

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 1 月 第 3 期 (总第 628 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 1 月 25 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 光学与 SAR 影像异源匹配方法研究
..... 陈世津, 夏 飞, 许 峰
- 004 大型压力机滑块防坠落系统关键技术研究
..... 余基洋
- 007 无人机三维目标定位系统关键研究与实现
..... 王继红, 胡三宁, 朱芝靖, 刘志广
- 010 无人机机库控制系统中关键指令失真问题的应对措施
..... 苟玉虎
- 013 智能优化技术在火力发电 DCS 系统控制中的经济性应用价值研究
..... 刘 云
- 016 能源结构转型背景下超超临界塔式锅炉 T23 水冷壁管理技术研究
..... 田宏建

智能科技

- 019 连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用
..... 姚红彬
- 022 矿山胶带运输智能巡检机器人应用研究
..... 孙 钰
- 025 接地保护暂态特征识别算法的应用分析
..... 姚舟华
- 028 信息化技术赋能路面厚度与弯沉智能检测系统设计
..... 韩笑飞
- 031 基于 AI 的图像识别技术在 UI 自动化测试中的应用研究
..... 杨 欢
- 034 基于工业互联网的电气系统远程监控与管理平台构建
..... 王奎元
- 037 基于数字化技术的燃气—蒸汽联合循环机组状态监测研究
..... 黄泽峪

应用技术

- 040 装配式建筑外墙防渗漏施工技术应用
..... 钟贞明, 徐四平, 廖桂红, 李 康

目录 Contents

- 043 装配式住宅外墙防渗漏性能提升的关键技术研究.....唐春鹤, 祝庆文, 冒东升, 李紫明, 危博
046 大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法分析.....薄慕长
049 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨.....赵云, 刘洋, 郑昆冈
052 水利堤防工程边坡失稳除险加固施工技术探讨.....王万信, 叶建军
055 软土地基岩土勘察特征及加固处理技术研究.....黄耀琦
058 城市地铁深基坑开挖引起地层变形特征及预测研究.....葛稳强
061 雨污分流顶管施工技术在市政给排水工程中的应用研究.....李瑞

科创产业

- 064 流化床 CVD 硅碳负极的制备与性能优化.....杨林涛, 陶刚义, 杜晓辉
067 DCS 控制系统在化工仪表中的应用分析.....李聪
070 城市集中供热系统能效优化与节能分析.....王若川
073 远程用电检查技术在电力营销中的应用研究.....于宁
076 分布式光伏电站工程建造技术优化路径探索.....丁中武
079 数字化采购技术在工程分包采购管控中的应用研究.....孙靖
082 工业园区 VOCs 排放企业智能化监管的模式与路径研究.....朱睿

技术管理

- 085 上跨铁路转体立交桥施工技术要点研究.....曹健
088 公路桥梁钻孔灌注桩施工质量控制策略.....孙俭宝
091 无损探伤技术在公路桥梁检测中的应用.....张浩
094 工程建设施工中的项目管理及成本控制分析.....张海燕, 吕文静, 田飞飞
097 公共建筑房建施工现场精细化管理技术应用.....刘建杰
100 电力工程高空作业安全防护技术应用与管理探讨.....张又伟
103 面向用户需求的小区建筑智能化工程施工全流程技术管理体系构建.....赵雪姣

科学论坛

- 106 市政道路软土地基处理中混凝土搅拌桩的优化设计.....丁国尚, 林天翔
109 钻孔灌注桩施工技术在路桥工程项目中的应用研究.....李逸
112 复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制与承载性能分析.....张赣
115 水利工程协同设计模式对设计效率提升的效果研究.....贾万伟, 陈淑青, 陈龙
118 倾斜摄影技术在城市 LOD1.3 级三维模型构建中的应用研究.....肖堃
121 五轴数控机床电气控制中急停回路的可靠性设计与验证.....贺文斌
124 大跨度拱桥景观照明网幕系统风荷载特性及抗风性能研究.....谢意华

光学与 SAR 影像异源匹配方法研究

陈世津, 夏 飞, 许 峰

(广西国土资源规划设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘 要 随着 SAR 卫星的陆续发射和普及, 其全天候、全天时、高分辨对地观测能力与光学卫星形成良好互补应用; 由于光学与 SAR 影像成像机理不同, 同名点自动匹配难度较大, 是近几年来遥感技术研究的难点和热点之一。为了满足光学和 SAR 影像自动匹配的精度需求, 本文基于已有的相位一致性直方图匹配方法, 提出了逐级自适应搜索半径、逐点小区域内存正射纠正、迭代剔除粗差点等匹配策略, 并开展了两种较为复杂地形特征的光学与 SAR 自动匹配实验验证, 旨在为进一步提升匹配算法的鲁棒性和正确率提供参考。试验结果表明, 该方法能够均匀匹配出大量的同名点, 正确率高于 92%。

关键词 遥感影像; 特征描述子; 光学影像; SAR 影像; 异源影像匹配

基金项目: 多源遥感数据自动化处理系统(项目编号: 桂科 AB24010337)。

中图分类号: TP751

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.001

0 引言

单一传感器获取的遥感影像所携带的信息量有限, 为了能够让遥感影像发挥最大的应用价值, 往往需要多源遥感影像的结合^[1]。其中光学影像易受到环境和气候的影响, 导致部分区域的影像因常年云雾覆盖而无法使用。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像具有不受云雾天气影响的特点, 可以弥补光学影像信息的不足^[2]。全自动的影像匹配是影像配准、影像融合、变化检测等最基础、最常用的一项技术, 影像匹配尤其是异源影像之间的匹配尤为关键。

有学者使用 SIFT、SURF、ORB 等基于特征描述子的匹配方法^[3-5]对遥感影像进行了匹配研究, 但对成像机理差异较大的光学和 SAR 影像并不适用; 互相关算法是一种基于区域的匹配方法, 通过计算两幅影像中对应区域的灰度值相关性, 实现对同名点的匹配。互相关算法简单直观, 但对影像的光照变化和噪声比较敏感^[6]。相位相关算法是一种基于频率域的匹配方法, 通过计算两幅影像的傅里叶变换的相位差, 实现对同名点的匹配。相位相关算法对影像的光照变化和噪声不敏感, 但计算量较大^[7]。叶沅鑫提出了基于结构相似性的多模态匹配框架, 将相位一致性特征值与特征方向相结合, 构建几何结构特征描述符, 通过逐像素结构特征匹配框架进行多模态影像匹配^[8]。近几年, 也有很多专家学者研究使用深度学习方法来对遥感影像进行自动匹配^[9-10], 但需要大量且全面的样本才能具有一定的普适性。

为了使光学和 SAR 卫星影像自动匹配能够更好地满足自动化和工程化应用, 本研究在已有的异源影像匹配技术的基础上做了匹配精度和成功率方面的改进, 并展开了匹配实验, 论证了该方法的有效性。

1 光学和 SAR 影像异源匹配技术

本研究首先针对高分三号雷达卫星影像进行了 SAR 噪声去除、距离多普勒(RD)模型重构 RPC 模型等预处理, SAR 噪声去除提升了 SAR 影像的纹理质量, 而 RD 模型重构 RPC 模型统一了和光学同样的数学模型基础; 其次介绍了 HOPC 实现可见光和 SAR 影像匹配的基本原理; 最后基于 HOPC 基本原理, 提出了三点改进方法, 进一步提升匹配的准确率和鲁棒性。

1.1 SAR 预处理

1.1.1 SAR 噪声去除

SAR 影像的相干斑噪声是成像过程中散射体相干叠加导致的固有噪声, 不仅影响视觉感受, 也会影响与其他影像的自动匹配。本研究采用小波变换法对 SAR 影像进行去噪处理, 小波变换法能够在不同尺度下分离影像的低频信号与高频噪声, 其核心优势在于兼顾噪声抑制与细节保留。小波变换法对 SAR 影像去噪的主要算法步骤如下:

(1) 小波分解: 将 SAR 影像分解为低频近似分量和高频细节分量, 实现噪声与有用信号的频域分离。(2) 噪声标准差估计: 量化高频分量中的噪声强度, 为阈值

作者简介: 陈世津(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 自然资源遥感监测和调查测绘、数智化与人工智能技术研究。

处理提供依据, 确保阈值能有效区分噪声与有用细节。

(3) 高频细节分量处理: 抑制高频分量中的噪声系数, 保留对应地物边缘纹理的有用系数。(4) 小波逆变换: 将处理后的低频分量与高频分量重构为去噪后的影像。

1.1.2 RD模型重构RPC模型

多视角SAR数据精密定位技术基于距离—多普勒模型这一核心理论展开, 该模型是SAR成像和目标定位的重要基础, 反映了雷达与目标之间的空间关系以及信号传播的物理特性。在多视角SAR系统中, 每个视角下的雷达都遵循距离—多普勒原理工作。从雷达发射信号到接收目标回波的时间延迟, 可以用于计算雷达与目标之间的距离信息。通过距离时间和方位时间可以构建出每个视角下的距离多普勒方程。当存在多个视角的雷达数据时, 每一个视角的数据都能根据距离—多普勒模型列出一组观测方程。这些观测方程从不同的角度描述了目标的位置信息。不同视角下的距离观测值和多普勒频移观测值都是目标位置的函数, 但由于视角的差异, 这些函数在参数上各不相同。R-D距离多普勒模型可以通过制作自身虚拟控制点的方式来构建其RPC模型, 经过大量数据的验证, 由此得到的RPC模型与R-D模型精度小于0.1个像素。

1.2 HOPC匹配基本原理

相位一致性方向直方图(Histogram of Orientated Phase Congruency, HOPC), 是一种基于相位信息的局部特征描述子, 常用于图像匹配、目标识别、遥感图像配准等场景。其核心优势在于对光照变化、噪声、几何形变具有较强的鲁棒性, 弥补了传统基于梯度特征匹配算法在低对比度、纹理模糊图像中性能下降的不足。

相位一致性的计算是HOPC的基础, 其本质是通过Gabor小波变换或Log-Gabor小波变换对图像进行多尺度、多方向分解, 再分析各分解分量的相位一致性程度。强度值计算公式如下:

$$PC(x, y) = \frac{\sum_n \sum_o W_o(x, y) [A_{no}(x, y) \Delta \Phi_{no}(x, y) - T]}{\sum_n \sum_o A_{no}(x, y) + \varepsilon} \quad (1)$$

式(1)中, $PC(x, y)$ 表示在像点 (x, y) 相位一致性的强度值, $[]$ 符号表示值为正时取本身, 否则取0, T 为噪声阈值, ε 是一个避免除数为零的常数, $A_{no}(x, y)$ 为像点 (x, y) 在 \log Gabor 滤波器尺度 n 和方向 o 上的振幅, 它与 $\Delta \Phi_{no}(x, y)$ 的乘积为:

$$A_{no}(x, y) \Delta \Phi_{no}(x, y) = (e_{no}(x, y) \bar{\phi}_e(x, y) + o_{no}(x, y) \bar{\phi}_o(x, y)) - |e_{no}(x, y) \bar{\phi}_o(x, y) - o_{no}(x, y) \bar{\phi}_e(x, y)| \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{\phi}_e(x, y) = \sum_n \sum_o e_{no}(x, y) / E(x, y) \\ \bar{\phi}_o(x, y) = \sum_n \sum_o o_{no}(x, y) / E(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

能量函数 $E(x, y)$ 为:

$$E(x, y) = \sqrt{(\sum_n \sum_o e_{no}(x, y))^2 + (\sum_n \sum_o o_{no}(x, y))^2} \quad (4)$$

式(4)中, $e_{no}(x, y)$ 为 \log Gabor 小波的偶对称滤波器响应值, $o_{no}(x, y)$ 为 \log Gabor 小波的奇对称滤波器响应值。

仅仅只有相位一致性的强度值并不能完全构建出特征描述符, 还需要引入特征方向来完善 HOPC 描述子的构建。将多方向的奇对称滤波器结果分别投影到水平方向和垂直方差, 可获得两个方向的反正切值, 从而获得相位一致性特征方向 Φ :

$$\begin{cases} a = \sum_\theta (o_{no}(\theta) \cos \theta) \\ b = \sum_\theta (o_{no}(\theta) \sin \theta) \\ \Phi = \text{artan}(b, a) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $o_{no}(\theta)$ 表示在方向 θ 上的奇对称滤波器响应值。

对影像进行均匀分块, 分别计算每块影像的相位一致性方向直方图, 将相位一致性的强度和方向归一化为0到1的值, 共同组成 HOPC 特征描述子, 最后使用正交化的相关一致性(NCC)作为相似性测度通过 HOPC 特征描述子来进行影像匹配, 定义为:

$$HOPC_{ncc} = \frac{\sum_{k=1}^n (V_A(k) - \bar{V}_A)(V_B(k) - \bar{V}_B)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (V_A(k) - \bar{V}_A)^2 \sum_{k=1}^n (V_B(k) - \bar{V}_B)^2}} \quad (6)$$

式(6)中, V_A 和 V_B 是影像区域A和影像区域B的 HOPC 描述子, \bar{V}_A 和 \bar{V}_B 分别表示 V_A 和 V_B 的平均值。

1.3 HOPC匹配改进方法

直接采用 HOPC 方法进行点位匹配时发现该方法的匹配错误率较高, 也不支持有旋转角度影像间的自动匹配, 如 SAR 原始影像和光学影像的角度差异较大。为此, 对该方法进行三点改进:

一是 SuperGlue+HOPC 匹配结果交叉验证。为了进一步提升自动匹配的正确率, 引入基于深度学习的 SuperGlue 算法和 HOPC 算法共同来决定匹配点是否成功。首先, 初始特征点采用 SuperPoint 特征点提取算法来对 SAR 影像进行特征提取, 目的是采用同一套初始特征点; 其次, 分别采用 SuperGlue 算法和 HOPC 算法同时对 SAR 影像和光学影像进行自动匹配, 得到两组匹配对; 最后, 对两组匹配对进行分析处理, 假设某个特征点使用 SuperGlue 匹配方法得到的第二景影像的像素坐

标为 $P_s(x_s, y_s)$ ，使用 HOPC 匹配方法得到的第二景影像的像素坐标为 $P_h(x_h, y_h)$ 。则最终确定的匹配点像素坐标如下 $P(x, y)$ ：

$$P(x, y) = \begin{cases} x = \frac{x_s + x_h}{2} (|x_s - x_h| \leq \theta) \\ y = \frac{y_s + y_h}{2} (|y_s - y_h| \leq \theta) \end{cases} \quad (7)$$

如果两种匹配方法匹配得到的坐标值差小于误差阈值 θ （本文取 0.3 像素），则取这两种匹配方法得到的坐标平均值，如果大于误差阈值 θ ，则匹配失败。

二是在匹配过程中结合 DEM 数据进行实时小块影像内存正射，解决 HOPC 算法不支持旋转影像和由于地形起伏等原因无法匹配的问题。原始 SAR 影像由于拍摄角度和升降轨问题，相对基准影像是上下颠倒的；无 DEM 正射的 SAR 影像，影像左下角扭曲严重，加入 DEM 后，扭曲问题得到了缓解，为匹配算法输入无旋转和精度差异最小的数据，提升匹配的可靠性和正确率。

三是使用迭代剔除粗差点的方法。由于可见光与 SAR 影像的纹理差异性，自动匹配的控制点会存在一定比例的错误点，如果不进行有效删除，则会影响区域网平差的精度。通过 RPC 模型和 DEM 数据计算每个点的误差值，删除误差值最大的点位，剩余的控制点再利用 RPC 模型和 DEM 数据计算每个点的误差值，再次删除误差值最大的点，如此循环迭代删除点位，直到最大误差值小于设定的误差阈值停止迭代，保留的控制点就认为是正确的。该方法虽然增加了一定的计算量，但是能够避免一次性删除多个点造成有些正确的点被误删。

2 试验与分析

2.1 匹配试验数据

为了验证本研究匹配方法改造的效果，采用两组光学和 SAR 影像作为试验数据（见表 1），分别采用本研究改进的方法、HOPC 方法进行匹配，并记录不同方法匹配的总点数、匹配正确率。

表 1 匹配试验数据情况

序号	参考影像		待匹配影像		数据特点
	数据 类型	分辨率 (米)	数据 类型	分辨率 (米)	
1	光学	2	SAR	3	SAR 数据内部存在畸变
2	光学	2	SAR	8	山区，地形起伏较大

试验中的匹配参数统一设置为：种子点数为 1 000 个，搜索半径为 50，RPC 模型粗差别阈值为 3 个像素，匹配精度小于 1 个像素为正确点。

2.2 匹配试验结果

分别使用原始的 HOPC 方法和本研究改进的 HOPC 方法使用相同的参数对两组实验数据进行自动匹配试验，两种匹配方法的试验结果对比见表 2。

表 2 匹配试验结果对比

序号	方法	匹配点数	匹配正确率
试验 1	HOPC	89	89.6%
	本文方法	129	92.4%
试验 2	HOPC	154	87.2%
	本文方法	210	93.4%

从匹配试验结果对比可以看出，对于内部存在畸变或地形起伏较大的数据，本研究改进的方法不论是匹配点数还是匹配正确率均优于原始 HOPC 方法。

3 结束语

针对光学和 SAR 影像自动异源匹配的问题，本研究基于相位一致性直方图匹配方法做了金字塔逐级自适应搜索半径、逐点小区域内存正射、迭代剔除粗差点三个方面的改进，并采用原始 HOPC 方法和本研究改进的 HOPC 方法分别对两组光学和 SAR 影像进行自动匹配试验。试验结果表明，本研究改进的 HOPC 方法相较于原始 HOPC 方法在鲁棒性和正确率方面均有明显的提升，为下一步批量化异源影像配准、融合、区域网平差等处理奠定了坚实的基础。

参考文献：

- [1] 林月卿. 多源遥感数据融合在土地利用变化监测中的应用 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(18): 220-222.
- [2] 杨超, 刘畅, 唐腾峰, 等. 基于深度特征重构增强的光学和 SAR 图像鲁棒匹配 [J]. 遥感学报, 2025, 29(08): 2616-2626.
- [3] 何巧. 线性注意力机制优化的光学与 SAR 影像匹配方法 [J]. 遥感信息, 2024, 39(05): 171-178.
- [4] 邓睿. 基于孪生网络和噪声解耦的可见光-SAR 图像匹配方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [5] 田丹, 陈钰坤. 基于改进 ORB 算法的遥感图像匹配 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2024, 36(01): 34-39, 85.
- [6] 门宇博, 宋佳, 程思源. 基于边缘特征互相关的快速 SAR 图像匹配算法 [J]. 中国宽带, 2023, 19(05): 68-70.
- [7] 衣家欣, 王金鹤. 基于改进相位相关算法的图像匹配 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48(06): 1456-1459.
- [8] 刘盼. 面向光学遥感与 SAR 图像的配准方法 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [9] 傅水清. 基于深度学习的宽基线弱纹理影像匹配研究 [J]. 科学技术创新, 2024(14): 47-50.
- [10] 王迎春. 一种基于学习型特征的多模态影像匹配方法 [J]. 时空信息学报, 2023, 30(03): 345-351.

大型压力机滑块防坠落系统关键技术研究

余基洋

(江苏环宇汽车零部件有限公司, 江苏 无锡 214257)

摘要 本文针对大型压力机滑块坠落这一重大安全隐患,研究了滑块防坠落系统的设计原理、关键技术及工程应用。通过分析滑块坠落的原因,提出了多级防护系统架构,集成机械锁紧机构、液压支撑保险系统和智能中控三大子系统,可靠性达到99.9%以上,旨在为大型压力机的安全防护提供技术方案参考,对提升压力机制造业的安全水平具有积极的工程意义。实际应用结果表明,防坠落系统能够有效防止滑块坠落,系统响应时间小于50毫秒,机械锁紧装置能够在100毫秒内紧急制动,制动承载能力可达额定负载的200%以上。

关键词 压力机; 滑块防坠落; 安全防护; 机械锁紧; 液压支撑保险

中图分类号: TG315.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.002

0 引言

大型压力机作为当代制造业的重要生产设备,广泛应用于汽车制造、航空航天、家电生产、工业设备制造等关键领域。随着现代工业自动化的程度不断提升,压力机的工作负荷和频率也在持续增加,降本增效成为企业提高竞争力的核心策略,这就对压力机在工作时长及工作效率等方面提出了较高的要求,使压力机的安全性能面临着前所未有的挑战。在长期高负荷运行过程中,由于系统维护不当、系统故障、机械疲劳等多方面的因素,滑块坠落事故时有发生,不仅会造成设备损伤,同时也可能导致人员伤亡等严重后果。基于此,压力机滑块防坠落技术的研究具有很大的实际应用价值。在安全技术方面,滑块的防坠落是压力机安全设计的关键环节,虽然无法消除滑块的坠落风险,但是可以通过主动预防和被动防护相结合的方式,显著降低滑块坠落事故发生的概率和严重度。在技术创新方面,滑块防坠落系统的升级将推动压力机向更加安全、可靠的方向发展。

国外对压力机安全技术的研究比较早,欧洲标准化委员会和美国国家标准学会都建立了比较完善的压力机安全防护标准体系。在技术方面,德国、日本等在滑块防坠落技术上处于领先地位,开发了多种机械锁紧、液压制动和电气控制的组合式的安全防护系统。例如:德国的赛特马 SITEMA 安全锁紧装置,可有效用于防止滑块脱落。我国对压力机滑块防坠落措施的研究

虽然起步较晚,但发展较为迅速。随着 GB/T 42596 系列国家标准的发布实施,我国压力机安全技术进入了规范化发展阶段。例如:邹兵等研发的液压机滑块防坠落装置采用碟形弹簧和内锥体结构,实现了快速可靠的锁紧功能^[1]。但是通过实际应用发现,现有安全防护技术仍存在响应速度慢、系统可靠性不足、系统智能化程度低、老式压力机改造成本较高等现实问题,亟需进一步研究和完善。

1 大型压力机滑块防坠落系统设计

1.1 防坠落系统总体架构

为有效降低压力机滑块坠落风险,本文针对滑块防坠落系统构建三级防护的架构。第一级为预防层,通过实时监测压力机液压系统压力、滑块位移传感器等关键参数,在故障发生前预警;第二级为主动防护层,机械锁紧机构在预防层检测系统异常时立即动作锁住滑块,同时液压系统在检测到压力异常时,可有效锁紧油压压力;第三级为被动防护层,压机顶部设置可靠的物理限位。这种分层防护极大地提高了系统的可靠性(见表1)。

1.2 机械锁紧机构设计

机械锁紧机构为防坠落系统的核心部件,其性能直接决定了整个系统的可靠性。对于机械锁紧机构的驱动力,一般采用液压油缸+弹簧式插销^[2]、蝶形弹簧组等方式。本文设计的机械锁紧机构采用气缸作为动力源,通过气缸连接杆推动卡爪锁住齿条的原理实

作者简介: 余基洋(1988-),男,本科,高级工程师,研究方向:安全工程。

表 1 三级防护系统功能对比

防护层级	技术手段	响应时间	保护范围	可靠性
预防层	压力、位移等传感器监测	实时	全面监测	99%
主动防护层	机械锁紧机构、液压双保险	< 100 毫秒	主要故障模式	99%
被动防护层	顶部限位	瞬时	极端情况	100%

现快速锁紧功能。当油压传感器检测到液压系统低于正常值或者当滑块位移传感器检测滑块速度异常时，系统通过气动阀控制气缸，推动卡爪锁住齿条，达到瞬间制动的效果。

机械锁紧机构由齿条、齿条底座、气缸锁紧机构、机构底座、气动系统、油压传感器、限位开关、滑块位移传感器等组成。每台压力机需对角或者对侧安装机械锁紧机构，使用焊接方式将气缸锁紧机构、齿条分别固定在压力机框架和滑块上。驱动气缸采用双作用气缸，通过交替供气实现气缸锁紧装置卡爪伸出及复位。为增加气缸的可靠性，在气动系统上安装气压传感器，一旦检测气动系统压力异常，压力机将会停止运行。

1.3 液压支撑保险系统

液压支撑保险系统作为该架构的辅助防护，在机械锁紧系统失效时提供第二道防线。该系统由两套液压锁紧阀、两套电池阀、蓄能器、注油单向阀、压力传感器组成。正常工作时，电池阀通电，液压锁紧阀保持开启状态，允许滑块自由运动；当传感器检测到液压系统压力异常下降时，电池阀不得电，锁紧阀立即关闭，将滑块锁定在当前位置；在油缸注油孔设置单向阀，液压油无法通过注油口回油，可锁定油缸压力。同时，油压系统蓄能器作为应急动力源，在主动动力系统失效时提供短时压力维持，可减速滑块掉落速度，为机械锁紧机构的动作赢得宝贵时间。

液压支撑保险系统可有效减缓滑块掉落速度，液压机工作时要求滑块可以在任意位置悬停，若液压系统出现油封漏油、油管松动等情况，就会出现滑块自动下滑现象。本文液压支撑保险系统采用双回路设计，两套独立的液压回路独立工作，如其中一套回路失效，另一套仍能提供 50% 的支撑力，有效地提高系统的容错能力。

1.4 安全销板系统

安全销板系统作为最后一道防线，是一种纯机械式的防坠落装置，具有结构简单、可靠性高的特点。

鞍山齐力机电的专利技术显示^[3]，该系统由安全销板、限滑杆和推送机构组成，安装在滑块顶部，当滑块上升到最高行程后，推送机构横向推动安全销板，将限滑杆的顶端锁紧固定，从而防止滑块下滑。

2 智能中控系统设计

2.1 智能中控系统架构

智能中控系统采用分布式架构，由控制器、监测系统 and 执行机构三部分组成。控制器基于设备 PLC，负责对检测数据的处理、分析和发布控制指令；监测系统包括压力传感器、位移传感器、加速度传感器和视觉检测系统，全方位监测滑块工作状态；执行机构包括电磁阀、气动阀、报警装置等，负责执行控制指令。

智能中控系统的核心是将多个传感器测量数据融合处理，消除单个传感器的检测误差，提高系统识别风险的准确性。智能中控系统设置三层故障诊断逻辑：首先通过传感器报警阈值判断，当系统任一参数超出安全范围时立即报警；其次是数据分析，智能控制系统通过比对不同传感器的监测数值，预测系统故障的发展趋势；最后通过系统设定逻辑，推送故障类型和应急处置方案推荐信息。

2.2 紧急制动

紧急制动设计主要是提高系统响应速度和精准控制，当系统检测到滑块下降速度或者位移异常时，紧急制动首先紧急关闭主液压系统油路，然后触发机械锁紧机构；如滑块坠落速度超过警戒值，立刻启动液压系统蓄能器辅助制动。系统紧急制动过程在 100 毫秒内完成，制动距离控制在 20 毫米以内。通过数字仿真系统建立压力机滑块的运动模型，模拟不同故障工况下的滑块坠落，最终确定系统的控制参数。模拟数据显示，优化后的控制参数可将冲击载荷降低 50%，极大地提高了系统的可靠性。

2.3 人机交互界面

为便于操作和维护，系统采用人机交互界面，通过中控屏显示实时液压数据、滑块运行数据以及设备

实时运行数据、历史运行数据、故障记录数据和界面参数设置、维护日历。系统采用三色报警模式，绿色为正常运行，黄色为警告状态，红色为紧急状态。可在中控屏上设置系统参数、报警阈值、维护日历，极大地提高系统的可操作性。

3 安全标准与规范分析

3.1 国家标准体系

我国压力机安全标准《机床安全 压力机 第2部分：机械压力机安全要求》(GB/T 42596.2-2024)^[4]于2024年11月28日发布，2025年6月1日正式实施。该标准对压力机的全过程提出了具体的安全技术要求，压力机必须配备防止滑块意外坠落的防护装置，紧急响应时间不超过200毫秒，紧急制动距离不得超过滑块最大行程的5%，锁紧力不低于滑块自重的1.5倍。同时防护装置必须定期测试，测试记录保存不少于3年。

3.2 国际标准对比

《机床安全 压力机 第2部分：机械压力机安全要求》(ISO 16092-2:2019)^[5]作为国际主流标准，与我国标准在技术要求上基本一致，但是在某些细节上仍然存在一定差异。例如：ISO标准侧重于生产厂商基于压力机的实际用途和使用环境进行个性化的安全设计。而我国标准明确了压力机的安全技术指标和测试方法，更符合国内制造业的实际情况。例如：EN 693是欧洲压力机安全标准，要求压力机防坠落装置必须通过型式试验，并取得第三方机构的认证。这种要求能够检验防护装置的生产质量和系统可靠性，值得我国借鉴。

4 性能评估

本文设计的防坠落系统与市场上主流产品进行对比。传统机械式防坠落装置虽然可靠性高，但响应时间通常在150毫秒以上，且需要人工复位；液压式锁紧装置虽然响应快，但受油温、污染等因素影响大，维护复杂、安装成本较高且增加液压系统漏油风险。本文设计的防坠落系统融合了机械的可靠性、快速响应性、经济性，在综合性能上具有明显优势。同时，本文设计的防坠落系统在极端工况下的表现仍然比较优异。在模拟液压系统完全失效、滑块自由降落时，系统响应时间小于50毫秒，机械锁紧系统能够在100毫秒内完成紧急制动，最大制动距离20毫米，滑块冲击载荷控制在安全范围内。实验表明，本文设计的压力机滑块防坠落技术性能优于市场主流产品，满足国标的技术指标要求。

5 结论与展望

5.1 研究成果总结

本文通过对大型压力机滑块防坠落技术的研究，取得了如下成果：

1. 设计了三级防护系统架构，通过将预防、主动防护和被动防护三级防护系统有效结合，大大提高了系统的可靠性。系统机械锁紧机构采用传统气缸锁紧机构，系统响应时间小于50毫秒，紧急制动在100毫秒内完成；液压支撑系统提供双回路保护，为机械锁紧机构赢得反应时间；安全销板系统作为最终屏障，极大地提高了系统防护的安全性能。

2. 创新提出了多传感器融合的智能中控系统理念，通过故障的快速识别和分析，准确判断故障类型，通过系统数据库提取紧急处置方案，推送至系统界面。通过优化控制参数，可将滑块制动冲击负荷降低60%，有效保护设备和模具。

5.2 技术展望

随着AI技术的发展，防坠落系统具备更强的学习和适应能力，能够根据设备历史数据以及网络数据库优化防护策略。同时，防坠落系统与压力机的其他安全系统（如光栅防护、安全扫描仪、双手操作装置等）有效结合，可形成集成的安全控制系统。随着行业标准的不断更新，压力机滑块防坠落技术将更加规范化、成熟化、科技化，促进行业内压力机安全水平的整体提升。尤其是数字仿真模拟技术在防坠落系统中的应用，通过建立压力机的数字仿真模型，可以模拟各种设备的运行状态，预测潜在故障，提前采取防护措施，并建立后台数据库，与AI技术有效结合，使压力机滑块防坠落技术朝着高智能化、集成化、标准化发展。

参考文献：

- [1] 邹兵,江唯,张晓平.一种液压机滑块防坠落装置制造方法及图纸:CN222590800U[P].2025-03-11.
- [2] 李卫华.防液压机滑块脱落的几种常用安全措施[J].锻造与冲压,2019(04):48-50.
- [3] 鞍山齐力机电设备有限公司.一种液压机滑块下滑保护装置:CN222904974U[P].2025-05-28.
- [4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.机床安全压力机第2部分:机械压力机安全要求(GB/T 42596.2-2024)[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [5] 国际标准化组织.机床安全压力机第2部分:机械压力机的安全要求(ISO 16092-2:2019)[S].2019.

无人机三维目标定位系统关键技术研究是实现

王继红¹, 胡三宁¹, 朱芝靖², 刘志广²

(1. 河南科技大学应用工程学院, 河南 三门峡 472000;
2. 郑州科技学院电子与电气工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要 为解决无人机三维目标定位在复杂环境中的精度、实时性与鲁棒性难题, 本文构建“机载端—中继端—地面端”三级协同架构, 重点研究远距离三维目标实时定位解算、超视距通信传输及组网、图像与地图匹配叠加三大关键技术。通过优化 SIFT 算法、设计混合拓扑通信模型及机器视觉匹配方法, 旨在提升远距离定位精度, 提高通信距离, 突破多源噪声干扰、动态跟踪、异构数据融合等瓶颈, 为无人机在测绘、巡检、应急救援等领域的应用提供技术参考, 进而助力低空经济智能化升级。

关键词 三维目标定位; 三级协同架构; 超视距通信; 图像地图匹配

基金项目: 2023 年河南省科技计划项目 (项目编号: 232102210145)。

中图分类号: TP391.41; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.003

0 引言

随着低空经济的蓬勃发展与智能感知技术的迭代升级, 无人机凭借机动灵活、部署便捷、成本可控的优势, 已成为测绘勘探、安防巡检、应急救援、智慧农业等领域的核心作业载体^[1]。三维目标定位作为无人机智能化任务执行的核心环节, 其定位精度、实时性与鲁棒性直接决定了无人机对复杂场景中目标的感知、识别与交互能力, 是连接无人机平台与下游应用的关键技术纽带^[2]。当前, 无人机目标定位技术逐渐从传统二维平面定位向三维空间精准定位跨越, 但在实际应用中仍面临诸多挑战: 复杂环境下的多源传感器数据噪声干扰、动态目标的实时跟踪与姿态解算难题、异构数据的融合精度瓶颈, 以及算力受限条件下的算法轻量化实现需求, 均制约着无人机三维定位系统的工程化落地^[3]。

在此背景下, 开展无人机三维目标定位系统关键技术研究具有重要的理论价值与现实意义。本文围绕无人机三维目标定位的核心难点, 探讨远距离三维目标实时定位解算技术、超视距通信传输及组网技术、图像与地图匹配叠加技术等关键技术, 旨在突破复杂环境下目标定位的精度与实时性瓶颈。本文的研究成果可为无人机在高精度测绘、智能巡检、应急搜救等领域的应用提供搜救等领域的应用提供技术参考, 助力低空经济产业链的智能化升级。

1 无人机三维目标定位系统总体框架设计

面对无人机三维目标定位的全流程需求, 无人机三维目标定位系统创新性地构建了“机载端—中继端—地面端”三级协同架构。通过功能分层与动态联动机制, 有效解决远距离场景下存在的视角偏差、数据断续及算力限制等一系列难题, 实现从目标感知到空间定位的完整技术闭环。

机载端作为前端感知核心, 搭载相机与 MPU9250I MU 组成多模态传感单元, 基于 Jetson Nano 嵌入式平台实现轻量化边缘计算, 采用 5×5 高斯滤波实现图像降噪, 同步结合 CLAHE 算法, 完成图像实时预处理与增强, 同步运行改进型 SIFT 算法执行图像特征提取, 通过对比度阈值与边缘响应阈值双重筛选, 保留有效特征点, 生成 64 维描述符后压缩至 ≤ 1024 字节, 经自定义帧格式封装, 通过 5G 模块向中继端传输, 在满足 60 fps 实时性的同时将数据量减少 60%, 有效缓解远距离传输压力。

中继端采用多机链状组网拓扑, 由 3~5 架搭载增强型通信模块的无人机组成弹性中继链路, 通过物理层网络编码技术将双节点信号叠加转发, 使单跳吞吐量提升至 100 Mbps, 同时内置自适应调制策略根据实时信噪比动态切换 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM 模式, 在 10 km 超视距链路中维持 ≤ 100 ms 延迟, 当某节点信号衰减时自动启用邻节点接力传输, 结合丢包重传机制将数

作者简介: 王继红 (1983-), 女, 本科, 教授, 研究方向: 智能检测与控制。

据断联率控制在1%以内,为机载端与地面端搭建可靠信息通道。

地面端作为中枢处理节点,依托Intel Xeon E5服务器与NVIDIA GTX 1650 GPU构建高性能计算集群,接收中继数据后启动深度解算流程。通过FLANN匹配器与RANSAC算法完成特征精匹配,再调用EPnP算法结合相机内参解算初始坐标,同步融合IMU姿态数据,通过EKF滤波抑制单帧噪声,最终输出 $RMSE \leq 4.5$ m的三维定位结果,同时将数据写入SQLite数据库drone_info表记录设备状态,image_data表存储带地理标签的图像元数据,localization_result表关联target_x、target_y、target_z坐标与confidence置信度,形成可追溯的定位档案。

三级架构通过动态联动机制实现全局优化。机载端根据中继端反馈的信号强度自适应调整传输帧率,中继端依据地面端指令动态调整链路拓扑,地面端则通过分析多机数据交叉验证修正视角偏差,当单机载端因姿态扰动出现定位漂移时,自动调用其他节点的同步观测数据进行校准,使500 m距离下的视角偏差从 $\pm 8^\circ$ 降至 $\pm 1.5^\circ$,最终在城市建筑群、山区林地等复杂场景中保持连续定位能力,较传统单级架构的稳定性提升40%。系统总体框架如图1所示。

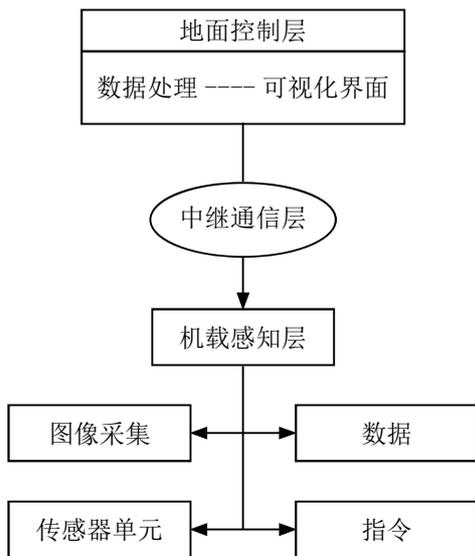


图1 系统总体框架图

2 无人机三维目标定位系统关键技术

2.1 远距离三维目标实时定位解算技术

在“机载端—中继端—地面端”三级协同架构中,当机载端与目标的距离突破500 m,受限于相机分辨率的物理极限与大气散射的累积影响,目标在图像中呈现的特征会逐渐模糊——边缘轮廓弱化、细节信息丢

失,像素占比常降至 5×5 以下,这使得传统依赖清晰纹理的定位算法容易出现尺度估计偏差^[4],远距离场景下的定位精度难以保证,要突破这一技术瓶颈,需解决远距离三维目标实时定位解算技术。

2.2 超视距通信传输及组网技术

在偏远山区、海洋等无基站覆盖的区域,机载端与地面端的通信链路常因距离阻隔、环境干扰出现中断,严重制约定位数据的实时回传。要突破这一限制,需从网络拓扑优化、抗干扰能力强化与低延迟传输保障三方面协同发力^[5]。中继节点部署的核心在于构建自适应拓扑结构。传统固定布局难以应对复杂地形遮挡,可引入智能组网策略,让多架无人机根据实时信号强度、剩余电量动态调整位置。针对高空强风环境下的节点偏移,设计姿态协同校正机制,让中继网络在无人机位置微幅变动时仍保持链路通畅。

2.3 图像与地图匹配叠加技术

无人机在作业时,受飞行姿态与任务需求影响,获取的地面端图像多呈现倾斜视角,而常用地图多采用垂直视角记录地理信息^[6],这种视角差异直接导致两者匹配时出现显著偏差,建筑立面在倾斜图像中可能被拉伸变形,道路边界在投影转换中易产生错位,直接影响三维定位的精度。要破解这一难题,需从三个维度突破技术瓶颈。

3 相关关键技术算法研究与设计

3.1 远距离三维目标实时定位算法

在500 m远距离成像下,目标仅占图像 $< 0.1\%$ 像素区域,传统SIFT算法因计算冗余和噪声敏感导致:特征点数量降低70%,误匹配率提高40%,处理耗时 > 100 ms。本方案通过三级优化,实现特征提取速度提升2.1倍,无纹理区域匹配率 $> 60\%$ 。

优化一:尺度空间构建是传统SIFT算法的首个核心环节,也是主要性能瓶颈。其原理是通过构建高斯金字塔,模拟人眼对不同尺度目标的感知能力。

优化二:在特征点筛选强化策略中,针对低分辨率图像受大气散射和运动模糊影响所致的对比度下降与边缘结构退化问题,构建了基于噪声模型的双阈值筛选机制。该机制主要应对两类噪声源:一是大气散射引起的整体对比度衰减,二是运动模糊导致的边缘弥散效应。

优化三:针对无人机飞行中存在的姿态扰动问题(俯仰/横滚角波动 $\pm 5^\circ$,航向角变化率 $> 10^\circ/s$),采用多方向增强策略以提升特征点鲁棒性。

围绕远距离低分辨率无人机视觉定位的核心需求,

通过三级递进式优化, 最终实现“500 m 远距离成像下, 实时处理耗时 ≤ 72 ms、定位精度 ≤ 4.5 m、弱纹理匹配率 > 65%”的核心目标, 攻克了远距离低分辨率无人机视觉定位的技术瓶颈。

3.2 超视距通信传输及组网技术

针对超视距场景, 设计多无人机中继通信模型, 如图 2 所示。

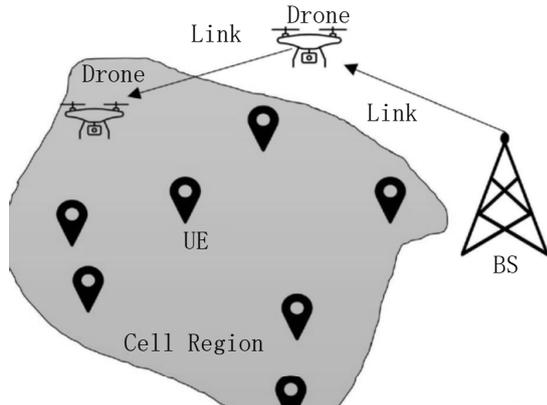


图 2 中继通信模型

采用“链状+星状”混合拓扑: (1) 主干链路: 由中继无人机组成链状结构, 实现远距离数据转发; (2) 分支节点: 每架中继无人机作为星状中心, 连接周边机载端与地面端。

建立无人机中继信道模型, 考虑路径损耗与阴影衰落:

$$L(d) = L(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

式 (1) 中, $L(d)$ 为距离 d 处的路径损耗; $L(d_0)$ 为参考距离 d_0 处的损耗; n 为路径损耗指数; X_σ 为高斯阴影衰落。中继通信链路参数如表 1 所示。

表 1 中继通信链路参数表

参数	取值
工作频率	2.4 GHz/5.8 GHz
发射功率	20 dBm
接收灵敏度	-110 dBm
中继节点数量	3 ~ 5 个
最大通信距离	10 km

3.3 基于机器视觉的图像与地图匹配叠加技术

为提高图像与地图的匹配精度, 需对无人机图像进行预处理, 主要包括几何畸变校正、透视视角转换和图像质量增强三个步骤。从地图中提取已知地理坐标的特征点, 在无人机图像中识别对应特征点, 获取像素坐标:

$$\min \sum_{i=1}^n \left\| H \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (2)$$

式 (2) 中, (X_i, Y_i) 为地图特征点的地理坐标。不同算法的配准精度对比如表 2 所示。

表 2 无人机视觉定位算法性能对比

算法	平面坐标误差	高程误差	配准耗时
SIFT	1.5 ~ 2.5	3.0 ~ 5.0	1.2
SURF	1.0 ~ 2.0	2.5 ~ 4.5	0.8
本文算法	0.5 ~ 1.0	2.0 ~ 3.5	0.6

采用加权平均法融合无人机图像与地图重叠区域:

$$I(x, y) = \alpha(x, y) I_1(x, y) + (1 - \alpha(x, y)) I_2(x, y) \quad (3)$$

式 (3) 中, $I(x, y)$ 为无人机图像, $I_1(x, y)$ 为地图图像, $I_2(x, y)$ 为待提取的目标图像; $\alpha(x, y)$ 为权重函数, 在重叠区域边缘从 1 平滑过渡至 0。将融合后的图像与数字高程模型结合, 生成三维地形; 在三维地形中标记目标定位结果, 显示目标高度、距离等信息; 支持缩放、旋转、平移等交互操作, 实现多角度观测。

4 结束语

本文围绕无人机三维目标定位系统的核心需求, 完成了总体架构设计与三大关键技术的算法研究及实现。通过三级协同架构优化、定位算法迭代、通信组网创新及匹配技术突破, 有效解决了远距离、复杂环境下的定位精度与实时性问题, 显著提升了系统的工程适用性。未来可进一步探索 AI 大模型与定位算法的融合应用, 优化极端环境下的抗干扰性能, 拓展多机协同定位的规模化应用场景, 为低空经济领域的技术创新与产业升级提供更全面的支撑。

参考文献:

- [1] 季俊赞, 孙宪坤, 周韦. 多源融合定位算法在巡检无人机上的应用 [J]. 导航定位学报, 2022, 10(04): 130-137.
- [2] 徐心宇, 陈建. 无人机状态检测 Kalman 滤波空地目标跟踪算法 [J]. 航空学报, 2024, 45(16): 232-251.
- [3] 王孟阳, 张栋, 唐硕, 等. 复杂动态环境下多无人机目标跟踪的分布式协同轨迹规划方法 [J]. 指挥与控制学报, 2024, 10(02): 197-212.
- [4] 沙苗苗, 李宇, 李安. 改进 Faster R-CNN 的遥感图像多尺度飞机目标检测 [J]. 遥感学报, 2022, 26(08): 1624-1635.
- [5] 李成. 基于相关滤波的无人机目标跟踪的研究与实现 [D]. 深圳: 深圳大学, 2021.
- [6] 杨浩. 基于深度学习与相关滤波的无人机目标检测跟踪系统研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.

无人机机库控制系统中关键指令失真问题的应对措施

苟玉虎

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要 在复杂通信环境与多任务高频调度条件下, 无人机机库控制系统中的关键控制指令易发生失真问题。本文围绕关键指令失真现象, 从类型特征、多源诱因及系统影响路径等方面展开分析, 构建端到端的指令完整性保障机制, 并提出链路冗余、协议纠错与调度重构等多层级应对策略, 以期提升无人机机库控制系统在复杂运行环境下的可靠性与容错能力提供技术参考。

关键词 无人机; 机库控制系统; 通信链路; 指令失真

中图分类号: TP274; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.004

0 引言

随着集群化、自主化无人机系统在城市巡检、应急保障与基础设施运维中的加速应用, 地面无人机机库逐渐由传统“停放单元”转变为集成调度控制、自动起降、自主充电等功能的智能作业平台^[1]。在该体系下, 机库控制系统通过通信链路实时下发起降、舱门联动与航迹调度等指令, 实现对无人机全生命周期的集中管理与协同控制。然而, 在城市高密度通信、无线干扰复杂与任务并发背景下, 关键指令在传输与执行中易发生丢失、延迟或误码, 进而引发作业偏差、路径冲突及系统响应异常^[2]。现有方案多聚焦链路增强或静态编码优化, 缺乏面向高耦合控制链的系统性防护与动态适配能力, 难以支撑高频复杂任务模式下的稳定指令交互。基于此, 本文以机库控制系统中的关键指令失真为核心, 系统识别其多源诱因与链路脆弱环节, 分析对系统运行的影响路径, 构建具备端到端完整性保障能力的分层应对策略, 为复杂环境下的稳定控制提供参考。

1 指令失真的主要类型与核心诱因

在无人机机库控制系统中, 关键控制指令在生成、编码、传输、解析及执行等环节均可能发生失真, 表现形式复杂且多样。常见类型包括: 指令丢失, 主要源于链路瞬断或缓冲溢出; 指令延迟, 多发于网络拥塞、任务冲突场景; 误码现象则涉及CRC校验失败或位反转错误, 通常由电磁干扰、射频噪声或硬件失配引起,

跳频通信或长链中继环境下尤为严重。异常指令响应表现为系统在信道污染或逻辑冲突中误执行非法命令, 而在多任务调度中, 冗余指令与覆盖冲突常导致行为不可预期。这些失真类型具有明显的阶段性、并发性与交叉影响特征。从诱因角度看, 指令失真由链路层、协议层与控制系统层多维因素交叠引发^[3]。链路层问题包括信号反射、电磁干扰与带宽动态波动; 协议层表现为报文格式不统一、握手机制缺失、解析规则不兼容; 控制系统层则涉及模块耦合弱、缓冲策略缺失与调度系统响应滞后, 易在任务切换时引发逻辑漂移与状态错位。此外, 部分系统安全机制薄弱, 未配置指令级身份认证与追溯路径, 亦使非法或伪造指令得以触发响应流程, 构成潜在风险源。

2 指令失真引发的系统性影响路径

2.1 关键任务阶段的链路依赖性与控制风险

无人机机库控制系统在起飞、舱门控制、姿态初始化等关键任务阶段对链路指令的完整性、实时性与确定性高度依赖。例如: 起飞阶段的指令链包括地锁释放、姿态初稳、功率上升与起落架收束等联动序列, 任一环节指令延迟或失配, 均可能引发推进-控制解耦, 导致升力不足或起飞失稳。舱门控制依赖高频率、低误码率的PWM或CAN总线信号, 若失真发生于反馈前, 舱门可能停留在中间状态, 影响风场稳定或造成物理干涉。姿态初始化需融合惯性导航与GPS数据, 若初始指令遭遇伪码、丢包或误码, 可能引发坐标系

作者简介: 苟玉虎 (1985-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 无人机导航定位、通信与信息系统等。

基准漂移，影响后续航迹规划与路径生成。部分系统在冷启动期间链路自适应尚未完成，控制调度已启动，易使指令链运行于未验证的通信通道，加剧“先激活后握手”的结构性链路风险，成为系统控制脆弱面的典型诱因。

2.2 多机协同下的控制冲突与同步失效

多架无人机编队协同飞行时，各节点依赖主控模块下发的高频广播指令与双向确认信号维持时间同步、路径分布与负载协同^[4]。若某节点因指令失真产生状态误报，将破坏系统内部目标一致性，导致其他节点基于错误信息调整路径或迁移任务。在缺乏状态验证机制的系统中，该类误判易被视为有效响应，触发队形收缩、交叉航线或避障机制误启动，弱信号环境下尤为频繁。此外，部分集群依赖 GPS 信号进行全局时钟同步，在城市峡谷、山地地形或强干扰区域，时钟基准频繁波动，易使节点间响应延迟出现非线性偏差，表现为同一指令在不同节点上动作次序错乱。在系统层面，控制链路带宽有限，若某节点因数据堆积或重传压力导致链路阻塞，其他节点有效指令亦可能滞后或丢弃，引发指令优先级错序与链路挤压。若任务调度模块未构建全局视图下的控制流感知机制，该类失真将被放大至系统维度，演变为队形失稳与任务协同失败。

2.3 高动态任务切换过程中的指令不一致性风险

无人机系统在执行侦察、打击、监控、返航等多任务序列时，常需高频动态切换，由多个子系统协同响应组合指令。此阶段若发生失真，风险传导与故障链生成效应尤为显著。例如：任务切换指令在链路中篡改或失序，可能导致部分模块提前执行目标态，其

他模块仍停留在原任务，形成逻辑“双轨”问题。飞控模块进入降落流程而导航子系统仍处目标搜索状态，将引发能量分配与控制策略冲突。系统通常依赖缓冲队列、状态机驱动与锁机制实现任务收敛，若无状态标记与互斥逻辑，易导致指令冗余与竞争。部分系统采用滞后确认机制，通过多轮反馈确认切换，但对链路稳定性要求极高，易因延迟致状态漂移。若任务突发中断或优先级变化，而控制系统未设置动态权重机制，次级任务指令可能覆盖主任务路径，破坏既有调度结构。

2.4 案例复盘与系统性风险归类建模

在工程实践中，无人机集群作业异常常源于关键指令失真引发的控制链级联效应。例如：在某城市巡检中，通信模块受干扰致起飞指令延迟，调度逻辑与飞控状态失配；在复杂地形作业中，历史状态未清空致路径指令附带旧标识，解析异常。综合案例可将此类风险归为链路脆弱型、逻辑错配型与调度冲突型，并构建“诱因—路径—节点—后果”四维模型进行结构化归类（见表 1）。

3 面向失真治理的多层级策略机制

3.1 指令完整性验证机制设计

为降低无人机机库中关键控制指令在生成、传输、解析环节中的失真概率，必须构建端到端的完整性验证机制。在指令生成端，需引入签名认证机制，以唯一性控制哈希摘要绑定指令包体内容，防止数据篡改与非法插包。在传输链路中，应采用多重 CRC 冗余校验结构，避免传统单字节低容错率校验方式对短帧误码的识别缺失；在部分中继网络上，还应配合使用 Merkle

表 1 控制指令失真典型案例风险路径建模

案例编号	应用场景	诱因类型	涉及模块	风险路径类型	任务阶段	具体后果表现
C1	城市巡防	通信链路干扰	通信模块 + 飞控单元	链路脆弱型	起飞准备	起飞授权指令延迟触发，姿态失稳
C2	山区搜索任务	缓存机制失控	任务调度模块 + 导航模块	调度冲突型	路径切换	前一任务 ID 未清除，目标定位错误
C3	编队飞行	状态反馈延迟	主控节点 + 多机导航模块	同步失配型	协同路径执行	航线重合、路径交叉，避障系统误触发
C4	多任务模式切换	指令顺序错乱	飞控模块 + 执行控制模块	控制逻辑错配型	任务模式切换	飞控执行返航，武器系统仍处激活状态
C5	城市立体侦察	协议不兼容	控制器 + 接收端解码模块	协议适配失败型	状态确认反馈	接收到异常指令，错误响应非法操作链路

Tree 结构校验以保障长链路连续完整性。接收端需具备双向确认反馈机制,即每条控制指令均需由无人机端返回状态响应帧,携带确认码与执行标志字段,并在未收到确认帧的设定时间窗口内自动触发重发逻辑。在缓存架构上,还应增设指令序号校验字段与回滚标识位,支持指令链断点恢复及状态追溯机制,以防止链路不稳定引发的状态跳跃。对高优先级指令,可采用加权确认机制,要求多维确认字段同时满足才可进入执行流程,提升高风险场景下指令响应的可靠性。

3.2 控制链路的冗余与容错机制设计

针对机库控制链路在不同作业环境下可能遭遇的突发干扰、中断失联与带宽衰减等问题,需部署具备层级结构与动态切换能力的链路冗余体系。在物理链路层,应采用主副链路并行布设,主链路选用 5G 或 UWB 高速通信,副链路采用 LoRa 或 433 MHz 低速信道作为容灾通道,二者由接口模块内置的状态切换单元实现即时绑定^[5]。在通信协议层,应为关键指令设计链路选择权重模型,依据 SNR、丢包率与时延波动动态调节优先级,通过阈值触发机制切换指令路径。部分系统还可引入 FEC 前向纠错编码机制,在主链中嵌入可恢复的数据冗余块,提升在字节丢失场景下的完整性恢复能力。对于关键控制任务,应部署链路心跳监测模块,定期采样质量指标并输出稳定性评估结果,作为策略切换依据,从而实现任务全过程中的链路动态适配。

3.3 通信协议的纠错与适配机制优化

无人机机库控制系统广泛采用多类型协议栈构建任务调度链路,面对复杂环境下的协议兼容冲突与误码传输风险,需强化底层协议纠错机制与适配逻辑优化^[6]。建议在现有协议栈中嵌入 Reed-Solomon 编码或 Turbo 码结构,实现字节级纠错,提升抗噪能力与容错阈值。针对协议转换接口中的字段偏移、状态误读等问题,应引入多协议适配中间件,结合字段映射、格式标准化与动态适配模块,保障指令结构无损转译。对采用 HTTP、MQTT 等非实时协议封装的系统,建议引入协议速率自适应机制,按链路负载与帧大小动态调整包传速率与确认窗口时长,缓解拥塞下的阻滞风险。同时,应配置超时异常响应逻辑,若确认窗口内未完成协议对接,则立即调用容错路径或备份通道。在高风险控制阶段,应采用协议绑定机制,将核心命令独立于常规控制信道,实现关键指令路径的隔离防护,降低协议栈冲突下的失控概率。

3.4 指令调度的优先级控制与异常重构机制

在多任务并行背景下,指令调度模块需同时应对实时性、优先级、互斥性及资源竞争等多重约束,一旦调度逻辑遭遇失真,易引发系统性故障链。建议构建基于优先级映射表的调度机制,将各控制指令绑定至任务权重、状态等级与资源占用系数三元组,构成调度节点属性模型,并借助控制器匹配实时资源图进行路径分发。对冲突指令应设互斥标识位与状态锁定位,确保状态转换过程不被次级任务干扰。在异常指令或状态漂移情形下,可启用控制逻辑重构机制,以缓存指令集为输入,结合当前状态机阶段重建依赖链,剔除无效指令,生成最简路径执行链。同时,应构建指令回滚框架,以任务中断点为参考,判断指令是否处于非收敛状态,若触发异常窗口,则清空缓冲、重置权重并退级指令路径。在存在人工干预与系统自适应并行控制源时,还需引入动态权重调节机制,构建权重切换曲线,保障主控调度分配稳定。

4 结束语

无人机机库作为集群化作业的重要支撑平台,其控制系统需在复杂通信环境与高并发调度条件下保持稳定运行。本文围绕关键控制指令失真问题,系统梳理其类型构成与诱发机制,识别控制链路中的脆弱环节与典型风险场景,并构建涵盖指令完整性验证、链路容错、协议适配与调度控制的多层级应对机制。相关研究成果可为无人机机库控制系统在复杂运行环境中的可靠运行提供技术参考,进而为后续面向规模化应用的系统设计与优化提供工程支撑。

参考文献:

- [1] 张钧,熊隆友.无人机库自动巡检系统行业应用现状[J].中国科技信息,2023(24):135-137.
- [2] 贾展鹏,王永璞,杨博文,等.智能化无人机库技术应用可行性研究[J].内蒙古石油化工,2024,50(07):77-81.
- [3] 项昌乐,徐彬,唐寿星,等.特种无人机创新应用与关键技术发展研究[J].中国工程科学,2025,27(02):62-72.
- [4] 武文强,范晨晨,吴志贺,等.无人机集群协同控制发展现状与关键技术[J].智能制造,2025(04):38-49.
- [5] 毛开,朱秋明,雷泰雅,等.面向无人机通信的无线信道测量系统研究综述[J].电波科学学报,2025,40(05):812-826.
- [6] 丁旭辉,卢琦,张园园,等.面向低空经济的通信技术综述[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(06):1026-1045.

智能优化技术在火力发电 DCS 系统控制中的经济性应用价值研究

刘 云

(大唐黄岛发电有限责任公司, 山东 青岛 266500)

摘 要 鉴于智能化发展驱动火力发电厂改革的时代要求, 本研究系统说明了火力发电 DCS 系统基本架构及局限性。通过实证案例分析, 展示了智能化 DCS 系统相较于传统 DCS 系统在经济性、技术性能及环保效益等方面的优势。同时, 从技术和管理两方面探讨火力发电智能化 DCS 系统的挑战及对策, 以期为同类型企业智能化改造提供有益参考。

关键词 火力发电; 智能化 DCS 系统; 分层分布式结构; 智能化控制; 经济性应用

中图分类号: TP273; TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.005

0 引言

全球能源结构逐渐多元化清洁化方向转型。火力发电特别是燃煤发电亟需转型升级, 提升效率、降低排放并增强竞争力, 以实现可持续发展^[1]。智能化发展成为火力发电行业摆脱困境、实现提质增效的关键^[2]。DCS 系统作为火力发电厂的“大脑中枢神经”, 其性能直接决定了电厂安全、稳定、高效运行的水平。推动 DCS 系统智能化升级并研究其智能化控制的经济性应用价值, 不仅是顺应技术发展趋势的必然选择, 更对评估智能化投入实际回报、指导电厂技术改造决策具有现实意义^[3]。

1 火力发电 DCS 系统概述

1.1 智能化 DCS 系统

智能化 DCS 系统是融合人工智能算法、大数据分析以及物联网技术的先进控制系统, 该系统借助实时数据采集、处理与分析实现对工业生产过程的精准监控和优化。从组成来看, 在火力发电厂中, DCS 系统架构采用分层分布式结构^[4]。上层是监控层, 主要由操作员站和工程师站共同组成, 负责全厂生产过程的集中监视、操作与管理; 中层为控制层, 由多个现场控制站组合而成, 每个现场控制站负责特定区域或设备控制, 如锅炉控制以及汽轮机控制等; 下层是现场设备层, 涵盖各种传感器、执行器与现场仪表等, 负责现场数据采集以及设备的驱动工作。这种分层分布式结构使 DCS 系统具备较高的可靠性和灵活性, 可适应火力发电厂复杂多变的生产环境^[5]。

1.2 智能化 DCS 系统实现所使用的关键技术

智能化 DCS 系统的实现依靠多项关键技术融合与创新。首先是人工智能算法, 如机器学习和深度学习等, 系统通过从海量数据提取有价值信息进行模式识别与预测, 进而实现故障诊断、性能优化和自适应控制。大数据分析技术通过数据挖掘和关联分析等方法发现生产过程隐藏规律与异常, 为决策提供支持。物联网 (IoT) 技术通过传感器和执行器等现场设备能无缝接入网络、实现数据实时传输和远程监控, 为智能化分析提供数据基础。此外, 云计算或边缘计算平台通过复杂算法, 支撑大数据处理工作。网络安全技术确保高度互联环境下系统数据传输和操作指令机密性、完整性和可用性。这些技术协同应用共同构成智能化 DCS 系统的技术支撑体系。

1.3 传统、智能化 DCS 系统对比分析

传统 DCS 系统在火力发电生产过程的应用集中于锅炉控制、汽轮机控制、发电机控制等关键环节。

在锅炉控制中, 传统 DCS 系统能够实现对锅炉燃烧过程自动控制, 通过合理调节燃料量以及风量, 让锅炉的燃烧始终保持在最佳状态, 以此来提高燃烧效率并且降低污染物排放, 同时它还可以对锅炉水位与压力等参数进行精确控制, 从而确保锅炉能够实现安全稳定运行。在汽轮机控制中, 传统 DCS 系统能够实现对汽轮机转速与负荷自动调节, 确保汽轮机在不同工况条件下都能稳定运行。对汽轮机振动以及轴向位

作者简介: 刘云 (1986-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 火电机组热控设备检修。

移等相关参数进行监测,从而发现潜在的故障隐患^[6]。

然而,在控制精度方面,传统DCS系统采用的控制算法相对简单,很难实现对复杂生产过程进行精确控制。在响应速度方面,传统DCS系统的通信网络和数据传输方式相对落后,数据传输存在一定延迟使得系统对生产过程变化响应不够及时。当生产过程出现突发状况时,传统DCS系统可能无法迅速做出反应,进而影响生产的安全和稳定状况,而且由于其技术相对落后,设备容易出现故障情况,需要频繁进行维修和更换,增加了企业的运营成本。相比之下,智能化DCS系统通过人工智能算法、大数据分析以及物联网技术等先进技术的加持。在控制精度方面,智能化系统能够借助复杂算法实现对复杂生产过程的精确控制;在响应速度方面,其先进通信网络和数据传输方式能够减少数据传输延迟,让系统对生产过程变化的响应更为及时。另外,智能化系统还具备更强的故障预测和诊断能力,能够提前发现潜在问题并采取相应措施,以此提高生产的安全性和稳定性,使系统设备故障率及维护成本更低。

2 经济性应用价值案例分析

2.1 案例选择

近年来,智能控制技术被广泛应用。智能控制技术能够大大提高工作效率,降低劳动强度,特别是在火力发电的锅炉控制中以及电气工程自动化方面应用效果较好。为了验证智能化DCS系统控制经济性,评估模型适用性和准确性,选取大唐黄岛发电有限责任公司为研究案例,该电厂在2022年完成了DCS系统智能化升级工作,采用国产自主可控的睿渥DCS系统替代了原有进口DCS系统,该DCS系统通过深度集成人工智能算法,实现了对锅炉燃烧过程的精准调控与优化,提升了能源利用效率。同时,借助大数据分析技术,能够实时监测并分析运行数据,快速识别异常工况且自动调整参数,以显著增强故障预警和应急响应能力。DCS系统结合物联网技术的应用实现可与电厂各类传感器、执行器及远程监控平台无缝对接,降低人工干预需求。

2.2 数据收集范围

选择2021年(传统DCS系统运行期)与2023年(智能化DCS系统运行期)的数据进行分析。数据指标说明见表1。

2.3 评估验证

将收集到的数据从经济性、技术性、环保性这三个维度开展量化分析工作,以验证其可靠性。其分析结果显示:

在经济性方面,智能化系统标准煤耗降幅约2.01%,年燃料成本减少约3.35%。与此同时,年维护成本大幅降低,降幅高达31.02%,表明智能化系统在备件人工和外包等方面管理优化。

在技术性方面,智能化DCS系统负荷响应时间降幅约47.46%,显著提高了机组的动态响应能力与制指令执行精度,自动化投入率增加了8.9%,这表明更多自动调节回路得到了有效利用进而减少人工干预。

在环保性方面,智能化DCS系统的二氧化硫排放降幅达到33.42%,其氮氧化物排放降幅为27.68%,颗粒物排放降幅为35.08%,碳排放强度降幅为4.99%,这些数据体现了智能化系统在节能减排方面有积极作用(详见表2)。

综合来看,智能化DCS系统在燃煤机组当中的应用具有经济性,能为电厂实现高效清洁且智能的运行提供有力支持。

表1 数据指标说明

数据类别	数据内容	数据来源
经济性数据	燃料采购成本	电厂生产管理系统(Power Management System, PMS)、财务系统
	设备维护费用	电厂生产管理系统(Power Management System, PMS)、财务系统
	发电量	电厂生产管理系统(PMS)
	上网电价	财务系统
技术性数据	机组负荷响应时间	电厂生产管理系统(PMS)
	控制指令执行精度	电厂生产管理系统(PMS)
	自动化投入率	电厂生产管理系统(PMS)
环保性数据	二氧化硫排放量	环保监测平台
	氮氧化物排放量	环保监测平台
	颗粒物排放量	环保监测平台
	碳排放强度(吨CO ₂ /MW·h)	电厂生产管理系统(PMS)、环保监测平台

3 智能化DCS系统控制应用推广挑战及对策分析

3.1 技术层面

智能化DCS系统在推广应用进程中面临显著技术复杂性挑战。该系统融合人工智能、大数据、物联网

表 2 传统 DCS 系统与智能化 DCS 系统数据分析结果

维度	指标数据	传统 DCS 系统 (2021 年)	智能化 DCS 系统 (2023 年)	提升幅度
经济性	标准煤耗 (g/kW·h)	318.7	312.3	-2.01%
	年燃料成本 (万元)	27 845 600	26 912 500	-3.35%
	年维护成本 (万元)	142.8	98.5	-31.02%
技术性	负荷响应时间 (秒)	47.2	24.8	-47.46%
	控制指令执行精度 (偏差范围, °C)	±2.8	±1.5	≈ -46.43%
	自动化投入率 (%)	86.5	94.2	≈ 8.9%
环保性	二氧化硫排放 (mg/m ³)	178.3	118.7	-33.42%
	氮氧化物排放 (mg/m ³)	348.6	252.1	-27.68%
	颗粒物排放 (mg/m ³)	30.5	19.8	-35.08%
	碳排放强度 (kgCO ₂ /MW·h)	898.2	853.4	≈ -4.99%

及传统控制技术,其架构比传统 DCS 系统复杂,这对系统设计、集成、实施和调试提出了极高要求,特别是和电厂现有老旧设备与系统进行兼容对接时,会因接口标准不统一、数据格式不匹配、通信协议不兼容等问题,导致项目周期延长、成本增加且效果难以预料。为应对技术方面挑战,需注意以下两个方面:首先,需加大产学研用的协同合作,积极推动制定智能化 DCS 系统在电力行业的统一标准,涵盖数据接口、通信协议以及安全规范等内容,以此降低集成难度并提升系统互操作性。其次,要重视数据治理和安全保障工作,建立电厂级的数据治理体系,对历史数据进行清洗、校验和整合,建设统一的数据平台,确保数据质量能够满足智能化应用需求。

3.2 管理层面

长久以来形成的经验型管理模式和相对保守安全的文化,让电厂管理层与一线员工对高度自动化、智能化控制系统心存疑虑。观念方面的阻力成为项目立项、投资决策以及推广应用的主要障碍。另外,智能化 DCS 系统的应用并非单纯的技术替换,而是涉及电厂内部组织架构调整和业务流程再造的系统性变革。变革常常触及现有部门职责边界和人员利益,容易引发内部阻力,协调难度大、实施过程缓慢,还充满不确定性^[7]。

传统管理思维需要进行转变,自上而下推动智能化项目顺利实施。首先,细化任务,责任到人,按照年度、季度计划召开管理思维研讨会,提高中高层管理质量,减少后期整改及变更工作。其次,需要系统规划并实施组织变革与流程优化,建立一套行之有效的变革沟通 and 反馈机制。将 DCS 智能化升级纳入整体战略规划,争取全面支持资源。

4 结束语

随着科学技术的不断发展,各行各业都将自动化技术、智能技术纳入发展规划并进行现场应用,以提高生产效率。我国热电技术发展较快,部分企业虽然采用 DCS 系统,但还存在智能化控制水平低、用户负荷波动大造成锅炉控制系统运行效率不高、热电系统运行稳定性低等问题。针对这种情况,智能化 DCS 系统应用成为火力发电行业顺应能源转型趋势、实现提质增效与可持续发展的关键举措,其经济性应用价值显著且推广意义重大。未来,随着人工智能和大数据等技术持续进步,智能化 DCS 系统将朝着更深度集成、更自主决策、更高效协同方向发展。

参考文献:

- [1] 付高见,沈思贤,涂攀,等.基于 DCS 控制的燃料智能化管控系统分析与应用[J].电气技术与经济,2023(07):86-90.
- [2] 伊怀海.火电企业数字化转型煤炭利用效益评价研究[D].北京:中国地质大学(北京),2023.
- [3] 莫日格吉勒图.火力发电机组 DCS 控制系统自主可控改造展望[J].自动化应用,2023,64(01):76-78.
- [4] 李双喜.分散控制系统 DCS 技术在火力发电中的应用[J].集成电路应用,2021,38(01):108-109.
- [5] 杨正.火力发电 DCS 系统安全防护措施浅析[J].企业管理,2020(S1):274-276.
- [6] 薛永明,樊鹏.三种锅炉排烟余热回收系统经济性分析[J].能源研究与利用,2020(02):37-42.
- [7] 陈德霖.浅谈某 1000MW 发电机组 DCS 系统电源优化技术[J].科技与创新,2018(05):78-79.

