

机电一体化技术在智能制造生产线中的集成应用研究

蒋锐琦 方雨涵 沈海峰 沈愉茗

浙江睿实数智科技有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21084

[摘要] 智能制造生产线的升级迭代,离不开机电一体化多学科技术的深度集成适配。本文以物质流、能量流、信息流三流动态耦合为核心视角,结合工业生产实操场景,梳理机电一体化技术的集成体系与落地路径,分析产线自动化、质量管控、柔性生产中的应用实效,剖析当前技术融合落地的现存短板,依托物联网、数字孪生技术提出针对性优化方案。研究证实,科学的机电一体化集成模式,可有效提升产线运行效率与设备稳定性,为制造业数字化转型提供实操支撑。

[关键词] 机电一体化技术; 智能制造; 生产线集成; 三流耦合; 生产优化

中图分类号: TH-39 **文献标识码:** A

Research on the Integrated Application of Mechatronics Technology in Intelligent Manufacturing Production Lines

Caqi Jiang Yuhan Fang Haifeng Shen Yuming Shen

Zhejiang Ruishi Digital Intelligence Technology Co., Ltd

[Abstract] The upgrading and iteration of smart manufacturing production lines are inseparable from the deep integration and adaptation of multidisciplinary technologies in mechatronics. This paper takes the dynamic coupling of material flow, energy flow, and information flow as the core perspective, combines with practical industrial production scenarios, sorts out the integration system and implementation path of mechatronics technology, analyzes the application effectiveness of production line automation, quality control, and flexible production, dissects the existing shortcomings of current technology integration implementation, and proposes targeted optimization solutions based on the Internet of Things and digital twin technology. The research confirms that a scientific mechatronics integration model can effectively improve the operational efficiency and equipment stability of production lines, providing practical support for the digital transformation of the manufacturing industry.

[Key words] mechatronics technology; intelligent manufacturing; production line integration; three-flow coupling; production optimization

引言

工业4.0相关产业升级进程持续推进,传统制造产线的各类适配缺陷逐步暴露。设备布局零散化、生产管控模式粗放、柔性适配能力薄弱等问题,制约制造业智能化转型节奏。机电一体化工程体系整合多领域专业知识,可作为智能制造场景落地的核心支撑。现有研究多聚焦单一技术应用维度,难以适配产线整体改造需求,依托工业实测数据可深挖技术集成的底层适配逻辑与优化路径。

1 机电一体化生产线集成概述

1.1 生产线集成核心创新逻辑

业界不少研究成果对机电一体化体系的认知存在明显片面性,单纯将其归为各类技术要素的简单组合。片面认知造成多数

制造企业出现设备硬件更新,生产综合效能却无法同步提升的行业通病。智能制造产线的机电一体化集成,核心目标指向生产全流程的三流动态耦合适配。

生产体系内部的物质流,主要对应产线物料输送、产品加工等实体作业环节。能量流聚焦生产设备动力输出与能耗调控的动态变化,信息流覆盖生产数据采集、智能研判、指令传输的全维度管控工作^[1]。三类流动体系形成相互约束、双向适配的关联关系,构成技术落地的底层支撑。单一设备智能化迭代难以突破传统生产桎梏,全链路集成形成的三流闭环联动,才是激活智能产能的关键,也是本次研究区别于现有文献的核心切入点。

工业生产场景的整体运转状态,由成套机械架构的装配精度与运行稳定性作为基础保障,以此维系生产物质流的有序推

进。设备电子控制单元的调控精度,直接决定生产能量流的输出匹配度与能耗管控水平。



图1 机电一体化生产线

1.2 核心支撑技术构成

智能制造生产线所适配的机电一体化系统,无法依靠单一技术模块独立完成作业,必须依托多项核心技术的互补协同,搭建起覆盖生产全流程的完整管控架构。不同技术模块具备专属的功能定位与应用场景,各模块相互配合、互补短板,完成工业生产全链条的精细化管控工作。传感检测终端作为产线最前端的感知载体,可全面捕捉设备运行工况、实时工艺参数以及车间生产环境等各类物理信息,完成物理信号向数字化电信号的精准转化。

