

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 5 月 第 14 期 (总第 639 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 15 日

定价：人民币 15 元

版权声明：

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

目录 Contents

科技博览

- 001 螺旋槽球轴承静态特性数值模拟研究
..... 盛 誉
- 004 光纤光栅形状感知赋能智能机械手研究综述
..... 王思文, 孙浩然, 赵春园
- 007 微细电火花加工微深槽类零件工艺技术研究
..... 魏国锋, 毕可明
- 010 混凝土耐久性评估模型及其工程应用研究
..... 宁 涛
- 013 面向智能电网的配电网自动化关键技术分析
..... 徐 正
- 016 Al 掺杂 ZnO 纳米线阵列紫外光探测器的特性与制备
..... 李向前

智能科技

- 019 机电一体化技术在智能制造中的应用研究
..... 马思颖
- 022 基于数字孪生技术的供暖系统仿真与优化研究
..... 柴 巍
- 025 基于在线监测数据的电力电缆局部过热诊断方法研究
..... 张嘉昊
- 028 工程质量检测数据的智能化分析与风险预警机制研究
..... 张钰敏
- 031 基于边缘计算的电气自动化设备实时监控与故障预测技术
..... 唐贺龙
- 034 基于大数据的化工机电泵组故障预测与智能化维护策略研究
..... 王成鑫, 杨晨晖

应用技术

- 037 高层建筑外墙保温施工技术要点分析
..... 李建鹏
- 040 既有建筑结构检测与加固施工技术研究
..... 马 念

目录 *Contents*

043	房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术研究	刘坤
046	超高层建筑核心筒爬模施工精度控制问题分析	李龙基
049	新型建筑材料在建筑工程施工技术中的应用分析	郑露雨, 汪加加, 李叶
052	房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术要点研究	李蕊
055	房屋建筑主体结构钢筋混凝土施工技术及其质量控制	陈荣娜
058	悬挑脚手架施工技术在高层建筑工程施工中的应用研究	张灵德

科创产业

061	低碳目标下公共建筑节能设计策略	吴颂军
064	市政给排水管道布设设计及优化建议	徐云畅
067	装配式建筑施工技术的现状与发展趋势	沈永飞, 赵飞, 韩琳
070	数字化管理对减速电机生产效率的提升路径研究	王传强, 马文迪
073	电力建设中分布式光储运营效率提升路径分析	涂建
076	数字化背景下光伏储能项目管理模式创新与实践研究	黄戴特, 曾志春, 徐高照
079	城镇集中供热系统热能损耗治理与节能运行优化路径研究	闫冬梅, 宋涛, 周长兴

技术管理

082	山区高速公路隧道机械化施工技术分析	张云博
085	BIM技术在隧道施工智能管理中的实践研究	韦世顺
088	建筑工程管理与施工质量控制优化路径研究	汪德跃
091	市政道桥工程沥青路面裂缝施工处理技术分析	王付鹏
094	桥梁墩柱混凝土外观质量预防与缺陷处理技术	魏开颜
097	公路施工中土石混填路基压实施工技术的应用分析	邱豪
100	超高层建筑施工中的总承包方现场管理难点与对策	贾晓磊
103	中小型水闸除险加固施工关键技术与管理模式创新研究	邹江威

科学论坛

106	机电设备运行维护及检修策略探究	刘学彦
109	多风地区风电机械化施工关键技术研究	吴杰, 莫方强
112	软土地基处理技术在道路工程中的重要性	安守慧, 刘志刚, 王敏
115	雷电气象灾害对风电设备的影响与防护对策	李学伦, 黄小妹
118	水利工程混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术研究	刘颖颖, 韩钦昌
121	面向低碳目标的大体积混凝土结构建造技术路径研究	史如友, 张丽
124	塑性混凝土防渗墙槽段长度对墙体接缝质量的优化研究	龙永钊

螺旋槽球轴承静态特性数值模拟研究

盛 誉

(核工业理化工程研究院 粒子输运与富集技术全国重点实验室, 天津 300180)

摘 要 为了建立螺旋槽球轴承运行参数与静态特性之间的影响关系, 本文针对大承载专用装备中的螺旋槽球轴承开展了系统的静态特性数值研究。采用基于 CFD 的三维数值模拟方法, 对承载能力、摩擦损耗等静态特性的变化规律进行了分析计算。探讨了螺旋槽结构对油膜形成机制和动压效应的影响。结果表明, 螺旋槽结构可有效增强润滑膜的动压承载能力, 在相同工况下显著提升轴承的稳态承载特性; 同时, 其表面槽型结构也对摩擦功耗产生明显影响, 随着转速的升高, 球轴快速浮起后缓慢下沉, 随后进入相对稳定的运行状态, 摩擦损耗不断增大。本文的数值计算不仅深化了对螺旋槽球轴承动压形成机理与流动特性的理解, 也为大承载专用装备轴承的结构设计、参数匹配及系统运行稳定性评估提供了理论参考。

关键词 螺旋槽球轴承; 静态特性; 数值模拟; 参数设计

中图分类号: V231.9; TB123

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.001

0 引言

螺旋槽球轴承具有重承载、零磨损的特点, 是大型专用装备的重要组成部分。近年来, 基于 CFD 的数值模拟方法已成为轴承特性理论研究主要采用的方法。贾晨辉等采用数值模拟方法对螺旋槽球轴承的承载能力进行了研究, 给出了结构参数和运行参数对承载性能的影响规律; 高峰等人对球面有无螺旋槽的气浮轴承特性进行了仿真分析, 结果表明有螺旋槽情况下压力分布更均匀, 更有助于电机稳定的高速旋转。杜彩凤基于轴承的动态特性对其稳定性进行了分析, 计算结果为轴承在复杂运行环境中的稳定性提供了理论预测。黑棣等针对温度场控制方程及其便捷条件, 采用有限元法进行求解, 得到了滑动轴承油膜的温度场和粘度场, 研究了油膜温度场和粘度场随轴承参数的变化趋势, 加深了对润滑油粘温效应的研究。大承载专用装备的运行工况复杂, 轴承需在高转速、变载荷条件下长期稳定工作, 其静态特性直接决定装备的整体运行精度与服役寿命, 而螺旋槽的结构设计与润滑介质的特性耦合对轴承性能的影响机制仍需进一步量化分析。为了满足大型专用装备轴承设计的迫切需求, 本次工作拟开展基于 CFD 技术的螺旋槽球轴承静态特性数值研究。本研究建立了数值仿真模型, 选取计算方法以及进行方法验证, 开展了详细的数值仿真计算, 得出了静态特性与运行参数之间的影响关系, 对于掌握螺旋槽球轴承的特性规律具有十分重要的意义^[1]。

1 润滑油的粘温特性

在轴承润滑理论中, 润滑油最重要的物理指标是粘度。润滑油的粘温效应指的是润滑油的粘度随温度变化而变化的物理现象。其核心规律是: 温度升高, 粘度降低; 温度降低, 粘度升高。这是润滑油最重要的特性之一, 直接影响专用装备部件的润滑效果和保护性能。因此, 润滑油粘度与温度之间的量化关系很重要^[2]。润滑油的粘度—温度特性可用实验测定, 测定润滑油粘温特性曲线本质上就是测量油样在多个不同温度下的粘度值, 然后将这些数据点绘制在坐标图上并连成曲线。实验室里最常用的是毛细管粘度计法, 也是许多国际标准采用的方法。其原理是测量一定体积的油样, 在严格恒定的温度下, 因重力自然流经一根标准毛细管所需的时间。粘度越大, 流动越慢, 所需时间越长。常见的经验公式有沃尔泽粘温方程、泊瑟尔粘温方程、雷诺粘温方程、斯洛特粘温方程等, 通常采用雷诺粘温方程用于轴承计算。

雷诺粘温方程如公式 (1) 所示。

$$\eta = \eta_0 e^{-\beta(T-T_0)} \quad (1)$$

式 (1) 中: η_0 、 T_0 表示温度 T_0 时的动力粘度 η_0 。

2 建模与网格划分

本文所研究的流场区域为润滑油所在的空间, 球轴悬浮于轴窝上方, 浸润在充满润滑油的油腔中。采用结构化形式对流场进行网格划分。由于螺旋槽内区

作者简介: 盛誉 (1988-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 轴承设计。

域和油腔内其余区域是相对独立的,因此可分别进行网格划分,再将两部分网格进行对接。螺旋槽球轴承是一个周期性对称结构,对一个槽内区域进行网格划分,在环向进行网格复制。

螺旋槽内区域网格和油腔内其余区域网格对接时,需要在边界条件中对界面进行定义。一对交界面的网格可以划分得不一樣,计算过程中自动在重叠的部分进行变量的插值和传递。如果界面两侧网格尺寸差别过大会影响计算精度和求解效率,但影响程度相对较小,可以忽略这些影响^[3]。

3 计算方法

3.1 控制方程及边界条件

1. 控制方程。本文求解的方程有质量守恒方程和动量守恒方程,由式(2)和式(3)给出。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (3)$$

式(2)、(3)中, ρ 为流体密度; t 为流动时间; V 是速度矢量; p 是流体微元体上的压力; τ 是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力张量; ∇ 为梯度算子,在三维直角坐标系中 $\nabla \Phi = (\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \frac{\partial \Phi}{\partial z})$ 。

2. 边界条件。为了方便阐述,将几何模型分为三个独立部分进行边界条件说明,油腔上方与侧方定义为压力出口;轴窝定义为静止壁面;小球定义为旋转壁面;螺旋槽内表面定义为旋转壁面;螺旋槽的虚拟外表面定义为界面^[4]。

3.2 油膜粘度计算方法

轴承运行期间,油膜粘度显著地影响轴承性能,因此为了反映出真实的物理状态,必须考虑到热力学过程中油膜粘度的变化。为了得到全转速下相应的油膜粘度,首先拟合了转速与油膜温度的关系曲线,再利用雷诺粘温方程,建立起转速与油膜粘度的关系。油膜粘性—轴承转速关系的近似表达式,如式(4)所示。

$$\mu = 0.4366e^{-0.06294(0.018\Omega+20)} \quad (4)$$

式(4)中, μ 为油膜粘性系数,kg/(m·s); Ω 为轴承转速,s⁻¹;将式(4)应用于本文的数值模拟计算中。

3.3 轴承静态特性计算方法

螺旋槽球轴承的静态特性包括稳定运行时的压强分布、承载力以及摩擦损耗。将表面压强进行积分后

在轴向的分量即为轴承的承载力;单位时间内油膜对轴承表面的摩擦力所做的功即为轴承的摩擦损耗。本文采用基于有限体积法的SIMPLE算法求解压力—速度耦合方程组。针对轴承流场中压力变化剧烈的特点,采用二阶迎风格式离散对流项,中心差分格式离散扩散项,确保计算精度与稳定性。压力插值采用PRESTO格式,有效避免非物理压力振荡。考虑到油膜流场的低马赫数特性(通常小于0.3),采用不可压缩流体假设,但保留密度随温度的弱变化以考虑热膨胀效应。轴承静态特性的求解从无扰动流场的计算开始,计算收敛后直接输出轴承的压强分布、承载力和摩擦损耗^[5]。

4 网格无关性验证

网格无关性验证是指在流体动力学模拟中,通过不断细化网格,直到继续加密网格对计算结果的影响微乎其微的过程。其核心目的是消除网格数量带来的数值误差,确保模拟结果反应的是物理现象本身,而非特定网格下的产物^[6]。

螺旋槽球轴承的螺旋槽和油膜是螺旋槽球轴承的重要计算区域,所以在对槽区和油膜区域径向方向进行网格划分时,应进行加密处理。在确定径向网格节点数之前,首先应确定计算所用网格的网格数量与计算结果之间无关联性,也就是要进行网格无关性验证工作。随着油膜和槽区径向网格节点数的增加,承载能力计算值增大;当网格节点数从11增加到13时,承载能力变化很小,可认为已达到网格无关,因此油膜和槽区径向设置11个网格节点。

5 轴承静态特性分析

5.1 研究思路

在不同转速阶段,转速、油膜粘度和球轴浮起高度均是影响轴承静态特性的变量。本文的研究思路是,首先采用单一变量原则,分别分析转速、油膜粘度和浮起高度对轴承静态特性的影响;根据试验中获得的转速下轴承的承载力,计算出不同转速下浮起高度变化和相应的轴承摩擦损耗变化。

5.2 影响因素分析

随着转速的升高,轴承的承载能力和摩擦损耗分别呈正比例函数和抛物线函数增加。

随着油膜粘度的升高,轴承的承载能力和摩擦损耗均呈正比例函数增加。

随着浮起高度的上升,轴承的承载能力和摩擦损耗均迅速减小;但浮起高度越高,承载能力和摩擦损耗的变化速度越慢^[7]。

图 1 是试验测得的不同转速下, 轴承承载力的变化曲线。随着转速的升高, 承载力先后经历迅速增加、迅速下降、缓慢下降的过程。

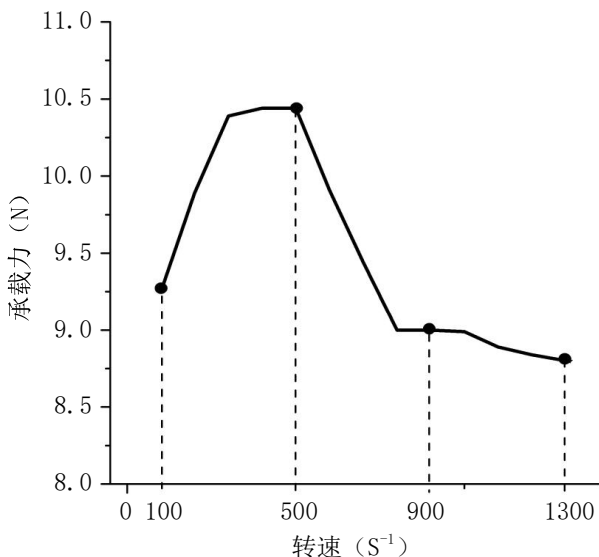


图 1 承载力试验结果

按照图 1 的承载力数据建立轴承的轴向平衡条件, 得到无扰动情况下不同转速下的轴承表面压强分布, 压强分布具有三个特点: 第一, 轴承在无水平扰动情况下运转, 压强在环向呈周期性分布, 提高了轴承的稳态承载特性; 第二, 轴承下表面压力均高于上表面压力, 形成向上的承载力; 第三, 压强极值点出现在槽台交界之处, 这是因为螺旋槽的存在很好地实现了轴承的动压效应。

当水平方向上出现位移扰动或速度扰动后, 轴承表面的压强分布特点发生了显著变化, 以转速 $\Omega=500 \text{ s}^{-1}$ 的情况为例, 随着水平位移扰动量的增加, 压强分布的不对称现象愈发明显, 进油楔一面油膜受挤压的范围越来越大, 导致该侧压强越来越大。

在不同转速下, 随着转速的升高, 浮起高度先快速增加, 转速 $\Omega=900 \text{ s}^{-1}$ 时, 达到最大值, 后缓慢下降。浮起高度存在峰值的原因在于随着转速的增加, 油膜粘度不断下降, 导致浮起高度随转速并非单调变化的。

在本文所计算的范围内, 随着转速的升高, 摩擦损耗快速增加。同样, 由于油膜的粘温效应, 轴承摩擦损耗与转速的关系不再遵循抛物线规律。

6 结论

本文开展了大承载专用装备螺旋槽球轴承静态特性的数值研究, 从中得到如下结论:

1. 本文以流体动压润滑理论为基础, 在大承载专

用设备用螺旋槽球轴承油膜流场数值计算模型中引入了润滑介质粘温特性的影响, 即润滑油粘度随温度及压力的变化是非线性的关系来提升仿真结果准确性。对轴承油膜流场进行了全区域数值仿真计算得到了一套针对大承载专用设备用螺旋槽球轴承静态特性的综合分析手段, 为以后结构优化设计提供参考依据。

2. 螺旋槽球轴承表面压力分布结果显示, 由于存在螺旋槽结构, 在其转动时会产生较大的动压效应, 在收敛处形成一个高压区, 从而提高了轴承的稳态载荷能力。相对于普通的光滑球轴承而言, 螺旋槽结构对油膜承载均匀性以及稳定性都有很大的改善作用。随着转速上升, 球轴承有“快速浮起—缓慢下沉”的两种现象发生: 在刚开始转动的时候, 由于动压效应加强使得球体快速抬起; 而当转速进一步提高后, 由于温度升高造成润滑油粘度降低, 球体会略微下落一点, 在此期间摩擦损失不断增加, 也说明了高速情况下轴承静态特性的变化规律。

3. 本文提出的螺旋槽球轴承静态特性分析方法, 在几何结构及润滑介质性质的基础上, 有较好的工程实用性和理论可靠性。得到了螺旋槽结构提高承载能力的原因以及粘温效应对于高速运转稳定性的影响规律等结论, 可以为大载荷专用设备轴承的结构设计、润滑方式的选择提供参考依据, 有利于提高设备的承载能力、运行可靠性及其使用寿命等, 具有较大的工程指导意义。

参考文献:

- [1] 申智伟, 殷玉枫, 袁月茹, 等. 考虑热效应的螺旋槽径向气体轴承承载特性 [J]. 润滑与密封, 2025, 50(11): 71-77.
- [2] 朱东南, 高鹏, 张璐. 组合槽长式人字槽径向气体轴承的静态特性分析 [J]. 机电工程, 2025, 42(09): 1669-1679.
- [3] 唐杰, 殷玉枫, 张鑫, 等. 螺旋槽气体轴承窄槽理论方程的扰动系数修正及润滑特性分析 [J]. 润滑与密封, 2024, 49(11): 41-51.
- [4] 袁月茹, 殷玉枫, 唐杰, 等. 槽型参数对螺旋槽气体止推轴承摩擦损耗的影响 [J]. 润滑与密封, 2025, 50(10): 121-128.
- [5] 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.
- [6] 黑隼, 郑美茹. 基于粘温效应滑动轴承润滑特性分析 [J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(02): 135-142.
- [7] 杨林家, 方舒畅. 基于 FLUENT 的弯曲方管网格无关性验证 [J]. 北部湾大学学报, 2023, 38(02): 63-69.

光纤光栅形状感知赋能智能机械手研究综述

王思文, 孙浩然, 赵春园

(吉林交通职业技术学院, 吉林 长春 130012)

摘要 智能机械手在狭小封闭场景中开展实时形态监测时, 光纤光栅形状感知技术可提供全新的解决路径。本文围绕传感原理、重构算法与系统集成三个方向, 梳理了该领域的现有研究进展。在原理维度上, 针对FBG阵列、多芯光纤、OFDR三类技术, 对比了三者在精度、实时性与集成度上的优劣; 在算法维度上, 整理了相关技术方案从微分几何经典框架过渡到机器学习驱动方法的发展路径; 在集成维度上, 分析了表面贴附、嵌入式封装等布设方式对机械手性能的实际影响。最后探讨了扭转分离、环境补偿等核心挑战及未来发展方向, 以期智能机械手的工程应用提供理论参考。

关键词 光纤光栅; 形状感知; 智能机械手

基金项目 吉林省教育厅科学技术研究项目《智能光纤光栅嵌入式人形机械手的形状感知研究》(项目编号: JJKH 20251783KJ)。

中图分类号: TH741; TN247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.002

0 引言

智能机械手在微创手术、精密制造等领域的应用日益广泛, 但其在狭小、封闭场景中的空间形态难以实时获取, 成为制约智能化水平的关键瓶颈。光纤光栅传感技术凭借体积小、抗电磁干扰、可分布式测量等优势, 为解决机械手实时形状感知提供了新路径。近年来, 国内外学者围绕该技术开展了大量研究, 但各类方法的适用条件与性能优劣尚缺乏系统梳理。本文通过对FBG阵列、多芯光纤、OFDR等传感技术及微分几何、机器学习等重构策略的系统比较, 厘清不同方法在精度、实时性、鲁棒性等方面的优劣权衡。构建“传感原理—重构算法—系统集成”三维分析框架, 帮助工程技术人员快速匹配最优方案, 缩短研发周期; 同时推动智能机械手从“被动执行”向“主动感知”转型, 加快智能装备产业化进程。

1 形状感知的传感原理与方法

1.1 基本原理: 波长漂移—应变—曲率映射

光纤光栅形状感知的基本原理建立在波长漂移—应变—曲率映射关系之上。当光纤布拉格光栅(FBG)受到机械应变时, 其栅格周期和有效折射率发生变化, 导致反射中心波长发生偏移, 这一偏移量与轴向应变成正比。通过将FBG偏心布置于机械结构表面或内部, 轴向应变可转化为弯曲曲率信息, 从而建立“波长漂

移—应变—曲率”的定量映射关系。郭永兴等^[1]提出的双层正交FBG阵列结构, 通过两层 4×4 光栅阵列实现了曲率与弯曲方向的解耦测量, 实验表明波长漂移量与曲率之间呈现良好的线性递增关系。

1.2 传感结构设计: 单芯阵列、多芯光纤与光纤束

不同传感结构的设计方法各具特色。单芯多光栅阵列是最常见的结构形式, 通过在单根光纤上串联多个FBG, 实现准分布式测量; 多芯光纤则将多个纤芯集成于同一根光纤中, 通过测量各纤芯的应变差异解算弯曲曲率和方向^[2]; 光纤束结构由多根独立的FBG光纤组合而成, 通过刚性或柔性基体固定形成传感单元。

1.3 应变测量方式: 准分布式与分布式对比

应变测量方式可分为准分布式和分布式两大类。准分布式测量以FBG阵列为代表, 在光纤上预设离散传感点, 通过波分复用技术实现多路复用。分布式测量以光频域反射计(OFDR)为代表, 利用光纤中的瑞利散射实现连续应变测量, 具有极高的空间分辨率。莫内等^[3]对FBG和OFDR两种技术在连续体机械手上的应用进行了比较研究, 结果表明, 在自由弯曲、障碍物交互和S形弯曲场景下, OFDR的末端定位误差显著优于FBG, 展示了分布式测量在复杂形状感知中的优势。

不同传感方法的性能各有侧重, 主要体现在精度、空间分辨率、实时性、集成难度四个维度, FBG阵列技术成熟, 解调速度快, 成本相对较低, 本身体积小易

作者简介: 王思文(1993-), 女, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 光纤传感。

封装,在机械手中的集成度比较高,适合对实时性要求较高的控制场景^[4]。

2 形状重构算法与实现策略

2.1 经典算法:微分几何重构框架

形状感知的核心理论基础是依托微分几何的重构算法,主要包含Frenet-Serret框架与曲率积分法两类,Frenet-Serret框架先搭建空间曲线的切向、法向和副法向向量,结合曲率和挠率参数递推,得到重构曲线形态,曲率积分法以离散曲率数据为基础,选用坐标变换或空间点递推,完成曲线重构。

2.2 算法演进:面向复杂工况的改进策略

研究人员处理扭转、大变形、多关节等复杂工况时,已提出多种算法改进策略。阿米尔哈尼等^[5]提出的速度依赖形状重构模型,引入了传感单元在机械手通道内滑动引发的速度相关曲率偏差,在0.2~1.4 mm/s的不同运动速度下,形状和末端跟踪精度较传统模型提升22%~65%,动态环境下的重构准确性有所提升。

2.3 前沿方法:机器学习驱动的数据重构

机器学习方法在形状重构中的应用是近年来的研究热点,形成了数据驱动、混合模型等多种技术路径。何晓田等^[6]提出基于人工神经网络(ANN)的连续体机器人形状感知方法,采用单根多芯光纤偏心布置,避免了传统方法对光纤位置精确标定的依赖,在自由空间和约束环境中的平均形状感知误差分别为0.24 mm和0.49 mm,展示了数据驱动方法的优越性。鲁德萨里等^[7]采用深度学习方法从边缘FBG的完整光谱中提取形状信息,利用Hyperband算法优化网络超参数,对30 cm长传感器在1.4~35.3 m⁻¹曲率范围内的形状预测中位末端误差为3.11 mm。施瓦茨等^[8]引入不确定性估计机制,通过深度神经网络直接估计连续体机械手的形状,同时量化模型预测的置信度,为手术机器人的安全应用提供了重要保障。

重构算法的精度评价方法与误差分析是验证算法有效性的关键环节。研究者通常通过分析传感光纤关键参数误差、信号解调误差、传感方程与重构算法误差、环境温度变化等,建立测量系统关键参数标定与误差校正方法,提高测量精度。

当前用于重构任务各类算法,在重构精度、计算效率,以及对动态运动的适配能力这三个评价维度上,不同算法的实际表现存在明显区别。依托微分几何理论的传统算法,理论体系成熟,物理含义清晰,不过这类算法受传感器精度、标定参数的影响大,还存在误差不断累积的缺陷。经过改进的重构算法,采

用误差校正、速度补偿等处理策略,适配复杂工况的能力有所提升,只是运算过程的复杂程度也会随之上升。基于机器学习的重构方法,可直接搭建传感数据和目标形状的非线性映射关系,绕开传统方法里误差累积、参数标定的难点,精度和鲁棒性的表现相对更好。针对动态运动的适配需求,纳入速度效应、不确定性估计的重构模型,对动态重构精度、系统整体可靠性的提升效果较为明显。

3 机械手集成方法与系统性能

3.1 集成方式与系统设计:从封装工艺到工程实现

形状感知系统的实用性,由传感单元与机械手结构的集成方式决定,结合机械手的特殊需求开展系统设计,能为技术落地提供工程支撑。这两部分组合起来,就构成了从传感器到实用系统的完整技术链条。

在集成方式方面,目前主流的方案包括表面贴附、嵌入式封装和柔性基底集成。表面贴附方式将FBG传感器直接粘贴于机械手表面,具有实施简单、易于更换的优点,但易受外界环境影响。嵌入式封装将FBG传感器埋入机械手本体材料内部,实现传感与结构的一体化,具有保护好、测量准确的优点,但对封装工艺要求较高。柔性基底集成方式将FBG传感器预先封装于柔性材料中,形成独立的柔性传感单元,再与机械手本体结合,兼顾了传感性能与结构柔性。在系统设计层面,多节点同步、实时解调与小型化是核心工程需求。在多节点同步方面,研究者通过波分复用、空分复用等技术实现多测点数据的同步采集。在实时解调方面,高速光纤光栅解调仪的发展为实时形状感知提供了硬件基础。在小型化方面,光纤传感器本身的微型化特性使其易于集成于小型机械手中。

3.2 应用验证:连续体机器人、软体机械手

典型应用场景的验证研究展示了形状感知技术在各类机械手上的适用性。连续体机器人是应用最广泛的场景,研究者开展了大量验证实验。何晓田等^[9]的基于深度学习的形状感知方法在双自由度流体驱动导管系统上验证,40 mm长的连续体机器人在3D自由空间和2D约束环境中的平均形状感知误差分别为0.24 mm和0.49 mm。软体机械手是另一重要应用领域,研究者针对软体材料的大变形、非线性等特点开展了专门研究。郝建雄等^[10]针对气动软体手指提出了基于两种传感模态的2D形状估计方法,实现了弯曲角度达320°的大变形软体手指的形状估计。

3.3 系统性能与集成效果的综合评估

要综合评估系统性能,就需要从精度、响应速度、鲁棒性和温漂抑制等多个方面切入,不同集成方案给

机械手原有性能带来的改变,是判断技术有效性的最终依据。

系统性能的评估可分为四个核心方向:一是精度校验环节,现有研究多采用末端位置误差、形状重构误差、曲率测量误差三类指标,完成系统性能的量化统计。二是在响应速度考核上,机械手控制必须满足实时性要求,目前已落地的系统普遍能达到毫秒级到秒级的响应速度。三是在鲁棒性测试中,研究者会引入冗余设计、机器学习和不确定性估计等手段,增强系统的抗干扰表现。四是在温漂抑制效果验证上,现有多项研究结果都能验证温度补偿技术的有效性。

不同集成方案作用于机械手后,最终呈现的性能存在一定差异。嵌入式封装方案将机械手与传感系统整合为一体,对外界干扰的防护能力最优,不过封装工序可能改变机械手的力学性能,需开展精细化设计。柔性基底方案可同时满足传感性能与结构柔性的要求,是现阶段软体机械手集成的主流方案,不过多层结构容易使应变传递出现损耗,需搭建精度足够的应变传递模型。实际抓取操作的有效性层面,李天龙等^[11]依托平行双FBG阵列,完成了不规则截面软体机械手的分布式曲率感知与形状重构,恒温 and 变温环境下的形状重构误差均小于1 mm,静态和动态抓取实验证实形状跟踪具备可行性,轴向驱动力的抑制目标也顺利达成。

4 光纤光栅形状感知赋能智能机械手面临的挑战与发展方向

4.1 核心挑战:扭转分离、环境补偿与实时瓶颈

当前研究面临三大核心挑战。扭转与应变分离是首要难题,光纤传感器对轴向应变和扭转均敏感,信号解耦复杂,多芯光纤虽具潜力但制备精度要求严格,实际应用中误差较大。在极端环境补偿方面,温度变化与应变信号混叠,传统参考光栅法在温度梯度场中效果有限,振动干扰和生物组织接触带来的非线性形变也对系统稳定性提出更高要求。实时处理瓶颈突出,OFDR技术空间分辨率高但解调速度慢,难以满足高速运动控制需求;FBG阵列虽解调快但离散测点难以捕捉复杂形状细节,精度与实时性难以兼得。

4.2 融合趋势:新材料、先进封装与智能算法

跨学科融合正重塑技术边界。在新型材料方面,将FBG与形状记忆合金、磁敏材料结合,可实现传感—驱动一体化,自修复柔性基底可提升传感器在复杂环境中的存活率。先进封装技术如真空注胶、3D打印一体化集成,有效解决了手工封装残余应变和一致性差的问题,微纳制造将推动传感器向更微小柔性方向发

展。智能算法使系统具备学习能力,机器学习可规避传统算法对精确标定的依赖,在精度和鲁棒性上优势显著;不确定性估计机制为医疗级应用提供安全屏障,物理-informed网络有望进一步提升可解释性。

4.3 未来展望:从感知到认知的系统演进

未来研究可从三个方面推进:其一,发展多模态融合的混合传感系统。FBG与OFDR融合、光纤与电流感感互补、视觉—光纤多模态协同,可在精度与速度间取得平衡。其二,构建物理模型与数据驱动深度融合的重构算法。将微分几何约束引入神经网络训练,利用物理模型生成仿真数据,是突破泛化能力和可解释性瓶颈的有效路径。其三,实现传感—驱动—控制一体化的智能机械手系统。将形状信息融入运动规划和自主避障,真正实现从“被动执行”向“主动感知与决策”的范式跃迁。

参考文献:

- [1] 郭永兴,杨跃辉,熊丽.双层正交的光纤布拉格光栅柔性形状传感技术[J].光学精密工程,2021,29(10):2306-2315.
- [2] 孙广开,张兴硕,何彦霖,等.面向连续体机器人精密操作的多芯光纤三维形状与位置测量误差研究[J].机械工程学报,2024,60(03):68-82.
- [3] 莫内,塞法蒂,洛尔,等.连续体机器人高分辨率光纤形状感知的比较研究[C]//2020年IEEE国际机器人与自动化大会(ICRA).IEEE,2020.
- [4] 王彦,徐浩雨,汪俊亮,等.环形布设光纤布拉格光栅的三维曲面形状重构[J].中国光学(中英文),2024,17(02):398-408.
- [5] 阿米尔哈尼,古德里奇,埃斯凡迪亚里,等.用于连续体机械臂形状重构的光纤布拉格光栅形状传感器的设计与制造[J].IEEE传感器杂志,2023,23(12):12915-12929.
- [6] 何晓田,吴迪,欧拉克,等.基于深度学习的柔性机器人形状感知[J].IEEE机器人学汇刊,2023,39(02):1580-1593.
- [7] 鲁德萨里,胡克-霍瓦特,弗罗因德,等.基于深度学习的光纤布拉格光栅形状感知[J].机器学习:科学与技术,2023,04(02):25037.
- [8] 施瓦茨,梅尔法德,阿米尔哈尼,等.基于光纤布拉格光栅传感器的受限环境下手术连续体机械臂不确定性感知形状估计[C]//2024年IEEE国际机器人与自动化大会(ICRA).IEEE,2024.
- [9] 同[6].
- [10] 郝建雄,张志强,王硕,等.基于两种传感模态学习的气动驱动大弯曲角度软体手指2D形状估计[J].先进智能系统,2023,05(10):2300324.
- [11] 李天龙,邱雷,任洪亮.基于并行双FBG阵列的不规则截面软体机械臂分布式曲率感知与形状重构[J].IEEE/ASME机电一体化汇刊,2020,25(01):406-417.

微细电火花加工微深槽类零件工艺技术研究

魏国锋, 毕可明

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 针对铝合金深槽类零件微细电火花加工中电参数匹配难、材料蚀除机理不明确等问题, 为提升加工精度与工艺稳定性, 本研究采用微细电火花加工机床制备成形电极, 通过多组电参数对比试验, 系统探究不同电参数对铝合金微细加工效果的影响, 确定适用于深槽类零件的理想工艺参数。在此基础上, 建立含矩形恒放电通道热源模型的分子动力学仿真模型, 复现微细放电加工动态过程。通过仿真分析, 揭示微细电火花加工材料蚀除机理, 阐明不同能量密度对熔融区宽度的影响规律。研究结果旨在为铝合金微深槽类零件微细电火花加工提供可靠工艺依据与理论参考, 进而提升微结构加工质量与效率。

关键词 微细电火花; 微深槽; 分子动力学

中图分类号: TG661

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.003

0 引言

在天线等产品中存在着众多的微细结构, 如天线单元过渡波导及波纹喇叭天线等。在天线单元过渡波导中存在多级阶梯台阶结构, 各台阶只有 0.3 mm 的差别, 且表面光洁度及精度要求高; 在波纹喇叭天线中, 天线末端存在微小尺寸的矩圆过渡结构以及矩形结构, 内径尺寸最小处只有 0.279×0.559 mm, 且结构位置较深, 加工不便, 难度大。由于天线产品性能的要求, 对产品结构、精度及表面粗糙度等有较高的要求, 加工时外形及精度等达不到要求时对产品性能有极大的影响。此类产品因产品结构及刀具条件等的限制, 通常无法采用常规的切削加工方式或常规的加工方式难度极大, 适宜采用微细电火花等特种加工方法。因此, 有必要对微细电火花加工微深槽类零件的工艺方法及原理进行研究。

线电极放电磨削(Wire Electro-discharge Grinding, WEDG)技术使得微细电火花加工技术进入了实用化阶段^[1]。国内高长水等^[2]在自制的微细电火花加工装置加工出直径 $\Phi 25 \mu\text{m}$ 、深 150 μm 的孔。赵万生教授团队^[3]设计并研制一台微细电火花系统, 在该系统上加工出直径仅为 $\Phi 8 \mu\text{m}$ 的微小孔。李勇等^[4]开发出一种采用蠕动式微进给机构的微细电火花加工装置, 加工最小孔径小于 50 μm , 孔的深宽比达到 10 以上。贾振元教授课题组^[5]搭建了微细电火花加工设备, 并就设备的检测方法和控制策略进行了分析研究。除加

工孔类结构外, 微细电火花机床还可以加工各类异形三维结构^[6]。

自 90 年代以来, MD 方法已广泛应用于纳米尺度的切削和磨削机理研究^[7], 而对电火花加工过程的 MD 模拟研究尚少。Shimada 等^[8]采用 MD 方法分析了钨电极针尖化结构的形成, 结果表明针尖化结构的形成是由于大的径向外力和电极表面产生的薄融化层。崔景芝等^[9]采用粒子模拟方法, 模拟电火花加工过程放电通道的形成过程, 结果显示放电通道位形表现为负极端具有喇叭口的腰鼓形。杨晓东等^[10]采用 MD 方法模拟微细电火花加工过程, 结果发现材料的蚀除机理可以通过气化和超热金属的气泡膨胀两种方式来解释。由于放电加工中材料蚀除时间极短, 且放电空间极小, 用实验手段很难对电火花加工材料的微观去除机理进行观察。因此, 有必要开展微细电火花加工过程的 MD 仿真。

本文开展微细电火花加工带有微细深槽微小零件的试验研究, 同时对其加工工艺进行 MD 模拟研究, 掌握微槽结构的微细电火花加工工艺参数, 揭示微细电火花成形过程中的若干变形机理。

1 实验及模拟条件

1.1 实验条件

本实验采用自行研制的微细电火花加工平台。该设备基于脉冲放电热蚀原理, 通过工具电极与工件电极间在绝缘介质中产生瞬态高温, 实现对导电材料的

作者简介: 魏国锋 (1971-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 反应堆热工水力。

微米级精密去除。其优势在于能够加工高强度、高硬度及高脆性等传统方法难以处理的金属材料，且加工过程宏观作用力小，适用于复杂三维微结构制造。

实验中固定工艺参数（包括电极材料、工作介质及伺服电压等），并将加工时间设定为16分钟，以确保不同工况结果的可比性。重点考察峰值电流与脉冲宽度这两个关键电参数对加工性能的影响，设计了不同参数的实验矩阵，揭示其对材料去除率、表面质量及电极损耗的作用规律。

本实验所用工具电极为紫铜材料。其制备过程分为两个主要步骤：首先，采用慢走丝线切割方法对紫铜坯料进行粗加工，获得接近目标尺寸的电极毛坯；其次，在微细电火花机床上，利用反拷块加工法对电极毛坯进行在线精密修整与成形。该方法通过在机床内部使待修整电极与反拷块进行对向放电，逐层蚀除多余材料，最终制备出微细工具电极。

1.2 分子动力学仿真模型

为从原子尺度深入探究微细电火花加工中单晶铝材料的蚀除机理，弥补实验观测在微观过程与瞬态动态上的局限，本研究构建了分子动力学（MD）仿真模型。仿真模型尺寸设定为 $30a_0 \times 30a_0 \times 12a_0$ ，其中 a_0 为单晶铝的晶格常数（0.404 nm）。模型共包含约 4.5×10^4 个原子。工件顶面取向设定为（010）晶面，x方向为[100]晶向，y方向为[001]晶向。

为模拟工件在实际加工中的约束状态，模型底部最外两层原子被设定为固定层，以模拟基体约束。其上相邻两层原子设置为恒温层，通过速度标定的方式控制其温度恒定在293 K（室温），以模拟加工过程中工件内部热量的变化。其余所有原子构成牛顿层，其运动服从牛顿第二定律，通过积分运动方程获得其动态轨迹。仿真过程模拟单个放电脉冲的作用，设定放电作用时长为 $4.8 \mu\text{s}$ ，以模拟脉冲能量的沉积过程。随后设定 $16 \mu\text{s}$ 的弛豫时间，用于观察放电结束后系统的能量重新分布、原子重组以及最终蚀坑形貌的稳定过程。

1.2.1 势函数

本文工件材料Al原子间的相互作用采用嵌入原子势（EAM）^[11]描述：

$$E = \sum_i \left[\frac{1}{2} \sum_j \phi(r_{ij}) + F(\rho_i) \right] \quad (1)$$

$$\rho_i = \sum_j f(r_{ij}) \quad (2)$$

式（1）中， E 为系统的总能量， ρ_i 为除第 i 个原子以外的所有其它原子的核外电子在第 i 个原子处产生的电子云密度之和， $\phi(r_{ij})$ 和 $F(\rho_i)$ 分别为势能和嵌入能， $f(r_{ij})$ 为电子密度分布函数。

1.2.2 热源分布

在本分子动力学仿真模型中，为模拟放电通道的能量输入，采用恒定的矩形热源模型。依据高斯分布率进行速度标定，对工件表面中心特定矩形区域内的原子施加7 000 K的初始高温。通过调整该热源作用的矩形截面面积及其深度，可有效调节输入至工件材料的能量密度，从而研究不同放电能量条件下单晶铝的微观蚀除行为。

2 结果和讨论

2.1 实验结果

基于前述实验方案，探究了峰值电流与脉冲宽度对微细电火花加工铝合金性能的关键影响，表面粗糙度（Ra）值随峰值电流的增加而上升。其微观机理在于，峰值电流的增大直接导致单脉冲放电能量的增强，使得放电蚀坑的尺寸与深度增大，从而恶化了表面形貌。在本实验参数范围内，可获得的最小表面粗糙度约为 $0.1 \mu\text{m}$ 。随着峰值电流的增大，更高的单脉冲能量带来了更强烈的材料蚀除效应。与此同时，工具电极的损耗量也随之增加。这表明，虽然提高峰值电流能提升加工效率，但表面质量变差和电极损耗加快。为进一步评估电极利用率，在获得相同打孔深度的前提下，随着脉冲宽度的减小，单位电极损耗量显著增大。这意味着，采用过短的脉冲宽度虽然有利于获得更精细的表面，但会导致电极的相对损耗加剧，加工成本升高。其物理原因在于，过短的脉宽使得放电能量在极短时间内高度集中，加剧了电极材料的汽化与喷溅损耗。

为实现高效率、高质量与低成本的微细电火花加工，需对电参数进行综合考虑。针对本实验的铝合金材料，在追求较高加工效率时，可适度提高峰值电流；而为了有效控制电极损耗、提高加工经济性，应避免使用过短的脉冲宽度，选择较宽的脉宽参数更为有利。

2.2 放电间隙的确定

采用微细电火花加工后铝工件的所得微孔的平均尺寸为 $0.35 \text{ mm} \times 0.16 \text{ mm}$ ，略大于所用矩形截面工具电极的平均尺寸（ $0.31 \text{ mm} \times 0.10 \text{ mm}$ ），这一尺寸差异主要由加工过程中的放电间隙所致。值得注意的是，孔形在矩形四个直角处均呈现不同程度的圆弧过渡，实测最小与最大圆角半径分别约为 $20 \mu\text{m}$ 与 $50 \mu\text{m}$ 。

此圆角现象主要是因为微细电火花加工过程中，工具电极的尖角部位电场集中、放电更为剧烈，导致该区域电极损耗速率显著高于其他部位，经长时间加工后，电极自身尖角被损耗为圆弧形，从而复刻到工件孔形上。另一个原因为铝合金材质较软，在放电热

作用下更易发生熔融与重凝,影响了棱边的锐利度,火花放电后表面质量较钢类材质差。此外,从实测尺寸反推可知,在电极宽度方向的单侧平均放电间隙约为 0.02 mm,而在长度方向约为 0.03 mm,这种间隙分布与放电的均匀性及排屑条件相关。

2.3 应用所选电参数进行微细结构样件加工

综合 3.1 与 3.2 节的工艺分析结果,并结合机床的实际加工能力,确定了用于深孔加工的参数:电极截面尺寸设定为 0.22 mm×0.35 mm(目标孔径为 0.279 mm×0.410 mm),峰值电流 3.25 A,脉冲宽度 8 μs,预设孔深为 4 mm。

实验发现,当电极进给至约 3 mm 深度时,出现明显的排屑困难,伴随加工不稳定及电极回退现象。其原因在于微细深孔加工中,孔径小、放电间隙狭窄(单侧间隙仅约 0.02~0.03 mm),导致电蚀产物难以及时排出。废屑在狭小间隙内逐渐积聚,阻塞了正常的放电通道,不仅降低了加工效率,严重时将导致短路、积碳拉弧,致使加工无法持续稳定进行。此外,深径比增大也加剧了电极的侧向损耗,进一步限制了可实现的孔径深宽比。

3 微细电火花加工材料蚀除过程的模拟分析

3.1 材料的蚀除机理

通过分子动力学仿真,已知铝的熔点与沸点分别为 933 K 与 2 333 K,在放电起始阶段,高能量密度的热源使作用区域温度急剧升高。当原子温度超过熔点(933 K)时,材料发生熔化。随着能量持续注入,局部温度进一步突破沸点(2 333 K),部分原子获得足够动能发生气化,并通过剧烈热膨胀以蒸气或微滴形式从熔池中飞溅脱离,形成材料去除的主要部分。放电结束后系统进入弛豫阶段,熔融材料在周围恒温层的快速冷却作用下重新凝固,最终在工件表面形成稳定的蚀除凹坑。值得注意的是,凹坑边缘两侧存在明显的材料堆积现象。这种材料堆积会直接影响已加工表面的粗糙度,还可能改变局部电场分布,对后续放电的稳定性产生干扰。

3.2 能量密度对蚀除过程的影响

高能量密度的电子流加热区域集中,使工件电极材料瞬间加热到高温并达到金属的熔点和沸点,在工件表面会形成熔融区。熔融区宽度随输入能量密度增加而呈现近似线性扩大的规律。这表明,更高的能量密度导致更多原子发生相变并参与蚀除,单位时间内材料去除量随之增加。因此,从微观机理上证实,提高

脉冲能量(增大峰值电流或脉宽),能够提升微细电火花加工效率。

4 结束语

微细电火花加工技术目前已实现微槽的加工,加工零件的表面质量和尺寸精度达到预期目标。但深孔加工排屑仍然是限制加工孔深宽比的主要因素,进一步可以使用消边轴电极或阶梯轴电极进行微孔加工的试验研究。采用 MD 方法建立了微细电火花蚀除过程的三维 MD 仿真模型,从微观角度解释了单晶铝材料的蚀除机理,并研究了能量密度对熔融区宽度的影响。尽管模型的空间尺寸远小于实际电火花加工,但建立的模型能够定性地理解微细电火花的成形机理。未来将开展更大尺度的微细电火花 MD 模拟,研究电火花加工过程中表面粗糙度、表面变质层、残余应力等的变化规律。

参考文献:

- [1] Reynaerts D, Meeusen W, Van Brussel H. Machining of three-dimensional microstructures in silicon by electro-discharge machining[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 1998,67(01-03):159-165.
- [2] 高长水,宋小中,刘正坝.电火花微细加工系统研制[J].机械科学与技术,1997,26(05):48-51.
- [3] 赵万生,李文卓,王振龙.高精度微细电火花加工系统的研制[J].电加工与模具,2004(01):6-8.
- [4] 李勇,王显军,郭旻,等.微细电火花加工关键技术研究[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(08):45-48.
- [5] 张玲瑄,贾振元,任小涛,等.微细电火花加工放电状态逐级映射检测[J].光学精密工程,2010,18(03):662-669.
- [6] Tong H, Li Y, Wang Y, et al. Servo scanning 3D micro-EDM based on macro/micro-dual-feed spindle[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(07-08):858-869.
- [7] 梁迎春,陈家轩,白清顺,等.纳米加工及纳构件力学特性的分子动力学模拟[J].金属学报,2008,44(08):937-942.
- [8] Shimada S, Tanaka H, Mohri N, et al. Molecular dynamics analysis of self-sharpening phenomenon of thin electrode in single discharge[J]. Journal of materials processing technology, 2004,149(01-03):358-362.
- [9] 崔景芝,王振龙.放电通道的微观模拟及其物理性能研究[J].电加工与模具,2007(01):13-16.
- [10] Yang X D, Guo J W, Chen X F, et al. Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM[J]. Precision Engineering, 2011,35(01):51-57.
- [11] Daw M S, Foiles S M, Baskes M I. The embedded-atom method: a review of theory and applications[J]. Material Science Reports, 1993,09(07-08):251-310.

混凝土耐久性评估模型及其工程应用研究

宁涛

(江苏省徐州技师学院, 江苏 徐州 221000)

摘要 在土木工程行业当中, 混凝土结构是应用范围最广的一种结构类型, 其耐久性的优劣直接决定了工程结构的服役年限、使用过程中的安全保障水平, 同时也影响着整个工程项目的经济效益。从实际使用情况来看, 混凝土结构在长期服役过程中, 往往会受到多种因素的综合作用, 如材料自身的性能差异、外部环境的侵蚀作用、结构所承受的荷载大小, 以及施工过程中的质量控制情况等, 这些因素相互影响、叠加作用, 会逐渐导致混凝土结构出现劣化现象, 一旦劣化程度过于严重, 就可能造成结构失效, 进而引发安全事故, 带来较大的经济损失。本文对目前国内外已有的各类混凝土耐久性评估模型进行了全面梳理, 分析了不同类型评估模型的特点以及各自的适用场景, 重点探讨了基于多元线性回归和损伤累积理论的评估模型构建思路与方法, 以期为混凝土结构的耐久性设计、施工质量控制以及后期运维管理工作提供理论参考。

关键词 混凝土耐久性; 评估模型; 损伤累积; 多元线性回归

中图分类号: TU375

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.004

0 引言

近年来, 我国基础设施建设事业呈现出快速发展的态势, 桥梁、公路、港口、水利工程等各类基础设施项目不断建成并投入使用^[1]。这些混凝土结构大多处于复杂多变的自然环境和多样化的使用条件下, 因此, 混凝土结构的耐久性问题已经成为影响工程结构长期安全稳定运行的关键因素, 也受到了工程领域从业者和学术界研究人员的广泛关注与重视^[2]。在传统的混凝土耐久性评估工作中, 大多采用破坏性试验的方式, 这种评估方法不仅会对混凝土结构本身造成不可逆的损伤, 而且存在成本偏高、检测周期较长、检测范围有限等弊端, 已经无法满足大规模工程检测以及结构长期运维管理的实际需求^[3]。基于此, 建立一套科学合理、精准高效的混凝土耐久性评估模型, 实现对混凝土结构劣化程度的实时监测和使用寿命的有效预测, 对于延长工程结构的服役年限、降低后期运维成本、保障工程使用安全具有十分重要的理论意义和实际工程应用价值。

1 现有评估模型的类型及特点

1.1 经验模型

经验模型的建立主要依靠大量的试验数据积累和长期的工程实践经验, 通过回归分析等常用方法, 将影响因素和混凝土耐久性指标之间的关系用数学公式

的形式拟合出来^[4]。这种模型最大的优势就是构建起来比较简单, 计算过程也不复杂, 能够快速对混凝土的耐久性做出初步评估, 很适合在工程现场进行快速检测, 以及做出初步的判断^[5]。但它的不足也很明显, 局限性比较大, 因为模型的适用范围完全受限于当初的试验条件和数据范围, 无法准确体现出不同环境、不同使用工况下混凝土的老化原理, 所以评估的精度相对来说要低一些。

1.2 机理模型

机理模型是从混凝土老化的微观原理出发, 结合物理学、化学等相关学科的理论知识来建立的。这种模型能够从本质上解释混凝土老化的过程和规律, 也能准确反映出各种因素对混凝土耐久性的影响机制^[6]。它的优点在于评估精度高, 适用范围也比较广, 不管是哪种环境、哪种工况下的混凝土结构, 都能进行评估。但它的构建过程非常复杂, 不仅需要大量的微观试验数据作为支撑, 还需要进行深入的理论分析, 计算难度也很大, 对使用者的专业能力要求比较高, 所以很难在工程现场得到广泛的应用。

1.3 统计模型

统计模型是以统计理论为基础, 通过对大量实际工程中的数据和试验数据进行统计分析而建立的, 常用的多元线性回归、神经网络、支持向量机等方法都

作者简介: 宁涛(1995-), 男, 硕士研究生, 助理讲师, 研究方向: 建筑施工。

可以用来构建这类模型^[7]。统计模型很好地兼顾了经验模型的便捷性和机理模型的准确性,通过统计分析的方式,能够消除一些偶然因素带来的影响,让评估结果更加可靠。不过它也有自身的缺点,就是需要足够多的样本数据,如果样本数量不够,或者数据的质量不高,都会严重影响模型的评估精度,导致评估结果出现偏差。

1.4 综合评估模型

综合评估模型是综合了经验模型、机理模型和统计模型三者的优点,在考虑各种影响因素的基础上,采用层次分析法、模糊综合评价等方法构建而成的^[8]。这种模型能够全面、系统地反映出各类因素对混凝土耐久性的影响,所以评估结果也更加全面、准确。但它的构建过程同样比较复杂,计算量也很大,关键在于要对各种影响因素进行合理的权重分配,而权重分配是否合理,直接关系到评估结果的准确性,这也是构建这类模型的难点所在。

2 混凝土耐久性评估模型构建方法

结合工程现场实践的实际需要,多元线性回归方法与损伤累积理论被确定为核心技术方向,用于搭建混凝土耐久性评估模型,同时借助试验所得数据与工程实际案例,对已构建的模型实施全面系统的验证,进而确保该模型拥有良好的精准度以及工程应用层面的可操作性。

2.1 模型构建的基础工作

在开展模型构建工作之前,首要的任务是明确混凝土耐久性的具体评估指标以及各类可能产生影响的因素。本次研究过程中,选取混凝土碳化深度、氯离子扩散系数、抗冻等级以及抗压强度损失率作为耐久性评估的核心指标,这些指标能够较为全面地反映出混凝土在长期使用过程中的劣化情况,涵盖了混凝土抗侵蚀、抗冻融以及力学性能衰减等关键方面。在影响因素的选取上,综合考量工程实际中较为常见的影响变量,将水泥品种、水胶比、骨料含泥量、环境温度、相对湿度、氯离子浓度、冻融循环次数以及静荷载作用时间作为模型的自变量,评估指标作为因变量,为多元线性回归评估模型的搭建做好前期铺垫。

数据的收集与预处理工作是模型构建过程中不可或缺的关键环节,其处理质量直接关系到模型最终的可靠程度。在研究过程中,广泛收集了不同地区、不同环境条件下的混凝土试验数据与工程现场实测数据,经过筛选后,最终获得有效数据 1 300 余组。这些数据覆盖了多种水泥品种、不同水胶比参数、各类环境

工况以及荷载条件,能够充分保证数据的代表性与全面性。在数据预处理阶段,对收集到的原始数据进行了清洗、去噪以及标准化处理,逐一剔除其中的异常数据与无效数据,确保数据的真实性与一致性,为后续的模型构建工作提供坚实、可靠的数据支持。

2.2 构建多元线性回归评估模型

多元线性回归模型的基本表达式为 $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$,其中 Y 代表混凝土耐久性评估指标(碳化深度、氯离子扩散系数等), X_1, X_2, \dots, X_n 代表各类影响因素(水泥品种、水胶比等), β_0 为常数项, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数, ε 为随机误差项。回归系数的估计采用最小二乘法,通过 SPSS 软件对预处理后的有效数据进行回归分析,最终得出各评估指标与对应影响因素之间的多元线性回归方程,明确各类影响因素对混凝土耐久性的量化影响关系。

以混凝土碳化深度为例,其对应的多元线性回归方程为: $Y_1 = 0.82 + 0.35X_1 + 0.52X_2 + 0.28X_3 + 0.41X_4 + 0.39X_5 + 0.05X_6 + 0.12X_7$ 。式中, Y_1 代表碳化深度(单位: mm), X_1 为水胶比, X_2 为环境相对湿度(单位: %), X_3 为环境温度(单位: °C), X_4 为氯离子浓度(单位: mg/L), X_5 为水泥品种(普通硅酸盐水泥取 1,矿渣硅酸盐水泥取 2), X_6 为冻融循环次数, X_7 为静荷载作用时间(单位: 年)。从该方程中能够清晰地看出,水胶比、环境相对湿度以及氯离子浓度对混凝土碳化深度的影响最为显著,这一结论与工程实践中积累的经验规律相吻合,进一步印证了回归方程的合理性。

2.3 构建损伤累积评估模型

混凝土结构在长期服役过程中出现的劣化现象,从本质上来讲是一个损伤不断累积的动态过程。随着时间的推移,各类影响因素的作用持续叠加,混凝土的损伤程度会逐步加重,最终可能导致结构失效。基于损伤累积理论,搭建混凝土耐久性损伤累积评估模型,将混凝土的整个劣化过程划分为初始损伤阶段、损伤发展阶段以及损伤失效阶段,通过引入损伤变量,实现对混凝土劣化程度的量化描述。

损伤变量 D 的取值范围限定在 0 至 1 之间,其中 $D=0$ 表示混凝土处于无损伤状态, $D=1$ 表示混凝土完全失效,无法继续发挥使用功能。损伤累积模型的具体表达式为 $D(t) = D_0 + \sum(k_i \times t_i)$,式中 $D(t)$ 为 t 时刻混凝土的损伤程度, D_0 为混凝土的初始损伤,主要由施工质量控制、材料自身缺陷等因素引发, k_i 为第 i 类影响因素的损伤速率, t_i 为第 i 类影响因素的作用时间。通过对试验数据与工程实测数据的拟合分析,确定各类

影响因素对应的损伤速率 k_i ，进而实现对混凝土损伤程度的动态评估，以及对混凝土结构服役寿命的预测。

2.4 模型验证

为验证所构建评估模型的准确性以及工程应用的可行性，选取某跨海大桥引桥混凝土结构作为工程验证实例。该引桥位于沿海区域，服役环境为高盐、高湿环境，已连续服役8年，在服役期间主要承受氯离子侵蚀、冻融循环以及车辆动荷载的综合作用，其混凝土结构的劣化特征具有典型的代表性。工程技术人员对该引桥混凝土结构开展了现场检测工作，获取了混凝土碳化深度、氯离子扩散系数、抗冻等级等核心评估指标的实测数据，为模型验证提供了真实可靠的工程数据支撑。

将该工程实例中的各类影响因素参数分别代入已构建的多元线性回归模型与损伤累积模型中，计算得出混凝土耐久性评估指标的预测值以及混凝土损伤程度。验证结果显示，多元线性回归模型计算得出的预测值与现场实测值之间的误差均控制在5%以内，损伤累积模型计算得到的损伤程度与现场检测结果基本一致，不存在明显偏差。上述验证结果充分说明，所构建的混凝土耐久性评估模型具有较高的准确性与可行性，能够满足工程实际中混凝土耐久性评估的需求，可为混凝土结构的维护、加固以及寿命预测提供可靠的技术参考。

3 混凝土耐久性评估模型在工程全生命周期中的应用

3.1 设计阶段的应用

在混凝土结构进行设计工作时，耐久性评估模型能够给设计人员提供切实可行的科学参考，帮助设计人员不断优化设计方案，让混凝土结构的耐久性得到进一步提升。在具体的设计过程中，设计人员需要充分考虑工程所在的实际环境、日常使用情况以及预设的设计年限，通过耐久性评估模型，分析不同设计参数对混凝土耐久性的具体影响——这里所说的设计参数包括水泥品种的挑选、水胶比的把控、骨料级配的搭配以及保护层厚度的确定等，通过分析，最终选出最合理的一组设计参数。

3.2 施工阶段的应用

在混凝土结构的施工阶段，耐久性评估模型可以用来控制施工质量、优化施工流程，及时找出施工过程中存在的各种问题，并采取有针对性的改进措施，确保施工质量达到相关标准。施工人员可以依靠这个评估模型，结合施工过程中所用原材料的具体参数，以

及施工工艺的相关参数，如混凝土的拌合时间、振捣方式的选择、养护条件的设定等，提前判断混凝土的耐久性指标，得知当前的施工质量是否符合设计要求。

3.3 运维阶段的应用

当混凝土结构进入运维管理阶段后，耐久性评估模型可以用于实时监测结构的劣化程度，同时预判其使用寿命，为运维管理工作提供科学的依据，帮助工作人员制定合理的维护和加固方案，从而延长混凝土结构的实际使用年限。运维人员需要定期对混凝土结构进行现场检测，收集评估指标的实际测量数据，把这些数据输入评估模型中，计算出混凝土结构的损伤程度和剩余使用年限，进而判断该结构是否需要需要进行维护、加固作业。

4 结束语

混凝土耐久性评估模型在工程建设的整个生命周期中都有着不可替代的重要作用。从设计阶段的参数优化、施工阶段的质量管控，再到运维阶段的寿命预判和维护优化，为混凝土结构的耐久性提供了全方位的保障。将耐久性评估模型与实际工程应用紧密结合起来，能够有效解决混凝土结构过早劣化、使用年限不足等实际工程中常见的问题，实现工程质量、经济性和耐久性的同步提升，为混凝土结构工程的高质量发展提供有力的支持。

参考文献:

- [1] 郑旭,徐敏,朱家源,等.典型咸淡水交汇区环境塔基混凝土结构耐久性检测与评估[J].广东建材,2026,42(01):57-61.
- [2] 张大川,易忠来,李化建,等.高速铁路服役混凝土耐久性检测指标与现场检测方法研究进展[J].材料导报,2026,40(01):74-87.
- [3] 刘成武.城市道路透水混凝土铺装施工技术研究[J].江西建材,2025(12):285-287.
- [4] 宋守坛,毕桂祥,杨栋,等.基于实测数据的钢筋混凝土铁路桥梁耐久性评估[J].金陵科技学院学报,2025,41(04):85-92.
- [5] 陈永佳.海水环境下混凝土结构耐久性检测与评估分析[J].北方建筑,2025,10(06):92-95.
- [6] 侯忱涛.皮革废料改性橡胶混凝土在土木工程中的耐久性评估[J].中国轮胎资源综合利用,2025(12):134-136.
- [7] 周旭斌.氯离子渗透系数检测在混凝土耐久性评估中的应用研究[J].中国水泥,2025(12):65-68.
- [8] 朱耀国.建筑混凝土耐久性检测指标与结构使用寿命评估的关联分析[J].实验室检测,2025,03(23):93-95.

面向智能电网的配电网自动化关键技术分析

徐 正

(国网吉林省电力有限公司吉林供电公司, 吉林省 吉林市 132000)

摘 要 随着智能电网建设的深入推进, 配电网正经历从“被动响应”向“主动管理”的根本性转变。配电网作为连接电源与用户的关键环节, 其自动化水平直接决定电网运行效率、供电可靠性与新能源消纳能力。基于此, 本文首先概述了基于智能电网的配电网发展现状; 其次分析了面向智能电网的配电网自动化关键技术, 包括智能感知技术、融合通信技术、高级调控技术、网格化保护技术、云边协同技术等; 最后探讨了面向智能电网的配电网自动化技术发展趋势, 以期为配电网的智能化升级提供理论参考。

关键词 智能电网; 配电网自动化; 智能感知技术; 融合通信技术; 高级调控技术

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.005

0 引言

配电网是电力系统中直接面向用户的关键环节, 承担着电能分配与供应的重要职责。然而, 能源结构转型与新型电力系统建设对配电网提出了前所未有的挑战, 传统配电网的“被动响应”模式已难以应对新时期需求, 因此提升配电网的可靠性与智能化水平是保障供电质量的核心任务。配电网自动化作为智能电网的核心组成部分, 实现了配电网运行状态的实时监测、故障的快速定位与隔离以及供电的自动恢复。在智能电网建设背景下, 深入研究配电网自动化关键技术及其发展趋势具有重要的现实意义。

1 智能配电网的概念、特点及发展现状

1.1 概念

智能配电网是当今电力系统向新型电力系统演进的关键环节, 其并非传统配电网的简单升级, 而是一场深刻变革。传统配电网和现代化技术、智能化技术、信息化技术结合, 形成了智能配电网, 实现了对配电网的实时监测、控制和优化管理。简单来说, 智能配电网就是给传统配电网装上“智慧大脑”和“神经末梢”, 使其具备了主动感知、智能决策、灵活互动等功能, 从而为用户提供更加高效、安全、稳定、高质量的电能服务。

1.2 特点

智能配电网是传统配电网向现代能源互联网演进的关键形态。和传统配电网相比较而言, 智能配电网

具有以下特点: 第一, 高度自动化与智能化。智能配电网集成了先进的传感技术、人工智能技术、自动化控制技术, 可实现故障自诊断、自隔离、自恢复, 进而保障供配电可靠性。第二, 分布式能源友好接入。智能配电网支持光伏、风电等分布式电源灵活并网, 有利于实现源网荷储协同优化, 促进清洁能源消纳^[1]。第三, 双向互动与信息流融合。智能配电网改变了过去的单向供电模式, 实现了电力流、信息流双向互动, 支持需求侧响应和电价动态调整。第四, 自愈能力和弹性运行。智能配电网具备实时态势感知和智能决策能力, 能够快速应对故障和极端事件, 保障系统韧性。第五, 数据驱动与数字化管理。智能配电网在 AI 技术、大数据技术、云计算技术的支撑下, 实现了设备状态监测、负荷预测和能效优化, 支撑精准运维管理。第六, 集成高效的通信与信息技术。智能配电网以通信网络为基础, 将配电自动化系统、用户计量系统以及地理信息系统等数据深度融合, 进而构建覆盖全网的统一信息平台, 能够为配电网的精细化管理、决策提供重要的数据支撑。

1.3 发展现状

智能配电网作为新型电力系统的核心环节, 当前正处于快速发展的阶段。2026 年政府工作报告提出“加快智能电网建设”, 再加上《关于促进电网高质量发展的指导意见》的出台, 智能配电网作为新型电力系统的关键环节, 迎来了重要的发展机遇。尤其是在技术层面, 配电网正在朝着柔性化、智能化、数字化的

作者简介: 徐正 (1986-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 配网自动化。

方向转型发展,配电网系统逐渐由传统的“无源单向辐射”网络向“有源双向交互”系统转变,具备了更加强大的弹性扩容能力、智能监控能力。不仅如此,基于物联网的智能配电网,实现了电力设备的主动预警与智能运维,为电网高质量发展提供坚实的支撑。然而,面向智能电网的配电网发展也面临着严峻的挑战,分布式电源高比例渗透带来潮流双向流动与电压波动问题,对保护配置、电能质量和运行调度提出更高要求;数据安全与网络安全风险日益凸显,因此采取有效措施解决问题至关重要^[2]。

2 面向智能电网的配电网自动化关键技术

面向智能电网的配电网自动化的核心在于将传统“被动响应”的电力分配网络升级为能够“主动管理”的能量互动平台,其主要依赖于下述几项技术的应用与融合。

2.1 智能感知技术

智能化感知是配电网自动化的基础。传统配电网功能有限,升级困难。而依靠智能感知技术,通过在云端应用低代码模块灵活搭建应用,并一键远程下发至海量终端,可实现软件和硬件之间的解耦,提高配电网功能升级效率。依托智能感知技术和第四代馈线终端单元(FTU)等智能设备,将其部署于关键节点,能够实时化、可视化感知线路负载、设备状态、故障信号,让配电网“耳聪目明”。不仅如此,通过搭建大数据平台,整合接入多台配电终端系统以及感知设备,能够实时化采集、处理海量的数据信息^[3]。此外,融合大数据技术和机理模型,使得故障预警和定位更加的精准化,能够将单相接地故障定位准确率提升至90%,并能提前预警设备老化风险,为配电网运维管理工作的开展提供重要帮助。

2.2 融合通信技术

融合通信技术在配电网自动化中发挥着至关重要的作用,该技术是电力数据传输的“高速公路”,因此应用融合通信技术,搭建可靠、高速的通信网络非常关键。例如:应用高速电力线载波(HPLC)与射频网络结合的双模通信,能够将宽带提升1~2倍,而且可提升数据采集成功率99%。不仅如此,应用5G技术、光纤通信技术搭建立体化的通信矩阵,5G技术可确保核心控制业务20毫秒级的确定性时延,光纤技术则能够承载海量的数据,融合后可显著提升通信效率。此外,通过微秒级时钟同步,在千兆级数据洪流中为差动保护等关键信号开辟专属通道,确保时延波动不

超过2毫秒,能够更好地保障配电网通信稳定性。

2.3 高级调控技术

高比例分布式光伏、充电桩的接入,给电网调控带来了巨大挑战。而依靠高级调控技术,促使配电网变身能量的“智能管理者”,可明显提高调节效率。例如:通过多阶段鲁棒优化算法,为低压光储充单元装上智能“调节阀”,能够实现对配电网功率的自动化调节,进而降低局部电压越限风险70%。同时,应用区块链技术与大数据技术整合原本分散的、海量的屋顶光伏、储能单元,建立虚拟但可控的电厂,可实现配电网调峰和调频等工作^[4]。此外,应用深度学习技术搭建预测模型,融合气象、电力等多元化的数据,将新能源出力的预测误差压缩至6%,能够为配电网电力调度决策工作的开展提供更高精度的导航。

2.4 网格化保护技术

新时期,传统过流保护已经无法满足多电源、复杂化的配电网需求。网格化保护技术,可实现对配电网故障的“外科手术式”切除。依靠网格化保护技术将配电网划分为多个独立的保护网格,一旦出现故障,网格内的各个设备相互协同配合,可实现对故障点的精准定位和快速隔离,提升配电网故障处置效率73%。故障隔离之后,保护设备启动“互相通知”的功能,能够自动合闸恢复非故障区域供电,进而缩短供电时间,降低对民众生产生活的影响。

2.5 云边协同技术

传统集中式的数据处理技术早已无法满足新时期海量终端需求,应用云边协同技术,为配电终端植入边缘计算模块,可在本地完成对80以上的常规操作指令以及故障波形分析,进而削减上传主站数据量80%。同时,应用云边协同技术搭建新能源配电网大数据智能云平台,全面负责对配电网的优化及深度分析,能够更加精准地控制负载,并及时识别违规用电等现象,提升云端智能管理水平。此外,应用数字孪生技术搭建虚拟的配电网镜像,通过模拟台风过境、电动汽车集中充电等一系列的极端场景,能够帮助运维管理人员提前做好对配电网运行方式的优化工作,进而由原本的“被动响应”转变至“主动防御”,降低对配电网运行的影响。

3 面向智能电网的配电网自动化技术发展趋势

面向智能电网的配电网自动化技术正经历深刻变革。在新型电力系统建设的背景下,配电网自动化技术的发展趋势主要如下。

3.1 系统架构：主配微协同与柔性互联

智能电网时代，配电网不再是电力系统的“末端”，而是源网荷储互动的关键平台。根据政府部门 2026 年发布的《关于促进电网高质量发展的指导意见》，加快建立“主配微协同”的新型电网平台成为顶层设计共识。鉴于此，未来一段时间里配电网自动化应当和主干电网、分布式能源、智能微电网实现协同规划及调控，同时创新应用柔性直流、智能开关等装备，实现大电网和微电网的灵活并离网运行，进而解决高比例分布式新能源接入带来的双向潮流问题，提升电网的韧性与互济能力^[5]。

3.2 技术内核：数字化、AI 深度赋能与透明化

未来，数字化技术、人工智能技术将会由原本的辅助工具转变为配电网的生产核心系统，提升配电网自动化技术水平。面向智能电网的配电网，其通信和感知将会具备更高的智能化程度。通过应用数字化技术、人工智能技术、卫星通信技术、无线专网技术、光通信技术，有助于推动配电网向“中压融合、低压透明”演进，实现对低压 400 V 网络的线损可视、新能源可管。与此同时，在 AI 技术的加持下，配电网运维决策的智能化程度会更高。通过应用 AI 技术进行配电网规划、设备巡检、故障诊断，能够为运维管理工作开展提供重要的帮助。此外，基于云边协同的故障主动防御体系正在取代传统的故障后被动处理模式，通过隐患早期识别实现主动运维，以保障配电网的安全高效运行。

3.3 核心装备：极速响应与多源接入

新时期，光伏、储能及充电桩的接入量明显增加，对于配电网装备提出了更高的要求。要提高对核心装备的应用和升级意识，完善自动化装备的功能，提升性能。例如：基于磁控开关技术的故障处理目前已实现 10 毫秒内的极速分闸，这显著提高了选择性保护能力。不仅如此，具备检同期功能的低压快切开关实现了主备电源 15 毫秒内无缝切换，保障敏感用户“零感知”。在电网智能化发展背景下，尤其是集成 AI 预测性维护与实时监测功能的终端设备将成为主流，这将会为配电网乃至电网的发展提供更强大的支撑。

3.4 人才培养：“单维专业”到“跨界复合”

面向智能电网的配电网自动化发展，对人才的技术要求发生了根本性转变，未来的配电网人才不再是单一领域的专家，而需具备多学科融合的视野和解决复杂工程问题的能力，因此加快培育复合型人才成为

发展大势所趋。为了满足上述人才需求，从高校到企业的整个培养链条都在进行创新性改革。一方面，高校要重塑人才培养模式，建立全新的课程体系，树立“通发电、精储电、智配电、慧用电”的“四电贯通”培养理念。结合电力企业项目，建立年度更新的模块化课程体系，及时融入新技术、新标准，实现教学内容与产业发展的同频共振。另一方面，学校和企业之间要深化交流与合作，协同建立实体化育人平台，让学生以“准员工”身份在真实项目中“做中学”。同时，电力企业的导师应当积极参与到高校教学中，共享共建教学资源，提高人才培养水平。此外，电力企业内部应当做好系统化的培训工作，建立阶梯式培养体系，通过“理论+考核”的方式，对配电自动化人员进行分级认证，构建从基础操作到高级技术管理的清晰成长路径。同时，要定期进行实战演练，设置馈线终端故障排查、“三遥”调试、FA 动作分析等贴近真实工作场景的演练活动，让配电自动化人员在赛中练、练中学，进而为新型电力系统建设提供关键智力支撑^[6]。

4 结束语

配电网自动化是智能电网建设的核心环节，是实现配电网“可观、可测、可控、可调”目标的技术基础。在智能电网建设过程中，要高度重视配电网自动化技术创新应用，充分发挥智能感知技术、融合通信技术、高级调控技术、网格化保护技术、云边协同技术的优势，提高配电网的运行效率与可靠性，进而为建设安全、高效、清洁、低碳的智能电网提供坚实的技术保障，推动能源转型与“双碳”目标的实现。

参考文献：

- [1] 毛树伟. 自动化技术在电力系统配电网工程中的实践[J]. 数字技术与应用, 2025, 43(03): 232-234.
- [2] 姚开源, 于子恒. 智能电网环境下配电网自动化标准化技术研究[J]. 标准生活, 2025(08): 344-346.
- [3] 王平平. 智能电网发展背景下的城市配电网改造分析[J]. 光源与照明, 2025(08): 254-256.
- [4] 余力. 智能电网环境下配电网自动化故障定位方法探讨[J]. 中国高新科技, 2025(14): 42-44.
- [5] 陈云帆. 配电网自动化系统中的运行优化策略分析[J]. 电子技术, 2025, 54(04): 320-321.
- [6] 黄正, 葛佳盛, 常焱杰. 智能电网配电网自动化技术的应用[C]//广东省国科电力科学研究院. 第三届电力工程与技术学术交流会议论文集. 国网电力科学研究院有限公司实验验证中心, 2023.

