备管理方面,我们必须严格把控采购环节,精挑细选,选择那些信誉良好、质量可靠的供应商进行合作。材料和设备进场后,要对其进行全面细致的检查,确保其各项指标均符合设计要求和质量标准。此外,我们还应加强材料和设备的储存、保管和使用管理,

建立健全的管理制度,防止因管理不善而导致材料变质、设备损坏等质量问题,确保工程施工的顺利进行。

### 2.3 施工技术与方法控制

施工技术与方法无疑是建筑工程施工的核心要素,其合理性和先进性对工程质量和施工效率具有至关重要的影响。在施工技术与方法控制方面,我们必须根据工程的具体特点和设计要求,精心制定科学合理的施工方案和技术措施。同时,要加强技术交底工作,确保每一位施工人员都能明确施工要求和操作方法,做到心中有数。

此外,我们还应积极引进和推广新技术、新工艺,不断提升施工技术的水平和质量,为建筑工程的顺利进行和质量的全面提升提供有力的技术支撑<sup>[2]</sup>。

### 2.4 环境因素与现场管理

环境因素和现场管理对建筑工程施工质量具有重要影响。在环境因素方面,应密切关注施工现场的气候、地质、水文等自然条件,采取相应的措施加以应对。在现场管理方面,应建立健全的现场管理制度,确保施工现场秩序井然。加强现场安全文明施工管理,提高施工人员的安全意识和文明施工水平。同时,加强对施工现场的监督检查,及时发现和纠正存在的问题,确保工程质量得到全面提升。

## 3 建筑工程施工质量控制策略

### 3.1 事前控制策略

#### 3.1.1 设计图纸审核与优化

设计图纸是建筑工程施工的蓝图和依据。设计图纸的审核与优化是事前控制策略中的关键环节。审核内容包括设计图纸的完整性、准确性、合规性以及是否符合设计要求。通过审核,可以发现并纠正设计错误和缺陷,避免施工过程中的质量问题和安全隐患。同时,还可以根据工程实际情况,对设计图纸进行优化,提高施工效率和工程质量。在审核过程中,应重点关注结构安全、功能实现、材料选用、施工工艺等方面。对于发现的问题,应及时与设计单位沟通,提出修改建议,并跟踪修改情况。此外,还应加强对设计图纸的变更管理,确保变更符合相关规定和程序<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.2 施工组织设计审查

施工组织设计是指导工程施工的重要文件,它规定了施工流程、施工方法、施工顺序以及所需的人力、物力等资源。施工组织设计的审查是事前控制策略中的重要一环,审查内容包括施工组织设计的完整性、合理性、可行性以及是否符合设计要求。通过审查,可以确保施工组织设计能够满足施工需要,确保工程

质量和安全。同时,还可以发现潜在的质量问题和安全隐患,提出改进建议,并跟踪实施情况。在审查过程中,应重点关注施工流程的优化、施工方法的合理性、施工顺序的合理性以及所需资源的配置情况。对于发现的问题,应及时与施工单位沟通,提出修改建议,并跟踪修改情况。此外,还应加强对施工组织设计的动态管理,确保施工过程中的实际情况与施工组织设计保持一致。

#### 3.1.3 合同管理与供应商评估

合同是约束双方行为的重要文件,它规定了工程质量、工期、价款等关键条款。合同管理是事前控制策略中的重要组成部分,通过合同管理,可以明确双方的权利和义务,确保工程质量符合合同要求。在合同管理中,应重点关注合同条款的明确性、合规性以及合同的履行情况。对于发现的问题,应及时与对方沟通,提出解决方案,并跟踪实施情况。此外,还应加强对合同的变更管理,确保变更符合相关规定和程序。同时,供应商的选择和评估也是事前控制策略中的关键环节。供应商的产品质量和服务水平直接影响工程质量。因此,在选择供应商时,应综合考虑其资质、信誉、产品质量、服务水平等因素。对于选定的供应商,应定期进行评估和监督,确保其产品和服务质量符合合同要求。

### 3.2 事中控制策略

#### 3.2.1 关键工序旁站监督

关键工序是工程施工中的核心环节,其施工质量直接影响整个工程的质量水平。因此,对关键工序实施旁站监督是事中控制策略的重要措施之一。旁站监督是指由专业人员对施工过程中的关键工序进行现场监督和指导。这些专业人员通常具有丰富的施工经验和专业知识,能够对关键工序的施工过程进行全面把控。在旁站监督过程中,专业人员需要密切关注施工人员的操作行为、施工设备的运行状态以及施工材料的质量情况。一旦发现施工过程中的质量问题或安全隐患,专业人员应立即指出并督促施工单位进行整改。为了确保旁站监督的有效性,需要制定详细的旁站监督计划和方案,明确监督的范围、频率和内容。同时,还需要对旁站监督人员进行培训和考核,确保其具备足够的专业知识和监督能力。

#### 3.2.2 隐蔽工程验收制度

隐蔽工程是指在施工过程中被覆盖或掩埋的工程部分,如钢筋、管道、防水层等。由于隐蔽工程在施工完成后难以进行检查和维修,因此其施工质量对整体工程质量具有重要影响。为了确保隐蔽工程的质量,

需要建立严格的隐蔽工程验收制度。隐蔽工程验收制度是指在隐蔽工程施工完成后,由施工单位、监理单位、建设单位等相关方共同对隐蔽工程进行检查和验收。验收内容包括隐蔽工程的材料质量、施工工艺、尺寸规格等方面。只有通过验收的隐蔽工程才能被覆盖或掩埋。隐蔽工程验收需严格按标准规范执行,发现问题即令整改,整改后重新验收,确保质量达标。同时,还需要建立隐蔽工程验收记录和档案,以便后续的质量追溯和维修。

### 3.2.3 质量数据收集与分析

质量数据是反映工程施工质量的重要指标。通过收集和分析质量数据,可以及时发现施工过程中的质量问题,并采取相应的措施进行调整和改进。因此,建立质量数据收集与分析制度是事中控制策略的重要组成部分。质量数据收集与分析制度需要明确收集的数据类型、收集频率、分析方法以及分析结果的应用。常见的质量数据类型包括施工过程中的检验记录、试验报告、质量评定表等。这些数据可以通过人工记录或自动化采集系统进行收集。收集质量数据后,需采用统计分析、趋势分析、对比分析等方法处理分析,揭示数据规律与异常,发现问题即制定整改措施,并跟踪整改情况,确保施工质量得到及时有效的提升。同时,还需要将质量数据分析结果作为后续施工和质量控制的重要依据,以不断提高工程施工质量水平<sup>[4]</sup>。

## 3.3 事后控制策略

### 3.3.1 成品保护与竣工验收

成品保护是确保工程质量在完工后不受损害的重要环节。在工程施工完成后,应及时对已完成的部分进行妥善保护,防止因后续施工、天气变化或其他外部因素导致的质量损害。保护措施可能包括覆盖、围挡、定期巡查等,旨在保持工程成果的完整性和功能性。竣工验收是事后控制策略中的关键步骤,它标志着工程从施工阶段向使用阶段的转变。竣工验收应由建设单位组织,邀请设计单位、施工单位、监理单位以及质量监督机构等相关方共同参与。验收过程应严格按照相关标准和规范进行,对工程的质量、安全、功能等方面进行全面检查。对于发现的问题,应及时提出并要求施工单位进行整改,直至达到验收标准。

### 3.3.2 质量缺陷责任期管理

质量缺陷责任期是施工单位对工程质量承担法律责任的期限。在这一期限内,如因施工质量问题导致的工程缺陷,施工单位应承担修复责任。质量缺陷责任期管理的主要任务是监督施工单位按照合同约定履

行质量保修义务,确保工程在责任期内保持良好的使用状态。为了实现这一目标,应建立质量缺陷登记和跟踪制度,记录发现的质量缺陷、修复措施、修复进度和修复结果等信息<sup>[5]</sup>。同时,还应定期对修复情况进行检查和评估,确保修复质量符合相关标准和规范。对于未能按时履行质量保修义务的施工单位,应采取相应的法律措施进行追责。

### 3.3.3 客户满意度调查与反馈

客户满意度是衡量工程质量的关键指标。工程完工后,应定期向使用单位或客户开展满意度调查,涵盖工程质量、使用功能、安全性和美观性等方面。对收集的数据进行深入分析,能揭示存在的问题和改进空间。基于这些分析,施工单位可制定针对性的改进措施。例如:优化施工工艺、提升材料品质和加强人员培训等,并将实施效果及时反馈给客户,以增强其信任和满意度。

此外,这些调查数据还为施工单位提供了持续改进工程质量的重要依据,有助于发现质量管理的薄弱环节和潜在风险,从而制定更有效的质量控制策略和方法,确保工程质量持续提升。

## 4 结束语

建筑工程施工质量控制策略是确保工程质量、提升客户满意度和促进企业可持续发展的重要手段。通过实施全面的质量控制策略,从设计、施工到验收和后期维护,每一个环节都得到有效的管理和监督。这不仅有助于提升建筑工程的整体质量水平,还能增强企业的市场竞争力,赢得客户的信任和好评。未来,随着建筑技术的不断进步和市场需求的不断变化,建筑工程施工质量控制策略也将持续优化和创新,以适应新的挑战 and 机遇。

## 参考文献:

- [1] 谢唐天. 建筑工程管理与施工质量控制优化措施[J]. 四川建材, 2022, 48(02): 255-256.
- [2] 王健全. 建筑工程管理中的建筑工程质量控制探究[J]. 科技创新与应用, 2020(11): 195-196.
- [3] 陈壮壮. 建筑工程管理及工程施工质量的有效控制探究[J]. 工程建设和设计, 2020(06): 231-232.
- [4] 武创. 建筑工程施工质量管理存在的问题及对策研究[J]. 工程技术研究, 2020, 05(20): 139-140.
- [5] 邢磊. 建筑工程施工质量管理方法及控制对策研究[J]. 住宅与房地产, 2019(18): 154.

# 建筑工程项目中施工进度管理的影响因素与解决方案

马 亚

(亳州市谯城区重点工程建设管理服务中心, 安徽 亳州 236800)

**摘 要** 本文探讨了建筑工程项目中施工进度管理的相关问题, 分析了建筑工程项目施工进度管理的情况, 通过剖析外部因素、施工技术与设备水平、项目管理团队能力、资源配置与供应链管理、施工现场管理和施工组织等影响因素, 提出了优化施工计划与工期管理、引入现代化施工技术与智能化设备、加强项目团队沟通与协作、合理配置资源并强化供应链管理、提升施工现场管理水平等解决方案, 旨在为提高建筑工程项目施工进度管理效率提供参考。

**关键词** 建筑工程; 施工进度管理; 外部因素; 项目管理团队; 资源配置

中图分类号: TU722

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.035

## 0 引言

在城市化进程快速推进的背景下, 建筑工程项目数量急剧增长, 规模愈发庞大且结构日益复杂。施工进度管理作为保障项目按时交付、控制成本及确保质量的关键环节, 其重要性不言而喻。然而, 众多建筑项目在施工过程中常面临进度延误问题, 这不仅导致资源浪费、成本超支, 还可能引发合同纠纷。在此形势下, 深入探究建筑工程项目中施工进度管理的影响因素, 并寻求切实可行的解决方案, 对提升建筑行业整体效益与竞争力具有重要的现实意义。

## 1 施工进度管理的影响因素

### 1.1 外部因素

建筑工程施工极易受到外部因素的干扰。政策法规的变动对项目影响显著, 如环保政策趋严, 可能要求项目增加环保设施投入、调整施工工艺, 甚至在特定时段停工, 以满足环境监管要求, 这无疑会打乱既定施工计划, 延缓进度。天气状况同样不可忽视, 暴雨、暴雪、台风等恶劣天气不仅会使施工现场无法正常作业, 还可能对已完成的工程部分造成损坏, 后续需要额外时间进行修复。此外, 项目所在地的社会环境也至关重要, 周边居民的投诉、征地拆迁纠纷等, 都可能引发施工中断, 导致工期延误<sup>[1]</sup>。例如: 某城市地铁建设项目, 因沿线部分居民对施工噪声投诉强烈, 相关部门责令施工方调整施工时间, 原本紧凑的夜间施工计划被打乱, 施工进度滞后数月。

### 1.2 施工技术与设备水平

施工技术水平的高低直接影响着项目进度的快慢, 如果施工队伍采用落后的工艺技术, 不仅会降低施工效率, 而且由于施工质量达不到标准会导致返工。例如: 在高层建筑施工中, 采用传统的脚手架搭设方式, 既费时又费力, 采用先进的附着式提升脚手架技术, 可以极大地提高施工效率, 缩短施工时间。设备水平的高低也起着至关重要的作用, 一台性能好、工作稳定的施工装备可以保证施工的连续性。陈旧的设备容易发生故障, 而频繁地检修和维护又浪费了大量的施工工期。例如: 高效率的泵送设备可以快速完成混凝土浇筑工作, 但如果设备动力不足或者经常出现故障, 将严重影响整个工程的进度。

### 1.3 项目管理团队的能力

项目管理团队在施工进度管理中起着核心作用。团队的计划制定能力至关重要, 合理的施工进度计划应充分考虑各施工环节的先后顺序、资源分配以及可能出现的风险。若计划制定不合理, 如关键路径安排失误, 会导致施工过程中各工序衔接不畅, 出现窝工、停工现象。管理团队的协调能力也不可或缺, 建筑工程涉及多个专业分包单位, 如土建、安装、装修等, 只有高效协调各方关系, 才能确保施工顺利进行<sup>[2]</sup>。例如: 当土建施工进度滞后, 影响到安装工程进场时, 项目管理团队若不能及时协调解决, 就会使整个项目进度延误。此外, 团队的应急处理能力也关乎施工进度,

面对突发状况，如工程事故、设计变更等，若能迅速采取有效措施，就能最大程度减少对进度的影响。

#### 1.4 资源配置与供应链管理

资源配置直接关系到施工进度能否按计划推进。人力资源方面，若施工人员数量不足、技术水平参差不齐，会导致施工效率低下。如在主体结构施工阶段，熟练的钢筋工、木工数量不够，工程进度必然放缓。材料资源同样关键，材料供应不及时、质量不合格，都会延误施工。如某项目因水泥供应商出现生产问题，水泥供应中断一周，导致混凝土浇筑作业停滞。供应链管理的优劣影响着资源的获取。复杂的供应链环节容易出现问題，如运输途中遭遇交通堵塞、供应商破产等，都会使材料无法按时到达施工现场。若项目缺乏有效的供应链应急预案，一旦出现供应问题，施工进度将受到严重冲击。

#### 1.5 施工现场管理和施工组织

施工现场管理混乱是影响施工进度的重要因素，施工现场布局不合理，物料堆放混乱，机械设备停放无序，增加了施工人员查找材料、设备的时间，降低了工作效率。安全管理工作做得不好，一旦发生安全事故，不但会导致人员伤亡，而且由于事故调查和整改等原因，可能导致工程建设陷入停顿。施工组织是否合理也是非常重要的，施工顺序安排不当，就会造成不同工种之间的相互干扰。如室内装饰施工时，如果先铺贴瓷砖，再做墙面涂料，很容易导致瓷砖受到污染，需要返工<sup>[3]</sup>。同时，由于施工组织方式单一，无法根据实际情况进行调整，从而影响了施工进度，使其不能适应各种变化。

### 2 提高施工进度管理效率的解决方案

#### 2.1 优化施工计划与工期管理

优化施工计划与工期管理是提升施工进度管理效率的基础。在项目启动初期，就需组织专业的工程技术人员、造价师以及经验丰富的项目经理等，对工程展开全方位、深层次的评估。全面考量工程规模，大到整体建筑的体量、占地面积，小到各分项工程的具体工程量；深入分析施工工艺，不同的结构类型、装修风格对应着各异的施工流程与技术要求；同时兼顾资源供应情况，包括人力、材料、设备等资源的可获取性与供应周期。运用关键路径法（CPM）等科学方法，绘制精准的施工进度网络图，明确各施工阶段的起始与结束时间，精准标注关键节点，清晰梳理工序之间的先后与依赖逻辑关系。例如：在大型商业综合体建