能源结构转型背景下超超临界塔式锅炉 T23 水冷壁管理技术研究

田宏建

(郑州裕中能源有限责任公司, 河南 郑州 450099)

摘要 随着我国能源结构向清洁、低碳、高效方向加速转型, 燃煤火电机组在电网中的角色逐渐从基础负荷电源向调节性电源转变, 深度调峰、快速负荷响应成为常态, 运行工况日趋复杂多变。锅炉作为火电机组的核心设备, 其“四管”(水冷壁、过热器、再热器、省煤器)的可靠性直接关系到机组安全与经济运行, “四管”泄漏已成为影响锅炉可靠性的突出短板。本文基于1000 MW超超临界塔式锅炉的长期治理实践, 系统分析了T23水冷壁裂纹产生的背景、现状与根源, 并针对性地提出了一套涵盖结构优化、备件定制、工艺革新、组织管理和预防性维护的综合治理技术体系。实践结果表明, 该体系能有效降低T23水冷壁泄漏风险, 显著提升机组在新型电力系统下的运行可靠性与经济性, 对同类型机组的治理工作具有参考价值。

关键词 超超临界锅炉; 塔式锅炉; T23水冷壁; 裂纹治理; 可靠性管理

基金项目: 郑州裕中能源有限责任公司2025年科技及管理创新项目“1030MW锅炉T23水冷壁裂纹治理技术研究与应用”。

中图分类号: TK223.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.006

0 引言

随着能源结构转型深入推进, 火电机组频繁参与深度调峰, 运行工况日益复杂严峻, 对关键设备的可靠性提出了更高要求。早期投运的百万千瓦超超临界塔式锅炉中, T23材质水冷壁因抗裂性能不足, 在复杂应力下频发裂纹泄漏, 已成为威胁机组安全稳定运行的突出短板。本文立足于工程实践, 系统剖析T23水冷壁裂纹产生机理, 构建涵盖结构优化、工艺控制与主动预防的综合治理体系, 以期为同类型机组实现安全、经济、灵活运行提供实践参考。

1 研究背景

在全球应对气候变化与我国“双碳”目标驱动下, 能源结构转型深入推进。风电、光伏等间歇性、波动性可再生能源大规模并网, 对电力系统的灵活调节能力提出了前所未有的要求。燃煤火电机组作为当前电力供应的“压舱石”, 正经历从提供稳定电量的基础电源向提供可靠容量与灵活调节服务的系统性电源的战略转变^[1]。在此背景下, 电网深度调峰、现货市场交易、省间电力互济、容量电价机制等新型运营模式不断深化, 对火电机组的运行可靠性、负荷快速响应能

力及频繁变负荷工况下的设备适应性构成了严峻挑战。

锅炉是火力发电机组的“心脏”, 其运行状态直接决定机组的安全性与经济性。锅炉“四管”泄漏是导致机组非计划停运的主要原因, 所造成的直接发电损失、抢修费用、启停损耗以及因缺额导致的容量电价损失极为巨大。尤其值得注意的是, 随着机组运行工况大幅、频繁地偏离设计值(如长期低负荷运行、快速升降负荷), 锅炉受热面承受的热应力、机械应力交变加剧, 导致其失效机理发生显著变化。根据部分区域电力科学研究院的分析报告, 近年来锅炉“四管”泄漏原因中, 由疲劳、应力集中等因素引发的裂纹类缺陷明显增多, 其中水冷壁部位的裂纹问题尤为突出。

在此背景下, 一批早期投运的百万级超超临界塔式锅炉所采用的T23材质水冷壁, 其固有缺陷与新型运行模式之间的矛盾日益尖锐。T23钢(07Cr2MoW2VNbNB)作为一种新型铁素体耐热钢, 初期因其在高温下强度较高、焊接性能相对传统材料有改善等宣传优点, 被国内主要锅炉制造厂应用于早期设计的超超临界塔式锅炉的高温区域水冷壁^[2]。然而, 大量同类型机组的运行实践表明, T23材质抗裂性能不足, 焊接敏感, 在结构应力、热应力及焊接残余应力的作用下, 其母材、

作者简介: 田宏建(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程技术。

焊缝及热影响区易萌生裂纹，导致泄漏。尽管锅炉后续中已弃用该材质，但对于已投运的机组，T23 水冷壁成为一个难以根治的安全隐患。因此，在能源结构转型的新形势下，深入研究 T23 水冷壁的裂纹产生机理与治理技术，探索一套行之有效的管理策略，对于保障机组的可靠运行、支撑新型电力系统建设具有现实意义和重要的经济价值。

2 T23 水冷壁问题普遍性缺陷及其治理困境分析

以某 1000 MW 超超临界塔式锅炉为例，其水冷壁为膜式结构，标高 63 米以上区域全部采用 T23 材质。该锅炉投产后，T23 材质水冷壁频繁发生裂纹泄漏。通过与国内多家同类型、同材质锅炉的电厂技术交流，确认 T23 水冷壁裂纹问题具有普遍性，难以彻底解决。为应对此问题，各电厂普遍采取加强检测的策略，每年利用机组检修，对 T23 区域的焊口、鳍片焊缝进行大面积的射线检测（RT）和磁粉检测（MT），往往能发现上百处甚至更多的裂纹缺陷。这种“事后检测、被动处理”的模式存在明显局限性：

1. 问题无法根治。检测只能发现已发展的宏观或微观裂纹，无法阻止新裂纹在运行中萌生。运行中突发泄漏导致非停的风险始终存在。

2. 成本高昂。大规模的专项检测耗费大量人力、物力和时间。发现裂纹后，更换管排、焊接处理等检修工作复杂，工期长，费用高。

3. 治理陷入循环。修复区域可能因应力重分布或焊接工艺控制不当，在相邻区域或修复处再次产生裂纹，陷入“泄漏—检修—再泄漏”的循环。

4. 存在检测盲区。受锅炉结构限制（如管排夹角、复杂节点内部），部分关键部位无法有效检测，成为隐蔽的“定时炸弹”。

具体到该锅炉，裂纹缺陷呈现一定的规律性，高发区域集中于：65 米标高附近（螺旋管圈向垂直管圈过渡区域）、82 米标高附近（“Y”形三通结构，将两根管子合并为一根的结构应力集中区）、各类门孔密封盒与水冷壁的连接处以及角部与钢结构连接部位。这些区域的共同特点是结构不连续、几何形状复杂、存在较大的机械约束或膨胀差异，导致局部应力水平高。

3 T23 水冷壁问题的系统性短板分析

T23 水冷壁裂纹问题的普遍性与顽固性，并非单一因素所致，而是材料特性、结构设计、焊接工艺、运行工况等多因素深度耦合、相互叠加的复杂结果。

1. 材料本身的局限性。T23 钢（07Cr2MoW2VNbNB）作为一种铁素体耐热钢，其设计初衷是在特定高温下

保持较高强度，但其金相组织与合金配比决定了其韧性与抗疲劳性能存在先天不足。在长期交变应力作用下，材料内部易萌生微观裂纹并扩展，表现出对应力集中异常敏感的特性，这是其频发裂纹的物理基础。

2. 结构应力集中。塔式锅炉本体高大，水冷壁系统结构复杂。螺旋管圈向垂直管圈过渡的区域、“Y”形三通合并处、各类门孔密封盒连接点等部位，存在几何形状突变、截面不连续等固有特征，形成了天然的应力集中点。在锅炉启停及负荷变动时，各部件因温度不均产生差异膨胀，又受到框架、刚性梁等结构的约束，从而在局部区域产生极高的机械应力与热应力峰值，远超材料平均承受水平^[3]。

3. 焊接工艺敏感性与残余应力。T23 钢对焊接热循环极为敏感，是一种典型的难焊钢材。若焊接过程中预热温度不足、层间温度控制不当或焊后冷却速度过快，极易在焊缝及热影响区形成硬脆的马氏体组织，并引入显著的焊接残余应力。这些内应力与锅炉运行中的工作应力相互叠加，大幅降低了接头的承载能力和抗裂性能^[4]。现场检修环境复杂，工艺纪律执行难度大，进一步加剧了焊接质量的不稳定性。

4. 运行工况的严苛化。在能源转型背景下，机组承担深度调峰任务，启停次数增多、负荷升降速率加快已成为常态。这使得水冷壁管壁温度频繁、大幅度地波动，导致材料承受的应力幅值和循环次数急剧增加，加速了疲劳损伤的累积^[5]。运行工况已远远偏离了锅炉初始设计所依据的稳态条件，使结构薄弱环节的问题被成倍放大。

5. 早期设计优化不足。早期引进并国产化的塔式炉型，部分结构设计直接沿用了国外原型方案，未能充分结合国内实际的燃煤特性、运行习惯和电网调度模式进行适应性优化。对局部结构的应力分布分析不足，某些区域的刚性约束过强，未能通过细节设计有效平滑应力过渡，留下了隐患。

6. 治理策略的被动性。长期以来，应对措施主要停留在“事后补救”层面，依赖泄漏后的紧急停运、检测和更换。这种模式缺乏系统性的顶层设计，未能从根源上（如通过结构改造降低应力）、过程中（如通过精细工艺控制质量）进行主动干预和预防，导致问题反复出现，治理工作陷入“头痛医头、脚痛医脚”的被动循环。

4 T23 水冷壁问题解决建议与技术体系构建

针对上述分析，必须转变思路，从事后补救的被动模式转向“源头治理、过程控制、主动预防”的综合治理模式。基于成功的工程实践，建议构建以下多

层次、全方位的T23水冷壁裂纹治理技术与管理体系:

1. 结构优化与应力工程治理。针对65米过渡段和82米“Y”形三通区等高应力区域,创新性地设计和应用应力释放槽。在管屏鳍片特定位置切割应力释放槽,两端设置止裂孔,以有控制地释放局部应力^[6]。实践证明,此方法能有效降低应力峰值,减少拉裂风险。应力释放槽使用耐高温密封材料封堵,防止漏风。对原设计不合理的门孔等附件进行轻量化改造。通过优化结构、减少不必要的弯管数量、改变密封盒与水冷壁焊接方式,降低附件自身重量及其对水冷壁造成的局部应力,消除此类附件的泄漏隐患。

2. 备件供应模式创新。改变传统采购单根管材、现场弯制焊接的模式。积极与锅炉制造厂协作,将复杂节点(如带短节的“Y”形三通、包含多道焊口的管屏、异形密封板等)作为整体部件进行定制化采购,推动定制化预制备件采购。由制造厂在工厂环境下完成所有组装、焊接和整体热处理,经无损检测后整体交付,提升检修部位质量的可靠性和一致性,将现场施工难度和不确定性降至最低。

3. 焊接工艺精细化与标准化。打破常规的焊接建议,结合自身锅炉裂纹特点,制定更严格、更细致的《T23材质水冷壁检修管理规定》。关键措施应包括:对所有T23焊口焊前预热、控制层间温度、采用氩弧焊(GTAW)等低热输入方法、焊后立即保温缓冷和热处理^[7]。鳍片焊缝不采用“点焊”或单面焊,同样实施焊前预热、双面氩弧焊、焊后缓冷的工艺,并进行磁粉检测,确保焊接质量,避免因鳍片焊缝开裂延伸至管子母材。

4. 检查检测与组织管理的体系。制定《T23水冷壁综合治理方案》和年度《防磨防爆检查方案》,明确治理目标、重点区域、检测方法、技术标准和责任分工。实现检查工作的计划性、科学性和全覆盖。采用宏观检查、射线检测(RT)、磁粉检测(MT)等多种手段相结合,对重点区域进行“地毯式”排查^[8]。建立跨部门(如运行、检修、金属监督)的联合工作小组,责任到人,通过缺陷联络单、工作任务单等形式实现检查、记录、处理、验收的闭环管理。

5. 经济效益与持续改进。上述综合治理体系需要投入一定的检测、材料和改造费用,但相比于T23水冷壁泄漏导致的非停损失,其经济效益极其显著。一次非停导致的电量损失、启停耗能、抢修费用及容量电价损失可达近千万元。而年度专项治理成本远低于此。通过有效治理,将非停次数降至零或极低水平,所产生的安全效益和经济效益巨大。应建立治理效果

的量化评估机制,持续跟踪裂纹缺陷率、泄漏次数等关键指标,不断优化治理策略,形成持续改进的良性循环。

5 结束语

在能源结构转型深化、火电机组运行模式发生根本性变革的当下,早期超超临界塔式锅炉T23水冷壁的裂纹问题已成为威胁机组可靠性与经济性的突出矛盾。本文的研究结果表明,该问题是材料、结构、工艺、运行多因素交织的系统性问题,单一的检测或修补措施难以奏效,必须采用系统工程思维,构建一套涵盖“应力释放与结构优化、定制预制与质量前移、工艺革新与标准提升、体系排查与主动预防”的综合治理技术体系。通过结构上“疏解”应力、供应链上“确保”质量、工艺上“控制”风险、管理上“消除”盲区,可以实现对T23水冷壁裂纹隐患的有效管控,显著降低非停风险。这不仅为同类型机组的治理提供了可复制、可推广的技术路径与管理经验,也为存量火电机组在新型电力系统中如何通过技术创新实现安全、灵活、高效运行提供了有价值的实践参考。未来,随着状态监测、大数据分析等技术的发展,可进一步探索T23水冷壁状态的在线评估与寿命预测,推动治理工作向智能化、精准化方向发展。

参考文献:

- [1] 陶爱军,杨帆,付跃文,等.水冷壁管腐蚀脉冲涡流检测聚焦探头特性研究[J].振动.测试与诊断,2025,45(02):367-375.
- [2] 秦萍丽.电站锅炉高温受热面用S30432不锈钢管焊接制造质量管理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
- [3] 渠江曼.金属腐蚀在锅炉水冷壁管失效中的分析与研究[J].化工时刊,2025,39(06):26-30.
- [4] 张白雪,宫杰.火力发电锅炉水冷壁爆管事故分析与改进措施[J].化工管理,2025(24):137-140.
- [5] 蒋志龙,焦占坡,胡乐关,等.超临界锅炉水冷壁管材料老化与失效规律研究[J].电力设备管理,2025(22):62-64.
- [6] 殷金桥.基于数据驱动的超临界直流炉水冷壁拉裂的软测量研究[D].贵阳:贵州大学,2024.
- [7] 张帅领,张磊.基于变分模态分解的风电机组水冷壁管焊接裂纹缺陷识别方法[J].焊接技术,2023,52(10):131-135.
- [8] 陈宇航.基于电力基础设施碳锁定的新能源供给消纳体系规划研究[D].北京:华北电力大学,2024.

连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用

姚红彬

(中铁隧道局集团有限公司六处工程分公司, 浙江 杭州 310030)

摘要 在连续梁工程项目建设中, 智能化挂篮姿态调控系统的应用能够提升挂篮姿态高精度, 进而提升连续梁工程施工质量与安全。本研究探讨了挂篮姿态控制的高精度要求, 同时解析智能化挂篮姿态调控系统构成, 并且就连续梁智能化挂篮姿态调控系统运用要点进行分析, 以期提升挂篮调控效率与精度、减少人工干预误差提供参考, 进而提高高难度连续梁桥智能化建造水平。

关键词 连续梁桥; 挂篮施工; 姿态调控; 智能监测; 线形控制

中图分类号: TP273; U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.007

0 引言

现代道路交通事业发展速度不断加快, 交通基础设施向大跨、高耸、复杂方向发展, 预应力混凝土连续梁在跨河、山区、城市立交中应用范围逐步拓展。预应力混凝土连续梁采用悬臂浇筑方法施工, 其挂篮是核心施工设备, 需要保证稳定性合格, 这关系到桥梁的拼接精度和成桥线形。以往挂篮施工中采用人工测量或手动调节方式无法满足毫米级控制要求, 这就需要研发集感知、分析、调控于一体的智能化挂篮姿态管理系统。本文主要分析连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用策略, 以期能够为提高桥梁工程建设质量水平提供参考, 进而促进智能制造技术在桥梁工程领域中的应用。

1 连续梁桥施工对挂篮姿态控制的高精度要求

1.1 高程控制精度要求

连续梁桥悬臂施工采用逐段浇筑方式, 每一节段高程偏差逐步累积导致最终合龙偏差过大, 或成桥线形不能达到技术标准。在连续梁桥设计方案中规定节段前端高程偏差在 ± 5 mm 内, 而挂篮浇筑、预应力张拉、温度变化影响下容易引发节段的变形与徐变。如果此时没有进行桥梁节段高程调控或精度不足, 极易造成桥梁线形偏离设计线形, 最终造成合龙困难或结构应力而影响连续梁桥运行的安全性。根据连续梁桥挂篮施工需求, 在前后节段高程采用毫米级监控和动态调整措施, 确保桥梁每一节段施工精度达到要求^[1]。

1.2 平面位置控制要求

连续梁桥在投入运营中受到风荷载、日照偏温、施工偏载的共同作用下, 引发桥梁横向位移或扭转,

这对桥梁的安全性造成不利影响。挂篮作为柔性支撑体系, 其在施工过程中的平面稳定性对于梁体轴线偏位有直接影响。按照相关标准规定, 桥梁梁体轴线偏位在 10 mm 以下。如果连续梁挂篮施工中行走、浇筑环节引发横向滑移或偏转, 极易造成桥梁节段错台、接缝不平顺而影响桥梁外观质量和整体性。而对于桥梁曲线段或斜交桥的平面控制复杂度更高, 需要保证挂篮中线、前后横梁偏角参数达到精度要求, 确保梁体空间位置精准。

1.3 姿态平衡与同步性要求

连续梁桥挂篮主要组成为主桁架、行走系统、模板系统、吊杆等, 各结构部件受力存在复杂性特性。挂篮两侧主桁架如果高差超出标准或位移不同步, 容易在施工中引发桥梁模板倾斜、混凝土厚度不均匀而造成结构失稳。同时, 桥梁施工环节两侧挂篮行走同步偏差在 2 mm 以内, 这样能够确保吊杆受力偏差不超过规定标准。

2 智能化挂篮姿态调控系统构成

2.1 高精度感知层

智能化挂篮姿态调控系统在安装过程中, 需要在主桁架、前后横梁、吊杆、模板关键节点内安装监控设备, 主要布置倾角传感器、位移计、索力计、温度补偿单元等, 能够及时获取挂篮运行中各项技术参数。上述各项传感器选择工业级防护等级, 其满足抗震、防潮、耐候功能, 且采样频率 1 次/s、定位精度 0.1 mm^[2]。

2.2 自动控制执行层

连续梁智能化挂篮姿态调控系统运行后获取各项感知数据信息, 并且利用后台控制系统自动化驱动液

作者简介: 姚红彬 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 连续梁机械化配套。

压千斤顶或电动推杆,对挂篮前后各支点高程、横向位置进行微调。执行机构在获取控制信号后利用闭环控制算法进行调控,其可以通过手动、半自动、全自动等模式调节,使行程精度控制在0.2 mm下。而该系统设置安全阈值,一旦系统监测发现偏差超出规定限值自动报警并锁定操作,以防出现误动作现象。

2.3 智能分析决策层

智能化挂篮姿态调控系统内部嵌入边缘计算单元及时获取传感器监测数据,并结合桥梁设计方案中预设线形模型和施工阶段参数。而后,自动计算当前节段理论位形和实测偏差,并形成调控指令。该系统能够精准识别温度变形、弹性挠度等干扰因素,并剔除虚假信号以提高调控准确性。此外,系统搭载机器学习算法模型,通过持续学习历史施工数据、环境参数与调控效果的关联规律,动态优化偏差修正系数。同时,内置施工规范知识库,自动校验调控指令是否符合安全标准与质量要求,若存在超阈值风险则即时预警并生成备选方案。决策过程同步可视化呈现于监控平台,清晰展示实测数据、理论模型、偏差数值及调控路径,支持管理人员人工介入调整,实现智能决策与人工干预的双向协同。

2.4 远程监控平台

智能化挂篮姿态调控系统运行中利用4G或5G网络传输信号,确保现场监测的挂篮姿态信息实时传输到监控平台。管理人员通过移动终端或电脑及时查看桥梁挂篮三维姿态、历史趋势、报警记录,并通过远程控制系统下达调控指令。该平台能满足多项目、多挂篮并行管理要求,能够对整个桥梁施工过程进行可视化以及可追溯管理。平台内置数据存储与分析模块,自动归档施工全过程的姿态参数、调控指令、环境数据等信息,支持按时间、项目、挂篮编号等多维度检索查询,生成标准化施工报告。同时具备智能预警功能,通过设定安全阈值,当监测数据超出允许范围时,立即以短信、平台弹窗等方式推送报警信息,并关联显示异常位置、偏差数值及应急处置建议^[3]。

3 连续梁智能化挂篮姿态调控系统施工应用

3.1 安装校准阶段

连续梁桥现场施工阶段在挂篮拼装作业结束后,智能化挂篮姿态调控系统即可进入初始校准程序。技术人员在现场使用高精度全站仪进行挂篮主桁架前端、后锚端、前后横梁中心等关键节点三维坐标测量,能够及时获取挂篮空间位置基准值。而后将全站仪测量

的数据信息和智能调控系统的内置传感器初始读数进行逐点对比,并按照测量结果调整传感器零点偏移量,从而使智能挂篮姿态调控系统的坐标系和工程坐标系空间对齐。在上述调整过程中,利用液压加载装置在挂篮前端施加分级模拟荷载,模拟实际浇筑工况,并获取各倾角仪、位移器、索力计等响应数据,从而保证传感器之间数据达到一致性与线性度要求。同时,控制系统驱动各液压千斤顶进行微量伸缩动作,检测执行机构的行程精度以及响应延迟。传感器、修正系数、执行机构控制增益、荷载—变形关系曲线等校准系数记录到数据库内,将其作为后续调控指令发布的基本语句。而在智能挂篮姿态调控系统校准结束后进行全链路自检,保证智能化系统内感知、传输、控制等各系统数据能够同步传输,使整个调控系统具备高精度、高稳定性的状态^[4]。

3.2 行走阶段

连续梁施工环节,挂篮进入启动程序,此时系统进行挂篮的实时监控。挂篮两侧主桁架底部位移传感器持续采集挂篮前行距离和高程变化参数,倾角仪同步监测横架纵向与横向姿态。而控制系统按照1次/s的频率对比挂篮两侧行走位移。如果监测挂篮两侧同步偏差超过预设的2 mm阈值,则系统立即发出指令暂停挂篮行走驱动装置,并且启动慢行侧液压千斤顶进行微量顶升或回缩,直到挂篮两侧位置达到对齐的效果。同时,挂篮行走轨道的沉降传感器和反扣轮压力传感器检测行走轨道平整度与反扣装置受力状态。如果检测发现存在轨道局部下沉或轮组异常受力,立即发出声光报警。挂篮行走到设计位置后系统自动触发复测程序,此时利用高程传感器和倾角仪检测挂篮整体姿态,并和目标标高参数进行对比。若经过对比发现存在偏差,则由控制系统操控驱动系统进行前支点、后锚千斤顶毫米级调整,确保挂篮主桁架精确就位到设计高程和平面位置。

3.3 浇筑阶段

连续梁挂篮混凝土浇筑施工开始后,需要进入高频率的监测状态,以掌握现场施工的具体情况。在桥梁施工中,混凝土逐层入模、荷载持续增加,桥梁主桁架出现弹性变形,此时高程传感器和倾角仪能够及时捕捉挂篮前端下挠量和整体倾斜变化情况。控制系统将现场测量数据信息输入理论挠度曲线进行动态对比,如果对比后发现偏差超出允许值则自动计算所需补偿量,并且同步给后锚吊杆液压系统或前支点调节千斤顶发送指令,其利用微调吊杆索力或支点高度方

式抵消部分挂篮弹性变形,确保桥梁模板底面高程达到稳定性要求。桥梁浇筑阶段系统同步监测挂篮两侧的荷载分布,如果挂篮一侧混凝土浇筑过快引发偏载现象,此时横向倾角传感器能够及时获取挂篮存在异常扭转现象,系统立即发出预警警示,并暂停单侧浇筑作业。上述传感器检测过程中以 10 s 间隔自动存档数据,主要记录时间戳、各点位移、倾角、温度、荷载等参数^[5]。

3.4 合龙前精调

连续梁桥进入主跨合龙的准备期,由智能姿态调控系统启动高精度精调模式。在该环节中需要连续 72 h 进行挂篮两侧悬臂端的监测,其监测频率为每 10 min 进行 1 次数据测量,主要掌握不同温度、日照条件下挂篮位移变化数据,并建设温度变形修整模型。而后智能调控系统以 1 mm 为补偿,需要对两侧挂篮前端高程和轴线位置进行多轮的监测、分析、微调、循环操作。在每次进行挂篮微调结束后需要保持 15 min 稳定,然后进行复测,确保挂篮两端高程偏差在 2 mm 以内、轴线偏差 20 mm 以下。挂篮微调时需要记录目前温度梯度、风速、预应力、张拉历史等因素,并预测未来 12 h 内悬臂端位移变化趋势,以此作为基础推算出最佳合龙时间窗口。连续梁桥合龙环节,混凝土浇筑过程中监测挂篮两端相对位移,如果存在异常收敛或分离及时采取应急处理措施。

4 工程应用效果分析

4.1 工程概况

某高速公路特大桥主桥采用预应力混凝土连续梁结构形式,其跨径尺寸为 80+120+80 m,梁高 6.8 m,单幅桥宽 12.6 m。该桥梁主跨跨越通航河道,现场施工环境复杂,对桥梁线形控制要求极高。该桥梁设计方案确定为 25 个悬浇节段,最大节段重量 2 200 t。为使该桥梁承桥线形和合龙精度达到要求,在施工环节引入智能化挂篮姿态调控系统,并对双幅共 4 套挂篮进行全面性智能监控。

4.2 连续梁智能化挂篮姿态调控系统应用

本项目施工环节,在每套挂篮中安装 24 个传感器节点,确保挂篮主桁、横梁、吊杆、模板系统进行监控。该系统需要和 BIM 模型构建挂篮三维数字孪生体,其施工环节具备如下功能:一是挂篮行走阶段自动监测挂篮两侧同步性,确保挂篮行走偏差不得超过 1.5 mm;二是桥梁浇筑环节采取实时补偿弹性变形措施,确保桥梁模板高程波动不超过 3 mm;三是大风、日照条件

下自动识别环境干扰,并剔除虚假信号影响;四是桥梁合龙前 72 h 连续监测悬臂端位移,并根据温度变形精准确定最佳合龙时机。上述调控指令由工程师在移动终端监控确认,达到人机协同效果。本项目施工环节累计处理数据超 50 万条,调控响应时间在 10 s 以内,能够提高连续梁桥施工精度。此外,系统应用过程中同步生成施工数据台账,自动关联各节段姿态参数、调控记录及质量验收结果,实现施工全过程可追溯。通过对比分析实际施工数据与理论模型,持续优化挂篮调控算法,后续类似桥梁工程可直接复用成熟参数体系。

4.3 工程应用效果

根据本桥梁施工经验,通过智能化挂篮姿态调控系统应用后,使挂篮高程精度达 ± 2.8 mm、轴线偏差 6 mm 内;本桥梁合龙段高差为 1.2 mm,达到一次精准合龙的效果。该技术与传统人工调控技术对比,单节段姿态调整时间缩短 60%,比人工测量频次减少 80%,也能够避免高空作业风险。同时,本桥梁施工后成桥线形平顺,预应力张拉顺利,整个桥梁结构状态良好。

5 结束语

连续梁桥智能化挂篮姿态调控系统将感知控制与信息技术进行融合,对连续梁桥悬臂施工中挂篮姿态进行精准调控,达到现场作业顺畅、安全性的效果。本文通过实际工程案例发现,智能化挂篮姿态调控系统具备高程控制、平面定位、同步行走、合龙精调的优势,能够提高桥梁施工的精度和效率,为今后桥梁领域施工技术的研发和创新提供坚实的基础。

参考文献:

- [1] 吴明威,刘冬冬,周雷,等.桥梁施工挂篮智能化控制系统研究[J].中国港湾建设,2018,38(01):66-70.
- [2] 曾宪柳.斜拉桥施工挂篮自动化与智能化控制技术应用[J].中外公路,2021,41(01):122-125.
- [3] 黄铁.超大跨度无砟轨道混凝土连续刚构铁路桥梁部施工及变形控制技术研究[J].工程建设与设计,2024(10):161-163.
- [4] 唐梓柯,刘凯,吴巨峰,等.智能桥梁挂篮监测系统关键技术研究与应用实践[J].土木工程信息技术,2025,17(01):129-134.
- [5] 朱正伟,程小娟.数字孪生驱动的预应力混凝土挂篮仿真分析与施工指导[J].建筑机械,2023(12):77-81.

矿山胶带运输智能巡检机器人应用研究

孙 钰

(中国电建集团华中投资有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘 要 在矿山开采作业中, 采用传统的方式开展巡检工作, 通常会耗费较多的人力资源和工程成本, 而加大巡检机器人的应用力度, 能够有效解决此类问题。将矿山胶带运输智能巡检机器人合理应用到矿山开采作业中, 不仅能够缩短巡检工作的周期、提升工作安全性, 还在提升管理效果、减少人力成本投入方面发挥积极作用。基于此, 本文分析了巡检机器人的应用条件和重要组成, 研究了其中涉及的重要技术, 并从人力资源配置和现场管理方面深入探索了机器人在巡检工作中的应用效果, 以期为矿产企业的顺利发展、经济效益的增加提供有益参考。

关键词 矿山; 胶带运输; 智能巡检; 机器人

中图分类号: TD679

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.008

0 引言

矿山巡检工作是矿山开采中的重要环节之一, 工作内容主要是检查排水系统、电力系统是否能够正常运行, 充分了解工作环境, 为后续的开采工作提供充足保障。安全巡检工作作为一项系统性工作, 具有工作量较大、涉及范围较广的特点, 不仅需要定期安排工作人员进行检查工作, 还要加大财力和时间方面的投入, 进而保证巡检工作的准确性和全面性。在科学技术高速发展的过程中, 相关部门对矿山开采工作的安全性提出了更高要求。将矿山胶带运输智能巡检机器人应用到开采作业中, 能够进行持续性的检测, 及时发现工作现场和仪器设备的异常情况, 提升巡检工作的质量和效率。由此可见, 探究巡检机器人的具体运用在矿山开采过程中具有重要意义。

1 矿山胶带运输智能巡检机器人及其应用条件和重要组成

1.1 矿山胶带运输智能巡检机器人

矿山胶带智能巡检机器人是进行信息采集、提交图像、管理控制工作的主体, 机器人具有设计简单、结构紧密、占地面积小、较为轻便的特点, 其电路设计的安全性较高, 还能在条件较为严苛的矿山中发挥良好性能。矿山胶带智能巡检机器人中配备的摄像机具有低照度的特点, 能够随时体现出输送机的运行情况, 还能实时监测工作过程是否存在错误; 如果输送机无法正常运行, 发生故障的部件能够及时发出警报, 可以通过采集声音分析故障发生的原因和类型; 机器

人还配备烟雾探测器, 可以时刻监测工作现场的烟雾浓度^[1]。机器中的温度检测器与输送机之间不存在直接接触, 而是采用检测辐射情况的方法, 得到输送机表面的温度, 然后根据检测结果合理控制其温度, 进而避免安全事故。如果发现其余流量计的显示数值与标准数值偏差较大, 应当及时激活; 激活工作包括两部分, 分别是本地激活和远程激活。

1.2 运用条件

由于煤矿井下的环境条件较为复杂, 特别是进行胶带运输工作的环境, 复杂性更高, 对于在该环境中开展巡检作业的机器人应当具备以下条件: 第一, 此类机器人的工作地点通常具有湿度较大的特点, 应当在测量环境中湿度的基础上, 采用适当措施进行处理, 避免湿度不符合要求而降低机器人工作的准确度和稳定性。第二, 矿山中的一些作业需要应用规模较大的机电类设施, 外界环境中的磁场和射频会降低此类设施的使用性能, 这就需要相关人员在设计巡检机器人系统的过程中, 有意识地增强其抗电磁干扰能力和抗射频干扰能力^[2]。第三, 矿山胶带运输智能巡检机器人的工作环境一般长度较大、较为狭小, 还可能会存在地面凹凸不平、转弯处较多的情况, 这就需要严格控制机器人的前进速度, 设置合理的行走范围与距离; 还要确定机器人的爬坡、转弯半径。

1.3 重要组成

1.3.1 驱动系统

在矿山中进行胶带运输的通道处, 通常具有地质地形复杂性较大的特点, 因此需要保证智能机器人在

作者简介: 孙钰(1982-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 绿色智慧矿山。

运行过程中具有良好的适应性，从而确保能够在场地复杂的条件下稳定运行。在设计机器人驱动系统的过程中，需要在两侧配备压紧机构，还要在横向和纵向上设置旋转机构，此类机构能够在很大程度上保障机器人巡检工作的稳定性。

1.3.2 图像采集系统

图像采集系统在云台搭载中发挥着重要作用，云台具备一体化水平较高、使用效益较大的特点，可以通过红外热成像手段，发挥可见光摄像机的功能，实现图像采集与上传，该系统的重要参数信息如表 1 所示。

表 1 图像采集系统的参数信息

项目	参数信息
测温范围	-20 ~ 150 °C / 50 ~ 500 °C
响应波段	17 μm
测温方式	点、区域测温
调焦	定焦
非均匀校正	无挡片技术、视频连续输出

1.3.3 环境检测系统

在矿山胶带运输智能巡检机器人用于环境检测的系统中，涉及多方面的检测内容且对检测结果准确性的要求较高。例如：在矿山条件较为复杂特殊的工作环境中，最重要的检测内容是气体含量，应当对各种气体开展长期监测。需要检测的气体类型主要有四种，分别是二氧化碳、硫化氢、氧气以及甲烷。如果气体含量与标准值不符，环境检测系统可以及时发出警报^[3]。在检测外界环境中的温度和湿度时，系统的实际测量范围如下：温度范围是 -40 ~ 123.8 °C、湿度范围是 0 ~ 100% RH，测量过程中应当保证结果的准确性，通常温度的测量误差应当控制在 ±0.5 °C 之间，湿度的测量误差应当控制在 ±4.5% RH 之间。在检测工作现场的烟雾含量时，对机器人的灵敏度有一定的要求，一般应设置为 0.5 db/m，误差应为 ±0.1。在检测光照度的过程中，测量范围在 0 ~ 65 535 Lux 之间，还要以现场光照强度的具体情况为依据，适当调整实际测量范围。

1.3.4 防撞系统

矿山胶带运输智能巡检机器人需要具有防撞和躲避障碍物的系统，该系统在巡检工作中发挥重要功能，能够保证机器人运行的长期性和稳定性。防撞系统能够实时且长期扫描工作环境中的技术人员和障碍物，还能精确判断物体的具体方位，从而达到躲避障碍物的目的；如果工作环境中存在影响机器人工作的障碍物，通过该系统可以准确检测其方位，然后控制机器人停止前进，

并发出警报。此外，在实际工作中可能会出现停电情况，在此期间该系统能够控制机器人的运行，在巡检机器人工作时，如果由于突发性问题导致断电，可以发挥防撞系统的能力，立即让机器人停止运行，避免发生强烈碰撞，导致机器人性能损坏，影响工作进行。

2 矿山胶带运输智能巡检机器人关键技术

2.1 移动平台技术

智能巡检机器人的结构较为复杂，移动平台是总体结构中的重要组成部分，尽管在现阶段的发展背景下移动平台的种类较多，但是不同种类的平台在工作性能和途径方面有显著差异，相关企业在选择移动平台时，应当详细分析工程现场的外界环境情况。移动平台的形式包括三种，分别是轮式、轨道式以及履带式，应当分析和对比不同形式移动平台的优点和不足，以保证移动平台选择的合理性和准确性。从对比结果来看，轮式与履带式移动平台具有较高的灵活性，但对地质地形情况的要求较高。在选择平台类型的过程中，还要从防尘、防潮和防震的角度进行综合性考虑；在使用轨道式移动平台时，通常要将该平台安装并固定在巷道上方，但难以确定移动轨道，灵活性较低^[4]。

2.2 定位与导航技术

将定位与导航技术应用到智能巡检过程中，能够提升定位结果的准确性，保证工作顺利进行。在智能化技术的发展过程中，相关人员对矿山胶带运输智能巡检机器人的定位与导航技术进行了深入探究，并且提供了强大的平台支撑。一些学者对此提出了磁迹诱导理论，并将技术与 RFID 电子标签有机结合；还在机器人的行驶路径上埋设了磁迹，然后在停靠地点附近设置 RFID 电子标签，这能在很大程度上保证定位的准确性^[5]。但在实际应用时会存在一些问题，如实施难度较大、运行轨迹灵活性较差等。于是一些学者借助地面引导标志设计了单目视觉导航方式，利用该方式可以采集图像，并进行自动识别，然后进一步确定巡检机器人的行驶路线和停靠地点，但该方式对光线的依赖程度较高，如果施工现场较暗，则难以充分发挥其性能，难以达到预期的定位和导航效果。在科学技术不断发展的过程中，为了提升巡检机器人工作的稳定性，一些技术人员将 GPS 定位技术应用到机器人的运行过程中，运用 GPS 定位技术时，应当确保施工范围内的无线传输信号无明显波动，并且电磁扰动较小，避免信号不稳或者丢失。

2.3 图像识别技术

图像识别技术在矿山胶带运输智能巡检机器人的制作和研发中得到了广泛应用，利用图像识别技术，

能够记录和上传清晰度较高的现场图像,全方位监测并评估工作区域内的设施运行状态。图像识别工作的主要目的包括查看并分析仪表显示数值、观察指示灯状态、明确设备开关位置以及判断设备是否能够正常运行等。在仪表读数的显示和分析方面,可以将从工作现场收集到的信息同数据库中的信息进行比对,比对工作结束后自动生成检测结果。在指示灯状态、开关位置以及设备运行情况方面,首先应当明确监测对象的具体方位,具体方位是指对象在上传图片中的方位,然后了解对象的运行状态和特点。

2.4 自动充电技术

研究与设计矿山胶带运输智能巡检机器人的电池时,相关人员在结合导航光源信息的基础上,帮助机器人顺利到达充电地点,与充电站有效连接,进行充电;该技术的应用过程中,如果工作现场的光线较强,可能会影响导航光源,不能让机器人进入充电站。可以应用磁轨道改善此问题,在导航定位时,不需要借助人工力量,就能对巡检机器人进行充电。此外,充电系统中的对接窗口呈漏斗形,对误差控制的要求较低,这就表示在较为复杂的工作条件下,也能保证设备顺利充电。

2.5 后台管理及诊断技术

后台管理及诊断技术是矿山胶带运输智能巡检机器人系统中的重要组成部分,具有数据整合、状态监控、故障预警和决策支持等功能。该技术通过工业以太网与智能巡检机器人前端图像采集和环境检测系统相连,实现实时联动,及时获取矿山胶带运输过程中各项设备的运行参数、环境气体浓度等数据,进行集中存储和标准化处理,并生成可视化报告,便于管理人员远程监控与实时管理。

智能巡检机器人能依托机器学习算法构建故障特征模型,智能识别和精准定位矿山生产胶带运输环节中胶带跑偏、轴承异响等故障,并结合历史故障数据,分析故障发生规律,生成预判报告,为预防性维护提供可靠依据^[6]。后台管理与诊断技术的应用,实现了巡检数据从采集、分析到决策的闭环管理,切实提升了矿山胶带运输系统的运维智能化水平。

3 矿山胶带运输智能巡检机器人的运用效果分析

在某矿企业中应用矿山胶带运输智能巡检机器人开展巡检工作,并检验了应用效果,从结果分析来看,机器人的应用效果较好,可以替代人工巡检方式进行工作。另外,还在工作现场开展了工业性试验,研究了机器人的应用效果。在巡检机器人的运用过程中,能够对工作的整个流程进行数字化监控,在巡检过程

中,机器人的运行状态稳定、工作结果可靠。巡检机器人能够及时发现工作现场的隐藏风险,并且将风险信息发送给技术人员,这不仅实现了现场工作的可视化,还在巡检与报警自动化方面得到了显著提升。通过详细分析矿山胶带运输智能巡检机器人在采矿工作过程中的运用效果,技术人员发现巡检机器人中的一些系统可以时刻收集现场的工作情况,还能实时记录重要参数并加以处理,如果管理人员需要了解设备的相关信息或者查看实际工作画面,可以在系统中直接搜索并下载。由此可见,利用矿山胶带运输智能巡检机器人能够实时监督和管理现场的工作情况和操作流程、查询历史信息、优化参数设计等,突破了时间和空间的局限性。调查发现,在引入巡检机器人前,该工程需要安排超过80人参与巡检工作,而在应用机器人之后,该数量下降至20人左右,这表示利用此方式不仅能够降低人力成本的投入、减小工作量,还能保证工程的安全性和稳定性。

4 结束语

矿山胶带运输智能巡检机器人通过应用不同类型的传感器,整合并分析了工作现场环境和工作设备生成的数据信息,充分发挥大数据分析技术的作用,让管理人员可以随时了解到现场的工作情况。借助大数据算法,可以了解和评估设备的使用情况,在最大限度上发挥设备的作用,有效提高工作质量、效果以及准确性。此外,将巡检机器人应用到矿山开采工作中,能够推进工作的智能化、自动化,降低巡检人员的数量,优化资源配置,减少人力方面的成本投入以及提升故障分析与处理效率。

参考文献:

- [1] 冯彩霞.智能巡检机器人在有色金属矿山中的应用研究[J].自动化应用,2024,65(24):97-99.
- [2] 南朝云.智能巡检机器人在选煤厂胶带机上的应用[J].洁净煤技术,2024,30(S02):681-686.
- [3] 陈继勋.矿山胶带运输智能巡检机器人的探索与应用[J].电子制作,2022,30(14):95-97.
- [4] 杜治宇.斜沟煤矿运输胶带轨道巡检机器人系统的应用与研究[J].煤,2021,30(02):33-34,54.
- [5] 刘尚争.矿山胶带运输智能巡检机器人的探索与应用:评《矿山运输与提升》[J].有色金属工程,2021,11(05):后插5-后插6.
- [6] 赵磊.矿山胶带运输智能巡检机器人的探索与应用[J].中国金属通报,2021(17):54-55.

接地保护暂态特征识别算法的应用分析

姚舟华

(上海道博电气有限公司南京分公司, 江苏 南京 211111)

摘要 接地故障是电力系统运行期间频繁出现的潜在风险, 极有可能导致设备遭受损坏、供电被迫中断, 更甚者会引发安全事故。暂态特征识别算法依靠其能够精确捕捉故障暂态信号, 并对其进行高效分析的能力, 成为增强接地保护可靠性以及灵敏性的关键技术保障。目前, 这类算法在实际应用过程中存在适应能力欠佳、抵抗干扰能力不足等一系列问题。本文基于电力系统的运行实际, 深入分析接地保护暂态特征识别算法的内在含义以及应用意义, 系统整理该算法的主要应用范围和目前存在的问题, 进而提出科学性优化方案, 以期为推动算法高效应用提供参考。

关键词 电力系统; 接地保护; 故障暂态信号; 暂态特征识别算法; 故障诊断

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.009

0 引言

电力系统能否实现安全且稳定的运行, 会直接对社会生产生活以及公共安全产生关联影响。接地故障呈现出突发性且不易察觉的特性, 传统的保护算法容易受到系统运行模式、故障种类等因素的干扰, 存在保护失效区域或者出现错误动作的潜在风险。暂态特征识别算法依据故障暂态信号的独特性进行识别, 能够切实弥补传统算法存在的不足。目前, 这类算法在实际的运用过程中面临着与复杂工况适配性的棘手难题, 开展相关的研究对增强电力系统接地保护的能力、确保供电具有重要的现实价值。

1 接地保护暂态特征识别算法的内涵与应用价值

1.1 接地保护暂态特征识别算法的内涵解析

接地保护暂态特征识别算法是在电力系统接地故障时, 采集此时产生的暂态电气信号, 然后借助信号处理、模式识别、智能计算等技术, 从暂态电流与电压信号中提取幅值、频率、相位、谐波等特征量, 进而实现接地故障的精确检测、定位以及类型识别的算法体系^[1]。该算法体系的核心要点为, 凭借暂态信号在故障开始阶段呈现的特征, 打破稳态信号分析存在的局限, 提高接地保护的响应速度以及识别的精准度, 从而为故障隔离和修复提供迅速且可靠的决策参考。

1.2 接地保护暂态特征识别算法的应用价值

在安全保障方面, 算法具备迅速且精确地识别接地故障的能力, 促使保护装置在合适的时机做出动作,

进而削减故障扩大的潜在风险, 防止设备遭受损坏以及人员伤亡情况, 以此确保电力系统运行的安全性。

在供电可靠性方面, 算法能够缩短故障诊断以及定位时间, 加速故障修复工作的推进过程, 减小供电中断的持续时长以及影响范围, 从而增强电力系统供电的稳定性。

在运维效率方面, 算法可以实现接地故障的自动化识别与定位, 减少人工进行巡检的工作量, 降低运维工作成本, 提高运维管理的智能化程度。

在系统优化方面, 所累积的故障数据能够为电力系统的网络架构优化、设备性能改良提供数据支持, 进而促使电力系统朝着智能化方向升级^[2]。

在经济收益方面, 能够切实降低因故障而引发的经济损失, 增强电力企业的运营效益以及市场竞争力。

2 接地保护暂态特征识别算法的主要应用领域

2.1 配电网接地故障检测与定位

在中低压配电网中, 该算法借助采集线路的暂态电流以及电压信号的方式, 进而提取故障暂态的特征量, 以此区分接地故障和干扰信号, 实现接地故障的精确检测。依据暂态信号的传播特性以及衰减规律, 再结合测距算法, 实现故障点的精确位置确定, 为运维人员迅速排查故障提供指引。考虑到配电网分支多、结构繁杂的特性, 算法能够通过多端数据的协同分析, 提高故障定位的准确程度, 切实解决配电网接地故障定位困难的问题。

作者简介: 姚舟华 (1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 配网自动化。

2.2 输电线路接地保护优化

在高压输电线路中,算法用于优化常规的接地保护方案,进而提高保护装置处于复杂故障工况时的性能表现。借助对故障暂态分量特征的剖析,能够切实地区分金属性接地、非金属性接地等不同种类的故障,防止保护装置出现误动作或者拒绝动作的情况^[3]。鉴于输电线路具备长距离、多工况的特性,算法能够自行适应并调整识别的阈值以及特征提取的方式,以此应对不同的气象状况、系统振荡等因素对故障识别造成的影响,从而确保输电线路能够安全且稳定地运行。

2.3 电力设备接地故障监测

在变压器、开关柜、电缆这类关键的电力装置中,算法借助监测装置外壳、接地引线的暂态电流讯号,识别装置内部或者外部的接地故障,能够实时捕捉装置运行期间的异常暂态特性,提前发出关于潜在接地故障危险的警报,实现装置的状态检修。将装置以往的运行数据与暂态特性分析相结合,评定装置接地性能的劣化情况,为装置的维护与替换提供科学依据,延长装置的使用时长。

2.4 新型电力系统接地保护适配

在包含分布式电源以及储能装置的新型电力系统中,算法用于适配因系统结构改变而产生的接地故障特征的变动。对于分布式电源接入所引发的故障电流幅值改变、相位变动等问题,优化暂态特征提取办法,以此保障接地保护的可靠程度。通过分析多源异构的暂态数据,对不同电源接入点的接地保护动作逻辑加以协调,防止保护配合出现失调的情况,进而促进新型电力系统实现安全高效的运行。

3 接地保护暂态特征识别算法应用的现存问题

3.1 抗干扰能力薄弱,识别精度受影响

在电力系统的运行过程中,存在雷电干扰、谐波干扰、负荷突变等多种干扰信号,这些干扰信号具备的暂态特征,容易和接地故障暂态信号混淆,进而使得算法的识别精度降低。部分算法对于干扰信号的抑制能力不足,很难切实区分故障信号和干扰信号,因而容易出现错误识别或者遗漏识别的问题。在高温、潮湿、电磁干扰等复杂环境下,传感器所采集到的暂态信号容易失真,这更进一步地对算法的识别效果造成影响。

3.2 工况适应性不足,场景覆盖有限

算法大多依据特定系统的运行模式、故障种类以及网络架构设计,对于复杂且不断变化的实际工况,其适应能力欠缺。一旦系统的运行模式改变、故障位

置变动,或者出现复合型的接地故障时,算法的识别性能会显著降低。在面对非金属性接地、高阻接地这类特殊故障类型时,算法在特征提取方面的能力不够,很难实现精准识别。对于新型电力系统中分布式电源接入、微电网运行等全新的应用场景,算法的适配程度较差,缺少针对性算法优化措施。

3.3 算法复杂度较高,实时性难以保障

部分暂态特征识别算法,如基于深度学习及复杂信号处理的算法,面临着计算复杂度高、运算量大的问题,很难契合接地保护实时性要求。算法在特征提取、模型训练以及参数优化这些环节所耗费的时间较长,造成保护装置的動作延迟,无法及时隔离故障。嵌入式保护装置的硬件计算能力存在局限,很难为复杂算法的高效运转提供支撑,从而对算法在工程应用领域的范围形成限制。

3.4 数据质量支撑不足,算法可靠性受限

在暂态信号采集过程中,存在采样频率不足、数据丢失、信号带有噪声等问题,使得输入到算法里的数据质量较低。由于暂缺统一的暂态数据标准以及共享机制,来自不同源头、具备不同类别的暂态数据在格式方面并不统一,进而提升了算法进行数据处理的难度。

3.5 工程化应用不足,协同衔接不畅

部分算法仅处于理论探究或者仿真试验的阶段,没有得到足够的工程实践验证,所以很难适应真实电力系统的复杂状况。算法和保护装置、数据采集设备、运维管理系统之间的协同衔接不畅,存在数据传输延迟、接口无法兼容等问题。在工程应用中,缺少专业的算法调试以及维护人员,算法在运行期间出现的故障难以在短时间内进行排查和解决,对算法应用效果的稳定性产生影响。

3.6 算法评估体系不完善,规范引导缺失

因缺少统一的算法性能评估准则,不同算法在评估指标、测试方式、实验情境方面呈现出差别,这使得算法性能难以进行有效比较。评估指标大多重点关注识别的精准度与速度,却忽略了对算法的抗干扰能力、工况适应能力、工程实用特性等关键指标的全面测评。由于缺少算法应用方面的工程规范与技术引导,算法选择、参数设定、调试优化等环节缺少统一的标准,对算法应用的规范化进程造成影响。

4 接地保护暂态特征识别算法应用的优化策略

4.1 强化抗干扰设计,提升识别精度

优化暂态信号预处理环节,运用滤波、去噪等技术抑制干扰信号,进而提高原始信号的质量。鉴于干

扰信号和故障信号在特征方面存在差异,设计针对性特征提取方法,以此增强算法对于故障信号的识别能力^[4]。引入自适应的抗干扰机制,算法能够依据运行环境的变化,动态调整识别策略,从而提高在复杂干扰场景下的识别精准度。强化传感器的选型以及安装优化,降低环境干扰给信号采集带来的影响,确保暂态信号的真实性与完整性。

4.2 优化算法结构,增强工况适应性

运用模块化以及可配置的算法架构,能够依据各种系统运行情况、故障类别,动态调整特征提取模块与识别模型。把机器学习、深度学习等智能化技术进行融合,构建自适应性的算法模型,实现针对复杂运行状况与特殊故障类别的精确识别。开展多种场景下的算法训练与验证工作,拓展数据样本的覆盖范畴,增强算法的泛化性能与对运行情况的适应能力。依据新型电力系统的特点,调整优化算法的适配逻辑,从而达到满足分布式电源接入、微电网运行这类新场景的保护需求的目的。

4.3 简化算法流程,提升实时性性能

优化算法的计算流程,简化特征提取环节以及模型运算环节,从而降低算法在计算方面的复杂程度。运用轻量化的算法模型,在确保识别精准度的条件下,削减运算的数量以及所耗费的时间,进而提高算法的实时特性。强化算法与硬件平台之间的协同性优化,根据嵌入式硬件在计算能力方面的特点来定制算法,提高算法于保护装置中的运行效能。引入并行计算的技术,实现多通道暂态数据的同步化处理,缩短故障识别和响应所需要的时间。

4.4 完善数据支撑体系,保障算法可靠性

提高暂态数据的收集质量,优化传感器的布局与采样的各项参数,以此保障数据收集既完整又准确。打造统一的暂态数据标准与共享的平台,规范数据格式、存放方式以及传输协议,实现数据资源的高效整合与共享。构建规模大、场景多的暂态数据样本库,库中包含有不同故障情形、干扰情况、系统运行状态下的样本数据,从而为算法的训练和验证提供足够支撑。构建数据质量的评估以及优化机制,迅速去除无效数据,提高输入算法中的数据质量。

4.5 推动工程化落地,强化协同衔接

强化算法理论探究与工程实操的融合,推进小规模试点性运用,积攒工程实操的经验,进而对算法予以优化。健全算法与保护装置、数据采集设备的接口规划,实现数据传输的高效对接以及兼容匹配^[5]。

构建算法工程化应用的技术准则,明晰算法挑选、参数设定、调试完善等环节的操作规范。加大专业人才培养力度,提高算法调试、维护以及运维管理的能力,确保算法平稳运行。

4.6 健全评估规范体系,强化引导作用

拟定统一的算法性能评估准则,对评估指标、测试手段、实验情境以及判定根据予以明确,以此保证不同算法性能具备可对比性。构建多样化的评估指标体系,该体系包含识别精准程度、实时特性、抗干扰的能力、对工况的适应能力、工程方面的实用特性等关键指标,从而全方位评估算法性能。设立算法应用的认证机制,针对投入到工程应用中的算法进行严谨的认证,以此确保算法应用的可靠程度与安全性能。强化行业技术方面的交流以及合作,普及优质算法应用的实际案例和相关经验,引领算法应用规范发展。

5 结束语

在提升电力系统接地保护性能方面,接地保护暂态特征识别算法作为核心技术,对于保障电力系统能够安全稳定地运行、提升供电的可靠程度具有重大意义。目前,该算法在应用过程中存在诸多问题,这些问题限制了其应用效能的充分发挥。通过强化抗干扰设计、优化算法结构、简化计算流程、完善数据支撑体系、推动工程化落地、健全评估规范体系等策略,能够切实解决算法应用方面的难题,提高算法应用的质量以及实际效果。未来,要持续强化算法技术的创新,依照电力系统智能化发展的需求改进算法设计,促进算法和新型电力系统实现深度结合,为电力系统安全且高效地运行提供稳固的技术保障。

参考文献:

- [1] 廖德辉,金鑫,田君杨,等.灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J].智慧电力,2024,52(05):90-97.
- [2] 刘永生,侯炜,王旭,等.基于馈线和电流的专用轨回流牵引供电系统接地故障保护[J].电气化铁道,2024,35(02):53-56.
- [3] 孟乐,李俊刚,宋祺鹏,等.考虑配电网故障隔离的单相接地保护整定计算[J].电气自动化,2023,45(03):95-98,102.
- [4] 郑泽寰,郑鹏鹏.10kV配电网接地选线保护装置运行实践及研究[J].海峡科学,2022(05):54-57,67.
- [5] 薛永端,金鑫,刘晓,等.灵活接地系统中配电网接地保护的适应性分析[J].电力系统自动化,2022,46(05):112-121.

信息化技术赋能路面厚度与弯沉智能检测系统设计

韩笑飞

(南京熙赢测控技术有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要 路面厚度和弯沉作为衡量道路工程质量的关键指标, 在传统检测模式下暴露出检测效率低、数据离散、主观因素影响大等诸多弊端。本文借助信息化技术, 构建了针对路面厚度与弯沉的智能检测系统, 此系统整合了北斗定位、物联网、大数据等先进技术, 实现了检测数据的即时采集、精确分析以及动态管理。本文详细说明了系统设计所依托的技术基础和主要目标, 对硬件架构与软件模块的设计进行了深入剖析, 通过开展实验对系统性能进行验证, 以期为推动道路质量检测朝着智能化方向升级提供技术参考。

关键词 信息化技术; 路面检测; 厚度; 弯沉; 智能系统设计

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.010

0 引言

道路路面的质量情况对道路的使用时长以及车辆行驶的安全情况产生决定性作用, 对道路厚度以及弯沉指标开展精确检测, 是道路工程质量管控的关键步骤。以往的检测工作主要依靠人工开展, 易出现检测遗漏、判断失误等问题。随着信息化技术的发展, 如北斗定位、传感器网络等技术, 使检测工作智能化发展成为可能。所以, 对借助信息化技术赋能的检测系统设计展开深入研究, 对于提高道路质量的管控水平、削减运维方面的成本有重要的现实价值。

1 路面厚度与弯沉智能检测系统的设计基础

1.1 核心检测指标的技术内涵

路面的厚度会对其承载能力以及抗疲劳性能产生直接影响, 该检测的关键在于精确得到路面结构层的垂直间距, 这就需要穿透表面层直至基层的界面处, 同时要防止对基层材料造成干扰。弯沉数值体现了路面在承受荷载时的变形能力, 它是评估路面承载能力的关键参数, 弯沉检测需要模拟车辆荷载所产生的作用, 捕捉路面瞬间变形数据, 并且要排除温度、湿度等环境方面因素的干扰。二者所获取的检测数据之间的关联性, 为协同开展检测工作创造了可能性。通常情况下, 当材料厚度不足时, 往往会同时出现弯沉值超出规定标准的现象。鉴于此, 要对相关数据进行系统性的同步采集以及分析。

1.2 信息化技术支撑体系

系统设计以多维度信息化技术支撑体系作为依托, 其核心涵盖了四大技术。其中, 北斗定位技术能够提供达到厘米级别的定位精度, 它与惯性导航模块相结合, 实现了对检测点位精确无误的定位以及轨迹追踪, 从而保证检测数据和路面位置能够精准地相互匹配; 物联网技术构建了“传感器—传输终端—云平台”数据链路, 进而实现了检测数据的及时实时传输以及远程的有效管控^[1]。

2 信息化技术在检测系统中的融合应用机制

2.1 北斗定位与惯性导航的协同定位机制

系统运用北斗三号和惯性导航共同开展定位工作, 以此攻克复杂环境中的定位难题。北斗定位模块借助接收多颗卫星发出的信号, 实现静态点位厘米级别的定位操作, 为检测数据标注极为精确的位置信息; 在卫星信号微弱的区域, 惯性导航模块依靠陀螺仪以及加速度计, 依据前期的定位数据来推算当前所处位置, 从而保证定位的连续性得以维持。二者利用卡尔曼滤波算法对数据进行融合处理, 进而消除定位过程中产生的噪声。实时关联定位数据与检测数据进行, 进而生成三维数据图谱, 此图谱涵盖了“位置—厚度—弯沉”等信息, 能够为路面质量溯源工作提供精确依据。

2.2 多传感器数据融合的检测机制

系统对多类型传感器加以集成, 达到协同检测的目的, 进而提高数据的全面程度。在进行厚度检测时,

作者简介: 韩笑飞 (1980-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 电子信息工程。

运用探地雷达和超声波传感器相融合的方式,探地雷达借助电磁波来穿透路面的结构,接收来自不同结构层的反射信号,以此计算层间的距离;超声波传感器起到辅助验证的作用,通过声波的传播时间来精确地测量厚度,这两者的数据融合能够消除因电磁波干扰而造成的误差。对于弯沉检测,采用激光位移传感器以及压力传感器,压力传感器模拟车辆所产生的荷载来施加压力,激光位移传感器实时捕捉路面的变形数量^[2]。

2.3 物联网技术的数据传输与管控机制

物联网技术构建三级数据传输网络,实现检测数据的实时控制与管理。感知层借助传感器节点收集诸如厚度、弯沉、定位等方面的数据,运用低功耗蓝牙技术实现短距离的数据汇整合;网络层凭借 4G/5G 与北斗短报文的双模传输方式,于常规的区域依靠 4G/5G 进行高速的数据传输工作,在偏远且没有信号的区域开启北斗短报文来保障通信的顺畅;应用层布置云平台用以接收数据,实现数据的集中式存储以及远程的访问操作。在数据的传输进程之中,采用加密算法来切实保障数据的安全性,以防止数据出现被非法篡改或者被恶意泄露的情况。

2.4 大数据与 AI 的数据分析机制

大数据以及 AI 技术共同构建起智能化的数据分析体系,进而对数据价值展开挖掘。在数据预处理阶段,借助异常值检测算法把因传感器故障所造成的错误数据予以剔除,运用插值算法来补充缺失的数据,以此保证数据集能够具备完整性。于特征提取阶段,利用卷积神经网络对路面厚度和弯沉数据的时空特征进行提取,进而识别数据的变化趋向;关联分析模块深入挖掘厚度和弯沉之间的相关性,构建二者的数学模型,从而对路面的长期性能做出预测。智能预警模块依据预先设定的阈值,自动识别超出标准的数据,标记其风险等级,而后向管理人员推送预警信息,实现从数据收集到决策辅助的智能化转变。

3 路面厚度与弯沉智能检测系统的架构设计

3.1 系统整体架构设计

系统运用“硬件层—传输层—软件层—应用层”这样的四层结构框架,实现功能的模块化以及可扩展性。硬件层作为数据采集的关键承载部分,包含了像检测终端、传感器集群、定位模块这类设备;传输层是由通信模块和网络设备所构成,承担着数据的即时传输工作;软件层覆盖了数据处理、AI 分析、数据库管理等一系列模块,实现了数据的智能化处理操作;

应用层朝着不同的用户群体提供丰富多样的服务内容,其中有施工单位所进行的质量管控工作、监理单位开展的验收评估任务、管理部门实施的路网监测事务^[3]。

3.2 硬件层设计:检测终端与传感器选型

采取模块化设计来构建硬件层,以此保障检测性能以及便携性。选用工业级平板电脑作为检测终端,此平板电脑配备了具备高清显示功能的触控屏以及拥有高性能运转能力的处理器,能够支持对多传感器数据开展同步处理工作,其续航时长超过 8 小时,可充分满足野外作业的实际需求。在传感器的选型方面,着重关注精准程度与稳定性能,在众多传感器中,探地雷达选用了 1.5 GHz 的高频天线,其穿透深度能够达到 1 米,分辨率可达到 0.1 毫米;激光位移传感器的测量范围处于 0~50 毫米之间,测量精度为 0.001 毫米;压力传感器的量程为 0~100 kN,测量误差小于 0.5%。定位模块集成北斗三号芯片和惯性导航芯片,其定位的更新频率达到 10 Hz,全部硬件拥有 IP67 级别的防水防尘能力,能够适应复杂施工环境。

3.3 传输层设计:双模通信与数据安全

传输层运用双模通信的方式,对数据传输的稳定性以及安全性予以保障。高速数据传输由 4G/5G 通信模块提供支持,其速率能够达到 100 Mbps 以上,能够满足实时传输高清检测图像以及大量数据的需求;数据收发可由北斗短报文模块于无公网区域实现,单次能够传输 1 000 字节的数据,使偏远地区的检测工作不会受到影响。数据安全借助三重保障达成,在传输过程中采用 SSL 加密协议,能够防止数据遭到拦截;在云平台采用访问权限管理,不同的操作权限会被赋予不同的用户;在数据存储时采用区块链技术确权,能够保证检测数据不会被篡改,为工程验收提供具有法律效力的依据^[4]。

3.4 软件层设计:核心模块功能实现

软件层包含五个起到关键作用的核心模块,借助这些模块来实现智能化处理。负责接收传感器所产生的数据以及定位数据的是数据采集模块,它会凭借时间戳来对数据进行同步与整合;采用滤波与插值之类算法以优化数据质量的是数据预处理模块;作为核心的 AI 分析模块,涵盖了特征提取子模块、关联分析子模块、异常识别子模块,它会运用训练好的机器学习模型来处理数据,进而生成分析结果;采用 MySQL 和 MongoDB 进行混合存储的是数据库管理模块,它把结构化数据用于存储检测指标以及位置信息,将非结构化数据用于存储检测图像和原始信号;系统管理模块具

有用户管理、设备监控、日志记录等方面的功能，可确保系统稳定运行。

3.5 应用层设计：用户需求与功能适配

在应用层方面，会依据不同用户的各类需求，来提供具有定制特性的功能。对于施工单位端而言，它能够具备具备实时性的检测功能，此功能可以把当下的检测数据予以显示，同时还能给出超标预警的提示，并且支持在现场对施工参数进行调整；另外，其具有历史数据查询功能，有助于对施工质量的变化走向开展分析。而监理单位端则具备数据审核的能力，该能力可将施工单位上报的数据与系统检测所得的数据进行对比，进而生成验收相关的报告。管理部门端具备路网质量可视化功能，它能够借助热力图来呈现不同区域路面的质量等级情况；统计分析功能可生成年度检测报告，为路网养护规划提供数据支撑^[5]。

4 系统性能测试

4.1 测试方案设计：场景与指标设定

测试挑选了高速公路以及市政道路这两类场景，涵盖了沥青和水泥混凝土两种不同的路面类型，测试的里程超过了50公里。测试的指标包含检测精度、效率、稳定性这三大类别，对于精度指标，是对比系统检测所得的数据和通过人工钻芯、贝克曼梁测试所获得的数据之间的偏差；对于效率指标，是统计在单位时间内检测的里程以及检测点位的数量；对于稳定性指标，是测试设备连续工作24小时的运行状态以及数据传输的成功比率。通过测试，同步模拟像高温、雨天、夜间这类复杂多样的环境，以此来对系统在不同环境下的适应能力进行验证。

4.2 精度测试结果与分析

精度测试所呈现的结果表明，该系统的检测性能比传统方法更为优越。在厚度检测方面，对于沥青路面而言，检测误差被控制在-1.8毫米到1.5毫米这个范围之内，其平均误差为0.3毫米；而针对水泥混凝土路面，误差范围处于-2.1毫米至1.7毫米之间，平均误差是0.5毫米，这两种路面的检测误差情况均符合规范所提出的要求。在弯沉检测中，当处于20℃的标准温度条件时，误差范围是-0.8（0.01毫米）到0.6（0.01毫米），平均误差为0.2（0.01毫米）；经过温度修正之后，在高温的环境之下，误差能够被控制在1（0.01毫米）以内。对比实验结果显示，系统检测数据与人工检测获取的数据之间的相关性系数达到0.98，结果有力证实了数据具备高度的精准性与可靠性。

4.3 效率与稳定性测试结果

通过效率测试可以看出，系统的检测能力得到大幅度提升。在高速公路的场景下，单车道的检测效率能够达到每天12公里，效率是传统检测方法的6倍之多；而在市政道路方面，由于交通状况复杂，其检测效率为每天8公里，是传统方法检测效率的4倍。在进行单点位检测时，仅仅需要耗时30秒，并且不需要中断交通，从而有效降低了对交通所产生的影响。在稳定性测试过程中，设备能够连续不间断地工作24小时，并且没有出现任何故障，数据传输的成功率达到99.2%，不过仅仅在隧道内部的短时间内出现了传输延迟的现象，当信号恢复之后，设备能够实现断点续传的功能。在高达45℃的高温以及阴雨天气的环境状况下，传感器的性能呈现出稳定的状态，其检测精度并未显著降低，充分证实了该系统具备适应复杂工作条件的能力。

5 结束语

借助信息化技术赋能而形成的关于路面厚度以及弯沉的智能检测系统，通过融合北斗定位技术、多传感器技术、物联网技术等，切实解决了传统检测模式所存在的效率低、精准度欠佳以及分析不及时等难题。该系统所构建的四层架构，实现了对检测数据进行实时采集、精准分析以及智能管控的目标，为道路质量方面的管控提供了高效且可靠的技术支持。此系统的运用不但提高了施工和养护在质量管控上的水平，而且还使人工成本有所降低，同时减少了对交通的影响，契合智慧交通的发展趋向。

参考文献：

- [1] 李宏伟. 信息技术应用于高速公路试验检测的研究[J]. 四川建材, 2024, 50(11): 42-44.
- [2] 陈光伟, 马永磊, 张定一, 等. 基于FWD弯沉盆参数的沥青路面层间接触状态识别方法及耐久性评估[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10508-10519.
- [3] 崔亮, 赖学新. 市政公路路基路面弯沉检测方法分析[J]. 广东建材, 2024, 40(02): 64-66.
- [4] 蔡嘉程, 张冰, 陈磊, 等. 落锤式弯沉仪校准试验标准值离散程度的优化[J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 76-81.
- [5] 陈小璐, 黄超, 张长弓, 等. 典型病害处路面弯沉盆信息分析与模量反演[J]. 建材世界, 2023, 44(04): 101-104.

基于 AI 的图像识别技术在 UI 自动化测试中的应用研究

杨 欢

(南京市产品质量监督检验院(南京市质量发展与先进技术应用研究院), 江苏 南京 210019)

摘 要 随着移动互联网与 5G/6G 网络的深度融合, 传统基于 DOM 定位的 UI 测试方法在跨平台、跨网络环境下面临维护成本高、适应性差等技术瓶颈。通过对 YOLOv8 目标检测算法进行优化, 引入多尺度特征金字塔与深度可分离卷积的轻量化架构, 结合 SSIM 相似度计算的状态转换机制, 提出视觉驱动测试技术。该技术优于现有主流方法, 在多个企业产品部署中显著降低测试成本并提高缺陷检出率, 为 AI 技术在软件测试领域的应用提供参考。

关键词 UI 自动化测试; 图像识别; YOLOv8; 深度学习; 跨平台测试

中图分类号: TP181; TP311.53

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.011

0 引言

随着 5G/6G 通信技术的商用部署与移动互联网应用的深度融合, 软件产品迭代周期从月度缩短至周级, 在多网络环境、多终端形态的复杂测试场景下, UI 自动化测试面临严峻挑战^[1]。传统的基于 DOM 树和 XPath 定位的测试方法, 在面对频繁出现的界面变更情况时, 其脆弱性表现得十分明显, 它的维护成本比较高, 而且跨平台的复用率比较低^[2-3], 现有的图像识别框架, 如 Airtest, 虽然在一定程度上缓解了元素定位的问题, 但是它依赖固定的模板匹配, 在处理动态内容的时候准确率仅仅能达到 60%~70%, 很难契合企业的实际需求^[4]。相关研究表明, 智能化技术的引入给 UI 测试提供了新的突破, 深度学习在图像分割与语义理解等方面拥有巨大的潜力, RPA 与 AI 协同合作能够为多目标测试提供可行的解决方案^[5-7]。针对现有方法在效率—精度权衡及复杂场景适应性方面的技术局限, 提出基于改进 YOLOv8 的视觉驱动测试技术, 融合卷积神经网络的深度特征提取与 SIFT 特征匹配的几何约束, 提升多尺度 UI 元素的识别能力与定位稳定性, 实现跨 Android、iOS 平台的统一执行。

1 技术方法与架构设计

1.1 基于改进 YOLOv8 的 UI 元素检测

移动应用界面控件分布密集、尺寸多样、背景复杂, 对目标检测算法提出更高要求。卷积神经网络在 UI 元素分类中展现出优异的特征提取能力^[8], 基于此选取 YOLOv8 作为基础架构。针对小尺寸控件特征响应弱、

密集分布遮挡严重、长宽比集中等技术挑战, 进行三项关键改进, 在特征金字塔中增加高分辨率特征层保留细节信息用于小图标、按钮识别, 采用 K-means 聚类优化锚点配置适应不同控件尺寸, 应用深度可分离卷积替代标准卷积层以减小模型参数数量与计算复杂度。训练采用迁移学习与增量训练相结合的策略, 先使用 COCO 预训练权重初始化, 再在 UI 控件数据集上增量训练, 利用随机裁剪、颜色抖动、MixUp 等数据增强技术提升模型泛化能力。

1.2 分层测试执行技术

元素识别仅构成自动化测试技术链路的起点, 技术难点在于将识别结果转化为有效的测试操作序列并管理复杂的多状态流程转换。传统图像测试方法受限于僵化的脚本架构, 难以适应动态应用程序接口^[9]。采用分层技术设计, 将测试执行逻辑解耦为感知层 (UI 元素检测与 OCR 文本提取)、决策层 (有限状态机管理与 SSIM 相似度计算)、执行层 (平台 API 封装与异常恢复机制) 三个模块。跨越这些层的模块借助接口来实现通信, 感知层负责捕捉接口信息, 这一层除了调用 UI 元素检测模型来识别交互控件之外, 还运用 OCR 技术提取文本数据, 并且基于颜色直方图计算页面主题位移, 借助多个特征呈现多维页面信息。决策层利用有限状态机模型管理测试流, 状态转换依靠页面相似度计算, 采用结构相似度指数 (SSIM) 进行判定, 当 SSIM 值低于 0.85 时, 判定为页面发生显著变化, 触发状态转换逻辑。执行层接收决策层下发的测试指令并转换为平台原生控制命令。针对 5G/4G 网络切换

作者简介: 杨欢 (1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电子信息、软件质量、AI 算法。

场景下页面加载时延的不确定性，设计自适应等待机制与异常恢复技术，等待机制通过动态监测页面加载状态调整超时阈值，异常恢复机制覆盖网络超时重连与应用崩溃恢复。参考 AI 数据采集技术^[10]，执行层集成操作日志、屏幕截图、性能指标等多维数据采集能力，为缺陷回溯分析提供支撑。分层测试执行技术架构设计如表 1 所示。

表 1 详细描述了各层的功能职责、关键技术以及模块间的接口定义。这种分层架构不仅提高了可维护性，还为后续的功能扩展预留了接口，能够灵活适配不同类型的测试需求。

1.3 跨平台测试技术

Android 与 iOS 平台在渲染引擎与交互协议层面存在显著技术差异，构成跨平台测试的核心障碍^[11]。采用三层抽象技术架构，视觉抽象层基于与平台无关的特征描述符实现 UI 元素的统一表征，交互抽象层通过 Adapter 模式将统一操作原语映射至各平台原生 API，验证抽象层提供多样化的断言机制。分辨率自适应技术采用基于锚点的相对定位方式将绝对坐标归一化为比例坐标，对动态区域采用 SIFT 特征匹配实现尺度不变定位，确保测试脚本的跨平台移植能力。

2 技术实现与应用验证

2.1 测试平台构建与实现

测试平台基于 Python 3.8、PyTorch 1.12、OpenCV 4.5 构建分布式技术架构，硬件配置采用 Intel 至强 Gold 6248R 处理器与 NVIDIA RTX 3060 显卡，测试设备集群包含 10 台 Android 终端，覆盖 Android 8.0 至 13.0 版本跨度。技术架构由识别模块（YOLOv8 推理引擎）、执行模块（测试指令转换与平台 API 调用）、报表模块（测试结果可视化）三部分组成，模块间通过 RabbitMQ 消

息队列实现异步解耦通信。集成 Jenkins Pipeline 与 GitLab 的持续集成流水线，基于 Webhook 机制实现现代码提交触发的自动化回归测试。

2.2 实验设计与性能测试

实验数据集从电商、社交、金融、工具、游戏五类主流移动应用中采集 15 000 张 UI 界面截图，涵盖不同网络环境（5G/4G/WiFi）与分辨率的多样化场景，标注包括按钮、输入框、图标等 15 类常见 UI 控件。为全面评估改进 YOLOv8 模型的性能优势，设计对比实验选取 Selenium（基于 DOM 解析）、Appium（基于原生控件识别）、Airstest（基于模板匹配）三种主流测试方法作为基准。在测试环境方面，统一配置成 Ubuntu 20.04 操作系统，并且让所有的算法都在相同的硬件条件之下运行。为减少随机误差，每项实验重复进行 5 次并取平均值。实验从元素识别准确率、执行效率、跨平台适应性、维护成本等关键维度进行综合评估，具体测试结果如表 2 所示。

数据如表 2 所示，人工智能模型实现 82.7% 识别率和 68% 跨平台应用，只需图片即可定位出控件，将原本几天完成脚本开发时间压缩到几小时以内。

2.3 企业应用实践与效果评估

技术方案在电商平台与金融应用的实际部署中，电商回归测试的周期显著缩短，金融兼容性测试通过锚点相对定位与 SIFT 特征匹配有效降低了人工成本。部署采用分布式架构，测试节点通过 RabbitMQ 消息队列调度并利用 GPU 加速推理。应用过程中遇到的主要挑战包括第三方广告等动态内容的识别稳定性问题，通过设置排除检测策略予以解决；5G 与 4G 网络切换导致的时延波动则依靠自适应超时机制动态调整阈值来应对。如表 3 所示，该技术在 11 款产品的部署中实现年度成

表 1 分层测试执行技术架构设计

架构层次	功能职责	关键技术	接口定义	数据流向
感知层	1. 界面状态实时获取 2. UI 元素识别与定位 3. 文本信息提取 4. 界面主题分析	YOLOv8 模型 (80 ms/ 帧)、 OCR 技术、颜色直方图分 析、多维特征提取	getUIElements()、 extractText()、 analyzeTheme()、 getPageFeatures()	截图数据→特征向量
决策层	1. 测试流程管理 2. 页面状态判断 3. 测试路径规划 4. 异常检测与处理	FSM 状态机、SSIM 相似度 计算 (阈值 0.85)、路径 规划算法、智能等待机制	calculateSimilarity()、 planTestPath()、 handleException()、 stateTransition()	特征向量→操作指令
执行层	1. 操作命令执行 2. 平台适配 3. 异常恢复 4. 数据采集记录	平台 API 封装、重试机制、 日志系统、性能监控	click(x, y)、 swipe(x1, y1, x2, y2)、 input(text)、collectData()	操作指令→执行结果

表 2 四种测试框架综合性能对比

评估指标	Selenium	Appium	Airtest	本文方法
元素识别准确率 (%)	依赖 DOM 结构	87.2 (原生控件) 62.3 (自定义控件)	68.5	82.7
平均执行时间 (ms)	85	126	145	92
跨平台复用率 (%)	30	42	55	68
动态内容处理 (%)	不支持	45.2	52.6	71.0
维护成本指数	100	85	72	62
模型 / 框架大小	15.3 MB	28.6 MB	42.3 MB	15.2 MB
初始配置时间 (小时)	2	4	3	8
支持的平台数量	1 (Web)	2 (Android/iOS)	3 (多平台)	3 (多平台)

(注: 维护成本指数以 Selenium 为基准 100, 数值越低表示维护成本越低。)

表 3 企业实际应用效果统计

应用场景	测试类型	测试规模	原耗时	现耗时	效率提升	缺陷检出率变化	年节省成本
电商 APP	功能回归测试	800 用例 / 天	16 小时	4.5 小时	71.9%	+18%	48 万元
金融 APP	兼容性测试	35 机型	6 人天	2.8 人天	53.3%	+15%	28 万元
社交 APP	UI 界面测试	500 用例	12 小时	5.2 小时	56.7%	+12%	待统计
合计 (11 款产品)	综合	月均 3 万用例	—	—	52%	+16.5%	76 万元

本节约 76 万元、测试效率提升 52%、投资回报率 1.9 倍。实践表明, 视频流 UI 的识别准确率为 68% (静态界面达 82.7%), 主要受压缩算法与运动模糊影响, 存在进一步优化空间; 首次部署需 15 个工作日完成模型调优。

3 结束语

针对移动应用 UI 测试在跨平台适配与维护成本方面的技术挑战, 提出基于改进 YOLOv8 的视觉驱动测试技术。通过引入高分辨率特征层、K-means 聚类优化锚点配置、深度可分离卷积轻量化等技术, 结合有限状态机与 SSIM 相似度计算的智能决策机制, 实现元素识别准确率 82.7%、平均响应时延 92 ms、跨平台复用率 68%。在电商、金融、社交等 11 款产品的部署中, 测试效率提升 52%, 年度成本节约 76 万元 (ROI 达 1.9 倍)。实践中发现视频流 UI 的识别准确率为 68% (静态界面达 82.7%), 主要受压缩算法与运动模糊影响, 首次部署需 15 个工作日完成调优。未来将探索 Transformer 架构增强时序特征建模能力, 引入预训练视觉模型提升复杂场景语义理解精度。

参考文献:

[1] 刘维维. 人工智能技术在移动终端自动化测试中的

应用 [J]. 软件导刊, 2021, 20(02):59-62.

