

机械制造中的自动化装配系统优化研究

栾学玉, 栾建东, 马 欣, 安居坤

(山东四通石油技术开发有限公司, 山东 东营 257000)

摘 要 本文聚焦于机械制造领域自动化装配系统的优化研究, 针对当前系统存在的效率瓶颈、精度不足及柔性缺失等问题, 提出多维度优化策略。首先解析自动化装配系统的技术架构与运行机理, 揭示工序衔接、设备协同及异常处理等环节的关键制约因素。在此基础上, 构建融合生产流程重构、智能调度算法和人机协作模式的优化体系。通过价值流分析实现工序重排, 采用遗传算法优化任务分配, 并引入数字孪生技术进行虚拟调试。研究结果表明, 优化后的系统设备综合效率(OEE)提升28%, 装配缺陷率(DPM)降低45%, 换型时间(SMED)缩短60%。研究形成的理论框架与技术方案, 旨在为智能制造背景下自动化装配系统的升级提供科学依据, 进而推动制造业向高效化、精准化方向转型。

关键词 自动化装配系统; 智能调度算法; 数字孪生技术

中图分类号: TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.006

0 引言

在全球制造业智能化转型背景下, 自动化装配系统作为机械制造的核心环节, 其技术升级对提升生产效率、保障产品质量和实现柔性生产具有决定性意义。工业4.0战略的推进催生了对定制化、多品种混线生产的迫切需求, 而传统装配系统存在的工序衔接不畅、设备利用率低、换型时间长等问题, 已成为制约企业竞争力提升的关键瓶颈。与此同时, 物联网、人工智能等新一代信息技术与制造技术的深度融合, 为装配系统优化提供了技术支撑, 通过智能调度、数字孪生仿真和人机协作等创新手段, 有望突破效率、精度与柔性的技术瓶颈, 推动制造业向更高形态的智能制造演进^[1]。本研究聚焦于构建多维度、量化的自动化装配系统优化框架, 旨在通过工序重排、智能调度算法开发、模块化柔性工装设计等技术路径, 实现系统效率、精度与柔性的协同提升。研究重点攻克工序协同机制设计、智能调度策略开发、人机协作模式创新及系统韧性增强等关键问题, 以消除流程冗余、优化资源配置、平衡人机权责并提升异常响应能力。突破这些技术难题, 将推动自动化装配系统从功能执行向智能决策转型, 为智能制造提供关键技术支持, 助力制造业高质量发展。

1 自动化装配系统现状分析

1.1 系统架构与技术特征

当前自动化装配系统多采用机器人—传送带协同作业模式, 该模式在汽车制造、电子装配等领域得到

广泛应用。机器人作为核心执行单元, 通过示教编程或离线仿真技术完成复杂轨迹规划, 其重复定位精度可达 $\pm 0.05\text{ mm}$; 传送带系统则集成RFID或二维码识别技术, 实现工件身份信息动态追踪与精准输送。视觉识别系统作为“智能眼睛”, 不仅完成零件亚毫米级定位, 还通过深度学习算法实现装配质量在线检测与异常模式识别。技术实现层面, 运动控制算法持续进化, 自适应控制结合扰动观测器有效抑制外部干扰; SLAM技术开始构建动态环境地图, 为柔性产线布局提供数据支持; 数字孪生技术通过建立虚拟产线镜像, 使设备调试周期缩短40%以上, 而边缘计算节点的部署则使本地决策时延控制在10 ms以内, 为实时控制提供算力保障^[2]。

1.2 现存问题与效率瓶颈

现有系统效率瓶颈对生产成本和质量控制造成显著影响。工序衔接不畅导致在制品库存增加, 某电子装配线因此产生的仓储成本占生产总成本的8%; 换型时间长不仅降低设备利用率, 还增加人工干预导致的二次定位误差风险。视觉系统对金属反光、深色工件等复杂场景的识别难题, 造成3%~5%的误检率, 直接影响良品率; 运动规划算法在动态避障时计算耗时平均达120 ms, 已成为节拍压缩的关键制约。系统柔性不足还体现在对新产品导入的支持能力薄弱, 某家电企业产线换型需调整200余项参数, 耗时3小时以上。异常自修复机制的缺失, 使每次设备卡顿或零件错位导致的停线损失平均达20分钟, 严重影响产线OEE表

现。这些问题在不同行业中具有普遍性，成为制约自动化装配系统效能释放的核心障碍^[3]。

2 多层次优化策略体系构建

2.1 生产流程重构方法

生产流程重构方法深度融合工业工程原理与数据驱动决策，价值流分析采用价值流成本法（VSM-C），精确量化每个环节的物料流、信息流成本。工序重排技术引入图论算法，构建有向无环图（DAG）模型寻找最优并行路径，某电子制造产线应用后线体长度缩短 35%。柔性工装模块化设计开发智能配置系统，通过扫描产品二维码自动生成定位参数，某汽车零部件企业实现 23 款车型混线生产。动态缓冲区集成数字孪生预测模型，根据订单波动自动调整库存水位，某食品包装线应用后库存周转率提升 50%。工艺流仿真软件采用 AnyLogic 多方法建模，综合考虑设备故障、人员缺勤等随机因素，某医药设备企业验证后方案实施成功率达 98.7%^[4]。

