

科海故事博览

KEHAI GUSHI BOLAN

(1993 年创刊·旬刊)

2026 年 3 月 第 9 期 (总第 634 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 3 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 典型缓冲器结构对比分析研究
..... 左亚南
- 005 基于工艺 FMEA 的连接支架风险管理
..... 禹蓁仪, 刘 磊, 徐书茂, 刘兴民
- 009 甲烷转化气 / 气换热器封头下法兰垫片改造技术探究
..... 代 明
- 012 复杂环境下防爆电气装置隐患识别与检验判定方法研究
..... 岳剑秋
- 015 面向度电成本持续下降的量产品硅太阳能电池技术发展研究
..... 朱鹏浩
- 019 宽浅河道断面复杂工况下的 ADCP 实时流量监测策略及相向组合式应用
..... 戴加远, 杨 光, 毛 威

智能科技

- 022 磨煤机智能液压系统控制策略研究
..... 廖伟辉, 屠 博, 吕兴城, 叶华锋, 张 南
- 025 基于 PLC 的智能电气控制系统设计与优化研究
..... 覃相植
- 028 电气工程中电气自动化技术的智能化发展研究
..... 王立志, 朱桂伟
- 031 基于数字孪生的铁路供电设备故障预测方法
..... 蔡肃攀
- 034 火电厂发电机运行故障分析与智能诊断技术研究
..... 左益龙
- 037 基于 PLC 的智能水处理系统电气控制方案设计与优化
..... 薛 权
- 040 绿色矿山建设背景下地质灾害智能化监测技术的应用
..... 徐付强, 李军伟, 王 辉, 雷晓强, 滕泽宇

应用技术

- 043 软土隧道异常沉降原因分析及处置措施
..... 谢发全, 李甲森

目录 Contents

046	高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析	李成江
049	建筑工程施工中的防水防渗技术应用分析	张灵德
052	建筑工程大型钢结构梁柱施工技术要点分析	刘春娣
055	悬臂浇筑连续梁挂篮施工效率影响因素分析	沙明
058	SMW工法桩在苏州市轨道交通4号线的应用分析	钟兴
061	高铁箱梁预制施工通病成因分析及针对性改进措施探讨	李勇

科创产业

064	基于云平台的工程造价数据共享机制研究	王晨
067	安全验收评价在新建工业项目中的实施与优化	石昌辉
070	智能制造背景下机电制造过程关键技术应用研究	张炯
073	面向低碳目标的电气自动化系统节能优化路径研究	何飘芸
076	基于数字孪生的智慧梁场综合管理平台构建与应用研究	田道洪
079	园区机械行业绿色生产标准化实施现状与优化管理策略	孙佳佳
082	工业废水梯级回用—资源回收—零排放—一体化低碳模式构建	魏超

技术管理

085	水厂给排水工程施工的工艺要点探讨	滑萍
088	土木工程施工安全风险与管理措施探析	李建鹏
091	老旧桥涵承载能力提升的加固改造设计方法	周翔
094	道路与桥梁施工的质量控制与管理对策分析	贾海鑫, 刘德兵, 苗丽丽, 王锋, 赵晶
097	配水厂配套管网工程现场管理的难点及解决措施	杨坤坤
100	城市配网工程施工中的工期管控与资源调配研究	费尚均
103	工业建筑施工项目质量安全与进度协同管控实践	陈永利

科学论坛

106	超大运量带式输送机动态张力分布与托辊布局优化	王婷婷
109	基于传感器融合的铁路轨道衡称量稳定性提升方法	张硕
112	城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响控制研究	屈德镇, 朱超, 姜宝
115	岩土勘察中分布式光纤感测与土体变形关联分析技术	沈华南
118	高强度螺栓抗滑移系数检测影响因素及精准测定方法研究	吴文波
121	“留皮换胆”技术在历史建筑结构加固与功能活化中的应用研究	姜欣健
124	沿海强台风区超高层建筑液压爬模体系抗风加固与安全防护施工研究	陈进

典型缓冲器结构对比分析研究

左亚南

(中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089)

摘要 缓冲器是指通过选用不同的缓冲原理设计出的具有隔振效果的机械装置, 在工程机械领域中扮演着不可或缺的身份。根据缓冲原理的不同, 缓冲器可以分为弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变缓冲器。随着科学技术的发展, 缓冲器由被动控制逐步向半主动控制和主动控制方向发展。缓冲器的缓冲性能与不同的缓冲原理、缓冲材料和控制方式有着密切的关联。本文详细分析和总结了国内外热点研究的缓冲器类型, 并将不同类型的缓冲结构的性能优势进行了横向对比, 指出了还需进一步研究的问题和发展前景, 以为不同应用环境的缓冲方案的选取提出有益参考。

关键词 缓冲器; 隔振; 液压; 电磁; 磁流变

中图分类号: TH7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.001

0 引言

振动不仅会降低系统的稳定性, 同时更可能造成系统结构破坏与工作失效, 因此施行隔振或减振措施十分必要^[1]。缓冲器是一种具有隔振特性的装置, 通常安装在振动源和需要保护的系统之间, 以吸收冲击能量, 减缓运动速度^[2]。现有的缓冲器结构类型多种多样, 常见的缓冲方式有弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变等。国内外专家根据不同的缓冲方式设计出了不同结构的缓冲器。本文从缓冲器的工作原理出发, 分析各缓冲器的缓冲性能和优缺点。

1 缓冲器的发展现状

根据外部能源的需求, 振动控制可分为三种方式: 被动、主动和半主动或主动被动切换控制^[3-4]。最初的缓冲器主要以被动隔振为主, 其中大部分利用的是弹簧、橡胶等材料本身的力学性质进行隔振。随着技术的进一步发展, 出现了半主动隔振和主动隔振等缓冲结构, 即气压、液压、电磁、磁流变液隔振器。

被动隔振具有结构简单、功耗低、稳定性高等优点, 被广泛应用于结构隔振。

主动隔振系统可以自动跟踪外部干扰的变化频率并有效控制低振动频率。

与主动隔振系统相比, 半主动隔振系统不需要大量的能量和重量, 成本低, 运行可靠。

所以, 根据不同的应用环境选取相应的隔振器非常重要。

2 缓冲器的结构及分类

缓冲器的结构可以根据不同的缓冲方式分为弹簧、橡胶、液压、电磁、磁流变等五种类型。下文将对每种类型的典型结构进行分析。

2.1 弹簧缓冲器

弹簧缓冲器是出现在早期的一种缓冲器。主要是利用弹簧被压缩, 将动能转化为弹性势能从而达到隔振效果, 但由于弹簧结构产生的阻尼力非常小甚至可以忽略, 所以需要配合其他材料增大阻尼, 这样才能达到预期的隔振效果。弹簧缓冲器形式多样, 其中包括金属丝弹簧缓冲器、凸轮弹簧缓冲器^[5]等。

弹簧缓冲器属于第一代缓冲器, 其结构简单、成本较低, 且后期维护方便, 小部分弹簧缓冲器带有主动控制系统, 对于一般的要求较低的结构隔振, 可优先选择弹簧缓冲器。

2.2 橡胶缓冲器

橡胶缓冲器属于粘弹性缓冲器, 粘弹性缓冲器的力学性能主要取决于粘弹性材料。早期美国研究的粘弹性缓冲器采用高分子聚合物材料作为缓冲介质, 该材料具有明显的频率、温度相关性, 且对缓冲器耗能效果影响较大^[6]。以橡胶材料作为缓冲元件的缓冲器在现代隔振系统中应用广泛, 这主要得益于其良好的阻尼特性、机械强度和抗腐蚀性能(可在油、酸、辐射等环境中使用)^[7]。

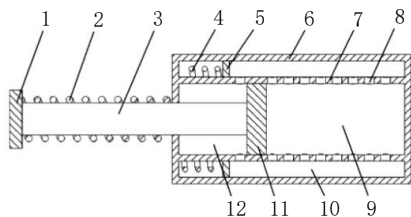
作者简介: 左亚南(1998-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机械结构设计。

2.3 液压缓冲器

液压缓冲器的主要部件包括：撞击头、活塞杆、活塞、缸套、缸体及复位弹簧等，其工作原理是通过活塞运动使流体流经缓冲器结构缝隙或阻尼小孔，进而产生液阻效应，将冲击动能转化为热能，并耗散于空气中，以实现缓冲和减速作用^[8]。现有的液压缓冲器主要包括以下类型：多孔式缓冲器^[9]、阀式缓冲器^[10]、胶泥缓冲器^[11]等。液压缓冲器作为第二代缓冲器，其结构相对简单，同时部分液压缓冲器还具有主动控制的功能，但也存在缓冲力难以提高、密封性能差、回位性差、成本高等缺点^[12]。

2.3.1 多孔式液压缓冲器

多孔式液压缓冲器的阻尼孔直径、阻尼孔间距和阻尼孔数量决定了其工作特性。图1^[13]为一种典型的多孔式液压缓冲器的结构简图。



1—撞头；2—复位弹簧；3—活塞杆；4—浮动活塞弹簧；
5—浮动活塞；6—外缸；7—内缸；8—阻尼孔；
9—无杆腔；10—补偿腔；11—活塞；12—有杆腔

图1 多孔式液压缓冲器结构简图

多孔式液压缓冲器属于被动式隔振装置，对于节流孔面积和数量的选择和设计有较高的要求^[14]，同时对于不同的工况和隔振环境，需要设计不同的多孔式液压缓冲器的结构，其适应性较差，但结构简单制造成本低是该缓冲器的主要优点。

2.3.2 阀式液压缓冲器

在阀式液压缓冲器的应用过程中，主要关注点在于其缓冲行程和节流阀开口面积的设计，设计者需根据缓冲装置的具体需求，合理设计该缓冲器的具体参数，由于该缓冲器结构简单且易实现主动控制，目前应用较为广泛。图2为一种典型的阀式液压缓冲器。

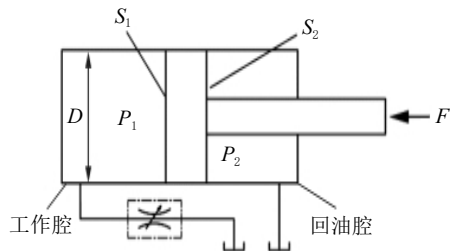


图2 阀式液压缓冲器

2.3.3 胶泥缓冲器

胶泥缓冲器的主要部件包括：缸体、缸盖组件、活塞、活塞杆、注泥部件及密封装置等^[15]。胶泥缓冲器兼具粘滞耗能和弹性储能的双重特性，既可耗散冲击能量，又可实现自动复位^[16]。胶泥缓冲器的工作原理主要基于胶泥在缓冲器缸体内的受压与流动过程。缓冲器在开始受力前，先将胶泥注入缸体内并施加一定预压力，当活塞所受外力超过预压力，活塞杆便向缸体内移动，压缩胶泥使其体积减小，同时胶泥对活塞杆产生反作用力。在此过程中，部分外部输入的冲击动能转换为胶泥的弹性势能，另一部分动能则通过胶泥与缓冲器各构件之间的摩擦转化为热能而耗散，从而实现缓冲减振作用^[17]。

当外力减小或撤销后，胶泥因自身弹性而体积膨胀，推动活塞及活塞杆回弹。在回弹阶段，活塞上的单向节流阀打开，上腔的胶泥经过此孔流回下腔，从而降低回弹阻力、提高回弹速率，使活塞迅速恢复原位，为下一次冲击做好准备。

胶泥缓冲器回位所需要的相对缓冲阶段的阻尼力小很多，所以其回位迅速，同时提供的阻尼力较大，能够满足正常情况的需求，并且克服了传统液压缓冲器的密封性能差、回位性差等缺点，具备了成本低的优点，目前在承受密集冲击的坦克装甲车上应用广泛。

2.4 电磁缓冲器

相比于传统的粘滞式或粘弹性缓冲器，电磁缓冲器通过非接触式的电磁相互作用产生阻尼力，其初级与次级导体板之间无物理接触，因而不会影响系统的动态响应及材料属性。此外，电磁缓冲器还具有噪声低、维护简便、寿命长、原理简单、控制灵活、可靠性高以及环境友好等优点。基于上述优越性能，电磁缓冲器在振动抑制、交通运输、工业自动化等工程领域中得到广泛应用^[18]。根据初级励磁源的不同，将电磁缓冲器分成电励磁、永磁式和混合励磁电磁缓冲器^[19]。

2.4.1 电励磁电磁缓冲器

电励磁电磁缓冲器的工作原理为：励磁绕组通电后产生主磁场，当导体板与初级铁心产生相对运动时，其内部会感应出涡流。图3为电励磁电磁缓冲器结构示意图。

该涡流进而与初级励磁磁场相互作用，从而产生阻尼力。为探究电磁参数对阻尼力特性的影响，很多学者采用有限元法进行了系统分析，并基于分析结果对电磁参数进行了优化设计，以实现电磁缓冲器缓冲性能的最优调控。

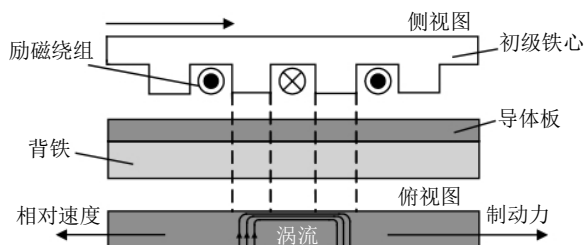
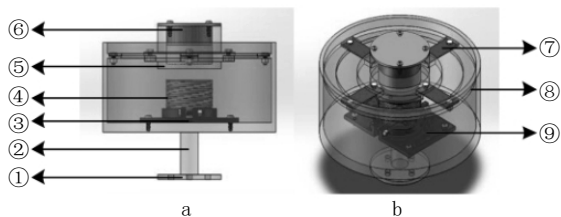


图 3 电励磁电磁缓冲器结构示意图

2.4.2 永磁式电磁缓冲器

永磁式电磁缓冲器主要是利用永磁铁与通电线圈之间的相互作用，通过对外界的冲击分析控制线圈中的电流控制作用力的大小，从而达到抑制振动的效果^[20]。

图 4 为一典型永磁式电磁缓冲器的结构简图。



①底座、②支柱、③铁芯、④线圈、⑤台、
⑥永磁体、⑦板簧、⑧外壳、⑨夹具

图 4 永磁式电磁缓冲结构简图

2.4.3 混合励磁电磁缓冲器

混合励磁电磁缓冲器将永磁体和电磁线圈结合，形成“永磁定基，电磁调节”的工作原理。永磁体提供恒定、高效的基础磁场；电磁线圈通过改变电流实时、精准地调节总磁场强度，从而控制阻尼力大小^[21]。这种设计兼具了永磁式电磁缓冲器的高能效和电励磁电磁缓冲器的宽范围、可调节的优势。它主要应用于智能阻尼的领域，如车辆的馈能悬架与涡流缓冲器，以及精密平台的主动隔振系统，代表了先进缓冲技术的发展方向。

电磁缓冲器为第三代缓冲器，主要利用的电生磁与动生磁原理相互配合达到缓冲效果，作为一种主动控制的缓冲器，电磁缓冲器的阻尼可调范围大，控制精准，相对其他的被动控制缓冲器具有较好的控制性能以及更好的适应性，其缺点在于控制系统较复杂，导致成本较高。

2.5 磁流变缓冲器

磁流变液体 (MRF) 是一种流变特性可受外界磁场调控的功能材料，主体构成是以硅油为载液，以油酸为稳定剂，同时加入了微米量级的可磁化颗粒悬浮液^[22]，其典型特征表现为：在磁场作用下，其剪切应力随外加磁场强度的变化而连续可调，且这一变化过程具有快速可逆性，通过变化磁场强度，可在毫秒级时间内

实现流变力学特性的控制，这一响应特性使其在动力学主动控制领域具有重要的应用价值。作为一种非牛顿液体，磁流变液体的剪切应力主要包括屈服应力和黏性应力。

磁流变缓冲器是一种基于磁流变液特性，实现阻尼可控的器件，其基本工作模式主要包括：流动模式、剪切模式和挤压模式。磁流变缓冲器所能产生的最大阻尼力主要取决于磁流变液的材料性能、所采用的工作模式以及具体的结构尺寸参数。这些采用磁流变液体的半主动缓冲器具有连续阻尼可控、运行安静、配置简单、功耗低和高控制稳定性^[23]。

单筒结构是磁流变缓冲器中应用最广泛的结构形式，其筒体主要用于容纳磁流变液。如图 5 所示，单筒单出杆结构仅包含一个筒体，活塞杆只从一端伸出。在活塞杆往复运动过程中，由于杆体体积占位变化，会导致磁流变液体积差，因此需在没有活塞杆的一端设置补偿气装置，以平衡筒内容积变化，避免因压力异常引起活塞运动卡滞。该补偿装置内部通常充有氮气，有助于维持系统压力稳定，防止磁流变液中产生气穴现象。

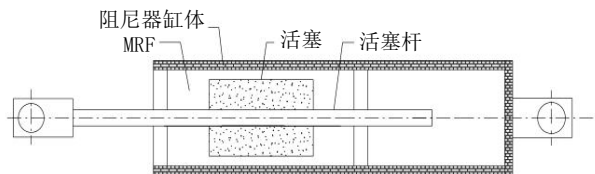


图 5 单筒单出杆 MRF 缓冲器

磁流变缓冲器的性能主要由结构参数、磁路参数以及磁流变液的性能参数决定。在磁流变液性能参数给定的条件下，实现高性能磁流变缓冲器设计的关键在于对其结构与磁路进行优化^[24-25]。

3 不同类型缓冲器的横向比较

前文介绍了五大类不同缓冲原理的缓冲器，其中有的阻尼系统简单，成本较低且后期维护方便，但在控制方面又相对较弱，针对不同的工程问题，相对应的工况千差万别，在保证达到缓冲效果的前提下，选择成本最低、最合适的缓冲器对于使用者非常重要。表 1 针对不同类型的缓冲器的性能特点进行了比较。

通过上述的缓冲性能的比较可知，在不同的应用领域需要通过具体的需求选取合适的缓冲器，五大类缓冲器各有优缺点，选用时要按需选配。

4 缓冲器的发展方向

1. 目前缓冲器在高频隔振方向的研究已经相对成熟，相较于主动控制，被动控制系统更加适用于高频隔振。而对于低频隔振，被动控制缓冲器还不具有良

表1 五大类缓冲器的性能比较

缓冲器类型	隔振类型	控制方法	阻尼材料	结构特点	影响因素
橡胶类	非线性	被动	高阻尼橡胶	结构简单	材料性质、缓冲结构
弹簧类	线性/非线性	被动	辅助材料	结构简单	材料性质、缓冲结构
液压类	非线性	被动/主动	液压油	结构简单	阻尼孔结构
电磁类	非线性	主动	磁场	较复杂	电流
磁流变液类	非线性	主动	磁流变液	较复杂	材料性质、MR 阀结构

好的效果,而主动控制缓冲器也由于其结构复杂、控制系统庞大、造价高等问题,一直处于研发改进阶段。

2. 相较于目前的缓冲器类型,大多数缓冲器为通用型结构,并未向专用性结构发展,以至于缓冲效果不能在某一特殊领域达到最优的缓冲效果,所以未来缓冲器在专用领域存在更大的改进发展的空间。

5 结束语

本文综合阐述了目前国内外所研究的不同类型的缓冲器的基本缓冲原理和缓冲结构。对典型的缓冲结构进行缓冲性能的论述和对比。随着力学、振动、材料等学科的进一步发展,缓冲器的种类会不断增加,可靠性会逐步提高,将有力推动缓冲、阻尼技术的发展,因此对缓冲器的研究具有重要的工程价值。

参考文献:

- [1] 李明华,曹广群,薛彦云,等.基于遗传算法的电磁炮缓冲器设计方法[J].兵器装备工程学报,2023,44(12):197-203,262.
- [2] 魏国,赵益,王率军,等.隔振缓冲结构设计与仿真分析[J].兵工自动化,2025,44(04):77-82.
- [3] 杜永峰,屠旭松,韩博.MRE耗能阻尼器力学性能及半主动控制分析[J].振动.测试与诊断,2024,44(04):703-709,826.
- [4] 杨仙娥,刘学广.基于Stewart隔振平台的振动主动控制方法研究进展[J].振动与冲击,2025,44(10):323-338.
- [5] 鲁正,赵若宇,柳祥千,等.基于SMA弹簧的调频TMD减振性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2025,45(05):77-87.
- [6] 夏立荣,张萌,赵博.低温环境下聚氨酯缓冲器安全性能研究[J].中国特种设备安全,2025,41(12):13-17.
- [7] 王乙辰,周旋,周旭升,等.高速/超高速电梯新型缓冲器研究[J].湘潭大学学报(自然科学版),2025,47(06):160-174.
- [8] 尤小梅,侯晓冬.基于不同算法渐变式液压缓冲器的优化研究[J].组合机床与自动化加工技术,2025(06):176-181.
- [9] 杨堃,宋顺利,王乐,等.多孔式缓冲液压缸设计、仿

真与试验研究[J].液压气动与密封,2023,43(11):62-66.

[10] 马佰周,黄惠,纵怀志,等.外部冲击下的液压阻尼作动器位置控制策略研究[J].液压与气动,2024,48(12):126-137.

[11] 徐忠四,肖有才,符振荣.胶泥缓冲器与高射机枪动力学性能优化匹配[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(10):89-97.

[12] 陈浩,董必辉.大型液压阻尼器结构优化设计[J].机械设计与制造,2024(12):303-307,313.

[13] 王成龙,魏学谦,王雪亭,等.一种多孔式液压缓冲器的设计与优化[J].机床与液压,2021,49(16):82-86,97.

[14] 王成龙,王雪亭,魏学谦,等.基于不同算法的多孔式液压缓冲器设计优化与比较[J].液压与气动,2021(02):71-76.

[15] 赵旭宝,魏伟,董靓瑜,等.弹性胶泥缓冲器关键参数对快捷列车纵向冲动的冲击影响[J].振动与冲击,2022,41(05):99-104,113.

[16] 周元辉,戴谋军,于海航,等.弹性胶泥缓冲器刚度特性分析[J].机械工程与自动化,2022(03):32-34.

[17] 宿方宗,毛从强,孟繁彬.内增压弹性胶泥缓冲器设计[J].电力机车与城轨车辆,2022,45(03):34-38,122.

[18] 范圣平,李竞,李林勇,等.电磁阻尼器工作特性的理论模型与试验研究[J].西北工业大学学报,2023,41(04):688-696.

[19] 梁仕民,杨国来,王义金,等.强冲击载荷下电磁阻尼器磁阻尼力影响分析[J].振动与冲击,2024,43(18):21-27.

[20] 何少东,唐长亮,徐静雯,等.柔性支承的立式转子主动电磁阻尼减振研究[J].电子测量技术,2025,48(05):22-29.

[21] 马学超,田俊梅,张建宏,等.串联磁路混合励磁电磁阻尼器分析与设计[J].微特电机,2023,51(05):24-27.

[22] 杨广鑫,王飞,周龙,等.基于正交试验法的磁流变液制动器设计和分析[J].机械传动,2026,50(01):32-39.

[23] 李祝强,付本元,古毅,等.径向楔形挤压磁流变缓冲器冲击动力学行为[J].振动与冲击,2025,44(02):30-39.

[24] 张广,张晋宁.磁流变减振器基本结构设计研究综述[J].机电工程技术,2023,52(10):34-40.

[25] 唐娟,毕力格图,董明明.磁流变减振器阻尼特性半主动控制研究[J].液压与气动,2025,49(12):26-36.

基于工艺 FMEA 的连接支架风险管理

禹蓁仪, 刘 磊, 徐书茂, 刘兴民

(中国原子能科学研究院, 北京 102400)

摘 要 连接支架作为系统的承载结构, 既要承担系统的重量, 又要为系统内其他设备提供支撑, 并在各种载荷环境中承受载荷, 一旦失效将会导致系统功能的丧失, 因此有必要对其制造过程进行风险管控。本文基于工艺 FMEA 方法进行连接支架风险管理, 列出失效模式清单, 并对每个失效模式进行定量分析, 通过严酷度、失效发生概率、可检测度、风险优序数来对制造过程中可能发生的风险进行评估, 制定风险管理措施, 以期对相关人员进行借鉴。

关键词 连接支架; 风险管理; 工艺 FMEA; 风险优序数

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.002

0 引言

在航空航天、核工业、船舶工业等大型机械制造领域, 项目产品在生产过程中往往会面临系统复杂、新技术开发、生产工艺优化等问题, 在任何一个环节出现问题都可能带来重大损失^[1-2]。《质量管理体系要求》(GJB 9001C-2017) 提出基于风险的思维是实现质量管理体系有效性的基础, 指出组织需策划和实施应对风险的措施, 这样有利于提高质量管理体系的有效性、获得改进结果以及防止不利影响。因此, 风险管理成为项目质量管理的重要内容之一^[3]。2023 年宇航产品质量问题发生原因统计中, 工艺问题占比约 20%^[4]。航天产品工艺 FMEA 技术及应用研究中提到航天型号使用过程中发生失效的一部分原因是工艺设计、实施、更改、控制不良^[5]。因此, 对产品生产制造过程进行风险管理十分必要。

连接支架是系统的承载结构, 面临着新环境、新材料等考验, 制造过程中发生质量风险的可能性较大。失效模式及影响分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) 是质量管理方法中的一种预防、控制质量风险的方法^[6]。FMEA 方法在产品的设计过程中应用较多, 针对制造工艺过程的 FMEA 应用较少^[7]。本文以连接支架为例, 探索基于工艺 FMEA 的制造风险管理。

1 基于 FMEA 风险管理的实施原理

工艺失效模式与影响分析 (FMEA) 作为工艺设计过程中的重要环节, 与工艺设计工作并行开展。该分析方法通过系统地识别工艺过程中潜在的失效模式, 并对这些失效模式进行定性与定量评估, 从而实现

工艺风险的科学评估。在评估过程中, 采用风险优先数 (Risk Priority Number, RPN) 作为关键指标。该指标由严酷度 (Severity, S)、故障发生概率 (Occurrence, O) 和可检测度 (Detectability, D) 三个维度的综合评分计算得出。基于 RPN 值的排序结果, 可以明确工艺风险等级, 进而确定需要重点防控的风险点。通过这种前瞻性的分析方法, 能够预先制定有效的防控措施, 从而规避潜在风险事件的发生, 确保工艺设计的可靠性和安全性^[8]。工艺 FMEA 实施流程如图 1 所示。

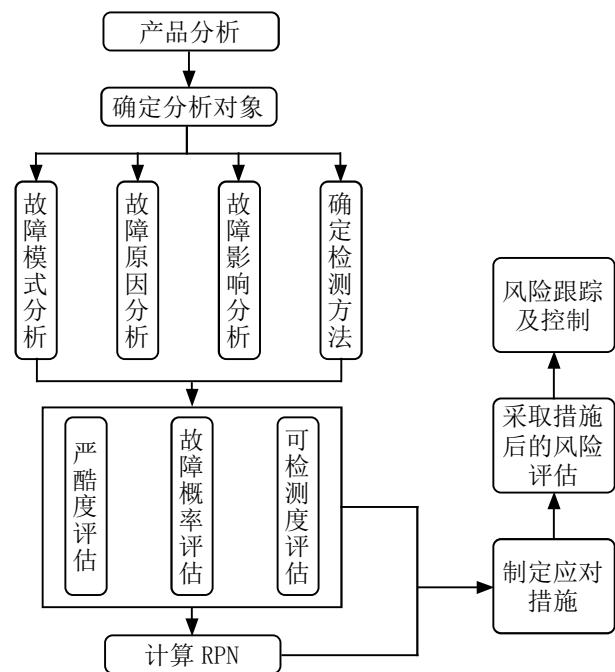


图 1 FMEA 实施流程图

作者简介: 禹蓁仪 (1993-), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向: 产品质量管理和风险管理。

1. 进行产品分析,明确产品结构、功能及基本要求。
2. 确定分析对象:在开展失效模式及影响分析(FMEA)时,针对制造工艺复杂、工序繁多的产品,若对所有工艺流程逐一进行分析,将导致工作量显著增加,风险管理难度大幅提升,进而影响风险管控的有效性。为确保分析工作的针对性和实效性,建议采取重点突出的分析策略。具体而言,应优先选择以下关键环节进行FMEA:形成关键/重要特性难度较大的工艺环节、新引入的工艺技术以及重要设备的装配工艺等。这种聚焦关键点的分析方法,既能确保风险管控的精准性,又能有效简化管理流程,实现资源的最优配置。

3. 失效分析:失效分析在产品分析的基础上进行。技术人员结合自身经验运用头脑风暴、专家讨论等方法将影响任务、安全的事项列出,确定失效模式,然后对其进行失效影响分析。失效影响分析需考虑失效对本工艺的影响、失效对后续工艺的影响、失效对产品的影响。

4. 风险评估:根据项目特点确定严酷度、失效概率、可检测度的评分准则,对失效模式进行评估,给出失效模式的严酷度、失效概率、可检测度。(1)严酷度是产品加工、装配过程中失效模式对产品影响严重程度的度量,根据最终可能出现的人员伤亡、经济损失、进度影响的程度来确定。(2)失效概率是产品加工、总装过程中某一个失效模式发生的可能性的度量,根据失效发生可能性的大小来确定。(3)可检测度是产品加工、装配过程中失效模式在已确定的检测手段和控制措施下被检测出来的可能性度量,根据检测难度评分。风险优序数是严酷度、失效发生概率和可检测度的乘积,即:

$$RPN=S \times O \times D \quad (1)$$

式(1)中,RPN是对工艺风险等级评价,RPN值越高代表风险等级越高。一般根据RPN值排序确定需重点防御风险,但对于单项评估参数高的也需重点防御。

5. 根据识别出来的风险及风险评估结果制定风险应对措施。

6. 确定重点风险并由质量管理人员及工艺人员进行风险跟踪及管控。

2 连接支架工艺 FMEA

2.1 产品分析

连接支架作为系统的重要组成部分,其主要功能是为各类设备提供可靠的安装接口,并承担相应的任务载荷。该支架采用典型的“球一杆”焊接桁架结构设计,每个节点球体可连接2根至9根结构杆件,整体呈现细高锥形的空间布局。从结构组成来看,连接支架由上接口、下接口、结构杆件及节点接头等部件构成,所有构件均选用316H不锈钢材料精密加工而成,并通过焊接工艺形成整体结构。在服役周期内,连接支架必须持续保持足够的结构强度、刚度以及几何精度,以确保其功能性和可靠性。

2.2 确定分析对象

连接支架制造过程主要包含零件加工和焊接组装。

零件按外形可分为节点类零件和管类零件。经分析与评估零部件加工过程无新工艺,加工技术难度相对较小,因此不对零部件加工工艺进行FMEA。

连接支架共有三种焊接接头:“管—管”对接接头、“板—管”单侧角接接头、“板—管”双侧角接接头。连接支架焊缝的质量直接影响连接支架的强度。根据设计要求和控制的性能特性确定焊缝等级是连接支架的工艺关键特性。连接支架的焊接是形成关键特性难度较大的工艺,因此选取焊接为FMEA分析对象。

2.3 参数评分准则定义

2.3.1 严酷度评分准则

从人员、经费、进度等三个方面的影响,将严酷度等级分为可忽略的、轻度的、中等的、严重的、灾难的5个等级(见表1)。

2.3.2 失效发生概率评分准则

根据失效发生可能性的大小将失效发生率等级分为极低、低、中等、高、极高5个等级(见表2)。

2.3.3 可检测度评分准则

可检测度是产品加工、装配过程中失效模式在已

表1 严酷度评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	可忽略的	轻度的	中等的	严重的	灾难的
描述	人员无影响,经济损失可忽略不计,不影响进度和质量	人员轻度不适,损失1万元以下,进度推迟3天	人员轻伤,损失1万元到10万元,进度推迟7天	人员重伤,损失10万到100万,进度推迟7天到1个月	人员死亡,设施损坏100万元以上,推迟进度1个月以上

表 2 失效发生概率评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	极低	低	中等	高	极高
描述	几乎不发生	很少发生	偶尔发生	经常发生	持续发生

确定的检测手段和控制措施下被检测出来的可能性度量,根据检测难度将可检测度等级分为肯定、高可能、中可能、低可能、几乎不可能 5 个等级(见表 3)。

2.4 失效模式分析及风险评估

识别出连接支架焊接可能发生的潜在风险,分析失效模式产生的影响,并依据 2.3 参数评分准则定义进行风险评估,最后填写 FMEA 表格(见表 4)。

3 连接支架风险管理

3.1 风险应对措施制定

经 FMEA 可知,连接支架焊接的失效模式有两种:焊点有裂纹、未焊透、有缺陷;支架焊接变形。针对两种失效模式分别制定应对措施。

预防焊点有裂纹、未焊透、有缺陷的应对措施是:制定详细的焊接工艺规程,并组织专业技术人员进行严格评审;开展规范的焊接工艺评定工作,以验证工

艺参数的合理性。在具体实施过程中,需按照连接支架全焊接周期的首、中、末三个阶段,分别完成各尺寸 3 个见证件的焊接作业,且必须确保见证件的焊接条件(包括操作人员、设备状态、环境参数及工艺参数)与当日实际生产条件完全一致;所有焊接件需经过射线探伤检测,并对局部试验件进行力学性能测试,以全面验证焊接质量。

2. 预防支架焊接变形的应对措施是:制定工艺规程、对工艺规程进行评审;增加预留收缩量;焊接过程中严格按照焊接顺序进行。

3.2 重点防御风险识别

在风险管理过程中,重点防御风险的识别主要依据风险优先数(RPN)排序结果进行判定。根据项目特性,将 RPN 临界值设定为 27(即严重度 S=3、发生频度 O=3、探测度 D=3 的乘积)。此外,为全面管控高风险项目,即

表 3 可检测度评分准则

取值	1	2	3	4	5
等级	肯定	高可能	中等可能	低可能	几乎不可能
描述	现行方法肯定可以检测或几乎肯定检测出	现行方法很有可能检测出	现行方法基本上可以检测出	现行方法较小机会可以检测	无法检测

表 4 连接支架工艺 FMEA 表

标识号	工艺名称	工艺功能、要求	失效模式	失效原因	失效影响	严酷度	发生概率	可检测度	风险优序数
01-01	3 钎焊(自动焊接)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
01-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3
02-01	5 钎焊(填充盖面焊)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
02-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3

续表 4

标识号	工艺名称	工艺功能、要求	失效模式	失效原因	失效影响	严酷度	发生概率	可检测度	风险优序数
03-01	7 钎焊 (焊安装板)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
03-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3
04-01	27 钎焊 (焊接上层零件)	焊缝质量满足《导管焊接技术要求》(QJ 2865A-2014) I 级要求	焊点有裂纹、未焊透、有缺陷	焊接工艺不合适、或焊接操作不当	焊点强度不够、连接架结构破坏	5	2	2	20
04-02		总高误差 < 5 mm	支架焊接变形	预留焊接收缩不足、焊接顺序不对	支架安装尺寸超差	1	3	1	3

使 RPN 值未达临界标准,但单项评估参数中严重度 $S \geq 4$ 、发生频度 $O \geq 5$ 或探测度 $D \geq 5$ 的风险项目,同样被列为重点防御对象。通过失效模式与影响分析(FMEA)评估发现,失效模式 01-01、02-01、03-01、04-01 的 RPN 值均为 20 ($S=5$ 、 $O=2$ 、 $D=2$),虽然其 RPN 值低于临界标准,但由于严重度 S 达到 5 (≥ 4),因此仍被确认为需要重点防御的风险项目。这一判定标准既考虑了风险的综合评估结果,又兼顾了单项风险指标的特殊性,确保风险管控的全面性和有效性。

3.3 风险跟踪及控制

为确保风险管控措施的有效实施,质量管理部门需建立完善的风险跟踪机制,对已识别的风险进行全过程监控。在制造环节启动前,必须组织技术交底会议,向工艺操作人员详细说明风险控制要点。在生产过程中,操作人员须严格遵循工艺文件要求执行作业,每道工序完成后必须进行质量检测并完整记录检测数据,经确认合格后方可转入后续工序。针对重点防控风险,应将其纳入专项质量计划实施重点管理,工艺操作人员和质量管理人員需将相关工序设定为质量见证点,实施重点监控并留存见证记录。通过建立多层次、全流程的质量管控体系,确保风险始终处于受控状态。

4 结束语

本研究基于项目特性,科学界定了评估连接支架制造风险的三个关键评价维度:严酷度、失效发生概率及可检测度。选取连接支架焊接工艺过程作为具体分析对象,采用定性与定量相结合的分析方法,系统

识别出焊接过程中存在的主要风险因素,包括焊点裂纹、未焊透、焊接缺陷以及支架焊接变形等问题。通过风险优序数计算及三维度综合评价分析,进一步明确了焊点裂纹、未焊透和焊接缺陷为需要重点防控的核心风险。基于上述分析结果,制定了针对性的风险管理方案,通过实施有效的风险管控措施,确保制造过程中的各类风险均处于可控范围之内。该研究旨在为连接支架制造工艺的风险控制提供实施路径参考。

参考文献:

- [1] 程大林,田玉蓉,司群英,等.航天项目研制风险识别与分析探索[J].中国电子科学研究院学报,2019,14(02):46-150.
- [2] 马骥,唐雷,梁孝彬.航天装备制造质量风险分析方法[J].装备制造技术,2019(06):222-224.
- [3] 质量管理体系要求(GJB 9001C-2017)[S].北京:中央军委装备发展部,2017-05-18.
- [4] 杨之浩.风云四号微波星技术风险识别与控制的思考与实践[J].上海航天,2025,42(01):29-37,67.
- [5] 李福秋.航天产品工艺FMEA技术及其应用[J].质量与可靠性,2011(02):29-33.
- [6] 陈红,孙志礼,王冬梅.工艺FMEA在机械零部件加工过程的应用[J].制造业信息化,2010(08):80-81.
- [7] 蒋志广,易旺民,张廷磊.卫星总装工艺FMEA应用初步研究[J].航天器环境工程,2010,27(04):510-514.
- [8] 故障模式、影响及危害性分析指南(GJB/Z 1391-2006)[S].北京:中国人民解放军总装备部,2006-05-17.

甲烷转化气 / 气换热器封头下 法兰垫片改造技术探究

代 明

(呼伦贝尔金新化工有限公司设备管理中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021506)

摘 要 某公司甲烷转化装置 E04302 (气 / 气换热器) 封头下法兰原采用唇式密封与 B22-400-4.0 型内环缠绕垫, 因多次焊接密封导致唇式密封损伤, 且法兰密封面设计较窄, 原垫片无法实现有效密封, 存在高温工况下可燃气体泄漏风险。为解决该问题, 经调研、选型与核算, 最终采用 BMC 恒应力垫片进行改造。该垫片基于“金属碰金属”理念, 由石墨密封环与金属内外环组成, 具有应力恒定、回弹优异、抗热冲击和压力波动、不易疲劳失效等特点, 其石墨材料与机械性能均满足设备工况要求。安装时对法兰密封面光刀处理, 按规范控制表面粗糙度与平行度, 依据《压力容器 第 3 部分: 设计》(GB/T 150.3-2011) 标准核算螺栓预紧力并按特定顺序紧固。改造后设备运行无泄漏, 密封效果可靠。本文详细阐述了 BMC 恒应力垫片的结构、性能特点及安装要点, 以期为行业内同类型法兰密封垫片的选用与改造提供借鉴。

关键词 唇式密封; BMC 恒应力垫片; 螺栓预紧力

中图分类号: TH49

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.003

0 引言

某公司甲烷转化装置 E04302 (气 / 气换热器) 的封头下法兰密封处在以往运行过程中出现过泄漏, 处理措施为紧固法兰螺栓并对法兰唇式密封进行密封焊接, 由于唇式密封的特殊结构导致多次焊接后, 唇式密封已损伤, 无法继续进行焊接密封。由于封头下法兰密封面设计得非常窄, 如不进行焊接密封, 则现有内环缠绕垫无法进行良好密封, 因而需对密封垫片进行改造。通过调研、选型、设计、计算, 最终选用 BMC 恒应力垫片作为 E04302 封头下法兰的新型式垫片, 本文对 BMC 恒应力垫片的结构、性能、安装等要点进行技术探究。

1 E04302 工艺参数和封头下法兰结构

E04302 为固定管板 U 型管式换热器, 由于管程介质温度高达 604 °C, 在封头及封头的接管内衬上了 LC-III 耐火浇注料, 而且封头下法兰密封处设计为唇式密封, 防止高温工况下可燃气体泄漏。封头下法兰密封垫片原设计为内环缠绕垫, 规格为 B22-400-4.0^[1]。

2 BMC 垫片结构

BMC 垫片遵循“金属碰金属”密封理念, 由石墨密封环和金属内、外环组成。金属内外环起到包容、支撑和限制石墨环变形的作用。石墨密封环主要制造材

料是性能优异的柔性石墨材料, 制造时, 将柔性石墨材料放置于凹凸型模具中。在加工成型后, 将石墨环嵌入不锈钢环内, 即可制造出密封垫片。包覆层金属材料采用整张金属薄板, 如果垫片直径过大, 垫片制造需采用拼接工艺, 其拼接头数不宜超过 3 个, 其拼接处板边应切割成 45°, 采用氩弧焊对拼接焊缝进行焊接相连, 焊后必须打磨焊缝与母材平齐。此垫片在温度压力波动下仍可保持密封面和法兰接触面之间的密封应力恒定, 从而有效保证密封的安全、可靠^[2], 垫片详细结构见图 1 所示。

3 BMC 垫片性能特点

BMC 垫片在螺栓预紧载荷的作用下, 上下法兰与垫片金属环能够实现紧密贴合接触。该金属环采用高强度合金材质, 可有效吸收法兰变形及热震载荷引发的机械应力, 通过分散应力集中、缓冲工况波动冲击的方式, 显著提升垫片整体密封稳定性。正因这一独特结构设计, BMC 垫片尤其适配 E04302 这类工业管道、设备法兰连接中温度与压力频繁波动的严苛工况, 其应力缓冲与密封补偿能力可有效规避因工况交变导致的密封失效风险, 进一步筑牢法兰连接的密封可靠性。

在“金属碰金属”的工作状态下, 充足的螺栓预

作者简介: 代明 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化工机械。

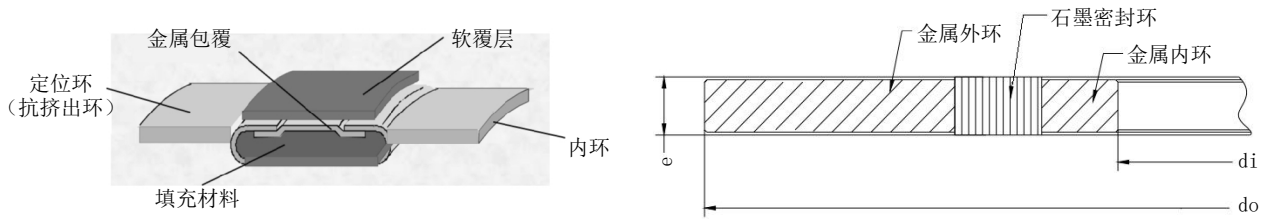


图1 BMC垫片结构

紧力会稳定储存在垫片内、外环的弹性结构中。石墨密封环本身兼具优异的回弹性能与耐高温、化学稳定性，搭配内、外环的弹性释放协同作用，形成“预紧力储存—动态回弹补偿”的闭环机制，能够持续抵消工况波动带来的密封面间隙变化，确保垫片在长期服役过程中始终保持稳定的压紧力，彻底避免弹力衰减或缺失问题，为设备长期安全运行提供持久密封保障^[3]。

高纯石墨保证了密封环本身的松弛率在极低的范围内（<5%），石墨本身不存在疲劳失效，金属环的设计保证了其应力水平远小于材料的屈服极限，发生疲劳屈服的可能性极小。石墨具有优异的延展性和啮合性，可充分地补偿法兰表面的缺陷。

垫片的内环和外环，可以在金属的抗压强度范围内不压溃。金属碰金属，足够螺栓力储存。当热冲击、压力波动等因素造成螺栓松弛时，释放的是作用在内、外环的载荷，密封应力恒定，密封不会失效^[4]。

覆层材料、填充材料均为柔性石墨，石墨的指标性能需满足以下要求，方可保证垫片耐压、耐高温、耐腐蚀性能。垫片的指标性能见表1，机械性能见表2。

表1 垫片的指标性能

化学成分	
碳含量	> 99.5%
灰份	≤ 0.5%
硫离子含量	< 200 ppm
总卤素含量	< 200 ppm
氯离子（游离态）含量	< 50 ppm
氟离子（游离态）含量	≤ 50 ppm
热损失	< 0.5%/h

表2 垫片机械性能

机械性能	
抗拉强度	≥ 4.5 MPa
压缩率	≥ 35% ~ 55%
回弹率	≥ 9%

垫片的密封泄漏率的实验条件和指标见表3。

表3 垫片的密封泄漏率的实验条件和指标

实验条件	泄漏率 (ml/s)
试验应力: 63.3 MPa	≤ 1×10 ⁻³
温度: (常温 ℃)	
介质: 氮气	
试验压力 1.1 倍的公称压力	

原设计使用的内环金属缠绕垫与新型式的 BMC 垫片在现有使用工况下的优缺点见表4。

4 螺栓预紧力核算

根据《压力容器 第3部分:设计》(GB/T 150.3-2011) 压力容器标准对螺栓预紧力计算, 公式:

$$F = \frac{T}{Kd} \quad (1)$$

式(1)中, F 为预紧力(单位: N), T 为施加的扭矩(单位: N·m), d 为螺栓公称直径(M24为24 mm), K 为扭矩系数(通过实验或手册查取, 选取0.1~0.3)。

材料参数转化:

35CrMo 材质的屈服强度取 540 MPa (参考碳钢标准值), 预紧力需控制在材料屈服强度的 80% 以内^[5], 即:

$$F \leq 0.8 \times 540 \times 3.14 \times (24/2)^2 = 81\,900 \text{ N}$$

螺栓扭矩计算:

K 取 0.3 (中等摩擦条件), 则:

$$T = F(K \cdot d) = 81\,900 \times 0.3 \times 0.024 = 589.68 \text{ N} \cdot \text{m}$$



因而紧固螺栓时, 扭矩扳手的最高扭矩设定值取整数为 589 N·m^[6]。

5 BMC 垫片安装

由于法兰密封面及唇式密封经过多次切割和手动打磨后, 存在凹凸不平, 无法达到密封标准, 需对密封面进行光刀处理。按照《钢制管法兰、垫片、紧固件》(HG/T 20592-2009) 标准, 光刀后的法兰密封面表面粗糙度全部达到 Ra3.2~6.3 μm 范围内, 符合标准规范要求, 密封面能够与垫片的石墨密封环紧密贴合^[7], 法兰密封面光刀方式。

垫片外环设置有 4 个间隔 90° 的定位杆, 定位杆可弯折, 并紧贴法兰外缘, 起到定位对中, 防止密封面偏移, 定位杆。

表 4 BMC 垫片与金属缠绕垫对比表

项目	BMC 垫片	金属缠绕垫
结构简图		
密封原理	由于采用金属碰金属的设计理念, 在密封服役期内, 垫片应力保持恒定, 从而保证密封的持续有效	由垫片本身弹塑性能 (主要依靠金属带的回弹性能) 来保证密封服役期间的有效密封应力
密封性能	金属碰金属的设计, 使其在服役周期内保持垫片密封应力的恒定, 降低泄漏风险	主要通过垫片本体的回弹性, 保证其密封性能。在使用初期可满足相应工况, 但随着运行时间的变化, 垫片回弹性逐渐降低, 无法保证其密封比压, 泄漏率逐渐上升
回弹性	事实上, 只要在密封服役期内保证金属碰金属, 并不主要依靠回弹性移位来补偿密封应力的缺失	必须保持持续的回弹性, 否则, 密封应力就会缺失
对热冲击和压力波动的敏感性	由于在初始设计的时候就保证垫片应力的恒定, 任何因素造成的应力缺失都在设计和安装时做了充分的考虑补偿	非常敏感, 极易发生补偿不足的情况, 最终导致密封失效
抗疲劳失效	由于纯石墨环装配于两个石墨环之间, 限制环受到的是正应力作用, 而且应力值远小于材料的弹性极限, 因此不会发生疲劳失效	在交变载荷的作用下, 缠绕部分的金属带容易出现疲劳屈服, 从而使垫片失去回弹性
整体刚度	由于采用金属碰金属的设计, 法兰和垫片的整体刚度得到大幅增强	在垫片密封受力面处形成的反力和螺栓的作用力形成弯矩, 对法兰的整体刚度影响较大
安装要求	由于采用金属碰金属的设计, 允许过载	不允许过载, 否则, 垫片有被压碎的可能

法兰密封面平行度要求小于 0.3 mm, 法兰密封面张口过大, 将无法给垫片提供足够的预紧力。法兰螺栓共计 32 颗, 规格为 M24, 材质 35CrMoA, 螺栓扭矩设置为 589 N·m, 采用扭矩扳手将螺栓紧固 2 遍, 第一遍扭矩值 294 N·m, 第二遍扭矩值 589 N·m^[8]。

6 结束语

E04302 封头下法兰垫片通过改造后, 使用效果好, 在未进行法兰唇式密封焊的情况下未出现过泄漏。虽然垫片选型是保证密封效果的核心要素, 但是也需要相应的垫片高标准安装要求才能发挥垫片的良好性能。通过介绍 BMC 恒应力垫片结构、性能特点、安装等要点, 旨在对行业中同类型法兰密封垫片的选用起到借鉴和指导作用。

参考文献:

[1] 陈立军, 李伟, 赵红波. 高温工况下法兰密封面光刀处理工艺研究 [J]. 石油化工设备, 2020, 49(02): 45-49.

[2] 机械科学研究总院. 法兰用密封垫片实用手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[3] 王建国, 张燕, 李刚. 化工装置高温可燃气体泄漏风险评估与密封技术优化 [J]. 工业安全与环保, 2019, 45(07): 56-60.

[4] 周贤, 翟浩东, 温伟鹏, 等. 新型金属碰金属接触垫片的压缩回弹与密封性能研究 [J]. 压力容器, 2018, 35(10): 1-7.

[5] 李超. 高压换热器设计易忽略问题解析 [J]. 化工设备与管道, 2021, 58(06): 30-33.

[6] 张磊, 王健, 刘军. BMC 恒应力垫片在化工甲烷转化气换热器法兰密封改造中的应用 [J]. 石油化工设备, 2021, 50(04): 45-49.

[7] 李红梅, 陈志强, 吴涛. 换热器法兰唇式密封失效原因及密封面优化技术研究 [J]. 化工设备与管道, 2020, 57(03): 32-36.

[8] 赵伟, 孙丽萍, 马强. 高温可燃气体换热器密封垫片选型及泄漏防控技术 [J]. 化工机械, 2022, 49(05): 689-693.

复杂环境下防爆电气装置隐患识别与检验判定方法研究

岳剑秋

(中海油安全技术服务有限公司, 天津 300450)

摘要 防爆电气装置在石油化工与煤矿开采等易燃易爆场所承担着关键的安全保障功能, 复杂环境因素如高温高湿、腐蚀性介质与机械振动等对装置安全性能产生显著影响, 传统检验方法难以准确识别潜在隐患。通过建立多参数耦合的隐患识别模型, 结合红外热成像与超声波检测等先进技术手段, 可实现对防爆电气装置典型失效模式的有效判定。研究表明, 环境温度、湿度与粉尘浓度等因素对隔爆间隙与电气绝缘性能存在交互作用, 需建立分级判定标准体系。基于失效物理分析的检验方法能够将隐患识别准确率提升至合格水平, 为复杂工况下防爆电气装置的安全运行提供技术支撑。

关键词 防爆电气装置; 复杂环境; 隐患识别; 失效模式; 检验判定

中图分类号: TU89

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.004

0 引言

防爆电气装置在易燃易爆场所中扮演着至关重要的安全角色。石油化工与煤矿开采等行业的作业环境普遍存在高温高湿、腐蚀性介质与机械振动等多重复杂因素, 这些因素对防爆电气装置的安全性能产生深层次影响^[1]。传统检验手段主要依赖经验判断和单一参数测试, 难以全面捕捉装置在复杂环境下的性能退化规律, 环境因素之间的耦合作用使得隐患识别工作面临更大困难。通过引入先进检测技术和多参数分析模型, 深入研究环境因素对装置典型失效模式的作用机理, 可为防爆电气装置的安全运行提供有力保障。

1 环境多因素耦合对防爆电气装置的失效作用机理

1.1 温湿度与粉尘浓度的协同作用对隔爆间隙的影响

隔爆间隙作为防爆电气装置的核心安全参数, 其有效性受温湿度与粉尘浓度协同影响: 60~80℃时外壳热膨胀使间隙改变0.02~0.05 mm, 粉尘吸附能力提升35%; 湿度40%~85%时, 粉尘团聚致沉积速率提升2.3倍, 积尘厚0.15~0.30 mm, 局部温度梯度增加18~25℃/cm, 影响火焰淬熄。三因素耦合可用修正失效概率模型表征:

$$P(T, H, D) = P_0 [1 + \alpha(T - T_0) + \beta(H - H_0) + \gamma D + \delta TH + \varepsilon TD + \eta HD] \quad (1)$$

式(1)中, P_0 为标准条件下失效概率, T 为温度(℃), H 为相对湿度(%), D 为粉尘浓度(mg/m^3), α 、 β 与 γ 为单因素影响系数(分别为0.012/℃, 0.008/%, 0.003 m^3/mg), δ 、 ε 与 η 为交互作用系数(数值范围0.0002~0.0005)。实验显示65℃、75%湿度、500 mg/m^3 粉尘下, 隔爆间隙有效性较标准工况降低42%, 远超单因素叠加预测的28%, 见图1。

1.2 腐蚀与振动耦合条件下电气绝缘性能劣化规律

电气绝缘材料在腐蚀介质与机械振动耦合作用下加速劣化: 300~500 ppm 氯离子环境使绝缘层产生0.08~0.12 mm 静态微裂纹, 振动将其扩展速率提升3.2倍^[2]。50~80 Hz 与 2~4 g 振动条件下, 材料应力集中区离子渗透速度增加65%, 6个月内绝缘电阻从500 MΩ 衰减至80 MΩ 以下; 腐蚀产物经振动楔形嵌入, 形成贯穿导电通道的概率为单一因素的4.1倍。材料介电强度劣化符合双参数 Weibull 分布, 相关参数随耦合强度指数衰减; 应力腐蚀开裂动力学模型验证, 振动使临界应力强度因子降低38%, 绝缘失效时间从15个月缩至9个月, 显著呈现环境耦合对绝缘寿命的非线性削减效应。

2 基于失效物理的多参数耦合识别模型

2.1 失效模式的物理—数学表征

防爆电气装置失效是多物理场作用下材料性能的渐进退化, 通过物理—数学模型可将失效机制转化为

作者简介: 岳剑秋(1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 防爆电气现场检验及雷电防护检测。

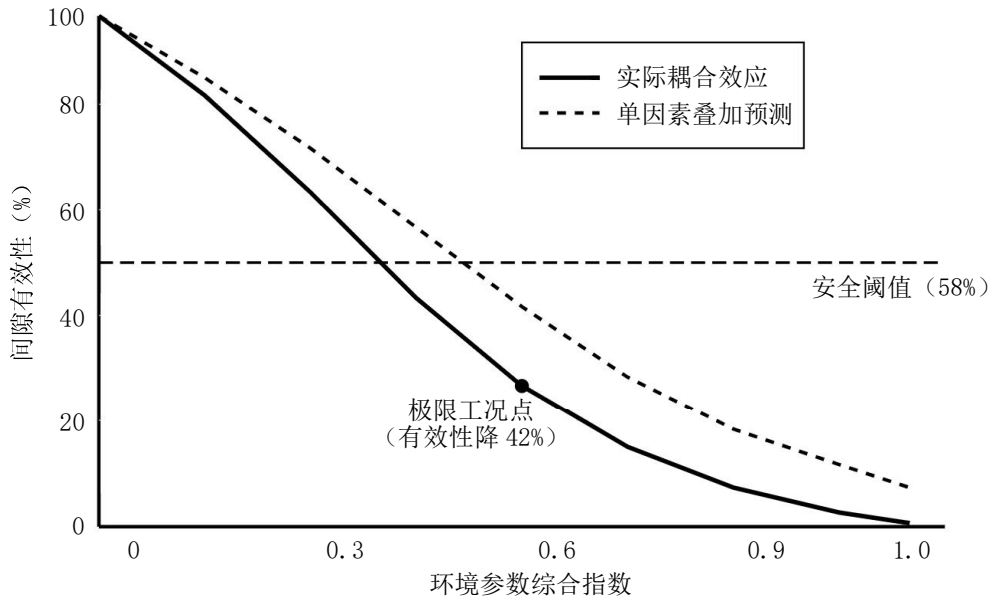


图 1 环境因素耦合对隔爆间隙有效性的影响

可计算判定依据，隔爆间隙的失效表现为火焰淬熄能力丧失，其临界间隙距离随环境参数的变化可用修正模型描述：

$$d = d_0 \cdot K_T \cdot K_H \cdot K_D \quad (2)$$

式(2)中， d_0 为标准间隙值 0.9 mm， K_T 、 K_H 与 K_D 分别为温度修正系数、湿度修正系数和粉尘影响系数。当温度从 25 °C 升至 75 °C 时， K_T 从 1.0 衰减至 0.82，相对湿度从 40% 增至 85%，使 K_H 降至 0.88。粉尘浓度 500 mg/m³ 条件下， K_D 约为 0.91。三者综合作用使有效间隙缩减至 0.66 mm 而低于安全阈值 0.70 mm。绝缘失效则采用时变击穿强度模型表征：

$$E_b(t) = E_0 \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

式(3)中， E_0 为初始击穿场强 28 kV/mm， τ 为特征衰减时间常数，在腐蚀—振动耦合环境中 τ 值从标准工况的 18 个月缩短至 7 个月，通过损伤累积参数 D 将多失效模式统一量化，当 $D \geq 1$ 时判定装置达到失效临界状态。

2.2 环境因素交互作用的定量化建模

环境因素存在显著非线性交互效应，需建立考虑该效应的定量化模型以准确预测装置性能退化。正交试验显示温度—湿度交互项系数为 0.0 042 (正值)，二者协同加剧退化，温度每提升 10 °C 且湿度提高 15%，隔爆间隙缩减量额外增加 8%；湿度—粉尘交互系数 0.0 038 (正值)，高湿促进粉尘吸附，增大间隙堵塞风险。对绝缘系统，腐蚀—振动交互作用最显著^[3]，交互系数 0.0 067，使绝缘电阻衰减速率较单因素作用提高 2.4

倍。方差分析表明，交互项对总方差贡献率达 37%，远超线性项的 23% (见表 1)

表 1 环境因素交互作用定量分析

交互因素组合	交互系数	协同 / 拮抗	对间隙影响 (%)	对绝缘影响 (%)	方差贡献率 (%)
温度 × 湿度	+0.0 042	协同	+8	+12	14
温度 × 粉尘	+0.0 038	协同	+11	+6	11
湿度 × 粉尘	+0.0 035	协同	+15	+9	12
腐蚀 × 振动	+0.0 067	强协同	+5	+24	18

3 红外—超声复合检测技术体系

3.1 红外热成像的隐患特征提取方法

红外热成像技术以非接触式捕捉防爆电气装置表面温度分布异常，实现隐患识别，正常运行时外壳温度场均匀，温度梯度 < 3 °C /cm，热点温度较环境温度差值超 12 °C 即判定异常，通过温度异常系数量化隐患程度，该系数超 1.35 时存在显著发热缺陷。采用图像处理算法提取热斑形状特征判别缺陷类型：绝缘击穿热斑不规则 (面积周长比 0.65 ~ 0.78)，接触电阻热斑呈圆形 (比值 > 0.82)；绝缘劣化区域热时间常数 8 ~ 15 秒，低于正常区域 25 ~ 30 秒。技术检测灵敏度达 0.08 °C，可早期识别肉眼不可见的温升异常，精准反映内部绝缘劣化与接触电阻增大等缺陷。

3.2 超声波检测的缺陷定位与定量评估

超声波检测依托声波传播特性，实现内部缺陷精确定位与尺寸量化，对隔爆间隙堵塞等隐蔽缺陷优势显

著,脉冲反射法中正常金属界面回波幅值稳定^[4],缺陷会产生中间回波,回波幅值比 η 可定量表征缺陷程度,粉尘层厚度与 η 呈线性关系,标定系数2.8 mm。利用钢材中5 900 m/s的超声传播速度,通过声时差计算缺陷深度,精度达0.1 mm,2.5 MHz探头适用于粗晶材料,可识别 ≥ 0.5 mm缺陷;5 MHz探头提升细晶材料分辨率至0.2 mm。绝缘层裂纹采用衰减系数法评估,完好材料系数0.15 dB/mm,有微裂纹时 ≥ 0.42 dB/mm,结合A/B扫描完成定量评估。

3.3 检测数据与耦合模型的融合判定

通过贝叶斯推理框架,融合红外、超声检测结果与环境耦合模型,构建统一隐患评级体系。融合判定函数涵盖红外指标(温度异常系数归一化值)、超声指标(回波幅值比与衰减系数加权组合)及环境耦合模型预测值,权重系数经层次分析法确定为0.35、0.40、0.25。实例计算显示,某区域温度异常系数1.42、超声衰减系数0.38 dB/mm,结合68℃、78%湿度、420 mg/m³粉尘参数,得损伤累积参数0.87,F值0.83超临界阈值0.75,判定为中度隐患需限期整改。该体系模糊综合评判矩阵设四级离散数据,交叉验证表明,融合方法准确率达92%,较单一检测手段提升18%,误判率降至5%,优势显著。

4 分级判定标准的构建与实验验证

4.1 基于耦合模型的分级判定准则

将隐患划分为四级实现差异化管理,正常状态 F 值 < 0.45 ,各项性能指标处于安全裕度内, $K_T < 1.2$,隔爆间隙 > 0.85 mm,绝缘电阻 > 400 M Ω 且损伤累积参数 $D < 0.3$,允许继续运行且检验周期可延长至12个月。轻度隐患 F 值0.45~0.75,个别参数轻微偏离阈值,隔爆间隙缩减至0.75~0.85 mm或绝缘电阻250~400 M Ω ,需加强监测并6个月内完成整改,中度隐患 F 值0.75~0.90,多项指标劣化致 D 达0.65~0.95,隔爆间隙接近0.70 mm临界值或 $K_T > 1.35$,需限负荷运行并3个月内维修,严重隐患 F 值 > 0.90 或 $D > 0.95$,存在即时失效风险,必须立即停机检修,实现定性到定量的转化。

4.2 典型工况下的检验流程与准确率评估

典型工况检验流程采用“环境参数采集—初步筛查—精细检测—融合判定”四阶段模式,兼顾准确率与效率,环境参数采集阶段^[5],通过温湿度传感器,粉尘浓度仪及振动加速度计实时监测,5分钟完成数据采集并代入耦合模型初评。初步筛查阶段,对 $D > 0.5$

的装置开展红外热成像扫描,覆盖率超95%,单台筛查耗时约8分钟,精细检测阶段对红外异常部位实施超声波检测,定位精度达0.1 mm,单台全面检测需25分钟,融合判定阶段输入三类数据计算 F 值并定级,单台全程评估 ≤ 40 分钟。300台次现场验证显示,准确率92%,漏检率3%且误报率 $\leq 5\%$,较传统经验判定法78%的准确率提升14%,验证了复杂工况下的可靠性,见表2。

表2 准确率评估与方法对比

评估指标	融合判定方法	传统经验判定	单一红外检测	单一超声检测	提升幅度
准确率(%)	92	78	74	81	+14
漏检率(%)	3	15	18	11	-12
误报率(%)	5	12	14	8	-7
验证样本(台次)	300	300	300	300	—

5 结束语

复杂环境下防爆电气装置的安全运行需要建立在科学的隐患识别与判定基础之上,通过系统研究温度、湿度与粉尘浓度等环境因素对隔爆间隙和电气绝缘性能的交互影响,揭示了装置失效的内在机理。多参数耦合模型的建立突破了传统单一参数检验的局限性,结合红外热成像与超声波检测等先进技术手段,实现了对典型失效模式的精准识别,分级判定标准体系的构建,为不同工况条件下的检验工作提供了科学依据,检验方法的准确率得到显著提升。这些研究成果为防爆电气装置在石油化工与煤矿开采等行业的安全应用奠定了技术基础,对保障生产安全具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李庚波. 化工企业防爆电气设备安全管理探讨[J]. 电气开关, 2025, 63(02): 108-110, 113.
- [2] 张少锋, 孟雪, 李艳丽, 等. 基于图像识别的防爆电气隐患识别模型及应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(13): 107-109.
- [3] 马思晨. 煤矿井下电气设备防爆管理方法[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(21): 138-140.
- [4] 窦磊. 防爆电气紧固连接常见隐患研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(13): 78-80.
- [5] 司少峰. 防爆电气紧固连接常见隐患[J]. 劳动保护, 2021(06): 68-69.