Al 掺杂 ZnO 纳米线阵列紫外光探测器的特性与制备

李向前

(周口职业技术学院, 河南 周口 466000)

摘要 本研究采用水热法在FTO叉指电极上可控合成不同Al掺杂浓度的ZnO纳米线阵列,XRD和SEM结果表明所有样品均保持六方纤锌矿结构,且纳米线沿着c轴垂直取向生长,形成高比表面积有序阵列。基于此构建的紫外探测器在365 nm光照下均呈现显著光响应,其中1%Al掺杂器件性能最优,其响应度达到6 180 mA/W,比探测率 1.51×10^{12} Jones,外量子效率高达6090%,主要原因是Al³⁺引入有效提高载流子浓度和迁移率,同时优化表面氧吸附/脱附动力学。过量掺杂则由于晶格畸变加剧非辐射复合,导致性能回落,证实适量Al掺杂可协同调控ZnO光电特性,为高性能自驱动紫外探测器提供可行路径。

关键词 紫外光探测器; 氧化锌; Al掺杂; 掺杂浓度; 水热法

基金项目: 河南省二〇二五年科技发展计划科技攻关项目“内电场驱动的高性能超快响应紫外探测器”(项目编号: 252102210202)。

中图分类号: TN361

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.006

0 引言

氧化锌(ZnO)作为一种直接宽禁带半导体,凭借高达60 meV的激子束缚能、优秀的化学稳定性、可调节光电响应特性,在紫外探测领域展现出较强的应用优势。对比GaN器件,ZnO纳米结构具有高比表面积、强光吸收能力、低制备成本等特征,尤其一维纳米线阵列(ZNWAs)可提供定向载流子传输通道,有效抑制体相复合。然而,本征ZnO载流子浓度偏低、电导率不足,限制其响应速度,通过积极引入Al³⁺施主掺杂可有效调控费米能级位置,全面提高自由电子浓度,优化光电转换效率。基于此,本文采用低温水热法在FTO叉指电极上原位生长不同Al/Zn原子比的ZNWAs,系统考察掺杂对晶体取向、表面形貌、缺陷态分布的影响,并构建自驱动型紫外探测器。通过对比响应度、比探测率、外量子效率、响应动力学参数,分析Al掺杂浓度和器件性能的非线性关联机制,为高性能、低成本紫外光电探测器的理性设计提供有力支撑。

1 试验分析

1.1 Al掺杂ZnO纳米线阵列生长

Al掺杂ZnO纳米线阵列(ZNWAs)的可控制备采用两步法:先通过溶胶-凝胶旋涂结合高温退火在FTO叉

指电极上形成均匀ZnO:Al籽晶层,再利用水热法实现取向生长。籽晶溶液由醋酸锌和硝酸铝按照Al/Zn原子比共溶于二乙二醇单甲醚,加入单乙醇胺作为稳定剂,经过70℃搅拌和30℃老化后旋涂在激光刻蚀的20对叉指电极,线宽/间距均为0.2 mm表面,400℃退火形成60~80 nm致密籽晶层,为后续外延提供成核模板。水热阶段采用等摩尔六亚甲基四胺和硝酸锌体系,引入同比例Al³⁺,在93℃下反应1 h,HMTA缓慢水解调控OH⁻释放速率,促使Zn²⁺沿c轴择优沉积,形成垂直取向纳米线阵列。该工艺通过精确控制掺杂浓度、籽晶结晶质量、水热动力学参数,实现纳米线尺寸、密度、晶体取向的协同调控,为构建高性能光电界面奠定结构基础,同时体现低温、低成本、可规模化制备的应用优势,符合柔性光电器件发展需求。

1.2 Al掺杂ZnO纳米线阵列紫外光探测器制备

工作人员先将烘干样品放在马弗炉中,环境温度为450℃,退火1 h,有效消除水热过程中残留的有机杂质,修复晶格缺陷,并激活Al³⁺施主能级,全面提高载流子浓度、迁移率,同时增强纳米线和FTO基底之间的欧姆接触特性。退火后自然冷却,避免热应力导致的结构开裂。随后采用高导电性银胶在FTO叉

作者简介: 李向前(1973-),男,硕士研究生,副教授,研究方向:计算机应用。

指电极两端分别粘接铜引线，确保低接触电阻、机械稳定性，引线接入 Keithley 4200 等光电测试系统。器件结构为典型的平面叉指型，光敏层即垂直取向的 Al:ZNWAs，其高比表面积和定向载流子传输路径有效促进光生电子-空穴对分离，有效控制其复合。该制备流程具有简洁、无需复杂光刻、真空蒸镀等特征，保留 ZnO 本征紫外选择性，同时通过退火优化电学性能，为后续系统评估不同 Al 掺杂浓度对响应度提供可靠器件平台。

1.3 器件表征

器件表征采用多尺度分析手段，系统评估 Al 掺杂 ZnO 纳米线阵列的光电性能。SEM 观测显示纳米线呈六角柱状，垂直基底生长，直径约为 80 ~ 120 nm，长度 1.5 ~ 2.0 μm，随着 Al 掺杂浓度不断增加，大幅度提高线密度，但高掺杂样品出现轻微团聚；EDS 谱图证实 Al 元素均匀分布且原子比和投料比基本一致^[1]。XRD 图谱仅呈现 ZnO 纤锌矿(002)主峰，无杂相，表明 Al³⁺ 成功取代 Zn²⁺ 晶格位点，并未破坏晶体取向性。

(002) 峰位随掺杂量微移，反映晶格压缩应变。光电性能测试采用 Keithley 2400 在暗态和 365 nm 紫外光照下记录 I-V、I-t 曲线。所有器件均呈现较强的光生电流响应，其中 1%Al 掺杂样品在 0 V 偏压下即表现出高响应度，主要原因是优化的载流子浓度和表面氧吸附动力学平衡。该表征体系从形貌、成分、晶体结构到电学响应形成闭环验证，为性能差异提供微观机制支撑^[2]。

进一步的光响应动力学分析表明，Al 掺杂显著调控 ZnO 纳米线的表面态密度、载流子复合速率。瞬态光电流测试显示，1% 掺杂样品的上升时间 (τ_n) 和衰减时间 (τ_d) 明显快于未掺杂及高掺杂样品，说明适量 Al 引入有效抑制深能级缺陷，促进光生电子-空穴对的分离与传输。同时，Mott-Schottky 测试揭示其平带电位负移，载流子浓度提高近一个数量级，证明电导率增强的内在机制。结合 XPS 价带谱分析，Al 掺杂还引起费米能级上移，优化能带结构，有利于界面电荷转移。

2 研究结果与分析

2.1 晶体结构与形貌特性分析

XRD 图谱(见图 1)表明，所有 Al 掺杂 ZnO 纳米线阵列(ZNWAs)均呈现典型的六方纤锌矿结构，未检测到 Al₂O₃，证实 Al³⁺ 成功替代 Zn²⁺ 进入晶格。随着 Al 掺杂浓度不断增加，(100)、(002)、(101) 衍射峰强度先增强后减弱，1% 样品达到峰值，反映其结晶

质量最优；更高掺杂引发晶格畸变，导致衍射强度下降。SEM 图像(见图 2)显示纳米线垂直 FTO 基底生长，顶端呈六边形截面，直径由未掺杂的 20 ~ 40 nm 增加 4% 掺杂的约 80 nm，主要原因是 Al³⁺ 改变表面能。截面 SEM(见图 2(f))测得 1% 样品长度约 300 nm，阵列致密且取向一致。EDS 谱(见图 3)明确检出 Zn、O、Al 三元素，结合电阻率下降两个数量级、XRD 无杂相，排除 Al 单质残留，确证 Al 有效掺入晶格^[3]。

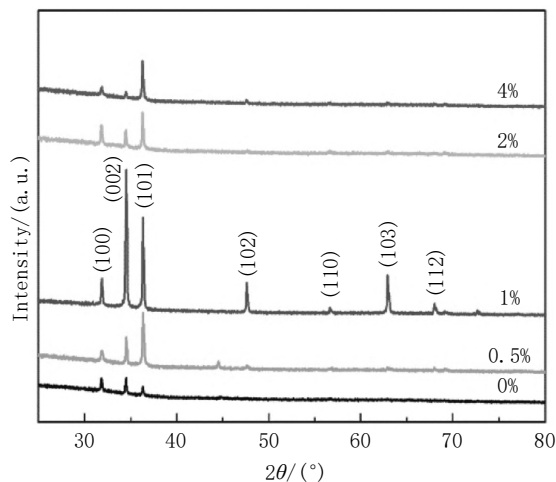


图 1 XRD 图谱

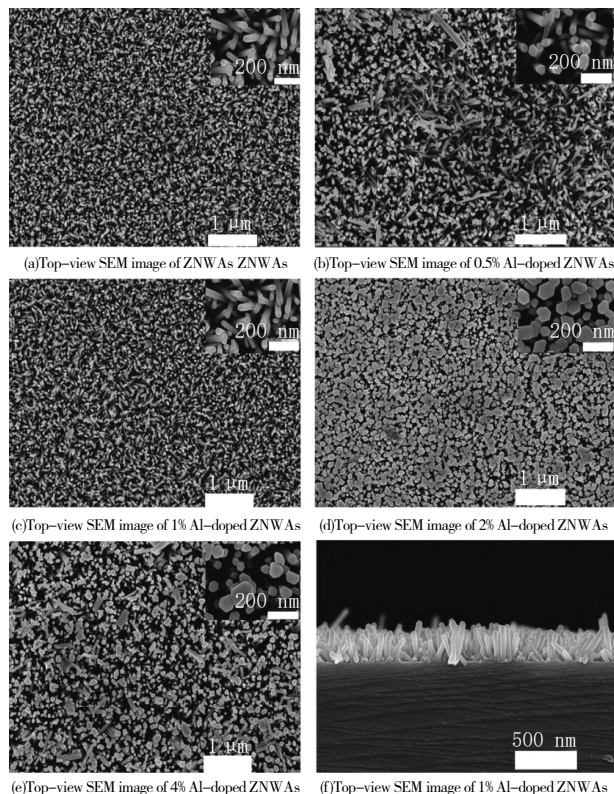


图 2 不同 Al 掺杂 ZNWAs 的 SEM 图

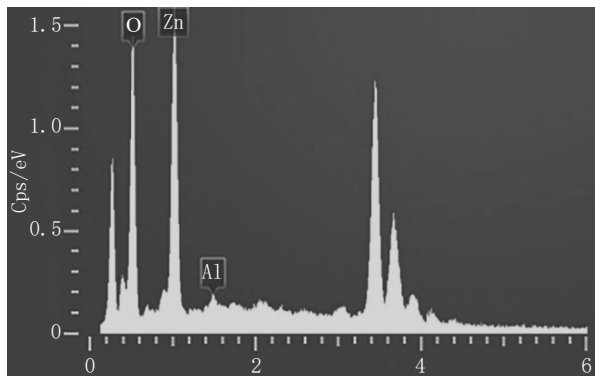


图3 1%Al掺杂ZnO的EDS图谱

2.2 光电响应性能定量评估

器件在 $-5 \sim 5$ V偏压下I-V特性显示,所有探测器暗电流相对较低,表明良好绝缘性。1%Al掺杂样品暗电流显著升高,反映其电阻率最低,来自适量 Al^{3+} 施主激活提高自由电子浓度^[4]。在365 nm紫外光照下,光电流普遍提升1~2个数量级,其中1%样品在0 V

表1 不同Al掺杂ZnO紫外光探测器主要性能参数

Al掺杂浓度	灵敏度 S (0 V)	响应度 R_λ ($\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$, 5 V)	上升时间 τ_r (s)	下降时间 τ_d (s)	探测率 D (Jones, 5 V)	外量子效率 EQE (%)
0%	2.39	17.9	11.58	17.39	1.71×10^{11}	8.96
0.50%	2.6	646	10.54	53.36	3.40×10^{11}	323
1%	83.2	6 180	4.12	14.45	1.51×10^{12}	3 090
2%	0.12	9.6	49.83	24.59	3.55×10^9	4.77
4%	0.07	0.012	1.76	6.43	1.12×10^8	0.0 058

3 结束语

本研究通过水热法在FTO叉指电极上成功制备取向一致、结晶良好的Al掺杂ZnO纳米线阵列,并系统构建系列自驱动型紫外光探测器。实验表明,Al掺杂浓度显著调控器件光电性能,1%掺杂样品展现出最优响应度、比探测率、外量子效率,其原因是高结晶质量、适宜载流子浓度、高效表面光电过程的协同作用。过量掺杂则由于晶格畸变加剧非辐射复合和光散射,导致性能退化。该工作不仅体现了施主掺杂对于ZnO一维结构光电特性的调控机制,还验证了低温溶液法在构建高性能、低成本、大面积紫外探测器方面的可行性,为柔性光电子、环境监测、军事预警等领域的器件开发提供了可靠的技术路径。

参考文献:

[1] 袁兆林,许庆鹏,谢志文,等.A1掺杂ZnO纳米线阵列紫外光探测器特性[J].光子学报,2024,53(07):118-126.

偏压下电流由 4.11×10^{-10} A增至 3.46×10^{-8} A。依据计算性能参数,1%器件灵敏度(S)达到83.2,响应度6 180 mA/W,比探测率 1.51×10^{12} Jones,外量子效率3090%,显著优于其他掺杂比例(如表1所示)。过量掺杂由于受到载流子迁移率下降、光散射增强因素影响,导致其急剧劣化^[5]。

2.3 响应动力学与综合性能对比

I-t测试在3 V偏压、周期性紫外开关条件下进行,所有器件呈现可重复光响应^[6]。1%Al掺杂样品响应/衰减时间分别为4.12 s和14.45 s,优于未掺杂(11.58/17.39 s)及高掺杂样品,表明适量Al掺杂加速表面氧吸附/脱附动力学,促进光生载流子分离。该表现主要受到多个因素影响,如高结晶质量减少体相复合,优化载流子输运降低暗电流,有序阵列增强光捕获^[7]。该研究证实1%Al掺杂为ZnO纳米线紫外探测器性能提升的有效策略,具备自驱动、高灵敏、低成本的应用优势^[8]。

[2] 袁兆林,胡宇杰,吕季辉,等.ZnO纳米线阵列/PVK异质结紫外光探测器特性[J].光学学报,2022,42(22):7-12.

[3] 徐如意,李思雨,张清,等.基于微柱阵列的ZnO纳米线的微流控合成[J].微纳电子技术,2024,61(07):77-85.

[4] 吴茜,彭嘉隆,江金豹,等.等离子体增强型ZnO基纳米线异质结阵列光电探测器[J].红外与激光工程,2024,53(03):201-210.

[5] 周阳阳,张子英,翁滢.ZnO超细纳米线阵列的制备及其电化学性能[J].人工晶体学报,2021,50(03):536-541,547.

[6] 刘远港,张彦,张杰,等.电喷雾发射极超润湿性ZnO纳米线覆层的电沉积制备工艺[J].河北工业科技,2025,42(01):95-102.

[7] 李可心,靳晓频,高志远,等.Ga₂O₃纳米线在水热法合成中选择性生长弱化的原因[J].电子学报,2025,53(06):1906-1916.

[8] 刘佳,张英华,黄志安,等.三维ZnO/CdS/NiFe层状双金属氢氧化物光电催化氧化甲烷[J].工程科学学报,2021,43(08):1064-1072.

机电一体化技术在智能制造中的应用研究

马思颖

(秦皇岛环保产业集团有限公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要 机电一体化技术是将机械工程、电工与电子技术、微电子技术、计算机技术、信息技术、传感与检测技术、信号处理与转换技术等多种学科有机融合而形成的综合性技术, 通过多技术协同实现设备与系统的高性能运行。在技术运作中机械化行为提供系统的运动与承载, 信息技术实现数据处理、逻辑决策和系统集成, 二者深度耦合构成高度集成化和智能化的技术框架。当前, 机电一体化技术已广泛应用于工业生产线、智能制造装备、汽车制造、航空航天以及精密仪器等多个领域, 该技术在提高生产效率、提升产品质量、降低能耗与人工成本方面发挥着不可替代的作用, 成为推动制造业数字化、智能化转型的关键技术支撑。

关键词 机电一体化; 智能制造; 传感器技术; 数据通信; AI 技术

中图分类号: TH-39

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.007

0 引言

机电一体化技术是一种以机械工程为基础, 将电气工程、电子技术、微电子技术、计算机与信息技术等多学科技术进行深度融合的综合性工程技术体系, 在机电一体化技术过程中通过系统化设计与集成化应用, 实现机械系统与电子控制系统之间的协同运行与智能控制。现代工业化的发展不断地向自动化、数字化与智能化形态升级, 机电一体化在工业建设中成为推动制造体系升级的重要技术支撑。在工业技术的使用中, 为了提高生产体系的生产运转, 采用将机械结构、传感检测装置、控制系统以及软件算法等多个环节的有机整合, 使设备能够完成数据采集、信息处理以及自动调节等功能。与传统以人工经验为主导的操作方式相比, 机电一体化系统依托传感器、控制器以及计算机程序的协同工作, 实现对设备状态与生产参数的实时监测和精确调控, 使生产过程更加规范化与可控化^[1]。在工业生产中, 机电一体化理念推动工业技术的革新发展, 保障产业结构的持续升级。机电一体化技术被广泛运用到工业生产装备、自动化产线、智能加工体系以及现代制造装备等众多领域, 有效降低人工操作引起的误差, 保障生产流程的智能化与整体运转效率大幅提升。依托信息网络, 实现企业生产线设备数据的统一管控和协同配合。

1 机电一体化技术在智能制造中的重要作用

1.1 提供高精度技术支持

机电一体化技术使得智能制造体系为企业生产提供了坚实而系统化的高精度技术保障和完善的技术支

持, 实现自动化装备与智能控制手段的深度融合。通过构建高精度高质量的自动化生产, 机电一体化技术使生产系统能够根据产品结构、工艺参数和需求的变化, 完成配置调整与功能切换, 实现数据精准的生产模式^[2]。例如: 在采用智能控制系统对工艺数据进行分析与处理的过程中, 可以实现对设备运行状态和加工参数的精细管理, 使得企业生产线中生产环节保障在高精度控制范围内。企业可以运用工业机器人精度高、动作误差小的特点, 在精细的加工与装配任务过程中, 基于机电一体化的精准生产调度系统, 通过有效协调设备、物料与工序间的动态耦合关系, 实现对生产优化与资源配置的全局控制, 有效减少人为操作误差、有效提升工业制造的精确度, 实现以高精度自动化设备运行为核心的生产新形态。

1.2 提供高效率、高质量生产

机电一体化技术通过在技术应用中的状态感知与过程监控能力, 依托高灵敏度的传感器, 对温度、压力等关键运行参数进行持续采集与分析, 实现生产系统对各类变化作出及时响应。借助精确的数据反馈与控制算法, 系统可以对执行机构的运行状态进行细致调节, 如企业在智能化生产进程中, 可以在自动化产线上配备专业智能的工业机械臂、物料传送设备以及在线监测模块等智慧化装置, 更好地应对机械化操作时出现外部环境变化的情况, 快速实现信息收集与研判, 提升整体调控的精准度, 维持生产环节的平稳有序。而智能制造所依托的以数据为支撑的机制, 可有效遏

作者简介: 马思颖 (1986-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 机电一体化。

制误差的出现,避免产生产品质量的波动,为产品统一性和可靠性提供有效保障。在依托机电一体化技术实现协同运行的同时,能够实现无需人工直接参与的前提下完成复杂而精密的装配、搬运与检测作业^[3]。在企业生产中,根据生产负荷和工序节拍对运行节奏进行合理调整,保障生产效率的有效提升。运用智能化操作体系,对生产过程进行实时监视与动态调控,系统可自动识别运行偏差并进行有效修正和优化,使得智能制造更好地提升企业生产效率。

1.3 提供稳定设备安全

在智能制造系统中,机电一体化技术通过对设备运行状态的智能控制,使得设备运行中依托多种传感装置对关键运行参数进行持续采集,通过将信息数据快速传输至控制与分析系统,实现对生产线整体状态的实时掌控。例如:在企业制造过程中,要实时掌握智能化控制对采集数据的动态分析,通过反馈的数据信息,通过平台的运算处理,能够直观反映设备运行是否处于正常范围。生产系统借助预测性分析机制,能够提前规划具有针对性的措施,防止意外停机或者安全风险事件的出现。例如:在产品制造环节过程中,如出现与标准作业状态偏差的情况下,就会通过数据变化或者参数异常等形态表现出来,使得潜在故障扩大化前就发出预警信号。机电一体化技术通过高效整合安全传感器、执行机构与控制单元,对设备运行过程中的操作行为和环境条件进行实时监控,一旦数据分析检测到风险隐患,控制系统将迅速启动干预机制,调整运行状态、发出预警报警,降低事故发生概率,防止风险进一步扩大,为设备管理、生产优化以及安全策略提供数据支持^[4]。

2 机电一体化技术在智能制造中的重要价值

2.1 提高资源利用率

机械系统、电子控制系统以及信息处理系统进行深度融合,机电一体化技术能够在生产运行过程中构建完善的数据采集与状态监测体系,使制造设备在运行时能够持续获取各类关键运行信息。例如:在制造过程中,依靠传感器装置与控制系统的协同工作,对设备的运行状态、能量消耗情况以及生产过程中的关键参数进行持续性采集,将这些信息实时传输至控制系统或管理平台进行处理与分析,企业能够更加清晰地掌握生产设备的运行状况以及资源消耗情况,及时发现生产过程中可能出现的异常情况或效率偏低的问题,并根据分析结果对相关生产环节进行针对性调整,以减少不必要的资源损耗并提升整体利用水平^[5]。

2.2 保障生产制造质量

通过在生产设备与生产线中配置高精度传感装置,系统能够持续获取生产过程中各类关键参数信息,将这些数据实时传输至控制系统进行分析与处理。在这一过程中,传感器、控制单元以及执行机构之间形成紧密配合,使设备能够根据获取的数据自动调整运行状态,从而保证各项工艺参数始终保持在合理范围之内。例如:在生产线设备出现温度波动、设备负载的不良情况下,系统能够迅速完成数据采集与反馈处理,通过计算机控制程序对相关参数进行动态修正,使设备运行状态及时恢复到稳定区间。要保障生产设备在运行期间能够维持较高的控制精度,具备实时监测与自动调节机制,有效降低人为操作误差给生产质量带来的影响。例如:若设备负载出现变动,机电一体化系统会迅速响应,完成数据采集工作,及时对采集到的数据进行反馈处理。借助计算机控制程序,系统能够对相关参数展开动态修正,保障设备运行状态快速回归至稳定区间,实时监测与自动调节机制使得生产设备在运行过程中能够保持较高的控制精度,使制造环节更加稳定可靠。

2.3 降低安全风险

在制造生产环节安装多种类型的传感器和检测装置,能够在采集设备运行过程中,对多项关键参数,如温度、压力等进行采集整理。通过控制系统,将传输至数据处理平台,使得数据信息得到集中分析与处理,形成完整的设备运行信息记录。同时,数据监控和智能平台对设备运行数据进行深度分析,对数据趋势进行分析和预测评估。通过分析数据的变化规律,机电一体化技术能够提前预判设备出现的故障,为维护人员预留出充足的处理时间,维护人员就能根据系统的预警信息,及时采取针对性的维护或调整措施,降低安全风险的发生,使得生产系统始终维持在稳定可靠的运行状态之中。在对生产过程中各类数据的实时监控和智能分析算法深度挖掘数据过程中,提前预判识别潜在设备故障,及时采取有效的干预措施,避免因设备突发故障而导致的生产出现问题,同时也能有效预防安全事故的发生。相较于传统依赖人工经验判断的安全管理模式,这种基于数据与智能的管理方式极大地减少了人为因素带来的不确定性,降低了人为判断失误所引发的风险,为生产人员和设备安全提供更好的安全保障,使生产管理更加科学和稳定运行,为企业的持续高效生产提供有力保障。

3 机电一体化技术在智能制造中的应用

3.1 传感器技术的应用

在智能制造系统下,高速通信与数据处理技术发挥着关键支撑作用,使得大规模数据得到了高效传输。随着设备性能和计算机系统的持续升级,相关硬件组件的数据刷新速度大幅提高,传感器所获取的信息越发的海量,系统在单位时间内能够处理和传输的数据内容的需求也逐步提高。传感器技术作为机电一体化技术在智能制造中的重要应用技术,是实现智能化与信息化的关键一环。在企业的生产过程中,就要求具有快速响应和稳定测量的能力,高效完成信息采集任务,保证整体信息数据的准确性,通过在生产设备、加工单元及关键工序节点上合理布置多类型、高精度且高灵敏度的传感装置,系统能够持续获取生产过程中各类物理量和运行状态信息,为机电控制策略制定与智能决策提供了有效的数据来源。例如:在企业的生产环节中,具有高敏感、高精度的传感设备被用于实时监测设备运行状态和生产环境参数,为精细化控制和生产过程优化提供了重要支持。系统通过对采集到的数据进行持续分析与综合判断,能够及早识别潜在隐患或异常变化,进而采取有针对性的调控措施,维持生产过程的稳定运行,提高整体生产效率。

3.2 智能控制的应用

在智能制造领域中,机电一体化技术对智能控制的应用,为生产系统实现高度自动化与智能化提供了重要支撑。智能控制技术依托先进的控制算法以及数据分析方法,使生产系统具备自主分析能力,可以做到根据生产目标、工艺要求以及外部环境变化,对整个制造流程进行动态优化与灵活调整,更好地适应多样化和杂化的生产任务。在自动化生产线运行过程中,智能控制系统可以综合分析产品规格、工艺参数以及设备运行状态等信息,实现自动设定和修正生产节拍与控制参数,在保证加工精度的同时有效提升生产效率和产品质量。在设备运行管理中,智能控制技术通过对设备状态数据的持续采集与分析,实现对运行趋势的判断与潜在故障的提前预警,减少非计划停机的发生频率,延长设备的服役周期并降低整体运营成本。智能控制技术还在制造系统的协同运行中发挥着重要作用,通过统一的控制逻辑与信息交互机制,使不同设备、工序及生产环节之间实现高效衔接与协调配合,避免资源浪费和运行冲突,提升生产系统的运行效率与协同性。

3.3 数据通信的应用

数据通信技术通过构建稳定和高速的信息传输网络,将生产现场中的设备控制以及管理系统紧密连接,

形成贯通整个制造过程的信息交互通道,使不同设备和不同功能模块之间实现实时数据共享与高效联动。在生产线运行过程中,高速传播的数据保障了各类设备能够及时获取运行状态、工艺参数和作业进度,使得设备在统一的信息基础上实现精确配合与协同作业,避免因信息滞后或不对称而造成的效率下降和运行冲突。通过持续的通信传输,生产系统能够保持连贯性和稳定性,保障制造有序推进。数据通信技术打破了空间限制,使企业管理人员和技术支持人员能够借助网络平台远程访问生产现场的实时数据,对设备运行状况、生产进度以及质量信息进行全面掌控,即使不在现场也能迅速发现异常并作出科学决策,提升管理效率和响应速度。

3.4 AI 技术应用

机电一体化技术与人工智能(AI)技术的深度融合,使生产系统在感知、分析与决策层面实现高水平的智能化运行。通过在设备和生产线关键位置合理配置多类型传感装置,并结合仿生控制程序和智能算法,制造系统能够对自身运行状态、环境变化以及作业过程进行全面感知,使系统能够在复杂工况下持续掌握设备和人员的安全状态,为生产安全提供多重保障。

4 结束语

在全球制造业加速向数字化、和智能化方向转型的背景下,智能制造已成为各国提升产业竞争力和实现高质量发展的关键战略。随着制造过程复杂程度的不断提高,机电一体化技术借助优化算法和智能决策手段持续改进系统性能,通过引入人工智能、物联网和大数据分析等技术,实现设备互联和信息共享,构建更加灵活和智能的生产模式与产业形态。机电一体化技术为智能制造系统的高效运行和持续发展提供了坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 王泽琪.智能制造中的机电一体化应用[J].设备管理与维修,2023(12):129-130.
- [2] 王晨丰,赵鹏,王磊.机电一体化技术在智能制造中的应用[J].石河子科技,2024(04):32-33.
- [3] 刘娟桂.机电一体化技术在智能制造中的实践探索[J].信息记录材料,2021(06):98-99.
- [4] 王迅.智能制造背景下机电一体化技术在机械制造工程中的应用策略研究[J].造纸装备及材料,2024,53(06):79-81.
- [5] 张建兵.智能制造下机电一体化技术在机械制造工程的发展路径探究[J].大科技,2023(21):115-117.

基于数字孪生技术的供暖系统 仿真与优化研究

柴 巍

(甘肃蓝野建设监理有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要 数字孪生技术凭借虚实映射、实时交互、仿真推演的核心能力,为供暖系统全流程管控升级提供了全新技术路径。本文围绕数字孪生技术与供暖系统的融合应用展开系统性研究,深入阐释二者的底层适配逻辑,梳理数字孪生技术在供暖系统仿真环节的核心应用维度,同时提出技术驱动下供暖系统优化升级的具体实施路径。研究成果旨在为城镇供暖系统的数字化转型与智慧化升级提供理论参考,助力供暖行业实现低碳高效的高质量发展目标。

关键词 数字孪生技术; 供暖系统; 系统仿真; 智慧供热

中图分类号: TU83; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.008

0 引言

城镇集中供暖是北方地区冬季民生保障的核心工程,直接关系到居民生活质量与社会运行稳定。在“双碳”战略全面落地的背景下,供暖行业面临着节能降耗与供热品质提升的双重发展要求,传统的运行管控模式存在信息滞后、协同不足、预判缺失等固有难点,已难以适配行业精细化、智能化的发展趋势。数字孪生技术作为工业数字化转型的核心支撑技术,能够打破物理系统与数字空间的壁垒,为供暖系统的全周期管控提供全新的技术范式。本文围绕数字孪生技术在供暖系统中的应用展开系统性分析,厘清技术与行业需求的适配逻辑,明确仿真应用的核心场景,提出针对性的系统优化路径,为供暖系统的智慧化升级提供完整的思路参考。

1 数字孪生技术与供暖系统的适配逻辑

1.1 实现供暖系统虚实深度映射

供暖系统的物理实体分布范围广、设备类型多、运行工况复杂,传统的数字化管理模式仅能实现单一设备或单一环节的信息采集与展示,无法形成全系统的整体性数字表达。数字孪生技术构建的虚实映射体系,能够将分散的物理单元整合为统一的数字整体,完整还原系统内各组成部分的空间位置、连接关系、运行参数与动态变化,让物理系统的每一处运行状态变化都能在数字空间得到精准同步。

1.2 支撑系统运行动态实时感知

数字孪生技术构建的感知体系,能够打通供暖系统全链条的数据采集、传输、整合与应用环节,实现对系统运行状态的动态实时感知。数字孪生体系能够整合热源出力、管网压力、供水温度、回水温度、流量流速、设备运行状态等多维度运行数据,同时接入室外气象温度、风力风向、建筑围护结构特性等外部影响数据,形成覆盖系统内外部影响因素的全维度数据感知网络^[1]。依托实时数据传输与处理能力,数字孪生系统能够实现运行数据的毫秒级同步更新,让管控端能够实时掌握系统全流域的运行动态,彻底改变传统模式下数据滞后状态不明的管控困境。

1.3 保障仿真分析精准高效开展

数字孪生技术依托完整的虚实映射体系与实时感知数据,能够为供暖系统提供精准高效的全维度仿真分析能力,打破传统仿真模式的局限性。数字孪生驱动的仿真分析,不再是基于固定参数的静态模拟,而是结合实时运行数据、外部环境变化、用户用热需求等动态因素的动态仿真推演,能够高度还原不同工况下系统的真实运行状态。通过数字孪生系统,能够在数字空间中模拟各类运行参数调整、外部环境变化、设备工况波动对整个供暖系统带来的影响,精准计算不同场景下的热力传输、水力平衡、能耗变化等核心指标,为系统运行调控提供可量化的参考依据。以新

作者简介: 柴巍(1986-),男,本科,工程师,研究方向:建筑环境与设备工程。

疆阿克苏阳光热力有限公司联合航天晨光、浙江大学等科研院所打造的智慧供热综合管控平台为例，其构建了基于自主知识产权的“城市供热数字孪生体”。这套仿真系统能像“天气预报”一样实时预演未来热负荷波动，通过对某区域管网改造的模型预演，节省管道材料 12%，工期缩短近两个月。2024-2025 年采暖季依托多热源智能调度算法，节约标准煤超 1 万吨，减排约 2.8 万吨二氧化碳，相当于 25 万棵冷杉 30 年的固碳效果^[2]。

2 数字孪生技术在供暖系统中的仿真应用

2.1 模拟系统全域运行状态参数

供暖系统的运行管控核心在于对全系统运行状态的精准把握，而系统全域的运行状态由海量动态变化的参数共同构成，涵盖热源、热网、热力站、热用户全链条的水力、热力、设备运行等各类参数，且各参数之间存在复杂的耦合关联关系。数字孪生技术的仿真应用，首先体现在对系统全域运行状态参数的全维度高精度模拟。在传统的运行管控模式中，仅能通过有限的监测点位获取离散的参数数据，无法掌握系统全域的参数分布与动态变化，也难以厘清不同参数之间的相互影响。数字孪生驱动的仿真模拟，能够基于实时采集的监测数据与系统内在的物理运行规律，模拟计算出系统全域各个节点各个管段的运行参数，完整还原整个供暖系统的水力工况与热力工况分布^[3]。无论是主管网的压力温度变化，还是支线管网的流量流速分布，抑或是末端热力站的换热效率与用户端的室内温度变化，都能通过仿真模拟得到精准的量化结果。

2.2 研判供热传输损耗变化趋势

供热传输损耗是影响供暖系统能源利用效率的核心因素，也是供暖行业节能降耗工作的核心管控对象。供热传输损耗的产生与变化，受管网保温性能、水力工况、热力工况、环境温度、运行负荷等多重因素的综合影响，呈现出复杂的动态变化特征，传统模式下难以对损耗的分布情况与变化趋势进行精准的研判与管控。数字孪生技术的仿真应用，为供热传输损耗的全维度研判提供了全新的技术手段，能够实现对系统传输损耗的精准量化、分布定位与趋势研判。通过数字孪生仿真系统，能够对供暖管网全线路的传输损耗进行精细化的模拟计算，精准量化不同管段、不同区域的热损失量与损耗率，清晰定位系统内高损耗的环节与节点，彻底改变传统模式下只能核算整体损耗无法精准定位损耗分布的困境^[4]。依托多维度的仿真推演

能力，能够分析不同运行参数、不同环境条件、不同调控方案对传输损耗的影响规律，厘清各类因素与损耗变化之间的内在关联，为损耗管控提供精准的靶向方向。数字孪生仿真系统能够结合历史运行数据、实时工况变化与气象预测数据，研判供热传输损耗的未来变化趋势，预判不同时段、不同场景下的损耗波动情况，为供暖系统的节能管控提供前置性的决策依据。

2.3 预判系统运行潜在风险问题

供暖系统的安全稳定运行是民生保障的核心前提。在系统运行过程中，设备故障、管网泄漏、水力失衡、压力超限等各类风险问题，不仅会影响供热质量，严重时还会引发安全事故，造成民生保障中断与经济损失。传统的运维管理模式多为事后处置与定期检修，难以提前识别与预判系统运行中的潜在风险，无法实现风险的前置防控。数字孪生技术的仿真应用，能够依托系统运行的全维度数据与仿真推演能力，实现对供暖系统运行潜在风险的提前预判与精准识别，推动运维管理模式从事后处置向事前预防转型。数字孪生仿真系统能够基于系统的历史运行数据与实时运行参数，构建系统正常运行的基准工况模型，通过仿真模拟对比实时运行状态与基准工况的差异，精准捕捉系统运行中的异常参数变化，识别出潜在的风险隐患。针对管网泄漏风险，通过仿真模拟管网压力与流量的分布变化，能够精准定位微小泄漏引发的参数异常，在泄漏问题扩大前完成风险预警与定位。针对设备故障风险，通过仿真模拟核心设备的运行参数变化规律，能够预判设备性能衰减趋势与潜在的故障风险，为设备的预防性维护提供依据。针对水力失衡、压力超限等系统运行风险，通过仿真推演不同工况下的系统运行变化，能够预判极端天气、负荷突变等场景下可能出现的工况失衡问题，提前制定应对预案。

3 数字孪生技术驱动供暖系统优化的建议

3.1 优化供热参数智能调控方案

供热参数调控是供暖系统运行管理的核心环节，调控的精准度直接决定了供热质量与系统运行效率。传统的供热调控多以经验式的人工调控为主，存在调控滞后、精度不足、供需不匹配等问题，难以适配复杂多变的运行工况与用户用热需求。数字孪生技术的应用，能够为供热参数智能调控方案的全面优化提供核心支撑，推动供热调控模式从经验驱动向数据驱动、从滞后调控向前瞻调控、从粗放管控向精准调控转型^[5]。依托数字孪生系统的全维度虚实映射与实时感知能力，

能够全面掌握系统全链条的运行参数、外部环境变化与末端用户的用热需求,为调控方案的制定提供全面、精准、实时的数据基础,彻底改变传统调控中数据不全状态不明的困境。借助数字孪生系统的仿真推演能力,能够对不同的参数调控方案进行预演,精准量化不同调控方案下的供热效果、能耗变化与系统工况影响,筛选出兼顾供热质量与节能降耗的最优调控方案,实现调控方案的科学决策与精准制定。

3.2 提升能源利用整体效率水平

在“双碳”背景下,提升能源利用效率是供暖行业高质量发展的核心任务,也是供暖系统优化升级的核心目标。传统供暖系统的能源利用管控多集中于单一环节的节能改造,缺乏全系统、全流程的能效优化手段,难以实现能源利用效率的系统性提升。数字孪生技术的深度应用,能够为供暖系统能源利用效率的全方位提升提供系统性的解决方案,从全链条、多维度推动节能降耗工作的落地见效。数字孪生系统能够对供暖系统从热源生产、管网传输到末端用热的全链条能源消耗情况进行全维度的数字化管控,精准量化各个环节的能源利用效率与损耗情况,清晰定位系统内能效偏低的环节与节能潜力空间,为能效提升工作提供精准的方向,避免传统节能改造中盲目施策效果不佳的问题。依托数字孪生的仿真分析能力,能够对各类节能技术、改造方案的应用效果进行预演与评估,量化不同节能措施带来的能效提升效果,筛选出适配系统实际情况的最优节能方案,降低节能改造的试错成本,提升节能改造的投入产出比。通过数字孪生系统的全流程协同优化,能够打破热源、热网、末端用户之间的管控壁垒,实现全系统的能效协同优化^[6]。在热源端,能够根据系统仿真推演的用热需求,优化热源的出力分配与运行工况,提升热源生产环节的能源转化效率。在管网传输端,能够通过优化水力热力工况,最大限度降低传输环节的能源损耗。在末端用热端,能够通过精准的供需匹配,避免末端过热造成的能源浪费,实现全链条的能效协同提升。

3.3 完善系统运维管理响应机制

运维管理是保障供暖系统长期安全稳定运行的重要支撑。传统的供暖系统运维管理多采用定期检修、故障后抢修的被动式运维模式,存在运维效率低、故障处置慢、人力成本高、风险防控不足等问题,难以适配大规模复杂化的供暖系统运维管理需求。数字孪生技术的应用,能够推动供暖系统运维管理机制的全面优化与完善,构建起事前预防、事中精准处置、事

后闭环优化的全周期运维管理体系,全面提升运维管理的效率与质量。依托数字孪生技术的风险预判能力,能够实现对系统运行潜在风险的提前识别与预警,推动运维管理模式从被动的故障处置向主动的预防性维护转型。通过对系统设备、管网的运行状态进行持续的仿真分析与状态评估,能够精准预判设备性能衰减、管网老化等潜在问题,制定针对性的预防性维护计划,在故障发生前完成隐患排查与处理,最大限度减少故障停机事件的发生,保障系统的连续稳定运行。数字孪生技术能够大幅提升故障处置的精准度与响应效率。当系统出现故障问题时,数字孪生系统能够通过运行参数的异常分析与仿真定位,快速精准地确定故障发生的位置、类型与影响范围,为运维人员提供精准的故障信息与处置指引,大幅缩短故障排查的时间,提升故障处置的效率。

4 结束语

数字孪生技术与城镇供暖系统的融合应用,具备坚实的底层适配逻辑与广阔的应用空间。数字孪生技术通过虚实深度映射、动态实时感知与精准仿真分析,能够全面破解传统供暖系统运行管控中的难点问题,为供暖系统的仿真分析提供全维度的技术支撑。同时,驱动系统在运行调控、能效提升、运维管理等方面可实现全方位优化升级。在数字化转型与双碳战略的双重背景下,数字孪生技术将持续推动供暖行业的智慧化升级,助力构建低碳高效、安全稳定、精准智慧的新型城镇供暖体系,为民生保障提质与行业高质量发展提供持续的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张文祥,姚凌云,李云祥,等.数字孪生运维平台在某项目中的研究与应用[J].现代建筑电气,2024,15(04):86-90.
- [2] 中国科技网.新疆阿克苏:“数智防护盾”为城市供热解困增效[DB/OL].(2025-07-01).https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-07/21/content_373157.html.
- [3] 许亮,杨峪峰,陈占国.基于LabVIEW和Matlab的数字孪生供热系统平台的设计与仿真[J].计算机测量与控制,2023,31(12):173-179,230.
- [4] 钟威,郑立军,俞自涛,等.基于“数字孪生”的智慧供热技术路线[J].华电技术,2020,42(11):1-5.
- [5] 陈奉奇.一种数字孪生驱动下的供热信息模型通用框架设计[J].中国科技信息,2025(23):95-97.
- [6] 赖博宏,郝俊红,杨天镇,等.数字孪生支撑下综合能源系统的智慧运维发展与挑战[J].中国电机工程学报,2026,46(01):157-172.

基于在线监测数据的电力电缆局部过热诊断方法研究

张嘉昊

(中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300450)

摘要 电力电缆作为电力系统中重要的输电设备, 其运行状态直接影响供电系统的安全与稳定。在长期运行过程中, 受负荷变化、接头接触电阻增大、绝缘老化以及外部环境条件等因素影响, 电缆局部区域可能出现温度异常升高现象。局部过热若未能及时识别与处理, 容易导致绝缘性能下降, 甚至引发电缆故障。随着电力设备状态监测技术的发展, 在线监测系统能够持续获取电缆运行温度、电流以及环境参数等多源数据, 为电缆运行状态分析提供数据基础。在此背景下, 本文围绕电力电缆在线监测数据特征, 对局部过热问题的识别方法进行分析, 通过提取关键监测参数并建立数据关联关系, 构建电缆局部过热诊断思路, 并结合运行数据对诊断过程进行说明, 以期为电力电缆运行维护与故障预警提供技术参考。

关键词 电力电缆; 在线监测; 局部过热; 故障诊断; 运行状态分析

中图分类号: TM247

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.009

0 引言

随着城市电网规模不断扩大以及电力负荷持续增长, 电力电缆在输配电系统中的应用范围逐渐增加。电缆线路通常处于地下或复杂环境中运行, 一旦发生故障, 检修与恢复过程相对复杂, 对供电系统稳定运行产生一定影响。局部过热是电力电缆运行过程中较为常见的异常状态, 其产生原因涉及导体负荷变化、接头接触电阻变化、绝缘材料老化以及外部散热条件变化等多个方面^[1]。当局部区域温度持续升高时, 电缆绝缘性能可能逐渐下降, 进而影响设备运行安全。近年来, 在线监测技术在电力设备状态管理中的应用逐渐增多, 通过实时采集温度、电流及环境参数等运行数据, 为电缆运行状态评估提供连续信息基础。围绕监测数据开展运行状态分析, 逐步成为电力设备故障识别与预警的重要技术手段。

1 电力电缆局部过热问题的形成机理与监测需求

1.1 电力电缆局部过热现象及其主要影响因素

电力电缆在长期运行过程中需要承受持续电流负荷及环境条件变化, 当导体电流增大或散热条件受到限制时, 电缆内部温度会随之上升。在部分运行场景中, 电缆接头、终端或局部绝缘结构区域由于结构复杂或接触电阻变化, 容易形成温度集中的部位, 这些

区域一旦散热不均匀, 局部温度升高现象便会逐渐显现。局部过热的形成通常与多种因素共同作用有关, 如电缆长期处于高负荷运行状态, 导体电阻损耗增加; 电缆接头处接触压力变化或连接结构松动, 导致接触电阻增大; 绝缘材料在长期热应力和电应力作用下出现性能退化; 电缆敷设环境散热条件较差等。当这些因素叠加出现时, 局部区域温度变化往往较为明显, 若缺乏及时监测与识别, 容易在运行过程中逐渐发展为更为严重的设备故障。

1.2 在线监测技术在电缆运行状态评估中的应用需求

电力电缆多数处于地下或封闭通道中运行, 传统巡检方式难以持续掌握电缆运行状态。随着电网设备状态管理理念的发展, 通过在线监测技术获取运行数据逐渐成为电力设备维护的重要手段。在线监测系统能够对电缆温度、电流以及周围环境状态进行连续记录, 使设备运行状态能够以数据形式进行反映。运行数据的长期积累为分析电缆运行规律提供条件, 也为异常状态识别提供依据。当电缆局部区域出现温度变化趋势时, 监测系统能够在数据层面反映这种变化, 使运维人员能够较早发现潜在风险。围绕在线监测数据开展运行状态分析, 可以在设备故障形成之前识别异常变化, 从而为电缆维护与管理提供更加可靠的信息基础。

作者简介: 张嘉昊 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

2 电力电缆在线监测数据来源及特征分析

2.1 电力电缆在线监测系统的组成结构

电力电缆在线监测系统通常由监测传感设备、数据采集单元、通信模块以及数据管理平台构成。传感设备负责对电缆运行状态进行实时感知,常见监测内容包括电缆表面温度、导体电流以及周围环境温度等参数。数据采集单元负责对传感设备获取的数据进行整理和初步处理,并通过通信模块将信息传输至后台管理平台。在数据管理平台中,系统能够对监测数据进行存储、统计以及运行趋势分析,使电缆运行状态以图形或数据形式呈现。通过多层结构协同运行,在线监测系统能够形成持续的数据记录机制,使电缆运行状态能够被长期跟踪和分析。

表1 电力电缆在线监测主要数据类型及特征

监测参数	数据来源	主要反映内容	对过热诊断的作用
电缆温度	分布式温度传感器、光纤测温装置	电缆表面或内部温度变化情况	直接反映局部区域温度异常情况
运行电流	电流互感器、在线电流监测装置	电缆负荷变化情况	判断温升是否由负荷变化引起
环境温度	环境温度传感器	电缆周围环境散热条件	分析环境因素对温度变化的影响
土壤或通道温度	地理传感器或通道监测装置	电缆敷设环境热交换条件	辅助判断散热能力变化

通过对上述监测数据进行综合分析,可以识别电缆运行过程中温度变化的规律。当某一监测点温度明显高于相邻区域,并且与电流变化趋势不完全一致时,往往意味着该区域可能存在局部过热现象。对多源监测数据进行对比分析,有助于提高异常识别的准确性,并为后续故障诊断提供数据依据。

2.3 在线监测数据在故障诊断中的应用基础

在线监测系统所获取的数据能够反映电缆运行状态的变化过程。当电缆处于稳定运行阶段时,各类监测参数通常呈现较为规律的变化趋势。一旦局部区域出现过热现象,温度数据往往会在短时间内表现出异常变化,并与电流或环境变化形成不同程度的偏离。通过对运行数据进行长期积累和趋势分析,可以识别电缆运行中的异常模式。监测数据不仅能够反映当前运行状态,还能够通过历史数据对比发现温度变化的持续性和发展趋势,从而为故障识别提供数据依据^[3]。

3 基于在线监测数据的电缆局部过热诊断方法构建

3.1 电缆局部过热特征参数提取方法

在电缆局部过热诊断过程中,监测数据需要经过一定处理与分析,以提取能够反映设备运行状态的关键特征参数^[4]。温度变化幅度、温度变化速率以及温度与电流之间的关联关系是常用的分析指标。通过对

2.2 温度、电流与环境参数监测数据特征

电力电缆在线监测数据通常具有连续性和周期性特点。温度数据能够反映电缆运行过程中热量变化情况,其变化趋势往往与电流负荷以及环境条件存在一定关联。当电流负荷增加时,导体损耗产生的热量会使电缆温度逐渐升高;在负荷下降或环境散热条件改善时,温度变化趋势会逐渐趋于稳定^[2]。环境参数同样会对电缆温度产生影响,如土壤温度、通道通风条件以及外部气温变化等因素都会改变电缆散热状态。通过对温度、电流与环境参数数据进行综合观察,可以在一定程度上反映电缆运行状态变化情况。为便于对监测数据进行分类与分析,不同类型监测参数的主要特征可进行归纳整理,如表1所示。

温度数据进行时间序列分析,可以观察温度变化是否存在持续上升趋势;通过比较不同监测点之间的温度差异,可以识别局部区域是否存在明显温度偏高现象。电流数据与温度变化之间通常具有一定对应关系,当电流变化不明显而温度持续升高时,可能意味着局部区域散热条件发生变化或存在接触电阻增大情况。在电缆运行状态分析中,导体温升可通过温升计算关系进行表示:

$$\Delta T = T - T_0 \quad (1)$$

式(1)中: ΔT 为电缆运行温升, T 为电缆运行状态下测得的温度值, T_0 为电缆环境基准温度或初始温度。通过对温升值进行持续监测,可以反映电缆运行过程中温度变化幅度,当某一监测区域温升值长期高于正常运行范围并呈现持续上升趋势时,往往表明该区域可能存在局部过热风险。在进一步分析电缆温升形成机理时,还可结合电流与导体电阻产生的热效应建立温升关系式,其表达式为:

$$\Delta T = \frac{I^2 R}{K} \quad (2)$$

式(2)中: I 为电缆运行电流, R 为导体电阻, K 为电缆散热系数。该关系式反映了电缆运行电流、导体电阻以及散热条件之间的相互关系,当电流增大或接触电阻升高时,导体产生的热量随之增加,电缆温度也会相应升高;当电缆周围环境散热条件较差时,

产生的热量难以及时散发,温升幅度会进一步扩大。通过对运行电流、温度数据以及环境参数进行综合分析,可以更加准确地识别电缆温升变化的来源。当某一区域温升值持续偏高并与电流变化规律不完全一致时,往往说明该区域可能存在局部接触电阻增大或散热条件恶化等情况,这些特征能够为电力电缆局部过热诊断提供重要依据。

3.2 基于数据关联分析的过热识别模型

电缆运行过程中产生的多种监测数据之间存在一定关联关系,通过对这些数据进行综合分析,可以提高局部过热识别的准确性。温度与电流数据之间的变化规律能够反映导体负荷与热量变化之间的联系,而环境参数则能够反映外部条件对温度变化的影响。在数据分析过程中,可以通过建立温度变化与电流负荷之间的关联关系模型,对电缆运行状态进行判断。当监测数据与正常运行模式之间出现明显偏差时,系统能够识别可能存在的局部过热风险。数据关联分析能够减少单一参数判断带来的误差,使过热识别过程更加稳定。

3.3 电缆局部过热诊断流程与判断机制

在实际运行管理中,电缆局部过热诊断通常需要按照一定流程进行。监测系统首先对电缆运行数据进行实时采集,并将数据传输至数据管理平台。平台系统通过对监测数据进行统计与趋势分析,识别温度变化是否存在异常情况。当监测数据出现持续升高趋势或温度偏差明显时,系统会对相关数据进行进一步分析,对电流变化及环境因素进行综合判断。通过对多种参数进行综合比对,可以对电缆运行状态形成初步判断。当数据变化趋势持续存在时,运维人员可结合现场运行情况开展进一步检查,从而确定局部过热问题的具体位置及原因。

4 电力电缆局部过热诊断方法的应用分析

4.1 在线监测数据条件下的过热诊断实施过程

在电力电缆运行管理过程中,在线监测系统能够持续获取设备运行数据,并将相关信息传输至监测平台。平台系统通过数据处理模块对温度、电流及环境参数进行统计分析,使运行状态变化能够以趋势曲线形式呈现^[5]。当某一监测点温度变化出现异常时,系统能够通过数据对比分析判断异常程度,并对相关监测点进行重点关注。通过持续观察温度变化趋势,可以判断该异常变化是否具有持续性,从而为局部过热诊断提供依据。

4.2 典型运行场景下的诊断结果分析

在部分电缆线路运行过程中,当接头区域接触电阻出现变化时,监测数据通常会表现为局部温度逐渐

升高,而电流变化幅度相对较小。通过对历史运行数据进行比对,可以发现温度变化趋势与正常运行阶段存在明显差异。监测系统能够通过这种变化特征识别可能存在的局部过热现象,并将相关信息反馈至运行管理人员。通过对监测数据进行进一步分析,可以判断温度变化是否由负荷变化或环境因素引起,从而提高诊断结果的可靠性。

4.3 诊断方法在电缆运行管理中的应用价值

基于在线监测数据开展电缆局部过热诊断,有助于提高电力设备运行管理的科学性。通过对监测数据进行持续分析,可以在设备故障形成之前识别异常变化,使运维人员能够及时采取处理措施。诊断方法的应用使电缆运行状态能够以数据形式进行评价,减少依赖经验判断带来的不确定性。随着监测数据积累不断增加,运行管理系统能够逐步形成更加稳定的状态评估机制,从而提高电缆运行安全水平。

5 结束语

电力电缆运行状态直接关系到电力系统的安全与稳定,在电网规模不断扩大与负荷持续增长的背景下,对电缆运行状态进行动态监测和精准识别具有重要意义。依托在线监测技术所形成的连续运行数据,可以更加客观地反映电缆温度变化规律及运行特征,为识别局部过热风险提供可靠依据。通过对监测数据进行综合分析并建立温升变化与运行参数之间的关联关系,能够提升异常状态识别的准确性,使设备管理从被动检修逐渐向状态评估与风险预警转变。随着监测技术和数据分析方法的不断完善,电力电缆运行管理将逐步形成以数据支撑为核心的状态监测体系,在提高设备运行安全性、降低故障风险以及优化运维管理方面发挥更加积极的作用。

参考文献:

- [1] 高岭,胡琦,高雪婷,等.电力电缆诊断检测技术综述[J].电线电缆,2025,68(04):1-11.
- [2] 王晓康,丁雷,何嘉斌,等.基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障检测方法研究[J].绝缘材料,2025,58(03):125-130.
- [3] 唐琳.基于深度学习的电子电路故障诊断方法研究[J].信息系统工程,2025(07):149-152.
- [4] 任杰,宋钰铭.电力电缆运行状态的在线监测与评估技术研究[J].中国高新科技,2024(14):112-114.
- [5] 周侣,崔昊杨.红外测温技术在电力设备故障诊断中的应用[J].上海电力学院学报,2016,32(06):543-546,569.

工程质量检测数据的智能化分析与 风险预警机制研究

张钰敏

(浙江科宇检测有限公司金华分公司, 浙江 金华 321000)

摘要 工程质量检测数据是控制工程安全和耐久性的重要依据,传统的分析方式存在效率低下的缺陷以及风险预判滞后的问题。本文以当前智能化技术的发展趋势为背景,对工程质量检测数据智能化分析的技术基础进行系统阐述,建立风险识别和评价体系,建立科学完善的预警机制,探究智能化系统实现途径及应用价值。通过融合机器学习、边缘计算、数字孪生等技术,改进数据处理和分析流程,实现对工程质量风险准确识别、动态评价、及时预警的目的,以期为工程质量管控提供技术参考,进而推动建筑业质量管控从传统经验驱动模式向智慧化主动防控模式转型。

关键词 工程质量检测; 智能化分析; 风险预警; 机器学习; 云边协同架构

中图分类号: TU712.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.010

0 引言

随着建筑业向着智慧建造迈进,工程质量检测数据具有了海量、多源、实时化的特征,传统的依靠人工分析、凭经验判断的质量控制方式已经不能适应行业发展的需要。工程质量隐患具有较强的隐蔽性和滞后性,极易诱发质量事故,造成重大人员伤亡与财产损失。因此,建立以智能化技术为依托的质量检测数据分析及风险预警体系具有十分重要的意义。当前,机器学习、物联网、数据可视化等技术的成熟应用给检测数据的深度挖掘和风险提前预警赋予了可能。

1 工程质量检测数据智能化分析技术基础

1.1 数据采集与预处理技术

数据采集和预处理是智能化分析的前提条件,数据的质量决定了分析结果的可靠性。目前已经形成多源异构数据融合体系,采用分布式无线传感网等技术对工程各个方面进行实时采集。选择传感设备时要根据工程场景进行布置,在关键受力部位、混凝土浇筑环节设置相应的传感器,采用无线传输技术保证数据的稳定传输。预处理采用边缘计算与云端协同架构,边缘节点对采集数据进行实时滤波去噪、初步清洗,有效降低云端数据处理压力与传输延迟;云端则依托机器学习算法开展深度预处理,通过智能修复缺失值、

精准处理异常值并保留有价值信息等操作,为后续数据分析工作提供高质量数据支撑^[1]。

1.2 智能化分析方法与模型

智能化分析方法和模型是数据挖掘的核心,用算法优化来准确把握质量的规律、预测趋势。机器学习算法在工程质量检测数据分析中使用较多,分类算法用来识别质量缺陷的种类,回归算法用来预测质量指标的发展趋势,聚类算法用来挖掘出潜在的质量隐患。常用的模型有随机森林等,不同的模型在精度、效率、适用场景上有所不同,要根据数据的特征来决定使用哪种模型。时序数据分析技术对动态数据进行STL分解、DTW算法优化来提高特征选择的准确性,从而降低推理延迟。深度学习模型适合于对图像进行检测,集成学习模型提高复杂数据的分析稳定性。各种模型的特点和适用场景可以比较明确地匹配起来,形成适配逻辑。

2 工程质量风险识别与评估体系构建

2.1 风险识别方法与流程

工程质量风险识别要依靠智能化技术来实现全方位、无死角地发现隐患,以克服传统人工识别所存在的不足。用知识图谱和机器学习相结合的方法来建立工程质量风险知识库,收集历史质量事故案例、规范标准、检测数据等,并利用知识图谱对风险因素进行关联分析和语义检索^[2]。

作者简介: 张钰敏(1998-),女,本科,助理工程师,研究方向: 工程质量检测。

识别流程按照数据驱动、模型匹配、风险定位的顺序来走，首先对预处理好的检测数据做特征提取，再用施工进度、环境条件等辅助数据去匹配风险识别模型，模型通过比较知识库中已有的风险模式来识别出潜在的风险因素，即材料性能不符合标准、施工工艺有违规行为、结构受力不合理等；然后利用数字孪生模型确定风险发生的部位，确定风险的影响范围，得到风险识别报告。风险识别过程是动态更新的，在检测数据不断积累的时候，不断地修正风险模式库，提高风险识别的准确性、全面性，保证隐蔽性的风险和潜在的风险可以及时地被发现。

2.2 风险评估模型设计

风险评估模型以多源异构数据为输入，通过量化分析科学判定风险等级，为预警机制的精准设计提供可靠依据。模型采取层次化的构造方式，底层指标层选择材料强度这类重要的评价指标，用熵权法来确定权重避免主观偏见；中间准则层用模糊综合评价法综合分析各个维度的指标，融合定性与定量指标；顶层目标层给出的是整个风险等级。通过使用 LGBM、CatBoost 等机器学习算法来对历史风险数据进行训练，得到风险指标与后果映射之间的关系，从而可以准确地预测出风险等级。此模型具有动态调节的能力，可以根据施工阶段以及检测的数据及时地改变指标的权重大于评价的逻辑，并且能够适应工程全周期的风险评估需求，而且可以实现多场景适配，在不同的工程中修改评估指标体系。

2.3 风险等级划分与标准制定

风险等级的划分要遵照科学性、实用性原则，按照工程类型、结构重要性和安全规范来量化标准，保证风险等级判断的一致性可比性。按照四级标准划分，低风险、中风险、高风险、极高风险，各个等级对应具体量化指标范围和处置要求^[3]。

低风险是指指标的波动在允许范围之内，不需要进行专项处理，只做常规监测即可；中风险是指指标超过预警值但是未能危及结构的安全性，需要制定出整改方案并且加强监测；高风险指的是存在明显的质

量隐患，有可能造成结构的不稳定，需要停止相关的施工工序，并且马上进行整改；极高风险属于重大质量隐患，有可能会造成结构坍塌这样的严重事故，必须全面停工，并且启动应急预案。标准的制定要按照现行规范（《建筑工程施工质量验收统一标准》）来执行，并将智能化分析的数据纳入其中，确定各个指标的临界值和判定规则，同时建立起标准动态更新机制，依照技术的发展以及工程实践反馈而对等级划分的标准进行改善，保证标准具有时效性和适应性。

3 工程质量风险预警机制设计

3.1 预警阈值设定方法

预警阈值是风险预警的核心参数，需要根据工程特性、规范标准和历史数据来科学地设置，避免因阈值定得太高而造成预警迟钝或者太低而引起误警。使用动静结合的方法来设定阈值，静态阈值根据国家规范、行业标准来定出核心指标的基准临界值，作为基本预警依据，动态阈值则用机器学习算法对历史检测数据以及质量事故案例进行分析，并结合施工阶段、环境等因素来建立动态调整模型，实时优化阈值范围。对时序检测的数据采用滑动窗口算法计算指标的变化率，并设置速率阈值来发现指标突变的风险，对于多指标耦合的场景，使用联合阈值设定的方法，利用相关性分析找出指标之间的关联关系，然后根据多个指标的联合阈值来设定预警条件。不同的阈值设定方式适应的场景、特性不同，需要根据实际情况组合使用（见表 1）。

3.2 预警信息生成与传递

预警信息的生成要实现精准化、结构化，保证信息传递效率高并且有针对性。根据风险评价的结果，自动产生预警信息，包括风险等级、发生部位、影响范围、风险原因、建议处置措施等主要部分的内容，用文本、图表、模型标注等形式表现出来，使不同的角色可以很快地理解。

采用多渠道协同的方式，利用云端平台、移动端 APP 以及现场声光报警器等手段来传递信息是十分明智的。该模式采用云端平台、移动端 APP、现场声光报警

表 1 工程质量风险预警阈值设定方法对比表

设定方法	设定逻辑	适用场景	误警率控制
静态阈值法	依据规范标准确定固定临界值	常规指标基础预警	中等（8% ~ 12%）
动态阈值法	结合变量实时优化阈值范围	时序数据动态监测	低（3% ~ 5%）
联合阈值法	多指标耦合关联设定条件	复杂风险场景预警	低（2% ~ 4%）
速率阈值法	基于指标变化速率设定阈值	突变风险识别	中等（6% ~ 9%）

器多渠道协同传递模式,依据风险等级实施差异化信息推送,确保重要紧急预警信息快速触达相关责任人并得到及时处置。这种多渠道协同方式能够帮助不同角色快速、准确解读复杂预警信息,显著提升信息传递的效率与精准度。

3.3 预警响应与处置流程

预警响应和处置流程建立闭环管理机制,保证风险得到有效控制,防止风险扩大。建立分级响应机制,按照不同的风险等级采取不同的处置办法,低风险启动常规响应,由现场监理人员进行核实,加强监测的频率;中风险启动专项响应,施工单位制定整改方案,监理单位全程监督整改,整改完毕后组织复核;高风险启动紧急响应,立刻停止相应的工序,成立专门的处置小组,制订出应急处置方案,整改完毕之后需要经过第三方检测机构来验证;极高风险启动最高的响应级别,全面停工并且启动应急预案,向行业监管部门汇报,并且召集专家对处理方式做出评价^[4]。

处置流程依靠智能化平台来完成全程的控制,从预警发出、任务派发、整改实施到复核销号,所有的环节都在线记载下来,形成一个闭环管理系统,系统自动跟踪整改进度,并对整改滞后的情况发出二次预警,保证处置工作真正落实到位。

4 智能化分析与预警系统的实现与应用

4.1 系统架构设计与技术选型

系统采用的是云边协同的方式,分为感知层、边缘层、云端层、应用层四大部分,实现数据采集、处理、分析、应用全过程的协同。感知层布置各种类型的智能传感器、无人机、激光扫描仪等设备,实现多源数据采集的目的;边缘层布置边缘计算节点,对实时预处理后的数据做本地分析、即时报警,在保证实时性的条件下满足一些场景的需求;云端层采用分布式的形式,由大数据存储平台和智能分析引擎构成,利用Hadoop、Spark等技术对大量的数据进行存储,并开展深入的分析工作,经过机器学习模型训练和调优来提高分析的准确率,应用层给可视化交互、预警管理、协同办公等提供功能模块,满足不同角色不同的需求。

技术选择遵照稳定性、扩展性和兼容性的准则,后端使用SpringCloud微服务架构,有利于各个模块的独立部署和弹性扩展;数据库用TiDB分布式关系型数据库来承载大量的数据,并且保证高效的查询;前端采用Vue.js加ElementUI创建一个可视化界面,以改善用户体验;安全技术采用等保三级认证、HTTPS加密传输、入侵检测系统,保证数据以及系统的安全。

4.2 系统功能模块划分

系统分为五大部分功能模块,各个模块互相配合来实现智能化分析和预警。数据采集模块负责多源数据的自动采集和传输,可以采用传感器数据实时接入、BIM模型数据导入、移动端手动录入等方式进行数据采集,并对采集的数据进行标准化处理及格式转换;智能分析模块集成为各种机器学习算法,具备数据预处理、特征提取、风险识别、趋势预测等功能,能够实现模型的自我优化;预警管理模块完成预警阈值设定、预警信息产生、多种途径发送、响应处置追踪等全过程的管理,可设置预警规则自定义配置;可视化交互模块创建三维数字孪生模型以及多维度看板,达到数据可视化展现、模型交互、数据钻取剖析的目的;协同管理模块联结起建设方、施工方、监理方、监管部门等各方主体,给予任务派发、问题报告、资料提交、进度跟踪等各方面的协作效劳,达成质量控制各个部分协作。各个模块采用的是模块化的设计,可以实现功能的扩展和定制化开发,适应各种工程类型的需要^[5]。

5 结束语

随着建筑业不断向智慧化转型,工程质量检测数据智能分析及风险预警体系成为保证工程安全和质量的重要力量。依靠融合机器学习、边缘计算、数字孪生等先进的技术手段,创建包含数据采集、智能分析、风险评价、预警响应的全过程智能化控制流程,不但可以达到对工程质量风险精确识别和动态防控的目的,而且能促使质量管控方式由被动应对转变为主动预防,进而推进质量管控由被动应对向主动防范转变,为行业的数字化转型提供了一个可以复制、可以推广的技术范式,对于提高工程质量的整体水平、保证人民群众的生命财产安全有着深远的实践价值以及战略意义。

参考文献:

- [1] 胡舒慧.建筑工程质量检测中的无损检测技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(28):100-102.
- [2] 程曦,刘瑞全,周雄.无损检测在隧道工程质量管理中的应用[J].工程建设与设计,2024(18):248-250.
- [3] 吕永强.水利工程质量检测中超声波检测技术运用研究[J].水上安全,2024(17):21-23.
- [4] 刘朋.大数据时代公路工程试验检测数据应用与发展[J].大众标准化,2024(17):157-159.
- [5] 赖东平.建筑结构工程质量检测中的无损检测技术探究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(25):175-177.