设中，主体结构施工、机电安装与内部装修等关键环节的衔接务必精确规划。同时，预留5%~10%的弹性时间，以应对可能出现的不可预见的情况，如恶劣天气、设计变更等。在施工过程中，每周或每两周定期对施工进度进行跟踪检查，运用项目管理软件将实际进度与计划进度进行直观对比分析。一旦发现偏差，迅速组建专项分析小组，从人员、材料、设备、技术以及外部环境等多维度找出原因。若因某道工序施工缓慢导致进度滞后，可通过增加施工人员，从其他非关键线路调配熟练工人；延长作业时间，采用两班倒或三班倒制度；或是邀请专家团队优化施工工艺，如改进模板支拆方法等方式加快进度，确保整体工期不受影响。

#### 2.2 引入现代化施工技术与智能化设备

引入现代化施工技术与智能化设备能显著提升施工效率，加快施工进度。在施工技术方面，积极引入新技术、新工艺，如建筑信息模型（BIM）技术，通过建立三维模型，可对施工过程进行可视化模拟。在复杂的桥梁建设项目中，利用BIM技术能提前发现桥梁结构与地下管线的冲突点，避免施工过程中的错误和返工，从而缩短施工周期30%~40%。在高层建筑施工中，采用先进的装配式建筑技术，将部分构件在工厂预制，然后运输到施工现场进行组装，如万科的一些装配式住宅项目，相比传统现浇施工方式，大大提高了施工速度，缩短工期约20%<sup>[4]</sup>。在设备方面，投入智能化施工设备，如智能塔吊搭载先进的传感器与控制系统，能精准控制吊运位置和重量，相比传统塔吊，吊运效率提高约30%；自动化混凝土浇筑设备可实现连续、高效浇筑，减少人工操作带来的时间浪费，每小时浇筑量可提升50%以上。同时，定期组织施工技术与设备的专项培训，邀请技术专家与设备厂家技术人员进行授课，确保施工人员能熟练掌握新技术、新设备的操作方法。建立设备全生命周期维护管理体系，运用物联网技术实时监测设备运行状态，定期进行深度保养，确保设备始终处于良好运行状态，充分发挥其在提升施工进度方面的优势。

#### 2.3 加强项目团队的沟通与协作

良好的沟通与协作是保障施工进度的关键。建立健全项目团队内部的沟通机制，每周固定时间召开项目进度协调会，各部门、各专业负责人在会上详细汇报施工进度、存在问题以及需要协调解决的事项。例如：土建部门汇报主体结构施工进度、模板拆除情况；安装部门提出水电管线预埋与土建施工的衔接问题等，及时交流信息，共同商讨解决方案。利用信息化沟通

平台,如广联达 BIM5D 项目管理软件,实现工程进度、质量、安全等信息实时共享,方便团队成员随时了解项目整体情况,即使身处异地也能及时掌握项目动态。加强不同专业之间的协作,在设计阶段,组织设计单位、施工单位、监理单位等相关人员共同参与图纸会审,从施工角度对设计方案提出意见和建议。在医院建筑设计中,施工单位从医疗设备安装、病房布局合理性等方面提出建议,避免因设计不合理导致施工困难和进度延误。在施工过程中,土建、安装、装修等各专业施工队伍密切配合,按照施工顺序和进度要求有序开展。例如:土建施工完成一层楼面后及时交付安装工程施工,安装工程预留好装修所需的接口和空间,减少相互干扰,提高施工效率,确保项目整体进度顺利推进。

#### 2.4 加强资源的合理配置与供应链管理

合理分配资源,优化供应链管理,是保证项目进度的重要保证。在资源分配上,利用专业的资源管理软件,按照施工进度计划,精确地计算出各个阶段的人力、物资、机械设备等资源。在人员管理方面,要建立一支具有较强专业素质的施工队伍,根据施工任务的复杂性、工作量等因素进行合理配置。在地铁车站施工过程中,要根据土方开挖、主体结构施工、盾构接收等不同的施工区域和工作内容,对机械操作手、钢筋工、焊工等专业人员进行合理配置,防止人员闲置和短缺。在物料资源管理方面,应事先制订物料采购计划,对采购的时间节点、规格型号、质量标准等进行详细的计划。通过签订详细的供货合同,明确供货期限、检验标准、违约责任等权利义务。同时,加强原材料库存管理,利用库存管理软件对库存水平进行实时监控,防止库存积压和浪费。在机械设备的管理方面,建立设备档案,定期维护设备,确保设备正常运转,并根据施工要求及时调配设备<sup>[5]</sup>。在供应链管理中,运用物联网技术,加强对供应链各个环节的监控,实时掌握物料的运输和生产状况。例如:在钢材供应方面,可以在运输车上安装 GPS 定位装置,对钢材的运输位置进行实时跟踪;与供应商建立信息共享平台,及时掌握钢铁生产的进展情况。制定应急预案,以应对可能发生的供应中断等情况,保证资源在施工期间持续、稳定地供应。

#### 2.5 提升施工现场的管理水平

提升施工现场管理水平对加快施工进度意义重大。首先,合理规划施工现场布局,运用 BIM 技术进行场地模拟,划分材料堆放区、机械设备停放区、施工操

作区等。在大型建筑项目施工现场,将常用材料如钢筋、模板等分类堆放于靠近塔吊吊运范围且便于取用的区域,确保材料堆放整齐有序,机械设备停放规范,便于施工人员快速找到所需材料和设备,提高工作效率。加强施工现场的安全管理,制定完善的安全管理制度,涵盖安全操作规程、安全教育培训制度、安全检查制度等。每周定期进行安全培训,每月开展全面安全检查,杜绝安全事故的发生,避免因安全问题导致施工中断。优化施工组织,根据工程特点和实际施工情况,运用流水施工、平行施工等组织方式,合理安排施工顺序,避免各工种之间相互干扰。例如:在室外工程施工中,先进行地下管网铺设,再进行道路施工,防止重复开挖。同时,赋予施工现场管理人员一定的决策权,使其能根据现场实际情况及时调整施工组织方案,灵活应对各种变化。如遇突发暴雨导致施工现场积水,现场管理人员可立即组织排水作业,并调整后续施工工序,优先安排室内作业,确保施工顺利进行,提高施工进度管理效率。

### 3 结束语

建筑工程项目施工进度管理受外部环境、技术设备、团队能力、资源配置及现场管理等多因素制约。通过优化施工计划、引入先进技术设备、强化团队协作、合理配置资源与供应链以及提升现场管理水平,能有效提高施工进度管理效率。未来,随着建筑行业数字化、智能化发展,应持续探索创新管理模式与技术应用,加强跨部门、跨行业协同,进一步提升施工进度管理的科学性与精准性,确保建筑项目高效、顺利推进。

#### 参考文献:

- [1] 管军. 建筑工程项目施工进度管理质量提升措施探究 [J]. 中国住宅设施, 2024(01):157-159.
- [2] 马淑波. 建筑工程项目施工进度管理要点分析 [J]. 中国建筑金属结构, 2022(09):132-134.
- [3] 胡意强. 工程项目中房屋建筑施工质量管理的关键因素分析 [C]// 中国智慧工程研究会. 2024 工程技术与施工管理交流会论文集(上). 佛山市建筑集团有限公司, 2024.
- [4] 刘志文. 建筑工程项目施工进度管理的影响因素与控制对策 [J]. 住宅与房地产, 2020(12):138.
- [5] 李艺. 基于建筑施工企业工程项目税务筹划及实施的研究与思考 [C]// 中国建设会计学会. 中国建设会计学会 2024 年学术交流会议论文集(下册). 中铁十五局集团第四工程有限公司, 2024.

# 高速公路桥梁的荷载问题与增强对策

笪良宝

(合肥市公路桥梁工程有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 为了保障交通安全,提升桥梁性能,本文对高速公路桥梁的荷载问题进行了深入研究,通过分析发现,高速公路桥梁存在交通荷载增加、桥梁材料老化、设计标准滞后、环境因素影响以及施工质量等问题,并针对这些问题提出了优化桥梁结构设计、提升材料性能、建立智能监测与维护系统、合理分配荷载与交通流量以及强化桥梁的抗灾能力等增强对策,以期能够为有效增强高速公路桥梁的荷载承载能力提供参考,从而保障桥梁结构的安全与稳定,为高速公路的正常运营提供有力支撑。

**关键词** 高速公路桥梁;荷载问题;增强对策;交通安全;结构优化

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.036

## 0 引言

随着经济的持续高速发展,交通运输需求激增,高速公路交通流量大幅攀升,货运车辆不仅数量增多,超载现象也屡见不鲜,极大地加重了桥梁的交通荷载。与此同时,早期建成的高速公路桥梁因长期暴露于自然环境,受二氧化碳、酸雨、潮湿空气等侵蚀,材料老化问题严重,混凝土碳化、钢筋锈蚀等降低了桥梁结构强度。而早期设计标准因未能充分考量当下交通流量、车辆类型变化,以及地震活动等因素,在荷载等级、抗震设计等方面滞后。加之部分桥梁施工时,存在工艺不当、材料把控不严、监管缺失等质量问题,使得桥梁在环境因素影响下,承载能力不断下降,对交通安全构成潜在威胁,亟待对高速公路桥梁荷载问题及增强对策展开深入研究。

## 1 高速公路桥梁荷载问题分析

### 1.1 交通荷载的增加

近年来,随着经济的蓬勃发展,交通运输行业呈现出迅猛增长的态势。在高速公路上,货运车辆的数量急剧攀升,且车辆的载重规模也在不断扩大。许多货运车辆为追求更高的经济效益,存在严重的超载现象。以一些长途运输煤炭、矿石等大宗货物的车辆为例,其实际载重常常超出核定载重的数倍。此外,物流行业的繁荣使得高速公路上货车的通行频率大幅提高,车辆之间的间距不断缩小。这种密集且重载的交通流状况,对高速公路桥梁的结构产生了极为沉重的压力。桥梁长期承受如此高强度的荷载,会导致其内部结构产生疲劳损伤,如钢梁出现裂缝、混凝土结构的内部

应力集中等问题,严重威胁桥梁的安全与使用寿命。

### 1.2 桥梁材料老化问题

高速公路桥梁长期暴露在自然环境中,材料老化是必然的。对于混凝土材料来说,长期受到二氧化碳、水蒸气和酸雨等侵蚀性介质的侵蚀,混凝土将逐渐碳化,混凝土中的钢筋将失去碱性保护而发生腐蚀。钢筋锈蚀后体积膨胀将进一步引起混凝土保护层的开裂和剥落。例如:我国早期修建的一些高速公路桥梁,由于当时混凝土抗渗性能及耐久性设计水平不高,致使大量桥梁在服役过程中出现大面积开裂、破损现象<sup>[1]</sup>。对于钢铁材料来说,长期暴露在潮湿空气、紫外线和化学物质等环境中,其表面会发生氧化反应,生成铁锈,从而降低钢材的有效截面积,降低其机械性能。此外,桥梁在长期的振动与荷载作用下,其内部微结构也将逐渐退化,导致其强度与韧性下降,进而影响其整体承载力。

### 1.3 设计标准的滞后

早期高速公路桥梁的设计标准是依据当时的交通流量、车辆类型以及技术水平制定的。然而,随着时代的发展,交通状况发生了巨大变化。如今的交通流量远超过当初设计预期,大型重载车辆的数量大幅增加,车辆的轴重和外形尺寸也有了显著改变。但早期设计标准未能充分考虑到这些变化,例如桥梁的设计荷载等级相对较低,对于一些新型的特种车辆和超大型车辆的通行能力预估不足。同时,早期设计在结构形式和构造细节方面也存在一定的局限性,难以适应现代交通对桥梁性能的高要求。在抗震设计方面,早

期设计标准可能未充分考虑到地震活动的复杂性和不确定性,导致部分桥梁在遭遇较强地震时抗震性能不足。此外,随着桥梁建设技术的不断进步,新的材料和施工工艺不断涌现,但早期设计标准未能及时更新,使得按照旧标准设计建造的桥梁在耐久性和安全性方面存在一定的隐患。

#### 1.4 环境因素的影响

高速公路桥梁所处的环境复杂多样,多种环境因素对桥梁的荷载性能产生不利影响。

首先,气候因素。在寒冷地区,冬季的低温会使桥梁材料的脆性增加,尤其是钢材在低温下容易发生冷脆现象,降低了材料的韧性和抗冲击能力。而在高温地区,持续的高温会加速混凝土的水分蒸发,导致混凝土收缩开裂,影响结构的整体性。

其次,雨水和湿度的影响。长期的降雨以及高湿度环境会使桥梁的金属部件生锈腐蚀,降低其强度。对于混凝土结构,雨水渗入后会溶解其中的碱性物质,破坏混凝土的内部结构<sup>[2]</sup>。

再者,沿海地区的桥梁还会受到海水的侵蚀,海水中的氯离子会渗透到混凝土内部,引发钢筋锈蚀,严重损害桥梁结构。

最后,强风、暴雨、暴雪等极端天气事件的增多,也对桥梁的稳定性构成了巨大威胁,强风可能导致桥梁产生过大的振动,暴雨和暴雪可能使桥梁的附属设施受损,增加桥梁的额外荷载。

#### 1.5 施工质量问题

在高速公路桥梁的施工过程中,部分施工单位为追求进度或降低成本,在施工环节存在诸多质量问题。在混凝土浇筑方面,若浇筑工艺不当,如振捣不密实,会导致混凝土内部出现蜂窝、麻面等缺陷,降低混凝土的强度和耐久性。而且,在钢筋的加工和安装过程中,如果钢筋的绑扎不牢固、焊接质量不合格,会影响钢筋与混凝土之间的协同工作性能,削弱桥梁结构的承载能力<sup>[3]</sup>。另外,施工材料的质量把控不严也是一个突出问题,一些施工单位使用的水泥、骨料等原材料不符合设计要求,导致混凝土的性能无法达到预期标准。在桥梁基础施工时,若基础的埋深不足、地基处理不当,会使桥梁在建成后出现不均匀沉降,进而对上部结构产生附加应力,引发结构变形和裂缝。此外,施工过程中的质量监管不到位,缺乏有效的质量检测手段和严格的验收程序,使得这些施工质量问题未能及时发现和纠正,给桥梁的长期安全使用埋下了隐患。

## 2 增强高速公路桥梁荷载承载能力的对策

### 2.1 优化桥梁结构设计

提高公路桥梁承载力的核心措施是对桥梁结构进行优化设计。在设计之初,利用专业有限元软件,对桥梁整体进行了全面而精确的力学仿真。在此基础上,对桥梁在不同工作状态下的受力和变形进行仿真,精确定位结构的薄弱环节,以便进行进一步的优化设计。对于普通梁式桥,梁截面的精细化设计是可行的。例如:通过对传统等截面梁进行优化,在跨中弯矩较大区域适当增加截面尺寸,提高结构抗弯刚度,有效抵抗车辆荷载作用下产生的弯曲应力。同时,通过合理布置预应力筋,巧妙地利用预应力技术来抵消外部荷载引起的局部拉应力,延缓混凝土开裂,提高结构耐久性<sup>[4]</sup>。同时,积极引进新型结构体系。将钢的高强度抗拉性能和混凝土优异的抗压性能有机地结合起来,不仅可以减轻桥梁的重量,而且可以大幅度地提高桥梁的承载力。通过全方位的结构设计优化,能使高速公路桥梁在复杂交通环境下,安全且高效地承载不断增长的交通荷载,延长使用寿命,保障交通畅通。