面向度电成本持续下降的量产晶硅太阳能电池技术发展研究

朱鹏浩

(鄂尔多斯市隆基光伏科技有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要 晶硅太阳能电池近年来在全球光伏产业持续占据主导地位, 其量产技术正加速迭代, 为光伏度电成本持续下降提供关键动力。从技术路径来看, PERC 技术的规模化普及奠定了高效量产基础, 而 TOPCon 与异质结电池 (HJT) 凭借更优的载流子选择性与钝化性能实现效率进一步突破, 背接触 (BC) 结构则通过减少栅线遮光在功率输出与度电成本方面展现出综合优势。技术发展主要从材料提升、结构创新与工艺优化协同推进: 高质量硅片、先进的界面钝化及金属化工艺共同支撑效率提升, 低温金属化与高度自动化装备则促进制造成本降低。未来, 晶硅电池技术将继续在多维度协同发展, 通过工艺、结构与装备的系统创新, 实现更高效率与更具竞争力的成本控制。

关键词 新能源; 光伏; 晶硅; 产业技术

基金项目: 高效太阳能电池的钝化及减反射效率提升关键技术研究与应用 (项目编号: YF20250287)。

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.005

0 引言

在全球气候变化加剧与能源安全挑战加速叠加的背景下, 实现碳达峰与碳中和已成为主要经济体的共同战略方向。作为增长最快、成本下降最显著的清洁能源, 光伏发电正处于全球能源转型的核心位置。自 2000 年以来, 全球光伏产业完成了从“边缘补充能源”到“主力替代能源”的跨越式跃迁: 2000 年全球累计光伏装机仅 1.29 GW, 占全球电力装机比重不足 0.01%, 处于能源体系的边缘位置; 随着德国《可再生能源法》(EEG 2000) 的实施, 以及日本、美国等国相继推出补贴政策, 全球光伏市场进入规模化发展期, 2010 年累计装机突破 41 GW, 较 2000 年增长超 30 倍。2015 年后, 中国凭借完整产业链优势成为全球增长核心, 叠加欧洲能源转型加速、美国本土制造政策推动, 全球光伏装机迎来爆发式增长: 2015 年累计装机达 226 GW, 2020 年跃升至 760 GW, 5 年间规模扩张超 2.3 倍。进入本世纪第三个十年, 光伏产业增长进一步提速, 2023 年全球新增装机达 447 GW, 同比增长 50%; 截至 2024 年底, 全球累计装机突破 2 000 GW (2 TW), 较 2000 年增长超 1 500 倍, 成为人类能源史上发展速度最快的发电技术^[1]。

光伏发电在全球电力结构中的占比也同步大幅提升。2000 年光伏发电量占全球总发电量不足 0.1%, 是典型的补充性能源; 2010 年占比升至约 0.5%; 到 2020

年已突破 3%, 德国、西班牙、澳大利亚占比超过 10%; 2023 年全球占比达到约 5.5%~6%, 成为仅次于水电、风电的第三大可再生能源形式。在部分国家和地区, 光伏在高峰负荷时段已具备主力能源特征, 对电力系统调度方式和市场机制产生实质性影响。随着组件效率持续提升、电站建设成本不断下降以及储能与智能调度技术快速发展, 光伏发电量占比仍将保持快速上升趋势, 预计到 2030 年全球占比有望达到 15% 左右, 并在部分国家达到 30% 以上^[2]。与此同时, 以技术升级为主线贯穿的产业链竞争正持续激化, 企业在效率、成本、可靠性等多个维度上的内卷态势加速显现。在此背景下, 对量产晶硅太阳能电池的技术迭代路径进行系统梳理, 对于把握未来技术发展方向、支撑产业投资布局与企业战略决策具有重要的现实意义。

1 晶硅太阳能电池技术研发与量产过程

晶硅电池的技术研发可追溯至 1950 年代。当前主流电池结构的原型包括 Al-BSF、PERC、SHJ、TOPCon 及 BC, 其关键技术突破大多集中在 1970 年至 1980 年完成^[3], 制造成本高, 应用场景主要局限于航天卫星等高价领域, 辅以少量地面示范项目。来自中国、美国、德国、澳大利亚、日本等国的科研力量, 围绕设备、材料与工艺等核心环节持续攻关, 局域钝化、选择性激光掺杂、光学减反膜、载流子隧穿、金属化同

作者简介: 朱鹏浩 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 量产晶硅太阳能电池技术发展。

步扩散钝化等底层技术相继问世并逐步成熟。服务于电池制造的关键装备体系亦同步完善，化学气相沉积、物理气相沉积、原子层沉积、湿法清洗、高温烧结等设备在性能指标与产能输出方面均实现持续提升。

进入本世纪后，随着全球气候变暖议题升温，晶硅太阳能电池作为关键可再生能源技术，开始迈向量产和大规模应用阶段。图1呈现了2000年以来的量产演进轨迹。面向碳中和目标，晶硅电池的研发与量产迄今已历经四轮技术迭代。在前三轮（Al-BSF、PERC、TOPCon）的迭代过程中，光伏行业完成了产业化能力的系统构建：原材料体系日趋完备，装备能力持续进阶，制造工艺不断精进，电池效率稳步提升。新技术从研发走向量产的迭代周期，也从约10年压缩至5年、再进一步收窄至3年。这一阶段整体可概括为双面电池时代。此后，在日趋完善的光伏制造产业链支撑下，制造难度更高但效率潜力更大的背接触电池启动大规模量产进程。与此同时，硅片厚度持续下降，从180 μm降至150 μm，进一步下降至130 μm；自TOPCon开始，硅片掺杂类型从P型转向少子寿命更高的N型，为效率提升提供关键支撑。从技术发展的内在逻辑来看，晶硅电池完成了从扩散电极结构向钝化接触电极结构的转化，这是电池性能持续提升的根本动因。BC技术的推进，标志着电池结构从传统的“界面优化”向“全维度载流子管理”转变，对工艺窗口控制、材料纯度、界面工程及大规模装备升级提出更高要求，推动晶硅电池技术从效率驱动阶段进一步迈向系统化、精细化和智能化的发展轨道。

1.1 PERC前时代（2000-2020）

2000年德国出台《可再生能源法》（EEG 2000），建立系统性的光伏上网电价补贴及配套机制。这一政策工具迅速拉动本土光伏市场扩张，并引导全球光伏产业迈向量产规模化与成本持续下行的通道，对行业发展产生深远影响。此后二十年，Al-BSF电池尽管效率受限，但因结构简单、成本低廉而率先实现大规模量产，并长期占据市场主流地位。PERC电池在Al-BSF基础

上引入背面钝化层及局部开孔技术，显著提升光利用率与载流子寿命，量产效率较Al-BSF明显占优，并逐步开启替代进程。自2015年起，中国光伏企业加速布局，持续扩张PERC产能，背钝化与激光装备成本快速下降，PERC进入吉瓦级量产阶段。此后PERC成为行业主流技术路线，量产效率突破21%关口，全球扩产潮持续加速。至2019年，PERC完成对Al-BSF的全面替代，占据全球晶硅电池80%以上份额，确立主流地位。

PERC前时代（2000-2020年）的核心特征在于政府补贴对晶硅电池研发与产业化的强力拉动。在这一时期，中国光伏产业完成了关键技术与装备的全面国产化，显著降低晶硅电池的量产成本，推动行业逐步摆脱补贴依赖，最终迈入平价上网时代。同时，这一阶段的快速演进还为后续高效电池技术的迭代奠定了必要基础：一方面，PERC的量产验证证明了钝化技术和激光图形化在大规模制造场景下的可行性；另一方面，补贴驱动的旺盛市场需求，倒逼企业持续优化硅片质量、清洗钝化与金属化工艺，推动行业在材料标准化、设备可靠性和生产管理体系方面快速成熟，为TOPCon、SHJ及BC等高效路线的工业化创造了前提条件。

1.2 PERC后时代（2020年后）

2020年后，晶硅太阳能电池技术进入高效化与智能制造协同推进的新阶段。PERC技术逐步接近效率极限，TOPCon、HJT、BC等下一代电池加速量产进程，推动光电转换效率持续提升。产业链日趋成熟，设备国产化程度进一步提高，吉瓦级产能成为常态，自动化与数字化技术广泛应用，有效提升生产效率与生产良率。与此同时，硅片减薄、银耗降低、材料回收等措施持续推进，有效降低碳足迹，支撑产业向可持续方向发展。整体而言，技术升级与降本并行，推动光伏产业迈向高质量发展轨道。

2024年始，TOPCon电池完成对PERC的技术替代，成为行业主流技术路线。2025年起，BC电池进入全面量产阶段，逐步形成对TOPCon的替代态势。PERC后时代的核心特征在于钝化接触电池技术的密集研发带动

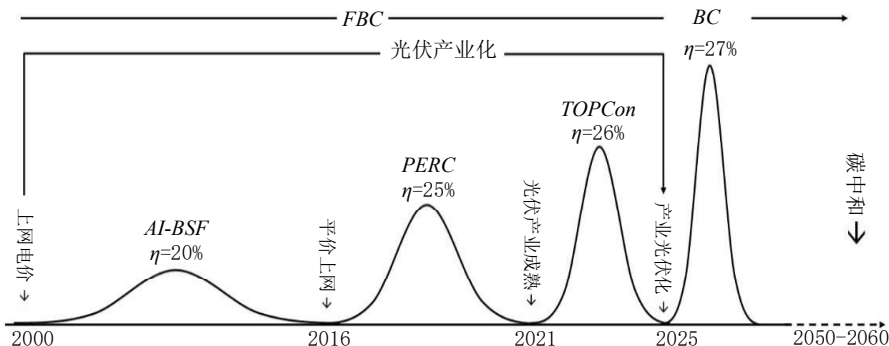


图1 量产晶硅太阳能电池的技术迭代过程

效率快速提升,多种技术路线并行发展,电池成本持续下行。TOPCon 电池最高光电转换效率已达 26.6%,HJT 电池最高效率达 26.81%,BC 电池效率纪录更提升至 27.81%^[4]。这一系列全球领先的效率突破均由中国企业创造,标志着中国光伏产业在高效晶硅电池技术上实现从“追赶者”到“引领者”的根本性跃升。中国企业不仅在吉瓦至太瓦级的量产规模化方面具备无可比拟的产业链优势,更在设备创新、工艺开发、材料体系优化和大规模技术验证等关键环节形成系统化能力,使实验室效率的突破能够快速转化为产业化成果。

与此同时,产业竞争持续加剧,技术与产能层面的内卷现象显著显现。此外,该阶段的发展呈现更强的系统化特征:一方面,企业通过机器学习、数字孪生和高级过程控制持续提升制造精度,使效率提升从“材料驱动”转向“工艺一装备协同驱动”;另一方面,政策端对碳足迹、供应链韧性与能源安全的要求不断提高,促使高效电池向更低耗材、更高可靠性和更强可持续性方向加速发展,形成技术、制造与市场三重驱动力相互叠加的共振格局。

2 量产晶硅太阳能电池技术升级趋势

2.1 量产技术迭代新特征

当前晶硅太阳能电池量产技术的升级,呈现三个显著特征:技术迭代频率持续加快、金属化降本路径快速推进、智能制造效益日益凸显。以 TOPCon 电池为例,量产完成后,LECO 技术的导入带来约 0.5% 的效率增益,且工艺简单、设备投资较低;随后激光图形化技术快速跟进,进一步提升电池效率与双面率^[5]。面向功率提升的半片钝化、多分片、高密度封装等技术陆续应用,在微弱提升电池效率的同时显著增加组件功率输出。为降低成本,细线径网版、金属网版等技术快速升级,贱金属浆料研发持续推进。

值得重点关注的是,量产晶硅电池常用金属材料银的价格,整体呈现单边上行态势。年初银价约 6 900 元/公斤,受工业需求与投资配置推动,至年中稳步升至 8 300 元/公斤左右;第三季度涨势加快,9 月接近 10 000 元/公斤;第四季度在供给偏紧与宏观预期叠加影响下明显拉升,年末一度接近 14 000 元/公斤,全年涨幅显著。这一价格走势进一步推动无银金属化技术的尽快导入量产应用。导电性良好、价格更低的铜和铝在晶硅电池上的金属化技术,亟待从实验室走向制造车间。这已成为行业降本议程中绕不开的课题。

相较于 PERC 电池, TOPCon 在装备和工艺智能化控制、精益制造能力方面优势明显,有力保障了规模化量产的稳定性。BC 电池在完成技术验证后,龙头企业迅速推动产线升级,效率、产能、良率同步提升,快

速缩小与 TOPCon 的成本差距。同时,工艺优化与材料升级进一步改善了电池在长周期运行条件下的稳定性,使组件在湿热、光致衰减和机械载荷等多重应力下表现更优。此外,背接触架构在量产中对精准掺杂、金属化均匀性和焊接可靠性的要求更高,也倒逼企业加强装备精密度与工艺闭环控制体系的建设。智能制造效益进一步凸显:AI 良率预测、在线缺陷检测及数据驱动工艺控制,实现产能、效率和良率同步提升,减少人工干预与生产波动,并通过数据反馈优化设计与工艺。这种能力逐渐成为头部企业的核心竞争壁垒。

技术迭代加速、降本路径清晰、智能制造深化三者协同推进晶硅电池量产技术的持续发展,加速产业向规模化、绿色化与高质量发展方向迈进,同时亦加剧行业竞争与技术内卷,成为当前全球光伏产业发展的核心特征。

2.2 新挑战与智能制造

在效率提升的持续驱动下,工艺复杂度不断增加;在成本压力的持续传导下,生产良率要求持续提高;在竞争持续激化下,精益制造与严格管控成为必然选择。这三方面因素共同构成量产晶硅技术迭代新格局下的核心挑战。面对上述挑战,为持续支撑电力变革所需的高效晶硅电池产品供给,智能制造逐渐成为破局的关键利器,通过数据驱动和自动化控制,实现效率、良率与成本的协同优化。

在晶硅太阳能电池量产过程中,智能制造已日益成为提升效率、降低成本和保障良率的核心手段。通过数据驱动的工艺控制,生产过程中的温湿度、镀膜均匀性、湿法化学成分、丝印流变特性、激光能量分布等关键参数实现实时监控与自适应调节,从根源上减少人工介入带来的波动,提升工艺重复性和电池一致性。基于机器视觉与深度学习的缺陷检测系统,能够在毫秒级时间窗口内识别隐裂、黑斑、针孔及金属化缺陷,并与 MES 等制造执行系统联动,实现异常根因定位和工艺闭环优化,加速产线稳定化进程。例如:在一些头部企业的量产线上,这套系统的误判率已控制在 0.2% 以内。

智能制造平台可实现设备集群控制、跨机台协同调度和产线节拍优化,使吉瓦级产能在复杂订单结构下仍保持高稼动率与低库存水平。物流系统与工艺参数的动态联动,有助于降低在制品周转周期并提升设备综合效率,从而在成本竞争中形成体系化优势。智能制造还强化了从研发到量产的“数字孪生”能力,通过模拟关键节点的电学与光学行为,预测工艺窗口变化对效率、衰减和大规模制造稳定性的影响,为 TOPCon、BC 等新技术的规模化落地提供决策依据,这使得新技术从实验室到量产线的导入周期进一步压缩。

综合来看,智能制造不仅能有效降低晶硅电池的度电成本和工艺风险,还建立起高效、可靠、低波动的量产体系,为高效电池的大规模制造和全球光伏产业向更高质量阶段发展提供了关键支撑,成为当前晶硅电池技术迭代和产业升级的核心驱动力。

3 量产晶硅技术与新型电力系统的协同

源网荷储的新型电力系统以“源—网—荷—储”协同为核心,通过光伏发电、储能系统、电网调度和负荷管理的有机结合,实现能源的高效生产、传输、分配和利用。该体系不仅提升了可再生能源接入比例和系统灵活性,还可根据负荷特性和用户需求优化能源配置,支持多场景应用,推动电力系统向智能化、低碳化和高可靠性方向发展。同时,在高比例新能源占比背景下,源网荷储协同能够有效应对短时波动和负荷不确定性,提升系统稳定性与安全裕度,为建设新型电力系统奠定基础^[6]。

光伏产业以客户需求为导向,紧密结合不同应用场景,推动细分市场发展。其包括户用光伏、分布式

光伏、工商业屋顶及光储一体化等多样化应用,BIPV(光伏建筑一体化)、VIPV(光伏汽车一体化)、光伏交通基础设施等新兴应用场景正快速扩展。同时,源网荷储一体化方案通过将发电、储能、逆变、能量管理与用户侧负荷深度耦合,使光伏从单一“发电设备”升级为“综合能源节点”,具备负荷调节、需求响应和削峰填谷功能。对客户而言,通过系统级设计优化、智能EMS调度、运维数字化及全生命周期管理,可实现更高的能量利用率、更低的度电成本和更强的供电稳定性。

通过优化系统设计、设备配置和运维策略,不仅满足了不同客户在功率、效率、成本和可靠性上的需求,也提升了光伏在能源结构中的调节能力和经济价值,推动产业从单一发电向高效、智能、多功能的综合能源解决方案转型。图2显示,在源网荷储的新型电力系统中,量产晶硅电池的技术、产品与整体方案以客户为中心,支持光伏发电站、光伏+应用一体化及光储一体化等多样化场景,实现发电、储能与负荷管理的深度协同,使光伏成为新型电力系统的核心支撑力量。

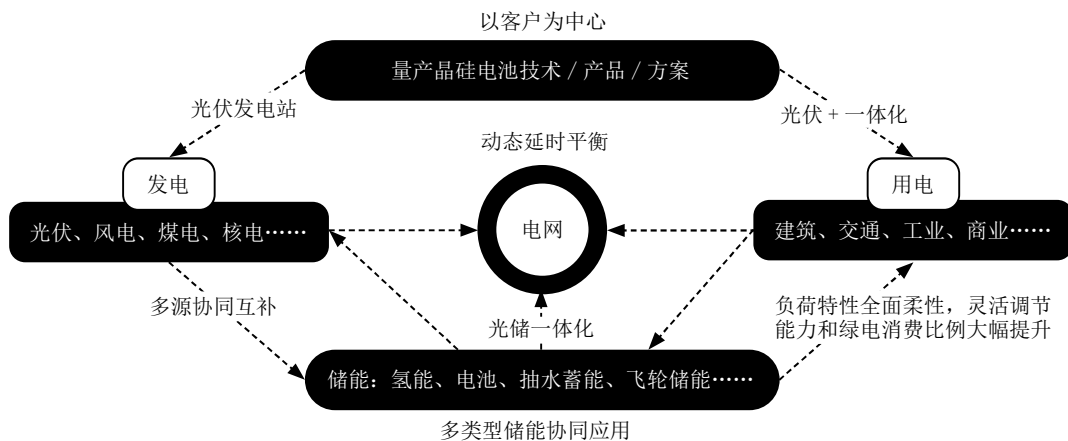


图2 量产晶硅电池技术/产品/方案等在新型电力系统中的角色

4 结束语

过去二十五年间,量产晶硅太阳能电池技术经历了从Al-BSF、PERC到TOPCon和BC的迭代发展。在PERC时代实现平价上网之后,技术迭代频率显著加快,智能制造成为满足效率与成本要求的关键手段。同时,在新型电力系统背景下,晶硅电池的生产与技术升级需以客户为中心,在发电、储能与负荷协同应用中持续优化,以支撑多场景综合能源解决方案的高效运行。

参考文献:

[1] 德国机械设备制造业联合会. 国际光伏技术路线图(ITRPV)2022年度结果(第十四版)[EB/OL].<https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>.

<https://www.ica.org/reports/renewables-2024>.

[2] 国际能源署. 可再生能源2024[EB/OL].<https://www.ica.org/reports/renewables-2024>.

[3] 马丁·格林. 硅太阳能电池: 演进、高效设计与效率提升[J]. 半导体科学与技术, 1999(08):1-12.

[4] 马丁·格林, 伊万·邓洛普, 吉田正弘, 等. 太阳能电池效率表(第66版)[J]. 光伏进展: 研究与应用, 2025,33(07):795-810.

[5] 费尔梅斯, 汉内斯·赫夫勒, 塞巴斯蒂安·马克, 等. iTOPCon太阳能电池的激光增强接触优化[J]. 光伏进展: 研究与应用, 2022,30(12):1393-1399.

[6] 李飞. 新能源发展背景下的源网荷储一体化策略研究[J]. 工程技术创新与发展, 2025,03(10):100-102.

宽浅河道断面复杂工况下的 ADCP 实时流量监测策略及相向组合式应用

戴加远, 杨光, 毛威

(南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要 本研究探讨适用于宽浅河道断面复杂工况下的流量监测策略及应用方法, 结合场景 A 分析复杂工况下的流量监测工作难点, 提出基于 ADCP 声学多普勒流速剖面仪进行流量监测的技术策略, 并探讨其在相向组合式应用当中的应用流程。研究表明, 相向组合式应用方法能够测得不同工况下的断面处流量分布情况, 且对于各流层流速检测的标准差始终能控制在 0.3 m/s 以下。因此, ADCP 实时流量监测在宽浅河道断面复杂工况中具有显著的应用价值。

关键词 宽浅河道断面; ADCP 实时流量监测; 复杂工况; 相向组合式应用

中图分类号: TV8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.006

0 引言

ADCP 声学多普勒流速剖面仪作为主流的流量监测设备, 其因具备全剖面、高度自动化与不扰流等优势被广泛用于多类水体的流量监测工作中。然而, 宽浅河道断面复杂工况下的流量检测仍然对单探头 ADCP 流量检测产生限制, 检测过程受到声束覆盖范围影响, 难以得出精准反映声波信号质量的测流数据。基于此, 本研究从 ADCP 实时流量监测介入宽浅河道断面复杂工况的视角出发, 在构建实时流量监测策略的基础上, 对双探头相向组合式应用方法展开深入研究。

1 项目概况

场景 A 位于泵站与节制闸群联合调度的宽浅河道断面, 周边水工建筑物频繁启闭形成了复杂的非恒定流场, 当泵站进入抽排模式时, 高强度水流从泵口喷涌而出, 在河道右侧形成局部高速射流区, 流速峰值可达 2.0 m/s 以上, 同时裹挟大量气泡与悬浮泥沙向下游扩散。除此之外, 受河床地形与边界约束, 射流在行进约 80 ~ 120 m 后逐渐扩散, 与主流区发生剧烈掺混, 形成大尺度紊动涡街。

2 宽浅河道断面复杂工况下的流量监测难点

2.1 宽浅河道复杂水文条件影响监测精度

宽浅河道的流量测量场景具有宽深比大、流速垂向分布不均匀等特征, 在采用 ADCP 进行流量监测的过

程中, 复杂水文条件将严重影响其测量精度。例如: 场景 A 当中的河道水面宽达到 180 m、水深为 4 ~ 10 m、断面宽深比为 18:45, 属于典型的宽浅河道结构。河道中水流流速在垂向上的梯度变化十分显著, 当采用单点探头测量方法进行流量监测时, 其产生的各层流量标准差平均值将超过 1.0 m/s, 严重影响测流结果精度。

2.2 多闸泵联合调度下出现流场扰动

宽浅河道通常位于水利枢纽调控河段位置, 在运行管理过程中, 水利枢纽的多闸泵群联合调度行为造成河道水流出现非恒定流或局部流场变化现象^[1]。如节制闸引水造成主流位置频繁变动、泵站抽影导致水流流向紊动。在此背景下, 传统 ADCP 流量监测在固定位置进行测流时难以精准捕捉参数信号, 河流中的水体紊流现象造成流场扰动, 导致水体散射体浓度分布不均, 而借助 ADCP 进行流量监测时的声波后向散射强度因此大幅衰减, 得出的流量估计值出现明显误差。

2.3 测流环境复杂引发监测盲区

在 ADCP 测量参数设计误差的情况下, 针对宽浅河道断面复杂工况的流量检测常出现检测盲区问题, 即因测量量程不足引发的空间盲区以及波束覆盖范围受限引发的环境干扰盲区^[2]。在处理浅水环境的流量监测方面, 水体环境内的底边界反射容易对回波信号产生混响干扰, 导致在采用 ADCP 进行流量监测时出现远

作者简介: 戴加远 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水文水资源监测。

距离急剧衰减现象,继而影响多普勒频率的稳定性,最终出现大量监测盲区。

3 ADCP 实时流量监测技术策略分析

3.1 利用信号编码提升监测精度

针对宽浅河道断面流态复杂、垂向流速梯度显著的应用场景,为保障固定式 ADCP 单元流速测量的精度与稳定性,监测人员需优化其发射信号的编码结构^[3]。例如:在固定断面在线监测中,监测人员可采用如巴克码的相位编码信号或相干脉冲串作为主要发射波形,并合理设置码元宽度、编码位数与相干脉冲数,确保其能够在既定功耗与数据更新率约束下,有效提升信号处理估计精度。

3.2 优化多频多信号发射频率用于应对流场扰动

宽浅河道断面的水文条件与散射体特性容易受到上游调度、降雨等因素影响,导致监测工作出现环境快速变化现象,继而引发监测中声波传播衰减以及后向散射强度不稳定情况^[4]。为增强 ADCP 系统对此类环境扰动的适应能力,监测人员可采用多频发射自适应选择模式进行监测实践。在应用实践中,不同频率的声波在水体中的传播损耗存在显著差异,如 300 kHz 的较低频率对应的声波衰减慢、穿透力强,更适用于需要较长探测距离的监测工况,而 600 kHz 及以上的较高频率则对应更短的波长以及高距离分辨率,在近场测量中能够保持最优信噪比。

3.3 针对监测盲区进行监测参数自适应调整

流量监测工作中应当针对存在的监测盲区现象,制定监测参数自适应调整策略予以应对,借此解决流量数据缺失、检测数据质量下降等关键问题^[5]。如图 1 所示,图中为在浅水环境下应遵循的发射信号设计流程,根据图中流程方法,监测人员应当基于过渡带效应进行分层厚度决策,并通过匹配滤波方法实时感知测量底深。

4 ADCP 监测在宽浅河道断面复杂工况下的相向组合式应用实践

4.1 相向组合式系统架构设计

监测人员在场景 A 中选择相向组合式系统架构设计方法,在河道两岸对称布设两个 ADCP 探头,使其声束保持相向交叉发射关系。为了确保双探头各距离单元采集的流量、回波强度数据能够做到零误差,相关人员通过设置数据采集单元,通过 4G 网络将 ADCP 系统与监测平台相连接,保证探头测得的数据通过 4G 网络

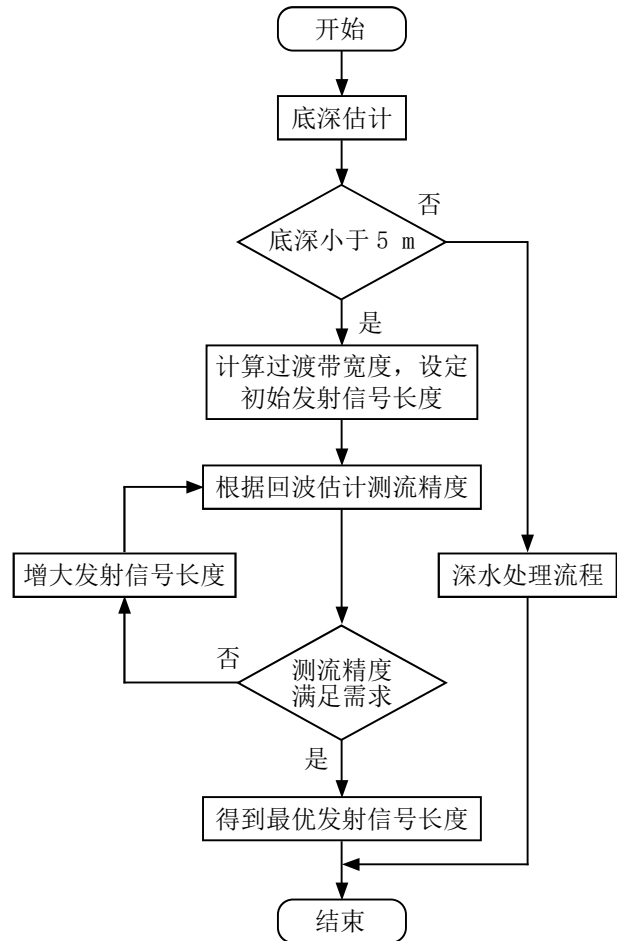


图 1 浅水环境下的发射信号设计流程

传递至监控中心。在硬件集成架构设计方面,系统采用模块化设计方法,其双探头通过电缆实现与岸上控制箱紧密连接,控制箱内嵌入工业级处理器,负责支持流量监测数据交互,为复杂工况下的高精度流量监测提供硬件基础。

4.2 流场适应处理下的安装优化

一方面,安装高度将影响 ADCP 声束的有效覆盖范围,在场景 A 的 ADCP 安装实践中,相关人员按照标准高程数据进行安装工作,为了避开表层波动与近底紊流影响,相关人员将探头置于相对水深 60% 位置,安装高程随水位变化控制在 $-3.342 \sim -2.492$ m 之间。另一方面,为了有效降低安装工程的复杂程度,相关人员采用优化固定安装高程的安装方案,确保安装高度在最低水位至最高水位区间之内,并且仍处于主流层范围内。ADCP 探头通过倾斜支架固定于栈桥前端,保持中心位置位于河底,用于增强不同水位下的测量一致性。

4.3 数据处理及流量推算

在优化多频多信号发射频率的背景下, 场景 A 中对相向组合式 ADCP 系统进行双指标流量提取, 为后续推算高精度流量数据奠定基础。首先, 在数据预处理与单元筛选阶段, 监测区域安装的每个 ADCP 探头能够获取 80 ~ 90 个距离单元的瞬时流量数据, 根据流产分析结果确定断面主流集中在 30 ~ 145 m 区间, 借助上述有效流量单元覆盖监测的主流区域。在此基础上, 监测过程中对每个单元流量序列进行空间平均处理, 得到的指标流速数据通过式 (1) 所示的计算方法, 转化为断面平均流速, 在组合关系系数接近 1 的情况下, 选取对应的流速数据组合作为最终数据。在此基础上, 监测实践中将左、右岸 ADCP 探头获取的单元流速数据与其地理坐标映射至统一的断面网格中, 用于构建完整的二维流速分布场, 针对左、右岸探头波束在断面中泓区域形成的交叉覆盖段, 监测过程中采用基于信噪比与波束入射角加权的数据融合算法对重叠单元流速进行分析, 对应的网格单元水体面积总和为测得流量。

$$\bar{V} = a \left[\frac{V_{ep1} + V_{ep2}}{2} \right]^b \quad (1)$$

式 (1) 中, \bar{V} 表示断面平均流速, m/s; V_{ep1} 表示左岸 ADCP 指标流速, m/s; V_{ep2} 表示右岸 ADCP 指标流速, m/s; a 表示相关系数; b 表示指标系数。

4.4 多工况下的 ADCP 监测效果分析

在完成流量数据提取后, 研究针对场景 A 当中的两种典型调度工况进行特征分析, 即 1 170 m³/s 与 2 237 m³/s 工况下的断面处流速, 前者工况为节制闸引水区域 (水流偏左侧, 流速分布均匀)、后者工况则为泵站抽排水区域 (主流偏右侧, 泵口附近紊动显著)。综合流速分布数据得出, 1 170 m³/s 工况下的左岸探头在主流区信号较为稳定, 单元流速标准差在 0.15 ~ 0.25 m/s 之间; 右岸探头在非主流区流速较低, 但数据具有良好一致性。2 237 m³/s 工况下的右岸探头在主流区信号强度高, 部分单元回波信噪比波动大; 左岸探头在非主流区能够稳定采集低流速数据, 与其他探头实现空间互补。如表 1 所示, 监测工作针对测区内第一至第六层水层进行流速监测 (水面依次向河底方向延伸的水层), 数据显示, 传统固定频率与信号形式下的 ADCP 采集 (使用单一固定发射频率和固定信号 7 位巴克码的编码形式, 系统参数不随环境变化而调整) 流速标准差显著高于多频多信号 ADCP (研究中基于双探

头相向组合式布置, 动态选择最优发射频率、编码形式和信号时长的形式) 对应的标准差结果, 表明双探头相向组合式测量方法在流量监测中的精度更高, 即使在底层流速测量中仍能保持 0.187 m/s 的较低测量标准差, 综合显示相向组合式 ADCP 在宽浅河道多变的调度工况下仍然具有较好的流量监测适应性。

表 1 各流层流速标准差对比

层数	传统 ADCP 标准差 (m/s)	多频多信号 ADCP 标准差 (m/s)
第一层	0.294	0.185
第二层	0.308	0.196
第三层	0.443	0.205
第四层	0.456	0.212
第五层	0.449	0.214
第六层	0.512	0.187

5 结束语

在宽浅河道复杂工况的影响下, 传统 ADCP 流量监测实施效果受到显著影响。本研究在采用 ADCP 进行流量监测的同时, 运用双探头相向组合式测量方法进行监测实践, 并在实际案例中证实该方法的有效性。未来, 研究将聚焦不同水体监测工况, 对 ADCP 实时流量监测介入下的关键技术策略进行深入探究, 构建完善的 ADCP 实时流量监测技术体系, 为推动水体流量监测工作实现高质量发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 李雨, 卢满生, 白亮. 河流流量在线监测研究现状与展望 [J]. 水利水电快报, 2025, 46(10): 54-60.
- [2] 刘丰. 基于 ADCP 的在线流量监测关键技术应用 [J]. 上海师范大学学报 (自然科学版中英文), 2025, 54(05): 607-616.
- [3] 毕博, 毕栋. 河道断面测量在水资源调度与管理中的应用研究 [J]. 水上安全, 2025(15): 144-146.
- [4] 钱睿智, 傅国圣, 王江, 等. 双探头 H-ADCP 在宽浅河道断面复杂工况下实时流量监测的相向组合式应用 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(09): 6-10.
- [5] 王刚, 苗宝文, 赵倩. 河道流量自动监测系统流速流量率定模型简析 [J]. 现代盐化工, 2024, 51(06): 42-44.

磨煤机智能液压系统控制策略研究

廖伟辉¹, 屠博¹, 吕兴城¹, 叶华锋², 张南³

(1. 广东红海湾发电有限公司, 广东 汕尾 515000;

2. 广东电力发展股份有限公司, 广东 广州 510620;

3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710001)

摘要 针对磨煤机在煤质波动和负载变化条件下液压加载响应滞后、能耗偏高及稳定性不足等问题, 开展磨煤机智能液压系统控制策略研究。通过分析智能液压系统的组成结构与运行机理, 结合现场运行数据, 构建基于工况感知的自适应控制方法, 并引入压力-流量协同调节与多参数融合控制机制, 实现加载力的连续、精准调节。应用结果表明, 所提出的智能控制策略能够有效提升磨煤机运行稳定性, 降低液压系统能耗, 增强设备安全性与运行可靠性。

关键词 磨煤机; 智能液压系统; 自适应控制

基金项目: 国家重点研发计划项目“煤与生物质直接耦合发电系统集成及工业验证”(项目编号: 2022YFB4202005)。

中图分类号: TP27; TD45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.007

0 引言

磨煤机作为火电厂制粉系统中起到关键作用的设备, 其运行时的稳定性会对锅炉的燃烧效率以及机组的安全产生直接影响。而在机组进行深度调峰以及煤质更加复杂的情况下, 传统的液压加载方式逐渐显现出响应速度滞后、所消耗的能量偏高以及对环境的适应性不足等方面的问题。基于此, 开展关于智能液压系统控制策略的研究工作, 不仅对于提升制粉系统的稳定性和经济性具有至关重要的意义, 同时对于推动电厂的智能化改造进程也具备切实的现实价值。

1 磨煤机智能液压系统的组成与工作原理

1.1 磨煤机液压系统的结构组成与功能分工

磨煤机液压系统是实现研磨压力调节、保证设备稳定运行的执行系统, 主要由液压油站、液压泵组、控制阀组、液压缸、传感与控制单元组成^[1]。液压油站提供稳定的动力源, 液压缸把液压力转化为磨辊的加载力, 从而实现对煤层的有效碾磨。与传统的弹簧加载方式相比, 液压系统在结构上具有更大的调节灵活性, 可以满足不同煤质、不同负荷工况下对碾磨比压的要求, 为制粉系统结构优化、出力提高奠定了基础^[2]。

1.2 智能液压系统的基本工作流程与控制对象

智能液压系统按照磨煤机工况的变化来执行加载控制, 对运行状况进行综合考虑, 从而动态地调节液

压加载的水平, 使磨辊所受的力一直与实际的碾磨需求相适应。该系统把加载调节和磨辊工作状态、碾磨过程特征、运行能效结合起来, 实现加载方式的综合优化, 提高制粉系统在各种煤质条件下的稳定运行能力。

1.3 关键液压元件的运行特性与协同关系

液压泵、比例阀、液压缸是加载执行的重要单元, 其工作效率直接影响磨煤机碾磨效果。比例阀实现加载力的平滑调节, 液压缸在磨损补偿过程中保持输出稳定, 各个元件在控制系统的协调下协同工作, 和喷嘴环优化后形成的下部流场一起作用, 促进细粉及时排出, 减少无效碾磨, 提高制粉效率。

1.4 智能控制在液压系统中的应用基础

智能控制技术以 PLC、DCS 平台为主, 利用算法模型对运行数据加以分析处理, 从而创建加载力同运行工况间的动态映射联系^[3]。结构优化之后的喷嘴环以及液压加载系统, 智能控制可以依据不同的工况自行调整, 为磨煤机长时间稳定且高效的运行提供可靠的技术支撑^[4]。

2 磨煤机液压系统运行中存在的主要问题

2.1 传统控制方式响应滞后与调节精度不足

火电厂中目前仍然大量采用弹簧加载或定值液压控制的中速磨煤机, 其调节逻辑大多依据经验参数来设定, 主要是根据给煤量或者设定负荷来调节, 在煤

作者简介: 廖伟辉 (1973-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 能源工程、发电技术。

质比较稳定的工况下,该控制方式仍能满足基本的运行要求,但是在实际生产中,煤来源复杂,水分、可磨性波动频繁,当煤质变差或者水分升高时,磨煤机碾磨阻力明显增大,传统的控制方式不能同步调整加载力,往往表现为反应滞后、调节不足,造成制粉能力下降。

在这样的情况下,为了维持锅炉负荷,运行人员一般通过调节分离器转速或者降低煤粉细度来弥补出力不足,但是这种方式属于被动补偿,容易造成煤粉粒径分布不稳定、分离效率下降、燃烧工况波动。相比之下,具有自适应调节能力的液压控制系统可以对加载力进行实时调节,在响应速度和调节精度上比传统方式要强得多。传统加载方式响应速度慢、控制精度低,已经不能满足当前电厂高效、稳定制粉系统的要求。

2.2 负载波动条件下系统稳定性问题

磨煤机在实际运行中一直处在动态负载状态,给煤量变化、一次风量波动、煤层厚度变化都会引起碾磨阻力的持续波动。由于传统液压系统控制策略比较单一,缺少对负载变化的快速识别以及前馈调节的能力,当负载发生较大变化的时候,加载力调整常常存在明显的滞后现象,甚至会出现过度调节的情况。滞后或者过冲都会直接反映在磨辊系统的力学状态上,表现为振动幅值增大、运行不平稳等问题。

在波动较大的工况下,磨煤机的振动水平比正常运行时要高很多,严重时还会引起高振动报警或者局部机械冲击,影响设备寿命和运行安全。长期处于这种不稳定的状态,一方面会加大机械的磨损,另一方面也会使液压系统本身承受更大的压力波动,从而加大系统可靠性风险。因此,在负载频繁变化的工况下,传统的液压控制方式不能实现平稳、柔性的加载调节,系统稳定性不够成为磨煤机安全运行的主要问题。

2.3 液压能耗偏高与运行效率不均衡

从整体运行情况看,在不同的负荷区间内,液压系统的单位制粉能耗有较大的差别,低负荷工况下能耗较高,而高负荷运行时又容易因为过载而降低系统效率。缺少动态优化的加载方式,造成磨煤机在全工况范围内的经济性表现不均衡,也增大了电厂辅助设备能耗占比,不利于节能减排和运行成本控制。

2.4 故障诊断与预警能力不足

传统磨煤机液压系统的监测体系比较简单,一般只对油压、油温等少数基本参数进行监控,系统对异常状态的识别主要依靠阈值报警,一般是在故障已经发展到一定程度之后才发出提示,缺少对早期隐患的主动预警能力。从运行实践来看,液压系统故障在发生之前很少有明显的征兆,维护人员很难及时采取干预措

施,容易造成非计划停机或者扩大化故障。这不但会干扰制粉系统的连续稳定运行,还会增大设备检修和备品备件消耗的成本。随着电厂对设备可靠性和智能运维水平要求的提高,传统液压系统在状态感知、趋势分析、预警能力等方面存在的不足越来越明显,已经成了制约磨煤机运行安全和管理水平提高的重要短板。

3 磨煤机智能液压系统控制策略设计

3.1 基于工况感知的自适应控制策略

对于煤质波动大、运行工况复杂的情况,建立以工况感知为依据的自适应控制策略。该策略可以自动识别磨煤机在低负载、稳定运行、高负载等典型工况下的运行特征,在此基础上匹配相应的加载力调节区间,使液压加载随工况变化实现连续、平滑调节。根据加载力和运行状态的动态匹配来避免调节滞后或者过冲现象。试运行结果表明,在煤质变化幅度大的情况下,该自适应控制策略可以将磨煤机出力波动由原来的 $\pm 12\%$ 降低到 $\pm 5\%$,大大提高了系统运行的稳定性。

3.2 面向运行稳定性的加载过程分阶段控制策略

磨煤机实际运行时负荷变化具有阶段性,在启动、稳态运行、负荷调整等不同的阶段,加载需求是不一样的。智能液压系统利用加载过程分阶段控制的方法,把加载调节分成启动过渡、稳态维持和动态调整这三个典型阶段。系统在启动以及工况突变之初,采用柔性加载的方式来慢慢形成磨辊压力,防止由于加载速度过快造成振动和机械冲击;稳定运行时期,控制策略主要是加载保持和微调,用加载变化速率来控制加载状态的平稳;当负荷发生明显变化的时候,系统按照运行趋势提前介入调节,对加载力实施有序调整,防止因为调节不当造成磨煤机运行波动。分阶段加载控制使液压系统在不同的运行状态下都具有较好的适应性,降低磨辊系统机械应力水平,改善磨煤机长期运行的平稳性、可靠性。

3.3 加载力调节与制粉过程耦合优化的控制机制

磨煤机加载力既影响磨辊受力状态,又影响煤层形成、碾磨过程、煤粉生成特性。为了提高制粉过程的整体协调性,智能液压系统把加载调节和制粉运行过程耦合起来,在控制策略中充分考虑加载行为对煤粉生成效率和排放特征的影响。系统对磨煤过程运行特征进行综合分析,优化加载变化节奏,使磨辊压力调整与煤层变化保持协调一致,防止由于加载不匹配造成煤层不稳定或者碾磨效率下降。同时,在制粉系统运行时,控制加载力频繁变化,减少下部气固流动状态的扰动,有利于煤粉稳定输送和分离效果提高。

耦合控制机制重视加载调节的整体协调性，而不是单个指标最优，使磨煤机在保证碾磨效果的同时也考虑到运行的平稳性以及经济性。现场应用证明，该控制方式可以改善煤粉质量稳定性，降低运行波动，对制粉系统长期高效运行有积极的作用。

3.4 异常工况下的安全控制与保护策略

为了提高磨煤机的运行安全，在智能液压系统中加入异常工况识别及分级保护^[5]。当系统检测磨煤机运行异常时，控制系统就会自动执行安全逻辑，根据异常程度采取限幅调节、缓慢卸载或者紧急停机等措施，防止故障扩大。同时，系统对异常数据进行记录和趋势分析，实现从事后报警到提前预警的转变。现场应用结果表明，此策略使液压系统有关故障的非计划停机率下降约30%，有效地改善了制粉系统的安全性和可靠性。

4 智能液压控制策略的应用效果与优化方向

4.1 控制策略在磨煤机运行中的应用成效分析

智能液压控制策略被应用在磨煤机运行之后，使液压加载调节更加符合实际工况的要求，大大改善了传统控制方式适应性差的问题。通过将加载调节与磨煤机运行状况相协调，系统在负荷变动、工况改变时可维持比较稳定的碾磨条件，减小加载波动给设备运行带来的影响。在不同的运行阶段，加载过程更加连续、有条理，磨辊系统机械冲击和振动水平降低。

从运行实践效果上看，可以提高磨煤机的工作稳定性、连续性，保证制粉过程的稳定运行，减少人工干预。同时，稳定的加载控制有利于煤粉的产生，提高制粉系统整体运行质量，为机组安全、经济运行提供可靠保障。

4.2 对系统稳定性与节能水平的提升作用

智能液压控制策略依靠加载力的动态调节，很好地减小了负载波动给磨煤机运行稳定性带来的影响。系统在工况变化时可以平滑调节液压参数，减小加载力突然变化造成的振动、冲击，降低设备运行的风险。同时，加载策略和实际工况相匹配，在低负载情况下保持较高的加载压力，就会增大液压系统无效能耗。精细化的控制使得磨煤机的工作状态更加接近于最佳的工作区间，从而使得系统的整体能效水平得到了很大的提高^[6]。

4.3 运行可靠性与维护管理水平的改善

在运行过程中，系统可以对关键部件的运行趋势进行持续跟踪，给设备维护提供决策依据。通过对异常运行特征进行识别和预警，可以在故障发生之初就

及时发现并加以处理，从而减少突发性停机给机组运行带来的影响。同时，运行人员对磨煤机工况的掌握更加直观，有利于优化运行调整方式，使维护管理由被动检修向状态检修转变，提高设备全生命周期管理水平。

4.4 智能液压系统控制策略的进一步优化路径

从长远发展和技术进步的角度看，磨煤机智能液压系统控制策略还有很大的改进空间。从运行角度可以累积长期运行数据，针对不同煤质状况、运行状态下的控制成效展开分析并加以修正，充实工况识别及调节逻辑，加强系统对复杂工况、极端运行条件的适应能力。从系统角度出发，需要加强液压加载控制同制粉系统其它部分之间的协调关系，使得加载调节同风量组织、分离运行状态等过程之间产生更为协调的运行机制，从而促进制粉系统整体性能的提高。

随着信息化、智能化技术的发展，采用性能更高的控制平台以及优化算法，可以提高系统对于运行状态变化的判断能力以及自主调整水平，使控制策略由经验修正向智能决策转变。不断改进控制方法、系统结构，可以为磨煤机高效、稳定、低能耗运行提供更加可靠的技术支持。

5 结束语

磨煤机智能液压系统控制策略的应用，把液压加载由经验型调节转变为工况感知的主动控制模式。通过自适应调节、异常工况保护等机制的配合，在负载波动的条件下系统仍能保持稳定运行，振动水平和液压能耗降低，煤粉质量提高，制粉系统可靠性提高。研究表明，智能液压控制策略可以提高磨煤机运行的安全性、经济性、智能化程度，为火电机组制粉系统优化运行提供了一种可行的技术途径。

参考文献:

- [1] 董永君. 火力发电厂中速磨煤机液压油站常见故障处理[J]. 内蒙古科技与经济, 2024(24):138-141.
- [2] 王朝阳, 赵宸宇, 韩友超, 等. 面向火电运行灵活性的钢球磨煤机制粉系统控制优化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(03):1156-1167.
- [3] 胡欢. 基于PCA-SVM的磨煤机在线智能诊断系统研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2024, 40(04):23-29.
- [4] 孙黎明. 磨煤机动态调整对火力发电厂集控系统性能的影响及优化[J]. 自动化应用, 2025, 66(S1):278-280.
- [5] 靳学锋. 火电厂中速磨煤机磨辊异常磨损诊断及对策[J]. 能源新观察, 2025(12):79-80.
- [6] 马越. 基于智能控制的港口起重机液压系统节能优化研究[J]. 时代汽车, 2025(16):115-117.

基于 PLC 的智能电气控制系统设计与优化研究

覃相植

(广西柳钢中金不锈钢有限公司, 广西 玉林 537624)

摘要 在工业自动化快速发展, 电气控制系统精准性、稳定性与运行效率亟待提高的背景下, 本文对 PLC 智能电气控制系统展开研究, 细致梳理系统核心构成及理论基础, 接着进行整体设计, 涵盖硬件选型、电路设计、程序编写和人机界面开发等, 并从控制算法、硬件参数、程序逻辑、抗干扰能力四个维度制定优化策略, 验证策略效果, 搭建实验平台并测试。优化后, 系统控制精度提高、响应时间缩短、稳定性增强, 能耗降低。该成果旨在为工业领域电气控制智能化升级提供从设计到优化的完整路径方案参考。

关键词 PLC; 智能电气控制系统; 系统设计; 性能优化; 效果验证

中图分类号: TP27; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.008

0 引言

工业自动化技术持续迭代, 电气控制系统作为工业生产核心支撑, 运行精度、稳定性与效率会直接影响生产质量和效益。传统电气控制系统有控制逻辑固化、响应滞后、抗干扰能力弱等问题, 难以适配复杂工业场景动态需求。PLC 具备高可靠性、模块化、可编程等优势, 成为智能电气控制核心载体, 基于 PLC 的智能电气控制系统研发与优化成为行业发展方向。开展相关研究可突破传统系统技术瓶颈, 提升电气控制智能化程度, 还能通过优化控制算法等改变能耗指标、降低能耗、减少故障发生概率, 保障工业生产高效、安全运行, 推动工业自动化升级、促进制造业高质量发展。

1 PLC 智能电气控制系统核心构成与理论基础

1.1 PLC 的工作原理与核心技术特性

PLC 工作时遵循循环扫描机制, 依次完成输入采样、程序执行以及输出刷新的闭环流程, 持续循环实现对电气系统的实时控制。PLC 核心技术特性主要体现在高可靠性, 以高可靠性适应复杂工业环境, 实现稳定运行, 采用模块化设计, 系统可根据控制需求灵活增减功能模块, 减小扩展难度。可编程性使 PLC 能用专用编程语言适配不同控制场景, 无需改动硬件即可调整控制逻辑, 增强系统通用性和适配性, 满足各类电气控制实际应用需求。

1.2 智能电气控制系统的硬件架构组成

智能电气控制系统硬件架构中, 作为系统决策中枢的 PLC 控制器进行控制指令的运算处理与逻辑判断,

检测元件采集电气设备运行状态信号, 把物理量转换为可识别的电信号后传至 PLC, 执行机构接收 PLC 输出的控制指令, 执行启停、调速、切换等具体操作。电源模块提供稳定电力供各组件运行, 布线与接口模块保障各硬件间的物理连接。各模块分工明确、协同工作, 形成完整的硬件运行体系。

1.3 PLC 与外围设备的通信协议适配原理

PLC 与外围设备通信时, 依赖标准化协议搭建数据传输桥梁。Modbus 协议以简单报文格式实现数据读写交互, 可适配传感器、变频器等常用外围设备, 因其通用性强, 在中小型控制系统中应用广泛。相较之下, Profibus 协议以高速传输和多主站通信能力, 满足复杂系统多设备通信需求。适配逻辑核心是统一数据格式和传输规则, 明确通信双方角色与交互流程, 通过地址映射, 实现数据精准定位与传输, 确保 PLC 与外围设备数据交互顺畅准确, 保障系统整体运行。

2 基于 PLC 的智能电气控制系统整体设计

2.1 系统设计目标与性能指标确定

系统设计目标主要集中于三个核心方向, 即控制精度、响应时效和运行兼容性, 确保系统精准匹配实际控制场景操作需求, 实现对电气设备精准调控。以智能算法建模为基础, 通过构建包含输入层、隐藏层、输出层的多层级控制架构, 实现对电气系统的多维度协同管控。多层级体现为控制逻辑的分层设计, 各层级各司其职又相互联动, 输入层负责采集设备运行数据与控制指令, 隐藏层完成数据处理与逻辑运算, 输

作者简介: 覃相植 (1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电气专业及其自动化。

出层实现控制指令的精准执行；多目标聚焦系统高效性、可靠性、节能性等多重需求，兼顾设备稳定运行、能耗优化、故障预判等核心目标；多结构则指适配不同电气设备类型、运行工况的差异化控制模式，确保控制方案的灵活性与适配性^[1]。在响应时效上，要满足实时控制要求，缩短指令传输与执行过程中的延时，保障流程衔接顺畅，运行兼容性需适配不同类型外围设备和各类控制场景，降低系统拓展与应用难度，控制精度同样关键。性能指标围绕上述目标量化界定，明确控制偏差、响应时长、设备适配范围等维度标准，为系统设计及后续测试提供依据，让系统设计和测试过程有章可循。

2.2 硬件系统选型与电路拓扑结构设计

硬件选型严格依据设计目标和性能指标进行，挑选 PLC 结合控制规模和复杂程度，兼顾运算能力和扩展接口，满足多设备控制需求。传感器选型适配信号采集类型，确保精准捕捉设备运行状态物理量并转化为稳定可识别电信号，接触器选择根据负载类型和功率，保障开关动作可靠性和耐用性。电路拓扑结构采用模块化设计，将输入电路、输出电路和电源电路分离布局，明确各模块连接关系和信号流向。设计时加强安全防护，设置浪涌吸收、过载保护等功能，将强电与弱电线路分离布置以减少干扰，建立安全稳定、易于维护的硬件运行架构。

2.3 PLC 控制程序的逻辑设计与编写

程序设计以梯形图为核心载体，梯形图直观清晰、逻辑明确，可适配工业控制实际需求，运用模块化编程理念处理整体控制逻辑，拆分为设备启停、流程联动、故障处理等独立子程序，子程序模块功能清晰，便于调试与维护。程序编写注重 I/O 信号集中编址与统一分配，对定时器、计数器和内部继电器规范编号以规避冲突^[2]。增强流程联动逻辑，利用自锁、互锁电路保障设备操作安全与顺序，实现多设备运行，精简冗余逻辑，调整指令执行顺序提升程序运行效率，确保系统精确响应控制需求，实现自动化流程稳定运转。

2.4 人机交互界面与监控模块设计

人机交互界面运用可视化设计，布局简洁直观，呈现设备运行状态、参数数据及故障信息，便于操作人员迅速掌握系统状况，界面设有参数调整、指令下发等操作按钮，操作逻辑清晰，降低使用难度。监控模块具备实时数据采集、运行状态监测及异常告警功能，实时采集设备电压、电流、运行位置等数据并动态更新至界面；以状态指示灯、数据曲线等形式直观

展现设备运行状态，跟踪控制指令执行情况。系统发生故障或参数超限时，触发声光告警，界面显示故障位置和原因，系统支持历史数据查询和故障追溯，为系统维护提供数据支撑。

3 PLC 智能电气控制系统性能优化策略

3.1 PLC 控制算法的优化设计与改进

控制算法优化着眼于 PID 参数整定和模糊控制算法改良，目标是提升控制精确性和动态响应能力，PID 参数设定采用自适应调节方式，根据系统运行状态实时动态修正比例、积分、微分参数，避免固定参数造成控制滞后或超调。模糊控制算法模拟人类决策逻辑处理复杂工况下的非线性、不确定性问题。通过神经网络算法模拟人类神经系统的信息处理模式，将电气设备的运行数据转化为单个神经元节点，构建辅助测算模型并计算连接权值，形成动态化的数据处理结构。基于该模型将故障识别诊断、异常位置标定、运行负荷监测等辅助应用内容，转化为可执行的应变指令，建立循环性指令群组，实现对电气系统的持续性监测与多层级调控。同时，结合数据采集与预处理技术，通过清洗、筛选、去噪等环节确保数据可靠性，为多目标、多结构控制的精准落地提供数据支撑^[3]。将其与 PID 控制结合形成模糊 PID 复合控制模式，保留 PID 控制精确性，增强系统对复杂环境适应力，结合系统建模数据优化算法结构，简化冗余运算步骤，确保算法在 PLC 中高效运转，实现对电气设备快速、精准调控，适应不同负载与工况动态变化要求。

3.2 硬件系统的能耗与稳定性优化方案

硬件优化以“降能耗、提稳定性”为核心目标，围绕参数动态调整和电路冗余设计两大方面，辅以元器件选型和散热结构升级，构建高效可靠的硬件运行体系。参数调整要精准匹配系统负载特性，基于实时数据动态调节核心参数。具体而言，电源模块按需优化输入输出电压、电流阈值，避免轻载冗余功耗和重载性能不足，执行机构调控运行频率、启停时序，与负载需求精准契合，从源头减少无效能耗，建立负载—参数匹配模型，实现不同工况自适应调节，确保硬件始终运行在高效区间。电路冗余设计保障稳定性，PLC 控制器、电源模块等组件采用“主备双单元”配置、独立备份电路与快速切换机制，单一组件故障时，备份单元无缝接替，避免系统中断，适应工业连续作业需求，冗余电路隔离设计，杜绝主备单元相互干扰，保障整体电路稳定。元器件优先选用低功耗、高可靠性的工业级产品，如宽温域低静态功耗芯片、高耐磨

抗氧化接口部件,降低运行损耗,散热设计采用“分区布局+结构优化”策略,按发热功率分区摆放组件,使高发热组件远离敏感部件,增加散热鳍片、优化风道、搭配低功耗静音风扇,控制设备工作温度,减缓老化速率,延长硬件寿命,保障系统长期稳定运行。

3.3 程序冗余优化与响应速度提升方法

程序优化工作主要围绕冗余精简和指令逻辑优化两方面展开,目的是缩短控制指令响应时长。从冗余精简角度,采用结构化编程思路梳理程序逻辑流程,删除重复判断、无效循环等冗余代码,合并功能相近的子程序,减轻 PLC 运算负担。在指令逻辑优化方面,优先用高效功能指令替换复杂逻辑组合,优化指令执行逻辑,调整指令执行顺序,将高频调用的指令模块置于程序前端,提高指令检索与执行效率,规范变量与数据存储方式,集中分配存储地址,降低数据读取与写入延时。避免不必要的 I/O 信号频繁交互,使用内部寄存器暂存中间数据,减少外部信号传输对响应速度的影响,确保系统快速响应控制需求^[4]。

3.4 系统抗干扰能力的优化设计

抗干扰优化综合采取电磁屏蔽、接地处理、信号滤波等措施提升系统对复杂环境的适应能力。电磁屏蔽把 PLC 主机和控制模块置于金属屏蔽柜,信号传输采用屏蔽电缆,降低空间电磁辐射干扰。接地处理采用统一接地方式,把电源接地、信号接地和保护接地整合为统一接地系统,规避不同接地方式产生的电位差干扰。信号滤波在输入输出电路增设滤波元件,滤除电源与信号线路中的高频干扰信号,稳固信号传输质量,优化布线规则,使强电与弱电线路保持安全间距,避免平行铺设,减少线路间的耦合干扰,保障系统在复杂工业环境稳定传输数据和执行控制指令。

4 系统设计与优化效果验证

4.1 测试平台搭建与数据采集分析

搭建实验平台时,参照实际工业场景复刻硬件连接逻辑,整合 PLC 控制器、高精度检测元件、适配型执行机构等核心硬件,然后接入优化后的控制程序与人机交互界面,构建闭环测试系统,这是整个实验的基础。测试方案包含功能与性能两方面,功能测试涉及正常运行、异常触发等场景,考察设备启停、流程联动、故障报警等核心功能的完备性,这关乎设备稳定运行,性能指标测试运用专业测试工具采集数据,着重分析控制精度是否契合预设标准、响应时效能否满足实时控制要求,监测系统持续运行的稳定性和抗干扰性能,之后整理测试数据,排查功能实现缺陷和

性能指标偏差,这些数据为效果验证提供支撑。通过多周期、多工况测试流程模拟不同负载与环境条件,梳理测试数据,排查功能逻辑漏洞与性能瓶颈,保障实验准确有效。

4.2 优化前后运行效果对比验证

仅就控制精度、响应时效、稳定性与能耗四大核心维度进行对比验证。优化后系统控制精度经参数偏差实测值验证,可精准契合设备运行参数阈值,响应时效上指令传输与执行延时减少、流程衔接顺畅,稳定性方面硬件冗余设计可实现故障无缝切换、抗干扰措施能减轻信号波动影响、降低复杂环境下系统故障发生概率、提升持续运行能力,相较于优化前系统能耗降低^[5]。这证实了优化策略实用性,通过精准调控参数、改进指令传输与执行机制、提高硬件容错与抗干扰能力、降低能耗等方式,改变系统控制精度、响应时效、稳定性和能耗指标,系统整体运行效果符合设计预期。

5 结束语

本文围绕 PLC 智能电气控制系统设计与优化展开,从理论基础入手,明确 PLC 工作机制、硬件架构及通信协议适配原理。在此基础上,完成包含硬件选型、程序编写、人机界面设计等方面的整体方案,提出综合策略,涵盖算法改进、硬件改良、程序精简以及抗干扰设计。经实验测试和对比验证,优化后的系统在控制精度、响应速度、稳定性和节能性等方面得以提升。构建“理论支撑—整体设计—优化—效果验证”完整体系,该体系解决了传统电气控制系统控制不精确、响应迟缓、稳定性欠佳等问题,改善了传统电气控制系统性能指标,为同类系统研发与升级提供实践思路,推动工业电气控制范围智能化发展。

参考文献:

- [1] 张苏友.基于群智能优化算法的电气控制系统设计[J].电气技术与经济,2025(12):354-356,364.
- [2] 王云升.电气设备智能控制方案的设计与系统优化研究[J].中国高新科技,2025(24):34-35,38.
- [3] 戴莹,伏杰,徐书洋.电气工程中的智能控制系统设计与优化研究[J].电子元器件与信息技术,2024,08(10):239-241.
- [4] 董俊峰.基于智能控制的电气系统设计与优化方法[J].电气时代,2024(07):111-113.
- [5] 吴昊,赵旭,陈磊,等.智能工厂自动化产线电气控制系统优化设计及应用[J].汽车工艺师,2022(03):8-13.

电气工程中电气自动化技术的智能化发展研究

王立志, 朱桂伟

(青岛雅合科技发展有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 电气自动化技术作为电气工程的核心支撑, 其智能化升级不仅能大幅提升电力生产、传输、控制及运维的效率与精度, 还能破解传统电气系统能耗高、响应慢、运维难等突出问题。本文基于电气工程发展现状, 系统分析电气自动化技术智能化发展的核心内涵与核心价值, 剖析当前智能化发展过程中存在的技术瓶颈、人才短缺、标准不统一等问题, 结合具体应用场景探究智能化技术的实践路径, 最后对未来发展趋势进行展望并得出结论。研究表明, 电气自动化技术的智能化发展是推动电气工程高质量发展的必然趋势, 通过技术创新、人才培育、标准完善等举措, 可实现电气系统的高效化、精准化、安全化运行。

关键词 电气工程; 电气自动化; 智能化发展; 人工智能; 运维管理

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.009

0 引言

电气工程作为能源供给、工业生产、民生保障的核心领域, 其发展水平直接关系到社会经济的高质量发展与国家能源安全。电气自动化技术自诞生以来, 始终是推动电气工程升级的核心动力, 从早期的继电保护、自动控制, 到中期的PLC编程、分布式控制, 逐步实现了电气系统的自动化运行与基础调控。近年来, 全球能源转型加速推进, 新能源发电(风电、光伏等)大规模并网、工业设备智能化升级、用户用电需求多元化等新形势, 对电气自动化技术提出了更高要求。传统自动化技术依赖固定程序与人工干预, 难以适配复杂多变的运行场景, 在能耗优化、故障预警、精准调控等方面存在明显局限。在此背景下, 融合人工智能、大数据、物联网、边缘计算等技术的智能化发展方向, 成为电气自动化技术突破瓶颈的核心路径。电气自动化技术的智能化, 核心是通过引入智能算法与感知技术, 实现电气系统的自主决策、自适应调节、自诊断修复, 无需人工干预即可应对复杂运行工况。

1 电气工程中电气自动化技术智能化发展的价值

电气自动化技术的智能化升级, 为电气工程领域带来多方面核心价值, 助力行业突破传统发展瓶颈。其一, 提升运行效率与精度, 智能算法可实现电气系统的动态优化调控。例如: 在电力传输过程中, 智能调度系统可根据负荷变化实时调整传输参数, 降低线损率, 相较于传统自动化技术, 运行效率可提升15%~

25%, 调控精度提升至毫秒级; 其二, 降低能耗与运维成本, 智能化技术可实现能耗的实时监测与精准优化, 减少无效能耗, 同时通过故障预警与远程运维, 大幅降低人工巡检成本与故障停机损失, 根据实践数据, 智能化改造后电气设备运维成本平均降低30%以上, 能耗降低10%~18%; 其三, 强化安全稳定运行能力, 智能诊断系统可提前识别设备老化、线路故障等安全隐患, 发出预警并自动采取防护措施, 避免故障扩大, 提升电气系统的抗干扰能力与应急处置能力; 其四, 适配多元应用场景, 智能化技术可灵活适配新能源并网、工业智能制造、智能建筑等多元场景的需求, 解决传统自动化技术适配性不足的问题, 推动电气工程与新兴领域的协同发展^[1]。

2 电气工程中电气自动化技术智能化发展的现状与突出问题

2.1 发展现状

当下, 在我国电气工程中, 电气自动化技术朝着智能化方向发展, 已然取得了具有阶段性的成果, 并且在多个细分的领域能够实现规模化的运用。在电力系统中, 智能电网的建设会持续地向前推进, 如智能变电站、智能调度系统、远程运维平台这类智能化的设备以及系统可被广泛应用, 从而能够实现电力生产、传输、配电整个流程的智能化管控。例如: 国家电网智能调度中心能够做到在全国范围之内对电力负荷开展实时的监测以及智能的调度; 在工业制造领域, 智

作者简介: 王立志(1978-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电气设备智能化开发与调试、安装。

能电气控制系统和工业机器人、物联网平台深度融合，能够实现生产过程的自动化以及智能化。例如：汽车制造企业可借助智能化电气控制系统，能够实现生产线的动态调整以及精准控制，使生产效率大幅度地得到提升；在建筑电气领域，智能配电系统、智能家居控制系统等被广泛地应用，能够实现建筑内电气设备的集中管控以及能耗的优化，进而提升居住的舒适度以及能源的利用效率^[2]。

与此同时，该行业当中技术创新活动与产业布局活动一直在推进着，众多企业以及科研机构能够加大对智能化技术开展研发工作的投入，成功突破了一批核心方面的技术。例如：高压设备执行智能诊断工作的技术、电力负荷开展预测工作的算法、数字孪生构建电气系统的技术等，能够推动智能化设备朝着高可靠性、低成本、小型化的方向发展。除此之外，政策所给予的支持力度会持续加大，国家先后出台了《“十四五”能源领域科技创新规划》《智能制造 2025》等政策，明确地提出要推动电气自动化技术实现智能化的升级，会支持智能电网、智能电气设备等领域开展技术研发工作以及进行应用推广工作，为智能化发展提供良好的政策方面的环境^[3]。

2.2 突出问题

虽然电气自动化技术朝着智能化方向发展获得了颇为显著的进展，然而在实际操作过程中仍面临着诸多十分突出的问题，其主要体现在以下几个方面：

一是核心技术自主创新能力不足。我国电气自动化以及智能化领域，核心的技术大多会依赖进口的。例如：高端智能传感器、核心芯片、智能算法模型等是会被制约的。国内的企业大多是可进行集成应用的，却会缺乏底层技术研发的能力。这致使智能化设备的可靠性、稳定性和国际先进水平之间存在差距。与此同时，核心技术进口的成本是比较高的，会增添企业智能化改造的负担。二是复合型人才供给严重短缺。电气自动化朝着智能化方向发展，要求既掌握电气工程专业知识、自动化控制技术这些内容，还熟悉人工智能、大数据、物联网等先进技术复合型人才。当下，行业内现存的从业人员大多擅长传统电气自动化技术，然而数字化、智能化技能方面存在不足，难以适应智能化设备的运维以及研发方面的需求；高校和职业院校相关专业的设置与行业需求出现脱节情况，课程体系更新难以做到及时，人才培养的针对性缺乏强劲力度，由此导致复合型人才供给表现出不足状态，供应与需求之间的矛盾十分突出^[4]。三是行业标准与规范

不统一。电气自动化智能化领域涉及诸多细分场景以及技术方向。就目前而言，行业中缺少统一的技术标准、数据接口相关规范以及安全事项标准。不同企业的生产智能化设备、不同领域的智能化系统之间兼容性较差，数据难以做到互联互通，进而造成“信息孤岛”。四是安全防护体系不完善。电气自动化智能化系统依赖着网络进行传输、数据存储，面临网络遭受攻击、数据出现泄露、系统陷入瘫痪等安全方面的风险。当下，部分企业对于智能化系统的安全防护重视程度不够，缺乏完善的安全防护技术以及管理制度。例如：防火墙设置、数据加密等防护措施落实不到位。

3 电气工程中电气自动化技术智能化发展的实践路径

针对当前电气自动化技术智能化发展存在的突出问题，结合行业发展需求与技术趋势，从技术创新、人才培养、标准完善、安全防护四个维度提出针对性的实践路径，推动电气自动化技术智能化高质量发展。

3.1 强化核心技术自主创新，突破技术瓶颈

智能化发展由核心技术自主创新提供核心支撑，可构建一种创新体系，此体系呈现“企业主导、科研引领、产学研融合”之态。一方面，加大对核心技术研发在资金与人才方面的投入，聚焦电气自动化领域的关键核心环节，如高端智能传感器、核心控制芯片、智能算法模型、数字孪生技术等，组织企业和科研机构开展集中攻关，重点突破高精度感知、高效运算、智能调控等技术难题，可提升核心技术自主可控的水平。例如：开展适用于高压电气设备、复杂工业场景的高精度智能传感器的研发工作，优化电力负荷预测、设备故障诊断、系统智能调控等核心算法，能提升算法的准确性、实时性以及响应速度，满足智能化应用的核心需求。另一方面，可深化产学研深度融合，搭建常态化合作平台，能促进高校、科研机构与行业企业进行资源整合、技术对接以及人才共育，加快科研成果从实验室向产业应用的转化进程，将先进技术快速转化成具备市场竞争力的实际应用产品与解决方案。例如：高校与企业联合开展智能电气控制系统、自动化运维平台等的研发工作，可快速应用于工业制造、电力系统、新能源等重点场景，能提升智能化应用实效^[5]。

3.2 完善复合型人才培育体系，强化人才支撑

围绕人才供需矛盾，构建“高校培养+企业培训+人才引进”三位一体的复合型人才培育体系。一是优化高校人才培养模式，高校与职业院校调整相关专业设置，增设人工智能、大数据、物联网、智能电气控

制等核心课程,构建“理论+实践”一体化教学体系,加强实践教学环节,与企业共建实训基地,提升学生的实践操作能力与岗位适配能力。二是加强企业内部人才培养,企业建立常态化培训机制,定期开展智能化技术、智能设备运维等专项培训,提升现有从业人员的数字化、智能化技能,适应岗位需求。三是加大高端人才引进力度,出台针对性的人才引进政策,优化薪资待遇、职业发展空间等,吸引国内外高端智能化技术人才与电气自动化专业人才加入,弥补行业人才缺口,为智能化发展提供坚实的人才支撑。

3.3 统一行业标准规范,推动协同发展

政府部门、行业协会与企业协同发力,加快完善电气自动化智能化领域的标准规范体系。一是建立统一的技术标准与数据接口规范,由行业协会牵头,组织企业、科研机构参与,制定智能电气设备、智能化系统的技术标准、性能指标、数据格式与接口规范,确保不同企业、不同领域的设备与系统之间兼容性与互联互通性,打破“信息孤岛”。二是完善安全标准与管理制度,制定智能化系统的网络安全、数据安全、设备安全等标准规范,明确安全防护要求与责任划分。三是加强标准的推广与执行,政府部门加强对标准执行情况的监督检查,鼓励企业严格按照标准生产与应用,推动智能化技术的规范化、规模化发展。

3.4 构建全方位安全防护体系,保障安全运行

在电气工程智能化发展进程中,聚焦智能化系统的安全风险,构建“技术防护+制度保障+应急处置”全方位安全防护体系。一是强化技术防护措施,企业在智能化系统建设过程中,采用先进的安全防护技术,如部署防火墙、入侵检测系统、数据加密技术等,加强对网络传输、数据存储、设备运行等环节的安全防护;定期开展智能设备与系统的漏洞检测与修复,及时更新安全补丁,提升系统的抗攻击能力。二是完善安全管理制度,建立健全智能化系统安全管理规章制度,明确安全管理责任,加强对从业人员的安全培训,提升安全意识与操作规范。三是建立应急处置机制,制定网络攻击、系统瘫痪、数据泄露等突发事件的应急预案,定期开展应急演练,提升应急处置能力,确保电气系统在突发情况下能够快速恢复正常运行。

4 未来发展趋势

随着先进技术的持续迭代与行业需求的不断升级,电气工程中电气自动化技术的智能化发展将呈现三大趋势。一是去中心化与协同化,依托物联网与边缘计

算技术,构建分布式智能电气系统,实现各节点的自主决策与协同运行,提升系统的灵活性与可靠性,适配新能源并网等多元场景需求。二是数字化与可视化,数字孪生技术将广泛应用于电气系统,构建虚拟数字模型,实现电气设备运行状态的全流程可视化监测与模拟仿真,为优化调控与运维管理提供精准支撑。三是绿色化与高效化,智能化技术将与绿色能源技术深度融合,实现电气系统能耗的精准优化与绿色能源的高效利用,推动电气工程向低碳化、绿色化方向发展,助力“双碳”目标实现。

5 结束语

当前,我国电气自动化技术智能化发展已收获阶段性成果,在多个细分领域实现规模化应用,但仍面临核心技术自主创新不够、复合型人才匮乏、标准不统一、安全防护不完备等突出难题,限制了它的深度推广和应用。推动电气自动化技术智能化高质量进步,需要政府、企业、高校、科研机构等多方一同发力,通过加强核心技术自主创新、健全复合型人才培育体系、统一行业标准规范、构建全方位安全防护体系等措施,解决发展难题,优化应用途径。电气自动化技术智能化发展是电气工程领域适应新时代发展需求的必然趋向,其核心是通过融合先进技术实现电气系统自主决策、精准调控以及安全运行,为行业高质量发展注入强大动力。未来,随着技术创新不断推进、行业生态持续完善,电气自动化技术智能化水平会持续提高,与绿色能源、智能制造等领域融合会愈发深入,不但可极大地提高电气系统运行效率以及安全性,还能够为社会经济高质量发展和国家能源安全提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 施焕健. 电气工程自动化的智能化技术应用与研究[J]. 科学与信息化, 2025(01):120-122.
- [2] 王深明. 电气工程自动化中智能化技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(07):133-135.
- [3] 刘朋, 张永林, 刘文君. 电气工程及其自动化的智能化技术应用[J]. 中国科技纵横, 2025(11):51-53.
- [4] 肖国安. 电气工程自动化控制中智能化技术的应用[J]. 今日自动化, 2025(11):123-125.
- [5] 袁挺. 电气工程自动化控制中智能化技术的应用探究[J]. 科技资讯, 2025, 23(11):50-52.