[2] 余锦润, 杨丹君, 李波波. 基于位图识别的 UI 自动化测试研究和应用 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36(03):90-94.

[3] 袁之国. 基于 UI 建模的移动应用自动化测试工具的设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.

[4] 胡莉琼, 詹夏城, 唐健玲, 等. 基于 Airtest 框架的图像识别自动化测试研究与应用 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(07):109-110.

[5] 丁磊. 智能技术在软件设计自动化中的应用 [J]. 电子技术, 2024(09):338-339.

[6] 黄非. 图像智能识别及其在自动化测试的应用 [J]. 现代信息科技, 2025, 09(06):67-70.

[7] 李晖, 辛华. 基于 RPA+AI 的多目标自动化软件测试系统设计 [J]. 粘接, 2025, 52(07):144-146.

[8] 中国工商银行股份有限公司. 基于卷积神经网络的用户界面测试结果分类方法及装置: CN202110484586.3[P]. 2021-07-06.

[9] 厦门星纵物联科技有限公司. 一种图像自动化测试的方法, 装置, 系统及存储介质: CN202211225800.4[P]. 2023-01-31.

[10] 北京墨云科技有限公司. 一种基于 AI 的自动化渗透测试系统的数据收集方法: CN202010303510.1[P]. 2023-08-11.

[11] 彭飞, 王建, 寇超, 等. 基于图像的航天业务软件 Web UI 自动化测试方法 [J]. 测控技术, 2024, 43(09):21-27.

基于工业互联网的电气系统 远程监控与管理平台构建

王奎元

(沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘要 电气系统是工业生产的根基,但传统的电气系统管理方式存在实时性差、运维效率低等问题,已难以满足目前的工业生产需求。基于此,本文以工业互联网的技术特性为出发点,从实时监控、运维优化、故障预警、决策支持四个方面分析平台的构建价值,提出包含数据采集传输、云边协同分析、安全防护等各方面的构建策略。平台打通端到端的信息链路,融合云计算、边缘计算等技术实现电气系统全生命周期智能化管理,以期为工业领域电力安全保障与效率提升提供实践路径参考。

关键词 工业互联网; 电气系统; 远程监控

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.012

0 引言

随着工业4.0以及数字经济的不断深入,工业互联网作为工业设备、数据以及应用之间的桥梁,已经成为促进制造业转型升级的重要动力。电气系统是工业生产中的“动力中枢”,它的稳定运行直接关系到生产的连续性和安全性,但是传统的依靠人工巡检、本地监控的管理模式存在响应滞后、数据割裂、运维成本高等问题,不能满足现代化工业高效运营的需求。在此背景下,基于工业互联网构建电气系统远程监控和管理平台,应用物联网、云计算、大数据等先进技术,打破信息孤岛,实现电气设备状态的实时感知、智能分析、精准控制,成为解决传统管理难点、提高系统运行可靠性和智能化水平的必然选择。本文就平台构建的价值和策略进行深入的研究,为相关的技术研发和工程实践提供参考。

1 工业互联网的发展背景与技术特征

工业互联网产生于工业生产提高效率、降低成本、保证安全的强烈愿望下,也得益于物联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术日趋成熟并融合应用。在全球制造业转型升级的大背景下,工业互联网冲破了传统工业生产中设备、流程、人员的物理限制,塑造出人、机、物全方位互联的智能环境^[1]。核心技术特点有三点:一是泛在互联性,依靠各种传感器、工业网关等设备来实现工业生产要素的实时连接

和数据采集,形成工业生产全过程的感知网络;二是智能分析性,利用云计算和边缘计算来对大量的工业数据进行挖掘和分析,从中提取出有价值的决策信息,进而对生产过程进行精确优化;三是动态适应性,根据实时数据反馈来调整系统并作出自主决策,系统具有较强的灵活性和扩展性,可以满足不同工业场景个性化的需求,保证系统在复杂工况下稳定运行,为工业生产的智能化和柔性化发展提供核心支撑。

2 基于工业互联网的电气系统远程监控与管理平台构建价值

2.1 提升电气系统运行监控的实时性与准确性

基于工业互联网的远程监控平台,在电气设备关键节点上布设高精度传感器、智能监测终端,对电压、电流、功率、温度、绝缘状况等核心运行参数进行不间断采集和实时上传,数据更新速率能达到毫秒级,完全颠覆了传统监控“事后发现、被动响应”的模式。平台依靠工业互联网的泛在互联特性,把分布于各个地区的电气设备归入统一的监控体系当中,管理人员可以凭借电脑,移动终端等设备,随时随地远程实时地查看系统的运行状况,清楚地了解到各个设备的工作参数以及负荷的变化情况^[2]。同时,平台内置的智能数据校验算法可以自动识别异常数据、排除干扰信号,保证数据传输和展示的准确性,避免因数据误差而造成的误判。这种实时、准确的监控能力,使管理

作者简介:王奎元(1988-),男,本科,高级工程师,研究方向:电气工程。

人员可以及时发现系统运行中哪怕是微小的波动和隐患,为后续的运维处置争取了宝贵的时间,从根本上提升了电气系统运行监控的有效性。

2.2 优化设备维护与运维管理,提高系统可靠性

基于工业互联网的远程监控与管理平台对设备运行数据不断追踪、深入分析,可以准确掌握设备的运行状况及健康趋势,从“定期检修”迈向“预测性维护”。平台通过大数据分析构建设备健康评估模型,利用设备历史运行数据、故障记录、维护日志等资料计算设备剩余使用寿命,在出现潜在故障风险的时候提前发出警报,提出相应的维护建议和方案。运维人员根据平台推送的维护任务,可以合理安排维护的时间和资源,避免盲目检修,降低维护成本。同时,平台也建有完备的运维管理流程,对维护任务的下达到执行、反馈形成了一套全流程闭环的管理体系,使管理人员可以随时掌握维护的进度并对维护的效果做出评价。

2.3 强化故障预警与应急响应能力,保障电力安全

电气系统故障具有突发性、破坏性大的特点,如果不能及时处置,就会造成设备损坏、生产中断甚至火灾、触电等安全事故,造成严重的经济损失和人员伤亡。基于工业互联网的远程监控平台通过创建多维度的故障预警模型,对设备运行参数的异常变化实施实时监测与智能分析,在故障征兆出现之前就发出预警信号。平台根据电气系统的拓扑结构及故障传播规律,准确找到故障发生位置、类型以及影响范围,为运维人员提出明确的故障处理建议。故障发生之后,平台会自动启动应急响应程序,迅速切断故障区的电源,把故障点隔开,避免故障蔓延,还会把故障信息、处理流程等及时推送给责任人,使运维人员及时进行抢修^[3]。平台具有故障模拟、应急演练的功能,可以依据历史故障数据模拟出各种复杂的故障场景,提高运维人员的应急处理能力。通过这种“预警、定位、响应、处置”的全链条管控模式,大大缩短了故障处理的时间,有效地减小了故障造成的损失,为电力的安全保驾护航。

2.4 支撑数据驱动的决策分析与智能化运维

工业互联网的电气系统远程监控平台汇集了大量的设备运行数据、维护数据、环境数据等,这些数据不仅是系统运行状态的客观反映,也是实现智能化决策与运维的重要资源。平台依靠大数据分析和人工智能技术,对这些数据加以深入挖掘,可以找出电气系统运行的内在规律和隐藏问题,为管理决策提供科学

的支撑。根据设备负荷变化的数据可以优化电力资源的配置,减少能耗,通过对不同区域、不同时间段的故障数据进行对比,可以找到高风险的设备及薄弱环节,并据此有针对性地提出改进措施,通过对维护数据和设备寿命相关性的分析,可以优化维护策略,提高维护效率。平台还支持数字孪生模型的创建,把电气系统的物理实体和虚拟模型实时映射,实现系统运行状态的可视化模拟与仿真分析,管理人员可以利用虚拟模型进行决策推演,预测不同决策方案的实施效果,从而做出最佳决策。数据驱动的决策模式冲破了传统依靠经验判定的束缚,使电气系统的管理与运维愈加科学、准确、高效,促使电气系统运维由“被动应对”转向“主动预判”“智能改进”。

3 基于工业互联网的电气系统远程监控与管理平台构建策略

3.1 构建统一的数据采集与传输体系,实现端端信息互联

数据是平台运行的基础,建立统一、高效的数据采集和传输体系是实现电气系统远程监控和管理的前提。根据电气设备的种类、运行工况、监控需求选择合适的感知设备和采集终端,即高精度电流电压传感器、温度湿度传感器、绝缘监测装置、智能电表等,保证可以全面采集设备运行的主要参数。同时根据不同的厂家、不同型号设备的通信协议的差异,部署统一的工业网关,使用协议转换技术来达到各种设备的互联互通的目的,消除“信息孤岛”。另外,根据工业场景的网络环境特点,设计分层的数据传输架构,采用“边缘节点—区域网关—云端平台”三级传输模式,边缘节点负责本地数据采集和初步处理,区域网关完成数据汇聚和转发,云端平台完成数据存储和深度分析^[4]。在传输协议的选择上优先采用 5G、工业以太网、LoRa 等具有高带宽、低时延、广覆盖等特点的协议来保证数据传输的实时性和稳定性。建立数据质量管控机制,用数据清洗、去重、校验等技术手段保证采集数据的准确性、完整性,制定统一的数据标准和规范,达到数据格式、编码规则的标准化,为之后的数据共享和分析应用奠定基础,真正实现设备端到云端的互联互通。

3.2 应用云计算与大数据分析技术,实现智能监控与预测

云计算和大数据分析技术是平台进行智能监控和预测的基础,使用这些技术能极大地提升平台数据处

理能力和智能决策能力。在云计算架构的设计上采取混合云的方式,对实时性要求较高的监控数据、应急响应指令等放在私有云上,保证数据处理的安全性、低时延;对海量历史数据存储、大数据分析、模型训练等非实时性业务放在公有云上,利用公有云弹性扩展、低成本的优势。采用云平台的分布式存储技术,对大量的电气数据进行安全存储和快速检索,以满足平台长时间运行所产生数据的积累。在大数据分析应用方面,建立设备运行状态评价模型、故障诊断模型、负荷预测模型等。用机器学习算法来训练设备的运行数据,让模型可以自己分辨设备正常运转的状态和出问题的特征,从而对设备有没有故障做出准确的判断,并且提前预测可能发生的故障。例如:从设备振动数据、温度变化数据中可以发现轴承磨损、线圈过热等隐性故障;从历史负荷数据和外部环境因素(如季节、生产计划)中可以预测出未来一段时间内电力负荷的变化情况,为电力调度、资源调配提供依据。利用云计算强大的计算能力,实现分析模型的实时迭代和优化,提高模型的适应性、准确性,从而达到对电气系统进行智能监控、精确预测和高效控制的目的。

3.3 利用边缘计算和物联网设备提升平台响应速度与可靠性

采用边缘计算技术和物联网设备,可以提高平台的响应速度和可靠性。

边缘计算把部分数据处理、分析和决策任务下放到靠近设备的边缘节点,不需要把所有数据上传到云端,可以显著减少数据传输的延迟,提升实时反应速度。当设备出现突发故障时,边缘节点可以直接对故障数据进行本地分析和判断,迅速发出应急处置指令,切断故障电源,防止故障扩大,不需要等待云端指令反馈,大大缩短了故障响应时间。

物联网设备的广泛应用使得数据采集更加全面,在设备之间也实现了本地的协同控制,提高了系统的可靠性。例如:某个区域网络中断时,边缘节点凭借本地物联网设备完成数据本地存储以及设备自主控制,保证系统主要功能不受影响,等网络恢复之后再吧数据上传到云端。边缘计算节点还有数据预处理的功能,可以对采集到的原始数据进行过滤、压缩、筛选,只把关键的数据上传到云端,降低网络传输的压力和云端存储的成本,同时减少无效数据对分析结果的影响,提高平台整体的运行效率和可靠性。

3.4 完善平台安全防护与权限管理机制,确保数据与系统安全

在工业互联网环境下,电气系统远程监控平台连接着大量的工业设备和核心生产数据,它的安全性直接关系到工业生产的稳定和安全,一旦发生网络攻击、数据泄露等安全事件,将会造成严重的生产事故和经济损失。因此需要建立全方位、多层次的安全防护和权限管理机制。从网络安全角度来讲,使用防火墙、入侵检测系统、数据加密传输等技术来建立边界防护、网络隔离和数据传输安全体系,避免非法入侵以及数据泄露。针对工业协议的安全漏洞,部署工业防火墙和协议审计系统,对网络通信进行实时监控、异常拦截,保证工业控制网络的安全。在数据安全方面,使用数据加密存储、访问控制、备份恢复等技术对采集到的数据、分析结果等核心数据进行全生命周期的安全保护,防止数据泄露、篡改和丢失^[5]。创建数据安全审计机制,对数据的访问、操作行为进行全程记录和追溯,保证数据使用符合规定。权限管理上使用基于角色的访问控制(RBAC)模型,根据不同的用户岗位职责、工作需求分配不同的操作权限,明确数据访问和系统操作的权限边界,防止越权操作。

4 结束语

基于工业互联网的电气系统远程监控及管理平台,依靠实时监控、运维改善、故障预警、决策支撑,实现从被动运维到主动预判、智能管控的转变。采用平台融合数据采集、云边协同、安全防护等手段,提高电力的安全性以及运行效率。未来依靠人工智能和数字孪生技术向智能化、柔性化、一体化发展,拓展应用场景,提高管理效能,为制造业、能源、化工等领域高质量发展提供支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 童心.基于物联网的海上起重机电气系统远程监控与维护技术研究[J].中国设备工程,2024(18):226-228.
- [4] 董明虎.建筑电气远程监控系统的应用研究[J].自动化应用,2023,64(06):189-191.
- [5] 刘潇,庞涛.水电站电气系统自动化设计应用分析[J].科技展望,2015,25(36):66-67.

基于数字化技术的燃气—蒸汽联合循环机组状态监测研究

黄泽峪

(中电常熟热电有限公司, 江苏 常熟 215500)

摘要 本文以 GE 6F.03 型燃气—蒸汽联合循环机组为研究对象, 针对其结构复杂、运行参数耦合紧密及传统监测手段实时性不足、诊断精度低等问题, 提出一种基于数字化技术的状态监测系统。通过分析机组机械故障类型, 系统采用分层分布式架构, 整合物理层传感器网络、数据层多源信息处理与应用层智能诊断功能, 以期为机组预测性维护提供技术参考, 对保障电力供应安全、降低非计划停机风险具有积极的实践意义。性能测试结果表明, 系统频谱分析基频误差仅 0.40%, 显著优于传统方法。

关键词 数字化技术; 燃气—蒸汽联合循环机组; 故障诊断; 状态监测

中图分类号: TM611.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.013

0 引言

GE 6F.03 型燃气轮机全球累计装机量突破 200 台, 处于中国市场规模化部署阶段。其发电出力与燃气耗量适配性良好且能效表现突出, 故在多类应用场景中得到广泛应用。燃气—蒸汽联合循环机组因结构集成度高、运行参数间存在强关联性, 致使燃气轮机运行过程易受多重故障与失效威胁。在此背景下, 对燃气轮机状态演变及潜在故障实施及时有效的监测与预判, 成为提升装备可靠性、保障生产安全的核心举措^[1]。传统监测手段普遍存在响应滞后、辨识精度有限、维护决策倚重经验等局限, 常诱发非预期停机事件并推高运维成本^[2]。基于故障特征的状态监测与预测技术成为研究与应用的焦点。本文以 GE 6F.03 机组为对象, 融合数字化技术构建状态监测系统, 旨在提升机组运行可靠性、延长设备寿命, 并为智能化运维提供实践依据, 对保障电力供应安全与经济效益具有现实意义。

1 GE 6F.03 型燃气轮机结构与故障类型分析

1.1 GE 6F.03 型燃气轮机结构

GE 6F.03 型燃气轮机是 GE Vernova 推出的重型、齿轮驱动 (geared) 燃气轮机, 采用水平分体式 (split-case) 结构, 主要由压气机、燃烧室、高压涡轮、功率涡轮、齿轮箱 (冷端驱动)、发电机、排气系统、辅助系统等组成^[3]。

该机组采用多轴、螺栓转子结构, 整体体积紧凑、功率密度高, 适用于分布式发电、工业热电联产以及偏远或海上电站。其燃烧和热路径检查间隔长达 32 000 小时, 已在全球 35 个国家超过 200 台机组中验证, 具备高效率、低排放和快速调峰能力。

1.2 机械故障类型分析

燃气轮机故障形态可归纳为四大类别: 机械失效、气流通道异常、附属系统紊乱及传感装置失灵^[4]。图 1 所示为典型机械失效形式谱系, 其根源多来自旋转轴系在服役过程中诱发的摩擦耗损、挠曲形变, 以及加工装配环节遗留的尺寸偏差。

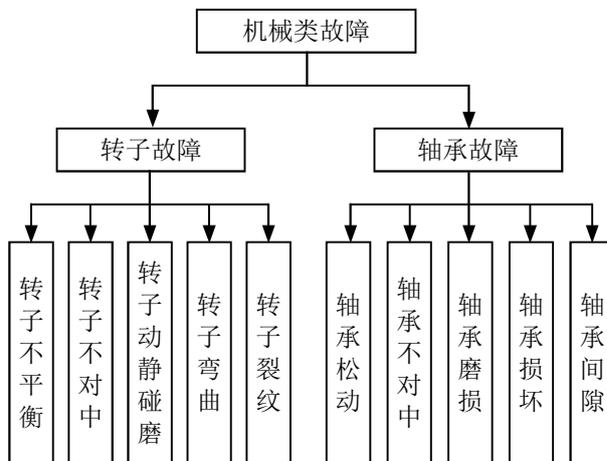


图 1 典型故障类型

作者简介: 黄泽峪 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 发电技术、燃气轮机。

2 燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统的构建

2.1 需求分析

燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统的设计需满足安全性、经济性与智能化运维的核心需求，结合机组运行特性与数字化技术发展趋势，具体需求如下：

1. 多源数据集成与实时性要求。机组运行涵盖燃气轮机、蒸汽轮机、余热锅炉等多个子系统，需要对温度、振动、压力、流量等多种传感器数据进行集成^[5]。系统需支持高速数据采集（采样频率 ≥ 128 kHz）与实时传输，确保关键参数（如转子振动、排烟温度）的监测延时低于1秒，避免因数据滞后导致故障漏报。

2. 状态感知与故障预警功能。通过分析振动信号的频域特征（如倍频成分）识别转子不平衡、不对中等典型机械故障，并结合历史数据训练模型，实现故障类型的精准分类与定位。

3. 智能诊断与决策支持。系统需具备数据驱动与模型驱动的混合诊断能力。一方面，利用大数据分析技术量化参数偏差对机组经济性的影响；另一方面，通过平衡流形模型估计气路部件健康参数，实现传感器故障与气路故障的协同诊断。

4. 系统兼容性与可扩展性。硬件需支持模块化设计，允许灵活扩展采集通道；软件层面需提供标准化

数据接口，便于与电厂SIS、MIS系统集成，并支持云计算边缘计算协同架构，实现预测性维护功能的持续升级。

2.2 系统架构

针对上述需求，本研究构建的燃气—蒸汽联合循环机组状态监测系统基于分层分布式架构，设物理层、数据层与应用层三个逻辑层级，系统总体架构如图2所示。

1. 物理层。系统的物理层构成基础，由燃气—蒸汽联合循环机组本体及其感知网络组成，关键设备包括GE 6F.03燃气轮机、蒸汽轮机、发电机、余热锅炉以及辅机等。层内布置电涡流位移、加速度振动、热电偶、压力变送等高性能传感器和智能仪表，直接采集振动、转速、温度、压力、流量等原始物理信号，并通过现场总线与机组的DCS、PLC等控制系统相连，形成完整的数据采集源头^[6]。

2. 数据层。数据层充当系统的中枢神经，负责数据的汇聚、清洗与初步处理。该系统由状态监测平台与数据库组成，集成数据采集、传输、处理及数据中心模块。借助状态监测技术采集燃气轮机关键运行参数；传输过程关联通信协议与具体传输手段；处理环节对采集数据实施解析并完成异常识别；数据中心由多类数据库组建。

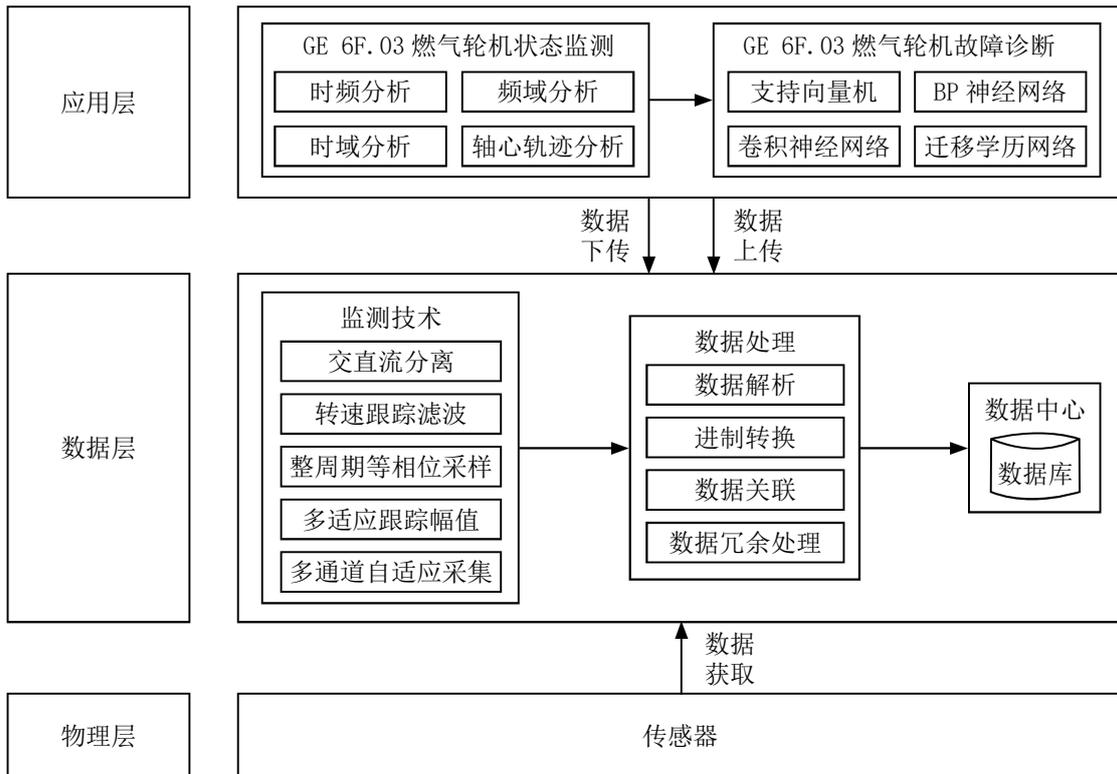


图2 系统总体架构图

3. 应用层。应用层是系统价值的最终体现,面向运维人员提供功能服务。系统针对燃气轮机关键部件实施信号处理及故障判别,动态追踪其运行态势,为运维决策提供关键支撑。

2.3 系统开发

1. 状态监测子系统开发。状态监测子系统研发聚焦高精度数据采集核心诉求,硬件与软件协同设计。硬件构型为模块化,核心架构采用 FPGA 与 ARM 协同处理机制。核心模块涵盖:双冗余电源单元确保供电稳定;瞬态信号采集单元搭载 8 路振动通道及 1 路键相信号调理电路,其内置基于开关电容的转速跟踪滤波电路(LTC1069 芯片),可依键相频率动态调节截止频率,进而高效滤除高频噪声;键相信号自适应调理电路通过数模转换器(D/A)与比较器构成闭环控制,实时跟踪键相幅值变化,避免信号异常或丢失;多通道同步数据获取及存储缓冲由 FPGA 负责,采样环节管控与网络通信运作由 ARM 完成。此外,独立的慢变信号与开关信号采集模块分别负责温度、压力等过程参数和开关量状态的采集。

软件设计采用分层模块化架构,确保系统的实时性与稳定性^[7]。底层为硬件驱动层,封装对 FPGA、A/D 等硬件的操作。核心是功能模块层,通过独立的键相倍频模块、跟踪滤波控制模块和跟踪幅值控制模块,分别实现预测脉冲周期计算、滤波器时钟动态设置及键相信号自适应调理算法。上层业务逻辑层负责解析上位机指令(如采样参数、报警阈值),协调各模块任务,并通过网络传输模块将 FPGA 缓存的数据可靠上传至服务器。这种软硬件紧密结合的设计,为系统提供了高质量的数据采集能力。

2. 故障诊断子系统开发。故障诊断子系统的开发旨在实现对机组状态的智能分析与故障精准定位,其核心是基于数据驱动算法构建一个高效、准确的诊断平台。

软件开发采用 C/S 架构,选用 Qt 框架进行跨平台人机交互界面开发。系统功能模块化设计主要包括:参数设置模块,用于配置采集卡、传感器及报警阈值;实时监测与数据存储模块,负责显示波形并依据策略存储正常与报警数据;历史数据分析模块,集成信号处理(时域、频域、轴心轨迹分析)与智能诊断算法;远程通信单元旨在实现与数据库服务器的数据互通。核心智能诊断能力基于动态链接库(DLL)调用实现,将经 Python 训练的深度卷积残差对抗网络等模型封装成 C++ 可调用接口,实现故障特征的跨域迁移及智能归类。

针对故障数据标签匮乏与分布异质性突出的难题,着重探究了迁移学习驱动的智能诊断方法。DCRWAN 模型包含深度残差特征提取、领域判别和分布差异度量等模块,能够有效提取域不变特征。该模型在由公开数据集作为源域、实验台数据作为目标域的迁移任务中,故障诊断准确率超过 95%,显著提升了在目标设备数据不足条件下的诊断精度和泛化能力。

2.4 性能评估

将本系统与高精度商用 LMS SCADAS 数据采集系统进行同步对比。在转子转速 1 500 rpm 工况下,采集轴承座振动加速度信号。结果显示,本系统频谱分析的基频为 24.90 Hz, LMS 系统为 24.88 Hz,相对误差仅为 0.40%,证明了本系统在信号采集与频谱分析方面具有高精度。

3 结束语

本文构建的数字化状态监测系统有效解决了燃气—蒸汽联合循环机组故障预警与诊断的难点。系统通过多源数据集成、智能算法融合及分层架构设计,实现了高精度实时监测与故障定位,验证了其在工程应用中的可靠性与先进性。本文的研究结果表明,基于迁移学习的诊断模型能够克服数据标签稀缺的局限,提升泛化能力;硬件软协同方案则确保了信号采集的准确性与系统扩展性。

参考文献:

- [1] 许未晴,冀守虎,安永伟,等.机器学习算法在重型燃气轮机健康监测的应用现状[J].液压与气动,2023,47(04):71-86.
- [2] 万震天,谢岳生,田书耘,等.燃气轮机性能监测与故障预警系统开发及工程应用研究[J].热力发电,2022,51(05):149-155.
- [3] 肖新宇,胡尊民,于国强,等.GE6F.03 燃气轮机一次调频测试逻辑优化[J].热力透平,2022,51(04):295-298.
- [4] 马灵楠.浅析燃气轮机系统故障识别及处理方法[J].电力设备管理,2025(17):53-55.
- [5] 潘冰.燃气轮机状态监测与故障诊断方法研究及系统开发[D].杭州:浙江大学,2023.
- [6] 彭道刚,裴浩然,尹德斌,等.基于机器学习的燃气轮机控制系统分层故障诊断[J].热能动力工程,2022,37(12):165-173.
- [7] 张明惠,董胜刚,贡文明,等.一种燃气蒸汽联合循环机组自启停控制系统[J].工业控制计算机,2022,35(10):15-16.

装配式建筑外墙防渗漏施工技术应用

钟贞明¹，徐四平²，廖桂红¹，李康¹

(1. 江西应用技术职业学院，江西 赣州 341000；

2. 赣州市第一建筑工程有限公司，江西 赣州 341000)

摘要 装配式建筑凭借低碳环保、高效集约的工业化生产优势，成为建筑行业转型升级的主要方向。其中外墙渗漏是装配式建筑常见的质量问题，不但会影响建筑物的使用功能以及耐久性，还会降低居住的舒适度，加大后期维修的成本。本文基于装配式建筑外墙构造特点，分析渗漏问题的主要原因和易发部位，重点从设计优化、材料选择、施工工艺、质量控制四个方面入手，阐述装配式建筑外墙防渗漏施工技术要点，旨在为提高装配式建筑工程质量提供借鉴，进而促进该行业高质量发展。

关键词 装配式建筑；外墙防渗漏；防渗漏优化技术；质量管控

中图分类号：TU741

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.014

0 引言

装配式建筑是将预制混凝土构件(PC构件)经工厂标准化生产后，运输至施工现场通过吊装、拼接、连接而成的建筑形式，契合我国“碳达峰、碳中和”目标下建筑业绿色发展的要求。相较于传统现浇建筑，装配式建筑具有施工周期短、资源消耗低、劳动力需求少等优势，但预制构件连接缝、预留孔洞等部位易形成渗漏通道，导致外墙渗漏问题频发。随着装配式建筑技术标准体系日趋完善，外墙防渗漏施工技术的研究与应用愈发受到重视。外墙防渗漏是一项涵盖设计、生产、施工、验收等环节的系统工程，需依托多类技术手段构建防渗漏管控闭环，并结合装配式建筑外墙渗漏成因，制定科学的防渗漏施工方案，避免出现外墙渗漏风险和隐患。

1 装配式建筑外墙渗漏的主要成因与易发部位

1.1 外墙渗漏的核心成因

1.1.1 设计层面的缺陷

设计方案是决定外墙防渗漏效果的前提，部分设计方案没有充分考虑装配式建筑的构造特点，存在节点构造设计不合理的问题，构件拼接缝没有设置多道防水防线、密封胶选型与节点适配性差、外墙预留洞口防水构造缺失等。另外，一些设计没有根据项目所在地的气候条件实施针对性优化，如多雨地区没有加强水平缝的排水功能，容易造成雨水在缝隙里积聚，从而引起渗漏。

1.1.2 构件生产的质量偏差

预制外墙板是装配式建筑的重要构件，预制外墙板生产质量好坏直接影响到防渗漏的效果。工厂生产过程中，一旦模具精度不够会造成构件尺寸偏差过大，拼接缝宽度不均匀；混凝土振捣不密实会产生蜂窝、麻面等缺陷，形成渗水通道。构件预留的止水条凹槽、注浆孔等构造尺寸不符合设计要求，会降低节点防水的可靠性，同时构件出厂前养护不到位，容易造成混凝土表面开裂，给雨水渗透提供通道。

1.1.3 现场施工的不规范操作

施工现场安装是防渗漏的重要环节，构件吊装时，若构件定位偏差过大，会造成拼接缝宽度超过设计允许范围，密封胶不能很好地填充；节点连接时，若灌浆料强度不够、注浆不饱满，会造成套筒连接部位出现空隙，形成渗漏通道；密封胶施工时，若基层清理不彻底、密封胶未饱满嵌填、粘结面未做底涂处理，会造成密封胶与构件粘结不牢固，雨水容易从粘结界面渗入。

1.1.4 后期维护的缺失

装配式建筑外墙防水构造存在有限的使用寿命，密封胶会随时间而出现老化、开裂、脱落等问题。如果后期使用中没有建立定期巡检、维护制度，不能及时更换老化的密封材料、修补开裂处，则会使得防水防线失效，产生渗漏。

1.2 外墙渗漏的易发部位

装配式建筑外墙渗漏存在部位集中性，主要出现在构件拼接缝、预留洞口、外墙预埋件等处。一是预

作者简介：钟贞明(1987-)，男，硕士研究生，讲师，研究方向：建筑工程。

制外墙板竖向缝和水平缝,这是装配式建筑外墙最主要的渗漏部位,竖向缝受墙体沉降、温度变形等因素的影响容易产生变形,水平缝容易积水;二是外墙门窗洞口,门窗框与预制板的连接部位是结构上的薄弱点,雨水容易从缝隙中渗入;三是预留孔洞和预埋件部位,如外墙套管、空调洞口、拉结件等,孔洞周围封堵不严就容易形成渗漏通道;四是女儿墙、挑檐等泛水部位,这些部位的防水收头处理不当,雨水容易沿着墙体和屋面的交接处渗入。

2 装配式建筑外墙防渗漏施工关键技术

2.1 设计阶段的防渗漏优化技术

根据装配式建筑外墙的构造特点,设计应遵循“防排结合、多道设防”的原则,形成结构自防水、材料防水、构造防水三重防水体系。结构自防水为基,通过改善预制外墙板混凝土配合比,加入防水剂、减水剂等外加剂,提高混凝土密实度、抗渗等级,使混凝土自身具有防水性;材料防水为主,在拼接缝、门窗洞口等处使用高性能密封材料、止水条等进行防水;构造防水为辅,设置滴水线、企口缝、排水槽等构造,加快雨水排出,缩短雨水在缝隙内停留时间^[1]。

外墙板拼接缝应采用“企口+密封胶+背衬棒+遇水膨胀止水条”的方式,水平缝应设置排水槽和滴水线,形成防水和排水双重保护;门窗洞口应预埋钢副框,钢副框与预制板之间用密封胶密封,内侧用防水砂浆封堵;预留孔洞应预埋套管,套管外侧设止水翼环,孔洞周围用膨胀防水混凝土封堵。设计时还要确定各个节点的防水构造详图,标注材料选择、施工工艺参数等关键信息,比如阳台反坎与外墙板连接节点应采用现浇混凝土与预制板整体浇筑的方式,反坎高度不低于 200 mm,且在接缝处设置遇水膨胀止水条,确保根部防水的连续性;女儿墙与屋面板的连接节点需设置混凝土压顶,压顶内侧向屋面找坡,坡度不小于 2%,压顶与女儿墙之间预留 5 mm 宽缝隙,填入弹性密封胶,并在压顶底部设置滴水线,防止雨水沿女儿墙内侧渗漏。

2.2 预制构件生产阶段的质量控制技术

一是提升构件生产精度。预制外墙板生产要采用高精度的钢模具,模具尺寸偏差不应大于 ± 2 mm,保证构件的平整度和垂直度达到设计要求。模具安装时要严格定位校准,用激光定位仪检测模具的水平度和垂直度,防止模具变形造成构件尺寸偏差。同时,构件的预留凹槽、注浆孔、预埋件等要准确定位,预埋件的固定要牢固可靠,防止生产过程中发生位移^[2]。

二是强化混凝土浇筑与养护质量。预制外墙板应采用高性能防水混凝土,配合比设计要经过试验确定,严格控制水胶比、砂率等参数,添加聚丙烯纤维等抗裂材料,提高混凝土的抗裂、抗渗性能。混凝土浇筑时应用分层振捣,振捣频率和时间要适中,防止漏振或者过振造成蜂窝、麻面等缺陷。构件浇筑完毕后,应采用蒸汽养护或者覆膜养护的方式,养护时间不少于 14 天,保证混凝土强度达标,表面无裂缝。

三是构件出厂前的质量检验。预制外墙板出厂前要进行尺寸偏差检测、外观质量检测、混凝土强度检测等全面的质量检验。存在裂缝、蜂窝、孔洞等缺陷的构件,应做修补处理合格后才能出厂;防水构造部位止水条凹槽、注浆孔等检查尺寸和位置是否符合设计要求,保证现场施工的可操作性。

2.3 现场施工阶段的防渗漏核心技术

2.3.1 预制外墙板吊装与定位技术

预制外墙板吊装前需要对构件的型号、尺寸、质量进行复核,清理构件拼接面的浮尘、油污等杂质,保证拼接面清洁干燥。吊装时使用专用吊具,用激光垂准仪和水准仪进行定位校准,控制构件的安装偏差,竖向缝与水平缝的宽度要一致,偏差不超过 ± 3 mm。构件定位后,用临时支撑固定,支撑数量、位置要符合设计要求,防止构件在连接过程中发生移动。

2.3.2 拼接缝防水施工技术

拼接缝防水施工是外墙防渗漏的关键工序,必须严格按照基层处理、安装背衬棒、设置止水条、嵌填密封胶的流程来操作。第一,基层处理,用高压水枪清理拼接缝内的杂物,待基层干燥后,在密封胶粘结部位涂刷底涂剂,底涂剂应涂刷均匀,不得漏涂,其作用是提高密封胶与混凝土的粘结力。第二,安装背衬棒,背衬棒应选用与拼接缝宽度相适应的聚乙烯泡沫棒,直径比缝宽大 2~3 mm,保证背衬棒能紧密填充缝隙,起到控制密封胶嵌填深度的作用^[3]。第三,设置止水条。在水平缝和竖向缝底部安装遇水膨胀止水条,止水条应连续铺设,不得有断裂,接头处用搭接连接,搭接长度不小于 50 mm。第四,嵌填密封胶。密封胶应选用高模量、耐候性好的硅酮密封胶或聚硫密封胶,嵌填时应使用专用工具将密封胶饱满嵌填到缝隙内,不得有气泡、空洞等缺陷,密封胶表面应平整光滑,与构件表面齐平。施工完成后需要对密封胶进行养护,养护期间不能淋雨、不能受外力撞击。

2.3.3 门窗洞口防水施工技术

门窗洞口防水施工应与门窗安装同步进行。首先,在预制外墙板生产阶段预埋钢副框,钢副框与混凝土

之间用防水砂浆封堵密实。其次,门窗安装时,门窗框与钢副框牢固连接,连接部位用不锈钢螺栓固定。最后,门窗框外侧与钢副框之间嵌填密封胶,内侧设置防水砂浆倒角,门窗洞口上方设置滴水线,下方设置排水孔,形成完整的防水体系。

2.3.4 预留孔洞与预埋件防水施工技术

外墙预留孔洞如空调洞口、套管等,应采用膨胀防水混凝土封堵,封堵前应清除孔洞内的杂物,浇水湿润基层,混凝土浇筑时应分层振捣密实,浇筑完成后进行养护。外墙预埋件如拉结件、装饰挂件等预埋件与混凝土之间缝隙用密封胶嵌填密实,预埋件表面涂刷防锈漆防止锈蚀引起缝隙扩大。

2.4 验收与后期维护阶段的防渗漏保障技术

首先,要严格执行防水工程验收标准。外墙防渗漏工程验收需符合《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014),屋面防渗漏验收遵循《屋面工程质量验收规范》(GB 50207-2012)。检测方法按构件类型执行:外墙采用淋水试验,防水施工完成后用高压水枪持续淋水不少于2小时,检查室内墙面有无渗漏;水平缝等易积水部位采用蓄水试验,蓄水高度不低于20 mm,蓄水时间不少于24小时,无渗漏即为合格,验收合格后方可开展后续装饰装修工序^[4]。其次,建立定期维护机制。建筑投入使用之后,应该创建外墙防水系统定时巡查和保养制度。每年雨季前对外墙密封胶、止水条等防水构件进行检查,对老化开裂的密封胶及时更换,对脱落的止水条进行修补;对有渗漏的部位要分析渗漏原因,采用注浆堵漏、重新嵌填密封胶等针对性的修补措施。同时不能在外墙随意打孔、挂装重物,以免破坏外墙防水构造。

3 装配式建筑外墙防渗漏施工质量管控措施

3.1 建立全过程质量管控体系

装配式建筑外墙防渗漏施工要形成“设计—生产—施工—验收”全过程质量控制体系,确定各个阶段的质量责任主体。设计单位要加强对节点构造设计的合理性审查,出具详细的防水施工图纸;预制构件厂要建立完善的生产质量管理体系,对原材料采购、模具制作、混凝土浇筑等工序进行严格控制;施工单位要编制专项施工方案,对施工人员进行技术交底,保证施工工艺符合设计要求;监理单位要全程跟进施工关键环节,重点核查构件吊装对位精度、拼缝密封材料选型及施工工艺,对防水节点进行旁站监督,同步做好隐蔽工程验收记录,发现质量隐患立即签发整改通知单,督促责任方限期落实整改,确保防渗漏施工质量达标。

3.2 强化防水关键工序过程管控

针对装配式建筑外墙防渗漏的核心工序,需制定精细化操作标准并严格执行过程管控。预制构件进场时,重点核查构件接缝处平整度、预留注浆孔及止水条安装槽的尺寸偏差,确保构件自身质量满足防水施工要求;构件吊装拼接阶段,严控构件对位精度,保证接缝间隙均匀一致,嵌填密封胶前需彻底清理接缝内灰尘、浮渣及积水,确保粘界面干燥洁净,同时控制密封胶嵌填深度与饱满度,避免出现气泡、空洞等缺陷;接缝注浆环节,需按规定配比调制注浆料,控制注浆压力与注浆速度,确保注浆料充分填充接缝缝隙,注浆完成后及时封堵注浆孔并做好养护^[5]。

3.3 引入数字化质量管控技术

利用BIM技术构建装配式建筑外墙数字化模型,实现预制构件生产、运输、安装全过程的可视化管理。依托BIM模型提前模拟构件接缝处防水施工工艺,优化施工流程与操作要点;施工现场通过扫码溯源,快速调取构件生产信息与质量检验报告,实现质量责任可追溯;采用无人机航拍技术对高层建筑外墙进行全覆盖检查,及时识别防水施工中存在的密封胶开裂、注浆孔封堵不严等质量隐患,保障外墙防水施工质量。

4 结束语

装配式建筑外墙防渗漏是一个涉及多环节、多专业的系统性工程,渗漏问题的解决要从设计、生产、施工、维护四个方面入手。采用防排结合、多道设防的设计原则来优化节点构造;提高预制构件生产精度,加强混凝土质量控制;规范现场拼接缝、门窗洞口等关键部位的防水施工工艺;建立全过程质量管控体系和后期维护机制,可以有效形成装配式建筑外墙防渗漏的闭环防线,提升建筑耐久性、使用品质。

参考文献:

- [1] 胡子林,王敏.装配式建筑外墙防渗漏施工技术研究[J].建筑机械化,2024,45(10):99-101.
- [2] 欧振彬,林国文,吴伟志,等.装配式建筑现浇外墙水平施工缝防渗漏技术实践[J].陶瓷,2024(10):176-179.
- [3] 龚成.装配式建筑现浇外墙水平施工缝防渗漏措施[J].产品可靠性报告,2023(07):47-49.
- [4] 张健.装配式建筑外墙水平施工缝防渗漏研究[J].建筑技术开发,2023,50(07):153-155.
- [5] 许月娥.装配式建筑现浇外墙水平施工缝防渗漏技术[J].城市建设理论研究(电子版),2023(19):107-109.

装配式住宅外墙防渗漏性能提升的关键技术研究

唐春鹤, 祝庆文, 冒东升, 李紫明, 危 博

(南京奥体建设开发有限责任公司, 江苏 南京 210046)

摘 要 本文针对装配式住宅外墙渗漏问题、核心渗漏部位难治理的行业难点, 以某个装配式住宅项目为例, 系统研究外墙防渗漏关键技术。通过构建“节点深化设计+材料适配升级+精细化施工+全过程监测”四维技术体系, 并采用 BIM 优化节点、试选新型密封材料、灌浆工艺优化等关键技术, 最终将装配式住宅外墙渗漏率降到 1.7%, 防水验收一次合格率达到 98.3%。该技术可以复制运用到类似的项目中, 为装配式住宅外墙防渗漏质量提升提供技术参考。

关键词 装配式住宅; 外墙; 防渗漏; 密封材料; 灌浆工艺

中图分类号: TU741

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.015

0 引言

随着《装配式混凝土建筑技术标准》(GB/T 51231-2016)^[1] 等国家标准的颁布实施, 新建装配式建筑越来越多。实际施工中构件的拼接缝多, 施工工艺复杂, 并且界面处理要求高, 使外墙渗漏成为此类装配式住宅项目的主要问题。

现有的装配式住宅外墙防渗漏技术存在三个明显的短板: 一是节点的设计缺乏针对性措施, 拼接缝、转角处等一些核心的渗漏部位构造设置不合理, 容易导致防水失效; 二是材料适配性比较差, 采用的传统密封胶、灌浆料与预制构件界面粘结的强度不足, 容易出现开裂; 三是施工管控粗放, 仅依赖人工操作, 缺乏过程中的一些监测手段, 渗漏隐患难以被及时地发现。例如: 从某地块 C、D 住宅项目试验实测的数据可以看出, 传统工艺下外墙的渗漏率达到了 12.8%, 其中构件拼接缝的渗漏占到了 76%、螺杆洞渗漏占到了 16%, 将直接影响项目整体的交付与公司品牌口碑。基于此, 本文聚焦核心的渗漏部位, 研究针对性的关键技术, 主要创新点在构建多个维度的防渗漏关键技术体系, 实现全链条的闭环管控; 基于 BIM 技术对核心渗漏节点构造的优化措施, 解决传统的设计与施工脱节以及节点渗漏问题; 整合了新型的材料, 采用精细化的施工工艺, 提升界面粘结的耐久性; 引入过程监测技术, 实现对渗漏隐患进行提前预警的目的。

1 装配式住宅外墙渗漏现状与症结分析

以某地块 C、D 住宅项目作为研究对象, 其位于南京市南部新城, 总建筑面积 10.94 万 m², 装配率超过 50%, 项目预制构件有剪力墙、楼梯、叠合板、外围护墙等, 其中尤以预制外围护墙数量最多, 整个项目总计约 4 944 块, 相应的接缝节点、螺杆洞数量也较多。项目初期采用传统施工工艺, 施工完成后经淋水试验检测, 外墙渗漏率达 12.8%, 不符合项目要求的“渗漏率 ≤ 5%”的质量目标。

通过对现场检测与数据的统计(见表 1), 以及对核心渗漏问题进行分析, 明确出三个核心渗漏部位及主要问题。

2 技术背景分析

预制构件与现浇主体结构连接节点不可靠, 容易导致预制构件的拼接缝密封效果较差。而传统的装配式住宅外墙的防渗漏措施一般采用灌浆接缝加外设防水或者明设缝打胶等方式, 其构造简单、长期使用容易出现老化开裂。传统施工管理模式依赖人力相对落后, 各专业间施工缺乏协作, 工序交接不到位, 容易导致防水构造遭到破坏, 并且过程渗漏隐患排查不及时。

针对以上传统施工技术问题, 建立了节点深化设计、材料适配升级、精细化施工和全过程监测的整体

作者简介: 唐春鹤(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程管理。

表1 渗漏水问题统计分析表

渗漏水部位	占比	主要问题
PC 构件拼接缝	58%	1. 节点设计未考虑温度引起的变形，密封材料本身的拉伸变形性能不足 2. 拼接缝清理不干净，界面有浮灰和油污等 3. 密封材料的施工厚度不均匀（偏差 ± 2 mm）
螺杆洞封堵处	22%	1. 封堵材料选用不当（如普通水泥砂浆），导致收缩开裂 2. 采用的封堵工艺不规范，未按照工序逐步落实
墙板转角处	15%	1. 转角处没有加强构造，应力集中导致开裂 2. 现浇混凝土与预制墙板的结合面不密实
其他部位	5%	现浇结构或者 PC 墙板本身渗漏水较少，局部微裂缝

技术体系：一是优化节点深化设计方案，优化不同节点的密封构造使得节点更加可靠；二是改进材料，对密封、封堵和界面材料进行适配和升级，提升节点密封和防渗漏性能；三是精细化的施工控制技术，对整个工艺流程进行优化提升；四是整个过程的渗漏检测，实现施工过程中的渗漏监测。

3 装配式住宅外墙防渗漏性能提升的关键技术

3.1 节点深化设计优化技术

首先采用 BIM 技术进行渗漏节点优化，重点对拼接缝、转角处、螺杆洞这三个核心部位进行优化设计。根据项目图纸建立外墙的模型，由于本项目预制外墙全部为非标构件，为此仅对部分典型墙体做建模优化分析^[2]。主要部位和节点的优化如下：

1. 拼接缝节点优化：采用双道密封并增加排水路径的构造形式^[3]，外侧设置宽度 15 cm 的反坎构造，深化预制构件钢模，接缝处增加外侧 10 cm 企口。同时内外侧采用新型改性硅烷密封胶，中间填充聚乙烯泡沫棒，直径比缝宽大 20% 后压入，解决密封胶长期受拉容易失效问题。

2. 转角处节点优化（见图 1）：原设计转角节点采用预制构件预留键槽硬拼并进行灌缝处理，但实际缝隙小，难以确保灌满密实，优化后在缩短墙板长度的基础上保留键槽，将缩短预制墙体部分采用增设现浇混凝土构造柱（截面 200×200 mm）形式，采用压槽 + 现浇的相结合的新连接方式，提升预制外墙转角处的整体性和抗渗性。

3. 螺杆洞节点优化：优化设计为“三段式封堵”的新构造，其螺杆洞内侧采用聚合物水泥砂浆，中间填充发泡聚氨酯^[4]，同时，最外侧封堵同样采用三段式的封堵——橡皮塞 + 防水砂浆 + 1.5 厚聚氨酯，大大降低了渗漏概率。

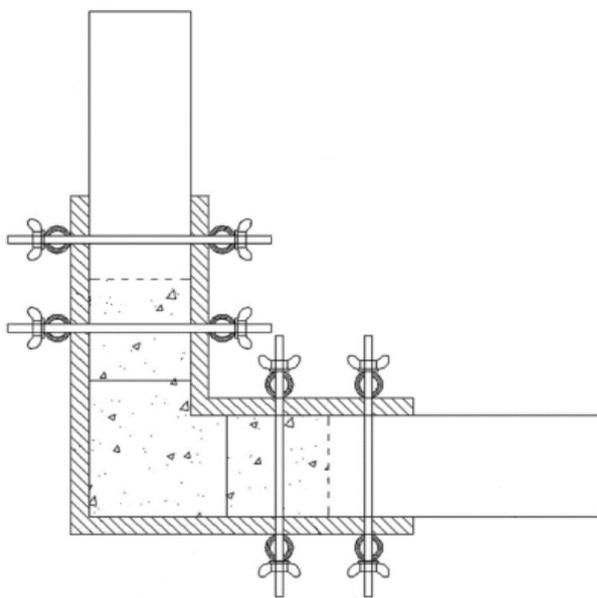


图1 PC 外墙转角优化图

3.2 材料适配与升级技术

对于材料的适配性问题和对环境的耐久性问题，运用材料适配和升级技术。

1. 密封材料选型，挑选采用新型的改性硅烷密封胶^[5]，要求其性能满足拉伸粘结强度大于 1.5 MPa，断裂伸长率大于 500%，耐紫外线的老化性能达 1 000 h 无开裂，做相应型式检验报告，以确保其满足装配式外墙长时间的温度变形。

2. 封堵材料的升级，螺杆洞的封堵优先采用聚合物水泥灌浆料，要求其抗压强度大于 40 MPa，抗渗等级满足 P8。替代常规使用的水泥砂浆，解决封堵处收缩开裂的问题。

3. 界面处理，对预制墙板拼接面、螺杆洞内壁涂刷专用界面处理剂，提升材料粘结强度，使其满足大于 2.0 MPa 的要求，阻断水的渗透路径。

3.3 精细化施工控制技术

对施工关键工序进行控制, 主要从拼接缝施工、螺杆洞封堵和转角处施工三个关键工艺进行工序控制, 力求精细化管控。

1. 拼接缝施工工艺: (1) 清理: 采用高压水枪和钢丝刷来对拼接缝清理, 确保没有油污、杂物等, 将含水率控制在 10% 以下; (2) 打底: 先涂刷基层处理剂, 保持晾干时间大于 4 h; (3) 填缝: 填入聚乙烯泡沫棒, 确保饱满, 多打后手动压入; (4) 打胶: 采用专用的打胶枪, 匀速施打密封胶, 厚度尽量控制在 8~12 mm, 偏差控制在 ± 1 mm, 打注后用专用工具进行压平, 确保与构件表面贴合; (5) 养护: 密封胶施工后 24 h 内采取防淋雨和碰撞措施。

2. 螺杆洞封堵工艺: (1) 钻孔清理: 先采用合适孔径电钻清理螺杆洞内壁, 去除掉浮浆和杂物等; (2) 涂刷界面剂: 将符合要求的专用界面处理剂均匀涂刷在孔内, 晾干 2 h; (3) 分层封堵: 第一层先填充聚合物水泥灌浆料, 厚度大约 1/3 洞深, 压实后养护 24 h; 第二层填充发泡聚氨酯, 厚度也大约 1/3 洞深; 第三层外侧用橡胶塞敲入, 采用防水砂浆压实抹平, 最后用聚氨酯做成半径 5 cm 圆饼。

3. 转角处施工工艺: (1) 预制墙板安装: 转角处墙板拼缝采用“企口搭接”, 搭接长度 10 cm, 安装垂直度偏差要求小于 3 mm; (2) 钢筋绑扎: 绑扎构造柱钢筋与墙板预留钢筋连接; (3) 混凝土浇筑: 采用自密实混凝土, 提高标号并采用抗渗混凝土, 将坍落度控制在 220 mm 左右, 振捣密实, 养护后拆模淋水。

3.4 全过程渗漏监测技术

进行全过程监测, 首先进行灌浆饱满度监测, 在拼接缝、转角处施工时监测混凝土和灌浆料用量, 根据计算用量确保足额实用, 当使用量较少时进行反馈。其次是施工过程巡检, 对关键工序密封胶打注、封堵施工等实行“三检制”, 全过程留存影像资料。最后是完工检测: 一是采用淋水试验, 采用喷壶对墙面进行逐块淋水 30 min, 检查无渗漏则为合格; 二是红外热成像从外侧检测, 使用红外热成像仪扫描墙面, 识别隐藏渗漏隐患。

4 装配式住宅外墙防渗漏性能提升的关键技术应用效果验证

装配式住宅外墙防渗漏性能提升的关键技术的应用在质量效果上, 经实际项目检测渗漏率从优化前的 12.8% 降到了 1.7%, 远低于行业的平均水平 8%。在耐

久性方面, 其经过 12 个月的自然环境暴露, 整体密封胶未出现开裂、脱落现象, 拼接缝无渗漏; 淋水试验重复进行了 3 次, 都没有出现渗漏现象。在经济效益方面, 其后期维修成本实际得到了大幅降低。在社会效益方面, 项目获评了“江苏省新技术应用示范工程”, 且该防渗漏技术被纳入了企业标准, 该技术也已在公司的江尚紫薇、源尚丹若等同类项目中得到推广应用, 渗漏率控制在 2% 以内, 获得业主与行业的认可, 减少了渗漏投诉, 提升了装配式建筑在市场中的认可度。

5 结论

本文针对装配式住宅外墙渗漏问题展开研究, 对“节点深化设计+材料适配升级+精细化施工+全过程监测”的四维防渗漏关键技术体系进行了研究和论证, 得出了如下结论: (1) 核心渗漏部位(拼接缝、螺杆洞、转角处)的节点构造优化是防渗漏关键, 其关键节点的优化使得项目抗渗性能得到大幅提升; (2) 采用高性能改性硅烷密封胶、聚合物水泥灌浆料等专用材料能显著提升界面的粘结强度与使用耐久性, 并解决传统材料适配性差的问题; (3) 精细化的施工工艺可有效地避免人为操作失误和工序穿插导致的渗漏隐患; (4) 运用全过程监测技术, 如用量监测、三检制和红外检测等技术, 可实现渗漏隐患的早发现和早处理, 降低后期维修成本。

本文研究的关键技术具有较强的可操作性, 形成了一整套标准化的设计流程、施工工艺与检测的方法, 可为其他各类装配式住宅项目提供参考。实际应用结果表明, 该技术能够将外墙渗漏率控制在 2% 左右, 防水验收的一次合格率提升至 98% 以上, 能显著降低后期维修成本, 为装配式建筑质量提升提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准 (GB/T 51231-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 王建国. BIM 技术在装配式建筑施工协同管理中的应用 [J]. 施工技术, 2025, 54(03): 89-93.
- [3] 张磊, 刘芳, 陈明. 装配式混凝土外墙拼接缝多道密封防水构造优化研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38(07): 121-126.
- [4] 赵伟, 王丽娜, 吴涛. 装配式住宅螺杆洞分层封堵材料性能及施工工艺研究 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50(04): 98-102.
- [5] 陈曦, 马明, 刘刚. 改性硅烷密封胶在装配式外墙中的耐久性试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2024, 27(02): 189-194.

大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法分析

薄幕长

(中交二公局第五工程有限公司, 陕西 西安 710119)

摘要 大体积混凝土在浇筑和早期硬化过程中, 水化热迅速累积、散热速度受结构体积限制而滞后, 极易形成内外温差超过材料允许拉应力的情况, 导致早期温裂、后期收缩裂缝及渗水、耐久性衰减等问题。基于此, 本文围绕温控措施与裂缝治理技术展开分析, 从原材料配合比优化、分层分段浇筑、预埋冷却水管、设置伸缩缝、表面保温养护及裂缝修复等方面探讨温控抗裂策略, 旨在为提升大体积混凝土施工质量提供参考。

关键词 大体积混凝土; 温控技术; 裂缝控制

中图分类号: TU755.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.016

0 引言

随着基础设施建设规模不断扩大, 大体积混凝土在桥梁承台、深基坑底板、跨河基础等领域广泛应用, 但其固有缺陷同样突出, 水化热集中释放、散热过程迟滞、温度应力难以自然释放, 一旦温差控制不当即会产生贯穿裂缝, 成为影响工程结构安全的关键隐患。因此, 系统性温控与防裂设计成为大体积混凝土施工管理的核心内容。传统温控依赖保温与延迟卸模, 然而在体量更大、环境波动更强的工程中, 该方法已无法完全满足应力释放节奏。基于此, 从配合比、分块浇筑、冷却系统与应力调控等角度入手, 梳理可操作、可量化的全过程控温技术, 同时补充裂缝发生后的分级修复方案, 可为大体积混凝土工程提供参考。

1 工程概况

本标段为 G309—S101 连接线工程二标, 由济南城鲁建设工程有限公司负责建设, 设计单位为上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 监理由北京铁城建设监理有限责任公司承担, 施工由中交二公局第五工程有限公司实施。工程起点位于美里北路交叉口以北, 路线跨越黄河后接入国道 G309, 路线全长 3 070.18 m, 跨越段所处河道南北大堤距离约 0.8 km, 桥位与京沪高铁桥间距约 1.2 km, 与建邦黄河大桥约 3.1 km, 整体与河道走向基本正交, 施工环境具有较强水力与通航适应要求。在结构方面, 主桥采用网状系杆拱跨结构, 跨径布置为 (95+280)+420+(280+95)=1 170 m, 为整幅形式, 兼具造型与受力优势; 北岸引桥及匝道按预应力现浇连续梁设计, 南岸引桥采用预制小箱梁。

2 大体积混凝土温控技术

2.1 优化原材料配合比设计

在本项目中, 选用 P·II 42.5 水泥作为基础胶凝材料, 其 3 d 抗压强度可达 27 MPa, 28 d 强度提升至 49 MPa, 从而为结构提供稳定的强度发展曲线^[1]。在确保结构承载性能的同时, 可降低水泥熟料比例来减弱放热峰值, 因此需加入 20% 矿渣微粉与 10% 粉煤灰, 在改善浆体致密性的同时降低绝热温升。粗细骨料采用 5~20 mm 连续级配碎石及细度模数 2.8 河砂, 使拌和物内部空隙率下降、导热能力增强, 以促进内部热量均匀扩散, 使整体密度处于可控区间。外加剂体系采用聚羧酸高性能减水剂, 减水率可达 25%, 既降低用水量, 又提升流动性; 同步引入葡萄糖酸钠延缓凝结, 使初凝推迟至 8 h, 为持续散热、分层浇筑创造时间窗口。此外, 对混凝土配合比进行确定: 矿渣微粉 0.4、粉煤灰 0.2、砂 2.2、碎石 3.6、水 0.45、外加剂 0.01, 从而在保证强度与耐久性的同时抑制水化热上升, 降低温度梯度, 为后续温控线路布设奠定基础。

2.2 分层分段浇筑

本工程现场气候、水位变化与地质条件均较复杂, 故采用 Leica Disto X4 激光测距仪进行前期测量, 将整个浇筑体分隔为 10 层, 每层厚度控制在 1.5 ± 0.1 m, 使散热过程逐级释放, 内部热量不致持续堆积, 从源头上缓解温度峰值。为进一步提升施工节奏可控性, 每层再依据 Trimble S9 全站仪测绘网格划分浇筑区块, 单段长度设定在 15~20 m 之间, 累计分为约 100 段, 使工序灵活拆分, 单次浇筑持续时间明显缩短, 以降低水

作者简介: 薄幕长(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 混凝土工程。

泥水化放热集中造成的温度应力、干缩开裂等风险。在施工过程中,采用 Schwing S58X 输送泵连续供料,使混凝土以 60 m³/h 的稳定流量进入作业面,避免断料或停机导致层间冷接;同时使用 Wacker Neuson IRFU 80 插入式振动器进行振捣,频率控制在 9 000 次/min,单点振捣时间 20~30 s,确保浆体均匀包裹骨料并排除多余气泡,从而提升密实度^[2]。为确保每一层、每一段浇筑过程均处于监控范围内,现场布设 GeoSIG SMC 位移传感器 50 个及 Vishay EPS-100 应变计 50 个,监测点以 5 m 为间距布网,实现应力变化与形变动态采集,并将数据实时传输至监控端,为后续施工提供依据。

2.3 预埋冷却水管

本工程在浇筑同步预埋冷却水管,使内部温度释放呈可控状态。冷却管采用 DN50、壁厚 4 mm 的 20# 无缝钢管,按 1.2 m×1.2 m 矩形网格布置,使冷水循环路径均匀覆盖核心区,避免局部过热。系统外接威乐 PH-123E 冷却装置,基础流量为 12 m³/h、扬程 40 m,可维持稳定输水压力。运行流程为冷水经进水管入过滤箱,杂质去除后进入循环水槽,在混凝土内部吸热升温,再由出水管回至水箱完成沉淀与热交换,随后重新回流至水槽降温,实现闭式循环^[3]。控温过程中布置 Pt100 热电阻传感器实时监测核心温度,每 1.5 h 记录一次并生成变化曲线。当温度接近 65 °C 控制值时,系统即将流量提升至 15 m³/h,以加速内部热量带出,防止温升突破应力阈值。

2.4 应用温控设备

2.4.1 循环冷却系统主动控温

在本工程的大体积混凝土施工中,循环冷却系统作为核心温控设备,用于对混凝土内部水化热进行主动调节。由于中墩承台厚度达到 5 m,单个承台混凝土方量为 3 712 m³,且单次浇筑最大方量可达 3 860 m³,混凝土内部热量集中释放明显,若仅依靠自然散热,极易造成内部温升过快并形成较大的温度梯度。基于上述特点,施工过程中在混凝土浇筑完成后及时启动循环冷却系统,通过预埋冷却水管在结构内部形成稳定的散热通道,使混凝土水化热释放过程始终处于可控状态。冷却水管按结构高度分层布设,中墩基础设置 7 层,次中墩基础设置 5 层,边墩基础设置 4 层,上下层及同层冷却水管间距均控制为 1 000 mm,距混凝土表面控制在 500 mm 以内,从空间布置上保证冷却作用覆盖混凝土核心区域。为确保系统运行稳定,每根冷却水管的连接总长度控制在 200 m 以内,避免因管路过长导致循环阻力增大、换热效率下降。通过持续循

环冷却,混凝土内部最高温度被控制在 75 °C 以内,实际温升控制在入模温度基础上不大于 50 °C,从而缓解大体积混凝土早期因水化热集中引起的温度应力问题。

2.4.2 温度监测设备动态调控

在循环冷却系统运行的同时,温度监测设备在大体积混凝土温控过程中发挥着关键的调控支撑作用。施工现场通过温度巡检仪和热敏电阻传感器,对混凝土内部不同深度位置、距混凝土表面 50 mm 处以及冷却水进出水温度进行连续监测,温度采集精度可达 0.1 °C,能够较为准确地反映混凝土内部温度场变化情况。监测点布置以结构对称性和温度场分布特征为依据,在混凝土几何中心附近布设内部测点,以及温度梯度变化较为明显的表层区域适当加密测点,确保监测数据具有代表性。根据对水化热发展规律的分析,混凝土浇筑完成后约 70 h 为水化热集中释放阶段,因此在该阶段内监测频率控制为每 1 h 采集一次,以便及时掌握温升趋势;当混凝土温度达到峰值并进入降温阶段后,监测频率调整为每 2 h 一次,使温度变化过程保持平稳。当混凝土中心温度与外界温差稳定小于 25 °C 后,再逐步降低监测和冷却强度。通过持续监测与数据反馈,施工人员根据温度变化情况及时调整冷却设备运行状态,使降温过程更加均匀可控,从而降低大体积混凝土早期温度裂缝的发生风险。

3 大体积混凝土裂缝控制方法

3.1 设置伸缩缝

本工程根据混凝土构件尺寸、形状及内部温度场的分布特点,依托 ANSYS 有限元分析软件开展模拟试验,通过改变伸缩缝间距对受力与变形影响进行多轮运算,最终筛选出应力分布更为合理的间距范围。模拟建模中,伸缩缝接触行为采用 CONTAC174 与 TARGE170 单元定义,以法向接触刚度、切向摩擦系数为变量,重现伸缩缝处混凝土在温度梯度与干湿循环作用下的受力特征。法向接触刚度采用公式(1)进行评价:

$$K_n = \frac{E_c A_c}{L_s} (1 + \alpha \Delta T) (1 + \beta \frac{\Delta \omega}{\omega_0}) (1 + \gamma \frac{\sigma_t}{\sigma_0}) \quad (1)$$

式(1)中, E_c 为弹性模量, A_c 为混凝土截面积, L_s 为伸缩缝间距, α 为温度膨胀系数, ΔT 表示温度变化值, β 表示混凝土干缩的影响系数, $\Delta \omega$ 表示混凝土干燥过程的水分变化量, ω_0 表示混凝土初始含水量, γ 表示混凝土应力影响系数, σ_t 表示混凝土实际承受应力, σ_0 表示混凝土初始应力。通过多次计算结果显示,当伸缩缝间距控制在 20~25 m 时,结构内部温度应力分布较为均匀,可削弱温度梯度带来的收缩变形影响,降低混凝土早期开裂概率^[4]。在切缝时间安排上,

选择混凝土浇筑完成后3~5 d实施伸缩缝切割,此时材料强度一般达到设计值30%~50%,既能确保切缝过程顺利,不致崩边断裂,又可避免强度高导致切缝失去应力释放效果。

3.2 加强表面保温养护

本工程在混凝土收面完成后的第一时间实施表面保温养护,使降温过程缓和、湿度持续可控。具体做法为:先覆盖厚度0.6~0.9 mm的针刺无纺土工布,使其迅速吸收表面自由水,减少初始蒸发并减缓热量散失;待表层收浆稳定后再铺设0.1 mm塑料薄膜形成阻水隔层,使混凝土表面始终处在高湿环境下,避免失水干缩引发早期拉应力。随后再加设同规格土工布作为第三层包覆材料,使保温与保湿形成叠层效应,进一步延长水化热向环境扩散的时间,提高表面温度变化的稳定性。在整个养护周期内安排专人巡查,每4 h检查土工布与薄膜的紧贴度及完整性,破损处立即使用同材质材料修复^[5]。土工布裂口可采用缝合机处理,塑料薄膜则通过热合机焊补,以保证整体覆盖连续无缺口,不为水分蒸发或冷空气侵入提供通道。同时,在表面布设温湿度记录仪,持续监控温度与RH变化,使表面温度与内部温度差稳定在25℃以内,相对湿度保持90%以上,并控制养护期限不少于14 d,让混凝土在低温差、低干缩的环境下完成硬化。

3.3 做好裂缝修复

在本工程中,对于宽度小于0.2 mm的微细表裂,采用表面封闭法作为第一道修复措施。施工时先以钢丝刷清理裂纹部位,去除浮浆与灰尘后再以丙酮或酒精擦洗,使表面完全干净,并确保孔隙无油污残留,随后在裂缝处均匀涂刷环氧胶泥或聚合物砂浆,涂层控制在1~2 mm,使细微裂隙被整体封堵,阻断水分及氯离子侵入路径,从而实现表面抗渗密封与耐久性修补的双重效果。若裂缝宽度扩展至0.2~0.5 mm,并具备一定深度时,需采用压力灌浆法使修补材料深入结构内部。其施工流程为:在裂缝两侧每隔10~15 cm钻孔,孔深约为构件厚度的1/3~1/2,并在孔口布置灌浆嘴后以环氧胶泥封闭裂缝表层,使注浆压力集中向裂缝内部传递。实际灌注过程中将压力控制在0.2~0.4 MPa,注入环氧树脂并持续观察浆液流动情况,直至浆体沿裂缝连续外溢,视为填充饱满,即可封闭注浆口并养护固化,通过内灌方式使裂缝得到深层粘结,恢复整体性。当裂缝宽度超过0.5 mm,或裂纹穿透构件、对承载能力产生影响时,需在灌浆基础上增加外贴加固措施,以提升抗拉抗弯能力。

3.4 接缝处理

本工程在仓块接缝位置采用企口嵌接方式,使新旧混凝土形成机械咬合,提高剪力传递效率。在先浇仓块成型后,于侧壁预留深150 mm、宽100 mm凹槽,后浇段混凝土填入后可自然嵌锁,从几何构造上避免接缝滑移。同时,缝区钢筋在浇筑前预留搭接,并在计算搭接长度基础上额外提高20%,以补偿由缝体削弱导致的承载影响,使跨缝受力保持连续。为增强后浇料与基底间的界面咬合性能,施工前对凹槽表面进行凿毛处理并清洗干净,再涂刷界面剂,使水泥浆液渗入毛糙表层,建立可靠粘结桥^[6]。在正式浇筑前,于企口槽内铺设与主体混凝土相同配合比但减石子处理的砂浆过渡层,厚度控制于30~50 mm,有助于填平细微段差并提升界面密实度。后浇混凝土灌注时加强振捣,使浆体能充分进入凹槽底角与钢筋周围空隙,避免形成隐性夹层。接缝施工完成后进入养护阶段,通过覆盖薄膜并连续湿养7 d,使水化反应稳定推进,最终使接缝与整体结构形成均匀连续体。对于接缝防水,本工程采用复合防渗体系:在凹槽内侧预埋止水钢板以切断潜在渗流路径,在外侧完成后再涂刷聚合物水泥基防水涂料作为二次屏障,提高防渗效果。

4 结束语

通过对大体积混凝土温控与抗裂技术的系统研究可知,温度控制应是跨越设计、施工与后期维护的全过程工程。各技术环节相辅相成,使混凝土在强度增长与体积稳定中取得平衡,从而实现长期使用状态下的结构安全性与耐久性。未来,对于大体积混凝土施工中的温控调节,施工单位可进一步与智能监测、数据驱动算法联动,以实现大体积混凝土温度及裂缝的智能化控制,从而为更大体量、更复杂环境下的混凝土施工提供参考。

参考文献:

- [1] 肖洪. 大体积混凝土施工中温控与裂缝控制一体化技术研究[J]. 水泥, 2025(12):83-85.
- [2] 张志光. 大体积混凝土温控技术及裂缝控制方法研究[J]. 水泥, 2025(10):104-106.
- [3] 苗田, 唐靖武. 大体积混凝土温度裂缝控制及温控效果有限元分析[J]. 四川水泥, 2024(01):189-191.
- [4] 王珏, 刘利军, 郑楠, 等. 大体积混凝土温控技术措施分析[J]. 中国建材科技, 2022, 31(01):44-46.
- [5] 林茂. 大体积混凝土智能温控技术探讨[J]. 福建交通科技, 2021(05):57-60, 117.
- [6] 陈逸群, 房霆宸, 朱敏涛, 等. 徐家汇中心大体积混凝土温控技术研究[J]. 科技视界, 2021(07):11-14.

