

Research on Optimization of Intelligent Manufacturing Process for Key Structural Components of Rail Transit Vehicles

Chang Tong

Wuhan CRRC Sifang Maintenance Center Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430200, China

Abstract

In response to the problems such as large cycle time fluctuations, high defect rate, and insufficient equipment utilization in the production of key components for rail transit vehicles, this paper focuses on the manufacturing process of the bogie frame and constructs a process optimization method based on digital twin, intelligent detection, and flexible scheduling. By establishing a mapping model between welding parameters and deformation amounts, combining machine vision and multi-source sensing to achieve pre-recognition of process quality, and using genetic algorithms to dynamically configure resources at multiple workstations, a comprehensive optimization path for quality, efficiency, and cost is formed. The application results show that the production cycle time has been shortened from 12.0 hours per piece to 7.5 hours per piece, the defect rate has decreased from 3.5% to 1.2%, the equipment utilization rate has increased from 65% to 88%, and the first-time inspection pass rate has increased from 93.1% to 98.4%. The study indicates that this method can effectively enhance the stability and flexibility of the production of key components, providing a reference for the intelligent manufacturing of rail transit equipment.

Keywords

rail transit vehicles; key structural components; digital twin; intelligent detection; flexible scheduling

轨道交通车辆关键结构件智能制造工艺优化研究

童昶

武汉中车四方维保中心有限公司, 中国·湖北 武汉 430200

摘要

针对轨道交通车辆关键结构件生产中存在的节拍波动大、不良率偏高、设备利用率不足等问题, 本文围绕转向架构架制造过程, 构建了基于数字孪生、智能检测与柔性调度协同的工艺优化方法。通过建立焊接参数与变形量的映射模型, 结合机器视觉与多源传感实现过程质量前移识别, 并采用遗传算法对多工位资源进行动态配置, 形成面向质量、效率与成本的综合优化路径。应用结果表明, 优化后生产节拍由12.0 h/件缩短至7.5 h/件, 不良率由3.5%降至1.2%, 设备稼动率由65%提升至88%, 一次交检合格率由93.1%提升至98.4%。研究表明, 该方法能够有效提升关键结构件生产的稳定性与柔性化水平, 为轨道交通装备智能制造提供参考。

关键词

轨道交通车辆; 关键结构件; 数字孪生; 智能检测; 柔性调度

1 引言

随着轨道交通装备制造向高质量、高一一致性与高柔性方向发展, 关键结构件生产正面临多品种、小批量、强耦合工艺条件下的组织挑战^[1]。以转向架构架为代表的结构件, 其制造过程涉及下料、组对、焊接、去应力处理、机加工与复检等多个环节, 任一工序参数波动都可能引发质量偏差并向后续环节传递。传统生产模式主要依赖人工经验进行工艺调整, 检测环节偏后置, 调度方式也缺乏对设备状态、

订单结构与物流约束的统一响应机制, 导致节拍不稳定、返修频繁以及资源利用效率不高。

2 工程概况

2.1 某轨道交通车辆关键结构件生产现状

某轨道交通车辆关键结构件以转向架构架为代表, 其生产组织通常覆盖下料切割、坡口加工、组对定位、焊接成形、去应力处理、机加工修整以及尺寸复检等环节, 工序之间存在较强的前后依赖关系, 任一节点的偏差都可能向后续装配精度传递。结合车体承载安全与运行可靠性要求, 现有生产线仍以人工经验调参与离线流转为主, 工艺参数、设备状态以及质量信息之间缺少连续关联, 造成节拍控制不够稳

【作者简介】童昶(1991-), 男, 中国湖南常德人, 硕士, 助理工程师, 从事高速动车组检修研究。

定,批次间一致性也难以保持。图1所示流程能够反映出当前生产组织的基本形态,即以单件流转为主、工位切换频繁、信息反馈链条较长。

在具体运行层面,切割环节对板材余量控制和热影响区管理依赖人工判定,焊接环节则对坡口间隙、焊丝送进速度以及热输入窗口保持高度敏感,机加工环节又对前道焊后变形补偿提出更高要求。由于这些参数尚未形成在线闭环控制,生产过程往往表现出明显的波动性,现有节拍约为12 h/件,不良率约3.5%,设备稼动率约65%。从工艺链条的衔接状态来看,等待、返修以及重复找正占用了较多有效时间,资源配置也呈现出局部拥堵与阶段闲置并存的状态,难以适配小批量、多品种的订单组织模式^[2]。

2.2 智能制造工艺优化需求分析

结合转向架构架生产链条的实际运行状态可以发现,当前工艺优化需求并不局限于单一环节的局部修补,而是同时指向质量、效率以及成本三个维度的协同改进。就质量控制而言,焊接热输入、坡口装配间隙以及机加工余量之间存在较强耦合关系,若仍依赖经验判定,容易把前序误差放大到后续精加工阶段,进而增加返修与报废风险。基于轨道交通车辆关键结构件对服役安全性的高要求,工艺体系需要把不良率由当前约3.5%压缩至1.5%以下,并将过程偏差控制从事后修正转向前置识别,这就对数字孪生建模提出了更明确的应用需求。数字孪生并非单纯的三维可视化,而是把现场设备状态、工艺参数以及质量数据映射到虚拟空间中开展同步推演,用以支撑参数寻优与异常预判。

