

# 科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 6 月 第 17 期 (总第 642 期)

主管：云南省科学技术协会

主办：云南奥秘画报社有限公司

编辑委员会：(按姓氏笔画为序)

马成勋 卢 骏 刘 杨 李 鹏

杨 璐 张 乐 陈贵楚 陈 洋

莫德姣 夏文龙 韩梦泽 蔡 鹏

总编：万江心

编辑部主任：张琳玲

编辑：周 罍 官慧琪

出版：云南奥秘画报社有限公司

地址：云南省昆明市护国路 26 号

邮编：650021

编辑部电话：0871-64113353 64102865

电子邮箱：khgsblzz@163.com

网址：http://www.khbl.net

国际标准连续出版物号：ISSN 2097-3365

国内统一连续出版物号：CN 53-1103/N

印刷单位：云南金伦云印实业股份有限公司

发行单位：中国邮政集团有限公司云南省分公司

邮发代号：64-72

出版日期：2026 年 6 月 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

# 目录 Contents

## 科技博览

- 001 基于 STM32 控制的移动式机械臂设计与应用  
..... 李勇澎, 黄再辉, 陈嘉源, 刘梓豪
- 004 智能制造技术在机械设计领域中的创新应用  
..... 王 丰
- 007 三段式电流保护在煤矿供电系统中的应用效能研究  
..... 李星辰
- 010 矿用气体传感器信号处理专用集成电路抗干扰技术研究  
..... 师 帅, 刘小菲
- 013 基于 SCADA 数据的风电机组故障诊断与预测性维护技术研究  
..... 刘 卓

## 智能科技

- 016 智能电力系统在现代建筑中的应用  
..... 任芳芳, 王 超, 刘俊麟, 刘守洋
- 019 智能化技术在市政工程管理中的应用研究  
..... 黄希刚
- 022 智能化矿山建设中机电技术的发展趋势分析  
..... 郭 超
- 025 磁传感技术在工控视觉定位系统中的应用研究  
..... 谢 明
- 028 多源遥感数据融合在地形测绘中的关键技术应用  
..... 吕维汉, 赵钧儒
- 031 基于 BIM 的公共建筑多专业协同施工管理优化研究  
..... 董树娟, 季永军
- 034 基于三维激光扫描技术在建筑工程测量中的应用研究  
..... 孙 锋, 韩保轩

## 应用技术

- 037 水利水电工程大坝填筑施工技术和方法  
..... 唐万里
- 040 水利水电工程施工质量控制关键技术研究  
..... 刘 慧

# 目录 Contents

043	灌区工程标准化建设与长效管护机制研究	施凌鹏, 高帆
046	大型灌区渠道防渗工程技术选型与效果分析	李虹钢, 武瑾
049	模板施工技术在水利工程建设中的应用研究	丁文聪
052	水利水电工程中的混凝土裂缝防治技术分析	元霖
055	水利工程压力钢管现场安装焊接质量控制技术	杜德平
058	水利工程施工技术标准执行与操作规程优化研究	朱佳栋

## 科创产业

061	基于新能源消纳的电网调度优化研究	刘永杰
064	高分子材料检测技术在轮胎工业中的应用	李丰瀚
067	仪器仪表数字化转型与智能制造融合应用	尹召杰
070	全过程造价管理在建筑工程中的应用研究	张丽
073	基于全生命周期的工程造价成本控制路径探析	王波
076	建筑施工全过程环保监测与数字化管控融合研究	范存存, 魏文龙, 张超
079	高比例分布式能源接入下的零碳产业园微电网稳定控制与市场化交易机制研究	李胜

## 技术管理

082	化工设备安装中焊接质量控制探究	任贵祯
085	建筑工程管理的现存问题和优化策略	罗祺
088	土木工程施工管理中存在的问题及对策分析	武汇棕
091	水利工程施工安全生产信息化管理体系构建	俞密密
094	建筑工程施工现场安全管理体系构建与实践研究	宋相永, 迟炜海, 任帅德
097	城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控研究	仇大伟, 梁浩, 张磊
100	建筑工程检测鉴定的常见问题及质量管控对策研究	刘浩然

## 科学论坛

103	注塑模具设计中的创新技术与优化策略	方贤能
106	装配式建筑电气工程施工技术与应用研究	秦治福
109	复合地质 FRP 锚杆改性及瓦斯封堵施工工艺	乔江
112	桥梁工程中橡胶支座的影响因素及检测方法	蒲春江
115	建筑工程电力系统节能改造与施工技术研究	史德凯, 周金星, 王晓龙
118	大型复杂钢结构施工过程变形控制与矫正技术	马可
121	市政给排水管网非开挖修复技术选型与设计优化研究	王龙
124	海油工程陆地导管架及组块高空作业脚手架防护措施实践分析	黄锦辉, 梁斌, 张清华

# 基于 STM32 控制的移动式机械臂设计与应用

李勇澎, 黄再辉\*, 陈嘉源, 刘梓豪

(桂林电子科技大学海洋工程学院, 广西 北海 536000)

**摘要** 本文采用机械结构与控制算法相结合的设计思路, 构建由六轴机械臂与麦轮悬挂底盘组成的整体机械结构, 实现可移动作业模式。控制系统以 STM32 为核心控制器, 引入增量式 PID 控制算法, 搭配编码器实现主从同构控制, 实现对机械臂的智能闭环控制。在自定义控制器与增量式 PID 算法的协同作用下, 机械臂在移动作业和执行具体操作任务的过程中, 能够实时精准控制, 完成预期效果。样机测试表明, 该可移动自适应六自由度机械臂控制响应迅速、姿态稳定性好, 具备良好的控制性能和实用价值。

**关键词** 增量式 PID 控制算法; 可移动机械臂; 自定义控制器; STM32; 六自由度

**基金项目:** 大学生创新创业训练计划项目“基于 STM32 控制的移动式机械臂设计与应用”(S2510595297)。

**中图分类号:** TP29

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.001

## 0 引言

随着全球工业化浪潮的加速推进, 移动机器人在越来越多的领域发挥着至关重要的作用。机器人的智能化迫在眉睫, 传统的固定式机械臂受限于活动空间、灵活性不足等多项因素, 已经无法满足工业的需求<sup>[1]</sup>。而移动式机械臂机器人恰好能够在传统机械臂发展过渡的期间发挥至关重要的作用。本项目旨在研发出一款能够进行灵活移动的多轴机械臂机器人, 因此机械结构设计是本项目的一个重要内容, 其结果直接决定着机器人的工作性能。在此基础上再通过智能控制算法, 赋予机械臂能够跨空间移动的能力以实现工作场地的局限性<sup>[2]</sup>。

## 1 移动式机械臂基本组成

本设计机械结构由六轴机械臂与麦轮悬挂底盘组成, 控制方面由以 STM32 为核心的自定义控制器控制。机械臂的机械构造由末端执行器、腕关节、“前置”肘关节、小臂、大臂、基座组成, 麦轮悬挂底盘由铝方管骨架、避震器、麦克纳姆轮组成, 机械臂核心驱动模块由自定义控制器 (STM32 单片机) 来控制, 采用主从同构的设计方案, 自定义控制器共包含六个自由度, 分别对应机械臂上的六个自由度。

## 2 移动式机械臂结构设计

根据现实工作情况及现有条件, 本文设计可移动式机械臂的整车结构如图 1 所示, 六自由度的机械臂结构如图 2 所示。

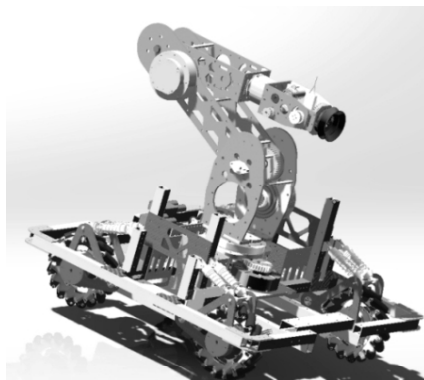


图 1 可移动式机械臂总装配图

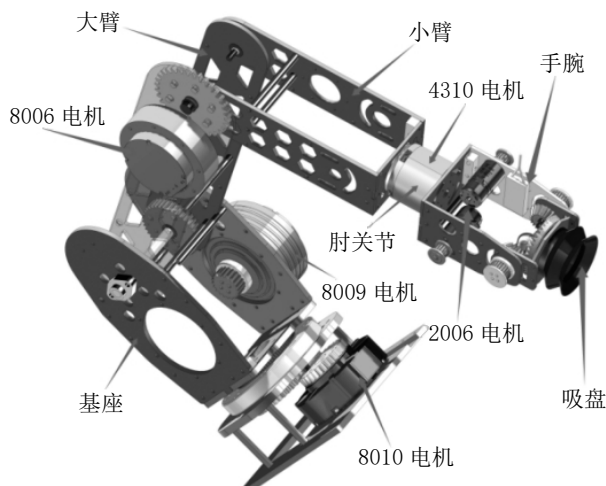


图 2 机械臂结构图

**作者简介:** 李勇澎 (2004-), 男, 本科, 研究方向: 机械结构设计。

**\*通信作者:** 黄再辉 (1989-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 机械设计。E-mail: 408309690@qq.com

## 2.1 各机械模块设计方案

本文设计的机械臂末端执行器采取吸盘负责目标物体的抓取或吸附。吸盘规格采用HB50型风琴式橡胶吸盘,该型号吸盘为标准工业级真空吸附组件,可以满足吸取大部分平滑物品的需要。机械臂腕关节提供pitch轴、roll轴两自由度姿态调整。选用DJI2006电机反对称布置,安装压缩整体结构的体积。通过控制两侧DJI2006电机转速的不同,从而使手腕获得P轴和R轴两个自由度,可以实现吸盘的两个自由度联动,将极大地提高吸盘的空间运动能力。由于机械臂连接腕关节与小臂关节的刚性结构正常放于大臂与小臂之间,电机负载过大易损坏,故本文选择将肘关节前置。该关节选用达妙4310电机,电机的输出性能可完全支撑该关节的转动。

小臂结构主要实现屈伸运动。该关节选用8006电机,在正常情况下可实现稳定旋转,但突发断电时,驱动系统失力会导致其因自重快速下垂,与限位装置发生刚性碰撞。针对此问题,本文设计齿轮传动机构,将电机与关节隔离,增加的减速比既能实现减速增扭,提升负载驱动能力,减少电机功率损耗与发热,同时齿轮啮合的弹性形变和传动间隙也可缓冲冲击,弱化对电机的载荷,有效保护了驱动部件,能显著延长电机使用寿命。

大臂结构主要实现支撑机械臂主体运动并传递力矩。该关节选用达妙8009电机,设计理念与小臂相同,但是因其力臂受冲击力时间更长,受力更大,故传动方式选用的是皮带传动,较齿轮传动拥有更好的缓冲效果,可以更好地保护电机。

基座固定机械臂并衔接麦轮底盘的关节,采用宇树8010电机,在实际使用中,机械臂虽然可以正常旋转,但电机发热较快,长期运行会影响整体性能和使用寿命。为此,本设计改用齿轮传动结构,通过设计合适的减速比实现减速增扭,以此降低电机驱动负载和能耗,缓解发热问题,减少高温带来的热应力,从而延长各部件的使用寿命。

## 2.2 四驱独立悬挂麦轮底盘设计

移动机构采用四驱独立悬挂麦轮底盘。该底盘不依赖车轮转向机构,仅通过对四个麦轮的转速和转向进行动态调节,就能实现平面内的全向运动。该控制方式基于差速原理,通过对四个麦轮的运动参数进行统一解算与分配,让底盘摆脱了传统轮系的运动限制,在无转向结构的前提下实现复杂轨迹的精确跟踪,为

移动式机械臂的灵活作业提供了可靠保障。

本文设计的四驱独立悬挂麦轮底盘如图3所示。底盘采用四驱独立悬挂结构,悬挂系统主要由轮组、避震器、底盘主体结构及转轴组件组成。轮组通过避震器与底盘结构刚性连接,同时依靠转轴组件实现绕指定轴线的转动,使每个轮组形成独立的悬挂单元。该独立悬挂结构可让各轮组随地面起伏自主调整姿态,有效提高了底盘在复杂地形下的通过与适应能力。

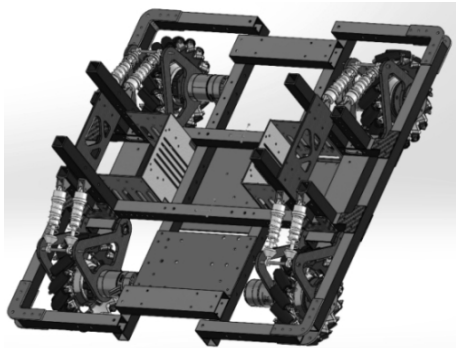


图3 麦轮底盘

在轮组与3508驱动电机的连接形式上,麦轮的驱动装配采用外嵌式连接。

## 2.3 自定义控制器机械结构设计

本文设计的自定义控制器机械机构采用主从同构的形式,如图4所示。

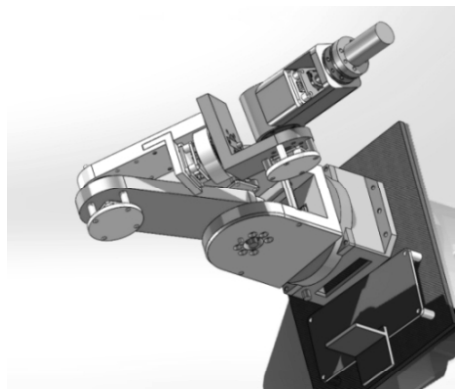


图4 自定义控制器样机图

本文自定义控制器的关节设计与机械臂保持完全一致的运动学特性<sup>[3]</sup>,可确保两者运动映射的精准性与直观性,实现控制精度与操作体验的最优平衡,为高效主从协同提供了关键支撑<sup>[4]</sup>。

## 3 算法控制设计

### 3.1 基于前馈补偿的PID控制算法

本文使用结合前馈控制与反馈控制的改进型控制方法<sup>[5]</sup>,通过传统PID控制中引入前馈补偿通道,

提前对系统的已知扰动或输入信号进行补偿,从而增强控制系统的响应速度与抗扰能力。

### 3.2 自定义控制器硬件设计

本文选用自定义控制器,选取 STM32F4VET6 作为核心芯片,包含一个 RS232 接口、TYPE-C 通信供电和测试时观测电路情况的 LED,6 个 ADC 采集接口,OLED 显示相关参数,便于调整数据,相较于 H7,此主控更为简便,为自定义控制器节省空间、方便操作。

本设计角度传感器集成方案采用传感器选型关节角度反馈,即增量式编码器(AS5048A,SP 接口,12 位分辨率),用于实时检测关节旋转角度。电位器采用低成本场景,即线性精度  $\pm 1\%$ ,通过 ADC 采集电压信号。底盘姿态反馈为 IMU(MPU6050),即检测底盘倾斜角与运动加速度,辅助动态平衡控制。

本设计角度 STM32 外设分配采用的编码器接口使用 TIM 模块的编码器模式,直接读取增量式编码器脉冲。ADC 通道配置多路 ADC 采集电位器电压。SPI 通信连接高精度绝对编码器(AS5048A)。信号调理电路的电位器信号需添加 RC 滤波电路,减少噪声干扰。 $\Pi$  性滤波电路中主控部分的 VDDA 模拟输入引脚采用的  $\Pi$  性滤波电机输入到 VDDA,此电路的输出端接到 VREF+ 引脚给参考,利于提高 ADC 的采集精度。

USART 通信中宇树电机采用的是 RS485 来进行通信,通过 RS485 芯片将 TTL 信号转换成 RS485 可用的信号。在遥控器对底盘的控制还使用了 DMA 的乒乓 Buff 来对遥控器传输的大量的数据的处理,以加快数据传输的准确性和底盘响应的稳定。

本设计控制算法中,通过编码器反馈关节实际角度,与目标速度对比,采用 PID 算法动态调整。底盘—机械臂协同控制是通过 IMU 数据实时调整底盘姿态,确保机械臂运动时底盘稳定。结合编码器与引 IMU 数据,实现全向移动+机械臂运动解耦。关节限位保护采用实时监测关节角度,超限时触发急停。自动校准采用上电时执行零点校准,机械臂回归初始姿态,编码器清零。动态轨迹规划使用基于角度反馈实时修正轨迹插补(S 曲线优化),减少末端抖动。卡尔曼滤波是在对电机进行 ADC 到电机之间的参数映射的时候,由于采用的模块 ADC 可能会产生一系列不稳定现象导致 ADC 采集得到的数据不稳定和抖动,采用卡尔曼滤波将会产生的不确定的结果,经过分析、推理和计算,得到相对稳定的 ADC 采集值。在电机刚上电时,由于每次机械臂变换导致电机的零位不同从而引发电机的零位

校准,使电机输出较大的电流回归零位,采用软启动减弱电机回归零位的力从而达到保护电机和防止电机伤人的情况。

### 4 功能测试

根据设计,完成实物样机的搭建,对样机进行 3 次测试,并完成改进。首先是抬升电机负载测试。测试发现电机堵转严重,经过改进优化后增加重力补偿。其次是进行底盘运动 PID 控制及四轮协同、验证机械臂关节电机的运动响应测试。测试结果表明,底盘运动灵敏,机械臂可以实现预期功能,表现优秀。最后是自定义控制器与机械臂的响应速度测试。测试结果反映自定义控制器可以实现主从同构,但是响应速度略微有点延迟,后续可以将霍尔传感器换为单圈绝对值编码器。

### 5 结束语

本文设计的可移动式机械臂,采用六轴机械臂与麦克纳姆轮悬挂底盘相结合的结构形式,构建了兼具移动能力与操作灵活性的作业平台。控制系统以增量式 PID 控制算法为核心,结合编码器实时反馈信号实现主从同构控制,形成了对机械臂各关节的智能闭环控制体系,有效提升了控制精度与响应速度。通过样机实测验证,该可移动式机械臂在移动作业与具体任务执行过程中,能够实现实时精准控制,不仅控制响应迅速、姿态稳定性优良,且各项性能指标均达到预期设计要求。该设计方案为未来机械臂的可移动化、智能化发展提供了新的思路与切实可行的技术参考,具有一定的工程应用价值与推广前景。

### 参考文献:

- [1] 王韩.全向移动底盘的自主导航技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [2] 周大鹏.一种液压机械臂的主从交互控制系统研究[D].济南:山东建筑大学,2021.
- [3] 黄焯东,吴晨曦.基于改进 PID 的机器人机械臂控制器设计[J].机械设计与制造工程,2023(07):45-50.
- [4] 刘义杰,王艳梅.基于 STM32 的三维机械手臂控制器设计[J].装备制造技术,2021(08):36-38.
- [5] 赵燕莲.基于模糊 PID 的多自由度机械臂自动控制研究[J].今日制造与升级,2024(02):6-8,41.

# 智能制造技术在机械设计领域中的创新应用

王 丰

(中国电子科技集团公司网络通信研究院, 河北 石家庄 050081)

**摘 要** 本文重点探索智能制造技术在机械设计中的创新应用。首先阐述相关定义; 其次分析智能制造技术在机械设计中的应用价值; 最后以实际案例分析智能制造技术在机械设计领域中的应用策略。本文旨在利用智能制造技术缩短重大机械装备研发设计周期、降低设计成本, 推动机械设计朝向数据驱动、人机协作的新形态转变, 同时提升设计经济效益, 更好地满足消费者的购买需求, 为推动机械设计领域的革新与发展提供借鉴。

**关键词** 智能制造技术; 机械设计; 智能仿真; 数字孪生技术; 协同设计

**中图分类号:** TH122; TP2

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.002

## 0 引言

随着我国科学技术的不断发展, 以人工智能、物联网、大数据等技术为代表的信息技术广泛应用于各个领域, 尤其是机械设计领域, 实现了我国机械设计工作的智能化和数字化转型。在此背景下, 传统的机械设计方法已经难以满足现代装备制造业的灵活、高效和个性化需求。因此, 如何正确使用数字技术实现机械设计的创新化发展, 成为当前工作人员亟需思考并解决的问题。

## 1 智能制造技术与机械设计定义阐述

### 1.1 智能制造技术

智能制造技术是新一代通信技术与先进制造技术相结合的产物, 该技术产生的最终目的是推动制造业的数字化和智能化发展。具体来说, 智能制造技术通过优化制造工业流程, 实现其系统性和优化与重构。同时, 利用以人工智能为代表的信息技术, 推动相关流程的自动化、灵活性和柔性化。在设计过程中, 相关工作人员无需投入精力到僵硬化、重复性的工作中, 转而投入到新技术的研发设计过程中, 从而形成良性循环。除此之外, 智能制造技术不仅能优化工厂内部的流程, 同时涵盖产品生命周期预估与管理、供应链协同和服务型制造等多个方面。因此, 从智能制造技术的定义可以看出, 以智能制造技术为载体的设计方式具有自感应、自学习和自适应的特点, 能够满足新时代机械设计的个性化需求, 提高设计效能和灵活性<sup>[1]</sup>。

当前智能制造技术在机械设计中具有重要的应用价值:

第一, 智能决策。制造企业在机械设计过程中会产生大量数据, 这些数据通常是结构化数据, 能够从多维度、多角度进行数据的分析与预测。智能决策技术能够在机械设计的过程中以用户的实际需求为导向, 构建一个完整的动态设计体系。在该体系的指引下, 相关的工作人员能够将机械设计拆分成可重构的工作单元。以单元为工作单位, 实现各部门接口的快速组合与替换。同时, 能够快速响应市场的变化情况, 进行设计调整, 确保设计方案的正品和快速落地。智能决策极大地提升了机械设计的效率和工作质量。

第二, 智能研发。智能研发是智能制造技术在机械设计工作中的核心要素。制造企业若想要设计多样化的机械, 就需要将机、电、软多学科协调配合。一是利用仿真化技术, 通过三维建模软件和参数化设计工具, 将产品的零部件转化为直观可触摸的数字化模型, 实现设计概念和设计样式的全数字表达; 二是利用智能交流平台。利用该平台能够实现跨部门的随时交流与沟通, 协同开展结构、电气、控制等多领域的设计工作。因此, 智能研发能够显著降低机械设计过程中所消耗的设计成本, 显著缩短研发周期, 实现制造企业经济效益的提高。

### 1.2 机械设计

机械设计是根据相关人员的实际需求在满足特定使用要求的前提下, 对机械的工作源和运动方式、零件的材料和形状等进行综合考虑和研究, 设计出性能优良、成本合理的机械产品。在机械设计的过程中需要相关工作人员坚守综合成本、机械可靠性等原则,

**作者简介:** 王丰(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 机械电子工程。

同时涵盖新型设计、继承设计和并行设计三种类型，形成以科学技术为基础的现代设计结构。然而，随着我国科学技术的不断发展，传统的机械设计方法已经不能满足现代化工业需求，具体存在如下问题：

第一，设计效率不高。传统的机械设计方法通常采用“明确开发流程—构思设计概念—进行整体设计—制作设计样机—测试最终成果”的流程。这套流程虽然能够保障机械设计的最终成果质量，但是设计效率不高，通常工作人员在样机制作完成后才能发现设计过程中存在的功能缺陷，进而进行调整与修改，不仅浪费设计工作时间，还会消耗大量样机制作成本，这种低效的流程难以满足快速变化的市场需求<sup>[2]</sup>。

第二，跨学科协同困难。现代机械包含多学科内容，一件机械产品的产生要联合多个部门共同设计。然而，传统的设计模式难以满足跨部门的交流与协同需求，部门和部门之间的机械设计数据传输慢，需要进一步进行人工的协调与同步，产生大量的设计时间成本。

第三，设计精度不高，影响最终的设计质量。在传统的机械设计过程中，部分零部件需要工作人员进行手工打磨和制作。然而，受到材料本身特性的影响，部分工作人员在实际制作过程中难以达成实际的设定参数，导致设计结果与实际产品要求产生偏差，难以满足现代装备制造业的精细化产品要求<sup>[3]</sup>。

## 2 智能制造技术在机械设计中的应用类型

### 2.1 数字化建模与智能仿真

数字化建模与智能仿真是智能制造技术在机械设计中应用的主要类型之一，其可以让设计师在虚拟环境中对设计方案进行验证。模拟真实的设备工作环境测试产品在不同环境中的工作情况，从而判断机械设计和制造后可能存在的各种问题和缺陷，从而有针对性地修改和优化，降低机械设计和制作的试错成本。

### 2.2 数字孪生技术

数字孪生技术是智能制造技术的种类之一，工作人员能够通过孪生技术实现实时监控与设计过程的优化调整，物理实体与虚拟实体能够通过数据和信息接口进行实时的数据传输与交互，从而实现对物理机械设计的实时监控与调整。同时，该技术能够让设计师在设计阶段就能发现该机械的运行状态和维护需求，在源头上进行调整，减少非必要的设计成本。

### 2.3 协同设计

协同设计是智能制造技术体系的重要分支之一，该技术在机械设计中的应用较为常见，其能够让所有

的设计人员在同一个平台上开展共同设计。这种方法通过设立统一的设计标准（图层、颜色、打印样式、线性），从而让所有设计专业人员在统一的平台上进行设计，进而减少由于沟通不善或沟通不及时导致的设计错误、设计漏洞和设计缺陷，极大地提高设计效率，减少因设计理念不协同出现的返工问题。

## 3 智能制造技术在机械设计中的创新应用路径

### 3.1 资源管理应用

第一，工作人员能够借助智能制造技术，实现资源的模拟使用。在设计工作开始前，首先搜集用户对机械设计的基本要求信息，根据信息内容进行资源的调配与设计的提前模拟，借助协同设计技术建立共享设计模型，以支持多部门进行资源的共同调配。在明确设计模型后开展资源调配工作，智能模型能够综合之前的设计经验，合理分配设计资源，保障资源使用效率最大化<sup>[4]</sup>。

第二，智能制造技术能够监控资源调配情况，减少资源损失与浪费，缩短设计需求与实际产品之间的差异。

第三，统计设计过程中的资源使用量。借助智能制造技术，能够搜集工作人员各个阶段使用的资源数据，发现并提醒设计过程中的过量使用行为，从而为企业的成本预算管理奠定基础。例如：某一离散型机械制造企业，主营精密零件的加工，在传统设计模式下，该企业存在设计调度复杂、设计设备利用率不高等问题，尤其是在小批量订单响应方面，设计效率低下，难以快速响应市场发展需求。而将智能制造技术引入该企业的设计环节中，将其与 MES 系统相关联，打通设计（CAD/CAM）、计划（ERP）与执行环节。利用智能制造技术，该企业实现了订单自动分解、工序排程优化、设计过程自动追踪，设计质量在线检验等功能。系统能够及时调整设计图纸，减少设计的等待时间<sup>[5]</sup>。

### 3.2 集成化应用

相较于传统的设计制造流程，应用智能制造技术能够实现集成化，将资源集成、技术集成、数据集成、人员集成，为企业后续的机械设计方案进一步优化奠定基础。例如：某企业借助智能制造技术实现设计系统的智能化重构，利用物联网技术构建设备互联网络，将机床、AGV、检测设备相结合，形成完整的数据闭环；利用边缘计算网关实施采集系统过程中产生的数据内容，包括温度以及能耗，综合以上数据，利用数字孪生模型模拟设计产线运行状态，提前发现该设计方案转

化成具体应用后,在相关过程中可能存在的安全隐患,将传统的事后维护转变为预测性的事前维护,进行设计方案的优化与调整。该企业借助智能制造技术进行集成化设计,设备的综合利用率提升约15%~25%<sup>[6]</sup>。

### 3.3 自动识别技术的应用

自动识别技术通常分为传感技术和图像识别技术,能够自动采集设备的参数内容,发现设备存在的各种问题,为机械设备的设计质量提高保驾护航。这一技

术通常应用在设计工作后的模拟应用环节,设备要进行设计检测,保障其能够应用于实际工作中。自动化技术通过设备线中的传感器采集数据,传感器能够将采集到的数据内容传输至系统中,形成直观化图表,以便工作人员进行后续设计的调整。以某企业为例,企业利用自动识别技术并将其与物联网技术相结合,通过射频识别和红外感应器广泛搜集物料使用情况,并将数据形成表格,以供工作人员参考,如表1所示。

表1 物料使用情况

序号	物料名称	数量	起始位置	当前位置	状态	更新时间	备注
1	传感器A	15	仓库A	车间1	使用中	2025-11-06 10:25:56	无
2	传感器B	34	仓库B	车间2	使用中	2025-11-06 10:25:56	无
3	传感器C	20	仓库C	中心控制器	待维修	2025-11-06 10:25:56	无

### 3.4 故障诊断技术的应用

利用故障诊断技术搜集同类型机械故障信息,将信息应用于机械设计工作中,从源头减少维修成本、提高设计质量。工作人员能够借助故障诊断技术,及时把握各种设备故障信息,通过数字技术将信息传输到设备设计部门,工作人员根据数据内容制定针对性设计方案。例如:某汽车制造器企业利用示波器捕捉汽车制造的机械设备。传感器和执行器与设备相对接,输出的是模拟和数字信号,当设备出现故障时,数字信号会出现畸变。技术人员借助示波器(PicoScope)采集信号,能够直观分析信号的频率、幅值和相位,从而鉴定故障出现的类型。故障诊断部门与设备设计部门进行线上沟通,设计人员在设计时会其中引入故障预测模型,设计出更具有可靠性的机械结构,在容易发生信号畸变的电路部分增设保护机制,从设计源头上规避同类型故障的发生。

### 3.5 虚拟现实技术的应用

借助虚拟现实技术,工作人员能够更好地实现机械设计。

第一,利用虚拟现实技术能够生成机械的三维模型,借助该模型,工作人员能够直观地发现机械设计中的各种问题并及时调整,避免后续样品生成产生的成本损耗。当前大部分企业使用TechViz的“虚拟装配”功能,在进行机械设计的过程中,设计人员能够使用该功能交互式移动CAD模型的任意部件,查看并记录碰撞路径,从而有针对性地优化模型。

第二,利用虚拟现实技术能够进行机械设计成果的调试,并模拟相应的后续销售和推广计划。例如:某企业利用虚拟现实技术,并结合深度学习模型对产

品的三维模型图像进行实时分析,该企业的AI质检系统将电池片引电检测的准确性有效提高到了99.8%,相较于人工检测的准确性提高了约10%,为机械设计和质量检测提供了精准的数据支持。

## 4 结束语

将智能制造技术深度融合入机械设计全流程,是推动机械工业向高端化、智能化、绿色化转型的核心引擎。它不仅能通过数字化建模、仿真优化等手段,将设计周期缩短20%~30%,还能借助AI算法实现拓扑优化、参数自动匹配,在提升设计精度与产品质量稳定性的同时,通过轻量化设计减少材料使用量15%以上,实现设计资源的高效配置与成本精准管控。未来,随着我国科学技术的不断发展,工作人员要以更加积极的态度拥抱智能制造技术,为推动机械设计优化带来更多的可能。

## 参考文献:

- [1] 徐浩峰.智能制造技术在机械设计中的创新应用[J].数字通信世界,2025(08):118-120.
- [2] 谭玲,周崇龙,黄辉,等.汽车智能制造技术在机械设计制造领域中的应用[J].汽车知识,2025,25(08):128-130.
- [3] 范学宇.智能制造技术在机械产品设计中的应用研究[J].科技创新与品牌,2025(06):75-77.
- [4] 程永康,赵晨悦,胡小波.智能制造技术在机械设计制造领域中的应用[J].内燃机与配件,2025(01):106-108.
- [5] 徐育冈.智能制造技术在机械设计中的应用[J].农业工程与装备,2024,51(06):54-56.
- [6] 姚翠翠,杨明慧.智能制造背景下自动化技术在纺织机械设计制造中的应用[J].化纤与纺织技术,2024,53(09):124-126.

# 三段式电流保护在煤矿供电系统中的应用效能研究

李星辰

(安徽省亳州煤业有限公司信湖煤矿, 安徽 亳州 233600)

**摘要** 为解决煤矿供电系统短路故障切除不及时、停电范围扩大、设备损坏等问题,保障井下生产安全,本文研究三段式电流保护(电流速断保护、限时电流速断保护、定时限过流保护)在煤矿供电系统中的作用、应用流程及实际效果。通过在某矿井应用测试,证明该保护系统可将短路故障切除时间缩短,降低越级跳闸发生率和设备故障率。结果表明,三段式电流保护可实现故障快速切除、分级防护,有效保障煤矿供电系统安全稳定运行,为煤矿供电安全提供技术参考。

**关键词** 三段式电流保护; 煤矿供电系统; 短路故障; 分级保护; 设备防护

中图分类号: TM771

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.003

## 0 引言

煤矿供电系统是井下生产的“生命线”,其安全稳定直接关系到作业人员的人身安全与生产连续性。井下环境恶劣,电网易发生短路、过载等故障,传统保护方式存在动作滞后、选择性差等问题,易引发越级跳闸、设备烧毁等事故。目前,三段式电流保护因结构简单、可靠性高、调试方便,已广泛应用于煤矿供电系统,但在实际应用中仍存在配置不规范、动作定值整定不合理等问题,影响保护效果。因此,深入研究三段式电流保护在煤矿供电系统中的作用及规范应用,解决实际运行中的技术难题,对提升煤矿供电安全性、降低事故发生率具有重要意义。

## 1 三段式电流保护原理

三段式电流保护由电流速断保护(I段)、限时电流速断保护(II段)、定时限过流保护(III段)串联组成,三者协同工作,遵循“阶梯式”保护逻辑,兼顾速动性、选择性与可靠性,通过电流定值与动作时限的分级设置,实现故障的精准定位与快速切除(见图1)<sup>[1]</sup>。电流速断保护作为主保护,动作电流按躲过线路末端最大三相短路电流整定,可靠系数取1.1~1.2,动作时限近似为0s,仅保护线路近端70%~80%范围,可快速切除近端严重短路故障。限时电流速断保护作为I段的近后备,动作电流大于下一条线路I段动作电流,动作时限设为0.3~0.5s,可保护线路

全长,并延伸至下一条线路首端一小部分,弥补I段保护盲区<sup>[2]</sup>。定时限过流保护作为远后备,动作电流按躲过线路最大负荷电流整定,动作时限按阶梯原则设置,从负荷侧到电源侧逐级增加0.5s,可保护本线路及相邻线路全长,作为系统最后一道安全防线。

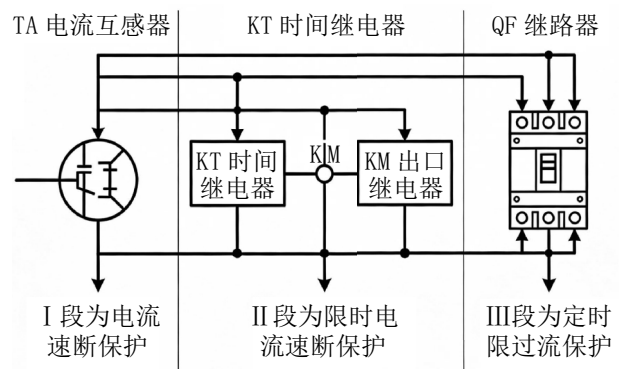


图1 三段式电流保护原理

## 2 三段式电流保护在煤矿供电系统中的作用

### 2.1 快速切除短路故障,保障供电安全稳定

煤矿井下供电线路多为电缆敷设,空间狭窄、环境潮湿,易因电缆破损、绝缘老化、设备漏电等引发短路故障,短路电流瞬间可达额定电流的数十倍,若不能快速切除,会导致电缆起火、设备爆炸,甚至引发瓦斯爆炸等严重安全事故<sup>[3]</sup>。三段式电流保护通过I段无时限动作与II段限时动作的协同,可实现短路

作者简介:李星辰(1997-),男,本科,助理工程师,研究方向:三段式电流保护。

故障的快速响应与切除,有效遏制事故扩大。当井下高压配电线路近端发生短路时,电流速断保护瞬间检测到电流超过整定值,无需延时,立即发出跳闸指令,将故障切除时间控制在0.1 s以内,避免短路电流长时间作用于线路和设备。当故障发生在线路末端时,I段保护未启动,限时电流速断保护在0.3~0.5 s内动作,确保故障在最短时间内切除。该保护系统可有效避免保护误动,通过精准的电流定值整定,躲过电动机自起电流和正常负荷波动,确保井下通风、排水、提升等关键设备持续稳定运行,为煤矿生产提供不间断供电保障。

## 2.2 分级动作保护,减少停电波及范围

煤矿供电系统采用多级辐射状供电模式,从地面变电所到井下中央变电所、采区变电所,再到工作面配电点,分级供电、层层衔接,若某一级线路发生故障,若保护动作无选择性,易引发越级跳闸,导致大面积停电,影响整个矿井的正常生产<sup>[4]</sup>。三段式电流保护通过分级动作逻辑,严格遵循“故障点就近切除”原则,可有效减少停电波及范围,保障非故障区域正常供电。通过动作电流与动作时限的阶梯式配置,上级保护的时限大于下级保护,上级保护的电流大于下级保护,确保故障发生时,仅故障所在级别的保护动作,切除故障线路,非故障区域不受影响。例如:井下采区配电点线路发生短路时,该线路的I段或II段保护优先动作,快速切除故障,井下中央变电所、地面变电所的保护不动作,确保其他采区、井下关键系统正常供电。定时限过流保护作为远后备,仅在下级保护拒动时才动作,提升保护的选择性,避免越级跳闸现象发生。

## 2.3 防止故障扩大,保护井下电气设备

煤矿井下电气设备投资大、维修难度高,且长期处于潮湿、多尘、腐蚀性环境中,绝缘性能易下降,若发生短路故障后不能及时切除,短路电流产生的高温、电动力会损坏设备绕组、外壳,甚至导致设备报废,增加生产成本<sup>[5]</sup>。三段式电流保护通过快速切除故障、分级后备防护,可有效防止故障扩大,延长井下电气设备使用寿命。当线路发生短路时,I段、II段保护快速动作,切断故障电流,避免短路电流长时间作用于变压器、断路器、电缆等设备,减少设备绝缘损坏、绕组烧毁等情况发生。定时限过流保护作为后备保护,不仅可保护本线路设备,还可保护相邻线路设备,当相邻线路保护拒动时,III段保护延时动作,切除故障,防止故障蔓延至其他设备。三段式电流保护可通过精

准整定动作电流,避免过负荷电流长期作用于设备,防止设备因过热老化,延长设备使用寿命。

## 3 三段式电流保护在煤矿供电系统中的应用

### 3.1 井下高压配电线路主保护配置

井下高压配电线路(6 kV、10 kV)主保护采用三段式电流保护配置,工作人员需现场测量线路长度、电缆型号、额定电流,计算线路末端最大三相短路电流、最大负荷电流,确定电流互感器变比,通常为600/5、1 000/5<sup>[6]</sup>。I段动作电流需严格按躲过线路末端最大短路电流进行整定,结合煤矿井下电缆敷设特点,充分考虑短路电流的暂态分量与稳态分量叠加影响,确保在线路近端发生短路故障时,能够瞬时动作切断故障线路,避免故障扩大蔓延至井下其他配电区域,保障供电系统核心设备安全。II段动作电流按躲过下一条线路I段动作电流整定,兼顾上下级保护的选择性配合,合理预留动作电流裕度,防止出现保护误动、拒动现象,确保故障发生时能够精准定位故障线路,实现分级分段保护,减少故障影响范围。III段动作电流按躲过线路最大负荷电流整定,结合煤矿井下设备启停规律、负荷波动特性,综合考量电机启动电流、季节性负荷变化等因素,设定合理的整定数值,避免正常负荷运行时保护装置误动作,在线路发生过载或轻微短路故障时,延时动作切断故障。将整定好的定值输入保护装置,模拟短路故障,测试I段、II段、III段保护动作的准确性和及时性,调整定值直至满足要求。投运后定期检查保护装置运行状态,每月校验一次定值,每季度进行一次故障模拟测试,确保保护装置正常工作。

### 3.2 矿井变电所进出线分级保护

矿井变电所进出线(地面35 kV进线、井下6 kV出线)采用三段式电流保护分级配置。工作人员需将变电所进线、出线按供电等级分为一级(进线)、二级(主出线)、三级(分支出线),明确各级保护的优先级<sup>[7]</sup>。进线I段动作电流大于所有出线I段动作电流,动作时限设为0 s;进线II段动作电流大于所有出线II段动作电流,动作时限设为0.9 s;进线III段动作电流大于所有出线III段动作电流,动作时限设为2.0 s。将各级保护装置与断路器、电流互感器正确连接,检查接线准确性,避免接线错误导致保护拒动、误动。模拟某一出线短路故障,测试该出线保护优先动作,进线保护不动作;模拟出线保护拒动,测试进线III段保护延时动作,确保分级保护协同可靠。每日

检查进出线保护装置指示灯、显示屏状态，每周检查接线端子紧固情况，及时处理设备异常。

### 3.3 煤矿低压供电系统后备保护

煤矿低压供电系统以短路保护和过载保护为主，三段式电流保护作为后备保护配置。工作人员需选用适配低压系统的三段式电流保护装置，确保额定电流、动作精度符合低压供电要求<sup>[8]</sup>。I 段动作电流按躲过低压线路末端最大短路电流整定，动作时限设为 0 s，主要保护低压电缆近端故障；II 段动作电流按躲过电动机自起动作电流整定，动作时限设为 0.3 s，保护低压线路全长；III 段动作电流按躲过低压系统最大负荷电流整定，动作时限设为 1.0 s，作为低压系统后备保护，兼顾过载保护功能。将保护装置安装在低压馈电开关内，正确连接电流互感器、断路器，确保接线牢固、绝缘良好<sup>[9]</sup>。模拟低压线路短路、过载故障，测试保

护装置动作准确性，调整定值至合理范围，投运后定期对保护装置进行校验，每半年进行一次全面调试，及时发现并处理定值漂移、设备老化等问题，确保后备保护可靠发挥作用。

## 4 效果分析

为验证三段式电流保护在煤矿供电系统中的应用效果，选取某年产 180 万吨煤与瓦斯突出矿井作为测试对象，该矿井采用多级辐射状供电模式，井下共分 4 级供电，此前采用传统继电保护，存在越级跳闸、故障切除滞后等问题，设备故障率较高。本次应用三段式电流保护系统，按上述应用流程完成高压线路主保护、变电所进出线分级保护、低压系统后备保护的配置与调试，运行周期为 6 个月，对比应用前后的供电系统运行指标（见表 1）。

表 1 三段式电流保护应用前后供电系统运行指标

运行指标	应用前（6 个月）	应用后（6 个月）	改善幅度
短路故障切除平均时间（s）	1.8	0.35	79.4%
越级跳闸次数（次）	12	0	100%
电气设备故障率（%）	8.5	2.72	68.0%
供电中断时长（h）	42.6	9.37	78.0%

由表 1 可知，应用前 6 个月，短路故障切除平均时间为 1.8 s，越级跳闸 12 次，电气设备故障率 8.5%，供电中断时长 42.6 h，设备维修成本 38.2 万元；应用后 6 个月，对应指标分别优化为 0.35 s、0 次、2.72%、9.37 h、17.19 万元，改善幅度依次达 79.4%、100%、68.0%、78.0%、55.0%。结论表明，三段式电流保护的应用可快速缩短故障切除时间，杜绝越级跳闸，降低设备故障率与维修成本，减少供电中断时长，有效提升煤矿供电系统可靠性与安全性。

## 5 结束语

三段式电流保护通过 I 段、II 段、III 段的协同配合，实现煤矿供电系统故障的快速切除、分级防护与后备保障，解决传统保护方式存在的动作滞后、选择性差、故障扩大等问题。其在井下高压线路、变电所进出线、低压系统中的规范应用，可提升供电系统可靠性，减少设备损坏与停电损失，保障煤矿井下生产安全。

## 参考文献：

[1] 张猛, 邱惠, 赵一萌, 等. 含多光伏配电网的分区三段式电流保护方案[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(04): 11-15, 108.

[2] 汪中霞. 基于 MATLAB/Simulink 配电网三段式电流保护的建模与仿真分析[J]. 电工技术, 2025(13): 172-175.  
 [3] 赖淞林, 贾红芳, 罗炳标, 等. 基于 Simulink 的三相模拟三相三段式电流保护系统建模及实验分析[J]. 机电信息, 2024(04): 16-19, 23.  
 [4] 戴志辉, 刘钧溢, 柳梅元, 等. 适用于 IIDG 接入的配网电流保护改进方案研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(06): 367-375.  
 [5] 成亚伟. 配电网不平衡电流继电保护的自发补偿及仿真分析[J]. 微型电脑应用, 2025, 41(11): 305-308.  
 [6] 于成澳, 高湛军, 刘朝, 等. 基于自适应制动补偿系数的有源配电网电流纵联差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 1-14.  
 [7] 张政伟, 陈谦, 牛应灏, 等. 基于实时生成定值的高比例新能源电网自适应电流保护[J]. 电力建设, 2024, 45(02): 137-146.  
 [8] 李小波, 赵海, 戚祎, 等. 一种具有高温保护的三段式充电控制电路[J]. 半导体技术, 2024, 49(05): 492-498, 504.  
 [9] 翁汉珺, 樊荣, 饶丹青, 等. 分布式能源脱网和其本身特性改变对线路限时电流速断保护的影响及对策[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 33-40.

# 矿用气体传感器信号处理专用集成电路抗干扰技术研究

师 帅<sup>1</sup>, 刘小菲<sup>2</sup>

(1. 淄博瑞安特自控设备有限公司, 山东 淄博 255100;

2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要** 针对矿用井下复杂电磁与工况环境下气体传感器信号处理专用集成电路(ASIC)弱信号链路易受干扰、测量精度失准、运行稳定性不足的核心问题, 本文系统解析了矿用井下核心干扰源的电气特征与对 ASIC 的干扰耦合传递机制, 构建了涵盖架构级、模块级、物理级的全链路抗干扰技术体系, 建立了适配矿用本质安全与电磁兼容标准的量化抗干扰性能评价体系, 明确了核心电路模块的抗干扰设计阈值与协同优化方法。基于 0.18  $\mu\text{m}$  BCD 工艺的仿真验证表明, 优化后的 ASIC 可实现  $\pm 2$  kV 电快速瞬变脉冲群干扰下输出信号波动  $\leq 0.2\%$ , 宽温工况下测量误差  $\leq \pm 0.3\%$ , 完全满足矿用井下设备的抗干扰与本质安全要求。

**关键词** 矿用气体传感器; 信号处理专用集成电路; 抗干扰技术; 电磁兼容; 弱信号处理

中图分类号: TN492; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.004

## 0 引言

本文聚焦矿用气体传感器信号处理专用集成电路的抗干扰核心科学与技术问题, 以矿用井下复杂电磁环境与本质安全工况约束为边界, 系统解析井下干扰源对 ASIC 弱信号处理链路的耦合机制与干扰传递规律, 构建涵盖架构级、模块级、物理级的全链路抗干扰技术体系, 建立适配矿用标准的 ASIC 抗干扰性能量化评价体系, 明确核心电路模块的抗干扰设计阈值与优化方法。核心范畴限定于矿用气体传感器信号处理专用集成电路的片上抗干扰技术设计与性能分析, 不涉及分立元件抗干扰方案、传感器敏感单元本身的抗干扰设计、非矿用场景的集成电路抗干扰研究。

## 1 矿用井下干扰源特征与 ASIC 干扰耦合机制

### 1.1 矿用井下核心干扰源的电气特征

矿用井下环境的干扰类型具有强耦合、宽频谱、多维度叠加的特征, 是制约 ASIC 稳定运行的核心外部因素, 可划分为四大类核心干扰源。一是强电磁干扰(EMI), 井下变频器、刮板输送机、开关设备等感性负载启停产生的传导与辐射干扰, 频率覆盖 10 kHz ~ 1 GHz, 电快速瞬变脉冲群(EFT)峰值可达 2 kV, 浪涌干扰峰值可达 4 kV, 符合《电磁兼容 试验和测量技术》

(GB/T 17626)系列标准的严酷等级要求, 是引发 ASIC 逻辑误动作的核心干扰源<sup>[1]</sup>。二是电源系统干扰, 井下本质安全电源的输出纹波峰峰值可达 500 mV, 负载突变、线路压降引发的电源瞬态波动范围可达额定值的  $\pm 20\%$ , 通过电源引脚耦合进入片内, 直接影响模拟电路的偏置稳定与测量精度。三是环境工况干扰, 井下  $-40$   $^{\circ}\text{C}$  ~  $+85$   $^{\circ}\text{C}$  的宽温波动引发电路参数温漂, 95% RH 高湿环境引发的片内漏电流变化, 机械振动引发的封装与键合线参数微变, 均会导致 ASIC 测量基准偏移、信号处理精度衰减。四是片内自干扰, ASIC 数模混合架构中, 数字模块的高频开关动作通过衬底、电源网络耦合至前端弱信号模拟链路, 形成片内串扰, 淹没 nA 级 ~  $\mu\text{A}$  级的传感器输出弱信号。

### 1.2 干扰耦合机制与传递规律

基于电磁兼容理论与集成电路传输线模型, 可将矿用环境下干扰对 ASIC 的耦合路径划分为三类核心传导路径, 形成完整的干扰传递链条。一是传导耦合路径, 干扰信号通过电源引脚、传感器信号输入引脚、IO 引脚直接进入片内, 是最主要的干扰耦合路径, 占比超过 70%, 其中电源引脚耦合的干扰会通过电源网络传递至所有电路模块, 形成全链路干扰。二是辐射耦合路径, 井下空间高频电磁场通过芯片封装、PCB 走线耦合

作者简介: 师帅(1987-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 集成电路煤矿井下气体检测。

至片内金属走线, 形成感应干扰电流, 影响高频敏感电路的稳定运行。三是衬底耦合路径, 片内数字模块的开关噪声通过硅衬底传导至模拟电路的衬底接触端, 引发衬底电位波动, 导致模拟电路的偏置点偏移、增益失准, 是数模混合 ASIC 片内干扰的核心传递路径<sup>[2]</sup>。

## 2 ASIC 全链路抗干扰技术体系构建

针对矿用环境的干扰特征与传递规律, 构建架构级、模块级、物理级三级协同的全链路抗干扰技术体系, 实现从顶层设计到物理实现的全流程干扰抑制。

### 2.1 架构级抗干扰顶层设计

架构级设计是抗干扰体系的核心基础, 从顶层规避干扰耦合路径, 实现全链路的干扰抑制。一是数模全隔离分区架构, 将片内模拟电路与数字电路完全划分为独立的电源域与地域, 模拟电源与数字电源采用独立引脚输入, 片内集成  $\pi$  型滤波网络实现电源域隔离; 模拟地与数字地仅在芯片封装引脚处实现单点连接, 避免数字地弹噪声通过地线网络耦合至模拟链路; 敏感的前端模拟电路布局在独立的隔离区内, 四周设置全包围保护环接地, 阻断衬底噪声耦合路径。二是全差分信号处理架构, 传感器输入的单端弱信号在引脚端直接转换为差分信号, 从放大、滤波到 ADC 采样的全模拟链路均采用差分结构设计, 可实现 100 dB 以上的共模抑制比, 有效抑制共模传导干扰与工频谐波干扰。三是斩波稳零与过采样协同架构, 针对前端弱信号的  $1/f$  噪声、直流失调与温漂干扰, 采用斩波稳零技术将失调电压控制在  $2 \mu\text{V}$  以内; 针对 ADC 采样环节的带内噪声, 采用过采样率  $\geq 256$  的  $\Sigma-\Delta$  转换架构, 将带内噪声推至带外, 提升信噪比, 抑制干扰引发的采样误差。四是三模冗余数字校验架构, 针对强电磁干扰引发的单粒子翻转与逻辑误动作, 数字控制与信号处理单元采用三模冗余设计, 通过多数表决机制剔除错误结果, 确保输出数据的准确性与可靠性。

### 2.2 模块级抗干扰电路设计

针对核心敏感电路模块, 开展定向抗干扰优化设计, 实现模块级的干扰抑制与性能稳定。一是前端仪表放大器模块, 采用全差分可编程增益仪表放大器架构, 集成片内 RC 低通 EMI 滤波网络, 截止频率匹配气体传感器的信号带宽, 滤除带外高频干扰; 增益调节范围覆盖  $1 \sim 1000$  倍, 适配不同类型矿用气体传感器的输出信号范围, 避免增益过高导致的干扰放大; 输入级集成过压、过流箝位保护电路, 将输入电压箝位在安全范围内, 抵御浪涌与 EFT 瞬态干扰对后续电路的损坏。二是带隙基准源模块, 采用高阶曲率补偿带隙

基准架构, 温漂系数控制在  $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  以内, 抑制宽温环境下的基准电压漂移; 优化电源噪声抑制结构, 在  $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ MHz}$  干扰频段内实现电源抑制比 (PSRR)  $\geq 85 \text{ dB}$ , 有效抑制电源纹波干扰; 基准源四周设置双层保护环, 隔离衬底耦合的数字噪声, 确保基准电压的稳定性。三是电源管理模块, 为每个核心电路模块配置独立的低压差线性稳压器 (LDO), 实现电源域的二次隔离, 阻断模块间的电源串扰; LDO 采用高 PSRR 架构, 全频段 PSRR  $\geq 70 \text{ dB}$ , 抑制输入电源的纹波与瞬态波动; 集成电源监测与复位电路, 当电源电压超出额定范围  $\pm 15\%$  时, 触发复位与保护动作, 避免电源异常引发的电路误动作与数据错误<sup>[3]</sup>。四是高阶可编程滤波模块, 片内集成 4 阶开关电容低通滤波器, 截止频率可通过数字寄存器编程配置, 匹配不同气体传感器的响应特性, 有效滤除带外高频干扰与  $50 \text{ Hz}$  工频及其谐波干扰, 提升输出信号的信噪比。

### 2.3 物理级 (版图级) 抗干扰设计

物理级设计是抗干扰技术体系的最终实现环节, 通过版图布局与走线优化, 阻断干扰耦合路径, 提升电路的抗干扰鲁棒性。一是数模分区隔离布局, 模拟电路与数字电路采用左右分离的分区布局, 中间设置  $20 \mu\text{m}$  以上的隔离带, 隔离带内设置高密度接地衬底接触孔, 阻断衬底噪声的横向传播; 敏感的前端模拟电路布局在远离数字时钟模块、电源引脚的区域, 避免高频噪声的直接耦合。二是电源与地线网络优化, 采用多层金属构建全芯片电源网格, 电源线采用宽金属走线, 降低电源线阻抗与压降, 减少开关噪声的传递; 模拟地与数字地采用独立的地线网络, 仅在芯片引脚处单点连接, 避免地弹噪声的跨域耦合; 每个模块的电源引脚处均集成片内去耦电容, 形成低阻抗的高频回流路径, 抑制电源高频噪声。三是敏感信号走线优化, 差分信号采用等长、等宽、平行的差分对走线, 长度差控制在  $1 \mu\text{m}$  以内, 保持差分阻抗一致性, 确保共模抑制能力; 模拟敏感信号走线远离高频数字时钟走线, 走线交叉采用垂直交叉方式, 减少串扰耦合; 敏感信号采用上层厚金属走线, 降低寄生电阻与电容, 减少干扰感应<sup>[4]</sup>。四是 ESD 与抗浪涌设计, 所有输入输出引脚均集成双向 ESD 保护电路, 满足人体放电模型 (HBM)  $\pm 8 \text{ kV}$ 、机器模型 (MM)  $\pm 400 \text{ V}$  的防护要求; 电源引脚集成片内瞬态电压抑制箝位电路, 抵御浪涌与 EFT 瞬态高压干扰; 高密度的衬底接触与阱接触设计, 降低衬底电阻, 抑制闩锁效应, 符合矿用本质安全电路的设计要求。

### 3 适配矿用标准的抗干扰性能量化评价体系

结合矿用井下设备的法定标准要求,构建涵盖电气抗干扰性能、环境适应性、本质安全符合性三大维度的量化评价体系,明确评价指标、测试标准与合格阈值,为ASIC抗干扰性能的验证提供标准化依据。

#### 3.1 核心评价维度与量化指标

1. 电气抗干扰性能维度,对标《电磁兼容 试验和测量技术》(GB/T 17626)电磁兼容系列标准与MT/T矿用产品通用技术条件,核心指标包括:电快速瞬变脉冲群抗扰度,测试等级 $\pm 2$  kV,要求电路无逻辑误动作、输出信号波动 $\leq 0.5\%$ ;浪涌抗扰度,测试等级 $\pm 1$  kV(线—线)、 $\pm 2$  kV(线—地),要求电路无永久性损坏、性能衰减 $\leq 1\%$ ;静电放电抗扰度,接触放电 $\pm 8$  kV、空气放电 $\pm 15$  kV,要求电路无损坏、无功能异常;电源纹波抑制能力,500 mV峰峰值电源纹波下,输出信号测量误差 $\leq 0.5\%$ ;共模抑制比 $\geq 100$  dB,电源抑制比 $\geq 80$  dB。

2. 环境适应性维度,对标矿用井下宽温高湿工况,核心指标包括: $-40$   $^{\circ}\text{C}$ ~ $+85$   $^{\circ}\text{C}$ 全温区内,电路增益漂移 $\leq \pm 1\%$ ,失调电压漂移 $\leq \pm 10$   $\mu\text{V}$ ,信号测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ ;95% RH(无凝露)环境下,片内漏电流变化 $\leq 1$  nA,电路性能无明显衰减。

3. 本质安全符合性维度,对标相关本质安全型设备标准,核心指标包括:电路最大输出电流 $\leq 100$  mA,最大输出电压 $\leq 24$  V,符合本质安全型电路的功率限制要求;电路无闩锁效应风险,在单一故障状态下不会产生引爆瓦斯的火花与热效应;电路在故障状态下的最高表面温度不超过 $135$   $^{\circ}\text{C}$ ,满足煤矿瓦斯环境的防爆要求。

#### 3.2 标准化评价方法

建立“仿真验证—实验室测试—工况模拟”三级评价方法,实现全流程的抗干扰性能验证。一是流片前仿真验证,采用Spectre软件完成电路的直流、交流、瞬态、噪声仿真,验证温漂、PSRR、CMRR等核心指标;采用EMC仿真软件完成EFT、浪涌、ESD干扰的瞬态仿真,验证电路的抗干扰鲁棒性。二是流片后实验室标准测试,按照《电磁兼容 试验和测量技术》(GB/T 17626)系列标准完成电磁兼容性能测试,在高低温湿热试验箱内完成环境适应性测试,采用高精度半导体参数分析仪完成电路核心性能参数测试。三是井下工况模拟测试,在矿用设备电磁兼容模拟试验平台内,模拟井下变频器、开关设备的实际干扰环境,完成ASIC的整机工况验证,确保电路在实际井下环境中的稳定运行。

### 4 抗干扰设计性能验证与核心规律分析

基于上述全链路抗干扰技术体系,采用 $0.18$   $\mu\text{m}$  BCD工艺完成ASIC的电路设计、版图绘制与流片前全功能仿真验证。仿真结果表明,ASIC核心性能指标完全满足矿用场景的抗干扰要求:前端仪表放大器共模抑制比达到 $112$  dB@ $50$  Hz,电源抑制比达到 $92$  dB@ $10$  kHz,输入失调电压 $\leq 2$   $\mu\text{V}$ ,温漂系数 $\leq 3$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ;带隙基准源温漂系数 $\leq 4$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ,全频段电源抑制比 $\geq 85$  dB; $\Sigma$ - $\Delta$  ADC有效位数达到 $16$ 位,信噪比 $\geq 98$  dB;全芯片在 $-40$   $^{\circ}\text{C}$ ~ $+85$   $^{\circ}\text{C}$ 宽温范围内,气体浓度测量误差 $\leq \pm 0.3\%$ 。

EMC仿真结果表明,在 $\pm 2$  kV电快速瞬变脉冲群干扰测试下,电路输出信号波动 $\leq 0.2\%$ ,无逻辑误动作;在 $\pm 2$  kV浪涌干扰测试下,电路无永久性损坏,性能衰减 $\leq 0.4\%$ ;在 $500$  mV峰峰值电源纹波干扰下,输出信号测量误差 $\leq 0.25\%$ ,所有指标均优于矿用产品标准的合格阈值<sup>[5]</sup>。

### 5 结束语

本文针对矿用气体传感器信号处理专用集成电路的抗干扰核心问题,系统解析了矿用井下核心干扰源的电气特征与对ASIC的干扰耦合传递机制,构建了架构级、模块级、物理级三级协同的全链路抗干扰技术体系,建立了适配矿用本质安全与电磁兼容标准的量化抗干扰性能评价体系,通过仿真验证了优化后的ASIC可完全满足矿用井下复杂环境的抗干扰要求。本文构建的全链路抗干扰技术体系与标准化评价方法,可为矿用气体传感器专用集成电路的国产化设计提供理论与技术参考,为矿用井下本质安全型监测设备的核心芯片自主可控提供技术基础。

### 参考文献:

- [1] 孟凡利,祝学斌,张华,等.SnO<sub>2</sub>气体传感器对挥发性有机物的温度调制及信号处理方法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(12):85-94.
- [2] 管海翔,陈娟,祁欣.基于高灵敏度电化学传感器的有害气体检测系统设计[J].北京化工大学学报:自然科学版,2020,47(02):107-114.
- [3] 鞠登峰,高海峰,程宇心,等.电力系统多参量灵敏感知:新型敏感材料与传感机理研究进展[J].高电压技术,2025(07):3109-3131.
- [4] 常云泽.基于煤矿顶板离层实时动态无线监测系统的设计[J].煤矿机电,2020,41(02):36-40,44.
- [5] 杨敏,张全柱,赵紫梅.高精度矿用粉尘监测系统的数据采集模块设计[J].煤炭与化工,2020,43(02):65-68,72.

# 基于 SCADA 数据的风电机组故障诊断与预测性维护技术研究

刘卓

(国电电力山东新能源开发有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要** 传统运维模式难以兼顾故障预警精度与经济性。为提升状态评估和维修决策的时效性, 本文基于 SCADA 数据构建技术链条, 涵盖数据清洗、故障诊断和预测性维护。通过动态边界滤除和变工况聚类剥离, 建立高保真数据基底。利用运行基线重构和劣化残差追踪机制, 识别早期微弱故障。然后将预测信息反馈到功率调节、停机时域和供应链调度环节, 形成闭环决策。现场案例验证了该方法在提升诊断灵敏度、延长运行周期和降低综合维修成本方面的有效性。

**关键词** 风电机组; SCADA 数据; 故障诊断; 预测性维护

中图分类号: TM359.9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.005

## 0 引言

风电机组的运行环境比较复杂, 其关键部件出现的故障有着渐进性和隐蔽性的特征, 传统的事后维修、定期维护模式, 在故障预警精度和运维经济性方面很难达到平衡。随着风电场数字化程度不断提高, SCADA 系统积累了数量众多的运行数据, 这给设备状态评估提供了重要的支持。近些年, 预测性维护理念逐渐融入风电运维模式当中, 它的核心是从数据里提取设备劣化轨迹, 以此来指导维修决策。如何建立适合变工况特征的状态评估方法, 实现从故障识别到主动控制的闭环, 是当前工程应用中亟须解决的技术问题。

## 1 风电机组及 SCADA 数据特性与处理基础

### 1.1 多物理场耦合下的 SCADA 监测参量特征解析

大型风电机组运行时表现出典型的气动、机械、电气与热力多场强耦合特征。SCADA 系统记录的海量参量, 本质上是上述物理场交互演化在数据空间的直接映射。以主轴承温度为例, 其数值波动并非单一的热力学过程, 而是受环境风况扰动、主轴机械转矩及网侧有功功率多重约束的综合结果。这种底层机制导致机组的 SCADA 监测序列呈现出显著的高维、非线性与动态时变属性。

### 1.2 动态边界约束下的传感器离群飞点滤除方法

受复杂环境与通信延迟干扰, SCADA 监测序列常夹杂阶跃型离散飞点。传统固定阈值法难以匹配机组变

工况属性, 极易误删有效特征信号。为此, 本文构建基于动态边界约束的自适应滤除机制。该方法以实时功率和转速为基准, 计算多维变量联合分布的合理波动区间, 生成随工况漂移的动态包络面。若新采集数据突破该边界, 算法即将其判定为异常飞点并滤除<sup>[1]</sup>。

### 1.3 变工况非稳态运行区间的聚类剥离算法

风电机组服役时常受限电或极端气象干扰, 频繁陷入启停等暂态切换过程。该非稳态区间内, 机电热参量的耦合关系剧烈畸变, 数据分布显著偏离健康图谱, 若直接混入将严重降低基准模型的重构精度。针对此问题, 多维特征聚类技术通过剖析核心监测参量间的联合概率分布, 对海量运行轨迹展开无监督解耦。此过程精准滤除过渡期与限电期的低质量散点, 有效剥离出表征设备真实物理特性的高保真稳态数据簇, 为深层诊断网络奠定可靠基石。

## 2 基于 SCADA 数据的风电机组故障诊断机制

### 2.1 时空特征耦合的深度感知诊断机制

风电机组 SCADA 数据兼具多维空间拓扑与长程时序演化双重属性, 传统浅层模型极易割裂二者的深层物理映射。时空特征耦合的深度感知机制直接面向底层多源特征张量, 前端利用二维卷积网络的滑动窗口, 精准提取同一时间断面下各传感节点间的局部空间关联; 随后, 空间特征矩阵流向长短期记忆网络, 依托内部门控结构深度解析机组运行轨迹的动态衰退规律<sup>[2]</sup>。

作者简介: 刘卓(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 新能源风力发电。

## 2.2 关键参量聚焦的动态权重分配机制

风电机组 SCADA 系统并发海量冗余参量, 极易掩盖设备早期的微弱劣化特征。关键参量聚焦的动态权重分配机制在深度诊断架构中嵌入注意力计算模块, 摒弃传统均等映射逻辑。该机制面向实时运行流, 高频解算各监测变量的故障敏感度矩阵。当核心部件萌生微观异常时, 算法动态调整特征序列的寻优系数, 自适应向高相关性参量倾斜网络权重。此过程靶向放大了关键退化信号的表达强度, 有效抑制无关变量噪声, 实现潜伏隐患的精准锁定。

## 2.3 运行基线重构的劣化残差追踪机制

故障演化的物理本质是设备运行状态对健康基准的持续偏离。运行基线重构与残差追踪机制摒弃了易致漏报的静态阈值, 以纯净历史稳态数据为驱动, 训练重构出表征机组正常行为的数字基线模型。实测 SCADA 流接入后, 该模型同步解算出当前特定工况下的理想预测向量。通过实时比对观测值与预测值, 算法持续量化二者偏差并生成动态均方根误差序列。当该残差轨迹打破随机波动分布、呈现单调发散趋势时, 系统即判定设备进入退化期, 实现隐蔽微弱故障的精准锁定。

## 3 基于 SCADA 数据的风电机组故障预测性维护技术

### 3.1 多维劣化残差融合的健康状态评估技术

设备早期的退化特征通常隐藏在多种不同的参量里, 单个变量不容易表现出整体变差的程度。多维劣化残差融合方法把前置诊断网络输出的误差矩阵当作主要输入, 并采用自编码器拓扑降维方法, 对高维离散的异常波动进行非线性加权整合。该技术可以滤除由于局部工况发生突变而引起的随机扰动, 把复杂的底层运行偏差映射成了一维单调递减的综合健康指数。该量化指标清楚地描述了机组从健康状态、轻微退化状态直到临界失效状态的整个演化生命周期。

### 3.2 长时程依赖驱动的剩余寿命外推技术

对设备触碰失效边界的时间窗口进行准确预测, 是进行视情维修的主要前提。长时程依赖驱动的剩余寿命外推技术没有使用传统马尔可夫链的无记忆假设, 而是利用双向长短期记忆网络来获得健康指数的历史衰退斜率。算法动态捕捉退化速率的非线性时变特征, 结合当前健康状态参量向未来时间步进行高频迭代映射。

### 3.3 真实服役驱动的劣化轨迹追踪验证技术

理论预测模型的工程可靠性需用真实服役数据来进行闭环检验。劣化轨迹化验证技术选用某风场主轴

数月的历史 SCADA 时序数据输入评估架构。实测曲线表明, 在轴承开始出现微观滚道剥落的潜伏期, 经系统重构得到的健康指数已表现出比较有规律的平滑下降趋势。预测技术在物理损坏彻底发生前两周准确确定了失效拐点, 主要因为外推网络在复杂交变载荷下有时间前瞻性, 并且同系统的事后停机报警相比<sup>[3]</sup>。

## 4 预测反馈驱动的自适应降级控制与视情维修决策探究

在风电行业中, 故障后维修和定期维护的策略是风场工作人员一直以来的措施, 这样的做法所面临的是维护不足与维护过度的问题, 特别是随着风电场装机规模的不断扩大, 这一问题变得更加突出。

### 4.1 寿命约束下的机组有功功率自适应重分配

运行基线重构与劣化残差追踪机制输出的健康指数及剩余寿命预测结果, 为机组的主动功率调节提供了量化边界。当核心部件的健康指数进入加速衰退阶段, 控制系统依据剩余寿命预估窗口动态修正有功功率设定值。该策略建立部件累积损伤速率与功率输出的映射关系, 在电网调度指令允许范围内, 以延缓关键部件劣化速率为约束条件, 反向求解当前工况下的最优功率系数。

以某风场一台 2.0 MW 直驱机组为例, 该机组主轴承在连续运行三年八个月后, 劣化残差追踪机制输出的健康指数从 0.94 下降至 0.71, 剩余寿命预测显示剩余可用时间约为 38 天。该机组所在场区受电网调度考核, 全年发电量偏差超过 3% 将触发罚款条款, 因此功率受限运行需在调度允许的弃风时段内执行。现场运维团队将剩余寿命预测结果接入机组主控系统后, 控制系统根据健康指数衰减速率, 在每日电网调度下发的限电窗口期内动态调整功率系数。在健康指数低于 0.75 且剩余寿命不足 45 天时, 系统将限电时段内的功率系数由 1.0 逐步下调至 0.82, 使机组在该时段内的最大输出功率由 2.0 MW 降至 1.64 MW。载荷监测数据显示, 功率受限运行期间主轴承载径向载荷均值较满发时段下降约 12% 至 17%, 轴承温度日均波动幅度较功率调整前收窄 3.8 °C。该机组在累计 32 天的限电窗口内以受限状态运行, 较立即停机维修方案多发电量 21 万千瓦时, 同时轴承温度峰值未超过预警阈值, 最终在预定窗口内完成更换。

### 4.2 多维成本惩罚函数驱动的停机时域寻优

劣化残差追踪机制输出的失效概率曲线与剩余寿命分布, 为维修停机时点的量化决策提供了动态先验信息。本文构建以停机损失、维修成本与故障风险成

本为核心要素的多维惩罚函数,将机组实时健康状态与风功率预测信息共同纳入约束条件。通过求解惩罚函数的极小值,锁定理论最优停机窗口。

以某风场一台 2.0 MW 双馈机组为例。该机组齿轮箱高速轴轴承连续运行五年后,劣化残差追踪机制输出的健康指数从 0.91 降至 0.64。历史故障数据统计显示,该型轴承健康指数低于 0.70 后,突发性故障概率随运行天数增加呈指数上升趋势。模型预测,该轴承未来 30 天内的故障概率为 62%。现场运维人员结合该机组所在回路的风功率预测数据,发现未来两周将有连续大风过程,平均风速维持在 8 米每秒至 10 米每秒。若立即停止机器进行维修,会损失大约 31 万千瓦时的发电量,以当地上网电价计算出的停机损失是 17.8 万元。主吊车资源在 25 天后可以调拨到到现场以进行齿轮箱更换,提前停机会使设备产生闲置成本达到 7 万元。如果等到资源到齐再停机,就要承担轴承突然损坏造成齿轮箱二次损伤的风险,其故障风险成本等于失效概率同潜在损失 52 万元相乘。惩罚函数采用停机损失加上闲置成本、故障风险成本之和的方式设定,以天作为时间步长滚动计算各个停机时点的综合成本。计算结果显示,第 19 天到第 23 天这段时间的综合成本位于谷值区间,第 21 天时的综合成本最低,大约为 21.3 万元。到第 21 天时,轴承的振动加速度值已经从最初的 0.12g 上升到 0.27g,不过还没有进入加速失效的阶段,运维团队在该日进行了停机操作,吊车资源也同时进场。该次维修方案比立即停机方案的综合成本降低了 19.7%,也比等待资源到位方案减少了 64.2%,并且防止了因轴承彻底失效而导致的齿轮箱二次损伤<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 动态失效率先验下的供应链节点随机规划

劣化残差追踪机制输出的动态失效率曲线与剩余寿命概率分布,为维修资源的供应链调度提供了时间轴上的先验信息。构建以维修备件库存节点与运维团队排程为决策变量的随机规划模型,将失效率越过设定阈值的时刻作为资源调度的触发信号。模型采用滚动时域优化方法,以剩余寿命分布作为时间驱动因子,对备件锁定、仓储调拨与人员预派遣进行联合求解<sup>[5]</sup>。

以某风场集群为例,该场区共有 33 台 2.5 MW 机组,分布在山地丘陵地带,距离最近的中心备件库约 120 千米。依据该场区历史维修数据统计,主轴承失效率阈值设定为 0.4 时,可在故障发生前预留充足的资源调拨窗口,且误触发率控制在 5% 以内。劣化残差追踪机制对全场机组持续评估后,输出三台机组的主轴承失效率曲线在未来 30 天内将先后越过 0.4 阈值,其

中 A 机组剩余寿命预测区间为 16 天至 22 天, B 机组为 26 天至 33 天, C 机组为 35 天至 43 天。考虑到预测区间存在不确定性,模型设置资源预调度缓冲机制:当两台机组预测窗口间隔小于 5 天时,启动备件双路径配置方案。优化结果显示,中心库锁定两套主轴承备件,其中一套在 A 机组失效率越过阈值时同步发运,另一套在 B 机组预测窗口前调拨至距离场区 30 公里的前置中转仓,新增中转仓月均仓储成本约 0.6 万元。吊车资源按照 A、B、C 三台机组的预测失效顺序进行串联排程,单台吊车在 23 天内完成三台机组更换作业,设备闲置时间压缩至 3 天。在实际执行中, A 机组在第 19 天停机更换, B 机组在第 28 天完成, C 机组在第 38 天完成,三台机组平均响应周期由 10 天缩短至 6 天,备件紧急调拨次数由 3 次降为 0 次,供应链综合成本(含新增仓储成本)下降约 23%。

#### 5 结束语

风电机组 SCADA 数据蕴含着设备全生命周期的状态信息,其价值释放的关键在于从海量监测参量中解耦出多物理场耦合的本质特征。通过动态边界约束下的数据清洗与变工况区间剥离,能够为后续诊断模型构建高保真的稳态数据基底。运行基线重构与劣化残差追踪机制将设备状态评估从静态阈值判断转向健康基准的动态比对,使早期微弱劣化特征得以有效识别。预测反馈信息的嵌入进一步打通了从状态感知到控制执行的闭环链路,使功率调节、停机时点选择与供应链调度形成协同决策,推动运维模式由被动响应向主动规划转变。

#### 参考文献:

- [1] 朱彦民,李忠虎,杨立清,等.基于卷积双向长短期记忆模型的风电机组故障预测[J].科学技术与工程,2024,24(25):10790-10797.
- [2] 黄仪灵,房方,卢成志,等.基于多源数据的风电机组可靠性模糊评估与健康预测研究[J].电气工程学报,2025,20(02):43-53.
- [3] 苏玮.新能源风力发电机组齿轮箱故障预警与预防性维护技术探讨[J].大众文摘,2024(41):126-128.
- [4] 郑毅,王承民,刘保良,等.基于多层级时空图神经网络的风电机组在线异常检测[J].电力系统自动化,2024(05):48.
- [5] 曹利宵,贾晓冰,李宁,等.基于自回归嵌入的风电机组传动系统双阈值状态监测[J].仪器仪表学报,2025,46(09):360-371.