水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨

赵 云¹, 刘 洋², 郑昆冈³

(1. 青岛市水利勘测设计研究院有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 山东省水网运行调度中心, 山东 济南 250100;

3. 山东省调水工程运行维护中心青岛分中心, 山东 青岛 266000)

摘 要 混凝土裂缝是水利工程施工中主要的质量问题, 直接影响水利工程结构稳定性以及使用年限。本文从混凝土裂缝形成的主要影响因素入手, 对水利工程施工全过程的防治技术体系进行系统的分析, 包括材料优化、工艺控制、环境适应等预防措施, 以及表面封闭、注浆封堵、结构补强等治理技术, 结合水利工程高水头、大温差、强侵蚀的环境特点, 提出预防为主、治理为辅、全程管控的技术路径, 以期为提高水利工程混凝土结构抗裂性能提供实践参考。

关键词 水利工程; 混凝土裂缝; 表面封闭; 注浆封堵; 结构补强

中图分类号: TV544

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.017

0 引言

水利工程是国民经济的重要基础设施, 其混凝土结构长久以来要面对水流冲刷、温度变化、地基沉降等复杂的影响, 产生裂缝后容易造成渗漏、结构强度下降等连锁反应, 严重时会对工程的安全运行造成威胁。混凝土裂缝的产生是材料特性、施工工艺、环境因素三者共同作用的结果, 水利工程施工场景的特殊性又加大了裂缝防控的难度。基于此, 探究水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术具有现实意义。

1 水利工程施工中混凝土裂缝的防治理论基础

1.1 裂缝形成的核心力学机制

混凝土在凝结硬化和使用初期由于水化热释放、体积收缩等原因产生内应力, 当内应力超过材料的抗拉强度时就会产生裂缝, 水利工程中地基约束、环境温湿度剧变等因素会进一步增大这一效应。材料内部孔隙结构、骨料与胶凝材料的界面结合状态影响应力传递效率, 施工过程中振捣不均、养护不当等操作会加大内部缺陷, 给裂缝萌生提供条件^[1]。

1.2 水利工程的特殊影响因素

水利工程混凝土结构大多处在水下、地下或者露天环境之中, 会遭遇高压水渗透、冻融循环、干湿交替等严酷的工况, 这些状况同施工过程相互叠加, 加大了裂缝防控的难度。大体积混凝土浇筑时产生的温度应力、高空作业导致的浇筑连续性问题、水下施

工时密实度控制的难题等都是造成裂缝的特殊原因, 需要防治技术适应水利工程的施工环境与结构特点, 达到技术措施和工程场景精准匹配的目的。

1.3 防治技术的核心原则

水利工程混凝土裂缝防治要遵循源头控制、过程调节、精准治理的基本原则, 把技术干预贯穿到施工全过程。源头控制以材料性能优化为主, 通过科学配比降低混凝土收缩性、水化热; 过程调节以施工工艺精细化控制为主, 减少人为操作造成的结构缺陷; 精准治理根据裂缝类型、规模、所处环境选择合适的治理技术, 避免过度治理或者治理不足。

2 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术

2.1 材料优化与配合比设计

混凝土材料性能是抗裂能力的基础, 施工前要根据水利工程的使用要求做针对性的优化。采用低热型胶凝材料, 复合矿物掺合料, 降低水化热峰值和速率, 改善混凝土内部孔隙结构, 提高界面粘结强度; 优化骨料级配, 选用质地坚硬、级配连续的骨料, 减少空隙率, 增强骨架支撑作用; 合理掺加复合型外加剂, 通过缓凝、引气、减水等协同作用, 调节混凝土工作性及体积稳定性, 防止早期塑性收缩裂缝和后期干燥收缩裂缝。

2.2 施工工艺的精细化管控

施工过程是裂缝预防的重要环节, 要根据水利工程不同的施工场景制定专项控制措施。大体积混凝土

作者简介: 赵云 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水工建筑物结构设计及水利工程施工技术。

浇筑采用分层分块施工法,控制浇筑层厚度和间歇时间,配合预埋冷却水管、布设保温层等温控措施,平衡内外温差和温度梯度;浇筑过程中使用高频振捣设备保证密实度,防止漏振、过振造成内部缺陷,控制浇筑速度,减少混凝土堆积产生的附加应力;模板工程需注意支护刚度和拆除时机,避免过早拆模造成结构变形开裂,水下浇筑时采用导管法保证混凝土浇筑质量,防止离析、泌水形成薄弱层面^[2]。

2.3 施工环境的适应性调控

水利工程施工环境复杂多变,根据气候、地质状况实时调整防控手段。高温季节施工时采用骨料预冷、搭设遮阳棚、夜间浇筑等方法降低混凝土入仓温度,加强表面保湿养护,延缓水分蒸发速率;寒冷地区施工要做好保温防冻措施,选用早强型混凝土并掺入防冻剂,浇筑后及时覆盖保温材料,防止冻融循环对未硬化混凝土的破坏;雨季施工重点控制骨料含水率,及时调整配合比,浇筑后做好防雨遮盖,防止雨水冲刷造成表面起砂开裂;对于地基不均匀地段,施工前进行地基处理,采用换填、夯实等方法提高地基承载力的均匀性,减少沉降引起的结构裂缝。

3 水利工程施工中混凝土裂缝的治理技术

3.1 表面封闭技术的应用

宽度小于0.2 mm、深度较小、位于表面的裂缝,用表面封闭法来防止裂缝继续延伸。封闭材料的选择要严格遵循环境适配原则:干燥环境中环氧树脂类封闭胶因粘性好、耐候性佳成为首选;潮湿环境中水固化型聚合物材料能在有水存在的情况下发生交联反应,形成致密防水层;水下裂缝处理要使用水下固化树脂或聚合物水泥浆,这些材料可以在水下快速凝固并与混凝土表面形成化学锚栓效应。

施工时基层处理为保证封闭效果。使用高压空气枪、钢丝刷等工具将裂缝表面的浮浆、油污、松散颗粒彻底清除,干燥环境要将基层含水率控制在6%以下,水下施工要利用水下机器人或潜水员配合,用高压水枪完成表面清理。封闭材料涂抹分多层次进行,首层用稀释过的材料渗透裂缝毛细孔,涂层厚度控制在0.5 mm到1 mm之间。

3.2 注浆封堵技术的实施

贯穿性裂缝、深层裂缝和有防渗要求的裂缝都会对结构完整性造成严重破坏,注浆封堵技术通过填充裂缝内部空隙来恢复结构的力学性能。注浆材料的选择要兼顾渗透能力与粘结强度,高渗透环氧树脂灌浆料

适合于细微裂缝(宽度 ≥ 0.1 mm),其粘度低至50~150 MPa·s,可以渗透到裂缝的深处,改性水泥浆因为成本低、耐久性好,常被用来处理宽度较大的裂缝(≥ 0.5 mm)。水免型注浆材料可以抵抗水流冲刷,在动态水环境中快速固化。

施工前要利用超声波检测仪、探地雷达等设备对裂缝进行三维定位,准确测定裂缝走向、深度和宽度分布。注浆孔布置采用“梅花形交错、间距合理”的原则,孔距一般为20~30 cm,孔径比注浆管外径大2~3 mm。采用电动高压注浆泵进行作业,注浆压力根据裂缝深度和材料特性动态调整,浅层裂缝控制在0.2~0.5 MPa,深层裂缝提高到1~2 MPa。注浆顺序按照“由浅入深、由低到高、间隔跳注”的原则,防止产生气腔。

3.3 结构补强技术的应用

当裂缝造成结构承载能力下降或者存在失稳风险的时候,需要把注浆封堵和结构加固技术结合起来,形成修复加固一体化解决方案。在水利工程中,由于碳纤维布的强度高、耐腐蚀性好,所以它经常用于粘贴加固技术。施工时先用环氧砂浆对混凝土表面凹凸处进行找平,误差控制在2 mm以内,涂刷底胶形成过渡层后,将碳纤维布浸渍配套树脂,沿主应力方向粘贴,用滚筒反复滚压排出气泡,保证粘贴密实度 $\geq 95\%$ 。

采用钢板加固的外包加固技术,适用于大跨度水工结构、闸墩等重要部位。在钢板和混凝土界面处填充高强度结构胶(剪切强度 ≥ 15 MPa),利用化学粘结和M12-M16膨胀螺栓的机械锚固双重作用来形成复合受力体系。对裂缝集中处增设加劲肋提高钢板刚度,螺栓间距控制在20 cm到30 cm之间,保证钢板与混凝土共同工作^[3]。

4 水利工程混凝土裂缝防治的综合保障体系

4.1 技术标准与质量管控

建立适应水利工程特点的混凝土裂缝防治技术标准体系,要深入结合现行的水工混凝土施工规范、混凝土结构耐久性设计标准等行业的规范,同时要融入工程实践中的创新经验。明确材料选型要求,细化不同强度等级、抗渗等级混凝土的原材料技术指标,水泥品种(优先选用水化热低的矿渣硅酸盐水泥)、骨料级配标准、外加剂掺量控制范围;规范施工工艺细节,涵盖混凝土搅拌时间、运输温度控制、浇筑分层厚度、振捣密实度标准等关键参数;针对不同类型的裂缝(塑性裂缝、温度裂缝、干缩裂缝等),制定对应的治理措施技术规程。

施工前组织专家小组和技术骨干编制专项防治方案,根据工程规模(大、中、小型水利工程)、结构形式(水坝、渡槽、涵管等)、环境条件(高寒、高温、潮湿地区)来制定针对性的技术措施。高坝大体积混凝土施工中用分层分块浇筑、预埋冷却水管等温控技术,在薄壁结构施工中优化混凝土配合比来降低收缩风险。

4.2 施工人员与设备保障

加强施工人员的专业技能培训,创建“理论教学+实操演练+案例分析”的三维培训体系。理论课程系统讲解水利工程混凝土裂缝的产生机理,包括温度应力、收缩应力、地基不均匀沉降等;实操环节设置模板安装、混凝土浇筑振捣、温控设备操作等模拟场景,加强技术要点的掌握;通过典型工程案例剖析,如某水库大坝由于温控不当造成的贯穿性裂缝的修复过程,提高操作人员的风险防范意识和应急处理能力。培训之后组织严格考核,实行持证上岗制度,保证关键岗位人员技术达标。

设备保障上按照工程需要配备专业施工、检测设备。施工设备有高精度智能温控系统(可以实时调节冷却水流量和温度)、自密实混凝土浇筑设备、智能振捣机器人等;检测仪器有裂缝测宽仪、钢筋扫描仪、应力应变监测仪等^[4]。建立设备全生命周期管理台账,制订详细的维护保养制度,日常巡检记录设备运行状况,每月做深度检修和校准,每季度进行性能评定,使设备一直处于最佳的工作状态。同时,建立设备应急调配机制,与周围施工单位或者设备供应商签订互助协议,以应对突发的设备故障,给裂缝防治技术的精准执行提供可靠的技术保障。

4.3 动态监测与应急响应

建立混凝土结构裂缝动态监测体系,采用光纤光栅传感器、振弦式应变计、无线倾角传感器等智能监测设备,对混凝土的温度、应力、位移等主要数据进行实时采集。利用物联网技术把数据传送到工程智慧管理平台,利用大数据分析和 AI 算法对裂缝发展趋势进行预测预警。在大坝坝踵、闸墩支座等重点部位加密布设监测点,形成点、线、面相结合的立体监测网络,保证裂缝隐患早发现、早研判。

对水利工程施工过程中出现的突发裂缝隐患,制定分级分类的应急响应预案。根据裂缝危害程度将裂缝分为 I 级(紧急)、II 级(严重)、III 级(一般),确定不同等级的应急处理程序: I 级裂缝要立即停止有关区域的施工,启动人员疏散和专家会诊; II 级裂

缝采取临时加固措施后,组织专项技术论证; III 级裂缝由现场技术人员按照既定方案处理^[5]。细化应急技术措施,表面封闭法(环氧树脂胶泥涂抹)、压力注浆法(水泥-水玻璃双液浆)、结构补强法(粘贴碳纤维布)的适用场景及操作规范。明确应急责任分工,设立现场指挥组、技术保障组、物资调配组等职能小组,保证应急响应高效有序。同时储备足量的应急治理材料(快速修补剂、止水带、灌浆材料)和应急设备(移动式注浆泵、发电机、照明设备),定期对应急物资进行清点与更新,在裂缝初期出现的时候可以迅速启动应急处置,有效控制裂缝的发展,将质量风险降到最低。

5 结束语

水利工程施工中混凝土裂缝的防治是一项系统性工程,需要结合工程实际,综合利用材料科学、施工技术、结构力学等多学科的知识,构建预防、治理、保障的全链条技术体系。通过科学的材料优化、精细的施工控制、合适的治理技术、完善的保障措施,可以有效地减少混凝土裂缝产生的概率,提高裂缝治理的效果。随着新型材料技术、智能监测技术在水利工程中逐渐应用,混凝土裂缝防治技术将朝着更加精确化、智能化的方向发展,并依靠技术创新提高水利工程混凝土结构抗裂能力和使用安全性。在工程实践中,要根据具体的工程特点来优化技术方案,使防治效果和经济效益达到统一,为水利工程的长期稳定运行提供有力保障。

参考文献:

- [1] 李征,王栋.浅谈水利工程施工中的混凝土裂缝的防治技术[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(一)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会、重庆市大数据和人工智能产业协会,2025.
- [2] 宋林超.水利工程中混凝土坝裂缝修补材料的耐久性及施工工艺优化[A].智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(三)[C].重庆市大数据和人工智能产业协会、重庆建筑编辑部、重庆市建筑协会、重庆市大数据和人工智能产业协会,2025.
- [3] 何吉东.水利工程中混凝土裂缝的防治施工技术[J].中国水泥,2025(05):110-112.
- [4] 杨文锐.水利施工中混凝土裂缝防治管理研究[J].低碳世界,2025,15(04):61-63.
- [5] 吴谷丰.水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(10):211-213.

水利堤防工程边坡失稳除险加固施工技术探讨

王万信, 叶建军

(江苏省水利建设工程有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘 要 水利堤防在长期承受水流冲刷、浸泡软化的条件下, 边坡极易出现滑动问题, 若处理不及时, 将对防洪安全造成直接威胁。为确保堤防在复杂水文环境中的稳定运行, 有必要对滑坡特征进行精准识别, 并采取有效措施进行系统治理。本文通过对水利堤防工程边坡失稳的原因进行分析, 并提出相应的除险加固技术措施, 旨在保障堤坡受到极端水力作用时仍能保持结构稳定, 为防汛安全提供有益参考。

关键词 水利堤防工程; 边坡失稳; 除险加固施工技术

中图分类号: TV551.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.018

0 引言

水利堤防作为河流、湖泊和水库防洪体系的重要组成部分, 其安全运行直接关系到沿岸地区居民的生命财产安全及社会发展。然而, 在长期运行过程中, 堤坡不可避免地受到渗流、软化、冲刷、荷载变化等因素影响, 从而产生不同形式的滑坡隐患, 尤其在汛期高水位持续或暴雨集中发生时, 边坡失稳问题更加突出。面对堤坡失稳的多样性、突发性, 传统经验式治理已难以满足现代防洪安全需求, 加固技术必须在科学评估基础上形成体系化、针对性强的施工方案。

1 水利堤防工程边坡失稳的原因

1.1 洪水期渗流

在汛期, 当河流水位升高到一定高度并维持较长时间时, 堤身浸没于高水位之下的区域会逐渐进入饱和状态, 土体原有的结构性被持续渗水破坏, 使抗剪能力显著下降^[1]。坡体在完全饱和后, 自重与外部水压力叠加, 使得下滑力快速增大, 滑动趋势随之加强。与此同时, 渗流贯穿坡体形成向外排出的水流路径, 使土体内部出现动水压力, 当水位下降速度快于堤身内水位消退速度时, 坡内水不能及时排出, 反向渗透力随之产生, 致使边坡在短时间内承受双重不利因素。再加上饱水导致的自重大幅提升, 堤坡在此阶段往往处于极为脆弱的状态。如果不能及时削减渗透压力或开展排水措施, 局部滑塌、深层滑移等失稳现象极易发生。

1.2 水流冲刷、漫坡侵蚀

在堤防紧邻急流或主流区的位置, 水流对坡脚的冲击往往较为剧烈, 尤其是在洪水涨落频繁、流速变

化突出的河段, 坡脚受到的切割、淘蚀和掏刷作用更为明显。若防护结构薄弱或缺乏必要的护脚措施, 坡脚土体被不断削弱, 最终使坡面失去应有的支撑力, 从而引发整体不稳定。更为危险的是, 当水位骤降至滩地以下并形成明显落差时, 饱和坡体内部水分尚未排出, 而坡外水位已低至坡脚, 外部压力减小与内部孔隙水压力失衡, 极易出现大范围坍塌^[2]。此外, 坡面表层在漫水阶段受到长期浸泡, 土粒骨架被弱化, 强度下降后在水流擦洗下逐渐剥落, 使坡度持续变陡, 最终丧失稳定性。尤其在弯曲河段, 流态变化复杂, 冲刷范围不固定, 坡体受力更不均匀, 从而加大失稳概率。

1.3 堤防地基强度不足

堤基强度不足是引发深层滑坡的重要内在因素之一, 尤其是在天然地基存在软弱夹层、透水层或地基土承载力偏低的情况下, 堤身在长期荷载与水作用下更易发生整体滑移。导致地基强度偏低的情形较多, 如设计阶段未能充分掌握地基土的真实特性, 或勘察深度有限, 未发现软弱层, 使得选用的计算强度指标与实际条件不符; 施工速度过快, 填土尚未固结或地基加固措施不到位, 使地基强度在短期内急剧下降^[3]。当地基局部出现不均匀压缩或受渗水影响导致土体结构破坏时, 滑面往往向深层发展, 一旦贯通便会形成整体式滑坡, 对堤防安全构成重大隐患。

1.4 施工缺陷、结构老化及外界因素叠加

若堤身填土未能按照设计密实标准进行压实, 或新旧堤身衔接处处理不当, 则可能形成弱面, 在暴雨

作者简介: 王万信 (1971-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程施工。

或漫水条件下首先出现裂缝,使渗水迅速向内部扩展,从而触发进一步滑移。堤脚附近开挖管线、施工扰动等人为因素,也会使土体结构遭到破坏,导致局部应力失衡并向周边扩展。长期运行后的堤防在经历多次水位涨落、干湿交替后,其土体结构也会逐渐老化甚至粉化,使强度不断下降。若再遇到洪水期强烈渗流、暴雨冲刷等外部条件叠加,堤坡便会在短时间内出现破坏。

2 水利堤防工程边坡失稳除险加固施工技术措施

2.1 浅层滑坡的剥离重构处理

在汛期或暴雨后,堤坡表层容易因浸泡、渗流或填筑缺陷出现局部滑动(见图 1)。

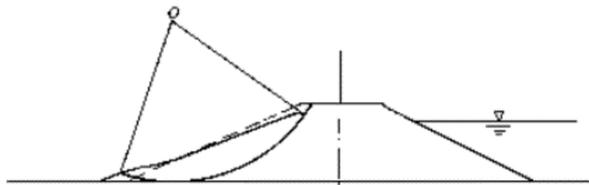


图 1 浅层滑坡示意图

当滑动深度不大且尚未破坏堤基结构时,需要以快速剥离、及时回填为核心进行处理,使堤坡在短时间内恢复稳定状态。施工人员会先确定滑坡区的平面尺寸和深度,再从坡面上缘开始逐步向下剥离不稳定土体。剥离必须循序渐进,每级高度宜控制在 20 cm 左右,使滑体剥离界面呈现稳定的阶梯状^[4]。在每一级剥离过程中,都需要同步检查滑体后方是否存在松动土,一旦发现未滑动但已处于软化状态的土层,应按规定继续剥离 0.5 ~ 1.0 m,以确保新旧土体结合界面具备稳定性。剥离完成后,应以向外延伸约 2 m 的范围为基准,将坡面整形成接近 1:3 的安全坡比,使回填区域具备良好的受力基础。回填工作可采取机械或人工进行,根据现场材料情况选择土方、砂性材料或适宜黏性土作为回填料。回填必须分层进行,每层厚度严格控制,使压实度达到设计强度,再继续向上填筑。为了让新旧土体形成有效咬合作用,填料的含水量、颗粒组成与压实度需要连续监测,同时施工队伍需随时关注坡面稳定情况,确保逐层填筑后坡体不会再次发生松动。整个区域的后填完成后,应再次调整坡比,使外观线型自然过渡,并在坡面表层预留防护结构的设置空间,使后续护坡体系顺利施工。

2.2 堤脚滑塌后的稳定性恢复

堤脚区域承担着上部堤身的主要荷载,一旦出现塌陷就会导致堤坡底部支撑能力削弱,使滑动力显著增大,因此需要在抢险阶段及时采取措施恢复基础稳

定。处置堤脚塌陷通常从卸荷开始,通过减少堤脚受压来降低堤身自重带来的下滑作用,再结合回填强化、形态重塑等措施,使滑坡区重新具备支撑能力^[5]。在实施卸荷施工时,先对堤脚塌陷区域外缘进行开挖,使塌陷体暴露,并将不稳定土体全部剥除。如果塌陷深度较大,需要扩大开挖范围,使其至少向外延伸约 5 m,避免形成新的松动块体。对于具有滞水特性的滑塌区域,应采用透水性良好的砂石作为回填材料,让渗水迅速排散,避免再次形成软化区。回填材料放置后,应按照整形、分层夯实、坡脚外展的步骤推进,使回填土在结构上形成向外扩展的稳定支撑体。在整形过程中,要特别注意坡面与堤基结合部位的密实程度,因为该区域是滑坡再次发生的高风险点。为提高整体稳定性,回填过程可结合局部削坡调整,使坡比更加缓和,让堤身与堤脚的整体结构更协调。在坡体重新成型后,应对整个处理区进行统一压实,使其达到设计规定的压实强度。由于塌陷区域的原状土已失去结构性,因此回填材料的压实质量直接决定加固效果,需要采取严格的检测措施确保填土质量。在堤脚恢复过程中,还需关注洪水期可能出现的渗透压力,一旦退水速度过快,堤脚内部渗水无法及时排散,进而产生向外的压力,使已恢复的区域再次出现滑坡。因此,在堤脚恢复后常需要预留排水通道,使渗水顺畅外排,为堤坡上部结构提供可靠支撑。

2.3 因堤身填筑质量偏低导致滑动的整治技术

滑坡区常存在密实度不足、颗粒组成不合理、夯填工艺缺陷等问题,若直接在原有基础上进行补强,效果往往有限,因此必须采取整体剥离再回填的方式进行系统整治。施工单位需首先明确滑坡区的边界线,并沿滑体上缘切割坡面,使其形成便于开挖的几何形状,再以分段开挖的方式逐步向下剥除全部滑动体。每次剥离的高度宜控制在合理范围,使坡面不因过快卸荷而引发新的滑移^[6]。同时,为保证新旧土体结合牢固,在剥离过程中应定期检查滑动深度,确保所有软化土层全部剔除,绝不留有潜在隐患。回填时,施工人员一般从坡脚开始填筑,让新土在自身重量和压实作用下形成稳固的承载层。填筑过程需采用分层压实方式,每层厚度经过试验确定,保证压实后填料密度达到设计值。为了避免出现局部滑移,坡面外缘要设置延伸约 2 m 的工作带,使新填土在成型后具备向外扩展的稳定效应。对于回填材料的选择,需要优先满足强度、渗透性能和粘聚力指标,使其在长期受水作用下仍能保持强度不降。若滑坡范围较大,施工单位还应适当调整坡比,使新坡面在外观上更为平缓,

降低滑动力。通常在稳定性较差的地段,坡比会调整为接近1:3,使整体结构的安全性提升。在回填完成后,还需再次检测压实度、含水率和弯沉值等指标,使新填土具备足够的结构性。

2.4 临水坡滑坡的抢险恢复

临水坡受水流冲击、浪涌拍击和水位涨落影响显著,是堤坡滑移最频发的区域之一。此类滑坡的处理需同时关注力学稳定和水动力环境,使治理后的坡体既能承受长期静水压力,也能应对突发性水流冲刷。处理临水坡滑坡的第一步是清理松散体,使坡面恢复规则形态,从而便于后续结构加固。对于由坡脚坍塌引发的滑坡,需先在坍塌位置采取反护措施,使坡脚支撑条件恢复,再逐级剥离滑体。滑体剥离过程需考虑水位变化带来的附加风险,一旦水位快速上涨,滑坡体可能再次松动,因此施工作业应保持连续性,使坡面及时暴露并处理。剥离完成后,施工单位会根据坡面软化程度和结构缺陷,决定是否需要延伸剥离范围,让新旧土层在结合处达到稳定状态。在恢复坡体形态后,需要重建坡脚支撑结构。常见做法是利用透水性良好的砂石混合料回填,使水流在冲刷坡脚时不集中破坏单一点,同时在坡脚外缘设置延伸2 m的工作带,使支撑区在结构上形成外展式稳定体。若潮位较高,施工人员还需在坡脚外增设石料护脚,使坡脚在洪水顶冲作用下保持完整。对于由暴雨或渗透引发的临水坡滑坡,其成因是渗水沿裂缝进入堤身内部,使滑动力增加并削弱抗剪强度。此类问题常伴随坡体表层的软化扩散,因此在挖除滑体后,应构建新的反渗结构,让水流低能量通过;再以逐层填筑方式恢复坡体,使内部空隙减少,避免新的渗流通道出现。

2.5 滑坡处理后的坡面保护

滑坡治理完成后,如果坡面未及时得到保护,外界风浪、暴雨或洪水涨落会迅速破坏新填土,使滑坡再次出现。因此,坡面保护的目标不仅是防止剥蚀,还要让坡面具备良好的排水性。在重新构成的坡体完成压实后,施工人员会根据堤段环境选择合适的保护结构^[7]。对于长期受水流影响的堤段,常采用石料护坡或混凝土结构作为保护层,使坡面在大流速冲击下依然保持稳定。如果坡面坡比较缓,可选择草皮覆盖,使植物根系形成天然加固网,提高土体抗剪力,同时使雨水得以慢速渗透,不会引发表面冲刷。在坡脚区域,由于坡脚承担着整个坡面的支撑功能,因此通常布设护脚石或片石抛填,使坡脚不因水流淘刷而破裂。一旦坡脚受损,滑体会在极短时间内失去平衡,因此

坡脚防护必须在坡面处理后立即实施。施工过程应严格按照图2严格实施,保障施工质量。在运行期,管理人员需要持续巡查坡面状况,一旦发现沉陷、裂缝或局部剥蚀,应立即修复,使坡体保持完整。

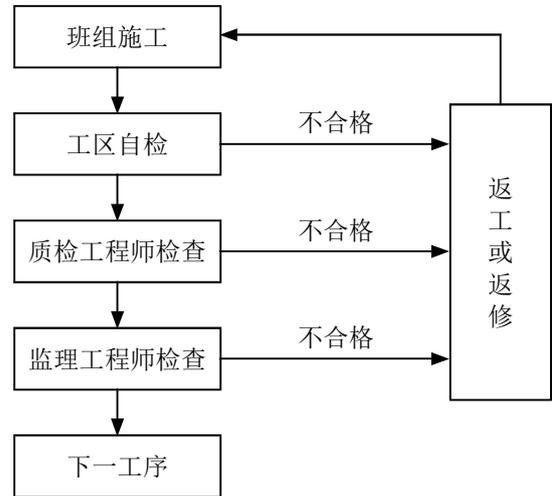


图2 坡面施工流程

3 结束语

堤坡失稳的除险加固是一项多环节、多技术联动的系统工程,不同类型的滑坡具有不同的触发机制,也对治理方式提出不同要求,因此在实施加固前必须准确识别失稳模式,再选择最匹配的技术路线。未来,随着极端气象事件增多,堤防的安全形势更加严峻,施工单位仍需推动加固工艺精细化与防护体系智能化建设,使堤防具备更高更强的应急保障能力,提升堤防整体安全水平,更好地服务于社会发展。

参考文献:

- [1] 于阳. 水库膨胀土高边坡滑坡失稳锚杆加固措施[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(08): 142-145.
- [2] 严行云, 杨寅, 刘欣怡, 等. 堤防工程边坡稳定性分析及其防护技术研究[J]. 珠江水运, 2025(05): 111-114.
- [3] 袁海. 某堤防工程高边坡施工技术应用探讨[J]. 中国设备工程, 2025(01): 231-233.
- [4] 丁涛. 新汴河堤防工程边坡稳定性分析[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(06): 40-43.
- [5] 许艳杰. 高水位长期浸泡背景下堤防土体工程边坡稳定性研究[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(05): 12-16, 26.
- [6] 王晗. 不同物理作用下河道堤防黏土力学特性及边坡稳定性研究[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(05): 36-41, 47.
- [7] 卞智远. 水利堤防边坡稳定性与加固分析[J]. 内蒙古水利, 2020(08): 51-52.

软土地基岩土勘察特征及加固处理技术研究

黄耀琦

(广西壮族自治区地球物理勘察院, 广西 柳州 545005)

摘要 为解决软土地基承载力低、压缩性大导致的工程病害问题, 本研究基于软土地基岩土勘察实践, 系统梳理勘察核心特征, 重点研究实用加固处理技术。通过勘察指标体系分析与勘察方法适配性研究, 明确软土工程地质特性; 深入探讨水泥土搅拌桩技术、预压排水固结技术、CFG 桩复合地基技术的作用机理、关键参数与施工控制要点, 构建加固技术选型方法与全流程效果验证体系。研究表明, 水泥土搅拌桩技术、预压排水固结技术、CFG 桩复合地基技术这三种加固技术可有效提升软土地基承载力, 控制沉降变形, 适配不同场地条件与工程要求。

关键词 软土地基; 岩土勘察; 水泥土搅拌桩; 预压排水固结; CFG 桩

中图分类号: TU195; TU472.33; TU447 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.019

0 引言

软土地基广泛分布于我国沿海、江河三角洲及内陆湖盆地区, 其天然含水率高、承载力低、压缩性大的工程特性, 易导致上部结构出现不均匀沉降、失稳等病害, 严重制约工程建设质量与安全。岩土勘察作为软土地基工程建设的前置环节, 精准揭示其工程地质特征是后续加固处理技术选型与参数设计的核心依据^[1]。郭将(2025)提出软土地基加固技术的适用性直接取决于勘察数据的完整性与准确性, 勘察环节的疏漏将导致加固方案失效风险显著提升; 林署炯(2025)指出当前软土地基加固技术应用中存在勘察与设计脱节问题, 需强化两者的耦合关联以提升工程实效^[2]。本文基于工程地质勘察实践, 系统梳理软土地基岩土勘察核心特征, 重点研究主流实用加固处理技术的作用机理、适用条件及参数控制, 为软土地基工程的安全高效实施提供技术参考。

1 软土地基岩土勘察核心特征

1.1 勘察指标体系及判释标准

软土地基岩土勘察指标体系涵盖物理性质指标、力学性质指标及渗透性质指标三大类, 各指标的精准测定是判释软土工程特性的关键^[3]。物理性质指标包括天然含水率 ω 、天然密度 ρ 、孔隙比 e 、液限 ω_L 、塑限 ω_P 及塑性指数 I_p , 其中天然含水率 ω 与孔隙比 e 是反映软土松软程度的核心指标, 当 $\omega > \omega_L$ 且 $e > 1.0$ 时, 软土呈现高压缩性与低承载力特征; 力学性质指标包含压缩模量 E_s 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及地基承载力特

征值 $f_{(ak)}$, 压缩模量 E_s 直接决定软土的压缩变形能力, 其值越小表明压缩性越强; 渗透性质指标以渗透系数 k 为核心, 软土的 k 值通常小于 10^{-6} cm/s, 属于低渗透性土层, 这一特征直接影响排水固结类加固技术的应用效果。勘察指标判释需结合区域工程地质背景, 采用多指标综合验证方式, 避免单一指标判释带来的偏差。例如: 通过天然含水率与塑性指数的协同分析, 可精准界定软土的灵敏度等级, 为后续加固技术选型提供依据。

1.2 勘察方法的适配性应用

软土地基岩土勘察需结合场地条件选用适配的勘察方法, 确保勘察数据的代表性与可靠性。常用勘察方法包括钻探、原位测试及室内试验, 钻探主要采用回转式钻探方式, 取样间距控制在 $1.0 \sim 2.0$ m, 取样过程需采用薄壁取土器以减少对软土试样的扰动, 保证试样的天然结构完整性; 原位测试以静力触探试验、十字板剪切试验为主, 静力触探试验可连续获取软土的锥尖阻力 q_c 与侧壁摩阻力 f_s , 通过经验公式换算得到地基承载力特征值与压缩模量, 适用于大面积软土分布区域的快速勘察; 十字板剪切试验可直接测定软土的不排水抗剪强度 τ_u , 该指标是评估软土地基稳定性的核心参数, 尤其适用于饱和软黏土场地。室内试验需针对钻探获取的试样开展, 重点进行含水率、孔隙比、压缩试验及直剪试验, 室内试验参数与原位测试参数的对比分析, 可实现勘察数据的相互验证, 提升勘察成果的精准度。不同勘察方法的协同应用, 可全面揭示软土地基的空间分布特征与工程地质特性, 为加固处理技术设计提供完整的勘察数据支持。

作者简介: 黄耀琦(1984-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程。

2 软土地基实用加固处理技术研究

2.1 水泥土搅拌桩加固技术

水泥土搅拌桩加固技术通过特制搅拌机械将水泥浆与软土强制搅拌均匀,水泥浆与软土发生一系列物理化学反应,形成具有一定强度与整体性的水泥土桩体,桩体与桩间软土共同构成复合地基,从而提升地基承载力并减少沉降变形^[4]。该技术适用于处理淤泥、淤泥质土、粉质黏土等饱和软土地基,尤其适用于处理深度在5~15 m的软土地基。其作用机理主要包括水泥的水化反应、离子交换反应及硬凝反应,水化反应生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质将软土颗粒胶结在一起,离子交换反应使软土颗粒表面电位降低,颗粒间凝聚力增强,硬凝反应则进一步提升水泥土的强度与稳定性。

水泥土搅拌桩加固技术的关键参数包括水泥掺量、搅拌次数、桩长及桩间距。水泥掺量通常控制在12%~20%(以干土质量计),掺量过低无法保证水泥土的强度,掺量过高则会增加工程成本且易导致桩体产生裂缝;搅拌次数需确保水泥浆与软土充分混合,通常采用“二次搅拌、二次提升”的施工工艺,搅拌速度控制在0.8~1.2 m/min,提升速度控制在1.0~1.5 m/min;桩长设计需穿透软土层到达承载力较高的持力层,桩端进入持力层的深度不小于0.5 m;桩间距根据复合地基承载力要求确定,通常为1.0~2.0 m,采用正方形或等边三角形布置方式。

水泥土搅拌桩复合地基的承载力特征值 $f_{(spk)}$ 可通过下式计算:

$$f_{spk} = m \cdot \frac{R_a}{A_p} + \beta \cdot (1-m) \cdot f_{sk} \quad (1)$$

式(1)中, m 为面积置换率,无量纲; R_a 为单桩竖向承载力特征值,kN; A_p 为单桩截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力发挥系数,无量纲,对于淤泥质土取0.4~0.6; f_{sk} 为桩间土承载力特征值,kPa。单桩竖向承载力特征值 R_a 可通过室内水泥土试块抗压强度试验确定,也可通过现场单桩静载荷试验验证。

施工过程中需重点控制搅拌均匀性与成桩质量,成桩后需采用低应变法对桩身完整性进行检测,检测数

量不小于总桩数的10%;采用单桩静载荷试验与复合地基静载荷试验对加固效果进行验证,试验数量分别不小于总桩数的1%且不少于3根。

2.2 预压排水固结加固技术

预压排水固结加固技术通过施加预压荷载促使软土孔隙水排出、体积收缩实现固结,进而提升地基承载力与稳定性。该技术适用于饱和软土、淤泥质土等低渗透性地基,分为堆载预压、真空预压两类,真空联合堆载预压因兼具两者优势,适配沉降控制要求高的工程。技术核心为排水系统设置与预压荷载施加:排水系统含塑料排水板(等效直径0.07~0.10 m,间距1.0~2.0 m)及级配砂石水平垫层(厚度0.5~0.8 m);荷载施加遵循分级原则,堆载为设计荷载的1.1~1.2倍,真空预压真空度80~90 kPa。

软土的固结度 U_t 是评估预压排水固结效果的核心指标,其计算式如下:

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 c_v t}{4H^2}} \quad (2)$$

式(2)中, n 为正整数; c_v 为软土的竖向固结系数, cm^2/s ; t 为预压时间, s ; H 为排水距离, m ,对于单面排水取软土层厚度,对于双面排水取软土层厚度的1/2。固结系数 c_v 需通过室内固结试验确定,其值直接影响预压时间的设计, c_v 越小表明软土的排水固结速度越慢,所需预压时间越长。

预压过程需进行沉降观测与孔隙水压力观测,沉降观测点布置在预压区域的中心及边缘,观测频率在加载期每1~2天观测一次,稳定期每3~7天观测一次;孔隙水压力观测采用孔隙水压力计,布置深度与软土层厚度适配,观测频率与沉降观测一致。当连续10天的沉降速率小于0.5 mm/d时,可判定软土地基已达到稳定固结状态,可停止预压加载。表1为某软土地基真空联合堆载预压加固观测结果,数据表明经过60天的预压处理,软土的固结度达到85%以上,沉降量趋于稳定,加固效果显著。

2.3 CFG桩复合地基加固技术

CFG桩复合地基加固技术以水泥、粉煤灰、碎石为原料,经搅拌压制成型为CFG桩(水泥粉煤灰碎石桩),

表1 某软土地基真空联合堆载预压加固观测结果

预压时间(d)	真空度(kPa)	堆载荷载(kPa)	累计沉降量(mm)	日均沉降速率(mm/d)	孔隙水压力(kPa)	固结度(%)
10	85	50	185	4.2	62	32
30	88	100	420	1.5	45	65
60	89	150	580	0.4	18	86

与桩间土、褥垫层共同构成复合地基，依托置换、挤密及应力扩散作用提升地基承载力并控制沉降^[5]。该技术适用于黏性土、粉土、淤泥质土等多种软土地基，处理深度可达 30 m，尤其适配高承载力要求的工业与民用建筑地基。其作用机理明确：置换作用以高强度桩体替代低强度软土提升整体强度；挤密作用增强桩周软土密实度；褥垫层采用级配砂石（厚度 10~30 cm），调整桩与桩间土应力分布，保障协同工作。关键参数含桩径 400~600 mm、桩长需穿透软土进入持力层不小于 1.0 m、桩间距 1.5~3.0 m（正方形或等边三角形布置）、混凝土强度不低于 C15 及适配褥垫层厚度，施工重点控制钻孔深度、混凝土浇筑质量与桩顶标高

表 2 CFG 桩复合地基加固技术参数与检测结果

桩径 (mm)	桩长 (m)	桩间距 (m)	混凝土强度等级	褥垫层厚度 (cm)	复合地基承载力特征值 (kPa)	加固前地基承载力特征值 (kPa)	最大沉降量 (mm)
500	18.0	2.0	C20	20	320	70	35
600	22.0	2.5	C25	25	410	70	28

上部结构类型与荷载、沉降要求，场地施工条件、周边环境限制及工程成本、工期。选型采用多指标综合比选法，选取地基承载力提升幅度、沉降控制效果（权重各 0.3）、施工难度、工程成本（权重各 0.2）、工期（权重 0.1）量化评分，择综合评分最优方案。适配场景明确：浅部低渗透性淤泥质土、上部荷载较小时优先水泥土搅拌桩；深层、高沉降控制要求地基选用 CFG 桩；大面积处理优先预压排水固结以控成本。

3.2 加固效果验证体系构建

软土地基加固效果验证体系采用“施工过程监测+竣工质量检测+后期沉降观测”的全流程验证模式，确保加固效果满足设计要求。施工过程监测重点包括桩体施工质量监测、预压荷载监测、沉降监测与孔隙水压力监测，桩体施工质量监测通过施工参数控制与现场取样检测实现，确保桩体强度与完整性；预压荷载监测确保加载速率与荷载值符合设计要求；沉降监测与孔隙水压力监测实时掌握软土的固结变形过程，及时调整施工参数。

竣工质量检测采用原位测试与室内试验相结合的方式，原位测试包括单桩静载荷试验、复合地基静载荷试验、静力触探试验等，重点检测地基承载力与桩体承载力；室内试验针对加固后的土样与桩体试样开展，检测其强度、压缩性等指标。后期沉降观测在工程竣工后进行，观测周期不少于 1 年，观测频率在竣工后 3 个月内每月观测一次，3~6 个月每 2 个月观测一次，6~12 个月每 3 个月观测一次。通过后期沉降

防断桩缩颈。质量检测采用低应变法（检测桩身完整性，占比 $\geq 10\%$ ）与复合地基静载荷试验（检测承载力，占比 $\geq 0.5\%$ 且不少于 3 根）。表 2 数据证实，该技术可有效提升软土地基承载力，沉降控制效果良好，满足上部结构设计要求。

3 加固技术选型与效果验证体系

3.1 加固技术选型原则与方法

软土地基加固技术选型遵循因地制宜、经济合理、技术可行原则，核心是结合勘察揭示的软土工程地质特征与上部结构荷载、沉降要求开展多方案比选。选型需重点考量软土类型、分布、厚度及工程地质参数，

观测数据的分析，验证加固地基的长期稳定性，确保上部结构的安全使用。全流程的效果验证体系可实现对加固技术应用效果的精准评估，及时发现并解决加固过程中存在的问题，保障工程质量。

4 结束语

软土地基勘察需精准揭示其物理力学特性与空间分布，合理选配勘察方法。水泥土搅拌桩适用于中浅层，预压排水固结适用于大面积低渗透性软土，CFG 桩复合地基适用于深层高承载力需求。三者均具施工简便、成本可控、效果可靠等优点。建立全流程加固效果验证体系，可精准评估加固成效。未来应加强勘察与加固设计的耦合，提升参数设计精度，保障工程安全高效实施。

参考文献：

- [1] 郭将. 公路工程中软土地基的岩土工程勘察技术应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(34):107-109.
- [2] 林署炯. 软土地基的岩土工程勘察研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(25):191-193.
- [3] 李兴龙. 复杂地质条件下建筑软土地基勘察技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(16):91-93.
- [4] 张船舶, 朱颖, 张玉婷, 等. 水利工程软土地基勘察及处理技术[J]. 科技风, 2024(05):64-66.
- [5] 邢江朋. 珠海滨海地区软土地基勘察及基础分析[J]. 石材, 2024(02):79-81.

城市地铁深基坑开挖引起地层变形特征及预测研究

葛稳强

(江苏省环境地质调查大队, 江苏 南京 210012)

摘 要 城市地铁深基坑施工会不可避免地扰动周围地层, 进而导致位移、沉降以及附加应力重新分布, 这就会对邻近结构及市政设施安全构成威胁。本文以深基坑工程的典型工况为基础, 总结开挖过程所引起的地层变形规律以及影响因素, 分析不同阶段的位移发展特征, 并且结合数值模拟与经验公式来讨论变形预测方法的适用性, 旨在为类似工程提供参考。研究结果显示, 地层变形具备明显的阶段性、累积性以及空间分布特征, 预测模型的选取需要充分考虑地质条件与支护体系特征。

关键词 深基坑; 地铁工程; 地层变形; 经验曲线; 数值模拟

中图分类号: U231.3; TU745.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.020

0 引言

随着城市化进程持续加快、地铁建设规模不断扩大, 深基坑工程数量也随之迅速增长。深基坑是地下空间开发当中的关键环节, 其施工过程常常会伴随较强的地层扰动情况, 若控制不当就容易引发过量沉降, 还可能造成围护结构位移以及邻近建(构)筑物损伤等问题。所以, 准确识别深基坑开挖引起的地层变形特征, 并且对其进行有效预测成为确保施工安全和城市运营稳定的重要技术问题。近些年, 国内外学者围绕深基坑变形机理、监测技术及预测模型开展大量研究, 已经形成了相对比较成熟的理论体系。不过因为城市地铁工程经常处于复杂地质环境当中, 而且基坑形态、支护体系与开挖顺序差异相当显著, 变形机制依然存在一定不确定性^[1]。本文在总结典型工程实践的基础之上, 系统分析城市地铁深基坑地层变形的基本规律及其影响因素, 并且探讨预测方法在工程当中的适用性与局限性, 以期能为实际设计与施工提供理论参考。

1 城市地铁深基坑开挖引起的地层变形特征

1.1 地层变形的总体发展规律

在深基坑进行开挖的过程当中, 地层变形一般会表现出明显的阶段性、空间集中性以及累积性特征, 随着支护结构施工、分层开挖以及降水等关键工况不断推进, 地层变形速率于不同阶段会有显著的变化情

况。开挖初期变形相对较小, 随着开挖深度不断增加以及支护体系作用逐步发挥, 位移和沉降会逐渐累积并且在底部开挖完成之后趋于稳定。在空间分布方面, 最大水平位移大多出现在坑深的0.3~0.6 H_e 处位置, 而最大地表沉降通常位于坑边外某一距离的地方, 并且会随着距离增加向远处进行扩散。变形还具备滞后性的特点, 支护结构变形往往在开挖结束之后仍会缓慢地发展, 这是土体固结、水位变化以及应力重新分布所引起的。

1.2 围护结构侧向位移特征

在深基坑开挖的过程当中, 围护结构如地下连续墙、桩—锚支护桩这类的侧向位移属于最直观且最关键的变形指标, 伴随开挖深度不断加深以及土体卸载逐步推进, 侧向位移会逐渐呈现增大的趋势^[2]。实践监测结果显示, 如地下连续墙, 其最大侧移一般为开挖深度 H 的大约0.05%~0.25%, 平均大概是0.12% H , 位移沿着墙高呈现出“鱼腹形”分布态势, 即顶端与底部的位移比较小而中部位移最大, 中部或者靠近开挖面的高度之处属于最大变形区域。如果基坑处于砂土或者松散填土层, 桩—锚支护结构在降水或者锚索预应力的作用之下, 也有可能产生比较大的水平位移, 其时空分布能够反映出土体与支护结构耦合受力的状态。围护结构侧向位移具备明显的随深度或开挖程度递增、沿高程“中段最大”和地层或支护体系密切相关的典型特征。

作者简介: 葛稳强(1983-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程、环境地质调查等。

1.3 地表沉降与深层土体变形特征

城市地铁深基坑开挖时地表沉降和深层土体变形呈现较稳定的空间分布规律,监测与数值模拟结果显示基坑外地表沉降沿距离基坑边缘方向先增加后减少,沉降曲线大多呈现“凹槽型”,且最大沉降通常出现在离墙体一定距离处,即基坑边缘外 5~15 米范围,之后向远处沉降值逐渐减小并趋于稳定。深层土体在软土区域开挖和土体卸荷常常会引起土层固结沉降、孔隙水压变化,以及侧向位移进而导致深层土体上下层发生变形。此外,在超深基坑中,由于卸荷回弹与应力重分布作用土体可能出现浅层回弹、深层压缩或隆起,甚至在某些地层条件下出现地连墙后“土体上浮”现象。

1.4 基坑底部隆起与隆起影响范围

当深基坑开挖到最后底部时,特别是在软土或者高地下水区域,土体垂直应力会急剧释放,底部土层有可能产生向上的“隆起”(heave)。这种隆起源自超载土体被挖除掉之后,原有的承压情况消失不见,使得土体“回弹”或者因为孔隙水压变化而产生上浮现象。隆起量会随着开挖深度以及土层塑性、压缩历史而不断增加,塑性黏土或者过固结黏土对此尤为敏感。在影响范围方面,如果土层比较软且基坑比较深,底部隆起及其影响区域可能会延伸到基坑边线以外数倍的坑深,规范建议监测范围至少要覆盖边线外 3 倍的基坑深度,而在滨海软土等极端条件之下,其影响范围甚至能够达到 6~8 倍的基坑深度。所以,工程设计与监测必须充分考虑底部隆起与其空间扩展情况,以此来防止基坑底部失稳或者邻近结构受到损害。

2 城市地铁深基坑变形的影响因素分析

2.1 地质与水文条件

在城市地铁深基坑工程中,地质与水文条件是决定地层变形形式和幅度的基础性因素。首先,软土、淤泥质土以及高压缩性黏性土层,由于含水量高、孔隙比大、渗透系数低且抗剪强度弱,在经过开挖卸荷和降水扰动之后容易产生明显沉降、固结与侧向变形,若再施加降水或者进行孔隙水压释放,沉降和变形情况将会进一步加剧。其次,地下水位高、含水层承压或者存在承压水的地层,在降水或者抽水过程当中会引起孔隙水压骤然减小,使得有效应力迅速增加,从而导致土体出现固结沉降或者不均匀变形。此外,若地质条件比较复杂,比如土层非均质、夹砂层、软硬层交错、含砂层与黏层叠置,土体响应就会更为复杂,变形分布可能不均匀且局部变形较为突出。因此,在

地铁深基坑设计和施工的时候,必须通过详尽的地质勘察与水文监测,准确判断地层结构、水文条件以及含水状态,以此制定合理的支护与降水方案,从源头对变形风险进行控制。

2.2 支护体系与结构刚度

在深基坑工程中所选支护体系及其结构刚度是控制地层变形的关键所在。刚度较大的支护结构(如厚壁地下连续墙密排桩或桩—锚桩复合支护)能显著降低开挖过程中围护墙侧向位移与地层沉降。研究显示,随着支护系统抗弯/抗剪刚度提高,最大水平位移与基坑深度之比可从 0.4%~1.5% 降到 0.1%~0.3% 以内^[3]。此外,支护桩嵌固深度桩间距墙体厚度与材料弹性模量等参数对刚度有着重要影响,当嵌固深度足够且桩距合理时,侧向变形和基坑底部隆起风险均能大幅降低,所以在不同地质和水文条件下应针对性选择,并设计支护体系以保证整体刚度满足基坑稳定与变形控制要求。

2.3 开挖方式与施工顺序

在城市地铁深基坑施工中,开挖方式和施工顺序对地层应力释放以及变形过程有着重要影响。常见的开挖方式包含分层开挖(layered excavation)和分层一段开挖(layered-section)这两种。研究结果显示,当基坑比较浅的时候,这两种开挖方式对变形的影响差异不是很大,但随着开挖深度不断增加,分层一段开挖在控制围护结构侧向位移以及地表沉降方面会更加有利^[4]。分层一段开挖借助分块卸荷以及对称或者交替顺序施工的办法,能够减缓土体应力重分布,有利于稳定支护结构并且减少整体变形。相反,要是采用大跨度、快速全面开挖或者不合理的开挖顺序如单侧连续开挖,就会造成不均匀卸荷,使土体产生较大的侧向位移和沉降,甚至还会引发流砂、局部塌陷等风险。所以,针对城市地铁深基坑常见的深度以及复杂地层条件,应该优先采用分层一段、步移/块状开挖并且结合合理施工顺序,以此来减少基坑及周边结构的变形风险。

2.4 市政环境及邻近结构荷载

城市深基坑施工时周边市政环境和邻近结构荷载对地层变形影响较大。若基坑周围有密集管线、道路、既有建筑基础或地下隧道,这些结构会改变原有土体应力状态,当基坑开挖与降水使土体应力重分布,荷载传递和结构—土体耦合会引发不均匀沉降、附加侧向位移或裂缝。若邻近建筑基础或地下结构基础浅且荷载重,其基础荷载叠加在软土或可压缩土层,会降低土体承载力并增强变形敏感性,易放大开挖导致的

土体扰动。市政管线、道路交通（含重载车辆）等动荷载，会通过周期性振动或静载叠加引起土体再扰动或加速变形，在降水或土体松弛期间更为显著。所以，地铁深基坑设计与施工要全面考虑市政环境和邻近结构的荷载/基础条件，合理布置支护体系、监测范围和加固方案，降低开挖引起的变形及结构损伤风险。

3 深基坑地层变形预测方法研究

3.1 基于经验曲线的预测方法

在深基坑或者隧道施工中，基于经验曲线的预测方法主要是来源于 Peck（1969年）等早期统计出来的大量工程实测资料，其经验公式是通过拟合地表沉降和距离基坑，或隧道中心线的关系曲线（通常呈现高斯分布）来估算的。沉降槽形、最大沉降值以及影响范围，采用经验曲线进行预测时，只需要输入基坑或隧道深度、土层类型、开挖断面尺寸等基本参数，便能够快速得出地表沉降的大致分布与幅度，比较适合初期设计或者快速评估阶段。经验方法计算起来较为简便、不需要复杂模型，也不需要大量计算资源，所以在工程实践当中被广泛采用。不过其局限性也比较明显，因为依赖统计数据，其适用性会受限于与原始案例地质条件、支护方式和施工工艺是否相似，当地层复杂、支护体系特殊、施工条件多变时，经验预测往往会偏保守或者发生较大误差。所以，经验曲线方法适用于设计前期的初步估算，而不是最终施工控制，对于复杂或者深基坑工程，应该结合数值模拟或者监测数据做进一步分析。

3.2 基于数值模拟的预测方法

在城市地铁深基坑工程中，基于数值模拟的方法（如有限元法 FEM 或者有限差分法等），能够对地层、支护体系和地下水三者的耦合效应做综合分析，进而对沉降、围护结构位移以及深层土体应力变化等进行精细预测。首先，通过建立能反映实际地质、水文、支护形式以及施工阶段的三维模型，数值模拟可量化分析复杂地质条件下的土-结构相互作用，尤其对地层异质、分层交错以及地下水变化剧烈等情况有良好适用性。其次，模拟结果涵盖土体位移、墙体变形、孔隙水压和应力分布等多个量，能在施工前对不同方案如支护结构、开挖顺序、降水方案等进行比选，为方案优化提供依据。然而此类方法对土体力学参数、边界条件、模型网格划分以及支护结构细节较为敏感，如果参数选取或者模型简化不当，预测误差可能会比较大，所以数值模拟方法虽强大，但应结合实测监测数据进行模型校正，以此提高预测精度与可靠性。

3.3 基于机器学习的预测方法

在深基坑和地铁基坑相关工程中，机器学习方法越来越多地被用于地层变形以及支护结构变形的预测工作。通过收集历史工程监测数据（涵盖支护结构侧移、地表沉降、施工参数、地质-水文条件、施工阶段信息等内容）作为训练样本，常用模型包含人工神经网络、支持向量机、深度学习模型、集成学习等。这些模型的优势主要在于能够处理多个复杂变量之间的非线性耦合关系，适合复杂地质、水文、支护体系与施工过程混合影响下的变形预测，和传统经验或数值模拟相比，其预测速度更快、计算资源要求更低、便于实时或近实时应用。近年来也有研究尝试将物理约束+数据驱动结合起来，将土-结构力学规律嵌入 ML 框架以提升预测精度与稳定性^[5]。然而其局限也比较明显，ML 模型高度依赖历史监测数据的质量与数量，在小样本、异构数据或地质/施工条件差异大时，模型泛化能力会下降，容易产生较大误差。所以，机器学习方法适合在施工监测/设计阶段和数值模拟、经验方法结合使用，既发挥其快速预测和实时预警优势，也通过物理约束与监测校正增强可靠性。

4 结束语

在城市地铁深基坑开挖过程当中引起的地层变形具有阶段性特点，空间分布规律明显，影响因素复杂，不同地质条件、支护体系以及施工工序都会对变形产生重要的影响，通过结合经验方法、数值模拟以及智能预测能够显著提升变形控制的效果。未来研究需要强化多源监测数据融合、智能预测模型的工程化应用以及复杂环境下变形机理的探索，以进一步提高深基坑工程的安全性及可控性。

参考文献：

- [1] 李淑,张亚芬,王笑然,等.北京地铁车站深基坑任意位置变形预测研究[J].建筑科学,2024,40(05):47-55,88.
- [2] 魏飞翼.换乘地铁车站深基坑变形特性及地表沉降预测研究[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [3] 陈建刚.超深基坑开挖对临近地铁与地层的影响分析[J].建筑机械,2024(10):212-215,223.
- [4] 孙斌,刘恒,刘婷婷.超深基坑开挖对临近地铁与地层的影响及控制措施[J].石材,2025(07):56-58.
- [5] 曾凌云.基于时空效应下深基坑开挖对临近地铁隧道的影响分析[D].南昌:南昌工程学院,2023.

雨污分流顶管施工技术在市政给排水工程中的应用研究

李 瑞

(安徽圣合建设工程有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 城市化进程的推进,加重了市政给排水系统的承载压力,加之雨污合流现象的存在,极易引发城市内涝、水体污染等问题。为有效改善水环境,在市政给排水工程中,可尝试引入雨污分流顶管施工技术。本文从这一角度出发,简单介绍该类技术的应用原理及应用优势,结合工程实践,着重探究技术的应用要点,以期对相关工程的高效推进提供技术参考。

关键词 市政给排水工程;雨污分流顶管施工技术;顶管设备;管道顶进;注浆加固

中图分类号: TU992.05

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.021

0 引言

我国持续开展城市水环境治理工作,现阶段已进入攻坚关键期。通过开展雨污分流改造项目的方式,切实提升污水收集率及水体质量。在传统的市政给排水工程中,通常会采取开挖式工艺进行上述项目,但极易对周边建筑安全及交通秩序造成影响,背离现代化城市建设要求。顶管施工工艺优势明显,无需进行开挖操作,是雨污分流管道铺设中的不二选择。

1 雨污分流顶管施工技术概述

雨污分流顶管施工技术的实施原理主要体现在力的传递与路径控制层面。在具体施工中,工程人员需要提前布设施工轴线,并在其两端处开挖工作井与接收井,以顶进设备产生的水平推力,按照设计轴线逐步将预制管道顶入土层,以实现管道的精准铺设^[1]。此期间,工程人员可借助导向系统,合理控制管道顶进方向;可通过注浆系统,减少管道及土层间的摩擦阻力。该技术的应用优势较明显,主要体现在以下方面:

首先,该技术对周边环境的干扰较小,工程人员仅需在轴线两端开挖作业井接收井,不会形成较大的地表作业面积,可控制对周边居民及商业活动造成的不良影响;其次,该技术的复杂地质适应力较强。城市地下地质条件复杂,土层结构繁琐,且地下水位较高。在顶管施工作业中,工程人员可根据现场实际情况,选择合适的工具管材料及大型设施设备。并且,该技术实施中,不会对原有构筑物造成破坏,可实现管道的安全推进,有助于提高工程综合效益。

2 雨污分流顶管施工技术在市政给排水工程中的应用实践

2.1 工程概况

案例工程为市政给排水工程中的主干管铺设项目。该项目位于城市核心商业区,施工路段为城市主干道,交通流量大,周边建筑物及地下管线密集。工程开展期间,需要基于城市给排水需求,铺设雨污分流污水主干管。该管道总长 820 m,设计坡度为 0.003。经过前期地质勘察,确定该区域地下土层组成复杂,由上至下包括表层杂填土、粉质粘土、中砂层及卵石层(厚度 1.5~2.8 m)组成,且地下水埋深 2.8 m,属于富水地层。

2.2 技术应用

2.2.1 设计施工方案

为保证顶管施工作业的顺利推进,工程人员需在正式开展施工任务前展开全面的现场勘查,充分了解工程地质条件、周边环境情况以及管道设计参数,设计合理可行的施工方案。案例工程中优先选择以下几类要点:

一是施工轴线设计。工程人员需要以市政给排水管网总体规划为参考,辅以现场勘查结果,对管道铺设轴线加以优化,尽量规避管线密集区域。可采取现场人工探测,配合 GIS 地下管线系统,对各类管线的位置走向与埋深形成精准定位,确保调整后的管道轴线及管线间距满足施工要求,避免后续作业中对现有地下管线造成破坏^[2]。同时,充分考虑现场地质条件

作者简介:李瑞(1988-),女,本科,副高级工程师,研究方向:市政给排水。

变化,提前预留轴线纠偏余量,以提升后续管道铺设精准性。

二是挺进参数设计。以地质勘察报告为参考标准,基于管道直径、管道长度等关键参数,合理设计顶进力及顶进速度。案例工程中,优先使用DN1600管道材料。在中砂层及粉质粘土中,该类材料的顶进力计算值为1 800 kN。因地下水位影响及摩擦阻力影响,选择额定顶进力为2 500 kN的顶进设备,以提升顶进效果。此外,为避免造成较大土层扰动,引发坍塌风险,还需合理控制顶进速度。案例工程中,将这一参数设定为8~12 cm/h。

三是工作井与接收井设计。在具体实践中,着重参考施工轴线及现场场地条件信息,在施工路段两端设置工作井与接收井。其中工作井尺寸为8 m×6 m×8 m;接收井尺寸为6 m×4 m×8 m。工程勘察阶段,发现施工作业区域土层稳定性较差,且地下水位较高,所以优先选用SMW工桩法进行井体支护。针对支护桩的关键参数,需根据现场情况酌情设定,如直径850 mm、桩长12 m、桩间距600 mm,切实保障井体结构稳定性。必要时,还需在工作井及接收井底部设置降水井。以轻型井点降水,控制地下水位,保障后续开挖作业的安全效益。

四是风险预案设计。雨污分流顶管施工作业中极易出现顶力不足、轴线偏差过大、涌水坍塌等风险,所以建立配套应急预案至关重要。针对轴线偏差问题,工程人员可采取调整顶进千斤顶受力分布的方案,以进行有效纠偏;针对涌水问题,工程人员可采取启动排水设备,加水泥浆封堵的方案,以避免险情进一步扩大。

2.2.2 顶管设备选型

在雨污分流顶管施工作业中,顶管设备的选型是对工程质量及施工效率造成直接影响的要素之一。工程人员需把握地质条件、施工环境、管道参数等指标,合理进行设备选型。

选择顶进设备时,优先选用液压千斤顶。针对该类设备的额进顶进力,需根据工程需要酌情筛选。例如:案例工程中优先选用额定顶进力为2 500 kN的千斤顶设备,以对称布置的方式,将两台设备安置于工作井底部导轨,以稳定顶进力,使之均匀传向雨污分流顶管^[3]。

在导轨选型方面,优先选用重型钢轨,并将其固定于工作井底部的混凝土基础。为保证引进作业期间达到轴线稳定的目标,工程人员需合理设计导轨顶面高程,确保其与管道设计高程一致。

选择出土设备时,优先选择能够与土压平衡顶管机配套使用的旋螺输送机。施工作业期间,该类设备

可实现高效输送土体连续出土的目标。市政给排水工程中,土体含水量相对较大,且地下水位较高,所以工程人员可提前在旋螺输送机出口处安装脱水装置,以便于运输渣土。

选择分流管道时,优先选用强度等级为C50的预制钢筋混凝土管,并以柔性承接式接口为主要形式,设置橡胶密封圈,提高管道密封性能,避免出现污水渗漏问题。

2.2.3 工作井与接收井施工

工作井与接收井施工是雨污分流顶管施工中的核心环节。在市政给排水工程中,施工人员需建立详尽可行的施工流程,具体包括以下三个环节:

一是测量放线作业。工程人员需要以设计方案为参考,精准定位工作井及接收井位置,辅以全站仪设备进行轴线放样,明确基坑开挖范围,确保井体作业结果满足设计要求。在开挖基坑时,优先采取分层开挖工艺,并将煤层深度控制在1.5 m范围内,避免诱发出土层坍塌风险。开挖期间,需在基坑边坡处安装智能传感设备,实时监测其位移情况及稳定性情况。一旦出现位移过大现象或稳定风险,需立即暂停开挖作业,采用加固措施进行处理。

二是支护结构施工作业。案例工程中,优先采用SMW工桩法。为切实提高支护桩强度及抗渗性能,工程人员需合理调配水泥浆水灰比。案例工程中将这一参数设定为1:1~1:1.5。此外,针对桩长偏差、桩位偏差等参数,也需要精准设定。其中前者需控制在100 mm范围内,后者需控制在50 mm范围内。完成支护桩作业后,需在桩顶位置安装钢筋混凝土冠梁,以提高支护结构稳定系数。

三是降水施工作业。在具体实践中,工程人员需提前在工作井及接收井周边布置降水井点,并严控井点间距及深度,有效控制地下水位。降水期间需实时监测地下水位变化,根据实际情况调整设备运行参数。并且完成基坑开挖作业后,工程人员需及时清理底部土层,并浇筑强度等级为C15的混凝土材料,形成稳定垫层;浇筑强度为C30的钢筋混凝土材料,形成稳定底板;在底板内可加设双层双向钢筋,以提高其承载力^[4]。

2.2.4 管道顶进施工

在管道顶进施工中,工程人员需严格控制顶进方向、顶进力度与顶进速度,同时可参考以下施工步骤,切实提高管道铺设的精准度与安全性。

一是需开展设备安装调试作业。提前向工作井内吊装顶管机、千斤顶、旋螺输送机等设备。当设备到达设计位置后,对其进行固定连接以及调试工作,确保其

位置精准、运行正常。安装导轨时需严格参考顶面高程、轴线偏差等参数指标。将前一偏差控制在 ± 2 mm 范围内, 将后一偏差控制在 ± 3 mm 范围内, 以保持管道顶进轴线稳定。

二是在管道吊装作业中, 可优先使用汽车起重机设备, 先将预制钢筋混凝土管吊至导轨, 而后以人工操作的方式进行位置调整, 确保管道接口能够对齐顶管机接口。最后以缓慢、平稳移动的方式, 将管道吊装至指定位置, 防止其与导轨或井壁发生碰撞, 造成损坏问题。

三是在顶进启动作业中, 工程人员需先启动顶管机刀盘, 当其转速达到稳定状态后, 缓慢启动千斤顶, 并逐步施加顶进力, 精准控制顶进速度, 使之处在 5 cm/h 区间范围内。作业期间需随时观察顶进情况及开挖面的稳定状态。一旦出现开挖面异常或顶进阻力过大现象, 需立即暂停作业, 进行问题全面排查, 确保问题解决后, 重新启动作业任务。此外, 在该环节, 工程人员还需以监测数据、地质条件为参考标准, 酌情调整顶进速度与顶进力, 确保前者处在 8 ~ 12 cm/h 区间范围内, 后者能够低于 2 000 kN。施工期间, 可运用导向仪工具对轴线偏差实时检测, 以调整千斤顶受力的方式进行纠偏。

四是在管道拼接作业中, 工程人员需在完成第 1 节管道引进作业且管道进入工作井内剩余 1 m 长度时停止操作, 替换第 2 节管道吊装^[5]。完成位置调整操作后, 需检查第 1 节管道与第 2 节管道接口是否对齐。在满足这一要求的前提下, 于接口处涂抹密封胶, 并安装密封圈。为切实提高接口密封性能, 还可利用螺栓进行紧固处理。完成拼接作业后, 工程人员需向接口处注水进行密封检测。

2.2.5 注浆加固施工

为有效减少雨污分流顶管施工作业中的顶进阻力, 预防管道沉降或土层坍塌风险, 工程人员需着重关注注浆加固施工环节。案例工程中, 在该环节优先选用触变泥浆注浆加固技术。

一是通过顶管机尾部的注浆孔向管道外周注入触变泥浆。随着泥浆的逐渐凝固, 形成天然泥浆套, 对管道与土层进行隔离, 控制摩擦阻力。并且, 触变泥浆的填充性能较大, 可密实填充管道及土层空隙, 避免出现管道沉降或土层坍塌风险。针对触变泥浆的材料配比, 工程人员需要以施工需求及地质条件为参考标准。例如: 案例工程中将膨润土比例设定为 20%, 并优先选用优质钠基膨润土, 以切实提高泥浆的流动性能与触变性能; 将纯碱比例设定为 2%, 以改善泥浆 pH

值, 确保其性能稳定; 将 CMC 比例设定为 0.5%, 以提高泥浆粘度, 避免泥浆流失。完成原材料配制作业后, 需利用搅拌机设备对其进行充分搅拌, 达到泥浆均匀细腻的标准。

二是在注浆作业中可采取同步注浆与补浆相结合的工艺。其中同步注浆作业需开展于管道顶进作业期间。工程人员可根据管道直径及土层空隙率, 合理设定注浆量及注浆压力。案例工程中将注浆量设定为 $0.5 \text{ m}^3/1 \text{ m}$ 管道; 将注浆压力设定在 0.2 ~ 0.3 MPa 区间。完成管道顶进作业后, 工程人员需进行全面检查及补交作业, 通过二次注浆, 确保泥浆套完整, 具有稳定的固壁作用及减阻作用。在二次注浆中, 工程人员需酌情提高注浆压力, 使之处在 0.3 ~ 0.4 MPa 范围内。此外, 在注浆作业中, 工程人员需实时监测注浆量与注浆压力两大参数。若出现注浆压力骤升现象, 表明可能出现注浆孔堵塞问题, 此时需及时进行清理作业, 而后继续注浆。整体注浆作业结束后需全面展开效果检测, 通过超声波检测技术, 观察泥浆套形成情况, 以无损检测保证注浆效果, 切实保障工程综合效益。

3 结束语

与传统雨污分流技术相比, 顶管施工技术应用优势明显, 既不会对周边环境造成过大影响, 也能够适应复杂地质, 是提升市政给排水施工质量及综合效益的必要举措。为确保技术应用优势的充分体现, 在相关工程中, 工程人员需基于前期的勘察, 制定合理可行的施工方案。同时, 要着重推进顶管设备选型作业、工作井与接收井施工作业、管道顶进作业、注浆加固作业。整体工程任务结束后, 还需展开全面的质量检测, 有效保障雨污分流顶管工程的质量安全, 切实提高工程综合效益, 助力城市水环境的健康发展。

参考文献:

- [1] 尹莎莎. 市政雨污分流工程项目中的顶管施工工艺[J]. 四川建材, 2023, 49(04): 247-249.
- [2] 孙虹波. 市政雨污分流工程中顶管施工技术应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(16): 91-92.
- [3] 李新. 城市雨污分流摇管及微型顶管施工技术[J]. 建井技术, 2024, 45(02): 20-24.
- [4] 苏玲. 市政雨污分流工程中的顶管施工技术分析[J]. 居业, 2021(08): 73-74.
- [5] 郑于浩. 雨污分流工程中顶管施工工艺的应用与优化[J]. 清洗世界, 2025, 41(11): 78-80.

