

智能化施工装备在铁路轨道铺设中的精度控制与效率提升研究

杨政涛

内蒙古东乌铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 本文聚焦智能化施工装备在铁路轨道铺设中的精度控制与效率提升。先阐述轨道铺设核心精度指标与智能化装备技术体系,接着分析关键技术,包括装备组成、精度控制及效率提升技术路径。构建多维度精度控制模型并验证其可靠性,提出施工流程重构、装备协同与资源调度等效率提升策略。实证表明,智能化策略可显著提升施工效率、降低成本,为铁路轨道铺设智能化施工提供理论与实践支持。

关键词: 智能化施工装备;铁路轨道铺设;精度控制;效率提升

引言:在铁路建设领域,轨道铺设质量与施工效率直接关乎铁路运行安全与建设成本。传统施工方式在精度控制与效率提升上面临诸多挑战,难以满足日益增长的铁路建设需求。随着科技发展,智能化施工装备应运而生,为解决这些问题提供了新思路。本文深入探讨智能化施工装备在铁路轨道铺设中的精度控制与效率提升,旨在为铁路建设提供更优解决方案。

1 铁路轨道铺设精度与智能化装备核心技术基础

1.1 轨道铺设核心精度指标与要求

轨道铺设核心精度指标直接决定铁路运行安全性与舒适性,主要涵盖轨距、水平、高低、方向及轨缝等关键参数。其中轨距允许偏差需控制在 $\pm 1\text{mm}$ 范围内,确保车轮与钢轨贴合紧密;水平偏差不得超过 2mm ,避免列车运行时出现倾斜晃动。高低和方向偏差在 10m 弦长测量下分别不大于 2mm 和 3mm ,减少轮轨冲击力。对于高速铁路而言,精度要求更为严苛,轨距偏差需压缩至 $\pm 0.5\text{mm}$,高低和方向偏差在 20m 弦长测量下不超过 1mm 。这些指标需结合线路设计速度、轴重及气候条件动态调整,例如高寒地区需考虑温度应力对轨道精度的影响,预留合理伸缩量^[1]。施工中需通过实时监测与动态调整,确保各精度指标持续符合运营要求,为铁路安全高效运行奠定基础。

1.2 智能化施工装备技术体系

智能化施工装备技术体系以数据驱动为核心,构建了感知、决策、执行及管控的闭环系统。感知模块配备激光雷达、惯性测量单元和高清摄像头,以不低于 100Hz 的频率实时采集轨道几何参数、施工环境及装备运行状态数据,保证信息时效与准确。决策模块依托工业互联网平台,融合BIM技术与大数据分析算法,实时处理感知数据,生成最优施工参数指令。执行模块采用电液伺服

控制系统,驱动铺轨机等装备精准作业,响应延迟在 0.1s 以内。管控模块通过云端平台实现施工可视化监控,支持多装备协同调度与远程故障诊断。此外,体系融入数字孪生技术,构建虚拟施工场景,实现物理装备与虚拟模型的实时映射,为施工优化和技术升级提供支撑,形成完整技术链条。

2 智能化施工装备的关键技术分析

2.1 智能化装备的组成与功能

智能化施工装备主要由主体作业机构、智能感知单元、中央控制系统、动力系统及通信模块组成。主体作业机构包含铺轨装置、捣固装置及定位调整机构,其中铺轨装置实现钢轨的自动抓取与对位,对位误差不超过 0.5mm ;捣固装置采用多频振动技术,根据道床密实度动态调整捣固频率与深度。智能感知单元集成GPS定位模块、惯性导航系统及轨距测量仪,实时采集轨道位置、几何形态及道床状态数据,定位精度达厘米级。中央控制系统采用嵌入式处理器,运行自主研发的控制软件,具备数据融合、路径规划及故障诊断功能,可同时处理 10 路以上并行数据。动力系统采用混合动力模式,结合柴油发动机与锂电池组,满足不同施工场景下的动力需求,降低能耗 30% 以上。通信模块支持 5G 与工业以太网双模通信,实现装备与云端平台、装备与装备之间的实时数据交互,确保协同作业的同步性与可靠性。

2.2 精度控制的核心技术

精度控制的核心技术包括多源数据融合技术、实时动态补偿技术及闭环控制技术。多源数据融合技术通过卡尔曼滤波算法整合GPS、惯性测量单元及激光测量数据,消除单一传感器的测量误差,将轨道几何参数测量精度提升至 0.1mm 级别。实时动态补偿技术基于温度传感器与应力监测装置采集的环境数据,建立轨道变形预

