

岸桥小车轨道排装系统设计与性能优化研究

王泽宇

华电蓝科技股份有限公司 北京 100070

摘要：针对传统岸桥小车轨道排装工艺精度差、稳定性不足、设备磨损严重等工程问题，本文剖析轨道排装误差对设备运行性能的影响机理，确立高精度、安全性的设计原则，完成轨道结构、装配工艺与参数匹配的整体优化设计。依托ANSYS搭建轮轨耦合仿真模型，结合响应面法开展多目标参数迭代优化。结果表明，优化方案可有效降低轨道应力与振动变形，提升小车运行平稳性，简化施工流程，具备较高的工程应用与推广价值。

关键词：岸桥小车；轨道排装系统；设计；性能优化

引言：港口智能化发展背景下，自动化岸桥对小车轨道排装精度与运行稳定性提出更高要求。传统轨道排装工艺粗放、校准效率低，安装偏差易引发轮轨磨损、设备振动、小车跑偏等问题，严重影响岸桥作业效率与设备使用寿命。为解决上述工程痛点，本文结合轨道系统结构原理与排装工艺标准，从结构设计、工艺优化、参数匹配多维度开展研究，通过仿真验证优化方案有效性，旨在为岸桥轨道高精度排装与性能提升提供技术参考。

1 岸桥小车轨道排装系统理论基础与性能影响机理

1.1 岸桥小车轨道系统结构与工作原理

(1) 小车轨道整体结构组成与装配关系。岸桥小车轨道系统主要由钢轨、轨道垫板、固定压块、紧固螺栓及基座主梁组成，各部件分层匹配、协同装配。钢轨为承载核心构件，通过垫板铺设于主梁顶面，利用压块与螺栓实现定位紧固，整体形成一体化承载结构，各装配节点的贴合精度直接决定轨道整体稳定性。(2) 小车运行机构与轨道耦合工作原理。岸桥小车依靠行走轮与轨道顶面刚性接触实现往复运行，运行机构的轮压、行走速度与轨道支撑刚度形成动态耦合。轨道为小车运行提供约束导向与承载基础，小车运行过程中产生的动载荷均匀传递至轨道及基座，二者精准配合保障装卸作业的连续稳定。(3) 轨道排装系统核心功能与技术指标。该系统核心功能为精准定位、平稳承载、误差调控，保障小车高速、重载运行。核心技术指标包含轨道直线度、水平度、轨距偏差及紧固稳定性，是控制小车运行精度、降低设备损耗、提升岸桥作业效率的关键参数。

1.2 轨道排装关键工艺与技术标准

(1) 传统轨道排装工艺流程与操作要点。传统排装以测量放线、基座找平、轨道就位、微调校准、紧固固定为核心流程。作业中需精准标记安装基准，逐段调整轨道位置，全程实时检测偏差，避免累计误差，保障轨

道初步安装精度。(2) 轨道找平、对接、固定核心工艺规范。找平需依托水平仪逐段校准，控制高低偏差；对接时保证轨道端面贴合平整，错边量严控在规范范围内；固定采用对称分步紧固方式，避免单侧受力偏移，保障轨道整体平整度与牢固性。(3) 港口岸桥轨道安装行业技术标准与精度要求。行业标准对轨道各项偏差制定严格阈值，直线度、水平度、轨距偏差均限定毫米级精度，同时明确轨道紧固强度、对接间隙标准，杜绝安装缺陷引发的设备运行隐患^[1]。

1.3 轨道排装误差对系统性能的影响机理

(1) 轨道水平度、直线度误差的力学影响机制。轨道水平、直线度超标会导致小车轮压分布不均，运行时产生附加交变载荷，使轨道与行走轮承受局部集中应力，长期运行易引发构件疲劳变形，破坏系统力学平衡。(2) 轨道间距偏差对小车运行平稳性的影响。轨距偏差会改变行走轮啮合状态，造成小车运行卡滞、跑偏，高速运行时会产生横向晃动，大幅降低作业平稳性，同时影响岸桥对位装卸的精准度。(3) 安装间隙偏差引发的振动、磨损失效机理。轨道对接、固定间隙超标会使轨道运行时产生微位移，持续引发机械振动，加剧钢轨、行走轮的摩擦磨损，长期工况下会扩大设备损耗，缩短轨道及小车机构使用寿命。

2 岸桥小车轨道排装系统整体设计

2.1 排装系统设计原则与设计目标

(1) 安全性、高精度、可装配化设计原则。岸桥小车轨道长期承受重载与交变冲击载荷，设计以安全性为首要准则，优化结构强度与约束布局，规避轨道松动、变形等安全隐患。以港口安装规范为依据落实高精度设计，严控安装偏差，保障小车运行稳定。同时采用标准化结构，简化装配流程，降低现场施工难度，适配港口复杂作业工况。(2) 提升安装效率、降低运行损耗的设