流化床 CVD 硅碳负极的制备与性能优化

杨林涛, 陶刚义, 杜晓辉

(内蒙古兴洋科技股份有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010400)

摘要 为应对硅基负极材料在循环中体积膨胀的挑战, 本研究利用流化床化学气相沉积 (CVD) 方法, 以多孔碳为基底, 硅烷 (SiH_4) 为硅源, 乙炔 (C_2H_2) 为碳源, 成功制备了系列纳米硅/碳复合材料; 系统地研究了硅烷沉积温度、沉积时间、碳包覆温度及时间等关键工艺参数对材料硅含量及储锂性能的影响规律, 以期为高性能硅碳负极的规模化制备提供工艺方案和理论参考。实验结果显示, 在精细调控工艺参数下, 可制备出硅含量高达 56 wt% 的复合材料, 该材料展现出了高比容量 ($1\ 807\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$)、高首效 (85.7%) 及出色的循环性能 (在 $500\ \text{mA} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下, 经过循环 150 次后容量保持率为 77%)。

关键词 硅碳负极; 化学气相沉积 (CVD); 流化床; 电化学性能

中图分类号: TM912

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.022

0 引言

鉴于电动汽车和便携电子器件对锂离子电池能量密度需求的日益增长, 研发新型高容量负极材料已成为焦点领域^[1]。硅因其高比容量和自然丰度被视为理想候选材料, 但其循环过程中的体积膨胀导致电极结构破坏和容量衰减。硅碳复合材料通过碳基质缓冲硅的体积变化, 可显著改善循环稳定性^[2]。然而, 如何实现硅纳米颗粒在碳载体中的均匀分散及稳定包覆仍是技术难点。本研究基于化学气相沉积法, 以多孔碳为基体, 通过优化工艺条件, 成功制备出具有高容量和长循环寿命的硅碳负极材料, 并系统研究了电池制备工艺对性能的影响。

1 实验部分

1.1 材料制备

以山东圣泉 ZLD-2 多孔碳 (500 g) 为基体, 置于流化床反应器中。在 N_2 载气 (流量 $10\ \text{L}/\text{min}$) 氛围下, 升温至设定温度 ($520 \sim 580\ ^\circ\text{C}$) 后通入硅烷进行化学气相沉积。沉积完成后, 在特定温度 ($540 \sim 580\ ^\circ\text{C}$) 下通入乙炔进行碳包覆。通过精确控制硅烷流量 ($0.9 \sim 1.2\ \text{L}/\text{min}$)、沉积时间 ($335 \sim 530\ \text{min}$)、乙炔流量 ($1.2 \sim 1.5\ \text{L}/\text{min}$) 和包覆时间 ($25 \sim 100\ \text{min}$) 来调控材料硅含量与包覆层结构。最终产物在氮气保护下冷却到室温后取出。

1.2 电池组装与性能测试

浆料制备采用 92 wt% 硅碳材料、2 wt% PVDF 粘结剂、4 wt% KB 导电剂和 1 wt% SCNT。极片负载量控制

在 $0.7\ \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 采用 CR2032 型扣式电池, 电解液为 $1\ \text{M}\ \text{LiPF}_6$ in DEC/DMC/EC (1:1:1) 添加 10 wt% FEC。电池在新威测试系统上进行恒流放电测试, 电压范围 $0.01 \sim 1.5\ \text{V}$ 。

2 结果与讨论

2.1 沉积温度对硅碳材料储锂性能的影响

首先, 通过不同温度下的典型充放电曲线, 对比材料的首效及后续循环性能。在 $520\ ^\circ\text{C}$ 沉积温度下, 材料的首次充电比容量约为 $1\ 440\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 首次放电比容量约为 $1\ 046\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 首次库仑效率为 72.2%。后续循环中曲线重合度高, 可逆比容量维持在约 $1\ 000\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 体现了良好的电化学可逆性。当温度升至 $550\ ^\circ\text{C}$ 时, 首次充电比容量降至约 $1\ 200\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 放电比容量约为 $823\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 首次库仑效率为 68.2%; 后续循环仍保持稳定, 但容量水平有所降低。在 $580\ ^\circ\text{C}$ 条件下, 首次充电比容量进一步下降至约 $1\ 120\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 放电比容量约为 $733\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 首次库仑效率为三者最低 (65.3%); 后续循环容量较低, 但曲线平稳。对比显示, $520\ ^\circ\text{C}$ 在首次可逆容量与首效之间取得了最佳平衡。其次, 循环性能结果进一步凸显了温度的影响。 $520\ ^\circ\text{C}$ 组展现出最高的初始放电比容量 (接近 $1\ 000\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$), 但其容量衰减最为迅速, 约 20 次循环后即降至 $200\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下。 $550\ ^\circ\text{C}$ 组的初始放电比容量约为 $850\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$, 虽低于前者, 却表现出最优的循环稳定性, 容量衰减平缓, 40 次循环后仍能维持约 $400\ \text{mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 。 $580\ ^\circ\text{C}$ 组的初始放电比容量约为

作者简介: 杨林涛 (1986-), 男, 硕士研究生, 中级化工工程师, 研究方向: 硅烷及硅基电子材料。

750 mAh · g⁻¹, 循环稳定性介于两者之间, 40 次循环后容量大约为 350 mAh · g⁻¹。在库仑效率方面, 三组材料均从第二次循环起迅速上升并趋近于 100%, 且后续循环中保持稳定, 表明电极界面副反应得到有效控制, 循环可逆性良好。

硅烷沉积温度是调控硅碳复合材料性能的关键因素。较低温度 (520 °C) 有利于获得较高的首次可逆容量, 但可能牺牲结构稳定性, 导致循环性能较差; 较高温度 (550 °C、580 °C) 虽使初始容量有所降低, 却促进了更稳定复合材料结构的形成, 从而显著改善循环寿命。

2.2 包覆时间、温度对硅碳材料储锂性能的影响

探究碳包覆条件, 保持其他工艺条件 (N₂ 载气流量为 10 L/min, SiH₄ 硅烷沉积温度为 520 °C、流量为 1.2 L/min、时间为 360 min) 不变。制备了四种在不同温度和流量下进行乙炔裂解碳包覆的硅碳材料, 分别为: (1) 包覆温度 540 °C、流量 1.2 L/min、时间 75 min; (2) 包覆温度 560 °C、流量 1.2 L/min、时间 75 min; (3) 包覆温度 540 °C、流量 1.5 L/min、时间 80 min; (4) 包覆温度 580 °C、流量 1.5 L/min、时间 80 min。在空气中对四种材料进行煅烧, 称量并计

算得到硅含量分别为 51.0 wt%、49.6 wt%、49.5 wt% 和 49.2 wt%^[3]。随着包覆温度和通入乙炔总量的增加, 硅含量逐渐下降, 这是因为更多的乙炔裂解导致碳包覆量增加 (见图 1、图 2)。

2.3 高性能硅碳材料性能表征

本研究确定了硅碳复合材料的最优制备工艺参数: 沉积温度 520 °C, 沉积时间 435 min; 包覆温度 540 °C, 乙炔流量 1.5 L/min, 包覆时间 90 min。在此优化工艺下, 成功制备出硅含量高达 56 wt% 的硅碳复合材料。通过 X 射线衍射 (XRD) 对材料结构进行表征, 结果显示, 该材料的 XRD 图谱在 20° 至 30° 范围内呈现一个宽泛的弥散包, 此为典型的非晶态结构特征, 未观察到尖锐的晶体硅衍射峰, 证实所制备的材料具有纳米非晶态结构。这种结构有利于缓解嵌锂脱锂过程中的体积膨胀, 从而提升材料的电化学稳定性^[4]。

该硅碳材料的电化学性能通过充放电测试与循环性能测试进行评估。在 100 mA · g⁻¹ 的电流密度下, 材料首次充电比容量高达 1807 mAh · g⁻¹, 首次放电比容量为相应值, 计算得出的首次库仑效率 (ICE) 达到 85.7%。如此高的首效表明材料表面的固体电解质界面 (SEI 膜) 形成过程中的不可逆损耗较低, 体现了优化

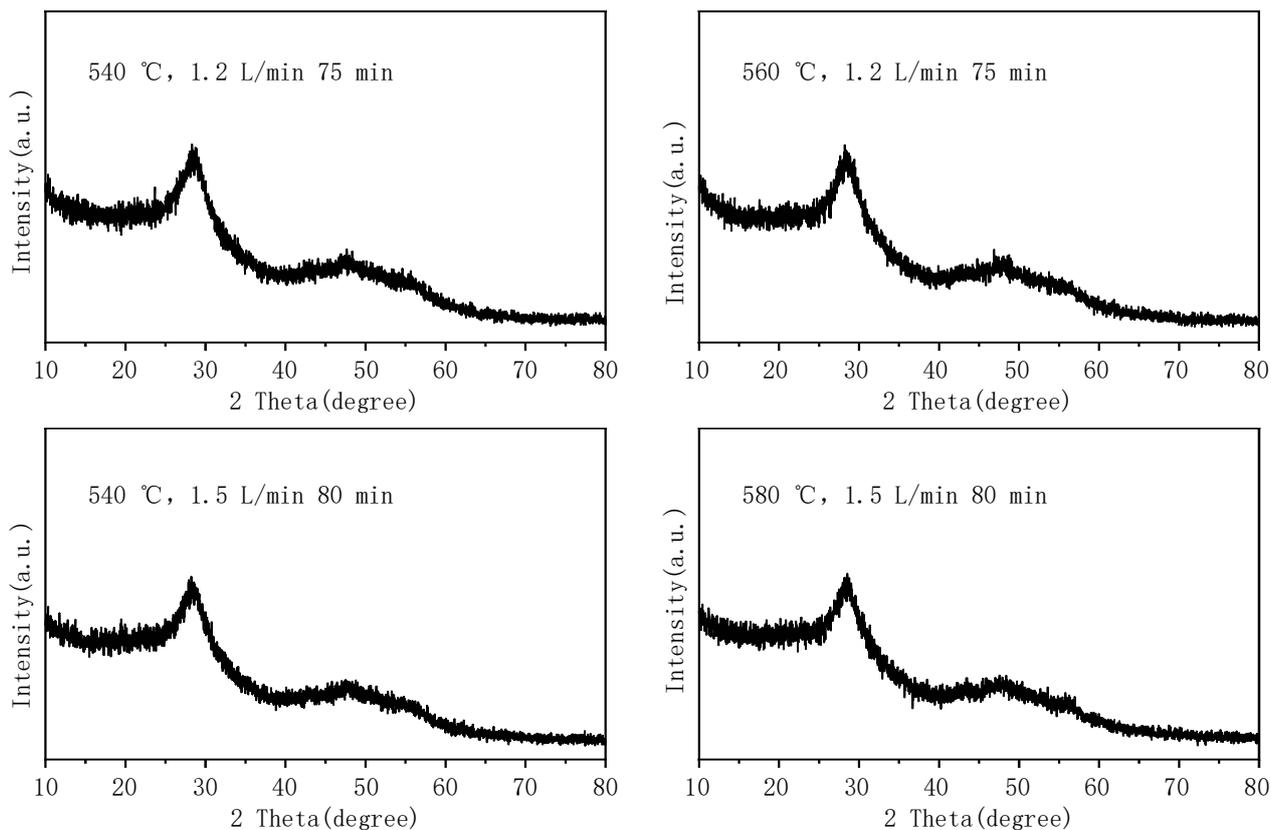


图 1 不同碳包覆条件下制备的硅碳材料性能—XRD 图谱

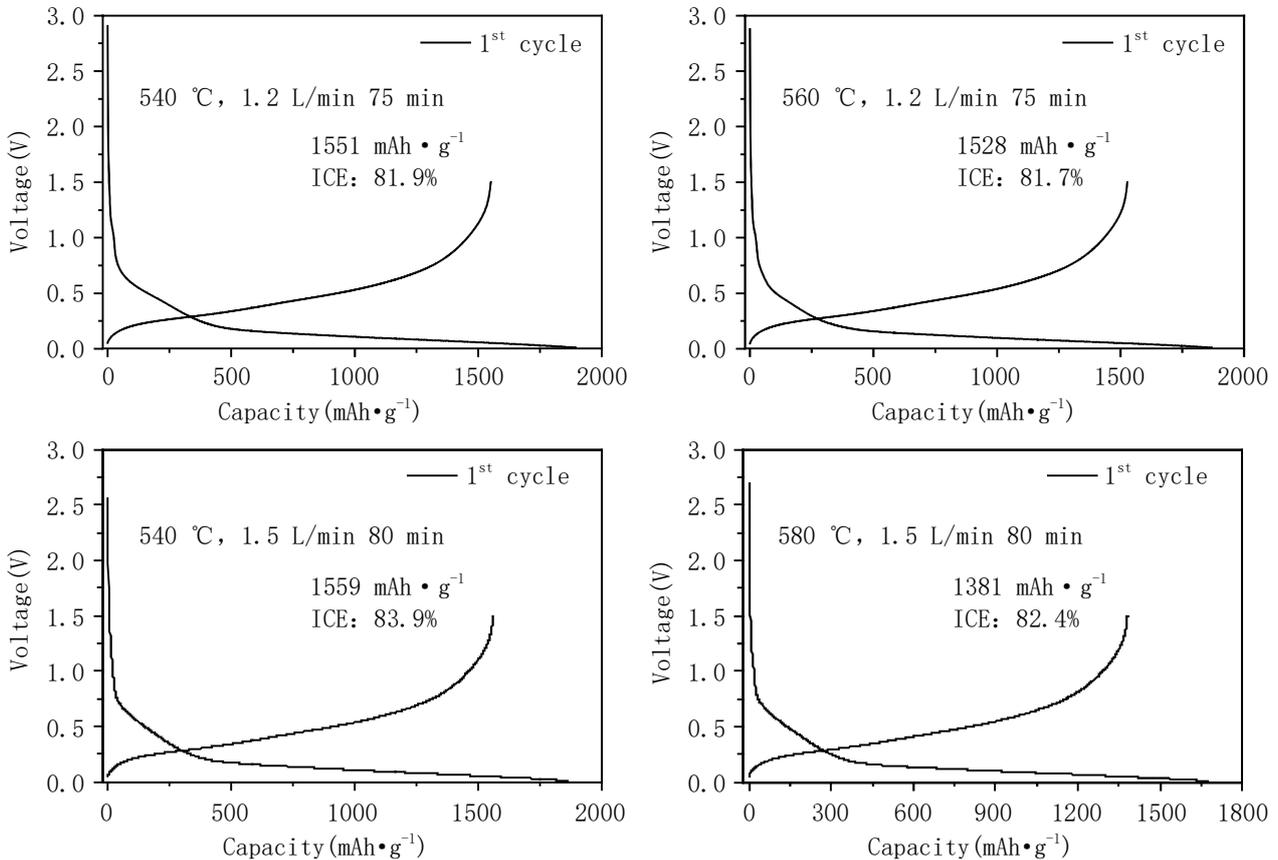


图2 不同碳包覆条件下制备的硅碳材料性能—100 mA·g⁻¹ 电流密度下的充放电曲线

的制备工艺有效减少了副反应的发生。在后续的第二和第三次循环中，其充放电曲线几乎完全重合，显示出电极反应优异的可逆性与循环稳定性^[5]。

为深入评估材料的长期循环性能，在 200 mA·g⁻¹ 和 500 mA·g⁻¹ 两种较高的电流密度下进行了循环测试。测试结果表明，该材料展现出卓越的容量保持能力。在 200 mA·g⁻¹ 的电流密度下循环 110 次后，材料的放电比容量保持率高达 79%。即使将电流密度提升至 500 mA·g⁻¹ 并循环 150 次后，其容量保持率依然维持在 77% 的水平。两条循环曲线均显示出库仑效率从首次循环后迅速上升并很快稳定在 99% 以上，证明了循环过程的高度可逆性。优异的倍率性能和循环稳定性共同表明，该 56 wt% 高硅含量的纳米非晶态硅碳材料能够有效耐受不同倍率的充放电冲击，结构保持完整，具有显著的综合性能优势。

3 结束语

本研究通过优化流化床 CVD 工艺，成功制备出高性能硅碳负极材料。硅烷沉积温度 520 °C、乙炔包覆温度 540 °C、包覆时间 90 min 为最优工艺条件，可实现硅含量 56 wt% 且结构稳定。材料比容量达 1 800 mAh·g⁻¹，

ICE 超过 85%，在 500 mA·g⁻¹ 大电流下循环 150 次容量保持率 77%，优于商业样品。

参考文献:

- [1] 桑元. 流化床化学气相沉积法制备高质量氮化钛粉体研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2020.
- [2] 杨旭,程心雨,刘荣正,等.流化床-化学气相沉积法制备金属涂层包覆燃料颗粒[J].清华大学学报:自然科学版,2021,61(04):361-366.
- [3] 刘荣正,赵健,刘马林,等.基于流化床化学气相沉积的碳化硅材料制备,性能及其在核领域的应用[J].硅酸盐学报,2020(03):381-390.
- [4] 桑元,向茂乔,宋焱,等.流化床化学气相沉积法制备近化学计量比的TiN粉体[J].化工学报,2020,71(06):2743-2751.
- [5] 程心雨,刘泽兵,刘荣正,等.碳化硅包覆层的流化床-化学气相沉积制备工艺研究[C]//中国核科学技术进展报告(第八卷)第3册核材料核化学与放射化学铜系物理论与化学,2023.

DCS 控制系统在化工仪表中的应用分析

李 聪

(中国石油化工股份有限公司济南分公司, 山东 济南 250100)

摘 要 随着科学技术的快速发展, 自动化技术已在各个领域占据着主导地位。化工仪表自动化, 即利用计算机技术将化工仪表应用在自动控制器中实现化工生产自动化。分散控制系统 (Distributed Control System, 简称 DCS, 也称“集散控制系统”) 就是一种典型的先进工业自动化控制系统。在工业自动化领域, 组态软件扮演着不可或缺的角色, 可实现工业可视化。DCS 控制系统的组建同样需要相应的组态软件实现。本文以中控 DCS 的 ECS-700 组态软件为例, 针对仪表自动控制系统的单回路控制和串级控制、DCS 控制系统的组成及组态等简单应用进行研究, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 DCS 控制系统; 单回路控制; 串级控制; 过程检测仪表

中图分类号: TQ06; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.023

0 引言

DCS 是一种实现过程控制与工厂管理一体化的综合自动化系统, 可实现生产流程的自动化监视、操作与运营管理, 节约人力, 极大地提高了生产效率, 降低了成本, 且提升了产品的质量^[1]。DCS 控制系统主要依靠组态软件得以实现, 成熟的组态软件在化工生产中扮演着至关重要的角色, 为工程师提供实现工业自动化系统所需的工具和功能。目前, 多数企业主要采用横河 DCS 和中控 DCS 的组态软件。由于目前国产化的趋势, 未来将会大范围采用中控 DCS, 因此本文主要对中控 DCS 系统进行相关阐述。

1 自动控制系统

1.1 自动控制系统的分类

自动控制系统指的是利用自动控制装置将某些工艺参数自动控制在设定值范围内, 当有干扰出现时, 仍能使所控制的工艺参数不受干扰影响而偏离设定值, 最终将参数控制在设定值附近。

自动控制系统的性能主要体现在稳定性、快速性和准确性三个方面:

1. 稳定性: 在输入扰动下, 系统仍能保持平衡状态。倘若系统不稳定, 那么将会表现为持续振荡或发散, 始终无法达到平衡状态。

2. 快速性: 当有干扰出现时, 系统的响应速度体现在动态响应时间以及稳态误差上。

3. 准确性: 系统的最终输出与设定值的误差。

稳定性是自控系统的前提, 快速性和准确性是自动系统的保障, 三者共同决定着自动控制系统的整体性能。

自动控制系统可分为简单控制系统和复杂控制系统。简单控制系统由被控对象、用于测量与检测的变送器、用于运算的控制器以及用于执行的调节阀这四大基本环节组成^[2], 按闭环反馈原理构成一个回路。与之相对应的是, 在结构、策略或功能上更为高级的系统, 则被称为复杂控制系统。当前工业过程中广泛采用的串级、均匀、比值、前馈—反馈及分程等系统, 均属于复杂控制系统的典型范畴。它们的共同结构特点是: 系统内至少包含两个测量变送器、控制器或控制阀。在石油化工生产中, 某些被控对象其动态特性表现为严重滞后和较大的时间常数, 然而根据工艺要求, 变量又需要严格把控控制精度, 此时, 简单的控制系统难以满足需求, 转而采用串级控制系统是普遍选择。

1.2 单回路与串级控制比较

现以重整加热炉 F-204A 为例, 对单回路控制和串级控制两种控制策略进行对比。其中, 燃料气作为操作变量, 控制炉温度。当调节阀直接控制温度时, 就是单回路控制。而串级控制指的是, 调节阀控制燃料气流量, 通过对流量的控制, 实现炉温度的控制, 其控制系统图如图 1 所示。

作者简介: 李聪 (1994-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 仪表自动化。

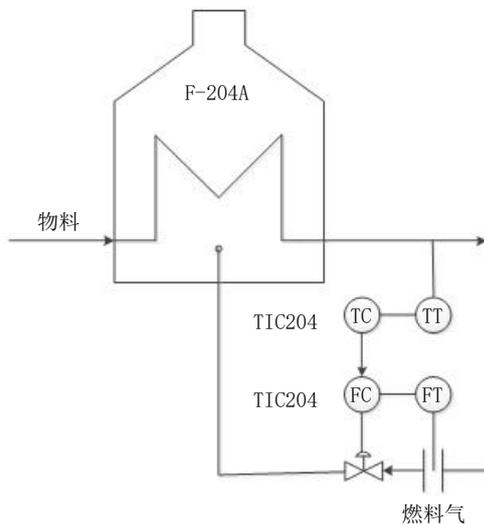


图1 加热炉出口温度串级控制系统

经查阅资料及计算可知，温度对象传递函数与流量对象传递函数分别为：

$$G_{01} = \frac{1}{(30s+1)(3s+1)}, G_{02} = \frac{1}{(10s+1)(s+1)^2}$$

为比较两种控制方式的性能，在 MATLAB 环境中建立模型并仿真，获取二者的阶跃响应对比图 2 左。由图可见，与单回路控制相比，串级控制的核心优势体现在其更快的响应速度以及更稳定的控制效果上。在两种控制已达到稳定状态下，在温度对象前引入阶跃干扰（均产生于 120 s）来模拟两种策略对干扰的响应速度及稳定误差，得到响应图 2 右。可见，串级控制对干扰的响应速度更快，稳态误差更小。从而得出结论：串级控制抗干扰能力强于单回路控制的抗干扰能力。

通过本次简单的仿真实验，可得出结论，在化工生产中，仅凭简单的单回路控制是很难实现复杂的生

产过程的，必须借助复杂控制回路来实现，而串级控制系统是工业中较常用的复杂控制回路。

2 DCS 控制系统

2.1 DCS 控制系统组成

DCS 由控制站、操作站和数据通信总线组成。其中，控制站作为 DCS 的核心单元，负责直接采集现场 I/O 数据、执行控制运算，从而实现对整个工业过程的实时控制^[3]。以中控技术旗下的 ECS-700 系统为例，ECS-700 由控制器模块、I/O 模块、通信模块、VisualField 软件包组成。控制器模块、I/O 模块、通讯模块组成了系统的控制站。VisualField 软件包包括控制组态软件和监控软件。工程师站配备了专用的组态软件平台。工程师利用该平台，可根据特定工艺需求构建完整的应用系统，完成对软硬件组态的创建、编辑，并将最终配置下载至控制系统。操作员站通过其运行的实时监控软件，构建了与控制站的双向通信链路：一方面接收来自控制站的实时过程数据用于监视现场工艺过程，另一方面则向其发送操作命令用于控制现场设备。

2.2 ECS-700 系统 I/O 位号及 AI 应用

2.2.1 ECS-700 的 I/O 位号

I/O 位号包括模拟输入位号 (AI)，模拟输出位号 (AO)，数字输入位号 (DI)，数字输出位号 (DO)。AI 位号可兼容多种类型的信号，其信号源包括常规 AI、热电阻、热电偶、脉冲量等^[4]。在组态配置下，这些原始信号经过处理后可转换为可直接使用的工程量。AO 位号作为控制输出的通道，负责将运算得到的模拟量控制指令传送至 AO 模块，进而直接控制现场执行机构的动作。现场设备的开关量状态信号首先通过 DI 模块接入系统，由对应的 DI 位号进行采集。该位号根据

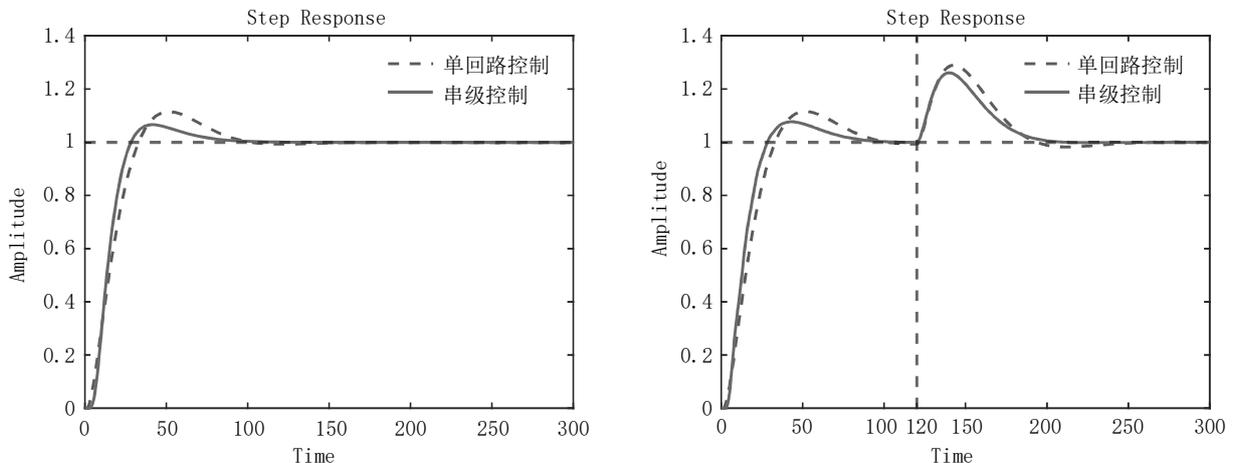


图2 单回路与串级控制对比图

预设的组态逻辑对原始信号进行处理,从而确定其最终的开关状态值。控制系统中运算产生的开关量指令,通过 DO 位号传递给 DO 输出模块。该模块根据指令动作,最终实现对现场设备(如报警灯、电机接触器)的状态指示或直接控制。

2.2.2 化工过程检测仪表在 DCS 的显示

石油化工生产的安全、稳定、长周期及高效运行,必须建立在对生产过程温度、压力、流量和液位等参数的实时精确测量基础之上,用于完成过程参数检测任务的设备统称为过程检测仪表。压力及液位在 DCS 的显示,其组态相对简单。控制系统需要配备 AI-711 模拟信号输入卡件。在相应控制站,对应的卡件地址,进行位号组态即可,组态内容包括:位号、位号说明、量程、单位等。

例如:某炼油厂采用热电偶和热电阻进行温度的检测。温度仪表在 DCS 上的显示分三种情况,第一种现场为温度变送器,则 DCS 可使用 AI-711 模拟信号输入卡件,通过组态可直接在 DCS 上显示。第二种现场无温度变送器,但在机柜内采用温度安全栅,则 DCS 仍使用 AI-711 模拟信号输入卡件。第三种现场测量仪表无变送器,也无温度安全栅,则可以使用相对应的 AI-722 热电偶输入卡件、AI-731 热电阻输入卡件。若为前两种情况,只需要在对应的常规卡件地址处进行位号组态即可。若为第三种情况,需先对卡件进行相应的配置。AI-722 需要配置该通道的热电偶类型以及设置量程。AI-731 则需要配置三线制或四线制采样模式、热电阻类型以及设置量程。

流量仪表在 DCS 的组态需注意选择是否进行开方,一般若为差压式测量方法,往往都需要进行开方运算。例如:电磁、超声波、涡街、转子等流量计一般都不需要开方运算。有些流量仪表还需要具有累计显示功能,可使用积分功能块实现。积分功能块中的模式设置有三种:0 代表限幅,1 代表自动复位,2 代表始终累积,一般选择模式 2。

2.3 单回路与串级回路组态

现以图 1 为例,进行单回路与串级回路的组态工作。其中,单回路是对温度的自动控制,采用 PID 功能块实现。常见的串级控制有加热炉温度+流量控制,温度+压力控制,汽包液位+流量控制。图 1 中串级控制则是典型的加热炉温度+流量控制形式,即通过流量来控制温度。

为实现无扰动切换,在 PID 控制回路中,A0 位号

内置了反演计算功能。该功能会生成一个反演计算输出值(BKOUT),并回馈至上游功能块作为其反演输入。其核心逻辑是令 BKOUT 始终等于 A0 位号的当前输出值(OUT),即 $BKOUT=OUT$ 。当 A0 位号处于强制输出状态时,其所在的 PID 控制回路被视为处于开环状态^[5]。在此状态下,上游功能块的输出值将不再由自身算法决定,而是直接跟踪其反演输入值。这样一旦 A0 强制状态解除,就实现了无扰切换。BKOUTERR 与上游功能块的 BKINERR 相连,若 A0 位号进入 OOS、跟踪、强制或故障安全任一状态,其错误状态输出(BKOUTERR)将置为 ON,由于 BKOUTERR 与上游功能块的 BKINERR 相连,此信号会直接导致上游功能块切换至 IMAN(初始化手动)状态,从而起到保护作用。其关系可描述为 $PID.MV=PID.BKIN=A0.BKOUT=A0.OUT$ 。

串级控制通过主、副回路的功能分工实现更优控制。主回路 TIC204 负责根据被控变量温度 TI204 与温度设定值的偏差进行计算,但其输出并不直接驱动调节阀,而是作为副回路 FIC204 的设定值。副控制器将据此设定值与副被控变量测量值进行比较和 PID 运算,其输出结果才最终作用于调节阀。

3 结束语

本文在介绍仪表自动控制系统的基础上,通过对重整加热炉相关参数的仿真实验,对比了单回路与串级控制的性能,证明了后者在响应速度、稳定性和干扰能力上均优于前者。以中控 ECS-700 为例对 DCS 控制系统进行详细的介绍,包括 I/O 位号组态以及化工 4 个过程参数在 DCS 显示的简单组态、单回路和串级控制组态,旨在为促进 DCS 控制系统在化工仪表中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 申圣强,黄国新,于英杰.化工安全生产中 DCS 自动化控制的应用[J].石油化工安全环保技术,2024,40(02):4-6,35.
- [2] 王佳琦.石油化工仪表中的自动化控制技术探讨[J].科学与信息化,2025(10):111-113.
- [3] 陈静云.基于 DCS 控制系统的化工自动化控制[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(02):124-126.
- [4] 董振锋.ECS-700 在化工自动化控制的应用[J].今日制造升级,2023(04):104-107.
- [5] 毕涛,刘迪,杨莉莉.基于串级控制系统控制液位的设计与分析[J].船电技术,2022,42(01):1-4.

城市集中供热系统能效优化与节能分析

王若川

(沈阳市热力工程设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110014)

摘要 在“双碳”战略目标落地与城市高质量发展的双重牵引下, 能源结构转型与能效提升已成为城市基础设施现代化建设的核心议题。城市集中供热系统作为北方地区冬季民生保障的关键载体, 亦是能源消耗的重点领域, 当前正面临热源结构亟待优化、管网老化问题凸显、调控模式相对粗放等多重现实挑战。随着可再生能源规模化接入与智慧城市建设的持续推进, 传统供热模式正经历深层次变革, 其能效水平直接关系到能源安全保障、生态环境承载力及供热企业可持续运营能力, 开展系统性节能优化已成为行业发展的必然要求。基于此, 本文对城市集中供热系统能效优化与节能分析进行研究, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 城市集中供热系统; 热源侧能效; 热网输配; 用户侧节能

中图分类号: TU995

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.024

0 引言

提升集中供热系统能效, 不仅是促进能源资源集约利用的核心路径, 更是推动城市绿色低碳转型的重要抓手。通过技术创新与管理模式革新实现系统层面的节能, 可有效降低供热运营成本, 提升供热质量与运行稳定性。同时, 这也是供热行业主动适应能源价格波动、积极应对气候变化、切实履行碳减排责任的必然选择, 对构建清洁低碳、安全高效、智能协同的现代城市能源体系具有深远的战略意义与重要的实践价值。

1 城市集中供热系统组成与运行模式

城市集中供热系统核心架构涵盖热源、热网及热用户三大核心模块。其作为系统能量供给的源头, 热源形式呈现多元化特征, 既包含热电联产电厂、区域燃煤或燃气锅炉房等传统热源, 亦囊括地热利用装置、工业余热回收系统及清洁能源供热站等低碳化热源类型。热网作为热量传输与分配的关键载体, 采用一次管网与二次管网分级布局模式, 借助换热站完成热量的传递转换与精准分配, 实现热源与用户侧的高效衔接^[1]。热用户作为热量消耗终端, 覆盖各类民用与公共建筑, 其内部散热末端是热量利用的最终执行单元。在运行调控方面, 系统多遵循“以热定电”或“以电定热”的负荷协调原则, 依托中央智能调度平台, 结合室外环境气象参数动态变化及用户侧用热需求反馈信息, 对热源输出功率、管网介质流量等关键参数进行全域

联动调节, 进而在保障供热稳定性与舒适性的前提下, 提升系统整体运行的经济性^[2]。

2 影响供热系统能效的关键因素分析

2.1 热源侧能源转换效率偏低

热源侧能效水平直接决定了集中供热系统的整体节能效果, 是能效提升的核心抓手。燃煤、燃气锅炉的额定能效指标虽已达到较高水平, 但在实际运行过程中, 因用户热需求动态变化导致负荷频繁波动, 锅炉常脱离设计高效运行区间, 使得实际平均运行效率大幅回落。对于热电联产机组而言, “以热定电”的运行模式在保障供热稳定性的同时, 也限制了电负荷的调节灵活性, 尤其在非供暖季或热负荷低谷时段, 机组的热电联供综合能效优势难以充分发挥^[3]。此外, 部分热源设备已进入长期服役阶段, 设备老化现象较为突出, 加之自动化调控体系不完善, 燃烧工况的精准调控能力不足, 且排烟温度偏高的问题未得到有效解决, 进一步加剧了能源的无效损耗。

2.2 热网输配环节能量损失显著

热网作为集中供热系统的热量传输核心通道, 其保温性能优劣与水力工况稳定性直接影响输配阶段的能效水平。随着管网服役时间的延长, 保温层性能会逐步衰减, 其中直埋管道的接口及补偿器部位因结构特殊性, 成为热量散失的主要薄弱环节。更为关键的是, 当前多数供热管网普遍存在水力失调现象, 具体表现为管网近端与远端用户的流量分配失衡。为保障远端

作者简介: 王若川 (1993-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 热力方向。

不利环路用户的正常用热需求，需通过提升系统整体循环流量与扬程来弥补，这不仅导致大量电能消耗于克服管网无效阻力，还需通过提高供水温度确保远端用户采暖效果，最终造成管网沿途散热损失进一步加剧。

2.3 系统调控粗放，水力热力失调问题凸显

当前国内多数集中供热系统依旧延续“大流量、小温差”的传统质调节方式，尚未构建起基于用户实际用热需求的精细化调控体系。多数热力站缺乏自动化气候补偿装置，分时分区调控能力普遍不足，致使供水温度调节存在显著的滞后效应。在二次管网运行过程中，垂直方向与水平方向的热力失调问题交织存在，同一建筑内不同楼层、不同朝向的房间室温差异明显^[4]。为保障低温薄弱区域达到基本采暖标准，系统不得不被动提高整体供热量，最终形成“过量供热”的被动局面。这种热力分布不均的失调现象，正是诱发系统能耗居高不下与用户用热投诉频发的核心诱因。

2.4 用户侧用能信息缺失，供需互动机制亟待完善

用户作为供热服务的终端载体，其用能行为特征与建筑自身围护结构特性，对供热系统的整体能效起着决定性作用。既有建筑普遍存在围护结构保温性能欠佳的问题，直接导致热量散失量偏高。更为关键的是，分户热计量装置与室温自主调控设备配置率不足，用户难以根据自身用热偏好灵活调节供热量，既无法享受节能带来的实际收益，也缺乏有效的用热调节途径，进而出现开窗散热等非理性用热行为。从系统调控层面分析，由于无法精准捕获用户端实际用热数据，难以开展基于需求预测的精准供热调控工作，最终因供需匹配失衡，造成大量能源无效损耗。

3 集中供热系统能效优化关键技术

3.1 多源协同驱动与运行优化赋能热源侧提效

该技术以提升能源转换全链条能效为核心导向，核心思路在于构建热电联产机组、调峰锅炉与可再生能源互补的多热源协同运行架构，依托优化算法实现负荷的经济性动态分配，保障各类热源稳定运行于高效工况区间。具体实施路径可从三方面推进：一是针对大型燃煤锅炉，重点开展低氮燃烧技术改造，搭配智能吹灰自适应控制策略，破解传统燃烧效率偏低与积灰能耗损耗难题^[5]；二是对于燃气锅炉，着力完成比例调节系统升级，同步配套烟气冷凝热回收装置，最大化挖掘烟气余能潜力；三是聚焦热电联产机组，一方面推广吸收式热泵深度回收烟气余热技术，另一方面积极探索电热解耦灵活性改造路径，持续提升其在新型电力系统中的调节响应能力与综合能效水平。

3.2 水力平衡优化与智能调控主导热网输配升级

该技术聚焦热网输配环节能耗损耗削减，通过硬件装备迭代与运行策略优化双轮驱动，实现输配效率的系统性提升。在硬件配置层面，推广应用压力无关型平衡阀、分布式变频泵等关键设备，构建精细化水力平衡系统，从源头破解传统热网普遍存在的静态水力失调问题；在运行调控层面，大力推行二级泵变流量调节模式，将传统固定流量运行系统改造为适配末端用热需求的动态流量调控系统，有效降低循环水泵电耗。与此同时，推进智能换热站建设，配套部署气候补偿器、分时分区控制器等智能设备，实现供水温度与流量的实时自适应调控，推动供热模式从传统“供给导向”向现代“需求导向”转变，真正达到“按需供热”的核心目标。

3.3 建筑节能升级与计量温控协同的用户侧互动技术

该技术聚焦用户侧节能潜力的深度挖掘，核心目标在于构建供热系统供需两端高效联动的良性互动机制。在实践推进过程中，需紧密衔接城市更新战略部署，将既有建筑围护结构节能改造作为重要抓手，通过外墙保温强化、外窗气密性提升、屋面节能优化等具体举措，从源头上削减建筑自身基准热负荷，为后续节能增效奠定坚实的基础^[6]。技术实施的关键环节在于构建全覆盖的分户热计量与室温精准调控体系，通过为用户端加装通断控制阀或自力式恒温阀，切实赋予用户根据自身用热需求自主调节室温的主动权，既保障用户用热舒适度，又为行为节能提供硬件支撑。与此同时，将分户热计量数据深度融入供热收费核算体系，实现“用热多少、付费多少”的精准计费，充分激发用户节能内生动力；同时依托计量数据构建系统能效诊断平台，精准定位供热系统运行中的能效短板与优化空间。

3.4 物联网与人工智能融合的智慧供热管控技术

该技术以构建集中供热系统数字化、智能化管控中枢为核心目标。通过在供热全链路部署物联网感知终端，动态捕获热源运行特性参数、管网温度压力流量数据、换热站实时工况及典型用户用热反馈信息，进而构建覆盖“热源—管网—换热站—用户”全链条的数字孪生映射体系。依托大数据深度挖掘技术与人工智能算法模型，精准实现短期供热负荷预测、系统运行状态实时故障诊断及调度方案全局最优配置。通过构建一体化智慧供热管理平台，打通各环节管控壁垒，形成多维度联动智能调控机制，推动供热系统运

行模式由传统经验主导向数据支撑与模型驱动并重转型,为持续提升系统能源利用效率、保障安全经济运行筑牢技术根基。

3.5 基于管网状态动态感知的泄漏与保温效能监测技术

该技术聚焦管网“数字神经网络”构建,精准捕捉输配系统隐性能量损耗特征并实现主动预警。核心思路在于依托主干线及关键节点部署分布式光纤测温系统、声学传感器与压力变送器,构建多物理量协同实时监测网络。通过解析管道压力波异常衰减规律,结合特定声波频谱的差异化特征,可智能辨识微小泄漏点位并完成定位,推动管网运维从传统“被动抢修”向“主动预警”转型。与此同时,融合红外热成像无人机巡检成果与分布式光纤温度监测数据,构建保温层热损失三维评估模型,精准量化防水层破损、土壤含水率波动及材料老化等因素引发的保温性能劣变程度,明晰其空间分布规律^[7]。该技术为管网维护决策提供可靠量化支撑,助力运维模式从定期检修向预测性维护升级,有效降低长期热损失,规避次生灾害发生风险。

4 节能效果量化分析模型

4.1 基于能量流分析的节能量计算模型

该模型以系统能量平衡原理为核心支撑,聚焦宏观层面的节能量核算工作,关键在于构建贯穿热源燃料消耗、管网输配电耗及各环节散热损失的全链条能量流图景。在实践中,通过锚定相同气候条件(一般采用日数或小时数完成工况修正),对比节能改造前后系统的总能耗差异,可直接实现节能量的量化统计。具体核算时,可进一步拆解为燃料节约量与电力节约量两个核心维度,再通过标准煤当量折算完成统一计量^[8]。该模型的核算精度高度依赖计量数据的全面性与可靠性,是评估节能项目整体成效的基础工具,在节能目标考核、项目效益核算等实际场景中应用广泛。

4.2 基于关键性能指标的能效对标分析模型

该模型通过构建并动态追踪一套精细化能效指标体系,实现对系统运行过程的精准诊断与对标管控。指标体系覆盖多维度关键参数:热源侧重点包含单位热量燃料消耗、热电联产机组热电比;管网侧聚焦单位面积输送电耗、供回水温差、循环水量系数等核心参数;系统侧则侧重单位面积供热能耗、管网热损失率等综合指标。通过对上述指标开展长期持续监测,结合设计标准值、历史最优运行值或行业先进水平进行对标研判,既能精准定位系统能效的薄弱环节,又

可量化各环节的节能改进空间。该模型更适配于系统运行优化调控、持续性能提升等精细化管理场景。

4.3 集成经济效益与环境效益的综合评估模型

该模型以节能量的精准量化为核心切入点,进一步拓展至技术措施经济价值与环境效益的协同测算维度。在经济性评估层面,通过系统核算节能产生的直接收益、运行维护成本的动态变动及项目初始投资规模,逐步推导静态投资回收期、净现值、内部收益率等核心财务评价指标^[9];环境效益评估则立足节约标准煤的总量数据,结合行业通用排放因子,精准量化二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物及粉尘等关键污染物的减排成效。该模型可为决策主体提供全方位的成本效益分析视角,不仅是研判节能项目可行性、开展优先级排序的重要依据,更是对接绿色金融支持、兑现碳减排收益的核心支撑工具。

5 结束语

集中供热系统能效提升绝非单一环节的改进,而是涵盖技术创新、管理优化与政策保障的系统性工程,需始终秉持“源—网—站—户”全链条协同优化的核心原则。未来,随着智慧供热技术与多元化清洁能源的深度融合,集中供热系统将逐步向柔性化调节、低碳化运行、高效化管控的方向发展。持续推动关键技术突破与体制机制改革,为城市能源体系可持续发展注入强劲动力,为“双碳”目标实现提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 黄悦.基于大数据分析的城市集中供热系统节能优化技术研究[J].科学技术创新,2025(19):201-204.
- [2] 张月.城市集中供热运行调节及负荷预测分析[J].暖通空调,2024,54(S1):50-52.
- [3] 张哲宇.试论城市集中供热运行管理的节能降耗措施[J].居业,2024(01):131-133.
- [4] 李跃.城市集中供热系统优化运行及节能改造措施研究[J].工程技术研究,2023,08(24):226-228.
- [5] 李琳.“双碳”目标下的供热系统节能分析[J].能源与节能,2023(09):79-81.
- [6] 耿皖雨.城市集中供热二次网运行优化与决策支持系统开发研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [7] 武瑞朋.城市集中供热系统热源的能耗分析[J].江苏建材,2023(01):8-9,12.
- [8] 陈俊娜.城市集中供热系统节能改造分析[J].能源与节能,2023(07):65-67.
- [9] 杨林.集中供热系统多热源调度优化分析[J].建材与装饰,2020(21):245,248.

远程用电检查技术在电力营销中的应用研究

于 宁

(内蒙古电力集团包头供电公司负荷管理服务中心, 内蒙古 包头 014030)

摘 要 在当前新型电力系统建设不断加速的背景下, 以往固化的人工用电检查模式已难以满足电力营销管理的新需求。在大数据等先进技术的助力下, 远程用电检查技术可实时采集用电数据、准确识别异常行为, 助力电力营销工作的提质增效。本文围绕远程用电检查技术在电力营销中的应用, 分析了远程用电检查技术在电力营销中的应用场景, 进一步探讨了其在应用实践中面临的问题, 并提出与之相应的有效对策, 旨在对充分发挥远程用电检查技术的优势有所裨益, 进而推动电力营销管理模式的创新升级, 为电力市场的健康发展赋能增效。研究结果表明, 远程用电检查技术的规模化应用能为电力营销注入新的技术动能, 是助推电力营销智能化转型的有效路径。

关键词 远程用电检查技术; 电力营销; 智能电网; 线损管理; 大数据分析

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.025

0 引言

传统用电检查工作主要依赖人工现场巡检, 存在工作效率低、检查范围有限、异常发现滞后等不容忽视的弊端。特别是在处理海量用户数据及复杂用电场景时, 人工模式的弊端愈发显露, 加快用电检查技术的革新已成为当务之急。人工反窃电稽查工作需要耗费大量的人力资源, 且往往无法精准捕捉到隐蔽的窃电行为, 弊端十分明显。在此背景下, 各大电力企业纷纷投身于远程用电检查系统的研发工作中, 在多个省市设置试点并取得了诸多可观的阶段性成果。基于此, 就远程用电检查技术在电力营销中的相关应用展开研究, 具有重要的现实意义。

1 远程用电检查技术在电力营销中的应用场景

1.1 远程抄表核算: 提升抄表效率, 降低数据误差

传统人工抄表模式存在诸多弊端, 一旦出现数据错误, 不仅会影响到电费核算的准确性, 还有可能引发用户与电力企业的纠纷。远程抄表是远程用电检查技术的基础应用, 与传统的人工抄表方式相比, 其具备显而易见的应用优势。一方面, 人工抄表效率低, 往往需要耗费数天乃至数周时间才能完成一个区域的抄表工作, 而远程抄表可以实现对海量用户的同时抄表, 将抄表周期缩短至 15 分钟/次。另一方面, 远程抄表能直接读取智能电表的原始数据, 很好地避免了人工抄表的主观误差, 数据准确率达 99.9% 以上。远

程抄表还能实时获取用户的用电数据, 电力企业能及时发现用户的欠费、过载等情况, 提前采取应对措施, 避免损失的进一步扩大^[1]。在电费核算过程中, 远程用电检查技术与电力营销系统可以无缝对接, 不但能自动核算电费, 还能自动生成账单。平台层利用大数据分析技术可以精准计算用户的用电数据, 根据各地的电价政策自动生成个性化的电费账单, 并以发送短信、APP 消息提醒等方式提醒用户及时缴费。远程抄表核算系统还具备异常电费预警功能, 在察觉到用户电费存在异常情况时会自动发出预警, 提醒工作人员尽快排查原因, 大大降低了用户投诉率。

1.2 反窃电稽查: 精准识别窃电行为, 减少电力损失

窃电行为一直以来都是电力营销管理领域的重难点问题, 其不但严重损害电力企业的经济利益, 还会扰乱正常的电力市场秩序, 甚至可能引发安全事故。传统反窃电稽查工作需要人工进行现场排查, 排查效率低且往往难以发现加装窃电装置等新型高科技窃电手段。远程用电检查技术的引入为反窃电稽查带来更为高效的技术手段, 使其从以往的“人海战术”成功转变为“精准打击”^[2]。远程反窃电稽查主要依托大数据技术与人工智能算法, 对用户的用电数据进行建模分析, 以此识别异常用电行为, 精准锁定存在窃电嫌疑的用户。例如: 若某用户的用电设备总功率为 5 kW, 但其实际月用电量却远远低于理论计算值, 系统便会

作者简介: 于宁(1979-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电能质量及用电检查。

将其列为窃电嫌疑用户；部分窃电用户通过改变电流互感器的接线方式来窃电，此时电表采集的电流数据将出现异常，系统只需进行相位分析便能快速识别此类窃电行为。除了精准识别窃电行为外，远程用电检查技术还能起到一定的威慑作用，窃电行为在电力企业的实时监测下无处遁形，不法分子往往有心无力。系统还可以深入分析各种窃电行为，从中总结不同用户群体的窃电规律，电力企业以此可以制定针对性的反窃电策略。

1.3 线损管理：细化线损分析，实现降损增效

传统线损管理模式以区域汇总为主，线损分析粒度较粗，通常无法精确定位线损异常的具体位置，严重影响降损工作的实际效率。而远程用电检查技术可以实时采集配电网各节点的用电数据，在此基础上构建全链路的线损监测体系。平台层在大数据分析技术的支撑下，可以通过计算各节点的输入输出功率、用电量等数据，推算出不同线路、台区的实时线损率，并将其同理论线损率加以对比，继而准确定位线损异常区域^[3]。例如：当某条线路的实际线损率远高于理论线损率时，系统会自动发出预警，工作人员通过远程用电检查系统便能及时排查原因。台区是直接面向用户的配电网末端单元，其线损管理一直是线损工作的重难点之一，而传统台区线损管理模式很难精准把握所有用户的用电情况。利用远程用电检查技术，可以实时监测台区内所有用户的用电数据，工作人员通过系统便可以准确获悉台区的用电信息，精准定位线损异常的具体位置。除此之外，远程用电检查技术还可以依托大数据分析优化配电网的运行方式，进一步降低技术线损概率。例如：系统基于对线路负载率的深入分析，可以合理调整变压器的运行档位，实现负载均衡；基于对用户用电负荷的准确预测，可以优化无功补偿装置的投切时间，提高功率因数，降低线路损耗。

1.4 客户服务：优化服务流程，提升用户体验

客户服务是电力营销的重要环节，其水平高低直接关乎用户的满意度，必须引起电力企业的足够重视。在传统客户服务模式下，用户无论是要查询用电信息还是遇到用电故障急需处理，皆需经过相对繁琐的申报程序。远程用电检查技术为用户提供了更为便捷的用电信息查询渠道，电力企业可以利用微信公众号、手机APP等平台向用户实时推送电费账单、电价政策

等信息^[4]。用户在手机上便可以查看每日的用电量，还可以设置电费预警，当电费余额不足时及时缴费，避免因欠费停电影响正常用电。而在故障报修环节，电力企业利用远程用电检查技术可以快速定位故障位置，准确判断故障类型，并拟定针对性的处理方案。当用电设备发生故障时，智能电表或配电终端会自动采集故障数据，系统基于数据分析可以快速定位故障位置，并自动生成故障工单派发给附近的维修人员。远程用电检查技术的应用还能为用户提供个性化的服务，电力企业基于对用户用电数据的深入分析，可以洞悉不同用户的用电习惯，为他们提供针对性的用电建议。例如：针对高耗能用户，电力企业可以建议其调整用电时间，避开峰谷电价高峰时段，以降低用电成本；针对光伏并网用户等新能源用户，电力企业可以通过远程监测为他们提供并网发电数据查询、补贴核算等个性化服务。

2 远程用电检查技术应用面临的问题与对策

2.1 数据安全与隐私保护问题

远程用电检查技术的有效应用离不开海量用电数据的支撑，数据安全与隐私保护问题也由此成为技术应用过程中必须直面的挑战之一。具体而言，远程用电检查系统涉及诸多电力企业的核心数据，包括但不限于用户用电数据、电网运行数据等。这些数据一旦外泄，不但会扰乱电力企业的日常运营进度，还会在无形之中危及电网运行的安全性。用户用电数据属于用户的隐私信息，其中隐含大量敏感内容，电力企业有责任保护用户的隐私不受侵犯。但就现阶段而言，部分远程用电检查系统的数据安全防护措施依然有待完善，埋下了不小的用户隐私信息泄露隐患。电力企业应从多方面着手采取有效措施，着力构建全面细致的安全防护体系，以强化数据安全防护，保护好用户的隐私信息。一方面，企业应积极引入各种先进的数据加密技术，对用户用电数据等重要数据做全程加密处理，全方位保障数据在各环节的安全性。另一方面，企业应设置严谨缜密的权限管理机制，基于不同岗位的工作需求进一步细化数据访问权限，明确不同工作人员的数据查看范围，从管理层面规避数据泄露风险。网络安全防护工作同样不能忽视，企业应严格部署入侵检测系统、病毒防护系统等安全系统，定期进行安全漏洞扫描，及时发现并修复系统潜在的安全漏洞。除此之外，企业还应规范数据的采集与使用行为，在

日常管理工作中必须一丝不苟地遵循相关法律法规。例如：在采集用户数据前，需明确将数据采集的目的、范围等信息告知用户，在使用数据时还需严格遵守最小必要原则，不能做出过度滥用用户数据的行为。

2.2 人员技能与管理适配问题

远程用电检查技术在电力营销中的应用在带来便利之余，同样对工作人员的技能水平及电力企业的管理模式提出了更严格的要求。远程用电检查技术是一种集多种技术手段于一体的综合性技术体系，其应用除了要求工作人员具备扎实的电力专业知识外，对信息技术技能也有着较高的要求。而电力企业的工作人员普遍出身于传统电力专业，对信息技术相关知识的了解有限，自然也难以胜任远程用电检查系统的运行管理工作。例如：部分工作人员无法熟练运用大数据分析技术，在面对海量用电数据时无法精准识别异常用电行为，系统的数据分析功能形同虚设。加之传统电力营销管理模式主要依赖人工现场操作，在管理流程及考核机制的设计上均围绕现场工作展开，存在一定的局限性。而远程用电检查技术的应用需要构建数字化的新型管理模式，部分企业未能及时调整管理模式，使得技术应用效果难达预期。为解决上述问题，企业应从人才培养与管理革新两方面双管齐下，着力打造一支复合型的专业人才队伍，构建一套高效协同的管理机制。在专业人才培养方面，企业应拟定分层分类培训方案，面向现有工作人员定期开展专项培训活动。培训内容除了包括基本的电力专业知识外，还应着重强化信息技术、网络安全等知识技能的培训，以切实提升工作人员的综合技能水平，确保他们能熟练驾驭远程用电检查系统。在管理模式革新方面，企业应加快数字化转型步伐，着力构建以远程用电检查系统为核心的智能化电力营销管理体系。将远程用电检查系统的应用效果作为绩效考核的重要内容，通过正向激励激发工作人员应用新技术的主动性。企业还应着力突破各部门之间的信息壁垒，深化跨部门交流协作，致力于远程用电检查全流程的高效衔接，以提高远程用电检查系统的运行效率^[5]。

3 远程用电检查技术在电力营销中的应用方向

远程用电检查技术与 5G 技术的融合将成为主流趋势，5G 技术凭借其不可比拟的技术优势，使得海量智能电力设备的高速互联成为可能。在 5G 技术的助力下，远程用电检查系统可以拓展至高清视频监控、远程设

备控制等新型应用场景，对电力设备的运行状态进行动态化监测。远程用电检查技术与区块链技术的融合能进一步夯实数据安全基础，减轻电力企业的数据安全维护压力。区块链技术具有去中心化、不可篡改等特性，能为电力营销提供重要的数据支撑，很好地突破了数据公信力难题^[6]。远程用电检查技术与数字孪生技术的融合应用则能加快远程用电检查的智能化转型进程。电力企业通过构建虚拟数字模型，可以实时仿真电网运行状态，以此模拟不同用电场景下的电网运行情况，为电网规划等工作提供可借鉴的决策依据。在未来的应用实践中，远程用电检查技术还将持续突破传统电力营销的应用范畴，拓展至新能源并网管理、电动汽车充电管理等新兴领域，为新型电力系统建设注入新的技术动能。

4 结束语

远程用电检查技术在电力营销中的应用愈发深入。其应用已经覆盖抄表核算、反窃电稽查、线损管理、客户服务等诸多场景当中，不仅大幅度提高了电力营销效率，还为电力企业的数字化转型注入了技术动能。但需特别强调的是，该技术在实际应用过程中依然面临诸多来自不同方面的问题，要求电力企业采取强化数据安全防护、紧抓人员培训等措施，以促进技术应用效能的最大化发挥。在未来的发展实践中，远程用电检查技术在电力营销中的应用空间将更为广阔，为新型电力系统建设进程的加快推进保驾护航。

参考文献：

- [1] 古昕. 远程用电检查技术在电力营销中的应用[J]. 中小企业管理与科技, 2025(18):99-101.
- [2] 陆妍. 智能电网建设中远程用电检查技术在电力营销中的应用[J]. 城市建筑空间, 2025,32(S1):471-473.
- [3] 石伟, 冯建伟. 远程用电检查技术在电力营销中的应用[C]// 广西生产力学会. 新质生产力与科技发展学术研讨会论文集. 国网酒泉供电公司, 2025.
- [4] 张强, 沈映鑫. 远程用电检查技术应用于电力营销中的重要性分析[J]. 电工技术, 2024(S2):466-468.
- [5] 陆妍. 智能电网建设中远程用电检查技术在电力营销中的应用研究[J]. 城市建筑空间, 2024,31(S2):434-436.
- [6] 梁浩然, 康超. 远程用电检查技术在营销风险防控中的应用分析[J]. 光源与照明, 2025(08):98-100.

分布式光伏电站工程建造技术优化路径探索

丁中武

(江苏悦达综合能源服务有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要 在“双碳”目标引领下, 分布式光伏电站成为能源转型的核心支撑, 其工程建造技术水平直接关系到电站全生命周期效益与安全运行。本文聚焦工程建造场景, 剖析技术把控的核心价值, 梳理施工质量失衡、设计适配不足、运维管理滞后、电网承载受限等现实难点, 提出强化施工管控、深化设计适配、健全运维体系、推进电网储能协同的优化路径, 以期为提升电站建造质量、推动行业高质量发展提供实践参考。

关键词 分布式光伏电站; 工程建造技术; 运维管理; 电网协同

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.026

0 引言

在全球能源转型与“双碳”目标深入推进的背景下, 分布式光伏电站凭借就近消纳、布局灵活的独特优势, 已广泛应用于工业厂房、居民楼宇等多元场景。工程建造技术作为电站长期稳定运行与效益释放的核心基础, 其科学性与规范性直接决定了能源转换效率、安全保障水平及全生命周期价值, 成为推动分布式光伏产业高质量发展的关键支撑。

1 分布式光伏电站工程建造技术把控的意义

1.1 提升发电效能稳定性

分布式光伏电站的发电效能与稳定性, 其核心依赖工程建造各环节的技术把控质量。针对依赖自然光照的能源形式, 组件安装的精准度、阵列排布的科学性直接决定了光能捕获效率, 技术把控能规范这些关键环节, 避免因安装偏差、排布不合理导致的光照利用不足问题。同时, 通过对电缆选型、铺设工艺及逆变器等核心设备配置的严格规范, 可有效减少电能传输与转换过程中的损耗, 避免系统运行失衡, 为电站长期稳定输出提供核心技术支撑, 确保其在整个运营周期内持续发挥能源转换效能。技术把控还能适配不同区域光照、温湿度差异, 优化设备运行参数, 抵御风雨侵蚀等外部环境的影响, 进一步强化输出稳定性。

1.2 压降全周期建设成本

技术把控对分布式光伏电站全周期成本的压降作用贯穿项目设计、施工、运维的完整流程。设计阶段的技术优化能规避不合理方案带来的资源浪费, 通过科学选型与结构设计提升材料利用效率; 施工阶段的

技术规范可减少因操作不当导致的返工返修, 降低额外人力与物料投入; 运维阶段的技术标准能为设备养护提供明确指引, 延长设备使用寿命, 减少故障维修与设备更换的频次^[1]。这种全流程的技术管控, 能从源头到后期持续优化成本结构, 实现项目经济效益的最大化。同时, 通过精准测算与流程优化, 减少材料冗余采购、缩短施工周期, 降低资金占用成本与管理成本。

1.3 筑牢安全合规防线

分布式光伏电站多依托建筑屋顶或工业园区建设, 安全运行与合规推进是项目落地的基本前提, 而技术把控正是筑牢这一防线的核心手段。在安全层面, 通过对支架承重设计、接地系统搭建、线缆防水处理等关键环节的技术规范, 可有效防范屋顶坍塌、漏电等安全隐患, 保障项目周边人员的人身和财产安全。在合规层面, 技术把控严格遵循行业相关技术标准与法规要求, 确保项目在建筑荷载、消防设施、环保要求等方面均符合验收标准, 规避因不合规导致的项目停工、整改等风险, 为项目顺利推进与长期运营提供保障。技术把控还能动态适配最新法规政策调整, 提前预留合规升级空间, 避免后期因标准更新产生额外整改成本。

2 分布式光伏电站工程建造技术存在的问题

2.1 施工质量把控失衡

分布式光伏施工环节的质量管控漏洞, 集中体现在材料选用与施工工艺两大核心维度。部分施工单位为压缩成本, 刻意选用不符合行业标准的低质材料, 支架厚度、电缆截面等关键指标不达标, 长期暴露在户外环境中, 尤其是沿海高盐地区, 支架锈蚀速度加

作者简介: 丁中武 (1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 光伏发电。

快 30% 以上, 易出现锈蚀、老化、断裂等问题, 直接影响电站结构稳定性与使用寿命。同时, 施工团队准入门槛低, 技术培训缺失, 操作人员缺乏标准化作业意识, 在组件安装、电气连接、防水处理等关键环节存在诸多不规范行为, 如组件安装角度偏差、接线虚接、防水胶条铺设不平整等, 此类虚接问题在夏季高温时易引发配电箱过热跳闸, 甚至烧毁设备, 不仅会降低发电效率, 还给后期运行埋下安全隐患, 增加故障发生率与维修成本^[2]。更关键的是, 部分项目缺乏全过程质量监督机制, 没有第三方检测机构介入, 材料进场验收流于形式, 施工过程中的违规操作难以被及时发现, 导致质量问题积少成多, 投运后集中爆发。

2.2 设计适配衔接不畅

设计环节与实地工况的脱节, 是导致分布式光伏项目效能不达标的重要根源。设计前缺乏全面细致的实地勘察, 对屋顶结构、承重能力、周边遮挡物分布及生长趋势、区域光照条件等关键数据采集不充分, 比如未测算周边树木年均生长高度, 投运 1 年后遮挡面积扩大 25%, 导致组件排布、支架选型等设计方案与实际不符, 投运后易出现阴影遮挡、承重超标等问题。此外, 设计过程中缺乏与电网企业、建筑产权方等相关主体的有效协同, 对配电网接入容量、接入点分布等情况掌握不全面, 导致接入方案不合理, 引发并网困难或发电受限; 同时, 部分设计忽视后期运维需求, 未预留充足的检修通道与设备操作空间, 如屋顶电站检修通道仅宽 0.6 m, 运维人员难以携带工具作业, 大幅增加运维难度与成本。设计方案还存在“一刀切”现象, 缺乏对老旧建筑、复杂地形等特殊场景的专项优化, 且设计文档对施工细节标注不清, 易导致施工方理解偏差, 进一步加剧设计与实际的脱节。

2.3 运维管理机制滞后

分布式光伏运维管理的滞后性主要表现为体系缺失、技术落后与响应低效。多数中小型电站未建立系统化的运维管理制度, 缺乏明确的巡检频率、清洁标准与故障处理流程, 依赖人工随机巡检, 部分项目甚至每月仅巡检 1 次, 难以实现全覆盖、无死角的隐患排查, 组件表面积灰、鸟粪堆积、杂草遮挡等问题长期得不到解决, 当积灰厚度达 2 mm 时, 会导致发电量持续衰减。此外, 运维技术手段单一, 未引入远程监控、红外检测等智能化设备, 无法实时监测电站运行状态, 对组件热斑、隐裂、逆变器故障等潜在问题发现不及时^[3]; 故障发生后, 缺乏快速响应机制, 维修流程繁琐、人员调配不及时, 如逆变器故障后平均修复时长超 72

小时, 导致停机时间过长, 造成大量发电损失。运维资金投入不足、专业人才匮乏也是突出问题, 部分企业将运维外包给非专业团队, 人员技能不足, 难以应对复杂故障, 且缺乏常态化培训, 运维能力始终处于较低水平。

2.4 电网接入承载受限

分布式光伏的大规模快速发展, 与配电网承载能力、接入机制之间的矛盾日益突出。部分区域配电网建设规划滞后于光伏项目发展速度, 线路导线截面偏小、变压器容量不足。例如: 某工业园区配变容量仅 630 kVA, 却集中接入 900 kW 光伏项目, 午间出力高峰时被迫限发, 限发率高达 35%, 难以承接集中接入的光伏出力, 导致光伏电力消纳困难, 被迫采取限发措施, 严重影响项目发电效益。同时, 并网审批流程涉及发改、电网、住建等多个部门, 审批环节繁琐、政策标准不统一, 部门间协调沟通成本高、周期长, 平均审批时长超 2 个月, 不仅延误项目投运进度, 还增加项目前期筹备的时间与人力成本。此外, 配电网智能化水平不足, 缺乏对分布式光伏出力的精准预测与灵活调度能力, 进一步加剧了电网接入与消纳的压力。不同区域并网政策差异较大, 部分地区缺乏明确的接入标准与流程指引, 企业需反复沟通确认, 且配电网改造与光伏项目推进不同步, 导致部分项目建成后长期无法并网, 资源闲置浪费。

3 分布式光伏电站工程建造技术优化路径

3.1 强化施工质量管控

在分布式光伏施工中, 基础浇筑强度不达标、组件安装角度偏差 1° 以上就可能导致年发电量损失 5%, 而线缆连接力矩不足引发的虚接问题, 更是夏季配电箱跳闸的常见诱因。为解决这些细节隐患, 需以“标准化施工 + 第三方监理”为核心抓手: 先制定《组件安装工艺手册》, 明确基础浇筑混凝土强度需达 C30、钢筋间距误差不超过 ± 5 mm, 组件安装角度误差锁定在 $\pm 1^\circ$ 内, 并网前需完成绝缘电阻 ≥ 20 M Ω 的检测, 同时细化 12 个关键节点核查清单, 每个节点必须经第三方监理签字确认才能推进。施工人员培训每月开展 1 次, 内容涵盖水平仪操作规范、多股铜线连接力矩 ≥ 1.2 N \cdot m 的标准, 考核采用 40% 理论 + 60% 实操的模式, 未达 80 分需补考, 合格后方可上岗; 组件安装完成 48 小时内, 用无人机厘米级定位技术复核阵列角度, 偏差超标的点位标注整改期限, 整改后二次巡检确认。材料进场时需同步开展抽检, 重点核查支架镀锌层厚度、电缆绝缘层完整性, 不合格材料直接清退出场;

施工期间做好成品保护，组件表面张贴保护膜，避免硬物划伤，接线盒、逆变器等设备做好防雨防尘遮盖。

3.2 深化设计实地适配

不少分布式光伏项目投运后，会因周边树木生长、屋顶承重测算偏差出现发电效率骤降或安全风险，这源于设计阶段脱离实地变量的“纸上谈兵”。要破解这一问题，需将实地适配贯穿设计全流程：采用BIM技术构建模型时，不仅需导入屋顶结构CAD图纸，还需录入当地近5年逐时光照数据、周边遮挡物树木建筑的坐标与高度参数，模拟四季9:00-15:00的阴影变化，据此调整组件排布间距，确保冬至日9:00后无遮挡。设计前联合结构工程师现场勘查，用回弹仪检测屋顶混凝土强度，按建筑年限制定支架方案：5年内建筑用常规钢制支架，5~10年建筑选轻量化铝合金支架，10年以上建筑额外增设承重加固件；同时主动对接电网企业，获取项目台区年度最大负荷、剩余接入容量等数据，接入容量按台区剩余容量的80%设计，线路路径优先利用原有电缆井，避免二次开挖^[4]。设计方案需组织施工、运维、电网三方联合评审，重点论证组件排布合理性、运维通道便利性 & 并网可行性，评审意见纳入最终设计文件，施工中若遇实地条件变化，及时启动设计变更流程并重新复核。

3.3 健全运维管理体系

分布式光伏运维常陷入“人工巡检覆盖不全、故障发现滞后”的困境，尤其是工业厂房屋顶项目，组件表面积灰3个月不清理就会导致发电量下降8%~10%，而逆变器故障后48小时内不修复，损失更是持续累积。针对这些难点，需构建“远程监控+定期巡检”的闭环体系：电站云平台实时采集每块组件的发电量、背板温度，逆变器的输入输出电压、电流，线缆接头温度等数据，设定组件温度超70℃、逆变器效率低于95%时自动报警，报警信息同步推送至运维人员手机APP与电脑端。组件清洁每季度1次，清洁前断开组件串直流开关，用0.3~0.5 MPa压力的高压清洗机搭配中性清洁剂，从组件顶部向底部冲洗，避免水流渗入接线盒；红外热像仪检测每半年1次，选择环境温度20~25℃的阴天或傍晚进行，重点排查温差超5℃的热斑组件、温升超40℃的逆变器IGBT模块，检测后生成隐患报告，运维人员8小时内抵达现场排查修复，修复数据同步上传平台存档。建立运维人员技能考核机制，每半年开展1次实操演练，内容涵盖故障排查、设备维护等核心技能，考核结果与绩效挂钩；同时完善设备台账管理，详细记录设备型号、安装时间、维护记录等信息，实现全生命周期可追溯。

3.4 推进电网储能协同

在配电网容量有限的工业园区，分布式光伏常因午间出力高峰与用电低谷错配被限电，部分项目年限电率甚至达15%，既影响投资回报，也增加了电网调控压力。想要缓解这一矛盾，需以“光伏+储能”协同为核心解决方案：储能系统按光伏装机容量的25%~30%配置，选用充放电效率≥90%的磷酸铁锂电池，设定固定充放电策略：11:00-14:00光伏出力高峰时充电至容量90%后停止，18:00-21:00用电高峰时放电至容量20%后切换浮充。同时推动与电网企业的数据共享，按小时上传光伏实时发电量、储能充放电状态、项目用电负荷数据，接入电网调度平台；签订调峰协议，承诺电网调峰指令下达后30分钟内调整储能放电功率，确保响应及时且符合电网调控要求^[5]。建立储能系统定期维护机制，每月检查电池单体电压一致性、充放电接口连接状况，每季度开展1次充放电循环测试，及时更换衰减严重的电池模块；推动区域内光伏项目集群化管理，构建分布式光伏协同调度平台，统筹协调各项目充放电节奏，提升整体消纳能力，减少单点限电影响。

4 结束语

分布式光伏电站的工程建造技术优化，是破解当前项目“建得快、效益低”难题的关键。通过聚焦施工质量、设计适配、运维管理、电网协同四大核心环节，将技术规范落地到项目全流程，既能提升电站的发电效能与安全性，也能降低全周期成本，为新能源产业高质量发展提供支撑。未来还需结合智能化技术，持续迭代优化路径，使分布式光伏在能源转型中发挥更大作用。

参考文献：

- [1] 刘一瑾, 李杰伟. 高海拔地区光伏电站建设难点与关键技术分析[J]. 光源与照明, 2025(06):162-164.
- [2] 王悦, 欧歌. 新能源光伏电站发展现状以及应用[C]//江西省工程师联合会. 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(二). 内蒙古电力(集团)有限责任公司乌海供电公司海南供电分公司, 2025.
- [3] 艾勇兵. 新能源光伏电站发展现状及规划设计[J]. 光源与照明, 2025(01):153-155.
- [4] 林旭洲. 分布式光伏电站在高原地区的应用与前景分析[J]. 青海交通科技, 2024, 36(04):98-102.
- [5] 湛航. 新能源光伏电站技术及项目建设策略分析[J]. 光源与照明, 2023(10):115-117.