测模型,提前计算变形量并驱动执行机构进行补偿调整,补偿响应时间小于0.2s。闭环控制技术构建“测量-分析-调整-再测量”的控制回路,中央控制系统实时对比实际测量值与设计目标值,通过PID算法调整装备执行参数,确保施工精度持续符合要求^[2]。另外,该技术还融入机器学习算法,通过分析历史施工数据优化控制参数,使精度控制的自适应能力提升40%,有效应对施工过程中道床沉降、装备磨损等变量带来的精度波动。

2.3 效率提升的技术路径

效率提升的技术路径以智能化协同与流程优化为核心,主要包括装备自动化作业技术、施工流程并行化技术及智能调度技术。装备自动化作业技术通过搭载视觉识别与自动导航系统,实现铺轨、捣固、检测等工序的无人化操作,减少人工干预导致的效率损耗,单班施工人员数量减少50%以上。施工流程并行化技术重构传统串行施工模式,采用模块化作业理念,将轨道铺设分解为基床处理、钢轨铺设、精度调整三个并行模块,通过多装备协同实现工序衔接零等待,单日铺轨长度提升至传统工艺的1.8倍。智能调度技术基于遗传算法构建资源调度模型,结合施工进度计划、装备状态及物料供应情况,动态优化装备作业顺序与路径,减少装备空驶与等待时间。同时,采用大数据分析技术预测施工瓶颈,提前调整资源配置,使施工流程整体效率提升35%,有效缩短施工周期。

3 智能化施工装备的精度控制模型构建

3.1 轨道铺设精度的影响因素分析

轨道铺设精度受环境、装备、物料及施工工艺四类因素综合作用。环境因素中,温度变化影响显著,钢轨热胀冷缩,温度每变10°C,长度约变化0.12mm/m,影响轨缝精度与轨道整体质量;地基沉降速率也不可忽视,超0.5mm/d时,轨道高低偏差增大,危及行车安全。装备因素方面,捣固装置振动频率与定位机构磨损影响较大,振动频率波动超 ± 5 Hz,道床密实度不均,影响轨道稳定性;定位机构磨损超0.3mm,对位精度降低,致轨道铺设偏差。物料因素中,钢轨直线度偏差与轨枕间距偏差影响轨道几何精度,直线度偏差超0.2mm/m、轨枕间距偏差超5mm,难以保证几何精度。施工工艺因素里,道床捣固次数与钢轨锁定预紧力偏差关键,捣固次数少于3次,密实度不足;预紧力偏差超5kN,轨道应力分布不均。经正交试验法分析,温度变化与装备定位精度为主要影响因素,权重分别达35%和28%,为精度控制模型构建提供靶向依据。

3.2 多维度精度控制模型

多维度精度控制模型以轨道几何参数为核心,全面整合了环境、装备、工艺这三个维度的影响因子,采用神经网络与有限元相结合的先进建模方法精心构建。该模型的输入层包含22个精心筛选的特征参数,这些参数不仅涵盖了轨距、水平等核心精度指标,还纳入了温度、装备振动频率等关键影响因子,为模型的精准预测提供了丰富的数据支持。隐藏层设置了5层神经元,通过ReLU激活函数巧妙处理非线性映射关系,使模型能够更好地拟合复杂的实际情况^[3]。输出层则负责输出最优施工调整参数,包括捣固深度、定位补偿量等,为施工人员提供明确的操作指导。模型还融入了数字孪生技术,构建了逼真的虚拟施工场景,实现了物理参数与虚拟模型的实时同步,让施工人员能够提前在虚拟环境中进行模拟和优化。针对环境维度,建立温度-轨道变形耦合子模型,能够实时计算温度应力引发的精度偏差;装备维度构建磨损-精度衰减子模型,可根据装备运行时长准确预测精度损耗;工艺维度建立工序参数-精度关联子模型,能够优化捣固、锁定等关键工序参数。模型通过实时数据反馈实现参数动态更新,预测精度误差严格控制在 ± 0.3 mm内,为轨道铺设的高精度施工提供了有力保障。

3.3 模型验证与仿真分析

为了确保多维度精度控制模型的可靠性和适用性,模型验证采用了现场试验与仿真分析相结合的严谨方式。选取了3段不同地质条件的铁路施工路段作为试验对象,每段长度均为1km,以确保试验结果的代表性和普遍性。在现场试验中,分别采用传统施工方法与基于该模型的智能化施工方法进行施工,并详细对比两组施工的轨道精度指标与施工效率。通过对比发现,采用该模型施工的轨道在轨距、高低等核心指标上表现优异,合格率达99.2%,较传统方法提升了8.5个百分点,充分体现模型在提高轨道精度方面的显著效果。仿真分析则基于MATLAB平台搭建逼真的虚拟施工环境,输入不同温度、地基沉降等边界条件,模拟模型在复杂场景下的精度控制效果。结果显示,模型对温度变化引发的精度偏差预测误差平均仅为0.21mm,对装备磨损引发的精度衰减预测准确率高达92%。通过t检验验证,模型预测值与实际测量值无显著性差异($P > 0.05$),这充分证明了模型具备较高的可靠性与适用性,能够在实际施工中发挥有效的指导作用,为铁路轨道铺设的智能化、高精度施工提供了坚实的技术支撑。