# 智能电力系统在现代建筑中的应用

任芳芳<sup>1</sup>, 王超<sup>2</sup>, 刘俊麟<sup>3</sup>, 刘守洋<sup>4</sup>

(1. 滨州市雅祥建筑装饰工程有限公司, 山东 滨州 256606;

2. 滨州市水利工程有限公司, 山东 滨州 256600;

3. 滨州市沾化区新拓新能源有限公司, 山东 滨州 256800;

4. 山东翔恒建工有限公司, 山东 滨州 251707)

**摘要** 随着新型城镇化进程的加快, 现代建筑向绿色化、智能化方向深度转型, 智能电力系统作为建筑运行的核心基础设施, 成为支撑现代建筑高质量发展的关键。本文系统分析了智能电力系统在现代建筑中的核心作用与应用价值, 梳理了当前应用过程中面临的核心难题, 提出了针对性的优化应用路径, 旨在为提升现代建筑的供电可靠性、能效管理水平与低碳发展能力提供理论参考。

**关键词** 智能电力系统; 现代建筑; 能效管理; 供电可靠性

中图分类号: TU855

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.006

## 0 引言

新型城镇化背景下, 现代建筑的功能复合化、需求多元化特征日益凸显, 对电力系统的安全性、灵活性、高效性提出了更高要求。传统电力系统的粗放式管理模式已无法适配现代建筑的发展需求。因此, 构建智能化、网络化的电力系统成为必然趋势。通过引入先进的信息技术和自动化控制技术, 可以实现电力资源的优化配置, 提高能源利用效率, 确保电力供应的稳定性和可靠性。智能电力系统凭借数字化、自动化、智能化的技术优势, 成为现代建筑升级发展的必然选择。

## 1 智能电力系统在现代建筑中的作用与价值

### 1.1 提升建筑供电系统的安全可靠性

随着现代建筑向功能复合化发展, 使其对供电连续性和稳定性的要求远超传统单一功能建筑。供电系统作为核心支撑体系, 其可靠性直接决定建筑功能的正常运转。一旦出现供电故障, 不仅会影响建筑内日常办公、居住等基础功能的实现, 还可能引发消防、安防等系统的瘫痪, 造成严重的安全隐患与经济损失。智能电力系统通过数字化传感设备实现对建筑内配电路、变压器、开关设备等全环节电力参数的实时采集与监测, 能够精准捕捉线路过载、电压异常、设备温升等潜在故障隐患, 在故障发生初期触发预警并启动自动化保护机制, 快速隔离故障区域, 避免故障范围的扩大<sup>[1]</sup>。

### 1.2 优化建筑全周期的能效管理水平

建筑是全社会能源消耗的重要载体, 其中电力能耗在建筑总能耗中的占比持续提升, 传统粗放式的能效管理模式无法实现对建筑用电的精细化管理, 造成了大量的能源浪费。智能电力系统依托边缘计算与大数据分析技术, 能够对建筑内不同区域、不同设备、不同时段的用电数据进行精细化拆分与深度分析, 精准定位建筑内的高能耗环节与无效能耗点, 为能效优化提供全面的数据支撑。系统可结合建筑内人员流动、环境变化、设备运行状态等动态信息, 自动调节空调、照明、给排水等用电设备的运行功率与启停状态, 在保障建筑内使用舒适度的前提下, 最大限度降低设备的无效能耗。同时, 智能电力系统可实现对建筑能耗数据的全周期追溯与可视化呈现, 帮助建筑运营管理者清晰掌握建筑能耗的变化规律, 制定针对性的节能管理策略, 实现建筑从设计、施工到运营全周期的能效精细化管理, 持续降低建筑的整体能耗水平。

### 1.3 支撑建筑多元场景的用电需求适配

现代建筑的功能呈现出高度复合化的特征, 涵盖居住、办公、商业、文娱、公共服务等多种场景, 不同场景的用电负荷特性、用电时段与用电需求存在显著差异, 同时分布式光伏、储能设备、新能源汽车充电桩等新型用电设施的接入, 也对建筑电力系统的灵活性与适配性提出了更高要求。智能电力系统具备灵活的负荷调度与源网荷储协同控制能力, 能够根据不

作者简介: 任芳芳(1985-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程。

同场景的用电需求特征,动态调整电力分配策略,实现对不同区域、不同场景用电负荷的精准调控,避免出现局部负荷过载或电力资源闲置的问题<sup>[2]</sup>。

## 2 智能电力系统在现代建筑中的应用难题

### 2.1 建筑既有设施与智能系统的适配性不足

我国现代建筑的存量规模庞大,其中大量既有建筑的电力系统建设时间较早,采用的是传统的配电设备与线路架构,设备的数字化、自动化水平较低,无法实现电力参数的实时采集与远程控制,难以与智能电力系统实现有效对接。部分新建建筑在设计阶段,未能将智能电力系统与建筑整体设计进行深度融合,电力系统的设计仍沿用传统的架构模式,仅在后期加装部分智能传感与控制设备,导致智能电力系统的功能无法得到充分发挥。同时,不同厂商生产的配电设备、智能终端的通信协议与技术标准存在差异,设备之间的兼容性不足,给智能电力系统的整体搭建与稳定运行带来了较大的阻碍,影响了系统应用的整体效果。

### 2.2 系统建设与运维的成本管控难度较大

智能电力系统的建设需要配置大量的智能传感设备、边缘计算终端、自动化控制装置与数字化管理平台,相较于传统电力系统,前期的设备采购、系统搭建与工程施工的投入成本显著更高,给建筑开发企业与运营管理方带来了较大的资金压力。部分中小型建筑项目受限于资金预算,只能选择简化版的智能电力系统,无法实现全环节的智能化管控,系统的应用价值难以充分体现。同时,智能电力系统的稳定运行需要持续的专业运维支持,系统涉及电力、自动化、信息技术等多个专业领域,运维过程中需要对各类智能设备、软件系统进行定期的检修、升级与维护,运维的技术门槛与成本投入相对较高,而多数建筑运营管理方缺乏完善的运维体系,难以实现对系统全生命周期的成本管控,进一步制约了智能电力系统的规模化应用<sup>[3]</sup>。

### 2.3 跨系统数据互通与协同控制能力不足

现代建筑内包含电力、消防、安防、暖通空调、照明、电梯等多个独立运行的智能化系统,不同系统分属不同的厂商建设与运维,各自采用独立的数据库与管理平台,形成了严重的数据孤岛,无法实现数据的互通共享与系统之间的协同联动。智能电力系统的核心价值在于通过全维度的数据采集与分析,实现对建筑内所有用电设备的协同管控,而数据孤岛的存在,导致智能电力系统无法获取其他系统的运行数据与状态信息,难以结合建筑内的实际运行情况制定最优的电力调度与控制策略。部分建筑虽然搭建了统一的建

筑智能化管理平台,但平台的协同控制逻辑不够完善,无法实现不同系统之间的深度联动,智能电力系统的自动化、智能化控制能力无法得到充分发挥,系统的应用效果大打折扣。

### 2.4 专业技术人才与管理体的配套缺失

智能电力系统是电力工程、自动化控制、信息技术、建筑管理等多个专业领域深度融合的产物,系统的设计、建设、运维与管理都需要具备跨领域专业能力的复合型人才,而当前行业内这类复合型人才的供给存在较大缺口,无法满足智能电力系统规模化应用的需求。多数建筑运营管理方的工作人员仅具备传统电力系统的运维管理经验,对数字化、智能化技术的掌握程度不足,无法熟练操作智能电力系统的管理平台,也难以处理系统运行过程中出现的各类技术故障,导致系统的很多智能化功能无法得到有效利用。同时,多数建筑项目尚未建立与智能电力系统相匹配的标准化管理体系,系统的运行管理、数据管理、安全管理、应急处置等环节缺乏明确的规范指引,管理的混乱进一步影响了系统的稳定运行与价值发挥,制约了智能电力系统在现代建筑中的广泛应用<sup>[4]</sup>。

## 3 智能电力系统在现代建筑中的应用路径

### 3.1 推动建筑电力系统的标准化设计与适配性改造

针对新建现代建筑项目,应在建筑设计的初始阶段,将智能电力系统纳入建筑整体设计体系,结合建筑的功能定位、场景布局、负荷特征与未来发展需求,开展电力系统的标准化、一体化设计,提前预留智能设备的安装空间、通信线路与接口,保障智能电力系统与建筑整体的深度融合,为系统功能的充分发挥奠定基础。针对既有建筑项目,应结合建筑的实际情况,制定分阶段、分层次的适配性改造方案,优先对建筑内的核心配电设备、关键负荷回路进行智能化改造,加装标准化的智能传感与控制设备,逐步实现对建筑电力系统全环节的数字化覆盖。同时,行业内应加快完善智能电力设备的技术标准与通信协议规范,推动不同厂商设备的标准化与兼容性提升,打破设备之间的技术壁垒,降低智能电力系统的建设与改造难度,推动系统的规模化推广应用。

### 3.2 构建全生命周期的成本管控与价值转化体系

应针对智能电力系统的建设与运维,构建覆盖项目全生命周期的成本管控体系。在项目设计阶段,结合建筑的实际需求与资金预算,制定科学合理的系统建设方案,避免过度设计带来的不必要成本投入。在设备采购与工程施工阶段,通过集中采购、标准化施

工等方式,降低系统建设的直接成本。同时,应充分挖掘智能电力系统的价值转化潜力,通过精细化的能效管理降低建筑的长期用电成本,通过设备状态的实时监测与故障预警,延长设备的使用寿命,降低设备的维护与更换成本,通过源网荷储协同控制与峰谷电价套利,降低建筑的用电支出,让项目投资方与运营管理方能够在短期内看到系统应用带来的经济效益,提升其应用智能电力系统的积极性。此外,可探索引入合同能源管理等市场化模式,由专业的能源服务企业承担系统建设与改造的前期投入,通过节能收益的分成实现多方共赢,缓解项目的资金压力,推动智能电力系统的广泛应用<sup>[5]</sup>。

### 3.3 搭建统一的建筑智能化管理平台与数据互通机制

应加快搭建统一的建筑智能化管理平台,将智能电力系统与建筑内的消防、安防、暖通空调、照明、电梯等其他智能化系统纳入统一的平台进行管理,制定统一的数据采集、传输、存储与应用标准,打通不同系统之间的数据壁垒,实现全系统数据的互通共享与集中管理。依托统一的管理平台,智能电力系统可实时获取建筑内各区域的人员流动情况、环境参数变化、设备运行状态等全维度数据,结合大数据分析 with 人工智能算法,制定更加精准、高效的电力调度与设备控制策略,实现对建筑内所有用电设备的协同管控,在保障建筑使用舒适度的前提下,最大化提升系统的能效管理水平。同时,应不断完善平台的协同控制逻辑,优化不同系统之间的联动机制,如在消防系统触发火灾预警时,智能电力系统可自动切断非消防电源,启动应急照明与排烟设备的供电,提升建筑的整体安全应急能力,充分发挥智能电力系统的核心价值。

### 3.4 完善复合型人才培养与标准化管理体系建设

行业内应加快完善智能电力领域复合型人才的培养体系,推动高校与职业院校优化相关专业的课程设置,增加电力工程、自动化控制、信息技术、建筑管理等跨领域课程的融合,培养具备综合专业能力的应用型人才,同时加强与行业企业的合作,通过校企合作、实训基地建设等方式,提升人才的实践能力,满足行业发展的人才需求。建筑运营管理方应加强对现有工作人员的专业培训,定期组织开展智能电力系统操作、运维、应急处置等方面的培训课程,提升工作人员的专业能力与实操水平,使其能够熟练掌握系统的各项功能,充分发挥系统的智能化优势。同时,应结合智能电力系统的运行特征,制定完善的标准化管理体系,明确系统运行管理、数据安全、设备运维管理、

应急处置等各个环节的管理规范与岗位职责,实现系统管理的标准化、规范化,保障智能电力系统的长期稳定运行与价值的持续发挥。

### 3.5 深化源网荷储协同与电网需求侧响应的融合应用

应充分发挥智能电力系统的源网荷储协同控制能力,结合现代建筑的屋顶资源与空间条件,合理配置分布式光伏、储能设备与新能源汽车充电桩等设施,通过智能电力系统实现分布式电源、储能设备、建筑用电负荷与公共电网的高效协同,最大化消纳分布式光伏产生的绿色电能,提升建筑绿电自用比例,降低建筑的碳排放与用电成本<sup>[6]</sup>。同时,智能电力系统可依托数字化平台与公共电网实现数据互通,积极参与电网的需求侧响应,结合电网的峰谷电价政策、供需情况与调度指令,优化建筑的用电计划与储能充放策略,在用电高峰时段主动削减非核心负荷,释放储能电量,在用电低谷时段增加储能充电,平抑电网的峰谷负荷差,提升电网的运行稳定性。通过与公共电网的深度协同,智能电力系统不仅能够提升建筑自身的经济效益与低碳水平,还能够为新型电力系统的建设提供支撑,实现建筑与电网的双向赋能,进一步拓展智能电力系统的应用价值与发展空间。

## 4 结束语

智能电力系统是现代建筑实现智能化、绿色化转型的核心支撑,在提升供电安全可靠、优化全周期能效管理、适配多元用电需求等方面具有显著价值。当前,智能电力系统在现代建筑中的应用仍面临设施适配、成本管控、数据协同、人才配套等现实难题,需通过多维度的优化路径破解发展瓶颈,推动智能电力系统的规模化应用,为建筑行业的高质量发展与双碳目标落地提供坚实支撑。

## 参考文献:

- [1] 徐才伟,李砦.智能建筑系统在现代建筑工程中的集成与应用[J].石材,2026(03):98-100.
- [2] 刘讓,尹宏.智能电网技术在现代电力系统中的应用与挑战[J].通讯世界,2025,32(03):91-93.
- [3] 张世怡.智能消防系统在现代建筑中的应用研究[J].消防界(电子版),2023,09(20):55-57.
- [4] 郑业景.楼宇自控系统在现代智能建筑中的应用[J].新型工业化,2021,11(11):224-225,230.
- [5] 王建明.探析楼宇自控系统在现代智能建筑中的应用[J].大众标准化,2021(12):31-33.
- [6] 静国梁.电力信息通信技术在智能建筑电气及电网中的应用[J].电子元器件与信息技术,2020,04(03):111-112.

# 智能化技术在市政工程管理中的应用研究

黄希刚

(唐山市市政建设总公司, 河北 唐山 063000)

**摘要** 为了解决传统市政工程管理模式在效率、精准度与安全监管等方面难以适应现代城市高质量发展需求的问题, 本文对智能化技术在市政工程施工管理中的实践路径进行系统探讨, 从 BIM 技术、人脸识别闸机、实名制管理系统、智能视频监控及 AI 行为识别、物联网传感器等方面对某市新区主干道示范工程的智能化应用进行了深入分析。结果表明: 以智慧工地平台为核心构建数字化管理体系后, 项目设计冲突 100% 做前置化解, 安全隐患识别响应时间缩短到 10 s 内, 人员考勤准确率 99.6%, 路基压实合格率提高到 98.5%, 施工效率提高了约 18%。

**关键词** 智能化技术; 市政工程管理; BIM 技术; 人脸识别; 智能监控

**中图分类号**: TU99; TP2

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.007

## 0 引言

由于城市化进程加快、基础设施规模持续扩大, 传统市政工程管理模式在效率、精度、响应速度方面已不能适应现代城市治理的需要, 而物联网、大数据、人工智能、数字孪生等智能化技术正在迅猛发展, 为市政工程管理带来了新的方法。因此, 探索智能化技术在市政工程管理中的融合路径及应用潜力, 具有重要的现实紧迫性和战略价值, 是推动城市治理体系和治理能力现代化的关键方向之一。

## 1 市政工程施工中常见的智能化技术

### 1.1 BIM 技术的应用

建筑信息模型 (BIM) 技术在市政工程中已有十分成熟的应用, 从规划、设计、施工直到运维各阶段都加以充分利用。道路、桥梁、综合管廊等项目中应用 BIM 进行三维建模, 将几何、材料、工期、成本诸种要素自然、合理地整合在一起, 解决传统二维图纸中管线冲突、施工碰撞诸种难题, 施工阶段可结合 4D/5D 模拟优化进度及资源调度, 运维阶段又可直接为设施管理建立可视化数据底座<sup>[1]</sup>。

### 1.2 人脸识别与人员实名制管理

由于人脸识别技术是十分成熟的生物识别手段, 故在市政工程“智慧工地”建设中已有应用。工地出入口布置人脸识别闸机, 即可自动、准确地完成工人考勤、身份核验、进出记录诸种登记, 因而有利于实现劳务人员实名制管理, 与安全培训、特种作业资质数

据库良好联动, 未培训或证件过期者不得进入作业区。

### 1.3 智能视频监控与 AI 行为分析

以高清摄像头及 AI 算法为基础的智能视频监控系统已经在市政工地得到广泛应用, 系统能做到 24 小时无死角录像, 又可借助深度学习技术自动、可靠地识别未戴安全帽、未系安全带、违规吸烟、区域入侵诸种高风险行为, 及时向管理人员手机或指挥中心发出告警<sup>[2]</sup>。

### 1.4 施工设备状态智能监控

市政工程施工阶段对塔吊、挖掘机、混凝土泵车、压路机等重要机械设备运行状态的实时监控已经是智慧工地建设的重要内容。在设备上加装振动、温度、油压、倾角、电流诸种传感器, 再配合物联网通信模块, 把设备运行参数、工作时长、负载状态、故障代码等数据实时上传到智慧工地管理平台。平台借助大数据分析及规则引擎, 自动、及时地识别超载、过热、非授权操作等异常工况, 由此杜绝设备带病作业带来的安全风险及工期损失<sup>[3]</sup>。

## 2 智能化技术在市政工程管理中的应用

### 2.1 工程概况

某市新区主干道建设工程 (示范段) 全长约 2.8 km, 规划红线宽度为 50 m, 采用双向六车道断面布置, 两侧设非机动车道及人行道。道路等级为城市主干路, 设计车速 60 km/h。项目管理目标聚焦“安全零事故、质量创优、进度可控、绿色低碳、智慧建造”, 明确

**作者简介**: 黄希刚 (1967-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 市政施工管理。

要求全面应用BIM技术、智慧工地平台、AI视频监控、人员实名制及施工机械智能监控等成熟智能化手段，打造区域市政工程数字化管理标杆。

## 2.2 智能化技术的应用

本项目以“智慧工地”综合管理平台为核心载体，系统集成多项成熟智能化技术，全面支撑施工全过程精细化管控，智能技术应用体系见图1。

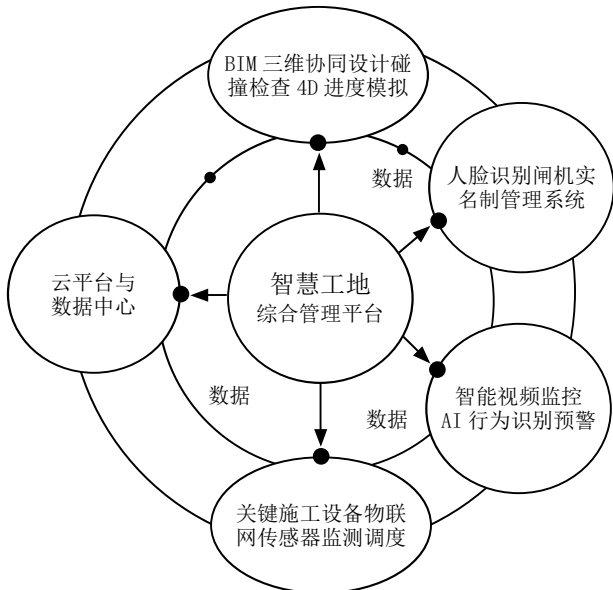


图1 智能技术应用体系

项目以统一的云平台及数据中心为基础，应用BIM技术做三维协同设计、碰撞检查及4D进度模拟，实现设计与施工的衔接。该项目在进场人员入口设置人脸识别闸机，配合实名制管理系统，对进场人员的身份核验、考勤统计、安全培训状态三者予以联动管理，劳务管理因而规范可控。项目布置了全覆盖的智能视频监控网络，辅以AI行为识别算法，自动及时地预警未戴安全帽、违规穿越等危险行为<sup>[4]</sup>。

### 2.2.1 BIM碰撞检查

该项目在设计深化、施工准备阶段引入BIM技术开展碰撞检查，由于工程地下管线极其密集，给水、雨水、污水、电力、通信、燃气诸种专业管线交织在一起，传统二维图纸极难及时发现空间冲突。因此项目团队以Revit平台为基础建立了全专业三维信息模型，继而用Navisworks对各专业进行协同整合及自动碰撞检测，设置硬碰撞（实体构件重叠）及软碰撞（间距不足）规则，识别出137处冲突点，诸如雨水管与电力井位置重叠、污水管高程低于地基梁等。项目在开工前组织BIM协调会议对所有冲突点予以优化调整，

做到了事前解决、避免返工、杜绝开挖、防止变更。

### 2.2.2 4D进度模拟

为了实现施工进度的可视化、动态可控，项目把BIM模型与Project计划合理地融合，先将WBS工作分解结构与BIM构件逐项关联，给各模型要素赋予明确的开始/结束时间、资源需求及施工逻辑关系，继而用Synchro软件做4D进度模拟推演，直观地呈现道路基层摊铺、沥青面层施工、人行道铺装、附属设施安装各阶段的空间时序安排<sup>[5]</sup>。在交叉路口施工高峰期的模拟中提前暴露出压路机与混凝土运输车作业路径冲突的问题，因而促使项目部主动、及时地优化施工组织，错峰安排机械进场。

### 2.2.3 人脸识别闸机

本项目在施工现场主出入口及生活区通道各处合理、有序地布置了6套有活体检测功能的人脸识别闸机系统，成为智慧工地人员管理的第一道防线。所有管理人员、施工班组人员及访客都须先在实名制平台完成人脸信息采集、身份绑定，方能获得通行权限。闸机所用红外双目摄像头配合先进的AI算法，能在0.3s内可靠、快速地完成1:1或1:N比对，因而能有效地防范照片、视频等各类欺骗手段。该系统与住建部门实名制监管平台实时无缝对接，考勤数据自动上传，真正做到“一人一档、进出可溯”<sup>[6]</sup>。施工高峰期日均通行人数已达1200人次，系统运行稳定，识别准确率长期保持在99.6%以上。闸机还与安全培训数据库联动，未完成三级教育或特种作业证过期的人员，即使人脸信息正确也一律不得通行，从源头切实杜绝无资质上岗。

### 2.2.4 实名制管理系统

本工程充分利用省级建筑工人实名制管理平台及项目自建智慧工地系统，建立了覆盖全体人员、全过程管理的实名制体系。进场人员先按身份证读取、人脸采集、劳动合同上传、工伤保险缴纳诸种程序完成注册，系统随即自动生成工种、技能等级、培训记录、健康情况诸种信息的唯一电子档案<sup>[7]</sup>。因此项目部借助移动端APP即可随时、实时查看各班组的在岗人数及出勤率。工资发放系由平台银行专户直接发放，做到“月结月清、足额支付”，有利于防范劳资纠纷。

### 2.2.5 智能视频监控AI行为识别

项目在全线各重要区域布置了32路高清AI摄像头，建成覆盖全线、全天候运行的智能视频监控网络，结合深度学习算法对未佩戴安全帽、未系安全带、吸烟、

闯入危险区域（深基坑、吊装半径内）、车辆超速等十余种违规行为自动识别，故能及时触发声光报警，把抓拍图像及准确位置信息实时、可靠地推送至安全员手机及指挥中心大屏，真正形成“发现—告警—处置”闭环。夜间施工时 AI 还能自动识别照明不足或反光衣缺失的情况。所有视频数据均同步保存于本地边缘服务器及云端，支持按时间、区域、事件类型回溯检索，为事故调查与安全教育提供素材<sup>[8]</sup>。

### 2.2.6 物联网传感器

项目在机械设备、环境监测点及重点工序部位广泛部署物联网（IoT）传感器。在 8 台主要施工设备（摊铺机、双钢轮压路机、挖掘机）上安装振动、倾角、油温、作业时长诸种传感器，把运行数据实时、准确地传送到智慧工地平台，遇超负荷、异常停机、偏离

作业面等情况即自动报警<sup>[9]</sup>。同时，在施工现场布设扬尘（PM2.5/PM10）、噪声、风速等环境传感器，数据超标时联动喷淋系统自动启动，切实保证绿色施工目标达成。

### 2.3 项目效果分析

通过系统化集成 BIM、人脸识别、AI 视频监控、实名制管理及物联网传感等智能化技术，本市政主干道工程在施工安全、质量控制、进度保障与绿色建造等方面取得显著成效，具体见表 1。通过智能化技术应用体系，该项目实现人员进出 100% 可追溯，高风险行为识别响应时间缩短到 10 s 内，设计碰撞问题做到 100% 前置解决，关键工序压实合格率达 98.5%，返工及资源浪费大大减少，施工效率提高了约 18%。

表 1 智能化技术应用前后关键管理指标对比

指标类别	应用前（传统模式）	应用后（智能化模式）	提升 / 改善效果
设计冲突发现率	约 40%（施工阶段暴露）	100%（施工前解决）	冲突处理前置化
安全隐患识别时效	人工巡检，平均 2 ~ 4 小时	AI 自动识别，< 10 s	响应速度提升 99%+
人员考勤准确率	约 85%（存在代打卡）	99.6%（人脸活体验证）	管理真实性显著增强
路基压实合格率	92%	98.5%	质量稳定性提高
月度进度偏差率	+12%	+5%	计划执行力增强
扬尘超标响应时间	30 min 以上	自动联动，< 2 min	环保合规性提升

（数据来源：本项目智慧工地平台运行前后统计汇总。）

## 3 结束语

智能化技术的深度应用不仅解决了市政工程施工中“看不见、管不细、控不准”的痛点，更构建了以数据为核心的新型项目管理模式，为后续同类工程提供了可复制、可推广的数字化建设范式。本文通过探讨典型市政道路工程中智能化技术的应用，论证了以 BIM、物联网、人工智能和大数据为基础的智慧工地体系在提高施工管理精细化、标准化、可视化等方面所具有的重大价值。未来，5G、数字孪生、边缘计算等新技术成熟之后，市政工程管理将向“全要素感知、全过程协同、全周期智能”的方向发展。

### 参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑信息模型应用统一标准 :GB/T 51212-2016[S]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2016.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑信息模型施工应用标准 :GB/T 51235-2017[S]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2017.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 人力资源和社会保障部. 建筑工人实名制管理办法 (试行)[Z]. 建市 [2019] 18 号 ,2019.

[4] 中华人民共和国公安部. 安全防范工程技术标准 :GB 50348-2018[S]. 北京 : 中国计划出版社 ,2018.

[5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 建筑施工机械与设备 远程监控系统通用技术条件 :GB/T 38187-2019[S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2019.

[6] 郝瑞. 智能化技术在市政道路施工管理中的应用研究 [J]. 新城建科技 ,2026,35(01):37-39.

[7] 蒋锋. 智能化技术在市政工程管理中的应用研究 [J]. 新城建科技 ,2025,34(06):16-18.

[8] 苗宇廷. 智能化技术在市政道路施工管理中的应用 [J]. 新发现 ,2025(12):52-54.

[9] 杜洁, 龙念, 梁鹏鹏. 基于人工智能的市政道路智能化施工技术研究 [J]. 住宅与房地产 ,2025(11):53-55.

# 智能化矿山建设中机电技术的发展趋势分析

郭超

(山西省工程职业技术学院, 山西 大同 037006)

**摘要** 随着煤矿生产方式由机械化向数字化、网络化、智能化不断推进,机电技术成了智能化矿山建设的关键支撑。本文以智能采掘、机电运输、状态感知、远程集控、安全保障等主要场景为依托,结合典型应用实践,对智能化矿山建设过程中机电技术的现实应用及未来发展方向进行系统的整理。结果表明,机电技术正在促使矿山生产组织由单机自动化向系统协同化转变,由人工经验控制向数据驱动决策转变,由故障后检修向全过程预警处置转变,在减员增效、节能降耗、安全稳产等各方面具有明显的优势。未来相关技术会向着自主协同、柔性联动、精准感知、少人值守、主动防控的方向不断深入,给矿山安全高效运行提供更好的支持。

**关键词** 智能化矿山; 机电技术; 协同控制; 远程集控; 安全防护

中图分类号: TD63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.008

## 0 引言

随着矿山开采强度不断增大,安全生产要求也越来越高,传统的机电系统已经不能满足高效协同、实时感知、智能决策的要求。5G、工业互联网、人工智能、物联网和边缘计算等技术不断渗入矿山的生产体系当中,使采掘、运输、监测、运维以及安全等各方面的作业方式发生了深刻的改变<sup>[1]</sup>。机电技术已经由原来的单一设备运行保障变成一种联系装备、数据、控制和管理纽带。基于此,本文根据智能化矿山建设的实际需要,对机电技术的典型应用进行归纳,分析其发展趋势,为矿山机电系统优化升级提供参考。

## 1 智能化矿山建设中机电技术概述

智能化矿山建设中机电技术就是指把机械装备、电气控制、自动化系统和信息通信技术有机融合起来,为矿山采掘、运输、通风、排水、供电、安全等全过程服务的体系。其核心已经不再是保证设备的正常运转,而是依靠传感感知、数据采集、智能控制、远程通信以及协同决策,使设备运行状态可以实时知道、生产过程可以动态控制、关键环节的风险可以预警。伴随着5G、工业互联网、人工智能、边缘计算等技术的快速渗透到矿山中,机电技术也从以前的单机控制、局部自动化向系统集成、全流程智能协同转变,已经成为提高矿山安全水平、生产效率、精细化管理水平的基础性技术<sup>[2]</sup>。

## 2 智能化矿山建设中机电技术的应用

### 2.1 智能采掘协同应用

智能采掘协同系统利用5G+工业互联网技术,把采煤机、液压支架、刮板输送机等主要设备的运行数据以低时延网络的形式传送到地面控制中心,从而达到对开采参数进行毫秒级实时调节的目的。系统安装有AI视觉识别模块,可以对煤层厚度变化做实时监测,煤层厚度发生变化时,自动调节采煤机滚筒高度,保证工作面采高误差不超过±5厘米,回采率达到95%以上<sup>[3]</sup>。系统自带的协同作业算法可以依据液压支架的支护状况,自行调节刮板输送机的速度,防止出现过载停机的情况。在晋能控股集团塔山煤矿,该系统使用后把工作面生产班操作人员由原来的12人减少到3人,单班产量保持在1.2万吨,综合能耗降低18%。利用三维激光扫描和惯性导航技术对井下进行实时的地质建模,指导采煤机进行“记忆割煤”,一刀割煤量达到5500吨,原煤日产量超过3万吨。本项目改善巷道布置,减小煤柱损失50万吨以上,年节省掘进成本超过2600万元,达成安全、高效、效益三者兼顾的目的。

### 2.2 机电运输联动应用

机电运输联动体系就是对核心运输设备进行智能化改造,创建出高效输送、智能控制、安全预警的综合管理系统。该系统采用永磁同步电机和智能变频控制方式,可以达到精确控制的目的,不但可以解决重

作者简介: 郭超(1989-),男,本科,工程师,研究方向: 机电及矿山机电教学研究。

载启动难的问题,而且使运行能耗降低 12%,还可以延长设备的检修周期。系统所搭载的智能监控平台可以实时采集到 12 个主要的运行参数,在出现异常情况的时候能够发出预警并启动保护,多次成功地避免了故障的发生。在晋能控股赵庄煤业,西胶大巷皮带驱动系统升级改造后,皮带运行速度提高 39%,运煤能力提高 25%,可以满足多工作面同时推进时的集中运输需求。

### 2.3 设备状态感知应用

设备状态感知系统在关键位置设置高精度传感器,对振动、温度、电参数等各方面信号进行实时采集,利用智能算法建立故障预警模型和专家知识库,从而达到隐患早发现、早预警、快定位的目的。该系统把物联网、大数据、人工智能等先进技术融合起来,以精准建模为依托,在设备参数出现微小趋势性变化的时候,就能立即察觉、秒级诊断,准确找到问题所在并加以剖析,给出解决方案<sup>[4]</sup>。山西焦煤西山煤电马兰矿机电设备在线监测和故障诊断系统投入使用后,矿井设备非计划停机次数明显减少,检修时间缩短近一半,关键设备寿命明显提高。系统可以实时监测预警,并且可以自动生成周期性的诊断报告,从而形成一个监测、预警、处置、验收的全过程闭环管理。

### 2.4 远程集控运维应用

远程集控运维体系依靠创建云端管理平台同智能终端之间的协同网络,实现对全部矿产设备的集中监控和远程操控。该系统使用 5G 混合专网架构,把 UPF/MEC 边缘节点下沉到矿区,使数据本地卸载和低时延传输得以实现,传输延迟控制在 50 ms 之内,保证远程操作的实时性、稳定性。系统配备有多个模态的智能分析平台,可以对视觉、声音、文本等各种各样的数据实施跨模态融合分析,依靠自身研发的算法来对大量的数据展开精确识别和深入研判,算法的识别准确率不得低于 90%。在晋能控股装备制造集团供电分公司,智慧巡检和安全管控项目实施后,单座变电站运维人员从原来的 12 人减少到现在的 4 人,每年节约的人力成本约为 64 万元,并且实现了“7×24 小时无人值守巡检”。另外,晋控电力长治发电公司把门禁、监控系统与智慧电厂物联网平台高效地整合在一起,形成了一个 24 小时不间断的“多屏联机”生产现场全方位监控系统。

### 2.5 安全保障闭环应用

安全保障闭环体系创建起“实时监控—智能告警—闭环处置”的全流程管控体系,把安全管理由原来的“被动应对”转变为“主动预警”。该系统依靠 5G、AI 技

术禀赋,创建起多模态智能剖析平台,可以实现视觉、声音、文本等数据的跨模态融合剖析,借助自研算法对海量数据展开精准识别和深入研判,算法识别准确率不低于 90%。系统 24 小时不间断工作,可以很好地解决人工监管的不足,促使煤矿安全管理工作由“人防为主、技防为辅”转变为“智防为主、人防为辅”<sup>[5]</sup>。在吕梁市鑫岩煤矿上搭建起通用基础模型,把单一场景下的 AI 模型训练数据量由原来的 5 000 张减少到现在的 100 张左右,训练时间由原来的 1 周缩短到现在的 1 天。系统可以对皮带的运行情况进行实时监测,可以准确地发现各种隐患并发出预警,联动相关设备进行停机处理,既保证了运输的安全,又减轻了人工巡检的工作量。

## 3 智能化矿山建设中机电技术的发展趋势

### 3.1 采掘系统自主协同

随着智能化矿山的不断深入,采掘系统机电技术也从原来的“设备联动控制”向现在的“自主感知、自主决策、自主执行”一体化协同迈进。未来的发展重点已经从单台采煤机、液压支架或者输送设备之间参数的匹配,转向覆盖工作面装备群、地质模型、生产任务和环境状态的统一协同控制体系。机电系统要将惯性导航、激光扫描、煤岩识别、姿态反馈、负载变化等信息及时传送到控制中枢,根据实时计算出的工作面推进速度、割煤轨迹、支护顺序、运输接续能力等来生成最优作业指令。这样一来,采掘作业就逐渐脱离了对固定程序以及经验调整的依赖,形成了对煤层起伏、顶板变化、设备波动具有自适应能力的作业方式。从另一个角度看,采掘系统会向着“群控化”方向发展,即把单工作面的优化拓展到多工作面协同,用上位调度平台统筹回采、掘进、运输和通风约束关系,使机电设备不再只是完成局部作业,而是参与到整个矿井生产组织优化当中来。其实质趋势就是把采掘机电系统由自动化执行单元变成具有连续学习、动态协同能力的智能作业主体。

### 3.2 运输链路柔性协同

机电运输系统在实现集中控制、联动运行之后,未来发展趋向于突出“柔性协同”的特点,也就是运输链路可以按照产量波动、线路负荷、设备健康状况以及作业组织等变化而做出相应的调整。传统的运输控制重视稳定的输送和单线的效率,接下来更重视各个节点、各个设备、各个任务之间的动态耦合能力。胶带输送机、转载机、提升设备、轨道运输、辅助运输车辆等将逐步纳入统一调度体系,依靠分布式控制

器、数字孪生模型、边缘协同算法来识别堵煤、偏载、空载、冲击启动、局部瓶颈等问题并主动调节启停顺序、速度曲线、功率分配。该运输体系不是简单的运转，而是具有按需配置的能力，根据采掘推进节奏和井下物流任务的变化，可以对运输资源进行快速重组。尤其在多工作面并行、峰谷负荷交替明显的矿井里，运输链路会越来越像一个可以调度、可以分流、可以自平衡的机电网络。其后续发展会和能源管理相结合，在保证运力的同时考虑峰值削减和能耗优化，把运输系统从单纯的生产配套环节变成具有效率调节、负荷协调、成本控制功能的智能支撑链。

### 3.3 感知监测精准融合

设备状态监测已经由原来的在线采集向在线诊断转变，未来更深层次的发展方向就是感知监测的精准融合，也就是把分散的参数监测整合成多源信息耦合的全景认知系统。单一温度、振动或者电流数据只能反映出局部异常的征兆，下一阶段机电监测会更加重视跨设备、跨系统、跨场景的数据联合解析，把视觉图像、声纹信号、电气波形、液压参数、工况记录和维修履历统一纳入分析框架，建立与设备寿命、负载规律、故障机理相对应的高精度识别模型。由此形成的监测体系，并不是简单的找出有无问题，而是可以判定出问题从何而来、将往何处发展、何时需要干预。伴随随机电装备数量不断增多，感知系统也会由点状布置变成网络化覆盖，利用边缘感知节点和云端模型的协同工作来达到井上井下、动设备和静设备、主系统和辅助系统之间的信息互通。进一步的方向就是将监测结果直接作为生产决策、检修决策的输入，让感知系统由技术的附属模块变为矿山运行调度的重要输入源。

### 3.4 集控运维少人值守

远程集控能大大减少现场值守岗位，但是其发展并不仅仅是简单的人员数量减少，而是一种由“远程取代人工操作”向“系统主导、人工决策兜底”少人值守新形态的转变。机电运维体系将依靠云边协同平台，把供电、排水、压风、提升、运输、通风和附属设施纳入同一个集控逻辑里，在同一个界面上实现状态总览、异常研判、工单生成、策略下发和处置反馈的闭环贯通。伴随着智能识别和规则引擎的不断发展，很多以前依靠人工巡检、人工确认、人工记录来完成的运维工作，将会逐渐被系统所代替，即异常筛选、优先级排序、检修窗口建议、操作风险校核等。少人值守的趋势就是重新塑造岗位的功能，把现场人员由常规的盯守者变为复杂的处理者，把地面调度人员由

设备的监看者变为系统的优化者。这就对机电技术提出了更高的要求，即控制系统要具有更强的稳定性、容错性以及可追溯性，在网络波动、局部故障或者极端工况下仍然可以保持基本运行。

### 3.5 安全防控主动演进

安全保障闭环应用日渐完善之后，机电技术的发展重点就会转移到更加前瞻的主动防控体系上，即把安全管理从事件响应型控制转变为风险孕育期干预。未来安全防控不再只是对违章行为、设备异常或者局部隐患进行识别告警，而是在人员行为、设备运行、环境参数、工艺状态和历史事故数据的基础上建立可以识别风险演化链条的主动防控模型。机电系统所起的作用也由原来执行保护命令转变为参与风险推演、预控决策。运输负荷异常、设备振动变化、巷道环境波动、人员活动轨迹有相关性的时候，系统可以提前判定出潜在的风险等级，并且会自动执行限速、降载、隔离、停机或者重新安排任务等一系列的操作，从而将事故消灭在萌芽状态之中。伴随着模型训练和规则不断的完善，安全控制会由原来的单点识别变成系统的预判，从即时处理变成全过程管控。

## 4 结束语

随着智能化矿山建设的不断发展，机电技术的功能边界也在发生变化，并且它的应用形式也越来越多。从采掘协同、运输联动、状态感知、远程集控到安全闭环防控，机电技术已经由原来的保障手段变成矿山智能运行体系的主要支撑。根据目前的应用效果可以发现，机电技术在提高生产效率、降低运行能耗、提高安全保障能力等方面有明显的优势。未来需要从系统自主协同、数据深度整合、运维模式重塑、风险主动防控四个方面不断努力，推动矿山机电系统向智能化、集约化、本质安全方向发展。

### 参考文献:

- [1] 徐记全,张雪山.智能化矿山机电设备中PLC技术的应用探究[J].机电产品开发与创新,2025,38(05):65-66,70.
- [2] 张振龙.智能矿山建设下煤矿机电管理[J].内蒙古煤炭经济,2024(09):169-171.
- [3] 霍建良.基于智能化矿山的煤矿机电设备安全技术管理措施研究[J].中国设备工程,2023(18):28-30.
- [4] 李红勇,张俊峰,马忠强.基于智能矿山建设环境的煤矿机电管理技术研究[J].自动化应用,2023,64(10):195-197.
- [5] 薛飞.浅析PLC技术在智能化矿山机电设备中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(08):153-154.

# 磁传感技术在工控视觉定位系统中的应用研究

谢 明

(西南应用磁学研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘 要** 在工业控制领域中, 视觉定位系统是实现设备精准操控、提升生产效率的核心支撑, 但在复杂工控环境下易受光照变化、粉尘干扰、遮挡等因素影响, 存在定位精度不足、稳定性差、响应滞后等问题, 难以满足高端工控场景的精准定位需求。本文以磁传感技术为核心优化手段, 结合工控视觉定位系统的应用难点, 系统分析磁传感技术与工控视觉定位的适配性, 设计基于磁传感技术的工控视觉定位系统, 涵盖总体框架、硬件、软件及抗干扰模块, 以期为工业控制领域精准定位提供实践参考。

**关键词** 磁传感技术; 工控视觉定位; 定位精度; 抗干扰设计; 工业控制

中图分类号: TP212; TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.009

## 0 引言

传统的基于工控机的视觉定位方法多采用图像采集 + 图像处理的方式进行定位, 然而在工业生产中不可避免地会受到光线变化、灰尘影响、机械阻挡以及磁场等因素的影响, 从而造成定位不稳定、速度慢等问题, 并容易发生失准情况, 无法满足高精度装配、机器人流水线等对定位精确性要求较高的应用需求<sup>[1]</sup>。磁传感具备抗干扰强、定位稳定、响应快、不依赖于光照及遮挡等特点, 这正好满足了对工控视觉定位系统进行改进的需求。基于此, 本文围绕磁传感技术在工控视觉定位系统中的应用展开研究, 通过系统设计与实践验证。

## 1 工控视觉定位系统现存问题

传统工控视觉定位系统以图像采集模块、图像处理模块、定位算法模块为核心, 依赖图像特征提取与匹配实现定位, 在复杂工控场景中暴露出诸多核心问题, 严重制约定位性能与工程应用效果。(1) 环境适应性差, 工业现场的光照波动会导致图像采集对比度下降、特征点模糊, 粉尘污染会遮挡图像采集镜头、干扰图像质量, 设备遮挡则会造成图像特征缺失, 三者均会导致定位算法误判, 降低定位精度, 甚至引发定位失效。(2) 定位精度与响应速度矛盾突出, 为提升定位精度需增加图像像素与特征点数量, 导致图像处理数据量激增, 响应延迟延长, 难以满足高速工控场景中设备实时操控的需求, 而降低数据量则会导致定位精度下降, 无法适配高端制造的精准定位要求。(3) 抗电磁干扰性能差, 工控现场有许多高频设备, 其电

磁波会对图像采集及传输产生干扰, 造成图像数据缺失、畸变, 引起定位算法不稳, 并且系统本身的图像处理部分电磁兼容性不高也会造成定位抖动<sup>[2]</sup>。(4) 鲁棒性不够强, 传统的定位算法对于工件的姿态变化以及表面纹理的变化适应性不够好, 在工件发生偏斜、磨损的情况下, 图像特征难以获取, 定位精度下降较大, 不能满足工业现场工件种类多、环境复杂的需求。

## 2 基于磁传感技术的工控视觉定位系统设计

### 2.1 系统设计总体框架

基于磁传感技术的工控视觉定位系统采用“分层架构、模块化设计”理念, 构建“感知层—传输层—处理层—应用层”四级总体框架, 各层级独立运行且协同联动, 实现磁传感信号与视觉信号的融合定位, 具体如图 1 所示。

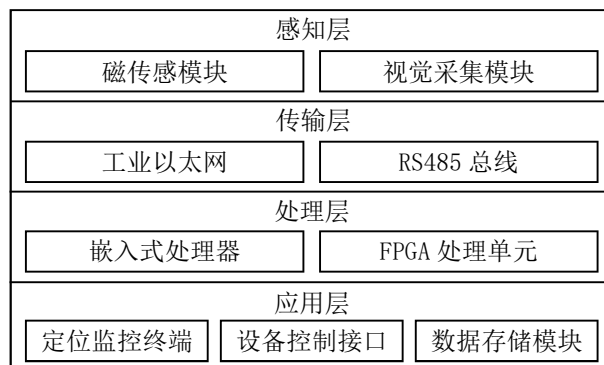


图 1 基于磁传感技术的工控视觉定位系统框架

感知层作为系统数据采集核心, 包含磁传感模块与视觉采集模块, 磁传感模块选用高精度磁传感器阵

作者简介: 谢明 (1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 自动化设备控制。

列,负责采集工控场景中的磁场强度、方向等特征信号,为定位提供基准位置信息;视觉采集模块由工业相机、镜头及补光单元组成,负责采集工件及设备的图像信息,提取图像特征点。传输层采用工业以太网与RS485总线结合的双传输模式,工业以太网负责传输大数据量的图像数据,确保传输速率与稳定性;RS485总线负责传输磁传感信号及控制指令,具备抗干扰强、传输距离远的优势,适配工控现场复杂布线需求。处理层是系统的核心运算单元,采用嵌入式处理器与FPGA协同架构,嵌入式处理器负责系统整体控制、数据融合算法运行及指令下发;FPGA负责图像特征快速提取、磁传感信号实时处理,提升数据运算效率,解决传统系统响应延迟问题。应用层完成定位结果的输出、显示以及反馈功能,包括定位监视终端、设备控制接口和数据保存单元,能够对定位位置、定位精度等进行实时展示,并将定位的结果返回到工业控制设备上,从而实现对工业控制设备的精确定位操作,而数据保存单元则用来记录定位的数据,便于后期故障处理和系统性能提升<sup>[3]</sup>。

## 2.2 系统硬件设计

系统硬件从感知层、传输层及处理层三个方面进行硬件设计,并兼顾其精确度、可靠性以及工业适用性,每个部分都根据实际工控环境选取了合适的硬件并进行了合理的设计。在感知层硬件中,针对磁传感模组,采用了MEMS高精度磁传感器,该磁传感器由4颗磁传感器构成,呈对称排列,部署在工控机执行终端,采用传感器量程 $\pm 10$  mT,精度达 $0.1 \mu\text{T}$ ,采样率100 Hz的方式对磁场信息即时采集及初级过滤,保障了信息采集准确性;图像采集部分采用工业级CCD摄像头,尺寸大小 $2048 \times 1536$ ,速率30 fps,配合定焦镜头以及红光增亮组件,补光模块能够根据外界光线情况智能控制补光灯的亮度,防止因光线变化造成图像采集不稳定现象的发生,相机采用千兆以太网口,保证了图像信息的快速传输。传输层硬件使用工业级以太网交换机以及RS485收发器,以太网交换机速率达千兆级别,并具有防电磁干扰功能,可以实现多个终端的同时传输;RS485收发器采用隔离型芯片,通信距离达1 000 m,并使用屏蔽电缆,可以防止在工业控制系统环境中受到电磁辐射的影响,可靠地传递磁传感器的信号以及控制命令。处理层硬件采用STM32H743嵌入式处理器与EP4CE6F17C8 FPGA芯片协同设计,STM32H743处理器主频高达480 MHz,具备强大的数据处理能力,负责运行数据融合算法、系统控制逻辑及与应用层的交互;FPGA芯片负责图像特征快速提取、磁传感信号滤波与运算,运算速度可达100 MIPS,有效降

低数据处理延迟,提升系统响应速度。在接口方面,有USB接口、以太网接口以及RS485接口,能够方便地与工业控制设备或者监控终端进行连接,增强了系统的通用性和灵活性<sup>[4]</sup>。

## 2.3 系统软件设计

系统软件设计与硬件架构对应,采用模块化设计思路,分为感知层采集软件、传输层通信软件、处理层核心算法软件及应用层交互软件,各软件模块协同运行,实现定位数据的采集、处理、融合与输出,注重软件的实时性、稳定性与可扩展性。感知层采集软件负责磁传感信号与图像信号的采集与预处理,磁传感采集软件采用卡尔曼滤波算法,对采集到的磁场信号进行降噪处理,去除工控现场电磁干扰导致的信号噪声,提取磁场特征参数并转换为数字信号;图像采集软件负责控制工业相机的拍摄参数,实现图像自动采集、曝光调节与预处理,通过高斯滤波算法去除图像噪声,采用直方图均衡化算法增强图像对比度,为后续特征提取奠定基础。传输层通信软件采用TCP/IP协议与Modbus-RTU协议,TCP/IP协议用于图像数据的高速传输;Modbus-RTU协议用于磁传感信号与控制指令的传输,实现处理层与感知层、应用层的双向通信。处理层核心算法软件是系统定位精度的关键,包含磁传感定位算法、视觉定位算法与数据融合算法,磁传感定位算法采用磁场梯度定位算法,通过分析磁传感器阵列采集的磁场信号,计算设备与工件的相对位置坐标;视觉定位算法采用SIFT特征提取算法,提取图像中的工件特征点,通过特征匹配实现初步定位;数据融合算法采用加权融合算法,根据磁传感定位与视觉定位的精度权重,对两类定位结果进行融合校正,进一步提升定位精度,降低定位误差<sup>[5]</sup>。

## 2.4 系统抗干扰设计

为应对工控现场复杂的环境(电磁干扰、灰尘等)因素的影响,本系统在硬件、软件及结构上进行相应的抗干扰处理,在复杂环境中确保系统的正常工作。首先,磁传感模块中的传感器被装入高屏蔽金属材料屏蔽罩内,并将所有信号接入端口设置成差分输入方式以减小传输过程产生的干扰。对于视觉部分,对摄像头进行了密封防尘处理并将其电源线与其他电路分开布线,同时为了避免相互之间的电磁干扰,相机及补光灯由独立的电源供电。在硬件方面,处理层、传输层硬件接地(接地电阻 $\leq 4 \Omega$ ),选用工业级抗干扰芯片;在软件方面,使用CRC和奇偶校验来防止数据失真,卡尔曼、高斯滤波来消除噪声,并配合看门狗定时器以防死机;在结构设计上,将硬件进行模

块化封装及设置屏蔽隔板，在外部增加金属外壳以实现电磁屏蔽及散热的功能。避免靠近工频感应源、相机避开工频感应源；屏蔽电缆避开强电线路铺设<sup>[6]</sup>。从多个方面防止外界影响对定位系统的影响，确保系统的精准性和可靠性，在工业控制中可以放心使用。

### 3 系统实践应用验证

#### 3.1 实践验证方案

实验环境以高精度智能化产线中的工业控制机器人精确定位应用为例，在产线中某一数控车床夹取工位处进行试验，此位置周围有强电磁源、灰尘较多以及光线变化频繁，具有典型的工业控制环境干扰条件，属于真实复杂工作环境下。本试验为同台试验方法，将本文提出的磁传感器辅助型工业控制系统视觉定位装置与传统的全视觉型工业控制系统视觉定位装置放置在相同的夹取工位上，安装相同的工控执行设备；

设置相同的验证参数。验证指标包括定位精度、响应时间、抗干扰稳定性及连续运行可靠性，其中定位精度以工件抓取定位误差为核心指标，响应时间测试设备从信号采集到定位输出的全程延迟，抗干扰稳定性通过开启工位高频设备、模拟粉尘遮挡镜头、调节环境光照强度三种工况测试系统定位波动，连续运行可靠性通过 72 h 不间断运行测试系统无故障运行时长及定位偏差变化。在进行验证时，利用高精度位移传感器对定位误差进行了标定，并用工业示波器检测了信号传输情况，同时记录两个系统相应指标的数据，保证了验证的有效性和公平性。

#### 3.2 实践结果与分析

实践验证结果表明，本文设计的系统在各项性能指标上均优于传统纯视觉定位系统，可有效适配工控现场复杂工况，具体如下表 1 所示。

表 1 实践结果

验证指标	基于磁传感技术的工控视觉定位系统	传统纯视觉定位系统	性能提升幅度
定位误差均值	3.2 $\mu\text{m}$	12.8 $\mu\text{m}$	75.0%
平均响应延迟	8.5 ms	19.3 ms	56.0%
抗干扰误差波动	$\leq 0.8 \mu\text{m}$	$\leq 5.3 \mu\text{m}$	84.9%
连续无故障运行时长	72 h	48 h	50.0%

在定位精度上，本文系统定位误差平均为 3.2  $\mu\text{m}$ ，最大不超过 5  $\mu\text{m}$ ，可以用于高端工控场景下的精准定位，而传统系统的定位误差平均达到 12.8  $\mu\text{m}$ ，在受到干扰的情况下，最大误差超过 20  $\mu\text{m}$ ；在响应时间上，本文系统平均响应时间为 8.5 ms，相比于传统系统的平均响应时间 19.3 ms 大幅缩短了响应时间，可以实现对高速工控设备进行实时控制的目的。对于抗扰度测试，在强电磁场干扰、灰尘遮蔽以及光线变化情况下，本文所设计系统的定位误差范围都小于 0.8  $\mu\text{m}$ ，并没有发生定位失败的情况；而对比系统的定位误差较大，达到 5.3  $\mu\text{m}$ ，在灰尘较多的情况下还发生了 3 次定位失败的情况。另外，在长时间工作环境下，系统连续无故障正常工作 72 h，定位误差没有明显的漂移，而传统系统的程序在连续运行了 48 h 之后开始卡顿，定位精度有了较大的下降。

### 4 结束语

为了解决传统的工控视觉定位系统在复杂工业环境中存在的环境适应性较差、定位稳定性不强以及实时响应速度慢等问题，本文将磁传感技术引入视觉定位系统中，提出了基于磁传感与视觉信息的定位系统框架，并从系统总体架构、硬件设计、软件算法和抗

干扰方面进行分析研究。实践结果表明，该系统在恶劣工业控制条件下能够可靠准确地进行定位，并提高其定位的精确度及效率，在一定程度上提高了系统的稳定性以及鲁棒性。未来可进一步结合人工智能算法与多传感器融合技术，持续提升系统的智能化水平与复杂场景适应能力。

#### 参考文献：

- [1] 陈辉煌,翁伟.基于机器人视觉自动压铆控制系统设计[J].电子制作,2024,32(04):80-82.
- [2] 肖云,王舒霏,王丽兵,等.地磁梯度张量测量及匹配导航关键技术研究[J].导航定位与授时,2025,12(02):102-110.
- [3] 陆黄钰薇.基于抗干扰算法的工业机器人轨迹跟踪控制研究[D].南京:东南大学,2023.
- [4] 杨留强,江松元,宫继刚,等.基于光纤磁传感的套损检测技术研究[J].电子测量技术,2021,44(04):155-159.
- [5] 陈棣湘,李自斌,杜青法,等.基于TMR器件的弱磁传感系统设计[J].中国测试,2024,50(06):93-97.
- [6] 王慧,宋健,王怀斌.嵌入式处理器基准性能测试技术研究[J].航空计算技术,2025,55(01):124-128.

# 多源遥感数据融合在地形测绘中的关键技术应用

吕维汉<sup>1</sup>, 赵钧儒<sup>2</sup>

(1. 山东协和人力资源有限公司, 山东 济南 250100;  
2. 山东省煤田地质局物探测量队, 山东 济南 250102)

**摘要** 地形测绘作为地理信息获取的重要环节, 对国土资源管理、城市规划、环境保护和灾害防控等领域具有重要支撑作用。本文围绕多源遥感数据的特性及融合技术展开分析, 包括数据预处理、配准技术、特征级与决策级融合、深度学习与智能算法应用, 探讨了融合技术在数字高程模型构建、地形要素提取、动态监测及应用实践中的作用, 以期显著提升地形测绘的精度和信息完整性提供参考, 进而为地形建模、灾害监测、城市规划及资源管理提供技术支撑。

**关键词** 多源遥感; 数据融合技术; 地形测绘; 地形建模

**中图分类号**: P217; TP751

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.010

## 0 引言

传统单一数据源测绘方法存在精度受限、信息维度不足及环境依赖性强的问题, 而多源数据融合技术能够充分发挥光学影像、雷达数据、激光雷达点云和无人机影像等数据源的互补优势, 实现地形信息的高精度获取和综合表达。多源数据融合技术能够充分利用不同数据源的互补优势, 实现对复杂地形的精细建模, 提高数字高程模型和地形要素提取的精度。

## 1 多源遥感数据类型与特点分析

### 1.1 光学遥感数据

光学遥感数据主要包括高分辨率卫星影像和航空摄影影像。高分辨率卫星影像能够覆盖大范围区域, 同时提供精细的空间信息, 便于地物识别和地形特征提取。航空摄影影像具有更高的空间分辨率和灵活的拍摄角度, 可针对局地重点区域进行精细观测。光学遥感数据的优势在于空间分辨率高、影像清晰、信息直观, 能够直观反映地表形态, 为数字高程模型和地形要素提取提供基础数据。然而, 光学遥感数据也存在局限, 其观测质量受天气条件和光照状况影响明显, 如云层覆盖或低光照环境会导致影像信息缺失或失真。

### 1.2 雷达遥感数据

雷达遥感数据主要指合成孔径雷达获取的影像数据, 其通过微波信号探测地表, 具有全天候、全天时

观测能力<sup>[1]</sup>。这使得合成孔径雷达能够在云雾、降雨或夜间等光学遥感难以观测的环境下, 依然获取稳定的地形信息。合成孔径雷达的优势在于能够穿透云雾获取地形起伏信息, 适用于山地、丘陵及复杂城市环境的地形测绘。合成孔径雷达数据可通过干涉处理生成数字高程模型, 支持地形变化监测和地表沉降分析。其局限性主要是噪声干扰较多, 尤其是散斑噪声, 以及几何畸变和信号反射复杂, 处理难度大, 对数据解译和融合提出了较高要求。

### 1.3 激光雷达数据

激光雷达数据能够获取高精度三维地形点云, 是精细地形测绘的重要手段。激光雷达通过激光脉冲扫描地表, 生成高密度点云, 能够准确测量地表高程和微地形特征。其优势在于测绘精度高、点云密度大, 能够捕捉山脊、河谷、道路高差及建筑物细节等复杂地形特征, 为数字高程模型和数字地表模型的生成提供精确基础。激光雷达数据成本高、数据量庞大, 对存储、传输及处理能力要求高, 同时在密集植被覆盖区域会存在测量遮挡问题, 需要与其他数据源结合使用以保证数据完整性。

### 1.4 无人机与移动测量数据

无人机与移动测量数据在地形测绘中具有灵活采集的优势。无人机能够在低空飞行, 自由调整航线和拍摄角度, 对特定区域进行高分辨率影像采集, 非常适

**作者简介**: 吕维汉 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 测绘。

合局地测绘或重点区域观测<sup>[2]</sup>。移动测量系统通过车辆搭载传感器,可实现沿线或城市街区连续测绘。无人机与移动测量数据与传统遥感数据互为补充,能够捕捉微地形和局地细节,还可以与光学、合成孔径雷达及激光雷达数据融合,实现宏观覆盖与局部精细测绘的有机结合,从而提升地形测绘的整体精度和信息完整性。

## 2 多源数据融合关键技术方法应用

### 2.1 数据预处理与配准技术

由于不同传感器的数据在空间分辨率、观测时间、拍摄角度和几何投影上存在差异,数据必须经过严格的空配准和时间配准,以确保同一地理位置的多源数据能够准确对应。空配准通常通过控制点匹配、影像特征点提取和投影变换实现,而时间配准则保证多时相数据能够反映同一测绘周期内的地形变化,避免因观测时间差异产生的误差。

几何校正是数据预处理的重要环节,其通过纠正遥感数据在获取过程中产生的畸变,包括传感器几何误差、大气折射影响和地球曲率效应,使数据在地理坐标系下达到精确定位要求。几何校正为后续多源数据融合提供统一参考框架,也保证了地形特征的空间准确性,为精细建模和地物分析提供可靠基础。

数据降噪与缺失值处理也是数据预处理的重要环节。多源遥感数据中普遍存在噪声干扰,如合成孔径雷达数据中的散斑噪声、光学影像的光照或云雾干扰,以及激光雷达点云的测量误差,需要采用滤波、插值或统计方法进行处理。数据采集过程中会出现的缺失值或空缺区域,也需通过插值、融合或多源数据互补来填补,以保证测绘数据的完整性和连续性。

### 2.2 特征级融合方法

特征级融合方法是多源遥感数据融合的重要手段,其通过对不同数据源的纹理、形态和光谱特征进行提取与整合,实现对地形信息的精细表达<sup>[3]</sup>。在地形测绘中,光学影像提供丰富的光谱信息,有助于地物识别,合成孔径雷达影像能够反映地形起伏与粗糙度特征,激光雷达点云则精确描述地表高程和微地形结构。通过特征级融合,可以将这些多维信息综合起来,生成更全面、更准确的地形特征集,为后续地形建模和分析提供基础数据。

特征级融合的优势在于能够在保持各数据源原始信息的同时,充分利用它们的互补特性,提升地形测绘精度和复杂地形要素提取能力。例如:在山区或城市高楼区域,通过融合光学影像的纹理与光谱信息、合成孔径雷达的形态特征以及激光雷达的高度信息,可以更准确地识别山体坡度、建筑物轮廓及河流走向,实现对微地形和宏观地貌的综合分析。

### 2.3 决策级融合方法

决策级融合方法是多源遥感数据融合的重要层次,其通过对不同数据源分类结果或判别信息进行整合,实现地形要素的高精度提取。与特征级融合直接处理原始数据不同,决策级融合关注各数据源在地形分类或地物识别上的判定结果,并通过逻辑、概率或统计方法进行组合,从而提高测绘结果的可靠性和准确性。例如:将光学影像的土地覆盖分类结果与合成孔径雷达影像的地形起伏信息以及激光雷达的高程分类结果进行融合,可以综合各类判别信息,生成更精确的地形要素图。

决策级融合的优势在于能够充分利用多源数据在分类或判别任务中的互补性,降低单一数据源分类误差对测绘结果的影响。在复杂地形或多种地物混杂的区域,通过决策级融合可以有效提升地形边界识别、坡度判断、河道提取等要素的精度和稳定性。决策级融合方法具有较强的灵活性,可以根据不同测绘目标和数据特点选择加权融合、投票法或贝叶斯方法等多种融合策略,实现针对性优化。

### 2.4 深度学习与智能算法融合

深度学习模型能够自动学习和提取数据中的高维特征,实现多源信息的高效融合,从而提升地形测绘的精度与智能化水平。卷积神经网络在多源遥感影像融合中被广泛应用,其通过多层卷积和池化操作,可以自动提取光学影像的纹理特征、合成孔径雷达影像的形态信息以及激光雷达的高度特征,实现数据特征的高效融合<sup>[4]</sup>。卷积神经网络在分类、分割和地形要素提取任务中表现出较高的准确性,能够适应复杂地形和异构数据源的融合需求。Transformer 模型通过自注意力机制,可以有效捕捉多源数据之间的长距离空间依赖关系和跨模态关联,对于多时相、多分辨率数据的融合处理具有独特优势,特别适用于大范围地形变化监测和动态地形建模。

深度学习与智能算法融合的核心价值在于自动化和高精度特征提取。通过训练端到端模型,系统能够自主学习不同遥感数据源的互补信息,无需依赖复杂的人工特征工程。这类方法能够支持三维地形建模、数字高程模型生成和微地形识别,实现对复杂地貌和城市空间结构的精准表示。

### 2.5 大数据与云计算在多源遥感数据融合中的应用

大数据与云计算在多源遥感数据融合中的核心价值体现在数据存储、分布式处理和实时分析能力上。通过云平台,遥感数据可以实现集中存储和统一管理,支持跨地域、跨设备的数据访问与共享。在处理方面,基于分布式计算的算法能够快速完成数据预处理、配准、特征提取和融合分析,有效解决单机处理效率低

下的问题。借助云计算的弹性计算能力,可在多源数据处理任务中按需分配计算资源,实现大规模遥感数据的实时处理与分析,为动态地形监测和快速地形建模提供技术保障。

大数据技术还支持对融合结果进行精度评估、异常检测和趋势分析,使地形测绘能够生成高精度的数字高程模型,还可以提供地形变化的预测与决策支持。通过云计算和大数据平台,测绘数据能够与地理信息系统、人工智能算法以及深度学习模型高效整合,实现多源遥感数据在地形测绘中的智能化处理。

### 3 多源数据融合在地形测绘中的应用实践

#### 3.1 地形精细建模

地形精细建模是多源遥感数据融合在地形测绘中的核心应用之一,其目标是通过整合光学影像、合成孔径雷达影像、激光雷达点云及无人机低空影像等多源数据,生成高精度、三维可视的地形模型。数字高程模型和数字地表模型是地形精细建模的基础成果,数字高程模型主要反映裸地表面高程信息,而数字地表模型则包含地表覆盖物(建筑物、植被等)的高度信息<sup>[5]</sup>。

在数字高程模型和数字地表模型生成过程中,多源遥感数据融合能够显著提升精度和细节还原能力。光学影像提供的高分辨率纹理信息有助于地物边界识别,合成孔径雷达数据可补充坡度变化和粗糙度特征,激光雷达点云提供高精度的高度信息,而无人机低空影像可补充局地细节。通过特征级融合、决策级融合及深度学习算法,能够将不同数据源的优势互补,实现数字高程和地表模型的精细化建模,提高地形要素提取的准确性和可靠性。

在实际应用中,城市微地形与复杂地貌的建模案例表明,多源数据融合能够有效解决高楼密集区、河流岸线、山地坡面等复杂地形的建模难题。例如:在城市规划与基础设施建设中,通过融合激光雷达点云和光学影像,可精确还原道路高差、建筑轮廓和地面坡度,为施工设计和环境分析提供依据。在山区或丘陵地带,融合合成孔径雷达和激光雷达数据能够准确捕捉山脊线、河谷地形及坡面起伏,实现对地形微特征的全面反映。

#### 3.2 变化监测与动态测绘

变化监测与动态测绘是多源遥感数据融合在地形测绘中的重要应用方向,旨在通过连续观测和数据对比,及时获取地形及地表特征的变化信息。在实际测绘中,河流流向变化、山体滑坡或塌方、道路沉降及城市扩展等地形动态,对资源管理、环境保护和基础设施建设具有重要影响。通过融合光学影像、合成孔径雷达影像、激光雷达点云及无人机低空影像等多源

数据,可以在不同时间尺度上获取地形变化信息,实现对地表动态的精准监测。

在河流监测方面,多源数据融合能够提供水体边界和河床高程的精确变化信息,为洪水预警、水资源管理和河道治理提供依据<sup>[6]</sup>。山体地形变化,如滑坡、泥石流等灾害,通常具有局地性和突发性,通过多源数据的时间序列分析,可以及时捕捉地形异常变化,辅助地质灾害预警和应急管理。对于道路沉降或城市扩展,多源数据融合能够精确记录道路高差和地面沉降情况,还能识别土地利用变化和城市扩展趋势,为规划与管理提供科学依据。

变化监测与动态测绘的优势在于多源数据的互补性。光学影像可以直观显示地表覆盖变化,合成孔径雷达影像能够在云雾天气下获取地形起伏信息,激光雷达点云提供高精度三维高度数据,而无人机影像可捕捉局地微地形变化。通过时间序列数据的对比与融合分析,能够发现宏观地形变化,还能识别微小地形变动,实现对自然环境和人工地表的动态管理。

### 4 结束语

多源遥感数据融合在地形测绘中展现出显著的技术优势。通过整合光学影像、合成孔径雷达数据、激光雷达点云以及无人机低空影像等不同类型的数源,融合方法能够充分发挥各类数据的互补性,实现地形信息的高精度、高完整性获取。在数据预处理、配准、特征提取、决策融合及深度学习算法的支持下,多源融合提高了数字高程模型和数字地表模型的精度,还增强了复杂地形和微地形特征的识别能力,为地形测绘提供了可靠的数据基础。在河流、山体、道路及城市微地形等动态监测中,多源融合技术实现了高效、连续的数据处理,为灾害预警、城市规划、交通工程及资源管理提供了可靠支撑。

### 参考文献:

- [1] 张媛媛,陈金容.高分辨率卫星遥感与AI技术结合的地形测绘方法研究[J].中国高新科技,2025(17):124-126.
- [2] 刘宇红.基于无人机遥感测绘数据的三维建模技术探讨[J].科技资讯,2025,23(12):20-22.
- [3] 徐静静.基于深度学习的测绘遥感多元数据整合技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(16):181-183.
- [4] 任彭睿智.无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用分析[J].建材发展导向,2025,23(10):1-3.
- [5] 何守健,冯宝义,赵焕仁.多源遥感技术在国土测绘中的应用研究[J].中国高新科技,2025(07):140-142.
- [6] 白洁.遥感测绘技术在测绘工作中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2024(07):40-42.