从效率提升的现实语境来看,现有生产组织仍然存在工位切换频繁、等待时间偏长以及返修占比偏高等问题,生产节拍约12 h/件已难以适配小批量、多品种订单的连续交付要求。若要把节拍缩短至8 h/件,必须把下料、焊接、去应力处理以及机加工等环节纳入同一套协同控制逻辑之中,借助智能调度对设备占用、工序衔接以及物流流向进行动态重构。柔性生产调度的核心并不在于简单压缩时间,而在于根据订单结构、设备负载以及在制品状态实时调整资源分配,使关键工位维持更稳定的运行节奏。与此同时,设备稼动率提升至85%以上,也要求把停机等待、换型准备以及重复找正纳入统一的约束优化框架,以减少隐性时间损失。

从成本降低的角度观察,传统模式下的材料消耗、返修返工以及人工复检共同抬高了单位制造成本,且工艺波动越大,成本外溢越明显。为适应高一致性制造要求,工艺优化不仅需要降低直接加工损耗,还需要减少因缺陷流转而带来的附加处置成本。智能检测体系在此环节具有承上启下的作用,其本质是借助机器视觉、激光测量以及多源传感数据融合,把尺寸偏差、焊缝缺陷以及装配错位尽可能前移识别,从而压缩质量损失的传递链条。结合当前产线的技术基础,只有把数字孪生、智能检测以及柔性调度联动起来,才能为关键结构件生产建立更具响应能力的优化路径,并使工艺调

整从被动纠偏逐步转向主动适配。

3 轨道交通车辆关键结构件智能制造工艺优化方法

3.1 基于数字孪生的工艺参数优化模型构建

面向轨道交通车辆关键结构件焊接成形过程,数字孪生工艺参数优化模型的构建并不止于对现场设备进行三维复刻,而是把材料属性、工装约束、焊接参数以及成形质量统一纳入同一数据语义空间之中。结合转向架构架焊接场景,模型层面需要把母材牌号、板厚、坡口形式、装配间隙以及焊丝规格等静态信息,与电流、电压、焊接速度和层间温度等动态变量建立持续关联,并借助传感采集与工艺数据库形成同步更新机制。

3.2 智能检测与质量控制体系设计

围绕转向架构架焊接成形后的过程管控需求,智能检测体系被设计为面向焊缝缺陷、尺寸偏差以及装配错位的连续感知单元,其运行逻辑并不止于终检环节的结果判读,而是把检测节点前移至组对、焊接以及机加工衔接界面。结合现场工艺节拍,系统以机器视觉为核心采集手段,联动激光位移传感器、工业相机以及编码同步触发装置,对坡口边缘形貌、焊缝余高、咬边、气孔和错边量进行同步识别;同时,对关键尺寸如对角线长度、孔位中心距以及基准面平面度实施在线测量。基于这种多源感知方式,检测数据能够在同一时间轴上完成配准,进而把外观缺陷、几何偏差以及工艺参数波动关联起来,为质量判定提供连续依据。

3.3 柔性生产调度与资源配置优化

鉴于转向架构架多工位、多品种小批量场景下存在工位切换频繁、物流阻滞与返修插单交织的现实情境,本研究把柔性调度建模为多约束组合优化问题,选用遗传算法作为求解器,并把设备能力边界、订单优先级、工序前后依赖、换型准备时长、夹具占用、AGV路径冲突与去应力工序时间窗一并纳入约束集合。编码层把工序序列与资源指派组合为双层染色体,针对切割、焊接、热处理和机加工等关键节点构建可重入工艺路线表达,以支撑不同车型切换时的快速重排与装夹再利用策略的自动衔接^[3]。

适配性评估采用多目标适应度函数,综合节拍偏差、在制品水平、关键设备负载均衡性与换型损失,并以数字孪生的状态预测和检测系统的缺陷预警作为动态权重来源,把排程偏好随设备健康与质量风险实时调整。运行机制采用事件驱动滚动时域,订单到达、设备停机与质量预警触发时启动快速重排;变异与交叉算子在资源日历与物流约束下进行受限搜索,避免不可行解占用计算窗口。资源配置层通过对焊接单元中机器人与人工协同比例、班次结构与工装池分配进行联动优化,把高频换型工位与共享夹具池绑定为优先级更高的可重构单元,并对AGV与起重工位的时隙进行统筹,以降低在制品跨区等待。

