

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 5 月 第 13 期 (总第 638 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 5 月 5 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

稿件凡经本刊采用，如作者无版权特殊声明，即视作该文署名作者同意将该文章著作权中的汇编权、印刷版和电子版（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 一种新型液压驱动锁定装置的研发及应用
..... 伍逸夫
- 004 电厂燃料系统圆形堆取料机防碰撞技术研究
..... 李欣宇
- 007 BP 神经网络预测再生粗骨料混凝土力学性能研究
..... 刘 磊
- 010 时频分析技术在三维地震薄层识别中的应用研究
..... 胡孝琰
- 013 石化 VOC 化学吸收工艺专用尾气收集装备制造集成技术研究
..... 胡 聪, 张红伟, 严进军
- 016 中频直流焊机在轴向柱塞马达柱塞精密焊接中的工艺适配性研究
..... 褚文辉

智能科技

- 019 数字化测绘技术在工程测量中的实践应用
..... 张先新
- 022 基于智能建造技术的装配式建筑施工要点探究
..... 宁胜利
- 025 基于数字孪生的 5G 物联网通信系统集成技术研究
..... 李建梁
- 028 基于 PLC 的水电现地控制单元硬件架构与软件实现
..... 陈博川
- 031 航道浅滩整治中实时动态定位技术对疏浚船作业效率的关键影响分析
..... 雒 磊
- 034 工业以太网 EtherCAT 在高速高精度运动控制系统中的实时性提升效果分析
..... 陈晓雯
- 037 BIM 与三维激光扫描技术融合的水利工程施工质量数字孪生全周期检测方法
..... 湛晓颖, 赵中亚, 党安华

目录 *Contents*

应用技术

- 040 土木建筑施工中钢筋工程施工技术研究..... 张文学
- 043 基于绿色理念的房屋建筑施工技术要点研究..... 施行生
- 046 数字化测量技术在水利工程施工中的应用研究..... 赵鑫, 肖焱
- 049 水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工工艺分析..... 张霞, 王瑜, 翟亮亮
- 052 水利工程高边坡施工安全风险评估与防护技术优化..... 刘过
- 055 市政给排水雨水口截污挂篮堵塞机理与防堵改进研究..... 叶立山
- 058 住宅建筑工程施工中的灌注桩后注浆施工技术分析..... 张超
- 061 建筑工程剪力墙结构大模板施工技术优化与混凝土成型质量控制..... 薛丽丽, 马洪波, 彭燕

科创产业

- 064 装配式建筑与建筑节能施工融合发展研究..... 王东平
- 067 “双碳”目标下绿色建筑造价管理策略探析..... 徐菴
- 070 基于数字化转型的企业生产效率提升路径研究..... 白杨
- 073 基于大数据技术的工业统计数据质量优化方法研究..... 朱豫秦
- 076 化工企业高压电动机继电保护方案设计与应用研究..... 李庆祺
- 079 高层建筑结构设计的安全性经济性平衡优化研究..... 许家华, 黑乃旺
- 082 减污降碳协同背景下的生态工业园区建设路径探讨..... 孔琦

技术管理

- 085 给排水管网信息化管理系统构建与应用..... 张春颖
- 088 智能化测量技术在工程安全监测中的应用..... 孙晓翠
- 091 暖通空调与建筑电气安装施工技术要点分析..... 牛诚, 毛毅鑫, 屈允帅
- 094 数字化技术赋能水利工程施工全过程管理研究..... 余剑锋, 方刚
- 097 污水处理厂设备安装技术要点与质量控制研究..... 张习聪
- 100 装配式建筑施工监理的关键风险点及防控措施实证研究..... 杨安平
- 103 新能源工程建设全生命周期管理体系构建与监管实践研究..... 刘剑维

科学论坛

- 106 污泥干化设备的设计与性能优化探析..... 肖凯文
- 109 钻井机械配套装置结构设计及强度研究..... 杨绍亮
- 112 机械电气设备电力节能技术研究与应用..... 赵建纲, 毛文学
- 115 污水处理厂给排水设备联动调试工艺应用思考..... 郝彦博
- 118 数字万用表直流电压档计量偏差校准方法研究..... 张海鹏, 王小栋, 刘志杰
- 121 大型起重船海上吊装动力学特性与稳性控制研究..... 史耀东
- 124 机器学习去噪技术在低信噪比地震资料处理中的应用研究..... 汤连盟

一种新型液压驱动锁定装置的研发及应用

伍逸夫

(海军装备部, 四川 成都 610000)

摘要 液压驱动锁定装置作为现代机械系统中的关键安全与定位部件, 在工程机械、航空航天、船舶重工等领域得到广泛应用。本文首先阐述了液压驱动锁定的基本工作原理与典型拓扑构型; 其次深入研究了其核心设计要素, 包括液压缸与锁紧机构的集成设计, 锁紧方式与可靠性的分析, 密封与材料技术以及液压控制系统设计; 最后对液压驱动锁定装置向智能化、高可靠性及紧凑化方向的发展进行了展望。结果表明, 优化设计的液压驱动锁定装置能显著提升设备的安全性、稳定性和自动化水平。

关键词 液压驱动; 锁定装置; 液压控制系统; 工程机械

中图分类号: TH137

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.001

0 引言

随着工业装备向大型化、重载化和高精度化的发展, 在航空航天、海洋工程、重型机械及轨道交通等关系到国计民生与战略安全的高端装备领域, 对运动部件在特定位置的可靠锁定与安全支撑提出了更高的要求。机械式锁定(插销)存在操作费力, 难以远程控制、存在人工操作的安全风险等缺点, 纯电气驱动则推力有限, 且在断电时无法保持锁紧力。液压驱动锁定装置则融合了液压传动出力大, 因体积小优势与机械锁定的可靠性, 成为一种理想的解决方案。本文系统地研究液压锁定装置的工作原理、设计关键点, 并探讨其不同工业场景下的应用, 并结合实际情况, 提出一种新型的液压驱动锁定装置, 旨在为相关产品的研发与优化提供理论参考。

1 液压驱动锁定机构的工作原理

装置通常有液压缸驱动、锁紧执行机构(锁舌、插销、卡钳等)和本体构成。工作原理分驱动和锁定保持两个阶段。驱动阶段: 压力油进入液压缸无杆腔, 推动活塞伸出(或缩回), 带动锁定机构精确的卡入卡槽(或目标锁孔等)。锁定与保持阶段: 锁定机构到位后, 液压系统可通过保压阀维持压力, 或利用机械自锁结构承受负载, 即使出现液压系统漏油或者泄压的情况, 机械锁也能锁定确保安全。按锁定的布置形式有内置式——锁定机构集成在驱动机构内部; 外置式——锁定机构单独布置在驱动机构外部^[1]。

2 液压驱动锁定装置的关键技术研究

1. 一体化构型和轻量化设计: 采用共用壳体, 内置流道等技术, 减少外部管路与连接, 提高系统刚性和抗振性; 在满足强度、刚度要求下, 对非承力件和非关键件进行减材设计, 选择轻量化材料进行设计。

2. 高可靠性锁定技术的分析设计: 液压驱动锁定装置的关键在于锁定功能的高可靠性, 通过承力能力要求进行锁定结构的合理选型。

3. 精密液压控制系统的设计: 液压驱动锁定装置的设计通常涉及液压驱动形式(直线运动或转动), 开锁或者上锁时的液压系统的压力、顺序的设计都会涉及液压系统设计, 需具备一定的精度和可靠性^[2]。

4. 特定环境和长寿命设计: 特定环境及长寿命是此项技术研究的另一个关键点, 涉及关键摩擦副的选择, 运动表面的表面处理以及热处理选择、密封件的选择等多方面的问题。

3 一种新型的液压驱动锁定装置

3.1 产品组成

本方案液压驱动锁定装置, 分别为直线运动和旋转运动, 受安装空间限制, 需集成直线运动和旋转运动的两种构型, 同时采用简单可靠的限位机构实现锁定, 原理结构如图 1 所示。

弹射驱动装置由液压马达、正向转动进油管嘴、反向转动进油管嘴、伸出管嘴、堵头、心轴、滑键、缩回管嘴、外筒、活塞杆、触碰机构、锁定机构等组成^[3]。

作者简介: 伍逸夫(1987-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 机械装置。

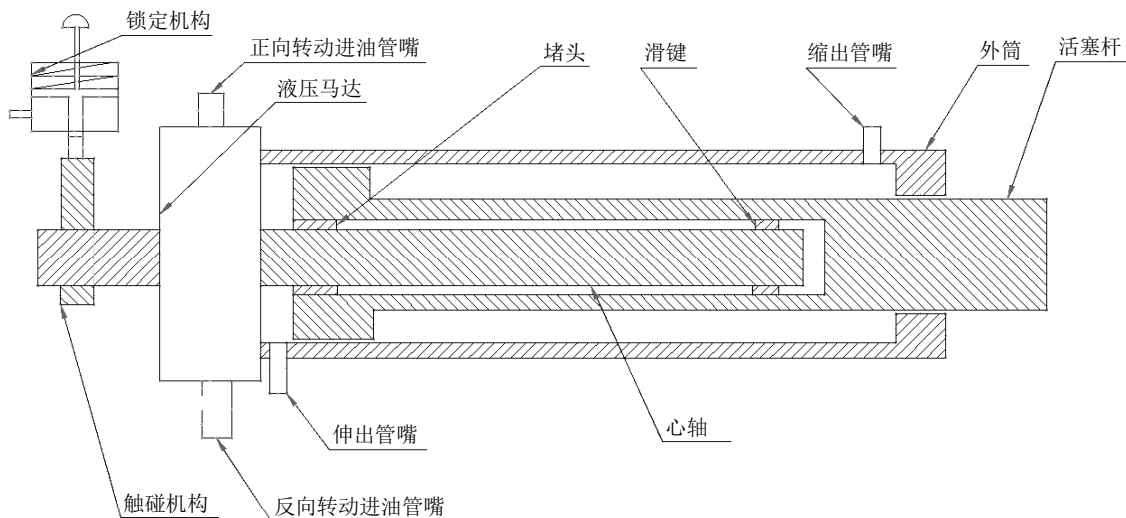


图1 液压驱动锁定装置原理图

3.2 结构特点

本机构将心轴与活塞杆通过滑键槽环向固定，使得心轴和活塞杆可以沿轴向滑动，但沿环向无法转动。是确保活塞杆沿心轴移动并且当活塞杆伸出到位后可以随心轴转动的关键。

本机构的油路转换通过液压阀实现，从而满足运动轨迹的先后顺序逻辑。

本机构到位锁定是通过顶杆卡在凸轮式卡槽里面实现定位上锁，通过液压油推动推杆活塞克服弹簧力实现开锁。

3.3 工作原理

作动筒伸出管嘴进油，推动活塞杆直线运动，滑键在活塞杆内卡槽滑动，当活塞杆伸出到位后，液压油压力升高，推动转换阀进行油路切换，高压油进入液压马达正向转动进油管嘴进油，推动心轴转动，心轴带动活塞杆，触碰机构转动，活塞杆带动机构转动到位时，锁定机构上的凸轮式卡槽推动顶杆，顶杆挤压弹簧，当滑过凸轮最高点时，顶杆卡在凸轮式卡槽里面，实现锁定机构锁定^[4]。

当准备打开时，液压马达反向转动管嘴进油，液压油通过锁定机构下腔推动顶杆脱离凸轮式卡槽，打开锁定机构，心轴带动活塞杆反向转动，转动到位后，缩回腔液压油压力升高，推动转换阀进行油路切换，作动筒高压油进入缩回腔，作动筒缩回。

3.4 结构设计计算

直线作动筒驱动力计算：驱动装置内集成直线作动筒和液压摆动马达两种构型，所需力由外筒、活塞杆、心轴构成的直线作动筒提供。

单套驱动装置驱动力为：

$$F_{\text{驱动}} = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) P \eta \quad (1)$$

式(1)中，D为外筒内径；d为心轴外径；P为额定工作压力，MPa； η 为效率，取0.9；假设取D为55 mm，d为30 mm，P为28 MPa，则：

$$F_{\text{驱动}} = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) P \eta = \frac{1}{4} \times \pi \times (55^2 - 30^2) \times 28 \times 0.9 = 42\ 036\ \text{N} \quad (2)$$

折叠时间计算：假设机构需在0.2 s内完成折叠，折叠前需转动120度；则其中包括阀切换油路时间，取换向时间为0.08 s，折叠动作时间0.12 s。

流量与角速度：

$$Q = \frac{1}{4} \pi (D^2 - d^2) b \times \frac{\omega}{2\pi} = (D^2 - d^2) b \omega / 8 \quad (3)$$

$$\omega = 120 / 360 / 0.12 = 2.8\ \text{rad/s}$$

式(3)中，b为叶片宽度，D为缸体内径，d为叶片轴直径， ω 为摆动角速度。假设D取55 mm，d取30 mm，b取10 mm，则所需流量为：

$$Q = \frac{(D^2 - d^2) b \omega}{8} = 0.002\ 125 \times 2.8 \times \frac{0.01}{8} = 0.000\ 000\ 744\ \text{m}^3/\text{s} = 0.4\ 464\ \text{L}/\text{min} \quad (4)$$

3.5 密封结构选型设计分析

针对液压驱动锁定装置，在密封设计时，有静密封、滑动密封、转动密封，因此在密封选型时需考虑符合这三种工况的密封结构形式。

针对静密封选择“O型圈+保护圈”的密封结构，作为最基本的密封结构形式，其制作技术成熟，价格实惠^[5]。

针对活塞上的滑动密封和其他转轴处的转动密封，滑动密封选择“O型圈+格莱圈”密封结构，转动密封处选择“O型圈+双三角”的密封结构，具有低摩擦、

寿命长、易安装、结构简单加工制造方便等特点。

针对活塞杆与外筒件的滑动密封选用图 2 所示的“K 型”+“2K 型”的组合密封结构，其“K 型”密封具有高静态和动态效果，低摩擦、高耐磨性，“2K 型”密封结构具有非常有效的刮唇，高耐磨性，两种密封结构通常配合使用，能起到很好的密封效果。

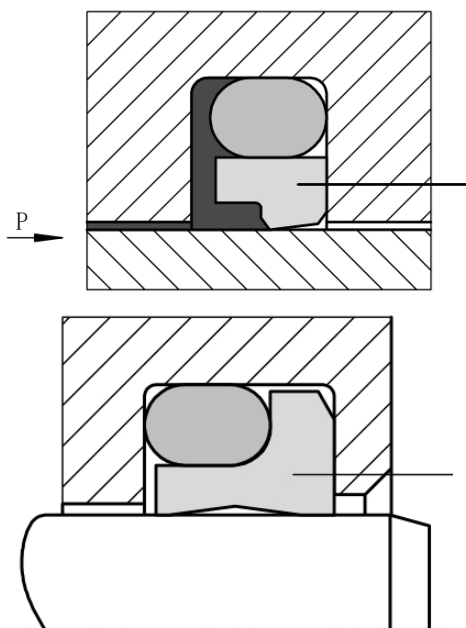


图 2 “K 型”及“2K”型密封示意图

3.6 可靠性设计分析

为保证产品的可靠性，综合采取了以下措施：在设计上，对产品可靠性进行分析，找出薄弱环节，在设计方案阶段予以加强；并策划方案的试验验证，在试验过程中，根据试验情况持续优化完善；通过对方案进行 FMEA 故障模式及影响分析，针对分析结果中可能出现的故障模式在设计上做了考虑，为防止外筒和活塞杆处封严套螺母松动以及其他螺纹连接处松动，在螺纹连接处设计了锥端螺钉或防松键^[6]。

3.7 维修性设计分析

考虑到液压驱动锁定装置的维修性，与驱动的负载连接的位置尽量选择双耳或单耳加螺栓的形式，在液压驱动锁定机构的锁紧方式中尽量避免用涂胶或自锁螺纹的形式，各个连接处优先选取可拆卸的连接方式。

3.8 环境适应性设计分析

1. 耐自然环境能力：为提高产品在高、低温环境下的适应能力，对液压驱动锁定装置的密封从结构和材料两个方面进行了优化，外部活动密封一般采用两道组合密封，密封圈材料分别采用耐高温和耐低温的

两种材料，内部活动密封采用一道组合密封结构，固定密封处采用 O 型密封圈加保护圈的结构，其中胶料方面，所选用的胶料根据该装置的介质（液压油）和耐温性选材，两道密封材料配合使用，能够满足产品温度要求；固定密封中低压一侧都装有氟塑料保护圈，在结构允许的情况下保护圈的厚度根据耐压要求选择。并在运动行程比较长的设计过程中，根据结构布局对相对运动行程较大的部位增加了支撑环。

2. 耐机械环境能力：液压驱动锁定装置选用的材料及结构具有合理的力学特性，减少了振动能量的传递，以使结构振动响应最小。设计时各机械强度有一定的富裕度，可以承受机械环境所产生的作用力。所有螺纹连接件均采用了保险丝、开口销和止动垫圈等防松结构。

3.9 适用性

本方案适用于航空、航天、船舶、行走机械、机床等行业，可以通过对电磁阀、换向阀等的远程控制，实现对液压油路切换控制，从而能够实现远程控制其功能，为作业环境恶劣、远程执行任务的机构提供了一套可选方案。

4 结束语

液压驱动锁定装置是机械、液压、控制与材料等多学科交叉的技术。本文系统论述了液压驱动锁定装置的通用性工作原理，以及其技术研究的难点、关键点，并结合通用性原理研发了一套新型的液压驱动锁定装置，并对这套新型机构从其功能原理和适应性方面进行了阐述，为机械行业的结构选型提供参考。

参考文献：

- [1] 史大炜, 贾晨辉, 张璐瑶, 等. 半球面螺旋槽动静压气体轴承运行稳定性研究 [J]. 机械设计与制造, 2023(09):68-72.
- [2] 史益鲜, 丁磊. 一种闸门自动锁定装置在望亭水利枢纽的应用 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44(06):66-71.
- [3] 胡忠会, 程巍, 李军宁, 等. 球轴承作滚轮应用承载能力研究 [J]. 航空标准化与质量, 2025(06):17-22, 27.
- [4] 罗忠, 郝昊天, 吴炫睿, 等. 考虑流体惯性的球面螺旋槽轴承特性分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2025, 46(11):90-97.
- [5] 徐立晖, 何先照, 鲍陈马, 等. 球面滚子轴承内圈磨损的影响因素研究 [J]. 机电工程, 2025, 42(12):2381-2387.
- [6] 徐鹏, 孙玲, 孙锋. 表面微结构对船用滑动式中间轴承润滑性能影响研究 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45(05):78-84.

电厂燃料系统圆形堆取料机防碰撞技术研究

李欣宇

(华电曹妃甸重工装备有限公司, 河北 唐山 063205)

摘要 电厂燃料系统中的圆形堆取料机是重要的卸料、取料设备, 其运行安全和电厂燃料供应的稳定以及生产效益息息相关。碰撞事故是圆形堆取料机运行中最大的安全风险, 极易导致设备损坏、生产停机甚至人员伤亡。本文根据圆形堆取料机的运行特点, 对防碰撞技术原理进行分析, 系统整理设备间、设备与料堆、设备与料场边界或者障碍物三种碰撞风险, 从硬件设备安装、软件系统融合检测、参数调节、故障判断排除、故障优化五个方面分析防碰撞技术体系, 并结合典型的电厂应用实例, 验证该技术体系应用成果, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 电厂燃料系统; 圆形堆取料机; 防碰撞技术; 设备安全

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.002

0 引言

随着电力行业迅猛发展, 电厂机组容量不断增加, 对燃料供应连续性要求越来越高。圆形堆取料机堆料容量大、取料效率高、占地面积小, 常被用在电厂燃料系统原煤储存和转运。但在实际运行中, 圆形堆取料机需要在有限的料场空间内来回进行堆料和取料操作, 其运行轨迹十分复杂, 很容易碰到周围的设备、料堆、料场边界及各种障碍物, 严重影响电厂正常发电工作的开展。因此, 研究电厂燃料系统圆形堆取料机防碰撞技术具有重要的现实意义。

1 圆形堆取料机防碰撞原理

圆形堆取料机防碰撞技术核心原理是通过各种检测设备及时采集设备运行等数据信息, 随后利用软件系统对所收集到的数据进行处理判断, 一旦发现碰撞危险就会自动发出报警信号或者控制设备减速、停止等避碰措施, 主要包括信息采集、数据处理、风险评估、执行控制四个重要环节。

堆取料机上装有位置传感器、距离传感器、角度传感器等设备, 可以及时获取大车行走位置、小车回转角度、悬臂俯仰角度、料堆高度及周围设备障碍物距离等信息, 这些数据是进行防碰撞判断的基础, 采集精度直接影响防碰撞系统的可靠性。

在数据处理之前, 利用软件算法对原始数据进行滤波、校正、融合处理, 先去除由于环境因素导致的数据偏差, 并根据电厂料场实际布局情况、设备参数等建立数字形式的料场模型, 将经过处理的设备位置

数据与模型进行关联, 实现对设备在料场内动态位置信息的实时更新。

在风险判断上, 根据事先设定的安全阈值和碰撞判断逻辑, 对设备的动态位置信息进行分析, 当设备与周围物体之间的距离小于报警阈值时, 系统就会发出声光报警信号来提醒操作人员。如果距离缩小到安全停机阈值以下, 系统就会立刻发出控制指令, 要求设备停止相应的动作, 防治碰撞问题的发生, 提前发出警报或者控制信号^[1]。

2 圆形堆取料机多场景协同运行控制特性

2.1 多设备协同作业运行控制

大型电厂圆形料场一般配有多个圆形堆取料机进行联合作业, 并且和皮带输送机、转运站等固定设备一起组成一体化的燃料输送系统, 设备作业区比较集中, 联动性较强。利用GPS精确定位、多机姿态实时监测技术可以实现多设备之间相对位置动态控制, 定位精度可达 ± 5 cm, 角度测量精度为 $\pm 0.1^\circ$ 。系统可以实时计算出多机间距、运行速度和干涉区域, 在3~5 m预警区间和1~2 m制动区间内实现自动调速和安全避让, 保证多台设备在有限空间内24 h连续、并行、无干涉作业。

2.2 设备与料堆适配取料控制

圆形堆取料机取料作业阶段, 悬臂斗轮与料堆接触状态、悬臂姿态和料堆轮廓匹配程度, 是保证连续高效取料的重要因素。采用激光测距和超声波检测相结合的方式, 可以实时得到悬臂和料堆之间的距离, 检测距

作者简介: 李欣宇(1998-), 男, 本科, 研究方向: 大型散料设备制作安装。

离为 0.1 m 到 10 m, 检测精度为 ± 2 mm 到 ± 5 mm。根据三维料场模型和姿态闭环调节, 设备可以在 0.8 ~ 1.2 m 的预警距离和 0.3 ~ 0.5 m 的安全作业距离内稳定工作, 保证斗轮取料深度均匀、悬臂姿态自适应优化, 在保证取料效率 550 t/h 以上的同时, 保持设备与料堆之间的安全、平稳、连续的作业状态。

2.3 料场边界及障碍物约束运行控制

圆形料场有围墙、防护栏、结构立柱、电缆沟和消防设施等固定构筑物, 为设备运行提供明确的边界约束。堆取料机大车行走、悬臂回转时, 依靠边界定位和距离实时检测, 可以对料场轮廓和障碍物进行全方位的覆盖监测, 检测范围 0.5 ~ 50 m。系统按照 2 ~ 3 m 的预警阈值和 0.5 ~ 1 m 的停机阈值来分层控制, 自动执行行走限位、回转限速、姿态修正, 使设备在限定的安全区域内有条不紊地运行, 达到料场空间充分利用和设备运行边界精确控制的目的^[2]。

3 电厂燃料系统圆形堆取料机防碰撞技术

3.1 硬件设备的安装

硬件设备是防碰撞系统的核心, 所选择的型号以及安装质量都会直接影响系统是否具备精准的感知, 按照信息收集的需求来妥善安排各种传感器、控制器、执行装置, 并按照规定的步骤完成安装设置工作。

位置和角度检测设备使用的是高精度 GPS 定位模块以及增量式编码器, 其中 GPS 定位模块用于大车行走位置检测, 增量式编码器则被用来检测悬臂回转角度及俯仰角度。GPS 定位模块安装在车架顶部, 保证信号接收的稳定性, 随时接受卫星信号来获取设备的绝对位置, 定位精度可以达到 ± 5 cm, 增量式编码器安装在回转机构、俯仰机构的传动轴上, 根据检测轴的旋转角度来推算设备的相对位置, 角度精度可以达到 $\pm 0.1^\circ$ ^[3]。

距离检测设备采用激光测距传感器和超声波测距传感器, 实现互补检测, 激光测距传感器具有检测距离远、精度高的特点, 安装在悬臂末端、大车侧边等处, 用以测量设备与附近设备以及料场边界之间的距离, 检测距离在 0.5 ~ 50 m 之间, 精度为 ± 2 mm; 超声波测距传感器具有较强的抗粉尘干扰能力, 安装在斗轮周围, 检测距离在 0.1 ~ 10 m 之间, 精度为 ± 5 mm。

控制器采用工业级 PLC 系统, 安装在设备的电气控制柜内, 负责接收各种传感器采集到的数据, 运行相关软件算法产生控制指令, 执行机构包括变频器、电磁继电器、液压控制阀等, 分别与大车行走电机、回转电机、俯仰电机、液压系统连接, 按照 PLC 发出的指令完成设备的速度调节, 发出报警信号, 显示设备的运行状态。

3.2 软件系统的集成测试

软件系统是防碰撞技术的核心, 负责数据处理、风险判断、控制指令的产生等工作, 其合成质量以及运行稳定性都会影响到防碰撞的效果。

数据处理模块使用卡尔曼滤波算法对采集到的原始数据进行滤波处理, 除去由于粉尘、震动等环境因素导致的随机误差, 再用数据校准算法修正传感器的系统误差, 提高数据精度, 随后通过数据融合算法将不同传感器采集的同一物理量的数据进行融合, 提高数据的可靠性, 形成数字化料场模型, 将处理过的设备位置数据与料场模型相匹配, 及时更新设备的动态位置信息。

控制输出模块可将碰撞判断模块产生的控制指令转变成执行机构可以识别的信号, 再通过 PLC 传送到变频器、继电器等执行机构上, 使设备减速、停机等功能得以实现, 并且还会把执行机构的动作状态反馈给数据处理模块, 形成闭环控制。

3.3 参数调整

安全阈值参数要结合料场布局和设备尺寸进行调整, 不同碰撞场景需要设置不同的阈值, 设备与设备相撞时, 根据设备运行速度和制动距离, 将报警阈值设为 3 ~ 5 m 之间, 停止运行阈值设为 1 ~ 2 m 之间; 设备碰到料堆时, 由于料堆形状不规则, 把报警阈值设为 0.8 ~ 1.2 m 之间, 停止运行阈值设为 0.3 ~ 0.5 m 之间; 设备碰到料场边界或障碍物时, 按照边界设施的强度和设备的制动性能, 把报警阈值设为 2 ~ 3 m 之间, 停止运行阈值设为 0.5 ~ 1 m 之间。

传感器采集参数的调节重点在于采集周期和检测范围。采集周期要按照设备运行速度进行调节, 设备运行速度快时可减小采集周期, 提升数据的即时性, 设备运行速度慢时可以适度增大采集周期从而减轻系统运行负担, 检测范围应该根据传感器的安装位置和检测对象进行调节, 保证检测范围包含所有的潜在碰撞区域, 防止产生检测盲区。

控制响应参数调整的重点是制动时间、减速梯度等, 根据设备的制动性能调整制动时间参数, 使设备在接到停机指令后立即稳定地停止下来, 避免制动过快导致设备受到冲击而损坏, 通过调节减速梯度参数来实现设备缓慢减速的目的, 减少对设备传动装置的损耗。

3.4 故障诊断排除

故障诊断主要通过软件系统故障监测模块和硬件设备状态检测实现, 软件故障监测模块可随时对各个

模块的运行情况进行监测,一旦出现数据传输中断、算法执行错误等故障问题,就会自动把故障信息记录下来,并发出故障警报信号。硬件状态检测通过在传感器、PLC、执行机构等设备上安装的状态监测传感器,可以及时获取设备的工作电压、电流、温度等参数,如果这些参数超出了正常范围,就判定设备出现了故障,然后将故障信息上传给软件系统。

4 典型电厂圆形堆取料机防碰撞技术应用案例

本文提出的圆形堆取料机防碰撞技术实际效果验证,选择某大型火力发电厂为案例研究对象,该电厂燃料系统有2台圆形堆取料机,料场占地约12 000 m²,主要储存原煤,年吞吐量约800万吨。之前,该电厂多次出现圆形堆取料机碰到料堆或者料场边界的情况,每年由于这些碰撞事故导致的经济损失大约为200万元,对燃料供应的稳定性有很大影响^[4]。

4.1 应用方案实施

在两台圆形堆取料机大车车架顶部装上GPS定位模块,在回转机构、俯仰机构的传动轴上安装增量式编码器,在悬臂端部、大车侧面装上激光测距传感器、超声波测距传感器;用西门子S7-400系列PLC作为控制器,安装在电气控制柜内;设置变频器、电磁继电器等执行机构,声光报警器、显示屏等辅助设备。

软件系统融合,融合数据采集、数据处理、碰撞判定、控制输出、人机交互模块,用卡尔曼滤波算法做数据滤波处理,形成数字化料场模型,预先设定各种碰撞场景的安全阈值。设备间警报阈值为4 m,停机阈值为1.5 m;与料堆警报阈值为1 m,停机阈值为0.4 m;与边界警报阈值为2.5 m,停机阈值为0.8 m。

根据设备运行速度和制动性能设置传感器采集周期,位置、角度传感器采集周期为10 ms,距离传感器采集周期为20 ms,大车制动时间为2 s,回转机构制动时间为1.5 s等参数^[5]。

故障诊断与维护保养优化,建立故障检测系统,定时做硬件、软件系统的保养维护工作,增强运维人员培训力度。

4.2 应用效果分析

2023年1月防碰撞技术系统安装调试完成,投入运行,到2023年底为止,运行状况比较稳定。通过比较系统启用前后的有关碰撞事故发生次数、设备运行效率和经济损失等各方面的数据分析应用效果,相关的数据详见表1。

表1数据表明,防碰撞系统投入运行后,电厂圆

形堆取料机碰撞事故的发生率为零,没有由于碰撞导致的停机和直接经济损失,设备运行效率提高了5.8%,减少了由于人工干预导致的效率损失,防碰撞系统故障发生率低、故障平均处理时间短,说明系统稳定性好、维护性好。

表1 圆形堆取料机防碰撞技术系统运行数据

指标	应用前 (2022年)	应用后 (2023年)
碰撞事故次数(次)	6	0
因碰撞导致的停机时间(h)	48	0
因碰撞导致的直接经济损失 (万元)	210	0
设备运行效率(t/h)	520	550
系统故障次数(次)	—	3
故障平均处理时间(min)	—	25

5 结束语

圆形堆取料机防碰撞技术的主要原理是感知、判断、执行闭环控制,它由信息采集、数据处理、风险判断和执行控制四个主要环节组成,从而达到防止碰撞的目的。建立以硬件支撑、软件核心、参数优化、故障保障为内容的防碰撞技术体系,可以全面提高设备运行的安全性,具有可行性。典型电厂应用案例显示,该技术体系可以有效地消除碰撞事故,避免停机损失,提高设备运行效率,有较好的工程应用价值。随着人工智能、数字孪生等技术的发展,防碰撞系统将会越来越智能化、自主化,实现更加准确的预测性防护和自适应控制,给电厂燃料系统的安全稳定运行提供更加有力的技术保障。

参考文献:

- [1] 郑祖军,许展文,陈木炳,等.圆形堆取料机螺栓防松问题研究及节能减排分析[J].能源与节能,2025(12):94-97.
- [2] 张海新,徐挺,陈东宇,等.圆形堆取料机行走机构防啃轨装置的研究与应用[J].吉林电力,2025,53(04):50-52.
- [3] 贾本康,朱淑勇,秦利敏.圆形煤场堆取料机无人值守系统的研究探索及应用[J].科技与创新,2025(15):87-90.
- [4] 赵树巍.基于激光三维成像建模的煤场圆形堆取料机智能控制研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):196-198.
- [5] 张海新,徐挺,陈东宇,等.圆形料场堆取料机智能控制降尘方案的创新与应用[J].吉林电力,2025,53(02):54-56.

BP 神经网络预测再生粗骨料混凝土力学性能研究

刘 磊

(重庆科创职业学院, 重庆 402160)

摘 要 在建筑行业向绿色转型的背景下, 再生粗骨料混凝土是建筑固废资源化的载体之一, 其力学性能受骨料特性、配比参数等多重因素的影响, 具有明显的离散性。本文从系统性的室内试验入手, 探究骨料替代率、水胶比等主要参数对力学性能的作用机理, 并改进其中的问题。经过误差分析和验证比对可知, 所提优化模型预测精度高、拟合效果好, 平均相对误差小于 5%, 可以快速实现力学性能的精确评价, 为配合比设计优化提供可靠的依据, 促进再生混凝土产业规模化发展。

关键词 BP 神经网络; 再生粗骨料混凝土; 力学性能; 性能预测

基金项目: 基于 BP 神经网络再生混凝土强度预测模型的研究 (项目编号: KJQN202405413)。

中图分类号: TP183; TU528

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.003

0 引言

再生粗骨料自身特性造成的再生粗骨料力学性能存在明显的波动性, 还会受到很多复杂的因素影响。传统的试配试验方法由于效率低, 已经不能满足工程实践的要求。BP 神经网络具有很强的非线性拟合能力, 对于多变量的关系有着明显的优势。但是现有的基于 BP 神经网络的研究大多存在着样本代表性差、模型优化不到位等缺陷。本文利用系统试验数据来建立和优化一个专门用来预测再生混凝土力学性能的 BP 神经网络模型, 为工程应用提供参考。

1 再生粗骨料混凝土力学性能试验研究

1.1 试验原材料与性能指标

严格按照《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685-2011) 和《混凝土外加剂》(GB 8076-2008) 国家标准有关材料的要求来选择材料, 保证实验数据的可靠性。胶凝材料选用 42.5 级普通硅酸盐水泥, 3 d 和 28 d 抗压强度分别为 27.8 MPa 和 45.2 MPa, 安定性检测结果满足规范要求; 细骨料为细度模数为 2.6 的天然中砂, 颗粒级配均匀, 含泥量、泥块含量均符合行业标准; 再生粗骨料由废弃混凝土破碎筛选而成, 粒径控制在 5~20 mm 连续级配范围内, 设置相同粒径的天然碎石为对照组; 拌合用水为符合饮用水卫生标准的纯净水; 外加剂为减水率为 25% 的聚羧酸系高性能减水剂, 掺

量为 1.2%。再生骨料的力学性质对工程应用起着决定性的作用, 本文主要针对再生骨料的核心性能参数进行研究, 并与天然骨料进行对比分析。由于再生骨料吸水性较强, 所以在试验前进行预湿处理, 消除拌合过程中水分对工作性的影响, 保证试件成型质量的稳定性。

1.2 配合比设计与试件制备

本文以 C30 普通混凝土为基准, 用单因素变量设计, 从再生粗骨料取代率、水胶比、砂率、养护龄期这四个主要参数入手进行详细的分析。各参数设置具体如下: 再生粗骨料取代率分为 0% (对照组)、30%、50%、70% 和 100% 五级; 水胶比依次为 0.38、0.42、0.46 和 0.50; 砂率则包括 35%、38%、41% 和 44% 四个水平; 养护龄期分别设为 7 天和 28 天。配合比设计严格按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011) 规范要求, 通过改变外加剂使坍落度在 160~200 mm 之间保持稳定。试验材料在标准化试验环境中进行统一加工, 环境温度控制在 (20 ± 2) °C。根据预先设定的配合比准确称量各种原料, 先将粗细骨料和水泥进行 60 秒干拌, 再加入再生骨料和拌和用水、减水剂, 然后继续搅拌 120 秒, 保证混合物均匀无分层、离析。使用规格为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准养护试模, 分两层轻敲振实到表面无气泡溢出为止。成型后要覆盖保湿膜静置 24 小时后脱模, 再转入恒温恒湿养护箱

作者简介: 刘磊 (1997-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 轻质混凝土材料。

(温度(20±2)℃、相对湿度≥95%)养护至设计龄期。每组三个平行试件,剔除异常值后取平均值来减小实验误差。

1.3 力学性能测试方案

本文采用7d和28d龄期立方体抗压强度、28d龄期劈裂抗拉强度为主要检测指标,使用YES-2000型压力试验机对试件进行逐级加荷,抗压试验的加载速率是0.5MPa/s,记录峰值荷载并计算抗压强度,劈裂抗压试验用弧形垫条和钢制垫块,加载速率是0.05MPa/s,同步采集相关参数来评价材料性能。试验前要对试件表面进行清洁处理,保证接触面平整无杂质。加载时要保持速率均匀,防止出现突变现象,同时还要记录试件的破坏特征,剔除异常或者无效的数据来保证结果的准确性。所采集的数据要迅速汇总并存入专门的数据库中,为BP神经网络模型的建立提供可靠的原始资料支撑。

1.4 试验结果与影响因素分析

对不同组别的试件进行力学性能测试,研究结果表明,再生粗骨料混凝土的力学性能受到诸多因素的影响,并且其性能变化的规律同数据的波动范围存在关联。混凝土28d抗压强度和劈裂抗拉强度都明显降低。当再生粗骨料取代率是30%的时候,抗压强度比基准组低大约4.2%,当取代率是100%的时候,强度下降到原来的18.7%。主要原因是再生骨料界面过渡区结构疏松、力学性能低,造成混凝土整体承压能力下降。

2 BP神经网络基础理论与预测模型构建

2.1 BP神经网络基本原理

BP神经网络是典型的多层前馈型监督学习算法。该模型由输入层、隐藏层和输出层组成,各层之间的神经元用全连接结构连接起来,但是同一层内的神经元是相互独立的。第一部分为正向传播过程,即外部输入信号依次经过输入层传到隐藏层,再经过加权求和和激活函数的作用后到达输出层,从而得到最初的预测结果;第二部分为反向传播过程,系统根据输出层预测值和实际目标值之间的差异来计算误差,如果误差大于预设阈值,就将误差沿着连接路径反向回传,用梯度下降法更新各个层间权重参数和偏置项,从而减小预测偏差、提高模型性能。BP神经网络结构中,激活函数起着完成非线性映射的作用。

2.2 预测模型整体设计

根据再生粗骨料混凝土力学性能的影响机理以及实验数据的特征,建立一个三层BP神经网络预测模型。在设计输入层的时候,结合核心影响因素的数量和特

性,将输入层神经元的数量设为5个,分别对应着再生粗骨料取代率、水胶比、砂率、养护龄期以及再生骨料吸水率这些主要变量,从而保证模型具备较好的适应性及解释性。输出层使用双神经元结构来对应28d立方体抗压强度和劈裂抗拉强度这两个力学性能指标,从而达到多目标同时预测的目的,提高模型的应用价值和预测精度。样本数据集划分的好坏直接影响到模型的泛化性。因此,本文选择80组有效样本,按照7:2:1的比例分为训练集56组、验证集16组、测试集8组。在此期间,通过严格控制各个子集样本分布的均匀性、典型性来避免由于数据偏差造成的预测误差。

2.3 数据预处理

再生粗骨料混凝土试验数据具有明显的异质性特点,量纲不同、数值范围宽广会使得深度学习模型的训练效率变差,优化过程很难控制,还容易出现梯度消失或者梯度爆炸。为了改善以上问题,本文用Matlab软件中的mapminmax函数对原始数据做标准化处理,把输入和输出的数据统一映射到[-1,1]区间内,从而消除量纲的影响,并提高模型的性能。具体的归一化公式如下所示:

$$\chi_{\text{norm}} = 2 \times \frac{\chi - \chi_{\min}}{\chi_{\max} - \chi_{\min}} - 1 \quad (1)$$

式(1)中, χ_{norm} 是归一化后的数值, χ 是原始观测值, χ_{\max} 和 χ_{\min} 分别是样本数据的最大值和最小值。数据预处理阶段为了提高数据质量,用格拉布斯检验剔除明显偏离整体分布的异常样本,用线性插值法填补少量缺失数据,保证数据集完整、规范。经过归一化处理之后,数据就具有了标准化的特征,数值区间一致,分布均匀,既有利于改善神经网络的训练性能和收敛速度,又为模型的实际使用提供了可靠的保证。在模型输出结果的时候,采用反归一化的方法把预测值恢复到原始的量纲上,以便和实验数据做精确的比较分析^[1]。

2.4 网络参数初始化与训练设置

BP神经网络中的隐藏层神经元数目属于决定预测精度的重要参数。如果设置太少,就会造成模型拟合能力不够好,产生欠拟合的情况;如果设置太多,又容易造成过拟合,使模型的泛化性能下降。本文根据经验公式和迭代试错法确定出最佳的隐藏层神经元个数,根据经验 $h = \sqrt{m+n} + a$ (其中h为隐藏层神经元个数,m、n分别为输入层和输出层的神经元个数,a为取值范围在1到10之间的调节系数),经过多次迭代实验,从训练误差、测试误差、收敛效率等指标综合考虑,最后得到隐藏层神经元数量为10。本研究依托科学严谨

的网络训练参数配置,采用 Levenberg-Marquardt 算法进行模型训练。该算法具有快速收敛性以及很好的预测精度,对于小规模数据集来说有明显的优势^[2]。在训练设置上把最大迭代次数设为 1 000 次,尽量得到数据本身的规律,期望误差阈值设为 0.001,严格控制模型的预测性能。初始学习率为 0.01 时,可以很好地防止过拟合和训练停滞。权重、阈值用区间内的随机小数来初始化,从而提高模型的鲁棒性。激活函数以及相关参数设置完毕后,开始训练样本的训练过程,并对误差的变化趋势进行动态监测。当实际误差收敛到设定的目标或者达到最大迭代次数的时候,立即停止训练,得到基础模型。

3 BP 神经网络模型优化与预测效果分析

3.1 模型优化方法

本研究用结构优化和参数调优两种途径提高了它的性能。在结构设计上使用固定单隐藏层,通过实验得到最优神经元数量为 10 个,加入动量因子(设为 0.9)来修正梯度方向、防止局部极值出现。参数调节采用自适应

应学习率、正则化(正则化系数为 0.001)的方式加速了训练速度,并且提高了模型的泛化能力和稳定性^[3]。

3.2 模型训练与收敛性分析

本文利用 MATLAB 工具箱建立并优化模型,用监控误差曲线来评价它的收敛性。从实验结果可知,经过 156 次迭代之后,优化后的模型就达到了预定的精度要求,训练集的均方误差为 0.0 009,验证集的误差一直呈下降趋势,并没有出现过拟合的情况。相比初始模型,优化后的模型收敛速度提高了 52%,训练误差降低了 71.9%,并且收敛过程也更加明显,验证了提出的优化方法是有效的,为后续精度验证打下了良好的基础。

3.3 模型预测精度验证

本文用 8 组独立测试样本数据对模型性能进行评价,从平均相对误差、均方误差、决定系数 R^2 三个方面对预测精度进行考察。结果表明模型预测值和实验观测值十分吻合,抗压强度平均相对误差为 3.1%,劈裂抗拉强度平均相对误差为 3.7%,两类指标的误差都在 5% 之内,完全满足工程应用精度的要求(见表 1)^[4]。

表 1 模型预测精度验证

样本编号	试验抗压强度 /MPa	预测抗压强度 /MPa	相对误差 /%	试验劈裂强度 /MPa	预测劈裂强度 /MPa	相对误差 /%
1	36.9	36.3	1.6	2.83	2.78	1.8
3	33.2	34.1	2.7	2.57	2.64	2.7
5	31.4	32.9	4.8	2.42	2.51	3.7

3.4 敏感性分析

用控制变量法对各个因素的作用权重进行量化分析可知,28 d 抗压强度对于水胶比(38.2%)的敏感度要大于取代率(31.5%),砂率(16.3%)居中,骨料含水率(9.7%)、养护龄期(4.3%)影响较小。劈裂抗拉强度的变化规律与一致,水胶比、取代率是主要的影响因素。该结论同实验数据十分契合,也证实了模型的可靠程度,为工程实践中的配合比改良提供了科学支撑,而且还显示了输入变量挑选的合理性^[5]。

4 结束语

本文利用系统的试验来研究再生混凝土力学性能的变化规律,建立并改进了包含 80 组样本数据的数据库。开发出一种改进 BP 神经网络的预测模型,可以很好地解决原始模型存在的过拟合、收敛慢、预测精度低等问题。经过优化之后的模型可以将预测误差控制在 5% 之内, R^2 值达到 0.989,具有较好的性能,可以很好地取代传统的适配试验,从而达到降低成本和提高效率的目的。敏感性分析结果表明,水胶比、替代

率对力学性能有影响,给工程实践提供科学依据。未来还可以获取冻融、腐蚀等极端工况下的冻融、腐蚀等参数,用智能算法对模型进行优化,提高模型的适用性、准确性,推动再生混凝土在工业化生产过程中实现智能化的应用。

参考文献:

- [1] 李战国,张浩,李洪文,等.基于人工神经网络和遗传算法的砖混再生粗骨料混凝土配合比优化设计[J].混凝土,2023(10):1-6,11.
- [2] 袁谱,谭平.在海蚀、老化和冻融条件下 GFRP 隔震支座的 GFRP 板性能试验研究[J].建筑结构,2026,56(06):123-130.
- [3] 闫春岭,刘德龙,闫世龙,等.改进 BP 神经网络的再生粗骨料混凝土强度预测[J].水泥工程,2020(01):87-89,92.
- [4] 任文豪,阿斯哈,周长东,等.风沙侵蚀下 GFRP 布剩余力学性能数值模拟分析[J].工程力学,2023,40(11):187-195.
- [5] 郭耀东,刘元珍,王文婧,等.基于 BP 神经网络的再生保温混凝土抗压强度预测[J].混凝土,2018(10):33-35,39.

时频分析技术在三维地震薄层识别中的应用研究

胡孝琰

(安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

摘要 为提升三维地震薄层识别精度, 本研究系统梳理短时傅里叶变换、小波变换和S变换等时频分析技术在薄层识别中的应用特征, 主要研究S变换的原理、落实流程和优化举措, 以渤海湾盆地某油田馆陶组薄互层砂体为研究载体, 落实实际应用验证。研究结果表明: S变换依靠频率自适应窗口和相位保持特性, 可精准呈现薄层调谐频率特征, 把纵向分辨率从传统方法的16 m提升至7 m, 识别准确率从58%提升至91%, 把厚度预测误差降低到1.2 m, 显著提升薄层识别精准度, 为储层预测和井位部署提供可靠支撑。

关键词 时频分析; 三维地震; 薄层识别

中图分类号: P631

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.004

0 引言

全球油气勘探持续向岩性—地层圈闭领域拓展, 薄互层砂体已成为重要的勘探目标, 但其单层厚度往往低于常规地震分辨率极限, 精准识别难度大。传统振幅分析、频谱分解、波阻抗反演等方法受固定时频分辨率制约, 难以有效描述薄互层地震响应特征。时频分析技术能够同时在时间域和频率域表征地震信号, 为薄层精细识别提供了新途径。本文系统梳理短时傅里叶变换、小波变换和S变换在薄层识别中的应用特征, 重点研究S变换的原理与实施流程, 以渤海湾盆地某油田馆陶组薄互层砂体为例开展实证验证, 旨在提升薄层识别精度与储层预测可靠性, 为油气勘探开发提供技术参考。

1 时频分析技术在薄层识别中的应用

1.1 短时傅里叶变换(STFT)的应用

STFT对地震信号做加窗处理, 实现时间域和频率域的协同分析。其核心思路是把非平稳地震信号分成若干短时段, 每个时段内的信号均假定为平稳信号, 之后进行傅里叶变换。在具体操作中, 选取一个固定长度的时间窗口沿地震道滑动, 在每个窗口位置对截取的信号段做傅里叶变换, 得到该时刻附近的频谱信息, 将所有窗口位置的频谱拼合, 即可构成完整的时频能量分布图。通过观察不同时刻的频谱变化, 可初步判断薄层的时频响应特征, 适用于相对平稳的地震信号分析^[1]。

然而, STFT采用固定窗口函数, 时频分辨率在整个时频平面保持不变, 这一特性在复杂薄层识别中存在明显局限。窗口过短则频率分辨率下降, 无法区分相近频率的薄层反射; 窗口过长则时间定位精度变差, 难以准确捕捉薄层界面位置。当薄层厚度横向变化较大或地质条件复杂时, 固定的时频分辨率无法同时满足不同频率成分的分析需求, 这一不足推动了更先进时频分析方法的形成与发展。

1.2 小波变换(Wavelet Transform)的应用

小波变换通过可伸缩的小波基函数对地震信号做多尺度分解, 从根本上规避了STFT固定分辨率的局限。其核心机制是尺度伸缩与时间平移的协同作用: 分析高频信号时压缩小波基函数, 采用窄时间窗以获取高时间分辨率, 精准定位薄层界面; 分析低频信号时拉伸小波基函数, 采用宽时间窗以获取高频率分辨率, 有效刻画厚层背景趋势。这种自适应的时频窗口使小波变换在面对不同厚度薄层时均能保持较好的分析效果^[2]。

在实际应用中, 针对薄层精细刻画通常采用连续小波变换, 通过对比不同尺度下的小波系数分布, 识别薄层顶底界面的反射特征, 并结合测井数据标定尺度与地层厚度的对应关系, 实现薄层横向追踪。大规模三维数据处理则多采用离散小波变换以降低计算量。但小波变换在分解过程中无法完整保留信号的绝对相位信息, 导致薄层界面的精准时频定位存在一定误差, 在相位敏感的薄层识别场景中仍有明显短板。

作者简介: 胡孝琰(1998-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地球物理勘探。

1.3 S 变换 (Stockwell Transform) 的应用

S 变换融合了 STFT 与小波变换的核心优势, 采用与频率直接关联的高斯窗函数, 窗口宽度随分析频率自动调整: 高频时窗口收窄, 提升时间定位精度, 便于识别薄层界面; 低频时窗口展宽, 增强频率分辨能力, 有利于刻画厚层背景。这种自适应机制使 S 变换在整个时频平面维持最优分辨率平衡, 同时完整保留信号的绝对相位信息, 这是精准识别薄层顶底界面位置的关键所在^[3]。

在薄层识别的具体流程中, S 变换首先对地震道逐道进行时频分解, 生成二维时频能量谱。当地震波在薄层内发生调谐效应时, 特定频率处出现能量异常集中, 该调谐频率与薄层双程旅行时成反比, 即薄层越薄, 调谐频率越高。通过提取各道调谐频率属性并横向连片, 可定量估算薄层厚度分布, 实现薄互层的平面展布追踪。此外, 利用 S 变换的相位谱可进一步精确标定薄层顶底界面的反射时刻, 辅助构建高精度储层几何模型。

与 STFT 和小波变换相比, S 变换在处理非平稳地震信号、识别薄互层方面优势显著。尽管其计算量相对较大, 但基于快速傅里叶变换的加速算法已大幅降低运算开销, 具备工业化应用的可行性。本研究以 S 变换为核心方法, 深入探讨其在三维地震薄层识别中的系统应用。

2 S 变换在薄层识别中的应用

2.1 S 变换基本原理

借助频率自适应的高斯窗函数, S 变换完成地震信号的时频分解, 核心工作逻辑为窗口宽度随分析频率自动调整: 处理高频信号用窄窗口, 提升时间定位精度, 擅长识别薄层界面; 解析低频信号用宽窗口, 加大频率分辨率, 适配刻画厚层背景, 凭借这种自适应特性, S 变换可在全时频平面维持最优分析效果^[4]。

开展薄层识别工作时, S 变换应用的操作流程: 先做地震道数据的频谱变换, 继而替每个目标频率打造对应宽度的分析窗口, 从该窗口内提取时频信息, 形成完整时频分布图, 该过程完整保存地震信号的相位信息, 准确定位薄层顶底界面离不开它, 查看时频分布图里的能量集中区, 可直接判定薄层的位置和厚度特征, S 变换结果可逆向还原, 依靠频率积分可无损还原原始地震信号, 保障分析结果可靠。该方法对地震这类典型非平稳信号处理适配性极强, 能精准捕捉薄层不同时间和频率下的响应变化。

2.2 地震数据预处理与参数选择

数据预处理是保障 S 变换效果的关键环节。首先进行噪声压制, 借助预测滤波技术剔除地震数据中随机干扰, 同时借助频率一波数滤波去除规则噪声, 执行这一步后, 数据信噪比一般可提升 3 ~ 5 dB。其次做振幅补偿, 校正地震波传播中几何扩散与地层吸收造成的能量衰减, 让不同深度的反射信号保持合理振幅关系^[5]。最后做频谱拓宽处理, 靠反滤波技术复原高频成分, 把地震数据有效频带从常规 15 ~ 45 Hz 扩展到 10 ~ 70 Hz, 给薄层精细识别提供更丰富的频率信息。

在参数选择方面, 分析频率范围需要根据实际地震数据特征确定。首先统计全区地震数据的频谱分布, 找出能量集中的频率段, 然后在此基础上向低频和高频各扩展 10 ~ 15 Hz, 作为 S 变换的分析范围。频率采样间隔一般设为 1 ~ 2 Hz, 既能保证足够的频率分辨率, 又不会产生过大的计算负担。窗口宽度因子的选择需要在时间分辨率和频率分辨率之间寻找平衡, 通常选取典型薄层位置进行多组测试, 对比不同参数下的时频聚焦效果, 选择能够最清晰显示薄层特征的参数组合。

2.3 变换算法实现

S 变换的核心计算基于频率域卷积实现。对地震道 $x(t)$ 进行傅里叶变换得到频谱 $X(a)$, S 变换的时频谱 $S(\tau, f)$ 可表达为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\alpha + f) \cdot e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} \cdot e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (1)$$

其中, τ 为时间位置, f 为分析频率, α 为频率域积分变量, $e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}}$ 为频率自适应高斯窗的频域表达式。该公式表明, 对于每个目标频率 f , 只需将原始频谱 $X(\alpha)$ 平移 f 后与对应高斯窗相乘, 再做逆傅里叶变换, 即可直接得到该频率下的时变响应。依次遍历所有目标频率并组合输出, 即形成完整的二维时频能量矩阵 $|S(\tau, f)|^2$ 。这一流程将原本需要逐时间点做卷积的运算转化为频域乘法, 大幅降低计算复杂度, 是 S 变换实现快速化的关键所在。

为进一步提高效率, 采用并行处理策略, 将不同频率的计算任务分配到多个处理器核心同时执行。对三维数据体按测线或切片分块处理, 每完成一块立即输出并释放内存。大型工区可采用集群计算, 将数据分割到多台服务器协同处理。

结果解释时, 重点观察时频能量分布图中的能量集中区域。薄层对应的能量团呈透镜状分布, 在调谐

频率位置能量最强。通过追踪能量团的时间位置确定薄层埋深,通过能量峰值频率估算薄层厚度。可视化时采用彩色编码技术,将不同频段信息分别赋予不同颜色通道合成显示,便于分析薄层空间分布规律。

3 案例研究:某油田三维地震薄层识别

3.1 工区背景与数据采集

研究区位于渤海湾盆地某油田,目的层为新近系馆陶组河流相砂岩储层,埋深1 800~2 200 m。该层段发育多套薄层砂体,单层厚度5~18 m,与泥岩呈薄互层分布,是该区重要的含油层段。传统地震解释方法难以准确识别厚度小于10 m的薄砂层,影响了储层预测精度和井位部署效果。工区三维地震数据采集面积120 km²,覆盖次数48次,道间距25 m,采样间隔2 ms。数据主频30 Hz,频带范围12~55 Hz,信噪比较高。区内共有12口井穿过目的层,测井资料显示薄砂层厚度6~15 m,岩性为细砂岩与粉砂质泥岩互层。主要识别难点在于薄层产生的调谐效应导致地震反射特征复杂,常规振幅属性难以有效区分不同厚度的砂体,需要采用高分辨率时频分析技术进行精细刻画。

3.2 S变换方法实施

数据预处理环节,需先采用预测滤波、频率一波数滤波去除随机噪声、相干噪声,信噪比上升约4 dB,再进行球面扩散补偿和反Q滤波处理,将有效频带从初始12~55 Hz扩展到8~75 Hz,高频拓展为后续薄层识别补充更丰富信息,调整S变换参数环节,按照目的层深度和频谱特征,选取15~70 Hz作为分析频率范围,采样频率间隔1.5 Hz。针对典型井位实施敏感性测试,确定窗口宽度因子为1.2,该参数让时间分辨率和频率分辨率实现最优平衡,提取时频属性阶段,统计主频、频率衰减梯度和调谐频率三类属性,尤其要关注调谐频率属性,可清晰呈现薄砂层的分布范围,对不同井位的调谐频率和实际砂层厚度做对比,搭建厚度-频率关系模型,实现薄层厚度定量预测,处理完毕后生成时间切片、频率切片和三维属性体,为后续解释提供多层次分析素材。

3.3 识别效果评价与对比分析

S变换识别结果在时频剖面上清晰显示了薄砂层的分布位置,调谐频率属性平面图准确刻画了砂体的展布形态,呈现出明显的河道充填特征。对比结果如表1所示。

与常规振幅属性相比,S变换结果对薄层的分辨能力显著提高,能够识别厚度6 m的薄砂层,而常规方

法只能识别12 m以上的砂体。与频谱分解方法对比,S变换在相位保持和边界刻画方面更为精确。测井标定验证显示,12口井的厚度预测平均绝对误差仅1.2 m,相对误差8.7%,明显优于传统方法的3.5 m误差。基于S变换识别结果部署的3口开发井均钻遇优质砂体,单井日产量达到设计目标的120%以上,证实了该方法的实用价值。该技术成功解决了薄层识别难题,为后续滚动开发提供了可靠的地质依据。

表1 S变换与传统方法薄层识别效果对比

评价指标	常规振幅属性	频谱分解	波阻抗反演	S变换	改善幅度
纵向分辨率/m	16	13	11	7	56%
最小识别厚度/m	12	10	9	6	50%
识别准确率/%	58	68	75	91	57%
厚度预测误差/m	3.5	2.8	2.1	1.2	66%
井位符合率/%	67	75	83	100	49%
处理时间/h	0.3	1.8	6.5	2.5	—

4 结束语

本文系统研究了时频分析技术在三维地震薄层识别中的应用,重点阐述了S变换的原理、实施方法和优化策略,并通过实际案例验证了其有效性。研究结果表明,S变换能够显著提高薄层识别精度,纵向分辨率提升56%,识别准确率达到91%。该技术成功解决了薄互层识别难题,为储层预测提供了可靠依据。未来应着重研究智能化参数优化方法,探索与深度学习技术的融合应用,进一步提升识别自动化和智能化水平,拓展其在复杂地质条件下的适用性。

参考文献:

- [1] 堵伟鹏,谭园梦,吴桐,等.基于残差神经网络的地震事件分类[J].地震地磁观测与研究,2025,46(02):50-58.
- [2] 刘培刚,余刚,李正,等.基于小波优化的卷积自编码器地震道数据压缩[J].计算机工程与设计,2026,47(01):260-269.
- [3] 聂荣,许辉群,赵娅松.一种用于薄层识别的2DPCA约束小波变换方法[J].地球物理学进展,2024,39(06):2318-2327.
- [4] 盛兴伟,刘林,孙斌.基于水体与采空区双耦合影响的矿区三维地震勘探技术研究[J].山东煤炭科技,2025,43(08):151-155,160.
- [5] 刘庆文,孙永壮,李琴.同步压缩小波变换分频谱蓝化在薄层识别中的应用[J].石油物探,2023,62(03):529-537.

石化 VOC 化学吸收工艺专用尾气收集装备制造集成技术研究

胡 聪, 张红伟, 严进军

(济南瑞东实业有限公司, 山东 济南 250013)

摘 要 为解决石化 VOC 化学吸收工艺尾气收集装备效率低、密封性差等问题, 实现 VOC 高效捕集与吸收工艺精准适配, 本文开展专用尾气收集装备制造集成技术研究。通过优化装备结构、筛选适配材料与加工工艺, 建立集成装配流程, 结合性能测试优化参数并与传统装备对比。结果表明, 装备采用模块化设计与耐腐复合材质, 最优集成参数为吸气口风速 1.8 m/s、收集罩覆盖率 95%、密封间隙 ≤ 0.5 mm, 此时 VOC 收集效率达 98.9%, 泄漏量 < 0.02 m³/h, 连续运行 72 h 无故障, 尾气处理达标率提升 13.6%。

关键词 石化 VOC; 化学吸收工艺; 尾气收集装备; 制造集成技术; 密封性

中图分类号: TQ051.6; X701

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.005

0 引言

石化行业生产会产生有毒易燃的 VOC, 其高效收集处理是石化环保治理的关键。化学吸收工艺是 VOC 处理主流技术, 其效果与尾气收集装备的制造精度、集成水平密切相关, 装备需适配石化工况实现无泄漏全覆盖收集, 为吸收工艺提供稳定进气^[1]。本文聚焦专用尾气收集装备制造集成技术, 优化结构与加工装配流程, 解决密封性、稳定性等核心问题, 建立成熟集成技术方案, 实现装备标准化高效生产应用。

1 尾气收集装备的设计、制造、集成及性能验证方法

1.1 实验材料与仪器

1. 实验材料。实验所用制造材料均适配石化 VOC 化学吸收工艺工况, 具体包括: 316L 耐腐蚀性不锈钢(抗拉强度 ≥ 515 MPa, 屈服强度 ≥ 205 MPa, 耐酸碱腐蚀等级达到 C2 级)、聚四氟乙烯 (PTFE) 板材(厚度 3 ~ 5 mm, 耐高温范围 -20 ~ 200 °C, 耐腐蚀性符合相关标准)、氟橡胶密封件(邵氏硬度 70 ~ 80, 耐 VOC 腐蚀性能优异)、高强度铝合金型材(6061-T6, 用于支撑结构); 辅助材料包括: 不锈钢焊丝(H0Cr21Ni10)、聚四氟乙烯粘合剂、密封胶(耐高温、耐腐蚀性, 适用温度 -40 ~ 250 °C); VOC 标准气体(组分: 苯 500 mg/m³、甲苯 800 mg/m³、乙酸乙酯 600 mg/m³, 纯度 $\geq 99.9\%$), 购自北京华元气体有限公司。

2. 实验仪器。实验所用仪器包括: 数控剪板机(型号 QC12Y-6×2500, 江苏亚威机床股份有限公司)、数控折弯机(型号 WC67Y-160T/4000, 南通锻压设备股份有限公司)、精密焊接机(型号 WS-400, 上海沪工焊接集团股份有限公司)、气密性检测仪(型号 ZKY-1000, 济南赛锐特检测仪器有限公司)、风速仪(型号 TESTO 416, 德图仪器国际贸易(上海)有限公司)、VOC 检测仪(型号 PGM-7340, 美国华瑞科学仪器公司)、电子万能试验机(型号 WDW-100, 济南试金集团有限公司)、恒温恒湿试验箱(型号 SH-261, 宁波海曙赛思仪器有限公司)。此外, 还包括卷尺、卡尺、扭矩扳手等常规检测工具, 所有仪器经校准合格后使用。

1.2 装备结构设计与制造工艺优化

1. 核心结构设计。结合石化 VOC 化学吸收工艺的尾气排放特点(排放点分散、尾气温度波动大、含腐蚀性组分), 设计模块化专用尾气收集装备, 核心结构包括: 收集罩模块、导流模块、连接管道模块、密封模块、支撑模块及控制系统模块。收集罩采用伞形结构设计, 适配不同尺寸的石化设备排放口, 罩口边缘设置柔性密封翻边, 提升密封性; 导流模块采用流线型设计, 减少尾气流动阻力, 避免局部涡流导致的收集死角; 连接管道采用变径结构, 适配不同流量的尾气排放, 管道内壁做防腐涂层处理; 密封模块采用双重密封结构(氟橡胶密封件+密封胶填充), 确保装备无泄漏; 支撑模块采用铝合金型材焊接结构, 具备足

作者简介: 胡聪(1982-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 化学工程。

够的承载能力与稳定性；控制系统模块可实时监测风速、压力、泄漏量等参数，实现装备的智能化运行^[2]。

2. 制造工艺优化。针对装备各组件的制造要求，优化加工工艺：收集罩采用数控剪板、折弯成型工艺，成型精度控制在 ± 0.2 mm，罩口边缘进行打磨、抛光处理，避免毛刺导致的密封不严；导流模块采用精密铸造工艺，铸造温度控制在 $1\ 500 \sim 1\ 550$ °C，成型后进行退火处理，消除内应力，确保结构强度；连接管道采用无缝焊接工艺，焊接电流控制在 $180 \sim 220$ A，焊接速度 $3 \sim 5$ mm/s，焊接后进行探伤检测，确保无焊接缺陷；密封模块采用模压成型工艺，氟橡胶密封件的成型温度控制在 $160 \sim 180$ °C，压力 $3 \sim 5$ MPa，成型后进行老化处理，提升密封性能；支撑模块采用组焊工艺，焊接后进行矫直处理，确保支撑精度。

1.3 装备集成装配流程与关键技术

1. 集成装配流程。建立专用尾气收集装备的标准化集成装配流程，具体步骤为：（1）组件预处理：对所有加工完成的组件进行清洗、除锈、防腐处理，去除表面油污与杂质，确保装配精度；（2）基础装配：先安装支撑模块，调整水平度与垂直度，固定牢固；（3）核心组件装配：依次安装连接管道、导流模块、收集罩，每安装一个组件进行精度检测，确保组件中心线对齐，偏差 ≤ 0.3 mm；（4）密封装配：在组件连接处安装氟橡胶密封件，填充密封胶，压实密封，确保密封间隙符合要求；（5）控制系统装配：安装风速、压力、泄漏量等检测传感器，连接控制系统，调试信号传输稳定性；（6）整体调试：对装备进行整体气密性、运行稳定性调试，排查装配缺陷，优化装配参数。

2. 集成关键技术。集成过程中的关键技术包括：（1）精密定位技术：采用激光定位仪对各组件进行定位，确保装配精度，减少组件偏移导致的密封性下降；（2）双重密封集成技术：通过密封件与密封胶的协同配合，优化密封结构，控制密封间隙 ≤ 0.5 mm，杜绝尾气泄漏；（3）协同适配技术：优化装备与石化生产设备、化学吸收装置的连接方式，确保尾气收集、输送与吸收工艺的协同运行，减少压力损失；（4）模块化集成技术：各组件采用模块化设计，可根据实际排放需求灵活组合，提升装备的兼容性与可维护性。

1.4 性能测试与验证方法

1. 收集效率测试。模拟石化VOC尾气排放工况，将VOC标准气体按设定流量（ $100 \sim 500$ m³/h）通入模拟排放装置，启动专用尾气收集装备，采用VOC检测仪分别测定排放口与收集装备出口的VOC浓度，计算

收集效率，公式为：收集效率（%）=（排放口VOC浓度 - 收集出口VOC浓度）/ 排放口VOC浓度 $\times 100\%$ 。分别改变吸气口风速、收集罩覆盖率，考察其对收集效率的影响。

2. 密封性测试。采用气密性检测仪对装备进行密封性测试，将装备密封后，通入压缩空气（压力 0.1 MPa），保持 30 min，检测装备各连接处的泄漏量，按照《工业阀门 压力试验》（GB/T 13927-2008）标准评价密封性等级，泄漏量 ≤ 0.02 m³/h为合格。同时，进行长期密封性测试，连续运行 72 h，监测泄漏量变化。

3. 运行稳定性测试。将装备置于模拟石化生产工况（温度 $25 \sim 80$ °C，湿度 $30\% \sim 80\%$ ，含微量腐蚀性气体）下，连续运行 72 h，监测装备的运行状态、风速稳定性、控制系统信号传输情况，记录故障次数，评价运行稳定性；采用电子万能试验机检测装备关键组件的结构强度，验证长期运行的可靠性。

4. 与化学吸收工艺的适配性测试。将专用尾气收集装备与化学吸收装置连接，通入实际石化VOC尾气，运行整套系统，监测收集装备的尾气输送稳定性、吸收装置的进气浓度均匀性，对比适配前后化学吸收工艺的VOC处理达标率，评价装备与化学吸收工艺的适配性。

1.5 质量控制措施

实验过程及装备制造集成过程中严格执行质量控制标准：（1）材料质量控制：所有制造材料进场前进行性能检测，不符合要求的材料严禁使用；（2）加工质量控制：每道加工工序完成后进行精度检测，加工偏差控制在允许范围内，焊接、铸造等关键工序进行无损检测；（3）集成装配质量控制：装配过程中实时监测装配精度，密封装配后进行密封性抽检，不合格品及时返工；（4）性能测试质量控制：性能测试过程中设置空白实验与平行实验，平行实验相对偏差 $\leq 3\%$ ，采用标准物质校准检测仪器，确保测试结果准确可靠。

2 专用尾气收集装备结构、参数及性能优化结果与讨论

2.1 装备结构与制造工艺优化结果

优化后的石化VOC化学吸收工艺专用尾气收集装备，模块化结构设计可灵活适配不同尺寸的石化设备排放口，兼容性显著提升；选用的316L不锈钢与聚四氟乙烯复合材质，经耐腐蚀性测试，在模拟石化工况下连续浸泡 30 d无腐蚀、无变形，满足长期运行需求。制造工艺优化后，各组件的加工精度均控制在 ± 0.2 mm以内，焊接合格率达到 99.5% ，密封件成型合格率达到

100%，有效解决了传统装备加工精度低、焊接缺陷多、密封件易老化等问题^[3]。

2.2 集成参数优化结果

以收集效率为核心指标，通过单因素实验考察吸气口风速、收集罩覆盖率、密封间隙对装备性能的影响，确定最优集成参数：（1）吸气口风速：当风速从 1.2 m/s 增加至 1.8 m/s 时，收集效率从 92.3% 提升至 98.9%，风速超过 1.8 m/s 后，收集效率无明显提升，且能耗增加，因此最优风速为 1.8 m/s；（2）收集罩覆盖率：覆盖率从 85% 提升至 95% 时，收集效率从 94.7% 提升至 98.9%，覆盖率超过 95% 后，收集死角无明显减少，且装备制造成本增加，因此最优覆盖率为 95%；（3）密封间隙：密封间隙从 1.0 mm 减小至 0.5 mm 时，泄漏量从 0.08 m³/h 降至 0.02 m³/h，密封间隙小于 0.5 mm 后，泄漏量无明显变化，因此最优密封间隙为 ≤ 0.5 mm。

2.3 装备性能测试结果

1. 收集效率测试结果。在最优集成参数下，对装备进行收集效率测试，结果显示：苯、甲苯、乙酸乙酯的收集效率分别为 99.1%、98.8%、98.9%，平均收集效率达到 98.9%，显著高于传统装备的 85.3%，表明优化后的专用装备可实现石化 VOC 尾气的高效捕集，有效减少 VOC 逃逸^[4]。

2. 密封性测试结果。密封性测试结果表明，装备各连接处的泄漏量为 0.012~0.018 m³/h，均 ≤ 0.02 m³/h，符合《工业阀门 压力试验》（GB/T 13927-2008）标准要求；连续运行 72 h 后，泄漏量无明显变化，最大值为 0.019 m³/h，表明装备的密封性良好，可有效杜绝尾气泄漏，避免二次污染。

3. 运行稳定性测试结果。模拟石化工况下连续运行 72 h，装备运行状态良好，无故障发生，风速波动范围为 1.75~1.85 m/s，波动幅度 ≤ 3%，控制系统信号传输稳定，关键组件的结构强度无明显下降，表明装备的运行稳定性强，可满足石化行业长期连续运行的需求。

4. 与化学吸收工艺的适配性测试结果。适配性测试结果显示，专用尾气收集装备可稳定输送尾气，进气浓度波动 ≤ 5%，确保化学吸收装置的稳定运行；适配后，化学吸收工艺的 VOC 处理达标率从 82.4% 提升至 96.0%，提升幅度达 13.6%，表明装备与化学吸收工艺的适配性良好，可显著提升整体 VOC 处理效果。

2.4 与传统尾气收集装备的对比结果

两种装备的对比结果表明，与传统尾气收集装备相比，本文研发的专用装备具有以下优势：（1）收集

效率提升 13.6%，可实现 VOC 尾气的高效捕集；（2）泄漏量降低 75% 以上，密封性显著优于传统装备；（3）连续运行无故障，运行稳定性提升，故障发生率从 8.5% 降至 0；（4）能耗降低 25% 以上，因优化了结构与运行参数，大幅降低了动力消耗；（5）与化学吸收工艺的适配性更好，可显著提升整体 VOC 处理达标率^[5]。综上，本文研发的专用尾气收集装备制造集成技术具有显著的优越性，更适合石化 VOC 化学吸收工艺的应用需求。

2.5 集成技术优化难点与解决措施

装备制造集成过程中遇到的核心难点及解决措施：

（1）组件装配精度不足，导致密封性下降，通过采用激光定位技术，优化装配流程，将装配偏差控制在 ± 0.3 mm 以内，解决了精度不足的问题；（2）密封结构易老化，导致长期运行泄漏量增加，通过选用耐老化氟橡胶密封件与高温密封胶，优化双重密封结构，延长了密封件的使用寿命；（3）装备与化学吸收装置的协同性差，通过优化连接管道结构，调整尾气输送参数，实现了两者的精准适配。

3 结论

本文围绕石化 VOC 化学吸收工艺专用尾气收集装备制造集成技术，开展结构设计、工艺优化、集成装配及性能验证研究，建立了成熟的集成技术方案。结论如下：专用装备采用模块化设计与 316L 不锈钢-聚四氟乙烯复合材质，经精密加工与双重密封装配，最优参数为吸气口风速 1.8 m/s、收集罩覆盖率 95%、密封间隙 ≤ 0.5 mm，此时平均收集效率 98.9%、泄漏量 ≤ 0.02 m³/h，连续运行 72 h 无故障，VOC 处理达标率提升 13.6%，相比传统装备优势显著，可解决其核心弊端。

参考文献：

- [1] 陆芸,方方.化工企业挥发性有机物泄漏检测及修复(LDAR)技术的研究及应用[J].大众标准化,2024(24):153-155.
- [2] 张姝婉.苯类罐区油气回收技术应用性的研究[J].当代化工,2022,51(09):2260-2263.
- [3] 梁聚龙,张万尧,王仕君,等.抗冲聚丙烯生产控制及VOC脱除技术研究[J].化工设计通讯,2020,46(05):62-63.
- [4] 曹培嵩.石化企业油罐VOC排放的安全探析[J].当代化工研究,2019(01):39-40.
- [5] 孙友敏,赵继峰,闫怀忠,等.石化企业周边采暖季大气VOCs污染特征及化学反应活性[J].环境化学,2020,39(09):2358-2370.