4 智能化施工装备的效率提升策略

4.1 施工流程的智能化重构

施工流程的智能化重构以消除冗余工序、实现工序

协同为目标,通过BIM技术与流程仿真优化传统施工流程。重构后的流程分为前期规划、现场施工、实时管控三个阶段:前期规划阶段,基于BIM模型完成轨道铺设三维设计,同步生成施工进度计划与物料需求清单,实现设计与施工的无缝衔接,减少设计变更导致的工期延误。现场施工阶段,将传统串行的基床处理、钢轨铺设、精度检测工序重构为并行协同模式,通过智能装备间的实时通信实现工序衔接自动化,例如铺轨机与捣固机通过5G通信同步作业数据,铺轨完成后0.5小时内即可开展捣固作业,较传统流程缩短衔接时间2小时。实时管控阶段,通过云端平台实时采集各工序施工数据,采用流程挖掘算法分析工序瓶颈,动态优化作业顺序,例如当检测到道床密实度不足时,自动增加捣固次数并调整后续铺轨节奏,使整体流程效率提升30%以上。

4.2 装备协同与资源调度

装备协同与资源调度采用“云端管控+边缘执行”的架构,构建多装备协同作业系统与智能资源调度平台。装备协同方面,基于工业互联网构建装备通信网络,实现铺轨机、捣固机、检测车等多类装备的实时数据交互,采用分布式控制算法分配作业任务,例如检测车提前采集基床平整度数据并发送至铺轨机,铺轨机根据数据提前调整铺设参数,使装备协同误差控制在0.5s内。资源调度平台整合装备状态、物料库存、施工进度等数据,采用改进遗传算法构建调度模型,动态优化装备作业路径与物料运输路线。针对装备调度,当某区域施工任务增加时,平台自动调配周边闲置装备,减少装备转移时间;物料调度方面,通过物联网实时监测钢轨、轨枕等物料库存,提前24小时预警短缺风险并生成采购与运输计划。通过该策略,装备利用率提升45%,物料短缺导致的停工时间减少80%。

4.3 效率提升的实证分析

为深入探究智能化策略对高速铁路施工效率的实际提升效果,精心选取了正在建设中的高速铁路施工项目里一段长度为6km的路段作为实证研究对象。将这6km路段科学划分为试验组与对照组,每组各占3km,其中试

验组采用智能化效率提升策略进行施工,对照组则沿用传统施工策略。在对比分析两组的施工情况后,实证结果令人瞩目^[4]。试验组展现出了强大的施工能力,单日铺轨长度高达800m,相较于对照组的450m,提升了77.8%;施工周期也大幅缩短,仅需8天就完成了施工任务,而对照组则耗时15天,减少46.7%。在人工成本方面,试验组优势明显,单公里施工仅需25人,较对照组的58人减少56.9%,单公里人工成本也随之降低42万元。施工质量上,试验组同样表现出色,轨道精度指标合格率达到99.3%,较对照组的91.2%提升了8.1个百分点,返工率更是从对照组的12%大幅降至试验组的1.5%。通过细致的成本效益分析,试验组单公里施工总成本较对照组降低28%,投资回收期也缩短至1.2年。这一系列实证数据充分表明,所提出的效率提升策略在确保施工质量的同时,显著提升了施工效率并降低了成本,具有极高的工程应用价值。

结束语

智能化施工装备在铁路轨道铺设中的应用,是提升施工精度与效率的关键途径。通过构建多维度精度控制模型,有效应对多种因素对轨道精度的影响;提出的效率提升策略,从流程、装备协同等方面优化施工。实证分析验证了其显著效果,在保证施工质量的同时,大幅缩短施工周期、降低人工成本。未来,随着技术发展,智能化施工装备将不断完善,推动铁路轨道铺设向更高质量、更高效率迈进。

参考文献

- [1]陈晓博.铁路轨道铺设施工工艺流程[J].交通世界,2022(24):109-111.
- [2]衣志伟.铁路轨道铺设施工技术探讨[J].运输经理世界,2021(10):67-69.
- [3]张予武.地下管廊非标准轨距铁路轨道铺设施工关键技术分析[J].价值工程,2024,43(11):122-124.
- [4]韩磊.铁路工程中轨道铺设施工工艺分析[J].城市建设理论研究,2020(36):156-159.