4 工艺优化效果评估与应用验证

4.1 工艺优化前后关键指标对比分析

结合转向架构架生产链条的工艺重构过程可以发现,优化效果并不体现在单一设备或单道工序的局部变化,而是集中反映在节拍、质量以及设备利用水平的协同改善上。原有生产组织以经验调参和离线处置为主,切割、焊接、热处理以及机加工之间的信息传递链条较长,工位等待和重复找正占用了较多有效时间,生产节拍长期维持在12 h/件。随着数字孪生参数优化、在线检测前移以及柔性调度联动实施,关键工序之间的耦合关系得到重新梳理,节拍被压缩至7.5 h/件,工序衔接的稳定性也随之增强。

从质量控制视角观察,不良率变化最能体现工艺链条的内在改进。优化前,焊接热输入波动、坡口装配间隙偏差以及机加工余量控制不稳,容易把前序误差持续放大,导致返修与报废占比偏高,不良率约3.5%。在数字孪生模型对工艺窗口进行重构之后,焊接参数设定逐步摆脱了经验依赖,智能检测体系又把尺寸偏差和焊缝缺陷前移到过程阶段识别,缺陷流转链条被明显压缩,不良率下降至1.2%。这一变化说明,质量改善并非来自单次修正,而是来自参数寻优、过程预警以及工艺回写的连续作用。

4.2 智能制造系统运行稳定性验证

智能制造系统的稳定性验证建立在连续30天的生产运行记录之上,观察重点并不放在单次开机或短时波动,而是放在焊接参数回写、在线检测联动以及调度重排三类功能在真实生产节奏中的持续响应能力。结合转向架构架多工位协同的运行语境,系统在日排产、工位切换以及质量预警触发时均保持了较稳定的数据交互链路,工艺参数与设备状态能够按既定频率完成同步刷新,未出现因数据不同步而导致的排程中断现象。需特别指出的是,稳定性验证的核心并不在于追求某一时刻的峰值表现,而在于考察系统在长周期负载下是否仍可维持一致的控制逻辑和处置节奏。

从故障运行特征来看,30天内系统共出现4次可记录故障,主要集中于工业相机通讯短时中断、AGV路径冲突提示以及局部传感器信号漂移等环节,单次故障持续时间均较短,且均可在现场维护和程序重连后恢复正常运行。进一步观察发现,故障并未对主生产链条形成持续性干扰,焊接单元、检测单元以及调度单元之间的联动关系仍可维持闭环状态,说明该系统在软硬件接口设计以及异常隔离机制方面具备较好的适配性。与此同时,平均故障间隔时间延长至168 h,反映出系统在连续运行过程中并未因多源数据叠加而快速积累不稳定因素,运行秩序保持相对平稳。

4.3 经济效益与社会效益评估

从工艺重构后的资源消耗结构来看,经济效益主要体现在制造成本压降、产能释放以及返修损失收敛三个方面。数字孪生参数优化把焊接热输入和装配偏差控制在更稳定的窗口内,智能检测则把过程缺陷识别前移到组对与焊接阶段,柔性调度又把设备空转、换型等待以及物流阻滞纳入统一排程约束,由此形成的协同效应使单位产品综合制造成本呈现持续下降趋势。结合转向架构架的批量生产组织测算,优化方案实施后,年降低生产成本约200万元,同时由于工位衔接效率改善以及设备利用水平抬升,年产能提升约15%,为订单连续交付提供了更充足的产能余量。

进一步观察发现,成本节约并不仅来自直接加工环节的压缩,还来自质量损失链条的缩短。焊接缺陷、尺寸偏差以及返修插单在原有模式下容易相互叠加,形成材料重复占用、人工复核增加以及设备重新找正等隐性支出;优化后,过程预警与参数回写机制把多数波动控制在前道工序内,使返修返工占比明显收敛,进而减少了辅助工时和附加能耗。对于轨道交通车辆关键结构件这种高一致性要求较强的产品而言,这种成本改善方式更具可持续性,也更契合小批量、多品种生产组织下的精益化管理需求。节拍压缩、稼动率提升以及返修率下降共同构成了经济收益的主要来源,且各项收益之间具有较强的联动关系。

5 结语

本文面向轨道交通车辆关键结构件生产过程,提出了数字孪生参数优化、智能检测闭环控制与柔性调度协同联动的工艺优化思路,并通过应用验证证明了其有效性。结果表明,该方法能够在缩短生产节拍的同时兼顾质量提升与资源优化,推动制造过程由经验驱动向数据驱动转变。研究进一步说明,工艺优化不应局限于单一环节改进,而应从设计、制造、检测与调度多个层面建立统一协同机制。后续可结合更高精度的过程数据采集与更复杂的多目标优化策略,进一步提升系统的自适应能力与跨车型复用能力。

参考文献

- [1] 向远琴,万宏伟,孙敏.基于构型的轨道交通车辆试验管理研究[J].黑龙江科学,2025,16(22):150-152.
- [2] 秦兆伯,杨晨,穆禹丞,李炳萱,陈广泰,于健.基于工艺参数库的铁路货车车钩铸造件等离子切割作业方法[J].科学技术与工程,2025,25(16):6698-6706.
- [3] 李森.焊接车间手动线自动化改造的关键技术研究与实践[J].汽车维修与保养,2025,(12):60-61.