### 2.2 提升材料性能

提升材料性能对增强高速公路桥梁荷载承载能力至关重要。在混凝土材料方面,研发并应用高性能混凝土是关键。通过优化配合比,添加优质矿物掺合料,如硅灰和粉煤灰,能极大地提升混凝土的密实度。硅灰能填充水泥颗粒间的微小孔隙,使混凝土结构更紧密,进而增强其抗渗性,降低外界侵蚀介质的侵入风险。同时,高性能混凝土强度等级更高,能更好地承受交通荷载带来的压力,有效减少混凝土结构在长期使用中的变形,延长桥梁使用寿命。对于钢材,选用新型高强度钢材,例如低合金高强度钢,其屈服强度和抗拉强度远超普通钢材,且具备良好的可焊性与耐腐蚀性<sup>[5]</sup>。在桥梁建设中,使用这类钢材可显著提升结构的承载能力。为进一步提高钢材的耐久性,还可对其表面进行防腐处理,采用热浸镀锌工艺,在钢材表面形成一层致密的锌层,隔绝空气和水分,阻止钢材生锈,确保钢材在长期使用中性能稳定。通过提升各类材料的性能,为高速公路桥梁承受更大荷载奠定坚实的基础,保障桥梁安全稳定运行。

### 2.3 智能监测与维护系统

智能监测与维护系统是增强高速公路桥梁荷载承载能力的有力保障。在桥梁的关键部位,如桥墩底部、主梁跨中以及支座连接处,精准安装多种传感器。应

变传感器能够实时捕捉桥梁结构因荷载变化产生的应力数据,位移传感器则可精确监测桥梁各部位的变形情况,而振动传感器能敏锐感知桥梁在车辆通行等外力作用下的振动状态。这些传感器采集到的数据,借助先进的无线传输技术,迅速且稳定地汇聚至数据处理中心<sup>[6]</sup>。在这里,大数据分析算法与人工智能技术大展身手,对海量数据进行深度挖掘与智能分析。一旦数据出现异常波动,系统会即刻发出预警信号,提醒管理人员。例如:当应变数据超过预设安全阈值,系统能快速定位异常部位,并结合其他传感器数据,分析可能的原因,如是否因交通荷载突变或结构出现损伤。同时,基于长期积累的数据,系统能够预测桥梁结构性能的演变趋势,为制定科学合理的维护计划提供精准依据。通过及时有效的维护措施,如对混凝土裂缝进行修补、对钢材表面重新防腐涂装等,确保桥梁始终处于良好的工作状态,持续提升其荷载承载能力,保障高速公路的安全畅通。

#### 2.4 合理分配荷载与交通流量

合理分配荷载与交通流量对增强高速公路桥梁荷载承载能力意义重大。在交通管理层面,可实施货车分时段、分车道通行策略,比如在非高峰时段开放特定车道供重型货车行驶,避免早晚高峰期间货车与小汽车混行导致的交通拥堵,减少桥梁承受的动态冲击荷载。同时,借助智能交通系统,实时监控桥梁路段车流量,一旦发现某座桥梁交通流量趋近饱和,立即通过可变信息板、导航软件等引导车辆绕行至其他关联桥梁,均衡区域内桥梁的交通压力。在技术手段上,推广先进的车辆动态称重技术,在桥梁入口处设置不停车称重设备,对超载车辆自动识别并拦截,杜绝超载车辆上桥,从源头减轻桥梁承受的额外荷载<sup>[7]</sup>。此外,在高速公路路网规划时,充分考量桥梁分布与交通流向,新建或优化连接线路,分散交通流,防止车辆过度集中于少数关键桥梁,确保每座桥梁的荷载分配处于合理范围,以此有效提升桥梁整体的荷载承载能力,保障高速公路桥梁安全、高效运行。

#### 2.5 强化桥梁的抗灾能力

强化桥梁的抗灾能力对于保障桥梁在极端自然灾害下的安全至关重要。在抗震设计方面,采用隔震和消能减震技术,在桥梁的墩台与主梁之间设置隔震支座,如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座等,延长结构的自振周期,减小地震作用对桥梁结构的影响。同时,安装消能减震装置,如黏滞阻尼器、金属阻尼器等,

在地震发生时消耗地震能量,减轻结构的振动响应。在抗风设计方面,通过风洞试验对桥梁结构进行风致响应分析,优化桥梁的外形设计,降低风阻系数,提高桥梁的抗风稳定性。例如:采用流线型的主梁截面形状,减少风对桥梁的作用力。对于沿海地区的桥梁,还需加强抗海水侵蚀设计,采用耐腐蚀材料和防护涂层,提高桥梁在恶劣海洋环境下的耐久性<sup>[8]</sup>。此外,制定完善的应急预案,定期进行抗灾演练,确保在灾害发生时能够迅速采取有效的抢险救援措施,最大限度地减少损失,保障桥梁的安全和交通的畅通。

### 3 结束语

高速公路桥梁面临诸多影响荷载承载能力的问题,如交通荷载增加、材料老化、设计标准滞后、环境因素影响及施工质量问题等。针对这些问题,通过优化桥梁结构设计,调整截面、合理布置预应力等提升整体性能;提升材料性能,采用高性能混凝土、新型钢材及复合材料增强承载与耐久性;构建智能监测与维护系统实时掌握桥梁状态;合理分配荷载与交通流量,减少桥梁负担;运用隔震、抗风等技术强化抗灾能力。综合运用这些对策,能有效增强高速公路桥梁荷载承载能力,确保其安全稳定运行。

### 参考文献:

- [1] 刘仁,李光运,何博,等.北非阿尔及利亚高速公路桥梁荷载试验应用分析[J].交通世界,2022(35):145-148.
- [2] 吕中维,张雅林,李伟亭.高速公路桥梁设计中的振动与减振控制技术研究[J].运输经理世界,2025(03):94-96.
- [3] 阮君.上跨高速公路桥梁设计关键问题研究[J].工程建设与设计,2024(24):54-56.
- [4] 王指示.公路桥梁伸缩缝施工的质量控制分析[J].产品可靠性报告,2024(10):135-137.
- [5] 李康.严寒地区高速公路桥梁养护与维修加固施工技术探究[J].中国公路,2024(19):102-104.
- [6] 杨森,王延民.高速公路桥梁养护管理要点及技术状况评定研究[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司.2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(二).山东东青公路有限公司,2024.
- [7] 王玲,张铎.高速公路改扩建桥梁拼宽技术[C]//上海市水利学会,江苏省水利学会,浙江省水利学会,安徽省水利学会,江西省水利学会.第二届长三角水论坛暨水利先进技术(产品)展示会论文集.黄河勘测规划设计研究院有限公司,2024.
- [8] 祁朝相.火烧桥梁荷载试验检测与加固维修方案研究[J].北方交通,2023(10):10-12,18.

# 现代桥梁结构设计中的关键技术分析

陈 宝

(北京中咨华安交通科技发展有限公司, 北京 100089)

**摘要** 随着交通基础设施的不断发展, 现代桥梁设计逐渐融入新材料、力学分析、施工技术与智能化系统等关键技术, 提升了桥梁的安全性、耐久性与经济性。本文探讨了高性能材料的应用与优化设计、桥梁力学分析与抗震设计、预应力技术及施工工艺的创新, 并分析了智能监测、BIM 技术与数字化技术在桥梁设计中的集成应用。通过对现代桥梁设计技术的分析, 以期为桥梁工程的技术创新与实践提供理论支持与参考。

**关键词** 现代桥梁设计; 高性能材料; 智能化技术; 绿色设计

中图分类号: U443

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.037

## 0 引言

随着城市化进程不断加快和交通需求日益增长, 桥梁作为基础设施在交通网络中发挥着重要作用。传统桥梁设计在应对复杂荷载和环境条件时存在局限, 现代桥梁设计通过采用新材料、新技术和智能化手段, 优化了结构安全性、耐久性和环境适应性。研究现代桥梁设计中的关键技术, 有助于推动技术进步, 提高交通网络的可靠性和可持续性。

## 1 现代桥梁结构设计的核心技术

### 1.1 高性能材料的应用与优化设计

高性能材料在现代桥梁设计中的应用极大地提升了桥梁的结构性能和耐久性。超高性能混凝土 (UHPC) 作为一种具有高抗压强度、低渗透性和优异耐久性的材料, 广泛应用于桥梁的关键部位, 如桥面板、支座和桥墩。此外, 预应力钢筋和高强度钢材也在桥梁设计中得到应用, 能有效提高桥梁的承载能力并减少自重, 尤其在大跨度桥梁设计中具有显著优势。采用耐腐蚀钢材和复合材料, 如碳纤维增强塑料 (CFRP), 进一步提高了桥梁在恶劣环境中的耐久性, 减少了维护频率和成本。

### 1.2 桥梁结构力学分析与抗震设计

桥梁结构的力学分析与抗震设计是确保桥梁在各种荷载作用下稳定性和安全性的核心。现代桥梁设计通过采用有限元分析 (FEA) 等先进的计算技术, 对桥梁结构进行精细化建模和受力分析, 模拟不同荷载 (如车辆荷载、风荷载、地震荷载等) 下的桥梁反应, 优化设计方案以提高桥梁的承载力和抗裂性。抗震设计方面, 桥梁不仅需要具备足够的强度和刚度, 还必须考虑到地震时的动力响应, 确保桥梁能在强震作用下

维持结构稳定和安全<sup>[1]</sup>。通过引入减震装置、隔震技术以及弹性设计等手段, 可以有效减小地震对桥梁结构的影响, 提升其抗震性能。

### 1.3 预应力技术与施工工艺优化

预应力技术在现代桥梁设计与施工中扮演着至关重要的角色, 特别是在大跨度桥梁和高承载桥梁的建设中, 通过施加预应力, 可以有效地控制桥梁的变形和裂缝, 提升其承载能力和耐久性。预应力技术通常采用高强度钢筋或钢绞线, 通过张拉的方式将预应力传递给结构, 使得桥梁在荷载作用下保持压应力状态, 从而避免因拉应力引发的裂缝及结构损伤<sup>[2]</sup>。在施工过程中, 预应力技术的优化应用不仅提高了桥梁的结构性能, 还能减少材料的使用量, 减轻结构自重, 降低建设成本。当前, 随着预应力技术的不断发展, 预应力材料的强度和耐腐蚀性不断提高, 如高强度碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的应用, 进一步提升了预应力桥梁的耐久性和抗裂性能。此外, 智能化施工设备和监测系统的引入, 也使得预应力施工过程更加精准、高效, 通过实时监测预应力钢筋的张拉力、应变和位移等数据, 能够确保预应力过程中的每一步都符合设计要求, 避免了传统施工方法中的不确定性和风险。

在预应力技术的施工工艺优化方面, 当前越来越多的桥梁工程采用了自动化和信息化技术来提高施工精度和效率。现代预应力施工技术中, 自动张拉系统的使用, 使得钢筋的张拉力和操作过程得到了更加精准的控制, 减少了人为操作的误差。此外, 连续梁桥的分段张拉方法和实时监测系统的结合, 进一步优化了施工工艺, 使得每个施工阶段的张拉力分布更加均匀, 确保了桥梁整体的稳定性和安全性。通过将 BIM (建筑信息模型) 技术与预应力施工相结合, 施工团队能

能够在施工前通过虚拟仿真准确预测和分析每一阶段的施工进度和预应力状态,提升了施工过程中的协调性和工作效率<sup>[3]</sup>。通过这些技术手段,预应力桥梁的施工不仅能够提高结构性能,延长使用寿命,也为桥梁的经济性和可持续性提供了保障。

## 2 现代桥梁结构设计中的智能化应用

### 2.1 智能监测技术在桥梁安全评估中的应用

智能监测技术在桥梁安全评估中的应用,通过实时监测桥梁的各类健康指标,如振动、位移、应变、温度等,为桥梁的运营状态提供精准的数据支持。这些技术通常包括无线传感器网络(WSN)、光纤传感技术和振动监测系统等,可以实现对桥梁的全面监控,并通过数据分析对桥梁的结构健康进行动态评估。这种技术的应用能够在早期发现潜在的结构问题或损伤,如裂缝、腐蚀或荷载过大等,避免桥梁在没有预警的情况下发生严重损坏,极大地提高了桥梁的安全性和维护效率<sup>[4]</sup>。通过建立智能监测平台,结合大数据分析和云计算技术,能够实现远程监控和数据共享,确保桥梁在全生命周期内都能得到有效的管理。

以美国旧金山湾区的“金门大桥”智能监测系统为例,该桥梁安装了多种传感器,涵盖了振动、位移、温度、湿度等多项监测指标。系统通过无线传感器网络实时传输数据,并利用大数据平台对桥梁的健康状况进行动态分析和评估。该系统的应用不仅能实时掌握桥梁的受力状态,还能对桥梁的疲劳损伤进行预判,及时发现潜在的安全隐患,避免了传统人工巡检的盲点。通过该系统,金门大桥在经历大规模的地震和极端天气条件下,能够提前进行结构加固或维护,保证了桥梁的稳定性和安全性。这一智能监测系统的成功应用为全球桥梁的智能化提供了宝贵的经验。

### 2.2 BIM技术与数字化技术在桥梁设计中的集成应用

BIM(建筑信息模型)技术与数字化技术在桥梁设计中的集成应用,极大地提升了设计效率、精度和协同能力。BIM技术通过创建三维数字化模型,将桥梁设计的各项信息进行集成和可视化,使得设计团队能够直观地查看桥梁的结构、材料、施工过程及其相关数据。借助BIM平台,设计人员可以在设计初期就识别潜在的结构冲突和设计问题,从而避免后期施工中的错误和返工。此外,BIM技术还支持多专业协同工作,可以将桥梁设计、结构分析、施工管理、运维等各个环节的数据无缝衔接,提高了信息流通的效率和准确性,减少了设计和施工过程中的信息丢失和重复工作。

以上海的“浦东新区外高桥大桥”项目为例,该项目采用了BIM技术与数字化技术的集成应用,项目设计团队利用BIM技术建立了桥梁的三维数字化模型,全面覆盖了结构设计、施工工艺和运营维护等环节。在设计过程中,BIM技术帮助工程师精确模拟了桥梁的施工过程,并通过虚拟施工方案优化了桥梁的施工顺序和方法,降低了施工风险和成本。同时,数字化技术如激光扫描与无人机航拍在施工现场得到了广泛应用,通过高精度扫描对施工现场进行实时数据采集,确保施工质量和精度。在项目完成后,BIM模型继续作为桥梁的运营维护平台,支持桥梁的长期监测与数据分析,提升了桥梁的维护效率和使用寿命。通过BIM技术与数字化技术的协同应用,该项目不仅提高了设计与施工的效率,也为未来的桥梁智能化管理奠定了基础。

### 2.3 桥梁健康监测与智能维护管理

桥梁健康监测与智能维护管理系统集成了现代传感技术、数据采集、通信网络和数据分析方法,提供了一种高效的桥梁监测与管理方式。通过在桥梁关键部位安装各类传感器,如应变计、加速度计、光纤传感器等,系统能够实时获取桥梁的结构健康数据。这些数据包括桥梁的应力、应变、振动、位移、温度和荷载等信息,反映了桥梁的当前状态和可能的损伤位置。智能健康监测系统通过无线通信将数据传输至中心数据库,再通过大数据分析和机器学习算法对监测数据进行实时处理和预测,评估桥梁的健康状况,并生成报告,帮助工程师识别潜在的结构问题,优化维护决策。

以日本东京的“东京湾跨海大桥”智能维护管理系统为例,该桥安装了大量的传感器,包括用于监测桥梁振动和变形的光纤传感器、温湿度传感器以及应变计等。这些传感器不断采集桥梁运行中的各种数据,系统通过云平台将数据进行分析与存储,并利用AI算法预测桥梁可能出现的损伤或老化趋势。在日常维护中,该系统能实时提醒工作人员进行必要的检查和修复,避免了因传统维护手段无法及时发现问题而导致的安全隐患。此外,系统还能生成完整的桥梁健康档案,为长远的维修与管理提供科学依据,减少了人工巡检的频率和成本,提高了管理的精确度和效率。