# 基于 BIM 的公共建筑多专业协同 施工管理优化研究

董树娟<sup>1</sup>, 季永军<sup>2\*</sup>

(1. 金正建设咨询集团有限公司, 山东 济南 250014;

2. 东营昌荣公路有限公司, 山东 东营 257400)

**摘要** 公共建筑因功能复杂、专业交叉多、施工周期长, 对多专业协同施工管理的精度与效率要求极高。传统协同模式依赖碎片化信息传递与经验式决策, 易引发专业冲突、进度延误、成本超支等问题, 已无法适配现代公共建筑施工需求。BIM 技术具备可视化、参数化、信息化与协同性优势, 为解决上述难点提供了有效路径。本文围绕公共建筑多专业协同施工管理的实际需求展开: 首先梳理分析行业现有管理模式的现状与核心问题, 明确 BIM 技术的应用价值定位; 其次构建涵盖平台搭建、流程优化与信息决策机制的 BIM 多专业协同施工管理体系; 最后针对施工前期准备、过程管控、竣工验收三个阶段, 提出针对性协同优化方案, 以期为推动 BIM 技术在公共建筑施工领域的推广应用提供参考。

**关键词** BIM 技术; 公共建筑; 多专业协同; 施工管理

**中图分类号:** TU71-39

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.011

## 0 引言

随着城镇化进程的加快, 公共建筑成为城市功能载体, 具有规模大型化、设计复杂化、功能集成化的特征, 包括建筑、结构、机电、装饰、市政等各个专业领域, 各个专业之间相互衔接、互相配合的好坏直接影响到工程的效率和质量。目前, 我国公共建筑多专业协同施工管理大多还采用传统的管理模式, 依靠纸质图纸、线下会议、分散式的管控等手段, 存在信息传递不及时、专业交叉识别迟缓、资源配置不合理、责任划分不清等一系列问题, 不但加大了施工返工的成本和安全风险, 也阻碍了工程整体建设水平的提高。BIM 技术是建筑行业数字化转型的主要支持, 可以对全生命周期的工程信息进行整合, 并且实现各个专业的数据集中管理、可视化显示和实时协作, 给多专业协同施工管理赋予新的技术范式。在此背景下, 对以 BIM 为载体的公共建筑多专业协同施工管理进行优化研究, 寻找适合于公共建筑特点的协同管理方式和策略, 对于解决传统管理中存在的问题、促进建筑施工行业的高质量发展有着重要的理论意义和实践价值。本文从现状问题、体系构建、优化策略这三个主要方面来展

开论述, 给公共建筑施工管理的数字化、协同化升级提出可行办法。

## 1 公共建筑多专业协同施工管理的现状与问题

### 1.1 公共建筑多专业施工的协同需求特征

公共建筑功能的特殊性, 使多专业施工协同需求具有明显的复杂性和高强度, 主要表现为以下三个特点: 一是专业交叉紧密、关联性强, 既要考虑功能、安全、美观和智能化的要求, 又要兼顾建筑结构、机电、消防等多个专业的施工过程, 施工流程嵌入、空间布置交织在一起, 专业调整容易造成连锁反应, 对协同的准确度要求很高; 二是施工约束多样, 大多位于城市的中心区域, 受到场地、周边环境、工期以及质量标准的限制, 在保证施工进度的前提下, 需要在资源调配、避开干扰等方面做出协调, 达到效率的最大化; 三是全周期协同要求高, 包括设计交底、施工实施、竣工验收、运行交接等各个阶段的信息必须进行无缝传递并闭环管理, 符合设计初衷和运维需求。

### 1.2 传统协同施工管理模式的局限性分析

传统的公共建筑多专业协同管理是以分散控制加线下协作为特点的, 缺陷很明显: 第一, 信息传递是

**作者简介:** 董树娟 (1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

**\*通信作者:** 季永军 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。E-mail: 1576673555@qq.com

碎片化的而且滞后的,依靠的是纸质图纸、表格等传统的方式,信息储存分散、格式不同,容易造成图纸版本混乱、数据差错等情况,跨专业的交流需要线下沟通,造成信息隔阂,产生专业冲突不能及时解决的情况;第二,协同决策是被动的并且是经验性的,缺少可视化支持,依靠管理人员的经验来衔接方案和进度,不能预先预测到交叉施工的风险,出现问题之后再被动地去整改,加大返工的成本和工期延期的风险<sup>[1]</sup>;第三,管控维度单一,只对一个专业进行管控,没有把进度、成本、质量这三个方面结合起来统筹考虑,资源配置不合理,责任划分不清容易产生推诿。

### 1.3 BIM技术在协同管理中的应用价值定位

BIM技术是以三维数字化模型为基础,把全生命周期的信息综合在一起,和公共建筑的协同需求相适应,应用价值有三个方面:一是打破信息壁垒,实现全专业的信息一体化管理,模型中包含各个专业的设计、施工、成本等数据,可以实现多个专业人员同时在线查看、修改、共享,实现一处修改、全局同步,从而打下协同的数据基础;二是给予可视化帮助,把二维图纸变为三维模型,在施工前对专业碰撞、工序冲突进行检测,对施工方案进行模拟,推进协同由被动整改向主动防控转变;三是给精确控制赋予力量,使进度、成本、质量数据动态关联更新,从而达到精准掌控施工进度和资源消耗的目的,优化方案,削减浪费、缩短工期、提高质量。

## 2 基于BIM的公共建筑多专业协同施工管理体系构建

### 2.1 BIM协同管理平台的搭建与功能配置

BIM协同管理平台搭建要遵照数据互通、功能适配、操作便捷的原则,考虑软硬件配置和功能规范,硬件上搭建高性能服务器集群,保证多专业在线操作以及模型存储传输稳定,配备移动终端实现现场数据实时采集同步,打通线上线下的联动<sup>[2]</sup>。软件采用兼容性好的BIM核心软件和协同平台,使模型融合、碰撞检测等功能得以实现,对接施工管理软件来保证数据跨平台流转,在功能上设置模型管理、协同沟通、进度控制等主要模块,并对各个模块进行明确划分,创建统一的数据标准以及操作规范,划定好每个角色所具有的权限以及协作流程,从而保证平台的正常运转。

### 2.2 多专业协同施工的流程优化与节点管控

基于BIM的多专业协同流程优化要以模型为纽带来重新划分全周期流程,加强节点控制,施工前由建设单位牵头成立协同小组,在平台上对图纸进行数字

化转换并整合成模型,做碰撞检测和设计优化,确定基准模型和分专业进度、协同方案,明确责任界限;施工过程中各个分包单位依据基准模型施工,每天上传进度、资源、现场问题等信息给协同小组,协同小组利用模型来监督进度偏差,对于交叉作业节点提前在线上交底,依靠移动终端实时反馈、迅速解决存在的问题;收尾时各专业按照模型自检整改、协同验收的方式进行,更新模型形成竣工版本,并建立流程反馈机制,及时改进卡顿环节,形成闭环管理。

### 2.3 基于BIM的信息共享与协同决策机制设计

BIM信息共享和协同决策机制,主要就是创建一个“分层共享、多方联动”的系统:在信息共享方面,对设计图纸、进度成本、质量记录等内容做出全面的划分,并根据“核心信息全员共享、专业信息分区共享”的原则来设定权限,创建标准化的信息传递流程,规定信息录入、审核、更新的责任人及时间,利用模型可视化的优点提高信息传递的速度<sup>[3]</sup>。在协同决策方面,实行分级管理,一般的事项由专业的负责人通过线上协商的方式来解决并留下痕迹,重要事宜由建设单位进行统筹协调,在模型模拟方案的效果、利弊分析的基础上做出科学的决定,并监测实施情况。

## 3 基于BIM的公共建筑多专业协同施工管理优化策略

### 3.1 施工前期的碰撞检测与方案预演优化

施工前期优化可以降低施工风险、提高协同效率,依靠BIM技术开展精准碰撞检测和方案预演,实现施工前期协同控制升级<sup>[4]</sup>。在碰撞检测优化上,突破传统的二维图纸审核的局限性,利用BIM平台把建筑、结构、机电、装饰等各个专业的模型集成起来,用Navisworks等软件做全专业碰撞检测,分为硬碰撞、软碰撞等多种形式,得到碰撞检测报告,找出碰撞的位置、种类及影响范围,由协同小组召集各专业的人员对碰撞问题进行协同优化,根据施工工艺以及空间要求来调整设计参数、改善管线布置或者修改结构尺寸,反复迭代检测并优化,直到所有的碰撞都消除为止,同时将优化后的内容重新录入BIM基准模型中,成为施工的依据,从而有效地减少施工过程中返工整改的情况;在方案预演优化方面,对于公共建筑复杂的施工环节,采用BIM模型进行施工方案模拟预演,重现施工全过程的人力调配、机械设备配备、工序衔接等情况,各个专业人员一起分析方案的可行性和合理性,改进施工顺序、设备选择和人员分工,提前预见施工过程中可能会出现空间干扰、设备冲突、安全风险等问题,

并提出相应的解决办法,如模拟大型空调机组吊装路径,优化吊装机械位置和吊装时间,防止与结构施工、机电安装产生干扰,通过预演使各个专业施工人员清楚地知道协同要点,提高施工衔接的流畅度,保证施工方案的科学性和可行性。

### 3.2 施工过程中的进度成本质量协同管控

施工过程中利用 BIM 技术来实现进度、成本、质量一体化协同控制,打破单一维度控制的局限性,提高施工管理的精确性和高效性。在进度协同控制方面,将施工进度计划同 BIM 模型紧密结合,创建起三维模型加时间轴的 4D 进度模型,把分部分项工程、施工工序和模型构件一对一地对应起来,实时更新各个专业的施工进度数据,用模型直观地展现计划进度和实际进度的差异,协同小组及时分析偏差的原因,根据各专业施工的需求对进度计划进行相应的调整,当机电安装进度落后的时候,通过模型模拟调整施工顺序,协调装饰专业推迟相关的区域施工,同时调动人力、设备资源支持机电专业,保证整体进度不被耽误<sup>[5]</sup>。在成本协同控制方面,依靠 BIM 模型创建出成本数据库,联系人工、材料、设备等资源的价格信息,实时统计各个专业的资源消耗情况,自动核算已完成的工作量及成本支出,比较分析成本偏差及原因,对于材料浪费、设备闲置等现象,及时优化资源配置方案,如通过模型准确计算某个区域管线材料用量,防止过多采购,同时跟踪材料进场时间和使用情况,减少库存积压,达到成本动态控制的目的。在质量协同控制方面,将质量验收标准、施工工艺要求融入 BIM 模型中,施工人员通过移动终端对照模型进行现场施工,及时上传质量检查数据和隐蔽工程影像资料,监理单位借助模型进行线上验收和线下复核,对质量问题标出具体的部位并发送整改通知,整改完毕后上传整改资料,形成质量控制闭环。另外,通过 BIM 模型可以追究施工过程中质量的责任,使各个专业施工质量达标,从而实现进度、成本、质量三者的相互平衡。

### 3.3 竣工阶段的数字化交付与运维衔接优化

竣工阶段的重点是使数字化交付和运维实现无缝对接,利用 BIM 模型创建全生命周期信息载体,为公共建筑运维管理打下基础。在数字化交付优化方面,根据施工过程中形成的 BIM 模型,整合竣工图纸、变更签证、质量验收记录、材料设备合格证、隐蔽工程资料等全部竣工资料,对模型进行最后的审核和补充,保证模型的数据和实际情况相符,形成完整的竣工 BIM 模型,作为数字化交付的主要载体,交付方式采取线

上平台交付和线下存储备份的方式,建设单位、运维单位可以通过 BIM 平台方便快捷地查阅、调用竣工资料及模型数据<sup>[6]</sup>。相比传统的纸质交付,可以大大提高资料查阅的速度和准确度,并确定交付验收的标准,明确规定竣工 BIM 模型的完整性和准确性、规范性的要求,召集各方面的力量协同验收,保证交付的质量;在运维衔接优化方面,把竣工 BIM 模型同运维管理平台连接起来,完善运维有关的信息,创建运维阶段的 BIM 模型,达到信息化的目的,运维人员能够通过模型很快找到设备的位置、参数以及维护记录,制定出精确的维护方案,遇到设备故障时可以根据模型模拟应急处置流程来解决问题,从而提高故障排除速度。同时,依靠 BIM 模型做能耗分析、空间管理等工作,改善运维方法,减少运维费用,使施工阶段与运维阶段的信息能够无障碍地传递给对方,扩展 BIM 技术应用的价值,构造起公共建筑全生命周期管理体系。

## 4 结束语

本文以基于 BIM 的公共建筑多专业协同施工管理优化为研究对象,通过对公共建筑多专业协同施工需求特点及传统管理模式存在的问题进行分析,得出 BIM 技术可以解决信息孤岛、实现可视化协同、提高施工管理精度等优点,从而建立包含平台搭建、流程优化、信息决策机制的 BIM 协同管理体系,从施工前期、全过程、竣工阶段提出相应的优化对策,形成全周期、一体化的协同管理方案。经过实践证明, BIM 技术可以有效地解决公共建筑多专业协同施工中出现的专业的交叉、信息的滞后、管控的低效等现象,明显提高施工管理效率、减少资源浪费、保证工程质量,给公共建筑施工管理数字化转型提供有效途径。

### 参考文献:

- [1] 龚伟.大型公共建筑多专业协同施工组织管理体系研究[J].广东建材,2025,41(12):166-169.
- [2] 杨军,刘晓沛,翁天龙,等.BIM技术在大型建筑工程全专业全过程协同管理中的应用:以深圳湾文化广场为例[J].绿色建造与智能建筑,2025(10):34-39.
- [3] 同[2].
- [4] 胡珊珊.BIM技术在绿色公共建筑设计中的运用研究[J].现代工程科技,2025,04(06):157-160.
- [5] 赵明哲,唐建.BIM技术导向下公共建筑室内装饰设计研究[J].住宅产业,2024(04):63-66.
- [6] 孙红雷.BIM技术在大型公共建筑结构施工中的应用[J].绿色建造与智能建筑,2024(02):46-48.

# 基于三维激光扫描技术在建筑工程测量中的应用研究

孙 锋<sup>1</sup>, 韩保轩<sup>2</sup>

(1. 济宁翔宇测绘股份有限公司, 山东 济宁 272000;

2. 山东华潍信息技术有限公司, 山东 潍坊 261205)

**摘 要** 地质测绘与工程测量是建筑企业发展的两大技术难点, 传统逐点式单点测量模式已难以适应日趋复杂的工程需求。为提升空间数据获取的精确性与作业效率, 本文结合某建筑工程测量实践, 围绕扫描方案设计、控制测量实施、外业数据采集、内业数据处理及三维建模等关键环节, 系统阐述三维激光扫描技术在建筑工程测量中的具体应用方法, 以期有效提升测量精度与作业效率提供技术参考。

**关键词** 三维激光扫描; 建筑工程测量; 点云数据; 三维建模

中图分类号: P258; TU198

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.012

## 0 引言

建筑工程测量领域, 传统的测量方法普遍存在精度不高、作业效率低、自动化程度不高、环境适应性差、数据处理流程繁杂等各方面的不足。随着建筑形态越来越多样化、复杂化, 常规测量手段对于异形结构、大尺度空间、复杂环境等的测量能力越来越弱。三维激光扫描技术属于一种新兴的测绘手段, 凭借高速采集、高精度、非接触式作业、可视化效果好、环境适应性强等明显优势, 在建筑工程测量领域得到越来越广泛的应用。该技术可以快速得到被测物体大量的三维坐标信息, 生成高密度点云数据, 给后续建模和分析提供丰富的数据基础。深入探究三维激光扫描技术在工程测量方面的应用, 对改善工程质量, 改良设计方案, 削减施工风险, 合理调配施工资源都有着十分重要的实际意义<sup>[1]</sup>。

## 1 三维激光扫描技术基本原理与特点

### 1.1 技术原理概述

三维激光扫描技术是在传统全站仪测量原理的基础上发展起来的自动化测量技术。其主要工作原理就是用激光发射器向目标物体发射激光脉冲, 用传感器接收物体表面反射回来的信号, 根据激光飞行时间或者相位差来计算出扫描仪和目标点之间的距离, 同时结合扫描仪自身的角度编码器记录激光束的水平和垂直方向角, 从而准确地得到目标点的三维空间坐标。

该过程不断重复, 每次测量得到一个点, 连续扫描就得到密集的点云数据。点云实际上就是大量的离散点的集合, 每一个点都有精确的空间位置信息, 当点云密度足够高时, 可以真实地反映被测物体的几何形态和表面特征。

### 1.2 技术发展现状

目前主流的三维激光扫描仪具有全天候作业能力, 扫描范围可以达到 $360^{\circ} \times 300^{\circ}$ 全景覆盖, 扫描距离可以达到数百米甚至数公里。本文所用的 FARO FocusS 系列扫描仪最小扫描距离为 0.6 m, 最大有效距离为 350 m, 测量速度为 97.6 万点/秒, 测距精度为 $\pm 1$  mm。设备集成高动态范围(HDR)成像系统, 像素大于 1 亿, 在逆光或者光照条件复杂的环境下, 也能得到清晰的纹理影像<sup>[2]</sup>。另外, 现代扫描仪一般都带有集成的相机, 在采集几何数据的同时可以得到被测物体真实的色彩信息, 从而实现点云和影像的精准融合。

### 1.3 技术优势分析

与传统的测量手段相比, 三维激光扫描技术有如下明显优势: 第一, 非接触式测量, 可以应用于危险区域或者人员难以到达的场所; 第二, 海量点云数据保证了测量结果的全面性、精细化程度; 第三, 自动化程度高, 大大减少了人工干预; 第四, 数据成果形式多样, 既可以生成传统的二维图纸, 也可以创建三维可视化模型, 满足不同的应用需求。

作者简介: 孙锋(1990-), 女, 专科, 助理工程师, 研究方向: 工程测量。

## 2 工程概况与技术选型

### 2.1 项目基本情况

本文以某大型公共工程为研究对象。该项目处于城市主干道的核心位置,总建筑面积约为 35 万  $\text{m}^2$ ,是集购物中心、写字楼、艺术馆、高端酒店于一体的综合性城市商业综合体。建筑整体采用错落叠置的形式,各个部分的几何线条变化多端,造型繁杂,存在很多异形曲面以及不规则的空间,对于测量工作来说,精度和全面性都比较高。

### 2.2 测量难点分析

该建筑结构特点决定了常规测量手段不能胜任,建筑形体复杂,存在大量非标准几何元素,传统逐点测量方式很难全面捕捉到所有的特征,建筑高度较大,部分测量点位人员不能直接到达,项目地处城市中心,施工环境受限,测量作业时间窗口小。根据以上情况,综合考虑后决定采用三维激光扫描技术作为本工程的主要测量手段。

### 2.3 仪器设备选型

根据工程规模、精度要求、现场情况,本项目使用的是 FARO FocusS 系列三维激光扫描仪。该设备的技术参数有最小扫描距离 0.6 m,最大有效距离 350 m,扫描速度 97.6 万点/秒,测距精度  $\pm 1$  mm,内置 HDR 相机像素大于 1 亿,激光安全等级为 1 级(人眼安全)。该型号扫描仪在复杂光照条件下仍然可以得到较好的影像数据,体积小、携带方便、操作简单,适用于建筑测量、文物保护、工业测绘等各个方面。

## 3 三维激光扫描技术在工程测量中的应用方法

### 3.1 外业数据采集实施要点

#### 3.1.1 扫描方案设计

在正式开始扫描作业前,项目组根据建筑形态特点及现场情况制订了详细的扫描方案。测站布设是方案设计的主要内容,测站布设的好坏直接影响到点云数据的完整性以及配准精度。方案遵循以下原则:测站之间视线上不得有遮挡物,相邻测站采集的数据要有足够的重叠区域;相邻测站之间的扫描重叠度控制在 25% 以上,保证后续点云拼接的可靠性;根据被测目标与扫描仪之间的距离合理设置扫描分辨率,保证精度要求的同时控制数据量规模;重叠区域内不少于 3 个标靶球,作为后期点云配准的控制依据。本工程共布设测站 30 个,建筑物四周布置 22 站,顶部区域布置 8 站,对建筑内外空间进行了全面覆盖<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.2 控制测量实施

为了对扫描数据进行空间基准控制,项目在建筑周边布设了 8 个永久性控制点。控制点测量采用实时动态差分技术,接入城市连续运行参考站系统,控制点坐标精度控制在  $\pm 2$  cm 以内。控制点的精确测定为后面点云数据的绝对定向提供了一个可靠的基准,使得扫描成果可以被统一到工程坐标系中。

#### 3.1.3 数据采集流程

数据采集严格按照作业方案进行,按测站顺序依次完成扫描任务。每个测站扫描结束之后,用设备内置相机同步采集场景影像,记录现场实况。标靶球和控制点的扫描作为专项内容单独进行,保证其点云质量满足配准要求。数据采集流程(见图 1)是现场踏勘、方案制定、设备架设、参数设置、扫描实施、质量检查的闭环管理。

### 3.2 内业数据处理方法

#### 3.2.1 点云预处理

外业得到的原始点云数据先导入 FARO Scene 软件做预处理。预处理环节主要包含点云去噪,剔除由于环境干扰或者设备误差造成的孤立点;点云滤波,保留有效目标点云的同时减少数据冗余;点云配准,利用标靶球或者特征点将各个测站的点云数据统一到同一个坐标系下;点云拼接,将配准后的多站点云合并成完整的建筑点云模型。经过预处理的点云数据量得到控制,几何特征的完整性也得到了保证。

#### 3.2.2 特征信息提取

将预处理过的高质量点云数据导入 HDmodeling 软件进行特征提取。该软件可以自动识别并提取建筑轮廓线,可以生成二维线划图并标注关键标高信息。技术人员以二维线划图为依据,得到建筑外墙、门窗洞口、结构边缘等主要轮廓数据,并且记录各个楼层的标高变化情况,从而得到完整的建筑空间关系图谱。这些成果给后继的施工放样、结构复核、装修设计提供准确的数据支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.3 三维建模技术路线

#### 3.3.1 模型构建流程

三维建模工作以点云数据为依托,按照提取的二维线划图分步进行。首先用二维轮廓线通过实体拉伸来创建主体结构模型,然后根据线划图中的曲线元素提取建筑造型特征,创建异形构件实体模型,再以建筑特征曲线为引导创建内部空间结构模型,最后利用软件的各项建模功能完成建筑整体三维实体模型的创建。为了使模型更加真实,在使用 3ds Max 等专业软

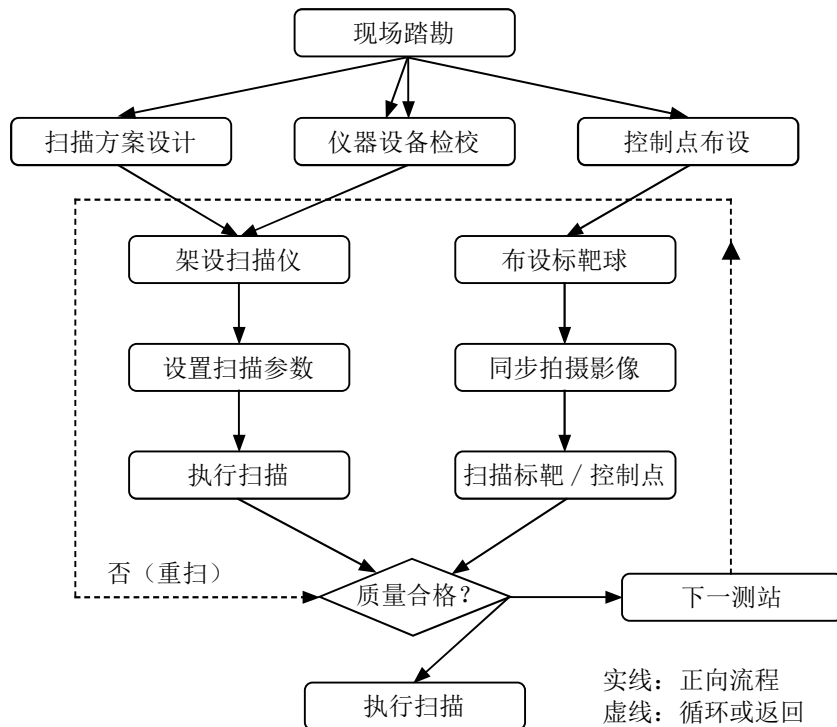


图1 某建筑工程应用三维激光扫描技术采集数据流程图

件的基础上对材质贴图、光影渲染以及细节处理做进一步的修改。

### 3.3.2 模型质量优化

当项目三维建模时出现纹理不清的现象时,利用现场拍摄的照片获取高分辨率的实景影像,把高分辨率的实景影像映射到模型上,从而提高模型的真实感。为了提高建模精度,在外业采集时采用高像素相机,保证拍摄的角度、位置不漏拍。经过上述措施,最终得到的三维模型几何精度满足工程要求,视觉表现也达到了较高的水平。

### 3.4 技术应用效果验证

为验证三维激光扫描技术的测量精度,选取点云模型中13条特征边长与全站仪实测数据进行对比。结果表明,两者误差在0.005 m至0.009 m之间,相对误差均小于千分之一,完全满足1:500大比例尺数字线划图的精度要求。从工程实践看,该技术在作业效率、数据完整性、施工安全及环境适应性等方面均表现优异,有效提升了测量质量与作业效率,具备良好的综合效益<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

经过本工程实践应用可知,三维激光扫描技术在复杂建筑工程测量中具有明显的技术优势和广阔的应用前景。该技术的顺利开展要依靠科学合理的方案设

计、规范严谨的外业工作、精细高效的内业工作。不同工程类型对测量成果的要求存在差异,在实际应用中要根据具体的项目特点,灵活地调整测站布设方案、优化扫描参数设置、选择合适的处理数据的方法,充分发挥三维激光扫描技术高效、精准、全面的技术优势,给工程建设提供可靠的技术支持。伴随着硬件设备性能不断提高、数据处理算法不断改进,三维激光扫描技术在建筑工程领域的应用越来越深广。

### 参考文献:

- [1] 李卓.地面三维激光扫描技术在市政工程测量中的应用分析[N].科学导报,2022-10-11(B02).
- [2] 袁丰波,孙攀,张少伟.地面三维激光扫描技术在工程测量中的应用[J].住宅与房地产,2020(24):215.
- [3] 唐汝焯.关于三维激光扫描技术在地质测绘和工程测量中的综合应用[J].信息系统工程,2020(07):67-68.
- [4] 李钦,陶儒川.三维激光扫描技术在地质测绘和工程测量中的综合应用[J].住宅与房地产,2020(12):227.
- [5] 赵佳楠,陈瑶.三维激光扫描技术支持下的地铁工程测量实施方法[J].价值工程,2020,39(02):210-211.

# 水利水电工程大坝填筑施工技术和方法

唐万里

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘 要** 本文系统阐述水利水电工程大坝填筑施工技术和方法。首先介绍了分层碾压填筑、振动压实、含水率实时控制及填筑质量检测等核心技术, 分析了各技术对提升填筑体密实度的作用。其次重点论述了分段流水作业、填筑匹配均衡施工、薄层多遍碾压以及全断面同步填筑四种施工方法, 详细说明了施工全流程工艺要点。结果表明, 科学运用水利水电工程大坝填筑施工技术和方法, 是保障大坝填筑施工质量的关键。

**关键词** 水利水电工程; 大坝填筑; 分层碾压填筑技术; 振动压实技术; 含水率实时控制技术

中图分类号: TV541.1

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.013

## 0 引言

大坝填筑是水利水电工程的核心工序, 其施工质量直接关系到工程质量。大坝填筑施工是将土料、石料及混合料等筑坝材料, 通过标准化工艺分层摊铺, 然后碾压密实, 最后成型固结的系统性工程, 兼具多重技术要求。随着水利水电工程建设规模不断扩大, 坝型结构日趋复杂, 填筑施工技术也朝着精细化方向持续升级, 既需适配不同地质条件, 也要兼顾施工效率与成本管控。对此, 优化大坝填筑施工技术与方法, 强化质量全过程管控, 成为推动行业技术升级的重要方向。

## 1 水利水电工程大坝填筑施工技术

### 1.1 分层碾压填筑技术

分层碾压填筑是大坝填筑的核心基础工艺, 核心思路是将填筑料按设定厚度分层摊铺, 再借助专业碾压机具逐次压实, 以此保障填筑体整体密实度与结构稳定性, 解决全域一次性填筑易出现的压实不均、受力失衡等通病。在水利水电工程中, 大坝填筑质量直接关乎防洪调度、发电运行、农田灌溉等核心功能的落地效果, 而分层碾压工艺通过精细化管控摊铺、碾压全流程, 能大幅缩减填筑体内部孔隙率, 从源头降低后期不均匀沉降、坝体渗漏等质量风险, 同步提升坝体抗渗性能与竖向承载能力<sup>[1]</sup>。该工艺适配性极强, 土料、砂砾混合料、堆石料等主流填筑材料均可适用, 施工中只需结合料性调整分层参数与碾压标准, 就能实现质量精准管控。结合工程实操经验, 土料填筑层厚一般控制在 20~30 厘米, 砂砾料层厚 30~50 厘米, 堆石料层厚可放宽至 80~120 厘米, 碾压遍数结合机

具吨位调整, 通常静压 2~3 遍、振压 4~6 遍即可达到设计密实度要求。分层压实后各层料体紧密咬合、形成连续受力整体, 既能抵御汛期水流冲刷、渗透压力, 也能适配地基微量沉降, 保障大坝长期服役的结构完整性。相较于整体填筑模式, 分层碾压在保证质量的前提下, 还能兼顾施工效率与成本控制, 是现代大坝填筑全程必须落实的核心工艺。

### 1.2 振动压实技术

振动压实技术依托高频振动能量传递, 打破填筑料颗粒间的摩阻力与松散结构, 促使颗粒重新排列嵌挤, 是解决粗粒料、砂砾料压实难题的关键技术, 也是分层碾压工艺的核心配套技术。相较于传统静压压实, 振动压实能穿透更厚的填筑层, 对松散颗粒的密实效果提升 30% 以上, 尤其适配堆石坝、砂砾石坝等大粒径填料填筑场景。在实际施工中, 技术人员会根据填筑料粒径、级配特性, 灵活调整振动碾的激振力(通常 100~300 千牛)、振动频率(20~35 赫兹)、行走速度(2~4 千米每小时)三大核心参数, 确保不同工况下压实质量稳定可控。该技术的核心优势在于, 能快速将松散填料碾压成致密整体, 提升坝体抗变形能力与抗渗性能, 抵御水流冲击、地质形变等外部干扰。同时, 振动压实的施工效率比静压提升 20%~40%, 既满足大坝填筑的严格质量标准, 又能压缩工期、降低机械损耗, 贯穿填筑全流程, 对工程整体质量与使用寿命起到决定性作用。

### 1.3 含水率实时控制技术

填筑料含水率是影响压实效果的关键指标, 含水率过高会导致碾压出现弹簧土、压实度不达标; 含水

作者简介: 唐万里(1990-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电。

率过低则会引发料体松散、孔隙率偏大，后期极易出现沉降、开裂、渗漏等问题，直接制约大坝功能发挥。含水率实时控制技术通过全程动态监测、精准调控，将填料含水率稳定在最优区间，筑牢坝体压实质量根基<sup>[2]</sup>。该技术依托便携式含水率快速检测仪、在线监测设备，对进场填料、摊铺后料体实时取样检测，数据采集后同步联动洒水、晾晒、拌料等调控工序，实现“监测—反馈—调控”闭环作业。结合水利工程施工规范，黏性土填筑最优含水率控制在18%~24%，砂类土最优含水率控制在8%~12%，针对不同料性、天气工况，可灵活微调调控策略，避免含水率大幅波动。通过实时管控，能彻底解决含水率失衡带来的质量隐患，强化填筑体整体性与抗渗能力，保障碾压工序高效推进。

#### 1.4 坝体填筑质量检测技术

坝体填筑质量检测是贯穿施工全周期的质控关口，依托专业检测原理与设备，对填筑料性能、摊铺厚度、压实度、均匀性等关键指标全程核验，为施工调整、质量整改提供科学依据，杜绝不合格工序流入下一环节。该技术融合工程地质、土工材料、精密检测等多领域技术，是保障大坝填筑质量的最后一道防线。检测环节覆盖全流程：填筑料进场前，开展颗粒分析、击实试验、含水率检测，严控原料质量；在施工过程中，采用环刀法、灌砂法、核子密度仪等方式，每100~200平方米布设1个检测点，实时核验压实度（土石坝压实度要求不低于96%~98%）、层厚偏差；填筑完工后，开展整体均匀性、抗渗性核验，及时排查局部松散、漏压、孔隙率超标等隐患。通过全方位检测，能有效规避沉降、渗漏、坝体失稳等安全风险，确保大坝长期抵御水文、地质等自然因素干扰，充分发挥防洪、发电、灌溉等综合效益，是水利水电大坝施工中不可或缺的质控支撑。

## 2 水利水电工程大坝填筑施工方法

### 2.1 分段划分，流水作业

施工人员要先结合大坝设计尺寸地形条件以及施工机械设备性能，合理划定填筑分段区域，确保各分段长度、宽度与施工队伍配置的机械设备作业半径相匹配，避免出现作业重叠或施工盲区。划定分段后，施工人员对各分段区域进行清理平整，清除地表杂草、树根以及腐殖土，对基底进行碾压夯实，确保基底承载力满足填筑要求。在夯实过程中，施工人员全程监测压实度，发现局部夯实不足的部位及时进行补压，

直至达到设计标准。基底处理完成后，施工人员按照设计要求的填料规格筛选合格填料，采用运输设备将填料有序运至对应分段作业面。在运输过程中，控制填料含水量，若含水量过高则进行晾晒处理，含水量过低则适当洒水湿润，确保填料处于最佳碾压含水量范围<sup>[3]</sup>。填料运至作业面后，采用摊铺设备将填料均匀摊铺，控制摊铺厚度符合设计规范。在摊铺过程中，及时调整摊铺平整度，避免出现局部堆积或凹陷。摊铺完成后，可以借助碾压设备对填料进行碾压。碾压时，遵循从边缘向中间、从低处向高处的顺序，控制碾压速度和碾压遍数。在碾压过程中，随时检查碾压效果，对碾压不密实的部位进行重复碾压，直至填料压实度达到设计标准。同一分段内完成一道填筑工序后，施工人员立即清理作业面，整理施工机械设备，快速转入下一道工序作业。

### 2.2 供填匹配，均衡施工

大坝填筑施工需保证填料供给与填筑作业同步推进，实现供需均衡、连续施工。施工单位结合填料储备总量、机械设备台班效率以及大坝阶段性填筑进度指标，统筹安排填料供应节奏和填筑施工进度，使填料输送速度与现场填筑速度保持匹配，既防止填料断供造成停工，也避免填料过量堆积，减少物料损耗和场地占用，降低施工管理成本。施工前期，施工人员可以自己提前规划填料储备分区，按照大坝填筑设计要求，对进场填料开展逐批次全面检测，重点检查颗粒级配、天然含水率、压实特性等指标，筛除不合格填料。填料检测合格后，根据填筑作业面的实际消耗量，调度自卸运输车辆沿规划路线转运填料。在这个时候，可以安排一些专职人员负责现场运输调度，实时记录作业面填料余量、车辆等候时间等信息，灵活调整运输频次和行车路线，保证填料按时送达作业面，同时疏导现场车流，避免车辆拥堵影响施工正常进行。填筑施工阶段，根据作业面面积和设备作业半径，合理布置施工人员和摊铺、碾压设备，明确各岗位职责，保障填筑工序连贯作业。操作人员操控摊铺机进行卸料和摊铺，将单层摊铺厚度控制在35~40厘米，随时调整摊铺平整度，修补局部凹凸部位，为后续碾压作业打好基础。摊铺完成后立即开展碾压作业，振动碾压行驶速度控制在2.5~3千米每小时，合理控制碾压力度和激振频率，并用核子密度仪实时监测压实度。压实度未达到96%设计值的区域，要及时进行局部补压，直到各项指标合格。施工全程监控填

料供需情况, 填料供应滞后时, 启用储备填料加快转运; 填筑进度滞后时, 增派人员和设备, 提升施工效率, 维持供需平衡。

### 2.3 薄层铺料, 多遍碾压

大坝填筑施工严格执行薄层铺料、多遍碾压工艺, 结合填料性能和设备工况, 设定铺料厚度为 28 厘米, 允许偏差  $\pm 2$  厘米, 全作业面厚度差值不超过 3 厘米。严控铺料厚度, 既能避免铺料过厚导致深层压实不合格, 也能防止铺料过薄降低施工效率、延误工期。摊铺作业安排专职测量人员, 每 3 米设置一个厚度检测点, 用测杆和水准仪检测铺料厚度, 每 10 分钟记录一次数据。厚度出现偏差时, 及时调整摊铺机速度和布料器幅度, 保证铺料厚度符合要求。填料运至作业面后, 摊铺机以 1.2 米每分钟的速度纵向匀速摊铺, 清理粒径超过 15 厘米的大块杂物, 做到全面清理无遗漏。同时修整摊铺面, 将表面高低差控制在 1 厘米以内, 消除堆积和空缺问题。铺料自检合格后, 立刻开展碾压施工, 碾压按照先边缘后中间的顺序进行, 沿横向划分 3 个碾压区段, 行驶速度控制在 2 千米每小时至 2.5 千米每小时, 碾压轮迹重叠宽度保持 15 厘米至 20 厘米, 防止填料推移离析。单遍碾压结束后, 用环刀法和核子密度仪联合检测压实度, 每 500 平方米布置 6 个检测点。压实度未达到 98% 的区域, 增加 2 遍至 3 遍复压, 复压时提高 10% 的激振频率, 直到连续 3 次检测结果均合格。在碾压过程中, 用快速含水率检测仪实时监测填料含水率, 每 15 分钟采集一次数据, 将含水率控制在最佳含水率  $\pm 2\%$  范围内。含水率超标时, 立即停止碾压作业: 含水率偏高, 用平地机翻松填料, 翻松深度 28 厘米, 每隔 30 分钟翻动一次, 加快水分蒸发; 含水率偏低, 用雾状洒水车均匀洒水, 每平方米洒水量控制在 0.8 升至 1.2 升, 防止局部结块。待含水率恢复至合格范围, 再继续碾压作业, 保证填筑质量达标<sup>[4]</sup>。

### 2.4 统筹兼顾, 全断面同步

按照统一标准同步推进全断面作业可以让各部位填筑质量保持一致, 避免出现质量差异带来的安全隐患。施工人员在施工前, 对大坝全断面的基底进行统一清理, 清除地表所有影响施工的杂物, 对基底进行全面夯实。夯实过程中安排专人分片负责, 逐区域检查基底压实度, 发现夯实不足的部位及时补夯, 确保全断面基底承载力均符合设计要求, 为后续全断面同步填筑奠定基础。施工人员根据全断面填筑需求, 合理调配填料储备、运输设备以及施工人员, 明确各区

域施工岗位职责, 确保每一处作业面都有专人负责, 填料供应能够同步满足全断面各区域的填筑需求。填料进场后, 先对填料质量进行全面检验, 剔除不合格填料, 合格填料按照施工规划有序堆放, 调度运输设备分区同步运送填料, 避免某一区域填料积压而另一区域供应不足。运输过程中安排专人实时反馈各区域填料余量, 及时调整运输路线和频次, 确保全断面各区域填料能够同步运抵作业面<sup>[5]</sup>。填料运抵后, 在全断面各区域同步开展摊铺作业, 操作摊铺设备均匀摊铺填料, 严格控制摊铺厚度和平整度, 摊铺过程中随时检查调整, 确保全断面铺料厚度一致、表面平整, 无局部凸起或凹陷。铺料完成后, 全断面各区域施工人员同步操作碾压设备开展碾压作业, 碾压时遵循统一的碾压顺序和速度, 每一遍碾压完成后, 同步对全断面各区域压实度进行检测, 若某一区域压实度未达标, 便针对性增加碾压遍数、调整碾压力度, 确保全断面碾压质量同步达标。

### 3 结束语

水利水电工程大坝填筑施工是一项系统性工程, 其技术应用与施工方法的科学性直接决定大坝的长期运行安全。在实际施工中, 施工人员必须坚持质量为本的原则, 根据工程实际合理配置资源, 确保供填匹配与工序衔接。唯有将先进技术与科学管理深度融合, 方能打造优质耐久的水利水电工程。未来, 随着水利工程建设向智能化迈进, 大坝填筑施工需进一步融合智能化技术手段。施工单位应强化技术交底, 严守施工规范, 推动大坝填筑施工提质增效, 为水利水电工程安全稳定运行、发挥防洪发电灌溉等核心功能提供坚实保障。

### 参考文献:

- [1] 刘宏伟. 大坝填筑施工技术在水电工程中的应用[J]. 价值工程, 2025, 44(27): 152-154.
- [2] 李霄. 水利工程大坝填筑施工技术要点思考[J]. 中国住宅设施, 2025(06): 151-153.
- [3] 丁丹. 大坝填筑施工技术在水电工程中的应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(07): 123-125.
- [4] 姜龙, 赵宇飞, 孟亮, 等. 水利工程智能建造 BIM 技术研究与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- [5] 张龙. 水利工程施工中的大坝填筑施工技术要点探析[J]. 工程技术研究, 2023, 08(18): 108-110.

# 水利水电工程施工质量控制关键技术研究

刘 慧

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610036)

**摘 要** 水利水电工程是民生基建的核心载体, 其施工质量直接关乎工程运行安全。当前, 我国水利水电建设力度持续加大, 工程规模不断扩大, 施工环境愈发复杂。基于此, 本文结合行业施工规范, 系统梳理了全过程闭环管控、标准先行合规施工及安全质量协同管控的三大核心原则, 然后重点剖析了五大关键技术, 旨在解决施工质量管控难点, 推动工程施工向精细化升级, 为同类水利水电项目质量管控提供参考。

**关键词** 水利水电工程; 质量溯源管控技术; 密实度精准控制技术; 温控防裂; 无损检测核检技术

中图分类号: TV523

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.014

## 0 引言

现阶段, 水利水电工程不断复杂, 施工环节涉及多专业交叉作业, 质量管控难度持续攀升。部分项目因管控原则缺失、技术应用不到位, 易出现原材料不合格等质量问题, 埋下工程安全隐患。为破解这类难题, 施工人员要明确质量管控核心原则, 深挖关键技术应用细节, 构建全流程质量管控体系, 全力保障工程建设质量达标。

## 1 水利水电工程施工质量控制原则

### 1.1 全过程闭环管控原则

施工人员开展水利水电工程质量管控工作, 需立足于工程全周期推进闭环管理, 打破单一环节管控的局限性。水利水电工程涉及前期筹备、中期施工、后期验收等多个阶段, 各阶段环环相扣, 任何一处管控疏漏都会引发连锁质量问题。施工人员要将质量管控思维贯穿始终, 从施工图纸会审、场地勘测等环节便介入管控, 细化各工序交接节点的质量核查标准, 杜绝工序跳转带来的质量隐患。进入现场施工阶段, 施工人员需紧盯每一道作业流程的质量状态, 针对土方开挖、结构浇筑、设备安装等核心工序, 落实定岗定责的管控机制。针对隐蔽工程这类易被忽视的环节, 施工人员更要强化过程盯控, 做好实时记录与数据留存, 确保施工行为全程可追溯<sup>[1]</sup>。工程收尾阶段, 施工人员需对照前期管控目标开展全面复盘, 排查质量偏差问题并制定整改方案, 形成前期预判、中期管控、后期复盘的完整闭环, 让质量管控覆盖工程建设的每一个角落。

### 1.2 标准先行合规施工原则

行业现行的水利水电施工规范、技术规程以及工程专项设计文件, 是指导现场作业的核心准则。施工人员需提前掌握各项标准要求, 细化各工序的施工参数、操作规范与验收准则, 杜绝凭经验随意施工的行为。施工前期, 施工人员要组织专项技术交底, 将标准要求拆解到具体施工环节, 让一线作业人员明晰操作边界与质量目标。针对特殊工艺、高危作业环节, 施工人员需单独制定标准化作业方案, 明确质量管控要点, 确保每一项施工动作都贴合规范要求。在施工过程中, 施工人员要对照标准开展常态化核查, 对施工工艺、参数控制、成品质量等进行逐一核验, 发现偏离标准的行为立即叫停整改, 保障施工流程始终处于合规状态。面对工程变更、工艺优化等特殊情况, 施工人员需严格履行审批流程, 在获得设计单位、监理单位确认后再调整施工方案, 严禁擅自更改标准、简化流程。施工人员还要建立标准执行台账, 记录各环节标准落实情况, 为后续验收、追责提供依据。坚持标准先行的管控原则, 既能规范施工人员的作业行为, 也能保障工程结构安全、功能达标, 契合水利水电工程长期服役的质量需求。

### 1.3 安全质量协同管控原则

施工人员需树立安全与质量协同管控的理念, 认清二者相辅相成的内在联系, 摒弃重质量轻安全或重安全轻质量的片面思维。水利水电工程多涉及高空作业、深基坑施工、大型设备运转等高危场景, 安全管控不到位会直接影响施工进度与成品质量, 而质量缺

作者简介: 刘慧(1987-), 男, 本科, 研究方向: 公路工程和水利水电工程技术管理。

陷也会埋下长期安全隐患, 施工人员需同步推进两项管控工作。施工人员在制定质量管控方案时, 需同步融入安全管控要素, 针对高风险施工环节, 兼顾质量达标与安全防护要求。例如: 开展混凝土浇筑作业时, 既要把控浇筑密实度、平整度等质量指标, 也要落实模板支撑、高空防护等安全措施, 避免安全事故中断施工流程、破坏已完工程质量。在施工过程中, 施工人员要同步开展安全巡查与质量核查, 及时消除安全风险与质量隐患, 保障施工环节平稳推进。施工人员还要优化管控资源配置, 组建兼具安全与质量管控能力的专项团队, 提升协同管控效率<sup>[2]</sup>。针对施工中出现的安全与质量冲突问题, 秉持统筹兼顾的原则制定处置方案, 在保障安全的前提下夯实质量基础, 在严控质量的同时筑牢安全防线。

## 2 水利水电工程施工质量控制关键技术

### 2.1 原材料性能检测: 质量溯源管控技术

工程所用的水泥、砂石、钢筋、外加剂等原材料, 性能优劣直接决定工程结构强度与耐久性, 施工人员需建立严格的进场检测机制, 杜绝不合格材料流入施工环节。材料进场前, 施工人员要核对供应商资质、出厂合格证明等文件, 确认材料来源合规后再开展现场性能检测。针对不同类型的原材料, 施工人员可以采用适配的检测方法, 精准核验各项性能指标。检测水泥时, 重点核查强度、凝结时间、安定性等核心指标, 确保 3 天抗压强度不低于 15 MPa、28 天抗压强度完全达标设计值, 初凝时间控制在 45 分钟以上; 检测砂石骨料时, 聚焦级配、含泥量、压碎值等参数, 严控粗骨料含泥量低于 1%、细骨料含泥量低于 3%, 压碎值控制在 18% 以内; 检测钢筋时, 核验抗拉强度、屈服强度、延伸率等性能, 保证屈服强度误差控制在设计值的 5% 以内, 外观无裂纹、锈蚀问题。完成性能检测后, 施工人员要推进质量溯源管控, 建立全链条材料追溯体系。对每一批次进场材料, 标注专属溯源编码, 记录进场时间、检测结果、使用部位、领用人员等信息, 实现材料从进场到使用的全程追踪。施工人员要定期梳理溯源台账, 核对材料使用与检测数据的一致性, 一旦发现质量问题, 快速定位问题材料批次与使用范围, 及时采取返工、替换等处置措施。依托这项技术, 施工人员能够精准把控原材料质量, 从源头规避因材料缺陷引发的工程质量问题。施工人员还要强化检测环节的监督管理, 安排专人负责检测工作, 确保检测结果真实有效。针对关键原材料, 适当增加检测频次与抽检比例, 提升管控力度<sup>[3]</sup>。

### 2.2 土石方填筑碾压: 密实度精准控制技术

土石方填筑是水利水电工程的基础施工环节, 密实度达标与否直接影响坝体、堤防等结构的稳定性, 施工人员需依托专项技术实现密实度精准控制。施工人员可以先结合工程设计与土质特性, 确定填筑分层厚度、碾压机具型号、碾压遍数、行驶速度等核心参数, 制定针对性的碾压施工方案, 为现场作业提供明确指引。填筑施工前, 施工人员要清理基底杂物、软弱土层, 对基底进行夯实处理, 提升基底承载能力, 避免基底沉降影响填筑体密实度, 要求基底压实度不低于 90%。在分层填筑过程中, 施工人员严格控制每层填料的摊铺厚度, 黏性土填料厚度控制在 20 ~ 30 cm, 砂砾石填料厚度控制在 30 ~ 50 cm, 确保厚度均匀一致, 杜绝局部超厚导致碾压不到位的问题。填料摊铺完成后, 施工人员按照既定方案开展碾压作业, 遵循先轻后重、先慢后快、先边缘后中间的原则, 选用 18 t 以上振动碾, 碾压遍数控制在 6 ~ 8 遍, 行驶速度不超过 4 km/h, 有序推进碾压施工, 保证填筑体各部位受力均匀。碾压施工结束后, 施工人员应及时开展密实度检测, 采用环刀法、灌砂法等专业方法, 精准测定填筑体密实度数值。检测点位按每 500 m<sup>2</sup> 布设 3 ~ 5 个的标准覆盖填筑面全区域, 包括边缘、转角等易遗漏部位, 确保检测结果能真实反映整体密实度状态。施工人员对照设计标准比对检测数据, 土石方填筑体密实度需达到 96% 以上, 堤防工程密实度需达到 94% 以上, 对密实度不足的区域, 标记具体位置并补充碾压 2 ~ 3 遍, 直至检测结果达标后方可开展下一层填筑施工。施工人员还要做好施工过程的动态调整, 结合天气变化、土质湿度等因素, 灵活优化碾压参数。阴雨天气后, 及时晾晒填料、检测含水率, 避免过湿土填筑引发密实度偏差。干旱天气时, 适当洒水调控填料湿度, 保障碾压效果。全程做好施工与检测记录, 留存密实度控制相关数据, 为工程验收提供支撑, 依靠精细化管控实现土石方填筑密实度的精准把控。

### 2.3 大体积混凝土施工: 温控防裂关键技术

混凝土拌合阶段, 施工人员要严控原材料温度, 夏季对砂石骨料进行遮阳降温处理, 冬季采用温水拌合, 把控入模温度稳定在 5 ~ 28 °C 之间。浇筑施工时, 施工人员采用分层分段浇筑方式, 控制单次浇筑厚度不超过 2 m, 浇筑速度保持匀速, 延长散热时间, 避免混凝土内部热量快速积聚。针对大面积结构, 每隔 20 ~ 30 m 合理设置施工缝与后浇带, 分散结构应力, 减少裂缝产生概率<sup>[4]</sup>。浇筑完成后, 施工人员可以启

动全程温控监测,在混凝土内部按每 $50\text{ m}^2$ 布设1个测温元件,实时采集内部温度、表面温度与环境温度数据,密切关注温度变化趋势。严格控制混凝土内外温差不超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,内部最高温度不超过 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,一旦温差超标,立即采取针对性调控措施。夏季施工时,及时覆盖保湿材料,避免阳光直射导致表面失水开裂;冬季施工时,做好保温防护,防止低温冻害影响结构质量。养护时长不少于14天,前7天保持混凝土表面湿润状态。养护阶段,施工人员要根据混凝土硬化状态,调整养护时长与养护方式,保障混凝土充分水化,提升结构强度。定期复测混凝土内部温度与外观状态,排查细微裂缝,对发现的裂缝及时采用灌浆、封闭等工艺处置。施工人员应全程梳理温控数据,总结施工规律,优化后续浇筑与养护方案,最大限度降低温度裂缝风险,保障大体积混凝土结构的整体性与耐久性。

#### 2.4 隐蔽工程专项施工:无损检测核验技术

隐蔽工程覆盖于工程结构内部,质量缺陷难以及时发现,施工人员可以先开展隐蔽工程专项施工,严格按照设计图纸与工艺标准推进基底处理、钢筋绑扎、管线预埋、防渗施工等作业,每完成一道工序,先开展内部自查,整改细节偏差,保障施工流程规范有序。专项施工结束后,施工人员要摒弃传统破损检测方式,采用无损检测技术开展质量核验,避免破坏已完工程结构。针对地基隐蔽工程,运用地质雷达、声波透射法检测,检测间距控制在 $0.5\text{ m}$ 以内,精准判定地密实度、承载能力与均匀性,排查空洞、软弱夹层等隐患;针对钢筋隐蔽工程,采用钢筋扫描仪检测,钢筋间距偏差不超过 $\pm 10\text{ mm}$ ,保护层厚度偏差控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,确认钢筋配置符合设计要求;针对防渗、灌浆隐蔽工程,借助无损探伤技术检测,密实度达标率需达到100%,判断防渗效果是否达标。施工人员要规范无损检测操作流程,选定合理的检测点位与检测参数,保证检测数据精准可靠。对检测获取的数据进行专业分析,对比设计标准判断隐蔽工程质量状态,区分合格区域与问题区域。针对检测发现的质量缺陷,定位具体位置与缺陷程度,制定专项整改方案,组织人员返工加固,整改完成后再次开展无损检测,直至质量达标。无损检测技术无需破损工程结构,既能全面排查隐蔽工程质量问题,也能保障施工进度不受影响。施工人员要做好隐蔽工程施工与检测的全过程记录,留存施工影像、检测报告、整改记录等资料,归入工程档案。

#### 2.5 施工现场动态监测:质量智能预警技术

施工人员可以先在施工现场布设监测设备,结构沉降监测点按每 $10\text{ m}$ 布设1个,位移监测精度控制在

$0.1\text{ mm}$ 以内,针对结构沉降、位移、应力、温度、含水率等关键指标,搭建全覆盖的监测网络,覆盖坝体、基坑、边坡、混凝土结构等核心管控区域。监测设备实时采集现场数据,同步传输至智能管控平台,施工人员借助平台对数据进行整合分析,掌握施工质量动态变化趋势。智能平台内置质量阈值标准,自动比对监测数据与标准数值,如基坑沉降速率超过 $0.5\text{ mm/d}$ 、混凝土内外温差突破 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,立即触发预警机制,通过声光提示、信息推送等方式,第一时间告知现场施工人员,响应时间不超过30秒。收到预警信息后,施工人员可以快速赶赴预警区域,核查现场施工状态,分析数据异常的原因,判断是施工工艺偏差、环境影响还是设备故障导致。针对不同诱因,制定应急处置方案,及时调整施工参数、加固作业面或更换设备,遏制质量问题扩大<sup>[5]</sup>。施工人员全程跟踪处置进度,确认数据恢复正常、隐患消除后,再关闭预警、恢复正常施工。施工人员可以定期维护监测设备,每月校准1次设备参数,保证监测数据的稳定性与精准度。

### 3 结束语

水利水电工程施工质量管控是一项系统性工作,需坚守核心管控原则,依托科学关键技术筑牢质量防线。本文从管控原则与关键技术两方面对工程施工质量控制进行系统研究,明确了质量管控的核心思路,同时围绕原材料检测、土石方密实度控制、大体积混凝土温控防裂、隐蔽工程无损检测及施工现场智能预警等技术展开分析,为解决实际施工中的质量痛点提供了可行路径。在未来施工中,施工人员需持续优化技术应用,将质量管控贯穿工程建设始终,打造优质的水利水电工程,实现行业高质量发展。

#### 参考文献:

- [1] 王耀,谭敏枝,纪德金.基于BIM技术的水利工程施工质量控制系统设计与应用[J].技术与市场,2026,33(02):100-103.
- [2] 朱佳辉,张鑫伟,韩毅.水利工程项目中施工质量控制智能化方法[J].科学技术创新,2026(02):161-164.
- [3] 吴育松.水利水电工程金属结构安装施工质量控制对策探析[J].现代工程科技,2025,04(24):189-192.
- [4] 蔡清发.水利水电设备工程施工质量控制要点分析[J].中国设备工程,2025(23):258-260.
- [5] 董文昌,王瑞锋.水利工程施工中商品混凝土的质量控制方法[J].建材发展导向,2025,23(23):4-6.

# 灌区工程标准化建设与长效管护机制研究

施凌鹏<sup>1</sup>, 高帆<sup>2</sup>

(1. 云南省红河州大型灌区管理局, 云南 红河 661100;

2. 开远市水务局, 云南 红河 661600)

**摘 要** 本文以灌区工程为研究对象, 分析了标准化建设的必要性、理论支撑及现存问题, 提出统一设计、施工标准与信息化管理等实施路径, 并构建制度化、经费保障和社会参与相结合的长效管护机制。结果表明, 标准化建设与长效管护协同作用可提升工程运行效率、安全性及可持续发展能力, 为现代灌区管理提供可推广的经验。

**关键词** 灌区工程; 标准化建设; 长效管护; 信息化管理; 可持续发展

中图分类号: S274.3; TV91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.015

## 0 引言

在农业现代化与水资源约束日益凸显的背景下, 灌区工程正由传统建设模式向精细化、系统化管理转型。既有灌区在长期运行过程中逐渐暴露出工程标准不统一、管护方式粗放及运行效率不稳定等现实问题, 制约了整体效益的持续发挥。与此同时, 信息技术的快速发展为灌区管理提供了新的技术路径, 也对工程建设与运行提出更高要求。在此背景下, 围绕标准化建设与长效管护协同推进开展研究, 对于提升灌区治理能力与运行质量具有重要的现实意义。

## 1 灌区工程标准化建设的必要性与理论基础

### 1.1 灌区水利工程建设的重要性

灌区工程是保障农业生产及粮食安全的关键基础设施, 与区域农业可持续发展直接关联。在发展现代化农业背景下, 灌区工程建设不仅能够提供作物生长所需要的水量, 借助科学调度方式提高灌溉效率, 还能显著减轻旱涝灾害对农业生产带来的影响, 实现产量持续稳定的增加。特别是大型灌区具备完善的蓄水灌排体系, 能够保证在一定程度干旱或洪涝的条件下维持合理的灌溉, 有效降低自然灾害给农业生产带来的冲击。与此同时, 水库、渠管道以及泵站等设施能够形成合理的水流网络, 对水资源进行优化配置, 极大地提高水的利用效率。灌区排涝设计增强了农业抵抗风险的能力, 保障作物生长的环境稳定, 实现农业经济、社会生活以及生态保护方面的综合价值。

### 1.2 标准化建设的理论支撑

标准化建设是提升灌区工程管理科学性及效率的重要手段, 其理论基础涵盖工程标准化管理理论以及

水利工程施工和管理规范的应用。通过对设计、施工以及运行管理规范进行统一, 实现工程能够被复制、能够被控制, 进而降低建设成本以及运行风险。在灌区工程中, 标准化建设能够保证设施按照统一的规范来进行施工和验收, 提高工程质量以及投资效率, 避免出现重复建设或者返工问题。同时, 通过制定操作规程、巡检制度以及维护规范, 让管理单位能够科学地安排巡检和维护任务, 实现对风险预防以及对故障快速处置。理论和实践的有效结合是实现标准化建设提升工程管理水平的核心手段<sup>[1]</sup>。

### 1.3 现阶段灌区水利工程建设存在的问题

近些年, 灌区工程建设取得了一定的成效, 但仍仍然存在一些问题。其一, 设计标准没有做到统一。不同地区、不同设计单位及各期工程在施工工艺、渠管道规格以及配套设施方面差异十分明显, 整体运行效率很难得到优化。其二, 工程质量参差不齐, 施工单位的技术水平、材料选择或者管理能力存在不同, 增加了后期维护的压力以及运行风险。其三, 管理与养护机制缺乏系统性, 部分灌区职责不明确, 养护资金和技术支持不足, 巡检、维护以及维修工作不规范, 影响整体运行效益。这些问题表明, 灌区工程迫切需要通过标准化建设和系统化管护进行结合, 提高工程效益水平。

### 1.4 标准化建设的目标与原则

灌区工程开展标准化建设的目标是形成规范化、科学化、能够被复制的工程体系, 实现全生命周期的高效管理。应该推动全生命周期管理理念, 从设计、施工到运营和维护建立科学的管理体系, 保持工程长

作者简介: 施凌鹏 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

期处于良好状态。在建设阶段强化质量控制,严格执行施工规范和标准,保障设施具有耐久性、安全性以及稳定性,同时兼顾技术的先进性和适用性;在运行阶段管理运行规章制度权责清晰明了,让管理操作便捷,减少人为差错,提高整体效率和经济效益。明确目标并且遵循科学原则,为灌区工程安全运行和可持续发展奠定基础<sup>[2]</sup>。

## 2 灌区水利工程标准化建设的实施路径

### 2.1 统一设计与施工标准

对设计和施工的标准进行统一,是实现灌区工程标准化建设的关键环节。同一区域实现统一的技术规范以及施工图集,能够保证各期工程在渠管道的规格、泵站的布局、堤坝的构造以及配套建筑物方面保持一致,从而实现整体网络的协调以及高效的运行。与此同时,推行标准化的施工工艺以及材料的选择,能够确保各类建筑材料符合质量标准,施工的过程符合规范要求,可以减少工程的返工以及质量隐患。通过对设计和施工的标准进行统一,运行管理单位在后期的运营和维护当中能够有明确的标准开展巡检和维修,让灌区整体的运行寿命及效率得到提升,并且为信息化管理以及智能化监控提供可靠的基础。

### 2.2 施工质量监控与验收体系

施工质量过程监控和规范验收标准是保障灌区工程质量的重要手段。全过程质量控制制度应覆盖工程设计、施工以及竣工验收各个阶段,对施工质量开展实时的监督记录,及时发现问题并采取纠正措施。同时,引入第三方的检测与验收的机制,能够独立评估工程质量,确保施工单位依照规范进行施工,避免主观管理的漏洞。通过科学、严格的质量控制体系,灌区工程在建设的过程当中达到高标准、高可靠性,为后期的管护和运行奠定坚实的基础。

### 2.3 信息化与智能化建设手段

信息化与智能化手段,是实现灌区标准化管理的技术的支撑。应用遥感、GIS以及物联网等技术对水库的水位、渠管道的流量、泵站的运行以及土壤的墒情等开展实时的监测,能及时掌握灌区运行的状况,科学调度水资源,提高灌溉的效率以及防洪排涝的能力。建设数字化的管理的平台,实现工程全生命周期的管理,不但有助于巡检、维护以及调度的科学化,还能够形成完善的档案和数据记录,为管理人员提供决策依据。信息化与智能化手段的应用,让灌区管理从传统经验的管理向数字化、科学化的管理转型,提高管理的效率和响应能力<sup>[3]</sup>。

## 3 灌区工程长效管护机制构建

### 3.1 制度化管护体系

灌区工程开展长效管理,首先是要依赖完善的管护体系,且管护体系要实现制度化。需通过制度化明确责任主体,明确管理权限,从而确保各级管理机构及运行单位职责清晰,分工合理。以红河州蒙开个大型灌区为例,灌区实现了管养分离,由红河州大型灌区管理局以及下设的蒙自、开远、个旧三个管理分局,分局下设4个管理处负责进行管理。管理体制顺畅,岗位设置与职责清晰,管理人员明确,运行管护机制健全,并引入社会资本进行灌区运行维护:蒙自片区与南洞泵站工程管理处签订合同,依照合同进行维修保养;开远片区由开远市兴水水务投资经营有限公司进行运行维护;个旧片区由个旧市大屯供排水有限公司和北坡供排水公司进行运行维护。几方签订合同明确责任及工作范围,形成一个管理链条完整、权责清晰、制度化的框架。与此同时,制定定期巡检、养护以及维修的标准,让工程设施设备在使用过程中按照统一的规范标准去检查、维修保养,极大地降低了灌区的运维难度,提高灌区整体的管理水平以保障灌区工程能够安全长久运行。

### 3.2 经费保障与激励机制

长效管护离不开稳定的经费保障以及有效的激励机制。建立起专项的养护资金投入机制,以确保日常巡检、维修以及设施设备更新有充足的资金支撑,避免因经费不足造成养护工作滞后或者工程出现退化的情况。以蒙开个大型灌区为例,管理单位红河州大型灌区管理局是隶属于红河州水利局的副处级公益一类事业单位,下设蒙自、开远、个旧三个市管理分局,分局下设四个管理处,人员工资均由州县财政统一发放,各类福利均能及时足额兑现。日常巡查维修保养经费由养护单位从收取的水费中列支。在经费能够保障的前提下,还需要明确经费使用制度,让资金的来源畅通使用透明。除此之外,要通过激励基层养护单位以及操作人员,提高他们的管护积极性,如采取绩效考核、发放奖金或者表彰等形式,促使工作人员积极主动去发现问题,并且及时对设施进行维护,形成一种激励奖励机制和责任约束制度相互结合的长效运维模式<sup>[4]</sup>。

### 3.3 信息化管理与预防性维护

信息化管理是现代灌区长效管护的重要支撑因素。通过监测得到的数据对灌区工程运行的健康状况开展动态评估,从而实现科学调度以及预防性维护。例如:

蒙开个大中型灌区通过各期信息化建设, 建成了一个调度中心、四个分中心, 已经形成了信息采集、信息传输、信息管理及信息应用的系统构架, 实现工程在线监管和自动化控制。通过水位测量自动监测站、流量自动监测站、土壤墒情自动监测站, 蒸发量自动监测站、闸位信息采集站、闸门自动控制系统, 大坝安全监测站等, 数据异常自动识别险情, 出现险情时及时预警。管理单位根据自动监测得到的结果提前制定维修养护计划, 实施预防性维护, 能够大大降低工程突发故障的风险, 提高灌区整体的安全性和稳定性。

## 4 标准化建设与长效管护的协同效应

### 4.1 标准化建设提升管护效率

灌区工程的标准化建设, 能够明显提升管护效率。以蒙开个大中型灌区为例, 自从在 1998 年被纳入全国重点大型灌区续建配套以及节水改造计划后, 通过开展多期的续建配套项目、节水改造项目以及信息化建设项目, 已经形成了一种以蓄水工程为作中心、灌排渠系作主线的统一灌排立体网络。开展灌区标准化建设明确工程设计规范、施工标准以及管理流程, 让灌区的日常巡检和维护工作具有更加便利统一、易操作的特点, 管理人员可以按照标准化手册去进行巡查、维修以及记录, 大幅度地提升了管护方面的效率。在建设阶段规范化施工很大程度上消除了工程存在的隐患, 降低了后期修复所需要的成本。蒙开个大中型灌区在建成运行多年后, 引(提)水工程完好率达到 90% 以上, 骨干渠道完好率达到 90% 以上, 各类设施设备仍保持着高效的运行状态, 确保了灌区能够稳定地运行, 减少了设备故障以及突发维修情况的发生。标准化建设和管护工作紧密地结合在一起, 让巡检、维修以及运行操作有章可循, 效率明显得到提升。

### 4.2 长效管护促进标准化成果落地

实行长效管护机制是标准化建设成果能够持续发挥效用的重要保障。蒙开个大中型灌区实行管理运行和维修养护相分离的模式, 由管理局以及分局负责运行管理的工作, 专业养护企业负责工程维修维护的工作, 明确了职责分工, 让标准化建设成果在日常运营当中得以落地。运行维护的经验能够为设计和施工提供反馈, 管理人员可以发现标准化手册当中不适应实际运行的环节并且提出优化的方案。例如: 在进行信息化管理的时候, 监测设备数据出现异常能够快速反馈到调度中心, 指导运维人员进行预防性维护, 同时为工程优化提供真实的数据支撑。长期进行管护实践形成了完整的档案, 包括用水量、灌溉效率以及设备运

行的数据, 这些数据不仅能够优化操作流程, 为标准化流程改进提供科学依据, 还能为灌区水量调度、取水计划、作物种植结构调整、水价改革等决策提供数据支撑。通过管护和数据反馈形成闭环, 标准化建设目标得以转化为工程运行的效益, 实现了理论标准向实际操作的落地<sup>[5]</sup>。

### 4.3 构建可持续发展模式

标准化建设和长效管护协同发挥作用, 有助于灌区形成灌区可持续发展的模式。标准化工程体系和健全的管护机制保障了工程的安全、经济效益以及生态的协调。在安全方面, 建立健全安全管理制度, 其中包括巡查、监测、应急演练以及责任落实等内容, 确保了水库大坝、闸门及泵站等关键设施能够安全运行; 在经济方面, 通过规范收费、精准补贴以及节水激励等措施, 实现了水资源的高效利用以及成本的回收; 在生态方面, 注重水土保持、绿化以及水环境保护等工作, 让工程运行和自然环境能够协调发展。标准化建设提供了操作的规范, 长效管护保证了执行的落实, 两者结合形成了全生命周期可持续发展的闭环, 既保障了农田灌溉的效益, 又实现了资源的节约和环境的保护, 为区域农业高质量发展提供了坚实的支撑。

## 5 结束语

灌区工程通过开展标准化建设工作能够形成统一规范、可以复制的工程体系, 把制度化管护、经费保障、信息化监控以及社会参与结合起来, 实现长时间的高效运行。标准化和长效管护所起到的协同作用, 不但提升了灌区管理的效率以及安全性, 而且为农业可持续发展提供了保障, 具有显著的示范和推广方面的价值。

## 参考文献:

- [1] 刘刚. 农业水利工程安全生产标准化建设研究[J]. 江西农业, 2025(20):134-136.
- [2] 王昆仑, 罗俊, 刘汉梅, 等. 浅谈水利工程工地试验室的标准化建设与规范化管理[J]. 四川水泥, 2024(11):44-46.
- [3] 张巧荣. 高标准农田建设中老旧灌区农田水利工程优化改造[J]. 农业工程技术, 2025, 45(02):31-33.
- [4] 辛亚雪. 农田水利工程运行管护现状与提升路径[J]. 农业开发与装备, 2026(02):196-198.
- [5] 任旭越, 夏旦丹, 吴自成, 等. 三门县东部灌区“先建机制, 后建工程”改革实践与思考[J]. 浙江水利科技, 2024, 52(05):85-88.