数字化采购技术在工程分包采购管控中的应用研究

孙 靖

(中铁上海工程局集团华南市政建设有限公司招标采购中心, 广东 广州 510700)

摘 要 工程分包采购管控的规范化与高效化直接影响工程项目整体效益, 传统管控模式的固有弊端已难以适配行业发展新形势。数字化采购技术的迭代升级为工程分包采购管控转型提供了技术赋能。本文以工程分包采购管控的数字化需求为切入点, 系统探究数字化采购技术在供应商管理、招标采购、合同管理、履约管控及支付结算全环节的具体应用路径, 旨在梳理数字化转型的实践逻辑, 为工程企业优化分包采购管控体系、提升风险防控能力与决策科学性提供理论参考。

关键词 数字化采购技术; 工程分包采购管控; 供应商管理; 合同管理; 履约管控

中图分类号: TU723.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.027

0 引言

工程分包采购管控作为确保工程质量、进度和成本控制的关键环节, 目前行业内仍主要采用传统的线下管控模式, 普遍面临信息传递不畅、流程效率不高、风险防范能力不足以及数据应用不充分等问题。随着工程行业数字化转型进程的深入推进, 以大数据、区块链和人工智能为代表的数字化采购技术快速发展, 为解决传统管理模式中的难题创造了有利条件。在此形势下, 促进数字化采购技术与工程分包采购管控的有机结合, 已成为提高行业管理水平、实现高质量发展的必然要求, 相关研究具有显著的实践意义和现实价值。

1 工程分包采购管控现状与数字化需求分析

目前工程分包采购管控主要采用传统线下模式, 其流程具有环节冗长、人工依赖性强的特点。具体而言, 供应商筛选主要通过线下资质审查及同业推荐等方式进行; 招标采购及合同签订环节需依赖纸质文件流转; 履约管理主要采取定期现场检查方式; 支付结算则需经过多级人工审批程序。在组织架构方面, 企业普遍采用职能型管理模式, 由采购部门负责总体协调, 技术、质量、财务等部门按职能分工参与审核, 但部门间协作主要依靠线下沟通方式, 虽权责界定明确, 但工作衔接效率有待提升。

传统管控模式存在诸多核心难点, 首要问题是信息不对称, 供应商资质审核依赖书面材料, 真伪核验难度大, 部分隐性信息难以挖掘, 同时采购信息传递

滞后, 导致供需匹配精准度不足。流程效率低下同样突出, 线下操作涉及大量纸质文件编制、流转与归档, 审批环节烦琐且周期长, 跨部门协同存在信息壁垒, 易出现流程卡顿。在风险管控层面, 价格波动预判缺乏数据支撑, 质量安全与履约违约风险多依赖事后核查, 前置防控能力薄弱。此外, 采购数据分散于各部门系统或纸质档案中, 缺乏统一标准与整合机制, 难以形成有效分析, 无法为决策提供精准支撑^[1]。

针对当前工程分包采购管控存在的问题, 数字化转型势在必行。首先, 亟需通过数字化手段实现流程标准化与自动化, 以解决传统操作流程烦琐的弊端, 规范各环节操作标准, 提升审批及流转效率。其次, 必须建立信息透明化与协同化机制, 打破信息孤岛, 实现供应商信息、采购流程及履约数据等全链条共享, 确保各参与方信息对称。再者, 应当运用数字化技术实施风险精准化与前置化管控, 实现风险点的自动识别与预警, 增强风险防控的主动性与精准性。最后, 需要构建统一的数据体系, 通过数据整合与分析挖掘数据价值, 为采购策略制定和供应商管理等决策提供科学依据。

2 数字化采购技术在工程分包采购各环节的具体应用

2.1 供应商管理环节的数字化应用

供应商管理作为工程分包采购管控的关键前置环节, 其重要性不言而喻。数字化技术的应用可有效解

作者简介: 孙靖 (1987-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 电子化招标与智能化采购。

决传统管理模式中存在的资质审核滞后、信用信息失真、评价体系僵化等难点问题，进而实现全生命周期精细化管理的目标。

基于大数据技术，通过构建供应商画像和实施资质审核自动化，显著提升了管理效率和审核精准度。具体而言，整合供应商资质文件、历史履约记录、行业信用数据及财务状况等多维度信息，运用大数据算法建立动态立体的供应商评价模型，全面展现供应商的核心能力与潜在风险。在资质审核环节，采用OCR识别和智能比对技术，自动核验营业执照、资质证书等材料的真实性和有效性；同时通过比对行业黑名单与违规记录，取代传统人工审核方式，大幅缩短审核周期，并有效降低因人为因素导致的资质漏审或误审风险。

区块链技术的应用为供应商信用档案管理提供了可靠的技术保障。利用区块链去中心化、不可篡改的特性，将供应商全生命周期内的信用信息（包括履约质量、合同兑现率、奖惩记录及投诉处理结果等）实时上链存储。各参与方可共享查看完整的信用链条，实现信用信息的全程可追溯，有效防范传统信用档案中可能出现的信息造假或篡改问题。该技术的应用不仅提升了信用信息的公信力，也为供应商筛选提供了客观依据，有助于构建“守信激励、失信惩戒”的良性市场生态。

构建供应商动态评价与分级管理体系，旨在实现常态化、精准化的供应商管理。该体系建立了包含质量履约、进度保障、服务响应、价格合理性等多维度的评价指标体系，通过实时采集工程施工过程中的相关数据，自动生成供应商绩效评分。基于评价结果，将供应商划分为不同等级，并实施差异化的合作策略：对表现优异的供应商给予优先合作权、简化审核流程等激励措施；对不合格供应商则采取限制合作或淘汰处理。这种动态管理模式突破了传统静态评价的局限性，不仅促进供应商持续提升服务质量，同时助力企业精准筛选符合项目需求的优质供应商资源^[2]。

2.2 招标采购环节的数字化应用

招标采购作为工程项目分包管理的关键环节，其规范性和效率直接影响工程建设整体质量与进度。传统招标采购模式存在诸多弊端，主要体现在以下三个方面：首先，操作流程过于繁琐，涉及大量纸质文件流转和人工操作。其次，整个周期耗时较长，严重影响工程进度。最后，人为干预风险较高，容易滋生违规操作。随着数字化技术的深入应用，通过流程再

造和智能化赋能，招标采购逐步向高效化、规范化和精准化方向转型。

电子招投标平台的建设是实现全流程线上化运作的重要基础设施。该平台整合了招标公告发布、投标文件提交、开标评标、结果公示等全流程功能模块，有效突破了传统招标在时间和空间上的限制。更重要的是，平台实现了招标采购全过程的电子留痕和可追溯管理。相较于传统线下模式，线上化运作显著减少了纸质文件流转和人员聚集等环节，不仅大幅缩短了招标周期，还通过标准化流程设计有效规避了人为操作风险，从而显著提升了招标采购的合规性管理水平，确保了采购过程的公平公正。

人工智能技术的应用为招标采购注入了新的活力，有效解决了多个环节的难点问题。在招标文件编制环节，人工智能系统能够根据项目类型、规模及行业标准，自动匹配相应模板并填充核心条款，同时进行合规性和完整性校验，显著提升了文件编制效率和质量。在评标专家遴选环节，系统基于专家的专业领域、项目经验及回避原则，从专家库中快速筛选出最合适的人选，确保评标工作的专业性和公正性。在异常投标识别方面，人工智能算法通过对投标文件相似度比对、报价偏离度分析等技术手段，能够精准识别围标串标、恶意低价等异常行为，及时防范采购风险。

2.3 合同管理环节的数字化应用

工程分包采购管控中的合同管控环节是风险防控的关键所在。当前传统管理模式在合同管理全流程中存在诸多亟待解决的问题：在合同编制环节，条款制定缺乏统一标准，导致文本质量参差不齐；在审核环节，人工审核效率低下，难以满足业务发展需求；在履约管理环节，跟踪机制滞后，难以及时发现履约风险；在争议处理环节，证据收集困难，影响纠纷解决效率。通过深度应用数字化技术，构建标准化流程与智能风控相结合的全生命周期管理体系，可显著提升合同管理效能。

基于标准化模板库与法律条款库的智能合同系统，为合同管理提供了高效的技术支撑。该系统整合了各类工程分包业务的标准化合同模板，能够根据项目特征、合作方式等关键要素自动匹配适用模板，快速生成基础合同文本。同时，系统内置权威法律条款数据库，运用智能算法对合同条款进行合规性审查，可精准识别条款缺失、条款冲突及不合规表述等问题，有效替代传统人工逐条审核模式。实践表明，该系统的应用不仅大幅缩短了合同编制与审核周期，更显著降低了合同法律风险^[3]。

区块链技术的应用为合同全流程管理提供了可信的技术保障。在合同签署环节,采用区块链电子签章技术实现线上签约,所有签署行为均被完整记录且不可篡改,确保签约主体身份真实性与签署行为法律效力。在合同履行阶段,将工程进度、质量验收、款项支付等关键履约数据实时上链,实现履约过程透明化与可追溯性。当发生合同争议时,区块链存储的完整交易记录与履约数据可作为具有法律效力的电子证据,不仅简化了争议解决流程,更显著降低了纠纷处理成本。这种技术应用从根本上改变了传统合同管理的被动局面,为工程分包业务提供了更可靠的风险防控手段。

2.4 履约管控环节的数字化应用

履约管控作为工程分包采购质量与进度保障的核心环节,其重要性不言而喻。传统管理模式主要依赖人工现场核查,存在监控滞后、偏差识别不及时以及跨部门信息壁垒等固有弊端。通过应用数字化技术,构建基于实时感知、智能分析和协同联动的全流程动态管控体系,可显著提升履约管控的精准性与时效性。

物联网技术的深入应用实现了施工进度、质量及安全的可视化实时监控。通过在施工现场部署智能设备、高清视频监控及各类传感器,可实时采集机械运行参数、混凝土强度、钢筋绑扎精度等关键施工数据,同时识别人员违规操作、临边防护缺失等安全隐患。相关数据通过无线网络传输至管控平台,自动生成动态进度看板和质量安全监测报表,有效替代传统人工巡检模式,使管理人员能够远程掌握现场实况,实现问题的及时发现与处置。

跨部门协同平台的建立有效解决了履约信息传递中的壁垒问题。该平台通过系统集成方式,整合采购、技术、质量、施工及财务等各部门需求,实现履约进度、质量验收结果、签证变更、付款申请等信息的实时共享与同步更新。各部门可通过平台协同处理履约问题,如质量部门发现的安全隐患可直接推送至施工和采购部门进行联动整改,大幅降低线下沟通成本,提升问题处置效率,形成履约管控的整体合力^[4]。

2.5 支付结算环节的数字化应用

工程分包采购管控中的支付结算环节是项目管控的关键收尾阶段。传统支付模式存在诸多弊端,包括申请材料繁杂、审批流程冗长、资金流向不透明以及风险防控不足等问题。通过数字化技术的深度应用,依托数据互联互通和技术赋能,构建了高效、安全、可控的支付结算体系,实现了资金流转与履约管控的无缝衔接。

区块链技术为资金流向追溯和支付安全保障提供了可靠支撑。该技术凭借不可篡改、全程留痕的特性,将支付指令、资金划转记录、履约关联数据等全流程信息上链存储。从发包方支付到分包方收款的全过程均可实现实时追溯,确保资金流向清晰可查。同时,区块链技术能够精准核验支付主体身份,有效防范虚假支付申请、冒领款项等风险,确保资金直达合规主体,为解决工程领域拖欠工程款、挪用资金等问题提供了技术保障^[5]。

基于大数据驱动的资金预算优化与风险管控机制成效显著。系统整合历史支付数据、项目进度计划、履约节点要求、市场资金成本等多维度信息,通过算法模型精准预测各阶段资金需求,优化资金预算安排,实现资源合理配置。同时,通过分析分包商财务状况、历史履约记录、行业信用等数据,构建支付风险评估模型,自动识别高风险支付节点及对象,及时预警资金链断裂、恶意拖欠等风险,为企业制定针对性防控措施提供决策支持,切实保障资金运营安全。

3 结束语

本研究系统探讨了数字化技术在工程分包采购全流程中的应用。研究表明,通过大数据、区块链及人工智能等先进技术的综合运用,能够有效解决传统管控模式中存在的信息孤岛、效率不足及风险预警滞后等关键问题,进而实现采购管控流程的标准化、自动化和精准化。数字化转型不仅显著提升了各环节的管理效能,更有助于构建全链条协同的管理体系。工程企业需持续推进技术创新与管理优化,建立健全数字化保障机制,推动工程分包采购管控高质量发展。

参考文献:

- [1] 张建国,于洋,潘庆,等.EPC模式下大型建设工程建材采购与招标管理要点分析[J].中国物流与采购,2025(22):77-78.
- [2] 雷羽.建筑施工项目采购管理中成本控制措施分析[J].商讯,2025(22):95-97.
- [3] 王钰.国资监管视角下工程类中央企业采购管理数字化转型路径探索[J].四川水利,2025,46(01):109-112.
- [4] 涂辰梓菡.数字化转型背景下国际工程招标采购智慧化发展路径[J].财经界,2024(32):57-59.
- [5] 陈瑜.建筑工程采购管理数字化探索[J].中国招标,2024(10):157-159.

工业园区 VOCs 排放企业智能化监管的模式与路径研究

朱睿

(扬州市高邮环境监测站, 江苏 扬州 225600)

摘要 工业园区 VOCs 排放源具有数量多、组分杂、排放时段波动大且受气象条件影响明显等特征, 监管模式面临监测覆盖不全、响应滞后、协同不足等难点, 难以满足精准治污需求, 智能化技术为破解园区 VOCs 监管难题提供了有效支撑。本文剖析了工业园区 VOCs 排放特征与监管难点, 设计工业园区 VOCs 智能化监管模式, 以期为 VOCs 排放企业提供智能化监管路径参考, 进而推动工业园区绿色低碳转型、改善区域空气质量。

关键词 工业园区; VOCs 排放; 智能化监管; 风险分级; 闭环管理

中图分类号: X701

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.028

0 引言

随着工业化进程的推进, VOCs 作为大气污染的主要“元凶”, 其排放治理已成为大气污染防治工作的重要环节。工业园区是 VOCs 污染防控的重点区域, 园区内 VOCs 排放具有来源分散、组分复杂、排放强度大且时空变化的特点, 部分物质会增强大气氧化性, 还会产生恶臭, 对生态环境和人体健康造成双重危害。在此背景下, 探索工业园区 VOCs 排放企业智能化监管的模式与路径, 成为提升环境治理现代化水平的必然要求。

1 工业园区 VOCs 排放特征与监管难点分析

工业园区 VOCs 排放主要有以下特征: (1) 排放源多元且分散, 工业园区集聚化工、涂装、印刷等多个涉 VOCs 行业, 排放源涵盖企业生产装置有组织排放、原料储运无组织泄漏、废弃物处理散发等多种类型, 不同企业排放时段、强度差异明显, 增加了监管覆盖难度。(2) 排放组分复杂且毒性显著, VOCs 组分包含烷烃、烯烃、芳香烃等多种物质, 部分组分具有强氧化性和毒性, 易形成臭氧和 PM2.5, 还会通过大气扩散影响周边生态环境与人体健康, 对监管的精准识别提出更高要求。(3) 排放浓度时空波动大, 受生产负荷调整、工艺切换、气象条件变化等因素影响, VOCs 排放浓度在不同时段、不同区域差异明显, 传统定点监测难以捕捉动态排放规律^[1]。

工业园区 VOCs 监管难点包含以下几个方面: (1) 监测体系不完善, 现有监测多聚焦企业有组织排放口, 对无组织泄漏、园区边界等区域覆盖不足, 且监测数

据碎片化, 难以形成全区域、全链条监管视角。(2) 响应处置效率低, 传统监管依赖人工巡查, 对超标排放、突发泄漏等事件发现滞后且缺乏快速溯源定位手段, 导致处置流程冗长, 污染影响范围扩大。(3) 协同监管机制不健全, 环保、园区管理、企业等多主体间信息互通不畅, 监管责任划分不清晰, 存在监管重叠或监管空白, 难以形成监管合力。

2 工业园区 VOCs 智能化监管模式设计

2.1 风险分级管控模式

构建风险评估指标体系, 涵盖企业生产规模、涉 VOCs 工艺复杂度、历史排放达标情况、治理设施先进性、周边敏感点分布等核心指标。采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的方式, 对企业风险等级进行量化评估, 划分高、中、低三个风险等级。针对不同风险等级企业实施差异化监管策略: 高风险企业作为监管重点, 执行高频次在线监测、月度现场核查与季度专项审计, 强制要求安装高效治理设施并实时上传工况数据; 中风险企业实施常规监管, 每季度开展一次现场检查, 定期核查治理设施运行状况与排放数据; 低风险企业采用信用承诺与随机抽查相结合的监管方式, 降低监管频次, 减少对企业正常生产的干扰。结合企业日常监管数据、整改落实情况及工艺改造升级等因素, 每年度更新风险等级, 确保分级结果的时效性与准确性^[2]。

2.2 监测、预警、处置、复盘闭环监管模式

工业园区 VOCs 智能化监管应构建监测、预警、处置、复盘的链路, 把以往分散的在线监控、现场执法和企

作者简介: 朱睿(1984-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 环境监测、环境管理。

业自管串成一套可追溯的流程。监测以固定源在线监测、厂界/园界网格站、重点点位便携走航组合为主,实时采集 VOCs 浓度、风速风向、工况参数以及治理设施运行状态,形成企业排放与环境响应的关联数据^[3]。预警环节基于阈值触发与模型识别并行,当出现浓度突升、日内波动异常、治理设施停运或旁路迹象、数据缺失与漂移等情况时,系统自动分级报警并定位到企业、装置与时段,同时推送处置建议。处置强调分级响应、证据固化,一般预警由企业在规定时间内自查并上传工况记录、维修照片与处置结果,较大预警由园区监管平台远程核查并启动现场核验或联合执法,必要时采取限产、停产或应急治理等措施并将监测曲线、报警记录、视频与台账固化为电子证据。

2.3 网格化+联动协同模式

1. 按照地理区位、企业分布密度、污染风险等级等因素,将工业园区划分为若干基础网格与重点网格,明确各网格的监管责任人与职责边界,实现监管区域的精细化划分与责任全覆盖。每个网格配备专人负责日常巡查、数据核查与信息上报,整合网格内企业监测点、园区公共监测设备等资源,构建网格化监测网络,实时掌握网格内 VOCs 浓度变化情况。

2. 联动协同层面构建多维度协同机制,纵向打通园区管理机构、环保部门、属地政府的层级壁垒,建立分级响应与指令传达通道;横向联动应急管理、市场监管、公安等相关部门,明确各部门在 VOCs 监管中的职责分工,针对跨部门的复杂监管问题开展联合执法与协同处置。

2.4 信用评价与差异化执法模式

工业园区 VOCs 排放企业智能化监管应从“同一把尺子”转向“分级分类、精准执法”,以信用评价作为差异化监管的核心抓手^[4]。园区可构建企业环境信用评分模型,将排放强度与稳定达标情况、治理设施运行有效性、在线监测数据质量、台账完整度、异常报警处置及时性、历史违法记录与整改闭环等纳入指标体系,按月/季动态更新,形成 A(守信)、B(一般)、C(风险)、D(失信)四级清单。对 A 类企业实施“少打扰”监管,以远程巡检为主、抽查为辅;对 B 类企业保持常态化在线核查与季度抽查;对 C 类企业强化预警联动与重点时段驻点检查,限期提升治污设施稳定性和台账规范;对 D 类企业实行严监管与强约束,综合运用加密监测、突击夜查、依法从严处罚、联合惩戒与公开曝光等措施。实际执行中可按“信用等级决定基础监管强度、风险颜色决定临时加严系数”的原则联动,如出现橙/红风险时即使信用较好也触

发加密核查,实现执法资源向高风险企业倾斜,提升监管效率与震慑力。

3 工业园区 VOCs 排放企业智能化监管路径

3.1 建立企业端感知+园区端补盲的一体化监测布设路径

1. 企业端以全链感知为主,在有组织排放口优先布设在线监测或准在线监测,指标覆盖非甲烷总烃/总 VOCs 浓度、流量、温度、压力与含氧量等,并同步接入治理设施关键工况。对无组织排放强、波动大的工段结合车间微站、厂界点位与 LDAR 巡检数据形成点、线、面感知网络,数据以分钟级采样、5 分钟级上传为宜,通过边缘网关实现本地缓存、断点续传与异常自检,确保数据连续与可用。

2. 园区端“补盲”重点解决企业边界之外的扩散识别与跨厂影响,按主导风向在园区边界布设厂界/园界网格站,建议 300~500 m 尺度设置一处微型站,配套风速风向、温湿度与气压,形成污染羽流辨识的气象底座,在敏感点位(居民区下风向、学校、园区出入口、河道沿线)增加高频监测点,必要时配置小型 GC 或走航质谱用于组分指纹,对热点时段采用移动走航车和手持 PID/FID 巡检,结合无人机巡航对高空逸散和管廊泄漏进行快速定位,实现“固定站看趋势、移动监测找源头”。

3.2 打通台账、工况、治理设施、排放数据链的归集与治理路径

1. 数据归集先统一口径与编码。园区建立数据标准:企业/装置/排口/点位,明确 VOCs 指标口径、采样频率、数据单位与质控规则;接口层采用统一协议与 API,把在线监测、厂界微站、移动走航、视频门禁等数据汇入园区数据湖。同步设置数据分级与权限:企业自管数据、园区监管数据、执法证据数据分库分权。

2. 以生产批次、工单、换产事件为主键,把企业台账中的原辅料用量、溶剂含量、产量与工艺参数以及 PLC/SCADA 采集的实时工况绑定,再与治理设施运行数据联动。平台用规则引擎识别工况升高但治理负荷不变、治理停运而排放不降、阀位异常和浓度突升等旁路特征,将企业上传的维修记录、备件更换、照片视频自动归档,形成从异常发现到处置闭环的证据链。

3. 对采集数据开展 ETL 清洗、缺失补齐与异常剔除,设置完整率、连续性、漂移、突变与一致性校验;再基于多源融合生成可监管指标,如单位产量 VOCs 排放强度、治理设施有效运行率、报警处置及时率、无组织峰值频次、夜间异常概率等,形成企业风险画像与动态排名,做到来源可信、过程可复盘、结论可解释,让智能化监管真正落到执法与减排实效上。

3.3 构建异常识别、溯源定位、工单处置—复核销号的执法路径

1. 异常识别以规则触发、模型识别、人工校核三层联动为主。规则层对浓度突升、日内波动异常、数据缺失漂移、治理设施停运或旁路阀位异常、风量压差突变等设置阈值与组合规则，做到分钟级预警；模型层引入趋势预测与相似事件匹配，对“低负荷却高排放”“夜间异常高发”等隐蔽情形进行识别；人工层由园区监管人员对关键告警进行二次研判，排除校准、检修、极端气象等非排放原因，预警结果需同时输出异常类型、发生时段、关联装置/排口、可能原因与处置建议并自动固化证据包，确保执法有据可依^[5]。

2. 溯源定位坚持风场约束、多点比对、指纹识别组合路径。平台对齐园区网格站、厂界点位与企业排口数据的时间戳，叠加风速风向反推污染羽流，生成候选源区与企业列表；对候选企业进一步对比工况、治理设施运行与排放曲线是否同步，优先锁定“工况变化与浓度变化同向、治理参数反常”的目标，对争议事件可启动移动走航与便携检测复核，在下风向进行网格扫描，必要时增加组分指纹（如苯系物、酯类、酮类等特征）以区分行业源，为工单派发与现场检查提供路线图。

3. 工单处置实行分级派单、限时整改、复核销号、闭环追责。一般异常先派发企业自查工单，要求在时限内上传处置记录、维修更换证明、工况台账与复测数据，较大异常由园区平台联合执法工单介入，开展现场核验，核查旁路、吸附饱和、燃烧温度不足、集气罩破损、泄漏点等问题并依据证据依法处理。复核销号坚持双确认：系统复核数据回归正常且持续稳定一段时间，同时现场或第三方抽测复核通过，对反复触发、屡改屡犯的企业自动升级监管等级，纳入重点名单并启动联合惩戒，形成执法链条与案例库。

3.4 推行风险分级+差异化监管+第三方质控的长效运行路径

1. 风险分级以排放强度、过程风险、守法表现三类因子构建动态画像。排放强度关注单位产量VOCs排放、夜间峰值频次、无组织贡献度，过程风险关注工艺波动、溶剂使用量、储运装卸频次、治理设施类型与冗余度，守法表现关注历史违法、报警处置及时率、台账完整度、数据质量与整改闭环。园区将企业划分为蓝色（低风险）、黄色（较低风险）、橙色（较高风险）、红色（高风险），分级结果与监管资源挂钩，做到高风险多投入、低风险少打扰，把有限执法力量集中到问题企业、问题装置与问题时段^[6]。

2. 对蓝色（低风险）企业以远程巡检为主，减少现场频次，更多提供合规辅导与技改建议；对黄色（较

低风险）企业保持常态化线上核查与季度抽查，重点盯住换产、检修、夜间等敏感窗口；对橙色（较高风险）企业强化预警联动与驻点核验，要求制定专项整改计划并跟踪达标效果；对红色（高风险）企业实施加密监测、突击夜查与联合执法，依法从严处罚，并将监管结果与金融、招投标、评优评先等机制联动^[7]。所有检查均由平台工单驱动，做到有触发、有证据、有记录、有反馈，避免随意执法与重复检查。

3. 园区可引入第三方对在线监测与微站开展校准比对、零点漂移检查、标气核查与运维审计，对数据异常、校准超期、设备离线等出具质控报告并纳入企业信用评分。对重点企业与争议事件，第三方开展监督性监测与走航复核，提供独立证据支撑执法；同时对治理设施运行效果开展评估，如活性炭更换周期合理性、RTO燃烧温度与停留时间达标情况、集气效率与泄漏率抽检等，推动企业从“装得上”转向“用得好”。

4 结束语

工业园区VOCs智能化监管有利于提升环境治理能力，通过构建多元协同的监管模式与全链条实施路径，能够实现VOCs排放的精准监测、高效处置与长效管控，落实企业环保主体责任，推动园区污染治理提质增效，同时为工业园区绿色低碳转型提供有力支撑，助力改善区域空气质量。未来应强化数据共享与模型预警联动，完善在线监测、执法监管与运维考核闭环，推动治理效果可量化、可追溯、可持续。

参考文献：

- [1] 范启亮,陈或兴.挥发性有机物(VOCs)废气全过程监控系统设计[J].中国仪器仪表,2025(11):74-78.
- [2] 曾雅丽.污染源自动监控设施在大气VOCs排放监管中的应用与优化策略分析[J].皮革制作与环保科技,2025,06(18):65-67.
- [3] 郭军.化工企业挥发性有机物排放监管现状与改进[J].山西化工,2025,45(05):289-292.
- [4] 朱贵娥,汪志强,王福云,等.工业园区VOCs综合监管治理体系的研究与实践:以X县工业园为例[J].皮革制作与环保科技,2025,06(09):196-198.
- [5] 李卫东.化工行业挥发性有机物(VOCs)排放治理浅析[J].皮革制作与环保科技,2023,04(15):124-126.
- [6] 郭军.化工企业挥发性有机物排放监管现状与改进[J].山西化工,2025,45(05):289-292.
- [7] 王狄.工业园区安全生产管理中政府、企业与第三方监管协同机制研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).乌鲁木齐高新区(新市区)工业园区管理办公室,2025.

上跨铁路转体立交桥施工技术要点研究

曹 健

(中铁六局集团北京铁路建设有限公司, 北京 100036)

摘 要 在城市化过程中, 桥梁工程上跨铁路的结构形式日益增多, 施工工法亦具备多样性, 如转体施工、预制小箱梁吊装、顶推、挂篮悬浇等。特别是在跨越繁忙运营铁路的特定场景下, 转体桥施工能将大量高风险、高干扰的“跨线作业”转化为安全的“离线作业”, 从而实现对铁路运营影响最小、安全保障最高的目标。本文以南山环线三期道路工程上跨大秦铁路立交桥工程为背景, 系统研究了转体施工在跨越重载铁路中的应用, 旨在为类似工程提供参考。通过工程实践, 验证了跨越重载铁路转体施工对铁路运行影响小、施工安全高、质量控制好、综合社会成本低等优点。

关键词 桥梁工程; 立交桥; 上跨; 重载铁路; 转体施工技术

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.029

0 引言

随着城市建设的快速发展, 公路、城市轨道交通和道路上跨高速铁路、重载铁路等施工日益增多, 如何降低对既有铁路的影响成为技术难点。常用架桥机施工、吊装施工、挂篮悬浇等对既有铁路影响大、安全风险高、质量控制难度较高, 而采用转体施工跨越既有铁路可显著降低对既有铁路运营的影响, 降低安全风险, 降低质量控制难度^[1]。本文以南山环线三期道路工程上跨大秦铁路立交桥工程为背景, 聚焦跨越重载铁路转体施工, 提出系统性解决方案。

1 工程概况

1.1 项目简介

南山环线三期道路工程位于北京市延庆区, 采用 2×59 m 转体 T 构跨越大秦铁路, 跨越点处铁路里程为 K272+254, 铁路为路堑段。转体总重量为 7 000 t, 顺时针转体, 转体角度为 85° (试转体 5°, 正式转体 80°), 采用两台 200 t 自动连续千斤顶在 II 级封锁点内进行转体施工。大秦铁路为双线电气化重载铁路, 货运任务繁忙, 在确保铁路运营安全的前提下, 上跨大秦铁路转体立交桥是南山环线三期道路工程能否顺利开通的关键节点。

1.2 施工重点、难点

(1) 1 号主墩基坑深约 8.3 m, 围护结构采用 $\Phi 1.2$ m 防护桩 + 桩顶冠梁结构, 根据开挖进度支设钢支撑, 基坑深度大, 安全风险系数高, 基坑支护要求高, 为

本工程施工重点; (2) 现浇箱梁转体 T 构下部结构及箱梁施工涉及邻近营业线施工, 做好临近既有有线施工的安全防护及手续办理是本工程的重点。

1.3 施工工序

总体施工顺序为: 桩基施工 → 下部结构 → 转体 T 构现浇箱梁施工 → 称配重 → 试转 → 正式转体施工 → 后浇段施工。

2 上跨铁路转体立交桥施工方案

2.1 桩基施工

转体主墩桩基共计 16 根, 桩径 1.5 m, 桩长 50 m, 距离大秦铁路安全限界 24 m, 采用作业高度 23 m 的旋挖钻进行钻孔施工, 25 t 吊车双吊点法进行钢筋笼安装, 采用导管法进行混凝土水下灌注。

2.2 下部结构施工

1. 承台尺寸为 16.3×14.5×4 m, 采用定型刚模板分两次进行浇筑。

2. 转体系统包括下转盘、转体支座、上转盘及牵引装置。施工中严格遵循设计要求, 控制安装精度, 采用“边测边调、先松后紧、对角抄平、步步紧跟”的操作原则, 确保满足规范标准^[2]。转体过程采用两套液压驱动、同步运行、自动连续的牵引系统, 通过水平方向形成的力偶, 拽拉并缠绕在转台上的钢绞线, 从而驱动整个转动体系平稳旋转。

3. 转体主墩为矩形墩柱, 截面尺寸为 8.5×3×2 m, 采用定型刚模板一次浇筑。

作者简介: 曹健 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 桥梁工程。

2.3 转体T构现浇箱梁施工

上部结构箱梁梁体为单箱双室、变高度、变截面直腹板结构,转体墩处梁高6.5 m,边墩处梁高3.0 m,墩顶部分共分7个梁端,跨度为59+59 m,地基采用高压旋喷桩+40 cm级配砂砾+20 cm混凝土进行加固处理,箱梁采用满堂支架法进行施工,单梁段一次浇筑成型。

2.4 称配重

采用4台500 t千斤顶进行称重,根据称重试验结果,确定合理的配重位置及重量,配重块设置在非转体侧,配重17.5 t。梁体配重采用2.5 t预制块,箱梁施工过程中已在箱梁顶板预留U型钢筋,预制块吊装完成后,采用钢丝绳+桥面预埋U型钢筋绑扎固定预制块,确保转体过程中配重块稳定。

2.5 试转体

2.5.1 转体工况计算

1. 转体结构的牵引力计算与设备配置需在现浇箱梁施工完成后实施。此时,将转动系统的支撑体系进行转换,移除临时垫板,使转台完全支承于球铰之上。随后施加转动力矩,驱动转台绕球铰中心轴旋转,并检查球铰运转状态,实测其摩擦系数,为后续正式转体提供技术依据^[3]。

本桥采用两套ZLD350 甬-200型连续张拉千斤顶系统,每套包含主千斤顶、液压装置、控制系统、牵引用钢绞线及多台辅助千斤顶,额定张拉力达3 567 kN,启动安全系数为3.8。两套系统协同工作,形成水平旋转力偶,通过牵引并锚固在直径970 cm转台圆周上的19束Φs15.2 mm钢绞线(牵引安全系数5.27),带动整个转动体系平稳旋转。

2. 试转体时间计算。桥试转体角度为5度,则:

转盘所走的弧线长度: $LS=(D\pi)\times\theta/360=9.7\times 3.14\times 2\times 5/360=0.846\text{ m}$

转体悬臂端所走的弧线长度: $LS_1=(D\pi)\times\theta/360=59\times 3.14\times 2\times 5/360=5.146\text{ m}$

转动过程中按角速度按0.02 rad/min(1.146°/min)控制,则梁端线速度: $V_1=0.02\times 59=1.18\text{ m/min}$

转台线速度: $V_2=0.02\times 4.85=0.097\text{ m/min}$

则试转体过程中行走时间为:

$T=5.146/1.18=4.36\text{ min}\approx 5\text{ min}$

2.5.2 试转体

1. 提前将施工方案、计划报铁路相关管理部门,认真清理梁体表面,确保桥面无轻飘物,易坠落物等。

2. 对梁体姿态进行测量,对转动体系处及梁端钢筋进行弯折处理,避免转体过程中发生阻碍,解除多余约束。

3. 试转前对转体所需设备进行检验、校定,对千斤顶等设备进行空载、荷载试验^[4]。

4. 清理滑道:清理滑道表面,并采用高压风清除滑道与撑脚间预留间隙内的杂物;随后检查该间隙,在撑脚底部与滑道顶部之间铺设10 mm厚的四氟乙烯滑板,并均匀涂抹润滑油,确保滑移顺畅。

5. 转体设备安装并调试完成、平衡配重、撑脚、滑道等均检查无误后方可进行试转。

2.5.3 试转体总结

(1) 转体方案实用、可靠;(2) 转体工程整个指挥系统运转良好;(3) 操作人员能明确自己的岗位职责和具备协同反应能力;(4) 试转实验实测数据得出:

$$\text{静摩擦系数为: } \mu_{\text{静}} = \frac{F_{\text{启动力}} * D}{\frac{2}{3} N * R_{\text{球铰}}} = 0.1$$

$$\text{动摩擦系数为: } \mu_{\text{动}} = \frac{F_{\text{转动力}} * D}{\frac{2}{3} N * R_{\text{球铰}}} = 0.05$$

实测启动力约为设计启动力的70%,牵引设备具有充足的安全储备;试转期间转体设备性能稳定,现场监测数据显示梁体转动平稳;启动牵引力660 kN,转动牵引力400 kN;均远小于计算启动牵引力938 kN和转动牵引力469 kN,满足要求。

试转中测出平转速度1.14°/min(0.019 897 rad/min),结果满足设计图纸角速度不大于0.02 rad/min的要求。试转中测出点动3 mm,梁端位移41 mm;点动5 mm,梁端位移70 mm;点动10 mm,梁端位移128 mm;监测结果作为转体精确定位的操作依据。

试转中测出惯性位移值2 mm,判断对桥体影响很小。

2.6 正式转体(II级施工)

1. 启动。同步启动牵引千斤顶,采取分级加载,由于各千斤顶间的进油腔并联,油压相等,实现分级加载将所有泵站溢流阀限压调成一致。

2. 平转。在转体过程中,根据转台上标识好的转角刻度,以防欠转或超转。在距离设计位置1 m时,改为点动转动,通过测量梁端6个360度棱镜测点对梁端轴线进行连续观测,直至结构轴线精确就位,确保轴线位置准确;转体轴线就位后,在滑道内放置4台500 t千斤顶,对转体结构进行姿态调整,确保高程准确。

3. 防超转措施。(1) 转体设备具备定距模式,转体就位前剩余1 m时,进入点动操作,精准就位时钢绞线定距距离不得超过2 mm,防止超转;(2) 转体系统设置防超转限位装置,限位装置采用40b标准工字钢,

转体过程中限位装置不得过早安装,避免阻挡撑脚转动,转体剩余 5° 左右安装限位挡板,并精调其位置^[5];(3)为防止转体超限,需在牵引钢绞线上设置明显标记,便于千斤顶操作人员直观掌握转体到位时的牵引行程,避免过量牵引。同时,在转盘上布设测量标识,实时观测并记录转动角度与结构位置,及时反馈信息。在接近设计就位点前,应加强数据采集与分析,形成转体前的测量报告,并据此合理调控转动速度,确保精准、平稳就位。

4. 临时锁定。梁体中线到达设计位置后,对转体系统进行临时锁定。中线锁定后进行边跨现浇段标高调整,可通过采用边跨梁端支架顶托进行微调,转体完成后边跨现浇段支架已支撑到箱梁底部,可通过人工敲打顶托进行梁体标高微调,标高调整完成后立即对转盘承台钢筋进行焊接锁定,并将撑脚与滑道进行焊接。然后报请铁路运输部门解除封闭,开通线路恢复正常运营。

5. 合拢。转体就位后,进行主梁合龙,体系转换。主梁合龙段混凝土浇筑、预应力钢束张拉等必须按设计要求的顺序进行,以使结构受力符合设计计算,同时要求在一天中尽可能低的温度下进行合龙。

3 上跨铁路转体立交桥施工保证措施

3.1 组织保障措施

1. 构建完善的安全保障体系,由项目经理牵头成立安全管理领导小组,并配备专职安全员,全面负责安全管理工作,确保转体施工全过程处于受控状态。

2. 同步建立转体施工专项保障机制,设立专门的安全领导小组,成员全程跟班作业,依据各自职责分工,在现场开展组织、指导与协调工作,切实保障转体作业安全有序进行。

3. 在转体施工前,对所有参建人员开展详细的技术交底和安全教育培训,增强全员安全意识,要求施工人员坚守岗位、服从统一指挥,严格执行指令,全力保障铁路运营安全及现场施工安全。

3.2 安全保证措施

1. 转体施工。(1)施工前组织通过方案专家论证,方案经监理、建设及中国铁路太原局集团有限公司审批通过后,方可实施;(2)施工前做好方案和安全技术交底,人员进场先行培训,培训合格后方可上岗作业;(3)严格遵照中国铁路太原局 2025 年 2 月 17 日下发的《铁路沿线大型机械施工 10 条硬措施》进行现场机械安全管理。

2. 营业线施工。(1)施工前,中国铁路太原局集

团有限公司各站段签订安全配合协议;(2)邻近大秦铁路既有线施工需在铁路侧布置密目防护网和刚性物理隔离,将施工现场与大秦铁路隔开;(3)施工时,严格执行中国铁路太原局集团有限公司制定的有关营业线邻近施工安全管理规定,人员培训合格后,持证上岗;(4)施工中及时清理施工范围内的废弃物和包装网、袋,防止杂物飘落到营业线内或接触网上,影响行车安全;(5)转体前,清理梁体上杂物,原则上梁面不存留任何物体、机械,如必须放置在梁上、随转体一同进行的,必须固定牢固,防止随转体随意摆动,威胁线路安全,同时经过精确计算,及时调整配重,防止影响转体安全^[6];(6)转体施工申报铁路营业线要点施工计划,大秦铁路垂停封锁,施工前模拟转体施工的各项工序、衔接及时间,精确计划,充分利用要点的时点,完成更多的工序内容,避免多次要点影响铁路正常运营。

4 结束语

通过南山环线三期上跨大秦铁路立交桥工程的实践,验证了在重载繁忙铁路干线上转体的可行性及优势。相对于传统的架桥机施工、起重机吊装施工,转体施工转体桥在平行于既有线路进行预制,仅在转体就位时段(通常 2 小时内)进行短暂封闭,对铁路影响极小;将大量高空、高危的跨线作业转化为低空作业,极大地减少了施工人员面临的风险,也减少了落物对下方行车、行人的威胁;采用 6 个 360 度棱镜测点对梁端轴线进行连续观测,可实现高精度转体对接,提高施工质量;转体施工过程技术含量高,视觉冲击力强,对工程技术和项目管理水平有较高要求,以提升工程的社会影响力。转体桥是跨越重载繁忙干线铁路、大跨度、大吨位桥梁时的最优安全选择,综合效益较高。

参考文献:

- [1] 侯晶波,王强,张志军.公路工程预制箱梁上跨既有铁路施工安全风险研究[J].建筑安全,2025,40(08):48-50.
- [2] 余芝升.上跨赣韶铁路的雄信高速T构桥转体施工技术[J].工程建设与设计,2025(14):153-155.
- [3] 张雷.上跨铁路立交桥工程的T构梁转体施工关键技术分析[J].建筑机械,2025(07):133-137.
- [4] 罗维.上跨既有铁路公路城市高架桥预制梁拼装风险研究[D].抚州:东华理工大学,2024.
- [5] 王翔.列车运营激励下上跨铁路T构转体桥振动响应研究[D].南昌:华东交通大学,2023.
- [6] 刘萌.上跨高速铁路立交桥施工风险评估研究[D].北京:北京交通大学,2020.

公路桥梁钻孔灌注桩施工质量控制策略

孙俭宝

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘要 钻孔灌注桩作为公路桥梁工程中广泛应用的基础形式,其施工质量直接关系到结构安全与服役寿命。在实际施工过程中,受地质条件、工艺参数及操作规范等多重因素影响,易出现钻孔倾斜、塌孔、钢筋笼上浮及断桩等质量问题。本文围绕上述典型问题,系统分析其成因机制,并提出针对性的质量控制对策。通过精准监测钻孔垂直度、优化泥浆护壁体系、强化钢筋笼抗浮措施以及智能监控导管理深等手段,构建全过程、多维度的质量保障体系,并强调施工过程中的动态调控与协同作业,旨在提升钻孔灌注桩的整体施工质量,为公路桥梁基础工程提供技术参考。

关键词 钻孔灌注桩; 施工质量控制; 泥浆护壁; 钢筋笼上浮

中图分类号: U445.551

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.030

0 引言

公路桥梁是交通基础设施的重要组成部分,其结构稳定性和耐久性直接关系到基础工程的施工质量。钻孔灌注桩由于具备承载力高、适应性强、施工扰动小等特点,在复杂地质条件下得到广泛应用。该工艺的流程较为复杂,涉及成孔、清孔、下笼、灌注等多个环节,任何一道工序控制不当都可能引发严重的质量缺陷。当前,钻孔倾斜、塌孔、钢筋笼上浮及断桩等问题在实际工程当中仍然较为常见,这不仅会影响桩体的完整性,还可能危及上部结构的安全。本文主要聚焦上述四类典型问题,从施工操作、材料性能以及过程监控等方面着手,提出切实可行的质量控制策略,以期能为同类工程提供参考。

1 公路桥梁施工中钻孔灌注桩常见问题

1.1 钻孔垂直度偏差问题

在钻孔的过程当中,钻杆受力不均匀或者地层软硬交替出现的情况,有可能会造成钻孔的轨迹偏离原本设计的轴线。钻机安装的时候没有处于水平状态、导向装置失去精准度或者钻具出现磨损却没有及时进行更换,都会加剧钻孔垂直度的偏差。在岩土交界面的位置,钻头容易受到侧向阻力的影响而发生偏移现象,如果没有实施有效的纠偏措施,偏差就会随着钻进深度不断累积。钻孔垂直度超过限定标准会削弱桩身的承载能力,影响接桩的精度,并且有可能造成后续钢筋笼无法顺利下放。倾斜的孔壁在灌注混凝土的

时候容易形成局部的薄弱区域,降低桩体整体的均匀性。施工人员如果忽视对钻孔情况的实时监测或者对监测数据的响应存在滞后,也会增加此类风险。钻孔垂直度的控制不仅仅依赖于设备的精度,更需要结合地质条件动态调整钻进参数,以此确保成孔轨迹符合相关规范的要求。

1.2 孔壁失稳引发塌孔的问题

钻孔灌注桩完成成孔之后,孔壁暴露在地下水和土压力的作用之下,倘若护壁措施不够充分,就非常容易发生局部或者整体的塌陷情况。如果泥浆比重过低、黏度不足或者失水率过高,就会削弱泥浆的支撑与封堵能力,从而无法有效平衡地层的侧压力。在砂层、粉土层或者松散填土的区域当中,颗粒之间的黏结力较弱,孔壁的自稳能力较差,塌孔的风险会显著增加。清孔作业的时间如果过长,或者反复提放钻具对孔壁造成扰动,也有可能诱发孔壁的坍塌。一旦出现塌孔的现象,情况较轻时会导致沉渣厚度超出标准,情况严重时会造成埋钻、卡笼等事故,严重影响到施工进度以及桩体的质量。泥浆性能的稳定性、循环系统的连续性,还有成孔之后等待灌注的时间控制,都是防止塌孔的关键要素^[1]。在施工过程当中,必须要维持泥浆参数处在合理的区间范围,并且避免对孔壁产生不必要的扰动。

1.3 钢筋笼在灌注过程中的上浮问题

在进行混凝土灌注的过程中,由于导管内部混凝土流动所产生的浮力作用影响,钢筋笼有可能会被顶

作者简介: 孙俭宝(1990-),男,本科,工程师,研究方向:公路工程、道路与桥梁。

托从而出现上移的情况。如果钢筋笼自身重量不足、固定措施失去效果或者导管提升操作存在不当之处,那么钢筋笼上浮的现象将会更为明显。当灌注速度过快、混凝土坍落度过大或者首批混凝土冲击力过强时,均会加剧浮力所产生的效应。钢筋笼出现上浮问题不仅会改变其原本设计的标高,还可能会造成保护层厚度不足、主筋位置出现错位等一系列问题,进而对桩身的受力性能以及耐久性产生影响。在部分工程当中,因为没有设置有效的抗浮锚固装置或者没有在灌注初期对导管埋深进行控制,最终导致钢筋笼上浮的情况难以得到抑制。若钢筋笼加工时刚度不足或者节段连接不够牢固,那么在浮力的作用下就会发生变形或者解体的情况^[2]。

1.4 混凝土灌注中断导致断桩问题

断桩指的是桩身混凝土在灌注过程中出现中断或者夹层进而形成不连续结构。导管埋深不足、提管过快或者混凝土供应中断等情况,均有可能使泥浆或者沉渣混入桩体而造成断桩。首批混凝土量不足、导管密封失效或者导管堵塞等情况,也会导致正常灌注流程出现中断。一旦混凝土面暴露于泥浆之中,新旧混凝土就无法有效融合进而形成软弱夹层。断桩会严重削弱桩体完整性与承载力,导致不可挽回的质量缺陷。施工组织协调不畅、设备故障频发或者应急措施缺失,是导致灌注中断的主要管理层面的原因。对混凝土和易性、初凝时间等性能控制不当,也可能在灌注后期引发流动性骤降从而增加断桩风险。全过程的连续性保障以及关键节点的实时监控,是预防断桩的核心要求。

2 公路桥梁施工中钻孔灌注桩的质量控制对策

2.1 实施全过程钻孔垂直度监测与动态纠偏

在钻孔作业正式开始之前,要对钻机底座进行精确水平调整,并仔细校核导向架的垂直度。在钻进的全过程当中,应该采用高精度测斜仪或者激光垂准仪,定期对孔斜率进行检测,检测频率需要根据地层变化情况动态灵活调整。在软硬交界的地层或者倾斜岩面的位置,应当降低钻压以及控制好转速,从而避免钻头所受的力出现突然变化。一旦监测所得到的数据显示垂直度快要接近允许偏差的上限时,必须马上暂停钻进作业,认真分析偏斜的方向以及偏斜的程度,并且采取定向的纠偏措施。纠偏可以通过使用偏心钻具、进行局部扩孔回填或者调整钻具配重等方式,逐步修正孔的轴线。纠偏操作必须谨慎小心地进行,防

止因为过度修正而引发二次偏斜的情况。所有的监测数据都应当进行实时记录并且纳入施工日志当中,将其作为质量追溯的重要依据^[3]。在钻孔完成之后,必须再次对全孔的垂直度进行复测,确认其符合规范要求之后才能够进入下一道工序。垂直度的控制贯穿成孔的整个过程,它依赖设备、工艺以及人员的协同配合。

2.2 科学配制与动态调控泥浆护壁性能

泥浆配制需要依据地层特性来选择合适的膨润土类型,并且要严格控制水土比、pH 值以及添加剂比例。新拌制的泥浆必须经过充分搅拌与熟化处理,以此确保其具备足够的黏度、胶体率和静切力。在泥浆循环使用的过程当中,应该持续监测泥浆比重、含砂率以及失水量,及时补充处理剂或者置换已经劣化的泥浆。在容易坍塌的地层当中,可以适当提高泥浆的比重与黏度,增强孔壁的支撑力,但要避免因过高导致沉渣增厚。泥浆循环系统应当保持连续运行状态,防止在停泵期间孔内压力出现失衡情况。清孔作业应该采用反循环或者气举法,减少对孔壁的扰动,并且严格控制清孔的时间。在灌注之前,泥浆性能指标必须满足沉渣厚度与含砂率的限值要求。泥浆管理不只是材料方面的问题,更是过程控制的关键环节,需要建立标准化操作流程与实时反馈机制。

2.3 强化钢筋笼定位与抗浮协同控制措施

2.3.1 钢筋笼结构刚度与制作精度控制

钢筋笼的结构刚度直接影响其在吊装、下放以及混凝土灌注过程当中稳定性。在制作过程中,主筋需要保持顺直状态,不可以存在明显的弯曲或者扭曲情况,以此确保受力均匀。箍筋间距必须严格依照设计图纸来执行,偏差不能超过规范所允许的范围,防止出现局部刚度不足的问题。在钢筋笼底部以及顶部区域增设加强箍筋,能够有效提升整体的抗变形能力,避免在自重或者外力作用下发生形变。所有焊接或者机械连接点都应该饱满、牢固,不能存在虚焊、漏焊或者松动的现象。加工平台要保持平整稳固,采用胎架定位来保证几何尺寸准确无误。钢筋笼节段长度需要综合考虑吊装设备能力与孔深条件,避免过长从而导致挠度过大。制作完成之后必须进行外形尺寸和节点质量的验收,合格之后才可以进入下放工序。结构刚度的保障是后续定位与抗浮措施能够有效实施的前提^[4]。

2.3.2 孔口定位支架与顶部固定装置设置

钢筋笼下放到设计标高之后,必须采用可靠的方式进行位置固定,以防止在灌注过程中发生位移或者上浮的情况,应该在护筒顶部或者地面设置专门的

定位支架, 支架结构需要具备足够的强度以及稳定性, 能够承受钢筋笼的自重以及可能出现的上浮力, 定位支架适宜采用型钢焊接制作而成, 并且要通过地锚或者螺栓与地面进行牢固连接。钢筋笼顶部应当通过焊接短筋、U形卡扣或者高强度螺栓与支架或者护筒进行连接, 从而形成刚性约束, 固定点的数量需要根据钢筋笼的直径与重量进行合理布置, 通常不能少于四处, 并且呈对称分布。固定作业完成以后, 要复核钢筋笼中心位置和设计桩位的偏差, 确保其能够满足规范要求, 所有固定装置在混凝土初凝之前都不可以拆除, 而且要具备抵抗灌注冲击与浮力的能力, 为钢筋笼提供全过程的位置保障^[5]。

2.3.3 中下部抗浮辅助措施配置

除了对顶部进行固定之外, 对于大直径或者深长桩的情况, 需要在钢筋笼的中下部增设专门的抗浮辅助装置, 以此来平衡混凝土灌注时所产生的上托力, 可以在主筋的内侧焊接压重块支架, 通过悬挂预制混凝土块或者钢质配重的方式, 进一步增加整体的自重。压重块的质量应该经过精确计算来确定, 要做到既能有效抑制钢筋笼上浮, 又不会超出吊装设备的承载能力。另一种可行的方式是在钢筋笼的侧壁设置临时拉索, 将拉索的一端锚固于笼体, 另一端固定在地面锚桩上, 通过张紧调节来提供向下的拉力。拉索的材质需要具备足够的抗拉强度, 并且要采取相应的防腐措施。抗浮装置的布设位置应当避开导管的通行路径, 防止对正常灌注施工造成干扰。所有的辅助措施都应该在不影响混凝土流动性的前提下实施, 并且要在施工方案中明确规定安装方法和拆除时机, 以确保这些装置功能有效且操作可行。

2.3.4 灌注过程动态监控与应急响应机制

混凝土灌注阶段是钢筋笼上浮风险最高的时段, 所以必须建立全过程动态监控机制。首先, 安排专职技术人员在孔口持续观察钢筋笼顶部标记位置, 一旦发现异常抬升情况就立即发出暂停指令。其次, 要严格控制首批混凝土下料速度以及方量, 避免高速冲击引发出瞬时浮力激增现象。导管初始埋深应当控制在1.0~1.5米的范围之间, 以此确保混凝土能够有效包裹钢筋笼底部。后续灌注过程当中导管提升要做到平稳缓慢, 每次提升之后必须重新测量混凝土面高度, 并且核算埋深是否处于2~6米的安全区间以内。如果出现轻微上浮状况可以暂停灌注作业, 检查固定点状态并且进行加固处理, 如果上浮较为严重则需要评估是否要终止该桩的施工操作。所有操作指令都由统一

指挥人员负责下达, 要杜绝出现多头指挥的情况。灌注记录应该详细记载钢筋笼状态变化相关内容, 将其作为质量追溯的重要依据, 从而确保问题可查、责任可究。

2.4 建立导管埋深智能监控与灌注连续保障机制

导管在安装之前必须要进行水密性试验, 以此确保接口密封达到可靠标准。在灌注的过程当中, 应该采用自动测深仪或者带刻度测绳实时监测混凝土面高度, 并且要依据此来计算导管埋深。导管埋深需要始终保持在2~6米的范围之内, 严格禁止提管速度过快或者埋深不足的情况。混凝土供应必须保证连续且充足, 搅拌站与运输车辆应该有备用方案, 从而防止出现断供问题。若遇到设备故障或者突发情况, 应该启动应急预案, 比如启用备用泵车或者采取临时缓凝措施。灌注记录要详细记载每车混凝土方量、灌注时间、导管提升次数以及埋深数据, 形成完整且可追溯的档案。导管拆卸操作应当平稳且有序进行, 避免碰撞到钢筋笼或者孔壁。整个灌注过程应该由专人进行统一指挥, 确保各个环节能够实现无缝衔接, 杜绝因人为失误而导致断桩现象。

3 结束语

钻孔灌注桩施工质量控制是一项系统性工程, 涉及成孔、护壁、下笼与灌注等多个相互关联的环节。针对钻孔倾斜、塌孔、钢筋笼上浮及断桩等典型问题, 必须从工艺执行、材料管理与过程监控三个方面入手, 建立全过程、精细化的质量保障体系。各项控制措施应立足于施工实际情况, 强调操作规范性与动态响应能力。只有严格执行技术标准, 强化各工序间的协同配合, 才能确保桩体结构完整、性能可靠, 为公路桥梁工程提供坚实的基础支撑。

参考文献:

- [1] 管志谨. 公路桥梁施工中钻孔灌注桩的质量控制对策[J]. 运输经理世界, 2024(23):85-87.
- [2] 何云枫, 赵聪. 公路桥梁钻孔灌注桩施工技术和质量控制要点构架[J]. 中华建设, 2025(04):163-165.
- [3] 李曼. 公路桥梁钻孔灌注桩施工质量控制分析[J]. 运输经理世界, 2022(26):107-109.
- [4] 杨磊. 公路桥梁施工中钻孔灌注桩施工质量控制问题探讨[J]. 交通世界, 2022(21):66-69.
- [5] 任安乐. 公路桥梁钻孔灌注桩施工技术及其质量控制分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(10):106-107.

无损探伤技术在公路桥梁检测中的应用

张 浩

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 在交通基础设施建设不断推进的背景下, 公路桥梁作为关键交通节点, 其结构安全和服役性能对交通运输效率和公共安全产生直接影响。无损探伤技术凭借在不破坏结构完整性的前提下实现内部缺陷识别与性能评估的能力, 成为桥梁检测领域中的重要手段。本文系统阐述了无损检测技术的基本概念及其核心特征, 分析了该技术在公路桥梁检测过程中具备的多重优势, 并且重点探讨了超声波技术、光纤传感技术、机敏混凝土和电化学等具体检测方法的应用路径, 还对实施过程中需要关注的技术要点进行了说明, 以期为桥梁结构健康监测提供有益参考。

关键词 无损探伤; 公路桥梁; 超声波检测; 光纤传感
中图分类号: U446 **文献标志码**: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.031

0 引言

公路桥梁是国家交通网络当中的重要构成部分, 长期处于复杂环境与动态荷载的双重作用之下, 容易产生材料老化、裂缝扩展以及钢筋锈蚀等各类结构性问题。传统检测方法大多依靠人工进行近距离目测或者开展局部取样操作, 不仅检测效率低, 还可能由于破坏性操作对结构整体性能造成不利影响。无损探伤技术凭借其非侵入性、高精度以及可重复操作等突出特性, 被广泛引入桥梁检测体系当中加以应用。该技术借助物理或者化学相关手段获取结构内部的具体状态信息, 有效弥补了传统检测方法存在的诸多不足之处^[1]。当前, 无损探伤技术已经涵盖声学、光学、电磁以及电化学等多个不同的技术分支, 在桥梁混凝土强度评估、内部空洞识别以及钢筋分布检测等方面展现出显著的应用价值。

1 无损检测技术的概念及其特点

无损检测技术是在不造成被检对象物理损伤或功能损害的前提下, 利用特定物理场或化学反应对材料内部结构、成分分布及缺陷状态进行识别与评估。该技术的核心是通过外部激励信号与结构响应的关联关系, 推断材料内部异常区域或性能退化情况。在公路桥梁检测中, 无损检测技术依托声波、电磁波、光信号或电化学参数等媒介, 实现对混凝土密实度、钢筋位置、裂缝深度及腐蚀程度等关键指标量化分析。此类技术具有高度适应性, 可用于新建桥梁质量验收,

也能用于既有桥梁定期健康监测。其操作过程包含信号发射、信号接收、数据处理与结果判读四个环节, 各环节间有明确逻辑衔接与技术依赖。无损检测技术实施不依赖结构表面明显破损, 能在不影响桥梁正常通行前提下完成全面检测^[2]。该技术数据输出形式多是数字化信号或图像, 便于长期存储、比对与趋势分析, 为桥梁全生命周期管理提供可靠的数据基础。无损检测技术的标准化程度较高, 多数方法已形成行业规范或国家标准, 确保了检测结果的可比性与权威性。无损检测技术的发展与仪器设备的进步密切相关, 现代检测装置普遍具备小型化、智能化与高灵敏度等特点, 进一步提升了现场作业的便捷性与准确性^[3]。

2 道路桥梁检测过程中无损检测技术的优势

2.1 道路桥梁检测中无损检测技术的成熟技术支持

无损检测技术在道路桥梁领域的应用是建立在长期工程实践与技术积累的基础之上的。各类检测方法经历多轮优化与验证之后, 已经形成相对完善的操作规程与判读标准。例如: 超声波检测、雷达探测、红外热成像等主流技术都具备成熟的硬件平台与软件算法支持, 能够稳定输出符合工程需求的检测结果。相关设备制造商与科研机构不断推动技术迭代更新, 促使检测精度与适用范围持续提升。检测人员经过系统培训之后, 可依照标准流程完成从现场布置直至数据分析的全过程操作, 有效保障了检测工作的规范性与一致性。无损检测技术和其他监测手段如结构健康监

作者简介: 张浩(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程、道路与桥梁。

测系统（SHM）的融合也日益紧密，形成了多源数据协同分析的新模式。这种集成化应用不但提高了检测效率，还增强了对复杂病害的综合诊断能力。如今，借助人工智能与大数据技术，无损检测技术如虎添翼。通过机器学习算法对海量检测数据深度挖掘，能更精准地识别病害特征与规律。同时，远程监控与实时传输技术让检测数据可即时回传分析，提升应急响应速度。此外，便携式、智能化检测设备的研发，进一步拓展了无损检测在偏远或复杂桥梁场景的应用，为道路桥梁安全提供更全面的保障。

2.2 道路桥梁检测中无损检测技术的无损性特征

无损检测技术最显著的特征是不会对被检测的结构造成任何形式的物理破坏，这一特性让它和钻芯取样、凿除表层等传统检测手段有所区别。在公路桥梁检测过程当中，结构完整性是保障通行安全的必要前提，任何人为造成的损伤都可能引发新的安全隐患或者加速材料劣化。无损检测采用非接触或微扰动的方式来获取内部信息，能够完全避免对混凝土保护层、钢筋锚固区等关键部位产生干扰。检测操作通常只需在结构表面布置传感器或者探头，不需要进行切割、钻孔或者加载试验，这样就能最大限度保留桥梁原本的力学性能与耐久性。该技术的无损性还体现在对交通运行的低干扰方面，多数检测可以在桥梁正常通行状态下开展，不用封闭车道或者中断交通流，显著降低了检测工作的社会成本。因为不涉及材料移除或者结构改造，无损检测不会改变桥梁的原始状态，这使得多次重复检测成为可能，有利于建立长期性能演变数据库^[4]。

2.3 道路桥梁检测中无损检测技术的拓展空间

无损检测技术在公路桥梁领域当中的应用边界目前仍在持续不断地延伸。由于新材料以及新结构形式不断涌现出来，传统检测方法正面临着全新的适应性挑战，而无损技术依靠其灵活性与可调适性，呈现出了十分良好的拓展潜力。例如：对于高性能混凝土、纤维增强复合材料这类新型建材，研究人员已经开发出与之适配的声学阻抗匹配算法与电磁响应模型，从而确保检测精度能够得以维持。在多塔斜拉桥或大跨径悬索桥等复杂桥梁结构当中，无损检测能够借助分布式传感网络实现全域覆盖，进而突破单一检测点存在的空间局限。技术融合趋势也为拓展应用提供了全新的路径，比如把光纤传感和无人机平台相互结合，就能够实现高空或者难以接近区域的自动化检测。引入人工智能与大数据分析技术，让海量检测数据的智能解析成为可能，进一步提高了病害识别的自动化水平。

3 无损检测技术的应用及检测方法

3.1 超声波技术在桥梁检测中的应用

超声波技术通过向混凝土结构内部发射高频弹性波的方式，并且接收其反射或者透射的信号，依靠波速、衰减以及频谱特征来判断材料内部的状态。在公路桥梁检测工作当中，该技术主要用来评估混凝土的强度，识别内部空洞、裂缝以及分层等各类缺陷。超声波在均匀介质里传播时速度较为稳定，当遇到界面变化或者材料不连续区域的时候，会产生反射、折射或者散射的现象，这些信号的变化经过传感器捕获之后，能够反演出缺陷的位置与规模大小。在检测过程中，通常会采用对测、角测或者平测等方式来布置换能器，以此适应不同的结构形式以及检测目标。超声波技术对于浅层至中深层的缺陷具有较高的灵敏度，特别适合用于桥墩、盖梁、箱梁腹板等关键承重构件的内部质量评估。该方法操作起来比较简便，设备便于携带，可以在现场快速完成大面积的扫描工作。在数据处理环节能够结合时频分析与成像算法，生成直观的缺陷分布图，辅助技术人员进行精准的判读。超声波检测不会受到电磁干扰的影响，适用于钢筋密集的区域，而且对操作人员没有辐射危害，安全性较高^[5]。

3.2 光纤传感技术在桥梁检测中的应用

光纤传感技术依靠光在光纤传播时对外界物理量（如应变、温度、振动）的敏感性，实现对桥梁结构状态的实时感知。在公路桥梁检测工作中，该技术主要通过布设分布式光纤或者光纤光栅传感器，持续监测结构关键部位的应变场与温度场变化情况。光纤具备体积小、重量轻以及抗电磁干扰能力强等诸多优点，能够嵌入混凝土内部或者粘贴于结构表面，进而形成长期稳定的监测网络。分布式光纤系统能够实现数十公里范围内的连续性测量，其空间分辨率可达到厘米级别，适合应用于大跨径桥梁的整体性能评估工作。光纤光栅具备高精度以及多参量同步测量的能力，常被用于支座变形、伸缩缝位移等局部状态的监测工作。该技术的数据采集频率较高，能够捕捉瞬态荷载响应，为动力特性分析提供基础数据。光纤传感系统一旦完成安装，可长期服役且无需进行频繁维护，特别适合用于重要桥梁的健康监测工作。其信号传输是基于光信号，不会受到雷电、高压电场等环境因素的干扰，确保了数据的稳定性与可靠性。

3.3 机敏混凝土检测方法的应用

机敏混凝土是在普通混凝土里掺入导电相或者多孔相等功能组分后所形成的智能材料，其电学、热学

或者力学性能会随着内部应力状态或者损伤程度发生规律性变化。在桥梁检测工作当中,机敏混凝土能够作为自感知材料,通过监测其电阻率、介电常数或者压电响应等相关参数,间接反映出结构内部的微裂缝发展、荷载分布以及疲劳累积情况。该方法把检测功能内置于结构材料之中,实现了“材料即传感器”理念。在进行检测时,只需要在混凝土表面布置电极或者引出信号线,就可以通过外接仪器读取内部状态信息。机敏混凝土对于早期微损伤具备较高敏感性,能够在宏观裂缝出现之前预警潜在风险。它响应速度快,信号稳定,并且与主体结构有良好的相容性,不会引入额外的界面薄弱层^[6]。该方法特别适用于新建桥梁的关键受力区域,如主梁底板、墩柱根部等位置,可为结构安全提供前置性保障。

3.4 电化学检测方法的应用

电化学检测方法借助测量混凝土里钢筋的电位、电流或者阻抗等电化学参数,来评估钢筋的腐蚀状态以及防护性能。在公路桥梁检测工作当中,此方法主要用于识别钢筋锈蚀的起始位置、发展速率以及严重程度。钢筋在碱性的混凝土环境中一般处于钝化状态,不过当氯离子侵入或者碳化深度达到钢筋表面时,钝化膜会遭到破坏,进而引发腐蚀反应。电化学检测采用半电池电位法、线性极化法或者交流阻抗谱法等手段,对腐蚀活性区域和腐蚀电流密度进行量化。检测过程只需在混凝土表面布置参比电极与工作电极,不用破坏保护层,操作较为简便且结果直观清晰。半电池电位法能够快速筛查大面积区域的腐蚀风险,而交流阻抗谱法则可以提供更为详细的界面反应动力学信息。电化学方法对湿度、温度等环境因素存在一定的依赖性,但是通过标准化测试条件能够有效控制误差。该方法适合用于沿海、融雪剂使用频繁等高腐蚀风险区域的桥梁检测,可为防腐维护决策提供科学依据。

4 无损检测技术的实施要点

无损检测技术在公路桥梁中的有效应用,依靠严谨实施流程和规范操作控制。检测开始前要依据桥梁类型、使用年限、环境条件以及历史病害记录,制定出具有针对性的检测方案,明确检测目标、方法选择和测区布置。传感器或者探头的安装位置需覆盖关键受力区域与容易受损的部位,以此确保数据具有代表性。检测环境应当尽量避开强电磁干扰、剧烈振动或者极端温湿度条件,从而减少外部噪声对信号质量产生的影响。操作人员必须严格按照设备操作规程执行,校准仪器参数,保证发射信号与接收信号的同步性和

准确性。数据采集过程中要使结构处于静止或者稳定荷载状态,防止车辆通行或风振引发的动态干扰。原始数据需要及时备份并且标注时间、位置、环境参数等元信息,为后续分析提供完整的依据。数据处理阶段应采用经过验证的算法模型,避免主观臆断或者过度滤波造成信息失真。检测报告要包含方法说明、数据图表、缺陷定位以及等级评定等内容,表述要清晰、逻辑要严密。不同检测方法的结果应相互印证,必要时结合目视检查或其他辅助手段进行综合判断。对于检测中发现的疑似缺陷部位,需进行复测与详细分析,确定其性质、程度及发展趋势。若存在严重安全隐患,要及时通知相关部门并采取应急措施。同时,建立桥梁无损检测档案,记录历次检测情况,为后续养护维修提供依据。定期对无损检测技术进行评估与改进,以适应桥梁结构变化和新技术发展,保障公路桥梁长期安全运行。

5 结束语

无损探伤技术在公路桥梁检测中的应用已形成较为完整的体系,涵盖了从信号采集到结果判读的全过程。其非破坏性、高适应性与技术成熟度使其成为保障桥梁结构安全的重要工具。超声波、光纤传感、机敏混凝土及电化学等方法各具特点,可针对不同检测需求提供有效解决方案。技术实施过程中需注重流程规范与数据质量控制,以确保检测结果的可靠性与工程适用性。无损探伤技术的深入应用有助于提升桥梁养护的科学化水平,为基础设施长效服役提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 赵亮.公路桥梁检测中的无损探伤技术应用[J].中华建设,2025(23):145-147.
- [2] 向延华.公路桥梁项目检测中的无损检测技术应用[J].中阿科技论坛(中英文),2021(03):49-51.
- [3] 张永红.无损检测技术在公路桥梁检测中的应用[J].交通世界,2024(Z1):229-231.
- [4] 洪阳,李和志,张远军.探地雷达与超声波技术在道路无损检测中的融合应用[J].凿岩机械气动工具,2025,51(10):135-137.
- [5] 贾沛源,赵静,贺静.交通毫米波雷达路侧感知关键技术与应用探讨[J].中国交通信息化,2025(S1):180-183.
- [6] 朱宏强.道路桥梁检测中的无损检测技术探讨[J].智能建筑与智慧城市,2023(10):174-177.

工程建设施工中的项目管理及成本控制分析

张海燕¹, 吕文静², 田飞飞¹

(1. 海逸恒安项目管理有限公司, 山东 济南 250100;
2. 山东上水环境科技集团有限公司, 山东 济南 250131)

摘要 随着工程建设复杂度和成本压力持续攀升,科学推进项目管理与精细化成本控制是保障工程效益的关键。本研究围绕工程建设质量、进度与成本的协同提升展开,分析覆盖目标设定、资源调配、风险及变更控制等核心环节的项目全周期管理框架,构建以“前置预判、过程管控、闭环优化”为主线的成本控制体系,并阐述限额设计、合同管理、图纸审核与激励机制等策略,通过全员参与和全过程管控平衡成本与综合效益,以期为相关人员提供有益参考。

关键词 工程建设项目管理; 成本控制; 资源管理; 风险管理

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.032

0 引言

现代工程建设项目往往横跨多个专业领域、需协调大量参建单位且统筹巨额资金投入,对项目管理水平提出了更高要求。材料价格波动、人工成本上涨、环保要求提升等因素也让成本控制面临严峻挑战。当下,通过科学项目管理方法与精细化成本控制手段实现工程建设质量、进度、成本的协调统一成了业界聚焦的重点。因此,研究项目管理和成本控制的内在联系与实施路径,成为推动建筑行业高质量发展的关键课题。

1 工程建设项目管理概述

工程建设项目管理在全生命周期内,需针对项目从立项策划、设计实施到竣工验收与后期运营各环节开展系统化与集成化组织管控,其核心除覆盖目标设定、资源调配、进度质量成本管控、风险应对、多方协同与团队建设等基础维度外,还需以全局视角打破阶段间的割裂状态,实现各环节无缝衔接与目标统一^[1]。工程建设项目管理以实现项目价值最大化为导向,科学构建管理架构并落实责任体系来规避工期延误、资源浪费、质量隐患等问题,而项目管理水平直接影响项目投资效益、资源利用效率与长期运营价值。

2 工程建设项目成本控制的核心理念

工程建设项目成本控制将全周期价值优化作为核心理念,既延续精细化管理与预见性规划的核心逻辑,更突破传统单一环节成本管控的局限,构建“前置预判—过程管控—闭环优化”的递进式管控体系。前置

预判要求项目在策划阶段结合设计方案、市场环境及政策导向完成全面成本测算与风险评估,精准识别潜在成本波动因素并制定应对预案,从源头规避无效投入。过程管控以精益管理为原则,拆解分析设计、采购、施工等环节的成本构成,强化资源投入的价值匹配度,严格控制变更流程与费用审批以杜绝浪费现象。闭环优化强调汇总复盘各阶段成本数据以形成可复用的管控经验,反哺后续项目成本规划,同时兼顾项目质量、安全与绿色建造需求,实现成本控制与综合效益提升的平衡而非单纯追求成本最低,最终保障项目经济效益与市场竞争力的双重提升。

3 工程建设项目管理控制要点

3.1 目标设定与规划控制

1. 项目目标的制定和确认。项目团队开展需求调研与利益相关方访谈时,同步梳理核心诉求、行业规范及战略定位,从产出、时间、质量、成本、安全、环保维度界定目标与细分指标,保障目标契合具体、可测、可行、相关、时限明确原则。结合历史数据与行业基准确定目标基准值后,项目团队按阶段、责任主体把总目标分解为岗位可执行任务目标。组织关键方完成目标评审后,形成《项目管理目标责任书》并签字确认,同步建立季度评估机制动态修订目标以匹配项目愿景与战略需求。

2. 项目规划和进度控制。项目组依据项目目标编制工作分解结构,将工作拆解为可管理任务单元并明确范围、责任人、依赖关系及标准,再据此制定综合

作者简介: 张海燕(1990-),女,本科,一级注册造价师(土建专业)、一级注册建造师(建筑工程)、注册监理工程师、注册(投资)咨询工程师,研究方向:工程咨询、项目管理、全过程咨询。

进度计划,采用专业方法确定时间安排、里程碑节点,识别关键路径时预留 5%~10% 工期冗余。同时编制资源配置计划,明确资源种类、数量与调配时间,避免冲突。构建数字化管控平台后建立日报、周例会制度,跟踪任务进度、汇总偏差并运用挣值法评估效果。分析项目进度滞后原因,通过优化资源、调整工期等方式纠偏,保障项目按计划推进。

3. 项目质量管理和控制。第一,结合项目目标与行业标准编制质量管理计划,明确管控流程、验收标准及责任并将质量要求融入全流程,同时设定材料检验合格率等量化绩效指标。第二,建立“事前预防、事中控制、事后整改”机制,事前检验材料设备、培训人员、交底方案,事中运用 BIM 技术排查隐患、旁站监督关键工序,事后严格验收、建立问题台账闭环整改,定期复盘质量偏差优化管控流程,提升项目质量。

4. 项目变更的控制。第一,建立标准化变更管理流程,明确全流程要求及各方权责,收到变更申请后先审核合理性,不符合的退回并说明理由,审核通过后组织专业人员评估变更对目标、进度、成本、质量的影响并量化工期与成本变化。第二,按评估结果确定变更优先级,重大变更集体评审、普通变更按权限审批,审批通过后制定执行方案调整计划与预算,变更完成后验收效果、归档资料,确保全过程可追溯管控。

3.2 资源管理与成本控制

1. 项目所需资源调配及采购供应链管控。项目团队要建立全周期资源管理台账,将各类资源信息梳理后形成数据库,再基于进度计划编制资源需求计划,用滚动式计划减少预测误差。在人力资源管理上,项目团队明确岗位权责、组建执行团队、开展针对性培训,同时建立绩效考核制度和跨部门协作机制。在物资设备管理上,项目团队筛选供应商建立合格库、签订柔性合同,实行“按需要配送+定时盘点”模式,用技术手段跟踪物流流转状态,并建立备用资源池,及时处理供应链中的问题,保障资源正常供应和合理利用^[2]。

2. 成本估算、预算控制及风险管控。项目团队要推行概算、预算、核算、决算“四算联动”机制,实现全周期成本管控,奠定成本基线、分解预算指标、实时归集成本、复盘归档数据。建立动态成本控制机制,设置预警阈值,一旦出现偏差就采取优化采购、调整资源配置等纠偏措施。同时,识别材料涨价等成本风险,量化风险影响,制定应对策略并预留 3%~5% 的风险储备金,定期评估风险状态、调整应对措施,确保成本可控,并同步更新绩效报告。

3.3 风险管理与变更控制

1. 风险的识别、评估及应对。项目团队需构建覆盖项目各阶段的全周期风险识别体系,运用调研、研讨

与历史数据复盘方法梳理潜在风险和机会以建立动态风险清单,后续采用定量与定性结合的分层评估方式,依托风险矩阵划定风险优先级并设定预警阈值。针对不同类型的风险,项目团队匹配规避、减轻等差异化应对策略以明确执行流程与责任主体,同时构建跟踪监控机制,定期核查风险状态并复盘应对效果,最终形成“识别—评估—应对—监控—优化”的闭环管理模式。

2. 变更管理和控制。项目团队要建立标准化变更管理体系,明确变更申请的统一入口和规范表单,不允许非正式变更指令出现。同时,组建变更控制委员会(CCB),设置微小、通常、重大三级审批机制,匹对应应的审批权限,使用标准化模板开展全维度变更影响评估,设定变更总量阈值来防控高频变更。变更决策确定后,项目团队及时把信息同步给相关人员,全过程跟踪变更实施过程,完成后更新项目基准文件并记录归档,通过验收验证变更效果,并定期复盘优化变更流程。

3. 风险管理与变更控制的联动。项目团队要建立风险管理与变更控制的联动机制,将风险评估结果放进变更决策依据里,在变更申请评审阶段同步核查是否会引发新风险,对风险可控性进行专项评估,如果变更可能导致高风险事项,就要补充风险应对方案才能推进。同时,将变更实施纳入风险监控范围,变更落地后重点跟踪潜在风险的触发情况,及时调整风险应对策略,形成“风险触发变更—变更引发新风险—风险管控反哺变更”的动态平衡。

3.4 监督与评估控制

1. 项目进展及关键绩效指标的评估。项目执行阶段,团队需构建覆盖进度与质量核心维度的关键绩效指标体系,明确划定各指标定义、目标值及考核周期,同时构建适配的数字化监控平台,运用四档预警机制实时追踪指标完成状态,触发预警后需同步明确处置责任及时限。推行定期评估机制,按周核查节点进度且按月开展综合绩效评估,分析偏差后制定针对性纠正措施,并建立标准化评估报告体系,将评估结果与资源调整、团队考核相挂钩,定期复盘优化指标及评估方法^[3]。

2. 控制项目变更及审查。项目需要建立全流程变更审查体系,先完成形式审查再由变更控制委员会开展实质性评估,充分征集相关人员意见,全过程监督变更实施过程,核查执行情况并纠正偏差,按季度组织利益相关方开展项目全面审查。建立数字化审查台账以实现全过程追溯,建立审查结果整改机制,形成“审查、整改、复核”闭环管理流程。

3. 全周期监督与长效评估。在构建全生命周期监

督体系过程中,将工作重点按前期、中期、后期划分,对应设计采购、施工管控、竣工验收等核心环节,明确各岗位监督责任以形成全方位覆盖的监督网络,再引入数字化工具实现任务闭环管理与现场数据实时采集追溯。项目基于PDCA循环建立持续改进机制,通过定期复盘监督评估结果,优化管控措施,推动监督评估工作向标准化与精细化发展。

4 加强工程建设施工中的项目成本控制策略

4.1 制定有效的激励机制

工程建设施工中推进全员成本管控,需要先构建全周期成本责任体系,按项目阶段划分设计、施工、运营等责任模块,明确各岗位管控职责与权限并将成本指标逐级分解至个人,同时配套成本控制流程规范以明确数据上报、偏差分析等关键环节的标准与时限,从组织层面保障全员参与的有序性。构建多维度激励与约束联动机制,激励端采用“基础绩效+成本节约奖励”模式,按阶段核算节约额度后提供阶梯式奖金及专项奖励,将管控表现与晋升、培训挂钩,同时约束端设定超支预警阈值,对无合理理由超支的岗位扣减绩效,情节严重时启动问责,以奖惩倒逼全员树立成本意识^[4]。推进全员参与过程中构建常态化交流平台,定期组织成本分析会,分享优化案例,同步开展定额标准、成本核算等专项培训,提升全员管控能力,全方位落实成本管控要求。

4.2 专业项目推行限额设计控制成本

工程建设中开展限额设计前期筹备,需要收集同类项目历史造价、技术参数及市场价格信息,结合项目功能定位与投资预算拆解各专业工程成本限额指标,明确分项造价上限后制定刚性技术标准与设计限值,细化材料、工艺、设备参数区间以杜绝盲目高标准设计。实施分阶段限额管控时,初步设计阶段审核方案与限额的匹配度,采用价值工程法优化冗余功能,转向施工图设计阶段则将限额分解至构件或工序,设计人员严格按限额设计,同时对接成本管理人员实时核算,出现超支苗头立即调整方案。工程团队建立动态调整与考核机制,定期对比设计与限额偏差并优化,将限额设计完成情况纳入绩效考核,对限额内优化功能的团队提供奖励、对无理由超限额设计的予以处罚,以双重举措保障限额设计落地。

4.3 做好合同管理

第一,合同管理需构建精细化条款体系,在发包、施工、结算等环节嵌入成本管控要求以明确工程量计量规则、工程计价方式、款项支付节点及工程变更审批流程,同时引入材料价格指数联动机制约定价格波动阈值与调价流程,规避价格波动纠纷,还需设置“提

前申报一联合评估一动态计量”变更流程,明确审批权限与成本调整方式,杜绝无序变更超支^[5]。第二,合同管理要建立风险共担与激励联动机制,借助合同设立浮动风险池或储备金账户,合理分担超支风险与分享节约收益;在EPC模式中设置分阶段考核点,将成本控制效果与工程款支付挂钩,对超额节约的承包方提供奖励,对未达标主体扣减绩效。第三,合同管理需强化执行管控,依托信息化台账实时跟踪合同履行进度与款项支付情况,定期开展合规性与风险排查,整改条款执行偏差,从法律与制度层面保障成本管控目标实现。

4.4 加强图纸审核和现场匹配度

图纸审核与现场匹配需要开展全流程管控,施工图完成后委托专业机构独立审查合规性、安全性及专业衔接性,并出具报告督促整改,后续组织多方联合会审排查错缺项与设计漏洞、分析优化空间以形成纪要,明确整改要求。图纸与现场匹配度强化需要在会审前由业主牵头组织踏勘,结合各方核查现场地形、地质等实际情况比对图纸与现状差异,聚焦关键节点匹配性提出优化建议。图纸动态调整机制要在施工阶段建立,若发现图纸与现场偏差或条件变化则立即启动变更流程,评估变更对成本、进度的影响并优化后再施工,还要留存全套资料以确保全过程可追溯,从源头避免返工拆改成本浪费。

5 结束语

在工程建设过程中,项目管理与成本控制构成相互关联且协同促进的有机整体,依托健全的项目管理体系、优化后的成本控制策略与创新型协同管理机制,工程建设的整体效益能够实现有效提升。随着新技术与新工艺的发展,未来项目管理和成本控制会逐步向智能化、精细化方向推进,建筑企业需主动适应行业发展的新趋势,持续完善管理体系并提升管控能力,为工程建设的高质量发展筑牢基础。

参考文献:

- [1] 万亮华. 建筑工程施工项目管理及成本控制[J]. 中国建筑装饰装修, 2023(22):170-172.
- [2] 雷丽莎. 工程质量管理在建设项目成本控制中的作用与效果评估[J]. 中国地名, 2024(01):211-213.
- [3] 刘宁. 工程项目主要成本的管理及控制措施分析[J]. 安家, 2024(02):199-201.
- [4] 冯浩然, 顾珏晟. 工程项目成本管理与控制策略分析[J]. 电子技术, 2024(08):212-213.
- [5] 范忠和. 浅谈建筑工程项目管理及成本控制提高经济效益[J]. 百科论坛电子杂志, 2023(16):154-156.