基于数字孪生的铁路供变电设备故障预测方法

蔡肃攀

(中铁建电气化局集团第四工程有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要 供变电设备的稳定性对铁路系统的安全性至关重要, 传统的设备故障预测方法存在精度低、响应慢等问题, 难以满足现代铁路系统的高效运维需求。基于数字孪生技术的故障预测方法, 通过实时监测设备运行状态并结合虚拟仿真模型, 能够提前预测潜在故障并优化维护策略。该方法通过数据采集、预处理与机器学习模型相结合, 提高了故障预测的准确性和实时性。实验结果表明, 数字孪生技术在提升铁路供变电设备故障预测精度、减少设备停机时间、降低运维成本等方面具有显著优势, 为铁路供电系统的智能化管理提供有效的解决方案。

关键词 数字孪生; 故障预测; 铁路供变电设备; 数据分析; 机器学习

中图分类号: U22; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.010

0 引言

铁路供变电设备承担着为整个铁路系统提供电力的重任, 其稳定性直接关系到铁路运输的安全与效率。随着设备运行时间的增长, 故障发生的概率也逐渐增大。传统的故障预测方法往往依赖于经验判断, 缺乏准确性与时效性。近年来, 数字孪生技术的应用为设备故障预测提供了新的思路。通过实时构建设备的虚拟模型并与实际设备进行数据交互, 数字孪生可以精准监控设备的运行状态, 并基于大数据分析和机器学习算法, 提前识别潜在故障, 优化维护方案, 降低设备故障的发生率。数字孪生的应用, 正逐步改变铁路供变电设备的管理模式, 提高了铁路电力系统的可靠性。

1 铁路供变电设备故障预测面临的挑战

1.1 设备运行状态的多变性

铁路供变电设备在长时间运行过程中, 其工作环境和负载情况会发生变化, 尤其在复杂的气候和负荷波动下, 设备的工作状态呈现出高度不确定性。设备的老化、外部冲击等因素, 都会影响其正常运行, 导致设备性能逐渐下降。为了实时捕捉这些变化, 传统监控手段显得力不从心, 难以全面反映设备的微小故障征兆。因此, 如何准确地获取设备在不同工况下的动态数据, 成为预测故障的核心挑战。

1.2 传统故障预测方法的局限性

传统的故障预测方法多依赖于历史经验和定期检测, 无法及时捕捉到设备潜在的异常状态。在故障发生前, 往往难以提前识别出具体的故障模式, 导致维修

和预防措施滞后, 影响铁路系统的可靠性和安全性^[1]。传统方法对设备个体差异和非线性行为的处理能力有限, 无法适应复杂的供电环境与设备状态。结合现代数据分析技术的需求, 传统方法的局限性愈加显现, 亟需通过新技术来提升其预测精度和时效性。

1.3 数字化转型的紧迫性

随着智能化技术和数字化管理的广泛应用, 铁路行业亟需加速设备管理模式的转型。数字化转型不仅能够提高设备监控精度, 还能通过大数据分析对设备运行状况进行更全面的评估。供变电设备的数字化转型, 是提高设备故障预测能力、优化维修策略的重要途径。通过引入数字孪生技术, 能够实时对设备状态进行虚拟仿真, 为故障预测提供更多的依据。铁路供变电设备的管理系统逐步走向自动化、智能化, 数字化转型已经成为提升系统可靠性和安全性的迫切需求。

2 数字孪生技术的原理与应用

2.1 数字孪生模型的构建

数字孪生模型的构建是基于物理设备的虚拟映射, 通过对设备的几何结构、工作参数以及环境因素的数字化建模, 创建其虚拟孪生体。此过程依赖于大量的实时数据输入, 来自设备传感器和外部监测系统, 通过数据融合与计算建模, 生成精确的数字双胞胎模型。该模型不仅模拟设备的物理属性, 还能够反映设备的运行特性和状态变化。通过集成物联网 (IoT) 技术、数据处理与大数据分析, 数字孪生能够实现实时同步和动态更新, 为后续的故障预测与性能优化提供坚实的基础。

作者简介: 蔡肃攀 (1994-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 铁路电气化。

2.2 设备实时监控与数据采集

设备的实时监控通过传感器和数据采集系统实现。每个供电设备都被装配了多种传感器，实时采集电压、电流、温度、压力等关键参数。这些数据通过无线通信网络或有线传输方式送入中央数据处理系统^[2]。数据采集不仅仅局限于常规监测数据，还包括环境监控、设备振动、噪声等多维度信息，通过这些细化的监控手段，能够全面、持续地跟踪设备的健康状况。集成化的监控系统不仅提高了数据的实时性与准确性，还加强了对设备异常状态的即时响应能力，确保系统的高效运转。

2.3 虚拟仿真与实际运行的结合

虚拟仿真与实际运行的结合是数字孪生技术中的重要环节。通过将仿真模型与实际设备的运行数据对接，可以模拟设备在不同工况下的表现，预测设备在特定条件下的运行状况。虚拟仿真提供了一个安全、可控的环境来测试设备在极端条件下的行为，避免了实际操作中的风险。在此基础上，仿真结果可与实际设备的运行状态进行对比校验，从而不断优化模型的精确度和预测能力。通过这种结合，数字孪生能够动态调整设备的运行参数，优化系统性能，减少因设备故障带来的影响。

3 基于数字孪生的故障预测方法

3.1 数据采集与预处理

数据采集是数字孪生技术应用中的关键步骤，尤其在故障预测过程中扮演着至关重要的角色。铁路供电设备在运行过程中产生的各类信息，如电压、电流、温度、振动、噪声等，通过安装在设备上的传感器进行实时采集。这些数据通常呈现出高维、多变量、时序性强等特征，如何从中提取出有效的特征数据并进行清洗，是确保后续预测模型准确性的基础。数据预处理环节包括噪声过滤、缺失值处理、异常值检测、数据归一化等多项操作，旨在提高数据的质量与一致性。在这一过程中，常用的技术包括时序数据插值方法、滤波器设计以及基于统计学和机器学习的异常检测方法。高质量的数据输入有助于构建更加精确和可靠的数字孪生模型，为后续的故障预测打下坚实的基础。

3.2 机器学习模型的应用

机器学习在基于数字孪生的故障预测中发挥着关键作用。通过对历史数据进行训练，机器学习算法能够识别出设备运行中的潜在模式和隐含关系，从而实现对未来故障的预测。在故障预测系统中，常见的机器学习方法包括监督学习、无监督学习和强化学习等^[3]。

监督学习方法，尤其是决策树、支持向量机（SVM）、随机森林等模型，能够根据已标记的历史数据对设备的故障模式进行分类预测；而无监督学习方法，如K均值聚类和主成分分析（PCA），则能够在没有标签数据的情况下，发现数据中的异常趋势并识别潜在故障。深度学习方法，如神经网络、卷积神经网络（CNN）和长短期记忆网络（LSTM），在处理复杂的时序数据时展现出强大的优势，能够自动学习设备运行中的非线性特征及其变化规律。通过对模型的不断优化和调整，机器学习算法能够在多变的运行环境中提供高效的故障预测能力。

3.3 故障诊断与预测精度分析

故障诊断是故障预测中的核心环节，旨在通过分析设备的状态信息，识别出可能的故障源并确定其类型。在数字孪生系统中，诊断过程通常基于实时数据和历史数据的比较，通过与正常运行状态的偏差进行对比，判定设备是否发生了故障。当设备运行状态出现异常时，故障诊断模块可以根据诊断结果定位问题，并给出可能的故障类别，如电气故障、机械故障或环境因素影响等。故障预测精度的高低直接关系到系统的有效性与可靠性。在预测精度分析中，常用的评估指标包括准确率、精确度、召回率和F1分数等，评估机器学习模型在预测故障时的表现。为了进一步提高预测精度，可以采用集成学习方法，通过多种预测模型的结合，提高预测结果的稳定性与准确性。故障预测模型的更新与迭代也是提升预测精度的关键步骤。通过结合更多的设备运行数据以及新的诊断方法，模型能够不断优化，逐渐适应设备在不同工况下的表现，提高整体预测的精准度。

4 案例分析与实验验证

4.1 实验设置与数据来源

在进行故障预测模型的验证过程中，实验设置的合理性与数据来源的准确性至关重要。为了确保实验具有代表性，选取了具有典型性的铁路供电设备，涵盖了不同型号、不同运行环境和不同负载情况的设备进行测试。实验中的数据来源主要依托现场传感器采集的实时数据，包括电流、电压、温度、振动、设备负荷等参数。为了保证数据的全面性，实验同时引入了设备的历史运行数据，涵盖了设备的维护记录、故障历史以及环境变化因素。数据采集系统采用高频采样率，以获取精确的设备状态信息。通过多层次的数据采集和融合，不同设备的运行数据能够为后续的模型训练提供丰富的样本，确保实验具有较高的信度与代表性。

4.2 故障预测模型的验证

在实验过程中,为了验证故障预测模型的效果,采用了多种机器学习算法,涵盖了传统的统计模型以及近年来广泛应用的深度学习算法。对于每一种算法,都在实验设置中进行了充分的训练和调试,以确保模型能够适应设备的实际运行状况。在验证阶段,通过模拟不同类型的故障情况,如设备过载、短路、老化等,对设备进行故障注入。将设备的运行数据与预测结果进行对比,检验模型的预测能力^[4]。还引入了交叉验证的方法,确保模型在不同数据集上的泛化能力。通过对比模型预测结果与实际故障发生时间点,进一步评估故障预测的准确性和响应时效性。在验证过程中,通过不断调整和优化算法的超参数,力求提高模型的准确性,并减少误报和漏报的情况。

4.3 实验结果与性能评估

实验结果表明,基于数字孪生的故障预测模型能够有效地识别设备的潜在故障,并提前给出预警。在多轮测试中,采用的深度学习模型,如长短期记忆网络(LSTM)和卷积神经网络(CNN),表现出了较高的准确率和预测精度。具体来说,LSTM模型在时序数据的处理上具有显著优势,能够捕捉到设备运行状态的长时间依赖关系,显著提高了故障预测的准确性。性能评估结果表明,模型的精确度和召回率均超过了传统机器学习方法,如支持向量机(SVM)和随机森林(RF)。基于数字孪生的故障预测方法在实时性上也有较大的提升,能够在设备故障发生之前提前若干小时或几天发出预警。通过对实验结果的综合评估,模型在实际应用中的表现出色,尤其是在减少设备停机时间、优化维护策略方面,具有明显的实际应用价值。

5 数字孪生技术在铁路供变电设备中的应用前景

5.1 技术发展趋势

数字孪生技术在铁路供变电设备中的应用正逐步从基础的数据监控向更复杂的故障预测与智能决策系统转变。随着人工智能、物联网、云计算和大数据技术的融合,数字孪生模型将更加智能化、实时化。未来,数字孪生技术能够实现全生命周期管理,对设备从安装、运行到维护、退役等各阶段进行全面监控与分析。随着5G技术的普及,设备之间的实时通信将更为高效,数据传输速率和处理能力将进一步提升,从而使得故障预测的精度和响应速度得到显著增强。随着技术的发展,数字孪生还将支持更加复杂的多设备协同预测,为铁路供变电系统提供更加全面和高效的运维支持。

5.2 面临的技术难点与解决方案

尽管数字孪生在铁路供变电设备中的应用前景广阔,但在实际部署过程中仍然面临一些技术难题。设

备的传感器数据质量参差不齐,存在噪声、缺失值等问题,如何保证数据的准确性和完整性是一个关键挑战。为此,数据清洗和预处理技术将成为解决这一问题的关键手段^[5]。设备运行环境复杂且多变,导致传统的建模方法难以精确反映实际情况。采用先进的建模方法,如深度学习和自适应建模技术,能够提高模型的灵活性和准确性。数据安全与隐私保护也是必须考虑的问题,在云平台 and 边缘计算的结合下,通过加密技术和安全协议的优化,能够有效解决这些隐患。

5.3 未来发展方向与应用潜力

数字孪生技术在铁路供变电设备中的应用潜力巨大,未来其发展将与智能铁路系统的建设紧密结合。随着智能化技术的发展,数字孪生不仅能够实现设备状态的监控和故障预测,还可以在系统层面进行优化决策,提升整体运营效率。预计未来的数字孪生系统将能够实现设备故障的自诊断和自动修复,大幅降低人工干预和维护成本。随着技术的成熟,数字孪生将从单一设备管理向多维度的铁路系统管理扩展,实现跨设备、跨系统的数据协同和智能决策,为铁路运输安全和高效运行提供强有力的支持。

6 结束语

数字孪生技术在铁路供变电设备中的应用展现出巨大的发展潜力,随着智能化和数字化技术的不断进步,故障预测与设备管理将更加高效与精准。通过集成传感器、机器学习与大数据分析,数字孪生能够显著提升铁路供变电系统的安全性与可靠性。未来,随着技术的不断成熟,数字孪生技术将在铁路系统的智能化运维中发挥更加重要的作用,为保障铁路运输的稳定性和高效性做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 苏斌.基于数字孪生的变电设备状态评估与预测性维护策略研究[J].自动化应用,2025,66(S1):315-318.
- [2] 邵小宁,王相坤,杨思炎.基于数字孪生的变电站设备状态预测与健康管理系统开发[J].现代工业工程,2025(11):8-10.
- [3] 勾安东.基于数字孪生的变电站设备预测性维护方法分析[J].电力设备管理,2025(09):200-202.
- [4] 王杜,吴兴中.基于数字孪生技术的新能源输电设备状态预警与故障诊断方法研究[J].科技资讯,2025,23(03):77-80.
- [5] 张俊尧,郭鹏飞,智鹏,等.基于数字孪生的铁路电力设备智能运维管理系统研究与设计[J].电工技术,2025(18):120-124.

火电厂发电机运行故障分析与智能诊断技术研究

左益龙

(深圳瑞莱保核能技术发展有限公司嘉兴分公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要 在火电机组长期连续运行的情况下, 发电机运行异常呈现多参数渐进偏移与状态耦合特征, 传统依赖人工巡检与单参数阈值的诊断方式难以及时识别风险演变。本文围绕发电机运行状态感知与故障识别需求, 依托运行监测数据, 对常见异常特征及其感知方式进行梳理, 分析传统诊断在响应时效与判别稳定性方面的局限, 进一步构建以多源数据融合、特征提取、模式识别与在线预警为核心的智能诊断技术框架, 以期为火电厂发电机运行管理和智能运维实践提供技术参考。研究表明, 基于多特征组合与时间窗口趋势判断的诊断方式, 有助于提前识别运行状态的持续偏移风险, 减少误报警干扰, 提高运行判断的连续性与一致性。

关键词 火电厂; 发电机运行状态; 故障特征分析; 智能诊断

中图分类号: TM62; TP27

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.011

0 引言

火电厂发电机作为机组核心设备, 运行状态直接关系到机组安全性与发电可靠性, 在长期高负荷与频繁调节工况下, 运行异常往往以参数缓慢偏移和状态关联变化的形式逐步显现, 而非表现为突发性故障, 传统运行管理中对异常的识别多依赖经验判断与阈值告警, 难以对状态演变过程形成连续感知。在监测手段数字化水平持续提高的背景下, 如何将分散的运行信息转化为可用于风险判断的状态认知, 成为目前发电机运行管理中亟需回应的现实问题。

1 火电厂发电机运行中常见故障特征分析

在火电厂长期连续运行条件下, 发电机运行状态的异常往往并非以突发性故障形式出现, 而是表现为多项运行参数的渐进式偏离与状态特征的持续变化。运行人员对异常的感知通常起始于监测数据的细微波动, 如电流幅值不稳定、振动水平缓慢抬升或温度分布出现局部偏高等现象, 这类变化在单次巡检或短周期观测中并不显著, 却在时间维度上呈现出可累积的偏移特征^[1]。受负荷调节频繁、运行工况切换及设备老化等因素影响, 发电机运行状态逐渐由相对稳定转向多参数联动变化, 异常信号不再以单一指标越限的方式被识别, 而是以组合特征的形式嵌入在正常波动区间之中。

从运行状态整体来看, 发电机常见异常多体现为

参数关联关系的改变而非绝对值的剧烈波动。例如: 在振动幅值尚未达到报警阈值时, 频谱结构已发生明显调整; 在温升水平仍处于允许范围内时, 温度变化速率与空间分布特征已显现出不均衡趋势; 在电气参数表面稳定的情况下, 电流、电压与功率因数之间的匹配关系却出现持续偏移。此类运行特征表明, 发电机故障表现正在由“单点异常”向“状态组合异常”转变, 传统依赖单参数或孤立阈值的识别方式难以及时反映运行风险的真实演变过程, 为后续诊断判断带来不稳定性(见表1)。

2 传统故障诊断方法的局限性分析

2.1 人工巡检与周期检测的响应滞后问题

在火电厂发电机长期运行过程中, 人工巡检与周期检测多依托固定时间节点开展, 判断依据主要来自当次采样或现场观察结果, 在运行参数呈现缓慢漂移或阶段性波动状态时, 异常信号被视为正常工况变化而未被及时标记, 尤其在负荷频繁调整或运行环境波动较大的情况下, 振动幅值、温升水平与电流参数虽已呈现持续偏移趋势, 但在单次检测中仍维持在允许区间, 潜在风险在多个运行周期内被反复掩盖^[2]。异常逐步累积并进入可感知阶段后, 相关参数已发生显著变化, 故障识别往往滞后于状态演变过程, 导致运维响应以事后处置为主, 压缩了调整空间也增加了运行干预的

作者简介: 左益龙(1995-), 男, 本科, 研究方向: 电厂二回路弯头部件穿孔失效原因分析。

表 1 火电厂发电机常见运行故障类型及特征表现汇总

故障类别	主要监测参数	典型特征表现	运行影响
电气绝缘相关异常	定子电流、绝缘电阻、局放信号	参数缓慢波动、局部异常信号间歇出现	运行稳定性下降，绝缘风险累积
机械振动相关异常	振动幅值、频谱特征	特征频率增强、振动结构变化	机械磨损加剧，结构可靠性降低
热状态与运行参数异常	温度、温升变化率、负荷参数	局部温升偏高、热分布不均	设备寿命缩短，安全裕度降低

被动性，设备运行安全和维护决策承受更高不确定性。

2.2 单一监测参数下故障判别准确性不足

在发电机运行监测实践中，故障判别常依赖单一关键参数进行触发判断，但在复杂工况条件下，单参数变化难以独立反映真实运行状态。在负荷调整、环境温度变化及辅助系统工况波动叠加存在的情况下，振动或温度等指标可能出现短时升高或阶段性回落，异常信号被归入正常工况扰动范围而未被有效识别。部分运行阶段中，个别参数维持相对稳定，而关联参数已持续偏移，导致监测结果与实际风险水平出现偏差。在上述情境下，故障判别结果易在误报与漏判之间反复切换，运维人员难以据此形成稳定判断依据，预警结果在运行决策中的支撑作用受到削弱。

2.3 多故障耦合工况下诊断结果失真问题

在发电机实际运行过程中，异常状态常以多种故障特征叠加的形式出现，如振动水平变化与局部温升偏高同步存在，电气参数波动与机械状态偏移相互交织，此类工况下，各监测参数受不同运行因素共同影响，异常信号在时间与幅值上相互干扰，单一特征难以被清晰识别，部分参数表现被其他波动掩盖，运行状态呈现出表面稳定而内部失衡的特征^[3]。在多重异常同时作用的情境中，诊断结果易出现偏移，风险判断与实际状态产生脱节，运维决策难以及时聚焦关键问题，运行干预的针对性与有效性受到明显制约。

3 火电厂发电机智能诊断关键技术

3.1 多源运行状态数据融合与特征提取技术

在火电厂发电机运行监测体系中，状态数据主要来源于振动、温度、电气量及运行工况等多个监测通道，这类数据分别反映设备在机械、热状态与电气运行层面的变化特征^[4]。在实际运行中，各类数据采集频率、时间尺度与波动幅度存在差异，如果直接以单源数据进行判断，难以完整刻画运行状态的整体变化趋势，运行监测通常依托统一时间轴对多源数据进行同步整理，在保持原始特征完整性的前提下，将离散参数纳入同一状

态描述框架，使不同物理量之间的关联关系得以体现。

在数据融合基础上，特征提取的重点在于选取能够反映运行状态变化的关键指标，用于表征异常累积过程。以振动信号为例，有效值可作为运行稳定性的综合反映指标，公式为：

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

式(1)中， x_i 为振动信号在第*i*个采样点的幅值，*N*为对应时间窗口内的采样点数量，该均方根指标在瞬时波动被平滑处理后，能够反映振动水平在一定时间尺度内的整体变化趋势。当该指标与温升变化率、电流波动幅度等运行特征进行同步分析时，可用于识别运行状态由正常向异常演变的早期迹象，为后续故障判别与预警判断提供相对稳定的数据基础。

3.2 基于机器学习的故障模式识别与分类方法

在火电厂发电机智能诊断应用中，机器学习模型主要承担运行状态模式识别与异常类型区分的辅助判断任务，功能侧重于对多维运行特征进行综合匹配，而非对单一参数越限情况作出直接结论^[5]。模型输入通常由振动均方根指标、温升变化率、电流波动幅度及运行负荷等特征构成，上述特征在统一时间窗口内进行组合描述，时间窗口长度多控制在 30 ~ 60 min，用于反映运行状态在一定周期内的整体特征形态，避免短时扰动对判断结果产生过度影响。

在线运行过程中，模型以固定更新周期参与状态识别，常见更新间隔控制在 1 ~ 5 min 范围内，诊断结果能够随运行状态变化持续调整，特征组合与正常运行样本的匹配度持续降低，且在连续多个更新周期内保持偏离的情况下，模型对异常趋势进行标记，并输出对应的状态类别或风险提示信息，该结果主要用于辅助区分暂态波动与持续性偏离，协助运维人员明确异常演变方向。当模型输出与运行经验判断存在差异时，可结合原始参数变化曲线进行复核，使诊断判断由经验依赖转向基于特征匹配与时间稳定性的综合分析，增强运行状态识别的稳定性与一致性。

3.3 智能预警与在线诊断系统集成技术

火电厂发电机智能诊断系统通常依托分层结构进行集成,整体由数据采集层、状态分析层与预警展示层构成。数据采集层负责接入振动、温度、电流及运行工况等在线监测信号,并在统一时间基准下完成数据整理与质量校核,使不同来源的数据保持一致的组织方式^[6]。状态分析层在此基础上调用特征处理与状态识别模块,对实时数据形成连续的运行状态描述,用于反映设备运行特征的变化轨迹,预警展示层承担结果输出与信息交互功能,将分析结果以可读形式反馈至运行与运维界面。

在线运行模式下,系统以滚动时间窗口方式对运行数据进行持续更新,状态分析结果随运行特征变化动态刷新。当特征组合持续偏离正常运行区间,且偏移幅度或持续时间达到设定条件时,系统触发预警提示,预警判断并非基于单次异常值,而是结合特征变化趋势与状态稳定性进行综合确认,使短时扰动与持续异常得以区分,相关预警信息同步关联关键参数变化情况,为运维人员提供明确的关注方向,运行干预更加关注状态变化过程,运行响应时机相应前移。

4 典型案例分析与诊断效果验证

4.1 试点电厂案例背景

华东地区某大型燃煤火电厂在推进设备运行管理数字化过程中,将智能诊断技术引入发电机运行监测环节,用于支撑运行状态分析与异常识别,该电厂机组容量较大,发电机长期处于高负荷与频繁调节工况下,运行参数波动特征明显,振动、温度与电气量之间的关联性逐步增强。在既有运行管理模式中,发电机状态判断主要依赖人工巡检与固定阈值告警,对运行状态的连续变化感知能力有限,异常识别多集中于参数明显偏离阶段,伴随设备运行年限增加,运行风险呈现出由单一参数异常向多特征耦合变化转变的趋势。

4.2 智能诊断系统应用过程

在实际运行过程中,智能诊断系统接入发电机振动、定子与轴承温度、电流及运行负荷等在线监测数据,并在统一时间基准下完成数据整理与同步处理^[7]。系统以滚动时间窗口方式对多维特征进行更新,结合历史运行数据构建正常状态参考区间,用于描述设备在稳定工况下的运行特征分布,运行过程中状态分析模块持续对特征组合进行比对,特征变化呈现出稳定偏移趋势时,系统对异常演变方向进行标记。

诊断结果并未直接形成故障结论,而是以状态提示与风险标识形式反馈至运行界面,并同步关联关键参数变化曲线,辅助运行人员快速理解异常来源。针

对模型输出与运行经验存在差异的情形,系统支持回溯原始数据进行复核,判断过程保持可解释性,伴随运行数据不断积累,诊断模型与参考区间同步更新,系统对发电机运行状态的识别逐步贴近实际工况,为后续运行调整与维护决策提供持续支撑。

4.3 系统运行效果与对比分析

从实际运行效果看,智能诊断系统投入使用后,发电机异常识别方式由依赖单参数越限转向基于多特征组合的状态判断。在既有运行管理模式中,系统能够在参数尚未明显越限阶段识别出持续偏移趋势,运行人员提前关注潜在风险区域,告警触发逻辑由瞬时波动判断转为趋势与持续性综合确认,运行过程中误报警干扰明显减少,异常提示的针对性得到增强。

在运维响应层面,智能诊断结果为运行人员提供了明确的核查方向,现场干预更具针对性,避免了频繁的被动排查。整体来看,该系统在不改变原有运行流程的前提下,提高了运行状态感知的连续性与稳定性,体现出多源数据与智能诊断技术在火电厂发电机运行管理中的应用潜力。

5 结束语

以运行状态整体感知为导向,将多源监测信息纳入统一分析框架,有助于使异常识别由被动响应转向过程性判断。实践表明,基于特征组合与趋势判据的智能诊断方式,能够增强运行风险识别的前瞻性与稳定性,运维决策更加贴合实际工况。相关探索为火电厂发电机运行管理向智能化、精细化发展提供了具有现实意义的技术路径。

参考文献:

- [1] 赵春晖,胡赞昀,郑嘉乐,等.数据驱动的燃煤发电装备运行工况监控:现状与展望[J].自动化学报,2022,48(11):2611-2633.
- [2] 汤嘉祥.火电机组典型设备运行状态智能监测方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2023.
- [3] 成景宾.火电厂电气设备状态监测与故障诊断技术的应用探讨[C]//中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会.2025人工智能与工程管理学术交流会议论文集.广西广投综合能源管理有限公司,2025.
- [4] 陈星宇.基于多元状态估计的中速磨煤机运行状态诊断和故障预警研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [5] 闵鑫,夏成军,黎翔,等.基于知识表达的电网故障智能容错诊断技术[J].电气自动化,2021,43(01):76-80.
- [6] 韩旭东,王仲.火电机组智能辅助诊断系统研究[J].热力发电,2021,50(07):8-14.
- [7] 毛雪.发电机保护自动校验系统在发电厂的应用[J].电工技术,2020(03):83-84.

基于 PLC 的智能水处理系统 电气控制方案设计与优化

薛 权

(南京中电智慧科技有限公司, 江苏 南京 211100)

摘 要 本文针对传统水处理系统自动化程度低、控制精度差、能耗较高等问题, 设计并优化了基于 PLC 的智能水处理系统电气控制方案。通过梳理典型水处理工艺流程, 明确电气控制需求与核心控制指标; 完成系统硬件设计, 涵盖 PLC 选型配置、传感器与执行器选型、硬件电路及人机交互与上位机硬件设计; 在此基础上开展软件架构搭建、核心控制程序开发及 HMI 界面; 同时提出能耗优化、控制精度优化及故障诊断与容错优化三类核心策略; 最后通过硬件调试、软件调试及性能验证完成方案验证。结果表明: 该方案可有效提升水处理系统的自动化水平与控制精度, 降低能耗, 具备良好的实用性与可靠性, 能稳定适配实际水处理工况需求。

关键词 水处理行业; 水处理系统; PLC; 智能水处理; 电气控制

中图分类号: TP3; TP27; X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.012

0 引言

在“双碳”目标引领下, 节能减排成为水处理行业转型升级的核心方向, 传统水处理系统的弊端愈发凸显。这类系统多采用人工控制或简单的继电器控制模式, 不仅控制精度低、响应速度慢, 导致出水水质波动较大, 难以稳定满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022) 等最新标准要求, 还存在能耗高、故障排查困难、运维成本居高不下等问题, 严重制约了水处理行业的高效可持续发展。可编程逻辑控制器 (PLC) 具有可靠性高、抗干扰能力强、编程灵活、易于扩展等核心优势, 已广泛应用于工业自动化控制领域, 为水处理系统的智能化升级提供了关键技术支撑。基于此, 本文设计基于 PLC 的智能水处理系统电气控制方案, 通过科学的硬件优化配置、精准的软件控制及针对性的优化策略, 提升水处理系统的运行效率与稳定性, 降低运维成本与能耗, 助力水处理行业实现绿色低碳发展, 为水资源循环利用提供可靠技术保障。

1 智能水处理系统工艺流程与控制需求分析

1.1 典型水处理工艺流程梳理

典型水处理工艺流程主要包括原水取水、预处理、深度处理、消毒杀菌及清水储存与输送五个核心环节。原水经取水构筑物进入预处理阶段, 通过格栅去除大颗粒杂质, 再经沉淀池实现悬浮杂质的初步沉降; 预

处理后的水进入深度处理阶段, 采用过滤、超滤等工艺去除微小杂质与污染物; 深度处理后的水经消毒杀菌工艺 (紫外线消毒、氯气消毒) 杀灭有害微生物; 最终经清水池储存后, 由加压泵输送至用水点或管网。各环节紧密衔接, 任一环节的运行状态直接影响出水水质与系统整体运行效率^[1]。

1.2 电气控制需求分析

结合工艺流程, 系统电气控制需满足以下核心需求: 一是实现各工艺环节设备的联动控制, 确保流程顺畅衔接, 如格栅除污机与沉淀池进水泵的协同运行; 二是具备精准的参数调节能力, 根据原水水质、水量变化实时调整设备运行参数, 保障出水水质达标; 三是实现系统运行状态的实时监测与数据采集, 包括水质参数、设备运行参数等; 四是具备故障报警与应急处理功能, 当设备故障或参数超标时, 能及时发出报警信号并执行预设应急措施; 五是具备良好的人机交互能力, 方便操作人员进行参数设置、状态监控与故障排查。

1.3 控制指标确定

基于水处理工艺要求与水质标准, 确定系统核心控制指标如下: 水质指标包括浊度 (≤ 1 NTU)、pH 值 (6.5 ~ 8.5)、余氯含量 (0.3 ~ 0.5 mg/L); 运行参数指标包括各水泵运行压力 (0.3 ~ 0.5 MPa)、流量 (根据实际工况动态调整)、格栅除污机运行频

作者简介: 薛权 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程类电气及其自动化设计。

率(5~15 r/min); 能耗指标包括单位水处理能耗($\leq 0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)。这些指标为电气控制方案的设计与优化提供了明确依据。

2 基于 PLC 的智能水处理系统硬件设计

2.1 PLC 选型与硬件配置

综合考虑系统控制规模、功能需求及可靠性要求, 选用西门子 S7-1200 系列 PLC (型号为 CPU1214C) 作为核心控制器。该型号 PLC 具备 14 个数字量输入点、10 个数字量输出点, 支持 4 个模拟量输入通道与 2 个模拟量输出通道, 可满足系统对各类信号的采集与控制需求; 同时具备良好的扩展能力, 可通过扩展模块

增加 I/O 点数, 适应后续系统升级。硬件配置还包括电源模块、信号隔离模块、通信模块等, 电源模块为 PLC 及其他硬件设备提供稳定供电, 信号隔离模块用于隔离外部干扰信号, 保障信号传输的准确性, 通信模块实现 PLC 与上位机、HMI 的双向通信^[2]。

2.2 传感器与执行器选型

根据控制指标与工艺需求, 精准选型传感器与执行器, 具体参数如表 1 所示。传感器负责采集各类水质与运行参数, 为控制决策提供数据支撑; 执行器根据 PLC 发出的控制指令调整运行状态, 实现对工艺参数的精准调控。

表 1 传感器与执行器选型参数表

设备类型	设备名称	型号规格	测量 / 控制范围	精度等级
传感器	浊度传感器	WTWTurb430T	0 ~ 10 NTU	± 0.01 NTU
传感器	pH 传感器	E+HCPS11D	0 ~ 14 pH	± 0.01 pH
传感器	压力传感器	SICKPHT-RB	0 ~ 1 MPa	$\pm 0.5\%$
执行器	变频水泵	格兰富 CR32-6	0 ~ 50 m ³ /h	$\pm 1\%$
执行器	电动调节阀	西门子 VAF51.1	0 ~ 100% 开度	$\pm 1\%$

2.3 硬件电路设计

硬件电路设计主要包括主电路、控制电路与信号采集电路。主电路采用三相四线制供电, 为水泵、格栅除污机等大功率设备提供动力电源, 电路中配置断路器、接触器、热继电器等保护元件, 实现过载、短路保护; 控制电路以 PLC 为核心, 连接各类按钮、指示灯、继电器等, 实现对设备的启停控制与状态指示; 信号采集电路将传感器输出的模拟信号(4~20 mA 电流信号)经信号隔离模块处理后传输至 PLC 模拟量输入通道, 同时将 PLC 输出的控制信号经放大后传输至执行器, 确保信号传输的稳定性与可靠性。在电路设计过程中, 严格遵循电气设计规范, 合理布局线路, 减少电磁干扰。

2.4 人机交互 (HMI) 与上位机硬件设计

选用威纶通 MT8102iE 触摸屏作为 HMI 设备, 该触摸屏具备 10.1 英寸高清显示界面, 支持多点触控, 可实现参数设置、运行状态实时显示、故障报警提示等功能, 通过 RS485 通信接口与 PLC 实现数据交互。上位机选用工业控制计算机, 配置高性能处理器与大容量存储设备, 安装组态王组态软件, 实现对整个水处理系统的集中监控、数据存储、报表生成与远程管理。上位机通过以太网与 PLC 通信模块连接, 构建稳定的通信网络, 确保数据传输的实时性与完整性。

3 基于 PLC 的智能水处理系统软件设计

3.1 PLC 程序总体架构设计

采取模块化设计思路, 将 PLC 程序拆成主程序、初始化模块、数据采集模块、逻辑控制模块、参数调节模块、故障处理模块及通信模块, 主程序统筹调用各功能模块, 维持程序有序运行; 初始化模块在系统启动时完成 PLC 内部寄存器、I/O 端口的初始配置; 数据采集模块实时收集传感器输出的水质和运行参数, 完成滤波、校准工序; 逻辑控制模块依据工艺要求实现各设备联动控制; 参数调节模块按照采集参数与设定值的偏差, 用 PID 算法调节执行器运行参数; 故障处理模块实时监控设备运行状态, 检测到故障的瞬间, 触发报警信号启动应急处理程序; 通信模块实现 PLC 和 HMI、上位机的数据传输交互。

3.2 核心控制程序开发

采用梯形图语言编写核心控制程序, 利于操作人员理解和维护, 聚焦开发 PID 调节程序与联动控制程序, 针对浊度、pH 值、压力等关键参数, PID 调节程序实施精准调节, 调整 PID 参数, 缩减参数超调量和调节时间, 优化控制精度; 联动控制程序统筹各工艺环节设备同步运行, 譬如原水浊度超标, 自动开启格栅除污机高频运行, 加大沉淀池进水泵流量, 强化预处理

成效,为程序配置联锁保护逻辑,当水泵运行压力超标,自动停止运行并打开泄压阀,保障设备安全运转。

3.3 HMI 界面设计

HMI 界面采取分层设计逻辑,涉及主界面、参数设置界面、状态监控界面、故障报警界面、历史数据查询界面,主界面清晰呈现系统整体运行状态,囊括各设备启停状态、关键参数实时值;借助参数设置界面,操作人员可设置各类控制参数的上下限、PID 参数等;状态监控界面按环节呈现设备运行参数和水质参数,可实时显示参数曲线;故障报警界面用红色弹窗展示故障设备、故障类型及故障发生时间,同步触发声光报警,给出故障处理方案;历史数据查询界面支持按时间范围检索历史运行数据和故障记录,方便操作人员剖析系统运行规律^[3]。

4 智能水处理系统控制方案优化策略

4.1 能耗优化设计

以变频调速技术削减能耗,按原水水量、水质变动调整水泵、风机等设备的运行频率,杜绝设备长期维持额定转速运行引发能耗浪费,清水池水位偏高,降低加压泵运转频率,降低供水量;原水浊度偏低时,减少格栅除污机运行次数,构建能耗监测与分析模型,依托上位机软件统计各设备能耗数据,探究能耗变化规律,为推进能耗优化提供数据依托^[4]。

4.2 控制精度优化

针对传统控制方式中参数调节滞后、精度低的问题,用模糊 PID 控制算法提升控制精度,模糊 PID 算法融合模糊控制和 PID 控制的长处,借助模糊控制器,结合参数偏差和偏差变化率实时调整 PID 参数,适配原水水质、水量的动态变化,降低参数波动,对传感器采集数据做二次滤波,结合使用均值滤波和中值滤波,去除随机干扰信号对控制精度的影响。

4.3 故障诊断与容错优化

构建多层次故障诊断体系,借助 PLC 程序实时检测设备运行的电流、电压、温度等参数,凭借传感器采集的工艺参数,判定设备有无故障;用上位机软件分析历史故障数据,提前诊断潜在故障,制定容错控制策略,任一传感器出现故障,依托其他相关传感器数据测算,维持系统正常运转;任一执行器出现故障,自动切换至备用设备,降低故障对系统运行的干扰。

5 系统调试与性能验证

5.1 硬件调试

硬件调试分单元调试和联机调试,单元调试重点核验各硬件设备的电气性能,确认 PLC 电源输出是否平稳、传感器输出信号是否精准、执行器动作是否迅捷;

联机调试排查各设备连接状态,信号传输有无阻碍,确认 PLC 与 HMI、上位机的通信是否正常,传感器信号能否精准传至 PLC,PLC 控制指令能否有效带动执行器动作,调试开展阶段,及时排查线路接触不良、信号干扰等故障,维持硬件系统正常运转。

5.2 软件调试

软件调试采用分步调试加整体调试的方式,分阶段调试:针对各功能模块程序分别调试,检查调试数据采集模块能否精准采集参数,逻辑控制模块能否实现设备的正确联动;整合各模块程序开展整体调试,还原实际运行场景,检查程序运行的稳定性和逻辑性,侧重调试 PID 调节程序控制效果,调校 PID 参数,调试开展阶段,依托 PLC 编程软件的监控功能,实时掌握程序运行状态,检查程序缺陷。

5.3 性能验证

在真实水处理场景开展系统性能验证,测试周期定为 72 小时,优先验证系统的控制精度、运行稳定性和能耗指标,验证结论证明:系统出水浊度稳定维持 0.5~0.8 NTU,pH 值稳定维持 6.8~8.2,余氯含量稳定维持 0.35~0.45 mg/L,全部符合控制指标要求;设备运转平稳,未出现重大故障,故障报警响应时间 ≤ 2 s;处理每立方米水能耗 0.42 kW·h,比传统控制系统少 16%,性能测试结果证实,该系统控制效果出色,节能效益突出^[5]。

6 结束语

本文提出的 PLC 智能水处理系统电气控制方案,依靠科学选型配置硬件、模块化设计软件及针对性优化策略,切实增强水处理系统的自动化水平和控制精准度,减少能耗和运维成本。系统调试与性能验证的结果证明,该方案运行状态稳定可靠,出水水质合格,具备较强实用性和推广潜力。未来,可进一步引入物联网、人工智能技术,实现系统远程智能诊断和自适应控制,提高系统智能水平。

参考文献:

- [1] 李权.基于 PLC 的电气自动化控制水处理系统初探[J].数字通信世界,2020(05):136,180.
- [2] 刘远会.基于 PLC 的化工污水处理自动化控制系统设计[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(11):178-180.
- [3] 唐娜娜.基于 PLC 的污水处理控制系统设计[J].南方农机,2022,53(23):185-188.
- [4] 许莹莹,张剑.基于 PLC 的电气自动化模块化控制水处理系统探讨[J].化工管理,2019(01):112.
- [5] 李书操.PLC 在水处理自动化控制系统的应用[J].电子技术,2020,49(01):100-101.

绿色矿山建设背景下地质灾害 智能化监测技术的应用

徐付强¹, 李军伟², 王 辉², 雷晓强³, 滕泽宇^{4*}

1. 青岛国道通设计咨询有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛尚裕盛工程科技有限公司, 山东 青岛 266000;
3. 安徽中掘建设工程有限公司, 安徽 淮北 235000;
4. 青岛交科建设集团有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 本文针对绿色矿山高陡边坡及排土场在复杂地质条件下的稳定性监测需求, 探究智能化监测技术在岩土体形变感知中的应用路径。通过集成高精度传感器、无线网络及边缘计算模块, 构建全天候、非接触式的地质环境感知体系, 解析多源异构数据在时空维度上的相关性, 实现对岩体位移、应力变化及水文地质参数的实时捕捉, 研究侧重于技术架构的物理实现与数据流转逻辑, 旨在解决传统人工监测在时效性与覆盖率上的不足, 为矿山地质环境的动态演变提供精准量化参考, 进而支撑绿色矿山地质环境的数字化重构。

关键词 绿色矿山; 地质灾害; 智能化监测; 多源传感

中图分类号: TD1; TP2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.013

0 引言

绿色矿山建设要求在地质环境扰动最小化的前提下进行资源开采, 这对地质灾害的早期识别与动态追踪提出了极高标准。传统点式、周期性的人工测量方式在应对突发性崩塌、滑坡等地质异常时, 存在数据滞后与样本缺失问题, 难以捕捉岩土体临界破坏前的微观征兆。随着物联网与传感技术的迭代, 利用智能化手段对矿山地质体进行全维度扫描成为技术发展的必然趋势。通过部署自动化传感阵列, 能够实现对地质体物理力学行为的连续追踪, 将离散的监测点位转化为连续的应力应变场云图, 从而精准揭示地质灾害的孕育演化规律。

1 绿色矿山地质环境监测现状

绿色矿山开采环境具有地形切割强烈、岩体结构破碎及水文地质条件复杂的特征, 当前地质监测主要依赖光学仪器与机械式量测工具, 受地形遮挡与气候条件制约明显, 难以在极端天气下保持数据的连续性, 在地质构造发育区域, 单一的表面位移监测无法穿透岩体内部获取深部滑动面信息, 导致对深层蠕变机制的认知存在盲区。同时, 传统监测数据采集频率固定,

无法根据岩体形变速率自动调整采样间隔, 在形变加速阶段极易丢失关键拐点数据, 现有的有线传输网络在矿山爆破及机械作业震动下易发生物理断路, 维护成本较高且数据传输稳定性差, 这种非连续、表象化的监测模式难以满足绿色矿山对地质环境微小形变的精准感知需求, 亟须引入智能化、集成化的监测技术体系^[1]。

2 智能化感知设备与关键技术

2.1 高精度北斗卫星位移监测

利用北斗卫星导航系统(BDS)的高精度载波相位差分技术, 在矿山边坡关键部位部署监测站, 实现毫米级地表位移感知, 监测终端通过解算卫星信号的多普勒频移与相位延迟, 实时获取测点的三维坐标变化量。系统采用双频接收机架构, 有效消除电离层延迟误差, 确保在露天矿坑深部信号遮挡区域的定位稳定性, 通过基准站与监测站的差分运算, 去除卫星钟差与轨道误差, 将平面定位精度控制在2.5 mm以内, 高程精度控制在5 mm以内, 该技术能够全天候捕捉边坡顶部及台阶边缘的水平位移与沉降趋势, 为分析滑坡体的整体运动矢量提供绝对空间基准。

作者简介: 徐付强(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿建工程。

***通信作者**: 滕泽宇(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。E-mail: 1048144705@qq.com

2.2 深部岩体倾斜与剪切感知

针对地质体内部滑动面的识别,采用基于微机电系统(MEMS)的阵列式位移计深入钻孔内部,该设备由多节重力加速度传感器串联组成,通过测量各节点的倾斜角度变化,反演钻孔轴向的侧向位移曲线。传感器通过柔性连接管下放至预定深度的地质钻孔中,能够适应岩土体的剪切变形而不易损坏,系统能够精确捕捉岩层层理间的相对错动,分辨率可达 0.01° ,通过对不同深度节点数据的差分计算,能够精确定位潜在滑动面的埋深位置及剪切方向,弥补地表监测无法反映深部岩体破坏机制的缺陷,实现对深层蠕滑行为的早期捕捉。

2.3 降雨量与地下水渗流监测

水动力条件是诱发矿山地质灾害的关键因素,采用翻斗式雨量计与孔隙水压力计构建水文地质耦合监测网,雨量计通过记录降雨脉冲信号,实时统计瞬时降雨强度与累计降雨量,数据精度达到 0.1 mm 。孔隙水压力计埋设于边坡渗流通道及含水层中,利用振弦式传感原理测量岩土体内部的渗透压力变化,传感器内部的钢弦频率随水压力变化而产生漂移,通过频率读数换算为水头高度,该监测组合能够揭示降雨入渗对岩土体有效应力的削弱作用,分析地下水位抬升与边坡抗剪强度降低之间的滞后响应关系,量化水力作用对地质体稳定性的扰动程度^[2]。

2.4 锚索应力与岩土压力监测

在边坡加固区域,利用穿透式锚索测力计监测支护结构的受力状态,测力计安装于锚索锚具与垫板之间,内部集成的多个弦式传感器能够测量锚索轴向拉力的变化,反映岩体的松动膨胀压力。当岩体发生扩容变形时,锚索受力即时增加,传感器输出频率同步改变,同时,在挡土墙及抗滑桩后埋设土压力盒,直接测量滑体对支护结构的推力,通过对比设计锚固力与实测应力值,可以判断支护体系的各个节点是否处于弹性工作区间,这种力学量的直接监测能够先于位移变形反映地质体的应力集中趋势,为判识岩体破坏前兆提供力学依据。

3 多源数据传输与处理架构

3.1 自组网无线传输网络构建

考虑到矿山地形复杂且存在信号盲区,构建基于LoRa与ZigBee融合的无线自组网传输体系。监测终端通过低功耗广域网协议将数据发送至中继节点,中继节点根据链路质量自动选择最佳跳数路径回传至网关,

该网络拓扑具备自愈功能,当单一节点因地质灾害损坏或断电时,网络能够自动重构路由,确保数据链路的连通性,在视距受阻的深凹矿坑,采用多级中继接力传输,有效规避山体遮挡对无线信号的衰减,传输协议中嵌入前向纠错编码,降低电磁干扰下的丢包率,确保原始监测数据完整上传至本地服务器或云端平台。

3.2 自适应滤波与异常值剔除

矿山作业现场存在爆破震动、重型车辆行驶等强背景噪声,需采用自适应滤波算法对原始信号进行降噪处理。利用小波变换技术将监测信号分解为不同频率的子带,识别并滤除高频随机噪声,保留反映地质体真实形变的低频趋势项,针对传感器故障或传输错误产生的离群值,设计基于滑动窗口的统计学检验算法,自动剔除超出物理极值或突变阈值的无效数据,通过卡尔曼滤波算法对动态数据进行平滑处理,在保留形变突变特征的同时抑制观测噪声,经过清洗的数据序列信噪比显著提升,能够更真实地还原岩土体的细微蠕变过程,防止误判^[3]。

3.3 边缘计算节点预处理机制

为减轻中心服务器的计算负荷并降低传输延迟,在数据汇聚网关处部署边缘计算节点,边缘节点内置轻量化算法,对采集的高频原始数据进行初步特征提取。例如:计算单位时间内的位移速率、加速度及累计变化量,仅将处理后的特征指标上传至云端,大幅降低带宽占用,在检测到数据超过预设的触发阈值时,边缘节点自动向底层传感器发送指令,提高采样频率,进入加密监测模式,这种分布式的计算架构实现了数据采集与初步分析的本地化,保证了在网络带宽受限情况下仍能对地质异常做出快速响应,提升了监测系统的实时性。

3.4 地质监测数据库存储策略

构建专门针对时序性地质监测数据的存储架构,采用时序数据库(TSDB)替换传统的关系型数据库,该架构针对高并发写入进行了优化,能够高效处理海量传感器每秒产生的连续数据流。设计分级存储策略,近期的高频热数据存储于高速固态介质中,支持快速查询与实时分析;历史冷数据自动归档至低成本存储介质,用于长周期的地质演化规律研究,数据库结构设计包含设备ID、时间戳、物理量值及状态码等核心字段,支持按时间窗口、区域范围及参数类型进行多维索引检索,这种存储机制确保了海量地质监测数据的持久化保存与快速调取。

4 智能化监测系统运行机制

4.1 形变速率与加速度耦合分析

系统依据岩石力学流变理论,通过分析位移—时间曲线的切线斜率,实时计算岩土体的形变速率,当监测到位移速率呈指数级增长且加速度持续为正时,表明岩体已进入非稳定蠕变阶段。系统算法自动关联同一断面上不同深度的位移矢量,判断是否存在整体剪切滑移趋势,通过计算切向位移与法向沉降的比值,分析滑坡体的运动模式(牵引式或推移式),这种基于运动学参数的实时解算,能够将静态的累积位移转化为动态的形变趋势指标,直观反映地质体的稳定性演化状态,为技术人员判断边坡所处的蠕变阶段提供量化支撑^[4]。

4.2 多参数阈值联动触发逻辑

建立基于多物理量耦合的阈值触发机制,改变单一参数超限即报警的粗放模式,逻辑设定中,将降雨量、孔隙水压力增量与深部位移速率进行逻辑“与”运算。仅当强降雨导致孔压显著升高,且同步观测到深部剪切位移加速时,才判定为有效地质异常,针对不同岩性的边坡,设定差异化的分级阈值,包括初始蠕变阈值、等速变形阈值及加速破坏阈值,系统实时扫描各传感器数值与阈值的比对结果,一旦满足多参数联动触发条件,立即启动高频采集与重点区域扫描,该机制利用物理量之间的内在因果联系,有效过滤了单一传感器误报,提高了地质异常识别的准确度。

4.3 边坡稳定性三维动态反演

结合地质勘探资料与实时监测数据,利用数值模拟软件构建边坡三维地质模型,系统将实测的位移边界条件与应力状态实时导入模型中,进行岩土体稳定性系数的动态反演计算。通过有限元或离散元分析方法,模拟当前工况下边坡内部的塑性区分布范围及潜在贯通面位置,随着监测数据的更新,模型参数不断修正,使其力学响应特征趋近于真实地质体,这种虚实结合的反演机制,能够可视化展示岩体内部的应力集中区与损伤演化路径,将监测点的数据推演至整个地质体,实现对未布设传感器区域的稳定性状态评估^[5]。

4.4 自动化报表生成与推送

系统内置自动化报表引擎,定期生成地质环境监测日报、周报及月报,报表内容涵盖各监测点的累计形变曲线、速率变化图、降雨响应特征图及稳定性系数波动图。程序自动抓取关键时段的极值数据,计算变化趋势的统计学指标,如均方差、相关系数等,生

成的数字化文档通过内部网络自动分发至相关技术部门,在遇到极端天气或数据异常波动时,系统自动生成专项分析简报,罗列异常点位、发生时间及关联参数的变化情况,这种标准化的信息产出机制,减少了人工整理数据的繁琐工作,确保了地质环境信息在技术层面的流畅传递与留档。

4.5 监测设备远程自诊断与维护

为确保监测体系的长期可靠运行,系统集成设备健康状态自诊断功能,监测终端定时上报电池电压、信号强度(RSSI)、内部温度及传感器自检状态码。服务器端算法根据回传的电压下降曲线预测设备剩余续航时间,提前生成更换电池的维护计划,对于信号强度持续低于阈值的节点,系统自动标记并在网络拓扑图中显示通信盲区,当传感器读数出现恒定值或空值时,系统远程下发重启指令尝试恢复,这种基于设备状态数据的运维机制,实现了对庞大硬件网络的精细化掌控,将被动维修转变为视情维护,保障了地质数据采集的连续性与完整性。

5 结束语

地质灾害智能化监测技术在绿色矿山建设中的应用,实现了从传统经验判断向数据驱动分析的跨越,通过高精度传感器的立体布设与多源数据的深度融合,构建了岩土体全生命周期的数字化感知体系。该技术不仅解决了复杂环境下地质参数获取难的问题,更通过边缘计算与多参数耦合分析,揭示了地质灾害演化的内在物理机制。未来,随着传感精度的进一步提升与传输协议的优化,智能化监测将更深度地嵌入矿山地质环境的各个层面,为矿山地质环境的稳定性提供更坚实的技术支撑,推动矿山地质工程向精准化、数字化方向持续发展。

参考文献:

- [1] 李秀雯,孙衍辉.绿色矿山建设中地质灾害预防与治理[J].世界有色金属,2025(11):139-141.
- [2] 于文浩,王佩韬.绿色矿山建设中的地质勘探技术应用研究[J].绿色中国,2025(10):82-84.
- [3] 汪光炎.地质灾害监测技术在绿色矿山建设中的应用探讨[J].世界有色金属,2025(06):145-147.
- [4] 江志鹏.绿色矿山建设下的矿区水工环地质勘查技术[J].中国金属通报,2025(03):151-153.
- [5] 刘郁平.绿色矿山建设中水文地质的灾害防治策略分析[J].中国金属通报,2024(11):234-236.

软土隧道异常沉降原因分析及处置措施

谢发全, 李甲森

(佛山市地铁运营有限公司, 广东 佛山 528051)

摘要 软土具有高压缩性和低承载能力的特点, 软弱地层中的隧道极易发生异常沉降和管片病害, 对隧道的安全性和运营稳定产生不利影响。基于此, 本文以某地铁出入场线隧道工程为研究对象, 该出入场线隧道 CDK1+200 ~ CDK1+230 段在运营过程中出现明显异常沉降, 管片出现裂缝、错台、掉块、渗水和椭圆度超限等病害。在此基础上, 结合工程地质条件、周边环境和监测资料, 揭示了 MJS 桩基荷载集中效应、路面车辆荷载和突发性异常荷载等因素造成的异常沉降。基于成因分析, 提出隧道管片裂纹修复、椭圆度超限钢环加固和地表桩—板结构加固等针对性处理措施, 并结合结构计算, 对加装钢环、桩—板结构等进行受力分析, 验证其承载力。工程实践证明, 采取的处置措施能较好地控制隧道的沉降, 保证了隧道的安全运行, 对同类软弱地层的处理具有一定的借鉴意义。

关键词 软土隧道; 异常沉降; MJS 桩; 洞内加固; 桩—板结构加固

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.014

0 引言

随着城市轨道交通建设的快速发展, 在软土地基上施工的隧道越来越多。软粘土天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度差, 在隧道建设和运营期间极易发生隧道沉降、管片开裂等病害, 严重威胁隧道的安全与服役寿命。某地铁出入场线隧道持力层位于珠江三角洲软粘土地层, 在运营过程中隧道出现了异常沉降、椭圆超限和管片开裂等问题, 严重影响了地铁的正常运行。本文以该工程为例, 对软弱地层中出现的异常沉降原因进行了深入分析, 并提出相应的处理措施, 进行相关受力验算, 以证明其可行性, 以期对类似工程具有参考价值。

1 工程概况

某地铁出入场线为盾构隧道, 呈东西走向, 出场线全长 1 299.218 m, 入场线全长 1 305.546 m。该区间以一环高速和 10 kV 高压线塔为控制性建筑, 沿线 2 条 508 mm 高压燃气管道, 距现状地面埋深约 4 m, 与隧道斜交且位于隧道上方。出入场线始发段上为河口三角洲平原地貌, 地势低平, 原多为河涌、鱼塘, 现已填平为建设用地, 地面标高一般为 2 ~ 4 m, 河涌底部最低约为 -1.0 m。出入场线于 2022 年 12 月投入使用, 整体结构基本位于 <2-1B> 淤泥质土中, 隧道覆土厚度 4 ~ 10 m。截至 2023 年 6 月 14 日, 该隧道管片突发裂缝、渗漏水、

掉块等病害问题, 具体为出场线 17 环管片椭圆度超 20%, 8 环有 3 条及以上 ≥ 0.3 mm 纵向贯穿裂缝, 85 环有破损掉块; 入场线 1 环有同类纵向贯穿裂缝, 74 环有破损掉块, 其中 CDK1+200 ~ CDK1+230 区段沉降最大, 达 14.3 ~ 19.8 mm, 较其他区段数据高约 10 mm。

2 软土隧道异常沉降原因分析

2.1 MJS 桩荷载集中作用

出场线异常沉降段, 与建设期 MJS 桩地基加固的范围大致相同。在施工阶段, 因隧道下穿燃气管道, 为保护燃气管道, 采用 MJS 桩对此范围区域地基进行了加固处理, 并在其上浇注了混凝土面板, 以减少隧道施工对燃气管道带来的影响。隧道运营后 MJS 竖桩将上部燃气管道、土体等荷载集中传递到隧道, 造成隧道管片应力集中, 从而引起了隧道的不正常沉降和管片的损伤。现场勘查发现出场线 737 环 (CDK1+207) 的病害最为严重, 而 MJS 补强区域内的竖向桩正好位于此范围, 进一步证实了 MJS 桩的承载力集中是诱发隧道病害的一个主要因素^[1]。

2.2 地面车辆荷载作用

一环辅道是收费站入口的匝道, 坡度为 2.5%, 汽车行驶至该路段开始减速制动, 产生了较大竖、纵向荷载。荷载经道路结构传导到土体中, 改变了周围土体的受力状态, 造成了土体的压缩变形, 从而导致了

作者简介: 谢发全 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通工程建设、维护维修。

隧道沉降、水平收敛异常^[2]。另外,重型车辆在下坡急停过程中所产生的瞬间纵向制动荷载,会对隧道结构造成多次冲击,长此以往,管片的疲劳破坏将进一步加重,进而引起裂纹的扩展和破坏范围的扩大^[3]。

3 软土隧道异常沉降处置措施及效果

3.1 洞内加固措施

1. 裂缝修复。按裂缝宽度、深度及渗漏情况针对性处理:缝宽 < 0.2 mm、缝深 < 3.5 cm且无渗漏者,仅持续监测; ≥ 0.2 mm或 ≥ 3.5 cm或有渗漏者,一般裂缝采用骑缝灌注刚性环氧树脂+粘贴芳纶布修复,有泥沙渗漏者先以快干水泥封堵再注亲水环氧泥浆; ≥ 0.3 mm纵向贯穿裂缝3条及以上或径向贯通裂缝 ≥ 1 条者,采用20mm厚钢环加固^[4]。

2. 椭圆度超限加固。为解决出场线椭圆度超限的问题,提出了如下处理方法:20% $<$ 椭圆度 \leq 30%时,采用20 mm厚钢环+地表微扰动灌浆;30% $<$ 椭圆度 \leq 50%时,采用20 mm厚带肋钢环+地表微扰动灌浆。钢环为Q355B钢材,5片焊接成环,锚栓用8.8级高强度钢材,管片与钢环间填充刚性环氧树脂;加劲肋布置于钢环腰部两侧,弦高 ≤ 150 mm。隧顶至隧底下6 m范围实施微扰动注浆,改善土体力学性质^[5]。

3. 钢环加固承载力计算。根据《混凝土结构设计标准》(GB/T 50010-2010)裂纹验算公式,代入管片主筋 $\phi 18$ mm、屈服强度400 MPa等参数,得钢筋屈服时裂纹宽度 $W_{max}=0.36$ mm,现场9条裂纹 ≥ 0.36 mm,需补强加固。20 mm厚Q355B钢环(内径5 400 mm、宽度1 000 mm)屈服强度355 MPa,弹性模量206 GPa,经计算,钢环与管片共同承载时可承受上部荷载720 kPa,承载力提升53%,满足要求^[6]。

3.2 桩—板结构加固

1. 桩—板结构设计参数。一是桩—板结构板厚:0.6 m;二是框架主梁尺寸:KL1(型钢组合梁)BH=2.5 m \times 1.5 m(工字型钢H1150 mm \times 1 500 mm \times 30 mm \times 40 mm),KL2 BH=2.5 m \times 1.7 m(工字型钢H1400 mm \times 1 500 mm \times 40 mm \times 40 mm),其余主梁BH按2 000 mm \times 1 500 mm至3 200 mm \times 1 500 mm适配;三是次梁BH=0.8 m \times 1.5 m;四是承台尺寸:3 m(宽) \times 2.5 m(高);五是桩直径:1.6 m;桩长40 m左右,桩端以中风化泥质粉砂岩或中风化砂岩为持力层;六是搭板长度:6 m,搭板一侧搁置在桩板结构框梁牛腿上,起缓冲作用,减小桩板与道路之间的不均匀沉降。

2. 桩—板结构承载力计算。(1)荷载取值。一

是恒载:板及主要梁体自重容重 $\gamma=25.0$ kN/m³;0.1 m厚混凝土面层容重取25 kN/m³;0.1 m厚轻质混凝土容重取9 kN/m³,找坡2%;二是活载:汽车荷载按公路-I级取值;人群荷载按《公路工程技术标准(JTGB01-2014)》中取值,为3 kN/m²;三是地震作用:地震基本烈度为7度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度为0.1 g。(2)桩基竖向承载力计算。根据地质勘察资料及相关规范,对桩基竖向承载力进行计算。以BK-3勘探孔为例,单桩竖向承载力特征值计算如下:单桩竖向极限承载力标准值 Q_{UK} 由侧阻力标准值 Q_{sk} 和端阻力标准值 Q_{pk} 组成,即:

$$Q_{uk}=Q_{sk}+Q_{pk} \quad (1)$$

式(1)中, Q_{sk} 为单桩总侧阻力标准值, Q_{pk} 为单桩总端阻力标准值。

侧阻力标准值 Q_{sk} 计算:

$$Q_{sk}=\sum q_{sik}l_i \quad (2)$$

式(2)中, q_{sik} 为第*i*层土的侧阻力特征值(kPa); l_i 为第*i*层土的厚度(m); u 为桩身周长(m), $u=\pi d$, d 为桩直径(m)。

根据地质资料,各土层的侧阻力特征值、厚度等参数如表1所示。

表1 各土层厚度及侧阻力特征值表

地层名称	地层厚度(m)	侧阻力特征值 q_{sik} (kPa)
粘性土	14.20	30.00
淤泥	6.20	16.00
粉土	3.30	60.00
细砂圆砾	3.50	18.00
圆砾	7.20	100.00
岩石	4.00	280.00

桩身周长 $u=\pi \times 1.6=5.024$ m。

代入数据计算各土层侧阻力:

一是粘性土: $q_{sik}l_i=30.00 \times 14.20 \times 5.024=2 138.69$ kN;二是淤泥: $16.00 \times 6.20 \times 5.024=498.38$ kN;三是粉土: $60.00 \times 3.30 \times 5.024=994.46$ kN;四是细砂圆砾: $18.00 \times 3.50 \times 5.024=316.67$ kN;五是圆砾: $100.00 \times 7.20 \times 5.024=3 617.28$ kN;六是岩石: $280.00 \times 4.00 \times 5.024=5 627.52$ kN,单桩总侧阻力标准值 $Q_{sk}=2 138.69+498.38+994.46+316.67+3 617.28+5 627.52=13 193.00$ kN。

端阻力标准值 Q_{pk} 计算:

$$Q_{pk}=q_{pk}A_p \quad (3)$$

式 (3) 中, qpk 为桩端土的端阻力特征值 (kPa); A_p 为桩端面积 (m^2), $A_p = \pi d^2/4$ 。

桩端持力层为中风化泥质粉砂岩, 其端阻力特征值 qpk 取 3 000 kPa (根据地质资料及相关规范确定)。桩端面积 $A_p = \pi \times 1.62^2/4 = 2.0106 m^2$, 端阻力标准值 $Q_{pk} = 3000 \times 2.0106 = 6031.80 kN$, 单桩竖向极限承载力标准值 $Q_{uk} = 1.3 \times 6031.80 = 7841.34 kN$, 单桩竖向承载力特征值 $R_a = Q_{uk}/k$, 其中 k 为安全系数, 取 2.0。则 $R_a = 7841.34/2.0 = 3920.67 kN$, 根据 Midascivil 软件计算结果, 各支座最大反力如表 2 所示。

表 2 各支座最大反力表

支座编号	最大支座反力 (kN)
1	12 186
2	14 992
3	13 221
4	7 638
5	9 490
6	14 497
7	10 318
8	5 871

通过分析, 得出了支座 4、8 的最大反力为 7 638 kN、5 871 kN, 比单桩极限承载力 9 612.40 kN 小, 可以采用单桩基础; 为了保证桩基的受力性能, 需要在桩基基础上增设双桩承台。

框架梁承载力计算。采用 Midascivil 软件对桩—板结构框架梁进行承载力计算, 主要框架梁弯矩计算结果如表 3 所示。

表 3 主要框架梁截面尺寸及弯矩计算结果表

梁编号	截面尺寸 (B*H, mm)	支座弯矩 (kN·m)	跨中弯矩 (kN·m)
KL1	2 500*1 500	-21 368	6 030
KL2	2 500*1 800	-30 860	12 412
KL3	2 000*1 500	-7 966	6 854
KL4	2 500*1 500	-13 819	10 972
KL5	3 000*1 500	-12 769	12 568
KL6	3 200*1 500	-13 842	13 186

框架梁采用 C40 混凝土, 其抗压强度标准值 $f_{ck} = 26.8 MPa$, 抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2.40 MPa$, 弹性模量 $E = 3.25 \times 10^4 MPa$, 泊松比 0.2。根据混凝土结构设计规范, 对其进行了抗弯承载力和抗剪承载力分析, 并对其

极限承载力进行了校核, 得到了其极限承载力, 其最大裂缝宽度都在 0.2 mm 以内, 最大挠度为 16.1 mm, 在规范范围内。

3. 桩—板结构施工要点。施工前备案燃气管道并制定保护措施; 桩基采用钢护筒灌注法 (护筒下入 6 m, 荷载 100 kN); 加强地表沉降、隧道沉降等监控; 桩板开挖分段进行并及时回填, 避免土体卸荷过度。

3.3 处置效果监测与分析

采用洞内钢环 + 微扰动注浆 + 桩—板结构综合治理后, 连续观测 2 年, 隧道沉降速度显著降低并趋于稳定, 累计沉降约 4 mm, 水平收敛基本稳定; 管片裂纹无扩大、无新增, 椭圆及漏水病害解决, 承载能力显著提升, 处置效果良好。

4 结束语

软土隧道的异常沉降是一种较为复杂的工程地质问题, 它与地质条件、施工技术和周围环境等因素有关。本文以某地铁出入场线隧道为研究对象, 在对其异常沉降产生原因进行剖析的基础上, 提出“洞内加装钢环 + 地表微扰动注浆加固、桩—板结构”的综合治理方案, 并对钢环加固、桩—板结构承载力进行了计算验证。工程实践证明, 在 MJS 桩基集中荷载、软弱土层及地面车辆荷载作用下, 该方式取得了较好的效果, 使隧道的沉降、椭圆得以有效控制, 从而保证了隧道的安全与运营。随着我国城市轨道交通的快速发展, 软土隧道所处的环境越来越复杂, 迫切需要对其进行深入的研究, 开发出更加高效、经济的加固新方法, 从而提升我国软土隧道的设计与建造水平, 确保我国地铁的安全运营。

参考文献:

[1] 付智源. 高速公路软基处治与沉降监测分析[J]. 山西交通科技, 2020(01):43-45.
 [2] 宋学庆. 高速公路软基路段沉降处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
 [3] 孙浩. 超高速列车荷载下软土隧道长期沉降预测与加固设计研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
 [4] 熊禹. 间断性地质差异软土中隧道不均匀沉降机理和监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
 [5] 赵志浩, 刘帅. 不同形式隧底加固对软土隧道长期变形的研究[J]. 水利规划与设计, 2024(10):115-119, 127.
 [6] 余君宇. 软土地区运营期盾构隧道不均匀沉降规律分析及注浆技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.

高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析

李成江

(四川川交路桥有限责任公司隧道分公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 本文围绕高速公路软弱围岩隧道施工中围岩稳定性差等问题, 明确施工技术的科学应用路径。结合软弱围岩隧道施工技术特性, 系统梳理超前支护预加固等技术体系, 从围岩等级适配、复杂地质协同等维度分析技术应用要点, 提出多场景技术适配方案, 形成协同衔接方式, 构建安全质量导向的综合应用模式, 以期为同类工程施工提供技术参考。研究结果表明, 高速公路软弱围岩隧道核心技术体系能够提高软弱围岩隧道施工稳定性。

关键词 高速公路隧道; 软弱围岩; 超前支护预加固技术; 分步开挖减扰技术; 围岩稳定性控制

中图分类号: U45

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.015

0 引言

随着高速公路建设不断向山区等地质条件复杂区域推进, 软弱围岩条件已经成为高速公路隧道施工中较为常见的地质条件之一。软弱围岩条件下施工技术选用是否合理, 影响着隧道施工安全及施工效率。结合当前工程建设实际, 分析高速公路软弱围岩隧道施工技术的应用情况, 总结不同条件下的技术要点, 为相关工程施工提供技术借鉴, 对提高施工质量具有现实意义。

1 高速公路软弱围岩隧道施工技术特性

1.1 围岩稳定性控制特性

伴随我国公路建设的持续发展, 高速公路建设里程持续升高, 各种复杂地质条件的施工项目也逐渐增多。相较于深埋隧道而言, 软弱围岩隧道施工在围岩稳定性控制方面, 更具有动态性。软弱围岩本身力学强度低, 且结构松散, 容易产生变形, 施工扰动会破坏原有应力平衡, 引起围岩位移, 稳定性控制需要适应围岩应力的动态变化规律。其核心特性是抗扰能力低, 施工过程中必须持续控制围岩稳定, 并准确识别应力变化, 达成动态平衡调控。同时, 稳定性控制效果影响着施工安全基础, 是后续支护结构发挥作用的前提^[1]。

1.2 支护结构适应性特性

支护结构适应性特性, 主要体现为匹配高速公路软弱围岩隧道施工要求及围岩特性。软弱围岩力学性能薄弱, 变形具有持续性, 这要求支护结构具备相应的力学承载能力, 以及变形协调能力。支护结构能够跟随围岩应力变化, 在施工全过程中, 与围岩保持受力平衡。支护结构的适应性, 体现在其结构形式及围

岩条件的协调匹配, 影响施工操作的安全性, 并关系到支护结构的长期稳定性。同时, 该特性符合高速公路隧道施工的质量要求, 是顺利推进施工的重要技术属性, 为优化施工技术提供参考^[2]。

1.3 施工监测与预警特性

施工监测预警特性, 主要体现为高速公路软弱围岩隧道施工中, 监测的实时性及预警的精准性。软弱围岩变形反应快, 且变形量明显, 监测需动态记录围岩及支护结构的受力状态, 保证及时传递数据, 为施工决策提供支持。监测指标应该贴合围岩稳定性控制要求, 覆盖主要安全参数, 监测频率要适应施工进度及围岩应力变化节奏。预警环节应建立合理阈值体系, 快速判断异常情况, 并及时响应。此特性贯穿整个施工过程, 能够防控施工风险, 是保证施工安全的重要技术手段。同时, 为调整施工技术提供参考, 在不同阶段顺利推进施工方案^[3]。

2 高速公路软弱围岩隧道核心技术体系

2.1 超前支护预加固技术

超前支护预加固技术, 是高速公路软弱围岩隧道施工技术体系的前置保障环节, 其主要作用是在施工开挖前, 对围岩进行加固处理, 提高围岩承载能力。该技术凭借调整软弱围岩应力状态, 减小开挖扰动引起的围岩变形风险, 为后续施工提供稳定条件。同时, 改善软弱围岩的力学性能, 提前防控施工风险, 弥补围岩自身强度低, 以及结构松散的不足。作为施工技术体系的基础组成部分, 该技术符合软弱围岩隧道施工的质量要求。预先建立稳固的围岩支护体系, 可为顺利进行开挖及支护作业提供技术支撑。

作者简介: 李成江(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 公路工程现场管理。

2.2 分步开挖减扰技术

分步开挖减扰技术, 凭借将开挖作业划分为多个阶段, 降低每次开挖对软弱围岩的集中扰动, 从而减轻围岩应力重分布的剧烈变化。技术依靠合理安排开挖顺序及空间分布, 控制围岩扰动范围, 减少一次性开挖引发的失稳风险。该技术可在开挖过程中, 使围岩应力状态保持相对平稳, 为支护结构提供良好条件, 便于顺利实施支护措施。分步开挖减扰技术衔接超前支护及后续支护作业, 在保证施工稳定性方面发挥重要作用, 为施工安全管理提供参考支持^[4]。

2.3 初期支护强化技术

初期支护强化技术, 是高速公路软弱围岩隧道施工核心技术体系中, 维持开挖后围岩稳定的支撑技术。其能在完成开挖作业后, 快速构建具有高承载能力及变形约束能力的支护结构, 承接围岩释放的应力, 抑制围岩后续变形。该技术的价值在于, 调控开挖后围岩应力, 增强支护体系的力学性能, 弥补软弱围岩开挖后整体强度下降的不足, 防止围岩变形加剧致使失稳。作为衔接开挖作业及后续永久支护的技术环节, 其逻辑符合软弱围岩隧道施工稳定性控制要求, 为安全推进施工提供防护支持, 是保障工程质量及施工安全的重要手段^[5]。

3 高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析

3.1 不同围岩等级条件下技术适配应用

不同围岩等级条件下技术适配应用, 重点在于依据围岩力学性能差异, 确立针对性施工技术体系。施工区段按软弱围岩等级划分, 施工技术也据此确定, 结合围岩强度及变形特点, 选用合适的施工方法。技术适配要把围岩稳定性控制作为目标, 凭借准确匹配, 达成施工扰动最小化及支护效能最大化。合理的技术适配, 能够提高施工安全性, 是高速公路软弱围岩隧道施工质量控制的关键要素。

例如: 对于 V 级软弱围岩隧道施工, 需要采用超前小导管注浆预加固技术, 注浆材料选用水泥浆及水玻璃双液浆, 凝胶时间控制在 30 秒至 60 秒, 注浆压力维持在 0.5 兆帕至 1.0 兆帕, 提高围岩承载能力。开挖时选用 CRD 法分步开挖, 每步开挖进尺控制在 0.5 m 至 0.75 m, 减少单次开挖对围岩的扰动。在施工过程中, 需要严格控制各分步开挖的时间间隔, 保证在前一部分支护完成, 并且达到设计强度 70% 以上, 再开展下一部分开挖, 以此降低围岩应力叠加效应, 强化施工过程的稳定性控制。初期支护采用 I22b 工字钢拱架, 间距设置为 50 cm, 配合 $\Phi 8$ mm 钢筋网, 网格间距 20 cm \times 20 cm, 喷射 C25 混凝土, 厚度 25 cm, 形成高强度初

期支护体系, 抑制围岩变形。对于 IV 级软弱围岩, 超前支护可选用超前锚杆, 锚杆长度 3.5 m, 间距 1.2 m, 梅花形布置。开挖采用台阶法, 上台阶每步开挖长度控制在 1.5 m 至 2 m, 台阶高度设置为 3 m, 合理控制上下台阶的开挖落差, 避免因落差过大致使围岩受力不均, 配套实施锁脚锚杆加固, 锚杆长度 4 m, 增强台阶开挖后的围岩稳定性。初期支护选用 I18 工字钢拱架, 间距 80 cm, 喷射 C25 混凝土厚度 20 cm, 支护体系强度适配 IV 级围岩承载需求。两种等级围岩施工中, 都同步配套施工监测技术, 基于围岩等级调整监测频率, V 级围岩每 2 小时监测一次, IV 级围岩每 4 小时监测一次, 保证技术适配效果实时可控, 稳定推进施工过程。

3.2 复杂地质环境下施工技术协同应用

复杂地质环境下施工技术协同应用, 主要在于整合多种施工技术, 适应复杂地质条件对施工稳定性的要求。高速公路软弱围岩隧道, 常遇到多种不良地质叠加场景, 单一技术不能保障施工安全, 需要借助技术协同, 达成风险防控全覆盖。协同应用需以围岩稳定性控制为重点, 统筹超前支护、分步开挖及监测预警等技术, 形成技术间的互补适配关系, 保证施工全过程风险可控。

例如: 高速公路软弱围岩隧道穿越富水破碎带地质区域, 该区域围岩为 V 级软弱围岩, 且含水量达 25% 至 30%, 岩体完整性系数仅 0.2 至 0.3。施工中需达成超前支护、排水减压、分步开挖、初期支护及监测预警技术的协同应用。超前支护采用超前小导管注浆结合井点降水技术, 小导管选用 $\Phi 42$ mm 无缝钢管, 长度 4.5 m, 间距 0.3 m, 注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力控制在 0.8 兆帕至 1.2 兆帕。同时, 在隧道两侧设置井点降水井, 井深 12 m, 间距 8 m, 降水后, 将地下水位控制在隧道拱顶以下 2 m, 为开挖作业创造干燥的稳定环境。开挖环节采用 CRD 法分步开挖, 每步开挖进尺 0.5 m, 开挖完成后, 立即实施初期支护, 选用 I22b 工字钢拱架, 间距 0.5 m, 配合 $\Phi 8$ mm 钢筋网, 网格间距 20 cm \times 20 cm, 喷射 C25 早强混凝土, 厚度 25 cm, 混凝土初凝时间控制在 3 小时内, 保证快速形成支护强度。同步配套实时监测技术, 监测指标涵盖围岩收敛位移、拱顶下沉及地下水压力。围岩收敛位移监测精度 0.1 mm, 每 1 小时监测一次拱顶下沉情况, 地下水压力监测采用孔隙水压力计, 数据实时传输至监控中心。当监测数据达到预警阈值的 80% 时, 立即调整施工参数, 强化支护措施。

借助多技术协同, 控制富水破碎带软弱围岩的变形, 隧道拱顶下沉量控制在 15mm 以内, 围岩收敛位移控制在 20 mm 以内, 保障安全推进施工。

3.3 施工阶段转换过程中技术衔接应用

施工阶段转换过程中技术衔接应用,主要在于让不同施工阶段技术体系平稳过渡,维持施工全过程围岩稳定性。高速公路软弱围岩隧道施工,各阶段的技术目标存在一些差异,阶段转换可能引起围岩应力二次扰动,需要借助衔接措施,达成技术配合。衔接应用以围岩稳定性控制为目标,明确各阶段技术衔接节点标准,统筹支护体系转换及开挖方式调整等环节,保证转换过程风险可控。

例如:高速公路V级软弱围岩隧道施工,涉及CRD法分步开挖阶段向二衬施工阶段的转换,该阶段需达成初期支护及二衬施工的技术衔接。衔接前需验收初期支护质量,使工字钢拱架间距偏差控制在 ± 5 cm内,喷射混凝土厚度达标,且表面平整度误差不超过10 mm,围岩收敛位移速率连续7天控制在0.5 mm/d以内,拱顶下沉速率控制在0.3 mm/d以内,适配阶段转换条件。衔接过程中,进行初期支护背后回填注浆,采用水泥浆,注浆压力控制在0.3兆帕至0.5兆帕,填充支护与围岩间隙,增强支护整体性。注浆完成后静置7天,检测注浆密实度达到90%以上,才能进入下一环节。同时,进行二衬施工准备,铺设防水板,搭接宽度控制在10 cm,采用热焊焊接,焊接强度达到母材80%。防水板铺设完成后绑扎钢筋,间距20 cm,保护层厚度5 cm。钢筋绑扎完成后,安装二衬模板,垂直度偏差不超过3%,模板间距偏差 ± 2 cm。模板验收合格后,浇筑C30混凝土,坍落度控制在160 mm至180 mm,采用插入式振捣器振捣,频率200 Hz至250 Hz,保证混凝土密实。另外,同步监测围岩变形,若出现变形速率突增,立即暂停浇筑,加强支护措施。二衬混凝土浇筑完成后,养护14天,养护期间强度达到设计75%以上,方可拆除模板。凭借各环节衔接控制,达成开挖阶段向二衬施工阶段平稳转换,转换过程中,围岩收敛位移累计增量控制在5 mm以内,拱顶下沉累计增量控制在3 mm以内,保障施工整体稳定性。

3.4 安全与质量控制导向下技术综合应用

安全及质量控制导向下技术综合应用,是把工程安全及施工质量贯穿整个过程,形成完整的施工体系。在高速公路软弱围岩隧道施工中,要做好安全风险防控及质量管控,合理配合技术,顺利开展各环节施工。综合应用借助施工技术特性及施工体系,建立技术应用及安全质量管理的联系,保证施工过程符合安全及质量要求,体现出施工技术的实际作用。

例如:高速公路V级软弱围岩隧道施工,整个过程采用安全及质量控制的技术综合应用,该隧道围岩

强度低,结构松散。施工前基于围岩特性,制定技术方案,整合超前支护预加固、分步开挖减扰等技术,形成全流程管理体系。施工前期采用超前小导管注浆预加固技术,选用 $\Phi 42$ mm无缝钢管,长度4.5 m,间距0.3 m,注浆材料为水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在0.8兆帕至1.2兆帕,并进行注浆检测,使注浆密实度符合要求,为后续施工提供安全条件。开挖阶段采用CRD法分步开挖,每步开挖进尺控制在0.5 m。开挖后,立即实施初期支护,选用I22b工字钢拱架,间距50 cm,配合 $\Phi 8$ mm钢筋网,网格间距20 cm \times 20 cm,喷射C25早强混凝土,厚度25 cm。混凝土浇筑后,及时养护,保证3天强度达到设计要求。施工全过程配套实时监测技术,监测指标涵盖围岩收敛位移、拱顶下沉及支护应力。围岩收敛位移监测精度0.1 mm,支护应力监测采用钢筋应力计,数据实时传输至监控中心。建立三级预警,当监测数据达到80%阈值启动预警,达到90%暂停施工并加强支护。同时,设置质量管理节点,验收每道施工工序,工字钢拱架偏差控制在 ± 5 cm内,钢筋网铺设平整度误差不超过10 mm,混凝土表面平整度不超过8 mm。凭借技术综合应用,该隧道施工全过程未发生安全事故,围岩收敛位移在合理范围内,拱顶下沉稳定,各分项工程验收合格,为同类工程提供参考。

4 结束语

高速公路软弱围岩隧道施工技术的科学应用,能够保障工程安全,为提高工程建设水平提供支撑,具有重要的实践价值。超前支护、分步开挖、初期支护强化的核心技术体系,经多等级围岩、复杂地质场景的适配与协同应用验证,可切实把控施工全流程稳定性。未来,应该通过技术创新,继续优化施工技术体系,结合工程实际,探索更具适配性的技术方案,让施工技术朝着高效化方向发展,为同类隧道工程建设提供可靠技术保障。

参考文献:

- [1] 方绍君.复杂地质条件下公路隧道施工技术要点研究[J].运输经理世界,2025(16):93-95.
- [2] 梁亚东.高速公路软弱围岩隧道施工技术应用分析[J].交通科技与管理,2025,06(09):61-63.
- [3] 吴常灿.软弱围岩隧道全断面加固施工技术探究[J].中国公路,2024(12):102-103.
- [4] 张尚应.浅埋软弱围岩隧道的施工技术探讨[J].交通世界,2024(16):178-180.
- [5] 李兵兵.高速公路浅埋软弱围岩隧道施工工艺[J].四川建材,2023,49(06):75-77.