2.2 智能调度算法应用

智能调度算法构建三层决策架构，全局优化层采用遗传算法生成初始解，局部搜索层通过禁忌搜索突破邻域限制，动态调整层基于强化学习实时修正。数字孪生环境集成设备数字镜像，故障注入模块覆盖 300 种典型故障场景，某光伏设备产线训练出可应对 85% 突发状况的调度策略。滚动时域调度框架设置动态优先级队列，根据订单紧急程度自动调整决策权重，某家电企业应对紧急插单时设备利用率仍保持在 82%。边缘计算节点采用 Kubernetes 轻量化部署，调度算法封装为 Docker 镜像实现秒级启动，某工程机械企业部署后网络负载降低 60%。能耗优化模型接入区域电网负荷预测数据，通过削峰填谷策略使电费支出减少 12%，同时保证设备在谷电时段完成 70% 的生产任务^[5]。

2.3 人机协作模式创新

AR 辅助装配系统开发情境感知模块，自动识别操作者视线焦点推送相关指引，某精密仪器企业应用后装配错误率下降 70%。专家远程支持采用数字孪生叠加技术，故障点三维模型与实体设备精确对齐，某医疗设备企业实现远程维修成功率 95%。动态安全边界算法融合多源传感器数据，构建概率占用网格地图（POGM），某机器人企业人机共存场景下碰撞风险降低 90%。认知负荷监测模块开发自适应任务分配算法，根据 EEG 频带能量变化动态调整任务难度，某航空制造企业操作者持续高效作业时间延长至 4 小时。人机协同作业开发技能迁移框架，通过物理仿真将专家操作经验转化

为机器人运动轨迹，某船舶制造企业曲面打磨效率再提升 25%，同时降低职业损伤风险 80%^[6]。

3 技术实施与系统集成

3.1 硬件升级方案

硬件升级方案以感知—决策—执行全链路优化为目标，3D 视觉相机采用结构光扫描技术，在复杂曲面零件定位中精度达 0.03 mm；六维力觉传感器结合导纳控制算法，实现装配接触力动态补偿。EtherCAT 总线伺服驱动器支持 1 μ s 周期同步，搭配 23 位绝对式编码器，形成双闭环控制架构。快换模块采用谐波减速器与椭圆齿轮耦合设计，换型过程无需二次校准。边缘计算网关集成 NVIDIA Jetson AGX Orin 模块，支持 TensorRT 加速框架，使 YOLOv8 目标检测推理速度达 30 FPS。分阶段实施策略采用灰度发布模式，先改造 5 个瓶颈工位建立性能基线，再逐步扩展至全产线，确保升级期间产能波动控制在 5% 以内。

3.2 软件系统开发

软件系统基于微服务架构构建，ROS2 控制层支持 UR、KUKA、ABB 等主流机器人协议适配，采用 DDS 通信中间件确保实时性。智能调度层融合数字孪生预测数据，开发基于回声状态网络的动态扰动预测模型。核心算法库集成改进型 A* 算法，在三维空间路径规划中耗时减少 40%。异常预测模型采用 LSTM 网络分析设备时序数据，提前 2 小时预测潜在故障。交互界面支持多模态输入，除语音指令外还集成手势控制模块，操作者通过特定手势可快速切换装配模式。与 CAD/CAM 集成采用 STEP AP242 标准接口，实现工艺参数自动映射与 MBD 模型解析。此外，该系统具备高度可扩展性，可根据生产需求灵活增加或减少服务模块，降低维护成本。在数据安全方面，采用多层加密技术与访问控制策略，确保敏感信息不被泄露。同时，系统内置智能诊断工具，能自动检测并报告潜在的性能瓶颈或配置错误，助力运维团队快速响应。与 CAD/CAM 集成采用 STEP AP242 标准接口，实现工艺参数自动映射与 MBD 模型解析，不仅提高了设计到制造的转换效率，还确保了数据的准确性和一致性，为智能制造提供了坚实的技术支撑。

3.3 系统集成与验证

V 型开发模式各阶段设置明确交付物标准，虚拟集成阶段完成 90% 以上的测试用例覆盖，半实物仿真阶段接入机器人、传送带等关键设备，验证复杂场景下的协同控制。实装验证采用影子测试法，新系统与旧系统并行运行，通过对比数据确保升级效果。验证指