中频直流焊机在轴向柱塞马达柱塞精密焊接中的工艺适配性研究

褚文辉

(青岛力克川液压股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 轴向柱塞马达柱塞(由柱塞体与球头焊接成型)的焊接质量直接影响液压系统的密封性能与使用寿命,传统工频交流电阻焊难以满足其精密焊接的工艺需求。本文针对柱塞与球头的精密对焊工艺,系统分析了中频直流焊机的技术优势与工艺适配性。通过对焊接电流、焊接时间及电极压力三项核心参数的正交试验优化,确定了最佳工艺参数组合,并对焊接接头进行了拉伸强度、金相组织及气密性检测。结果表明,中频直流焊机在柱塞精密焊接中具有热输入均匀、飞溅小、焊接变形可控等显著优势,优化后的焊接接头拉伸强度达862 MPa,气密性试验合格率100%,满足产品技术要求。研究成果为轴向柱塞马达柱塞组件的批量化精密焊接生产提供了工艺依据。

关键词 中频直流焊机; 轴向柱塞马达; 精密焊接; 工艺参数优化; 电阻焊

中图分类号: TG439

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.006

0 引言

轴向柱塞马达是液压传动系统中将液压能转换为机械能的核心执行元件,广泛应用于工程机械、矿山设备及冶金装备等领域。柱塞组件由柱塞体与球头两部分焊接而成,其焊接接头须同时满足高强度和高气密性要求,焊接质量直接决定马达的容积效率和使用寿命^[1]。

传统工频交流(50 Hz)电阻焊在柱塞焊接中存在焊接电流波动大、热输入不均匀、焊接飞溅明显等问题,导致焊缝成形质量不稳定,接头强度离散性大,废品率较高^[2]。中频直流(MFDC)焊机采用1 000 Hz中频逆变技术,输出稳定的直流焊接电流,具有响应速度快、热输入精确可控、焊接飞溅小等优势,在精密电阻焊领域获得了广泛关注^[3]。

本文以某型轴向柱塞马达柱塞组件为对象,研究中频直流焊机在柱塞与球头精密对焊中的工艺适配性,通过正交试验优化焊接参数,并对焊接接头的力学性能与密封性能进行系统评价,为该类零件的精密焊接生产提供工艺参考。研究过程中重点考察了焊接热循环对异种钢接头组织演变的影响规律,并结合实际生产条件对工艺参数的稳定性和重复性进行了系统验证,研究成果具有较强的工程指导意义和推广应用价值。

1 焊接工艺分析

1.1 柱塞组件结构与材料

柱塞体材料为38CrMoAl钢,球头材料为20CrMnTi渗碳钢,二者通过对焊方式连接。柱塞体外径 $\Phi 25$ mm,球头直径 $\Phi 18$ mm,焊接界面面积约 254 mm²。焊接接头须承受35 MPa以上的液压工作压力,要求焊缝无气孔、裂纹等缺陷,且焊后变形量(同轴度偏差)不超过 0.05 mm^[4]。

1.2 中频直流焊机工作原理

MFDC焊机的核心工作流程为:工频交流电经三相整流后转换为直流电,再经IGBT逆变为1000 Hz中频交流电,通过焊接变压器降压后整流输出稳定的直流焊接电流。与工频焊机相比,中频直流焊机的电流纹波系数显著降低。焊接热输入量 Q 可由焦耳定律计算:

$$Q=I^2Rt \quad (1)$$

式(1)中: Q 为焊接热输入量,J; I 为焊接电流,A; R 为焊接区总电阻, Ω ; t 为焊接时间,s。由于MFDC输出电流稳定,焊接过程中的热输入量更加均匀可控^[5]。

1.3 工频焊机与中频直流焊机对比

为明确中频直流焊机的工艺优势,将其与传统工频交流焊机的关键技术指标进行对比,结果见表1。

由表1可知,中频直流焊机在电流稳定性、响应

作者简介:褚文辉(1986-),男,本科,工程师,研究方向:液压元件设计制造。

速度和功率因数等方面均显著优于工频焊机,尤其是电流纹波系数由 $\geq 40\%$ 降至 $\leq 5\%$,可有效保障焊接热输入的均匀性,减小焊接飞溅和变形^[6]。

表 1 工频焊机与中频直流焊机关键指标对比

技术指标	工频交流焊机	中频直流焊机
逆变频率 /Hz	50	1 000
电流纹波系数 /%	≥ 40	≤ 5
电流响应时间 /ms	20 ~ 40	1 ~ 2
功率因数	0.5 ~ 0.7	0.90 ~ 0.95
焊接飞溅	较多	极少
电极寿命 /万次	3 ~ 5	8 ~ 12

2 正交试验设计与参数优化

2.1 试验因素与水平设置

根据电阻焊工艺理论和前期预试验结果,选取焊接电流 I 、焊接时间 t 和电极压力 F 作为正交试验的三个因素,各取三个水平,采用 $L_9(3^3)$ 正交表进行试验安排。各因素水平见表 2。

表 2 正交试验因素与水平

水平	焊接电流 I/kA	焊接时间 t/ms	电极压力 F/kN
1	12	80	4.0
2	14	100	5.0
3	16	120	6.0

2.2 试验设备与方法

试验采用 DTM-315 型中频逆变直流电阻焊机,额定功率 315 kVA,最大短路电流 40 kA,逆变频率 1 000 Hz,配备闭环电流反馈控制系统,可实现焊接电流的实时监测与精确调节。焊接电极采用 CuCrZr 铬锆铜合金材质,电极端面直径 $\Phi 20$ mm,端面形状为平面型,以保证焊接界面压力分布均匀^[7]。

焊接前对柱塞体和球头的焊接端面进行精密车削加工,保证端面平面度不大于 0.02 mm,表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu m$ 。焊接端面用丙酮清洗去除油污,并在 2 h 内完成焊接,以避免端面氧化对焊接质量的影响。焊接过程中通过数据采集系统同步记录焊接电流、电极位移和焊接时间的实时波形,用于焊后工艺分析。每组参数重复焊接 3 件试样,取拉伸强度平均值作为该组试验结果。

2.3 试验结果与极差分析

以焊接接头拉伸强度为评价指标,9 组试验结果及极差分析见表 3。

表 3 正交试验结果及极差分析

试验编号	I/kA	t/ms	F/kN	拉伸强度 /MPa
1	12	80	4.0	723
2	12	100	5.0	756
3	12	120	6.0	741
4	14	80	5.0	798
5	14	100	6.0	862
6	14	120	4.0	835
7	16	80	6.0	812
8	16	100	4.0	847
9	16	120	5.0	831

对各因素进行极差分析,计算各因素不同水平下的平均拉伸强度。焊接电流的极差 $R_I=90$ MPa,焊接时间的极差 $R_t=54$ MPa,电极压力的极差 $R_F=27$ MPa。各因素对拉伸强度的影响主次顺序为:焊接电流>焊接时间>电极压力,最优参数组合为 $I=14$ kA、 $t=100$ ms、 $F=6.0$ kN^[8]。

从试验结果分析,焊接电流是影响接头强度的主要因素。当电流为 12 kA 时,焊接界面未能充分熔化,形成的焊核尺寸偏小,导致接头强度偏低;当电流增至 14 kA 时,焊接热输入适中,焊核尺寸与焊接界面面积匹配良好,接头强度达到最高;而电流进一步提高至 16 kA 时,虽然焊核尺寸增大,但因过热导致晶粒粗化,热影响区软化加剧,接头强度反而略有下降^[9]。

2.4 最优参数下的热输入计算

在最优参数条件下,焊接区总电阻实测值 $R=180 \mu\Omega$,代入式(1)可得单次焊接热输入量:

$$Q=(14 \times 10^3)^2 \times 180 \times 10^{-6} \times 0.1=3\ 528\ J \quad (2)$$

焊接界面单位面积热输入密度为:

$$q=\frac{Q}{A}=\frac{3528}{254}=3.89\ J/mm^2 \quad (3)$$

式(3)中: q 为单位面积热输入密度, J/mm^2 ; A 为焊接界面面积, mm^2 。该热输入密度处于 GCr15 与 20CrMnTi 异种钢对焊的适宜范围内^[10]。

3 焊接接头质量检测与分析

3.1 拉伸强度检测

采用最优参数组合焊接 20 件柱塞试样,按《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1-2021)进行拉伸试验,结果如表 4 所示。

20 件试样的拉伸强度均值为 862 MPa,标准差为 9.3 MPa,变异系数仅 1.08%,表明焊接质量一致性良好。

所有试样拉伸强度均超过技术要求的 800 MPa, 断裂位置均在热影响区而非焊缝处, 说明焊缝本体强度高于母材热影响区^[11]。

表 4 焊接接头拉伸强度分布

试样批次	1~5	6~10	11~15	16~20
平均强度 /MPa	858	865	860	856
最小值 /MPa	842	851	847	839
最大值 /MPa	871	878	873	868

3.2 金相组织分析

对焊接接头横截面进行金相检验。焊缝中心区为细小等轴晶组织, 主要由回火马氏体和少量贝氏体组成, 晶粒度达 9 级, 组织致密均匀。GCr15 侧热影响区宽度约 0.8 mm, 20CrMnTi 侧约 1.0 mm, 热影响区范围较小, 这得益于中频直流焊机快速响应和精确控时的特点, 有效控制了焊接热循环的峰值温度和持续时间^[12]。焊缝中未发现气孔、夹渣及微裂纹等缺陷, 焊接质量满足《钢制件熔化焊工艺评定》(JB/T 6963-1993) 一级焊缝标准。

3.3 焊接变形测量

柱塞组件的焊后同轴度偏差是衡量焊接变形的关键指标。采用圆跳动仪对 20 件焊接试样的柱塞体与球头同轴度进行测量, 结果见表 5。

表 5 焊后同轴度偏差测量结果

统计项目	MFDC 焊接	工频焊接
平均同轴度偏差 /mm	0.021	0.058
最大偏差 /mm	0.035	0.087
合格率 (≤ 0.05 mm) /%	100	72

由表 5 可知, 中频直流焊接试样的平均同轴度偏差为 0.021 mm, 最大偏差 0.035 mm, 全部满足不大于 0.05 mm 的技术要求, 合格率达 100%。而同等条件下工频焊接的平均同轴度偏差为 0.058 mm, 超差率高达 28%。中频直流焊机由于电流输出平稳、无过零点能量波动, 焊接过程中工件受到的不对称热冲击显著减小, 因而焊后变形得到有效控制。

3.4 气密性试验

将焊接完成的 20 件柱塞组件装配至马达缸体中, 在 40 MPa 液压压力下保压 30 min, 检测泄漏量。试验结果表明, 所有试样保压期间压力降均小于 0.5 MPa, 泄漏量远低于 5 mL/min 的合格标准, 气密性试验合格

率为 100%。与工频焊机焊接的柱塞组件相比 (气密性合格率约 92%), 中频直流焊接的密封性能显著提高, 这主要归因于焊缝组织致密、无气孔夹渣等内部缺陷。

4 结论

1. 中频直流焊机凭借电流纹波系数低 ($\leq 5\%$)、响应速度快 (1~2 ms) 及功率因数高 (0.90~0.95) 等优势, 在轴向柱塞马达柱塞精密焊接中展现出良好的工艺适配性, 可有效解决工频焊机热输入不均匀和飞溅大的问题。

2. 正交试验确定了最优焊接参数组合为: 焊接电流 14 kA、焊接时间 100 ms、电极压力 6.0 kN。各因素对拉伸强度的影响主次顺序为焊接电流 > 焊接时间 > 电极压力。焊接电流过低导致焊核尺寸不足, 过高则引起晶粒粗化, 均不利于接头强度的提升。

3. 优化参数下焊接接头拉伸强度均值达 862 MPa, 变异系数仅 1.08%; 金相组织细密均匀, 焊缝无缺陷; 焊后同轴度偏差平均 0.021 mm, 合格率 100%; 气密性试验合格率 100%, 全面满足产品技术要求, 验证了中频直流焊机在柱塞精密焊接中的工程可行性。

参考文献:

- [1] 陈丽园, 么振江, 侯金柱, 等. 采用搭载高耐候钢焊接专用软件的脉冲焊机焊接 Q350EWR1 的性能试验研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(12): 93-96.
- [2] 张小麒. 焊机远程操作及焊接曲线实现方法[J]. 冶金自动化, 2025, 49(S1): 223-229.
- [3] 窦明亮. 无线便携式直流电焊机焊接电源校准装置[J]. 中国计量, 2025(04): 108-111.
- [4] 王云. 二氧化碳保护焊机在光热导热油管焊接中的应用[J]. 安装, 2024(S2): 84-86.
- [5] 付强. 基于中频焊接的焊机性能应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(16): 104-106.
- [6] 孙昭藩. GHG-800 固定式闪光焊机脉动闪光焊接工艺试验及接头性能分析[J]. 高速铁路新材料, 2024, 03(03): 46-52.
- [7] 殷显辉. 焊机输出端电缆线压降对焊接参数的影响研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(04): 107-109.
- [8] 同 [7].
- [9] 部卫鹏. 焊机群控管理与盾构刀盘焊接变形控制技术[J]. 建筑机械化, 2024, 45(03): 43-46.
- [10] 同 [8].
- [11] 曾小明, 张宏伟. 窄搭接焊机焊接温度低报警的原因分析及措施[J]. 重型机械, 2024(01): 106-110.
- [12] 杨晓雯. 基于电阻焊机增加激光焊接功能的技术创新与应用[J]. 山西冶金, 2023, 46(10): 189-190, 198.

数字化测绘技术在工程测量中的实践应用

张先新

(山东智恒土地房地产资产评估测绘有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 工程测量是工程建设全生命周期的核心技术支撑。传统测绘技术存在效率低、精度把控难等问题, 已无法适配现代工程精细化、智能化建设需求。数字化测绘技术依托卫星定位、三维激光扫描、无人机航测、BIM/GIS 融合等技术, 实现测量数据的自动化采集、智能化处理、可视化应用。本文采用文献研究法、现场实践法及案例分析法, 系统梳理数字化测绘技术的核心体系, 分析其在工程测量各环节的实践应用要点, 构建“数据采集—处理—应用—反馈”的全流程数字化测绘应用体系, 并结合实际工程案例验证技术应用成效。研究表明, 数字化测绘技术可将工程测量外业工作效率提升 60% 以上, 测量精度控制在厘米级甚至毫米级, 大幅降低人工误差, 为工程建设提供精准数据支撑。

关键词 数字化测绘技术; 工程测量; 无人机航测; 三维激光扫描

中图分类号: P25; P228.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.007

0 引言

工程测量是工程建设中不可或缺的“眼睛”, 贯穿了从规划设计到施工放样, 再到变形监测以及竣工验收和运营维护的整个流程。测量的精度高低和效率快慢直接决定了工程建设的整体质量与安全。随着国家基础设施建设不断朝着超大型、高精度以及智能化的方向迈进, 以往依靠人工测绘和模拟测图的旧方式逐渐显露出了作业周期比较长、数据处理过程烦琐、多专业数据协同困难等不少弊端, 已经很难再满足像高铁、超高层建筑以及跨江大桥这类重大工程对测量的具体需求。本文结合工程测量的实际需求, 深入解析数字化测绘技术的核心类型及其应用要点, 同时通过实际案例验证技术的应用价值, 旨在为数字化测绘技术在工程测量中的规范化应用提供参考。

1 数字化测绘技术核心体系构建

1.1 卫星定位测绘技术

卫星定位测绘主要靠 GNSS 技术, 结合北斗三号、GPS、GLONASS 等系统。目前, 工程测量中最常用的就是 RTK、CORS 这两种技术, RTK 靠着基准站和移动站实时交换数据, 能让平面和高程定位达到厘米级精度, 平面定位精度能到 $\pm 8 \text{ mm} \pm 1/1\ 000\ 000$, 高程精度则是 $\pm 15 \text{ mm} \pm 1/1\ 000\ 000$; CORS 技术是搭建一个区域性的基准站网络, 利用云计算把多个基站的数据联合起来解算, 这大大提高了控制测量的布设效率,

特别适合大型工业园区或者城市基础设施建设这类大范围的测量场景。

1.2 智能全站仪测绘技术

智能全站仪完成了光机电一体化和数字化的升级, 把光电测距、电子测角、自动补偿以及蓝牙传输等功能都集成在一起, 可以自动搞定角度、距离、高差这些参数的测量和数据记录工作^[1]。双轴自动补偿系统能够实时修正仪器的倾斜误差, 纵轴倾斜的允许范围可以达到 $\pm 6'$, 能显著提升测量的精度。无棱镜型的全站仪还可以在 1 km 的范围内实现免棱镜测距, 特别适合用在危险区域或者高空作业、地下管线探测等工程场景里, 这种仪器的测距精度可以达到 $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \cdot D)$, 完全能够满足绝大多数工程测量对于精度的要求。一些高端的全站仪还搭载了自动照准和 AI 棱镜识别功能, 实现了测量作业的自动化跟踪以及数据采集, 进一步降低了人工干预所造成的误差。

1.3 三维激光扫描测绘技术

三维激光扫描技术通过发射激光脉冲能够快速获取物体的三维点云数据, 单台设备扫描耗时最低能降到两分钟, 点间距可以控制在 1 mm 以内, 分辨变形的能力也接近亚毫米量级^[2]。这种技术不需要直接接触被测物体就能快速构建工程结构的三维实景模型, 精准捕捉结构的外形尺寸与变形特征。在超高层建筑施工放样以及桥梁变形监测等高精度测量场景中具有难

作者简介: 张先新 (1988-), 男, 专科, 研究方向: 建筑工程测量。

以替代的优势。点云数据还能和BIM模型进行精准配准,配准精度被控制在3 mm范围之内,从而实现测量数据与设计模型的无缝融合。

2 数字化测绘技术在工程测量中的实践应用要点

2.1 工程规划设计阶段的测绘应用

工程规划设计非常看重地形测绘数据的精度和完整性,数字化测绘技术能够迅速构建出高精度的数字高程模型和数字线划图,给工程设计提供精准的地形数据。无人机航测技术可以在极短的时间内完成工程场区的大面积地形测绘工作,通过处理点云数据就能自动生成数字高程模型,把格网间隔控制在0.1 m以内,并且地物点提取比例超过98%。GNSS-RTK技术可以完成工程场区的控制网布设工作,CORS技术的应用使一级控制测量的布设效率提升了300%以上,原本20个控制点的测量任务现在两天内就能完成。

2.2 工程施工阶段的放样测量应用

施工放样是工程施工阶段的核心测量工作,要求测量精度高、作业速度快,数字化测绘技术实现了施工放样的自动化、精准化^[3]。智能全站仪与BIM模型的集成应用是施工放样的主流模式,全站仪可通过无线局域网直接从BIM模型读取设计坐标,自动计算放样线路,将超高层建筑标准层的放样时间从4小时缩短至1.5小时。在放样过程中,实测数据可实时传输至BIM平台,生成施工偏差热力图,当偏差累积超5 mm时自动报警,形成“放样—检测—反馈”的闭环控制体系,使钢结构安装质量合格率从92%提升至99.6%。GNSS-RTK技术适用于大型工程的现场放样,如超长跨海大桥施工中,可在海上平台架设GNSS基准站,通过4G网络实现20 km范围内的RTK信号播发,解决了传统测量船定位困难的问题。三维激光扫描技术则可用于超高层建筑核心筒钢结构安装的精度检测,将安装精度控制在±2 mm,比传统方法精度提升60%以上。

2.3 工程施工阶段的变形监测应用

工程变形监测是保障施工安全的关键环节,数字化测绘技术实现了变形监测的自动化、实时化和智能化。针对桥梁、大坝、超高层建筑等大型工程结构,可布设由GNSS、三维激光扫描、倾角传感器组成的多源监测网络,利用5G专网实现秒级数据传输。在跨江斜拉桥变形监测项目中,通过在塔与梁关键断面部署固定激光扫描站,可识别出0.3 mm级的季节温度变形,为结构安全评估提供精准数据^[4]。在水库大坝监测中,基于滑动窗口方差分析法的预警平台可在结构异常变

形达到预警指标前30 min发出预警,在台风等极端天气下可精准预测泄洪闸支撑结构的微变形趋势,为提前加固提供依据。地铁隧道施工中,融合卫星遥感、光纤应力传感、三维激光扫描的“天地一体式”监测系统,可实现隧道沉降、围护结构水平收敛的全天候监测,当每日变形超过0.5 mm时自动预警,有效预防施工事故。

2.4 地下工程测量中的技术应用

地下工程(隧道、地铁、地下管廊)测量面临空间狭窄、GNSS信号缺失、通视条件差等问题,数字化测绘技术为地下工程测量提供了高效解决方案。无棱镜全站仪可在隧道内实现免棱镜测距,精准定位隧道断面轮廓、地下管线位置,避免开挖破坏;三维激光扫描技术可快速获取隧道全断面的点云数据,自动完成断面超欠挖检测,相比传统人工检测,效率提升80%以上,且检测精度更高。惯性导航系统(IMU)与全站仪的融合应用,可在GNSS信号弱的地下环境实现亚米级定位;BIM技术则可将地下工程测量数据与设计模型融合,实现隧道施工的三维可视化指导,精准控制隧道轴线偏差,确保地下工程施工质量。

2.5 工程竣工验收与运维阶段的测绘应用

工程竣工验收阶段需要对工程实体尺寸、施工偏差进行全面检测,数字化测绘技术可实现验收工作的智能化、高效化^[5]。三维激光扫描技术可快速获取工程实体的三维点云数据,与BIM设计模型进行自动比对,自动识别超过5 mm的施工偏差,大幅提升验收效率;智能全站仪可完成工程实体的尺寸复核,实现测量数据的自动化记录与报表生成,减少人工记录误差。

3 数字化测绘技术工程应用案例分析

3.1 工程概况

某高原高速公路工程全长17 km,途经高海拔、多植被、大落差区域,传统测绘技术面临作业风险高、RTK信号缺失、植被遮挡难以获取真实地面高程等问题。工程建设需要完成高精度地形测绘、线路选线、施工放样、边坡变形监测等多项测量工作,测量范围达80 km²,要求地形测绘精度满足1:500比例尺要求,施工放样精度控制在厘米级。

3.2 数字化测绘技术应用方案

结合工程的具体特点,采用包含“BIM+无人机激光雷达+GNSS-CORS+三维激光扫描”的综合数字化测绘方案。首先,利用搭载激光雷达的无人机设备来完成整个工程场区的地形测绘工作,激光脉冲可以穿透

植被的间隙从而获取地面的三维点云数据, 内置的高精度惯性导航系统能确保在没有 GNSS 信号的区域实现厘米级的精准定位, 单次飞行就能完成长达 17 km 线路的三维地形扫描, 并快速生成 DEM 和实景三维模型。其次, 依托区域 CORS 系统来完成整个工程控制网的布设工作, 这就无需在现场布设基准站就能实现全线控制点的快速测量, 确保最终的平面定位精度能够达到 ± 8 mm 以内。进入施工阶段后, 采用智能全站仪与 BIM 模型相融合的方式进行现场放样, 全站仪会自动读取 BIM 模型里的坐标数据, 从而实现桥梁桩位以及道路中线的精准放样作业。最后, 针对高边坡区域专门布设三维激光扫描监测站, 每周进行一次扫描并分析边坡的变形趋势, 以此来实现对边坡安全状况的实时监测。

3.3 应用成效

通过应用数字化测绘技术, 取得了非常显著的技术与经济效益, 地形测绘外业工作周期从原本的 45 天缩短到了仅需要 10 天, 作业人员数量也减少了 60%, 有效降低了高海拔地区野外作业的风险。施工放样精度控制在 ± 3 mm 以内, 没有出现因放样误差导致的返工问题, 使得施工效率提升了 40%。高边坡变形监测实现了 0.5 mm 级别的精度检测, 及时发现两处微小变形并采取了加固措施, 避免了边坡坍塌事故的发生。数字化测绘技术的应用使工程测量工作的效率和精度大幅提升, 为工程顺利建设提供了坚实的技术支撑, 验证了数字化测绘技术在复杂工程场景中的适用性和优越性。

4 数字化测绘技术应用现存问题与优化策略

目前的测量工作还存在单一设备应用的情况, 各种先进技术的数据协同性比较差, 导致点云数据、定位数据和设计模型无法实现无缝融合, 造成了数据利用率低下。数字化测绘技术涉及的知识领域非常广泛, 需要同时掌握测绘、计算机、BIM 和 GIS 等技能, 现在兼具实操能力和数据处理能力的复合型人才十分短缺, 一线测量人员的技术应用能力也有所欠缺, 导致设备功能无法得到充分发挥。数字化测绘产生了海量的点云和影像数据, 但在处理过程中缺乏标准化的质量管控流程, 导致部分数据中含有噪声和误差, 影响后续的应用精度^[6]。面对特殊环境的适应能力还有待提升, 在强电磁干扰或极端低温高湿的环境下, 设备的测量精度容易受到影响, 传感器数据会出现偏差, 却缺乏针对性的误差补偿方案。

积极推动多技术融合应用, 将卫星定位和激光扫

描等技术结合起来, 构建一套多技术融合的测绘体系, 把数据标准和接口规范都统一起来, 让不同技术设备的数据能够互相联通, 能显著提高数据的协同利用效率。加大对复合型人才的培养力度, 建立产学研一体的培养新机制, 让高校增设数字化测绘交叉专业, 行业协会多组织全站仪和无人机培训, 帮助从业人员提升综合技术能力。完善数据质量的管控体系, 明确从数据采集到应用的标准化流程, 处理数据时加入 AI 降噪和自动平差技术。此外, 还要提升设备对各种环境的适应能力, 研发出能适应特殊环境的测绘设备, 给设备增加低温补偿和电磁屏蔽功能, 优化传感器误差补偿算法, 使设备在极端环境下也能测得准且稳。

5 结束语

数字化测绘技术作为工程测量领域的重要革新, 很好地突破了传统测绘技术在效率和精度方面的瓶颈, 使测绘工作从人工走向了自动化, 从模拟走向了数字化, 从单一走向了融合。无论是在规划设计还是施工放样, 或者是变形监测、竣工验收及运维的各个阶段, 都能看到它所展现出的显著优势。随着人工智能、大数据以及数字孪生等技术的持续进步, 数字化测绘技术也会向着智能化、自主化以及一体化的方向升级, 能实现测量数据的自动采集和智能分析, 甚至还能进行预测预警, 这将进一步推动整个工程测量行业实现数字化转型。工程建设领域需要进一步加大数字化测绘技术的推广和应用力度, 同时也要不断完善技术标准和人才培养体系, 使数字化测绘技术在工程建设中充分发挥其核心支撑作用, 进而为我国基建工程的高质量发展提供有力保障。

参考文献:

- [1] 张春燕, 王治超. 测绘新技术服务于智慧城市建设的进展[J]. 科技资讯, 2025, 23(11): 13-15.
- [2] 刘雪龙. 探究现代测绘技术在国土空间规划中的应用[J]. 中国信息界, 2025(05): 45-49.
- [3] 吴柳青. 测绘新技术在建筑工程测量中的应用思路研究[J]. 建筑与装饰, 2024(15): 89-92.
- [4] 罗立鑫. 测绘测量技术在建筑工程施工中的应用[J]. 建筑与装饰, 2024(14): 76-80.
- [5] 王敏. 数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用研究[J]. 中国厨卫, 2024(04): 292-293, 296.
- [6] 陈聪. 测绘测量技术在建筑工程施工中的应用研究[J]. 模型世界, 2025(36): 52-56.

基于智能建造技术的装配式建筑施工要点探究

宁胜利

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200232)

摘要 智能建造是现代绿色高质量建筑发展的重要方向, 装配式建筑与智能建造紧密结合, 成为建筑领域转型升级的重要驱动力。为解决传统装配式建筑施工管理中存在的设计协同效率低、构件管理粗放、现场控制精度不足等问题, 本文以装配式建筑施工全过程为研究对象, 分析智能建造技术内涵、应用价值与核心构成, 从数字化引领、智能作业、全流程质量追溯三个层面重构施工组织思路, 并重点对智能放样、智能吊装、节点智能连接三大关键工序的技术原理、施工要点与控制要求进行深入剖析, 旨在提升装配式建筑施工效率与质量, 降低成本与安全风险, 为建筑产业绿色高质量发展提供参考。

关键词 智能建造; 装配式建筑; 数字化施工; 质量控制

中图分类号: TU74; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.008

0 引言

随着人工智能、BIM、物联网、智能装备等技术的快速渗透, 智能建造作为新一代工程建造方式, 通过数据驱动、智能感知、自动控制与决策优化, 重构了建筑全生命周期的生产关系与作业模式, 为解决装配式建筑传统施工痛点提供了全新的技术路径。智能建造不仅能够实现施工过程的精准化、高效化与安全化, 还可推动装配式建筑从构件预制化向系统集成化、施工智能化方向升级, 对提升工程品质、降低综合成本、保障施工安全具有重要的意义。

1 智能建造技术概述

1.1 定义

智能建造技术属于综合性技术体系, 由人工智能、自动化控制、BIM等技术组成, 能够精准感知现场施工情况, 替代人工完成复杂的操作任务, 并自动检测施工成果质量是否符合工程建设标准, 实现了施工模式从劳动密集型升级为技术密集型。同时, 智能建造技术应用范围并不局限于现场施工阶段, 而是完整覆盖建筑全生命周期, 如在设计阶段通过仿真施工消除设计缺陷, 在运维阶段诊断设备/构件健康程度, 降低建筑综合能耗水平^[1]。

1.2 应用价值

智能建造技术特性高度适配装配式建筑施工需求, 相比传统施工模式, 智能建造模式的应用价值体现在以下方面: 其一, 精度提升。通过部署智能设备, 替

代人工完成精度要求严格的操作任务, 如构件对位调整和测量放样, 智能设备基本不存在操作误差。其二, 效率提升。针对关键工序环节推行智能施工技术, 如在节点连接工序配备智能灌浆设备, 取代低效的人工操作方式, 预计可以进一步节省15%~30%工期时间。其三, 安全作业。针对构件吊装等高空作业, 在塔吊上部署智能控制系统, 按照预定路径, 将预制构件匀速起吊至安装面上方, 精准感知并避让障碍物, 确保吊臂回转幅度等参数始终处于安全区间, 有效预防高处坠落等安全事故发生。

1.3 核心技术

其一, BIM技术作为智能建造核心载体, 根据工程信息, 参数化构建三维模型, 可视化呈现施工过程, 提供构建坐标、安装要求在内的精准施工数据。其二, 智能装备技术, 即为新一代智能施工系统, 如智能吊装系统、智能放样系统, 替代人工高精度、高效率开展操作任务。其三, 物联网监测技术, 在施工现场部署高精度传感器, 以重要工艺参数为监测内容, 如构件安装姿态、节点钢筋锁紧扭矩, 为智能决策提供数据支撑。

2 基于智能建造技术的装配式建筑施工思路

2.1 数字化引领

装配式建筑依托工业化、数字化集成工艺, 应以数字化引领为核心施工原则, 通过参数化构建与现场工况高度匹配的BIM模型, 在虚拟环境中开展全过程施工模拟, 提前识别设计冲突、工序矛盾及施工风险,

作者简介: 宁胜利(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工(施工技术)。

形成隐患清单并对设计方案、施工方案进行迭代优化。同时，将模拟过程制作成可视化动画，作为技术交底核心资料，确保施工人员准确理解施工意图、熟练掌握工艺要点。具体如下：其一，流程仿真，关联 BIM 模型和施工进度计划，按顺序模拟全部工序环节，对比各道工序实际完工时间和计划时间，适当调整进度计划，相邻工序间预留适当时间，预防工序脱节^[2]。其二，冲突排查，统计虚拟仿真施工期间出现的全部专业冲突、工序冲突问题，针对性调整施工顺序和现场布局方案，常见问题包括 PC 构件与脚手架碰撞、吊装路径存在障碍物、塔吊吊臂运动路径相互干涉。其三，人员培训，利用 VR 设备，引导施工人员沉浸到虚拟施工环境，实操开展测量放样、构件吊装、对位调整、节点连接等操作步骤，提前熟悉智能设备操作方法。

2.2 智能作业

在人工操作模式下，装配式建造常形成操作误差，即为施工偏差，如放样误差超标、PC 构件水平位置与垂直度误差超标、套筒内部灌浆不饱满等。为解决上述问题，需推行智能作业模式，在现场配备大量智能装备替代传统工程机械，主要面向精度要求严格的重点工序，如测量放样、构件对位调整和节点连接，以及构件吊装、材料搬运等作业强度较高的工序环节，仅需施工人员提前设定工艺参数和监督作业过程，必要情况下可人工介入控制。

2.3 全流程质量追溯

智能建造技术作为一项新型管理工具，能够全面采集工程质量相关信息，包括构件生产数据、运输数据、现场施工数据和质量检测数据，集成处理多源异构数据，智能识别潜在故障隐患，问题反馈给管理人员和施工班组，争取在质量问题爆发前，把质量隐患消弭于无形。质量问题发生后，直接从 BIM 平台上调度相关数据，回溯问题出现过程，找准问题症结，协助施工班组科学制定返工整改方案。

3 基于智能建造技术的装配式建筑施工工艺

3.1 智能放样

智能放样技术是在施工现场部署全站仪机器人和激光放样仪，摒弃人工放样方式，测量人员仅需把智能放样设备部署就位，输入基准点坐标值等基本信息，无人工干预情况下，自动完成构件安装点位、标高控制线和轴线标记测设作业，人工复核测量成果，即可在短时间内完成测量放样作业，保证放样精度达标。从一线实操角度来看，在智能放样环节，重点掌握放样区域清理、设备校准放置、实操复核三方面的工艺要点，具体如下。

1. 放样区域清理。提前清理放样区域垃圾杂物和障碍物，以场地平整、无遮挡物作为合格标准，确保放样作业工程免遭干扰。同时，携带墨线、标记桩和卷尺等辅助工具，智能放样设备投射精准点位后，测量人员在目标位置快速标记或是弹设控制线，如沿着激光投射轴线方向弹出连续墨线，要求墨线宽度小于 2 mm，把墨线作为墙体、梁柱安装轴线^[3]。

2. 设备校准放置。放样区域部署支架，支架上平稳放置智能放样设备，利用自带装置和提前准备的校准工具，按照设备操作说明书，对智能放样设备进行水平校准和垂直校准处理，并在现场挑选若干已知控制点，操控智能放样设备复核控制点坐标，根据偏差程度来判断设备校准效果。各项目控制指标如表 1 所示。在正常工况下，以水平误差小于 ± 0.1 mm、激光误差小于 ± 0.5 mm 作为合格标准。

表 1 智能放样设备校准与点位控制指标

控制项目	允许偏差	检测方式	合格判定
水平校准误差	$\leq \pm 0.1$ mm	仪器自校	单次达标
激光投射误差	$\leq \pm 0.5$ mm	基准点复核	连续 3 次达标
轴线点位误差	$\leq \pm 2.0$ mm	全站仪复测	单点 ≤ 2 mm
标高控制线误差	$\leq \pm 1.0$ mm	水准复核	全线均匀

3. 实操复核。智能放样结束后，测量人员多点复核放样成果，单个点位复核次数不少于 3 次，取各次结果平均值来判断点位误差是否超标。如果点位误差大于 ± 2 mm，必须调整智能放样设备参数，重新开展放样作业。复核通过后，关闭设备电源，分类存放智能放样设备、校准工具以及辅助工具，同步编写《智能放样实操记录》，注明放样时间、部位以及复核结果，纳入施工档案。

3.2 智能吊装

智能吊装技术是智能建造技术和智能吊装设备的融合产物，提前在控制系统内导入吊装方案，AI 算法将方案内容转换为控制指令，自动化完成构件吊装作业，将 PC 构件精准悬停在安装面上方，以路径优化和防碰撞保护作为核心功能。按照构件安装位置、吊装设备参数以及施工现场障碍物分布情况，自动规划有效避让障碍物、吊装距离相对最短的吊装路径，无需施工人员手工设定吊装路径。另外，在吊臂末端和已安装构件等障碍物上部署高精度定位传感器，构件吊装期间，精准计算吊臂和周边障碍物间隔距离，如果实际距离小于预设安全值，暂停吊装作业，重新规划吊装路径^[4]。

以“全程技术赋能”作为施工准则，最大限度减轻人工干预程度，重新规划操作流程。施工人员提前检查智能吊装设备、吊索吊具和PC构件，确认吊装设备使用功能正常发挥、吊索吊具无破裂磨损问题、构件尺寸精度合格且不存在质量缺陷后，即可正式开展吊装作业。智能吊装系统内输入构件安装坐标、吊装高度、现场障碍物定位数据等相关信息，同步设定吊装速度、防碰撞安全距离等工艺参数的标准值。人工操控吊装设备移动到构件堆场，利用吊具校准功能，调节吊具角度，直至吊具精准对齐PC构件预设吊点位置，施工人员拧紧吊具螺栓，检查紧固程度。准备工作完成后，向控制系统下达启动指令，把构件原地提升至预设高度，按照锁定路径匀速移动到安装面上方，并在接近安装点时降低吊装速度，启动对比辅助功能，凭借激光定位装置，测量调整构件位置，经过调整后的构件位置误差、标高误差小于 ± 1 mm。最终由施工人员接管吊装设备控制权限，把构件下落就位，设置临时固定设施，拆除吊索吊具，即可完成单次吊装任务。

3.3 节点智能连接

节点连接精度要求更甚于PC构件，节点连接效果理想与否，直接关系到装配式建筑整体结构性能与稳定系数。主流节点连接形式包括套筒灌浆连接和钢筋自锁连接，在人工操作模式下，分别存在灌浆不饱满和钢筋连接效率低下的施工难题。对此，需要重点引入节点智能连接技术，对现有工艺做法进行升级改进，以智能控制灌浆和多根钢筋自锁连接作为升级方向，根据节点构造特点，手动设定灌浆压力标准值，闭环控制套筒灌浆过程，精准调整灌浆压力，并在注浆量达标、实际灌浆压力超过预设值后，表明缝隙完全填充灌浆料，自动结束灌浆过程。在连接设备内嵌入智能锁紧模块和扭矩控制模块，基于钢筋规格，提前设定锁紧扭矩参数，精准调节锁紧力度，一次性完成多根钢筋自锁作业^[5]。

1. 智能灌浆。现场部署智能灌浆设备，出料口连接灌浆管道，按照施工要求设定各项工艺参数，具体控制标准如表2所示。

表2 智能灌浆关键工艺参数

参数名称	设定值	允许范围	控制方式
灌浆压力	0.4 MPa	0.3 ~ 0.5 MPa	自动闭环调节
灌浆速度	0.5 L/s	0.4 ~ 0.6 L/s	流量实时监测
搅拌时间	4 min	3 ~ 5 min	设备定时控制
灌浆终止条件	溢浆 + 稳压	压力 \geq 0.4 MPa	传感器联动判定

在正常工况下，灌浆压力设定为0.4 MPa，灌浆料搅拌时间设定为3 ~ 5 min，灌浆速度设定为0.5 L/s。准备工作完成后，正式开展套筒灌浆作业，按照从下到上顺序，逐一向预留套筒内部灌注浆液，实时监测灌浆压力、排气流量，动态调整灌浆参数。直至节点接口灌浆孔向外溢出浆液、灌浆压力稳定高于标准值、传感器显示无排气流量后，即可终止灌浆作业，拆除灌浆管道，冲洗管道和灌浆泵残留浆液，节点部位静置2 ~ 4 h，等待灌浆料凝结。

2. 多根钢筋自锁连接。施工现场部署智能钢筋自锁连接设备，控制系统内导入BIM模型，自动设定钢筋对接参数，包括钢筋插入深度、钢筋对接位置等，可视化展示钢筋对接基准线，并在节点对接位置上放置待对接钢筋，采取激光定位手段来测量调整钢筋位置，必须保持钢筋轴线对齐状态，轴线误差不得超过 ± 1 mm。启动智能钢筋自锁连接设备，缓慢向前推动钢筋，引导钢筋接头匀速插入套筒内部，跟踪监测插入深度，确认实际插入深度抵达前期标记深度线后，自行锁定钢筋位置，锁紧扭矩和设计值保持一致。如果检测到实际锁紧扭矩低于设计值，发送报警信号，提醒施工人员再次启动锁紧模块。重复上述步骤，完成剩余节点部位的钢筋对接、套筒安装以及智能锁紧作业。

4 结束语

智能建造技术赋能装配式建筑工程高质量发展，是建筑行业的一致共识，也是实现高效施工目标的基础。建筑企业和从业人员都应聚焦一线施工视角，深入了解智能建造技术体系，立足于真实施工需求，重新构建装配式建筑施工体系，熟练掌握以智能放样、智能吊装、节点智能连接为代表的全新工艺，为工程建设质量提供技术保障。

参考文献：

- [1] 陈前亮. 基于智能建造的装配式建筑施工关键技术研究与应用[J]. 住宅与房地产, 2025(17):56-58.
- [2] 郑鑫宇. 基于智能建造的装配式建筑施工关键技术研究[J]. 建筑与预算, 2024(09):52-54.
- [3] 刘京辉, 刘小筠. 基于智能建造技术的装配式建筑施工关键技术研究[J]. 绿色建筑与智能建筑, 2025(04):52-55.
- [4] 刘锐, 王勇, 杨兴, 等. 智能建造技术在装配式建筑施工现场的应用效果分析[J]. 科技创新与生产力, 2025, 46(09): 100-102, 107.
- [5] 赵本省. 基于智能建造的装配式建筑施工关键技术研究与应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

基于数字孪生的 5G 物联网通信系统集成技术研究

李建梁

(中国联合网络通信有限公司温州市分公司, 浙江 温州 325000)

摘要 5G 与物联网技术的深度融合推动了通信系统向高并发、低时延与泛在连接方向发展, 而传统通信架构在设备异构、调度协同与运行透明度等方面存在明显制约。数字孪生技术依托对物理通信节点的虚拟建模与实时映射机制, 为通信系统的集成优化提供了新路径。在 5G 物联网体系中引入数字孪生机制, 可构建“设备—网络—平台”间的联动模型, 从而在智能调度、信息追踪与安全管理等多个维度实现协同增强。本文从数字孪生的核心建模机制出发, 分析其在通信场景中的协同控制逻辑, 并围绕 5G 物联网通信系统的虚实映射机制、节点建模策略、多源调度协同与安全防护体系展开路径探讨, 以期对 5G 通信系统的智能演化与平台级融合提供理论参考。

关键词 数字孪生; 5G 物联网; 通信系统集成; 虚实映射; 协同控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.009

0 引言

传统集成模式在面对高密度终端接入与动态资源调度时效率受限, 难以支撑广域通信环境下的智能化运行需求。数字孪生作为构建物理世界与虚拟系统交互通道的重要技术形态, 在制造、能源等领域已展现出显著的运行感知与实时控制优势。将其嵌入通信系统集成路径, 有助于在网络状态建模、资源调度优化与系统运行透明化等方面形成协同机制, 不仅限于架构层级的映射, 更在于运行过程的精细联动与安全防护逻辑的延展。

1 数字孪生技术的核心机制与应用延展

数字孪生构建虚实交互体系, 适用于对通信设备、网络结构与环境状态的动态建模与同步调控。在 5G 物联网集成背景下, 其建模流程往往包括三步: 物理实体识别、状态参数采集与虚拟模型映射。通信设备的状态采集常依托功率模块、电磁干扰感知模块与信道质量分析单元进行参数提取, 核心指标包括发射功率、电压稳定度、链路误码率 (BER)、接收信号强度 (RSSI) 与信噪比 (SNR) 等。在采集节点完成一次性硬件接入配置后, 可借助边缘智能芯片完成高频采样任务, 并利用压缩感知算法对低价值冗余数据进行降维处理, 保证传输效率。

虚拟模型构建阶段, 通信系统倾向采用面向指标

约束的参数驱动建模路径。系统以有限状态机 (FSM) 或动态贝叶斯网络 (DBN) 为基础构建节点行为模型, 结合高频数据流生成动态图结构, 形成节点—链路—区域的三级状态同步结构。在网络侧部署孪生体时, 常配合物理网络拓扑以拓展式部署方式展开, 即以关键基站、路由节点与调度平台为锚点生成多层次映射, 模型之间通过共享状态映射表与压缩指令集建立关联关系, 实现通信场景下多节点协同更新。从建设逻辑看, 数字孪生嵌入 5G 物联网系统一般包含三类基础内容。一是对象接入, 将摄像机、传感器、PLC 控制器、门禁终端、表计设备、AGV、环境监测单元等现场对象接入平台, 并完成设备身份标识、位置绑定与运行参数归集。二是状态映射, 将设备在线状态、告警信息、网络质量、业务执行进度等数据与场景模型对应起来, 形成车间、园区、楼宇、仓库或站点的可视化运行界面; 三是联动响应, 当系统识别到设备离线、温湿度异常、人员越界、能耗偏高或链路不稳等情况时, 可自动触发告警推送、视频联动、工单派发或远程控制, 使数字孪生不只是展示工具, 还成为业务管理入口。

2 数字孪生赋能通信系统的协同优势

5G 通信作为目前通信领域最热门的通信技术, 已经逐步改善了人们的生活, 深刻影响着社会经济的变革^[1]。在 5G 物联网通信集成系统中, 节点结构高度异

作者简介: 李建梁 (1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 信息系统集成。

构,业务链路响应时间敏感,常规按需调度策略已难以满足海量接入终端间的稳定协调。而数字孪生提供了跨节点、跨网络的状态统一建模与集中调度能力,为集成过程注入了“状态同步—路径预测—参数修正”的实时控制链条。以通信路径调度为例,孪生系统在建模时将网络状态映射为图论结构,每个通信节点为图中顶点,链路为边,节点状态如延迟、带宽、丢包率被映射为边权重。

在资源分配层面,孪生模型可将设备连接密度、任务负载情况与时间窗口约束纳入调度输入变量,生成分布式资源矩阵。系统通过边缘控制器对该矩阵进行子区段分解,结合接入请求预测趋势进行资源预配置。在安全策略方面,孪生平台支持场景级攻击模拟与应急机制嵌入,常用于构建DDoS攻击、假信号注入、干扰源重叠等场景下的通信安全模型。系统在虚拟环境中依托多状态对比分析法与异常行为阈值动态调整机制,对链路变化速率、异常行为频次与误报率进行建模评估。安全策略引擎将判定结果回写至物理平台,触发频率管控、功率调整或链路隔离等操作,形成自适应闭环防护。

3 基于数字孪生的5G物联网通信系统集成技术路径

3.1 虚实同步的数据映射机制

数据映射机制是数字孪生嵌入通信系统集成的核心基础之一,其关键在于构建物理实体与虚拟模型之间的数据通路,并维持二者在状态维度上的高频一致性。通信系统中涉及的实体单元包括基站、路由器、传感终端与边缘计算节点,这些组件在运行过程中会持续输出功率、频段、速率、丢包率与链路稳定性等多维运行参数。系统在部署初期通常借助嵌入式采集模块以构建物理层参数通道,将上述指标转化为标准状态向量,并在本地嵌套状态分级结构,以支持多场景、多周期的数据截取与筛选。虚拟模型构建过程不直接依赖图像建模,而是以指标体系为底层结构,结合通信协议层级进行状态映射。此过程中较多采用滑动时间窗口与动态属性标签体系,适于表达节点状态的波动区间、路径压力变化趋势与干扰响应滞后特征。数据上传阶段则依托边缘网关中的本地判别算法,将运行状态初步压缩后编码为指令序列,通过MQTT或低开销UDP协议传输至控制中枢。

在高频状态变动场景中,系统倾向于部署基于特征重叠度的状态判别机制。每一个孪生体都被绑定唯

一状态哈希索引,当物理设备运行参数出现超出预测区间的突变,平台将自动调用历史状态模板,执行快速重校与动态补充过程。这一操作往往嵌套在状态演化图谱识别机制中,通过识别状态路径中断点与偏移率,重构映射路径并向主控制平台回送校正结果。状态重构完成后,将同步更新虚拟模型的运算逻辑与边界判断机制,确保后续反馈与控制指令基于最新状态结构生成。

3.2 通信节点的动态建模与状态反馈

通信节点在运行过程需构建具备响应性、预测性与适应性的数字模型。该建模过程以节点物理结构参数为基础,结合实际运行数据展开迭代训练,适宜采用状态驱动建模策略而非静态属性封装方式^[2]。数据维度通常覆盖节点的通信时延、信号强度、接入频次、缓存使用率与瞬时带宽负荷等指标,在边缘侧同步建立状态参数集与行为映射表,便于节点动态特征归档。建模任务由本地智能单元触发,以状态标识的时间序列特征为输入,在模型中嵌入归一化模块与滑窗预测结构,构建多层状态抽象图。模型训练过程中往往借助自回归算法(AR)与轻量神经网络(GRU-Lite),实现对节点状态变化趋势的拟合与预测区间构建。状态标签被实时绑定至孪生节点索引,平台端结合其波动幅度与稳定性评分,对各通信单元生成分类权重,用于后续调度优先级分配与路径选择参考。

状态反馈机制同步展开,在状态偏移率超过预设浮动门限时,由孪生模型自动触发反馈通道,借助边缘节点中的低功耗通信模组发送高频数据摘要与状态变异指令包^[3]。控制中枢接收到该信息后将结合历史稳定运行段进行相似性比对,并调取行为模式库进行交叉验证,识别该节点是否处于临界负载、干扰波动或短时退化状态。识别完成后,系统生成节点调控建议,如限载运行、路径旁路或临时延迟处理机制,并构建控制建议编号绑定于反馈指令链中。节点完成反馈响应后,本地孪生模型状态需根据回收数据包信息进行补正,并同步更新状态预测路径与参数浮动范围,确保下一周期的状态跟踪具有延展性与适配性。反馈链路并非单一数据回传结构,而是融合实时识别、分类建议与局部调度接口的结构性路径,可嵌入多层级资源监测系统中,为构建高密度接入环境下的通信系统状态闭环管控机制提供必要支撑。通过云边协同、轻量级持续学习,实现业务实时更新、优化计算等需求,根据边缘AI模型监测设备状态并部署模型^[4]。

3.3 多源协同的集成控制策略

在 5G 物联网通信系统中,集成控制策略需适应跨设备、跨协议与跨平台的协同场景。通信网络内部节点状态变化速度快、结构变化频繁,若仅依靠中心式静态调度将导致响应迟滞与资源错配。为构建具备实时响应能力与柔性调度特征的控制机制,系统通常借助数字孪生平台构建多源信息融合通道,形成状态感知、策略生成与控制执行的闭环控制链。策略协同机制以多源数据聚合为起点,边缘设备端实时上传链路状态、节点负载与区域网络热度等信息,经由边缘计算单元压缩编码后进入孪生平台策略融合层。以智慧园区为例,当夜间某区域出现人员异常进入、照明能耗异常升高与设备间门禁开启等复合情况时,平台可自动汇聚门禁记录、视频画面、照明运行参数与现场环境数据,在孪生界面中同步标记异常区域,并触发安防告警、视频联动和人员通知,若在工业场景中发现某生产单元温度升高、振动异常和网络时延抖动同时出现,平台则可将此判断为潜在设备风险,优先推送巡检任务,必要时联动控制系统调整设备运行状态。

在策略生成层,系统引入基于自适应权重分配机制的策略融合算法,按任务紧急度、历史成功率与链路稳定性等因素计算节点可调度值。策略引擎以此为基础,在平台内部构建策略片段集并结合状态阈值触发逻辑排序输出。当前区域内某节点出现负载过高与频段冲突叠加现象时,策略引擎将优先调用“切换频段+临时路径迁移+降载运行”策略组合,打包为轻量控制指令包下发至节点本体。控制响应由执行层承担,各通信单元基于指令包中附带的状态标签与策略编号快速查找本地执行映射表,完成参数调整、链路重构或节点休眠等控制动作。执行过程配合孪生模型的状态反馈模块进行回传,平台据此记录策略执行结果、响应时间与系统抖动变化值,进一步用于策略评分与模型修正^[5]。

3.4 面向安全性的孪生防护体系设计

通信系统在集成运行过程中易暴露出多类安全脆弱点,尤其是在多终端异构接入与边缘节点快速切换场景下,传统基于静态防火墙与加密协议的保护方式已难以应对动态攻击路径与深层入侵行为。数字孪生平台为此类风险防控构建了模拟预警、行为识别与策略联动的虚拟安全防护体系,能够在系统未遭受实质破坏前完成威胁建模与应急策略生成。该体系的基础为状态级安全感知结构,平台借助分布式采集单元在

链路层、传输层与控制层同步布设状态感知点,实时捕捉异常信道扰动、设备接入突变与数据流量偏移信号。每个感知点对应不同维度的行为参数,如链路时延异常梯度、接入指令频次剧增或信道干扰功率波动,通过状态匹配算法生成异常概率标签。

在策略生成阶段,系统以行为模拟引擎为核心构建攻击路径推演模块,结合既往攻击样本库与当前状态特征,构造可能发生的攻击链路径,常见于 DDoS 流量淹没、伪基站劫持、信号欺骗干扰等场景模拟^[6]。模拟引擎采用状态路径重演机制,对节点响应时延、链路阻塞级别与路由节点抖动幅度进行虚拟演练,生成一组应急策略组合方案。策略模块以策略片段为单位构建响应指令队列,预设包括频段切换、流量削减、链路迁移与访问临时冻结等操作手段,由安全执行模块打包为指令集分发至边缘设备。

4 结束语

在 5G 物联网架构持续深化与系统异构性加剧背景下,通信系统集成正面临结构弹性、状态同步与策略响应等多重挑战。数字孪生技术依托其虚实映射、行为预测与模型驱动能力,正在重塑通信系统的运行逻辑与控制结构。其赋能路径不仅限于建模精度与数据反馈,更在于激发通信节点间的协同潜力与平台间的调度韧性。构建虚拟运行空间与物理状态通道之间的高耦合联动机制,有助于增强系统稳定性、提升响应闭环速度与拓展集成边界,为复杂网络体系在泛在感知环境下的智能运行提供结构支撑与技术通路。

参考文献:

- [1] 王健,杨闯,闫宁宁.面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J].电波科学学报,2021,36(03):340-348,385.
- [2] 张创基,陈运胜,孙令真.5G 专网数字孪生技术及在网络管理中的应用[J].智能计算机与应用,2022,12(12):88-92.
- [3] 李文正.数字孪生流域系统架构及关键技术研究[J].中国水利,2022(09):25-29.
- [4] 蔡畅,王军生,刘佳伟.基于 5G 现场网协同的数字孪生架构及通信技术[J].冶金自动化,2023,47(01):35-42.
- [5] 孙滔,周铨,段晓东,等.数字孪生网络(DIN):概念、架构及关键技术[J].自动化学报,2021,47(03):569-582.
- [6] 吴维农,莫婷,赵妍妍,等.5G 电力虚拟专网和数字孪生相结合的系统架构和构建[J].半导体光电,2023,44(05):803-810.

基于 PLC 的水电现地控制单元 硬件架构与软件实现

陈博川

(中国长江电力股份有限公司葛洲坝水利发电厂, 湖北 宜昌 443002)

摘要 现地控制单元(LCU)是水电厂监控系统的核心,直接决定机组运行的稳定性与智能化水平。PLC凭借高抗干扰性、强实时性和模块化扩展优势,成为水电现地控制单元的主流控制器件。本文结合水电厂现场运行需求,系统阐述基于PLC的现地控制单元硬件架构设计、软件程序实现及关键技术优化要点,分析硬件选型、组网架构、逻辑编程和故障处理的核心思路,并通过工程实践验证该架构的实用性。结果表明,该设计可适配水电厂复杂工业环境,实现机组启停、工况调节、故障预警的全流程自动化控制,为水电监控系统升级改造提供技术参考。

关键词 PLC; 水电厂; 现地控制单元; 硬件架构

中图分类号: TV736

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.010

0 引言

水电厂现地控制单元是连接主控与现场设备的关键枢纽。针对传统设备存在的集成度低、实时性差等问题,本文基于可编程逻辑控制器(PLC)设计了一套硬件架构,并开发了配套的控制与通信程序,实现对水轮机、发电机等设备的一体化控制。经工程验证,该系统稳定可靠,可为水电现地控制的标准化和智能化提供可行方案。

1 基于 PLC 的水电现地控制单元整体设计要求

现地控制单元设计需严格遵循水电工业控制行业标准,兼顾实时性、可靠性、扩展性、易维护性四大核心要求:实时性要求毫秒级完成信号采集、数据处理与指令下发,保障关键操作无延时;可靠性要求硬件冗余设计、软件故障自诊断,杜绝单点故障;扩展性要求硬件模块化、软件分层编程,适配不同机组改造升级;易维护性要求硬件标准化接口、软件逻辑清晰,降低现场检修成本。系统需兼容 IEC 61850、Modbus TCP/IP、Profibus-DP 等主流通信协议,实现与电厂主控系统、励磁系统、继电保护装置的无缝通信,确保数据共享与指令协同^[1]。

2 基于 PLC 的水电现地控制单元硬件架构设计

硬件架构采用 PLC 主站、分布式 I/O 从站、冗余组网形式,以西门子 S7-400H 冗余 PLC 为核心,搭配远程 I/O 模块、通信模块、现场测控箱等设备,围绕

核心控制、信号采集、通信交互、现场执行四大功能模块设计,兼顾控制性能与运行可靠性。

2.1 核心控制模块

核心控制模块采用西门子 S7-400H 双机热备 PLC,包含 2 个 CPU417H 冗余主站、冗余电源模块及背板总线。双机热备实现主备 CPU 实时数据同步,故障切换时间小于 10 ms,杜绝核心单点故障。CPU 模块负责逻辑运算、数据处理与指令下发,内置高速运算芯片满足实时性要求,同时支持多协议通信;电源模块输入 AC220V、输出 DC24V,具备过压、过流、短路保护,适应现场复杂供电环境^[2]。

2.2 信号采集与输入输出模块

分为本地 I/O 模块与分布式远程 I/O 模块,适配现场分散测控点布局。本地 I/O 模块直接挂载 PLC 背板总线,选用西门子 SM321/322 数字量模块、SM331/332 模拟量模块,采集屏柜附近关键信号并输出核心控制指令,数字量响应速度 0.1 ms,模拟量采集精度 16 位。分布式远程 I/O 模块采用西门子 ET200M 系列,通过 Profibus-DP 总线与 PLC 主站通信,布置于水轮机层、发电机层等区域,采集温度、压力、油位等现场信号,有效减少电缆敷设量。所有 I/O 模块均具备 2500V 以上光电隔离,抵御电磁干扰,确保信号准确。

2.3 通信模块

采用多协议多接口设计,配置 CP443-1 工业以太网模块、CP441-2 串口模块、Profibus-DP 模块,兼容

作者简介: 陈博川(1991-),男,本科,工程师,研究方向:水电自动化。

IEC 61850 协议，构建现地通信网与上位通信网。现地通信网通过 Profibus-DP 连接远程 I/O 站、调速器、励磁装置，通过 Modbus RTU 连接智能仪表，通过 IEC 61850 GOOSE 网实现保护信号高速传输；上位通信网通过工业以太网连接电厂主控系统，采用 Modbus TCP/IP 实现数据双向传输，支持现地结合远程双重控制。所有通信接口均配置双路链路，避免通信中断^[3]。

2.4 现场测控与执行模块

由现场测控箱与执行设备组成，直接面向现场机组设备。测控箱按布局布置于发电机层、上导、水轮机层等区域，内置远程 I/O 模块、信号隔离器、浪涌保护器，防护等级 IP65，完成现场信号初步采集与隔离；执行设备包括断路器、调速器执行机构、阀门、泵组等，接收 PLC 控制指令完成现场操作，同时通过内置传感器反馈运行状态，形成闭环控制。

2.5 人机交互模块

采用西门子 TP1200 触摸屏作为现地操作终端，与 PLC 通过工业以太网通信，实时显示机组运行参数、设备状态、故障信息，支持手动/自动模式切换、机组启停、参数设置、故障复位等操作，界面简洁直观，满足现场工作人员操作需求^[4]。

3 基于 PLC 的水电现地控制单元软件实现

软件设计采用西门子 STEP 7 V5.6 编程软件，遵循 IEC 61131-3 标准，采用结构化文本 (ST) 与梯形图 (LD) 混合编程，复杂逻辑用 ST 编写，开关量控制用 LD 编写。程序采用分层模块化设计，分为主程序、数据采集模块、控制逻辑模块、通信模块、故障处理模块、人机交互模块，各模块独立编程、相互调用，便于调试与扩展 (见表 1)。

3.1 主程序设计

主程序是软件系统入口，负责程序初始化、模块调度与数据交互，运行流程为：系统上电初始化→硬件自检→通信链路建立→模块参数配置→循环调用子程序→数据上传与指令接收。系统上电后先完成硬件与

通信自检，故障时立即报警；自检通过后进入 100 ms 周期的循环扫描，依次调用各子程序，完成信号采集、逻辑运算与指令下发，实现机组实时控制。

3.2 数据采集模块

数据采集模块负责现场模拟量、数字量信号的采集、处理与有效性判断，为控制逻辑提供可靠数据，分为模拟量与数字量采集子程序。模拟量采集针对转速、电压、温度等信号，经硬件滤波、中值滤波与滑动平均滤波消除干扰，通过标度变换转换为工程物理量，无效数据采用历史有效值替代；数字量采集针对断路器状态、阀门开关等信号，经 10 ms 防抖处理消除触点抖动，连续 3 次采集状态一致方判定为有效。所有有效数据存储于 PLC 实时数据区，实时同步至人机界面与主控系统。

3.3 控制逻辑模块

控制逻辑模块是软件核心，实现机组启停控制、工况调节、辅控设备控制，采用模块化设计，各子程序相互连锁。机组启停控制支持手动/自动模式，自动启动按辅控启动→调速器开阀→机组升速→励磁投运→准同期并网流程执行，自动停机按减负荷→解列→励磁退出→调速器关阀→辅控停止流程执行，故障时立即终止流程并触发保护；工况调节通过 PID 闭环算法实现有功/无功功率精准调节，有功功率调节调速器导叶开度，无功功率调节励磁电流，调节精度 ±0.5%；辅控设备控制根据机组状态自动完成油泵、水泵等设备启停与连锁，如压油槽油位过低时自动启动补油泵，故障时启动备用设备^[5]。

3.4 通信模块

通信模块可实现 PLC 与各设备、系统的双向通信，开发 Modbus TCP/IP、Modbus RTU、Profibus-DP、IEC 61850 GOOSE 等协议的通信子程序，采用数据帧校验与重传机制确保数据准确，接收端校验错误时立即请求重传。模块具备通信链路自诊断功能，链路中断时及时报警并尝试重连，保障通信连续。

表 1 核心软件模块及功能

软件模块	核心功能
主程序	系统初始化、模块调度、循环扫描、数据交互
数据采集模块	模拟量 / 数字量信号采集、滤波、有效性判断
控制逻辑模块	机组启停、工况调节、辅控设备自动化控制
通信模块	多协议通信、数据帧校验、链路故障自诊断
故障处理模块	故障分级诊断、自动处理、故障信息记录与报警
人机交互模块	界面组态、参数设置、状态显示、现场手动操作

3.5 故障处理模块

实现故障自诊断、自报警、自处理,分为设备故障与系统故障处理子程序。设备故障按轻微、一般、严重分级处理:轻微故障仅报警,一般故障报警并启动备用设备,严重故障立即触发紧急停机、解列等保护动作;系统故障针对PLC硬件、I/O模块等自身故障,实现故障模块无扰切换,如I/O模块故障时切换至备用模块。模块同时具备故障记录功能,存储故障类型、位置、时间等信息,存储时间不少于1年,便于故障分析。

3.6 人机交互模块

采用WinCC flexible组态软件设计界面,分为主监控、参数设置、故障报警、手动操作、历史数据五大界面。主监控界面实时显示机组核心参数与设备状态;参数设置界面支持运行参数与保护定值修改,具备权限管理;故障报警界面声光提醒当前故障,提供处理措施;手动操作界面支持设备点动控制,便于调试;历史数据界面可查询参数历史曲线与数据,支持时间与参数类型筛选。

4 关键技术优化与工程实践

4.1 关键技术优化

为提升系统性能与可靠性,针对现场控制难点,从以下三个方面进行优化:

1. 全系统冗余,硬件层面实现PLC、电源、通信的冗余,软件层面实现程序与数据存储冗余,杜绝单点故障。

2. 双重抗干扰,硬件采用光电隔离、浪涌保护、铠装屏蔽电缆,软件采用组合滤波与防抖处理,消除电磁干扰。

3. 实时性优化,采用程序优先级调度与数据分优先级传输,关键程序与数据设置最高优先级,同时优化程序逻辑,缩短循环扫描周期。

4.2 工程实践

将本设计应用于某2×50 MW中型水电厂现地控制单元改造工程,该厂原有系统为传统继电器控制,存在控制精度低、维护成本高等问题。改造工程于2025年3月实施,完成两台机组现地控制单元的硬件搭建与软件调试,随后进行6个月现场试运行。

试运行结果表明:系统运行稳定,硬件无故障,软件无逻辑错误,实现机组全流程自动化控制;功率调节精度达±0.5%,满足设计要求;故障响应及时,模拟机组超速故障时,50 ms内触发紧急停机保护;与

主控系统通信无延迟、无丢包,实现现地与远程双重控制。改造后,现场工作人员减少50%,设备维护成本降低60%,机组年平均运行时间提升至8 760小时,无因现地控制单元故障导致的停机事故,取得良好的经济效益与社会效益,验证了本设计的实用性与稳定性。

5 结论

本文设计的基于PLC的水电现地控制单元,通过PLC主站、分布式I/O从站、冗余组网的硬件架构,结合分层模块化的软件程序,实现了水电机组的自动化、精细化控制,主要结论如下:硬件架构采用全冗余与抗干扰设计,可有效适配水电厂复杂现场环境,杜绝单点故障,提升系统可靠性与环境适应性;分层模块化软件程序实现了数据采集、控制逻辑、故障处理的全流程自动化,逻辑清晰、扩展性强,满足机组全工况控制需求;关键技术优化进一步提升了系统实时性与稳定性,工程实践验证该设计可大幅提升水电厂现地控制智能化水平,降低运行与维护成本。未来,随着水电智能化建设的深入,基于PLC的现地控制单元将向智能化、网络化、一体化方向发展;引入人工智能与大数据技术,增加机组运行状态预测模块,实现故障提前预警;基于IEC 61850标准构建水电厂工业互联网,实现各系统、设备的深度互联与数据共享;融合机组状态监测、设备寿命管理、智能检修功能,打造一体化现地控制体系,进一步提升水电厂智能化运行水平。基于PLC的现地控制单元作为水电自动化系统的核心,其技术升级对推动水电智能化建设具有重要意义,需结合现场需求,不断融入新技术、新方法,为水电厂安全、稳定、高效运行提供更可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 向强铭,张文韬,夏国强,等.安全可信PLC在水电站监控系统中的应用[J].水电站机电技术,2023,46(12):4-6.
- [2] 王健,杨俊杰,刘刚.基于IEC 61850的水电厂主辅控一体化监控系统设计[J].水电能源科学,2022,40(05):186-189.
- [3] 李建辉,张立军,王鹏.自主可控PLC在水电厂现地控制单元改造中的应用[J].水利水电技术,2024,55(03):158-165.
- [4] 赵鑫,孟繁欣,周明.水电厂LCU系统网络安全防护策略研究[J].电测与仪表,2022,59(20):98-104.
- [5] 陈曦,方芳,吴斌.DL/T 578-2021实施下水电厂LCU升级改造关键技术[J].水电站设计,2025,41(01):76-80.