建筑工程施工中的防水防渗技术应用分析

张灵德

(甘肃然书商贸有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要 本文以苏州东方之门商业综合体项目为例, 对防水防渗技术在建筑工程施工中的应用进行了分析。该项目总建筑面积约为 25 万平方米, 地下水位高, 年均降水量大, 对防水防渗技术提出了严格的要求。本文详细论述了地下室、屋面、卫生间等部位的防水防渗施工技术, 即防水卷材的选择和铺设、防水涂层的使用、细部构造处理、排水系统的设计等。研究结果表明, 通过采用高性能防水材料、精细构造处理、可靠的排水系统可以有效保证建筑结构的防水防渗性能, 并提高建筑的使用功能和寿命。

关键词 建筑工程; 防水防渗技术; 防水防渗性能; 防水卷材; 防水涂层

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.016

0 引言

建筑工程防水防渗技术作为保障建筑结构安全、提升使用功能、延长使用寿命的关键技术, 其重要性在地下水位高、降水量大的地区尤为凸显。本文以苏州东方之门商业综合体项目为典型案例, 系统阐述了防水防渗技术在建筑工程施工中的具体应用策略, 包括材料选型、施工工艺、质量控制等关键环节, 旨在为同类工程提供具有可操作性的技术参考与实践借鉴。

1 项目概况

苏州东方之门商业综合体项目总建筑面积约 25 万平方米, 建筑高度为 150 米, 地下结构为 3 层, 深度约 15 米。项目地所在地理位置处在长江中下游冲积平原, 地下水位常年较高, 平均年降水量大于 1 200 毫米, 雨季集中且降水量大, 对建筑工程的地下结构、屋面、室内湿区防水防渗性能提出了非常严峻的考验。本工程结构形式为框架核心筒结构, 地下室为大型停车场和设备用房, 屋面设计为种植屋面和上人活动平台相结合, 卫生间数量多、分布复杂。根据国家《地下工程防水技术规范》(GB 50108-2008) 和《屋面工程技术规范》(GB 50345-2024) 的规定, 本项目防水等级设计为地下工程一级, 屋面一级, 卫生间等室内用水房间一级^[1]。因此, 对该项目系统地研究并应用先进的防水防渗施工技术, 对保证建筑结构安全、提高使用功能、延长建筑寿命有十分重要的工程意义。

2 地下室防水防渗施工技术

2.1 防水卷材的选择

防水卷材是地下室柔性外包防水层的主要材料, 其性能好坏直接影响到整个防水系统是否可靠。通过

技术经济综合比选, 本工程地下室外墙及底板大面积防水层采用 4.0 毫米厚双层 SBS 改性沥青防水卷材, 上层为聚酯胎基, 下层为玻璃纤维增强胎基, 以达到较好的抗拉强度和延伸率。该卷材要符合国家标准《弹性体改性沥青防水卷材》(GB 18242-2008) 的规定, 耐热性不低于 90 摄氏度, 低温柔性不小于负 25 摄氏度无裂纹, 纵向最大拉力不小于 800 牛/厘米, 横向最大拉力不小于 600 牛/厘米, 断裂延伸率大于 40%。选择依据为 SBS 改性沥青卷材耐高低温性能好、抗基层变形能力强、耐穿刺性好, 可以适应本工程深基坑回填后产生的沉降变形和地下环境的侵蚀。卷材铺设前对混凝土垫层或者外墙基层进行严格处理, 使其坚固、平整、干燥、洁净, 阴阳角处做成半径为 50 毫米的圆弧, 消除应力集中, 保证卷材铺贴密实。

2.2 防水涂层在工程中的应用

在防水卷材层之外, 在地下室底板混凝土垫层之上、外墙卷材防水层内侧等处, 本工程辅助使用了聚合物水泥防水涂料作为附加增强层。该涂料为双组分材料, 液料与粉料按 1 比 2.5 的质量比混合, 搅拌后得到高弹性、高强度、与混凝土基层粘结力强的涂膜。施工时采用辊涂或者刮涂的方式, 共涂刷 3 层, 总厚度达到 1.5 毫米, 涂膜方向相互垂直, 保证涂膜均匀无遗漏。地下室底板与外墙交接处、桩头、降水井封堵处等复杂节点, 先用水泥基渗透结晶型防水材料加强处理。该材料中活性化学物质在水的引导下渗入混凝土毛细孔道里, 生成不溶于水的枝蔓状结晶体, 有效地堵住了渗水通道, 提高了混凝土自身的抗渗能力, 作用深度可达 300 毫米以上。涂层和卷材配合使用就形成了互补的防水屏障^[2]。

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

2.3 细部处理

地下室防水工程的薄弱环节是各种细部构造,其处理质量的好坏决定着防水成败。施工缝处理上,本工程采用300毫米×3毫米钢板止水带,居中埋设在底板、外墙的水平施工缝中,配合使用膨胀止水条和预埋注浆管系统。混凝土浇筑前,对施工缝表面进行凿毛、清理,涂刷界面处理剂。后浇带防水为重点,两侧用钢筋网片和快易收口网先行封闭,预埋可重复注浆的管件。主体结构沉降基本稳定后,用微膨胀抗渗混凝土浇筑后浇带,待混凝土达到强度后再用预埋管件进行压力注浆,保证新旧混凝土接缝密实。另外,在地下室底板、外墙上穿过的各种管道、线缆套管都安装了带有翼环的刚性防水套管。套管与管道之间环形间隙用沥青麻丝填塞密实,两端用聚硫密封膏做弹性密封,保证管道在沉降或振动时,管道与结构之间仍然具有良好的防水密封性。穿墙管根部、转角处增设500毫米宽的防水卷材附加层。

3 屋面防水防渗施工技术

3.1 屋面防水卷材的铺设

屋面主体防水层采用的是3毫米厚热塑性聚烯烃高分子防水卷材。该材料以优质的TPO树脂为基料,在其中掺入高性能抗氧化剂、光稳定剂和紫外线吸收剂等助剂,然后用先进的压延工艺制成。分子结构稳定,使卷材具有很好的长期耐候性,可以抵抗长时间日照下紫外线老化、臭氧侵蚀。同时TPO卷材具有良好的耐化学腐蚀性,能很好地抵御酸雨、融雪剂等的影 响;表面一般是浅色,反射率高,可以减少屋面温度,降低热应力对防水层和建筑结构的影响。最核心的工艺特性就是其可靠的可焊接性,用热风焊接可以使搭接缝融为一体,从根本上杜绝了传统粘结可能存在的窜水隐患。

在施工前,必须对钢筋混凝土屋面基层进行极其严格地处理。基层要坚实、平整、干净、干燥,不能有起砂、空鼓、裂缝、尖锐的凸起。平整度用2米靠尺检查,空隙不大于5毫米。然后施工20毫米厚的1:2.5水泥砂浆找平层,砂浆应压实抹光,在预制板端缝、屋脊、转折处等部位预留分隔缝,缝宽20毫米,内嵌填密封材料,防止基层开裂拉损防水层。找平层施工完毕并充分养护干燥之后,方可进行防水卷材铺设。卷材铺设采用的是先进的机械固定与热风焊接相结合的施工方法。先按照屋面形状和尺寸进行卷材预铺和定向,确定出最优铺设方案并准确裁剪。卷材铺设方向一般垂直于屋脊方向,长边搭接宽度80毫米,短边搭接宽度100毫米。搭接处必须保持清洁干燥,固定部位使用不锈钢或者镀锌钢固定件,包括垫片和带有抗腐蚀涂层的螺钉。

固定点的间距不是均匀分布的,而是根据工程所在地风荷载设计值计算得出的,一般要求卷材纵向边缘处间距不大于300毫米,卷材内部横向方向间距不大于500毫米。固定件要穿透卷材并牢固地锚固在屋面结构层中,保证在负风压的作用下卷材不会被掀起^[3]。

3.2 细部构造处理

屋面防水工程成败,一般都取决于对复杂细部构造处理是否精细。这些部位是应力集中、变形频繁、渗漏概率最高的地方,必须做增强和专项密封处理。

垂直立面和水平屋面交接处,女儿墙、出屋面烟道、通风井壁等,卷材的收口是防水的关键。以女儿墙为例,在转角处先铺设一道宽度不小于500毫米的同种TPO卷材作为附加加强层来抵抗该部位由于结构变形所引起的应力。大面卷材顺屋面铺贴到女儿墙根部,垂直向上铺贴立面部分,上翻高度不小于250毫米。卷材上端裁切整齐后,用专用铝合金或不锈钢金属压条配合耐腐蚀螺钉,将其牢固地固定在墙体预埋的木砖或经处理的混凝土基层上,固定钉距不宜大于200毫米。最后,金属压条上口和所有螺钉头涂刷高性能硅酮耐候密封胶封盖。硅酮胶弹性好、耐候性好、黏结性好,可以适应墙体和压条之间微小的位移,形成持久的弹性密封,防止雨水沿墙上翻卷材的端头渗入。屋面天沟、檐口、水落口、设备基础根部等处均应遵循先做附加层后做大面层的原则。水落口杯应牢固地固定在屋面板上,周围500毫米范围内坡度不应小于5%,并用防水涂料或密封材料做多道涂封。卷材附加层应进入水落口杯内不少于50毫米。所有这些精细构造的处理共同保证,在屋面各边角、转角、穿插件等复杂部位防水层仍能保持连续、完整、密封的状态,形成无缝隙的整体防水屏障。

3.3 屋面排水系统设计

本工程根据屋面造型和面积,采用了内排水和外排水相结合的排水系统。雨水斗是屋面排水的枢纽,本设计选用87型重力式雨水斗。该型雨水斗采用科学的水力设计,泄水流量大,内部的防涡流装置和格栅能防止树叶等杂物堵塞,保证排水畅通。雨水斗应准确地安装于结构预留的孔洞上,雨水斗的安装高度应与屋面完成面平齐或者略低。雨水斗四周与屋面结构层之间要采用细石混凝土浇筑密实。更重要的是屋面TPO防水层与雨水斗之间要实现可靠密封连接,一般用不锈钢或铝制泛水板,将防水卷材牢固地机械固定在雨水斗法兰上,再用热风焊接或者专用密封胶将卷材与泛水板、泛水板与雨水斗之间的接缝完全密封,此接口是防水的重点,必须确保万无一失。排水管道用

高密度聚乙烯管材。HDPE 管材重量轻、内壁光滑摩擦系数小、耐化学腐蚀性好、柔韧性好,能适应一定的沉降、连接可靠。管道连接采用承插电熔连接技术,利用电加热使管材和管件接触面熔融成一整体,连接强度高、密封性极好,实现了管道系统的零渗漏。管道系统的设计坡度是保证排水能力的关键,规范规定最小设计坡度不得小于 0.5%,施工中必须用水平仪等工具严格控制,任何区段都不能出现平坡或倒坡。管道的适当位置,如立管底部、转弯处等处必须设置检查口或清扫口,方便以后的维护疏通^[4]。

4 卫生间防水防渗施工技术

4.1 防水涂膜施工

本工程卫生间地面及墙面 1.8 米以下墙面用聚合物水泥防水涂料作为主要防水层。该材料是由有机聚合物乳液和无机水泥基粉料两部分组成的复合材料,复合后兼有有机材料的高弹性、延伸性、无机材料的高强度、耐久性以及与水泥基基层良好的粘结力。固化后的涂膜能抵抗由于温度变化或者微小沉降而产生的微小裂缝,而且无毒无害、环保,适合于室内密闭空间使用。涂料施工必须按薄涂多遍、交叉涂刷的原则进行。正式涂刷前,先用涂料兑水稀释后涂刷一道底涂,增强与基层的渗透粘结。待底涂表干后再分三道涂刷后续涂层。每道涂刷方向要与上一道垂直,保证涂层均匀,无漏刷、堆积、起泡等现象。单道涂层厚度应控制在 0.5 毫米左右,三道总厚度不应小于 1.5 毫米。门口处是防水层的薄弱环节,防水层必须向外侧及门洞两侧墙面延伸涂刷,宽度不小于 300 毫米,形成有效的防水屏障。整个涂膜施工完毕后,要在自然条件下养护不少于 72 小时,等其完全固化。最后做 24 小时蓄水试验,在卫生间门口用砂浆筑起挡水坎,放水深度不小于 20 毫米,做好水位标记。24 小时后观察水位是否明显下降,到楼下对应位置检查有无湿渍、渗漏,无渗漏现象后才能判定为合格,进入下一道工序。

4.2 管道节点防渗处理

卫生间内穿楼板的管道是防水的重中之重,必须进行多道设防的综合处理。给排水立管本工程要求预埋带止水翼环的刚性防水套管。套管应比管道直径大两倍,翼环宽度不小于 50 毫米,厚度不小于 3 毫米。套管一次浇筑预埋在楼板混凝土中,顶部高出最终地面完成面 50 毫米。管道安装完毕后,套管与管道之间的环形间隙处理分为两步,第一步是套管底部到楼板厚度中部的范围,用微膨胀防水砂浆分两次填塞捣实;第二步是上部间隙,用聚氨酯或硅酮等弹性密封胶嵌填密封,形成下刚上柔的密封体系,既能承受荷载,

又能适应管道震动。地面敷设的排水横支管,穿越卫生间周边混凝土防水翻边或隔墙处,也必须设置套管。施工顺序上应先完成管道安装、固定和灌水试验,确认无泄漏后再进行防水涂层的施工。防水涂料施工时,管根部位必须作为重点,用涂料反复涂刷,保证涂膜包裹管道根部并上翻到管道表面一定高度(一般不小于 50 毫米,使管道与楼板通过防水涂膜结合成一个整体的防水壳体。

4.3 墙面与地面防水连接

保证墙面防水层和地面防水层无缝连接,形成连续的防水整体,是防止水沿墙体缝隙或者毛刺作用向上、向侧向渗透的关键。墙面防水层的高度有规定,一般墙面防水层涂刷高度应高出最终地面完成面 300 毫米;设有淋浴房的区域墙面防水层高度不得低于 1.8 米,有条件时宜做到板底。涂刷墙面防水层时,必须和已经施工的地面防水层充分搭接,墙地交接的阴角处重点加强。一般做法是在阴角处先涂刷一层涂料,然后铺设宽度为 200 毫米的无纺布增强层,用刷子压实使无纺布紧贴基层并排出气泡,在无纺布表面再涂刷 1~2 道涂料,使之完全覆盖。此增强层能很好地抵抗由于材料收缩或者变形所引起的应力^[5]。

5 结束语

建筑工程施工中的防水防渗是一项系统工程,技术的关键点在于遵从因地制宜、多道设防、综合治理的原则,渗透到设计、选材、施工、维护的各个环节当中。随着新型防水材料不断涌现,装配式建筑、绿色建筑技术的不断发展,防水防渗技术也必然要朝着更加环保、高效、智能化监测与维护的方向发展。只有依靠技术创新和精细化施工管理,才能从根本上提高建筑工程防水防渗的质量,保证建筑长久的安全和使用价值。

参考文献:

- [1] 韩栋梁. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术运用探讨[J]. 中国建筑金属结构, 2026, 25(01): 85-87.
- [2] 江文杰. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术应用[J]. 居业, 2025(11): 16-18.
- [3] 张文祥. 建筑工程施工中防水防渗施工技术解析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(11): 43-45.
- [4] 杨民阳. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23(08): 88-90.
- [5] 鲁志军. 建筑工程施工中的防水防渗施工技术应用[A]. 数字化背景下建筑企业生产与企业文化融合式发展论坛论文集[C]. 中国企业文化促进会职业教育专业委员会, 2025.

建筑工程大型钢结构梁柱施工技术要点分析

刘春娣

(安徽中陆建设工程有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘 要 随着我国社会经济的不断发展, 建筑工程逐渐趋向于高层化、大跨度化发展, 常规钢结构梁柱已难以满足工程需要。大型钢结构梁柱应具有高强度、轻自重、抗震性能优良的优势, 逐渐成为现代建筑工程中的核心承重构件。本文结合建筑工程施工实际, 简单梳理大型钢结构梁柱施工的核心逻辑, 以技术应用流程为线索, 详细阐述该类施工技术各环节的应用要点, 并对有效提高施工质量的质控措施加以分析, 以期对提高大型钢结构建筑工程的综合效益有所裨益。

关键词 建筑工程; 大型钢结构; 梁柱施工

中图分类号: TU74

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.017

0 引言

大型钢结构梁柱施工技术多用于建设规模较大的工程项目。然而, 对比常规技术手段来看, 大型钢结构梁柱构件体积较大, 且加工精度要求较高, 极易受到环境、设备等多种因素的影响, 引发工程质量隐患。因此, 在相关工程中, 工程人员需深入掌握技术应用流程, 把握各环节的应用要点, 并能够展开施工全过程质量控制管理工作, 以推动钢结构施工技术的规范化、有序化开展, 满足大型钢结构梁柱施工的质量要求及安全要求。

1 建筑工程大型钢结构梁柱施工技术概述

在建筑工程中, 大型钢结构梁柱是整体建筑的核心承重构件, 承载着结构竖向荷载力与水平作用力。大型钢结构梁柱施工技术以高强度钢材为关键材料, 结合加工精度控制、现场吊装拼接及防腐防火处理等关键工序形成了极致安全性、稳定性及耐久性的结构体系, 广泛应用于高层及大跨度建筑工程^[1]。

施工作业中, 工程人员需充分贯彻精准加工、安全吊装、可靠连接的准则。在前期施工阶段, 需严格参考施工图纸进行构件预制; 在现场施工阶段, 需选择合适吊装设备, 并生成合理吊装方案, 精准定位构件位置。辅以焊接工艺进行节点拼接, 提高连接强度; 最后, 需配套开展防火处理工作与涂装工作, 避免结构产生锈蚀或高温损坏等风险。

综合来看, 该技术融合了建筑施工、材料科学、机械工程等多领域知识, 对现场人员能力及设备性能

有较为严格的要求, 是促进大型建筑现代化、轻量化发展的关键要素。

2 建筑工程大型钢结构梁柱施工技术应用要点

2.1 工程概况

案例工程为某大型商业综合体项目。建筑总面积约12万平方米, 建筑高度为78 m。其中地上共18层, 1~4层为商业裙房, 5~18层为写字楼; 地下3层主要用于设备库房与停车场。项目主体采用钢框架+混凝土核心筒结构, 在写字楼框架与裙房大跨度区域施工中主要应用大型钢结构梁柱。该项目位于城市繁华区域, 周边建筑较密集。在施工过程中, 工程团队能够严格遵循《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205-2020)与《建筑钢结构焊接技术规程》(JGJ 81-2012)规定, 切实维护工程质量及安全效益。

2.2 技术应用

2.2.1 构件加工精度控制

构件加工是大型钢结构梁柱施工中的基础环节, 且直接影响着现场安装质量。工程人员需做好各环节的把控工作, 确保构件加工精度能够满足设计及施工标准。

首先, 在材料及构件进场阶段, 工程人员需要展开高标准的检验工作, 着重检查钢材、紧固件、焊接材料等原材料的相关信息, 包括但不限于出厂合格证与检测报告^[2]。同时需按照特定要求, 对材料的力学性能、化学成分进行抽样检测, 严禁现场出现不合格材料。案例工程中选用的所有构件均为Q355B钢材, 强度为250 N/mm², 屈服强度处在345 KPa以上。并且,

作者简介: 刘春娣(1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

在力学性能检测中, 工程人员需充分参考《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018) 文件中的规定标准。在钢柱一类构件入场时, 工程人员还需仔细核对材料参数, 确保其长度、表面平直度能够满足施工规定。

其次, 需加强加工精度管控。在下料阶段, 需应用高精度设备, 如数控火焰切割设备或等离子切割设备, 严格按照图纸方案及参数规划进行下料作业。完成操作后, 还需对构件的尺寸及切口平整度进行检查, 及时将不合格的构件进行返工处理。案例工程中, 优先选用 LGK-120 型等离子切割机, 该设备可精准控制切割误差标准高达 0.5 mm/m。组队作业中, 需使用专用台架, 严控垂直度、截面尺寸、轴线偏差。为防止构件出现变形问题, 还可应用专用夹具进行固定, 完成组对复合后进入下一道工序; 在焊接校正环节, 工程人员需要以构件材质及厚度为参考, 生成工艺方案, 合理选择焊接工艺, 设计焊接参数。并且, 为避免出现焊渣或未焊透的现象, 需严控焊接速度及电流电压。完成焊接操作后, 及时清理焊渣并检查构件外观, 辅以火焰校正法进行构件校正, 避免其二次变形, 切实提高尺寸垂直度精度。

最后, 作为加工精度管控中的最后一道防线, 在预拼装验收环节, 工程人员需全面清理构件, 并检查其尺寸, 严格按照相关规划进行拼装以及临时固定。完成偏差测量, 并确保其在允许范围内后, 逐一进行编号标识。针对未达标构件需及时进行返工处理, 直至验收通过。

2.2.2 现场吊装方案优化

案例工程钢结构构件重量较大, 且吊装环境较为复杂。因此, 在施工作业中, 优先选取分区吊装工艺, 按照先柱后梁的顺序进行吊装作业, 辅以吊装模拟技术及实时监测技术, 切实提高吊装精准度。

正式进行构件吊装作业前, 需展开全面的准备工作。第一, 做好场地清理工作, 确保其表面不存在障碍物。同时, 需进行硬化处理, 提高地面承载力, 保证满足塔吊系统、车吊施工需要; 第二, 规划构件堆放场地。按照构件分类进行分别摆放, 并做好标识; 第三, 在吊装区域周边加设排水沟, 防止施工作业中出现暴雨天气, 致使吊装作业区域被浸泡, 引发设备沉降、构件质量下滑问题^[3]; 第四, 严格按照规格选用吊具、索具等设备, 并着重检查其拉力性能。按照各设备的安装特点, 设计临时固定装置, 提高设备性能、稳定性; 第五, 需对现场作业人员展开全面的技能培训及考核, 严格检查其职业资格证书, 确保持证上岗。除此之外, 在正式进行施工作业前, 需由管理人员、

监护人员协同开展现场排查工作, 确保不存在安全隐患。本项目吊装作业高度较高, 且钢结构梁柱用量较大。在吊装作业各环节均需落实精细化管控理念, 具体操作如下。

首先, 需严格核对构件编号。因裙房大跨度区域与写字楼框架之间的钢结构梁柱型号差异较大, 且部分构件需提前进行定制化生产, 所以, 为规避错吊、混吊问题, 工程人员需逐一核对构件编号, 确保主体与设计图纸一致。同时, 需着重检查构件表面质量, 判断其是否存在锈蚀、变形或缺损问题。所有检查结果均需记录存档, 确保可追溯。

其次, 在起吊作业环节, 考虑到项目位于繁华区域、周边建筑密集, 工程人员需遵循缓慢、平稳可控的原则。起吊时需缓慢启动设备, 并逐步提升构件, 避免因操作不当, 致使构件晃动。在地面及楼层高处, 需安排专人进行指挥, 实时调整吊装角度, 尽量减少构件晃动幅度, 防止出现高空坠落或碰撞周边建筑物的风险^[4]。当构件起吊至离地面 10~20 cm, 可暂停操作, 对设备运行状况进行检查, 判断吊具受力情况及构件平衡情况, 确保无异常后继续起吊。当构件起吊至指定高度, 需再次暂停检查, 确定不存在问题后进行转运操作。转运作业环节, 工程人员需贯彻精准指挥、避免碰撞的理念。专人需要持指挥旗以及对讲机等设备与吊装人员进行交流, 精准调控设备行走速度、转向及构件摆放角度。对于商业裙房顶部的施工设施、周边既有建筑及写字楼核心筒结构需重点规避, 尽量保证构件在转运过程中无晃动或碰撞问题, 能够平稳到达指定区域, 在转运路线规划方面, 工程人员也要严格遵循相关的规范要求及专项方案。

最后, 在构件就位阶段, 工程人员可应用水准仪、经纬仪等设备检测构件的高度, 确保其标高能够与设计图纸相同。若存在标高偏差, 也需尽量控制在允许范围内。而后适当调整构件的轴线位置, 结合限位板、定位销等装置进行辅助固定, 避免出现轴线偏移问题^[5]。构件就位后, 需立即通过固定措施进行处理。在大型钢结构、梁柱结构中, 可采取缆风绳、临时支撑等方式进行多点固定。完成这一操作后, 还需对标高轴线进行再次核对, 确保无误进入到卸载环节。在卸载作业中需缓慢放松吊机, 使得构件重量能够逐步释放。同时, 可应用传感器设备, 实时监控临时固定装置的受力情况, 防止卸载速度过快, 致使构件晃动或出现临时固定失效的问题。完成卸载作业后, 需及时清理并检查吊具, 将其妥善存放于指定位置, 便于后续工程使用, 间接维系工程成本效益。

2.2.3 钢结构现场焊接

大型钢结构梁柱施工作业中,现场焊接质量决定了结构的承载性能。所以,在该环节工程人员需把握较多的操作要点。

首先,需展开全面的准备工作。焊接之前,需检验焊工的职业资格证书,确保其持证上岗。同时,需要对焊接部位的组装质量进行检查并对其表面进行清理,确保焊接20 mm范围内不存在铁锈油污。在此基础上,对焊接表面进行修模补焊处理,确保其粗糙度能够达到25 μm 标准。除此之外,在准备阶段,工程人员还需调试电焊机设备及预热设备,按照工艺要求准备焊接材料,并做好领用记录。

其次,需进行焊前预热处理与后热处理。在焊前,需应用测温仪器实时监测高强度钢材、厚板的预热温度,确保处在预热范围内且均匀稳定。完成焊接作业后,需进行后热处理。通过加热保温、缓慢冷却的方式,消除焊接作业中产生的残余应力,切实提高接头韧性,防控延迟裂纹^[6]。此外,在后热处理中,需做好焊丝的清理工作,并将焊条烘干。预热区域可设置在焊接坡口两侧,将宽度调整至施焊处板件厚度的15倍以上。

再者,焊接作业中,需严格按照工艺方案进行操作,着重把握焊接电流、电压、速度、层数等参数,确保接头成形良好。并且,若现场环境温度低于5 $^{\circ}\text{C}$,或风速高于8 m/s,需在焊接作业场域架设防风棚;若层间温度低于150 $^{\circ}\text{C}$,需重新进行预热以及焊接作业,防止温度不达标,影响焊接效果。

最后,在焊后阶段,需进行消氢处理。需将加热温度控制在200~250 $^{\circ}\text{C}$ 区间范围内。针对高强度钢材及厚板接头,可酌情提高加热温度。为防止出现氢致裂纹、加速氢溢出等现象,工程人员可应用测温仪器实时监测参数变化。在此基础上,需展开全面的质量检测与缺陷处理工作。一方面,需进行外观检测,着重检查接头表面成型情况以及焊缝尺寸,判断是否存在咬边、气孔缺陷。针对轻微缺陷可及时修补。针对严重缺陷,需做好记录,并查明原因,而后进行返工处理;另一方面,需进行无损检测,以超声波检测、磁粉检测,精准识别焊接内部缺陷。完成缺陷修补作业后,需再一次进行检测,直至达标。

2.2.4 钢结构现场涂装

钢结构现场涂装时,大型钢结构梁柱施工作业中的重要防护环节,可有效延长结构使用寿命,提高结构防火防腐性能。

进行涂装作业前,工程人员需先对钢结构表面进行喷砂防锈处理,确保其能够满足国家标准中的相关规

定。同时,需对结构表面进行净化处理,确保表面无油、无锈且干燥,表面粗糙度也需提升至70 μm 。底漆、中间漆分别选用环氧富锌材料与环氧云铁材料。其中前者厚度可设定为80 μm ,后者厚度则需设定为110 μm 。

在涂刷作业中,工程人员可采用高压无气喷涂工艺。在处理最外层时,需严格按照防火要求,选用具有防火性能的涂料。针对环境温度,工程人员需控制在15~30 $^{\circ}\text{C}$ 。而在涂刷防火涂料时,则需将温度区间拓展至5~38 $^{\circ}\text{C}$,并保证空气流通,避免影响到现场作业人员的人身安全。若作业期间面临恶劣气候环境,需暂停施工,避免涂层产生介质污染。

实际作业中,工程人员需按照自上而下、由左向右、先里后外的顺序进行操作,确保漆膜能够均匀、光滑且平整。采用喷涂工艺时,需合理控制喷涂设备与构件间的距离,防止距离过远或过近,致使漆膜过薄或出现流淌、橘皮问题。此外,工程人员需根据喷枪口径,合理调整喷涂距离。例如:若使用大口径喷枪,可在距离喷涂作业面200~300 mm处进行操作;若使用小口径喷枪,则可将距离缩短至150~250 mm,以此切实提高喷涂均匀性及稳定性,有效维护大型钢结构梁柱作业质量效益。

3 结束语

在建筑工程中,大型钢结构梁柱施工技术应用优势较明显。工程人员可通过控制构件加工精度、优化现场吊装方案、规范化进行钢结构现场焊接及涂装作业的方式,切实提高工程综合效益。未来,工程人员还需打造更完善的质量控制体系,严控源头质量,强化过程管控,并建立完善的检测框架,以高标准验收管理,使施工综合效益得到有效保障。

参考文献:

- [1] 琚金建,杨小三,廖明生.装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术研究[J].建设机械技术与管理,2024,37(06):112-114.
- [2] 徐智恒.装配式钢结构梁柱连接节点设计要点及施工工艺研究[J].工程技术研究,2024,09(05):107-109.
- [3] 张可辉.大型公共建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术研究[J].建设科技,2025(09):73-75.
- [4] 杨清茹.装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术[J].城市开发,2025(08):144-146.
- [5] 同[4].
- [6] 景玲.装配式建筑钢结构梁柱节点焊接施工技术分析[J].科技资讯,2025,23(17):133-135.

悬臂浇筑连续梁挂篮施工效率影响因素分析

沙 明

(中铁上海工程局集团第五工程有限公司, 广西 南宁 530100)

摘 要 大跨度连续梁采用挂篮施工方式较为普遍, 其施工措施对于项目建设的工期、成本效率存在直接影响。本文选择乐至车站特大桥(33+44+48+64+48) m 连续梁工程作为案例, 从实际管理角度出发, 深入分析悬臂浇筑连续梁挂篮施工的能效影响因素。从本工程实际情况进行分析, 悬臂浇筑连续梁挂篮施工技术应用阶段, 其受到“人、机、料、法、环”多个因素共同作用而导致能效无法达到要求。基于此, 在悬臂浇筑连续梁挂篮施工过程中, 需考虑到项目实际情况进行方案优化, 从工序衔接、资源配置、技术交底、外部协调、过程监控等多个角度出发, 确保各项施工措施有序进行, 进而满足悬臂浇筑连续梁挂篮施工要求, 促进现代桥梁工程事业发展。

关键词 挂篮施工; 施工能效; 生产管理; 连续梁; 工序衔接

中图分类号: U215

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.018

0 引言

铁路作为现代交通领域的重要组成部分, 近年来建设规模大、速度加快, 尤其是大跨度连续梁作为铁路工程中的重要组成部分, 其施工进度对于全线架桥及铺轨关键节点顺利完成有直接影响。挂篮悬臂浇筑施工方法提高桥梁施工效率, 其具备不占桥下空间、适应复杂地形、跨越障碍能力强等优势, 使该技术在跨越河流、高速公路等地带建设桥梁具备极高应用价值。然而, 悬臂浇筑连续梁挂篮施工具备循环周期长、工序复杂等特点, 其施工能效往往无法达到理论预期^[1]。因此, 深入分析悬臂浇筑连续梁挂篮能效影响因素, 并结合项目经验总结出可行性的措施, 确保各工序紧密衔接, 可为现代交通事业的高质量发展奠定基础。

1 工程概况

乐至车站特大桥(33+44+48+64+48) m 连续梁位于四川省资阳市乐至县, 上跨 G5013 渝蓉高速公路, 全长 238.8 m, 采用悬臂浇筑法施工。主桥由 48#~53# 墩组成, 其中 51#、52# 为主墩, T 构分别跨越高速公路的 4# 和 3# 节段, 施工净空最小为 14.69 m。梁体为单箱单室变截面预应力混凝土结构, 中支点梁高 6.015 m, 跨中及边跨直线段梁高 3.015 m, 箱梁顶宽 12.78 m, 底宽 8.2 m。全桥共划分为 44 个节段, 0# 块采用支架现浇, 1#~6# 标准节段采用菱形挂篮对称悬浇, 边跨现浇段采用钢管支架施工, 合龙顺序为先边跨后中跨。工程地质以弱风化泥岩夹砂岩为主, 施工环境复杂,

涉路协调与线形控制要求高, 是全线关键控制性节点工程。

2 挂篮施工能效的内涵与目标设定

挂篮施工能效能够体现出项目施工的效率, 其主要指的是单位时间内完成一个标准节段的综合效率。挂篮施工能效能够体现桥梁标准阶段施工周期, 这也能突出施工单位在项目施工中的协作性以及管理能力。乐至车站特大桥项目施工的过程中, 根据合同工期和项目施工组织设计, 将标准节段目标周期设定为 12 天, 具体分解如下: 钢筋与模板安装 2 天、混凝土浇筑 1 天、养护 5 天、张拉压浆及挂篮前移 2 天, 预留 2 天作为机动缓冲。为达到这一目标, 需保证本项目施工中各工序紧密衔接, 确保资源精准投放, 有效控制施工风险, 这对施工单位的管理能力方面要求极高。

3 影响挂篮施工能效的关键因素分析

3.1 工序衔接不畅, 形成“等待”浪费

悬臂浇筑连续梁挂篮施工对于工序衔接有极高要求, 任何工序存在中断现象都会引发连锁反应。而在该技术应用作业阶段, 其主要存在如下工序衔接不畅问题: 钢筋半成品未按节段需求准时配送, 造成钢筋绑扎工期延误; 混凝土供应时超出凝时间, 造成混凝土结构存在冷缝风险影响后续浇筑进度; 标准节段养护结束后, 张拉设备未准备完成造成两者衔接不畅; 挂篮前移前, 未完成两面清理、预埋件复核与验收^[2]。

作者简介: 沙明(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

3.2 资源配置失衡, 关键资源成为瓶颈

悬臂浇筑连续梁挂篮施工中, 如果脱离工序动态需求, 将会造成施工工效无法达到最理想状态。本项目在施工过程中资源配置失衡存在如下两个方面: 第一, 劳动力未按要求进行配置, 导致现场施工存在人员冗余或缺失现象。第二, 塔吊、智能张拉设备等大型设备没有进行精准调配, 造成现场施工环节存在资源闲置或浪费现象。例如: 塔吊需同步承担钢筋吊运、模板滑移与挂篮转运, 如果在 30 min 内未及时调整吊装计划, 导致各专业相互交叉制约, 进而造成设备综合利用效率下降。

3.3 技术交底与执行力不足, 返工频发

悬臂浇筑连续梁挂篮施工对各部分精度要求极高, 需确保后锚精轧螺纹钢、劲性骨架连接件、波纹管坐标等精度达到要求, 各部件安装过程中经定位偏差不得超过 ± 5 mm。若本项目技术交底未按标准要求进行, 使施工人员没有充分了解设计方案和技术标准, 也没有结合 BIM 模型展开全面技术交底, 作业人员无法了解施工程序和标准, 会在施工中引发操作偏差。本项目中这一问题较为普遍, 如挂篮后锚精轧螺纹钢预埋精度不足, 后续需要凿除混凝土进行钢筋移位; 合拢段预埋钢板标高偏差较大, 由工作人员进行切割补焊调整, 单次耗时超 8 h。上述问题的存在导致施工工期延长, 并且各结构部件存在质量缺陷容易导致桥梁施工过程中引发质量事故^[3]。

3.4 外部协调不力, 施工环境受干扰

乐至车站特大桥上跨 G5013 渝蓉高速公路, 需在施工过程中严格按照要求进行审批。这时施工窗口期相对较短, 并且需由高速交警、路政、产权单位的联合审批通过才能进行施工。如果项目施工前未按要求提交作业计划, 或者施工单位上报的安全方案未获审核通过, 则会因当日施工内容取消而导致作业时间延长。本项目施工阶段并未和搅拌站构建协同机制, 信息沟通交流不畅无法及时共享节段混凝土方量与浇筑时间, 造成现场施工过程中混凝土供应不足, 或者现场混凝土供应滞后引发初凝导致连接效果受到影响。在项目施工阶段遇到雨季无法进行施工作业时, 如果现场没有提前准备足量防雨布、抽水泵等应急物资, 即使小雨天气也会全面停工。

3.5 过程监控缺位, 问题响应滞后

悬臂浇筑连续梁挂篮施工并未制定系统化、量化的监控机制, 导致管理决策滞后于现场变化影响项目顺利开展。在本项目施工阶段, 由于施工单位未构建

形成完善管理台账, 导致管理人员并不能掌握现场施工情况, 对于钢筋绑扎进度、浇筑混凝土速率等关键指标, 未动态跟踪, 造成现场情况掌握不够完善影响施工功效。同时, 在挂篮施工作业阶段关键受力部件极为重要, 吊带、销轴、锚固系统等未落实分级检查制度, 也没有做好日常巡查记录工作, 导致存在的隐患出现逐步累积现象。如某次挂篮前移时由于吊带出现裂纹没有及时发现, 在吊装过程中发生突然断裂。这一事故造成现场非计划停机超 48 h, 打乱原本的施工节奏, 也会引发人员伤害事故^[4]。

4 基于生产管理的挂篮施工功效提升路径

4.1 推行标准化作业流程(SOP), 固化高效模式

根据桥址双幅挂篮同步推进结构特点, 将 12 天标准节段施工周期细化为小时级作业指导书, 细化到各班组和工种在左右幅挂篮上进行协同工作、各自节点完成目标、按时间节点划分完成情况, 做到双幅作业一线上下错时、互不影响。例如: 早班(7:00-11:00)安排左幅腹板钢筋绑扎、右幅预应力管道支架绑扎; 下午班次(11:00-12:00)同步开展双幅挂篮自检及报验工作, 保证同一环节能够同时办理并行开展。中午(13:00前)完成右幅顶板底层钢筋, 左幅进行混凝土泵管布置, 下午(14:00前)完成双幅波纹管定位与固定, 利用挂篮对称性, 可减少部分对位测量工作。工程施工中每一工序均需按照工程管理看板分幅分区标识左右幅目前的工作状态及下步工作安排, 使施工现场人员了解清楚左右幅现阶段正在开展的工作以及具体的上下交界面, 不至于发生工作重叠或者出现空挡等待的现象^[5]。

4.2 实施动态化资源调度, 精准匹配工序需求

该桥梁施工项目部在双幅挂篮同步推进下, 建立了匹配的动态资源调度体制。生产副经理每天会组织相关负责人早班对当天工作安排部署、协调当天双幅节段的工作顺序和重要工作的分工, 对接当天的工作量, 统筹各种人力、设备、物资的安排。在安排计划时, 充分考虑了当天工作的配合度, 左右幅的人力、设备、材料等资源配置均衡、进度同步、互不影响。例如: 当左右幅同步进入钢筋绑扎阶段时, 调集 80 名钢筋工同时分幅作业; 当预应力张拉时因为错时张拉避免挂篮偏载, 从 6 人改为分批、每人上一个班次、一个工人开展张拉工作, 用两台智能张拉装置进行轮班, 按照工艺间隔时间的要求两个节段交替施工的同时又提高了设备利用率; 进行混凝土浇筑时左右幅的泵车双泵轮流为左右幅供料、同步布料、同步振捣, 在现场

增配振捣和泵送工,在浇筑过程中保证随到随浇筑,并且专人负责泵车的工作;为了保证吊装机械的连续作业,将塔吊、汽车吊进行了整条班次 24 小时预留,并且由调度员根据当天的需要制作出双幅吊装作业表,明确每台设备在左幅或右幅的作业时段、起吊构件、站位及指挥责任人,确保双幅吊装任务有序穿插、高效衔接,杜绝设备空转或冲突,实现资源投入与双幅工序需求的精准耦合。

4.3 强化技术交底与过程验证,杜绝返工

该项目将技术交底进一步细化到双幅挂篮施工过程中,做到左右幅的作业标准一致,操作过程一样。在进行 0# 块、标准节段和合龙段等施工前由技术主管组织左右幅的钢筋、模板、预应力等班组一同进行技术交底工作,并利用 BIM 模型的动态显示功能,在显示屏上分别显示两幅结构之间的对称关系、两幅结构中各个预埋件的空间位置关系以及每道工序的操作逻辑,让工人明确知晓类似构件其各自所在不同的幅面之间所存在的差异;现场设置 1:1 的实体样板,并将挂篮后锚部位、波纹管交叉部位以及劲性骨架连接部位等一些重要节点制作成实体样板,工人可以十分容易地看出双幅的样子与挂装顺序,从而避免由于理解错误而引起的左右幅之间的不对称施工问题或者返工的问题。

4.4 前置化外部协调与风险预控

项目部设置专职协调员,负责与高速公路产权、营运管理单位的日常联系和对接工作。提前 7 天将全部需要跨路作业的施工内容报至相关部门,说明具体作业时间、空间、交通组织方案和安全防护措施等,保证有足够的施工窗口时间供其审批通过。设置“外部风险预警清单”,由生产副经理牵头,组织技术、安环、物资等相关人员对天气、交通管制、材料等问题进行实时监测并制定不同等级的应急抢险方案,若气象预报预测未来 24 h 将有 6 级以上大风来临,则应在挂篮前移或者混凝土浇筑之前做好锚固系统的紧固、作业面清理以及防风覆膜。进入雨季之前,准备足够的防水布、彩条布及大功率的抽水设备,在下小雨的时候可以正常对筋进行绑扎、模板进行安装等工作,在大雨来临时可以做到及时排水、避免窝工,保障正常的生产。除此之外,项目部还需建设与地方交警以及路政、应急相关部门的管理模式,同时在定期之内与各单位协调商议,一起分享施工计划,使得工程项目在开展时能够对施工动态进行全方面的管理。而在一些重大节假日或者是特殊保证期间,项目主要负责人必须要对施工的节奏进行调整,减少在车流高峰

时期之内出现占道的情况。另外,为了能够有效地减少舆情风险的情况,还需安排专门的人员对外发布相应的信息,并且统一口径,把一些不良的风险舆论进行优化,防止这种不对称的信息引发误解。

4.5 构建精细化过程监控体系,实现快速纠偏

项目部应用数字化管理手段实现挂篮施工全过程量化管理,每日收工前由工组班长真实填写当日已完成的节段工程量及人工、机械等资源消耗情况及当日存在的问题并将相关数据录入到项目管理平台,由生产经理每日在平台上查看当天计划完成量与实际进度对比情况,查看功效偏差是否控制在可接受范围内,如果某项工作连续两个节段未达预计效能,则通知项目总工程师组织召开技术、安质、施工班组人员等参加的专题会议查找原因并拟出解决办法:采用优化钢筋绑扎顺序、调整混凝土浇筑速度、增加作业人员的办法改进。项目部针对挂篮设备建立专项设备健康管理档案,确定主桁架、吊杆、锚固系统的重点受力点并提出需要检查的内容以及频率,由项目部指定专人负责做好“日检、周检、月检”的工作,详细记录挂篮设备的各项异常情况,并做好相应的维修、更换等隐患点检修工作,杜绝因设备出现故障而导致停工及安全生产事故发生。

5 结束语

在悬臂浇筑连续梁挂篮施工过程中,其功效影响因素较多,对施工效率和工期造成直接影响。根据悬臂浇筑连续梁挂篮施工要求制定科学合理的施工计划,明确各环节施工要点,并且全面落实各项施工控制措施,可提高桥梁工程施工水平。同时,悬臂浇筑连续梁挂篮施工阶段要重视人、机、料、法、环资源优化配置,使各节点进行全面控制,保证各项施工任务有序完成,为今后同类型工程施工奠定基础。

参考文献:

- [1] 李强,严军.变截面连续梁挂篮悬臂浇筑与大节段支架现浇施工技术分析[J].四川水力发电,2021,40(05):22-27.
- [2] 孙红月.高速铁路大跨度连续梁悬臂浇筑技术及线形控制方案[J].交通世界,2022(27):17-19.
- [3] 李洋.斜拉桥连续梁挂篮施工安全风险分析与防控[J].水上安全,2024(07):148-150.
- [4] 王磊.铁路特大桥连续梁挂篮悬臂浇筑法施工工艺[J].四川建材,2024,50(06):152-154.
- [5] 贺飞,王磊,徐世超.基于挂篮悬臂浇筑的高铁大跨度连续梁桥施工监控研究[J].工程建设与设计,2024(18):98-100.

SMW 工法桩在苏州市轨道交通 4 号线的应用分析

钟 兴

(中铁十二局集团城市发展有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘 要 本文详细研究了 SMW 工法桩在苏州轨道交通 4 号线延伸线工程中的应用。介绍了 SMW 工法桩的起源、原理及在基坑开挖围护中的作用。以该延伸线工程为例, 阐述了工程概况、地质及水文条件。深入分析了 SMW 工法桩的施工工艺, 包括施工工序、水泥浆液制备及注入、型钢插入与固定以及型钢拔除等关键环节。同时, 探讨了施工过程中的质量控制措施, 以期为确保桩身强度和均匀性提供有益参考。实际应用表明, SMW 工法桩在该工程中成功应用, 实现了型钢的重复利用, 有效节约了项目成本。

关键词 SMW 工法桩; 轨道交通; 水泥浆液制备; 型钢插入; 型钢拔除

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.019

0 引言

SMW 工法桩围护结构凭借其先进的技术特点, 在基坑开挖围护领域应用广泛, 尤其在阻隔基坑外侧的地下水与流沙上表现突出。施工时会用到多轴钻掘搅拌机(三轴搅拌机), 钻进土体时一边钻一边搅, 同时通过钻头的喷浆孔喷出水泥浆, 和地基土充分混合拌匀。而且每段钻进的区域都得重叠搭接施工, 避免留下未搅拌的空隙^[1]。钻进结束后, 在水泥土混合体凝固前, 插入 H 型钢或钢板做加固, 提升整体强度, 待水泥土硬化后, 就能形成一道强度和刚度都在线、连续无断缝的地下围护墙。SMW 工法桩在保障基坑施工安全稳定上起到了重要的作用, 深入探讨其在实际工程中的应用具有重要的现实意义。

1 工程概况

1.1 项目简介

苏州市轨道交通 4 号线延伸线工程(观塘路~龙道浜)意义重大, 它北起观塘路站, 南至 4 号线既有起点龙道浜站, 线路全长 7.13 千米。其中, 出场线为单线, 平面采用 2 段曲线, 曲线半径均为 250 米, 线路呈单向坡, 竖曲线半径均采用 2 000 米。出场线地下暗埋段区间结构采用混凝土箱型结构, 断面宽度为 6.0 米(局部宽 7.8 米), 高度在 6.4~7.25 米之间, 底板埋深约 7.0~15.4 米, 采用明挖法施工。围护结构结合了地下连续墙及工法桩, 地下连续墙厚度为 600 毫米, 工法桩采用 $\phi 850@600$ 的规格, 设置了 3 道支撑,

第一道为钢筋砼支撑, 第二、三道采用 609 钢支撑。

1.2 工程地质及水文概况

工程场地处于太湖水网平原区, 地质条件较为复杂。浅部填土厚度在 1.8~11.5 米之间, 下部②层为软弱土, 工程性质较差, 这给施工带来了一定挑战。③层为灰黄、褐黄色可~硬塑黏性土或稍密~中密砂粉土, 性质相对较好。下部主要以灰色土为主, 包括软~可塑状黏性土、稍密~密实状粉土、粉砂层等。拟建场地岩土种类繁多, 地层变化大, 这就要求施工过程中要根据不同地质条件采取相应的施工措施。根据地下水埋藏条件, 该工程沿线地下水主要分为孔隙潜水、微承压水及承压水。苏州地区降雨集中在 6~9 月份, 在此期间, 地下水位一般达到最高。地下水的存在对基坑施工影响较大, 需要采取有效的防水、排水措施, 以确保施工安全和工程质量。

2 SMW 工法桩施工工艺

2.1 施工工序

SMW 工法施工主要有两种方式, 一种是单排咬合式连接, 另一种是跳槽式全套复搅式连接(见图 1、图 2)。这两种顺序都能很好地实现连续加固土体的目的^[2]。现场施工时, 阴影区域属于重复套钻的范围, 这样的设计能保障墙体的连贯效果与接头部位的施工品质。借助重复套钻的操作, 既能保证水泥搅拌桩的有效搭接, 还能对施工桩体的垂直度进行校正, 最终实现理想的止水成效。

作者简介: 钟兴(1988-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 工程施工。

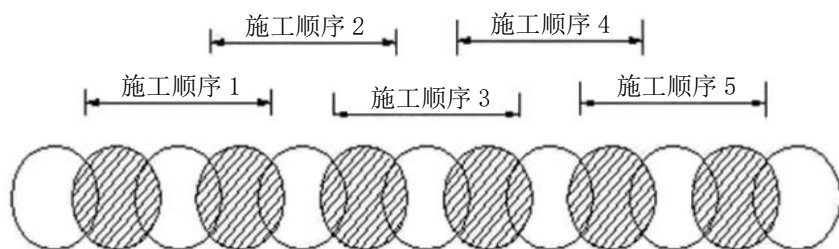


图 1 单排咬合式连接

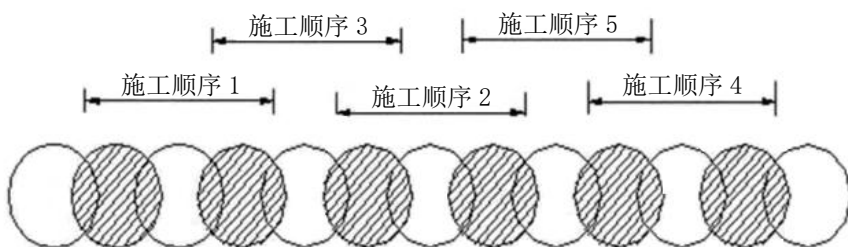


图 2 跳槽式全套复搅式连接

2.2 水泥浆液制备及注入

本工程中搅拌桩直径为 $\phi 850$ ，SMW 工法桩及止水帷幕相邻桩采用套打的方式。成桩选用 42.5 级的普通硅酸盐水泥，对水泥质量要求较高。制备好的浆液严禁离析，泵送过程必须保持连续。为了确保施工质量，拌制水泥浆液的罐数、水泥和外掺剂用量、流量泵流量、下沉和提升时间以及泵送浆液的时间都安排专人进行详细记录。水泥浆配制好后，停滞时间不得超过 2 小时，因为超过这个时间，浆液的性能可能会发生变化，影响成桩质量^[3]。搭接施工的相邻搅拌桩施工间隔不得超过 24 小时，若超过此时间限制，须在外侧补桩或采用高压旋喷桩加固，以保证基坑的安全。在施工围护结构的搅拌桩时，每机每班要求做一组以上水泥搅拌桩试块，搅拌桩 28 天龄期无侧限抗压强度要求不小于 1.0 MPa。

水泥浆液的水灰比严格控制 在 1.5:1，施工前需通过试配确定最佳配比，确保浆液在满足流动性的同时具备足够的后期强度。浆液制备采用自动计量搅拌系统，将水泥、水及必要的外掺剂按设定比例投入搅拌罐，搅拌时间不少于 3 分钟，以保证浆液均匀性。注浆时采用注浆泵通过钻杆内的注浆通道从钻头喷口压入土体，注浆压力控制在 0.5 ~ 1.0 MPa，根据地层情况动态调整，避免压力过大造成地表隆起或浆液流失。在钻头下沉和提升过程中，注浆需连续进行，下沉速度控制在 0.5 ~ 1.0 米 / 分钟，提升速度不大于 1.5 米 / 分钟，确保水泥浆与土体充分搅拌混合。施工过程中，技术人员需实时监测浆液比重、注浆量及钻进参数，

发现异常及时停机检查，必要时调整浆液配比或施工工艺，确保每延米水泥用量达到设计要求，从而保障搅拌桩的整体止水和承载性能。

2.3 型钢插入与固定

1. 本工程选用的 H 型钢是 Q235B 材质，这种材质刚好方便后续回收复用，契合环保节能的理念。往施工处插 H 型钢之前，需先给型钢热涂减摩剂——用电热丝将固态减摩剂加热至融化成液体，随后均匀涂抹到型钢表层，如此便能降低插装与拔出过程中的阻力。

2. 水泥土搅拌桩施工完成后，吊机需及时到场，为 H 型钢的吊放做好准备，吊放孔径为 50 毫米。该工程采用 25 吨汽车吊进行起吊，确保起吊作业的安全与平稳。H 型钢的插入时间需严格把控在搅拌桩施工完成后 3 小时内，毕竟水泥石的强度会随时间推移不断提升，超出这个时限再插，不仅费劲还可能影响型钢与水泥石的结合效果。

3. 布设完定位型钢卡后，将 H 型钢顺着定位卡缓缓嵌入水泥土搅拌桩体中。嵌入 1 ~ 2 米深度时，借助线坠校正型钢的垂直度，确保植入位置准确无误。调整好之后继续往下插，让它在围护结构中充分发挥加固作用。

4. 当 H 型钢插至设计标高时，得按实际情况灵活处理。如果型钢底标高高于搅拌桩底标高，就用 $\phi 20$ 吊筋固定，把标高控制在设计要求内，防止后续施工中位移；倘若两者底标高相同，便无需用吊筋进行固定。溢出的水泥石需由挖掘机及时清理，为后续作业提供便利，还能让施工现场始终整洁规整。

5. 待水泥土搅拌桩达到规定硬化标准, 便可拆除吊筋及槽沟定位型钢, 为后续工序做好铺垫。

6. 若H型钢未能插至设计标高, 可先将其向上提升, 再反复向下插入, 直至满足设计标高要求, 保障围护结构质量符合标准。

2.4 型钢拔除

主体结构竣工且地面复原完毕后, 便要启动H型钢的拔除作业。借助专用夹具与千斤顶配合, 将圈梁作为反梁进行起拔回收, 使型钢得以循环利用。型钢拔除后, 需及时用砂浆填充空隙或是注浆封孔, 把控变形程度, 防止型钢拔除后引发周边土体沉降, 进而保障工程的安全稳固。

1. 拔H型钢前, 平整场地可是关键准备步骤。得先把冠梁上的土清掉, 作业面的杂物得清理干净, 确保16吨吊车具备起拔型钢的条件。该16吨汽车吊自重24.3吨, 后轮间距1.8米, 需在型钢内侧6.5米外规划妥当作业区域, 同时要预留型钢拔除后的堆放空间与运输路径, 保障施工过程顺利开展。

2. 安装千斤顶时, 将两台QD-200T型千斤顶平稳放置在顶圈梁上。先由吊车吊起待拔H型钢两侧的起拔架, 把起拔架冲头的“哈夫”圆孔对准H型钢上部的圆孔后套入, 随后插入销子, 两侧用开口销锁紧, 防止销子脱落。之后向起拔架与H型钢翼缘之间嵌入锤型钢板, 将型钢夹紧, 为后续拔除作业做好铺垫。

3. 起拔型钢的过程中, 先开启高压油泵, 两台千斤顶同步向上顶推起拔架的横梁, 正式启动起拔作业。待千斤顶行程达到设定值, 便将锤型钢板敲离, 起拔架随千斤顶缓缓复位。进行第二次起拔时, 吊车需用钢丝绳穿过H型钢上部的圆孔, 将其吊稳。重复以上步骤就能把H型钢拔出来, 保证型钢能安全顺当地脱离围护结构。

3 施工质量控制

3.1 确保桩身强度和均匀性要求

1. 施工进行期间, 需定期在现场核查压浆泵流量、水泥浆调制情况、浆液配比等核心参数, 这些参数会直接关乎桩体的成型质量。调配完成的浆液不能出现离析现象, 通常要在2小时内用完, 这样才能确保浆液性能保持稳定^[4]。例如: 如果浆液离析, 会导致水泥和水分离, 注入土体后无法形成均匀的混合物, 从而影响桩身的强度。

2. 压浆作业期间, 输浆管道的核查工作尤为关键。得保证浆管没有堵塞情况, 也不会出现漏浆问题, 让水泥浆可以持续流动。整根桩的注浆操作必须均匀进行, 不能出现水泥土固结不一致、存在夹心层的现象。

如果输浆管道出现堵塞或者漏浆问题, 会造成部分区域水泥浆注入量不够, 进而形成薄弱部位, 对桩身的整体强度产生影响。

3. 水泥流量、注浆压力、水泥掺量采用设备电脑自动控制, 同时设置专人检测水泥浆的比重。通过自动控制和人工检测相结合的方式, 能够更准确地控制施工参数, 确保桩身质量符合设计要求。例如: 电脑自动控制可以根据预设的参数精确控制水泥流量和注浆压力, 而专人检测水泥浆比重可以及时发现浆液配制过程中的问题, 保证浆液质量。

3.2 确保桩身均匀性

在SMW工法桩施工过程中, 桩身均匀性差是一个常见问题。为预防此类情况发生, 施工前要对施工设备进行全面检查, 确保其处在良好的工作状态。例如: 检查搅拌机的搅拌叶片是否磨损严重, 如果叶片磨损会影响搅拌效果, 导致桩身不均匀。选择合适的施工工艺也至关重要, 根据不同的地质条件选择相应的施工参数和方法^[5]。拌浆机搅拌时间不少于2分钟, 增加拌合次数, 保证拌合均匀。提高搅拌转数、降低钻进速度, 边搅拌边提升, 这些措施可以提高桩身均匀性。例如, 在软弱土层中, 适当降低钻进速度, 增加搅拌次数, 可以使水泥浆与土体充分混合, 形成均匀的桩身。

4 结束语

SMW工法桩在苏州轨道交通Y-IV-SG-01标五工区出场线(元和停车场至莫阳站)明挖区间标段基坑围护施工中的成功应用, 充分展现了其独特的优势。通过合理的施工工艺和严格的质量控制措施, 不仅实现了型钢的重复利用, 有效节约了项目成本, 还为工程的顺利实施提供了可靠保障。这种工法在类似工程中具有广泛的应用前景, 值得进一步推广和研究。未来, 随着技术的不断发展和创新, SMW工法桩有望在更多领域发挥重要作用, 为工程建设带来更大的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 王辉.SMW工法桩在地铁深基坑工程中的应用[J]. 冶金管理, 2022(09):124-126.
- [2] 康璞, 王烁, 吴梦龙, 等.SMW工法桩与组合型钢支撑在软土地区的应用[J]. 绿色科技, 2023, 25(08):255-258.
- [3] 肖磊.SMW工法桩施工技术质量控制探析[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(05):92-93.
- [4] 郑永红. 地铁明挖区间施工技术 with 风险应对措施[J]. 中国高新科技, 2025(06):139-141.
- [5] 蔡宗洋. 地铁盾构穿越施工地块的相互影响分析[J]. 四川建材, 2023, 49(06):114-116.

高铁箱梁预制施工通病成因分析及 针对性改进措施探讨

李 勇

(中交二公局铁路建设有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要 高铁箱梁预制施工质量关系到线路的安全性, 但是目前高铁箱梁预制施工过程中存在诸多通病, 影响施工质量, 造成长期的运营风险。本文对高铁箱梁预制施工中常见的通病如支座板空响、梁面裂纹、滴水槽裂纹、接触网预埋件定位误差进行分析, 找出问题的具体表现及产生原因, 提出支座板空响现象改进、梁面裂纹防治、滴水槽裂纹控制接触网预埋件精准定位的改善措施, 以期通过改进施工工艺来提高箱梁预制的质量, 加快施工进度, 保证高铁线路安全运行。

关键词 高铁箱梁; 预制施工; 支座板空响; 梁面裂纹; 滴水槽裂纹

中图分类号: U238

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.020

0 引言

随着高铁建设规模的不断增大, 预制施工过程中出现的问题越来越多, 成为影响施工质量的主要因素。这些通病的产生与施工工艺、材料选择等因素有关, 而且影响时间较长, 直接影响高速铁路的安全运行。对上述通病的成因进行详细的分析, 并提出相应的技术改进措施, 可以提高施工质量, 降低工程的风险, 保证铁路线路长期安全、稳定地运行。本文结合实际工程案例, 分析常见的施工通病成因, 并提出有效的改进措施。

1 高铁箱梁预制施工通病成因

1.1 支座板空响

当箱梁受到外界荷载的作用时, 空隙处会发生剧烈的相对运动, 从而产生空响声。施工过程中支座板安装不准确, 也会造成接触不良, 产生空响。在施工过程中, 如果支座板不能和箱梁底部完全衔接, 支座板与箱梁之间没有被有效填充, 就会造成支座板受力不均, 产生局部空隙, 从而引起空响。除施工质量问题外, 材料也是产生支座板空响的另一个原因。一部分低质量或材质不符合要求的支座板, 在长期的使用过程中会出现局部变形、疲劳裂纹的现象, 造成支座板和梁体接触不良, 空响现象更加严重^[1]。

1.2 梁面裂纹

若混凝土在浇筑时没有被充分振捣, 使气泡不能排出, 混凝土内部结构松散, 产生空隙, 在后期干燥

固化过程中容易产生裂纹。另外, 混凝土配合比不符合要求也会使混凝土的收缩性变大, 从而产生裂纹。预制箱梁的养护过程中受到环境温度、湿度等影响较大, 在冬季温差过大时会造成混凝土表面收缩过快, 内部水分不能及时蒸发, 从而引起应力集中, 造成裂纹的产生。

1.3 滴水槽裂纹

滴水槽裂纹的存在影响箱梁的排水功能, 使水渗入混凝土内, 引起钢筋锈蚀、混凝土膨胀等一系列损伤, 对箱梁的长期稳定性及安全造成影响。在施工过程中浇筑混凝土时, 如果滴水槽处的混凝土振捣不实, 则会造成局部密实度不够, 出现孔洞或空隙。这些空隙在后期混凝土干燥硬化后容易产生裂纹, 在混凝土由于收缩变形而产生应力时, 裂纹就会沿这些薄弱的地方扩展。如果设计中滴水槽的尺寸不合理, 会引起水流压力集中, 在槽壁上造成局部很大的压力而产生裂纹。

1.4 接触网预埋件定位误差

箱梁预制过程中, 如果预埋件的安装位置没有按照设计要求进行, 安装时没有进行充分的检查、调整工作, 就会产生位置误差。在混凝土浇筑之前, 预埋件定位、固定及标记不准确会造成预埋件在混凝土硬化过程中发生偏移, 从而产生定位误差。传统的人工定位方法在施工过程中容易受人为主观因素影响, 造

作者简介: 李勇 (1985-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高铁预制梁场通病问题防治。

成定位误差的累积。对于复杂的预埋件，人工操作难度更大，误差也会出现得更多差^[2]。

2 高铁箱梁预制施工通病针对性改进措施

2.1 支座板空响现象改进

为防止支座板出现空响现象，需要改善混凝土的性能。通过提高混凝土强度、选用优质的原材料、对不同的配合比进行实验分析来改善混凝土配方，提高混凝土的整体质量。应增加一定的塌落度和混凝土的和易性，保证其流动性和施工的方便性，防止流动性不够造成与支座板接触面结合不好，从而避免出现空洞的现象。由于支座板处钢筋密集，传统的振捣棒很难达到足够的深度，造成混凝土密实度不够。因此，增加微震工装属于一种有效的改善办法。微震工装依靠细小振动来弥补人工振捣的不足，保证支座板部位的混凝土得到足够的振捣，从而提高其密实度，防止产生空洞、不密实等现象。环氧树脂粘贴碎石法是通过增大碎石层来提高支座板和混凝土接触面的稳固性。为达到更好的效果，需改善环氧树脂的使用时机、固化时间和碎石的粒径。通过多次试验改善参数，能有效保证碎石和环氧树脂以及支座板之间更加紧密地结合，从而减少空响的现象。

2.2 梁面裂纹防治

为防止梁面出现裂纹，需要改善混凝土的性能，提高混凝土强度，优化配合比以提高抗裂性。应选用抗拉强度高、收缩性小的水泥以及骨料，适量加减水剂等化学添加剂来提高混凝土的流动性及密实度。通过试验来分析不同的配合比效果，选择出最合适的配合比，进而提高混凝土的抗裂性，保证浇筑过程中混凝土的稳定性以及抗裂性。在施工过程中，保证混凝土振捣到位，在梁面等容易产生裂纹的地方，加大振捣力度，使混凝土充分密实。通过增加振捣次数或采用振捣频率高的设备来保证混凝土的均匀振捣，防止出现局部空洞，减少由于密实度不够而引起的裂纹。为防止温差应力造成裂纹，预制梁浇筑完成后要采取一定的保湿养护措施，防止温度变化过快^[3]。

2.3 滴水槽裂纹控制

为控制滴水槽裂纹，需要合理地设置滴水槽工装。工装设计要能够有效地把张拉过程中产生的应力分散掉，防止产生局部应力集中造成裂纹。设计时要保证工装有足够的柔性以及刚性，使其在使用中不容易变形并且可以均匀地传递张拉力。另外，工装要具有很高的耐久性和轻便性。应采用高强度钢材或复合材料

来保证工装在多次使用的过程中仍能保持稳定性能，防止由于材料老化、损坏而影响滴水槽施工质量。在张拉时，需要合理地调节张拉力的施加顺序、大小，防止局部应力过大，对有滴水槽等特殊形状的结构更要注意张拉力的控制。根据其特殊的几何形状和力学性能，应制定出相应的张拉方案，保证应力的均匀分布，减少裂纹的发生。另外，在混凝土浇筑前要对滴水槽的结构进行精确的设计和模拟，保证滴水槽在张拉过程中能承受得住所受的应力^[4]。

2.4 接触网预埋件精准定位

为保证接触网预埋件准确定位，需要使用专用的定位工装。工装可以有效地减少定位误差，保证接触网安装误差控制在0~50 mm之内，符合高标准施工的要求。定位工装设计时要充分考虑安装过程中分散张拉所引起的应力，防止应力集中产生裂纹、变形。为克服滴水槽造型特殊、保护层小、混凝土强度低等缺点，定位工装可以减少初张拉时摩擦力的影响，从而减少应力集中，控制裂纹的产生。定位工装的设置要既具有轻便性又有刚性，在施工中容易操作不能产生变形。可以用合理的结构设计出“端支座”工装（见图1），既保证工装的轻便性又保持刚性，从而达到准确定位的目的。可设计合理的预埋件位置及尺寸，保证接触网系统安装准确、均匀地分散张拉过程中产生的应力，减少局部应力过大的问题，图2为接触网预埋件精准定位示意图。

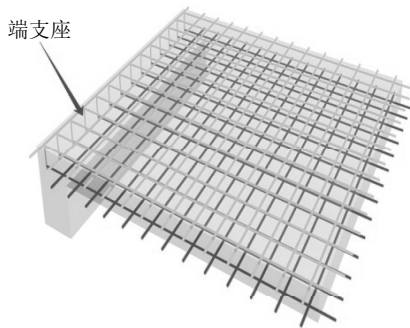


图1 接触网预埋件定位工装示意图

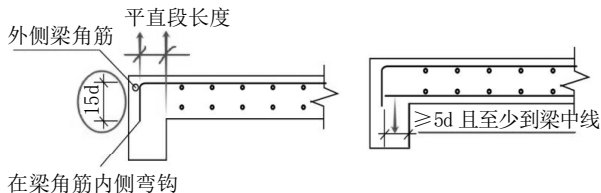


图2 接触网预埋件精准定位示意图

工装在施工过程中操作尤为重要，在操作时需按照规范的要求来执行，保证其发挥出最大的效能。对

工装的使用情况进行跟踪并给予反馈,及时改善和改
进设计,可以不断地提高定位精度、提高施工效率,

保证接触网预埋件在施工中达到高精度定位的目的^[5]。
表 1 为接触网预埋件定位数据。

表 1 接触网预埋件定位数据

工装类型	定位误差范围 (mm)	材料类型	工装重量 (kg)	使用次数	工装稳定性
标准定位工装	0 ~ 50	铝合金	3.5	25	高
加强型定位工装	0 ~ 30	高强塑料	4.0	30	非常高
自定义定位工装	0 ~ 40	钢材	5.0	15	中
轻量型定位工装	0 ~ 45	铝合金 / 塑料	2.5	20	高

3 工艺改进的实施效果

在混凝土浇筑、振捣和养护工艺上进行改进,采用
高效振捣工装及振捣工艺,提高混凝土密实度,减
少由于振捣不实引起的空洞、裂缝等问题。另外,在
施工过程中使用自动化温控系统,对混凝土的养护温
度、湿度进行精确控制,保证混凝土强度、稳定性,
防止由于温差造成的裂纹及表面缺陷。对支座板空响、
梁面裂纹、滴水槽裂纹等常见的问题进行治理,采用

优化支座板安装工艺、改善梁面裂纹防治措施、使用
先进的滴水槽工装的方法,有效降低这些问题发生的
概率。改进后的支座板安装工艺使支座板与箱梁紧密
结合,防止接触不良造成的空响。同时梁面裂纹的防
治依靠精细的施工管理和高强度混凝土的使用,有效
减少裂纹的发生。为检验工艺改进效果,施工单位对
改进前后各个施工数据进行详细的记录并进行对比。
表 2 为实施工艺改进前后变化情况。

表 2 实施工艺改进前后变化情况

项目	改进前	改进后	变化幅度
支座板空响发生率 (次 / 批次)	12	3	下降 9 次
梁面裂纹发生率 (次 / 批次)	15	5	下降 10 次
滴水槽裂纹发生率 (次 / 批次)	10	2	下降 8 次
混凝土密实度 (kg/m ³)	2 300	2 450	增加 150 kg/m ³
振捣深度 (mm)	50	70	增加 20 mm
养护温度 (°C)	20	25	增加 5 °C

由表 2 可知,工艺改进以后,在施工过程中常见的
问题,即支座板空响、梁面裂纹、滴水槽裂纹等发生
率有所降低。支座板空响发生次数由原来的每批 12 次
降到现在的 3 次,梁面裂纹、滴水槽裂纹发生次数也
分别降为 15 次、10 次,各下降 9 次、8 次。从上述数
据可以看出,工艺改进对于减少施工缺陷有明显效果。
混凝土的密实度、振捣深度都有所提高,混凝土的密实
度由原来的 2 300 kg/m³ 增大到现在的 2 450 kg/m³,
振捣深度由原来的 50 mm 增大到现在的 70 mm。说明改
进后的振捣工艺、温控养护能够提高混凝土质量,从
而降低裂纹和空洞发生的风险。

4 结束语

确保高铁箱梁预制施工质量是保证其安全稳定的
前提,对高铁箱梁施工中常见的通病原因进行分析,
提出相应的改进措施,以提高施工精度,减少质量问
题,保证结构的长期稳定性。应改善混凝土性能,改

进振捣工艺,采用先进的工装设计,对支座板空响、
梁面裂纹、滴水槽裂纹等质量问题采取精准控制措施,
提高预制箱梁整体质量,为高铁建设提供更可靠的技
术支持。

参考文献:

[1] 刘涛. 基于高铁预制箱梁的智能张拉压浆施工关键
技术研究与应用 [J]. 建筑机械, 2025(12):113-117.
[2] 周刘强. 高铁预制箱梁智能张拉施工技术及其质量控
制措施 [J]. 四川水泥, 2025(03):198-199,205.
[3] 姜登朋. 高铁预制箱梁智能振捣系统快速施工技术
研究 [J]. 价值工程, 2025,44(05):121-124.
[4] 姜登朋. 高铁预制箱梁桁架式收面装置快速施工技
术研究 [J]. 价值工程, 2025,44(01):68-70.
[5] 田海燕. 高铁特大桥简支箱梁预制施工技术 [J]. 工程
机械与维修, 2021(06):192-193.