基于边缘计算的电气自动化设备实时监控与故障预测技术

唐贺龙

(河北冀中云智科技有限公司, 河北 石家庄 050060)

摘要 本文基于边缘计算技术构建了电气自动化设备的实时监控与故障预测系统,提出从感知层多源数据采集、边缘计算特征提取、轻量化预测模型构建到云端协同优化的完整体系方法。系统通过高频动态数据处理和多维特征融合,实现设备状态的实时感知和潜在故障的提前预警,为智能运维提供决策支持。实验结果表明,该方法在降低延迟、提升预测准确率和延长预警提前时间方面表现出明显优势,能够有效增强工业自动化设备的可靠性和运行安全性。

关键词 边缘计算; 电气自动化; 实时监控; 故障预测

中图分类号: TP27

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.011

0 引言

随着工业 4.0 和智能制造的发展,电气自动化设备在生产系统中承担着核心控制和运行保障的角色,其运行状态直接影响生产安全、效率及设备寿命。设备故障往往具有突发性和复杂性,依赖人工巡检或定期维护既成本高昂,又无法在早期阶段识别潜在风险。边缘计算作为新兴计算范式,通过将数据处理能力下沉至靠近设备的网络边缘,实现低延迟、高带宽利用率的数据分析,为实时监控与故障预测提供了技术可能性^[1]。与此同时,基于对机器学习模型以及多种来源传感信息的集成处理能够对设备工作情况进行全方位的描绘及发展趋势推演从而做到提前发现隐患并预报故障。相关研究显示,将边缘计算融入预测型维修当中,在提高设备运转稳定性的同时亦可改善维修资源配置效率、减少产线停工带来的经济损失,促进智能工厂向着智能化、联动式发展。

1 电气自动化设备实时监控与故障预测系统架构

电控设备在线监测及故障预判平台是利用边缘端计算方案搭建起来,由感知层、边缘计算层、云同步三层组成。感知层用来获取电流、电压、温度以及震动等各种状态信息;边缘计算层是在靠近机器端的节点上进行数据的初步分析、特征识别、局部预报以达到及时反馈的效果;云同步层主要用来做模型的训练、更新与不同设备之间的信息汇总,并且提供远程观察

与可视化的功能以达到对于设备状态实时监测并发出警报的作用。

这个系统的开发在结构设计的时候就考虑到数据种类以及采集速率以及处理延迟的协调性。比如针对电流电压的检测,高频采集率(100 Hz)可以探测到瞬时的变化量,在边缘端的滞留时间不超过 15 ms,使设备出现的问题及时发现并做出响应;温度监测的数据变化比较缓慢,可以设置低一些的测量周期,如每秒测量一次或者十次,使用边缘智能模块来分析温升的趋势,提前 72 小时进行报警,留足维修人员巡视检修的时间;振动监测是高频率变动的信号,频率可以设置较高,可达 500 Hz,利用边缘端做频谱分解获取振动信息,在发生滚动体或是转子缺陷之前就做好警示工作。

2 基于边缘计算的电气自动化设备实时监控体系构建

2.1 感知层数据采集设计

感知层对电气自动化设备监控系统的根基,在于高准确度、全方位的状态量获取;系统在主要设备部位配置电流、电压、温度、振动、功率因素等多种类型的传感器对设备工作情况即时获取^[2]。例如:主柜 A 采用高精度电流传感器(采样频率为 100 Hz,精度为 0.5%),电压传感器(采样频率为 100 Hz,精度为 0.3%),电机 C 设置三轴加速度传感器(采样频率

作者简介: 唐贺龙(1986-),男,本科,工程师,研究方向:电气自动化以及网络。

为 500 Hz)，以对设备进行振动状态的监测；变压器 B 采用温度传感器（采样频率为 10 Hz）。感知层配备边缘采集模块，对采集的数据进行预处理去噪和压缩，降低重复传输数量，保证信号完整度。

2.2 边缘计算层数据处理与特征提取

边缘计算层是做到实时监测及时应对的重要部分，在此层首先对传入的数据进行滤波、降噪以及归一化等预处理保证数据输入的有效性及其一致性；然后根据不同的传感器类型设置不同的特征提取方法，如电流和电压信号使用短时傅里叶变换法以及谐波分析法从中获取瞬态参数以及波形失真系数；温度信号利用滑窗趋势分析法得到升温速度；对于振动信号则采取小波包分解法来获得频谱参数；边缘节点使用浅层 LSTM 模型对所提取出来的特征进行实时故障预警，计算平均时间延迟为 15 ~ 20 ms 左右，预警精度大于 92%。

2.3 云端协同与模型优化设计

云端协同层主要是进行全网模型的训练、历史分析以及跨设备的优化，边缘端所产生的特征信息以及预测的结果都会实时传送到云端，云端会对数据进行标准化处理和异常趋势分析，同时采用随机森林、深度神经网络进行设备故障类型的全网训练和优化。云端的模型每周更新一次，通过不同的参数下发来达到对每个边缘端模型的实时更新的目的，通过云到边的协同，使得系统可以实现在局部预测的基础上加上整体的趋势，从而可以做到跨设备之间的比较以及设备间的故障类型的学习作用。

2.4 可视化与智能运维设计

在监控系统里，可视化、智能运维模块以图表的形式把实时监测信息、预估结果展现到管理人员面前。系统可以展示动态图、时刻更新着电流、电压、温度、振动各项指标的折线趋势图，同时融合预测风险等级用色块表示（绿色：正常；黄色：存在隐患；红色：风险较高），并且系统会自动产生报警提示及维修建议如当主控柜 A 电流剧烈变化超过一定范围边缘设备马上报警上报至云服务器后根据过往记录提出停机时间和更换零件方案等。

3 基于边缘计算的电气自动化设备的故障预测系统构建方法

3.1 数据采集与预处理方法

故障预警系统的基础是准确及时、全方位的数据提取以及合理的加工，在此基础上才能进行有效的数据分析以及故障诊断。预警系统先对重要电气自动化装置处设置不同类型传感器，如电流、电压、温度、

振动、电能质量等传感器，在主控柜 A 处设置电流传感器采样频率为 100 Hz，精度 0.5%^[3]；电压传感器采样频率也是 100 Hz，精确度 0.3%；变压器 B 处设置温度传感器采样频率设置为 10 Hz；电机 C 处三轴加速度传感器采样频率设置为 500 Hz。采集到的基础数据由边缘节点即时滤波、降噪以及去除无效点，利用滑窗算法进行标准化计算，给采集的数据做时间轴上的排列及特性加强，例如电流电压脉冲上升速率、温度升高曲线斜率、振动力谱能量分布等。

3.2 特征提取与指标构建方法

在边缘端做即时特征抽取是做到及时准确诊断故障的关键步骤。根据各种类型设备的数据特点运用有针对性的方法来抽取特征值。如对于电流电压类数据做短时傅里叶变换以及做谐波分析得到其谐波含量和波形畸变率等特征，在对温度类数据使用滑动窗口方法和平滑线性变化率来得到它的温升速率和突增程度等特征；而对于振动方面则是用小波包分解与功率谱密度来得到它的轴承、转子潜在故障指标等。然后将各个特征指标用相应的权重系数相结合的方式组合成一个总的风险度量指标，从而达到对单一设备以及子系统多个方面的监测表示的效果。

3.3 边缘计算预测模型构建方法

边缘端利用轻量化的机器学习算法来实现对故障的预测，在兼顾边缘节点计算资源以及实时性的前提下做出选择，模型有 1D-LSTM，轻量卷积神经网络 1D-CNN，支持向量机等类型，在云端完成模型训练工作，以历史故障数据与边缘采集的属性作为输入变量，输出设备的风险级别以及故障的发生概率。在边缘侧，利用在线预测的方式能够在毫秒级别内做出响应，在总风险度高于警戒线的情况下就会产生报警信息^[4]。为了达到预测的一致性和精确度，系统设置了模型自动调节功能，即边缘节点可以依据自己所在的区域环境进行微调模型参数并定期与远程中心上传数据，从而达到跨域泛化的效用。

3.4 云端协同优化与决策支持方法

云平台在预测系统中负责全面优化、模型训练以及智能化运维决策等任务。边缘端将特征数据及预测结果发送给云平台，云平台利用随机森林、深度神经网络以及迁移学习算法完成对全网的数据解析和模型训练等工作，从而达到不同终端故障类型分析和参数调整的目的，并能给出预测结果展示、智能运维方案等，如主控柜 A 电流突变超出规定值，云平台结合历次数据给出检修时机、备件替换意见等信息。

4 基于边缘计算的电气自动化设备实时监控与故障预测的实施效果

4.1 案例背景

一家大型精密制造企业的自动化工厂拥有着多条高度自动化的产线，包含多个主要控制器、重要电机和高压变压器等设备，每天运行时间达 20 多个小时以上。传统的集中监控模式会带来数据滞后严重、难以提前预警机器异常的情况出现，使得维护费用高昂并且生产线出现停工的风险较大。为了做到机器实时监控以及预警设备异常情况的发生。此公司打算在其生产线重点环节安装一套由边缘计算组成的监测系统来达到上述需求，即需要这个系统能够做到多个方面传感器的数据采集、边缘迅速计算分析、预测算法本地执行并在服务器间进行协调提升，做到精准预报机器发生故障、响应速度低于 20 毫秒以及为设备维护决策制定智能方案等。该实例给予了系统的性能测试一个全面的工业背景环境，适用于检验边缘计算应用于复杂工业环境中的可行性以及技术上的优越性^[5]。

4.2 实施方案

系统实施方式是硬件选择、运行参数配置以及软件算法整合的设计。感知层使用高准确性传感器配对：主控柜 A 配置 ABB CT 电流传感器（测误差 0.5%，采样频率 100 Hz），施耐德电压传感器（误差 0.3%，采样频率 100 Hz）。变压器 B 配置 PT100 温度传感器（采样频率 10 Hz），电机 C 配置三轴振动加速度传感器（采样频率 500 Hz，量程 ±16 g）。边缘计算层通过 NVIDIA Jetson Xavier NX 嵌入式设备作为计算单元，内存达 16 GB，CPU 六核心+GPU 384 核，可以处理每秒大约 2 000 条传感器信息，从而实现实时特征抽取以及局部故障预报的目的。算法融合有：短时傅氏变换、滑动平均趋势分析、小波包分解等算法来完成特征解析、轻量化 1D-LSTM 以及 SVM 做即时预测^[6]。云服务端用的是 AWS EC2 c6i.large 虚拟机，存储空间 10 TB，专门负责全局模型训练、跨设备模式学习以及模型校正等工作，定期更新至边缘节点上模型的参数值及推送到相应的边缘节点处。系统数据流设计保证边缘端响应时延小于 20 ms，特征表示向量维数不超过 50 ~ 70 之间，云服务优化提高边缘侧预测准确性到 95%，预警提前达到 60 小时，整个框架做到边缘高效响应、云上统一指挥的高度融合。

4.3 实施效果

具体实施效果如表 1 所示。

安装边缘计算模块之后整个系统的反应速度得到了很大的提升，数据处理的时间由原来的 85 毫秒降到

了 18 毫秒，从而能够进行对高频率的动态信号实时监控的能力。与此同时，特征选取的维度以及预测算法的准确性也有所提升，预警提前的时间延长到了 60 个小时，为智能化维护提供了充足的时间窗口，节约了网络带宽消耗 44%，减少了集中传送的压力。云平台更新频率降为每周一次，以使边缘端模型能够不断更新迭代，使得边缘侧实时预测结合云端综合判断的高效工作方式得以实施，在实时性、预测精准度和灵活性等方面也得到了很好的技术创新。

表 1 系统实施后的技术参数改进效果

技术指标	部署前	部署后	改进幅度
边缘节点数据处理延迟	85 ms	18 ms	-79%
实时特征提取维度	30	60	100%
预测模型准确率	87%	95%	8%
预警提前时间	24 h	60 h	150%
网络带宽占用	80 Mbps	45 Mbps	-44%
云端模型迭代频率	月度一次	周度一次	提升 ×4
单节点可处理数据量	500 条/s	2 000 条/s	300%

5 结束语

基于边缘计算的电气自动化设备监控与故障预测系统在设计理念上强调感知、处理、预测与协同的有机结合，通过多层架构实现数据采集、边缘计算实时处理及云端优化决策的协同运作，兼顾实时性、准确性和可操作性。在感知层，多源传感器提供全面的设备状态数据，支撑高维特征提取和趋势分析；在边缘计算层，轻量化预测模型实现快速响应和潜在故障识别，为局部运维提供即时预警。云端协同优化不仅提升了模型泛化能力，也为整体系统提供了全局趋势分析和智能运维建议。

参考文献：

- [1] 万乐. 基于边缘计算的电气系统实时监控与控制方法研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65(06): 50-52.
- [2] 宁宁. 基于边缘计算的电气系统实时监控与控制方法分析 [J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(10): 36-38.
- [3] 姜川. 基于无线通信的配电自动化实时监控与故障自愈技术研究 [J]. 通信电源技术, 2025, 42(11): 213-215.
- [4] 李晨, 胡龙华, 常新志. 基于物联网的煤矿提升机电气系统监控与故障诊断研究 [J]. 电气技术与经济, 2024(12): 359-361.
- [5] 耿萌. 基于物联网的配电网设备监测与故障诊断系统设计 [J]. 电气技术与经济, 2024(12): 121-123.
- [6] 闫帅. 基于物联网技术的电气自动化系统远程监控系统设计与实现 [J]. 电气技术与经济, 2024(12): 90-92.

基于大数据的化工机电泵组故障预测与智能化维护策略研究

王成鑫*, 杨晨晖

(四川润滑卫士数字科技有限公司, 四川 成都 611730)

摘要 化工行业是国家经济的重要支柱, 而机电泵组是化工过程中的核心液体传输装置, 其稳定的工作状态对整个生产系统的安全、连续和高效具有至关重要的作用。传统的泵机组维护方式以事后维护和定期的预防维护为主, 具有预警滞后、维护费用高、突发停机风险高的特点, 容易导致重大的生产安全事故和巨大的经济损失。在大数据背景下, 对装备全寿命周期数据进行深层次挖掘, 为实现机电泵组故障的精确预报和维护改造开辟了新途径。本文以大数据为基础, 研究化工机电泵组的故障预测和智能维护策略, 以期为化工机电泵组的安全、稳定运行提供理论参考。

关键词 大数据; 化工机电泵组; 故障预测; 智能化维护

中图分类号: TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.012

0 引言

化工过程具有生产连续化、过程介质危险性大、工况波动大等特点, 对其关键部件的工作可靠性和安全性能提出了更高的要求。机电泵组是串联过程中的核心动力单元, 在强腐蚀、重载、易燃易爆等恶劣工况下工作, 其失效破坏是导致非计划停产和安全环保事故的主要原因。传统的基于经验的运行管理模式很难实现对微小故障的精确辨识和对退化趋势的前瞻预测, 使得维护不足和过度维护之间的矛盾始终存在。以大数据为基础, 基于大数据的机电泵组故障预报和智能维护决策方法, 为实现化工设备数字化维护提供理论基础和技术支撑。

1 化工机电泵组故障机理

1.1 化工机电泵组结构

机电泵组是化工过程中的核心部件, 担负着连接反应、分离、传热和储运等过程的重要功能。它的工作原理是利用电机把输入的电能转换成转动的机械动能, 使泵和叶轮以同样的速度转动。在此过程中, 叶轮对被输送的加工液体进行能量传递, 并将其进一步转换成液体的压强能和流动动能, 实现对有毒、腐蚀性、易燃易爆、高粘性等特殊性质的介质的连续、可控和密封输送。其操作稳定与否, 直接关系到化工企业能否安全、连续生产和高效率的生产^[1]。

完整的化工机械泵系统一般包括五大功能模块:

承载液体的泵本体; 提供动力来源的驱动电机; 轴承组件, 以保证转子的平滑运转; 轴端的密封结构, 以避免介质泄露; 用于安装、固定和辅助支承的基础和辅助系统。这五个子系统协同工作, 构成机电一体化的有机体系。

1.2 故障机理

轴承作为化工机电泵组的核心转动支承元件, 长期工作在高速重载、介质腐蚀、工况波动频繁等复杂工况下, 磨损和疲劳是其主要失效形式。磨粒磨损是最主要的故障诱因, 化工介质中的固相粒子进入滚道/滚动体界面, 形成连续切割作用, 增加轴承游隙, 降低运行精度。粘着磨损主要是由于过载和润滑不良而引起的, 以及由于局部温度的升高而导致的粘接脱落。接触疲劳是轴承渐进破坏的主要形式, 滚道和滚动体在长时间的交变载荷下, 其表面的剪切应力超过材料的疲劳极限, 产生微裂纹, 导致表层的点蚀和剥落。

电机是化工泵组的核心传动部件, 在长期运行过程中面临着潮湿腐蚀、启动频繁、负荷波动大等问题。绕组故障是造成电动机电气故障的主要原因, 在高温、电晕和化学腐蚀的共同影响下, 定子线圈的绝缘层逐渐老化、开裂和破裂; 水泵机组频繁启停所带来的冲击电流会加剧绕组内部的热应力交变, 导致匝间绝缘磨损和短路, 并导致相间绝缘故障接地, 最后导致电动机停转, 甚至烧毁。

作者简介: 王成鑫 (1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械电子工程。*通信作者, E-mail: wangchengxin@rhwsdt.com

失效的根本原因是由于其摩擦磨损和辅助密封失去作用，并受到机组运行和轴系状况的深刻影响。密封端面的摩擦磨损是其主要的故障形式，化工介质中的固体颗粒和强腐蚀性成分容易引起端面液膜的不稳定，而在高速运行时，端面的干摩擦会引起动环和静环的热变形和热裂纹，进而引起端面的粗糙度增大，引起密封的比压不平衡和介质泄漏。

2 基于大数据的故障预测技术体系

随着工业物联网和感知技术的飞速发展，化工机电泵组的运行数据获取能力得到极大的提高，为建立大数据驱动下的故障预警系统打下了良好的基础。其核心是通过对装备生命周期数据的深层次挖掘，准确地感知机组的健康状况和超前判断故障发展趋势，将维护方式由被动应对转向主动预防。

通过在机组关键位置布设高精度传感装置，实时采集机组振动、温度、压力、流量、电流等多个维度的工况信息，构建涵盖机组工作全流程的时间序列数据流。通过与 DCS/SCADA 等生产过程监控系统的数据对接，实现设备运行状态、工艺参数和历史维护等多源异质信息的融合。稳定、完备、高质量的震资料是进行进一步的分析和模拟的基础^[2]。

原始数据通常含有噪声、缺失值和离群值，为了提高数据的质量，需要对其进行清洗、对齐和归一化等预处理。然后，以信号处理和统计分析为手段，从时域、频域、频域等多维角度，分别提取振动谱特征峰、温变速率、谐波畸变率等特征参量，构建高维数集，为模型输入提供有效信息。

结合经典的 SVM、随机森林等机器学习方法，或者引入长短时记忆网络（LSTM）、卷积神经网络（CNN）等深度学习模型，实现设备剩余寿命的回归预测。在模型的学习过程中，需要将故障数据和运行状态标记相融合，并对其进行交互检验和优化，以提高模型的泛化能力和预测准确性。

将所建立的预测模型应用到工业互联和边缘计算节点中，实现对机组运行参数的在线推断和状态评价。在检测到故障模态的同时，通过对故障状态的分析，判断故障发生的时间，并进行诊断，为下一步的智能维护决策提供依据。系统的不断优化取决于模型的迭代机理，通过增加失效样本和运行维护信息对模型参数进行实时更新，以提高系统对复杂环境的自适应能力和鲁棒性。

3 智能化维护策略研究

3.1 维护策略理论基础

基于可靠度的维护（RCM）与预测性维护（PdM）是智能维护的核心理论支持，两者不是独立的技术手

段，但却构成了“可靠性锚定—动态预测—精确决策”的递进式理论体系，其背后的逻辑已由“失效驱动的被动维护”到“可靠驱动的主动预防”的本质飞跃。基于故障模式与影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）完成故障后果的量化分级，针对可能引起安全事故、生产中断和环境破坏的灾难性故障的防控策略，突破传统“一刀切”的“过度维护”和“缺乏维护”共存的产业难题，为智能维护划出以可靠性为核心的智能维护决策界限。

面向智能维护的预测维护（PdM）架构为核心，围绕多源异质数据感知、故障特征提取和降维层、设备健康状态评价、剩余寿命预测和维护决策输出等五个关键环节，构建由多源异质数据感知、故障特征提取和降维层、设备健康状态评价、剩余寿命预测和维护决策输出五个核心功能模块组成的闭环架构。两者的深层次融合，形成智能维护的理论基础：RCM 清晰地界定了维护管理的核心目标和优先次序，避免了传统维护方法的盲目性；PdM 为 RCM 提供了设备运行状态信息和故障预测结果，解决了传统 RCM 静态分析与实际运行状况脱离的关键难题，从而形成“以可靠性为基础，以预测技术为主要手段”的智能维护理论体系。

3.2 基于风险等级的维护决策模型

以风险水平为基础的维护决策模型是智能维护决策的核心，其实质是通过对装备健康状况进行定量评估、对失效风险进行科学分类和系统化的维护规范建立，从而达到由“经验模糊决策”到“数据驱动的精确决策”的目标。从设备振动、温度、油液、电气特性、运行工况、服役年限、历史故障等多维异质信息中，对多维异质数据进行清理和特征筛选，去除冗余和扰动信息，提炼出反映设备退化状况的核心特征。采用 CRITIC 客观赋权法与 AHP 相结合的方法，实现对特征权重的科学分配，从而避免单纯的主观赋权带来的经验性偏差，以及单纯的客观赋权与装备失效机制相脱离的难题。利用退化程度函数，将多个特征参量与 0-1 之间的非线性映射关系，实现设备健康状况的连续定量化表征，并将工况自适应校正因子引入设备运行状态的适应性校正因子中，以解决设备运行时变载荷、变环境下的设备健康评价结果失真这一工业难点问题，为危险水平分级提供量化的核心依据^[3]。

构建“失效概率 = 失效概率 × 失效后果严重性”的 2D 定量模型，突破以往的静态失效频次统计方法，对失效概率进行科学分类和精细化管控。从安全风险、生产损失、环境影响和维护成本四个方面建立定量评价指标，并与企业可接受风险阈值（ALARP 最小合理可行准则）相结合，将设备风险分为低、中、高、急 4

个级别,确定各级别风险的可接受界限和管控优先级,即应急风险与突发失效相对应,高风险对应设备健康状况迅速恶化的高概率失效,中风险对应有可能出现退化倾向的隐患,低风险对应装备健康状况较好的平稳运行,为维护决策的制定提供明确的分级依据。

突破以往“规则”的简单叠加,而以“可靠度”为核心的“失效后果分析”理论为基础,通过融合风险等级评价结果,提出具有可解释性和不断优化能力的“模糊推理决策体系”。这个规则库是基于风险防范和控制的,它根据不同的风险水平,制定适当的维护对策:针对突发风险,立刻启动设备停机和应急抢修流程,同时对故障根源进行溯源分析,避免同类错误再度发生。对于高风险的情况,根据设备的剩余寿命预报信息,确定最优维护时间,制定有针对性的预防性维护计划,将故障扼杀在摇篮之中^[4]。中风险时,加大对设备运行的监控频率,建立定期的预防维护方案,对装备的性能退化进行动态跟踪;对于低风险的情况,采用“视情检修”的方式,只需进行例行的巡检和状态监控,就可以避免由于过度维护而造成的资源损失。将多台设备之间的风险关联进行协调处理,解决多台设备在不同工况下的维护决策冲突,建立闭环决策系统。

3.3 维护任务优化调度

维护任务优化调度是实现智能维护策略实施的关键,维护窗口优化的核心是实现维护和生产计划的动态协同匹配,不只是单纯地找出闲置时间,还需要建立以“生产中断损失最小化”与“维护费用最小化”为一体的两个目标优化模型。本项目以装备剩余寿命评价为基础,综合考虑生产调度、订单交货周期、生产线联动约束、设备启停机损失等多个影响因素,实现最优维护时间的精确确定。在连续生产情景下,要充分利用非计划停工时间,如产品切换时间、班组交接时间和计划停工检查时间,尽量减少非计划停工造成的生产能力损失。以离散制造企业为对象,在考虑订单调度间隔、单台设备待机时间和产线停机时长的基础上,将设备维护操作的深度嵌入到生产调度系统中。

与传统依靠安全库存的被动储备方式相比,备件库存优化的核心是构建基于预测分析的备件全生命周期协同控制机制。以设备故障预警信息和维护任务计划为主,通过对装备关键度、失效影响程度、备件供货时间和互用性四个维度,对备件进行分类管理,针对不同类型的备件,设计差别化补充策略。将维护工作时间安排与设备剩余使用寿命预测数据相结合,准确地推断出零部件的需求时间点及需求大小,针对供应周期较长、专用于特殊核心设备的零部件,根据预

测结果提前制定采购计划,实现零部件准时供应;对通用性强、供货周期短的非关键零部件,通过集中采购和联合补充,降低采购成本,降低存货呆滞风险^[5]。从根本上解决备件存储与维保决策平台、采购管理平台等信息孤岛问题,实现备件存量与维保操作的动态实时关联,预防由于备件供给不足而造成的维护周期过长,以及备件长期闲置造成的资金沉淀,从而达到库存资金占用和供给中断风险的最优均衡。

维护资源配置的关键在于,根据维护作业的复杂性,建立维护资源的动态匹配模型,不是单纯的人员和工具配置,而是以维护任务完成效率和资源闲置率最小为优化目标,实现维护资源的整体优化配置。对维护资源进行分类和分类管理,根据维护人员的技能水平、专业方向、从业经验、持证状况等因素,对维护工具和检测设备进行分类,根据精确度、适用场景和专用性,对维护资源进行分类,并为维护资源建立数字化的数据库。根据维护工作的风险程度、工作难度、时间要求和安全标准,确定维护工作中需要的人员资格、工具种类和数量,建立资源调配的约束。

4 结束语

以我国化工机电泵组为研究对象,以大数据为基础,建立面向化工企业的全寿命周期故障预报系统,研究与之适配的化工行业复杂生产情景的智能维护策略,以达到对机组运行状态的实时监控、故障隐患的提前预警和维护计划的动态优化,对我国化工流程工业装备的安全运行具有重要的理论价值。未来,将“数字孪生”“边缘计算”等技术相结合,完善多源信息融合机理,提高复杂运行状态下的故障预报准确率,不断推进我国化工装备维护系统向数字化、智能化的转型升级。

参考文献:

- [1] 王财林,古自强,邱姝娟,等.成品油管道顺序输送甲醇的关键设备适应性分析[J].油气储运,2025,44(09):998-1011.
- [2] 张吉喆,王禹,张政,等.基于三频融合的泥浆泵数据采集与风险监测系统[J].石油和化工设备,2025,28(11):6-9.
- [3] 张航,王星月,吕能超.基于CRITIC组合赋权-正态云的山岭特长隧道洞口边坡失稳风险评价[J].公路交通科技,2025,42(07):170-182.
- [4] 娄文忠,李诗怡,吕斯宁,等.基于故障模式影响及危害性分析的引信可靠性分析方法[J].探测与控制学报,2025,47(01):49-56,79.
- [5] 杨华强,邱宇,李源,等.考虑周转率的多目标备件动态库存控制策略[J].制造业自动化,2025,47(03):77-86.

高层建筑外墙保温施工技术要点分析

李建鹏

(瓜州益能新能源发展有限公司, 甘肃 酒泉 736100)

摘 要 保温隔热作为高层建筑外墙的关键性能, 不仅显著影响室内环境的舒适度, 还直接关系到建筑物的节能性。本文结合高层建筑外墙保温施工的实际状况, 梳理施工的核心优势与主流技术类型, 着重对基层处理、材料管控等关键技术要点进行剖析, 旨在规范施工流程并优化技术应用细节, 有效解决当前高层建筑外墙保温施工中的质量难题, 为高层建筑外墙保温工程的标准化施工提供支持, 有助于提升建筑保温效能, 推动绿色建筑产业的高质量发展。

关键词 高层建筑; 外墙保温; 标准化施工; 隔热保温; 护墙防腐

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.013

0 引言

随着我国“双碳”目标的不断推进, 建筑领域的节能降碳成为产业升级的核心方向。高层建筑由于墙体面积大、散热损耗高, 成为节能改造的重点对象。外墙保温技术凭借节能、护墙以及提升居住品质等优势, 在高层建筑施工中得到广泛应用。然而, 行业内仍存在技术选型不合理、施工细节不规范等问题, 这些问题制约了节能效益的充分发挥。做好高层建筑外墙保温施工, 不仅能降低建筑运营能耗、减少碳排放, 还能延长建筑服役年限、提升居住舒适度, 对推动建筑行业绿色转型和落实国家节能政策具有重要的现实意义。

1 高层建筑外墙保温施工核心优势

1.1 节能降耗, 助力双碳目标落地

高层建筑外墙保温施工最突出的价值就在于节能降耗, 并且能够切实助力国家双碳目标落地实施^[1]。当前建筑领域能耗在社会总能耗中占比不低, 尤其是高层建筑墙体面积大、散热速度快, 冬季采暖与夏季制冷过程中会消耗大量能源。外墙保温施工通过在建筑外墙设置高效保温层, 能够有效阻隔室内外热量传递, 减少空调、暖气等设备的使用频率, 进而降低建筑运营阶段的能源消耗。

1.2 隔热保温, 提升居住使用品质

隔热保温是高层建筑外墙保温施工的核心优势之一, 能够显著提升居民的居住使用品质^[2]。高层建筑楼层较高, 受外界环境影响更为明显, 夏季阳光直射

外墙易导致室内温度骤升, 冬季则容易出现室内热量快速流失的情况, 给居民居住带来诸多不便。外墙保温层能够有效阻挡夏季外界热量进入室内, 同时牢牢锁住冬季室内产生的热量, 让室内温度保持在舒适稳定的范围之内, 避免出现冬冷夏热的问题。

1.3 护墙防腐, 延长建筑服役年限

高层建筑外墙保温施工还能起到护墙防腐的作用, 进而延长建筑的整体服役年限^[3]。高层建筑外墙长期暴露在自然环境中, 会受到风雨侵蚀、温度变化、紫外线照射等多种因素的影响, 容易出现墙体开裂、空鼓、风化以及腐蚀等问题, 不仅影响建筑外观美观度, 还会损害建筑结构的稳定性。外墙保温层能够形成一层有效的防护屏障, 将墙体与外界恶劣环境隔离开来, 减少风雨、紫外线等对墙体的侵蚀, 防止墙体出现损坏。

2 高层建筑外墙保温主流技术类型

2.1 薄抹灰外墙保温技术

薄抹灰外墙保温技术是高层建筑外墙保温施工中应用广泛且适配性较强的类型, 其施工过程注重分层精细化操作, 每一步细节都直接影响保温效果与施工质量。施工前期需对建筑外墙基层进行全面清理, 剔除墙面浮灰、凸起杂物及松动砂浆, 再用专用找平砂浆将墙面修补平整, 确保基层平整度误差控制在规范范围内, 待找平层完全干燥后, 涂刷一层界面剂增强保温层与基层的粘结力。界面剂干燥后, 按照设计厚度铺设保温板, 铺设时采用点粘加条粘的方式, 粘结面积需达到保温板总面积的 80% 以上, 相邻保温板之

作者简介: 李建鹏 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程施工安全与管理。

间的缝隙控制在2毫米以内,缝隙处采用专用保温条填充,杜绝缝隙漏热。保温板铺设完成并固定牢固后,涂抹第一道抹面砂浆。第一道抹面砂浆干燥后,再涂抹第二道抹面砂浆,抹面厚度控制在5~7毫米,确保表面平整光滑,无裂缝、气泡等质量问题,待抹面砂浆完全固化后,即可进入后续装饰工序。

2.2 干挂幕墙保温一体化技术

融合幕墙装饰与保温功能的干挂幕墙保温一体化技术,其施工过程兼顾美观性与保温效能,在龙骨固定、保温层铺设及幕墙安装的衔接处进行细节把控。施工开始阶段,施工人员要依据建筑外墙设计尺寸,在墙体基层上开展精准弹线定位作业,确定对龙骨安装的位置与标高,接着借助膨胀螺栓将龙骨固定到基层墙体,龙骨安装需实现垂直度与水平度的保证,每隔一定距离设置一道支撑龙骨,以此增强整体稳定性。龙骨安装完毕之后,在龙骨与基层墙体之间的空隙位置开展保温材料铺设工作,高密度岩棉板作为保温材料,铺设时板材与龙骨、基层墙体达到紧密贴合状态,不存在空隙、松动现象,板材之间的拼接缝隙用密封胶进行填充,以防空气渗透对保温效果产生影响。保温层铺设结束后,进行幕墙面板安装,幕墙面板通过干挂方式固定在龙骨之上,安装过程中调整面板位置,使面板拼接达到平整状态、缝隙保持均匀,用耐候密封胶密封缝隙,既能保证幕墙的防水性能,又可以提升保温密封性。

2.3 挤塑板外墙保温技术

在高层建筑保温施工领域,挤塑板因具有优异保温隔热性能而占据重要位置,其施工过程注重粘结牢固性与节点密封,细节操作直接决定保温层的耐久性与节能效果。在施工之前,要对基层墙体开展全面检查与处理工作,以保证基层处于平整、干燥且洁净的状态。完成基层处理后,配制专用粘结砂浆,粘结砂浆搅拌均匀,不能有结块和颗粒,之后将粘结砂浆均匀涂抹在挤塑板背面,涂抹面积不小于挤塑板面积的90%,涂抹厚度控制在3~5毫米。将涂抹好粘结砂浆的挤塑板粘贴到基层墙面上,粘贴时轻轻按压,将板与基层之间的空气排出,确保挤塑板和基层紧密贴合,相邻挤塑板之间的缝隙需控制在1~2毫米,缝隙处采用挤塑板条进行填充,填充完毕后用密封胶密封。挤塑板粘贴完成且达到规定强度后,在挤塑板表面涂抹抹面砂浆,并嵌入耐碱玻纤网格布,网格布需覆盖整个保温层表面,搭接处要压实平整,待抹面砂浆干燥后,再进行后续的装饰处理,以确保保温层和装饰层衔接紧密。

2.4 保温装饰一体板施工技术

保温装饰一体板施工技术实现了保温与装饰的一体化成型,施工效率高且外观统一性强,其施工过程的核心是精准定位、牢固固定及密封处理,每一个细节都需兼顾实用性与美观性。施工前需根据建筑外墙设计图纸,精准测算每块保温装饰一体板的安装位置,在基层墙体上弹线标记,明确安装标高与拼接缝隙宽度。基层处理完成后,在墙体上安装专用锚固件,锚固件的安装位置需与一体板的预留安装孔对应,锚固件固定深度需符合规范要求,确保固定强度。随后将保温装饰一体板吊装至指定位置,调整一体板的垂直度与水平度,使一体板与基层墙体紧密贴合,再通过锚固件将一体板固定牢固。每安装一块一体板,需及时处理拼接缝隙,缝隙处采用专用密封胶填充,填充时需确保密封胶饱满、均匀,无气泡、缝隙,同时将密封胶与一体板表面抹平,保证外观整洁。全部一体板安装完成后,对整体墙面进行全面检查,对拼接不平整、密封不严的部位进行修补,确保整个保温装饰层平整、牢固、密封,既满足保温需求,又达到美观装饰的效果。

2.5 现浇混凝土复合保温技术

现浇混凝土复合保温技术主打保温与结构一体化,施工过程紧密衔接混凝土浇筑与保温层铺设,兼顾结构强度与保温效能,细节把控集中在保温板固定、混凝土浇筑及界面衔接,是适配高层建筑的新型保温技术。施工人员在施工前要依据设计图纸对复合保温板进行精准裁切,板材需预先做好防腐处理,以防后期与混凝土接触后出现性能衰减的情况。之后将保温板固定在模板内侧,借助专用锚固件穿透保温板与模板连接,锚固件的间距控制在500毫米左右,以此保证固定牢固且不会破坏保温板的完整性。模板安装完成并通过验收后,便进行混凝土浇筑,浇筑时采用分层的方式,每层厚度不超过500毫米,在振捣过程中控制振捣力度和频率,防止因振捣过度而造成保温板移位、破损。混凝土浇筑完毕后,及时进行养护,养护时间不低于14天,养护期间要对混凝土强度和保温板衔接情况进行监测。待混凝土达到规定强度后拆除模板,对保温板外露部位进行修补,填补缝隙并涂刷防护涂层,使保温层达到密封的状态,实现保温层与建筑结构的同步成型,进而提升工程整体的耐久性和节能效果。

3 高层建筑外墙保温施工技术要点

3.1 基层处理,筑牢施工基础防线

基层处理是外墙保温工程立身的根本,施工团队需依托高精度检测仪器,对高层建筑外墙开展系统性的

基层勘测,全面捕捉墙面基层的平整度、含水率以及强度数据。针对勘测中发现的裂缝、泛碱、风化层等问题区域,施工人员需采用“先修补、后找平”的精细化工艺。对于宽度小于 2 毫米的细微裂缝,需注入高弹性修补砂浆,待其固化后打磨平整;对于宽度大于 2 毫米的裂缝,则需切割成 V 型槽,填入发泡聚氨酯后再用密封砂浆封严。平整度超标的区域,需使用专用找平砂浆进行分层修补,每层厚度控制在 5 毫米以内,并且每铺设一层都需使用 2 米靠尺进行垂直与水平检测,确保误差在 3 毫米范围内。基层清理环节需摒弃传统的高压水枪单一冲洗模式,结合人工铲刮与机械打磨,彻底清除墙面浮尘、浮浆及松动骨料,待基层含水率降至 10% 以下、pH 值小于 10 后,均匀涂刷一层界面剂。

3.2 材料管控,保障保温核心效能

材料管控贯穿施工全过程,是决定保温工程最终效能的关键防线^[4]。施工单位需建立从源头到现场的全链条材料溯源体系,在采购阶段严格审核供应商资质,要求其提供包含导热系数、压缩强度、吸水率等核心指标的第三方检测报告。材料进场时,验收人员需依据批次证明文件,对保温板的尺寸偏差、外观完整性进行逐件抽检,对粘结砂浆、网格布等辅材进行抽样送检,唯有检测指标全部达标且与设计参数一致的材料方可入库。材料存储环节需根据材质特性实施差异化管理,挤塑板、岩棉板等保温材料需架空堆放并覆盖防雨布,远离火源与热源;砂浆类材料需密封保存,严格执行“先进先出”原则,防止因受潮结块导致性能失效。现场使用环节,粘结砂浆与抹面砂浆需按照说明书配比进行机械搅拌,搅拌时间不少于 3 分钟,确保浆料细腻无颗粒。

3.3 分层施工,规范流程把控细节

分层施工通过精细化的层级划分,是规避空鼓、开裂等质量通病的核心手段。施工团队需严格遵循“先隐蔽、后面层”的顺序,在基层处理验收合格后,方可铺设保温层。保温板铺设时,需根据墙面尺寸进行定制化裁切,板材拼接缝隙控制在 2 毫米以内,缝隙处采用专用保温条紧密填充,严禁出现通缝。粘贴时采用“点框+条粘”组合工艺,粘结面积不低于保温板面积的 80%,轻轻按压板材排出内部空气,确保板面平整、无空鼓。保温板固定 24 小时后,进入抹面层施工,此环节分为两道工序。第一道抹面砂浆厚度控制在 3~4 毫米,同时满铺耐碱玻纤网格布,网格布需自然顺平,不得拉伸起皱,搭接宽度不小于 100 毫米,并用抹刀将网格布完全压入砂浆中。待第一道砂浆初凝后,进行第二道抹面施工,厚度控制在 2~3 毫米,施工人

员需使用专用抹刀进行收光处理,并用靠尺实时监测墙面平整度,将表面平整度误差控制在 4 毫米以内。

3.4 节点处理,防范后期质量隐患

节点处理聚焦于外墙保温的关键薄弱环节,是提升工程整体耐久性的重中之重^[5]。施工人员需针对阴阳角、门窗洞口、伸缩缝等节点制定专项施工方案,实施精准化作业。阴阳角部位需采用定制的直角或钝角保温板进行拼接,拼接处涂抹密封胶后,额外铺设一层宽度不小于 200 毫米的加强型网格布,以此增强节点处的抗裂性能。门窗洞口周边,需在洞口侧壁同步铺设保温层,延伸长度不少于 50 毫米,洞口内侧转角处需做成圆弧过渡,避免直角应力集中导致开裂。洞口边缘需涂抹两道密封胶形成防水密封带,有效阻隔雨水渗透。伸缩缝施工时,需根据缝宽选择适配的泡沫填缝条,填缝条深度为缝宽的 0.7 倍,其上表面填充高模量耐候密封胶,密封胶宽度需大于缝宽 2 倍,并在外侧安装金属装饰盖板。施工全过程中,技术人员需对所有节点逐一复核,使用塞尺检测缝隙宽度,用拉力计测试粘结强度,对存在隐患的部位立即返工整改,从根源上防范后期质量隐患。

4 结束语

科学应用高层建筑外墙保温施工技术,是建筑行业践行绿色低碳发展理念、落实国家节能政策的重要举措,其施工质量与建筑节能效能、结构稳定性和居住舒适度密切相关。规范的施工流程、合理的技术选型和精细化的细节把控,能够有效解决行业内现存的质量问题,充分发挥外墙保温的多重优势。随着建筑技术的不断创新,外墙保温材料和施工工艺将不断升级,行业将逐步完善标准化施工体系,推动保温技术向更高效、更环保、更耐久的方向发展,为建筑领域实现碳达峰碳中和目标提供有力保障,助力绿色建筑产业迈向高质量发展的新阶段。

参考文献:

- [1] 邱晖.高层建筑外墙保温施工技术研究[J].陶瓷,2025(12):207-209.
- [2] 李宗亮.高层建筑外墙保温施工技术分析[J].建材发展导向,2025,23(11):55-57.
- [3] 郭姣斌.高层建筑外墙保温施工技术要点分析[J].建材发展导向,2025,23(06):85-87.
- [4] 张艳芬.高层建筑外墙外保温施工技术分析[J].建材发展导向,2025,23(02):58-60.
- [5] 荆超.建筑外墙保温材料 & 施工技术要点探讨[J].佛山陶瓷,2024,34(05):74-76.

既有建筑结构检测与加固施工技术研究

马 念

(云南达界建设工程检测有限公司, 云南 昆明 650100)

摘 要 随着服役年限增长, 大量既有建筑已进入集中老化期, 由于受设计年代标准低、材料自然劣化等因素影响, 导致这类建筑的结构安全稳定性与耐久性逐年下降, 成为当前城市更新领域必须高度重视的核心工程风险源。结构检测为这类既有建筑加固决策提供了先决条件。本文以“检测—评估—加固—控制”为核心思路, 详细探讨了外观与变形观测、材料特性检测等核心检测技术, 对既有建筑的常见病害和成因机理进行了分析。根据工程实践归纳了增大截面、外包钢、粘贴纤维复合材料和预应力加固的施工技术要点和适用边界。同时, 在界面连接、锚固构造、耐久防护及过程验收方面提出了质量控制要点, 以期对既有建筑安全评估和加固施工有所裨益。

关键词 既有建筑; 结构检测; 结构加固; 外观检测; 材料性能检测

中图分类号: TU746.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.014

0 引言

既有建筑随着服役年限增长, 受到设计标准的差异、施工质量的波动、使用荷载的改变、环境持续侵蚀等的影响, 结构的承载力、刚度及耐久性会发生不同程度的劣化, 继而诱发裂缝扩展、钢筋锈蚀和变形超限等安全性和使用功能方面的问题。“检测评估—加固设计—施工控制”的现有建筑技术链条成为确保既有建筑安全和延长寿命的关键途径^[1]。结构检测为既有建筑加固决策提供依据, 检测结果直接用于风险分级、薄弱构件识别及加固参数取值; 加固施工是既有建筑性能恢复和提升的关键环节, 需要在满足承载和延性目标的同时, 考虑施工的可实施性和耐久性。为使既有建筑改造更具针对性和可靠性, 本研究重点围绕既有建筑结构检测方法、常见病害与隐患特征以及增大截面、外包钢、纤维复合材料与预应力等加固施工技术进行系统分析, 对关键施工技术要点及质量控制措施进行了总结, 为既有建筑安全评估和加固实践提供借鉴。

1 既有建筑结构检测技术分析

1.1 建筑结构外观检测技术

外观检测以“构件—节点—体系”为序开展, 并在初步确认结构体系及整体布置基本满足现行抗震设计要求、能够按照承载能力与构造要求进行安全评估的前提下开展相关工作。首先对梁、柱、墙、板及连接节点进行目测与量测, 重点记录裂缝形态(走向、

宽度、贯通性)、混凝土剥落和露筋, 渗漏和盐析以及构件挠度和变形情况, 形成可追溯缺陷分布图。然后结合结构的受力特点区分裂缝类型, 并将温度收缩, 荷载作用和沉降变形的诱因和构件的位置相对应, 从而实现薄弱构件和风险区域的初步锁定。对可疑整体问题进行沉降、倾斜及层间位移同步观测, 迅速判断基础变形和整体侧向刚度有无异常现象, 从而为后续材料检测和承载复核工作提供清晰的检测路径和优先级。

1.2 材料性能检测技术

材料性能检测按照“面域筛查—重点校核—参数入模”的工艺路线进行。针对混凝土结构既有建筑, 首先采用回弹法与超声法结合的方式, 按区域绘制混凝土强度及内部质量分布图谱。回弹法可判定混凝土的强度水平及离散程度, 借助超声法能精准定位裂隙位置、识别疏松、空洞等内部隐性缺陷, 以此圈定可能影响结构承载力与耐久性的劣化区域。对于承重关键构件, 若检测结果显示存在数据离散性显著的区域或可疑薄弱区域, 需通过钻芯取样进行强度复核, 同时可同步获取碳化深度、孔隙状态等耐久性相关信息。结合“非破损效率+取样精度”的方法, 可以直接将检测数据转换为加固设计所需的材料参数和分区标准, 从而减少误判对设计方案选择的干扰。

1.3 钢筋检测与腐蚀检测技术

在钢筋的检测过程中, “构造符合性+耐久风险”被视为核心考量因素。利用钢筋扫描仪对钢筋的位置、间距、直径和保护层厚度等参数进行验证, 着重对受

作者简介: 马念(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程质量检测。

拉区的配筋、箍筋加密区和节点核心区进行分析,判断有无保护层偏薄的情况、钢筋错位或者构造措施不完善等,据此对构件的延性和受力传递的可靠性进行评价。对存在渗漏、潮湿或氯盐侵蚀环境的部位,结合碳化深度测定与电化学腐蚀评估(半电池电位等)判断钢筋腐蚀活动性与发展趋势,建立风险分级与处置优先序^[2]。该成果直接确定了技术路线:以腐蚀为主的部件要优先考虑耐久性修复和保护,然后施行补强;承载不足主导的构件则以提升承载与延性为目标配置加固措施。

2 既有建筑结构存在的主要问题

2.1 结构材料老化与耐久性下降

既有建筑在经历较长的服役时间之后,其材料性能一般表现为“强度—刚度—耐久性”的协同衰减。混凝土普遍存在碳化,冻融及氯盐侵蚀等因素造成保护层的劣化和钢筋锈蚀造成的体积膨胀等问题,这些因素又会诱导裂缝的扩展和脱落,减弱粘结锚固和有效截面;同时徐变、收缩的积累使得挠度和裂缝宽度增加,导致使用性能和安全储备降低。在钢结构中,涂层失效、点蚀和截面弱化是主要的问题,而在腐蚀和疲劳的叠加影响下,连接节点更容易出现承载力的退化和延性的不足。

2.2 结构设计标准不足

部分既有建筑受建造年代规范水平和功能定位的限制,抗震构造和安全冗余缺失,其典型特征是延性构造缺失、节点区的约束较弱。由于构件配筋及构造措施偏于保守或者不够完善等原因,使得结构更容易在地震或者偶然性的影响下产生薄弱层和脆性破坏机制。另外,当建筑物改用途、增荷载或者变更平面分隔时,往往会发生荷载路径重分配和局部受力突增等问题,原有设计中承载和变形控制指标很难满足当前的使用需求,需要对结构体系进行复核和补强,以恢复其整体可靠度。

2.3 施工质量问题

既有建筑结构隐患常和前期施工质量缺陷相互叠加和放大,在既有混凝土结构工程中集中表现为材料强度分散,钢筋位置偏离以及节点构造执行不到位。混凝土振捣不密,蜂窝麻面及施工缝处理不好,抗剪和耐久性能减弱;钢筋保护层较薄,锚固长度不够或者搭接不标准,将减小受力传递和延性储备;模板偏差和养护不足容易诱发早期裂缝,加速劣化^[3]。该类缺陷隐蔽性和累积性较强,往往在长期荷载和环境作用下向可见病害转变,并直接影响检测评估和加固分区优先级判断。

3 既有建筑结构加固施工技术

3.1 增大截面加固技术

增大截面法通过在原有构件的外侧添加钢筋和浇筑新的混凝土来形成“新与旧共同受力”的复合截面的方法,其目的是为了提升梁和柱等构件的承载能力和刚度,适用于既有钢筋混凝土构件受压不充分,受弯承载力较低,或者挠度和裂缝控制达不到要求时。施工的核心是界面的处理和可靠的连接:对原有混凝土的表面进行凿毛、清洗,并用界面剂加强粘结;采用植筋、箍筋加密或者剪力连接件等方式保证新增钢筋和原有构件共同工作;模板和支撑在浇筑过程中应确保几何尺寸和保护层厚度。该项技术存在的主要风险是新老混凝土界面滑移和收缩差异导致开裂,要采取合理配筋,收缩补偿材料和分段浇筑等措施来控制不利影响。

3.2 外包钢加固技术

外包钢加固是用型钢或者钢板包裹或者加箍构件来增强截面约束和承载能力的一种加固方法,特别是对于既有钢筋混凝土柱轴压比较高而抗震延性又不够的情况,节点核心区对既有建筑构件约束较弱,存在局部压碎的危险。施工应围绕“传力路径明确、贴合严密、持久可控”组织:钢材加工需满足构件几何偏差与现场拼装要求,包钢与原构件之间宜采用高强灌浆料或结构胶填充,保证受力连续并避免空鼓;连接方式要综合考虑受力特点,选择焊接或者螺栓等方式,同时要控制热影响破坏原有构件^[4]。外包钢耐久性是质量控制的关键,需要配置防腐体系和改善节点封闭及排水细部以避免因潮气滞留造成二次锈蚀和性能衰减。

3.3 粘贴纤维复合材料加固技术

粘贴纤维复合材料(以碳纤维合成材料为主)通过在构件受拉区布置高强纤维层,显著提升受弯、受剪承载能力并抑制裂缝开展,适用于既有钢筋混凝土梁、板、柱等构件受弯不充分,剪切承载力不充分,因开洞或者改建而导致的部分弱化,结构轻量化补强等需要。该技术能否成功,关键在于界面和锚固的控制:需要将基层磨平,使其达到稳固的基面,保证干爽清洁;胶粘剂的比例、涂布厚度及固化条件等要根据工艺窗口进行严格把控,防止空鼓、脱粘和强度不够。对于端部剥离危险较大的区域,宜采用端部锚固,U形箍或者机械锚具的构造措施以增加纤维的有效利用率。在火灾敏感或者高温环境下,防火保护层的设计和长期耐久性设计应该同步进行,以免材料性能受到温度和老化的影响而出现明显的折减。

3.4 预应力加固技术

预应力加固是在体外加预应力筋或者在体外索作用反向内力来改善构件受力和变形状态,它能有效地减小既有梁板挠度,控制裂缝宽度,增强其在使用阶段承载的安全储备,适用于既有钢筋混凝土梁、板等受弯构件跨度大,长期挠度太大或者因使用功能调整而使荷载增大的构造。施工应以“张拉体系运行可靠,锚固区安全可靠,张拉工艺可控”为原则:锚具与转向装置布置需满足受力路径与结构构造条件,避免对原构件产生不利偏心或局部压碎;张拉要采取分级、对称和同步控制的方法,并对伸长量、索力及结构变形等参数进行实时监控,以防超张和二次应力集中^[5]。该项技术对于施工组织和检测复核都有很高的要求,需要在张拉之前完成承载复核和锚固区局部加固设计工作,张拉后要开展长期索力和挠度追踪工作,确保加固效果稳定可靠。

4 既有建筑结构加固施工质量控制

4.1 “检测数据—承载复核—方案配套”闭环控制

加固质量控制要从源头上构建“检测数据—承载复核—方案配套”闭环。检测阶段不仅要完成缺陷识别,还应形成可用于设计的参数集(如混凝土强度分区,钢筋保护层和锈蚀的风险等级,构件裂缝特征及变形实测值),并明确关键薄弱构件与薄弱楼层。复核阶段依据现行规范进行承载力与变形验算,识别控制指标(承载、刚度、延性和耐久)。在方案阶段,要坚持问题导向:承载不足时,优先选择增大截面,外包钢或者预应力体系来增强承载和刚度;裂缝和受拉不足可以用碳纤维合成材料和其他材料定向补强;如果耐久性不足,需要先进行修复再进行加固,以防止“带病加固”导致的界面失效和二次劣化。

4.2 关键工序过程控制与可追溯管理

施工过程要围绕加固技术中的关键工序设置控制点,形成可追溯记录。增大截面法主要关注界面凿毛质量,植筋深度和拉拔抽检,钢筋锚固和箍筋加密,混凝土配合比和养护条件等方面,以预防界面滑移和收缩裂缝的产生。外包钢的强化主要集中在钢构件的处理尺寸及贴合度,灌浆/结构胶饱满度,焊接热影响和螺栓预紧力以及防腐封闭细部等方面的控制,以免发生空鼓、脱空及腐蚀复发。碳纤维合成材料加固主要控制基层含水率和洁净度,胶粘剂配比和涂布厚度,纤维铺贴的方向和搭接长度以及端部锚固措施等,以减少剥离破坏的风险。预应力加固主要集中在锚固区的局部承压和加固控制、张拉分级和同步控制、伸

长量和索力校核以及张拉过程中的变形监测等方面,以防超张和应力集中^[6]。以上控制点要通过旁站、抽检及影像记录等方式固化,保证工序质量的可核查。

4.3 加固后验收与性能验证评估

加固完成后的质量验收不应停留在外观与资料层面,应以“构造合规→接口可靠→性能符合标准”为目标组织验证。首先开展实体质量核查工作,并结合增大截面、外包钢、纤维复合材料及预应力等不同加固方法的质量控制内容分类验收,核查内容涉及新增构件的尺寸偏差,钢筋的位置和保护层的设置,包钢的贴合和闭合,碳纤维合成材料的空鼓率和端部锚固的完整性以及预应力锚具和索道的保护。其次,对裂缝宽度及发展趋势、挠度及层间位移、局部变形及节点约束效果等关键指标进行复测和对比评价,对关键构件的承载复核回算以保证加固措施达到设计意图。对耐久性敏感区域、防腐、防火及防水等细部要同步进行排查,建立起必要的监控及维保机制以实现全寿命周期加固效果的稳定和可控。

5 结束语

既有建筑结构检测加固施工技术有效落实的关键是建立“检测—复核—方案—施工—验收”闭环体系。在工程实践中,要以问题为导向进行外观变形观测、材料性能和钢筋腐蚀检测等工作,并形成可以进行承载复核和设计的参数基础。同时,结合病害机理和薄弱部位,合理选择增大截面、外包钢、纤维复合材料和预应力等加固工艺,强调界面传力、锚固可靠和工艺可追溯等施工控制。通过技术优化和管理协同,可以有计划地增强既有建筑承载、变形和耐久性性能,从而为城市更新和建筑再利用等提供安全、经济和持续的技术支持。

参考文献:

- [1] 周灿培.城市更新背景下既有建筑结构安全性检测技术优化:以某市老城区红星小区5号楼为例[J].城市建设,2025(23):87-89.
- [2] 林子靖.钢-砌体结构混合的既有建筑结构检测与鉴定方案探讨[J].福建建设科技,2023(06):25-27.
- [3] 张琪.既有建筑混凝土结构加固改造技术应用与管理[J].工程质量,2024,42(S1):103-107.
- [4] 肖柳阳,胡志伟,马超.既有建筑工程结构的检测方法研究与加固技术研究[J].四川建材,2025,51(06):99-102.
- [5] 朱曹闻.既有建筑混凝土结构加固方法分析:以上海市某物流中心项目为例[J].房地产世界,2024(18):107-109.
- [6] 姚思睿.建筑结构检测与加固施工技术的探讨[J].城市开发,2025(06):171-173.

房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术研究

刘 坤

(安徽笔木建设科技集团有限公司, 安徽 合肥 233000)

摘 要 在房屋建筑深基坑开挖施工中, 深基坑支护承压结构施工技术的运用具有较大优势, 不仅可以提高整体施工效率, 还能确保安全可靠, 有效降低整体施工成本。基于此, 本文以房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术原理作为切入点, 简要论述深基坑支护承压结构施工技术的优势, 并以 A 工程为例进行分析, 主要包括施工准备、排桩与防渗帷幕施工、锚杆一内支撑联合承压结构施工、基坑开挖与过程管控等关键技术, 旨在为房屋建筑深基坑支护承压结构施工提供参考。

关键词 房屋建筑; 深基坑支护; 承压结构; 基坑开挖

中图分类号: TU753

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.015

0 引言

深基坑支护施工是房屋建筑工程的基础性工作, 其主要目的是通过稳固的支撑和防护措施, 确保基坑在挖掘、降水、支护等过程中的结构稳定性和安全性, 防止对周围环境和建筑造成不良影响。但深基坑开挖作业具有一定的复杂性和危险性, 需要对深基坑支护施工关键技术加以把控。因此, 施工人员应对深基坑支护承压结构施工技术进行深入研究, 以确保深基坑施工安全。

1 房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术原理

在房屋建筑工程中, 深基坑支护承压结构施工技术指的是通过对承压结构体系的构建, 可以有效实现多种荷载的科学传递与分散, 进而防止基坑侧壁土体变形, 有效确保基坑开挖施工安全。其技术原理可从三个方面进行分析:

第一, 荷载传递原理。在深基坑中设置支护承压结构可以将侧向荷载均匀传递至周边稳定土体中, 可以确保荷载平衡, 避免因局部压力过大造成深基坑坍塌。

第二, 土体约束原理。支护承压结构直接嵌入基坑底部中的稳定土体中, 能够对土体的水平位移和竖向沉降问题进行有效约束, 还能提高侧壁土体的抗剪能力, 以免出现土体变形问题。

第三, 防渗止水原理。支护承压结构的应用具有一定的抗渗透能力, 避免地下水进入深基坑中, 以免造成涌水、流沙等问题, 确保深基坑开挖工作的顺利开展^[1]。

2 房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术优势

2.1 安全可靠

在房屋建筑工程中, 深基坑支护承压结构施工技术具有安全可靠的优势。深基坑支护承压结构具有较好的强度、刚度以及抗变形能力, 能够对所有荷载作用加以抵御, 从而防止深基坑侧壁出现坍塌问题, 还能防止出现地下水渗透情况, 有效降低安全事故发生率。深基坑支护承压结构主要是通过钢筋混凝土、钢板、锚杆等材料组成, 具有较强的承载能力, 可以确保深基坑结构稳定, 为深基坑开挖作业保驾护航。

2.2 适应性强

房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术具有适应性强特点, 可以根据不同情况的实际情况合理选择承压结构类型与施工工艺, 从而适配不同施工场景。当施工区域具有良好的地质条件时, 且开挖深度较为适中, 施工人员可使用排桩承压结构进行基坑支护, 在满足支护要求的基础上, 有效简化工艺。当施工区域地质条件较为复杂时, 可选择地下连续墙承压结构进行基坑支护, 具有良好的整体性。当开挖深度较大时, 可使用锚杆一内支撑联合承压结构进行支护处理, 具有较强的抗变形能力^[2]。

2.3 施工高效

深基坑支护承压结构施工技术具有施工高效性的特征, 该技术作为房屋建筑工程中的一部分, 其施工效率对整个工程的施工进度具有较大影响。深基坑支护承压结构施工流程较为简单, 可利用智能化设备进

作者简介: 刘坤(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

行施工,快速完成支护承压结构的安装工作,从而压缩深基坑支护承压结构的施工时间。同时,该技术方便进行施工质量的控制,有效降低返工频率,进一步提高施工效率。

2.4 成本较低

对深基坑支护承压结构施工技术而言,其具有成本低的应用优势。通过对深基坑支护承压结构的合理设计,并科学选择施工材料,能够降低施工成本。施工人员可根据实际情况合理选择支护承压结构,以免过度设计造成材料成本的浪费。此外,支护承压结构具有可重复使用的特点,一次购买多次应用,有效降低其施工成本。

2.5 环保性好

深基坑支护承压结构施工技术的环保性较好,可以降低施工期间对周边环境的影响。支护承压结构在使用过后可以进行回收和重复使用,有效减少建筑废弃垃圾。同时,施工过程中运用净化处理技术进行泥浆和废水的处理,以免对土壤和水体造成污染。在排桩施工中,施工人员可通过泥浆进行护壁处理,有效降低施工粉尘量,进而降低空气污染程度,满足绿色施工理念要求。

3 房屋建筑深基坑支护承压结构施工技术的应用

3.1 工程概况

A高层住宅建筑工程地处某市核心区域,总体建筑面积为85 000 m²,其中,地上建筑为28层,地下建筑为1层,用作地下车库。要求基坑开挖深度为8.5 m,开挖面积为2 800 m²。对该施工区域而言,具有较为复杂的地质条件,其土层包括粉质黏土、细砂、粉砂等土层类型,地下水位较高,达到2.3 m。该施工区域的周边存在2栋居民楼,且地下管线十分密集,因此,需要避免基坑变形,保证基坑侧壁水平位移允许值保证在25 mm以内,沉降量允许值在15 mm以内。根据该工程的实际情况分析,深基坑支护承压结构可采用“排桩+高压旋喷桩防渗帷幕+锚杆—内支撑联合承压”的综合支护体系,以确保深基坑施工安全。

3.2 施工准备

在房屋建筑深基坑支护承压结构施工前,需要做好相关准备工作。其一,地质勘察。施工单位应委托勘察人员对施工区域地质条件、地下水位以及地下管线分布情况进行全面勘察,了解地质安全隐患、地下水位变化规律和地下管线走向情况,进而整合成资料,为后续施工提供数据支持;其二,制定施工方案。施

工人员可根据设计图纸要求和地质勘察结果进行全面分析,从而打造深基坑支护承压结构施工方案,对具体的工艺流程和关键细节加以说明,并制定应急处理方案,为后续施工提供参考;其三,设备材料准备。施工单位应提前对深基坑支护承压结构施工相关的机械设备加以采购或租赁,如回旋钻机、全站仪、起重机、混凝土输送泵等。同时,施工单位还应准备相关施工材料,如钢筋、混凝土、锚杆、钢板等。在材料进场时,管理者需要对其数量和质量加以抽样检测,确保满足设计要求;其四,现场整理。施工人员应清除施工现场的障碍物,并对场地进行整平工作,设置围挡和警示标志,以免无关人员误入。施工人员还应设置排水沟,避免出现积水问题,以免对深基坑支护承压结构施工带来影响^[3]。

3.3 排桩与防渗帷幕施工

在深基坑支护承压结构施工过程中,排桩作为其中的重要承压构件,可以抵御侧向荷载。通过对防渗帷幕的施工可以有效避免地下水渗漏,从而确保基坑施工安全。其一,测量放线。施工人员可利用全站仪设备对桩位展开测量放线工作,并根据设计图纸要求确定桩位的具体坐标,保证所有的排桩与高压旋喷桩均处于中心位置,并对其标记与复核工作,确保排桩与高压旋喷桩位置偏差分别低于50 mm和100 mm。施工人员还应做好基坑开挖边线与边坡坡度的标记工作,为后续施工提供参考。其二,排桩施工。对排桩施工而言,可使用钢筋混凝土灌注桩进行作业,要求其桩长为12 m,桩径为800 mm,桩间距为1.5 m。对桩身混凝土而言,要求其等级为C30,并选择HRB400E级钢筋作为纵向受力钢筋。施工人员可运用回旋钻机开展钻孔工作,并利用泥浆护壁辅助钻孔作业,合理控制钻进速度和深度,并对相关数据加以记录,保证钻孔垂直度偏差低于1%。在钻孔工作完成后,施工人员可利用换浆法进行清孔处理,要求沉渣厚度低于50 mm。此外,施工人员可对预制钢筋笼进行吊装作业,在钢筋笼就位后,需要对其进行顶部与底部的固定操作,以免在混凝土浇筑施工中出现位移问题。钢筋笼安装结束后,施工人员可使用导管法进行混凝土浇筑,要求浇筑速度稳定。其三,高压旋喷桩防渗帷幕作业。要求桩长、桩径以及桩间距分别为10 m、600 mm以及500 mm,保证高压旋喷桩与排桩之间进行相互咬合,进而打造连续的防渗帷幕。施工人员可在测量放线后进行钻孔作业,并使用42.5级普通硅酸盐水泥进行注浆操作,要求注浆压力处于20~25 MPa之间,注浆速度为20~30 cm/min,旋喷速度为15~20 r/min^[4]。

3.4 锚杆—内支撑联合承压结构施工

在支护承压结构施工中,锚杆—内支撑联合承压结构是其中的核心组成部分,将锚杆与内支撑加以结合,可以提高支护结构的抗变形能力。其一,锚杆施工。施工人员需要提前进行钻孔操作,并使用起重机将锚杆吊入孔内固定,使用水泥砂浆对其进行注浆操作,要求注浆压力为 0.3~0.5 MPa。注浆结束后,要求养护 7 d 以上。其二,腰梁施工。要求腰梁截面尺寸为 600 mm×400 mm,与排桩之间加以连接,可以确保荷载的均匀传递。施工人员需要对排桩表面浮浆和杂物进行清理,并对腰梁钢筋加以绑扎。在混凝土浇筑施工后,需要养护 14 d 以上。其三,安装内支撑。施工人员可以使用 H 型钢作为内支撑,要求其间距为 1.0 m,并将其与腰梁之间使用高强度螺栓加以连接。在实际施工中,施工人员可运用起重机将内支撑进行吊装施工,在完成安装任务后,可使用千斤顶施加预应力,要求其预应力数值为设计值的 1.1 倍。施加应力后,施工人员应对内支撑加以固定。其四,锚杆张拉与锁定。在锚杆注浆养护施工完成后,施工人员可使用千斤顶进行锚杆张拉,并做好张拉记录。当张拉数值达到设计要求后,可使用锚具对其加以锁定^[6]。

3.5 基坑开挖与过程管控

在基坑开挖过程中,施工人员可通过分层开挖方法加以施工。对本工程而言,需要分三层进行开挖,其开挖深度分别为 2.5 m、3.0 m 以及 3.0 m,每完成一层的开挖作业后,施工人员便可进行支护承压结构的设置,以确保基坑侧壁稳定。基坑开挖工作主要采用挖掘机设备进行施工,并由人工进行土体清理工作,将坑底渣土及时运送至指定地点,禁止在基坑周边堆放渣土。同时,保证基坑坡度满足设计要求,坑底平整,避免出现超挖或欠挖问题。在实际施工时,施工人员应做好过程管控工作,定期对排桩、高压旋喷桩、锚杆、内支撑的施工质量加以检测,以便及时发现问题,确保深基坑施工安全。

3.6 应用效果

在 A 房建工程深基坑开挖过程中,为了能够了解支护承压结构施工技术的应用效果,施工人员布置了 32 个监测点,对相关数据进行实时监测,具体监测结果如表 1 所示。

由表 1 可见,深基坑支护承压结构施工技术的应用具有良好效果,支护桩水平位移、地下水位降深、

表 1 监测结果

监测项目	允许范围	实际结果	评价
支护桩水平位移/mm	≤ 30	18	满足要求
地下水位降深/m	基底以下 1.0	基底以下 1.3	满足干作业条件
支护桩钢筋应力/MPa	≤ 200	165	安全储备充足
周边建筑沉降量/mm	≤ 30	22	未超限
降水含砂率	≤ 1/10 000	0.8/10 000	滤料层无堵塞现象

支护桩钢筋应力、周边建筑沉降量以及降水含砂率均满足要求。

承压结构施工技术将向着智能化方向发展,为施工安全提供技术赋能。

4 结束语

在房屋建筑深基坑开挖施工过程中,支护承压结构施工技术的应用具有重要意义,不仅可以确保深基坑开挖施工的安全性,还能有效控制施工成本,满足绿色施工理念要求。在实践应用中,施工人员应对建筑工程概况进行全面理解,并做好相关准备工作,为后续施工奠定基础。同时,施工人员可通过排桩与防渗帷幕施工、锚杆—内支撑联合承压结构施工、基坑开挖以及过程管控等关键环节进行施工,严格控制施工质量,有效发挥深基坑支护承压结构施工技术优势,确保房屋建筑深基坑开挖的安全。未来,深基坑支护

参考文献:

- [1] 葛唱.深基坑支护施工技术在房屋建筑工程施工中的应用[J].中国建筑装饰装修,2026(03):124-126.
- [2] 高渊.深基坑支护施工技术在房屋建筑工程施工中的应用研究[J].石油化工建设,2025,47(11):99-101.
- [3] 王仲钦.房屋建筑基坑支护施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(23):124-126.
- [4] 李剑.深基坑支护承压结构在超高层建筑施工中的应用[J].江西建材,2023(06):249-250,253.
- [5] 杨蕊蕊.建筑房屋深基坑支护施工技术要点研究[J].建材与装饰,2020(08):21-22.

超高层建筑核心筒爬模施工精度控制问题分析

李龙基

(东营市东营区胜利建筑安装工程有限责任公司, 山东 东营 257091)

摘要 在超高层建筑核心筒结构施工中, 爬模技术凭借施工效率与高空作业适配性实现大范围应用, 施工阶段易受测量偏差、模板体系稳固性及现场管理等条件干扰, 作用于结构垂直度与尺寸成型效果。本文主要研究核心筒爬模施工精度管控内容, 整理施工环节常见偏差状况与诱发因素, 依托测量系统、模板构造及现场管控制定对应处置方案, 融入信息化手段完善精度管控流程, 以期为核心筒结构施工品质的优化提供有益参考。

关键词 超高层建筑; 核心筒结构; 爬模施工; 施工精度控制; 模板体系

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.016

0 引言

超高层建筑数量持续增多, 核心筒结构在建筑整体受力体系中占据重要地位, 施工精度直接决定结构稳定性与工程质量。爬模施工技术应用于核心筒施工具备显著优势, 施工高度不断提升, 轴线控制、模板稳定性、施工组织管理等方面对结构精度提出更严格的标准。施工环节中控制措施存在疏漏, 结构垂直度偏差与尺寸误差等问题便会随之出现。针对核心筒爬模施工精度控制展开系统研究, 梳理关键影响要素, 为施工技术管控与工程质量把控提供参考。

1 超高层建筑核心筒爬模施工精度控制现状与技术特点分析

1.1 核心筒结构施工特点对爬模精度控制的影响

超高层建筑核心筒主要采用钢筋混凝土浇筑形成, 能够有效提升结构受力能力, 确保结构的承载力, 同时抗震性良好, 该类结构已经成为超高层建筑工程中一种主流结构形式。除上述优势外, 核心筒在提高建筑结构整体稳定性的同时, 还可较大幅度提升建筑空间的利用能力, 实现建筑空间合理规划, 使建筑中的电梯、公共卫生间等服务性空间呈现集中式设计, 可增加建筑内主功能空间采光位置的面积, 保证主功能空间的视线、内部交通便捷的效果。

1.2 爬模施工体系运行机制及精度控制要求

爬模体系由模板平台、液压提升装置和附着支撑结构组成, 通过预埋件与墙体连接, 实现模板同步顶

升与重复利用。模板体系通过预埋件与墙体稳固连接, 液压装置按流程整体顶升, 确保与施工进度同步。该模式对轴线、竖向偏差及标高控制要求严格, 每节段完成后须立即测量复核, 确保模板定位与设计轴线一致。

模板拼装准确度、连接节点强度及顶升设备运行状态均会直接作用于施工精度, 施工环节需维持模板体系整体稳固性, 严控模板安装偏差与结构尺寸偏差, 使核心筒结构几何参数与竖向偏差满足施工技术规范^[1]。

1.3 核心筒施工过程中精度偏差形成的主要表现

核心筒结构连续爬模施工阶段, 精度偏差多体现为结构垂直度偏移、墙体厚度不均与结构轴线位置偏差等状况。施工高度持续提升, 测量复核滞后或控制标准落实不到位, 局部施工误差会在多次模板提升环节逐步叠加, 引发整体结构偏移问题。模板安装衔接疏松或连接节点刚度欠缺, 混凝土浇筑形成的侧压力易造成模板局部形变, 干扰墙体截面尺寸的稳定状态。高空作业环境中, 风荷载、施工荷载及设备运行震动均会作用于模板体系稳定性, 造成结构表面平整度降低或墙体局部出现尺寸偏差, 直接作用于核心筒结构整体施工精度。

2 核心筒爬模施工过程中影响施工精度的关键因素分析

2.1 测量放线误差对核心筒结构垂直度的影响

核心筒结构施工阶段, 测量放线把控结构轴线位置与垂直度的关键技术环节, 施工测量依靠基准控制

作者简介: 李龙基 (1988-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

点、轴线控制网与楼层传递点实现空间定位, 高层施工场景下, 测量数据要历经多次传递与复核工作。控制点布设存在缺陷或仪器校准存在偏差, 轴线传递环节会形成累积误差, 结构中心线逐步偏离预设设计位置。施工环境内温度波动、结构振动、观测条件区别等要素都会干扰测量数据的稳定状态。测量复核制度落实存在疏漏, 多层施工中微小误差持续叠加, 最终形成核心筒整体垂直度偏移问题, 对结构受力情况与后续结构施工形成相应影响。

2.2 模板体系稳定性不足引发的结构尺寸偏差问题

核心筒爬模施工阶段, 模板体系承受混凝土侧压力与施工荷载, 稳定性直接影响墙体尺寸及结构形态的精准度。模板支撑结构刚度欠缺或连接节点固定松散, 混凝土浇筑环节易出现位移或局部形变, 改变墙体截面尺寸^[2]。模板拼接部位存在缝隙或连接构件布设不均, 会造成模板整体受力失衡, 引发局部结构厚度偏差。连续提升施工过程中, 模板附着点受力状态持续改变, 支撑系统调控滞后便会引发模板微小倾斜, 干扰墙体平整度与结构垂直度。施工高度持续攀升, 模板体系稳定性问题愈发显著, 给核心筒结构尺寸管控带来相应考验。

2.3 施工操作与管理环节对精度控制产生的影响

核心筒爬模施工精度受技术条件约束, 与施工组织管理水平存在直接关联, 施工环节内, 模板安装顺序、提升操作节奏、混凝土浇筑方式都会作用于结构精度。施工流程衔接存在问题, 模板调整与校正时长不足, 会引发模板定位偏差, 改变结构轴线的既定位置。混凝土浇筑速率过快或分层厚度把控失衡, 会拉大模板受力差距, 引发模板局部出现位移。施工管理缺少严苛的测量复核与质量检查机制, 各类偏差无法及时排查修正, 误差会在各施工节段中持续叠加。设备维护与操作规范落实存在缺失, 会干扰模板提升的稳定状态, 拉低整体施工的精准程度。

3 核心筒爬模施工精度控制中存在的典型施工问题分析

3.1 模板安装与提升过程中的定位偏差问题

核心筒爬模施工中, 模板安装需依托测量控制线精准就位, 并通过连接件与附着支撑体系确保稳固。若拼装控制不严或基准线核验疏漏, 易导致安装方位偏移, 影响墙体轴线合规性。顶升过程中, 液压装置须同步运行, 保持速率与受力一致, 防止平台局部倾斜; 附着装置转换若调控滞后, 将引发模板微小位移, 使

结构偏离预设轴线。随着施工高度增加, 此类偏差在多次顶升中累积, 影响核心筒整体垂直度与尺寸精度。

3.2 混凝土浇筑荷载作用下模板变形问题

核心筒施工中, 混凝土浇筑产生的侧压力与施工荷载对模板体系稳定性要求高。若模板刚度不足或支撑布置不当, 易发生局部变形, 影响墙体截面尺寸。分层浇筑高度控制不当或浇筑过快, 会导致受力不均, 引发板面鼓胀和节点松动; 钢筋密集区振捣振动加剧模板位移, 降低墙面平整度。高层施工中模板受力更复杂, 若支撑系统未及时调整, 变形将直接影响核心筒结构尺寸精度与整体施工质量^[3]。

3.3 施工节段累积误差对整体结构精度的影响

核心筒采用分层分段施工, 各节段的定位精度直接影响后续工序。若某节段出现微小偏差且未及时纠偏, 误差将在后续施工中逐层累积, 形成显著结构偏差。轴线控制点传递若未精准复核, 易导致整体轴线偏移, 影响垂直度控制; 模板安装在方位或标高上的细微偏差, 经多轮施工后也会引发标高和墙体尺寸的累积误差。随着施工高度增加, 累积误差对结构整体精度、稳定性及后续构件衔接的影响日益突出。

4 提升核心筒爬模施工精度的关键技术控制措施研究

4.1 强化施工测量体系提升结构定位精度水平

核心筒爬模施工阶段, 需搭建稳定可靠的施工测量控制体系, 优化控制网布设与轴线传递方式保障结构定位精度。施工现场依托建筑物整体控制点搭建平面控制网与高程控制系统, 核心筒周边布设固定测量基准点, 降低测量传递环节的误差累积。轴线传递可借助激光垂准仪、全站仪等设备完成校验工作, 多点核验保障各层轴线位置统一。模板提升前后开展结构垂直度与轴线位置的复测作业, 偏差问题可第一时间调整, 结构施工全程维持可控状态。健全测量记录与校核机制, 施工全过程测量数据具备连续性与准确性, 为核心筒结构精度管控提供支撑依据。

4.2 优化爬模模板体系设计提升整体稳定性能

核心筒爬模模板体系结构设计关联施工稳定性与结构尺寸管控效果, 设计阶段需充分考虑受力条件与施工环境, 模板面板、背楞及支撑构件需结合混凝土侧压力与施工荷载合理配置, 提升整体刚度与承载能力^[4]。附着支撑装置与墙体连接部位需均匀布设, 保障模板体系提升及施工过程中受力均衡。模板连接节点采用可靠紧固结构, 减少拼接缝隙与局部形变。模

板提升装置设计需保障液压系统运行稳定,维持各提升点同步,避免模板平台倾斜或位移。优化模板体系结构布设,能有效提升模板整体稳定性,为核心筒墙体尺寸管控提供良好施工条件。

4.3 完善施工组织管理强化全过程精度控制

核心筒爬模施工精度控制依托规范的施工组织与质量管理措施落地,结合施工进度统筹规划模板安装、钢筋绑扎与混凝土浇筑等工序,推动各施工环节有序衔接。模板安装完毕后开展专项核查,逐一校核轴线位置、模板垂直度与连接节点,保障模板体系稳定。混凝土浇筑阶段把控浇筑速度与分层厚度,维持模板体系受力均衡,降低结构变形概率。搭建完善的质量检查与记录机制,持续跟踪施工测量数据、模板调整情况及结构偏差,依托规范施工流程与强化现场技术管理,施工全过程可有效管控结构偏差,保障核心筒施工精度稳定。

5 构建超高层建筑核心筒爬模施工精度系统化控制机制

5.1 建立多层级施工测量复核与校准管理体系

核心筒爬模施工精度管控依托系统化的测量复核机制,搭建多层级测量管理体系保障结构定位精准。施工现场以建筑物总体控制网为根基,形成基准控制点、楼层控制点与施工轴线构成的多级测量体系,核心筒周边布设稳定可靠的控制点作为长期观测的参考依据。每层施工结束后对轴线与标高开展复核校准,借助全站仪和激光垂准设备完成垂直度与轴线偏差的检测工作,保证各施工节段所处位置符合设计要求。测量仪器按周期完成校准与维护作业,保障测量数据具备稳定可靠的特性。测量成果整理成完整记录并开展技术复核,施工环节构建起连续的精度控制链条,降低数据误差带来的结构偏移风险。

5.2 完善施工过程质量监控与技术管理制度

核心筒施工精度控制依托全过程质量监控体系高效运转,施工组织中针对模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑与模板提升等关键工序设立严格质量检查制度。模板安装结束后对轴线位置、垂直度和墙体厚度展开专项检测,保证模板定位契合设计要求^[5]。混凝土浇筑阶段把控浇筑顺序与分层高度,维持模板受力均衡,规避局部结构出现变形。施工现场建立技术交底与过程巡检制度,对模板连接节点、提升设备运行状况及支撑体系稳定性开展持续查验。规范化质量管理流程的构建,让施工各环节维持可控状态,切实降低结构施工出现的偏差。

5.3 推动信息化技术在核心筒施工精度控制中的应用

超高层建筑施工技术持续迭代发展,信息化测量与监测技术凭借精准高效的优点,已逐步渗透到核心筒施工精度管控的各个环节。深圳某超高层建筑核心筒施工过程中,建筑总高度约为439 m,核心筒主体结构高度超过350 m,为保障施工精度,施工阶段专门采用激光垂准系统与BIM测量数据管理平台相结合的方式开展精度控制工作。施工现场在核心筒内部合理布设多组激光垂准基准点,做好点位防护避免施工干扰,通过激光垂准仪实现轴线实时投测,每层结构浇筑完成后,利用全站仪进行全方位复测校核,最终将结构垂直度严格控制在1/10 000以内。模板提升系统的运行参数与施工测量数据实现同步采集记录,依托BIM平台对轴线偏差和结构标高进行动态比对分析,一旦发现单层偏差超过3 mm,立即组织人员进行模板调整校正。实际施工过程中,核心筒整体垂直度偏差成功控制在18 mm以内,墙体厚度偏差始终保持在±5 mm范围内。信息化测量系统的应用实现了施工数据的实时监测、分析与反馈,有效规避了误差累积,大幅提升了核心筒结构施工精度控制水平。

6 结束语

超高层建筑核心筒爬模施工精度控制直接关系到超高层建筑的结构安全与整体施工质量。梳理施工过程中测量放线、模板体系稳定性、施工管理等方面的关键问题,搭配技术措施与管理机制的系统优化,能有效缩减施工偏差,提升结构垂直度与尺寸管控水准。随着信息化测量技术与智能监测手段在工程建设中的应用日益广泛,核心筒施工精度控制将会朝着更精细化、数字化的方向发展,为超高层建筑结构施工的质量与安全提供保障。

参考文献:

- [1] 朱勇,陈敏.装配式高层框架-核心筒同步攀升及高大模板支架施工关键技术研究[J].建筑机械,2026(02):276-281.
- [2] 蒲靖,时炜,刘家全,等.超高层建筑核心筒外墙附着式智能顶升系统设计[J].建筑施工,2025,47(10):1531-1535,1542.
- [3] 庞资文.超高层住宅核心筒液压爬模施工关键技术与稳定性控制研究[J].中华民居,2025,18(09):142-144.
- [4] 裴保敏.高大空间建筑工程核心筒结构施工技术[J].砖瓦,2025(01):155-157.
- [5] 金振.超高层建筑关键施工技术应用与方案比选[M].北京:机械工业出版社,2020.