航道浅滩整治中实时动态定位技术对疏浚船作业效率的关键影响分析

雒磊

(四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610047)

摘要 在航道浅滩整治中, 疏浚船作业高度依赖位置控制的精度、稳定性与时效性。实时动态定位技术凭借厘米级定位能力和连续动态跟踪功能, 使疏浚设备在复杂水域条件下保持最佳施工姿态与作业轨迹, 减少偏移、重复疏浚与无效作业, 其应用能提升挖深控制与航槽成形准确性, 优化船机调度效率, 提高整体作业连贯性与施工进度。基于实时定位数据的智能化施工判断进一步强化作业过程可控性, 为浅滩整治提供高效、稳态且可量化的技术支撑, 形成显著效率增益。

关键词 实时动态定位; 疏浚船; 航道浅滩整治; 作业效率; 高精度定位

中图分类号: U617.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.011

0 引言

航道浅滩整治施工对位置控制精确度要求极高, 稍有偏差就可能造成重复挖掘或成槽误差, 影响整体施工效率。高精度定位技术迅猛发展, 实时动态定位方式已在疏浚装备落地应用, 作业轨迹与施工断面控制更可靠, 在水流变化、视距受限、船体漂移等挑战下, 实时动态定位技术为复杂水域提供技术支撑, 疏浚作业可在连续监测与动态修正中保持高效状态。分析其对作业效率的实际影响, 可揭示浅滩整治施工效率提升的核心动力, 为后续施工管理与技术选择提供思路。

1 疏浚作业效率受限的核心矛盾

在航道浅滩整治中, 疏浚船作业效率受限的核心在于水域环境动态多变与施工对高精度定位的刚性需求之间的矛盾。浅滩区域水深小、流速突变、回淤频繁、地形复杂, 极易引发船体横移、纵漂和偏航, 导致挖掘轨迹偏离设计断面。疏浚作业依赖船位、桩位与铲斗位置的精准同步, 一旦定位精度不足, 便会造成成槽宽度超差、挖深失控, 返工量增加, 有效作业时间被严重压缩。水流扰动与潮汐影响甚至短时间内改变船体姿态, 传统定位手段难以实时修正偏移, 形成工作量大、有效掘进率低、作业连续性受阻的矛盾局面, 浅滩疏浚施工缺乏稳定动态监控支撑, 单次作业无法精准覆盖设计区域, 进度计划难以保证, 作业效率瓶颈由此显现。

在实际施工组织中, 船机协同不稳定也是效率受

限的重要因素, 疏浚船定位、挖掘和排运系统需在动态水域保持高度协同, 定位信号滞后或漂移幅度过大, 挖泥头、吸管或耙头偏离既定轨迹, 土方量计算与作业剖面控制失去准确依据, 调度层面缺乏连续高精度位置信息, 船舶推进方向、船头角度修正与导线保持出现延迟, 影响挖深控制与边坡成形^[1]。浅滩区域空间狭窄, 船舶操控余量有限, 定位偏差造成的轨迹误差被放大, 挖掘路径曲折, 设备行程时间增加, 耙吸效率显著下降, 作业轨迹与水下地形无法稳定匹配, 疏浚船需更频繁调整作业姿态, 油耗增加、机械负荷上升、连续作业时长被压缩, 整体施工组织呈现高投入却难以形成高产出的矛盾状态。

浅滩整治目标是形成稳定、规则且满足航运通行要求的通航断面, 任务对施工精度的刚性要求, 使定位误差与效率矛盾进一步突出。人工测量或低频定位方式无法覆盖连续施工周期, 难以在复杂水况提供实时反馈, 挖深控制出现跳变, 航槽成形度离散度加大, 施工船舶往返次数增多, 泥浆输送路径不稳定, 单位时间内有效疏浚量下降。船舶尺寸增大、施工节奏加快, 高精度实时化船位数据成为保障效率的核心基础, 传统定位系统无法满足厘米级轨迹控制需求, 形成浅滩整治最突出的技术矛盾, 疏浚作业越依赖精密控制, 定位滞后和误差带来的效率损失越明显, 施工进度、质量稳定性与设备利用率在定位瓶颈下均受抑制, 最终疏浚效率受限的核心问题愈趋集中。

作者简介: 雒磊(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 航道整治与疏浚工程。

2 浅滩施工定位偏差的关键成因

浅滩疏浚施工中的定位偏差多源于水域环境与定位系统在动态条件下的多重扰动,浅滩区域水深变化敏感,底床受潮汐、水流剪切和局部回旋流影响明显,疏浚船遇微小水动力差异即产生横摆、纵移或尾流偏转,船体姿态难以保持稳定,常规定位方式在复杂水动力场中难以实时捕捉船体漂移量,定位信号易受反射、水汽吸收及岸基遮挡影响出现跳变^[2]。高频施工动作造成船体微振,叠加水流扰动,船位、姿态和作业点间出现时间差,定位误差在动态过程中不断放大,这些环境性因素在浅滩内格外突出,施工轨迹难以精准匹配设计断面,偏差随之累积。

在设备系统层面,定位偏差与船载传感器、通信链路和数据融合机制的稳定性密切相关,部分疏浚船惯性测量单元精度不足,姿态角更新速率偏低,无法在高动态环境下提供连续、低噪声的姿态数据,动态坐标系出现微小漂移,差分信号中断、RTK基准误差、船载天线安装误差等因素使坐标解算出现时间延迟,影响铲斗、吸头或耙头的空间位置计算。船舶推进装置在小水深条件下易受涡流与反推干扰,推进力方向难以保持恒定,轨迹修正执行效果与定位系统给出的修正量出现偏差,传感器间缺乏高精度标定,多源数据融合不一致,作业点漂移,成槽线性难以维持稳定状态。

施工组织因素也是定位偏差的重要来源,疏浚流程包含频繁转向、重新定线、调头作业等动作,作业路径连续性易在每次姿态切换中受扰动,定位系统对施工节奏变化反应迟缓,路径切换时出现定位空档,作业点随之偏移,浅滩空间有限,船舶操作余量较小,操控策略未依托实时定位数据动态调整,推进力补偿不足或过度,偏航角和船艏指向与规划线不一致。浅滩整治多伴随连续多时段施工,夜间光照不足、水面干扰增强、能见度下降,人工校核难以提供有效参考,定位误差进一步放大,多因素交叠,浅滩区域定位偏差呈现环境扰动与系统性能共存、动态变化与操作方式耦合的复杂特征,成为影响疏浚作业精度与效率的关键瓶颈。

3 实时动态定位技术的效率强化机制

实时动态定位技术在浅滩疏浚作业的效率强化,依托高精度坐标解算与连续动态监测提升施工轨迹控制能力,厘米级定位精度让船位、姿态、挖掘点保持稳定耦合,疏浚船受水流扰动、浅水反射波和底床变

化影响时仍能维持既定作业线,高频率动态更新机制将船体横漂、纵移和偏航角变化以毫秒级周期反馈控制系统,轨迹修正不再依赖人工判断,避免延迟补偿引发的挖深波动^[3]。北斗RTK、GNSS组合定位与惯性导航融合技术在浅滩复杂水域增强定位稳定性,作业点空间连续性得到保障,减少重复挖掘与无效航行,形成效率增益。

作业控制系统内,实时动态定位技术依托多传感器融合实现作业姿态动态优化,船载IMU、高程测量仪、索位传感器与定位天线形成实时联动,构筑完整空间信息链,铲斗或吸头位置可在三维坐标精确呈现,作业控制界面实时显示规划断面、当前作业点、轨迹偏移量与挖深误差,船舶推进方向与桨角调节由定位数据驱动,实现连续状态自动纠偏。潮流变化、底床扰动或施工动作引发的微小姿态差异,在高精度定位支撑下可快速修正,挖掘断面与设计线保持一致,动态定位数据可实时计算船舶推进力补偿需求,推进器输出更契合水动力变化,缩短姿态调整时间,提高单循环作业效率。

在施工组织调度中,实时动态定位应用为疏浚船群提供精准航迹管理能力,船舶间空间分布、航行路径、装卸节奏与耙吸覆盖范围具备可量化依据,连续定位数据支持调度系统预测船位变化趋势,提前规划航迹交叉点与施工重叠区,减少航行等待与重复作业,作业过程中泥浆输送线路、回归航道与耙吸路径可依实时数据优化,单位时间有效疏浚量得到提升。浅滩区域受限空间内,动态定位可通过精确控制船舶运动范围,让施工活动更集中目标区,提高作业时间利用率,定位数据记录的施工轨迹可作为质量控制与偏差分析依据,每次作业覆盖范围与深度达成可验证状态,为施工连续性与高效率提供稳定支撑。

4 基于实时定位的数据化施工优化路径

实时定位系统在浅滩疏浚施工中的数据化优化路径,依托连续高精度空间数据采集,实现施工过程从经验驱动到量化控制的转变。定位数据与地形测绘、作业断面设计和土方模型结合,设计线、目标槽底和边坡控制参数在船载终端实时呈现,作业点偏移、挖深差值与轨迹变化清晰可视,动态数据流在作业中形成闭环,疏浚船依实时偏差自动修正推进角度和挖掘姿态,减少人工判断滞后^[4]。定位点云与施工轨迹叠加,指挥系统可判断覆盖率与未作业区域分布,避免返工和漏挖,让浅滩整治每一条疏浚路径更具针对性和完整性,形成实时数据校正施工行为的技术框架。

在作业控制策略中,实时动态定位技术与多源传感信息融合,构建适配浅滩特征的动态模型,船位数据与潮流速度、底床变形趋势和挖掘负载同步处理,控制系统可预测船体漂移方向与挖深变化趋势,自动调整推进机角度、导线方向与耙臂下压量,姿态控制更贴近设计断面,泥浆输送路径、耙吸幅宽和连续耙线布置依托定位数据自动优化,作业轨迹间距保持稳定,提高覆盖率。数据化施工对耙吸阻力、挖深波动和推进功率实时分析,系统识别低效区段,通过规划新轨迹或修改作业角度恢复效率,动态地形模型实时更新后提供连续水下变化信息,施工计划不再依赖间断测量,助力保持浅滩疏浚连续性。

在调度与管理层面,实时定位系统形成的施工数据作为优化资源配置的核心依据,疏浚船群航迹分布、耙吸时间窗、运泥船对接频次和返航节奏依托定位数据动态调控,整个施工链条形成协调时间序列,高精度轨迹记录为施工偏差分析提供数据基础,管理系统可识别效率下降时段与作业区域,调整作业顺序或重新分配设备。实时数据构建可回溯施工数据库,每一段浅滩整治过程具备坐标化、连续化记录能力,便于开展质量核查与覆盖率分析,施工组织者依定位数据生成多维度作业报告,判断航槽成形一致性、边坡稳定性和挖深均匀度,施工质量与效率在数据化体系中同步提升。

5 航道浅滩整治中的效率提升总结

航道浅滩整治作业的效率提升,由高精度定位支撑的轨迹控制优化、作业连续性强化与施工组织协同提升共同推动,浅滩区域水动力条件复杂,底床变化频繁,疏浚船受横漂与偏航影响易偏离设计线,实时动态定位技术提供持续稳定空间参照,让船体姿态与作业点保持稳定关联,厘米级定位精度将挖深控制、作业轨迹规划与船位保持融为一体,疏浚路径更贴近设计剖面^[5]。定位更新频率提高,船舶在水流扰动、回淤增速、浅水波反射条件下依旧维持既定作业走向,挖掘剖面趋于稳定,减少偏差累积引发的返工,有效疏浚时间得到保障,形成效率提升的基础条件。

在耙吸、挖泥和输送环节中,实时定位系统形成的动态数据链推动施工过程精细控制,作业点坐标与地形模型实时匹配,控制系统快速识别挖掘不足或超深位置,及时修正作业姿态,疏浚剖面保持连续性,三维空间监测使耙吸轨迹间距调整更精准,在覆盖率提升的同时减少重复作业带来的能耗和工时浪费。推

进系统与定位数据联动,船舶在浅滩狭窄空间内航行稳定性增强,轨迹切换和路径重建更顺畅,缩短姿态调整时间,多源数据融合带来的姿态预测能力进一步减少突发漂移造成的轨迹偏移,连续耙线与挖沟路径呈现更高一致性。

在施工组织与管理层面,定位数据构成的时空数据库强化疏浚船群协同能力,实现施工链条更高程度匹配,动态航迹信息支撑调度系统绘制清晰作业区域分布图,判断疏浚船间距、覆盖范围和作业深度差异,减少路径重叠与航线冲突,泥浆运输调度依托实时数据,运泥船到位时间更精准,装卸衔接顺畅,降低疏浚船等待时间。轨迹记录与施工过程的坐标化管理,为质量检查和覆盖率分析提供依据,识别效率下降环节并针对性调整,定位数据在施工链中深度应用,浅滩整治呈现作业行为可控、施工过程可量化、项目管理可追溯的特点,效率提升在组织、控制和执行层面形成协同效应,为高效施工奠定稳固基础。

6 结束语

实时动态定位技术在浅滩疏浚施工中的应用,可强化施工精度、作业连续性与船机协同能力,为航道整治构建高效稳定的作业体系。高精度轨迹控制、动态数据监测与多源融合带来的姿态优化,使疏浚路径贴合设计要求,减少返工与能耗,提升有效作业量。数据化施工在调度、质量核查和覆盖率管理的运用,赋予施工过程可控性与可验证性,使浅滩整治呈现高效、稳态、可追溯的技术特征,为航道治理提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] 沈华. 集装箱码头自动化起重机运动及作业效率计算方法[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(05): 923-928.
- [2] 胡江, 李建树, 李耕, 等. 山区航道浅滩整治对草鱼溯河行为的影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2026, 45(01): 39-44.
- [3] 张家墅, 余龙, 黄琼. 疏浚船溢流管道环保发电装置可行性研究[J]. 船舶工程, 2025, 47(02): 97-103.
- [4] 黄龙, 姬兴禹. 基于北斗的疏浚船舶智慧监管平台构建及应用[J]. 中国水运, 2024(24): 36-38.
- [5] 和悦, 陈界仁, 屈一晗. 饶河双港—褚溪河口航道整治后浅滩演变及最低通航水位变化[J]. 水运工程, 2023(12): 100-103, 111.

工业以太网 EtherCAT 在高速高精度运动控制系统中的实时性提升效果分析

陈晓雯

(四川烟叶复烤有限责任公司会东复烤厂, 四川 凉山 615200)

摘要 随着智能制造与高端装备的发展, 高速高精运动控制系统对通信实时性和同步精度提出了更高要求。EtherCAT 作为一种基于以太网的现场总线技术, 凭借其独特的报文处理机制和确定性通信特性, 在多轴高速高精控制领域得到了广泛应用。本文围绕高速高精运动控制系统的实时性瓶颈, 系统分析了 EtherCAT 技术特性与控制系统实时性需求之间的内在关系, 在此基础上从通信层和同步与控制层两个维度提出针对性的实时性优化方法。通过构建实验平台并开展对比测试, 对优化方案在通信延迟、同步误差及运动控制性能方面的提升效果进行了验证。研究表明, 所提出的实时性优化策略能够有效改善系统动态响应能力和控制精度, 为 EtherCAT 在高端运动控制系统中的工程应用提供参考。

关键词 EtherCAT; 工业以太网; 高速高精运动控制; 实时性优化; 多轴同步

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.012

0 引言

高速高精运动控制系统在数控机床、半导体生产、工业机器人以及精密组装中得到广泛应用, 其主要特性是快速响应、高定位精度以及多个轴之间的协调控制。此类系统中控制器性能的好坏不但取决于算法本身, 而且对底层通信网络的实时性和确定性有着极高的要求。传统的现场总线技术已经不能满足新一代设备的宽频带、同步能力和可扩充性的需求。EtherCAT 技术是以太网方法深层次优化之后的一种新的实时控制方案。但是, 对于高速高精度的场合来说, 通信延时、抖动和同步误差等问题还可能影响整个系统的性能。针对这些问题, 本文围绕 EtherCAT 在运动控制系统中的实时性优化进行了深入研究, 以期为提高其实用价值提供借鉴。

1 EtherCAT 技术及高速高精运动控制系统的实时性需求分析

1.1 EtherCAT 工业以太网的技术原理与通信特性

EtherCAT 是由 Beckhoff 公司提出的一种高效的工业以太网技术, 它的基本理念是对传统以太网通信体制加以改造, 应用于严格的实时控制场合。它不同于基于 TCP/IP 或 UDP 工业以太网协议采用的方式, 而是以主站集中调度、从站依次处理的方法来进行通信。

主站周期性发送一个以太网帧, 帧在环网上按物理顺序经过各个从站, 从站在数据帧经过的过程中直接完成数据的读写工作, 不需要先接收再转发。即所谓的“on-the-fly”处理方法, 大大减小了网络延时并减少协议处理造成的时延抖动。

在通信性能上, EtherCAT 可以实现非常小的通信周期以及较高的带宽利用率。在现场实际应用中, 当以一百兆以太网的物理层条件为前提时可以实现高达 90% 的有效数据传输带宽利用率; 一个通信周期可以达到百微秒级别。EtherCAT 使用的是主站集中时钟模式对网络内的所有从站进行精准的时间同步, 为多轴联动打下基础, 相比于 CANopen 等传统现场总线来讲, EtherCAT 在节点数的增加以及通信速度以及同步精度上有明显的提高^[1]。

EtherCAT 在系统结构扩展性及网络稳定性上也有一定优势。EtherCAT 支持线型、树型或环型等不同类型的网络连接方式, 在实际工程项目布线时比较方便。另外, 由于对通信报文进行集中控制, 所以有利于监控整个网络工作情况并及时发现出现的问题以加快维修速度。而在一些复杂的工业场合下, 这就可以大大增强通信性能, 从而保障了高速高精度运动控制系统正常工作。

作者简介: 陈晓雯 (1977-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: PLC 与变频器控制、工业以太网通信。

1.2 高速高精运动控制系统的实时性与同步性要求

高速高精运动控制系统性能指标主要反映在其动态响应速度、位置与速度控制精度及多轴同步协调性方面,在该类系统中,控制系统周期一般为毫秒乃至亚毫秒范围内,通信系统必须在严格的时限要求下完成控制命令的发出和检测数据的获取。过大的传输时延或者时延抖动都会造成控制环路内等效采样周期不稳定,进而致使跟踪误差变大乃至系统失稳。

同步性也是高速高精运动控制的又一个重要指标。对于多轴系统而言,在做插补运动或者协同轨迹的时候,各个执行轴之间的时间误差会直接影响到轨迹的平滑度及空间精度。实验与现场测试发现轴间的同步误差一旦超过几十微秒就会在高速下产生可见轨迹偏离和机械振动等问题。特别是在电子凸轮、龙门架、并联机构等应用场景中同步精度已经成为影响系统性能的关键因素^[2]。

2 基于 EtherCAT 的高速高精运动控制系统实时性优化方法

2.1 通信层实时性优化策略

高速高效传动系统中的通信层实时性能直接影响命令以及反馈信息传输速度。对于 EtherCAT 网络通信层优化,首先要考虑的是网络拓扑和通信周期的设计。通过实际项目发现线型拓扑结构在网络节点数目较大的情况下会导致累积传播延时较长,而分支数较少的树形网络能够加快关键控制线路通信速度。文中提出的方法是根据从站分布的功能分区,把需要高实时性的伺服驱动节点都安排到离主机最近的位置,这样关键控制轴的通信延时可以减少约 15%。

通信周期配置也是实时性的一个重要因素。太大的通信周期会制约控制系统的快速跟踪性能,太小的周期又会增大主站压力以及产生资源冲突。通过将控制周期与通信周期进行整合规划,将 EtherCAT 通信周期设置为控制周期的整数分频,则可以使得数据更新同控制运算保持同步节拍,显著减少周期性抖动情况的发生。实验证明,在 1 kHz 的控制频率下,适当搭配好通信周期就可以把周期性抖动抑制于 $\pm 2 \mu\text{s}$ 的范围内。

报文的内容以及长短都会对实时性产生较大影响,在保证控制的同时减少不必要的过程数据的传输,不在同一帧内掺杂低级别的诊断信息等可以降低帧处理的时间;简化过程数据对象映射减少单帧报文长度约 20%,通信链路上的负荷大幅减轻。EtherCAT 主站的任务调度策略的优化也起到了重要的作用。把 EtherCAT 主站任务作为实时优先级,不再和其他非实时任务争夺 CPU 资源,通信延时的确定性有了明显的提升^[3]。

在实际工程项目中,还需根据网络负载情况对通信资源进行检测,通过对各个从站的数据刷新时间以及带宽占用情况进行统计分析,找到通信存在的问题进而对其进行改进。在此过程中,部署网络监控软件可以在一定程度上实现对通信帧丢失率、时延分布、带宽等进行实时监测以供参考。经过长时间的实验验证,在以上方法的共同作用下,通信网络的鲁棒性和实时确定性得到了很大的改善,从而有利于提高高速高精度运动控制系统的工作效率。

2.2 同步与控制层实时性提升措施

针对 EtherCAT 网络,在同步控制层面的优化主要是在充分利用其分布式时钟的基础上,与运动控制算法相结合。EtherCAT 分布式时钟系统采用网络中选择参考时钟的方法来进行纳秒级的时间对齐,能够提供用于多轴同步的时间参考。对于工程而言,周期调整从站时钟误差可将轴间时间偏差稳定维持在 $1 \mu\text{s}$ 以下,为精确度极高的协同动作提供了先决条件。

针对控制层的设计,对同步触发机制进行优化可继续提高系统的实时性能。将控制命令下达、采集触发以及驱动器刷新等环节与分布式时钟同步事件关联起来,防止由于软件层面的调用不确定性造成的延时。在多轴联动插补上,使用带时间戳的方式进行插补操作,在一阶逻辑时刻让各个轴同时进行位置刷新的操作,从而解决了高速情况下轨迹同步的问题。

控制器算法及通信周期联合优化亦不容小觑,在高速、高精度场合下控制器的算法运算量大,而且通信时隙分配不合理易造成计算延时挤占通信的时间。通过算法运行步骤优化并提前部分运算至上一周期内完结,使得控制输出与通信调度呈流水线形式。实验测试表明该种方式能降低每个周期的整体延迟大约 12%,系统输出更为平稳。

为了检验优化效果,在多轴伺服系统上增加了实时性的监控手段,对其进行同步错误、控制延时以及动作抖动进行在线的统计数据,相关数据可以作为后期工程调校的量化参考,同时也对于实时性优化措施是否切实有效起到了一定客观的佐证作用。保持长期连续运行,同步和控制层实时性优化对系统整体可靠性的影响同样要重视,测试系统连续运行时长不低于 72 h,全程覆盖实验环节,优化后的系统运行在高频启停、高速插补工况时,未出现通信超时或同步失锁现象,控制周期的波动区间显著收窄,同步误差和控制延时的统计分布逐步稳定,说明系统应对负载变化和外界扰动的适应能力有所提升。从工程应用层面考量,该优化方案不仅能提升瞬态控制性能,也能为高

速高精运动控制系统长期稳定运行提供技术支撑, 适合大范围工程推广^[4]。

3 实时性优化方案的工程应用与效果分析

3.1 系统架构设计与实验平台构建

为了检验本文提出的实时性优化方案在工程中是否具有应用价值, 设计了一个基于 EtherCAT 实时以太网协议的高速高精度运动控制实验平台, 整个系统的硬件结构包括上位机、EtherCAT 主站卡、多轴伺服驱动模块和高分辨率编码器。主站端安装有实时操作系统, 其控制周期设置为 1 ms, 并且通信周期与控制周期同步配置。实验平台总共配置了六个伺服轴, 其中包含线性轴和回转轴两类典型的运动轴, 能够仿真复杂设备的实际工作环境。

而针对硬件设置上则是选择带有分布式脉冲功能的伺服驱动器以及相应的编码器并实现其时间同步; 网络架构使用改良的树形结构, 核心的运动轴位于主要的通信线路之中, 次要的运动轴由旁支连接, 减少主要线路上的时间延迟。该系统在未经调整及已经调整的两种不同状态下进行测试工作, 以此来建立对照实验环境。

表 1 EtherCAT 实时性优化前后高速高精运动控制系统关键性能指标对比

指标类别	未优化系统	优化后系统	改善幅度	测试条件
平均通信延迟 (μs)	210	172	18.10%	1 kHz 控制周期
周期抖动峰值 (μs)	± 6.5	± 2.1	—	恒速运行
轴间同步误差 (μs)	4.8	0.9	—	六轴联动
最大跟踪误差 (μm)	12.4	7.6	38.70%	高速插补
系统稳定运行时间 (h)	72	120	—	连续运行

就工程应用而言, 实时性的改善不仅提高了控制精度, 并且提升了系统的长时间稳定运行能力, 在连续的运行测试过程中没有发生通信超时及同步丢失的情况, 具备良好的工程实用性。由此可见, 采取合理的方式对通信、控制系统进行协同优化可以使得 EtherCAT 更加适用于高速高精运动控制应用场合。

4 结论

本文基于高速高精运动控制系统对实时性以及同步方面的要求, 对 EtherCAT 工业以太网进行实时性优化研究。针对 EtherCAT 通信特点及控制系统的需要, 提出了一种以通信层、同步与控制层为基础的综合优化方式, 在实验平台上实施了工程验证。结果显示: 基于本文提出的优化方案可以有效地减少通信延时与抖动现象, 使得多轴同步更加精确, 运动控制更加优秀, 具有较强的工程实用性。结论为: EtherCAT 技术在高

在试验期间, 使用高分辨率的时间分析模块测量了通信延时、周期偏移以及各轴间的同步误差等性能参数; 并且在不同的负载及速度情况下执行了多个轴联动插补运动来考查系统的实时特性。为了提高测试数据的准确性, 对于每组实验都要重复做若干次并对其数据进行统计处理, 尽量避免随机误差的存在, 同时结合均值与离散度指标对测试结果的稳定性进行综合评估。

3.2 实时性与控制性能测试结果分析

实验结果显示, 对 EtherCAT 实时性进行优化后, 在高速、高精度运动控制的应用背景下, EtherCAT 网络的性能有了较大的提高。通信延时平均值相较未经优化的状态减少了约 18%, 周期抖动也大幅减小, 多个轴之间的同步误差也能够保持在一个比较低的程度上^[5]。针对高速插补运动轨迹条件下, EtherCAT 运动控制测试表明系统的位置跟随误差及速度偏差都有所减少, 轨迹曲线更为流畅。

表 1 列出了某些重要的性能对比值来具体说明优化程度。表格中的数据源于实验环境反复测量的数据汇总, 不同于文中所列举的分析性能指标项。

端装备中的应用为相关研究提供了实践基础, 对于提高整个工业控制系统的性能有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 胡召阳. 工业以太网在煤矿自动化监控系统中的应用研究 [J]. 煤炭新视界, 2025(02):10-12.
- [2] 蔡杰. 基于 433 MHz 无线和工业以太网的能耗监测平台设计 [J]. 数字技术与应用, 2025, 43(11):174-176.
- [3] 王志远, 杨明川, 游祖南, 等. 基于工业以太网的车间自动拧紧设备数字化改造 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(19):170-174.
- [4] 樊帅, 蒋毅, 江晨松, 等. 基于 EtherCAT 的嵌入式多核电火花小孔机床数控系统研究 [J]. 电加工与模具, 2025(02):26-31.
- [5] 杨鸣, 刘远正. 基于工业以太网的轮胎成型机变频器控制方法 [J]. 橡塑技术与装备, 2025, 51(04):69-72.

BIM 与三维激光扫描技术融合的水利工程施工质量数字孪生全周期检测方法

湛晓颖¹, 赵中亚¹, 党安华^{2*}

(1. 山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东禹科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 水利工程施工质量直接影响到工程的安全稳定运行和使用年限, 传统的检测方法存在着效率低、精度差、数据割裂等缺点, 无法满足现代化水利工程精细化、智能化的质量控制要求。针对上述问题, 可采取建筑信息模型 (BIM) 与三维激光扫描技术相结合的水利工程施工质量数字孪生检测方法。本文首先梳理 BIM、三维激光扫描和数字孪生的相关理论和技术基础, 确定各个技术在水利工程质量检测中所用的方法; 其次, 创建融合二者的技术体系, 确定检测指标体系、数据融合机制、搭建并完善数字孪生检测模型; 再次, 以工程实例为背景进行场景设置, 并展开实际操作来检验该方法的检测准确性和使用效果; 最后, 对研究结果以及其应用价值进行总结, 指出未来的改进方向。结果表明, 该方法可以实现水利工程施工质量的实时、精准、全面检测, 提高质量管控的数字化和智能化水平, 为水利工程施工质量检测提供新的技术途径和理论依据。

关键词 BIM 技术; 三维激光扫描; 水利工程; 施工质量检测; 数字孪生

中图分类号: TV51; P234.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.013

0 引言

水利工程是关系到民生保障和生态安全的基础建设工程, 其施工质量直接影响到工程的运行安全性、稳定性以及耐久性。施工质量检测是保证工程质量的关键步骤。传统的水利工程施工质量检测大多依靠人工操作和常规仪器测量, 存在检测效率低、劳动强度大、数据主观性强、检测范围小等缺点, 不能满足大型、复杂的水利工程对精细化质量控制的要求, 也不能实现施工过程中质量隐患的实时预警和动态管控。随着数字化、智能化技术在工程领域迅速发展, BIM 技术、三维激光扫描技术、数字孪生技术开始结合使用, 为水利工程施工质量检测提供了新的途径。BIM 技术依靠可视化、参数化、协同化的特性, 可以完成水利工程全生命周期的数字化建模和信息管理; 三维激光扫描技术能迅速、准确地获得施工现场的三维空间数据, 为质量检测提供客观、真实的依据; 数字孪生技术可以把物理工程和虚拟模型进行实时映射, 达到施工质量的动态模拟、实时检测和精准控制的目的。因此, 本文以融合 BIM 和三维激光扫描技术的水利工程施工

质量数字孪生检测法为核心, 建立完整的检测体系并进行应用验证, 旨在弥补传统检测方法的不足, 促进水利工程施工质量检测由传统的数字化、人工化向智能化、数字化方向发展, 为水利工程施工质量控制提供技术支持。

1 相关理论与技术基础

1.1 BIM 技术核心特性及在水利工程中的应用

BIM 技术即建筑信息模型技术, 是用数字方式对建筑物进行描述的一种新的工程管理技术, 其主要特点有可视化、参数化、协同化和全生命周期性。可视化特性打破传统的二维图纸的局限, 可以把水利工程的结构、构件、施工流程等用三维立体模型的形式直观地表现出来, 使人们清楚地了解工程的各个部分以及它们之间的空间位置; 参数化特性可以对模型中的构件进行参数化的定义和关联, 在一个构件参数发生变化时, 关联构件也会自动更新, 从而提高建模速度和模型精度; 协同化功能可以让多个专业的人员在同一个模型平台上共享数据并开展合作, 有效地解决传统工程中信息分割、沟通不畅等问题; 全生命周期性可

作者简介: 湛晓颖 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。

*通信作者: 党安华 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。E-mail: danganhua@163.com

以使从工程的设计、施工、运维到最后的报废全过程的信息得到有效的管理,给工程各阶段的决策提供数据支持。

1.2 三维激光扫描技术原理及数据处理流程

三维激光扫描技术具有扫描速度快、测量精度高、非接触式测量、数据获取全面等优点,不需要接触被测物体就可以得到该物体的全部三维空间信息,适合于复杂、危险环境下水利工程施工质量检测。三维激光扫描技术的数据处理流程由三个部分组成,即数据采集、数据预处理和数据后处理。数据采集阶段用激光扫描设备对水利工程施工区进行全面扫描,得到原始三维点云数据;数据预处理阶段是对原始点云数据做去噪、滤波、对齐等工作,去掉多余的点云和噪声点云,统一数据坐标系,提高点云数据的质量;数据后处理阶段对点云数据进行分割、提取、建模等处理,把点云数据变成可以用于质量检测的三维模型或者特征参数,为后续数字孪生检测提供数据支持。

1.3 数字孪生技术在工程质量检测中的构建逻辑

在工程质量检测领域,数字孪生技术的创建过程主要是从物理实体层、虚拟模型层、数据链路层和服务应用层这四个部分展开的。物理实体层是数字孪生检测的基础,主要是指水利工程施工实体以及与其配套的检测设备,负责采集施工过程中各种质量数据和运行状态数据;虚拟模型层是对物理实体的数字化映射,用BIM技术和三维激光扫描技术创建起来的,可以准确地复现出物理实体的结构特征、尺寸参数及运行状态,从而对物理实体进行可视化的模拟;数据链路层是连接物理实体层和虚拟模型层的关键部分,它把物理实体产生的各种数据及时地传送给虚拟模型层,又把虚拟模型层模拟出来的结果同控制指令一起送还给物理实体层,使数据能双向交流并实时更新;服务应用层是数字孪生检测的目标,依靠虚拟模型和实时的数据,来完成施工质量的实时检测、隐患预知、结果剖析等工作,给工程质量治理提供决定性的依据。

2 融合BIM与三维激光扫描技术的数字孪生检测体系构建

2.1 水利工程施工质量检测指标体系确立

根据水利工程施工实际情况,检测指标体系主要由结构几何参数检测指标、结构外观质量检测指标和结构性能检测指标三大部分组成。结构几何参数检测指标主要用来检测水利工程结构尺寸精度、位置偏差、平整度、垂直度等关键参数,是保证工程结构稳定和安全的因素;结构外观质量检测指标主要是检测

结构表面的裂缝、蜂窝、麻面、破损等外观缺陷,防止外观缺陷对结构耐久性和整体性造成影响;结构性检测指标主要是检测结构的强度、刚度、抗渗性、抗冻性等主要性能,以保证工程结构能满足设计要求并达到运行目的^[1]。

2.2 BIM与三维激光扫描数据融合机制设计

根据融合机制可以分为数据坐标对齐、数据互补融合和数据误差修正这三个部分。在数据坐标对齐过程中,由于BIM模型和三维激光扫描点云数据使用的坐标系不同,需要使用坐标转换技术把两者都统一到同一个坐标系上,保证数据的一致性,坐标对齐主要用坐标平移、旋转、缩放等方法,配合特征点匹配技术,使二者的精确对齐。在数据互补融合环节,BIM模型的数据主要是指工程结构的设计参数、构件信息、施工流程等结构化数据,三维激光扫描数据主要是指施工实体的三维空间信息、外观缺陷等非结构化数据,经过数据融合技术把两种不同的数据加以综合,使设计数据同实际施工数据达到对比分析的目的,从而精确地找出施工质量存在的问题。

2.3 数字孪生检测模型搭建与优化路径

数字孪生检测模型的搭建是实现水利工程施工质量数字孪生检测的关键载体。它的搭建要以BIM技术和三维激光扫描技术为依托,按照数字孪生建立模型的逻辑,把物理实体和虚拟模型进行实时映射并双向互动^[2]。模型建立分为三步:第一步是利用BIM技术创建水利工程的设计三维模型,并补充完善模型的参数信息、构件关联关系和施工流程信息,使模型可以准确地再现工程设计方案;第二步是用三维激光扫描技术获取水利工程施工实体的实时点云数据,经过数据预处理和数据融合技术把点云数据和BIM设计模型融合起来,得到包含实际施工数据的虚拟孪生模型,达到设计模型与实际施工实体的精确对比的目的;第三步是集成物联网、人工智能等技术,在虚拟模型上建立起数据采集、传输、分析和反馈的闭环系统,从而对物理实体实施实时监控并动态更新。

3 水利工程施工质量数字孪生检测应用与验证

3.1 工程实例选取及检测场景设定

为了检验融合BIM和三维激光扫描的数字孪生检测方法的可行性和有效性,选择典型的水利工程进行应用验证^[3]。一般来说,常规的水利枢纽工程包括主体结构施工、附属设施施工等各个部分,施工工艺繁杂,质量控制难度大,传统的检测方法不能满足精细化控制的要求,更适合用数字孪生检测的方法来开展质量

检测工作。根据工程的施工特点和质量控制要求,确定三个主要检测场景,即主体结构几何参数检测场景、主体结构外观质量检测场景和附属设施施工质量检测场景。主体结构几何参数检测场景主要是对工程主体结构尺寸精度、位置偏差、平整度等重要参数进行实时检测,重点是结构关键部位施工精度的控制;主体结构外观质量检测场景主要是对主体结构表面的裂缝、破损、蜂窝等外观缺陷进行自动识别和检测,及时发现施工过程中出现的外观质量问题;附属设施施工质量检测场景主要是对工程附属设施安装精度、结构连接质量等进行检测,保证附属设施能与主体结构共同工作,满足工程运行需要。

3.2 数字孪生检测方法实操步骤实施

根据设定的检测场景,数字孪生检测的方法操作步骤主要有五个部分,保证检测工作的有序、高效进行^[4]。第一,做好前期工作,组建专业的检测队伍,确定各个成员的职责,调试 BIM 建模软件、三维激光扫描设备、数据处理软件等相关的设备和软件,保证设备和软件正常工作,并收集工程设计图纸、施工方案等相关资料,根据 BIM 技术建立工程设计三维模型,补充模型参数信息,使模型准确无误。第二,数据采集工作,用三维激光扫描设备对各个检测场景的施工实体进行全面扫描,得到原始三维点云数据,再通过物联网设备采集施工过程中各种质量数据和运行状态数据,保证数据采集全面、实时。第三,数据处理和融合,对采集来的原始点云数据做去噪、滤波、对齐等预处理,去掉冗余的数据以及噪声的数据;用设计的数据融合方法,把经过预处理过的点云数据同 BIM 设计模型融合起来,构成数字孪生检测模型,完成设计数据同实际施工数据的对比分析。第四,实时检测和缺陷识别,用数字孪生检测模型对各个检测场景下的施工质量进行实时检测,用人工智能算法自动识别出结构几何参数偏差以及外观质量缺陷,并将检测结果及缺陷位置记录下来。第五,检测结果的反馈和整改,把检测过程中发现的质量问题以及检测结果及时地反馈给施工队伍,并明确整改的要求及整改期限,施工队伍完成整改之后,再用数字孪生检测的方法对质量进行复核,保证质量问题整改到位。

3.3 检测结果准确性与应用效果分析

通过各检测场景的实操来检验数字孪生检测方法的检测准确性和应用效果,主要比较该方法和传统的检测方法的不同之处,证明它的优越性^[5]。从检测准确度来说,选择多个检测指标,用数字孪生检测法和

传统的检测法进行检测,比较两者检测的结果,发现数字孪生检测法的检测误差较小,可以更好地识别出结构几何参数偏差以及外观质量缺陷,检测准确性比传统检测方法高很多,可以满足水利工程施工质量精细化检测的要求。采用数字孪生检测的方法可以实现施工质量的实时检测和动态控制,比传统的检测方法提高检测效率,减轻人的工作负担,减少人为因素造成的检测结果偏差,实现质量问题早发现、早解决的目的,有效避免工程质量隐患扩大。另外,该方法所创建的数字孪生检测模型可以达到施工数据实时共享和协同管理的目的,提升各个参与方之间沟通效率及协同水平,改善施工质量控制流程,推进水利工程施工质量管控由传统的物理方式向数字化、智能化的方向转变。因此,融合 BIM 和三维激光扫描技术的数字孪生检测方法准确率高、实用性强,可以很好地弥补传统检测方法的不足,在水利工程施工质量检测中具有很好的推广价值。

4 结束语

通过对融合 BIM 和三维激光扫描技术的水利工程施工质量数字孪生检测方法进行深入的研究,系统地梳理 BIM 技术、三维激光扫描技术和数字孪生技术的相关理论及应用基础,建立完整的数字孪生检测体系,即检测指标体系、数据融合机制和数字孪生检测模型,用工程实例的应用来证明该方法的可行性和有效性。经研究可知,该方法可以完成水利工程施工质量的实时、准确、全方位检测,有效地提高质量控制的数字化和智能化程度,解决传统检测方法效率低、精度差、数据割裂等缺点,为水利工程施工质量检测提供新的技术途径及理论依据。

参考文献:

- [1] 王雪健,张育雨,蒋四礼,等.基于数字孪生的地铁工程盾构施工风险管理与平台实现[J].隧道建设(中英文),2025,45(11):2100-2116.
- [2] 袁媛,刘杨,张国文,等.基于 BIM 技术的数字孪生水利[J].水利技术监督,2025(12):26-28,66.
- [3] 高玉生,王国岗,赵文超,等.水利工程勘测全过程数字孪生技术研究[J].中国水利,2025(19):3-13.
- [4] 张利娟,秦俊虹,聂常山.基于数字孪生技术的水利工程造价控制分析[J].黑龙江水利科技,2025,53(08):155-157.
- [5] 冯燕青.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].智能建筑与智慧城市,2025(06):177-179.

土木建筑施工中钢筋工程施工技术研究

张文学

(天津市亨祥建筑安装工程有限公司, 天津 301509)

摘 要 钢筋工程是土木建筑结构的主要受力支撑体系,钢筋工程施工技术水平直接影响到建筑结构的承载能力、稳定性和耐久性。本文从土木建筑施工全过程出发,全面论述钢筋工程施工技术的主要内涵和实际意义,对原材料质量控制、钢筋加工工艺、绑扎安装技术、连接施工规范、成品保护措施等方面展开详细分析,并给出各个方面的关键技术和操作标准,创建“全流程精细化—技术标准化—质量可控化”的施工技术体系,以期为提升钢筋工程施工质量提供实践参考。

关键词 土木建筑; 精准化成型技术; 质量管控; 结构安全

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.014

0 引言

在土木建筑工程中,钢筋工程是保证结构安全的重要环节,它和混凝土一起形成复合受力体系,担负起结构抗拉、抗剪等主要的力学作用。随着现代土木建筑向着高层化、大跨度、复杂化的趋势发展,钢筋工程施工精度要求越来越高,对连接可靠性和安装规范性有了更高的要求。钢筋工程施工技术的科学应用,可以保证钢筋和混凝土有效配合,提高结构整体力学性能,还可以避免钢筋移位、连接失效、保护层偏移等质量隐患,延长建筑使用寿命。本文从土木建筑施工中钢筋工程施工技术的概述和实践两方面进行系统的探究,把行业先进的施工经验和技术标准融合起来,形成既有学术性又有操作性的技术体系,给工程技术人员提供参考,促进钢筋工程施工技术向着标准化、精细化的方向发展。

1 土木建筑施工中钢筋工程施工技术概述

1.1 核心内涵与技术特征

随着我国经济的迅速发展,我国的城市建设步伐也不断加快,而人们对工程施工质量的要求也越来越高。钢筋混凝土结构施工技术可以提高建筑工程结构的稳定性、强度等,建筑领域应用范围越来越大^[1]。土木建筑施工中钢筋工程施工技术的核心内涵是以结构设计图纸和行业技术规范为依据,围绕钢筋从原材料进场到成品安装成型的全过程,对钢筋原材料的选择、钢筋加工、钢筋连接、钢筋绑扎安装、钢筋成品

保护等各环节的技术参数、操作流程、质量控制要求进行系统的整合,形成科学完善的施工技术体系。技术特征表现为精准性、规范性、协同性三者有机统一。精准性是指钢筋的规格、数量、间距、连接方式等技术参数要符合设计要求,保证结构受力均匀;规范性是施工操作标准化、流程化的体现,钢筋加工、安装成型等均要按照既定的技术规范执行,防止人为失误造成质量问题;协同性是钢筋工程同模板工程、混凝土工程及其它施工环节的衔接配合,保证施工流程顺畅高效,体现技术适配设计、施工保障质量的核心导向。

1.2 实践价值与工程意义

钢筋混凝土结构是现代建筑中使用最广的结构形式,施工质量的好坏直接影响到建筑的安全性及使用寿命。钢筋工程施工技术的科学应用和规范执行,对土木建筑工程质量提高、安全保证和行业发展有着十分重要的实践意义和工程意义。从工程质量方面来说,严格遵守钢筋工程施工技术要点可以保证钢筋结构安装精度和连接可靠度,提高钢筋与混凝土协同受力性能,增强建筑结构承载能力、抗裂性和耐久性,有效防止由于钢筋施工缺陷造成的结构安全隐患,保证建筑长期安全稳定运行;从施工安全角度来说,规范的施工技术可以规避钢筋加工、安装过程中存在的机械操作不当、高空作业防护不到位等安全风险,保证施工人员的生命安全和工程的顺利进行;从行业发展角度来说,系统化的钢筋工程施工技术可以促进土木建筑行业施工标准化、规范化发展,提高土木建筑行业

作者简介: 张文学(1992-),男,本科,工程师,研究方向:土木建筑。

施工技术水平和质量控制能力,为土木建筑工程向高质量、高效益、绿色化方向发展提供技术支持,符合现代工程建设的发展要求。

1.3 理论基础与技术逻辑

钢筋工程施工技术的产生和发展,并不是孤立的操作规范叠加起来的,而是依靠材料力学、结构工程学、施工组织学、质量管理学、金属工艺学等诸多学科理论作为基础,达到理论同工程实践的深度融合。材料力学是钢筋选型和受力分析的主要依据,通过对钢筋在拉、压、剪等应力作用下力学响应的研究,确定不同强度等级、规格钢筋的适用场合,指导钢筋的合理布置和截面设计;结构工程学根据整体结构受力特性来确定钢筋的配筋率、布置方式以及连接强度要求,保证钢筋工程同建筑结构的力学性能相适应;施工组织学为钢筋施工流程的优化、资源配置和进度控制提供方法论,使技术执行和施工效率达到平衡;质量管理学建立全流程质量管控体系,给施工各个环节的质量检验、隐患排查提供理论支持;金属工艺学支撑钢筋加工和连接技术的改进,保证钢筋成型精度和连接可靠。其技术逻辑主要表现为一个三维的架构,即基础保障、核心实施、质量控制,各个层次之间互相衔接,形成完整的系统。基础保障维度主要针对原材料质量及技术准备展开,以材料力学和结构工程学为依据,对钢筋材料性能进行严格检测,对设计图纸进行准确解读并开展钢筋翻样工作,针对特定情况制定专项施工方案,确定施工技术参数、施工流程及安全要求,并做好施工机械、人员配置等前期准备工作,为钢筋工程施工提供良好的物质和技术条件;核心实施维度包含钢筋加工、连接、绑扎安装等重要施工环节,以结构工程学、金属工艺学为基础,对钢筋下料、弯曲、切断等加工工序加以规范,对绑扎、焊接、机械连接等主要工艺的操作标准予以优化,精准把控钢筋间距、保护层厚度、连接强度等技术参数,保证钢筋结构成型质量和力学性能符合要求;质量管控维度贯穿施工全过程,依靠质量管理学理论以及过程监测技术,创建“事前预防—事中控制—事后验收”的全链条管控体系。

2 土木建筑施工中钢筋工程施工技术

2.1 原材料质量管控:筑牢施工质量基础

原材料质量控制是钢筋工程施工的第一项技术要点,也是保证结构安全的源头,需要对钢筋和配套材

料从进场验收、过程储存到使用前复核全过程进行严格的筛选和质量检验。钢筋进场时要实行“双验证”,即对产品的合格证、出厂检验报告、型式检验报告等全部质量证明文件进行核查,保证文件信息与实物规格、型号、生产批次完全一致;并委托具有资质的第三方检测机构对钢筋进行抽样复检,主要检测钢筋的直径偏差、屈服强度、抗拉强度、伸长率、冷弯性能等关键力学性能指标,同时对钢筋的化学成分进行核查,确保其符合国家标准和设计要求,严禁不合格钢筋进入施工环节。外观质量检查也不可忽视,逐捆、逐根检查钢筋表面情况,不得使用有裂纹、重皮、锈蚀、结疤、折叠及局部凸块等缺陷的钢筋,对轻微锈蚀的钢筋要进行除锈处理并重新检验,保证钢筋外观质量符合施工要求^[2]。配套材料的质量控制要同步进行,扎丝优先选用强度符合要求、不易锈蚀的镀锌铁丝或者不锈钢丝,根据钢筋规格选择相应的扎丝粗细,防止扎丝强度不够造成绑扎松动,垫块选用强度不低于混凝土设计强度、耐久性好的专用成品垫块,根据构件种类选择水泥砂浆垫块、塑料垫块或钢筋垫块,保证垫块能够支撑钢筋,保持保护层厚度均匀稳定,预埋件需核查材质等级、几何尺寸、加工精度和防腐处理效果,重点检查预埋件的锚筋焊接质量及锚固长度,防止因配套材料质量缺陷影响钢筋工程整体稳定性。

2.2 钢筋加工工艺:精准化成型技术

初期对材料质量进行控制、优化施工工艺、丰富项目检测技术、提高施工人员专业素质^[3]。钢筋加工工艺的准确执行是保证钢筋安装精度的关键,必须严格按照设计图纸和施工规范进行下料、弯曲、切断等加工工作。钢筋下料前要准确计算,根据钢筋的弯钩长度、搭接长度等技术参数来确定钢筋的实际下料长度,防止因为下料偏差造成安装困难;下料时用机械切断,保证切口平直、无毛刺,防止手工切断造成的尺寸误差和钢筋损伤。钢筋弯曲成型应使用专业弯曲机械,按照设计要求的弯钩角度和弯曲半径进行操作,HPB300级钢筋末端应做180°弯钩,弯钩平直段长度不应小于钢筋直径的3倍,HRB400级钢筋弯曲时应控制弯曲半径,防止弯曲处产生裂纹^[4]。对于箍筋、预埋件等特殊形状钢筋,应采用定制化的模具进行加工,保证钢筋形状、尺寸与设计图纸高度一致;加工好的钢筋要分类堆放并加以标识,标明钢筋规格、型号、使用部位,利于后续安装施工,同时对加工质量实施抽样检查,保证钢筋加工偏差符合规范要求。

2.3 钢筋连接施工：可靠化连接技术

为了保证建筑工程主体结构的安全性、稳定性，延长建筑使用寿命，防止建筑出现严重的裂缝等病害，要重视建筑主体施工中钢筋工程质量控制工作。钢筋连接施工技术直接关系到钢筋结构的受力传递和整体稳定，要按照钢筋规格、受力情况及施工条件来选择合适的连接方式。常见的钢筋连接方式有绑扎连接、焊接连接和机械连接，绑扎连接适用于直径小、受力小的钢筋，搭接长度应符合设计要求，用十字交叉绑扎法使绑扎牢固，搭接区域内的绑扎点间距要均匀，不能有松动现象。焊接连接适合于直径大、受力大的钢筋，常用的焊接方法有闪光对焊、电弧焊、电渣压力焊等，闪光对焊要控制焊接电流、电压和焊接时间，保证焊缝饱满、无夹渣、气孔等缺陷，电弧焊要保证焊缝高度和长度符合规范，电渣压力焊要重点控制钢筋轴线对中偏差，防止焊接后钢筋偏移^[5]。机械连接有套筒挤压连接、螺纹连接等，连接可靠、施工速度快，连接时要保证套筒与钢筋规格一致，钢筋丝头加工精度达标，套筒拧紧力矩符合要求，连接完成后要进行外观检查和力学性能抽检，保证连接质量满足结构受力要求。

2.4 绑扎安装技术：精准化定位与固定

随着城市化的不断发展，建筑工程的技术要求越来越高，质量标准也越来越严格。钢筋绑扎安装技术是钢筋结构成型的重要环节，必须严格依照设计图纸来控制钢筋位置、间距、保护层厚度等技术指标。绑扎安装前要进行精确放线定位，在模板或者基层上标记出钢筋安装位置、间距和标高，保证钢筋安装准确；绑扎顺序按照先主梁后次梁、先底板后墙板、先外侧后内侧的原则，逐层推进绑扎施工。受力钢筋的间距、排距必须符合设计要求，偏差控制在规范允许范围内，箍筋的加密区长度、间距要准确控制，保证结构抗剪能力；钢筋交叉点用扎丝十字绑扎法，绑扎点间距均匀，保证钢筋固定牢固，防止浇筑混凝土时发生移位。钢筋安装时应设置垫块，垫块材质、尺寸及布置间距均须符合要求，保证钢筋保护层厚度一致，防止钢筋外露锈蚀^[6]。

2.5 成品保护措施：保障施工质量完整性

钢筋成品保护是保证钢筋工程施工质量闭环的关键环节，应建立“验收—防护—协同—修复”的全过程保护体系，采取相应的措施防止钢筋安装成型后受

到损害、污染或者性能衰减。钢筋绑扎安装完成后，应及时组织建设、设计、监理和施工单位进行隐蔽工程联合验收，重点检查钢筋的规格、间距、保护层厚度、连接质量、预埋件位置等重要指标，验收合格后出具书面记录，尽快安排混凝土浇筑工作，缩短钢筋暴露时间，从源头上降低锈蚀、污染的风险；如果因为施工计划调整而造成浇筑延迟，需要根据环境条件采取分级防护措施，常温干燥环境用土工布覆盖防尘，潮湿或者雨雪天气用防水塑料薄膜加铺，必要时搭设临时防护棚，在防护层下方设置支撑垫，防止防护材料直接压迫钢筋造成移位，防止雨水冲刷、灰尘堆积、杂物散落对钢筋造成的污染和腐蚀。施工全过程要加强现场控制，严禁施工人员在成型钢筋上随意行走、攀爬或者堆放模板、钢管、水泥等重物，对大跨度楼板钢筋可以铺设临时走道板供施工人员通行，防止直接踩踏造成钢筋变形、移位^[7]。

3 结束语

土木建筑施工中钢筋工程施工技术的科学应用和规范执行，是保证建筑结构安全、提高工程质量的关键。通过实践可知，严格按照钢筋工程施工技术要点进行施工可以避免出现质量缺陷，提高结构的受力性能，给土木建筑工程的安全稳定运行提供保障。随着新型钢筋材料、加工设备和施工技术不断发展，钢筋工程施工技术将不断改进升级，需要加强技术创新和实践应用，使土木建筑行业朝着高质量、绿色化、智能化方向发展。

参考文献：

- [1] 闫红. 建筑工程施工中钢筋混凝土结构施工技术[J]. 中国住宅设施, 2025(02):221-223.
- [2] 同 [1].
- [3] 李东东. 建筑工程中钢筋混凝土工程施工技术[J]. 建材发展导向, 2025,23(05):112-114.
- [4] 林文荣. 建筑钢筋混凝土结构工程施工技术要点与应用分析[J]. 广东建材, 2024,40(05):158-160.
- [5] 同 [3].
- [6] 卢超. 某建筑项目主体结构钢筋工程的施工技术分析[J]. 建材发展导向, 2025,23(13):94-96.
- [7] 黄兴方. 框架结构施工技术在建筑工程中的应用[J]. 工程与建设, 2024,38(06):1361-1362,1464.

基于绿色理念的房屋建筑施工技术要点研究

施行生

(中铁上海工程局集团建筑工程有限公司, 上海 201906)

摘要 在“双碳”目标驱动下,绿色理念成为建筑行业转型升级的核心导向,更是房屋建筑工程实现可持续发展的关键路径。本文立足于循环经济、可持续发展及生态建筑学三大核心理论,从主体结构、围护结构、机电安装及施工环保四大维度,系统阐述装配式建造、夹心保温、节能机电设备应用等绿色施工技术要点,结合施工全流程管控明确技术实施规范,最后展望数字化与绿色建材升级两大发展方向,以期为房屋建筑绿色施工落地及行业绿色转型提供实践参考。

关键词 房屋建筑;绿色理念;绿色防水;数字化

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.015

0 引言

随着城市化进程加快,建筑行业迎来高速发展,房屋建筑工程数量与日俱增,对促进社会经济发展具有重要意义。与此同时,在房屋建筑施工阶段,消耗大量能源和持续排放污染物,具备高能耗、高污染的施工特性,违背了绿色施工理念,也不利于实现绿色转型目标。在此行业背景下,主动引入绿色理念,全方位重构房屋建筑施工体系,是推动房屋建筑工程高质量可持续发展的核心,具备重要的工程实践价值。

1 绿色理念理论基础

1.1 循环经济理论

循环经济理论强调引导物质资源在经济活动中循环利用,消耗少量资源即可满足经济运行需求。从房屋建筑施工角度来看,循环经济理论完整贯穿施工全流程,同时遵循减量化、再利用和资源化三项原则,形成完整资源循环链条。其一,减量化原则。通过优化调整设计方案,如采取轻量化结构体系,从源头上减少建筑材料消耗量,杜绝材料浪费。其二,再利用原则。在施工期间主动回收具有一定残余价值的施工废弃物,如废弃构件、废旧模板、破损脚手架、废弃钢筋等,经过修复翻新后再次投入使用,或是重新加工形成建筑配件。其三,资源化原则。将施工废弃物进行资源化处置,最大限度利用残余价值,如将废弃 PC 构件破碎形成骨料,制备再生骨料混凝土或是再生砂浆,替代天然骨料^[1]。

1.2 可持续发展理论

可持续发展理论强调在满足当前发展需求的基础上,严格控制人类活动对生态环境造成的影响,不得无限度消耗不可再生资源,重点兼顾短期经济效益和长期生态效益及社会效益。在房屋建筑施工层面,严格控制污染物排放规模,组合采取扬尘控制、噪声控制、废水处理、固体废弃物无害化处置在内的多项绿色施工措施,在满足现场施工需求的前提下,尽量保护周边生态环境不受破坏,还有助于保障现场人员职业健康安全。

1.3 生态建筑学理论

生态建筑学理论本质上属于绿色理念在建筑层面的具体延伸,强调引导建筑内部体系和外部自然生态系统有机结合,致力于打造环境友好、生态适宜的建筑空间,主动利用自然资源,同步减轻自然环境干预程度。从房屋建筑设计、施工角度来看,生态建筑学理论以自然资源高效利用、生态适应性作为核心内容。自然资源高效利用是重点改善建筑自然采光通风条件,选择性利用建筑屋顶空间来部署太阳能集热系统或光伏发电系统,利用太阳能、风能等可再生能源来替代传统能源。生态适应性是根据外部环境条件,针对性调整房屋建筑功能结构和构件使用特性,如在多雨地区采取绿色防水技术,严寒地区重点强化围护结构热工性能。

2 基于绿色施工理念的房屋建筑关键施工技术

2.1 主体结构绿色施工

早期房屋建筑工程普遍采取混凝土现浇结构体系,现场开展大量湿作业,施工综合能耗和碳排放量居高

作者简介: 施行生 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 房屋建筑。

不下,还会浪费部分施工材料。对此,需要对房屋建筑主体结构施工技术进行绿色升级,以装配式建造、低碳浇筑养护作为绿色施工方向,具体方法如下。

第一,装配式建造。提前委托专业工厂批量化制作PC构件,提供设计详图,明确提出构件尺寸、形状、材质、预埋件位置等具体要求,在封闭车间内自动化制作PC构件,彻底解决扬尘污染、噪声污染等问题,且构件成型质量得到保障。确认PC构件外观质量和尺寸精度合格后,装车运往施工现场,把各类构件起吊安装就位,高空拼接形成完整结构,除去节点套筒灌浆等少数工序外,基本不需要开展湿作业。同时,在构件运输、现场堆放环节,必须采取防护措施,使用专用堆放架,着手修复轻微缺陷,避免因构件严重破损而造成资源浪费^[2]。

第二,低碳浇筑养护。面向现浇混凝土结构,在保留大致工艺做法的基础上,组合采取多项低碳技术措施,把施工全过程的碳排放量控制在较低限度,具体采取自流平浇筑、双覆盖养护两项措施。其中,自流平浇筑是制备流动度超过130mm的混凝土,浇筑部位弹放标高线,自流平混凝土直接倾倒在地面上,浆料自动流动摊平,也可选择使用齿形刮板引导浆料流向和控制厚度,最终使用表面带刺放气滚筒反复滚压浆料,排出内部气泡,以此来取代传统泵送浇筑方式。双覆盖养护是在混凝土浇筑完毕后,依次在混凝土表面覆盖塑料薄膜和保温被,即可长期保持混凝土表面湿润状态,控制内表温差,中途无需频繁开展洒水作业,以及采取其他温控措施。

2.2 围护结构绿色施工

房屋建筑围护结构施工阶段,以自然资源高效利用作为绿色施工方向,主动结合外部环境条件,针对性强化围护结构使用功能,在改善建筑使用体验的同时,尽可能降低房屋建筑综合能耗水平。从现实层面来看,以保温隔热、绿色防水和透光围护作为围护结构绿色施工关键技术,技术要点如下。

第一,保温隔热。对于房屋建筑外墙大面,推荐采取夹心保温技术,墙体分内外墙叶、中间嵌保温板,两侧墙叶作外保护层,优先选低导热系数新型保温材料,外墙及门窗关键部位热工性能控制指标如表1所示,兼顾保温效果与施工规范性。

第二,绿色防水。选用环保耐用、无毒性的绿色防水材料,替代传统防水材料,并围绕材料特性来设计施工工法。以水泥基渗透结晶型防水涂料为例,由硅酸盐水泥、石英砂和活性化学物质搅拌形成,粉料和水质量

表1 房屋建筑围护结构保温隔热施工控制

控制部位	核心控制指标	标准要求
外墙夹心保温层	玻璃棉保温板导热系数	$\leq 0.038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
门窗框缝填充	聚氨酯发泡胶密度	$\geq 35 \text{ kg}/\text{m}^3$
门窗密封胶缝	中性硅酮耐候胶厚度	6~8 mm
门窗密封胶缝	中性硅酮耐候胶宽度	8~12 mm
Low-E中空玻璃	空气层厚度	12~15 mm

比控制在1:0.35~1:0.4,持续搅拌3~5 min,以浆料无结块为合格标准,静置3 min后再次搅拌1 min,确保化学物质充分活化。配料搅拌完毕且基层质量合格后,分2~3遍涂刷防水涂料,总体涂膜厚度控制在1~1.5 mm。首遍使用硬毛刷横向涂抹涂料,涂抹厚度为0.5~0.8 mm,阴阳角部位施做50 mm以上半径圆弧^[3]。间隔2~4 h,确认首遍涂料初凝不粘手后,再次涂刷涂料,第二遍和首遍涂刷方向相互垂直,涂抹厚度为0.5~0.7 mm。

第三,透光围护。选用透光材料作为围护构件,引导室外光线进入室内空间,缩短人工照明时间来取得节能效果。可选透光围护材料众多,包括中空玻璃、PC耐力板、ETFE膜材和光伏玻璃,适用于玻璃幕墙、采光顶等位置。以PC耐力板采光顶为例,提前把大量型钢焊接形成网格状骨架结构,清理表面锈迹并涂刷防腐漆层,同步把PC板裁剪为特定形状尺寸,按照5 mm/m标准预留热膨胀缝,板材边缘去除毛刺。准备工作完成后,PC板固定安装在钢结构骨架上,打入多组自攻螺钉作为固定件,螺钉间距不超过0.3 m,螺钉和板材间垫设尼龙垫片,相邻板材重叠搭接,搭接宽度超过100 mm,搭接方向和雨水流向保持一致。

2.3 机电安装绿色施工

在机电安装环节,需选用新型节能机电设备,替代老旧型号机电设备,通过降低设备运行能耗,取得显著节能效果,还能减少碳排放量和污染物排放量。房屋建筑可选节能设备聚焦暖通空调系统、电气系统和给排水系统,包括变频多联机空调、地源热泵机组、变频调速离心泵等,施工人员及早掌握相应施工工法。以变频多联机空调为例,单台室外机连接多台室内机,以“按需功能”作为控制准则,按照室内机开启数量及负荷占比,动态分配制冷剂流量,并凭借换热器与制冷循环路径,减少能量传输与交换环节的实际损耗。现场施工期间,重点控制冷媒管施工和换热器安装工序,预防冷媒泄漏问题发生,尽可能降低换热阻力。

冷媒管施工环节,选用闭孔橡塑保温棉作为保温层,保温层厚度不小于 15 mm,利用氮气吹扫管道内部,去除氧化皮,各节管道焊接连接,保温层接缝位置缠绕多圈胶带,焊后开展保压测试,试验压力超过 3 MPa,保压时间超过 24 h。换热器安装环节,无遮挡且通风良好位置安装室外机,室外机进风距离和出风距离分别保持在 1.5 m 和 3 m 以上,选用风管式室内机,要求送风阻力小于 50 Pa,也可选择壁挂式和嵌入式室内机,保持水平安装状态,引导冷凝水顺利排出^[4]。

2.4 施工环保技术

施工环保技术面向施工污染源,在不干扰施工活动正常开展的前提下,从源头上切断污染源扩散路径,保护周边生态环境不受破坏。根据现场施工情况来看,施工污染源包括扬尘污染、有毒有害气体污染、施工废水污染、机械噪声污染、建筑垃圾污染等,必须专项采取控制措施。以扬尘控制技术为例,施工场地出入口部署洗车池,工程机械和运输车辆进出场时,冲洗表面附着灰尘,必须密闭运输水泥等粉状材料,并准备防尘网来覆盖裸露土方、弃土弃渣和基坑边坡,从源头上减少扬尘形成。同时,现场部署传感器和扬尘净化设备,多点检测空气粉尘浓度,确认实际粉尘浓度超出限定值后,发送报警信号,自行启动雾炮机、喷淋系统在内的扬尘净化设备,通过高压喷雾和喷水雾方式,细小水雾和扬尘颗粒相互结合,通过增加重量来引导扬尘颗粒沉降地面,达到降尘效果。

3 房屋建筑绿色施工技术未来发展方向

3.1 数字化

早期房屋建筑工程绿色施工模式停留在经验化管控阶段,高度依赖历史施工经验来分析施工形势、采取绿色施工措施,未能周全考虑问题,难免形成施工纰漏,造成生态损失。因此,需要引入以 BIM 技术为代表的数字化技术,推动绿色施工模式向“精准化、智慧化”方向转型,核心应用场景包括仿真施工、现场布局方案优化、施工污染动态管控。例如:在仿真施工场景,着手构建场地模型、单体构件模型、材料模型和各专业模型,所有模型相互拟合形成虚拟施工环境,精准推演房屋建筑施工过程,检验施工成果质量是否合格,统计资源消耗量、施工能耗水平、碳排放量和污染物排放总量,如果违背绿色施工要求,针对性优化调整设计方案与施工方案^[5]。唯有仿真施工过程完全符合设计要求后,才能正式开展现场作业,前置解决施工问题和保障绿色施工效果,而不是被动等待问题爆发,再去采取补救措施。

3.2 材料升级

在房屋建筑绿色转型背景下,材料性能是决定绿色施工成效和建筑使用体验的核心因素。传统材料在生产使用期间持续释放二氧化碳和甲醛等有害物质,且性能水平无法满足房屋建筑工程日益严格的建设标准,已不再适用。因此,建筑企业应把材料升级作为绿色施工方向,重点研发低能耗低碳建筑材料和功能性材料。其中,低能耗低碳材料是研制全生命周期碳排放总量较低的新型绿色材料,包括以工业废渣和农业废弃物为原料的低碳水泥,利用再生骨料替换天然骨料的高性能再生骨料混凝土。功能性材料也被称为辅助降耗材料,重点改善建筑功能结构,通过降低使用场景下综合能耗水平来取得绿色节能效果,常用绿色材料包括 PCM 相变储能材料、反射隔热涂料、太阳能光伏组件、Low-E 中空玻璃、空气源热泵换热器等。以 PCM 相变储能材料为例,适用于建筑空调系统,准备相变潜热超过 150 kJ/kg、温度波动范围小于 ± 2 °C、循环使用寿命超过 1 000 次的相变材料,相变温度范围设定为 20 ~ 28 °C,将适量相变材料掺入混凝土或是保温层内,夏季吸收多余热量,冬季向外释放热量,维持室内温度稳定状态。

4 结束语

绿色化是我国建筑行业转型发展目标,也是房屋建筑工程必然发展趋势。建筑企业和从业人员都应强化绿色意识,全面梳理理论内容,把绿色理念作为房屋建筑施工体系核心价值导向,并举采取多项绿色施工技术,更新施工内容,并推动绿色施工技术向数字化和材料升级方向发展,为环境友好型社会的建成贡献力量。

参考文献:

- [1] 马鑫颖.基于绿色理念的建筑施工技术要点分析[J].砖瓦,2022(05):150-151.
- [2] 董振荣.绿色节能施工技术在房屋建筑工程中的应用[J].大众标准化,2022(09):71-73.
- [3] 李峰峰.房屋建筑施工中节能技术的应用探究[J].大众标准化,2020(06):30,32.
- [4] 李坤,曲婕.基于绿色施工理念的住宅建筑工程管理模式探究[J].产业创新研究,2025(15):154-156.
- [5] 彭冰.房屋建筑绿色节能施工存在的问题及对策[J].山东农业工程学院学报,2021,38(01):40-44.

数字化测量技术在水利工程 施工中的应用研究

赵 鑫, 肖 垚

(浙江省第一水电建设集团股份有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘 要 水利工程作为国民经济的基础性工程,其施工质量直接关系到工程运行安全。传统测量技术受人为操作、环境因素的影响,存在效率低、精度不够、数据滞后等缺点,已难以满足现代水利工程规模化施工的要求。数字化测量技术是以计算机、信息、空间定位技术为依托,融合GPS、GIS、RS、无人机测绘、三维激光扫描等多元技术手段,实现测量数据的自动化采集、精准化处理、可视化呈现和智能化应用的完整体系,为水利工程测量带来了革命性突破。本文对数字化测量技术的内涵和技术体系进行阐述,分析其在水利工程测量中的应用优势,并结合水利工程施工准备、施工过程、竣工验收全周期应用场景,旨在为水利工程施工智能化提供理论参考。

关键词 数字化测量技术; 水利工程; 自动化水平; 数据信息; 测量精度

中图分类号: TV51

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.016

0 引言

水利工程是水资源调配、防洪抗旱、灌溉供水、水力发电等领域的核心基础设施,对国家水安全、生态文明建设、区域协调发展起着不可替代的作用。传统的水利工程测量大多采用水准测量、三角测量、钢尺量距等人工操作的方式,耗费大量的人力物力,而且测量周期长、精度易受人为操作误差、天气环境、地形条件等因素的影响,难以满足现代水利工程精细化施工、动态化控制的要求。伴随数字化技术、空间定位技术、信息技术的迅速发展,数字化测量技术也应运而生,并逐渐应用于水利工程施工领域。

1 数字化测量技术概述

数字化测量技术是指以计算机技术、信息技术、空间定位技术、传感器技术为依托,将多种测量手段结合起来,实现测量数据的自动采集、传输、处理、分析、存储和可视化展示的一整套测量技术。

数字化测量技术的主要特点是“数字化”,与传统的手工测量方式不同,可以克服传统测量技术的不足,提高测量工作效率和质量。

数字化测量技术主要的技术体系有如下几类,分别是空间定位技术、地理信息系统(GIS)技术、遥感(RS)技术、无人机测绘技术、三维激光扫描技术、数字化测绘仪器。

数字化测量技术的工作流程分为三个阶段,数据采集阶段用各种数字化测量设备自动采集地形、地貌、建筑物、水文等有关数据,实现数据的实时传输和存储;数据处理阶段用计算机软件对采集到的原始数据进行清洗、校正、分析、建模,消除冗余数据和误差,生成准确的测量成果;成果应用阶段将处理后的测量数据和成果用可视化技术呈现给工程技术人员,为水利工程施工的规划、设计、施工、验收提供数据支撑和决策依据^[1]。

2 水利工程测量中数字化测绘技术应用优势

数字化测量技术相比于传统的测量技术,具有自动化、精准化、智能化等特点,优势明显,可以很好地解决传统测量技术在水利工程中的难点问题,为水利工程施工提供精准的测量服务,具体优势表现在以下三个方面。

2.1 自动化水平高

传统的水利工程测量要依靠大量的人工操作,从测量仪器的架设、数据的读取、记录到数据的处理,都是靠人工完成,不但劳动强度大,而且容易造成人为操作误差,从而影响到测量效率和精度。数字化测量技术依靠自动化测量设备和计算机软件,对测量过程实行全程自动化,减少人工干预^[2]。

自动化水平的提高,一方面可以减轻测量人员的

作者简介: 赵鑫(1981-),男,本科,助理工程师,研究方向: 水利工程测量。

工作负担,另一方面也大幅缩短了测量时间。大型水利工程的传统测量工作需要几十人花费数天甚至数周才能完成,而采用数字化测量技术之后,只需要几个人就可以在短时间内完成,提高测量工作的效率,为水利工程施工进度的推进提供保证。

2.2 数据信息丰富

水利工程施工测量要得到大量的地形、地貌、水文、建筑物等有关数据,传统的测量技术受测量手段的限制,只能得到单一的测量数据,难以满足工程施工多样化的要求。数字化测量技术可以整合各种测量手段,得到丰富的多维数据,即空间位置数据、地形高程数据、影像数据、三维模型数据等,给水利工程施工提供全面的、完整的数据支持^[3]。

无人机测绘除了可以得到高清影像数据外,还可以生成数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)等成果,清楚地表现出工程区域的地形地貌特征;三维激光扫描技术可以获取建筑物、地形的三维空间信息,生成准确的三维模型,给工程结构设计、变形监测提供详细的资料;遥感技术可以获取大范围的水文、地形数据,为水利工程的规划设计、洪水监测提供宏观的数据支持。

2.3 测量精度更高

水利工程施工的测量精度要求很高,在大坝、溢洪道、输水管道等重要部位,测量精度的好坏直接影响到工程结构的安全以及施工质量。传统的测量技术由于人工操作、环境因素的影响,测量精度难以保证。

数字化测量技术可以通过先进的测量仪器和数据处理算法,有效地减小各种误差的影响,提高测量精度。GPS定位技术的静态精度为毫米级,动态精度为厘米级,可以满足水利工程精确定位的需求;电子水准仪测量精度远大于传统水准测量,可以有效防止人工读数误差;三维激光扫描技术测量精度可达毫米级,可以准确地捕捉到地形、建筑物的细微变化,防止由于测量误差造成的工程隐患^[4]。

3 数字化测量技术在水利工程施工中的应用

数字化测量技术已经渗透到水利工程施工的全过程,即施工准备阶段、施工过程阶段和施工完成后的竣工验收阶段,为各个阶段的施工工作提供精确的数据支撑,促使水利工程施工朝着精细化的方向发展。

3.1 施工准备阶段的应用

施工准备阶段是水利工程施工的基础,主要包含工程勘察、地形测绘、方案设计、场地平整等各项工作,

数字化测量技术在该阶段的应用,可以为施工准备工作提供准确全面的数据支持,保证施工方案的科学性。

传统的工程勘察测绘方式,由于效率低、精度差等缺点,在大型水利工程的勘察中存在很大的问题。使用数字化测量技术,利用无人机测绘、遥感技术、GPS定位技术等手段可以快速得到工程区域地形地貌、水文地质等相关数据,生成高清影像图、数字高程模型、地形剖面图等成果。水库工程施工准备阶段,利用无人机测绘可以迅速覆盖整个水库流域,得到流域内地形地貌数据,为水库选址、库容计算、大坝设计提供准确的依据;在河道整治工程中,利用遥感技术可以获取河道走向、宽度、水深等数据,为河道整治方案的制定提供支持。

数字化测量技术可以实现精准定位和放线,保证场地平整精度和施工放线的准确性。使用GPS-RTK技术可以快速确定场地平整的高程控制点和平面控制点,指导施工人员进行场地平整作业,保证场地平整后高程满足设计要求,在大坝、溢洪道等关键部位施工放线时,用全站仪、电子水准仪等数字化测量设备准确放出建筑物轴线、轮廓线、高程控制点,防止由于放线误差造成施工质量问题。

3.2 施工过程中的应用

施工过程是水利工程质量控制的重要环节,利用数字化测量技术进行施工过程的动态监测控制,可以及时发现施工过程中存在的问题并加以解决,保证工程施工质量与进度。

大坝施工中应用大坝是水利工程的主体结构,大坝施工质量直接影响工程安全,对测量精度和动态监测要求很高。利用数字化测量技术可以对大坝施工过程实施全过程动态监测和精确控制。大坝浇筑时,利用三维激光扫描技术可以即时得到大坝浇筑高度、厚度、轮廓等数据,同设计数据比较分析,及时找出浇筑过程中的偏差,指导施工人员调节浇筑工艺,保证大坝浇筑质量;GPS变形监测技术可以实时监测大坝沉降、位移等变形数据,一旦发现变形超过允许范围,立即发出预警,采取相应的防控措施,防止大坝出现安全隐患^[5]。

河道整治和输水工程施工环境复杂,河道开挖、边坡修整、管道铺设等环节都牵涉测量精度和效率的问题。使用数字化测量技术可以大幅度提高施工效率和质量。河道开挖施工时,利用无人机测绘加GPS-RTK技术,可以及时掌握开挖深度、宽度、坡度等数据,保证开挖尺寸满足设计要求,在边坡修整时,用三维

激光扫描技术准确获取边坡轮廓数据,指导施工人员进行边坡修整,防止边坡坍塌等安全问题的发生。

3.3 施工完成后的应用

施工结束后,水利工程需要进行竣工验收,数字化测量技术在竣工验收阶段的应用,可以给验收工作提供准确、全面的测量成果,保证验收工作的科学性,为工程后期运维提供数据支持。

竣工测量传统上采用烦琐、低效的测量方式,难以得到工程竣工后全部、准确的数据。使用数字化测量技术,可以利用无人机测绘、三维激光扫描技术、全站仪等手段,对工程竣工后地形、建筑物、构筑物等进行全方位的采集,生成竣工测量报告、竣工图、三维模型等成果。例如:大坝竣工验收时用三维激光扫描技术可以得到大坝实际轮廓、高程、尺寸等数据,和设计数据进行对比分析,评价大坝施工质量是否符合设计要求,在河道整治工程竣工验收时,用无人机测绘可以得到整治后河道走向、宽度、水深等数据,评价河道整治效果是否达到设计标准。

在水利工程竣工后,需要长期进行运维监测,及时发现工程的变形、损坏等问题,保证工程的长期安全运行。数字化测量技术可对工程后期运维实施常态化监测,利用GPS变形监测技术、三维激光扫描技术定期监测大坝、溢洪道等重点部位变形数据,建立变形监测数据库,剖析变形规律,预估变形走向,为工程运维决策提供支撑,延长工程使用寿命。

4 数字化测量技术在水利工程施工中的前景

伴随我国水利事业的不断进步,以及数字化技术、智能化技术、信息技术的持续更新升级,数字化测量技术在水利工程施工中的应用前景十分广阔,将会向着智能化、一体化、精细化、协同化方向发展,给水利工程施工技术的升级换代提供强有力的支撑,促进水利事业高质量发展。

首先,智能化水平会不断提高,人工智能技术与数字化测量技术深度融合发展成为趋势。未来数字化测量设备会慢慢朝着智能化方向发展,具有自主导航、自主采集、自主分析、自主预警等能力,减少人工操作,提高测量速度和精确度。智能无人机自主规划航线、避让障碍物,自动获取并处理数据,形成测量成果;智能监测设备对工程变形、水文等数据进行实时监测,用人工智能算法分析数据,及时发现异常,发出预警,从而实现水利工程的智能化监测与管控。

其次,一体化应用将会更广泛,多技术融合完成全流程控制。数字化测量技术会和BIM(建筑信息模型)、

物联网、大数据等技术深度结合,建立水利工程施工全过程一体化管控平台。借助BIM技术和数字化测量技术的融合,可以将测量数据同工程模型结合起来,从而实现工程施工的可视化管控,清楚地显示施工进度和质量状况,利用物联网技术和数字化测量技术的融合,对施工设备、测量设备、工程结构实施实时监测,进而实现数据的实时传输和共享,通过大数据技术和数字化测量技术的融合,为工程规划、设计、施工、运维提供全生命周期的数据支撑,实现水利工程施工的全流程精细化管控。

最后,应用场景也将越来越广泛,覆盖水利工程的各个方面。目前,数字化测量技术主要被应用在大型水利工程的施工中,随着技术的发展以及成本的降低,数字化测量技术的应用范围会逐渐扩大到中小型水利工程、农村水利工程、生态水利工程等各个方面。在农村水利灌溉工程中,应用数字化测量技术可以准确得到灌溉区域的地形、水文数据,从而改善灌溉方案,提高水资源利用率。

5 结束语

数字化测量技术是现代测量技术的核心,凭借自动化、精准化、智能化的特点,已经成为水利工程施工中不可缺少的重要技术,在施工准备、施工过程、竣工验收、后期运维等各个阶段都起着重要的作用,解决了传统测量技术在水利工程中遇到的难点问题,提高水利工程施工质量,为水利工程的科学化施工提供有力支持。随着数字化技术、智能化技术、信息技术的不断更新换代,数字化测量技术将会与人工智能、BIM、物联网、大数据等技术深度融合,向着智能化方向发展,为我国水利事业高质量发展注入新的动力。

参考文献:

- [1] 徐小兴. 水利工程测量中数字化测绘技术的应用研究[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2025, 18(03): 220-222.
- [2] 贾磊. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用探究[J]. 治淮, 2025(07): 37-38, 43.
- [3] 徐蕾. 数字化测量技术在水利工程施工中的应用与前景研究[J]. 水上安全, 2025(08): 52-54.
- [4] 黎迪. 数字化测图在维护性航道测量及管理中的应用探究[J]. 珠江水运, 2024(19): 40-42.
- [5] 陈文坤, 吴传彦, 李章超, 等. 数字化技术在水利工程测绘设计中的应用研究[J]. 长江技术经济, 2022, 06(S1): 248-250.