# 大型灌区渠道防渗工程技术选型与效果分析

李虹钢<sup>1</sup>, 武 瑾<sup>2</sup>

(1. 红河州大型灌区管理局, 云南 红河 661100;  
2. 个旧市水利电力勘测设计队, 云南 红河 661000)

**摘 要** 本文围绕大型灌区渠道防渗工程技术选型与效果分析, 结合弥泸灌区竹园新沟改造案例, 探讨传统土工、混凝土及膜类防渗技术的适用性、施工要点及效果评估, 以期为大型灌区水资源保障和管理提供参考。结果表明, 科学选型结合差异化施工和智能监测, 可显著降低渗漏率, 减少水损, 提高灌溉水利用率。

**关键词** 大型灌区; 渠道防渗技术; 综合改进技术

**中图分类号**: S277.9; TV223.4

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.016

## 0 引言

随着农业节水要求不断提高与灌区运行管理水平持续提升, 渠道防渗已成为影响输水效率与工程安全的重要环节。既有灌区中普遍存在结构老化、渗漏加剧等问题, 新建工程则面临技术选择与成本控制的双重约束。在此背景下, 有必要从工程实践出发, 对不同防渗技术的适用条件、施工特点及运行效果进行系统分析, 以提升技术应用的针对性与合理性, 为灌区高效运行与水资源优化配置提供技术支撑。

## 1 渠道防渗工程的技术背景与重要性

### 1.1 大型灌区渠道渗漏问题概述

在大型灌区建设和运行管理过程中, 渠道渗漏问题历来被认为是水资源实现高效利用产生影响的一个关键问题。出现渠道渗漏, 不仅会导致灌区供水量减少, 灌溉效率降低, 对作物的产量产生影响, 同时还会造成地下水位升高以及局部湿地生态系统发生改变的状况, 给灌区以及周边环境带来负面影响。在云南一些地方已建成运行的大型灌区项目中, 由于渠道土质的渗透性比较高、衬砌出现老化的情况或者接缝处理得不合理, 渗漏率普遍达到 10% 至 20%, 严重影响灌溉管理效率。

### 1.2 防渗技术发展历程

渠道防渗技术经历了从传统的土工方法朝着现代材料技术进行转变的一个过程。早期的灌区大多采用黏土衬砌、土工布等传统的土工防渗技术, 通过把土层增厚或者使用黏性土料的方式来减少渗漏, 不过存在施工周期比较长、材料取材受到限制、耐久性比较

差以及长期效果不太稳定等方面的局限。随着材料科学以及工程技术的发展, 新型的防渗材料(高分子膜、复合防渗布、防渗涂层等)以及复合注浆加固工艺等逐渐被应用到大型灌区渠道当中, 其技术特点包含施工比较便捷、耐久性比较强、适应性比较广泛, 并且能够结合信息化监测来实现实时的渗漏分析。这些新型材料以及工艺的发展, 为大型灌区防渗提供了更加高效、可以控制并且经济合理的技术途径<sup>[1]</sup>。

### 1.3 防渗工程在灌区管理中的作用

渠道防渗工程不只是保障水量供应的一种工程措施, 也是提升灌区管理效率的一个重要手段。通过科学的防渗设计以及施工, 能够有效地提高渠道输水效率, 确保作物灌溉水源保持稳定, 减少渗漏所造成的水资源浪费以及管理成本。例如: 通过复合膜或者混凝土衬砌等措施能够减少渠道渗漏率, 降低灌区水损失, 实现水量精准调度。除此之外, 长期有效的防渗措施能够延长渠道工程的使用年限, 减少维护次数, 为灌区长效运行、设备使用寿命以及管理系统优化提供坚实的支撑, 形成技术和管理相互协同的良性循环。

## 2 渠道防渗工程技术选型原则

### 2.1 水文地质条件适配性

对于渠道防渗技术进行选型的时候, 必须要充分考虑水文地质方面的条件, 包括土壤类型、渗透系数、地下水位以及地形坡度等因素。在土壤渗透性比较高的地区, 需要采用高性能防渗膜或者是混凝土复合衬砌, 以此来确保渗漏率能够控制在合理的范围之内; 在地下水位比较高、地下水活动比较强的区域, 应该

**作者简介**: 李虹钢(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程。

选择防水性能比较好并且能够耐受长期浸泡的材料,同时还要考虑衬砌结构和水压之间的匹配情况。在不同的水文地质条件下,技术选型应该兼顾防渗效果和施工适应性,要避免因为忽视水文地质方面的差异而导致工程设计缺陷或者后期维护成本有所增加。

## 2.2 经济性与工程造价考量

大型灌区工程投资规模一般比较大,所以经济性是技术选型的一个重要原则。在选择防渗方案的时候,需要综合建设成本、材料费用、施工机械使用以及长期维护成本来进行综合分析,从而确保技术方案具备合理性和可持续性。高性能的材料虽然初期投资比较高,但是耐久性比较强、维护的频次比较低,长期综合效益往往要优于低成本、短寿命的方案。在决策的过程中,应该结合灌区的经济效益、投资回收期以及运行管理预算,来选择性价比最优的防渗技术<sup>[2]</sup>。

## 2.3 施工难度与可操作性

渠道防渗工程施工的难度以及可操作性会直接影响工程的进度和质量。施工期比较短、施工设备适配性比较高、施工工艺可操作性比较强的技术方案更加适合大规模灌区进行推广。例如:采用预制复合衬砌或者卷材防渗膜,能够减少现场施工的数量,降低人工以及机械操作的难度,提高施工效率。技术方案在施工过程中还应该兼顾安全性、施工环境影响以及技术工艺要求,确保防渗的效果和施工的质量能够同步实现。

## 2.4 耐久性与长期效果

防渗工程的耐久性是保证水资源长期高效利用的关键所在。材料应该具备优异的物理性能和环境适应性,能够抵抗温差变化、紫外线、机械磨损以及化学腐蚀等这些因素。衬砌结构和防渗材料的寿命需要和渠道设计使用的年限相匹配,同时维护的周期要合理,减少频繁修复所带来的运营成本。长期的效果不仅体现在渗漏率的降低上,还应该反映在渠道整体管理的效率和灌区水资源保障能力的持续提升方面。

# 3 主要防渗技术及适用分析

## 3.1 传统土工布与黏土衬砌技术

传统的土工布和黏土衬砌技术是以天然材料为主,夯实黏土形成低渗层,在黏土层表面或者内部铺设土工布来提高抗冲刷和整体防渗性能。该类技术对于地质条件要求较高,适合于土质均匀、地形平坦的灌区,过流能力中等,适合中小型渠道,结构稳定性依靠黏土厚度和压实质量,长期流速高或者洪峰流量大的情

况下可能会出现局部开裂。征占地面积小,在长距离渠道施工中需要一定的操作空间,施工过程简单,压实度应达到 95% 以上,土工布搭接宽度不小于 15 cm,采用热焊工艺。在经济合理上,黏土、土工布材料容易获取、造价低,但是耐久性差,在长期冲刷或者微动土壤的作用下,容易产生渗漏,需要定期维护。该技术适合用在中小型渠道或者生态敏感区的防渗上,也可以在局部关键段落配合其他结构加固一起使用<sup>[3]</sup>。

## 3.2 混凝土及复合材料防渗技术

混凝土及复合材料防渗技术主要是用 C20 ~ C40 混凝土现场浇筑或者预制拼装形成连续防渗层,可以和聚合物涂层等复合使用。该技术适应性强,在各种土质、地质条件下均可达到低渗漏率,承载能力强、抗冲刷性能好,过流能力满足大中型渠道的设计流量和流速要求,结构稳定、耐久性强,设计使用年限可达 30 年以上。征占地面积中等,施工空间比较稳定,但是施工工艺复杂,渠基平整、压实、伸缩缝设置、混凝土振捣养护等工序多,施工周期较长,在低温时容易产生裂缝。经济合理表现为单平方米造价较高,但是长期运行维护费用低,综合效益好。该技术适合于骨干渠道、大中型灌区、高流量段等防渗工程,耐久性好、安全性高的情况下有明显优势。

## 3.3 膜类与涂层防渗技术

膜类和涂层防渗技术主要采用 HDPE 膜、TPO 膜或者聚合物涂层作为防渗材料,在平整压实的基础上铺设膜材,并用热焊接、搭接和表面保护层形成防渗系统。该技术渗透系数低、抗老化强,适合于复杂的地形或者重要的节点局部加强,过流能力由膜材基底稳定性和附加护岸措施决定,结构柔性好,可以适应一定的地基沉降和微小变形,在高流速段或者洪峰流量下需要配合保护层防止机械损伤。施工条件要求基底干燥、平整,铺设施工周期短,技术操作简单,施工难度小,适合快速实施。在经济合理性方面,膜材本身价格较高,但是可以大大减少水损,节约灌溉用水,长期维护费用中等,经济性较好。该技术可以作为大中型渠道关键段落的局部防渗措施或者现有渠道加固手段,也可以与混凝土或者浆砌石结构相结合使用,提高综合防渗效果<sup>[4-5]</sup>。

## 3.4 综合改进技术与智能监测应用

综合改进技术一般采用多层复合的方式,黏土、土工布、混凝土或者膜材、保护层、排水层等组合结构可以实现不同的防渗效果。此类技术具有较强的水文地质适应性,在平缓地形以及复杂地质段落的防渗

中均能得到较好的应用效果,过流能力大、结构稳定,可以满足高流量、洪峰排涝的要求。征占地面积方式不同,但是控制在可接受范围内,施工难度较大,需要协调不同材料的铺设顺序和养护工艺,并且可以利用智能监测技术对渠道运行状态进行实时监控。设置流量监测装置、水位传感器、远程数据传输系统,可对渗漏、流量、水位变化等实施实时剖析与管控,及时察觉异常并加以修复,从而保证防渗成效及水资源利用率<sup>[6]</sup>。

## 4 灌区渠道防渗工程案例分析与优化

### 4.1 典型灌区工程案例分析

以弥泸灌区竹园新沟改造工程为例,工程实施前渠道渗漏率38%,一年内水流失量860万立方米,灌溉用水利用率0.52,灌区供水效率和农业生产能力严重降低。针对目前存在的现状,对竹园新沟拟用的防渗技术进行了综合分析论证,分为传统土工布和黏土衬砌、混凝土和复合材料防渗、膜类和涂层防渗、综合改进技术四种方案。传统的土工布和黏土衬砌依靠夯实黏土形成低渗透层,再用土工布加强抗冲刷性,适用于平缓地形、中小型渠道,耐久性差、抗冲击性弱;混凝土和复合材料防渗耐久性好、施工后能承受高流速,适用于大中型渠道,竹园新沟大部分渠段采用该技术后渗漏得到有效控制,但施工周期长、低温容易开裂;膜类和涂层防渗渗透系数小、耐老化,适用于关键节点的局部加强,竹园新沟局部段落使用后渗漏率降到5%以下,但是容易受到机械损伤需要保护;综合改进技术将多层复合结构与智能监测结合起来,可以实现防渗效果和管理优化的结合,实时监测水位和渗漏,及时修复异常,保证运行安全。

改造之后竹园新沟渠道渗漏率降到8%以下,年水损减少610万立方米,灌溉用水系数提高到0.73,有效灌溉面积增加0.9万亩,渠道清淤周期从原来的每年两次延长到现在的三年一次,管护费用每年节约约23万元,汛期排涝时间缩短40%,有效防止了农田内涝,提高了灌区运行安全和管理便捷性。该案例用科学选型、差异化施工的方法,既改善了渠道水工性能,又大大提高了灌区的整体效益,给类似的大型灌区提供了一个综合防渗改造的经验模式。

### 4.2 工程优化建议

在技术改进方面,应该根据渠道骨干段和支渠段不一样的特性来进行有差异的选型。骨干渠道优先采用混凝土加上涂层的复合防渗技术,以此来增强结构

的稳定性能和防渗的耐久性能;支渠则可以选择土工布与黏土进行衬砌的组合方式,兼顾施工的成本和防渗的效果。在材料选择方面,应该考虑区域的环境和地质的条件,在寒冷的地区适宜选用具有抗冻性能的混凝土(抗冻等级大于或者等于F50),用来应对低温冻融的循环情况;在地形复杂和地势起伏比较大的段落,可以采用柔韧性比较强的TPO膜,提高材料的适应能力并且降低施工的风险。在管护和运行管理方面,应该建立科学的巡检制度,确保每个月巡检的覆盖率达到100%,并且利用监测得到的数据来进行渗漏风险的预先判断。对于竹园新沟等经过村庄的段落、桥涵的段落等关键的节点,应该加强防护和维护的工作,确保渠道能够长期稳定地运行。同时,可以结合排水的调度和水量的监测,实现精细化的管理,进一步提升防渗工程的综合效益<sup>[7]</sup>。

## 5 结束语

大型灌区渠道防渗工程,通过运用科学技术来进行选型,能够明显地降低渗漏率、减少水的损失,并且提升灌溉水的利用率。以弥泸灌区的竹园新沟改造为例,在采用了混凝土护岸以及膜类防渗技术之后,渗漏率从38%下降到了8%,水的损失减少了610万立方米,灌溉水的利用系数提升到了0.73,还新增加了0.9万亩的灌溉面积。将差异化的选材、精细化的施工以及智能的监测相结合,能够实现防渗工程的高效、耐久以及可持续管理,从而为大型灌区的水资源保障提供可靠的支撑。

## 参考文献:

- [1] 赵鹏涛.分析大型灌区续建配套与节水改造工程防渗渠道衬砌施工技术[J].中国科技纵横,2021(02):92-93.
- [2] 王蓉.水利工程灌区渠道工程防渗技术探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):116-118.
- [3] 苏娅.水利工程中的农田灌溉防渗渠道衬砌施工技术[J].农业开发与装备,2024(12):220-222.
- [4] 张延.渠道防渗技术在农田水利工程中的应用效果探究[J].数字农业与智能农机,2024(02):56-59.
- [5] 顾良.农田水利渠道防渗处理技术优化与维修养护效果[J].江西农业,2026(04):140-142.
- [6] 赵朝良.农田水利灌溉渠道防渗衬砌施工技术探析[J].当代农机,2025(11):49-50.
- [7] 严晓红.农田水利工程施工中高效防渗技术探讨[J].现代农业科技,2025(21):162-164.

# 模板施工技术在水利工程建设中的应用研究

丁文聪

(安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

**摘要** 模板工程作为水利水电工程施工的关键环节, 直接关系到混凝土结构的成型质量、外观美观程度以及整体工程的安全性、稳定性。本文深入探究模板工程技术的基本概念与设计准则, 系统地分析水利水电工程中模板施工的具体原则与安全规范, 着重阐述模板材料的选择策略、安装工艺的精细化操作以及拆除技术的科学实施, 并对木质模板等技术形式的应用展开剖析。通过对施工全过程的技术梳理, 旨在明确模板施工在保障水利工程实体质量方面的核心作用, 为提升水利基础设施建设水平提供参考, 进而确保工程在复杂水文地质条件下能够维持优良的结构性能与耐久性。

**关键词** 水利工程; 模板施工; 混凝土成型; 安全技术

**中图分类号**: TV544; TV52

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.017

## 0 引言

水利水电工程属于国家基础设施的重要构成部分, 其建设质量直接关乎防洪安全、供水保障以及能源供应等民生大事。在水利枢纽、大坝、渠道以及水电站厂房等建筑物施工期间, 混凝土工程所占比重极大, 而模板工程是混凝土浇筑成型的必要方式。模板系统的优劣决定着混凝土构件的几何尺寸、表面平整度以及内在密实度, 进而对整个水利建筑物的结构安全和使用寿命产生影响。伴随水利建设规模持续扩大以及技术标准不断提高, 传统模板施工工艺面临更高挑战, 迫切需要在技术理念、材料选择以及操作流程等方面进行优化与革新。当前, 水利工程常处于复杂自然环境中, 施工条件多变, 对模板的刚度、强度以及适应性提出严格要求。所以, 深入研究模板施工技术在水利工程建设中的应用, 对于规范施工行为、提高工程质量、降低安全风险具有重要现实意义。

## 1 模板工程技术概述

### 1.1 模板工程技术的概念及重要性

模板工程是指在新浇筑的混凝土结构中, 用于支撑混凝土直至其达到规定强度且能够自行承重的临时性结构系统。此系统主要由面板、支撑结构以及连接件这三部分构成, 其核心功能在于赋予混凝土设计所要求的形状、尺寸和位置, 同时承受混凝土浇筑过程中产生的各类荷载。在水利工程建设当中, 模板工程

的重要性十分显著, 它不仅是混凝土成型的模具, 更是保证结构几何精度的关键保障。鉴于水利工程大多涉及大体积混凝土浇筑或者薄壁结构施工, 模板系统的稳定性直接关系到结构物的抗渗性、抗冻性以及整体承载能力。倘若模板设计不合理或者施工不恰当, 容易导致混凝土出现跑模、漏浆、蜂窝麻面甚至结构变形等质量问题, 严重情况下可能引发安全事故, 造成巨大的经济损失和社会影响<sup>[1]</sup>。因此, 模板工程技术被视作衡量水利施工技术水平的重要标志之一, 其科学性与规范性是确保水利工程高质量交付的前提条件。

### 1.2 模板设计的要求分析

模板设计需严格遵循科学性、安全性与经济性相统一的原则, 其首要任务为确保模板系统具备足够的强度、刚度和稳定性。强度方面要求模板在承受混凝土侧压力、施工人员及设备荷载、振捣荷载以及可能出现的风荷载时, 不会发生破坏或产生塑性变形。刚度要求着重于控制模板在荷载作用下的弹性变形量, 以此防止混凝土结构尺寸超出标准或表面出现凹凸不平的情况。稳定性是为防止模板系统在受力过程中出现倾覆或失稳现象, 尤其是在高墩、深槽等复杂部位进行施工时, 这一点尤为关键。在设计过程中, 需充分考量水利工程的特殊性, 如水流冲刷、水位变化以及地基沉降等因素对模板基础所产生的影响。模板构造应便于进行制作、安装与拆除操作, 节点连接需做到牢固可靠, 拼缝应保证严密以防止漏浆。设计还应

**作者简介**: 丁文聪 (1996-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程建设。

兼顾材料的周转利用率,通过开展标准化、模数化设计来降低工程成本,确保施工方案在技术可行的基础上实现经济效益的最大化<sup>[2]</sup>。

### 1.3 模板的分类

依据不同的划分标准,水利工程中的模板能够分为多种类型,目的是适应多样化的施工需求。按照材料属性进行划分,主要包含木模板、钢模板、钢木组合模板、铝合金模板以及近年来逐步推广的塑料模板和复合材料模板。木模板由于加工较为灵活、适应性较强,常常被应用于异形结构或者小规模工程,钢模板凭借强度高、周转次数多、混凝土表面光洁度好等优点,在大体积混凝土以及标准化构件施工中处于主导地位。按结构形式进行分类,可以分为固定式模板、移动式模板、滑动式模板以及爬升式模板等。固定式模板适用于常规的梁板柱结构,滑模与爬模技术广泛应用于高塔、桥墩以及大坝坝体等竖向高耸结构的连续施工,能够明显提高施工效率并且减少接缝<sup>[3]</sup>。按受力特点进行分类,又可以分为承重模板与非承重模板,前者需要承受混凝土自重以及施工荷载,后者主要承受侧压力。不同类型的模板在实际应用时需要根据工程特点、工期要求以及资源条件进行合理选择与组合,从而达到最佳的施工效果。

## 2 水利水电工程中模板工程的施工要求

### 2.1 模板施工原则

水利模板施工需严格遵循“先设计后施工、先方案后作业”这一基本原则,以此确保所有工序均处于受控状态下开展。施工过程中应秉持安全第一、质量为本的理念,将技术规范切实落实到每一个操作环节。模板安装前需对基础面或者施工缝进行全面彻底的清理,保证无杂物、积水以及松散颗粒,进而确保结合面的密实性。在安装过程中,必须严格把控轴线位置、标高以及截面尺寸,运用测量仪器进行实时校正,确保偏差控制在规范允许的范围内。拼接缝的处理属于施工原则中的重点内容,应采用双面胶条、海绵条或者专用密封胶进行封堵,杜绝出现漏浆现象,从而保障混凝土的外观质量。施工要注重工序衔接的紧凑程度,避免模板长时间暴露而导致变形或者锈蚀。对于特殊部位,如止水片、预埋件等,需在模板安装时同步进行定位固定,确保其位置准确且不被扰动。整个施工过程应当建立严格的质量检查制度,实行自检、互检与专检相互结合,一旦发现问题便立即进行整改,严禁存在带病作业的情况。

### 2.2 模板安全技术施工要求

安全技术作为模板施工的生命线,需贯穿于施工准备、安装、使用以及拆除的整个过程。支撑系统的基础务必要坚实可靠,针对软弱地基需开展加固处理并设置垫板,以此防止因不均匀沉降而致使模板失稳。支撑杆件的间距、步距以及剪刀撑的设置必须严格按照设计方案执行,严禁随意加大间距或者减少构造措施。在进行高处作业时,必须搭建稳固的操作平台并设置防护栏杆,作业人员需佩戴安全带,从而防止高空坠落情况发生。在模板吊装过程中,应当由专人进行指挥,确保吊点合理且绑扎牢固,严禁在风力过大或者视线不良的状况下开展吊装作业。混凝土浇筑期间,需安排专人对模板及支撑系统进行巡视监测,一旦发现变形、异响或者松动迹象,应立即停止浇筑并采取加固措施。施工现场的临时用电必须符合规范要求,防止因漏电而引发火灾或者触电事故<sup>[4]</sup>。拆除模板时,应遵循“后支先拆、先支后拆”的顺序,严禁采用猛撬、硬砸等野蛮施工方式,避免混凝土棱角受损或者模板崩落伤人。

## 3 水利工程中模板施工技术的应用

### 3.1 水利工程中模板材料的应用

模板材料的选择对施工效率与成型质量起着直接决定性作用,在水利工程当中需依据结构特点和环境条件开展科学选配工作,钢材凭借其优异的力学性能以及较高的重复使用率,成为大型水利枢纽大坝、溢洪道和厂房结构的优先选择材料,尤其是定型组合钢模板能够切实保证大面积混凝土表面的平整度和光泽度。木材尽管在强度和耐久性方面比不上钢材,但其良好的可加工性使其在曲面、异形结构以及细部节点处理过程中具备不可替代的作用,通常作为钢模板的补充或者用于小型渠道衬砌。随着材料科学不断进步,新型复合材料模板逐渐进入人们的视野,这类材料兼具轻质高强、耐腐蚀以及脱模容易等诸多优点,特别适用于潮湿、腐蚀性强的水利环境。在实际应用时往往采用多种材料组合的形式,如主体部分采用钢模板以确保刚度,边角及过渡段采用木模板以适应形状变化。材料进场时需要严格检验其规格、材质以及表面状况,剔除变形、锈蚀严重或者破损的板材,确保投入使用的材料满足施工技术要求,从源头上保障工程质量。

### 3.2 模板安装施工技术

模板安装作为决定混凝土结构最终形态的关键工序,其核心技术聚焦精准定位与牢固连接。安装前,

需依据测量放线结果,于基面上弹出模板边线以及控制线,同时设置限位钢筋或者定位块,以此固定模板底部位置。针对竖向模板,要利用经纬仪或者激光铅垂仪进行垂直度校正,并借助斜撑、拉杆等支撑体系将其固定,从而防止在浇筑过程中发生位移。在水平模板安装时,重点在于标高控制与起拱处理,需依照跨度大小预留适当的起拱值,用以抵消混凝土自重引发的挠度。拼缝处理属于安装技术的难点,相邻模板间应做到平整对齐,当缝隙过大时需嵌入密封材料,以此确保接缝严密且不漏浆。对于有防渗要求的部位,对拉螺栓需加焊止水片,并且在拆除后对孔洞进行防水封堵处理。安装过程中还需关注预留孔洞、预埋件的位置准确性,采用焊接或者绑扎方式将其固定在模板或者钢筋骨架上,防止在浇筑时发生移位。整个安装过程应做到层层把关,每道工序验收合格后方可进入下一环节,以此确保模板系统整体稳定可靠。

### 3.3 模板施工的拆除技术

模板拆除属于技术性要求极高的工作,必须严格把控拆模时机与操作顺序,以此确保混凝土结构不会受到损伤。拆模时间的确定主要依据混凝土强度的增长状况,通常需要借助同条件养护试块的抗压强度试验来判断。非承重侧模可以在混凝土强度能够保证其表面及棱角不会因拆模而受损时进行拆除,一般强度约为 2.5 MPa,承重底模则需等待混凝土达到设计强度的特定百分比后方可拆除,大跨度结构甚至需要达到 100% 设计强度。拆除顺序应当遵循“先非承重后承重、先侧面后底面、自上而下”的原则,严禁上下同时开展作业或者大面积撬落。对于悬臂构件以及大跨度梁板,拆除前需要检查支撑系统的卸载情况,必要时采取回顶措施以防止结构开裂。拆模过程中应当使用专用工具,轻撬慢卸,避免用力过猛撞击混凝土表面或者损坏模板本身。拆下的模板应及时清理表面黏附的砂浆,涂刷隔离剂并分类堆放,以便进行周转使用。若发现混凝土存在缺陷,应在拆模后立即记录并按照技术方案进行修补,确保结构外观与内在质量符合相关要求<sup>[5]</sup>。

### 3.4 木质模板技术形式

木质模板于水利工程中虽不像钢模板那样普及,但在特定场景下依然呈现出独特的技术优势与应用价值。其主要形式涵盖散拼木模板、胶合板模板以及定制木模等。散拼木模板借助原木板材在现场进行加工拼装,具备极高的灵活性,适用于形状不规则的沟槽、涵管入口以及局部修补工程。胶合板模板尤其是覆膜

胶合板,表面光滑且防水性能良好,能够提供较为理想的混凝土饰面效果,常用于对表观质量有较高要求的渠道衬砌或小型水闸工程。定制木模是针对特殊异形构件预先加工成型的模板,能够精准贴合设计曲线,减少现场切割所造成的浪费。在施工过程中,木质模板需要特别留意防潮防腐处理,以延长其使用寿命。其支撑体系大多采用方木与钢管混合搭配的方式,既利用木材易于加工的特性,又发挥钢管高强度的优势。尽管木质模板的周转率相对较低,但其初始投资小、适应性强的特点,使其在偏远山区水利项目或临时性工程中依旧占据重要地位,是模板技术体系中不可或缺的一部分。

## 4 结束语

模板施工技术于水利工程建设而言起着极为关键的作用,其应用水平直接反映出工程的整体质量与管理效能。通过对模板工程设计、材料选型、安装工艺以及拆除技术进行系统掌握,能够切实保障混凝土结构的几何精度、表面质量以及结构安全。鉴于水利工程环境具有复杂性与特殊性,这就要求施工技术人员必须严谨对待每一个环节,严格执行施工规范,杜绝出现随意性与盲目性。科学合理的模板施工方案不仅能够提升工程建设效率,更能够从源头上消除质量隐患,确保水利建筑物实现长期稳定运行。在实际操作过程中,应当持续优化施工工艺流程,强化过程监测与质量检验,确保模板系统在各种工况下均能发挥预期功能。只有将模板施工技术切实落到实处,才能够为建设优质、高效、安全的水利工程奠定坚实的基础,进而更好地服务于国家水资源开发利用与防灾减灾战略大局。

## 参考文献:

- [1] 王正,张平,戴成根.模板工程技术在水利工程施工中的应用[J].工程建设与设计,2022(04):148-150.
- [2] 陈建军.混凝土模板工程技术在建筑工程施工中的应用[J].中国建筑金属结构,2025,24(16):46-48.
- [3] 杨磊.水利工程施工中模板工程技术应用研究[J].现代工程科技,2024,03(23):85-88.
- [4] 宋道春.水利工程技术在软土区域土堤防提标建设施工中的应用[J].水上安全,2024(09):148-150.
- [5] 张彦明.模板工程施工技术在水利工程中的应用研究[J].四川水泥,2021(08):310-311.

# 水利水电工程中的混凝土裂缝防治技术分析

元 霖

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘 要** 近些年,我国水利水电建筑工程建设规模持续扩大,混凝土作为工程核心结构材料,其裂缝问题正不断影响水利水电建筑结构的稳定性。本文系统分析了混凝土裂缝的主要类型及成因,并论述了骑缝灌浆法、钻孔灌浆法、开槽填补法以及粘贴碳纤维布法等混凝土裂缝施工技术,旨在为合理选择裂缝处理技术,有效恢复水利水电工程中的混凝土结构性能,保障水工建筑物长期安全运行提供有益参考。

**关键词** 水利水电工程;混凝土裂缝;骑缝灌浆法;钻孔灌浆法;开槽填补法

中图分类号:TV544; TU755.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.018

## 0 引言

混凝土裂缝是影响水利水电工程结构安全的常见病害,且长期受温度变化、基础约束、荷载作用等多重因素影响。这就要求在处理混凝土裂缝时,采取针对性施工技术。水利水电工程混凝土裂缝还会在不断发展过程中不断降低整个工程的结构整体性,甚至引发渗漏及安全隐患。因此,应在工程建设运行阶段加强分析裂缝成因分析,并结合材料选择、施工工艺优化及后期养护措施,进行系统化的防治,以提升水利水电工程的安全性。本文系统分析当前水利水电工程混凝土结构的裂缝类型与施工技术,旨在为防治水工混凝土裂缝提供技术参考。

## 1 水利水电工程中混凝土裂缝种类及原因

### 1.1 温度应力所致的伸缩裂缝

水利水电工程中的大体积混凝土浇筑后,会由于水泥水化反应释放大量热量,再叠加混凝土材料导热性能较差的特点,容易在混凝土结构内部积聚形成温度达60℃至80℃的高温核心,且在混凝土内外产生明显的温度差,形成温度应力,引发混凝土裂缝<sup>[1]</sup>。水利水电工程混凝土中的这种非均匀分布的内外部温度场,会致使混凝土内部受热膨胀产生压应力,表面冷却收缩承受拉应力,从而在表面拉应力超过混凝土抗拉强度时,形成表面裂缝。此类裂缝受温度场特征影响,多发于混凝土的向阳面、薄壁结构或约束较强部位,既会破坏水利水电工程的结构完整性,更会形成通道,为外界侵蚀提供途径,威胁水利水电建筑物的长期安全。

### 1.2 基础约束所致的深层裂缝

水利水电工程中,施工人员在岩基或老混凝土垫层之上浇筑大体积混凝土时,容易导致混凝土在水泥水化热的升温阶段产生体积膨胀,并由地基刚性边界条件反向约束这种混凝土膨胀变形,对底部混凝土产生明显的压应力。这种情况还会在混凝土进入降温阶段后,收缩混凝土体积,由基础强约束作用限制其回缩,对底部混凝土造成显著拉应力,并在拉应力超过混凝土极限抗拉强度后,从约束界面附近萌生裂缝,向上部扩展延伸,形成贯穿性深层裂缝。此类裂缝具有缝深大、延伸长度广的典型特征,严重破坏水利水电工程结构的抗渗性能,更为绕坝渗流提供通道,甚至会在水压力作用下诱发水利水电工程渗透破坏,危及工程长期运行安全<sup>[2]</sup>。

### 1.3 荷载过载所致的受力裂缝

在水利水电工程的施工期或运行期因荷载作用超过混凝土抗拉强度而产生的结构性损伤便是受力裂缝。这种受力裂缝是由于水压力、土压力、结构自重及温度荷载共同作用于水利水电工程,导致其实际荷载超过设计预期而发生的不利变化。受力裂缝的显著特征是走向垂直于主拉应力方向,且在受拉区表面开口较宽,向内部逐渐尖灭,缝面较为粗糙。出现这种受力裂缝也标志着水利水电工程的混凝土结构进入弹塑性工作阶段,会随时间不断折减构件刚度,改变变形特性,甚至在高水头作用下发展为渗透通道,增大渗流量,严重时威胁建筑物整体稳定。

作者简介:元霖(1990-),男,本科,研究方向:水利水电工程。

#### 1.4 材料配比所致的塑性裂缝

在水利水电工程施工中,若浇筑后初凝前的材料配比不当或养护不到位,表面失水过快,都会导致出现塑性裂缝<sup>[3]</sup>。这种塑性裂缝一般呈不规则网状或不连续短细纹,表现为沿深度方向缝宽迅速衰减,一般限于表层数厘米范围。这种塑性裂缝多发于水利水电工程中的大面积薄板结构、护坡及溢流面等部位,虽不会直接威胁水利水电工程的结构承载力,但会为释放后期硬化过程中的收缩应力提供缺陷,并在温湿度变化作用下进一步扩展,成为贯穿性裂缝的诱发源。

### 2 水利水电工程中的混凝土裂缝防治技术

#### 2.1 骑缝灌浆法

骑缝灌浆法是处理水利水电工程中混凝土裂缝的有效施工技术,主要沿工程中的混凝土裂缝走向布置灌浆孔,进而压入具有流动性的灌浆材料,以填充孔隙,恢复结构整体性,主要适用于修复裂缝宽度较大、走向较为规则且缝内无充填物的裂缝。一般情况下,应用骑缝灌浆法多根据裂缝宽度、环境条件及结构受力要求选择环氧树脂、聚氨酯或水泥基浆液等灌浆材料。其中结构强度要求较高的部位多使用黏结强度高、收缩率低的环氧树脂类材料;处理潮湿或有渗水的裂缝则多应用具有遇水膨胀特性的聚氨酯材料;至于填充大宽度裂缝,则更多的是低成本水泥基浆液<sup>[4]</sup>。在骑缝灌浆施工过程中,施工人员要先使用裂缝测宽仪、超声波检测仪等设备精准测定混凝土的裂缝走向、宽度、深度及分布范围,以明确灌浆孔布置方案,并清理裂缝表面的浮灰、油污及疏松混凝土,保证后续灌注的封缝材料能够牢固黏结基面。在修复宽度较大且延伸较长的裂缝时,沿裂缝走向每隔 30~50 厘米布置 20~30 毫米孔径的钻孔,且采用清水冲洗钻孔内部,清除孔内岩屑与粉尘,保证灌浆通道畅通。随后,施工人员沿裂缝表面涂刷宽度 5~10 厘米的环氧胶泥,形成封闭带,防止后续灌浆出现浆液外渗现象。在此基础上,施工人员按照由低向高、由一端向另一端依次推进的原则进行灌浆作业,根据裂缝宽度和结构受力状态确定灌浆压力,控制在 0.2~0.5 兆帕范围,且利用专用灌浆泵经注浆管将配制好的浆液压入裂缝,压力平稳缓慢,避免压力突变导致的结构损伤。在整个灌浆过程中,施工人员还要密切观察相邻孔出浆情况,在邻孔出现纯浆液且出浆浓度与注入浆液一致时,关闭邻孔阀门,持续压注直至达到设计压力,稳定 5~10 分钟。若裂缝过宽,施工人员还要采用间歇灌浆方式,在裂缝空间充分填充浆液,且在结束灌浆后,及时清洗灌浆设备,防止浆液固化堵塞设备。

#### 2.2 钻孔灌浆法

钻孔灌浆法主要应用于处理水利水电工程中的混凝土深层裂缝与贯穿性裂缝,会在裂缝两侧或沿裂缝带布置钻孔,穿透裂缝所在区域,经钻孔在裂缝内部及周边微细孔隙中压入灌浆材料,实现充填封闭裂缝。该技术与骑缝灌浆法区别在于,不依赖裂缝表面开口,而是人工钻孔建立灌浆路径,适用于裂缝面闭合、缝内充填物较多或裂缝走向复杂的工况,尤其适用于修补深层隐蔽裂缝。选择灌浆材料时,施工人员需综合考虑需要修补的裂缝宽度、渗流状态及结构受力要求,常用超细水泥浆液、改性环氧树脂灌浆材料及聚氨酯类化学浆液等灌浆材料进行修补。在施工过程中,施工人员要采用梅花形或方格状布置钻孔,并根据浆液的有效扩散半径明确孔距的具体数值,一般在 1.0~2.0 米范围,且适当加密裂缝发育密集区的钻孔数量。钻孔深度需穿透裂缝,进入下部完整混凝土 0.5~1.0 米。钻孔直径多为 50~75 毫米,便于钻孔冲洗和压水试验操作。钻孔施工需由施工人员选择金刚石钻头或硬质合金钻头钻进,控制钻进过程中的钻压与转速,避免过度扰动孔壁。在此基础上,施工人员还要采用气水混合流冲洗方法,控制冲洗压力在设计灌浆压力的 70%~80%,循环冲洗钻孔,清除孔内的岩屑、泥皮等,直至回水清澈为止。随后,以 3~5 米为分段长度,划分钻孔为若干灌浆段,适当缩短裂缝发育段的分段长度,保证灌浆效果。之后,施工人员要采用孔内循环灌浆或纯压式灌浆方式进行灌浆作业,依照裂缝深度、结构厚度及混凝土强度综合确定灌浆压力,一般为 0.2~0.3 兆帕,可适当提高深层裂缝灌浆压力。同时,按照自上而下分段灌浆或自下而上分段灌浆的顺序进行灌浆,先是灌注深层段,再逐段上升至表层,监测灌浆压力、注入率,只有在注入率逐渐减小、压力稳定上升时,才表明正有效填充裂缝。另外,施工人员还需在灌注完成后,检查灌浆情况,及时补孔复灌尚存在空隙的部位,直至达到设计标准。在水利水电工程裂缝处理中,这种钻孔灌浆法具有适应性强、处理深度大等优点,适用于加固大型水工建筑物的深层裂缝。

#### 2.3 开槽填补法

开槽填补法是一项传统而有效的施工技术,主要用于处理水利水电工程中混凝土表面的裂缝及局部破损。一般由施工人员沿裂缝走向人工开凿出一定深度的槽口,清除缝内杂物,填充具有黏结性、密实性的修补材料,恢复结构表面平整度。该技术尤其适用于

水平缝或缓倾角裂缝,以及缝口破碎、充填物较多的部位,有助于显著提高水利水电工程中的裂缝封闭可靠性。该施工技术多根据不同环境有针对性地选择预拌砂浆、环氧砂、聚合物改性水泥砂浆以及纤维增强砂浆等填充材料。在施工过程中,施工人员会根据前期的勘察结果明确开槽几何参数,通常涉及槽口断面形状为U形或V形,其中U形槽适用于宽度较大裂缝,能够增加填充材料与槽壁的黏结面积,提高受力条件;V形槽则适用于宽度较小裂缝,开槽工作量小,便于填充密实。开槽时,施工人员一般控制槽深在3~6厘米,以完全清除缝口劣化层、露出新鲜混凝土为准。槽宽则为裂缝宽度的5~10倍,最小不小于2厘米<sup>[5]</sup>。开槽施工与基面处理时,施工人员还要结合机械切割与人工凿除两种方法,先使用手持切割机或角磨机沿裂缝两侧切割槽口边界线,随后应用电镐或手工钢钎分层凿除槽内混凝土,防止扰动槽壁及槽底基体,减少产生新微细裂纹的可能。在此基础上,施工人员还需凿毛处理槽底,使其形成粗糙面,增加与填补材料的机械咬合力。针对水利水电工程中的潮湿环境,施工人员需在填补前进行干燥处理,必要时安装导流管临时引排渗水,待填充材料初凝后封闭导流孔。具体地,施工人员要按水泥与砂子1:2至1:3的重量比配制预缩砂浆,加入适量水拌和至手握成团、手松即散的干硬状态,堆放预缩30~60分钟,使砂浆体积趋于稳定。之后,分层填筑,充分捣实,控制每层厚度在1~2厘米,且第一层填补材料略高于槽底,使用木槌或捣棒反复插捣密实,排出气泡,使材料充分接触槽底与槽壁,最后一层还要注意表面略高于原混凝土面,保证填补材料平顺衔接两侧原混凝土。填筑完成后,施工人员还要压光或拉毛处理混凝土表面,不得存在错台或凹陷。

#### 2.4 粘贴碳纤维布法

粘贴碳纤维布法主要是采用高性能环氧树脂黏结剂,在混凝土结构受拉区或裂缝分布区域粘贴碳纤维复合材料布,以形成新的受力复合层,进而利用碳纤维材料的高抗拉强度分担混凝土结构所承受的拉应力,限制裂缝进一步扩展。该技术适用于补强加固水利水电工程的受力裂缝,尤其适用于修补水工建筑物中梁板结构、闸墩、溢流面及压力管道等需提高承载力的部位。碳纤维布具有轻质高强、耐腐蚀等突出优点,其抗拉强度是普通钢材十倍以上,但重量仅为钢材五分之一,能够良好适应水利工程的潮湿环境,进而有效抑制裂缝发展,改善结构受力性能,延长建筑物服役寿命。在施工过程中,为保证碳纤维布有效黏结混

凝土,施工人员需要使用角磨机或喷砂设备清除裂缝的浮浆、油污及碳化层,露出坚实新鲜的基面,实现基面处理与找平,并采用高压空气吹扫表面粉尘,再使用丙酮或专用清洗剂擦拭脱脂,确保基面干燥洁净。针对水利水电工程中的潮湿环境混凝土表面,施工人员需进行干燥处理,并先采用灌浆法或开槽填补法封闭处理裂缝,再粘贴碳纤维布,避免荷载作用下裂缝继续变形导致撕裂碳纤维布。随后,施工人员裁剪与浸渍碳纤维布,先采用专用剪刀或刀具,按照结构尺寸裁剪碳纤维布,且要求保证搭接长度高于15厘米。浸渍作业中施工人员可采用现场湿贴法或预浸渍法,其中现场湿贴法是先找平层表面涂刷浸渍树脂,然后粘贴碳纤维布于树脂上,利用滚筒滚压保证树脂充分浸润纤维布;预浸渍法则是预先在浸渍树脂中浸泡碳纤维布,待充分浸润纤维后取出粘贴于结构表面。多层粘贴时,施工人员还应当待第一层树脂指触干燥后再涂刷第二层浸渍树脂,层间滚压密实,保证层间结合良好,且在粘贴转角部位时,平滑过渡碳纤维布,避免折角过大弯折损伤纤维。

#### 3 结束语

在水利水电工程中,防治混凝土裂缝不只是一个技术问题,更是对工程耐久性的深层考量。为确保达到有效控制混凝土裂缝的目的,应该以分析混凝土裂缝现象与成因为出发点,深入探究如何控制混凝土裂缝发生,进而提供针对性的应对措施,保障水利工程质量。同时,重视管控施工全过程质量,推动优化防治材料、工艺与管理,以降低源头发生裂缝的概率,全面提升水利水电工程的可持续运行能力。未来,裂缝处理将更趋精准,进而真正筑牢水利工程的稳定根基,使技术服务于工程的长治久安。

#### 参考文献:

- [1] 俞晓东,张旭,曹正.探析水利施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J].价值工程,2026,45(09):15-18.
- [2] 陈书杰.探究水利工程施工中控制混凝土裂缝技术[J].中国房地产业,2026(03):190-193.
- [3] 李佳璇.水利建筑施工中大体积混凝土裂缝防治技术分析[J].住宅与房地产,2026(02):122-124.
- [4] 雷延刚.混凝土温控防裂处理技术在水利施工中的应用研究[J].水上安全,2026(01):160-162.
- [5] 沈凯,马飞燕,李军军,等.混凝土裂缝控制施工技术在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2026(01):169-171.

# 水利工程压力钢管现场安装焊接质量控制技术

杜德平

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

**摘 要** 压力钢管是水利枢纽引水、发电、泄洪系统的关键结构部件, 现场安装焊接质量直接决定其承压性能、结构安全与长期服役寿命。本文系统梳理了水利工程压力钢管现场安装焊接全流程的质量控制体系, 明确了原材料管控、工艺评定、组对焊接、焊后处理等关键环节的管控要点, 分析了焊接施工中常见缺陷的形成机理, 归纳了标准化的防控与处置对策, 以为同类水利工程施工提供技术参考。

**关键词** 水利工程; 压力钢管; 现场安装; 焊接质量控制

中图分类号: TV547.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.019

## 0 引言

随着我国水利基础设施建设的持续推进, 高水头水电站、长距离跨流域引水工程等项目的建设规模不断扩大, 压力钢管凭借承压能力强、输送效率高、结构适应性好等特点, 成为水利工程中输水、发电、泄洪系统的核心结构形式之一<sup>[1]</sup>。现场安装焊接是压力钢管施工的关键环节, 焊接接头的质量直接决定钢管整体的结构强度、密封性与抗疲劳性能, 是保障水利工程长期安全稳定运行的基础<sup>[2]</sup>。因此, 深入分析常见焊接缺陷的形成机理, 归纳标准化的防控与处置对策, 具有重要的现实意义。

## 1 压力钢管现场安装焊接前期准备与基础质量管控

### 1.1 原材料与焊接材料质量管控

原材料与焊接材料的性能是保障焊接质量的基础, 需在施工前开展全流程、全批次的质量检验与管控。针对压力钢管母材, 需严格核对钢板的牌号、规格、质量证明文件, 重点检验其屈服强度、抗拉强度、冲击韧性、化学成分等关键指标, 确保符合设计与规范要求; 钢板进场后需按批次开展复检, 同时检查外观质量, 严禁使用存在锈蚀、裂纹、夹层、变形超标的钢板<sup>[3]</sup>。

焊接材料的选用需与母材的冶金性能、力学性能完全匹配, 焊条、焊丝、焊剂、保护气体的型号需符合设计要求, 严禁擅自更换焊材类型。焊材的存放、烘干与使用需执行标准化管控。焊材存放需设置专用库房, 控制库房内温度与湿度, 避免焊材受潮、锈蚀; 低氢型焊条烘干后需放入保温筒随用随取, 重复烘干次数不得超过 2 次, 药皮脱落、锈蚀严重的焊材严禁使用。

### 1.2 现场作业环境与工装设备管控

水利工程压力钢管现场焊接多涉及隧洞内、户外高空、临水等复杂工况, 作业环境的管控直接影响焊接质量与施工安全。施工前需对作业区域进行专项整治, 高空作业需搭建稳固的操作平台与安全防护设施, 洞内作业需完善通风、照明、排水系统, 确保作业环境符合焊接施工要求。同时, 需提前预判环境因素对焊接的影响, 制定专项管控措施, 严禁在不符合要求的环境下开展焊接作业。

施工前需完成吊装设备、坡口加工设备、焊接设备、热处理设备及无损检测设备的全面检修与校验, 确保设备运行状态完好、计量精度符合规范要求。焊接设备需重点校验电流、电压输出的稳定性, 送丝机构运行的流畅性; 热处理设备需校验温控系统的精度, 确保加热温度可控。同时, 需完成钢管预制管节的进场验收, 核对管节的几何尺寸、椭圆度、周长偏差、坡口加工质量, 管口平面度、坡口角度与钝边尺寸需符合设计要求, 验收不合格的管节严禁进入组对环节。

### 1.3 焊接工艺评定与作业人员资质管控

焊接工艺评定是现场焊接施工的根本依据, 需在施工前完成全项焊接工艺评定工作。针对工程所用的母材材质、规格、焊接方法、接头形式、焊接位置, 需编制专项焊接工艺评定方案, 通过试验验证焊接接头的力学性能、弯曲性能、冲击韧性与耐腐蚀性能, 确保各项指标符合设计与规范要求。焊接工艺评定合格后, 需编制正式的焊接作业指导书, 明确焊接方法、焊接参数、预热要求、层间温度控制、焊后处理等全流程作业标准, 严禁无评定依据开展焊接施工。

作者简介: 杜德平 (1993-), 男, 本科, 研究方向: 水利水电工程。

参与焊接作业的焊工必须持有特种设备作业人员资格证书,证书核准的焊接方法、母材类型、焊接位置需与现场作业内容完全匹配,严禁无证上岗或超范围作业。焊工上岗前需开展岗前培训与实操考核,考核内容贴合工程实际工况,考核合格后方可参与现场作业。施工前需完成全员技术交底,明确作业标准、质量要求与安全管控要点,确保每一位作业人员掌握焊接工艺的核心要求。

## 2 压力钢管现场安装焊接关键工序质量控制技术

### 2.1 钢管组对与定位焊质量控制

钢管组对是焊接施工的前置环节,组对精度直接影响焊接成型质量与结构受力性能,需执行严格的尺寸偏差管控。管口组对前需彻底清理坡口及两侧50 mm范围内的油污、铁锈、水分、氧化皮等杂物,露出金属光泽。组对时需严格控制管口错边量、对口间隙与坡口角度,壁厚 $\leq 10$  mm的钢管,对口错边量不得超过1 mm;壁厚 $> 10$  mm的钢管,对口错边量不得超过壁厚的10%且最大不超过3 mm,严禁采用强行组对的方式消除错边<sup>[4]</sup>。

定位焊是固定组对管口的关键工序,其焊接工艺需与正式焊接完全一致,严禁使用与正式焊接不符的焊材与焊接参数。定位焊的焊缝长度宜为30~50 mm,间距宜为100~300 mm,焊缝高度不得超过设计焊缝厚度的2/3,定位焊需布置在坡口内侧,不得布置在管口起弧、收弧位置。定位焊完成后需检查焊缝质量,存在裂纹、气孔、夹渣等缺陷的定位焊缝必须彻底清除后重新焊接,严禁直接在缺陷定位焊缝上进行正式焊接。组对完成后需对钢管的轴线位置、高程、里程进行复核,偏差符合规范要求后,设置牢固的内支撑与外加固装置,防止焊接过程中发生管口变形。

### 2.2 焊接工艺参数与作业过程管控

焊接工艺参数的精准控制是保障焊接接头质量的关键,需严格按照焊接作业指导书确定的参数开展作业,严禁擅自调整焊接参数。现场焊接需根据钢管材质、壁厚、焊接位置选择适配的焊接方法,埋弧自动焊适用于管节预制纵缝、现场环缝平焊位置,焊接效率高、成型质量稳定;手工电弧焊适用于全位置焊接、现场修补与空间受限部位作业;气体保护焊适用于薄壁钢管、高空全位置焊接作业。

焊接过程中需重点管控焊接电流、电弧电压、焊接速度、热输入量等关键参数,多层多道焊需严格控制层间温度,每层焊缝焊接完成后,需彻底清理焊渣与飞溅物,检查焊缝表面质量,存在缺陷需清除后方

可焊接下一层。焊接顺序需遵循“对称焊接、分段退焊、减少应力集中”的原则,先焊接纵缝后焊接环缝,环缝焊接宜采用双人对称同步焊接,避免单侧焊接引发的管口变形与残余应力集中。纵缝焊接需设置引弧板与熄弧板,焊接完成后采用机械方式切除,严禁强行敲除。

### 2.3 特殊工况下焊接作业质量管控

水利工程压力钢管现场焊接常面临低温、高湿、大风、洞内受限空间等特殊工况,需制定专项质量管控措施,避免环境因素引发焊接缺陷。针对大风工况,手工电弧焊作业区域风速超过8 m/s、气体保护焊风速超过2 m/s时,必须设置防风棚或防风围挡,封闭作业空间,严禁在无防风措施的情况下开展焊接作业。针对雨雪天气,严禁露天开展焊接作业,焊接部位受潮时,需采用火焰烘干处理,确认坡口干燥后方可焊接。

针对高湿工况,作业区域相对湿度大于90%时,需采用除湿机、火焰烘干等方式降低局部湿度,否则不得开展焊接作业。针对低温工况,环境温度低于0℃时,需对焊缝两侧各100 mm范围内的母材进行预热,预热温度较常温工况提高20~30℃,焊接过程中需控制层间温度不低于预热温度,焊后采用保温棉覆盖缓冷,避免焊缝快速冷却引发冷裂纹。针对洞内受限空间作业,需完善通风系统,及时排出焊接烟尘,确保作业人员安全,同时加强照明与过程监控,避免空间受限引发的焊接操作不到位问题。

### 2.4 焊后热处理与残余应力管控

对于厚壁钢管、低合金高强度钢钢管,焊后热处理是消除焊接残余应力、防止延迟裂纹、改善焊缝力学性能的关键工序,需严格按照规范要求执行。焊后热处理优先采用局部热处理方式,选用履带式电加热器配合保温棉进行加热,加热范围为焊缝两侧各3倍壁厚,且不小于100 mm,保温范围需超出加热范围至少100 mm。热处理过程中需严格控制升温速率、保温温度、保温时间与降温速率,升温与降温速率不得超过50℃/h,保温时间根据钢管壁厚确定,通常按每25 mm壁厚保温1 h控制,且最短保温时间不低于30 min。

热处理完成后,需对焊缝及热影响区开展硬度检测,验证热处理效果,硬度值需符合设计与规范要求。对于壁厚较薄、无需开展热处理的钢管,可采用锤击法、振动时效法消除焊接残余应力,锤击作业需在焊后焊缝温度处于200~300℃时开展,避免在蓝脆温度区间锤击引发焊缝开裂。焊接完成后需对钢管的几何尺寸进行复核,检查椭圆度、轴线偏差、管口平整度,确保焊接变形控制在规范允许范围内。

### 3 焊接常见质量缺陷与标准化防控处置技术

#### 3.1 体积型缺陷（气孔、夹渣）防控处置

气孔、夹渣是压力钢管现场焊接最常见的体积型缺陷，虽危害性较面状缺陷低，但会降低焊缝的有效截面积，影响焊缝的力学性能与密封性。气孔的主要形成原因包括焊材受潮、坡口清理不彻底、保护气体纯度不足、防风措施不到位、焊接参数不当导致熔池冷却过快；夹渣的主要形成原因包括层间焊渣清理不彻底、坡口角度过小、焊接电流过小、焊接速度过快、焊条角度不当。需严格执行焊材烘干与存放要求，焊前彻底清理坡口及两侧的油污、铁锈、水分，优化焊接参数，加强层间焊渣清理，完善作业区域防风措施。缺陷处置需根据缺陷深度与范围采取差异化措施：表面气孔、浅表层夹渣，可采用角磨机打磨彻底清除后，按焊接工艺进行补焊；深层气孔、密集夹渣，需采用碳弧气刨彻底清除缺陷至完好母材，清理干净后按焊接工艺补焊，补焊完成后需重新进行无损检测。

#### 3.2 面状缺陷（未焊透、未熔合）防控处置

未焊透、未熔合是压力钢管焊接中危害性较大的面状缺陷，会大幅降低焊缝的有效承载面积，形成应力集中点，在钢管高压运行过程中易引发裂纹扩展，导致焊缝失效。未焊透的主要形成原因包括坡口角度过小、组对间隙不足、焊接电流过小、焊接速度过快、钝边尺寸过大；未熔合的主要形成原因包括焊接热输入不足、焊条角度不当、层间清理不彻底、焊接电弧偏离坡口侧壁。针对该类缺陷的防控，需优化坡口设计，合理控制坡口角度、钝边尺寸与组对间隙，选用适配的焊接参数，规范焊工操作手法，加强层间清理与过程检查。未焊透、未熔合缺陷严禁采用表面打磨的方式处置，必须采用碳弧气刨彻底清除全部缺陷，直至露出完好母材，清理干净后严格按照焊接作业指导书进行补焊，补焊层数与焊接参数需符合要求，补焊完成后必须进行无损检测，确认缺陷完全消除<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 裂纹类缺陷防控处置

焊接裂纹是压力钢管焊接中危害性最大的缺陷，分为焊接过程中形成的热裂纹与焊后冷却过程中形成的冷裂纹，其中延迟冷裂纹具有隐蔽性，易在钢管运行过程中引发突发性断裂事故。热裂纹的主要形成原因包括母材硫、磷等杂质含量过高、焊接热输入过大、熔池冷却速度过快、焊缝成型不良、应力集中；冷裂纹的主要形成原因包括母材淬硬倾向大、焊材含氢量过高、焊前预热不足、焊接残余应力过大、焊后未及时缓冷。针对裂纹类缺陷的防控，需严格控制母材与焊材的化学成分，选用低氢型焊接材料，严格执行焊前预热、层间温度控制与焊后缓冷要求，优化焊接顺

序降低焊接残余应力，厚壁钢管焊后及时开展热处理。裂纹缺陷的处置必须执行专项流程，先通过超声波、射线检测确定裂纹的长度、深度与延伸范围，在裂纹两端钻止裂孔，防止裂纹进一步扩展，随后采用碳弧气刨彻底清除全部裂纹，直至完好母材，再按焊接工艺补焊，补焊后需开展焊后热处理，完成后重新进行无损检测，严禁擅自对裂纹缺陷进行补焊。

#### 3.4 焊接变形与尺寸偏差防控处置

焊接变形主要表现为管口椭圆度超标、钢管轴线弯曲、角变形、波浪变形等，会影响钢管的安装精度与结构受力性能。其主要形成原因包括焊接顺序不合理、未设置反变形措施、组对加固不到位、焊接热输入过大、焊接参数不对称。针对焊接变形的防控，需在组对时根据焊接工艺预设合理的反变形量，采用对称焊接、分段退焊的方式控制焊接热输入的均匀性，加强组对后的内支撑与外加固，优化焊接参数与焊接顺序，多层多道焊严格控制层间温度。变形处置需根据变形程度采取差异化措施：轻微变形可采用千斤顶、压力机等设备进行机械矫正，矫正过程中严禁损伤母材；变形量较大的，可采用局部加热矫正法，控制加热温度在 600 ~ 800 °C，严禁过烧，矫正后缓慢冷却；变形严重、无法矫正的，需割除焊缝，重新组对焊接，确保钢管尺寸偏差符合规范要求。

### 4 结束语

本文系统梳理了水利工程压力钢管现场安装焊接全流程的质量控制体系，明确了前期原材料管控、工艺评定、作业环境准备的基础要求，细化了组对焊接、过程管控、焊后处理等关键工序的技术要点，归纳了各类常见焊接缺陷的形成机理与标准化处置对策。未来研究可聚焦智能化焊接装备研发、焊接过程在线监测技术应用、新型低氢焊接材料研发等方向，完善质量管控标准体系，提升水利工程压力钢管的建设质量与长期服役安全保障能力。

#### 参考文献：

- [1] 张玉国. 焊接速度对水电站压力钢管残余应力的影响分析[J]. 水电站机电技术, 2026, 49(01): 97-103.
- [2] 肖云鹏. 压力钢管焊接接头性能优化与结构安全分析[J]. 冶金与材料, 2025, 45(06): 157-159.
- [3] 余志亮, 崔成林, 刘小刚, 等. 高承压钢管焊接技术研究与应用[J]. 珠江水运, 2024(19): 130-132.
- [4] 施秉亮, 高丽萍. 大仰角长斜井压力钢管快速安装技术[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(07): 31-33, 69.
- [5] 刘迎帝. 倒虹吸工程钢管制作安装施工技术分析[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(01): 88-91.

# 水利工程施工技术标准执行与操作规程优化研究

朱佳栋

(浙江省水利水电建筑监理有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘要** 水利工程施工活动具有工序衔接紧、作业环境复杂、质量控制要求高等特征,技术标准执行是否到位直接关系到工程实体质量、安全管理水平及施工组织秩序。在实际建设过程中,部分项目虽已形成较为完整的标准体系,但在现场落实层面仍存在标准要求传导不细、岗位操作尺度不一等情况,致使技术标准与一线作业之间出现落差。操作规程作为连接管理要求与施工行为的重要载体,其科学性、针对性和适配度对标准执行成效具有直接影响。本文围绕水利工程施工实际,从标准细化、工序约束、岗位职责、动态调整及监督反馈等层面推进操作规程优化,使技术要求能够稳定转化为现场可执行、可检查、可追溯的操作依据,以期为提高水利工程施工管理的规范性与实施效果提供参考。

**关键词** 水利工程; 施工技术标准; 操作规程; 标准执行

中图分类号: TV52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.020

## 0 引言

水利工程建设多处于地质条件复杂、作业面分散、施工周期较长的环境中,现场管理稍有松动,就容易引起质量波动和工序失序。技术标准能否真正落到班组操作、设备使用和过程控制之中,往往决定着工程建设的稳定程度,尤其在基础处理、混凝土施工、导流围堰及隐蔽工程作业环节,这种要求表现得更为明显,规程设计若停留在一般化表述层面,现场执行就难以形成统一尺度。

## 1 水利工程施工技术标准执行与操作规程优化的必要性

### 1.1 保障水利工程施工质量与安全的现实需要

水利工程施工安全隐患与风险识别是保障水利工程施工安全的重要环节,对于及时发现并解决可能导致事故的潜在危险具有关键意义<sup>[1]</sup>。

水利工程施工涉及测量放样、基础处理、模板安装、混凝土浇筑、防渗施工及设备安装等多个环节,工序之间联系紧密,任何一个节点控制不到位,都可能对整体质量与施工安全造成影响。尤其在水闸、泵站、堤防加固、渠道衬砌等工程中,现场常常伴有露天作业、交叉作业和隐蔽作业并存的情况,受地质条件、水文

变化、机械运行状态和人员操作水平影响明显,仅靠经验组织施工,很难维持全过程稳定。技术标准的作用正在于把材料选用、工艺要求、质量偏差和安全控制边界明确下来,使施工活动有据可依。若标准要求停留在交底层面,没有细化为岗位动作、检查节点和处理要求,现场执行就容易出现偏差,进而带来质量缺陷和安全隐患,如基础清理不彻底、混凝土振捣不规范、养护时间控制不足、防渗层搭接处理不严等问题,往往都与标准执行不到位直接相关。

### 1.2 推动施工管理规范化与标准化的内在要求

水利工程建设周期较长,参与单位多,管理链条复杂,既包括技术、质量、安全、进度等多项内容,也涉及不同岗位、不同班组和不同施工区域之间的协同衔接。

规范化管理并不只是把制度写出来,更关键的是让每一道工序、每一个岗位都能按统一要求运行,技术标准解决的是施工应达到什么要求,操作规程解决的是现场具体如何操作,二者衔接是否紧密,直接影响管理成效。若能把标准要求细化到操作步骤、岗位职责和检查流程之中,施工准备、过程实施、节点验收和问题整改就能形成较完整的闭环,项目管理也更容易由经验驱动转向规范驱动。

作者简介: 朱佳栋(1991-),男,本科,工程师,研究方向:水利工程。

## 2 水利工程施工技术标准执行与操作规程优化路径

### 2.1 围绕施工环节细化技术标准内容

水利工程施工进入现场后，技术标准通常不会直接以原始条文形态进入班组作业，而是先结合分部分项工程重新拆解，再对应到测量放样、基坑开挖、钢筋安装、模板支设、混凝土浇筑、防渗处理和设备安装等具体工序之中<sup>[2]</sup>。细化过程往往沿着“工序内容—控制参数—作业要求”展开，如土方开挖，不只写开挖深度和边坡坡比，还会把测量复核频次、分层开挖顺序、机械与人工配合方式、槽底扰动控制和排水沟布置写入作业内容；到了钢筋安装阶段，技术交底会把钢筋间距、锚固长度、接头位置、保护层厚度、垫块设置和绑扎顺序一并列清，质检记录则同步对应抽检部位和偏差值<sup>[3]</sup>。混凝土施工更强调连贯控制，拌和物进场检验、入仓顺序、分层厚度、振捣点位、施工缝处理和养护时段通常会被整理成单独的工序卡，班组按卡作业，技术员按卡检查，现场就容易把标准要求变成稳定动作。在做这项工作时，通常还会结合工程特征作二次细化。河道整治工程更看重导流转换、围堰稳定和岸坡防护，泵站与水闸施工更看重结构定位、埋件精度和混凝土外观质量，渠道衬砌则更关注基面整平、伸缩缝顺直和防渗层搭接质量，不同工程的现场控制重点并不相同，规程内容也会随之调整。

### 2.2 围绕工序组织完善操作规程体系

操作规程进入优化阶段之后，写法通常不再停留在单项动作描述上，而会向全过程组织延伸，把施工准备、工序展开、节点复核、交接验收和成品保护串成连续链条。以基础处理到结构施工这一段为例，现场往往先完成基面开挖、清底、排水和测量复核，再组织验槽确认，随后进入垫层、钢筋、模板和混凝土作业。规程体系在这里承担的作用是把每一步之间的衔接条件写实，比如基面验收记录未完成之前不进入下道工序，钢筋隐蔽检查结束后再启动模板封闭，模板轴线和标高复核完成后再安排首仓浇筑。完善规程体系时，还会把重点工序单独做专章控制。常见于止

水带安装、伸缩缝处理、金属埋件定位、灌浆施工、闸门安装和隐蔽工程验收等环节，这类内容返修成本高，后续影响持续时间长，因而规程表述通常更细。例如：止水结构安装，现场会把中心线定位、固定方式、接头处理、周边模板加固和浇筑过程防偏移措施一并写入交底；机电埋件安装则会把坐标控制、标高复核、临时固定、浇筑保护和复测记录一体化安排（如图 1 所示）。在此基础上，项目资料管理往往也会同步嵌入规程体系之中，把技术交底单、隐蔽验收单、工序交接单和现场测量复核表对应到具体施工节点，做到工序推进与资料形成同步展开，这样处理之后，规程执行不再只是现场动作控制，还延伸到了过程留痕和责任追溯层面，后续质量核查、问题复盘和竣工资料整理也会更顺畅<sup>[4]</sup>。

### 2.3 围绕岗位落实强化培训检查与动态修订

技术标准和操作规程进入现场之后，要真正转化为持续稳定的执行结果，往往离不开分层培训和同步检查。水利工程现场岗位多、工种杂，技术员、施工员、班组长、测量员、质检员和机械操作人员接触规程的角度并不一致，培训内容也就不能只停留在统一宣读层面。把培训拆成专项交底、班前提醒、样板示范和节点复盘几个层次，技术负责人讲参数边界，施工员讲工序安排，班组长讲动作顺序，质检人员讲检查项目，几类信息同时进入作业面，规程内容才能真正落实到施工中<sup>[5]</sup>。

现场培训往往跟着任务走，而不是脱离工序单独存在，如围堰填筑启动前，项目会围绕填料粒径、摊铺厚度、压实遍数、边坡修整和排水沟设置开展现场交底，测量员和机械操作手同步确认控制点位置，再由班组按分段推进方式展开填筑；渠道混凝土衬砌施工前，则更重视模板顺直度、仓面清理、入仓连续性、表面收光和养护覆盖要求，技术员先做样板示范，再由质检员按控制表逐项复核。培训内容一旦和当日任务紧密对应，班组更容易把规程要求转成实际动作，现场执行也更稳。检查和修订往往是同时推进的，项

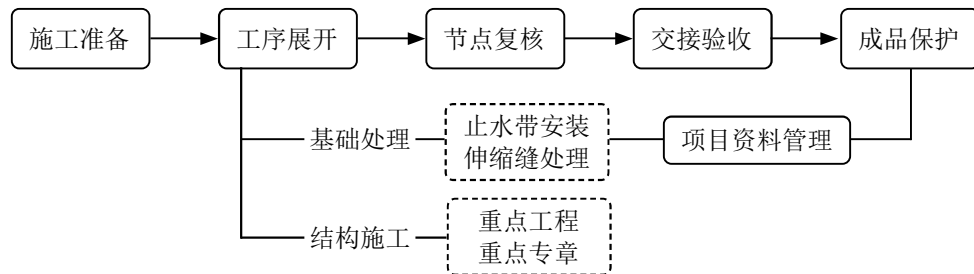


图 1 工序组织导向下水利工程操作规程流程示意图

目日常巡检、质量评定、隐蔽验收和安全排查形成的记录,会持续回到规程体系内部,用来校准哪些内容需要补细,哪些节点需要前移,哪些作业卡需要更新。可以把季节转换、工序切换和设备调整带来的变化纳入修订内容,如汛期施工补入导流值守、排水组织和材料防护要求,冬季施工补入保温覆盖、测温记录和养护时段控制,机电安装阶段再把吊装路径、构件防碰撞和成品保护细节写实。

### 3 案例分析

#### 3.1 案例背景与施工技术管理要求

引江补汉工程可作为水利工程施工技术标准执行与操作规程优化的典型案例。该工程属于南水北调后续工程首个开工项目,由中国南水北调集团负责建设运营,输水线路总长194.7千米,采用有压单洞自流输水方式,施工总工期108个月,静态总投资551.58亿元。沿线地质条件复杂,工程兼具大埋深、长线路、大洞径等特征,同时面临高地应力、高水压、断层多、地下水多、软岩多等施工难点,现场技术管理对工艺统一、过程控制和安全组织的要求明显高于一般项目。

在此类长距离输水隧洞工程中,技术标准的作用并不止于规范施工行为,更直接关系到隧洞成型质量、围岩稳定控制和施工安全边界。引江补汉工程建设过程中,项目管理方围绕“安全、精品、绿色、智慧、阳光”工程目标推进施工管理,既重视施工技术标准的细化传导,也重视现场工艺工法的标准化组织,使该工程具备较强的案例代表性。

#### 3.2 标准执行与规程优化的实施做法

从公开资料看,引江补汉工程在标准执行层面并未停留在一般性制度传达上,而是把标准要求进一步转入现场工法和操作控制之中。针对大规模钻爆法施工,项目逐渐形成了隧洞掌子面施工管理的标准化工艺工法,并在现场推行“红黄白绿牌”安全管理制度,把风险识别、过程约束和作业反馈嵌入日常施工组织,落实到施工面的工序控制、班组执行和安全检查之中。在质量控制方面,这个工程较有代表性的做法是首件工程认可制。江汉水网公司在全线推行首件制和样板引路,把最先开工、工程量较大且具有推广价值的工序作为首件工程进行观摩和认可,如“8号平洞隧洞仰拱及衬砌施工”“10号混凝土路面”等样板工程,已在全线形成示范效应。监理人员在公开报道中提到,首仓混凝土出现的问题经过总结后,第二仓混凝土质量明显提高。

在现场组织方式上,引江补汉工程还引入了数字

孪生智能建造中心,集成人员车辆定位、水情雨情监测、有毒有害气体监测等多种信息化模块,形成“一屏观全域、一网管全局”的管理方式。到2026年1月,全线首个贯通标段——输水总干线出口段工程贯通时,公开报道仍强调其施工中实行“一炮一设计,一炮一分析”,并依托数字化模块对复杂地质段施工进行全过程辅助管控,这说明该项目在施工标准执行过程中,已经把技术参数控制、工法组织和动态监测结合在一起。

#### 3.3 案例启示

水利工程施工技术标准要真正落地,往往需要先完成“条文要求—工艺工法—岗位动作”的转化过程,首件制和样板引路正好承担了这一中间环节的转换功能;操作规程的优化不宜理解为单次修订文本,更适宜理解为依托首仓施工、现场复盘、监理反馈和后续推广持续完善的动态过程,引江补汉工程首件制下的质量改进就体现了这一点;面对长线路、复杂地质和多作业面的工程条件,标准执行越细,现场管理越不能脱离数字化辅助与实时监测,数字孪生建造平台在该工程中的运用,恰好说明了操作规程正在由传统静态文本向“标准要求+过程感知+动态反馈”一体化方式延伸。

### 4 结束语

水利工程施工管理要真正落到实处,关键不在制度写了多少,而在于技术标准能否落实到工序控制、岗位动作和现场检查之中,操作规程能否把分散要求接成连续链条。把标准执行与规程优化放在一起推进,施工现场才更容易形成统一尺度,质量控制更容易落细,安全管理也更容易落稳,这项工作既关系到单个项目建设质效,又关系到水利工程施工管理方式的持续进步。未来,水利工程施工规程将更加贴近复杂环境下的动态组织需求,并向精细化、协同化和数字化方向持续深化。

#### 参考文献:

- [1] 黄银香.水利工程施工安全管理及其应对策略研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(28):25-27.
- [2] 张连斌.基于生态可持续的水利工程施工技术应用与优化[J].城市建设理论研究(电子版),2025(04):199-201.
- [3] 赵伟佳,贾长华,杜昭翰.水利工程施工中安全生产标准化的应用[J].大众标准化,2025(24):139-141.
- [4] 钱淳,严岳同.水利工程施工安全管理标准化体系构建研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(06):226-228.
- [5] 余航.水利工程施工安全管理标准化探究[J].水上安全,2024(07):25-27.

# 基于新能源消纳的电网调度优化研究

刘永杰

(国能辽宁新能源开发有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要** 新能源快速发展为能源行业带来了机遇, 同时也面临挑战。高效地消纳风能和太阳能等可再生资源, 有利于提高新能源利用率和电力系统的可靠性。针对新能源消纳问题, 需要优化风光储微电网, 提高调度方案的科学性和新能源消纳比例。本文主要研究了基于新能源消纳的电网调度优化, 综合考虑新能源不确定性, 构建优化调度模型, 同时融合智能优化算法, 以期为提高新能源消纳效率、优化电力系统运行指标提供借鉴, 进而为电力行业的可持续发展提供助力。

**关键词** 电力系统; 新能源; 电网调度

**中图分类号**: TM711

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.021

## 0 引言

在全球能源转型的背景下, 逐渐提高了能源结构中新能源的地位, 在电力系统中不断融合风能和太阳能等可再生能源。但是, 新能源具有间接性和波动性以及不确定性, 增加了电网调度的难度。新能源出力的波动性, 将会影响电网频率和电压的稳定性, 很难协调传统电源和新能源, 不利于电网顺利消纳新能源。因此, 研究基于新能源消纳的电网调度优化具有重要的意义, 不仅可以提高电网新能源的消纳能力, 同时保障了电力系统运行的安全性和稳定性, 减少了化石能源的消耗, 使电网向绿色低碳方向发展, 顺利实现双碳目标。

## 1 新能源发电特性及对电网调度的影响

### 1.1 新能源发电特征分析

#### 1.1.1 风力发电特性

风力发电作为新能源的重要组成部分之一, 其随机性和间接性特点直接影响电力系统运行的稳定性。自然条件对风力资源造成限制, 风速具有波动性特点, 影响了风电出力的稳定性。除了气象因素之外, 地形和地貌等地理环境也会影响风速改变, 导致风力出力变化具有非线性特点<sup>[1]</sup>。风电出力的波动性要求提高电网调度水平, 且风力发电的间歇性特点, 不利于保障风能供应的持续性, 需要合理增加电力系统的备用容量。从技术角度出发, 合理预测风力变化, 有利于应对风力发电不确定性的影响。风速变化比较复杂, 现有的预测方法无法满足工作要求, 尤其在极端天气

下, 将会直接影响预测结果的精准性, 不利于在电网中大规模接入风力发电。此外, 地理位置直接关系到风力发电的特性, 各地区风资源风速分布条件具有较大的差异性, 不利于均衡风电出力。因此, 在分析风力发电特点的过程中, 要综合考虑各种影响因素, 提高电网调度优化的科学性。

#### 1.1.2 光伏发电特性

光伏发电属于重要的新能源, 光照强度和温度以及天气状况直接影响光伏发电的出力特性, 突出了光伏发电的波动性和不确定性。光伏强度关系到光伏发电效率, 而光伏强度的变化规律直接影响光伏出力的时间分布特点。例如: 白天光照充足, 可以保证光伏出力的稳定性, 而夜间和阴雨天气会显著降低光伏出力<sup>[2]</sup>。此外, 温度因素也会影响光伏发电效率, 在高温条件中会降低光伏组件运行效率, 提高了光伏出力的不确定性。

### 1.2 对电网调度的影响

#### 1.2.1 电力平衡挑战

新能源处理具有波动性, 不利于平衡电力系统的电力, 降低了电网频率的稳定性。针对传统的电力系统, 通过调整常规电源, 可以有效平衡电力供需, 提高电网频率的稳定性。但是接入新能源之后, 因为新能源处理随机性和间接性等特点的影响, 不利于平衡电网电力<sup>[3]</sup>。例如: 突然降低风力发电的风速之后, 也会随之降低风电出力。在夜间和恶劣天气下, 会直接影响光伏发电的出力, 甚至无法正常供应电力资源。

**作者简介**: 刘永杰 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 发电厂及电力系统。

新能源出力的波动性，需要提高电网调峰能力。在负荷高峰阶段，如果新能源出力较低，需要发挥常规电源的调峰作用。在负荷低谷阶段，如果新能源出力较多，可能会出现弃风弃光问题。因此，在电网调度优化中，不仅要平衡电网电力，还要高效地消纳新能源。

### 1.2.2 调度计划制定困难

新能源预测难度较大，不利于制定科学的调度计划。在编制调度计划的过程中，要结合负荷和电源处理预测结果，但是新能源出力具有不确定性，会增加预测误差，增大实际出力和预测值的偏差，最终降低调度计划的科学性。

出现新能源预测误差，一方面会增加计划编制的不确定性，降低调度方案的灵活性；另一方面，在计划执行中，因为预测误差的影响，将会频繁调整调度计划，增加整体投资<sup>[4]</sup>。此外，新能源预测误差具有时空分布特点，不同地区和不同时间段的预测结果具有一定的差异性，进一步增加了调度计划制定难度。为了提高调度计划的科学性，在编制过程中要综合考虑各种影响因素，同时利用各种先进的算法动态调整调度方案，降低新能源预测误差的影响。

## 2 基于新能源消纳的电网调度优化策略

### 2.1 改进调度模型

#### 2.1.1 基于新能源不确定性的模型

在电网中引入风能和太阳能等，可以保障环境效益，促进能源结构的转型，同时符合国家的规划目标，在最大程度上开发并利用可再生能源。

$$\max E_1 = \sum_{t=1}^N (p_{wt} + p_{vt}) \quad (1)$$

式(1)中， $E_1$ 代表新能源消纳容量， $p_{wt}$ 代表t时刻风机输出功率， $p_{vt}$ 代表t时刻光伏输出功率。

新能源出力的随机性和间接性直接影响电网调度工作。调度模型中要综合考虑新能源出力特点，提高模型的灵活性。在模型中可以利用概率分布函数，将新能源出力的波动特点反映出来，如利用概率密度函数对风电出力的不确定性进行刻画。在模型构建中还可以利用基于场景分析的方法，对出力场景和概率权重进行分析，有利于全面分析新能源出力波动。利用这一方法有利于分析新能源出力特点，可以降低预测误差的干扰。同时，结合电价机制的变化，对调度模型的响应能力合理优化，保障电网运行的灵活性和经济性。

引入分层调度模型，有利于应对新能源不确定性。

该模型合理分解调度过程为不同的层次，同时可以分别求解不同的时间尺度和优化目标。例如：在调度层中，利用目标粒子群算法协同调度常规电源和新能源，在满足电网约束条件的同时，在最大程度上控制投资和碳排放。在实施调度层中，结合新能源预测结果动态修正调度计划，降低突发事件的影响力<sup>[5]</sup>。利用分层调度框架，可以提高模型的适应性，保障电网运行的经济性和安全性。

#### 2.1.2 多目标优化模型

为优化新能源消纳和电网运行经济性，在构建调度模型的过程中，要综合考虑经济和环保以及新能源消纳等目标。传统调度模型的目标为最小化发电成本，而不断提高新能源接入比例之后，不再适合利用单一的经济指标。多目标优化模型是综合各个目标来确定最佳方案。引入该模型，主要是利用权重系数对各目标的重要性合理平衡，同时结合实时电价机制协同发展居民用电和新能源发电。此外，构建多目标优化模型，综合考虑电网运行过程中的各种约束条件，引入这些约束条件，可以保证构建的模型符合实际运行场景，但是也提高了求解难度<sup>[6]</sup>。在求解过程中可以利用智能优化算法，如利用改进粒子群算法，有利于快速获取最优解集，提高调度决策的科学性。通过利用多目标优化模型，有利于提高电网新能源的消纳能力，同时可以优化电网运行性能，推动电力系统可持续发展。

### 2.2 优化算法应用

#### 2.2.1 智能优化算法

在电网调度优化中，智能优化算法的全局搜索能力和求解性能较强，其中最具有代表性的算法为粒子群算法和遗传算法。粒子群算法可以快速搜索最优解，但是在处理复杂问题的过程中很容易出现局部最优情况，需要采取合适的改进措施，如融合惯性权重等，提高算法的能力。粒子群算法的流程图如图1所示。

遗传算法对生物进化过程进行模拟，利用选择和交叉等操作搜索解空间。对比粒子群算法，遗传算法的全局搜索能力比较强，可以规避局部最优情况。但是遗传算法计算过程比较复杂，针对大规模调度工作，将会降低求解效率<sup>[7]</sup>。为了规避这一问题，可以综合利用遗传算法和其他优化方法，如利用多目标进行算法，有利于提高求解效率和精准性。此外，在利用智能优化算法的过程中，可以特殊处理新能源调度问题，如利用精英保留策略和动态调整机制，有利于更好地适应新能源波动，提高算法有效性。

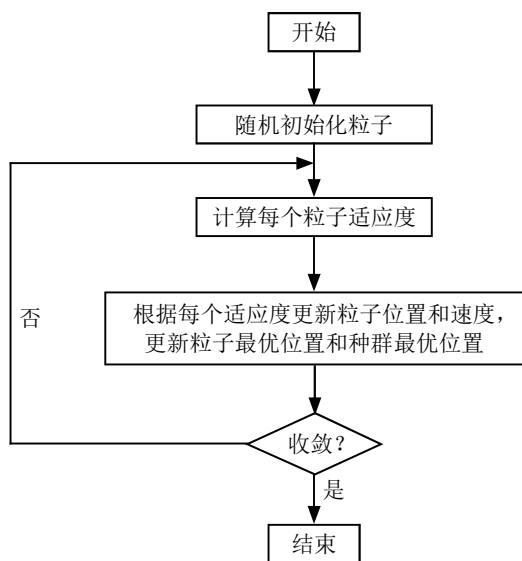


图 1 粒子群算法的流程图

### 2.2.2 算法改进

虽然在电网调度中智能优化算法的优势明显,但是在处理新能源调度问题的时候会面临各种挑战,如求解效率较低,同时会出现局部最优的情况。为了应对这些问题,需要做好算法改进。首先,为了提高求解效率,在智能优化算法执行中可以利用分布式计算技术,如分解大规模调度问题为多个子问题,并且利用不同的计算节点求解问题,提高整体求解速度。此外,可以利用近似模型和代理模型,不仅可以保障求解精度,也能减少计算时间,保证实时调度水平。其次,为了提高求解精度,需要积极开发混合优化算法。该算法中融合了各种优化方法,合理平衡全局搜索和局部开发,如综合利用粒子群算法和模拟退火算法,有利于提高全局搜索能力。综合利用遗传算法和局部搜索算法,有利于提高解的质量和精度。针对新能源出力不确定性,可以基于不确定性处理提出改进算法,如利用模糊逻辑和区间分析方法,提高算法的灵活性。

### 2.3 深化需求侧资源开发利用

深化需求侧资源开发利用,有利于建设需求侧响应机制,通过完善价格信号体系,引导用户结合新能源出力波动对自身用电行为合理调整。在新能源大发时段,可以增加用电需求,有利于动态平衡电力供需。构建可调节负荷和虚拟电厂,综合利用先进通信技术和控制技术,实现分布式资源的聚合,在电网调峰辅助服务中引入虚拟电厂,可以灵活应对需求侧,保证系统有效适应新能源出力波动<sup>[8]</sup>。积极推广电制氢、电供暖等消纳方式,提高消纳途径的多元化,有利于充分利用新能源。

### 2.4 加强电网基础设施升级

在电网基础设施升级中,需要完善输电网络架构,通过建立跨区域大容量输电通道,可以提高电网输电能力,避免出现局部电网阻塞问题。综合利用智能电网和柔性输电技术,可以综合利用传感器和通信技术以及控制技术等技术实时监测和调节电网运行状态。在电网中利用柔性交流输电系统等,有利于适应新能源出力波动性特点,提高潮流分布的合理性,提高整体电能质量。落实配电网柔性化改造,配置智能配电设备,同时利用先进的控制技术,提高配电网的兼容性,有效接入分布式新能源。对网络拓扑动态调整,同时执行无功补偿,有利于高效地消纳分布式新能源,避免出现弃风弃光问题。

### 3 结束语

本文立足于新能源发电随机性、间歇性、波动性的核心特性及对电网调度的影响,通过改进调度模型、优化算法应用、深化需求侧资源开发利用、加强电网基础设施升级、优化评估和动态调整机制等措施,有效破解弃风弃光难题,提升新能源消纳效率,同时增强电网应对功率波动的韧性,保障系统安全稳定运行。未来,电网调度优化需以技术创新为核心驱动力,要积极融合新技术,提高电力系统中新能源接入比例,积极开发利用新能源优势,推动我国电力行业绿色转型与可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 周宁,徐铭铭,刘清秋,等.面向强不确定性供需波动的新能源电网调度强化学习算法[J].全球能源互联网,2026,09(01):60-71.
- [2] 浦洁,陈轶.考虑新能源消纳的光伏微电网储能配置优化方法[J].电气技术与经济,2025(12):124-127.
- [3] 刘福龙.新能源渗透下大渡河流域集控中心多能互补调度策略研究[J].四川水利,2025,46(06):6-11.
- [4] 边家瑜,李昌陵,荆世博,等.面向新能源消纳的制氢-储热-蓄电池混合储能系统低碳运行优化方法[J].洁净煤技术,2025,31(S2):40-49.
- [5] 宋竹萌,王宝,贾健雄,等.面向新能源消纳和季节性负荷供应的农村配电网联合调控策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(06):77-89.
- [6] 谢艳菲.人工智能技术在智能电网高效消纳新能源中的应用[J].科技视界,2025,15(27):32-34.
- [7] 叶海峰,李智,李顺,等.基于时序生产模拟的新能源消纳能力测算方法研究[J].国外电子测量技术,2025,44(11):357-362.
- [8] 王舟.新能源消纳导向下水库蓄能电站电力运行控制技术[J].应用能源技术,2025(10):65-67.