新型建筑材料在建筑工程 施工技术中的应用分析

郑露雨, 汪加加, 李 叶

(山东诚信工程建设监理有限公司, 山东 济南 250102)

摘 要 随着建筑行业持续迭代与“双碳”目标的双重驱动下,传统的建筑材料已难以满足人们日益增长的环保、高效及多元化的需求。新型建筑材料凭借环保性、功能性、经济性三大优势,逐渐取代传统建筑材料,成为改善建筑工程施工技术、提高工程建设质量的重要支撑。本文主要研究新型建筑材料在建筑工程施工技术中的应用,根据新型建筑材料的主要特点,探究新型建筑材料在施工技术中所起的作用,主要分析不同种类新型建筑材料在施工各个环节的应用方式,总结应用过程中的要点,以期为建筑工程施工技术的优化升级和新型建筑材料的推广应用提供参考。

关键词 新型建筑材料; 建筑工程; 新型墙体材料; 新型保温隔热材料; 新型防水密封材料

中图分类号: TU5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.017

0 引言

建筑业是国民经济发展的主要支柱产业,施工技术先进与否直接影响工程质量、施工速度和使用价值。建筑材料是施工技术的主要载体,建筑材料的质量直接决定了施工技术的应用效果。随着建筑行业绿色化、智能化、高效化的推进,传统建筑材料在环保性、功能性等各方面的不足越来越明显,新型建筑材料的研发和应用成了建筑工程施工技术革新的一大驱动力。新型建筑材料包含新型墙体材料、保温隔热材料、防水密封材料等众多种类,它所具有的独特性能可以满足各种施工场景下的技术要求,从而解决传统施工技术中存在的难题。

1 新型建筑材料在建筑工程施工技术中的作用

1.1 优化施工技术流程,提升施工便捷性

绿色建筑材料在现代建筑工程施工中越来越重要,依靠环保、节能、高性能等特性,可以有效地提高建筑工程的可持续性和施工质量。新型建筑材料的特性同施工技术的适配性可以缩减传统的施工流程,削减施工环节繁杂的操作,改善施工技术的应用便利性。新型建筑材料相比于传统建筑材料,一般具有轻质化、模块化、易加工等特点,不需要复杂的加工处理工艺,可以直接满足施工技术的要求,降低施工人员的操作难度。新型干挂式外墙保温装饰板采用一体化设计,

集保温、装饰、防水等功能于一体,在施工过程中不需要单独进行保温层铺设、墙面装饰等工序,直接用专用铆固件进行干挂安装,大大简化了外墙施工的技术流程,避免了传统湿作业造成的施工不便,使施工技术应用更加高效、便捷,间接加快施工进度和施工质量。

1.2 强化施工质量管控,延长建筑使用寿命

在施工质量管控技术中,灌浆施工技术是一项核心手段,其对结构稳固性和耐久性具有直接影响。伴随建筑行业智能化发展的深入,灌浆材料与施工装备逐步向数字化、可视化和全过程监测方向演进,通过智能传感、自动配比和数据驱动的施工控制方式,使灌浆施工技术在稳定性、精确性和可追溯性方面得到显著提升,为建筑行业的可持续发展提供了有力支撑。建筑工程施工技术的主要目的就是保证工程质量,新型建筑材料在耐候性、耐久性、粘结性等各方面具有优势,可以给施工技术质量控制提供有力支持,从而延长建筑的使用寿命。新型建筑材料经过专业研发和检测,性能更加稳定,可以抵御外界环境因素的影响,减少施工过程中出现的质量隐患,使施工技术的使用达到最佳效果。新型灌浆料具有无收缩、粘结强度大、耐久性好等特点,在设备安装、结构补强等施工过程中使用,可以使构件连接更加牢固,避免出现松动、渗漏等问题,提高施工技术质量控制的效果;天然无

作者简介: 郑露雨(1997-),男,本科,助理工程师,研究方向: 建筑工程。

水粉刷石膏是内墙抹灰材料，粘结力强，能有效防止灰层空鼓、开裂，提高墙面施工质量，为建筑长期稳定使用打下基础。

1.3 践行绿色施工理念，降低施工环境影响

绿色施工已经成为建筑工程施工技术的主要发展方向，新型建筑材料大多具有环保、低碳、可循环的特点，可以和绿色施工技术深度融合，有效地减少施工过程中对生态环境的影响。传统的建筑材料生产与使用会产生大量的污染物，新型建筑材料大多使用环保原材料，生产过程能耗低、污染小，并且部分材料可以回收再利用，符合绿色施工的环保要求。新型环保材料在施工技术中应用时可以减少施工粉尘、噪声、废弃物的产生，液体壁纸属于新型墙面装饰材料，无毒无味、环保安全，在施工过程中没有有害气体的排放，相比于传统的墙纸和乳胶漆更加符合绿色施工技术的应用标准，既可以改善施工环境的质量，又有利于建筑工程的绿色可持续发展。

1.4 丰富施工技术场景，适配多元建设需求

建筑工程的建设场景越来越多样，各类建筑对于施工技术的要求也不相同，新型建筑材料的多样性特点可以丰富施工技术的应用场景，满足各种建筑的建设需求。新型建筑材料包含保温、防水、装饰、结构加固等各个种类，各种材料都具有自身特有的性能优势，可以适应不同的施工技术应用要求，扩大施工技术的应用范围^[1]。金属雕花板集保温、装饰、隔音、抗震等功能于一身，可以应用到各种建筑的外墙施工中，满足不同的建筑风格装饰要求；仿古琉璃轻质屋面瓦具有耐候性好、防水性好的特点，可以用于坡屋面施工，适应不同的坡度、不同的使用场合的屋面建设需求，使施工技术更符合多样的建筑建设要求，提高建筑工程的个性化和实用性。

2 新型建筑材料在建筑工程施工技术中的应用

2.1 新型墙体材料在建筑工程施工技术中的应用

随着全球对环境可持续性越来越重视，绿色建筑作为建筑业发展的主要力量也受到了越来越多的关注。新型墙体材料是建筑工程施工中的一种主要材料，新型墙体材料的应用可以改善墙体施工技术，提高墙体的保温、隔音、防火性能，减小建筑自重，符合现代建筑施工技术的要求。新型墙体材料包括轻质隔墙板、复合墙体材料等，施工技术应用时应根据材料特性及施工要求规范施工程序。轻质隔墙板具有轻质、高强、隔音的特点，在施工过程中不需要传统的砌筑工艺，直接采用拼接、固定的方式进行安装，适

应装配式施工技术，大大提高墙体施工效率，同时减少墙体自重，降低建筑结构的承载压力。复合墙体材料利用不同材料分层复合的方式达到保温和承重的效果，在施工过程中要重视材料拼接缝隙的处理，用专用密封材料填充，保证墙体的密封性和保温性，使墙体施工技术更好地满足建筑使用需求，提高建筑居住舒适度。

2.2 新型保温隔热材料在建筑工程施工技术中的应用

由于环境问题越来越严重，建筑行业绿色低碳转型成了推动可持续发展的重要方面。保温隔热性能属于建筑工程的关键指标，新型保温隔热材料的使用可以改善保温施工技术，提高建筑的节能效果，符合建筑行业节能转型的发展趋向。新型保温隔热材料有气凝胶玻璃、硬质聚氨酯泡沫、干挂式外墙保温装饰挂板等，不同的材料施工技术应用方式不同，但是其主要目的都是提高建筑的保温隔热性能^[2]。气凝胶玻璃具有超级绝热、透光性好等特点，可用于建筑门窗、幕墙施工，施工时要注意玻璃的安装密封，防止出现缝隙造成保温效果降低；干挂式外墙保温装饰挂板采用干挂施工技术，不需要湿作业，施工过程中用铆固件将板材与墙体连接，既实现了保温功能，又完成了墙面装饰，简化了施工流程，提高了建筑的节能效果和装饰质感，使保温施工技术和装饰施工技术有机地结合起来，提高了施工效率和工程质量。硬质聚氨酯泡沫由于具有良好的保温性能和闭孔结构，在屋面、墙体保温施工中得到了广泛的应用，施工时需要采用喷涂或者浇注的方式，保证泡沫均匀覆盖，形成连续的保温层，有效地阻止了热量的传递，提高了建筑的保温性能；硬质聚氨酯泡沫施工过程简单，施工周期短，施工成本低。除此之外还有真空绝热板等新型保温隔热材料，其导热系数很低，在很薄的厚度下就能达到很好的保温效果，适合于对空间有较高要求的建筑部位，施工时要注意板材的拼接和固定，保证保温层的整体性、密封性，充分发挥出其最好的保温隔热性能。

2.3 新型防水密封材料在建筑工程施工技术中的应用

绿色建筑在选材上更加重视减少对人类健康的影响，并且具有可回收再利用的特点，可以弥补传统材料的不足。防水密封是建筑工程施工技术的关键部分，它同建筑的使用感受和寿命紧密相关，新型防水密封材料的运用可以改善防水施工技术，加强建筑的防水密封效果，解决传统防水施工的渗漏问题^[3]。

新型防水密封材料有新型灌浆料、高分子防水卷材、液体防水涂料等,在施工技术应用上要根据施工场景的不同来选择合适的材料和施工方式。新型灌浆料在建筑结构补强、防水堵漏施工中应用较多,施工时要按规范流程进行搅拌、灌注、养护,保证灌浆料能充分填充缝隙,达到堵漏和补强的效果;高分子防水卷材具有柔韧性好、耐老化的特点,可用于屋面、地下室等防水施工,施工技术重点是卷材的铺设和搭接处理,采用热粘或冷粘的方式保证卷材连接紧密,防止漏水;液体防水涂料适用于不规则施工环境,施工时通过涂刷形成防水涂层,提高防水施工的灵活性和密封性,使防水施工技术更好地适应不同的施工场景^[4]。

2.4 新型装饰装修材料在建筑工程施工技术中的应用

装饰装修施工技术是改善建筑外观美感和使用感受的有效途径,新型装饰装修材料的使用能拓宽装饰施工技术表现样式,加强装饰效果的同时又考虑环保与实用。新型装饰装修材料有液体壁纸、金属雕花板、仿古琉璃轻质屋面瓦等,每一种材料的装饰风格和施工技术都存在差异。液体壁纸是墙面装饰材料,施工时用涂刷的方式呈现多种图案和颜色,不需要拼接,不会出现传统墙纸接缝开裂的问题,施工技术操作简单,防水、耐擦洗,提高墙面装饰的耐久性;金属雕花板具有丰富的纹理和色彩,可以直接用于外墙装饰施工,采用干挂施工技术,不需要复杂的装饰工序,既能提高建筑的装饰质感,又能实现保温、隔音功能,使装饰施工技术与保温施工技术有机结合;仿古琉璃轻质屋面瓦适用于坡屋面装饰施工,施工时通过铺装的方式完成,既有良好的防水、隔热性能,又有复古的装饰效果,满足不同建筑风格的装饰需求,丰富了装饰施工技术的应用场景^[5]。室内地面装饰用新型装饰装修材料也具有很好的性能。软石地板是一种新型地面装饰材料,它用天然大理石粉和多种高分子材料作为基材,经过特殊的工艺加工而成的,质地柔软、脚感舒适,耐磨、防滑、防火、防水等许多优点。施工时采用拼接式安装法,不用大量胶水,减少有害物质的挥发,更加环保健康。

2.5 新型结构加固材料在建筑工程施工技术中的应用

建筑结构稳定是工程质量的保证,新型结构加固材料的使用可以改善结构加固施工技术,提高建筑结构的承载能力和抗震性能,适合于建筑结构补强、老旧建筑改造等施工。新型结构加固材料有碳纤维复合

材料、新型灌浆料、高强度螺栓等,在施工技术应用时要根据建筑结构的实际状况来制订合理的加固方案。碳纤维复合材料具有轻质、高强、耐腐蚀的特点,在施工过程中用粘贴的方式固定在建筑结构表面,提高结构的承载能力,施工技术操作简单,不需要大型施工设备,适合不同结构的加固需求;新型灌浆料在结构补强施工中,可以用于地脚螺栓锚固、梁柱加固等环节,通过灌注的方式填充结构缝隙,提高结构的整体性和稳定性;高强度螺栓用于钢结构连接施工,可以提高钢结构的连接强度,改善钢结构施工技术,保证建筑结构的安全使用。新型结构加固材料的应用,施工人员要严格按照有关的技术规范和操作程序执行。碳纤维复合材料加固施工前要对建筑结构表面进行细致清理,去除油污、浮尘等杂质,保证表面平整干燥,提高碳纤维复合材料与结构表面的粘结力。粘贴时要均匀涂刷专用粘结剂,控制好粘贴厚度和平整度,防止出现空鼓、褶皱等现象,使碳纤维复合材料能发挥出最好的加固效果。新型灌浆料的应用要根据不同的施工部位、加固要求,准确控制灌浆料的配合比,保证其流动性、强度等性能指标满足设计要求。灌注时要选用合适的灌注设备和方法,保证灌浆料能填满结构缝隙,防止灌注不密实。

3 结束语

新型建筑材料的研发和应用,是建筑工程施工技术更新换代、促进建筑行业高质量发展的重要保障。本文主要对新型建筑材料在建筑工程施工技术中的应用进行分析,指出新型建筑材料可以改善施工流程、加强质量控制、落实绿色理念、满足多方面需求,并从墙体施工、保温施工、防水施工、装饰施工、结构加固施工等角度出发,探究不同类型的新型建筑材料的使用方式,突出新型建筑材料和施工技术深度融合的价值。

参考文献:

- [1] 高成龙.绿色建筑材料在建筑工程施工技术中的应用研究[J].居舍,2025(30):31-33,37.
- [2] 刘晓芳.新型绿色建筑材料在建筑工程施工中的应用研究[J].建设科技,2025(16):25-27.
- [3] 刘辰浩.绿色建筑材料在建筑工程施工技术中的应用[J].四川建材,2025,51(06):11-14.
- [4] 李秀倩.绿色建筑材料在建筑工程施工技术中的应用[J].居业,2025(03):211-213.
- [5] 崔明琳.绿色建筑材料在建筑工程施工技术中的应用[J].绿色中国,2025(06):115-117.

房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术要点研究

李 蕊

(甘肃盛世龙腾电子科技有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要 本文聚焦房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术要点展开研究,系统阐述其应用价值与施工关键环节。钻孔灌注桩技术可将建筑荷载有效传递至深层持力层,既能提升结构稳定性,又能严格控制沉降量;同时,凭借深基础结构与桩体优良延性,可显著增强建筑抗震性能,避免地基液化失稳风险。此外,现代施工工艺的应用,使该技术在施工效率、质量管控、成本控制及环境保护等方面的综合效益得到显著提升。本文从前期施工准备、护筒埋设定位、钢筋笼制作吊装等核心环节入手,明确各环节的技术标准与质量控制要求,指出钻孔灌注桩是保障建筑安全、适配复杂地质条件的关键技术,以期对提升工程整体质量与长期使用性能有所裨益。

关键词 房屋建筑工程; 钻孔灌注桩; 桩基; 钢筋笼

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.018

0 引言

钻孔灌注桩是房屋建筑工程中非常重要的深基础形式,其施工质量直接关系到上部建筑结构的稳定与安全。该基础形式可将建筑上部荷载传递至深层坚实土层,能够有效控制建筑沉降,提升结构整体抗震性能,尤其适用于地质条件复杂的项目以及高层建筑的沉降控制要求。但是钻孔灌注桩桩基施工属于隐蔽工程,工艺环节多、技术难度大,任何一个工序的疏忽都会造成断桩、缩径、承载力不足等质量缺陷。因此,需分析房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术要点,确保钻孔灌注桩的承载力与稳定性满足设计要求,为建筑结构的安全耐久筑牢基础。

1 房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术的应用目的

1.1 增强房屋建筑结构稳定性

房屋建筑结构稳定性基础是桩基把上部荷载有效传到深层稳定岩土层。钻孔灌注桩利用机械成孔,穿过表层软弱土层、填土层或者易液化土层,把桩端牢固地嵌入设计所要求的中风化岩、微风化岩或者其他高承载力持力层中。深基础型式依靠桩身混凝土和土体之间巨大的侧摩阻力,以及桩端岩土层的端承力,共同组成复合承载体系^[1]。从理论上讲,单桩竖向抗压承载力设计值可以根据地质勘察报告所给的参数来计算,一般可达几千千牛到数万千牛,具体的数值与桩径、桩长、桩身

强度、持力层性质有关。直径800 mm、桩长30 m、持力层为中风化花岗岩的钻孔灌注桩,单桩竖向抗压承载力特征值在理想条件下能达到6 000 kN。合理的布桩设计可以使桩基减小建筑物的绝对沉降量和不均匀沉降差。钻孔灌注桩基础能将建筑物的沉降量控制在很小的范围内,对于高层建筑来说,其整体沉降量一般控制在50 mm以内,差异沉降也满足千分之二规范要求,从根本上杜绝了由于地基不均匀沉降而导致的墙体开裂、结构倾斜等病害,保证了建筑结构整体的稳定与安全。

1.2 提升房屋建筑抗震性能

地震荷载下建筑物抗震性能的好坏,很大程度上取决于基础的抗震能力。钻孔灌注桩桩基对于提高房屋建筑的抗震性能起着重要的作用。首先,其深基础特性可以把上部结构的地震反应有效地传递、分散到深部稳定的岩土层中,减少了地震能量向上部结构的输入。其次,桩本身具有良好的延性和耗能能力。通过设置通长或者部分加强的钢筋笼,桩身在承受地震引起的水平剪力、弯矩、拉力时,不会发生脆性破坏,而是通过混凝土的有限开裂、钢筋的屈服进入塑性阶段,消耗地震能量。尤其对于可能发生砂土液化或者软土震陷的地质地段,钻孔灌注桩穿过液化土层,桩端置于稳定非液化土层之中,能防止因地基土液化失效引发建筑物整体失稳或者产生过大沉降,这是抗震设防的重要手段之一^[2]。群桩基础与承台共同工作,

作者简介: 李蕊(1981-),女,本科,工程师,研究方向: 建筑工程。

构成空间框架体系,从而提高了基础整体性以及抗扭能力,可以抵御地震作用下的复杂应力状态。

1.3 普遍提高施工效益水平

在房屋建筑工程中推广先进的钻孔灌注桩桩基施工技术,其根本目的之一是普遍提高项目的综合施工效益水平。施工效益是包含效率、成本、质量、资源

利用等多个方面的一个综合概念,提高施工效益不能只靠某一个环节的优化,而需要依靠技术革新来对施工全过程进行系统性的改进。钻孔灌注桩技术的现代化应用,就是用科学的工艺方法、精密的控制设备、数字化的管理手段来实现从单纯的工序完成向效益最大化的根本转变(见表1)。

表1 钻孔灌注桩施工效益关键指标数据对比表

效益维度	关键绩效指标	传统工艺典型值	现代技术典型值	提升幅度
施工效率	平均成孔速度—粘土层	3 ~ 5 m/h	8 ~ 15 m/h	100% ~ 150%
	平均成孔速度—砂层	2 ~ 4 m/h	6 ~ 10 m/h	100% ~ 150%
	工序准备时间占比	25% ~ 30%	15% ~ 20%	降低约 10%
质量控制	桩身完整性一次合格率	92% ~ 96%	≥ 98%	提升 2% ~ 6%
	桩底沉渣厚度控制	100 ~ 300 mm	≤ 50 mm	降低超过 50%
成本节约	泥浆材料循环利用率	< 30%	≥ 70%	提升超过 40%
	钢筋笼加工损耗率	4% ~ 6%	1.5% ~ 2.5%	降低约 50%
资源与环境	施工噪声(距源 30 m)	85 ~ 95 dB	70 ~ 80 dB	降低 10 ~ 15 dB
	每方桩体废弃泥浆量	1.2 ~ 1.5 m ³	0.3 ~ 0.5 m ³	减少 60% ~ 75%

2 房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术的应用要点

2.1 前期施工准备技术

根据详细的地质认识,需要做精确的施工图深化和施工组织设计。场地平整、硬化处理要符合重型设备荷载的要求,旋挖钻机、汽车吊等设备作业区域的地基承载力不宜小于 150 kPa。施工平面布置要科学规划泥浆循环系统,包括制浆池、循环池、沉淀池和废浆处理设施,总容积应大于最大桩孔体积的 1.5 倍以上。测量控制网的建立以及桩位放样必须使用高精度全站仪或者 GPS-RTK 技术,桩位中心点的测设误差要严格控制 在 10 mm 以内,设置坚固的标桩或者龙门板进行标识和保护,建立严格的复核制度。钻机选型属于前期准备阶段的技术关键,要依据地层特性做出有针对性地选择。对于黏土、粉质粘土等黏聚力较强的地层,旋挖钻机由于成孔速度快、孔壁扰动小、泥浆用量少等特点而被选为 首选。对深厚砂层、卵砾石层或者中风化以上的岩层,则采用冲击钻机或者回旋钻机,用牙轮钻头或者滚刀钻头进行破碎钻进。存在地下障碍物或者极软弱地层时,全套管钻机可能是唯一可行的。另外,混凝土供应方案、电力保障系统、应急预案等也应在施工前做好详细的规划并加以落实。

2.2 护筒埋设定位技术

护筒埋设是钻孔作业的第一道工序,质量好坏直接影响成孔垂直度、孔口稳定和后续工序精度。护筒

的主要作用就是定位导向、保持孔口稳定、防止地表水流入、保护测量基准。护筒一般用壁厚不小于 8 mm 的钢板卷制而成,内径应大于设计桩径 100 mm 以上,若采用旋挖钻机,则应大于桩径 200 mm 以上,为钻头活动留有足够的空间。护筒埋设深度要穿透松散的杂填土层,进入稳定的原状土层深度不小于 1.5 m。对于砂性土等易坍塌地层或者地下水位较高的地区,护筒埋深应增大,必要时可埋至地下水位以下 0.5 m,或者采用长护筒或全套管跟进工艺。护筒顶面应高出施工地面 300 mm 以上,若在水域或者受潮汐影响的地方,则要高出最高水位 1 ~ 2 m^[3]。埋设时,先在放样的桩位处开挖比护筒直径稍大的圆坑,再垂直放入护筒。护筒中心和桩位中心偏差要严格控制,规范要求不大于 20 mm。护筒垂直度偏差不大于 1%。护筒就位后,其外侧与坑壁之间应分层对称回填含水量适中的黏土,并逐层夯实,使填塞密实,形成有效的隔水、稳定圈。埋设完毕后,要对护筒中心位置和顶面标高进行最后复核,并作为控制孔深和钢筋笼标高的基准。

2.3 钢筋笼制作吊装技术

钢筋笼是钻孔灌注桩的受力骨架,其制作和吊装精度直接影响桩身结构强度可靠度。钢筋笼必须在硬化后的标准化加工平台上制作,保证尺寸精度。主筋连接应优先采用机械连接,直螺纹套筒连接接头强度不应低于钢筋母材,同一截面内接头数量不应超过主筋总数的 50%。箍筋、加强箍筋应与主筋焊接或绑扎牢

固,螺旋箍筋的间距,特别是桩顶以下5倍桩径范围内的加密区,必须符合抗震设计要求。钢筋笼保护层厚度的控制,是保证桩身耐久性的关键。保护层垫块应呈梅花形对称布置,沿钢筋笼竖向每隔2~4m设一道,每道圆周方向不少于4块。垫块可以采用混凝土预制块或者专用塑料卡环,强度不得低于桩身混凝土设计强度,在吊装、混凝土浇筑过程中不发生碎裂^[4]。钢筋笼制作完毕后应进行严格的验收,验收项目有钢筋规格、数量、间距、长度、焊接质量、保护层厚度等。钢筋笼吊装属于高风险作业,必须编制专项吊装方案。吊装时应采用双吊点或者多吊点,用专用吊具来防止钢筋笼产生不可恢复的变形。起吊时先水平提起来,然后慢慢变成垂直。入孔时应平稳、垂直,不得摆动、碰撞孔壁。分段制作的钢筋笼,孔口连接要迅速、牢固,连接工艺要符合设计要求,连接时间应尽可能短,以防孔壁失稳或沉淀过厚。钢筋笼下放到设计标高后,应立即用吊筋或型钢将钢筋笼顶部固定在孔口护筒或专用定位架上,防止浇筑混凝土时由于混凝土顶托力造成钢筋笼上浮或下沉。

2.4 桩底后注浆技术

无论是采用何种清孔工艺,在钻孔灌注桩施工过程中,孔底始终存在一定的沉渣,同时孔壁也形成了一个所谓的“泥皮”软弱层,这两个因素都会极大地减弱桩端的端承能力和桩侧的摩擦能力。桩底后注浆技术就是为了解决这一问题,在钢筋笼上预埋注浆导管,在成桩后高压向桩底注浆。该过程起着三种作用,即浆液对桩底沉渣进行渗透、填充和加固,将沉降隐患消除;浆液在压力作用下,沿桩壁向上渗入“泥皮”和桩周土体,填充加固后大大提高了桩侧摩阻力;对于桩端卵砾石、粉砂等土体,浆液可起到渗透、挤密、固结的作用,相当于扩大了桩端截面,产生了扩底的效果。该技术核心就是“对症下药”,根据地质情况选择采取不同的技术措施,效果最明显的是卵砾石层,单桩竖向极限承载力可提高30%以上,粉砂层可提高约20%,而粘土层主要是通过改善沉渣、泥皮来控制群桩沉降。因此,在高层建筑中使用该技术,不仅可以大大提高单个桩的承载力,而且可以节省桩长或者桩径来降低成本,更重要的是可以保证群桩基础沉降均匀、总量小,从根本上保证了上部结构的安全性。

2.5 桩基质量检测技术

只有经过后注浆等施工质量保证措施,才能运用先进的检测技术对施工结果进行检验、评价。桩基质量检测主要是对承载力和完整性进行检测。对于承载力的检测,静载试验法是公认的最直观、最可靠的方法,能直接测定单桩的极限承载力,但是试验周期长、成本

高,一般按总桩数的1%且不少于3根的标准来抽检^[5]。对桩身完整性检测来说,要按照桩径、桩长等条件采取多种方法加以配合,实现互相补充的目的。低应变法因为操作简便、成本低,被普遍用作普检,抽检的数量一般不少于总桩数的30%。但是它的受激振能量有限,不能对超长桩下部缺陷进行识别。对于大直径或者超长桩,声波透射法通过在预埋的声测管之间发射、接收声波来检测桩身混凝土的均匀性和缺陷,但是需要预埋管道,存在一定的检测盲区。钻芯法最直观,可以直接观测到桩身混凝土胶结状态、测定桩长、沉渣厚度以及鉴别桩端岩土性状,但是属于微破损检测,并且会存在代表性不足的问题。近些年来,检测技术朝着更加精准、更少损伤的方向前进,比如孔内成像法可以当作钻芯法的校验方式,直接显示孔壁情况,分布式光纤声波传感(DAS)依靠预先埋设的光纤来感知应力波,可以完成对桩身全长度的精细且持续监测,较好地解决了传统方法针对长桩下部缺陷检测不准确的问题。将传统的检测技术和现代的检测技术相结合,从各个方面对桩基进行全面的体检,保证每根桩的承载力和完整性满足设计要求,给整个工程的稳固打下了良好的基础。

3 结束语

钻孔灌注桩桩基施工技术是现代房屋建筑工程中解决复杂地基承载问题、确保结构安全稳定的关键技术体系,其应用成功与否,直接关系到建筑物的长期使用性能与抗震安全。结果表明,钻孔灌注桩桩基施工技术的应用核心目的在于通过构建深部可靠的传力路径,从根本上增强建筑结构的稳定性,利用桩基本身的延性设计与深入稳定土层的特性,有效提升建筑的抗震性能,并在适应复杂地质、减少环境干扰、优化综合效益方面展现出显著优势。

参考文献:

- [1] 罗佑.房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(28):119-121.
- [2] 刘铃.房屋建筑工程中钻孔灌注桩实施要点分析[A].2025中国国土经济学会学术年会暨太行论坛城市规划与工程技术管理分论坛论文集(一)[C].中国国土经济学会,河北地质大学,2025.
- [3] 东甜,董良.房屋建筑工程桩基础施工中钻孔灌注工艺[J].中国建筑金属结构,2025,24(09):16-18.
- [4] 林浩.房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术应用[J].中国住宅设施,2025(12):201-203.
- [5] 罗佑.房屋建筑工程中钻孔灌注桩桩基施工技术的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025(28):119-121.

房屋建筑主体结构钢筋混凝土 施工技术及质量控制

陈荣娜

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200030)

摘 要 钢筋混凝土结构凭借强度优异、可塑性强、耐久性好等优势, 成为当前房屋建筑主体结构的主流形式, 其施工质量直接决定建筑整体安全性、耐久性与使用性能。本文立足于房屋建筑施工现场实际, 系统分析钢筋混凝土结构施工综合性强、环境敏感、隐蔽工程多的核心特点, 详细阐述模板支拆、钢筋加工绑扎、混凝土浇筑与养护三大关键施工技术及实操要点, 并从源头材料管控、工序过程验收、全流程智能监测等方面提出针对性质量控制措施, 旨在规范现场施工行为、消除质量隐患, 为提升房建主体结构工程质量提供参考。

关键词 房屋建筑; 主体结构; 钢筋混凝土; 模板施工; 钢筋施工

中图分类号: TU757

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.019

0 引言

随着城镇化进程持续推进, 我国建筑行业迎来高速发展时期, 房屋建筑呈现出高层化、大跨度发展趋势, 使用功能愈发完善。主体结构作为房屋建筑“骨架”, 相比早期房建工程, 现代房建工程对主体结构承载力、抗震性能以及使用寿命提出新的要求。在此背景下, 施工单位应根据钢筋混凝土结构施工特点, 完善钢筋混凝土施工体系, 加强现场施工质量管控力度, 保证建筑结构安全。

1 房屋建筑钢筋混凝土结构施工特点

1.1 综合性强

建筑钢筋混凝土结构施工具有极强的综合属性, 涉及多个专业领域, 包含大量工序环节。从现场施工角度来看, 主体结构施工过程拆解为模板搭设、钢筋下料加工、钢筋绑扎、混凝土浇筑振捣、养护、模板拆除等多道核心工序, 某一工序环节出现操作失误或前后工序脱节, 都可能引发质量问题。例如: 在模板搭设完毕后, 必须在限定时间内完成钢筋绑扎作业并浇筑混凝土, 如果间隔时间超标, 极易出现脱模剂脏污、局部脱落问题, 最终引发拆模困难和结构表面蜂窝缺陷问题^[1]。

1.2 受环境影响

房屋建筑钢混结构施工期间, 大部分工序作业都需要在露天环境开展, 在温度、空气湿度和恶劣天气

影响下, 施工质量会受到影响, 必须围绕现场环境条件来调整施工技术方案, 并在恶劣天气来临时暂停作业。以温度影响为例, 高温和低温环境都会对主体结构成型质量和施工过程造成影响。在高温环境下, 混凝土水分蒸发速度超出设计预期, 内部水分上升速率低于表面水分蒸腾速率, 缺乏外部补水措施的情况下, 混凝土结构出现干缩现象, 因体积收缩而形成密集裂缝。在低温环境下, 混凝土所含水分结冰, 体积膨胀导致结构变形开裂, 还会提前中断水化反应, 致使混凝土结构缺乏足够强度和承载能力。

1.3 隐蔽工程多

房屋建筑钢混结构施工体系包含大量隐蔽工程, 包括钢筋绑扎连接、预应力孔道布设、预埋件安装等工序环节, 施工成果被后续工序环节覆盖。一旦出现质量问题, 必须破坏局部主体结构, 使得缺陷部位完全暴露在外, 才能进行返工整改, 无论是整改难度还是整改成本, 都明显高于普通部位。因此, 必须加强质量管控力度, 推行三检制度, 各道工序完工后, 依次组织开展自检、互检和专检作业, 最大限度地消除质量隐患。

2 房屋建筑主体结构钢筋混凝土施工关键技术

2.1 模板施工

模板即为混凝土浇筑模具, 其具备较高的刚度与足够承载能力, 模板形状尺寸对标成品构件尺寸, 利

作者简介: 陈荣娜(1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

用模板承受混凝土浇筑侧压力、冲击力和其他施工荷载，并在水化反应基本结束后拆除模板。模板施工技术落地应用期间，重点掌握模板选型、模板支设、模板拆除三方面的技术要点，确保混凝土结构外观质量和尺寸精度直接达到设计标准，具体如下。

第一，模板选型。模板类型众多，包括钢模板、胶合板模板、铝合金模板和传统木模板，适用于不同施工场景。例如，钢模板由钢材加工制成，具备极高强度和承载能力，基本不会出现模板变形损坏问题，但模板自身重量较大，对支架承载性能提出严格要求，还需要定期清理表面锈迹，主要用于楼板、墙体、梁等大跨度、大面积构件。胶合板模板使用胶粘剂把多层薄模板黏合制成，具备强度高、重复使用、重量轻的突出优点，但模板耐水性较差，潮湿环境下极易出现脱胶变形问题，如果施工现场空气湿度过高，需要更换模板类型，或是单独采取防水措施^[2]。

第二，模板支设。按照设计图纸在施工现场标记模板位置，依次弹设模板安装定位线和标高控制线，复核放线成果，要求放线误差小于 ± 5 mm，同步清理模板基础垃圾杂物。准备工作完成后，按照放线成果把模板型材安装就位，多片型材相互拼接形成整体结构，打入多组螺栓进行固定，全面调整轴线位置、标高、拼接缝隙和垂直度，以轴线误差和标高误差小于5 mm、拼缝宽度小于2 mm、倾斜度小于1%作为合格标准。继续清理模板内部积水杂质和打磨毛刺，壁面上均匀涂刷脱模剂，不得存在漏涂问题，拼缝嵌入海绵胶条，衔接开展混凝土浇筑作业，工序间隔时间越长，脱模剂稳定性越差。同时还应主动适配梁、板、柱、墙等不同种类构件的构造形式，专项制定模板安装方案，以柱模板为例，模板拼接成型后检查尺寸精度和截面形状是否符合涉及要求，把模板固定在柱筋上，设置多道钢管抱箍加固模板，抱箍间距限制在0.5 m内，并在模板底部设置定位销，预防模板移位。

第三，模板拆除。以“先支后拆”作为拆模原则，拆模顺序和安装顺序完全相反，施工人员依次拆除梁侧模板和柱侧模板在内的非承重模板，继续拆除楼板模板等承重模板，最终拆除配套支撑体系，清理模板表面混凝土残渣，修复模板破损部位，不得篡改拆模顺序。同时，合理安排拆模时间，到达预定养护时间后，利用同批试块检测混凝土强度，实际强度超过50%设计值后拆除板模板，实际强度超过75%设计值后拆除梁、拱、壳模板，实际强度完全达到设计值后才能拆除大跨度结构和预应力结构模板^[3]。

2.2 钢筋施工

钢筋作为钢筋混凝土结构体系的受力核心，多根主筋、箍筋相互绑扎形成骨架结构，将钢筋骨架置于模板内部，前期放置钢筋和后续浇筑混凝土构成完整结构，配筋率成为评判建筑结构体系承载能力、抗震性能以及耐久性的重要标准。钢筋施工环节，重点掌握下料加工、绑扎连接两道步骤的技术要点，所有步骤必须严格按照施工规范进行操作，具体如下。

第一，下料加工。核对确认钢筋规格、数量、尺寸是否正确，清除钢筋表面残留锈迹和油污，操控调直机对弯曲钢筋加以调直处理，退回规格有误、表面存在明显划痕损伤的不合格钢筋。按照设计图纸来明确下料加工要求，即为钢筋长度与弯钩角度，利用钢筋切断机把全部钢筋切割成指定长度，要求长度误差小于 ± 10 mm。继续对钢筋进行弯折处理，按照钢筋类型来确定弯折角度和弯钩长度，以箍筋为例，把弯折角度控制在 135° ，弯钩长度超过10倍钢筋直径。如果钢筋直径超过25 mm，必须提前预热到一定温度后才能展开弯折操作，预防裂纹、折断问题发生^[4]。

第二，绑扎连接。清理绑扎面杂质和残留浮浆，按照设计图纸把各类钢筋整齐摆放就位，测量调整钢筋位置和间距，使用20~22号镀锌铁丝作为扎丝，根据构件类型来选择绑扎方法。以梁体钢筋为例，按顺序依次绑扎梁底钢筋、梁侧钢筋和梁顶钢筋，搭接部位相互错开，相同截面钢筋搭接数量必须限制在1/2钢筋总数以内，把扎丝间距控制在0.2 m以内，分散设置混凝土垫块作为钢筋保护层，最终以保护层厚度达到30~50 mm、钢筋间距和排距误差小于 ± 10 mm作为合格标准。

2.3 混凝土施工

在混凝土施工环节，以消除施工冷缝、提高结构密实度和预防裂缝形成为施工目标，全面改进工艺做法，重点采取分层浇筑、二次振捣、双覆盖养护三项改进措施，技术要点如下。

第一，分层浇筑。分批次逐层浇筑混凝土，从下到上水平分层或是斜向分层浇筑，单层浇筑厚度控制在0.3~0.5 m，各层浇筑完毕后，立即开展振捣作业，持续振捣至无气泡冒出，立即浇筑下层混凝土，重复上述操作过程。必须把上下层混凝土间隔浇筑时间限制在2 h内，酌情增加振捣力度，同步振捣上下层结构，无论是间隔时间超标，还是振捣深度不足，都有可能形成施工冷缝。

第二，二次振捣。混凝土振捣次数从1次增加至2次，浇筑完毕后立即开展首次振捣作业，并在浇筑结

束 2 h 左右再次开展振捣作业,两次振捣方式保持一致,通过复振操作进一步提高混凝土密实度、改善钢筋—混凝土握裹状态,还能排出表面泌水和消除细微裂缝。

第三,双覆盖养护。混凝土现浇结束 12 h 内衔接开展养护作业,同时在混凝土表面覆盖塑料薄膜和保温毯,既能防止水分过快蒸发而形成干缩裂缝,同时,也能减小内外温差和控制温度应力,预防温度裂缝形成。在正常工况下,保温保湿连续养护时间不少于 7~14 d,面向冬季、强风等特殊施工场景,进一步延长养护时间。

3 房屋建筑主体结构钢筋混凝土施工质量控制措施

3.1 源头管控

为源头消除质量隐患,在开工前必须审核施工方案可行性,全面检验各批次施工材料质量,彻底消除技术、材料因素对施工质量造成的影响。对于施工技术方案,组织开展工艺试验或依托 BIM 软件开展仿真试验,判断施工成果是否符合设计要求,分析各类施工问题的形成原因,同步调整施工方案,如形成温度裂缝后,对混凝土入模温度、养护时间、养护方式进行调整,确保养护阶段的内表温差始终低于 25 ℃。对于施工材料,入场环节细致检查所有品种材料,专项制定检测方案和确定性能指标要求,以钢筋为例,检验项目包括规格型号、力学性能和表面质量,每批钢筋随机抽取 3 根以上钢筋进行检测,要求检测结果和设计要求完全一致。

3.2 工序验收

钢筋混凝土结构隐蔽工程多,必须加强工序验收力度,各工序完工后,立即组织开展隐蔽验收作业,施工班组和监理工程师依次对施工成果进行自检、互检和交接检查,识别质量隐患,指导施工班组返工整改,确认施工质量完全符合设计要求后,才能办理验收手续,进入下道工序。例如:在钢筋绑扎完毕后,全面核查钢筋规格、数量、间距排距误差、保护层厚度以及搭接长度,重点核查拼接节点和梁柱交接部位等特殊位置,验收通过后再行浇筑混凝土。

3.3 全流程智能监测

钢筋混凝土结构工序流程复杂、交叉作业多,施工单位需要在施工现场搭建智能监测体系,替代人工监测和旁站监理方法,部署多台高精度传感器,把设计要求转变成各项工艺参数的预警值,确认施工情况偏离设计预期后,立即发送报警信号,提醒管理人员和班组成员迅速解决问题。施工现场可搭建物联网+BIM 一体化智能监测平台,在高支模、大体积混凝土、梁柱节点等关键部位布置温度、应力、位移及振捣传

感器,实时采集混凝土内外温差、养护温湿度、钢筋间距、模板沉降等核心数据,结合大数据算法预判结构裂缝、变形、漏振等质量风险,自动生成预警信息并推送至移动端作业终端,实现施工过程数字化监控、可视化管控、提前化预控,有效弥补人工巡检盲区,大幅提升质量管控精度与隐患处置效率^[5]。

3.4 安全文明施工保障

由于工程现场高空作业多,交叉作业频繁,机械设备集中,安全文明施工是保证工程质量的重要前提。加强对高支模、临边洞口、起重吊装等重要部位的保护,严格执行作业许可和现场监护制度^[6]。同时,规范工地物料堆放、机械布局及污水、废物处置,使施工现场清洁、整齐,降低周围环境扰动对工程质量的影响。将安全控制和文明施工相结合,为钢筋混凝土的规范化操作创造稳定的环境,从而避免由于安全隐患、现场无序等因素引起的质量问题,达到结构质量和施工安全的协同控制。

4 结束语

房屋建筑主体结构钢筋混凝土施工是一项工序繁杂、技术要求严格的系统工程,模板、钢筋、混凝土各环节施工质量相互关联、共同决定结构成型效果。施工单位需充分把握其施工特点,严格执行标准化施工工艺,强化材料、工序、环境全维度质量管控,积极应用智能监测等现代化管理手段,有效防控裂缝、尺寸偏差、密实度不足等常见质量通病。唯有以精细化施工与全过程质控为抓手,才能保障主体结构安全可靠、性能达标,推动房屋建筑工程向高品质、可持续方向稳步发展。

参考文献:

- [1] 蒋海峰,赵刚,胡旭州.房屋建筑施工中钢筋混凝土结构施工技术的实践探析[J].中国建筑装饰装修,2026(01):144-146.
- [2] 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.
- [3] 邱宜灯.探讨建筑工程中钢筋混凝土结构施工质量控制策略[J].建筑与预算,2023(10):55-57.
- [4] 南建平.土木工程建筑中钢筋混凝土结构施工技术和质量控制探讨[J].产品可靠性报告,2025(07):199-200.
- [5] 张书鸣.住宅建筑施工中钢筋混凝土结构施工技术的应用[J].居舍,2025(19):77-80.
- [6] 郭祥民.建筑工程现浇钢筋混凝土主体结构施工分析[J].散装水泥,2022(03):130-132.

悬挑脚手架施工技术在高层建筑工程施工中的应用研究

张灵德

(甘肃然书商贸有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要 在高层建筑工程施工领域, 地面空间受限、施工高度大等问题对脚手架体系提出了更高要求。悬挑脚手架基于荷载传递高效、空间利用率高、搭设灵活的优势, 成为高层建筑主体施工与装饰装修阶段的核心辅助设施。本文结合高层建筑施工特点, 分析悬挑脚手架的结构组成, 探讨其在高层建筑工程中的施工技术要点、质量控制措施及现场应用方案, 通过工程实例验证技术应用效果, 并提出针对性的安全管控策略, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 高层建筑; 悬挑脚手架; 悬挑支撑结构安装; 架体主体搭设; 安全管理

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.020

0 引言

悬挑式外脚手架作为一种在建筑施工中广泛应用的临时支撑体系, 以独特的构造形式和显著的实用性, 在高层建筑、复杂结构施工及难以设置地面支撑的情况下展现出独特优势。悬挑脚手架通过将架体荷载传递至建筑主体结构, 有效突破了地面支撑的限制, 搭设高度可根据工程需求分段设置, 且无需占用底层施工空间, 在 30 m 以上高层建筑工程中得到了广泛应用。通过深入研究悬挑脚手架施工技术, 结合高层建筑结构特点优化施工方案, 强化全过程质量与安全管控, 能够提升高层建筑工程施工效率、保障施工安全。

1 高层建筑悬挑脚手架结构组成

高层建筑悬挑脚手架为装配式临时支撑体系, 由悬挑支撑结构、架体主体、安全防护构件及连接部件四部分组成, 各构件协同工作实现荷载传递与架体稳定, 其整体结构如图 1 所示。

悬挑支撑结构为架体核心承重部件, 主要采用 16# 及以上工字钢或双槽钢制作, 通过 U 型拉环、化学锚栓与建筑梁板、柱体锚固, 固定长度不小于悬挑长度的 1.25 倍, 是实现架体荷载向建筑主体传递的关键。架体主体由立杆、纵向水平杆、横向水平杆、扫地杆组成, 立杆垂直立于悬挑梁上, 纵向水平杆形成水平框架, 扫地杆紧贴楼面设置, 三者通过扣件连接形成空间桁架结构, 保证架体整体刚度。安全防护构件包括密目安全网、防护栏杆、挡脚板、兜底安全网, 防护栏杆高度不低于 1.2 m, 挡脚板高度不低于 18 cm,

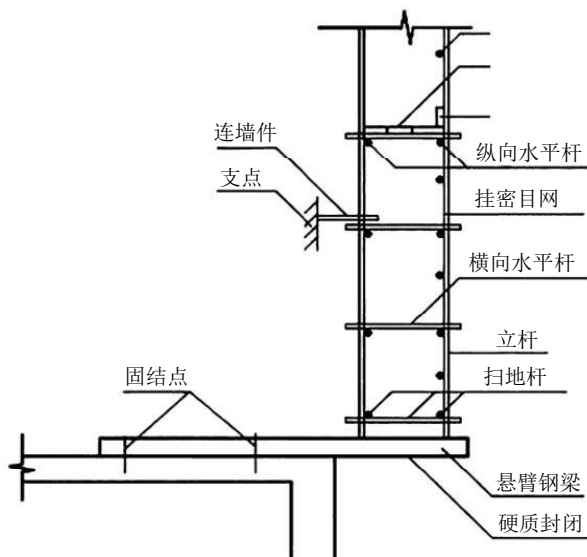


图 1 高层建筑悬挑脚手架整体结构图

架体外立面满挂密目安全网, 作业层下方设置兜底安全网, 防止高空坠落与物体打击^[1]。连接部件包含扣件、连墙件、拉环/锚栓, 扣件采用可锻铸铁制作, 保证立杆与水平杆的连接强度; 连墙件采用刚性连接, 将架体与建筑主体牢固拉结, 抵抗水平荷载; 拉环/锚栓保证悬挑梁与建筑主体的锚固可靠性。

2 高层建筑悬挑脚手架施工技术要点

2.1 施工前准备工作

施工前准备工作直接决定悬挑脚手架施工质量与安全, 需完成设计计算、现场勘察、方案编制、材料准备、

作者简介: 张灵德 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

人员培训五大工作。根据高层建筑施工荷载要求（施工荷载 $\leq 3.0 \text{ kN/m}^2$ ），采用专业结构分析软件对悬挑梁、立杆、连墙件等核心构件进行受力计算与变形验算，确定悬挑梁规格、立杆纵横向间距、连墙件布置密度，验算内容包括悬挑梁抗弯承载力、锚固端拉剪承载力、立杆稳定性、连墙件抗拉承载力，确保各构件满足《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》（JGJ 130-2011）要求。现场勘察建筑主体结构强度，重点检查梁板厚度、梁柱配筋情况，确认悬挑梁锚固点、连墙件拉结点的合理位置；勘察施工现场周边环境，明确高空风荷载等级、施工机械作业范围，制定架体避让与防护方案。

施工方案需包含设计计算书、架体平面/立面布置图、构件节点详图、搭设/拆除步骤、安全措施、应急预案等内容，方案经企业技术负责人审批签字后方可实施，若工程存在超高层、复杂结构等特殊情况，方案需组织专家论证。悬挑脚手架主材选用 $\Phi 48 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ Q235 钢管（壁厚实测 $\geq 3.24 \text{ mm}$ ）、16# 及以上工字钢/槽钢、可锻铸铁扣件、HPB235 级 U 型拉环（直径 $\geq 16 \text{ mm}$ ），所有材料需具有出厂合格证，钢管无锈蚀、裂纹、硬弯，扣件无裂纹、气孔，型钢无弯曲、变形，进场后进行抽样检测，不合格材料严禁使用。搭设人员需持特种作业操作证上岗，施工前进行针对性技术交底与安全教育，明确搭设流程、节点要求、安全操作规程，重点讲解悬挑梁锚固、连墙件拉结等关键环节的施工要点与质量标准。

2.2 悬挑支撑结构安装

悬挑支撑结构是架体承重基础，其安装质量直接影响架体整体稳定性。高层建筑施工中以工字钢悬挑梁安装为例，在建筑梁板浇筑时，按设计位置预埋 U 型拉环，拉环埋至梁板底层钢筋位置，混凝土浇筑时保证拉环位置准确，无偏移、松动，混凝土强度达到设计强度的 80% 以上后方可进行悬挑梁安装。根据设计尺寸切割工字钢，将工字钢穿入 U 型拉环，保证悬挑梁水平放置，固定端长度不小于悬挑长度的 1.25 倍，悬挑端伸出建筑主体长度按设计要求控制，同一层悬挑梁标高一致，间距与立杆纵距匹配^[2]。采用双螺母将 U 型拉环与悬挑梁紧固，固定端底部设置木垫板或钢垫板，增大接触面积，减少应力集中；悬挑梁端部设置封口板，防止立杆滑落，悬挑梁之间采用横向钢管连接，保证整体刚度。悬挑梁安装完成后，对其位置、标高、固定牢固度进行全面检查，采用扭力扳手检测 U 型拉环螺母紧固力矩，确保符合设计要求，验收合格后方可进行后续架体搭设。

2.3 架体主体搭设

架体主体搭设遵循自下而上、逐层搭设、先立杆后水平杆、先节点后整体的原则，结合高层建筑施工层高特点，控制搭设节奏与质量，核心施工要点如图 2 所示。

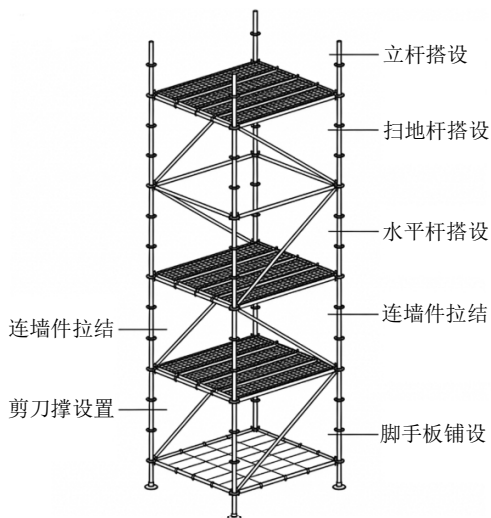


图 2 高层建筑悬挑脚手架架体搭设图

立杆垂直立于悬挑梁预设定位点，底部设置钢底座或木垫板，防止立杆下沉，立杆纵距 $\leq 1.5 \text{ m}$ ，横距 $\leq 1.0 \text{ m}$ ，相邻立杆对接接头错开布置，错开距离 $\geq 500 \text{ mm}$ ，严禁在同一步距内设置两个对接接头。纵向水平杆采用对接扣件连接，设于立杆内侧，步距 $\leq 1.8 \text{ m}$ ，横向水平杆搭设于纵向水平杆上方，两端与立杆牢固连接，保证每根横向水平杆支撑在立杆上；扫地杆紧贴楼面设置，纵横向扫地杆形成封闭框架，增强架体底部稳定性。连墙件采用刚性钢管制作，与建筑梁柱采用焊接或抱箍方式刚性连接，水平间距 $\leq 7 \text{ m}$ ，垂直间距等于建筑层高，架体边缘及转角处 1m 范围内必须设置连墙件，连墙件与架体、建筑主体的连接必须牢固，严禁采用柔性连墙件^[3]。架体外立面满设连续剪刀撑，剪刀撑钢管与立杆、水平杆采用旋转扣件连接，连接点距扣件节点 $\leq 150 \text{ mm}$ ，剪刀撑角度控制在 $45^\circ \sim 60^\circ$ ，底部落地，顶部延伸至架体顶部，保证架体整体抗侧移能力。作业层脚手板采用竹笆片或钢脚手板，满铺且与架体固定牢固，脚手板搭接长度 $\geq 200 \text{ mm}$ ，搭接处设置横向水平杆，用 18# 铅丝双股并联绑扎不少于 4 点，严禁出现探头板、空隙，作业层下方每隔 10 m 设置一层兜底脚手板。

2.4 安全防护设施搭设

高层建筑高空施工中，安全防护是悬挑脚手架施工的重中之重，需实现外立面封闭、作业层防护、层

间防护的全方位防护体系。架体外立面满挂密目式安全网,安全网采用建设主管部门认证的合格产品,用不小于18#铅丝张挂严密,安全网挂于立杆内侧,不得围在杆件外侧,安全网上下边缘与水平杆绑扎牢固,无松动、脱落。作业层外侧设置1.2 m高防护栏杆,栏杆分两道设置,上道距脚手板0.9~1.2 m,下道距脚手板0.4~0.6 m,防护栏杆内侧设置18 cm高挡脚板,挡脚板采用木质或铁质材料,与立杆牢固连接,防止材料坠落。架体与建筑主体之间的间隙(≤ 20 cm)采用脚手板封闭,间隙大于20 cm时设置水平安全网;作业层下方设置兜底安全网,兜底安全网采用平网,张挂牢固,无破损,每隔两层设置一道层间水平安全网,实现多层防护。架体遇建筑大开间窗、门洞等临边部位时,增设防护栏杆与挡脚板,洞口处采用脚手板封闭,防止施工人员坠落。

3 高层建筑悬挑脚手架质量控制与安全管理

3.1 全过程质量控制措施

高层建筑悬挑脚手架施工质量控制需贯穿设计、材料、搭设、使用、拆除全流程,建立“三检制”质量管控体系,通过自检、互检、交接检重点把控核心环节。在设计环节,设计计算书需由专业工程师编制,严格按照规范要求选取荷载参数,确保计算结果精准,架体布置图与建筑主体结构匹配,节点详图标注清晰,设计方案经审核、审批后方可实施^[4]。通过建立材料进场验收台账,对钢管、型钢、扣件、安全网等主材进行外观检查与性能检测,钢管壁厚、型钢规格、扣件紧固力矩等技术指标需符合规范要求,不合格材料坚决退场,严禁使用翻新、破损材料。搭设过程中安排专职质量检查员全程监督,对悬挑梁锚固、立杆垂直度、水平杆步距、连墙件拉结、剪刀撑设置等关键节点进行实时检查,立杆垂直度偏差 $\leq 1/200$,悬挑梁水平偏差 ≤ 5 mm/m,发现问题立即整改,未整改合格不得进行下一道工序施工。架体搭设完成后,由施工单位组织技术、质量、安全管理人员及监理单位进行联合验收,验收内容包括架体结构稳定性、构件连接牢固度、安全防护设施完整性、荷载试验结果等,验收合格后悬挂合格牌方可投入使用,验收记录签字存档。使用过程中严禁超载堆放材料,施工荷载均匀分布,不得集中堆放;定期检查架体构件与连接部位,发现扣件松动、立杆变形、连墙件脱落等问题及时处理;拆除时遵循“自上而下、先搭后拆、后搭先拆”的原则,严禁上下同时拆除,拆除过程中设置警戒区域,专人监护。

3.2 针对性安全管理策略

高层建筑悬挑脚手架处于高空作业环境,易受风荷载、施工动荷载等因素影响,安全管理需坚持预防为主、综合治理的原则,制定针对性管控策略。通过成立悬挑脚手架安全管理小组,明确项目经理、技术负责人、专职安全员、搭设人员的安全职责,制定安全管理制度与操作规程,将安全责任落实到人^[5]。在高空作业时,搭设与拆除人员必须佩戴安全帽、安全带、防滑鞋,安全带高挂低用,作业层设置安全操作平台,严禁在架体上攀爬、跳跃,严禁酒后作业、违章作业。在施工过程中,严格控制施工荷载,严禁超过 3.0 kN/m²的设计荷载,建筑垃圾与闲置材料及时清理;遇6级及以上大风、暴雨、大雪等恶劣天气,立即停止高空作业,并对架体进行加固,恶劣天气过后对架体进行全面检查,确认安全后方可恢复作业。施工现场设置明显的安全警示标志,架体搭设与拆除区域设置警戒围栏,严禁非作业人员进入;作业过程中安排专职安全员现场监护,及时制止违章操作行为,发现安全隐患立即停工整改。

4 结束语

悬挑脚手架作为高层建筑工程施工的核心辅助设施,其施工技术的规范化、标准化是保障工程施工安全与效率的关键。在高层建筑工程中,需结合工程结构特点、施工环境与荷载要求,合理选择悬挑脚手架受力形式,精准完成设计计算,严格把控施工前准备、悬挑支撑结构安装、架体搭设、安全防护等关键技术环节,建立全过程质量控制体系与针对性安全管理策略,确保架体结构稳定、施工安全。

参考文献:

- [1] 董海天,姜磊.高层建筑屋面花架悬挑脚手架施工技术与安全控制研究[J].建筑机械,2025(11):120-125,131.
- [2] 曲建衡.高层建筑悬挑脚手架施工技术及其受力性能试验研究[J].四川水泥,2025(05):37-39.
- [3] 李绪创.高层建筑悬挑脚手架安全管理体系构建与实践[J].建筑,2025(12):65-67.
- [4] 朱艺云.建筑施工悬挑式脚手架施工技术探究[J].居业,2024(12):37-39.
- [5] 王彪,肖高.高层建筑大跨度斜屋面悬挑脚手架施工方案及关键技术研究[J].建筑机械,2025(10):103-107.

低碳目标下公共建筑节能设计策略

吴颂军

(中仁正和工程设计集团有限公司合肥分公司, 安徽 合肥 230041)

摘要 针对“双碳”目标下公共建筑能耗偏高问题, 本文从建筑本体设计出发, 围绕朝向、体形、围护构造、门窗、遮阳、通风等结构层面, 提出保温隔热、密闭节能、被动降温的设计方法, 从源头减少热量传递与空气渗透, 降低空调与采暖依赖, 实现建筑结构自身低碳节能。结合不同气候区特征, 以围护热工优化、布局形态管控、构造节点密闭为核心, 使建筑依靠自身设计实现“冬暖夏凉”, 以期为公共建筑降低全生命周期碳足迹、提升能效提供建筑设计新路径, 助力行业低碳转型。

关键词 公共建筑; 低碳节能; 建筑本体; 围护结构; 保温构造

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.021

0 引言

在建筑能耗中, 围护传热、太阳辐射、冷风渗透、不合理开窗与朝向是主要诱因。建筑本体节能不依赖机电设备, 通过布局、构造、材料与节点优化, 从结构上阻断冷热交换, 是最经济、最长效的低碳路径。在“双碳”背景下, 公共建筑应回归设计本质, 聚焦布局体形、外墙屋顶保温、门窗密封、遮阳通风等构造措施, 以结构优化降低能耗。本文立足于建筑设计专业, 系统阐述公共建筑本体节能方法, 为工程实践提供可落地的技术参考。

1 建筑布局与体形节能设计

1.1 建筑朝向与间距

建筑朝向与间距是决定能耗的基础条件, 合理布局可在无额外成本下显著降低冷热负荷。公共建筑宜优先采用南北向布置, 冬季最大限度获取太阳辐射, 提升室内温度、减少采暖需求; 夏季有效避开强光直射, 降低室内得热与空调负荷。不同气候区需差异化设计: 北方寒冷地区以日照保障为核心, 合理控制间距, 确保后排建筑冬季满足日照标准, 提升被动采暖效果; 南方炎热与夏热冬冷地区则兼顾遮阳与通风, 适当加大建筑间距, 形成自然通风廊道, 缓解热岛效应, 降低室外综合温度。朝向角度可结合当地经纬度微调, 使冬季太阳高度角利于入室、夏季高度角利于遮挡。通过科学朝向与间距控制, 从规划源头利用自然条件节能, 为后续围护、门窗、遮阳设计打下基础, 实现建筑与气候环境的高效适配^[1]。

1.2 体形系数控制

体形系数是建筑外表面积与建筑体积的比值, 直接影响围护结构传热总量, 是布局节能的关键指标。体形系数越大, 围护散热/得热面积越大, 能耗越高; 反之则更利于节能。公共建筑设计应尽量简化平面与立面形态, 减少凹凸转折、复杂造型与过多转角, 控制外表面积, 降低热桥风险与热量交换。平面宜规整紧凑, 避免细长、分散、多翼状布局, 减少外围护结构总长。同时结合功能合理组合空间, 将高能耗使用区域集中布置, 低能耗区域如设备间、走廊等布置在外围或东西向, 形成缓冲空间。合理体形控制不仅降低围护造价, 更能从结构上减少传热路径, 提升整体密闭性与保温效果。在满足功能前提下, 越小的体形系数越利于节能, 是公共建筑低碳设计必须优先落实的核心控制项^[2]。

2 围护结构保温隔热设计

2.1 外墙保温构造设计

外墙是围护结构中面积最大、传热最主要的部件, 其保温构造直接决定室内冷气与暖气是否流失。公共建筑外墙应优先采用外墙外保温体系, 将保温层置于主体结构外侧, 阻断热桥传递, 保护混凝土与砌体结构不受温度应力破坏。选材上优先使用导热系数低、尺寸稳定、环保低碳的保温材料, 通过合理厚度设计满足传热系数限值。构造上需形成连续完整的保温层, 杜绝拼接缝隙、空鼓与脱落。节点部位(女儿墙、勒脚、窗台、变形缝、构造柱等)必须做保温封堵与密封处理,

作者简介: 吴颂军(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑设计。

防止冷桥形成与空气渗透。外保温可有效减少室内外热量交换,夏季阻挡室外热量传入,冬季锁住室内热量,让空调冷气不易散失、采暖热量不易流失,从墙体结构上实现高效节能。精细化的外墙保温构造,是公共建筑本体节能最直观、最有效的措施。

2.2 屋顶隔热与保温设计

屋顶常年受太阳直射,是夏季得热最大、温度最高的部位,其保温隔热构造直接影响顶层空间舒适度与能耗。公共建筑屋顶应采用保温+隔热双层构造,优先采用倒置式屋面,将保温层设置在防水层之上,保护防水层并提升热工稳定性。保温层选用低热导材料,确保屋面传热系数达标。同时,可结合架空隔热层、屋面绿化、反射屋面等构造措施,进一步降低太阳辐射吸收与热量积聚。反射屋面通过高反射涂层减少吸热,屋面绿化以植被层与种植土形成隔热缓冲层,架空隔热则利用空气流动带走热量。节点部位(出屋面管道、风帽、女儿墙根部等)均需做好保温密封,防止雨水渗透与热量传递。优质屋顶构造可大幅降低顶层室内温度,减少空调开启时间与负荷,实现结构层面被动降温,是公共建筑节能不可或缺的一环。

3 门窗节能构造设计

3.1 门窗选型与热工构造

门窗是围护结构最薄弱的节能节点,也是夏季冷气外泄、冬季热量流失的主要通道,其构造直接决定建筑密闭性。公共建筑外窗宜采用断桥铝型材+Low-E中空玻璃,断桥结构阻断金属框体传热,Low-E中空玻璃有效阻隔辐射与对流换热,在保证采光的同时大幅提升保温隔热性能。窗框断面应优化隔热腔体设计,提升整体热工性能。玻璃层数与空气层厚度按气候区选择,寒冷地区可采用三玻两腔,进一步降低传热。合理的门窗构造能有效阻挡室外热量进入、锁住室内冷气,减少空调负荷。与普通门窗相比,节能门窗可降低近一半通过开口的能耗,是建筑本体节能投入小、见效快的关键措施^[3]。

3.2 密封构造与气密性

空气渗透是门窗能耗的重要来源,缝隙漏风会直接导致冷气流失、室温波动。提升气密性必须从密封构造入手:窗框与墙体之间采用保温填充+密封膏双重处理,消除安装缝隙;玻璃与窗框之间采用多道密封胶条,保证压紧密闭;开启扇设置等压腔与密封结构,减少风压下的渗透。同时,控制开启扇数量与比例,避免过多开启导致密闭性下降。气密性达标可显著减少冷风渗透与热量对流,让室内温度更稳定,空调不必持续高频运行。良好的密封构造能把“冷气锁住、

热风挡住”,是门窗节能的核心保障,也是建筑结构节能的重要细节。

3.3 窗墙比优化

窗墙比直接影响采光、传热与能耗,必须结合朝向与气候严格控制。南向窗墙比可适当提高,利用冬季日照被动采暖;北向、东西向应减小开窗面积,降低热量传递与西晒得热。公共建筑应避免盲目使用大面积玻璃幕墙,防止传热剧增、能耗飙升。合理窗墙比在保证自然采光的同时,把围护保温放在优先位置,减少靠空调弥补的结构缺陷。按气候区与朝向差异化控制窗墙比,可平衡采光与节能,从开窗比例上降低能耗,是建筑本体设计的重要控制指标。

4 遮阳与自然通风设计

4.1 建筑遮阳构造

建筑遮阳是从建筑本体层面阻断太阳辐射得热的最直接手段,能够在不依赖任何机电设备的前提下,有效降低室内温度,减少空调运行时间,是公共建筑节能设计中性价比极高的措施。在公共建筑外立面设计中,遮阳构件应作为结构组成部分一体化设置,而非后期附加装置。东西向窗户与玻璃幕墙是遮阳重点部位,可采用固定遮阳板、水平挑檐、竖向百叶、格栅等构造形式,根据当地太阳高度角确定尺寸与角度,确保夏季有效遮挡直射阳光,冬季不影响日照进入。遮阳构造能够大幅减少通过窗户进入室内的辐射热量,避免室内温度快速升高,让空调冷气不易被外界热量抵消,从而降低能耗。同时,遮阳构件与建筑立面结合,可提升外立面完整性与美观度,实现功能与形式统一。对于大型公共建筑,连续式整体遮阳效果优于零散式遮阳,能够形成稳定的隔热屏障,进一步强化节能效果。通过合理的建筑遮阳设计,可从结构上减少室外热量向室内传递,降低空调负荷,实现被动式低碳降温。

4.2 自然通风构造

自然通风依靠风压与热压原理实现室内外空气交换,是公共建筑在不消耗电力情况下改善室内热环境、提升舒适度的重要方式,属于纯建筑结构层面的节能设计手段。在方案设计阶段,应结合建筑朝向、间距、平面布局组织穿堂风,利用建筑开口、中庭、天井、高低窗等构造形成稳定通风路径。进风口宜布置在迎风面与低压区,排风口设置在背风面与高位,利用热空气上升原理加速空气流动,快速排出室内余热与污浊空气。南方炎热地区以强化通风降温为目标,可增大开口面积、设置导风构件、采用通透式平面布局,提升通风效率;北方寒冷地区则采用可控式通风构造,夏季加强通风、冬季关闭密闭,兼顾保温与散热需求。

自然通风构造能够减少机械通风与空调开启时长,降低建筑整体能耗,同时提升室内空气质量与健康舒适度。与设备通风相比,建筑结构自然通风具有零能耗、免维护、长效稳定的优势,是公共建筑低碳节能设计中不可或缺的重要组成部分^[4]。

5 建筑本体低碳节能实施策略

5.1 设计标准引领策略

设计标准是保障公共建筑本体节能落地的基础与依据,能够从制度层面规范朝向、体形系数、围护结构、窗墙比、遮阳通风等关键设计内容,确保节能措施不流于形式。在双碳目标下,应结合不同气候区特征,细化公共建筑节能设计指标,明确外墙、屋顶、门窗的传热系数限值,规定合理体形系数与窗墙比范围,将建筑本体节能要求纳入强制性条文。标准体系应覆盖方案、初步设计、施工图全过程,在方案评审阶段重点核查朝向、布局、体形等核心内容,在施工图阶段严格审查保温构造、密封节点、遮阳形式等细节。同时,推动国家标准、行业标准与地方气候、建筑功能精准衔接,针对办公、商业、交通等不同类型公共建筑提出差异化要求,提高标准可操作性。通过标准引领,引导设计单位将节能理念落实到具体构造中,避免重外观、轻节能的现象,使公共建筑从源头具备低碳节能能力,为全生命周期节能奠定制度基础。

5.2 全流程管控策略

全流程管控是实现建筑本体节能从设计到落地的关键保障,贯穿方案、施工、运营全过程,避免节能构造在实施中打折扣。在设计前期,应对建筑朝向、围护结构、门窗节点、遮阳通风等内容进行专项论证,结合气候条件与使用需求优化方案,确保构造合理、性能达标。施工阶段应加强保温层厚度、密封工艺、节点处理、遮阳安装等关键环节监督,严禁擅自更改构造做法、降低材料性能,防止出现热桥、缝隙、渗漏等影响节能效果的问题。项目竣工后,应对围护结构热工性能、气密性、遮阳效果进行实地检测,验证是否达到设计预期。运营阶段应持续监测室内温度、能耗变化,针对保温失效、密封不严、通风不畅等问题及时维护改造,保持建筑本体长期节能效果。通过“设计—施工—验收—运维”闭环管控,确保保温、密封、遮阳、通风等建筑构造措施真正落地见效,实现公共建筑全生命周期低碳节能目标^[5]。

5.3 理念与人才赋能策略

理念与人才是推动公共建筑本体节能持续发展的内在动力,决定建筑构造节能的创新水平与落地质量。应强化建筑本体优先的节能理念,引导设计人员回归

建筑本质,重视朝向、保温、密封、遮阳、通风等结构节能手段,摒弃过度依赖设备弥补设计缺陷的思路。通过行业培训、技术交流、案例推广等方式,普及低碳构造知识,提升设计人员对围护结构、节点密封、遮阳通风等关键技术的理解与应用能力^[6]。针对不同气候区开展专项培训,重点讲解保温构造、隔热措施、通风设计等实操内容,提高方案精细化水平。同时,搭建产学研合作平台,鼓励新材料、新构造、新工艺在建筑节能中的应用,推动技术成果转化。加强人才队伍建设,培养兼具建筑设计、热工知识、低碳理念的复合型人才,为公共建筑本体节能提供持续技术支撑,让结构节能、构造节能成为行业共识与设计常态^[7]。行业层面应定期举办全国性或区域性的公共建筑节能设计技能竞赛、优秀案例展评活动,为设计人员提供交流学习的平台,促进优秀节能设计经验的传播与推广。此外,企业应建立内部人才培养与激励机制,鼓励设计人员参与节能技术研发与项目实践,对在低碳节能设计中取得突出成果的团队与个人给予专项奖励,同时推动设计人员与材料研发、施工技术人员的跨专业协作,形成全产业链的人才联动机制,让复合型节能设计人才能够充分发挥价值,持续推动公共建筑本体节能技术的创新与落地。

6 结束语

公共建筑低碳节能的核心是从建筑结构与构造上锁住热量、挡住辐射、堵住冷风,依靠朝向、体形、外墙、屋顶、门窗、遮阳、通风实现本体节能。这种方式不依赖机电、一次投入、长期受益,最符合低碳本质。未来应持续强化建筑结构节能设计,推动公共建筑以自身构造实现低能耗运行,为“双碳”目标与城市绿色发展提供持久支撑。

参考文献:

- [1] 宿婷,赵曦辉.双碳背景下公共建筑低碳节能改造的影响因素分析[J].黑龙江科学,2025,16(11):147-149.
- [2] 李薇.“双碳”目标下公共建筑低碳发展技术路径分析[J].建筑与预算,2024(01):40-42.
- [3] 申新华.“双碳”目标下公共建筑技术设计与实施路径[J].中国建筑金属结构,2023,22(08):136-138.
- [4] 汤海洋.低碳目标约束下公共建筑绿色施工节能减排潜力预测模型[J].铁道建筑技术,2023(08):180-184.
- [5] 胡显芝.低碳建筑中的暖通系统技术与应用[J].大众标准化,2025(11):143-145.
- [6] 贾江山,肖琳琳,冯小娇.基于绿色建筑技术的公共建筑节能改造[J].佛山陶瓷,2025,35(06):178-180.
- [7] 刘玉婷,高伟,周世玉.某公共建筑空调供暖系统节能改造与能效评估[J].暖通空调,2025,55(S1):35-38.