水利工程大坝混凝土护坡 现场浇筑施工工艺分析

张 霞, 王 瑜, 翟亮亮

(青岛江达建设工程有限公司, 山东 青岛 266300)

摘 要 水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工质量关系到大坝安全与运行寿命, 当前施工中存在模板安装精度不足、支护稳定性欠缺, 混凝土配合比适配性差、浇筑密实度不达标, 施工缝处理不规范及后期裂缝防控不到位等问题。本文分析了问题成因, 采取优化模板安装与支护、精准配比混凝土与改进浇筑振捣工艺、规范施工缝处理与完善裂缝防控等技术措施, 并强化全过程质量、材料设备及安全管控。实践表明, 这些措施可有效解决现存施工问题, 提升混凝土护坡成型质量与结构稳定性, 为大坝长效运行提供保障。

关键词 大坝混凝土护坡; 现场浇筑; 施工工艺; 质量管控; 裂缝防控

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.017

0 引言

水利工程大坝作为防洪、灌溉、供水及发电的核心枢纽, 其护坡结构直接承担着抵御水流冲刷、防止边坡侵蚀、保护大坝主体安全的关键作用。混凝土护坡因结构稳定性强、抗渗耐久性好, 成为大坝护坡的主流形式, 其现场浇筑施工质量直接决定护坡防护效能与大坝长期运行安全。当前, 随着水利工程建设规模扩大、标准提升, 大坝混凝土护坡现场浇筑施工面临诸多技术挑战, 施工过程中易出现各类质量隐患, 影响护坡结构完整性与服役寿命。因此, 深入分析现场浇筑施工工艺, 排查现存技术问题, 对优化施工流程、提升施工质量、保障大坝长效稳定运行具有重要的现实意义与工程价值。

1 水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工现存技术问题

1.1 浇筑模板安装精度不足及支护稳定性欠缺

在水利工程领域, 大坝混凝土护坡的现场浇筑施工技术是保证大坝结构稳定性和延长服务寿命的关键环节。此工艺包含复杂的技术步骤和精细的工程操作, 需严格控制质量。浇筑模板安装精度不足易引发拼接缝隙偏大、表面平整度超标等问题, 部分构件未依据设计坡面完成精准调校, 与坝体坡面贴合度不足形成局部凹凸, 致使后续混凝土护坡产生错台、蜂窝等质量问题, 破坏结构整体性能与外观效果。模板支护体

系杆件间距、步距难以满足规范标准, 底部垫板设置缺失、连接节点紧固性不足, 斜撑与拉接构件布设数量不足, 在浇筑侧压力与振捣作用力下易出现位移、变形乃至失稳, 干扰施工作业推进, 形成安全隐患并造成材料损耗, 抬升工程成本并延长建设周期。

1.2 混凝土配合比适配性差且浇筑密实度不达标

在大坝混凝土护坡现场浇筑作业中, 混凝土配合比适配性差、浇筑密实度不足问题突出。配合比多采用常规参数, 未结合坡面施工与长期水环境工况专项试配, 水胶比、砂率、胶凝材料及外加剂掺量难以协同匹配; 原材料进场后未动态检测砂石含水率、骨料级配与水泥活性, 拌和计量偏差超标且随意调整配比, 导致混凝土和易性、保水性、黏聚性失衡, 易出现离析、泌水、流动性不足, 难以满足坡面连续均匀浇筑要求^[1]。浇筑时布料不均、分层过厚、下料过高, 振捣设备与操作不符坡面特点, 振捣间距偏大、插入深度不足, 转角、边缘及钢筋密集区易漏振, 局部过振引发骨料下沉、浆体分离; 模板密封不严造成漏浆, 致使混凝土内部残留气泡孔隙、骨料填充不密实, 结构均匀性与密实度不达标, 降低护坡强度、抗渗性与耐久性。

1.3 施工缝处理不规范及后期裂缝防控不到位

施工缝处理不规范主要表现为: 浇筑中断后, 未按规范彻底清理缝面, 浮浆与松动骨料未剔除, 也未采用高压水冲洗或刷毛处理以提升粘结力, 新混凝土浇筑前未铺设同配合比水泥砂浆结合层, 造成新旧混

作者简介: 张霞 (1981-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

混凝土结合不紧密,形成受力薄弱面,在水压力与温度变化作用下易出现渗漏、脱空等隐患。后期裂缝防控不到位体现在:未依据护坡浇筑面积与环境温度合理设置伸缩缝、沉降缝,缝宽及间距不满足设计要求,且未使用合格填缝材料密封;同时混凝土浇筑后养护不及时、养护周期不足,洒水频次与养护湿度未达标,加之水泥用量控制不当,水化热大、散热不及时,使混凝土内外温差过大产生温度应力,引发表面及深层裂缝,降低护坡结构整体性与抗渗性能。

2 大坝混凝土护坡现场浇筑施工问题成因分析

2.1 施工技术交底不细致及操作流程不规范

施工技术交底不细致、操作流程不规范,直接影响大坝混凝土护坡浇筑质量。交底内容偏宏观,未结合护坡坡度、坡长及浇筑区段等现场条件细化参数,对布料厚度、振捣点位、抹面时机、养护起始时间等关键工序缺乏量化要求,作业人员难以精准把控施工标准。现场作业随意性较大,工序执行不严格,混凝土入仓方式与浇筑速度控制不当,易产生离析;振捣存在漏振、过振问题,坡面平整度无统一控制标准。模板支设与加固工序简化,支撑稳定性不足,在混凝土自重及侧压力下易发生位移、变形,降低护坡结构尺寸精度与外观成型质量,为后续裂缝、蜂窝麻面等质量缺陷埋下隐患。

2.2 材料质量管控不严及施工设备性能不足

材料质量管控不严体现在混凝土原材料进场检验环节缺乏系统性核查,砂石骨料的含泥量、颗粒级配未达到设计规范要求,部分骨料中夹杂杂质未及时清理,水泥的强度等级、安定性等关键指标未进行全面复检就投入使用,外加剂的掺量未根据现场环境温度、骨料含水率进行动态调整,导致混凝土拌和物的和易性、凝结时间出现偏差,浇筑后易产生裂缝、强度不足等质量隐患^[2]。施工设备性能不足主要表现为混凝土拌和设备的搅拌叶片磨损严重、搅拌转速不稳定,无法实现原材料的均匀拌和,输送设备存在漏浆、堵管等问题,导致混凝土浇筑过程中断、坍塌度损失过大,振捣设备功率不足、振捣棒插入深度和振捣时间不符合规范,使得混凝土内部密实度不足,形成蜂窝、麻面等缺陷,影响护坡结构的整体性和抗渗性。

2.3 现场施工环境管控缺失及应急处置不当

现场施工环境管控缺失体现在对大坝护坡浇筑区域周边水文、气象及地质条件的动态监测不到位,未建立完善的环境监测机制,对浇筑过程中突发的降雨、大风、高温、低温等恶劣天气预警不及时,未提前采

取针对性防控措施,导致混凝土浇筑过程中出现离析、初凝过快、表面裂缝等质量问题。对施工区域的排水系统布置不合理,雨水、施工废水无法及时排出,积聚在浇筑作业面,破坏混凝土配合比稳定性,降低护坡结构密实度。应急处置不当则表现为未制定完善的突发环境异常应急预案,对浇筑过程中出现的暴雨冲刷、边坡坍塌、混凝土浇筑中断等突发情况,缺乏科学有效的处置流程和应急物资储备,处置过程中操作不规范、响应不及时,进一步加剧施工质量隐患,甚至影响施工安全和进度。

3 大坝混凝土护坡现场浇筑施工问题解决技术措施

3.1 优化模板安装工艺及强化支护体系设计

优化模板安装工艺、强化支护体系设计,能够从模板选型、安装精度与支护稳定性等维度提升施工质量。结合大坝护坡坡度与结构尺寸,选用刚度适中、表面平整、拼接严密的定型钢模板,降低模板形变与漏浆概率。模板安装前清理基面并均匀涂刷隔离剂,保障脱模后混凝土外观质量^[3]。以设计高程与坡面线型为依据控制模板就位,借助精准测量放线确定布设位置,利用可调支撑构件校正垂直度与平整度,避免错台、跑模等问题。依据坡面受力特征完善支护体系,采用斜撑、对拉螺栓与横向围檩组合形式,提升模板整体抗侧压性能,结合浇筑速度与侧压力确定支护间距与杆件规格,关键区域增设加固节点,防范支护失稳。模板接缝设置密封压条,减少漏浆隐患,浇筑阶段实时监测模板形变,动态调整支护参数,确保模板体系在浇筑与振捣全过程中保持稳定,为大坝混凝土护坡成型质量提供可靠支撑。

3.2 精准配比混凝土及改进浇筑振捣施工方法

水利工程大坝混凝土护坡施工有其自身特性,需优化混凝土配比精度与浇筑振捣工艺,参照护坡结构的强度标准、抗渗抗冻性能及耐久指标,结合现场气象状况、骨料级配情况和水泥品类开展适配试验。在进行配合比设计时,需综合考虑工程的结构类型、使用环境、施工条件等多方面因素,合理选择水泥类型、骨料粒径分布以及水灰比等关键参数,并通过严格的试验验证其可行性和有效性。合理确定水胶比、砂率、外加剂掺量等关键配合比参数,严格把控原材料进场检验与拌和计量精度,采用自动计量拌和设备保证拌合物均匀稳定,防止离析、泌水。浇筑按分段分层、循序渐进实施,结合护坡坡度与结构尺寸合理划分施工段,控制浇筑层厚,及时摊铺、缩短停歇时间。振捣选用适配设备,执行快插慢拔,严控振捣间距与时长,

保证密实平整, 消除蜂窝、麻面、漏振等缺陷, 做好振捣衔接, 避免过振造成骨料下沉、浆体上浮, 提高护坡混凝土整体密实度与结构稳定性。

3.3 规范施工缝处理及完善裂缝防控技术

规范大坝混凝土护坡施工缝处理应严格执行《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666-2011) 及《水利水电工程施工质量检验与评定规程》(SL 176-2007)。施工缝宜设在结构受剪力较小且便于施工部位, 纵向每 20 m、横向每 2 m 设置, 缝宽 2 cm, 采用聚乙烯泡沫板填塞。凿毛宜在浇筑后 20 ~ 30 小时进行, 混凝土强度达 1.2 ~ 2.5 MPa 时, 机械凿毛深度 5 ~ 10 mm, 密度 600 ~ 800 点 /m², 骨料外露 1/3 ~ 1/2, 凿毛后高压水清理干净, 浇筑前缝面保持饱和面干无积水。裂缝防控构建“光照管理+温度调节+应力缓释”三维体系, 夏季采用双层纳米银反射膜遮阳, 反射率 92%, 配合纳米雾化冷却, 表层温度日波动控制在 ±2 °C 以内, 预埋空心储能钢筋调控温差, 同时控制混凝土坍落度 6 ~ 8 cm, 减少收缩裂缝, 保障护坡结构完整与抗渗性能。

4 大坝混凝土护坡现场浇筑施工质量管控要点

4.1 施工全过程技术管控及工序验收标准

混凝土护坡浇筑应实施全过程技术管控, 覆盖各施工环节。进场原材料需完成核验, 水泥、砂石骨料、外加剂等均开展取样检测, 性能参数满足设计标准与施工条件后方可使用, 不合格原料严禁投入现场作业。浇筑前对护坡基面全面清理, 清除杂物、浮土及松动岩体, 按设计要求修整坡面坡度, 检查模板支撑牢固性、表面平整度及接缝密封效果, 防范浇筑中漏浆、形变等状况^[4]。浇筑阶段控制混凝土拌合质量、坍落度与浇筑速率, 采用分层浇筑、分层振捣作业, 保证振捣密实, 减少蜂窝、麻面、空洞等质量缺陷。各工序严格执行验收要求, 基面清理、模板架设、混凝土浇筑完工后均开展现场实测实量, 参数达标后方可进入下一工序, 不满足要求部位及时整改并重新验收。

4.2 材料设备全周期管控及性能优化措施

大坝混凝土护坡现场浇筑实行材料设备全周期闭环管控, 从原材料进场验收、存储保管、拌合加工, 到设备运行调试、现场浇筑及后期维护均实施全过程管理。水泥、砂石骨料、外加剂、钢筋等进场时严格核查出厂合格证与检验报告, 按批次复试检测, 严控质量指标, 杜绝不合格材料进场使用^[5]。砂石骨料分类堆放并做好防雨防尘措施, 稳定含水率; 水泥密封仓储, 防止受潮结块; 外加剂精准计量, 确保混凝土

和易性、强度及耐久性达标。施工设备定期检修保养, 振捣设备、输送泵、模板体系、计量装置保持良好运行状态, 优化参数匹配。结合现场工况及时调整设备运行模式, 强化实时监测与隐患排查, 以精细化管控保障施工连续有序, 从源头提升护坡结构成型质量与长期运行稳定性。

4.3 现场施工安全管控及质量追溯体系构建

现场施工安全管控需聚焦浇筑作业全流程风险防控, 对模板支撑体系进行定期承载力检测与加固处理, 严防坍塌隐患, 同时规范混凝土输送设备操作流程, 划定作业安全区域并设置警示标识, 管控高空作业防护措施落实情况, 及时排查用电设备漏电、机械运行故障等安全隐患, 确保浇筑作业期间人员与设备安全。质量追溯体系构建需明确各环节责任主体, 对原材料进场检验报告、配合比参数、浇筑时间、振捣工艺参数、养护记录等信息进行全面详实记录, 采用信息化手段建立追溯台账, 实现原材料进场、施工过程、成品检测等各环节可追溯, 一旦发现质量问题, 可快速定位问题环节、排查原因, 为质量整改提供精准依据, 保障护坡浇筑质量符合设计标准。

5 结束语

水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工直接关系到大坝整体安全、耐久性与运行寿命。当前施工中仍存在模板安装精度不足、混凝土配合比不合理、浇筑振捣不规范、施工缝与裂缝防控不到位等问题, 其根源在于技术交底、材料设备、环境管控及现场管理等多环节管控缺失。通过优化模板支护、精准设计配合比、规范浇筑振捣、强化施工缝处理与裂缝防控, 并建立全过程质量管控与安全追溯体系, 可有效提升混凝土护坡成型质量与结构稳定性。在实际工程中, 应持续细化施工工艺、严格落实规范标准, 为水利工程大坝长效稳定运行提供坚实的技术与质量保障。

参考文献:

- [1] 滕杰. 基于水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工工艺的应用研究[J]. 科技与创新, 2025(14):149-151.
- [2] 毛玉增. 基于水利工程大坝混凝土护坡现场浇筑施工工艺的应用研究[J]. 珠江水运, 2024(11):74-76.
- [3] 郑旭明. 水利工程水库大坝混凝土施工技术初探[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(20):190-192.
- [4] 姜丽玉. 水利工程中大坝护坡混凝土施工技术[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(12):122-123.
- [5] 陈凤贵. 水利工程大坝护坡绿色混凝土试验研究与应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 08(04):37-40.

水利工程高边坡施工安全风险 评估与防护技术优化

刘 过

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

摘 要 本文以水利工程高边坡施工安全为研究对象, 针对传统风险评估粗放、防护技术适配性不足等问题, 系统探究安全风险评估体系构建与防护技术优化路径。通过构建“固有风险—管控能力—动态修正”三级风险评估模型, 优化“主动加固+被动防护+智能监测”三位一体防护技术体系, 重点分析风险分级标准、新型支护结构与智能监测技术的应用机理, 以期提升水利工程施工安全水平提供借鉴。结果表明, 优化后的风险评估模型可实现风险等级判定准确率 $\geq 95\%$, 配套的新型锚杆格构+主动网防护体系, 配合智能预警系统, 能将边坡坍塌风险降低90%以上, 边坡位移速率控制在0.5 mm/d以内, 较传统技术防护效果提升70%。

关键词 水利工程; 高边坡施工; 安全风险评估; 防护技术优化

中图分类号: TV513

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.018

0 引言

水利工程高边坡作为大坝、溢洪道、引水隧洞等核心构筑物的关键组成部分, 广泛分布于山区水利枢纽工程中, 其施工安全直接关系到工程建设成败与人员生命财产安全。水利高边坡施工具有显著复杂性: 边坡高度多超60 m, 部分可达200 m以上, 地质条件涵盖断层、软弱夹层等复杂构造, 水文环境受降雨、地下水动态影响显著; 施工过程需进行开挖、支护、排水等多工序交叉作业, 且多处于高空、临边作业环境, 安全风险源多、管控难度大。传统高边坡施工安全管理存在诸多短板: 风险评估依赖经验判断, 缺乏量化标准与动态更新机制, 难以精准识别重大风险; 防护技术多采用单一锚杆、喷锚支护, 对复杂地质条件适配性不足, 易出现支护结构失稳; 安全监测手段滞后, 难以实时捕捉边坡位移、裂缝发展等风险征兆, 导致事故预警不及时。本文结合近三年行业创新成果, 构建科学量化的风险评估体系与适配性强的防护技术优化方案, 为同类工程提供技术参考。

1 水利工程高边坡施工安全风险核心问题与影响因素

1.1 安全风险评估与防护的核心难点

水利工程高边坡施工安全风险管控面临三大核心难点。其一为风险评估量化不足, 传统评估多采用定

性描述方式, 未建立系统的指标体系与分级标准, 对边坡高度、地质条件、支护质量等关键风险因素的权重分配缺乏科学依据, 导致重大风险漏判、误判率较高。其二为防护技术适配性差, 传统支护结构多为标准化设计, 未结合边坡地质类型、开挖坡度等个性化条件优化^[1]。其三为风险管控动态性不足, 施工过程中边坡地质条件、水文环境会随开挖进程发生变化, 传统风险评估与防护方案缺乏动态调整机制, 且安全监测多采用人工巡检与定点监测相结合的方式, 数据反馈滞后, 无法实现风险的实时预警与防护措施的及时优化。

1.2 安全风险的关键影响因素

水利工程高边坡施工安全风险的产生是地质、施工、环境、管理等多因素协同作用的结果, 核心影响因素可归纳为四类。地质与水文因素是基础, 边坡岩土体抗剪强度、地质构造(断层、软弱夹层)、边坡高度与坡度直接决定固有风险等级, 如最终边坡角 $\geq 50^\circ$ 时风险显著升高; 地下水渗流、降雨入渗会降低岩土体稳定性, 是引发边坡滑塌的主要诱因。施工工艺因素是核心, 开挖方式不合理会破坏边坡应力平衡, 支护施工质量缺陷会降低防护体系承载能力; 爆破作业震动会加剧边坡裂隙发育, 进一步增大坍塌风险。环境条件因素是重要外部变量, 强降雨、暴雨、高温冻融等极端天气会加速边坡失稳^[2]。安全管理因素是

作者简介: 刘过(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

保障, 安全生产责任制落实不到位、从业人员素质不足、安全投入不足、应急救援体系不完善等, 会导致风险管控链条断裂, 无法形成“评估—防护—监测—整改”的闭环管理。

2 水利工程高边坡施工安全风险评估体系构建

2.1 风险评估指标体系设计

基于安全分级分类监管要求, 构建“固有风险—管控能力—动态修正”三级指标体系。一级指标包括固有风险(权重 0.3)、管控能力(权重 0.4)、动态修正(权重 0.3), 二级指标涵盖 12 项核心要素^[3]。固有风险指标包括边坡参数、地质条件、水文条件、周边环境, 其中边坡高度超 200 m 或水文地质复杂的高边坡, 固有风险基础分值上浮 20%。管控能力指标包括支护设施质量、监测系统配置、安全生产管理、特种作业人员持证率。动态修正指标包括施工工序合规性、地质条件变化、极端天气影响、隐患整改效果, 根据施工阶段实时数据调整分值。

2.2 风险分级标准与评估方法

采用层次分析法确定各指标权重, 结合评分表法实现风险量化评估。评估初始分为 100 分, 其中固有风险指标满分 30 分、管控能力指标满分 40 分、动态修正指标满分 30 分, 最终风险得分 = 固有风险得分 + (40 - 管控能力得分) + 动态修正得分。参照安全风险分级标准, 将高边坡施工安全风险划分为四级: 得分 ≥ 80 分为重大风险(D 级), 需停工整改; 60 ~ 79 分为较大风险(C 级), 需专项管控; 40 ~ 59 分为一般风险(B 级), 需常规管控; ≤ 39 分为低风险(A 级), 可正常施工。对本年度发生过人员伤亡事故、存在重大事故隐患未整改的高边坡, 直接判定为重大风险(D 级)。评估方式采用初次评估与动态评估结合, 初次评估在施工准备阶段完成, 动态评估每施工循环开展一次, 结合监测数据与现场检查结果调整风险等级^[4]。

2.3 风险评估流程优化

构建“数据采集—指标评分—等级判定—措施制定”的闭环评估流程。数据采集阶段通过地质勘察报告、施工图纸、现场检测(锚杆锚固力测试、岩土体强度试验)、监测数据等多渠道获取指标数据, 确保数据真实性与完整性。指标评分阶段采用专家打分与仪器检测相结合的方式, 对定性指标由 3 名以上行业专家联合评分, 对定量指标依据检测数据直接计分。等级判定阶段通过评估模型计算得分, 结合分级标准确定风险等级, 并生成风险评估报告, 明确重大风险点、风

险等级及管控要求。措施制定阶段针对不同风险等级制定差异化管控措施, 重大风险需编制专项整改方案, 较大风险需强化支护与监测, 一般风险与低风险按常规管控要求执行。

3 水利工程高边坡施工防护技术优化路径

3.1 主动加固技术优化

主动加固技术优化聚焦提升边坡岩土体稳定性, 结合地质条件个性化设计支护结构^[5]。对岩质边坡, 采用新型高强度锚杆(HRB500 级)+格构梁支护体系, 锚杆直径扩大至 32 mm, 锚固深度根据边坡高度调整, 通过高压注浆工艺确保注浆饱满度 $\geq 95\%$, 锚固力提升至 300 kN 以上; 格构梁采用 C35 钢筋混凝土, 间距优化为 2.5 m \times 2.5 m, 增强对边坡表层岩土体的约束作用。对含软弱夹层的边坡, 创新采用“锚杆+抗滑桩”联合支护结构, 抗滑桩截面尺寸为 2 m \times 3 m, 桩间距 8 ~ 10 m, 嵌入稳定岩层深度 ≥ 5 m, 与锚杆形成协同受力体系, 有效阻断软弱夹层滑动路径。

3.2 被动防护与排水技术优化

被动防护技术优化重点提升落石拦截与灾害缓冲能力, 排水技术优化聚焦降低地下水影响。在被动防护方面, 采用新型 SNS 柔性防护网, 网片材质升级为高强度钢丝, 抗拉强度 $\geq 1\ 800$ MPa, 网孔尺寸优化为 5 cm \times 5 cm, 确保拦截落石粒径 ≤ 50 cm; 防护网布设采用“自上而下、分层分段”方式, 根据边坡坡度调整布设密度, 坡度 $\geq 45^\circ$ 时加密至每 2 m 布设一道。在排水技术方面, 构建“地表排水+地下排水”立体排水体系, 地表设置截水沟与排水沟, 截水沟距边坡顶边缘 ≥ 5 m, 坡度 $\geq 3\%$, 确保雨水快速排出; 地下设置排水孔与排水廊道, 排水孔采用 $\Phi 100$ mm PVC 管, 倾角 10 ~ 15°, 间距 3 m \times 3 m, 深入边坡内部 ≥ 5 m, 排水廊道沿边坡走向布置, 间距 50 m, 有效降低地下水位, 减少渗流对边坡稳定性的影响。

3.3 智能监测与预警技术融合

构建“多维度监测+智能预警”的动态管控系统, 提升风险监测精准度与实时性。监测指标包括边坡位移、裂缝发展、锚杆应力、地下水位、环境参数, 监测设备采用北斗定位+光纤传感+雷达监测的组合方式。边坡位移监测采用北斗高精度定位终端, 数据采样频率 1 Hz, 定位精度 ± 2 mm, 实时捕捉边坡水平与垂直位移; 裂缝监测采用光纤光栅裂缝计, 量程 0 ~ 5 mm, 分辨率 0.01 mm, 及时发现裂缝扩展趋势; 锚杆应力监测采用振弦式应力计, 实时反馈锚杆受力状态^[6]。

4 工程案例验证与优化效果分析

4.1 工程案例概况

以某大型水利枢纽溢洪道高边坡施工工程为研究对象,该边坡最大高度186 m,最终边坡角 42° ,地质条件复杂,含3层软弱夹层,水文地质条件中等,施工区域周边300 m范围内有村庄,属于较大风险等级(C级)。项目采用本文构建的风险评估体系与优化防护技术,包括三级风险评估模型、“锚杆+抗滑桩”联合支护、立体排水体系与智能监测系统,重点监测边坡位移速率、风险预警响应时间、事故发生率等指标。

4.2 优化效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统技术对比,优化后的风险评估与防护体系取得显著成效。在风险评估方面,评估模型对重大风险点识别准确率达98%,较传统评估方法提升30.7%,成功识别出软弱夹层部位的滑动风险,为防护技术优化提供了精准依据。在防护效果方面,边坡施工期间最大位移速率控制在 0.3 mm/d ,远低于规范限值 0.8 mm/d ,未发生落石、滑塌等安全事故,安全事故发生率为0,较传统技术降低100%;锚杆平均锚固力达320 kN,抗滑桩最大水平位移 $\leq 2\text{ mm}$,支护体系稳定性显著提升。在监测预警方面,智能监测系统实现了风险的实时捕捉,预警响应时间平均为3分钟,较传统人工监测大幅缩短,为应急处置赢得充足时间。

5 技术落地保障机制与应用推广建议

5.1 技术落地的保障机制

为确保水利工程高边坡施工安全风险评估与防护技术有效落地,需从组织、制度、人才三个维度构建保障体系。在组织保障方面,成立专项安全风险管控领导小组,由建设、设计、施工、监理单位技术负责人组成,明确各方职责,定期召开风险评估与技术交底会。在制度保障方面,严格执行材料进场检验制度,对锚杆、防护网等关键材料进行复检,确保性能符合设计要求;建立绩效考核制度,将风险评估准确率、防护措施落实情况纳入施工班组考核,实行奖惩分明。在人才保障方面,开展风险评估方法、智能监测设备操作、新型支护技术施工等专项培训,提升从业人员专业技能;吸纳地质勘察、结构工程、智能监测等领域专业人才,组建技术研发团队,针对复杂地质条件下的高边坡施工开展专项攻关。

5.2 技术应用推广建议

结合水利工程高边坡的地域差异、地质特性,提出针对性应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案,

针对西南山区高海拔、多降雨地区,重点强化排水体系与抗冻防护技术;针对华北平原软弱地基区高边坡,优先采用“锚杆+抗滑桩”联合支护;针对中小型水利工程,推出轻量化风险评估工具与经济型防护方案,降低技术应用成本。二是推动技术标准化与政策衔接,联合行业协会、科研院校制定高边坡施工安全风险评估与防护技术标准,明确指标体系、分级标准、施工要求。三是强化示范引领与产学研协同,选择典型水利工程打造示范项目,总结可复制的经验做法,通过现场观摩、技术交流等方式推广应用。四是完善应急救援配套,针对不同风险等级的高边坡,制定差异化应急救援预案,配备无人机、应急拦截网、抢险设备等应急物资,定期开展应急演练,提升风险处置能力。

6 结束语

水利工程高边坡施工安全风险评估与防护技术优化是一项系统性工程,需立足于“精准评估、科学防护、动态管控”的全流程思路,实现风险的提前识别、精准防控与实时预警。本文通过构建量化风险评估体系、优化“主动-被动-监测”一体化防护技术,有效解决了传统管控模式的难点。工程案例验证表明,该体系可显著提升高边坡施工安全水平,降低事故发生率。随着水利工程建设向复杂地质区域拓展,高边坡施工安全风险管控面临更高挑战。未来应进一步推动风险评估模型的智能化升级,结合人工智能、大数据技术实现风险的预测性评估;加强新型绿色支护材料研发,降低施工能耗与环境影响;完善技术标准与人才培养体系,推动优化技术在水利工程中规模化应用,为我国水利基础设施高质量建设提供坚实的安全保障。

参考文献:

- [1] 张学峰. 水利工程中高边坡开挖与支护工程的施工要点[J]. 建筑与装饰, 2024(05):166-168.
- [2] 孙兴龙. 高标准农田水利工程施工中的质量控制实践研究[J]. 当代农机, 2025(06):75-76.
- [3] 宋佳, 许兴虎. 基于智能化技术的水利工程建筑施工安全事故预防信息化策略与路径探索[J]. 水上安全, 2025(10):10-12.
- [4] 肖晶, 陈明文. 智能化技术在水利工程施工中的应用研究[J]. 水上安全, 2024(24):37-39.
- [5] 张泽. 水利工程建设施工过程中的质量管理措施[J]. 模型世界, 2025(23):206-208.
- [6] 肖俊聪. 水利工程质量与安全监督管理问题研究[J]. 水上安全, 2024(20):148-150.

市政给排水雨水口截污挂篮堵塞机理与防堵改进研究

叶立山

(莱州市恒通园林绿化工程有限公司, 山东 烟台 261400)

摘要 市政雨水口截污挂篮兼具控污与排水双重职能, 运行中却易受来流水力、颗粒负荷、挂篮参数、降雨过程及养护方式共同作用, 逐步出现入口架桥、筛网糊堵、篮底淤积和局部溢流等问题, 进而削弱截污效率并抬高积水风险。本文结合青岛市相关工程实践, 从设施布设现状入手, 梳理不同场景下堵塞表征, 进一步揭示水流冲击、垃圾汇聚、孔径配置、容积约束和季节性源强叠加所形成的演化链条, 并提出分段式“滤—拦—排”结构优化、模块化易维护构造、海绵设施协同减载及风险分级运维等改进方向, 以期为市政雨水口精细化改造提供参考。

关键词 市政给排水; 雨水口; 截污挂篮; 堵塞机理

中图分类号: TU992.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.019

0 引言

在全球气候变化和快速城镇化的影响下, 城市径流系数逐年升高, 雨水径流量持续增加, 城市洪涝灾害日益严重, 对人民的生命财产安全构成了重大威胁。雨水口作为城市内涝排水系统的重要组成部分, 是下排地表径流的关键设施。但随着城市化的快速推进, 地表漂浮物随径流输移堵塞排水系统的现象日益普遍^[1]。在大规模推广雨水口截污挂篮的情形下, 这一末端设施一方面承担削减初期雨水污染的功能, 另一方面却成为系统水力脆弱环节, 糊堵诱发的积水与溢流屡见不鲜^[2]。本文围绕市政给排水雨水口截污挂篮, 立足于设施类型与布设特征, 细化堵塞演化机理, 进而提出具有可操作性的防堵改进思路, 为排涝安全与水质控制的统筹提供参考。

1 市政给排水雨水口截污挂篮设置现状与堵塞问题归纳

1.1 设施类型与工程布设特征

市政雨水口内设置的截污挂篮受道路等级、排水体制和周边用地影响, 结构类型呈多样化格局。常见形式有侧石雨水口挂篮式格栅、雨水井箱体式收集篮, 也有与沉泥井、截流井组合的多级截污单元, 部分城市在篮体外侧增设沉砂腔或过滤网片, 用于分级拦截漂浮物和颗粒物^[3]。在工程布设方面, 新建干道多在方案阶段整体配置挂篮, 对雨水口间距和篮体容积统

一校核; 老旧片区则在既有井位基础上加装挂篮, 尺寸、提篮方式及检修空间受限较多。以青岛为例, 沿海低洼路段和核心商业街区雨水口挂篮布设较密, 普通居住街巷控制数量, 形成差异化配置格局。

1.2 堵塞现象的工程表现与空间分布

截污挂篮投入运行后, 堵塞问题在不同城市片区呈现出相似外观又带有各自印记。工程现场常见的表现包括雨水口箅面局部糊堵、挂篮内部垃圾堆积至溢流口附近、连接管口形成泥砂团块, 轻者削弱过水能力, 重者诱发道路积水和井内恶臭。在空间分布上, 临近商业街区、交通枢纽和集贸市场的雨水口, 塑料包装、一次性餐具集中, 堵塞形态以漂浮物架桥为主; 靠近绿化带和行道树密集路段, 则以落叶和枝条遮挡筛网为突出特征。青岛沿海景观大道在旅游季节客流增大, 雨水口挂篮内可见海边垃圾和城市生活垃圾交织, 形成季节性高风险带, 对截污效果和运维强度都构成压力。

2 市政雨水口截污挂篮堵塞机理分析

2.1 来流水力与颗粒负荷的耦合作用

来流条件决定截污挂篮承受的水力载荷和颗粒输运强度, 是堵塞形成的起点。小雨阶段, 道路面以薄层缓流为主, 携带的细颗粒泥沙在雨水箅附近减速, 先在筛网边缘与挂篮上缘附着; 中到大雨时, 井箅缝隙处形成束流, 局部流速显著提高, 树叶、塑料袋等轻质漂浮物被推压至挂篮入口, 架桥效应开始显现^[4]。

作者简介: 叶立山 (1971-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

雨季初期或降雨间隔较长的场次，道路沉积物与交通、旅游活动产生的垃圾叠加，悬浮物质浓度和化学需氧量峰值集中释放，进入雨水口的固体负荷明显抬升。青岛沿海景观带在游客高峰期，道路表面塑料碎片与细砂共存，轻质垃圾在上部筛网形成“盖帽”，密度较大的颗粒则在篮底堆积，两者交织，水流通道逐渐收缩，进入暴雨阶段后短时间内跨越临界堵塞状态。

2.2 挂篮结构参数对堵塞演化的放大效应

截污挂篮的几何尺度和构造细节，会在来流条件既定的前提下放大或缓释堵塞风险。筛网孔径减小有利于提高悬浮物去除率，在试验条件下孔径降至0.074 mm时，对悬浮物的削减效果明显增强，但有效过水面积骤减，压降累积速度显著加快。部分产品采用自下而上孔径递增的多级孔板或网篮结构，初期雨水经底部细滤段净化，后续大流量雨水经上部粗格栅泄流，设计意图是在水质和水量之间寻找平衡。若篮体容积偏小、深度不足，泥砂层很快占满沉积空间，细滤层提前被覆盖，上部粗格栅虽仍可过水，但整体水头损失急剧增加。青岛部分老城区改造中，早期采用浅盘式小容积挂篮，汛期数场强降雨后即出现频繁满篮现象，反复清掏也难以恢复初始水力条件，说明结构参数在堵塞演化中具有放大效应。

2.3 降雨历时、季节性源强与堵塞路径

降雨历时与季节性污染源强共同塑造截污挂篮的堵塞路径。短历时强降雨驱动高峰流量迅速形成，固体颗粒尚未充分沉积，更多在筛网上发生瞬时架桥，短时间内就可能触发溢流；长历时中小雨则促使细颗粒在篮底缓慢累积，形成致密泥皮，后续场次降雨即使强度不高，也容易在既有沉积层基础上完成堵塞闭合^[5]。城市初期雨水污染特征决定了首场或间隔较长场次降雨在污染负荷中的主导作用，相关监测结果表明，初段径流中悬浮物和有机物浓度显著高于后续阶段。青岛落叶期沿街行道树集中掉叶，扫保作业稍有疏漏，大量叶片在首场降雨中被卷入雨水口，在挂篮上缘形成厚叶层；若接续出现1场至2场中雨，叶片层吸水膨胀、压实，筛网孔隙明显缩小，堵塞从局部发展为整体，后续汛期维护压力随之抬升。

2.4 运维模式对堵塞风险的调节机制

截污挂篮的堵塞风险不仅取决于水力条件和结构参数，运维模式的选择直接改变风险暴露时间和空间分布。部分地区已在排水专项行动方案中提出按“雨前、雨中、雨后”分段清捞雨水口和挂篮，汛期每月至少开展2次全覆盖清捞，非汛期维持常态频次。从

机理层面看，清掏频次越贴近高风险降雨窗口，挂篮越有机会在承受高负荷来流前恢复有效容积；反之，即便日常有例行检查，只要清掏时点偏离关键场次，堵塞仍可能在短时间内形成。部分城市在试点中引入集中示范路段，对挂篮设置编号、记录满载周期，有的路段一周清掏一次即可稳定运行，有的节点在沿街夜市开放后需增加巡检班次。青岛主城区若能结合降雨预报与片区垃圾产生特征，构建分级巡检清掏制度，在有限人力条件下集中干预高风险挂篮，堵塞触发概率会显著压低，截污效益也更易保持在合理水平。

3 市政给排水雨水口截污挂篮防堵改进思路与关键技术方向

3.1 面向“滤—拦—排”分段功能的结构优化

围绕截污挂篮的“滤—拦—排”分段功能重塑内部构造，可以从源头削弱堵塞演化趋势。现状中，雨水口挂篮通常采用单腔箱式结构，雨水自算子跌入后直接冲击挂篮上部网面，树叶、塑料袋等粗颗粒在入口一带堆积，很快形成“拱桥”，导致水头急剧抬升，既削弱截污效果，又诱发路面积水。针对这一短板，可在雨水算子下方设置可拆卸预滤单元，引导初期径流在短程内完成粗筛，减轻挂篮主腔瞬时负荷；挂篮内部则采用“上疏下密”的多级网格，下部配合下沉式沉砂斗，使大粒径颗粒与细颗粒在竖向上自然分层，减少二次翻搅。为兼顾强暴雨条件下的行洪安全，可在挂篮侧壁或后壁布置独立溢流孔，溢流标高高于日常工作水位，平时保持截污优先，大流量时形成旁路排水路径。青岛西海岸新区在大湾港路以西、滨海大道吾悦广场公交站等易积水点开展排水“微改造”，通过增设雨水算子、铺设排水支管，将局部径流更均匀引入管网，改造后积水深度明显减轻，这类精细化整治为雨水口内部挂篮的分段布置腾出了水力余地，体现出“滤—拦—排”协同设计在工程上的可行性和必要性。

3.2 面向“易维护”的挂篮构造与配套部件

防堵思路一旦落到日常运维环节，挂篮结构很快显露“人一装备一道路”三方面的掣肘：篮体过重、开启空间狭窄、靠人工弯腰提举，维护周期稍一拉长，堵塞风险便迅速抬头。优化方向应围绕“易取、易卸、易洗、易复位”重新组织构造细节。一类思路是将整体挂篮拆分为上、中、下三段模块，上段承担截留漂浮物，中段收集中粒径杂物，下段沉淀泥沙，每段重量控制在单人可操作范围，配合侧向滑轨或翻转支点，运维人员站在路缘即可完成抽出、倾倒和回装，减少

在车道内长时间弯腰操作的危险；另一类思路是在挂篮上设置导向锁扣、定位限位和防脱落保险件，避免雨夜抢险时因视线受限导致复位不到位。青岛西海岸新区在滨海大道吾悦广场公交站改造期间实行“昼备夜战”的施工组织，利用凌晨窗口期完成雨水算子增设和排水支管铺设，早高峰前恢复路面，形成“施工零占路、交通零中断”的约束条件，这种对占道时间极为敏感的场景提醒设计者，在挂篮和配套部件布设时，应预留快捷拆装的界面，使运维队伍在类似“夜间窗口”内可以完成高频清掏，而无需大规模围挡与反复破复路，从制度层面降低因维护不及时引发的堵塞概率^[6]。

3.3 与海绵城市设施协同的源头减堵布局

截污挂篮承接的是街道尺度上的末端径流，如果上游缺少渗透、滞蓄和就地净化环节，挂篮必然长期工作在高颗粒负荷状态，任何局部结构优化都难以彻底化解堵塞隐患。更稳妥的路径是将挂篮纳入海绵城市格局，通过源头减量削弱其入流强度。青岛在修订城镇排水条例时，将雨水源头减排和资源化利用写入制度，对新建、改建项目提出配建低影响开发设施的要求，强调道路、广场、绿地应具备雨水吸纳、渗透和调蓄功能，从规划层面限制径流短时间集中压向雨水口。山东省适应气候变化行动方案中提出，海绵城市建设要配套雨水调蓄与内涝防治标准，推动雨水控制设施与排水系统一体布局，为挂篮减压提供上位政策支持。在青岛东岸前海湾区典型案例中，入海排污口系统整治、近岸海域水质优良面积比例连续多年保持 100%，表明源头削减陆源污染和径流负荷后，末端排水口的水质与水量状态得到根本改观，也为下游雨水口和截污挂篮提供了更温和的工况。沿着这一思路，在道路布设中将树阵下沉绿地、渗透铺装、线性雨水花园等设施与雨水口串联，使部分泥沙和有机碎屑在土壤和植被界面完成前置拦截，挂篮转而承担“精细截污+应急行洪”的复合角色，堵塞风险随源头负荷降低而显著缓解。

3.4 基于风险分级的监测预警与运维策略

截污挂篮堵塞并非均匀分布，而是集中在地势低洼、树叶飘落密集、车流扰动强烈和施工干扰频繁的路段，管理层若沿用“一刀切”的巡检频次和清掏模式，运维投入难以对应风险差异。更合理的做法是建立以风险分级为核心的监测和运维体系，将雨水口与挂篮按服务区域、历史积水记录、上游土地利用类型等指标划分等级，高等级点位加强监测和预警，低等

级点位实行常规巡查。青岛西海岸新区在排水“微改造”中构建“三级联查+物联研判+市民诉求梳理”的立体排查机制，配套智能传感设备实时记录重点路段积水数据，再结合群众反映集中度建立易积水点台账，形成数据支撑下的分类整治和改造顺序，这种做法同样适合迁移到挂篮运维场景，将传感器从路面扩展到雨水口内部，对水位异常抬升和排水时长延长进行阈值预警。在市域层面，青岛提出加快现代水网建设，推进防洪排涝、城市排水和智慧水务等项目，并集中改造道路低洼点排水设施和“卡脖子段”管网，内涝多发区排水能力显著提升。基于这些实践，可将挂篮清掏频次从“按固定周期”调整为“按风险等级+监测反馈”，在高风险路口叠加雨前预清掏和雨中应急巡查，低风险片区则侧重雨后抽查和抽样检查，既压缩无效作业，又把有限运维力量精确投向最有可能堵塞的挂篮节点，使防堵策略真正落在风险源头。

4 结束语

围绕市政雨水口截污挂篮的设置现状和堵塞表现，从来流条件、结构参数、降雨历程和运维模式等方面梳理作用链条，呈现挂篮由轻度淤积演变为失效的过程。基于此，提出分段滤拦排的结构优化思路，强调易维护构造、源头减堵布局及风险分级运维的组合应用，并强调与海绵设施布局和城市水网建设协调推进。青岛相关工程表明，规划、设计和养护环节若能形成合力，截污挂篮既可承担面源污染削减任务，又能保持排水能力处于安全区间，为类似沿海和老城区道路的设施改造提供了可操作的思路。

参考文献：

- [1] 侯精明,王梓驿,李东来,等.管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟[J].水科学进展,2025,36(01):122-131.
- [2] 夏军强,陈倩,董柏良,等.雨水口堵塞程度对其泄流能力影响的试验研究[J].水科学进展,2020,31(06):843-851.
- [3] 卜良河,侯精明,吕佳豪,等.漂浮物对城市道路雨水口致堵规律研究[J].人民珠江,2025,46(07):43-52.
- [4] 王子源,蔡敏,廖卫红,等.考虑雨水口堵塞及处置效果的城市内涝模拟[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(03):598-608,618.
- [5] 和迎富.雨水排水防堵塞装置研究[J].水利技术监督,2025(02):194-196.
- [6] 严建虎.城市市政给排水管网的优化配置与管理探析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(26):91-93.

住宅建筑工程施工中的灌注桩后注浆施工技术分析

张 超

(淮南乾城置业有限公司, 安徽 淮南 232099)

摘 要 灌注桩后注浆施工技术是住宅建筑地基处理的重要技术手段, 其应用质量直接决定住宅建筑主体结构的承载能力与整体结构稳定性, 关系到住宅使用过程中的安全性与长期耐久性。在住宅建筑工程施工中, 场地条件、地质状况、施工工艺等因素会导致该技术应用存在诸多不完善之处。本文结合住宅建筑工程施工特点与现场施工经验, 阐述该技术的特征, 明确各关键施工环节的操作要点, 提出质量控制措施, 为该技术的规范应用提供实用参考, 助力施工单位提升住宅建筑地基施工质量, 保障住宅建筑安全稳定运行。

关键词 住宅建筑; 灌注桩后注浆; 注浆管; 灌注桩成孔; 地基处理

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.020

0 引言

住宅建筑与人们的日常生活联系紧密, 其施工质量直接影响居住的安全性与舒适性, 也关系到居民生活的幸福感。地基工程是住宅建筑的基础支撑, 施工质量不合格会引发住宅沉降、开裂等问题, 影响住宅建筑功能正常使用, 甚至威胁居住者的生命财产安全。灌注桩施工技术具备适应性强、施工便捷、承载性能优良、造价合理等优势, 在各类住宅建筑地基处理中应用广泛。灌注桩后注浆技术基于传统灌注桩技术发展而来, 可改善桩身与土体结合性能, 解决传统技术存在的质量不均、承载力不足等问题。

1 灌注桩后注浆施工技术的特点

1.1 承载性能

灌注桩后注浆施工技术的承载性能优势主要在于注浆作业形成的固化作用, 能够有效固化桩端沉渣与桩周土体, 消除桩体与土层之间存在的各类空隙, 包括施工过程中因成孔、浇筑等环节产生的微小缝隙与松散空间, 增强桩体与土层之间的结合紧密性, 让桩体与周围土体形成更为牢固的整体, 减少桩体受力时的相对位移, 提高桩体的侧摩阻力与端承力, 实现桩体承载能力的大幅提升。注浆形成的固化体还能对桩体本身的质量起到一定的补强作用, 减少桩体浇筑过程中可能出现的质量缺陷对承载性能的影响, 让桩体整体受力更为均匀, 形成长期稳定的受力体系, 适配

各类住宅建筑的地基承载需求, 减少因承载能力不足引发的地基隐患, 延长桩体的使用寿命。

1.2 施工成本合理

灌注桩后注浆施工技术无需新增大型施工设备, 可沿用传统灌注桩施工的现有设备, 仅需额外增设注浆管、注浆泵等结构简单、成本较低的辅助设备, 有效控制设备投入方面的成本支出。同时, 该技术可在保证承载需求的前提下, 减少桩体长度与桩体数量, 降低桩体材料、施工人工等方面的成本支出, 从而降低地基处理的整体成本, 施工流程与传统灌注桩施工流程衔接顺畅, 无需改变原有施工节奏, 可同步规划、分步实施, 不会大幅延长施工周期, 可减少人工、设备租赁等方面的额外支出, 且施工工艺简单、浆液用量可精准控制, 进一步降低成本投入, 符合住宅建筑工程的经济性要求。

2 住宅建筑工程施工中灌注桩后注浆施工技术的操作要点

2.1 注浆管设置

注浆管的设置必须严格按照设计要求与施工规范执行。注浆管的规格选择结合桩体直径大小、注浆压力设计参数及施工现场实际施工条件综合确定, 实际施工中应用最广泛的是直径 25 ~ 32 mm 的无缝钢管, 材质均匀、承压性能良好, 壁厚严格遵循设计给出的具体标准, 确保能承受高压注浆过程中产生的瞬时压力与持续压力, 防止注浆时出现钢管破裂、变形、渗漏等影响

作者简介: 张超(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

施工进度与质量的问题。注浆管数量根据桩体直径实际尺寸灵活调整,桩体直径小于 1.2 m 时,一般设置 2 根,对称分布在钢筋笼两侧;桩体直径大于等于 1.2 m 时,设置 3~4 根,所有注浆管均匀固定在钢筋笼上,保证注浆时浆液均匀扩散,全面覆盖桩端沉渣层与桩侧周边土体,避免注浆盲区导致的承载能力不足。注浆管安装应与钢筋笼制作同步开展,避免后期单独安装破坏钢筋笼结构或影响安装精度。安装时应将注浆管牢固固定在钢筋笼主筋上,固定方式可选用绑扎或焊接,绑扎点间距控制在 1.5~2 m,确保绑扎牢固不松动;焊接时保证焊缝饱满、无夹渣、无气孔,焊缝高度不低于钢管壁厚,避免施工中因钢筋笼吊装、混凝土浇筑等工序扰动,导致注浆管脱落、移位、松动^[1]。

2.2 灌注桩成孔与浇筑施工

灌注桩成孔前,详细勘察施工现场地质条件,结合勘察报告选用合适成孔方式,钻孔灌注桩适用于粘性土、砂土、粉土等地质较好、土层稳定的场地,成孔效率高、孔壁平整,减少孔壁坍塌风险;冲孔灌注桩适用于岩石、碎石土、卵石土等地质复杂、土层较硬的场地,通过冲击锤冲击破碎岩层,确保成孔深度达到设计要求。

成孔过程中需合理控制钻进速度与深度,粘性土层中钻进速度可控制在 1~1.5 m/min,避免过快扰动孔壁导致坍塌;砂土、粉土层中需放缓至 0.5~1 m/min,及时注入泥浆保持液面高度,增强孔壁稳定性;岩石层中根据岩石硬度调整速度,确保钻进质量。钻进至设计标高后,停留 10~15 min,利用钻具旋转清理孔底浮渣,确保桩端达到设计持力层,成孔后采用专用设备检测孔深、孔径、孔垂直度,孔深偏差不大于±50 mm,孔径偏差不大于±10 mm,垂直度偏差不大于1%,检测合格方可进入下一道工序。

成孔后及时清孔,清除孔底沉渣与孔壁泥皮,避免沉渣影响桩体与持力层结合、削弱桩体端承力和侧摩阻力,实际施工多采用换浆法,注入新泥浆替换含沉渣旧泥浆,清孔时间 30~60 min,根据沉渣厚度调整,确保端承桩沉渣厚度不大于 50 mm,摩擦端承桩不大于 100 mm。清孔后 30 分钟内需浇筑混凝土,选用与桩体设计强度一致的商品混凝土,坍落度控制在 180~220 mm,偏差不大于±20 mm,保证流动性与和易性。采用直径 200~300 mm 无缝钢管导管浇筑,提前做水密性试验,试验压力为导管工作压力的 1.5 倍,导管下口距孔底 30~50 cm,浇筑前注入适量水泥砂浆,浇筑中不断提升导管,确保下口埋入混凝土 2~6 m,浇筑速度控制在 2~3 m³/h,桩顶浇筑高度高出设计桩顶 50~100 cm,浇筑完成后覆盖土工布洒水养护,时间不少于 14 天,保持混凝土表面湿润^[2]。

2.3 注浆施工操作要点

注浆施工严格按照设计要求与施工规范操作,精准控制各项参数。注浆应在混凝土浇筑完成、强度达到设计强度 70% 以上开展。注浆顺序遵循“先桩端后桩侧、先外围后内部”原则,桩端注浆压力稳定达到设计要求后再进行桩侧注浆;群桩基础应先对外围桩注浆,利用外围桩注浆形成的约束作用,避免内部桩注浆压力过大导致移位,保证注浆均匀性。

注浆材料以水泥浆为主,选用强度等级不低于 42.5 级的普通硅酸盐水泥,配合比根据设计与地质条件确定,水灰比控制在 0.5~0.7。注浆材料采用专用设备搅拌不少于 2 分钟,确保水泥完全溶解、浆液均匀无结块,搅拌完成后经 1~2 层滤网过滤,去除杂质与未溶解颗粒。注浆压力根据地质、桩体直径、注浆深度确定,桩端 2~4 MPa、桩侧 1~2 MPa,注浆中用压力传感器实时监测记录,压力骤升应停止注浆排查堵塞或阻力问题,压力过低则调整参数、加固接口。注浆量应符合设计要求,用流量计量设备实时记录,注浆量达标且压力稳定 3~5 分钟后停止注浆,注浆速度控制在 20~30 L/min,根据压力与注浆量及时调整^[3]。注浆完成后用水泥砂浆密实封堵注浆管,详细记录注浆相关参数,为后续检测验收提供依据。

2.4 后期养护与清理

后期养护与清理是确保施工质量的重要环节,住宅建筑施工中需严格按规范开展,不得随意简化省略。注浆完成后对桩体全面养护,时间不少于 28 天,结合混凝土强度增长规律与注浆材料固化速度,确保混凝土与注浆固化体充分结合、强度达到设计要求。养护中应保持桩体周围土壤湿润,采用洒水、覆盖土工布等方式,避免桩体表面干燥开裂,洒水频率根据天气调整,高温干燥天气增加次数,阴雨天气适当减少。

养护期间严禁在桩体周围进行重型机械作业,禁止车辆碾压、重物撞击,防止桩体变形损坏,同时设置明显警示标志、划定养护区域,禁止无关人员进入。养护完成后清理桩头,去除高出设计标高的多余混凝土、浮浆与松散块体,采用人工或小型机械操作,避免大型机械撞击损坏桩体主筋与结构,清理后修整桩头,确保标高、平整度符合设计标准,表面无蜂窝、麻面、裂缝等缺陷。同步清理施工现场,注浆设备需全面清洗保养,去除内部残留水泥浆后妥善存放;剩余材料分类整理,可回收材料妥善保管,不可回收材料按环保要求处理;废弃泥浆集中收集于专用泥浆池,经沉淀、过滤、固化处理后排放,避免污染地下水与周边土壤。养护清理完成后全面检查施工质量,抽样检测桩体承载能力与注浆固化体密实度,核对施工参数与效果,发现问题及时整改,确保符合设计与规范要求,保障住宅建筑地基安全稳定。

3 住宅建筑工程施工中灌注桩后注浆施工的质量控制措施

3.1 注浆管通畅性控制

注浆管的通畅性是注浆施工顺利开展的基础。注浆管安装前的清理工作要细致,所有进场的管道都需进行全面清理,彻底去除管道内部的杂物、铁锈及残留灰尘,清理完成后对管道内壁进行检查,确保管道内壁光滑平整。注浆材料的搅拌环节,搅拌的均匀性影响浆液的纯度,搅拌完成后的水泥浆经过双层滤网过滤处理,滤网的孔径选择贴合实际施工需求,能够彻底拦截浆液中的结块、杂质及未完全溶解的水泥颗粒,过滤环节是保障注浆管通畅性的重要防线。

在注浆施工过程中,连续作业的节奏保持尤为重要,各工序间的间隔时间尽量缩短,减少水泥浆在管道内的停留时间,水泥浆的凝固特性决定停留时间过长会导致浆液结块,进而堵塞管道,影响注浆作业的连续性。因施工需求不得不暂停注浆时,注浆管的清理工作及时跟进,采用清水高压冲洗管道内部,冲洗的力度控制合理,确保管道内无任何残留浆液,冲洗完成后对管道进行密封处理,防止杂物进入。恢复注浆前,再次对管道通畅性进行全面检查,采用清水试通的方式确认无任何堵塞后,再启动注浆作业^[4]。施工过程中安排专人全程巡查注浆管的运行状态,确保注浆管始终处于通畅状态,保障注浆作业的连续性与稳定性,为注浆效果的提升提供保障。

3.2 注浆压力稳定性控制

注浆施工开展前,对注浆泵及配套设备的全面调试工作落实到位,调试工作围绕设备的各主要部件展开,重点检查压力控制装置、密封装置的运行状态,压力控制装置的精度符合设计标准,能够精准反馈与调节注浆压力,密封装置确保无任何渗漏,避免因密封不严导致压力损耗。调试过程中进行多次试运转,记录设备运行过程中的压力输出情况,确认设备各部件运行正常、性能达标,能够稳定输出设计要求的注浆压力,从设备层面避免压力波动现象的出现。

注浆管安装完成后,注水试验作为检查管道密封性的核心手段,能够全面排查管道接口、管道本身的漏水、漏气隐患,试验过程中逐步提升试验压力,观察管道各部位的密封情况,对发现的密封问题及时进行加固处理,接口处采用密封胶与加固件双重防护,管道破损部位及时进行修补或更换,确保管道无任何渗漏,保障压力传递的有效性。注浆材料水灰比的确 定结合施工现场的地质条件,不同地质条件下土层的渗透阻力不同,对水泥浆的流动性与压力传递效果的要求也存在差异,水灰比的调整贴合实际地质情况,

既保证水泥浆具有良好的流动性,便于浆液在管道内顺利输送,又确保浆液具有良好的压力传递效果^[5]。针对地质条件复杂、土层渗透阻力较大的区域,适当提高注浆压力或采用分段注浆的方式,确保各区域注浆压力均能达到设计要求,实现压力的稳定控制。

3.3 注浆量合理性控制

注浆量需结合工程实际情况实现精准管控,既要保证注浆量满足设计要求,充分发挥注浆对桩体承载能力的提升作用,又要避免不必要的浆液浪费,降低施工成本。施工前的注浆量设计工作要结合施工现场的地质勘察数据、桩体直径、桩长、桩体类型等相关参数,通过理论计算与现场试注浆相结合的方式,确定每根桩的注浆量标准,为施工过程中的注浆量控制提供明确依据。

注浆施工过程中要安排专人负责注浆量的实时记录,详细记录每根桩的注浆总量、注浆速度及注浆过程中的流量变化。记录数据要求精准无误,同时密切关注注浆量与注浆压力的联动变化,当压力出现异常波动时,及时调整注浆量,确保注浆量逐步达到设计标准。注浆管及接口的密封性检查常态化,定期排查管道是否存在漏水情况,管道接口处的密封防护到位,对发现的漏水问题及时处理,采用加固密封的方式减少水泥浆的流失,确保注浆量能够全部作用于桩端与桩侧。

4 结束语

灌注桩后注浆施工技术在住宅建设中的实用性强,能有效保障住宅建设工程的顺利推进。该技术通过加固桩底与桩侧的土体,能够大幅度提升桩体承载能力,稳固房屋结构,保障住宅的安全性与耐用性。同时,灌注桩后注浆施工技术还能帮助施工企业降低工程成本,提升经济效益。随着建筑行业的发展,灌注桩后注浆施工技术将在各类型建筑项目中得到广泛应用,并在实践中持续优化,为打造更优质的住宅项目提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 彭伟.住宅建筑工程施工中灌注桩后注浆施工技术[J].居舍,2025(02):55-58.
- [2] 胡伟鹏,欧光付.房屋建筑工程灌注桩后注浆施工技术应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024(23):171-173.
- [3] 张永振.建筑工程灌注桩后注浆关键施工技术分析[J].砖瓦,2024(10):160-162.
- [4] 许志伟.建筑工程灌注桩后注浆施工技术研究[J].工程技术研究,2024,09(18):85-87.
- [5] 周龙海.建筑工程施工中灌注桩后注浆施工技术标准[J].大众标准化,2024(11):35-36.

建筑工程剪力墙结构大模板施工技术 优化与混凝土成型质量控制

薛丽丽, 马洪波, 彭 燕

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

摘 要 本文针对建筑工程剪力墙结构大模板施工传统工艺存在的模板变形、接缝漏浆等质量难点, 结合高层、超高层建筑对结构精度与施工效率的双重需求, 系统探究大模板施工技术优化路径与混凝土成型质量控制方法。通过文献研究法、试验对比法与工程案例分析法, 从模板材料创新、支模体系优化、施工工艺精细化、质量智能管控四个维度构建全流程技术体系, 重点分析新型模板材料应用、支模加固工艺改进、混凝土浇筑控制对成型质量的影响机理。结果表明, 优化后的高性能改性聚碳酸酯模板+单侧支模体系, 配合根部防漏浆工艺与智能监测系统, 可将剪力墙垂直度偏差控制在 3 mm 以内、平整度偏差 ≤ 1 mm, 混凝土表面缺陷发生率较传统工艺降低 85% 以上, 施工效率提升 30%。

关键词 剪力墙结构; 大模板施工; 模板材料优化; 成型质量控制; 支模体系优化

中图分类号: TU755.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.021

0 引言

随着我国建筑业向高层化、装配化、绿色化转型, 剪力墙结构因抗震性能优、空间利用率高, 被广泛应用于住宅、商业综合体等建筑工程中。大模板施工技术作为剪力墙结构成型的核心工艺, 其施工质量直接决定墙体垂直度、平整度及混凝土观感, 进而影响建筑结构安全性与耐久性。当前建筑工程施工中, 传统大模板技术仍存在诸多短板: 模板材料机械强度不足导致变形超标, 支模体系稳定性差引发浇筑过程位移, 接缝处理粗放造成漏浆、烂根等缺陷, 混凝土浇筑与养护协同性不足导致表面裂缝、蜂窝麻面等问题, 难以满足现代建筑对施工精度与效率的高要求。在高质量发展背景下, 建筑工程施工对剪力墙成型质量的要求持续提升, 大模板施工技术优化与质量控制成为突破行业瓶颈的关键。本文结合近三年行业创新成果, 从材料、结构、工艺、管理全流程开展研究, 构建科学高效的技术优化与质量控制体系, 为同类工程施工提供技术参考。

1 剪力墙结构大模板施工的核心问题与影响因素

1.1 施工面临的核心技术难点

建筑工程剪力墙大模板施工受材料性能、施工工艺、环境条件等多重因素影响, 现阶段主要面临三大

核心难点。其一为模板体系适配性不足, 传统钢模板自重过大, 拼装效率低下且易锈蚀, 木模板则存在强度低、周转次数少、变形量大等问题, 难以兼顾施工效率与成型精度。其二为支模加固工艺粗放, 传统双侧支模体系在地下室外墙等狭窄空间施工受限, 支撑立杆间距不合理、拉结件强度不足易引发模板位移, 进而导致剪力墙垂直度偏差超标; 根部封堵采用砂浆封堵方式, 因强度不足或封堵不密实, 易出现烂根、露筋等质量通病。其三为质量管控精准度低, 传统施工依赖人工目测与尺量检测, 难以实时监测浇筑过程中模板变形与混凝土凝结状态, 质量缺陷发现滞后, 修复成本高。

1.2 成型质量的关键影响因素

剪力墙混凝土成型质量是材料、施工、管理等多因素协同作用的结果, 核心影响因素可归纳为四类。模板材料特性是基础, 模板的机械强度、刚度、表面平整度直接决定混凝土成型精度, 传统模板拉伸强度不足 30 MPa、弯曲强度 ≤ 45 MPa, 难以抵御混凝土侧压力^[1]; 而新型改性材料的性能参数则能显著提升抗变形能力。支模体系设计是核心, 支撑构件的布置密度、拉结件的紧固力、模板拼接精度直接影响体系稳定性, 立杆间距过大、拉结件松动易导致浇筑过程中

作者简介: 薛丽丽 (1988-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

模板位移；单侧支模体系的地锚承载力、三角架刚度设计不合理，会引发外墙倾斜。施工工艺参数是关键，混凝土浇筑速度过快、振捣深度不足或过振，易导致骨料堆积、表面泛浆不均；模板拆除时间过早，会引发墙体表面剥落、裂缝。质量管控水平是保障，监测手段的及时性、养护措施的有效性直接影响最终质量，传统养护方式因保湿不充分，易导致混凝土表面干缩裂缝；智能监测系统的缺失则无法实现对模板变形的实时预警^[2]。

2 大模板施工技术优化路径与质量控制方法

2.1 模板材料创新与选型优化

模板材料优化是提升成型质量的源头，核心目标是选用“高强度、低自重、高周转、易拼装”的新型材料，兼顾技术性能与经济性。在材料选型方面，推广应用高性能改性聚碳酸酯（PC）模板，该材料经专项改性处理后，机械性能显著优于传统模板，拉伸强度达45 MPa、弯曲强度60 MPa、维卡软化温度126℃，能有效抵御混凝土侧压力；其自重仅为钢模板的1/3，标准层施工中一名工人每日可完成25~30 m²拼装，施工效率较传统钢模板提升30%，且周转次数可达200次以上，大幅降低材料损耗成本。在辅助材料配套方面，采用高密度海绵条作为拼缝密封材料，其压缩回弹率≥85%，能有效填充模板拼缝间隙，避免漏浆。在模板规格设计方面，根据剪力墙尺寸定制模块化模板，减少拼缝数量，阴阳角采用专用异形模板，弧度偏差≤0.5 mm，确保墙体转角成型顺直^[3]。

2.2 支模体系优化与加固工艺改进

支模体系优化的核心是提升稳定性与空间适配性，针对不同施工场景设计差异化方案。对于地下室外墙等狭窄空间，采用单侧支模体系替代传统双侧支模，该体系以型钢三角架为主承力构件，通过地锚系统将受力传递至本层梁板结构，无需对拉止水螺杆，消除渗水隐患点。对于标准层剪力墙，采用“立杆+水平杆+斜撑”组合支撑体系，立杆间距≤0.9 m，水平杆步距≤1.2 m，斜撑与地面夹角控制在45°~60°，并设置扫地杆增强整体稳定性；模板背部采用双拼槽钢背楞，间距≤400 mm，提升模板抗变形能力^[4]。在根部防漏浆工艺方面，摒弃传统砂浆封堵方式，采用50×50×3 mmL型角铁封堵，角铁与地面混凝土紧密贴合后用钢钉固定，局部空隙采用聚合物砂浆填充，确保根部密封严实。在加固质量验收方面，采用扭矩扳手检测拉结件紧固力，扭矩值≥40 N·m，并用激光测距仪检测模板垂直度与平整度，偏差超标时立即调整。

2.3 施工工艺精细化与混凝土浇筑控制

施工工艺精细化是保障成型质量的关键，从模板安装、混凝土浇筑、拆模养护全流程制定管控标准。在模板安装阶段，先进行放线定位，弹出剪力墙边线与控制线，偏差≤2 mm；模板安装采用“先立侧模、后加固、再校正”的顺序，利用经纬仪与水准仪实时监测垂直度与标高，安装完成后进行整体验收，确保垂直度偏差≤3 mm、标高偏差≤5 mm。在混凝土浇筑阶段，选用干缩裂缝抑制剂与自愈合结晶掺合料复合改性混凝土，坍落度控制在140~160 mm，扩展度≥500 mm，提升混凝土工作性与抗裂性能；振捣采用插入式振捣器，振捣间距≤400 mm，振捣时间15~20 s/点，至表面泛浆无气泡逸出，杜绝漏振、过振。在拆模与养护阶段，根据混凝土强度发展情况确定拆模时间，侧模拆除时混凝土强度≥2.5 MPa，且保证表面及棱角不受损伤；养护采用智能喷淋系统，保持混凝土表面湿度≥90%，养护时长≥14 d，地下室外墙等关键部位延长至21 d，促进混凝土强度发展与微裂缝自愈合。

2.4 质量智能管控系统构建

针对传统质量管控精准度低的问题，构建“监测—预警—调控”一体化智能管控系统。在监测设备布设方面，沿剪力墙高度方向每2 m布设1组应变传感器，监测模板变形量；在模板拼缝处安装湿度传感器，实时监测漏浆情况；采用高清摄像头对浇筑过程进行全程可视化监控，捕捉振捣不规范、浇筑速度异常等问题。在数据处理与预警方面，监测数据通过无线传输模块实时上传至云端平台，自动生成模板变形曲线、混凝土湿度变化趋势图，当变形量超过2 mm或湿度异常时，系统自动触发声光预警，提醒管理人员及时采取加固、补封等措施。在质量追溯方面，建立施工全过程数据库，记录模板材料参数、支模加固验收记录、混凝土配合比、养护数据等信息，实现质量问题可追溯^[5]；采用三维激光扫描技术对成型墙体进行实测实量，生成点云模型，与设计模型对比分析，精准识别偏差部位，为后续整改提供数据支撑。

3 工程案例验证与优化效果分析

3.1 工程案例概况

以京东上海中心项目地下结构及标准层剪力墙施工为研究对象，该项目为超高层建筑，地下3层、地上42层，剪力墙结构总浇筑面积约8.6万m²，地下室外墙施工空间狭窄，对模板体系适配性与成型质量要求极高。项目采用本文优化的大模板施工技术体系，

包括高性能改性 PC 模板、地下室外墙单侧支模体系、根部 L 型角铁封堵工艺及智能监测系统,重点监测剪力墙垂直度、平整度、表面缺陷发生率等指标。

3.2 优化效果量化分析

通过施工现场监测数据与传统工艺对比,优化技术体系取得显著成效。在成型质量方面,剪力墙垂直度偏差平均为 2.8 mm,平整度偏差 ≤ 1 mm,达到“垂三平一”高标准,较传统工艺提升 61.3%;混凝土表面无烂根、漏浆、蜂窝麻面等缺陷,表面缺陷发生率为 3.2%,较传统工艺的 21.5%降低 85.1%,观感质量达到优良标准。在施工效率方面,PC 模板模块化拼装减少了拼缝处理时间,单侧支模体系解决了狭窄空间施工难题,标准层剪力墙施工周期从传统 4 d/层缩短至 2.8 d/层,施工效率提升 30%。在结构性能方面,混凝土 28 d 抗压强度达标率 100%,平均强度 ≥ 40 MPa,抗渗等级达到 P8,满足超高层建筑设计要求;墙体裂缝发生率为 0.8%,且裂缝宽度 ≤ 0.1 mm,可通过自愈合掺合料修复,结构耐久性显著提升。在经济性方面,虽然新型模板与智能监测系统增加了 8% 的前期投入,但因质量缺陷修复费用减少 90%,材料损耗率降低 35%,工程综合成本降低 15%,实现了质量与效益的双赢。

4 大模板施工技术优化落地的保障机制与应用建议

4.1 技术优化落地的保障机制

为确保大模板施工技术优化措施有效落地,需从组织、制度、人才三个维度构建保障体系。在组织保障方面,成立专项技术领导小组,由建设、设计、施工、监理单位技术人员组成,明确各方职责,建立“总项目部—施工班组”三级推进机制,定期召开技术交底会与进度推进会,及时解决施工中的技术难题。在制度保障方面,制定完善的技术管理制度,包括模板材料进场检验制度、支模体系验收制度、施工过程旁站监理制度、质量考核制度等;对新型模板材料进行进场复检,拉伸强度、弯曲强度等指标需符合行业标准;将垂直度、平整度等质量指标纳入施工班组绩效考核,实行奖惩分明的考核机制。在人才保障方面,开展新型模板安装、智能监测设备操作等专项培训,通过理论教学与实操演练相结合的方式,提升施工人员专业技能。

4.2 技术优化的工程应用建议

结合建筑工程地域差异、结构类型特点,提出针对性应用建议。一是因地制宜选择技术方案,高层住宅标准层剪力墙可优先采用高性能 PC 模板+组合支撑

体系,提升施工效率。二是推动技术与管理深度融合,将智能监测数据与质量管理体系结合,建立质量预警机制;把模板安装、混凝土浇筑等关键工序纳入 BIM 模型,实现施工过程可视化管控;加强材料供应商管理,建立新型模板材料合格供应商名录,确保材料质量稳定性^[6]。三是加强产学研协同创新,联合科研院所开展新型模板材料、智能监测技术的研发,优化材料性能与监测精度。四是完善行业标准规范,结合新型模板技术发展现状,修订大模板施工质量验收标准,明确 PC 模板、单侧支模体系的施工技术要求与质量评定指标,为工程实践提供统一指导。

5 结束语

建筑工程剪力墙结构大模板施工技术优化与混凝土成型质量控制是一项系统性工程,需立足于“材料创新、体系优化、工艺精细、管理智能”的全流程思路,从源头解决传统工艺的质量难点。本文通过优化模板材料、支模体系、施工工艺与质量管控方式,构建了科学高效的技术体系。工程案例验证表明,该体系可显著提升剪力墙成型精度与施工效率,降低质量缺陷发生率。随着建筑业数字化、绿色化转型,大模板施工技术将朝着轻量化、模块化、智能化方向发展。未来应进一步推动 BIM、物联网、人工智能与施工技术的深度融合,开发智能模板机器人、混凝土凝结状态实时监测系统先进技术;加强新型绿色模板材料研发,提升材料循环利用率;完善技术标准与人才培养体系,推动优化技术在更多同类工程中推广应用,为建筑工程高质量发展提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 杨涛,冯力强,何翰卿,等.钢框架-钢板墙和组合柱-钢梁框架振动台试验研究[J].振动与冲击,2023,42(04):10-18.
- [2] 曾婷.混凝土装配式住宅建筑工程的施工技术[J].砖瓦世界,2023(06):64-66.
- [3] 张明,喻需雯.超高层建筑基础大体积混凝土施工控制研究[J].中国建筑装饰装修,2024(10):184-186.
- [4] 刘俊青.高层建筑钢管混凝土结构施工技术探析[J].河南建材,2024(08):45-51.
- [5] 张德华.土木工程中大体积混凝土结构施工技术实践探讨[J].四川建材,2024,50(07):132-134.
- [6] 张鑫.房屋建筑工程大体积混凝土结构施工技术[J].工程建设与设计,2024(03):151-153.