计目标。针对传统排装工艺流程繁琐、校准耗时久的短板,通过模块化、结构化设计缩短施工与调试周期,提升安装效率。通过优化装配精度与结构适配性,改善安装偏差引发的振动、磨损问题,减少设备运行与疲劳损耗,有效降低运维成本和设备运行能耗。(3)适配自动化岸桥的模块化设计要求。针对智能港口岸桥高精度、高平稳性的运行需求,本系统采用模块化集成设计,整合定位、紧固、缓冲等功能单元。整体结构规整、拆装便捷,可满足自动化岸桥作业要求,同时方便后期设备检修、部件更换与功能升级,契合港口智能化发展趋势。

2.2 轨道排装系统结构优化设计

(1)轨道支撑结构与定位组件优化设计。优化原有单一垫板支撑结构,采用复合型支撑底座,提升支撑均匀性与整体刚度,避免局部受力不均引发的沉降变形。同时改进定位限位组件,增设双向定位挡板与限位卡槽,实现轨道横向、纵向双向精准限位,杜绝小车运行过程中轨道微位移问题,提升定位稳定性。(2)轨道对接密封与紧固结构改进设计。针对传统轨道对接缝隙易进杂尘、受潮锈蚀、螺栓松动等问题,优化轨道对接端面结构,匹配专用密封垫片,提升接缝密封防水防尘性能。改进紧固结构,采用分区对称紧固组件,搭配防松锁紧结构,替代传统单一螺栓固定方式,有效提升轨道整体紧固强度,规避长期振动导致的紧固失效问题^[2]。

(3)适配小车动态运行的轨道缓冲结构设计。结合小车高速往复运行的动态载荷特性,在轨道支撑基座与钢轨之间增设柔性缓冲垫层,构建刚柔结合的承载结构。可有效吸收小车启停、运行过程中的冲击载荷,削弱振动传递效应,降低钢轨与车轮的刚性磨损,大幅提升轨道系统动态适配性能与使用寿命。

2.3 轨道排装工艺方案设计

(1)精细化分层排装工艺流程设计。摒弃传统粗放式施工流程,设计基座清理、基准放线、垫板铺装、轨道就位、微调校准、紧固固定、密封防护的分层化排装流程。各工序层层衔接、分步把控,明确每一层施工的操作规范与验收标准,规避多工序交叉施工引发的精度偏差,实现排装施工的标准化、规范化作业。(2)高精度定位与找平工艺优化方案。采用激光定位放线技术替代传统人工放线,提升基准定位精度,精准标定轨道安装轴线与安装区间。找平工艺优化分层微调模式,通过多点高程检测、局部垫板微调、整体复核校准的方式,逐段修正轨道水平度偏差,解决传统整体找平精度不足、局部高低差超标的问题,保障轨道全程顶面平顺统一。(3)排装质量检测与校正工艺设计。构建全过程质

量检测体系,施工前检测基座平整度、基准精度,施工中实时监测轨距、直线度、水平度,施工后开展整体载荷复核检测。针对检测发现的微小偏差,设计动态微调校正工艺,无需拆解整体结构即可完成局部修正,确保所有安装参数均符合行业精度标准^[3]。

2.4 排装系统配套参数匹配设计

(1)轨道安装公差参数合理匹配。结合岸桥重载、高速运行工况,针对性匹配轨道直线度、水平度、轨距、接缝错边量等公差参数,区分常规运行区段与端部启停区段的公差标准,实现公差参数与设备运行特性的精准适配,避免统一公差标准导致的性能适配不足问题。(2)紧固预紧力、安装间隙参数优化选型。通过力学仿真计算,确定不同规格螺栓的最优预紧力参数,避免预紧力过大导致轨道变形、过小引发结构松动。同时优化轨道对接间隙、支撑间隙参数,结合热胀冷缩特性确定合理间隙值,平衡密封防护与热变形适配需求,杜绝间隙不当引发的振动与磨损问题。(3)不同工况下排装参数适配方案。针对港口大风、高湿、重载、高频作业等不同工况,制定差异化排装参数适配方案。恶劣工况下适当收紧精度公差、提升紧固预紧力标准,优化密封间隙参数;常规工况下以标准参数为主,兼顾施工效率与运行性能,保障轨道排装系统在各类作业工况下稳定可靠运行。

3 岸桥小车轨道排装系统性能仿真与优化分析

3.1 仿真模型构建与参数设定

(1)基于ANSYS的轨道-小车耦合仿真模型建立。依托ANSYS有限元仿真平台,结合岸桥小车轨道实际结构尺寸、材料属性与装配关系,搭建轨道、支撑垫板、紧固组件与行走小车的一体化耦合仿真模型。模型充分还原轨道承载形式、小车轮轨接触状态与结构约束关系,摒弃单一构件独立建模的简化方式,真实还原实际作业中的动态耦合受力状态,保证仿真结果贴合工程实际。