公共建筑房建施工现场精细化管理技术应用

刘建杰

(山东德林工程项目管理有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 公共建筑房建工程施工现场具有作业面广、工序衔接紧密、管理要素高度集中等特征, 施工管理水平直接影响工程质量、安全运行及建设效率。在建设规模不断扩大、管理标准持续提高的背景下, 传统施工现场管理方式在精度、协同性与持续控制能力方面逐渐显现局限性。精细化管理以系统化技术手段为支撑, 将管理重心前移至施工全过程, 对现场组织、施工过程、资源配置与运行秩序实施精准调控。本文围绕公共建筑房建施工现场的实际需求, 系统梳理精细化管理形成的现实条件, 归纳其关键技术构成, 并结合工程实践探讨技术应用效果。研究表明, 精细化管理技术有助于提升施工现场运行稳定性, 增强质量与安全保障能力, 对公共建筑高质量建设具有积极的意义。

关键词 公共建筑; 房建施工; 施工现场管理; 精细化管理

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.033

0 引言

随着公共建筑功能需求日益多元化, 仅依靠经验判断和常规管理手段已难以有效应对现场运行中的复杂变化。管理精度不足、过程控制不连续、资源配置响应滞后等问题, 在一定程度上制约了施工管理水平的提升。以技术手段支撑的精细化管理理念逐渐受到重视, 其强调对施工现场各要素实施系统协调与动态控制, 使管理活动更加贴合工程实际运行状态, 也为公共建筑房建施工现场管理方式的优化提供了现实方向。

1 公共建筑房建施工现场精细化管理的现实基础

1.1 公共建筑房建施工现场管理的复杂性特征

公共建筑房建工程在功能配置、结构形式与使用要求等方面均呈现出高度综合的特征, 施工现场随之表现出工序交叉频繁、作业界面多样、组织关系复杂等显著特点^[1]。空间利用受限与施工任务密集并存, 使现场管理在时间安排、资源调配和安全控制等层面面临较高协调要求。质量目标与公共使用属性叠加, 使施工现场不仅要关注结构安全与施工精度, 还需兼顾后期运行稳定性与使用舒适性。管理重心由单一工序控制转向全过程统筹, 是公共建筑房建施工现场的现实特征之一, 也对管理方式的精细程度提出更高要求。

1.2 传统施工现场管理模式面临的主要问题

在公共建筑房建施工实践中, 传统现场管理更多依赖经验判断和人工协调, 管理标准执行弹性较大,

过程控制的连续性与可追溯性相对不足。信息传递链条较长, 现场反馈滞后现象时有发生, 使问题处理难以及时形成闭环。资源配置侧重阶段性安排, 对施工动态变化的响应能力有限, 易引发局部效率下降。安全管理与质量控制往往侧重结果检验, 过程干预深度不足, 隐性风险不易提前显现。上述问题在工程体量较大、施工周期较长的公共建筑项目中更加突出, 促使施工现场管理向精细化方向发展。

2 公共建筑房建施工现场精细化管理的关键技术

2.1 施工过程动态管控技术

围绕公共建筑房建施工工序多、衔接紧密的特点, 施工过程动态管控技术强调对关键节点与关键工序的持续跟踪, 使施工状态始终处于可掌控的范围之内。施工计划、现场进度与实际执行之间形成动态对照关系, 管理重心由事后调整逐步转向过程协调, 施工组织运行的前瞻性与灵活性明显增强^[2]。随着施工阶段不断推进, 作业界面频繁转换, 施工条件持续变化, 动态管控技术使管理判断始终建立在现场真实状态之上, 避免计划与执行脱节。

2.2 质量与安全协同控制技术

公共建筑房建工程对结构安全和使用安全提出双重要求, 质量与安全协同控制技术在施工现场中体现出高度融合特征。施工质量标准与安全管控要求同步嵌入现场管理流程, 使质量控制不再局限于成品检查,

作者简介: 刘建杰 (1973-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

而是延伸至施工全过程之中。施工活动在质量约束与安全边界共同作用下运行,管理逻辑由单一控制转向协同约束,质量管理与安全管理之间的边界逐渐弱化。风险识别、隐患预判与过程纠偏形成联动关系,管理关注点由结果合格转向过程稳定,施工现场运行环境的可靠性持续提升。质量目标在受控施工条件中稳步落实,安全管理亦在质量标准约束下更加规范,公共建筑施工整体可靠性由此获得系统性保障,也为工程后期稳定运行提供了坚实的支撑。

2.3 施工资源精细配置技术

施工现场人力、材料与机械设备的配置状况直接影响工程效率与管理成本。施工资源精细配置技术注重资源使用状态的清晰化与协调性,使投入规模与施工需求保持动态匹配关系。资源配置不再停留于阶段性安排,而是随施工进度持续优化调整,现场运行的适配性明显增强。材料供应节奏与施工进度形成协同联动,避免集中进场带来的管理压力,材料周转效率随之提升。设备使用计划与施工工序保持高度契合,设备运行状态更加稳定,人力安排更加契合施工实际运行状态。资源浪费与无效占用现象逐步减少,施工现场运行效率随之提高,管理成本控制能力同步增强,为公共建筑房建工程实现高效、有序推进奠定了坚实的基础。

2.4 施工现场信息集成管理技术

公共建筑房建施工现场信息来源广泛、更新频繁,信息集成管理技术强调信息的统一整合与高效传递。施工数据、管理指令与现场反馈在同一体系内顺畅流动,信息链条由分散走向集中,管理决策的依据更加充分。施工信息在持续整合过程中保持一致性与完整性,管理层对现场运行状态的掌握更加全面。部门之间协同效率明显增强,管理指令在现场的执行准确性随之提高。信息孤岛现象逐渐减少,施工现场管理响应速度不断加快。信息透明度持续提高,使施工管理由经验主导逐步转向数据支撑,精细化管理技术的整体效能可在系统协同运行中得到充分释放。

3 精细化管理关键技术在公共建筑房建施工现场中的应用

3.1 施工过程动态管控技术在现场组织中的应用

公共建筑房建施工现场工序交错密集、作业空间高度集约,施工组织的稳定性与连续性直接决定了现场运行质量。施工过程动态管控技术在现场组织中的应用,强调对施工节奏、工序衔接和作业状态的持续

掌握,使施工管理始终围绕实际运行情况展开。施工计划不再是单一的时间安排,而是与现场执行状态保持动态呼应,管理活动能够随施工变化进行同步调整,现场秩序由此保持相对稳定。

在实际施工过程中,主体结构、机电安装与装饰施工往往存在阶段性交叉,若缺乏动态管控,极易出现作业冲突和管理失序。引入动态管控技术后,关键工序被置于统一协调框架之中,施工组织的重心转向整体协同。作业面变化、人员投入调整及工序转换节奏均能得到及时反映,使现场管理具备前瞻性^[3]。施工过程中潜在的进度偏差不再集中爆发,而是在早期阶段被逐步消化,现场运行的连续性明显增强。

在某大型公共文化建筑建设中,项目结构复杂,施工周期较长,专业交叉程度较高。施工管理团队在实施过程中强化动态管控理念,将结构施工节奏与后续专业工序进行整体统筹。施工现场运行状态随进度变化持续更新,关键节点安排保留调整空间。当局部工序推进节奏出现变化时,管理措施能够迅速跟进,避免作业冲突集中显现。施工过程始终保持有序推进,工期目标在动态调整中得到有效保障,现场组织能力明显提升。

3.2 质量与安全协同控制技术在施工风险管理中的应用

公共建筑房建工程具有使用功能集中、公众参与度高等特点,对施工质量与安全稳定性提出更高要求。质量与安全协同控制技术在施工现场中的应用,使质量管理与安全管理在同一体系内协调运行,风险控制由单一目标转向综合防控。施工管理重心不再停留于结果检验,而是前移至施工过程,使质量偏差与安全隐患能够在早期阶段被识别。

在协同控制模式下,质量标准与安全规范同步嵌入施工流程,管理要求在各施工环节中形成叠加效应。施工条件评估不仅关注工艺达标情况,也兼顾作业环境的安全状态,施工现场运行的稳定性随之增强。质量控制活动在安全保障前提下开展,安全管理亦在质量标准约束中实施,两者相互支撑,形成良性循环。例如:在某公共医疗建筑施工中,结构施工阶段工序复杂,对安全与质量均提出较高要求。项目管理团队将质量检查与安全确认同步纳入现场管理流程,对关键工序实施协同管控。隐蔽工程施工前,施工条件在质量与安全两个层面同时完成核查,现场作业环境更具可靠性。协同控制机制运行后,施工现场风险显著

降低, 质量问题返工率明显下降, 工程整体稳定性得到有效保障, 为后续投入使用创造了良好条件^[4]。

3.3 施工资源精细配置技术在现场运行中的应用

施工资源配置是否合理直接影响公共建筑房建施工现场的运行效率与管理成效。施工资源精细配置技术在现场中的应用, 强调资源投入与施工需求之间的动态适配, 使人力、材料与机械设备在合理范围内高效运行。资源管理由粗放供给转向精准调度后, 施工现场整体运行质量随之提升, 资源利用的结构性效率逐步显现。

在人力配置方面, 施工人员数量与作业强度保持

表 1 公共建筑房建施工现场主要资源精细配置要点

资源类型	配置重点	管理目标	现场效果体现
人力资源	作业强度与工序匹配	提升作业连续性	人员利用率提高
材料资源	进场节奏与施工节点协调	减少堆放与二次搬运	现场秩序改善
机械设备	使用频率与工序需求适配	降低闲置与重复调配	设备运行效率提升

中引入精细配置理念, 对材料进场计划与施工进度进行统筹协调, 减少无效堆放与重复搬运现象。机械设备使用安排与工序推进保持一致, 设备闲置率明显下降。施工现场运行效率显著提升, 资源浪费得到有效控制, 工程综合管理效益不断增强。

3.4 施工现场信息集成管理技术在管理协同中的应用

公共建筑房建施工现场信息来源多、更新频繁, 信息传递效率直接影响管理协同效果。施工现场信息集成管理技术在现场中的应用, 使分散的信息资源实现统一整合, 施工管理由经验主导逐步转向数据支撑。信息流动路径清晰化后, 管理层对施工状态的掌握更加全面, 决策判断更具连续性与一致性。

信息集成管理强调施工进度、质量状态与安全信息在同一平台内协同呈现, 使管理决策具备更强针对性。现场问题反馈与管理指令传递形成顺畅通道, 信息理解偏差明显减少^[5]。多方参建主体在统一信息框架下开展协作, 现场管理响应速度显著提升。

在某大型公共交通配套建筑项目中, 参建单位较多, 专业协调难度较大。项目管理团队对施工现场信息进行集中整合, 使各类管理信息保持同步更新。施工问题能够在较短时间内完成反馈与处置, 管理指令执行效率明显提高。信息集成管理机制运行后, 施工现场协同能力显著增强, 精细化管理技术的综合效能得

到充分发挥, 为后续管理优化提供了可靠的数据支撑。

协调, 阶段性人员过度集中或闲置现象得到有效缓解。材料管理注重供应节奏与施工进度之间的匹配关系, 使材料进场、存放与使用更加有序。机械设备配置强调使用效率与施工需求相契合, 设备运行状态更加稳定。资源配置逻辑由单点保障转向系统协同, 现场运行压力明显减轻。

结合现场管理实践, 可对施工资源精细配置的主要控制要点进行归纳, 如表 1 所示, 不同资源在精细化管理条件下呈现出更加清晰的配置逻辑与运行效果。

在某综合性公共办公建筑施工现场中, 施工阶段跨度较长, 资源种类多样。项目管理团队在资源管理

到充分发挥, 为后续管理优化提供了可靠的数据支撑。

4 结束语

公共建筑房建施工现场管理正处于由经验驱动向技术引领转变的关键阶段, 精细化管理技术的持续应用, 使施工组织更加有序, 过程运行更加稳健, 管理决策更加理性。在复杂施工条件下, 管理精度与技术深度相互支撑, 工程质量、安全水平与建设效率得以协同提升。实践结果表明, 精细化管理不仅改善了施工现场的运行状态, 也推动了房建施工管理理念的升级。随着技术体系不断完善, 精细化管理将在公共建筑建设中展现更强的适应性与延展性, 为高质量建造目标提供长期支撑。

参考文献:

- [1] 张炳强. 房建工程监理现场的质量管理要点探讨[J]. 居业, 2025(10):247-249.
- [2] 郑晓. 精细化施工技术在房建装修工程中的应用研究[J]. 中华民居, 2025,18(06):99-101.
- [3] 王洪涛. 精细化管理模式在房屋建筑管理中的应用与优化[J]. 中国建筑装饰装修, 2025(05):141-143.
- [4] 陈响. 房建工程地下室防水施工精细化管理研究[J]. 房地产世界, 2025(13):85-87.
- [5] 赵东洋. 房建工程施工技术与现场施工管理的分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(06):116-118.

电力工程高空作业安全防护 技术应用与管理探讨

张又伟

(江苏天九机电安装集团有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要 高空作业是电力工程建设与维护运行的关键环节, 高空作业安全防护技术关系到作业人员的生命财产安全以及电网运行安全。电力工程高空作业环境比较恶劣、危险性较大, 安全防护难度较高, 将技术手段与管理手段相结合可以降低事故发生率、提高高空作业的安全度。本文从电力工程高空作业角度出发, 以系统性、智能化技术和管理模式创新为基础, 提出加强对电力工程高空作业安全防护技术的应用模式和管理体系建设的研究、不断完善相应的行业安全标准并加以实践等建议, 以期为相关人员提供参考。

关键词 电力工程; 高空作业; 安全防护技术

中图分类号: TU27; TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.034

0 引言

随着电力系统不断扩容增容, 输电线路架线、变电站电气设备安装与检修等高处作业频率日益增加。高处作业通常在数十米乃至百米以上的高空进行, 作业人员可能由于各种意外因素诱发失稳、坠落、触电以及物体打击等安全风险。由于强电、复杂地貌及高空作业施工等因素叠加, 电力行业高处作业难度大, 传统依靠人工管理的模式对各种突发状况和系统性风险无法起到根本性的预防作用, 导致电力工程高空作业事故频发。提高电力工程高空作业安全防护水平, 建立健全安全防护技术及体系, 是确保电力工程建设的重要保证, 研究电力工程高空作业安全防护技术的应用和管理具有重要的现实意义。

1 高空作业概述

高空作业又称高处作业, 是指人在以一定位置为基准的高处进行的作业。根据国家标准《高处作业分级》(GB/T 3608-2008)规定: 高处作业为“在距坠落高度基准面 2 m 或 2 m 以上有可能坠落的高处进行的作业”。根据这一规定, 在电力工程中涉及高处作业的范围是相当广泛的。在电力工程作业时, 若在 2 m 以上的架子上进行操作, 即为高处作业。电力工程施工中的高处作业主要包括临边、洞口、攀登、悬空、交叉这五种类型, 这些高处作业是伤亡事故可能发生的主要风险点。

2 电力工程高空作业的特点

电力工程高空作业因其特殊的工作性质和外部条件, 呈现出一系列区别于一般施工作业显著特征。这些特征不仅增加了安全管理的复杂度, 也对防护技术提出了更高要求。

2.1 作业环境动态性

电力工程高空作业的场所环境复杂, 经常会在露天或者城郊地带, 高低起伏, 植被、水体、交通等外在因素经常会对作业空间产生影响。输电线路通常要穿越山区、河流、公路等地貌地形多样复杂的环境, 电力工程施工就会出现作业平台不稳定的情况, 需要做临时支撑。由于高空作业过程中受外界环境影响较大, 时常会有风速、湿度、温度等的变化影响作业人员和设备性能, 一旦遇有暴雨、降雪的情况, 很容易引发作业人员坠落事故^[1]。除此之外, 电力设施处于带电或者调试状态, 其电压等级和电流大小也有可能发生变化, 所以需要工人及时了解带电区域的情况, 这种动态性使得安全评估难以静态固化, 防护措施需具备快速响应与灵活调整能力。传统固定式防护设施因缺乏环境适应性, 难以满足动态作业场景下的安全需求, 亟需引入可移动、模块化并集成智能感知功能的防护系统, 实现对环境参数变化的快速响应与精准防控。

2.2 施工过程交叉复杂性

电力工程高空作业通常与其他工种同步开展, 多工种、多工序交叉作业是其常见特点。不同施工阶段

作者简介: 张又伟 (1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电力工程。

的塔基施工、电缆敷设、设备吊装和电气调试等工作均在同一空间内有序交叉进行，且人员众多，作业通道交叉。高空作业人员会在一些位置上做杆塔组装工作，在另一个位置下做基础浇筑或者设备搬运工作，很容易导致物体坠落而危及人员生命安全。不同的专业分别使用不同的机械和工具，容易造成各单位间沟通协调较为困难。此外，工作计划的变动很容易造成原有安全隔离措施失效的问题。在复杂的交叉作业环境下，单一防护措施不能够满足现场所有的安全风险点防护需要，需要建立统一调度以及协同防护的体系，保证整个施工过程顺利进行。通过合理划分各作业面、尽量错开作业时间、利用共享平台实现有效的信息共享，将每个系统的防护技术相互融合，确保各个施工环节都能实现实时的风险联防联控。

2.3 安全风险累积性

电力工程高空作业风险的累加效应，作业中细小的问题，如安全带稍有破损、锚固点存在异动、突发天气状况没有及时撤离等隐患点，如果未得到妥善的处置，将存在累加风险，在后面连续作业中强化或激发后，进而引发事故。高空作业人员长期从事重复性作业会产生疲劳堆积，反应缓慢，容易出现操作失误。设备频繁应用的过程中会产生隐性的损坏，如钢丝绳内存在断丝、链接件出现锈蚀等，多起低概率风险叠加偶合会产生连锁反应，共同作用下导致安全事故。

3 电力工程高空作业危险因素分析

基于系统工程风险传导理论，电力工程高空作业风险的形成受多重因素交互作用，针对电力工程高空作业中存在的安全隐患，本文重点从人为因素、环境因素及设备设施因素三个维度展开系统性研究。

3.1 人为因素

作业人员行为和精神状态是影响安全的关键因素，安全意识不足会导致不符合安全规范的操作行为，如未系好安全带、攀爬错误、工具乱放等。作业人员情绪上的波动，如紧张、焦虑、过于自信会降低判断力及应急反应能力。疲劳作业会减弱作业人员的协调性及注意力，增加人的失误概率。企业的安全培训不到位容易造成作业人员对新设备、新工艺、新技术、新环境没有足够的应对经验。管理人员若缺乏必要的专业素养与沟通能力，其指令易出现模糊或偏差，进而影响作业人员对安全规程的准确理解和有效执行^[2]。电力工程行业人员流动性较大，部分企业临时用工多，无形之中加大了培训和管理的难度，所以就要重视人的行为因素，完善规范化、标准化的作业，从人为因素上降低安全风险概率。

3.2 环境因素

自然环境是电力工程高空作业的一个主要威胁。例如：大风容易使作业人员失去平衡、吊装设备产生晃动和偏移，增加坠落的风险，造成身体伤害；大雨、雪会使作业面变得湿滑，降低了摩擦系数，进一步增加了攀爬以及行走时的意外伤害风险。人在高处被闪电击中的概率更大，在雷电频发地区作业时，在雷电作用下出现直接雷击和感应过电压的情况会对人身以及设备带来很大的危害。夏天气温高，作业人员在户外工作更容易出现中暑、脱水等现象，影响生理机能。而在寒冷的冬季，作业人员的四肢容易变僵硬，妨碍正常作业。高空作业时外界环境可能突变，在工作前要进行气象预报以及现场勘探，提前做好准备预案以及应急方案。

3.3 设备设施因素

防护设备和作业设施的可靠性决定着整个电力工程高空作业的安全水平，一旦安全带、安全绳、自锁器等防坠落装置存在制造缺陷、陈旧老化或者保养不到位等问题，在发生高处坠落时极有可能失效。高空作业时锚固点的设置不合理或未按要求进行固定，不能承受坠落冲击力，容易造成坠落施工。施工过程中脚手架、作业平台的承载力不足或者连接件没有拧紧，可能导致倒塌事故。升降设备的控制失灵会造成平台失控，电气设备的绝缘不好，增加触电的可能性，工作场所的工器具及物品堆放不牢固，可能发生高处坠物现象。若设备设施未按规范要求进行严格检测，将埋下长期安全隐患。合理的设备布局应基于全面的安全考量，确保作业通道畅通、逃生路线无任何障碍物。同时，应强化设备全寿命周期管理，将其选型、安装、使用、定期检测直至报废等各环节纳入统一管控体系，确保所有组成部件性能可靠，为系统安全稳定运行提供根本保障。

4 电力工程高空作业安全防护技术应用与管理

面对复杂多变的风险场景，单一防护手段已难以满足现代电力工程的安全需求。因此，亟需构建覆盖人员、设备、环境与管理的多维技术体系。

4.1 多重防坠落协同控制技术

高空作业是电力工程施工过程中的重要施工环节之一，多重防坠落协同控制技术可形成多层次、立体化防护，有助于提高对高空作业人员的安全防护作用。多重防坠落协同控制技术可以摆脱传统的单一防护理念，将个人防护、临时防护以及作业管控等有机结合在一起，其不仅能相互配合、互相支持、互为补充，而且能够形成具有较强保护作用的防护网络。具体而

言,在电力工程高空作业施工过程中,应按标准的规定佩戴安全带、速差自控器或全身式安全吊带,在失稳后能够及时防止坠落。电力施工企业要选用强度高的安全绳索,计算锚固点的受力情况,确保能够有效防止坠落事故。现场人员作业周围要设置牢固可靠的防护栏杆和密目式安全网进行防护,以防高处坠物造成人员伤亡^[3]。脚手架及升降平台等登高用具需有严格的验收手续,并且要保证结构稳固,防滑效果良好。高空作业前,作业人员需双人互检,查看防护装置佩带、连接是否正确。

4.2 全过程安全防护智能监管技术

相较于传统人工监管难以实现对高空作业全过程的连续、精准安全防护,全过程安全防护智能监管技术可依托现代信息技术有效弥补这一不足。电力工程高空作业全过程安全防护智能监管是通过在作业区域安装高清摄像头、智能传感器等,采集人员行为、设备状态、环境参数等信息,并将采集的信息通过视频分析算法自动识别未系安全带、跨越警戒区、违规攀爬等危险行为,并及时给予声光报警。智能安全带中设置有姿态感应模块,在出现异常倾斜和自由落体现象时会触发报警并定位出危险位置,数据信息经过无线网络发送到中央监控平台,管理人员可以通过远程终端随时观察到现场情况^[4]。后台智能监管系统还支持多画面同屏显示、重点区域轮巡等功能,提高监管效率,系统不受时间空间限制,即使是在夜间的高空作业也能进行有效的监管,不仅可以强化对作业人员的监管作用,还可以对人员产生一定的震慑作用,促使作业人员自觉遵守安全规定。平台可以生成周期性安全报告,反映风险趋势与管理成效,以及管理效果的数据,从而为企业管理人员提供管理数据支撑。

4.3 高空作业区域智能隔离控制技术

电力工程高空作业区与其他区域交叉在一起,可能发生物件打击作业人员或者有作业人员误进此区域的事。智能隔离控制技术通过自动化手段实现作业空间的有效封闭与管控。在电力工程施工作业区域的边界,通过设立电子围栏或红外感应装置,当未经授权的人员、车辆靠近警戒线的时候,装置就会发出报警,提醒管理人员及时介入现场管理。对于作业现场通道的出入口,可以设置智能门禁系统,管理人员实时记录并保存进出时间和人员数据,作业人员使用身份证、感应卡或者人脸识别的方法通过,在出现闯入和突发情况时会自动播出语音提示,避免非作业人员误入作业区域^[5]。高空临近带电体的作业,隔离范围根据电压等级科学划定,以保证足够的安全距离。在高空作

业区域,智能隔离控制技术的应用要根据现场作业情况动态调整,根据移动的作业面,及时移动隔离区域,通过管理人员使用移动终端对隔离情况进行实时监控,发现异常状况及时处理。

4.4 特殊环境下的综合防护管理

电力工程高空作业一般处于相对恶劣复杂的工作环境,在特殊环境下综合防护技术是对一些特殊情况所提供的系统性措施。当进入强风或台风季节,对于高空作业要依据当时当地的气象情况,风速大于规范要求要立即停止作业,并且设备应采取保护措施防止倾覆^[6]。在雨雪天气作业,作业面太滑,必须采取相应的防滑措施。在靠近高压线作业时要确保作业人员正确佩戴绝缘用品,确保作业人员与高压线的安全距离,必要时进行停电作业或者挂绝缘挡板。夜间作业时需要有足够的照明,防止有阴影区或盲区,针对不同环境特点,制定专项防护措施。

5 结束语

电力工程高空作业的安全防护是一项涉及技术、管理、人员以及环境的综合难题,也是一个长期存在的问题,传统的防护方法已无法解决一些较高风险的施工环节,必须依托技术创新与管理升级实现根本性突破。未来,随着物联网、人工智能、新材料等技术的进一步应用,高空作业安全防护将会向着更加智能化、自动化的方向发展。

参考文献:

- [1] 王庆林. 电力建筑工程中的高空作业安全管理与技术创新[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(24):1-3.
- [2] 江志平,仇吕佳,仇斌斌,等. 新型电力高空作业安全工具包[J]. 农村电工,2024,32(04):37.
- [3] 曹捷,郭志彬,潘立志,等. 高空作业场景下的安全带穿戴检测[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(01):92-99.
- [4] 杨美军. 基于电力高处作业防坠安全装置的应用研究[J]. 江西电力,2020,44(02):40-42.
- [5] 王琨,巩锐. 智能安全带在电力高空作业安全保障中的创新应用研究[C]//中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网(苏州)城市能源研究院. 2025年(第三届)城市电网技术创新会议论文集. 新疆信息产业有限责任公司,2025.
- [6] 赵志刚. 高空作业安全智能监测与警示系统的设计与应用[C]//中国电力技术市场协会城市电网专业委员会,国网(苏州)城市能源研究院. 2025年(第三届)城市电网技术创新会议论文集. 广东电网有限责任公司湛江供电局,2025.

面向用户需求的小区建筑智能化工程施工全流程技术管理体系构建

赵雪姣

(南京泽利建设工程有限公司, 江苏 南京 211300)

摘要 小区建筑智能化工程在满足居民安全及便捷生活需求方面发挥着重要作用, 但实际施工管理过程中常因忽视用户需求而影响系统运行效果。本研究从用户视角系统梳理智能化工程施工各阶段技术管理要点, 提出从设计到施工再到运维的全流程技术管理体系构建思路, 采用需求导向的方法对管理体系进行优化配置。研究结果表明, 该体系可有效提升工程实施质量与用户满意度。

关键词 用户需求; 小区建筑; 智能化工程; 技术管理体系

中图分类号: TU71; TU741

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.035

0 引言

随着城市居住环境智能化水平不断提升, 小区建筑智能化工程已成为提升住宅品质和服务能力的重要手段。在智能化系统设计与实施过程中, 用户需求呈现出多样化与个性化的趋势, 促使项目管理模式向更加精细及用户导向转型。传统施工管理以设备部署和系统集成为核心, 忽略用户实际体验与功能匹配导致工程成果难以满足预期使用效果。智能化工程具有技术关联复杂和后期运维依赖度高等特点, 在一定程度上对全流程技术管理提出更高要求。建立以用户需求为核心的技术管理体系, 推动设计及施工与运维各阶段协同优化已成为提升小区智能化水平的关键路径。本研究围绕这一目标构建适用于住宅类智能化工程的施工全过程技术管理框架, 以进一步提升管理实效性与系统运行性能。

1 用户需求在智能化工程中的核心地位

1.1 用户需求识别方法

用户需求识别是智能化工程决策阶段的关键环节, 其有效性关系到项目后续功能架构与系统性能的合理性。需求识别不仅包括对显性需求的归纳分析, 还应覆盖隐性需求与潜在使用习惯的深度挖掘, 在实际操作中可采用结构化访谈及典型用户画像构建等方式来建立完整需求清单。例如: 某住宅社区通过阶段性问卷调查与实地访谈发现用户对智能门禁的期望不仅在于安全防护, 还涉及访客预约以及老人识别辅助等复合场景支持, 将上述细化需求纳入系统设计阶段可提

升功能落地的针对性。识别过程中需结合用户特征和行为模式与操作偏好, 借助可视化工具形成需求模型, 为系统架构与技术选型提供数据支撑, 在一定程度上可以减少主观判断与误差的影响^[1]。

1.2 需求导向的工程特点

面向用户需求的小区智能化工程在功能契合度、系统灵活性与运维效率等方面展现出显著优势。工程设计阶段强化了对使用场景动态变化的响应机制, 强调空间逻辑与系统交互之间的匹配关系, 技术实现层面注重界面操作的直观性与系统响应时间的压缩控制。在某住宅小区项目中, 前期调研引入以家庭行为习惯为核心的数据分析模型, 优化智能家居系统的功能结构, 使照明与安防系统实现远程一体化联动, 用户可在移动终端内完成日常操作与紧急指令切换, 系统上线三个月内, 相关功能的用户满意度得分提高至 4.6, 服务请求量相比旧系统减少 186 次。项目实施阶段引入用户代表参与协同机制, 使施工节点设置与系统测试流程根据反馈及时调整, 有效规避无效工期与重复调试。后期运维环节将用户意见纳入升级评估体系, 形成需求识别、功能迭代与服务优化连续闭环, 增强工程生命周期内各环节的协同性与稳定性^[2]。

2 小区建筑智能化工程施工全流程分析

2.1 设计阶段技术管理

设计阶段是技术逻辑构建的起点, 在智能化系统中承担着系统架构制定、功能模块划分与设备参数设

作者简介: 赵雪姣 (1989-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑智能化。

定等任务,技术管理重点在于提升方案的可实施性与技术边界的清晰度。设计方案应结合建筑空间结构、用户使用行为与系统运行流程构建全景逻辑图,在功能布局、系统耦合与接口规划等方面形成稳定的实施基础。例如:在某住宅项目中,设计团队采用BIM模型与系统图集成的方式进行协同建模,将设备选型、通信路径与布线空间进行三维表达,使得后期施工中管线冲突数量减少了48项,设计调整频次控制在6次以内。技术管理需强化跨专业联动机制,在建筑、结构、给排水、电气与智能化等多个专业之间建立标准接口定义,防止设备接口与结构节点重叠造成二次返工。设计图纸应基于用户使用情境进行逻辑反推,构建控制流程图与功能实现图的双重映射,并输出详细的设备参数表与接口说明书,使施工与调试阶段具备明确执行标准。技术评审应设置多轮校审机制,每一轮均需包含用户需求对照检查、功能闭合性审查与系统稳定性模拟,确保输出成果具备完整性、适配性与一致性,为后续环节提供技术支撑^[3]。

2.2 施工阶段技术控制

施工阶段是智能化系统从图纸实际落地的关键阶段,技术控制管理主要围绕设备布设精度、系统布线规范、接口配置一致性与安装调试流程等内容进行过程监督与质量校验。在实际操作中,施工单位应依据设计文档建立点位控制表与技术交底清单,将所有接口编号、通信参数与布线路径形成现场执行模板,防止因技术信息不对称造成错误施工。例如:在某住宅小区施工过程中,项目部设立三级施工检查机制,将智能照明、门禁、监控等子系统按分区进行样板区建设,提前验证设备安装方式与接口匹配情况,现场技术问题报告数由原阶段的132项降为64项。技术控制还应关注多工种交叉作业区域,在弱电井道、桥架层与设备间等节点进行精细化布线分区,使用不同颜色与编码标识区分通信线缆类型,降低误接或损耗风险。在系统联调过程中,应建立基于功能链路的测试路径,对每一条功能链条从前端采集设备到后台控制平台进行闭环模拟验证,记录响应延时、信号完整性与联动准确性,形成调试记录档案并归档至项目技术资料体系。变更控制应采用技术审批流程,对所有图纸修改、设备型号替换或功能逻辑调整进行审核备案,形成版本更新记录,以保障后续运维阶段技术延续性^[4]。

2.3 运维阶段技术保障

运维阶段是智能化系统运行周期中持续最久的环节,其技术保障体系应具备高频响应、状态监控、数

据支撑与迭代优化四个特征。系统运维不再仅限于设备检修与故障恢复,更依赖于对用户使用行为与设备运行数据的深度分析,从中提取性能偏移、故障趋势与使用瓶颈,实现预测性维护与功能更新。例如:在某住宅社区中,通过部署统一运维平台,将门禁、监控、梯控与能耗系统数据接入平台进行持续监测,在连续监测周期内提前识别出通信中断类异常67次、功耗波动异常52次,有效避免大范围系统瘫痪。运维管理需建立设备运行状态评估机制,以运行时长、数据完整性与报警记录为基础构建健康评分模型,对设备制定定期维护计划。巡检制度应细化为模块级维护作业计划,明确每类系统的维护周期、检查内容与操作标准,使得运维作业标准化与可复核。技术保障还应延伸至用户服务层面,构建用户反馈数据库,对不同类型的功能建议、故障报告与使用障碍进行归类分析,在系统平台中设立改进任务清单,并定期提交系统优化方案。文档管理体系应覆盖所有变更记录、版本升级说明与接口调整路径,为后续设备更新、平台替换或第三方接入提供完整的技术依据^[5]。

3 技术管理体系的构建策略

3.1 体系框架设计

基于小区建筑智能化工程的系统属性与管理需求,可构建由三层结构组成的技术管理体系框架。该框架包括“用户导向层”“技术执行层”与“信息支撑层”,三者相互耦合,在工程不同阶段承担明确职责。在用户导向层中,设置需求采集、偏好建模与反馈回流三个模块,形成需求识别与评价机制。在技术执行层中,包含设计管理、施工控制与运维保障三大核心单元,各单元之间建立接口标准,推动技术逻辑一致性与执行路径清晰性。在信息支撑层中,设置数据管理、模型分析与系统集成平台,作为技术活动的数据库与决策依据。该框架的结构图如图1所示。

该框架实现了以用户需求为起点的全流程管控逻辑,借助数据支撑与平台连接,形成闭环管理系统。在不同工程阶段中,各层的功能权重有所差异,但相互之间保持信息同步与技术耦合,避免局部优化影响全局绩效。

3.2 实施步骤与方法

技术管理体系的实施过程分为准备、构建、执行与反馈四个阶段,每一阶段均需建立标准流程与量化指标以实现管理可控。准备阶段需进行用户需求调研与功能定位分析,建立基线数据与用户场景库,明确系统功能边界与性能目标。构建阶段的重点在于制定

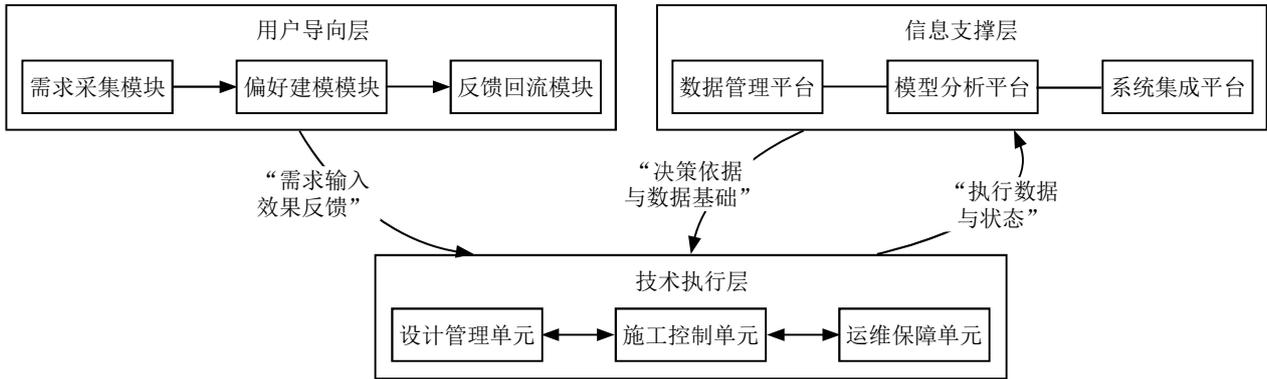


图 1 面向用户需求的智能化工程技术管理体系框架图

接口标准与管理制度，完成设计交底机制、设备配置模板与专业联动流程的配置，并形成工程信息模型作为项目实施依据。执行阶段需依托信息平台进行施工节点监控与技术审核管理，建立施工日志、接口联调记录与测试报告的闭环文件体系。反馈阶段设立系统评估机制，以运行数据、用户投诉记录与维护响应时间为基础，进行问题归类与优化建议输出。

3.3 案例分析

以某小区智能化工程为例，该项目工程建设内容涵盖视频监控、智能门禁、背景广播和智能照明等 10 个子系统。项目管理团队为提升管理效率与用户满意度，引入基于用户需求的全流程技术管理体系，并在施工前期完成全生命周期信息模型的构建，具体情况如表 1 所示。

表 1 项目实施前后关键技术管理数据对比

指标项	传统管理模式数值	体系实施后数值
设计变更次数	19 项	7 项
施工问题处理工单数	132 项	58 项
调试阶段系统异常记录数	64 项	21 项
运维首年响应时长（小时）	14 小时	6 小时
用户功能满意度反馈分数	72 分	88 分

表 1 数据表明，采用新体系后，在设计阶段设计变更次数减少 12 项，说明前期需求识别更为精确且设计决策更加稳定；在施工阶段处理工单数量减少 74 项，反映施工控制流程更加规范以及接口冲突问题被提前解决；调试阶段系统异常记录数由 64 项下降至 21 项，表明系统联调更加精准且技术协调更为充分；在运维阶段，用户提出问题后的平均响应时间缩短 8 小时，反映出数据支撑下的分类值守机制具备较高效率；用户功能满意度评分提高 16 分，显示需求导向策略与功

能落地之间形成良好适配。以上数据从多个维度证实该技术管理体系在实际项目中的适用性与成效，为后续同类工程提供可借鉴的实施模板与评估路径。

4 结束语

小区建筑智能化工程作为现代居住体系中融合技术与空间的重要载体，其施工全过程中的技术管理质量在很大程度上决定了系统运行的连续性与用户使用的稳定感知，在项目组织过程中构建以用户需求为导向的技术管理体系，有助于提升系统功能与生活场景之间的适配性，并在设计逻辑以及施工执行与后期运维之间建立联动机制，实现从方案制定到实施反馈的闭环路径。本文围绕工程周期内的关键管理节点展开分析，从需求识别到阶段控制再到系统整合提出面向实际的技术管理框架，并结合具体项目应用效果进行评估。在用户层面，系统反馈速度与操作界面的持续优化，促使用户满意度稳定提升。未来，在智能化工程管理体系发展过程中，需进一步深化数据驱动模型与行为感知机制的集成逻辑，增强建筑信息模型与智能设备平台之间的交互能力，持续推动系统架构向高可靠性与高使用体验方向发展。

参考文献：

[1] 徐仙送, 毕廷辉. 老旧小区建筑智能化改造策略研究 [J]. 住宅与房地产, 2025(13):66-68.
 [2] 杨亚楠. 智能化小区建筑设计中的绿色节能技术研究 [J]. 住宅与房地产, 2025(04):101-104.
 [3] 尹峰. 基于数据融合的智能化小区建筑电气谐波检测 [J]. 建筑节能 (中英文), 2023, 51(02):87-91.
 [4] 韦龙艳, 梁惠. 住宅小区建筑电气与智能化控制系统的规划设计研究 [J]. 建设科技, 2023(03):79-82.
 [5] 马云. 住宅小区智能化系统的设计实现 [J]. 工程与建设, 2023, 37(01):350-353.

市政道路软土地基处理中 混凝土搅拌桩的优化设计

丁国尚¹, 林天翔²

(1. 青岛迪蓝市政工程设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 青岛能源热电集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 混凝土搅拌桩是市政道路软土地基处理的主流技术, 兼具工艺简便、扰动小、成本可控等优势, 能够有效提升软基承载力、降低工后沉降量。但该技术在工程应用中仍存在场景适配性不足、施工质量缺陷、长期服役性能衰减及施工污染等问题。基于此, 本文阐述了混凝土搅拌桩的技术原理与软基处理适配性, 分析技术应用现存的短板, 从场景化设计、精细化施工、耐久性提升、环保优化四个维度提出优化设计措施, 以期为市政道路软土地基高效处理提供技术参考。

关键词 市政道路; 软土地基; 混凝土搅拌桩

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.036

0 引言

软土地基具有高压缩性、低承载力、沉降变形显著等特点, 直接影响市政道路的施工质量与服役寿命, 易引发路基沉陷、路面开裂等病害, 对交通运行安全构成威胁。混凝土搅拌桩通过固化剂与软土的物理化学反应形成复合地基, 可从根本上改善软土力学性能, 在市政道路工程中得到广泛应用。然而, 在实践过程中, 因技术方案缺乏针对性、施工管控粗放、耐久性设计不足及环保措施缺位等因素, 混凝土搅拌桩的软基处理效果未能充分发挥。基于此, 在市政道路建设期间, 需合理运用混凝土搅拌桩, 挖掘技术应用价值, 制定科学的设计方案, 提升该技术的工程适用性与应用成效。

1 混凝土搅拌桩技术概述

1.1 技术定义

混凝土搅拌桩本质上属于复合地基处理技术, 以水泥或是石灰作为固化剂, 现场操控搅拌机强力搅拌地基土体, 破坏土体原状结构, 同时向外喷射固化剂, 固化剂和软土颗粒充分混合后, 进行一系列物理化学反应, 将松散土体胶结形成高密度、高强度桩身, 即搅拌桩, 搅拌桩和桩间土体保持协同受力状态, 构成复合地基体系。从市政道路软基处理角度来看, 混凝土搅拌桩以化学固化、物理密实、协同受力作为软基加固作用机理。其中化学固化是利用水化产物把软土

颗粒胶结形成完整结构, 物理密实是通过挤压软土、排出部分自由水来提高土体密实度和抗剪强度, 协同受力则是多根搅拌桩和桩间土体共同承受上部荷载, 桩身实质上承受绝大多数的竖向荷载^[1]。

1.2 软基处理适配性

软土地基存在承载力不足、沉降变形量超标、自稳能力差三项典型问题, 直接影响道路使用性能和危及交通行车安全。市政道路建成通车以来, 出现肉眼可见的工后沉降现象, 瞬时沉降量和累计沉降量均超出现行规范要求, 并在道路边坡、交叉口等位置出现滑动破坏问题。相比其他软基处理技术, 混凝土搅拌桩技术高度适配市政道路软基处理需求, 从根本上解决上述工程问题。对于地基承载力问题, 利用大量水化产物来胶结土体颗粒, 把软土转变为复合土体, 实际强度保持在 1.5~3 MPa, 通过改变土体力学性质来提升地基承载力, 处理后的复合地基承载力特征值达到 150~300 kPa, 市政道路地基荷载要求为达到 150 kPa 以上。对于沉降变形问题, 搅拌成桩期间, 持续挤压软土地层, 提前完成固结沉降过程, 大幅降低地基压缩性, 预计可以减少 60%~80% 的工后沉降量, 剩余沉降量小于市政道路工后沉降限值^[2]。而对于自稳能力差的问题, 凭借桩身自身抗剪强度和复合地基协同受力效应, 大幅增强地基抗滑稳定能力, 无论是普通路段还是桥头引道等特殊路段, 在市政道路服役施工

作者简介: 丁国尚(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程。

期间,均不会出现地基整体失稳、垮塌等安全事故。

2 市政道路软土地基混凝土搅拌桩技术现存问题

2.1 适配性不足

目前,技术方案适配性不足是混凝土搅拌桩技术在工程化应用阶段面临的首要问题,由于施工经验匮乏,缺少足够的工程案例作为参考,未能精准结合施工场景情况来差异化制定混凝土搅拌桩技术方案,软基处理效果大打折扣。例如:从地质条件角度来看,软土地基细分为高含水率软土、高有机质软土和多层软土,现有设计方案采取统一参数标准,实质上并不符合软基处理要求。对于高含水率软土,实际含水率超过 50%,所使用的泥浆稠度不足,搅拌次数偏少,极易出现桩体离析问题,且桩身无侧限抗压强度也有所降低。对于高有机质软土,有机质含量超过 5%,抑制水化反应进行,无法生成足够水化产物来胶结软土颗粒,致使复合地基承载力低于设计值。对于多层软土,即为存在软硬夹层的软土地基,常规设计方案采取等长桩,致使浅层软土过度加固,深层软土加固不足,后续在市政道路通车阶段出现局部差异沉降问题。

2.2 施工过程质量缺陷

早期市政道路工程普遍采取粗放型施工模式,完全按照现行规范文件来确定技术标准,技术内容缺失,无法为现场作业提供明确技术指导,高度依赖施工人员自身经验,容易出现错误操作,导致成桩质量和软基加固处理效果不受控制。根据现场施工情况来看,常见问题包括提升速度失控、桩径/桩位误差超标、缺少二次搅拌步骤、固化剂注入量和注入压力剧烈波动。例如:在某市政道路工程,为追赶施工进度、保证市政道路按时交付使用,施工单位违背规范要求,把提升速度由 0.5~0.8 m/min 提升至 1.0~1.2 m/min,浆液和软土颗粒未能均匀混合,导致不同深度部位的桩径值存在明显偏差,实际误差大于 ±50 mm。

2.3 长期服役性能衰减

市政道路工程有软基长期加固需求,而非短期加固需求,要求混凝土搅拌桩在市政道路服役期限内始终维持地基稳定状态,主动预防整体失稳、差异沉降等问题发生。结合往期工程案例来看,在外部环境侵蚀和动态交通荷载作用下,随着通车年限增加,桩体出现强度衰减现象,通车 5 年和 10 年后的桩体强度下滑比例大约为 20%~25% 和 35%~40%,伴随出现疲劳损伤问题,累计变形量和工后沉降量超出规范限值。如果市政道路位于寒冷地区,在冻融循环作用下,还将在桩体内部形成裂缝,微小裂缝自我发育形成贯穿性裂缝,大幅降低桩体承载能力。此外,复合地基体系长

期服役以来,还可能出现协同失效问题,桩体弹性模量远超桩间土体,在动态交通荷载作用下,二者出现差异变形现象,最终导致桩体剪切破坏或是弯曲破坏。

2.4 施工污染

市政道路工程位于核心城区,周边环境较为敏感,随着绿色施工模式的推广实施,提出日益严格的环保要求。传统施工工法未能满足当下提出的环保要求,违背绿色可持续发展理念,甚至扰乱正常施工秩序。结合现场施工情况来看,混凝土搅拌桩施工期间,伴随出现泥浆污染、粉尘污染和噪声污染问题,粉尘排放浓度超过 1.5 mg/m³,关键工序的施工噪声超过 85 dB,严重干扰周边居民日常作息,间接引起大气污染、土壤污染、地下水源污染等一系列生态问题,造成难以估量的生态损失。

3 市政道路软土地基混凝土搅拌桩优化设计措施

3.1 场景化设计

面对市政道路工程复杂的施工形势和要求,需引入场景化设计理念,提前掌握工程资料信息,区分施工场景类型,精准诊断不同场景下的软基加固处理需求,量身定制混凝土搅拌桩处理方案,才能保证实际软基加固效果完全达到设计要求。首先,施工前需组织专业技术团队开展详细的地质勘察工作,通过原位测试、室内土工试验等手段,明确各路段软土的含水率、有机质含量、孔隙比、承载力特征值等核心指标,以此作为场景划分的科学依据。结合往期工程案例来看,在市政道路软基处理领域,实际遇到施工场景包括高含水率软土路段、高有机质软土路段、管线密集路段、交叉口荷载集中路段、多雨地区路段和寒冷冻融路段,不同场景特征与技术难点有着显著差异。

以高含水率软土路段为例,实际含水率超过 50%,土体孔隙比为 1.2~1.6,地基承载力特征值仅为 50~80 kPa,搅拌成桩期间,极易出现离析和糊钻问题,桩体强度水平偏低。一方面,对桩体参数进行优化调整,桩径值从 500 mm 增加至 600~700 mm,按照等边三角形布设各处桩位,相邻桩体间距控制在 1.2~1.5 m,要求桩身完全穿透软土层,并按照软基实际含水率来控制水泥掺量,土体含水率越高,水泥掺量越高,具体控制在 15%~20% 区间,基准水泥掺量为 12%。另一方面,着手调整水泥浆配比方案,水灰比从 0.6~0.7 调整为 0.55~0.6,适当掺入 2% 石膏激发剂和 3%~5% 膨润土,分别用于加快水化进程和提高浆液稠度^[3]。

3.2 精细化施工

混凝土搅拌桩对施工精度有严格的要求,软基加固效果取决于多项工艺参数,任何一项工艺参数的实

际误差超出设计容许范围,都会削弱软基加固效果,导致桩身强度、地基承载力特征值低于预期指标。因此,为确保设计成果顺利转化为施工成果,方案设计阶段,必须主动代入现场施工视角,重点补充技术内容,明确提出各项工艺参数的标准值和允许偏差范围,并总结现场施工条件和工艺参数的内在关联,针对不同施工场景,差异化设定工艺参数。技术人员需结合地质勘察报告,对不同土层分布区域标注针对性施工要点,同时编制工艺参数动态调整手册,为现场施工人员提供清晰指引。施工前需组织专项技术交底会,对参数设定逻辑、设备操作规范及异常工况处置流程进行细致讲解,确保全员熟练掌握技术要求。例如:在软基含水率大于50%时,采取“慢沉慢提”工艺,把下沉速度调整为0.6~0.8 m/min,提升速度调整为0.4~0.6 m/min,同时增加1次复搅次数,确保桩体无侧限抗压强度满足设计要求。同时,现场部署智能施工系统,配备多种类传感器,多尺度跟踪监控混凝土搅拌桩施工过程,确认提升/下沉速度、注浆压力、注浆量、桩身长度、桩位偏差等工艺参数的实际误差量超出允许值后,自动发送报警信号,提醒施工班组纠正错误操作行为,对质量不合格部位进行返工整改^[4]。

3.3 提升耐久性

混凝土搅拌桩长期稳定性核心难点集中在性能衰减和复合地基协同失效双重维度,问题症结在于桩体环境适应能力不足和差异变形。从设计层面来看,分别以配比调整和增设褥垫层作为优化设计方向,方能从根本上解决问题。第一,配比调整。提前了解市政道路工程环境条件,基于场景特点,针对性提升抗冻性、耐腐蚀性、抗疲劳等使用性能,调整原材料种类,重新计算最佳用量比例,并掺入功能型外加剂。例如:针对多雨地区和地下水丰富地区,水泥浆内掺入有机硅防水剂或是膨胀剂,实际掺量分别控制在5%~8%和2%~3%,确保桩体抗渗等级超过P6。针对交通荷载规模庞大的城市快速路和主干道,以纤维抗裂作为优化思路,掺入微量聚丙烯纤维或是钢纤维,重点增强桩体韧性,延缓裂缝形成时间,提升疲劳寿命^[5]。针对年冻融循环次数超过50次的寒冷地区,则在常规配比方案基础上掺加3%~5%亚硝酸盐作为抗冻剂。第二,增设褥垫层。以褥垫层作为桩体和桩间土体的受力协调载体,桩体固化成型后,继续在桩顶部位铺设级配砂石与土工格栅,重要路段褥垫层厚度控制在30~35 cm,普通路段褥垫层厚度控制在20~25 cm,土工格栅层数设定在1~2层,桩体荷载分担比例下降至60%~70%^[6]。

3.4 环保优化

开展混凝土搅拌桩传统施工工法,需要在设计方案内补充环保内容,主动采取绿色施工措施,降低生态损失,确保施工现场周边环境免受污染,具体补充泥浆零排放、粉尘控制、噪声控制三项内容。第一,泥浆零排放。现场部署三级沉淀池和配置压滤机,废弃泥浆依次送入沉淀池、絮凝池和清水池进行处理,再把底层淤泥送入板框压滤机进行脱水处理,最终把固体污泥装车运往专业机构进行无害化处置,禁止在施工现场违规排放废弃泥浆和填埋固体污泥。第二,粉尘控制。借鉴同类工程施工案例,准确识别混凝土搅拌桩施工活动的粉尘污染源,采取针对性防治措施,如在搅拌桩机上部署封闭防尘罩,部署封闭式储罐作为水泥仓,出料口设置柔性密封接头,并在封闭式搅拌棚内搅拌浆液^[7]。第三,噪声控制。一方面,配备低噪声施工设备替换传统设备,如配备运行噪声小于75 dB的变频式搅拌桩机,替换运行噪声超过90 dB的柴油式搅拌桩机。另一方面,施工区域外围连续设置隔音围挡设施,底部设置隔音裙边,物理层面上切断噪声传播路径,缩小噪声扩散范围。

4 结束语

混凝土搅拌桩技术在软土地基加固处理领域展现出广阔的应用前景,已成为市政道路首选软基处理技术,并取得十分显著的加固效果。为进一步发挥该技术的应用成效,施工单位应系统性诊断混凝土搅拌桩施工问题,从设计层面发力,并采取场景化设计、精细化施工、提升耐久性、环保优化等策略,确保混凝土搅拌桩处理方案合理可行。

参考文献:

- [1] 薛轲.混凝土搅拌桩在市政道路软土地基处理中的优化设计与应用[J].水泥,2025(04):90-92.
- [2] 既有祥.市政道路软土地基处理设计中水泥搅拌桩的应用[J].大陆桥视野,2023(10):133-135.
- [3] 黄志华,曹雄,李蒙杰.换填硬壳层对软土区水泥土搅拌桩影响分析[J].公路,2023,68(10):124-132.
- [4] 史越.混凝土搅拌桩在市政道路设计软土地基中的应用[J].交通科技与管理,2024,05(03):72-74.
- [5] 熊乐举,夏伟.市政道路设计中的软弱土地基处理技术研究[J].交通世界,2024(Z2):179-181,196.
- [6] 张杰,夏昊,程雪斌,等.混凝土搅拌站绿色智能化技术研究[J].建筑机械,2025(10):10,296-298,303.
- [7] 苏文卓.预拌混凝土搅拌站绿色生产管理措施探究[J].居业,2025(06):203-205.

钻孔灌注桩施工技术在路桥工程项目中的应用研究

李逸

(安徽省城建设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230051)

摘要 随着城市现代化建设步伐的持续加快, 路桥工程项目数量增加, 钻孔灌注桩对复杂地质条件具有较强的适应性, 且承载力相对较高, 施工噪声相对较小, 在路桥工程项目中得到广泛应用。在路桥工程施工期间, 施工人员应做好钻孔灌注桩施工准备工作, 并优化成孔和清孔等操作, 高质量地制作和安装钢筋笼, 做好混凝土浇筑作业, 提高桩基质量, 保证工程安全。本文针对钻孔灌注桩施工技术在路桥工程项目中的应用展开分析, 介绍了钻孔灌注桩施工技术的核心优势, 探讨了钻孔灌注桩的主要应用场景, 并提出具体的技术应用要点, 以为相关人员提供有益参考。

关键词 路桥工程项目; 钻孔灌注桩; 成孔效率; 成桩质量

中图分类号: U445.551

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.037

0 引言

在路桥工程项目实施过程中, 钻孔灌注桩施工技术发挥着重要作用, 不仅具有较高的承载力, 而且可以对复杂地质条件充分适应, 使路桥工程项目的建设质量得到提高。在路桥工程项目中应用钻孔灌注桩施工技术, 可以为桥梁基础构建良好的承重系统, 并加固处理道路的软土地基, 使工程结构的耐久性和稳定性得到提升, 从而保障我国路桥工程行业的长期稳定发展。

1 钻孔灌注桩施工技术的核心优势

1.1 地质适应性强

对于路桥工程项目, 一般面临复杂的地质条件, 并要跨越复杂地质区域, 包括软土、河流以及山地等。通过应用钻孔灌注桩施工技术, 可以借助钻孔工艺与设备, 充分适应不同的地质条件, 如岩层、碎石土、砂土、粉土以及黏性土等。在软土地基处理时, 可以借助该类技术预防地基沉降问题。在岩层区域, 可以采用硬质合金钻头, 保证成孔效率, 使基础稳定性得到提升。

1.2 承载力强且稳定性好

钻孔灌注桩施工主要通过钢筋混凝土灌注成型, 可以确保桩身充分结合周围土体, 使桩侧摩擦阻力以及桩端阻力得到增强, 确保在水平与竖直方向上具有较强承载力。当路桥工程有着较高的基础承载力要求

时, 如高填方道路以及大跨度桥梁等, 应做好变截面桩或者群桩的设计工作, 使桩基稳定性得到提高。

1.3 施工对环境的影响小

对比预制桩锤击方式, 钻孔灌注桩的施工操作噪声与振动幅度相对较小, 可以减轻对周围居民生活和环境的影响。与此同时, 在钻孔过程中所产生的泥浆, 可以通过循环系统充分回收与利用, 使废弃物排放量减少, 确保与现代路桥工程项目的环保要求相符合^[1]。

2 钻孔灌注桩在路桥工程中的主要应用场景

2.1 桥梁基础工程

在路桥工程施工期间, 桥梁是一个重要的关键节点, 通过保证基础结构的稳定性, 可以进一步确保桥梁运行安全性, 并延长桥梁使用寿命。在桥梁基础施工中, 钻孔灌注桩可以在不同类型的桥梁桥墩与桥台基础上加以运用, 如斜拉桥、拱桥以及梁桥等。对于跨河桥梁工程, 应借助水中钻孔平台, 使深水施工难题得到解决。在山区桥梁工程施工期间, 应将边坡防护与钻孔施工充分结合, 确保可以对复杂地形条件有效应对。

2.2 道路软土地基加固

当道路修建区域为软土地基时, 在施工过程中容易有路面开裂与路基沉降等问题发生。通过运用钻孔灌注桩, 可以在竖直方向上为复合地基提供增强体, 并组合褥垫层与桩间土形成复合地基, 使软土地基承

作者简介: 李逸 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 钻孔灌注桩施工技术。

载力得到提高,使路基沉降量减少。除此之外,通过组合钻孔灌注桩和搅拌桩,可以分层加固软土地基,使道路使用性能得到增强。

2.3 高填方路基及边坡支护

对于高填方道路工程项目,一旦路基底部缺乏足够的承载力,将会影响到填方土体结构的稳定性。施工人员可以在填方的路基底部位置设置钻孔灌注桩,将其作为承重桩或者抗滑桩,可以使路基抗滑性得到提升,增强路基承载力。与此同时,对于边坡支护施工,可以结合钻孔灌注桩和锚索以及锚杆,在此基础上建立桩锚支护体系,使边坡坍塌问题得到预防,提高道路工程施工质量,保证道路工程项目的运营安全性^[2]。

3 钻孔灌注桩施工技术在路桥工程项目中的应用要点

3.1 施工准备阶段要点

在路桥工程钻孔灌注桩施工前,施工人员应做好地质勘察工作,对施工区域地质条件展开详细勘察,明确地下水水位,了解土层分布情况,深入分析岩土力学性能,同时还需要确定是否有特殊地质存在,如软土、溶洞以及流沙等。在路桥工程中,施工人员应结合荷载要求,按照勘察结果确定各项参数,包括桩间距、桩长以及桩径等,并选择适合的成孔设备,包括旋挖钻、旋转钻以及冲击钻等,其中冲击钻对于碎石土层或者岩层较为适用,旋挖钻对粉土、粉质黏土等土层比较适用。在布置场地时,应保证施工场地的平整度,保证钻机作业面的坚实度与稳定度,必要时应通过钢板铺设、碾压、换填等操作,使场地得到有效加固。与此同时,在施工现场应做好各类设施的划分与建设,具体应布置材料堆放区,并建设沉淀池与泥浆池,合理设置运输通道,其中泥浆池的容量应与成孔阶段泥浆循环需求相符合,并做好防护设施的设置。在使用各类设备前,如电焊机、泥浆泵以及钻机等,应全面调试设备,明确设备的机械性能,确认其是否满足相关标准,而计量仪器应定期进行校验。在测量放线、桩位复核过程中,应按照设计图纸合理运用高精度仪器,如水准仪以及全站仪等,确保做好桩位放线工作,并对水准点、定位桩加以设置,保证其标记明显。此外,施工人员还应严格控制桩位偏差,使其维持在允许范围内,一般桩位中心偏差应保持在50 mm以下。在实际施工前应多次进行复核,保证桩位的准确性,防止由于桩位偏差对桥梁基础或者路基受力产生影响^[3]。

3.2 成孔施工阶段要点

在钻孔灌注桩的成孔环节,需要做好泥浆制备工作,确保可以有效护壁与携渣,并将钻头彻底冷却。

施工人员应结合地质条件合理配置泥浆,充分保证泥浆性能,通常应选用纯碱以及膨润土等原料,并对泥浆各项指标严格控制,包括含砂率、黏度以及比重等。例如:对于粉砂土层成孔操作,应将泥浆比重控制在1.2~1.3,使其护壁效果得到提升。对于黏性土层,应将其比重适当降低,具体维持在0.05~1.1。在泥浆循环系统运行过程中,应保证循环通畅,具体通过正循环或者反循环有效携渣,将沉淀池中的废渣充分清理,避免由于泥浆含砂率过高对成孔质量产生影响。在成孔期间应在钻机就位后做好钻杆垂直度的调整,使成孔垂直度偏差保持在1%以下。在实际钻进时,施工人员应结合土层变化做好钻进压力、速度等参数的调整,防止由于盲目钻进引起缩颈、塌孔等问题。在钻进过程中一旦遇到流沙层,应将泥浆比重合理增大,并在黏土块投入后采取慢速钻进形式,全面提升护壁效果。如果遇到溶洞,应提前为片石回填与反复冲击黏土制定处理方案。此外,施工人员还应按照设计要求合理控制成孔深度,并用测锤、测绳展开测量,使桩长可以满足承载力要求,禁止出现欠钻或者超钻问题。

3.3 清孔施工阶段要点

对于钻孔灌注桩的清孔操作,可以将孔底沉渣有效清除,减少桩基沉降量,使桩端承载力得到提高。在完成成孔操作后,应分两次进行清孔操作。首先,在第一次清孔操作时,应在成孔后做好泥浆循环清孔,向地面携带孔底的钻渣,一直到泥浆含砂率满足要求。对于孔底沉渣应严格控制其厚度,使其保持在规定范围内。在第二次清孔操作时,应在安装钢筋笼和导管后展开操作,通过导管有效压注清水,或者可以采用优质泥浆,做好孔内沉渣的置换工作。在清孔操作后,应做好孔底沉渣厚度的检测工作,端承桩应不超过50 mm,摩擦桩应控制在100 mm以下。此外还需要严格控制泥浆指标,将泥浆比重控制在1.03~1.1,并将含砂率控制在2%以下,在检测合格后才能开展混凝土浇筑作业^[4]。

3.4 钢筋笼制作与安装要点

在钢筋笼制作时,应对钢筋间距、数量、规格严格控制,并按照设计图纸制作。在连接主筋时,应合理运用机械连接方式,包括滚轧直螺纹连接,使接头强度得到保证,确保与钢筋母材强度相符合。在连接箍筋、主筋时,应运用点焊方式加以固定,而在使用螺旋箍筋时,应控制缠绕间距偏差小于20 mm。在完成钢筋笼的制作工作后,应做好主筋保护层厚度、长度、直径的检查工作,一般为50~70 mm,并做好保护层垫块的设置,间隔2~3 m安排一组垫块,每组垫块的数量为3~4个,避免由于钢筋笼偏移而影响到保

护层。施工人员应合理使用吊车, 确保对钢筋笼有效吊装, 保证钢筋笼安装的精准度与安全性。在吊装期间应使钢筋笼保持竖直, 防止钢筋笼出现扭曲变形问题。在安装过程中应对钢筋笼的下放速度合理控制, 避免由于与孔壁发生碰撞出现塌孔问题。在钢筋笼就位后, 应利用吊筋对其标高加以固定, 使桩顶钢筋笼的长度可以满足设计要求。除此之外, 还需要做好钢筋笼和桩孔的中心偏差检查, 避免偏差超过 10 mm。

3.5 混凝土浇筑施工要点

在导管安装环节, 应使用无缝钢管进行制作, 并按照桩径合理选择直径, 通常为 200 ~ 300 mm。在连接导管时, 应使用法兰或者丝扣展开连接, 在连接位置处应做好密封圈的设置, 使其密封性得到提升。在下放导管前应做好水密性的试验工作, 压力应达到孔内水深 1.5 倍的压力, 避免在混凝土浇筑期间出现导管漏水情况, 防止出现断桩问题。在导管底端与孔底的间距应维持在 300 ~ 500 mm, 确保可以顺利排出混凝土。在配置和浇筑混凝土时, 可以在现场对高性能混凝土进行搅拌, 或者直接采购与使用商品混凝土, 并严格控制混凝土强度等级, 使其满足设计要求, 将坍落度维持在 180 ~ 220 mm, 提升混凝土的流动性与和易性。在运输混凝土时, 为了避免发生离析现象, 应合理采取防控措施, 保证混凝土运输过程的稳定性。当运输时间较长时, 应通过试验对能否二次搅拌加以确定。在混凝土浇筑期间, 施工人员可以采用“导管法”在水下完成浇筑作业, 应对导管低端的埋入深度加以控制, 在混凝土面中埋入应达到 1 m 以上, 确保可以彻底置换孔内泥浆。在混凝土浇筑期间应保证操作的连续性, 避免出现中断情况, 并控制好浇筑速度。在导管提升时严格控制导管埋入深度, 使其在混凝土面的埋入深度控制在 2 ~ 6 m, 禁止在混凝土面中提出导管。当混凝土浇筑到桩顶时, 应超灌处理 0.5 ~ 1 m, 使桩顶位置的混凝土质量得到提高。在后续将浮浆凿除后, 应合理控制桩顶标高, 确保与设计要求相符合。

3.6 质量检测与缺陷处理要点

在完成桩基施工工作后, 应严格检测成桩质量, 按照各项规范和要求开展质量检测工作, 比较常见的检测方法包括超声波透射法、高应变动力试桩法、低应变反射波法等。其中, 低应变法可以对桩身完整性展开检测, 对桩身是否有夹渣、缩颈、断桩等缺陷问题做出准确判断。超声波透射法对大直径桩较为适用, 能够对桩身混凝土均匀性进行精准检测。在检测数量上, 应确保与设计要求相符合, 通常应达到总桩数 10% 以上。在处理常见缺陷问题时, 一旦发现桩身存在轻

微缺陷问题, 应通过高压注浆法进行处理。当出现断桩等缺陷问题时, 应结合缺陷程度与位置, 做好接桩和补桩等操作。在制定处理方案后, 应由设计单位进行确认, 并在处理后保证桩基承载力, 使路桥工程项目的施工要求得到满足。

3.7 安全与环保要点

为了保证路桥工程钻孔灌注桩施工安全性, 应在钻机作业区域做好安全警示标志的设置。对于钻机操作人员应保证持证上岗, 并做好防护用品的佩戴, 包括安全带以及安全帽等。在钢筋笼吊装处理时, 应做好吊具可靠性的检查工作, 禁止下方站人。与此同时, 在泥浆池与桩孔周边, 应做好警示灯与防护栏杆的设置工作, 避免出现人员坠落问题。在成孔后如果暂不开展混凝土浇筑作业, 应将孔口位置及时覆盖。在落实环保措施时, 应对工程施工期间所产生的废泥浆有效处理, 具体可以采用沉淀池处理方法, 并按照环保要求向指定地点运输, 禁止随意排放废泥浆。对于建筑垃圾, 如废混凝土以及钻渣, 应采取分类堆放方式, 并保证清运的及时性。在施工现场应做好洗车槽的设置, 禁止车辆带泥运行, 减少工程现场的扬尘污染问题^[5]。

4 结束语

在路桥工程项目中, 钻孔灌注桩施工技术具有显著优势。施工企业需要合理选择应用场景, 并严格控制钻孔灌注桩施工流程, 使其技术优势得到有效发挥, 提高路桥工程的施工质量和效率。随着我国路桥工程施工技术的快速发展, 钻孔灌注桩施工技术水平也将得到进一步提升, 如采用超长桩、大直径施工技术, 可以使大跨度桥梁等工程需求得到满足。此外, 还需要充分推广环保型施工工艺, 包括干成孔施工技术、无泥浆循环钻孔技术等, 降低工程施工对周围环境带来的影响, 促进我国路桥工程行业的可持续发展。

参考文献:

- [1] 余小东. 钻孔灌注桩施工技术在路桥工程项目中的应用研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(14): 113-115.
- [2] 梁国立. 路桥工程钻孔灌注桩施工技术应用及质量控制探析[J]. 建筑工程技术与设计, 2024, 12(27): 28-30.
- [3] 康玉鹏, 康玉宅. 简析道路桥梁钻孔灌注桩的施工技术与工程质量监督管理技术要点[J]. 建筑与装饰, 2023(06): 88-90.
- [4] 赵琪. 公路桥梁桩基施工中钻孔灌注桩技术研究[J]. 建材与装饰, 2024, 20(26): 151-153.
- [5] 刘子仪. 全回转套管钻进施工技术在钻孔灌注桩施工项目中的应用思考[J]. 城镇建设, 2024(18): 242-244.