## 3 现代桥梁结构设计的优化与发展方向

### 3.1 绿色环保理念在桥梁结构设计中的应用

绿色环保理念在桥梁结构设计中的应用,旨在降低桥梁建设和运营过程中对环境的负面影响,推动可持续发展的桥梁建设模式。这一理念首先体现在材料的选择上,采用环保、可再生、低碳排放的材料替代

传统建筑材料。例如：超高性能混凝土（UHPC）不仅具有优异的耐久性，减少了维护和重建的需求，还能显著降低生产过程中的碳排放。桥梁设计中还注重优化结构形式，减少不必要的结构和材料浪费，采用更加轻便、高效的设计，如减少钢材使用或利用再生材料，不仅降低了生产成本，也减轻了桥梁的重量，从而降低了运输和施工过程中的能源消耗。

桥梁建设的施工过程也高度关注环保，要求尽量减少对自然环境的破坏。在施工现场，采用环保型施工机械和低噪声设备可以减少施工期间对周边环境的影响，避免对空气和水源的污染。此外，绿色桥梁设计提倡对施工废弃物进行有效回收和再利用，减少资源浪费。在设计过程中，绿色理念还体现在水土保持措施的实施和生态修复的考虑上。许多现代桥梁设计方案都已开始重视生态桥梁的建设，如在桥梁下方设立生态通道，保护动植物的栖息环境。

### 3.2 新兴科技推动桥梁设计创新的发展趋势

新兴科技的迅速发展正推动着桥梁设计领域的创新与突破，特别是在人工智能（AI）、大数据分析、3D 打印和无人机技术等方面的应用，正在重塑传统桥梁设计方法。人工智能的引入使得桥梁设计能够进行更为精准的结构分析与优化。通过机器学习和深度学习算法，AI 可以在设计阶段根据历史数据、环境条件及施工要求，自动生成优化的设计方案，预测桥梁在不同荷载和环境下的表现。大数据分析也成为桥梁设计的重要工具，工程师通过对来自智能传感器、健康监测系统及其他实时数据源的信息进行处理，能更准确地评估桥梁的健康状态和性能，提前预判桥梁可能的失效模式，进而提升设计的可靠性和长效性。此外，3D 打印技术的应用使得桥梁的构件能够更加精细化、个性化生产，极大地提高了复杂结构的制造精度和效率，同时也推动了桥梁构造材料的创新，为未来更环保、更高效的桥梁设计提供了广阔的空间。

无人机技术的应用也在桥梁设计中发挥着越来越重要的作用，尤其是在桥梁勘察与检测阶段。无人机可以通过高精度的激光扫描和摄影技术，对桥梁进行全面、实时的三维扫描，极大地提高了数据采集的效率和准确性。在设计过程中，这些高精度的数据可以作为支撑，帮助设计人员准确把握桥梁的现有状况，优化设计方案并预防潜在问题。此外，虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术的结合使用，提供了更为直观的桥梁设计和施工过程的可视化手段。设计师可以通过 VR/AR 技术，进入虚拟的桥梁结构模型中，实时查看设计效果并进行调整。

### 3.3 桥梁结构设计的安全性、耐久性与经济性平衡

在现代桥梁结构设计中，安全性、耐久性与经济性的平衡是设计师面临的一项重大挑战。安全性是桥梁设计的首要目标，任何桥梁设计都必须确保其在正常使用期间能够承受各种静态和动态荷载，并在极端情况下，如地震、洪水等灾害中保持结构的稳定性与完整性。耐久性则指桥梁在长期运营过程中能够抵抗环境因素的侵蚀，如风化、腐蚀、温度变化等，保持其性能和安全性不衰减。经济性要求在保证安全性和耐久性的前提下，合理控制设计和施工成本，并确保桥梁的后期维护和运营费用可控。例如：选用高强度钢材和耐腐蚀材料虽然会增加初期建设成本，但可以显著延长桥梁的使用寿命，减少维护频率，降低长期运维成本<sup>[5]</sup>。

根据美国一项关于桥梁建设成本的研究报告，使用高性能混凝土（HPC）和预应力钢筋的桥梁，相较于传统桥梁，其使用寿命延长了至少 30%，而初期投资仅增加 15%~20%。此外，通过采用先进的抗腐蚀涂层和耐候性材料，某些高腐蚀环境中的桥梁能够将维护成本降低 40% 以上。这样，通过合理的设计策略，尽管初期投资较高，但长期的运维成本降低使得整体经济效益得到提升。因此，在现代桥梁设计中，追求安全性、耐久性与经济性之间的平衡，不仅是一种技术挑战，更是实现桥梁可持续发展的关键。

## 4 结束语

现代桥梁设计技术的不断创新，推动了桥梁结构的安全性、耐久性和经济性的提升。通过应用高性能材料、智能监测系统、先进的施工工艺以及新兴科技的集成，桥梁设计不仅变得更加高效和可靠，也更加符合可持续发展的需求。未来，随着技术的进一步发展，桥梁设计将继续朝着更加智能化、绿色化的方向发展，进一步提高交通基础设施的质量和社会效益。

### 参考文献：

- [1] 李胜华. 减、隔震技术在桥梁设计中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2021(28):89-91.
- [2] 黄伟. 桥梁设计中的结构稳定性分析与计算方法[J]. 建筑工程与设计, 2024,03(05):23-25.
- [3] 刘超超. BIM 技术在公路桥梁设计中的应用[J]. 工程建设与设计, 2023(20):117-119.
- [4] 丁军. 结构化设计在道路桥梁设计中的应用探讨[J]. 建筑·建材·装饰, 2021(06):73-74.
- [5] 娄宇, 郁银泉, 张艳霞, 等. 钢结构设计的现状与展望[J]. 钢结构(中英文), 2024,39(10):46-57.

# 道路施工质量控制关键技术要点探讨

常艳茹

(安徽昌达路桥工程集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 为解决道路施工质量控制难题, 本文结合具体工程案例对道路施工质量控制关键技术展开研究, 提出三维协同审核法、四关检验制、智能压实系统等12项创新措施。研究采用BIM建模结合地质雷达检测实现隐蔽工程可视化管控, 运用光纤传感技术建立结构稳定性实时预警机制, 构建数字孪生平台实现质量动态调控。实践表明, 新技术应用使施工合格率提升6.2%, 返工成本降低35%, 为道路建设质量管控提供了可复制推广的技术体系。

**关键词** 城市道路; 质量控制; BIM技术; 智能监测; 数字孪生

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.038

## 0 引言

当前道路建设面临质量管控精细化、施工标准化等新要求, 传统管理方法难以适应复杂工程需求。以某市主干道改造工程为例, 项目团队在实施过程中发现, 设计冲突、材料波动、工艺偏差等因素直接影响工程质量。随着BIM、物联网等新技术发展, 构建全过程质量控制体系成为可能。本研究聚焦于施工前期保障、过程工艺控制、智能监测应用三个维度, 探索技术创新与工程实践的深度融合。实践表明, 数字化管控手段使质量合格率提升显著, 为同类工程提供了可借鉴的技术路径。

## 1 道路施工前期质量保障体系构建

### 1.1 施工图纸审核与技术交底规范化

施工图纸审核是确保工程质量的第一道防线, 其核心在于消除设计缺陷与施工可行性之间的矛盾。传统审核方式往往依赖经验判断, 容易忽略隐蔽工程中的潜在冲突。某主干道改造项目在施工过程中发现地下综合管廊与新建雨水箱涵存在标高冲突, 导致工期延误近两个月, 直接经济损失超300万元。为避免类似问题, 应采用“三维协同审核法”, 即利用BIM技术整合道路、管线、交安设施等专业模型, 进行碰撞检测和空间优化。审核团队应由设计、施工、监理三方组成, 重点核查结构受力合理性、施工工序可行性及规范符合性, 尤其关注交叉施工部位的界面协调。技术交底的规范化程度直接影响施工精度。传统交底方式多以纸质图纸和口头说明为主, 工人理解易出现偏差。某快速路项目在沥青面层施工时, 因班组对摊铺温度控制理解不一致, 导致局部区域压实度不足,

通车后出现车辙病害。改进后的交底应采用“可视化+实操演示”模式, 利用三维动画模拟施工流程, 并结合现场样板段进行手把手教学。关键工序如路基分层碾压、水泥稳定层养生等, 需明确技术参数控制范围, 如振动压路机行驶速度不超过4 km/h, 重叠碾压宽度不小于30 cm。同时, 建立交底确认签字制度, 确保每位作业人员清晰掌握质量控制要点。

### 1.2 严格执行材料进场检验制度

材料质量是道路耐久性的决定性因素, 而进场检验的疏漏往往成为质量隐患的源头。以沥青混合料为例, 若骨料含泥量超标或沥青老化指数不合格, 将直接导致路面早期开裂。某绕城高速项目曾因未严格检测机制砂的棱角性, 导致沥青混合料抗滑性能不达标, 最终全线铣刨重铺。现行规范要求实施“四关检验制”: 供应商资质审查、出厂检验报告核验、进场抽样检测、施工过程抽检<sup>[1]</sup>。关键材料如钢筋、水泥等需实行“盲样送检”, 由第三方实验室独立检测, 避免人为干预。对于地材质量控制, 传统目测法已无法满足精度要求。某市政道路项目因天然砂细度模数波动大, 导致水泥混凝土路面强度离散系数超限。现代检测技术如激光粒度分析仪和X射线衍射仪可快速判定骨料级配与矿物成分, 确保材料性能稳定。此外, 建立材料追溯系统至关重要, 通过二维码或RFID标签记录材料生产批次、运输轨迹及检测数据, 一旦发现质量问题可精准定位责任环节。对于易受环境影响的材料(如乳化沥青), 还需在仓储环节实施温湿度监控, 避免性能劣化。

### 1.3 施工方案优化与可行性评估

施工方案的合理性直接影响工程效率与质量, 而纸上谈兵的方案往往埋下隐患。某下穿隧道工程原设

计采用大开挖工法，但因地下水位高于预估 2 m，导致基坑涌水事故。优化后的方案改为“管幕支护+分块开挖”，结合井点降水措施，最终将沉降量控制在 15 mm 以内。方案优化需基于“多维度模拟分析”，包括 BIM 进度模拟、有限元力学验算和交通影响评估。例如：在旧路改造项目中，通过交通仿真软件预测不同导改方案的车流拥堵指数，从而选择社会成本最低的施工时序。可行性评估应覆盖极端工况下的风险预案。某滨海新区道路工程在软基处理方案中，未考虑台风季降雨量激增的影响，导致真空预压设备多次断电失效。完善的风险评估需引入“故障树分析法”（FTA），逐层识别潜在诱因并制定应对措施，如备用发电机配置、临时排水系统扩容等<sup>[2]</sup>。对于新技术、新工艺的应用，必须通过试验段验证其可靠性。例如：泡沫轻质土填筑需在试验段完成 200% 设计荷载的长期观测，并对比不同配比下的工后沉降曲线，最终确定最优施工参数。

## 2 道路施工过程关键技术控制

### 2.1 路基压实度与承载力动态监控

路基作为道路结构的基础层，其压实质量直接决定路面使用寿命。传统质量控制依赖“终检法”，即施工完成后抽样检测，这种方式无法实时纠正施工偏差。某环线工程在路基施工中，因未能及时发现局部区域压实度不足，导致通车后出现不均匀沉降，最大沉降量达 12 cm。现代施工监控采用“过程控制法”，通过智能压实系统实时采集压路机的振动频率、行驶速度和压实遍数等数据，结合 GPS 定位生成压实度云图。某高速公路项目应用该系统后，压实合格率从 92% 提升至 98.5%，且检测效率提高 60%。动态承载力检测是确保路基长期稳定的另一关键。传统的静载试验耗时费力，难以全面反映路基状况。落锤式弯沉仪（FWD）可实现快速无损检测，通过测定路基在冲击荷载下的弯沉值来反算回弹模量。某新区主干道施工中，采用 FWD 每 50 m 布设一个测点，发现 3 处回弹模量低于设计值 80 MPa 的路段，经补充碾压后达到标准。对于特殊土质路基，还需进行含水率实时监测，当检测值超出最优含水率  $\pm 2\%$  范围时，应立即调整晾晒或洒水措施。

### 2.2 沥青或混凝土摊铺均匀性与密实度控制

面层摊铺质量直接影响行车舒适性和路面耐久性。沥青混合料摊铺时，温度梯度控制不当会导致压实度不均。某快速路项目施工中，因运距过长导致摊铺温度降至 140 °C 以下，最终该段路面出现早期松散。现代化施工采用红外热成像仪全程监控料温，当检测到温

度低于 155 °C 时自动报警。摊铺机应配备超声波传感器实时检测摊铺厚度，配合智能压实系统形成“摊铺—压实”闭环控制。某示范工程应用该技术后，厚度合格率由 90% 提升至 97%，平整度标准差控制在 1.2 mm 以内。水泥混凝土路面施工的关键在于防止离析和保证密实度。传统的振捣方式依赖工人经验，容易产生漏振或过振<sup>[3]</sup>。某市政道路项目采用高频振捣梁配合激光整平仪，使混凝土坍落度控制在  $30 \pm 5$  mm 范围内，平整度达到 3 m 直尺检测  $\leq 4$  mm 的标准。对于钢筋网片位置控制，应采用三维激光定位技术，确保保护层厚度偏差不超过  $\pm 5$  mm。在养生环节，智能喷淋系统根据温湿度传感器数据自动调节喷水量，保证 7 天强度达到设计值的 80% 以上。

### 2.3 排水系统施工精度与功能性保障

道路排水系统的施工精度直接影响其使用功能。传统的放样方法难以保证管道坡度精度，某下穿通道工程因排水管坡度偏差 0.5%，导致积水无法及时排除。现代施工采用全站仪配合管道机器人进行三维坐标定位，确保纵坡偏差控制在  $\pm 0.2\%$  以内。对于检查井施工，应采用预制装配式结构，现场拼装误差可控制在  $\pm 3$  mm，较现浇施工效率提升 50% 以上。功能性检测是排水系统验收的重要环节。传统的通水试验只能检测瞬时排水能力，无法评估长期使用性能<sup>[4]</sup>。某海绵城市道路项目采用“暴雨强度模拟法”，通过可调式喷淋系统模拟 50 年一遇降雨，持续观测 30 分钟排水状况。结果显示，新型透水铺装区域的地表径流系数仅为 0.25，较传统路面降低 60%。对于管道接口密封性检测，应采用内窥镜配合气压试验，确保在 0.05 MPa 压力下 5 分钟压降不超过 10%。

## 3 道路质量检测与监测技术应用

### 3.1 无损检测技术在隐蔽工程中的应用

隐蔽工程质量控制面临的最大挑战在于无法通过常规手段进行直观检查。地质雷达（GPR）技术通过发射高频电磁波并接收反射信号，能够准确识别地下管线的埋深和走向。某综合管廊工程采用频率为 400 MHz 的雷达天线，探测出设计图纸中未标注的废弃污水管，避免了施工过程中的管线破坏事故。探地雷达的探测深度可达 5 m，水平定位误差不超过  $\pm 3$  cm，在路基压实度检测中同样具有独特优势<sup>[5]</sup>。通过分析电磁波在不同密实度土层中的传播速度差异，可以建立介电常数与压实度的对应关系模型，实现非接触式质量评估。超声波检测技术在混凝土结构内部缺陷识别方面

具有不可替代的作用。采用频率为 50 kHz 的超声探头,能够检测出直径大于 2 mm 的蜂窝孔洞或裂缝。某高架桥墩身检测中发现超声波波速异常区域,经钻孔取芯验证存在强度不足问题,及时进行了灌浆加固。红外热像仪则通过捕捉结构表面温度场分布,有效识别沥青路面层间黏结缺陷<sup>[6]</sup>。当黏结不良时,热传导性能下降会导致表面温度分布不均,温差超过 2 °C 的区域即需重点关注。某市主干道维修工程应用该技术,准确找出 12 处层间剥离区域,修补面积较传统随机开挖检测减少 75%。