基于云平台的工程造价数据共享机制研究

王 晨

(辽宁省建筑设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要 工程造价数据是项目全过程的重要支撑,但其分散存储、标准不同、不能共享等缺点极大地阻碍了行业的进步和升级。云平台依靠虚拟化、分布式存储、高扩展性的特点,为工程造价数据的集中管理、高效的共享提供全新的解决方案。本文以基于云平台的工程造价数据共享机制为研究对象,梳理云平台核心技术与工程造价数据相适应的地方,确定数据共享的理论根据以及特性,创建包含全流程管控、跨主体协作、分层结构的完整的共享机制,从数据安全、标准规范、运维优化三个方面提出保证措施,旨在打破行业的数据壁垒,达到工程造价数据高效、安全、有序共享的目的,为建筑行业的数字化发展提供参考。

关键词 云平台; 工程造价; 数据共享; 共享机制; 数据协同

中图分类号: TP3; TU723

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.021

0 引言

随着我国建筑行业的市场化程度不断提高,工程造价管理的复杂性、专业性也越来越强,其核心就是对各种造价数据的精确把握和高效利用。目前,工程造价数据散落在建设、施工、设计、咨询等各个市场主体之中,存在存储碎片化、格式不统一、共享渠道单一、更新不及时等问题,造成明显的“数据壁垒”。分散的状态会加大造价编制的重复劳动、提高数据误差率,并导致项目各个阶段造价之间的衔接不畅,从而影响决策的科学性和管理的有效性,不能适应行业数字化、智能化转型的要求。云平台技术的发展和普及打破了传统数据管理时空的束缚,使大量的数据得以集中存放、高效处理并方便地传递,在某种程度上为数据共享提供了技术支持。在这种情况下,研究以云平台为载体的工程造价数据共享机制,整合行业数据资源,规范共享流程,解决共享问题,具有重要的理论和实践意义。本文以云平台 and 造价数据共享为融合点,整理出相关的理论依据,并建立可行的共享机制,提出相应的保障措施,以期为推动行业的数据资源得到更好的优化配置并提高整个行业管理水平提供参考。

1 基于云平台的工程造价数据共享理论支撑

1.1 云平台核心技术与应用适配性

虚拟化技术属于基础,在服务器、存储、网络虚拟化的基础上,对物理硬件资源进行抽象整合,并可

以动态地调配和使用这些资源,根据造价数据存储量、访问量的变化来自动调节资源,从而减少由于数据分散而造成的资源浪费。分布式存储技术把大量的造价数据分散存储在多个节点的服务器上,依靠冗余备份来保证数据的安全性和可用性,防止单个节点出现故障而造成数据丢失,同时提高访问速度,适合造价数据量大、类型多、访问频繁的特点。大数据处理技术可以清洗、整合、分析异构化的造价数据,迅速提取出有价值的资料,给决策和造价控制提供支持,解决传统数据处理效率低的问题。云计算服务模式根据各个主体的需求可以提供个性化的服务,减少小型机构信息化的投入,满足大型企业的定制化需求,实现技术与应用精准适配,为数据共享机制的技术基础。

1.2 工程造价数据的类型与共享特性

基础数据包含定额、价格、建材信息、地质勘察等数据,是造价编制和控制的基础,通用性强、更新周期固定、覆盖面广,是各方面的迫切共享数据,可以减少重复编制的工作量,提高造价的准确度。过程数据是在设计、施工过程中产生的,包含设计变更、签证、进度、成本控制等数据,具有实时性、关联性强、动态变化的特点,可以实现各个阶段造价的无缝对接,有利于各个主体掌握造价动态、做出更好的决策。成果数据主要是估算、概算、预算、结算报告等,专业性强、针对性强、价值密度高,共享可以给同类项目提供参考,提高行业的整体管理水平。共享特性主要

作者简介: 王晨(1992-),女,本科,工程师,研究方向:工程概预算。

是指协同性、异构性、安全性、实时性，分别对应各个主体的协同工作需要、数据标准不一致状况、隐私保护要求和动态访问需求，给共享机制的建立赋予明确的方向。

1.3 数据共享的核心理论依据

信息资源共享理论为依据，认为信息资源是重要的生产要素，信息资源的价值实现要依靠高效的共享和优化配置，用到工程造价上就是打破数据垄断，通过云平台把造价数据集中整合起来并高效流动，发挥它对决策、造价控制的支撑作用，提高行业的资源使用效率。协同治理理论重视多元主体的协同配合来达到治理目的，核心就是权责分明、流程规范。工程造价数据共享牵涉到多个主体，利益诉求和需求差别大，利用该理论可以确定各个主体的权责划分，创建协作机制，解决利益冲突，达到互利共赢的目的。云计算理论包含虚拟化、分布式处理等主要思想，给造价数据的海量存储、高效的运算、便捷的传输提供支持，弹性扩展、按需服务等特点适合于大数据共享动态的需求，降低共享的成本和门槛，保证机制顺利推进。三大理论互相支持、互相促进，一起构成工程造价数据共享机制的理论框架和实践基础。信息资源共享理论确定核心目的，协同治理理论理清主体之间的关系，云计算理论给技术的支持，三者构成互相补充、相互关联的整体，精准解决行业内存在的数据孤岛、主体协同不足、技术支持弱等问题。由此推进造价数据共享，可提高机制的科学性、系统性、可操作性，进而推动工程造价行业向着数字化、智能化的方向前进。

2 基于云平台的工程造价数据共享机制构建

2.1 数据共享全流程管控体系

以云平台为载体的工程造价数据共享全流程管控体系，在数据采集、清洗整合、存储备份、传输共享、使用反馈、销毁归档的全生命周期里，用规范流程、明确标准来保证数据共享规范、准确、高效。数据采集环节要创建多源采集体系，确定各个主体的采集责任，规定采集范围、格式和频率，依据自动采集和人工录入来保证数据的全面性及时效性，另外，要设立审核制度，淘汰掉无效错误的数据，从而保证数据的质量。数据清洗整合阶段，依靠云平台的大数据分析技术，对异构的数据进行清洗、转换、整合，统一格式、编码和统计口径，去除冗余和冲突，形成标准化的造价数据资源库，为共享打下基础。存储备份阶段采用分布式存储、冗余备份的方式，根据数据重要程度分为不同的等级保存，对于核心的敏感数据进行加密处

理，定时备份并设置恢复机制来保障数据的安全性和可用性。传输共享环节采用加密传输技术来保证数据不会被泄露或者篡改，实行分级访问制度，按照权限分配访问范围，实现按需精准共享。设置反馈和销毁归档两个环节，分别创建反馈机制、生命周期管理机制、意见收集优化机制、数据销毁和归档规范，实现闭环控制。

2.2 跨主体数据协同共享模式

基于云平台的工程造价数据跨主体协同共享模式，以云平台为载体、多元协同为核心，明确各主体权责，构建“政府引导、市场为主、多方参与、共赢发展”的机制，消除数据壁垒。政府部门是监管和引导者，制订行业的标准、制度和扶持政策，创建公共云平台，整合定额标准、建材指导价等公共数据并免费公开，加强监管规范行为、化解利益冲突。建设单位是项目的核心主体，对项目全生命周期造价数据进行整理，并按照要求向有关方授权共享，协调数据的协同工作，保证各个阶段造价的衔接顺畅，提高管理效率。施工企业是执行主体，上传施工阶段的签证、变更、成本等数据，实时共享造价动态，方便各方面的人员了解成本的变化，同时得到共享的数据来优化施工方案、控制成本。设计单位负责提供设计图纸、概算等资料，共享设计阶段的造价信息，在得到各方的意见之后再对设计方案进行修改以减少造价风险^[1]。

2.3 云平台数据共享架构设计

以云平台为载体的工程造价数据共享架构，按照分层设计、权责分明、灵活扩展、安全可靠的原则，根据共享的需求，建立基础设施层、数据资源层、平台服务层、应用服务层四个层次的架构，各个层面一起支持数据高效的共享与使用。

基础设施层是基础，由服务器、存储设备、网络设备和虚拟化软件组成，用虚拟化的方式将其整合成虚拟资源池，动态地分配资源，给用户稳定的硬件和网络支持，部署安全设备保证基础设施的安全，满足海量的数据存储计算的需求。

数据资源层为中心，包括标准化造价数据资源库、数据管理系统和数据安全管理系统，对数据实行集中管理、质量控制与信息保护。

平台服务层对接上下两层，给数据接口、大数据分析、协同、权限管理等核心服务提供支撑，实现数据的互联互通、价值挖掘和安全共享。

应用服务层面向各个市场主体，为不同的市场主体提供个性化的应用系统，满足建设方、施工方、设

计方等不同的需求,并具备灵活扩展的能力,根据行业的发展和需要增加新的服务模块,提高架构的适应性。

3 基于云平台的工程造价数据共享保障措施

3.1 数据安全和隐私保护保障

数据安全和隐私保护是共享机制正常运转的保证,对于造价数据包含商业秘密、项目隐私等特点而言,从技术、管理、法律三个方面创建全方位的安全系统,防止数据泄露、篡改、滥用的风险^[2]。

从技术角度出发,用全流程加密的技术手段来保证数据的存储、传输、使用过程中的安全性,设置精细的权限分级管理体系,坚持最小化授权的原则,避免出现越权操作的情况,部署安全监测和应急响应系统,对一切可能发生的状况进行实时监控,并准备相应的解决方案,迅速处理突发状况,采用数据脱敏的方法,隐藏主要的敏感信息,维护好用户的隐私安全。

从管理角度来说,要健全数据安全管理制度,明确规定各部门的责任和权限,规范各项工作的程序,加强员工的安全教育,提高员工对安全的认识及操作能力,定期进行安全检查、风险评估,并及时发现和消除安全隐患。

从法律角度来说,在《网络安全法》《数据安全法》《个人信息保护法》等法律法规的框架下,明确各个主体的权利与义务,规范数据的行为,打击违法违规行为,给数据的安全提供法律保障。

3.2 行业标准与制度规范保障

行业标准和制度规范属于共享机制落地的保障条件,依靠创建统一的标准、健全管理制度来规范共享流程以及行为,处理好数据异构、标准不同、权责不明等题目^[3]。在行业标准建设上,由政府牵头,联合行业协会、科研机构和龙头企业,创建起数据标准统一定额、建材价格等各类数据分类、编码、格式和统计口径的标准体系,实现数据的互联互通;技术标准明确云平台架构、数据接口、安全等技术要求,规范平台建设和服务;服务标准对各个主体之间的共享服务进行规范并提出服务质量的要求,提高服务水平。在制度规范建设上,创建数据共享责任制度,确定各个主体的权利和义务,对于违反规定的主体予以惩罚,创建激励机制,鼓励积极参加、供给高品德数据的主体得到扶持和表扬,提高参加的积极性,创建数据质量管理体系,定出评价指标以及流程,不定期评价并且催促改正,保证数据的质量,创建监管制度,增强共享过程的监督,防止数据垄断及滥用,保证共享公平有序。

3.3 机制落地运维与优化保障

共享机制的落地实施,需要完备的运维管理以及持续地改进,依靠建立专业的运维队伍、健全管理制度、建立动态优化机制来保证机制长久正常运转,提高共享效能和质量^[4]。运维管理上设置以云计算、工程造价、数据管理、网络安全等为内容的专业队伍,确定各自的职能范围,对平台的日常维护工作、设备维修保养、软件系统升级更新、数据备份和安全监控进行处理;建立健全运维管理制度,规范操作程序,定期开展检查考核,提高运维规范化程度;采用先进的运维技术和方法来达到运维自动化、智能化的目的,降低运维成本、提高运维效率^[5]。机制的改善就是创建动态改进机制,依照行业的改变、技术的发展和顾客的需求来不断检验改良机制,创立起需求搜集机制,整理出问题缺欠,给改良提供参考,创立起技术更新机制,引进先进的技术,革新平台结构及办事形式,建立效果评价机制,依据共享效率、数据质量等指标予以改良,加强行业间的交流协作,学习高效方法,吸收好的理念,推进机制不断地完善,适应行业数字化转型的要求^[6]。

4 结束语

随着建筑行业的数字化转型不断深入,基于云平台的工程造价数据共享成为行业发展的一种必然趋势,可以打破数据壁垒,整合资源,提高工作效率和成本,推动工程造价行业由原来的分散走向协同化。通过研究共享机制,整理出云平台技术适配性、数据类型特性及核心理论依据;从全流程管控、跨主体协同、架构设计这三个方面来建立完整的共享机制;从数据安全、标准规范、运维优化三个方面提出保证措施,保证机制应用效果。

参考文献:

- [1] 王小丽.数智经济时代工程造价管理数字化转型路径探索[J].市场周刊,2025,38(20):33-36.
- [2] 方毅勇.基于大数据技术提升工程造价预结算审核质效的对策探讨[J].企业改革与管理,2025(06):127-129.
- [3] 唐瑞莲,汤斌.基于大数据技术的公路工程造价动态管理模式优化[J].工程技术研究,2025,10(01):157-159.
- [4] 陈赛.大数据赋能工程造价市场化建设的优化路径研究[J].市场周刊,2024,37(17):92-95.
- [5] 马新勇,高家兴,宋雨初,等.工程造价数字化研究综述[J].建材世界,2025,46(05):110-114.
- [6] 徐潇洁.工程造价信息化管理研究[J].房地产世界,2023(21):103-105.

安全验收评价在新建工业项目中的实施与优化

石昌辉

(无锡鼎时安全科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要 新建工业项目安全验收评价是落实“安全三同时”制度的核心环节, 更是衔接项目建设与投产运营的关键安全生产抓手, 直接关系到项目投产安全与工业生产整体安全管理成效。本文结合第三方安全评价机构的一线实操经验, 从合规防控、成本管控、管理提升三个方面剖析其应用意义, 梳理出评价形式化、专业能力不足、协同不畅、整改乏力等实施难点, 并针对性提出监管强化、动态评价、队伍建设、信息化闭环等优化策略, 以期为提升安全验收评价工作的实操性与落地性, 推动其规范化、实效化开展提供参考, 进而为新建工业项目安全生产筑牢坚实防线。

关键词 新建工业项目; 安全验收评价; “安全三同时”制度

中图分类号: TU712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.022

0 引言

新建工业项目是推动产业升级、夯实经济发展根基的重要载体, 其安全生产水平直接关系到工业生产整体安全格局与人民群众生命财产安全。安全生产是新建工业项目落地运营的首要底线, 而安全验收评价作为落实“安全三同时”制度的关键环节, 是衔接项目建设与投产运营的核心安全管控手段, 更是从源头防范安全风险、规范项目安全管理的重要举措, 在新建工业项目全流程安全管控中占据不可替代的重要地位, 是保障项目合规、安全、高效投产的重要支撑。

1 安全验收评价在新建工业项目中应用的意义

1.1 筑牢合规底线, 防控安全风险

安全验收评价是新建工业项目投产前不可或缺的合规管控环节, 作为独立的第三方评价机构, 会严格依据国家安全生产法规与行业标准, 对项目开展全维度的现场核查, 核查范围覆盖设备配置、工艺实施、安全管理体系构建等建设全流程, 精准识别各环节潜藏的安全隐患, 确保项目各建设维度均符合安全生产的合规要求。这项工作从源头筑牢了项目的安全准入防线, 将各类安全风险提前把控在投产之前, 从根本上规避因合规缺失引发的安全问题, 夯实项目安全运营的合规基础, 降低投产后安全事故发生的潜在可能。

1.2 降低整改成本, 践行社会责任

安全验收评价在项目竣工前开展专业的安全核查, 能够在项目建设收尾阶段及时发现安全层面的短板与

不足, 推动问题在投产前完成整改, 避免项目投产后因安全指标不达标被责令停工整改, 从根源上减少后期因大规模安全改造产生的各类投入, 有效控制项目整体运营成本, 保障项目投产后的运营效率^[1]。同时, 企业主动开展安全验收评价, 是切实履行安全生产主体责任的体现, 彰显了企业对生产安全、人员安全的重视, 是企业践行社会责任的重要组成部分, 也是企业可持续发展的安全基石。

1.3 压实责任链条, 提升管理效能

安全验收评价天然串联起建设、施工、设计等项目建设各主体, 第三方机构以专业的评价标准为依据, 推动各主体清晰界定自身的安全管理职责, 打破责任模糊的管理壁垒, 倒逼设计、施工、设备采购等各环节严格遵循安全规范开展工作。评价工作的开展能推动项目各环节形成安全管理的联动效应, 促进项目搭建起全流程、闭环式的安全管理体系, 让安全责任层层传导、落地见效。同时以安全管理的标准化和规范化为抓手, 带动项目各建设环节质量管理的精细化提升, 实现安全管理与工程管理的协同增效, 全面提升项目整体管理效能。

2 安全验收评价在新建工业项目中的实施现状

2.1 评价流于形式, 针对性不足

部分新建工业项目建设中, 企业过度追求投产进度, 将安全验收评价当作程序性环节而非实质性风险排查手段, 刻意忽视评价工作的专业深度与实操价值,

作者简介: 石昌辉 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 安全评价。

动辄要求评价机构简化现场核查流程、压缩报告编制周期，直接造成评价报告模板化问题凸显。部分评价机构为迎合企业需求、维持合作关系，也主动降低评价标准，未按规定制定专项核查方案，甚至直接套用同类项目报告框架。评价工作浮于表面，现场核查多为走过场式开展，未结合项目建设实际开展精细化、针对性排查，对于项目涉及的危化品储存使用、特殊生产工艺运行等特有安全风险，既未组织专业人员开展专项现场勘查，也未进行系统性风险分析，仅依托通用资料堆砌报告内容。这类报告与项目实际安全现状严重脱节，无法客观反映建设中的真实隐患，原本的风险识别核心功能完全失效，让安全验收评价失去了应有的实际意义。

2.2 人员素养欠缺，专业性薄弱

新建工业项目安全验收评价对专业能力要求严格，但部分评价团队的人员素养难以匹配工作需求，核心症结在于缺乏工业项目相关的行业实践经验，对不同领域项目的生产工艺流程、专用设备安全运行特性、现场安全管控核心要点的理解仅停留在理论层面，现场核查中缺乏专业判断能力，难以识别出建设中潜藏的隐蔽性、关联性安全隐患^[2]。部分评价机构为降低运营成本，未配备与项目行业匹配的专业技术人员，跨行业开展评价的情况普遍，更有部分评价人员脱离项目现场实际，仅依靠建设单位提供的书面资料闭门编制报告，提出的隐患判定依据与整改方向均脱离实操场景，缺乏落地性。同时部分人员未及时更新安全生产标准与规范知识，对新规要求掌握不足，进一步削弱评价工作的专业支撑，无法为项目隐患排查整改提供有效指导。

2.3 协同机制不畅，衔接性欠佳

建设单位、施工单位与第三方评价机构之间未建立高效的常态化沟通协同机制，三方的安全管理责任划分缺乏明确清晰的界定，易出现责任推诿、工作衔接断层的问题。设计单位作为安全设计源头，也未被纳入协同体系，设计方案的局部调整未同步告知施工与评价单位，导致施工环节的安全偏差无法及时发现。施工单位在项目建设过程中，针对工艺参数调整、设备型号变更、施工工序优化等关键内容，未及时向评价机构同步更新信息，导致评价机构开展核查与报告编制的依据存在滞后性与失真性。建设单位则对评价机构提出的安全隐患问题重视不足，整改响应迟缓，未及时推动问题落地解决。

三方间信息传递无固定渠道、问题处理无规范流

程，使得评价发现的安全问题无法快速推进整改，项目安全管理的各衔接环节漏洞频发，直接影响安全验收评价闭环管理的整体效果。

2.4 整改落实乏力，监管性缺位

部分企业对安全验收评价出具的隐患整改要求缺乏正确认知，仅将整改工作视为应对检查的形式化操作，对提出的整改项仅做“纸面整改”，仅完成书面回复与资料完善，甚至编造整改资料、伪造现场照片蒙混过关，并未真正结合项目现场实际落实现场整改措施，隐患问题并未得到实质性解决。同时项目整改后的复查跟踪机制存在明显缺失，缺乏对整改过程的持续监督管控与整改效果的专业核验，无法从流程上确保隐患整改到位^[3]。此外，部分地区的行业监管部门对安全验收评价的监管方式较为单一，仅对评价报告进行书面形式审核，未建立常态化的现场抽查、整改复核机制，受人力精力限制，监管覆盖也难以全面，对企业的隐患整改落实情况缺乏有效的监督与约束，监管的滞后性与形式化使得整改要求难以落地，隐患防控的最后一道防线失效，部分安全隐患长期留存于项目中。

3 安全验收评价在新建工业项目中的优化策略

3.1 强化三方监管，规范评价流程

明确建设单位委托要求，需选择与项目行业类别匹配的甲级资质第三方评价机构，签订正式委托协议并列明禁止干预评价工作的条款，协议需经行业监管部门备案后生效，从源头保障机构独立性。行业监管部门建立评价工作全流程监管体系，立项阶段核查机构资质与项目的匹配性，现场评价阶段每月随机抽查不低于30%的在评项目，核验核查记录的真实性，报告编制阶段组织由行业实操专家和安全管理专家组成的复核组，复核报告内容与现场实际的一致性。建立安全生产信用管控机制，对评价走过场、出具虚假报告的机构，依法吊销相关资质并纳入行业黑名单，信息同步至市场监管等部门实现跨部门联合惩戒，对黑名单机构实施三年市场禁入；对干预评价流程的建设单位，责令限期整改并将相关行为记入企业安全生产信用档案，整改期间暂停项目相关审批手续。同时监管部门建立评价工作台账，实时记录各环节监管情况，台账细化项目信息、监管结果、问题处置情况，实行“一项目一台账”动态更新，还定期复盘监管工作，优化抽查和复核流程，通过全节点监管与硬性惩戒措施，规范评价各环节操作标准。

3.2 建立动态评价, 精准排查隐患

打破竣工后一次性评价模式, 将安全验收评价精准嵌入设计审查、设备安装、试运行三个核心节点, 明确各节点评价核心要点与资料留存标准, 设计审查阶段留存专家评审意见和设计修改回执, 设备安装阶段留存现场核验记录和设备检测报告, 试运行阶段需对安全设施运行状态连续监测不少于 72 小时。第三方机构制定各节点评价实操细则, 提前与建设单位对接项目进度计划, 在各节点启动前完成人员调配, 现场核查结束后当日出具问题清单, 明确整改反馈时限, 要求建设单位按节点同步提交整改进展资料, 各节点评价均出具正式意见书, 作为项目推进的必备资料, 未完成上一节点整改的不得进入下一建设环节^[4]。安排专人跟进各节点整改进度, 每周将进度同步至监管部门, 对未按时反馈的建设单位发出书面预警函, 对预警后仍未整改的即时同步监管部门, 核验资料双方签字留存, 评价结果纳入项目安全生产档案, 实现隐患即查即改, 杜绝隐患跨节点累积。

3.3 锤炼专业队伍, 沉淀实践经验

第三方评价机构按化工、冶金、制造等行业划分专业评价小组, 制定年度实操培训计划, 每月组织行业工艺、专用设备安全管控要点的线下培训, 培训师邀请行业龙头企业工艺工程师和资深安全评价师担任, 确保培训内容贴合现场实操, 培训后组织现场模拟核查演练, 检验学习效果。推行“老带新”一对一结对机制, 新人全程跟随资深评价人员参与项目现场核查、隐患分析等全流程工作, 每次实操后形成包含隐患识别思路和现场处置建议的工作记录, 并由导师逐一点评指导。建立企业内部典型案例库, 按行业、隐患类型分类整理, 明确隐患识别特征、现场核查重点, 每月更新最新隐患案例和规范调整内容, 要求评价人员每月开展案例研讨。定期组织行业特有风险识别考核, 采取现场实操+理论笔试的形式每季度开展一次, 考核不合格者暂停现场工作, 经专项培训补考通过后方可重新上岗, 考核结果与个人绩效、岗位晋升直接挂钩, 案例库收录行业事故案例, 培训内容随规范动态调整, 鼓励人员参与行业研讨, 形成培训、实操、考核的闭环管理。

3.4 搭建信息平台, 实现闭环管理

依托物联网、大数据技术搭建安全验收评价数字化管理平台, 设置隐患排查、整改要求、复查验收等功能模块, 实行操作权限分级管理, 建设单位、评价

机构、监管部门各设专属操作权限, 录入信息需明确隐患具体位置、问题详细描述、责任部门、整改时限及复查核验人员, 所有信息按项目建档永久留存可随时调阅, 平台同步对接当地安全生产监管大数据平台, 实现数据互通共享。第三方机构完成现场核查后, 即时将隐患信息录入平台并同步至建设单位与监管部门; 建设单位按要求整改, 同步上传附带定位和时间水印的整改现场影像、验收资料等佐证材料, 杜绝资料造假; 复查验收由第三方机构现场核验后, 在平台提交复核结果, 未达标项重新设定整改时限^[5]。平台对超期末整改项进行系统自动预警, 预警后 12 小时内监管部门需介入督办, 隐患按风险等级分级标注, 高风险隐患自动推送至监管部门重点督办, 形成预警一督办一反馈的快速响应机制, 全程记录各环节操作轨迹实现责任可追溯, 通过“线上督办+线下复核”的硬性流程, 从技术层面杜绝“纸面整改”。

4 结束语

安全验收评价是新建工业项目安全生产的重要屏障, 其工作质量直接决定项目投产后的安全管理水平, 更是落实“安全三同时”制度的关键抓手。从第三方安全评价的实操经验来看, 当前评价工作的难点并非源于制度本身, 而是落地执行与协同管理的缺位。唯有通过监管部门、建设单位、第三方机构的三方协同, 以动态评价完善机制, 以专业建设提升能力, 以科技赋能实现闭环, 才能让安全验收评价摆脱形式化困境, 真正发挥风险识别与防控的作用。未来, 还需持续结合行业实践深化优化策略, 推动评价工作规范化、常态化, 让安全验收评价成为新建工业项目安全生产的坚实保障, 为工业产业高质量发展筑牢安全根基。

参考文献:

- [1] 李娟, 胥豪杰. 某厂工业化 PC 预制构件建设项目安全验收评价工作探析 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(28): 157-160.
- [2] 吴迪, 安晓. 浅谈造成工程建设项目安全设施验收“久试未验”的因素及对策 [J]. 石化技术, 2022, 29(08): 145-146.
- [3] 沈耀. 关于建设项目安全设施“三同时”的编制研究 [J]. 企业改革与管理, 2020(23): 31-32.
- [4] 黎静, 王兴太, 李茂. 安全评价专业的业务发展与技术进步 [J]. 西北水电, 2020(05): 14-16.
- [5] 陈明. 安全验收评价过程中的问题与建议 [J]. 中外企业家, 2017(05): 213.

智能制造背景下机电制造过程 关键技术应用研究

张 炯

(青岛乾程科技股份有限公司杭州分公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要 在制造模式持续发展的背景下, 机电制造过程正面临生产节奏加快、系统复杂度提升以及质量稳定性要求提高等多重挑战, 传统制造方式在数据感知、过程协同与设备运维等方面逐渐显现局限, 难以支撑制造系统的持续优化与柔性运行。本文围绕机电制造全过程, 从智能化转型需求出发, 系统探讨工业互联网、数字孪生、智能机器人以及智能检测与预测维护等关键技术制造过程中的应用路径, 并结合系统集成与场景验证, 分析多技术协同对制造效率、质量控制与运行可靠性的支撑作用, 以期对机电制造领域智能化升级提供实践参考。

关键词 机电制造过程; 智能制造; 数字孪生; 预测性维护

中图分类号: TP2; TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.023

0 引言

智能制造通过深度融合先进的信息技术、制造技术、自动化技术和人工智能技术, 打破了传统制造业的界限, 实现了制造过程的智能化、柔性化和集成化。智能制造的核心在于数据的收集、分析和利用, 通过实时采集生产现场的数据, 运用高级算法进行优化决策, 使得制造过程更加精准、高效, 不仅提高了生产效率, 降低了生产成本, 还显著提升了产品质量和产品创新的速度。在智能制造日益成为工业发展核心趋势的背景下, 智能制造以数据驱动为核心重塑机电制造运行方式, 促使生产过程由经验控制向智能决策转变。这一转型为复杂制造流程的精细化管控与系统协同运行提供了基础, 也为机电制造在效率与质量层面的持续提高创造了条件。

1 机电制造过程智能化转型需求分析

1.1 机电制造流程特征与环节构成

机电制造通常以零件加工、部件装配、整机调试与出厂检测串联成主流程, 同时穿插工装夹具管理、物料配送与过程追溯等支撑环节, 加工段以数控机床为核心, 涉及刀具寿命、切削参数与几何精度的耦合控制, 过程数据既来自 CNC 系统也来自测量单元与环境传感; 装配段更强调多源不确定性, 包含定位误差、紧固力矩、间隙配合与装配顺序约束, 往往需要视觉

定位与力控策略协同; 检测段既有尺寸与形位的计量链, 也有电气性能与可靠性试验链, 数据形态从结构化量测到波形与图像并存^[1]。各环节节拍差异明显, 设备与工位呈离散分布, 导致信息流、物流与工艺流高度交织, 构成智能化改造的对象基础。

1.2 制造过程智能化升级的核心瓶颈

机电制造转型的阻力多出现在数据链与决策链断裂处。设备侧接口标准不一, CNC、PLC、机器人控制器与检测仪器常以不同协议输出数据, 采集依赖定制脚本或人工导出, 形成时序不连续与口径不统一的问题, 追溯时难以还原真实工况; 工艺侧知识沉淀不足, 关键参数窗口往往由师傅经验确定, 参数变更缺少可验证依据, 出现质量波动时只能依靠返修与抽检兜底; 管理侧计划与现场脱节, 排产更多基于静态产能假设, 未把设备状态、换型损耗与质量风险纳入同一约束, 导致局部最优与全局拥堵并存; 运维侧偏事后响应, 故障征兆未被有效利用, 停机损失与备件浪费叠加, 进而放大交付不确定性与成本压力。

1.3 全流程智能制造体系架构设计

面向上述特征与瓶颈, 体系架构宜以统一数据底座牵引跨环节协同。底层以边缘网关承接多协议接入, 完成数据采集、时间同步、信号清洗与事件化封装, 使 CNC 状态、机器人轨迹、检测结果与能耗振动等信息具备一致语义与可追溯链路; 中间层以制造执行与

作者简介: 张炯(1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电能表、设计开发、电能计量、电碳计量。

过程质量为核心,贯通工单、工艺规程、设备能力与物料批次,实现工序级数据关联与质量闭环,同时保留工艺变更的版本控制与审批轨迹;上层以模型驱动优化为抓手,将数字孪生用于节拍仿真、瓶颈识别与参数敏感性分析,把结果回写到排产与工艺窗口;运维层引入健康评估与寿命预测,将异常预警与维修策略联动备件与停线计划,形成从感知到决策再到执行反馈的连续闭环,从而支撑机电制造的柔性运行与稳定交付。

2 智能制造背景下机电制造过程关键技术及应用

2.1 互联感知下制造数据实时采集技术

在机电制造场景中,制造数据实时采集已由单点参数获取转向对加工、装配与检测全过程状态的连续感知与关联建模。数控加工环节以 CNC 系统为核心,围绕主轴转速、进给速度、切削负载、伺服电流及刀具磨损状态等关键变量进行高频采样,依托 MTConnect、OPC UA 或私有接口接入边缘计算节点,实现亚秒级甚至毫秒级时间对齐,同时引入振动与声发射传感器,对切削异常和刀具劣化进行补充感知,以弥补控制系统原生数据粒度不足;装配环节强调多模态融合,工业相机用于获取零部件位姿与装配间隙,力矩与压力传感器记录紧固和压装过程的受力曲线,位置编码器与机器人控制器输出运动轨迹信息,这些数据在边缘侧完成同步融合,用于表征装配一致性与过程稳定性;检测环节将在线测量结果、电气性能测试数据与工序和设备信息绑定,形成可追溯的质量数据链。在系统层面,凭借统一数据模型、时间戳与设备标识机制,对异构数据进行规范化封装,并在边缘侧完成异常点过滤与特征提取,为后续制造优化与智能决策提供语义一致的数据基础^[2]。

2.2 数字孪生支撑的制造过程动态优化

数字孪生在机电制造中的核心价值体现在对复杂制造过程的动态刻画与可预演能力上,其实现基础在于构建与物理系统高度一致的多层级虚拟模型,该模型一般由设备模型、工艺模型与生产组织模型共同构成,其中设备模型刻画数控机床、装配机器人及检测设备的运动学特性与性能边界,工艺模型描述切削参数、装配顺序与公差传递关系,生产组织模型则反映工位布局、节拍约束与资源占用情况^[3]。依靠工业物联网采集的实时数据,孪生模型在运行过程中不断校正关键状态参数,使虚拟空间能够同步反映物理制造过程的实际演变。在加工环节,基于历史加工数据建

立切削力与表面质量预测模型,并结合实时负载与振动反馈,对进给速度、转速及切削深度进行在线仿真与风险评估,从而在保证加工精度的前提下优化效率;在装配环节,数字孪生用于分析不同装配路径、工序组合与工位配置对整体节拍的影响,提前识别潜在瓶颈并生成重排方案。相关优化结果依托接口回传至 MES 与控制系统,用于指导参数调整与排产修正,使制造过程由静态规划转向动态自适应调控。

2.3 柔性装配场景中的智能机器人应用

在机电制造装配环节中,产品结构复杂、零部件规格差异大以及装配公差链较长,使传统固定程序的自动化装配方式难以适应多品种与频繁切换的生产需求,柔性装配场景下的智能机器人系统通常以协作机器人或多轴工业机器人为主体,依托集成视觉、力觉与运动控制模块构建感知—决策—执行一体化能力^[4]。在感知层,基于工业相机获取零部件外形、孔位及姿态信息,并借助深度学习目标检测与位姿估计模型,实现对随机来料和装配偏差的稳定识别;控制层则引入力控与阻抗控制算法,在插装、压装和精密紧固过程中根据实时力矩、位移反馈动态调整运动轨迹与装配速度,防止因刚性控制引发的卡滞或结构损伤。针对多品种装配需求,装配工艺被拆分为标准化动作单元,与参数库和装配规则库关联存储,凭借 MES 下发工单自动匹配装配路径与参数配置,实现快速换型与一致性控制,由此机器人系统与视觉、工艺数据的深度协同,使机电装配过程在保证精度与可靠性的同时,具备对复杂结构和工况变化的柔性适应能力。

2.4 智能检测与设备预测维护协同应用

在机电制造体系中,智能检测与预测性维护的协同应用逐步成为保障制造稳定性与质量一致性的关键支撑,其核心在于打通质量数据与设备状态数据之间的关联关系。检测环节一般围绕尺寸精度、形位公差、装配完整性及功能性能展开,凭借工业相机、激光测量与电气测试装置获取多源检测信息,并利用图像处理与特征学习模型对表面缺陷、装配偏差及性能异常进行在线判别,检测结果不再作为孤立结论,而是与对应工序参数、设备运行状态和批次信息进行绑定,形成可用于分析质量成因的数据基础;设备预测维护则依托振动、温度、电流及润滑状态等连续监测数据,构建反映设备健康状况的特征指标体系,依靠趋势分析与模型推断识别异常演化特征,并对关键部件的剩余寿命进行动态评估,当质量检测结果出现异常波动

时,系统可同步调取设备健康状态进行交叉分析,判断问题源于工艺参数偏移还是设备性能退化,并据此给出参数修正或维护干预建议。通过此类检测与运维的协同机制,机电制造过程由事后纠偏逐步转向基于状态感知的主动预防,为稳定生产节拍与产品质量提供了技术保障^[5]。

3 关键技术集成应用与制造案例验证

3.1 多技术融合的智能制造平台构建

面向机电制造的多环节协同,平台建设宜采用“边缘接入—数据中台—业务应用”一体化架构,将设备互联、过程建模与智能分析纳入同一技术栈^[6]。底层以边缘网关承接CNC、PLC、机器人控制器及在线检测设备的异构接入,完成协议适配、采样频率统一与时间同步,保证高频信号与工序事件能够在同一时间轴上对齐;数据层以统一设备模型与工艺语义模型为核心,将主轴负载、伺服电流、紧固曲线、尺寸测量结果等要素按工单、工序、设备与批次建立关联索引,形成可追溯的数据链;应用层将数字孪生、质量分析与运维评估作为核心服务模块,依靠API对接MES,实现工单下发、参数调用、异常告警与处置闭环。平台运行时,数据并非简单汇聚,而是以特征化、事件化方式沉淀,使切削异常、装配偏差与设备劣化具备可计算、可定位的表达,从而为后续场景验证与效果评估提供统一的技术底座。

3.2 典型机电制造场景应用流程分析

以某机电减速器制造为例,场景覆盖齿轮轴加工、箱体装配与整机测试三个关键段,用于检验关键技术制造过程中的协同运行效果,加工段在CNC侧接入负载、电流与振动信号,边缘节点对切削过程进行窗口化特征提取,识别负载突增与振动谱异常,并将事件回传至孪生模型进行工况校核,当孪生预测显示刀具磨损风险上升时,系统在不改变工艺路线的前提下调整进给与换刀策略,避免精度漂移。装配段依托视觉定位获取轴承与齿轮位姿,力矩传感记录紧固曲线并与工艺参数库对照,若出现扭矩爬升异常或装配偏差超限,系统触发返工或工位复核,同时同步检查机器人末端工具状态与夹具磨损信息。检测与运维段将尺寸测量、噪声振动测试结果与设备健康指标关联,当质量波动与设备劣化同步出现时,优先定位为设备侧退化并安排计划性维护,若设备健康正常则回溯工艺参数与来料批次,实现从异常触发到处置反馈的闭环验证。

3.3 应用效果评估与过程优化对比

为评估集成应用的实际收益,对同一条减速器装配线在改造前后各运行4周的数据进行对比,指标涵盖质量、节拍与设备可用性三类。质量层面,在线视觉与紧固曲线判别投入后,装配一次合格率由92.4%提升至97.1%,关键紧固点扭矩超限事件占比由3.6%降至1.2%,返工工时占比由7.8%下降到4.1%;效率层面,依托孪生节拍分析与工位重排,平均单台装配节拍由168s缩短至152s,换型准备时间由38min降低至24min,生产节拍波动范围由±9.5%收敛至±5.2%;运维层面,基于振动与电流特征的预测维护使计划外停机次数从每周2.1次降至0.9次,设备综合可用率由86.3%提升至91.7%,备件非计划消耗金额在统计周期内下降约18.5%。上述结果表明,多技术协同并非局部改良,而是凭借数据贯通与闭环处置带来质量稳定性与产线可靠性的同步增强。

4 结束语

本文围绕机电制造过程的智能化转型需求,从数据感知、过程建模、柔性装配以及检测与运维协同等方面,对关键技术的应用路径与集成效果进行了系统梳理与验证。实践表明,多源数据贯通与模型驱动优化能够显著改善制造过程的可控性与稳定性,为复杂机电产品的高质量生产提供支撑。未来,随着制造场景进一步复杂化,如何在现有体系基础上引入更高层次的智能决策能力、增强跨系统自适应协同水平,将成为机电制造智能化持续发展的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 杨梓嘉. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(09): 49-51.
- [2] 韩文杰. 机械制造智能化技术与机电一体化的融合研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(04): 93-95.
- [3] 王赞, 何俊峰. 智能制造背景下机电一体化技术的应用与发展[J]. 南方农机, 2023, 54(15): 141-143, 158.
- [4] 杨张海, 徐盼盼. 机电自动化在工程机械制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(01): 26-28.
- [5] 母国才, 莫日华. 机电产品制造质量特性预防控制关键技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(12): 158-161.
- [6] 李俊青. 机械制造的智能化技术与机电一体化的融合[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(12): 86-88.

面向低碳目标的电气自动化系统 节能优化路径研究

何飘芸

(浙江大尧建设有限公司, 浙江 金华 322000)

摘要 在低碳发展目标持续强化的背景下, 电气自动化系统的能耗水平已成为工业领域节能减排的重要约束因素。本文围绕电气自动化系统运行过程中存在的能效偏低与负载匹配不足等问题, 以低碳目标为导向, 对系统能耗特性进行梳理, 并从设备选型、运行控制与系统协同等层面探讨节能优化思路。在此基础上, 结合典型工业应用场景, 对节能优化措施实施前后的能效变化进行对比分析, 验证相关路径在降低能耗与改善运行效率方面的可行性, 以为工业领域低碳运行提供技术参考。结果表明, 面向低碳目标构建系统化的节能优化路径, 有助于提高电气自动化系统的整体能效水平。

关键词 电气自动化系统; 低碳目标; 能效优化; 节能运行

中图分类号: TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.024

0 引言

电气自动化工程中的电力消费涉及电能发、输、供、配等各个方面, 且目前依然是过多地依靠火力发电机组进行生产, 无形中增加了我国的碳排放量, 造成的环境问题也越来越严重。近几年, 世界上多个国家已经率先提出了碳达峰以及碳中和的“双碳”目标, 我国也积极响应号召将其作为长期坚持的战略。如何做好电气自动化工程的节能工作是大众越来越关心的问题。因而探索电气自动化系统的节能运行思路, 对于缓解能源消耗压力、推动工程领域绿色转型具有现实意义。

1 面向低碳目标的电气自动化系统能耗特性分析

1.1 电气自动化系统能耗构成与运行特征

电气自动化系统的能耗结构一般由驱动执行单元、供配电环节以及控制与辅助装置共同构成, 其中驱动系统占据电力消耗的主体位置, 尤以电机及其传动链条最为显著。在实际运行中, 电机本体的铜损、铁损与机械损耗相互叠加, 当工艺负载呈现波动或长期偏离额定工况时, 电机往往运行于低效率区间, 无效能耗随之累积, 供配电环节同样不容忽视, 变压器在低负载或非经济运行区间内, 铁损占比明显上升, 而母线、电缆在大电流或功率因数偏低条件下, 其压降与线路热损会在连续运行中被不断放大, 同时无功功率需求

增加将抬高系统电流水平, 间接加剧供电设备的附加损耗。从运行特征看, 电气自动化系统普遍存在工况离散与负载漂移现象, 设备在轻载、频繁启停或待机状态下仍保持较高基础功耗, 此外变频器、整流及电力电子装置的大量应用虽改善了调速性能, 却引入一定比例的谐波电流, 降低电能质量, 进一步诱发附加损耗与容量冗余, 使系统整体能效呈现结构性下降趋势^[1]。

1.2 低碳目标约束下的能效评价重点

面向低碳目标开展能效评价时, 若仅依据用电量进行判断, 往往难以揭示系统运行中的结构性问题, 更适宜将能源消耗与产出水平、运行工况与电能质量进行联动刻画。评价过程可围绕单位产量电耗、单位运行小时能耗及关键设备负载率等指标展开, 同时将功率因数、谐波畸变率、电压偏差等电能质量参数纳入约束, 以识别无功功率需求与谐波电流引起的隐性增耗。针对电机系统, 应结合效率特性曲线与实际负载分布情况, 判断其是否长期处于低效率区间, 并重点评估变频运行条件下的系统整体效率, 而非孤立考察电机本体性能; 对于工艺运行环节, 还可引入峰谷电量占比、最大需量及负荷波动系数等指标, 分析负荷调度是否存在“高峰硬扛、低谷空转”的非经济运行状态, 从而将低碳约束转化为可量化、可追溯的能效评价依据。

作者简介: 何飘芸 (1981-), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电气系统及其自动化。

1.3 自动化系统运行中的主要能耗问题

现场能耗水平偏高通常并非由单一因素触发，而是设备选型、控制策略与运行组织相互叠加后的综合结果。在设备层面，“大马拉小车”现象较为普遍，电机及减速机构往往依据极端工况放大配置，致使其在多数运行时段处于轻载区间，效率显著下滑，供配电环节为追求运行可靠性而过度预留容量，使变压器长期低负载运行，铁损比例上升并伴随无功功率需求增加；在控制层面，定速运行配合节流、旁通等传统调节方式在风机、水泵等场景中仍被广泛采用，系统依靠压差消耗实现流量调节，电能被持续转化为无效损失，粗放的启停逻辑还易引发冲击电流与频繁再加速损耗；在管理层面，能耗数据采集多停留在总量统计，缺乏对关键回路与典型工况的分项计量和负荷画像分析，异常能耗难以及时识别，设备待机、空转及跨班次低效运行便在无形中被固化为常态^[2]。

2 面向低碳目标的电气自动化系统节能优化路径

2.1 高效电气设备支撑下的节能优化方式

面向低碳目标的设备层优化应从“损耗源头”入手，以电机、变压器与功率补偿装置为优先对象完成能效重构。电机侧更倾向于以高效等级电机替代普通机型，并结合负载谱重新校核容量，使电机在常用工况落入高效率区间，对频繁启停或存在再生能量的工况，可匹配具备制动能量回馈能力的驱动器，降低制动电阻消耗；变压器侧应依据实际最大需量与负荷波动重算配置容量，防止长期低负载导致铁损占比过高，并优先采用低损耗变压器与合理分段运行方式，使其运行点更接近经济区间^[3]。供配电回路可依托降低线路压降与接触电阻来压缩热损，采用低阻抗母线、缩短不必要的迂回走线，并对高电流支路实施温升监测以提前识别接点劣化，同时功率因数治理宜采用分层补偿与动态投切方案，低压侧按负荷分组配置电容器组并配合投切控制器，必要时引入有源滤波或静止无功发生装置削减谐波与无功电流，减少电流放大效应对线路与变压器的附加损耗，从设备配置层面为系统节能打下可持续的能效底座。

2.2 变频调速技术引导的运行能效提升

变频调速的节能价值并不止于“降速”，关键在于将转速调节与负载需求实时匹配，减少节流、旁通等以压差消耗实现调节的无效功，针对风机、水泵等平方转矩负载，可在满足工艺下限的前提下，将流量或压力设定由固定值改为随工况自适应的目标量，并

依靠闭环控制使转速随需求变化而连续调整，从而在低需求阶段显著降低轴功率输出^[4]。为避免低速区间效率劣化，应同步优化电机参数与变频器控制方式，常用做法是采用矢量控制或直接转矩控制提升低频力矩能力，并对电机磁链进行适配以减少轻载励磁损耗；在多泵并联场景，还需综合考虑单台泵效率曲线与系统曲线，依托“变频主泵+工频辅泵”的组合策略实现分段投运，防止所有泵同时低效运行。变频器选型与工程实施环节需关注谐波与电磁兼容问题，凭借配置输入电抗器、滤波器或采用多脉波整流降低电流畸变，并合理设置载波频率与加减速时间以兼顾损耗与动态性能，对长电缆与高惯量负载，应配置输出滤波与制动单元，减少过电压与制动能量浪费，使变频调速成为低碳运行下“按需供能”的核心抓手。

2.3 智能控制策略驱动的系统能效改善

在自动化系统中，能效往往受控制策略的“细节品质”影响显著，智能控制的关键目标是把能耗从被动结果变为可控变量。对具有明显时变特性的工况，可在传统PID基础上引入自整定与增益调度机制，根据负载、温度、压力等关键变量在线调整控制参数，减少过冲与振荡带来的重复调节能耗；对存在多变量耦合的过程控制对象，可采用模型预测控制对未来短时段负荷进行滚动优化，依托约束条件限定能耗与工艺指标的权衡区间，使控制输出更贴近经济运行点^[5]。设备群控场景中，智能控制更强调启停决策与运行排序，比如空压站可依据气量预测与管网压力波动，动态选择基载机与调节机，结合最小运行时间与启停次数约束，降低频繁启停造成的能量损失与设备磨损；能耗异常识别可依托电参量与工艺量的关联模型开展，利用功率、转速、阀位、产量等变量构建特征向量，凭借阈值与趋势联合判别发现空转、泄漏、堵塞或机械阻力升高等隐患，并将告警与控制策略联动，促使系统在异常初期即回到低耗状态。该类策略落地通常需要在PLC或DCS侧实现数据采集与实时计算，并与上位监控系统协同，形成可解释、可追溯的节能控制闭环。

2.4 系统协同运行条件下的综合节能优化

系统级协同的重点在于打通“设备能效最优”与“系统能效最优”之间的差距，凭借工序、设备群与供配电的联动调度压缩结构性浪费，对于多工序生产线，应建立以节拍与产量为约束的负荷编排机制，将高耗能单元的运行窗口与电价、峰谷时段、供能条件相匹配，减少尖峰时段的最大需量并降低容量冗余，同时对同

类设备实施负荷均衡,避免个别设备长期高负载导致效率下降与故障率上升,供配电侧可结合能耗分项计量建立回路级能效看板,识别关键回路的功率因数与谐波贡献度,动态调整补偿与滤波投切顺序,使无功与谐波治理与生产节拍同步。对具有热工或储能特性的系统,可利用蓄冷、蓄热或气罐缓冲能力平滑负荷波动,将短周期的峰值需求转化为可控的储放过程,从而降低驱动设备的频繁调节损耗,协同优化还需要统一的控制边界与权限划分,通常由上位能效管理模块给出目标值与调度指令,现场控制层负责执行与反馈,形成跨层闭环。依靠此种运行组织方式,节能不再依赖单点改造,而是以系统整体的能效约束驱动设备、控制与供配电协同进入更经济的运行区间。

3 电气自动化系统节能优化路径的应用分析

3.1 典型工业电气自动化系统运行场景

为验证节能优化思路在工程实践中的适用性,选取某工业园区循环水泵与空压系统构成的电气自动化单元作为研究对象。该系统长期承担生产冷却、设备驱动及辅助工艺供能任务,运行时间连续且负载受工况影响显著,系统由多台异步电机驱动的水泵与螺杆式空压机组成,原有运行方式以工频定速为主,依托阀门调节与卸载控制满足用能需求^[6]。现场测试结果显示,系统日内负载波动幅度约为 40%,但设备长期保持额定转速运行,水泵平均负载率不足 60%,空压机在低需求时段频繁进入卸载状态,单位产出能耗明显偏高,同时供配电侧功率因数维持在 0.82~0.86 之间,谐波电流使部分馈线电流有效值放大,线路与变压器附加损耗随之增加,该类运行特征为多层级节能优化措施的实施提供了现实条件。

3.2 节能优化路径实施效果对比分析

围绕上述运行特征,对系统在设备配置、运行控制与调度方式等方面进行协同优化,水泵系统依靠引入变频闭环控制,使转速随压力需求动态调整,低负载时段转速下降约 20%~35%,阀门节流调节基本退出运行;空压系统采用分工明确的运行策略,使基载设备稳定运行,调节设备随气量需求变化平滑跟随,从而显著提高单机加载率。改造后运行数据表明,水泵系统年均耗电下降约 22%,空压系统单位产气耗电由 0.118 kW·h/m³ 降至 0.096 kW·h/m³。与此同时,凭借动态无功补偿与谐波治理,系统功率因数稳定在 0.95 以上,馈线电流下降约 10%,供配电侧附加损耗得到有效抑制。结合运行参数与能耗指标的变化情况可以看

出,节能效果主要来源于无效功率输出的削减以及电能质量改善所带来的系统性降耗。

3.3 面向低碳目标的节能效果综合评价

在统一运行对象与数据口径的基础上,对节能成效进行低碳导向评价更具工程意义。统计结果显示,该自动化单元年综合节电量约为 32 万 kW·h,按照目前电力排放因子折算,年均可减少二氧化碳排放约 260 吨,同时系统最大需量下降约 12%,在降低容量冗余的同时,为后续负荷增长预留了运行空间;从运行品质角度看,关键工艺参数波动幅度较优化前降低约 15%,设备启停次数明显减少,机械与电气故障风险同步下降。综合分析表明,在同一应用场景内,依托多层级节能措施的协同实施,系统不但实现了显著的能耗与碳排放削减,也在运行稳定性与可持续性方面获得了同步改善,体现出节能优化路径在工程层面的实际可行性。

4 结束语

围绕低碳目标下的工业用能需求,本文从系统运行特性出发,对电气自动化系统在设备配置、运行控制与系统协同等层面的节能优化思路进行了工程化探讨,并依托典型应用场景验证了相关措施在降低能耗与碳排放方面的实际成效。实践表明,将节能目标融入自动化系统的运行组织与控制策略,有助于实现能效与稳定性的同步改善,后续研究可进一步结合多源运行数据与智能算法,对能耗预测、调度优化及碳排放精细化管理展开深入探索,以推动电气自动化系统向更高水平的低碳运行发展。

参考文献:

- [1] 杨建强. 电气自动化工程中的节能设计技术浅析[J]. 中国设备工程, 2023(S1):148-150.
- [2] 张似玉. 基于电气工程自动化技术的供配电节能控制方法[J]. 光源与照明, 2023(05):222-224.
- [3] 彭万里. 建筑机械设备电气工程自动化的供配电节能控制探讨[J]. 中国设备工程, 2023(01):227-229.
- [4] 陶仁海. 电气工程及其自动化供配电系统节能控制分析[J]. 科技创新与应用, 2022,12(36):189-192.
- [5] 李良. 电气自动化中的信息技术与节能措施[J]. 集成电路应用, 2022,39(08):152-153.
- [6] 孙国君. 电气自动化工程中节能设计技术应用研究[J]. 电气时代, 2022(05):67-69.

基于数字孪生的智慧梁场综合管理平台构建与应用研究

田道洪

(中交二公局铁路建设有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要 数字孪生技术创建虚拟与现实之间的映射关系,对梁场进行数据采集、处理并提供准确的决策依据,改善梁场的各项操作流程,提高施工效率及安全性。本文介绍了智慧梁场的项目概况,并对基于数字孪生的智慧梁场综合管理平台进行详细的描述,通过智能监控管理、智能喷淋养护、制梁流程智慧化管理等多方面应用来体现该平台在实际操作中的效果,总结该平台对于推进梁场智能化管理的作用及局限性,从而提出未来的改进方向,以期为相关人员提供借鉴。

关键词 数字孪生技术;智慧梁场;梁场管理平台

中图分类号: TP3; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.025

0 引言

传统的梁场管理方式存在信息化程度低、资源配置不均衡、生产过程不能实时监控等问题,需要依靠现代信息技术来改善。数字孪生技术依靠虚拟和物理世界之间实时的数据同步,创建高效智能的梁场管理平台,可以对梁场的生产全过程进行全方位的监控,从而提高生产效率,保证施工质量,减少工程风险。该平台将智能监控管理、智能喷淋养护、制梁流程智慧化管理等集成为一个系统,从而改善梁场的资源配置,提高施工过程中的安全性。

1 项目概况

雄商高铁十三标中交二公局定陶制梁场位于山东省菏泽市定陶区马集镇陈庄村,正线里程在DK596+400线路右侧,占地203亩,整个区位条件较好,梁场负责DK578+698.290~DK609+190.960范围内863榀后张法预应力混凝土简支箱梁的预制、运输和架设工作,双线32m箱梁803榀、双线24m箱梁60榀,同时配合完成18.055km桥面系施工、17561m²声屏障安装和33.489km铺轨公里轨道工程,生产任务量大、工序协调要求高,给智慧梁场综合管理平台在计划调度、资源配置、过程控制和质量追溯等各方面提出系统性的要求。梁场总体上采取“六区两站一中心”的功能分区布置方式,将办公生活区、制梁区、搬梁区、存梁区、提梁上线区、试验检测区分并串联,配套有混凝土拌和站、污水处理站、钢筋集中加工配送中心,为数字

孪生模型的创建提供清楚的空间拓扑。

2 基于数字孪生的智慧梁场综合管理平台构建

2.1 智慧梁场系统架构

智慧梁场系统架构采用分层结构,如图1所示,整个系统由管理层、业务层、工业互联网层和监控层组成,其中管理层负责系统的总体规划,业务层承担生产调度、数据分析、任务执行等主要功能,工业互联网层用数据采集与传输模块将梁场实际生产的动态信息同物理设备真实地映射到虚拟环境中,从而达到对数字孪生进行实时监控的目的。

在生产管理模块中,系统借助智慧梁场APP同生产MES系统之间的无缝连接来完成32m和24m双线箱梁生产的全流程管理,而物料控制模块则是依靠物资管理平台及RFID技术实现生产所需物料的精确调配和实时监控,保证资源得到合理的配置与调度,设备监控模块由PLC、DCS等控制系统组成,再加装智能设备和传感器,对设备的状态实行实时监控,可以及时发现设备出现的异常并采取相应的应急措施,使生产设备处于良好的工作状态。

2.2 核心功能模块设计

生产管理模块是智慧梁场平台的主要部分,和MES系统进行对接之后,可以实现制梁过程中数据采集、生产调度以及质量控制的自动化。此模块会实时记录钢筋加工、混凝土拌合、制梁、存梁、搬梁等生产环节的数据,并根据分析结果生成生产任务报告,保证

作者简介: 田道洪(1985-),男,本科,工程师,研究方向:智慧梁场平台搭建与应用。

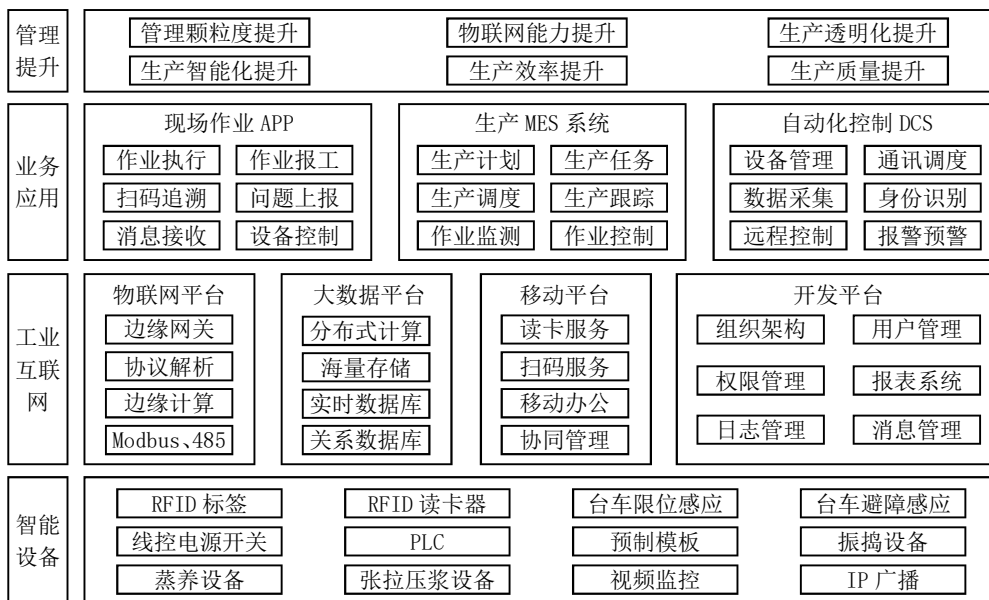


图 1 智慧梁场系统架构

生产计划的顺利完成。用 RFID 技术加物资管理平台的方式对物料进行控制，可以实现生产所需原材料的准确调配、实时跟踪，防止资源浪费和错配，提高物料管理水平。设备监控模块使用 PLC、DCS 等控制系统对现场的设备实行实时监控及状态诊断，保证设备正常工作，在第一时间内发现并采取相应的措施来防止由于设备故障导致生产停止。数据处理模块属于平台基础架构的一部分，负责将各个传感器、设备以及生产数据采集、储存，并对这些数据进行有效的整理和分析，保证数据顺利传输到相应的系统中。同时，平台利用数据库和云计算服务将生产数据传到云端，对大数据进行分析，给决策者提供数据支持。智能调度模块可以对生产线、设备状况、物料库存等各方面信息实行实时的监视和剖析，平台根据实际情况来主动调节生产计划，改善资源调配方案，减少生产过程中的等待时间以及不必要的运输费用^[1]。

3 智慧梁场综合管理平台的应用

3.1 智能监控管理

梁场摄像头区域布设包括网头区、预制区、蒸养区、张拉区等。各个区域的摄像头用无线网络同控制中心连接起来，监控画面由硬盘录像机（DVR）保存并传输给控制中心，便于工作人员对实时情况实行查看和历史数据回放。传感器设备对生产线上的温度、湿度、压力等环境参数进行采集，然后传送到数据处理系统中，保证生产环境可控、安全。

智能监控管理系统根据梁场的实际情况进行设计，在制梁区用实时视频监控的方式，可以随时看到生产

过程中每一个环节的情况，及时发现并解决问题。在搬梁区，摄像头可以对箱梁移运、存放全过程进行监视，保证箱梁在运输及储存的过程中不被损坏。在张拉区，用高清摄像机实时监控钢筋张拉的精度，保证每一根钢筋的张拉力符合设计要求^[2]。

3.2 智能喷淋养护

养护系统主机由 PLC 控制器、调试变频器、节能水泵、压力测试计、温湿度测试仪、电磁阀门等组成，对水养过程进行精确地控制。借助 PLC 控制器可以对每一个台座的喷淋时间、喷淋力度、水流量实行精确控制。恒压供水系统装有压力泵、变频器以及恒压罐，保证整个梁场能提供稳定的供水压力，使水养过程更稳定、高效。地喷管路系统由两大部分组成，一部分为预埋在台座两侧的 PPR 喷淋管，用以浇筑预制梁腹板的养护用水；另一部分为橡胶喷淋管，用于浇筑预制梁顶面或者内箱的养护用水。这些喷淋管可以均匀地喷洒水分，使梁体各个部位都能得到足够的水养。

根据水养控制柜的改造，系统可以采集每一个台座的喷淋开关状态，并经过 PLC 和控制柜相连，保存水养开始时间及水养时长。所有的水养台座的水养状态、时长以及喷淋头的开闭状态都会在制梁区的某个位置用产线大屏显示，保证生产过程中各个台座的水养情况可以被实时监控。

3.3 制梁流程智慧化管理

在智慧化管理下，制梁过程中每一个环节都被智能控制，工序前开工检查记录、技术交底、质检信息、作业环境参数等重要信息都得到高效的数字化管理。

工程部管理人员每天下发作业计划，在APP上通知现场工班长，用对接系统的方式上报第二天具体的施工内容。所有的安排都被细分为每一个工序，保证生产过程中每一个环节都能得到精确的指导和控制。作业通知单中包含每一道工序的技术交底内容。通过技术交底可以给现场的作业人员交代清楚工作的具体要求、质量标准，保证每一项工作都有明确的操作规范以及质量标准。作业过程中所用到的信息记录也被进行数字化的处理，作业人员采用拍照、录音、录像、文字等方式对工作过程进行记录，并实时上传到系统中，反映作业进程及质量。及时地采集并存储相关信息，使生产管理層可以随时了解现场情况，并对工作进行控制、调节^[3]。

3.4 张拉与压浆智能化

整个张拉过程系统自动计算并调节张拉力，保证每一个工序都按照预设标准执行，防止人工操作中出現误差及不均匀张拉，提高施工精度和安全性。该系统也可以实现多点同步张拉，同时对多个张拉点进行控制，提高工作效率。智能压浆系统中的操作流程被简化成全自动化管理模式。施工人员将系统管道和梁体预应力管道连接，形成一个浆液循环回路。通过在系统控制台上输入预定的压浆要求及浆液比例，系统自动调节浆液的混合比例并进行压浆施工。压浆系统可以自动采集压浆过程中各项数据，用无线远程数据传输的方式对这些数据进行实时的监控。该系统还可以随时调出历史的搅拌数据，保证每一批次浆液的配方和质量，从而避免传统的人工操作中出现的误差。

3.5 智能蒸养系统

智能蒸养系统的设计要对移动蒸养台座进行技术改造，在台座四周安装可以自由伸缩的温湿度传感器单元，实时监测蒸养环境变化。这些传感器和系统相连接，将实时的数据传送给中央控制单元，给蒸养过程中温湿度的调节提供准确的信息。每8个蒸养台座为一组，用一台自动控制系统来统一调节，达到对整个蒸养区域的集中控制的目的。系统按照设定的温度、蒸养曲线自动调节，保证蒸养过程中各个台座的温度都按照预先设定的曲线变化。在蒸汽管线后面装有电磁阀来精确地控制蒸汽的流量和温度。系统自动运行之后，电磁阀的开启和关闭就会根据实时温度的变化来动态调节，使棚内的温度始终维持在设定的范围内^[4]。

3.6 智能钢筋加工

智能钢筋加工系统将图纸上钢筋的信息转换成计算机的语言，输入智能加工系统中，系统自动完成所有的加工任务。智能化的数控设备可以根据输入的参

数来准确控制各个工序的执行，保证加工出的钢筋符合设计要求，减少由于人工操作造成的误差，大大提高生产精度。梁场钢筋加工车间智能化设备，包括数控钢筋剪切机、数控弯箍机。采用程式控制技术，根据工程技术人员所设置的参数来自动完成钢筋的调直、剪切、弯曲等工作，可以实时对各种数据进行统计和监控，保证每根钢筋的规格都合格。系统控制程序可以按照实际情况进行更改，满足不同的项目对于钢筋各种规格的要求。

3.7 外围智能子系统

引进台座沉降监测系统、浇筑混凝土坍落度现场监控系统、二维码标识系统、BIM建模等智能子系统，梁场的生产管理实现了全面的自动化。台座沉降监测系统可以实时地监测台座沉降状况，及时发现和处理沉降问题，保证梁场设备的稳定。在浇筑混凝土时，坍落度控制系统在施工现场安装坍落度检测设备，对混凝土进行实时监测，将数据传到后台，保证各个工序的质量都符合要求。二维码标识系统给每根梁赋予唯一的二维码，通过扫描可以得到梁体所有的制造信息及质检数据，提高管理的透明度和效率，未张贴二维码的梁在移至存梁区时会被限制，保证梁体信息的完整性和可追溯性。BIM建模和三维孪生技术可以对梁场进行数字化建模、实时监控，保证梁场各个环节同现场实际状况相符合^[5]。

4 结束语

随着建筑行业对生产效率要求的不断提高，智慧梁场建设成为推动行业发展的重要方向。基于数字孪生技术的智慧梁场综合管理平台，引入智能化管理手段实现梁场生产过程的全自动化，提升生产效率，降低人工干预，确保梁体质量的稳定性。该平台将智能设备和系统结合起来，对生产过程中的每一个环节进行改进，对材料管理、生产调度、质量控制等各个方面实施数字化，使梁场管理更加精细、高效。

参考文献:

- [1] 叶龙.基于工业化生产的智慧梁场建设技术应用[J].中国高科技,2024(02):82-84.
- [2] 刘佩斯.深中通道智慧梁场建设及运营研究[J].世界桥梁,2023,51(S1):26-33.
- [3] 李泽晖.高速铁路梁场智能化建设实践与研究[J].江西建材,2023(02):241-242,249.
- [4] 杨永成,姚辉宁,张正鹏,等.纵列式梁场综合管控系统建设及应用[J].中国公路,2023(03):108-109.
- [5] 韩晓强,刘文荐,江忠贵,等.铁路智能化预制梁场实践[J].中国铁路,2021(09):73-78.