# 高分子材料检测技术在轮胎工业中的应用

李丰瀚

(山东省三利轮胎制造有限公司, 山东 菏泽 274000)

**摘要** 本文聚焦轮胎工业对高分子材料性能精准把控的核心需求, 针对传统检测技术效率低、精度不足、全生命周期管控缺失等行业难点, 系统构建涵盖原材料筛查、生产过程监控、成品性能评估、服役状态监测的全流程检测技术体系。通过整合力学性能检测、热分析、无损检测等关键技术, 建立“多维检测+数据溯源”的质量控制机制, 重点突破橡胶复合材料相容性、动态力学性能精准表征等技术瓶颈, 并以高性能乘用车子午线轮胎生产项目为案例验证, 以期为轮胎工业高质量发展提供参考。结果表明: 优化后的检测技术体系可将原材料不合格率降低68%, 成品力学性能检测误差控制在±2%以内, 轮胎使用寿命延长35%, 生产效率提升40%, 综合生产成本降低22%。

**关键词** 高分子材料; 检测技术; 轮胎工业; 质量控制; 全生命周期

**中图分类号**: TQ336.1; TQ317

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.022

## 0 引言

轮胎作为交通运输装备的核心部件, 其安全性能、耐用性与舒适性直接依赖于橡胶、帘线、橡胶助剂等高分子材料的综合性能。随着汽车工业向轻量化、节能化、智能化方向发展, 轮胎工业对高分子材料的抗老化、抗疲劳、耐磨耗等性能要求持续提升。当前行业面临多重挑战: 传统检测技术以事后抽样检测为主, 难以实时发现生产过程中材料性能波动; 橡胶复合材料组分复杂, 相容性与界面结合状态缺乏精准检测手段; 服役过程中材料老化、损伤等状态无法动态监测, 导致轮胎早期失效风险增加。近年来, 《橡胶和橡胶制品 拉伸性能的测定》(GB/T 528-2022)、《轮胎力学性能测试方法》(GB/T 29046-2023)等标准陆续实施, 推动高分子材料检测技术向精准化、高效化、智能化转型。同时, 差示扫描量热法、激光拉曼光谱、X射线荧光光谱等先进检测技术的成熟应用, 为破解传统检测难题提供了技术支撑。本文结合近三年行业创新实践, 整合多维度检测技术, 构建全流程检测体系与质量控制机制, 通过工程案例验证应用效果, 提出落地保障措施, 为同类企业技术升级提供可参考的解决方案。

## 1 轮胎工业中高分子材料检测核心技术体系

### 1.1 检测技术体系整体架构

基于轮胎生产全流程特性, 构建“原材料筛查—生产过程监控—成品性能评估—服役状态监测”四级

闭环检测体系, 各环节深度协同、数据双向贯通。原材料筛查层聚焦橡胶、炭黑、纤维帘线等核心材料的关键性能检测, 筑牢质量管控第一道防线; 生产过程监控层针对混炼、硫化等关键工序, 实时监测材料加工性能变化; 成品性能评估层全面表征轮胎成品的力学性能、耐磨性能等核心指标; 服役状态监测层通过动态检测技术, 跟踪轮胎使用过程中材料老化与损伤情况, 形成“检测—反馈—优化”的全链条管控模式<sup>[1]</sup>。

### 1.2 原材料性能精准筛查技术

采用“多技术协同筛查”模式, 实现高分子原材料关键性能的全面覆盖与精准评估。橡胶基材检测中, 运用电子拉力试验机按《橡胶和橡胶制品 拉伸性能的测定》(GB/T 528-2022)标准测定拉伸强度、断裂伸长率等力学指标, 结合邵氏硬度计(A型)表征材料硬度, 测试精度达±0.1 MPa; 通过差示扫描量热仪(DSC)分析橡胶玻璃化转变温度(T<sub>g</sub>), 精准判断材料低温韧性, 测试误差严格控制在±1℃以内, 确保轮胎在极端低温环境下的使用可靠性<sup>[2]</sup>。炭黑、白炭黑等填充剂检测中, 采用激光粒度分析仪测定粒径分布(D<sub>10</sub>、D<sub>50</sub>、D<sub>90</sub>), 结合比表面积测试仪(BET)表征吸附性能, 确保填充剂在橡胶基体中分散均匀性, 避免因团聚导致的性能缺陷。纤维帘线(聚酯、尼龙帘线)检测中, 利用X射线荧光光谱仪(XRF)精准分析化学成分, 通过万能材料试验机测试拉伸强度与弹性模量, 对不合格原材料实行100%拦截, 杜绝流入后续生产环节。

**作者简介**: 李丰瀚(1989-), 男, 本科, 研究方向: 化工分析。

### 1.3 生产过程动态监测技术

针对混炼工序，采用橡胶加工分析仪（RPA）实时监测胶料门尼黏度、硫化特性等参数，数据采样频率达 10 Hz，确保混炼均匀度；通过在线流变仪实时反馈胶料流动性能，当黏度波动超  $\pm 5\%$  时自动调整混炼时间与温度<sup>[3]</sup>。在硫化工序中，运用无线温度传感器嵌入轮胎胎面，精准采集硫化过程温度变化曲线，结合硫化仪数据优化硫化工艺参数，确保交联度均匀性。采用近红外光谱（NIRS）技术对胶料组分进行在线检测，快速识别材料配方偏差，检测时间缩短至 30 秒/次，较传统实验室检测效率提升 90%。

### 1.4 成品性能综合评估技术

构建“力学性能+耐用性能+安全性能”三维综合评估体系，全面保障轮胎成品质量。力学性能检测中，采用动态力学分析仪（DMA）测试轮胎橡胶在不同温度（ $-40 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、频率（ $0.1 \sim 100\text{ Hz}$ ）下的储能模量（ $E'$ ）、损耗模量（ $E''$ ）与损耗因子（ $\tan \delta$ ），精准表征材料抗疲劳性能与阻尼特性；通过撕裂强度试验机、压缩永久变形测试仪全面评估材料抗损伤能力与弹性恢复性能<sup>[4]</sup>。针对耐久性能检测，采用轮胎均匀性试验机测定径向力波动、侧向力波动等关键参数，并结合耐磨试验机（阿克隆磨耗法）模拟实际运行环境评估胎面材料磨损速率，确保轮胎使用寿命符合设计要求。在安全性能评估方面，通过高速耐久试验机验证轮胎在 120 km/h 工况下的运行稳定性，并利用穿刺试验机检测材料抗冲击能力且各项检测指标严格遵循《轮胎力学性能测试方法》（GB/T 29046-2023）国家标准来保障行车安全。

### 1.5 服役状态动态监测技术

采用无损检测方法对轮胎服役状态做实时监控，超声波检测技术能探测胎体内部脱层及气泡等缺陷，其检测深度可达到 50 mm 且缺陷识别准确率超 98%，采用激光扫描技术对胎面磨损状况开展动态评估，借助温度传感器采集胎面工作温度数据并构建老化预警机制，基于大数据分析技术对轮胎服役数据进行整合处理以实现轮胎剩余使用寿命预测评估，当性能衰减幅度达到 30% 时系统会自动触发更换提醒来有效防范潜在安全风险。

## 2 核心应用场景与质量控制机制

### 2.1 橡胶复合材料相容性检测应用

针对天然橡胶和丁苯橡胶复合体系，采用动态力学谱图分析与扫描电镜表征结合方法，通过考察材料

相分离形貌特征并测定玻璃化转变温度范围，对复合材料相容性进行系统评价<sup>[5]</sup>，当体系呈现明显双玻璃化转变峰特征时，通过调控相溶剂添加比例并优化混炼工艺参数，有效保障材料内部结构的均一性。在某乘用车轮胎应用案例里，基于上述检测方案的优化调整，使橡胶复合材料拉伸强度提高 25%、断裂伸长率提升 18%，成功解决传统共混体系易出现开裂缺陷的技术难题。

### 2.2 生产过程质量追溯应用

构建依托区块链技术的全周期质量追溯体系，把原材料检测信息、生产过程监控数据以及成品性能参数进行整合，为每一批次的轮胎产品分配独一无二的识别码，实现质量信息的链式存储与关联。该系统运用加密算法保障数据的安全性与完整性，建立起从原料到成品的全程可追溯机制，当成品检测出现质量异常情况时，追溯系统能够在 30 分钟内精准定位问题节点，追溯到具体的原料批次、设备编号或者工艺参数，让问题整改效率相比传统方法提升 70%，大幅降低质量风险所带来的经济损失。

### 2.3 个性化检测方案定制应用

面对多元化应用场景下对轮胎特性的具体要求，需要构建有针对性的差异化检测体系。对于新能源汽车轮胎，要着重评估其低滚动阻力特性，利用专用试验设备精确测定滚阻系数，把测量精度控制在  $\pm 0.001\text{ N}\cdot\text{m}/\text{kg}$  范围内。针对越野轮胎，应重点考察其耐磨及抗冲击性能，通过模拟砂石路面行驶条件与穿刺试验来验证，确保其在极端环境下的使用可靠性。对于冬季轮胎，必须强化其在低温环境下的性能检测，在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下评估其拉伸强度与抓地力表现，以此满足冰雪路面行驶的特殊需求。

### 2.4 全流程质量控制措施

事前预防阶段，制定原材料准入检测标准，对供应商提供的高分子材料实行“双检测”制度（供应商自检+企业复检），合格材料纳入合格供应商名录；对检测设备进行定期校准，委托法定计量机构检定，确保检测精度符合《检测和校准实验室能力的通用要求》（GB/T 27025-2019）要求<sup>[6]</sup>。事中控制阶段，建立“三级巡检”机制，班组每 2 小时抽检 1 次，车间质量员每日全覆盖检查，技术部门每周专项督查；对关键检测数据设置预警阈值，超标数据自动触发整改流程。事后验收阶段，按《橡胶和橡胶制品拉伸性能的测定》（GB/T 528-2022）等标准开展全项目检测，成品抽检比例不低于 5%，不合格产品严禁出厂；建立质量分析例会

制度，每月汇总检测数据，优化检测方案与生产工艺。

### 3 工程案例验证与应用效果

#### 3.1 案例概况

以青岛森麒麟轮胎股份有限公司高性能乘用车子午线轮胎生产项目为研究对象，该项目年产轮胎300万条，采用天然橡胶/丁苯橡胶共混体系，配套新能源汽车与高端燃油车市场。项目面临高分子材料性能波动大、生产过程管控难度高、成品一致性不足等挑战，采用本文构建的全流程检测技术体系与质量控制机制，重点监测原材料合格率、成品性能达标率、轮胎使用寿命等核心指标。

#### 3.2 应用效果量化分析

与传统检测方法相比，改进后的技术体系应用成效特别卓越。在质量管控方面，原材料不合格率从5.2%显著下降到1.6%，降幅达到了68%，成品力学性能检测误差被严格控制在±2%的区间内，比传统检测模式精度提高了50%，轮胎耐磨性能提升了35%，实际使用寿命从6万千米延长到8.1万千米，明显超过行业平均水平（5万千米至6万千米）。在生产效率方面，原材料检测周期从4小时/批次缩减到30分钟/批次，生产过程检测自动化水平达到了90%，整体生产效率提升了40%，质量问题导致的返工率从8.5%降到2.3%，有效减少了资源浪费和生产成本。在经济效益层面，通过优化原材料使用、降低返工成本以及延长产品使用寿命，综合生产成本降低了22%，年新增经济效益超过8000万元，检测数据为产品配方优化提供了科学依据，研发周期缩短了30%，市场响应速度明显加快，核心产品市场占有率提升了5%。

### 4 技术落地保障机制与推广建议

#### 4.1 落地保障机制

在组织保障层面，成立由技术、生产、质量、采购部门组成的专项领导小组，明确职责分工，建立“检测—生产—研发”协同工作机制，每月召开技术交底会与质量分析会。在制度保障层面，制定《高分子材料检测技术规范》《质量追溯管理办法》等制度文件，将检测数据准确率、质量问题整改率纳入绩效考核；执行检测设备定期维护与校准制度，建立设备管理台账。在人才保障层面，开展高分子材料检测技术专项培训，重点培训DSC、DMA等设备操作与数据分析能力；引进材料科学、检测技术等专业复合型人才，与青岛科技大学合作建立产学研基地，联合开展技术研发与人才培养。

#### 4.2 应用推广建议

针对不同规模企业优化技术方案，大型企业推广“全流程智能化检测”模式，配置高端检测设备与数据管理平台；中小型企业推出轻量化方案，优先实现关键指标检测自动化，降低投入成本。推动行业标准化建设，联合中国橡胶工业协会制定《轮胎用高分子材料检测技术规程》，统一检测方法与精度要求。强化示范引领作用，选择行业龙头企业打造标杆项目，通过现场观摩、技术交流会等形式推广经验；建议行业主管部门出台政策支持，对采用先进检测技术的企业给予资金补贴或税收优惠，鼓励技术升级。加强技术创新，持续研发高分子材料动态监测、在线无损检测等先进技术，推动检测设备小型化、智能化发展，拓展技术应用场景。

### 5 结束语

高分子材料检测技术是轮胎工业质量保障和产品竞争力提升的关键支撑。本文提出的“四级检测体系+全流程质控机制”有效克服了传统检测方法效率低下、精度有限以及管控滞后等弊端。工程实践验证表明，该体系能显著提高原材料筛选准确度、生产过程控制精度和成品性能稳定性，进而延长轮胎使用寿命并降低生产成本。未来研究要致力于推动检测技术与人工智能、大数据深度融合以开发智能化检测与预测性维护系统，还要加强绿色检测技术研发来减少检测过程中的能源消耗与环境污染，同时完善行业标准体系与专业人才培养机制。

### 参考文献：

- [1] 平琦,高祺,王晨.不同内径圆环砂岩试件温水耦合动态劈裂力学试验研究[J].振动与冲击,2023,42(17):43-51,152.
- [2] 张铁军,唐潮,宋鹏伟,等.C型聚能管锥角的优化研究[J].爆破器材,2023,52(05):30-37.
- [3] 柴涛.改性氧化石墨烯对环氧树脂固化行为及宏观性能的影响[J].塑料科技,2025,53(03):18-23.
- [4] 张颖,汪燕,徐旗,等.不同牌号低玻璃化转变温度溶聚丁苯橡胶在轿车轮胎胎面胶中的应用性能对比[J].橡胶科技(中英文),2024,22(12):686-689.
- [5] 曹亚奇,胡素佩,孙丽文,等.钕改性医用温敏性聚乳酸基聚氨酯弹性体[J].工程塑料应用,2024,52(08):64-71.
- [6] 王玉合,王晓龙,司虎,等.PA66/PET复合帘子线的性能对比研究[J].合成技术及应用,2024,39(04):42-45.

# 仪器仪表数字化转型与智能制造融合应用

尹召杰

(山东新时代药业有限公司, 山东 临沂 273400)

**摘要** 本文聚焦仪器仪表行业数字化转型与智能制造融合的核心需求, 针对传统仪器仪表功能单一、数据孤岛严重、生产效率偏低、全生命周期管理脱节等行业难点, 结合政策导向与 5G、工业互联网、数字孪生等技术发展趋势, 系统构建“感知层—网络层—平台层—应用层”四级融合体系。通过技术适配优化、场景化应用落地与全流程质量管控, 重点突破智能传感、数据互通、柔性生产等关键技术瓶颈, 以重庆川仪 5G 智能工厂建设项目为案例验证, 以期为促进仪器仪表行业高质量发展提供参考。结果表明: 融合体系可使仪器仪表生产周期缩短 35%, 产品故障率降低 42%, 数据传输时延控制在 20 毫秒以内, 生产效率较传统模式提升 60%, 综合运营成本下降 28%。

**关键词** 仪器仪表; 数字化转型; 智能制造; 融合应用; 工业互联网

中图分类号: TH86; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.023

## 0 引言

仪器仪表作为工业生产的“感知神经”与“决策大脑”, 其技术水平直接决定智能制造的精准度与高效性。当前, 我国仪器仪表行业规模持续扩大, A 股板块头部企业总市值均突破百亿, 但传统发展模式面临多重挑战: 中低端产品同质化严重, 高端产品核心技术依赖进口; 仪器设备多为独立运行状态, 数据采集与传输存在延迟, 难以满足智能制造实时管控需求; 生产过程以刚性生产线为主, 柔性化程度不足, 难以快速响应市场个性化需求; 产品设计、生产、运维各环节数据割裂, 全生命周期管理能力薄弱。近年来, 国务院明确提出推动计量数字化转型, 加强仪器仪表智能化、网络化技术研发与应用。5G、工业互联网、数字孪生等新技术的成熟落地, 为仪器仪表行业与智能制造深度融合提供了技术支撑。本文结合近三年行业创新实践, 整合智能传感、边缘计算、协同制造等关键技术, 构建全流程融合应用体系, 通过工程案例验证应用效果, 提出落地保障措施, 为同类企业数字化转型提供可参考的解决方案。

## 1 仪器仪表数字化与智能制造融合核心技术体系

### 1.1 融合体系整体架构

基于智能制造全流程的动态性、协同性与智能化特性, 构建“感知层—网络层—平台层—应用层”四级闭环融合体系, 各层级之间打破技术壁垒与数据边界, 实现深度协同联动、数据双向高速贯通, 形成一

体化的技术运转闭环<sup>[1]</sup>。感知层以高精度智能传感技术为核心支撑, 搭载多维度感知模块, 实现对工业生产场景中温度、压力、流量、振动等多参数的精准、实时采集与设备运行状态的全方位感知, 为后续数据处理奠定基础; 网络层依托 5G 专网的低时延、大带宽特性与工业 PON 光网的高稳定性、高传输效率优势, 构建起双网协同的低时延、高可靠数据传输通道, 保障感知层数据无损耗、快速度传递; 平台层以工业互联网平台为核心载体, 整合数据存储、汇聚、分析、建模等核心功能, 成为整个体系的数据处理与智能决策中枢; 应用层深度聚焦仪器仪表设计、生产、运维、供应链管理等核心业务场景, 针对性提供定制化、智能化的解决方案, 最终形成“感知—传输—分析—应用”全链条、全场景的融合应用模式, 实现智能制造各环节的无缝衔接。

### 1.2 智能传感与感知技术升级

采用 MEMS (微机电系统) 技术与量子计量技术两大核心技术路径, 研发兼具集成化、微型化、高精度特性的智能传感器, 突破传统传感器单参数采集局限, 实现温度、压力、流量等多参数的同步、并行采集, 将测量精度大幅提升至 0.01 级, 满足高端工业生产的精准计量需求<sup>[2]</sup>。通过将嵌入式芯片与边缘计算模块深度集成于仪器仪表终端, 赋予设备本地数据预处理、异常数据识别与自主决策的核心能力, 可在数据上传前完成初步分析, 实时识别偏离阈值的异常数据并自动触发多级预警机制, 实现问题的早发现、早处置。

作者简介: 尹召杰 (1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 智能仪器仪表。

针对冶金、化工、水利水电等复杂工业环境的严格要求，对传感器进行全方位抗干扰优化设计，采用高强度密封式封装工艺隔绝外部环境干扰，搭配自适应校准算法实现动态误差补偿，确保传感器在高温、高压、强电磁干扰、高粉尘的恶劣场景下持续稳定运行，让数据采集准确率稳定保持在99.8%以上。

### 1.3 低时延网络传输技术适配

构建“5G专网+工业PON光网”双模传输网络，针对仪器仪表数据传输需求，优化网络切片技术，将生产控制类数据传输时延控制在20毫秒以内，满足实时管控要求<sup>[3]</sup>。采用工业以太网与无线传感网络（WSN）协同部署，实现车间设备、仪器仪表、管理系统的全连接。通过区块链技术建立数据传输安全机制，对采集数据进行加密处理与溯源管理，确保数据完整性与安全性，防止数据篡改与泄露。

### 1.4 工业互联网平台构建技术

搭建企业级工业互联网平台，深度整合设备集中管理、智能生产调度、多维度数据分析等核心功能模块，全面实现仪器仪表从研发、采购、运维到报废的全生命周期数据统一汇聚与高效流转。运用大数据深度分析与人工智能算法，精准构建生产过程动态优化模型、设备故障提前预警模型及全流程质量管控模型，依托高效数据挖掘持续推动生产工艺迭代升级、设备预测性维护落地执行与产品全链条质量精准追溯。深度融合数字孪生技术，精细构建仪器仪表生产全流程虚拟仿真映射模型，实现物理生产场景与数字虚拟空间的实时同步交互，有力支撑生产全过程可视化集中监控、流程模拟推演与智能化迭代优化。

### 1.5 柔性生产与协同制造技术

采用模块化设计理念，构建柔性生产单元，通过可编程逻辑控制器（PLC）与工业机器人协同作业，实现多品种、小批量产品的快速切换生产，换线时间缩短至30分钟以内。引入协同制造技术，建立企业间数据共享机制，实现上下游企业在设计、采购、生产等环节的协同联动。通过数字孪生技术模拟生产过程，提前预判生产瓶颈，优化资源配置方案，提升生产过程的灵活性与高效性。

## 2 融合应用关键场景与实施路径

### 2.1 智能化设计与研发

基于数字化设计平台，构建仪器仪表三维模型库与标准化零部件库，实现设计方案快速选型与参数化设计，研发周期缩短30%以上<sup>[4]</sup>。利用仿真分析手段

来对产品的结构和性能开展虚拟测试，能够提前发现设计缺陷，减少物理样机试制的次数。建立跨部门协同设计机制，设计人员、工艺人员和市场人员可通过平台进行实时沟通，使得设计方案可以和生产能力以及市场需求实现精准匹配，设计变更率降低了45%。

### 2.2 柔性化生产与过程管控

车间部署智能仪器与机械臂，搭建形成柔性生产线，通过工业互联网实现生产任务的智能排程调度。设备运行状态、材料消耗数据、产品质量参数均可实时可视化监测，依托大数据分析持续迭代优化生产工艺。通过视觉检测系统与智能仪表协同，对产品尺寸与性能进行全检管控，将不良品率稳定控制在5%以内。同时，搭建生产过程数字化追溯体系，完整记录每台产品的生产流程、原材料来源与全环节质量检测数据，实现产品全生命周期可追溯。

### 2.3 智能化运维与服务升级

依托工业互联网平台搭建远程运维服务体系：通过设备内置传感器实时采集运行数据，结合智能算法实现故障预判，提前生成定制化维护方案，已成功降低设备故障率42%；同步开通远程诊断与线上技术支持服务，引入虚拟调试技术辅助现场运维作业，将维修响应时长压缩60%。此外，建立产品全生命周期管理档案，整合设计、生产、全周期运维数据，为产品迭代升级提供精准数据支撑，顺利推动企业完成从“卖产品”到“卖服务”的商业模式转型<sup>[5]</sup>。

### 2.4 供应链协同与数字化管理

建立一个协同管理供应链系统，将供应商、生产商以及经销商等全链条资源进行统筹，将需求预测、订单处理和物流追踪等关键环节实现数字化与一体化的管控。利用各类仪器设备实时采集供应链各个节点的运行数据，原材料库存得到动态监控、生产进度被精准跟踪且产品流向实现了全程可追溯。运用大数据分析技术对供应链资源配置进行优化，有效降低了库存积压成本和物流运输损耗，整体供应链响应速度得到了超过50%的提升。

## 3 融合应用质量控制与风险防控

基于行业标准与实践经验，建立一个包含精度、效率和安全的三维评价体系<sup>[6]</sup>。关于精度指标的要求，仪器仪表测量精度不能低于0.01级，数据传输准确率至少要达到99.8%，产品合格率也要保持在99.5%以上。效率指标方面需要生产周期缩短超过三成，运维响应时间减少一半，能源消耗也要降低两成以上。安全指标则规定数据加密等级须符合国家三级标准，设备运

行故障率控制在 0.2% 以内, 网络防护能力达到等保三级水平。在事前预防阶段要制定数字化转型专项方案, 明确各个环节的技术要求及质量标准。对智能仪器仪表和传感器等关键设备严格选型并校准, 确保设备精度满足实际使用要求。同时, 开展技术培训工作, 提升操作人员在数字化方面的技能水平。进入事中控制阶段后, 建立动态质量监控机制, 通过工业互联网平台实时查看生产过程与产品数据。系统对异常情况会自动预警并追溯原因, 采用双人双机平行校验模式来保证数据处理准确无误。事后验收阶段则按照国标开展全要素质量检查, 对不合格产品进行溯源整改并建立质量改进台账。针对技术融合风险采取先小范围试点后规模化推广的路径, 选择典型产品与生产线进行试点验证, 待技术方案优化完成之后再进行全面的推广实施。在数据安全风险防控方面, 采用加密传输、访问控制、安全审计等多重防护措施, 定期开展网络安全测评与漏洞扫描, 确保数据安全。供应链风险防控通过建立多源供应商体系, 实现关键零部件备份供应, 同时搭建供应链应急响应平台, 快速应对供应链中断风险。

## 4 工程案例验证与应用效果

### 4.1 案例概况

以某自动化股份有限公司 5G 智能工厂建设项目为研究对象, 该项目总投资 3.2 亿元, 覆盖智能仪器仪表研发、生产、运维全流程, 采用本文构建的融合技术体系, 部署 5G 专网、工业互联网平台、柔性生产线等关键设施, 重点生产智能压力变送器、流量计等产品, 验证融合应用的实操性与有效性。

### 4.2 应用效果量化分析

对比传统生产模式, 融合体系应用成效显著: 产品研发周期从 12 个月缩短至 7.8 个月, 缩短 35%; 生产过程实现柔性化生产, 多品种产品换线时间从 2 小时缩短至 30 分钟, 生产效率提升 60%; 产品测量精度从 0.05 级提升至 0.01 级, 合格率从 98.2% 提升至 99.7%; 通过远程运维服务, 设备故障率从 8.5% 降至 4.9%, 运维成本降低 32%; 综合运营成本下降 28%, 年新增经济效益超 1.2 亿元。项目入选工信部 2024 年 5G 工厂名录, 成为仪器仪表行业数字化转型标杆案例。

## 5 融合应用落地保障机制与推广建议

### 5.1 落地保障机制

在组织保障层面, 成立由企业高层牵头的数字化转型专项领导小组, 明确技术、生产、市场等部门职

责分工, 建立定期沟通协调机制。在制度保障层面, 制定数字化转型管理制度、数据安全规范等一系列标准文件, 将融合应用效果纳入绩效考核体系。在人才保障层面, 开展智能传感、工业互联网、数字孪生等专项培训, 引进复合型数字化人才, 与高校、科研院所合作建立人才培养基地, 提升团队技术水平。

### 5.2 应用推广建议

针对大型企业, 全面推广“全流程数字化+智能化”融合方案, 重点打造智能工厂与工业互联网平台; 针对中小型企业, 推出轻量化融合方案, 优先实现生产过程与运维环节的数字化升级, 降低转型成本。推动行业标准化建设, 联合行业协会制定仪器仪表数字化接口标准、数据传输规范等, 实现不同企业、不同设备间的数据互通。强化政策支持, 建议政府出台税收优惠、资金补贴等政策, 鼓励企业加大数字化转型投入, 培育一批标杆示范企业, 通过现场观摩、技术交流等形式推广实践经验。

## 6 结束语

仪器仪表数字化转型与智能制造融合是推动行业高质量发展的必然趋势。本文构建的“四级融合体系+三维质控指标+全流程应用场景”模式, 有效解决了传统仪器仪表行业精度不足、效率低下、协同性差等难点。工程案例验证表明, 该体系可显著提升产品精度、生产效率与运维水平, 降低综合成本。未来应进一步推动技术创新, 加强量子计量、人工智能等先进技术与仪器仪表的深度融合, 完善行业标准体系, 培育复合型人才队伍, 持续推动仪器仪表行业数字化、智能化转型, 为智能制造发展提供更坚实的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 李勇波. 自动化仪表安装调试要点与维护措施[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(03): 118-120.
- [2] 邢东, 高翔. 自动化仪表系统中的控制技术应用[J]. 数字技术与应用, 2025, 43(01): 232-234.
- [3] 何玉立. 集中供热自动化系统在能效提升中的应用与效果分析[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(05): 63-65.
- [4] 刘振鹏, 杜浩. 热量计量仪表在供热系统中的精准度研究[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(09): 18-20.
- [5] 路昇. 供热系统中仪器仪表的精准监测与调控技术研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 08(11): 252-254.
- [6] 王成城, 王金江, 张来斌, 等. 智能仪表预测性维护关键技术[J]. 仪表技术与传感器, 2024(04): 29-37.

# 全过程造价管理在建筑工程中的应用研究

张 丽

(合肥工大建设监理有限责任公司, 安徽 合肥 230001)

**摘 要** 建筑工程领域长期存在造价超预算、资金浪费、各阶段管控脱节等问题,严重影响工程建设效益与建筑企业市场竞争力。本文以建筑工程全过程造价管理为研究对象,明确其核心内涵与应用价值,系统分析决策、设计、招投标、施工、竣工结算全生命周期各阶段的造价管理实施策略,并探索其优化方向。结合建筑工程全生命周期管控实际需求,从强化全流程协同、优化管控细节、适配行业发展趋势三个维度完善全过程造价管理应用路径,旨在实现工程成本的精细化、动态化管控,有效规避造价管控风险,提升资源利用效率与工程整体建设效益,为建筑工程全过程造价管理的实践应用提供参考,助力建筑企业实现高质量发展。

**关键词** 全过程造价管理; 建筑工程; 协同管控

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.024

## 0 引言

当前建筑行业步入总量收缩、结构分化的转型发展阶段,市场化造价改革持续深化,绿色智能建造技术快速推进,行业同时面临材料价格波动、资金回款周期拉长、用工成本持续上升等现实挑战。造价超预算、各阶段管控脱节等行业痛点仍未得到根本解决,严重制约工程建设效益提升与建筑企业核心竞争力培育。在此行业背景下,全过程造价管理作为贯穿工程全生命周期的系统性管控手段,成为适配建筑行业高质量发展、破解工程成本管控难题的关键路径。本文立足于新版工程量清单计价标准要求,结合行业转型发展趋势,深入探索建筑工程全过程造价管理的应用策略与优化方向,对规范建筑工程造价管控流程、规避造价管控风险、提升工程资源利用效率具有重要的现实意义。

## 1 建筑工程全过程造价管理的核心内涵与应用价值

### 1.1 全过程造价管理的核心界定

建筑工程全过程造价管理并非单一阶段的造价核算工作,而是贯穿工程决策、设计、招投标、施工、竣工结算全生命周期的系统性管控活动。其核心是以系统性思维整合各阶段造价管理环节,实现工程成本的精细化、动态化管控。该管理模式以成本节约与效益提升为双重核心目标,通过构建动态平衡的管控机制,既有效规避盲目压缩成本导致的工程质量下降风险,又避免因成本管控不当造成的资源浪费,最终实现工程成本与建设效益的最优平衡。全过程造价管理

强调全流程协同管控,打破工程各建设阶段、各管理部门之间的信息壁垒,推动设计、施工、造价、监理等相关主体形成管控合力,确保造价管理理念深度融入工程建设各环节<sup>[1]</sup>。

### 1.2 全过程造价管理的应用价值

全过程造价管理能够精准破解建筑工程领域长期存在的成本管控难点,为工程建设提质增效提供坚实的支撑。在成本控制层面,通过全生命周期的精细化管控,从工程建设源头规避无效成本消耗,有效防范造价超预算、资金浪费等常见问题,确保工程投资控制在预期范围内。在资源配置层面,依托科学的成本测算与实时的管控调整,合理调配人力、物力、财力等各类资源,避免资源闲置与配置失衡,显著提升资金使用效能,实现投资效益最大化。在工程管理层面,明确各阶段造价管控标准与实施流程,规范各参与方的建设行为,减少因流程不规范、责任不明确引发的结算争议,保障工程建设有序推进。从长远发展角度来看,全过程造价管理可通过成本优化与流程规范化,提升建筑工程的整体盈利水平,强化建筑企业的市场核心竞争力。

## 2 建筑工程全过程造价管理各阶段应用策略

### 2.1 决策阶段造价管理策略

决策阶段作为建筑工程建设的起点,其造价管控水平直接决定工程整体成本走向,对该阶段实施科学的造价管控,能够为工程全生命周期成本控制确立合理基准,从源头规避造价管控风险。项目可行性研究

作者简介:张丽(1991-),女,本科,工程师,研究方向:工程造价。

是决策阶段造价管控的核心环节，需全面调研工程建设背景、市场发展环境、技术实施条件等相关因素，精准完成投资估算工作，确保估算结果贴合工程建设实际，既不低估工程成本引发后续资金缺口，也不高估成本造成资金闲置浪费。建设方案优化是降低工程整体成本的关键举措，需结合工程功能需求，对比不同建设方案的造价水平与功能效益，平衡功能实用性与成本合理性，摒弃过度追求高端设计、忽视成本控制的不合理设计思路，选取性价比最优的建设方案。

## 2.2 设计阶段造价管理策略

设计阶段是工程造价管理的关键环节，优化设计方案能够从源头控制工程成本，实现技术先进性与经济合理性的有机融合，避免后续施工阶段因设计问题引发成本增加。限额设计是设计阶段造价管控的核心方法，需与工程投资估算深度结合，明确各专业、各施工环节的成本控制标准，将造价控制目标贯穿设计全过程，要求设计人员在满足工程功能需求的基础上，严格把控设计成本，杜绝过度设计、功能冗余等问题。设计方案优化需立足于工程建设实际，从建筑结构、材料选择、施工工艺等多维度出发，对比不同设计方案的造价差异与实施难度，选取造价合理、技术可行的最优方案，在保障工程质量与功能的前提下，最大限度降低设计阶段的造价风险<sup>[2]</sup>。

## 2.3 招投标阶段造价管理策略

招投标阶段造价管理的核心是规范管控流程、明确计价标准，科学确定合同价款，有效防范该阶段各类造价风险，保障招投标工作公平、公正、高效推进，为后续施工阶段的造价管控奠定坚实的基础。招标文件与工程量清单的编制需做到科学严谨，编制人员需全面熟悉工程设计图纸、施工方案与现场实际情况，精准计算工程量，明确工程计价标准、工期要求、质量标准等核心内容，确保清单内容完整、数据准确，避免因清单漏洞、数据误差引发后续造价纠纷。评标过程需坚持规范透明原则，构建科学的评标标准，综合考量投标单位的报价合理性、企业资质、技术能力、施工经验等因素，杜绝低价中标、恶意竞争等不良现象，择优选取报价合理、综合实力强劲的投标单位，保障工程施工质量与造价管控效果。合同条款的完善是防范招投标阶段造价风险的关键，需明确合同价款的确定方式、调整范围、结算标准以及双方的权利与义务，细化设计变更、工期调整、索赔处理等相关条款，避免因条款模糊、权责不清引发后续结算争议，为工程造价管控提供清晰的合同依据。

## 2.4 施工阶段造价管理策略

施工阶段是工程建设的核心实施环节，也是造价波动最为频繁的阶段，对施工过程实施动态造价管控，严格控制工程变更与索赔，能够确保工程造价位居合理范围，实现工程成本的有效管控。施工现场造价监管需实现常态化，重点管控材料使用、人工消耗、施工工艺等关键环节，杜绝材料浪费、人工闲置、工期延误等问题；建立完善材料领用与消耗台账，合理安排施工进度，避免因现场管理不到位引发成本上升。工程变更审批流程需做到规范严格，施工过程中出现的设计变更、工艺调整等情况，必须经各相关主体共同审核确认，明确变更原因、变更范围与变更造价，严禁未经审批擅自变更施工内容；同时严格审核变更造价的合理性，防止因不合理变更引发造价超预算<sup>[3]</sup>。工程索赔处理需坚持公平合理原则，明确索赔责任划分与计价标准，施工单位需提供完整、真实的索赔依据，建设单位与监理单位需严格审核索赔申请，杜绝虚假索赔、过度索赔等行为，合理处理索赔纠纷，保障双方合法权益，维护施工阶段造价管控的严肃性与合理性。

## 2.5 竣工结算阶段造价管理策略

竣工结算阶段是工程造价管理的收尾环节，规范结算流程、细致审核结算造价，能够确保结算工作合规高效开展，最终实现工程成本的闭环管控。竣工资料审核是结算工作的基础，需全面核查竣工图纸、施工记录、签证资料、验收报告等相关资料，确保资料真实完整、规范有效，避免因虚假资料、资料缺失引发结算偏差，为结算审核提供可靠依据。工程量与计价标准的核对需做到细致精准，审核人员需结合工程设计图纸、施工合同、工程量清单等相关文件，严格核对施工实际完成工程量，核查计价标准的执行情况，杜绝虚增工程量、高套定额、重复计价等违规行为，确保结算造价真实准确。结算争议处理需坚持公平公正、实事求是的原则，针对结算过程中出现的分歧与争议，精准梳理争议焦点，结合合同条款与行业相关规范，组织各相关主体开展沟通协商，明确解决方案，保障建设单位与施工单位的合法权益，确保竣工结算工作顺利推进，实现全过程造价管理的最终目标。

# 3 建筑工程全过程造价管理应用的优化方向

## 3.1 强化全流程协同管控

当前建筑工程全过程造价管理中，各建设阶段、各管理部门之间的信息壁垒是制约管控效能提升的核心问题，强化全流程协同管控，打破信息壁垒、凝聚

管控合力，能够显著提升造价管理整体效能。跨部门协同机制的构建是核心举措，需明确设计、施工、造价、监理、物资等各部门的造价管控职责，建立常态化沟通机制，推动各部门在工程建设全生命周期内高效配合，避免各自为战引发的信息脱节、流程衔接不畅等问题<sup>[4]</sup>。多方协同管控需覆盖建设单位、施工单位、监理单位、设计单位等所有参与主体，明确各方在造价管控中的责任与义务，推动各方树立协同管控理念，实现造价信息共享、管控策略共商、管控责任共担，形成上下联动、左右协同的造价管控合力。各阶段造价数据的无缝衔接是重要支撑，需搭建统一的造价信息管理体系，实现决策、设计、招投标、施工、竣工结算各阶段造价数据的实时共享与高效流转，避免数据重复录入、信息失真等问题，让造价管控工作能够基于完整、准确的数据分析，实现全流程动态调控。

### 3.2 优化造价管控细节

全流程造价管控的精细化程度直接决定管理成效，针对各阶段造价管控难点，细化管控手段、落实管控要求，能够切实提升造价管理的精准性，规避各类细节问题引发的造价隐患。工程量清单编制与审核流程的细化是根本，编制环节需深入解读设计图纸内容、实地勘查现场实际情况，精准计算各项工程数量，清晰界定清单项目的编码、名称、规格、计量单位等关键要素，避免清单出现遗漏或错误；审核环节需建立多级审核制度，安排专业人员对清单数据逐项核对，重点核查工程量计算准确性、清单项目完整性，降低清单偏差，为后续造价管控奠定精准的数据基础<sup>[5]</sup>。材料价格的动态管理需实现常态化，搭建材料价格跟踪机制，实时掌握建筑材料市场价格变动趋势，结合工程实际施工进度，合理规划材料采购计划，优化材料采购渠道，有效规避材料价格剧烈波动引发的造价风险。

### 3.3 适配行业发展趋势

建筑行业正朝着绿色化、工业化、智能化方向加速转型，结合行业发展特征，优化全过程造价管理模式，提升管理模式与行业发展的适配性，成为推动造价管理高质量发展的必然要求。绿色建筑、装配式建筑的快速发展为造价控制带来新的挑战，需针对性优化造价控制策略，将绿色建材选用、节能技术应用、装配式构件生产与安装等相关成本纳入管控范围，在满足绿色环保要求与成本控制目标之间寻求平衡，探索适配绿色建筑、装配式建筑的造价管控模式，推动绿色

建筑与装配式建筑健康发展。工程总承包模式的广泛应用改变了传统工程管理流程，需及时调整全过程造价管理思路，将造价控制深度融入工程总承包的设计、采购、施工、试运行全阶段，明确总承包单位与各分包单位的造价控制责任，搭建适配工程总承包模式的造价核算与控制体系，提升造价控制的针对性与实效性。行业政策的持续调整对造价管理工作产生直接影响，需密切关注行业政策变化，及时优化造价控制措施，主动适应政策在工程计价标准、成本控制要求、节能环保等方面的调整，确保全过程造价管理工作合规有序开展。

## 4 结束语

建筑工程全过程造价管理是贯穿工程全生命周期的系统性工作，直接关系到工程成本控制、资源利用效率与建筑企业核心竞争力，其应用价值在工程建设各环节均得到突出体现。本文通过梳理全过程造价管理的核心内涵，明确各建设阶段的管控重点与实施策略，提出贴合行业发展实际的优化路径，以期逐步破解建筑工程造价管理中各阶段管控脱节、信息壁垒突出、细节管控疏漏等现实难题。随着建筑行业向绿色化、工业化、智能化深度转型，全过程造价管理需持续适配行业发展趋势，不断完善协同管控机制、细化管控细节、创新管理模式。未来，还需结合工程建设实践持续探索优化，将造价管控理念深度融入工程建设每一个环节，实现工程成本与建设效益的最优平衡，为建筑工程高质量发展提供坚实保障，推动建筑行业造价管理整体水平迈向新高度。

## 参考文献：

- [1] 张钦荣. 全过程造价管理在建筑工程管理中的应用研究[J]. 砖瓦, 2024(11):146-148.
- [2] 李跃. 全过程造价管理在建筑工程管理中的应用探究[J]. 大众标准化, 2024(19):125-127.
- [3] 罗沛佩. 铁路工程项目中绿色建筑全过程造价管理分析[J]. 财富时代, 2024(09):41-43.
- [4] 徐明. BIM技术在建筑工程全过程造价管理中的应用研究[J]. 中国住宅设施, 2024(02):81-83.
- [5] 程梅, 祁巧艳. 全过程造价管理在建筑工程中的应用[J]. 住宅与房地产, 2021(34):33-34.

# 基于全生命周期的工程造价 成本控制路径探析

王波

(安徽省招标集团股份有限公司, 安徽 合肥 230041)

**摘要** 本文围绕工程项目全生命周期内造价失控、成本管控碎片化, 以及各阶段管控衔接不畅导致的投资效益偏低等问题, 结合工程项目决策、设计、招投标、施工、竣工结算全流程, 对工程造价成本控制路径展开系统研究。立足于各阶段管控核心难点, 明确投资估算精准管控、建设方案优化等决策阶段关键举措, 推行限额设计、优化设计方案筑牢设计阶段管控基础, 通过规范招投标流程、合理确定合同价款强化招投标阶段管控, 依托施工过程动态管控、变更与索赔精细化管理把控施工阶段成本, 借助结算资料审核、争议高效协调完成竣工结算阶段闭环, 以期构建全流程、多层次的造价成本控制体系, 为实现各阶段管控协同联动提供参考。

**关键词** 全生命周期; 工程造价; 成本控制; 数字化管控

**中图分类号**: TU723.3

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.025

## 0 引言

当前工程造价行业呈现总量增长、结构优化的发展特征, 全过程咨询需求日益旺盛, 数字化、低碳化转型成为行业高质量发展的核心方向。与此同时, 工程项目仍面临造价失控、管控碎片化、各阶段衔接不畅等突出问题, 制约投资效益提升, 与行业转型升级要求不相适配。在 BIM 技术普及、零碳建筑推广的新形势下, 立足于项目决策、设计、招投标、施工、竣工结算全流程, 聚焦各阶段管控痛点, 探索科学高效的成本控制路径, 构建全流程协同管控体系, 既能有效遏制造价乱象, 又能兼顾短期成本节约与长期运营效益, 为工程项目高质量推进提供支撑, 助力行业实现从“算量计价”向“价值创造”的跃迁。

## 1 工程项目决策阶段工程造价成本控制

### 1.1 投资估算精准管控

精确的投资估算是决策环节成本控制的关键点, 它的核心价值体现在从项目伊始避开投资失去控制的风险, 为设计、施工等阶段的成本管理给出明确基准, 直接决定项目投资效益的高低和投资估算的精确性。首先, 确保编制依据的完整性, 需要全面整合项目地质勘察报告、材料市场价格清单、行业政策文件、类似项目造价资料等基础信息, 避免由于资料缺失、滞后带来的估算偏差。其次, 结合项目种类与规模挑选

合适的估算模型, 住宅项目可以采用指标估算法, 工业项目适合运用系数估算法, 复杂项目则需要结合多种方法交叉验证, 借助细化估算维度提高结果的可信度。

### 1.2 建设方案优化选型

优化整个建设方案是项目决策阶段完成成本节约的一个关键抓手, 核心部分在于技术可行性和经济合理性之间需要找到最优平衡点, 从源头遏制不必要的造价支出<sup>[1]</sup>。比选论证多个建设方案, 要集中关注造价、工期、运营效益这三大核心指标, 再结合项目功能定位、地域条件、政策要求等因素, 构建差异化的方案体系, 借助比较不同方案的材料消耗、施工难度、后期维护成本, 筛选出性价比最高的建设方案。合理界定建设标准是方案优化的核心内容, 过度设计会带来无效成本的增加, 如多余的装饰造型、超出功能需求的材料规格。标准过低则会引起后期维修成本增加、使用寿命缩短的问题, 需要结合项目实际用途、目标群体来制定更贴合需求的建设标准, 实现功能与成本的匹配。兼顾项目全生命周期效益是方案优化的长远考量, 必须杜绝只关注前期建设成本的短期思维, 综合评估方案的节能性、耐久性、可维护性, 避免因为短期追求节能、降本而选择劣质材料或不合理工艺, 造成后期运营成本大幅增加, 真正实现项目全生命周期内的成本最优化。

**作者简介**: 王波 (1994), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

## 2 工程项目设计阶段工程造价成本控制

### 2.1 推行落实限额设计

限额设计是设计阶段对成本进行管控的核心方法，其根本思路是明确各个专业造价上的限额，来约束设计行为，让设计成果与投资估算以及预算要求高度匹配，从设计源头对造价规模加以把控。造价限额的设定需要做到科学合理，以项目投资估算作为基础，结合设计阶段的具体深度要求，将总限额分解到建筑、结构、水电、装饰等不同专业，明确每个专业在造价控制上的具体指标，既不能盲目压低成本从而影响工程功能和质量，也不能随意放松限额导致造价失控。建立并完善限额设计的考核机制，把造价控制的实际效果跟设计团队、设计人员的绩效直接关联，对那些严格控制限额、实现成本节约的团队给予相应奖励，而对超限额设计且没有合理理由的情况进行问责，这样能够倒逼设计人员树立起成本意识，加强设计过程中的成本动态监控<sup>[2]</sup>。

### 2.2 优化升级设计方案

设计方案优化的核心目标，是在保证工程功能完整、质量合格的基础上，尽可能减少不必要的造价开支，达到设计与成本之间的协同管理。价值工程理念给设计方案优化带来核心指引，需要将注意力放在工程核心功能上，去掉多余的功能设计，如非必需的装饰构件、超出实际使用需求的设计参数，在不干扰使用感受的条件下简化设计，降低费用。优先选择成熟、经济、节能的设计技术和材料，成熟技术能够降低施工复杂度和返工开支，经济材料可以直接减少材料采购费用，节能材料则有助于削减后期运营的能源成本，这三者结合起来，实现短期投入和长远效益的平衡。强化设计交底工作，在设计团队和施工团队之间架起顺畅的沟通机制，明确传达设计意图、技术要求、成本管控重点，防止因为设计意图理解偏差带来施工误差，降低后期设计变更出现的可能。设计方案优化需要贯穿设计的全过程，从初步设计阶段到施工图设计阶段，持续梳理设计中的成本控制点，不断优化设计细节，达成造价节省和功能保障的双重目的。

## 3 工程项目招投标阶段工程造价成本控制

### 3.1 招投标流程规范化管控

规范招投标流程是招标阶段成本控制的关键举措，核心是通过标准化、规范化的流程设计，规避围标、串标、恶意低价竞标等违规行为，确保招标过程公平、公正、高效，保障项目造价合理可控。招标文件的科

学编制是基础，需明确工程范围、计价方式、评标标准、工期要求、质量标准等核心内容，避免因条款模糊、范围界定不清导致后期造价纠纷。计价方式需结合项目特点明确，固定总价合同适用于工期短、设计成熟的项目；单价合同适用于工期长、设计变动较大的项目。评标标准需兼顾报价合理性、企业资质、技术实力等多方面因素，杜绝单纯以低价作为中标的唯一标准。

### 3.2 合同价款合理确定

合理确定合同价款是成本控制的核心目标，其关键价值在于锁定前期造价水平，明确双方权利义务，规避合同履行流程里可能出现的造价争议，为施工阶段成本控制提供清晰依据。合同计价方法的选择需要符合项目实际情况。固定总价合同能够锁定总体造价，降低后期价款更改风险，适合设计完善、工期比较短的项目；单价合同可以灵活应对设计变更，适合工期较长、设计存在不确定性的项目；成本加酬金合同则适用于紧急项目或技术难度极高的项目，需要根据项目具体情况灵活选用<sup>[3]</sup>。明确合同价款调整范围、方式和程序，清晰界定人工、材料、机械价格波动，以及设计变更、现场签证等导致价款调整的具体情形，明确调整计算方法和审批流程，降低后期索赔隐患，细化合同条款，明确建设单位与施工单位的权利义务，对工程质量、工期、付款方式、违约责任、争议解决等内容进行详细约定，避免模糊条款带来的权责不清、造价增加。

## 4 工程项目施工阶段工程造价成本控制

### 4.1 施工过程成本动态管控

施工阶段是造成工程造价消耗的核心环节，成本动态管控的核心在于实时跟踪实际成本与预算成本的偏差，及时采取调整动作，确保实际成本控制在预算范围内，防止成本失控。建立完善的施工成本动态监控体系，明确监控主体、监控内容、监控频率，实时收集人工、材料、机械等各项成本数据。对比分析实际消耗与预算标准的差异，精准定位偏差产生的原因，如材料价格上涨、人工效率不高、机械闲置等情况。优化施工方案成为控制施工成本的关键点，结合施工现场实际状况，合理安排施工工序，避免工序交叉冲突带来的工期延误和成本浪费。优化施工工艺，提高施工效率，减少人工和材料消耗，加强施工现场管理，严控材料损耗，建立材料采购、入库、领用、消耗的全过程管理机制，合理规划材料堆放，减少材料损耗和浪费。

## 4.2 施工变更与索赔精细化管理

施工变更和索赔的精细化管理在施工环节成本控制中占据重要位置,其核心是通过规范流程、明确权责,严格把控不必要的变更和超出额度的索赔,防止由于变更、索赔缺乏依据引发的造价失去控制。建立一套严格的施工变更审批机制,将变更申请、审核、批准的流程和权限加以明确,施工单位在提出变更申请时,需要详细描述变更原因、变更内容、对成本造成的影响,经由建设单位、设计单位、监理单位共同审核,确认变更具备必要性且合理,坚决杜绝没有正当理由的变更。规范索赔管理流程,明确索赔的适用情况、申请的时间限制、证据的具体要求,施工单位必须及时收集、整理与索赔相关的证据材料,如现场签证、设计变更文件、气象记录、施工日志等,合理界定索赔范围和涉及金额,避免超额索赔和虚假索赔的发生<sup>[4]</sup>。加强变更、索赔的成本核算工作,对变更带来的额外成本、索赔金额进行精确核算,结合项目预算和实际成本情况,评估变更、索赔对总造价带来的影响,确保变更、索赔成本被控制在合理范围内。

## 5 工程项目竣工结算阶段工程造价成本控制

### 5.1 结算资料规范化审核

规范审核结算资料是竣工结算阶段成本控制的基础,严谨审核,保证结算数据真实、准确、合规,去掉虚增造价,保障项目结算成本合理可控。结算资料的审核需要聚焦完整性、真实性、合规性三个核心,完整性要求审核结算资料包含工程量清单、竣工图纸、现场签证、设计变更、验收报告、材料价格证明等全部相关文件,防止资料缺失带来的结算偏差;真实性要求核查结算资料跟实际施工情况一致,防止虚假签证、虚增工程量、虚报材料价格等违规行为;合规性要求审核结算资料符合行业规范、合同约定、政策要求,保证结算流程、计价标准合规。工程量核对是结算审核的核心环节,需要对照竣工图纸、现场实际情况,逐一核对工程量计算的准确性,重点核查隐蔽工程、变更工程的工程量,避免多算、漏算、错算。定额套用与取费标准的审核同样关键,需要确认定额套用跟工程实际相符,避免定额错套、高套,严格按照合同约定和行业标准审核取费标准,防止取费超标、重复取费,保证结算造价真实反映项目实际成本<sup>[5]</sup>。

### 5.2 结算争议高效协调

高效协调结算争议是借助建立规范的协调机制、强化多方沟通,迅速化解结算分歧,压缩结算周期,防止因争议拖延带来的成本上升,达成竣工结算阶段

的成本闭环管控。设立专门的结算争议协调机制,明确争议处理的流程、方式和时限,组建由建设单位、施工单位、监理单位、造价咨询单位构成的协调小组,负责统筹协调结算过程中各类争议,确保争议获得及时处理。强化多方沟通协商,针对结算过程中出现的工程量争议、定额套用争议、材料价格争议等,组织各方展开充分沟通。结合合同约定、行业规范、现场实际情况,明确争议处理思路,兼顾各方合理利益,防止矛盾激化。借助专业人员提供技术支持,邀请造价专家、行业学者参与争议协调,针对复杂争议问题,给出专业的技术指导和解决方案,确保争议处理公平、合理,防止因专业不足带来的争议长期拖延。借助高效的争议协调,加快结算进度,减少结算过程中的额外成本支出,确保项目竣工结算工作顺利结束,实现全生命周期成本控制的闭环。

## 6 结束语

工程项目全生命周期造价成本控制是一项系统性、综合性的工作,贯穿项目决策至竣工结算的全过程,各阶段管控环环相扣,相互影响,缺一不可。决策阶段的精准估算与方案优化奠定成本管控基础,设计阶段的限额管控与方案升级筑牢成本控制核心,招投标阶段的流程规范与价款锁定规避前期风险,施工阶段的动态管控与变更管理把控成本消耗,竣工结算阶段的资料审核与争议协调实现管控闭环。唯有立足于全生命周期视角,打破各阶段管控壁垒,强化协同联动,将成本管控理念融入每一个环节,兼顾短期成本节约与长期运营效益,才能有效遏制造价失控问题,提升项目投资效益。未来,可结合行业发展趋势,进一步完善管控体系,融入数字化技术,推动成本管控向精细化、智能化升级,为工程项目高质量发展提供更有力的支撑。

## 参考文献:

- [1] 郑焕杰.公路工程全生命周期造价管理措施[J].工程技术研究,2025,10(20):152-154.
- [2] 薛宇琨.全生命周期视角下的建筑工程造价管理研究[J].中国房地产业,2025(26):30-33.
- [3] 孙海云.全生命周期视角下智能家居的工程造价影响机制[J].工程造价管理,2025,36(04):80-83.
- [4] 刘宏文.建筑工程全生命周期造价管理方法研究[J].低碳世界,2025,15(06):99-101.
- [5] 张少楠.基于全生命周期的建筑工程造价风险管理探究[J].房地产世界,2025(11):95-97.

# 建筑施工全过程环保监测与数字化管控融合研究

范存存<sup>1</sup>, 魏文龙<sup>2</sup>, 张超<sup>3</sup>

- (1. 山东环发海若环境技术有限公司, 山东 青岛 266000;  
2. 北京中铁诚业工程建设监理有限公司, 北京 丰台 157000;  
3. 青岛德勤环境科技有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要** 建筑施工全流程涵盖土方开挖、主体施工、装饰装修等多个环节, 易产生扬尘、噪声、污水、固体废物等污染。传统环保监测存在诸多弊端, 已难以满足全流程精细化管控要求。基于此, 本文结合建筑施工环保监测需求与数字化管控技术特点, 构建全过程环保监测与数字化管控融合体系, 优化监测指标、整合管控流程, 并通过试验验证其可行性与有效性。依托物联网、大数据、无线传输技术搭建数字化监测平台, 实现多污染物实时监测、数据采集、分析预警与精准管控, 结合各环节要求制定专项管控策略。试验结果显示: 融合体系可将扬尘噪声监测响应时间缩短80%以上, 监测数据准确率提升至98%, 污染物超标预警准确率达95%, 管控效率提升60%以上, 有效降低了污染发生率。

**关键词** 建筑施工; 全过程环保监测; 数字化管控; 污染管控

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.026

## 0 引言

建筑施工全过程工序复杂、作业面分散, 各施工环节易产生扬尘、噪声、污水、固体废物等污染, 不仅影响周边环境与居民生活, 还会制约施工合规开展。传统环保监测多为人工离线检测, 存在监测滞后、覆盖有限、数据与管控脱节等问题; 数字化管控技术虽广泛应用于施工管理, 但在与环保监测融合中仍存在技术适配不足、流程衔接不畅等短板。本文聚焦两者融合核心, 明确融合技术路径与实施要点, 构建科学的融合体系, 优化监测与管控流程, 通过试验验证体系有效性, 解决传统环保管理短板, 实现施工环保精细化、数字化管控。

## 1 相关理论与技术基础

### 1.1 建筑施工全过程环保监测核心内容

建筑施工全过程环保监测覆盖施工全工序, 核心是监测各类污染物, 结合工序特点确定监测指标与范围, 确保监测全面、重点突出, 为管控工作提供可靠数据支撑。

核心监测内容包括: 扬尘监测重点关注PM10、PM2.5

浓度, 覆盖施工边界及周边敏感点; 噪声监测聚焦施工机械与运输噪声, 监测等效连续A声级; 污水监测针对施工及生活污水, 重点检测pH值、COD、SS等指标; 固体废物监测关注产生量、堆放及处置情况, 杜绝乱堆乱放。

环保监测需遵循实时性、精准性、全面性原则, 根据施工工序调整监测频次与重点, 确保监测数据真实反映施工环保现状。

### 1.2 数字化管控核心技术

建筑施工数字化管控以数字化、智能化为核心, 核心技术包括物联网、大数据、无线传输及可视化技术<sup>[1]</sup>, 为两者融合提供支撑: 物联网通过部署各类传感器实现污染物实时采集与传输; 大数据处理海量监测数据, 识别污染隐患与趋势; 无线传输保障数据实时稳定; 可视化技术实现监测与管控直观化。

物联网技术是融合体系的核心支撑, 通过在施工区域部署各类传感器(扬尘传感器、噪声传感器、水质传感器等), 实现污染物指标的实时采集与数据传输, 传感器可实时捕捉监测数据, 通过无线传输模块将数据上传至数字化管控平台, 实现监测数据的实时更新;

作者简介: 范存存(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 环保工程。

大数据技术用于处理海量监测数据，通过数据清洗、分析、挖掘，识别污染物浓度变化规律、污染隐患及超标趋势，为管控决策提供数据支持；无线传输技术采用 5G、WiFi 等传输方式，确保监测数据传输的稳定性与实时性，解决施工区域信号不稳定、数据传输滞后的问题；可视化技术将监测数据、施工工况、管控措施等以图表、动画等形式呈现，实现环保监测与管控的可视化、直观化，便于管理人员实时掌握施工环保现状。

数字化管控平台作为融合核心载体，整合数据采集、分析预警、指令下发、处置反馈等功能，实现环保监测与管控协同联动，打破数据壁垒<sup>[2]</sup>。

### 1.3 两者融合的核心逻辑

两者融合的核心是构建“监测数据驱动管控决策、管控措施反哺监测优化”的协同机制，将监测数据与数字化管控流程、技术结合，解决两者脱节问题。

融合逻辑体现在三个方面：数据融合实现监测与施工、管控数据共享；流程融合将监测嵌入管控全流程，形成“监测—预警—处置—反馈”闭环；技术融合优化监测方式，提升管控精准度。

## 2 研究方法与融合体系构建

### 2.1 研究方法

本文采用试验研究与理论分析结合的方法，通过理论分析明确融合需求、路径与要点，构建体系框架；选取典型住宅施工项目开展试验，设置传统管理对照组，对比分析体系应用效果，验证其可行性与优越性。

试验涵盖施工全工序，周期 6 个月，重点监测扬尘、噪声、污水等核心污染物，对比监测精度、管控效率、污染发生率等指标，保障试验结果真实可靠。

### 2.2 融合体系构建

#### 2.2.1 体系框架

融合体系以“实时监测、数据驱动、精准管控、闭环管理”为核心，构建“监测层—数据层—管控层—应用层”四层框架，各层协同联动，实现深度融合。

监测层负责实时采集环保指标，合理部署传感器确保覆盖无死角；数据层负责数据接收、存储与分析，挖掘数据关联与污染趋势；管控层根据分析结果下发指令、处置隐患，形成闭环；应用层为管理人员提供可视化、预警、指令下发等功能，支撑管控决策。

#### 2.2.2 核心内容与实施路径

1. 监测指标与传感器部署：结合建筑施工各工序污染排放特点，优化完善环保监测指标体系，明确各

污染物监测标准严格参照国家及行业相关规范执行，合理设定监测频次以兼顾监测精准性与效率——扬尘（PM10、PM2.5）每 10 分钟监测 1 次，噪声每 30 分钟监测 1 次，污水每日监测 1 次，固体废物每周监测 1 次。传感器部署遵循“重点区域加密、一般区域全覆盖”的原则，在土方开挖区、物料堆放场、污水处理点、施工出入口等污染高发区域，加密部署扬尘、噪声及水质传感器；在施工边界及周边 500 米内敏感点，合理部署监测设备，确保监测覆盖无死角、无盲区，同时定期对传感器位置进行动态调整<sup>[3]</sup>，适配施工工序变化，保障监测数据的精准性与全面性，为后续管控决策提供可靠的数据支撑。

2. 数字化管控平台搭建：搭建建筑施工环保监测与数字化管控一体化平台，整合数据采集、实时分析、预警提示、指令下发、处置反馈、历史查询等核心功能，实现监测数据与管控流程的无缝衔接。平台支持电脑端、移动端（手机 APP）双重访问模式，方便管理人员随时随地查看监测数据、接收预警信息、下发管控指令。平台内置灵活的阈值设置功能，可根据不同施工阶段、不同污染物类型，设定对应的超标阈值，当监测指标超过预设阈值时，系统自动触发声光预警，同时通过短信、APP 推送等方式，将预警信息精准推送至项目负责人、现场管理人员等相关人员，明确预警等级、超标指标及具体位置，确保超标信息及时传递、快速响应，为污染隐患的及时处置争取时间。

3. 流程融合与闭环管理：将环保监测流程深度嵌入建筑施工全工序，从施工准备阶段的监测设备部署、监测方案制定，到工序施工阶段的实时监测、数据分析，再到竣工验收阶段的监测数据汇总、环保效果评估，实现监测工作与施工流程同步推进。构建“监测—预警—处置—反馈”的闭环管理机制，监测数据实时上传至数字化管控平台后，数据层快速完成分析处理，若发现指标超标或存在污染隐患，立即发出预警；管控层根据预警级别，快速下发针对性处置指令，明确处置要求、责任人和完成时限；现场管理人员接到指令后，及时落实处置措施，处置完成后，将处置过程、处置结果上传至平台，由管控层进行复核，确保污染隐患及时处置、整改到位，形成闭环管理，避免出现“监测与管控脱节”“隐患处置不彻底”等问题。

4. 管控策略制定：结合建筑施工各工序的环保特点与污染排放规律，制定针对性的融合管控策略，实现精准管控、分类施策。土方开挖环节重点管控扬尘与噪声，采取洒水降尘、覆盖防尘网、设置围挡等措施，

合理规划施工时段，避免夜间施工噪声扰民；混凝土浇筑环节重点管控污水排放，设置沉淀池、过滤池等污水处理设施，确保混凝土养护废水、冲洗废水经处理达标后再排放；装饰装修环节重点管控挥发性有机物（VOCs）与固体废物，优先选用环保型装修材料<sup>[4]</sup>，规范固体废物分类堆放、集中处置，严禁随意丢弃；运输环节重点管控扬尘与噪声，运输车辆加盖篷布、冲洗干净后出场，合理规划运输路线，避开居民集中区域和交通高峰期，从各环节源头减少环境污染。

### 2.2.3 质量控制措施

采取严格的质量控制措施，保障融合体系稳定运行与试验结果的准确性、可靠性。传感器定期进行校准，每月校准1次，委托具备资质的第三方机构开展校准工作，确保监测数据的精准度，对校准不合格的传感器及时更换；监测数据实行实时备份与定期存档制度，采用云端存储与本地备份双重模式，避免数据丢失、损坏，同时定期对数据进行清洗、校验，剔除异常数据，确保数据的真实性与有效性；数字化管控平台安排专人负责日常维护，每周进行1次系统排查，及时处理系统故障、优化系统性能，确保平台稳定运行；试验过程中，同步记录施工工况、环境温度、湿度等相关信息，避免环境因素、施工工况变化对试验结果造成影响；明确专人负责环保监测与管控工作，细化岗位职责，加强现场巡查，确保管控指令执行到位、处置结果及时反馈，全方位保障融合体系的运行质量与试验数据的科学性<sup>[5]</sup>。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 试验结果

试验周期内，分别对融合体系应用组与传统管理对照组的监测精度、管控效率、污染发生率等指标进行统计分析，结果如下：（1）监测精度：融合体系应用组扬尘、噪声、污水监测准确率分别达98%、97.5%、99%，显著高于传统管理组（75%、72%、80%），有效避免数据失真。（2）管控效率：融合体系监测响应时间缩短80%以上，污染隐患处置时间缩短75%，整体管控效率提升60%以上，实现隐患快速处置。（3）污染发生率：融合体系扬尘、噪声、污水超标及固体废物乱堆乱放发生率分别为2.3%、1.8%、0.5%、0.3%，远低于传统管理组，管控效果突出。（4）数据利用率：融合体系数据利用率达95%，可形成趋势报告支撑决策，传统管理组仅40%，数据价值难以发挥。

### 3.2 结果讨论

试验表明，融合体系可有效解决传统环保管理短板，核心优势体现在实时性、精准性、协同性，能及时发现隐患、精准支撑决策、实现闭环管控。

体系发挥作用的核心是实现监测数据与管控流程深度绑定，贴合施工工序制定管控策略。同时也发现不足：部分区域传感器信号不稳定、大数据模型适配性不足、管理人员操作能力参差不齐，后续需针对性优化。

同时，试验过程中也发现融合体系存在的不足：一是传感器部署受施工工况影响较大，部分施工区域（深基坑等）信号不稳定，导致数据传输偶尔出现延迟；二是大数据分析模型的针对性有待优化，对不同类型施工项目的适配性不足；三是现场管理人员的数字化操作能力参差不齐，部分人员对平台操作不熟练，影响管控效率。针对上述问题，后续可优化传感器部署方案，采用信号增强技术解决信号不稳定问题；完善大数据分析模型，提升对不同施工项目的适配性；加强现场管理人员的培训，提升数字化操作能力，进一步优化融合体系。

## 4 结束语

本文通过理论分析与试验研究，明确两者融合逻辑、路径与要点，构建四层融合体系，优化监测与管控流程，验证了体系的可行性与有效性。结果表明，融合体系可显著提升监测精度与管控效率，降低污染发生率，解决监测与管控脱节问题，为建筑施工环保管理提供科学技术方案，推动行业绿色智能化发展。本文的研究存在局限性，对不同类型施工项目的融合适配性不足，融合深度有待提升。未来将优化体系参数，加强新技术应用，完善分析模型，探索推广路径，为行业绿色发展提供更有力的支撑。

### 参考文献：

- [1] 陈祖荣,徐月明.工程数字化现场管控体系的构建[J].中国电力企业管理,2022(06):27-29.
- [2] 李强,邱伟刚,穆启升.建筑施工质量数字化管控体系的构建与实践[J].中国品牌与防伪,2025(04):131-133.
- [3] 刁玉雷,方超,卢业宁,等.房屋建筑工程深基坑变形监测技术研究[J].砖瓦,2024(06):81-83.
- [4] 张敏玉,李海东.基于绿色环保理念的建筑施工管理研究[J].建筑技术研究,2021,04(01):56-58.
- [5] 李海龙.工程检测对建筑工程质量控制的重要性分析[J].产品可靠性报告,2025(07):149-150.