装配式建筑与建筑节能施工融合发展研究

王东平

(安徽东垣建设工程有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要 为破解装配式建筑与建筑节能施工各自独立发展、融合程度不深的现实问题, 推动建筑行业绿色低碳转型, 本文以装配式建筑与建筑节能施工融合发展为研究对象, 从产业政策、技术体系、市场需求三个维度剖析两者融合的现实基础, 梳理标准体系衔接不足、技术集成应用滞后、产业协同机制缺失等突出问题。在此基础上, 从构建协同化标准体系、推动一体化技术组合、完善全产业链协作模式三个层面提出优化路径, 旨在为相关人员提供借鉴。

关键词 装配式建筑; 建筑节能施工; 协同机制; 绿色建造

中图分类号: TU761.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.022

0 引言

新质生产力赋能建筑行业转型, 绿色化、工业化、智能化成为发展核心导向。当前各地持续优化装配式建筑发展政策, 推动智能建造与节能技术深度融合, 装配式建筑凭借工厂预制、现场装配的优势, 成为实现建筑节能的重要载体。但在实践中, 两者融合仍面临标准衔接不畅、技术集成不足、产业链协同薄弱等现实困境, 难以适配行业发展要求。本研究立足于2026年装配式建筑发展新规, 聚焦行业绿色转型刚需, 剖析两者融合的现实价值与现存问题, 探索科学优化路径, 为推动建筑行业高质量、低碳化发展提供实践支撑。

1 装配式建筑与建筑节能施工融合的现实基础

1.1 产业政策导向下的融合必然性

政策体系为装配式建筑与建筑节能施工的融合提供顶层支撑与发展方向。“双碳”目标的提出从国家战略层面倒逼建筑行业摆脱高能耗、高污染的传统发展模式, 绿色化转型成为行业不可逆转的核心趋势。装配式建筑凭借工厂预制、现场装配的核心特性, 从源头减少施工过程中的物料浪费与能源损耗, 天然契合建筑节能的核心诉求, 而建筑节能施工则为装配式建筑的绿色价值赋能, 让装配化的优势进一步转化为实际的节能效益, 两者的融合是响应“双碳”目标、推动行业转型升级的必然选择。国家层面已将装配式建筑与建筑节能施工纳入统一产业规划, 打破两者各自发展的割裂格局, 明确两者融合的发展路径与核心

要求, 为行业发展划定清晰方向。地方层面配套政策持续落地, 通过优化审批流程、加大扶持力度等方式, 推动装配式技术与节能施工标准的协同衔接, 破解两者融合过程中的政策壁垒, 让政策红利切实转化为融合发展的动力, 推动两者从政策引导走向常态化、规范化发展, 彰显产业政策导向下的融合必然性。

1.2 技术体系互补性支撑融合可行性

技术特点的互补性为装配式建筑和建筑节能施工这两项工作的结合奠定了基础, 它们的技术架构并不是完全分开的, 反而有着与生俱来的匹配程度和协作能力, 能够带来比简单叠加更明显的发展成果。装配式建筑在工厂进行预制环节的主要优势体现在把过去需要在工地完成的浇筑工作挪到工厂里面用标准化流程来做, 大幅度减少现场建造过程中模板使用上的浪费、混凝土材料的损耗, 还能避开现场搅拌操作、养护阶段带来的能源开支和环境污染问题, 从施工开始就做到节约能源、降低消耗, 为建筑节能施工创造了基本条件^[1]。模块化设计思路属于装配式建筑关键技术内容, 通过统一标准、明确的设计规范, 可以将外墙保温处理、门窗节能性能、新型节能材料运用等节能技术与构件生产环节做整体性结合, 规避节能技术和装配构件之间后期再去匹配的烦琐步骤, 使得节能手段能够覆盖构件生产的全部过程。装配式施工采取模块化拼装、标准化操作的办法, 施工步骤简单明确, 契合节能施工要求, 不用再添加烦琐的操作环节, 既提高了施工速度, 又可以确保节能成效, 这种匹配度

作者简介: 王东平(1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

让两者的深度整合拥有了可靠的技术后盾，突出技术架构互补所带来的结合可能性。

1.3 市场需求升级催生融合紧迫性

市场与社会需求的提升带动装配式建筑与建筑节能施工的融合从可以选变成必须选。绿色低碳已经成为建筑行业的核心价值导向，市场需求的变化直接倒逼行业完成技术与模式的革新。随着广大人民群众生活品质的改善，高品质绿色建筑成为市场主流需求，消费者不再仅仅在意建筑的居住功能，更看重建筑的节能性、环保性、舒适性，装配式建筑与节能施工的融合，能够实现建筑功能和绿色价值的双重提升，精准匹配市场需求的提升方向。从项目竞争力方面看，全生命周期节能效益成为衡量建筑项目价值的核心指标，融合装配式与节能施工的项目，能够有效降低建筑使用过程中的能耗成本，减少后期运维投入，这样能够契合绿色建筑评价标准，提升项目的市场认可度与核心竞争力，是企业抢占市场份额的关键。低碳建造已经成为建筑企业的核心品牌价值，在行业竞争日益激烈的背景下，企业唯有推动装配式与节能施工的深度融合，打造绿色低碳的建造模式，才能建立差异化竞争优势，实现可持续发展，这种市场与企业发展的双重需求，催生了两者融合的紧迫性，推动行业从传统建造向绿色融合建造转型。

2 装配式建筑与建筑节能施工融合的现存障碍

2.1 标准体系衔接不足

标准不统一制约装配式建筑与建筑节能施工融合的规范化与规模化推进。当前我国装配式建筑与建筑节能施工的标准体系仍存在条块分割的问题，两者各自形成独立的标准框架，缺乏系统性的协同衔接。装配式建筑的标准主要聚焦构件生产、现场装配的工艺要求、质量验收等方面，侧重规范装配流程与构件质量，未充分融入建筑节能的核心要求，对构件的节能性能、装配过程中的节能措施缺乏明确界定^[2]。建筑节能施工的标准则重点针对传统现浇建筑的节能工艺、材料要求等，未考虑装配式建筑的模块化、装配化特性，导致部分节能标准无法直接应用于装配式建筑的施工过程。关键节点的节能验收标准缺乏统一依据，装配式建筑的拼接节点、构件连接部位等是节能的薄弱环节，而目前针对这些关键节点的节能验收缺乏明确统一的标准，不同地区、不同企业的验收流程与标准存在差异，导致融合项目的节能效果无法得到有效保障。

2.2 技术集成应用滞后

技术协同方面不够到位，造成装配式建筑与建筑节能施工的融合仅仅停留在表面上的叠加，没有达成真正意义上的深度融合。核心问题在于技术集成应用存在滞后性，预制构件与节能技术的一体化设计水平比较低。目前，多数项目的设计环节还是保持“先设计装配式构件，后考虑节能措施”的方式，设计过程中没有将节能技术与装配式构件的生产、装配同步规划，使得节能技术与构件的适配性不够充分，部分节能措施难以有效带进构件设计，只能在后期施工里另外加上，既增加了施工成本，又对节能效果与施工效率造成影响^[3]。施工工艺与节能措施的适配性也不足，装配式建筑的标准化装配工艺与传统节能施工工艺有差异，部分节能施工工艺无法直接适应装配式建筑的施工流程，而针对两者融合的专项施工工艺研发又较少，造成施工过程中出现节能措施与装配工序冲突、衔接不顺畅等情况，给融合效果带来了负面影响。

2.3 产业协同机制缺失

产业链的割裂状况对装配式建筑和建筑节能施工之间融合的落地速度和实际质量带来了影响。当前建筑行业的产业链条表现出比较碎片化的特点，设计、生产、施工、运维等环节各自独立运作，彼此之间缺少有效的协同配合机制，这就成为阻碍两者融合的一个主要障碍。设计、生产、施工和运维环节之间的联动不够充分，设计单位在做装配式建筑设计的时候，没有充分结合构件生产企业的实际生产能力以及节能施工企业所掌握的施工技术，造成设计方案难以同时兼顾生产的可行性和节能的实际效果。生产企业只是关注构件的生产质量以及生产效率，忽略了构件的节能性能和施工适配性，施工企业在装配过程中没有严格按照节能设计要求落实各项节能措施，导致设计与施工之间出现脱节，影响了融合的实际效果。企业之间的节能技术共享和合作机制不够健全，装配式建筑企业和节能技术企业之间缺乏常态化的合作与交流，节能技术无法及时转化为装配式建筑的实际应用，同时装配式企业的装配技术也没有和节能技术形成有效协同，造成技术资源上的浪费，无法真正实现优势互补。

3 装配式建筑与建筑节能施工融合的优化策略

3.1 构建协同化标准体系

统一标准为装配式建筑与建筑节能施工的融合发展提供制度保障。破解当前标准条块分割的问题，需构建协同化的标准体系，实现两者标准的无缝衔接。

建立装配式建筑与建筑节能施工的融合通用标准，立足于两者融合的核心需求，整合装配式建筑的装配标准与建筑节能的节能标准，明确融合项目的设计、生产、施工、验收等全流程要求，打破两者各自独立的标准框架，让标准能够同时规范装配式施工与节能施工的核心环节^[4]。完善预制构件节能性能与施工规范，针对预制构件的节能指标、生产工艺、质量控制等制定明确标准，明确不同类型构件的节能性能要求，同时结合装配式施工的特性，优化节能施工的流程规范，使节能措施能够与装配工序精准适配，避免施工过程中的标准冲突。健全融合施工全过程验收评价体系，明确融合项目的节能验收节点、验收指标与验收流程，重点规范关键节点的节能验收要求，统一验收标准与评价方法，确保融合项目的节能效果能够得到有效验证。

3.2 推动一体化技术组合

技术深度结合带来建造节能整体效果提升，解决了单项技术应用无法满足整体要求的局限。要推动一体化技术组合，让装配式建筑与建筑节能施工从表面拼凑转向深度结合，加强设计环节装配化与节能的同时优化，将节能技术带进装配式建筑的设计全部过程。采取“节能与装配协同设计”的方法，设计单位需要考虑节能规定和装配流程，改进构件设计思路，完成预制构件与节能技术的一体化合并，保证节能措施可以贯穿构件设计、制造、装配的整个链条^[5]。提高设计思路的科学性和可操作性。推行预制构件自带节能功能的一体化制造，带领构件生产企业增加节能技术研发投入，使用新型节能材料、改进生产工艺，制造具有保温、隔热、隔音等节能功能的预制构件，降低后续节能施工的工作量，同时提高构件的节能效果跟质量稳定程度，创造适合装配式体系的节能施工方法^[6]。针对装配式建筑的模块化装配特点，开发专门的节能施工技术，改进节能施工与装配步骤的连接过程，完成节能施工与装配作业同步进行，提高施工效率和节能效果。

3.3 完善产业链协作方式

产业链互动打通了装配式建筑与建筑节能施工结合发展的主要障碍，解决了产业链断裂的情况。通过完善整个产业链协作方式，完成设计、生产、施工、运维等环节的高效互动，构建设计—生产—施工一体化协作平台，整合产业链各环节资源，设立经常性的沟通与合作安排，让设计单位、生产企业、施工企业能够做到信息互通、协同努力^[7]。设计方案可以充分

考虑生产可能性与施工适应性，生产环节能够准确对接设计要求与施工需要，施工环节能够严格执行设计方案与节能规定，完成各环节的顺畅连接。培养拥有综合能力的专业化执行主体，带领企业扩大业务范围，推动装配式建筑企业与节能施工企业的合并重组或合作互助，培养一批既有装配式设计与施工能力，又掌握节能技术与管理经验的综合型企业，提高结合项目的执行能力跟质量水平。设立节能技术与装配技术的共享转化机制，搭建技术共享平台，推动节能技术企业与装配式企业之间的技术交流与合作，促进节能技术的产业化应用与装配技术的节能化改进，完成技术资源的优化分配。

4 结束语

装配式建筑与建筑节能施工的融合，既是响应“双碳”战略、推动建筑行业转型升级的重要方向，也是实现建造方式绿色化、高效化、集约化的必然选择。政策支撑、技术互补与市场需求共同构成了两者融合发展的坚实基础，而标准不统一、技术集成不足、产业链协同薄弱等问题，仍在制约融合质量与推广速度。未来，建筑行业的高质量发展离不开装配式建筑与建筑节能施工的深度融合，唯有打破各环节壁垒，强化标准协同、技术一体与产业联动，才能真正将工厂化生产、装配化施工的优势转化为稳定可靠的节能效益。持续推进两者融合发展，不仅能够降低建筑全生命周期能耗与成本，提升项目综合竞争力，更将助力我国建筑行业加速摆脱传统高耗模式，迈向低碳、高效、可持续发展的新型建造时代。

参考文献：

- [1] 王正,邱国林.双碳背景下装配式建筑发展研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(07):81-83.
- [2] 陆敬辉,朱明,张焯.装配式建筑围护结构节能保温的应用分析[J].中国住宅设施,2023(05):154-156.
- [3] 薛胜.装配式建筑综合施工技术的应用案例分析[J].住宅与房地产,2023(08):48-50.
- [4] 牛稼芳.装配式建筑幕墙施工技术[J].建材发展导向,2022,20(12):97-99.
- [5] 孙凤平.鉴于装配式建筑技术低碳节能剖析[J].居舍,2021(02):57-58,66.
- [6] 王永晋.预制装配式建筑施工技术与质量控制路径[J].建材发展导向,2025,23(13):67-69.
- [7] 陈明山.装配式建筑项目成本控制优化路径探索[J].中国建筑金属结构,2025,24(12):151-153.

“双碳”目标下绿色建筑造价管理策略探析

徐 箬

(安徽金深建设工程有限公司, 安徽 合肥 238000)

摘 要 “双碳”目标的提出, 推动建筑行业向低碳化、绿色化转型, 绿色建筑作为行业转型的主要载体, 其造价管理的水平影响项目的实施质量与低碳效益的实现。当前绿色建筑造价管理存在诸多现实短板, 部分企业沿用传统管控模式, 忽视绿色建筑的低碳特性与全生命周期成本需求。本文结合绿色建筑造价管理的实际现状, 分析“双碳”目标对造价管理的具体要求, 提出针对性优化策略, 优化造价管控全流程, 控制项目建设与运营成本, 实现绿色建筑多效益的统一, 以期为促进行业高质量发展提供实践参考。

关键词 “双碳”目标; 绿色建筑; 造价管理; 全生命周期; 成本管控

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.023

0 引言

建筑行业是能源消耗与碳排放的主要领域, 其碳排放总量占全国总碳排放的比重较高, 涵盖材料生产、施工建设、运营维护等各个环节, 是实现“双碳”目标的关键攻坚领域。绿色建筑以节约资源、保护环境、减少污染为导向, 在全生命周期内降低能源消耗与碳排放, 是建筑行业落实“双碳”目标的重要路径。造价管理作为绿色建筑项目实施的重要环节, 贯穿项目全流程, 其管理水平直接决定项目投资效益与低碳目标的落地效果, 亟需优化完善以适配行业转型需求。

1 “双碳”目标下绿色建筑造价管理的要求

1.1 兼顾低碳效益与成本控制的平衡

“双碳”目标下的绿色建筑造价管理, 脱离了传统成本压缩的单一局限, 指向的是低碳效益与成本控制的双向平衡, 关系到绿色建筑项目的可持续性与实际价值。绿色建筑的建设环节, 需采用具有环保属性的材料、节能型的技术以及低碳化的施工工艺, 这些特殊要求带来的投入增加, 会直接体现在项目的初期增量成本上, 科学的造价管理要对这部分增量成本采取合理把控。造价管理需将项目全生命周期的低碳效益纳入考量, 挖掘运营阶段节能降耗带来的成本节约空间, 实现短期增量成本与长期节能效益的平衡, 将低碳效益这类隐性的效益纳入造价核算。

1.2 强化全生命周期的造价管控

绿色建筑的低碳特性, 决定了其造价管理必须贯穿项目从决策到运营的全生命周期, 决策、设计、施工、

运营四个主要阶段的管控质量, 都影响着项目的整体成本与低碳效益。决策阶段要明确项目的低碳定位与节能目标, 结合实际合理确定投资预算, 设计阶段的方案合理性决定项目大部分成本, 要在满足低碳要求的基础上优化方案、降低造价^[1]。施工阶段需加强现场管控, 规范施工工艺, 运营阶段要通过精细化管理优化能源使用效率, 做好设施维护、延长建筑寿命, 实现全生命周期成本最小化。

1.3 突出技术赋能的管控效能

在“双碳”目标背景下, 绿色建筑发展需要各类低碳技术的支撑, 造价管理提升管控质量与效率, 也需要先进技术的赋能, 摆脱传统管控模式的束缚。信息化技术可整合分析造价数据, 把控成本变化趋势; 低碳技术能降低碳排放, 优化成本投入结构, 造价管理要发挥这些技术的赋能作用, 将技术与管控各环节深度融合, 提升管控效率与质量。

2 “双碳”目标下绿色建筑造价管理中存在的问题

2.1 造价管理理念滞后, 认知存在偏差

当前多数建筑企业在绿色建筑造价管理中仍沿用传统建筑的管控理念, 这种滞后的理念与“双碳”目标下绿色建筑的发展需求不符, 导致企业对其内涵理解不深、认知有明显偏差。部分企业认为绿色建筑造价管理只是增加环保投入, 忽视低碳效益与长期成本节约的关联, 盲目投入导致初期成本过高、经济效益不佳; 另有企业过度追求成本控制, 擅自降低环保标准, 选用非环保材料与落后工艺, 违背绿色建筑发展初衷。

作者简介: 徐箬(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

2.2 全生命周期管控体系不健全，各环节协同不足

多数建筑企业未建立完善的全生命周期造价管控体系，各阶段管控相互脱节、缺乏协同，制约管理质量提升。决策阶段，一些企业缺乏可行性分析与低碳效益评估，盲目确定预算与绿色标准，留下管控隐患。设计阶段，设计与造价管理人员缺乏沟通，不是重低碳轻成本导致方案无法落地，就是重成本轻低碳不符合“双碳”要求。施工阶段缺乏精细化管控，材料浪费、工艺不规范及频繁设计变更，导致成本超预算。运营阶段管控缺失，能源消耗与维护成本管控不足，各阶段脱节导致管控效率低下^[2]。

2.3 技术应用不足，管控效率偏低

多数建筑企业造价管理中技术应用不足，仍依赖传统人工核算，效率偏低、误差较大，无法满足精细化、智能化需求。先进信息化技术应用范围有限，仅用于简单工程量核算，未与管控全流程融合，造价核算中未利用大数据整合全生命周期数据，决策缺乏科学依据。低碳技术与造价管控结合不紧密，部分企业选用低碳技术与材料时未做充分成本效益分析，导致初期投入过高、长期节能效益不明显，管控精细化水平不高。

2.4 政策支撑体系不完善，落地保障不足

针对绿色建筑造价管理的专项政策不完善，落地保障不足，制约管控工作有序开展。部分现有政策仅明确宏观内容，未对造价管理具体要求、核算标准作出细致规定，企业开展工作缺乏指引。政策执行力度不足，部分地区补贴、税收优惠落实不到位，增加企业成本压力。造价管理标准体系不健全，缺乏统一核算与管控规范，数据缺乏可比性，行业缺乏有效监管机制，部分企业违规选用非环保材料与落后工艺却未受处罚，加剧管控混乱。

3 “双碳”目标下绿色建筑造价管理的优化策略

3.1 更新造价管理理念，树立科学管控认知

建筑企业的造价管理工作，要适应“双碳”目标下绿色建筑的发展节奏，必须彻底摆脱传统造价管理理念的束缚。结合“双碳”目标的具体指标与绿色建筑的发展特点，更新造价管理的核心理念，树立全生命周期、低碳化、精细化的管控认知，让造价管理的每一个环节、每一项工作都紧密围绕绿色建筑的发展需求与低碳目标的落实要求，实现造价管理与低碳发展的深度融合。企业管理层作为造价管理工作的主导者，要提高对绿色建筑造价管理的重视程度，清晰认识造价管理与“双碳”目标落实、企业长远发展之间的密切关联，将低碳效益纳入造价管理的核心考量范

围，实现低碳效益与成本控制的双向平衡，让绿色建筑项目既满足“双碳”目标提出的低碳排放要求，又保障企业的合理经济效益。

3.2 完善全生命周期管控体系，强化各环节协同

绿色建筑的低碳特性与可持续发展需求，决定其造价管理必须贯穿项目全生命周期。当前多数企业存在的管控体系不健全、各环节协同不足等问题，严重制约造价管理效能的发挥，完善全生命周期管控体系、强化各环节协同配合，是“双碳”目标下绿色建筑造价管理的重要优化方向。建立完善的绿色建筑全生命周期造价管控体系，要将管控范围全面贯穿项目决策、设计、施工、运营四个核心阶段，细化各阶段的管控内容、管控重点与责任分工，明确各环节的衔接流程，强化各阶段之间的协同配合，打破各环节各自为政的局面，实现项目整体造价的优化与低碳目标的落地实施。

决策阶段作为项目造价管控的源头，管控质量直接影响项目后续的成本投入与低碳效益，该阶段要加强项目的可行性分析与低碳效益评估，组织造价管理人员、设计人员、技术人员、环保专家组成专业评估团队，结合项目的实际用途、建设规模、地域气候特点、资源禀赋以及“双碳”目标的具体要求，对项目的绿色等级标准、低碳技术应用方向、投资预算额度等进行全面论证，合理确定项目的绿色标准与投资预算，避免盲目追求高绿色标准导致的成本浪费，也杜绝为控制成本擅自降低绿色标准、违背“双碳”目标要求的情况，同时建立决策阶段的造价评审机制，邀请第三方专业机构参与评审，提升决策的科学性与合理性。设计阶段要推动设计人员与造价管理人员的沟通协作，建立设计与造价协同管控机制，采用限额设计方式，根据项目投资预算明确设计阶段的总体造价控制目标，分专业、分环节设定成本限额，优先选用节能、环保、低成本、易施工的设计方案与建筑材料，优化建筑结构与户型设计，从源头控制造价成本^[3]。

施工阶段要加强现场精细化管控，建立施工成本动态监测机制，安排专人跟踪施工成本的实时变化，详细记录材料消耗、人工投入、机械使用、能源消耗等各项成本数据，实时对比实际成本与预算成本的差异，及时解决成本偏差问题；规范施工工艺执行，推广绿色施工技术，严格控制施工过程中的设计变更，建立规范的变更审批机制，加强施工材料的全流程管控，合理规划材料采购、储存与使用，降低材料损耗与采购成本。运营阶段要建立精细化运营管理体系，安装能源消耗监测设备，实时掌握建筑用电、用水、用气等能耗数据，优化能源使用方案，定期对建筑设施、

环保设备进行维护与检修,建立运营成本动态监测机制,实现运营阶段成本的最小化,建立信息共享机制,实现各阶段成本数据、技术信息、低碳指标的实时共享,确保管控衔接顺畅。

3.3 强化技术赋能,提升管控效率与质量

绿色建筑造价管理的精细化、智能化水平决定管控效率与质量。企业要加大先进技术的应用力度,将信息化技术、低碳技术与绿色建筑造价管理深度融合,打破传统人工管控模式的局限,提升管控的精细化、智能化水平,实现造价管理与低碳目标的协同推进。推广 BIM 技术的全面应用,充分发挥其可视化、协同化、精细化的优势,将其贯穿于项目全生命周期的造价管控中。设计阶段,利用 BIM 技术构建三维立体模型,直观呈现建筑结构、材料布置、管线走向等细节,优化设计方案,精准核算工程量,减少人工核算误差与后续设计变更;施工阶段,利用 BIM 技术实现施工过程的可视化管理,模拟施工流程,合理安排施工进度与人员、机械调配,避免工序冲突导致的工期延误与成本增加,实时纠正施工偏差;运营阶段,利用 BIM 技术对建筑设施、能耗情况进行智能化管理,精准定位能耗偏高环节,优化能源使用方案,制定科学的维护计划,降低运营成本与维护成本^[4]。

引入大数据技术,整合项目全生命周期的成本数据、能耗数据、技术参数、市场价格数据、政策数据等,建立完善的造价管理数据库,通过大数据分析技术挖掘数据背后的规律与关联,优化成本投入结构,精准预测成本变化趋势,提前预判材料价格波动、能耗超标等管控风险,为造价决策提供科学精准的数据支撑。推广低碳技术与绿色建材的应用,结合项目的实际需求、地域特点与成本预算,选用节能、环保、低成本、适用性强的低碳技术与绿色建材,优先推广装配式施工技术、光伏组件应用技术等成熟技术,选用节能门窗、环保涂料、再生建材等绿色建材,对低碳技术与绿色建材的成本效益进行充分分析,确保技术应用的合理性与经济性。

3.4 完善政策支撑体系,强化落地保障

绿色建筑造价管理的有序开展,离不开完善的政策支持与有力的落地保障。国家与地方层面要结合“双碳”目标要求,不断完善绿色建筑造价管理的专项政策,强化政策的导向作用与落地保障,推动绿色建筑造价管理工作的规范化、标准化开展。制定明确的绿色建筑造价管理规范与标准,结合绿色建筑的不同等级、不同类型,明确全生命周期造价核算的范围、方法与具体要求,统一行业内的造价管理标准,规范企业的造价核算与

管控行为,在规范与标准的制定过程中,充分结合行业实际,广泛征求企业、科研机构、行业协会等各方意见,确保规范与标准的科学性、合理性与可操作性。

出台针对绿色建筑造价管理的专项补贴与税收优惠政策,加大对绿色建筑项目的政策支持力度,对采用低碳技术、绿色建材且造价管控规范、低碳效益显著的项目给予财政补贴,补贴资金用于弥补项目初期的增量成本,对开展绿色建筑造价管理工作的企业实行税收减免政策,提高企业的参与积极性,同时优化政策支持方式,实行差异化的补贴与税收优惠政策,引导企业注重低碳效益与成本控制的平衡。加强政策的执行力度,建立健全政策落实监督机制,将政策落实情况纳入相关部门的考核指标,定期排查督导,及时整改补贴发放不及时、税收优惠落实不到位等问题,确保政策落实到位^[5]。

加强对绿色建筑项目的监管,建立健全行业监管机制,组建专业监管队伍,定期检查项目的绿色标准执行情况、造价管控情况、低碳技术应用情况,对违规企业进行严肃处理,建立信用评价体系,引导企业主动规范自身行为。鼓励行业协会发挥桥梁纽带作用,制定行业自律规范,组织开展行业培训与交流,建立绿色建筑造价管理信息共享平台,为企业提供信息支撑,加强政策的宣传解读,让企业充分了解政策内涵,引导企业主动优化造价管理策略,推动绿色建筑行业的高质量发展,为“双碳”目标的实现提供有力支撑。

4 结束语

在“双碳”目标引领下推进绿色建筑造价控制,具有重大的现实意义,关系到建筑业的低碳转型,是实现生态文明建设的必然要求。各参建方要协同配合,创新管理模式,实现节能减排与成本控制有机统一,推动绿色建筑规模化发展,并助力建筑业降本增效,为行业的可持续发展以及碳达峰碳中和目标的实现提供保障。

参考文献:

- [1] 向艳妮.绿色建筑材料对工程造价的成本控制效果[J].江苏建材,2025(02):168-169.
- [2] 楚晶莹.新型绿色建筑工程造价预算与成本控制研究[J].砖瓦,2025(03):99-101.
- [3] 赵金江.价值工程在绿色建筑工程造价成本控制中的应用研究[J].价值工程,2025,44(06):35-37.
- [4] 陈倩.建筑工程造价中的绿色建筑成本控制原则和措施[J].现代企业,2025(02):25-27.
- [5] 田欣鑫.新型绿色建筑工程造价预算与成本控制的实现路径[J].陶瓷,2021(10):129-130.

基于数字化转型的企业生产效率提升路径研究

白 杨

(中航沈飞民用飞机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110170)

摘 要 随着工业 4.0 和物联网技术的快速发展, 企业正在寻求通过技术创新来显著提高生产效率。然而, 当前许多企业在实际应用中面临“数据孤岛”“重硬轻软”的挑战, 即设备、管理和运营之间的信息割裂严重, 导致生产效率提升效果不明显。本文提出“五层三闭环”的技术路径, 通过研究设备级、流程级、系统级等效率提升技术, 明确关键技术和选型要点, 并通过案例对比数字化转型前后的生产效率提升实践, 以为相关人员提供参考。

关键词 数字化转型; 生产效率; 设备级优化; 流程级优化; 系统级优化

中图分类号: F270

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.024

0 引言

工业 4.0 的推进和物联网技术的快速发展为企业的智能化转型提供了机遇。然而, 企业在技术创新过程中往往面临以下问题: 设备与管理系统的脱节、生产计划难以动态响应、故障诊断效率低下等。这些问题直接限制了企业提升生产效率的能力。基于此, 本文提出了基于多层次优化策略的技术框架, 通过设备级优化、流程级优化和系统级优化协同作用, 实现从设备到车间再到工厂的全维度生产效率提升。

1 数字化转型驱动生产效率提升的技术框架

数字化转型驱动生产效率提升的核心理论是通过数据流动的自动化, 优化资源配置效率, 从而实现资源(设备、物料、能源、人力、时间)投入与有效产出的比值升高。本文构建“五层三闭环”技术实施框架, 剖析各层级的核心技术构成、选型要点与协同机制, 为制造企业提供兼具理论与实践指导意义的“技术路线图”, 如图 1 所示。

各层级的核心功能、关键技术、对生产效率的主要贡献如表 1 所示。

2 设备级生产效率提升的关键技术

针对单台或产线设备, 实现“状态监控—故障预测—维护决策—运行效率提升”闭环, 提升设备可用率。通过物理资源层的准确选型、智能感知层的精准采集、网络互联层的高效通信、平台数据层的数据管理和智能应用层的自适应优化, 可以实现设备级的智能化管理, 不仅能够显著提升设备运行效率和可靠性, 还能降低停机时间和维护成本, 为智能制造提供坚实的技术支撑基础^[1]。其中, 基于智能传感与物联集成的数据采集、设备互联互通、仿真驱动的过程优化、“感知—决策”实时联动是关键技术。

2.1 物理资源层

物理资源层是设备的基础, 其核心参数决定了设备的性能和可靠性。在选型时, 需适配设备的核心参数, 结合智能感知技术提升智能化水平。例如: 自动钻铆设备、AGV 自动导引车等选型, 应对其核心参数如钻头直径、进给量、旋转速度、切削深度、最大载重量、移动速度、转弯半径等基本参数进行适配。

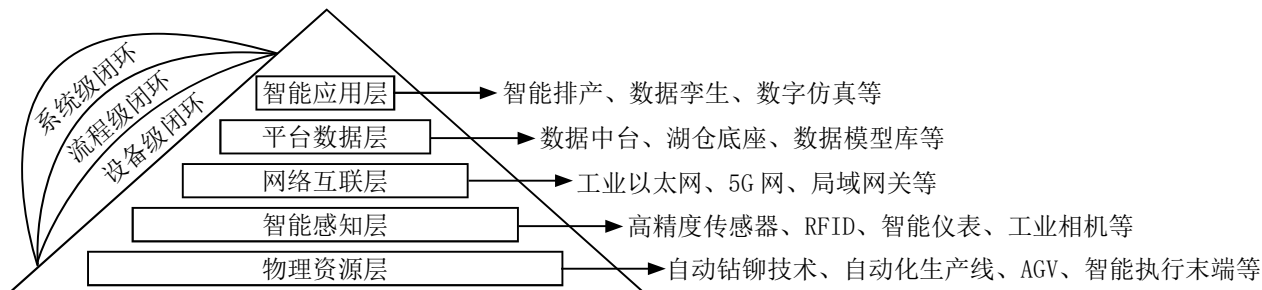


图 1 “五层三闭环”的技术路线图

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

表 1 生产效率提升技术框架层级功能与核心技术组成

层级	核心功能	关键技术组成	对生产效率的主要贡献
物理资源层	支撑和承载生产执行	自动钻铆机、自动化生产线、AGV、机器执行末端等	直接决定加工精度、作业速度与物流效率
智能感知层	数据采集与状态数字化	高精度传感器（视觉 / 力觉 / 声学）、RFID、智能仪表	实现生产过程可视化，为分析优化提供数据源
网络互联层	数据可靠传输与边缘计算	工业以太网、5G 网、局域网关	保障实时控制与反馈，支撑快速响应
平台数据层	数据汇聚、治理与模型服务	数据中台、数据模型库等	打破数据孤岛，推动数据资产化与服务化
智能应用层	业务场景智能化	数字仿真、数据孪生、智能排产（APS）等	生产决策与执行，实现效率提升

2.2 智能感知层

基于智能传感与物联集成的数据采集技术是数字化转型的“神经末梢”，旨在实现从“哑设备”到“智能体”的转变。其技术核心与挑战在于选择高精度、抗干扰的传感器，如采用嵌入式压电式振动传感器监测主轴健康状态、应用高光谱相机对产品内部缺陷非接触式检测等。结合高精度传感器数据，实时评估设备的运行状态。

2.3 网络互联层

使用物联传感器将设备运行数据实时传输到云端系统，包含钻头磨损情况、切削参数变化、设备负载波动等信息。使用物联网传感器技术（无线传感器网络、M2M 通信等），实现设备间的互联互通。利用 5G 网络的高速率和低时延特性，实现设备与云端平台之间的快速数据传输^[2]。

2.4 平台数据层

平台数据层是设备级生产效率提升的核心部分，它通过整合和管理设备的原始数据、中间结果和分析结果，为设备优化提供决策支持。具体的技术实现和技术选择如下：建立统一的数据仓库，整合设备数据，提供可视化界面，将复杂的数据转化为易于理解的图表或报告，如通过趋势图展示设备参数变化，通过热力图显示异常区域分布。

2.5 智能应用层

数据驱动的预测模型是通过历史数据分析和机器学习算法（回归分析、时间序列预测或深度学习等），对加工参数（切削速度、进给量等）进行优化，以实现质量、效率和能耗的最佳平衡，并用于提前识别潜在故障^[3]。

仿真驱动的过程优化是结合工艺参数调整和设备状态优化，制定最优的生产策略，从而提高整体生产

效率。结合历史数据与强化学习算法，对加工参数（切削速度、进给量等）进行迭代寻优。

“感知—决策”实时联动是当传感器检测到某工序质量波动时，数字孪生系统可立即调用模型库，分析原因并推荐调整工艺参数，经仿真验证后下发执行，形成快速闭环。

3 流程级生产效率提升的关键技术

针对多工序生产流程，实现“计划—执行—监控—动态调度”闭环，提升生产节奏与资源利用率。与设备级聚焦单点效率不同，流程级更注重多工序的协同联动、跨层级的技术融合。通过物理资源层的设备优化、智能感知层的数据采集与分析、网络互联层的高效通信、平台数据层的多维度监控以及智能应用层的动态优化，实现对生产过程的实时监控和动态调整，显著提高生产效率和产品质量，其中智能排产（APS）、数据驱动的流程决策支持是关键技术。

3.1 物理资源层

物理资源层涵盖参与生产的设备、传感器、执行机构等硬件设施。其关键技术在于根据工艺要求优化设备参数（刀具直径、速度、进给等），确保设备处于最佳工况，以提高加工效率和产品质量。

3.2 智能感知层

智能感知层涉及传感器数据的采集、处理和分析。包括实时数据采集与传输、异常检测与预警，如使用多传感器阵列实时采集设备运行参数、利用机器学习算法（异常检测模型等）识别设备运行中的异常状态、通过结合机器学习算法和实时数据整合，开展智能排产技术（APS）。其核心在于利用高精度传感器和智能传感器对设备状态进行监测，设定规则基于历史数据建立预测模型，提前识别潜在瓶颈和调整生产参数^[4]。

3.3 网络互联层

为确保设备与系统之间的高效数据传输，实现多工序协同优化，采用5G/物联网等高效率通信技术实现实时数据传输，通过统一的数据平台实现不同工序之间的信息共享，分析各工序的参数设置对产品质量的影响。

3.4 平台数据层

为整合、存储、分析和可视化层级间的数据，可以将来自设备、传感器、工业自动化系统等各层级的数据，通过平台构建、规则设定、挖掘有用信息，实现对设备和工艺的动态优化，将复杂的数据转化为可视化界面，帮助操作人员快速理解和洞察生产状态。

3.5 智能应用层

构建统一的企业级管理平台，整合实时数据和历史数据分析结果，实现对生产、库存、设备状态等多维度数据的可视化管理和智能分析，支持数据驱动的流程决策，如实时监控设备运行状态（温度、压力、振动等），为生产管理决策提供智能化支持；利用智能传感器对设备状态进行实时采集，提前识别潜在故障，实现“预防性维护”。

4 系统级生产效率提升的关键技术

系统级的架构优化是实现整体效率提升的关键，需要从设备、工艺、物流和数据等多个层面进行协同设计，要求从底层传感器到顶层决策系统实现深度集成，形成从数据采集、智能分析到执行反馈的完整闭环。

4.1 物理资源层

物理资源层是工业4.0系统的基础，涵盖了生产设备、生产线、物料和能源等物理资源的管理与分配，通过优化物理资源的使用效率，可以显著提高系统的整体效能。例如：实时监控设备运行状态，及时发现并调整参数（温度、压力、速度等），防止设备过载或故障；结合数据分析技术预测设备故障，实现设备的自动化运行，减少停机时间；根据生产需求动态调整物料库存和运输安排，避免资源浪费和瓶颈问题；优化设备能量消耗，如通过节能控制提高能源利用率。

4.2 智能感知层

智能感知层是工业4.0系统的技术核心，其高效运行直接决定了系统的整体效率。通过传感器技术和物联网技术整合设备、环境、物料等多源数据，形成全面的生产感知系统，并结合人工智能算法进行数据分析和决策支持。

4.3 网络互联层

网络互联层是工业4.0系统的关键基础设施，它将分散在不同物理位置的设备、平台和应用连接起来，实现数据的高效传输和实时共享。高效、统一的通信平台，支持设备、平台和应用之间的无缝协作，实现生产数据在不同层级（设备层、工艺层、物流层等）的实时共享，支持协同优化。

4.4 平台数据层

平台数据层是工业4.0系统的数据中枢，负责整合来自物理资源层、智能感知层和网络互联层的海量数据，通过数据分析技术提取价值，支持决策优化和系统改进。搭建统一的数据标准和架构，利用大数据平台对生产数据进行高效存储和管理，对生产数据进行全面分析，优化生产工艺、设备参数和物流安排。

4.5 智能应用层

智能应用层是工业4.0系统的价值实现核心，通过集成化、智能化的应用程序和工具，将物理资源、数据和网络互联层的优化成果转化为实际的应用场景。通过数据分析和算法支持，实现设备的预测性维护，利用人工智能算法对物料运输、生产线调度等进行智能优化，通过闭环控制系统对生产过程进行实时监控和动态调整，显著提升系统的智能化水平和整体效率^[5]。

5 结束语

在数字化转型背景下，生产效率作为企业核心竞争力的关键载体，其系统性提升需要从设备、流程、系统着手。本文深入探讨了设备级、流程级、系统级等各层级的效率提升关键技术，为企业转型及产业高质量发展提供实践方向。数字化转型是企业提升生产效率、提升核心竞争力的选择，其核心在于突破数据孤岛，构建跨部门协同机制，实现数据全链路闭环管理，为传统产业的高质量发展提供了可复制、可推广的实践范式。

参考文献：

- [1] 杨佳节,詹光远,冉晖.数字化转型的内涵、机遇、挑战与实施路径[J].中国集体经济,2026(07):100-103.
- [2] 于永进.数字经济赋能企业差异化经营战略探析[J].中国集体经济,2026(07):71-74.
- [3] 施文婷.企业数字化转型中组织文化适配与变革管理策略研究[J].中国电子商情,2026,32(04):46-48.
- [4] 张文彬.企业数字化转型对流通效率异质性影响[J].合作经济与科技,2026(06):86-88.
- [5] 李秋月,徐聪,王常静.数字化转型驱动企业高质量发展的机制研究[J].统计理论与实践,2026(02):62-72.

基于大数据技术的工业统计 数据质量优化方法研究

朱豫秦

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要 工业统计数据是工业经济运行监测、产业政策制定的重要基础, 数据质量直接影响到工业经济治理的科学性、有效性。大数据技术的迅速发展为解决工业统计数据在采集、处理、应用等各个环节存在的质量问题提供了技术支持。本文以工业统计工作实际为立足点, 剖析当前工业统计数据质量存在的主要问题, 挖掘大数据技术和工业统计质量管控的适配性, 从技术融合、流程优化、机制建立等角度提出工业统计数据质量提升的方法, 构建工业统计数据质量全生命周期的管控体系, 实现工业统计数据质量从被动修正到主动优化的转变, 为工业统计现代化建设提供实践路径和方法参考。

关键词 大数据技术; 工业统计; 数据质量; 全生命周期管理

中图分类号: F270.7; TP274

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.025

0 引言

工业是国民经济的主导, 工业统计是工业经济运行分析的基础工作, 工业统计数据是否真实、准确、及时, 直接关系到产业决策的科学化、工业发展的高质量^[1]。随着数字经济和工业实体经济深度融合, 工业生产经营数字化、智能化水平不断提高, 工业统计数据来源更加多元、种类更加复杂、数量呈爆发式增长, 传统统计数据处理模式和质量控制方法已经不能满足新时代工业统计工作要求。研究利用大数据技术对工业统计数据质量进行优化的方法, 成为促进工业统计体系现代化、提高工业经济治理能力的重大课题。

1 工业统计数据质量的核心要求

根据工业统计工作特点和大数据时代应用需求, 工业统计数据质量应该达到以下五个方面的要求。一是准确性, 数据质量的基础是数据本身可以真实反映企业生产经营活动, 数值核算准确、逻辑关系无矛盾, 保证数据客观真实性。二是完整性, 即统计数据的采集要覆盖工业生产经营的各个环节、主要指标, 不能有重要字段的缺失、时间序列的断点, 保证数据体系的全面性。三是时效性, 即数据可以实现采集、处理、上报的迅速传递, 符合工业经济变化快的特点, 给及时监测和快速决策提供数据支持。四是协同性, 即使多源、跨部门、跨企业的统计数据达到标准统一、

语义互通的目的, 消除数据壁垒和信息孤岛, 保证数据融合应用的可行性。五是可溯性, 要求统计数据全生命周期流转过程可以被记录、跟踪、核实, 确定数据的产生、处理、更改责任单位及时间点, 给质量问题追溯和责任认定提供支撑。五大核心要求相互联系、相互支撑, 精准性是基础、完整性是保证、时效性是关键、协同性是拓展、可溯性是兜底, 共同组成了新时代工业统计数据质量评价体系, 也成为开展数据质量优化工作的主要方向^[2]。

2 工业统计数据质量的现存问题

2.1 数据采集环节存在标准不一、源头失准的问题

工业企业的数字化水平良莠不齐, 各个企业、不同行业使用的采集设备制式不同, 统计信息的采集接口、数据格式、指标口径等没有形成统一的标准, 某些领域存在着多头采集、重复采集的情况, 造成数源矛盾、数据重复。部分企业仍然使用人工录入方式来进行数据的收集工作, 很容易造成录入偏差、漏报和错报等不良现象的发生, 并且没有建立起可靠的设备端实时校验手段, 从而导致基础数据源头质量无法得到保证^[3]。

2.2 数据处理环节存在技术滞后、效率偏低的问题

传统的工业统计数据处理工具是以结构化表格解析为主, 对于工业生产中出现的各种非结构化的数据如设备运行日志、视觉监测数据、音频数据等都没有

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

很好的处理方法。数据清洗规则固化，校验手段单一，不能满足海量、异构、高并发的工业统计数据处理要求，造成数据清洗不到位，异常数据发现迟缓，致使数据处理效率和质量无法兼顾。

2.3 数据应用环节存在协同不足、价值偏低的问题

政府部门的统计机构、行业管理部门以及企业等之间缺少有效的数据共享和协调机制，各主体的数据分散存储、独立管理，从而造成信息孤岛。跨部门数据融合缺少技术支撑和制度保障，数据关联挖掘不够深入，不能发挥多源数据的协同效应，造成统计数据只能满足基础的指标核算要求，在产业趋势预测、精准政策制定等方面的支持作用没有得到充分发挥。

3 基于大数据技术的工业统计数据质量优化方法

3.1 大数据驱动的多源协同采集与实时校验

数据采集属于工业统计数据质量控制的第一个环节，借助大数据技术创建多源协同采集体系及设备端实时校验体系，从源头保证数据品质。创建统一的数据采集接口，利用大数据技术制定出统一的工业统计数据采集标准，规定数据格式、指标口径、字段要求，研发出符合各种采集设备、各种行业的智能适配中间件，使工业企业ERP系统、生产执行系统、设备监测系统各个系统的数据能够自动生成地进行采集对接，防止由于不同数据源之间格式不一样而产生的数据冲突，也减少了人工操作，降低了由于人为失误造成的错误^[4]。搭建“设备一边缘一云端”三层采集和校验结构，设备端安装具有数据采集和实时校验能力的智能终端，依靠数字孪生技术搭建设备的理论运行模型，并将传感器所测得的数据同理论模型数据展开即时比较，若出现数据偏离超过设定标准的情形，则会立即发出拦截警报并实施警告，从而实现源头数据质量的提前把控。在边缘端采用边缘计算手段，针对采集来的数据实施初步清洗并且确认其时间序列的连贯情况，从而找到由于网络断开或是设备发生故障而造成的断点以及无效信息，进而执行数据预处理的工作流程。云端则承担着汇聚并存储大量的采集数据的任务，为之后深入处理和分析奠定基础。创建采集数据的动态筛选机制，采用机器学习算法智能判断采集数据是否有效，结合工业生产实际，把温湿度、气压、生产计划等有关信息综合起来，剔除极端天气、设备检修等特殊情况下无效的监测数据，提高采集数据的有效性、精准性。

3.2 大数据支撑的异构数据处理与异常识别

数据处理属于工业统计数据质量改善的关键部分，依靠大数据技术加强对于异构数据的处理能力，创建

智能化的数据清洗和异常识别体系，从而实现数据处理过程的质量改善。创建基于大数据的异构数据统一处理平台，将分布式存储、数据湖、数据仓库等技术融合起来，实现结构化、半结构化、非结构化工业统计数据的统一存储和规范化处理，创建解析并转化非结构化数据成可分析、可利用结构化数据的软件工具，克服传统处理工具功能上的限制。开发出融合知识图谱和动态规则引擎的智能数据清洗系统，建立包含工业统计指标、设备工艺参数、行业运行规则的工业统计知识图谱，用知识图谱对指标之间、领域之间的逻辑关系进行关联以及一致性检查，自动发现数据中存在的逻辑矛盾以及不合理的关系^[5]。通过机器学习的方式从历史的质量数据中挖掘出异常数据的可能模式，并且产生相应的动态清洗规则以及校验阈值，再依靠对实时的数据流的实时更新来进行规则参数的调节工作，在保证数据清洗质量的情况下实现智能化、自适应地进行数据清洗工作。创建基于机器学习的异常数据深层次诊断模型，将随机森林、长短期记忆网络等算法融合在一起，对数据处理时找出的异常数据实施深入剖析，找出异常数据产生的原因，区分设备故障、录入失误、网络问题等种类的异常诱因并给出对应的解决建议，从而达到精确地诊断和迅速修正异常数据的目的，改进数据处理质量和效率。

3.3 大数据赋能的跨域协同共享与价值挖掘

数据应用是工业统计数据质量的最终反映，依靠大数据技术冲破数据壁垒，创建安全可控的跨域数据协同共享体系以及深入的价值挖掘体系，从而优化数据应用的质量和价值。搭建以隐私计算为基础的跨部门数据协同共享平台，用多方安全计算、联邦学习等隐私计算技术来保证政府统计部门、税务、电力、工信等行业主管部门以及工业企业数据的安全和隐私，并且促进多源跨域数据的协同融合。平台提前设定产值和用电弹性系数、增值税与营业收入比对这些主要校验规则，用多源数据关联来达到对统计数据相互校验的目的，从而保证数据的准确性、可靠性。创建工业统计数据深度价值挖掘模型，借助大数据关联挖掘、趋势预测等技术，剖析融合后的多源数据，探寻工业生产经营指标间的隐秘联系，从而实现工业经济运行趋向的准确预估，针对产业政策推行成效展开动态评判，促使工业统计数据由核算型转向决策支撑型，优化数据的应用水平。创建数据应用的反馈改良体系，凭借大数据技术抓取统计数据在各个应用场景下的使用反馈，剖析数据在决策支持、趋势预估等场合里的欠缺，形成数据品质改良的需求清单，反向引领数据采集、处理环

节的标准修订和流程改善,达到数据采集、处理、应用的闭环改良,加强数据与应用需求的契合程度^[6]。

4 工业统计数据质量优化方法实施的保障措施

4.1 完善制度保障,明晰权责边界

制度保障是保证优化方法落实的基础,必须从制度上对工业统计数据质量管理工作做出明确的规定,界定各个主体的职责范围。推进工业统计质量管理制度的更新和健全,针对大数据技术的应用特点,充实数据全生命周期追踪、跨部门数据互相配合共享、数据品质分层管理等有关内容,把大数据技术支撑的质量改良办法纳入制度化、规范化轨道上来。创建企业数据质量分级认证制度,按照企业数据采集规范度、处理流程合规度、应用反馈时效度这些指标,把企业分成不同的等级,对优质的加以统计报表简化、项目审批优先安排等扶持举措,对数据存在明显问题的企业实施重点监管和指导,建立激励和制约相交织的制度架构。创建跨部门的协同工作机制,明确各个部门对于工业统计数据采集、共享、质控等各个环节的责任和分工,创建常态化的沟通协调和工作联动机制,推进多源数据协同共享和质量控制工作,破除跨部门协同的制度性梗阻。健全数据质量责任追究制度,规定企业法定代表人对统计数据真实性负主要责任,规定统计部门、数据处理机构等有关方面对于数据的真实性负有管理责任,对于存在数据造假、漏报错报或者整改不到位等情况,要从严追究相关责任人的责任。

4.2 强化技术支撑,夯实硬件基础

不断加强大数据技术在工业统计领域的应用支撑,夯实硬件和数据处理技术平台基础。推进工业统计大数据平台的建立和升级,加大省级、市级统计机构对于数据采集、处理、存储、分析、质量控制等各方面的数字化基础设施建设的投入,使统计系统同企业、行业主管部门的数据系统无缝对接,提高平台对于海量数据处理、实时分析以及安全防护的能力。创建研发标准化的工业统计大数据工具包,把数据清洗、异常辨别、质量评判、趋向预估等关键功能囊括其中,研制契合不同行业、各样统计场合的模块化工具组件,从而达成工具包的标准化、轻量化推广目的。创建数据安全保障技术体系,依靠区块链、加密算法、访问控制等技术创建全面的数据安全保障体系,对工业统计数据的收集、保存、传递、使用全过程展开全方位的保护工作,从而保证数据的安全性与隐私性,并且防备数据被泄露或者被篡改的情况出现。

4.3 培育人才队伍,提升应用能力

培育具有工业统计专业知识以及大数据技术运用能力的复合型人才,从而提高整个行业的数据应用能力。创建统计系统的大数据人才培育体系,制订具有指向性的培养方案。就目前的统计工作人员展开工业统计专业知识与大数据技术的双项培训,涵盖分布式存储、机器学习、数据可视化等核心技术,加强其大数据技术应用水平和质量把控能力。创建统计分析师和数据工程师双重认证体系,把大数据技术的应用能力纳入统计人员的考核和晋升体系,从而调动专业人员学习和运用技术的积极性。加强工业企业统计人才的培养和指导,统计部门会同行业主管部门、专业培训机构,对工业企业统计人员进行免费的培训和指导,主要讲解大数据背景下工业统计数据的采集标准、处理方式以及质量控制要求,提高企业源头数据的质量控制水平。积极引进具有工业统计、大数据分析、计算机技术等多种知识的高素质复合型人才到统计部门工作,给大数据技术在工业统计领域的应用和创新发展提供人才支持^[7]。

5 结束语

本文从大数据技术的角度出发,对基于大数据技术的工业统计数据质量优化方法进行系统的探究,立足于工业统计工作的实际情况,结合数字经济与工业实体经济深度融合的时代背景,针对目前工业统计数据质量管控所遇到的困境,探寻出一种利用大数据技术与工业统计数据质量管控深度融合的新思路和新途径,为工业统计体系的现代化建设提供参考。

参考文献:

- [1] 潘慧敏,陈岩.煤炭生产企业统计数据质量控制与评估体系研究[J].煤矿现代化,2026,35(02):114-118.
- [2] 茆翠红.提升企业统计数据质量的对策研究:基于演化博弈分析[J].现代商业,2026(01):78-81.
- [3] 高芳.提高基层统计数据质量的有效策略探究[J].财经界,2025(34):56-58.
- [4] 叶哲全.房地产统计数据质量的控制标准研究[J].标准生活,2025(07):69-71.
- [5] 李作彬.影响工业统计数据质量的因素与解决措施分析[J].中国电子商情,2024(23):7-9.
- [6] 叶发明.基层工业统计数据质量管理与提升策略[J].中国商界,2024(04):151-153.
- [7] 王慧.新经济下基层工业统计数据质量的控制与提高[J].现代工业经济和信息化,2023,13(05):325-326.

化工企业高压电动机继电保护 方案设计与应用研究

李庆祺

(中国石化塔河炼化有限责任公司, 新疆 阿克苏 842000)

摘要 高压电动机是化工企业压缩、输送、循环、搅拌等关键设备的重要动力来源, 其运行状态直接关系到装置连续性、安全性与经济性。本文围绕化工企业高压电动机运行特点, 分析继电保护需求, 探讨速断、过流、过负荷、堵转、接地、负序及低电压等保护配置方法, 并结合工程应用研究其安装实施、参数整定与运行维护, 以期为保障化工企业高压电动机安全稳定运行提供参考。

关键词 化工企业; 高压电动机; 继电保护; 保护整定; 联锁保护

中图分类号: TM621.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.026

0 引言

在化工企业供配电系统中, 高压电动机通常承担着驱动大型泵、风机、压缩机和搅拌装置等重要任务, 是保障生产装置连续稳定运行的核心设备。建立完善、可靠、灵敏且具有选择性的继电保护系统, 是保障高压电动机安全运行和化工装置稳定生产的重要措施。当前, 在实际工程中, 部分高压电动机保护仍存在配置不完善、整定不合理、保护与工艺联锁衔接不足等问题^[1]。基于此, 研究化工企业高压电动机继电保护方案设计与应用, 对提高供电可靠性、降低故障风险、保障装置安全生产具有重要的现实意义。

1 化工企业高压电动机运行特点与继电保护需求分析

化工企业高压电动机多用于驱动压缩机、循环泵、引风机、增压机及大型搅拌设备, 通常具有容量大、连续运行时间长、启停频次受工艺约束强等特点。与一般工业场景相比, 一是负载类型复杂, 既有平方转矩类负载, 也有恒转矩或冲击性负载, 启动电流大、启动时间长, 部分电动机启动电流可达额定电流的5~7倍; 二是工艺连续性要求高, 电动机一旦停运, 容易造成整条装置波动, 甚至引发联锁停车; 三是运行环境较为特殊, 常伴随高温、高湿、粉尘、腐蚀性气体或易燃易爆介质, 对电机绝缘、测量回路和保护装置可靠性提出更高要求; 四是供电系统结构较复杂, 母线切换、短时电压波动、系统接地方式差异等因素都会影响保护动作判断。

高压电动机继电保护的需求应兼顾快速性、选择性、灵敏性和可靠性, 对于相间短路故障, 应配置电流速断和过电流保护, 做到近区故障快速切除; 对于长期过载、转子堵转和启动异常, 应设置过负荷保护、堵转保护和启动时间保护, 防止绕组过热及机械损伤; 对于单相接地、三相不平衡和负序电流问题, 应通过接地保护、负序保护和不平衡保护抑制热效应和转矩脉动; 对于工艺系统中常见的失压、晃电和低电压工况, 还应结合低电压保护、失压保护及再启动联锁逻辑, 避免电动机误跳闸或带故障重启^[2]。

2 化工企业高压电动机继电保护方案总体设计

2.1 继电保护方案设计与系统构成

化工企业高压电动机继电保护方案设计应围绕分层配置、主辅结合、保护与工艺联锁协同的思路展开, 对于6 kV或10 kV高压电动机, 一般采用微机型电动机保护测控装置作为核心保护单元, 配套电流互感器、电压互感器、开关柜断路器、温度检测元件及DCS/PLC联锁接口, 构成测量、判断、动作、信号、联锁一体化保护系统。设计时应根据电动机容量、负载类型、启动方式、供电母线结构及工艺连续性要求确定保护配置层级, 对2 000 kW以上关键电动机, 宜按“一机一保护单元”独立设置, 对重要泵、压缩机及引风机应同时接入事故跳闸、备用联启和工艺闭锁信号。在系统构成上, 一次主要包括高压断路器、三相CT、零序CT或开口三角电压回路, 二次则包括速断、过流、过负荷、堵转、启动超时、接地、负序、低电压等保护功

作者简介: 李庆祺(1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 继电保护。

能模块,并设置跳闸出口、报警出口和事件记录功能。

2.2 电流速断保护与过电流保护配置设计

电流速断保护主要用于切除电动机引出线、接线盒及定子绕组附近的相间短路故障,其动作特点是无时限或短时限、灵敏快速。对于化工企业常用 6 kV 高压电动机,若额定电流为 180~320 A,速断保护整定值一般可按电动机额定电流的 6~8 倍进行初设,即可整定在 1 080~2 560 A 范围内;对启动电流较大的笼型电动机,应避免正常启动冲击电流,通常取大于最大启动电流的 1.2~1.3 倍。动作时限宜取 0~0.10 s,其中关键设备若断路器性能较好,可采用瞬时动作;若系统暂态冲击明显,则可加 0.05 s 短延时,以提高抗干扰能力。过电流保护主要作为速断保护的后备保护,用于切除电动机外部短路、母线残余故障或速断拒动情况。整定时既要保证对故障有足够灵敏度,又要避开启动电流和短时工艺冲击。一般可按额定电流的 2.0~3.0 倍整定过流启动值,如额定电流 250 A 的电动机,过流定值可取 500~750 A;动作时限通常取 0.5~1.5 s,与上级馈线保护形成 0.3~0.5 s 的级差配合。

2.3 过负荷保护、堵转保护与启动时间保护设计

第一,过负荷保护主要防止电动机长期超额定运行引起绕组过热。设计时宜采用反时限或热模型方式整定,连续运行设备的启动值一般可按额定电流的 1.05~1.20 倍选取,其中普通泵、风机可取 1.10 倍左右,重载设备可适当放宽至 1.15~1.20 倍。热报警值可设为热容量的 80%~90%,跳闸值设为 100%,以兼顾预警和保护要求。第二,堵转保护主要用于防止电动机启动失败或运行中转子卡滞造成大电流烧损。堵转电流一般可按额定电流的 3.5~4.5 倍整定,动作延时取 0.3~1.0 s;对惯量较大、启动时间较长的设备,可适当增加延时,但不得超过电机允许热承受时间^[3]。当电流持续高于堵转定值,且转速、功率或启动状态未表现出正常加速特征时,保护应迅速跳闸。第三,启动时间保护用于监督电动机从合闸到进入稳定运行的全过程。一般高压电动机允许启动时间可取 8~15 s,大惯量设备可取 15~25 s,整定值通常按实测正常启动时间的 1.2~1.5 倍确定。设计中应与过负荷、堵转保护协调配合,即启动阶段投入启动时间保护并适当闭锁部分过负荷判据,启动完成后投入完整热过载监测,保证保护逻辑既安全又不误动。

2.4 单相接地保护、负序保护与不平衡保护设计

第一,单相接地保护应结合系统接地方式进行配置。化工企业 6 kV 或 10 kV 高压系统若采用小电阻接地方式,电动机回路宜设置零序电流保护,可通过专用零序 CT 或三相 CT 残流实现检测,启动值一般取 5~20 A,

延时取 0.2~0.8 s;对容量较大、供电电缆较长的电动机,可适当提高至 10~30 A,以防电容电流引起误动。若系统为不接地或消弧线圈接地方式,则宜采用零序电压保护或方向接地保护,零序电压启动值可按额定相电压的 10%~20% 整定,动作时限宜取 0.5~1.5 s,并与上级保护保持配合。第二,负序保护主要用于防止三相不对称运行引起的转子附加发热和机械振动。设计时通常按负序电流与正序电流比值 I_2/I_1 进行整定,常用启动值为 0.08~0.15。对连续运行、重要性较高的高压电动机,可取 0.08~0.10 提高灵敏度;对启动波动较大的设备,可取 0.12~0.15 以兼顾可靠性。动作特性宜采用定时限与反时限相结合的方式,例如 $I_2/I_1=10\%$ 时延时 8~12 s,达到 20% 时延时 2~4 s,超过 30% 时可按 0.5~1.0 s 快速切除。第三,不平衡保护主要作为负序保护的补充,用于反映三相电流或电压偏差超限的异常运行状态。工程上可按三相电流最大偏差率或电压不平衡率整定,电流不平衡率告警值一般取 10%,跳闸值取 15%~20%;电压不平衡率告警值可取 3%,跳闸值可取 5%~8%。当不平衡现象持续 5~10 s 且伴随负序分量明显升高时,可与负序保护联动出口。通过接地保护、负序保护和不平衡保护的协同配置,可形成多层次异常状态防护链条,提升高压电动机在复杂供电条件下的安全运行能力。

2.5 低电压保护、失压保护与联锁保护设计

第一,低电压保护主要用于防止母线电压明显下降时电动机因转矩不足而堵转或过热。设计中应根据负荷重要程度分级整定,低电压保护动作值一般取额定电压的 0.65~0.75 U_n ,动作时限取 0.5~2.0 s。其中一般负荷可按 0.70 U_n 、1.0 s 左右整定,关键工艺设备可适当延时至 1.5~2.0 s,以躲避短时晃电。对 6 kV 系统,动作值通常可取 4.2~4.5 kV;对 10 kV 系统,可取 7.0~7.5 kV。当电压降至 0.4~0.5 U_n 以下时,应优先切除非重要负荷,防止电动机长期低压运行。第二,失压保护用于识别电源完全消失或断路器异常失电状态。失压动作值一般取 0.25~0.40 U_n ,动作延时取 0.2~0.5 s。考虑到大惯量设备在失压后存在残压,恢复送电时不宜全部同时再启动,应设置失压闭锁和再启动管理逻辑^[4]。通常可按先关键后一般、先小容量后大容量的原则分批恢复,关键泵可延时 3~5 s 自启动,辅助设备可延时 8~15 s 投入,而大功率压缩机、风机宜在人工确认或系统许可后再启动。对允许自启动的设备,还应满足母线电压恢复到 0.85~0.90 U_n 且持续 2~3 s 的条件。第三,联锁保护应与工艺控制系统协同设计,避免单一电气动作引发误停机或误启动。高压电动机联锁通常包括跳

闸联锁、启动闭锁和备用联启三部分。继电保护动作后，除切断断路器外，还应向DCS发送故障信号，并联锁相关阀门和上下游设备；启动闭锁应将润滑油压力、冷却水流量、阀位、轴承温度、急停信号等条件纳入合闸判据；对于“一用一备”设备，可在运行机组跳闸后经2~5 s延时自动投入备用机。通过低电压、失压和联锁保护的综合配置，可使高压电动机保护兼顾故障切除、工艺连续性和恢复控制要求。

3 化工企业高压电动机继电保护方案的工程应用

3.1 高压电动机继电保护系统配置与安装实施

在工程应用阶段，高压电动机继电保护系统的重点是如何将设计方案准确落地到现场设备与工艺系统中，以高压开关柜为安装载体，将微机保护装置、测量单元、开入开出回路、跳闸出口、信号回路及通信接口进行成套集成，并结合电动机重要等级确定配置方式。对压缩机、循环氢泵、主引风机等关键设备，宜采用独立保护测控装置，保护、测量、控制和事件记录集中配置；对一般辅助电机，可采用标准化柜型和统一端子接口，提高安装效率。现场安装中应重点落实CT极性、变比及接线正确性，二次回路屏蔽接地可靠性，跳闸回路独立性，以及PT、零序回路和联锁信号接点的对应关系，避免因接线差错导致保护误判。对于存在振动、潮湿、腐蚀性气体或高温影响的区域，应优先选用抗干扰能力强、绝缘水平高、密封性能好的保护装置和端子元件，柜内宜配置防潮加热与温湿度监测装置。控制电缆和信号电缆应与动力电缆分层敷设，交叉处尽量成直角布置，以降低电磁干扰；跳闸回路、CT回路及通讯回路应分别编号和挂牌。

3.2 继电保护参数整定与保护逻辑调试

继电保护参数整定与逻辑调试是工程应用中最关键的环节，其核心任务是把设计值转化为适合现场工况的可执行整定值，并验证各保护功能在真实运行边界下是否动作正确。整定工作一般以电动机铭牌参数、启动试验数据、供电系统短路容量、CT/PT实测变比及工艺运行方式为依据，结合同类设备运行经验进行复核。实际整定时，不能简单照搬设计初值，而应根据启动电流持续时间、稳定运行负荷率、母线电压波动范围及外部故障配合关系进行修正。例如：某些大惯量风机和压缩机在冷态启动时加速时间明显长于理论值，若仍采用固定初值，容易造成启动超时误动，因此应结合现场空载、带载启动记录适当优化动作门槛和时间配合。逻辑调试更强调保护动作链条的完整性和工艺匹配性，调试中要验证动作顺序是否正确，如保护动作后断路器跳开、故障信号上传、事故报警弹窗、备用机延时联启、故障机闭锁重启等是否按预定

逻辑执行。对低电压、失压、自启动和工艺闭锁等功能，应重点测试边界条件，防止因电压短时波动、接点抖动或信号延迟引起误跳闸。经过整定与联调优化后，保护系统才能真正做到既“能保护”，又“会配合”，满足化工连续生产条件下的实际应用要求。

3.3 高压电动机继电保护系统运行维护与管理

继电保护系统投运后，其长期可靠性很大程度取决于运行维护与管理水平。化工企业高压电动机数量多、负载类型复杂、工艺连续性强，若保护装置长期缺乏检查和维护，容易出现定值漂移、接点老化、通讯异常、回路松动或逻辑失配等问题，在运行阶段应建立“定值管理、状态巡检、试验校验、异常分析”四位一体的管理机制，日常管理中应定期核对保护定值单、版本号、软压板投入状态及联锁条件是否与当前运行方式一致，特别是在设备检修、工艺改造、母线分段运行或备用机切换后，更应重新核查保护配置是否仍然适用^[5]。在维护实施上，企业宜将继电保护纳入计划检修体系，按周期开展二次回路紧固、绝缘检查、动作试验、通信测试和备用电源检查。对关键高压电动机，可结合年度停机安排进行一次完整的传动试验和保护校验，验证跳闸出口、开关分合闸回路及DCS联锁动作的可靠性。对于曾发生误动、拒动或异常告警的装置，应建立专项分析台账，查明原因并闭环整改，必要时对整定值和控制逻辑进行修订。

4 结束语

化工企业高压电动机继电保护方案设计与工程应用，应立足于设备运行特点、供电系统结构及工艺连续性要求，综合考虑短路、过载、堵转、接地、失压及不平衡等多类异常工况，构建分层配置、功能完善、联锁协调的保护体系。在实际应用中，还应重视保护装置安装实施、参数整定、逻辑调试及运行维护管理，确保保护系统既能快速准确地切除故障，又能兼顾装置稳定运行。

参考文献：

- [1] 许劲夫. 大型异步电动机故障特性分析及对保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2025.
- [2] 贺鹏程. 高压变频器对电动机继电保护的影响及解决措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(04): 232-233, 260.
- [3] 赵觉, 陈正辉. 高压变频电动机差动保护的应用研究[J]. 中国设备工程, 2021(12): 138-140.
- [4] 侯国峰. 高压电动机零序保护动作原因分析[J]. 电气时代, 2021(06): 46-48.
- [5] 盛洪. 浅谈高压电动机故障及应对措施[J]. 模具制造, 2025, 25(04): 225-227.