园区机械行业绿色生产标准化 实施现状与优化管理策略

孙佳佳

(江苏灌云经济开发区管理委员会综合服务中心, 江苏 连云港 222200)

摘要 机械制造业开展绿色生产标准化建设是推动产业升级的关键举措。以灌云开发区为典型案例, 通过开展实地考察并且进行案例解析, 深入探究了区内机械行业推行绿色生产标准的现实条件、主要障碍及其成因, 指出当前标准体系建设面临着工艺标准不统一、能耗管理机制不健全、环保监督体系存在漏洞、企业积极性不高等核心难题。依托全周期管理理论以及多目标优化思想, 提出构建系统化标准框架、加强技术支撑、完善政策引导、搭建数字化监管平台等综合改进方案, 以期为工业园区绿色化转型提供可借鉴的实践模式。

关键词 工业园区; 机械行业; 绿色生产; 标准化管理; 灌云经济开发区

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.026

0 引言

绿色制造是贯穿产品从设计到报废生产全过程控制的综合性工程, 为构建现代化产业体系提供关键动力。机械工业作为制造业基础产业, 其绿色发展水平直接关系到工业园区整体环境表现。当前灌云经济开发区内机械制造企业普遍存在生产方式传统、能耗过大、污染治理不力等状况, 导致绿色生产规范落实程度不一。灌云经济开发区作为江苏省重要机械制造基地, 近年来致力于探索该行业绿色生产标准化管理模式, 积累了有效经验, 但也暴露出标准体系存在缺陷、监管执行机制不够健全等发展瓶颈。深入剖析园区机械行业绿色生产现状并提出有效改进策略, 对促进园区产业结构绿色升级具有重大实践价值。

1 灌云经开区机械行业绿色生产标准化实施现状

灌云经济开发区作为江苏省重要机械产业基地, 近年以绿色生产标准化为驱动力引领产业迈向高质量发展。园区内机械制造业长期面临高耗能以及污染管控难等传统发展瓶颈, 亟须建立标准化体系来实现绿色化革新。通过对园区现有产业条件、政策环境和企业现状进行综合分析, 可全面掌握其绿色生产标准化推进现状与发展阶段。

1.1 园区机械行业发展基础与转型需求

灌云经开区机械产业已经明确以工程机械配套、金属制品加工及专用设备制造为核心来搭建发展框架,

产业呈现出明显的集群化态势, 但现有的生产模式所引发的高资源消耗和环境压力问题日益凸显。生产工艺碎片化、设备能效水平低下以及污染治理设施不完善等短板, 极大地削弱了该行业的长远发展潜力。随着国家“双碳”战略不断深化落实以及江苏省制造业绿色升级政策全面推行, 园区面临着环保管控趋严和能耗管控强化的双重挑战, 而且终端用户对产品环保特性的要求在持续提高, 市场竞争格局正在经历深刻的变革。在政策引领和市场需求的的双重推动下, 构建覆盖生产全过程的标准化体系, 成为园区机械产业突破资源环境瓶颈、强化自身竞争优势的关键途径, 绿色升级的需求愈发强烈^[1]。

1.2 绿色生产标准化建设进展与实施成效

园区管委会在近几年推行机械行业绿色生产标准化示范项目, 还出台与之配套详细的实施细则, 其中对工艺流程、能源管理及污染防治三方面标准做详细规定。在政策大力支持的背景下, 一些关键企业率先开展标准化升级工作。例如: 江苏隆铝金属复合新材料有限公司把自主研发的连续式生产线当作核心, 并且自主建立起涵盖工艺能耗及排放等多个方面的企业标准体系, 进而显著提高了整个企业的生产效能, 生产效率实现了 40% 的增长、单位产品能耗减少了 28%、废气排放浓度降低了 52%。该公司的成功经验被树立成园区标准化建设的典范。这家企业依靠 PLC 技术对温度、

作者简介: 孙佳佳 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 机械工程标准化。

压力等核心工艺指标进行精确控制,让温度波动范围保持在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,使压力稳定在 $0.3\sim 0.5\text{ MPa}$ 区间,这样做每年能够节省电力消耗120万度,并且可以降低燃煤用量450吨,产品良品率从原来的95%提高到了99.5%,客户交付周期缩短至原先的60%,生产废水回用率达到了高达90%的水平,而且环保排放指标一直持续达标没有出现超标现象,有效提高了生产效率和资源的利用率,同时还大幅降低了生产过程中污染物排放量。园区层面积极构建绿色生产标准化培训体系,组织企业管理层和技术骨干接受系统性学习,以此促进设备能耗管控规范、废气废水处理作业指导书等企业标准在行业内广泛应用。示范企业在资源节约和减排方面取得了初步成果,初步建立标准引导、企业落实、园区监督的协同机制,为全面推动机械行业绿色生产标准化建设提供宝贵经验^[2]。

2 园区机械行业绿色生产标准化实施的主要问题

灌云经开区机械行业绿色生产标准化工作已经开始起步,不过后续推进过程当中仍然存在多重瓶颈。当前标准化体系存在设计不够全面、执行难度较大等问题,相关企业在这方面的内在驱动力和落实能力较为薄弱,同时园区缺乏高效的协调管理机制,这些因素相互影响显著制约绿色生产标准化整体推进效果,有必要深入剖析并且寻求有效的破解方案。

2.1 标准化体系建设滞后

园区目前的绿色生产标准化体系有着明显不连贯和过时的特征,大多数工艺流程标准只是给出方向性的指导内容,缺乏像江苏隆铝公司《连续式金属基复合材料生产操作规范》那样明确给出参数指标,使得企业在实际执行相关工艺流程标准时存在比较大的难度,这让企业在落实时难以精准领会标准内涵。能源管理标准未涵盖设备选型运行保养及能效评价等核心环节,使得节能减排举措缺乏系统化依据支撑。污染防控标准仅聚焦末端治理设施配备而对前端减量与过程管控等环节关注不够,难以构建贯穿全程的管理闭环。另外,现有标准更新机制存在缺陷,部分技术准则未能及时融入绿色制造新技术与新方法,而与产业实际发展情况脱节。在设备能耗方面,江苏隆铝公司设定明确数值标准,要求加热炉单位能耗不能超过 $3.2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$,同时推行每日能耗统计与月度节能评估机制,与之相比,园区内其他企业大多只提供宏观性指引,缺少具备量化特征且切实可行的具体数据。这让节能减排的举措难以得到有效实施,各领域标准之间协同性不足,

工艺能源环保等标准各自为政且缺乏统一顶层设计,降低了标准体系的综合效能^[3]。

2.2 企业实施动力与执行能力不足

在绿色生产标准化推进的进程中,机械企业普遍都面临动力和能力双重困境。在动力层面,一些企业把标准化当作成本负担,觉得短期内难以获得相应经济回报,所以缺乏主动推进标准化的意愿。因为绿色产品市场溢价机制并不完善,企业难以通过标准化改造来提升自身竞争力,再加上投入产出预期不够明确,进一步降低了企业实施的积极性。在能力层面,多数中小型机械企业存在专业人才匮乏问题,对标准化要求理解得不够透彻,在工艺参数设置和设备改造方案设计等方面明显不足。企业内部管理基础比较薄弱,质量与环境管理体系建设处于滞后状态,难以满足绿色生产标准化相关要求,资金限制也对实施进程形成制约,绿色技术改造需要大量的前期资金投入,而融资渠道狭窄削弱了企业的实际实施能力。例如:江苏隆铝公司的经验表明标准化改造初始投入较大但后续收益很可观,生产效率提高40%以及能耗降低28%所创造经济价值远超改造花费,然而因缺少可参考案例和资金援助许多中小企业对投入回报平衡心存顾虑,这无疑阻碍了标准化普及进程。

2.3 园区协同管理与监督机制缺失

园区在协同管理和持续监督方面存在明显不足,这对绿色生产标准化的全面实施造成了影响。管委会各部门之间在标准制定、政策支持以及监督职责的界定上比较模糊,容易导致管理重复或者监管缺失,降低了政策落地实施的效果^[4]。园区与企业之间的信息传递存在一定障碍,企业在推行标准化过程中面临的技术与政策问题难以得到回应,而且园区提供的培训和技术支持等服务的匹配度较低。现有的监督工作只是停留在表面,缺乏科学有效的成效评估体系,对企业标准落实情况的追踪不够深入,奖惩机制也未能有效落实到位。产业链上下游企业之间的协作存在不足,废弃物循环、能源梯级利用等跨企业合作尚未形成有效模式,园区资源整体配置效率难以得到提高,制约了绿色生产标准化综合效益的发挥。

3 园区机械行业绿色生产标准化优化管理策略

在针对灌云经开区机械行业推行绿色生产标准化过程中,暴露出体系构建落后、企业参与意愿与能力欠缺、协同管理机制缺位等难题,需要围绕标准体系优化、管理机制革新、协同模式创新这三个层面开展

系统性改进工作。通过完善标准体系架构、加强政策激励与数字化监督、建立多元化循环联动机制等举措，共同凝聚起促进绿色生产标准化有效落地的综合力量。

3.1 完善多层次标准化体系建设

构建包含宏观引导、中观规范、微观操作的多层级标准化架构来提升标准系统性与实用性。宏观层面要确立园区机械行业绿色生产标准化总体规划并明确工艺改进、能源管理、污染防治、资源循环等领域战略方向与具体措施以提供顶层设计。中观层面需结合金属加工、装备制造、表面处理等不同行业特性制定分类别的行业规范并明确关键工艺参数控制区间、设备能效基准要求、污染物排放上限等核心指标来增强标准适用性。微观层面应引导企业根据自身生产情况把行业规范细化为具体作业指导书、操作流程、检验标准以确保标准贯穿各生产环节，同时要构建标准动态更新机制及时融入绿色制造新技术、新工艺并定期组织标准修订与优化。还要加强标准间的协调配套打通工艺、能源、环保等领域的标准关联形成相互支撑的完整体系来提高标准体系整体效能。

3.2 构建政策激励与数字化监管双轮驱动机制

要推动企业落实相关举措并加强全程管控，需要政策激励和数字化监管双管齐下。在政策层面，应该设立财政专项扶持资金，给从事绿色技术升级以及达标认证的企业提供资金补助与税收减免，以此减轻企业在发展过程中的负担。同时，要健全绿色金融支持体系，鼓励金融机构为标准化改造项目发放低息贷款并提供融资担保，进而拓宽企业融资的渠道。另外，还需建立绿色采购与市场准入制度，在政府招标以及园区招商的过程中优先录用达标企业，以此提升标准化实施的市场吸引力。在数字化监管方面，需要构建园区智慧环保监控平台，通过借助物联网技术实时采集企业能耗、排放等核心数据，实现生产环节动态监控和风险预警的功能。要建立标准化实施成效评估机制，可效仿江苏隆铝公司所践行的“规划—实施—监督—改进”循环运作体系来达成对过程的实时跟踪，把单位工业增加值能耗、污染负荷指数、生态服务价值等指标纳入考核范畴，定期公布企业绿色生产标准化评价信息形成有力监督制约。

3.3 打造“企业—产业—园区”三级循环协同模式

应构建“企业—产业—园区”三级协同循环机制，以提升绿色生产行业规范全面落地效果。在企业层面，引导企业打造覆盖原料采购、生产制造、产品销售及

废物处理全流程标准化管理机制，以此促进内部资源高效循环与污染物源头削减。在产业层面，借助园区产业链协同效应制定上下游企业统一标准，推动副产品和废弃物跨企业循环利用，比如把金属加工业边角料供给铸造企业、将表面处理业废液集中处理后回用构建产业共生体系。在园区层面，统筹规划能源供应污染治理固废处置等公共设施建设，制定园区级能源梯级利用与污染物集中处置标准以实现企业标准与园区公共服务标准无缝对接^[5]。建立园区绿色生产标准化协调会议机制，定期组织企业行业协会及技术机构开展交流，及时解决标准实施过程中的共性问题，形成企业自主落实产业协同联动园区服务，保障可持续发展格局。

4 结束语

园区机械行业推进绿色生产的标准化建设是复杂系统工程，需要标准体系、技术支持、政策保障和监管平台共同发挥作用。以灌云经开区江苏隆铝公司为例，打造贯穿工艺流程、能源管控和污染治理的完整标准框架，加大绿色技术创新和数字化应用力度，健全财税金融激励措施和动态监管模式，能显著提升企业绿色生产标准化执行效果。未来将加强产学研深度合作，形成企业内部小循环、产业内部中循环和园区整体大循环的三级互动网络，推动标准化管理从单个企业扩展到全产业链层面。同时，要持续优化绩效评估机制，将资源消耗、污染排放和生态恢复等指标纳入实时监测，借助标准化手段促进园区机械行业经济、环境和社会效益协调统一，为工业园区绿色化、高质量发展探索可借鉴、可推广的成功模式。

参考文献：

- [1] 鲁译. 四川全周期全流程绿色制造体系建设路径研究[J]. 四川建材, 2025, 51(11): 4-9.
- [2] 马子轩, 李孝元, 李少坤, 等. 基于绿色制造理念的机械制造工艺与装备技术革新: 以西门子机械制造工厂为例[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(09): 155-157, 160.
- [3] 马儒剑, 邱士收, 高振雷, 等. 山东省生态工业园区建设实施路径及对策建议[J]. 科技经济导刊, 2025, 33(02): 58-68.
- [4] 孙凤娟. 工业园区环境管理绩效评估指标体系的构建研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 06(20): 190-192.
- [5] 王欣. 基于改进NSGA-II算法下的机械绿色制造系统多目标优化研究[J]. 农机使用与维修, 2023(09): 72-75.

工业废水梯级回用—资源回收—零排放一体化低碳模式构建

魏超

(南京万德斯环保科技股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 工业废水排放是水资源浪费、环境污染的主要源头之一。传统废水处理模式能耗高、资源回收率低,难以适配“双碳”目标与绿色工业发展需求。构建工业废水梯级回用、资源回收和零排放一体化低碳模式,是破解工业废水处理难点、实现水资源循环利用、推动工业绿色低碳转型的关键路径。当前,工业废水处理仍存在突出问题,制约了一体化低碳模式的落地实施。本文立足于工业废水处理实际,剖析现有处理模式的困境及成因,结合梯级回用、资源回收与零排放的核心要求,探索一体化低碳模式的构建原则与具体实施路径,优化工艺组合、强化技术赋能、完善保障体系,以期为企业实现废水资源化、低碳化处理提供实践参考,助力工业绿色低碳高质量发展。

关键词 工业废水; 梯级回用; 资源回收; 低碳模式

中图分类号: X7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.027

0 引言

随着工业产业快速升级和“双碳”目标深入推进,绿色低碳已成为工业发展核心导向。工业废水处理作为工业绿色转型重要环节,面临更高要求。工业废水成分复杂,排放量巨大,若处理不当,不仅会污染地表水、地下水,还会造成水资源严重浪费。传统废水处理工艺难以实现水资源循环利用与低碳发展双重目标。梯级回用—资源回收—零排放一体化低碳模式将废水梯级回用、有价资源回收和零排放目标有机结合,实现“废水资源化、处理低碳化、排放无害化”协同发展。当前,我国工业废水一体化低碳处理模式还在探索,面临技术、管理、政策等多方面困境。开展相关模式构建研究,破解实施难题,对推动工业废水处理提质增效,节约水资源,助力工业绿色低碳转型有重要意义。

1 工业废水处理背景

“双碳”目标深入推进,绿色工业战略逐步落地,工业废水处理方向生变,从“达标排放”转向“资源化、低碳化、零排放”,多元转型成为趋势,它还是工业绿色低碳发展的核心抓手。现在,我国工业产业规模不断扩大,工业废水排放量始终很高,废水成分也越来越复杂,里面有重金属、盐类、有机物,还有其他多种污染物。要是处理得不好,不仅会污染地表水,

还会污染地下水环境,更会严重浪费水资源,这和我国水资源短缺的基本国情不符。传统工业废水处理模式主要采用末端治理,目标是“达标排放”,使用的工艺有活性污泥法、化学沉淀法等。这些工艺能耗高,药剂用量也大,碳排放量很突出,而且没重视废水中的有价资源,导致资源被浪费,所以很难适应低碳发展的需求。不同行业工业废水处理水平差异大,部分企业环保意识薄弱,处理设施较为落后,而且水资源循环利用理念未全面普及^[1]。因此,推动工业废水处理模式升级、创建一体化低碳体系,已成为破解工业环保、资源短缺双重困境的手段,助力工业实现高质量发展的迫切需求。

2 工业废水处理现存困境

2.1 废水回用率偏低

当前我国工业废水回用率普遍偏低,水资源循环利用水平不高,造成严重的水资源浪费。多数工业企业沿用“处理后排放”的传统模式,对废水回用重视程度不足,缺乏系统的废水梯级回用规划,仅将少量处理后废水用于厂区绿化、道路清扫等低标准场景,未能实现废水的分级利用、精准回用。部分企业废水处理工艺简陋,处理后废水水质难以满足生产回用标准,无法用于生产环节循环使用,只能达标排放。废

作者简介: 魏超(1993-),男,本科,工程师,研究方向: 环境工程。

水回用的管网建设不完善,不同水质废水的分流、输送系统不健全,导致处理后的回用废水难以精准输送至对应回用场景,进一步制约废水回用率提升,与水资源循环利用的绿色发展理念相悖。

2.2 资源回收不充分

工业废水中含有大量有价资源,这些资源包括重金属、盐类、有机物等。当前多数工业废水处理流程中,资源回收环节常缺失,或回收不够充分,造成资源浪费,还带来二次污染风险。部分企业只关注废水净化处理,忽视废水中有价资源的提取、回收,把处理过程产生的污泥、浓缩液等直接处理,既浪费了其中的有价资源,又增加处置成本和环境压力。现有资源回收技术较为落后,回收效率低、能耗高,部分技术难以规模化应用,特别是针对成分复杂的工业废水,很难实现多种资源同步回收。而且,企业资源回收意识不足,动力也缺乏,他们觉得投入成本高、收益周期长,所以不愿主动改造资源回收设施,这让资源浪费问题更严重了^[2]。

2.3 低碳技术应用不足

低碳技术是构建一体化低碳模式的核心支撑,但当前工业废水处理过程中,低碳技术应用不足,能耗与碳排放居高不下。传统废水处理工艺如活性污泥法、化学沉淀法等,能耗高、药剂用量大,处理过程中会产生大量碳排放,难以适配低碳发展需求。新型低碳处理技术如膜分离技术、高级氧化技术、节能生物处理技术等,虽具有能耗低、碳排放少的优势,但受技术成熟度、投入成本等因素制约,未能广泛应用。部分企业即使引入了低碳处理技术,也未能实现技术的优化组合与高效运行,导致技术优势难以充分发挥,仍存在能耗偏高、碳排放超标等问题。低碳技术研发、转化力度不足,缺少适配不同行业工业废水的专用低碳技术,制约了一体化低碳模式的构建。

2.4 模式协同性较差

工业废水梯级回用、资源回收、零排放间缺少有效协同机制,这让一体化模式难以形成合力,整体处理效果也因此变差。部分企业把梯级回用、资源回收和零排放看作独立环节,没有系统规划与协同设计,各环节衔接不畅、流程脱节。例如:废水梯级回用没考虑资源回收需求,废水中有价资源被白白浪费;资源回收环节设计没兼顾零排放目标,产生的二次废水难全量处理回用,达不到零排放要求。而且,企业内部各部门缺乏协同,生产部门、废水处理部门、资源回收部门各自为政,没能创建“生产—处理—回用—回收”闭环管理体系,进一步降低模式协同性与运行效率,制约了一体化低碳模式的落地。

3 一体化低碳模式构建原则

3.1 循环利用优先

循环利用优先原则围绕着工业废水资源化的核心,能最大限度减少水资源浪费,推动水资源高效循环。模式创建要立足于企业生产需求,考虑废水水质特点,需摒弃“处理后排放”的传统逻辑,构建分级回用体系。要将不同处理标准的废水,精准匹配至对应回用场景,优先保障生产环节回用,把深度处理后的废水用于工艺补水、设备冷却等核心场景,减少新鲜水资源消耗;合理拓展非生产回用场景,将适度处理后的废水,用于厂区绿化、道路清扫等,实现废水全量梯级回用,增值利用,践行绿色节水理念,推动水资源循环和工业生产的有机融合。

3.2 低碳高效适配

低碳高效适配原则围绕着“双碳”目标,它兼顾处理效率,节能减碳需求,目标是废水处理低碳化、高效化转型。在模式构建中,优先选用低碳技术,这类技术能耗低,碳排放少,处理效率高,用来替代传统工艺,传统工艺高能耗、高排放。同时优化工艺组合,目的是降低能耗,减少药剂用量;要加强处理系统节能改造,采用节能设备,优化运行参数,提升系统运行效率;合理利用可再生能源,如太阳能、风能,为废水处理、资源回收提供能源支撑,减少化石能源消耗,实现高效处理、节能减碳的协同推进^[3]。

3.3 协同闭环可行

协同闭环可行原则着重阐述梯级回用、资源回收、零排放的协同联动,创建能落地、可持续的闭环管理体系。模式构建要对三个核心环节做系统性规划、协同设计,优化流程衔接,确保各环节无缝联动,形成合力。废水梯级回用得兼顾资源回收与零排放目标,资源回收要减少二次废水产生,零排放须整合前两者成果,最终形成“生产、废水处理、梯级回用、资源回收、零排放”的闭环。结合企业行业特点、经济实力,确保模式设计适配可行,避免照搬照抄,保障模式长期稳定运行。

4 一体化低碳模式构建路径

4.1 构建梯级回用体系

为解决废水回用率低的难题,重点创建科学完善的废水梯级回用体系,通过废水分级处理、精准回用,全面提高水资源回用率。前期对企业废水水质、水量,回用需求开展全面调研,结合生产工艺特点,将废水划分为高、中、低三个等级,针对性设计处理工艺,

确保处理后废水精准匹配对应回用场景的水质要求。比如高浓度废水经深度处理后,可用于生产工艺补水、设备冷却;中浓度废水可用于车间清洗;低浓度废水直接用于厂区绿化、道路清扫。完善分质分流回用管网建设,搭建单独收集、精准输送的管网系统,避免不同水质废水混合污染,防止回用困难^[4]。创建动态管理机制,实时监测废水情况,监测指标包括水质、水量,同时关注回用状况,依据生产需求来调整,灵活变更回用方案;加强企业回用意识,改变“重排放、轻回用”观念,确保回用体系运行,保持其稳定高效状态。

4.2 优化资源回收工艺

针对资源回收不充分问题,优化回收工艺设计,推动废水中有价资源高效回收,变废为宝,减少资源浪费,降低二次污染。结合工业废水成分特点,选用适配的回收技术,优化工艺组合方式,实现多种有价资源同步回收。其中,重金属废水采用膜分离、化学沉淀组合技术提取;高盐废水采用蒸发结晶技术回收盐类;有机废水采用厌氧发酵技术回收生物质能。将资源回收工艺嵌入废水处理全过程,在预处理、深度处理阶段同步开展资源回收,简化处理流程,降低回收成本。强化资源回收技术的研发和转化,推广高效低耗的规模化回收方法,通过政策引导、收益激励提升企业资源回收意识,增强其主动性,以此推动资源回收常态化、规范化。同时,建立资源回收效果监测体系,实时跟踪回收效率与资源纯度,动态优化工艺参数,保障回收质量稳定。推动回收资源本地资源化利用,搭建产业联动平台,实现回收资源的就近转化与循环利用。

4.3 推广低碳处理技术

破解低碳技术应用难题,要重点推广新型处理技术,优化工艺组合方式,实现废水处理节能减碳,提高处理效率和质量。加快推广膜分离技术、节能生物处理技术,还有高级氧化技术等新型低碳技术,用这些技术替代传统工艺,比如高能耗、高排放的活性污泥法,化学沉淀法等也在替换之列。结合不同行业废水特点,优化技术组合,提升处理效率,降低能耗与碳排放;加强低碳技术研发,进行适配性改造,推动科研机构和企业协同合作,研发专用低碳技术,这些技术要适配不同行业工业废水,提升技术成熟度,增强经济性^[5]。升级现有的废水处理设施,采用节能设备,优化运行参数,提升系统运行效率;合理利用太阳能、风能等可再生能源,为废水处理和资源回收提供能源支撑,降低化石能源消耗,强化低碳技术赋能作用。

4.4 强化模式协同管理

针对模式协同性较差的问题,需要强化梯级回用、资源回收、零排放的协同联动,打造闭环管理体系,提升模式运行效率。建立系统性协同规划机制,对三个核心环节统一规划、协同设计,优化流程衔接,确保各环节无缝联动、形成合力。例如:废水梯级回用方案设计时预留资源回收工艺接口,资源回收工艺优化时兼顾零排放目标,避免流程脱节。建立企业内部协同管理机制,整合生产部门、废水处理部门、资源回收部门的职责,明确各部门协同责任,打破各自为政的局面,形成“生产—废水处理—梯级回用—资源回收—零排放”的闭环管理。加强协同运行监测和调控,实时跟踪各环节运行情况,及时解决衔接不畅、运行不稳定问题,推动一体化模式高效协同运行。

5 结束语

创建工业废水梯级回用、资源回收、零排放一体化低碳模式,是破解工业废水处理难点,实现水资源循环利用,推动工业绿色低碳转型的重要路径,它契合“双碳”目标和绿色工业发展需求。当前工业废水处理还面临回用率偏低、资源回收不充分、低碳技术应用不足、模式协同性差等突出困境,这些问题制约了一体化模式的落地。要实现模式的有效构建,需坚持循环利用优先、低碳高效适配、协同闭环可行三大原则;同时需构建梯级回用体系,优化资源回收工艺,推广低碳处理技术,强化模式协同管理这四大路径,以此精准破解对应的困境。未来,要依据各行业企业实际情况,不断优化现有模式设计,避开应用中的误区,推动一体化低碳模式推广,助力工业绿色低碳发展,实现水资源循环和碳减排的双重目标。

参考文献:

- [1] 黄广礼.造纸工业废水深度处理与回用技术方案分析[J].华东纸业,2025,55(04):7-9.
- [2] 王朋,张新震,刘宇曦,等.高回收率中水回用深度处理工艺在钢铁废水处理中的应用[J].科技创新与应用,2025,15(03):185-188.
- [3] 杨清华,罗遥.天然气热电厂工业废水回用技术方案比较研究[J].科技创新与应用,2025,15(03):161-164.
- [4] 周俊怡,谢益民,张功侠,等.仿酶生物处理杨木心材Bio-APMP制浆废水及回用[J].中国造纸学报,2024,39(03):114-122.
- [5] 段小冰,翟秋月,净晓星,等.反渗透技术在钢铁工业废水资源回用系统中的应用[J].冶金动力,2023(01):77-81.

水厂给排水工程施工的工艺要点探讨

滑 萍

(阜阳市阜水实业有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘 要 针对水厂给排水工程施工中质量管控、安全防护及生态干扰等问题,以水厂给排水工程施工为研究对象,对施工全流程工艺要点展开系统探讨。明确施工前期材料设备管控、场地技术准备的核心要求,细化给水与排水工程核心施工工艺细节,建立工序质量闭环管控、专项检测验收机制,落实针对性安全防护与环保管控措施,优化各环节工艺衔接与执行标准,以期为水厂给排水工程高效稳定运行提供技术参考。研究结果表明,通过工艺管控可有效规避接口渗漏、管道沉降、生态污染等问题,保障工程施工质量、安全与环保达标。

关键词 水厂给排水工程; 质量管控; 绿色施工; 生态保护

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.028

0 引言

水厂给排水工程是城镇供水保障体系的核心组成,其施工质量直接关系到供水稳定性、公众用水安全及周边生态环境。当前,绿色施工、低碳转型与工程精细化管控成为行业发展主流,叠加生态环保要求日趋严格,传统施工模式中的接口渗漏、管道沉降、生态干扰等问题亟待破解。立足于工程实际工况,精准把控施工全流程关键环节,优化工艺衔接与执行标准,平衡工程效率、质量安全与生态保护的协同关系,成为水厂给排水工程施工的核心诉求。本文聚焦水厂给排水工程施工各阶段核心要点展开探讨,为工程高效推进、长期稳定运行及行业绿色升级提供实践参考。

1 水厂给排水工程施工前期准备工作

1.1 材料与设备管控

严格把控材料和设备的质量与适配性,是水厂给排水工程施工工艺顺利落地的核心前提,直接决定工程整体稳定性和使用年限。需要对照施工设计图纸,逐一核查给排水管材、管件和核心设备的规格型号、材质性能与设计要求的契合程度。重点查验管材压力等级、管件接口类型和设备运行参数,杜绝因规格偏差带来的适配问题,从源头避开后期接口渗漏、设备运行故障等隐患。针对水泵、阀门、消毒设备等关键装置,进场后需要开展全面调试和性能校验,校准扬程、流量、启闭灵敏度等核心指标,确保设备运行状态符合工艺标准。同时记录调试数据形成可追溯档案,

这有助于建立科学的材料储存管理制度。根据材料特性分类存放,管材采用架空堆放方式隔绝地面潮气,避免锈蚀氧化;精密设备单独存放于避光防尘库房,配备防潮、防碰撞防护措施,防止设备精度受损。这样能够合理规划材料领用流程,实行按需领用、余料回收机制,既能减少浪费,又能避免材料长期堆放带来的性能下降,为后续施工工艺的规范实施打下基础。

1.2 场地与技术准备

科学地进行场地规划与技术交底,可以很好地避开施工干扰,给工艺有序推进带来保障。结合水厂施工场地的地形状况与施工流程,优化场地整体布局,清楚划分材料堆放区、主体作业区、临时运输通道以及办公区域,确保每个区域功能独立、动线清晰,材料堆放区靠近作业区与运输通道,缩短材料转运距离,减少对作业面的占用与干扰^[1];运输通道宽度要适配施工机械通行需求,设置明显标识避免交叉作业冲突,提升施工效率。技术准备环节需要细化施工技术方案,结合水厂给排水工程特性,明确各个分项工艺的操作参数、质量标准与衔接要求。针对管道敷设坡度、接口处理方式、混凝土浇筑工艺等核心要点,制定针对性操作细则,避免工艺执行出现偏差。技术交底需要突破传统告知模式,结合施工图纸拆解核心工艺逻辑,向施工人员明确操作要点与风险控制点。同步解答施工人员疑问,确保每位作业人员不仅掌握操作流程,更理解工艺背后的技术原理,同步完成施工场地的勘测复核,确认地下管线、地质条件与设计图纸一致,

作者简介:滑萍(1990-),女,本科,工程师,研究方向:市政给排水。

提前处理不良地质区域,为后续施工工艺的精准实施创造有利条件,保障施工全过程有序衔接、高效推进。

2 水厂给排水工程核心施工工艺

2.1 水厂给水工程施工工艺

水厂给水工程施工需聚焦系统密封性与耐压性,通过规范落实管道与构筑物施工工艺,保障供水系统稳定运行。管道施工前需根据设计要求精准放线,确定开挖坡度与深度,结合地质条件采取支护措施,软土、流沙等不良地质区域需进行换填夯实处理,增强管道基础承重能力,避免后期管道沉降变形。管道敷设过程中严格控制轴线与高程偏差,确保符合设计坡度要求,敷设完成后及时进行基础回填,回填土分层夯实,防止管道受力不均。管道连接工艺需结合管材类型针对性操作,钢管采用焊接方式时,控制焊缝高度与宽度,做好焊缝探伤检测,杜绝夹渣、气孔等缺陷;PE管采用热熔连接时,精准控制加热温度与对接压力,保障接口融合紧密。水池、泵房等给水构筑物施工,需强化混凝土浇筑与防渗处理,浇筑过程中控制振捣频率与范围,确保混凝土密实度,避免出现裂缝。构筑物内壁涂刷防渗涂层,涂层施工前清理基层杂质,保证涂层均匀附着,接口处增加涂刷厚度,同时做好防渗试验,排查渗漏隐患^[2]。泵房设备安装需控制安装精度,水泵找平找正后固定牢固,连接管道与设备接口时做好密封处理,避免运行时出现渗漏,全方位保障给水系统的密封性与耐压性,满足水厂供水工艺需求。

2.2 水厂排水工程施工工艺

水厂排水工程实施围绕通畅性能与防止渗漏核心要求,准确做好管道同处理构筑物施工关键点,保证排水系统高效运转。管道装设需严格把握坡度安排,依据管径尺寸同排水流量明确恰当坡度,既要防止坡度不够造成积水堵塞,也要避免坡度太大干扰管道稳定性能。管道接头选取柔性连接形式,装设时保证橡胶圈压紧到位,接头外侧完成防腐处理,加强密封性能同使用期限,从根源上避开渗漏隐患,排水检查井、跌水井的安排需结合管网布局同地形状况。转弯位置、坡度变动处及管网汇集处必须安排检查井,便于日后检修与清理淤泥。跌水井安排在落差较大区域,减轻水流冲击,保护管道内壁。污水处理构筑物实施需重视防腐、防渗及设备装设精度,池体混凝土浇筑后及时进行养护工作,把握养护周期同温湿度,提高混凝土抗渗、抗腐蚀能力。构筑物内壁选取防腐防渗材料,针对酸碱环境挑选耐腐蚀性能良好的涂层或衬里,实施

时保证材料附着均匀、无损坏。设备装设前校正基础标高,保证设备装设位置准确,连接部位密封严密。调试设备运行状态,保证设备同构筑物匹配性,确保排水系统既能通畅排放,又能满足污水处理工艺对设备精度和构筑物性能的要求。

3 水厂给排水工程施工质量控制要点

3.1 工序质量管控

强化各施工工序闭环管控,是确保工艺执行质量符合标准的关键,需构建全流程管控体系,层层压实质量责任。落实工序交接检验制度,上道工序完成后,由施工班组自检合格,再报技术部门复检,核查工艺执行情况与质量指标,不合格项立即制定整改方案,整改完成并验收合格后,方可进入下道工序,杜绝质量隐患遗留^[3]。聚焦管道焊接、接口处理、混凝土养护等关键工序,建立专项管控机制,明确管控责任人与操作标准,焊接工序全程跟踪焊缝成型质量,采用专业仪器检测焊缝完整性;接口处理重点检查密封性能,及时纠正接口松动、密封不严等问题;混凝土养护严格执行养护方案,控制养护时间,避免过早受力导致裂缝。建立质量隐患排查机制,结合各工序工艺特点,梳理潜在质量风险点,日常巡检与专项排查相结合,精准识别工艺执行偏差。发现隐患后及时分析成因,调整施工工艺参数或操作方式,避免同类问题重复出现。同步做好工序质量记录,详细记录各工序施工时间、操作人员、工艺参数及质量检测结果,形成完整的质量追溯链条,确保每一道工序都处于可控状态,全方位保障施工工艺质量达标。

3.2 质量检测与验收

全面检测和规范验收,是验证施工工艺质量是否达标的核心环节,需要结合水厂给排水工程自身特点,制定有针对性的检测验收方案。管道施工结束之后,开展水压试验和闭水试验,水压试验应当缓慢提高压力,稳压过程中观察管道接口、焊缝以及附件有没有渗漏,记录压力变化的具体数值;闭水试验重点检查管道密封性和通畅性能,注水之后观察水位下降情况,查找渗漏点位并马上进行整改,实体质量检测主要关注混凝土强度、防渗性能等关键指标,借助回弹法检测混凝土强度,保证符合设计需要;防渗性能通过渗水试验加以验证,针对构筑物与管道接口等关键位置,增加检查次数,确保不存在渗漏隐患,分项、分部工程验收严格对照施工规范和设计标准,逐一核对工艺执行质量、检测数据完整性,验收内容覆盖材料设备

质量、工序施工质量、实体性能指标等各个层面^[4]。验收过程中做好记录,对发现的问题明确整改要求和时间限制,整改完成之后安排再次验收,直到符合标准为止,所有检测验收记录整理归档,形成完整的工程质量档案,不仅为工程整体验收给出依据,也为后期运维提供参考,确保施工工艺质量得到有效验证,保障工程长期稳定运行。

4 水厂给排水工程施工安全与环保管理

4.1 施工安全防护措施

安全防护和管理措施落实到位,是防范施工安全风险的基础条件,需要建立全面的安全防护框架。对于临时用电、高空作业、基坑开挖这类高危险性的工作,要严格按安全工艺标准来执行。临时用电采用“三级配电、两级保护”,线路铺设要规范,避开作业面和通道位置,定期检测线路的绝缘性能,及时排除漏电风险;高空作业要搭建牢固的脚手架和防护栏,工作人员需佩戴合格的防护装备,严禁不按规范操作;基坑开挖则要根据深度和地质情况来设置支护结构,做好边坡的监测,一旦发现边坡有位移情况就要立即采取加固手段,防止坍塌事故的发生。配备足够数量且合格的安全防护设备,如安全帽、安全带、绝缘手套等,并要定期检查,确保安全防护设备性能达标,对出现老化、破损的设备要及时更换。加强对施工人员的安全操作培训,结合水厂施工的具体特点,讲解高危作业的安全要点和应急处置办法,提升人员的安全意识和应急处理能力,杜绝违规操作行为。制定安全应急预案,针对坍塌、触电、高处坠落这些常见事故,明确应急处置流程、责任分工和物资保障,定期组织应急演练,不断优化预案细节^[5]。日常巡查中要重点排查安全隐患,及时整改违规行为,形成一个安全管理的闭环,从各个角度去防范施工安全风险,保障施工人员的生命安全以及工程建设进度^[6]。

4.2 施工环保管控要点

考虑到水厂附近水体敏感、生态保护标准高,要推行环保施工,最大程度降低对周围环境的破坏^[7]。施工产生的废水、废渣采取专门处理办法,废水经过沉淀池沉淀以后回收用于洒水压尘,防止直接向附近水体与土壤排放废水;废渣按类别清运,能回收的材料集中堆放再使用,无法回收的废渣送到合规处置点,严禁随意倾倒;采用精细化的降尘、降噪方法,作业面定期洒水压尘,材料转运时盖上防尘布,减少扬尘飘散;高空作业、机械施工区域装设隔音屏障,合理

选择低噪声设备,控制施工噪声水平,避免对周边环境造成干扰;合理排布施工时间安排,避开周边水体生物活跃期和居民休息时段,减少施工活动给生态环境与居民生活带来的影响^[8]。施工场地周围设置围挡,防止施工杂物外散,施工结束后及时清理现场,平整土地,采取植被恢复手段,修复施工对周边生态造成的改变。同时建立环保巡查制度,跟踪检查环保做法执行情况,及时纠正不合规行为,确保施工全过程达到环保标准,实现工程施工与生态保护的协同推进,符合水厂绿色施工的根本要求。

5 结束语

水厂给排水工程作为供水保障体系的核心载体,施工工艺水平直接决定工程使用寿命与运行稳定性,更关联周边生态环境与公众用水安全。本文围绕施工全流程梳理关键点,从前期准备到核心工艺实施,再到质量、安全、环保多维管控,形成适配水厂工程特性的工艺把控逻辑。施工中需兼顾技术标准与实际工况,精准落实各环节要求,平衡工程推进与生态保护需求,筑牢工程质量与安全防线。后续运维需依托施工过程形成的质量档案,强化常态化巡检与养护,延长工程服役周期。本次梳理的工艺要点,可为同类工程提供实践借鉴,推动水厂给排水工程施工向精细化、绿色化升级,助力行业整体施工水平提升。

参考文献:

- [1] 雷治.市政给排水工程施工中的管材选择及质量控制分析[J].建材发展导向,2024,22(22):19-22.
- [2] 傅丽.浅谈建筑给排水工程造价的全过程控制研究[J].居业,2024(09):224-226.
- [3] 朱世平.浅析市政给排水工程施工的质量标准化之路[J].中国品牌与防伪,2024(09):58-60.
- [4] 孙贤东,王晓宁,狄明轩.长距离顶管施工技术在水厂给排水工程中的应用研究[J].工程技术研究,2024,09(15):87-89.
- [5] 韩孟奇.建筑给排水工程施工质量与安全管理优化措施[J].水上安全,2024(12):148-150.
- [6] 郭汪旭.建筑给排水施工中节水节能技术的应用分析[J].建材发展导向,2025,23(09):124-126.
- [7] 马志强,徐虎.石化厂区改造中给排水系统的设计与施工策略[J].石化技术,2025,32(04):367-368.
- [8] 孙振,于德志,郇晓敏.给排水施工中消防系统安装技术分析[J].散装水泥,2025(02):130-132.

土木工程施工安全风险与管理措施探析

李建鹏

(瓜州益能新能源发展有限公司, 甘肃 酒泉 736100)

摘要 安全风险管理工作作为大型住宅建筑工程管理的核心环节, 其系统性实践对保障施工安全具有重要意义。本文以唐山市丰润区棚户区改造项目为典型案例, 通过构建风险评估模型, 对其施工全过程安全风险进行实证分析。研究表明: 项目风险点分布以低等级风险为主, 但存在需重点管控的中高等级风险, 其中高处坠落、物体打击、坍塌、机械伤害和触电构成五大核心风险事件。分析表明, “人的不安全行为”和“管理缺陷”是导致风险事件发生的主要致险因素。

关键词 土木工程; 施工安全风险; 安全风险管理工作

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.029

0 引言

随着城市化进程的持续推进, 超高层建筑呈现爆发式增长态势, 已成为现代城市空间重构的核心载体与标志性景观。但是超高层建筑施工过程复杂, 深基坑、高模架、大型起重吊装等危险性大的工程较多, 施工安全风险高。一旦发生安全事故, 就会造成巨大的人员伤亡和财产损失, 还会产生严重的社会影响。因此, 如何能有效地识别、评价并控制土木工程施工过程中的安全风险, 是当前建筑行业亟需解决的重要问题。

1 项目概述

1.1 项目情况

深圳深港国际金融中心超高层综合体项目, 是集甲级写字楼、高端商业、会议功能为一体的标志性建筑。项目位于深圳市福田区核心商务区, 总占地面积 15 300 平方米, 总建筑面积 286 500 平方米。建筑主体结构为巨型框架、核心筒、伸臂桁架抗侧力体系, 地上 92 层, 结构高度 468 米, 塔冠最高点标高 498 米。地下部分为 5 层, 开挖深度 28.5 米, 基坑周长 480 米, 主要功能为设备机房、人防工程、1 200 个车位的地下停车场。

1.2 工程的主要施工技术和关键数据

工程的主要施工技术内容和关键数据指标为: 一是深大基坑工程, 用 1.2 米厚、45 米深的地下连续墙和四道钢筋混凝土内支撑做支护体系, 总土方开挖量约 43 万立方米。二是大体积混凝土工程, 基础底板厚度为 4.5 米, 局部核心筒区域厚度达 9.3 米, 一次性

连续浇筑混凝土方量约 22 000 立方米, 采用 C50P10 抗渗混凝土, 并铺设三层冷却水管温控系统。三是超高模架工程, 核心筒竖向结构用液压爬模系统, 外框钢结构楼板用重型铝合金模板体系, 最大单层支模面积达 3 800 平方米。四是钢结构工程, 全楼总用钢量约 9.8 万吨, 外框由 16 根巨型劲性钢骨柱和环带桁架组成, 最大构件单重达 85 吨, 需要使用 M1280D 型动臂式塔吊进行吊装。五是幕墙工程, 单元式玻璃幕墙总面积约 23 万平方米, 最高安装高度超过 450 米。

2 项目安全风险评估分析

2.1 评估的依据、涵盖范围及具体实施步骤

本项目安全风险评估严格按照一系列有强制性的法律法规、标准和项目特定文件来进行。法律上首先要遵守的是《中华人民共和国安全生产法》《建设工程安全生产管理条例》^[1]。技术标准上主要依据有《建筑施工安全技术统一规范》(GB 50870-2013)、《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》(住建部 37 号令及配套文件)、《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120-2012)、《建筑施工高处作业安全技术规范》(JGJ 80-2016)、《建筑施工塔式起重机安装、使用、拆卸安全技术规程》(JGJ 196-2010)等。项目特定依据则涵盖了岩土工程详细勘察报告、全套结构设计图纸与计算书、经专家论证的超过一定规模的危险性较大的分部分项工程专项施工方案共计 18 项、施工总承包合同中的安全协议条款以及施工现场前期踏勘的影像与测绘资料。评估的物理和过程范围实现了对项目立

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

体空间和时间线的全覆盖。从空间维度上来说,评估场域不只限于红线内的施工区,还延伸到受降水、振动、沉降影响的相邻地铁保护区、道路和管线区域;垂直方向上,从地下 28.5 米基坑底到 498 米塔冠作业面都属于评估对象。从三通一平、支护施工、土方开挖、基础施工、主体结构、机电安装、幕墙封闭到装饰装修的七个主要施工阶段,在时间上进行评估。作业活动维度的评估对象包括所有的常规建筑施工活动以及激光校直、高强螺栓施拧、超高压泵送混凝土、大型构件空中组拼等特殊工艺环节。评价使用作业安全分析加风险矩阵的标准流程。第一步就是系统性风险识别,由九人风险评估委员会用各种方法,历时两周初步识别出 247 个危险源。第二步半定量风险分析,从事故发生可能性和后果严重性两方面分级,可能性 L 分 1 到 5 级,后果严重性 S 分 1 到 4 级。第三步风险评价分级,用 L 乘 S 确定风险矩阵的位置,将风险分为 R1-R4 四类。第四步成果输出,生成包含全部风险信息的项目初始安全风险评估报告》和动态风险清单数据库^[2]。

2.2 风险点分布情况以及各作业单元的风险等级划分

根据系统的评价,风险点在项目中分布有明显的时空非均匀性。高风险浓度区空间分布很集中。地下工程阶段基坑周围尤其是邻近地铁侧、管线密集侧的支护体系和土方开挖面为风险点。地上主体施工阶段风险高发区转移到核心筒液压爬模操作平台、外框钢结构吊装焊接作业层、塔吊施工电梯附墙作业点、高空临边洞口。装饰、幕墙安装阶段,单元板块吊运轨迹下方、大型擦窗机安装区域成了新的风险密集区。时间上存在五个风险峰值期,如深基坑开挖到第二道支撑完成期间。按照风险矩阵评价,基坑工程、超高层模板工程等被列为 R4 级重大风险,主要风险事件为坍塌等,后果灾难性;钢结构安装工程等被评 R3 级较大风险,风险形态有高处坠落等;幕墙单元体安装等也被评 R3 级;常规的钢筋加工等作业,措施得当大多为 R2 级一般风险。

2.3 风险事件的类型及其致险因素的具体构成

本项目潜在的典型安全风险事件可以分为八类。坍塌类事故主要威胁源有深基坑边坡、12 米高的模板支撑体系、4.5 米以上的悬挑脚手架和重型材料堆场。高处坠落类事故,高风险场景有核心筒爬模平台和外围钢梁之间的间隙、电梯井道和管道井的临边、吊篮和擦窗机作业过程、塔吊顶升操作平台。物体打击类事故的风险来自高空掉落的小型工具或螺栓、塔吊吊

运物件滑脱、钢结构安装时高强螺栓或手动工具飞溅。起重伤害类事故,即 M1280D 动臂塔吊等重型设备带负荷试验、非标准工况吊装、与相邻塔吊或结构干涉时发生的倾覆、折臂、断绳等。机械伤害类事故,和数十台大型机械设备如混凝土泵车、钢筋加工机械、液压爬模油缸等长运动部件有关。触电类事故风险点存在于地下室潮湿环境配电、数十台电焊机同时作业的临时线路、高压电缆布设路径、受损电动工具。火灾和爆炸类事故,原因是装饰阶段大量易燃材料堆放、氧气乙炔气瓶管理不当、电气线路过载、动火作业火花飞溅。此外,还包括有限空间作业可能导致的中毒窒息,以及场内车辆交通导致的伤害^[3]。

3 项目安全风险管理与对应防范举措

3.1 完善风险管控架构并落实责任机制

项目以总承包单位为龙头,辐射到所有参建方的矩阵式安全风险管控组织架构。顶层由建设单位、监理单位、施工单位、主要分包单位负责人组成项目安全生产委员会,对重大风险作出决策。下设独立的、有否决权的项目安全总监办公室,设 8 名专职安全工程师,按土建、钢结构、机电、幕墙四个专业板块进行纵向监督。同时在各个分包单位内部设立专职安全岗,纳入总包统一管理考核,形成统一领导、专业监管、单位负责、全员参与的网络化格局。责任机制的核心是将风险控制的责任量化和刚性传递。项目实行安全生产责任清单制,编制了项目经理到一线班组长共 32 个岗位的《安全风险管控责任清单》,规定了每个岗位在每一项 R3、R4 级风险管控中的具体职责和工作标准。依靠数字化管理平台来完成对安全履职情况的每日线上记录、每周自动考核。建立安全风险抵押金制度,项目各级管理人员和分包单位负责人按比例缴纳,其返还和奖励同所负责区域的风险控制效果直接挂钩。对因责任落实不到位而造成隐患升级或发生未遂事故的,实行事故隐患责任倒查和“说清楚”制度,使压力层层传递,责任环环相扣。

3.2 加强安全培训工作,构建双重预防机制

安全培训体系设计出分层次、分类别、分岗位的精准赋能模式。对超过 800 名一线作业人员实行“入场教育—班组教育—实操考核”三关准入制,针对基坑支护、钢结构焊接、塔吊操作等 28 个特殊工种,开设微型实训工坊,开展实物化操作训练。对管理人员开展每月一次的“安全技术讲堂”,重点讲授风险辨识、BIM+ 安全应用、事故案例分析等内容。创新地使用 VR 虚拟现实技术开发出基坑坍塌、塔吊倾覆、高空

坠落等10种高风险情景的沉浸式培训模块,培训了超过1500名人员,使他们身临其境地体会到了风险。双重预防机制的创建属于风险控制的主要手段。第一道防线风险分级管控项目制作了可视化的“四色风险空间分布图”,把R4级红色风险区、R3级橙色风险区在总平面图和各楼层平面图上动态标注。对每一个风险点制定包含工程技术措施、管理措施、个体防护措施和应急处置措施的《风险管控措施卡》,张贴在现场对应的位置。第二道防线隐患排查治理用智能巡检和人工核查相结合的方式。为安全员配备带有定制APP的智能安全帽,可以实时拍照上传隐患、语音描述、定位坐标,系统自动生成整改通知单并推送至责任人。每周由项目经理带队进行综合检查,对R3、R4级风险控制措施的执行情况开展专项检查。所有的隐患数据上传到云端数据库,利用大数据分析预测高频隐患类型和分布规律,由排查隐患转变为预警风险^[4]。

3.3 严格把控危险性较大的工程管控,实施分级风险监控

对深基坑、高模架、大型起重吊装等危大工程实行方案、交底、施工、验收四阶段闭环管理。方案阶段邀请外部专家对18项超规模危大工程专项方案进行论证,并采用BIM技术做施工模拟及碰撞检测,发现方案中存在冲突和缺陷。在交底阶段用三维动画、BIM模型进行可视化交底,使每个作业人员都清楚技术要点和安全要求。施工阶段基坑开挖、支撑拆除、塔吊附墙、桁架提升等重要工序实行项目总工、安全总监、监理工程师三方联合旁站监督。验收阶段严格实行“作业班组自检一分包单位复检一总包和监理联合验收”程序,验收数据及时上传至监管平台。分级风险监控就是资源配置的差异化倾斜。对于R4级重大风险,实行“每日一查、实时监控”的强化监管。在深基坑工程中,除常规监测点外,在靠近地铁一侧增设12个自动化实时监测传感器,位移变化率大于2毫米/天就自动报警。对4台动臂塔吊全部安装塔机安全监控系统,实时监测载重、力矩、幅度、回转角度等数据,并与BIM模型中的虚拟塔吊做碰撞预警。对R3级较大风险采取每周专项检查与评估。对R2级以下的风险进行常规的安全巡查和标准化管理。分级监管可以保证有限的安全管理资源得到最优配置和最大产出^[5]。

3.4 建立动态风险评估体系,完善应急防控体系

建立和施工进度计划联动的动态风险评估机制。主体结构每施工20层、重要的施工工艺变更、发生险情或重大社会活动前必须进行风险再评估。评估不单

依靠现场检查,还结合监测系统、设备传感器、隐患排查记录等多源数据进行分析。通过塔吊吊次历史数据与近期违章记录分析,动态调整塔吊作业风险等级。利用无人机每周对高空作业面、临边防护进行自动巡航拍摄,用图像识别技术辅助发现新增风险点。所有的动态评价结果都更新到项目风险清单以及“四色图”当中,并且通过安全例会以及信息化平台告知所有相关人员,保证风险认知的同步更新。应急防控体系重视实战能力建设。项目编制了1个综合应急预案和8个针对基坑坍塌、塔吊倒塌、大型火灾、极端天气等的专项应急处置方案。方案中准确标明了应急物资仓库的位置、储备清单和调用程序,在基坑周围常备沙袋5000个、应急水泵20台。组建了一支由总包及各分包单位骨干组成的60人常备应急救援队,每季度开展一次无脚本“双盲”演练。演练之后,用视频复盘和专家点评的方式找出指挥协调、应急响应、现场处置中的薄弱环节。项目同深圳市定点医院、消防部门以及专业抢险单位建立了应急联动机制,保证在重大突发事件发生的时候,内外救援力量可以实现无缝对接、高效协同。

4 结束语

土木工程施工安全风险,是贯穿于项目全生命周期的、以持续的风险识别与评价为基础、依靠系统的控制手段来实现动态调整的复杂管理过程。通过对深圳深港国际金融中心这样技术极限高、环境制约强的超大型工程案例可知,安全风险具有明显的聚集性、动态性、关联性,主要分布在深基坑、超高空、重型吊装等关键技术及作业界面,其根源在于人、机、料、法、环、测等多要素的相互作用之中,管理体系的科学性、执行力是决定风险可控与否的关键变量。

参考文献:

- [1] 彭臣.住宅建筑工程施工安全风险管理与防范措施[J].居舍,2026(01):162-164.
- [2] 张辉鹏.路桥工程施工风险识别、评估及安全管理措施[J].工程技术研究,2025,10(23):142-144.
- [3] 于瀛洲.建筑工程施工安全监理的风险管理与防范措施探究[J].中国住宅设施,2025(10):176-178.
- [4] 董贤强.水利工程施工管理中的安全风险识别与控制措施研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(27):40-42.
- [5] 黄小锋.基于BIM技术的土木工程施工质量与安全措施[J].大众标准化,2025(14):154-156.

老旧桥涵承载能力提升的加固改造设计方法

周翔

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 为了提升老旧桥涵在复杂荷载与水力冲刷下的整体承载能力, 采用构件增强、体系转换、基础处治等多元协同的加固改造技术路径, 对典型桥梁与涵洞结构开展结构重构与性能恢复设计。以某城区 T 梁桥与箱涵联合体为例, 分析病害机制并实施系统加固。结果表明, 涵洞结构通过内衬加固与水流适应性优化实现渗透控制与结构稳定性显著增强, 桥涵整体变形协调性与耐久性能同步提升。

关键词 老旧桥涵; 承载能力; 加固改造

中图分类号: U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.030

0 引言

随着桥梁基础设施服役年限增长, 老旧桥涵因结构退化、荷载超限及规范滞后等问题广泛存在承载力不足与安全隐患, 严重制约交通系统运行效率。为系统提升桥梁与涵洞结构的整体服役能力与耐久性能, 需构建基于材料补强、力学路径重构与地基协同治理的加固改造设计方法体系, 尤其在涵洞结构中, 底板沉陷、接缝变形、混凝土劣化与排水功能丧失等病害普遍存在, 需在传统桥梁加固思路基础上引入涵洞水文适应性、防渗性能恢复与结构抗冲刷能力重构等关键策略, 实现涵桥一体的协同治理。

1 老旧桥涵承载能力下降的主要原因分析

老旧桥涵因混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融循环等作用, 导致保护层劣化、钢筋锈蚀, 削弱受力截面, 降低抗弯抗剪强度; 钢结构则受疲劳裂纹与腐蚀穿孔影响, 易产生应力集中^[1]。长期积水及防水失效加剧渗水侵蚀, 服役年限增长致承载力持续衰退。超限荷载比例升高使早期按公路—I 级、铁路—ZC 级设计的桥涵无法满足现行需求, 叠加抗震、抗冲刷、防撞能力不足, 隐患突出^[2]。

2 老旧桥涵承载能力加固改造设计方法

2.1 构件增强补固技术

在老旧桥涵构件承载力下降的背景下, 构件增强补固技术需从力学性能恢复与耐久性提升双重目标同步展开。针对钢筋混凝土梁板类构件, 通过粘贴 CFRP 或配置外包型钢提升截面有效刚度, CFRP 粘贴长度宜不小于跨中净跨的 40%, 典型厚度控制为 1.2~2.0 mm,

拉伸弹性模量 $\geq 2.3 \times 10^5$ MPa, 以确保应力重分布稳定。与桥梁上部构造类似, 涵洞箱涵顶板及立墙在长期水流冲刷、车辆荷载与环境侵蚀作用下亦普遍出现裂缝扩展、钢筋锈蚀、节点剪切失稳等问题^[3]。

对于墩柱、桥台等竖向承重构件, 补强设计应以约束提升和整体刚度恢复为核心导向。当原结构混凝土碳化深度超过 15 mm、钢筋保护层剥落面积占比超过 20% 时, 需采用环箍钢带或碳纤维布环抱包裹进行体积约束增强, 其环向拉应力不得小于 2.5 MPa, 以确保在地震或冲击荷载作用下具备足够的塑性耗能能力。在预应力 T 梁端部疲劳裂纹控制中, 广泛采用锚板外贴 + 高强螺杆限位装置形成主动夹持力, 设计张拉力宜控制在 0.6~0.7 倍屈服强度区间, 以保障钢构件稳定性不被扰动应力破坏。加固材料与原构件界面应设置界面剂粘接剪应力上限值不超过 1.5 MPa, 并通过拉拔试验验证耐久锚固性能。

2.2 体外预应力技术

体外预应力技术可有效提升桥梁结构承载力与延性, 适用于预应力耗损严重或布置不合理的老旧 T 梁桥加固。实施时须依据主梁受力路径与残余内力分布优化筋材布置, 形成协同受力体系。常用 $\Phi 15.2$ mm、1860 MPa 级七股低松弛钢绞线, 张拉控制应力为抗拉强度的 65%~70%。若跨中挠度超限或腹板裂缝扩展, 应于中跨与端部设置对称体外筋, 并采用可调锚头抑制裂缝扩展。锚固系统需结合梁端尺寸与混凝土强度配置 U 型锚具与钢板压座, 并以钢筋网增强抗剪性能。张拉施工应分级控制, 误差限于 $\pm 5\%$, 并在张拉后 72 小时内监测挠度与裂缝响应^[4]。与桥梁结构不同, 涵

作者简介: 周翔(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源项目风电道路设计。

洞整体性强、构件截面闭合、受力路径稳定,通常不采用体外预应力方式进行加固。在涵洞顶板承压能力不足、立墙出现受压屈曲或节点剪切失稳等情况下,宜采用内衬钢筋混凝土板、喷射混凝土加固、裂缝注浆封闭等方式形成新的受力单元,使整体刚度提升并恢复通水断面。同时,通过在顶板内设置局部短向构造筋或局部加厚段,可改善涵洞在集中荷载作用下的抗冲击性能。该加固路径与桥梁预应力体系存在实质性差异,但在提升结构整体性能上的逻辑一致。

2.3 体系转换与整体加固技术

对于破坏模式复杂、局部加固难以满足整体性能恢复要求的老旧桥涵,需采用结构体系转换与整体加固技术,重构受力路径与变形协调机制。该方法适用于T梁跨径 > 20 m、裂缝累计长度 $>$ 总跨长20%、桥面连续性破坏或支承系统病害严重的桥涵^[5]。在桥梁设计中,宜通过简支梁转连续梁构造湿接缝(长度 \geq 梁高1.2倍,配筋率1.2%~1.8%),结合纵向预应力或横隔梁实现跨径协同,使跨中弯矩降低15%~25%、挠度下降20%以上。涵洞结构出现顶板下挠、侧墙剪裂、接口错台时,可设置120~160 mm厚钢筋混凝土内衬二衬,内灌强度 ≥ 40 MPa的非收缩浆体以改善整体刚度。对水流冲刷区涵洞入口及急转断面,采用“端部圈梁+加密环带”构建整体约束单元,配筋率1.0%~1.4%;顶板纵裂或薄弱区增设厚 ≥ 180 mm的帽梁,经植筋连接提升抗弯刚度。桥梁支承转换采用中性轴内移式钢构托换结构,配容许位移 ≥ 100 mm的滑移支座,节点局部压应力不超混凝土抗压强度70%。涵洞进出口布设抗弯楔块与加劲肋(楔块高 \geq 净高1/12),配环向箍筋抑制剪切变形,确保传力连续性。加固后应分别对桥梁与涵洞进行有限元建模,涵洞模型重点关注环向拉应力、土压力不均及水流冲击,验证其在静载、动载与温度荷载下的协同变形能力,满足相关桥涵评定标准要求。

2.4 基础加固与桥台处治技术

针对老旧桥涵在长期运营中普遍存在的基础不均匀沉降、承载力不足及背部沉陷问题,基础加固与处治设计需以地基承载能力恢复与结构变形协调控制为核心。涵洞因处于覆土环境并长期受水流冲刷,其底板承载力下降、侧墙接头错台与环向受力不均尤为突出。对于底板沉陷超过规范限值(L/1 000)的涵洞,可采用钢筋混凝土托换板与注浆固结组合方式实现整体抬升,托换板厚度宜为200~260 mm,边缘与侧墙需设置连系筋形成整体底盘,提高地基反力分布均匀性。在出口侧墙出现剪裂、倾斜或环向弯曲变形时,应采用预

应力锚杆结合刚性封闭钢框架构建侧向约束体系,锚杆设计拉力不小于90 kN,框架内部灌注强度 ≥ 40 MPa的非收缩浆料,使侧墙水平变位保持在 ± 5 mm以内。涵洞进出口过渡段易出现路基附加应力集中与错台跳车问题,应设置复合搭板与柔性过渡带。搭板厚度不小于160~200 mm,其端部需加设植筋抗滑单元,使涵洞顶板与路面结构变形协调,避免因车辆冲击导致结构阶跃放大。对水流冲刷较强的涵底,可布设浆砌片石护底与固结注浆帷幕,注浆压力宜控制在0.3~0.6 MPa,固结范围覆盖涵底两倍宽度区,以提高抗冲刷能力及底板承载力。

在桥台部分,应解决台背空洞、车辆荷载引起的周期性沉陷及桥头跳车等问题。当空洞深度超过200 mm、连续长度超过1.5 m时,应采用水泥-水玻璃双液注浆法填充,单孔注浆压力控制在0.3~0.5 MPa,注浆量不小于 0.8 m³/m。应在台背设置双层土工格栅,拔拉强度不低于35 kN/m,并配置整体式桥头搭板(板厚 ≥ 180 mm,锚固长度 ≥ 600 mm),形成柔刚过渡结构,提升台背刚度连续性。涵洞基础治理还需重点关注水位变化对地基有效应力的影响,应设置水位监测孔与沉降观测点,对涵洞底板、侧墙接口及加固层进行至少3个月的变形监测,评估固结注浆均匀性与地基稳定性。

3 工程实践与应用

3.1 案例背景

某城区K11+480处桥涵由三跨预应力混凝土简支T梁桥(3 \times 20 m)与下承式钢筋混凝土箱涵联合构成。桥梁建于2002年,桥宽12.5 m,采用U型桥台与扩大基础;涵洞净宽4.2 m、净高3.6 m,承担汇水区排洪功能。该桥涵体系作为南北主干通道的重要节点,通行量达3.6万辆/日,重载比例21%,涵洞长期受车辆附加动荷载及周期性水流冲刷双重作用。服役20余年未实施系统加固,既有桥梁出现贯通裂缝、支座偏移及不均匀沉降(差值达24.3 mm),涵洞结构亦产生顶板受压开裂、侧墙剪切裂缝、水流冲刷导致的进出口错台(最大18 mm)及渗水扩散带等典型病害。上述病害反映出桥涵体系在耐久性、承载能力及水荷载适应性方面均存在结构退化。本项目作为区域典型老旧桥涵整治工程的代表性案例,为后续加固技术路径、材料体系匹配及系统治理策略的选型提供了实践基础与验证平台。

3.2 加固改造实施技术要点

本工程加固设计以桥梁与涵洞的协同性能恢复为目标,构建由构件修复、体系转换、支座更换、地基与水力稳定性提升组成的综合加固体系。项目组根据结构病

害分布特点, 将桥梁与涵洞分别分区制定技术措施, 确保施工过程中不影响交通通行, 同时控制关键阶段的应力重分布风险。在主梁补强方面, 采用 CFRP 板粘贴与体外预应力联合方案, 布设三道碳纤维板 (厚 1.4 mm、宽 120 mm、有效粘结长度大于 1.8 m), 并外加四束 15.2 mm 体外钢绞线, 张拉应力 1 100 MPa。桥台基础采用 $\Phi 500$ mm 高压旋喷桩, 深度 12 m, 间距 1.2 m, 构建复合地基筏板结构, 同时将原损坏支座更换为水平位移容许量 100 mm、转角容许值 0.02 rad 的聚四氟乙烯滑板支座。施工中布设跨中应变、支座反力、桩身变形监测点进行动态监控, 确保补强体系受力稳定。

在涵洞部分, 针对顶板受弯不足与侧墙剪切损伤, 采用“内衬二衬层+接口注浆+进出口刚度强化”的综合加固路径。顶板内衬采用 140 mm 厚 C40 二衬混凝土, 并通过直径 12 mm 的植筋与原结构可靠连接, 以提高整体抗弯能力。侧墙采用封闭钢框架与预应力锚杆加固, 锚杆设计拉力不低于 100 kN, 框架内部灌注非收缩浆料, 消除剪切裂缝扩展风险。涵洞进出口错台采用钢筋混凝土楔块平整, 楔块厚度 120 ~ 160 mm, 内部布设横向加密筋, 改善行车荷载与水流冲击造成的附加应力。为提高抗冲刷能力, 在涵底布设 0.6 MPa 压力的固结注浆帷幕, 形成连续防护带, 并增设双层防渗水泥基涂层以阻断渗水路径。桥梁与涵洞加固体系通过统一的监测体系校核其受力耦合性, 使两类结构在交通荷载与水流冲击作用下均保持稳定的力流传递过程。

3.3 加固改造实施效果

加固完成后, 项目组从应变、位移、裂缝控制、基础沉降、水流作用响应等维度对桥梁与涵洞进行综合评估。评估方法采用静载试验、现场监测与有限元模拟三种技术路径交叉验证, 监测周期覆盖通车后连续 90 天。监测点包括桥梁跨中与支点、台背沉降点、涵洞顶板跨中、侧墙中高程及进出口错台控制点, 具体性能指标对比结果详见表 1 与表 2。

表 1 桥梁与涵洞关键断面加固前后性能对比

结构部位	指标	加固前	加固后
桥梁跨中	最大挠度 (mm)	38.6	27.7
	主拉应变 ($\mu\epsilon$)	225	148
	裂缝宽度 (mm)	0.34	0.18
涵洞顶板	最大竖向变形 (mm)	9.8	4.1
	环向拉应变 ($\mu\epsilon$)	186	92
	渗水带宽度 (mm)	12.5	3.4

表 1 数据显示, 桥梁加固后最大挠度减少 28.3%, 主拉应变下降 34.2%, 裂缝宽度降低 47.1%, 表明结构刚度与耐裂性能显著提升。涵洞顶板加固后竖向变形下降 58.2%, 环向应变下降 50.5%, 渗水带宽度缩减 72.8%, 反映出二衬内衬与接缝封闭体系在提升承载与防渗性能方面具备显著效果, 涵洞结构安全性与耐久性同步增强。

表 2 桥台与涵洞基础加固前后沉降与错台指标对比

监测点位	初始值	加固后	改善率
台背 A 点沉降 (mm)	18.6	3.4	81.70%
台背 B 点沉降 (mm)	21.2	2.9	86.30%
中桩区沉降 (mm)	9.7	2.1	78.40%
涵洞出口错台 (mm)	18	3	83.30%
涵洞侧墙水平位移 (mm)	5.8	1.6	72.40%

表 2 结果显示, 台背与中桩区沉降量分别下降 81.7%、86.3% 与 78.4%, 地基加固后差异沉降显著缓解。涵洞错台由 18 mm 降至 3 mm, 改善率 83.3%, 侧墙水平位移下降 72.4%, 表明钢筋楔块、注浆帷幕与约束结构有效控制了涵洞基础及连接部位的变形趋势, 显著提升结构整体协同稳定性与服务性能。

4 结束语

老旧桥涵加固改造需从构件修复、体系转换至地基协同治理多维联动, 形成结构—水力—地基一体化提升路径。在桥梁结构中, 预应力重构与材料增强技术可显著恢复承载性能; 涵洞加固则需注重内衬体系、防渗体系与水流冲击适应性的融合。未来应进一步建立以性能评估为导向的桥涵协同设计标准, 提升加固方案在不同服役阶段下的适应能力, 推动老旧基础设施治理体系科学化与工程化发展。

参考文献:

- [1] 朱莉. 预应力碳纤维板在空心板梁桥加固工程中的应用 [J]. 交通世界, 2025(29):172-174.
- [2] 王涛. 公路大跨度混凝土连续梁桥加固和养护施工技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2025(10):37-39.
- [3] 张上慧. 公路桥梁养护管理与危桥加固改造研究 [J]. 运输经理世界, 2025(27):157-159.
- [4] 张立乾, 杨延军, 张孝春, 等. 一种旧桥涵加固支撑结构研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(13):174-177.
- [5] 王伟伟. 钢筋混凝土箱涵加固设计研究 [J]. 四川水泥, 2023(01):222-224.