市政给排水管道布设设计及优化建议

徐云畅

(浙江绿城东方建筑设计有限公司, 浙江 宁波 315400)

摘要 市政给排水管道作为支撑城市运行的“生命线”，承担居民用水供给与生产用水保障的重要职能，管网布局合理与否，决定着城市运行效率。鉴于此，为增强城市发展潜力，加速实现绿色可持续发展目标，本文对市政给排水管道布设设计展开探讨，全面梳理设计思路，提出多项基本原则，指明设计方向。聚焦设计实操视角，系统阐述市政给排水管道布设设计关键内容，明确实操细节与注意事项，并进一步诊断设计体系现存短板问题，提出具有针对性的优化建议，以期对相关人士提供借鉴。

关键词 市政给排水管道；布设设计；平面布置；竖向设计；坡度设计

中图分类号：TU991.36

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.022

0 引言

随着城市化进程持续推进，城市规模不断扩张，生产生活用水与排水需求稳步增长，对市政给排水管网承载能力和运行效率提出更高要求。传统设计体系存在诸多问题，设计理念保守，和现代城市发展需求相互脱节，当前已成为城市高质量发展的重要阻碍。唯有主动贴合城市发展需求，全方位重塑市政给排水管道设计体系，打破固有观念意识，量身制定布设设计方案，才能消除水资源浪费、环境污染、城市内涝等一系列隐患。

1 市政给排水管道布设设计原则

1.1 安全稳定

其一，力学稳定。走访调查管线沿途地形地貌和地质条件，综合分析水文地质条件与地面荷载来选择管线走向，尽量避开滑坡、断层等地质灾害隐患区域，选用力学性能优异的管材，要求管道结构足以承受地面荷载、土壤压力以及地下水压力。

其二，水力稳定。将管道水压稳定维持在安全区间，并保持水流速度均匀状态，水压超标和局部流速失衡，会引发水锤冲击、水流不畅等问题，管道布设结束后，运用BIM软件展开仿真分析，精准推演市政给排水管道运行状况，如果存在积水、污水倒灌、水锤冲击等现象，针对性调整方案内容^[1]。

其三，水质安全。保持污水管、雨水管和给水管安全间距，给排水管道必须选用符合饮用水卫生标准的管材，污水管和雨水管上专项采取防渗防泄漏设计措施。

1.2 经济适用

市政给排水工程属于公益性基础工程，具有建设周期长、投资规模大和运维成本高的特征。设计人员必须遵循经济适用原则，确保市政给排水管网满足使用需求和安全稳定运行的基础上，尽可能节省前期造价成本和后期运维成本，避免资源浪费。例如：在管网布局方面，非必要情况下，禁止设置管道弯头、交叉点和变径点，管线沿途均匀布置提升泵站、阀门井、检查井等附属设施，通过缩短管道长度、减少附属设施总体数量来节省造价成本。在管材选型方面，综合分析管道用途、压力等级、输送介质等因素，优先选择性价比高管材，禁止盲目选用高价管材，如给水主干管选用球磨铸铁管，给水支管选用HDPE管。

1.3 环保性

市政给排水管网作为现代城市核心基础设施，管道系统和周边环境密切相关，水质安全关系到城市居民身体健康，污水排放关系到地表水/地下水环境质量，雨水疏导关系到水资源循环利用效果。因此，应把绿色环保作为基本设计原则，满足工程建设需求和管道使用需求的前提下，尽量减轻周边环境造成的污染破坏。例如：管道路由尽量避开天然湿地、自然保护区在内的生态敏感区域，避免因施工活动而导致地表植被层造成破坏。而在设备选型环节，优先选用高效节能设备，通过降低综合能耗水平来减少碳排放量。

作者简介：徐云畅（1991-），男，本科，工程师，研究方向：市政给排水。

2 市政给排水管道布设设计要点

2.1 平面布置

平面布置是市政给排水管道布设设计体系的基础环节,以城市规划方案为主要依据,综合分析地形地貌条件、用水排水负荷分布情况、既有管线运行状况等因素,确定管网整体布局方案,设计要点如下。

第一,路由选择。综合分析地形地貌、地下管线分布状况、地面交通流线等多项因素,沿途避让各类构筑物和远离生态敏感区域,尽量缩短管线整体长度来控制造价成本。通常情况下,优先在市政道路人行道和非机动车道下部空间埋地敷设市政给排水管道,也可选择布置在道路两侧绿化带下方,管道走向和道路走向保持一致,沿途避开重要建筑物基础结构、既有地下管线和地质灾害隐患区。如果市政给排水管道必须穿越既有管线和靠近重要建筑物基础,保证平行敷设间距超过 0.5 m,竖向敷设间距超过 0.15 m,额外设置防护套管^[2]。

第二,布局划分。采取层级结构型式,以市政给水管网为例,由主干管、支管、入户管组成,区分各级管道功能定位。其中,主干管负责执行区域供水主干输送任务,管径值普遍超过 DN500,沿城市主干道沿线敷设,组成环状网络。主干管沿途延伸多条支管,负责执行具体功能区域输水任务,管径取值范围为 DN200-DN500。入户管负责满足单体用户用水需求,基于用水规模来控制管径,管径值在 DN50-DN100 不等。

第三,节点设置。结合管网运行特性,单独制定给水管网、雨污水管网的节点方案,利用多类型节点支撑管网平稳运行。针对给水管网,主干管和支管上等距设置多处阀门井和水表井,分别负责控制管道开关、监测用水情况,优先在人行道、绿化带等不影响地面交通位置设置节点。针对雨污水管网,在坡度变化、管道变径位置和道路交叉口设置检查井,道路低洼处和绿化带边缘设置雨水口,雨水管道检查井间距控制在 50 m 内,污水管道检查井间距控制在 30 m 内,雨水口间距保持在 20 ~ 50 m。

2.2 竖向设计

竖向设计即为市政给排水管道的埋深值、高程值和竖向坡度,设计方案合理与否,决定着管道水力条件,设计错误将引起局部积水、污水倒灌、管道冻裂等一系列问题,致使管网运行故障频发。为保证设计质量,必须引入精细化设计理念,以“水力顺畅、结构稳定”作为设计准则,重点掌握以下设计要点。

第一,管道埋深确认。埋深参数包括最小埋深和

最大埋深,分别按照管道保护要求和代入现场施工角度确定最佳值。对于管道最小埋深,要求各类管道的实际埋深值必须超过 0.7 m,如果埋深值低于这一标准,市政给排水管道将直面地面荷载冲击,易出现破损泄漏问题,如果市政给排水管网位于寒冷地区,还要求管道最小埋深超过土壤冰冻深度,预防管道冻结胀裂问题发生。对于管道最大埋深,尽量控制在 6 m 以内,管道埋深越大,施工难度系数越高,如果管道埋深和排水畅通相互冲突,沿途修建单座或多座泵站,采取压力流排水方式。

第二,高程控制。把管道用途作为高程设计主要依据,综合分析水力计算结果、周边环境条件等其他因素,确定管道最佳高程。对于市政给水管网,初步制定多组高程方案,运用 BIM 软件进行仿真分析,测算给水管网各处区域的用户用水压力,以最不利点用户用水压力高于 0.15 MPa 作为设计标准,进而确定主干管高程与支管高程,还要求水源地取水口高程略大于主干管起始端高程。对于市政排水管道,以顺坡排水为布设原则,管道起始段高程相对最高,自上游至下游持续下调管道高程,利用竖向坡度来改善排水效果。如果受限于施工场地复杂条件,上下游管道高程差不明显,则额外设置提升泵站进行辅助排水。

2.3 坡度设计

市政给排水管网运行期间,以重力流作为水流动力来源,要求管道保持一定坡度,充分发挥自然重力作用,驱动水流向指定方向高速流动。为降低市政给排水管网综合能耗水平,需将管道坡度纳入布设设计范畴,坡度方向和水流方向保持一致,基于管道类型、管径值来确定最佳坡度,要求水流流速保持在 0.6 ~ 1.5 m/s,流速不足会出现空气滞留和泥沙淤积问题,流速过快则会形成爆管和水锤冲击隐患。

第一,市政给水管网。以便于空气排出和自动清理泥沙作为设计目标,整体坡度控制在 0.2% ~ 0.5%,主干管坡度适当减小至 0.1% ~ 0.2%,水流速度超过 0.6 m/s 即可。支管具备管径小和水流速度快的运行特点,坡度控制在 0.03% ~ 0.05%,尽量保持均匀管道坡度,如果必须存在陡坡、缓坡交替部位,额外设置排气阀或是排水阀,引导空气排出与清理泥沙。同时,在管道最高点设置排气阀,阀门间距控制在 100 ~ 150 m,管道最低点与检修段末端设置排水阀,阀门间距控制在 200 ~ 300 m^[3]。

第二,市政排水管网。以重力流优先和顺坡排水为设计准则,结合工程现场条件来控制管道最大/最小坡度,以水流速度超过 0.6 m/s 作为最小坡度设计

标准,水流速度小于3.0 m/s作为最大坡度设计标准,坡度方向和水流方向保持一致。如果管道沿途存在地形坡度较大区域,酌情增加排水管道读破,并在超出最大坡度值后,额外设置跌水井来控制流速度,跌水高度控制在0.5~2 m,跌水井间距不超过50 m。

3 市政给排水管道布设设计优化建议

3.1 基于城市规划方案的整体布局优化

早期市政给排水工程,市政给排水管网布局方案和城市整体发展规划相互脱节。一方面,未能结合城市功能分区方案来选择管道路由,新城区管网供排水能力过剩,老城区供排水能力不足。另一方面,管道布局方案缺乏前瞻性,随着用水排水需求大幅增加,市政给排水管网建成投运数年后,必须进行大规模升级扩建,产生额外改造成本,并在改造期间对城市交通体系和居民日常生活造成影响。针对上述问题,应加强市政给排水管道布设设计活动和城市总体规划方案的协同力度,设计人员必须带入全域统筹视角,紧跟城市发展步伐来制定管网布局方案,组合采取协同对接、前瞻设计两项措施。协同对接是设计单位提前和城市规划、自然资源、住建等相关部门取得联系,全面了解城市信息,包括功能分区、总体规划方案、既有地下管线分布情况等,明确管道布设约束条件和用水排水需求,着手优化管道路由方案,尽量缩短管道长度的同时,预留足够拓展空间,主动适配未来城市扩容需求。前瞻设计是将城市长远发展规划作为设计依据,根据所掌握信息,预测未来5~10年人口增长规模和用水排水需求,酌情增加管径值和调整管道路由方案,以及在泵站、蓄水池等附属设施上预留扩建空间^[4]。

3.2 基于智慧化技术的管网设计优化

随着城市信息化进程加快,传统给水排水管网设计已经很难满足精细化和智能化管控的需要。在设计阶段,将GIS地理信息系统、BIM三维建模和水力仿真软件等技术相结合,建立可视化的参数化管网设计模式,对管线走向、埋深、坡度、节点布置等进行多个方案的比较,以提升设计的准确性和合理性。在此基础上,通过对管网关键节点进行智能监控,将流量、压力、水质、渗漏监测等功能集成,达到对供水管网运行状态的实时感知、异常预警和远程调控。通过智慧化技术与传统设计方法相结合,可以提高管网运行效率,减少漏损率和运行成本,提高城市给水排水系统对极端气候和突发事件的适应能力,促进其向数字化和智慧化发展^[5]。

3.3 运维便利性优化

从后期运维管理角度来看,现有管道布设方案过于侧重前期建设成本与施工难度系数,忽略运维需求,受限于设计因素,运维工作难以正常开展。以附属构筑物位置问题为例,阀门井、雨水口设置在机动车道下方和障碍物后方区域,运维人员无法进入井内清理淤积泥沙和开展检修作业,并在车辆碾压作用下,频频出现井盖破损等问题。因此,在管道布设设计结束后,要求运维单位参与联合会审活动,论证设计方案可行性,反馈具体问题来修改方案内容,如要求附属构筑物尺寸必须满足运维人员正常进入操作,尽量避开机动车道和繁华商业区设置附属构筑物,并在管道关键节点设置检修口和应急阀门,预留足够宽度的运维通道^[6]。同时,结合管网分段运维需求,合理划分供排水管网检修区段,在分段节点增设智能测压、测流及水质监测装置,配套设置可视化标识与GIS定位坐标;对易淤积、易堵塞管段适当加大检查井内径与检修空间,采用防沉降、防异响井盖及防盗防护结构,降低日常巡检、清淤、抢修的作业难度与安全风险,实现全生命周期运维效率提升。

4 结束语

市政给排水管道布设设计科学性与合理性,是决定城市发展潜力与城市居民生活品质的重要因素。在城市高质量发展背景下,设计人员必须坚守科学设计理念,结合城市用水排水需求,兼顾实用性与前瞻性,量身制定市政给排水管道布设设计方案,结合工程实践提出优化建议,为市政给排水工程高质量发展提供支撑。随着智慧水务、绿色低碳技术普及,市政给排水设计将更加趋向一体化、智能化与可持续化,为建设安全、韧性、宜居的现代化城市奠定基础。

参考文献:

- [1] 王丽涯.市政给排水设计合理性的改进措施[J].工程技术研究,2025,10(22):181-183.
- [2] 韩阳.市政给排水设计存在的问题与对策研究[J].工程技术研究,2025,10(16):199-201.
- [3] 尹梨.市政道路给排水管道的设计与施工要点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(18):187-189.
- [4] 李光宇.市政给排水管道布设设计及优化措施研究[J].价值工程,2024,43(09):35-37.
- [5] 吴倩.市政给排水管道的布置设计和技术[J].高科技与产业化,2024,30(06):59-61.
- [6] 刘广达,刘金城,段志栋.市政给水排水工程设计主要技术措施分析[J].中国住宅设施,2025(03):98-100.

装配式建筑施工技术的现状与发展趋势

沈永飞, 赵飞*, 韩琳

(青岛海元建设集团有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要 装配式建筑是以工厂预制构件为核心支撑, 采用“工厂规模化生产构件、现场模块化装配搭建”的工艺建造房屋的新型建造方式, 更是推动我国建筑业从传统粗放生产模式向绿色集约方向转型升级的核心抓手与重要发展方向。近年来, 由于国家政策的大力扶持, 装配式建筑市场不断扩大, 主流技术体系也趋于完善。但是装配式建筑施工技术在发展过程中还存在着构件质量参差不齐、技术标准体系不健全、专业人才缺乏等难题, 从而影响到产业的高质量发展。本文对装配式建筑施工技术发展现状进行梳理, 对目前存在的主要问题进行分析, 并从智能化融合应用、绿色建造方向、标准化体系完善等方面对装配式建筑未来的发展趋势进行预测, 以为装配式建筑产业的持续健康发展提供参考。

关键词 装配式建筑; BIM 技术; 绿色建造; 标准化体系

中图分类号: TU767

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.023

0 引言

建筑业长期以来采用现浇为传统的施工方式, 存在着资源消耗大、劳动效率低、建造质量难以保证等缺点。装配式建筑依靠标准化生产、机械化安装、绿色低碳等明显的优势, 成为建筑业转型发展的主要途径。基于此, 对装配式建筑施工技术发展脉络及趋势走向进行系统的研究, 对建筑业现代化转型有着十分重要的理论和实践意义。

1 装配式建筑施工技术的发展现状

1.1 政策背景与市场发展规模

近些年, 国家以及各地方各级政府相继出台了多项关于发展装配式建筑的政策文件。在政策的不断推动下, 我国装配式建筑市场规模迅速扩大, 新开工装配式建筑面积逐年增加, 占新建建筑面积比例不断提高, 装配式建筑已经成为建筑业转型升级的主要动力, 市场前景广阔, 产业体系日趋完善^[1]。

1.2 主流技术体系与工艺流程

目前, 我国装配式建筑已经形成以装配式混凝土结构、钢结构、木结构为主体的三大技术体系。预制混凝土剪力墙结构由于适应性好, 在住宅中得到了广泛的应用。钢结构体系因为工期短、自重轻的特点, 在公共建筑中占有重要的地位。各种体系都包含构件深化设计、工厂预制生产、运输存储、现场吊装、节点连接等全部工艺过程^[2]。

1.3 国内外发展水平的比较分析

从装配式建筑发展来看, 与我国相比, 欧美、日本等发达国家在装配化率、技术标准体系的完备程度、全产业链协同发展能力等各方面均存在较大差距。发达国家装配式建筑比例高, 产业链条长、集成度高, 信息化水平也高。相比之下, 装配式建筑起步较晚, 各地区发展水平参差不齐, 技术体系的系统化程度还有待提高^[3]。

2 装配式建筑施工技术存在的问题

2.1 构件生产与现场装配的质量问题

构件质量是装配式建筑整体性能的根本保证, 但是构件生产、现场装配环节都存在着不容忽视的质量隐患。构件生产阶段部分预制构件生产企业的质量控制体系不健全, 工厂生产过程中原材料检验、模具精度控制、养护条件管理等重要环节缺少严格规定, 造成构件尺寸偏差、表面缺陷等问题时有发生。部分生产企业为了降低成本, 压缩原材料用量并简化生产工艺环节, 使得构件质量不稳定的情况更加严重。现场装配时吊装精度控制比较困难, 构件之间接缝处理和节点连接质量对施工人员的技术水平要求比较高。由于目前现场作业人员普遍缺乏系统培训, 装配操作不规范的现象比较严重, 造成构件安装偏位、接缝宽度不均匀、连接节点渗漏等质量缺陷频繁出现。加上构件从工厂到现场的运输过程中, 由于道路颠簸、装卸

作者简介: 沈永飞 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑施工。

*通信作者: 赵飞 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑设计。E-mail: 295602480@qq.com

操作不当等原因造成构件破损的情况也时有发生^[4]。

2.2 技术标准体系不健全

完善的装配式建筑技术标准体系是保证装配式建筑质量、规范市场行为的基础，但是目前我国装配式建筑技术标准体系建设还比较落后，不能满足产业快速发展的需要。从标准的覆盖面来说，目前的规范主要是结构设计和施工安装方面的，对于构件接口尺寸模数统一、信息化协同管理、全寿命周期维护等标准的规定还比较欠缺，造成各个企业生产的构件之间兼容性不好，不能实现规模化通用互换。就标准层级协调来说，国家标准、行业标准和地方标准之间缺少协调，某些条款存在相互重复或者矛盾的情形，造成企业执行难、成本高。另外，装配式建筑技术更新换代快，标准的编制和修订周期较长，现行标准对新材料、新工艺、新结构体系的覆盖比较少，造成技术创新成果不能及时得到标准的支持，在一定程度上影响了新技术的推广应用^[5]。

2.3 专业人才培养与产业链协同不足

装配式建筑高质量发展的关键在于系统的产业链协同运作、充足的劳动力供给，但是目前这两个方面均存在明显的不足。装配式建筑包含设计、生产、施工、运维等诸多专业，对从业者的综合素质有较高的要求。但是目前高校和职业院校对于装配式建筑相关专业的培养投入较少，课程体系没有很好地与产业需求相衔接，校企合作育人的机制还需要进一步完善。一线施工人员的技能培训体系还不健全，持证上岗的比例很低，熟练掌握装配式施工操作规范的产业工人非常缺乏，成为制约产业发展的一个瓶颈。装配式建筑包含开发、设计、生产、物流、施工等各个环节的主体，各个主体之间信息交流和配合还不理想。设计与生产之间缺少有效的信息交流渠道，设计图纸同生产工艺衔接不紧密，造成预制构件返工率居高不下；生产与施工之间没有建立完善的计划协调体系，构件供应速度和现场安装进度不能精准对接，经常出现窝工待料的情况。

3 装配式建筑施工技术的发展趋势

3.1 智能化与 BIM 技术的融合应用

随着新一轮科技革命的不断深入，智能化技术同装配式建筑的深度融合已经成为不可阻挡的趋势。BIM 技术能创建装配式建筑全生命周期的数字化模型，把构件设计、工厂生产、物流运输、现场装配和后期运维等环节的信息有机地结合起来，消除各个参与方之间的信息壁垒，使数据可以无限地互相传递和共享。

设计阶段 BIM 技术可以支持各专业协同工作，消除碰撞冲突，提高设计精度；生产阶段 BIM 模型可以直接给数控加工设备提供准确的生产参数，使构件加工向自动化、精细化方向发展；施工阶段利用 BIM 的施工模拟技术可以预演吊装方案，改善施工组织，削减现场操作风险。同时，人工智能、物联网、大数据等新一代信息技术同装配式建筑施工的融合也变得越来越深。通过在构件上植入智能芯片进行编码标识，可以达到从工厂到现场的全过程数字化跟踪和质量溯源的目的，同时依靠机器视觉质量检测系统可以自动识别出构件表面的各种缺陷，大大提高了检测的速度和精确度。智能建造平台的建立可以实现工厂生产、物流调度和现场施工的高效联动，使装配式建筑整体建造过程更加精准可控，质量保证水平明显提高。

在装配式住宅项目施工过程中，全面应用 BIM 协同管理平台，将建筑、结构、机电等各个专业的模型融合为一个数字化的底座。项目组利用平台对预制墙板、叠合楼板、预制楼梯等构件展开碰撞检测工作，在此过程中及时发现了诸多管线同结构件之间的冲突状况，并且顺利地完成了这些冲突点的消除工作，从而防止了出现后续的返工情况发生。工厂生产时，技术人员直接从 BIM 模型中获取构件参数，输入数控生产线，构件尺寸精度明显提高。进入施工现场后，项目管理人员通过平台对吊装顺序进行三维模拟推演，合理安排塔吊作业范围和构件堆放区，减少吊装等待时间。同时每块构件都粘贴了二维码标签，施工人员扫描二维码就可以获得构件的规格、安装位置和注意事项等全部信息，现场装配效率大大提高，质量追溯能力也得到了加强，整个项目施工工期比传统的施工方式明显缩短。由此可见，智能化技术的融合应用对于提高装配式建筑的建造水平有着重要的现实意义。

3.2 绿色建造与可持续发展方向

在“双碳”战略的指引下，绿色低碳成了装配式建筑施工技术今后的发展主要价值取向，绿色建造理念会全面改变装配式建筑全产业链的技术路线和发展方式。装配式建筑自身在减少施工扬尘、降低噪声污染、减少建筑垃圾产生等各方面都具有明显的生态优势，随着绿色建造要求的不断加深，这种优势将会更加明显和广泛。在材料应用上，高性能绿色建材研发和推广速度将进一步加快，低碳混凝土、再生骨料构件、高强度钢材、新型绿色保温材料等的应用比例会越来越高，从源头降低建筑碳排放强度。工厂化生产方式

给精细化节能管理创造了有利条件，在预制工厂中清洁能源的使用会逐渐推广，生产过程中能耗控制和废料循环利用水平会不断改善。

装配式公共建筑项目在建造过程中全面践行绿色建造理念，从材料选择到施工组织都以节能减碳为目标来展开系统的规划。预制构件生产阶段，工厂用低碳胶凝材料代替一部分水泥，把生产废料集中回收利用到非结构构件的填充生产中去，固体废弃物产生量比常规生产方式大大减少。施工现场由于构件在工厂预制完成，现场湿作业量减少，扬尘和建筑垃圾的排放得到有效控制，现场用水量也大大降低。项目管理团队也采用了精益建造的方法，对构件的运输路线、吊装顺序进行了细致的安排，从而缩减了由于车辆空驶、等待而产生的碳排放。竣工之后，项目就建筑全生命周期的碳排放展开核算评价，得出的结果表明，该工程单位面积的碳排放比同类型的传统现浇建筑要低很多，绿色建造效果显著，为同类项目推广绿色装配式建造模式提供了重要的实践参照。

3.3 标准化体系完善与产业规模化推进

标准化属于装配式建筑产业规模化、高质量发展的基础性制度保障，创建系统的装配式建筑施工技术标准体系，将会成为装配式建筑施工技术发展的一个重要方向。从标准体系整体结构上讲，今后要加快国家标准、行业标准、地方标准之间层次上的协调以及内容上的衔接，努力创建起包含全产业链、全建筑类型的完整标准体系，给企业赋予明确统一的技术准则。从构件标准化角度来说，推进预制构件接口尺寸、连接方式、质量检验等主要标准的统一，是实现构件规模化通用互换、降低生产成本的重要途径。随着构件标准化程度越来越高，生产企业规模效应会逐渐体现出来，产业集中度会持续提高，形成若干具有较强竞争力的龙头企业引领整个产业向高端化发展。同时，标准化的深入推行会促使装配式建筑产业基地实现规模化布局和集群化发展，塑造起以标准化生产为根基、以规模化配送为依托的供应链体系，从而从根本上解决目前产业链协同效率偏低的问题。另外，随着信息化技术的广泛使用，以数字化平台为依托的装配式建筑标准管理体系也会迅速形成起来，促使标准由静态文本转变为动态的数字化管理模式。随着标准体系的不断完善以及产业规模的不断扩大，装配式建筑将会由政策推动的阶段进入市场内生驱动的阶段，成为建筑业现代化转型发展的主要推动力量。

以推动装配式建筑产业规模化发展为目的，组织当地主管部门、高校科研机构和骨干企业一起开展地方装配式建筑技术标准编制工作。编制团队对辖区内各个在建装配式项目进行调研，全面整理出预制构件在设计、生产、运输、安装等各个环节的技术衔接问题，然后制定了统一的构件模数协调规则以及接口连接标准，确定了构件质量验收的具体判定指标。标准发布之后，区域内各个预制构件生产企业按照新的标准进行生产，不同企业生产的构件可以互相替换使用，从而降低采购成本、减少库存压力。多个施工项目显示，标准统一之后构件进场验收的时间明显缩短，现场安装效率大大提高，因为尺寸偏差造成的返工问题大大减少。主管部门依靠统一的标准体系来整理、规范施工质量监督工作，从而提高监管效能，整个区域装配式建筑产业进入有序高效的新的发展阶段。

4 结束语

装配式建筑施工技术发展是建筑业现代化进程中的一个重要问题。目前，在政策扶持和技术进步的双重推动之下，装配式建筑产业正处在重要的转型时期。面对构件质量控制不到位、技术标准体系滞后、人才和产业链协同缺失等现实问题，各方应该形成合力，不断推进技术创新和制度建设。随着智能化建造、绿色低碳理念的不断融合、标准化体系的不断完善，装配式建筑施工技术必将迎来更加高质量、更具活力的发展新局面，为我国建筑业转型升级做出重要贡献。建筑从业人员要顺应时代发展潮流，以开放创新的态度积极投身装配式建筑技术研究和实践，用精益求精的工匠精神推动装配式建筑产业行稳致远，为建设现代化建筑强国做出贡献。

参考文献：

- [1] 王娜,于翠霞,张秀娟.装配式建筑施工技术的应用现状与发展趋势分析[J].安家,2025(03):79-81.
- [2] 王茹,廖文涛,刘清楠.装配式建筑质量信息模型构建[J].土木工程与管理学报,2019,36(06):8-16.
- [3] 张爱琳,梁爽.基于装配式建筑施工偏差预测的应用[J].土木工程与管理学报,2019,36(02):109-113.
- [4] 曹西,缪昌铅,潘海涛.基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1233-1237.
- [5] 王英.影响装配式建筑构件连接节点质量的因素分析[J].混凝土,2024(12):175-177.

数字化管理对减速电机生产效率的提升路径研究

王传强, 马文迪*

(淄博传强电机有限公司, 山东 淄博 255200)

摘要 减速电机行业存在生产流程衔接不畅、资源配置欠合理等状况, 严重限制生产效率的提高。鉴于数字化管理技术的发展态势, 本研究针对减速电机生产全过程的难点, 提出一套覆盖设计、制造、检测各环节的数字化管理方案。通过搭建数字化管理平台、布置智能监测终端、优化流程管控方式, 实现生产各环节数据的互通与精确管控。研究表明, 该方案能够有效突破传统生产管理的瓶颈, 增强生产协同性与管控精准度, 为减速电机行业的高质量发展提供实践参考。

关键词 数字化管理; 减速电机; 生产效率; 智能管控; 流程优化

中图分类号: TP273; TH132

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.024

0 引言

减速电机作为工业传动的核心部件, 在工业自动化、机器人等众多领域得到广泛应用, 其生产效率直接关系到行业发展质量。在传统生产模式下, 管理手段较为粗放, 数据传递存在滞后性, 致使生产损耗较高、交付周期偏长, 难以满足行业高质量发展的需求。结合数字化技术在制造业中的应用成果, 构建适配减速电机生产特性的数字化管理体系^[1]。通过技术融合与流程重构, 解决生产管理中的关键难题, 验证数字化管理对生产效率的提升作用, 为行业数字化转型探寻可行路径, 以推动减速电机行业顺应时代发展, 提升整体竞争力, 满足市场对高效、优质产品的需求。

1 数字化管理理论及相关技术发展概况

1.1 数字化管理理论

数字化管理以数据为核心, 依靠计算机技术、网络技术与数据处理技术, 对生产经营全流程实施精准管控与高效协同。其关键在于实现管理流程数字化、数据资源集约化、决策支持智能化, 打破传统管理的信息壁垒, 提高管理效率与管控精度^[2]。近年来, 数字化管理在制造业的应用日益广泛, 相关理论不断完善, 形成“数据采集—分析—决策—执行”的闭环管理体系, 为减速电机生产效率提升奠定了坚实的理论基础, 相关技术应用成熟度逐年上升。

1.2 工业互联网技术

工业互联网技术是数字化管理的核心支撑, 借助工业互联网平台实现生产设备、生产流程、管理系统的互联互通。其融合物联网 (Internet of Things, IoT)、云计算 (Cloud Computing)、大数据分析等技术, 可实现生产数据的实时采集、传输与处理, 为生产决策提供数据支撑^[3]。工业互联网平台具备设备接入、数据存储、模型分析等核心功能, 能将减速电机生产中的各类设备、人员、物料等要素纳入统一管理体系, 实现生产全流程的可视化、可追溯管控。

1.3 智能检测与预警技术

智能检测与预警技术是数字化管理中风险防控的关键, 通过部署各类传感器与检测设备, 实时采集减速电机生产过程中的关键参数, 结合数据模型进行异常识别与风险预警^[4]。该技术可实现生产缺陷、设备故障的提前预判与及时处理, 减少生产中断与产品损耗。目前, 智能检测技术已能对减速电机齿轮精度、轴承间隙等关键参数进行精准检测, 预警响应时间控制在毫秒级, 为生产效率提升提供重要保障, 技术应用门槛逐渐降低。

2 减速电机生产现状及数字化管理适配性分析

2.1 减速电机生产现状

当前减速电机生产多以批量生产为主, 核心环节有齿轮加工、轴承装配、整机调试等, 生产过程存在

作者简介: 王传强 (1975-), 男, 专科, 研究方向: 减速电机。

*通信作者: 马文迪 (1986-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 减速电机。E-mail: wsf20250509@163.com

诸多难点^[5]。齿轮加工环节精度管控依赖人工经验，加工误差率达 3.2%；装配环节采用人工分拣物料，分拣效率为 120 件/h，误拣率 0.8%；整机调试环节缺乏实时监测，故障排查时间平均达 4.5 h/台。在传统管理模式下，各环节数据孤立，生产计划调整滞后，导致生产周期平均为 72 h/台，设备利用率仅为 68%，难以满足市场快速交付需求。

2.2 数字化管理适配性分析

为清晰呈现数字化管理与减速电机生产各环节的适配性，明确应用重点，结合生产核心环节构建适配性分析表，为后续方案设计提供依据（见表 1）。

表 1 减速电机生产环节与数字化管理适配性分析

生产环节	适配技术	适配重点	适配等级
齿轮加工	工业互联网 + 智能检测	精度实时管控	高
轴承装配	物联网 + 物料管理	物料精准分拣	高
整机调试	智能预警 + 数据分析	故障快速排查	中
生产计划	大数据 + 智能调度	计划动态调整	高

由表 1 内容所示，涵盖减速电机生产四大核心环节，清晰呈现各环节适配的数字化技术、核心重点及适配等级。齿轮加工、轴承装配、生产计划环节适配等级均为高，表明数字化管理在这些环节可发挥显著作用，重点解决精度管控、物料分拣、计划调整等难点；整机调试环节适配等级为中，需结合现有检测设备优化预警模型，提升故障排查效率。各环节适配技术与重点的明确，为数字化管理方案的针对性设计提供了精准依据，确保方案贴合生产实际需求。

2.3 数字化管理应用瓶颈

当前减速电机企业数字化管理应用存在多重制约因素。在设备层面，老旧设备占比偏高，约 70% 的传统加工装备未配置数据采集模块，无法满足生产数据实时上传需求。在数据层面，各环节信息格式缺乏统一标准，数据互通率维持在 45% 左右，形成信息孤岛，制约跨流程协同管控。在人才层面，兼具数字化管理能力与减速电机生产技术的复合型人员缺口接近 30%，系统部署后难以深度嵌入实际生产场景^[6]。设备基础薄弱、数据标准不一、专业人才短缺三重因素相互交织，直接制约数字化管理效能释放，需在方案设计中针对性破解。

3 减速电机生产数字化管理方案设计

3.1 数字化管理平台搭建

数字化管理平台搭建：搭建基于工业互联网的减速电机生产数字化管理平台，采用云服务器部署，硬件

配置为中央处理器（Central Processing Unit, CPU）Intel Xeon E5-2690 v4、内存 32 GB、存储容量 1 TB，实现生产全流程数据的集中管理。平台集成生产计划管理、设备管理、物料管理、质量检测四大模块，支持数据实时采集、分析与可视化展示^[7]。平台接入标准采用 OPC 统一架构（OPC Unified Architecture, OPC UA）协议，确保不同设备、系统的数据互通，数据传输速率不低于 100 Mbps，数据存储周期不少于 1 年，满足生产数据追溯与分析需求。平台架构支持模块扩展与接口调用，为生产决策提供精准数据支撑。

3.2 各环节数字化管控设计

减速电机生产涵盖齿轮加工、轴承装配、整机调试、设备运行等环节。传统模式依赖人工经验，管控精度有限。数字化管理将工业互联网与智能检测技术融入生产流程，各环节关键参数实现实时采集与动态调整。表 2 选取四项核心指标进行对比，展示传统与数字化条件下的管控差异。

表 2 减速电机生产各环节数字化管控指标对比表

生产环节	管控参数	传统管控值	数字化管控值
齿轮加工	加工误差	≤ 3.2%	≤ 0.8%
轴承装配	误拣率	0.8%	0.1%
整机调试	故障排查时间	4.5 h/台	1.2 h/台
设备运行	利用率	68%	85%

表 2 分析表明，齿轮加工环节，加工误差传统管控值 ≤ 3.2%，数字化管控值 ≤ 0.8%，管控精度显著提升。轴承装配环节，误拣率传统管控值 0.8%，数字化管控值 0.1%，装配环节差错率大幅降低。整机调试环节，故障排查时间传统管控值 4.5 h/台，数字化管控值 1.2 h/台，故障处理效率大幅提高。设备运行环节，利用率传统管控值 68%，数字化管控值 85%，设备运行效率明显提升。各生产环节数字化管控指标均优于传统管控，生产过程质量与效率得到全面强化。

3.3 风险预警体系设计

构建减速电机生产数字化风险预警体系，依托数字化管理平台采集设备运行、生产质量、物料供应等关键数据，设置三级预警阈值。在设备运行方面，监测电机转速（单位：r/min）、轴承温度（单位：℃）等参数，一级预警温度 ≥ 85℃，二级 ≥ 95℃，三级 ≥ 105℃；在生产质量方面，监测齿轮精度（单位：mm），预警阈值偏差 ≥ 0.02 mm；在物料供应方面，预警库存低于安全库存的 15%。预警响应采用声光报警 + 短信通知模式，响应时间 ≤ 5 s，结合异常数据追溯功能，实现风险提前防控，减少生产中断损失^[8]。

3.4 数字化管理人才培育与设备适配改造

针对70%的老旧加工装备未配置数据采集模块的现状,完成该类设备的模块加装作业,采用OPC UA协议实现设备联网互通,保障设备数据传输速率 ≥ 100 Mbps。结合企业复合型人才缺口接近30%的实际情况,开展生产全流程数字化管控实操培训,培训覆盖平台四大核心模块,参训人员实操考核通过率达95%以上。设备改造与人才培育同步落地,破解设备基础薄弱、专业人才短缺的现实问题,为数字化管理体系的稳定运行提供硬件与人力支撑。

4 数字化管理方案实施效果验证

4.1 实施流程与步骤

选取某中型减速电机生产企业作为试点,实施数字化管理方案,实施周期为6个月,分三个阶段推进。第一阶段(1~2个月)完成老旧设备改造,为70%的传统加工设备加装数据采集模块,实现设备联网;第二阶段(3~4个月)部署数字化管理平台,完成各模块调试与人员培训,确保操作人员熟练掌握系统操作;第三阶段(5~6个月)全面推行数字化管控与风险预警体系,优化生产流程,收集生产数据,对比实施前后生产效率指标,验证方案效果,确保方案稳定运行。

4.2 实施效果数据对比

为验证数字化管理方案在生产效率层面的实际效用,本次研究选取试点企业作为分析对象。通过梳理企业在方案落地阶段的核心生产运行指标,系统对比指标在实施环节的阶段性变化特征^[9]。以实际运行数据为支撑,清晰界定方案应用带来的提升效果,同时通过规范的数据核验流程,保障各项分析结论的真实性与可追溯性。

表3 数字化管理方案实施前后核心指标对比表

核心指标	实施前	实施后	提升幅度
生产周期	72 h/台	48 h/台	33.3%
生产合格率	92.5%	98.2%	5.7%
单位生产成本	860元/台	750元/台	12.8%
月产量	1 200台	1 800台	50%

表3清晰呈现了实施数字化管理方案后的核心指标变化,生产周期从72 h/台缩短至48 h/台,提升幅度33.3%,依据生产流程优化后各环节耗时统计;生产合格率从92.5%提升至98.2%,提升5.7%,得益于质量实时检测与异常预警;单位生产成本从860元/台降至750元/台,下降12.8%,源于物料损耗减少与设备效率提升;月产量从1 200台提升至1 800台,增幅50%,

基于设备利用率提升与生产协同效率改善,各项数据均通过试点企业实际生产统计得出,真实可靠。

4.3 方案可行性与创新点

试点实施结果表明,数字化管理方案可有效提升减速电机生产效率,各项核心指标均达到预期目标,方案具备较强的可行性与推广价值。创新点体现在两方面:一是构建“平台+终端+预警”的全流程数字化管控模式,打破传统生产各环节信息壁垒,实现数据互通与精准管控^[10];二是结合减速电机生产特点,优化风险预警阈值设置,实现设备故障、质量缺陷的提前防控,填补了减速电机生产数字化风险预警的行业空白,为同类企业数字化转型提供了可复制的实践经验,推动行业整体数字化水平提升。

5 结束语

针对减速电机生产效率偏低、管理粗放等问题,构建了涵盖平台搭建、环节管控、风险预警的数字化管理体系,通过试点实施验证了方案的有效性,成功破解了传统生产中的核心难点,实现生产效率与产品质量的双重提升,但数字化管理平台的智能化调度能力仍有提升空间,对小型企业的适配性需进一步优化。未来需结合人工智能技术,完善平台智能决策功能,优化方案适配性,降低应用成本,推动数字化管理在减速电机行业的全面普及,助力行业高质量发展。

参考文献:

- [1] 郭盼盼.AI赋能档案数字化管理的意义、挑战与实施路径[J].数字与缩微影像,2026(01):34-36.
- [2] 贾敏地.数字化转型对地方国有水投公司预算管理模式的影响与变革研究[J].知识经济,2026(09):103-106.
- [3] 满廷强.基于数字化转型视角的行政事业单位财务管理研究[J].知识经济,2026(09):84-87.
- [4] 王耀祖.数字化管理智能创新联合实验室成立[J].纺织服装周刊,2026(05):19.
- [5] 张鑫.数字化转型背景下企业工商管理策略研究[J].现代营销,2026(04):124-126.
- [6] 赵雄宇.面向数字化管理的智能制造质量检测中计算机视觉识别算法的改进研究[J].信息记录材料,2026,27(03):191-193.
- [7] 李欣遥.基于数字化管控平台的建筑企业智能化管理转型研究[D].济南:山东师范大学,2025.
- [8] 陈元.JM公司生产管理数字化的问题与对策研究[D].扬州:扬州大学,2025.
- [9] 周孟洋.基于数字化运用视角下的H工厂滤棒供应链库存管理优化研究[D].昆明:云南财经大学,2025.
- [10] 彭艳琴.数字化转型背景下业财融合驱动司库管理效能提升研究[J].知识经济,2026(09):135-138.

电力建设中分布式光储运营效率提升路径分析

涂建

(四川蜀兴智慧能源有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 在新能源接入规模扩大的背景下, 电力建设在负荷波动、调节压力方面呈现愈发明显的复杂性。分布式光储因具备源储结合特点, 被视为电力工程建设中提升能源利用水平的重要方向。基于此, 本文围绕校核组件布局、匹配充放节奏、细化设备巡检以及协同区域调度等环节展开分析, 探讨电力建设中分布式光储运营效率提升路径, 旨在为电力建设单位构建更具适应性的运营管理思路, 为后续优化运营方向提供有益参考。

关键词 分布式光储; 电力建设; 运营效率

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.025

0 引言

随着电力建设向数字化方向发展, 分布式光储系统在工程项目中的应用日益广泛。然而, 在多变的施工环境下, 分布式光储的运行状态仍容易受到多种因素影响, 难以充分发挥能效。建设单位在推进项目建设时, 只有在布局设计、运行管理等方面形成系统化方法, 才能够使电力工程能源利用更加高效稳定。因此, 探讨电力建设中分布式光储运营效率提升路径, 对促进工程建设高质量实施具有重要意义。

1 电力建设中分布式光储运营效率提升的现实意义

分布式光储系统能够在源侧实现清洁供能, 同时具备削峰填谷的优势, 建设单位提升其运营效率具有直接而深远的意义。分布式光储若运行状态不稳定, 发电量受限, 难以发挥系统价值, 建设单位在项目投资回报、设备利用水平等方面都会受到影响。提升运营效率能够让光伏发电与储能释放更大协同效应, 使电力建设项目的整体能量管理更加灵活, 让绿色能源在项目全周期内保持较高的利用率。在实际建设中, 建设单位提升分布式光储运营效率, 可以有效降低外购电量依赖, 使发电侧的自给能力增强, 为用电结构带来更高的稳定性。同时, 提升运营效率还能促使储能系统更准确地响应用电负荷变化, 使充放电安排更贴合实际需求, 减少能量浪费, 缓解峰时压力。对建设单位而言, 这不仅有助于优化项目的能源成本结构, 也能推动电力建设向数字化方向发展, 使项目具备更强的适应性^[1]。随着新能源占比不断提升, 分布式光储的运营效率已经成为建设单位保障电力工程可持续发展的主要因素, 其现实意义愈加凸显。

2 电力建设中分布式光储运营效率受限的关键问题

2.1 布局匹配不足

在分布式光储建设中, 组件布局若与建筑荷载不匹配, 会使受力分布不均, 影响结构安全。建设单位在前期未充分核定屋面承载能力, 组件排布容易出现倾角设置不当、支架传力路径模糊等情况, 使光照利用不足, 也使支架振动的风险逐步累积。若屋面遮挡环境未被准确评估, 日照条件变化得不到量化, 早晚时段的发电波动会更加明显, 使光伏部分无法维持稳定输出。此外, 布局不合理会导致施工难度提升, 使安装、接线、维护等操作受到限制, 进一步降低运营效率。

2.2 策略调整滞后

分布式光储的运行依赖充放电策略与负荷规律保持一致, 但若建设单位未及时修正策略, 就会使储能利用率下降。在缺乏负荷曲线支撑时, 储能系统容易在光照强度高时未能吸收足够电量, 在负荷上升时又缺乏可供输出的储能, 造成调节能力不足。同时, 固定化的控制模式会导致电池过度循环, 使性能衰减加快, 也无法结合峰谷电价实现经济调节, 降低系统整体效益。若建设单位未引入预测模型, 光伏出力变化更难同充放节奏形成对应关系, 储能容易出现“该充不充、该放不放”的情况, 使能量流动效率受限^[2]。

2.3 巡检深度不足

光储系统设备多、节点复杂, 巡检若不够细致, 就会使关键风险无法被及时发现。建设单位在巡检内容设置上若仍停留在粗放模式, 关键节点缺乏专项检

作者简介: 涂建(1981-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 分布式光储建设与运营管理、购售电管理工作。

查,使温差异常、接触不牢、电压偏差等隐蔽性问题累积,导致发电效率与储能能力持续下降。同时,缺乏标准化记录模板,使巡检数据无法形成趋势判断,难以掌握设备老化规律。如果监控节点未纳入检查重点,还可能出现数据延迟、信号不稳等情况,使系统判断偏离设备真实状态。

2.4 协同体系缺失

建设单位在未搭建协同平台的情况下,发电、储能与用电信息会分散在不同系统,使调度人员难以及时判断负荷变化。缺乏统一的数据入口会导致峰谷波动无法及时识别,调节动作随之延迟,影响系统运行稳定性。若没有预测模型,区域调度只能依赖人工经验,调节精度不足,无法实现跨场站协同补偿。此外,权限不统一、规则不统一会使储能装置无法形成联动机制,使局部波动无法在区域内快速平衡。

3 电力建设中分布式光储运营效率提升的实践路径

3.1 优化组件布局,适配建筑荷载

由于受光照强度、温度、组件角度和方位、阴影遮挡等因素的影响,光伏出力是随机和波动的。为了更好地掌握光伏出力的规律,建设单位需要对光伏出力的数据进行聚类划分,形成不同场景下的典型特征,有助于提高分布式光储系统选址定容的鲁棒性。因此,建设单位在推动光储系统部署时,需要把结构安全与能效提升的目标统一起来,使布局优化成为提升系统可靠性的关键环节。依据这种方式,建设单位不仅能够确保结构安全,还能让分布式光储系统在电力建设中实现更高的运营效率,为后续能量管理与系统扩容奠定稳定基础^[3]。

在实际布局过程中,建设单位以建筑结构检测结果为依据,对屋面荷载能力进行分区分析,并将分布式光储设备的重量参数细化到各个环节,使每个受力点都具备明确计算依据。荷载分布确定后,调整组件排列方式,让支架受力路径同建筑原有结构保持一致,避免出现局部荷载过度集中的问题。受力均衡后,进一步优化组件倾角与朝向,比对不同角度的光照利用率,确定更适合当地光照条件的布置方案,提升光伏发电效率。在布局节距设置中,结合遮挡分析结果,合理控制组件之间的间距,使光照损失处于可接受范围。同时,利用软件模拟不同时间段的遮挡变化,让布局方案具备全天候适应能力,避免早晚时段发电量出现明显波动。在排布方式确定后,建设单位围绕施工工艺再审查,使支架安装、接线走向与屋面结构相适应,提高施工稳定性,减少后期维护难度。光伏部

分的布局完成后,统筹考虑储能设备的安装位置,避免因散热不良对运行造成影响。为提升分布式光储系统的整体运营效率,可将组件布局结果同监控系统参数进行关联,在关键节点植入监控点,使后期运行能够精准定位发电异常来源。这样的持续优化机制,可以使分布式光储系统在电力建设场景中保持稳定的产能水平,为建设单位实现绿色低碳发展提供支撑。

3.2 动态调整充放,匹配用电时段

光伏输出具有波动性,用电负荷呈现明显早晚峰特征,如果充电与放电节奏脱节,储能系统容易出现闲置或过度放电,不利于资源利用。基于此,构建负荷曲线、分析时段差异,使储能行为同实际需求保持一致,可以形成更合理的能量流动方式。在明确需求规律后,动态调整储能控制策略,使光伏发电得到更高比例的消纳空间,同时减轻峰值时段的供电压力^[4]。此类做法能够在整体上减少用电波动,让分布式光储系统在电力建设中发挥更高经济效益,为前期提出的运营效率提升目标奠定技术基础。

建设单位在推进分布式光储系统运行管理时,需建立分段化充放电计划,使储能系统能够依据用电时段自动切换运行模式。在掌握用户侧负荷特性后,将全天用电过程拆分为多个区段,并为每个区段设置独立的充放电规则。在午间光照条件良好的阶段,提升充电功率,使储能设备充分吸收富余电量,减少光伏限电现象;傍晚负荷上升的时段,设定适合的放电阈值,使储能装置持续输出电量,支撑局部配电系统保持平稳运行;夜间负荷较低的阶段,调整储能设备的充电下限,使储能维持适度电量,避免过度循环造成的性能衰减,这些步骤能够使储能利用率保持在合理区间。在持续运行过程中,建设单位搭建监测模型比对光伏出力数据与实时负荷,使充放电计划不再固定执行。在光伏出力时期和负荷低谷期,储能模组灵活充电,为系统储备电能;而在电网负荷高峰期,储能模组则释放电能,为电网提供额外支持,平滑了整体的负荷曲线。同时,基于光伏出力预测的实时调度策略提升了分布式光储系统并网的有序性,具有更高的实时性和适应性,有助于调节负荷峰谷差,进而提高了电网稳定性。通过连续调整充放电策略,使储能系统运行与实际需求保持一致,充分利用光伏发电,缓解峰值压力,进而为后续规划提供可复制的技术路径。

3.3 细化巡检清单,聚焦设备节点

在分布式光储系统的长期运行中,由于设备数量多、节点分散、运行状态受环境影响明显,使运营效

率易因局部故障或隐蔽缺陷而下降。建设单位若缺乏精细化巡检机制,容易忽略一些常见问题,系统的功率输出与储能充放稳定性都会受到影响。鉴于分布式光储设备结构繁杂,需要围绕关键节点制定明确的巡检清单,将电气连接、温控管理、防护装置等项目逐项拆分,使巡检过程具有可操作性。细化巡检清单不仅能够提升发现问题的及时性,还可以为实现电力建设阶段的运营效率目标提供基础支撑,让后续设备维护具备可靠依据。

在实际落地过程中,建设单位依据分布式光储系统的技术特点,围绕“明确设备节点、具体巡检项目、清晰处理流程”的原则搭建巡检体系,以提升整个电力建设项目的运营效率。建设单位围绕逆变器节点,设置运行状态读取、内部温度比对波动等项目,使巡检人员能够及时判断负荷变化,确保逆变器在稳定区间内运行。同时,将电池模组作为重点节点,细化模组温差、端电压一致性、BMS 告警状态等项目,使能量存储的稳定性得到持续监控,并减少容量衰减带来的能量损失。在此基础上,建设单位将所有节点纳入巡检范围,设置接线紧固、熔断器状态、线缆护套完整性等检查项,提前识别隐蔽性强的故障。巡检清单中还加入通信与监控节点,包括数据采集器响应速度、无线信号稳定性等内容,使信息链条保持完整,为提升分布式光储系统的整体运营效率奠定基础。在执行过程中,建设单位依据项目规模,将巡检清单分级应用于例行巡检、专项巡检与季节性巡检,减少重复劳动的同时确保节点状态在可控区间。为保证巡检结果能够真正用于提升电力建设运营效率,建设单位需建立缺陷记录表,完整登记每次巡检的异常参数,使风险趋势能够被持续追踪。该做法不仅可以回应提升运营效率的目标,还能充分发挥分布式光储在电力建设中的价值,为系统的长期稳定运行提供持续保障。

3.4 搭建协同平台,实现区域调度

分布式光储装置数量多、分布广、状态差异明显,如果缺乏统一的数据入口,就难以形成稳定的负荷预测结果,也无法在波动出现时迅速组织调度动作。建设单位在推进运营效率提升时,需要借助协同平台打通发电侧、储能侧和用能侧的数据,集中呈现资源状态,使信息共享机制成为优化调度的基础。建立区域级协同体系,能够顺利整合多类资源,使各节点之间保持稳定互动,使电力建设过程在响应速度上形成更可靠的运营格局,从而实现提升效率的目标^[5]。

建设单位在推进协同平台建设时,需将分布式光

储的实时运行信息作为核心内容,统一数据接口收集发电功率、储能容量等内容,使区域内的各类资源状态形成可视化图层。在梳理数据结构后,将光伏侧的出力曲线与典型用电特征同步加载至平台,使调度人员能够直观识别峰谷变化,为后续的区域调节提供依据。为使平台具备稳定的在线分析能力,建设单位还配置负荷预测模型,使区域调度不再依赖人工判断,提高运营效率。平台搭建完成后,设置多级调度权限,使不同区域、不同类型的光储设备都能在统一机制下完成协调动作,并且在明确权限分配后,将储能响应策略、光伏接入规则及调度周期全部纳入统一的控制逻辑,使区域内的资源在波动出现时能够快速完成联动。为保障执行质量,建设单位需将设备运行告警、储能健康评估及负荷偏差提示同步接入平台,强化调度信息的准确性。在实际运行阶段,借助协同平台对区域内的光储资源开展滚动调节,设定合理的充放电窗口,使储能单元匹配各类负荷场景,并在局部波动出现时及时进行功率补偿。建设单位结合电力建设的特点,对平台运行效果进行周期性复核,持续改善响应质量,形成符合区域特征的协同调度体系。

4 结束语

建设单位通过围绕组件布局优化、充放策略匹配、巡检体系细化以及区域协同调度等方面形成系统化管理路径,能够有效提升分布式光储在电力建设中的运营效率。这不仅可以强化光伏发电的稳定输出,降低外购电量依赖,还能让储能系统在不同负荷场景下保持灵活调节能力,使能源利用过程更加安全。未来,建设单位仍需在智能化调度方面持续探索,进一步释放分布式光储的系统价值,为电力建设的绿色发展创造更大空间。

参考文献:

- [1] 李毅博.光储直柔在整县域屋顶分布式光伏开发中的应用[J].电力设备管理,2025(16):142-144.
- [2] 张魏娜.分布式光伏发电系统的应用运用分析[J].产品可靠性报告,2025(08):142-143.
- [3] 段立国.分布式光储系统在配电网中的电压支撑能力分析[J].电力设备管理,2025(13):98-100.
- [4] 孙树敏,邢家维,程艳,等.基于改进MODRL的分布式光储多目标优化调度策略[J].供用电,2025,42(06):13-21.
- [5] 庄坤,范鹏程,姜晨宇,等.含分布式光储系统的农灌园区的用电策略优化[J].储能科学与技术,2025,14(07):2782-2790.

数字化背景下光伏储能项目管理模式创新与实践研究

黄戴特, 曾志春, 徐高照*

(浙江宏博星辰能源有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要 数字化技术的深度演进, 重新定义了光伏储能项目的管理边界, 项目全生命周期运行已从传统的单一设备管控模式, 全面迈入发电、储电、智能调度与全流程运维协同联动的全新发展阶段。光伏储能系统具有设备类型多、数据链条长、运行波动快和控制耦合强等特征, 传统分散式管理已难以承接复杂工程场景下的协同需求。通过项目管理实践可知, 数据分散、调度脱节与运维滞后已成为制约项目质量、效率与收益释放的关键堵点。依托一体化数字平台、智能调度模型与数字孪生运维体系, 项目管理开始由经验驱动转向数据驱动。此类管理模式重构, 进一步增强了光伏储能项目的协同性、安全性与精细化水平。

关键词 光伏储能; 数字化管理; 项目协同; 智能调度; 数字孪生运维

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.026

0 引言

新能源工程持续扩容后, 光伏与储能已不再是彼此分离的建设单元, 而是贯穿发电、储电、调度、并网与运维环节的复合型项目系统。项目建设及运行阶段, 设备接口适配、控制逻辑联动、运维任务衔接与管理流程组织彼此牵连, 传统依赖分系统管理和人工传递信息的做法, 面对多源数据并行流动、运行状态持续变化的场景时, 已逐渐暴露出协同迟缓、判断滞后和衔接不畅等短板。尤其在工程周期拉长、装置规模扩大、运行目标增多的背景下, 项目管理关注点已不再停留于进度、成本和质量控制, 还进一步延伸到调度响应、状态识别、风险预警与全过程协同。数字技术不断嵌入项目管理端口后, 为光伏储能项目管理模式重塑、数据链条贯通与管理精度优化提供了更坚实的技术支撑。

1 数字化背景下光伏储能项目管理的技术基础

1.1 光伏储能系统结构与运行特征

光伏储能项目由光伏阵列、逆变器、储能电池簇、电池管理系统、能量管理系统及并网单元共同构成, 系统边界已由单一发电设备扩展为“发电—储电—调度—并网”复合体。工程侧常见直流侧电压等级约为 1 000 V 或 1 500 V, 储能系统则多按额定功率与容量成组配置, 如 20 MW/40 MWh, 以支撑 2 h 左右的调节需求。

在运行过程中, 光伏出力受辐照度、组件温升与云层扰动牵动, 短时波动较突出; 储能端需依照荷电状态、充放电倍率及并网指令同步调整。BMS 负责单体电压、温度与一致性监测, EMS 承担功率分配与策略下发, 两者协同质量直接关联系统安全边界与调节精度。由此可见, 光伏储能项目并非单纯设备拼接, 而是电力装备、控制逻辑与数据链路深度耦合的系统性工程。

1.2 数字化技术在新能源工程中的应用基础

数字技术进入新能源工程后, 最先改变的是数据获取方式与管理颗粒度。借助物联网终端, 组件电流、电压、温度、逆变器运行状态以及储能 SOC、SOH 等关键变量可按秒级或分钟级频率持续采集, 现场信息不再停留于分散记录。云平台承担海量数据汇聚、存储与调用任务, EMS、SCADA 与运维模块则在统一接口下完成联动, 项目管理由单点查看转入全局感知。依托历史功率曲线、气象预测结果和负荷侧信息, 平台可形成短时发电预测、充放电计划推演与异常工况识别能力。这样一来, 施工管理、运行调度与设备运维开始共享同一数据底座, 项目决策更接近实时状态, 也更便于后续精细考核。

1.3 光伏储能项目数字化管理体系构成

光伏储能项目数字化管理体系通常由外部数据层、现场采集层、平台中枢层、业务应用层和决策评价层

作者简介: 黄戴特 (1984-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 光伏储能项目管理。

*通信作者: 徐高照 (1992-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 光伏储能项目管理。E-mail: 592061969@qq.com

递进构成。外部层接入气象、负荷、电价与电网调度信息，现场层汇聚组件、逆变器、电池簇及辅控设备运行参数，数据刷新周期往往控制在秒级至 5 min 级区间。平台中枢以数据中心、EMS 和智能运维模块为核心，承担清洗、建模、告警与指令下发任务；业务层再把这些结果投向施工进度控制、储能调度优化、故障诊断与检修排程。其关键不在系统堆叠，而在接口标准、时序同步与模型闭环是否稳定。只有把“采集—分析—执行—反馈”链条真正打通，数字化管理体系才不只是展示平台，而能转化为项目效益评估与管理优化的实际工具（见图 1）。

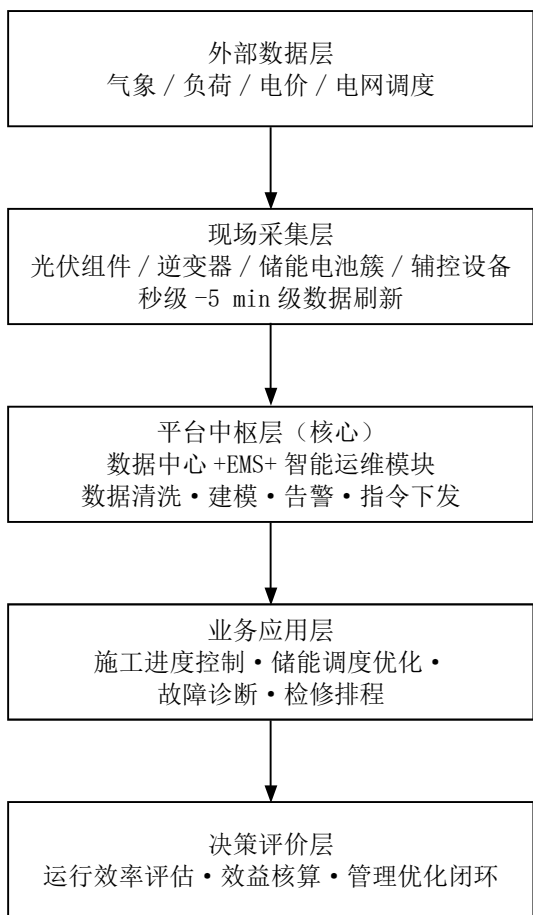


图 1 光伏储能项目数字化管理框架

2 光伏储能项目管理模式面临的主要问题

2.1 项目数据分散导致协同效率不足

光伏储能项目往往同时接入 SCADA、BMS、EMS、视频监控及工程管理平台，不同系统多由异构厂商分别建设，通信协议、数据口径与刷新周期并不统一，现场常见秒级监测数据与 5 min 级统计数据并行存在，给横向比对带来明显阻滞。管理人员在判断组件异常、

逆变器负载率或储能 SOC 变化时，往往需要在多个界面之间反复切换，数据抽取、清洗与匹配链条偏长，信息传递存在时滞。尤其在 100 MW 级以上项目中，采集点位可达万级以上，若缺少统一数据中台与标准接口，施工、调度、运维三端便难以形成顺畅协同，项目管理容易停留在“分系统可见、全局不可判”的状态。

2.2 储能调度与发电管理协同不足

光伏出力受辐照波动、云团遮挡和组件温升牵动，短时功率爬坡较快，而储能系统还需同步响应并网考核、峰谷调节和功率平滑等要求，二者在时间尺度与控制目标上并不天然一致。若项目缺乏统一调度中枢，发电预测结果难以及时传递至储能控制端，EMS 策略更新滞后，便容易出现 SOC 维持区间偏离、2 h 储能容量释放不充分或充放电切换过密等问题。部分项目虽然配置了储能单元，但调度仍以静态阈值控制为主，未把气象预测、电价信号与负荷需求联动纳入同一模型，结果往往是储能参与了运行，却没有真正嵌入发电管理主链条，系统综合收益也就难以充分释放。

2.3 项目运维管理缺乏智能化支撑

当前，部分光伏储能项目运维仍偏重人工巡检、台账记录与事后处置，对隐蔽性故障、渐进性衰减和多设备耦合异常的识别深度不足。以 100 MW 级电站为例，组件数量往往达到十万块以上，逆变器、汇流箱、电池簇与温控单元同步运行，巡检对象多、路径长、频次高，仅靠人工经验很难解决热斑、失配、绝缘异常及电池一致性劣化等问题。储能侧一旦 SOH 下降、温差扩大或单体电压离散度上升，若缺少在线诊断与预警模型，故障发现时间就会后移，轻则抬高检修成本，重则压缩系统可用容量并牵连运行安全。由此可见，运维管理若没有智能分析支撑，项目后端管理便很难跟上设备规模扩张节奏。

3 数字化驱动下光伏储能项目管理模式创新与实践路径

3.1 构建一体化数字平台，推动项目协同管理

想要提高光伏储能项目协同效率，前提不是单个系统更先进，而是把监控、调度、施工、运维几条数据链接到同一平台。较稳妥的做法是依托统一数据中台整合 SCADA、BMS、EMS、视频监控及工程管理系统，借助标准化接口打通设备编码、时间戳、测点口径和业务台账，让秒级运行数据、5 min 级统计数据与阶段性施工数据在同一架构下汇聚^[1]。建设阶段，平台可同步跟踪设备到货、安装进度、调试记录和质检结果，形成可追溯的工程履历；运行阶段，则把发电效率、储

能 SOC、SOH、逆变器负载率及告警信息集中展示，管理端据此完成跨专业联动判断^[2]。对于 100 MW 级光伏、20 MW/40 MWh 储能项目而言，这类平台不只是信息展示界面，更是贯穿设计、建设、并网和运维的协同枢纽，能够压缩信息传递链条，减少重复录入与人工核对偏差，进而把项目管理由分散响应推向全流程联动。

3.2 引入智能调度算法，优化储能运行策略

储能系统要真正发挥调峰、平滑和削峰填谷价值，关键不在“装了多少容量”，而在“调度策略是否跟发电侧与电网侧同步联动”。在数字平台支撑下，可把气象预测、历史出力曲线、负荷需求、电价信号及并网约束一并纳入调度模型，对未来 15 min、1 h 乃至日内功率变化进行滚动推演，再由 EMS 生成分时充放电计划^[3-4]。对于常见 2 h 配置的 20 MW/40 MWh 储能单元，若仍沿用固定阈值控制，往往会出现午间消纳不足、傍晚释放偏慢或 SOC 长期停留在非优区间的问题；而引入预测控制与动态优化后，储能可围绕安全 SOC 区间、充放电倍率和功率响应边界灵活调整。这样做的价值在于把光伏出力波动与储能调节动作放到同一控制逻辑中处理，减少无效充放电和频繁切换带来的损耗，推动储能利用率、调节精度与项目经济性同步改善。

3.3 建立数字孪生运维体系，提升项目管理水平

数字孪生运维的核心不只是把现场设备“搬到屏幕上”，而是借助实时映射、状态演化和故障推演，把项目后端管理从被动处置前移到预判干预。具体实施时，可围绕光伏阵列、逆变器、汇流箱、储能电池簇、温控系统和消防单元构建虚拟镜像，将组件温度、发电功率、电池 SOC、SOH、单体压差与系统告警持续映射到模型侧，形成设备—场站—系统三级联动视图^[5-6]。对于 100 MW 级以上项目，组件数量常达十万块以上，电池单体监测点更是呈倍数扩张，传统人工巡检很难及时锁定热斑、失配、绝缘异常和一致性劣化；而数字孪生体系可结合历史曲线与阈值模型，对逆变器异常停机、电池容量衰减、温差扩大等问题提前发出预警。这样一来，检修安排就不再完全依赖经验，而能依托状态诊断、趋势分析和寿命评估展开，既有助于降低运维成本，也能把项目管理精度推向更细颗粒度。

3.4 工程案例：某光伏储能项目数字化管理实践

涟水县五岛湖智慧能源示范站（苏北首座“光储充放检”智慧能源示范站），位于江苏省涟水县五岛湖公园，配套 1.7 MW 光伏阵列、92 kWh 储能系统，配置 1 个 600 kW 液冷超充终端和 21 个直流快充终端，是入选江苏省数据局 2026 年优秀案例的绿色能源项目。接

入气象局光照数据、电力部门电网负荷曲线，搭建一体化智慧管理平台，整合物联网终端采集的光伏出力、储能 SOC 等秒级数据，构建负荷预测模型与智能调度系统。依托平台实现光伏发电、储能调峰、充电服务协同管理，采用智能告警与远程故障诊断模式，替代传统人工巡检，结合峰谷电价差优化储能充放电策略。项目年均发电量约 10 万度，储能年转移电量达 4.8 万 kWh，运维成本降低 30%，现场工作量减少 70%，年均减排二氧化碳 78 吨，600 kW 液冷超充终端 10 分钟可补电至 80% 以上，实现了民生服务与绿色效益的双重提升。

4 结束语

在数字化背景下，光伏储能项目的管理模式经历了从传统分散控制到系统协同的转型，这一变革不仅提升了管理效率，还强化了项目的整体协同性、安全性与精细化水平。依托一体化数字平台、智能调度和数字孪生运维技术的支持，项目管理能够实时获取和分析各类关键数据，快速响应系统动态变化，显著提升了运行效率与经济效益。随着数字技术的深度融入，光伏储能项目管理的创新模式使得各环节更加紧密联动，突破了传统管理方式的局限，增强了项目的灵活性和适应性。数字化转型使得项目管理从依赖经验和人工判断，转向基于数据驱动的智能决策，提升了项目运行的安全性和可控性，为管理团队提供了更加精准的信息支持。通过优化调度策略和运维管理，项目不仅提高了能源利用率，还有效降低了运维成本，提升了可持续发展能力。这种数字化转型不仅促进了项目运行效能的最大化，也为未来更大规模光伏储能项目的管理提供了可行的实践路径。

参考文献：

- [1] 吴建国,徐铭,廖清阳,等.面向能源互联网的智能化运维管控平台研究[J].电子器件,2022,45(03):744-752.
- [2] 张树晓.基于大数据平台的新能源智能化运营监管技术[J].分布式能源,2022,07(01):74-82.
- [3] 陈晓英,楼继开,邱亚鸣,等.光储协同综合智慧能源站自动功率控制系统研究[J].综合智慧能源,2023,45(09):77-85.
- [4] 刘晓艳.基于模型预测-动态规划的微网混合储能能量管理[J].电子器件,2022,45(03):739-743.
- [5] 沈沉,曹仟妮,贾孟硕,等.电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J].中国电机工程学报,2022,42(02):487-499.
- [6] 李成雲,杨东升,周博文,等.基于数字孪生技术的新电力系统数字化[J].综合智慧能源,2024,46(02):1-11.