高层建筑结构设计的安全性与经济性平衡优化研究

许家华¹, 黑乃旺²

(1. 山东中欣建设项目管理有限公司, 山东 临沂 276000;

2. 中达安股份有限公司山东分公司, 山东 济南 250100)

摘要 高层建筑结构设计安全性和经济性难以兼顾, 本文选取一栋 42 层总高 168 m 的钢筋混凝土框架—核心筒结构办公楼作为案例, 提出“参数优化—软件模拟—方案验证”的三阶段研究方法, 运用 PKPM 和 ETABS 软件建立有限元模型, 采用振型分解反应谱法和时程分析法, 系统分析核心筒与框架刚度比、构件截面尺寸、材料类型这三类核心参数对结构安全性能与经济指标的共同作用机制, 以期为高层建筑设计提供切实可行的经济安全协同优化方案。结果表明, “刚度比 1.8-2.2+ 渐变式截面优化+ 低碳材料应用”的综合优化方案, 在 7 度罕遇地震作用下, 优化后结构层间位移角降至 1/350 且优于规范 1/250 的要求。混凝土用量降低 22.3%、钢筋用量减少 15.8%、工程总造价下降 18.5%, 全生命周期碳排放削减 12.1%。

关键词 高层建筑; 结构设计; 安全性; 经济性; 平衡优化

中图分类号: TU973.3

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.027

0 引言

随着城市建设脚步加快, 高层建筑成为城市空间拓展的主要形式, 其结构设计既要达到“小震无损坏、中震可修复、大震不倒塌”安全标准, 又要符合“成本有节制、资源高利用”经济要求。当前领域存在两方面冲突, 一方面过分注重安全储备致构件尺寸过大、材料消耗过多, 使单位造价超出合理范围 15%~20%; 另一方面单纯追求经济效益, 降低安全标准, 让结构抗震能力不足、后期维护费用急剧攀升等隐患显现。数据表明: 超过 30% 的高层建筑结构纠纷和安全与经济指标不协调有关。常规优化途径通常只针对单一指标展开, 没有对安全和经济相互关联做整体剖析, 部分研究简化运算忽略地震情况下动态反应, 使安全评价过于保守。另一些研究依赖经验参数进行试算, 效率不高且难以全面涵盖各种工况。近年来, PKPM-AID 等智能设计工具的运用, 加快了优化进度, 但多数实践仍局限于“指标合格”阶段, 未形成可推广均衡优化体系。

鉴于此, 本文选择框架—核心筒结构为研究对象, 借助有限元模拟和参数化分析, 明确安全与经济指标敏感参数及相互作用规律, 提出多方面协同优化策略, 并通过实际工程案例验证其可行性, 以期为高层建筑设计提供合理实用的平衡方案。

1 安全与经济指标的耦合关系及影响因素

1.1 耦合机理

安全与经济指标的关系呈现出“倒 U 型”关联特征, 在安全投入没有达到某一阈值之前, 适当增加资源投入能有效增强结构安全性, 这时投入回报相对比较高^[1]。若投入超过这个阈值, 持续增加投入对安全性能提升的作用比较有限, 并且投入成本会急剧上升。以框架—核心筒结构为例, 当核心筒刚度比从 1.5 增加到 2.0 时, 结构层间位移角减小幅度达到 23%。然而, 造价仅仅上升了 8%, 但当刚度比从 2.5 提高至 3.0 时, 层间位移角仅仅下降了 5%, 造价却增长了 15%, 这表明此时安全投入已进入“效益递减”的阶段。

1.2 结构体系选型的影响

不同结构体系在安全性和经济性平衡点上差异明显。钢结构凭借优异抗震能力脱颖而出, 但其造价较高, 主要适用于超高层建筑或多地震地区^[2]。钢筋混凝土框架—核心筒结构造价较为合理, 但自重较大, 适宜建造 100~150 m 的高层建筑。混合结构能较好地兼顾安全与经济需求, 但是其施工工艺复杂, 需增加约 10%~15% 的施工成本。

作者简介: 许家华 (1998-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程。

1.3 构件参数设计的影响

核心筒和框架之间的刚度比例会决定水平荷载具体的分布方式^[3]。当比例处于1.8~2.2之间时,核心筒能够分担70%~75%的水平作用力,而框架则承担剩下的25%~30%的水平作用力,这种配比能够实现两者之间的最佳协同效应。刚度比小于1.8时,框架会承受过大的荷载,从而可能导致柱端发生损坏。当刚度比超过2.2时,核心筒的刚度过高会造成材料的大量浪费。框架柱每增加100 mm的截面,工程造价会上升5%~8%,但基底剪力的降幅仅有3%~4%。当连梁高度从600 mm提升至800 mm时,其抗剪能力会增强20%,不过梁端弯矩同时会增长15%,所以需要相应地调整配筋设计。

1.4 荷载与工况条件的影响

地震烈度对平衡关系影响显著,7度设防区结构造价比6度区高12%~15%,8度区比7度区高20%~25%。烈度每提升1度,安全投入需增加10%~15%才能维持平衡^[4]。基本风压从0.45 kN/m²增至0.60 kN/m²,框架梁配筋率需提高20%,造价增加8%~10%,需通过优化梁截面高度平衡抗风性能与成本。

2 平衡优化的研究方法 with 模型构建

2.1 研究方法与技术路线

本研究采用综合方式,运用参数化分析、有限元模拟以及工程验证这三阶段研究方法。首先基于敏感性分析,识别出核心筒刚度比、框架柱截面尺寸以及钢筋强度等级这三个关键影响参数,且它们的敏感性系数均超过0.6。然后以某42层框架—核心筒办公建筑当作工程实例,利用PKPM完成初步设计,借助ETABS构建具有精细化特点的有限元模型。同时,考虑材料与几何双重非线性特征,进而把安全性能作为约束条件、将经济指标作为优化目标,通过PKPM-AID智能算法实现多目标迭代优化操作^[5]。最后采用时程分析法,检验优化结构在7度罕遇地震作用下的动力响应表现,并且通过成本核算确保经济性目标能够达成。

2.2 工程背景与模型参数

某42层的超高层办公楼,建筑总高度达到168 m,总建筑面积8.5万m²。抗震设防等级设定为丙类,抗震设防烈度是7度,设计地震分组属于第一组,场地类别为II类,基本风压值为0.45 kN/m²。建筑的设计使用年限为50年,该建筑采用钢筋混凝土框架—核心筒结构,核心筒的平面尺寸为12 m×8 m,外围框架柱

的间距为8 m。核心筒及框架柱使用的混凝土强度等级为C60,框架梁与连梁采用C50混凝土。框架柱与梁部采用HRB500级钢筋,核心筒剪力墙的分布筋选用HRB400级钢筋。各类荷载按照现行规范取值,恒载部分楼面取值为4.0 kN/m²、屋面取值为5.0 kN/m²。活载根据不同功能区域确定,办公区为2.0 kN/m²、会议室为3.0 kN/m²,风荷载体型系数取1.3、地面粗糙度类别为B类。

2.3 优化目标与约束条件

首要目标为结构总造价达到最低程度,并尽可能减少混凝土和钢筋的消耗以及碳排放。约束条件包含7度多遇地震情况下层间位移角不能超过1/500、7度罕遇地震情况下层间位移角不能超过1/250、周期比不能超过0.85。采用C60混凝土时,框架柱轴压比不能超过0.8,核心筒剪力墙剪压比不能超过0.25,框架柱截面尺寸不能小于800 mm×800 mm、连梁高度不能超过梁跨的1/4、钢筋保护层厚度不能小于30 mm,构件截面尺寸需要符合模板标准化要求。

3 平衡优化方案与验证分析

3.1 优化方案设计与迭代过程

为实现预定目标,依托PKPM-AID 2.0平台开展五轮精细化优化。首轮聚焦核心筒刚度调整,初始刚度比2.5(对应墙厚600 mm)优化至2.0(墙厚500 mm),层间位移角由1/420改善至1/380,同时实现6.2%的造价节约。二轮优化框架,柱截面尺寸通过分级调整,将轴压比控制在0.75~0.80,造价进一步降低8.5%。三轮革新连梁构造,采用“钢支撑(Q355材质)+BRB-300阻尼器”的组合方案,连梁抗剪能力提升25%,并将层间位移角优化至1/350,造价增加2.1%。四轮实施材料升级,框架梁主筋由HRB400替换为HRB500,钢筋用量减少15%,造价下降3.8%。五轮精细化调整,核心筒分布筋配筋率从0.25%降至0.20%,造价再降0.9%。

3.2 安全性验证

优化后的结构一阶自振特征周期达到3.2秒,主要呈现平动形态。二阶周期是2.6秒,以扭转形态为主要表现,计算得到的周期比为0.81,处于0.85的限值范围之内。这表明结构具备合格的抗扭能力,同时振型参与质量系数超过90%,确保地震作用计算精准度。X向的一阶平动周期为3.2秒,对应参与质量系数65.2%,Y向的二阶平动周期为2.8秒,参与质量系数为82.5%,三阶扭转周期为2.6秒,其参与质量系数达到91.3%。选用包含EL Centro波和Taft波在内的两条天然波及一

条人工波进行时程分析。结果显示：在 7 度罕遇地震作用下，结构 X 向与 Y 向最大层间位移角分别为 1/350 和 1/360，这两项指标均满足规范中 1/250 的限值要求。此外，框架柱最大轴压比测得 0.78 且不超过 0.8，核心筒最大剪压比为 0.22，不超过 0.25，连梁承受的最大剪力也在规范计算值允许范围内。

3.3 经济性验证

施工建设环节造价统计显示，经过方案优化之后，混凝土消耗量从 38 500 m³ 减少到 30 000 m³（降幅达到 22.1%），钢筋消耗量由 5 520 t 下降至 4 650 t（降幅为 15.8%）。虽增加了 85 万元的阻尼器投入，但结构工程总预算从 15 300 万元缩减至 12 500 万元（降幅达 18.3%），单位面积造价也相应地由 1 800 元/m² 降低到 1 470 元/m²（降幅达 18.3%）。上述计价是参照《建设工程工程量清单计价规范》（GB/T 50500-2024），具体取费标准为：混凝土 580 元/m³、HRB500 级钢筋 5 200 元/t、阻尼器 1.7 万元/个。基于 50 年设计基准期开展全生命周期成本评估表明，优化后的方案把年度维护开支从 230 万元压减至 188 万元（降幅 18.3%），半世纪累计维护费用从 11 500 万元降至 9 400 万元（降幅 18.3%），碳排放强度由 320 kgCO₂/m² 下降至 282 kgCO₂/m²（降幅 11.9%），由此产生的碳减排收益为 380 万元，最终全生命周期总成本从 26 800 万元显著回落至 21 520 万元（降幅 19.7%）。维护费用按结构造价的 1.5% 进行测算，碳减排收益则是基于 2024 年 60 元/tCO₂ 的碳交易价格计算。

4 平衡优化的设计建议

4.1 体系选型优化

对于高度处于 100 m 到 150 m 区间的高层建筑，推荐采用钢筋混凝土框架—核心筒结构体系。对于高度在 150 m 至 200 m 范围之内的建筑，适宜选用钢—混凝土组合结构体系。对于高度超过 200 m 的超高层建筑，应优先考虑采用纯钢结构体系。在地震设防烈度达到 8 度及以上的高烈度区域，可采用混凝土核心筒与钢框架相结合的混合体系，以此在抗震性能和经济性之间取得平^[6]。

4.2 参数设计优化

核心筒和框架的刚度比例最好保持在 1.8 到 2.2 这个区间之内，柱体设计采用自下而上，让截面逐渐减小的阶梯式方案（每上升 15 层柱截面尺寸就缩减 100 mm），同时优先选择斜撑附加阻尼器的构造措施，替代传统连梁以降低剪切破坏发生的可能性。

4.3 材料选型优化

核心筒以及框架柱选用 C50 到 C60 强度的混凝土，强度等级需控制在 C70 以下，以防材料价格大幅上涨增加成本。主要受力钢筋建议选用 HRB500 型号，钢筋用量减少能够抵消成本增加，非关键性构件可考虑掺入再生骨料，且掺入比例不超过 30% 以减少碳排放量。

4.4 软件应用与施工配合

借助 PKPM-AID 开展多目标优化，并把安全指标设为不可突破限制。通过 ETABS 进行详细校核，着重分析罕遇地震下动力表现，确保优化过程至少完成 5 轮迭代^[7]。构件截面选用标准化尺寸像柱子采用 800 mm、900 mm 或 1 000 mm 规格，以此减少模板浪费。钢筋连接以机械方式为主，混凝土养护采用蓄水法来实现整体成本有效控制。

5 结束语

本文主要聚焦框架—核心筒结构体系开展研究，利用有限元方法以及参数化分析技术，深入探究高层建筑结构安全性和经济性指标内在关联，构建出“刚度比优化+梯度截面+材料替代”综合优化策略。工程实践证明：该方法能确保结构达到 7 度罕遇地震设防标准，同时项目总造价降低 18.3%，且全生命周期成本减少 19.7%，为同类工程提供可推广的优化范式。未来研究可朝着多种结构体系协同优化方向延伸，融合超高性能混凝土、纤维增强复合材料等新型材料和智能监测技术，达成安全、经济与低碳的多维目标，引领高层建筑结构设计向高效化、可持续化方向发展。

参考文献：

- [1] 彭占. 高层住宅建筑结构的抗震优化设计策略研究[J]. 砖瓦世界, 2023(16):56-58.
- [2] 郑鹏, 管平平. 住宅抗震性能优化设计研究: 以高层楼宇大开间结构为例[J]. 建筑与装饰, 2024(21):124-126.
- [3] 吴可. 高层建筑结构的抗震性能优化[J]. 模型世界, 2024(19):89-91.
- [4] 刘何谦, 陈秀. 基于抗震性能的带加强层高层建筑结构优化设计研究[J]. 工程建设和设计, 2024(14):25-27.
- [5] 高利亚, 叶秀斌. 高层建筑结构抗震设计优化措施[J]. 砖瓦世界, 2023(23):25-27.
- [6] 洪艳. 基于性能化设计的高层建筑结构抗震优化策略[J]. 工程建设和设计, 2025(18):98-101.
- [7] 徐昕. 高层建筑结构设计中抗震性能优化策略[J]. 城市开发, 2025(08):147-149.

减污降碳协同背景下的生态工业园区建设路径探讨

孔琦

(济宁高新技术产业开发区生态环境事务中心, 山东 济宁 272000)

摘要 我国对生态工业园区建设提出了新的要求, 要求生态工业园区要以建设现代化产业体系为导向, 以减污降碳协同为重点目标, 坚持智能化、绿色化、融合化方向, 具备“低碳、高质、创新、循环”典型特征, 对工业领域生态文明建设具有较强的示范引领作用。基于生态工业园区建设新标准, 本文对生态工业园区建设路径进行了探讨, 阐述了生态工业园区建设基本原则, 构建了生态产业共生体系、减污降碳协同体系、资源循环利用体系、绿色科技创新体系四大创建体系, 旨在对生态工业园区建设有所裨益。

关键词 生态工业园区; 生态产业共生体系; 减污降碳协同体系; 资源循环利用体系; 绿色科技创新体系

中图分类号: F205

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.028

0 引言

生态工业园区建设关注解决工业园区生态环境问题, 是我国实现园区绿色、低碳、可持续、循环发展的主要途径之一。“十四五”以来政府出台一系列促进工业园区绿色低碳转型的政策, 明确了园区绿色低碳发展的相关内容, 其中生态工业园区的建设对我国经济发展转型, 建设节约型社会具有重要作用。我国生态文明建设进入了以减污降碳协同整治、经济发展全面绿色转型的时期^[1]。通过近年来的研究显示, 生态工业园区作为绿色发展理念在工业领域内的一种实践形式, 对城市的经济增长有显著的作用, 践行了“绿水青山就是金山银山”理念^[2]。2026年生态环境部、商务部、工业和信息化部印发《生态文明建设示范区(生态工业园区)管理办法》(以下简称“新办法”), 提出生态工业园区要以现代化产业体系为导向, 以减污降碳协同为重点目标, 坚持智能化、绿色化、融合化方向, 具备“低碳、高质、创新、循环”典型特征。着力把生态工业园区打造成为推动工业领域深入践行习近平生态文明思想的重要平台, 为培育发展绿色生产力、推动工业领域绿色低碳转型做出新贡献。

1 我国生态工业园区建设现状

我国2000年开始生态工业园区建设, 近年来取得了显著的成效, 逐步将循环经济、清洁生产、减污降碳协同发展等理念融入园区建设, 带动园区绿色低碳发

展, 已有73家园区获得生态工业园区命名, 生态工业园区已经成为工业园区绿色低碳发展的标志性成果^[3]。多年来, 生态工业园区在绿色低碳高质量发展等方面取得了显著成效, 成功践行了习近平生态文明思想。生态工业园区模式通过生态系统的共生方式, 使园区内的企业之间形成了有效的链接, 加强了企业之间的资源共享, 不断提升资源之间的有效利用, 同时减少污染物的排放, 园区内企业得到了共同发展^[4]。

相关统计数据显示, 生态工业园区创造了全国8.66%的工业增加值, 而化学需氧量、氨氮、二氧化硫和氮氧化物排放量仅分别为全国工业排放的0.07%、0.07%、0.50%和0.43%, 主要污染物排放强度比全国水平低90%, 固废综合利用率达到90%以上, 实现了减污降碳协同高质量发展^[5]。生态工业园区也推动了环境治理的新发展, 与无废园区建设、园区整体清洁生产审核、绿色园区建设等工作均进行了有效的结合。

2 新办法下生态工业园区建设分析

生态工业园区的核心是将传统经济的资源、产品、污染排放模式转变为资源、产品、再生资源循环流动模式, 循环经济模式可使园区废弃物大幅度的减少。生态工业园区的建设着力于解决环境与发展之间的冲突, 生态工业建设也是未来工业领域的发展方向。新办法结合碳达峰碳中和目标和新型工业化要求, 进一步突出生态工业园区减污降碳协同的引领作用, 要求

作者简介: 孔琦(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环境保护工程。

园区采取能源、产业和运输结构优化，以及低碳技术创新应用等有效措施，提升园区绿色生产力发展水平。根据近年来各项生态文明发展的要求，扩展生态工业园区内涵，调整 8 项基本指标并新增了 7 项基本指标，如新增要求工业园区具备明确的 2030 年前碳达峰目标；要求工业园区内重点行业重点企业整体不低于行业清洁生产评价指标体系Ⅲ级水平。将“经济发展”“产业共生”“资源节约”“环境保护”“信息公开”共五个方面的评价指标调整为“降碳减污”“发展质效”“创新驱动”“生态引领”共四个方面的评价指标。

3 生态工业园区建设的制约因素分析

3.1 能源结构有待优化

国内工业园区能源结构以煤炭、天然气、石油等为主，风电、太阳能、生物质能等可再生能源利用较少。同时，新能源和可再生能源利用手段单一，以光伏发电为主，缺乏多元化新能源利用形式。企业生产用能以电力为核心，工业生产电力消费以传统制造业占比最高，不合理的能源结构导致了一系列的大气污染问题、工业固废问题。

3.2 产业结构和布局不尽合理

产业结构依然以工业发展为主，服务业发展水平不能有效支撑工业发展，不能有效支持传统工业向现代工业的升级转化；区内产业集群度低，企业之间没有形成共生关系明显的产业链，园区引导产业集聚的作用还没有发挥，园区产业集群的综合竞争力得不到体现。园区企业发展依然以传统产业为主，能耗高、技术水平低、占地面积大的企业较多，不能有效实现土地的集约利用；产业空间布局不完善，园区产业规划不合理，产业机构单一，传统制造业转型不够彻底。

3.3 科技创新面临挑战

科技创新面临挑战，公共科技创新平台还不够健全，科技与产业融合不够紧密，如何加强科技创新与产业发展的链接，提升高新区高新技术产业实力和研发实力，是有待解决的问题。产业支持政策以广泛、全面支持为主，对绿色产业培育、传统产业绿色转型等绿色发展重点环节、重点领域缺乏精准聚焦。

3.4 碳排放管理机制尚未建立

与能耗核算体系不同，碳排放核算体系较为复杂，尚未围绕碳排放管理建立健全相关数据平台或管理机制，对园区碳排放情况掌握不够清晰，对重点行业、重点排放环节缺乏诊断和监管能力。另外，还存在各层级

碳排放统计核算底数不清、工业生产过程基础统计体系不健全、碳排放因子本地化水平不高等问题和挑战。

4 生态工业园区建设基本原则

4.1 与自然和谐共生原则

与自然和谐共生原则强调园区发展必须尊重自然、顺应自然、保护自然，实现工业活动与生态系统的良性互动。园区发展必须摒弃以牺牲生态环境为代价的传统模式，而是要将工业系统视为自然生态系统的一部分，转化为将生态环境与产业发展相互融合的动态模式，实现工业活动与自然环境的和谐统一。

4.2 系统性原则

生态工业园区建设是一个全面系统建设过程，不仅仅是园区企业单独相加。要求将园区视为一个有机整体，从规划、建设到后期维护全方位进行管理。建设工作需要统筹园区各部门、各企业建立协调机制，确保资源流动、信息共享和污染控制能够协同运作。同时必须考虑园区与周边社区、自然生态系统的和谐共生，包括合理规划土地利用、保护生物多样性、控制污染物跨界影响，以及确保园区的发展能够带动区域经济的绿色转型。

4.3 循环经济原则

根据循环经济的原则，在园区层面构建产业共生和物质代谢网络，使一家企业的废水、固废、废热等废物成为另一家企业的原料。通过技术改造和流程优化，减少能源和原材料的输入，同时减少废弃物的最终排放，从而降低碳排放强度，这是实现能源结构优化和减污降碳的微观基础。同时，园区内的企业应从源头（产品设计、原料选择）到过程（生产工艺、设备管理）再到末端（废物处理）都贯彻清洁生产理念，通过先进的技术改善企业的废物处置方式，提高企业的资源利用效率，减少污染物产生，而不是仅仅依赖末端治理。

4.4 高科技原则

积极采用各项再循环技术、污染治理技术和信息技术等，采用先进的生产过程管理和环境管理标准，对先进的环保技术和节能设备进行有效利用，从而减少园区的能源消耗以及污染物排放^[6]；园区科学合理引进项目，引导园区产业向高新技术方向发展，规范工业项目用地投资强度，促进土地的集约利用和优化配置。

5 生态工业园区建设四大体系

5.1 生态产业共生体系

围绕优势产业、支柱企业、拳头产品，建立绿色产业链供应链，从“企业小循环、园区中循环、区域大循环”三个维度加速产业链条布局。首先针对主导产业链上下游进行延伸，从原材料的加工到最终产品进行深入分析，扩展主产业链，形成了原料成本更低、产品品质更高、产品之间转化更加高效的主产业链；其次对主产业链的其他环节进行横向耦合，吸引符合园区的企业入驻，形成具有良好生态效应的支链，加强与主链之间的物质、能量、信息交换，共同形成更加稳定的产业体系；最后区域整合，充分共享交通、供水、供电、污水治理等基础设施，与周边区域建立资源共享、带动发展的模式。根据国内某高新区实际情况，结合产业发展规划及招商引资情况，加强高端装备、汽车及零部件、医养健康、新一代信息技术、新材料新能源等产业体系生态工业链的构建，在产业链各个链条分别引进以构建产业链为目的的项目，实施后新增构建生态工业链项目数量可满足8个的目标要求。

5.2 减污降碳协同体系

以协同减排的管理体系、技术路径、基础设施等为着力点，探索减污降碳协同创新解决方案，多层次逐级推进减污降碳协同增效。一是强化宏观区域层面协同推进的工作格局和激励机制，持续聚焦区域环境质量改善和碳达峰目标，以源头降碳为导向研究建立产业准入及退出清单制度、碳污一体化融合清单，围绕协同度评价体系，创新数字化精细化协同监管体系。二是优化中观园区层面基础设施低碳改造和上下游产业链绿色发展的共生耦合，多措并举打通物质流—能量流—价值流—碳流的共建共治共享，探索构建降碳引领经济发展、能耗管控与环境治理等多元并存的协同发展模式，推动能耗双控逐步向碳排放双控转变。三是推动微观企业层面关键环节及重点工艺的碳污溯源，实施源头替代降低能源消耗、过程控制提高资源利用、末端治理深化污碳协同、综合利用促进循环发展的节能增效减排路线，着力研究传统污染物、新污染物与温室气体协同减排技术路径。

5.3 资源循环利用体系

聚焦固体废物产生强度高、源头减量和资源化利用手段单一等突出问题，着力提高工业固体废物、建筑垃圾、生活源废物和农业废弃物等固废源头减量与

末端资源化利用水平，加快完善“无废城市”建设长效机制，提升园区固体废物减量化、资源化、无害化水平。按照“治用保”并举的思路，构建节约用水、高效循环、中水回用有机结合的水资源循环及水污染控制体系，制定并实施水资源管理制度，加强对工业企业、居民生活用水的监管。

5.4 绿色科技创新体系

优化绿色技术创新载体建设，聚焦绿色前沿关键技术，支持科研院所建设创新平台，鼓励企业建立绿色技术基地，打造低碳智库平台。强化企业科技创新扶持力度，鼓励企业搭建节能、节水、污染防治技术研发平台。支持企业联合科研机构 and 高校，开展绿色技术产学研攻坚行动，推动减污降碳协同治理、固体废物综合利用、绿色低碳发展、清洁生产、中水回用等为导向的，持续加强企业核心技术的创新发展，促进科技创新与产业创新深度融合。

6 结束语

我国生态文明建设进入了经济发展全面绿色转型的时期，更加强调减污降碳协同整治，生态工业园区的建设具有重要的意义。本文通过分析生态工业园区建设标准，阐述了生态工业园区建设的基本原则，并且构建了新形势下生态工业园区四大建设体系，指导生态工业园区建设向智能化、绿色化、融合化方向发展，实现园区“低碳、高质、创新、循环”典型特征，助力园区实现绿色低碳高质量发展。

参考文献：

- [1] 孙金龙. 深入学习贯彻习近平生态文明思想加快构建人与自然和谐共生的现代化[J]. 环境保护, 2022, 50(Z2): 8-10.
- [2] 蒲龙, 丁建福, 刘冲. 生态工业园区促进城市经济增长了吗? : 基于双重差分法的经验证据[J]. 产业经济研究, 2021(01): 56-69.
- [3] 刘晓宇, 周长波, 张永波, 等. 我国工业园区绿色低碳发展现状、问题及建议[C]// 中国环境科学学会, 中国光大国际有限公司. 中国环境科学学会2024年科学技术年会论文集(一). 生态环境部环境发展中心, 2024.
- [4] 程秀娟. 生态工业园区建设的环境管理策略研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(10): 118-120.
- [5] 同[3].
- [6] 黄涛. 关于生态工业园的规划设计分析[J]. 居舍, 2021(11): 92-93.

给排水管网信息化管理系统构建与应用

张春颖

(山东省滕州市中润供水有限公司, 山东 滕州 277599)

摘要 由于城市化速度加快以及水资源管理的要求越来越高, 传统的给排水管网管理模式已经不能满足城市水循环的需要。本文主要对本系统的构建基础、核心功能模块和应用场景进行研究。首先对系统构建目标、数据整合机制以及架构设计逻辑进行分析, 确定数据驱动的建设原则; 其次说明包含管网全生命周期管理、实时监测预警、运维调度和决策支持等模块的功能体系, 突出模块之间的耦合以及数据流转; 最后集中讨论智慧水务、应急抢险、漏损控制、规划辅助这四个场景下信息化技术对管网管理数字化转型的赋能作用, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 给排水管网; 信息化管理; 智慧水务; 数据融合

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.029

0 引言

城市给排水管网是维持城市生命体征的“血管”, 直接影响居民的生活、公共安全以及生态环境的可持续性发展。由于技术以及管理的落后, 大量城市管网系统存在底数不清、运行不明、故障响应慢、资源调配低效等问题。传统的被动式维修、碎片化的管理造成水资源浪费, 还会带来城市内涝的风险。因此, 依靠新一代信息技术创建给排水管网信息化管理系统是行业发展的必然趋势, 它既是一种技术的更新, 也是管理思想由“经验主导”向“数据主导”转变的过程^[1]。该系统冲破信息孤岛, 实现管网与数字空间的融合, 可以及时察觉运行状况, 精确预估危险, 助力运维决策, 从而改善城市水务系统的韧性以及智慧化程度。

1 给排水管网信息化管理系统构建基础

1.1 系统构建目标与原则

建立给排水管网信息化管理系统, 主要目的在于将管网资产数字化映射、运行状态透明化感知和管理决策智能化辅助结合起来, 从而达到安全、高效、节能、环保的综合运营效果。实现这一目标需要遵循建设原则。“统筹规划、分步实施”是系统落地的前提条件, 要从城市的长远发展出发, 兼顾当下的需求, 避免重复建设或资源浪费。“标准先行、互联互通”是打破数据壁垒的重要手段, 需要建立统一的规范和协议, 保证不同数据来源之间可以顺畅交流。“安全可靠、自主可控”也是不可忽视的原则, 系统架构要稳定, 具备容灾能力, 核心技术和关键设备应逐渐实现国产

化, 以防止出现风险。这些原则互相支撑, 形成系统建设的基础, 保证系统建成、使用和长久发展, 为城市水务治理服务^[2]。

1.2 数据采集与整合

数据是信息化管理系统的中心, 数据采集是否全面、准确、及时, 会直接影响系统的应用效果。数据采集要构建“空天地”一体化感知网络, 利用定位技术对管网坐标进行校准, 部署物联网终端设备高频采集运行参数, 采用无人机、管道机器人和卫星遥感技术获取影像数据。海量数据汇集之后, 更重要的在于深度整合和治理, 构建数据中台, 使用 ETL 技术处理数据, 消除数据孤岛和噪声。利用时空关联分析法, 将静态属性数据、动态监测数据、事件数据三者相结合, 形成管网数据资产体系, 为之后的分析建模、智能应用打下数据基础^[3]。

1.3 系统架构设计

科学合理的系统架构是保证系统稳定运行、灵活扩展的骨架, 主流采用云、边、端分层分布式架构(见图 1)。

2 给排水管网信息化管理系统功能模块

2.1 管网信息管理模块

管网信息管理模块作为系统的数字基础, 实现管网“一张图”展示, 对管网资产的全生命周期进行数字化管理。它不是简单的电子台账记录, 而是依靠高精度的 GIS 技术, 对地下给水排水管线等设施进行三维可视化建模, 并赋予实体对象唯一的编码和详细的属

作者简介: 张春颖(1978-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 给水排水工程。

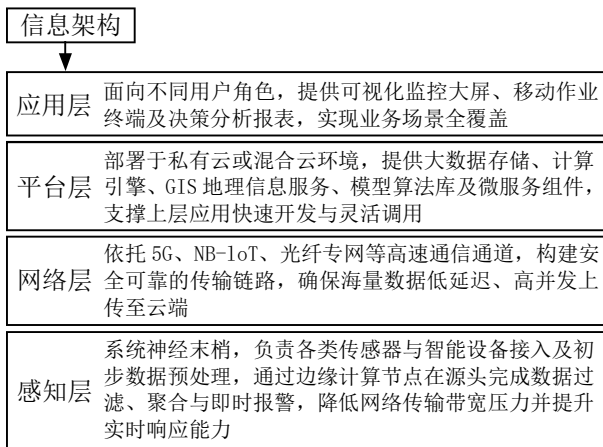


图1 给排水管网信息化管理系统架构图

性档案, 包含全方位的信息。通过动态更新持续反映管网变动, 从而实现账实相符, 破解传统方式面临的“盲管”“暗管”困局。此外, 本模块具有很强的空间分析能力, 可以进行爆管分析等高级功能, 为规划设计和应急抢修提供空间依据。它把静态的数据变成动态的空间资产, 使管理者能够掌握管网的脉络, 给后续的监测预警等提供可信的数据来源, 是管网精细化管理的前提和基础^[4]。

2.2 实时监测与预警模块

实时监测和预警模块是保证管网安全运行的重要手段, 它的主要价值在于从被动应对转变为主动防御。该模块依靠管网智能传感网络, 在7×24小时的时间里对压力、流量等关键指标实施不间断的监测, 用数据可视化大屏来显示运行状况。系统自带智能算法模型, 可以依据历史和实时数据来识别异常波动模式, 如潜在的漏损、爆管风险等。一旦监测数值超过阈值或者算法判定有风险, 系统则会立刻启动多级预警机制, 用各种方式将责任人的信息发送出去, 并且会自动调用周边的视频以及应急预案来协助找到故障点。

2.3 运维管理模块

运维管理模块对传统的管网维护流程进行重新塑造, 促使运维由原来的粗放式、单向化向标准化、精细化、闭环化转变。集成为工单管理、巡检调度等功能, 实现了运维业务的全流程数字化管控。系统根据监测预警或者报修请求自动生成智能工单, 按照人员位置、技能和任务紧急程度, 用算法进行最优匹配, 派给最近的运维班组, 缩短响应半径。运维人员在作业过程中使用移动终端实时上传现场情况, 管理人员通过远程监控作业。维修完毕后系统会自动生成记录, 并对管网资产进行状态更新, 实现闭环。本模块提高了运维效率, 优化了人力资源的配置, 提高了城市水务服务的满意度和公信力。

2.4 决策支持模块

决策支持模块是信息化管理系统的“智慧大脑”, 主要利用大数据分析以及人工智能技术为管理层提供科学、量化、前瞻的决策支撑。本模块不再只是简单的数据统计和报表展示, 而是进入了数据挖掘、模型仿真这样的高层次领域。它可以对大量的历史运行数据进行多维关联分析, 找到用水规律、漏损热点和能耗瓶颈, 产出深入的运营分析报告。利用水力模型和机器学习算法, 模块可以模拟出各种工况下的管网运行状况, 预测未来需求变化的趋势, 评价改扩建方案的经济性和可行性, 从而做出科学的管网规划和投资计划。在突发事件处理时, 可以迅速推演事故影响范围, 比较各种应急方案的优劣, 给出最好的处理办法。该模块把管理者的经验判断变成数据驱动的理性决策, 有效地避免了人为失误, 提高了资源配置效率, 使城市水务管理由“定性模糊”变为“定量精准”。

3 给排水管网信息化管理系统应用场景

3.1 智慧水务全域感知与协同调度

在智慧水务的宏观架构之下, 信息化管理系统早已不是对单个管网的监控, 而成为一个城市水循环系统的全域感知中枢和协同调度引擎, 它的关键在于冲破给水、排水、再生水、原水等各个子系统之间的数据壁垒, 创建起依靠数字孪生技术的城市级水务统一体^[5]。本场景已经不再只是对静态数据进行展示, 而是把气象预报、河道水位、地下水位、用户用水行为等各方面的数据融合在一起, 从而达到对城市水系统运行状况的实时全息呈现以及动态推演的目的。系统采用高精度水力模型加人工智能算法, 可以准确预测未来一段时间内供需平衡情况, 进而对跨区域、跨层级的调配进行计划。例如: 用水低谷期自动生成泵站运行速度来均衡管网压力分布, 在高峰供水时期智能打开调蓄设施来削峰填谷, 保证供水服务压力的同时大大降低了能耗和漏损风险。该场景实现了排水系统厂、网、河一体化联动, 根据降雨预测提前预排管网存水, 腾出库容应对暴雨冲击, 在雨后根据河道水位自动规划退水路径, 防止倒灌和内涝。全域感知和协同调度机制把传统分散、被动的管理模式升级为全局最优、主动干预的智慧化运营体系, 大大提高了城市水资源配置的弹性、效率, 使水务管理从经验驱动走向数据驱动, 为创建绿色、低碳、韧性城市水生态系统奠定了坚实的技术支撑。

3.2 突发事件应急响应与精准抢险

面对爆管、严重内涝、水质污染等突发性公共安全事件, 信息化管理系统创建起从风险识别、快速反

应到精准处置的全过程应急指挥体系，成为守护城市生命线安全运行的最后一道防线。该场景的主要优点在于把传统的“接报—查找—抢修”的被动流程重新构建成“监测—预警—预判—处置”的主动防御模式，依靠高灵敏度的传感网络和异常检测算法，在事故发生毫秒级时捕捉到压力突然下降、流量突然变化或者水质出现异常的信号，并且立刻启动多级联动预警。一旦发生险情，系统则会立即启动智能应急预案，利用 GIS 空间分析技术迅速找到事故的准确位置，自动生成事故影响范围和扩散方向，精准找到需要关闭的阀门组来缩小停水区域，并及时获取最短的抢修路线和物资清单，最后用移动终端一键将任务发给离事故最近的应急班组。抢险过程中指挥中心利用大屏幕对现场视频回传、人员定位、作业进度、周边交通等信息实施实时监控，使资源得到及时合理的调配，使指令能够迅速下达给各个地方，从而实现协同作战。

3.3 管网漏损精细化控制与节水增效

在水资源越来越紧张、供水成本不断上涨的情况下，采用信息化管理系统对管网漏损进行精细化管理已经成为水务企业降低成本增效的重要战略，它以分区计量、智能诊断、主动修复为闭环体系，把宏观总量控制和微观定点治理结合起来。系统以 DMA（独立计量区域）为理念，把庞大的复杂供水管网科学地分成若干个层次分明的计量单元，实时采集各个区域的进出流量、压力和夜间最小流量等数据，用大数据分析和机器学习算法建立动态漏损基准线，自动识别异常波动模式并准确找到物理漏点和管理漏损源头。不同于传统的听漏，本场景重视预防性维护，系统会把管材年限、地质状况、运行压力这些要素纳入考量范围之内，从而评定各个区域的漏损危险等级，给出不同的检漏安排和维修先后次序，助力运维人员实施有目的性的作业。系统中还具有压力管理功能，对管网运行压力进行实时监测和自动调节，使管网运行压力处于满足服务要求的最小必要范围内，从而抑制由于压力过高造成的背景漏损和爆管风险。经过这样的深度应用场景之后，水务企业不但可以大幅度地降低产销差率，节省宝贵的水资源和泵送能耗，而且可以延长管网设施的使用寿命，提高资产运营效益。

3.4 规划建设辅助与资产全生命周期管理

在城市更新扩张和基础设施提质增效的大环境下，信息化管理系统为给排水管网的科学规划、精准建设以及资产全生命周期管理提供了贯穿始终的数据支撑和决策依据，从根本上改变了以往规划依靠经验、建设依靠图纸、管理缺乏数据的粗放状态。规划阶段，

系统依靠海量的历史运行数据以及城市发展预测模型，可以对现有的管网承载能力和服务盲区进行定量的评价，并且可以模拟不同的规划方案下水力工况的变化情况，从而帮助决策者做出合理的管网改扩建和投资计划，防止出现无谓的建设或者资源的浪费^[6]。系统给用户提供的三维地下管线数据库和地质信息模型，可以对管线路由进行优化选线、碰撞检测，从而降低施工风险、提高设计质量、提高施工可行性。建设移交时系统可以实现工程资料数字化同步归档、竣工数据无缝对接，保证账实相符，为以后的运营打下良好的基础。进入运营期以后，系统则会对资产实施动态跟踪并展开健康度评价，依照设施运作状况，维修记录以及尚存的寿命预估来自行提出更新改良倡议和保养安排，从而实现对资产价值的最佳化发掘。该种应用场景将管网从“出生”到“退役”的全过程数据链条打通，保证城市规划的前瞻性、建设的规范性以及资产管理的科学性，促使城市基础设施管理由碎片化走向系统化，由静态台账走向动态资产，给城市水务的可持续发展构筑起稳固的根基。

4 结束语

给排水管网信息化管理系统创建和应用不仅仅是简单的技术引进或者设备堆砌，还是管理革命、思维重塑。它把地下管网系统变成城市智慧基础设施，依靠数据感知、整合、应用。从基础建立、功能完善、场景赋能三个方面可以看出，给排水管网信息化管理系统具有很强的生命力和广阔的发展前景，解决了水务管理的难点，给城市水系统智能化指明方向。随着技术的进步以及场景的拓展，给排水管网信息化管理系统在保证水安全、提高利用效率、推进生态建设等各方面起着重要的作用，助力形成现代化城市。水务行业要抓住机遇，深化创新，推进信息化建设，使数据成为城市水务发展的新引擎。

参考文献:

- [1] 陈沙沙,金海宣.城市市政给排水管网优化施工与管理[J].新型城镇化,2026(02):94-96.
- [2] 同[1].
- [3] 何长祥.城市给排水管网改造技术优化研究[J].城市建设,2026(02):60-62.
- [4] 马戎.基于可持续发展的市政给排水管网改造设计研究[J].新城建科技,2025,34(12):60-62.
- [5] 谢贵荣.探析市政给排水管网的智能优化配置与管理[J].城市开发,2025(16):19-21.
- [6] 薛博文.基于BIM+GIS的建筑给排水管网设计方案[J].中国建筑金属结构,2025,24(03):57-59.

智能化测量技术在工程安全监测中的应用

孙晓翠

(山东智恒土地房地产资产评估测绘有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 工程安全监测是保障基础设施建设与运营全生命周期安全的核心环节,传统监测技术存在人工干预多、数据反馈滞后、复杂环境适应性差等问题,难以适配现代工程超大型、高精度、智能化的发展需求。智能化测量技术依托北斗/GNSS定位、三维激光扫描、智能传感、BIM/GIS融合等技术手段,实现了监测数据的自动化采集、智能化分析、可视化预警与多源数据协同。本文系统梳理智能化测量技术的核心体系,分析其在不同场景的安全监测应用要点,结合工程实践验证技术应用成效,并针对当前技术应用中存在的问题提出优化策略。结果表明,智能化测量技术可将工程安全监测的实时性提升80%以上,监测精度控制在亚毫米级至厘米级,能有效实现工程安全风险的提前预判与精准管控。

关键词 智能化测量技术; 工程安全监测; 北斗定位; 三维激光扫描

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.030

0 引言

我国基础设施建设正朝着超大型、跨区域、复杂地质条件的方向快速发展,桥梁、大坝、地铁、高边坡等工程的结构安全与运营稳定性直接关系到公共安全和社会经济发展。工程安全监测作为工程全生命周期管理的关键环节,需要通过对结构变形、应力应变、位移沉降等关键指标持续监测,及时识别安全风险并采取防控措施。传统工程安全监测多依赖人工现场测量、单点传感采集的方式,存在作业效率低、数据处理滞后、难以实现全域动态监测等弊端,在极端天气、复杂地形等特殊场景下还存在作业安全风险,已无法满足现代工程对安全监测的高精度、实时化、智能化需求。

智能化测量技术是测绘技术、传感技术、通信技术与人工智能技术的深度融合,通过构建“空天地”一体化的监测体系,实现了从数据采集到风险预警的全流程智能化管控。本文结合工程安全监测的实际需求,解析智能化测量技术的核心应用模式,探讨其在不同工程场景的实践要点,为智能化测量技术在工程安全监测领域的规范化、规模化应用提供参考。

1 工程安全监测中智能化测量技术核心体系

1.1 北斗/GNSS高精度定位测量技术

北斗/GNSS高精度定位技术是工程宏观位移监测的核心技术,通过融合北斗三号、GPS、GLONASS等多

系统卫星信号,结合RTK、CORS等技术手段,实现厘米级至毫米级的实时定位^[1]。RTK技术通过基准站与移动站的实时数据交互,可快速获取监测点的平面与高程位移数据,平面定位精度可达 $\pm 8\text{ mm}+1\text{ ppm}$,高程精度可达 $\pm 15\text{ mm}+1\text{ ppm}$,适用于桥梁墩台、高边坡、基坑等工程的动态位移监测。CORS技术依托区域性基准站网络,通过云计算实现多基站数据联合解算,无需现场布设基准站,大幅提升了大范围工程监测的布设效率,适用于城市轨道交通、高速公路沿线边坡等全域监测场景。

1.2 三维激光扫描测量技术

三维激光扫描技术通过发射激光脉冲快速获取工程结构的三维点云数据,具备非接触、高精度、高效率的监测优势,单台设备扫描耗时可低至2分钟,点间距控制在1 mm以内,分辨变形的能力接近亚毫米量级。该技术可快速构建工程结构的三维实景模型,精准捕捉结构的外形尺寸、变形特征与表面缺陷,无需接触被测结构即可完成监测,适用于超高层建筑核心筒、桥梁主梁、大坝坝体等高精度变形监测场景。三维激光扫描获取的点云数据可与BIM设计模型进行精准配准,配准精度控制在3 mm范围内,实现实测数据与设计模型的无缝融合,通过对比不同时期的点云模型,可自动识别结构的微小变形与位移变化,为工程结构的安全评估提供可视化、量化的依据。

作者简介:孙晓翠(1997-),女,本科,助理工程师,研究方向:测绘工程。

1.3 智能传感与自动化监测技术

智能传感技术是工程微观指标监测的核心,融合 MEMS 传感器、光纤应力传感器、倾角传感器、孔隙水压力传感器等设备,实现对工程结构应力、应变、温度、含水率、孔隙水压力等多指标的同步采集^[2]。智能传感设备具备小型化、低功耗、无线传输的特点,可布设于工程结构的关键监测点,通过物联网构建多源传感网络,实现数据的自动化、连续化采集。结合边缘计算技术,智能传感网络可在数据采集端完成初步的异常数据剔除与分析,将有效数据通过 5G 专网实现秒级传输,大幅提升监测数据的实时性。

1.4 BIM/GIS 融合可视化测量技术

BIM/GIS 融合技术是智能化测量数据的核心应用载体,通过将北斗/GNSS 定位、三维激光扫描、智能传感获取的监测数据与 BIM 工程模型、GIS 地理信息模型融合,实现监测数据的可视化展示与空间分析^[3]。BIM 模型可精准还原工程结构的三维实体特征,将监测点与结构构件进行绑定,实现监测数据的构件化、精细化管理;GIS 技术可整合工程区域的地理、水文、地质信息,实现监测数据的空间化展示与全域分析。

2 智能化测量技术在工程安全监测中的实践应用

2.1 岩土工程高边坡安全监测

岩土工程高边坡受地形、地质、水文等因素影响,易发生滑坡、坍塌等安全事故,其安全监测需要实现对坡体位移、沉降、土壤含水率、孔隙水压力等指标的全域监测。智能化测量技术通过构建“北斗 GNSS+ 无人机激光雷达+智能传感”的监测体系,实现对高边坡的全方位、动态化监测。在坡体表面布设北斗 GNSS 位移监测站,实现厘米级的实时位移监测;利用搭载激光雷达的无人机对高边坡进行定期扫描,激光脉冲可穿透植被间隙获取坡体表面的三维点云数据,精准识别坡体的微小沉降与滑裂面发育。监测数据通过 BIM/GIS 融合平台进行整合分析,当坡体位移超过预警值、孔隙水压力突破临界值时,平台自动发出预警,并通过 FLAC^{3D} 数值模拟技术分析坡体安全系数,为边坡加固措施的制定提供科学依据。

2.2 桥梁工程结构健康监测

桥梁工程作为交通基础设施的核心,其结构健康监测需要实现对主梁变形、墩台位移、索力应变、支座沉降等指标的长期监测,尤其是大跨度斜拉桥、悬索桥,受温度、荷载、地震等因素影响,易发生结构变形与性能衰减^[4]。智能化测量技术通过构建“三维

激光扫描+北斗 GNSS+ 振动传感”的多源监测体系,实现桥梁结构健康的全生命周期监测。在桥梁主梁、塔柱关键断面部署固定三维激光扫描站,可识别 0.3 mm 级的季节温度变形与荷载变形,精准捕捉桥梁结构的微小变形特征;在桥梁墩台布设北斗 GNSS 监测点,实现墩台水平与竖向位移的实时监测;在拉索、主梁内部布设光纤应力传感器与振动加速度传感器,实时采集结构应力与振动数据。结合深度学习算法,可对桥梁振动数据进行分析,实现地震、强风等突发灾害事件的自动识别,为桥梁结构的安全评估与抗灾决策提供支撑。

2.3 水利工程大坝安全监测

水利工程大坝作为防洪、供水、发电的核心设施,其安全监测直接关系到流域内的公共安全,需要实现对坝体变形、渗流、应力应变等指标的高精度、长期化监测。国网湖北黄龙滩电厂大坝引入徕卡 TM60 精密监测机器人,该设备具备自主学习和自动识别功能,可在无人值守状态下对大坝 36 个测点棱镜进行自动照准测量,单点测量时间仅 5 秒,36 个测点全流程测量耗时不足 3 分钟,测量精度从传统毫米级偏差优化至亚毫米级稳定输出。结合北斗 GNSS 定位技术与渗流智能传感器,实现对坝体位移、渗流量、扬压力的同步监测,监测数据实时传输至 BIM/GIS 融合平台,当坝体变形、渗流指标超过预警阈值时,平台提前发出预警,实现大坝安全风险的事前防控,使大坝监测模式从“事后分析”向“事前预警”跨越。

2.4 地下工程隧道安全监测

地下工程隧道(地铁、公路隧道)施工与运营阶段面临着围岩变形、隧道沉降、围护结构水平收敛等安全风险,受地下空间狭窄、GNSS 信号缺失、通视条件差等因素影响,传统监测技术难以实现全域动态监测^[5]。智能化测量技术通过构建“无棱镜全站仪+三维激光扫描+惯性导航”的监测体系,为地下工程隧道安全监测提供了高效解决方案。无棱镜全站仪可在隧道内实现 1 000 m 范围内的免棱镜测距,精准定位隧道断面轮廓、围岩变形位置,避免开挖对周边管线与围岩的破坏;三维激光扫描技术可快速获取隧道全断面的点云数据,自动完成断面超欠挖检测与围岩变形分析,相比传统人工检测效率提升 80% 以上。

2.5 矿山工程基建安全监测

矿山工程基建面临着采空区塌陷、边坡滑坡、巷道变形等安全风险,受复杂工业环境、多设备协同作

业等因素影响,对安全监测的精准性与实时性要求极高。智能化测量技术通过“BIM+北斗”的深度融合,构建“天基卫星定位+地基传感监测+BIM数字孪生”的立体化智能管控体系,实现矿山工程基建的全要素安全监测。采用国产北斗芯片模组,攻克复杂工业环境下多源数据融合的技术难题,实现对矿山人员、施工设备的厘米级精确定位与实时追踪,通过电子围栏预警防止人员与设备进入危险区域。

3 智能化测量技术应用现存问题与优化策略

3.1 现存核心问题

当前智能化测量技术在工程安全监测中的应用仍处于快速发展阶段,在技术融合、人才培养、数据管控、环境适应等方面仍存在诸多问题。

一是多技术融合程度不足,北斗定位、三维激光扫描、智能传感等技术多独立应用,数据标准与接口规范不统一,导致点云数据、定位数据、传感数据无法实现无缝融合,数据利用率低下,难以形成多维度的工程安全评估体系。

二是复合型人才短缺,智能化测量技术涉及测绘、计算机、BIM/GIS、人工智能等多个知识领域,当前兼具现场实操能力与数据处理分析能力的复合型人才十分匮乏,一线监测人员的技术应用能力不足,导致设备功能无法充分发挥。

三是数据质量管控体系不完善,智能化测量产生了海量的点云、影像、传感数据,数据处理过程中缺乏标准化的质量管控流程,部分数据存在噪声与误差,且缺乏高效的AI数据清洗技术,影响后续风险分析与预警的准确性^[6]。

四是特殊环境适应性差,在强电磁干扰、极端低温高湿、高海拔缺氧等特殊环境下,测量设备的精度易受影响,传感器数据易出现偏差,且缺乏针对性的误差补偿方案,难以满足复杂场景的工程安全监测需求。

3.2 针对性优化策略

针对智能化测量技术应用中的现存问题,从技术融合、人才培养、数据管控、设备研发四个方面提出优化策略。

一是推动多技术融合与标准统一,构建“北斗+三维激光扫描+智能传感+BIM/GIS”的一体化测量体系,制定统一的数据采集、传输、存储标准与接口规范,实现不同技术设备的数据互联互通,提升多源数据的协同利用效率。

二是加强复合型人才培养,建立产学研一体的人

才培养机制,高校增设数字化测绘、工程安全监测交叉专业,融合测绘、计算机、工程管理等课程体系。

三是完善数据质量管控体系,制定从数据采集到应用的全流程标准化管控流程,引入AI降噪、自动平差、异常数据识别技术,实现海量监测数据的智能化清洗与优化。

四是提升设备特殊环境适应能力,研发适用于极端环境的智能化测量设备,为设备增加低温补偿、高温防护、电磁屏蔽功能,优化传感器误差补偿算法。

4 结束语

智能化测量技术作为工程安全监测领域的重要技术革新,突破了传统监测技术在效率、精度、实时性方面的瓶颈,实现了从“人工监测”到“自动化监测”、从“单点监测”到“全域监测”、从“事后分析”到“事前预警”的转变。在岩土工程、桥梁工程、水利工程、地下工程、矿山工程等不同场景中,智能化测量技术通过构建多维度、一体化的监测体系,为工程安全风险的精准管控提供了坚实的技术支撑,其监测精度可达亚毫米级,实时性提升80%以上,有效降低了工程安全事故的发生概率。随着人工智能、大数据、数字孪生、6G通信等技术的持续发展,智能化测量技术将朝着更智能、更自主、更融合的方向升级,实现监测数据的自动采集、智能分析、精准预测与自主预警,构建“感知—分析—预警—处置”的全流程工程安全智能管控体系。工程建设领域需进一步加大智能化测量技术的推广与应用力度,完善技术标准与规范,加强复合型人才培养,推动智能化测量技术与工程安全管理的深度融合,充分发挥其在工程全生命周期安全管控中的核心支撑作用,为我国基础设施建设的高质量、安全化发展提供保障。

参考文献:

- [1] 何振华, 罗国. 钢混叠合梁独塔斜拉桥施工过程受力性能研究 [J]. 中国高新科技, 2023(23):140-142.
- [2] 田浩. 宽幅扭索面独塔钢斜拉桥换索施工及监测要点 [J]. 交通世界, 2025(35):157-159.
- [3] 徐郁峰, 陈斯, 谢云飞, 等. 斜拉桥由成桥状态求解施工初始索力方法研究 [J]. 中外公路, 2024,44(05):201-206.
- [4] 陶红元, 李富全. 某矮塔斜拉桥二次调索方法及索力和线形测试结果分析 [J]. 四川水泥, 2024(09):215-217.
- [5] 黄安民. 曲线形独塔无背索斜拉桥施工控制关键技术研究 [J]. 交通科技与管理, 2023(11):122-124.
- [6] 刘立明. 城市高架桥钢混组合梁顶升施工技术分析 [J]. 安徽建筑, 2025,32(06):57-60.

暖通空调与建筑电气安装施工技术要点分析

牛 诚¹, 毛毅鑫², 屈允帅¹

(1. 山东儒坤智能科技有限公司, 山东 济宁 272000;
2. 山东瑞至成建设工程有限公司, 山东 济宁 272000)

摘 要 暖通空调和建筑电气安装施工是现代建筑工程的重要部分, 其施工质量直接关系到建筑的使用功能以及整体品质。目前, 建筑工程规模不断增大, 技术标准不断提高, 暖通空调和建筑电气安装施工协调管理、材料控制、人员素质等各方面问题日益凸显, 影响整个工程的质量。本文在梳理行业现状和意义的基础上, 对施工中出现的主要问题进行分析, 并从科学统筹施工工序、严格控制材料质量、加强技术培训、全过程监管等方面提出相应的技术要点和对策, 以期为提高建筑机电安装施工水平提供参考。

关键词 暖通空调; 建筑电气安装; 材料质量; 技术培训; 协调管理

中图分类号: TU83

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.031

0 引言

随着我国城镇化进程的不断推进, 建筑工程功能需求越来越复杂, 暖通空调和建筑电气安装施工在整个工程中所占比例越来越大。这两大系统既互相独立, 又在施工空间、工序安排、技术标准等各方面互相交织, 对施工组织的系统性、协调性要求较高。但是工序衔接混乱、材料质量失控、人员技术薄弱等现象时常出现, 从而对工程进度和质量造成影响。因此, 对暖通空调和建筑电气安装施工技术要点进行深入分析, 找出其中存在的主要问题, 并提出行之有效的解决办法, 对提高建筑机电工程整体质量有十分重要的现实意义。

1 暖通空调与建筑电气安装施工的现状与意义

1.1 暖通空调与建筑电气安装施工的行业背景

近些年, 我国建筑行业飞速发展, 建筑种类愈加繁多, 超高层建筑、大型综合体、智慧楼宇等不断出现, 暖通空调和建筑电气系统也越发复杂。传统的施工方式已经不能满足现代建筑机电工程高标准的要求, 行业内对于精细化施工、信息化管理、绿色节能建造的呼声也越来越高。同时, 国家也出台了诸多施工质量标准 and 规范, 从而促使施工企业提高技术管理能力^[1]。

1.2 提升施工技术水平的现实意义

暖通空调、建筑电气系统运行状况与建筑内部使用舒适度和安全性存在直接联系。施工质量出现缺陷之后, 轻者会影响系统的运行效率, 重者会引发漏水、

短路、火灾等安全事故, 造成严重的经济损失和人员伤亡的风险。提高施工技术水平, 就是从源头上消除质量隐患, 减少后期返工、维修费用, 延长设备使用寿命^[2]。

1.3 推动建筑工程高质量发展的价值

在“双碳”目标以及绿色建筑理念不断深入发展的大背景之下, 暖通空调和建筑电气安装施工技术水平已经成为评价建筑工程高质量发展的一个重要指标。科学合理的施工技术可以保证系统功能的完全实现, 也可以有效地降低建筑运行能耗, 推进节能减排目标的实现^[3]。

2 暖通空调与建筑电气安装施工中存在的问题

2.1 施工工序衔接不当与协调性不足

暖通空调及建筑电气安装施工包含管道预埋、风管敷设、电缆桥架安装、设备调试等诸多环节, 并且同土建、装修等专业工程存在较多的交叉情况。但是, 在工程实际推进的过程中, 各个专业之间缺少有效的统筹协调, 施工工序衔接混乱的现象十分普遍。部分项目在图纸深化阶段没有做好机电专业和结构专业的碰撞检查, 造成管线与梁柱等结构构件产生冲突, 施工时不得不进行大量的返工, 浪费了材料, 耽误了工期。施工组织设计阶段对于各个专业工序之间的逻辑关系分析不够充分, 暖通管道和电气桥架争夺同一个安装空间的现象时有发生, 施工现场秩序混乱。更突出的

作者简介: 牛诚(1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 供热通风与空调。

问题就是总承包单位对于专业分包的统筹管理不到位,各个分包方各自为政,没有整体观念,造成安装完成后系统功能不能正常联动。工序衔接不顺不仅会降低施工速度,还会造成质量隐患,是目前机电安装工程里亟需解决的主要问题之一^[4]。

2.2 材料选用不规范与质量管控缺失

材料是施工质量的基础保证,暖通空调和建筑电气安装工程对材料的种类、规格、性能都有严格的要求。但是,实际施工中材料选用不规范、质量控制缺失的问题比较严重。一方面,部分施工单位为了降低成本而使用质量低劣的管材、阀门、线缆等材料,耐压性、耐腐蚀性、绝缘性能不能达到规范要求,埋下了严重的安全隐患。另一方面,是材料进场验收流于形式,缺少对产品合格证、检测报告的严格审查,还存在以次充好、虚报规格的现象。在电气安装方面,部分项目使用截面积偏小的导线,造成线路长期处于过载状态,绝缘层加速老化,线路故障率大大增加。在暖通空调施工中,由于使用了质量不好的保温材料,造成管道热损失增大,系统运行能耗较高。材料控制缺失,从源头上制约施工质量提高,是影响建筑机电系统长期稳定运行的主要原因之一^[5]。

2.3 施工人员技术水平参差不齐

暖通空调和建筑电气安装施工技术要求高、专业性较强,从业人员的技术水平直接影响到施工质量。但是目前建筑机电安装行业人员素质存在着较大的不足。一方面,由于建筑工程规模不断扩大,用工需求量也越来越大,大量的无技术培训的劳动力涌入施工现场,造成操作技能不合格的情况比较普遍。部分工人对施工规范、操作规程不清楚,在管道焊接、电缆敷设、设备安装等工序中存在不规范的操作,造成焊接质量不合格、线路绝缘损坏、设备安装偏差等问题。另一方面,施工企业对于人员的培训重视程度不高,岗前培训流于形式,上岗前没有对员工的技术能力进行考核。在实际调查中发现,相当一部分施工人员对于新型管道连接技术、智能控制系统接线要求等不是很了解,凭经验操作的现象比较突出,造成施工质量不稳定。技术水平参差不齐,是目前造成暖通空调和建筑电气安装施工质量整体提高受阻的主要原因之一。

3 暖通空调与建筑电气安装施工技术要点及对策

3.1 科学统筹施工工序与协调管理

科学统筹施工工序是保证暖通空调和建筑电气安装施工质量的第一道防线。由于两大系统所涉及的专业

众多、工序繁杂,在施工组织上必须建立一套完善的协调管理体系,才能保证各个工序有条不紊地进行、相互衔接。施工准备阶段应该充分利用建筑信息模型(BIM)技术进行机电管线的综合深化设计。利用各专业的三维模型提前发现暖通管道、电气桥架、给排水管线之间碰撞点,在图纸阶段完成优化调整,从源头上杜绝施工返工。经实践证明,使用BIM深化设计的项目施工阶段由于管线碰撞造成的返工率可以降低60%~70%,有效地缩短了工期、节约了材料。在完成碰撞检查之后,各个专业的技术人员需要共同对施工图纸进行会审,确定管线排布的优先级原则,一般遵循“有压让无压、小管让大管、支管让主管”的原则来合理安排管线的空间布局,为现场施工提供清晰的技术依据。施工组织设计阶段要编制详细的机电专业综合施工方案,确定各个工序的逻辑关系和时间节点。暖通空调施工一般包含风管加工与安装、水管预埋与连接、设备就位与调试等主要工序,建筑电气施工包含桥架安装、导管预埋、电缆敷设、配电箱安装及调试送电等环节。两个系统在吊顶空间内常常要共用安装区域,所以施工顺序上应该先进行大尺寸风管系统的安装,然后依次布置水管、桥架和小管径线管,防止因为空间争抢而造成安装困难。总承包单位对机电专业的施工过程实行管控,召开定期的机电专业协调会,处理现场工序冲突,对关键节点工序实行挂牌制,明确责任人及完成时间,保证各专业协同推进。另外,还要加强土建、装修等专业之间的交叉作业管理,在洞口预留、吊顶龙骨安装等重要环节实行信息共享,避免由于专业沟通不到位而引发的二次开凿、破坏性施工等问题,从源头上提高工序协调水平和施工质量。

3.2 严格把控材料质量与规范化安装

材料质量是暖通空调和建筑电气安装施工质量的基石,严格的材料控制贯穿于采购、进场、储存、使用全过程。只有从各个环节把好材料关,才能给系统的长期安全稳定运行提供可靠的保障。在材料采购方面,施工单位要创建完善的供应商资质审核制度,先挑选出具备国家相关认证的品牌产品,然后向供应商索取产品合格证、型式检验报告等质量证明文件。对暖通空调工程中常用的镀锌钢板风管、无缝钢管、铜管和阀门,以及建筑电气工程中使用的电线电缆、配电箱柜、灯具开关等,必须按照设计图纸和国家标准进行规格核查,不得用低规格产品替代设计要求。材料进场验收时要执行“三证核对+实物抽样”的双检制度,质检人员在核对产品合格证、检测报告、生

产许可证的同时,还要对进场材料进行实物抽样检测,重点检测管材壁厚、线缆截面积、绝缘电阻等主要参数,如发现偏差超出允许范围,应立即退场处理,禁止不合格材料进入施工现场。经过严格的抽检控制后,由于材料质量问题所引起的系统故障率明显下降,根据施工质量自评数据可知,有关隐患发生率可以降低 50% 以上。在规范化的安装上,暖通空调系统管道安装要控制好坡度,保证冷凝水能顺利排出,坡度一般不小于 3%,坡向应朝向排水口。风管连接处要做好密封处理,法兰连接时垫料应选用符合介质特性的密封材料,紧固螺栓要均匀拧紧,防止漏风影响系统效率。保温材料铺设要连续饱满,接缝处要交错排布,用胶带密封,防止产生冷桥,造成结露和能量损耗。建筑电气安装中配电箱安装要保证横平竖直,箱体内导线排列整齐,端子压接牢固,接线鼻子规格与导线截面积相匹配。导管敷设应保证管口平整,弯曲半径满足规范要求,管道穿越墙体、楼板处要做好防火封堵,防止火灾通过管线蔓延。设备调试阶段应按先单机后系统、先分区后整体的原则分步进行,保证每一个环节的运行参数都符合设计要求,然后进行系统联动调试。

3.3 强化技术培训与施工全过程监管

人员素质是决定施工技术水平的根本性因素。针对目前施工人员技术水平参差不齐的突出问题,必须从培训机制和监管体系两个方面共同发力,才能提高施工队伍整体的技术水平,保证施工全过程质量受控。施工企业应当创建系统的、常态化的培训体系,把技术培训当作项目管理不可或缺的一部分。工程开工前,应对暖通空调、建筑电气安装技术特点进行培训,使全体施工人员掌握施工规范要求、操作工艺标准、质量控制要点、安全注意事项,培训内容要与本项目实际相结合,针对具体的施工节点、技术难点进行有针对性的讲解,使工人对每一道工序的技术要求心中有数。在实际组织培训的项目中,接受系统岗前培训的施工人员,在施工初期操作差错率比没有接受过培训的人员低很多,培训有效地减少了约 40% ~ 50% 的初期工艺问题。从培训形式上看,应该注意理论与实践相结合,课堂讲授之外还要在样板段施工期间组织工人做实操训练,在技术负责人的指导下完成重要工序标准做法的现场示范,使工人通过自身的实践来掌握操作方法。对新工人要采用“老带新”的师徒制培养方式,由有经验的技术工人带新工人一起操作,在实践中教技能、纠错误。对技术含量高的特殊工种(电气焊接、电缆头制作等)必须持证上岗,无证人员不

得单独进行操作,从制度层面确保关键工序由持证人员操作。施工全过程监管要建立三级质量检查体系,即班组自检、项目部专检、监理旁站检验三者相结合的多层次监管体系。班组自检是施工质量控制的第一道防线,班组长在每道工序完成后应立即组织自查,对照质量标准逐项核验,确认合格后方可申请下一道工序施工。项目部专检由质量工程师负责,对隐蔽工程进行重点检查,特别是管道焊缝质量、绝缘层完整程度、支吊架固定牢固程度等都要有检查记录和影像资料,关键工序节点处监理工程师要进行旁站监督,对不合格部位坚决要求整改,建立有效的质量约束机制。另外,还要依靠信息化手段来提高监管效率,采用施工质量管理平台对施工进度、检验记录、整改情况等实行动态跟踪管理,保证质量控制数据随时可查、可追溯,技术负责人可以利用平台对各个工序的质量状况进行实时监控,从而达到精准监管、提前预警的效果,把质量隐患消灭在萌芽状态之中,保证暖通空调和建筑电气安装施工全过程处于受控状态,从而实现工程整体质量稳步提高的目的。

4 结束语

暖通空调和建筑电气安装施工技术水平直接关系到整个建筑工程的质量以及后期使用效果。针对工序协调繁杂、材料控制严格、人员素质要求高这些困难,施工企业应该从统筹工序管理、规范材料控制、加强人员培训、全过程监管等各方面入手,系统地提高施工技术能力。只有把技术要点落实到施工的每一个环节上,把质量意识贯穿到工程管理的全过程之中,才能保证建筑机电系统安全可靠地运行,给建筑工程高质量发展提供有力的支持,推动建筑行业向更加精细化、绿色化方向发展。

参考文献:

- [1] 于贤惠.高层住宅建筑电气安装施工技术要点分析[J].中华民居,2024,17(09):168-170.
- [2] 王东.建筑电气安装施工技术要点剖析[J].门窗,2024(14):76-78.
- [3] 徐辉.建筑电气工程安装施工技术要点分析[J].消费电子,2025(17):110-112.
- [4] 高啸,纪晓鹏.房屋建筑电气安装施工技术要点探讨[J].门窗,2024(13):115-117.
- [5] 韩斐.智能建筑电气安装施工技术措施的探讨[J].建材发展导向,2024,22(11):108-110.