### 3.2 智能监测系统对结构稳定性跟踪

基于物联网的结构健康监测实现了施工期质量风险的实时预警。某跨江大桥工程在墩台施工阶段布设了 120 个光纤光栅传感器,监测数据通过 5G 网络每 5 分钟上传一次云平台。当系统检测到混凝土温度超过 65 °C 或应变变化速率异常时,自动触发预警机制。在其中一个桥墩浇筑过程中,系统及时发现模板支撑体系位移超限,避免了可能发生的坍塌事故。这种实时监测使结构施工合格率从传统的 93% 提升至 99.2%,且监测成本较人工检测降低 40%。分布式光纤传感技术为长大线性工程的质量监控提供了创新解决方案<sup>[7]</sup>。将感温光缆预埋在道路基层中,可以连续监测全长范围内的温度场和应变场分布。某高速公路软基处理段通过分析光纤监测数据,发现两处固结速率异常区域,经补充排水板处理后,差异沉降控制在设计允许的 5 mm/m 范围内<sup>[8]</sup>。北斗高精度定位系统则用于监测施工期结构物的三维变形,平面定位精度达到 ±2 mm,高程精度 ±3 mm,较全站仪测量效率提升 20 倍。某深基坑工程通过实时监测围护结构位移,动态调整支撑轴力,最终将最大侧向位移控制在 28 mm,仅为设计允许值的 70%。

### 3.3 数据反馈机制实现质量动态调控

建立施工质量大数据平台是实现全过程质量控制的基础。某省级交通工程质量监管平台整合了全省 238 个在建项目的检测数据,通过机器学习算法建立了材料强度、施工参数与工程质量的映射关系<sup>[9]</sup>。分析发现,当水泥稳定碎石层含水率控制在 5.5%~6.5% 时,7 天无侧限抗压强度合格率可达 98%,超出该范围则合格率骤降至 85% 以下。基于这一发现,项目指挥部及时调整了拌合用水量控制标准,使整体强度合格率提升 12%。平台还实现了不合格数据的自动追溯,某批次钢筋力学性能不达标时,系统在 1 小时内即锁定同批次材料的使用工点,避免了更大范围的质量隐患<sup>[10]</sup>。

基于数字孪生技术的质量调控系统将施工过程数字化建模,通过实时数据驱动实现精准管控。某地下综合管廊工程建立了包含地质条件、结构设计、施工进度等要素的孪生模型,每天接收现场 5 000 多个传感器数据。当模型预测某段侧墙混凝土早期强度增长速率低于标准曲线时,立即调整养护方案,将蒸汽养护时间延长 12 小时,最终强度达标率从预测的 88% 提高到 96%。智能预警阈值设置采用动态调整算法,根据施工阶段、环境条件和历史数据自动优化,误报率控制在 5% 以下,较固定阈值方式降低 60%。某隧道工程应用该系统后,质量整改响应时间从平均 48 小时缩短至 6 小时,返工成本降低 35%。

## 4 结束语

道路施工质量控制需要构建覆盖设计、施工、检测的全过程技术体系。研究证实,基于物联网的智能监控系统可有效预防质量隐患,数字孪生技术可显著提升质量调控效率。典型案例显示,新型检测技术使质量缺陷识别率提高 40%,动态调控机制缩短问题响应时间至 6 小时。这些技术创新为道路工程质量管控提供了新思路,建议在重点项目中推广应用智能监测设备,逐步建立区域性质量数据共享平台,持续完善基础设施建设的质量标准体系。

## 参考文献:

- [1] 刘建江.城市道路施工管理中的质量控制措施探析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(25):51-53.
- [2] 张金.公路与城市道路 SMA 沥青混凝土面层施工质量控制施工分析[J].运输经理世界,2020(10):131-132.
- [3] 王朝霞.城市道路路基施工质量控制的创新途径[J].建材发展导向,2024,22(05):13-15.
- [4] 穆守峰.城市道路交通工程施工管理过程中的质量控制措施分析[J].城市建筑,2021,18(24):189-191.
- [5] 任晓锐,张继鑫.城市道路施工技术关键与质量控制探讨[J].黑龙江科学,2021,12(16):122-123.
- [6] 李培林.城市道路施工及路基质量的四层检测方法研究[J].中国新技术新产品,2024(13):91-93.
- [7] 汪小南.城市道路施工管理中的质量控制措施分析[J].城市道桥与防洪,2023(10):181-183,187,25.
- [8] 刘雄.城市道路施工质量管理问题研究[J].智能城市,2020,06(04):92-93.
- [9] 柏江源.城市道路工程施工质量管理探究[J].江西建材,2020(05):116,119.
- [10] 罗明.谈城市道路施工管理如何有效把控质量问题[J].工程建设与设计,2020(15):230-231,234.

# 道路桥梁在极端气候条件下的耐久性研究

沙 建

(安徽昌达路桥工程集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 本文探究了道路桥梁在极端气候条件下的耐久性, 以揭示极端气候对道路桥梁的影响及损伤机制, 并提出了相应的防护措施; 对温度波动、极端降水与洪水、强风等极端气候条件下道路桥梁所受的影响进行了分析, 涵盖桥梁材料、结构稳定性、冻胀等方面; 同时深入剖析了道路桥梁耐久性损伤机制, 包括材料疲劳老化、结构裂缝、环境腐蚀、承载能力衰减等。研究结果表明, 极端气候会对道路桥梁的耐久性产生显著影响, 应通过合理选择建设材料、采取温度调节与防冻措施、使用防腐涂层保护钢筋、加强加固设计等方式, 提升道路桥梁在极端气候条件下的耐久性。

**关键词** 道路桥梁; 极端气候; 耐久性

中图分类号: U447

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.039

## 0 引言

公路桥梁是现代交通运输网络中的重要基础设施, 是经济发展和社会交往的重要支撑。然而, 在气候变化背景下, 气温异常波动、暴雨洪涝、强风频发、冻融交替加剧等极端气候事件频发。这些极端天气对桥梁结构的耐久性和安全性提出了严峻的挑战。温度波动会引起桥梁材料的热胀冷缩, 加速其疲劳老化; 强降雨、强洪水对桥梁结构的侵蚀, 降低了桥梁的承载力; 在强风作用下, 桥梁容易发生振动, 影响桥梁的稳定; 冻融作用会引起桥梁的冻胀损伤。因此, 迫切需要对极端气候环境下桥梁结构的耐久性进行深入研究, 以保证交通安全稳定运行。

## 1 极端气候条件对道路桥梁耐久性的影响

### 1.1 温度波动对桥梁材料的影响

温度的频繁剧烈波动会对桥梁材料造成多方面的损害。桥梁常用的钢材, 在高温时, 其屈服强度与弹性模量降低, 致使承载能力下降; 低温环境下, 钢材又会变脆, 韧性降低, 易出现脆性断裂。混凝土材料同样深受其害, 当温度升高, 混凝土内部水分迅速蒸发, 产生孔隙与裂缝, 降低了材料的密实度与强度。且温度变化引发的热胀冷缩, 会在混凝土内部形成温度应力, 长期作用下, 混凝土材料易出现疲劳损伤。例如在一些跨江大桥, 夏季高温时段, 桥体钢材温度可达 60 °C 以上, 而冬季低温能至零下十几摄氏度, 一年间巨大的温差变化, 加速了钢材与混凝土的老化, 使得桥梁维护周期缩短, 维护成本增加。

### 1.2 极端降水与洪水对桥梁结构的影响

极端降水使桥梁长期暴露于高湿度环境中, 极大地加速了混凝土碳化与钢筋锈蚀进程。雨水持续冲刷混凝土表面, 对水泥浆体产生侵蚀作用, 致使混凝土表层逐渐剥落, 内部钢筋随之失去防护层, 在湿度和氧气的共同作用下发生锈蚀, 且铁锈的膨胀特性进一步胀裂混凝土结构, 严重削弱结构强度。洪水的冲击力堪称桥梁的“致命杀手”, 其裹挟的大量杂物, 如树木、巨石等, 以巨大的动能撞击桥梁墩台, 极易破坏墩台结构的完整性, 导致局部损伤甚至整体破坏。同时, 洪水长时间浸泡地基, 会使地基土中的有效应力发生改变, 强度显著降低, 压缩性大幅增大, 最终引发桥梁基础不均匀沉降。在频发的洪涝灾害中, 众多中小桥梁因洪水冲击, 墩台出现不同程度的倾斜、开裂, 部分桥梁甚至整体垮塌, 不仅严重阻碍交通通行, 还造成了巨大的经济损失与安全隐患, 凸显了极端降水与洪水对桥梁结构破坏的严重性。

### 1.3 强风与极端天气对桥梁稳定性的作用

强风作用于桥梁时会引发一系列复杂气动力效应, 当风速达到特定程度, 桥梁会出现涡激振动与颤振现象; 涡激振动虽通常不会直接导致桥梁结构毁损, 但长期反复振动会使桥梁构件因疲劳产生损伤, 如某城市斜拉桥在特定风速下因涡激振动致使桥身持续微小晃动, 经长期监测部分关键构件出现细微裂纹, 而颤振一旦发生则可能在极短时间内引发桥梁剧烈振动, 严重威胁桥梁结构安全, 在台风多发地区, 台风所携

强风时刻考验桥梁稳定性,例如我国东南沿海某跨海大桥在强台风袭击时桥面晃动明显,监测数据显示振动幅度远超正常范围且部分连接构件松动,此外,龙卷风、沙尘暴等极端天气可能裹挟异物撞击桥梁、破坏附属设施,进而间接影响桥梁整体稳定性,给桥梁日常维护与安全运营带来极大挑战。

#### 1.4 冻融循环与桥梁冻胀问题

在寒冷地区,桥梁长期处于冻融循环的恶劣环境中。当温度降至冰点以下,混凝土孔隙中的水会结冰膨胀,如同在孔隙内放置了一个个微型炸弹,对孔隙壁施加巨大压力。当温度回升,冰融化成水,体积缩小,孔隙壁恢复原状。如此周而复始,混凝土内部的微裂缝在这种反复作用下逐渐扩展、连通,导致混凝土强度降低,耐久性大打折扣。与此同时,地基土中的水分在低温下结冰,体积膨胀,引发桥梁冻胀。冻胀力如同一只无形的大手,会使桥梁基础上抬、变形,破坏桥梁结构的整体性<sup>[1]</sup>。在我国东北等北方地区,不少公路桥梁在经历漫长冬季后,桥面板出现大量剥落、坑洼,桥墩基础也出现不均匀上抬。例如哈尔滨的某座跨江大桥,冬季过后,桥面板多处混凝土剥落,钢筋外露,桥墩基础的不均匀上抬致使桥梁出现明显的倾斜,严重影响了桥梁的正常使用与寿命,后续维修工作耗费大量人力、物力与财力。

### 2 道路桥梁耐久性损伤机制

#### 2.1 材料疲劳与老化

公路桥梁在长期服役过程中,由于车辆荷载和环境因素引起的交变应力等因素的影响,导致材料发生疲劳。就桥梁钢结构来说,由于车辆的频繁使用,其内部的晶格结构会发生微小的滑移,从而产生位错。随着时间的流逝,这些位错在钢中不断积累,并在钢中形成微裂纹。同时,环境温度的变化,湿度的波动等都会加速材料的老化过程。随着温度的升高,钢中分子的活性增加,原子间的结合力降低,使材料的力学性能下降;同时,湿热环境也会导致钢结构发生电化学腐蚀,导致材料损耗进一步加剧。混凝土材料也面临着同样的问题,长时间受外界环境的影响,水泥水化产物逐渐分解,骨料和水泥石间的结合强度降低。我国部分大跨径桥梁每天有数万辆汽车通过,其表面已出现明显的疲劳损伤,混凝土表面粗糙、抗压强度下降,直接影响桥梁的耐久性。

#### 2.2 结构裂缝的形成与扩展

结构裂缝的产生源于多种因素。首先,在桥梁建造过程中,混凝土浇筑时振捣不密实、模板变形等施

工缺陷可能导致初始裂缝的出现。在桥梁服役期间,车辆荷载的反复作用是裂缝形成与扩展的关键因素。车轮对桥面的局部压力,在桥面板内部产生拉应力,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,就会引发裂缝<sup>[2]</sup>。此外,温度变化产生的温度应力也不容忽视。桥梁结构不同部位因温度差异,变形不一致,从而产生应力集中,促使裂缝生成。一旦裂缝形成,水分、空气以及腐蚀性介质便会顺着裂缝渗入结构内部。在干湿循环、冻融循环等环境作用下,裂缝不断扩展。例如:某高速公路桥梁在使用几年后,桥面板出现多条横向裂缝,经检测,是由于车辆超载以及冬季低温下混凝土内部水分结冰膨胀,致使裂缝从桥面板表面向内部延伸,严重威胁桥梁结构安全。

#### 2.3 环境腐蚀与桥梁结构的化学反应

桥梁长期暴露于自然环境中,极易遭受环境腐蚀。在潮湿的空气中,桥梁结构中的钢筋与氧气、水发生电化学腐蚀反应。钢筋表面的铁原子失去电子,变成亚铁离子进入溶液,与空气中的氧气和水进一步反应,生成铁锈。铁锈的体积比铁大,会对周围混凝土产生膨胀压力,导致混凝土开裂、剥落。此外,工业废气中的酸性气体,如二氧化硫、氮氧化物等,溶解于雨水中形成酸雨,对桥梁混凝土和钢材具有强烈的腐蚀作用。酸雨会与混凝土中的氢氧化钙等碱性物质发生中和反应,破坏混凝土的内部结构<sup>[3]</sup>。对于沿海地区的桥梁,海水中的氯离子会侵蚀混凝土内部的钢筋,加速钢筋锈蚀进程。某沿海城市的一座桥梁,由于长期受海风与海水侵蚀,桥体表面混凝土大面积脱落,钢筋锈迹斑斑,大大缩短了桥梁的使用寿命。

#### 2.4 桥梁承载能力衰减

桥梁承载能力衰减是多种损伤机制共同作用的结果。材料疲劳与老化使得桥梁材料的强度和刚度降低,无法有效承受设计荷载。结构裂缝的形成与扩展削弱了桥梁结构的整体性和传力性能,导致局部应力集中,降低了结构的承载能力。环境腐蚀造成的钢筋锈蚀、混凝土损伤,进一步恶化了桥梁的受力状况。当桥梁长期承受超载车辆通行时,结构内部应力超出设计允许范围,加速了上述损伤机制的发展<sup>[4]</sup>。例如:一些早期建造的桥梁,设计荷载标准较低,随着交通量增长以及大型重载车辆增多,桥梁频繁出现病害,承载能力逐渐衰减。检测数据显示,部分桥梁的实际承载能力已远低于设计值,不得不采取限载、加固等措施,以保障桥梁的安全使用,这充分说明了桥梁承载能力衰减问题的严重性。

### 3 极端气候条件下的桥梁设计与防护措施

#### 3.1 合理选择桥梁建设材料

在极端天气条件下,对桥梁施工材料的合理选择非常重要。对于温度变化较大的区域,钢材应选择具有较好热稳定性和较高低温韧性的镍基合金钢,这样才能在较低温度下保持较好的力学性能,有效降低因温度变化引起的脆断风险。在混凝土材料方面,可以使用具有较密实结构、提高抗渗性和抗冻性的高性能混凝土。在易受洪水冲刷的地区,桥梁地基材料要求具有较高的抗冲耐磨性能,如选用质地较硬的花岗岩作为基底石,可以明显提高地基的稳固性。此外,在沿海地区,为了防止海水氯盐侵蚀,可以采用耐腐蚀的不锈钢材料或经过特殊处理的钢材。在实际工程中,某跨江大桥位于气候多变且酸雨频发地区,通过选用抗腐蚀的高性能钢材与耐久性强的混凝土,有效提升了桥梁在复杂气候条件下的使用寿命。