# 高比例分布式能源接入下的零碳产业园 微电网稳定控制与市场化交易机制研究

李 胜

(中铁铁工城市建设有限公司, 北京 102600)

**摘 要** 随着能源结构由集中式向分布式、由单一化向多元化转型, 传统电力系统的调度逻辑与运行模式正面临系统性重构。本文构建了“源—网—荷—储”一体化技术体系, 重点分析系统运行特征与架构演化规律。在此基础上, 提出基于虚拟惯量、储能快速调节及多时间尺度协调的稳定控制策略, 并进一步设计园区内电力现货交易、辅助服务补偿及动态定价机制, 旨在对实现技术控制与市场信号的协同耦合有所裨益。

**关键词** 分布式能源; 零碳产业园; 微电网; 市场化交易机制

中图分类号: TM73; F426.61

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.027

## 0 引言

零碳产业园作为新型能源系统的重要实践载体, 其核心在于通过高比例分布式能源接入, 实现能源自平衡与低碳运行。随着光伏、风电等新能源渗透率不断提升, 传统电力系统基于同步机惯性支撑与集中调度的运行逻辑受到显著冲击, 系统频率稳定性、电压支撑能力以及供需动态匹配能力均面临新的挑战。与此同时, 零碳产业园的运行不再局限于技术层面的稳定控制, 而逐渐呈现出“技术系统—市场机制—运营模式”协同发展的特征<sup>[1]</sup>。

## 1 零碳产业园微电网运行特征

### 1.1 多源耦合特征

零碳产业园微电网形成的是“源—网—荷—储”深度融合的整体架构, 从能源方面看是以分布式光伏发电、分布式风电、储能设施为主构建起来的模式。在零碳产业园里, 光伏系统的装机量一般可达 60%~75%, 储能系统的配备量大约是 20%~30%, 通过 10 kV 或 35 kV 配电网来进行区域性的电力供需调节。相较于传统的集中型电源而言, 这样的多点接入形式大幅提高了能源利用率, 但是也存在电源分布过于分散、调度难等问题。

### 1.2 波动与不确定性

当有较大比例的新能源接入的情况下, 微网的功率输出表现出很大的随机抖动特性。例如: 光伏发电系统在晴转阴骤变的过程中, 其出力可在短短的几分

钟内上升或是下降 20%~40%, 而风力发电机的输出功率也可以产生额定功率 30% 以上的剧烈跳变, 使得系统频率出现较大的偏差<sup>[2]</sup>。如果没有相应的调控措施的话, 该频率的变化会达到  $\pm 0.2$  Hz, 远远超过理想的运行区间 ( $\pm 0.05$  Hz)。

### 1.3 负荷柔性增强

零碳产业园区内用电负荷结构朝着灵活化的趋势发展, 在对工业负荷、电动汽车充电、空调系统等方面而言, 其可调节性也得到了很大程度上的提高。从园区的实际情况来看, 能够进行调节的柔性负荷占整个负荷总量的比例一般会达到 25%~40%, 而且充电负荷可调率甚至达到了 60% 以上。基于需求响应调控机制的作用之下, 企业园区可以在 15~30 分钟之内完成大约 10%~20% 之间的负荷转移量, 达到平滑用电曲线的目的。

## 2 高比例分布式能源接入下的零碳产业园微电网的架构分析

在高渗透率分布式电源接入情况下, 零碳园区微电网逐渐从传统的“配电网延伸结构”转变为“源—网—荷—储—控”的集成模式, 主要目的已不仅仅是输送电力, 而是要依靠多层次节点联动来完成对能量流、信息流以及价值流的统一调度<sup>[3]</sup>。该模式注重分级管控、区域独立以及平台运营, 满足新能源随机性和市场机制运行的要求。典型零碳产业园微电网架构配置参数如表 1 所示。

零碳产业园微电网也不再是单一的电力系统, 它

作者简介: 李胜 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 经营开发。

表1 典型零碳产业园微电网架构配置参数

模块类别	子系统构成	装机 / 容量	响应时间	控制方式	数据交互周期
电源侧	分布式光伏	45 MW	≤ 1 s	MPPT+VSG	1 s
	分散式风电	18 MW	≤ 2 s	下垂控制	2 s
储能侧	锂电储能系统	20 MW/40 MWh	≤ 100 ms	双向变流控制	0.5 s
负荷侧	工业可调负荷	25 MW	≤ 5 min	需求响应	5 min
	充电负荷	12 MW	≤ 1 min	聚合控制	1 min
网络侧	配电网(10kV)	80 MW 承载能力	—	潮流控制	2 s
控制层	微电网主控系统	—	≤ 200 ms	分层协调控制	1 s
平台层	能源管理与交易平台	—	≤ 1 min	优化调度 + 交易撮合	5 min

是一个具有多维度耦合特征的多能系统，在电源端分布式能源占到70%以上并且以光伏及风电为主，对它们的控制策略也由传统的最大功率跟踪逐渐向能够提供惯量支撑的虚拟同步控制过渡；同时，新能源不再仅是生产电能的角色，在其中还起到了一部分系统稳态的作用。

在网络及控制系统方面，10 kV配电网具有电力输送以及局部调整的功能，而微电网主控系统通过对系统的分层控制来达到对整体优化和局部自主的统一，其控制时延不超过200 ms，可以满足动态稳定的需要。

### 3 高比例分布式能源接入下的零碳产业园微电网稳定控制策略

#### 3.1 虚拟惯量与频率支撑控制

对于较高渗透率下分布式电源接入情况，系统转动惯量大幅度降低、频率容易受到负荷波动的影响增大，所以要进行虚拟惯性控制以补充系统的惯性不足。实现方法就是在光伏并网逆变器以及储能变流器里加入虚拟同步机(VSG)控制器，设置等效惯量常数(一般为2~6 s)，阻尼比(0.5~1.5)，使逆变器具有类似同步发电机的频率动态特性。

在实际应用过程中，对于系统的负荷突然增加5 MW的情况来说，没有使用VSG的情况下电网频率降低可以达到0.18 Hz，在加入了虚拟惯性之后电网的频率变化就可限制在0.05 Hz以内，回复时间也只需要3~5 s<sup>[4]</sup>。并且利用有功功率下的下垂特性来协调多个电源间的有功功率分摊，防止一个电源过度负担，这种方法就是用“控制模拟物理惯量”的方法增强电力系统的暂态稳定性，在弱电网或者是孤岛状态下尤为重要。

#### 3.2 储能快速调节与功率平衡控制

储能系统是微网稳定运行的重要组成部分，它对系统的抗干扰程度有着决定性的作用，在示范型零碳

园区里，储能装置的装机容量一般占到新能源装机容量的20%~30%，功率占比在0.5C~1C左右，保证具有较强的充放电速度，控制系统方面运用“频率—功率”的双闭环控制系统，使得储能装置能够在频率出现大于等于±0.03 Hz后自动参与调节，它的反应速度不超过50~100 ms，正常运行下光伏出力在10 min内减少了30%(大约15 MW左右)的情况下，储能系统能在1 s内提供10 MW功率用于调节，把功率变化的范围降到最初的40%以下。

#### 3.3 多时间尺度协调控制策略

微网运行包括从毫秒级动态调节到小时级最优化决策的一系列不同时间尺度的问题，所以要形成一个分级协同的控制系统<sup>[5]</sup>。在短期内(0~1 s)，利用逆变器调节、储能的快速调节来抑制频率、电压的变化等；在中期(1~15 min)，用滚动优化调度调整储能出力以及可调负荷分摊比例；而在长期(大于1 h)时采用预测模型(新能源预测误差一般控制在±10%左右)来进行日内的调节优化。例如：在典型运行工况下，应用日前预测加滚动修正的方法可以使调度误差由原来的15%下降到小于6%，从而节省大约20%的备用能力。并且，在此基础上增加模型预测控制法(MPC)，对未来的负载及发电情况提前做出预测并及时采取措施，在其变化之前就有所准备。此方法采用“预测—调度—反馈”的闭环方式，能够把各个不同时间段的控制联系在一起。

#### 3.4 柔性负荷协同调节控制

在高占比新能源背景下，仅通过电源侧调节不足以彻底抵消波动冲击的作用，在此情况下应充分发挥负荷侧调节能力的作用。零碳园区中可调负荷占比一般可达其总负荷量的30%以上，其中主要包含着工业负荷及充电负荷等。以价格信号联动和控制指令双轮驱动的方式，当系统频率偏移幅度大于等于±0.05 Hz

或者电价变动幅度大于等于 20% 时, 就会引起负荷做出相应的反应。而实际运行中, 对于工业负荷可以在短时间内作出 10% ~ 15% 的功率变动; 充电负荷也仅需一分钟时间就可以做到 20% 以上的功率减小或者转移出去。例如: 在晚高峰期间, 负荷侧调节能削减系统最高负荷达到 8 MW 左右, 降低峰谷差达 30% 及以上的水平。在具体措施上, 园区可以建设负荷聚合控制系统、将分散负荷进行统一管理, 它的响应准确度可以做到  $\pm 2\%$  内。这样的方式就是把负荷变为“可调资源”, 实现了发用电侧联合调节的能力增强的同时也为其后市场交易打下了良好的基础。

#### 4 大比例分布式电源接入下的零碳园区微电网市场交易规则研究

##### 4.1 园区内多主体电力现货交易机制

零碳产业园区内部要搭建一个针对多方参与者的电力现货市场, 在此平台之上能够让分布式电源、储能装置、用电客户能够开展即时的交易。即在园区内建立周期为 5 ~ 15 min 的滚动出清模式, 将边际电价设定为市场的信号源, 从而达到供求平衡的目的。

在标准运行条件下, 光伏出力足的时候, 园区电价可以降低到 0.25 ~ 0.35 元/kWh, 让企业提高用能或是储能充电; 而新能源出力不够或者负荷高峰的情况下, 电价可以升高到 0.70 ~ 0.90 元/kWh, 使负荷侧降低用能或者是放电储能。这样园区内的新能源就地消纳率就可以从原来的 75% 左右提高到 90% 以上, 减少了对购电的比例 20% ~ 30%。从技术上来说, 交易平台要实时与微电网控制系统连接起来, 通过数据采集频率(一般为 1 ~ 5 min), 达到电价及调度同步更新的效果, 形成一个完整的“价格引导调节”闭环控制过程。

##### 4.2 基于辅助服务的价值补偿机制

高比例分布式电源系统稳定性的保障很大程度上取决于储能以及柔性负载所提供的调节支持, 所以要建立一个辅助性服务市场来评价补偿频率调整、电压支撑以及备用容量等服务的价值。

园区在建设初期即可把调频服务根据反应时间划分为两类: 快速( $\leq 1$  s)、一般( $\leq 10$  s), 并相应地给予补偿价格为 0.8 ~ 1.2 元/kW·次、0.4 ~ 0.6 元/kW·次; 对于备用容量则以能够供电量来进行补偿量(约为 50 ~ 80 元/kW·年)。储能装置通过提供调频服务来获得收入, 每年收益可达到总收入的 30% 及以上; 而工业企业所付出的备用容量以及削峰等服务所获取的经济补贴也足以抵消其 10% 左右的电费开支。该机制的关键点就是把“稳定性贡献”的价值变现为可以买

卖的经济效益, 让原本需要系统免费提供的调频义务变成市场化的刺激, 提高各方面主体对于系统调频的积极性, 在技术上提升微网本身的自我调节功能。

##### 4.3 技术—交易耦合的动态定价机制

为了使技术创新同市场竞争相结合, 需要建立起一种以运行状态为基础的动态电价体系, 把系统的频率、电压以及功率的裕度这些重要的参数转换成市场价格信息, 可以设立“状态变量—价格映射模型”, 当系统的频率偏移值  $\geq \pm 0.04$  Hz 或者备用电源  $\leq 20\%$  的时候, 就启动价格的上升机制, 即上涨大约在 15% ~ 30%, 如果此时处于比较充裕的状态下, 那么价格就会降下来, 这样就使得价格不只是传递了供求信息, 同时也传递了系统运行的安全水平。

在实际操作中, 该措施可促使储能反应时效加快大约 25%, 负荷侧反应比率提升到 85% 以上, 大大地提高了整个系统的调节水平。并且能够借助于微电网控制系统的信息接口联动(信息刷新时间小于 1 min), 做到电价信号、控制措施的同步协调, 让“控制指令驱动”过渡到“价格信号驱动”。其实质就是建立起一个基于技术条件下的市场反馈体系, 使得微电网在确保自身安全的基础上达到资源调配水平的最大化。

#### 5 结束语

在能源系统由集中走向分布、由单一走向协同的发展过程中, 零碳产业园微电网已逐步成为新型电力系统的重要实践单元, 其运行逻辑呈现出由“技术主导”向“技术与市场协同驱动”的深层转变。围绕高比例分布式能源接入带来的不确定性与波动性, 单纯依赖控制技术已难以支撑系统长期稳定运行, 必须通过控制策略与市场机制的耦合, 重构能源系统的运行逻辑与价值实现路径。

#### 参考文献:

- [1] 张锋, 张怡, 张炜, 等. 县域电网视角下零碳园区建设路径探析与对策研究[J]. 农村电气化, 2025(11):1-7.
- [2] 顾用祥, 李苗苗. 5G 网络与智能电网的融合与应用[J]. 农电管理, 2025(11):27-28.
- [3] 周颖, 白保华, 蒲田, 等. 零碳产业园的构建与示范[J]. 化工进展, 2025, 44(07):4282-4286.
- [4] 李永鹏, 王宏霞. 打造智慧零碳电力系统推动绿色低碳发展: 国网青海电力服务青海首个零碳产业园发展侧记[J]. 农村电工, 2022, 30(12):28.
- [5] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(04):70-79.

# 化工设备安装中焊接质量控制探究

任贵祯

(五冶集团上海有限公司, 上海 201900)

**摘要** 化工设备是化工生产的重要组成部分,其安装质量对生产的安全、稳定和运行寿命有重要影响。化工设备大多工作在高温、高压、强腐蚀等严苛的环境中,并且经常使用易燃易爆、有毒有害的介质,如果焊接接头的强度、密封性和耐腐蚀性达不到标准,就容易发生泄漏、断裂等安全事故,从而导致巨大的经济损失,甚至造成人身伤害。本文结合化工设备安装的实际情况,从焊接前准备、焊接过程控制、焊接后检测三个关键环节对化工设备安装过程中的焊接质量进行了分析,并制定了有针对性的质量控制方法,再根据工程实例,对控制过程进行了优化,旨在保证化工设备的安装和焊接质量达到工业规范和生产要求,为化工设备的安装和焊接工作提供具有实操性的参考。

**关键词** 化工设备安装; 焊接质量; 全流程控制

**中图分类号**: TQ053.2; TG44

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.028

## 0 引言

化工工业是我国国民经济的支柱工业,而化工设备是其生产的重要组成部分,其安装的好坏直接影响到整个化工生产的持续、安全和经济效益。焊接作为化工设备安装的核心工序,在整个安装过程中起着至关重要的作用。化工设备长期工作在高温、高压、强腐蚀等复杂条件下,如果焊接部位出现裂纹、气孔等缺陷,很容易导致介质泄漏,从而导致安全事故、设备损坏和生产停顿,危及人身安全和生态环境。目前,化工设备的安装与焊接还存在选材不规范、工艺参数不准确、工人技能水平不高、检测手段不完备等问题,致使生产过程中出现了许多缺陷。研究成果为化工设备安装与焊接质量管理提供实践指导,对提高安装质量、保证生产安全稳定运行具有重要意义。

## 1 化工设备安装中焊接质量的影响因素

### 1.1 材料因素

焊条、焊丝、焊剂、保护气等材料的选择是否合理是保证焊接质量的根本。化工设备的焊接材料不仅要与母材具有相匹配的特性,而且要能够适应苛刻的工作环境,例如:果选材不合理或者品质不合格,很容易出现焊接缺陷。如在不锈化工容器的焊接中,如果选择非奥氏体钢,则会降低焊缝的耐蚀性能,长时间使用容易产生点蚀和裂纹;如果焊条受潮、锈蚀,或熔剂中的杂质含量超过规定标准,将导致焊缝出现

气孔、夹渣等缺陷;当保护气的纯度不够时,将引起焊缝表面的氧化,从而降低焊缝的强度及密封性能。母材自身的质量对焊缝质量也有很大的影响,如果母材中含有裂纹、夹杂物和气孔等原始缺陷,则会造成焊缝裂纹的扩展,从而降低焊缝的质量。

### 1.2 工艺因素

焊接工艺参数是否合理,焊接过程是否规范,是焊接质量的关键。在化工设备的焊接中,通常采用埋弧自动焊、手工电弧焊、氩弧焊等工艺方式,这些方法的应用场合各不相同,如果不恰当地选用工艺,将会造成产品的质量不合格。例如:低温容器和低温管道的焊接不应使用埋弧自动焊,而在高温、压力较大的设备中应使用氩弧焊;如果不对焊接过程中的电流、电压、速度、预热温度、层间温度等进行精确控制,则会对焊缝成形及焊缝质量产生不利影响。过高的焊接速度会造成焊缝的不饱满,过低的焊接速度会造成焊缝过热和晶粒粗大,从而使焊缝的韧性下降。结果表明:预热温度过低时,焊缝中易出现冷裂纹;不合理的焊接顺序,不规范的坡口加工,不完全的清理根部,都会对焊接质量产生不利的影响<sup>[1]</sup>。

### 1.3 人员因素

焊接工人的技术水平、责任心和职业素质是保证焊接质量的重要因素。化工设备焊接是一项技术活,需要熟练掌握各种焊接工艺及其参数的调试方法,并具有相关资格证书。如果操作人员的技术水平不够,

**作者简介**: 任贵祯(1991-),男,本科,工程师,研究方向:冶金及化工机电设备安装与维保。

不能精确地掌握焊接工艺参数,不能规范操作,就会造成焊接缺陷的频繁发生;如果对焊接工作的责任心不强,对焊接区域的清理不及时,焊条受潮,就会产生质量问题;由于操作者对化工设备的工作条件和焊接质量的要求认识不够,也会对焊接质量的控制造成一定的影响。

#### 1.4 环境因素

焊接环境中的温度、湿度、风速、灰尘等因素,都会直接影响到焊接工艺及焊接质量。化工设备大多是在野外工作,其工作环境非常复杂,如果环境温度太低( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下),会使焊缝快速冷却,出现冷裂纹。高湿度(大于  $8\text{ m/s}$ )环境下,焊缝局部易受潮,出现气孔和冷裂纹。当风速超过  $8\text{ m/s}$  时,保护气会被吹走,造成熔池的氧化,从而影响焊接质量;焊接部位的灰尘和杂物太多,容易造成焊缝的夹渣和未熔合。在焊接过程中,如果不及时清除易燃、易爆物料,也会引起安全事故,从而对焊接质量的控制产生间接的影响。

### 2 化工设备安装中焊接全流程质量控制措施

#### 2.1 焊接前准备阶段的质量控制

在化工设备安装和焊接过程中,必须从材料、设备、工件、工艺、人员和环境六个方面进行全方位的控制,把早期的质量问题排除在外。材料控制要按照“与母材相匹配,工况相适应”的原则,选择合格的焊材,在进场时要进行严格的检验和核对,焊条和焊剂要按照规范进行干燥,保护气体要确保纯度,并且要分门别类地存放。母材进场后,要对其进行外观和抽样检测,并将拼接部位清洗干净。在设备控制方面,需要选择性能稳定的焊机,在进场之前要对焊机进行彻底的调试和校验,保证电源的稳定性和测量仪器的准确性,还要对焊机和辅机进行定期的维修和校验。工件控制需要检查尺寸、坡口等参数,对于复杂的工件要预先装配,规范坡口的加工和清洗,需要预热的工件要根据材料和厚度规范进行预热和保温。过程控制需要与设备的设计需求相结合,对新的材料和复杂的结构进行工艺评价,在进行方案评审后,要对焊接顺序进行合理的计划。在人员管理方面,需要有相关的资格证书,在进入工地之前,要对工人进行培训、交底和评估,制定工作岗位的责任,强化现场监管,并定期进行技能提升培训。环境控制要求对施工场地进行综合整治,保证温度、湿度、风速等符合规定,清除垃圾和易燃物质,配置防火设备,做好应急准备。

#### 2.2 焊接过程中的质量控制

在化工设备的安装与焊接中,焊接工艺是关键,需要对其进行严格的工艺参数、操作规范、环境安全

和接头质量的精确控制,并对异常进行及时的检查和处理,从而保证其焊接质量的稳定性。操作者必须按照焊接规程,对焊接电流、电压、速度、预热和层间温度进行实时监控和控制,根据焊条直径和母材的厚度,对各参数进行精确的匹配,避免出现烧穿、咬边、未熔合等问题,并由专人进行监控,做好相应的记录,保证参数的可追踪性。与此同时,操作者要进行标准化的焊接作业,把电极的角度控制在  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$  之间,要保证输送的平稳性、电弧的稳定性,对多层、多层的焊缝进行彻底的清理,焊缝的间距要在  $100\text{ mm}$  以上,这样才能避免应力的集中,手工电弧焊和氩弧焊都要注意熔池的保护。在焊接的时候,需要不断地对周围的温度、湿度和风速进行监控,并对其进行调节,使其达到规定的程度。同时,还要保证工作场所的干净整洁。加强对现场的安全管理,让工人们按照正确的方式穿戴好自己的防护用品,将易燃和易爆的东西都清除干净,并且要配备消防设备,还要有专人监护。此外,还需要有专门的人员在现场进行巡视,对焊缝的形状、外观和接头的质量进行检查。一旦出现问题,就要马上停止工作,找出原因。在对表面的缺陷进行打磨和重新焊接、对严重的缺陷进行彻底的去除之后,再进行复检,以保证所有的缺陷都能被彻底排除<sup>[2]</sup>。

#### 2.3 焊接后检测阶段的质量控制

焊后检验是化工设备安装和焊接质量的最终环节,其关键在于采用合适的检测方法对其进行彻底的检查,以保证焊接接头的质量达到标准,避免不合格的焊缝投入使用。在检测工作中,必须按照“先外观检测、后内部检测”的原则,根据设备的重要性和工况需求,选择合适的检测方式。首先要对焊接后的焊缝进行外观检查,通过目测和放大倍数不少于 10 倍的放大镜来检查焊缝表面的平整度、缺陷状况、尺寸精度、接头的错边量和表面洁净度。在外观检验通过之后,才能进行内部检验,如果有缺陷要立即进行处理和返修,并进行复查,同步做好可追溯的检测记录。内部检测主要关注焊缝的隐蔽缺陷,通常采用射线检测和超声波检测等方式。根据母材材料、厚度和工作条件,选择合适的检测方式。核心装备的焊接接头要 100% 地进行检测,普通设备的抽检不少于 30%。检测人员必须具有相关的资格,并且要对检测设备进行定期的校准,对检测数据和缺陷进行详细的记录,并出具相关的报告。缺陷处理遵循“彻底清除,合理修复,严格复查”的原则,对表面有缺陷的部位进行打磨修补,对内部缺陷进行彻底清除后再进行修补,最多两次返修,对严重无法修复的零件进行报废替换。在检验合格之后,

需要按照母材的材料和技术规范,对焊接后的热处理和防锈进行处理,消除焊接应力,预防焊接接头的腐蚀,并对焊接的整个过程数据进行汇总,构建完善的质量档案,支持设备的后期维修。

### 3 化工设备安装焊接质量控制的实际工程案例

为了检验上述几种方法的效果,以一家冶金化工企业的反应器安装与焊接为例,对其进行了具体的阐述。该工程中使用的是304不锈钢材料,体积 $50\text{ m}^3$ ,设计压力 $1.6\text{ MPa}$ ,设计温度 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,主要用来进行腐蚀介质的反应,对焊接的品质有很高的要求,采用氩弧焊+手电弧焊的方式,并对整个过程进行质量监控。在施工前期,由于作业人员没有严格执行工艺参数,焊接环境湿度过大,出现了气孔、咬边等缺陷,其中有8%的焊缝不合格,严重影响了项目的进度和设备的安全性。对工程进行全流程整改:在焊接之前,要按照规定的规格选择合适的焊接材料,并按照规定进行干燥。对焊接设备进行调试和校准,清理工件坡口,调整装配精度,对操作者进行训练和评估,建立一个隔热的除湿棚,对周围的环境参数进行控制。在焊接时,由专业人员对焊接过程进行监控(电流 $90\sim 110\text{ A}$ ,电压 $23\sim 25\text{ V}$ ,转速 $8\sim 12\text{ cm/min}$ ),并标准化作业程序,强化现场巡视;对焊后的焊缝进行全面的外观和射线检测,及时对缺陷进行修复,并做好焊后的退火和防锈处理,然后存档。经整改后,焊接合格率提高到99.8%,未发现重大缺陷,焊接质量达到规范要求,设备工作平稳,表明所提出的控制方法是可行和有效的。

### 4 化工设备安装焊接质量控制的优化建议

#### 4.1 强化质量意识,落实质量责任

企业要树立“质量第一,安全至上”的思想,加强对焊接质量管理的关注,抛弃“重进度轻质量”的误区;建立和完善焊接质量管理体系,明确各个部门和岗位的质量职责,把质量管理工作落实到每个环节和每个岗位上;强化质量监管,制定相应的奖惩制度,对严格执行规范、焊接质量合格的员工进行表彰,对违反规定或质量不合格的员工进行惩罚,保证质量责任的落实。

#### 4.2 加强人员培训,提升技能水平

建立健全的操作人员培训制度,定期对操作人员进行技能培训与研究,主要包括焊接工艺、操作规范、质量控制、安全知识等方面,着重提高操作者掌握TIG、MIG等新焊接技术及复杂装备的操作技能。强化作业工人资格管理,禁止无证作业,定期评估,评估不合格者,暂缓上岗,直到考核通过为止;组织员工积极参加行

业交流、技能大赛等活动,不断学习国外先进的焊接工艺及控制管理经验,提高业务水平。

#### 4.3 完善检测手段,强化检测管理

企业要增加检测仪器的投资,增加射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤等仪器,保证检测方法的完备;要加强对检验队伍的培训与管理,保证检验人员具有一定的资格与技术水平,并能对缺陷的种类及严重性作出正确的判断;建立检验仪器的周期性校验体系,保证检验结果的准确性;严格按照检验程序进行,“先检测后验收”,不合格的焊缝一律不验收,保证焊接质量达到标准<sup>[3]</sup>。

#### 4.4 引入先进技术,优化管控方法

针对化工设备大型化、精细化的发展方向,采用智能化焊接设备、焊接参数自动控制等先进焊接工艺与管理手段,提升焊接效率与质量稳定性。通过对焊接工艺参数、试验数据、缺陷处理等数据的数字化控制,提升焊接质量控制的有效性和精确性。通过与科研院所、大学等单位的合作,研究开发适合于新的化工设备的焊接过程及质量管理方法,提高焊接质量的控制能力<sup>[4-5]</sup>。

### 5 结束语

在化工设备的安装过程中,如何保证设备的安全、稳定和经济运行,是保证设备安全、可靠、经济的重要环节。化工设备的焊接质量控制是一个系统工程,需要贯穿于安装的整个过程,以实操性和针对性为重点,在材料、设备、工艺、人员、环境、检测等多个层面上进行全方位的控制,并制定出切实可行的控制方法,这样才能让焊接质量达到工业和设计的要求。未来要对焊接质量控制过程进行持续的优化,引进先进的技术手段,提高焊接质量的控制能力,从而保证化工设备的安装质量,促进化工工业的高质量发展。

### 参考文献:

- [1] 王建忠,张文彪,赵松凯.化工机械设备安装工程质量控制方法探寻[J].新型工业化,2022,12(03):126-127,130.
- [2] 李晓民,刘媛,郑涛.化工设备安装中焊接技术的质量控制措施[J].化学工程与装备,2021(10):192-193.
- [3] 刘壮.化工设备安装中焊接技术质量控制[J].石油石化物资采购,2024(01):85-87.
- [4] 朱静晗.石油化工设备安装中的常见问题及解决措施[J].辽宁化工,2024,53(05):801-803.
- [5] 祁生贵.不锈钢压力化工设备安装过程中的焊接质量控制[J].科学与信息化,2023(16):131-133.

# 建筑工程管理的现存问题和优化策略

罗 祺

(甘肃省万达物流有限责任公司, 甘肃 天水 741000)

**摘 要** 建筑工程管理水平直接决定工程建设的效率、质量、安全及经济效益, 更是推动建筑行业高质量发展的关键支撑。当前我国建筑工程管理领域仍存在管理体系不完善、人员专业素养参差不齐、技术应用不深入、协同管控不到位等突出问题, 制约了工程管理效能的充分发挥, 也增加了工程建设的风险隐患。本研究结合建筑工程管理实践, 系统分析当前建筑工程管理的现存问题, 深入探索提高建筑工程管理水平的有效途径, 结合具体案例分析验证途径的可行性, 以期为企业优化管理模式、提升管理效能、降低建设风险提供实践参考。

**关键词** 建筑工程; 建设风险; 建筑工程管理; 精细化管理

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.029

## 0 引言

随着我国城市化进程不断推进, 建筑行业机遇与挑战并存, 工程项目数量、规模及技术复杂度不断提升, 对建筑工程管理水平提出更高要求。建筑工程管理是工程建设的“生命线”, 直接决定工程质量、成本、安全及效率, 高效管理可优化资源配置、规避风险, 落后模式则易引发各类问题<sup>[1]</sup>。当前建筑行业正从粗放式向精细化、智能化转型, 传统管理模式适配性不足, 加之市场竞争加剧、行业监管趋严, 建筑企业亟须破解管理痛点、补齐管控短板。与此同时, 绿色建筑、智慧工地等新业态兴起, 也倒逼工程管理模式迭代升级。因此, 研究提高工程管理水平的有效途径对建筑行业高质量发展具有重要的现实意义。

## 1 建筑工程管理的现存问题

### 1.1 管理体系不完善, 管控机制不健全

部分建筑企业缺乏完善的工程管理体系, 未建立起覆盖工程全生命周期(规划设计、施工实施、竣工验收、运维管理)的管控机制, 管理职责划分不清晰、权责不明确, 导致“多头管理”“无人负责”的现象频发。例如: 在施工阶段成本管理、进度管理、质量管控等环节相互脱节, 缺乏有效的协同机制, 出现成本超支时无人追责、进度滞后时无人牵头整改的问题。此外, 部分企业的考核激励机制不完善, 未将管理效能、工程质量、安全绩效等与管理人员的薪酬、晋升挂钩, 难以调动管理人員的工作积极性和责任心, 进一步弱化了管理成效<sup>[2]</sup>。

### 1.2 管理人才匮乏, 专业素养参差不齐

建筑工程管理是一项综合性工作, 要求管理人员具备扎实的专业知识(建筑工程技术、成本核算、法律法规等)、丰富的实践经验、较强的协调能力和应急处置能力。当前, 我国建筑工程管理领域人才匮乏的问题较为突出, 专业的工程管理人才数量不足, 难以满足大规模工程建设的需求, 持证上岗的资深管理人才更是供不应求。同时, 现有管理人员的专业素养参差不齐, 部分管理人员缺乏系统的专业培训, 仅具备单一领域的知识, 难以应对复杂工程的综合管理需求。此外, 部分管理人员责任意识淡薄, 存在违规操作、违规指挥等现象, 加之行业人才流动性大、梯队建设断层, 进一步增加了工程管理的风险, 影响了管理水平的提升。

### 1.3 技术应用不深入, 管理模式较为粗放

当前智能化、数字化技术(BIM技术、大数据、物联网等)已广泛应用于建筑工程领域, 但部分建筑企业仍沿用传统的粗放式管理模式, 对先进技术的应用不够深入, 甚至未引入相关管理技术。例如: 部分企业未采用BIM技术进行施工模拟、碰撞检查, 导致施工过程中出现管线冲突、施工偏差等问题, 影响施工进度和工程质量; 部分企业未利用大数据技术进行成本分析、风险预判, 成本管控仍依赖人工核算, 不仅效率低下, 还容易出现核算误差, 导致成本超支<sup>[3]</sup>。粗放式的管理模式导致工程管理的精准度不足, 资源浪费严重。

作者简介: 罗祺(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设工程管理。

### 1.4 协同管控不到位，多方联动机制缺失

建筑工程建设涉及建设单位、施工单位、设计单位、监理单位、材料供应商等多个参与方，各方的协同配合程度直接影响工程管理水平。当前部分建筑工程存在多方协同管控不到位的问题，各方之间缺乏有效的沟通机制和联动机制，信息传递不及时、不畅通，导致设计方案与施工实际脱节、材料供应与施工进度不符等问题频发。例如：监理单位未严格履行监理职责，对施工质量、安全的监管不到位，未能及时发现和制止违规施工行为；材料供应商未按时供应合格材料，导致施工停滞，影响工程进度。多方联动机制的缺失使得工程管理难以形成合力，管控效能大打折扣。

## 2 提高建筑工程管理水平的有效途径

### 2.1 完善管理体系，健全管控机制

完善的管理体系是提高建筑工程管理水平的基础，建筑企业应结合自身发展需求和工程建设特点，构建覆盖工程全生命周期的管理体系，明确管理目标、流程及职责，杜绝“多头管理”“无人负责”。结合项目规模、施工难度制定标准化管理手册梳理各环节管控节点，建立前期策划、施工执行、竣工验收、后期运维的全链条管控流程，厘清建设、施工、监理等各方管理边界，细化岗位职责清单，做到事事有标准、件件有人管。需细化分解成本、进度、质量、安全等管理工作，落实到具体部门和个人，同时健全施工全流程管控机制，优化考核激励体系，将关键指标与薪酬、晋升挂钩。建立动态督查机制，定期开展管理成效复盘，针对管控漏洞及时优化调整；推行量化考核模式，把进度达标率、质量合格率、安全零事故率、成本控制率等核心指标纳入考核体系，实行奖优罚劣，倒逼管理人员履职尽责，切实提升体系运行实效<sup>[4]</sup>。不同管控机制的实施重点及预期成效如表1所示，可以看出，通过完善体系、健全机制，可有效规范管理行为，提升管理效能。

### 2.2 培育专业人才，提升综合素养

专业人才是提高建筑工程管理水平的核心支撑，建筑企业需要建立“引进+培训+激励”三位一体的人才制度，全面提升管理人员综合素养。加大人才引

进力度，拓宽校招、社招渠道，定向吸纳工程管理、土木工程、工程造价等专业毕业生，高薪聘请具备大型项目实操经验、持证上岗的资深管理人才，重点培养兼具专业知识与实践经验的复合型管理骨干，补齐人才缺口。建立常态化、分层分类培训机制，针对基层管理员、中层骨干、高层管理者制定差异化培训方案，针对现有管理人员能力短板开展涵盖工程技术、成本核算、法律法规及智能化管理技术的系统培训，定期组织行业交流、标杆项目观摩、实操演练，提升全员应急处置、多方协调与数字化管理能力。同时，加强对人才的激励，建立合理薪酬体系与清晰晋升通道，摒弃重复表述，完善绩效考核与人才评优机制，尊重人才价值、激发创新活力，搭建人才成长平台，健全人才留存机制，降低核心管理人才流失率，打造高素质、专业化的工程管理团队。

### 2.3 深化技术应用，推行精细化管理

深化智能化、数字化技术应用，推行精细化管理，是建筑行业转型升级背景下提高工程管理水平的重要途径。建筑企业应主动引入先进管理技术，优化粗放式管理模式，实现工程管理精准化、高效化。组建专项技术团队，统筹推进数字化管理落地，结合项目实际制定技术应用方案，避免盲目投入导致资源浪费；搭建一体化工程管理平台，打通设计、施工、成本、运维各环节数据壁垒，实现全流程数据互通、动态管控。重点推广BIM技术、大数据、物联网等技术的落地应用，结合精细化管理理念，优化施工流程、管控资源消耗、规避各类隐患。利用物联网设备实时采集现场进度、物料消耗、设备运行数据，依托大数据平台开展深度分析，精准预判进度延误、成本超支、质量缺陷等风险，提前制定防控措施；借助BIM模型实现三维可视化交底、工序模拟推演，减少施工返工与失误，推动管理模式从事后管控向事前预判、事中管控转变，全面提升工程管理精细化与智能化水平。不同技术的应用重点及预期成效如表2所示，可以看出，通过技术与管理的深度融合可显著提升管理效能、降低建设风险。

### 2.4 强化协同管控，建立多方联动机制

建设工程建设过程中需要各参与主体之间加强协作，构建高效的联系机制，形成治理合力。建立多方

表1 不同管控机制的实施重点及预期成效

管控机制类型	实施重点	预期成效
设计审核机制	核查设计方案合规性、实用性，规避施工脱节隐患	减少设计变更，降低成本损耗 5% ~ 8%
质量验收机制	分阶段验收，严控各工序质量达标	工程质量达标率提升至 100%
考核激励机制	绑定管理效能与薪酬晋升，奖优罚劣	管理人员积极性提升 30% 以上

表 2 不同技术的应用重点及预期成效

应用技术类型	应用重点	预期成效
BIM 技术	施工模拟、碰撞检查、进度与成本管控	减少返工, 节省工期 3 ~ 5 天、降低成本 1% ~ 2%
物联网技术	施工现场实时监控、大型设备管控	降低设备安全事故率, 隐患处置效率提升 40%
大数据技术	成本分析、风险预判、资源优化调配	减少资源浪费, 成本核算误差降低 80% 以上

沟通机制, 定期组织施工、建筑、设计和监理等相关各方进行交流, 及时通报工程建设进度、存在的问题, 协调各种矛盾纠纷, 保证信息交流的顺畅。同时, 完善协同管控机制, 通过对各方的责任界定, 增强各方的协作, 促进设计方案与施工实际、材料供应与施工进度、监理监督与施工执行的深度结合。避免出现脱节现象。搭建工程协同管理信息化平台, 实现图纸、进度、成本、变更等数据实时共享、线上流转, 打破信息壁垒, 解决线下沟通滞后、资料传递误差等痛点, 实现全流程可视化管控。建立协同责任追溯机制, 明确各方违约追责条款, 针对设计变更、工期延误、质量缺陷等问题快速定责、限时整改, 形成“沟通—落实—核查—闭环”的全流程管控模式, 进一步压实各方管控责任。例如: 监理单位应加强对施工全过程的监理, 确保工程质量和安全。此外, 加强与材料供应商、分包单位的协同管理, 对原料及分包商进行严格的审核, 并与其建立长期、稳定的合作伙伴关系, 保证原料的

及时、优质, 规范分包单位的施工行为, 提升工程管理的整体水平<sup>[5]</sup>。

### 2.5 强化安全管理, 筑牢安全管控底线

安全管理是建筑工程管理的重中之重, 关系到施工人员的生命安全和工程顺利推进, 是提升管理水平的重要保障。建筑企业需强化安全意识, 健全安全管理体系, 明确职责、落实责任制, 实现安全管控无死角; 加强施工人员安全培训与技能演练, 杜绝违规操作。同时, 加大现场安全监管与隐患排查力度, 重点管控高空、临时用电、动火等高危环节, 配备齐全防护设施, 建立应急处置机制与应急预案, 定期演练, 最大限度降低安全事故损失。推行安全网格化管理, 将施工现场划分为若干管控单元, 定岗定人定责, 实现安全隐患闭环管理; 建立安全奖惩制度, 对违规行为严肃追责, 对安全管控到位的班组予以奖励, 倒逼全员落实安全责任, 营造人人讲安全、事事为安全的施工氛围。不同安全管理措施的实施重点及预期成效如表 3 所示,

表 3 不同安全管理措施的实施重点及预期成效

安全管理措施	实施重点	预期成效
安全培训演练	开展安全知识培训、高危岗位技能演练	违规操作率降低 60% 以上
现场隐患排查	重点管控高空、临时用电、动火等高危环节	安全隐患整改率达 100%
应急机制建设	制定应急预案, 定期开展应急演练	事故损失降低 50% 以上

各项安全管理措施靶向明确、成效显著, 能有效筑牢安全防线, 为工程管理水平提升提供坚实的保障。

国建筑业提质增效、转型升级提供坚实的保障, 助力行业实现更高质量、更可持续的发展。

### 3 结束语

提高建筑工程管理水平是建筑企业实现可持续发展的必然要求, 也是推动建筑行业高质量发展的关键举措。当前我国建筑工程管理领域仍存在管理体系不完善、人才匮乏、技术应用不深入、协同管控不到位等突出问题, 制约了管理效能的充分发挥。建筑企业应立足于自身发展需求和工程建设特点, 从完善管理体系、培育专业人才、深化技术应用、强化协同管控、筑牢安全底线等方面入手, 不断优化管理模式, 提升管理效能, 实现工程质量、进度、成本、安全四大目标的协同统一。未来, 随着建筑行业数字化、绿色化转型持续深入, 工程管理模式将不断创新完善, 为我

### 参考文献:

- [1] 张勃. 建筑工程管理影响因素与解决措施研究[J]. 工程建设与设计, 2025(09):247-249.
- [2] 罗富荣. 新时期建筑工程管理影响因素与对策分析[J]. 居业, 2025(04):241-243.
- [3] 刘强. 基于 AHP-模糊综合评价的建筑工程管理质量评价方法[J]. 绿色建造与智能建筑, 2025(04):41-44.
- [4] 李海. 建筑工程管理创新模式应用与发展动向探讨[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(S2):41-43.
- [5] 徐书建. 智慧城市视域下建筑工程管理信息化技术应用研究[J]. 新城建科技, 2025(12):182-184.

# 土木工程施工管理中存在的问题及对策分析

武汇棕

(甘肃蓝野建设监理有限公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘要** 随着土木工程规模扩大与技术复杂度不断提升, 土木工程施工管理面临诸多挑战。土木工程施工管理是确保工程项目质量、安全、进度与成本目标得以实现的关键性活动。基于此, 本文系统阐述了土木工程施工管理的核心内容, 深入剖析了其在实践中存在的主要问题, 并提出了具有可操作性的解决对策, 旨在为提升土木工程施工管理水平、保障工程项目的综合效益提供理论参考。

**关键词** 土木工程; 质量管理; 进度管理; 成本管理; 安全管理

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.030

## 0 引言

土木工程建设是国家基础设施建设的重要组成部分, 其建设质量在很大程度上取决于施工管理水平的高低。高效、科学的施工管理能够合理配置资源, 控制工程风险, 确保项目在预定目标下顺利完成<sup>[1]</sup>。在工程实践过程中, 由于内外部环境的复杂性, 施工管理环节常常暴露出各种问题, 制约了工程质量的提升与行业的高效发展。因此, 识别当前土木工程施工管理中的关键问题, 并采取行之有效的解决措施, 具有重要的现实意义。

## 1 土木工程施工管理的核心内容

### 1.1 质量管理

在土木工程施工管理当中, 质量管理占据着首要且核心的地位, 它自项目材料采购阶段起, 一直延续至竣工验收阶段, 贯穿于整个过程。质量管理的核心目的在于保证工程实体能够契合设计文件、技术规范、合同所约定的标准, 同时满足使用功能方面的要求。其管理工作涵盖了多个方面, 如要建立并运转质量保证模式, 精心制定详尽的质量计划、检验标准, 针对进场的原材料、构配件展开严格检验, 针对施工工序像模板支设、钢筋绑扎、混凝土浇筑等实施过程控制、旁站监督, 并且对成品进行实测实验。借助持续不断地进行质量检查、记录、分析、改进等工作, 预防质量通病的出现, 处理质量缺陷问题, 最终交付符合要求的建筑产品。

### 1.2 进度管理

进度管理旨在通过科学的计划与控制手段, 确保工程项目在合同工期内或更优的时间内完成。其核心

内容包括基于工程分解结构和工作逻辑关系, 编制切实可行的总进度计划、月季月周计划, 并确定关键线路。在实施过程中, 需定期跟踪、检查实际进度, 收集现场数据, 与计划进行对比分析, 及时发现进度偏差。针对偏差分析原因, 评估其对后续工作及总工期的影响, 并采取有效的组织、技术、经济与合同措施进行动态调整与纠偏, 协调各方作业, 以保障工程按既定节点有序推进。

### 1.3 成本管理

成本管理是对工程项目施工过程中所产生的全部费用进行预测、计划、控制、核算、分析与考核的一系列活动。其目标是实现项目成本的最优化, 在保证质量与工期的前提下将实际成本控制在预算范围内。工作内容涵盖施工前的成本预测与目标制定, 施工中的成本计划分解与动态控制, 包括对人工费、材料费、机械费及间接费的精细化管理。通过加强施工方案的经济比选, 推行限额领料制度, 减少浪费, 提高工效, 并定期进行成本核算与差异分析, 查找超支原因, 及时采取纠偏措施, 以实现项目的经济效益。

### 1.4 安全管理

安全管理在施工管理中占据着非常关键的地位, 是绝不能触碰的红线, 其关键要点在于预防、减少生产安全事故的发生, 以此保障人员的生命健康、财产安全。管理工作包括了创建并完善安全生产责任制、规章制度, 还要制定安全技术措施与专项施工方案, 尤其是针对深基坑、高支模、起重吊装这类危险性比较大的分部分项工程。实施的内容包括对所有进场人员进行安全教育培训、交底工作, 还要定期或不定期

作者简介: 武汇棕 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程。

地进行现场安全检查、隐患排查治理,保证安全防护设施、劳动保护用品能够配备齐全并且有效使用,同时要制定应急预案,组织演练,进而建立起以预防为主的安全管理模式。

### 1.5 信息与沟通管理

现代土木工程施工管理对高效的信息与沟通管理有着很强的依赖性,其目的在于保证项目相关信息能及时且准确地生成、收集、传递、存储、利用,以此来支持项目决策与协同工作。核心工作包括建立项目信息管理平台或者系统,规范各类文件、图纸、指令、记录、数据的格式、流转程序。要确保设计单位、业主、监理、施工方、供应商等各参建方之间的信息渠道保持畅通,借助定期会议、报告制度、即时通信工具,促进技术、进度、成本等信息的有效共享与反馈,减少误解与冲突,为项目的顺利实施提供信息支持。

## 2 土木工程施工管理中存在的问题

### 2.1 质量管理体系落实不到位

尽管多数施工企业建立了质量管理体系文件,但在实际项目运行中,体系要求往往未能得到有效落实。表现为质量责任制流于形式,岗位职责不清,奖惩机制不健全,导致管理人员质量意识淡化。过程控制存在漏洞,对关键工序和特殊过程的监控力度不足,技术交底针对性不强,工人仅凭经验操作。检验批、分项工程的自检、互检、交接检制度执行不严格,有时甚至存在事后补资料的现象。材料检验环节存在薄弱点,对某些进场材料的抽样复检未能完全按照规范执行,使得不合格材料有流入施工现场的风险,给工程实体质量埋下隐患。

### 2.2 施工进度计划与控制脱节

施工进度管理常见的问题是计划编制与实际脱节,以及过程控制乏力。进度计划编制时,对工程特点、现场条件、资源供应等因素考虑不周,或过于理想化,导致计划本身可执行性差。在计划实施过程中,缺乏有效的动态监控机制,进度信息的收集滞后、不准确,无法及时反映现场真实情况。当出现设计变更、材料供应延迟、气候影响或交叉作业矛盾时,应对措施不够及时有效,调整计划往往滞后。各专业、各分包队伍之间的进度协调困难,相互掣肘,缺乏统一的指挥与调度,导致局部延误扩散,最终影响总工期目标的实现<sup>[2]</sup>。

### 2.3 成本控制精细化程度不足

当前,许多项目的成本管理仍处于粗放阶段,精细化管理水平有待提高。成本预测与计划不够精准,预算未能根据施工方案有效分解到具体工序和作业面。

过程控制薄弱,特别是对材料消耗和现场用工的控制缺乏有效手段,材料浪费、重复搬运、返工等现象时有发生,机械设备利用率不高。成本核算与分析不及时,往往在项目后期或结束后才进行核算,难以在施工过程中及时发现成本超支并采取纠正措施。对变更、签证的管理不规范,导致应得的费用未能及时确认,造成项目收益流失<sup>[3]</sup>。

### 2.4 安全生产管理存在形式化倾向

施工现场安全生产管理形式化问题较为突出。安全管理制度和操作规程虽已上墙,但未能真正深入人心并转化为作业人员的自觉行为。安全教育培训效果不佳,内容针对性不强,方式单一,部分一线工人尤其是流动性大的工人,对危险源和操作规程知之甚少。现场安全检查多为应付上级,隐患排查不深入、不彻底,对发现的问题整改闭环不及时,同类隐患反复出现。安全投入与措施落实不到位,部分防护设施简陋或缺失,劳动保护用品配备不合格或使用不规范。对分包单位的安全管理责任未能有效传递和压实,存在以包代管现象<sup>[4]</sup>。

### 2.5 信息沟通不畅与协同效率低

项目各参与方之间的信息沟通不畅是影响管理效率的普遍问题。信息传递主要依靠传统方式,如会议、电话、纸质文件,导致信息延迟、损耗甚至失真现象严重。设计图纸变更不能及时同步通知到所有相关方,造成现场施工与图纸不符。项目数据分散在不同部门或个人手中,缺乏统一的信息共享平台,形成信息孤岛,管理层难以及时获取准确全面的项目状态信息以支持决策。由于沟通机制不健全,参建各方协同作业时容易产生误解、推诿和冲突,问题解决周期长,降低了整体工作效率,影响了项目目标的顺利达成。

## 3 土木工程施工管理问题的解决对策分析

### 3.1 健全并刚性执行质量管理体系

为确保质量管理体系从文件落实到行动,必须构建权责清晰、运行闭环的管控机制。核心在于确立以项目经理为核心的责任链条,将总体质量目标逐级分解至部门、班组及作业岗位,并以书面形式明确各岗位的质量职责与验收标准,将其纳入绩效考核实行奖优罚劣。过程控制需聚焦关键工序与隐蔽工程,严格执行技术交底与会签制度,推行实物样板引路,使施工标准可视化、可感知。必须强化质量检查的独立性与权威性,配备足额质检人员,实行施工班组自检、工序交接互检、质检员专检的三检制,并对重要部位实施旁站监督。建立从原材料进场验收到试验检测的全流程监控,确保所有材料证件齐全、复检合格,杜

绝不合格品流入,通过定期质量分析会持续改进,形成刚性约束下的质量行为习惯。

### 3.2 强化进度计划的动态管控与协调

提高进度管理成效的关键之处在于计划编制与现场执行的无缝衔接、动态调整。在计划编制阶段,要运用专业的项目管理软件,全面考虑技术逻辑、资源供应、环境约束这些因素,进而制定出详细且具体的多级网络计划,再组织各个参建方进行评审以此保证该计划具有可行性。在计划执行过程中,应当建立以周或者旬作为周期的短周期进度跟踪、盘点机制,借助现场巡查、工程例会、信息化工具实时收集进度数据,把这些数据与基准计划做对比分析,准确识别偏差情况。一旦发现有滞后现象,就要立刻组织专题会议分析根本原因,评估该原因对关键线路、总工期所产生的影响,并且迅速做出决策,采取调整施工顺序、优化工艺、增加资源配置等有效的措施来进行纠偏。还要设立强有力的现场施工协调机构,定期召开有各专业分包参与的协调会,提前解决界面冲突、协作方面的问题,保障工程在受控状态下协同推进。

### 3.3 推行全过程精细化成本管控

成本精细化管理需覆盖项目整个生命周期,从事前预测,到事中控制,再到事后分析,从而形成一个完整的管理闭环。在事前预测阶段,要根据优化过后的施工方案来做精确的成本测算,并且把目标成本依据工程结构、工序、费用科目进行详细分解,以此形成清晰明确的控制基准。事中控制作为核心部分,关键在于对人工、材料、机械这三大主材实施动态监控。实行限额领料、物资消耗每日核算制度,把材料使用和施工任务单联系起来,优化劳动组合,减少窝工情况,提高工作效率,强化设备调度、维护,提高台班利用效率。要进行月度成本核算与分析,及时比较实际成本和目标成本之间的差异,深入分析节超原因,对异常偏差发出预警,制定具有针对性的纠偏措施。要规范变更与签证管理流程,保证任何变更都能及时、准确地评估其对成本的影响并完成签认手续,以此保障项目的经济效益。

### 3.4 压实安全生产责任与深化风险防控

破解安全管理形式化的关键点在于切实把责任落实到每一个环节,同时建立起系统的风险预防机制。首先要做的是完善并且严格执行全员安全生产责任制,借助签订责任书、进行责任考核与问责等举措,把安全压力传递到包括分包单位在内的最末端。安全教育要注重实际效果,运用体验式、案例式等多种方式,并且针对不同工种、不同施工阶段进行专项培训与交

底工作。另外,还必须建立运行风险分级管控与隐患排查治理双重预防模式,辨别评估各类危险源,制定并落实相应的管控措施,加大现场日常巡查与专项检查的力度,对隐患建立台账,明确整改责任人与整改时限,实行闭环销项管理。

### 3.5 构建一体化信息管理平台促进协同

提高管理协同效率的关键在于借助现代信息技术打破信息壁垒,建立集成共享的项目管理数据中心。要投资引入或者定制开发一体化管理平台,该平台包括进度、质量、安全、成本、合同、图纸等核心业务模块,统一数据标准和流程,强制所有关键业务进行在线流转、审批和存档,保证数据的唯一性与及时性。借助这个平台,设计变更、工程指令能够瞬间同步给相关各方,现场检查、验收数据可以通过移动终端实时上传,让管理决策依据准确、全面的实时信息。平台应拥有任务自动分发、流程驱动、在线协作功能,便于组织线上会议、协调工作界面,极大地减少沟通成本和时间延迟。因此,各参与方能够在统一数字空间里协同工作,实现管理流程的透明化、追溯化与高效化,进而整体提高项目管控能力与执行效率<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

土木工程施工管理的优化提升,是一个直面问题、系统施策、持续改进的过程。本文所剖析的问题,深刻反映了当前项目管理实践中的共性挑战,并提出以刚性执行压实质量责任、以动态调整保障进度受控、以全程精细实现成本节约、以双重预防筑牢安全根基、以信息平台驱动协同高效等对策。这些对策的核心在于推动管理模式从经验主导向制度与数据驱动转变,从条块分割向全流程集成转变。未来,随着智能建造技术与精益管理思想的深度融合,施工管理必将迈向更高效、更精准、更可靠的新阶段,为铸造精品工程提供坚实的支撑。

## 参考文献:

- [1] 董轩.土木工程施工管理中存在的问题及对策分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(14):206-208.
- [2] 线伟.土木工程施工管理中存在的问题及对策分析[J].陶瓷,2023(09):234-236.
- [3] 邹镜亮.土木工程施工管理中存在的问题与对策研究[J].冶金管理,2023(11):14-16.
- [4] 白泽.土木工程施工管理中存在的问题及对策分析[J].居业,2022(10):156-158.
- [5] 徐磊.土木工程施工管理中存在的问题分析[J].安徽建筑,2022,29(09):191-192.

# 水利工程施工安全生产信息化管理体系构建

俞密密

(浙江省水利水电建筑监理有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘要** 水利工程施工场景兼具临水作业、空间分散与工序交织特征, 边坡扰动、设备运行、人员流动和环境波动相互叠加, 传统依赖巡查记录的管理方式难以及时应对高频变化的现场风险, 安全管理常处于信息分散与响应滞后的被动状态。依托感知终端、数据贯通与平台协同构建安全生产信息化管理体系, 可将风险发现、隐患流转、整改跟踪和调度联动纳入同一链条, 进而增强施工安全治理的连续性、精准性与现场响应强度。

**关键词** 水利工程; 施工安全; 信息化管理; 安全生产; 智慧施工

中图分类号: TV512; TP391.6

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.031

## 0 引言

水利工程建设常处于地形起伏明显、作业面持续迁移的条件下, 单点巡查往往只能覆盖局部时段, 隐患一旦跨工序、跨区域传递, 原有管理方式就难以稳定接续, 尤其在围堰转换、交叉施工与机械调配同步推进之际, 风险识别、信息传递和现场处置更容易出现脱节。伴随施工组织精细化要求不断加深, 安全管理更需要把现场状态、人员活动和设备信息放到统一视野中统筹研判, 进而把被动补救压缩到风险前端, 防止局部异常在传导过程中演变为连锁性安全问题。

## 1 水利工程施工安全生产的风险特征

### 1.1 自然环境扰动明显

水利工程多分布于河道沿线、库区边坡、山地沟谷及临水区域, 施工安全始终受水位涨落、强降雨、地质松动和风浪冲刷等外部条件牵动, 围堰稳定、基坑排水、边坡支护与施工道路通行状态都会随环境变化而重新波动<sup>[1]</sup>。现场一旦遇到突发来水、局部塌岸或软弱夹层暴露, 原有作业安排就可能被迅速打乱, 安全风险不再停留于单一工点, 而是沿着临水面、运输线和作业面向周边区域扩散。

### 1.2 现场作业交叉频繁

水利工程施工往往不是单线推进, 土石方开挖、模板支设、钢筋绑扎、混凝土浇筑、设备吊装、材料运输和临时用电维护常在同一时段压茬展开, 不同班组围绕有限场地同步进入, 人与机械、车辆与构筑物之间的安全边界持续被压缩。特别是在坝体施工、闸室结构作业和机电安装并行推进之际, 吊装回转半径、运输通道占用、交叉作业落物和误入危险区域等问题

更易集中出现, 现场组织稍有失衡就会放大机械伤害、坠落和触电风险。

### 1.3 安全管理链条较长

大型水利工程建设周期普遍较长, 从导流围堰、基础处理到主体结构施工、金属结构安装和机电调试, 施工阶段持续转换, 参建队伍、作业人员、设备配置与风险重点也在动态调整, 安全管理很难依靠一次布置长期维持稳定状态<sup>[2]</sup>。时间线一旦拉长, 隐患整改复核、责任交接、教育培训和制度执行就容易出现衔接空档, 早期形成的风险信息若未被完整保留并及时传递, 后续阶段就可能在工序介入后再次暴露出同类问题。

## 2 水利工程施工安全生产信息化管理的价值

### 2.1 强化动态感知

水利工程现场风险并不总以事故形态出现, 往往先表现为水位缓涨、边坡位移增大、设备振动异常或人员进入限制区域等细微信号。若仍依赖间断巡查和口头反馈, 异常状态常在记录、上报与核实之间被延迟识别, 班组换班或工序转换过程中还可能被忽略<sup>[3]</sup>。依托信息化管理接入环境监测、视频识别和设备状态数据后, 管理端能够把分散信号放到同一界面连续对比, 风险由静态判断转为动态捕捉, 预警阈值、异常趋势和重点点位同步呈现, 高风险工点的持续盯控也更容易落细。

### 2.2 推动流程闭环

施工安全管理难点不仅在发现隐患, 更在于隐患从发现到销项往往跨越巡查、登记、派发、整改和复核多个环节, 任何一处交接模糊, 问题都可能停留在

作者简介: 俞密密 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

纸面记录层面，整改责任难以压实<sup>[4]</sup>。将巡检任务、隐患描述、责任到岗、整改时限和复查结果纳入信息系统后，每项问题都会带着时间标记和流转轨迹向下推进，管理动作由分散留痕转向全过程留痕。逾期提醒、闭环校验和历史追溯嵌入日常业务，安全制度也由原则性要求转为可核验、可追踪的操作流程。

### 2.3 增强调度响应

水利工程施工作业面广、人员分布散，现场一旦出现围堰渗漏、边坡松动、吊装冲突或临电异常，管理成效往往取决于信息能否迅速传递到调度、监理和作业班组。尤其在夜间施工、交叉施工和恶劣天气叠加之际，响应迟缓容易放大局部险情。信息化管理将监测告警、视频画面、点位位置和责任单元同步推送后，值班人员能够依据异常等级组织停机避让、人员撤离和区域封控，现场响应由层层传话转为点对点联动，调度决策与处置指令更加贴近风险变化节奏。

### 2.4 支撑协同治理

水利工程安全治理涉及建设单位、监理单位、总包、分包及专业作业队伍，多主体同场运行之际，若安全信息仍停留在各自台账或微信群组中，责任边界容易模糊，交叉作业面的风险也难以及时识别<sup>[5]</sup>。将巡查记录、整改进度、预警信息、教育培训和现场许可纳入统一平台后，各参与主体能够围绕同一数据口径开展会商、核查和联动处置，安全管理由各管一段转向协同接续，跨单位协作中的信息失真和责任悬空现象随之减少，联动处置节奏也更加稳定。

## 3 水利工程施工安全生产信息化管理体系构建路径

### 3.1 布设施工感知终端

施工感知终端布设不能按“设备有什么就装什么”的思路推进，而要先依托施工总平面、专项施工方案

和危险源清单把监测对象分层落位，临水临边、深基坑、围堰迎水面、高边坡、栈桥通道、拌和站、钢筋加工区、起重作业区和临时用电集中点应列为优先布设区域，其中水位、降雨量、边坡位移、基坑积水、视频画面、塔机回转区、门机运行状态和临电箱开闭情况需对应专门终端。布点时不宜只看单个工点，而应把“风险源—作业面—通行线”串成监测链，围堰段宜沿迎水侧、背水侧和上下游转角设置水位及渗压采集点，深基坑宜在坑顶、坑底与排水沟节点布设水位和位移终端，交通便道则把急弯、陡坡、会车口和材料堆场出入口纳入视频覆盖范围，使监测信号顺着施工组织路线连续展开。

终端安装完成后，还需把采集频率、供电方式、固定结构和巡检周期一并定实，露天点位宜采用防水防尘外壳并加设防撞护栏，边坡和围堰监测终端底座应避开松散土层与机械碾压带，视频设备安装高度要兼顾识别精度与检修便利，夜间作业面同步配置补光设施，防止回传画面失真。现场交付前应安排一次分区域联调，逐个核验点位编号、采样间隔、信号强度、画面角度和掉线报警规则，后续按“日常巡看+周度核校+工序转换复检”的节奏维护，遇到导流转换、作业面迁移或大型设备进场时同步调整监测点，避免终端停留在旧工位而脱离真实施工面，水利工程施工安全感知终端布设要点如表1所示。

### 3.2 搭建统一管理平台

统一管理平台搭建要先把管理边界划清，不宜把所有数据堆到同一页面，而应依照项目部、分部工程、作业区域和责任岗位建立四级管理视图，首页集中呈现总览数据，分区页面展开边坡、围堰、基坑、吊装、临电与交通组织等专题信息，值班室、项目部、监理部和分包负责人进入系统后各自看到与职责匹配的界面。平台结构宜按“总览看板—风险地图—设备状态—

表1 水利工程施工安全感知终端布设要点

施工区域	监测内容	终端类型	典型布设位置
围堰段	水位、渗压	水位监测终端 渗压监测终端	迎水侧、背水侧、转角处
深基坑	积水、水位、位移	水位监测终端 位移终端	坑顶、坑底、排水沟
高边坡	位移变化	位移监测终端	边坡顶部、坡脚
起重作业区	设备运行、作业范围	视频监控终端 设备终端	塔机回转区、门机区
栈桥与便道	通行状态	视频监控终端	急弯、陡坡、会车口
加工与拌和区	作业活动	视频监控终端	设备区、出入口
临时用电区	配电状态	临电监测终端	配电箱、用电集中点

隐患事项—处置指令—历史记录”展开，其中风险地图挂接施工平面图与电子围栏，点击工点即可调出视频画面、监测曲线、责任人名单和近期处理记录，值班人员无需在多个表格间反复切换，调度动作也能在同一界面完成。

平台功能配置需贴近日常管理动作，登录权限划分为查看、填报、审核、调度和系统维护几类，班组长负责现场上报，安全员负责核实派单，项目管理层负责阈值设置、停工指令和资源调配，监理单位侧重旁站核验与整改复核，权限划清之后责任链条便随界面流转稳定下来。系统运行初期宜先选围堰、基坑和起重设备三个高风险板块上线，待操作流程顺畅后再接入教育培训、进场验收和分包考核等内容，同时将短信提醒、平台弹窗与移动端推送分级设置，一般提醒由岗位端接收，预警事项同步推送项目负责人，触及停工条件的信号直接进入红色待办列表，使各层级在同一时刻获得一致信息并形成统一响应。

### 3.3 贯通多源数据链路

多源数据贯通的关键不在“接入数量多”，而在“数据口径一致、传输关系清楚、调用顺序稳定”，开工前应依托视频监控、环境监测、设备传感、门禁考勤、人员定位、移动巡检和隐患台账建立数据目录，为各类数据统一编码规则、时间格式、位置标识和责任单位，防止字段名称不一、时间戳混乱或点位命名随意致使系统匹配困难。传输链路宜按“前端采集—边缘网关—项目服务器—管理平台”展开，网络条件稳定区域采用光纤或工业交换机回传，边坡、弃渣场和临时便道等区域结合 4G、5G 或 LoRa 组网，数据先在边缘端完成去噪、压缩与时间校准，再进入平台数据库，防止高频原始数据直接堆积至主系统影响运行效率。

数据接通之后，还需把“同一事件的多源证据”串联使用，比如起重吊装出现异常时，平台调取内容不应停留于单一摄像头画面，而应联动设备运行参数、作业许可状态、现场定位信息和当班巡检记录，使调度人员能够迅速判断是指挥失误、设备超限还是人员误入吊装半径。为防止形成新的信息孤岛，项目部应建立数据映射表和接口维护清单，新设备或分包队伍进场时先完成接口测试、字段校核和权限绑定，再允许数据写入系统；日常运行安排专人核对离线点位、空值记录和异常跳变曲线，对失真数据及时标注并清洗，使查询、预警与统计始终建立在统一数据底盘之上。

### 3.4 嵌入安全业务模块

安全业务模块开发不能停留在“把纸质表单搬到电脑里”，而应围绕现场高频管理动作拆分功能，巡

查检查、隐患上报、整改派发、复查销项、作业许可、教育培训、机械验收、临电检查和应急处置宜形成独立模块，并嵌入固定字段、办理时限与流转节点。例如：隐患排查模块要求上传点位、照片、问题描述、风险等级、责任班组和完成时限，系统接收信息后生成整改单并推送责任人，处理完成再上传复原照片与措施说明，复查人员依同一记录核验，销项前任务不得关闭；作业许可模块则将吊装、动火、临时用电、有限空间和围堰迎水面作业等许可单设为电子流程，并与现场监测状态联动，条件不满足时无法提交审批。

模块真正落地还需把规则写入系统，而不是依赖口头提醒维持运转，隐患逾期未整改的事项自动进入催办序列，连续两次未按时闭环的班组转入重点监管名单，机械验收未完成的设备不得进入当日作业计划，教育培训未签到或考试未达标的人员无法激活门禁权限，此类控制逻辑嵌入平台后，现场管理不再依赖人工反复追问。应急模块宜单独设置事件分级、处置流程、物资调度和联系人库，围绕坍塌、涌水、触电、机械伤害及极端天气停工等情形预置处置卡，值班人员接警后点选事件类型，系统同步弹出处置步骤、撤离路线、联络对象和周边监控画面，使现场指挥、物资调用与信息报送在同一闭环内展开。

## 4 结束语

水利工程施工安全治理的关键，已不再停留于单点巡查和事后补救，而在于将分散于作业面、设备端、通行线和管理链条中的风险信号纳入统一运行逻辑，使监测、研判、处置和复核在同一时序中衔接，促使安全管理由经验驱动转向数据支撑、由局部应对转向全过程控制。信息化体系落地后，现场管理的敏捷度、责任传导的清晰度和风险处置的前置性随之增强，水利工程施工安全由此更接近可感知、可追踪、可联动的常态治理状态。

### 参考文献：

- [1] 焦刘霞,吴云飞.基于信息化技术的水利工程施工质量安全管理方法[J].城市建设理论研究(电子版),2025(32):202-204.
- [2] 李春林.水利工程管理信息化的实践应用与未来发展[J].内蒙古水利,2025(03):94-95.
- [3] 汤磊,徐晖.基于信息化技术的水利工程施工质量安全管理方法[J].大众标准化,2025(03):170-172.
- [4] 杜广敏.水利工程施工项目质量控制与质量管理体系的构建[J].水上安全,2024(15):43-45.
- [5] 方根,张海龙,王大勇.信息化系统在水利工程安全管理中的应用[J].黑龙江水利科技,2023,51(10):119-121.