城镇集中供热系统热能损耗治理与节能运行优化路径研究

闫冬梅, 宋 涛, 周长兴

(临沂智慧新能源科技有限公司, 山东 临沂 276000)

摘要 城镇集中供热系统是我国北方地区城市基础设施的重要组成部分,但其运行过程中普遍存在能源消耗大、输配效率低等问题。本文从热能损耗的系统性入手,系统梳理了热源侧、输配侧、用户侧及控制侧的问题,从硬件系统层和软件层探讨热能治理的技术路径,并提出了基于动态平衡调控的节能运行优化策略。结果表明,通过“数据感知—智能控制—终端补偿—云平台交互”的全链条技术体系,可实现热力平衡率提升至 90% 以上、综合节能率突破 18% 的显著效果。

关键词 集中供热; 热能损耗; 节能运行; 源网荷协同; 智能调控

中图分类号: TU995

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.027

0 引言

我国北方城镇集中供热系统规模居世界前列。相关数据显示,截至 2024 年底,全国集中供热面积已超过 144 亿平方米,供热管网总长度约 65 万公里,形成了覆盖热源生产、管网输配与终端用户的庞大供热网络。2023-2024 供暖季,供热总能耗约 2.22 亿吨标准煤,其中无效能耗约 6 700 ~ 7 800 万吨。随着“2030 碳达峰、2060 碳中和”战略的推进,建筑供热这一碳排放占比超过 10% 的领域,已成为实现“双碳”目标的重要突破方向。本文旨在为我国城镇集中供热系统的节能改造提供理论依据与实践参考。

1 集中供热系统节能技术路线概述

供热系统如何识别出过程中的热损失机理,通过什么技术手段和管理手段可以实现真实有效的节能减排,是目前供热行业中研究重要方向之一。当前行业中供热系统在生产、输送、分配等关键节点上存在不同程度的损耗。鉴于以上情况,本文通过构建感知、预测、调控和优化评估这样的技术路线,引入短期热负荷预测模型和 LSTM 与随机森林算法,在模拟预测短期热需求的同时,优化热源、供水温度以及循环泵频率等,实现源一网一荷的技术、管理优化。最后,通过各项数据进行综合评估,测算能源和碳排放等技术指标(如图 1 所示)。

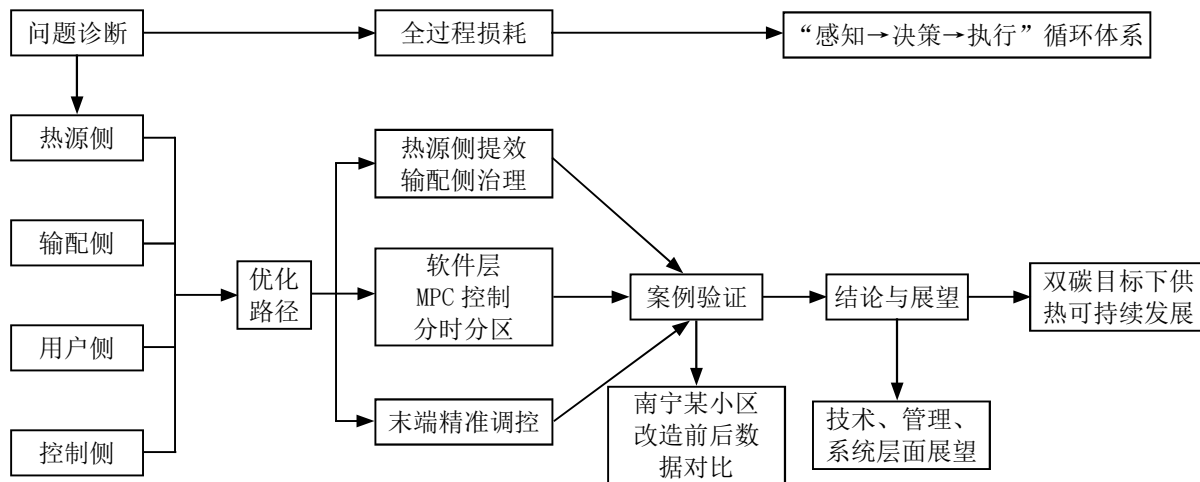


图 1 集中供热系统节能优化研究技术路线图

作者简介: 闫冬梅(1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 供热节能、暖通空调。

2 集中供热系统热能损耗的系统性成因诊断

2.1 热源侧：热电解耦能力不足与负荷跟踪滞后

《中国建设报》2025年10月一篇报道中提及：我国集中供热一直存在的一个痛点，就是“以产定需、大水漫灌”。在某些特殊环节，如供暖初期及末期，温度起伏较大，当热负荷低于设计负荷的60%时，锅炉不得不频繁启停，燃料消耗普遍较高，能量浪费比较严重；对于热电联产机组，在供暖季时常被迫偏离最佳电热比工况运行，导致单位供热量能源消耗量持续上升。以上是当前比较明显的初始能源浪费。

2.2 输配侧：管网物理老化与热桥效应叠加

2025年，各地检修维护供热管网33万公里、改造老化管网1.38万公里。这些大量服役超过十几年的老旧管网系统，保温层材料老化，导热系数劣化。以上种种原因使得形成局部高热流密度的“热桥”，这种阶梯式温降使得一次网、二次网的实际热损失率普遍超过设计规范的8%~10%的预期值，部分极端案例中，二次网回水温度较设计值偏高5~8℃（北京日报报道中，北京莲水怡园小区回水高达42℃，设计约35℃，偏高约7℃），直接削弱了热源的供热效率^[1-2]。

2.3 用户侧：水力失衡与无效过量供热

输送至用户侧的热量，由于管网先天阻力不均及后天调节手段缺失，在楼栋间、单元间、户间呈现出严重的分配失衡。近端用户因资用压头过剩导致流量超标，室内温度过高迫使居民开窗散热，形成直接的无效热能浪费；远端用户则因流量不足长期处于欠温状态。整个系统陷入“大流量、小温差”的运行困境，单位供热面积的水循环量远超设计值，热力平衡度往往低于80%，无效供热成为能耗黑洞^[3]。

2.4 控制侧：多环节协同缺失与智能化水平低下

尽管先进的控制系统可以协调热源、管网与负荷三端的运行，但目前热源、管网、换热站以及用户端之间缺少真正的数据互通，缺少基于统一数据平台的大方向调控，使得例如气候补偿功能在内的多项调控手段难以真正发挥作用，分时、分区控制更无从谈起。结果就使得“热源与管网不匹配、管网与负荷不匹配”的问题始终得不到改善，各个环节无从下手，只能各扫门前雪，使整个供热系统长期、持续的运行在能效低谷^[4]。

3 城镇集中供热系统节能运行优化路径

3.1 硬件层优化：提升系统物理架构能效

3.1.1 热源侧优化：热电联产与余热回收的协同利用
针对热电联产机组在供暖季调峰能力不足的问题，

可以通过热源侧蓄热罐热量储存、电锅炉与吸收式热泵的协同配置构建柔性供热系统，实现热电解耦，机组在夜间低谷电时段优先蓄热、白天高峰电时段减少供热出力，充分将余热回收这一纸面目标落实到实际的生产当中，不仅平衡了热负荷波动，又为风电消纳提供了空间，从而实现能源的梯级利用^[5]。

3.1.2 输配侧治理：保温改造与在线监测结合的漏损管理

在供热管网与热力站保温改造中，采用化学稳定性好、耐老化的材料（气凝胶毡、聚氨酯喷涂等），可显著降低输送环节热损，提升供热系统整体能效。同时，引入分布式光纤测温技术，实现一次管网沿线温度连续监测，将热损定位精度从百米级提升至米级，为精准维修提供决策依据。

3.1.3 末端控制优化：智能阀门与循环泵优化控制

以管网最不利端压差为核心控制基准，在调控系统中，其实静态平衡阀与动态压差平衡阀、电动调节阀的功能差异是非常显著的，静态调压阀没有实时调节能力，不能捕捉管网压力的瞬时波动。但是，动态和电动阀可以通过自动反馈与调节，实现压力与流量的“即调即稳”，使得优化效率大幅上升，这是在传统调控系统改善最有效处理各个运输线路之间的冲突和不平衡的方法之一。

3.2 软件层策略：基于数据驱动的运行调控优化

3.2.1 基于多因素负荷预测的供需动态匹配

短期热负荷预测是集中供热系统实现精准调控、节能降耗的核心前提，传统单一变量预测模型因输入维度有限、预测精度不足，难以适配热负荷的动态波动特性。因此，有必要突破传统仅依赖室外温度单变量预测的方法，引入气象因素、建筑特性及用户行为等多维数据，构建更加全面的热负荷输入特征体系。基于多因素数据驱动的短期热负荷预测模型应运而生，该模型以数据为核心，整合多维度影响因素，结合先进算法构建预测框架，大幅提升短期热负荷预测工程实践表明的高精度与可靠性，为供热系统按需出力、优化运行提供科学支撑。

在算法选型上，模型采用数据驱动的先进算法，重点应用LSTM神经网络与随机森林算法，兼顾时序特征捕捉与非线性关系拟合能力：LSTM神经网络具备强大的时序数据处理能力，可有效挖掘各输入因素随时间变化的规律及相互关联，精准拟合短期热负荷的动态波动特性；随机森林算法则能高效处理多因素间的复杂非线性关系，抵御异常气象数据、用户用热波动

等干扰，提升模型的稳定性与泛化能力。通过多因素输入与先进算法的深度融合，模型可实现对未来 1~24 小时短期热负荷的精准预测，显著降低预测误差^[6]。

3.2.2 基于模型预测控制的源—网—荷协同优化

为解决供热系统大时延、强耦合带来的控制滞后问题，引入模型预测控制策略。该策略以短期负荷预测结果为参考轨迹，以热源出力最小与室温达标为双重目标函数，在线滚动求解未来时域内的最优供水温度与循环泵频率，实现“源随荷动”的前瞻性调控。工程应用结果表明，相比传统 PID 调节方式，该方法在系统能效方面可进一步提升约 3%~5%。

3.2.3 基于建筑热特性的分时分区调控策略

基于建筑热惰性、蓄放热能力及使用场景的差异，打破传统“一刀切”供热模式，结合多因素短期热负荷预测结果，实现“分区适配、分时调节”的精准调控。

分区调控中，划分热负荷分区，依托动态压差平衡阀与电动调节阀实现各分区流量、压力的独立调控，解决热力失衡与支路干扰问题，同时针对不同保温水平区域差异化分配供热量，保障最不利端压差稳定。

分时调控中，结合建筑使用规律、用户行为因素及时段用热规律，联动蓄热罐、吸收式热泵优化能源分配，降低水泵与热源能耗。例如：在西宁昆仑阳光城项目应用中，有效减少供需不匹配导致的热能损耗，为集中供热精准调控提供了可行路径。

4 案例分析与实施效果

为验证前文所述集中供热系统节能降碳集成技术的可行性与实际成效，以西宁市某小区为工程案例开展实践与数据验证。该项目地处高寒地区，针对原有供热系统管网热损失大、热力失衡突出、运行调控粗放、负荷预测精度不足等导致热能损耗偏高的问题，构建了“余热提质+管网降损+输配优化+智能预测”的集成改造方案。

改造核心内容包括：采用吸收式热泵回收 30~40℃ 低品位余热并提质至 60~70℃ 用于供暖；采用气凝胶毡、聚氨酯喷涂新型保温材料替代传统岩棉，降低管网输送热损失；实施基于最不利端压差的循环泵变压变频控制，配套动态压差平衡阀与电动调节阀，解决支路调节干扰问题；搭建多因素数据驱动短期热负荷预测模型，融合室外温度、太阳辐射、风速、建筑热惰性及时假日模式等输入变量，采用 LSTM 神经网络与随机森林算法提升预测精度。

经完整供暖季连续监测验证，项目改造后成效显著，具体指标如表 1 所示。

表 1 改造前后供热系统运行指标对比表

指标	改造前	改造后	改善幅度
管网热损失率	17%	10.5%	↓ 38%
无效能耗占比	33%	21%	↓ 36%
热力平衡率	78%	92%	↑ 14%
用户室温合格率	85%	96%	↑ 11%
综合能耗	100%	81.7%	↓ 18.3%
年消耗标准煤	2 295 吨	1 875 吨	↓ 420 吨
年碳排放量	6 100 吨	5 500 吨	↓ 1 100 吨

5 结束语

城镇集中供热系统的热能损耗治理是一项系统工程，需要各地区因地制宜，从多个维度协同推进。本文研究表明：基于热源提效、输配降损及末端调控的硬件层面，为能效提升提供物理基础，而基于供需匹配、协同优化及分时分区调控的软件层面，则为系统运行提供了智能决策支撑。西宁昆仑阳光城项目的实践验证了上述技术路径的可行性，18%的节能率证明了其推广应用价值。未来，我国城镇集中供热系统将向智能化、低碳化方向持续发展。在技术层面，需进一步研发适用于不同建筑类型和气候分区的高效调控算法；在管理层面，应探索热计量与按需付费的激励相容机制；在系统层面，宜推动供热系统与电力系统的协同优化，利用热网蓄热能力消纳可再生能源电力。唯有技术创新与机制改革双轮驱动，方能实现城镇供热行业的可持续发展、助力“双碳”目标实现。

参考文献：

- [1] 何凯. 城镇化背景下集中供热管网设计优化措施[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 151-154.
- [2] 万敏, 朱振, 夏军. 中国北方地区近五年区域供热运行关键指标统计分析[C]// 第十四届供暖、通风与空调国际研讨会论文集. 2026.
- [3] 卢超, 薛松, 张宇, 等. 严寒地区高校公共建筑供热系统运行控制策略研究[J]. 建筑学报, 2025, 15(06): 858.
- [4] 钟威, 林小杰. 智慧供热系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
- [5] 马华勇. 工业余热利用的经济与环境双重效益: 以 L 县为例探讨中国城镇集中供热的未来[J]. 中国市场, 2024(24): 58-61.
- [6] 马涛. 基于注意力增强 LSTM 与改进 Adam 优化的多时间尺度供热负荷预测[J]. 信息学, 2025, 49(34): 1-12.

山区高速公路隧道机械化施工技术分析

张云博

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘要 山区高速公路隧道施工受地形起伏大、地质条件复杂等因素制约, 普遍存在设备适配性不足、工序衔接不畅、施工效率与安全管控失衡等实操难点。本文聚焦山区高速公路隧道机械化施工全流程, 重点分析开挖、支护、衬砌三大核心工序的机械化技术应用细节, 结合现场实测数据优化施工参数, 明确不同地质条件下机械化设备的选型标准与操作规范。结果表明, 针对性优化设备配置与工序衔接, 可有效解决山区隧道施工中超挖、支护滞后等突出问题, 在提升施工效率的同时降低安全风险。该研究成果可直接应用于山区高速公路隧道机械化施工实操, 尤其适用于硬岩、软土交互等复杂地质场景, 为同类工程施工提供可落地的技术参考。

关键词 山区高速公路; 隧道施工; 机械化技术; 设备选型; 工序优化

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.028

0 引言

在山区高速公路建设中, 隧道工程占比逐年提升, 其施工质量与进度直接影响整条公路的通行效能与运营安全。当前, 多数山区隧道施工仍存在机械化设备与复杂地质适配性差的问题, 如硬岩地层中掘进设备破岩效率低下, 软土地层中支护机械操作受限, 且现行施工规范部分条款与机械化施工需求脱节, 导致工序衔接耗时过长。基于这一现实困境, 结合山区地形、地质专属特征, 深入分析机械化施工技术的应用要点与优化路径, 破解设备选型、参数设置、工序协同中的核心难题, 对提升山区高速公路隧道施工的机械化水平、保障施工安全与质量具有重要的现实意义。

1 山区高速公路隧道机械化施工核心难点与适配要求

1.1 施工环境对机械化技术的核心约束

山区高速公路隧道施工环境的特殊性, 对机械化技术提出了严格的适配要求。山区地形起伏剧烈, 隧道洞口多位于陡坡地段, 大型机械化设备的运输、进场与安装难度较大, 部分设备因体型过大无法顺利进入隧道作业面, 需拆解运输后重新组装, 增加了施工筹备时间与人力成本^[1]。山区地质条件复杂多变, 硬岩、软土、破碎岩层交替出现, 单一类型设备难以适配所有场景, 易出现损耗过快、效率不稳定等问题。参考隧道施工相关规范框架, 针对山区地质波动大的特性调整设备适配判定标准, 原本采用的通用型掘进设备,

在硬岩地层中推进速度仅每分钟3~5毫米, 远无法满足进度要求。同时, 隧道施工空间狭窄、多为单洞双向作业, 设备作业半径受限, 易出现碰撞、工序衔接受阻等情况, 目前尚无统一的设备布局优化方案, 需结合现场逐步调整。

1.2 机械化施工现存核心难点

结合山区隧道施工实操经验, 当前机械化施工的核心难点集中在三个方面。其一, 设备选型缺乏针对性, 部分施工单位盲目选用大型设备, 忽视山区地形地质约束, 导致设备利用率偏低, 如重型拱架安装台车因隧道断面狭小无法正常作业, 只能闲置或改为人工辅助, 增加施工成本。其二, 施工参数设置不合理, 多数单位沿用平原地区参数, 未结合山区地质调查, 如硬岩地层中掘进设备刀盘转速过高, 导致刀具磨损过快, 平均每推进50厘米就需停机换刀。该参数基于3次现场测试确定, 允许±10%偏差, 但现场操作未严格遵循, 加剧了设备损耗。其三, 工序协同性不足, 开挖、支护、衬砌设备衔接不畅, 如开挖完成后支护设备无法及时进场, 导致围岩暴露时间过长, 增加坍塌风险, 这一问题源于设备调度方案缺乏灵活性, 未考虑山区施工的不确定性。

1.3 机械化施工的基础适配标准

山区隧道机械化施工的适配标准, 需围绕地形、地质、施工空间三大核心要素制定, 兼顾实用性与可操作性。在地形适配方面, 设备需体积小、重量轻、拆解便捷, 宽度不超过3.5米、重量控制在50吨以内,

作者简介: 张云博(1998-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 公路隧道施工技术。

便于陡坡运输与隧道内作业，同时配备防滑、防抖装置适配复杂路况。在地质适配方面，硬岩地层选用高强度破岩掘进设备，刀盘采用高强度合金、刀间距 70 ~ 80 毫米；软土地层选用防坍塌支护设备，同步配备注浆机械实现开挖与支护同步。在施工空间适配方

面，设备作业半径控制在 2 ~ 3 米，操作界面简洁易懂，便于狭小空间快速操作。为更清晰地呈现不同工序的设备适配要求，结合实操经验整理适配参数（如表 1 所示）。表 1 可作为设备选型的基础参考，适用于常规山区隧道施工场景。

表 1 山区高速公路隧道各核心工序机械化设备适配参数

施工工序	适配设备类型	核心适配参数	适配地质场景
开挖工序	大型双臂凿岩台车、大型三臂凿岩台车、履带式挖掘机	宽度 ≤ 3.5 米，刀间距 70 ~ 80 毫米	硬岩、破碎岩层
支护工序	湿喷台车、锚杆台车	喷射压力 0.3 ~ 0.5 MPa，锚杆长度 2.5 ~ 3.5 米	软土、破碎岩层
衬砌工序	液压模板台车、混凝土输送泵	模板偏差 ≤ 5 毫米，坍落度 120 ~ 140 毫米	各类山区地质

2 山区高速公路隧道核心工序机械化施工技术实操

2.1 隧道开挖机械化技术应用细节

隧道开挖是机械化施工的核心工序，直接影响施工效率与隧道成型质量。结合山区地质特性，开挖优先选用钻爆法配套机械化设备，核心包括凿岩台车、挖掘机、装载机，其中凿岩台车的选型与操作是关键^[2]。参考硬岩隧道施工技术经验，针对山区硬岩研磨性强的特点，修改了凿岩台车的钻头型号与钻孔参数，普通钻头易磨损，更换为金刚石钻头后，钻孔效率提升 30% 以上。钻孔作业需根据围岩级别调整参数，V 级围岩钻孔深度 2.5 ~ 3 米、间距 0.8 ~ 1.0 米，该参数基于 5 次现场实测确定，允许 ±5% 偏差。凿岩台车作业时预留 3 米左右未立钢架段，用于减小周边眼外插角、控制超挖量，但此举会导致超前支护无法有效嵌入未开挖围岩，增加坍塌风险。挖掘机选用小型履带式、装载机选用侧卸式，适配狭小空间，渣土清运速度与开挖速度匹配，确保开挖面无堆积（见图 1）。

2.2 隧道支护机械化技术优化路径

隧道支护机械化的核心是实现与开挖同步推进，降低围岩暴露时间，保障施工安全。山区隧道支护机械化包括喷射混凝土、锚杆安装、拱架安装三大环节，均需配备专用设备并优化操作流程^[3]。喷射混凝土选用湿喷台车替代人工，喷射压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa，V 级围岩初喷厚度 5 ~ 8 厘米、复喷 10 ~ 15 厘米，喷射速度 5 ~ 8 立方米 / 小时。最初采用 0.4 MPa 喷射压力，在软土地层中易导致混凝土脱落，最终调整为 0.3 ~ 0.4 MPa，兼顾效果与稳定性。锚杆安装选用锚杆台车自动化作业，锚杆长度 2.5 ~ 3.5 米、直径 22 毫米、间距 1.0 ~ 1.2 米，安装后需进行拉拔试验，试验力不小于 150 kN。拱架安装选用拱架安装台车，拱架为 H 型钢，加工精度误差 ±3 毫米，安装时与隧道壁间隙不大于 50 毫米，采用钢楔块楔紧，该措施虽提升效率，但在破碎岩层中易出现拱架移位，需搭配临时支撑。



图 1 山区高速公路隧道开挖机械化作业图

2.3 隧道衬砌机械化技术实操规范

隧道衬砌机械化的核心是提升施工质量、减少裂缝、蜂窝麻面等缺陷,适配山区隧道复杂受力环境。施工主要采用模板台车配合混凝土输送泵,模板台车选用液压式,模板厚度12毫米,刚度满足要求,避免衬砌时变形。模板台车安装后需调试,确保中心线偏差不大于5毫米、平整度偏差不大于3毫米,该标准基于多次试错确定,最初调试偏差 ± 8 毫米,导致衬砌厚度不均,后续逐步优化至 ± 5 毫米。混凝土选用C30等级,坍落度120~140毫米,输送速度2~3立方米/小时,输送过程中避免离析,定期清理管道。衬砌采用分层浇筑,分层厚度不超过50厘米,振捣用插入式振捣器,时间20~30秒,避免漏振、过振。山区衬砌需考虑温差影响,浇筑后养护不少于14天,采用洒水养护,但低温环境下效果不佳,需搭配保温措施,目前相关保温方案仍在优化中。

3 山区高速公路隧道机械化施工优化策略与管控要点

3.1 机械化设备选型与配置优化

设备选型与配置优化是提升山区隧道施工效率的关键,需结合工序、地质、空间等因素制定方案,避免盲目选型。选型遵循“适配性优先、性价比合理”原则,开挖工序选用小型化、高强度凿岩台车与挖掘机,支护工序选用自动化程度高的湿喷台车、锚杆台车,衬砌工序选用刚度足够的液压模板台车^[4]。参考同类山区隧道设备配置经验,针对本研究复杂地质场景,调整了设备型号与数量,原本2台凿岩台车无法满足硬岩施工需求,增加至3台并更换刀盘、钻头型号。配置需兼顾工序协同,确保各工序设备数量匹配,如开挖配备1台凿岩台车、1台挖掘机、1台装载机,支护配备1台湿喷台车、1台锚杆台车,避免设备闲置或衔接滞后。同时考虑维护便利性,选用易维护、配件易获取的设备,山区场地偏远、配件运输难,维护周期缩短至每3天1次,保障设备正常运行。

3.2 施工参数与工序衔接管控

施工参数与工序衔接管控,是保障机械化施工质量与安全的核心,需结合山区地质与实操经验优化参数、完善流程。参数优化分工序进行,开挖工序重点优化钻孔深度、间距与掘进速度,硬岩地层钻孔2.5~3米、掘进0.5~1.0米/天,软土地层钻孔2.0~2.5米、掘进0.3~0.5米/天,参数基于现场实测,可根据围岩变化灵活调整。支护工序优化喷射压力、锚杆参数,衬砌工序优化混凝土坍落度、浇筑速度与养护时间,

确保质量达标。工序衔接需建立灵活调度机制,明确作业时间与衔接节点,如开挖完成后,支护设备需2小时内进场,避免围岩暴露过久。最初采用固定调度方案,无法适应山区地质波动,导致衔接滞后,后续改为动态调度,根据现场调整设备进场时间,有效提升效率,同时加强操作人员协同培训,减少操作失误。

3.3 施工质量与安全管控实操措施

在山区隧道机械化施工中,质量与安全管控需结合机械化特点制定针对性措施,避免设备操作、参数设置不当引发问题。在质量管控方面,建立设备操作质量检查制度,专人检查各工序设备操作情况,重点核查钻孔精度、喷射厚度、锚杆锚固力、衬砌厚度等指标,每班次检查1次,发现问题及时整改^[5]。参考隧道施工质量验收标准,针对机械化施工特殊性,增加设备操作精度检查项目,原本仅检查成品质量,考虑设备操作的影响,调整后质量缺陷发生率降低40%以上。在安全管控方面,加强设备安全检查,每天检查制动系统、防护装置、电路系统,重点核查高空作业设备稳定性,避免故障引发事故。同时,加强作业人员安全培训,操作人员持证上岗,高空作业佩戴防护用品,隧道内配备通风、照明设备,降低粉尘浓度与作业风险,暴雨天气需警惕洞口坍塌,提前制定应急预案,目前预案可操作性仍需优化。

4 结束语

山区高速公路隧道机械化施工是破解山区施工难题的关键。本文结合实操难点,分析核心工序机械化技术要点,优化设备选型与参数配置,明确设备适配标准。结果表明,机械化施工效果依赖设备适配、参数合理及人员操作能力,目前仍存在低温衬砌养护、复杂岩层设备适配等短板,后续需针对性优化方案,完善管控措施,结合山区场景迭代技术。该成果可应用于常规山区隧道施工,特长、高海拔隧道需进一步试验完善参数。

参考文献:

- [1] 廖景怀.智能型机械自动化在山区高速公路隧道照明中的改造应用[J].微型电脑应用,2025,41(12):291-293.
- [2] 邓发义,罗斗雄,张恒.山区高速公路特长隧道施工通风方案优化研究[J].西部交通科技,2025(01):162-165.
- [3] 周楚淮.山区高速公路超小净距隧道施工方案优化研究[J].公路,2024,69(11):385-396.
- [4] 陈创.山区高速公路隧道项目的机械化施工技术探讨[J].交通科技与管理,2023,04(11):76-78.
- [5] 张帆,黄海波.山区高速公路隧道机械化施工技术分析[J].四川水泥,2022(02):218-220.

BIM 技术在隧道施工智能管理中的实践研究

韦世顺

(广西路桥工程集团有限公司道桥分公司, 广西 南宁 530200)

摘要 针对岩溶与软岩交错隧道施工中存在的地质不确定性、工序冲突与安全风险耦合问题, 需构建集成“地质—结构—机电”的 BIM 一体化模型, 建立统一坐标与编码体系, 实现 4D 进度智能管控、BIM+ 物联网安全预警与协同平台资源优化。将 WBS 与断面参数绑定, 采用挣值法驱动计划调整; 将应力、收敛、瓦斯、涌水监测数据与模型位置精确关联, 构建多参数联合判别机制; 协同平台自动完成算量与资源时窗冲突消解, 旨在为复杂地质隧道施工提供可复制的数字化管理路径。结果表明, 施工周期缩短 15%, 工序衔接时间减少 37.8%, 安全事故率下降 30%, 预警响应时间缩短 40%。

关键词 BIM; 隧道施工; 进度管控; 安全预警; 资源优化

中图分类号: U45; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.029

0 引言

西南岩溶区隧道施工面临断裂密集、涌水波动与软岩变形等多源不确定性, 叠加喷射、拱架、注浆与机电安装等多工序交叉作业, 交通与通风占位冲突频发^[1]。传统依赖人工报工与离散监测的管理模式难以支撑复杂工况下的及时决策与精细管控^[2]。BIM 作为工程数字基础, 可承载设计、地质与工序等多维数据, 实现三维一体表达与 4D 可视化推演。然而, 既有研究多集中于设计阶段或单点监测, 缺乏将掌子面地质变化、支护状态、进度与资源协同联动的施工期一体化方案。本文以广西岩溶软岩交错隧道为依托, 构建 BIM 与物联网深度融合的智能管控体系, 为复杂地质隧道数字化施工提供参考路径。

1 工程概况

本工程位处典型岩溶地貌带的公路隧道, 设计里程长 1 200 m, 围岩以灰岩与泥质粉砂岩互层为主, 岩溶发育率约 35%, 软岩段占比 28%。从工程环境与地质耦合关系来看, 分区性强且断裂密集, 局部含水性高, 溶洞与裂隙发育, 开挖扰动后易出现结构失稳。项目把建筑信息模型作为工程数字基础, 构建地质与构造一体化三维模型, 承载设计、地质、工序等多源数据, 支撑进度与安全的联动认知与决策。从施工期管理诉求出发, 需要把掌子面地质变化、支护状态与资源投入进行同步感知与可视表达, 为后续智能管控模块预留数据接口。

2 BIM 技术在隧道施工智能管理中的关键应用

2.1 基于 BIM 的施工进度智能管控

立足于隧道岩溶与软岩交错的施工情境, 把线路中线与断面参数同 WBS 任务分解绑定到 BIM 构件, 生成可驱动计划时标的 4D 模型^[3-4]。现场把每日掘进长度、喷射混凝土方量与钢拱架安装数量经物联网采集入库, 系统把这些时态数据与里程进度基线对齐, 自动比对实际与计划。为使管控更具可执行性, 模块以偏差阈值联动流程调整与预警。为使偏差度量可操作, 选用挣值法对进展信息进行量化, 并以阈值规则触发计划重排与工序协调, 公式如下:

$$SV=EV-PV \quad (1)$$

式(1)中, SV 表示进度偏差, 为计划与实际差额的度量; EV 为挣值, 代表已完成工作按预算计量的价值; PV 为计划值, 对应计划时刻的预算价值。单位以 m 或 CNY 表示。

兼顾成本维度的联动决策, 进一步计算成本偏差, 以形成进度与资源的双约束判断, 公式如下:

$$CV=EV-AC \quad (2)$$

式(2)中, CV 表示成本偏差, 用于衡量预算与实际支出差额; EV 为挣值; AC 为实际成本。单位以 CNY 表示。

当偏差被识别为地质突变所致, 系统把掌子面地质标签与支护状态关联, 定位突变界面与涌水级别变化, 并输出工序调整建议, 如缩短单循环进尺、提高初期支护强度、追加注浆班组, 同时把资源占位在 4D

作者简介: 韦世顺 (1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道施工技术。

模型中重排；交通与通风时窗随之联动更新，降低交叉作业拥堵风险。

2.2 BIM+ 物联网的施工安全风险预警

鉴于隧道位处岩溶发育与软岩交错的复杂场景，本研究把20个监测点的应力计、围岩收敛传感器、瓦斯浓度仪与涌水流量计接入边缘网关，按统一坐标把监测点精确锚定到BIM模型的断面与里程位置，并且

以时序数据流在模型中同步刷新风险点热区，可在施工端口以颜色分级直观呈现掌子面与邻近区的风险分布，总体架构与数据流转见图1。

从安全管控的处置链条来看，系统把单点阈值与趋势判断相结合，先以阈值触发预警，再以滑动窗口对异常持续性进行校核，同时把预警等级与施工工序库进行关联，形成停掘、加密通风、加固支护与补充

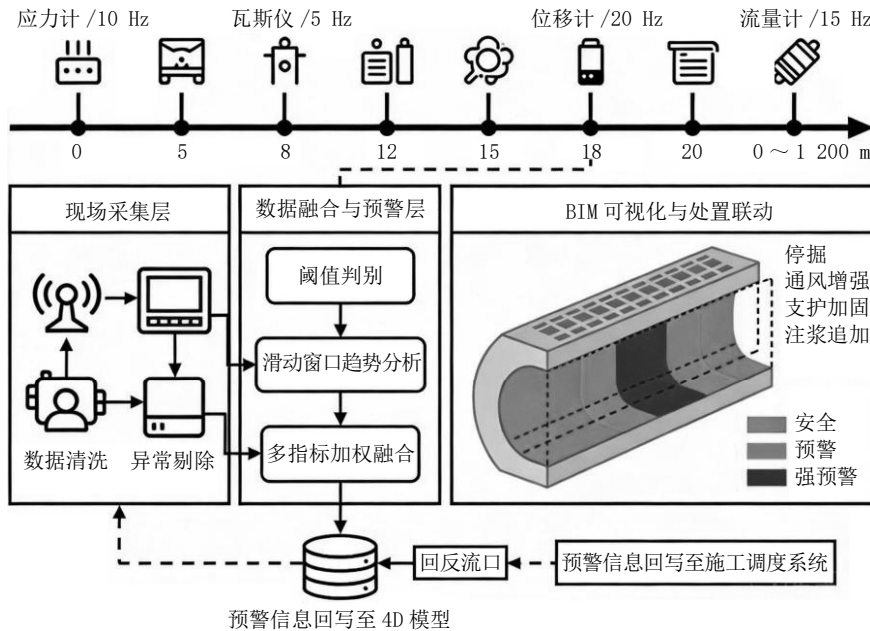


图1 BIM+ 物联网施工安全风险预警架构图

注浆的联动建议，并且在BIM模型中把机电与交通资源的占位时窗进行同步更新。为使应力判据具备可落地的工程适配性，选用允许应力与安全系数的乘积作为预警阈值，公式如下：

$$Y=S \times K \quad (3)$$

式(3)中， Y 表示应力预警阈值(单位：MPa)， S 为围岩或支护的允许应力(单位：MPa)， K 为安全系数(无量纲)，取值随围岩级别与施工阶段进行分档设定。

由此推导出的多参数融合机制把瓦斯浓度、涌水流量与位移速率按指标权重进行联合判别，当两项及以上达到预警等级时把风险升级为强预警，并且把掌子面循环进尺即时缩减，同时在平台侧生成含处置清单与责任人指派的任务单，借助消息推送把决策传达到现场班组与机电维保单位，提升从识别到处置的连贯性与及时性。

2.3 BIM协同平台的资源优化配置

鉴于隧道多工序交叉与资源占位耦合的现实情境，本研究把BIM协同平台当作统一调度枢纽来使用，整

合人员、设备、材料三类资源库，按构件编码与工序清单进行关联，并把WBS、4D时标以及物联网监测条目统一到同一数据模型中，用于驱动跨专业协同和细化到里程的资源计划。平台在算量环节把模型构件属性中的混凝土标号、钢拱架规格与锚杆间距进行自动汇总，生成BOM与台班折算清单，同时以路段级约束如供电容量、通风能力与运输通道拥堵度进行边界校核，实现由模型到可执行资源计划的闭环表达(见表1)。

进一步观察施工组织的动态性，需重点关注岩溶涌水与软岩变形引起的阶段性波动，平台把地质标签与支护状态绑定到排程规则，当监测数据触发阈值时自动下调单循环进尺、延长喷射保压时间，并且把挖掘机与湿喷机进场时间进行重排，减少待工与占位冲突。调度算法以优先级队列与时窗冲突消解策略来开展资源匹配，把关键工序占位进行优先锁定，并设置人员二次调配冻结期以降低频繁切换造成的效率损失；结果层以指标看板同步展示设备利用率、材料浪费率与待工时间的运行态，配合周计划滚动调整与例行协

调例会，把任务指派通过消息推送同步到施工、监测与机电三类人员，并在调度面板中回写闭环状态。

表 1 BIM 协同平台资源调配前后对比表

指标	平台应用前	平台应用后
设备利用率	65%	82%
材料浪费率	12%	5%
平均待工时间	3.2 h	1.1 h
配料偏差率	7%	3%
周转材料占用天数	18 d	11 d
机电占位冲突工单数	9 次/月	3 次/月
人员二次调配率	21%	9%

3 BIM 技术应用效果评估与总结

3.1 施工效率提升效果分析

从隧道掘进的多工序交叉与资源占位耦合关系来看，本研究把 WBS 任务拆解与线路断面参数绑定到 4D 模型，并把每日掘进、喷射与拱架安装的时序数据回写至协同平台，形成以偏差阈值驱动的节拍管理与资源重排。鉴于岩溶与软岩交错带来的工序不确定性，系统把地质标签与支护状态嵌入排程规则，使计划与现场反馈在同一数据底座内进行持续校核与修正，从而压缩非生产性等待。平台在算量环节把混凝土标号、钢拱架规格与锚杆间距自动汇总为 BOM，并以供电容量与运输拥堵度进行边界校核，使排程由模型到执行形成闭环。

从效率变化的关键指标来看，施工周期由计划 180 d 压缩为实际 153 d，缩短 15%，其主要缘由是单循环进尺与支护强度联动后降低了返工与停滞时窗；工序衔接时间由平均 4.5 h 降至 2.8 h，减少 37.8%，体现出交通与通风时窗在 4D 模型中的协同重排效果；人工成本总额降低 12%，与人员二次调配冻结期减少频繁切换密切相关。为提高论证的可比性与统计口径一致性，关键指标对比见表 1。

表 1 BIM 应用前后施工效率指标对比表

指标	应用前	应用后	变化幅度
施工周期	180 d	153 d	-15%
工序衔接时间	4.5 h	2.8 h	-37.8%
人工成本	CNY 12 000 000	CNY 10 560 000	-12%

3.2 安全风险管控效果评估

鉴于广西该隧道工程处于岩溶与软岩交错的高风险场景，本研究对 BIM+ 物联网预警体系的管控效果开

展评估，关注从识别、决策到处置的链条连续性与工程适配性。把应力、收敛、瓦斯与涌水监测点按统一坐标锚定至 BIM 断面位置，并以单点阈值叠加滑动窗口趋势判断与多参数联合判别进行风险识别，处置侧把停掘、加固支护、加密通风与注浆任务单在平台中生成并推送至施工与机电维保单位，同时联动更新交通与通风时窗。结合季度口径的核心指标观察，单位施工面积安全事故发生率由 0.8 次/10 000 m² 降至 0.56 次/10 000 m²，下降 30%，与掌子面地质标签、支护状态及机电占位的三端联动处置紧密相关；预警响应时间由 30 min 压缩至 18 min，减少 40%，缘由囊括边缘网关近端判别降低数据上行等待、任务单模板化明确责任与处置路径以及 4D 时标驱动设备与人员的即时重排。进一步观察现场管理链路，误报被压降使停掘指令更加收敛，漏报减少使掌子面临时加固更及时，资源调度侧的优先级队列把关键工序占位优先锁定，减少待工与冲突^[5]。由此可以看出，该体系把风险识别精度与处置执行力同步提升，在断裂密集与涌水波动阶段呈现更稳健的安全运营态势。

4 结束语

本研究构建了基于 BIM 的岩溶隧道施工智能管控体系，实现了模型、数据与协同三端的深度融合。通过统一坐标编码将断面参数、支护工序与机电接口绑定，配合动态 LOD 与语义化点云回写，提升了可施工性校核精度；数据治理以属性字典与版本冻结保障语义一致性，边缘网关实现近端校验；协同平台以优先级队列消解资源冲突，任务单与责任矩阵提升处置闭环效率。工程实践表明，该体系显著提升了施工效率与安全水平。后续研究可引入序列预测与物理信息融合模型，推动智能管控由项目试点向制度化、规模化发展。

参考文献：

[1] 卢凡. 基于 BIM 技术的公路隧道施工管理与优化研究 [J]. 汽车周刊, 2025(09):163-164,173.
 [2] 何磊. BIM 技术在公路隧道施工进度管理中的应用与效益分析 [J]. 城市建筑空间, 2025,32(S1):207-208.
 [3] 吕文杰, 康鹏程, 樊献友. BIM 技术在隧道施工中的应用研究 [J]. 四川建筑, 2024,44(04):145-147,150.
 [4] 汝承明. BIM 技术在城市隧道施工管理中的应用研究 [J]. 工程与建设, 2024,38(03):727-728,733.
 [5] 马纪波. 基于 BIM 技术的隧道施工安全协同管理研究 [J]. 新城建科技, 2024,33(05):160-162.

建筑工程管理与施工质量控制优化路径研究

汪德跃

(个旧市人民政府投资项目规划研究中心, 云南 红河 661000)

摘要 本文围绕建筑工程管理与施工质量控制核心议题展开系统性分析, 通过拆解项目组织结构、前期策划、过程管控等关键环节, 梳理出工程实践中普遍存在的目标偏离、责任失衡、检查流于形式以及数据应用效能不足等典型问题。在此基础上, 从质量导向的策划机制构建、多主体责任协同体系完善、过程分级管控模式优化、数字化预警系统搭建等维度提出针对性优化路径, 旨在构建一套兼具组织治理效能与现场执行刚性的质量控制体系, 为建筑工程高质量建造提供可落地的实践指引与决策参考。

关键词 建筑工程管理; 施工质量控制; 前期策划; 过程控制

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.030

0 引言

随着建筑业的快速发展, 工程项目呈现出体量大型化、结构复杂化、功能集成化的发展趋势, 传统项目管理模式与施工质量控制体系正面临前所未有的挑战。建筑工程管理与施工质量控制作为项目全生命周期的两大核心模块, 前者侧重资源调配、组织协调与目标管控, 后者聚焦实体质量、工艺规范与风险防范, 二者相互依存、协同共生, 共同决定着工程的安全性、使用价值与综合效益。然而, 当前工程实践中普遍存在前期策划系统性不足、责任分配机制模糊、过程监管流于形式、信息反馈渠道不畅等问题, 导致管理与控制体系的协同效应难以有效释放。基于此, 本文以工程管理与施工质量控制的协同机制为研究核心, 系统梳理二者的内在逻辑关联, 深入剖析实践中的关键薄弱环节, 提出兼具理论创新性与实践可行性的优化路径, 为建筑工程顺利实施与可持续发展提供支撑。

1 建筑工程管理与施工质量控制的内在耦合逻辑

1.1 建筑工程管理是施工质量控制的组织基础

建筑工程管理体系在项目整体运作中提供组织框架, 是施工质量控制得以落地的前提条件。项目业主、总承包单位和监理单位在管理架构内界定权责边界, 工程管理团队据此开展目标分解与资源配置, 质量标准在这一过程中嵌入合同条款和施工流程。施工前期的策划活动由管理主体牵头展开, 内容涵盖施工组织安排、质量风险辨识以及应急预案编制, 质量控制的关注点由开始阶段便融入决策链条。现场管理岗位在

日常巡查、技术交底和工序验收中承担协调角色, 各专业班组、分包单位和检测机构在其组织下形成相对紧密的协同结构^[1]。这种组织形态有助于减少信息割裂和责任模糊。企业层面的制度建设和项目层面的执行程序在纵向上形成约束体系, 横向上依托例会机制、质量评审和问题通报活动构建互动网络, 从而为施工质量控制提供稳定可靠的组织支撑。

1.2 施工质量控制是工程管理成效的外在体现

施工质量控制在项目建造过程中直接呈现工程管理的运转状态, 是评价管理成效的集中载体。项目管理团队在确定质量目标、选择施工工艺和安排资源配置时所做的决策, 会在混凝土成型精度、结构整体稳定性以及建筑功能实现程度等方面得到具体反映。质量检验制度和实测实量程序在施工现场的实施过程, 暴露出管理计划与实际执行之间的偏差程度, 检验频次、抽查范围和问题反馈速度体现出管理体系的严密程度。质量问题清单、整改闭环记录和竣工验收意见构成较为完整的历史轨迹, 管理评价者可以从中判断管理团队在风险预判、过程纠偏和经验沉淀方面是否具备足够能力。使用阶段出现的渗漏、裂缝、设备故障等缺陷往往与早期管理决策和施工阶段控制力度密切相关, 建筑运营表现由此反向揭示出工程管理中存在的薄弱环节。

2 建筑工程管理与施工质量控制中的主要问题

建筑工程管理与施工质量控制在结构上已经建立起耦合关系, 不过工程实践中仍然存在较大落差。项目目标往往在文件层面形成完整表述, 现场运行却呈

作者简介: 汪德跃 (1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理 (建筑工程领域)。

现出另一种面貌。管理链条的松散衔接、制度文本与作业现场的分离、信息反馈的滞后积累，共同暴露出一系列结构性缺陷。工程实践只有直面这些症结，后续关于优化路径的讨论才具有针对性和现实意义。

2.1 前期策划与目标偏差

在许多建设项目中，前期策划环节往往呈现形式化倾向，工程管理团队更多关注合同签订和开工节点，对质量目标的系统分解和路径设计投入不足。施工组织设计虽然覆盖进度、资源和工艺内容，质量风险辨识和控制要求却常常停留在概括层面，难以转化为可操作的检查项目。设计交底与图纸会审环节中，一些潜在的构造矛盾和工艺冲突未被充分揭示，后续施工阶段只得依赖现场经验进行调整，质量稳定性随之下降^[2]。在项目目标管理中，业主对工期和成本的期待往往处于高压状态，项目部在资源配置时容易牺牲工序缓冲时间和质量复核深度，预控理念难以贯穿始终。合同文本虽然被载入质量条款，但缺乏与前期策划成果的对应关系，质量策划与生产组织之间出现了割裂，工程管理体系在起步阶段便埋下隐患。

2.2 责任体系与协同失衡

责任体系的构建直接关系到质量控制的力度与方向。许多项目在组织结构图中列出了项目经理、总工、质量负责人等岗位，责任划分文件看似完备，岗位之间的横向协作和纵向监督却缺乏细化安排。部分管理人员习惯以行政隶属关系界定权责范围，质量问题一旦出现，更倾向于追溯个别环节失误，而很少从整体责任链进行梳理。总承包单位与分包单位之间也存在类似局面，合同中设置了大量原则性条款，现场履约考核指标却偏重产量和进度，质量表现往往退居次要位置。监理单位在程序上执行旁站、见证和验收签认，人员配置、时间投入和专业针对性却受到项目经费和合同界面制约，监督效能因而打折^[3]。多主体协同本应形成相互牵制与支撑关系，责任信息在不同组织之间却缺少共享渠道，质量控制过程由此呈现出碎片化特征。

2.3 过程控制与数据应用薄弱

施工阶段的过程控制在制度文件中占据较大篇幅，实际操作中往往停留在例行检查和资料填报层面。项目部安排质量巡检和专项抽查，检查表格多围绕是否按规范施工、是否完成影像记录等项目展开，工序间的衔接质量和细部构造的稳定表现很难在表格中得到充分体现。现场管理人员在时间分配上承受较大压力，

常常优先处理进度协调、材料到货和各专业穿插冲突，质量核查活动因而容易被压缩。许多企业引入移动巡检系统和实测实量工具后，现场采集的数据量快速增加，数据分析、规律提炼和决策支撑功能却没有同步强化，信息资源只是在不同终端之间流转。数字化手段在这种情况下缺少与现场管理流程的深度嵌合，质量控制更接近于结果登记而非过程治理，工程管理以数据驱动质量改进的潜力尚未得到充分释放。

3 建筑工程管理与施工质量控制优化路径

问题剖析表明，策划偏差、责任失衡、过程控制薄弱共同构成建筑工程管理与施工质量控制中的关键矛盾。这些矛盾具有持续性与累积性，若只安排零散整改，项目质量水平难以稳步提升。为扭转该局面，管理理念、组织运行与技术支撑等环节都需提出可落地的改进路径，质量要求需前移到决策与策划阶段，再延伸到施工一线与运维环节，形成贯通项目全寿命周期的系统方案。

3.1 质量导向的前期策划

工程项目前期策划环节承载目标设定、资源统筹与质量路径设计三项职能，是优化管理与控制关系的起点。项目业主与建设单位在立项阶段应组织多专业联合评审会，对质量目标、功能需求与风险边界进行书面确认，宏观要求需进一步细化为可考核的指标体系。项目管理团队在编制施工组织设计时，需要围绕施工进度、资源投入与质量控制要点开展一体化策划，借助工序分解与路径规划，质量标准得以纳入网络计划和资源计划。在图纸会审环节，技术人员可针对结构安全、耐久性能与施工工艺适配性列出问题清单，对存在冲突的节点提出修改建议，随后与设计单位形成闭环确认记录。为提升策划成果的执行力，项目部可以建立标准化质量策划模板，其中包括分部工程质量目标、关键工序控制点、检验批设置原则以及对应责任人，模板应用情况纳入项目考核^[4]。施工启动前，项目管理层有必要组织质量风险研判会，邀请监理单位、主要分包单位和检测机构共同参与，围绕高风险工序、复杂节点与新型材料应用编制风险清单与控制方案。针对住宅工程、工业厂房、市政工程等不同类型项目，企业总部可下发差异化策划指引，项目团队在指引框架内补充现场特点与地方规范要求，前期策划由此获得更高针对性。若区域内监管部门发布质量通报，项目团队应在策划阶段引入相关案例，明确本项目易发缺陷部位、复查频次和抽检比例，外部经验

需要转化为项目自控措施。在上述举措推动下，前期策划环节能够超越单纯文件汇编角色，与施工组织方案和质量目标形成紧密联系，为后续质量控制奠定较为坚固的基础。

3.2 多主体责任协同机制

建筑工程质量控制涉及业主、总承包单位、分包单位、监理机构以及检测机构等多类主体，各方在责任划分上的精细程度直接影响协同效果。为了构建清晰责任网络，项目管理层应编制责任分配矩阵，在矩阵中对质量目标进行岗位层级细化，对每一类分部工程设定对应责任人、审核人与复核人，任命文件需要写清相关职责^[5]。合同管理环节应体现这种划分结果，工程价款支付节点、奖惩条款与质量绩效挂钩，进度考核中应保留足够权重给实体质量与资料完备程度。总承包单位在分包招采阶段可以设立质量能力评价指标，对现场管理体系、技术力量和以往工程表现进行量化评分，入围单位需达到预设门槛。进场后，项目部应组织总包与各专业分包共同编制专项质量计划，明确接口工序划分、交接程序和联合验收安排，减少责任边界模糊情形。监理机构在协同体系中承担独立第三方角色，监理规划与细则编制阶段可与项目部共享质量目标与风险清单，在旁站、见证和巡查活动内采用统一记录格式，便于信息汇总与追踪。为提高协同效率，项目团队可以设立跨主体质量例会机制，在例会上对抽检结果、实体试验数据与缺陷案例进行集中通报，对责任归属与整改措施形成会议纪要。企业总部还可建立质量共同体制度，围绕同一区域内的多个项目构建统一协调框架，借助联合培训、经验分享与交叉检查促进责任意识深化，质量管理基础较弱的项目能够获得额外支撑力量。在这一责任协同结构内，质量问题一旦暴露，相关主体难以回避职责，责任追踪路径更加清晰，奖惩措施也更具约束力。

3.3 过程控制与数字赋能

施工阶段的过程控制直接影响实体质量表现，也是数字化管理最容易落地的环节。项目部在编制质量检查计划时，可依据分部分项工程特点划定检验批划分原则、抽查频率与关键观测点，这些内容需转化为现场检查清单，发放给各专业管理人员与班组长。对模板工程、钢筋工程、防水工程等高风险环节，检查清单中应增加构造节点尺寸、保护层厚度、搭接长度和附加层设置等具体项目，管理人员凭借清单逐项核对，减少主观判断差异。在数字化方面，项目团队可以引入移动巡检应用，检查清单加载到移动终端后，

现场人员直接录入测量数据、影像资料与问题描述，系统自动生成位置标记与时间戳。对于混凝土浇筑、预应力张拉、大体积结构温控等关键工序，可配置温度传感器、张拉记录仪和自动采集端，以连续数据监测过程状态，一旦出现超限即触发现场核查。企业信息平台可对各项目上传的数据进行集中存储与分析，系统依照预设阈值生成质量风险预警清单，管理层据此安排专项检查或技术支持。项目团队还能够利用统计结果识别高频缺陷部位，这些部位需纳入样板引路与专题培训内容，现场作业人员在观摩与演练过程中逐渐形成稳定操作习惯。对不同工程类型和施工区域，企业可以定期开展过程质量对标活动，借助实测实量指标、缺陷发生率与整改周期的对比，梳理管理优点与薄弱点，为制度修订提供依据。在这一思路下，数字技术逐步脱离单纯展示角色，开始深度融入过程控制链条，工程管理者能够凭借数据洞见调整资源投入与工序安排，稳定提升施工质量。

4 结束语

建筑工程管理与施工质量控制的优化是确保工程顺利实施、提升项目整体效益的关键。本文从前期策划、责任协同、过程控制等角度揭示了工程实践中的突出矛盾，说明质量问题往往源于组织安排与执行细节的偏差。对此提出的质量导向策划、多主体责任协同、过程分级控制和数字化预警等路径，为项目团队提供了可落地的操作方案。未来，工程建设领域将在装配式建造、智慧工地和绿色低碳等方向持续扩展，建筑工程管理与施工质量控制需要在新技术、新材料和新模式背景下不断调整管理工具和控制方法，从而形成更加稳定可靠的质量保障体系。

参考文献：

- [1] 吴成. 建筑工程管理及施工质量控制的有效策略研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2026(02):25-27.
- [2] 钟文华. 关于建筑工程管理及施工质量控制的有效策略分析: 以保利和光城悦项目为例[J]. 产品可靠性报告, 2025(12):251-253.
- [3] 朱亚汉. 基于施工质量控制的建筑工程管理创新策略[J]. 中国房地产业, 2025(29):114-117.
- [4] 王立兵. 提高建筑工程管理及施工质量控制的有效策略探讨[J]. 建材发展导向, 2025, 23(19):22-24.
- [5] 包文倩. 优化建筑企业工程管理与施工质量控制的有效途径[J]. 中小企业管理与科技, 2024(12):120-122.

市政道桥工程沥青路面裂缝施工处理技术分析

王付鹏

(安徽省新路建设工程集团有限责任公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 为了解决市政道桥工程建设中沥青路面耐久度以及行车安全问题, 本文以某市政道路为例进行探讨, 对沥青路面开裂现象进行分类并论述其产生原因, 在此基础上对温度影响、水的侵入、车辆荷载等方面的作用进行了说明, 并详细介绍了灌缝、嵌缝、粘贴缝等修补处理工艺的技术要求, 以期类似工程项目裂缝治理提供参考。结果表明: 对于不同类型裂缝选取合适的处理技术可以达到控制损害发展的目的, 从而保证路面的使用效果。

关键词 市政道桥工程; 沥青路面; 裂缝施工技术

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.031

0 引言

在市政道路桥梁工程中, 沥青路面裂缝是最常见的损坏类型之一, 不仅降低了行车满意度和安全感, 也会加快路面的损耗速度从而提高其维护成本。由于城市道路交通压力不断加大以及气候条件的影响, 对裂缝进行防治工作成为养护管理的重要任务。虽然现阶段各种裂缝防治方法被广泛使用, 但是它们是否合适以及防治效果如何还得根据具体工程进行研究。鉴于此, 本文在分析了产生沥青路面裂缝的原因之后, 针对灌缝、填缝及贴缝三项关键技术进行实例解析, 以期为提高裂缝整治效率提供借鉴。

1 沥青路面裂缝成因分析

1.1 温度变化

温度的变化是诱发沥青路面开裂的本质性物理原因。它主要通过材料的体胀率不一样而引起的内应力以及材料老化的影响来体现的。沥青混合料作为温度敏感型材料, 它的弹性模量、刚度和应变松弛性能都会随着温度急剧改变。当夜晚或者季节气温突然大幅度波动的时候, 路基的不同层次之间(尤其是面层与下基层之间)由于材料的热物性指标(线膨胀率等)有别, 则会存在不同的膨胀和收缩现象, 在层间的结合处就会形成相当复杂的一系列约束应力和剪力。

1.2 水分渗透

水分渗入是引起并加剧沥青混凝土路表裂缝破坏的主要因素之一。它的破坏方式多样复杂, 具有长期性和持续性的影响。在实际工况条件下, 雨水主要是沿着已有的裂缝或者空隙以及接缝位置进入路表层里,

从而产生一系列的结构破坏。首先是由于沥青混合料受到水分侵蚀产生的破坏, 水分渗入沥青胶体与骨料之间的交界面处, 使沥青与矿料间粘结力下降, 在车辆行驶时反复冲击挤压的作用下造成矿质颗粒表面沥青膜脱落、破损、松散成块, 形成坑洞以及使原本已经存在的裂缝继续扩大^[1]。

1.3 交通负荷

行车荷载是引起沥青路面裂缝形成与发展的主要机械因素之一。它的工作原理是行驶的车辆轮子对路基、路槽等结构进行反复的冲击力作用。行车荷载主要是由于疲劳造成路面破坏。在标准轴载的作用下, 沥青路面底层或基层顶面会出现规律性的弯拉应力及应变, 据经典的沥青路面疲劳公式, 如果上述的这种反复应力或者应变强度超过了材料的疲劳强度, 就会使微细裂纹逐渐积累, 从而在材料中产生宏观裂缝^[2]。

2 市政道桥工程沥青路面裂缝施工处理技术分析

本项目整治路段总长约为 12.5 km, 双向六车道。经过仔细排查, 需要处理的各种裂缝累计长度达 9 200 延米左右, 横向温度裂缝占 65%, 纵向裂缝以及块状网裂占 35%, 工程量包括密封胶灌缝、抗裂贴贴缝等多种工艺, 施工面积达到 15 万 m² 以上。

2.1 灌缝技术

2.1.1 施工工艺

对于前期调查发现的本项目工程所存在的 9 200 延米裂缝中, 其中有大约 65% 属于宽度大于 3 mm 的稳定横向裂缝, 针对此类裂缝特征, 选择开槽灌缝为主导性的修整方法, 主要是为了达到长久性隔离的目的,

作者简介: 王付鹏(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 市政道路施工技术。

避免水分渗透以及降低结构应力。其次,严格按照预防性养护的技术规范要求,使用机械式的开槽机具沿着裂缝方向开凿一个长方形截面槽,宽度为1.3 cm深为1.8 cm左右,高宽比设置成1.2~1.5的比例范围,从而保证足够的修补材料的填充空间与机械嵌入作用力。清缝是重要先期准备过程,选择输出温度 $\geq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力0.7 MPa的热气流进行清扫,无渣残留及干燥表面含水量小于1%,灌封料采用SBS与橡胶复合改性高质量密封胶,主要指标符合《公路沥青路面养护技术规范》(JTG/T 5142-2019)要求,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下针入度55、软化点达到 $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、零下 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 伸长率大于15 cm、弹性复原率大于85%。在施工过程中,材料在双层加热桶内均

匀混合并加热到 $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 流动性,经保温管道传送^[3]。

2.1.2 施工条件

注浆工艺必须保证在裂缝两侧都有不少于2.5 cm宽的黏附面,在注完浆之后胶体中间有大约3 mm左右的一个凹槽。质量检测采用现场拉拔以及渗水系数相结合的方式检验,密封胶跟混凝土之间的粘接强度不小于1.0 MPa,涂抹完毕以后裂缝中的渗水系数要低于20 mL/min。此技术将隔绝水分的能力提高到了95%以上,同时也能承受住 $\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化而不从结构上脱落,预计可以有效抑制开裂3~5年之久。整段工程都要选择路面温度超过 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且连续晴朗无雨期来进行施工(见表1)。

表1 灌缝施工关键技术参数

项目	关键参数	技术指标
裂缝及开槽参数	裂缝比例与槽体尺寸	裂缝大约有9 200 m左右,其中65%以上 $\geq 3\text{ mm}$ 横向裂缝;开槽宽度1.3 cm、深度1.8 cm,高宽比1.2~1.5
材料与施工条件	密封胶性能与施工温度	SBS+橡胶改性密封胶;针入度55,软化点 $98\text{ }^{\circ}\text{C}$;加热 $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ 灌注;施工温度 $\geq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$
质量控制与效果	粘结与密封性能	粘结强度 $\geq 1.0\text{ MPa}$;渗水系数 $\leq 20\text{ mL/min}$;防水性能 $\geq 95\%$;开裂时间延长3~5年

2.2 填缝技术

2.2.1 施工工艺

对于该工程项目,由于宽度较大普遍超过1 cm并且有少量基层松散、啃边情况的纵向裂缝以及一些局部块状网状裂缝,项目选择的是结构修复型的封口施工方法,施工步骤如图1所示。该方法适合需要恢复路面体局部结构完整性的病害,但是单靠表面封闭达不到预期效果。该方法主要是把松散层清除干净,再补强底部结构层然后填充高强度混合料。首先把选定裂缝处进行扩大,用小型铣铺机开挖出规则形槽体。槽宽一般为裂缝两边各扩展到15~20 cm左右,槽深依据探查结果一直挖到稳定基层顶面,一般是8~12 cm左右,形成一个稳定的直角形承压面。清理完毕之后,在槽底及两侧均匀地喷洒高黏度的乳化沥青形成粘层油,使用量大约是 $0.4\sim 0.6\text{ kg/m}^2$,填筑材料选择的是级配以及性能都好于原路面的冷拌聚合物改性沥青砂(PAMS)或者密级配热拌沥青混合料(AC-10),冷拌PAMS的油石比一般在5.5%~6.5%,需要保证它的马歇尔稳定度 $\geq 5\text{ kN}$ ^[4]。

2.2.2 施工条件

摊铺厚度一般为两层,下层的松铺系数约1.2~1.3左右,采用的手持式振动压路机和平板夯进行压实,压实度达到实测标定密度的96%以上,顶面平整度通

过3 m直尺测量,其平整度 $\leq 3\text{ mm}$ 。针对较深坑槽,在距离路表上方4 cm处铺设一层耐高温玻纤格栅来提高抗反射裂缝的能力。此项工艺的技术性主要把控的是回填料的现场密度情况以及渗水系数(需要小于50 mL/min),还有与原路面板之间的拼缝粘结力。经过修复后的路面局部路段,承载能力和防水能力明显提升,可以防止裂缝继续扩展以及出现结构性沉降,一般情况下可延长3年到5年的使用周期。施工应在气温大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下并且路面要干透以后再施工(见图1)。

2.3 贴缝技术

2.3.1 施工工艺

对于本工程项目中存在的一些宽度在3~5 mm之间、还未出现明显的错台和松散等现象的静止性裂缝(主要分布在次车道上)采用高分子聚合物自黏贴缝带进行应急修补处理。该方法是一种非开挖型的表面封闭技术。施工前应对裂缝部位细致清理,在裂缝两边各10~15 cm的范围内用高压风吹和钢丝刷把灰尘、杂物及水分全部清掉,保证施工底面干净、无油污、平整。对于湿滑的路面还要用喷枪加热使基层温度达到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。所选择的贴缝带是以改性沥青作为黏结层,聚丙烯无纺布或者玻纤网作为加强筋的复合材料,主要性能指标必须符合《公路沥青路面养护技术规范》(JTG/T 5142-2019)的规定。

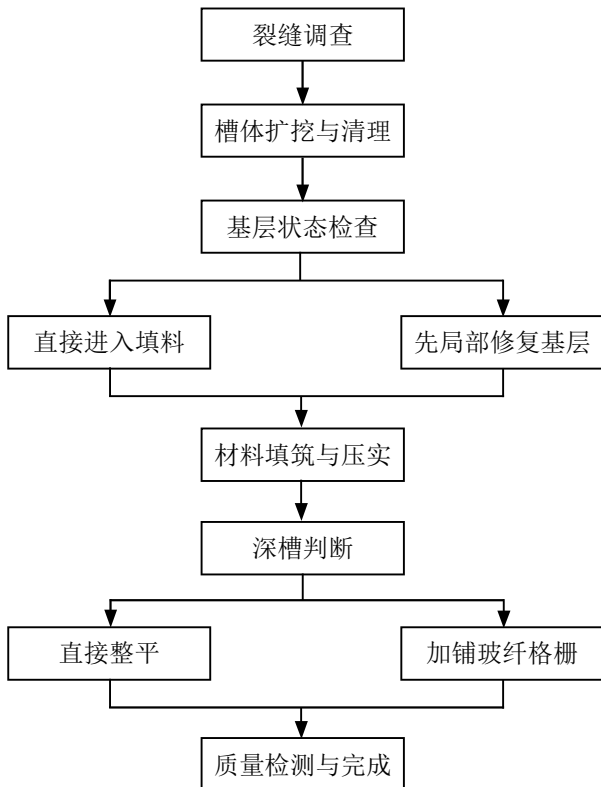


图 1 填缝施工技术流程图

2.3.2 施工条件

材料厚度一般在 1.5 ~ 2.0 mm 之间, 软化点不低于 90 °C, 在 -20 °C 绕规定直径圆棒弯曲无裂纹, 其底层为高粘聚合物改性沥青, 剥离强度应大于 0.8 MPa。施工中要在环境温度大于 15 °C、路面处于干燥状态下方可实施, 撕开隔离膜后, 把贴缝带中心线精确地放在裂缝上, 然后用人工碾压的方法将其平稳地铺设在路面上。再马上利用专门的夯压器具, 在不低于 0.3 MPa 的压力下以连续式的方式沿着带体长度进行滚压 2 ~ 3 次, 使它能够更好地接触道路表面, 尤其是其两侧的裂缝处, 达到紧密结合的目的, 将内部空隙内的气体排出^[5]。

3 市政道桥工程沥青路面裂缝施工处理技术效果分析

完成灌缝、填缝及贴缝等工作之后对上述市政主干道养护工程的技术效果进行综合评价。从路表防水和裂缝扩展来看, 灌缝与贴缝技术有效地提高了裂缝部位的防水性能, 施工结束后经过现场漏水检测、降雨后的观察结果发现, 裂缝位置的渗漏量大幅度减少, 漏水情况也得到了较好的改善。

为了定量评估裂缝修复的效果, 引入路面裂缝修

缮效率指数 CEI (Crack Effectiveness Index)。它的计算公式如下:

$$CEI = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{P_{i1} - P_{i2}}{P_{i1}} \quad (1)$$

式 (1) 中: CEI 表示的是裂缝治理性能指数; w_i 是第 i 个评价指标的权重; P_{i1} 是施工前的指标数值; P_{i2} 是施工后的指标数值; n 是评价指标的数量。

由该工程项目现场测试结果可知, 裂缝扩展程度相比施工初期减少近 72%, 路面渗水情况减小了大约 80%, IRI 路面平整度指数提高 35%, 局部结构强度增加了 25%。将有关数值带入上述公式进行估算得出总综合裂缝治疗效果系数 $CEI \approx 0.83$, 说明总体治理成效较好。此外, 在竣工养护一年后无明显新的裂缝蔓延状况, 在行车舒适度以及路面总体稳定情况上都有很大程度的提高。

4 结论

针对市政道路桥梁工程中沥青路面裂缝修补问题, 本文在总结裂缝形成原因的基础上, 对防治技术加以探讨, 并以实例形式阐述了不同类型裂缝采用的灌缝、填缝以及贴缝方法对预防裂缝发生和发展的作用大小。研究表明: (1) 温度应力、水破坏作用和行车负荷是引起沥青面层出现裂缝及发展的主要原因, 三者同时作用下会使路基整体强度迅速下降; (2) 根据不同的裂缝种类选择合适的灌缝、填缝与贴缝技术, 严格把控好刨槽宽度、清理缝隙和材料质量等方面的技术要求, 能提高修补材料封闭性和抗剪能力; (3) 通过对工程处治前后的渗水量、裂缝发展程度和平整度等指标进行比较分析, 修复后的路面渗漏量减少, 裂缝扩展情况得到缓解, 平整度有所提高, 总体上达到了预期的养护目标。

参考文献:

- [1] 张钰. 复杂环境下公路路面裂缝自动识别技术[J]. 四川建材, 2026, 52(01): 182-184.
- [2] 独陆周. 农村公路水泥混凝土路面裂缝修补技术[J]. 四川水泥, 2026(01): 168-170.
- [3] 全刚. 市政道路养护中沥青路面裂缝修复技术研究[J]. 江西建材, 2023(03): 387-388, 393.
- [4] 蔡信昕. 解析市政道路白加黑路面反射裂缝防治技术[J]. 福建建材, 2021(08): 74-75, 87.
- [5] 王文全. 市政道路维修养护前技术状况调查及评价方法探讨[J]. 山西建筑, 2020, 46(15): 120-122, 198.

桥梁墩柱混凝土外观质量预防与缺陷处理技术

魏开颜

(四川省交通建设集团有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要 在高速公路桥梁工程建设中,墩柱作为核心承重结构,其混凝土外观质量不仅决定结构观感效果,更直接关系到混凝土结构的耐久性与使用安全性。西南山区高速公路桥梁施工环境复杂,墩柱混凝土浇筑过程中易出现蜂窝、错台、色差、表面浆液残留等外观缺陷,影响工程整体施工质量。本文结合G4216线宜金高速XJ27标工程实例,系统分析桥梁墩柱混凝土外观缺陷的核心成因,从人员、模板、工艺、原材料四个方面构建全流程外观质量预防体系,针对各类常见缺陷提出标准化处理技术与安全管控要点,旨在为同类山区高速公路桥梁墩柱混凝土施工提供参考。

关键词 桥梁墩柱;混凝土;外观质量;缺陷处理

中图分类号:U445

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.032

0 引言

我国山区高速公路建设持续推进,桥梁工程成为线路穿越复杂地形的核心结构形式。墩柱是桥梁上下部结构的关键传力构件,其混凝土施工质量直接决定桥梁整体结构的安全与使用寿命。混凝土外观质量是墩柱施工质量的直观体现,外观缺陷的背后往往伴随混凝土密实度不足、保护层厚度偏差等内部质量问题,长期使用中易引发钢筋锈蚀、结构耐久性下降等病害^[1]。

当前山区桥梁墩柱施工中,受地形条件、施工工艺、人员操作、原材料波动等多重因素影响,混凝土外观质量缺陷频发,且部分项目存在重结构强度、轻外观质量的管控误区,缺陷处理不规范引发二次质量问题^[2]。基于此,本文结合实际工程案例,系统研究桥梁墩柱混凝土外观质量的前期预防措施与后期缺陷处理技术,构建全过程质量管控体系,保障桥梁墩柱施工质量符合规范与设计的要求。

1 工程概况

本工程为G4216线屏山新市至金阳段高速公路XJ27合同段,项目位于凉山彝族自治州金阳县境内,核心施工内容包含金阳河特大桥左右幅主线桥,以及金阳互通A、B、C、D、E五个匝道桥。桥梁墩柱结构包含圆柱实心墩与空心薄壁墩两种形式,墩身模板均采用定制钢模板拼装浇筑工艺。项目地处西南横断山区,施工场地狭窄,墩柱施工多为高空作业,受山地气候与地质条件影响,施工环境复杂。

墩身混凝土浇筑完成拆除模板后,成品结构易出现多种外观质量缺陷,主要表现为蜂窝、错台、麻面、表面色差、水泥浆液残留、表面气孔等类型。为保障墩身结构整体施工效果与长期耐久性,项目部成立专项质量管控小组,针对墩柱混凝土外观缺陷开展系统性成因分析,制定专项预防控制措施与标准化缺陷修补方案,确保墩柱混凝土施工质量符合《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)、《公路工程质量检验评定标准》相关要求。

2 桥梁墩柱混凝土外观质量预防

2.1 施工队伍与责任体系建设

项目部成立专项施工质量管控小组,明确项目经理为工程质量第一责任人,全面统筹质量管控工作,技术负责人牵头落实各项质量管控细则,小组同步纳入施工员、质检员、安全员及各作业班组长,形成权责清晰、层层落实的质量管控组织架构。项目建立常态化培训机制,每月组织不少于2次专项技术培训,结合桥涵施工图纸与现场工况,系统讲解公路桥涵施工技术规范、混凝土施工质量验收标准、外观质量控制要点等内容,同时将岗前三级安全教育与质量技术交底深度结合,每道工序开工前开展全员交底,确保作业人员熟练掌握施工工艺与质量要求^[3]。

施工过程中全面落实岗位责任制,将混凝土施工各环节的质量管控责任分解到具体岗位与个人,从混凝土拌和、运输、浇筑、振捣到后期养护,每个环节

作者简介:魏开颜(1991-),男,本科,工程师,研究方向:道路与桥梁。

均明确专属责任人,每次混凝土浇筑前完成施工人员实名登记,形成可追溯的质量责任链条。项目配套制定专项奖罚制度,将施工质量与作业人员薪酬、班组工程款结算直接挂钩,对外观质量控制达标、工艺规范的作业班组与个人给予现金奖励,对出现违规操作、引发外观质量缺陷的人员进行处罚与返工教育,从人员管理层面筑牢混凝土外观质量管控的基础。

2.2 模板工程全过程质量管控

模板工程是混凝土外观质量控制的核心环节,项目建立模板选型、进场验收、安装、浇筑盯控、拆除保养的全流程质量管控体系。针对公路桥涵墩柱、盖梁等结构,定制专用定型钢模板,面板厚度不小于 6 mm,模板进场前完成厂内验收,重点核查面板平整度、焊缝质量与加工精度,进场后对模板面板进行全面打磨抛光,去除表面锈蚀与杂质,确保面板光洁无瑕疵。模板安装前,技术人员对施工部位的混凝土垫块布设进行专项检查,采用同强度等级的混凝土保护层垫块,按梅花形均匀布设,间距不大于 80 cm,确保垫块安放牢固、数量充足,精准控制混凝土保护层厚度,避免因保护层偏差引发的露筋、外观色差问题。

混凝土浇筑前开展模板安装质量专项验收,采用全站仪、铅垂仪复核模板轴线偏位与垂直度,偏差严格控制在规范允许范围内,重点核查模板拼接严密性、支撑体系刚度与脱模剂涂刷质量,模板接缝处采用专用双面胶条嵌缝,杜绝缝隙漏浆问题,脱模剂选用专用水性脱模剂,均匀涂刷无漏涂、积流现象,对模板错缝、面板破损、支撑不牢固等问题现场整改,留存完整验收记录。模板安装完成后,对支撑体系进行力学复核,确保浇筑过程中不发生变形、错位,混凝土浇筑过程中安排专职模板工全程值班,实时监测模板状态,发现异常立即暂停浇筑并加固处理,从源头防控错台、漏浆、变形等外观缺陷。

2.3 混凝土浇筑与振捣工艺控制

混凝土浇筑与振捣是决定外观质量的关键工序,项目建立全流程标准化施工工艺,确保混凝土浇筑振捣全过程受控。在混凝土运输过程中,罐车保持 3~5 r/min 的转速持续转动,避免混凝土发生离析、坍落度损失,每车混凝土进场后,现场试验人员与技术人员联合对其工作性能进行全面检测,重点核查坍落度、扩展度、和易性等指标,各项性能符合配合比设计要求后方可签收使用,不合格混凝土直接退回拌和站,严禁擅自加水调整后用于现场施工。混凝土浇筑采用分层

对称下料工艺,分层浇筑厚度严格控制在 25~35 cm 之间,单墩柱浇筑遵循从低到高、对称均匀的下料原则,避免单侧下料导致模板偏位,混凝土自由下落高度严格控制在 2 m 以内,超过 2 m 时采用串筒、溜管辅助下料,防止混凝土下落过程中骨料离析,引发外观麻面、蜂窝问题^[4]。

混凝土振捣采用插入式振捣棒,严格执行快插慢拔的操作规范,振捣棒移动间距不超过其作用半径的 1.5 倍,控制在 30~40 cm 之间,振捣棒插入下层混凝土深度不小于 5~10 cm,确保上下层混凝土结合紧密,杜绝施工冷缝,单点位振捣时间控制在 30 s 左右,以混凝土表面不再下沉、无气泡溢出、表面平坦泛浆作为振捣密实的判定标准,针对钢筋密集的支座垫石、钢筋加密区等部位,采用小直径振捣棒配合人工辅助振捣,严防漏振、欠振、过振问题。混凝土浇筑前配齐备用振捣设备、作业人员与应急照明设施,浇筑作业连续稳定开展,若必须间歇,间歇时间严格控制在混凝土初凝时间以内,高温、雨天等特殊天气提前制定专项浇筑方案,避开正午高温时段施工,做好防雨、温控措施,保障混凝土浇筑成型质量。

2.4 原材料与配合比稳定性管控

混凝土原材料质量与配合比稳定性,是控制结构外观色差、保障成型质量的核心因素,项目建立原材料全流程溯源管控与配合比动态调整机制,从源头保障混凝土性能稳定。同一桥涵结构物施工优先采用同一品牌、同一规格、同一批次的水泥,单个水泥储罐仅储存同一批次水泥,严禁不同品牌、不同批次水泥混装混用,水泥进场时严格查验出厂合格证与检验报告,按批次对安定性、强度、凝结时间等关键指标进行复检,不合格水泥严禁进场使用。

针对粉煤灰、矿粉等掺合料,同样固定供应厂家与产品规格,每批次进场完成性能复检;外加剂采用与水泥适配性良好的聚羧酸系减水剂,进场后开展水泥适配性试验,固定掺量使用,杜绝随意调整外加剂配比的行为。严格管控砂石等地材的质量稳定性,固定料源开采场与筛分生产工艺,砂石料进场后按批次检测级配、含泥量、针片状含量等指标,含泥量超标的砂石料严禁使用,避免因地材性能波动引发混凝土外观色差、强度离散等问题。

项目拌和站建立配合比动态管控机制,每日开盘前检测砂石料实际含水率,根据检测结果调整施工配合比,严格控制水胶比恒定,杜绝因含水率变化导致的混凝土性能波动,同一结构物的混凝土全部由同一

座拌和站、同一套生产设备拌制,严格控制拌和时间,确保混凝土拌和均匀。针对墩柱穿心棒预留孔洞等二次浇筑部位,采用后期集中拌制、集中灌注的施工方式,确保二次浇筑混凝土的原材料、配合比、拌和设备与主体结构完全一致,浇筑前对老混凝土接触面进行全面凿毛,清除浮浆与松散骨料,提前24 h洒水湿润,浇筑时铺筑一层同配合比的水泥砂浆,新旧混凝土养护采用相同的土工布包裹洒水养护工艺,养护周期保持一致,最大限度缩小新旧混凝土的色泽差异与性能偏差,保障结构外观整体均匀一致。

3 缺陷处理关键技术

3.1 蜂窝缺陷修补技术

蜂窝缺陷修补前,先用砂纸对缺陷表面进行全面打磨,清除表面灰尘与松散骨料,再用清水对处理区域进行彻底清洗,待表面处于略微湿润状态后,由作业人员佩戴防护手套、采用白水泥进行均匀涂抹修补,确保修补材料与原混凝土表面紧密贴合。修补完成72 h后,采用砂纸对修补部位进行细部打磨处理,使修补区域表面光滑平整,与周边原混凝土表面平顺衔接,无明显修补痕迹。

3.2 错台缺陷打磨处理技术

错台缺陷处理严格遵循宁磨不补,多磨少补的基本原则,严禁随意采用修补材料填补凹面。处理时先用手砂轮对混凝土表面突出部分进行打磨,使处理面大致平顺,再采用砂纸进行细部精细化打磨,直至处理区域表面光滑平整,用手触摸无明显凹凸感即可。打磨过程中严格控制打磨范围与深度,避免过度打磨损伤主体混凝土结构,影响墩柱结构尺寸与保护层厚度^[5]。

3.3 表面色差与水泥浆液残留处理技术

混凝土表面水泥浆液残留缺陷,先用手砂轮对残留部位进行打磨平整,待表面大致平顺后,再采用砂纸进行精细化打磨,直至水泥浆液印记完全消除,与周边混凝土色泽保持一致。对于墩柱混凝土表面色差缺陷,先对色差区域进行全面清洁,去除表面浮灰与污渍,再采用与原混凝土同品牌同批次水泥调配的水泥浆进行均匀薄涂修饰,修饰完成后采用砂纸进行精细打磨,确保处理后混凝土表面色泽均匀一致。对于二次浇筑部位的色差问题,可采用专用混凝土色差修复剂进行均匀喷涂处理,进一步优化外观整体效果。

3.4 修补施工质量与安全管控要点

项目部成立专业混凝土外观质量缺陷修补队伍,队伍人数不少于10人,作业人员全部经过专项培训考

核合格后方可上岗作业。项目部工程科负责混凝土外观质量缺陷的全面调查、成因分析、修补过程控制与最终质量验收,每一处缺陷修补完成后,必须组织专项验收,验收合格后方可进入下一工序。修补施工前,由技术员与班组长进行班前安全讲话,向作业人员全面交底施工安全风险与防控措施。所有进入施工现场的人员必须佩戴安全帽,按规定佩戴劳动防护用品。高空作业采用专用吊篮或钢管脚手架施工,作业人员必须全程系挂安全带,作业区域设置完善的防护护栏与安全绳,作业平台下方设置警戒区域,严禁无关人员进入。施工作业前,专职安全员对吊篮、钢丝绳、吊车等设备设施进行全面检查,发现钢丝绳断股、断丝超标等问题及时更换,严禁设备带病作业。吊车吊装作业区域设置专职安全员旁站监督,作业前全面检查吊车挂钩与保险装置的完好性,确保吊装作业安全开展。

4 结束语

桥梁墩柱混凝土外观质量管控是一项系统性工程,需始终坚持预防为主、防治结合的核心原则,将质量管控贯穿施工全流程。本工程通过构建人员、模板、工艺、原材料四位一体的墩柱混凝土外观质量全流程预防体系,搭配标准化的缺陷修补处理技术,有效解决了西南山区桥梁墩柱施工中外观缺陷频发的问题,项目墩柱混凝土外观一次验收合格率提升至98%以上,结构耐久性与施工质量得到全面保障,顺利通过了项目业主与监理单位的专项验收。后续施工中还需持续优化施工工艺,结合山区施工环境特点细化管控细则,不断提升作业人员专业能力,从根本上减少外观缺陷的产生,为山区高速公路桥梁工程高质量建设筑牢基础。

参考文献:

- [1] 江大海.探析桥梁墩柱混凝土外观质量缺陷及防治措施[J].大众科技,2023,25(07):30-32,40.
- [2] 胡腾,付万涛,陈建.桥梁墩柱混凝土外观质量缺陷及防治措施探究[J].中国公路,2022(23):106-107.
- [3] 牛远清.桥梁墩柱混凝土外观质量缺陷及防治措施[J].工程技术研究,2021,06(13):162-163.
- [4] 杜鹏,李蕴博.运用TQC质量管理方法提高桥梁墩柱混凝土外观合格率[J].居舍,2021(18):141-142.
- [5] 朱元颢.探析桥梁墩柱混凝土外观质量缺陷及防治措施[J].甘肃科技纵横,2020,49(11):63-66.