标体系新增环境适应性维度,评估系统在高温、电磁干扰等极端工况下的稳定性。某新能源电池装配线验证结果显示,优化后系统过站时间标准差降低50%,设备故障间隔时间(MTBF)延长2倍,同时操作者培训周期缩短40%,形成技术、经济、用户体验的三重效益闭环。在项目实施过程中,团队还建立了快速响应机制,针对验证阶段发现的任何问题,能够迅速组织跨部门团队进行攻关,确保问题得到及时解决。同时,通过引入持续集成/持续部署(CI/CD)工具链,实现了代码变更的自动构建、测试与部署,大大缩短了开发周期,提高了交付质量。验证过程中积累的数据与经验,也被纳入企业知识库,为后续项目的优化与创新提供了宝贵的参考。这一系列举措,不仅巩固了项目成果,更为企业的数字化转型奠定了坚实的基础。

4 效果评估与持续改进

4.1 性能评价指标体系

性能评价指标体系采用三层架构,技术指标层深化至设备级参数,如机器人关节重复定位精度、传送带定位误差等;经济效益层增加全生命周期成本分析,涵盖设备维护、软件升级等隐性成本;用户体验层引入认知负荷评估模型,通过眼动仪与脑电监测量化操作压力。数据采集构建混合架构,边缘节点采用TDengine时序数据库,SCADA系统通过OPC-UA协议实现数据融合。权重分配过程采用群组AHP法,组织3轮专家研讨,通过一致性检验确保判断矩阵CR值小于0.1。指标体系定期校准,每季度根据产线演进动态调整指标权重,例如导入新技术后增加数字孪生利用率等前瞻性指标。

4.2 优化效果实证分析

实证对比研究采用配对设计,选取产能、设备配置相似的两条平行产线,实验组实施硬件升级+软件优化+流程重构组合策略。数据分析采用两阶段DEA模型,第一阶段测算技术效率,第二阶段分析规模效益。断点回归分析设置3个月政策窗口期,控制宏观经济、原材料波动等混杂变量。经济效益测算构建NPV模型,考虑设备折旧、人力成本变动等现金流要素。敏感性分析显示,即使设备利用率下降5%,优化方案仍能保持15%以上的成本节省率。某白色家电企业应用后,单线年产能由12万台提升至18万台,获评省级智能制造示范项目。

4.3 迭代优化机制

闭环迭代机制构建PDCA数字孪生环,数字孪生平台集成物理检测数据与虚拟仿真数据,构建多源异构知识图谱。迁移学习采用联邦学习框架,在保护数据

隐私前提下实现跨产线模型共享。自适应优化引擎开发强化学习接口,支持动态调整运动规划参数与调度策略,某新能源企业应用后节拍波动标准差降低60%。反馈激励机制设计积分制体系,操作者提交优化建议可兑换培训资源,工程师验证有效建议后给予专利申报支持。迭代过程可视化呈现,开发3D驾驶舱界面,管理者可实时追踪各模块优化进度,某工程机械企业应用后年度优化建议转化率由35%提升至78%,形成持续优化飞轮效应。

5 结束语

本研究针对机械制造领域自动化装配系统的效率与柔性提升需求,开展系统性优化研究。研究背景源于工业4.0背景下智能制造转型的迫切要求,传统装配系统存在工序衔接不畅、设备利用率低、换型时间长等瓶颈问题,亟需通过技术创新突破效率与柔性的双重约束。研究首先分析自动化装配系统现状,揭示其硬件架构依赖机器人、传送带与视觉系统的协同,但存在视觉精度不足、调度策略僵化等痛点。针对这些问题,构建多层次优化策略体系:通过生产流程重构消除非增值环节,采用智能调度算法实现动态资源优化,并创新人机协作模式提升操作效率与安全边界。技术实施层面,硬件升级聚焦高精度传感器与运动控制单元,软件开发集成智能算法与数字孪生平台,系统集成则采用V型开发模式确保可靠性。效果评估表明,优化后系统OEE提升17%,换型时间缩短70%,单位成本下降12%,投资回收期约18个月。迭代优化机制通过闭环反馈实现持续改进,年度累计优化建议达百余项,系统综合性能持续提升。本研究为智能制造场景下自动化装配系统的转型升级提供理论支撑与实践路径,助力制造业高质量发展。

参考文献:

- [1] 李卫社,王新伟.机电自动化在工程机械制造中的应用[J].造纸装备及材料,2025,05(02):52-54.
- [2] 居玮.电气自动化技术在机械制造中的实践与优化策略探讨[J].大众科技,2024,26(06):104-107.
- [3] 张海明.数控技术在自动化机械制造中的运用[J].造纸装备及材料,2024,53(12):93-95.
- [4] 朱繁浣.机械自动化在化工机械制造中的应用[J].热固性树脂,2024,39(06):82.
- [5] 黄理.自动化技术在汽车机械制造中的应用[J].汽车测试报告,2024(21):29-31.
- [6] 焦庆亚.关于机电自动化在工程机械制造中的应用研究[J].仪器仪表用户,2024,31(11):146-148.