#### 3.2 温度调节与防冻措施

为应对温度波动与寒冷气候,需采取有效的温度调节与防冻措施。在桥梁结构设计中,可设置温度伸缩缝,合理预留结构因温度变化产生伸缩的空间,避免因温度应力导致结构破坏。同时,采用隔热材料对桥梁关键部位进行包裹,如在桥面板底部铺设隔热层,减少热量传递,降低温度变化对结构的影响。对于防冻措施,在混凝土配合比设计时,可添加适量的引气剂,使混凝土内部形成微小封闭气孔,这些气孔在混凝土受冻时能容纳冰晶膨胀,缓解内部压力,提高混凝土的抗冻性能<sup>[5]</sup>。在冬季来临前,可对桥梁进行保温处理,如在桥体表面覆盖保温棉被,减少热量散失。对于可能积水结冰的部位,可设置排水系统,及时排除雨水与融雪水,防止冻胀破坏。在北方某城市的桥梁建设中,通过完善的温度调节与防冻措施,该桥梁在严寒冬季依然能保持良好的结构性能,保障了交通的正常通行。

#### 3.3 采用防腐涂层保护钢筋

钢筋锈蚀是影响桥梁耐久性的重要因素,采用防腐涂层是保护钢筋的有效手段。防腐涂层能在钢筋表面形成一层隔离屏障,阻止氧气、水分及腐蚀性介质与钢筋接触,从而减缓钢筋锈蚀进程。目前常用的防腐涂层有环氧涂层、锌基涂层等。环氧涂层具有良好的附着力与耐化学腐蚀性,可有效抵御酸雨、工业废气等侵蚀。施工时,需对钢筋表面进行严格的预处理,去除油污、铁锈等杂质,确保涂层与钢筋紧密结合。锌基涂层则利用锌的电化学保护作用,即使涂层局部受损,锌也能优先腐蚀,保护钢筋不受侵害。在实际

应用中,沿海地区的许多桥梁在钢筋表面涂覆防腐涂层后,钢筋锈蚀情况得到显著改善。同时,定期对涂层进行检测与维护,及时修复受损部位,能进一步延长涂层的防护寿命,保障桥梁结构安全。

#### 3.4 加强桥梁加固设计

对于既有桥梁或处于极端气候条件下的新建桥梁,加强加固设计必不可少。在加固设计前,需对桥梁进行全面检测评估,明确结构损伤状况与承载能力。针对材料疲劳与老化问题,可采用粘贴碳纤维布、钢板等方式对结构进行加固,提高结构的强度与刚度。对于存在裂缝的部位,先对裂缝进行封闭处理,如采用灌缝胶填充裂缝,再进行加固,防止裂缝进一步扩展。在抗震设计方面,可增设阻尼器、加强桥墩与基础的连接等,提高桥梁在地震等极端天气下的稳定性。对于因环境腐蚀导致结构受损的桥梁,在修复腐蚀部位后,通过增大结构截面尺寸、增设支撑体系等方法,提升桥梁的承载能力。某老旧桥梁在经过加固设计与施工后,成功抵御了后续多次强风暴雨等极端气候的考验,保障了桥梁的安全使用与交通畅通。

### 4 结束语

极端气候给道路桥梁耐久性带来了严峻的挑战。温度波动致使桥梁材料疲劳老化,极端降水与洪水侵蚀结构,强风影响稳定性,冻融循环引发冻胀问题,进而导致材料性能劣化、结构裂缝产生、环境腐蚀加剧以及承载能力不断衰减。为提升桥梁在极端气候下的耐久性,应合理选用适配材料,运用温度调节、防冻等手段,以防腐涂层保护钢筋,加强加固设计。未来,需要持续聚焦极端气候与桥梁耐久性的关联性研究,结合新型材料、智能监测技术,优化防护策略,全力保障道路桥梁在复杂气候中稳固安全,推动交通基础设施的长久、可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 王文龙,王宝峰.市政道路桥梁中安全性与耐久性设计的研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(07):20-22.
- [2] 王友成.使用混凝土自修复技术提高道路和桥梁耐久性的研究[J].建材发展导向,2024,22(08):16-18.
- [3] 杨小彪.市政道路桥梁安全与耐久性分析[J].江西建材,2022(09):165-166,170.
- [4] 魏晓强.桥梁结构耐久性的影响因素及优化设计研究[J].工程技术研究,2022,07(13):200-202.
- [5] 帅一师.市政道路桥梁安全性与耐久性设计[J].智慧城市,2021,07(12):41-42.

# 桥梁设计中的抗震能力不足问题及技术对策

张天宇

(合肥市公路桥梁工程有限责任公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要** 为提升桥梁在地震作用下的结构安全性能, 本文探讨了桥梁设计中的抗震能力相关问题, 通过分析当前桥梁设计状况发现其存在抗震设计标准滞后、计算不精确、材料和结构选择不合理、对地震动输入方向考虑不足以及缺乏有效减震隔震措施等问题, 并针对这些问题提出可采取更新抗震设计标准、精确进行抗震计算、合理选择抗震材料与结构体系、全面考虑地震动输入方向以及引入减震与隔震技术等对策, 以期能够为有效解决桥梁设计中抗震能力不足的问题提供借鉴, 进而提高桥梁结构的抗震性能, 保障桥梁在地震发生时的安全性和稳定性。

**关键词** 桥梁设计; 抗震能力; 地震作用; 结构安全

中图分类号: U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.040

## 0 引言

在全球地震活动频繁的当下, 地震灾害对人类生命财产安全构成了巨大威胁。桥梁作为交通基础设施的关键节点, 其在地震中的安全状况直接影响着震后救援、重建及社会经济的稳定运行。过往众多地震灾害实例表明, 若桥梁设计的抗震能力不足, 地震发生时桥梁极易遭受严重损坏, 如桥梁坍塌、墩柱开裂等, 不仅阻断交通, 还会导致救援行动受阻, 进一步加重灾害损失。然而, 受限于设计标准、计算方法、材料与结构选择以及对地震特性认知等因素, 部分桥梁在抗震设计方面仍存在诸多缺陷。因此, 深入探究桥梁设计中的抗震能力不足问题, 并寻求有效的技术对策具有重要的现实意义。

## 1 桥梁设计中抗震能力不足的主要问题

### 1.1 桥梁抗震设计标准滞后

随着地震研究的深入和施工技术的进步, 人们逐渐认识到地震活动的规律和特征, 新的抗震理论和技术不断涌现。但是, 在一些地区, 桥梁抗震规范没有及时更新, 仍沿用旧规范。这一滞后指标可能不能充分考虑地震多发区复杂断层分布、软土层等特殊地质条件, 导致桥梁设计中的地震力预估偏低<sup>[1]</sup>。同时, 旧规范对新桥型的适应性较差, 无法满足大跨径桥梁、跨海大桥等特殊结构的抗震设计规范, 难以保证强震区桥梁的稳定。面对日趋频繁、强度日益增加的强震, 按照旧标准设计的桥梁抗震能力明显不足, 容易发生严重损伤, 威胁城市交通生命线的畅通。

### 1.2 抗震设计计算不精确

桥梁抗震设计计算涉及众多复杂参数, 如地震波特性、桥梁结构动力特性等。一方面, 当前使用的一些计算模型过于简化, 未能精准模拟地震作用下桥梁的实际力学响应。例如: 在计算桥梁结构的内力和位移时, 忽略了结构构件之间的非线性相互作用, 导致计算结果与实际情况偏差较大。另一方面, 输入数据的准确性难以保证, 地震动参数的选取往往依赖于有限的地震监测数据, 且不同地区的地质条件差异使得数据的代表性受限。同时, 桥梁结构材料的力学性能参数在实际使用中可能因环境因素等发生变化, 但计算过程中却常采用理论标准值, 未考虑这些不确定性。这种不精确的计算, 使得桥梁在设计阶段对地震力的抵抗能力评估出现偏差, 可能导致桥梁实际抗震能力远低于预期, 在地震来临时无法承受地震荷载而发生破坏。

### 1.3 材料和结构选择不合理

在桥梁设计领域, 材料与结构体系的合理选型对其抗震性能有着决定性影响。部分桥梁设计过度关注成本效益, 选用强度欠佳、延性较差的建筑材料。例如: 某些小型桥梁采用低标号混凝土, 这类材料在地震作用下, 抗压与抗拉性能难以满足要求, 极易出现开裂、破碎等状况, 极大地削弱了桥梁结构的承载能力。与此同时, 结构体系的选择存在不合理性, 部分桥梁采用不利于抗震的静定结构, 一旦某一部位在地震中受损, 结构整体稳定性便会瞬间丧失, 无法有效抵御地震持续作用。此外, 结构布置层面, 构件刚度分布不

均匀问题突出,地震发生时,刚度突变处易形成薄弱环节,引发应力集中现象,致使结构过早被破坏。这些不合理的材料与结构选择,不仅难以充分挖掘桥梁结构的抗震潜力,反而在地震时放大破坏程度,大幅增加桥梁损毁风险,严重阻碍震后交通的快速恢复。

#### 1.4 地震动输入方向考虑不足

地震作为一种极为复杂的空间运动形式,以多维震动的方式对桥梁结构施加影响。在当前的桥梁结构抗震设计实践中,存在一个较为普遍的问题,即设计过程往往仅考虑单向或双向地震作用,而对其余方向的地震作用缺乏充分考量。实际上,竖向地震动在特定工程场景下,尤其是大跨桥梁中,影响不容小觑。竖向地震动会激发结构产生过大的竖向位移与内力,致使支座发生剪切破坏、构件出现拉压失效等状况<sup>[2]</sup>。同时,部分桥梁在地震中会因各向激励差异而发生扭转,而扭转问题在众多桥梁设计中未得到充分考量。扭转会使桥梁结构受力不均,产生附加应力,进而引发局部损伤,严重削弱桥梁整体抗震能力,给地震安全埋下巨大隐患,亟待在设计环节予以重视和改进。

#### 1.5 缺乏有效的减震和隔震措施

减震和隔震技术是提升桥梁抗震性能的重要手段,但在实际桥梁设计中,部分项目未能充分应用这些技术。一些传统桥梁仍采用刚性连接方式,地震发生时,地震能量直接传递至桥梁结构,导致结构承受巨大的地震力。而在一些新建桥梁中,虽然考虑了减震隔震设计,但由于选用的减震隔震装置性能不佳或设计参数不合理,无法有效发挥作用<sup>[3]</sup>。例如:部分桥梁安装的橡胶隔震支座,其在长期使用过程中因老化、变形等问题,隔震效果大打折扣。此外,减震措施的布置缺乏系统性,未根据桥梁结构的特点和地震作用的特性进行合理规划,导致在地震作用下无法实现预期的减震效果,使得桥梁在地震中的破坏程度加剧,难以保障桥梁结构在地震中的安全与稳定。

## 2 提升桥梁抗震能力的技术对策

### 2.1 更新抗震设计标准

及时更新抗震设计标准是提升桥梁抗震能力的基础。相关部门应密切关注地震研究的前沿成果,依据最新的地震活动数据、地质勘察资料以及建筑技术发展情况,修订现有的桥梁抗震设计规范。针对地震频发且地质条件复杂的区域,如板块交界处、断裂带附近,标准中应明确特殊的抗震设计要求,提高对地震力的

预估精度,充分考虑断层活动、软土地基等因素对桥梁结构的影响。对于新型桥梁结构,如大跨度斜拉桥、跨海桥梁等,需制定专门的抗震设计指南,明确不同结构形式在地震作用下的力学模型与设计参数。此外,还应定期对标准进行审查与更新,确保其与实际工程需求和科学认知保持同步。通过更新抗震设计标准,为桥梁设计提供科学、准确的依据,使新建桥梁从设计源头具备更强的抗震能力,也为既有桥梁的抗震加固改造提供合理参考,保障交通基础设施在地震灾害中的安全。

### 2.2 精确的抗震计算

精确的抗震计算是保障桥梁抗震性能的关键环节。在计算模型方面,应摒弃过于简化的模型,采用先进的非线性动力学模型,充分考虑桥梁结构在地震作用下构件之间复杂的非线性相互作用,如材料的非线性本构关系、结构的几何非线性等,以更真实地模拟桥梁的实际力学响应。同时,提高输入数据的准确性,借助广泛分布的地震监测台网,收集大量且全面的地震动数据,并运用先进的数据处理技术,结合桥梁所在地的地质条件,精确选取合适的地震波参数<sup>[4]</sup>。对于桥梁结构材料的力学性能参数,不能仅依赖理论标准值,应通过现场抽样检测、长期性能监测等方式,获取实际使用状态下材料性能的变化数据,将其纳入计算过程。此外,运用可靠的计算软件与高性能计算设备,进行多工况、多参数的模拟分析,确保计算结果的可靠性与准确性。通过精确的抗震计算,能够在设计阶段准确评估桥梁的抗震能力,为合理的结构设计及抗震措施制定提供有力支撑。

### 2.3 合理选择抗震材料与结构体系

合理选择抗震材料与结构体系对提升桥梁抗震性能至关重要。在材料选择上,优先选用强度高、延性好、耐久性强的建筑材料,如高标号混凝土、高强度钢材等,以增强桥梁结构在地震作用下的承载能力与变形能力<sup>[5]</sup>。对于一些重要桥梁,可采用新型复合材料,如纤维增强复合材料,其具有轻质、高强、耐腐蚀等优点,能有效减轻桥梁自重,同时提高结构的抗震性能。在结构体系方面,应避免采用不利于抗震的静定结构,优先选用超静定结构,当结构某一部位遭受地震破坏时,其他部位仍能通过内力重分布维持整体稳定性。此外,注重结构布置的合理性,确保构件刚度分布均匀,避免出现薄弱环节。例如:在桥墩设计中,合理调整桥墩的截面尺寸与配筋,使各桥墩在地震作用下受力

均匀。通过合理选择抗震材料与结构体系,充分发挥桥梁结构的抗震潜力,降低地震破坏风险,保障桥梁在地震中的安全运营。

#### 2.4 全面考虑地震动输入方向

在桥梁抗震设计中,全面考量地震动输入方向是提升抗震能力的关键策略。

首先,要构建多维度地震动输入模型,借助先进的地震监测数据与模拟技术,精准捕捉地震动在水平、竖向以及扭转等多方向的特征参数,为设计提供全面且准确的基础数据。

其次,在结构设计阶段,运用精细化有限元分析软件,对桥梁结构在不同方向地震动组合作用下的力学行为进行深入模拟。针对大跨度桥梁,着重强化竖向承载与抗扭设计,合理增加竖向支撑构件,优化桥墩与支座的连接方式,提升结构竖向刚度与稳定性,有效抵御竖向地震动影响。对于各类桥梁,均需合理布置抗扭构件,例如在关键节点设置抗扭筋,增强结构的抗扭性能,均衡不同方向地震力作用下的受力情况<sup>[6]</sup>。

同时,在设计过程中充分考虑地震动的不确定性,进行多工况模拟分析,制定相应的设计冗余方案,确保桥梁在复杂地震环境下,能通过结构自身的合理设计,有效应对来自各个方向的地震动,切实提升整体抗震性能。

#### 2.5 引入减震与隔震技术

在众多提高桥梁抗震性能的技术措施中,采用减震隔震技术是一项十分重要的工作。减震技术是指在桥梁结构中合理地设置消能器,可以有效地耗散地震输入能量,减少结构的振动反应。目前常用的粘滞阻尼器等阻尼器是利用流体粘滞阻力将地震能转换成热能散去,在地震作用下,可以有效地降低桥梁的位移、加速度,减轻结构的震害。隔震技术是指利用橡胶隔震支座、摩擦摆隔震支座等特种隔震设备,实现对上部结构和下部结构的隔离<sup>[7]</sup>。这种隔震装置可以有效地延长结构自振周期,避开地震动的显著周期,有效地降低了地震作用向上部结构的传递。如橡胶隔震支座,由于其良好的弹性、耗能能力,可以有效地缓冲、吸收地震作用,从而减小地震对桥梁的影响。在实际应用中,需要根据桥梁的结构类型、尺度、地震环境等因素,合理地设计、选择合适的隔震装置,以及合理的布置方式和参数,才能保证减震和隔震技术发挥最大的作用<sup>[8]</sup>。同时,要建立健全的维修机制,定期检查和维修减震装置,确保其长时间处于良好状态。