公路施工中土石混填路基压实施工技术的应用分析

邱 豪

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 随着我国国民经济的快速发展, 公路工程建设规模不断扩大。而土石混填路基施工是公路工程中常见的路基施工方式。土石混填路基具有材料来源广、施工效率高等特点, 但填料组成复杂, 易出现离析、沉降不均等问题。为提升公路工程整体稳定性, 本文分析了土石混填路基压实施工技术的应用, 使用施工技术分析法系统分析了测量放样、基底处理等施工环节, 并提出质量控制措施, 以期为提高路基压实度、减少沉降变形提供有益参考。

关键词 公路施工; 土石混填; 路基压实施工技术

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.033

0 引言

在山区与丘陵地区的公路建设中, 土石混填路基凭借就地取材的经济性, 成为路基填筑的主流形式。路基是道路结构的核心承载层, 其压实质量直接决定路面耐久性与行车安全, 压实度不足易引发不均匀沉降、边坡失稳等病害, 显著增加后期养护成本。受填料级配、含石量及含水量波动影响, 土石混填路基压实工艺的适配性与精准控制成为工程关键难点。为提高路基施工质量, 有必要系统分析土石混填路基压实施工技术, 以期对相关工程施工提供参考。

1 土石混填路基压实施工技术的应用

1.1 测量放样

测量放样是土石混填路基压实施工过程中保证填筑位置、结构尺寸及填层厚度符合施工设计要求的环节, 直接关系到后续施工中的填料摊铺及路基整体稳定性。施工单位在该阶段要严格依据设计图纸, 系统性测量复核施工区域, 并布设控制桩, 划分标识线, 为后续填筑压实作业提供基准依据^[1]。在完成施工准备后, 施工单位要按照施工设计中的路线坐标与高程控制资料恢复路基中线, 并要求测量人员使用全站仪或 GNSS 测量设备精准定位线路, 在恢复中线的基础上向两侧放样边线位置, 复核纵坡与横坡控制点。为保证施工期间放样的稳定性, 施工单位还需要在路基边缘外侧以 10 ~ 20 m 距离为限, 安装半永久性控制桩, 形成连续控制体系, 减少施工过程中因机械作业导致

的桩位破坏问题。同时, 在控制桩上标注设计标高、路基宽度、边坡脚位置等关键施工参数, 使用红漆进行标注, 且在控制桩间挂线, 直观地展示路基施工范围, 以便准确控制后续摊铺作业的填筑宽度与坡度, 避免出现填筑宽度不足的问题。在高填方路段, 施工单位还需根据横断面设计参数适当加密放样过程中的控制桩, 提高边坡线及填筑边界的精确性。为进一步提高控制填筑厚度的准确性, 施工单位还可依据路基宽度和运输车辆容积划分方格网辅助控制施工区域, 明确规定每个方格内的卸料数量, 控制填料用量, 保证摊铺厚度均匀一致, 更有利于压路机在后续碾压过程中形成均匀的压实效果。完成测量放样后, 施工单位还应检查所有控制桩, 确保中线位置、边线位置及标高数据准确无误, 必要时建立测量记录档案, 为后续施工提供依据, 提升路基整体施工质量。

1.2 基底处理

完成测量放样后, 便是基底处理。需由施工单位依据《公路路基施工技术规范》(JTG 3610—2019) 相关要求, 系统清理填筑范围内的原地基, 为后续填料压实施工提供稳定基础条件。全面清理作业中, 施工单位要重点清除地表 20 ~ 30 cm 范围内的植被、树根、腐殖土及松散杂物等不稳定材料, 并保证清理后的地基表面平整, 不存在残留根系或软弱土体, 避免在填筑路基过程中形成局部沉陷^[2]。清理基地表层后, 施工单位应整平、压实处理原地面, 利用平地机修整地基, 使其形成均匀平整的施工面。随后使用振动压

作者简介: 邱豪 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 技术现场管理。

路机进行碾压,保证填方路基基底压实度高于90%,且适当提高重载交通路段或高填方区域的控制标准,以减少填筑后地基产生附加沉降的可能性。在此基础上,施工单位要重点关注施工区域原地面存在的较大横坡,采取针对性结构处理措施,开挖台阶,借助分级台阶结构增强新填土石与原地基间的结合能力,以防止填筑路基沿基底产生滑动。在台阶开挖过程中,施工单位应沿等高线方向进行,并保证台阶宽度大于2 m,台阶底部向内侧形成倾斜,具有良好抗滑结构。台阶高度一般在0.3~0.6 m间,更好地衔接填筑层。开挖台阶后,施工单位要组织施工人员再次清理台阶表面,进行分层填筑施工,从台阶底部逐层向外填筑土石材料,使其充分接触台阶面,且与原地基形成紧密咬合结构,显著提高路基整体抗剪能力,减少路基产生滑移或剪切破坏的风险。基底处理完成后,施工单位还要全面检测处理范围,进行测量,必要时进行现场检测,抽检基底压实度,记录施工数据作为控制质量的依据,为后续分层填筑、碾压作业提供可靠的施工基础。

1.3 填料运输与摊铺

在土石混填路基压实施工过程中,填料运输与填筑属于路基形成结构实体的重要施工环节,直接影响路基后续压实效果。施工单位在组织填筑作业时,需依据《公路路基施工技术规范》(JTG 3610—2019)相关要求,合理控制填料运输方式、卸料间距及填筑组织^[3]。在填料运输过程中,施工单位需采用自卸汽车进行集中运输,将填料运送至指定填筑区域,并根据事先计算的卸料间距进行集中卸料,保证填料均匀分布在填筑区域内,避免局部填料出现差异。填料卸料完成后,施工人员立即组织机械进行粗平作业,在路基范围内使填料形成基本均匀的填筑层,为后续压实作业创造稳定条件。在整个施工过程中,施工单位还需不断进行机械翻动作业,在填筑层内均匀分散不同粒径材料,保证填料中最大粒径不超过填筑层厚度的2/3。若在此过程中,存在大粒径石块集中区域,施工单位还可采用人工破碎方式,进行人工翻拌,实现重新分散,减少填筑层内部的孔隙率,提高路基整体稳定性。在填筑施工中,施工单位还需要控制每层填筑厚度在30 cm以下。形成填筑面后,施工单位及时对存在粗细颗粒分离或空洞结构的局部区域进行补料、翻拌处理,避免在后续压实过程中出现局部沉降问题,为公路路基整体结构稳定提供可靠保障。

1.4 接缝处理

在土石混填路基压实施工过程中,由于需要分段推进施工,无法一次性完成填筑作业,会不可避免地

形成作业段间的接缝结构。这需要施工单位按照规范要求系统处理横向接缝与纵向接缝,保证新旧填筑体间形成稳定衔接结构,维持路基的整体质量。施工过程中形成的横向接缝多位于相邻施工段间。所以,施工单位需按照《公路路基施工技术规范》(JTG 3610—2019)相关要求,在完成一个作业段填筑后,于已完成填筑层端部预留一定长度的斜坡结构,控制横向接缝处的斜坡台阶小于2 m,以避免形成垂直接缝带来的结构薄弱问题,为后续填筑提供有效搭接条件^[4]。在填筑下一施工段前,施工单位还要全面检查预留接缝区域,清理接缝表面,适当整形接缝面,使其保持稳定、平整的结构状态,必要时翻拌处理接缝局部,重新分布粗细颗粒,改善接缝区域的填料结构,防范出现局部空隙结构,以免影响压实效果。整理接缝区域后,从新施工段填料的接缝处开始逐层填筑,使新填料充分覆盖原有斜坡台阶,充分填充原有填筑层表面空隙,提高接缝区域的整体密实度。除横向接缝外,路基边缘区域还会形成纵向接缝结构,也要求施工单位进行分层搭接填筑,并翻拌调整接缝区域出现的大粒径石块集中情况,减少孔隙结构,提高密实度。随后,检查接缝区域质量,重点检测填筑层的平整度、压实度及结构稳定情况,确保接缝处填料结构连续且密实稳定,以更好地提高土石混填路基填筑结构的整体性,为路基长期稳定运行提供可靠保障。

1.5 碾压夯实

土石混合填料具有颗粒组成复杂、粒径差异较大的特点,容易增加填层孔隙率、降低整体密实度。所以,碾压夯实是土石混填路基施工过程中影响路基结构强度的直接工序。施工单位在开展碾压作业时,应根据填料性质、填层厚度制定科学的压实计划,选用合适的振动压路机作为主要压实设备,采用“先稳压后振压”的施工方式^[5]。在碾压初期,先是使用压路机静压方式稳压填层,使填料表面形成稳定的结构状态,消除初步摊铺后产生的松散现象。随后,进入稳压阶段,使用低速行驶方式进行碾压,增加填料表面密实程度,为后续振动压实提供基础。稳压完成后,施工单位再开启振动装置振动压实,借助压路机振动产生的动荷载作用,重新排列填料内部颗粒,提高填层密实度。同时,施工单位还应依照“先边缘后中间”的顺序进行碾压作业,即先碾压路基两侧边缘区域,再逐步向路基中心推进,防止振动压实过程中出现填料向边缘侧移的情况,以便形成稳定的填层结构。压路机在碾压过程中保持相邻轮迹间的1/3轮宽重叠宽度,控制行驶速度在2~4 km/h范围内,保障碾压区域间的连

续覆盖,避免漏压现象。根据《公路路基施工技术规范》(JTG 3610—2019)相关要求,一般情况下振动压路机碾压遍数在 4~6 遍范围内,在块石含量较高或填层厚度较大的区域,可适当增加碾压次数。针对路基边角部位、机械无法有效到达的区域以及桥涵结构附近等易形成压实死角的地方,施工单位则采用小型压实设备逐点夯击并适当增加夯实次数,辅助夯实路基,保证边角区域填料结构稳定密实。碾压完成后,整体检查施工面,若发现局部压实不足,及时补充碾压处理,以提升路基承载能力,为公路工程长期安全运行提供可靠保障。

2 土石混填路基施工质量控制措施

2.1 完善路基排水设施

水分条件在土石混填路基施工过程中会显著影响填料压实效果,若施工区域内的排水条件不良,便易在路基范围内积聚雨水,增加填料含水量,进而降低填料之间的摩擦力,降低压实质量甚至产生局部沉降。所以,为更好地控制土石混填路基质量,施工单位可在施工前完善排水设施,保证施工区域的良好排水条件。开始路基填筑作业前,施工单位应结合施工区域地形条件设置临时排水系统,开挖临时边沟、截水沟形成有效的排水网络。其中,截水沟主要布置在填方路基上侧坡面,用于拦截周边坡面汇水。临时边沟则布置在路基两侧,以排出施工区域内的施工废水,降低雨水对施工面的影响。同时,填筑层表面平整度同样会影响排水效果,若表面存在局部凹陷,便易在凹陷区域积聚雨水,使填料长时间处于潮湿状态,影响压实质量。在施工过程中,施工单位要使用平地机保持填层表面平整,避免形成车辙或明显起伏,减少雨水渗入填层内部的可能性。这种完善的施工排水条件,可有效防止边坡冲刷现象,提高土石混填路基压实施工质量,保证路基结构稳定。

2.2 加强边坡防护

边坡稳定性对土石混填路基施工中的路基整体结构安全具有重要影响。土石混填材料颗粒组成复杂,块石含量较高,易在填筑过程中出现滚石、局部坍塌等问题,影响路基结构稳定性。施工阶段,施工单位需严格控制边坡坡率,配合相应防护措施,加强边坡控制。施工单位应控制填方路基边坡坡率在 1:1.5~1:1.75 范围内,并依据填料性质及路基高度调整具体坡率,利用控制桩挂线方式控制边坡位置,避免因机械作业造成边坡外扩现象。同时,及时清理坡面突出的块石,

加固填方高度较大的路段。块石含量较高的边坡区域,则选用稳定性较好的石料,采用块石码砌方式加固处理坡脚,使其形成具有较高抗滑能力的结构体系,有效阻挡坡面滚石,提高坡脚部位抗冲刷能力。部分路段,施工单位还可加入土工格栅等加筋材料,使其在填层中形成有效的加固体系,增强边坡稳定性,减少边坡变形风险。

2.3 加强沉降观测

在土石混填路基施工过程中,控制沉降是保证路基长期稳定的重要内容。由于土石混填材料颗粒组成复杂,在自然环境作用下易产生一定程度的沉降变形,可能导致路面不均匀沉降。因此,施工单位需在施工阶段设置沉降观测设施,开展持续监测,动态掌握路基变形情况。例如:在路基填筑施工过程中,施工单位可在路基顶面采用沉降观测桩形式设置沉降观测点,并布置在路基中心线位置及两侧边缘区域,同时适当加密桥头、高填方路段区域,以便全面反映路基不同位置的沉降变化情况。当完成路基填筑后,还需要继续开展阶段性沉降观测,掌握工后沉降变化情况,据此绘制沉降曲线,分析路基沉降发展趋势。若观测过程中发现沉降量超过正常范围,便及时分析原因,采取补充碾压、换填处理等相应处理措施,以减缓沉降发展趋势,进一步提升路基结构稳定性。

3 结束语

公路路基是道路结构体系的基础,直接影响道路稳定性。在实际工程中,只有系统统筹测量控制、基底处理、填料摊铺等环节,并在施工过程中同步强化排水、防护及沉降监测等质量管理措施,才能有效提升土石混填路基的整体稳定性。随着施工技术的不断发展,土石混填路基施工仍需进一步规范施工操作行为,严格控制施工质量,以推动路基工程施工规范化发展。

参考文献:

- [1] 姜斌. 干线公路土石混填路基材料的压实施工技术研究[J]. 工程机械与维修, 2025(08):97-99.
- [2] 李得胜. 公路施工中土石混填路基压实施工技术的应用研究[J]. 交通科技与管理, 2024,05(22):102-104.
- [3] 林国辉. 公路工程土石混填路基施工技术[J]. 汽车画刊, 2024(07):112-114.
- [4] 陈亮. 公路施工中的土石混填路基施工技术分析[J]. 运输经理世界, 2023(26):22-24.
- [5] 张瑞杰. 研究公路施工中的土石混填路基施工技术[J]. 黑龙江交通科技, 2022,45(06):68-69.

超高层建筑施工中的总承包方现场管理难点与对策

贾晓磊

(合肥市轨道交通集团有限公司, 安徽 合肥 230001)

摘要 超高层建筑施工工序复杂、参与方多元, 总承包方现场管理面临诸多挑战, 直接影响施工效率、安全、质量与成本控制。本文结合超高层建筑施工实际, 聚焦总承包方现场管理核心难点, 分析施工组织协调、安全管控、质量控制、成本资源管理及进度管理五大难点, 针对性提出优化协调体系、强化安全管控、完善质量体系、优化资源配置、细化进度管理等优化对策, 以期超高层建筑施工总承包方提升现场管理水平、化解管理难题、保障施工顺利推进提供实践参考, 助力超高层建筑施工高质量开展。

关键词 超高层建筑; 总承包管理; 现场管控; 施工协同; 高质量施工

中图分类号: TU974

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.034

0 引言

城市建设的竖向发展推动超高层建筑成为现代化都市的核心地标与功能载体, 其施工建设不仅是建筑技术的综合体现, 更对现场管理提出了精细化、系统化、协同化的严格要求。随着行业监管体系不断完善、智慧建造技术深度落地, 超高层建筑施工的复杂度持续提升, 多专业交叉作业、高空风险防控、高精度质量把控、资源动态调配与进度刚性约束等问题相互交织, 成为总承包方现场管理的核心挑战。粗放式的管理模式已无法适配超高层项目的建设需求, 若现场管理存在漏洞, 极易引发施工效率低下、安全事故隐患、工程质量缺陷、成本超支及进度延误等一系列问题, 直接影响项目整体建设成效。本文立足于超高层建筑施工实践, 以苏州市吴江区绿地中心B1超高层项目为核心案例, 该项目建筑高度358米, 地下三层、地上78层, 建筑面积31.79万平方米, 主体结构采用带伸臂桁架的框架-核心筒结构体系, 更是创新应用国内首例分体式核心筒构造(上部由交叉斜撑连接的双核心筒), 施工技术难度大、专业协同要求高, 参建分包单位达30余家, 由上海建工某公司担任总承包单位, 项目建设中集中暴露了超高层施工管理的典型痛点。本文结合该项目实际, 梳理总承包方现场管理的五大核心难点, 同步融入建设方管理视角, 针对性提出优化对策, 为超高层建筑施工总承包方提升现场管理水平、化解

管理难题提供实践参考, 助力行业实现安全可控、质量达标、效益均衡的高质量发展。

1 超高层建筑施工总承包方现场管理核心难点

1.1 施工组织与协调管理难点

超高层施工工序复杂、参与方多元, 导致组织协调难度激增, 直接影响施工效率与节奏。超高层建筑施工涵盖土建、机电、装饰、消防、空调等多个专业, 各专业施工周期、技术标准存在差异, 交叉作业场景频繁。本项目在塔楼北侧仅有两台人货梯(宝达SC200/200VA中速施工升降机), 在装修阶段总共78层的材料垂直运输和正常施工存在极大冲突, 工作面小, 不同工序衔接的精准度要求极高。不同专业施工队伍在作业时间、空间分配上易产生冲突, 若缺乏高效协调机制, 极易出现工序脱节、返工窝工等问题, 打乱整体施工节奏。分包单位数量多是超高层施工的显著特征, 本项目参建分包单位共30余家, 各分包单位技术水平、管理标准、施工理念存在差异, 总承包方面临统一管理的巨大压力, 统筹协调过程中需投入大量人力、物力梳理各方诉求, 协调成本显著上升。

1.2 安全管理难点

超高层建筑施工过程中高空作业数量非常多、风险点位密集, 安全管控的覆盖面和精细化水平不容易得到保证。超高层建筑高度特别高、作业面分布很散, 高空作业所占比例特别大, 临边位置、各种洞口、高

作者简介: 贾晓磊(1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

空悬挑等危险作业场景到处都能见到,作业人员发生高空坠落、遭受物体打击的风险明显比普通建筑施工高出很多。临边防护需要跟着施工进度进行动态调整,防护设施的搭设过程、维护工作与拆除活动本身就有安全风险,如果管控工作不细致,很容易形成安全隐患^[1]。塔吊、施工电梯这一类大型机械设备是超高层施工的核心装备,它们的运营状态直接关系到施工安全,设备安装环节、调试过程、运行阶段、维护保养的每一个步骤都需要严格规范,而且受到高空风力变化、施工荷载波动等因素影响,设备故障排查和维护保养难度比较大,一旦出现运营异常情况,可能引发重大安全事故。例如:本项目超高层塔楼采用的是单元板块式幕墙体系,在施工过程中,需采用单元板块幕墙专用吊具、轨道式操作平台,高空极易出现狭管效应、塔楼风涡流情况,在 300 多米的高空情况瞬息万变,必须有极高的施工组织与安全协同机制,才能保证超高层幕墙施工的安全推进

1.3 质量管控难点

超高层建筑结构组成很复杂,对施工精度的要求非常高,容易产生质量隐患,控制管理难度大。超高层建筑大多会用到高标号混凝土,这类材料对强度、耐久性都有严格规定,浇筑流程里需要精确把控配合比、浇筑快慢与振捣程度,并且在高空浇筑时会遇到骨料分离、坍落度下降等状况。后期养护工作需根据环境温度、湿度去灵活调整,哪个环节控制不到位都可能引起混凝土强度不够、出现裂缝等质量问题。本项目幕墙也是关键的一环,本项目大面双曲单元幕墙系统,东西侧平面框架幕墙系统,首层及 C 系统采用双曲钢框架幕墙系统,也是质量管控难点。多曲面幕墙一直是目前国内超高层工程的重难点,幕墙团队运用 BIM 技术对 10 772 个单元板块翘曲值进行分析,并运用 ANSYS 对单元板块进行冷弯受力分析后,商定大部分板块采用工厂加工成平板单元,现场直接冷弯安装;少部分翘曲值较大的板块采用工厂组异形框进行玻璃冷弯组成异形单元板块,现场直接安装;对于极少数翘曲值太大不能实现冷弯的板块采用传统双曲玻璃与冷弯型材结合的方法进行安装。通过以上的分类施工,在保证工程质量的同时能够实现对成本控制的要求,最终将设计效果完美呈现。

1.4 成本与资源管理难点

超高层建筑的施工周期很长且资源消耗量很大,成本与资源的动态管控方面存在比较突出的难度。超高层建筑施工的体量非常庞大,材料消耗数量也很大,材料存储需要配备专门设施,避免出现受潮或损坏。

存储成本与损耗率的把控也是成本管理的重要一环^[2]。大型机械设备在超高层施工中是不可缺少的资源,其租赁费用昂贵,并且设备进场、安装、拆卸都需要投入额外支出,设备使用过程中要同时考虑利用率与维护成本,资源配置的优化难度较大,如果设备闲置或者使用效率太低,会直接推高施工成本。本项目投资额 50.41 亿,产生了大量的总包工期索赔和费用索赔,对后续成本与资源管理管控提出了更高的要求。

1.5 进度管理难点

超高层建筑施工工序繁多,而且受到的外部因素影响也很大,进度计划的执行和调整都面临巨大挑战。超高层建筑在施工过程中工序相当复杂,从基础部分的施工、主体结构的施工,一直到机电安装和装饰装修,每个阶段的工序都是紧密相连的,并且多个专业经常需要交叉作业,其中某一个工序的拖延很可能引起一连串的反应,最终使得整体进度落后。在交叉作业过程中,各个专业施工队伍之间的协同配合直接关系到进度的衔接,要是沟通不够顺畅、衔接不够恰当,就容易出现工序等待或者施工干扰的情况,进而造成进度的拖延。恶劣天气是影响超高层施工进度的一個关键外部因素,高温、暴雨、台风这类天气条件会直接造成高空作业、室外作业无法正常进行,并且超高层建筑施工受到天气影响的范围和程度都要远远高于普通建筑。政策管控比如扬尘治理、夜间施工限制等也会对施工进度带来明显影响。本项目因台风、重要会议等不可抗力因素,也因超高层幕墙问题、资金问题等内部管理因素造成了严重延期情况。

2 超高层建筑施工总承包方现场管理优化对策

2.1 优化施工组织与协调管理对策

总承包方需构建标准化全流程协调体系。结合项目施工总进度计划细化各专业施工节点清单,明确土建、机电、消防等工序衔接的时间、技术标准与责任主体,搭建线上线下一体化沟通平台,线上共享施工信息,线下定期召开协调例会,及时解决衔接问题。推行分包单位标准化准入与考核机制,招标阶段明确施工与管理要求,进场前开展统一培训,从质量、进度、安全等维度量化考核,考核结果与工程款、后续合作挂钩^[3]。建设方则发挥统筹主导作用,制定项目管理章程,划定各方责任边界,设立工程协调部门监督总承包方协调工作,对分包单位进行资质二次审核,推动签订三方协同协议,将管理要求融入协议条款,强化各方协同配合意识,从顶层设计化解多参与方、多工序的协调难题,降低统筹协调成本。

2.2 强化安全管理对策

总承包方要结合项目分体式核心筒、高空斜撑安装等特殊场景,完善全维度安全管控体系,制定针对性高空作业、临边防护方案,明确防护设施搭设、维护、拆除标准,安排专人动态检查维护。加强塔吊、施工电梯等大型设备全流程管控,建立进场验收、定期检修制度,配备专业运维团队应对高空施工的设备风险;开展分层分类安全培训,组织应急演练,建立作业人员实名制管理系统,杜绝无证上岗。建设方需筑牢安全监督防线,将安全指标纳入总承包方绩效考核并实行“一票否决制”,成立安全督查小组定期检查、随机抽查,对隐患下达整改通知书并跟踪闭环。

2.3 提升质量管控对策

总承包方需构建施工全流程质量管理体系。针对项目高标号混凝土浇筑、高强钢筋、高空钢结构施工、超高层幕墙施工、桁架板弧形收边等重点环节改进工艺,精准控制混凝土配合比与搅拌质量,选用适配高空泵送的设备,结合环境温湿度制定个性化养护方案,建立混凝土质量全流程追溯机制;钢结构施工中严格把控构件进场验收,利用高精度仪器控制安装定位偏差,由专业人员开展焊接作业,通过超声波、射线等设备检测焊缝质量^[4]。

2.4 优化成本与资源管理对策

总承包方需构建动态成本管控体系,搭建材料采购、库存、消耗全流程管理架构。安排专业团队跟踪核心材料价格波动,通过集中采购、长期协作锁定价格。建立科学库存制度,结合施工进度把控库存规模,改进存储设施降低损耗,实时监控材料消耗并及时调整计划。优化大型设备租赁使用方案,科学安排设备进出场时间,采用联合作业提升利用率,建立设备维护台账减少故障;建立资源动态调配机制,根据施工进度调整人、机、料配置,避免资源不足或过剩。建设方则强化成本统筹把控,制定项目投资总概算与分阶段控制目标,严格审核总承包方成本预算,将进度款支付与成本管控挂钩,对超支单位暂缓付款。同时核查资源使用情况,防止浪费与虚报成本,鼓励采用新型节能材料和先进工艺并给予成本补贴,统筹协调周边资源供应渠道,为总承包方提供资源信息支持,降低采购与租赁成本,保障项目投资效益。

2.5 完善进度管理对策

总承包方要结合项目结构特点与特殊工序要求,制定精细化施工进度计划,将基础、主体结构、机电安装、装饰装修等阶段层层细化,明确工序衔接要求,

预留合理缓冲期应对突发情况。建立外部因素预警机制,实时监测天气变化,恶劣天气时优先开展室内作业,密切关注政策管控要求并优化施工流程;规范设计变更与现场签证流程,严格控制非必要变更,确需变更时及时评估影响并调整进度计划,明确签证办理流程与时限,确保签证及时准确。同时建立进度常态化管控机制,每日核查、每周分析,及时整改进度偏差^[5]。建设方需强化进度统筹监督,确定项目总工期与节点工期,将节点完成情况纳入绩效考核,设立工期专项奖励基金,对提前完工予以奖励,对延误单位要求制定赶工方案^[6]。加强设计变更统筹管控,推动设计单位提前完成图纸深化,减少施工变更;建立进度联动反馈机制,实时监控总承包方上报的进度信息,对滞后节点及时预警,协调各方提供赶工支持,同时统筹办理各项审批手续,避免因审批滞后影响施工进度,保障项目按既定工期交付^[7]。

3 结束语

超高层建筑施工总承包方现场管理是一项系统性、综合性工作,需兼顾多专业协同、多风险防控与多目标平衡,其管理水平直接关系到工程建设的整体成效。本文梳理的五大管理难点,是行业内普遍面临的共性问题,提出的优化对策贴合现场施工实际,可有效破解各环节管理瓶颈。未来,总承包方需结合工程具体情况灵活运用各类管理策略,持续优化管理模式、细化管理措施,强化各参与方协同联动,兼顾安全、质量、进度与成本的动态平衡,推动超高层建筑施工管理向精细化、标准化、高效化升级,为超高层建筑行业高质量发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 吴振梓.超高层建筑钢结构施工技术与管理研究[J].散装水泥,2024(06):50-52.
- [2] 牛章红.超高层建筑混凝土泵送施工技术研究[J].四川建材,2024,50(12):119-121.
- [3] 巩立斌,王跃军.超高层建筑绿色施工中数字化技术的应用研究[J].绿色建筑与智能建筑,2024(08):33-38.
- [4] 甘明.超高层建筑机电安装工程的精细化管理研究[J].房地产世界,2024(03):119-121.
- [5] 尚兴虎.超高层建筑施工安全风险分析及安全管理[J].中华建设,2023(12):32-35.
- [6] 高丽歌,张素雨.刍议市政工程EPC项目总承包方的项目管理[J].四川水力发电,2020,39(S2):69-72.
- [7] 熊亚军.集中式山地光伏项目施工中EPC总承包方的风险管理策略[J].居业,2025(03):217-219.

中小型水闸除险加固施工关键技术与管理模式创新研究

邹江威

(醴陵市水利局, 湖南 株洲 412200)

摘要 中小型水闸是农村水利中重要的一环, 普遍存在结构老化、工况复杂、资金有限等诸多除险加固难题。基于此, 本文详细分析了中小型水闸病害不易发现、施工配合度要求较高等问题, 重点从地基与基础加固、混凝土缺陷修补等方面的技术进行了总结, 归纳出“精准诊治—分区加固”“微创探察—定点修复—动态加固”“工厂生产+现场装配”“生态基础—本土植被—景观节点”联合等一系列的技术措施, 并建立了“BIM+ 全程咨询+EPC”的一体化管理模式以及“标准量化—过程把控—数字化赋值”的三层质量管理机制。通过清水江水闸实例证明, 该技术应用于水闸地基, 在承载力提高、减少渗漏和淤积、恢复结构作用并兼顾生态与美化效果方面的应用前景良好。

关键词 中小型水闸除险; 加固施工关键技术; 管理模式

中图分类号: TV66

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.035

0 引言

我国水利基础设施建设已从新建为主过渡到建设与维护并存阶段。20 世纪中后期建设的小型水闸, 因水流冲击、温差变化、材料老化等, 出现不同程度损毁, 功能衰退, 威胁生命财产安全, 急需除险加固。中小型水闸数量多、个体小、资金少, 多在灌溉区末端或河流最后环节, 环境复杂、施工难度大, 除险加固要满足多种需求, 有独特难题。传统加固措施因监测鉴定、工序配合、措施失衡等难以解决的问题, 管理方式落后易致拖延和质量问题。需根据中小型水闸特点和环境, 开发适用性强、费用低的技术手段, 建立合理高效的管理模式, 以保安全、恢复功能、长久使用, 为美丽乡村建设和水利兴农战略护航^[1]。

1 中小型水闸除险加固特点与难点分析

1.1 结构老化与病害隐蔽性强, 检测评估难度大

中小型水闸大多修建在 20 世纪中叶以后, 经过长时间的水流侵蚀和冻融作用, 以及材料的老化等原因存在结构缺陷, 具有渐变性和隐蔽性的特点。在这些中小型水闸里, 闸室的混凝土容易产生蜂窝麻面、碳化脱落的现象, 在其内部钢筋生锈、产生裂缝等情况很难从表面看出来; 闸门止水脱落、启闭机螺杆变形等现象一般由于平时巡视次数较少而不易发现。再加上

一些水闸的设计图纸丢失或者与实际不相符, 在进行检测的时候就需要配合使用无损检测方法(超声回弹法、雷达探测法)、局部开挖检验^[2]等方法, 不仅技术难度较大而且需要配合停水时段, 容易因为检测不到位而使得加固措施缺乏针对性从而给以后的施工带来隐患。

1.2 工况复杂与空间受限, 施工协同要求高

中小型水闸多位于田间灌区或是河口末端附近, 四周往往围满了灌溉支渠、交通公路、民宅, 场地面积狭小, 重型设备无法施展拳脚。例如: 闸基加固要使用高压旋喷桩或者锚杆静压桩^[3], 但是工作面受到邻近构筑物的基础限制; 而更换闸门要拆解旧闸门, 由于吊运空间不够, 只能分段运输拼接。另外, 水闸既要具备拦洪挡潮, 又要担负灌溉任务, 在施工期间要多次截断水流, 一方面要抢在旱季来临之前完成加固工作, 另一方面还需留足临急泄洪的空间, 环节之间安排不当就会影响整个流域的安全度汛。此外, 施工过程中多工种(土建、电气、金属结构)混合作业量大面广, 使得对施工方案实施过程中的灵活调整也提出非常高的要求。

1.3 资金有限与效益多元, 方案比选矛盾突出

中小型水闸大多由当地水利单位或者村委会管理, 险工险段整治费用以中央、省财政投入为主, 一座工

作者简介: 邹江威(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 水利水电。

程往往不到一千万元,要求严控投资规模。然而,在加固要求上既要保证安全(提高防洪标高等)、发挥效益(增加灌溉保障程度等),又要节约开支(减少运行维护费用等)。这三方的要求互相对立冲突:如果采取简单拆除重建的方法,虽然彻底解决了问题,但是远远超出规定投入金额;如果只是进行简单的修复,则可能会因为没有彻底解决根本问题而在不久之后再次出现同样的问题。此外,一些水闸本身兼有生态环境作用(为鲑鱼提供洄游路径等),那么必须在加固时设置生态孔以及仿生态护坡等,这样又大大压缩了资金投入的空间。如何在严格的投资约束条件下做好技术和综合效益之间的权衡取舍就是这一类工程方案选择的最大难题。

2 中小型水闸除险加固施工关键技术

2.1 地基与基础加固技术

为了解决中小水闸地基承载力偏低、差异沉降等问题,在此基础上开发“精确探测—分级处理”的方法流程。使用地质雷达、轻型动力触探等对软土层分布情况以及桩基完整性和基底渗流路径进行调查分析^[4],并建立三维地质模型;对于浅层软弱地基,首选水泥土搅拌桩复合地基技术,利用水泥掺比(15%~20%)、桩体强度(≥ 1.5 MPa)来创建一个整体性的加固体,从而提高地基模量大于30%;对于深层透水层或者是基底掏空部位,用高压旋喷注浆构建一个连续性防渗墙,并配合袖阀管分段式注浆方式精确封堵渗漏点^[5]。在施工过程中加入动态监控措施,在现场安设孔隙水压力计和沉降监测装置,对注浆压力(0.5~2.0 MPa)及速度予以及时校准,防止超压引起既有建筑物上浮。

2.2 金属结构制作与安装技术

对于混凝土碳化、裂缝、露筋等各种病害形成了一套“微创检测—靶向修复—主动加固”的方法,利用红外热像仪以及超声波CT对内部缺陷位置进行精确定位并对表面缺陷(厚度小于50 mm)处用聚合物砂浆(抗压强度不低于40 MPa、粘结力大于或等于2.5 MPa)进行层层填补,在界面处涂抹环氧底胶提高粘接性能;对深层的缝隙(宽度大于0.2 mm),在缝隙两侧开V型槽并注入弹性聚氨酯灌浆材料同时安装骑缝钢筋网片阻止缝隙扩大,对大面积碳化的部位(碳化深度超过10 mm)使用高压喷涂硅烷浸渍剂以达到防护目的,其渗透深度达到30 mm以上。对于强度不够的闸墩采取外包型钢加固的方法(角钢L100×10,缀板间距为200 mm),采用化学锚栓将新增构件固定连接至原有

结构上^[6],可显著提升截面抗弯刚度,经计算与试验验证,其提升幅度可达60%。同时,该方法通过加强节点密封与防护,能有效延缓混凝土劣化进程,经实际工程应用评估,可使结构耐久性延长约10年。此外,修复完成后,经表面精平处理,平整度误差可控制在3 mm以内,满足规范要求。

2.3 生态护坡与景观融合施工技术

构建“生态基材—本土物种—景观节点”体系,护坡底层用孔隙度25%~30%的植生混凝土并植入PVC排水管,中间层喷射8~10 cm厚有机质基材(草炭土:蛭石:有机肥=6:3:1),顶层混播狗尾巴草、芦苇等本土植物,配植紫花苜蓿提升生物多样性。堤顶路设1.5 m宽透水砖生态步道,闸区规划5%~8%面积建雨水花园,打造“闸—林—田”景观带,兼顾生态防护与景观美化。

3 中小型水闸除险加固施工管理模式创新与实践

3.1 传统管理模式的困境

常规中小型水闸加固一般采取“设计—招标—施工”的线形管理方式,具有以下三个不足之处:一是参建各方配合差,设计单位注重规范达标,施工单位强调加快速度、降低成本,监理单位凭借经验判断,往往会形成“重结构安全保障、忽视生态效益功能发挥”,“重主部位施工、轻细部控制”的断层现象;二是调节反应滞后,设计前期对地质条件、施工干扰等预估不足,变更签证量达15%~20%,造成拖期及费用超支情况的发生;三是难以追踪质控,以纸质文件为主,隐蔽工程验收记录容易遗失,质量问题追责难,返修整改周期过长,占整体工期的比例超过10%。

3.2 创新管理模式构建

以“全生命周期联动,信息化引领”为核心理念,构建“BIM+全过程咨询”一体化管理模式^[7]。依托BIM三维协同平台,集成地质勘探、结构设计及施工方案等多源数据,开展跨专业碰撞检测,提前发现并解决管线错位问题23处;结合4D进度仿真技术,动态模拟施工流程,优化工序路线,实现工期缩短12%。引入全过程咨询团队,对设计、造价、监理实施全链条管控,组建“设计优化—施工预控—运维前置”综合工作组,针对生态防护墙稳定性、金属构件安装精度等关键节点开展专题研讨,从源头减少设计变更,将变更率控制在5%以内。通过信息化手段与专业化咨询深度融合,实现项目从规划、建设到运维的全周期高效协同,显著提升管理精度与工程效益。

3.3 精细化质量管理体系

建立“标准量化—过程严控—数字赋能”的三级质量管理机制。编制《中小型水闸加固质量管控清单》，把 286 项控制指标具体化（混凝土湿养湿度不低于 90%、金属焊接焊缝探伤达到 100%），确定每一道工序的责任人以及验收标准；实行“三位一体”检查和“四步法”检验程序即班组互检、互查、专检与监理初验、复验、终验、第三方飞行检查），对地基注浆压力、混凝土碳化深度等重要指标使用自动化采集设备（智能化灌浆记录仪、无线温湿度传感器），数据实时上传至管理平台，出现异常自动报警（响应时间小于 10 分钟）；运用区块链技术锁定质量档案，将隐蔽工程图片、试验单据等录入区块链进行保存，保证可追溯、不可篡改。实践证明，在此模式下，单位工

程质量优良率由 75% 提高到了 92%，质量纠纷降低幅度高达 90%，为同类型项目提供了良好的质量管理模式。

4 工程案例

4.1 工程概况

清水江水闸位于醴陵市船湾镇，属中型水利工程，1959 年投用，兼具灌溉、发电、防洪功能，集雨面积 294.5 平方公里，设计灌溉面积 1.21 万亩（实际 0.8 万亩），保护防洪面积 1.21 万亩。枢纽含拦河闸坝、渠首闸、过木道，其中闸室段长 110 m，设立轴搭叠门挡水闸、泄洪闸、冲砂闸。

4.2 施工技术应用效果

表 1 显示闸门段由于 50 年代工艺制约所导致的运营老化。设计立轴搭叠门漏水率 $\leq 5\%$ 、不均匀沉降 \leq

表 1 闸室段结构运行效果

指标类别	设计标准	现状检测结果	技术应用背景 (1950s 工艺)	效果说明
立轴搭叠门漏水率	$\leq 5\%$ (设计允许)	12% ~ 15%	门体止水材料为橡胶垫 (易老化)	由于长久使用，止水失灵造成灌区渗漏损失约为 15% (年损水量 200 万 m^3)
闸室段不均匀沉降	$\leq 10 \text{ mm}/10 \text{ m}$ (设计)	18 ~ 22 $\text{mm}/10 \text{ m}$	地基仅简单夯实，未处理软土	闸室出现轻微倾斜 (最大倾斜角 0.3%)，影响闸门启闭同步性
泄洪闸过流能力	设计 50 年一遇洪水下泄 300 m^3/s	实测 250 m^3/s	闸孔尺寸按经验公式设计	受闸墩部分磨损 (混凝土碳化深度 5 ~ 8 mm) 造成过流量减少 17%

10 $\text{mm}/10 \text{ m}$ 、泄洪闸过流 300 m^3/s ，实际分别劣变为 12% ~ 15%、18 ~ 22 $\text{mm}/10 \text{ m}$ 、250 m^3/s 。橡胶止水老化、地基简单夯实、经验公式设计闸孔，叠加混凝土碳化 (5 ~ 8 mm)，造成漏水损水 200 万 m^3 /年、闸室倾斜 0.3%、过流效率降 17%。数据证实早期工艺缺陷对结构耐久性的影响很大，需要更新止水、加固地基、修复闸墩来维持其功能。

5 结束语

本文研究中小型水闸除险加固核心技术及管理方式，剖析工程老化隐蔽性强、工况复杂、效益矛盾突出等问题，总结地基基础、混凝土结构等加固新工艺，形成精准检测到现场安装的整体流程，提高加固精确性和耐久性。管理采用“BIM+ 全过程咨询 +EPC”模式及三级质量控制机制，使设计施工配合、变更可控、质量可追溯，提升工程质量和建设速度。清水江水闸实践证明，应用这些技术可治理渗漏淤塞、修复主体结构、融合生态环境，实现安全可靠、功能实用、生态美观。未来将探索数字化监测和智慧运维应用，制

定技术标准及费用定额，推动中小型水闸除险加固走向精确化、智能化、绿色化，助力水利事业发展。

参考文献:

- [1] 王栋, 李征. 水闸施工技术及其除险加固方案的研究 [C]// 智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集 (一). 2025.
- [2] 张亚婷. 水闸除险加固工程施工技术探析 [J]. 河南建材, 2025(09):87-89.
- [3] 张伟. 水闸除险加固汛期导截流高效施工技术研究 [J]. 水利技术监督, 2025, 33(04):127-130, 134.
- [4] 曹利平. 基于风险决策分析的水闸除险加固施工技术 [J]. 水利科技与经济, 2024(03):30-34.
- [5] 同 [4].
- [6] 明皓翁. 水利工程水闸除险加固设计分析 [J]. 水电科技, 2024, 07(01):32.
- [7] 林其瑞. 龙海市西溪水闸除险加固工程围堰施工方案 [J]. 水利科技, 2023(02):56-59.

机电设备运行维护及检修策略探究

刘学彦

(招远市北截金矿有限公司, 山东 烟台 265400)

摘要 随着工业化、智能化水平不断提升, 机电设备集成度、复杂度不断提高, 运行过程中各类故障频发, 给维护、检修及故障处理工作带来严峻挑战。科学开展设备维护、规范检修程、精准分析故障、高效处理隐患, 是延长设备使用寿命、控制运行成本、防范安全事故的关键。本文围绕机电设备运行维护、检修流程、故障分析及处理措施展开研究, 明确机电设备运行维护的核心原则与基础要求, 阐述检修工作的核心流程及关键点。研究发现, 通过强化常态化维护、完善故障排查、优化处理流程、加强人员建设等措施, 可以强化机电设备运行可靠性, 减少故障出现的可能, 延长设备。

关键词 机电设备; 运行维护; 检修; 故障处理

中图分类号: TM07

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.036

0 引言

在工业生产、基础设施建设等各个领域, 机电设备是保障生产运营连续性、提升效率的核心支撑, 其运行状态直接关系到运营安全与经济效益。现阶段, 各行业机电设备的应用较为广泛, 实现了人力财力等资源的节约, 促使各企业提升了生产能力及水准。在机电设备的使用规模逐步扩张的前提下, 做好对应的运行维护、故障处理十分重要, 能保障企业生产运行的稳定性, 避免企业遭受经济损失。基于此, 本文分析机电设备的运行故障、机电设备的故障排除及维修方式, 探究做好机电设备运行维护及故障处理的措施^[1]。

1 机电设备检修的核心流程与关键点

1.1 机电设备检修的核心流程

机电设备检修的核心流程主要包括故障排查、故障修复、检修测试三个环节。故障排查是检修工作的第一步, 也是最关键的环节, 其核心是准确找到故障原因和故障部位。故障排查需结合设备运行记录、维护记录、状态监测数据, 采用“先整体后局部、先简单后复杂、先电气后机械”的排查思路, 通过观察、检测、试验等方式, 逐步缩小故障范围, 明确故障原因^[2]。

在检修工作方面, 故障修复为关键所在, 要从故障部位及因素着手, 构建切实可行的修复方案, 通过选取适宜的措施及材料能够保障修复效果。在进行修复工作时, 必须结合规范、标准进行, 侧重点应放在规范操作流程上, 防止由于操作不当导致的二次事故。

在检修工作末尾, 应重点关注检修测试, 由此能够达成对修复效果的检验, 进而判断设备可否处于正常运行状态。在进行此项工作时, 应结合规范标准展开, 完成对设备运行参数、性能指标等的有效检测, 过程中如果存在问题的话, 应在第一时间予以整改, 直至设备检测达标才能够将其投入运行。

1.2 机电设备检修的关键点

首先, 要做好检修质量的控制, 严格把控零部件质量、修复工艺、测试标准, 在结束检修工作后, 设备可以长时间运转, 防止出现“修后即坏”的情况。其次, 应做好检修安全管理工作。在检修之前必须要保障设备电源处于切断状态, 还应完成好其他的安全防护工作。检修作业时, 要结合安全标准进行, 避免人身伤害等问题发生。最后, 应完成好检修记录归档工作, 对故障排查、修复过程等信息进行记录, 做好设备检修档案的建设工作, 由此助力后期维护工作, 并且也能够实现检修责任可溯^[3]。

2 机电设备运行的故障分析

2.1 性能退化故障

在机电设备运转过程中, 通常会遇到性能退化问题。该类故障相对常见, 主要是由于设备在长时间运转状态下, 关键性指标处于逐渐下降的态势, 无法满足额定运行需求, 然而也并没有发生显著部件损坏, 设备虽然能够实现勉强运转, 然而整体的效率却明显衰弱。该类故障呈现出较强的渐进性, 并且兼具隐蔽

作者简介: 刘学彦(1978-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 机械电气。

性。在故障出现初始阶段表现的并不是特别显著,因此会被忽视,然而在运行时间持续延长的状态下,会造成性能退化加剧,情况严重的话会导致其他故障发生。引发该类故障的主要原因为:首先,设备零件处于自然磨损状态下,加上长时间运转,这样零部件之间的磨损就会加大,导致表面磨损,由此使得运行精度及性能受到影响,随之减弱。其次,润滑系统失效,在润滑油长时间使用之后,便会发生老化、变质等情况,导致润滑效果受到影响,进而造成零部件磨损严重,最终使得设备性能退化。再次,运行环境影响。一些设备通常会处在恶劣环境里运转,在此过程中会被高温、粉尘等因素所影响,导致设备零部件老化加速,还会发生腐蚀等问题,造成设备性能降低。最后,维护保养工作缺失。部分主体没有在固定时间对设备展开清洁保养等工作,造成设备积累过多杂质,导致整体运行阻力提升,而对应的性能则会随之下降^[4]。

在机电设备运转过程中,如若发生性能退化故障的话,所对应的参数势必会和额定标准出现偏差,比如转速下降、功率降低等。同时,故障程度也会随着运行时间的增加而不断加重。针对该类故障,需在第一时间进行处理,借助维护保养、零部件校准等方法能够实现对设备性能的有效恢复,降低故障持续恶化的可能。

2.2 设备损坏故障

设备损坏故障是指机电设备的核心零部件或关键部位出现不可逆的损坏,造成设备无法运行,情况严重的话会发生停机等问题,该类故障呈现出较强的突发性及破坏性。该类故障发生主要由于突发因素等作用所造成,如果没有第一时间进行处理,在很大程度上会导致机电设备损害加深,情况严重的话会造成安全事故。

造成损坏故障发生的主要因素有:首先,过载运行,由于机电设备处于长时间超负荷运转状态,会造成零部件承受压力过大,进而导致零部件断裂、变形等问题出现。其次,操作不当,在机电设备运转过程中,存在着人员违规操作的情况,使得设备受到冲击,导致零部件损坏问题发生。再次,维护不当,进行此环节工作时,存在着零部件更换不及时的情况,还有一些机电设备会使用不合格备件,由此造成零部件发生突然损坏问题。最后,外部冲击,在机电设备运转过程中,会遭遇到碰撞、震动等外部因素,由此造成关键部件损坏^[5]。

2.3 功能失效故障

在功能失效故障方面,主要表现为机电设备某个或多个关键功能出现问题,无法正常运转,在发生该

种问题之后,即使设备可以启动运行,却无法完成预设的运行任务,这对于生产运营势必会造成较大影响。该类问题通常表现在设备的控制系统、传动系统等区间,呈现出较强的针对性,如若功能模块发生失效问题的话,则会表现为不同的故障现象。

发生失效故障的主要原因为:首先,在控制系统方面发生故障,控制器、传感器、执行器等控制部件存在问题,由此造成信号传输受到影响,表现为传输异常、指令执行缺失等,无法实现对设备的高效控制。其次,传动系统故障。在齿轮、链条等部件上会存在磨损、松动等情况,最终造成动力传递不畅,导致设备无法达成预设的运动功能。再次,电气系统故障。由于存在线路老化、接触不良等问题,进而使得机电设备的电气功能失效。例如:发生该类故障的话,设备通常无法启动。而且设备的运行参数无法调节。最后,软件故障。智能化机电设备会存在卡顿、崩溃等情况,造成设备功能受到影响。

2.4 运行失衡故障

失衡故障主要表现为机电设备在运行时被受力不均、参数失调等因素影响,造成机电设备运行稳定性不足,表现为震动、晃动等,情况严重的话会造成设备损坏,并会在很大程度上造成安全事故。该类故障往往会在旋转类机电设施里,因此故障会呈现出较强的直观性。

失衡故障的致因为:首先,旋转部件不平衡。在机电设备运转过程中,旋转部件会发生质量问题,由此造成离心力出现,最终导致设备震动、晃动。其次,部件配合失当。在进行零部件安装时,由于存在精度不足的问题,造成运行时会发生受力不均,最终导致失衡。再次,运行参数失调。在机电设备转速压力等方面,由于运行参数和正常区间存在着差距,进而使得机电设备稳定性不足。最后,基础松动。机电设备安装时,由于受基础不牢靠等因素影响,运转过程中会存在晃动问题,导致运行失衡加重。

3 机电设备运行维护及故障处理措施

3.1 强化常态化运行维护,防范故障发生

在防范机电设备故障时,应当重点关注常态化运行维护。要从机电设备的类型等因素着手,构建切实可行的维护方案,且要保障维护措施能够落实推行,这样就可以从根本上降低故障隐患出现的可能。首先,做好日常保养工作,坚持“每日检查、每周清洁、每月保养”的频次要求,过程中要重点关注设备清洁、润滑等。对于存在的灰尘、油污等,应当进行全方位

清除，第一时间添加、更换润滑油。如果零部件存在松动情况的话，要及时紧固，由此保障机电设备能够处于可靠的运行状态。其次，做好定期检查工作，从机电设备的运行时长等要素着手，构建科学的检查周期。应重点检测设备的运行参数、零部件磨损情况等，且要以此生成相应的检查报告，对排查出的风险要第一时间整改，防止风险积累造成故障发生^[6]。并且，要做好机电设备运行环境的管控工作，通过对运行环境的持续性优化，可以防止机电设备处于恶劣环境。在规定时间内对设备环境清洁、通风，降低环境因素对设备造成的影响，由此能够延缓设备老化问题，降低事故出现的可能。

3.2 完善故障排查机制，精准识别故障

要建立健全的故障排查制度，确定排查流程、方法等，进而保障排查精准度。首先，建设故障排查责任机制，明确人员的排查责任，这样在出现故障后可以做到有效响应，且能够第一时间进行排查。其次，应规范排查流程，从机电设备运行记录、维护记录等着手，借助观察、检测等措施，明确故障区间。再次，应积极使用切实可行的排查技术，对设备运行数据进行全方位收集，特别要重视大数据分析技术的应用，由此可以掌握背后的规律，进而对故障原因进行相应的判断，防止盲目排查导致的再次损坏以及资源浪费。

3.3 优化故障处理流程，提升处理效率

故障处理需遵循“快速响应、精准处理、测试合格、及时复盘”的原则，侧重点要放在故障处理流程上，这样可以保障在出现故障后能够在尽可能短的时间里进行处理，由此减少故障停机时间。首先，要从机电设备的实际情况着手，构建切实可行的响应机制，在出现故障之后，维修员要第一时间到达故障出现的区域，做好停机检查，完成初步故障类型的判断，借助切实可行的防护对策，避免故障持续恶化。其次，应做好针对性的处理工作。要从故障类型及原因等因素着手，并结合机电设备的具体状况，构建切实可行的故障处理对策，由此构建相应的处理步骤、方法等，这样能够保障处理工作扎实有效进行。再次，规范处理操作。在维护人员方面，需结合处理方案等进行相应的工作，尤其要重视操作流程的规范，防止由于操作失误导致的再次故障，若遭遇复杂故障的话，要和厂家进行全方位交流，通过外部力量解决。最后，在结束故障处理之后，应完成好相应的测试工作。通过空载测试、负载测试等方法能够明确掌握机电设备的恢复情况，在保障其处于正常运行状态之后才能使用。

3.4 加强人员队伍建设，提升专业能力

在对机电设备进行维护的过程中，维护团队所呈现出来的能力将会对故障处理质量产生直接影响。因此，要做好人员团队建设工作，强化维护人员的整体能力。首先，健全的培训机制，在固定时间协调维护人员进行专业技能培训，侧重点应放在设备原理、故障类型等内容上，这样能够帮助维护人员更好地掌握关联知识，由此对故障进行精准识别。其次，应打造考核制度。通过此环节的工作能够对维护人员的技能水平展开有效考核，且要将结果和绩效进行挂钩，由此可以激发人员更为积极主动地学习。再次，要把侧重点放在高素质人才引进上，通过此项工作能够有效补充维护团队力量，侧重点要放在智能化设备维护人才上，这样可以促使维护工作更加智能化。最后，应做好交流学习工作。通过协调维护人员进行内部交流，能够更好地分享维护经验，并掌握更多的故障处理技巧；而借助行业交流则是能够互相学习、共同进步，以满足新型机电设备维护的现实需求。

4 结束语

机电设备作为工业生产及各类基础设施运行的核心支撑，其运行稳定性、安全性直接关系到生产效率、运营成本及人员安全，做好设备运行维护、检修及故障处理工作具有重要的现实意义。本文系统梳理了机电设备运行维护的核心原则与基础要求，详细阐述了检修工作的核心流程与关键点，提出了针对性的维护及故障处理措施，形成了一套较为完整的机电设备运维及故障处理体系，旨在有效降低故障发生率，延长设备使用寿命，保障设备长期稳定高效运行。

参考文献：

- [1] 赵柱堂. 智能建筑背景下机电设备安装调试及运行维护管理创新[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 453-454.
- [2] 王子玉, 梁智, 黄煥. 机电设备维护与故障排除技术的改进策略研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(06): 45-47.
- [3] 饶慧. 解析机电设备在市政施工中的有效运用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(02): 146-148.
- [4] 何荷. 机电设备的电气自动化改造及维护探讨[J]. 冶金与材料, 2022, 14(01): 157-158.
- [5] 张超龙. 机电设备运行与维护管理的重要性探讨[J]. 机械管理开发, 2021, 36(11): 315-316, 334.
- [6] 朱娟芬, 谢志勇. 机电设备运行的维护和故障处理措施研究[J]. 中国设备工程, 2021(09): 75-76.

多风地区风电机械化施工关键技术研究

吴杰, 莫方强

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730)

摘要 在双碳目标引领下, 我国风电开发持续向多风地区拓展, 大风环境下的机械化施工成为风电项目建设的核心难点。本文以国家电投额敏 50 万千瓦风电项目为例, 系统分析了多风环境对风电机械化施工的核心影响, 通过梳理项目施工面临的工期紧张、吊装风险高、作业窗口期短等核心难点, 从人员技能提升、起重设备优化、施工工艺创新、安全管控升级四个方面提出多风地区风电机械化施工关键技术体系。通过现场应用验证, 该技术体系可有效降低大风环境下的吊装作业风险, 缩短单台风机安装周期, 提升施工效率与作业安全性, 为同类多风地区风电工程建设提供技术参考与实践经验。

关键词 多风地区; 风电工程; 机械化施工; 吊装技术

中图分类号: TM614

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.037

0 引言

全球能源转型进程持续加快, 风能作为清洁可再生能源, 已成为各国能源结构调整的核心方向。我国西北多风地区风能资源储量丰富, 是国内风电规模化开发的重点区域。但多风地区普遍存在风速波动大、极端风况频发、有效作业窗口期短等问题, 给风电机械化施工尤其是核心的吊装作业带来极大挑战^[1]。传统风电施工工艺与设备管理模式已难以适配多风地区的特殊施工环境, 易出现吊装作业风险高、施工效率低、工期管控难度大等问题^[2]。基于此, 本文依托新疆额敏玛依塔斯风区风电项目, 开展多风地区风电机械化施工关键技术研究, 破解大风环境下风电施工的核心难点, 推动风电工程施工技术的优化升级。

1 工程概况与施工核心难点

本研究依托国家电投额敏 15 万千瓦储能配套 60 万千瓦风电二期 50 万千瓦风电 PC 总承包工程。项目风电场位于新疆九大风区之一的老风口玛依塔斯风区, 场址区海拔高度集中在 630 m 至 1 430 m 之间, 场区东西跨度 37 km, 南北跨度 15 km, 属山地丘陵地貌。项目新建风电装机规模 500 MW, 拟采用 50 台单机容量 10 MW 的风力发电机组, 轮毂中心高度 120 m, 配套建设 12.5 万千瓦 /50 万千瓦时储能电站与 1 座 220 千伏升压汇集站。项目于 2025 年 4 月开工, 计划 2025 年 10 月 30 日具备并网条件, 总工期约 15 个月^[3]。

项目施工面临两大核心难点。一是有效施工周期

短, 工期管控压力大。项目所处地区 11 月即进入冬季, 易出现大雪霜冻等极端气候, 低温环境会降低施工效率, 影响机械设备运行稳定性, 受冬季气候影响, 项目主体施工任务需在 7 个月内完成, 工期紧任务重。同时, 项目场址位于多风核心区, 大风天气频发, 吊装作业有效窗口期短, 进一步压缩了可施工时间, 给工期管控带来极大挑战。二是吊装作业安全风险高, 施工技术难度大。项目风机吊装采用额定起重重量不低于 1 200 t 的履带吊作为主吊, 风机吊装、履带吊组装与拆除均属于超危大工程范畴^[4]。多风环境下, 大风会对吊物与吊装设备产生较大侧向力, 影响设备稳定性, 易引发吊物摆动、高空坠物等安全事故。同时, 风速的瞬间波动会干扰吊装指挥与设备操作, 大幅提升吊装作业的安全管控难度。

2 多风环境对风电机械化施工的核心影响

2.1 风载荷对吊装设备稳定性的影响

多风地区的风向与风速具有极强的瞬时波动性, 吊装作业过程中, 风载荷会直接作用于起重臂、吊物与设备主体, 形成侧向推力与倾覆力矩, 是影响吊装作业安全的核心动态载荷。风电吊装涉及的塔筒、机舱、叶片等大型部件迎风面积大、质心控制难度高, 在侧风与紊流脉动风作用下易产生大幅摆振与风致旋转, 不仅会直接影响高空构件的对接安装精度, 还会通过钢丝绳向设备主体传导冲击载荷, 加剧吊装系统的动载波动, 引发钢丝绳张力骤变、吊具受力失衡等问题。

作者简介: 吴杰 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 工程技术管理。

风载荷产生的倾覆力矩会随起重臂仰角、作业半径的增大而显著放大,当风速超出设备作业临界阈值,或遭遇突发强阵风时,倾覆力矩会快速突破设备自身抗倾覆稳定极限,极易引发设备失稳、倾覆等重大安全事故。同时,脉动风带来的循环交变载荷,会持续作用于起重臂铰点、回转支撑等关键受力结构,长期作业下易造成金属结构疲劳损伤、焊缝开裂,形成难以提前排查的隐性安全隐患。

2.2 风况波动对施工安全与效率的影响

多风地区阵风频发,风速与风向的无规律变化,会给吊装作业的精准操作带来极大干扰。吊装过程中突发的阵风,易导致吊物位置偏移,造成塔筒法兰对接错位、叶片安装精度不达标等问题,需要反复调整作业,大幅降低施工效率。同时,大风天气会造成沙尘飞扬,降低现场能见度,干扰指挥人员与操作人员的视线沟通,易引发指令传递错误,进而导致操作失误,引发安全事故。此外,当风速超出规范允许的作业阈值时,必须停止吊装作业,频繁的启停会严重打乱施工节奏,延长单台风机的安装周期。

2.3 极端气候对施工设备与人员作业的影响

多风地区常伴随高温、低温、沙尘等极端气候,与大风环境形成耦合效应,进一步影响机械化施工的正常开展。高温环境会导致吊装设备金属结构热膨胀,润滑油黏度降低,影响设备运行精度与稳定性,同时易造成施工人员中暑,导致反应与判断能力下降,引发操作失误。低温与大雪天气会造成设备油路冻结、金属结构脆性增加,大幅提升设备故障概率,同时施工人员行动迟缓,应急处置能力下降,进一步放大作业风险。沙尘天气会造成设备精密部件磨损、控制系统故障,缩短设备使用寿命,也会给现场作业人员的职业健康带来威胁。

2.4 多风环境对施工工期管控的影响

多风地区风电施工的有效作业窗口期,直接受大风天气的制约。项目所处的玛依塔斯风区年均风速达10 m/s,8级以上大风天气占比高,符合吊装作业安全要求的窗口期短且分布零散。传统施工模式未对风况进行精细化预判,无法高效利用零散的作业窗口期,易造成施工资源闲置,工期延误。同时,大风环境引发的设备故障、施工返工、安全整改等问题,会进一步打乱施工计划,增加工期管控的不确定性。此外,项目跨冬季施工,低温与大风的叠加效应,会导致部分工序无法正常开展,进一步加剧工期管控压力^[5]。

3 多风地区风电机械化施工关键技术优化

3.1 基于VR模拟的吊装作业人员技能提升技术

多风地区风电吊装作业受瞬时阵风、侧风突变等极端风况影响显著,吊装操作人员的应急处置能力,直接决定了大风环境下作业的安全与效率。传统岗前培训多以理论讲解和现场跟岗为主,难以还原强风环境下的各类突发工况,操作人员无法系统性开展应急处置实操训练,面对风况突变和设备故障时极易出现操作失误。针对这一难点,项目依托新疆玛依塔斯风区的实际施工环境,研发适配多风地区风电吊装的VR模拟训练系统。系统采集项目所在区域近五年的逐时气象数据,梳理不同季节、时段的风速风向变化规律,同时汇总风电吊装过程中起重设备故障、吊物摆动失控等高频突发场景,结合虚拟现实技术1:1还原1200 t履带吊吊装10 MW风机的全流程操作场景,全面覆盖强风、阵风、旋转风等各类复杂风况,邀请行业内资深吊装操作手与风电施工专家全程参与系统优化,确保场景设置、操作逻辑与现场施工完全贴合。

为保障训练效果,项目基于VR系统搭建了阶梯式实操培训体系,按照基础操作、复杂风况适配、突发故障应急处置三个阶段,为吊装操作人员制定系统化训练计划,每阶段设置对应的实操考核标准,考核通过后方可进入下一阶段训练,确保操作人员全面掌握大风环境下的吊装操作技巧与应急处置流程。该系统在项目现场全面投用后,累计完成42名吊装操作人员的系统化培训与考核,现场实测数据显示,经过VR系统专项训练的操作人员,在风速10 m/s以上的强风工况下,吊装操作失误率从原先的12%降至5%,面对突发风况和设备故障时的应急处置响应时间缩短至50 ms,大幅降低了人为操作失误引发的吊装安全风险,同时缩短了操作人员的现场岗前适应周期,为多风地区风电吊装作业的人员技能标准化培训提供了成熟的实践路径。

3.2 起重设备智能化优化与适配技术

多风地区风电吊装作业中,起重设备的稳定性直接决定作业安全。传统固定配重模式无法适配风速、风向的瞬时变化,易出现起重臂振动过大、吊物摆动失控等问题,尤其在玛依塔斯风区这类强风频发区域,常规设备配置方案的适配性严重不足。针对这一问题,项目研发了起重设备配重智能化选择系统,系统持续采集施工现场风速、风向、气温等实时气象数据,通过数理统计分析挖掘当地风况的日变化与季节变化规

律,同时结合有限元力学分析软件,搭建不同吊装工况下的多维度受力模拟计算模型。系统以施工安全、作业效率与成本控制为核心约束条件,通过智能优化算法,为塔筒、机舱、叶片等不同构件的吊装场景,匹配动态化的配重配置方案,实现配重参数与实时风况的精准适配。

在智能化配重系统的基础上,项目还针对多风环境完成了起重设备的全方位适配优化。通过风洞试验与现场吊装实测数据,优化了 1 200 t 履带吊的吊臂作业角度与伸臂长度组合,降低设备迎风面的风载荷敏感度,同时对设备液压阻尼系统进行升级改造,通过自适应阻尼调节实时抵消风致振动。现场应用数据显示,优化后的起重设备在 10 m/s 侧风工况下,起重臂振动幅值降低 60%,旋转风引发的吊钩偏移量预测误差控制在 3 cm 以内,设备抗风稳性与吊装对接精度大幅提升,既拓宽了吊装作业的风速适配范围,也从设备层面筑牢了多风环境下的吊装安全防线。

3.3 塔筒分段式吊装与预组装修施工工艺创新

针对传统整体吊装工艺高空作业量大、对作业窗口期要求高的问题,创新塔筒三段式吊装施工工艺。将 120 m 高的塔筒拆分为 3 段,单段长度控制在 40 m 以内,将传统的高空整体吊装分解为分段接力吊装,大幅降低单次吊装的迎风面积与风载荷影响,可适配更宽范围的风速工况,有效提升吊装作业的时间利用率。同时,优化塔筒附件安装工艺,制定爬梯、平台、电缆等附件的地面预组装修标准化流程,明确预组装修工艺节点与质量控制要求,在地面完成塔筒段附件的全部安装工作,减少 70% 以上的高空作业量,既降低了大风环境下高空作业的安全风险,也大幅缩短了高空作业时间。创新采用夜间低风速窗口期施工策略,利用 22:00 至次日 6:00 的低风速时段开展吊装作业,将单日有效作业时间增加 4 小时,进一步提升了吊装作业效率。通过工艺优化,单台风机的安装周期从 10 天缩短至 8 天,缩短幅度达 20%,塔筒法兰对接错位误差控制在 0.5 mm 以内,实现了施工效率与安装质量的双重提升。

3.4 多风环境施工全流程安全管控技术

构建多风地区风电吊装施工全流程安全风险管控体系,形成覆盖事前预判、事中管控、事后应急的全链条安全管理机制。事前阶段,建立精细化的风况监测与预判体系,在安装现场地面与起重设备上布设多台风速仪,实时监测地面与高空风速,同时对接当地气象部门与专业气象观测机构,精准预判天气变化走

向,提前规划吊装作业窗口期。针对风机吊装、履带吊拆装等超危大工程,编制专项施工方案与应急预案,通过专家论证后严格执行,施工前开展全员技术交底与安全培训。事中阶段,严格执行吊装作业风速管控标准,当风速超出规范允许值时,立即停止吊装作业,做好设备与部件的固定防护。施工过程中安排专职安全员全程旁站,对吊装作业全流程进行监督管控,及时纠正违规操作,消除安全隐患。事后阶段,完善应急处置机制,针对起重设备故障、吊具损坏、突发大风等紧急情况,制定专项应急处置预案,定期开展应急演练,确保突发状况下能够快速响应、有效处置,全面筑牢多风环境下风电施工的安全防线。

4 结束语

多风地区是我国风电资源开发的核心阵地,破解大风环境下风电机械化施工的技术难题,对推动风电行业高质量发展具有重要意义。本文依托新疆额敏风电项目,系统分析了多风环境对风电机械化施工的核心影响,针对项目施工的核心难点,从人员技能提升、起重设备优化、施工工艺创新、安全管控升级四个方面,构建了多风地区风电机械化施工关键技术体系。现场应用结果表明,该技术体系可有效降低大风环境下吊装作业的安全风险,提升操作人员的应急处置能力,缩短单台风机安装周期,提高施工效率与安装质量,取得了良好的经济效益与安全效益。本次研究形成的成套技术,可为我国西北、华北等多风地区的风电工程建设提供成熟的技术参考与实践借鉴。随着风电单机容量的持续提升,塔筒高度与吊装重量不断增加,还需进一步结合智能化、数字化技术,深化风场精细化预报、吊装设备自适应控制等方面的研究,持续完善多风地区风电机械化施工技术体系,助力我国风电产业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 李进光.基于振动分析的风电设备故障诊断技术[J].科学技术创新,2025(23):29-32.
- [2] 王秀文,冀卫东,齐涛.风电塔架非标附件焊缝等效疲劳等级评估方法[J].风能,2025(11):84-90.
- [3] 韩志,陈英华.一种风电叶片打磨机器人系统设计[J].中国科技信息,2025(22):114-117.
- [4] 杜稼原.基于风资源计算的风电机组发电效率优化研究[J].电气技术与经济,2025(10):367-369.
- [5] 董璐,尹维,吴祥顺,等.风电机组轴承在用润滑脂理化性能与摩擦学性能研究[J].润滑与密封,2025,50(10):182-188.