# 建筑工程施工现场安全管理体系构建与实践研究

宋相永<sup>1</sup>, 迟炜海<sup>2</sup>, 任帅德<sup>3</sup>

(1. 山东智诚信远工程管理有限公司, 山东 潍坊 261000;

2. 胶州市三里河街道办事处, 山东 青岛 266300;

3. 章丘市第二建筑安装(集团)有限责任公司, 山东 济南 250200)

**摘要** 建筑工程施工现场工序繁杂、人员流动大、风险点多, 高空作业、用电作业等危险环节易引发安全事故, 当前现场安全管理存在体系不完善、责任模糊、管控不精准等问题。结合施工现场特点, 构建科学的安全管理体系, 明确风险类型与影响因素, 优化管控流程、完善保障措施, 并通过试验验证体系有效性。结果显示, 该体系可显著降低安全隐患与事故发生率, 提升施工人员安全意识和管控效率, 实现现场安全精细化、规范化管理, 为建筑工程施工现场安全管理提供可行技术方案与实践参考。

**关键词** 建筑工程; 施工现场; 安全管理体系

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.032

## 0 引言

建筑工程施工现场是施工活动的核心载体, 涵盖土建、机电等多个专业, 作业人员、施工机械、建筑材料高度集中, 高空坠落、触电、机械伤害、火灾等安全风险贯穿施工全过程, 安全管理是保障施工有序推进的核心任务。当前建筑工程施工现场安全管理仍存在诸多薄弱环节, 管理体系缺乏系统性, 责任落实不到位, 管控措施流于形式, 应急处置机制不健全, 各类安全隐患难以及时排查治理, 制约施工安全有序推进。基于此, 聚焦施工现场安全管理核心问题, 构建科学完善的安全管理体系, 优化实践路径与保障措施, 实现安全全流程、精细化管控, 成为解决当前现场安全管理困境的关键。

## 1 施工现场安全管理核心内涵与特征

### 1.1 核心内涵

建筑工程施工现场安全管理是施工全过程中, 围绕人员、机械、材料、环境、作业流程等核心要素, 通过建立管理体系、制定管控措施、开展安全培训、排查隐患、处置事故等一系列活动, 防范安全风险、杜绝安全事故, 保障施工人员生命财产安全与工程施工安全的系统性管理过程<sup>[1]</sup>。该管理贯穿施工准备、基础施工、主体结构施工、装饰装修至竣工验收全工序,

形成“风险识别—管控实施—隐患排查—应急处置”的闭环管理, 其中风险识别是基础, 管控实施是核心, 安全培训是前提, 应急处置是重要保障。

### 1.2 风险类型与管理特征

结合施工现场作业特点, 按风险性质与危害程度, 可将安全风险划分为四大类, 全面覆盖各类作业环节: 一是高空作业风险, 集中于主体结构、装饰装修环节, 主要表现为高空坠落、物体打击, 与防护不到位、作业平台不牢固等相关; 二是用电安全风险, 源于临时用电不规范、线路老化、接地保护缺失等, 易引发触电事故; 三是机械作业风险, 涉及塔吊、施工电梯等设备, 因设备性能不达标、违规操作、维护不及时引发机械伤害; 四是消防安全风险, 由易燃材料堆放不当、消防设施失效、违规动火等导致, 易造成人员伤亡与财产损失。

施工现场安全管理具有鲜明的特征: 一是复杂性, 作业环节多、人员流动大、风险因素交织, 管理难度较高; 二是突发性, 安全事故多由违规操作、隐患排查不及时引发, 难以提前精准预判; 三是全员性, 需管理人员、作业人员、技术人员全员参与, 任何环节疏忽都可能引发事故; 四是规范性, 需严格遵循建筑施工安全规范标准, 确保管控措施合法有效; 五是动

作者简介: 宋相永(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

态性,施工现场工况不断变化,安全风险随之动态调整,需建立动态管控机制<sup>[2]</sup>。

### 1.3 主要影响因素

施工现场安全管理效果受人员、机械、环境、管理四大因素影响:人员因素方面,施工人员安全意识薄弱、违规操作、专业技能不足,管理人员责任不落实、管理能力欠缺,是引发事故的主要主观因素;机械因素方面,设备性能不达标、维护保养不及时、安全防护缺失,直接增加安全风险;环境因素方面,作业空间狭窄、地质复杂、恶劣天气、照明不足等,影响作业规范性,加剧安全隐患;管理因素方面,体系不完善、责任模糊、管控不精准、培训不到位、应急机制不健全,导致管理流于形式。

## 2 研究方法与安全管理体系构建

### 2.1 研究方法

采用理论分析与试验研究相结合的方法开展研究:通过理论分析,明确施工现场安全管理核心内涵、风险类型与影响因素,梳理核心环节与关键技术,构建体系框架;选取典型住宅建筑工程项目作为试验对象,搭建安全管理体系并投入实践,设置传统安全管理组作为对照,对比分析安全隐患发生率、事故发生率、人员安全意识等核心指标,验证体系可行性与优越性,优化完善体系。

### 2.2 安全管理体系构建

#### 2.2.1 体系框架

结合施工现场安全管理需求,构建“决策层—管控层—执行层—监测层”四层管理体系,各层职责明确、协同联动,形成完整闭环管理,实现安全全流程、动态化、精细化管控。决策层由建设、施工、监理单位核心管理人员组成,负责整体规划、目标制定与重大决策,明确责任分工与管理原则;管控层由安全管理人员、技术人员组成,负责统筹协调、措施制定、安全培训与管控监督;执行层由施工班组与作业人员组成,严格遵循操作规范,落实防护措施,排查身边隐患;监测层负责动态监测现场安全状况,跟踪风险变化,排查隐患并及时反馈,确保管控措施及时调整、隐患整改到位<sup>[3]</sup>。

#### 2.2.2 核心环节与实践路径

1. 风险识别与分级:采用“全面排查+专业研判”相结合的方式,开展全工序风险识别,覆盖施工准备、基础施工、主体结构施工、装饰装修及竣工验收全阶段,排查工作由管控层牵头,联合执行层施工班组开展,每周完成一次全面排查,每月开展一次专业研判。

梳理形成完整的施工现场安全风险清单,明确风险名称、所在环节、成因及潜在危害,按重大、较大、一般、低风险四级分级,明确各等级管控重点与责任主体。其中重大风险由决策层牵头管控,每周跟踪管控进度;较大风险由管控层负责日常管控,每日排查;一般风险与低风险由执行层落实管控,定期上报管控情况,确保风险分级管控落地见效,不出现管控盲区。

2. 管控措施实施:针对不同等级、类型风险制定精准管控措施,形成“一风险一措施”的管控模式。高空作业严格规范作业平台搭设,要求搭设人员持证上岗,作业平台验收合格后方可使用,作业人员必须全程佩戴安全帽、安全带等防护用品,作业区域设置硬质围挡与安全警示标识,严禁无关人员进入;用电作业规范临时用电布置,严格遵循“三级配电、两级保护”原则,线路敷设整齐规范,避免乱拉乱接,安排专业电工定期检查线路设备,发现老化、破损及时更换,接地保护装置定期检测,确保符合安全标准;机械作业强化设备检测维护,进场设备必须验收合格,每日作业前进行设备检查,每月开展一次全面维护,操作人员必须持证上岗,严禁违规操作、超负荷作业;消防安全规范易燃材料堆放,划分专门堆放区域,远离动火作业区,配齐灭火器、消防栓等消防设施,定期检查维护,确保完好有效,动火作业必须办理动火审批手续,配备监护人员与灭火器材,严禁违规动火。

3. 安全培训教育:建立常态化培训机制,针对不同岗位开展针对性培训,涵盖安全法规、操作规范、风险防控、应急技能等内容,采用集中培训、现场实操等形式,定期考核,不合格者不得上岗,强化安全责任意识。

4. 隐患排查与整改:建立“日常巡查+定期排查+专项排查”机制,明确排查重点,对隐患实行“责任人、措施、时限”三明确,建立台账、销号管理,同时总结隐患成因,优化管控措施,防范同类隐患重复发生。

5. 应急处置管理:制定完善应急处置方案,明确各类事故处置流程、责任分工与物资保障,定期组织应急演练,配备齐全急救药品、救援设备等物资,定期检查维护,事故发生后及时启动方案,减少人员伤亡与财产损失,做好事故总结与方案优化。

#### 2.2.3 体系保障措施

为确保体系落地见效,采取五大保障措施,形成全方位、多层次的保障体系:一是人员保障,加强管理人员与作业人员专业培训,管理人员每季度开展一次安全管理专业培训,提升管理能力与应急处置水平。作业人员进场前必须完成安全培训,考核合格后方可

上岗,每月开展一次常态化安全培训,强化安全意识与操作规范,明确各岗位安全管理职责,签订安全责任书,落实安全责任制,将安全管理成效与个人绩效挂钩;二是制度保障,完善安全责任、培训、隐患排查、应急处置等各项管理制度,细化管理流程,明确各项工作的具体要求、责任主体与完成时限,确保安全管理有章可循、有规可依,定期对制度的执行情况进行检查,及时修订完善不适配施工现场实际的条款;三是技术保障,引入信息化、BIM等先进技术,搭建智能化安全管理平台,实现施工现场安全风险的实时监测、隐患排查的精准定位与管控指令的快速下发,利用BIM技术对高空作业、临时用电等危险环节进行模拟推演,提前排查潜在隐患,提升管控精准度与效率<sup>[4]</sup>;四是物资保障,合理配置安全防护、应急救援物资与施工机械,安全防护物资按施工人员数量足额配备,定期检查更换,应急救援物资定点存放、专人管理,确保应急时能够快速调用,施工机械优先选用性能达标、安全防护完善的设备,定期开展检测维护,保障设备安全运行;五是监督保障,建立建设、施工、监理三方联合监督机制,加大对违规操作、隐患未整改等行为的处罚力度,每周开展一次联合监督检查,每月进行一次全面考核,对管控成效突出的班组与个人给予奖励,对管控不力的进行通报批评与处罚,调动各方安全管理积极性。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 试验结果

试验周期内,对比体系应用组与传统管理对照组核心指标,结果显示:应用组安全隐患发生率1.2%,无重大隐患,较对照组(12.8%)下降90.6%;应用组未发生安全事故,发生率为0,较对照组(3.8%)大幅降低;应用组施工人员安全意识达标率98.5%、培训合格率100%、隐患整改率100%,管控效率较对照组提升70%;应用组安全管理合规率99%,显著优于对照组(80%),体系应用效果显著。

#### 3.2 结果讨论

试验结果表明,该安全管理体系具有显著优越性,可有效解决传统管理体系不完善、责任不落实、管控不精准等问题,核心优势体现在系统性、精准性、常态化三个方面:系统性覆盖全工序、全要素,打破传统管理碎片化弊端;精准性通过科学分级与针对性管控,聚焦高风险环节;常态化通过常态化培训、排查与演练,实现安全管理从被动应对向主动防控转变。同时,安全管理体系仍存在不足,需在后续实践中持

续优化完善:一是信息化技术应用深度不够,部分监测环节仍依赖人工巡查,智能化监测设备的覆盖率不足,数据采集与分析的效率有待提升,未能充分发挥信息化技术在安全管控中的核心作用;二是安全培训针对性不足,缺乏岗位个性化培训,培训内容多以通用规范为主,与不同岗位的实际作业风险结合不够紧密,导致培训效果未能完全落地;三是应急演练实战性不强,演练场景设置较为简单,与施工现场可能发生的实际安全事故贴合度不高,部分施工人员应急处置技能有待提升,演练后的总结复盘不够深入,未能充分发挥演练的预警与提升作用<sup>[5]</sup>。后续可加强信息化技术应用,扩大智能化监测设备的覆盖范围,优化智能化管理平台功能,提升数据采集与分析效率;优化培训方案,结合不同岗位的作业特点与风险类型,开展个性化、针对性培训,增加现场实操培训环节,提升培训效果;提升应急演练的实战性,结合施工现场常见安全事故设置演练场景,加强演练后的总结复盘,针对性提升施工人员的应急处置技能,进一步完善安全管理体系,提升管控成效。

### 4 结束语

针对建筑工程施工现场安全管理现存困境,通过理论分析与试验研究,明确了施工现场安全管理的核心内涵、风险类型与影响因素,构建了“决策层—管控层—执行层—监测层”四层安全管理体系,优化了核心管控环节与实践路径,提出了针对性保障措施,并验证了体系的可行性与有效性。该体系可有效降低安全隐患与事故发生率,提升人员安全意识与管控效率,解决传统管理短板,为建筑工程施工现场安全管理提供科学可行的技术方案与实践参考,助力施工安全高质量推进。

### 参考文献:

- [1] 陈胜谋.建筑工程施工安全管理体系的构建与实践研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(09):124-126.
- [2] 李达军.建筑施工现场安全管理体系构建与事故预防研究[J].建筑安全,2026,41(03):78-81,89.
- [3] 赵诗雨.建筑施工现场安全隐患识别与风险评估方法研究[J].城市建筑与发展,2025,06(20):143-145.
- [4] 赵立洲.基于风险分级的化工厂消防安全管理体系构建路径探讨[J].中国设备工程,2025(12):133-135.
- [5] 赵春景.基于风险分级管控的矿井现场安全管理策略研究[J].智库时代,2025(05):267-269.

# 城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控研究

仇大伟<sup>1</sup>, 梁浩<sup>2</sup>, 张磊<sup>3</sup>

(1. 山东沃莱建筑工程有限公司, 山东 青岛 266600;

2. 滨州国投测绘有限公司, 山东 滨州 256600;

3. 山东沃莱建筑工程有限公司, 山东 青岛 266600)

**摘要** 城市综合体集商业、办公、居住、休闲于一体, 体量庞大、工序复杂, 建筑施工与电力配套工程的协同衔接直接影响工程进度、质量、安全及投资效益。当前两者多采用分阶段、分主体管控模式, 存在工序衔接不畅、进度不同步、责任模糊、协同低效等问题, 易引发工期延误、成本增加、安全隐患。本文结合两者施工特点, 开展同步管控研究, 明确核心内涵与要素, 构建同步管控体系, 优化流程、明确分工、完善协同机制, 通过试验验证其可行性, 采用协同、动态、信息化管控方法制定策略。结果表明, 该体系可使工期缩短 15% 以上, 成本降低 12%, 质量合格率达 99%, 安全隐患下降 80%, 有效解决管控脱节问题。

**关键词** 城市综合体; 建筑施工; 电力配套工程; 同步管控; 协同机制

**中图分类号**: TU71; TM92

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.033

## 0 引言

城市综合体作为城市功能聚合的核心载体, 建筑结构复杂、功能业态多元, 施工环节涉及土建、机电、装饰装修等多个专业, 电力配套工程作为其正常运营的核心支撑, 贯穿建筑施工全过程, 涵盖变配电、线路敷设、设备安装、调试验收等多个工序。建筑施工与电力配套工程的协同同步, 是保障城市综合体建设顺利推进、如期交付的关键。当前, 两者管控多处于独立状态, 缺乏有效的协同机制, 建筑施工进度与电力配套工程推进不同步、工序衔接不合理, 易出现电力配套工程滞后于建筑施工, 或建筑施工未预留电力配套施工空间等问题, 不仅影响工程整体进度, 还会增加返工成本, 引发安全隐患。本文聚焦城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控核心问题, 明确同步管控的核心逻辑与实施要点, 构建科学的同步管控体系, 优化管控流程与协同机制, 通过试验验证体系的有效性, 解决两者管控脱节的短板, 实现工程进度、质量、安全、成本的协同管控<sup>[1]</sup>。

## 1 相关理论与工程特点

### 1.1 城市综合体建筑施工核心特点

城市综合体建筑施工具有体量庞大、工序繁杂、专业交叉多、施工周期长等特点, 核心施工内容涵盖

土建施工、机电安装、装饰装修、消防工程等多个专业, 各专业施工衔接紧密、相互影响。其施工过程具有明显的阶段性, 分为基础施工阶段、主体结构施工阶段、装饰装修阶段及竣工验收阶段, 每个阶段的施工重点不同, 对电力配套工程的需求也存在差异。

与普通建筑施工相比, 城市综合体建筑施工对施工精度、协同效率要求更高, 需兼顾多元业态的功能需求, 施工过程中需协调多个施工单位、多个专业班组, 易出现工序冲突、进度失衡等问题, 这也对电力配套工程的同步推进提出了更高要求。

### 1.2 城市综合体电力配套工程核心特点

城市综合体电力配套工程具有专业性强、技术要求高、与建筑施工衔接紧密等特点, 核心内容包括变配电系统安装、高低压线路敷设、配电箱柜安装、用电设备调试、防雷接地工程等, 贯穿建筑施工全过程, 与土建、机电等专业施工深度交叉。

电力配套工程的施工进度、施工质量直接影响城市综合体的交付使用与正常运营, 其施工需严格遵循电力工程相关规范, 确保用电安全与供电稳定性。同时, 电力配套工程需与建筑施工同步规划、同步施工、同步验收, 避免出现后期返工、改造, 降低工程成本与安全隐患。

**作者简介**: 仇大伟 (1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

### 1.3 同步管控核心内涵与核心要素

城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控，核心是打破两者独立管控的壁垒，构建“协同规划、同步推进、动态调整、闭环管理”的管控模式，实现两者在进度、质量、安全、成本等方面的协同联动，确保工程整体高效推进。

同步管控的核心要素包括四个方面：一是进度协同，确保建筑施工各阶段与电力配套工程施工进度匹配，避免出现进度脱节；二是质量协同，统一质量标准，加强两者施工质量的协同管控，确保工程质量达标；三是安全协同，排查两者交叉施工中的安全隐患，制定协同安全管控措施，保障施工安全<sup>[2]</sup>；四是成本协同，优化资源配置，减少返工、浪费，实现工程成本的合理控制。

## 2 研究方法 with 同步管控体系构建

### 2.1 研究方法

本文采用理论分析与试验研究相结合的方法，开展城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控研究：首先通过理论分析，明确同步管控的核心需求、实施路径与关键技术，构建同步管控体系框架；然后选取典型城市综合体建设项目作为试验对象，搭建同步管控体系并投入应用，设置传统管控组作为对照组，对比分析同步管控体系与传统管控模式的应用效果；最后通过数据统计、效果评估，验证同步管控体系的可行性与优越性，优化体系相关参数与管控策略<sup>[3]</sup>。

### 2.2 同步管控体系构建

#### 2.2.1 体系框架

结合城市综合体建筑施工与电力配套工程的施工特点，构建“决策层—协调层—执行层—监控层”四层同步管控框架，各层协同联动、职责明确，实现两者的深度协同管控。决策层负责同步管控的整体规划、目标制定与重大决策，由建设单位、施工单位、电力配套单位的核心管理人员组成，明确管控目标、责任分工与协同原则；协调层负责统筹协调建筑施工与电力配套工程的施工衔接，解决两者交叉施工中的矛盾与问题，确保工序衔接顺畅；执行层由建筑施工班组与电力配套施工班组组成，严格按照管控要求与施工方案执行施工任务，落实管控措施；监控层负责对施工全过程进行动态监测，跟踪进度、质量、安全、成本等管控指标，及时发现问题并反馈至协调层、决策层，确保管控目标实现。

#### 2.2.2 核心管控内容与实施路径

1. 进度同步管控：结合工程总工期，制定建筑施工与电力配套工程的同步进度计划，明确各阶段的施工任务、完成时限与衔接节点。基础施工阶段，同步推进配电室基础施工与建筑基础施工，预留电力管线敷设通道；主体结构施工阶段，同步开展高低压线路敷设与主体结构浇筑，确保电力管线与建筑结构同步成型；装饰装修阶段，同步推进配电箱柜安装、用电设备调试与装饰装修施工，避免后期返工；竣工验收阶段，同步开展建筑工程与电力配套工程验收，确保工程同步交付。建立进度动态调整机制，定期对比实际进度与计划进度，对滞后环节及时采取补救措施，确保进度同步。

2. 质量同步管控：统一建筑施工与电力配套工程的质量标准，严格遵循建筑工程与电力工程相关规范，建立协同质量管控机制。加强原材料质量管控，建筑材料与电力设备进场前共同检验，不合格材料与设备严禁使用；加强施工工序质量管控，对交叉施工环节（如电力管线敷设与土建浇筑）进行联合验收，确保施工质量达标；加强隐蔽工程质量管控，电力管线敷设、防雷接地等隐蔽工程施工完成后，由双方共同验收，验收合格后方可进入下一工序，避免隐蔽工程质量隐患。

3. 安全同步管控：针对建筑施工与电力配套工程交叉施工的特点，制定协同安全管控措施，排查交叉施工中的安全隐患。加强施工人员安全培训，提高施工人员的安全意识与操作规范，重点培训电力施工安全与交叉施工安全注意事项；加强现场安全巡查，设置安全警示标识，严禁违规操作，重点管控高空作业、用电作业等危险环节；建立安全隐患协同排查与处置机制，发现安全隐患后，及时通知双方施工单位，限期整改，确保施工安全。

4. 成本同步管控：优化资源配置，实现建筑施工与电力配套工程的资源共享，减少资源浪费与成本损耗。合理规划施工方案，避免交叉施工中的返工、改造，降低返工成本；加强材料与设备采购协同，批量采购降低采购成本；优化施工工序，提高施工效率，缩短施工周期，降低人工成本与管理成本<sup>[4]</sup>。建立成本动态监测机制，实时跟踪成本支出，及时发现成本超支问题并采取管控措施，确保工程成本控制在预算范围内。

#### 2.2.3 协同机制与管控保障

建立完善的协同协调机制，定期召开协同管控会议，由决策层、协调层、执行层共同参与，通报施工

进度、质量、安全等情况,解决施工中的矛盾与问题;建立信息共享机制,搭建信息化管控平台,实现建筑施工与电力配套工程的施工信息、管控数据实时共享,打破信息壁垒,提升协同效率;明确责任分工,签订协同管控协议,明确各方的职责与义务,避免责任划分模糊导致的推诿扯皮。

同时,采取严格的管控保障措施:加强人员培训,提升施工人员与管理者的专业能力与协同意识;建立考核评价机制,对双方施工单位的管控效果进行考核,考核结果与奖惩挂钩,调动各方的管控积极性;加强技术支撑,引入信息化管控技术、BIM 技术等,优化管控流程,提升管控精准度;建立应急处置机制,针对施工中可能出现的进度滞后、质量隐患、安全事故等问题,制定应急处置方案,确保及时响应、妥善处置。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 试验结果

试验周期内,分别对同步管控体系应用组与传统管控对照组的进度、质量、安全、成本等管控指标进行统计分析,结果如下:

1. 进度管控效果:同步管控应用组,建筑施工与电力配套工程进度同步率达 98%,工程阶段性节点完成率达 100%,总工期较计划缩短 15.2%;传统管控对照组,进度同步率仅为 72%,阶段性节点完成率为 83%,总工期较计划延误 8.7%,同步管控体系可有效实现两者进度同步,缩短工程总工期。

2. 质量管控效果:同步管控应用组,建筑工程质量合格率达 99%,电力配套工程质量合格率达 99.5%,交叉施工环节质量隐患发生率仅为 0.8%;传统管控对照组,建筑工程质量合格率为 88%,电力配套工程质量合格率为 89%,交叉施工环节质量隐患发生率为 12.3%,同步管控体系可显著提升工程质量,降低质量隐患发生率。

3. 安全管控效果:同步管控应用组,施工安全隐患发生率为 0.5%,未发生安全事故;传统管控对照组,施工安全隐患发生率为 4.2%,发生轻微安全事故 2 起,同步管控体系可有效降低安全隐患发生率,保障施工安全。

4. 成本管控效果:同步管控应用组,工程成本较预算降低 12%,返工成本占比仅为 1.3%;传统管控对照组,工程成本较预算超支 5.8%,返工成本占比为 8.5%,同步管控体系可有效控制工程成本,减少返工浪费。

#### 3.2 结果讨论

试验结果表明,城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控体系具有显著的优越性,能够有效解决传统管控模式中存在的进度脱节、质量不佳、安全隐患突出、成本超支等问题,其核心优势体现在协同性、动态性、精准性三个方面。

协同性是同步管控体系发挥作用的核心,通过构建协同机制、实现信息共享、明确责任分工,打破了建筑施工与电力配套工程独立管控的壁垒,实现了两者在进度、质量、安全、成本等方面的协同联动,解决了交叉施工中的矛盾与衔接问题<sup>[5]</sup>;动态性体现在通过动态监测与动态调整,能够及时跟踪施工进度与管控指标,对滞后环节、质量隐患、成本超支等问题及时采取补救措施,确保管控目标实现;精准性体现在通过优化管控流程、引入信息化技术,明确各阶段的管控重点与实施要点,提升了管控的精准度与效率。

### 4 结束语

本文聚焦城市综合体建筑施工与电力配套工程同步管控核心问题,通过理论分析与试验研究,明确了同步管控的核心内涵、核心要素与实施路径,构建了“决策层—协调层—执行层—监控层”四层同步管控体系,优化了进度、质量、安全、成本的协同管控流程,完善了协同机制与管控保障措施,验证了同步管控体系的可行性与有效性。研究结果表明,该同步管控体系可有效实现建筑施工与电力配套工程的协同联动,显著缩短工程工期、提升工程质量、降低安全隐患发生率与工程成本,解决了传统管控模式中两者脱节的核心问题,为城市综合体建筑施工与电力配套工程的协同管控提供了科学、可行的技术方案,为同类工程的管控提供了实践参考。

#### 参考文献:

- [1] 许永佳. 建筑工程项目全周期质量管理体系优化研究[J]. 建筑与装饰, 2025(20):70-72.
- [2] 郑鹏涛. 商业综合体消防安全管理方式研究[J]. 大众标准化, 2021(21):202-204.
- [3] 吕文松. 大数据与通信技术融合下的消防监督管理智能化研究[J]. 消防界(电子版), 2025, 11(15):139-141.
- [4] 陈正晖. 建筑工程预结算与施工成本管理的关系探究[J]. 福建建材, 2020(02):109-110, 66.
- [5] 武艺萌, 王楨栋, 王昊, 等. 城市综合体绿化经济可持续性提升策略研究[J]. 建筑学报, 2024(S2):106-111.

# 建筑工程检测鉴定的常见问题及质量管控对策研究

刘浩然

(安徽开埠建筑有限公司, 安徽 亳州 236800)

**摘要** 建筑工程检测鉴定是保障工程质量安全、规范行业发展的核心环节。然而,当前行业内仍存在检测标准不统一、技术手段滞后、流程管控缺位等突出问题,严重影响检测结果准确性与公信力,给工程安全埋下隐患。本文聚焦建筑工程检测鉴定工作实际,从机构、人员、技术设备、流程管理四个核心层面剖析各类问题的具体表现与潜在危害,结合行业发展现状与工程实践经验,针对性地提出规范机构管理、提升人员素养、优化技术设备配置、健全流程管控机制的质量管控对策,以期为解决行业乱象、强化检测鉴定质量、防范工程安全风险提供参考,进而推动建筑工程检测鉴定行业规范化、良性化发展,保障建筑工程质量安全稳定。

**关键词** 建筑工程; 检测鉴定; 鉴定机构; 鉴定人员; 鉴定技术

中图分类号: TU712; TU198

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.034

## 0 引言

建筑工程检测鉴定是守护工程质量安全、引领行业规范发展的核心支撑,更是建筑行业高质量发展进程中不可或缺的关键环节。当前,随着新型建筑结构、环保材料广泛应用,工程复杂度持续提升,检测鉴定行业面临的挑战日益凸显,各类突出问题仍未根治,不仅影响检测结果的准确性与权威性,更给建筑工程长效安全埋下潜在隐患。本文立足于行业发展新形势与工程实践现状,剖析检测鉴定工作中的各类突出问题,探寻问题产生的根源,针对性提出科学可行的质量管控对策,为规范行业秩序、强化质量监管、防范工程安全风险提供支撑,助力检测鉴定行业良性发展。

## 1 建筑工程检测鉴定常见问题分析

### 1.1 检测鉴定机构层面问题

机构资质管理与运营规范不足,直接侵蚀检测鉴定的公信力,同时拉低结果准确性,成为行业良性发展的阻碍。资质挂靠、超范围经营是当前的突出乱象,部分不具备相应资质的小型团队或个人,通过依附正规机构获取业务准入资格,规避监管部门核查,其服务能力远达不到行业标准却混入市场,打破公平竞争格局的同时,让大量不合格检测报告流入工程领域。内部质量管理体系缺失或流于形式,进一步放大运营风险,多数违规机构未建立完整的岗位权责划分机制,

检测流程缺乏标准化约束,从样品接收、检测实施到报告出具,各环节衔接松散,无专人负责全程把控。在市场化竞争压力下,部分机构陷入恶性竞争误区,为留住委托方客户,主动迎合不合理需求,擅自调整检测参数、篡改原始数据,背离检测鉴定的客观性原则。

### 1.2 检测鉴定人员层面问题

检测人员专业能力和职业操守的不平衡,成为限制检测鉴定工作水准的关键障碍,直接关系到技术应用成效和结果可信程度。建筑领域技术更新步伐加快,新式建筑材料、复杂结构类型持续出现,而一部分检测人员缺少主动学习意愿,专业知识跟进缓慢,对于新型材料的力学特征、结构系统的受力特性理解不够充分,难以准确适配相应的检测手段和技术规范<sup>[1]</sup>。实际操作技能的不足同样带来一系列连锁反应,现场检测中对仪器设备的运用不合规范,取样地点选取不恰当,都会造成检测数据产生误差,无法如实体现工程实际质量状态,更为严峻的是职业道德缺失现象,个别人员受到利益驱使,有意掩盖检测流程中发现的质量问题,乃至捏造检测数据、开具不实报告,给不合格工程提供“合格凭证”。

### 1.3 检测鉴定技术与设备层面问题

技术应用设备配置出现不合理情况,直接制约了检测鉴定结果的精准程度,难以满足复杂工程对质量

作者简介: 刘浩然(1990-),男,本科,工程师,研究方向:工程检测鉴定。

评估的高维度、精细化需求。传统检测技术大多针对常规建筑结构与材料的特性设计,对隐蔽工程、异形结构以及老旧建筑等复杂检测场景时,其局限性明显;以混凝土结构内部裂缝检测为例,传统超声检测技术很难精确定位裂缝深度和走向;针对钢结构焊缝内部缺陷,传统检测手段的识别率偏低,容易造成质量隐患被漏判,给工程结构安全埋下风险。新型检测技术(无损检测、智能化监测等)虽然具备优势,但推广应用进度缓慢,主要面临两大制约因素:一是技术成本较高的限制,中小检测机构难以承担设备购置和技术培训所需费用;二是技术适配性不足,部分新型技术尚未形成统一的行业操作标准,检测人员对技术的掌握程度参差不齐,无法充分发挥技术具有的优势。检测设备的老化和校准缺位进一步加剧问题,部分机构为控制成本,长期使用超期服役的检测设备,仪器精度衰退后没有及时检修校准,检测数据的误差范围超出规范允许值,设备管理缺乏系统性,没有建立完善的采购、校准、维护档案,无法追溯设备使用状态和性能变化,导致检测工作从源头失去数据支撑的可靠性,影响后续质量评估和决策的科学性。

#### 1.4 检测鉴定流程与管理层面问题

检测流程控制不严谨、管理机制不健全,直接造成检测鉴定工作的秩序混乱,使得全流程质量管控失去有效支撑,无法为工程质量评估提供可靠依据。检测委托环节的规范性缺失,为后续检测鉴定工作埋下风险隐患,部分委托方为避开质量追责,存在刻意提供不完整、不真实的工程资料,隐瞒工程施工流程里的变更、违规操作等关键信息,部分委托方甚至插手检测范围划定,有意绕开质量薄弱环节<sup>[2]</sup>。现场检测环节控制松散,取样、送检流程缺少有效监督,取样人员没有严格按照规范要求随机取样,出现针对性挑选合格样品的现象,送检流程里样品保管不妥当、标识搞混,造成检测样品跟工程实际情况不符,检测数据管理混乱问题明显,数据记录不及时、不规范,手写记录马虎、关键参数遗漏等情况,审核环节流于形式,多级审核机制缺位,无法及时发现数据错误与逻辑矛盾,归档管理缺少标准化规范,检测报告、原始数据、仪器校准记录等资料分散存储;数字化溯源体系的缺失,导致数据复核、责任追溯时难以快速调取完整资料。全流程管理的系统性漏洞让检测鉴定工作失去连贯性和严肃性,使得各环节风险无法得到有效防控,最后造成检测结果失实,难以对工程质量管控形成有效支撑。

## 2 建筑工程检测鉴定质量管控对策

### 2.1 规范检测鉴定机构管理

强化机构资质监管与合规运营,是筑牢建筑工程检测鉴定行业发展根基的关键举措,从源头遏制违规行为。资质审批环节需严格执行行业标准,细化资质分级分类要求,对机构的技术人员配置、设备条件、场地设施等进行全面核查,杜绝不符合条件的机构进入市场。建立常态化动态核查机制,定期对已取得资质的机构开展专项检查,重点核查资质使用情况、业务范围合规性,对资质挂靠、超范围经营等行为依法从严查处,情节严重的吊销资质证书,形成有力震慑。健全机构内部质量管理体系,明确各岗位权责边界与工作流程标准,将检测实施、数据审核、报告出具等环节纳入闭环管理,确保每一项工作都有章可循、有据可查<sup>[3]</sup>。构建行业信用评价体系,整合监管部门检查结果、市场反馈信息、违规处罚记录等,建立机构信用档案,实行信用分级管理。信用评价结果与市场准入、业务承接挂钩,对信用良好的机构给予政策扶持,对失信机构实施联合惩戒,引导行业形成“守信激励、失信惩戒”的良好氛围,推动机构主动规范运营。

### 2.2 提升检测鉴定人员素养

构建系统化的培养与考核机制,打造专业合格的检测队伍,为检测鉴定工作质量提供人才保障,建立常态化培训体系,结合行业技术发展走向和工程实际需要,针对性安排新型建筑材料、复杂结构检测、智能化检测技术等培训内容,借助理论授课与实操演练相结合的办法,带动检测人员更新知识储备、提升实操能力。培训内容需要定期优化调整,紧跟行业标准更新与技术迭代节奏,确保人员能力适应行业发展需要,完善人员考核与准入制度,设定严格的上岗门槛,对拟入职人员开展专业知识、实操技能与职业素养综合考核,考核合格以后才能上岗,建立在职人员定期考核机制,把考核结果跟岗位调整、薪酬待遇挂钩,倒逼人员主动提升专业能力。加强职业操守教育,借助案例警示、职业道德讲座等形式,强化检测人员的责任意识与底线思维,明确数据造假、出具虚假报告等行为的法律后果与行业惩戒措施,这有助于建立人员信用档案,记录考核结果、违规行为等,实现人员从业全过程可追溯,引导人员自觉坚守职业准则。

### 2.3 优化检测鉴定技术与设备配置

推动技术上的创新与设备方面的升级,成为提高检测鉴定工作精准程度和效率水平的关键路径,使其

能够适应复杂工程质量评估方面的需要。加强新型检测技术的研究开发与推广使用,支持科研单位同检测机构之间展开合作,针对隐蔽工程、复杂结构检测里遇到的困难点,研究开发针对性明确、精度较高的检测技术,如智能化无损检测、结构健康监测这类技术,使检测工作的科学性与效率得到提升<sup>[4]</sup>。建立一套新型技术推广的办法,借助行业内部交流会、技术试点应用这些形式,加快已经成熟技术的普及速度,同时完善配套的操作标准与技术规范,明确技术应用的范围与操作上的要求,规范检测设备采购、校准、维护的流程。机构要结合业务上的需要,采购符合行业标准、精度达到要求的检测设备,避免购置质量低劣的设备,建立设备全生命周期的管理档案,详细记录采购信息、使用状态、校准情况、维护记录这些内容,定期对设备做校准与检修,校准工作要委托具备相应资质的机构来开展,确保设备精度一直保持在达标状态,这有助于建立技术与设备共享机制,鼓励区域内检测机构联合组建设备共享平台,整合优质设备资源,降低中小机构的设备投入成本,同时促进技术经验方面的交流,让行业整体设备配置水平与技术应用能力得到提高。此外,还要加大对检测技术研发的政策和资金扶持,鼓励企业和科研院所开展核心技术攻关,突破国外技术垄断,研发出适配我国建筑工程特点的本土化检测技术和设备。同时,建立技术设备更新换代的引导机制,推动老旧设备有序淘汰,引导机构主动引入先进技术和设备,让检测鉴定的技术设备水平始终跟上建筑工程行业的发展步伐,提升检测结果的精准性和可靠性。

#### 2.4 健全检测鉴定流程管控机制

强化全流程闭环管理,规范检测鉴定各个环节工作,实现从委托到归档整个链条质量可控,规范委托与资料审核流程,明确委托方责任,要求委托方如实提供工程图纸、施工记录、材料合格证等完整资料,检测机构要对资料真实性、完整性进行严格核查,对资料缺失、虚假的委托项目,坚决不予承接<sup>[5]</sup>。资料审核结果需要形成书面记录,作为后续检测工作的基础依据。加强现场检测全过程监督,落实取样、送检见证制度,由委托方、监理方与检测机构共同参与取样过程,确保样品具有代表性,取样后及时做好标识、密封处理,全程跟踪送检过程,防止样品被调换、篡改。完善检测数据管理流程,推行数字化记录方式,确保数据记录及时、准确、完整,避免手写记录的随意性与误差。建立多级数据审核机制,由专人对检测数据

进行复核,核查无误后签字确认,确保数据逻辑严密、结果可靠,优化检测报告出具流程,报告需要明确检测依据、方法、数据、结论等关键信息,表述精准规范,经审核通过后方可出具,同时完善数据记录、审核、归档数字化管理体系,实现检测资料电子化存储与溯源,便于后续数据复核、责任追溯,确保全流程可管控、可追溯。除此之外,还要建立全流程风险防控机制,对委托审核、现场检测、数据处理、报告出具等各环节的潜在风险进行梳理排查,制定针对性的防控措施,同时引入第三方监督机制,邀请专业的监理单位或行业专家对检测鉴定全流程进行随机抽查,及时发现并纠正流程执行中的不规范行为,让流程管控的刚性约束落到实处,保障检测鉴定工作每一个环节都规范有序,从流程上确保检测结果的真实性和权威性。

#### 3 结束语

建筑工程检测鉴定工作的质量直接关系到建筑工程的安全稳定性,关联行业健康发展与公共安全利益,其重要性随着建筑行业的转型升级日益凸显。当前检测鉴定领域存在的机构违规运营、人员素养不足、技术设备滞后、流程管控松散等问题,并非孤立存在,而是相互关联、相互影响,需统筹兼顾、系统破解。本文针对各类常见问题提出的管控对策,立足于行业实际、贴合工程需求,注重可操作性与实用性,旨在补齐行业发展短板、规范检测鉴定行为。未来,需持续强化监管力度、推动技术创新、完善行业体系,引导检测鉴定机构坚守职业底线,提升服务水平,让检测鉴定工作真正发挥质量把关作用,为建筑行业高质量发展筑牢安全屏障。

#### 参考文献:

- [1] 肖静文. 建筑工程检测鉴定与加固技术探究[J]. 散装水泥, 2024(04):101-103.
- [2] 李瑞雪, 刘嘉诚, 任洹, 等. 既有加固后砌体结构的检测鉴定研究[J]. 工程质量, 2024, 42(07):34-38.
- [3] 耿宪坤. 建筑工程安全性检测鉴定方法应用[J]. 工程建设与设计, 2024(01):208-210.
- [4] 姜可可. 建筑工程结构检测鉴定方法[J]. 大众标准化, 2023(20):174-176.
- [5] 石玮. 建筑框架结构安全鉴定检测方法研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(04):98-100.

# 注塑模具设计中的创新技术与优化策略

方贤能

(宁海县第一注塑模具有限公司, 浙江 宁波 315600)

**摘要** 注塑模具设计在塑料制品成型过程中承担结构确定与质量控制的核心任务, 传统设计路径多依赖经验判断与试模修正, 在复杂结构与多腔布局条件下易出现充模不均与周期延长问题。本文围绕上述情形, 结合数字化设计、模流分析与参数寻优方法, 对模具结构与工艺参数之间的匹配关系进行系统梳理, 并在浇注系统配置、冷却路径布置及仿真结果校核等环节展开技术整合, 以期为模具设计向精细化与工程化方向发展提供参考。结果表明, 通过流动路径计算与参数约束调整, 浇口位置、流道尺寸与冷却参数在设计阶段即可完成协同匹配, 试模修正频次明显下降, 成型稳定性与生产节拍得到同步强化。

**关键词** 注塑模具设计; 模流分析; 参数寻优; 冷却系统; 结构优化

**中图分类号**: TQ320.66

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.035

## 0 引言

复杂塑料制品在尺寸精度与外观一致性方面提出更高要求, 模具结构与成型行为之间的耦合关系随之凸显, 流动路径受限或温度分布不均时, 熔体前沿推进失稳与局部收缩差异容易叠加, 制品缺陷在成型阶段逐渐放大。传统设计依赖经验匹配结构尺寸与浇注方式, 在多腔或长流程条件下难以准确对应压力传递与热量扩散过程, 结构调整往往滞后于实际成型表现, 设计与生产之间存在偏差。设计活动逐步引入流动计算与参数约束后, 浇口布置、流道尺寸及冷却路径开始围绕材料特性与几何条件进行协同设定, 模具结构在构型阶段即具备一定的可校核性, 复杂条件下的成型稳定性由此获得更可靠的支撑。

## 1 传统注塑模具设计的局限性分析

### 1.1 经验主导下的结构设计偏差

传统注塑模具设计多依赖工程经验展开, 结构尺寸与分型方式多在既有案例基础上进行类比推断, 制品几何形态趋于复杂或壁厚分布出现明显不均时, 经验路径难以准确对应熔体在型腔内的实际流动状态, 设计初期即可能埋下充模不均与局部过压隐患<sup>[1]</sup>。流道截面、浇口位置及排气结构如果没有结合压力场与温度场协同分析进行匹配, 熔接痕、气穴及短射现象在后续成型阶段逐步显现, 制品表面质量与尺寸精度同步受限, 结构调整呈现滞后特征。进一步来看, 多腔模具在分流道平衡控制不足时易出现充模不同步问

题, 各型腔压力差异逐渐放大, 成型收缩率难以统一, 进而影响批量生产的一致性与稳定性。

### 1.2 试模依赖下的周期与成本约束

在传统设计中, 模具结构合理性多依托试模结果反向修正, 初次开模后需根据充模状态与制品缺陷逐轮调整浇口尺寸、流道布局及冷却参数, 修模过程呈现多次迭代特征, 开发周期随之被持续拉长。反复试模过程中, 材料消耗、设备占用及人工投入不断累积, 当涉及大型模具或高精度零件时, 加工与调试成本同步上升, 同时生产节拍难以提前锁定, 模具投产节点存在不确定性。进一步分析可见, 试模阶段参数调整多依赖现场经验判断, 温度场与压力分布缺乏系统反馈支撑, 修模方向易出现反复修正路径, 致使资源投入与时间消耗呈递增趋势。

## 2 注塑模具设计中的创新技术

### 2.1 数字化设计与模流分析技术

数字化设计与模流分析直接嵌入模具结构确定过程, 围绕熔体在流道与型腔内的流动路径及压力分布展开计算, 在三维模型建立完成后即可对浇口位置与流道截面进行校核, 当流动距离与壁厚比值偏离合理区间时, 进料方式随之调整以保证充模连续性。熔体流动状态常以剪切速率进行刻画, 计算公式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

式(1)中,  $\dot{\gamma}$  表示剪切速率,  $Q$  为体积流量,  $R$  为流道半径, 该关系揭示流道尺寸与流量变化会直接影响

**作者简介**: 方贤能 (1974-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 模具设计开发。

熔体黏度与压力传递过程。结合计算结果对充模时间、型腔压力及熔体温度进行控制,充模时间多控制在0.5~3.0 s区间,最大注射压力宜限定在80~120 MPa范围,熔体温度维持在200~260 ℃区间,从而在设计阶段完成流动状态与结构参数的匹配。

流动状态完成量化后,结构调整转入浇注系统与排气路径的协同修正,型腔内压力峰值若集中于浇口区域,可通过扩大浇口截面或改变进料位置对压力分布进行重排,以降低局部过压风险,流动末端出现充填不足迹象时,需缩短流道长度或布置辅助进料点以增强熔体推进能力<sup>[2]</sup>。排气结构在复杂型腔中承担关键作用,排气槽深度一般控制在0.02~0.04 mm区间,以保证气体顺利排出且不引发飞边,流道截面尺寸与剪切速率之间存在直接关联,局部截面过小容易引发黏度上升与流动阻力增加,因而需结合流量分布对截面尺寸进行匹配调整,结构参数在计算结果与成型需求之间形成对应关系。

## 2.2 智能优化与参数寻优技术

智能优化与参数寻优技术嵌入模具设计决策过程,围绕浇口位置、流道尺寸及冷却参数构建多变量协同分析路径,在模型参数初步设定后,借助遗传算法或粒子群算法对设计变量进行迭代筛选,当适应度函数以充模均匀性与压力波动为约束条件时,最优参数组合逐渐趋于稳定区间。参数寻优过程中,浇口截面尺寸与流动阻力呈反向关系,冷却水道间距通常控制在20~40 mm范围以保证温度场分布均衡,冷却时间多限定在8~20 s区间以压缩成型周期并避免内应力集中。伴随迭代过程推进,型腔内压力峰值与温度梯度同步得到校正,设计变量由离散调整转入连续优化状态,参数组合在多轮筛选后趋于收敛,从而在设计阶段形成相对稳定的结构参数方案。

## 2.3 模具结构创新与冷却技术

模具结构创新与冷却技术围绕热量传递路径与熔体输送过程同步调整,传统直线水道在复杂型腔中易形成局部热积聚,因而随形冷却结构逐步引入,冷却通道沿型腔曲面分布以缩短热扩散距离并稳定温度场<sup>[3]</sup>。对于壁厚差异明显的制品,冷却回路常采用分区布置方式,局部强化冷却强度以削弱温度梯度波动,参数设定中,冷却水道直径一般控制在6~12 mm范围,水道间距多取15~25 mm,冷却介质流速维持在0.5~1.5 m/s区间以保证换热过程连续,同时热流道结构逐步替代传统冷流道,熔体在输送过程中保持熔融状态,温降幅度得到控制,流动前沿稳定性随之增强,压力

损失与充模均匀性在设计阶段可被预判与评估,结构与冷却路径在协同调整中逐渐形成稳定匹配关系。

冷却结构进一步细化过程中,冷却回路形式对温度场分布具有直接影响,并联式回路有利于维持各区域冷却强度一致,适用于多腔或对称结构布置,串联式回路易形成沿程温差,在局部强化冷却需求较高区域可作为辅助配置。随形冷却通道与型腔表面距离通常控制在8~12 mm区间,以保证热量能够在较短路径内导出,同时避免对模具结构强度产生削弱,针对局部高温积聚区域,可借助嵌入高导热铜合金镶件形成快速导热通道,热量沿镶件路径向冷却回路传递,从而降低局部温度峰值。热流道系统中喷嘴类型选择同样影响熔体温度稳定性,针阀式结构有利于控制进料节奏并减少拉丝现象,点浇口形式更适用于小型制品的快速充填,冷却结构与流道形式在组合配置过程中形成对应关系。

## 2.4 绿色制造导向的模具设计技术

绿色制造导向下的模具设计围绕材料利用率与能耗控制同步展开,在结构设计阶段就对流道形式与冷却路径进行约束,传统冷流道体系在成型过程中会形成浇口凝料,材料需经过二次回收处理方可再利用,工序链条随之拉长,热流道结构引入后,熔体在输送过程中保持熔融状态,凝料不再产生,材料利用率得到提高,同时修边与回收环节明显减少<sup>[4]</sup>。冷却系统作为能耗集中环节,参数设定直接影响设备负荷,冷却水温差通常控制在5~10 ℃区间以维持稳定传热条件,循环水流速多取0.8~1.5 m/s以增强对流换热能力,成型周期中冷却时间占比宜控制在60%以内以压缩能源消耗。针对局部热积聚区域,常结合高导热模具钢或镶件结构进行强化处理,热量在关键区域快速导出,型腔温度分布逐步趋于均衡,制品收缩差异得到控制。

## 3 注塑模具设计的优化策略

### 3.1 匹配材料特性,优化初始结构

初始结构设计围绕材料流动性与收缩行为展开匹配,选用PP、ABS等热塑性材料时,收缩率通常分布在0.5%~2.5%区间,型腔尺寸需依此预留补偿量,以避免冷却后尺寸偏差累积<sup>[5]</sup>。针对壁厚变化明显的制品,流动距离与壁厚比值需控制在合理范围内,过高比值易导致充模末端压力衰减,由此需在结构布置中调整浇口位置或增设辅助进料点以维持熔体前沿推进稳定。分型面与型芯布局也需结合材料冷却收缩路径进行协同设定,避免局部收缩受限引发内应力集中,

在此基础上对流道截面尺寸进行初步匹配,常将主流道直径控制在 4~8 mm 范围以平衡流动阻力与充模速度,结构参数在设计阶段即完成与材料性能的对应关系校正。

### 3.2 优化浇注系统,协同冷却设计

浇注系统调整需与冷却路径同步配置,结构初步匹配完成后,浇口位置与流道布局需优先校正以均衡充模过程,制品呈长流程或多腔分布时,进料位置宜向中心或对称区域转移,流道长度随之压缩以降低压力衰减。分流道截面尺寸通常控制在主流道的 0.6~0.8 倍范围,以维持流速连续并减少局部滞流区,同时结合冷却系统进行协同布置,冷却水道间距多取 15~25 mm 以覆盖主要热积聚区域,流速维持在 0.5~1.5 m/s 区间以保证换热过程稳定。

浇注路径与冷却回路之间需进一步进行匹配调整,流道截面尺寸变化会直接影响熔体流速分布,局部流速过高易引发剪切升温现象,从而改变冷却负荷分布,因此在分流道设计过程中需结合温度场分布对截面尺寸进行修正。多腔模具中,分流道长度与分支位置宜保持对称,以减小各型腔之间的充模时间差异,型腔间压力波动由此得到控制。壁厚变化明显区域往往成为热积聚集中位置,冷却回路可结合结构特征进行局部加密或调整走向,以削弱温度梯度引发的收缩差异,在此过程中浇注路径与冷却分布形成联动关系,熔体充填过程与热量释放路径在结构调整中逐渐形成匹配关系。

### 3.3 验证仿真结果,修正设计参数

仿真结果在结构优化完成后进入校核环节,围绕充模时间、型腔压力及温度分布进行对比分析,流动前沿推进不均或局部压力峰值偏高时,需针对性调整浇口尺寸与注射参数以削弱波动影响。充模时间通常控制在 0.5~3.0 s 区间,如果末端区域出现短射趋势,可适当提高注射速度或扩大浇口截面以增强流动能力,型腔内最大压力宜限定在 80~120 MPa 范围,压力集中于局部区域时,流道截面需重新匹配以分散负载。仿真判读过程中,压力峰值位置与流动路径之间的偏差可作为结构修正依据,进料方向与分流道布局需同步调整以保证压力传递连续性。

温度场分布作为冷却策略修正的重要依据,熔体温度多维持在 200~260 °C 区间,局部降温过快易引发收缩不均,冷却水道布局需进行局部强化或延长冷却时间以平衡温度梯度。温度梯度超过 10~15 °C 区间时,热积聚区域需重点修正,冷却路径与结构尺寸

在调整过程中形成联动关系,参数修正通常依托多轮仿真结果进行反复比对,结构尺寸与工艺参数在持续校核中逐渐形成稳定匹配状态,仿真分析与设计方案之间保持动态对应关系。

### 3.4 控制成本投入,提升生产效率

成本控制与生产效率需在结构与工艺参数匹配基础上同步展开,在前序设计已完成流道与冷却协同配置后,进一步压缩成型周期成为关键环节。当冷却时间占比过高时,可结合型腔温度分布调整冷却水道布局或提高循环水流速,通常将流速控制在 0.8~1.5 m/s 区间以增强换热效率<sup>[6]</sup>。针对材料利用率问题,流道结构需进行精简处理,减少不必要的分流长度或采用热流道结构以削减凝料产生,从而降低原料消耗。在设备运行层面,注射压力与保压时间需进行匹配调整,最大注射压力宜控制在 80~120 MPa 范围,保压时间多限定在 3~8 s 区间以避免能耗累积。结构参数与工艺条件在调整过程中形成协同关系,生产节拍与资源投入在结构与参数匹配过程中形成稳定控制关系。

## 4 结束语

注塑模具设计由经验判断转入以参数约束为基础的结构匹配模式,流动行为与温度场分布在设计阶段即被纳入统一考量,浇注路径与冷却布局之间形成稳定对应关系,型腔内压力传递与热量释放保持连续状态。在复杂结构条件下,关键参数在建模阶段完成校核与调整,试模阶段的反复修正频次明显降低,资源投入与开发周期得到压缩。结构尺寸与工艺参数在多轮比对中形成稳定匹配,成型过程中的收缩差异与尺寸波动被控制在合理范围,模具运行节拍与产品质量保持一致,注塑模具设计在工程实践中呈现出更高的确定性与适配能力。

## 参考文献:

- [1] 郑贝贝,任建平.基于增材制造的随形冷却水路注塑模具技术研究进展[J].塑料工业,2025,53(12):7-14.
- [2] 杨磊.模具工业发展现状及注塑模具新工艺和新技术[J].南方农机,2021,52(14):135-137,143.
- [3] 叶真铭,唐臣升,王韬,等.基于模具技术的复合材料壁板制造工艺研究[J].工具技术,2023,57(04):123-127.
- [4] 王媛,杨晶,孙然.基于CAD/CAE技术的复杂面板注塑模具设计研究[J].科技资讯,2023,21(21):100-104.
- [5] 李祥伟.注塑模具数字化设计与智能制造技术研究[J].现代制造技术与装备,2022,58(07):176-179.
- [6] 李国辉,顾吉仁.基于CAD技术的注塑模具设计与仿真研究:评《模具设计基础》[J].铸造,2021,70(09):1138.

# 装配式建筑电气工程施工技术与应用研究

秦治福

(山东胜利建设监理股份有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要** 为提升装配式建筑电气工程施工质量与实施成效, 推动建筑产业工业化、现代化发展, 本研究围绕装配式建筑电气工程施工技术及应用展开相关分析。首先阐明了装配式建筑电气工程的核心价值和路径, 其次系统剖析了工程安装阶段的关键技术要点, 再者重点探讨了管线敷设的方式和电气装置安装工艺等内容, 最后结合工程实际总结了技术应用的操作方式与控制要点, 以期为促进装配式建筑产业升级提供电气技术参考。研究结果表明, 规范施工技术应用能够有效提升装配式建筑电气工程整体实施水平。

**关键词** 装配式建筑; 电气工程; 线路敷设技术; 照明系统安装技术; 建筑工业化

中图分类号: TU758.1; TU964

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.036

## 0 引言

随着建筑工业化转型的全面有序开展, 装配式建筑凭借模块化建造、环境友好、过程可控等优势, 成为行业发展的主流趋势。在模块化的建筑体系中, 作为建筑功能实现的“神经中枢”, 电气工程是装配式建筑体系统中不能替代的核心单元, 其施工水平和实用成果直接影响建筑的功能运转与安全保障。然而, 传统电气安装模式存在作业效率低、预制构件协调性差等诸多问题, 专项研究装配式建筑电气系统安装技术及应用案例, 对提升装配式建筑整体质量、推动建造产业转型升级具有十分重要的现实意义。

## 1 装配式建筑电气工程概述

### 1.1 装配式建筑的概念与特点

装配式建筑是将建筑构件在工厂进行预制的工艺, 之后把工厂预制构件转运到作业现场拼合的建造模式, 它的特点非常显著, 实施效果十分突出。利用构件预制化可有效降低工期压力, 降低施工现场的湿作业数量; 品控的把握力度很好。通过模块化技术规范 and 分阶段质量审查, 保证构件规格达标并延长其使用期限; 可持续性产生的效果显著, 大大减少施工所产生的声波、颗粒物飘散、垃圾堆积和能源支出; 既可以重复利用, 又让标准保持一致, 有益于达成大批量生产及快速仿制。

### 1.2 电气工程在装配式建筑中的重要性

电气工程是装配式建筑高效运行的保障, 贯穿于设计、生产、运输、装配的各个环节。全方位协调能

源分配、光电系统、通信矩阵、安防预警、智能交互和避雷设施等功能模块, 是保障建筑稳定并持久运行的关键依托。该方案的系统可靠水平、集成灵活水平与预制覆盖水平直接影响建筑的空间品质、运维的简易程度、风险抵御水平和可持续使用表现。通过优化照明设计和供电方案, 可以提升环境的品质和视觉健康。完善的节能供电方案可支撑设备长时间运转, 全面提升建筑综合效能。

### 1.3 装配式建筑电气工程的发展现状

装配式建筑电气工程发展的势头迅速, 随建筑工业化进程不断加快, 运用装配式技术的建筑项目数量不断上升。电气安装的实施也在不断进行优化, 管线嵌入式安装、箱体精准预留和接口标准工艺于预制构件当中渐渐完善<sup>[1]</sup>。BIM技术系统运用到设计与生产链当中, 极大地改善了机电单元和预制构件的装配贴合度。规范要求逐步系统化, 为装配式建筑电气工程施工提供了更科学的实施依据。在工程实施阶段, 依旧存在一些缺陷, 呈现出的问题多为技术整合程度有限、跨工种配合有待更好优化、施工偏差影响电气精度, 以及后期运维检修和模块替换机制不够完善等。这些情形阻碍了装配式建筑电气工程的升级。

## 2 装配式建筑电气工程施工关键技术

### 2.1 线路敷设技术

线路分布是装配式建筑电气工程的实施重点, 覆盖构件预制、现场装配和系统联调的各个环节。在构件厂预制阶段, 要参照深化设计图纸, 准确把控线管

作者简介: 秦治福 (1978-), 男, 专科, 研究方向: 电气仪表安装。

布置方向、套管规格参数以及管线槽尺寸要求,保证管线埋设精准无误、接口的密封合格达标、管口平顺无突起。运用连续冷弯镀锌钢管或阻燃 PVC 管来进行预埋<sup>[2]</sup>,严禁现场开槽钻孔的现象。在施工过程中,强化线管和接线盒的牢固连接,严格把握弯曲半径和固定间距,导线连接采用压接端子工艺或者焊接工艺,不可以采用缠绕方式接线。

## 2.2 配电箱与开关插座安装技术

配电箱是电力系统调控与分配的基础装置,装配质量直接影响电力系统的安全运行水平。配电箱安装架设的时候,必须按照施工图纸的规范做好定位,保证箱体水平垂直,安装高度精确;使用镀锌螺栓把箱体可靠固定到墙体或支架上,做好电缆进出口的良好密封,保证电气配线横竖规整,标签清晰可见;接地端子要和接地干线之间要不间断连接,保证接地电阻测试结果符合相关要求。开关插座装设应该高度一致、间隔规整,面板跟墙面紧密贴合,防止倾斜变形。

## 2.3 照明系统安装技术

照明系统安装要紧密关联建筑功能及空间特性,兼顾视觉体验以及活动要求。在预制环节,要预留灯具定位孔、电缆敷设通道和供电的连接点,做到构件组接快速准确。安装阶段要根据技术标准确认灯具的离顶高度、照明角度以及布设距离,防止产生光线刺眼和亮度分布不均匀等问题。优先采用照明良好、寿命较长的节能照明产品,从设备选择的阶段控制能耗。就智能照明体系来讲,应当一同敷设通信线路、传感器底盒与控制主机的接口<sup>[3]</sup>,达到全域调控、照明状态变换、行为识别和移动端管控等效果,增强照明模块的适配性和可持续运转能力。

## 3 装配式建筑电气施工阶段质量把控工作

### 3.1 施工前期准备

施工准备阶段的工作质量对装配式建筑电气工程的实施效果有直接作用。重点工作是统筹各建设相关方开展深入全面的图纸核查,主要审核预留位置管线排布和施工详图是否契合,及时干预并经协商弥合方案分歧,同步与设计专家进行全面的对接,确定关键技术规格相互交流的要求及专门制作工艺。按照职级不同,对工作开展技术交底,包含配件装配节点、电路铺设计划、仪器定位公差值等重要内容。严格把关合格供货商,对智能终端、线管、桥架、配电箱等主辅材按批次检查外形尺寸和功能特性。筑牢防止不合格品进场的防线,明确划定预制材料堆放处、加工区域和吊运通道,制定可以动态调整的工序穿插执行计划。

### 3.2 施工流程

工程实施的工序主要包含预制构件电气预埋处理、现场装配和调试方面的工作。在预制构件成型的阶段,根据设计标准开展线路预留套管和线盒的布设工作,确保标准准确且牢固可靠。在安装操作的实施过程中,首先要将配电箱和桥架等主体设备安装就位,然后开展线缆铺设及照明器具、开关插座的安装工作;安装阶段做完之后,开展全方面的测试和调试工作<sup>[4]</sup>,核查电气系统是否可以正常运作;在工程开展实施的阶段,要根据施工工艺和操作守则开展操作内容,使项目质量达到合格条件。

### 3.3 施工质量控制

施工质量管控渗透于装配式建筑电气工程实施的各个环节,涵盖深化设计交底的步骤、构件预埋的配合工作、现场安装同步和系统调试等阶段。在物料质量把控方面,应优先选用性能稳定的电气材料和器材。严格把控供应商进入的资格,切实落实进场建材检测的要求,查看认证文件外观标识与参数的一致性。在施工操作期间,要严格把控各施工环节的质量检查验收,包括预制件内部线管的铺设和预开孔洞的精准程度、桥架装配的直线精度和接地的连续性、线路敷设弧度半径以及防火密封的完整状况、机械就位的坐标精度和固定情况等。

## 4 装配式建筑电气技术应用的优势与面临的挑战及策略

### 4.1 技术应用的优势

装配式建筑电气工程技术实施呈现出多方面明显优势。通过工厂预制标准化单元和现场模块化集成开展工作,施工效率大幅提高,建设全周期显著缩短。在规范管理的生产环境当中,线槽桥架、配电箱和智能终端等各类电气设施的尺寸标准、绝缘情况与防火参数保持稳定,有力减少了传统手工操作期间频繁出现的连接错误、接地失效及防护不足现象。工程实施可以减少高空施工与交叉作业的冲突,缩减人力的投入量,缩减建材损耗以及重复施工成本<sup>[5]</sup>,对管线预埋路径进行统一设计,精准预留接口,为物联传感终端、用能监测设施及楼宇系统搭建了可靠的基础设施,可支撑建筑全阶段的智能化运维与精细化管理。

### 4.2 面临的挑战

装配式建筑电气工程技术实施的过程当中面临一些挑战:要想破除技术融合的壁垒,需达成电气系统设计、管线暗装、机械连接和建筑体系、预制部品详图设计以及工业化生产全进程一体化联动,这需要多

学科配合与预先决断,对从业人员的综合知识储备、联合设计执行能力及工程应急能力提出更高要求。相应的标准体系正处于逐步完善的阶段,深化设计深度、构件预留预埋精度、接驳工艺、检测验收等方面的技术要求还不够成熟,导致设计交底不完整、施工依据不足、质量追溯不易,迫切需要构建高效统一的全周期协同管理体系。

### 4.3 应对挑战的策略

针对装配式建筑电气工程设计整合方面存在不足,模块接口具有多样化特点、施工对位要求高、调试环节步骤多等客观情况,要全方位开展应对举措,加大BIM技术与电气设计的融合深度。深化模块化预装和智能布线技术方面的探索,各部件无缝衔接的效率得到提升。全方位搭建贯通设计选型,使加工安装调试验收评估全流程技术提升至标准体系。改良以总承包方为着力点的多边协同管理架构,对施工图交底、作业链衔接和协同质量评审操作做细化工作,对一线作业人员开展分阶段的实操能力培训,囊括识图能力、预埋件布点、装配化桥架安装与智能系统协同等核心板块,切实改进实际操作标准化与职业化的品质。

## 5 装配式建筑电气工程未来发展趋势

### 5.1 智能化发展趋势

装配式建筑电气工程要主动顺应智能化发展的趋势,智能照明安防及家居系统与建筑本体深度融合,采用设备插上即用及系统连上可控技术,植入智能传感阵列、超快传输通道和边缘计算的节点,电气系统可迅速对环境变化和用户行为做出反应,自动完善控制逻辑。光照自适应管理、轨迹智能联动、电力预测与分时控制等功能都已渐渐落地,电气设计以前置化、模块化和数字化形式覆盖整个建造周期。预制构件与现场安装实现精确无差的匹配,系统调试从分步手动校验升级到自动整体联调,建筑电气突破基础功能提升成能够感知环境、懂得需求、主动服务的仿生系统,不断提高运行表现、防护可靠性与人性化水平。

### 5.2 绿色节能发展趋势

建筑行业正加速推进绿色节能观念,装配式建筑电气工程也融入这股发展潮流。未来将全方面运用高效节能变压器、智能灯光调控装置、低能耗配电装置与LED照明灯具等环保电气设备,大力推动太阳能光伏发电与风能互补设备以及地源热泵等清洁能源技术的整合,搭建源网荷储高协同的低碳能源利用模式。借助BIM技术与数字化设计平台,对供电路径规划予以重组并分区调控负载,实现系统高效匹配;创建项目全阶段的能耗智能化监控体系,协同开展智能计量

远程监控以及自适应调节技术的推广,增强电气系统快速调节能力以及容错性,实际降低运转所带来的浪费,极大地提升能源产出比率和低碳化程度。

### 5.3 标准化与模块化发展趋势

以提高装配式建筑电气工程施工效率和工程质量为目的,标准化和模块化发展正成为不能忽略的发展趋势。要对设计、加工、施工、维保各阶段做系统整合,确立标准化的电气组件规格及对接办法,涉及线路布置、配电箱装设、桥架装配和智能系统联通等重要工序。对开关插座、配电箱和照明控制模块等基础部件加以优化,开展工厂预制完成现场对接式拼装,这种工艺可有力减少现场校验不精确等情况发生。加强固定精度和机组同步的程度,标准化接口给设备更替、功能延展和智能优化筑牢根基,对系统的服役周期予以优化,提高全阶段运维工作效率以及投入产出比。

## 6 结束语

装配式建筑电气工程施工技术是建筑工业化进程中的关键支撑,其核心涵盖线路敷设、电气设施安装等重要环节。通过对施工流程的全链条管控与质量管理的精准落地,该技术在实际应用中已展现出显著优势。然而,当前装配式建筑电气工程的发展仍面临多重挑战,应对方法包括加强技术研发创新、加快标准体系建设步伐以及设立跨专业协作管理体系。未来,装配式建筑电气工程施工技术发展的核心集中于智能化、绿色节能、标准化与模块化:凭借智能技术实现舒适性升级和运维负担减轻;绿色节能技术对可持续发展起到支撑作用;标准化与模块化可保证施工速度和质量。应着力开展技术创新以及工程实施,针对产业痛点,实施精准技术攻关,做到技术版本的升级,才可以带动装配式建筑大批实施,带动行业工业化和现代化的升级,保障建筑具有稳固性、灵活性和低碳性等更高水平。

## 参考文献:

- [1] 刘贯荣.装配式建筑电气工程的施工与安装[J].工程抗震与加固改造,2024,46(05):199.
- [2] 李学荣.浅谈装配式建筑电气工程施工技术存在的问题及其对策[J].智能建筑电气技术,2022,16(01):113-116.
- [3] 吴琪.建筑电气工程施工技术难点分析[C]//中国智慧工程研究会.2024人工智能与工程管理学术交流会议论文集,2024.
- [4] 孙正.建筑电气工程施工中新技术应用研究[J].中国厨卫,2021(06):97-98.
- [5] 张轶权.装配式建筑施工技术在电力工程施工管理中的应用[J].微型电脑应用,2025,41(12):294-298.

# 复合地质 FRP 锚杆改性及瓦斯封堵施工工艺

乔江

(四川公路桥梁建设集团有限公司大桥工程分公司, 四川 成都 610031)

**摘要** 复合地质隧道施工面临围岩稳定性差、瓦斯逸散风险高等难题, 传统锚杆存在耐久性不足、瓦斯封堵协同性差等问题。本文针对复合不良地质(含瓦斯、断层、滑坡体)的工程特性, 开展 FRP 锚杆改性技术与瓦斯封堵施工工艺研究。通过优化 FRP 锚杆材料配方, 添加抗腐蚀剂、黏结增强剂及瓦斯封堵剂, 提升锚杆力学性能与抗腐蚀能力; 设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封”一体化施工流程, 优化钻孔直径、注浆压力等关键参数, 旨在为相关人员提供参考。

**关键词** 复合地质; FRP 锚杆; 材料改性; 瓦斯封堵; 协同施工技术

**中图分类号**: TD353.6; TU753

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.037

## 0 引言

复合地质隧道在公路建设中日益增多, 其施工过程中面临围岩承载能力弱、瓦斯逸散易引发安全事故等突出问题。锚杆支护作为隧道围岩加固的核心技术, 直接影响工程安全与耐久性。传统钢制锚杆在潮湿、腐蚀性复合地质中易锈蚀, 使用寿命短, 且无法兼顾围岩加固与瓦斯封堵需求<sup>[1]</sup>; 普通 FRP 锚杆虽具备轻质、耐腐蚀优势, 但在复合地质中力学适配性不足, 与瓦斯封堵协同效果差, 制约其推广应用。

当前国内外针对 FRP 锚杆的研究多集中于单一性能提升, 缺乏对复合地质下“力学强化—抗腐蚀—瓦斯封堵”一体化改性技术的系统研究; 瓦斯封堵施工多独立于支护工序, 存在工序脱节、封堵效果不佳等问题<sup>[2]</sup>。基于此, 本文以昭普高速红星隧道复合地质为工程依托, 研发适配复合地质的改性 FRP 锚杆, 优化瓦斯封堵与支护协同施工工艺, 实现围岩加固与瓦斯防控双重目标, 为复合地质隧道施工提供全新技术路径。

## 1 工程概况

昭普高速红星隧道全长 4 860 m, 穿越复合不良地质区域, 涉及 3 条断层破碎带、2 处滑坡体及低瓦斯区段, 瓦斯浓度 0.08% ~ 0.35%, 隧道最大埋深 320 m。围岩以粉质黏土、砂质页岩为主, 部分区段含石膏夹层, 遇水易软化, 抗压强度 3 ~ 8 MPa, 属于 V 级软弱围岩<sup>[3]</sup>。

隧道原设计采用普通 FRP 锚杆支护, 锚杆直径 25 mm, 长度 3.5 m, 间距 1.2 m × 1.2 m。施工过程中出现锚

杆与围岩黏结力不足、瓦斯沿锚杆孔逸散、锚杆表面腐蚀等问题, 导致围岩变形量达 120 mm, 瓦斯浓度局部超标, 严重影响施工安全。为解决上述问题, 项目采用改性 FRP 锚杆及配套瓦斯封堵施工工艺, 施工区段长度 1 200 m, 重点针对断层破碎带与瓦斯富集区段开展技术应用。

## 2 FRP 锚杆改性技术研究

### 2.1 改性材料选型

基于复合地质潮湿、腐蚀性及瓦斯封堵需求, 筛选核心改性材料。基体材料选用无碱玻璃纤维与环氧树脂, 无碱玻璃纤维抗拉强度  $\geq 3\ 000$  MPa, 环氧树脂固含量  $\geq 98\%$ , 保障锚杆基体力学性能; 抗腐蚀剂选用胺类固化剂与纳米二氧化硅复合体系, 胺类固化剂可提升树脂耐酸碱性能, 纳米二氧化硅粒径 50 ~ 100 nm, 增强材料致密性; 黏结增强剂采用硅烷偶联剂 KH-550, 改善纤维与树脂界面结合力; 瓦斯封堵剂选用水溶性聚氨酯, 固化后体积膨胀率  $\geq 300\%$ , 具备良好的裂隙填充与瓦斯阻隔能力。

### 2.2 配方优化设计

采用正交试验设计优化 FRP 锚杆改性配方, 选取玻璃纤维含量、抗腐蚀剂掺量、黏结增强剂掺量、瓦斯封堵剂掺量 4 个因素, 每个因素设 3 个水平, 以抗拉强度、弹性模量、抗腐蚀率及瓦斯封堵率为评价指标。

正交试验结果表明, 最佳配方为: 玻璃纤维含量 65%、抗腐蚀剂掺量 5%、黏结增强剂掺量 1.5%、瓦斯封堵

作者简介: 乔江(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁施工。

剂掺量8%。该配方下,FRP锚杆抗拉强度达680 MPa,弹性模量28 GPa,满足复合地质支护力学需求;在质量分数5%的盐溶液中浸泡90 d后,抗腐蚀率仅2.3%,显著优于普通FRP锚杆(抗腐蚀率8.7%);瓦斯封堵率达95.2%,可有效阻断瓦斯沿锚杆孔逸散通道<sup>[4]</sup>。

### 2.3 改性工艺优化

采用拉挤成型工艺制备改性FRP锚杆,优化工艺参数以保障产品质量。纤维浸渍温度控制在80~90℃,浸渍时间15~20 min,确保纤维与树脂充分结合;拉挤速度设定为0.8~1.0 m/min,避免速度过快导致锚杆内部缺陷;固化温度分三段控制,第一段120℃、第二段140℃、第三段160℃,总固化时间4 h,确保树脂完全固化。

锚杆锚固段采用螺纹结构设计,螺纹深度3 mm,螺距15 mm,增强锚杆与注浆体的机械咬合力;杆体表面涂刷界面处理剂,进一步提升黏结性能;锚杆端部设置密封帽,防止瓦斯从杆体端部逸散,实现支护与封堵功能一体化。

### 2.4 改性性能验证

通过室内试验验证改性FRP锚杆性能。力学性能测试显示,改性FRP锚杆抗拉强度680 MPa,弹性模量28 GPa,断裂伸长率2.1%,均优于普通FRP锚杆(抗拉强度550 MPa,弹性模量25 GPa,断裂伸长率1.8%);抗腐蚀性能测试中,在酸性、碱性及盐溶液中浸泡90 d后,锚杆力学性能损失率均小于5%,远低于普通FRP锚杆(损失率15%~20%);瓦斯封堵试验采用自主设计的模拟装置,在0.5 MPa瓦斯压力下,改性FRP锚杆锚固后瓦斯渗透率仅0.02 mD,较普通FRP锚杆(0.15 mD)降低86.7%,封堵效果显著。

## 3 瓦斯封堵协同施工工艺优化

### 3.1 施工流程设计

针对复合地质特性,设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封—监测”一体化施工流程,实现FRP锚杆支护与瓦斯封堵协同作业。

钻孔采用气动凿岩机,按设计孔位、角度施工,钻孔直径42 mm,深度较锚杆长度长100 mm,避免孔底残留岩屑影响锚固效果;清孔采用高压风与高压水交替冲洗,风压0.6~0.8 MPa,水压1.0~1.2 MPa,确保孔内岩屑清理干净;注浆采用高压注浆泵,注入掺加瓦斯封堵剂的专用注浆材料,注浆压力1.5~2.0 MPa,注浆量按孔体积的1.2倍控制,确保注浆饱满;锚杆安装采用机械推送方式,将改性FRP锚杆缓慢推入孔内,

确保杆体居中,安装完成后拧紧端部螺母;密封处理采用水溶性聚氨酯封堵孔口,封堵深度50~80 mm,固化后形成密封层;施工后开展瓦斯浓度与围岩变形监测,及时调整施工参数<sup>[5]</sup>。

### 3.2 关键参数优化

通过现场试验优化施工关键参数。钻孔角度根据围岩倾角调整,断层破碎带区段钻孔与围岩层面夹角 $\geq 75^\circ$ ,提升锚杆抗滑能力;注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆,掺加8%瓦斯封堵剂与2%减水剂,凝结时间控制在3~5 min,早期强度达10 MPa/24 h,满足快速支护与瓦斯封堵需求;注浆压力按地质条件调整,瓦斯富集区段采用2.0 MPa高压注浆,确保浆液渗透至围岩裂隙;锚杆间距在断层破碎带加密至1.0 m $\times$ 1.0 m,增强围岩整体性;密封层厚度根据瓦斯浓度调整,瓦斯浓度 $\geq 0.3\%$ 时,封堵深度增至80 mm,确保封堵效果。

### 3.3 协同施工技术

构建“开挖—支护—瓦斯封堵”一体化协同施工机制,实现各工序无缝衔接与风险闭环管控。开挖环节采用短台阶法施工,上台阶先行开挖,下台阶跟进距离控制在3~5 m,循环进尺严格限定在1.5~2.0 m,减少爆破或机械开挖对围岩的扰动。支护施工必须在开挖完成后2 h内启动,优先采用喷射混凝土封闭围岩表面,再同步安装改性FRP锚杆与钢筋网,缩短围岩暴露时间。瓦斯封堵与支护作业同步推进,注浆过程中通过分布式瓦斯传感器实时监测浓度,当数值超过0.3%时立即暂停施工,调整注浆压力至1.8~2.2 MPa或增加封堵剂掺量至10%,待浓度降至安全阈值后再复工。施工区段按“拱顶—拱腰—一边墙”三点布设瓦斯监测点,间距5 m,数据实时上传智能平台,异常时自动触发补强指令。

针对断层破碎带与瓦斯富集叠加区段,优化“注浆帷幕+FRP锚杆”联合支护方案。先沿开挖轮廓线布设环形注浆孔,孔距0.8 m、孔深3.5 m,注入高标号水泥—水玻璃双液浆,注浆压力控制在2.0~2.5 MPa,形成厚度不小于1.2 m的注浆帷幕,阻断瓦斯沿裂隙逸散通道。待帷幕固化24 h后,按设计参数安装改性FRP锚杆,锚杆间距加密至1.0 m $\times$ 1.0 m,注浆材料掺入8%瓦斯封堵剂,实现“帷幕宏观封堵+锚杆微观加固”的双重防护。施工中严格遵循“先封瓦斯、后固围岩”的顺序,同步监测围岩变形与瓦斯浓度,动态调整施工参数,确保叠加区段施工安全。

### 3.4 质量控制措施

建立全流程质量控制体系。在原材料检验方面, 改性 FRP 锚杆进场时核查出厂合格证与性能检测报告, 随机抽样进行抗拉强度与抗腐蚀性能测试, 不合格产品严禁进场; 注浆材料进场时检测凝结时间、强度及封堵性能, 确保满足设计要求。在施工过程控制方面, 采用全站仪定位钻孔位置, 偏差控制在  $\pm 50$  mm; 钻孔深度采用测绳测量, 偏差  $\leq \pm 50$  mm; 注浆过程中记录注浆压力、注浆量, 采用超声波检测仪检测注浆饱满度, 饱满度  $\geq 95\%$ ; 锚杆安装后采用拉拔试验检测黏结力, 黏结力  $\geq 15$  MPa, 不合格区段及时补打锚杆。在成品检测方面, 施工完成后采用瓦斯检测仪检测孔口瓦斯浓度, 浓度  $\leq 0.08\%$  为合格; 通过位移计监测围岩变形, 拱顶下沉速率  $\leq 2$  mm/d, 收敛速率  $\leq 1.5$  mm/d; 定期检测锚杆受力状态, 采用应力计监测锚杆轴力, 轴力控制在设计值的 80% ~ 120%。

## 4 工程应用与效果验证

### 4.1 应用情况

该改性 FRP 锚杆及瓦斯封堵施工工艺在昭普高速红星隧道 K3+200 ~ K4+400 区段应用, 区段长度 1 200 m, 涵盖 2 条断层破碎带与 1 处瓦斯富集区。施工过程中累计使用改性 FRP 锚杆 12 000 根, 完成注浆量 860 m<sup>3</sup>, 施工效率达 30 根 / 工日, 较传统工艺提升 20%。

施工期间未发生瓦斯浓度超标及围岩失稳事故, 现场监测数据显示, 瓦斯浓度稳定在 0.02% ~ 0.06%, 远低于规范限值 0.5%; 围岩拱顶下沉量最大 35 mm, 水平收敛量最大 28 mm, 变形速率均满足设计要求; 锚杆受力均匀, 最大轴力 120 kN, 未出现断裂或失效现象。

### 4.2 效果对比

与传统施工工艺相比, 改性 FRP 锚杆及瓦斯封堵施工工艺优势显著, 具体对比结果如表 1 所示。

表 1 工艺对比结果表

对比指标	传统工艺	本文工艺	提升效果
锚杆抗拉强度	550 MPa	680 MPa	提升 23.6%
瓦斯封堵率	75%	95.2%	提升 20.2%
围岩最大变形量	120 mm	35 mm	减少 70.8%
锚杆腐蚀率 (1 年)	15%	2.3%	降低 84.7%
施工效率	25 根 / 工日	30 根 / 工日	提升 20%
瓦斯超标频次	6 次 / km	0 次 / km	完全消除

### 4.3 经济与社会效益

在经济效益方面, 改性 FRP 锚杆使用寿命达 30 年, 较传统钢制锚杆 (使用寿命 10 年) 延长 2 倍, 减少后期更换成本; 施工效率提升 20%, 缩短工期 30 d, 节约工期成本 180 万元; 瓦斯封堵效果提升, 避免因瓦斯超标导致的停工整改, 减少经济损失 200 万元以上。

在社会效益方面, 该工艺有效控制瓦斯逸散风险, 保障施工人员的生命安全; 减少围岩变形, 提升隧道结构稳定性, 降低运营期维护成本; 改性 FRP 锚杆为环保材料, 可回收利用, 减少环境污染; 技术成果可为同类复合地质隧道施工提供参考, 推动隧道支护技术升级。

## 5 结束语

本文针对复合地质隧道施工中 FRP 锚杆耐久性不足、瓦斯封堵协同性差等问题, 开展 FRP 锚杆改性技术与瓦斯封堵施工工艺研究, 取得以下成果: 通过添加抗腐蚀剂、黏结增强剂及瓦斯封堵剂, 优化 FRP 锚杆材料配方与制备工艺, 使锚杆抗拉强度达 680 MPa, 抗腐蚀率降至 2.3%, 瓦斯封堵率超 95%; 设计“钻孔—清孔—注浆—锚固—密封—监测”一体化施工流程, 优化钻孔直径、注浆压力等关键参数, 构建“开挖—支护—瓦斯封堵”协同机制; 在红星隧道应用验证表明, 该技术显著提升围岩稳定性与瓦斯封堵效果, 降低施工风险与成本。该研究实现了复合地质下 FRP 锚杆“力学强化—抗腐蚀—瓦斯封堵”一体化提升, 创新了支护与瓦斯封堵协同施工模式, 为复合地质隧道施工提供了可靠技术方案。未来可进一步拓展改性 FRP 锚杆在高瓦斯、强腐蚀等更复杂地质中的应用研究, 优化施工设备智能化水平, 推动技术成果规模化推广。

## 参考文献:

- [1] 刘强. 高瓦斯地层公路隧道瓦斯运移扩散特征及通风优化措施研究 [J]. 市政技术, 2025, 43(12): 55-64.
- [2] 陈宏源. 瓦斯隧道钻爆施工关键技术分析 [J]. 交通科技与管理, 2025, 06(23): 77-79.
- [3] 谢天. 冻融循环作用下预应力锚固结构疲劳损伤研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2025.
- [4] 谢天, 李聪, 张新宙, 等. 不同类型锚杆冻融效应与损伤机制分析 [J]. 西部探矿工程, 2025, 37(04): 5-7.
- [5] 陈健, 杨公标, 王志奎, 等. 纤维增强复合材料在大直径盾构隧道工程中的研究与应用 [J]. 工业建筑, 2024, 54(06): 54-60.