科学引入减震隔震技术,可显著提高桥梁抗震安全性,有效降低结构损伤程度,提高震后可修复性,保证交通顺畅,降低地震灾害损失。

### 3 结束语

桥梁设计中的抗震能力不足问题严峻,主要体现在设计标准滞后、计算不精确、材料与结构选择不当、对地震动输入方向考虑欠缺以及减震隔震措施缺乏等方面。这些问题严重威胁桥梁在地震中的安全。而更新抗震设计标准、精确抗震计算、合理选用材料与结构体系、全面考量地震动输入方向以及引入减震隔震技术等对策,能有效提升桥梁抗震性能。通过实施这些技术对策,可从设计源头增强桥梁抗震能力,降低地震破坏风险,保障桥梁在地震灾害中的安全与稳定,维护交通生命线的畅通,为震后救援及社会经济恢复提供有力支撑。

#### 参考文献:

- [1] 杨璇,刘庆,唐站站,等.速度锁定器在斜拉桥抗震设计中应用研究[C]//中国力学学会结构工程专业委员会,广西大学,中国力学学会《工程力学》编委会,清华大学土木工程系,水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学).第31届全国结构工程学术会议论文集(第II册).扬州大学建筑科学与工程学院,浙江科技学院土木与建筑工程学院,2022.
- [2] 曾永平,陈克坚,庞林,等.近断层高速铁路典型桥梁抗震优化设计研究[J].铁道工程学报,2020,37(08):51-58.
- [3] 李腾.桥梁工程设计中的隔震设计分析[J].运输经理世界,2021(06):113-114.
- [4] 廖资大.桥梁设计中隔震设计技术的方法研究[J].黑龙江交通科技,2021,44(07):133-134.
- [5] 肖阳,张亮,张宿峰,等.大跨径桥梁抗震性能模拟因素的影响作用分析[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册).黑龙江省公路建设中心,吉黑高速山河(吉黑省界)至哈尔滨(永源镇)段工程建设项目办,2022.
- [6] 陈永祁,郑成成,马良喆,等.重庆桥梁结构抗震阻尼器的应用与发展[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2021年工业建筑学术交流会议论文集(下册).北京奇太振控科技发展有限公司;燕山大学建筑工程与力学学院,2021.
- [7] 颜晓伟.钢筋混凝土桥墩与圬工桥墩在轨道交通桥梁设计中对比分析[C]//江苏省综合交通运输学会公路分会.2019年泛长三角公路发展论坛论文集.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2019.
- [8] 袁慧玉,徐佳.桥梁立柱与盖梁节点的抗震设计方法研究[J].城市道桥与防洪,2024(12):104-108,17.

# 建筑工程供热通风与空调系统故障诊断及预防

蔡 辉<sup>1</sup>, 李位清<sup>2</sup>, 郑志远<sup>3</sup>, 李全年<sup>4</sup>

1. 山东旭正项目管理有限公司, 山东 枣庄 277100;
2. 山东秉信工程咨询管理有限公司, 山东 枣庄 277100;
3. 日照北方设备安装有限公司, 山东 日照 276800;
4. 日照高新环保科技有限公司, 山东 日照 276800)

**摘要** 供热通风与空调系统的稳定运行是保障建筑环境质量的关键因素之一。然而, 供热通风与空调系统故障时有发生, 不仅影响室内环境的舒适性, 还可能导致能源浪费和设备损坏。故障诊断与预防技术的应用, 能够通过实时监测和数据分析, 有效识别潜在问题并采取针对性措施, 从而避免故障的进一步扩大。通过建立科学的故障诊断体系和预防机制, 不仅可以延长设备使用寿命, 还能优化系统性能, 降低维护成本, 为建筑提供更加安全、高效的运行环境。随着智能化技术的发展, 故障诊断与预防将更加精准和高效, 进一步提升系统的可靠性和可持续性。本文对建筑工程供热通风与空调系统故障诊断与预防进行了详细探讨, 以期对相关从业人员提供有益参考。

**关键词** 建筑工程; 供热通风; 空调系统; 故障诊断与预防

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.041

## 0 引言

建筑工程供热通风与空调系统是现代建筑的重要组成部分, 其运行状态直接影响室内环境的舒适性和能源利用效率。随着建筑功能的复杂化和设备技术的不断升级, 系统故障的发生频率和影响范围也在增加。故障不仅会导致能源浪费, 还可能引发安全隐患, 甚至影响建筑功能的正常使用。因此, 深入研究供热通风与空调系统的故障诊断与预防方法, 对于提高系统可靠性、降低维护成本具有重要意义。

## 1 建筑工程供热通风与空调系统概述

建筑工程供热通风与空调系统是现代建筑中不可或缺的重要组成部分, 其功能是为建筑内部提供适宜的温湿度环境、良好的空气品质以及高效的能源利用。该系统主要由供热系统、通风系统和空调系统三大部分组成, 各子系统相互配合, 共同保障建筑环境的舒适性和功能性。供热系统通过热水或蒸汽等介质为建筑提供冬季供暖, 确保室内温度维持在舒适范围内; 通风系统则通过自然或机械方式实现室内外空气的交换, 改善室内空气质量; 空调系统则通过制冷、除湿、加湿等功能, 调节室内温湿度, 满足不同季节和场景下的环境需求。供热通风与空调系统的设计与运行需要综合考虑建筑的功能需求、气候条件、能源效率以及环保要求, 以确保系统的高效性和可持续性。随着

建筑技术的不断进步, 智能化、节能化已成为该系统发展的重要趋势, 通过引入智能控制技术和可再生能源, 能够进一步提升系统的运行效率和环境友好性。科学的故障诊断与预防机制显得尤为重要, 这不仅能够保障系统的稳定运行, 还能延长设备寿命, 降低维护成本, 为建筑提供更加安全、舒适的环境保障。

## 2 建筑工程供热通风与空调系统故障原因分析

### 2.1 责任主体对规范不熟悉

责任主体对供热通风与空调系统相关规范不熟悉, 是导致系统故障的重要原因之一。规范是系统设计、施工和运行的基础, 如果责任主体对规范理解不足或执行不到位, 可能导致系统设计不合理、设备选型错误或运行参数设置不当。施工人员可能未按照规范要求要求进行管道连接, 导致漏风或漏水; 运行管理人员可能不了解设备的操作规范, 导致设备过载或损坏。这些问题不仅会影响系统的正常运行, 还可能导致能源浪费、室内环境质量下降, 甚至引发安全隐患。此外, 责任主体对规范的不熟悉还可能增加后期维护和改造的难度, 导致系统使用寿命缩短, 增加建筑运营成本<sup>[1]</sup>。

### 2.2 设计图纸问题

设计图纸是供热通风与空调系统施工和运行的指导文件, 如果设计图纸存在问题, 将直接影响系统的性能和可靠性。设计图纸中的错误可能包括设备选型

不当、管道布局不合理、负荷计算不准确等。管道布局不合理可能导致气流分布不均，影响室内舒适性；负荷计算不准确则可能导致系统无法应对极端天气条件，造成能源浪费或设备损坏。这些问题不仅会降低系统的运行效率，还可能导致频繁的故障和维修，增加建筑运营成本。此外，设计图纸问题还可能影响施工进度，导致工期延误，甚至引发施工过程中的返工和整改，进一步增加项目成本。

### 2.3 施工不规范

施工不规范是供热通风与空调系统故障的常见原因之一。在施工过程中，如果未严格按照设计图纸和规范要求进行操作，可能导致系统性能下降甚至完全失效。例如：管道连接不严密会导致漏风或漏水，影响系统运行效果；设备安装不到位可能导致振动和噪声，影响室内环境质量；保温层施工不规范则可能导致能量损失，降低系统能效。这些问题不仅会影响系统的正常运行，还可能导致设备损坏，增加维修和更换成本。此外，施工不规范还可能引发安全隐患，影响系统的使用寿命，增加后期维护和改造的难度，导致建筑运营成本大幅上升。

## 3 建筑工程供热通风与空调系统故障诊断方法

### 3.1 基于规范检查

基于规范检查是供热通风与空调系统故障诊断的基础方法之一，其核心是通过对照相关规范和标准，对系统的设计、施工和运行进行全面审查，以发现潜在问题。设计阶段的规范检查包括审查设计图纸是否符合国家和行业标准，例如设备选型是否合理、管道布局是否科学、负荷计算是否准确等<sup>[2]</sup>。通过这一步骤，可以提前发现设计中的缺陷，避免因设计不当导致的系统故障。施工阶段的规范检查主要关注施工过程是否符合规范要求，例如管道连接是否严密、设备安装是否到位、保温层施工是否符合标准等。这一阶段的检查能够有效避免因施工质量问题导致的系统性能下降或安全隐患。运行阶段的规范检查包括审查系统运行参数是否符合设计要求，例如风量、温度、湿度等参数是否在合理范围内，设备运行状态是否正常等。通过基于规范检查，能够系统性地识别和解决供热通风与空调系统中的潜在问题，确保系统的设计、施工和运行均符合标准，从而提高系统的可靠性和效率，降低故障发生的概率。

### 3.2 外观检查

外观检查是供热通风与空调系统故障诊断的直观方法，通过对系统各部件的外观进行仔细观察，可以

发现许多明显的故障迹象。检查管道和风管的外观，查看是否存在裂缝、变形、锈蚀或泄漏等问题。这些问题可能导致系统漏风、漏水或能量损失，影响系统的正常运行。检查设备的安装情况，查看设备是否固定牢固、连接是否紧密、支撑结构是否稳定。设备安装不当可能导致振动、噪声或设备脱落，影响系统性能和安全性<sup>[3]</sup>。此外，检查保温层的完整性，查看保温材料是否完好无损、是否存在脱落或破损现象。保温层损坏会导致能量损失，降低系统能效。检查电气线路的外观，查看是否存在老化、破损或接触不良等问题。电气线路问题可能引发火灾或其他安全事故。

### 3.3 功能测试

功能测试是供热通风与空调系统故障诊断的关键方法，通过对系统的各项功能进行实际测试，能够全面评估系统的运行状态和性能。进行风量测试，测量各风口的风量是否达到设计要求，是否存在风量不足或分布不均的问题。风量不足可能导致室内环境质量下降，影响舒适性。进行温度测试，测量室内各区域的温度是否在合理范围内，是否存在温度过高或过低的现象。温度异常可能表明系统制冷或制热功能存在问题。进行湿度测试，测量室内湿度是否符合设计要求，是否存在湿度过高或过低的情况。湿度异常可能影响室内环境的舒适性和健康性。最后，进行设备运行测试，检查设备的启动、运行和停止是否正常，是否存在异常噪声、振动或过热现象。设备运行异常可能导致系统性能下降或设备损坏<sup>[4]</sup>。

## 4 建筑工程供热通风与空调系统故障预防措施

### 4.1 专业人员标准设计

专业人员标准设计是预防供热通风与空调系统故障的首要措施，其核心在于确保系统的设计过程由具备专业知识和经验的设计人员完成，并严格遵循相关规范和标准。设计人员需对建筑的功能需求、使用场景和地理环境进行全面分析，以确保系统设计能够满足实际需求。例如：对于高层建筑，设计人员需考虑风管的布局和设备选型，以确保系统能够高效运行；对于特殊功能建筑，如医院或实验室，设计人员需重点考虑空气洁净度和温湿度控制，以满足特定环境要求。设计人员需严格按照国家和行业标准进行设计，包括设备选型、管道布局、负荷计算等方面。管道布局需科学合理，确保气流分布均匀，避免局部过热或过冷现象。设计人员还需考虑系统的节能性和环保性，例如通过引入变频技术、热回收技术等，提高系统的能源利用效率<sup>[5]</sup>。

## 4.2 加强施工人员培训

加强施工人员培训是预防供热通风与空调系统故障的重要措施,其核心在于提高施工人员的专业技能和规范意识,确保施工过程严格按照设计图纸和规范要求进行。施工人员需接受系统的专业培训,包括设备安装、管道连接、保温施工等方面的知识和技能。管道连接需严密无泄漏,避免因漏风或漏水导致的系统性能下降。施工人员需熟悉相关规范和标准,确保施工过程符合国家和行业要求。电气线路的安装需符合安全标准,避免因线路老化或接触不良引发的安全事故。施工人员还需具备一定的故障排查和应急处理能力,能够在施工过程中及时发现并解决潜在问题,避免问题进一步扩大。通过加强施工人员培训,能够有效提高施工质量,减少因施工不规范导致的系统故障,确保系统的高效运行和长期稳定性。

## 4.3 按技术要求调试

按技术要求调试是预防供热通风与空调系统故障的关键措施,其核心在于在系统投入使用前,严格按照技术要求进行全面的调试和测试,以确保系统能够正常运行并达到设计要求。调试人员需对系统的各项功能进行逐一测试,包括风量、温度、湿度、压力等参数。通过温度测试,确保室内各区域的温度在合理范围内,避免温度过高或过低现象。调试人员需对设备的运行状态进行全面检查,包括设备的启动、运行和停止是否正常,是否存在异常噪声、振动或过热现象。调试人员还需对系统的节能性和环保性进行评估,例如通过能耗测试,确保系统的能源利用效率达到设计要求,避免能源浪费。通过按技术要求调试,能够全面评估系统的运行状态,及时发现并解决潜在问题,确保系统的高效运行和长期稳定性,为建筑的舒适性和安全性提供保障<sup>[6]</sup>。

## 4.4 定期维护与保养

定期维护与保养是预防供热通风与空调系统故障的重要措施,其核心在于通过系统性的检查和维护,及时发现并解决潜在问题,确保系统的长期稳定运行。制定科学合理的维护计划,包括设备清洁、部件更换、润滑保养等内容。例如:定期清洁风管和过滤器,避免灰尘和杂质积累导致的气流不畅或设备过载;定期更换磨损的部件,如皮带、轴承等,避免因部件老化导致的设备故障。对系统的关键部件进行重点检查,例如检查压缩机的运行状态、冷凝器的散热效果、电气线路的连接情况等,确保这些关键部件的正常运行。定期对系统的运行参数进行监测和记录,例如风量、温度、湿度、压力等,通过数据分析发现潜在问题并

采取针对性措施<sup>[7]</sup>。通过定期维护与保养,能够有效延长设备的使用寿命,减少故障发生的概率,降低维修成本,同时提高系统的运行效率和能源利用效率,为建筑提供更加安全、舒适的环境保障。

## 4.5 引入智能化监控系统

引入智能化监控系统是预防供热通风与空调系统故障的先进措施,其核心在于通过实时监测和数据分析,及时发现并解决潜在问题,提高系统的运行效率和可靠性。智能化监控系统能够对系统的运行状态进行实时监测,例如风量、温度、湿度、压力等参数,并通过数据分析发现异常情况。智能化监控系统能够对设备的运行状态进行监测,例如设备的振动、噪声、温度等,通过数据分析预测设备的故障风险,并提前采取预防措施。智能化监控系统还能够优化系统的运行模式,例如通过数据分析调整设备的运行参数,提高系统的能源利用效率,降低运行成本。通过引入智能化监控系统,能够实现供热通风与空调系统的精细化管理和预防性维护,减少故障发生的概率,提高系统的运行效率和可靠性,为建筑提供更加安全、舒适的环境保障。

## 5 结束语

供热通风与空调系统的故障诊断与预防是保障建筑功能正常运行的重要环节。通过科学的方法和先进的技术,能够及时发现并解决系统运行中的问题,从而提高系统的可靠性和效率。未来,随着智能化技术的不断发展,故障诊断与预防将更加精准和高效,为建筑环境的安全与舒适提供更加坚实的保障。

## 参考文献:

- [1] 陶磊. 现代建筑工程中供热通风与空调安装技术研究[J]. 建设科技, 2024(13):46-48.
- [2] 卢传强. 浅论现代建筑工程中的供热通风与空调安装技术[J]. 中国住宅设施, 2024(04):130-132.
- [3] 郑斌斌. 探究供热通风与空调工程的施工技术要点与节能控制措施[J]. 中国高新科技, 2024(01):158-160.
- [4] 张峰. 建筑供热通风与空调工程施工要点分析[J]. 石材, 2023(07):54-56.
- [5] 王璐晗. 传感器对建筑空调系统性能影响及故障诊断研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
- [6] 张璐, 孙长富, 邹道忠, 等. 建筑中央空调系统运行故障诊断及节能影响[J]. 资源节约与环保, 2022(08):29-30,36.
- [7] 张善兴. 变频空调系统热力故障的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.