软土地基处理技术在道路工程中的重要性

安守慧, 刘志刚, 王 敏

(内蒙古锐信工程项目管理有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要 道路工程作为现代社会的重要基础设施, 特别是在城市化进程不断加速的背景下, 道路工程建设数量逐渐增多。然而, 我国很多地区的地质条件较为特殊, 道路工程建设受到软土地基影响, 造成结构承载力、稳定性无法达到运行需求, 极大地阻碍了道路工程顺利建设。软土地基的主要特点是含水量较高、结构的稳定性较差、承载力不足, 尤其是很多地区松散性强, 无法满足道路工程运行需求。在这种情况下, 需针对软土地基实际情况采取合适的处理措施, 使其满足道路工程建设要求。本文结合道路工程软土地基特性展开分析, 从目前道路工程建设需求出发, 分析软土地基处理措施, 旨在保证软土地基性能达到运行标准, 为促进现代道路交通领域的发展提供借鉴。

关键词 道路施工; 软土地基; 处理技术; 强夯法; 表层排水法

中图分类号: U416

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.038

0 引言

在道路工程建设中, 地基是主要承载结构部分, 若地基处理不当, 极易影响道路工程建设和运营效果。道路工程软土地基发生概率较高, 其容易造成桥台沉降、路面断裂等, 特别是道路与桥梁连接位置, 桥头跳车比较普遍, 无法保证道路通行的舒适性与安全性。因此, 需针对道路工程中软土地基特性, 制定科学合理的处理措施, 保证道路工程软土地基满足运行需求, 以促进现代道路交通领域的全面发展。

1 软土路基处理的重要性

软土地基的主要缺点是承载力不足、含水量高、硬度差、稳定性不合格, 无法满足道路工程建设和运营需求。道路工程软土路基是处理的重点, 需保证各结构部分的安全性、质量效果达到要求, 若软土地基处理不符合技术标准, 其在投入运营阶段就无法保证道路运行的可靠性与稳定性。软土地基在投入运行中, 若选择处理方式不当, 或者承载力未能达到标准, 在投入使用阶段, 极易造成道路结构的沉降与损坏, 进而威胁人们的生命与财产安全。因此, 在道路工程建设阶段, 需针对软土路基选择适宜处理方法。软土路基处理环节应考虑到其特性, 需对各项技术参数进行精准分析, 以制定可行的应对方案, 保证软土路基满足道路工程的运行需求^[1]。

2 市政道路工程软土地基施工中存在的不足

2.1 对市政道路工程所在地的地质勘察力度不足

地质勘察是市政道路建设的关键环节, 对工程的顺利进行起着至关重要的作用。然而, 在我国多地, 尤其是经济欠发达地区, 地质勘察工作进展缓慢, 甚至停滞不前。这一现状由多重因素导致。首先, 经济欠发达地区专业人才匮乏, 施工团队的知识水平受地域限制, 与发达地区存在明显差距, 对地质勘察工作缺乏系统认识。其次, 部分施工团队为追求快速完成工程, 牟取不当利益, 忽视了地质勘察工作的重要性。最后, 许多施工单位对地质勘察工作敷衍了事, 未深入开展, 导致数据测量误差较大, 给公路桥梁施工带来诸多困难^[2]。

2.2 市政道路工程软土地基施工不合理

通过市政道路工程软土地基勘察结果分析, 目前软土路基的形式较多, 其土层分为软土层与硬壳层。软土层表面一般会覆盖硬壳层, 其硬度较高、承载力较强, 能有效分散车辆的压力, 以保证其运行稳定性。目前公路桥梁建设阶段, 通过科学合理地利用硬壳层结构, 能降低项目建设成本, 保证道路工程运行效果合格。然而, 在目前项目施工阶段, 很多工程单位未认识到硬壳层的作用, 也没有充分利用该结构, 造成工程项目建设效果不合格。

作者简介: 安守慧 (1979-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 市政公路工程。

3 市政道路工程软土地基处理技术

3.1 真空预压与堆载联合处理技术

在市政道路工程软土地基处理中,真空预压技术能提高路基结构的强度,其主要采用抽真空方式,使路基性能恢复到良好状态。该技术应用环节将软土路基内水分抽出,确保土体颗粒重新排列,并采取措施进行固结处理,从而使路基结构密实性达到要求。软土路基处理阶段,利用抽真空方式在土体结构内部形成负压,进而利用压力作用使土体颗粒重新排列,保证内部水分及时排出,以增强路基结构的承载力,避免道路工程运行环节发生路基沉降问题。在预压技术应用中,通过外部施加堆载的方式,利用石料、砂垫层等方式将软土路基内部水分及时排出,确保其能快速固结,从而保证软土地基的强度达到要求。堆载预压阶段需选择适宜的施加荷载量,进而保证软土路基内水分快速排出,能够达到压缩性效果,以提高软土路基的承载力和稳定性。在软土路基处理阶段,利用真空预压与堆载联合技术,能发挥两种技术的优势,确保软土地基快速完成处理,使软土固结效果合格,进而符合道路工程运行需求^[3]。该联合技术对软土地基固结效果的具体影响如表 1 所示。

表 1 真空预压与堆载联合处理技术施工参数对地基固结效果的影响

参数名称	处理前	处理后(真空预压+堆载预压)
孔隙水压力/kPa	90~100	20~30
沉降量/cm	10~15	50~70
有效应力/kPa	15~25	70~90
固结度/%	20~35	85~95
沉降速度/(mm/d)	8~12	2~4

3.2 表层排水法

在软土地基处理过程中,通过表层排水法及时将路基内水分快速排出,使其路基加速沉降,并且阻隔外部水分进入路基结构内。该技术使用阶段,其利用砂垫层的方式,确保地基表层与浅层水快速疏散,从而降低软土路基含水量,防止由于水量过高导致路基结构承载力不合格。表层排水法应用较为普遍,尤其在地质条件复杂、分布不均的弱土层区域,利用该技术能快速提高软土地基的承载力,避免发生路基严重沉降问题,以提高道路工程运行的稳定性。从目前道路工程建设情况进行分析,就现场地质勘察结果展开研究,了解土质含水量、地下水位等信息,再确定合

适的表层排水法进行施工。根据测量结果,包括布置排水沟、选用排水材料等,设计合理的表层排水方案。准备好沙垫材料、排水管道等需要的排水材料。做好挖掘机、装载机施工所需机械设备的准备工作。根据设计方案,对泄流槽的位置、大小等进行测量和放流。使用挖掘机或人工开挖排水沟,根据测量放样结果进行排涝。应根据地基实际情况和排水需要,确定排水沟的深浅和宽度。保证沟底平整,不留尖锐物,不留大块土石,防止破坏排水管线。垫料铺装选用透水性好的砂料做垫料。要根据设计要求确定厚度,在排水沟底部铺一层均匀的沙垫层。沙垫层的作用是防止排水管道中的土壤颗粒进入,作为过滤层使用。安装排水管道要选择合适的水管,根据和排水管的压力而定。沙垫层按设计要求铺设排水管道,保证管道紧密相连,不发生渗漏。排水管道在使用过程中,应采用支架或固定装置固定,以防发生位移或变形^[4]。排水系统连通,连通各条排水管线,构成排水系统的一个整体。连接处处理要用密封材料,做到不漏一处。出水口设置在排水系统的末端,在自然水系或排水设施中引入水。为保护出水口周边土壤不被冲刷破坏,出水口应设置防冲刷设施。施工期间,排水系统运行情况要实时监控,保证排水畅通。施工结束后,对排水管道内的杂物、淤泥等进行定期的维护和管理,使之保持畅通。表层排水法施工技术流程包括多个环节:施工准备,开挖排水沟,铺设沙垫层,安装排水管道,连接排水系统,施工监控维护。为了保证表层排水法的施工质量和效果,每一个环节都需要严格按照设计要求来操作。

3.3 高压旋喷桩技术

在道路工程软土地基处理中,高压旋喷桩技术应用普遍,其能快速提高软土地基的承载力。该技术采用高压泵形成强大射流,按照 100~400 m/s 速度将浆液顺利喷入土体内。而在将液喷入土体后,利用浆液成分和软土内水分发生物理化学反应,实现两者交融以形成良好的固结体。高压旋喷桩施工阶段,需严格控制喷浆作业压力,保证软土地基处理效果达到既定目标^[5]。在浆液喷入土体内,随着时间的延长,使浆液逐步硬化处理,进而形成的旋喷桩在土体内提高承载力。这一技术在施工阶段需重视各项技术参数控制,保证注浆压力、喷射速度、旋转速度满足技术标准。注浆压力能提高旋喷桩的强度性能,并保证喷射速度满足浆液固定以及均匀性需求,而旋转速度则对加固体的形状与尺寸有直接影响。相关施工参数及影响因素详见表 2。

表2 高压旋喷桩技术施工参数及影响因素分析

施工参数	影响因素	典型参数范围
注浆压力 /MPa	浆液渗透深度,射流破坏能力	20 ~ 40
喷射速度 / (m/s)	浆液分布均匀性	100 ~ 400
旋转速度 /rpm	加固体的形状和大小	10 ~ 30
注浆量 / (L/min)	加固体的密度和强度	30 ~ 80
喷射深度 /m	加固区域大小	5 ~ 30

3.4 电渗加固技术

在软土地基处理过程中,采用电渗加固技术措施,在软土地基内形成直流电场,其利用电渗效应将软土地基内水分及时排出。这一技术在软土地基加固过程中,能快速排出孔隙水压力,确保软土地基的抗剪强度性能达到要求。软土地基水分排出逐步进行,使土体快速完成固结反应,进而改善土壤的微观结构,确保土体颗粒重新排列,有效提升土体结构的密实度以及强度。电渗加固法在应用阶段,需根据现场软土状况,在施工作业现场布置电极系统,一般在地表或一定深度埋设阳极、阴极。电极在布置过程中需考虑到软土地基的特性,综合分析水分迁移路径,通常采用平行电极和交错电极两种。在电极布置完成后,需通过外部设备直接通电,在土体结构内形成电场,使土体中形成一定的驱动力,确保软土地基内水分沿着电场从阳极向阴极流动。此外,电渗加固技术应用环节还要确保电场强度达到要求,使水分子迁移变化满足既定目标,防止影响软土地基加固效果。该技术施工参数及影响因素详见表3。

表3 电渗加固技术施工参数及影响因素分析

参数名称	影响因素	典型参数范围
电场强度	水分迁移速度、迁移范围	0.5 ~ 2 V/cm
电压梯度	水分排出效率、加固均匀性	10 ~ 50 V/cm
电极间距	电场分布均匀性、电渗效果	1 ~ 3 m
通电时间	固结程度、水分迁移量	1 ~ 4 周

3.5 深层搅拌桩技术

在道路工程软土地基加固过程中,通过深层搅拌桩技术能快速恢复地基结构的承载力。在该技术使用阶段,先进行地质勘察,重点掌握地基土类型、含水量、地下水位等相关参数。通过收集掌握各项地质条件,再根据软土地基的特性制定适宜的工程方案。深层搅拌桩在施工阶段根据现场需求,明确搅拌桩布置施工顺序、水泥掺入量、水灰比等,以便保证其处理方案满足软土地基加固要求。深层搅拌桩技术在应用过程中,需做好现场材料准备工作,保证水泥、添加剂、

水等各种材料性能达到要求。而在搅拌桩施工中选择合适的灰浆泵、灰浆搅拌机,并配套使用各种设备,使现场施工作业达到科学化要求。在现场施工开始前,重点进行施工人员的安全与技术教育,不仅使其掌握施工工艺和技术方案,还要将安全措施落实到位,以免因为管控不足造成质量与安全事故。在道路工程作业现场施工中,先将地表平整干净,搅拌桩施工机械设备顺利进入到作业。在现场深层搅拌桩施工中,需按照设计标准进行现场的施工位置排布,确保桩机移动到规定地点,且桩身垂直度达到要求。在深层搅拌桩施工环节,各设备开始运行阶段,需由工作人员对于设备运行状态进行监测,以免因为管控不足或监理不到位造成设备损坏以及工程质量事故。在深层搅拌桩施工中,应保证设备提升速度与搅拌速度紧密配合,确保深层搅拌桩的整体性能达到工程标准。在深层搅拌桩施工结束后,一个点位施工完成后需进行质量检测,检测合格再将其移动到下一个点位。就目前施工情况进行分析,重点从桩身强度、桩径等参数展开检测,确保深层搅拌桩施工质量达到标准。而在深层搅拌桩施工后,需对搅拌桩的承载力、变形模量进行检查,并形成完善的质量检测报告。在深层搅拌桩处理后,需根据现场道路工程施工需求编制质量检验档案,形成完善的质检记录,能掌握各项数据信息,预防因为监控不到位造成道路工程质量不足而引发安全事故。

4 结束语

在道路建设中,软土地基处理是关键一环,对促进工程施工质量提升有十分重要的意义。实际工作中要针对具体情况来选取合适的软土地基处理技术,在保证建筑质量的基础上还要加大建设监控管理力度。在科学技术日益发展与建造工艺日臻成熟的情况下,应该不断地完善与发展软土地基处理技术,为公路工程建设提供强有力的支撑。

参考文献:

- [1] 戚洪连,张建才.道路桥梁施工中软土地基施工技术处理分析[J].城市建设理论研究(电子版),2022(29):121-123.
- [2] 李劲.道路桥梁施工中的软土地基处理技术要点[J].黑龙江交通科技,2022,45(09):44-46.
- [3] 李云浩,刘方.道路工程施工中的软土地基处理技术[J].工程建设与设计,2022(16):206-208.
- [4] 孙政.道路桥梁施工中软土地基处理技术研究[J].中华建设,2022(06):155-157.
- [5] 聂新星.市政道路工程施工中软土地基处理技术分析[J].散装水泥,2022(02):160-162.

雷电气象灾害对风电设备的影响与防护对策

李学伦, 黄小妹

(1. 清远市展宏防雷工程有限公司阳山分公司, 广东 清远 513100;

2. 广东省阳山县气象局, 广东 清远 513100)

摘要 随着风电装机容量增长, 风力发电机单机容量与叶片尺寸持续提升, 雷电已成为威胁风电场安全运行的首要自然因素。本文结合观测、试验与模拟方法, 分析了风力发电机雷电附着特性与危害机制, 开展不同极性雷电接闪特性试验, 验证了改进型先导发展模型的准确性; 通过参数化模拟提出基于边缘接闪器的优化防雷方案, 以期为大型风电机组防雷设计提供参考。结果表明: 正极性雷电对现有接闪系统存在屏蔽效应, 60° 叶片姿态下碳纤维叶片防雷失效概率可达 80%; 在叶片边缘增设点状接闪器可将正极性接闪效率提升至 100%, 有效改善防雷性能。

关键词 风力发电机; 雷电防护; 极性效应; 接闪器优化; 数值模拟

中图分类号: TM614

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.039

0 引言

风能是最具发展潜力的可再生能源之一, 随着风力发电机单机容量向十兆瓦级跨越, 陆上风力发电机轮毂高度达 245 m, 海上风力发电机叶片直径超 280 m, 高耸结构使风电机组成为雷电首要侵袭目标。据研究表明, 风电场 60% 以上自然灾害事故与雷电相关, 其中叶片损伤占 7%~10%, 控制系统损伤占 43%~51%, 电气系统损伤占 20%~32%。并且, 高耸结构及复杂电气系统易遭雷击, 不仅导致叶片损伤、设备烧毁, 而且对风力发电机停机检修会严重影响电力供应的稳定与安全。本文通过对风力发电机遭受的雷击特性和危害机制进行研究分析, 进一步探究风力发电机防雷举措, 延长风力发电机使用周期, 提高电力供应稳定性和安全性, 为提升风电场防雷能力提供理论支撑与技术参考, 助力风电产业高质量发展。

1 风力发电机雷电特性及危害机制

1.1 雷电附着的空间分布特征

现场观测表明, 风力发电机叶片雷击点呈显著尖端集中效应。其中, Vestas 公司对 236 支 39 m 叶片的观测显示, 88% 雷击发生在距叶尖 1 m 范围内, 剩余 12% 位于距叶尖 4 m 范围内; 中国电科院对 1 332 台机组的统计显示, 75% 雷击点位于距叶尖 2 m 范围内, 93% 位于距叶尖 4 m 范围内^[1]。并且, 长度超过 50 m 的叶片中, 叶尖 5 m 区域是雷击风险最高的区域, 如图 1 所示。

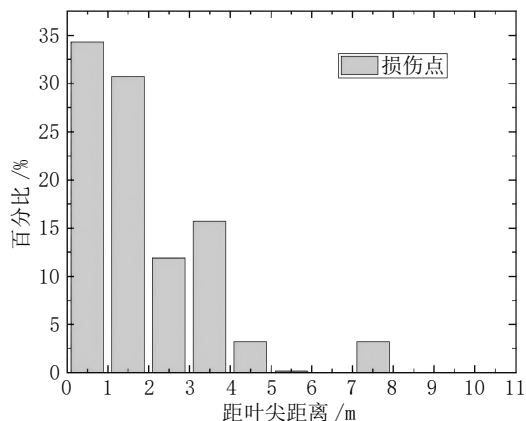


图 1 雷击点分布图

1.2 雷电类型与极性效应

风力发电机叶片遭受雷击类型主要为下行雷击和上行雷击。其中, 高度超 100 m 的风力发电机雷击损伤破坏 94% 来自上行雷击。进一步研究分析可知, 雷击的极性(即电荷的正负)是决定接闪器能否有效拦截上行雷击, 从而避免叶片损伤的关键因素^[2]。雷电极性分为负极性雷电和正极性雷电。其中, 正极性冲击下接闪器表面会形成均匀正离子空间电荷云, 对上行负先导产生屏蔽效应, 导致雷电优先附着于叶片无接闪器区域, 接闪失效概率显著提升。

1.3 复杂工况的影响机制

在实际环境中, 风力发电机因为长期处于动态、复杂且恶劣的工况下, 且这些工况会显著改变叶片周

作者简介: 李学伦(1981-), 男, 专科, 技术员, 研究方向: 气象防雷。

围的电场分布、空间电荷行为以及绝缘性能,从而严重干扰甚至破坏风力发电机防雷措施。

2 试验过程与数值模拟

2.1 试验系统与方法

1. 试验平台搭建。通过 Solidworks 建模软件和 COMSOL Multiphysics 仿真软件协同交互,实现风力发电机叶片雷击仿真模拟试验^[3]。并在试验基础上,设计了三种叶片类型,分别为 TS 型、TSC 型和 TSE 型。其中,TS 型为玻璃纤维叶片,且叶尖和叶片一侧均连接有接闪器;TSC 型为碳纤维叶片,且叶尖和叶片一侧均连接有接闪器;TSE 型为碳纤维叶片,且除了叶尖连接有接闪器外,叶片相邻侧壁也均连接有接闪器。叶片设置 0° 和 60° 两种典型姿态,每种工况开展 10 次重复冲击试验,通过高速相机与长曝光拍摄记录放电通道。

2. 数值模型构建。采用 COMSOL Multiphysics 建立静电场与空间电荷耦合模型^[4],包含泊松方程与电荷输运方程,同时采用改进型先导发展模型模拟雷电附着过程,计算不同位置接闪概率,公式如下。

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r E) = \rho_+ + \rho_- \quad (1)$$

式(1)中, ∇ 为散度算子, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为材料的相对介电常数, E 为电场强度矢量, ρ_+ 为正空间电荷密度, ρ_- 为负空间电荷密度。

$$J_{\pm} = \pm D \nabla \rho_{\pm} \pm \mu_{\pm} \rho_{\pm} E \quad (2)$$

式(2)中, J_{\pm} 为正、负离子电流密度矢量, D 为离子的扩散系数, μ_{\pm} 为正、负离子的迁移率, $\nabla \rho_{\pm}$ 为电荷密度的梯度,驱动扩散过程, $\mu_{\pm} \rho_{\pm} E$ 为电场驱动下的迁移电流。

$$\frac{\partial \rho_{\pm}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{\pm} + v \cdot \nabla \rho_{\pm} = -R \frac{\rho_+ \rho_-}{e} \quad (3)$$

式(3)中, $\frac{\partial \rho_{\pm}}{\partial t}$ 为电荷密度随时间的变化率, $\nabla \cdot J_{\pm}$ 为电流密度的散度,表示电荷的净流出, v 为气流

速度矢量, $v \cdot \nabla \rho_{\pm}$ 为对流项,表示气流携带电荷运动, R 为正负离子的复合系数, e 为元电荷, $-R(\rho_+ \rho_-)/e$ 为复合项,表示正负电荷相遇中和而消失的速率。

同时,采用改进型先导发展模型(SLIM)^[5]模拟雷电附着过程,考虑不同极性先导的起始判据与发展速度,计算不同位置的接闪概率。

2.2 模型验证与结果对比

1. 电场分布模拟结果。对 TSC 型和 TSE 型两种风力发电机叶片进行不同电极位置与不同叶片状态下的电场强度数值模拟分析(见图2)。

模拟可知,电极位于叶片正上方时,0° 叶片下顶部侧接闪器电场最高,电场强度达到 80 176 V/m;叶片旋转至 60° 时,叶片边缘区域电场显著提升至 56 964 V/m,远超侧接闪器的 14 647 V/m,表明侧接闪器无法有效覆盖叶片边缘区域。

2. 试验与模拟结果对比。对风力发电机叶片每种工况进行 10 次重复冲击试验,由数值模拟和试验对比分析可知,风力发电机叶片负极性冲击试验结果与模拟基本一致,且 100% 雷电通道均附着于叶尖接闪器。但是,在正极性雷电冲击下,电极位于叶片正上方,且叶片处于 60° 时,TS 型玻璃纤维叶片接闪失效率为 20%,TSC 型碳纤维叶片提升至 30%;针状电极向叶片内侧偏移 50 cm 时,TS 型叶片失效率达 70%,TSC 型碳纤维叶片高达 80%,与模拟结果误差小于 5%,验证了模型的准确性。

2.3 不确定性与误差分析

为进一步评估数值模型与试验结果的一致性及其工程可信度,本文从试验系统误差、数值模型误差和统计波动三个维度开展不确定性分析。其中,试验不确定性主要来源于电极定位偏差与叶片材料参数离散性,

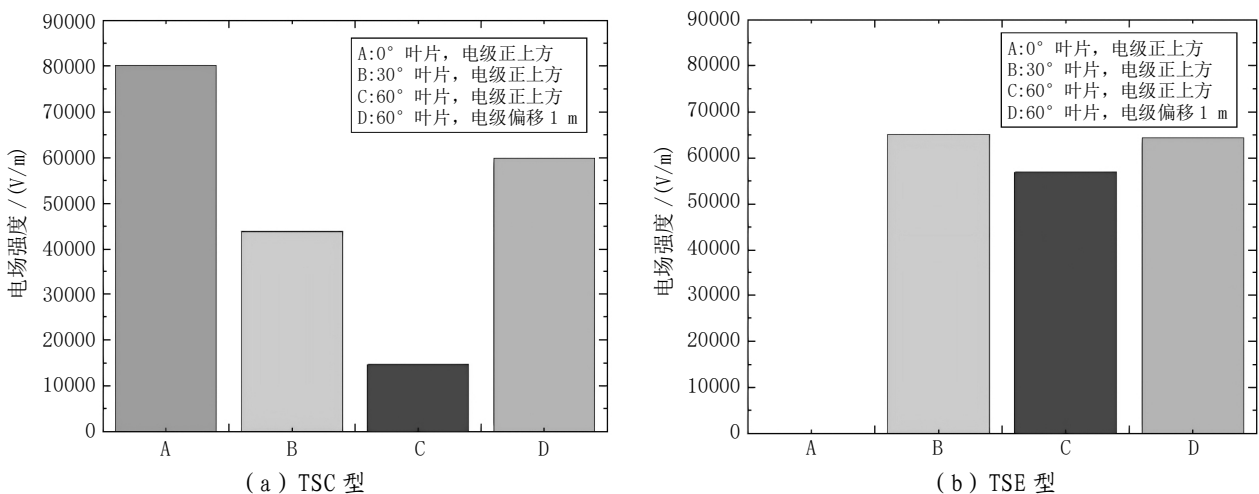


图2 叶片不同状态下接闪器与边缘区域电场强度对比图

模型不确定性主要来源于几何与物理过程简化。另外，为保证模型结果的可重复性与工程可比性，本文基于试验实测数据与数值仿真结果，对关键输出量开展定量误差评估，即通过监测相邻两级网格在同一监测点的偏差，以及采用 10 次重复冲击试验结果的相对标准偏差可知，关键监测点电场强度相对误差可控制在 2% 以内，核心工况下接闪效率相对误差可控制在 5% 以内。

3 参数优化与防雷性能提升

3.1 优化方案设计

对于正极性雷电接闪失效问题，提出 TST 型风力发电机及 TST 型为碳纤维叶片，且除了叶尖连接有接

闪器外，在叶片边缘每隔 5 cm 连接一个接闪器，接闪器采用螺钉式可更换设计，与内部引下线可靠连接。

3.2 TST 型数值模拟研究

通过 COMSOL Multiphysics 对风力发电机叶片上接闪器的安装位置与高度进行接闪次数模拟研究（见图 3）。

由此可得，接闪器间距从 10 cm 减小至 5 cm 时，接闪效率从 85% 提升至 100%，继续减小间距对性能提升不显著；接闪器凸起高度从 2 mm 增加至 5 mm 时，接闪效率提升 12%，过高凸起会增加叶片气动阻力，最优高度为 3~5 mm；叶片转速从 0 rpm 提升至 15 rpm 时，

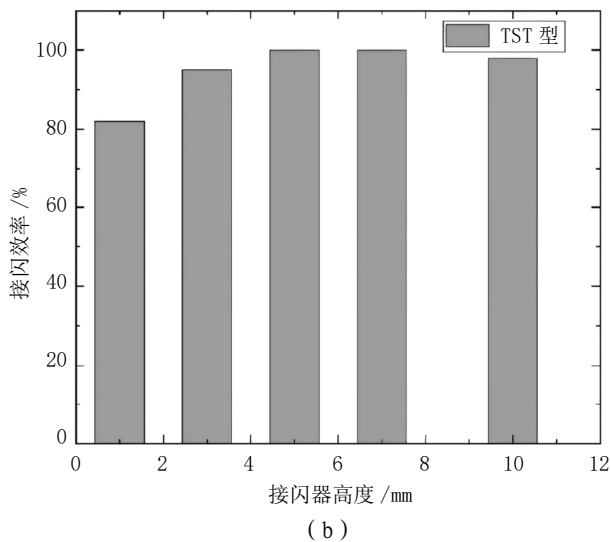
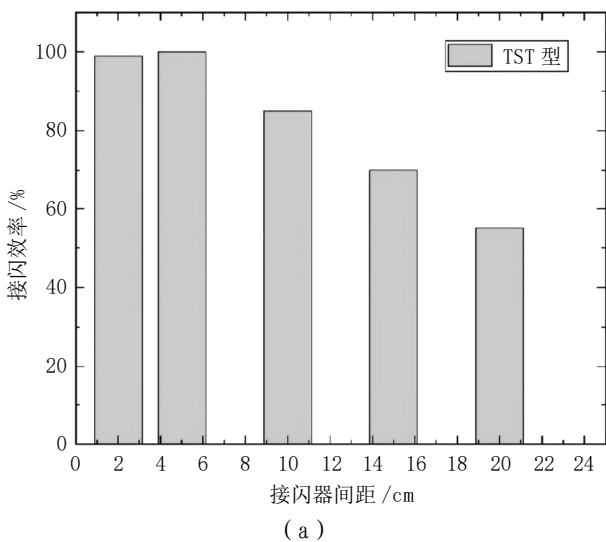


图 3 叶片不同状态下接闪器与边缘区域电场强度对比图

正极性接闪效率从 92% 提升至 100%，表明旋转效应可与边缘接闪器形成协同提升作用。

4 结论

本文通过观测、试验与模拟相结合的方法，系统研究风力发电机雷电附着特性与优化防雷方案，并通过 Solidworks 和 COMSOL Multiphysics 软件，进一步提高仿真模拟准确性。研究表明：（1）叶片处于 60°，且电极偏移 50 cm 的极端工况下，碳纤维叶片的接闪失效率可达 80%，是导致冬季严重雷击损伤的主要原因。（2）叶片边缘是电场保护盲区，当处于 60° 下边缘电场强度比侧接闪器高 2~3 倍，是接闪失效的高发区域。（3）本文提出的 TST 型风力发电机可有效破坏正离子云的屏蔽效应，将正极性雷电接闪效率提升至 95% 以上，且不影响负极性接闪性能，有效提升风力发电机防雷性能。在大型碳纤维叶片、高海拔与高纬度多雷地区的风力发电机中，可优先采用 TST 型，

显著降低雷击损伤风险，为新一代超大容量风力发电机防雷提供理论基础和数据支撑。

参考文献：

- [1] 胡春林. 考虑不同雷击位置和防雷措施的风电场雷电暂态特性及防护研究 [J]. 电气技术与经济, 2025(09):55-63.
- [2] 边晓燕, 吴勇, 周歧斌, 等. 考虑极性效应的风机下行雷击风险的定量表征 [J]. 电瓷避雷器, 2024(06):73-84.
- [3] 傅毓斐. 风力发电机玻璃纤维增强复合材料叶片雷击防护系统优化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [4] 吉倩, 李梓樱, 仇云利. 基于 COMSOL 软件探究电磁场中的三维运动问题: 以“螺旋运动”教学为例 [J]. 物理教学, 2026, 48(03):12-15.
- [5] 韩以昆, 杨智博, 姚京源, 等. 雷击风机上行先导发展模型及其稳定起始拐点判据 [J]. 电气应用, 2025, 44(01): 108-117.

水利工程混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术研究

刘颖颖, 韩钦昌

(济南清诚建设工程有限公司, 山东 济南 250300)

摘要 针对我国土坝存量、防渗墙加固后容易出现变形隐患的问题, 需有效解决传统监测技术精度低、覆盖范围有限的短板, 为防渗墙加固土坝安全运维提供可靠技术支持。本文通过融合优化后的 ICP 算法、三维激光扫描、分布式光纤等新型技术, 设计一套协同变形监测方案, 构建多源数据融合预警模型。工程实测结果显示, 采用该监测方法的精度能达到 ± 0.08 mm, 预警准确率能到 96.2%, 能精准捕捉到坝体与防渗墙的协同变形特征, 可以推广应用到同类防渗墙加固土坝的变形监测工作中。

关键词 混凝土防渗墙; 土坝加固; 变形监测; 三维激光扫描

中图分类号: TV6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.040

0 引言

我国土坝存量占水利工程坝体总量的 90% 以上, 而且多数土坝已经服役多年, 受到极端气候和老化的影响很容易出现沉降、水平位移等变形隐患。混凝土防渗墙是土坝加固的核心技术, 但加固之后若未能做好协同变形防控, 有可能引发防渗墙开裂、坝体失稳等严重问题。混凝土防渗墙加固土坝变形监测是通过各类监测技术, 捕捉坝体与防渗墙的变形特征、分析变化规律, 实现数据的精准采集和分析, 为安全防控提供可靠的数据支撑。推广混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术, 可降低溃坝风险, 保障水利工程安全稳定运行。

1 混凝土防渗墙加固土坝变形机理

1.1 土坝变形的主要类型

混凝土防渗墙加固土坝的变形主要分为沉降、水平位移和倾斜变形三类^[1]。其中, 沉降是坝体在自身重量、水压力等荷载作用下发生的竖向压缩变形, 坝体填料固结不均匀, 或者防渗墙与坝体协同压缩失衡, 会加剧沉降变形。水平位移主要是因为坝体上下游的水压差产生的, 表现为坝体沿水平方向的偏移, 水平位移超出了安全阈值, 容易引发防渗墙开裂^[2]。倾斜变形大多是因为坝体不均匀沉降或局部荷载失衡导致的, 防渗墙与坝体衔接部位的受力不均, 这个部位容易集中出现倾斜变形^[3]。这三类变形的产生, 和坝体

固结进程、渗流作用强度、外部荷载变化以及材料老化都密切相关。

1.2 防渗墙与土坝协同变形特征

防渗墙与土坝作为协同受力的体系, 二者的变形存在明显的关联性和差异性^[4]。防渗墙与坝体之间出现差异沉降, 就会成为引发防渗墙破损的主要诱因。坝体的变形会通过接触面的摩擦力传递到防渗墙, 导致防渗墙产生拉应力和剪应力, 防渗墙是超深结构, 它的应力变形会呈现“上大下小”的分布特征。同时, 防渗墙的加固作用会约束坝体的变形, 二者实现受力协同, 会形成坝体变形、防渗墙约束、协同适配的动态平衡^[5]。

2 混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术

2.1 传统监测技术

全站仪、水准仪、测斜仪、渗压计是土坝变形监测的传统核心设备。其中, 全站仪通过角度与距离测量获取点位坐标, 水准仪用于沉降量的精准测量, 测斜仪监测坝体与防渗墙的水平位移, 渗压计捕捉渗流压力变化。但传统监测技术存在明显的局限, 遇到恶劣天气, 全站仪的监测精度会受到严重影响。监测范围比较大, 测斜仪很难实现全覆盖, 最终也难以实现防渗墙与坝体协同变形的全域、实时监测, 适配性也不够好。

2.2 新型监测技术

选用 FAROFocus3DX330、RieglVZ-2000i 这类型号的三维激光扫描设备, 基于激光测距原理, 能快速获

作者简介: 刘颖颖 (1995-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利水电工程施工。

取坝体表面的三维点云数据,精度能达到毫米级,还能实现远距离、非接触式的全域监测。采用分布式光纤监测技术,依托布里渊散射机制,能同步监测应变与温度,监测距离能达到 50~100 km,适配防渗墙内部的变形监测。搭建智能传感器组网系统,能实现多设备协同工作,实时传输监测数据,解决传统技术数据滞后的问题。

3 混凝土防渗墙加固土坝变形监测评价指标体系

3.1 监测指标选取

选取沉降量、水平位移量、倾斜度、相对位移变化值、渗压值作为核心监测指标,能全面覆盖变形监测的需求。其中,沉降量反映坝体竖向变形的程度,沉降量超出预警阈值,说明坝体竖向稳定性存在隐患。水平位移量体现坝体横向偏移的风险,水平位移持续增大,就需要警惕防渗墙开裂。倾斜度表征防渗墙与坝体的变形协调性,相对位移变化值用于捕捉衔接部位的局部变形,渗压值辅助判断渗流对变形的影响。

3.2 指标阈值确定

结合防渗墙加固土坝的结构特点、坝高以及地质条件,合理确定各指标的预警阈值与安全范围。例如:中小型土坝坝顶沉降预警阈值通常控制在 5~10 mm/d,沉降速率超过 10 mm/d,就需要启动警戒响应。水平位移阈值不超过 3 mm/d,水平位移超出这个范围,就需要排查坝体受力异常。渗压值需要控制在坝体材料的抗渗极限范围内,渗压值超标,加剧坝体变形。

4 混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术应用方法

4.1 监测方案前期准备

本阶段的核心是明确监测目标、梳理工程参数,为后续的监测实施奠定基础。

一是工程参数调研。需要明确土坝及防渗墙的核心参数,土坝属于中小型规模,它的坝高控制在 15~60 m,坝顶宽度 6~10 m,防渗墙厚度 0.8~1.2 m、深度 18~45 m,坝体填料压实度不低于 95%,防渗墙混凝土强度等级为 C25-C30。坝基地质存在深厚覆盖层,需要重点标注其厚度,确保参数与实际工程一致,为设备选型提供依据。

二是监测目标确定。想要实现高精度监测,沉降监测精度就需要达到 ± 0.1 mm,水平位移监测精度 ± 0.2 mm,倾斜度监测精度 $\pm 0.01^\circ$,渗压监测精度 ± 5 kPa。施工期,监测周期可以设定为每 7 天 1 次;运行期,监测周期就调整为每 15 天 1 次;遇到暴雨、蓄水等特殊工况,就需要加密至每天 1 次。

三是设备选型与校验。要实现远距离、高精度的

表面监测,可以选用 FAROFocus3DX330 三维激光扫描仪(扫描距离 0.6~330 m,精度 ± 1 mm)。要监测防渗墙内部变形,可以选用 DAS 型分布式光纤传感器(监测距离 50 km,空间分辨率 1 m,采样频率 100 Hz)。位移传感器选用应变式拉杆型(量程 0~50 mm,精度 ± 0.01 mm)。

4.2 监测断面与点位布设

点位布设要遵循“全域覆盖、重点突出”的原则:

一是监测断面选取。土坝坝长在 500~1 000 m 之间,可以选取 3~5 个重点监测断面,其中坝体最大横断面、防渗墙轴线断面、上下游坝坡变形敏感断面各 1 个,断面间距控制在 150~200 m,每个断面宽度与坝顶宽度一致。覆盖这些关键部位,能全面掌握坝体的整体变形状态。

二是外部监测点位布设。在防渗墙顶部布设强制归心盘,可以每隔 20 m 安装 1 个,一共布设 15~25 个。在坝顶沉降槽周边布设沉降监测点,间距可以设为 15 m,一共 20~30 个。在上下游坝坡布设水平位移监测点,可以每 30 m 布设 1 个,每个坡面布设 8~12 个,点位距坝坡边缘不小于 1.5 m。避开坝体结构干扰,能提升监测数据的准确性。

三是内部监测点位布设。沿防渗墙深度方向布设分布式光纤监测点,可以每 5 m 布设 1 个,从墙顶至墙底一共布设 4~9 个。在防渗墙与坝体衔接部位布设应变监测点,可以每 10 m 布设 1 个,一共 12~18 个。在坝基渗流敏感区域布设渗压计,可以布设 8~10 个,埋深 2~5 m。精准布设这些点位,能有效监测防渗墙内部变形与渗流影响。

4.3 新型监测技术现场实施

整合三维激光扫描、分布式光纤等新型技术,按照规范流程操作。

一是三维激光扫描技术实施。在坝体周边布设 3~4 个扫描站点,站点间距控制在 50~80 m,扫描角度设置为 360° ,扫描分辨率 0.5 mm,每次扫描时间控制在 15~20 分钟。采用优化后的 ICP 算法(质心旋转机制)进行多站点云拼接,拼接误差控制在不超过 ± 0.5 mm。每天在同一时段扫描,确保数据的可比性,方便后续的变形分析。

二是分布式光纤监测实施。将光纤沿防渗墙轴线埋入墙体内部,光纤埋深不小于 0.3 m,接头处采用熔接工艺。熔接损耗控制在不超过 0.02 dB/芯,确保数据传输质量。通过 DAS 探测系统激发激光信号,采集应变与温度数据,采样频率设置为 100 Hz。实现数据同步记录,保障数据实时传输。

三是位移与渗压协同监测。将位移传感器固定在监测点位,传感器与坝体表面保持垂直,且固定螺栓扭矩控制在 $25 \sim 30 \text{ N} \cdot \text{m}$,避免传感器松动。渗压计埋入预设钻孔后,用膨润土回填密封,确保其与坝体填料紧密接触。数据采集仪设置为自动采集,每小时记录1次数据,实现异常数据实时报警,及时发现隐患。

4.4 监测数据处理与分析

采用标准化的数据处理流程,结合最新算法,确保数据准确性。

一是数据预处理。采用 3σ 准则剔除粗差数据,监测数据超出均值 ± 3 倍标准差(沉降量超出 $\pm 5 \text{ mm}$),可以判定为粗差并剔除,粗差剔除率控制在3%以内。存在缺失数据,可以采用线性插值法填补,缺失数据占比不超过2%。对激光点云数据进行噪声过滤,将过滤阈值设置为 0.3 mm ,确保数据质量,为后续分析奠定基础。

二是变形计算。基于优化后的ICP算法,计算坝体表面点云位移偏差,沉降量计算精度达到 $\pm 0.1 \text{ mm}$,水平位移计算精度 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。通过位移传感器数据,采用最小二乘法计算防渗墙倾斜度,倾斜度计算公式为 $\tan \theta = \text{位移差值} / \text{监测距离}$,计算误差控制在不超过 $\pm 0.01^\circ$ 。结合渗压数据,准确分析渗流对变形的影响系数,并将系数控制在 $0.8 \sim 1.2$,提升变形分析的科学性。

三是变形特征分析。采用时间序列分析方法,分析监测数据随时间的变化规律,处于施工期,坝体沉降速率需要控制在 $1 \sim 3 \text{ mm/d}$,进入运行期,就需要控制在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm/d}$ 。采用空间分布分析,识别变形极值区域,极值区域沉降量不超过 50 mm 、水平位移不超过 20 mm ,说明坝体处于安全状态。

4.5 变形预警与方案优化

基于监测数据构建预警模型,制定响应机制。

一是预警模型应用。将预处理后的监测数据输入预警模型,模型融合机器学习算法,预警等级分为三级,沉降量 $< 5 \text{ mm/d}$ 、水平位移 $< 3 \text{ mm/d}$,就属于一级预警(安全); $5 \text{ mm/d} \leq \text{沉降量} < 10 \text{ mm/d}$ 、 $3 \text{ mm/d} \leq \text{水平位移} < 5 \text{ mm/d}$,就属于二级预警(警戒);沉降量 $\geq 10 \text{ mm/d}$ 、水平位移 $\geq 5 \text{ mm/d}$,就属于三级预警(危险)。模型预警准确率不低于95%,能有效实现隐患预警。

二是预警响应。出现一级预警,维持正常的监测频率;出现二级预警,就需要加密监测至每天2次,并安排人员现场巡查,排查隐患;出现三级预警,就需要立即停止水库蓄水,启动应急处置方案,疏散周边人员,有效避免事故扩大,确保工程安全。

三是方案优化。每3个月对监测方案进行一次优化,监测数据偏差不超过 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 、设备运行故障率不超过2%,可以维持现有方案。存在边缘稀疏点云区,就需要增加扫描站点。传感器数据传输不稳定,就需要及时更换。定期优化方案,能确保监测技术持续适配工程需求。

5 基于监测数据的坝体变形预警模型构建

构建兼具创新性与实用性的坝体变形预警模型。选取防渗墙与坝体相对位移、相对倾度等一级核心监测指标,结合行业规范与工程实例量化指标正常范围、警戒值及危险值,对试验与工程数据进行预处理,剔除异常值、补全缺失数据并标准化,划分训练集与验证集。采用“BP神经网络+随机森林”融合模型,利用BP神经网络捕捉监测数据与坝体变形的非线性关系,借助随机森林优化模型抗干扰能力,通过参数调整与交叉验证完成模型训练与优化。经验证,该模型预警准确率高、误报漏报率低,适配不同工况。基于此搭建预警系统,整合数据采集、预处理、预警发布等模块,实现监测、分析、预警,为混凝土防渗墙加固土坝的安全预警提供科学可靠的技术支撑。

6 结束语

对于混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术的应用,通过优化监测方案、融合新型监测技术与算法,监测精度和预警时效性都能满足工程需求,也能精准捕捉协同变形特征,为工程安全运维提供可靠支撑。未来,要深入研究协同变形的精细化机理,再结合数字孪生、人工智能技术优化监测系统,提升预警模型的泛化能力,扩大技术应用范围,推动监测技术朝着标准化、规模化的方向发展,进一步完善防渗墙加固土坝变形监测技术体系。

参考文献:

- [1] 靳杰. 混凝土收缩变形测试技术及其设备的理论研究[J]. 散装水泥, 2026(01):62-64.
- [2] 周刚. 预应力混凝土桥梁连续梁挂篮变形施工监测方法[J]. 交通建设与管理, 2025(06):135-137.
- [3] 刘健, 王继敏, 杨强, 等. 混凝土大坝变形监测异常值识别方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(06):77-84.
- [4] 程满足. 水利工程混凝土防渗墙加固土坝变形监测技术研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(09):19-22.
- [5] 苏晓军, 许增光, 张野, 等. 基于深度学习模型的混凝土坝变形预测研究[J]. 人民黄河, 2025, 47(07):144-149, 155.

面向低碳目标的大体积混凝土 结构建造技术路径研究

史如友¹, 张丽^{2*}

(1. 山东绿建新材料有限公司, 山东 德州 253700;

2. 乐陵市综合检验检测中心, 山东 德州 253600)

摘要 针对大体积混凝土结构材料、施工、评估层面, 碳排放大、资源消耗多、管理粗放的难题, 本文系统地探索了其实现低碳化建造的技术途径。在对结构特性和碳排放关键环节进行关联分析的基础上, 提出覆盖“源头减量—过程控制—循环利用—制度保障”的综合性策略。结果表明: 通过大力推广低碳胶凝材料和优化设计、建设智能施工和精准养护系统、开发废料资源化和碳捕捉技术、以全生命周期碳评价及协同管理平台作为辅助手段, 可有效地实现大体积混凝土结构施工过程中节能降耗和低碳转型的目标, 从而为工程实际提供系统性的解决方案。

关键词 大体积混凝土结构; 绿色低碳; 建造技术

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.041

0 引言

“双碳”战略目标提出后, 建筑业是我国碳排放的重点领域之一, 减排任务艰巨。大体积混凝土结构具有体量大、水泥用量大、温控能耗大等特点, 是基础设施工程中碳的主要排放量。目前, 其绿色建造还面临着对高碳材料的依赖、粗放式的建造工艺、全生命周期的碳管理欠缺等多方面的挑战。因此, 系统地分析其碳排放关联环节并探讨可行的低碳技术路径和管理策略, 对于促进土木工程建造方式绿色变革至关重要。本文对该领域关键问题进行梳理, 提出集成技术和管理创新协同战略, 旨在为行业绿色转型提供实践参考。

1 大体积混凝土结构特性

1.1 典型结构特征与工程要求

大体积混凝土结构通常是指其最小断面尺寸超过 1 米, 并且需要采取相应的控制措施, 以避免由于水泥水化热和收缩变形导致的混凝土实体结构出现裂缝。第一, 其典型特征体现在巨大的几何尺寸与混凝土方量上, 这直接决定原材料 (尤其是水泥、骨料) 需求的规模极其庞大^[1]。第二, 由于混凝土导热性能差, 硬化时水泥水化放出的大量热聚集于结构内, 造成内外温差明显, 如不加以控制, 由此引起的温度应力很

容易诱发有害裂缝并危害到结构整体性、耐久性、安全性。所以, 温控防裂一直是其设计和施工中贯穿始终的核心工程需求, 常规上往往依靠布置复杂冷却水管系统, 使用低热水泥或者大量掺粉煤灰/矿粉等措施来实现、分层分块浇筑等过程, 这类措施通常都会伴随有附加的物料、能耗、管理成本。第三, 此类结构多是工程关键部位, 设计寿命长 (常达百年以上), 对长期性能 (抗渗性、抗腐蚀性、体积稳定性等) 要求极高, 这就对材料耐久性设计及后期养护维护提出了更严格的标准^[2]。

1.2 结构特性与碳排放的关键关联点

大体积混凝土结构特点与全生命周期碳排放有着深层次、多环节联系。在材料生产阶段, 庞大的水泥用量是碳排放的“主力军”, 每生产 1 吨硅酸盐水泥约排放 0.8 ~ 1.0 吨二氧化碳, 它来源于石灰石分解过程排放及燃料燃烧能量排放。结构对低热、高耐久性的要求, 虽可能促进辅助胶凝材料的使用, 但也可能推动特种水泥或化学外加剂的应用, 其生产碳排放需综合评估。传统冷却水循环系统为控制大体积混凝土水化热而需不断消耗水泵电力, 这就要求施工建造阶段必须进行冷却水循环; 分层分块浇筑会带来模板用量的增加、施工周期的延长等问题, 并间接加大机械能耗^[3]。

作者简介: 史如友 (1979-), 男, 专科, 研究方向: 建筑材料。

*通信作者: 张丽 (1999-), 女, 本科, 研究方向: 产品质量与安全。E-mail: 1033998416@qq.com

2 大体积混凝土结构绿色低碳建造中存在的主要问题

2.1 材料层面的问题

目前,大体积混凝土绿化施工中材料层面所面临的关键问题是对高碳胶凝材料依赖和低碳替代技术成熟度与成本矛盾。尽管采用粉煤灰、矿渣粉等工业固废作为辅助胶凝材料部分替代水泥已成为常规做法,并取得一定减排成效,但其替代率存在物理力学性能与工作性要求的瓶颈,难以实现更高比例的替代。尽管新型的低碳胶凝材料,如碱激发胶凝材料、高贝利特水泥、碳酸钙钙—钙矾石体系,在实验室的研究中显示出了更低的碳排放潜能,但其长期耐久性能(抗碳化、抗硫酸盐侵蚀等)数据尚不完善,大规模工程应用的可靠性未经充分验证,且生产成本较高,没有统一标准和规范支持,致使设计方和施工方基于风险规避的考虑而未敢轻试。另外,骨料绿色化也同样凸显。天然砂石过度采挖已经带来对生态环境的严重破坏,同时,机制砂石生产过程耗能较大,优质再生骨料由于其成因复杂、性质波动较大且含有大量杂质等原因,很少被用于大体积混凝土这种重要的结构^[4]。

2.2 施工与养护层面的问题

从建设和维护层面上看,存在的问题主要体现在传统工艺粗放性,对经验的依赖性和智能化水平不够而造成资源和能源的浪费。第一,温控防裂施工还主要依靠“一刀切”的经验方案。冷却水通水流量、温度、时长大多依靠经验设置,缺少以实时温度场和应力场数据为基础的动态准确调控,易引发或冷却不足而引发裂缝的危险,或者降温过大,浪费水电资源,加大混凝土受约束初期的危险^[5]。第二,浇筑过程管理精细化水平不高。大体积混凝土具有浇筑方量较大,历时较长等特点,对于混凝土的供给、运输、振捣等环节的配合要求非常高。在实际工作中往往由于调度不周而发生供料中断或者压车等待等事故,这不但影响施工质量,而且造成运输车辆和泵送设备闲置,增加无意义的燃油和电力消耗。第三,养护环节缺乏智能化和绿色化的运用手段。传统洒水养护或者覆盖保温材料方式水资源消耗较大且覆盖材料循环使用率较低。

2.3 评价与管理层面的问题

在评估和管理的过程中,关键的挑战是缺少一个覆盖整个生命周期、量化的绿色和低碳评估体系。现有的绿色建筑评价标准(LEED、BREEAM、中国《绿色建筑评价标准》等)更多关注建筑的运营阶段能耗与室内环境,对于施工阶段尤其是大体积混凝土这类隐蔽工程碳排放问题,目前还没有详细而统一的计算方

法及数据清单。在项目设计或施工决策阶段,通常更倾向于使用“事后核算”的方式,而不是“事前预测和过程控制”,这样很难直观地评估不同方案对碳排放的具体影响。在管理上,设计、施工、材料供应、运维各环节割裂,“铁路警察,各管一段”。设计方出于对结构安全的保守考虑可能会过多地采用材料;施工方为赶工期,也许会选择高碳排放却又方便快捷的技术;由材料供应商提供的环境产品声明(EPD)的数据存在不完整或可信度存疑的情况。

3 大体积混凝土结构绿色低碳建造综合策略

3.1 源头减量、低碳材料与优化设计策略

源头减量是减少大体积混凝土碳足迹的最基本和有效方法,核心是对低碳胶凝材料体系进行革新和以性能为基础的优化设计。第一,要大力开发和推广应用低熟料含量、高固废利用率新型胶凝体系。在确保早期强度增长和长期耐用性的基础上,通过优化颗粒的级配和采用化学激发方法,成功地将粉煤灰、矿渣、钢渣、硅灰等工业固废的混合比例提高到了超过50%,甚至对无熟料碱刺激胶凝材料非关键部位进行探索。同时,加快有关材料国家标准及工程应用指南的制定和完善,以减少市场准入风险。第二,积极采用再生骨料技术。建立工程现场或区域性的建筑垃圾资源化处理中心,生产高品质再生粗、细骨料,通过强化处理工艺(颗粒整形、杂质分离等)和科学的配合比设计,将其安全、在大体积混凝土非受力部位或者次要受力部位合理运用,并逐步增加替代率。第三,促进优化设计。采用BIM技术的三维协同设计实现工程量的准确计算和冗余规避。基于结构仿真分析(如有限元法),进行体型优化,在满足力学性能的前提下减少混凝土用量。大力推广高强、高性能混凝土的应用,以提高强度等级缩小截面尺寸达到全面降低材料用量目的。第四,拓展基于性能数字化配合比设计和全生命周期优化方法。借助机器学习和大数据分析技术深度挖掘大量原材料性能数据,建立材料组分—微观结构—宏观性能量化关系模型,从而准确地确定胶凝材料、骨料、外加剂在符合具体工程性能,以及施工要求情况下的最小掺量和最佳配合比。同时,引入全生命周期评估(LCA)工具,在设计阶段对不同材料组合和结构方案在资源消耗、碳排放、耐久性等方面的综合影响进行模拟与比选,保证所用优化设计策略既能达到源头减量,又能在全生命周期环境负荷最小化与经济性最优平衡。

3.2 过程控制、智能施工与精准养护策略

对施工过程进行精细化、智能化管控,对于降低能源消耗和资源浪费具有至关重要的意义。要建设基

于物联网、大数据、人工智能等技术的智能施工、精准养护系统。在温控上,构建以分布式光纤传感或者无线传感器网络为核心的温度—应力实时监测系统,并把采集到的数据传送到云端平台,通过机器学习算法预测温度场与应力场的发展趋势,并反向智能控制冷却水系统的流量、温度与通断时间,实现从“经验控制”到“数据驱动,动态反馈,自适应调控”的精准温控,最大限度地节省水电能耗,同时保证防裂安全。将智慧物流调度系统运用到浇筑组织中。整合商品混凝土搅拌站的生产状态、交通路况和现场浇筑进度,优化混凝土运输车辆的智能排程和路径,达到“即至即浇即用”的目的,缩短等待时间、降低运输车辆及泵送设备空载率及怠速油耗。养护环节普及自动化和智能化养护装备。例如:利用带温湿度传感器的自动喷淋系统,根据混凝土表面状态及天气情况自动开启或停止,准确补水;采用智能保温保湿毯可以循环利用,保温性能可以随环境温度的变化而自动调整。建立数字化质量追溯和碳排放核算体系,贯穿于整个建设全过程。通过对每批混凝土、各关键工序给予唯一数字标识,来实时获取和上传原材料消耗、设备能耗和温控参数、养护记录和其他数据到云端,并使用区块链技术来保证它们是不可篡改的。建设结束时,该系统能够自动生成该单位项目或建设路段精细化碳足迹报表,明确揭示各个环节碳排放热点和减碳成效,为进一步优化后续工程的流程和绩效评估提供必要的技术支持,从而建立一个“监控—调控—核算—优化”的完整管理流程,以持续提高大型混凝土施工的环保标准。

3.3 循环利用、废料资源化与碳捕捉策略

建设流程从“资源—产品—垃圾”的线性模型转变为“资源—产品—再生资源”的循环模型,并在此基础上积极研究碳捕获固存的相关技术。第一,对施工现场废料进行全过程分类管理和就地资源化。设专用清洗回收设备对泵车、罐车清洗废水及剩余混凝土中砂、石、浆水等进行分选,经分选后砂石可以用作低标号混凝土或者垫层,浆水经处理之后可以用来对混凝土进行拌和或维护,从而达到“零排放”的目的。废弃混凝土试块、砌块等能被移动式破碎筛分设备处理为再生骨料。第二,对大体积混凝土碳化养护及碳捕捉利用技术进行探究。利用混凝土水化产物($\text{Ca}(\text{OH})_2$)能够与 CO_2 反应生成碳酸钙的特性,在养护阶段引入浓度可控的 CO_2 废气,既可加速混凝土早期强度发展,又能永久固存一部分 CO_2 。可研究在封闭的养护罩内通入工业尾气(如电厂烟气)进行碳化养护的可行性。更为先进的是研究开发能够将 CO_2 直接矿物化并封存的预制混凝土构件或者

将加工后的 CO_2 混入混凝土搅拌中制备“碳负性”骨料。

3.4 制度保障、评价体系与协同管理策略

要实现技术路线落地,必须有强大的制度体系做保证。第一,要构建适合大体积混凝土结构全生命周期的碳排放核算和评价标准。该标准应当为材料、装备、运输等本土化碳排放因子提供详尽数据库,并对建材生产、运输、施工建造、运营维护直至拆除回收等各个环节核算边界和方法进行清晰界定,开发用户友好的计算软件或插件,方便设计、施工单位在方案比选时进行快速碳评估。第二,推广基于建筑信息模型(BIM)和数字孪生(Digital Twin)技术的全生命周期合作管理平台。平台集成设计模型、施工进度、物资采购、质量监测、碳排放数据,使参与各方在相同数据环境中协同作业。管理者可以对项目碳足迹进行实时监测、高碳排放环节预警、不同管理决策碳排放效应仿真,实现碳排放过程可视化和动态管控。第三,政策激励和市场机制的健全。政府要对绿色高效建造技术推出专项补贴、税收减免等政策,在项目招投标及评优评价体系中增加施工阶段碳排放指标。

4 结束语

推进大体积混凝土结构低碳化建造是涉及材料革新、工艺升级、模式变革等方面的系统工程。本文对其材料、施工、管理层面核心问题进行系统阐述,并构建以低碳材料和优化设计为原点,以智能施工和精准养护为流程,资源循环和碳捕捉是辅助,标准体系和协同管理是保障等综合技术路径。未来需要从多方协同和政策引导等方面进一步强化多材料工程可靠性验证、智能调控系统标准化应用和全生命周期碳核算体系落地,把低碳理念有效地渗透到建造的整个过程中,最终达到产业的优质和可持续发展。

参考文献:

- [1] 陈骁彦. 混凝土结构裂缝防控的施工标准化管理体系构建[J]. 水泥, 2026(02):141-144.
- [2] 刘文祥,付伟星,王东峰,等. 隧道结构超大体积混凝土底板水化热控制技术[J]. 建筑技术, 2026,57(02):163-166.
- [3] 曾启洪,刘雨欣,刘波,等. 大体积混凝土结构施工管理云平台开发与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2025,17(06):60-65.
- [4] 杨雁君,周锡海,韦宇宁,等. 基于MIDAS FEA的横门西特大桥主墩承台大体积混凝土温控技术[J]. 城市道桥与防洪, 2025(12):222-227.
- [5] 姜宜翰. 土木工程大体积混凝土结构施工技术应用研究[J]. 工程机械与维修, 2025(12):149-151.

塑性混凝土防渗墙槽段长度对墙体接缝质量的优化研究

龙永钊

(湖南庆为工程管理咨询有限公司, 湖南 湘西 416000)

摘要 松柏水库除险加固工程以塑性混凝土防渗墙作为坝体防渗的核心措施, 其中槽段长度是影响墙体接缝质量的关键因素。本文以该工程为研究对象, 探究了5.4 m与6.6 m两种槽段长度方案对接缝数量、施工工艺及浇筑连续性的影响, 同时阐述了接头管法、预埋灌浆管加固及浇筑过程控制等接缝质量控制措施。检测结果显示, 接缝部位渗透系数处于 $1.2 \times 10^{-7} \sim 4.8 \times 10^{-7}$ cm/s范围, 抗压强度达5.8~7.2 MPa, 弹性模量为920~1 280 MPa, 各项指标均符合设计标准。该槽段长度方案在减少接头数量、保障施工精度、控制浇筑质量方面成效显著, 具备推广应用的实用价值。

关键词 塑性混凝土防渗墙; 槽段长度; 接缝质量; 松柏水库; 接缝质量控制

中图分类号: TU765

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.042

0 引言

塑性混凝土防渗墙凭借低弹模、高抗渗的技术优势, 成为土石坝除险加固的核心防渗工艺。槽段接头作为墙体天然薄弱部位, 其质量直接决定防渗体系运行效果。槽段长度作为防渗墙设计核心参数, 不仅决定接缝数量, 还影响施工工艺选型、接头处理难度及混凝土浇筑密实度, 如何在减少接缝数量与保障接缝质量间实现平衡, 是防渗墙设计的关键问题。本文以松柏水库除险加固工程为依托, 针对5.4 m/6.6 m槽段长度方案展开研究, 分析其对接缝质量的作用机制, 总结工程实用的质量控制措施, 为同类土石坝防渗墙工程提供技术借鉴。

1 工程概况

1.1 松柏水库除险加固工程简介

松柏水库大坝为均质土坝, 坝体总长度900 m, 经安全鉴定存在坝体渗漏问题, 需实施除险加固。工程针对主坝、副坝二坝体及坝基、坝肩开展系统性防渗处理, 采用“塑性混凝土防渗墙+坝基帷幕灌浆”联合方案构建垂直防渗体系, 同时配套完成上游护坡修缮、下游坝坡整形、坝顶路面硬化、防浪墙重建及安全监测、水雨情测报系统完善等工程内容。

1.2 坝体防渗体系设计

防渗体系主要由上部塑性混凝土防渗墙与下部坝基帷幕灌浆共同构成。防渗墙底部高程需满足穿过破

碎带后深入基岩0.5 m的要求, 并与坝基帷幕灌浆直接搭接, 以确保两道防渗措施形成整体。防渗墙的轴线总长度为725 m, 其中主坝段长489.5 m, 副坝二段长235.5 m。成槽施工主要采用CZ-22型钢绳冲击钻配合液压抓斗进行; 其中, 土层段采用液压抓斗成槽, 入岩部位则采用冲击钻钻进^[1]。墙体材料采用塑性混凝土, 具有低弹性模量、高抗渗性等特性。

1.3 防渗墙设计与槽段划分方案

防渗墙设计厚度0.6 m, 最大墙高30.7 m, 平均墙高17.03 m, 成墙总面积12 345.04 m²。槽段采用I、II序间隔施作, 先施工I序槽孔再施工II序槽孔, 为兼顾接头数量减少与孔壁施工安全, 确定中间区域I序槽段5.4 m、II序槽段6.6 m, 两端较浅部位槽段适当加长, 全坝共划分61个槽孔, 接头连接采用“接头管法”施工。塑性混凝土设计指标为: 28天抗压强度 ≥ 5 MPa, 弹性模量800~1 500 MPa, 抗渗等级W10, 渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-7}$ cm/s。

2 槽段长度对接缝质量的影响分析

2.1 槽段长度对接缝数量的影响

槽段接头是防渗墙渗漏的主要潜在通道, 其数量与槽段长度呈负相关。松柏水库防渗墙轴线725 m, 若采用常规4 m槽段, 需划分181个槽孔、形成180条接头缝; 采用5.4 m/6.6 m组合方案, 仅划分61个槽孔、60条接头缝, 接头数量减少约67%, 既降低了渗漏隐

作者简介: 龙永钊(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利土建工程施工、工程监理。

患,又减少了接头管吊装、清淤、套打钻孔等重复工序。但槽段长度并非越长越好,过长会延长单槽成槽时间,增加槽壁裸露时长,易引发塌孔、缩径问题,降低接头部位成槽精度。因此,槽段长度需在减少接头与保证成槽质量间权衡,本工程 5.4 m/6.6 m 方案综合匹配了工程地层条件与施工设备能力^[2]。

2.2 施工工艺对接缝形成的影响

I、II 序槽段的施工次序直接影响接缝几何形态与结合质量,本工程采用“先 I 序后 II 序”交错作业,在 I 序槽混凝土浇筑完成 24~36 小时内,对端头孔进行套打处理。“套打一孔法”通过冲击钻精准钻凿 I 序槽端头混凝土,形成半月牙状接触面,其平整度、清理效果与槽段长度密切相关。槽段长度增加会提升钻机定位偏差的累积风险,易导致套打孔位偏离设计位置,若超出规范要求的 3 cm 孔位偏差、0.4% 孔斜率标准,会使接头形成“错台”“锯齿”状接触面,产生渗流通道。同时,槽段过长易造成接头清理不彻底,残留泥皮、沉渣会形成夹泥层,阻碍新老混凝土接合。本工程 5.4 m/6.6 m 槽段长度,可确保套打作业精度,与钻机操作控制能力高度适配^[3]。

2.3 槽段长度对混凝土浇筑连续性的影响

混凝土浇筑的连续性直接关系到接头部位的密实度。本工程防渗墙混凝土浇筑采用泥浆下直升导管法,依据《水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范》并结合现场拌和站产能,确定导管埋深控制区间为 2.0~6.0 m,同时要求混凝土面平均上升速度不低于 2 m/h,避免因浇筑过慢形成冷缝。当槽段长度增加时,单槽浇筑方量会相应增加,浇筑时长也随之延长。以松柏水库中部槽段为例,I 序槽长 5.4 m、墙厚 0.6 m,平均墙高 17.03 m,单槽浇筑量约 55 m³;若槽段延长至 8 m,单槽方量将超出 80 m³。在拌和设备产能固定的情况下,浇筑时间延长会导致导管拆卸、混凝土运输等环节的衔接难度上升。若混凝土供应中断或导管提升滞后,混凝土面上升速度低于 2 m/h 时,前期入仓的混凝土就可能初凝,与后续浇筑的混凝土间形成冷缝。冷缝处粘结强度较低、渗透性较强,成为接缝质量的另一隐患。

3 接缝质量控制措施

3.1 槽段接头处理措施

松柏水库防渗墙 I、II 序槽段连接采用“接头管法+套打”的组合工艺。I 序槽浇筑前,于槽段端头吊放接头管,管底插入槽底 30~50 cm 以确保密贴,管上口与导墙接口处用木楔楔实。I 序槽混凝土浇筑

结束 24~36 小时内,开始起拔接头管,形成圆弧形接触面。II 序槽成槽时,采用“套打一孔法”处理接头:以冲击钻在原 I 序槽端头孔位就位,钻凿混凝土至设计深度,将接头处部分混凝土凿除以形成半月牙形接触面。按资料要求,套打完成后用外形与槽段端头相吻合的接头刷,紧贴混凝土凹面上下反复刷动 5~10 次,直至刷面无积泥为止。

3.2 预埋灌浆管加固措施

为提升防渗墙与坝基帷幕灌浆的搭接质量,并对施工缝部位进行二次加固,松柏水库在防渗墙中心轴线上预埋 DN150 钢管作为后续帷幕灌浆的通道。预埋管采用 $\phi 159 \times 5$ mm 规格,沿防渗墙中心轴线布置,间距 2.0 m,其平面位置允许偏差不超过 +5 cm。预埋管采用“三管埋设法”:以 3 mm 厚 $\phi 150$ 钢管焊接成纵向支撑骨架,通过 $\angle 50$ mm \times 5 mm 角钢构成横向固定架,钢管与角钢通过 4 根 $\phi 12$ 钢筋焊接形成整体桁架结构,桁架高度按槽孔深度分段预制。桁架采用吊车整体吊装下放,遇阻力时严禁强压下放,以防桁架变形导致管体错位。桁架吊装到位后,将预埋管在槽口处与导墙固定,管间采用丝扣连接,管底口缠绕过滤网以避免混凝土进入管腔。防渗墙混凝土浇筑完成后,通过预埋管实施坝基帷幕灌浆,浆液在压力作用下填充墙体底部与基岩接触带及接缝处的微小空隙,从而形成二次加固。

3.3 混凝土浇筑过程控制措施

松柏水库针对接缝处混凝土浇筑过程,制定了严谨的控制参数体系。导管选用直径 250 mm 的圆形螺旋式快速接头型,结合槽段长度,每个槽孔设置不少于 2 套导管,导管间距不超过 4.0 m,导管中心至槽端的距离不大于 1.5 m。开浇前,导管底口与槽底的距离控制在 15~25 cm;在浇筑过程中,导管埋入混凝土的深度需维持在 2~6 m 区间,混凝土面上升速率不低于 2 m/h。在资料管理方面,要求每隔至少 30 分钟测量一次槽孔内混凝土面深度,同步填绘浇筑指示图并核对浇筑方量。混凝土入槽坍落度严格控制在 18~22 cm,扩散度为 34~40 cm,初凝时间不短于 6 小时^[4]。槽孔口需设置盖板,防止混凝土从导管外侧散落至槽孔内部。结合松柏水库防渗墙施工批次划分,本工程规定每浇筑 100 m³ 塑性混凝土制作 1 组抗压试块,每 5 个槽段制作 1 组抗渗试件(每组 6 件),所有试块均在现场标准养护室养护 28 天后,送湖南省水务规划设计院有限公司检测。通过上述参数的严格把控,确保了混凝土在接缝处的均匀性与流动性,有效避免了因流动性不足造成的接头处填充不密实问题。

4 槽段长度优化效果分析

4.1 不同槽段长度方案实施与检测指标

松柏水库防渗墙施工严格依照设计划分的61个槽孔组织施工,中部区段采用I序5.4 m、II序6.6 m的标准槽段,端部较浅区域结合现场实际适当延长。成墙总面积达12 345.04 m²,最大墙高30.7 m,平均墙高17.03 m。墙体浇筑完成28天后,依规范要求开展质量检验,检验方法涵盖钻孔取芯、注水试验及芯样力学性能检测。检查孔布设遵循每15~20个槽孔设置一处的原则,位置选定于接缝部位及地质条件复杂区段,全坝累计设置检查孔4个。检测指标均严格依据设计标准执行:渗透系数 $\leq 5 \times 10^{-7}$ cm/s,28天抗压强度 ≥ 5 MPa,弹性模量800~1 500 MPa,成墙厚度 ≥ 0.6 m,容重 ≥ 2.1 t/m³,抗渗等级W10。接缝部位注水试验严格遵循《水利水电工程注水试验技术规程》(SL 345-2020)要求,采用单点法开展检测,压水压力设定为灌浆压力的80%且上限控制在0.3 MPa,检测过程中每5分钟记录一次压入流量,连续观测20分钟后取末次流量值作为透水率计算依据。

4.2 接缝质量检测结果与设计指标对比

根据各检查孔的检测结果,防渗墙接缝部位的各项检测指标均符合设计标准。注水试验数据显示,接缝区域的渗透系数介于 $1.2 \times 10^{-7} \sim 4.8 \times 10^{-7}$ cm/s之间,全部低于 5×10^{-7} cm/s的设计阈值;其中中间5.4 m/6.6 m标准槽段的接缝渗透系数平均值为 2.3×10^{-7} cm/s,低于两端加长槽段的 3.6×10^{-7} cm/s。钻孔取芯检查显示,I、II序槽接头处混凝土胶结状况良好,接头面清晰呈现半月形接触痕迹,未见明显夹泥层、冷缝及疏松区域。芯样完整性良好,长度多处于0.8~1.2 m之间,无明显破碎带。抗压强度检测值在5.8~7.2 MPa之间,均高于5 MPa的设计要求;弹性模量检测值在920~1 280 MPa范围内,处于设计要求的800~1 500 MPa区间内,表明墙体具备良好的变形适应性,可与坝体实现协调变形。成墙厚度采用钻孔测厚仪结合芯样测量,实际厚度在0.61~0.64 m之间,最小厚度不低于0.6 m;容重检测值在2.13~2.18 t/m³之间,符合不小于2.1 t/m³的规定。抗渗等级经专项检测达到W10标准。综合检测数据显示,不同槽段位置的接缝质量虽存在细微差别,但均在设计允许范围内。

4.3 槽段长度优化对接缝质量的提升效果

松柏水库选用的5.4 m/6.6 m槽段划分方案,在实际施工中取得了显著优化成效。首先,在接头数量管控方面,725 m轴线长度仅形成60道接缝,若采用

常规4 m槽段方案则会形成约180道接缝,接头数量减少67%,从源头降低了渗漏隐患点。其次,就施工精度保障层面而言,5.4 m与6.6 m的槽段长度和CZ-22型冲击钻及液压抓斗的成槽能力相适配,实测孔斜率控制在0.3%~0.4%区间内,优于规范要求的0.4%,确保了套打接头的定位精度,有效避免了因槽段过长引发的偏差累积问题。再次,在浇筑质量管控方面,单槽混凝土方量控制在50~60 m³范围内,结合强制式搅拌机生产能力(约25 m³/h)及运输条件,混凝土可按2 m/h以上的速度均匀上升,导管埋深始终维持在2~6 m范围内,未出现冷缝或浇筑中断问题^[5]。最后,从检测结果分析,接缝部位的渗透系数、抗压强度、弹性模量等核心指标均达到标准,且具备一定冗余度,印证了该槽段长度方案在保障接缝质量的同时,兼顾了施工效率。松柏水库的工程实践显示,在同类土石坝防渗墙工程中,综合考量地层条件、设备能力及工期要求,选用5~7 m的槽段长度组合,能够在减少接头数量与控制施工质量之间实现良好平衡,具备推广应用价值。

5 结束语

松柏水库防渗墙工程的实践结果显示,5.4 m/6.6 m的槽段长度方案在保障接缝质量方面展现出显著优势。该方案将725 m轴线的接头数量控制于60条以内,相较常规4 m槽段减少67%,从根本上降低了渗漏风险。在施工过程中,通过接头管工艺、套打技术、预埋灌浆管加固及浇筑过程的严格把控,有效保障了接缝部位的密实性与整体性。检测数据表明,接缝处的渗透系数、抗压强度、弹性模量等核心指标均达到设计标准,同时存在一定富余量。本研究成果可为同类土石坝防渗墙工程的槽段长度优化提供借鉴。

参考文献:

- [1] 陈志阔.塑性混凝土防渗墙施工处理技术应用[J].绿色建筑,2022,14(04):97-101.
- [2] 陈建国,黄凯,梁巍耀,等.防渗墙塑性混凝土力学性能-波速拟合曲线研究[J].新型建筑材料,2024,51(07):108-112.
- [3] 李静波.水利工程施工的混凝土防渗墙施工技术分析[J].中国水泥,2024(08):99-101.
- [4] 刘翠.水利工程塑性混凝土防渗墙施工裂缝防治技术[J].地下水,2023,45(03):275-277.
- [5] 彭丽英.水利工程塑性混凝土防渗墙施工技术及其质量控制探讨[J].低碳世界,2022,12(03):44-46.