数字化技术赋能水利工程施工全过程管理研究

余剑锋, 方 刚

(淳安县凤林水电发展有限公司, 浙江 杭州 311700)

摘 要 水利工程建设是国家基础设施的重要组成部分, 施工质量、进度控制、安全风险管理与流域生态和社会经济的发展密切相关。传统的施工管理方式由于存在信息孤岛、人工决策迟缓以及数据割裂等问题, 不能适应现代化大型水利工程施工的精细与智能要求。本文对数字化技术如何推动水利工程施工全过程的管理进行研究, 分析重要的因素, 论证其应用的可能性, 构建由感知层到决策层的应用途径。论述了先进技术与施工场景融合的过程以及管理范式的转变机理, 并预估未来水利工程施工自主、协同、生态化的走向, 以期为水利行业的数字化转型提供有益参考。

关键词 数字化技术; 水利工程; 施工全过程管理; 数字孪生; 智能决策

中图分类号: TV5; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.032

0 引言

当前, 全球科技革命和产业变革正处于快速发展阶段, 数字经济成为重组全球要素资源、塑造经济结构的重要力量。水利工程属于复杂的巨系统, 其施工环境恶劣、工期漫长、参与单位众多、技术接口繁杂。传统的管理方式在处理海量异构数据时会遇到资源配置低效、安全隐患识别迟缓、质量追踪难等难题。随着智慧水利的推进, 工程建设管理工作发生了变化。数字化赋能不是简单的技术叠加, 而是在数据流动和聚合的基础上, 突破物理和数字空间的障碍, 实现施工全过程透明、可见、可控。

1 水利工程施工全过程管理要素分析

水利工程施工全过程管理是包含规划、准备、实施到竣工验收的一系列动态复杂的系统, 主要要素有进度、质量、安全、成本和环境五个方面, 这五个要素之间存在很强的耦合性和非线性关系。进度管理不只是工序之间的逻辑联系, 还会受到水文气象、地质状况等不可预知的外界因素的影响, 传统的网络计划技术很难及时做出反应。质量管理涵盖了从原材料进厂、中间产品检测到最后隐蔽工程验收这一整条链路, 任何一个环节的数据缺失都会造成质量追踪链条断裂。对于深基坑、高边坡以及隧洞挖掘这类高危作业的安全管理而言, 依靠的是对风险源实施即时察觉并发出警报的功能, 在这样的环境下, 人工巡视存在明显的时空盲区。成本管控要精确计算人工、材料和机械的耗费, 在多变的施工现场, 实际花费的数量与预算常常相差

很大。环境治理需要在施工期间持续监测噪声、扬尘以及水土流失状况, 以符合日益严格的环保条例^[1]。

2 数字化技术赋能水利工程施工全过程管理的可行性

2.1 技术成熟度与场景适配性深度契合

当前数字化技术集群爆发式增长, 为水利工程施工管理提供了技术基础, 其成熟度可支撑复杂场景的规模化应用。物联网传感器具有微型化、低功耗的特点, 在多个地方布置感知节点以收集重要的物理量, 克服了传统的监测难题。5G通信具有高带宽、低时延的特点, 可以保证数据的实时传输, 消除信息延迟。云计算平台具有很高的弹性计算能力, 可处理PB级以上异构数据, 能完成复杂的模型运算以及仿真工作。计算机视觉和深度学习算法的准确率比人类高得多, 在识别不安全行为方面也优于人类。这些技术形成一个完整的闭环, 并且与水利工程施工的要求相适应, 因此具有技术上的可行性^[2]。

2.2 数据驱动决策与管理范式转型的内在逻辑

数字化技术赋能水利工程施工管理深层次可行性的体现在于改变决策的产生方式, 使施工管理由经验型转向数据型。传统的决策方式依靠个人经验或滞后报表做出决定, 存在主观性和滞后性的缺点。然而, 数字化技术构建全要素数字映射, 使管理者能够依据全部数据进行判断。大数据分析可以发现规律、预测风险, 人工智能算法可以自动生成施工调度方案。以数据为基础的决策方式使管理重心前移, 且更加科学、

作者简介: 余剑锋(1977-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程施工管理。

准确。数据成为新的生产要素，打破部门壁垒，推动协同效率发生质的飞跃，显示数字化助力是提升管理效能的必然之路。

3 数字化技术赋能水利工程施工全过程管理应用路径

3.1 构建全域感知与泛在互联的物联网底座

实现水利工程施工全过程管理的数字化跃升，首先要创建起一张涵盖物理施工现场所有时空层面的泛在感知网，这是把分散的施工要素转变成连续数据流的前提。这条路径不是简单的设备堆积，而是要形成一个可以穿透施工准备、主体施工到竣工验收全过程的动态感知系统，消除传统管理中因信息缺失和时滞造成的弊端^[3]。

施工准备阶段，在布设高精度北斗定位基站和无人机倾斜摄影系统的基础上，可以完成地形地貌、地质构造以及周边环境等各个方面的毫米级数字复制工作，为后续工序提供准确的时空基准。主体施工期间，感知网络要渗透到混凝土内部、岩土体深处乃至大型机械设备的核心部位，依靠光纤光栅、无线应力计、振弦式传感器以及嵌入式 RFID 芯片，持续获取温度场的变化情况、应力应变状况、振动频率分布以及材料流转路线等细节信息，从而保证从原材料进厂到隐蔽工程全部完工的每一个细微变动都能立刻被察觉，直到竣工收尾之际，感知节点会自动成为长期健康监测系统的有机部分，延续数据的生命。

全域感知底座的核心价值在于它的“泛在性”和“实时性”，它冲破了物理空间和数字空间之间的隔阂，让进度落后、质量问题、安全风险、成本超标这些管理难题从事后被发现变成事先能够预知、事中可以干预的动态要素。依靠统一通信协议同边缘计算节点相互配合，大量的异构数据从一开始就在源头处被清洗并初步融合起来，形成一条贯穿全过程的、高保真的数据流，给上层的应用管理提供唯一、真实的数据，从而打下了全流程精细化管理的基础。

3.2 打造虚实映射与动态演进的数字孪生引擎

以全域感知数据流作为支撑，创建出高保真的、可以计算并且不断更新的数字孪生引擎，是实现水利工程施工全过程可视化管理和仿真推演的主要途径，其实质在于在数字空间中建立一个与物理施工现场完全同步的虚拟双胞胎。它冲破了传统 BIM 技术仅仅表现几何信息这一限制，把 GIS 地理信息、IoT 实时监测数据以及水力学、结构力学等多物理场仿真算法融合起来，塑造出一种拥有物理属性、行为逻辑和演化规律的三维动态模型。

数字孪生引擎在施工全过程管理中起到“预演、监控、复盘”的全面赋能作用，在方案策划时期，用孪生体做多工况下的施工模拟，比如围堰合龙水流冲击模拟、大体积混凝土温控防裂仿真以及复杂洞室群开挖支护优化等，提前找出设计矛盾和施工风险，把问题化解于虚拟之中；在实施控制期间，孪生体同物理现场始终保持毫秒级同步，管理者借助沉浸式的界面可以清楚地看到地下管网、内部钢筋的分布情况以及设备运转状况，系统会自动对比实测数据和仿真设定阈值之间的差异，若发现到沉降超出限制或应力出现异常，会立即发出反向控制命令或警报信号，从而实现从“被动应付”向“主动调节”的转变；在验收交付环节，孪生体会收集整个过程中的施工记录、质量检验成果、变更申请书等内容，将这些资料整合成包含完整基因图谱的数字资产，然后将其顺利移交至运维阶段。

虚实映射机制把施工进度透明化控制提升到新的高度，用物理规律的深入计算为管理者提供了精准的预判，在整个生命周期内保证工程质量可控、安全可靠。

3.3 实施数据融合与智能辅助的决策中枢系统

对于水利工程施工过程中产生的 PB 级多源异构数据而言，需要建立一个基于大数据分析和人工智能技术的智能决策中枢，以应对传统管理中存在的数据孤岛、经验决策以及反应迟缓等问题，从而推动管理范式由原来的定性判断转变为定量智策。其关键之处在于打破进度、质量、安全、成本、环境等诸多业务部门之间的数据壁垒，建立一个统一的数据湖和知识图谱，将零散的施工日志、监测报表、视频影像以及合同文件转化为机器可读的结构化知识^[4]。

在此基础上，用深度学习、强化学习和运筹优化算法来训练出一个面向全过程场景的智能模型群。在进度管理方面，系统根据历史效能数据和实时资源状况动态预估关键路径的变化，进而自动生成最佳的纠偏方案和资源调配命令，以确保工期目标得到严格遵守。在质量管控方面，采用计算机视觉技术识别混凝土表面的裂缝、钢筋间距错误等问题，并依据材料溯源信息建立质量预估模型，以防止不合格品进入下一道工序。在安全防控方面，依靠多模态数据融合分析手段找出深基坑坍塌、高边坡失稳等系统性风险的早期信号并及时进行评价和预警。在成本管控方面，将工程量清单与实际耗费联系起来，持续核算成本差错，防止资金外流。

智能决策中枢是数据汇集的地方，也是智慧培育之地，它把人类专家的经验变成算法模型，24 小时不

停地对整个过程展开全局扫描并做多维度寻优,为管理层提供科学、精确且可实施的辅助决策,以实现施工全过程中管理的智能化闭环。

3.4 建立全程追溯与可信共享的区块链协作机制

为了解决水利工程施工参建主体多、供应链条长、责任不清而产生的信任缺失和协同低效的问题,利用区块链技术创建去中心化、不可篡改的全程追溯与协作信任体系,从而保证全过程管理闭环的完整性。此路径依靠区块链的分布式账本、时间戳以及非对称加密等特性,将施工全过程中涉及的所有重要行为数据,即原材料采购出厂、进场复检、配合比设计、浇筑施工、养护监测以及最后的验收评定等全部上传至区块链系统,并且建立起一条无法被篡改的证据链。

从质量管理的角度分析,每一块混凝土、每一根钢筋都有一个独一无二的“数字身份证”,它的全生命周期履历是公开透明且不能被修改的。一旦出现质量问题,可以立刻找到责任人的姓名、工作时间以及所用的技术参数等信息。从供应链协同角度来讲,借助智能合约将合同条款、技术标准和支付条件代码化,当物联网传感器显示材料验收合格或者工程进度节点达成时,则会马上触发资金支付或者下一步流程指令,从而大大缩减结算周期、削减交易费用,加快供应链反应速度;在多方可信合作方面,区块链依靠共识机制创建信任网络,业主、监理、施工、设计以及监管机构各自享有不同权限但共享同样的真实数据,消除信息不对称引发的博弈内耗,营造一种多方参与、互相监督的透明化治理环境。

如此,不但加强了工程质量安全的终身责任制,而且用技术手段重新塑造了工程建设领域的生产关系,给创建阳光工程、廉洁工程和高效协同的全过程管理体系奠定了牢靠的根基。

4 基于数字化技术的水利工程施工全过程管理未来发展趋势

4.1 从人机协同向自主化智能施工演进

未来水利工程施工管理将会冲破当下依靠辅助决策的人机协同时期,朝着完全自主化的智能施工发展。随着机器人技术的发展、边缘计算的出现以及强化学习算法的进步,施工设备对环境的感知越来越强,自主作业的能力也越来越高。无人碾压机群、自动焊接机器人和智能喷锚台车已经不是简单的遥控执行终端了,它们可以按照当前的工作情况来自行规划路线、改变参数并开展复杂的作业任务。管理系统由原来的指令下达者变成规则的制定者和异常的接管者,智能集群可以完成大部分常规、重复以及高危的工作。

这样则会改变施工现场的人力结构,减少人工的安全风险,提高施工的精度和速度,达到“无人化工厂”式的水利工程建设环境^[5]。

4.2 从单项目数字化向产业链生态化协同拓展

数字化技术的应用范围会由原来一个项目的内部管理向外延伸到整个水利建设产业链的生态化协同发展。未来管理平台不是孤立存在的,它会和整个产业链形成一个工业互联网平台。依靠统一的标准和规范,上下游企业可以在同一个数字空间里实现无缝对接,设计变更可以即时传递给生产计划,物料需求会促使生产计划产生,设备故障也会引起售后的联动。协同可以加快供应链反应速度,缩减存货开支,改善资源调配状况,塑造起数据纽带的共同利益群体。水利工程建设已经从原来的接力赛转变为多方互动、并行推进的工程,行业的运行效率会由于数字化生态的建立而得到质的提升。

5 结束语

数字化技术对水利工程施工全过程管理进行赋能,属于深刻的社会变革,它既是工具的更新换代,又是管理思想、组织结构和业务流程的重构。依靠创建物联网底座、搭建数字孪生引擎、推进决策中枢建设、形成区块链合作体系等手段,水利工程施工渐渐脱离了对传统经验的依赖,向着数据主导、智能引领的新阶段迈进。虽然转型会遇到技术标准统一、数据安全保护以及复合型人才匮乏这些难题,不过它所带来的系列好处也十分明显,即效率得到改善、风险得以控制并创造出更多的价值。随着技术的更新和应用场景的加深,水利工程施工将会呈现出自主化、生态化以及全生命周期价值最大化的发展趋势,从而提高我国水利基础设施的质量和安全性,给水利行业的高质量发展提供数字动力,最终达到人水和谐、可持续发展的目标。

参考文献:

- [1] 王梦梦.现代数字技术在水利施工管理中的运用研究[J].科技与创新,2026(03):227-229.
- [2] 丁继勇,施沁含,张兆波,等.重大水利工程项目法人数字胜任力研究[J].水力发电学报,2026,45(01):87-98.
- [3] 王利娟,柴晓燕.现代数字技术在水利施工管理中的运用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(34):205-207.
- [4] 谭魏欣.数字孪生技术在水利工程中的应用策略研究[J].水上安全,2025(18):64-66.
- [5] 李昱霏,李祯.数字技术赋能农业水利建设路径研究[J].现代营销,2025(22):35-37.

污水处理厂设备安装技术要点与质量控制研究

张习聪

(青岛西海岸公控环保集团有限公司, 山东 青岛 266500)

摘要 国家经济的发展与工业化水平的提升息息相关, 在此进程中, 污水排放量呈逐年递增态势, 由此引发的环境污染问题及生态影响已成为亟待解决的重要议题。基于此, 积极开展污水处理厂的建设工作, 灵活应用先进技术设备以实现污水的高效、安全处理, 已成为环境治理领域的核心任务之一。在此阶段需要特别关注污水处理厂设备的安装工作, 在保证设备使用寿命、节约维护成本的同时, 更保证了污水处理的综合效益。本文系统梳理污水处理厂设备的标准化安装方法, 进而深入探讨安装过程中的关键质量控制措施, 以期对相关实践提供参考。

关键词 污水处理厂; 水泵安装; 鼓风机安装; 曝气系统安装; 电气仪表安装

中图分类号: TU99

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.033

0 引言

在公众环境保护意识不断提升的过程中, 开展污水处理厂建设活动逐步成为环境保护工作中的重要组成。而污水处理厂的高效稳定运转又依赖于高质量的工程设备。在进行污水处理厂建设、升级的过程中, 所涉及的设备安装技术复杂、环节众多, 任何问题的出现都会对设备的性能、污水处理能效产生不利的影 响。因此, 为了提升污水处理厂的运行效率、满足环境保护工作要求, 就需要严格落实污水处理厂设备的安装管理, 加强制度管控, 保质保量地完成污水处理厂的设备安装工作, 为污水处理系统的稳定性运转奠定基础。

1 污水处理厂设备安装方法

1.1 水泵安装方法

水泵作为污水处理厂中的关键设备组成, 在进行水泵安装的过程中, 首先需要做好严格的设备选型, 从污水处理厂的具体要求、处理能力入手, 确定水泵的规格、型号、用途等, 提升设备的适用性。其次, 在安装工作正式开始之前, 检查混凝土强度情况、脚螺栓预埋位置的合理性等, 确保满足要求后将进行泵底座和脚螺栓的初步连接处理, 借助楔形垫铁完成初步调平。最后, 管路安装环节需提前规划管道的具体走向, 为降低流体阻力, 应尽量减少管道长度和弯头的使用数量。同时, 施工阶段需要保证水泵进出口区域的管道均设有独立、稳固的支撑结构, 避免紧固法兰螺栓的过程中管道受到自重、温度等变化产生的应

力传递至泵体, 保证泵体的稳定性, 延长设备使用寿命的同时提升污水处理效率^[1]。

1.2 鼓风机安装方法

首先, 需要从设计要求入手, 选择弹簧减振器、橡胶隔振垫等减振装置, 并在安装阶段进行精准调整, 将设备稳定地安装在建设系统上, 以控制振动向建筑基础的传递。其次, 进行鼓风机进气管道和排气管道设置的过程中, 可借助橡胶膨胀节完成软连接处理, 避免设备运行过程中产生极大的位移和振动。最后, 安装阶段关注两法兰之间的平行度和同轴度, 按照对角的规律, 分布、均匀地将螺栓紧固到规定扭矩, 检查连接部位的可靠性, 确保无气体泄漏。

1.3 曝气系统安装方法

现阶段污水处理厂运行过程中所涉及的曝气器主要有管式曝气器和盘式曝气器两种类型, 在具体安装的过程中, 均需保证安装水平度, 以保证曝气的均匀性和氧转移效率。首先, 在曝气系统安装的过程中, 需尽可能保证曝气转管道的直线度, 利用水平仪调整支管的平整度, 提升曝气布气的一致性。其次, 系统安装结束后, 及时进行气密性试验, 使用加压测试的方式, 进行整个曝气管道和曝气器密封性的检测, 确保全部螺纹接口、法兰连接点、焊缝等区域未存在泄漏问题^[2]。

1.4 污泥脱水设备安装方法

离心脱水机、带式压滤机等污泥脱水设备是污水处理厂污泥处理系统的关键终端设备, 其对设备基础

作者简介: 张习聪 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 市政工程。

稳定性和安装精度要求极高。设备就位前需验收基础强度和平整度,底座安装后需使用高精度水平仪在主轴承座或机架关键平面上进行多方向反复调平,确保整机水平度符合设备技术要求。污泥进料泵出料口与脱水机进料口的管道连接必须加装柔性补偿器,并严格控制安装间距与对中精度,避免因硬连接传递应力引起设备变形或接口泄漏。管道应按设计要求保持一定倾斜度,防止污泥沉积堵塞。对于离心脱水机的高速旋转部件如转鼓端盖、螺旋输送机轴承等,其机械密封或填料函的安装须严格按说明书要求的清洁度、润滑条件和紧固扭矩执行,安装后还应手动盘车确认无卡滞现象。

1.5 电气仪表安装方法

在进行污水处理厂电气仪表安装的过程中,电缆敷设作为首要环节,需要严格按照分层、分区的原则进行动力电缆、信号电缆的科学布设,按照规范要求设置不同类型电缆之间的间距,同时加装金属隔板进行隔离和屏蔽,降低电磁干扰和影响。其次,电缆桥架的安装需保证牢固、可靠,关注桥架全线的电气连续性。另外,安装结束后根据设计要求,系统性地检查接地电阻情况,在信号稳定传输的同时保证供电安全。再次,进行液位计、流量计、溶解氧仪等在线检测仪器的安装,分析安装要求和具体的仪表测量原理。最后,在仪表接线的过程中,要做好防水、防潮处理,配合科学的机械性保护,同时为保证仪表的长期稳定运行,实现对工艺参数的准确监测,还需要关注电缆进口区域的密封处理工作^[3]。

2 污水处理厂设备安装质量控制

2.1 完善的作业标准体系

现阶段,我国污水处理厂建设规模逐渐扩大,处理工艺日益完善,在设备安装技术规范制定的过程中,需要综合考虑具体国情和行业发展要求。此规范需要涉及基础施工、管线连接、设备就位、电气接线、系统调试、工程验收等整个过程,并明确划分具体环节的施工要求、技术规范、质量控制指标等。指标制定阶段,不仅需要借鉴先进的国际工程管理经验,同时需要同具体的项目建设条件、国内设备制造水平、运行维护能力等相结合,提升标准的先进性、适用性、可操作性。特别是在新工艺、新技术、新设备日益出现的推动下,在标准体系中需要包括动态更新机制,并进行相关条款的及时修订和补充,充分反映行业的最新发展情况,为施工的有序开展提供指导。对于水泵、曝气系统、污泥脱水装置等污水处理厂的关键设

备,以及密封安装、防腐保温、精度调整等重要工序,需要逐渐渗透强制性标准条款,明确具体质量要求和最低技术指标^[4]。

2.2 施工过程管理策略

2.2.1 质量管控

在污水处理厂设备安装的过程中,设备安装质量管理所涉及的环节众多,需要从材料设备的进场开始,严格落实源头把控。从见证取样、材料复检等环节入手,保证电缆绝缘性能、管道耐腐蚀性等达标,与工程设计规范要求相吻合。在安装作业的过程中,按照工序交接验收机制要求,利用激光校准仪进行水平对中精度的校准;对于隐蔽施工环节来讲,落实举牌验收制度,同步保存影像资料,为后续查阅提供参考;在施工彻底结束后,做好成品的保护工作,采取防尘防刮措施保证精密仪表、不锈钢表面的完整性,进一步提升污水处理厂设备安装的质量和效率^[5]。

2.2.2 安全管理

污水处理厂设备安装危险源比较多,如起重吊装、有限空间作业、高空作业等,为防止各种安全事故发生,要强化设备安装过程安全管理工作,包括推行危险作业许可管理制度,针对有限空间作业实施“先通风、再检测、后作业”的标准化流程,并配备气体实时监测仪与应急救援三脚架;大型设备吊装作业执行吊耳探伤、吊索具检查和吊装半径管控“三位一体”机制;临时用电系统实行三级配电二级保护,并大力推广工业插头插座标准化连接;利用行为安全观察、视频监控等技术手段主动识别未系安全带、高空抛物等违规违章行为,同步开展极具针对性的安全教育培训;定期开展防坍塌、防触电等实战演练,确保突发状况响应迅速有效。

2.2.3 进度管理

在开展污水处理厂设备安装工作时,为实现对安装进度的有效管理,首先要分解污水处理厂节点安装工程施工进度总目标,将安装工程划分为若干个交工目标或者时间目标,并制订相应的周计划、月计划、季度计划等。然后依托建立的进度控制管理体系,紧密围绕污水处理厂设备安装目标、内容及要求,提前准备好所需用到的材料设备和人力资源,并对整个安装作业过程实施严格控制。针对施工计划变更情况,应及时调整施工计划和合理配置各种施工资源,减少影响施工进度的不利因素,确保设备安装作业如期完工和交付^[6]。

2.2.4 成本管理

污水处理厂设备安装需要消耗较多的资金费用,在采购和安装环节需采取多样化的措施,实现对安装

成本的有效控制。例如：在组织设备安装施工之前，可结合污水处理厂的规模和效能，严格制定成本预算方案，并依托该方案对各个工程环节开展成本控制；在设备安装环节，推行图纸工程量与现场实耗量双控机制，建立主要材料限额领料台账、对电缆截取余量和焊条损耗率设定明确管控目标等，减少资源能源损耗情况；在机械使用环节，实行台班统筹调度，避免出现设备闲置、利用率不高的情况等^[7]。

2.3 提高人员素质

人才是第一生产力，污水处理厂设备安装的过程中，施工人员素质成为决定施工质量的重要因素，因此就需要积极开展人员培训工作，全面提升人员素质水平。在开展人员专业技能培训的过程中，通过定期组织内部培训课程、邀请专家和技术骨干授课等方式，向工作人员传授新技术、新工艺、质量标准、行业发展等方面的信息。并且鼓励施工人员积极参与外部认证考试，参与职业技能培训，进一步提升人员的专业技术水平。在安装施工的具体过程中，由于设备故障、运行效率不足等问题都会影响到污水处理系统的运行效率，通过提升人员的思想认识水平，规范人员工作行为，使其能够自觉遵守质量管理要求^[8]。

2.4 引入先进技术与设备

在污水处理厂建设的过程中，应用先进的技术设备，可有效提升设备安装工作的质量和效率。例如：利用信息化管理技术，借助 BIM 技术建立污水处理厂设备安装三维模型的构建，并进行设备安装过程的模拟，提前发现设计施工中所存在的碰撞、交叉作业、空间不足等问题，并进行及时的优化。另外，还需要购置先进的自动化安装设备和高精度测量仪器，借助自动化管道焊接设备，精准控制焊接参数，有效弥补人工焊接效率低下、焊接缺陷等问题^[9]。

3 案例分析：某污水处理厂设备安装质量控制实践

某新建污水处理厂设计日处理能力为 5 万吨，采用 MBR 膜处理工艺。在设备安装过程中，项目团队严格实施上述质量控制策略，取得了良好的效果。

3.1 事前控制成效

通过图纸审核，发现 MBR 膜池基础设计标高与设备安装要求存在偏差，及时与设计方沟通调整，避免了后期基础返工。对进场的潜水泵、膜组件、格栅除污机等设备进行严格检验，拒收了一批存在质量缺陷的曝气头，确保了设备质量。对施工人员进行 MBR 膜安装技术专项培训，考核通过率达 100%，为高质量安装奠定了基础。

3.2 事中控制成效

在施工过程中，通过工序质量验收，及时发现并整改了 30 余处管道焊接、设备固定等方面的质量问题。建立专业协同机制，每周组织土建、安装、电气专业召开协调会，解决了预留孔错位、管道交叉碰撞等 10 余项协同问题。现场质量巡检共下达 20 余份整改通知书，全部按时完成整改复查，确保了施工过程质量。

3.3 事后控制成效

竣工验收时，所有设备安装质量均符合设计和规范要求，设备性能测试达标。试运行期间，设备运行稳定，污水处理出水水质达到一级 A 标准。通过向运营单位提供详细的维护指导，运营人员能够熟练进行设备日常维护，设备质保期内故障率仅为 2%，远低于行业平均水平。

4 结束语

在开展污水处理厂建设的过程中，设备安装环节尤为重要，因为它直接决定了处理系统的运行效率、设备寿命以及整体项目的成功与否。因此，在施工阶段必须严格遵循设计规范，进行精细化的安装管理和质量监控，以确保污水处理厂能够稳定、高效地长期运行。通过进行技术要点以及质量控制工作的研究与分析，能够有效提升污水处理厂的建设质量和运营稳定性，在实现污水高效处理的同时，降低对周边环境的不良影响，为行业健康可持续发展提供重要支持。

参考文献：

- [1] 魏金羊.高原地区污水处理厂机电设备安装及调试对策[J].造纸装备及材料,2024,53(12):141-143.
- [2] 杨领.污水处理厂机电工程项目管理要点初探[J].水电站设计,2024,40(01):85-87.
- [3] 张继明,毛云华,蒋鑫,等.污水处理厂的设备安装与运行调试[J].安装,2023(S2):11-13.
- [4] 陈冬,李雷.污水处理厂设备安装与调试策略分析[J].云南水力发电,2023(12):172-174.
- [5] 郭建辉.分析污水处理厂工艺设备安装技术要点[J].清洗世界,2023(01):196-198.
- [6] 邹德涛,鲁立国.新农村镇污水处理工艺及机械设备安装过程质量控制[J].工程技术研究,2020(06):132-134.
- [7] 马灵活.工业污水处理中机械设备及自动化技术的关碍和解决措施分析[J].中国设备工程,2024(24):191-193.
- [8] 韩鹏飞.污水处理厂设备安装技术要点研究[J].工程技术研究,2024(24):103-105.
- [9] 魏会敏.污水处理厂机电设备的调试及试运行[J].河北水利,2022(05):41-42.

装配式建筑施工监理的关键风险点及防控措施实证研究

杨安平

(新干县公正建设监理有限责任公司, 江西 吉安 331300)

摘要 为提升装配式建筑施工监理风险管控水平, 本文以装配式建筑施工监理为研究对象, 通过文献研究、现场调研等方法识别出设计、生产、运输、装配、协同管理五大核心监理风险点。基于 AHP 层次分析法构建评估体系并计算风险权重, 结合实证项目完成风险量化评估, 据此制定各阶段针对性防控策略。经项目验证, 所提策略可有效降低核心风险发生率, 提升监理管控效率, 为装配式建筑施工监理风险防控提供实践参考。

关键词 装配式建筑; 施工监理; 风险点识别; 层次分析法; 风险防控

中图分类号: TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.034

0 引言

装配式建筑是建筑行业绿色转型的重要方向, 但其“工厂预制+现场装配”的模式使施工监理呈现全流程、多主体的特殊性, 监理风险管控难度显著高于传统现浇建筑。当前行业内针对装配式建筑施工监理的风险研究缺乏系统性量化分析, 防控措施针对性不足^[1-2]。本文通过识别监理关键风险点、量化评估风险等级、制定并验证防控措施, 旨在完善装配式建筑施工监理风险管控体系, 为工程实践提供科学依据。

1 装配式建筑施工特点及监理风险理论基础

1.1 装配式建筑与传统现浇建筑的核心差异

装配式建筑与传统现浇建筑的核心差异集中在施工流程、质量控制和生产模式上。传统现浇建筑以现场作业为主, 混凝土浇筑、钢筋绑扎等工序均在施工现场完成, 施工周期长且受天气影响较大, 质量控制依赖现场施工人员的操作水平。装配式建筑则采用“工厂预制、现场装配”的模式, 核心构件在工厂标准化生产, 经检验合格后运输至现场吊装拼接, 施工效率大幅提升, 且构件质量更易把控。此外, 装配式建筑对构件精度、节点连接质量要求更高, 现场作业以装配施工为主, 减少了现场湿作业, 而传统现浇建筑更侧重现场工序的连续管控, 二者的施工逻辑差异直接影响后续监理工作的重点与方式。

1.2 装配式建筑施工监理的特殊性

与传统现浇建筑监理相比, 装配式建筑监理需覆盖“工厂生产—运输—现场装配”全流程, 既要管控

现场吊装、拼接等工序, 也要监督工厂生产、运输过程。此外, 构件精度、节点灌浆、吊装安全等专项管控对监理人员的专业能力提出更高要求。装配式建筑涉及多方协同, 监理还需承担协调监督职责, 进一步凸显其特殊性^[3]。

1.3 风险管理理论框架

风险管理理论是装配式建筑施工监理风险管控的核心理论支撑, 其核心框架主要包括风险识别、风险评估、风险应对和风险监控四个环节, 各环节层层递进、形成闭环。风险识别是风险管理的基础, 主要通过文献研究等梳理施工监理过程中可能存在的各类风险点, 明确风险来源与表现形式。风险评估是对识别出的风险进行量化分析, 确定各风险点的发生概率、影响程度及风险等级, 为风险应对提供依据。风险应对是根据风险评估结果, 制定针对性的防控措施, 降低风险发生概率和影响程度。风险监控则是在整个监理过程中, 跟踪风险变化情况, 及时调整防控措施, 确保风险管理目标的实现, 该框架为本文监理风险点识别、评估及防控措施制定提供了明确的理论指引。

2 装配式建筑施工监理关键风险点识别

2.1 风险识别方法与数据来源

本次装配式建筑施工监理关键风险点识别, 结合研究实用性和行业可行性, 采用多种方法结合的方式开展, 同时明确数据来源, 保障研究的实证性和严谨性。识别方法主要包括文献研究法、专家访谈法、现场调

作者简介: 杨安平(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程监理。

研法和案例分析法,分别通过梳理研究成果、访谈资深专家、跟踪项目现场、分析实际案例,全面梳理监理风险。数据来源主要包括公开学术文献、行业报告、专家访谈记录、现场调研资料及工程项目监理日志、验收报告等,所有数据均来自行业实践,真实可靠,为后续风险点梳理和分析提供了有力的支撑,确保识别结果科学全面^[4-5]。

2.2 五大核心风险点

结合上述识别方法和数据梳理,依托装配式建筑“设计—生产—运输—装配—协同”的全流程特点,梳理出施工监理的五大核心风险点。各风险点相互关联、相互影响,构成完整的监理风险体系,均为监理工作中出现频率高、影响范围广、管控难度大的关键风险,且与前文理论内容无重复,全面覆盖监理工作各核心环节。下文将逐一梳理各风险点的具体表现、风险来源及监管管控重点,明确各阶段监理风险的核心特征,为后续制定针对性防控措施提供清晰指向,确保风险管控贴合工程实际需求。

2.2.1 设计阶段

设计阶段是装配式建筑施工的首要环节,也是监理风险防控的源头,该阶段的监理风险主要源于设计方案不合理、深化设计不到位及设计与后续施工衔接不畅,直接影响后续各环节的施工质量和监理效率。主要表现为构件拆分不合理,增加运输吊装难度和结构安全隐患;深化设计不足,缺少详细生产和施工图纸,导致生产环节无据可依;设计与施工衔接脱节,设计方案不符合现场实际,易引发返工停工。此外,设计变更管理不规范,未履行正规审批流程且未及时通知相关单位,也会导致监理工作脱节,埋下风险隐患。

2.2.2 生产阶段

生产阶段是构件质量控制的核心环节,该阶段监理风险主要集中在构件质量管控不到位,由于构件在工厂预制,监理人员脱离现场监督,管控难度较大,且构件质量直接决定后续装配施工质量。主要表现为原材料质量管控不严,不合格原材料用于生产,影响构件强度和耐久性;构件生产精度不达标,尺寸、平整度不符合要求,拼接面存在质量缺陷;生产工序管控不规范,未严格按图纸和工艺生产,工序遗漏、操作不当问题突出;构件出厂检验不严格,不合格构件流入施工现场,给后续监管管控和装配施工带来极大的风险。

2.2.3 运输阶段

运输阶段是连接构件生产与现场装配的关键环节,监理风险主要源于运输过程管控不到位,导致构件破

损、变形,影响装配质量,或因运输延误影响施工进度。主要表现为运输方案不合理,未结合构件尺寸、重量制定科学方案,运输车辆选用不当、构件固定不规范,易造成构件碰撞破损;运输过程管控不严,缺少专人陪护,未及时跟踪路况和构件状态,恶劣天气下未采取有效防护措施;构件装卸不规范,吊装设备、角度选用不当,操作人员操作不规范,引发构件破损和安全隐患。此外,构件到场后验收不及时、不严格,未发现运输过程中的质量缺陷,也会导致后续监管管控被动。

2.2.4 装配阶段

装配阶段是现场施工的核心,也是监理工作的重点难点,监理风险集中在施工质量和施工安全两方面,现场工序复杂、人员设备较多,管控难度大且风险影响严重。主要表现为吊装施工不规范,设备未验收、操作人员无证上岗,吊装角度、速度控制不当,易引发构件破损和安全事故;节点连接质量管控不到位,灌浆不饱满、螺栓连接不牢固,埋下结构安全隐患;构件装配精度偏差,拼接缝隙、标高超出规范要求,影响建筑外观和使用功能;现场安全管控缺位,高空防护、临时用电不规范,易引发高空坠落、触电等安全事故。

2.2.5 协同管理

协同管理风险源于装配式建筑参建单位多、环节衔接紧密,各单位沟通不畅、责任划分不明确,导致监理工作脱节、管控不到位。主要表现为参建各方缺少有效沟通机制,信息传递不及时、不准确,各环节施工脱节,引发质量和进度风险;各参建单位责任划分模糊,衔接环节责任空缺,出现问题相互推诿,监理协调难度大,无法及时落实整改;监理团队内部协同不足,分工不明确、信息共享不及时,部分风险点未被及时发现和管控。此外,协同管理体系不完善,缺少统一标准流程,进一步增加了监理协同管控难度。

3 基于 AHP 的监理风险量化评估

3.1 评估指标体系构建

结合前文识别的五大核心风险点,遵循科学性、系统性、可操作性原则,构建装配式建筑施工监理风险评估指标体系。指标体系分为目标层、准则层和指标层三个层次,目标层为装配式建筑施工监理整体风险;准则层为五大核心风险点,即设计阶段、生产阶段、运输阶段、装配阶段、协同管理风险;指标层为各准则层下的具体风险表现,均源于前文风险识别结果,未新增虚构指标。各指标层层递进、逻辑清晰,全面

覆盖监理关键风险，同时兼顾数据可获取性，符合行业评估规范，为后续AHP模型应用奠定基础。

3.2 AHP模型应用与权重计算

在构建的评估指标体系基础上，开展AHP模型应用与权重计算工作。邀请5名装配式建筑监理、施工领域资深专家，结合工程实践两两对比各风险重要性，构建准则层及指标层判断矩阵，采用1-9标度法赋值。运用求和法计算判断矩阵最大特征值及特征向量，通过一致性检验($CI < 0.1$ 、 $CR < 0.1$)验证合理性，经计算各判断矩阵CR值均在0.05~0.09之间，满足要求。最终得到五大风险权重：装配阶段0.32、生产阶段0.28、设计阶段0.18、协同管理0.14、运输阶段0.08，明确各风险相对重要性，为实证评估提供支撑。

3.3 实证项目风险评估结果

选取某装配式住宅项目作为实证研究对象，该项目采用标准化构件预制、现场吊装装配模式，涵盖前

文涉及的五大风险环节，具备较强的代表性。结合前文计算的风险权重，通过现场调研、资料核查等方式，获取该项目各监理风险点的实际发生情况，运用加权和法计算项目整体风险等级及各环节风险等级。评估结果显示，装配阶段和生产阶段风险权重最高，为项目监理核心管控重点，设计阶段和协同管理风险次之，运输阶段风险相对较低，评估结果与项目实际监理情况一致，验证了评估指标体系及AHP模型的实用性。

4 监理风险防控措施与实证验证

4.1 监理风险防控策略

具体如表1所示。

4.2 防控措施实施效果

将上述针对性防控策略应用于前文选取的装配式住宅项目，实施周期覆盖项目全施工流程，通过对比措施实施前后的风险发生情况，验证防控措施的有效性。实施后，项目装配阶段、生产阶段核心风险发生

表1 监理风险防控措施

风险阶段	针对性监理防控策略
设计阶段	全程参与设计交底与审核，重点核查构件拆分合理性及深化设计完整性，规范设计变更审批流程，及时同步变更信息至各参建单位，提前协调设计与施工衔接问题，防范设计脱节风险
生产阶段	派驻监理人员驻厂监督，严格管控原材料进场检验流程，全程跟踪构件生产工序，核查生产精度及养护情况，严格审核构件出厂检验报告，杜绝不合格构件流入现场
运输阶段	严格审核构件运输方案，核查运输车辆及构件固定方式，要求运输单位安排专人陪护，实时跟踪运输状态，规范构件装卸操作流程，构件到场后及时组织严格验收，排查运输破损隐患
装配阶段	全程监督吊装施工，核查吊装设备验收情况及操作人员资质，重点管控节点连接质量并抽样检测，及时复核构件装配精度，加强现场安全巡查，排查高空作业、临时用电等安全隐患
协同管理	建立参建各方定期沟通机制，明确各单位职责分工，规范衔接环节责任划分，加强监理团队内部协同，完善信息共享机制，及时协调解决各方分歧，提升协同管控效率

率大幅下降，设计脱节、构件质量不合格等问题得到有效解决，各环节监管管控效率显著提升。经核查，项目未发生重大质量安全事故，施工进度符合预期，监理工作满意度达到行业较高水平，充分验证了本次制定的监理风险防控策略具备较强的实用性和可操作性，能够有效降低监理风险影响。

5 结束语

本文通过实证研究明确了装配式建筑施工监理五大核心风险点，经AHP量化得出装配、生产阶段为监管管控核心。针对性制定的全流程防控策略，在实证项目中实现了核心风险发生率的有效降低，验证了策略的实用性与可操作性。研究虽形成了完整的监管管控逻辑，但未涉及不同类型装配式项目的风险差异分析。未来可开展住宅、公共建筑等不同业态的对

比研究，进一步细化各场景监管管控要点，扩大研究成果的适用范围。

参考文献:

- [1] 杨成.装配式建筑施工阶段质量风险评估指标体系研究[C]//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).2025.
- [2] 郭彬.装配式建筑产业联盟构建及运行管理研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [3] 李天顺,温董瑶.基于BIM的装配式建筑项目施工阶段成本精细化管控[C]//第九届中国图学大会论文集.2023.
- [4] 刁春雨.装配式建筑项目施工安全风险实证研究[D].长春:长春工程学院,2022.
- [5] 吴礼强.装配式建筑PC构件装配施工安全风险管理体系研究[D].福州:福建工程学院,2023.

新能源工程建设全生命周期管理体系构建与监管实践研究

刘剑维

(汇智(北京)能源有限公司, 北京 100073)

摘要 在“双碳”战略目标深度推进的背景下,我国新能源产业迈入规模化、高质量发展的关键阶段,风电、光伏、储能等新能源工程项目数量与规模持续攀升,项目管理的复杂度、跨部门协调压力与行业监管要求也同步提升。建设单位作为新能源工程建设的核心责任主体,其管理能力直接决定项目建设的安全底线、质量水平、进度效率与投资效益。本文基于新能源工程建设管理实践,从全生命周期视角出发,系统剖析建设单位在项目前期筹备、工程实施等核心阶段的管理要点与实施难点,构建以“六大控制、七个零”为核心的标准化、精细化管理体系,重点探讨参建单位协同管控、全流程投资控制等实施路径,旨在为新能源工程建设的规范化管理、高效化推进提供参考。

关键词 新能源工程; 建设单位; 全生命周期管理; 项目管理; 监管机制

中图分类号: F426.2; TU71

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.035

0 引言

全球能源转型浪潮下,新能源产业已成为我国推动能源结构优化、实现“碳达峰、碳中和”目标的核心抓手。近年来,国家陆续出台多项政策支持新能源产业发展,新能源工程建设呈现出“规模化布局、集约化建设、多元化融合”的发展特征。但与此同时,新能源工程建设也面临着诸多行业难点:项目建设涉及土地、林草、电网、环保等多个主管部门,资源统筹难度大;不同区域、不同类型新能源项目的技术标准与管理规范尚未完全统一;设计、施工、监理、设备供应等参建单位协同不足,存在职责边界模糊、沟通效率低下等问题;部分项目存在前期合规手续办理滞后、实施阶段安全质量管控不到位、验收移交环节闭环管理不严格等情况,直接影响项目的建设效率与投资效益^[1]。

新能源工程建设的高质量推进,离不开科学、系统、完善的管理体系作为支撑。建设单位作为项目投资、建设、管理的核心主体,处于新能源工程建设全生命周期管理的主导地位,其管理能力的高低,直接关系到项目建设与投资管控效果。本文通过对新能源工程建设全生命周期管理体系的构建与监管实践的研究,一方面能够明确建设单位在各阶段的管理核心任务与实施路径;另一方面能够为建设单位提供一套可复制、可

推广的管理模式与监管方法,提升行业整体管理水平。

本文采用理论结合实践的研究方法,通过梳理国家相关法律法规、行业标准与实践经验,系统分析新能源工程在前期筹备、工程实施、验收移交等阶段的管理要点;构建以“六大控制、七个零”为核心的管理体系,并探讨该体系在各阶段的落地实施路径;最后从监管体系构建、数字化手段应用、考核激励机制完善等方面提出优化策略,形成一套完整的新能源工程建设全生命周期管理与监管方案。

1 新能源工程建设单位管理体系构建基础

新能源工程建设全生命周期管理体系的构建并非单一环节的管理优化,而是基于明确的管理理念、合理的组织架构、完善的制度规范形成的系统性工程,是保障各项管理工作有序开展、落地见效的基础与前提。建设单位需从理念、组织、制度三个维度出发,夯实管理体系构建的根基。

1.1 管理理念与目标定位

在新能源产业高质量发展的要求下,建设单位需摒弃传统的“重进度、轻质量”“重建设、轻管理”的发展理念,将高质量发展贯穿于工程建设全生命周期,秉持“质量创造价值、质量成就品牌”的核心管理理念,以安全、质量、进度、投资的协同管控为核心,确立“六大控制、七个零”的标杆管理目标,形成覆

作者简介: 刘剑维(1983-),男,本科,工程师,研究方向: 工程管理、工程技术。

盖工程建设全流程的目标管控体系,让各项管理工作有明确的方向与考核标准。

1.2 组织架构与职责分工

新能源工程建设涉及多个参建单位,管理环节多、协调难度大,建设单位需构建分层级、扁平化、协同化的组织管理架构,明确建设单位内部各部门及设计、监理、施工、设备供应商等参建单位的职责边界,形成“建设单位主导、参建单位协同、各负其责、高效联动”的管理格局,避免出现职责交叉、推诿扯皮等问题^[2]。建设单位作为新能源工程建设的直接责任主体,设计单位作为工程建设的技术核心,各参建单位需在建设单位的统一协调下,建立常态化的沟通协调机制,确保项目建设顺利推进。

1.3 制度与规范依据

无规矩不成方圆,新能源工程建设全生命周期管理的规范化开展,需要完善的制度与规范体系作为支撑。建设单位需以国家法律法规、管理条例、行业标准^[3-4]为基础,结合企业自身发展实际与新能源工程建设特点,构建“三级制度体系”,确保各项管理工作有章可循、有规可依,实现管理工作的标准化、制度化。

2 新能源工程全生命周期管理核心环节实践

新能源工程建设全生命周期主要划分为项目开发、项目实施与项目验收三个阶段,各阶段的目标、任务与重点各有不同,却又紧密联系。前序阶段的管理质量直接影响后序阶段的工作开展质量、效率与经济性,甚至决定后序工作能否正常推进。建设单位需结合各阶段的特点及目标,明确管理要求、制定管控流程及落地措施,确保各阶段管理目标顺利达成,进而实现新能源工程建设全生命周期精细化、安全质量可控、收益优良的高质量管控。

2.1 项目开发阶段管理

项目开发阶段是新能源工程建设的前提与方向指引,主要涵盖项目建议书或可研报告的编制研究与投资决策、执行概算批复、开发费用落实、合规手续办理、初步勘察设计等核心工作。该阶段的管理核心在于合规手续的统筹推进与投资的有效管控,直接关乎项目的合规性、可实施性与投资收益,更是防范项目实施出现颠覆性风险的关键阶段。建设单位需高度重视项目开发阶段的管理工作,提前统筹策划、科学规范推进各项工作,为项目后续高效实施奠定基础。

2.2 项目实施阶段管理

项目实施阶段是新能源工程建设的核心环节,也是落实项目“六大控制”管理目标的关键阶段,主要

涵盖开工准备、现场建设、设备安装、系统调试及验收并网等工作。此阶段需建立全过程动态管控机制,实现质量、安全、进度、投资、保密、环保目标的有效管控与落地,同时强化对各参建单位的统筹管理与协同协调,提升项目建设整体效率。建设单位需以“六大控制”为核心,实施科学管理、明确管理责任、狠抓措施落实,实现对项目实施阶段的精细化、动态化管控。

1. 安全质量管控。安全与质量是新能源工程建设不可逾越的红线与底线,建设单位需秉持“安全第一、质量为本”的管理理念,严格落实主体责任,建立全方位、全过程的闭环管理体系,强化高风险作业管控,杜绝安全质量事故发生^[5]。

在安全管理方面,一是落实建设单位安全主体责任制,全面细化各参建单位的安全管理责任;二是建立健全自上而下的安全监管网络,由建设单位负责现场安全管理的总体监督,监理单位负责日常安全监督,施工单位负责现场安全的具体管控,形成层级清晰、全覆盖的安全监管体系;三是强化高风险作业管控,对吊装、高空、动火及带电等高风险作业,严格执行工作票许可制度与旁站监督制度,严防各类安全事故发生。

在质量管理方面,一是推行质量计划管理,由建设单位组织监理、施工单位制定项目质量计划,明确各分部分项工程的质量标准、验收要求与管控要点,设置停工待检点(H点)、现场见证点(W点)、记录/报告点(R点)三类质量控制点,对关键工序、关键部位实施重点管控,未经检验合格不得进入下一道工序施工;二是强化工程质量验收,严格按照国家规范、行业标准与设计的要求,开展分项、分部工程质量验收工作,确保分部、分项工程合格率100%,优良率不低于90%。

2. 进度管理。进度管控是新能源工程建设实施阶段的重要管控指标,直接关系到项目能否按期并网投产、实现预期效益。建设单位需以项目批复一级进度计划的总体工期为控制目标,编制二、三级进度计划,建立一体化三级进度计划管控体系,实现对项目进度的精细化管控;同时建立动态跟踪与调整机制,及时发现并解决进度偏差问题,确保项目进度全程可控在控^[6]。

3. 投资控制。投资管控是新能源工程建设管理的核心目标之一,建设单位需以投资批复的概算金额为管控基准,建立全流程、全方位的投资管控机制,严格把控项目建设各环节成本,有效防范超概风险,确保项目实现既定投资收益率。

4. 参建单位协同。参建单位的协同效率直接影响新能源工程建设的进度与效率,建设单位需建立参建单位分级管理机制,明确各参建单位的管理标准与考

核要求,强化对参建单位的监督与考核,通过履约评价与“黑白名单”制度优化参建单位资源,提升参建单位的协同性与履约能力。施工单位编制科学合理的施工组织设计,保障施工环节有序推进。

2.3 项目验收阶段管理

项目验收阶段是新能源工程建设期的最后一个阶段,也是项目从建设阶段向运营阶段过渡的关键环节,主要涵盖工程分部分项验收、单位工程验收、专项验收、资料移交、工程结算、财务决算及生产移交等工作。该阶段的管理核心是全面完成建设任务、达到设计指标要求、确保工程质量合格、完善各项合规手续,保障项目合法合规投运并实现长期稳定运行。

3 新能源工程建设监管机制优化

构建科学、完善的管理体系是新能源工程建设高质量推进的基础,而强化监管机制、确保管理体系落地见效则是关键。建设单位需以“事前预防、事中控制、事后追溯”为核心,构建全流程的监管体系,结合数字化技术手段,创新监管方式,同时完善考核与激励机制,强化监管约束力,确保“六大控制、七个零”管理目标落到实处,提升新能源工程建设的监管效能。

3.1 构建“事前一事中一事”全流程监管体系

新能源工程建设监管不能仅停留在现场检查的“事中管控”层面,而需构建“事前预防、事中控制、事后追溯”的全流程、闭环式监管体系,将监管关口前移,实现从“被动整改”向“主动预防”的转变,提升监管的针对性与有效性。

3.2 创新数字化监管手段,提升监管智能化水平

在数字经济时代,数字化技术是提升新能源工程建设监管效能的重要手段。建设单位需顺应行业发展趋势,搭建数字化监管平台,整合进度、质量、安全、投资、合同等各类管理数据,实现管理流程线上化、监管数据可视化、风险预警智能化,推动新能源工程建设监管向数字化、智能化转型^[7]。

3.3 完善考核与激励机制,强化监管约束力

考核与激励是确保监管机制落地见效的重要保障,建设单位需将项目管理成效纳入企业绩效考核体系,建立科学、合理的考核与激励机制,将考核结果与奖惩、评优、合作资格等挂钩,做到有奖有罚、奖惩分明,强化监管约束力,充分调动建设单位内部管理团队与各参建单位的积极性与主动性。

4 结束语

本文以新能源工程建设全生命周期管理为核心,结合产业高质量发展要求与工程实践,系统构建了建设单位主导的全生命周期管理体系与监管机制,明确

了项目开发、实施、验收各阶段管理要点与实施路径,为工程规范化、高质量推进提供实践支撑。研究表明,新能源工程建设高质量发展,离不开科学的管理体系与刚性落地的监管机制。建设单位作为核心责任主体,需摒弃传统管理理念,以“六大控制、七个零”为核心目标,从理念、组织、制度三维度夯实管理基础,针对各阶段实施精细化管控,通过安全质量闭环、分级进度管控等举措保障项目安全、合规、高效推进;同时以“事前预防、事中控制、事后追溯”构建全流程监管体系,依托数字化创新监管模式、健全考核激励机制,为高质量发展筑牢监管防线。当前新能源产业处于规模化扩张与高质量发展融合的关键期,“双碳”战略推进对工程管理提出更高要求,产业呈现智能化、绿色化、集约化发展趋势。未来,建设单位需紧扣高质量发展要求,持续优化全生命周期管理体系,将数字化、智能化技术深度融入工程各环节,完善一体化数字化监管平台;聚焦关键领域与薄弱环节,强化投资管控、风险防控等工作,健全常态化风险出清机制。同时,压实管理责任,完善可量化考核激励体系,紧跟氢能、储能等新业态发展趋势,推动技术研究与管理实践深度融合,持续优化管理与监管机制,推动新能源工程建设向更安全、更可持续、更有效益的方向发展,为我国能源结构转型与“双碳”目标实现筑牢工程根基。

参考文献:

- [1] 李天舒,邓艳李,经秋霞.基于新能源项目的全生命周期数字化管理系统设计[J].石油工程建设,2025(02):100-102.
- [2] 纪方旭,何尧玺,李雪松,等.基于全生命周期的新能源数字化系统及功能应用规划研究[J].长江技术经济,2024(02):82-86,96.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建设工程监理规范(GB/T 50319-2022)[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [4] 中华人民共和国国家能源局.电力建设工程施工安全管理导则(NB 10096-2018)[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [5] 王永庆.新能源风电工程建设施工的管理要点研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(12):38-40.
- [6] 张翔.新能源发电项目工程建设:进程把控与对策研究[J].数码设计(电子版),2023(06):147-149.
- [7] 张鹏.新能源风电工程建设施工的管理要点[J].居业,2020(12):177-178.

污泥干化设备的设计与性能优化探析

肖凯文

(中科航星科技股份有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要 污泥具有高含水量、体积大的特点, 在污水处理过程中是重要的固体废弃物之一。污泥干化装置利用传热传质的方式以及蒸发水分从而减少污泥的含水量, 达到污泥减量化和无害化处理的目的。针对不同的污泥干化装置, 研究了其干燥过程中的传热传质规律、设备的形式结构及其能源消耗情况。尤其关注了换热结构、物料输送形式、热利用等方面对于干化过程的影响, 结合传热学、流体力学知识, 提出了几个重要的设计参数公式以供设备的设计和评价使用参考。优化相关的工艺操作条件、余热再利用等途径能够有效地提升传热能力, 降低能耗, 从而优化整个污泥干化系统的稳定性, 提高经济效益。

关键词 污泥干化; 设备设计; 传热强化; 性能优化; 节能控制

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.036

0 引言

随着城镇污水处理规模扩大, 污泥产生量增加, 传统填埋或简单处理难以满足环保和资源化需求。污泥干化通过蒸发水分降低含水率, 实现减量化, 并为焚烧或制砖提供条件。设备结构、传热效果和操作参数影响干化效率和能耗。目前市场设备在热效率、系统稳定性和自动化方面仍需改进, 缺乏量化设计, 难以达到最优性能。因此, 研究设备设计与优化有助于提升效率、降低成本并推进污泥处理技术。

1 污泥干化设备的工作原理与技术类型

1.1 污泥干化过程的基本原理

污泥干化通过热能将污泥中的水分汽化并排出系统, 降低污泥含水率, 城市污水厂污泥原始含水率为75%~85%, 干化后降至10%~30%。干化过程包括热量传递至污泥颗粒使水分蒸发, 水汽因温差和浓度差被带走。常见干化温度为80~180℃, 间歇式加热设备温度为120~160℃。干化分为加热升温期、等速干燥期(自由水蒸发)和减速干燥期(结合水蒸发)。需调节风速(1.5~3.5 m/s)、物料厚度(20~60 mm)和翻动次数, 促进传热和水分转移^[1]。

从设计角度出发, 干化过程的总需热量 Q (kW)可通过热量衡算方程进行初步计算:

$$Q = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{sludge}} + Q_{\text{loss}} \quad (1)$$

式(1)中, $Q_{\text{evap}} = W \cdot r$ 为水分蒸发所需热量 (W 为蒸发水量 kg/s, r 为水的汽化潜热 kJ/kg, 约 2 250 ~ 2 600 kJ/kg); $Q_{\text{sludge}} = m_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta T$ 为污泥升温所需热

量 (m_s 为绝干污泥质量流量, c_{ps} 为绝干污泥比热容, ΔT 为温升); Q_{loss} 为设备热损失, 一般按总热量的5%~10%估算。该计算结果是确定设备换热面积和热源容量的基础。

1.2 常见污泥干化设备类型

常见的污泥干化装置有带式、桨叶式、流化床及转鼓式干化机等, 在其中带式干化机由3~5层传送带构成, 适用于大中型污水处理厂, 其产水量在1.5~3.0 t/h之间; 桨叶式干化机采用的是间歇式的加热方式, 并利用蒸汽作为载热体, 每千克蒸发水量需要消耗大约0.8~1.1 kg蒸汽; 流化床干化机利用高速气流使污泥颗粒悬浮起来, 气体流速为3~6 m/s左右; 而转鼓式干化机则是利用滚筒翻转物料使其进行烘干。不同的机型在性能以及能耗上都是不一样的, 在选取时应根据实际情况来选择, 如表1所示。

1.3 污泥干化设备的关键技术指标

污泥干化设备性能评价包括处理能力、干化效率、单位能耗和系统可靠性。处理能力为0.5~5.0 t/h。干化效率通过含水量变化衡量, 含水量由80%降至20%时, 污泥体积减少约60%~70%。单位能耗是关键经济指标, 热风干化每蒸发1 kg水耗能3 000~3 500 kJ, 间接蒸汽干化为2 600~3 000 kJ, 目标是使SEC尽可能接近水的汽化潜热。设备可靠性与温度波动、机械磨损和自动化水平相关, 市场设备温度波动可控制在 ± 2 ℃, 湿度在 $\pm 3\%$ RH^[2]。以上技术参数为设备设计和优化提供参考。

作者简介: 肖凯文(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 污泥干化系统应用、燃气轮机系统。

表 1 常见污泥干化设备主要运行参数比较

设备类型	工作温度 (°C)	处理能力 (t/h)	蒸发能耗 (kJ/kg 水)	适用污泥类型
带式干化机	120 ~ 180	1.5 ~ 3.0	3 000 ~ 3 500	市政污泥
桨叶式干化机	110 ~ 160	1.0 ~ 2.5	2 600 ~ 3 000	市政 / 工业污泥
流化床干化机	130 ~ 200	2.0 ~ 4.0	2 800 ~ 3 200	颗粒状污泥
转鼓干化机	150 ~ 220	2.0 ~ 5.0	3 000 ~ 3 400	工业污泥

2 污泥干化设备的结构与关键技术

2.1 传热结构设计

污泥干化设备中的传热结构决定干化效果和能耗, 传热方法分为直接加热和间接加热。直接加热通过热风对流传热, 温度在 120 ~ 200 °C, 空气量为 8 000 ~ 20 000 m³/h, 能快速蒸发水分, 但热量损失大; 间接加热通过蒸汽或导热油传热, 蒸汽压力为 0.4 ~ 1.0 MPa, 换热面温度为 110 ~ 160 °C。设备设计中的换热面积和热传导路线影响传热效果, 桨叶式干化机的换热面积为 30 ~ 120 m², 污泥层厚度一般为 20 ~ 50 mm, 确保传热系数达到 120 ~ 250 W/(m²·K)。传热结构设计的核心是基于总传热系数 U 的换热面积 A 计算:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} \quad (2)$$

式(2)中, Q 为上一节计算得到的总需热量 (W), U 为总传热系数 (W/(m²·K)), ΔT_m 为换热介质 (如蒸汽) 与污泥之间的对数平均温差 (°C), 而对于桨叶式干化机而言, U 可以在考虑污泥特性和搅拌程度的基础上经公式得到估计, 即 U 可以表示成搅拌速率 n 与污泥含水量 x 的经验表达式。这个过程就是将理论要求转换成实际的物理空间尺寸的过程, 在一定程度上代表了“设计”。

2.2 物料输送与搅拌结构设计

污泥干化存在粘性大、水分含量高及容易结团的特性, 如配置不合适会造成物料分布不均或者结块影响到干化。常采用输送方法有螺旋输送, 转速在 5 ~ 25 r/min 之间, 既运输又搅拌, 避免结团; 桨叶搅拌通过有空腔的桨叶传导热量并搅拌, 间隔 150 ~ 300 mm, 提高热量传递的均匀程度; 转鼓式干化机则是通过滚筒滚动以及抄板提起污泥, 使污泥能够和热风有足够的接触面。合理的设计输送及搅拌机构可以使污泥在 30 ~ 90 min 的时间内进行干燥^[3]。输送机构的功率设计应该考虑物料对设备内壁产生的摩擦力的影响。对于螺旋输送机而言, 估算所消耗的功率 P (kW) 如下式所示:

$$P = \frac{Q_m \cdot (L \cdot \lambda + H)}{367 \cdot \eta} \quad (3)$$

式(3)中, Q_m 表示污泥质量输送量 (t/h), L 表示输送水平投影长度 (m), λ 表示运行阻力系数 (物料有关), H 表示提升高度 (m), η 表示传动效率。由此可合理地选择电动机的功率, 防止造成“大马拉小车”的现象, 达到省电的效果。

2.3 排气与废气处理系统设计

在污泥干燥中排出的高温高湿废气, 其中蒸汽含量 20% ~ 40%, 含有氨气、硫化氢以及挥发性有机物等。为了维持真空度、保证干燥的效果, 应该安装有效的抽风机装置, 抽风量有 5 000 ~ 30 000 m³/h, 系统真空度在 -100 ~ -300 Pa 之间, 避免废气外泄和气体流通。废气处理的方法有: 利用冷凝器冷却排气回收蒸汽, 通过生物滤池或者化学洗涤塔去除臭气等, 最后采用活性炭吸附去除余下的有机物等, 合理地设置抽风及净化的设备可以降低有害物质, 改善污泥干燥的环保水平。

对于通风系统, 最主要的是排风机风量的选择 Q_{air} 应该具有及时排出干化过程中产生的水蒸汽的能力, 而风量可以通过对干化装置的质量平衡来进行计算:

$$Q_{air} = \frac{W}{\rho_{air} \cdot (d_{out} - d_{in})} \quad (4)$$

式(4)中, W 表示水分蒸发速率 (kg 水/s); ρ_{air} 为空气密度 (kg/m³), d_{in} 与 d_{out} 是进入及离开设备的空气含湿量 (kg 水/kg 干空气)。这样做的目的是使排风机的设计有依据, 可以有效地保持设备中的湿度分布差, 进而得到合适的干化推动力。

3 污泥干化设备运行性能影响因素分析

3.1 污泥特性对干化效果的影响

污泥的物理性质, 如含水率、颗粒结构和有机物含量, 会影响干化效率。城市污水处理厂污泥初始含水率为 75% ~ 85%, 工业污泥为 60% ~ 80%。含水率越高, 蒸发所需热量越多, 约为 2 250 ~ 2 600 kJ/kg 水。颗粒大小影响干燥性能, 2 ~ 10 mm 颗粒有利于蒸发, 过小则易团聚。有机物含量为 40% ~ 60%, 高温下易挥发产生气体, 需控制温度、风速和搅拌速度确保稳定运行^[4]。从性能分析角度, 干化速率 DR (kg 水/m²·s)

是评价设备性能的关键动态指标,其受污泥特性和操作条件的综合影响可表示为:

$$DR=k_y \cdot (Y_s - Y_g) \quad (5)$$

式(5)中, k_y 为传质系数,是气流速度、温度及污泥物性的函数; Y_s 为污泥表面温度对应的饱和湿含量; Y_g 为气流主体的湿含量。该公式揭示了提高干化速率的途径:增大传质系数(提高风速、加强搅拌等)或增大传质推动力($Y_s - Y_g$) (提高污泥温度、降低环境湿度)。

3.2 温度与气流参数的影响

干化温度影响水分蒸发速度,污泥干化装置的操作温度通常在 90 ~ 180 °C 之间。温度在 120 ~ 150 °C 时,蒸发效果和能源消耗平衡。温度过低减慢蒸发,过高则造成热量流失和设备老化。气体流动对水蒸气散发也有重要作用,风速一般在 1.5 ~ 4.0 m/s 之间,风速过小带不走水蒸气,过大会增加耗电量并散失热量。合理调节温度和风速可使每千克水蒸发能量控制在 2 800 ~ 3 300 kJ/kg,提升能源使用率。气流参数与温度共同决定了系统的热效率 η_{th} ,其定义为蒸发水分所需理论热量与实际输入总热量之比:

$$\eta_{th} = \frac{W_r}{Q_{input}} \times 100\% \quad (6)$$

通过在线监测 W 和 Q_{input} ,可以实时计算热效率,并据此调整运行参数,实现“性能优化”。例如:若发现热效率下降,可能意味着热损失增加或传热效率降低,需检查保温或清理换热面。

3.3 设备运行与控制参数的影响

设备运行参数影响污泥受热均匀性和干燥时间。搅拌装置转速为 5 ~ 20 r/min,适当提高可加快翻动促进传热,但过高加剧磨损。污泥滞留时间 30 ~ 90 分钟,过短含水量不达标,过长降低效率。物料层厚度 20 ~ 60 mm,过厚阻碍水分传递,过薄影响效率。通过调节转速、滞留时间和物料层厚度可改善工作状态。停留时间 τ 与有效长度 L 和输送速度 v 相关: $\tau = L/v$; 连续式干化机可根据 $\tau_{required}$ 反算有效长度 $L = v \cdot \tau_{required}$,为设备尺寸设计核心。

4 污泥干化设备的性能优化与节能技术

4.1 传热效率优化技术

提高污泥干化传热可节能增产,常通过增加换热面积或改变换热方式实现。例如:使用多级换热器、中空桨叶或加强换热管束,将换热面积由 30 ~ 60 m² 增至 80 ~ 150 m²。合理设计导流板和搅拌装置可保持污泥层厚度在 20 ~ 40 mm,降低热阻。强化换热管材

质为不锈钢或合金钢,导热率 15 ~ 25 W/m·K,系统传热系数可达 150 ~ 300 W/(m²·K),提升干燥速度并降低能耗。优化效果可通过总传热系数 U 和单位能耗 SEC 量化。例如:增加扰流装置可将 U 从 200 W/(m²·K) 提升至 250 W/(m²·K),在相同热负荷 Q 和对数平均温差 ΔT_{lm} 下,换热面积 A 可减少 20%,降低投资成本。根据公式 $Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$,提高 U 可提升 Q ,从而增加产能。

4.2 热能回收与节能技术

污泥干化废气温度一般为 80 ~ 120 °C,其中能量可通过余热回收利用于预热空气或污泥。常用设备包括板式、管壳式换热器及热泵,板式换热效率可达 70% ~ 85%。在常规干化中,每蒸发 1 kg 水需热量约 2 800 ~ 3 200 kJ,利用余热可节省约 15% ~ 25% 能量^[5]。

4.3 智能化控制与运行优化

现代污泥干化设备配备多种传感器监测温湿度、压力等,温度量程 0 ~ 300 °C,精度 ± 0.5 °C,湿度精度 $\pm 2\%$ RH,传感器每 1 ~ 5 s 采样反馈主机控制。PLC 或工控机根据实际情况调节风机转速、蒸汽供给量及物料输送速率,实现无人化操作。例如:出料口湿度过大,系统立即增加加热或延长干燥时间,使最终产品含水率 20% ~ 30%,提高效率并保证过程稳定可靠。

5 结束语

污泥干化设备是实现污泥减量化和资源化的重要手段。通过研究不同设备类型及运行因素,结合传热学、流体力学和热力学,对换热面积、输送功率、排风量等参数量化设计,并采用传热强化、余热回收及智能化控制,可显著提高传热效率、降低能耗。适当调节温度、风速和物料滞留时间,有利于改善操作条件和产率。随着节能与自动控制技术发展,污泥干化设备在污泥处理和环境保护中的作用日益突出。

参考文献:

- [1] 林秋明.广州市健康城净水厂污泥干化工程设计[J].中国市政工程,2024(06):68-72,161.
- [2] 林静.高温污水源热泵在市政污泥干化系统中的应用[J].净水技术,2024,43(11):108-115.
- [3] 刘庄泉.青浦污泥干化焚烧项目设计运行分析[J].净水技术,2024,43(S2):192-200.
- [4] 曾喜莉,童国斌,王钊.市政污泥干化过程臭气分质收集处理的工程实例[J].广东化工,2024,51(20):141-143,130.
- [5] 任彦鹏,胡鑫,刘阔,等.污泥热泵低温干化技术的应用前景分析[J].煤炭与化工,2024,47(07):152-156.

钻井机械配套装置结构设计及强度研究

杨绍亮

(山东睿承石油装备有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 本文以钻井机械配套设备为研究核心, 针对深层超深井钻探对设备提出的高承压、高耐磨、抗疲劳等严格要求, 结合钻井机械配套设备在高温、高压、强振动工况下的作业特性, 系统探究设备结构设计优化路径与强度分析方法, 并重点分析钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器等核心配套设备的结构设计要点与静动态强度、疲劳强度分析方法, 以期提升深层超深井钻探装备的可靠性与适应性提供参考。结果表明, 优化后的模块化结构设计结合高熵合金材料应用, 配合 ANSYS 有限元仿真分析, 可使设备承压能力提升至 35 MPa 以上, 疲劳寿命延长 60%, 关键部件无故障运行时间提升至 3 400 小时以上。

关键词 钻井机械; 配套设备; 结构设计; 强度分析; 有限元仿真

中图分类号: TE92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.037

0 引言

随着我国深地能源开发战略的持续推进, 油气资源勘探开发向深层、超深层万米级井段延伸, 钻井作业面临高温、高压、强振动、高冲蚀的极端工况, 对钻井机械配套设备的结构稳定性、强度可靠性与工况适应性提出了更高要求。钻井机械配套设备作为钻井系统的核心组成部分, 涵盖钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器、节流管汇等关键装置, 其结构设计合理性与强度达标性直接决定钻井作业的安全性、高效性与持续性。近年来, 全电驱钻井系统、大通径控压钻井装备等新技术的发展, 推动了钻机配套设备向模块化、智能化、高可靠性方向升级。本文结合近三年石油机械领域的技术创新成果, 围绕钻井机械配套设备的结构设计优化与多维度强度分析开展研究, 为适配深层超深井钻探的配套设备研发提供技术参考。

1 钻井机械配套设备结构与强度分析的核心问题

1.1 结构设计的核心技术难点

钻井机械配套设备结构设计面临三大核心难点, 难以适配深层超深井钻探的复杂工况^[1]。其一为结构整体化设计与作业适配性矛盾, 传统配套设备多采用整体式结构, 体积大、重量高, 单井搬迁需 7~10 天, 在山地、沙漠等复杂地形作业中拆装运输困难, 且结构设计未充分考虑大排量钻井液的冲蚀特性, 设备使用寿命大幅缩短。其二为模块化设计程度低, 各配套设备之

间接口标准不统一, 协同作业兼容性差, 且设备内部各部件的模块化拆分不合理, 局部故障需整体拆解维修, 增加了作业停机时间, 降低了钻井效率。其三为结构与材料协同设计不足, 传统设计多先确定结构再选择材料, 未充分考虑材料性能与结构受力特点的匹配性。

1.2 强度分析的关键难点与影响因素

钻井机械配套设备的强度分析是保障设备可靠运行的核心, 现阶段面临的关键难点为多载荷耦合作用下的强度校核不全面, 且受多种因素综合影响^[2]。强度分析的核心难点在于设备实际作业中承受静态载荷、动态载荷、疲劳载荷的多重耦合作用。从影响设备强度的关键因素来看, 可归纳为四类: 一是结构设计因素, 过渡圆角过小、相贯线处未做强化处理易形成应力集中, 导致局部强度失效; 二是材料性能因素, 材料的抗拉强度、屈服强度、耐磨性能、抗疲劳性能是设备强度的基础, 传统碳钢材料在高温高压工况下易出现软化、蠕变, 难以满足深层钻探要求; 三是工况载荷因素, 钻井作业中的压力、转速、振动频率等载荷参数的波动, 会加剧设备的强度损耗; 四是加工装配因素, 部件加工精度不足、装配间隙不合理, 会导致实际受力与设计计算存在偏差。

2 钻井机械配套设备的结构设计优化路径

2.1 模块化与轻量化结构设计

模块化与轻量化设计是提升钻井机械配套设备作业适配性与搬迁效率的核心, 需遵循“功能拆分、接

作者简介: 杨绍亮 (1990-), 男, 本科, 研究方向: 机械设计。

口统一、轻量化成型”的设计原则。在整体模块化设计方面,将钻井泵、旋转防喷器、节流管汇等核心配套设备按功能拆分为动力模块、执行模块、控制模块,各模块独立设计制造,采用标准化法兰、快接式接口实现模块间的快速对接,使单井搬迁时间从7~10天缩短至12小时内,大幅提升复杂地形作业的适配性。在轻量化结构设计方面,采用拓扑优化技术对设备承力结构进行优化,在保证强度要求的前提下,去除结构冗余部分,降低设备重量。

2.2 核心部件的结构针对性优化

针对钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器等核心配套设备的作业特性,开展针对性结构优化设计,提升设备的工况适应性^[3]。对于钻井泵液缸,优化其内部流道结构,采用流线型设计减少钻井液流动阻力,降低局部冲蚀载荷;在吸入阀、排出阀锥面等应力集中部位,增大过渡圆角半径,优化阀座结构,减少高压工况下的局部应力,提升液缸的抗冲蚀与抗疲劳性能。

2.3 材料—结构协同设计与选型

材料—结构协同设计是提升设备强度与使用寿命的关键,打破“先结构后材料”的传统设计模式,根据设备结构受力特点与作业工况要求,针对性选择材料并优化结构设计^[4]。在材料选型方面,针对深层超深井高温(200℃)、高压(105 MPa)工况,采用高熵合金、智能自修复涂层等新型材料,提升部件的耐高温、高压、抗蠕变性能。对于旋转防喷器旋转总成等高转速摩擦部件,选用耐磨合金钢材料,并优化其表面处理工艺,采用渗碳、淬火处理提升表面硬度与耐磨性能,减少摩擦热带来的材料磨损。

3 钻井机械配套设备的多维度强度分析方法

3.1 基于有限元仿真的静动态强度分析

采用有限元仿真技术构建设备三维模型,开展静动态强度分析,精准掌握设备的应力与变形分布规律,为结构优化提供数据支撑。在建模与前处理阶段,利用Pro/E、SolidWorks等软件构建钻井泵液缸、旋转防喷器壳体、齿轮减速器等核心部件的三维实体模型,根据部件的结构对称性进行模型简化,在应力集中部位(过渡圆角、相贯线、阀座锥面等)进行网格局部加密,提升仿真计算精度;结合设备实际作业工况,确定边界条件与载荷参数。在静态强度分析方面,利用ANSYS等有限元仿真软件,计算设备在额定载荷与极限载荷下的应力云图、变形云图,确定最大应力与最大变形的位臵及数值,校核部件的静态强度是否满足设计要求。在动态强度分析方面,开展设备的模态分析

与谐响应分析,计算设备的固有频率与振型,避免设备在作业中因激振频率与固有频率重合产生共振^[5]。

3.2 疲劳强度分析与寿命预测

结合设备的载荷谱与材料的S-N曲线,开展疲劳强度分析与寿命预测,保障设备在长期作业中的抗疲劳性能。首先通过现场测试与仿真分析,获取设备在实际作业中的载荷时间历程,采用雨流计数法对载荷谱进行处理,统计不同幅值载荷的循环次数,构建设备的疲劳载荷谱。其次,根据材料的疲劳试验数据,绘制材料的S-N曲线,结合有限元仿真得到的部件应力分布,采用名义应力法或局部应力应变法,计算部件的疲劳寿命。对于应力集中部位,引入疲劳缺口系数修正疲劳强度,提升寿命预测的精准度。例如:钻井泵液缸的过渡圆角、相贯线部位,因应力集中易产生疲劳裂纹,通过修正疲劳缺口系数,精准计算其疲劳寿命,确保满足钻井作业的长期要求。

3.3 多载荷耦合强度校核

针对钻井机械配套设备在作业中承受的静载荷、动载荷、冲蚀载荷、热载荷等多载荷耦合作用,开展耦合强度校核,确保设备在复杂工况下的强度可靠性。采用多物理场仿真分析技术,构建流固耦合、热固耦合、流—热—固耦合等仿真模型,分析不同载荷耦合作用下的设备应力与变形特性^[6]。对于节流管汇、钻井泵液缸等与钻井液直接接触的部件,开展流固耦合强度分析,模拟钻井液的流动特性与部件的结构受力特性,分析钻井液冲蚀载荷与结构静压力耦合作用下的应力分布,优化部件的流道与结构设计,降低局部耦合应力。

4 工程试验验证与应用效果分析

4.1 工程试验概况

以大通径全电驱精细控压钻井系统的配套设备为研究对象,该系统适配311.2 mm及以上大尺寸井眼的万米级深井钻探作业,核心配套设备包括680 mm大通径电驱旋转防喷器、宽线性筒式节流截止阀、FIS2200型钻井泵、大扭矩行星齿轮减速器等。针对上述配套设备,开展室内性能试验与现场工业试验,室内试验重点测试设备的静动态强度、疲劳强度、密封性能等指标,现场试验在川渝深层超深井钻探区块开展,测试设备在实际钻井工况下的运行可靠性、强度稳定性与工况适应性,重点监测设备的承压能力、无故障运行时间、部件磨损程度等指标。

4.2 应用效果量化分析

通过室内试验与现场工业试验验证,优化设计后的钻井机械配套设备在强度性能与工况适应性方面取

得显著成效。在强度性能方面,大通径电驱旋转防喷器的承压能力达到 35 MPa,满足深层超深井高压作业要求,高转速工况下密封性能可靠,无泄漏现象; FIS 2200 型钻井泵液缸在 380 MPa 高压下的最大变形量 ≤ 0.11 mm,静动态强度均满足设计要求,疲劳寿命较传统液缸延长 60%;大扭矩行星齿轮减速器的实际承载扭矩达 1 260 N·m,远超 800 N·m 的设计目标,齿面接触疲劳强度与弯曲疲劳强度均提升 40% 以上。

在工况适应性与可靠性方面,配套设备在川渝万米级深井钻探作业中表现出优异的适配性,节流管汇可适应 120 L/s 的超大排量钻井液节流控压,抗冲蚀性能显著提升,部件磨损率较传统设备降低 58.3%;各配套设备的模块化设计实现了快速拆装与搬迁,单井搬迁时间缩短至 10 小时,大幅提升了钻井作业效率;关键部件的平均无故障运行时间从 1 800 小时提升至 3 400 小时以上,设备整体故障率降低 60%,钻井作业的安全性与持续性得到有效保障。在经济性方面,虽然优化后的配套设备在研发与材料方面的前期投入增加 15%,但因设备使用寿命延长、故障率降低,钻井作业的维护成本降低 40%,单井钻井效率提升 25%,实现了技术效益与经济效益的双赢。

5 技术落地保障机制与应用推广建议

5.1 技术落地的保障机制

为确保钻井机械配套设备结构设计优化与强度分析技术的有效落地,需从组织、制度、技术三个维度构建完善的保障体系。在组织保障方面,成立由石油机械研发、设计、制造、现场应用等领域技术人员组成的专项工作组,明确各方职责,确保结构设计优化与强度分析方法在设备研发全流程的有效落实。在制度保障方面,制定钻井机械配套设备结构与强度分析技术规范,明确模块化设计标准,实现设备设计与分析的标准化、规范化。在技术保障方面,组建专业的有限元仿真分析与强度测试团队,配备先进的仿真软件与试验设备,提升设备设计与强度分析的技术水平。

5.2 技术应用推广建议

结合钻井机械配套设备的研发与应用现状,针对不同钻井工况与作业区域,提出应用推广建议。一是因地制宜优化设备设计方案,针对深层超深井钻探作业,重点强化设备的高承压、耐高温、抗冲蚀性能,推广大口径、高压力的配套设备;针对海上钻井作业,强化设备的防腐蚀、抗风浪性能,优化设备的密封结

构与抗振设计。二是推动技术标准化与产业链协同,加强石油机械研发企业、材料生产企业、零部件制造企业的产业链协同,共同研发新型材料、核心零部件与先进制造工艺,提升配套设备的整体研发水平。三是强化示范引领与产学研协同创新,选择川渝、塔里木、渤海湾等深层超深井钻探区块打造示范工程,推广优化后的钻机配套设备与设计分析技术,总结可复制、可推广的经验做法。

6 结束语

钻井机械配套设备的结构设计优化与强度分析是适配深层超深井油气资源勘探开发的关键,直接关系到钻井作业的安全性、高效性与持续性。本文针对传统配套设备结构与强度分析的核心问题,从模块化轻量化设计、核心部件针对性优化、材料—结构协同设计三个方面提出结构设计优化路径,构建了基于有限元仿真的静动态强度分析、疲劳强度分析、多载荷耦合强度校核的多维度强度分析体系,实现了设备结构与强度性能的协同提升。工程试验验证表明,优化后的配套设备在承压能力、抗疲劳寿命、工况适应性等方面均得到显著提升,可满足万米级深层超深井钻探的严苛要求。随着我国深地能源开发战略的深入推进,钻井机械配套设备将朝着模块化、智能化、绿色化、高可靠性方向发展。未来应进一步推动数字孪生、人工智能、新材料等技术与钻机配套设备设计分析的深度融合,研发智能监测、自修复、无人化的高端配套设备,为我国油气资源深层超深层勘探开发提供坚实的装备技术支撑。

参考文献:

- [1] 周涵锐.基于 API 极限工况下钻机结构安全性分析[J].石油机械,2023,51(01):9-17.
- [2] 郑黎明,李彦霖,张洋洋,等.智能钻机与传统钻机系统组成差异与发展分析[J].石油机械,2023,51(11):41-50.
- [3] 张奇志,吴凡,石宪峰.基于多机协同策略的管柱智联控制系统设计[J].石油矿场机械,2025,54(03):1-7.
- [4] 裴学良,黄哲.胜利工程智能钻井关键技术探索与建议[J].石油钻探技术,2024,52(05):62-68.
- [5] 王昕灿,郭志阳,王贺,等.基于多层次故障树分析法的电机在线故障诊断[J].现代制造工程,2023(11):137-143,39.
- [6] 赵金海,张洪宁,王恒,等.中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J].钻采工艺,2024,47(02):28-34.