复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制与承载性能分析

张 赣

(中铁广州工程局集团有限公司, 广东 广州 511400)

摘 要 随着交通基础设施建设规模的持续扩大, 桥梁工程逐渐向跨径大、结构复杂、建设环境多样化方向发展。尤其是在山地丘陵区、河谷冲积区及软土地基广泛分布区域, 桥梁基础往往需穿越多种岩土层, 桩基施工不可避免地受到复杂地质条件的制约。在此背景下, 传统经验型施工控制方式已难以满足高安全性与高可靠性的工程需求, 桩基施工质量控制与承载性能分析逐渐成为桥梁工程技术研究与实践中的重点问题。本文围绕复杂地质条件下桥梁桩基工程面临的施工质量控制与承载性能评价问题, 结合工程实践特点, 从地质条件影响机理、施工关键工序控制以及承载性能分析方法等方面展开系统研究, 可以引入施工实测参数、检测数据与试验结果, 对桩基承载性能的形成与验证路径进行分析, 提出适用于复杂地质条件的工程化分析思路, 以为桥梁桩基施工质量控制与承载性能评估提供技术参考。

关键词 复杂地质条件; 桥梁桩基施工; 质量控制; 承载性能

中图分类号: U445.551

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.038

0 引言

随着交通基础设施向跨区域、复杂环境和高技术标准方向持续推进, 桥梁工程在山地丘陵区、河谷冲积区及软弱地基广泛分布区域的建设需求显著增加。随着我国交通基础设施建设的不断发展, 在复杂地质条件下修建桥梁的工程日益增多。复杂地质条件是指由于特殊的地质作用和外力作用, 形成工程地质性质复杂多变、岩土体非均质性强、不良地质现象发育的特殊地质环境。实践表明, 复杂地质条件并非单一的不利因素, 而是通过影响成孔稳定性、桩端持力状态及桩土相互作用机制, 系统性放大施工质量缺陷对结构安全的不利影响。尤其在软硬交错、地下水条件复杂或持力层起伏显著的区域, 传统以经验参数或单一检测结果为主要的控制与分析方式已难以满足桥梁工程对安全性、耐久性与可控性的综合要求。在此背景下, 如何在施工阶段实现对桩基质量的全过程控制, 并在成桩后对承载性能进行符合实际工况的分析与验证, 成为桥梁工程技术研究与工程实践中亟需解决的关键问题。从复杂地质条件的工程特征着手, 全面且深入地研究桥梁桩基施工质量控制策略以及承载性能分析方法, 对于提高桥梁基础工程的可靠性以及工程适应性具有关键的现实意义。

1 复杂地质条件对桥梁桩基施工的工程影响

1.1 地层结构非均质性对成孔稳定性与孔型控制的影响

在复杂的地质条件下, 桥梁桩基需要穿过软土、粉质黏土、砂层以及风化岩等多种不同的介质。地层的力学性质会沿着深度方向发生变化, 其非均质性会直接对成孔过程的稳定性产生削弱作用。从工程实践可看出, 当桩孔穿过饱和粉砂层或者含水率超过30%的软黏土层时, 孔壁自身的稳定能力明显不够, 塌孔以及缩径的风险会较大增加。以旋挖钻成孔为例, 在比重处于1.15~1.20的常规泥浆条件下, 软弱地层的孔径实际测量偏差可达到设计孔径的5%至8%, 局部缩径的深度甚至会超过0.5 m, 这样的孔型缺陷会影响钢筋笼顺利下放, 还会破坏桩侧土体原本的结构, 削弱桩侧摩擦阻力的有效发挥, 复杂地层条件会改变成孔受力平衡状态, 使得孔型控制难度比单一均质地层更高, 对施工工艺以及参数控制提出更高的技术要求。

1.2 软硬交错及持力层变化对桩端有效承载条件的影响

复杂地质条件下经常出现的“上软下硬”或者“软硬互层”地层结构, 致使桩端持力条件呈现出较强的不

作者简介: 张赣 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 土木工程、桥梁专业。

确定性。当桩端处于中风化或者微风化岩层的情况下,钻进扰动以及清孔不充分等施工方面的因素,很容易在岩面形成扰动破碎带,使得设计端承条件难以真正实现^[1]。工程检测所得到的数据说明,在岩层桩基里,要是孔底沉渣厚度控制不严格,桩端承载力实测数值相较于设计数值下降的幅度可达到 15%~25%。而在端承—摩擦复合型桩基当中,持力层厚度不够或者岩土界面起伏比较大,也会引发桩端受力不均衡的问题,增加桩基沉降的离散性。由此可看出,复杂地质条件会放大桩端施工质量对于承载性能的敏感性,让桩基设计承载模式在施工阶段更容易偏离理论假定状态。

1.3 地下水条件复杂化对混凝土灌注质量与桩体完整性的影响

复杂地质条件大多伴随着地下水位较高以及渗透性差异较大等问题,这些问题会对桩基混凝土灌注进程产生直接的干扰。在地下水位埋深小于 3 m 或者存在承压水状况的区域,孔内泥浆性能容易因为水力交换而出现衰减,致使混凝土在灌注初期出现离析或者夹泥的现象。现场统计显示,当导管埋深不足 2 m,并且灌注中断时间超过 20 分钟时,桩体缺陷发生的概率会较大上升,低应变检测异常率可从常规条件下的 5% 提升至 15% 以上。这类缺陷虽说不一定会使得承载力马上失效,但是会削弱桩体整体的刚度以及耐久性,增加长期服役的风险。地下水条件的复杂化对灌注工况稳定性产生影响,成为复杂地质条件下桩基质量控制中不可忽视的关键工程因素。

2 复杂地质条件下桥梁桩基施工质量控制策略

2.1 基于工程地质再识别的桩基施工参数精细化控制策略

在复杂地质条件下,仅仅依靠勘察阶段所取得的成果,一般很难精准地呈现桩位处实际的地层情况。在施工阶段要引入“工程地质再识别”机制,把它当作质量控制的前置步骤,施工单位需要在试桩或者首批桩施工的进程中,根据钻进参数记录、取芯状况以及返渣特征,对桩位实际的地层展开动态校核。例如:在旋挖成孔的过程中,可凭借钻进扭矩与钻速的变化来判定软硬地层界面的位置,当钻进扭矩从 15~20 kN·m 突然增加到 40 kN·m 以上的时候,往往就意味着进入了中风化岩层,应当及时调整钻进方式以及清孔工艺,依据再识别的结果,针对成孔深度、扩孔范围以及泥浆性能指标进行有针对性的修正,如在软弱砂层中将泥浆比重从 1.10 提升至 1.18~1.22,黏度控制在 17~22 s,以此提高孔壁的稳定性。通过把地质再识别的成果直接转变为施工参数控制的依据,可有效地降低复杂地质条件所带来的施工不确定性,

为后续工序质量的稳定提供可靠的前提条件。

2.2 针对成孔全过程的稳定性与沉渣双控制技术措施

成孔质量是桩基施工质量控制中的关键部分,在复杂地质条件下要同时开展孔壁稳定控制以及孔底沉渣控制这两条技术主线。针对容易塌孔的地层,需运用分层控制钻进速度的办法,在软土或者砂层里把钻进速度控制在 0.3~0.6 m/min,并且让孔内泥浆液面高于地下水位不少于 1.5 m,以此维持正压平衡。在进入持力层之前,要预留不少于 0.5 m 的缓冲钻进段,防止一次性快速切入硬层致使孔底受到扰动。成孔结束后,要通过换浆、正反循环清孔等方式,把孔底沉渣厚度严格控制在设计要求的范围之内,一般摩擦桩不超过 100 mm,端承桩不超过 50 mm。工程实践显示,当沉渣厚度从 120 mm 降低到 50 mm 以内时,桩端承载力实测值平均提升大概 18%~22%。通过对成孔稳定性以及沉渣厚度实施全过程双控制,可改善桩土接触条件,为承载性能的有效发挥创造基础条件。

2.3 钢筋笼与混凝土协同施工的结构完整性控制策略

在复杂地质条件下,桩孔形态呈现不规则态势,并且孔壁出现局部变形,使得钢筋笼与混凝土施工更容易产生结构性质量方面的隐患。施工控制需要从钢筋笼空间定位以及混凝土灌注连续性两个方面共同开展。在钢筋笼制作阶段,应当通过加密定位筋以及设置刚性支撑环的方式,保证其整体具有足够刚度,在吊装下放过程中,要采用多点同步控制手段,防止单点受力致使笼体发生偏斜。在实际工程中,当钢筋笼保护层厚度偏差被控制在 ± 10 mm 以内时,桩体受力的均匀程度明显优于偏差超过 ± 20 mm 的情形。在混凝土灌注阶段,要严格把控导管埋深,一般维持在 2~6 m 的范围之内,保证混凝土在正压状态下上升,避免出现夹泥以及离析现象。要连续完成单桩混凝土的灌注工作,防止中途停歇时间超过 30 min,通过对钢筋笼与混凝土工序进行协同控制,可提升桩体结构的完整性,降低复杂地质条件下隐蔽缺陷出现的概率。

2.4 基于检测反馈的桩基承载性能验证与质量闭环控制

在复杂地质条件下,桩基质量控制不能仅停留在施工完成阶段,而是要借助检测与反馈机制构建闭环管理体系,桩基成桩之后,需依据工程关键程度以及地质复杂状况,合理安排低应变、高应变以及静载试验等检测手段,对桩体完整性和承载性能展开综合评估^[2]。检测结果说明,在复杂地质区域,低应变异常桩的比例一般比常规地层高出约 5%~10%,若不结合

复核检测,就容易出现误判情况。要把检测数据和施工记录进行对照分析,如异常反射位置是不是对应着沉渣控制薄弱区域或者灌注中断时段,对于承载力偏低或者完整性存在疑问的桩基,应及时采取补桩、加固或者设计调整等措施,防止问题向上部结构传递。只有通过把检测结果反向反馈到施工与技术管理环节,形成“施工—检测—修正”的质量闭环控制机制,才能在复杂地质条件下实现桩基工程质量的可控与可验证。

3 复杂地质条件下桥梁桩基施工的承载性能分析方法

3.1 基于施工实测参数反演的桩侧摩阻力分布分析方法

在复杂地质条件下,桥梁桩基的桩侧摩阻力呈现出较大的分段性以及非线性特性,仅仅依靠规范经验公式很难精确体现真实受力情形,施工单位需以施工过程实测参数作为基础,构建桩侧摩阻力反演分析方案^[3]。展开来说,技术人员可在钻孔施工以及混凝土灌注阶段系统收集钻进扭矩、钻速、泥浆比重以及返渣特征等参数,并且把这些参数与地层划分结果开展对照分析。当钻进扭矩稳定在15~25 kN·m且钻速较快时,一般对应软塑黏土或者粉土层,这个区段桩侧摩阻力实测值大多集中在30~50 kPa,当钻进扭矩提升到35~60 kN·m且钻速明显降低时,往往进入中密砂层或者弱风化岩层,其桩侧摩阻力可提升至80~120 kPa。技术人员通过对不同地层区段的摩阻力参数进行反演校核,可建立更贴近实际工况的桩侧摩阻力分布模型。该方法的优势在于把施工行为直接转变为承载性能分析依据,有效减少复杂地质条件下参数选取的不确定性。

3.2 结合静载试验与沉降曲线分段解析的桩端承载性能分析方法

在复杂地质条件下,桩端的承载性能会受到持力层完整性、施工扰动以及沉渣控制水平等多种因素的作用,其发挥过程有较大的阶段性特点。想要精确评估桩端的承载能力,工程技术人员需把静载试验当作核心方式,联合荷载—沉降曲线的分段解析办法展开系统剖析。在实际操作时,试验人员在加载过程中要着重留意沉降速率的变化^[4]。当荷载从设计值的50%提升到80%时,若沉降增量明显加快,大多时候意味着桩端接触条件欠佳或者持力层受到了扰动。工程实测数据表明,在孔底沉渣厚度控制在50 mm以内的岩层桩当中,极限承载力对应的沉降值一般小于40 mm;而当沉渣厚度超过100 mm时,在同等荷载条件下,沉降值可增大到60~80 mm。通过对沉降曲线的弹性阶段、

塑性发展阶段以及破坏阶段进行分段辨别,技术人员可判定桩端阻力的实际发挥程度,为复杂地质条件下桩基承载性能的定量评估提供可靠的依据。

3.3 基于多源检测数据融合的桩基整体承载性能综合评估方法

在复杂地质条件下,仅依靠单一检测手段很难全面呈现桩基的真实承载性能,要采用多源检测数据融合的综合评估方式,施工单位需组织技术人员对低应变检测、高应变检测以及静载试验的结果展开联合分析,并且把检测数据和施工记录进行对应^[5]。在具体实施过程中,技术人员可先借助低应变检测来识别桩体完整性缺陷的位置。若异常反射集中出现在桩底以上2~4 m范围内,那就结合施工日志核查这个区段是否存在灌注中断或者导管埋深不足的问题,接着凭借高应变检测获取桩端阻力与桩侧阻力的比例分布情形。工程经验显示,在复杂地质条件下,桩端阻力占比的波动范围可达到30%~55%。技术人员要以静载试验结果作为校核基准,对前两类检测结论给予修正,经过多源数据的交叉验证与综合判读,可降低误判风险,使桩基整体承载性能评估结果更接近真实工程状态。

4 结束语

复杂地质条件下桥梁桩基工程的质量与承载性能,本质上是地质环境、施工行为与结构响应共同作用的结果。桩基施工过程中产生的成孔扰动、持力层状态变化以及混凝土成型质量,均会通过桩土相互作用机制对承载性能产生深远影响。因此,桥梁桩基工程的技术控制不应局限于单一环节或单一指标,而应在充分认识复杂地质条件工程特征的基础上,构建覆盖施工全过程的质量控制体系,并辅以符合实际工况的承载性能分析方法。通过将施工参数、检测结果与承载响应进行系统关联,可以有效缩小理论假定与工程实态之间的偏差,使桩基设计与施工控制更具针对性和可靠性。

参考文献:

- [1] 梁昌德.复杂地质条件下桥梁桩基施工的质量控制研究[J].产品可靠性报告,2024(07):114-115.
- [2] 陈镇.不良地质条件下高速公路桥梁桩基施工工艺优化与质量控制[J].四川水泥,2025(05):284-286.
- [3] 王海东,田凯,李显,等.基于复杂地质条件的桥梁桩基施工技术 with 质量控制[J].前卫,2024(31):182-184.
- [4] 毕明辉,高云.基于复杂地质条件下桩基施工方法及质量控制措施探究[J].建筑与装饰,2025(03):160-162.
- [5] 迟占华.桥梁桩基施工技术在复杂地质条件下的应用分析[J].工程建设与设计,2025(08):132-134.

水利工程协同设计模式对设计效率提升的效果研究

贾万伟¹, 陈淑青², 陈龙^{1*}

(1. 山东新汇建设集团有限公司, 山东 东营 257000;
2. 山东新汇建设集团有限公司济南分公司, 山东 济南 250000)

摘要 随着信息技术的快速发展与工程复杂程度的不断提升, 传统线性设计模式已无法满足现代水利工程高质量发展的期望。本研究深入剖析协同设计模式的理论基础与实践特征, 结合我国水利工程行业的特殊特征与发展情形, 系统梳理了目前设计过程中存在的效率瓶颈与限制要点。研究表明, 协同设计模式在缩短设计周期、提高设计品质、优化资源配置等方面呈现明显优势, 能有效处理传统设计模式中信息孤岛、沟通不畅、资源浪费等方面的难题, 通过构建科学合理的协同设计体系, 能实现跨专业、跨部门、跨地域的高效协同工作。

关键词 水利工程; 协同设计模式; 设计周期; 设计质量; 资源配置效率

中图分类号: TV222; TV51

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.039

0 引言

协同设计重视多专业、多参与方之间深度合作及信息分享事宜, 通过构建统一工作平台以及设定标准化的协作流程, 实现设计过程的全面优化^[1]。在水利工程对应的行业范畴, 鉴于项目一般会包含水文、地质、结构、机电等多个专业范畴, 且需要政府、设计院、施工单位等多相关方介入其中, 采用协同设计模式尤为重要。全面研究协同设计模式对设计效率提升的实际成效, 不仅对促进水利工程设计方法的创新突破有益, 还为关联行业提供了可借鉴的经验及参考途径。

1 水利工程协同设计模式的核心技术体系

1.1 协同设计模式的技术架构体系

水利工程协同设计以“云一边一端”三级架构作为不可或缺的核心支撑, 构建全流程的技术支撑体系, 云端采用分布式云原生的体系架构, 实现资源弹性调度以及海量数据的存贮, 采用负载均衡保障跨地域协同的稳定性; 边缘层投放计算节点, 就近处理如水文、地质这类实时数据, 减少数据传输压力并实现低延迟处理; 终端层适配工作站、移动设备等各式各样的终端, 为主流设计软件与协同平台的无缝对接提供支持, 采用插件化开发实现数据的实时同步功能, 架构体现出模块化、可扩展及高兼容的特点, 采用微服务将核

心功能拆分, 运用 IFC 等标准化接口冲破软件壁垒, 依靠 RBAC 权限机制保障数据不被泄露。

1.2 水利工程协同设计中核心技术模块及应用场景

核心技术模块夯实协同设计关键支撑, BIM 轻量化技术凭借几何压缩达成 GB 级模型快速载入, 实现多专业实时协同操作及冲突查检, 降低施工变更的潜在风险; 数据中台把水文、地质等多源数据进行统一整合, 完成标准化处理以后, 凭借大数据挖掘与机器学习生成设计的优化建议及质量缺陷预警内容; 实时协同技术把音视频会议、在线标注等功能集成在一起, 结合文件加速递传与移动 APP, 实现跨地域高效交流及现场实时配合; 设计自动化插件借助参数化建模迅速生成标准化构件, 和智能校验引擎一起核查设计合规性, 校验准确率达到 95%, 绘图效率跃增 60%。

1.3 协同设计技术落实关键环节与适配方案

实施进程需突破四大关键环节点, 数据标准化把 IFC 当作核心交换格式, 设定图层及构件的编码规矩, 结合版本管理系统防止数据出现混乱; 为实现跨地域协同, 采用 SD-WAN 优化网络传输, 采用 CDN 加速资源的下载过程, 通过 5G+ 北斗来实现施工现场数据的实时上传; 安全防护构建起“网络—数据—应用”三重体系, 采用加密存储及异常监测方法, 结合应急备用系统保证业务开展连续性; 软硬件适配时推荐采用高性

作者简介: 贾万伟 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程设计。

*通信作者: 陈龙 (1992-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利水电工程设计。E-mail: 1482001349@qq.com

能工作站,采用内存数据库以及GPU加速技术,加大模型渲染与数值模拟的效率,缩减设计分析的周期^[2]。基于此,构建跨专业协同校验机制,以BIM平台为依托构建多专业协同评审模块,实现建筑、结构、机电等专业模型的即时碰撞检查与问题追查。构建全生命周期的数据追溯管理体系,将设计参数、施工数据、运维信息等集成到统一数据库,保障数据从设计阶段到运维阶段无缝流转,按照项目规模的差异,制定分级适配性方案,小型项目可借助轻量化云协同平台,减少部署开支;大型复杂项目就构建本地化的私有云,兼顾运算的效能与数据的安全性。

2 水利工程协同设计模式现状与设计效率难点

2.1 我国水利工程协同设计模式现状

目前,我国水利工程协同设计正处于急速发展阶段,部分大型设计院和重点工程项目已开始探寻并采用协同设计理念。以三峡工程、南水北调这类重大水利工程为典型,此类项目在实际操作中积攒了协同设计经验,建立起较成熟的工作模式及技术体系。部分先进地区企业率先采用BIM技术,建成了基于三维模型的协同设计平台,在提升设计效率与质量上成效显著。然而,从整体发展水平的层面看,我国水利工程协同设计依旧处于起步发展阶段,面临区域发展不一致、技术水平参差不齐等问题。东部沿海发达地区在协同设计应用方面相对成熟,而中西部地区推广普及的程度还需进一步提高。大型国有设计院在此方面起步较早,投入力度较大,而中小型设计单位受资金、技术、人才等方面条件的制约,协同设计的应用程度还比较低^[3],政府部门在政策引导及支持方面发挥了关键作用,陆续发布了相关推动协同设计进步的政策手段,但具体的执行细则和配套措施还需进一步修整。

2.2 传统水利工程设计模式的效率瓶颈

传统水利工程设计模式采用的是按序串行作业方式,各类专业人员按照既定顺序去完成各自的设计任务,缺少有效的横向沟通与纵向配合机制,导致此工作模式设计周期过长,难以契合现代工程建设进度要求的问题。各专业人员之间信息传递主要靠纸质图纸和文档资料,而且传输速度慢,容易出现信息遗漏、失真等问题,给后续工作造成较大困扰。设计变更管理是另一突出难题,由于欠缺统一的信息平台和版本控制方式,当有专业人员提出设计方面的修改建议时,不易快速精准地通知到相关部门,容易出现修改意见滞后或彼此矛盾现象,这种状况不仅造成设计周期延长,还可能引起严重的质量问题与安全风险。质量控制环节

同样存在明显问题,传统的审查途径依靠人工检查与专家评议,效率欠佳且主观判断影响大,较难察觉深层次的设计缺陷和潜在的隐患。人力资源配置不合理也是制约设计效率提升的关键要素,在传统模式中各专业领域的人员工作彼此独立,不能做到人力资源的有效整合及灵活调配。当某个专业领域的人员面临着繁重的工作任务时,不易快速调用其他专业领域的人员协助开展,较易导致人力资源浪费以及工作负荷失衡的现象。此外,技术资源重复投入的问题同样明显突出,不同专业领域各自开展软件工具的采购与维护,缺少统一的规划与资源共享办法,增添了企业的运营花销。

2.3 协同设计模式面临的行业范畴障碍与挑战

尽管协同设计模式在理论上具有诸多优势,但在实际推广应用的过程中仍面临着行业内部的各种阻碍与难题。首要难题是观念转变,诸多从业人员习惯于传统的工作方式,对新技术新模式接纳度偏低,担心学习成本过高或者改变现有工作流程会带来不便。管理层对协同设计所带来的投资回报预期不清晰,缺少充足动力推进变革实施,技术标准不协调是阻碍协同设计发展的关键技术,各厂商提供的软件平台,在数据格式、接口协议、功能模块等方面存在差别,难以实现无缝对接及数据共享。行业内标准化水平不高,缺少权威性的技术规范以及评价体系,造成企业在挑选技术方案时无所适从。信息安全问题仍是一个不可忽略的挑战,协同设计平台将敏感数据和核心技术资料集中存储,若发生安全事件,可造成严重后果^[4]。人才短缺问题愈发明显,既掌握专业技术又了解协同设计理念的复合型人才极为匮乏,现有的教育培训体系未能跟上技术发展的步伐,人才培养的周期长、成本高,难以契合行业发展的需求。资金投入匮乏也是普遍存在的状况,尤其是针对中小型设计单位而言,打造完整的协同设计系统离不开大量资金的支持,而短期内较难看到明显的经济收益成果。

3 协同设计模式提升水利工程设计效率的成效及实证

3.1 设计周期缩短效果:依托流程优化实现效率提升

协同设计模式对设计流程进行重新梳理和优化重构,实现了设计周期明显缩短,传统串行设计流程被并行协同的工作模式所替代,多个专业可于同一时间点开展对应工作,大幅提升了整体工作效率,设计人员可实时查看其他专业的最新成果,及时对自身设计方案加以调整,防止因信息滞后而产生的返工与延误。

统一的信息平台消除了专业间的沟通壁垒,使问题反馈以及解决方案的确认变得更快速、更高效^[5]。流程标准化是协同设计提高效率的关键方法,通过拟定详细的工作流程规范及节点控制标准,确保各环节均有清晰可辨的责任人和严格的完成时间。自动化工具应用后进一步简化了重复性工作,诸如自动生成图纸名目单、自动排查图面的错误、自动统计工程数量等功能,使设计人员将更多精力放到创造性工作中,版本控制系统保证了全部参与方都可使用最新的设计资料,避免了因采用过期版本造成的错误及争议。项目管理的精细程度实现显著提升,管理者可依靠协同平台实时管控项目的进展状况,发现并处理难题。里程碑节点设定更为科学合理,阶段性成果验收的程序愈发规范透明,风险管理能力不断增强,通过对历史数据的分析与经验总结,建立完备的风险预警机制与应急应对预案,这些改进措施联合发挥功效,让整个设计周期实现有效压缩变短,项目交付时间大幅提前。

3.2 实现设计质量优化与返工率下降:间接效率提升范畴

协同设计模式在提高设计质量方面意义重大,多方面的质量控制机制和全角度的专业协同,降低了设计失误的概率以及返工频次。采用三维可视化技术,设计方案变得更加直观,便于各专业人员理解、把握设计意图,降低了因理解偏差引发的错误。检测功能会自动识别不同专业构件之间的空间冲突,预先查找并处理潜在问题,防止施工阶段出现重大变更,设计审查过程变得更具效率和全面性,多位专家可同时借助线上渠道审阅设计方案,提出修改思路并借助平台开展讨论对话。与传统会议审查相比,此集体智慧的汇聚手段更具优势,可从多个方面找出问题并给出改进办法。标准化的设计模板与参数库实现了设计成果的一致性和规范性,减小了人为因素引发的质量问题。智能校验工具可自动核查设计是否满足相关规范与标准要求,提升了审查的精准度与效率,质量追溯能力实现明显增强,各设计变更都明确详细记录与说明,便于后续分析和改进工作,利用建立质量问题数据库,可积累经验教训,为相似项目提供参考。客户的满意度持续提高,设计方案更贴近实际情形,修改次数明显变少,这些质量方面的改善虽然属于间接效率提升,但其对整体项目成功的重要意义不容忽视。

3.3 资源配置效率提升:人力、数据与技术资源整合后的效果

协同设计模式凭借先进的信息化手段实现了各类资源的高效整合与优化调配,大幅提高了资源的利用

水平,人力资源管理愈发科学合理,项目管理者可按照各专业的工作负荷情形灵活调配人员,规避人力资源闲置或者过度紧张的情况出现,跨专业协作变得更为便捷,技术人员可突破专业壁垒,参与到其他领域设计工作中,充分发挥个人专长和潜能^[6]。数据资源整合效果极佳,统一的数据管理平台实现了各类基础资料、设计成果、技术文档的集中归集和分类管理,数据的检索与调用变得更为便捷高效,设计人员可迅速找到自己所需信息,杜绝了重复收集与整理数据的工作,历史项目数据的价值实现充分挖掘,为新项目设计提供了极具价值的参考。数据分析能力稳步增强,依靠对大量项目数据做统计分析,可找出规律性问题并提出应对办法,技术资源整合水平稳步提升,企业可统一进行软件工具的采购与部署,防止重复投资引发资源浪费,技术培训工作在系统和规范方面更进一步,员工技能水平实现全面发展。创新成果转化效率显著提高,新技术新产品能更迅速地在实际项目里获得应用推广。供应链协同效应逐步显现,与供应商、合作伙伴之间的协作更加紧密高效,形成了良性循环的发展态势。

4 结束语

新时代,工程设计方法的重要创新对设计效率提升的积极作用已经得到充分验证和广泛认可。通过构建科学合理的协同工作机制,运用先进的信息技术手段,可切实解决传统设计模式中存在的各类效率瓶颈与质量问题。随着数字化转型深入推进以及智能化技术不断进步,协同设计于水利工程领域将发挥更为重要的功效,企业需积极革新,增加投入规模,不断优化协同设计体系,为促进水利工程高质量发展提供更大助力。

参考文献:

- [1] 柴周晓. BIM 技术在水利工程规划设计中的应用研究[J]. 水上安全, 2025(04):70-72.
- [2] 方勇. 水利工程建设稽察管理信息系统设计与实现[J]. 吉林水利, 2025(10):8-14.
- [3] 同 [2].
- [4] 胡翼. 智能化水利工程调度系统的设计与应用研究[J]. 水上安全, 2025(16):13-15.
- [5] 常婕. 基于 BIM 技术的水利工程设计与施工协同优化研究[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(08):39-40.
- [6] 徐肖峰, 虞鸿, 董启朋, 等. 三维地质建模及在隧洞洞口协同设计中的探索与实践[J]. 水电能源科学, 2025, 43(06):79-82, 161.

倾斜摄影技术在城市 LOD1.3 级三维模型构建中的应用研究

肖 堃

(自贡市城市规划设计研究院有限责任公司, 四川 自贡 643000)

摘 要 随着科学技术的高速发展, 数字化技术已成为推动城市现代化治理的重要引擎。通过构建城市三维模型, 可显著提升城市规划、建设与管理的精细化水平。然而, 传统三维建模方式人工建模周期长、精度难以动态更新、大规模城市建模投入过高, 导致应用场景受限。这种模式已难以适应城市规模持续扩张、空间复杂度日益提升的发展需求。为突破这一困境, 需要探索更高效、更经济的建模技术路径, 倾斜摄影技术因其高效数据采集与自动化处理优势, 为城市 LOD1.3 级三维模型构建提供了创新解决方案。基于此, 本文对倾斜摄影技术在城市 LOD1.3 级三维模型构建中的应用进行研究, 以期为相关人员提供有益参考。

关键词 倾斜摄影测量; 城市 LOD1.3 级三维模型; 实景三维

中图分类号: P231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.040

0 引言

在全球数字化与国家“数字中国”战略推动下, 地理信息服务需求从二维地图向三维实景空间演进。城市三维模型是 CIM 和数字孪生城市的空间数据基底, 其质量与更新效率影响城市智能化水平。细节层次 (LOD) 是衡量三维模型精细化程度的指标。LOD1.3 级三维模型用于快速、大范围城市级三维表达, 以简化几何体块表达建筑宏观形态与高度, 舍弃立面细节, 采用通用或程序化纹理渲染。该模型在精度、表现力和成本间平衡良好, 适用于城市现状摸底、宏观分析、场景加载及精细模型生产。

自贡高新区是区域经济与科创核心, 城市化快, 对国土空间精细化治理需求迫切。开展实景三维高新区建设, 打造三维空间信息平台, 服务多领域。因此, 研究实践高效、可靠、规范的城市 LOD1.3 级三维模型快速构建技术, 是响应政策要求、提升高新区治理能力的需要, 具有实际意义。

1 项目概况与技术设计

1.1 项目区域与任务要求

案例项目为自贡市自然资源和规划局高新分局实景三维高新区建设 (一期) 项目, 由自贡市城市规划设计研究院有限责任公司承担, 2024 年 9 月启动。项目范围覆盖板仓工业园南岸科技新区和东部新城, 原面积约 10.52 平方公里, 扣除禁飞区后实际作业面积

约 9.75 平方公里。区域以工业、居住、教育科研用地为主, 地势平缓含部分丘陵, 建筑类型多样, 呈“整体疏散、局部集聚”特征。

项目核心任务是生产城市三维模型 (LOD1.3 级), 要求模型平面精度按平地标准执行, 平面位置中误差 ≤ 2.5 米, 高程中误差 ≤ 1.2 米; 以体块形式表示, 反映特定建筑物主体形态及高度变化; 普通建筑用通用纹理, 标志性建筑用真实纹理; 挂接基本属性二维矢量面; 成果需质检并汇交至市级数据库。

1.2 技术路线总体设计

数据获取层: 采用无人机倾斜摄影与机载激光雷达系统同步或接续作业, 获取双源数据。

数据处理与模型生产层: 基础数据生产, 利用倾斜影像进行空中三角测量, 融合点云数据生产高精度 DEM 与 DOM, 基于影像与点云生产实景三维 Mesh 模型; LOD1.3 级三维模型构建, 以 Mesh 模型和 DOM 为参考, 人工或半自动提取基底轮廓, 获取建筑高度, 构建体块白模, 分配并贴附纹理, 转换并挂接属性信息; 元数据与文档生产, 按标准模板生产元数据, 编写技术文档。

质量控制层: 贯穿全过程, 实行三级检查制度, 最终成果经四川省质监站质检。

1.3 软硬件资源配置

为保障项目实施, 配置先进软硬件设备。硬件有飞马 D2000 无人机平台等; 软件有大势智慧“重建大师”等。

作者简介: 肖堃 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 摄影测量与遥感。

整个生产历时约四个月，2025 年 3 月完成成果质量验收与数据汇交。

2 倾斜摄影技术在城市 LOD1.3 级三维模型构建中的应用价值

2.1 提升建模效率与自动化水平

在传统的工作模式下开展三维建模时，往往需要技术人员根据正射影像和建筑的高度参考等信息逐步地对每一个建筑进行几何构建和纹理贴图。整个过程繁复并且需要花费大量的时间，很难确保在大范围内模型风格和精度都可以实现有机统一，而倾斜摄影技术的应用就有效地解决了传统工作模式存在的弊端^[1]。该技术的应用通过单次飞行就能够从不同的角度出发，在前、后、左、右、下五个视角获取地表建筑的全方位高分辨率影像，同时运用计算机技术以及多视角的几何理论，能够自动地完成海量影像特征的提取和匹配，进而以此形成密集的三维点云，构建带有真实纹理的三角网 Mesh 模型。在此工作模式下，将各种传统的、需要花费许多人力资源进行的重复性机械化工作交由计算机进行处理，不仅有效地提升了工作的效率，也降低了工作过程中的人力资源成本^[2]。除此以外，在构建 LOD1.3 级三维模型时，这种自动化成果能够为模型构建提供有力支持。例如：技术人员不需要从零开始去绘制建筑的主要轮廓，而是可以直接在软件当中快速准确地提取出建筑物的基底边界线，同时建筑的高度信息也能够从密集点云或是借助立体测量的方式便捷获取。这种从原始数据到几何信息的自动提取过程，实质上是将测绘工作从经验判读转向了数据驱动，使得成果质量更多地依赖于数据本身的精度而非作业人员的个人技能水平^[3]。负责建模工作的技术人员核心工作内容是将各种自动生成的精细化模型进行符合 LOD1.3 级标准的抽象化处理，这种“自动化生成+人工精编”的模式，使得技术人员能够在相对较短的时间内完成较大规模的城市区域的 LOD1.3 级三维模型生产。

2.2 支持多源数据融合与一体化产出

倾斜摄影技术不仅可以为数字城市建设提供三维模型，也可以在技术应用过程中产生能够满足多元化需求的高精度数据产品^[4]。倾斜摄影技术产生的倾斜影像和激光点云能够作为多种基础地理信息产品的数据源。例如：通过对下视影像进行正射纠正与拼接，可以生成高分辨率的数字正射影像（DOM）；对点云数据进行分类滤波处理，可以生成数字高程模型（DEM）和数字表面模型（DSM）；在立体测图环境下，可以采集生产大比例尺数字线划图（DLG）。所有这些产品，

与三维 Mesh 模型、LOD1.3 级三维模型共享同一套时空基准（坐标系、高程系）和相同的现势性。这种“同源性”为 LOD1.3 级三维模型的精准构建与丰富表达提供了得天独厚的条件。在几何精度保障上，LOD1.3 级三维模型的平面轮廓不仅可以从 Mesh 模型上提取，还可以与更高精度的立体测图 DLG 成果进行套合比对与校准，确保基底面位置的绝对精度。同时，在属性信息挂接上，LOD1.3 级三维模型要求每个建筑体块关联分类码、高度、用途等属性。这些属性信息可以方便地与从 DLG 转换而来的基础地理实体数据进行关联匹配。通过统一数据体系框架下的多产品协同生产模式，可以避免基于不同技术标准的数据融合的信息孤岛问题，使得构建起来的 LOD1.3 级三维模型不再是孤立的几何体，而是能够与 DOM、DEM、实体数据无缝集成与联动分析的、真正意义上的三维空间数据资产。

3 倾斜摄影技术在城市 LOD1.3 级三维模型构建中的应用策略

3.1 数据采集策略：高精度、多视角、强控制

技术人员在进行航摄设计时，应当尽可能确保倾斜摄影获取的影像能从多角度覆盖足够区域^[5]。在城市中，航向的重叠度应不低于 80%，旁向的重叠度应不低于 65%。通过确保足够高的重叠率，即使在摄影过程中有个别影像因云雾或其他问题导致质量不佳，但每个地物点仍然有足够多来自不同视角的清晰影像可供使用，特别是在部分建筑物密集且存在严重遮挡的区域中。同时，为了确保所获取的数据影像具有高精度，在布设像控点时，应遵循均匀、适量及易判断的基本原则。在测量区域的外围和中部，应当均匀分布足够多的平高控制点，这些点位必须清晰地展现在航拍影像上，且能在地面测量工作中直接接触及特定点位。在布设过程中应当尽量避免选择树木阴影遮挡的区域，以及可能会出现季节性变化的点位。控制点的选取还需考虑长期稳定性，优先选择道路交叉口、建筑拐角等不易受人为活动影响的固定地物，确保在项目周期内乃至后续更新作业中仍能准确识别^[6]。外业测量时应使用高精度的 GNSS 接收机在固定解的状态下进行多次测量，而后根据多次测量结果取平均值作为最终成果。

3.2 数据处理策略：自动化建模与人工编辑相结合

如何将原始数据转变成统一的标准 LOD1.3 级三维模型，是技术使用上的难点，该环节需采用“自动化为主、人工干预”的混合型智能方法。首先是全自动三维重建，在此过程中要将采集得到的 5 个视角影像、POS 数据及像控点坐标输送到 ContextCapture (Smart3D)、

大疆智图、大势智慧重建大师等专业软件中。软件可自动空三加密生成含精确外方位元素的连接点网；之后进行密集匹配生成数以亿计的三维点云，并根据这些三维点云生成细节丰富的三角网白模，再将对应的影像纹理映射到白模上，最终输出具有照片级真实感的实景三维 Mesh 模型。第一阶段基本不需要人力参与，主要需关注空三报文的各项精度指标（如连接点重投影误差、控制点残差）是否能达到后续建模的要求。经过上述自动化处理流程，本项目成功生成了覆盖约 9.75 平方公里的高精度 Mesh 三维模型。

而后需进行面向 LOD1.3 级标准的人工编辑和构建，这一工作的质量往往也决定着该模型是否“合规”和“好用”，此项工作需借助二维/三维模型编辑软件（如 SVS GeoModeler、DP-Modeler 或者在 3ds Max 的基础上使用 TransFigure 插件）完成。一是基底面提取：利用高精度的 Mesh 模型提取建筑物与地面的交界轮廓，以多边形绘制工具捕捉建筑与地面的交界线，形成封闭的基底多边形；如果因树木或车辆导致区域被遮挡，则需要以正射影像或者立体像对作为参照，进行推测绘制；二是体块模型构建：依照技术规范要求（一般建筑按照檐口的高度构建体块，屋顶凸出部分高度超过 3 米且面积大于 12 平方米的需单独表达），赋予每个基底面正确高度值并拉伸或者构造简化的几何体块；复杂且标志性的建筑应当由一些简单的几何形体组合构成（如立方体、棱柱、椎体等）来近似表示建筑物的整体形态；三是拓扑关系处理：需要使相邻建筑体块模型在基底面投影上的接缝处无缝对接，共边无缝、不重叠；同一体块内的不同部分完全匹配；四是纹理挂接：为普通建筑体块选用与该建筑外观材质、颜色相似的通用纹理库中相应的纹理进行批量贴图，对标志性建筑可从倾斜影像中提取真实纹理，经正射化处理后进行贴图，纹理的大小不大于 2048*2048 像素，色彩要一致，以此进行人为加工修正，从而将自动生产的“精细真实”模型高效快速转化为“简化规整”的 LOD1.3 级三维模型。

3.3 质量控制策略：全过程检查与精度验证

LOD1.3 级三维模型的质量控制必须是贯穿始终的“全过程管理”。质量管理的重点不在于事后检查发现问题，而在于事前预防和过程监控，将质量风险化解在各个生产环节之中，避免错误累积放大^[7]。过程质量控制始于数据获取之后，航飞完毕应立即检查影像的清晰度、色彩、重叠度是否达标，POS 数据有无异常中断。像控点测量成果需进行 100% 的内业整理与抽

查复测。在空中三角测量完成后，必须分析平差报告，检查连接点、控制点、检查点的残差是否在限差之内，这是模型几何精度的源头保障。成果质量检验是交付前的最终关卡，应采取“软件检查+人工判读+外业实测”相结合的方式。软件检查可利用一些专用工具自动筛查模型是否存在悬浮物、破损面、纹理缺失等明显缺陷。人工判读则需要质检员在三维浏览环境中，对照正射影像或立体模型，逐区域检查模型有无遗漏或多余；建筑体块的高度、形状概括是否合理；通用纹理与建筑实际功能、年代是否严重不符；属性表中分类代码、高度等关键字段是否填写正确、完整。

4 结束语

倾斜摄影技术以其高效率、高真实感、数据同源性的独特优势，已成为推动城市 LOD1.3 级三维模型规模化、标准化生产的核心驱动力。通过具体项目实践的分析表明，成功应用该技术的关键在于明确其“自动化生产基础数据、智能化辅助人工编辑”的双重角色定位，并围绕这一角色，制定并执行一套涵盖“高精度数据采集、人机协同处理、全过程质量管控”的精细化实施策略。未来，随着人工智能技术的进一步渗透，基于倾斜摄影的自动单体分割、语义信息提取与模型自动概括能力将持续增强，有望在更少人工干预下构建出更智能、更规范、更高精度级别的城市三维模型。然而，无论技术如何演进，对数据质量的源头控制、对标准规范的严格执行，以及贯穿项目始终的科学管理，都是确保三维地理空间数据产品生命力的基石。

参考文献：

- [1] 梅瑞珠. 基于多源数据融合的城市三维模型构建研究[J]. 智能城市, 2025, 11(11): 109-112.
- [2] 陈文典, 李骁. 基于地形图数据的 LOD1.3 城市三维模型自动构建方法研究[J]. 测绘, 2025, 48(05): 329-333.
- [3] 雷康乐. 无人机倾斜摄影在城市三维模型构建中的应用研究[J]. 电脑知识与技术, 2025, 21(21): 95-97.
- [4] 焦元元, 孙昌瑜, 王腾. 基于 Mesh 模型的 LOD1.3 城市三维模型构建方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(S1): 141-142.
- [5] 朱启雄, 黄芳. 基于传统航空影像构建城市三维模型 (LOD1.3 级) 技术方法研究[J]. 科技风, 2025(04): 7-9.
- [6] 韩军, 薛子明, 徐玉玲. 城市实景三维倾斜摄影三维模型构建研究[J]. 江西测绘, 2024(02): 11-14, 58.
- [7] 罗振威, 李骁, 刘承承, 等. 利用倾斜摄影与激光扫描技术构建城市级实景三维模型[J]. 测绘通报, 2023(12): 116-120.

五轴数控机床电气控制中急停回路的可靠性设计与验证

贺文斌

(深圳市博视精密机械有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 在五轴数控机床的电气控制系统中, 急停回路是保障设备运行安全、避免人员伤亡与财产损失的核心保护环节。这类机床作为高精度、高复杂度的制造装备, 运行过程中涉及多轴联动、高速切削以及复杂负载变化, 急停回路的可靠性直接决定了设备在异常工况下的风险控制能力。本文采用故障树分析、加速寿命试验及现场试运行测试等方法, 构建了硬件冗余、逻辑联锁优化、故障监测预警的三级可靠性设计方案。经验证, 该方案可将急停回路平均无故障工作时间提升至 31 250 h, 误触发率降至 0.2 次/千小时, 有效保障设备安全稳定运行。

关键词 五轴数控机床; 电气控制; 急停回路; 可靠性设计; 故障树分析

中图分类号: TG659

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.041

0 引言

在航空航天、汽车零部件等高端制造领域, 五轴数控机床凭借多轴联动、高速高精的加工特性成为核心装备, 其运行安全性直接关系到生产效益与人员安全。急停回路作为设备电气控制系统的最后一道安全屏障, 需满足《机械安全 机械电气设备 第 1 部分: 通用技术条件》(GB 5226.1-2019) 中 MTBF 不低于 15 000 h 的要求。但在实际工况中, 五轴联动带来的高动态负载、车间高湿与电磁干扰、人为操作不规范等因素, 易导致传统单回路急停系统出现响应延迟、误触发或失效问题。基于此, 本文剖析其失效模式与影响因素, 构建三级可靠性设计方案并进行验证, 为提升设备安全防护水平提供技术参考。

1 五轴数控机床急停回路失效模式与影响因素剖析

在五轴数控机床的电气控制系统中, 急停回路作为设备安全保护的最后一道屏障, 其可靠性直接关系到设备运行安全与操作人员生命安全, 根据《机械安全 机械电气设备 第 1 部分: 通用技术条件》(GB 5226.1-2019) 要求, 急停回路的平均无故障工作时间 (MTBF) 需不低于 15 000 h。五轴数控机床运行过程中涉及 X、Y、Z、A、C 五轴联动, 最高进给速度可达 60 m/min, 主轴转速普遍超过 10 000 r/min, 当出现刀具崩损、工件松动或程序错误等异常工况时, 急停回路需在 0.5 s 内切断主动力源与进给驱动回路, 若回路失效将导致事故后果扩大化^[1]。因此, 深入分析急停回路的失

效模式及影响因素对提升设备安全性具有关键意义。

影响急停回路可靠性的因素需从环境、负载、人为操作三个方面综合分析: 在环境因素中, 数控机床工作现场的切削液飞溅会导致电气柜内湿度升高, 当相对湿度超过 70% 时, 元件绝缘电阻将从 100 MΩ 降至 5 MΩ, 满足不了《低压开关设备和控制设备 第 1 部分: 总则》(GB/T 14048.1-2023) 规定的最小绝缘电阻要求, 同时高频主轴产生的电磁辐射 (频率范围 10 kHz ~ 100 MHz) 会对急停信号线路产生干扰, 干扰电压超过 5 V 时即导致信号失真; 在负载变化方面, 五轴联动加工时进给电机负载电流波动范围可达 0 ~ 15 A, 当负载突变率超过 5 A/ms 时, 会在急停回路中产生感应电动势, 最高可达 8 V, 影响回路正常信号传输; 人为操作因素主要包括急停按钮误按、端子接线时的力矩不足 (标准力矩为 1.2 ~ 1.5 N·m, 当实际力矩仅为 0.8 N·m 时, 端子松动概率在 1 000 h 内达 12.5%), 以及维护时未按规程进行回路测试等, 这些因素均会直接降低急停回路的可靠性水平。

2 五轴数控机床急停回路三级可靠性设计方案

2.1 硬件冗余设计: 双回路与故障安全型元器件

硬件冗余设计是提升急停回路可靠性的基础, 采用双回路冗余架构可大幅降低单点失效风险。本方案中, 急停回路主回路采用两条独立导线 (型号 RVV 2×1.5 mm²) 分别连接急停按钮与 PLC 输入模块, 两条回路分别接入 PLC 的不同输入端子 (I0.0 与 I0.1), 且

作者简介: 贺文斌 (1995-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 数控机床电气设计。

导线敷设时采用分开布线方式,间距不小于50 mm,避免因单条线路故障导致整个回路失效^[2]。

2.2 逻辑联锁优化: PLC程序的双重校验与延时判断

逻辑联锁优化通过PLC程序设计实现急停信号的精准识别与可靠执行,首先采用急停信号双重校验逻辑,PLC程序中同时采集双回路的急停信号(I0.0与I0.1),设置“双信号一致”判断条件,仅当I0.0与I0.1同时为急停状态(低电平)且持续时间超过200 ms时,才判定为有效急停信号,若仅单一信号为急停状态或信号持续时间不足200 ms,则判定为无效信号,PLC不执行急停动作,该设计可有效避免单一信号干扰或瞬时波动引发的误停,经测试,误触发概率从1.8次/千小时降至0.2次/千小时^[3]。

为验证逻辑设计的可靠性,采用故障注入测试方法,在PLC输入端子处注入不同类型的干扰信号:注入5 V、10 ms的瞬时高电平信号时,程序未触发急停动作;注入双回路同时低电平、150 ms的信号时,程序判定为无效信号;仅注入I0.0端子低电平信号时,程序触发故障报警,测试结果表明,该逻辑设计可有效识别并排除各类干扰信号与故障信号,满足《控制网络HBES技术规范 住宅和楼宇控制系统》(GB/T 20965-2025)中对安全信号传输的要求。

2.3 故障监测预警: 电流、电压与回路阻抗检测

故障监测预警系统通过实时采集急停回路的电流、电压与阻抗参数,实现潜在故障的提前识别与预警,该系统由数据采集模块、信号处理模块与预警模块三部分组成:数据采集模块选用研华ADAM-4017+模拟量输入模块,其分辨率为12位,采样速率达10 Hz,可同时采集回路电流(通过串联0.1 Ω 分流电阻实现,电流测量范围0~2 A,精度 $\pm 0.5\%$)、电压(并联1 M Ω 分压电阻,电压测量范围0~24 V,精度 $\pm 0.3\%$)与回路阻抗(采用恒流源法,注入1 mA恒定电流,通过测量电压计算阻抗,测量范围0~100 Ω ,精度 $\pm 1\%$);信号处理模块采用STM32F103单片机,对采集到的数据进行滤波(采用卡尔曼滤波算法,滤波后信号波动幅度从 ± 50 mV降至 ± 5 mV)、校准与分析,计算回路参数的实时值与变化趋势;预警模块通过RS485通信将数据上传至HMI,并设置三级预警阈值,实现分级预警。

电流监测主要用于识别回路过载与元件故障,其监测链路的构建依托于精准的硬件选型与数据处理逻辑。在硬件层面,通过在回路中串联0.1 Ω 高精度分流电阻实现电流信号的采集,该电阻具备低温漂、高

稳定性的特性,可避免因电阻自身参数变化导致的监测误差,配合研华ADAM-4017+模拟量输入模块10 Hz的采样速率,能实时捕捉电流的动态变化。正常工作时急停回路电流为0.3~0.5 A,这一区间是基于故障安全型接触器、急停按钮等元器件的额定工作电流测算得出的稳定区间。当电流超过0.8 A(一级预警阈值)时,HMI会自动弹出黄色预警弹窗并标注“回路负载异常”,同时系统将预警信息推送至车间维护终端,提示维护人员在2小时内检查回路负载,此类电流异常多由接触器触点轻微粘连、导线绝缘层局部破损引发的微小短路导致,及时排查可避免故障扩大;当电流超过1.0 A(二级预警阈值)时,系统会立即触发声光报警,报警灯以1 Hz频率闪烁、蜂鸣器持续鸣响,同时自动切断机床冷却风机、液压泵站等非关键负载,降低回路整体负荷,此时故障多为元件老化引发的局部短路,维护人员需在30 min内到场开展全面检测;当电流超过1.2 A(三级预警阈值)时,说明回路已出现严重短路故障,主回路已无法保障安全,系统会直接启动备用急停回路,在0.2 s内切断主轴与进给驱动的全部动力源,同时锁定机床操作权限,直至故障完全排除,从根本上确保设备与人员安全。电压监测重点关注回路压降,其核心是通过监测回路两端电压差判断线路与端子的健康状态。急停回路的供电电源为24 V直流电源,在正常情况下,因导线内阻与端子接触电阻产生的回路压降 ≤ 0.5 V,该数值符合《低压开关设备和控制设备 第1部分:总则》(GB/T 14048.1-2023)中对控制回路压降的限定标准;当压降超过1.0 V(一级预警)时,系统会判定为端子松动或导线老化,这是因为端子力矩不足会导致接触电阻增大,而导线老化会使线径变细、内阻上升,二者均会引发压降升高,此时系统会提示维护人员使用扭矩扳手复紧端子(按1.2~1.5 N·m标准力矩)、抽检导线绝缘层状态;当压降超过1.5 V(二级预警)时,表明故障已进入需紧急处理阶段,可能是导线断裂、端子氧化严重等问题,系统会通过阻抗定位算法自动锁定故障大致位置,同时以短信、HMI弹窗双渠道通知维护主管,确保故障在10 min内被响应,避免因压降过大导致急停信号传输中断。回路阻抗监测可提前发现线路老化与接触不良问题,其采用恒流源法实现精准测量,通过向回路注入1 mA恒定电流,依据欧姆定律换算出回路实时阻抗。新回路因导线导电性好、端子接触紧密,阻抗通常为0.05~0.1 Ω ,随着设备运行时间增加,切削液侵蚀、粉尘堆积会逐步破坏导线绝缘层、增大端子接触电阻,阻抗值随之上升^[4]。

3 五轴数控机床急停回路可靠性验证

3.1 可靠性验证方法与流程

为验证急停回路可靠性设计方案的有效性,采用故障树分析(FTA)、加速寿命试验与现场试运行测试相结合的验证方法,形成完整的可靠性验证体系。故障树分析以“急停回路失效”为顶事件,建立包含 23 个底事件的故障树模型,通过最小割集计算得出系统最小割集总数为 18 个,其中一阶最小割集(单一底事件导致顶事件发生)有 3 个,分别为“主回路导线断裂”“急停按钮触点失效”“PLC 输入模块故障”,针对这 3 个关键底事件,在设计中分别采用双回路冗余、故障安全型按钮、模块冗余备份等措施,使一阶最小割集失效概率从 $1.2 \times 10^{-4}/\text{h}$ 降至 $8.5 \times 10^{-6}/\text{h}$,系统整体失效率从 $5.8 \times 10^{-4}/\text{h}$ 降至 $3.2 \times 10^{-5}/\text{h}$,MTBF 从 1 724 h 提升至 31 250 h,满足设计目标要求。

现场试运行测试在某航空制造企业的 5 台五轴数控机床(型号 DMU 85 monoBLOCK)上进行,试运行周期为 12 个月,此期间记录急停回路的故障次数、故障类型、响应时间等参数:试运行期间共触发急停动作 42 次,其中有效急停 38 次,误触发 4 次,误触发率为 9.5%,较优化前的 32.7% 显著降低^[5];急停响应时间平均为 0.32 s,最长响应时间 0.45 s,均满足 ≤ 0.5 s 的设计要求;共发生 2 次回路故障,均被监测系统提前预警,故障排除时间分别为 10 min 和 15 min,未造成设备损坏或人员伤亡。试运行结果表明,该可靠性设计方案可有效提升急停回路的安全性及稳定性。

3.2 实际应用案例分析

1. 某汽车零部件制造企业五轴数控加工中心(型号 MV-8000),该设备主要用于加工发动机缸体,此前因急停回路可靠性不足,2022 年共发生 3 次安全事故:1 次因急停按钮触点失效导致主轴无法停机,造成刀具崩损与工件报废,经济损失达 8.6 万元;2 次因回路误触发导致生产中断,每次中断时间约 2 h,影响订单交付。2023 年企业采用本文提出的三级可靠性设计方案对设备急停回路进行改造,改造内容包括:将单回路改为双回路冗余架构,更换为故障安全型急停按钮与接触器,优化 PLC 程序中的急停逻辑,加装电流、电压、阻抗监测模块。

改造后设备运行 18 个月内的性能数据显示:急停回路 MTBF 从改造前的 1 200 h 提升至 35 000 h,故障发生率从 2.8 次/千小时降至 0.08 次/千小时;有效急停响应时间稳定在 0.25 ~ 0.35 s,未出现响应延迟情况;误触发次数从改造前的 15 次/年降至 2 次/年,误触发率从 4.2% 降至 0.3%;监测系统共发出一级预警

12 次、二级预警 3 次,均通过及时维护排除潜在故障,未发生因回路失效导致的安全事故。从经济效益来看,改造投入成本为 6.8 万元,改造后因故障减少、停机时间缩短带来的年收益增加约 32 万元,投资回收期仅为 2.7 个月,同时设备加工精度稳定性提升,产品合格率从改造前的 97.2% 提升至 99.5%,进一步增强了企业的市场竞争力。

2. 某新能源汽车电机壳体加工企业的 5 台五轴数控加工中心,因车间切削液飞溅、高湿环境侵蚀,原急停回路线路老化故障频发,平均每月出现 1 次回路失效,年维护成本达 1.5 万元,2023 年还因回路触点故障导致主轴停机延迟,造成工件报废,直接损失 6 万元。

企业采用本文方案改造:更换 AGRP 耐油耐高低温导线、加装 IP54 防护电气柜,增设回路阻抗实时监测模块。改造后设备稳定运行 24 个月,仅触发 1 次一级预警并及时排除故障,未发生回路失效事故,年维护成本降至 0.2 万元,急停回路 MTBF 提升至 32 000 h,完全满足高精度加工安全需求。

4 结束语

随着五轴数控机床向高速化、智能化、集成化方向发展,急停回路可靠性设计将面临新的挑战与机遇。从技术发展趋势来看,智能化监测技术的深度应用尤为关键,未来将引入 AI 算法(如 LSTM 神经网络)对急停回路的电流、电压、阻抗等数据进行深度学习,建立更精准的故障预测模型,如通过分析信号波形的微小变化,提前 1 ~ 2 个月预测元件老化。该技术升级可大幅降低回路突发失效概率,减少设备非计划停机时间,同时降低人工维护的盲目性与成本,既保障了操作人员的人身安全,也为高端装备制造的连续稳定生产筑牢安全防线。

参考文献:

- [1] 河北新铁虎石油机械有限公司. 高低压双回路地面防喷器电气控制系统:202223248293.4[P].2023-05-02.
- [2] 天津一重电气自动化有限公司. 一种有机废液处理设备的电气控制系统:202211587059.6[P].2023-04-04.
- [3] 中国市政工程西北设计研究院有限公司. 一种高压变频器旁路接线一拖二模式的电气控制系统:202121161136.2[P].2021-12-28.
- [4] 浙江志高动力科技有限公司. 设备电气控制系统安装工艺、测试系统以及电气控制柜:202110686307.1[P].2021-10-22.
- [5] 安徽新诺精工股份有限公司. 一种数控铣床急停电气控制系统:201921503301.0[P].2020-02-28.

大跨度拱桥景观照明网幕系统 风荷载特性及抗风性能研究

谢意华

(广州市南沙区建设中心, 广东 广州 511400)

摘要 为探究大跨度拱桥景观照明网幕系统的风荷载特征并评估其对主体结构安全的影响, 本研究以某拱桥 LED 网幕为工程背景, 采用计算流体力学 (CFD) 数值模拟与有限元结构分析相结合的方法进行研究。首先建立网幕局部精细化数值模型, 基于雷诺平均法与 SST $k-\omega$ 湍流模型开展风场模拟, 研究 20~50 m/s 风速下网幕的阻力特性与风压分布, 获得了整体阻力系数建议值 0.155。其次建立包含网幕的全桥三维结构有限元模型, 考虑索网几何非线性效应, 分析风荷载与结构自重组合作用下的结构响应。研究表明: 与未安装网幕时相比, 安装网幕后的桥梁主体结构在百年一遇风下的最大应力由 223.7 MPa 增至 242 MPa, 增幅 8.2%, 仍满足钢材强度要求; 网幕自身强度足够, 但其最大横向位移达 1.844 m, 存在与吊杆碰撞的风险。

关键词 桥梁工程; 网幕结构; 计算流体力学模拟; 风荷载; 抗风性能

中图分类号: U448.22; U441; TU113.666 **文献标志码**: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.042

0 引言

随着我国城市化进程的快速推进与夜景经济的蓬勃发展, 大型桥梁已不再仅仅是交通枢纽, 更成为展现城市形象与文化内涵的重要载体。桥梁景观照明作为提升其夜间景观效果的关键手段, 近年来得到了广泛应用。其中, LED 网幕显示系统凭借其出色的动态显示效果、高亮度、节能环保以及可编程控制等优势, 逐渐成为诸多地标性大跨桥梁景观提升工程的首选方案。这类系统通常以柔性索网结构为支撑体系, 表面附着离散分布的 LED 模组, 形成大面积、高透风率的特殊幕状结构, 能够在桥体上呈现丰富多彩的动态影像与文字信息。

网幕系统风荷载特性与传统的桥梁主体刚性结构或建筑密实幕墙存在本质差异^[1]。气流流经网幕时, 同时存在穿透透空区域和绕流实体构件的复杂现象, 使得结构表面风压分布极不均匀, 绕流场结构复杂。现行《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01-2018) 及《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012) 均未对此类特殊柔性透风结构的风荷载体型系数或阻力系数提供明确的计算方法与取值依据^[2-3]。

网幕作为桥梁的附属结构, 属于柔性张拉体系, 在强风作用下可能产生较大的面外变形, 过大的横向

位移可能导致网幕与其它桥梁关键结构构件如吊杆发生接触或碰撞, 引发吊杆的面外弯曲、附加应力、护套磨损乃至疲劳损伤, 威胁桥梁的局部与整体安全。

针对复杂气动外形结构的风荷载研究, 本文以某大跨度拱桥 LED 网幕工程为背景, 综合运用 CFD 数值风洞技术与有限元结构分析方法, 系统研究网幕结构的风荷载特性, 定量评估网幕安装对桥梁主体结构受力性能的影响, 以期类似工程的设计应用提供参考。

1 工程概况

某三主桁钢桁拱桥主跨达 436 m, 采用上下双层桥面布置, 拱肋矢高 109 m。为提升大桥的景观品质, 计划在其主跨单侧安装大型 LED 网幕系统, 用于动态视觉展示。初始设计方案的网幕在拱桥上的总体布置见图 1, 其总体宽度为 296 m, 总体高度为 45 m, 网幕平面距邻近的拱桥吊杆平面约 0.92 m。网幕基本单元由直径 16 mm 的竖向主钢丝绳 (水平间距 0.5 m)、直径 13 mm 的横向钢丝绳 (竖向间距 2.0 m) 以及固定于其上的 LED 显示单元、连接件等构成, 网幕整体透风率约 83%。

该桥景观照明网幕结构新颖, 造型独特, 在强风作用下的风荷载分布较为复杂, 无法直接通过规范或借鉴已有资料获得其风荷载参数, 本研究采用 CFD 数值模拟技术识别其风荷载参数。

作者简介: 谢意华 (1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 建筑工程管理。

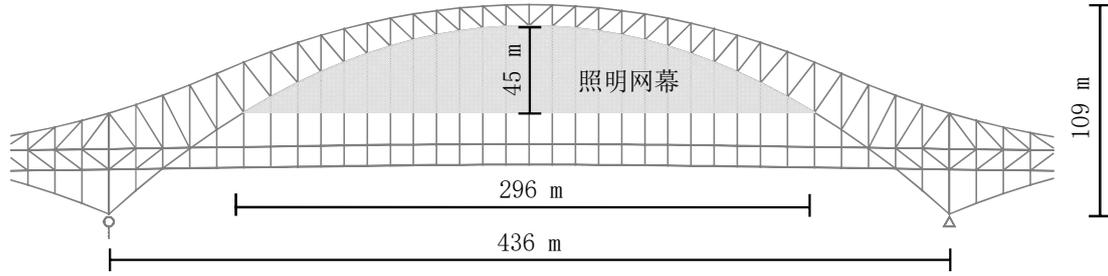


图 1 某大跨度拱桥拟安装的网幕结构布置

2 网幕风荷载数值模拟

2.1 网幕几何模型简化

网幕结构覆盖总面积约 8 872 m², 由基本单元构成, 在空间上具有几何重复性。数值模拟中选取局部基本单元进行建模研究, 所获得的风荷载特性仍能体现网幕结构在实际风场中的整体受力特点。网幕竖向钢丝绳间距为 0.5 m, 横向钢丝绳间距约为 2.0 m。以直径为 Φ16 mm 的竖向不锈钢主钢丝绳为对称中心, 取网幕局部宽 0.6 m × 高 0.4 m 的区域为基本单元, 进行风荷载模拟。模拟中分别考虑包含横向钢丝绳、不包括横向钢丝绳两种情况进行建模并开展风荷载计算, 实际网幕的风荷载为这两种情况下所得风荷载的面积加权平均^[4]。

2.2 数值计算域

将代表基本单元的局部网幕置于数值风洞中, 网幕上游扩展 2 m, 下游扩展 5 m, 建立数值计算域。上游边界设置为速度入口, 下游边界设置为压力出口, 四周侧边设置为对称边界条件, 网幕表面为无滑移壁面。采用混合网格划分方案, 对网幕附近流体区域使用四面体网格进行空间离散, 其最小网格尺寸为 1 mm, 在远离网幕处使用六面体结构化网格, 计算模型网格总数为 5 932 258。

2.3 网幕风荷载阻力系数

在横桥向风作用下, 网幕的阻力系数按式(1)计算:

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 A} \quad (1)$$

式(1)中, D 为作用在网幕上的顺风向阻力 (N); ρ 为空气密度 (kg/m³), 取为 1.25 kg/m³; U 为计算来流风速 (m/s); A 为网幕顺风向名义面积 (m²), 即包含演绎屏、钢棒、钢丝绳和其间透风区域的总面积, 其值为 0.24 m²。

数值模拟得到各个工况下的网幕阻力, 并按式(1)换算为阻力系数, 结果列示于表 1。在 20 m/s 至 50 m/s 的宽风速范围内, 无论是具有横向钢丝绳还是无横向钢丝绳, 计算得到的网幕阻力系数值基本保持恒定, 不随风速 (即雷诺数) 的增加而发生系统性变化, 最大波动范围在 ±1% 以内。这表明, 对于该网幕结构, 在此风速区间内流动已进入自相似区, 由结构气动外形决定的形状阻力 (压差阻力) 占主导地位, 表面摩擦阻力的变化影响甚微。

对比同一风速下正面来风与背面来风的阻力系数值, 两者差异非常小。对于无钢丝绳的工况, 平均差异约为 0.001; 对于有横向钢丝绳的工况, 平均差异约为 0.002; 最大相对差异不超过 1.5%。这说明网幕结构的气动外形近似对称, 在工程设计中, 可以忽略来风方向对整体阻力系数的影响, 偏于安全地取统一值。

从表 1 中还可看出, 无横向钢丝绳的局部网幕平均阻力系数为 0.147, 有横向钢丝绳的局部网幕平均阻力系数为 0.186。横向钢丝绳虽然直径较小, 但其存在增加了结构的阻塞率和气动粗糙度, 导致了额外的压差阻力, 并对流场产生一定的扰动。对于一个宽 0.6 m × 高

表 1 数值模拟的网幕局部阻力及阻力系数

来流风速 U (m/s)	网幕阻力 D (N)		网幕阻力系数 C_D		网幕平均阻力系数
	正面来风	背面来风	正面来风	背面来风	
20	8.88 (11.16)	8.78 (11.13)	0.148 (0.186)	0.146 (0.186)	0.147 (0.186)
30	19.93 (25.01)	19.91 (25.15)	0.148 (0.185)	0.147 (0.186)	
40	35.28 (44.64)	35.09 (44.78)	0.147 (0.186)	0.146 (0.187)	
50	55.51 (70.13)	55.25 (70.35)	0.148 (0.187)	0.147 (0.188)	

(注: 括号外数字为无横向钢丝绳工况, 括号内数字为有横向钢丝绳工况。)

2.0 m 的标准网幕单元,考虑两种局部网幕的面积占比进行加权平均,得到整个网幕的平均阻力系数为 0.155。

3 拱桥及网幕结构风致响应有限元分析

3.1 桥梁和网幕结构有限元模型

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 对拱桥及网幕结构进行建模。主梁采用 BEAM188 空间梁单元模拟,钢桥面板采用 SHELL63 壳单元模拟,梁、壳单元共节点,吊杆索采用 LINK10 空间杆单元来模拟。墩柱支座对主梁变位的限制作用通过约束梁上节点自由度来实现。网幕的竖向及横向钢丝绳均采用仅受拉的索单元模拟,并为各索段施加了设计初始预应力,其中竖向主索预应力为 8 kN,横向索预应力为 4 kN,以模拟其正常工作状态下的张紧刚度。

3.2 风荷载和自重联合作用下的桥梁结构响应

未安装网幕时,拱桥主体结构等效应力最大的几根杆件均位于拱肋顶部下弦杆处,最大为 223.7 MPa。安装网幕后,最不利应力杆件位置与安装网幕之前相比没有明显变化,桥梁主结构杆件的最大等效应力为 242 MPa,满足《公路钢结构桥梁设计规范》中对于 Q420 钢的强度设计要求。安装网幕稍微降低了桥梁主体的抗风安全裕度(降幅约 8%),但不会直接威胁桥梁主体结构的抗风安全^[5]。

未安装网幕的桥梁在风荷载和自重联合作用下,拱桥主体结构横桥向位移最大值为 0.413 m,位于拱顶处。安装网幕后,拱桥主体结构横桥向位移最大值同样出现在拱顶处,其数值为 0.495 m,增幅约 19.9%。

网幕竖向钢丝绳最大应力为 282 MPa,横向钢丝绳最大应力为 133 MPa。网幕钢丝绳采用抗拉强度标准值为 1 570 MPa 的高强度钢丝,其屈服强度也远高于此。网幕构件的强度安全储备非常充足,不是其自身抗风设计的控制因素。

网幕系统属于桥梁附属设施,其设计寿命不必与桥梁主体结构保持一致,应依据客观工程需求和经济条件酌情选取,为便于设计参考,本研究计算给出了其它几种重现期的设计风速条件下(5年、10年、20年、50年)网幕结构的最大横桥向位移,见表 2。

从表 2 中结果可以看出,即使在 5 年一遇的常遇大风(27.5 m/s)下,网幕位移已超过 1.4 m,网幕碰撞拱桥吊杆风险在常遇风况下即已存在。可能导致的不利后果有:(1)吊杆面外弯曲,产生附加弯曲应力,影响其轴向受力性能和疲劳寿命;(2)钢丝绳与吊杆护套之间的长期磨损,影响耐久性;(3)碰撞冲击可

能诱发吊杆或网幕的振动,甚至引发更复杂的动力相互作用^[6]。应对措施应考虑在网幕与邻近吊杆之间设置柔性缓冲限位装置,避免硬性碰撞,消耗振动能量。

表 2 不同重现期设计风速条件下网幕结构的最大横桥向位移

设计风速 重现期	桥位 10 m 高度处 平均风速 (m/s)	网幕最大横向 位移 (m)
5 年	27.5	1.486
10 年	29.8	1.575
20 年	32.1	1.661
50 年	35.2	1.774
100 年	37.5	1.844

4 结论

本研究采用 CFD 数值模拟与有限元结构分析相结合的技术路线,对某拱桥大型 LED 景观照明网幕系统的抗风安全问题进行研究,结果表明:

1. 基于局部基本单元的 CFD 模拟能有效识别高透风率网幕的整体风荷载,所得阻力系数(0.155)在 20~50 m/s 风速范围内表现出良好的稳定性,为工程设计提供了关键参数。

2. 网幕传递的风荷载使桥梁主体结构在百年一遇风速下的最大应力增加约 8.2%,虽未超过材料强度,但降低了结构的安全储备,设计中需引起重视。

3. 网幕结构强度并非控制因素,但其在风载下的大幅柔性变形(百年一遇风下横向位移达 1.844 m)会引发与吊杆的接触或碰撞,是该网幕方案后续须重点解决的问题。

参考文献:

- [1] 贺虎成,王铁龙,黄伟,等.某大型焰火网幕风荷载体型系数试验研究[J].应用力学学报,2021,38(04):1611-1615.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗风设计规范:JT/T 3360-01-2018[S].北京:人民交通出版社,2018.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 刘泽江.公路桥梁抗震性能的精细化数值模拟与损伤识别技术[J].交通世界,2025(25):162-164.
- [5] 张立平.基于数据驱动的桥梁荷载与效应极值预测方法及其应用[D].石家庄:石家庄铁道大学,2025.
- [6] 同[3].