# 桥梁工程中橡胶支座的影响因素及检测方法

蒲春江

(四川智通路桥工程技术有限责任公司, 四川 成都 610200)

**摘要** 为解决橡胶支座性能劣化隐患, 满足桥梁工程安全运维需求, 本文系统讨论了桥梁工程中影响橡胶支座服役性能的材料因素、施工因素、结构因素及环境因素。同时, 总结了外观检测、尺寸检测、物理性能检测、声波无损检测等检测手段的具体方法, 旨在为综合评估橡胶支座质量提供有益参考, 进而推动被动桥梁养护维修向主动预防转变。

**关键词** 桥梁工程; 橡胶支座; 外观检测; 尺寸检测; 物理性能检测

**中图分类号**: U446

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.038

## 0 引言

在我国交通体系中, 桥梁是重要的基础设施, 受各结构部件影响, 需重视其运行安全。而桥梁工程中的橡胶支座具备良好的弹性变形能力, 在调节桥梁上部结构位移方面发挥着关键作用。但也要注意, 不同桥梁工程在材料质量、施工技术以及使用环境等不同因素上存在一定差异, 严重影响着桥梁上的橡胶支座老化、错位情况, 易降低桥梁工程的使用寿命, 甚至对桥梁整体结构安全造成不利影响。基于此, 使用科学有效的检测手段及时掌握桥梁工程的支座运行状态, 成为桥梁运维管理的重要研究方向。

## 1 桥梁支座质量影响因素

### 1.1 材料因素

材料品质是决定橡胶支座性能的核心基础, 若原材料存在缺陷, 即便后续生产与施工环节管控再严格, 也无法避免支座出现早期劣化问题, 因此需从入场到生产全流程构建严密的材料管控体系。借助专业检测装置与方法对每批次入场的原材料施行严格检查, 唯有经检验达标的基础材料方能流入生产流程, 未达标的必须坚决退回, 绝不能应用于橡胶支座的生产和使用。在橡胶支座生产环节中, 构建原材料质量追溯体系可以达成全过程的质量监控目标。引入批次管理理念, 记录每一批次原材料的采购路径、批次编号、投入使用的时间及对应部位等多个关键参数, 在成品显现问题时有助于锁定原材料的生产和供货源头以采取应对措施; 采用信息化手段开发追溯管理系统则便于在线维护与调取数据内容, 进一步优化追溯效能和信息精度, 同时该系统通过数字化方式实现了对原料流通过

程的信息留痕功能<sup>[1]</sup>。针对《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)新增的剪力卡榫装置等配套部件, 还需额外检测其材料的强度及耐磨损性能, 保证符合规范工艺要求。这些材料管控的举措, 能从源头保障橡胶支座品质, 为桥梁结构长期稳定运营筑牢关键基础。

### 1.2 施工因素

橡胶支座需借助施工环节精准安装到桥梁结构中, 才能真正发挥协调变形的核心作用, 这一过程的操作质量管控直接关系到支座设计性能能否落地。施工准备阶段, 支座安装前的基础处理至关重要却易被忽视。若桥梁墩台支座垫石表面平整度未达到设计要求, 会致使支座受力面接触不均, 长期运营中局部应力集中, 不仅会加速橡胶老化, 还可能引发支座偏压、脱空等病害, 严重削弱其承载与变形协调能力。此外, 若施工团队未按《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)规范要求, 结合施工环境温度控制支座安装位置偏差, 温度变化时上部结构伸缩会对支座产生额外剪切力, 超出其承载极限后易出现开裂问题。同时, 安装操作过程中的细节把控同样关键, 不当的施工行为会直接损伤支座性能。定位时若未使用高精度测量仪器控制支座中心坐标与高程, 偏差超出规范允许范围, 会使支座传力路径改变, 原本应均匀传递的上部荷载出现分布失衡, 部分支座承担过量荷载, 缩短使用寿命。此外, 施工后的防护措施缺失, 也会为支座后期劣化埋下隐患。这些施工环节的疏漏, 虽短期内可能未显现突出的问题, 但随着桥梁运营时间增长, 会逐步引发支座性能劣化, 威胁桥梁结构安全<sup>[2]</sup>。

**作者简介**: 蒲春江 (1994-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

### 1.3 设计因素

设计环节是橡胶支座发挥性能的蓝图,若设计方案与桥梁实际工况脱节,即便材料优质、施工规范,支座仍可能因先天不足陷入性能失效的困境。一方面,部分设计未充分考虑桥梁长期运营中的动态荷载和静态荷载的叠加效应,仅按理论值选取支座承载等级,致使支座实际受力远超设计阈值,长期处于超负荷状态,加速橡胶老化及钢材疲劳。另一方面,支座结构选型与桥梁特性不匹配也会引发问题。此外,设计中对环境适应性考量不足同样关键。部分设计未结合桥梁所在地的气候条件优化支座材质配方。例如:在高温地区未选用耐高温橡胶,支座长期受高温烘烤易出现软化、变形。在沿海地区未针对盐雾腐蚀设计防腐涂层,钢材组件易锈蚀,影响支座整体稳定性。这些设计层面的疏漏,会使橡胶支座从应用之初就存在性能短板,无法满足桥梁长期安全运营需求<sup>[3]</sup>。

### 1.4 环境因素

桥梁橡胶支座长期暴露于自然环境中,需持续承受各类环境因素的动态侵蚀,这种慢性损耗会逐步破坏支座材料结构,削弱其力学性能,成为支座性能劣化的重要诱因。首先,极端气候条件的循环作用会显著影响支座的稳定性。在温差剧烈的地区,夏季高温会使橡胶材料软化、弹性降低,冬季低温则会使橡胶脆化、抗裂性下降,长期冷热交替会引发橡胶内部产生微裂纹,进而扩展为明显破损。而多雨及高湿度的环境中,水分会渗透至支座内部,不仅使橡胶发生溶胀,破坏其原有分子结构,也会致使内部钢材组件生锈,削弱支座整体承载能力,尤其在桥梁墩台排水不畅时,支座底部易积水,加速腐蚀进程。其次,特定环境中的腐蚀性介质还会加剧支座劣化。沿海桥梁面临的盐雾腐蚀最为典型,含盐雾气会附着在支座表面,借助橡胶缝隙侵入内部,与钢材发生化学反应生成铁锈,同时破坏橡胶的抗老化性能,使支座出现表面剥落、强度衰减的现象。这些环境因素的综合作用,虽然短期内不会引发支座突发失效,但会持续缩短支座使用寿命,增加桥梁的运维风险<sup>[4]</sup>。

## 2 桥梁支座检测方法

### 2.1 外观及尺寸检测,初步判断支座质量状态

外观及尺寸检测的核心思路是结合视觉识别及精准量测,借助直观观察支座表面状态,同时量化关键尺寸参数,综合判断支座是否符合《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)中对橡胶支座的设计规范。此类外观尺寸检测主要是基于桥梁橡胶支座的形态特征与性能关系进行检测,并以橡胶支座表

面是否出现裂缝、鼓起等异常现象为具体判定因素。若橡胶支座表面已经出现相应问题,则表明其内部结构已发生变化,需进行进一步的检测。在此基础上,该检测方式还注重观察支座的尺寸参数,若发现参数与设计不符,也表明支座受力发生改变,可能存在荷载分布不均的情况<sup>[5]</sup>。基于此,检测人员要在检测过程中遵循“先筛查、后精测”思路,先肉眼观察支座外观,再使用相应的专业测量仪器精确量化尺寸数据。在此过程中,检测人员还需要记录表面裂纹的裂纹长度(L)、宽度(W)及深度(D),依照规范逐一判断支座存在的缺陷类型及程度。若裂纹宽度超过0.3 mm且长度超过50 mm则为严重缺陷。随后,检查支座上的橡胶与钢板黏结情况,及时判定脱粘面积(S)占总黏结面积(S总)的比例是多少,在其超过5%(即 $S/S_{总} \times 100\% > 5\%$ )时则上报管理人员黏结失效。同时,记录支座表面老化或腐蚀等现象。

在尺寸检测方面,检测人员还应使用卡尺、全站仪等相应检查设备测量橡胶支座的几何参数,计算偏差率。偏差率计算公式如下:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= |L_{实} - L_{设}| / L_{设} \times 100\% \\ \eta_2 &= |B_{实} - B_{设}| / B_{设} \times 100\% \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中,L实是实测长度、B实是宽度与L设、B设是相应的设计值。

《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)规范要求 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 均 $\leq 2\%$ ,超出则分析安装或生产误差原因。

厚度偏差率计算公式如下:

$$H_3 = |H_{实} - H_{设}| / H_{设} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中,H实是测量的支座实际厚度,H设是设计的厚度。

当 $\eta_3 > 3\%$ 时,橡胶支座的缺陷会不断影响支座竖向承载能力,要求检测人员结合抗压性能检测进行进一步的评估,即对角线偏差,要求测量矩形支座的两组对角线长度( $d_1$ 、 $d_2$ ),计算偏差值 $\Delta d = |d_1 - d_2|$ ,若 $\Delta d > 5 \text{ mm}$ ,表明支座存在变形。

由此,检测人员综合分析橡胶支座的外观缺陷与尺寸偏差,能够明确该支座的质量初步分级。其中无明显缺陷且各项尺寸指标均满足规范要求的是合格支座,仅存在轻微缺陷但尺寸符合要求的是需跟踪观察对象,缺陷明显或尺寸偏差超标的支座是不合格支座。相关管理人员需要及时更换处理不合格的支座。

### 2.2 物理性能检测,量化评估支座基本性能

物理性能检测的核心理论是借助测定支座在受力时的抗压强度、弹性模量等具体力学参数,判断其是否符合

《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)设计要求。该理论基于“材料力学响应反映结构性能”原理。支座的力学参数直接决定着其传递上部荷载的效率,以及在温度变化、车辆制动等工况下的变形适应能力,只有精准测量这些参数,才能突破外观检测仅能判断表面状态的局限,从力学本质上评估支座的能否满足桥梁长期服役需求。

在实际检测中,抗压弹性模量检测是核心项目之一,相关团队需借助压力试验机施加分级竖向荷载,记录对应变形量。其计算公式为:

$$E=(F_2-F_1) \times t / (A \times (\delta_2-\delta_1)) \quad (3)$$

式(3)中,  $E$  为抗压弹性模量(MPa),  $F_1$ 、 $F_2$  分别为分级荷载的初始值与终值(kN),  $t$  为支座总厚度(mm),  $A$  为支座有效承压面积( $\text{mm}^2$ ),  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为对应荷载下的竖向变形(mm)。《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)规范要求板式橡胶支座的抗压弹性模量需在 1 000 ~ 1 500 MPa 范围内,超出该范围则表明橡胶弹性不足,影响变形协调能力。

抗剪性能检测同样关键,相关团队需固定支座一端,对另一端施加水平剪切力,测量剪切变形。例如:检测支座抗剪弹性模量时,按支座短边长度的 1/300 施加水平位移,记录对应的剪切力,计算公式为:

$$G=\tau / \gamma=(F_s/A) / (\delta_s/t) \quad (4)$$

式(4)中,  $G$  表示支座抗剪弹性模量(MPa),  $F_s$  是施加的水平剪切力(kN),  $\delta_s$  是对应的剪切位移(mm),  $\tau$  表示剪应力,  $\gamma$  为剪应变。当计算的  $G$  值低于《桥梁减隔震装置通用技术条件》(JT/T 1062—2025)规定的 0.9 MPa 限值时,就表明该支座的抗剪性能不足,容易在桥梁承受水平作用力时发生过大剪切变形,影响桥梁结构安全。在此基础上,检测人员还应当逐级加载直至支座破坏,检测橡胶支座的极限抗压能力,且判断极限破坏荷载低于设计荷载 1.5 倍的支座不满足桥梁使用要求,避免在实际服役过程中出现压碎等问题。

### 2.3 声波无损检测,探查支座内部结构缺陷

在检测橡胶支座时,检测人员可基于声波在材料中的传播特性,使用声波无损检测技术辅助评估橡胶支座内部可能存在的空洞、分层等隐蔽缺陷,弥补外观检查与力学性能测试在识别支座内部缺陷方面的不足。若橡胶支座内部存在缺陷时,能够直观发现声波传播路径发生改变,并具体表现为传播速度降低,衰减振幅。

在实际检测中,检测人员可以计算声波在完好橡胶中的传播速度,再使用超声波脉冲反射法向支座发

射超声波,接收从内部界面反射的回波信号。声波传送公式如下:

$$v=d/t \quad (5)$$

式(5)中,  $v$  是声波传播速度(m/s),  $d$  是支座厚度(m),  $t$  是从发射到接收声波的时间(s)。若橡胶支座的局部区域存在声波传播速度  $v_1$  低于完好区域速度  $v_{10\%}$  的情况,则可直接判定该区域存在空洞、脱粘等问题。

在具体检测过程中,检测人员应当按照 20 mm×20 mm 网格划分超声波检测区域,并逐点采集声波传播时间、回波振幅数据,及时发现回波振幅  $A_1$  低于参考振幅  $A$  的 70% 的缺陷部位,进而分析声波速度变化,判断该位置内部损伤情况。在此基础上,若检测人员发现存在多重反射信号,还要根据声波衰减系数,分析橡胶支座内部是否存在分层或裂纹,评估缺陷严重程度。衰减系数  $\alpha$  计算公式如下:

$$\alpha=(20 \lg(A/A_1))/d \quad (6)$$

式(6)中,  $\alpha$  为衰减系数(dB/m)。  $\alpha$  值越大,说明橡胶支座内部损失的声波能量越多,也说明内部缺陷越严重。检测人员综合分析上述这些检测参数,可明确了解橡胶支座的内部缺陷分布情况,为后续维修提供依据,减少因隐蔽缺陷引发的安全风险。

### 3 结束语

橡胶支座检测是明确橡胶支座情况,保障桥梁全寿命周期安全运行的基础。明确影响橡胶支座的因素,并系统分析检查橡胶支座质量的相关检测手段,既有助于为桥梁运维养护提供依托,还能降低桥梁结构失效风险,推动桥梁养护模式从传统事后维修过渡到主动预防。未来,随着智能监测技术不断发展,橡胶支座检测将逐步实时,为桥梁工程安全运行提供坚实的技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 游新,王艺钦,吴刚.板式橡胶支座老化时变性及其对斜交桥地震响应影响研究[J].世界地震工程,2025,41(04):192-200.
- [2] 齐澍椿,杨文,李晗,李茂,张晗,田泽敏.盆式橡胶支座老化对铁路简支梁桥受力性能的影响分析[J].山西建筑,2025,51(20):166-170.
- [3] 任炫知.圆形板式橡胶支座高度对连续桥梁抗震能力的影响[J].科学技术创新,2025,(18):125-128.
- [4] 龚程豪.公路工程橡胶支座原材料性能与质量控制措施[J].运输经理世界,2025(14):163-165.
- [5] 王怡,陶庆东,罗丹霞.基于实际桥梁工程的板式橡胶支座的设计研究[J].四川建材,2022,48(07):108-109.

# 建筑工程电力系统节能改造与施工技术研究

史德凯<sup>1</sup>, 周金星<sup>2</sup>, 王晓龙<sup>3</sup>

(1. 山东黄河工程集团有限公司, 山东 济南 250013;

2. 山东龙源电力工程有限公司, 山东 济南 250014;

3. 山东省建设监理咨询有限公司, 山东 济南 250013)

**摘要** 建筑工程电力系统是保障建筑正常运行的核心基础设施, 承担电力输送、分配与供给功能, 能耗水平与运行稳定性直接影响建筑整体节能效果与使用安全。当前多数建筑电力系统存在设备老化、线路损耗大、节能配置不足、施工工艺不规范等问题, 导致能耗偏高、故障频发, 难以适配绿色节能发展需求。本文结合建筑电力系统结构特点与运行需求, 明确节能改造与施工技术核心要点, 分析现有系统节能短板与施工难点, 构建完善的技术体系, 提出针对性改造方案与施工优化措施, 并验证方案可行性。结果显示, 优化方案可使建筑电力系统能耗降低 20% 以上, 线路损耗减少 35%, 施工效率提升 40%, 有效提升系统稳定性与节能性, 实现电力资源高效利用, 契合建筑绿色低碳发展导向。

**关键词** 建筑工程; 电力系统; 节能改造; 能耗优化; 线路损耗

中图分类号: TU964

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.039

## 0 引言

建筑工程电力系统涵盖变配电设备、输电线路、配电装置、用电设备等多个组成部分, 广泛应用于住宅、商业建筑、工业厂房等各类建筑场景, 是保障建筑照明、通风、供水、设备运行等各项功能有序开展的基础。建筑电力系统的节能水平与施工质量直接关系到建筑能源消耗总量、运行成本及使用安全性, 对建筑绿色节能发展具有重要影响。当前各类建筑工程电力系统运行与施工中仍存在诸多薄弱环节, 老旧建筑电力设备老化、节能性能不足, 新建建筑电力系统设计不合理、施工工艺不规范, 导致电力损耗过大、能耗偏高, 同时施工过程中存在安全管控不到位、施工精度不足等问题, 影响电力系统运行稳定性。基于此, 聚焦建筑工程电力系统节能改造与施工技术核心, 优化改造方案、规范施工工艺、提升节能效果, 实现电力系统高效、节能、稳定运行, 成为解决当前建筑电力系统困境的关键。

## 1 建筑工程电力系统节能改造与施工技术核心内涵及特征

### 1.1 核心内涵

建筑工程电力系统节能改造, 是指针对建筑现有电力系统存在的能耗偏高、设备老化、配置不合理等

问题, 通过更换节能设备、优化系统结构、改进运行模式等措施, 降低电力损耗、提升能源利用效率的系统性工程, 核心目标是实现电力系统“低损耗、高效率、节能化”运行<sup>[1]</sup>。施工技术则是指在电力系统节能改造过程中, 围绕设备安装、线路敷设、调试检测等环节采用的各类施工方法、工艺与管控措施的总称, 核心目标是保障改造施工质量、提升施工效率、确保施工安全。

二者相互关联、协同推进, 节能改造方案为施工技术提供明确方向, 合理的施工技术是节能改造效果落地的保障, 只有将科学的改造方案与规范的施工技术相结合, 才能实现建筑电力系统节能增效与运行稳定的双重目标, 兼顾节能性、安全性与经济性。

### 1.2 节能改造与施工技术特征

建筑工程电力系统节能改造的核心是具备针对性、系统性、经济性三大特征。首先是针对性, 节能改造绝不能套用通用模板搞一刀切, 必须结合项目的建筑类型、现有电力系统的实际运行状况, 以及项目核心的能耗痛点量身定制改造方案, 从源头规避盲目改造造成的无效投入。其次是系统性, 节能改造覆盖变配电设备、输电线路、终端用电设备等多个核心环节, 绝非单一设备更换、单条线路调整就能实现预期效果,

作者简介: 史德凯 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

只有完成全系统的协同优化,才能发挥出最佳的节能效益。最后是经济性,改造方案必须兼顾节能效果与投入成本,在切实提升系统节能水平的同时,合理管控改造投入,才能保障方案具备实际可操作性与行业推广价值<sup>[2]</sup>。

### 1.3 主要影响因素

建筑工程电力系统节能改造效果与施工质量受系统、技术、施工、管理四大因素影响:一是系统因素,电力系统结构设计不合理、设备配置老化、线路布局不科学,会导致电力损耗过大,影响节能改造效果;二是技术因素,节能改造技术与施工技术适配性不足、技术应用不规范,会降低改造效果与施工质量;三是施工因素,施工人员专业技能不足、施工工艺不规范、施工设备精度不够,会影响施工进度与质量,埋下安全隐患;四是管理因素,施工管控不严格、安全管理不到位、后期运维不完善,会导致节能改造措施落实不到位,难以实现长效节能。

四大影响因素并非独立存在,而是存在显著的联动传导效应。系统设计的先天缺陷会放大技术应用与施工操作的难度,施工环节的质量偏差会直接削弱节能技术的应用效果,而管理体系的不完善则会导致系统、技术、施工层面的各项优化措施难以落地。只有统筹把控四大核心影响因素,实现全流程、全维度的协同管控,才能从根本上破解节能改造效果不达预期、施工质量难以保障的行业共性痛点。

## 2 研究方法与节能改造及施工技术体系构建

### 2.1 研究方法

采用理论分析与试验研究相结合的方法开展研究:通过理论分析,明确建筑工程电力系统节能改造与施工技术的核心环节、现存短板与痛点,梳理节能改造与施工技术的核心要点,构建节能改造与施工技术体系框架;选取典型建筑工程(住宅建筑、商业建筑)作为试验对象,应用优化后的节能改造方案与施工技术,设置传统改造与施工模式作为对照组,对比分析电力能耗、线路损耗、施工效率、运行稳定性等核心指标,验证体系的可行性与优越性,优化完善改造方案与施工技术。

试验选取两类建筑工程的电力系统进行节能改造,覆盖变配电设备更换、线路优化、节能设备安装等改造内容,试验周期为7个月,重点监测改造前后的电力能耗、线路损耗、施工质量等指标,确保试验结果贴合实际建筑场景,为节能改造与施工技术的推广应用提供数据支撑。

### 2.2 节能改造与施工技术体系构建

#### 2.2.1 体系框架

结合建筑工程电力系统节能改造需求与施工质量要求,构建“节能改造层—施工技术层—管控保障层”三层体系,各层协同联动、职责明确,形成“方案设计—施工实施—质量管控—长效运维”的闭环管理,实现电力系统节能改造效果与施工质量的双重提升,兼顾节能性、安全性与经济性。

节能改造层负责制定科学合理的节能改造方案,解决电力系统能耗偏高、设备老化等短板;施工技术层负责优化施工工艺、规范施工流程,保障改造施工质量与效率;管控保障层负责人员、制度、设备、安全等全方位保障,确保节能改造与施工工作有序推进、落地见效。

#### 2.2.2 核心节能改造方案

1. 变配电设备节能改造:针对现有变配电设备老化、能耗偏高的问题,更换高效节能型变压器,替代传统高损耗变压器,降低变压器空载损耗与负载损耗,提升电能转换效率;优化变配电装置布局,减少配电距离,降低线路损耗;引入智能变配电控制系统,实时监测变配电设备运行参数,自动调节运行状态,确保设备在最佳节能工况下运行,避免能源浪费<sup>[3]</sup>。

2. 输电线路节能改造:梳理现有输电线路存在的线路老化、截面不合理、布局混乱等问题,更换节能型导线,选用低电阻、高强度的导线材料,减少线路电阻损耗;优化线路布局,缩短输电距离,避免线路迂回、交叉,降低线路损耗;对线路进行绝缘处理,加强线路维护,防止线路漏电、老化,提升线路运行稳定性与节能性;定期对线路进行检测,及时整改线路隐患,确保线路安全、高效运行。

3. 用电设备节能改造:针对建筑内高能耗用电设备进行针对性节能改造,更换节能型照明设备、空调、水泵等用电设备,替代传统高能耗设备,提升用电效率;安装智能控制装置,对用电设备进行精细化管控,根据使用需求自动调节设备运行状态,避免设备空载运行,减少电能浪费;优化用电负荷分配,平衡各区域用电负荷,避免负荷过载导致的能耗增加与设备故障。此外,搭建建筑用电智能管控平台,集成实时能耗监测、短期负荷预测与自动调控功能,可实现对各区域用电设备的集中化、精细化管理。平台通过采集分钟级用电数据,精准识别高能耗设备与无效用电时段,自动下发优化调控指令,如夜间自动关闭公共区域非必要照明、根据室内人员密度动态调节空调运行功率

与新风量。该管控模式可深度挖掘终端用电节能潜力,显著提升整体节能改造的综合效益。

### 2.2.3 核心施工技术优化

1. 设备安装施工技术:完善变配电设备、节能设备的安装工序,细化安装流程与精度标准,运用精确定位工艺,保障设备安装平整、稳固,防止因安装偏差引发的设备运行异常与能耗上升;严格遵照施工规范完成设备接线,保障接线合规、接触紧密,降低接触电阻损耗;安装完工后,对设备开展全项调试,保障设备运行稳定、节能效果达标。

2. 线路敷设施工技术:优化输电线路敷设工序,结合建筑结构与线路排布要求,选用架空敷设或埋地敷设形式,保障线路敷设合规、规整;架空线路布设时,科学把控线路间距与高度,防止线路摩擦、磕碰,降低线路损耗;埋地线路布设时,做好线路防护措施,防止线路被腐蚀、破损,同步做好标识,便于后期运维;线路布设完工后,开展绝缘检测与耐压试验,保障线路绝缘性能达标,消除漏电隐患。

3. 施工安全与质量管控技术:建立全流程施工安全管控体系,对施工人员进行安全培训,规范高空作业、高压作业等危险环节的操作行为,配备齐全安全防护用品,防范安全事故;采用全过程质量检测技术,在施工前对施工材料、设备进行严格检测,杜绝不合格材料、设备进入施工环节;在施工过程中,对设备安装、线路敷设等关键环节进行实时检测,及时发现并整改施工缺陷;施工完成后,进行全面竣工验收,确保施工质量符合规范与节能改造要求<sup>[4]</sup>。

### 2.2.4 体系保障措施

为确保节能改造与施工技术体系落地见效,采取四大保障措施:

1. 人员保障,加强施工人员、技术人员与管理人員的专业培训,提升其节能改造技术水平、施工操作能力与安全管理意识,定期开展培训考核,考核合格者方可上岗,明确各岗位职责分工,落实岗位责任制。

2. 制度保障,完善电力系统节能改造管理制度、施工质量管理体系、安全管理制度等,细化管理流程,明确各项工作的具体要求与完成时限,定期对制度执行情况进行检查,及时修订完善不匹配实际施工场景的条款。

3. 设备与材料保障,严格把控施工设备与材料质量,优先选用节能型、高质量的设备与材料,建立设备与材料采购、检测机制,杜绝不合格产品进入施工环节,定期对施工设备进行维护保养,确保设备性能稳定。

4. 技术保障,加大节能改造与施工技术的研发与应用力度,引入先进的施工技术与设备,优化改造方案与施工工艺,建立技术指导机制,及时解决施工过程中遇到的技术难题,确保节能改造与施工工作有序推进。

## 3 试验结果

试验周期内,对比节能改造与施工技术应用组(试验组)与传统改造与施工模式组(对照组)的核心指标,结果显示:试验组建筑电力系统能耗较对照组降低 21.3%,其中变配电设备能耗降低 25.6%,线路损耗减少 36.8%;试验组施工效率较对照组提升 42%,施工质量合格率提升 19.5%,施工安全事故发生率为 0;试验组电力系统运行稳定性显著提升,故障发生率为 0.6%,较对照组(4.9%)下降 87.8%;试验组改造后的电力系统节能效果与运行稳定性均达到预期目标,节能改造与施工技术应用效果显著<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

针对建筑工程电力系统节能改造与施工技术的核心问题,结合建筑电力系统的结构特点与运行需求,通过理论分析与试验研究,明确了节能改造与施工技术的核心内涵、特征与影响因素,构建了“节能改造层—施工技术层—管控保障层”三层体系,提出了针对性的节能改造方案与施工技术优化措施,验证了体系的可行性与有效性。优化后的节能改造方案与施工技术可显著降低建筑电力系统能耗与线路损耗,提升施工效率与运行稳定性,有效解决传统改造与施工模式的短板,为建筑工程电力系统节能改造与施工技术推广提供了科学可行的技术支撑与实践参考。

## 参考文献:

- [1] 张益滔.基于能效评价模型的油田电力系统节能改造策略研究[J].石油石化节能与计量,2025,15(12):31-35.
- [2] 张文明.发电厂热动力系统优化与节能改造研究[J].百科论坛电子杂志,2020(11):215.
- [3] 崔博.探析发电厂热动力系统优化与节能改造[J].安防科技,2020(08):117.
- [4] 陆超,詹研.超低能耗居住建筑技术体系优化与工程实践[J].建设监理,2025(S1):51-53.
- [5] 刘洪高.优化建筑施工技术降低建筑能耗[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2022(06):218-221.

# 大型复杂钢结构施工过程中变形控制与矫正技术

马 可

(菏泽天源水务发展有限公司, 山东 菏泽 274000)

**摘 要** 大型复杂钢结构施工过程中容易受到多因素耦合作用而发生显著变形, 对结构的安全和成型精度造成影响。本文以施工阶段变形机理为主线, 系统地分析了结构受力特性、初始缺陷和环境效应共同作用, 并着重研究施工方案优化、高精度监测和临时支撑调控关键控制技术, 将有限元分析和数据驱动方法相结合, 提出了全过程变形预测和动态修正策略, 以期为同类项目提供技术路径参考。结果表明, 多技术协同应用能有效地提高施工精度和减小变形风险, 具有较好的推广前景和工程应用价值。

**关键词** 复杂钢结构; 施工变形; 有限元分析; 施工监测

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.040

## 0 引言

大型复杂钢结构由于具有空间体系复杂、构件尺度大、施工阶段受力不确定性等特点, 在施工过程中易发生累积变形而成为限制施工精度和结构安全的一个关键问题。施工期结构常处于非稳定受力状态, 并叠加了初始缺陷、施工荷载和温度效应等因素, 使得变形控制的难度明显增加。传统的依靠经验控制方式已经很难适应高精度建造的需要。为了解决这一难题, 需要在机理分析、过程控制和预测方法上进行系统研究, 从而对整个施工过程进行科学调控和精细化管理。

## 1 大型复杂钢结构施工变形机理分析

### 1.1 结构受力特性与初始缺陷影响

大型复杂钢结构一般跨度较大、构件细长比大、空间受力复杂, 施工阶段和成型阶段受力状态明显不同。施工期构件常位于非完整受力体系内, 局部受压、偏心受力和不对称荷载较易诱发初始变形放大效应<sup>[1]</sup>。由于制造和运输等环节无法避免的构件弯曲、扭曲以及焊接残余应力等初始缺陷也将在安装时逐渐释放和叠加外部荷载, 而引起整体结构的非线性响应。从实际工程经验来看, 对于高层钢结构和大跨度空间结构, 初始缺陷对节点位移的影响可以超过设计允许偏差的30%。因此施工前需要通过构件检测和预拼装来控制初始误差, 以减少后续变形的累积风险。

### 1.2 施工荷载与温度效应耦合作用

施工阶段结构需要承受自重、施工设备荷载以及临时堆载等各种不确定性载荷, 这些载荷的分布呈现

出显著的阶段性和随机性特征。同时钢材对温度的变化异常敏感, 昼夜温差和季节变化可使构件热胀冷缩, 而产生附加应力和位移。施工荷载和温度效应的叠加作用下, 结构容易发生非均匀变形, 特别是大跨度桁架和屋盖体系的变形较为明显<sup>[2]</sup>。实际工程中的监测数据表明, 10℃的温差就能使毫米级的节点位移发生变化, 这在高精度的安装需求中已经不能忽略。为此, 应从合理安排施工时序、控制荷载集中和采取温度补偿措施等方面入手, 使施工荷载和环境效应协同可控, 从而避免耦合作用诱发结构整体偏移。

### 1.3 连接方式与安装顺序对变形的影响

钢结构主要有高强螺栓和焊接两种连接形式, 其刚度形成和应力传递路径在建造过程中有所不同。焊接连接引入了明显的热输入和收缩变形, 如果控制不到位, 就容易造成节点区域应力集中和构件的局部变形; 而高强螺栓的连接虽然变形不大, 但是初拧和终拧时也会出现局部位移的调整。安装顺序的选择直接决定了结构受力体系形成的轨迹, 而不合理的吊装顺序将导致某些构件预先受到超设计荷载作用, 从而产生不可逆变形。实践证明, 通过优化连接工艺和安装顺序可以有效地把整体结构的变形限制在设计容许的范围之内, 从而提高了结构的施工精度和安全性。另外, 实际项目需要综合考虑施工阶段分段划分和受力重分配等特点, 进行关键节点分级控制和动态校核。借助数字化建设技术, 如BIM与实地监测数据的即时互动, 可以对部件的安装状况进行直观的管理, 并适时地调节施工的相关参数。对于焊接区域要合理安排焊接顺

作者简介: 马可(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

序和分层施焊工艺以降低温度梯度引起的附加应力。在使用高强度螺栓进行连接时，必须严格监控预紧力和施工的准确性，以确保连接的稳定性和可靠性。考虑施工组织、工艺优化及监测反馈机制等因素有利于实现结构变形全过程控制，以进一步提高复杂钢结构施工整体质量和工程效益。

## 2 大型复杂钢结构施工过程变形控制关键技术

### 2.1 施工方案优化与分阶段控制策略

在大型复杂钢结构施工过程中，对方案进行优选是控制变形的首要环节。通过施工前的全过程仿真与分析，明确各阶段结构受力转换路径，可以有效降低施工期间非设计状态引起的附加变形。当前工程实践普遍采用“分区安装，分步成型，分期分批封闭”的控制策略，将整体结构划分为若干受力相对独立的单元，并通过合理的吊装顺序及节点锁定时机使结构逐步形成稳定的系统。尤其在大跨度屋盖及超高层钢结构施工中，分阶段控制可以显著降低悬臂状态下挠度累积。结合 BIM 与施工仿真技术对关键节点进行预布置设计，使构件在最终受力状态下趋于设计位置，从而有效提高施工精度及结构稳定性。并在此基础上，根据现场实时监控结果，对施工方案进行动态优化与反馈修正。通过设置位移、应变、温度传感器等获取关键构件的响应数据，并与仿真结果进行比较分析，能够及时识别偏差来源并采取针对性措施加以调整。

### 2.2 高精度测量与实时监测技术应用

伴随工程精度需求持续增加，高精度测量以及实时监测技术在变形控制中的作用越发重要。全站仪、激光扫描和 GNSS 已完成核心节点毫米级监控，同自动化数据采集系统配合，能即时反馈结构变形发展趋势，为施工修改创造条件<sup>[3]</sup>。在工程实际应用中，监测数据不仅用于结果验证，也用于动态修改施工参数，如吊装位置、预拱度及连接节点顺序，物联网智能监测系统逐步推广，实现多点同步监测及远程预警等功能，明显提高施工安全性以及响应能力。表 1 数据基于最近几年大型公共建筑及桥梁钢结构施工监测实例统计，

体现不同技术在精度、能力及适用场景的区别，为施工监测方案选择提供参照依据。

### 2.3 临时支撑与预应力调控方法

施工期合理布置临时支撑体系对控制结构变形具有十分重要的意义。临时支撑在施工阶段既要承受一部分荷载，又要通过支撑刚度和布置位置的调整来优化结构受力状态和减小构件变形累积<sup>[4]</sup>。对大跨度结构往往采用可调支撑或者千斤顶系统来达到对施工期标高和位移进行精细调控的目的。预应力调控技术也被逐步应用于复杂钢结构的施工过程中，它通过给关键构件以预拉力或者预压应力的作用，使得施工阶段的结构形成一种有利的内力分布，来抵消一部分的施工变形。

## 3 大型复杂钢结构施工变形预测与数值模拟方法

### 3.1 有限元分析在施工模拟中的应用

有限元分析已经成为预测大尺寸复杂钢结构建造变形的核心手段，关键是要把建造过程变成一个可以计算出来的阶段力学问题<sup>[5]</sup>。一是建立精细化的三维有限元模型，来考虑构件的几何非线性和材料非线性，从而提高计算精度；二是对分阶段的施工工况进行模拟，采用逐步加载和结构体系转换的方法，真实地反映了施工期内力和位移的演变情况。多引入施工误差和初始缺陷参数，以提高模型在实际工况下的适应性。以济南奥体中心体育场项目为例，采用有限元模拟的方法分析悬挑桁架的整个施工过程，并对吊装顺序和支撑布置进行优化，从而有效地控制关键节点的变形情况。

### 3.2 施工全过程仿真与误差修正机制

施工全过程仿真技术的实际应用说明，该技术借助把设计模型以及施工动态过程相结合，可以持续地预测并纠正结构变形。一是搭建按时间顺序排列的施工模拟模型，把每个施工阶段当作单独的计算单元实行重复分析；二是利用现场监测数据不停修正模型参数，增强预测结果以及实际状况的吻合度；三是该模型设置误差反馈机制，反向输入测量偏差，实时地调整施工控制参数。

表 1 典型钢结构施工监测技术精度与适用范围对比表

监测技术类型	测量精度 (mm)	适用范围	单次监测周期 (min)	自动化程度
全站仪测量	±1.5	常规节点定位	10 ~ 20	中
激光扫描	±1.0	大范围空间结构	15 ~ 30	高
GNSS 监测	±5.0	超高层结构整体位移	5 ~ 10	高
光纤传感	±0.5	局部应变监测	实时连续	高

### 3.3 数据驱动的变形预警与评估模型

在智能建造持续发展的背景下,依据数据驱动模型的应用观点,该技术逐渐应用于钢结构变形预测与预警领域。详细来说:一是依据历史监测数据,建立机器学习模型实现结构变形趋势预测;二是借助多源数据融合,融合应变、位移等数据改良模型,加强了预测的稳定性与准确性,依赖风险评估体系;三是设置概率分析机制实现变形风险分级预警。研究结果表明,使用多任务学习方法更新结构参数,可以有效减少预测的不确定性,同时增强局部损伤以及异常变形的识别能力。

表2数据根据典型大跨度钢结构工程的模拟及实测资料被系统地整合,用来折射数值模拟和实际变形在各种跨度下的偏离程度,给施工预测模型的精度判定以及算法改良等提供基础数据的保障。

表2 典型钢结构施工仿真与预测参数统计表

项目 编号	结构跨 度 (m)	最大节点 位移 (mm)	仿真预测 值 (mm)	监测实测 值 (mm)	误差 (mm)
1	120	32.6	31.8	33.1	1.3
2	180	45.2	44.5	46	1.5
3	220	58.7	57.9	59.6	1.7
4	260	73.4	72.6	74.5	1.9
5	300	89.1	88	90.3	2.3

## 4 大型复杂钢结构施工变形矫正技术与质量保障措施

### 4.1 机械矫正与热矫正技术选择

大型复杂钢结构施工实行变形矫正,需依据变形类型、材料性能和构件尺寸融合地挑选合理的技术。机械矫正技术常用于弹性或者小塑性变形区间,使用液压矫正机和压力机分级地加载达到了恢复外形的目的。为了防止新的损害产生,这种校正技术的载荷一般都被限定在材料屈服强度的80%之内。热矫正技术利用钢材的热胀冷缩特性,借助局部加热产生收缩应力,然后抵消原有的变形。该方法适用于焊接残余变形以及较繁复构件的矫正,一般会控制加热温度在600~900℃范围内,以避免过烧。

### 4.2 分区分步调整与精细化校正方法

根据大型结构良好的整体性及变形传递的复杂性,分区分步调节变成目前主流的矫正方案。该方法把结构划分为若干控制单元、逐次实行调节,有效避免局部矫正产生新的整体偏差。实行时首先校正主要受力

构件的整体线形,再将节点区域及局部构件实行精细化校正,保证变形逐步收敛。实践经验说明,合理控制各项矫正量并改良顺序可避免重复矫正造成的材料性能劣化。

### 4.3 质量控制体系与验收标准完善

钢结构变形矫正最终结果取决于健全的质量控制体系和严格的验收标准。在目前的工程操作中,必须严格按照《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205-2020)等相关标准来操作,确保对构件的直线度、平面度和节点偏差进行持续的监控。建设过程中要建立闭环管理机制,以保证各阶段矫正结果达到设计要求。加强焊接区域、加热区域及其他关键部位质量检测,以避免由于矫正而出现裂纹或者性能退化。信息化质量管理平台推出,可以实现对施工数据的全程追溯,增强了验收工作的科学性和透明度。通过标准化流程和数字化手段的结合,可以有效提高大型复杂钢结构施工整体的质量水平和安全保障能力。

## 5 结束语

大型复杂钢结构的施工变形存在多因素耦合和阶段性演化的特点,需要采用系统化的技术手段综合控制。研究表明,根据施工阶段的力学特征进行方案优化和分阶段控制是减少初始变形积累的关键;高精度的监测和数据反馈机制可以达到动态调控的目的;有限元和数据驱动模型对变形的预测提供了可靠的支持。同时,合理地选择矫正工艺和健全的质量控制体系可以有效地确保结构成型的精度。总体上看,多技术融合和全过程控制,是提高复杂钢结构建设质量和安全的核心途径路径。

## 参考文献:

- [1] 齐宏拓,刘界鹏,程国忠,等.基于点云数据的大型复杂钢结构智能化施工方法[J].土木工程学报,2024,57(01):65-75.
- [2] 马晓波.施工荷载耦合作用下超大直径盾构隧道结构力学响应[J].城市轨道交通研究,2025,28(09):63-71.
- [3] 高芳芳.基于高精度测量技术的管道架工程沉降变形分析与控制方法研究[J].科技资讯,2025,23(08):139-141.
- [4] 唐海峰.城市高架体系临时支撑的选型与布设分析[J].科技创新与应用,2023,13(08):118-121.
- [5] 郭娜,宋浩,杨建伟,等.城市轨道交通车辆制动盘散热筋设计及有限元分析[J].城市轨道交通研究,2025,28(05):283-287.

# 市政给排水管网非开挖修复技术选型与设计优化研究

王 龙

(福州市规划设计研究院集团有限公司蜀山区分公司, 安徽 合肥 230031)

**摘 要** 为破解市政给排水管网修复中技术选型盲目、设计方案粗放、管控不到位等行业难点, 聚焦非开挖修复全流程展开系统性研究, 构建涵盖经济性、安全性、功能性的多维度选型决策体系, 细化全周期成本权衡、双重安全管控、功能精准适配三大选型逻辑。针对工程设计与实施环节, 梳理前置勘察、工艺参数、施工组织三大设计优化方向, 制定全过程质量管控、动态成本管控、文明施工管控三类实施保障措施。研究成果贴合市政管网修复实际需求, 可规范技术选型流程、优化工程设计方案, 提升非开挖修复工程的质量效益与长效性。

**关键词** 市政给排水管网; 非开挖修复; 技术选型; 设计优化; 全过程管控

中图分类号: TU991.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.041

## 0 引言

市政给排水管网是城市基础设施的核心组成部分, 承担着供水输送、污水排放的关键职能, 直接关系到城市运行效率与居民生活质量。随着城市管网服役年限增长, 管网破损、渗漏、变形等病害频发, 传统开挖修复方式存在施工周期长、交通干扰大、环境影响恶劣等弊端, 非开挖修复技术凭借施工扰动小、工期短、适用性强等优势, 逐步成为管网修复的主流手段。当前行业内非开挖修复技术选型缺乏统一标准, 设计方案与现场实际脱节、施工管控粗放等问题突出, 导致修复效果参差不齐、成本管控失效、工程长效性不足。基于此, 构建科学的选型体系、优化设计与管控流程, 成为提升市政给排水管网非开挖修复工程质量的关键, 本文就此展开深入研究, 为管网修复工程规范化推进提供理论支撑与实践思路。

## 1 非开挖修复技术多维度选型决策体系构建

### 1.1 经济性导向的选型权衡策略

兼顾全生命周期成本与短期投入, 才能实现非开挖修复技术的性价比最优选型, 打破只看重前期施工成本的片面思维, 统筹短期投入与长期效益的平衡关系。前期施工成本与后期运维成本是成本核算的两大核心板块, 选型时不能仅聚焦材料、设备、人工等前期投入, 还要测算修复后的运维频次、养护成本、返

修概率, 全周期核算成本投入, 避免前期低成本带来后期高运维的恶性循环。小规模病害与大范围病害的成本管控逻辑截然不同, 小规模单点病害无需投入高成本的整体修复技术, 选用局部修复类轻量化技术即可控制投入; 大范围管网老化、连续破损则需兼顾修复效果与规模成本, 选用适配大面积作业、耗材利用率高的技术, 摊薄单位修复成本。

### 1.2 安全性导向的选型管控原则

把施工安全以及管网运行安全作为核心来挑选修复技术, 是市政给排水工程不能退让的底线要求。安全管控要贯穿选型整个流程, 得从施工过程、后期运行、特殊环境这三个方面来细化筛选标准, 施工过程要做到无扰动、无风险的基础要求, 挑选技术的时候需要优先考虑作业方式的安全性, 避开那些容易带出地面沉降、塌方、介质泄漏的技术类型, 明确施工操作的安全规范, 保障施工人员与周边设施的安全<sup>[1]</sup>。修复以后管网运行稳定性是核心目标, 所选技术必须拥有可靠的结构补强与密封性能, 杜绝修复后出现渗漏、开裂、脱节这些次生问题, 保障给排水管网持续稳定运行, 满足城市供水、排水的基础需求。特殊地质、环境下的安全选型需要做好风险规避, 软土地基、高水位地质、腐蚀性土壤这些特殊场景, 会加剧施工风险与管网老化速度, 需要选用适配特殊地质、耐腐蚀抗渗的技术, 同时优化施工工艺来降低地质风险, 避

作者简介: 王龙(1993-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 市政给排水设计。

开不适配的技术类型。安全性是技术选型的首要前提，只有紧扣施工与运行双重安全标准，才能保障修复工程合规落地、长效运行。

### 1.3 功能性导向的选型适配逻辑

围绕给排水管网运行功能上的需要来做技术选择，才能让修复带来的结果贴合管网实际使用上的要求，同时照顾到供水安全与排水通畅这两项关键功能，供水管网的关键功能在于保证水质安全以及输水压力平稳，做选择的时候要优先采用不会带来二次污染、密封表现好的修复手段，防止修复中用到的材料对水质造成污染，借助手段本身在结构补强上的能力来维持管网压力，避免由于修复带来水压降低、供水停止这类状况。排水管网的关键功能是确保排污顺畅、防止污泥堆积堵塞，所挑选的手段得同时考虑管壁光滑程度和结构稳定程度，修复以后保持管网内壁平整顺畅，降低杂物积聚的可能，还要拥有比较好的抗冲刷、抗腐蚀能力，去匹配污水介质的腐蚀特点，保障排水效率。在管网扩容、标准提升改造的情形下，修复手段需要与改造需要相配合，既要完成病害处理，又要考虑到扩容以后在承载力、通流能力方面的要求，选用能够适应管径调整、压力提高的手段类型，做到修复和改造一起进行，功能上的匹配是选择的核心方向，不同管网在运行需要上差别明显，只有准确对接功能需要，才能让修复手段产生最大效果，支撑管网长期稳定运行。

## 2 非开挖修复工程设计优化核心策略

### 2.1 修复方案前置勘察设计优化

精细化勘察夯实设计基础，能有效规避后期施工隐患，让修复方案贴合现场实际，从源头减少设计偏差与施工变更。管网病害全方位探测与精准定位是勘察的核心环节，摒弃片面勘察模式，采用专业探测设备全面排查管网破损、渗漏、变形、淤积等各类病害，精准锁定病害位置、范围与严重程度，为修复范围划定、技术选用提供精准依据，避免漏查、错查导致的修复遗漏<sup>[2]</sup>。地质条件、地下环境详勘是设计适配的关键支撑，重点勘察地下水位、土壤质地、岩层分布等参数，分析地质对施工工艺、材料性能的影响，针对性调整修复设计方案，优化施工防护措施，降低地质因素引发的施工风险。管网权属、周边设施摸排需做到全面细致，厘清地下管线、市政设施、建构筑物的分布位置与权属边界，在设计阶段做好避让规划，明确施工操作红线，避免施工过程中破坏周边设施、引发权属纠纷。

### 2.2 修复工艺参数设计优化

工艺参数的准确设定成为提升修复质量与施工效率的核心手段。参数设定需要贴合技术特性、管网条件以及环境要求，防止参数不合理带来的修复失败，修复材料配比、厚度的参数化设计应当兼顾性能与成本，依照管网病害程度、承压需要、介质腐蚀特性，精确计算材料配比比例，确保材料强度、耐腐蚀性满足要求；结合管网管径、结构损耗情况，设定合适的材料厚度，既能够满足结构补强与密封需求，又能够避免材料浪费、增加施工难度，施工温度、压力、固化时间的参数控制直接影响修复效果，不同非开挖技术的工艺参数阈值存在差异，需要结合现场环境温度、管网介质温度，设定合适的施工温度区间，严格控制施工压力参数，防止压力过大对管网造成损伤、压力过小影响修复密实度，精确控制材料固化、内衬成型时间，确保修复结构完全成型、性能达标<sup>[3]</sup>。内衬搭接、接口密封的精细化设计是防止渗漏的关键，明确搭接宽度、密封方式与衔接标准，针对接口部位做加强处理，消除衔接缝隙，保障管网整体密封性。工艺参数的准确优化，能够让修复工艺发挥出最佳效能，提升工程质量与施工效率。

### 2.3 施工组织与工序设计优化

优化施工工序与组织模式，不仅可以压缩施工工期，还能减少对城市运行和周边环境的干扰，达到高效施工与文明施工两个目标，分段施工、流水作业的工序排布设计，适合大范围管网修复场景，依据管网分布、病害分布划分施工区段，采取分段推进、流水作业的方式，避免施工扎堆、资源闲置，提高施工设备和人员的使用率，同时缩短单区段施工时间，减少占道时长，交通导行、围挡布设的人性化组织设计，主要针对城区施工场景，结合周边交通流量、出行高峰时段，优化交通导行路线，设置清楚的导行标识；合理规划围挡范围，采用轻量化、可移动围挡，兼顾施工安全和市民通行需要，降低施工对交通秩序的影响。多技术协同施工的工序衔接设计，需要做好统筹规划，面对复杂病害需搭配多种修复技术的场景，明确不同技术的施工顺序、衔接节点，细化交接验收标准，避免工序冲突、衔接不畅带来的工期延误和质量隐患。

## 3 非开挖修复工程设计的实施管控优化措施

### 3.1 施工质量全过程管控的设计优化

将质量管控要求融入工程设计全流程，构建覆盖原材料选型、施工工序规划、竣工验收标准的一体化

质量管控设计体系,从设计源头保障修复工程达标,实现管网长效治理。在原材料设计环节,明确修复主材、辅助耗材的质量标准、性能参数及进场检验要求,规划关键材料抽样复检的流程与判定准则,通过设计规范材料选用,从源头规避劣质材料使用风险。施工工序设计中,细化关键工序的旁站监督节点、工艺参数执行标准及工序验收要求,设计工序衔接的质量核验流程,明确不合格工序的整改设计方案,严禁未达标工序进入下一环节,通过设计将质量管控嵌入施工全流程。在竣工验收设计层面,针对供水管网、排水管网的功能差异,优化设计闭水、耐压试验的参数指标、操作流程及合格判定标准,供水管网重点设计耐压性能与渗漏检测的试验方案,排水管网侧重密闭性与通畅性检测的设计规划,以标准化的验收设计验证修复效果,确保管网运行达标<sup>[4]</sup>。

### 3.2 施工成本动态管控的设计优化

以设计为抓手细化成本管控节点,构建全周期成本动态管控的设计体系,实现预算可控、效益提升,从设计阶段规避成本超支风险。基础成本设计优化方面,结合管网修复工况,设计材料精准切割、领用与核销的流程方案,明确材料损耗率控制指标,减少边角料浪费;优化施工机具的选型、调配与养护设计,规划设备使用效率提升方案,避免设备闲置与重复租赁,通过设计控制材料与机具的基础成本。风险成本防控设计上,梳理工期延误、工程变更的潜在诱因,在设计阶段制定针对性的应急预案与施工调度设计方案,明确工程变更的审批流程、签证规范及变更成本核算标准,通过前置设计管控工期与变更带来的成本风险<sup>[5]</sup>。规模化修复成本集约设计中,针对片区化管网修复工程,设计施工资源整合、材料集中采购、人员统筹调配的整体方案,优化规模化施工的工艺参数设计,提升耗材利用率,通过设计摊薄单位修复成本,实现成本集约。同时,在设计中规划预算执行跟踪与成本偏差纠正的流程,确保工程成本始终控制在合理范围。

### 3.3 施工环境与文明施工管控的设计优化

将绿色环保、文明施工要求纳入工程设计,制定全流程的施工环境管控设计方案,减少施工对城市生态、居民生活及市政设施的影响,契合市政工程绿色发展理念。在污染防控设计方面,针对施工扬尘、噪声、污水,设计专项防控方案:规划作业现场洒水降尘、围挡防尘的布设与操作标准,设计低噪声施工机械的

选型及作业时间规划方案,避开居民休息时段;优化施工废水的收集、处理与达标排放的流程设计,明确废水处理设施的选型与布设要求,严禁污水直排。在垃圾处理设计方面,分类规划施工垃圾、废弃耗材的收集、回收与清运设计方案,明确可回收材料的回收利用标准,设计不可回收垃圾的规范化清运流程,避免垃圾随意堆放造成环境污染。在周边保护设计方面,细化施工区域内绿化植被、水体资源的保护设计方案,明确施工防护措施;针对周边道路、井盖、消防设施等市政设施,设计专项防护与保护的施工方案,划定施工操作红线,避免施工造成市政设施损坏,通过系统化的设计实现施工与城市环境、民生需求的和谐共生。

## 4 结束语

市政给排水管网非开挖修复的技术选型与设计管控直接决定工程落地质量与管网服役寿命,多维度选型体系打破了传统单一维度选型的局限性,实现经济性、安全性、功能性的有机统一,让技术选择更贴合管网病害特征与运行需求。设计优化与全过程管控措施,从源头规避施工隐患、严控工程成本、保障施工合规,有效解决非开挖修复工程中的各类实操难题,推动管网修复从粗放施工向精细化治理转变。非开挖修复技术的规范化应用,既能减少城市道路开挖、降低民生干扰,又能延长管网使用寿命、节约市政运维资金,契合城市基础设施绿色低碳发展理念。未来可结合不同地域地质条件、管网材质,进一步细化选型参数与管控标准,持续完善非开挖修复技术体系,助力城市给排水管网长效运维与高质量发展。

## 参考文献:

- [1] 苏睿.长距离顶管施工技术在市政给排水管网建设中的应用[J].建材发展导向,2025,23(11):70-72.
- [2] 李超,孙修成,李新星,等.探究市政给排水管网设计中非开挖检测修复技术[J].科技资讯,2025,23(08):145-147.
- [3] 王涛.市政给排水施工中管网缺陷管段非开挖原位固化修复技术研究[J].建设科技,2024(12):29-32.
- [4] 李吉明.非开挖检测修复在市政给排水管网维护中的应用[J].工程技术研究,2023,08(23):43-45.
- [5] 陈邦杰.市政给排水管网非开挖检测修复技术分析[J].四川水泥,2022(09):84-86.

# 海油工程陆地导管架及组块高空作业 脚手架防护措施实践分析

黄锦辉, 梁 斌, 张清华

(海工(珠海)重工有限公司, 广东 珠海 519000)

**摘 要** 海油工程企业进行陆地建造与施工作业时, 高空作业环境存在场地条件复杂, 吊装过程动载荷波动大, 作业过程易受季节性强风、暴雨侵扰等多方面特点。本文分析海油工程陆地导管架及组块建造阶段场地地基条件、吊装动态载荷、大气腐蚀环境对脚手架结构安全产生的各类影响, 围绕架体基础处理、节点附着加固、常规防腐工艺、安全通道设置多个方向, 阐明脚手架搭设防护技术的应用要点。结合工程实践, 梳理恶劣天气使用限制、日常检查维护、人员防坠落装备配置、拆除作业安全管控等多个方面的安全管理内容, 旨在为海油工程陆地建造阶段导管架及组块高空作业脚手架的安全防护提供技术参考。

**关键词** 海油工程; 陆地建造; 高空作业; 脚手架; 安全管理

中图分类号: TE54

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.17.042

## 0 引言

海油工程是国家能源战略和基础设施建设中的关键领域, 其陆地建造阶段的导管架及组块施工作业, 和普通建筑工程相比存在特殊性<sup>[1]</sup>。在海洋油气装备建造体系中, 大量导管架、组块等大型钢结构往往需要先在陆地建造场地完成预制、总装、焊接、吊装配合及装船前施工, 这一阶段高空作业频繁、交叉工序集中、机械设备投入强度大, 对脚手架安全防护提出了更高要求。在陆地施工过程中, 常出现交叉作业密度高、大型构件吊装冲击强、场地地基条件不均等情况, 脚手架承受的安全风险超出常规建筑工程范围, 局部失稳、基础沉降、杆件变形等隐患必须纳入管控<sup>[2]</sup>。本文结合海油工程陆地建造场区导管架及组块施工的特殊工况, 分析环境因素对脚手架安全的作用方式, 从架体结构设计、节点连接、防腐工艺等方面, 梳理搭设防护的相关技术内容, 结合工程实际分析恶劣天气管控、日常维护、人员防护等方向的安全管理内容, 旨在为同类工程高空作业脚手架的安全防护提供技术参考与实践指导。

## 1 海油工程陆地建造阶段导管架及组块施工特殊工况分析

### 1.1 场地地基及环境影响因素分析

海油工程企业在陆地建造场区进行导管架和组块施工作业时, 场地条件存在多样性与复杂性, 其作业

环境兼具工业建造场地、重装吊装场地和高处交叉作业场地的复合特征。施工现场多为大面积回填土地基, 或是经过平整处理的天然地面, 地基承载力分布不均, 遭遇强降雨或是地下水渗流作用后, 土体易出现软化, 脚手架立杆基础会出现不均匀沉降。施工区域周边常同步进行大型履带吊行走、重型平板车运输等作业, 作业产生的地面振动与侧向挤压, 会对邻近架体稳定性形成潜在威胁<sup>[3]</sup>。陆地风场受地形地貌和周边构筑物影响, 常形成湍流与狭管效应, 局部瞬时风压超出规范设计取值的情况时有发生, 夏季台风与暴雨发生频次高, 强风伴随强降雨, 同时对脚手架基础产生冲刷作用, 也会影响架体稳定性。昼夜温差和季节温差会引起钢管材料热胀冷缩, 大型架体中若未增设对应构造措施, 节点可能出现松动, 杆件内部会产生附加应力。大气环境中的工业粉尘等物质附着于杆件表面, 潮湿条件下会引发钢材均匀锈蚀, 锈蚀速率虽低于海油环境, 但长期累积作用下, 依然会改变杆件耐久性能。

### 1.2 吊装作业动态载荷分析

海油工程陆地建造阶段导管架、组块进行施工时, 动态载荷主要来自大型构件吊装作业和设备运转, 尤其在总装、翻身、抬吊、临时就位等陆地建造关键工序中表现更为突出。导管架和组块多属于百吨级以上的大型钢结构, 吊装过程产生的冲击载荷和偏心力,

作者简介: 黄锦辉(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 海油工程脚手架优化设计与应用。

会顺着附着点或邻近位置传递给脚手架,让架体瞬时受力重新分布,大型构件翻身、就位环节实施牵引溜绳操作,会对周边架体形成侧向拉力<sup>[4]</sup>。焊接作业打磨作业产生的持续微振动,重型起重设备行走或回转产生的地面激励,都会顺着地基传递到脚手架基础。动态载荷持续作用,会让扣件出现微量滑移,滑移量不断累积,最终形成扣件松动。架体与主体结构连接节点处,交变应力会让焊缝或连接螺栓出现疲劳损伤。

### 1.3 常规大气环境材料劣化分析

在陆地大气环境中,脚手架钢管的劣化主要体现在机械损伤和均匀锈蚀,这与海上平台服役环境下高盐雾、高湿热腐蚀特征存在明显差异,更体现出陆地建造阶段材料损伤的阶段性和可控性。与海油高盐雾环境不同,陆地大气腐蚀主要为缓慢的均匀锈蚀,影响因素包括空气湿度、工业污染程度、防护层完整性。钢管投入使用后,损伤大多来自重复搭拆带来的磕碰变形、局部凹陷,还有焊接作业时飞溅造成的灼伤。靠近地面的立杆底部,积水或泥土掩埋会催生局部锈蚀,水平杆件和扣件连接处的螺纹部位,粉尘堆积和潮湿空气共同作用会引发锈蚀卡滞。材料性能劣化大多是渐进过程,壁厚减薄幅度偏小,但杆件弯曲变形、局部凹陷等机械损伤出现频率更高。

## 2 海油工程陆地建造阶段导管架及组块脚手架架设防护技术

### 2.1 架体基础与结构设计标准

海油工程陆地建造阶段导管架和组块脚手架进行结构设计时,要参照《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130-2011),结合陆地总装场、预制场、吊装配合作业面等工程特点适当加强。架体布局优先选用整体性较强的空间桁架结构,依靠连续设置剪刀撑提高整体刚度,纵向剪刀与撑横向剪刀撑都要从底部向顶部连续布置,转角位置额外加装加强斜撑。立杆间距要严格控制,步距不超过 1.5 米,纵距不超过 1.5 米,横距不超过 1.0 米,以减小单根杆件长细比,提高受压稳定性。高度超出 24 米的架体,必须完成风荷载验算,按规范设置连墙件,或是采取分层卸荷措施。基础处理是设计的核心环节,搭设在硬化地面上的架体,要设置通长垫板或底座,保证接触面承载力符合要求。搭设在回填土或天然地基上的架体,必须完成地基承载力验算,采取夯实、铺设碎石垫层或浇筑混凝土支墩等操作,避免不均匀沉降引发架体倾斜。

### 2.2 节点附着加固技术

脚手架与导管架及组块主体结构的可靠连接,是保证架体整体稳定的核心。导管架及组块多为直线型钢结构或混凝土结构,附着节点的设置需保证足够的连接刚度和可靠性。对于钢结构主体,应使用标准连墙件或焊接短钢管作为附着点,连墙件与立杆之间采用双扣件刚性连接,确保能承受拉力和压力双重作用<sup>[5]</sup>。对于混凝土结构,可采用预埋件或在结构上钻孔安装后扩底锚栓的方式设置附着点,锚栓选用应满足承载力要求并采取防腐处理。附着点的间距应严格执行规范要求,竖向间距不超过 3 步,水平间距不超过 3 跨。在架体的转角处、开口处以及顶部,应加倍设置附着点。所有附着件及其连接件的承载能力,应按最不利荷载组合进行验算,并留有足够的安全储备。连墙件应尽可能靠近主节点设置,偏离距离不应大于 300 毫米。

### 2.3 防腐蚀材料表面处理工艺

针对陆地大气腐蚀程度较低的特点,脚手架防腐处理可选用常规工艺以满足耐久性要求。新购脚手架钢管可选用热浸镀锌处理,也可采用涂装防腐。采用涂装防腐时,表面处理应达到 St3 级(彻底的手工和动力工具除锈)或 Sa2 级(彻底的喷射除锈),然后涂刷防锈底漆和面漆,如醇酸防锈漆、环氧底漆配套聚氨酯面漆等,干膜总厚度应不低于 120 微米。扣件、螺栓等连接件宜进行镀锌处理或采用防锈油保护。在现场搭设过程中,因焊接、切割等作业造成的防腐层损伤,应及时进行补涂处理。

### 2.4 安全通道作业平台设置规范

海油工程陆地导管架及组块高空作业中,安全通道与作业平台的设置直接关系到人员通行安全和作业效率,尤其在陆地建造场区多工种穿插、作业面转换频繁的条件下,其规范设置更是现场安全管理的重要基础。通道和平台的设计应满足稳定性、防滑性和便利性要求。脚手板应选用刚度大、防滑性能好的材料,如钢制脚手板或符合标准的木脚手板,严禁使用腐朽、扭曲、裂纹的板材。脚手板铺设必须满铺、铺稳,两端采用镀锌铁丝绑扎或专用压板与支撑杆件固定,防止踩踏翻转移位。通道和平台临边必须设置防护栏杆,上杆高度 1.2 米,下杆高度 0.6 米,并设置不低于 180 毫米高的挡脚板,防止物料坠落。人员上下通道宜采用钢斜梯或垂直爬梯,斜梯踏步应有防滑措施,梯宽不小于 600 毫米,坡度不宜大于 1:3。作业平台面积较大时,应考虑设置不少于两个上下通道,满足紧急疏散要求。平台堆载应严格控制,严禁超载使用。

### 3 海油工程陆地建造阶段导管架及组块脚手架安全管理实践

#### 3.1 恶劣天气使用限制措施

海油工程陆地建造施工区域常遭遇台风、暴雨、雷电等恶劣天气,建立并严格执行恶劣天气下的使用限制措施至关重要,特别是露天总装场地、大型构件拼装区和吊装配合区域,更应突出陆地现场气象条件对脚手架使用安全的直接影响。施工现场应配备风速监测仪,当预报风力达到6级及以上(风速超过10.8米/秒)或遇暴雨、雷电、台风等恶劣天气时,应立即停止脚手架上的高处作业,组织人员有序撤离至安全区域。强风暴雨来临前,应对已搭设架体进行全面检查加固,重点检查附着节点的紧固状态,清理架体上堆放的松散物料和工具,对独立高大架体可增设揽风绳等临时稳固措施。暴雨过后,应检查地基是否有积水、下沉,架体是否有倾斜变形,确认安全后方可恢复作业。

#### 3.2 日常检查监测维护保养

建立常态化检查维护制度,是及时发现和消除安全隐患的关键。检查分为日常巡查、专项检查和定期检查三类。日常巡查由架子工或班组安全员每日作业前进行,重点检查扣件紧固状态、脚手板固定情况、连墙件完好性。专项检查安排在强风暴雨过后或停工复工前,重点排查架体变形、基础沉降、构件锈蚀等情况。定期检查由项目技术负责人组织,每月进行一次全面检查,对关键受力杆件、扣件抽样进行紧固力矩测试,重点检查结构变形、扣件松动、基础沉降等项目。检查中发现的问题,如扣件松动、杆件变形、防护缺损等,必须立即组织整改,整改完成经复查合格后方可继续使用。所有检查应形成书面记录,归档备查。

#### 3.3 作业人员防坠落装备配置

在海油工程陆地建造高空作业中,个人防坠落装备是保护作业人员生命安全的最后防线,其配置和使用应与陆地场区吊装作业、焊接作业及多层交叉作业条件相适应。所有高处作业人员必须按规定佩戴合格的安全帽、全身式安全带,并正确系挂。安全带的挂点必须设置在独立、牢固的锚固点上,如主体结构的可靠部位或专用的生命绳,严禁挂在临时的、不稳定的脚手架杆件上。在无法设置可靠挂点的区域,应架设专用的水平生命线,生命线的端部锚固和中间支撑必须经过强度验算。作业人员移动时应使用双钩安全带,确保至少一个挂钩始终处于挂接状态。

#### 3.4 拆除作业安全管控流程

脚手架拆除是事故高发环节,必须实施严格的安全管控,尤其在海油工程陆地建造后期、组块转运前及大型结构吊装转换阶段,拆除作业往往与设备转场、构件出运交叉进行,更需强化全过程组织管理。拆除前,应制定详细的专项施工方案,并向作业人员进行技术交底。方案应明确拆除顺序、作业区域隔离措施、材料传递方式以及应急响应流程。拆除区域应设置警戒区,派专人监护,严禁无关人员进入。拆除作业应遵循“先搭后拆、后搭先拆”的原则,自上而下逐层进行,严禁上下同时作业或采用推倒、拉倒等野蛮拆除方式。拆除过程中,应注意保留必要的连墙件,直至该层架体拆除完毕,防止整体失稳。拆卸下的杆件、扣件、脚手板等材料,应采用滑轮绳索平稳下传或使用起重设备吊运,严禁高空抛掷。

### 4 结束语

海油工程陆地建造阶段导管架及组块进行高空作业时,脚手架防护属于多要素参与的完整作业模式,其核心在于对施工特殊工况的准确认识和针对性应对。与海上服役环境不同,陆地建造场区更突出地基条件差异、重型吊装扰动、交叉作业集中和阶段性大气环境影响等特点。设计环节,要围绕基础处理方向,调整结构布局方式,优化节点连接方案,落实常规防腐操作,明确作业平台规范,对应技术措施可强化防护整体性能。技术手段要落地为严谨的管理动作,覆盖恶劣天气状态下的动态管控、全周期的检查维护、高标准的人员防护以及拆除环节的规范化操作。只有技术和管理协同推进,才可提高海油工程陆地建造阶段导管架及组块高空作业的安全保障能力,为海油工程建设筑牢安全防线。

### 参考文献:

- [1] 王宇堃,扈静霆,吴佳忆.海洋工程导管架的EPCI总承包模式项目质量管理[J].中国石油和化工标准与质量,2025(01):19-21.
- [2] 刘青杨.陆地与海洋石油工程建造的安全管理对比研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(07):40-42.
- [3] 肖义方.高层建筑悬挑脚手架施工技术分析[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(02):107-110.
- [4] 吴美娟.建筑工程脚手架施工安全问题分析[J].建筑·建材·装饰,2024(20):34-36.
- [5] 杨月峰.建筑工程脚手架及模板支撑体系安全控制要点[J].建材发展导向,2024,22(18):92-94.