(2)模型网格划分与边界条件设定。为平衡仿真精度与运算效率,采用分区网格划分方式,对轨道接触面、对接接缝、受力集中区域进行精细化网格加密,对基座等非核心受力区域进行适度稀疏划分。边界条件依据现场工况设定,固定轨道基座底部约束,模拟钢结构基座刚性支撑,同时施加小车自重、额定起重载荷与运行冲击载荷,还原真实受力边界环境^[4]。(3)仿真工况与核心性能评价指标确定。结合港口常规作业场景,设定额定载荷匀速运行、小车启停冲击运行、偏差工况运行等多种仿真工况。选取轨道等效应力、最大变形量、振动幅值、运行冲击系数、结构磨损量作为核心评价指标,全

面衡量轨道系统的力学性能、运行稳定性与耐久性能。

3.2 原有排装系统性能仿真分析

(1) 常规安装工况下轨道应力分布特性分析。通过仿真计算可得,传统排装方案下轨道应力分布不均匀,轨距偏差、对接间隙误差会导致轮轨接触位置应力集中,轨道接缝处、支撑点位局部应力明显高于标准区域,长期载荷作用下易产生疲劳损伤,影响结构整体承载性能。(2) 小车运行过程中轨道振动与变形特性。小车往复运行过程中,传统排装结构因间隙不合理、紧固均匀性不足,会产生周期性微变形与高频振动。尤其在小车启停阶段,冲击振动幅值显著增大,轨道动态变形量超出合理范围,造成小车运行晃动、定位偏移等问题。(3) 传统排装方案的性能缺陷与问题总结。综合仿真结果可知,传统排装工艺存在安装精度可控性差、受力均匀性不足、抗冲击能力弱等缺陷。人工校准误差较大,结构防松、缓冲性能不足,长期作业下易出现轨道磨损加剧、部件松动、运行平稳性下降等问题,难以适配自动化岸桥高精度运行需求。

3.3 多目标性能优化与方案迭代

(1) 以平稳性、耐久性、高效性为核心的优化目标。针对传统方案缺陷,确立多维度优化目标,以降低轨道振动、减小应力变形提升运行平稳性;以弱化疲劳磨损、提升结构抗冲击能力延长设备耐久性;以简化装配流程、提升校准精度提高施工与运行高效性,实现性能与工艺双向优化。(2) 基于响应面法的排装参数优化迭代。选取轨道安装公差、螺栓预紧力、对接间隙、缓冲垫层厚度为核心参数,采用响应面法构建参数与性能指标的映射关系,通过多轮仿真迭代运算,筛选各参数最优取值区间,规避参数耦合带来的性能负面影响,实现参数精准匹配。(3) 结构与工艺协同优化方案确定。结合参数迭代结果,整合结构优化与工艺改进方案,确定精细化分层排装工艺、对称分级紧固方式、柔性缓冲适配结构的协同优化方案,兼顾结构力学性能、装配施工效率与长期运行稳定性^[5]。

3.4 优化后系统性能对比验证

(1) 优化前后轨道力学性能对比分析。对比仿真数据表明,优化后轨道应力分布更加均匀,局部应力集中现象显著消除,最大等效应力与动态变形量大幅降低,结构承载合理性与抗变形能力得到有效提升,力学性能整体优于传统排装系统。(2) 小车运行稳定性与耐磨性能提升验证。优化后排装结构的减振效果明显,小车运行振动幅值、冲击系数显著下降,轮轨接触贴合度提升,摩擦磨损量有效减少,彻底改善小车跑偏、晃动问题,大幅提升设备运行稳定性与使用寿命。(3) 排装效率与工程实用性综合验证。优化方案简化了现场校准流程,标准化模块化装配方式降低了施工难度,有效缩短排装与调试周期。同时优化结构适配多工况作业环境,故障率与运维成本降低,具备良好的工程实用性与推广价值。

结束语

本文完成岸桥小车轨道排装系统的理论分析、结构工艺优化与仿真验证,构建了精细化分层排装工艺与刚柔结合的承载结构,优化了关键装配参数。仿真结果证实,优化系统可显著改善轨道受力状态,弱化振动磨损,提升设备运行稳定性与安装效率。本次研究有效解决了传统排装技术的核心缺陷,后续可结合现场实测工况进一步优化参数,适配复杂港口作业场景,持续完善轨道排装技术体系。

参考文献

- [1]钱亮亮.低姿态桁架大梁岸桥小车轨道安装工艺[J].港口装卸,2025,11(3):62-65.
- [2]张锋锋,魏红梅.岸边集装箱起重机小车轨道理论寿命与影响因素分析[J].港口装卸,2024,6(3):25-28.
- [3]胡建军,翟海清.集装箱岸桥起重机小车运行机构的优化设计[J].工程机械与维修,2024,24(2):112-114.
- [4]黄国平.小车运行状态下岸桥结构动力响应分析[J].振动工程学报,2024,37(4):789-798.
- [5]李益波.小车轨道踏面缺陷的多体动力学仿真[J].机械工程与技术,2023,12(2):111-118.