# 非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度探讨

晏 权

(广东省地质局清远地质调查中心, 广东 清远 511500)

**摘 要** 非饱和花岗岩残积土的剪切特性直接影响边坡稳定性、地基承载力等工程问题。本文通过室内试验, 探讨不同含水率和围压条件下原状与重塑花岗岩残积土的剪切特性及抗剪强度变化规律, 以期为非饱和花岗岩残积土的工程应用提供理论依据, 从而提高边坡稳定分析的准确性, 为地基处理优化奠定坚实的基础。试验结果表明, 原状土黏聚力随含水率升高衰减达 86%, 且剪切破坏模式由剪切带向鼓胀破坏转变, 验证了 VG 模型对土水特征曲线的适用性。

**关键词** 非饱和花岗岩; 残积土; 剪切特性; 抗剪强度

**中图分类号:** TU4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.042

## 0 引言

花岗岩残积土是由长时间风化作用形成的一种特殊土体, 由于其形成过程复杂, 结构松散, 且受含水率影响显著, 在降雨、地下水渗流等环境因素作用下易发生边坡失稳、地基沉降等工程问题。因此, 研究其剪切特性及抗剪强度演化规律, 对于预测滑坡风险、优化地基设计及提高土体工程稳定性具有重要意义。

## 1 试验方案设计

### 1.1 现场取样

本研究的试验土样选自某处正在进行削坡施工的边坡, 采样深度控制在 8~12 m 范围内。为保证样品的代表性, 取样过程中采用机械开挖与人工挑选相结合的方式, 对边坡剖面进行精细处理, 以尽量减少土体扰动<sup>[1]</sup>。将原状土样切割成长约 30 cm 的立方体, 并用保鲜膜和泡沫塑料紧密包裹, 以最大限度地减少水分散失, 同时防止结构破坏。此外, 在采样点周围收集大量扰动土, 以便进行后续物理力学性质的补充试验<sup>[2]</sup>。

为了明确试验土样的特性, 根据《土工试验方法标准》进行物理指标测试。然后采用筛分法和激光粒度分析, 对颗粒级配进行测定。结果显示, 粒径小于 0.075 mm 的细颗粒约占 50.79%, 不均匀系数 (Cu) 73.53, 曲率系数 (Cc) 0.14, 低于 1。根据这些特征, 可判断该土体属于颗粒分布较为离散的细粒土。利用 X 射线衍射分析测试土体的矿物成分。结果表明, 该土的主要矿物成分以石英 (26%) 和高岭石 (40%) 为主, 表明该土样表现出较高的风化程度, 其中的长石和云母长期

受水解、氧化影响, 逐渐发生转化, 最终形成高岭石等次生矿物。通过化学成分分析可知, 该土样的主要构成包括  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

### 1.2 试样制备

为确保试验过程中土样的可比性, 本研究分别制备原状土样和重塑土样, 以用于不同测试条件下的力学性质分析。

原状土的制备首先从采集的块状土样中选取尺寸略大于目标试样的部分, 避免在加工过程中因土体损耗导致尺寸不足<sup>[3]</sup>。选定土块后, 将其放置在切土盘上, 使用钢丝锯进行精细切割。切割过程中, 缓慢转动土块, 逐步削去多余部分, 以确保最终试样尺寸均匀, 且避免因应力集中导致裂纹产生<sup>[4]</sup>。为满足三轴试验的要求, 最终试样被削割成直径 39.1 mm、高 80 mm 的标准圆柱形试样。

重塑土的制备流程如下: 首先将扰动土样充分碾碎, 使其解体成较小颗粒, 然后通过 2 mm 筛网筛分, 以剔除较大颗粒, 确保颗粒级配均匀<sup>[5]</sup>。然后结合原状土的干密度、含水率, 对于土质量和加水量进行计算。按照计算比例加入适量水分后, 充分搅拌, 使土样均匀湿润。搅拌后的土样用保鲜膜包裹, 静置 24 小时, 确保水分在土体内部充分扩散, 达到均衡分布状态。待土样水分均匀后, 使用液压机进行压制成型, 最终得到符合试验要求的水重塑土试样。整个制备过程中需严格控制土样的含水率和压实度, 尽量减少实验误差。

### 1.3 试验方法

本研究采用 USTX-2000 非饱和土动三轴试验系统,

对土样开展剪切试验,以探讨含水率对花岗岩残积土抗剪特性的影响。试验过程中分别对五种含水率条件(13.00%、16.00%、19.00%、23.00%和27.05%)的土样进行测试,并在不同围压条件下评估其抗剪强度及变形特性。

1. 试样处理与含水率控制。试验前,为保证不同含水率试样的制备精度,使其状态尽可能一致,所有试样均需经过真空饱和处理。具体方法是将制备好的试样置于真空饱和缸中进行抽真空,使试样尽可能排除内部气体,提高饱和度。完成饱和处理后,根据得出的干密度对含水率进行计算,并优化控制。如果含水率过高,可采用自然风干的方式进行处理,直至达到目标含水率。随后,用保鲜膜包裹处理后的试样,并放入保湿缸中 24 h,减少试验误差。

2. 试验加载与控制参数。根据试样的埋深条件,三轴试验的固结围压分别设定为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa,以模拟不同围压环境下的土体力学响应。固结过程的判定标准是 10 min 内的试样体积改变在  $5 \text{ mm}^3$  以下。剪切试验可应用应变控制方式进行加载,加载速率设定为  $0.08 \text{ mm/min}$ ,以保持土体的变形速率稳定。试验终止条件为轴向应变达到 20%,此时记录试样的抗剪强度及变形情况。

3. 试验设备安装与操作。为确保试验顺利进行,试样安装前需对围压系统及反压管道中的气泡进行排除,防止气体残留影响试验结果。所有传感器在试验前需进行零点校准,以减少测试误差。试样安装过程中,依次完成试样放置、加载杆连接、压力室罩安装等步骤,并检查各连接部位的密封性,防止试验过程中因泄漏导致含水率变化。在固结过程中,为防止试样含水量发生非预期变化,反压设定为 0,使试样在固结期间保持稳定的含水状态。待固结完成后,在剪切开始前,关闭反压阀门,确保测试过程中试样含水率不受额外影响。

## 2 试验结果分析

### 2.1 原状土剪切变形特性

在不同围压条件下,对原状花岗岩残积土试样进行剪切加载后,其破坏形态随含水率和围压的变化表现出一定规律性。

试验结果表明,除含水率较低(13.00%)且围压较小(100 kPa)的试样出现明显剪切带外,其余试样均表现为鼓胀破坏特征,即试样中部膨胀、两端收缩,且破坏面较多。变形模式的产生主要与花岗岩残积土的结构特性密切相关。由于其强度主要依赖游离氧化铁的胶结作用及母岩的残余结构,其整体结构性较一般黏性土弱,因此在受力过程中容易发生形态变化。

在低含水率和低围压条件下,颗粒间仍存在一定的胶结作用,使得土体初始结构具有较高的抗剪能力。在加载初期,土颗粒之间的联系较为紧密,但随着偏应力持续增加,颗粒联结逐渐削弱,并最终形成局部的软弱带,进而演化为明显的剪切带。而当含水率和围压增大时,土颗粒之间的胶结作用进一步降低,颗粒更容易发生重新排列,导致土体整体以压密变形为主,破坏形式趋向于鼓胀模式,且破坏面增多,呈现较为分散的破坏特征。由此表明,在较高含水率和围压条件下,花岗岩残积土的变形机理更倾向于塑性变形,而非脆性破坏。

### 2.2 重塑土剪切变形特性

由于重塑花岗岩残积土在制样过程中经历碾散、筛分及重新压制,其颗粒间的天然胶结作用几乎完全丧失,导致其内部结构特性显著弱化。因此,在相同围压和含水率条件下,重塑土的抗剪强度明显低于原状土。在剪切变形过程中,重塑土的颗粒主要依靠相互摩擦承受外部荷载,而非依赖颗粒间的胶结力,因此应力—应变曲线普遍呈现硬化型特征,具体如图 1 所示。

在剪切过程中,重塑土的孔隙水压随变形的发展呈现出不同的趋势。在围压较低(100 kPa)时,只有含水率 19.00% 的试样未发生明显波动,其他试验的水压从呈现先升后降的趋势,含水率 13.00% 的试样后期时又出现负水压大情况可见,试验出现了先缩后胀的情况。而在围压较高的条件下,高含水率(23.00% 及 27.05%)的试样表现出先上升后下降的孔隙水压力变化趋势,并在 10% 左右的应变阶段后出现剪胀现象。而对于其他试样,尤其是围压为 300 kPa 的低含水率试样,孔隙水压力则持续上升,表现为剪缩趋势。

### 2.3 抗剪强度指标

花岗岩残积土的抗剪强度指标可根据摩尔—库仑强度准则计算,包括总抗剪强度指标和有效抗剪强度指标。不同含水率条件下,原状土与重塑土的抗剪强度随水分变化呈现出一定规律。在相同含水率条件下,原状土的抗剪强度明显高于重塑土,表明原状土因母岩残余结构和胶结作用的影响,使其整体强度保持较高水平。随着含水率提升,原状土、重塑土的黏聚力均呈现显著下降的趋势,且减小幅度较大。尤其是在含水率上升到饱和状态的过程中,原状土的黏聚力减少约 86%,而重塑土下降 91%。但内摩擦角整体波动不大,并未出现明显降低。表明在高含水率条件下,土体强度的衰减主要归因于颗粒胶结作用的减弱,而颗粒间的摩擦力则相对稳定,对土体整体抗剪能力的贡献变化不大。

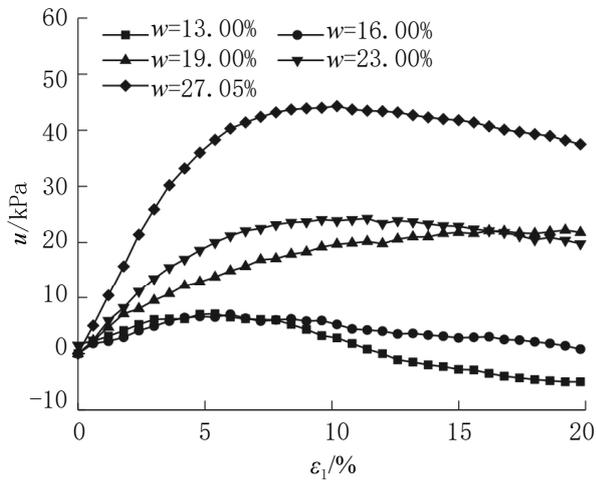
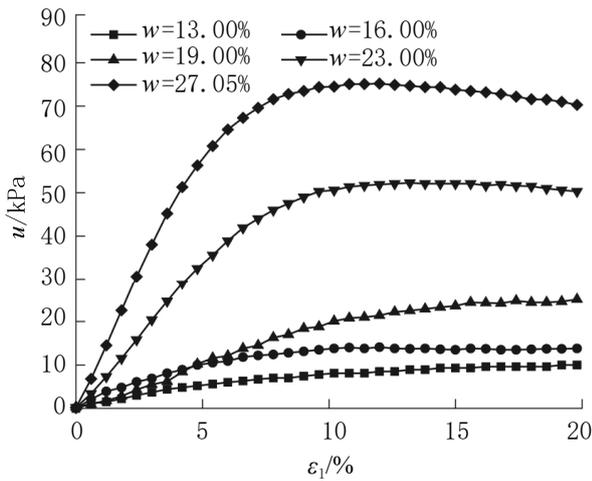
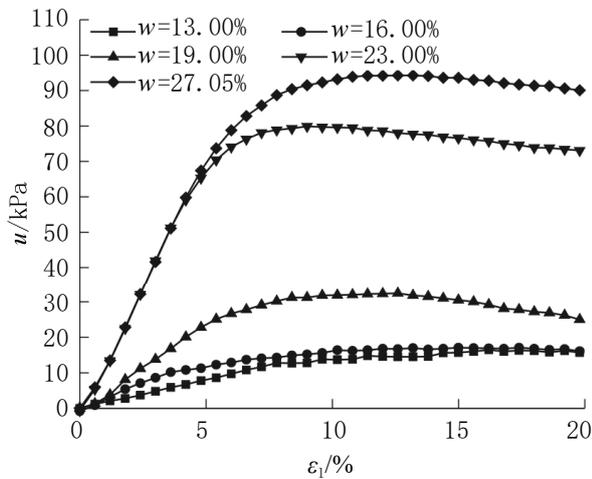
(a)  $\sigma_3=100$  kPa(b)  $\sigma_3=200$  kPa(c)  $\sigma_3=300$  kPa

图1 试样的孔隙水压与应变关系

## 2.4 非饱和抗剪强度

土水特征曲线的测试采用压力板仪进行测定,并结合VG模型进行数据拟合,以获取不同含水率下土体对应的基质吸力。

结果表明,基质吸力对土体内摩擦角的影响较小,而对黏聚力的影响较为显著。随着基质吸力增加,土体颗粒之间的联结作用增强,使得黏聚力呈上升趋势。然而,这种增长并非线性,而是随着基质吸力的提升逐渐趋缓,表明当吸力达到一定程度后,其对土体强度的提升作用有限。由此说明,在低含水率条件下,基质吸力是维持土体稳定性的重要因素,但当土体接近饱和状态时,基质吸力的贡献显著减弱,导致抗剪强度下降。

## 3 结论

研究表明,花岗岩残积土的应力—应变特性会随着含水率提升及围压增加而变化,表现出明显的硬化特征。然而,两者在低围压和低含水率条件下的表现有所不同,原状土在此情况下呈现出一定的软化趋势,而重塑土由于强度比原状土低,始终较为硬化。在应力路径的变化趋势方面,两类土体中基本保持一致,在较低围压下,均经历了剪缩后剪胀的情况,而当含水率趋于饱和状态时,孔隙水压力也会逐步增加,使得有效应力与总应力之间的路径出现越发偏离的情况,进而影响到土体的抗剪特性。在土水特征方面,VG模型的应用可以很好地描述土样的特征曲线,结果显示,原状土的残余吸力相较于重塑土更高,脱湿时会使得原状土有更广阔的过渡范围,说明其结构更稳定,含水率的变化过程较为缓慢。在高饱和度阶段,基质吸力对两种土样的影响较小,直到进气值达到一定水平后,含水率才迅速下降,并最终趋于稳定,表现为残余状态。

## 参考文献:

- [1] 尚召伟,孔令伟,鄢俊彪,等.非饱和花岗岩残积土的小应变剪切模量特性与其持水特征曲线确定方法[J].岩土力学,2025(04):1-10.
- [2] 马勤国,郭皓公,罗晓晓.非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(11):55-68.
- [3] 胡华,吴毅峰.渗流条件下花岗岩残积土渗流-剪切变形试验研究[J].福建建材,2024(09):1-4.
- [4] 钟祎琦.花岗岩残积土渗流侵蚀及其对土体稳定性的影响研究[D].武汉:华中农业大学,2024.
- [5] 林学东.MICP技术改良花岗岩残积土非饱和强度及渗透特性试验研究[D].南昌:南昌大学,2024.