机械电气设备电力节能技术研究与应用

赵建纲¹, 毛文学²

(1. 青岛雷霆重工股份有限公司, 山东 青岛 266112;

2. 青岛东盛电力工程有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要 随着能源问题日益突出, 机械电气设备的电力节能成为重要研究课题。本文围绕机械电气设备电力节能技术展开研究, 探讨了节能的重要性与现状。详细分析了多种节能技术原理及特点, 包括优化电机设计、采用智能控制系统等, 并对不同场景下电力节能技术的应用情况进行阐述, 旨在为机械电气设备电力节能提供理论参考, 进而推动能源可持续利用和企业降低运营成本。

关键词 机械电气设备; 电力节能技术; 节能原理; 能源可持续

中图分类号: TM92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.038

0 引言

在全球能源紧张和环保要求不断提高的大背景下, 机械电气设备的电力节能具有重大的现实意义。机械电气设备广泛应用于工业、农业、建筑等各个领域, 其耗电量巨大。传统的机械电气设备在能源利用效率方面存在诸多不足, 造成了大量的能源浪费。研究和应用电力节能技术, 不仅能够有效降低能源消耗, 缓解能源供需矛盾, 还能减少对环境的负面影响。对于企业而言, 采用节能技术可以降低生产成本, 提高经济效益和市场竞争力。因此, 开展机械电气设备电力节能技术的研究与应用势在必行。

1 机械电气设备电力节能的重要性与现状

1.1 电力节能的重要性

机械电气装置作为现代生产生活当中的基础组成部分, 其电力相关支出在能源总支出中占比较大, 开展电力节能能有效应对能源紧张情形, 保证国家能源供应一直稳定。随着经济的大幅增长, 能源需求的规模日益增大, 传统能源的可开采潜力比较小, 节能不仅可减少传统能源的长期依靠程度, 还能缩减企业运营相关的支出, 提高产品在行业竞争中的竞争影响力。从节约能源削减排放的视角看, 节约电力可以抑制发电环节的污染排放量, 提高环境保护的水平, 实现资源的可持续利用。

1.2 机械电气设备电力消耗现状

大量的机电设备在运转时会有能耗过高的问题, 部分未做升级的老设备性能不佳, 电机能源转换效率

不好, 铁芯和绕组造成的损耗比较多, 运行状态更替频繁且未做到自动化, 造成大量电力资源无用的流失。一些设备的运行方式欠佳, 频繁发生无作业负载或者低功率的工况, 控制模块的反馈有延迟问题, 不能随工况的变动及时调整功率输出, 造成能源的不必要浪费。在设备选型与设计的阶段, 未充分纳入节能要求, 未重视能效等级匹配系统协同优化, 未实施全生命周期能耗评估, 造成设备在实际运转当中无法达到预期的节能目的, 定期维护工作有遗漏之处, 润滑不理想、传动部分松散和散热不好等情况进一步扩大了能量转化的损耗。

1.3 节能技术的发展对行业的推动作用

机械电气设备行业正凭借节能技术的进展开展业务拓展, 目前变频调速、智能温控、能量回馈和高效电机等技术不断成熟, 极大地提升了设备的能源利用水平, 降低了无用功分量消耗以及空载电力的流失。企业开展整体性能效的升级工程, 不但能减少单产能耗与运维方面的费用, 更提高了商品的竞争潜力和市场应对能力。节能措施已完全渗透进产品研发设计与生产工艺以及全流程管控当中, 助力产业往智能绿色且高可靠的方向转型发展^[1], 绿色制造理念逐渐成为行业所认同的标准, 助力产业链一起发展, 国家有序落实标准更新、深化示范作用、改革财税补贴和绿色采购的流程, 为节能技术的研发和应用奠定了良好发展的政策根基。

2 常见的机械电气设备电力节能技术原理

2.1 优化电机设计的节能原理

电机是机械电气装置中能源消耗比例较大的基础部件, 其功耗占整个工业用电量的较大比例。通过有

作者简介: 赵建纲 (1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械设计与制作。

组织、有计划地对电机进行结构优化设计,可以大幅度提高机械工作效率,减少对电能的不必要消耗。使用高磁导率、低涡流损耗的硅钢片,配合高矫顽力、高剩磁强度的永磁体材料,可以大大减少铁心中的涡流损耗和磁滞损耗,有效抑制线圈的升温发热。对定子绕组进行合理的设计改良,改进气隙磁通分布状况,增强磁路对称分布均匀性,达到提高电机功率因数和转矩密度的目的。利用精确的板材冲压、真空浸漆、旋转部分动平衡校准等先进制造技术来保证电机的良好电性能、低噪音以及较好的散热效果,在不同的负载情况下,实现电机的高效节能和可靠运行。

2.2 智能控制系统的节能原理

依靠设备实时运行信息,智能控制系统自动调整工作参数,极大地改善了能源转化的水平。系统装设的精密测量传感器不断采集负载温度、压力、流量和振动等多方面动态参数,凭借内置的自适应算法精准捕捉工况的改变,准确调校电机转速、输出功率、阀门开度及冷却强度等主要参数^[2]。轻载状态当中,设备自动做转速功率双调节,减少没必要的耗电;当面临高负载或运行突变时马上动作,保证输出稳定以符合工艺规范。这个过程由系统自动处置,无需人员介入,可以延长设备的使用寿命,降低检修次数。

2.3 无功补偿技术的节能原理

在机电电气设备系统中,电动机、变压器、电焊机等用电负荷均具有较强的感性负载特性,运行过程中需要从电网吸收大量无功功率。无功补偿技术在配电网中加装电容器组等补偿装置,在感性用电设备附近提供无功功率支持,减少无功功率在输变电设备以及输电线路上的远距离输送,大大降低线路铜损以及变压器的铁损、铜损,有效提高了整个电网的综合功率因数,使得电能转换为有效功的利用率得到了极大的提高;减少电压的波动范围,稳定母线电压,有利于各类型电动机安全稳定启动,延长设备使用寿命,整体提高了供电和配电系统的运行可靠性以及能源转换效率。

3 不同类型机械电气设备的节能技术应用

3.1 工业生产设备的节能技术应用

在工业生产体系中,大量的生产装置(机床、风机、水泵等)一直消耗电能,针对机床主体,可采用变频调速的相关技术,结合加工件物理性能、尺寸公差的相关要求及切削工况等工艺参数,按工艺要求改变电机转速,实现动力输出与负载的最优契合,降低无负荷和低负荷期间的能源浪费。在风机与水泵的相关方面,采用智能的操作模块,依据生产工序的变动以及

管道压力的回馈,实时对风门开启大小和水泵开关进行优化,抑制节流作用所造成的效率降低和恒速多余消耗,使生产线布局的合理性得到提升。

3.2 建筑电气设备的节能技术应用

照明系统、空调系统和电梯等作为部分构成建筑电气设备,针对照明配置的相关情况,可采用节能发光的器件,使用 LED 类的灯具,其优势体现在高光效以及长使用期限方面,使用自动化照明控制办法,按照日光照射强度和人员的活动路径,主动对光源的亮暗做调整。在空调能耗系统相关方面,使用优化的制冷压缩机来与智能空调节能方案配合,如变风量、变水量的管控方式,可有效减少空调系统的电力用量,电梯可采用能量回收的相关技术,回收电梯运行阶段释放出来的剩余能量以作再利用。

3.3 交通运输设备的节能技术应用

运输行业的机电装备主要涉及电动小汽车、电力客运车辆、电动公共汽车以及城轨系统等。针对新能源汽车而言,加大电池容量密度以及提升充电速度是节能的核心条件,要使用智能电池管理模块,开展热力和电气参数的联合控制,做到充放电时段的稳定有效防护,协同对永磁同步电机的机械布局和控制逻辑作出调整,减轻绕组以及铁心的损耗^[3],对传动系统进行改进以消减能量浪费,电动列车普遍把再生制动模块集成进去,在减速及进站的时候把机械能高效转为电力,及时输送至供电网络或者电池组,有力提高能源回收率,借助轻量化车身设计加上低风阻气动优化是系统性节能的重要因素。

4 电气设备节电技术的实施及监管

4.1 节能技术的实施步骤

开展机电设备电能消耗精细化管理,需要完成详尽的电力审计工作,针对负载运行特性、工作状况、功率因数水平及无功损耗等重要指标,仔细寻找能源浪费节点及节能潜力。根据审计结果,分阶段、有序地制定和执行节能改进措施,主要推广采用高效电机替换、智能变频调速、无功补偿及能量反馈等先进节能技术,改造施工过程中要严格按照设备安装定位及电缆敷设标准进行,完善设备间的联合调试以及保护装置的设定值,达到电网的安全运行稳定接轨。设备运行之后,建立长效机制的能效监测体系,以实际运行数据为参考对比评估节能效果,根据监测情况及时调整控制参数,不断提高能源转换效率。

4.2 节能管理措施

建立完善的节能管理制度是保证机电设备节电目标的重中之重。有关单位成立专项节能管理团队,全

面协调并快速实施节能方案,制定节能长期目标及年度工作计划,在整个过程中进行全程监控与及时的更新完善工作。加强全体员工节能的培训工作,包括新入职员工培训、在岗人员技能提升以及节能标兵事迹学习,充分调动职工节约的积极性和提高操作水平的自觉性。定期做好设备日常巡检、校准、润滑以及预防性维护等工作,排除设备跑、冒、滴、漏等现象,确保设备始终处于良好的运行状态下。

4.3 节能技术的监测与评估

构建厂区全范围节能数据采集系统,引入智能监控边缘网关以及云服务给予支持,在线抓取主体设备电力、水分、空气的消耗及温度、压力、流速等的实时数值^[4],采用大数据分析方法,实时分析能耗偏离、运行效率低下和节能潜力的关键因素,系统自行评估技改实施前后的能效曲线差异,综合思考能源节约率、节能成本效益比和单位产品能耗降幅等多方面的指标因素,进行质性量化双方面的闭环评价,项目各环节都设有评估的节点,关乎建设质量、运行稳定性和长期的适配情况,最终完成能用于借鉴推广的节能实践案例整理,持续完善技术方案与管控办法,给企业绿色升级提供长期助力。

5 机械电气设备电力节能技术的发展趋势

5.1 新技术的研发与应用

随着工业技术不断发展,先进技术将在机电设备电力节能中深度融合。人工智能技术不仅能开展设备智能分析与优化协调方面的工作,还可以实时了解运行规律并主动改变参数,使整体能效水平得到提高。纳米技术于电机铁芯、绕组和永磁体中的创新运用,大幅度降低了铁损和铜损数值,改良热量散发表现^[5],保证电机在负载波动范围有高效的运作表现。以太阳能和风能为例的新能源技术正与变频驱动智能微电网以及储能系统密切结合,实现源网荷协同的可优化电力模式。数字孪生技术使设备全生命周期节能管理可视化得以实现。

5.2 节能标准与规范的完善

政府及行业协会需要制定机电设备节能标准更新计划,把标准管理贯穿到产品设计、生产制造、质量检测、能效标识到循环再利用的整个生命周期,严格执行强制性标准的刚性约束,发挥推荐性标准的柔性指导作用。健全能效等级分类制度,逐步提高能效标准,禁止高耗能设备进入市场流通,加强对第三方能效认证机构的监督管理,加大日常抽查力度以及产品来源追溯审查力度,严厉打击能效造假和违法生产行为。

鼓励龙头企业牵头成立标准制定小组,整合产学研用资源联合攻关,尽快将节能新技术、新产品标准转化为标准条文,加大力度进行节能法律法规宣传和实际操作的培训工作,让企业把节能措施上升到企业的总体战略规划和各个环节的日常管理当中,建立生态优先、内生动力的行业节能的长效机制。

5.3 节能技术的集成化发展

机电设备电力节能技术逐渐向一体化、系统化、智能化高度融合发展。以智能控制集成、无功动态补偿、高效电机应用、变频调速、能量回馈及实时在线监测等为主要手段,形成从运行监控、动态调节、故障报警到能效优化的全过程节能闭环机制。组合节能装置可以及时感知负荷变化及电网运行状况,自动调整运行状态,降低无效电量消耗,提高供电质量;使各个子系统的相互连接,联合控制,避免了单个技术的缺陷以及重复投资的弊端,提高了节能运行的可靠性与适用性。

6 结束语

研究与应用机电设备电力节能技术对于应对能源紧张、维护生态系统平衡和增加企业利润具有重要意义。本文阐述了机械电气设备电力节能的重大意义与实施方面的现状,研究了主流节能技术核心原理的相关内容,探究了不同种别设备节能技术的实施方式,以及节能办法实施的控制与革新方式。在工程实施的过程中,应参考设备技术参数以及实际条件,采用符合要求的节能技术,同时落实节能监督以及绩效核查。随着科技的不断发展,势必会涌现更多的突破性节能技术,使机械设备节能工作跃上新台阶。政府、企业联合社会各方面力量共同发力,促进机械电气设备节能技术推广,助力能源的可持续利用与经济的环保型发展。

参考文献:

- [1] 罗康.机械电气设备自动化调试技术研究与应用优化[J].造纸装备及材料,2022,51(08):16-18.
- [2] 叶繁.机械电气设备的可靠性设计与安全技术[J].铸造,2022,71(04):515.
- [3] 张艳军.机械电气设备维修中的故障诊断和解决措施[J].中国设备工程,2023(18):172-175.
- [4] 彭卫生.机械电气设备自动化调试技术研究与应用优化[J].现代制造技术与装备,2023,59(05):210-212.
- [5] 吕彬彬.电气工程及其自动化供配电系统的节能优化[J].电工技术,2023(S1):271-273.

污水处理厂给排水设备联动调试工艺应用思考

郝彦博

(秦皇岛排水有限责任公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要 污水处理厂给排水系统作为工艺全流程的核心枢纽, 承担着水量调控的重要职责, 通过动态匹配各单元处理负荷, 实现工序间的无缝衔接, 为污水处理系统的高效、稳定运行筑牢基础。然而, 在实际工作中, 经常出现设备与设备的协同度较低, 自动化控制效果有限, 一旦进水水量和水质发生变化, 系统就容易出现故障。本文以某市政污水处理厂扩建工程为研究对象, 根据其具体调试过程, 对联动调试中的关键技术应用和优化措施进行系统分析, 并对系统的协调性进行验证, 进一步优化自动化控制策略, 旨在构建一套完善的联动调试技术方案, 为相关工程提供参考。

关键词 污水处理厂; 给排水系统; 联动调试

中图分类号: TU992.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.039

0 引言

随着自动化水平日益提升, 污水处理厂中的设备类型不断增加, 设备与设备之间的联动机制越发复杂, 若单纯依靠某一设备, 很难对整个系统的稳定性和可靠性进行检验。在具体工程中, 若无法对所有设备进行联动调试, 当设备正式投入运行以后, 容易出现液位控制异常、水泵频繁开启和停止、系统响应速度慢等问题。因此, 要高度重视联动调试工作, 探讨关键技术应用路径和方法。

1 案例概况

本文以某城市污水处理厂扩建工程作为研究对象, 该厂设计处理规模为每天处理 8 万立方米污水。采用活性污泥生化处理工艺对污水中的污染物进行生物降解。该厂主要处理生活污水、附近工厂与企业所产生的部分工业废水。在扩建工程中包含的给排水系统中, 主要涉及以下内容。

一是进水提升泵房。该设施负责将未处理的污水提升, 送到调节池, 满足后续处理需求, 保证供水稳定。二是回流泵系统。该系统主要将活性污泥抽回前面的生化池, 保证池内的微生物数量浓度稳定。三是电动控制阀门。该设施主要对水流路径进行控制, 同时合理分配各个处理单元的水量, 通过与其他实现自动化调整, 确保系统运行更加协调。四是在线流量与液位监测系统。该系统可实时显示水量和液位数据, 将数据传输至系统之中, 为决策提供参考依据。五是

PLC 集中控制系统。系统结合仪表数据和预先设定好的程序, 对泵和阀的启停动作进行自动化控制, 确保设备实现自动化运行, 彼此配合。

工程建设完毕, 刚开始投入运行时, 系统出现以下几个问题。一是液位波动比较频繁, 导致水泵出现频繁启停的现象, 对系统的稳定性造成影响。二是水泵启动和停止过于频繁, 有的水泵持续工作, 有的水泵很少工作, 工作量分配不均匀, 从而增加设备磨损的风险。三是系统对负荷变化的适应能力较差, 存在一定的响应延迟现象, 部分联动设备可能会在较短的时间内出现异常运行的情况。

通过对上述问题进行分析, 发现其主要原因如下: 一是对自动控制系统的程序、规则和判断条件进行设计时, 并未考虑周全, 如应设置液位缓冲区间, 保持多台水泵轮流工作; 仪表信号容易受到水流波动、气泡等因素的干扰, 导致数据不准确; 负荷递增方案不完善。上述原因导致系统很难实现高效和稳定运行。因此, 为了解决上述问题, 需对整个系统展开全面的联动调试。

2 污水处理厂给排水设备联动调试工艺优化

2.1 控制逻辑优化

在传统给排水自动控制系统中, 常用的控制方式为固定启停点和顺序启泵相结合, 当水位靠近启停限值时, 水泵会频繁启动和停止^[1]。根据实际使用情况, 在本项目中, 对 PLC 的控制逻辑进行优化, 保证这一控制程序更加合理。

作者简介: 郝彦博 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机电工程。

2.1.1 运行时间自动均衡算法

根据原有的顺序启动逻辑,在PLC程序中新增一个模块,负责对每台泵的运行时间进行记录和统计。当水泵正式运行时,系统开始计时,水泵暂停时,系统也会暂时停止计时,最终获得每台水泵的累计运行时长。当满足启动条件时,会优先启动运行时间短的水泵,通过动态轮换的方式,保证几台水泵轮流工作。引入这一控制逻辑后,可有效避免某一设备长期处于高负荷运行状态,而其他设备处于闲置状态。同时,每台泵的运行时间分布更加均衡,可有效降低局部设备出现磨损的可能性,为后续设备维护计划的制定奠定基础。

2.1.2 启停滞回控制模块

由于原来设定的开泵水位和停泵水位距离比较近,水位在狭小的区间里出现小幅波动,导致水泵出现频繁启停现象,因此,可在PLC程序中新增滞回控制单元,进一步增加开泵水位和停泵水位之间的差距,形成一个缓冲区间,结合延时判断逻辑,即使水位出现小幅度波动,也不会立刻导致泵启动和停止。通过对液位的变化趋势进行判断,可以有效提高系统运行的稳定性和可靠性。这一措施的目的是提高控制系统的抗干扰能力,即使水位出现迅速和小幅波动,系统也不会轻易受到影响。

2.1.3 信号滤波处理

在污水处理系统中,一旦涌入大量的污水,集水井中的液位就会瞬间升高,导致液位传感器传回的信号不稳定。为保证液位数值更加稳定、真实,在PLC程序中,引入滑动平均滤波和时间延迟判断,将二者相结合,首先利用滑动平均滤波将抖动的信号磨平,再通过时间延迟对信号的有效性进行确认,起到双重保障的作用。当液位的变化幅度在设定范围内,系统会对整个水位的变化趋势进行判断和分析,并不会立刻开启或停止水泵。通过这一机制,可以减少误操作概率,保证控制系统更加稳定、准确。

通过实施这一优化措施,系统的报警次数显著降低,设备运行更加稳定、可靠。

2.2 分阶段负荷调试

为了验证系统的适应能力,需开展负荷调试。若一次性直接开到最大和满负荷运行状态,可能会导致设备出现瞬时过载的情况,还会导致系统出现误操作。因此,需采用分阶段递进式负荷调试技术,保证整个项目运行更加安全和平稳^[2]。

2.2.1 低负荷运行

在低负荷运行阶段,并非验证设备在极限条件下

的能力,而是要对自动控制逻辑的准确性进行验证,同时对连锁关系的完整程度进行判断。在这一阶段,重点关注水泵启停顺序,对备用泵切换逻辑进行检查,确定泵和阀门按照程序要求配合,同时还要对控制单元进行仔细检查。对液位变化和异常情况进行模拟,对报警系统进行测试,保证在异常状态下,系统能够及时做出响应。在低负荷运行阶段,选择相对安全的条件,对程序缺陷进行排查,及时发现和解决问题,避免控制机制发生错乱,对系统造成不利影响,在后续工作中,即使进一步增加负荷,也能保证系统稳定运行。

2.2.2 中负荷运行

确认控制程序与逻辑没有问题后,就要保证系统在重负荷条件下正常运行。此时,对设备进行调试时,要更加关注设备与设备之间的配合程度,以及水流、压力、管理之间的匹配度。通过监测水泵电流的变化、阀门调节速度与准确性、调节池水位波动程度,可以在进水流量一直变化的情况下,综合判断系统运行的稳定性与协调能力。中负荷阶段往往是暴露问题的关键。由于水量波动频率增加,设备运行状态接近真实工况,若存在流量分配不均、阀门响应滞后或液位控制区间设置不合理等问题,会影响系统运行的安全性和可靠性。因此,在该阶段,需根据运行表现对控制参数进行适度修正,如调整液位滞回区间,优化阀门开度比例,完善轮换运行逻辑,使系统控制策略更加贴合实际运行需求。

2.2.3 设计负荷运行

当前两阶段的工作完成以后,将系统逐步增加至设计负荷,保证系统长时间连续运行,持续观察其运行状况。这一阶段的主要目标是验证处于满负荷的系统是否能够保持持久稳定的运行状态。在这一模式下,需持续关注设备的温度升高情况,设备的振动和噪声是否正常,同时,分析系统是否存在频繁报警、不正常停机等现象。若系统在连续运行的过程中并未出现明显的异常情况,可以说明给排水系统能够正常、稳定运行。通过分阶段和逐步增加负荷的方式,使调试工作从最初检查程序逻辑的正确性,逐渐过渡到验证设备运行稳定性和可靠性。这种循序渐进的调试方式,不仅能够有效减少对系统造成的冲击,还可实现参数优化,留出足够时间观察运行效果,找出问题所在,对参数进行修改,从而对系统性能进行全面评估。

2.3 仪表信号稳定性改进

作为自动化控制的基础,仪表系统信号质量与决策息息相关^[3]。在本项目调试过程中,液位数值不够

稳定,这与仪表的安装位置和现场环境密切相关。

2.3.1 安装位置优化

对液位计的安装位置进行重新检查和分析,避免其位于强水流冲击区和进水落差区,这些位置的水位波动比较大,容易导致信号混乱。要保证液位计所在位置有更安静的水流和稳定的水位,从根本上解决信号扰动问题。

2.3.2 信号延时判断机制

在控制程序中,设置信号持续时长判断规则,可为信号达标设置时间门槛,当液位数值需要稳定达到设定值时,PLC 才能执行动作。这一方法可以有效避免由于短暂的信号波动而产生的误启动和停止操作^[4]。

利用上述措施,可以保证原有液位不再出现较大波动,更加平稳,水泵不再出现频繁启停现象,系统不会轻易报警,不会出现误操作,提高整个系统运行的稳定性和可靠性。

2.4 污水运行适应调整

在污水调试阶段,系统面临更加复杂的运行环境,为了进一步提高系统的适应能力,在本项目中,采用综合调整措施。

2.4.1 加强预处理管理

工作人员要做好格栅和沉砂池的日常巡检与清理工作,加大管理力度,尽量减少大块杂物和沙石混入管道与水泵之中,从源头上拦截杂质,减少设备堵塞的可能性。

2.4.2 优化泵前运行策略

根据污水浓度与杂质情况,适当提高泵前冲洗次数。同时,对水泵的启停时间和频率进行合理控制,保证多个水泵彼此配合,避免由于浓度波动较大,导致电流出现异常现象。

2.4.3 阀门与流量匹配调整

在进水量不稳定和负荷出现波动的情况下,对阀门的开度进行合理调整,保证水流在各管路之间得到更加均匀的分配,减少某一区域水位过高或过低等情况,进一步提高系统对复杂环境的适应能力,提高其运行的安全性和可靠性^[5]。

3 应用效果与总结

通过优化调试后,系统的运行呈现以下特点:一是水泵的启停次数减少,设备运行更加平稳;二是设备的运行时间分配更加合理,多个水泵通过轮换的方式运行,保证负载均衡;三是水位不再忽高忽低,信号更加稳定;四是在满负荷运行期间,系统未出现较大的故障。虽然未对系统具体运行参数进行详细统计

和分析,但从实际运行效果来看,系统运行更加稳定可靠。

结合本项目的实际经验,总结出一套可复制和可操作的技术调试方案。一是对每台设备进行单独验证,确认设备自身不存在问题。严格保障调试安全,确保所有人员能够严格按照安全操作法规范标准执行工作,不得随意更改调试顺序。二是正式调试之前,需制定更详细的调试方案与计划,确定各阶段的调试任务和目标,严格按照方案计划逐步开展,确保各环节得到充分验证。三是采用清水进行调试,对启停、连锁、切换和报警等程序进行验证。四是在污水阶段,对系统的适应能力进行验证。五是从小流量到中流量,再到满负荷,逐步增加。六是对自动控制逻辑进行优化和调整。七是及时对数据信息进行记录,为后续分析、改进工作提供依据。调试数据类型众多,数量较大,如设备参数、系统运行参数、故障参数等,需保证所有信息准确、规范。八是及时发现问题,分析问题产生的原因,对问题进行整改,再对整改结果进行验证,形成闭环。总之,联动调试不只要考虑设备是否正常运转,还要对控制系统的控制策略进行调整^[6]。

4 结束语

在污水处理厂中,对给排水设备进行联动调试时,要充分结合设备与现场的实际情况,保证设备互相配合协作,积极对 PLC 控制策略进行调整,提高自动化控制水平。结合具体案例,在设备调试阶段,通过分阶段负荷提升的方式逐渐增加流量,提高信号的稳定性与系统运行的可靠性。在后续实践中,应进一步完善联动调试机制,对问题进行全面排查,优化参数和控制逻辑,确保设备安全运行,提高给排水设备运行质量与污水处理效率。

参考文献:

- [1] 宋广霞.污水处理厂给排水设备联动调试工艺探讨[J].清洗世界,2025,41(06):92-94.
- [2] 张旭.污水处理厂给排水设备联动调试工艺分析[J].清洗世界,2022,38(12):17-19.
- [3] 魏俊.城市给排水设计及污水处理重点研究[J].中国设备工程,2022(06):19-21.
- [4] 谢安斌,李倍,李英华.试析市政给排水设计中污水处理技术要点[J].建材发展导向,2025,23(23):34-36.
- [5] 胡鹏程.城市化进程中市政给排水系统的优化设计探讨[J].陶瓷,2025(11):20-22.
- [6] 李冰阳.市政给排水工程中污水处理技术的应用分析[J].标准生活,2025(07):163-165.

数字万用表直流电压档计量偏差校准方法研究

张海鹏, 王小栋, 刘志杰

(山东寿光检测集团有限公司, 山东 寿光 262700)

摘要 数字万用表作为电子测量领域的核心基础仪器, 其直流电压档的计量精度直接决定了电气参数测量结果的可靠性, 在电子研发、工业控制、计量检测等各个领域都有很大的影响。本文阐述了数字万用表直流电压档基本的工作原理, 明确计量偏差的定义、分类和主要特点, 着重从四种主要的校准方法入手展开论述, 结合真实的校准过程以及技术参数, 并通过精准的案例分析, 利用表格来补充偏差特性与校准方法参数对比, 旨在为提高数字万用表直流电压档计量准确度提供参考。结果表明, 科学选择校准方法, 并且严格控制校准过程, 可以有效地抑制系统偏差和随机偏差, 保证仪器达到计量规范的要求。

关键词 数字万用表; 直流电压档; 计量偏差; 校准方法; 系统偏差

中图分类号: TM93

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.040

0 引言

在现代电子测量体系中, 数字万用表凭借测量范围广、精度高、显示直观、操作便捷等优势, 成为不可或缺的基础测量工具, 其直流电压档主要用于检测电路中稳定直流信号的电压幅值, 是电力电子、航空航天、精密制造等行业的重要测量环节。随着技术的发展, 数字万用表的测量精度不断提高, 在长时间使用的过程中, 由于内部元件老化、环境因素的影响、电路参数漂移等因素, 直流电压档容易产生计量误差, 如果误差超过了允许的范围, 则会造成测量结果失真, 从而影响到产品研发的质量、生产工艺控制精度和计量检测的公正性。因此, 确定计量偏差的种类及原因, 采用科学有效的校准办法对于保证数字万用表测量的准确性有重大现实意义。本文以数字万用表直流电压档的工作原理为基础, 对偏差进行分类, 对主流的校准方法和实际的应用要点展开详细的阐述, 给相关领域计量校准工作提供借鉴。

1 数字万用表直流电压档基本原理

数字万用表直流电压档核心工作逻辑是将输入直流电压信号转为数字信号, 经过处理之后再通过显示模块输出结果, 过程包含信号衰减、整流滤波、模数转换(A/D转换)、数据处理这四个部分^[1]。

输入衰减电路采用高精度的分压电阻网络, 根据测量量程自动调节分压比, 把不同的幅值电压信号衰减到A/D转换器可接受的量程内, 防止过载, 一般用

低温漂电阻来减少参数漂移的影响。整流滤波部分用滤波电容和整流二极管组成的电路来抑制交流干扰, 提取直流信号, 保证后面转换的稳定。A/D转换器为主, 主流采用逐次逼近式, 对输入的电压和基准电压进行比较, 把模拟信号转换成二进制数字信号, 高端万用表配内置恒温基准源提高稳定性。数据处理模块用微控制器(MCU)来实现, 对转换出的数字信号进行运算、修正和补偿, 去掉偏差之后再传给显示模块完成测量。分压电阻精度、基准电压稳定度、A/D转换分辨率和电路抗干扰能力都会影响到测量的准确性。

2 数字万用表直流电压档计量偏差定义与分类

2.1 绝对偏差与相对偏差的概念

数字万用表直流电压档的计量误差是指测量值与被测量的真实值(约定真值)之差, 是评价仪器测量精度的主要指标, 分为绝对误差和相对误差两种基本表现形式。绝对偏差为测量值和约定真值的代数差, 数值可以是正也可以是负, 单位和被测量单位相同, 可以直接反映测量结果偏离的程度, 但是受到测量量程和真值大小的影响, 不能跨量程、跨数值范围比较精度。相对偏差是以约定真值为基准, 把绝对偏差和真值的比值转化为百分比来表示的指标, 不受测量量程和真值大小的影响, 可以用来比较不同的量程、不同的数值下的测量精度, 是校准中评价偏差程度的一种常用的指标。实际应用时应优先选用经过计量检定合格的标准源给出约定的真值, 保证偏差计算正确。绝对偏差

作者简介: 张海鹏(1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 质量工程。

和相对偏差的量化计算给校准工作提供数据支持,综合分析两者可以准确地找到偏差来源及偏差大小^[2]。

2.2 系统偏差与随机偏差的区分

根据偏差的原因和特点,数字万用表直流电压档计量偏差分为系统偏差和随机偏差两种,两者在产生原因、变化规律以及影响机制上存在明显的不同,需要分别进行控制。系统偏差是由仪器结构缺陷、组件参数偏差、电路设计问题等确定性因素引起的,具有可重复性、可预测性和单向性,偏差数值和方向固定或者有规律可循,如分压电阻阻值漂移所造成的偏差可以通过校准修正或者补偿来消除,是校准的主要对象。机偏差由测量中偶然因素(环境温度波动等)引起,偏差数值与方向无固定规律、随机分布,无法单一校准消除,只能通过多次测量取平均值来减小其影响。两者共同作用于系统误差上,系统偏差决定了测量的准确性,随机偏差决定了重复性的高低,校准要兼顾两类偏差来提高精度。

3 数字万用表直流电压档计量偏差的校准方法

3.1 标准源校准法

标准源校准法是数字万用表直流电压档校准的基础方法,其核心原理是利用精度等级显著高于被校准万用表的直流标准电压源,输出一系列已知约定真值的电压信号,把被校准万用表测得的量值同标准值比较,求出偏差再进行修正,这种方法操作简单、精度高、适用范围广,是计量检测机构常用的校准方法。校准时必须遵守量程全覆盖的原则,在被校准万用表直流电压档的所有量程上,选取不少于 3 个校准点(一般为量程的 20%、50%、80%),保证整个量程范围内偏差都得到有效的校准,实时控制校准环境条件,温度保持在 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$,相对湿度在 45%~65% 之间,防止环境因素对校准结果造成影响。标准源的精度等级要符合校准的要求,一般应比被校准的万用表高两个以上精度等级,并需要经过上级计量机构检定合格并取得有效的检定证书,在校准前应对标准源和被校准万用表进行预热,标准源预热时间为 30 分钟,万用表预热时间为 15 分钟,保证仪器处于稳定的工作状态^[3]。

用 FLUKE 5730A 直流标准源对一款 4 位半数字万用表的直流电压档进行校准,以 FLUKE 5730A 直流标准源校准某款 4 位半数字万用表直流电压档为例,该标准源直流电压输出范围为 0~1 000 V,精度等级为 0.001%,被校准万用表直流电压档量程为 0~10 V、0~100 V、0~1 000 V,精度等级为 0.01%。校准前把标准源和万用表置于符合要求的校准环境里预热 40

分钟,接上专用校准导线,保证接触良好以减小接触电阻所引起的误差。校准 10 V 量程时,标准源分别输出 2 V、5 V、8 V 三个校准点,待标准源输出稳定后,记录万用表的测量值,计算各点的绝对偏差和相对偏差,其中 2 V 校准点标准值为 2.00 000 V,万用表测量值为 2.0 002 V,绝对偏差为 +0.0 002 V,相对偏差为 0.01%;5 V 校准点标准值为 5.00 000 V,测量值为 4.9 998 V,绝对偏差为 -0.0 002 V,相对偏差为 -0.004%;8 V 校准点标准值为 8.00 000 V,测量值为 8.0 001 V,绝对偏差为 +0.0 001 V,相对偏差为 0.00125%。对于偏差超过允许范围的校准点,用万用表内置校准程序调整分压电阻网络参数,反复校准直到各个点的偏差都控制在允许范围内,完成 10 V 量程校准,其他量程也按照同样的方法进行校准,保证全量程精度合格。

3.2 多点校准法

多点校准法是解决数字万用表直流电压档非线性误差的方法。它的关键在于利用 A/D 转换器的非线性特性,在各个量程上选取更多的校准点,用拟合校准曲线来修正偏差。与标准源校准法的固定点修正不同的是,它可以更好地反映量程内偏差的变化情况,适合于高精度万用表以及有明显非线性偏差的仪器。非线性偏差是由 A/D 转换器的转换特性、分压电阻网络的非线性响应等因素引起的,不同的校准点偏差变化无规律,只能对某一固定的校准点进行修正而不能消除全量程的偏差。多点校准法加大校准点的密度,用最小二乘法拟合偏差和测量值函数的关系得到校准曲线,测量时实时修正测量值来提高精度。校准点的选择应根据偏差的变化趋势来定,一般每个量程选择 5~7 个点,包含量程的起始点、中间点、末端点和偏差容易发生突变的地方,分布要均匀,给曲线拟合提供可靠的依据^[4]。

例如:某款 6 位半高精度数字万用表,其直流电压档 1 V 量程存在明显非线性偏差,采用多点校准法进行校准,选择 Agilent 3458A 万用表作为标准仪器(精度等级为 0.0001%)搭建校准系统。校准之前对系统进行预热和环境控制,保证测量条件稳定,在 1 V 量程下选择 0.1 V、0.25 V、0.5 V、0.75 V、0.9 V 五个校准点,依次输出标准电压信号,记录被校准万用表的测量值和标准值,计算各个点的偏差。其中,0.1 V 校准点的绝对偏差为 +0.000 002 V,0.25 V 校准点为 +0.000 001 V,0.5 V 校准点为 -0.000 003 V,0.75 V 校准点为 -0.000 002 V,0.9 V 校准点为 +0.000 001 V。根据上述的数据,利用最小二乘法拟合出二次校准曲线,把曲线的参数写

入万用表内部存储器中,仪器工作的时,实时调用校准曲线对测量值进行修正。校准完毕之后再次检测各个校准点的电压值,偏差都在 $\pm 0.000\ 001\ \text{V}$ 之内,非线性偏差得到有效控制,测量精度比校准前提高3倍以上,可以满足高精度测量的要求。

3.3 温度补偿校准法

温度补偿校准法是对环境温度变化造成计量偏差的专项校准方法。通过检测校准环境温度和基准温度(一般为 $23\ ^\circ\text{C}$),用仪器内部的温度传感器来采集数据,再根据预先设定好的补偿系数实时地修正测量值,消除温度对分压电阻、基准电压源、A/D转换器等参数的影响。温度对数字万用表直流电压档的精度有影响,分压电阻、基准电压源、A/D转换器受温度的影响,造成温度变化时计量误差变大,在温度波动较大的环境(野外作业、工业现场)中温度补偿校准更加重要。校准之前要先定出温度系数,在不同的温度环境下进行校准,得到温度和偏差的对应关系,形成补偿表或者函数,保证在一定的温度范围内准确补偿^[5]。

以工业级数字万用表直流电压档温度补偿校准为例,该万用表需在 $-10\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 的宽温度范围下工作,其直流电压档 $100\ \text{V}$ 量程的温度系数为 $0.0005\%/^\circ\text{C}$,需要经过温度补偿校准来提高不同温度下的测量精度。在校准的过程中,用高低温试验箱模拟不同的温度环境,选择 $-10\ ^\circ\text{C}$ 、 $0\ ^\circ\text{C}$ 、 $23\ ^\circ\text{C}$ 、 $40\ ^\circ\text{C}$ 、 $60\ ^\circ\text{C}$ 五个温度点,在每一个温度点上,用FLUKE 5790A标准源输出 $50\ \text{V}$ 的标准电压,记录被校准万用表测得的电压值,求出各个温度点相对于 $23\ ^\circ\text{C}$ 基准温度的偏差。其中 $-10\ ^\circ\text{C}$ 时的偏差是 $+0.0\ 025\ \text{V}$, $0\ ^\circ\text{C}$ 时是 $+0.001\ \text{V}$, $40\ ^\circ\text{C}$ 时是 $-0.0\ 015\ \text{V}$, $60\ ^\circ\text{C}$ 时是 $-0.003\ \text{V}$ 。根据上述数据,创建温度偏差补偿函数,把补偿参数写进万用表的温度补偿模块中,模块利用内置的温度传感器实时地采集环境温度,然后带入补偿函数里去计算出修正值,对测得的结果进行实时的调节。校准完毕之后,在各个温度点上再做一次测量, $50\ \text{V}$ 标准电压的测量偏差都小于 $\pm 0.0\ 005\ \text{V}$ 之内,有效地抵消了温度变化对测量结果的影响,保证宽温度范围内测量精度稳定。

3.4 软件修正校准法

软件修正校准法是利用数字万用表内置的微控制器和软件系统来对计量偏差进行修正的一种校准方法,不需要拆解仪器或者改变硬件参数,只通过软件操作就可以完成偏差修正,适合于硬件结构比较复杂、不能拆卸的高精度万用表,并且可以做到动态校准和远程校准,是当前数字化校准的技术热点。该方法的关键在于通过校准得到各个量程、各个校准点的偏差数

据,把偏差数据存入仪器的非易失性存储器里。仪器在测量时,微控制器调用存储的偏差数据,采用插值法、非线性修正法等对测量值进行实时修正,同时可以配合软件滤波算法来减小随机误差,提高测量结果的稳定性。软件修正校准法可以同时修正系统的偏差和随机偏差,可以采用优化算法减小随机误差的影响,并且校准流程简单,能对大批量仪器进行快速校准,大大提高校准效率。

以某款智能数字万用表直流电压档软件修正校准为例,该万用表内置ARM Cortex-M4微控制器,支持通过USB接口上传校准数据与更新修正算法。校准之前用标准源对各个量程、各个校准点进行偏差测量,把测量到的偏差数据按照量程分类存入偏差数据库中。对于系统误差,使用分段线性插值法,根据测量值所在的区间,调用对应的区间偏差数据进行线性修正,提高修正的精度;对于随机误差,嵌入滑动平均滤波算法,对多次测量值做加权平均处理,消除瞬时干扰所引起的偏差。校准时,用专用校准软件读取万用表的测量数据和偏差数据,调整插值算法参数,保证修正后的测量值与标准值偏差满足要求。

4 结束语

数字万用表直流电压档的计量准确性作为电子测量领域的关键要素,关系到多行业测量结果的可靠性。随着技术的发展和应用范围的扩大,计量偏差问题也越来越突出,对校准技术提出了更高的要求。经过对系统偏差及随机偏差特性深入了解之后,采用标准源、多点、温度补偿、软件修正等方式来消除偏差、提高测量精度。这不但为数字万用表精确计量提供了强有力的支撑,也为电子测量行业规范化、标准化的发展奠定了重要的基础,促使测量技术向更高的层次迈进。

参考文献:

- [1] 朱玉微.高精度数字万用表校准技术进展与应用分析[J].中国机械,2025(22):121-124.
- [2] 楼健.数字万用表的测量不确定度评定[J].品牌与标准化,2025(04):286-288.
- [3] 刘义平,杜好岗,周恒,等.露点仪变送器修正值的校准及不确定度评定[J].计量与测试技术,2024,51(03):128-130.
- [4] 孙韦,于森,彭小红,等.基于数字多用表自动校准系统的研究现状分析[J].计量与测试技术,2023,50(07):61-63,66.
- [5] 侯毅,柴艳丽,王剑昆,等.基于视觉识别技术的手持式数字万用表自动校准装置[J].计测技术,2023,43(02):118-127.

大型起重船海上吊装动力学特性与稳性控制研究

史耀东

(中国铁建港航局集团有限公司新能源分公司, 广东 珠海 519000)

摘要 大型起重船是海洋油气与风电工程的核心装备, 其海上吊装作业的安全性与效率直接决定工程成败。本文研究起重船在复杂海况下的动力学特性与稳性控制问题。首先分析了起重船—柔性吊索—大型组块耦合系统所受的海洋环境载荷; 其次介绍了基于多体系统动力学的耦合建模方法, 并探讨了系统在波浪激励下的运动响应规律, 揭示了吊重参数、波浪频率与船舶运动的共振机理。在此基础上, 综述了以动力定位 (DP) 系统、压载调载系统为核心的主动稳性控制策略, 以及吊重摆动减摇控制技术; 最后提出了基于作业窗口预报与多系统协同的动力学—稳性综合优化框架。本文旨在为显著提升大型起重船在极端海况下的作业安全边界与操作效能提供参考。

关键词 大型起重船; 海上吊装; 耦合动力学; 运动响应; 稳性控制

中图分类号: U653.92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.041

0 引言

海洋工程向深远海、大型化发展, 海上安装需求增加, 大型起重船因为起吊能力大、灵活性好成为关键装备。但是海上环境复杂, 风浪流等载荷使起重船产生六自由度运动, 通过吊索引发组块摆动, 形成船、缆、物耦合系统, 具有强非线性、多自由度。相互作用增大吊装难度, 改变船舶载荷和运动, 影响稳性, 由于估计不足或者控制失效而发生事故。因此, 对动力特性进行准确的预报, 并且找到有效的稳定控制策略是当前的主要课题^[1]。本文对其研究进展进行了梳理, 从动力学建模理论、参数对运动响应和稳性的影响、主动与被动控制技术、智能化作业优化方向四个方面进行总结, 为相关实践提供参考。

1 海上吊装作业动力学建模

海上吊装作业本质上是多体耦合动力学的过程。建立能真实反映系统本质特性并适合工程分析的数学模型, 是开展动力学特性研究和稳性控制设计的前提。

1.1 系统构成与载荷环境

典型的海上吊装系统由三个部分组成: 起重船本身作为承载平台, 连接船体和被吊物的吊索系统 (吊钩、滑轮组、钢丝绳), 以及被吊的组块或者结构物。该系统的作业环境为开放的海洋, 受以下三种载荷激励:

1. 环境载荷: 风产生的持续作用力与力矩, 波浪

引起的船舶一阶振荡运动和二阶慢漂力, 海流带来的定常力。波浪载荷是造成系统耦合振荡的主要激励源, 它的特性可以用波浪谱 (JONSWAP 谱) 与船舶运动响应幅值算子 (RAO) 结合来描述。

2. 操作载荷: 主要是指起重船作业过程中, 由动力定位系统或者锚泊系统产生的主动推力或者系泊力, 用来抵抗环境载荷, 并保持船位。

3. 惯性载荷: 由于船舶运动、吊重摆动而产生的动载荷, 是耦合效应的直接体现。尤其当吊索长度很长的时候, 被吊物可以看成是一个大摆锤, 它的摆动周期会和波浪周期或者船舶的横摇、纵摇周期相近, 从而产生动力放大的效应。

1.2 耦合动力学建模方法

为了分析上述复杂系统, 需建立集总参数动力学模型。主流方法将起重船和大型组块视为刚体, 吊索系统则作为具有刚度、阻尼和质量属性的柔性连接单元, 通常采用拉格朗日方程或牛顿—欧拉法推导运动方程^[2]。

对于简化的平面内 (二维) 模型, 系统自由度一般包括起重船的纵荡 (或横荡) 和纵摇 (或横摇), 以及吊重相对于船体的摆动角。其动力学方程的一般形式为:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + K(q)q = F_{env} + F_{thr} + F_{cable} \quad (1)$$

作者简介: 史耀东 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 船舶工程、工程船施工。

式(1)中, q 为广义坐标向量; M 为系统质量矩阵(含附加质量); C 为科里奥利力与阻尼矩阵 K 为恢复力(矩)矩阵; F_{env} 为环境载荷向量; F_{thr} 为推力器控制力向量; F_{cable} 为吊索张力向量。该方程呈非线性, 主要源于质量矩阵与运动状态的耦合、阻尼的非线性特性, 以及吊索张力方向随摆角的变化。对于更精确的三维全耦合分析, 需考虑起重船六自由度运动与被吊物的三维空间摆动(面内、面外摆动)。此时常用耦合刚度法, 将船舶与吊物在吊点处视为铰接的两刚体, 建立九自由度(船舶六自由度加吊物相对摆动三自由度)耦合运动方程。此类模型能更真实地模拟横浪下船舶横摇与吊物横荡间的强烈共振。

近年来, 随着计算能力提升, 基于三维势流理论的水动力分析(AQWA、WAMIT)与有限元方法(ANSYS)的联合仿真成为研究热点。前者可精确计算船舶水动力系数与波浪载荷, 后者能细致分析吊臂、A型架等局部结构的柔性变形及其对整体动力学的影响, 从而提升动态性能预报的准确性。

2 耦合系统运动响应特性与稳性影响分析

根据建立的动力学模型, 采用数值仿真或者模型试验的方法, 可以深入研究吊装系统在不同海况和作业参数下的响应规律, 定量评价其对船舶稳性的影响。

2.1 关键参数敏感性分析

研究表明, 起重船一吊物耦合系统的运动响应幅值对多个作业与环境参数极为敏感。在特定参数组合下, 系统可能发生强烈的非线性耦合共振, 严重威胁作业安全^[3]。

1. 波浪激励频率: 当波浪的主频率接近船舶横摇固有频率时, 船舶会发生大幅横摇共振。更严重的是, 如果波浪频率接近吊物一吊索系统的摆动固有频率, 将引起船舶运动和吊物摆动的双重耦合共振, 使吊物产生剧烈的水平运动(横荡或纵荡), 吊缆动张力急剧增大。数值研究表明, 除了主共振(波浪周期与吊物摆动周期之比为1:1)外, 当吊物摆动周期与波浪周期之比达到2:1时, 系统还会出现显著的亚谐共振现象, 同样会导致吊物摆幅大幅增加。在实际海况中, 当有效波高达到1~1.5 m时, 吊物可能出现无法预测的大幅摆动, 通常迫使作业中断。据统计, 全球大部分海域适合吊装作业的时间窗口普遍低于正常作业时间的50%, 在中国东海水域这一比例仅为34%。

2. 吊索长度: 这是决定吊物摆动频率的主要参数。根据单摆原理, 吊物摆动周期为:

$$T=2\pi\sqrt{L/g} \quad (2)$$

式(2)中, L 为吊索长度, g 为重力加速度。吊

索越长, 固有周期越大。在涌浪等长周期波浪海域作业时, 当吊索长度超过25 m时, 其摆动周期将进入典型涌浪周期范围(约10~15 s), 与波浪发生共振的风险显著增加。吊索长度同时影响系统的阻尼特性, 进而影响摆动衰减速率。

3. 吊重质量: 吊重质量影响系统的惯性。质量越大, 船舶在起吊和回转过程中产生的横倾力矩就越大, 对初稳性高度(GM值)的瞬态削减效应也越明显。工程实践中, 当装卸重大件货物产生的横倾角可能超过3°时, 必须通过侧翼压载水舱进行调整以保证作业安全。此外, 大质量吊物的摆动动能很大(与质量成正比), 一旦失控, 对船舶和人员安全的破坏力也会更大。

4. 浪向角: 浪向角对系统响应应具有决定性影响。相比顶浪或随浪工况, 横浪(浪向角接近90°)是吊装作业的最不利工况之一。横浪直接激励船舶的横摇运动, 而横摇是与吊物摆动耦合最强烈的船舶运动模态。频域分析表明, 横荡幅值响应算子(RAO)的峰值随浪向角的增大而增大, 在横浪时达到最大; 而纵荡RAO峰值则随浪向角的增大而减小。横浪条件下, 船舶横摇与吊物摆动的耦合最容易引发系统的不稳定响应, 应尽可能避免在此浪向下进行大型吊装作业^[4]。

2.2 对船舶稳性的动态影响机制

吊装作业对船舶稳性的影响是动态且复杂的, 主要体现在两个方面:

1. 重心变化和横倾力矩。在起吊离地瞬间, 重量由外部支撑完全转移到船舶吊钩上, 造成船舶重心瞬间升高, 初稳性高度GM值减小。吊臂做回转动作时, 由于吊重水平移动所产生的一组连续的静态横倾力矩会使船体产生一个固定的横倾角。稳性损失在起吊超大件货物的时候更加明显^[5]。

2. 动力倾覆力矩。在波浪环境下, 船舶的摇荡运动与吊重的摆动相结合, 就会产生周期性的动力倾覆力矩。尤其在发生共振的时候, 动力力矩的幅值会比静态力矩大得多。动力效应会大大消耗船舶的稳性储备, 使它在动态情况下有效复原力矩减小, 增大倾覆的风险。国际海事组织(IMO)第二代完整稳性平衡中有关瘫船稳性等问题, 在起重船作业时需要特别评估。

因此, 吊装作业稳性评价要由静态计算扩展到动态稳性评价, 考虑时变环境载荷和耦合动力响应, 才能真实反映作业期间安全裕度。

3 稳性控制策略与技术

为了保证吊装作业的安全, 必须采取综合性的稳性控制措施, 这些措施主要是围绕船舶运动与位置控制、抑制负载摆动这两个目标进行的。

3.1 船舶运动与位置控制

动力定位 (DP) 系统, 对于没有锚泊限制的起重船来说, DP 系统就是保持其预定船位和艏向的关键。现代 DP 控制系统采用分层结构, 上层控制器根据位置、艏向偏差来计算所需要的总控制力和力矩, 下层推力分配器把指令优化分配给各个推进器^[6]。为了克服吊装耦合动力学的复杂性, 先进的控制算法被引入, 模糊 PID 控制器可以依据运动误差以及变化率来在线调节控制参数, 提高鲁棒性, 结合遗传算法等优化算法进行推力分配, 可以提高效率, 减少能耗。DP 系统通过抑制船舶低频漂移运动给吊装作业提供一个相对稳定的平台。

3.2 吊重摆动抑制技术

抑制吊重摆动可提升作业精度与安全性。除优化船舶运动减少激励外, 直接控制负载的技术也迅速发展。

1. 被动减摇: 在吊钩与负载间安装机械减摇框架或液压阻尼装置, 通过增大阻尼以消耗摆动能量。该方法简单可靠, 但对大幅值、低频摆动效果有限。

2. 主动减摇。输入整形技术通过预处理卷扬或变幅指令, 生成抵消摆动的运动轨迹。更先进的并联绳索驱动稳定装置, 采用多根独立收放的辅助缆绳, 既可提供阻尼, 又能主动施加控制力, 使负载在海浪扰动下保持相对空间静止。有研究设计的并联绳索驱动吊重限位机构, 配合自适应抗摆张力控制方法, 经仿真与试验验证, 在模拟 5 级海况、吊重 20 吨条件下, 负载摆幅降低 80% 以上, 显著提升了高海况作业能力^[7]。

4 动力学与稳性综合优化及展望

未来大型起重船吊装作业的发展趋向于智能化、自主化、极限化。这就要求动力学分析、稳性控制和作业决策三者更深层次的融合。

4.1 基于数字孪生的作业窗口动态预报

创建高保真动力学模型、实时环境感知数据 (气象预报、船载传感器)、船舶控制系统三者组成的数字孪生平台。在实际作业前和作业过程中, 该平台可以进行快速、高精度的实时或者准实时的仿真, 可以动态预测未来几个小时特定海况下船舶运动、吊重摆动、吊缆张力和稳性指标的变化。根据预测结果可以科学地决定作业窗口, 判断目前和近期是否满足安全作业条件, 并提前预警潜在的风险。

4.2 多系统智能协同控制

未来的控制核心将会是各个子系统 (DP、压载、起重机) 的各自为政, 转变为全局的协同优化控制。

智能化的协同控制器会接到统一的目标 (安全、精准、节能), 并调配所有执行机构。当预测出大浪将产生不利耦合运动的时候, 控制器可以协同控制 DP 推进器产生一个补偿力矩, 并微调压载水的分布, 命令起重主动减摇装置做好准备, 实现多系统联动的前馈—反馈复合控制, 最大程度上发挥整体性能。

4.3 面向第二代完整稳性衡准的评估与控制集成

IMO 第二代完整稳性衡准发展之后, 恶劣海况下动力失稳模式 (参数横摇、瘫船稳性失效等) 的评价将会成为强制性要求。研究起重船在吊装作业的特殊装载工况下遇到极端动力现象的风险, 把评价模型直接嵌入控制系统中, 实现稳性风险的在线实时评估与预防性控制, 将会是保证未来超大型起重船深远海安全作业的重要课题。

5 结束语

大型起重船海上吊装作业复杂, 需深入认识耦合动力学特性和精准控制船舶稳性。研究显示, 起重船—吊索—重物系统在波浪中呈现非线性和共振特性, 受波浪频率、吊索长度和浪向影响。吊装作业动态影响稳性, 包括静态损失和动力倾覆风险, 需动态评估。现代稳性控制集成 DP 系统、智能压载和主动减摇技术, 自适应抗摆控制等新技术有应用潜力。未来, 依托数字孪生、智能协同和集成控制, 可实现主动预判和全局优化, 提升恶劣海况作业能力。随着技术的进步, 海上吊装作业的安全性、经济性和适应性将不断提升, 为海洋资源开发提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 骆寒冰, 黄一峰, 姚光启, 等. 动力定位起重船尾吊上部组块耦合运动响应研究 [J]. 中国造船, 2024, 65(05): 1-13.
- [2] 付玉平. 重吊船双吊联动规划与稳性研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021.
- [3] 张志敏, 陈雷. 大型船舶装载和风浪条件下的稳性校核与分析 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 65-68.
- [4] 杨薛亮, 陈光俊, 崔峰浩, 等. 3600 t 全回转浮式起重船海上吊装作业运动响应 [J]. 造船技术, 2025, 53(01): 7-11.
- [5] 骆寒冰, 龙禹, 屈湛博, 等. 动力定位起重船吊装海洋平台组块耦合运动响应模拟 [J]. 中国造船, 2022, 63(06): 88-100.
- [6] 龙禹. 波浪中动力定位起重船吊装海洋平台组块作业耦合运动响应研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [7] 任昭鹏, 黄哲, 魏一, 等. 绳驱动限位式吊重稳定装置动力学及试验研究 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(05): 26-37.

机器学习去噪技术在低信噪比地震资料处理中的应用研究

汤连盟

(安徽省煤田地质局物探测量队, 安徽 宿州 234000)

摘要 低信噪比地震资料的有效处理, 是地球物理勘探的核心技术难题。本文针对传统去噪方法应对复杂噪声环境的局限性, 系统研究了基于深度学习地震资料去噪技术。通过构建整合卷积神经网络和残差学习的去噪模型, 实现对随机噪声、相干噪声的智能识别及分离。测试结果证明, 该方法在信噪比提升、有效信号保真度等方面显著优于传统滤波技术, 为低信噪比地震资料的高质量处理提供了新的技术路径。

关键词 地震资料去噪; 低信噪比; 卷积神经网络; 残差学习; 信噪比提升

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.042

0 引言

复杂地质条件下获取的地震数据多受环境噪声、仪器干扰等多种因素影响, 显现低信噪比特性, 严重制约后续处理和解释工作的精度。针对特定类型噪声, 传统去噪方法能发挥一定处理效果, 但面对非平稳、非线性的复杂噪声环境, 难以实现信号和噪声的精准分离。机器学习技术在图像处理、信号分析等方面展现出极强的特征学习能力, 为地震资料去噪提供了全新的解决方向。

1 机器学习去噪技术基础与地震资料特征分析

1.1 机器学习去噪技术原理

机器学习去噪的核心在于通过大量训练样本学习噪声与有效信号的内在分布特征, 建立从含噪数据到纯净数据的非线性映射关系。深度卷积神经网络通过多层特征提取与抽象, 能够捕捉地震信号在时间-空间域的复杂模式。

残差学习框架将去噪任务转化为噪声残差的估计问题, 网络学习目标函数可表示为:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|R(X_i; \theta) - N_i\|^2 \quad (1)$$

式(1)中, X_i 为含噪地震数据, N_i 为噪声分量, $R(X_i; \theta)$ 为网络预测的噪声残差, θ 代表网络参数, N 为训练样本数量。

这种学习策略使网络专注于噪声特征的刻画, 避免了直接预测纯净信号可能导致的细节丢失问题。相

比于直接回归方式, 在地震去噪上, 残差学习方式在地震去噪任务中具有明显优势: 网络输出近似零均值, 参数优化更稳定; 跳跃连接可以保证信号低频部分不受损失地传递到下一层, 从而使网络能够有效去除噪声的同时维持波形整体形态。

1.2 低信噪比地震资料噪声类型与特征

低信噪比地震资料中的噪声呈现多源性 with 复杂性特征。随机噪声表现为宽频谱、无规律的振幅扰动, 在时频域均匀分布, 与有效反射信号在频率域存在部分重叠^[1]。相干噪声(面波、声波等)具有特定的频散特性和视速度, 在共炮点道集中呈现规律性线性同相轴。工业电噪声则表现为特定频率的周期性干扰, 在频谱上形成尖锐的能量峰值^[2]。这些噪声类型在实际资料中往往交织出现, 单一噪声模型难以全面描述其统计特性, 这对去噪算法的自适应能力提出了更高要求。

1.3 传统去噪方法及其局限性

传统滤波技术基于信号与噪声在特定变换域的可分性假设开展去噪处理。频率域滤波通过设计带通滤波器抑制特定频段噪声, 但在信噪频谱重叠区域容易造成有效信号损伤^[3]。小波变换利用多尺度分解实现时频局部化分析, 通过阈值处理去除小波系数中的噪声成分, 然而阈值选取缺乏自适应性, 难以兼顾不同地质目标的保护需求。预测滤波方法假设有效信号具有可预测性而噪声为随机分量, 但在低信噪比条件下预测算子容易受噪声污染导致性能退化。

作者简介: 汤连盟(1997-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地球物理勘探。

2 机器学习去噪技术在地震资料处理中的应用设计

2.1 地震数据预处理与训练样本构建

高质量训练样本是机器学习去噪模型性能的基础保障。针对地震资料的特殊性,采用合成数据与实测数据相结合的样本构建策略。合成样本通过褶积模型生成理论地震记录作为纯净标签,叠加不同类型、不同强度的噪声形成含噪输入,确保样本覆盖多种噪声场景。为了提高合成样本与实际地质情况的一致性,在添加噪声时要根据实际情况给定信噪比取值范围并且加入随机噪声相关长度、相干噪声视速度等物理限制,使得合成样本具有尽可能符合实际采集环境统计性质的特点。实测样本的构建则利用高信噪比叠加剖面作为近似纯净标签,从原始单炮记录中提取对应位置数据作为含噪样本,这种配对方式虽然标签存在一定误差,但能够反映真实噪声的统计特性。数据预处理阶段对地震道进行归一化处理,将振幅映射至 $[-1, 1]$ 区间,消除不同测线间的幅度差异对模型训练的干扰。考虑到地震数据的时空连续性,将相邻若干道组合成二维数据块作为网络输入,既保留了横向相干信息,又控制了计算复杂度。

2.2 针对地震噪声特征的机器学习模型设计

模型架构设计充分考虑地震信号的时空耦合特性与噪声多尺度分布规律。采用编码器—解码器结构实现特征的渐进抽象与重构,编码路径借卷积层和池化层逐步挖掘深层语义特征,解码路径借反卷积恢复空间分辨率。在编码器各层引入残差连接单元,改善深层网络的梯度消失问题,提升特征传播效率。注意力机制融入编解码器跳跃连接路中,在通道注意力以及空间注意力相互配合下,对有效反射信号所在频率范围及位置进行加权,降低噪声占据优势位置对于解码器的影响,从而在特征级别实现更精细的信噪分离。为捕捉不同尺度的噪声成分,设计多分支并行卷积模块,各分支搭配不同感受野尺寸的卷积核,提取局部细节噪声特征及大尺度相干噪声特征,通过特征融合层整合多尺度信息^[4]。网络输出层依托线性激活函数直接输出噪声残差估计值,去噪结果由输入数据减去预测残差获得。损失函数在均方误差基础上引入感知损失项:

$$L_{total} = L_{MSE} + \lambda L_{perceptual} \quad (2)$$

式(2)中, $L_{perceptual}$ 度量去噪结果与标签在特征空间的差异, λ 为权重系数。这种设计促使模型在降低噪声的同时保持地震信号的相位连续性与振幅特征。

2.3 模型训练、优化与调参流程

训练阶段用 Adam 优化器更新网络参数,初始学习率设为 10^{-3} ,每间隔 20 个 epoch,依据指数衰减策略

把数值降到原值的 0.5 倍,保障模型训练后期稳定收敛。为防范过拟合出现,在全连接层引入 Dropout 正则化,丢弃率设为 0.3。数据增强策略包括随机水平翻转、时间轴微小延迟、振幅随机缩放,增加训练样本多样性,提高模型匹配不同采集条件的能力。验证集管控训练环节,连续 10 个 epoch 验证损失未下降即触发早停机制,防止无效训练浪费。超参数调优采取网格搜索与贝叶斯优化结合的方式,重点优化网络深度、卷积核数量、感知损失权重等关键参数,通过交叉验证研判不同配置的去噪性能,最终确定使网络兼顾信噪比提升和细节保真的最优参数组合。

2.4 去噪处理系统集成与结果输出

实际应用中将训练好的模型加入地震资料处理流程,搭建端到端去噪处理系统。系统接入 SEG-Y 格式地震数据,自动完成数据格式转换、分块处理及结果拼接等操作。针对大规模三维地震数据体,采用滑动窗口策略做分块处理,各窗口设重叠区域,消除边界效应,加权平均融合重叠部分的去噪结果^[5]。处理完成后输出三类内容:去噪后地震剖面、噪声残差剖面、定量评价指标。定量评价用信噪比增益、均方根误差以及结构相似性指数等多维度指标开展,全面检验去噪效果。系统设计了可视化交互界面,可实时调整参数并对比显示结果,方便处理人员结合实际地质目标调整处理参数(见图 1)。

3 实验验证与案例分析

3.1 实验资料来源与工区概况

实验选取西部某盆地三维地震勘探资料开展验证分析。该工区地表条件复杂,戈壁覆盖区与山前带交替分布,地震波激发接收条件差异显著,导致采集资料信噪比普遍偏低。目的层为中生界碎屑岩储层,埋藏深度 3 500 ~ 4 200 m,有效反射信号频率主要集中在 15 ~ 45 Hz 频段,而环境噪声频谱范围宽达 5 ~ 80 Hz,信噪频带严重重叠。选取代表性测线原始单炮记录 200 炮用于训练集构建,叠加剖面 20 km 作为测试数据,评估模型在实际复杂条件下的去噪能力。

3.2 去噪处理效果分析

机器学习去噪处理后的单炮记录显示,原始资料中淹没于强背景噪声的弱反射同相轴得到有效恢复,信号连续性明显改善。定量统计表明,处理后单炮记录的平均信噪比从原始的 -2.3 dB 提升至 8.7 dB,信噪比增益达到 11 dB。叠加剖面对比更加直观地展现了去噪效果,深层反射界面的成像清晰度显著提高,原本模糊不清的断层特征在去噪剖面上呈现出清晰的错

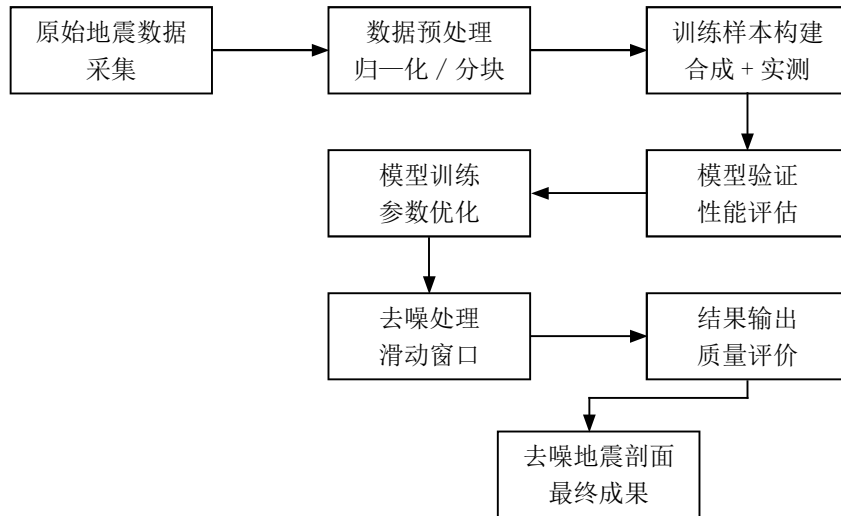


图1 机器学习去噪处理流程图

断关系。频谱分析显示,有效信号频段能量得到保留,而噪声主导的低频与高频成分被有效压制,频谱结构更加合理。振幅保真度检验通过对比去噪前后相同界面的反射振幅,统计误差控制在5%以内,说明模型在噪声抑制的同时较好地保持了地震信号的动力学特征,为后续振幅类属性解释提供了可靠的数据基础。

3.3 不同去噪方法处理效果的对比分析

为客观评价机器学习方法的优势,对比了带通滤波、小波阈值去噪以及传统预测滤波的处理效果。表1汇总了不同方法的定量评价指标。

表1 不同去噪方法性能对比

去噪方法	信噪比增益 (dB)	均方根误差	结构相似性指数	处理时间 (min/km)
带通滤波	4.2	0.183	0.726	0.8
小波阈值去噪	6.5	0.157	0.801	2.3
预测滤波	7.8	0.142	0.835	3.1
机器学习方法	11	0.098	0.912	1.5

从对比结果看,带通滤波由于频谱重叠导致去噪能力受限,虽然处理效率最高但信噪比提升仅4.2 dB,且对有效信号造成了明显损伤,结构相似性指数较低。小波阈值方法通过多尺度分解改善了去噪效果,但固定阈值策略在不同噪声水平区域适应性差,部分强能量噪声残留明显。预测滤波在相干噪声压制方面表现较好,但计算复杂度高,处理效率偏低。机器学习方法在各项指标上均显著优于传统方法,特别是在结构相似性指数上达到0.912,表明其在强力去噪的同时最

大程度保持了地震信号的原始特征,这得益于深度网络从大量样本中学习到的信噪分离规律,具备更强的自适应能力与泛化性能。

4 结束语

本文系统探究了机器学习去噪技术在低信噪比地震资料处理中的实际运用,构建基于残差学习的深度去噪网络,通过实际资料验证了方法的有效性。测试结果证明,该技术在信噪比提升、信号保真度等方面均优于传统方法,信噪比增益达到11 dB,为复杂条件下地震资料的高质量处理提供了新的技术手段。随着训练样本持续扩充和网络结构不断优化,机器学习去噪技术将在地震勘探工作领域发挥更加重要的作用,推动地震资料处理技术向智能化发展。

参考文献:

- [1] 赵玉星,李月,杨宝俊,等.基于深度学习的分布式声学传感垂直地震剖面数据耦合噪声压制技术[J].地球物理学报,2025,68(05):1922-1933.
- [2] 刘威,徐振旺,未晔,等.基于DnCNN与多尺度特征提取的地震数据去噪方法[J].西安石油大学学报(自然科学版),2025,40(01):18-31.
- [3] 高磊,乔昊炜,梁东升,等.融合梯度预测和无参注意力的高效地震去噪Transformer[J].计算机科学与探索,2025,19(05):1342-1352.
- [4] 王若雯,宁媛丽,赵威,等.松辽盆地西南部低信噪比地震资料精细处理技术研究及应用[J].中国矿业,2025,34(S1):613-619.
- [5] 邹少峰.黄土塬探区低信噪比资料振幅补偿方法应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):159-161.