道路与桥梁施工的质量控制与管理对策分析

贾海鑫¹, 刘德兵², 苗丽丽¹, 王 锋³, 赵 晶⁴

(1. 青岛交科建设集团有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 克拉玛依市城投城市建设开发有限责任公司, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 庆阳市宏远建筑安装工程有限公司, 甘肃 庆阳 745000;

4. 青岛海岳景泰建筑工程有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 针对道路与桥梁建设中的技术执行环节, 探讨了路基压实、桩基成孔、混凝土灌注以及预应力张拉等关键工艺的具体实施标准。通过对施工参数的精确设定与过程监控, 分析了提升结构稳固性与耐久性的技术路径, 重点研究了沥青路面摊铺过程中的温度与平整度调节, 以及大体积混凝土水化热抑制等核心工艺规制, 旨在通过标准化操作规避工程瑕疵, 强化结构受力性能。分析结果表明, 严格执行工艺技术规范及数据监测, 是实现交通基础设施长久服役与工程精细化建设的核心途径, 可有效提升工程整体技术水平。

关键词 道路桥梁; 路基填筑; 参数监控; 结构性能

中图分类号: U415; U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.031

0 引言

道路与桥梁作为交通基础设施的骨架, 其建设精度直接影响区域物流效率与行车可靠性。在复杂地理环境与载荷条件下, 施工工艺的每一个环节都承载着结构性能的实现任务。从基础的土石方填筑到高难度的预应力体系构建, 技术参数偏差会导致结构病害。随着现代材料学与工程力学的发展, 施工过程已转化为对物理参数与力学指标的精确操控, 通过深入剖析施工中的技术细节, 落实标准化作业流程, 能够从根本上解决结构失稳与性能衰减问题, 为现代交通网的稳健运行提供坚实的技术支撑。

1 路基填筑与压实工艺参数把控

路基作为道路工程的基础承载层, 其密实程度与受力均匀性直接决定了上部结构的服役寿命, 在施工过程中填料的选择应依据粒径分布与塑性指标进行严格筛选, 确保填料的物理力学性能符合设计标高要求^[1]。分层填筑厚度应严格限制在 30 cm 以内并通过现场压实试验确定最佳含水率, 将其波动范围控制在 $\pm 2\%$ 之间以达到最优压实状态, 压实机械的组合应遵循先轻后重、先慢后快的原则, 确保路基边缘与中心区域的压实度均达到 96% 以上的标准, 对于特殊路段的软基处理, 应采用换填或加筋技术, 从物理结构上改善土体剪切强度, 防止路堤产生不均匀沉降而引发的路面纵向裂缝。

2 桥梁下部结构施工核心环节

2.1 钻孔灌注桩成孔工艺分析

钻孔灌注桩的成孔精度是支撑桥梁结构稳固的首要环节。在钻进过程中护壁泥浆的性能参数调节至关重要, 泥浆比重通常维持在 1.15 g/cm^3 左右, 以平衡地层压力并防止孔壁坍塌。钻头升降速度应平稳, 避免因剧烈扰动产生缩径或斜孔现象, 成孔深度达到预定位置后, 需进行二次清孔作业, 将孔底沉渣厚度压缩至 50 mm 以下, 确保桩尖承载力得以充分发挥。通过超声波检测技术对孔径、垂直度及孔深进行复核, 确保成孔指标完全符合受力模型要求。

2.2 钢筋笼加工与安装工艺

钢筋骨架的刚度与位置准确性直接关系到桩基的抗弯性能^[2]。在加工阶段, 主筋连接应优先采用机械连接或搭接电弧焊, 焊接长度须满足 $10d$ 的规范要求, 且接头位置应相互错开。为了防止钢筋笼在吊装及混凝土灌注过程中发生变形或浮笼, 需在笼体四周设置足量的定位筋或混凝土垫块, 保证保护层厚度均匀。吊装时应采用多点起吊, 严禁产生永久性塑性变形, 下放过程须对准孔位, 严禁强行冲撞孔壁, 确保钢筋骨架轴线与孔道中心线重合, 偏差控制在许可范围内。

2.3 水下混凝土灌注控制要点

水下混凝土的流动性与连续性是形成稳固桩身的基石。配合比设计应兼顾和易性与强度要求, 坍落度

作者简介: 贾海鑫 (1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路与桥梁工程。

宜设定在 200 mm 附近,以提升导管内的流动性能。灌注起始阶段,首批混凝土数量必须充足,确保导管埋入深度不小于 1.0 m,防止泥浆渗入形成断桩。在灌注过程中应实时监测混凝土面上升高度,导管埋深需动态调整并维持在 4 m 左右,严禁导管拔离混凝土面,灌注作业须一气呵成,避免因间歇时间过长导致冷缝产生,确保桩身结构的整体性与密实性。

2.4 承台大体积混凝土施工技术

承台结构厚度较大,内部水化热积聚易引发温度裂缝。技术控制重点在于温差调节,施工中应采用低水化热水泥,并掺入适量的粉煤灰以延缓放热峰值。内部需布设循环冷却水系统,通过冷水循环带走多余热量,确保混凝土内外温差不超过 25 ℃。浇筑方式宜采用分层连续浇筑,每层厚度应结合振捣器性能合理排布,确保振捣密实且无漏振。表面处理应在初凝前进行二次抹面,减少塑性收缩裂缝的产生并在后期采取蓄水或覆盖薄膜的方式进行恒温养护。

2.5 墩身模板安装与线形偏差

墩身作为桥梁的垂直支撑,其线形精度与外观形态反映了工艺执行深度^[3]。模板系统需选用弹性模量较大的钢材,面板厚度通常不低于 6 mm 以增强抗侧压能力,防止在混凝土浇筑产生的巨大侧压力下发生挠曲变形,模板拼缝处应采用高弹性止水胶条进行嵌入式密封,并配合高强双头螺栓进行紧固,确保接缝处的物理缝隙压缩至 1 mm 以内,从根源上消除因浆体流失导致的蜂窝麻面。模板表面的平整度需利用靠尺逐板复核,确保拼缝两侧的错台控制在微米级范围内,为后续结构受力提供均匀的截面物理基础。

安装完毕后,需利用全站仪建立空间三维坐标网,在模板顶部对称设置四个观测基准点,进行多点位垂直度校核,将墩身中心线偏差严格限制在 10 mm 以内。振捣作业过程中,振捣棒应与模板内壁保持 10 cm 以上的间距,严禁触碰模板支撑体系或预埋钢筋,防止高频振动导致模板扣件松动而引发线形偏移。拆模时间应依据同条件养护试件的抗压强度确定,通常需达到 2.5 MPa 以上,防止过早拆模造成表层结构剥落。拆模后应立即采用全包裹式塑料薄膜进行包裹,利用膜内冷凝水维持混凝土表面的湿润状态,维系结构表面性能的稳定性。

3 沥青混凝土路面铺装关键工艺

3.1 混合料拌和技术参数把控

沥青混合料的配比精度与拌和温度是决定路面耐久性的源头。拌和设备应采用具有二次筛分功能的间歇式生产工艺,矿料与沥青的投放精度偏差应通过称

重传感器实时修正,确保其波动范围控制在 ± 1 以内。沥青加热系统需具备精确的恒温调节功能,将基质沥青加热温度维持在 160 ℃ 至 170 ℃ 之间,确保沥青在混合瞬间具备良好的浸润性。通过对矿料粒径进行严格的级配设计,动态调整冷料斗转速,维持级配曲线的平顺度,规避级配离析带来的孔隙率异常。

混合料拌和时间应依据叶片转速与拌缸容量进行测定,干拌时间通常不少于 5 s,湿拌时间应确保集料表面完全被沥青膜裹覆,总拌和周期需达到 45 s 以上^[4]。对于改性沥青混合料,需根据改性剂的物理特性适当延长拌和时间,促进高分子聚合物在混合料中的均匀扩散,增强胶浆的粘附性,出场温度检测应采用红外感应与插入式热电偶相结合,严禁使用温度超限或发生老化的混合料,通过对拌和环境湿度的监测,及时修正骨料含水率参数,确保每一批次混合料的物理属性均处于受力模型设定的最优区间。

3.2 摊铺平整度与厚度调节

摊铺作业的连续性与均匀性是决定路面行车舒适度的核心指标,摊铺机熨平板的预热温度应保持在 100 ℃ 以上,以减小对混合料的瞬间冷却效应及表面拉动阻力。自动找平装置应结合基准线法与平衡梁法,实时调节液压升降系统,补偿基层不平整带来的标高误差。熨平板的振捣频率与振动振幅应根据摊铺厚度进行匹配调节,通过机械振动初步提高铺装层的摊铺密度,作业过程中,摊铺速度应恒定保持在 2 m/min 至 4 m/min 之间,严禁随意变换速度以消除铺装层表面的物理波浪现象。

厚度检测应通过多点插尺与容重折算系数相结合,确保实铺厚度与设计值的偏差在许可范围内。摊铺机前应有至少 3 辆运料车候机,确保混合料供应与摊铺速度达到动力学平衡,防止因停机导致熨平板下沉产生压痕。在摊铺机行进过程中应持续监测受料斗内的料位高度,避免料位过低引起离析或厚度波动,通过对螺旋布料器转速的精确控制,确保混合料在全宽范围内均匀分布,从物理空间上保障铺装层的平整度指标,为后续碾压工艺提供规整的受力平面。

3.3 初压复压及终压组合工艺

碾压是形成沥青路面结构密实度与抗变形能力的终结工序。初压应在混合料温度不低于 150 ℃ 时紧跟摊铺机进行,采用双钢轮压路机静压两遍,起到稳固铺装层的作用。复压阶段是提高密实度的关键,通常采用重型轮胎压路机与振动压路机组合方式,碾压遍数需通过试验段确定。终压则旨在消除轮迹,应在温度降至 80 ℃ 前完成,采用双钢轮压路机直至路面平整,整个碾压轨迹应由低处向高处推进,重叠宽度维持在

合理区间,严禁压路机在未冷却的路面上转向或急停。

3.4 接缝处理与路面边缘处理

接缝是路面结构中的薄弱环节,其处理精细度影响到路面的整体性^[5]。纵向接缝应优先采用热接缝工艺,即两台摊铺机梯队作业,重叠部位实时碾压使之结合成整体。横向接缝则需采用平接缝处理,通过人工切齐、涂刷粘层油并进行横向碾压,确保接缝处平顺且无跳车现象。路面边缘的压实应在主体压实完成后及时跟进,利用小型压实机具或夯实设备强化边角区域的密实度。接缝与边缘处的细部操作,对于防止雨水下渗以及路面结构过早剥落具有重要的结构防护意义。

3.5 路面性能养护与检测控制

铺装完成后的养护期决定了初期结构的形态稳定性。在路面温度降至 50℃之前,严禁任何工程车辆或社会车辆驶入,防止产生车轮压痕。养护期间应清理表面杂物,保持铺装层的洁净度。性能检测阶段应对路面的压实度、平整度以及构造深度进行抽样实测,利用连续式平整度仪获取路面行驶指标,若发现局部平整度超标或密实度不足,应及时查找工艺环节中的偏差原因并进行局部技术干预。通过完善的检测反馈机制,确保路面各项技术指标均处于受控状态,延长道路使用年限。

4 预应力桥梁构件预制技术要点

4.1 预应力管道定位与安装工艺

预应力孔道的空间位置直接影响到预应力筋的受力效应。在模板内部安装波纹管时,应采用定位钢筋支架进行固定,支撑点间距不宜超过 50 mm,以防止在混凝土浇筑过程中管道发生径向移位。管道接头部位应密封严密,利用胶带或热缩管包裹,防止水泥浆渗入孔道造成堵塞,安装完毕后应对管道轴线坐标进行三维校核,确保其线形偏差控制在 5 mm 之内。通过对孔道坐标的严密控制,可以保证张拉力作用线与结构轴线契合,提升预应力构件的结构抗力。

4.2 预应力张拉工艺与伸长值控制

张拉工艺是预应力混凝土结构形成强度的核心。张拉作业应在混凝土强度达到设计值的 80% 以上方可进行,且龄期需符合规定,采用双控原则进行控制,即以张拉应力控制为主、伸长值校核为辅。张拉程序通常遵循从 0 到初应力,再到控制应力 $1.03\sigma_{con}$ 并持荷的流程,实测伸长值与理论伸长值的偏差必须控制在 $\pm 6\%$ 范围之内,一旦超出此范围,应立即停止张拉,并查明摩擦损失或材料模量偏差原因。通过精确的张拉控制,能赋予梁板结构预期的反拱值与承载储备。

4.3 孔道压浆与封锚技术流程

压浆作业旨在保护预应力筋不受腐蚀并建立筋材与梁体的粘结力^[6]。在张拉完成后 24 h 内应进行压浆,采用真空辅助压浆工艺以提升孔道填充的密实度,压浆压力应保持在 0.8 MPa 左右,并在排气孔排出均匀浓浆后关闭。封锚作业需对锚具进行防锈处理,并安装密合性良好的锚穴模板,浇筑高强无收缩混凝土。通过对压浆浓稠度与压力的动态监控,确保孔道内部无空隙,形成坚固的物理屏障从而维系预应力体系在复杂服役环境下的长期可靠性。

4.4 预制梁板存放与吊运控制

预制构件在移场与堆放过程中,其支撑位置对受力性能至关重要。存放场地应平整坚实,排水设施完善,防止底座下沉导致梁体开裂。梁板堆放层次不宜过高,且上下层支撑点应垂直对齐,位置应选在支座附近区域。吊运时应采用专用吊具,起吊速度需缓慢平稳,吊绳与构件水平面夹角应大于 60° ,减少水平分力对构件的影响。在运输过程中应设置稳固的侧向支撑,防止横向失稳产生结构损伤,对构件存放与流转环节的技术规范化处理,是保证预制构件在安装前保持性能完好的关键步骤。

5 结束语

通过对道路与桥梁施工中关键技术环节的深度剖析可以得出,精密化的工艺控制是提升工程稳定性的必由之路。从路基填筑的参数优化到桥梁下部结构的稳固成型,再到沥青路面铺装与预应力张拉的严密規制,每一个细节都决定了交通设施的力学表现。通过对各项技术指标的实时监控与动态调节,工程实践能够从经验主义转向科学数据支撑的标准化体系。未来,应进一步强化对核心工艺环节的精细化探索,利用高精度检测仪器实现全过程的动态监管,从而不断夯实交通工程的技术根基。

参考文献:

- [1] 郑艳杰.道路桥梁工程现场监理质量的控制对策分析[J].现代交通与路桥建设,2025(04):181-183.
- [2] 于锐.道路桥梁工程施工中的质量控制与管理策略探讨[J].安家,2024(05):112-114.
- [3] 刘全旺.道路与桥梁施工技术与质量控制对策研究[J].门窗,2025(14):64-66.
- [4] 庄茂兰.桥梁道路施工过程中的质量管理与风险控制分析[J].现代交通与路桥建设,2025(10):190-192.
- [5] 丁显明.道路桥梁工程施工质量管理与控制探析[J].汽车周刊,2024(06):169-171.
- [6] 刘妍.道路与桥梁施工过程中的质量控制与检测技术研究[J].越野世界,2025(16):119-121.

配水厂配套管网工程现场管理的难点及解决措施

杨坤坤

(阜阳市供水有限公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要 为解决配水厂配套管网工程现场管理混乱、风险频发等问题,以城市配水厂配套管网施工为研究对象,梳理现场管理面临的核心难点。施工环境复杂、多方协同不畅、质量管控薄弱、安全隐患突出及进度失衡,均对工程推进造成阻碍。结合工程实际,从施工环境适配、多方协同机制、全流程质量管控、安全保障体系及动态进度管控五个维度,制定针对性解决策略,以期同类工程现场管理提供实操参考,助力提升工程质量、安全水平与施工效率。

关键词 配水厂; 配套管网工程; 现场管理; 多方协同机制; 安全管理

中图分类号: TU991

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.032

0 引言

配水厂配套管网作为城市供水生命线,是落实“美丽中国建设”“城市更新行动”的核心基础设施。当前,政策层面持续加大管网补短板力度,超长期特别国债、中央预算内资金精准赋能项目建设,同时智慧工地、城市生命线工程建设要求倒逼现场管理升级。城区施工环境复杂、多方协同壁垒、质量安全管控等难题仍制约工程提质增效,与智能化监管、绿色施工的新形势不相适配。立足于管网工程实操难点,结合物联感知、三维探测等新技术应用场景,梳理现场管理核心梗阻,探索针对性管控路径,对筑牢城市供水保障网、提升工程管理规范化水平具有重要的现实意义。

1 配水厂配套管网工程现场管理难点

1.1 施工环境复杂多变

地形地质与周边环境制约施工效率,增加管理难度。配水厂配套管网多沿城市道路、居民区铺设,地形地质条件直接决定施工工艺选型与推进节奏。软土区域易出现基坑坍塌、地面沉降问题,需额外投入加固措施且延长作业周期;岩石层则需采用爆破或重型机械开挖,不仅提升施工成本,还受环保、噪声管控限制。周边管线密集是另一核心阻碍,市政道路下燃气、电力、通信等管线纵横交错,部分老旧管线位置记录模糊,极易在挖掘作业中发生交叉干扰,引发安全事故与维修纠纷。气候与季节因素对施工的影响同样显

著,雨季降水易导致基坑积水、土壤泥泞,无法正常开展开挖与管材铺设;冬季低温会降低接口焊接强度、影响防腐涂层附着力,极端天气还可能造成施工机械故障,打乱预设作业计划,迫使管理团队频繁调整方案,进一步加剧现场管控压力。

1.2 多方协同协调难度大

跨主体、跨部门配合不顺畅,带来管理上的内耗以及流程上的阻塞。管网工程涉及多部门,住建部门负责施工许可的审批,市政部门控制道路占用和管线接驳,环保部门监管施工扬尘、污水排放,各个部门的监管要求和审批手续存在差别,如果衔接不好容易出现审批无法通过,造成施工陷入被动局面^[1]。参与建设的单位之间责任划分不清楚同样影响建设效率,施工单位偏重进度推进,设计单位需要保证方案符合规定,监理单位坚持质量底线,三方在设计改动、工艺调整等环节上容易产生不同意见,而且缺乏清晰的权责边界会带来推诿责任。施工带来的噪声、扬尘会干扰居民日常生活,部分管网铺设需要占用小区公共区域,容易引起居民抵触心理,如果沟通不及时、解释不充分,可能出现投诉、阻挠施工等状况,不但拖慢工期,还会损害项目可信度,加大现场管理的难度。

1.3 质量管控风险突出

管网工程质量受到诸多环节的作用影响,隐蔽工程管控难度大。管材作为核心物料,质量参差不齐直

作者简介: 杨坤坤(1983-),男,本科,工程师,研究方向:市政公用工程。

接带来安全隐患。一些供应商为了压缩成本而降低管材壁厚、简化防腐处理,进场检验时如果只是采用抽样检测,可能漏掉不合格产品,投入使用后容易出现渗漏、破损。接口焊接与防腐处理对施工精度要求很严格,钢管焊接需要控制温度、速度保证焊缝密实,PE管热熔对接需要确保接口清洁与压力稳定,任何操作偏差都会造成接口密封性不够,长期使用后可能因为水压冲击、土壤腐蚀出现渗漏。隐蔽工程是质量管控的薄弱环节,管网铺设后要马上回填,焊接接口、防腐层状态、管材摆放位置等关键信息不容易直观核查,验收时只能依靠前期记录与局部检测,容易形成质量盲区。隐蔽工程质量问题经常在投入使用后暴露,维修需要开挖路面、拆除设施,不仅修复成本高,还会影响周边居民用水与交通通行。

1.4 安全管理隐患频发

现场作业环境情况多样,人员、设备还有临时搭建的设施在安全管控上负担重。地下挖掘工作属于安全风险比较集中的部分,城市地下的管线布置错综复杂,一些老旧管线缺少准确的位置记录,挖掘过程中很容易触碰到燃气或电力管线,引起爆炸、触电这类严重事故。施工机械操作不规范同样对现场安全构成威胁,挖掘机、起重机等大型设备作业范围广,假如操作人员没有遵守安全规定,可能撞到施工人员、破坏周围设施^[2];机械维护保养不到位会导致刹车失灵、零件掉落,进一步加大安全风险。临时设施管理上的疏漏容易引起一连串问题,临时用电线路如果没按标准铺设、接地保护措施没到位,可能出现短路、漏电;基坑支护要是没有结合地质条件做优化设计、没有定期检查沉降和位移,容易发生塌陷事故;现场作业人员安全意识不够、操作不合规,加上安全警示标识不够明显、防护设施配备不齐全,都会让安全管控变得更困难,增加事故发生的概率。

1.5 进度管控失衡风险高

多重变量干扰施工计划,进度调整与管控灵活性不足。设计变更频繁是导致工期延误的核心因素,前期勘察不够细致、现场实际条件与设计方案不符,或业主方根据实际需求调整管网路由、管径,都会迫使施工单位停工返工,不仅浪费人力物力,还会打乱各工序衔接节奏。材料供应与设备状态直接制约施工进度,管材、防腐材料等关键物料若因生产周期、运输问题延迟进场,会导致后续作业无法开展;施工机械长期高强度运转易出现故障,若维修配件短缺、维修团队响应不及时,会造成现场停工待料、待修。交叉作业衔接不畅进一步加剧进度失衡,管网工程各工序

关联性强,开挖、铺设、焊接、回填等环节需有序推进,若未明确各工序时间节点与衔接标准,可能出现前序工序滞后、后序工序等待,或多工序同时作业引发冲突,导致整体进度无法同步推进,难以达成预设工期目标。

2 配水厂配套管网工程现场管理解决措施

2.1 优化施工环境适配方案

科学勘察加上动态调整,降低环境带给施工的制约作用。施工前做全方位地质勘察,结合钻探数据、地形测绘结果来构建三维地质模型,精准标注软土、岩石层等特殊区域分布范围与厚度。有针对性地优化施工工艺,软土区域使用钢板桩支护和井点降水组合措施,控制土壤沉降和基坑稳定性;岩石层优先选用静态破碎技术来替代爆破,减少噪声和环保影响^[3]。提前做周边管线排查工作,联合市政、电力、燃气等部门调取管线档案,借助人力探测仪实地探测定位,绘制详细管线分布图,明确各管线材质、管径和埋深。针对交叉作业区域制定专项避让与保护方案,对近距离管线采用人工开挖、悬吊保护方式,避免机械作业带来损伤。建立气象动态预警机制,与气象部门实时联动,提前获取降雨、低温、大风等极端天气信息,合理调整施工计划,雨季提前搭建排水设施、储备防雨物资,优先开展室内或不受降水影响的工序;冬季优化焊接工艺、采取保温措施,确保施工质量和效率,最大限度降低气候因素对施工的干扰。

2.2 构建高效多方协同机制

清晰界定权责边界并且理顺沟通流程,形成跨主体之间的协同闭环。组建专项协调小组,包括施工方、设计方、监理方负责人以及政企部门对接人员,明确该小组具体职责和沟通频次,统筹推进审批对接、争议协调等事务。主动联系住建、市政、环保等相关部门,提前梳理各环节审批要求与监管标准,整合审批所需材料、优化申报流程,打通审批与监管之间的衔接通道,避免因标准不一致造成审批停滞。与参建单位签署三方协同协议,细化施工、设计、监理在质量管控、进度推进、安全管理等方面的权责内容,明确设计变更、工艺调整的决策流程与责任划分。建立定期会商机制,每周召开协同会议,通报施工进展、解决现场分歧,针对设计变更等重大事项及时组织专题研讨,形成统一解决方案。提前公示施工计划、作业范围与工期安排,搭建线上线下居民沟通平台,线下设立咨询点、开展入户走访,线上通过社群同步施工动态,主动回应居民对噪声、扬尘、出行影响等方面的诉求,及时优化施工方案、采取降噪防尘措施,化解居民抵触情绪,构建良性协同氛围。

2.3 强化全流程质量管控体系

对每一批管材进场都落实双检流程,仔细核对生产厂家的资质文件、质量合格证明以及检测报告。现场随机抽取样品送去检验,重点检验管材壁的厚度、抗压强度还有防腐性能这些指标,不合格的材料禁止进场,从源头上防范质量隐患。施工工艺的标准要规范,针对接口焊接、防腐处理这类关键环节,专门编写作业指导书,向所有人员做技术交底。把操作流程、参数标准和质量要求都讲清楚,焊接作业安排持证人员操作,借助无损检测技术对焊缝质量做全面检查;防腐处理严格按除锈、涂刷、固化步骤执行,现场监督涂层的厚度和均匀程度,确保防腐效果符合要求,建立隐蔽工程全流程可追溯体系,施工过程中用高清影像记录关键节点,详细标注施工时间、人员、工艺参数和物料信息,同时建立电子和纸质两套验收台账,明确验收标准和责任人^[4]。隐蔽工程覆盖之前,要组织施工、设计、监理三方一起验收,逐一比对影像资料和现场实际情况,验收合格并签字确认后,才能进行后续回填作业,这样质量管控就没有盲区,也能做到可追溯。

2.4 完善安全管理保障体系

制定专门的安全管理制度,落实人员操作、设备使用、临时设施搭建等安全规范,厘清每个岗位的安全责任,将安全管理放进现场考核系统里。组织全部人员进行安全学习与考查。针对地下挖掘、机械操作、临时用电这些高风险环节,讲清楚安全风险点与紧急应对办法,考查没过关的人不能上岗操作。动工之前对地下管线做一遍彻底探测,结合档案材料与实地检测结果,在现场设置告示牌,标出管线种类、位置与安全距离。安排专人在现场监督挖掘作业。管控好临时设施,临时用电线路严格按照“三级配电、两级保护”标准铺设,定期查看线路绝缘情况与接地状态;基坑支护根据地质状况优化设计,实时监控沉降、位移数据,发现异常立刻做加固动作^[5]。建立常态化安全隐患排查机制,每日开展现场巡查,重点监控机械设备运行状态、防护设施完整性及人员操作规范性。对识别的隐患建立动态清单,明确整改时限与责任人;整改完成后进行复检,确认无误后方可销号,形成“排查—整改—验证”的闭环管理。

2.5 实施动态进度管控策略

建立柔性施工计划与资源统筹机制,通过动态监控施工进度,实现进度可控与灵活调整。优化施工计划编制,综合考量工程规模、工序特性及潜在风险,

预先设定阶段性进度目标,并建立目标跟踪与反馈闭环,留出 10% 到 15% 的缓冲期来应对设计变更、天气影响等突发情况。针对关键工序画出进度网络图,明确各个工序衔接的点还有相互关系,优先保证核心工序的施工资源,让整体进度可以有序推进。建立设计变更的快速反应机制,施工之前组织设计单位做现场交底,提前找出方案与实际条件不一样的地方,减少施工过程中的变更次数;变更发生以后,及时组织三方一起讨论优化施工方案,调整工序安排,尽可能减少返工对工期带来的影响。加强材料设备资源统筹,建立供应台账随时更新物料库存与到货进度,提前跟供应商签好供货协议,明确到货时间跟质量标准,准备一定数量关键管材、配件作为应急保障。定期检查施工机械,建立设备运行档案,及时找出故障隐患,配上专业维修团队与常用配件,确保机械正常运转。明确交叉作业衔接规则,建立工序交接验收制度,前序工序做完后经过监理验收合格才能交给后序工序,同时协调各个作业班组施工时间,避免工序冲突,做到交叉作业同步管控、高效推进。

3 结束语

配水厂配套管网工程现场管理是系统性工作,难点贯穿施工全流程,直接关系工程投用后的稳定性与实用性。上述管控策略立足于工程实际难点,兼顾针对性与可操作性,既能有效破解环境、协同、质量等核心难题,也能为现场管理提供清晰指引。在实际施工中,需结合项目地域特点、规模大小灵活调整策略,避免照搬套用。唯有坚守质量与安全底线,持续优化管理模式,加强各主体联动配合,才能实现工期、成本与效益的平衡。未来,可进一步探索智能化技术在现场管理中的应用,提升管控精准度,为城市供水保障工程高质量推进筑牢基础。

参考文献:

- [1] 董浩.某水厂供水管网延伸及末端改造分析[J].安徽建筑,2024,31(07):150-152.
- [2] 杨萍,温雪丰.数字化水厂供水管网远程监测系统的探讨[J].石油化工自动化,2022,58(06):98-100.
- [3] 季京宣,俞亭超,杨玉龙,等.多水厂供水管网的供水分界带水质改善研究[J].给水排水,2022,58(08):116-122.
- [4] 石琦.水利工程及给排水管网工程管理研究[J].水上安全,2024(22):142-144.
- [5] 赵继东.沉井技术在城市管网工程中的应用[J].广州建筑,2024,52(06):33-36.

城市配网工程施工中的工期管控与资源调配研究

费尚均

(湖南品致晟电力工程有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要 城市配网工程作为城市能源供给核心, 其工期管控与资源调配对工程履约质量、成本控制及复杂环境应对至关重要。当前该领域存在排程缺乏动态适配、资源配置衔接失衡、协同管控机制缺失等问题。为破解困境, 需构建“排程优化—资源适配—动态管控”一体化体系, 通过精准排程、节点管控、责任分层、全域资源整合及多主体协同等策略, 实现工期与资源的协同联动, 提升工程推进效率与质量, 为城市供电保障筑牢基础。

关键词 城市配网工程; 工期管控; 资源调配; 协同优化

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.033

0 引言

城市配网作为能源供应的关键基础设施, 其施工质量和投用效率直接影响着城市的机能运转和能源安全^[1]。而工期把控与资源调配是配网工程施工管理的重点环节, 二者相互配合的效能决定工程质量、综合成本控制能力以及复杂环境适应能力^[2]。目前城市配网工程施工时, 会受到场地受限、交叉作业多、外部干扰等因素影响。而传统管理模式下排程僵化, 资源调配不合理, 缺少协同机制等短板渐渐明显, 限制工程施工推进速度和质量。基于此, 探究城市配网工程施工工期管控与资源调配的优化途径, 创建科学有效的协同经营体系, 对于提升供电保证力量, 推动行业提质增效有着重要的理论和实际价值。

1 城市配网工程施工中的工期管控与资源调配的必要性

1.1 保障工程履约质量, 筑牢供电保障根基

城市配网作为城市能源供给的核心载体, 其施工质量与投用时效直接关联区域生产生活秩序。工期管控的核心价值在于通过科学时序规划, 规避施工环节的无序推进, 确保工程各节点按标准落地; 资源调配则为施工全过程提供精准支撑, 使人力、设备、物料等要素形成高效合力。二者协同发力, 既能避免因工序脱节、资源错配导致的工程质量隐患, 又能保障配网工程按期投用, 强化供电系统的稳定性与可靠性, 为城市能源安全筑牢基础。在城市化进程加速的背景下, 配网工程的履约质量直接影响城市功能的正常运转, 工期与资源

的精细化管理成为保障供电服务连续性的关键前提。

1.2 优化资源配置效能, 降低工程综合成本

城市配网工程施工涉及要素繁多、场景复杂, 资源的粗放式管理易引发闲置浪费与供给短缺并存的矛盾, 进而推高施工成本。科学的资源调配体系能够基于施工进度动态调整各类要素的投放规模与时序, 实现人力技能与工序需求的精准匹配、设备作业与施工节奏的同频联动、物料供应与现场消耗的动态平衡。而工期管控通过明确施工节点、优化工序衔接, 可减少因进度滞后产生的额外费用, 如设备租赁延期成本、人工窝工损耗等^[3]。二者的有机融合, 能够最大化提升资源利用效率, 减少无效投入, 实现工程成本的精准管控, 为企业提升市场竞争力提供核心支撑, 符合工程建设领域提质增效的发展导向。

1.3 应对复杂施工环境, 提升协同管控能力

城市配网工程多在人口密集、交通繁忙的城区进行, 施工过程中会受到市政规划调整、交通管制、居民诉求等外部因素的影响, 多班组交叉作业的场景大大增加了管理的难度。工期管控的动态调整机制可以对各种突发事件做出快速反应, 通过改变施工顺序、调整施工方案来降低外部干扰给工程进度带来的影响; 资源调配的灵活性能够根据现场工况的变化, 及时补充或者调整资源的供给, 保证施工的连续性^[4]。同时二者的推进也能倒逼企业建立与市政、交通、社区等多方主体的沟通协作机制, 明晰各个环节的权责边界, 提高交叉作业的协调效率, 不仅可以化解施工过程中

作者简介: 费尚均(1981-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 输配电工程施工。

出现的各种矛盾和风险,而且能促使施工管理体系的规范化升级,提高企业应对复杂环境的能力。

2 工期管控与资源调配现存困境分析

2.1 排程缺乏动态适配,工期管控刚性不足

城市配网工程施工环境具有显著复杂性,而当前部分企业的工期排程多基于静态规划模式,未能充分考量施工过程中的动态变量。排程制定阶段对场地条件、工序衔接、外部环境等因素的研判不够全面,导致预设工期与实际施工进度存在偏差。同时,工期管控体系缺乏弹性调整机制,面对交叉作业冲突、交通管制限制、突发技术问题等情况时,无法及时优化调整施工时序,进而引发工期延误。此外,管控责任划分模糊,部分环节存在权责脱节现象,导致工期管控的刚性要求难以有效落地,进一步加剧了工期履约风险。

2.2 资源配置衔接失衡,利用效能有待提升

资源调配与工期推进的协同性不足是当前城市配网工程施工中的突出问题。在人力资源方面,存在专业技能与工序需求不匹配、人员调配缺乏前瞻性等问题,既出现部分工序人员冗余闲置的情况,又存在关键作业环节人力供给短缺的现象。在物资资源管理中,对核心设备、耗材的库存盘点与供应周期预判不够精准,采购计划与施工进度衔接不畅,易引发物资积压或短缺,影响施工连续性。设备资源调配缺乏统筹规划,专用机械的作业时序安排不合理,存在设备闲置与施工等待并存的情况,导致资源利用效能偏低,无法为工期管控提供有力支撑,同时增加了工程施工成本。

2.3 协同管控机制缺失,外部干扰应对乏力

城市配网工程施工涉及多方主体,需与市政、交通、社区等单位密切协作,但当前缺乏完善的协同管控机制。与相关部门的沟通对接存在滞后性,施工占道、交通疏导等手续办理流程繁琐,延误施工进场时间。在多班组交叉作业场景中,缺乏有效的协调管理措施,作业区域划分不合理,易产生施工干扰,影响工期推进。同时,对外部环境干扰的应对能力不足,面对居民协调难题、极端天气影响、城区交通流量变化等突发情况时,未能制定完善的应急预案,导致施工进度受阻。此外,各管控环节信息传递不顺畅,缺乏高效的信息共享平台,使得工期管控与资源调配的调整决策滞后,难以快速响应各类突发问题^[5]。

3 城市配网工程施工中的工期管控与资源调配策略

3.1 精准排程动态管控工期,科学统筹高效调配施工资源

在城市配网工程提质增效、按期履约的核心导向下,企业需以精准排程为核心抓手,推动工期管控与

资源调配从分散应对向协同联动转型。优化管控调配路径,应立足于工程全生命周期,打破传统模式中工期规划与资源供给脱节的局限,构建排程优化与资源适配深度融合的管理体系,切实筑牢工程施工有序推进的基础。

企业可搭建“施工排程精细化—资源调配科学化—过程管控动态化”的三阶管理路径,以工期节点拆解为核心牵引,贯穿工序划分、资源梳理、现场管控等全环节,实现工期履约效率与资源利用效能的同步提升^[6-7]。企业需建立工期节点与资源供给的联动适配机制,将管控目标拆解为工序优化、资源统筹、现场调度等具体任务,由工程管理团队牵头推进核心管控举措落地。例如:在城市配网线路改造工程中,企业可组建专项管理小组,主导施工工序的精细化拆解与排程优化,结合施工场地条件与工序衔接要求理顺作业流程^[8]。且企业可同步统筹人力、设备、物料等各类资源,兼顾资源供给均衡性与施工连续性,避免出现资源闲置或供给短缺问题,将管控责任细化到各工序班组与岗位人员。

此外,企业需推动工期管控标准与资源调配体系的深度融合,将排程优化与资源调配流程纳入配网工程施工管理制度。在工程推进过程中,由管理专家组联合一线施工人员梳理工期延误、资源浪费等难点,结合城市配网施工场地分散、交叉作业多等特点,制定差异化的管控调配方案,形成“排程优化—资源适配—现场管控—复盘迭代”的闭环推进机制。为强化管控效能,企业可搭建施工管控数字化平台,由管理骨干牵头整合排程管理、资源调度、现场监测等功能模块,实现工期节点与资源使用情况的实时联动,形成标准化管理规范,精准调整资源调配节奏与施工进度,有效规避工期延误风险,全面提升城市配网工程施工的高效性与规范性^[9]。

3.2 锚定节点严控工期进度,按需适配优化资源配置效率

精准的工期动态管控与科学的施工资源统筹,是企业破解城市配网工程施工中工期延误、资源浪费等行业难点的核心路径。企业作为工程施工的实施主体,需兼顾施工效率与工程质量,破解工序衔接不畅、资源配置失衡的难题,构建“工期排程—资源适配—动态调控”一体化管理体系,筑牢城市配网工程高效推进的基础。

企业可结合配网工程施工工况,针对性规划施工工序与资源供给方案,整合人力、设备、物料等核心资源,搭配精细化施工管理模式,兼顾施工进度与作业规范。企业需采用分层管控思路,先完成施工全流

程工序拆解,明确各环节作业标准与衔接节点,再结合施工场地条件与作业要求,统筹调配施工班组、专用设备及各类耗材,避免资源闲置或供给不足,为工期管控提供支撑。

依托工期管控与资源调配的协同机理,结合城市配网工程施工特点,企业可预设多组工序排程方案与资源配置组合,覆盖不同施工节奏、资源供给强度及工序衔接模式。企业可采用动态优化策略,综合考量施工进度、资源利用效率及现场作业安全要求,灵活调整工序衔接时序与资源调配比例,同步优化施工流程,减少工序等待时间,提升施工整体效率^[10]。

而对于城市施工场地狭小、交叉作业多等复杂工况,企业需改善资源调配和工期控制方案,加强多班组协同作业管理,并合理划分作业区域,减少施工干扰。管理过程以工期节点落地、资源高效利用为根本,依靠加强现场巡查、优化衔接流程、动态调整资源供给。以规避工期延误、资源浪费的风险,保证工期管控和资源调配精准匹配。

3.3 多维管控压实工期责任,全域整合精准调配各类资源

企业推进城市配网工程施工时,工期管控的刚性落地和资源调配的高效匹配,是保证工程按期竣工、提高施工质量和效益的重要支撑。城市配网工程受城区交通管控、居民协调、多工序交叉作业等因素影响,工期延误、资源浪费的风险较大,企业应从施工全流程出发,从多方面管控压实各个环节的责任,并整合各种资源实现精准投放,破解施工瓶颈,筑牢工程推进的基础。

企业需以责任分层管控为切入点,构建全流程工期管控体系,破解责任虚化、管控脱节难题。构建“项目总控一标段分管一班组执行”的三级责任架构,明确各层级岗位职责与工期节点要求,将总工期拆解为工序节点工期,细化到每日施工任务,签订责任状压实到人。同时建立动态管控机制,依托施工管理平台实时跟踪工序推进进度,对比计划工期排查滞后隐患,针对滞后环节制定专项纠偏方案。例如:针对线路架设工序滞后,及时优化作业排班、增补作业人员,避免单一工序延误引发连锁反应。

而资源调配的精准度直接影响工期管控成效,企业需开展全域资源梳理整合,实现供需精准匹配。在人力资源调配方面,结合施工工序需求,筛选具备配网施工资质与经验的作业队伍,按工序类型划分专业班组,避免人员冗余或缺缺,同时建立人员储备库,应对突发人员调配需求。在物资资源管理方面,提前

摸排导线、变压器、绝缘子等核心物资的库存与供应周期,结合施工进度制定分批采购与进场计划,如针对老旧小区配网改造工程,优先调配小型化、易安装的配电设备,减少场地限制对施工的影响,同步建立物资动态盘点机制,规避物资积压与短缺问题。

同时,企业需强化多维度协同,联动优化工期管控与资源调配策略。加强与市政、交通、社区等相关单位的沟通对接,提前办理施工占道、交通疏导等相关手续,优化施工路线与作业时段,减少外部因素对工期的干扰。针对交叉作业环节,合理调配施工设备与场地资源,如统筹安排挖掘机械、起重设备的作业时序,避免设备闲置与场地冲突。

4 结束语

城市配网工程的工期管控与资源调配是保障工程质量、控制成本、应对复杂环境的核心环节。当前城市配网工程存在的排程僵化、资源配置失衡、协同不足等问题,需通过精准动态排程、节点化责任管控、全域资源整合及多主体协同等策略破解。构建工期管控与资源调配协同联动的一体化管理体系,可有效提升工程推进效率与质量,为城市能源安全供给提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 陈慧萍.配网架空绝缘导线防雷击断线的施工工艺改进[J].电力设备管理,2025(24):49-51.
- [2] 林晓麟.配网杆塔机械化组立施工关键技术及效率优化[J].电力设备管理,2025(24):244-246.
- [3] 杨筱文.电力配网架空线路工程施工技术及造价控制[J].中国招标,2025(S2):108-109.
- [4] 付雪,贾文慧.双网格化管理模式下的配网施工安全管理[J].农电管理,2025(12):64-65.
- [5] 关健锋.10 kV配网外线工程中机械顶管与电缆敷设的协同施工技术优化[J].机电信息,2025(23):83-85,89.
- [6] 谢媛媛.电力工程配网架空线路的施工技术分析[J].科技资讯,2025,23(22):115-117.
- [7] 翟家辉,李心怡.信息化技术在配网施工现场安全风险动态管理应用[J].城市建设,2025(25):83-85.
- [8] 李才星.配网施工项目优化管理模型构建[J].农电管理,2025(10):59-60.
- [9] 陈劲.电力配网架空线路工程施工技术研究[J].现代工程科技,2025,04(18):25-28.
- [10] 王梦瑶,虞荻,庄兴科,等.智能化技术在配网工程施工中的应用研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(08):250-252.

工业建筑施工项目质量与安全与进度协同管控实践

陈永利

(南京渠成建设工程有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要 工业建筑施工项目具有施工规模大、工艺流程繁杂、作业环境特殊、人员与设备高度聚集等特点。质量是项目的基本底线, 进度管控是项目实现履约的核心要素, 二者协同推进, 是确保项目高效实施、实现效益最大化的关键。本文基于工厂施工项目实际操作场景, 对协同管控存在的困境进行分析, 梳理协同管控的关键内容以及核心要点, 提出了具有针对性的协同管控实践策略。明确各施工阶段管控的关键内容, 构建协同管控体系, 以期为工厂施工项目在质量、安全和进度方面的协同管控提供实践指导, 进而推动工业建筑项目达到高质量、高效率且安全有序的建设目标。

关键词 工业建筑; 质量管控; 安全管控; 进度协同

中图分类号: TU714

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.034

0 引言

随着工业产业升级速度的加快, 工业建筑项目在数量与规模上均呈现出持续扩增的态势, 此类项目不仅与企业生产布局的优化以及产能的提升密切相关, 更会对工业经济的高质量发展产生直接影响, 对于建设质量安全有着严格的要求。同时, 工业建筑项目的履约进度与企业的投产计划以及经济效益直接关联, 质量安全管控与进度管控之间的矛盾则更为突出。开展工业建筑施工项目质量与安全与进度协同管控的实践探究, 以解决管控脱节难题, 优化协同管控模式, 明确管控关键要点, 对于确保项目顺利履约、降低管控过程中的潜在风险、提升企业核心竞争力具有重要的工程实践价值和现实意义。

1 工业建筑施工项目协同管控现存困境

1.1 管控理念脱节

现阶段, 多数施工企业于工厂施工项目之中呈现出质量安全管控理念与进度管控理念相互分离的情况, 未能树立协同管控的思想观念。部分管理人员过度且片面地追求施工进度, 将进度管控当作最为核心的目标, 却对质量安全管控有所忽略。为了缩短工期, 擅自对施工工序进行简化、降低质量标准、违规开展高危险性作业, 导致质量隐患与安全事故频繁发生。最终, 因开展整改工作、实施停工举措, 反而对施工进度造

成了影响。还有部分管理人员过度专注于质量安全管控领域, 制定的管控措施尤为严格, 未能依据进度要求对管控流程予以优化。由此, 导致施工效率显著降低, 各工序之间的衔接亦不够流畅。例如: 存在检查过度、审批流程繁琐等情况, 间接造成了工期延误^[1]。

1.2 协同机制缺失

质量安全与进度协同管控缺少完备的机制支撑, 各个管控部门大多各自为政, 协同配合不足, 导致管控工作出现脱节。在工厂施工项目中, 质量管控、安全管控以及进度管控大多由不同部门负责, 各部门相互之间缺少行之有效的沟通协调机制, 信息传递不及时也不顺畅。例如: 质量部门在察觉施工质量存在隐患后, 未及时向进度管理部门反馈, 致使进度计划未能及时调整, 在整改期间出现了工期浪费的情况; 进度管理部门在调整施工进度后, 未及时通知质量安全部门, 导致质量安全管控无法同步跟进。

1.3 管控体系不完善

质量安全与进度的协同管控体系存在不完备之处, 管控流程处于不规范状态, 责任划分亦不够清晰明确, 致使管控工作最终流于形式。部分施工企业未依据工厂施工项目自身所具备的特点, 制定具有针对性的协同管控体系, 质量安全管控和进度管控的流程相互独立, 彼此间缺少有效衔接。例如: 在进行进度计划编制时, 未能全面且充分地考量质量安全管控要求, 未

作者简介: 陈永利 (1985-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程管理。

预留合理时间用于质量检测及安全整改；质量安全管控工作未结合进度计划对管控节点进行优化调整，进而导致管控工作与施工进度出现脱节情况。与此同时，管控职责并未精准落实至特定岗位、具体人员，一旦出现质量安全问题，或是项目进度延迟，各个部门便会相互推卸责任，难以迅速将整改举措落到实处，其对项目的顺利推进也将造成不利影响^[2]。

1.4 管控手段滞后

工厂施工项目在质量、安全以及进度方面的管控方式比较落后，缺少信息化和智能化的支持，导致管控效率处于较低水平。当前，大多数项目依旧运用传统的人工管控方式，质量检测、安全巡查以及进度统计大多依赖人工记录和现场核查。这种方式不仅工作量大，且效率不高，容易出现数据偏差、信息更新不及时等状况，无法及时察觉质量安全潜在危险以及进度上的偏差，很难达到精准的管控。除此以外，信息化技术诸如BIM、物联网等未得到充分运用，使得施工过程的可视化与智能化管控无法达成。例如：无法借助BIM技术优化施工工序、规避交叉作业冲突，也无法通过物联网技术监测设备运行的实时状态与作业人员的安全状况，此类情况导致协同管控的精准度与效率难以提升。

2 工业建筑施工项目协同管控实践措施

2.1 树立协同管控理念

确立“以质量为首要考量、以安全为保驾护航之力、确保进度在可控范围”的协同管控理念，扭转单一的管控思路，促使质量安全管控与进度管控实现深度融合态势，此为协同管控的思想基础。加强对管理人员和一线施工人员的分层培训与教育，广泛宣传协同管控理念及工厂施工管控要点，使全体人员深刻认识质量安全与进度的辩证关系，明确协同管控对于项目按时完成、提升企业品牌形象的重要意义，坚决摒弃“重进度轻安全质量”或“重安全质量轻进度”的极端理念。同时，将协同管控的理念全方位地融入项目管控的整个过程中，在进度计划编制、施工工序安排、质量安全检查、隐患整改等各个具体环节，全面且审慎地考量质量安全以及进度方面的要求。制定出既具备科学性 with 合理性，又具有切实可行性的管控办法，以此保证质量安全和进度能够协同推进，有效达成项目的整体管控目标。

2.2 完善协同管控机制

构建一套完备的协同管控机制，破除各个部门彼此间的管理屏障，增强质量管控部门、安全管控部门

以及进度管控部门之间的协同协作，进而形成一种上下相互联动、各方共同参与管理的管控合力。打造常态化的沟通协调机制，清晰地界定沟通的频率、沟通的具体内容以及负责的人员，定时举办协同管控的例行会议，由质量、安全、进度等管理部门各自汇报管控工作的推进状况，交流施工过程中存在的协同方面的矛盾问题，一同探讨解决的办法，以此保证信息的传递能够做到及时、顺畅且精准。例如：每周都召开一回协同管控的例行会议，着重展开协调工作，化解交叉作业所产生的冲突、整改质量安全方面的隐患并调整进度这三者之间的矛盾问题，同时预先研判管控过程中可能出现的风险。与此同时，构建一套具有统一性的协同管控目标以及考核机制，将质量安全相关的指标与进度指标都归入统一的考核体系中，清晰界定各部门、各岗位在协同管控工作中的责任，将考核所得到的结果和绩效薪酬相互关联，从而充分激发全体人员主动投身于协同管控工作时的积极性与执行力。

2.3 优化协同管控体系

基于工厂施工项目具备工艺繁杂、安全风险颇高、进度要求严格等核心特性，对质量安全与进度的协同管控体系加以优化，使管控流程更为规范，让管控责任更加明晰，实现项目全流程、精细化的协同管控。编撰专项协同管控方案，将质量安全管控节点和进度计划进行有机整合，确定各施工工序的进度节点、质量检测的具体标准、安全管控的关键重点，合理预留出质量检测以及安全整改所需的弹性时段，从而保证质量安全管控和进度推进能够同步衔接、同频发挥作用。清晰界定管控责任的分工情况，施行岗位责任制度，将质量安全和进度协同管控的责任逐次分解，再落实到确切的岗位及具体人员身上，明确各个岗位的管控职责以及工作标准确保在出现问题时能够实现追溯，并可进行问责^[3]。

2.4 创新协同管控手段

创新质量安全与进度的协同管控手段，积极引入信息化、智能化技术，突破传统人工管控的局限，大幅提高管控精准度与工作效率。应全面应用BIM技术，构建工厂施工的三维可视化模型，精准优化施工工序安排，提前规避各专业交叉作业时的冲突，预判施工过程中可能出现的质量安全潜在风险与进度偏差，制定具有针对性的应对方案。借助BIM模型实现各专业的协同设计与协同施工，确保施工工序衔接顺畅，减少工序脱节现象与返工造成的浪费，提升施工效率。引入物联网方面的技术，在施工现场布置监测设备，对施工人员的安全状况、大型机械设备的运行情形、

施工质量的关键参数展开实时监测,及时察觉安全隐患以及质量问题,实现精准管控与快速整改。搭建协同管控的信息平台,对与质量安全、进度管控有关的数据加以整合,实现数据共享、实时查询以及动态管控的目标,全方位提高协同管控的智能化程度^[4]。

3 工业建筑施工项目施工阶段协同管控重点

3.1 施工准备阶段

施工准备阶段作为协同管控的基础性环节,需着重开展计划编制、资源配置、风险预判等工作,为后续的协同管控工作筑牢根基。应依据工厂施工工艺的具体要求及投产时间节点,制定兼具科学性与合理性的进度计划,同时将质量安全管控的相关要求融入其中,明确各个工序的施工时长、质量标准以及安全管控关键点,并且预留出适度的弹性工期用以应对可能出现的突发状况。对资源配置予以优化,依照进度规划以及质量安全方面的要求,合理地施工人员、机械设备、材料这类资源进行调配,保证资源供应能够及时且充足,防范因资源短缺而对工程进度产生影响或导致质量安全标准降低的情况发生。开展全面的风险预判,识别施工过程中可能出现的质量安全风险及影响进度的因素,制定针对性的应对措施,提前规避和管控风险。

3.2 主体施工阶段

在整个建设进程中,应着重开展多项工作,如对工序进行有效管控、细致协调交叉作业以及积极地整改施工中产生的隐患。其目的是保证工程的质量安全能够与施工进度一同有序推进。施工时,要严格依照既定的施工方案以及质量安全标准来开展各项作业,加强对各个工序的质量检测工作。同时,开展全面且频繁的安全巡查工作,每完成一道工序均需经过质量安全部门严格的验收。只有验收合格,方可进入下一道工序施工,从而坚决杜绝质量隐患与违规作业情况的出现。加强交叉作业的协同管控,合理规划各专业的施工顺序,明确界定交叉作业在安全管控方面的要求及质量保障的相关措施,防止交叉作业产生冲突,确保施工能够有序推进。构建隐患整改的闭环式机制,针对所发现的质量与安全隐患,确切明确整改的责任人员、整改应采取的措施以及整改的限定时间,在整改工作完成之后要及时开展验收工作,避免由于隐患未能得到及时整改而对施工进度造成影响或引发安全事故^[5]。

3.3 竣工收尾阶段

竣工收尾阶段属于协同管控的关键环节,此阶段需着重开展质量验收、安全收尾、进度冲刺等工作,

从而保证项目能够依照预定时间竣工并且顺利完成交付。要强化竣工质量验收的管控力度,依据工厂既定的施工质量标准以及设计要求,全面开展质量验收工作,一旦发现质量问题,需立刻进行整改,以此保证项目质量能够达到相关要求,防止因为质量验收不达标而对交付进度造成影响。将安全收尾工作妥善完成,对施工现场展开全方位的安全隐患排查工作,拆除临时设施,清理干净施工垃圾,保证施工现场处于安全、整洁的状态,防止在收尾阶段出现安全事故。对进度冲刺计划予以优化,以收尾阶段的施工任务而言,需合理调配资源,优化施工工序,加快施工进度,确保项目按预定时间竣工。同时,要兼顾质量与安全,杜绝为赶进度而忽视质量安全的不良行为。

4 结束语

工厂施工项目的质量安全与进度协同管控工作,是化解管控环节相互脱节难题、保障项目高效达成履约目标的关键举措。质量是项目顺利推进的基本要求,进度管控是项目成功履约的核心要素,二者相辅相成又相互制约。唯有实现二者的协同推进,方能确保项目在高质量、高效率的状态下安全有序地落地实施。目前,工业建筑施工项目的协同管控工作依旧面临着诸多突出的困境,这些困境对项目的管控效果以及企业的履约能力造成了严重的制约。凭借确立具备科学性的协同管控观念、健全协同管控机制、对管控体系予以优化、对管控手段进行创新,着重关注施工各个阶段的管控关键点,建立与工业建筑施工特性相契合的协同管控体系,实现质量安全和进度的协同共进。未来,要结合工业建筑施工项目的实际操作经验,持续对管控模式加以优化、对管控方法进行创新,不断提高协同管控的水准,为工业建筑施工项目的高质量完成提供坚实的保障,促进工业建设领域的高质量提升。

参考文献:

- [1] 于国锋. 浅议建筑工程施工中的安全、质量及进度管理[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(23):29-31.
- [2] 马翠香. 钢结构工业厂房工程质量监督控制措施研究[J]. 中国建筑装饰装修,2025(08):139-141.
- [3] 陈雷. 建筑工地施工质量安全监督与工程质量管理协同研究[J]. 砖瓦世界,2025(20):196-198.
- [4] 赵昂焱. 建筑施工进度管理与安全质量管理的思考[J]. 城市建设理论研究(电子版),2025(15):163-165.
- [5] 崔婷婷. 建筑工程施工进度与质量的协同管理研究[J]. 模型世界,2025(14):171-173.

超大运量带式输送机动态张力分布与托辊布局优化

王婷婷

(淮南舜立机械有限责任公司, 安徽 淮南 232000)

摘要 本文聚焦超大运量带式输送机, 深入研究其动态张力分布规律, 并对托辊布局进行优化。通过分析动态张力分布对输送机运行稳定性、部件寿命等方面的影响, 运用相关理论和方法对托辊布局进行调整和优化, 以期对超大运量带式输送机的设计和运行提供实践参考。研究表明, 合理的托辊布局能够有效改善动态张力分布, 提高输送机的运行效率和可靠性, 降低运行成本。

关键词 超大运量带式输送机; 动态张力分布; 托辊布局优化

中图分类号: TH22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.035

0 引言

超大运量带式输送机广泛地应用于矿山、港口和电厂中, 是物料输送的高效设备。但因其输送距离远、运量大、作业速度快, 作业时存在着复杂的动态张力分布问题。动态张力分布不尽合理, 不仅造成输送带磨损加重、接头破损, 而且还会影响托辊及其他零件寿命, 甚至造成输送机故障停运、生产效率下降。所以, 对超大运量带式输送机动态张力分布规律进行深入研究, 优化托辊布局, 对改善输送机性能及可靠性具有实际意义。

1 超大运量带式输送机动态张力分布与托辊布局优化的关系

超大运量带式输送机动态张力分布和托辊布局优化有着密切而复杂的联系, 这一联系渗透在输送机设计、运行和维修的全周期。动态张力分布作为输送机工作时的核心参数之一, 其受到启动加速度、负载变化和运行速度起伏等诸多因素的影响而表现出动态变化特点。启动阶段如果加速度控制不合适, 将使输送带张力剧烈增大, 并形成张力波现象, 不但加剧了输送带和托辊之间的摩擦, 而且有可能诱发输送带振动而影响输送稳定性。但托辊布局优化是通过托辊间距、布置形式和结构参数等参数的调整来直接影响输送带支撑状态和受力分布情况, 从而起到调节动态张力分布的目的。合理的托辊间距可以有效地分散输送带所受动态张力, 从而避免因局部张力集中而造成输送带的过度伸展或者疲劳损伤; 过于密集的托辊布置虽可

增强支撑效果并增加设备成本和安装维修难度, 但过于疏密又可能导致输送带下垂量过大而引发局部张力突然增大。托辊排列方式也是重点, 槽形托辊和平形托辊配合匹配, 可以适配各种输送段张力特性, 如张力峰值范围内加密槽形托辊, 本实用新型能够加强输送带约束并抑制张力波传播和放大。托辊的各种结构参数, 如辊的直径和轴承的性能, 都会对其与输送带之间的摩擦阻力产生影响, 对动态张力的分布产生间接效应, 通过系统地优化托辊布局, 能够实现动态张力精准调控, 使得张力分布更均匀, 不仅减少了输送带损耗风险, 而且延长了设备使用寿命, 还可以增强超大运量带式输送机运行的稳定性和安全性, 对实现高效连续输送具有可靠保证。

合理布置托辊需要综合考虑承载能力、使用寿命和输送带下垂度等方面的要求。在张力较高地段, 可以通过缩小托辊间距来加强对输送带的托持作用, 减小输送带局部下垂度和减小输送带松弛造成的张力波动; 同时对托辊的排列方式进行了优化, 如采用不等距排列方式或者根据张力的变化来调节托辊组间距等, 可以使输送带的受力得到进一步的均衡, 避免出现局部的应力集中^[1]。另外, 托辊直径、槽角以及旋转部分的质量等结构参数也会影响动态张力分布。例如: 加大托辊直径可以减少输送带和托辊之间的接触应力和运行阻力; 通过调节槽角, 可以改变物料在输送带上的分布状况, 从而影响输送带的张力分布。

托辊布局优化也需要结合输送机动态特性分析,

作者简介: 王婷婷 (1983-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 带式输送机设计与开发。

通过动态分析可以精确地计算出输送机工作时输送带张力峰值的大小和发生条件,从而为托辊的布置提供科学依据^[2]。以张力峰值区段为例,增加托辊个数或者使用高强度托辊都可以提高输送带承载能力,避免输送带由于张力过高而发生断裂或者托辊破损。同时动态分析也可以揭示输送带的振动特性规律并指导托辊的布置优化,从而达到抑制振动、减小张力波动、增强输送机的整体工作稳定性的目的。

2 超大运量带式输送机动态张力分布

2.1 起动阶段的张力波动特点

超大运量带式输送机起动阶段动态张力波动是输送机由静止状态向平稳运行状态转变时不可避免的一种力学现象。波动程度与起动方式和物料载荷等因素有密切关系,超大运量输送机一般所载物料重量远远超过常规机型,在起动瞬间输送带会由于惯性作用而出现明显张力冲击现象,如果起动控制不到位,很容易造成输送带打滑和滚筒轴系损坏^[3]。当前主流软起动方式如变频调速起动和液力耦合器起动,其核心作用是通过控制加速度减弱起动阶段张力波动峰值。

从具体表现来看,起动初期输送带驱动端首先发生张力陡增现象,之后张力波将沿输送带运行方向逐渐转移,空载段和重载段张力波动明显不同,重载段张力峰值一般为空载段张力峰的几倍。以具有长距离和大运量特性的矿山输送机为研究对象,当使用直接启动模式时,驱动端的张力峰值能够达到稳定运行阶段的 1.5 ~ 2 倍,然而,通过采用变频软启动技术并合理配置加速度参数,张力峰值有可能下降 30% ~ 40%。同时起动阶段张力波动在时域上也表现出明显特征,其波动频率和输送带刚度、滚筒惯量等因素有关,而波动持续时间主要由输送机启停控制过程决定。通过准确监测和分析起动阶段张力波动特性,可为输送机起动参数优化和输送带强度选择提供重点依据,确保设备起动过程平稳安全。

2.2 平稳运行的张力分布规律

超大运量带式输送机在平稳运行阶段,动态张力分布规律表现出明显的规律性,分布状态受输送带自重、物料载荷和托辊组阻力影响较大。在平稳运行状态下,输送机张力传递已不存在显著波动,而形成了一个较为恒定的张力梯度,该梯度对保持输送带连续运行和克服各分段阻力具有重要意义^[4]。

就其分布规律而言,输送带张力值自驱动滚筒绕出端起,沿运转方向逐渐减小,改向滚筒上略有反弹,构成封闭张力循环。与空载段相比,重载段的张力衰

减速度显著更快,这是因为重载段不仅需要克服输送带本身的运行阻力,还需要承受物料的重量阻力,但空载段只需要克服输送带自重和托辊之间的摩擦阻力。以横向排列超大运量输送机为例,在平稳运行状态下驱动端绕出点张力达到最大值,然后沿重载段至尾部改滚筒逐渐减小,尾部改向滚筒处的张力下降到最低,然后通过空载段回程时张力略有反弹到驱动端的绕入点^[5]。另外,在稳定运行的阶段,张力分布还会出现微小的动态波动,这种波动主要是由于物料分布的不均匀性和托辊旋转阻力的不同造成的,波动的幅度通常会控制在稳定张力值的 5% ~ 10% 之间。在稳定运行阶段把握张力分布规律是托辊间距设计和滚筒优化布置的核心基础,可有效减少输送带磨损和延长设备寿命。

2.3 制动阶段张力突变的表现形式

超大运量带式输送机刹车阶段动态张力突变是指设备由平稳运行转变为静止状态时发生的急剧力学变化,突变幅度与刹车方式和刹车减速度等因素有直接关系。制动阶段张力突变在输送机工作时属于高危工况,如果张力峰值大于输送带许用张力将直接造成输送带撕裂、滚筒损坏及其他严重失效,所以对制动阶段张力突变表现进行分析有很大工程意义^[6]。具体表现为制动指令发出时输送带驱动端首先发生张力陡降现象,输送机尾部由于物料与输送带惯性作用张力陡增,形成明显张力差,该张力突变传递速度符合输送带弹性波速。当使用不同的制动方法时,张力的突变特性会有显著差异。例如:在机械制动中,制动的减速度很难精确控制,尾部的张力峰值可能达到稳定运行阶段的 2 ~ 2.5 倍,这极易导致设备受到冲击;但当使用液压制动和变频回馈制动这两种可控制制动方式后,尾部张力峰值可以通过制动曲线的合理设定限制在 1.3 倍稳定值范围之内。另外,制动阶段张力突变与输送机输送长度、物料载荷有关,输送距离越大,物料载荷越大,张力突变范围越大。对于制动阶段张力突变的表现形式,在工程中一般采用增加制动缓冲装置和优化制动程序来减弱张力峰值以确保输送机制动时安全,复杂运行条件下张力异常变化突发性和局部性强,很难用常规启停控制程序来调整,需借助于在线张力监测系统,实时采集张力异常信号并及时启动预警和调控机制,确保输送机处于复杂运行状态。

3 超大运量带式输送机托辊布局优化的方法

3.1 根据张力数据对间距进行优化

根据张力数据对托辊间距进行优化是超大运量带式输送机托辊布局优化研究的核心手段,其核心是依

靠输送机在不同工作阶段张力分布数据进行分析,实现了托辊间距的精准匹配,兼顾了设备运行稳定性和成本控制。托辊间距对输送带垂度及受力状态有直接影响,间距太大容易造成输送带垂度超标,并与材料发生摩擦而增大运行阻力,间距过小将抬高设备购置和安装的费用,并增加托辊磨损输送带的可能性。超大运量运行条件下输送带张力分布具有明显的阶段性,起动、稳定和制动阶段张力波动特性各异,需要托辊间距不使用单一标准而需要基于张力数据差异化设计。

具体优化时,先利用张力监测系统对输送机各个运行阶段、各个区段实时张力数据进行采集,并着重对重载段和空载段张力峰值和均值进行标记。对于张力值较大的重载段适当减小托辊间距并控制输送带垂度处于行业标准之内,以免张力过大导致输送带拉伸变形;对于张力值比较小的空载段可以适当加大托辊间距以减少设备投入成本。

3.2 结合工况特性的选型优化

结合工况特性对托辊进行选型优化是确保超大运量皮带输送机托辊布置适配的关键手段,其核心是依据输送机实际工况对材料、结构等进行选型、规格配套托辊型号增强了托辊使用寿命和运行稳定性。针对运输矿石、煤炭等硬质和高磨损性材料的使用条件,优先选用高分子复合材料托辊或者耐磨陶瓷涂层托辊进行托辊加工,该类托辊耐磨性能比常规钢制托辊提高3~5倍,可有效减少材料对托辊冲击磨损;对大倾角排列输送机选用带有防跑偏功能锥形托辊或者调心托辊进行设计,利用托辊结构设计对输送带跑偏趋势进行自动矫正,从而避免输送带跑偏而导致张力异常;针对潮湿、多粉尘等恶劣工作条件,选用密封性能优越的迷宫式密封托辊以防止水和灰尘进入托辊内,减少轴承故障率。

3.3 采用仿真模拟对方案进行优化

利用仿真模拟进行托辊布置方案优化是一种现代超大运量带式输送机托辊布置优化手段,其核心是借助于专业输送机仿真软件,构建了设备的数字化模型,并模拟了在不同的托辊布局方案下设备的运行状况,从而实现了布局方案的科学决策。传统托辊布局优化往往依赖于经验设计且缺乏准确数据支持,超大运量运行条件下经验设计很难处理复杂力学传递,容易造成布局方案不足。但仿真模拟技术可以通过数字化建模准确地还原输送机运行状态,并直观地展现不同布置方案的张力分布、输送带垂度等、托辊的受力及其他关键参数为方案优化提供数据支撑^[7]。

具体优化时,先使用三维建模软件建立输送机整机数字化模型并输入输送带参数、物料载荷和托辊规格基本数据,再借助于输送机专用仿真软件对不同托辊间距和排列方式的装置运行工况进行仿真。通过对不同方案仿真结果进行比较,分析了托辊布置方式对输送带张力起伏、垂度改变的影响规律,并选出了最佳布置方案。例如:在某长距离大运量输送机的布局优化中,通过仿真模拟对比了等间距布局、分段间距布局、变倾角布局三种方案,结果显示采用分段间距布置时输送带张力波动最小、垂度控制最为平稳、托辊整体受力较为均匀。根据仿真的数据,确定了分段间距的布局策略,这在实际操作中使得输送机的运行阻力减少了10%,同时输送带的磨损速度也下降了18%。采用仿真模拟进行方案优化可以突破经验设计限制,促进托辊布置方案科学准确。

4 结束语

研究超大运量带式输送机动态张力的分布规律,优化托辊布局,是增强输送机工作性能与可靠性的关键措施。本文通过理清动态张力分布规律及托辊布置对托辊的影响程度,提出托辊布置优化的有效方法并对优化效果进行验证。但在具体运用时仍需要考虑多种因素,才能保证优化方案可行有效。未来,需进一步深入地研究、完善动态张力分布理论、托辊布置优化策略等,从而为超大运量带式输送机高效运转提供更加强大的支撑。

参考文献:

- [1] 李玮华,杨秦建.在线带式输送机托辊工况动态监测系统的研发[J].西安科技大学学报,2008,28(01):100-104.
- [2] 揭施军,黄富连,谢冬儿,等.首尾张紧方式对带式输送机动态特性的影响分析[J].机械管理开发,2026,41(01):1-4.
- [3] 王得胜,陈亚丰.带式输送机的输送带参数和托辊间距的优化[J].河南理工大学学报:自然科学版,2015,34(04):525-531.
- [4] 关晓路.煤矿大型带式输送机驱动头架力学特性分析[J].机械管理开发,2025,40(10):62-63,88.
- [5] 罗超,程彬彬,方厚儒,等.双向带式输送机纠偏和托辊清理优化与设计[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021(07):140.
- [6] 王太平.带式输送机动态特性分析与多驱动功率平衡控制策略研究[J].机械管理开发,2025,40(12):206-208.
- [7] 同[5].

基于传感器融合的铁路轨道衡称量稳定性提升方法

张 硕

(中国铁路沈阳局集团有限公司科学技术研究所, 辽宁 沈阳 110000)

摘 要 铁路轨道衡是列车动态计量的核心设备, 而结构扰动、车辆冲击、传感器波动等多种因素经常干扰其称量稳定性, 很容易引起数据偏差、误判风险。为增强轨道衡复杂运行场景下的稳定表现, 本研究采用传感器融合机制, 建成多源协同感知系统, 搭配误差识别及补偿算法, 依托信号层面落实动态修正和稳态控制。现场验证表明, 该方法应对结构干扰和传感噪声表现出良好的适应性, 可切实优化动态称量一致性。

关键词 铁路轨道衡; 传感器融合; 称量稳定性; 误差补偿; 动态信号处理

中图分类号: U2; TP21

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.036

0 引言

轨道衡是铁路货运系统里完成列车过轨动态称重的关键装置, 它的计量精度和稳定性直接关系到车站计费、车辆调度和安全管理等关键环节。在复杂环境下运行时, 轨道结构弹性改变、车辆载荷瞬时冲击、传感器信号干扰, 都可能引发称量数值波动甚至误差累积, 影响整套系统运行稳定性。随着传感器技术和多源数据融合方法的进步, 围绕轨道衡系统构建高鲁棒性的稳态识别与误差修正路径, 成为计量保障技术发展的核心方向。

1 轨道衡称量稳定性的影响因素分析

1.1 结构扰动影响

铁路轨道衡在列车通行过程中需要同时应对轨道结构的弹性变形、底座回弹和列车荷载冲击所带来的动态扰动, 这些扰动在实际称量时会表现为瞬时响应过冲、信号震荡和零点漂移等问题, 容易对短时间内的稳定输出构成干扰。以 50 吨轴重的货运列车为例, 当借助普通型钢轨道衡时, 轨面会出现高达 0.8 mm 的瞬时下挠, 叠加车辆振动频率范围 (5 ~ 20 Hz) 后, 让信号呈现周期性跳变。若该扰动没有被有效识别时, 会直接影响系统判断是否进入稳态窗口, 造成称量数据偏离真实值^[1]。

1.2 传感波动问题

称量系统中常用的应变式、压电式或电阻式传感器在动态工作条件下都存在一定程度的输出波动, 来源包

括传感材料滞后性、电子信号传输延迟和环境干扰。具体来看, 应变片在重复加载过程中可能产生 $\pm 1.5 \mu \varepsilon$ 以内的应力迟滞, 而传感器零点漂移率在常温下可达 0.02% FS/h, 在高温高湿环境中甚至翻倍, 如果系统没有引入温度漂移补偿机制与低频噪声滤除模型, 误差会随时间累积, 对稳定性形成长期影响。

2 融合系统构建与处理机制

2.1 传感器布设策略

为实现列车运行过程关键受力状态的持续监测, 轨道衡系统采用多种传感器布设策略。在钢轨和基础结构之间布设应变式称重传感器, 捕捉轮轨作用引发的主载荷变化, 安装位置必须和轨枕中心线精准对齐, 横向偏差不超过 ± 2 mm, 防止偏载造成信号畸变。另外, 在轨道衡两端轨腰位置安装加速度传感器, 一并采集纵向和垂向振动信号。加速度传感器采用 ± 50 g 量程, 采样频率达 500 Hz, 保障完整捕捉高频扰动信号。此外, 在轨道下方基础结构中, 还整合了位移传感器, 检测轨道下挠变化, 最高分辨率 0.01 mm, 可精准呈现低频结构变形过程。图 1 呈现该传感器布设方案, 结构设计符合纵向分层、横向对称原则, 保障数据采集的准确性和一致性^[2]。

2.2 数据同步机制设计

为确保多类传感器在动态称重过程中协同响应, 要构建统一的数据同步机制。各类传感器采集端统一接入同步触发模块, 外部脉冲信号做时间基准, 构建全通

作者简介: 张硕 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 计量技术与设备。

道一致的采样时序体系。针对列车通行周期短、冲击突变快，同步信号频率设置1 000 Hz，保障在轨距范围内任一位置采样延迟不超过1 ms，各通道数据采集单元嵌入高精度时钟芯片（年漂移不大于±3 ppm），并配置低延时缓存结构，支持预采样与补偿计算操作。同步机制中引入时间戳插值补全策略，在传输链路出现片段丢帧或数据错位时，借助上下帧速率拟合进行恢复，维持完整、连续的数据时间轴，构成后续融合计算的基础保障。

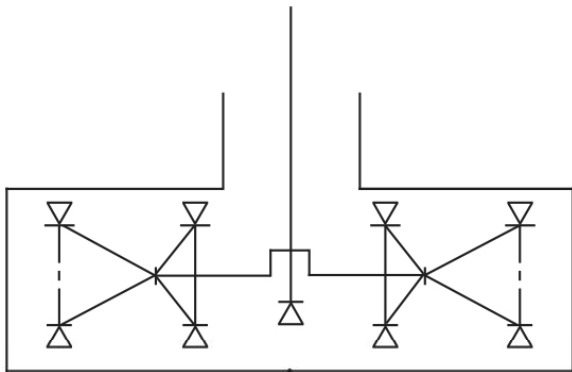


图1 传感器布设示意图

2.3 融合计算模型构建

多源数据在同步采集后要依靠融合计算模型实现统一输出，系统用分层融合架构，结合物理参数特性和统计特征构建协同解算机制。基础层以归一化预处理为起点，对应变、电压、位移等信号进行幅值重构和噪声剔除，选用带通滤波器控制有效频带在3~25 Hz之间，压制低频漂移与高频扰动，融合核心层引入加权卡尔曼滤波模型，根据各个传感器历史偏差方差自动调整融合权重，权重初始设定区间为0.15~0.6，动态调整周期不超过0.2 s^[3]。对非线性扰动响应，引入残差动态门限机制，实时计算各通道残差向量与预设稳定区间的拟合偏差，如果超过±5% FS，自动切换到自适应融合模式，最终输出层集成三轴位移、动载梯度和主称重通道信号，继而滑动均值和中值滤波联合输出稳定称量数据，构建全过程动态解耦的数据融合路径。

3 稳定性识别与误差自适应补偿策略

3.1 稳态识别与阈值判断

轨道衡的动态信号在列车通过过程中表现出明显的非稳态—稳态—离轨三阶段特征，系统要借助信号波动特征完成稳态窗口的自动识别。在信号处理链路中引入滑动窗口机制，设定窗口宽度2.5秒，内部采样点数量和系统采样率绑定，以500 Hz为例，每窗口包含1 250点，选用方差与偏移率联合判据建立稳态识别模型，定义任意时刻t的原始称量信号是 X_t ，滑

动均值为 μ_t ，则信号波动度量函数为：

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (X_{t-i} - \mu_t)^2} \quad (1)$$

式(1)中， σ_t 是波动方差， n 对应窗口内的点数，给系统设稳态阈值 Δ 为0.15% FS，连续3个窗口全部满足 $\sigma_t < \Delta$ ，最大偏移率不超0.3%，判定这段数据为稳态输出段，还要防范误触发造成伪稳态识别，给窗口末尾加退判机制，容错干预轨尾扰动。该识别流程借助动态判别模型确保输出数据具备足够的波动稳定性和时段完整性，给后面误差建模提供基础数据支撑。

3.2 误差建模与动态补偿

轨道衡称量输出长期带有微小系统误差，主要来自传感器间响应滞后、温度漂移和信号通道非同步引发的缓慢偏移。为提高输出数据稳定性，要在稳态段植入基于时间序列的误差建模机制，达成误差趋势识别与动态补偿，系统设定融合信号 Y_t ，标准参考值 R_t ，给出瞬时残差表达式：

$$\varepsilon_t = Y_t - R_t \quad (2)$$

式(2)中， ε_t 表示第t时刻的系统误差； Y_t 为融合后输出； R_t 为经标准载荷校验获得的理想值，考虑误差存在时间依赖性，系统采用自回归模型进行误差拟合预测：

$$\hat{\varepsilon}_t = \phi_1 \varepsilon_{t-1} + \phi_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \phi_p \varepsilon_{t-p} \quad (3)$$

式(3)中， $\hat{\varepsilon}_t$ 为预测残差， ϕ_i 为第i阶回归系数， p 为模型阶数。预测误差经过动态调节系数 λ 控制后叠加到融合输出，选择形式是 $Y_t^* = Y_t - \lambda \hat{\varepsilon}_t$ ，其中 $0.6 \leq \lambda \leq 0.9$ 。补偿逻辑结合滑动窗口平滑与极差监控策略，实现高频扰动压制与慢变误差跟踪，增强称量结果的稳定性与可控性^[4]。

3.3 闭环控制与自适应调节

轨道衡在完成稳态识别与误差建模之后，要构建闭环调节机制，以保障输出持续稳定。系统依托动态监测窗口，对输出值和历史预测结果开展一致性判定：当连续采样段内残差偏离超限，会触发调节指令，按照扰动等级设定不同阻尼系数与修正周期，压制信号异常。参数更新模块用误差变化率为触发条件，结合历史响应调整平滑因子与修正步长，使调节逻辑匹配结构状态变化趋势，融合修正通道在信号注入环节设立优先级分配策略，稳定性优先原则下动态赋权，避免通道冲突引发输出抖动。

4 实验验证与性能分析

4.1 测试平台与采集方案

1. 应用背景与平台构建。检验所提出的传感器融合和误差自适应补偿策略在实际铁路运行环境的可行

性和稳定性,借助东北某货运编组站现有轨道衡线路搭建实验平台,这条线路用典型单线双轨结构,配备 S 型轨道衡框架和嵌入式应变片称重单元,能满足稳定载荷通行和多次重复实验需求,适配动态信号采集和模型运行测试。

2. 实验布设与数据采集流程。平台搭建阶段,依据结构扰动和称重响应路径,轨道衡左右两侧各布设高精度应变计 16 组,布设点位覆盖轨枕中线、钢轨底部和钢轨腰部,并依照分层布设原则,给基础层加装 6 组位移传感器,承担结构形变量和偏移趋势的记录工作。选用 ZL-2A 型应变片充当传感器,配套测量区间 0~2 000 $\mu\epsilon$,位移传感器量程是 0~10 mm,分辨率 0.01 mm,契合微变形识别要求。

实验列车采用单节货运编组配置,将标准轴重设为 23.5 t,通行速度锁定 3~8 km/h 区间,实现典型低速称量工况全覆盖。同步采集系统采用嵌入式数据采集模块,自带 32 通道 A/D 转换器与高精度时钟源,固定采样频率为 1 000 Hz,采用统一时钟信号触发所有采集通道,搭建无时序漂移的同步采集链路。

平台配置信号处理主机和现场边缘服务器,前者

执行数据缓存和滤波操作,后者植入融合计算模型和误差补偿控制逻辑,实现在线实时处理和离线分析双模式自由切换。采集数据经过千兆以太网实时上传上位机控制中心,同步配套设置自校准流程,每轮实验前开展零点校验与标准载荷压载验证,维持测试数据精度和可比性^[5]。

为提高对复杂环境的响应分析水准,平台设置双环境试验场景,配合开展湿度扰动及基础可控干扰实验,系统对比不同外部条件下传感器融合模型的输出稳定性,确认实验数据覆盖维度广、结构响应全、测试逻辑闭环完整。

4.2 系统输出对比分析

在完成各项实验工况下的数据采集后,对比分析了传统轨道衡信号输出与本研究所构建融合系统的输出稳定性、重复性和误差控制能力,选取同一组列车重复通过 5 次的称量结果为样本,分别提取最大偏差、重复标准差与均值漂移三类指标进行横向比对,并结合稳态识别判定比率衡量融合机制对有效输出窗口的提取能力(见表 1)。分析表明,融合系统在轨道扰动与传感波动并存的环境中输出波动范围更窄,重复性

表 1 系统输出稳定性指标对比分析

项目	传统轨道衡系统	传感器融合补偿系统	指标说明
最大偏差 (%FS)	0.73	0.28	表征误差极值,融合后大幅收敛
重复标准差 (t)	0.46	0.17	表示多次称重一致性,融合系统更为稳定
均值漂移量 (t)	0.21	0.06	衡量漂移趋势,补偿机制抑制长期偏移
有效稳态识别比例 (%)	71.3	92.6	表明融合算法更精准提取高质量输出段

更优,特别在基础扰动增强场景下,融合机制表现出更强的抗干扰能力,明显降低了残差传播效应。

从实验对比结果看,融合系统在数据分布紧密性和误差可控性方面显著比传统方案更优,它的稳定性优势在多轮通行、复杂干扰及温变条件下表现更加明显,具备工程推广应用的结构基础和算法适配性。

5 结束语

针对轨道衡动态称量过程中的结构扰动和信号不稳定问题,本研究构建了一套以传感器融合为核心的数据获取、处理和输出控制机制,并嵌入稳态识别与误差自适应补偿策略,在多轮实验验证中展现出良好的精度保持和抗干扰能力。整体方案实现了从感知布局、数据同步到输出优化的链路闭环,具有在典型货运场景中部署运行的可适应性。未来需结合边缘计算架构进一步拓展其实时处理性能和工程集成水平。

参考文献:

- [1] 张宇.全要素轨道精测技术在铁路大修中的应用[J].测绘通报,2025(S2):110-114.
- [2] 王佳丽,谢征宇,杨庆玺,等.基于层次化语义融合的铁路天窗作业安全检测算法[J/OL].北京交通大学学报,1-13 [2025-12-24][2026-01-27]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=hmNf6PfbABsAfTmbeboExzSTI0DdzgH4XeR5UXJrn3_sDWT1ELC8decMxicI51B2T_u5_tg7Mj0ublx_UKXq1E58kMUxdLoQ1bCj0wmjgrSWoiJrOxfqKU-9URsIIQfjofQwNO5IxZjtLnoMkS0ZL5_u-uwEaW9KtLcBs1diHDUpH7PgEkH6Hw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 余祖俊,王洪伟,王悉,等.轨道交通自主运行控制技术综述[J].北京交通大学学报,2025,49(05):6-33.
- [4] 陈俊臣,魏琛.基于多传感器数据融合的铁路智能调度指挥系统设计[J].自动化与仪器仪表,2025(11):78-82.
- [5] 陈春雷,韩志,贺雨,等.基于多维校准平台的铁路轨道测量模拟研究[J].计量科学与技术,2025,69(03):42-52.

城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响控制研究

屈德镇, 朱超, 姜宝

(青岛地铁集团有限公司第三建设分公司, 山东 青岛 266100)

摘要 本研究以青岛地铁8号线五四广场站换乘通道工程为例, 针对城市密集区复杂环境里暗挖施工对既有管线的影响机理和控制策略展开系统研究。依托理论分析、数值模拟和现场实践结合的路径, 建立覆盖前期精准勘测、风险分级、过程精细化管控、实时动态监测和应急联动的综合管控体系, 以期同类工程提供参考。工程实际应用表明, “刚柔并济”复合预支护、微扰动开挖及数据驱动动态调控等关键技术, 可有效控制管线沉降和变形, 保障核心区重大基础设施安全运转。

关键词 城市密集区; 地铁暗挖施工; 既有管线

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.037

0 引言

深度开发城市地下空间, 往往会和既有的、错综复杂的市政管线系统紧密交织。地铁暗挖施工造成的地层位移、水土环境变动及施工振动, 很容易引发邻近管线出现附加应力和变形, 造成渗漏、断裂乃至灾难性事故, 严重威胁公共安全和城市生命线平稳运行。尤其在地质条件复杂、管线年代久远、分布密集的城市核心区域, 该问题表现明显, 依靠经验的传统保护方法已无法达到当前安全与环保的高标准。基于此, 研究城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响至关重要。

1 暗挖施工对既有管线的影响

1.1 地层扰动引发的不均匀沉降与管线变形

暗挖施工对既有管线的直接影响是地层扰动引发的不均匀沉降导致的, 从管线下方向邻近区域开挖地下隧道, 原有土体平衡状态遭到破坏, 应力路径出现变化, 会引发周边土体向开挖临空面移位, 这种位移会借助沉降槽传递到地表及浅层土体, 直接作用于埋设其中的管线。管线不会独自悬浮在土里, 它与周围土体借摩擦力紧密结合, 土体出现位移, 会带动管线产生相应弯曲变形。采用不同材质与接口形式的管线, 耐受这类变形的能力差异显著, 带刚性接口的混凝土管或铸铁管对差异沉降反应极强, 轻度弯折就可能造成接口开裂或管体断裂; 采用柔性接口的PE管或HDPE管, 能依靠自身伸缩特性, 在一定程度上适配变形。

但拉伸或压缩幅度过大也会引发失效, 施工方案强调必须严格监测管线沉降。管线面临的最直接、最普遍的力学威胁, 就是这种由地层损失引发的强迫位移, 调控地表沉降曲线的形态和幅度是保护管线的关键^[1]。

1.2 水土环境改变导致的次生风险

暗挖施工会明显改变管线周边的水土环境, 由此催生次生风险, 开挖隧道穿透富水层、改变地下水渗流路径或引发地下水位下降, 造成渗透力, 带离管线底部及周边细颗粒土出现局部空洞或土体软化, 这类水土流失会降低对管线的支撑力, 使它在自身重量或上部荷载作用下形成局部应力集中, 甚至造成管体悬空、沉降骤然加剧或接头脱离。控制地层变形、止水所用的注浆加固工艺, 本身兼具利弊双重属性, 如施工方案运用的地表深孔注浆和帷幕注浆, 压力控制偏差或浆液配比不合理, 浆液有概率渗入管线周边土体, 甚至挤入非压力管线内部。需注意的是, 高压浆液或对老旧管线施加不均挤压力, 引发变形或破裂, 施工全程精准把控注浆参数、实时监控管线状态, 是破解这类“保护性破坏”的核心。

1.3 水土环境改变导致的次生风险

暗挖施工带来的震动会影响管线, 尤其会对它的接口长期服役性能形成潜在且累积的影响, 即便根据方案规定运用静态破碎等非爆破手段减轻强烈震动, 但大型机械作业(凿岩、破碎、出土等)、重型车辆

作者简介: 屈德镇(1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 地铁土建施工。

运输以及地层应力调整阶段仍会产生持续的低频振动。此类振动借助土体传至管线,维持它的持续微幅颤动,针对采用刚性连接的管线,反复微振会加速接口密封材料老化、松动,可能引发细微渗漏的慢慢加重,针对出现腐蚀或已有微裂纹的旧管线,振动产生的交变应力有概率推动疲劳裂纹延伸,减小它的承载能力,抵达特定临界点后触发突发破裂,这类影响往往隐而不现且逐步加深,常规监测无法第一时间察觉,但会显著压缩管线剩余服役寿命。在评估施工影响阶段,不可只聚焦静态的位移和应力,还要将施工期持续的动态扰动,作为管线长期安全的核心考量内容。

2 城市密集区地铁暗挖施工对既有管线的影响控制策略

2.1 全面系统地前期调查、风险评估与协同设计

管控城市密集区地铁暗挖施工对既有管线影响的关键是开展全面、精准的前期调查和动态风险评估,基于此进行多主体配合的专项设计,此策略大幅领先传统资料收集,施工单位须主动与所有管线权属单位、市政档案管理部门开展深度对接,采取查阅竣工图纸、实施实地探挖(人工挖探沟等)、应用物探技术扫描等多种手段,建立收录管线精确平面位置、埋深、材质、管径、接口形式、使用年限、当前运行状况及历史维修记录等信息的“管线健康档案”。

需特别注意老旧管线、带柔性接口的燃气管、带承插接口的混凝土排水管等薄弱部分,要重点标识,基于这些详实内容,结合地质勘察报告及暗挖隧道设计参数,采用数值模拟等技术,预判施工造成的土体位移场变化,评估不同管线各施工阶段的理论变形与受力,科学界定风险等级,把管线风险划分为 I 级至 III 级。该控制策略的核心是把管线保护从“被动应对”调整为“主动预控”,设计阶段综合对比选取并融合永久性迁改、临时悬吊保护、原位加固等多种方案,联动地铁结构设计、施工工法选择(采用 CRD 法分步开挖控制变形)开展一体化设计,保证保护措施与工程本体深度契合,从根源阻断重大风险^[2]。

2.2 精细化的施工过程控制与地层改良技术

施工开展阶段,控制策略核心为开展精细化工艺控制及主动地层改良,全力减少对周边土体的扰动,间接实现对管线的有效保护。施工需严格执行“管超前、严注浆、短进尺、快封闭、勤量测”的原则,正式开挖隧道前,管线集中或风险偏高的区段,提前实施超前支护和地层加固。方案已有说明,用超前大管幕($\phi 299$ 钢管)搭建刚性防护棚架,预支撑上方土体;采用全

断面帷幕注浆或地面深孔注浆,让管线下方及周围的松散土体(特别是砂层)固化成整体,提升自身稳定性与抗变形能力,就像给管线打下牢固的“人工地基”。

开挖作业阶段,优先采用静态破碎、机械切削等非爆破或弱扰动施工手段,替换传统爆破,从震源头削弱振动作用,严控每循环开挖进尺,快速架设刚度达标的初期支护并及时封闭成环,缩减围岩无支护暴露时长,遏制变形扩大,竖井或基坑周边的管线,具体采用刚度较大的支护体系(方案中的倒挂井壁配合工字钢支撑)、推行分步对称开挖、及时布设预应力支撑等措施,遏制侧向土压力变动引发的位移,全流程施工操作恰似一台精准的“外科手术”,要实现的是精准干预地层行为,最大程度减小施工活动对管线的力学影响。

2.3 实时动态的监测预警与信息化施工管理

构建全覆盖、即时响应的智能监测预警体系,是管线风险动态管控的核心指挥节点。落实此策略需要构建多层立体的监测网络,既包含对管线自身状态的直接监测,还要把监测对象拓展到支撑其存在的环境——周边土体和支护结构,依照方案内容落实,需统一布设地表沉降点、隧道拱顶下沉点、净空收敛测线、土体深层位移测斜孔及地下水位观测井等,搭建“管线下覆土体→管线本体→管线上覆土体→地表”完整监测流程,全部监测数据须通过自动化采集和传输系统,实时归集到统一信息化管理平台。

该平台的关键作用是完成数据快速处理、可视化展示和智能分析,预设多级预警阈值,监测数据触及预警线,系统会马上自动报警,把信息推送给相关技术人员和管理人员,实现了从“定期巡检”到“实时感知”的跃迁,信息化施工管理的关键为“基于监测反馈的决策优化”。技术团队每日分析监测数据变化趋势,把它和施工工况(开挖位置、注浆压力、支撑架设等)做关联对比,判定现有施工参数是否合理,预估后续施工的潜在影响,排查到异常,可快速调整施工工序、优化注浆参数或采取额外预加固措施,建立“监测→分析→决策→调整→再监测”的闭环管控循环,维持施工过程全程可知、可控。

2.4 健全应急响应机制与多方联动保障体系

即便前期工作再周全,施工控制的精细化实现路径,针对地下工程的未知风险,要建立一套响应迅捷、资源配齐、权责分明的应急响应与多方联动保障体系,这是风险控制最后一道坚实防线。该策略第一步明确组建由建设单位牵头,整合施工、监理、设计、管线权属单位及第三方监测机构的应急联动小组,厘清

各方在应急状态下的职责、联络人及通信方式,维持信息渠道无阻碍通行,要以最不利情况为假设基础,制定可落地性强的专项应急预案,预案内容需细化不同险情(管线沉降超限、渗漏、破裂等)的识别征兆、初步判断方法、首段应急处置流程(关闭阀门、疏散人员、交通管制等),以及后续专业抢修方案^[3]。

在施工现场常备应急抢险物资和设备,如各类管材、快干水泥、双液注浆机、抽水泵、发电设备等,并按期检查维护,保障它随时可用,策略的深层要义是构建制度化的沟通协调机制,要和管线权属单位固定时段会商,通报施工进度和监测状态,采纳专业见解。关键节点施工实施前,实施专项交底;执行监测预警环节,即刻联合诊断,深度融合的“路地协同”或“路企协同”,把施工方的现场管控能力和产权单位的专业处置经验统筹结合,保障突发状况出现时,可最快调动最专业的资源实施科学抢修,以最大限度压制事态扩大,降低对社会公共安全和居民生活的干扰,实现从“被动抢险”到“主动联防”的升级。

3 工程应用与效果评估

3.1 五四广场站换乘通道施工中的管线保护实践

实施青岛地铁8号线五四广场站换乘通道施工阶段,上文提到的控制策略已实现系统性集成化工程应用,为应对下穿城市核心区、紧邻多条重要市政管线和既有运营地铁线的极端复杂环境,项目团队把管线保护列为施工组织的核心,实践从最深入的前期勘探开启,联合产权单位进行现场物探与人工挖探,精准绘出管线三维分布图,重点明确横跨暗挖断面的DN300污水管、雨水管及800*200电力管线的易损空间位置,为后续设计敲定核心依据。依照“主动加固、微扰动开挖”的标准,统筹采用多种关键技术:给竖井周边施作地面深层帷幕注浆,切实稳固高含水砂层,给竖井开挖筑牢稳定边界;暗挖通道拱部部位,精准安装22米长、间距0.4米的 $\Phi 299$ 大管幕,好比在管线下方建起一座结实的“地下拱桥”,结合全断面注浆加固工艺,有效分担上部土体荷载。开挖时不用传统爆破,全流程运用静态破碎加机械凿除的工法,把施工振动减到最小,施工全周期,一套覆盖地表、管线、隧道结构的自动化监测网络不间断运转,实时数据反馈修正施工参数,构建出可动态优化的“感知—决策—执行”闭环,全流程精密管控管线变形^[4]。

3.2 控制措施实施效果分析

本工程采用的综合控制措施收到明显成效,系统监控量测数据可直接验证它的有效性,换乘通道竖井

及暗挖段全施工周期。周边关键管线(上水管、燃气管等)及地表的沉降监测数据显示,累计沉降值全部被严格管控在设计预警值区间,沉降曲线走势平缓,无任何突变或加速情况出现,证实地层扰动得到有效抑制。尤其需要留意的是,暗挖断面上横有多条浅埋管线,依托管幕与注浆联合体系的防护,变形程度远未达标,未发现管线接口因差异沉降产生泄漏或损坏,隧道内部监测同样证实,初支结构收敛和拱顶下沉数据平稳,支护体系快速闭合并维持稳定,从而证实地层预加固的成效,规避隧道变形过大拉动上部土体与管线出现有害位移。对比同类地质条件下未实施同等强度预加固措施的工程案例,本工程在沉降速率与累计变形量控制方面表现更好,切实防止因管线损坏引发的停水、断电、燃气泄漏等社会公共安全事故,保障香港中路和山东路这个交通枢纽正常运转,实现工程进度、安全和周边环境保护的高度统一^[5]。

4 结束语

本研究依托实际工程开展,完整阐释城市密集区地铁暗挖施工中管线保护面临的挑战及应对策略,综合运用精准勘探、主动预加固、微扰动工艺、智能监测与协同应急等综合措施,能对既有管线风险进行有效识别与精准管控,限定施工影响在可接受范围。五四广场站换乘通道的成功经验,更证实了上述技术与管理体系的有效性,还可为今后同类敏感环境下的地下工程建设,提供核心技术参考和决策依据,感知技术与人工智能深度结合,管线保护肯定会往更智能、更具预判性的方向走,为城市地下空间安全、高效和可持续发展夯实更牢靠的根基。

参考文献:

- [1] 申富林,钟子林,张雪松.地铁列车下穿运行振动对既有管线影响研究[J].南方职业教育学刊,2024,14(06):104-109.
- [2] 李宗,孟毅欣,易本奇,等.大断面矩形顶管超近接下穿既有管线施工控制技术研究[J].市政技术,2024,42(05):115-122.
- [3] 袁耀飞.深厚砂层顶管施工沉降控制措施技术探讨[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2024(03):5-10.
- [4] 王冬.地铁盾构下穿大直径输水管道沉降控制技术研究[J].东北水利水电,2025(07):52-54,72.
- [5] 史江伟,王金朴.盾构开挖面失稳下既有管线三维变形特性研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(03):1057-1065.

岩土勘察中分布式光纤感测与土体变形关联分析技术

沈华南

(深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 分布式光纤感测技术通过将传感光纤埋入岩土体或附着于工程结构, 实现了土体变形场从离散点位监测到全域连续精准感知的突破性升级。该技术以布里渊散射、瑞利散射等为核心物理机理, 搭配多维度科学布设策略, 可实时捕捉边坡滑移、地基不均匀沉降、基坑潜在滑移带等关键变形特征, 构建覆盖工程全域的立体化监测体系。基于实测连续应变数据, 通过深度融合岩土体物理力学模型与智能算法, 建立从光纤传感信号到土体变形机理的完整关联分析体系, 有效破解了传统监测的空间盲区难题, 显著提升了岩土工程风险的早期识别能力、预警时效性及防控精准度, 为工程安全管控提供了全新的技术支持。

关键词 岩土勘察; 分布式光纤感测; 土体变形

中图分类号: TU4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.038

0 引言

岩土体变形监测是筑牢工程安全防线的核心环节, 其数据质量直接决定风险研判的可靠性。传统点式监测方法受限于离散布设特性, 存在明显空间盲区, 难以完整刻画变形场的连续演化规律, 易错失关键预警信号。分布式光纤感测技术的问世, 凭借长距离覆盖、高精度测量、全域分布式感知的独特优势, 为岩土变形监测提供了革命性解决方案。如何将海量连续的光纤传感数据, 与土体实际变形状态及力学响应精准关联, 已成为当前岩土工程智能监测领域亟待突破的关键科学问题与技术瓶颈。

1 岩土工程变形监测的重要性

1.1 保障工程安全运营的生命线

岩土工程变形监测的核心价值在于构建起重大安全事故的主动预警防线。地下岩土体的性状具有显著的不确定性与隐蔽性, 其失稳破坏多源于内部变形的缓慢累积, 最终引发突发性灾变。缺乏系统监测时, 工程师对工程潜在风险的判断如同盲人摸象, 难以精准把控安全边界。通过对边坡、基坑、隧道围岩及地基的位移、沉降数据进行持续追踪, 可及时捕捉超出设计阈值的异常变形信号, 为管理人员争取宝贵的预警时间——在变形进入加速阶段、整体坍塌或滑移尚未发生前, 迅速启动应急预案, 采取加固、卸载、人

员疏散等针对性措施, 从根本上规避群死群伤与巨额财产损失的恶性工程事故, 实现风险管控从被动应对向主动预防的转变^[1]。

1.2 优化设计与验证理论的关键反馈机制

变形监测绝非工程建设的收尾环节, 而是贯穿项目全生命周期、衔接理论设计与工程实践的重要桥梁。在施工阶段, 实测变形数据是检验设计假设与施工工艺合理性的直接依据。通过对比实测值与理论预测结果, 能够清晰辨识实际地质条件与勘察报告的偏差, 精准评估支护结构受力效能及施工工序的科学性, 进而推动设计方案的动态调整与施工过程的信息化管控。进入运营阶段, 长期积累的监测数据形成工程结构性能演化的完整台账, 为评估结构长期耐久性、预判剩余服役寿命提供坚实的科学支撑。更为重要的是, 这些源自工程实践的海量实测数据, 是修正并完善岩土力学理论、优化计算模型与设计规范的核心素材, 推动岩土工程设计从经验估算逐步迈向基于实测反馈的精准化循环, 持续赋能行业技术水平迭代升级。

2 分布式光纤感测技术原理

2.1 基于布里渊散射的分布式应变与温度传感

布里渊散射是支撑分布式光纤感测技术实现应变与温度监测的核心机制。激光脉冲在光纤中传输时, 与光纤材料内热激发声子发生非弹性相互作用, 进而

作者简介: 沈华南(1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 岩土勘察。

产生布里渊散射光。该散射光的显著特性在于，其频率相对入射光存在固定偏移，即布里渊频移，且这一频移量对光纤所处的温度与应变状态极度敏感，二者的变化均会引发频移呈线性规律改变。借助高精度光学检测技术，捕捉光纤沿线各点位的布里渊频移特征，再通过预先标定分离温度与应变的交叉耦合影响，便能同步获取整根光纤空间维度上的应变分布与温度场数据。以布里渊光时域分析技术为典型代表，该技术可实现数十公里范围的测量覆盖，且具备米级空间分辨率，已然成为当前岩土工程长距离、分布式变形监测中的主流技术方案^[2]。

2.2 基于瑞利散射的分布式应变与振动传感

瑞利散射的相干探测机制，构成了分布式光纤传感技术的另一重要分支。瑞利散射源于光纤内部折射率的微观不均匀性，属于弹性散射范畴，散射光频率与入射光保持一致，且其散射强度分布具备光纤专属的“光学指纹”特性。当光纤局部产生微小应变或温度波动时，对应位置的瑞利散射光谱会出现可量化的漂移现象。通过比对测量状态与初始基准状态的瑞利散射光谱，能够以极高空间分辨率反演光纤沿线的应变及温度变化，应变测量精度可达到微应变级别。以光频域反射技术为核心的该类方案，尤其适用于小变形场景下的高精度监测。此外，通过高速捕捉瑞利散射光信号的相位或强度时序波动，该原理还可延伸为分布式声学传感技术，能够灵敏感知沿光纤传播的振动与声波信号，广泛应用于工程周界安防、地质活动实时监听等场景。

2.3 基于拉曼散射的分布式温度传感

拉曼散射效应则为分布式光纤温度传感提供了另一项基础技术原理。光脉冲在光纤中传播时与介质分子发生相互作用，会产生两种非弹性拉曼散射光——频率高于入射光的反斯托克斯光与频率低于入射光的斯托克斯光。二者的核心差异在于，反斯托克斯光强度对温度变化极具敏感性，而斯托克斯光强度基本不受温度扰动影响。基于这一特性，通过测算光纤各点位反斯托克斯光与斯托克斯光的强度比值，可直接解算出该位置的绝对温度值，无需额外设置温度参考基准。这类分布式温度传感技术专门面向温度场监测需求，具有系统结构简洁、成本可控的优势，在岩土工程领域，常被用于大坝渗漏监测、地下管线泄漏排查、冻土区域温度动态追踪等与温度场异常密切相关的场景，是分布式温度监测的可靠技术手段^[3]。

3 传统点式监测技术现状

3.1 传统点式监测技术的应用与成熟性

传统点式监测技术作为岩土工程监测领域的基石，历经数十年发展积淀，技术体系已趋于完善成熟。该技术通过在地表或地下结构关键部位预埋、安装测斜仪、沉降标、钢筋计、土压力盒等独立传感器单元，直接捕获特定点位的位移、沉降、应力等核心物理参数。其工作原理简洁直白，数据解译无需复杂转化，易于工程技术人员理解与应用。经过长期工程实践打磨，从设计选型、现场安装，到数据采集规范与预警阈值设定，均已形成完备的标准化流程，积累了海量工程实例数据与实操经验。诸多成功应用案例印证了其在常规地质条件、监测目标明确场景下的可靠性，这套技术体系也成为现有岩土工程安全评估规范制定的核心依据，至今仍是绝大多数工程项目中不可或缺的基础监测配置，为工程安全初步评判提供核心数据支撑。

3.2 传统点式监测技术固有的空间局限性与代表性缺陷

传统点式监测技术的核心短板源于离散化布设的本质属性，这使其监测信息在空间维度上存在显著盲区。传感器仅能精准反映自身安装点位的物理状态，测点之间的岩土体力学状态始终处于监测盲区。岩土体失稳破坏，如滑坡滑动面、基坑深层潜在滑移带的萌生与发展，往往集中于力学性质最薄弱的区域，而这些关键区域未必能被预设测点覆盖。这种以点代面的监测模式，极易错失关键变形区域的预警信号，导致灾害预警滞后甚至失效。同时，为弥补空间覆盖不足的缺陷，需加密布设测点，不仅会显著提升钻孔、安装及长期运维的成本与工作量，过度钻孔还可能扰动岩土体原有结构，反而影响工程自身稳定性。此外，点式传感器的存活率受施工扰动影响较大，在潮湿、腐蚀等复杂工程环境中，其长期稳定性易受侵蚀而下降，常出现数据中断问题，极大地限制了其在恶劣工况下的适用性^[4]。

4 岩土勘察中分布式光纤感测与土体变形关联分析技术

4.1 分布式光纤感知技术实现土体变形场的空间连续捕获

分布式光纤感测技术在岩土勘察中的核心价值在于从根本上重塑了监测数据的获取范式，实现了监测数据从离散点位采样到全域连续捕获的突破性转变。传统点式监测恰似在复杂岩土体中靠零星“探头”摸索，

而分布式光纤技术则如同点亮了贯穿全域的“感知光带”。数公里长的传感光纤可直接埋入土体内部或附着于工程结构表面,自身兼具信号传输与传感探测双重功能。依托布里渊或瑞利散射原理,激光脉冲在光纤中传输时,背向散射光的特征参数会随光纤沿线各点位的应变、温度变化同步改变。这种“空间扫描”能力,可直观捕捉边坡滑动面、基坑潜在滑移带、地基不均匀沉降区域等关键变形特征,清晰呈现变形的具体位置、影响范围、形态特征及演化趋势,为揭示岩土体失稳破坏机制提供了以往难以企及的全景式数据支撑。

4.2 多维度布设与网络化构建形成立体感知体系

单一维度的线性监测难以完整刻画岩土体复杂的三维变形特征,因此,通过科学布设策略构建分布式光纤多维度传感网络,是实现土体变形精准关联分析的核心前提。在勘察与监测方案设计阶段,需结合具体地质条件、工程类型及监测目标,针对性规划光纤布设拓扑形态。在垂直方向上,可分层埋设光纤以捕捉不同深度土体的压缩、剪切变形规律;在水平方向上,采用网格状或放射状布设模式,实现平面范围内应变分布的全面覆盖;针对桩基、隧道等构筑物,可环绕桩基侧壁或沿隧道衬砌环向布设,精准监测结构周边土体的变形形态。这种预设式网络化布设,使传感光纤从一维“监测线”延伸为二维“感知面”,进而构建起三维“监测体”^[5]。

4.3 基于物理力学机理的应变—变形转换与模型构建

在获取连续应变数据的基础上,核心在于将这些光学传感信号转化为具有工程指导意义的土体变形特征与力学状态参数,这一转化过程需依托物理力学机理构建科学的关联分析模型。针对分层沉降监测这类一维简单场景,可通过对沿深度方向的光纤应变数据实施数值积分,直接解算出各土层的压缩量。而针对二维、三维复杂变形问题,则需结合岩土力学理论开展反演分析。以边坡稳定性监测为例,光纤应变曲线上出现的峰值突变点或应变陡增区段,通常与潜在滑动面位置及剪切变形带高度吻合。通过搭建融入土体本构关系的数值模型(有限元模型等),将实测分布式应变数据作为输入条件或校准依据,可反向解译出土体位移场、应力场分布及稳定性系数。这种实测数据与力学模型深度融合的分析思路,既验证了理论模型的适用性,又实现了对工程状态的科学诊断与前瞻性预判,推动监测工作从单纯现象描述迈向深层机理揭示^[6]。

4.4 数据驱动与智能算法赋能变形模式识别与预警

分布式传感技术产生的海量高频数据,远超传统人工分析的处理能力,数据驱动型智能关联分析技术由此成为领域发展的核心方向。通过深度挖掘历史与实时应变数据,可提取出表征土体变形演化规律的关键特征,诸如应变速率、应变空间梯度、异常波动频率等。借助机器学习算法,可实现变形特征的智能解析——利用卷积神经网络开展空间模式识别,能自动定位变形异常区域;依托长短期记忆网络进行时间序列分析,可精准预判变形发展趋势。另外,可构建融合物理定律(平衡方程、本构关系等)与数据算法的混合智能模型,物理信息神经网络是典型代表。该类模型既能从数据中习得规律,又能严格遵循物理约束,即便在数据稀疏或工况超出历史经验范围时,仍具备可靠的外推预测性能。最终,通过设定多级智能预警阈值,系统可从连续背景噪声中自动捕捉预示失稳风险的早期微弱异常信号,实现从“事后解释”到“事前预警”的根本性转变,大幅提升岩土工程风险防控能力与智能化监测水平^[7]。

5 结束语

分布式光纤感测与关联分析技术的迭代发展,正推动岩土工程监测从离散化、表象化描述,向连续化、机理化分析的深度转型。该技术不仅破解了隐蔽性岩土灾害预警的难题,实现了风险的精准预判与防控,更以数据赋能推动岩土工程设计、施工全流程的智能化升级。未来,随着该技术与物联网、数字孪生等先进技术的深度融合,必将在重大基础设施全生命周期安全管控中发挥更为核心的支撑作用,为岩土工程领域的技术革新注入持续动力。

参考文献:

- [1] 林本锐. 岩土工程勘察存在的问题及解决对策[J]. 散装水泥, 2025(06):186-188.
- [2] 张钰. 公路工程岩土勘察与地质灾害评估技术研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(34):113-115.
- [3] 杜亚军, 王鹏. 人工智能在岩土工程勘察领域的应用[J]. 中国科技信息, 2025(15):38-40.
- [4] 李文恩. 数字化技术在城市建设岩土勘察工程中的应用[J]. 城市开发, 2025(09):119-121.
- [5] 席泽伟. 水文地质对岩土工程勘察的影响及应对措施研究[J]. 中国金属通报, 2024(12):140-142.
- [6] 洪成雨, 周子平, 姜在明, 等. 基于分布式声波光纤传感技术的岩土勘察方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(01):171-178.
- [7] 刘晓东, 张建, 赵伟河, 等. 基于岩土工程勘察的基岩支护技术研究[J]. 科学技术创新, 2024(01):122-125.

高强度螺栓抗滑移系数检测 影响因素及精准测定方法研究

吴文波

(北京恒建通达检测服务有限公司, 北京 100043)

摘要 高强度螺栓凭借卓越连接性能, 在大型钢结构工程中应用广泛。其中, 抗滑移系数是评价其连接可靠性与安全性的关键指标。但当前检测过程受螺栓表面处理工艺、预紧力控制精度、连接构件材料性能等多种因素影响, 检测结果易出现不一致或偏差较大的情况。基于此, 本文系统梳理了影响抗滑移系数检测的主要因素, 以实际工程需求为指引, 提出精准测定方法, 涵盖优化表面处理流程、强化安装工艺管控、完善检测规程等方面。经理论分析与可行性研究, 采用标准化、流程化检测并消除误差, 可有效提升测定的稳定性与精度, 为高强度螺栓连接可靠性评估及工程应用提供理论参考, 助力保障结构安全与标准完善。

关键词 高强度螺栓; 抗滑移系数; 材料性能参数; 表面处理工序; 连接可靠性

中图分类号: TU39

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.039

0 引言

随着国家基础建设与大型钢铁构造工程加速推进, 高强度螺栓凭借优良力学与连接稳固特性, 成为钢铁构造连接的主要零件。依据《钢结构通用规范》及相关工程数据, 螺栓连接方式占比不断提高。在钢铁构造安全评价中, 抗滑移系数是衡量高强度螺栓连接表面防滑能力的核心指标, 其检测精度直接影响构造安全与使用年限。但现行检测方法易受螺栓表面处理、预紧力控制、连接材料性能等因素影响, 导致测量偏差, 增加安全隐患。尽管学者已开展诸多优化研究, 可实际施工中仍面临技术难题, 不同地区和单位差异大, 干扰检测结果。故需深入总结关键因素, 制定标准化测算方案, 为行业技术进步提供支撑。

1 高强度螺栓连接的工程应用及意义

1.1 高强度螺栓在钢结构中的应用场景

高强度螺栓是钢结构工程中的关键连接件, 承担着十分重要的作用^[1]。使用范围涵盖大型桥梁、高层建筑以及工业厂房等, 这些建筑对于连接件牢固程度、耐久程度以及可靠性要求特别高。高强度螺栓能够承受巨大拉力以及剪力, 确保建筑面对复杂荷载加上恶劣环境时候保持稳定。尤其在桥梁建造过程中, 高强度螺栓连接各种钢构件, 抵御风力荷载以及车辆流动

产生影响。在超高层建筑中, 保证各个构件遇到极大风速加上地震影响时候仍可牢固连接。工业厂房需要支持超重设备并且抵抗机器振动, 对连接件防止滑动能力提出严格要求。高强度螺栓提供充分技术保障, 满足了严格并且多样的工程需求。

1.2 连接性能对结构安全的重要影响

高强度螺栓作为连接件, 其性能直观影响到钢结构的全局安全性。在钢结构工程中, 高强度螺栓的抗滑移能力为保障连接可靠性的核心。未经改良的连接性能易引发结构运用过程中产生滑移, 不但削弱了连接强度, 而且容易造成结构变形乃至失效^[2]。高强度螺栓的正确应用可确保钢结构抵抗动载荷和静载荷时的稳定性, 维护全局结构免于外力干扰并高效抗御各种外部因素隐性威胁。研究如何提升螺栓连接性能是维护大型钢结构依照预定功能运作的任务。研究连接性能的优化及标准化, 能够为工程实践提供实用的技术指导。

2 抗滑移系数的影响因素

2.1 螺栓及连接件表面处理工艺

螺栓连接件表面加工方式直接改变螺栓连接件之间摩擦能力, 进而决定整体连接抗滑移能力。常见加工方式包括机械抛光、化学镀层、热处理等, 这些方式能够提高材料表面平整程度、硬度程度和接触面性

作者简介: 吴文波 (1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 建筑材料检测。

能^[3]。表面粗糙度大小、镀层厚度以及均匀程度等参数选择不当很容易引起摩擦系数出现变化,造成测试数据产生波动。加工方式稳定程度以及重复程度同样成为测定系数准确程度关键条件。合理挑选并且严格控制表面加工方式,可以显著降低测试偏差,提高高强度螺栓连接可靠程度以及安全程度。

2.2 螺栓预紧力控制与安装工艺

螺栓预紧力控制准确程度决定连接部件牢固水平以及抗滑移性能优劣。在实际操作中,预紧力设置太大或者太小都会造成螺栓连接性能明显降低。采用扭矩以及张力控制设备能够保证预紧力精确程度,同时使连接稳定性变得更强^[4]。安装过程中各种细节处理,如螺栓孔加工精确程度,安装时候对齐到位程度,都会改变抗滑移系数最终结果。安装过程需要准确按照标准操作步骤执行,这样能够降低因为人为错误产生多种偏差以及差异现象。持续改进预紧力控制技术以及安装过程步骤,成为实现更精确抗滑移系数测量的重要途径。认真研究并深入分析这个环节,可以显著提高螺栓连接整体可靠水平以及使用安全水平,确保工程质量达到更高标准。

2.3 连接构件的材料性能参数

连接构件材料性能参数明显影响高强度螺栓抗滑移系数检测(见表1)。材料强度刚性、表面粗糙度属性决定连接构件受力时的滑移表现。材料强度增加,抗滑移能力增强;而刚性不同容易导致连接件螺栓之间出现相对移动。表面粗糙度决定摩擦系数,与抗滑移系数关系非常密切。准确评估材料性能参数成为确保抗滑移系数检测精确程度的重要步骤。优秀材料性能数据可帮助完善连接设计,提高施工质量水平。

3 检测流程的优化措施

3.1 表面处理工序的标准化

对表面处理步骤进行统一管理,是提高高强度螺栓抗滑移系数测量准确性的关键环节^[5]。螺栓与连接

板表面处理方式直接决定接触面产生摩擦性能,进而显著改变滑移系数数值。因此,需要把表面处理过程全部实行严格统一管理,确保每个环节都能做到准确控制。采用相同表面粗糙程度加上涂层厚度大小,可以有效减少因为处理方式不同导致检测数据出现差异。选择已经验证合格的表面处理材料与具体操作方法,能够保持接触面质量稳定不变,可以保证抗滑移系数测量结果保持稳定可靠。通过统一管理表面处理步骤,能够降低操作人员带来误差,为后续连接强度安全评估提供可靠依据^[6]。统一管理处理过程既能提升抗滑移系数测量准确程度与可靠程度,又能为高强度螺栓用于钢结构工程安全使用提供保障。

3.2 预紧力管控技术的提升

预紧力管控技术的进步成为保证高强度螺栓连接稳定性的重要因素。提高预紧力控制准确度需要采用先进扭矩管理设备,用数控扭矩工具完全代替传统手动操作方式,从而确保预紧力分布均匀并且保持稳定。高精度传感器加上智能监测系统能够实时查看螺栓安装时的预紧力具体情况,发现异常立即调整,可大幅减少人为失误带来的负面后果。针对各种规格螺栓和连接件都要制定对应专用预紧力数值标准,这样才能适应各种工程需求。组织操作人员接受系统专业培训,让操作人员熟练掌握精密设备使用方法完成预紧力控制工作,最终提高螺栓连接整体可靠性以及抗滑移能力。

3.3 输送与装配环节精细化把控

输送与装配环节在高强度螺栓抗滑移系数检测中担当着重要角色,其细节把控直接决定检测结果的精确性^[7]。该环节的精细化管理需贯穿“输送—存储—装配”全链条,既要保障螺栓及连接件的物理性能与表面状态不受影响,也要通过标准化操作还原真实工程应用场景,为检测数据的有效性筑牢基础。保证整个过程的精准性:

一是需优化输送与存储条件,采用专用防护工装

表1 高强度螺栓抗滑移系数影响因素分析表

影响因素类别	关键参数	影响表现
螺栓及连接件表面处理工艺	表面加工方式(机械抛光、化学镀层等)、表面粗糙度、镀层厚度及均匀度、加工方式稳定性与重复性	改变摩擦力,影响抗滑移能力;参数不当致数据波动;合理控制降偏差,提可靠与安全性
螺栓预紧力控制与安装工艺	预紧力控制准确度、扭矩及张力控制设备使用、螺栓孔加工精确度、安装对齐程度	决定牢固与抗滑移性能;预紧力不当降性能;精准控制与规范安装降偏差,提可靠与安全性
连接构件的材料性能参数	材料强度、刚性、表面粗糙度	决定受力滑移;强度增抗滑移强;刚性异致相对动;粗糙度影响摩擦系数,评估准助设计与提质量

分隔装载螺栓及连接件,避免运输途中的碰撞、摩擦导致表面涂层破损,同时存储环境需保持干燥洁净,严防油污、灰尘等污染物附着,防止污染和磨损妨碍表面处理效果,确保螺栓摩擦面的原始性能不受破坏。

二是装配环节需实施严谨的工艺规程,装配前需对螺栓、螺母及垫圈的摩擦面进行专项清洁,去除残留杂质。

4 精准测定技术与流程

4.1 标准流程的制定

建立规范流程是提升高强度螺栓抗滑移系数测量精确水平的重要环节。需清晰说明测量全部环节以及相关技术参数,保证每个环节全部受到严格管理。例如:测量以前将螺栓和连接件表面全部彻底清洁,清除表面差别给测量结果带来干扰。明确规定仪器选择和调整标准,保证数据真实可信^[8]。全部工作人员都要接受专业培训,熟练掌握规范流程和仪器使用方式,降低人为因素造成偏差。完整记录每次测量数值以及现场环境状况,提高测量结果可追溯性和统一性。依靠认真完善文件和标准操作流程制定,满足规定标准,为高强度螺栓连接可靠性提供准确数据支撑。

4.2 检测规程与设备选型

在检测高强度螺栓的抗滑移系数时,科学合理的检测规程和设备选型至关重要。检测规程应以国内外相关标准为基础,结合实际工程需求,明确各检测环节的具体步骤和要求。选择先进的检测设备能够提升测定的准确性与效率。使用电子扭矩扳手控制预紧力,有助于减少人为误差。表面轮廓仪对于评估表面处理质量起到关键作用。电子式滑移检测装置则可实时监测滑移情况,确保检测结果的可靠性。结合精准的设备选型和科学的检测规程,能够有效提升高强度螺栓抗滑移系数测定的精度,为工程应用提供坚实的数据支持。

4.3 误差消减与结果校准机制

误差降低和结果调整方法是高强度螺栓抗滑移系数检测的关键环节。为了提高测量准确程度,需要使用科学方法减少仪器设备以及操作过程中的系统误差,如选用高精度仪器并且认真执行检测流程。环境条件对检测结果产生不利影响需得到良好控制,如温度变化和湿度变化对材料性能造成干扰,可以依靠实验室环境标准化来完成调节。采用相同数据处理方法成为保持结果一致性基本保证,利用统计学方法对检测数

据实施分析,从而剔除异常数据。建立标准数据模型,确保检测结果能够准确反映螺栓真实抗滑移性能。

5 结束语

本文深入剖析了影响高强度螺栓抗滑移系数检测结果的关键因素,从理论到工艺改进实践,揭示了表面处理、预紧力控制、连接部件材料性能等环节对检测精度和一致性的决定性作用,并提出优化流程、强化工艺控制、完善标准等可靠测量方法。结果显示,标准化、流程化检测可显著提升测量准确性与工程应用价值,保障钢结构安全管理与连接性能评估质量。但当前工程现场测量仍受环境与制造差异制约,存在偏差,需深入定量分析。检测设备自动化、智能化水平亟待提升。未来研究应聚焦环境因素影响规律、新型材料与处理技术机理及数字化智能化检测设备研发。

参考文献:

- [1] 邓宗梁. 钢结构高强度螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验方法探讨[J]. 福建建材, 2025(09):33-37.
- [2] 卢林枫, 聂少锋, 丁松林, 等. 钢结构用高强度螺栓摩擦型连接抗剪性能的腐蚀退化[J]. 交通运输工程学报, 2025,25(02):218-234.
- [3] 兰涛, 李泽旭, 张博雅, 等. 腐蚀后摩擦型耐候高强度螺栓连接抗滑移系数试验研究[J]. 工业建筑, 2023,53(09):95-103.
- [4] 刘荣阳, 张威, 曲慧, 等. 不同螺栓孔型下高强度螺栓连接抗剪试验及有限元分析[J/OL]. 工业建筑, 1-10[2023-09-06][2026-01-23]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyq-bpgvx2X2nIiZyWgmWa8oHSy2WrGqOaf_OT1S-8LFB4dCsLSquXGg4f8IzBztL_KgF6I0PqLkVeNoE3V74qYLu4YggHfXx3AglPNDk62ZZmJbK3R-04ymL6zZ4uM_lQMinuUOXt5SFaPmQH4TqT0lNkN4xgilbarsJ\]eRMlAMg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=MXvIvFkaDQyq-bpgvx2X2nIiZyWgmWa8oHSy2WrGqOaf_OT1S-8LFB4dCsLSquXGg4f8IzBztL_KgF6I0PqLkVeNoE3V74qYLu4YggHfXx3AglPNDk62ZZmJbK3R-04ymL6zZ4uM_lQMinuUOXt5SFaPmQH4TqT0lNkN4xgilbarsJ]eRMlAMg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [5] 毛坤宇, 杜叶挺, 王海荣, 等. 抗滑移系数自动检测系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(02):99-101.
- [6] 宁浩杰. 高强度螺栓抗滑移系数及抗剪承载力分析[J]. 江西建材, 2023(03):37-39.
- [7] 卓凡. 高强度螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验的影响因素[J]. 江西建材, 2023(01):92-93, 96.
- [8] 傅椒春, 杨开怀, 程艳, 等. 钢结构用高强度螺栓连接副的试验方法[J]. 福建冶金, 2022,51(04):64-66.

“留皮换胆”技术在历史建筑结构加固与功能活化中的应用研究

姜欣健

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011)

摘要 城市更新与存量建筑再利用开展阶段, 历史建筑保护修缮正从单一“原状保存”转变成“保护与活化并重”。“留皮换胆”作为一种不破坏历史风貌、重构内部结构体系的修缮策略, 逐步成为近代历史建筑更新的核心技术手段。本文以近代砖木及混合结构历史建筑为研究对象, 兼顾文物保护原则、结构安全需求与当代功能适配要求, 系统分析“留皮换胆”修缮模式的技术逻辑和设计方法, 探究它在空间重构、结构加固和功能活化方面的综合应用价值, 排查修缮实施中的关键问题, 并制定统筹历史真实性和可持续利用的综合设计方案, 以期为同类历史建筑保护更新提供有益参考。

关键词 历史建筑保护; 留皮换胆; 功能活化; 结构更新; 综合修缮设计

中图分类号: TU3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.040

0 引言

城市发展核心从增量建设变为存量更新, 历史建筑复用在城市空间里的价值日渐突出, 多数近代历史建筑存在结构老化、功能落后和安全隐患等问题, 仅做原样修复, 无法满足当下使用需求。基于这样的情况, “留皮换胆”作为一种兼顾文物保护与功能更新的修缮手段, 逐步在实操当中大量运用。该模式保留建筑外墙、屋面等历史“表皮”, 对内部结构和空间体系做系统更新, 在传承历史风貌的同时实现使用功能的升级。本文从理论和实践层面深入探讨“留皮换胆”与功能活化结合的综合设计策略, 以回应当前历史建筑保护碰到的实际挑战。

1 从“原状保护”到“结构更新”的理论转向

1.1 文物保护理念演进中的“留皮换胆”逻辑

文物保护理念正由强调“原状保护”向兼顾结构更新转变。传统原状保护侧重建筑的真实性与完整性, 但在近现代历史建筑中, 因结构老化和功能落后已难以满足现实需求。“留皮换胆”作为创新修缮方式, 在保留外墙、屋面和立面等历史“皮肤”的前提下更新内部结构、重组空间, 既遵循最低干预原则、延续历史信息, 又适应现代使用功能要求, 并符合相关法律和技术规范对历史风貌保护的要求。“留皮换胆”修缮策略已广泛应用于近代历史建筑更新实践中, 如

上海外滩源通过保留石库门及历史立面、内部嵌入新结构实现商业与公共功能复合利用, 北京 798 艺术区厂房改造则以保留工业外壳、重构内部空间激活当代价值。这些案例表明, 该模式在兼顾历史保护与功能更新方面具有较强的适用性和可复制性。

1.2 近代历史建筑结构退化的普遍特征

多数近代历史建筑采用砖木或混合结构, 随着使用年限增长, 结构退化问题逐渐显现。砖木结构常出现墙体开裂、砖块脱落和木构件腐朽, 湿度较高区域尤为明显; 混合结构建筑的病害多集中在木构件与混凝土、砖结构的接合部位, 受力不均易引发墙体裂缝和变形, 导致整体稳定性下降。相关勘察数据表明, 该区域建筑木屋架的木构件腐朽比例普遍达 30% 左右, 砖墙有竖向贯通裂缝, A 楼、C 楼的墙体裂缝宽度全长达 4~5 mm, 已超出正常使用区间, 这类病害表现决定修缮方法的选用, 依靠加固、更换木构件, 加入钢筋混凝土框架解决结构退化问题, 同时维持建筑的历史风貌外观。

1.3 功能再利用驱动下的修缮模式重构

随着城市功能转变, 历史建筑逐步由宿舍转向办公、文创等公共空间, 需要对内部空间进行合理再利用设计。“留皮换胆”修缮模式通过保留原有外立面和屋顶, 拆除非承重内墙及旧结构, 重建钢筋混凝土

作者简介: 姜欣健 (1998-), 男, 硕士研究生, 初级工程师, 研究方向: 城市更新及乡村振兴。

框架以适应新功能需求。安远路899弄华纺宿舍修缮中,将原砖木结构楼层改造为钢筋混凝土框架,并采用筏板基础与静压桩加固,有效提升承载能力,满足现代办公和文创空间使用要求。

2 “留皮换胆”修缮模式的技术内涵与实施路径

2.1 外围护结构保留的安全边界与技术控制

采用“留皮换胆”修缮模式时,外围护结构保留是核心环节,保留外墙和屋面原有位置,必须保证结构稳定,防止拆除或加固施工引发结构失稳,按照《优秀历史建筑修缮技术规程》^[1],外墙加固需先通过临时支撑系统保障结构稳定,重点控制拆除阶段风险。以安远路华纺宿舍修缮工程为例,拆除前严格控制外墙稳定性,在外侧设置临时钢框架支撑并通过拉结梁与内部结构连接,防止倾斜或坍塌;支撑体系按建筑高度和荷载精确计算,承载力不低于原墙体的1.5倍,并在施工中对外墙沉降与裂缝进行实时监测,确保修缮过程安全可控。需要指出的是,“留皮换胆”并非适用于所有历史建筑类型,其应用前提在于外围护结构整体稳定、历史价值主要集中于立面及空间形态,对于结构体系已严重失稳或历史价值高度集中于内部构件的建筑,应谨慎采用该模式。

2.2 内部结构“换胆”的体系重构方式

历史建筑中原有木结构或砖木结构因长期使用易发生腐蚀和变形,“换胆”成为结构更新关键,常以钢筋混凝土框架或钢结构提升承载与抗震能力。安远路华纺宿舍修缮中,A、B、C楼采用单跨悬挑钢结构框架与原砖砌体外墙结合的混合结构体系,并对原有墙体同步加固,通过可靠拉结实现新旧结构协同受力,显著提升整体稳定性与安全性。故此设计框架结构阶段,必须按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012)对办公和商业空间荷载的规定^[2],实施合理的负荷计算。相较于传统钢筋混凝土框架,钢结构体系自重较轻、施工装配化程度高,更有利于在受限场地条件下实施历史建筑内部结构更新,降低对既有外墙和基础的不利影响。

2.3 新旧结构协同工作的关键节点设计

新旧结构协同配合格外关键,尤其采用“留皮换胆”修缮模式时,如何实现新框架和历史外墙的有效衔接,是设计的核心问题,依照《古建筑木结构维护与加固技术规范》(GB 50165-92)^[3],设计结构节点必须保障新旧结构受力传递顺畅,避免局部结构出现应力集中,修缮安远路华纺宿舍期间,通过设置混凝土销键

及化学锚栓,将新建钢结构框架与原有砖砌体外墙进行可靠拉结,以实现新旧结构之间的受力传递与协同工作,保证外围护结构在使用阶段的整体稳定性。这类销键一般用12 mm钢板加固板和化学锚栓搭配制作,保障两者稳定性及抗震能力,开展节点设计,需重点保障和历史结构的兼容性,切勿过度损坏原有砖墙和木构架,节点设计须严格管控力的分配,令新旧结构同步受力,提升建筑修缮后的整体性和抗震性。该类节点通过销键剪切承载与锚栓拉结作用,将外墙自重及部分水平作用合理传递至钢结构体系,有效避免外墙作为孤立构件受力,降低局部应力集中风险,同时满足历史结构最小干预和可逆性原则。

3 功能活化导向下的空间重塑策略

3.1 从宿舍到公共使用:空间功能转译路径

历史建筑空间功能转化面对的主要问题是既要保留历史价值,又要满足现代功能需求。以安远路华纺宿舍为样本,这一建筑起初用作职工宿舍,功能定位类型偏少,但伴随社会发展和功能需求变动,改成交创、办公及展览空间,历史建筑空间改造需遵守《历史文化名城保护规划标准》(GB/T 50357-2018)明确的最小干预原则^[4],改造过程中守住文化遗产核心要素。实施空间适配操作时,要兼顾空间结构的可调整性,拆完A楼、B楼内部墙体,通过新建钢筋混凝土框架结构,充分释放内部空间,符合现代办公和公共功能的需求,调整C楼和D楼的功能后,空间利用率进一步提升,且最大程度保存建筑的历史风貌。

3.2 内部空间“释放”与历史格局的平衡

功能转化阶段以维护历史建筑空间秩序为核心,通过拆除非承重墙体实现空间释放。以安远路华纺宿舍修缮工程为例,项目依据《优秀历史建筑修缮技术规程》对拆除范围进行精准控制,在A、B楼改造中有序拆除非承重墙体,拓展展览与公共活动空间,同时保留并修复原有木楼面及传统构件,避免破坏历史格局,实现空间利用提升与历史风貌保护的平衡。

3.3 现代设施嵌入的隐性化设计方法

为历史建筑引入现代设施,隐性化设计是平衡建筑历史价值和现代功能需求的核心手段,这种设计逻辑偏向巧妙藏好现代化设施,采用不破坏建筑外观和结构的方式整合,以安远路华纺宿舍修缮为例,设计团队全面考量建筑的历史特性,采用了隐蔽的管道布设与设备安装方式。在机电系统设计中,电气线路、通风系统和消防设施均被隐蔽于墙体内部或吊顶空间

等不显眼位置, 诸如墙体内部或吊顶空间中, 既适配现代建筑使用需求, 且不改变原有建筑的结构和外观, 《建筑设计防火规范》(GB 50016-2014) 有相关说明^[5], 历史建筑消防设计应坚守最小干预原则, 防止破坏建筑外观, 消防管道与电气系统的铺设均采用低噪声、低冲击的设计, 兼顾修缮后建筑的使用功能和历史文化双重需求。

4 综合设计视角下的修缮价值评估

4.1 历史真实性与使用安全性的双重评估

历史建筑修复阶段需在历史真实性与使用安全性之间取得平衡, “留皮换胆” 模式在保留外立面历史风貌的同时调整内部结构。修缮中严格遵循《文物保护法》, 控制外立面干预强度, 内部结构更换时强化新旧结构拉结, 确保整体稳定与抗震性能。安远路华纺宿舍工程采用钢筋混凝土框架加固, 原有立面砖墙、屋面瓦及关键节点得到修复保留, 在延续历史信息的同时提升了建筑安全性和使用年限。

4.2 功能可持续性与建筑生命周期延续

历史建筑维修不仅在于保留外观风貌, 更在于保障其长期使用功能。“留皮换胆” 修缮模式通过系统更新核心结构, 使建筑适应当代多元功能需求并延长使用寿命。安远路华纺宿舍修缮中, 将原有木结构和砖木结构更换为钢筋混凝土框架, 显著提升抗震和承载能力, 设计严格符合《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2012), 确保建筑在新功能定位下安全稳定运行。该结构更新在增强安全性能和空间利用效率的同时, 实现了历史文化价值的完整保存与延续^[6-8]。

4.3 对同类历史建筑修缮的启示意义

历史建筑修缮采用“留皮换胆” 模式, 有效协调功能再利用与历史保护矛盾, 具备较强推广价值。以安远路华纺宿舍为例, 通过修复原有木结构并嵌入钢筋混凝土框架, 在保留历史风貌的同时满足现代办公和公共空间需求, 并结合低能耗材料等可持续设计提升环境品质。该模式适用于具有相似历史背景、存在结构老化和功能转化需求的近代历史建筑, 为其安全更新与持续利用提供了可行路径(如表 1 所示)。

在工程实践中, “留皮换胆” 修缮模式仍存在一定风险与争议, 如新旧结构刚度和沉降差异控制不当易引发外墙二次开裂, 内部空间过度更新或立面细部处理不当也可能削弱历史风貌内涵。因此, 该模式推广应用时应加强前期结构评估与设计管控, 避免简单化、模板化实施^[9-10]。

表 1 修缮后建筑功能与结构评估

修缮项目	历史真实性保留 (%)	使用安全性提升 (%)	功能活化程度 (%)
A 楼	85	50	40
B 楼	90	55	45
C 楼	80	60	50
D 楼	75	65	55

(数据来源: 基于安远路 899 弄华纺宿舍修缮工程相关勘察报告、结构设计计算及后期使用情况评估综合分析。)

5 结束语

借助“留皮换胆” 修缮模式, 历史建筑兼顾历史风貌保留与现代使用需求满足, 该模式成功破解了结构安全性与功能活化的冲突, 还为历史建筑持续利用提供有效途径, 通过结构更新和功能适配, 延长建筑生命周期, 保护历史文化。这套修缮模式顺利落地, 为其他类似建筑修缮提供了经验, 展现历史建筑在现代城市中的关键价值与可行空间, 适合大范围推广。

参考文献:

- [1] 上海市建设和管理委员会. 优秀历史建筑修缮技术规程(附条文说明)(DGJ 08-108-2004)[S].2003.
- [2] 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].2012.
- [3] 中华人民共和国建设部. 古建筑木结构维护与加固技术规范(GB 50165-1992)[S].1992.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 历史文化名城保护规划标准(GB/T 50357-2018)[S].2018.
- [5] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范(GB 50016-2006)[S].2006.
- [6] 何娇. 基于数字化的历史建筑清水砖墙精细化修缮技术研究与应用[J]. 建筑施工, 2025,47(07):1036-1041.
- [7] 谈雅雅. 城市更新背景下优秀历史建筑保护标准体系的构建策略[J]. 住宅科技, 2025,45(03):50-53,61.
- [8] 史庆雪, 程莎莎, 徐洪军. 历史建筑砌体结构墙体保护性修缮加固设计方案对比[J]. 新城建科技, 2024,33(02):88-90.
- [9] 付涌, 张怡欣. 基于价值呈现的历史建筑保护真实性思考: 上海康定东路 85 号张爱玲故居修缮设计为例[J]. 建筑遗产, 2023(02):140-149.
- [10] 归豪域. 优秀历史建筑外立面保护修缮工程中的超高脚手架数字化设计及智能化监测[J]. 建筑施工, 2022,44(06):1281-1284.

沿海强台风区超高层建筑液压爬模体系 抗风加固与安全防护施工研究

陈进

(深圳市湛艺建设集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 液压爬模作为高空施工的一种高效垂直施工技术, 在施工过程中抗风能力及施工安全防护问题十分重要。本文主要研究广东地区强台风环境下超高层建筑液压爬模体系抗风荷载特性、结构加固措施、安全防护技术及施工管理。通过对台风作用下的风振响应的分析, 提出主动式预警—被动式增强的抗风措施, 结合工程实际, 对连接件的强度、导向机构稳定性、爬升过程中临时固定、顶部封闭防护棚优化设计进行研究, 以为广东地区气候条件下提供一套液压爬模抗风加固与安全施工技术参考, 进而保证超高层建筑施工的质量和施工安全。

关键词 沿海强台风区; 超高层建筑; 液压爬模; 抗风加固; 安全防护

中图分类号: TU97

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.041

0 引言

广东省位于中国东南沿海, 属于典型的强台风多发区。历史气象数据显示每年夏季、秋季都会遭遇7级以上的台风, 而珠江三角洲城市群超高层建筑群施工安全、结构稳固性问题更为严重。由于液压爬模系统具有自动化程度高、施工速度快、作业面封闭性好等优点, 成为超高层建筑核心筒施工的主要技术。但是爬模体系本质上是一个悬挂在主体结构上的大型临时性钢结构, 在高空暴露在强风的环境下, 其侧向刚度、整体稳定性以及与主体结构的连接可靠性都会影响施工安全^[1]。因此, 根据广东沿海强台风区的特殊气候条件, 对超高层建筑液压爬模体系的抗风加固技术、系统性安全防护施工措施展开研究, 既是保障工程安全、质量的迫切需要, 又是提高我国超高层建筑施工技术水平的重要课题。

1 强台风区液压爬模体系的风荷载特性分析

液压爬模体系由爬升架、模板系统、导向机构、爬升机构、悬挂支承系统和安全防护系统组成, 它依靠液压油缸来使模板、脚手架、防护棚随着核心筒结构同步连续上升^[2]。超高层建筑施工中, 它的优点是减少垂直运输、加快施工速度、封闭作业面。

爬模体系所受的静风荷载 P 与风速 v_k 的平方成正比。广东强台风区的基本风速取值远远大于内陆地区, 结构所承受的瞬时风荷载基数很大。

$$P=0.5 \cdot \rho \cdot v_k^2 \cdot \mu_s \cdot \mu_z \cdot C \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; μ_s 为结构体型参数; μ_z 为风压高度变化参数; C 为风荷载体形参数。

风压高度变化系数 μ_z 随着建筑高度的增加而急剧增大, 使得超高层顶部施工的爬模所受的静风压力呈指数增长。爬模外部的封闭式防护棚提高了作业的安全性, 但是结构体型系数 μ_s 、风荷载体形系数 C 增大, 从而放大了静风荷载。

2 液压爬模体系的抗风加固技术与结构优化

2.1 增强爬模主体结构的整体刚度

1. 水平和竖向支撑系统加强。爬升架主体钢桁架在高度方向、平面方向均要加设剪刀撑和斜撑。特别是迎风面和角部, 斜撑要构成 K 形或 X 形的空间桁架, 减小风荷载产生的横向变形。平台承重主纵梁采用更大截面模量、更高屈服强度的钢材来抵抗较大的弯矩。所有的梁柱和支撑杆件的连接, 从螺栓连接升级为高强螺栓摩擦型连接或者全熔透焊缝, 保证节点刚度^[3]。

2. 模板与爬架的刚性连接。模板应采用专用水平连接桁架或刚性连接件与爬升架主体钢结构相接, 使模板既是成型工具又是爬架整体受力结构的一部分, 共同抵抗风荷载^[4]。

2.2 核心连接件与主体结构的锚固增强

连接件是保证爬模安全的生命线, 其设计必须满足抗拔、抗剪及抗疲劳要求。

作者简介: 陈进(1981-), 男, 本科, 一级建造师, 研究方向: 建筑施工管理。

1. 悬挂支座的冗余设计与强度。预埋件应深埋入，多级锚板设计来提高它在混凝土中的抗拔力。强风区悬挂支座要锚固于强度等级更高、龄期更久的混凝土结构上。关键受力点应采用双螺栓或者双支座的冗余设计来分散单点的剪切、拉拔应力。

2. 临时防风锚固的实施与优化。超高层顶部由于楼层结构还在养护阶段，可以采用环抱式的临时锚固装置。该装置采用高强度钢丝绳或者抱箍紧固已成型的核心筒墙体，再用张拉螺杆与爬模架体相接，提供很大的水平约束，防止爬模在强风下晃动和移位。依照当地气象台发布的台风预警，制订三级响应机制。当达到Ⅲ级预警风速或台风来临前 24 h 时，所有工人都应该立即完成临时防风锚固，并清点检查。

2.3 导向机构的防脱轨与限位设计

导轨和导靴是防止爬模侧向位移和转动失稳的关键。导靴应为全包围或三面约束，保证在剧烈风振或者横向冲击时，导靴能够牢牢抱住导轨，杜绝脱轨发生。为避免涡激振动共振，必须确保爬模体系的固有频率与台风风速下的涡激脱落频率错开^[5]。涡激脱落频率与爬模固有频率的关系如图 1 所示。

3 防风安全防护棚优化与施工管理

3.1 封闭防护棚的防风与导流优化

液压爬模体系一般配有全封闭式防护棚，为高空作业提供防坠落、防雨雪、防风的环境。但是强台风区封闭性带来了巨大的迎风面积，必须优化以达到作业保护与抗风的平衡。

1. 防护棚的柔性—刚性可调围护系统。传统防护棚多采用密闭的硬质板材，风荷载作用下极易产生高压集中。防护棚的迎风面和侧风面应设置成分段、可调式的围护结构。非台风季节可用刚性板材保持密闭，改善内部作业环境，在台风来临前必须能快速转入“半开启”或“透风”模式。在防护棚外侧，尤其是上部可采用高强度、低密度的柔性尼龙网或者金属丝网代替部分刚性板材。柔性网具有天然的透风性、风能缓冲性。它会把阵风的瞬时冲击能量给分散吸收掉，把风压的峰值变成历时稍微长一点、但是峰值低一些的压力，这样就能减小对主体结构的冲击。在硬质围挡下部设置可以开关的百叶窗或者导流孔。精确计算和风洞试验来确定开启角度，在强风下允许部分气流穿过防护棚，消除防护棚内负压区，有效降低迎风面平均风压系数。

2. 顶部结构的气动优化与物料管理。顶部平台边缘应设计成一定的向上倾角或者弧形过渡，形成气动导流面，有利于气流平稳过渡到上方，防止气流在顶部作业平台产生湍流或者负压集中。负压对顶部横梁的锚固、连接都不利。强风区高空坠物危险性很大，施工方应制定并执行台风来临前物料清理、紧固的规程，严格物料控制。台上的所有设备、模板、工具、闲置材料都必须用销轴、链条或缆绳牢固地固定在爬模主钢架上，不能被强风吹动。在台风红色预警发出之后 4 h 之内，要求把防护棚顶上、作业平台以及所有楼层的临时堆场清理干净，所有可能被风吹落的散

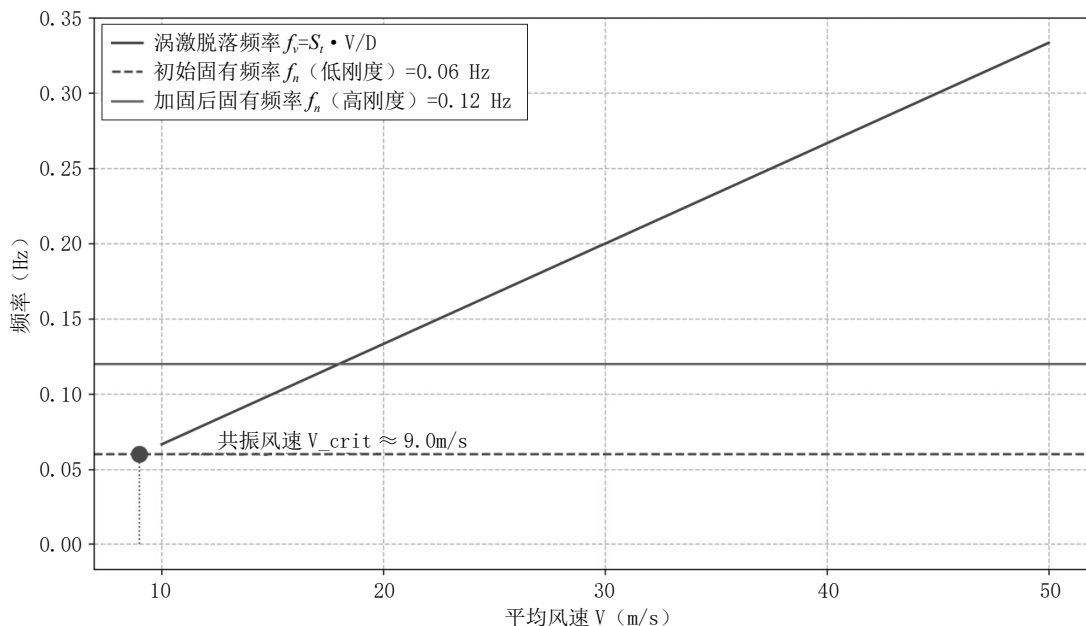


图 1 涡激脱落频率与爬模固有频率关系及共振风险

落物都必须转移到核心筒内或者地面安全处。

3.2 主动式预警与实时监测系统

主动式预警是强台风区超高层爬模施工安全管理核心，把传统的被动管理变为基于数据的实时响应，建立爬模结构健康监测系统。爬模体系上设置结构健康监测系统，采用物联网技术对重要参数实时、自动采集和分析。

在爬模顶部和迎风侧设置超声波风速风向仪，实时获取瞬时风速、阵风系数、平均风速、风向。悬挂支座、导向机构、液压缸支座等受力大的部位装设高精度应变片、力传感器，实时采集连接件所受的力、应力变化情况。在爬模平台四角设置高精度倾角仪、位移传感器，对爬模平台倾斜度、水平位移、振动加速度进

行监测。监测液压油缸的压力、行程，确保爬升过程中各点的同步性。

监测数据要实时传送到云端平台以及项目控制中心。根据结构静风荷载、疲劳寿命、风振控制目标，设置一级（关注）、二级（警示）、三级（紧急）三级安全阈值。例如：振动加速度（横风向）连续10 min > 0.2 g，就立刻引发二级警报，此时爬模结构也许踏入了涡激振动临界状况，须立刻展开临时锚固预备。

3.3 爬模施工安全防护投入与效益分析

在强台风区，安全防护的投入是成本效益最大化的体现。加固、监测系统投入大，但和潜在台风事故损失相比效益极大。抗风加固对降低爬模系统预期损失的效益分析如图2所示。

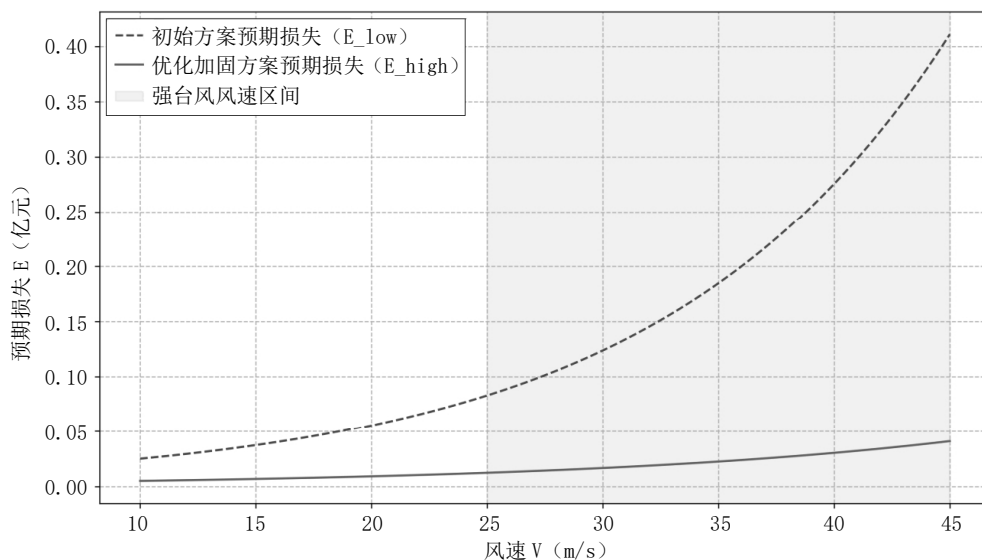


图2 抗风加固对降低爬模系统预期损失的效益分析

通过对爬模体系进行结构加固和管理优化，不仅将结构失效的临界风速提高，更重要的是显著降低了在台风常见风速区间内(25 m/s以上)的预期事故损失。这种投入是符合成本效益原则的，体现了安全投入是最大的效益的理念。

4 结束语

本研究聚焦广东省沿海强台风区超高层建筑液压爬模体系的施工安全问题，通过对台风荷载特性、爬模结构受力弱点的分析，提出一种主动式预警、被动式增强的抗风策略，在台风来临之前可以及时、有效地实施临时加固、人员撤离。未来研究应进一步利用CFD等先进仿真技术，对复杂的爬模体系进行气动弹性行为的仿真，并研究智能减振技术在超高层爬模中的应用。只有结构设计合理、监测技术先进、施工

管理严格相结合，才能保证在极端气候条件下超高层建筑施工的安全和质量。

参考文献:

- [1] 常成锋.前海金融控股大厦项目液压爬模施工探析[J].住宅与房地产,2025(02):34-36.
- [2] 刘兴国,林飞扬.液压爬模系统安全防护标准化的研究及应用[J].中国水运,2025(02):59-61.
- [3] 李立辉.红莲大桥主塔液压爬模施工技术要点分析[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2024,23(02):15-18.
- [4] 张培强.超高层建筑施工中液压爬模与集成高层造楼机选用分析[J].四川水泥,2024(05):134-136.
- [5] 李嘉祺,李日荣,邝喜旗.超高层建筑核心筒内外式液压爬模结构设计技术[J].建筑技术开发,2024,51(02):15-17.