自动控制模块是智能生产线实现自主调控的核心技术载体,可编程逻辑控制器可搭建闭环调控运行逻辑,针对生产过程中出现的各类参数偏差完成动态修正,维系设备全天候连续稳定作业,规避人工操作带来的精度偏差问题。依托海量工业实测数据完成迭代训练的智能算法,能够赋予产线自主研判与自适应调节能力。

依托物联网通信技术结合数字孪生仿真建模方式,能够搭建物理产线与虚拟模型双向联动的新型生产架构。设备互联互通与全域数据共享的落地,搭配虚拟空间的工艺迭代优化,可有效降低实体产线试错作业带来的资源消耗。

2 机电一体化技术在产线中的集成应用场景

工业控制与自动化技术的持续迭代升级,不断推动国内现代制造业产业结构的优化调整与模式革新。机电一体化体系整合机械结构、电气控制、计算机技术、工程管控等多领域专业内容,实现软硬件设备的深度融合。

2.1 自动化产线全流程集成应用

自动化生产作业是机电一体化技术落地普及的核心场景,技术应用范围可全面覆盖工业产品加工、自动化物料输送、成品装配检测以及产品下线入库的完整生产链路。多类智能设备与核心技术的深度耦合应用,逐步替代传统人工主导的粗放生产模式。

机械加工工序中,五轴联动数控设备搭配高精度传感装置,实时捕捉切削力度、工作台位移等关键生产参数,把加工误差稳

定控制在微米级别。控制系统依托比例积分微分调控逻辑动态校准设备运行参数,保障批量生产的精度一致性。物料输送环节借助工业机器人与AGV设备,搭配视觉识别与柔性夹具,完成物料精准抓取与输送,适配多规格产品生产作业。表1为生产线优化前后核心效率数据对比,数据源自工业实测统计结果,可直观体现机电一体化集成的提质增效效果。

表1 产线优化效率对比

生产阶段	优化前效率/%	优化后效率/%
阶段一	90	85
阶段二	65	80
阶段三	80	75

一线工业实测数据统计结果能够客观反映,机电一体化技术的系统化集成改造,可让生产线各作业环节的综合作业效率实现15%左右的浮动提升。这套全流程自动化集成体系,能够改善传统产线工序衔接滞后、人工操作误差偏大、批量生产产能波动明显的行业问题,适配3C产品、汽车零部件等品类的精细化批量生产场景。

2.2 智能检测与质量闭环集成应用

质量管控环节始终是智能化工业生产的核心组成模块,传统人工抽检、全检的作业模式存在诸多固有短板,无法匹配现代工业生产的高精度、标准化作业要求。机电一体化集成体系可搭建全流程智能化质量管控闭环,实现产品检测、缺陷研判、工艺参数校准的一体化作业流程^[2]。

工业智能质控体系的稳定运行,依托机器视觉采集设备、高精度传感终端、智能分析算法以及工业传输网络四大核心模块的协同配合。连续化生产作业过程中,视觉设备负责采集产品外观形态、精密尺寸等核心信息,各类传感终端实时捕捉生产工艺参数的动态波动变化。

相较于行业普遍采用的后置集中质检模式,机电一体化集成质控体系具备实时动态参数校准的核心能力。系统一旦识别生产缺陷或工艺参数偏差,可自主调整设备运行工况,从源头规避批量性质量问题。检测数据可绑定产品专属编码,实现产品全生命周期质量溯源。

2.3 人机协同柔性生产集成应用

消费市场个性化、多元化的采购需求持续扩张,对制造业生产线的柔性适配能力提出更高的全新要求。传统固定式全自动生产线,难以适应当下小批量、多品类的定制化生产订单,人机协同的柔性机电集成模式,可有效平衡规模化生产效率与多场景适配能力。

协作机器人为柔性集成体系的核心载体,依托视觉感知、力觉传感模块突破传统工业机器人的安全作业边界。设备作业区域可与人工作业区域相互重叠,依据人工操作节奏微调自身运行轨迹与作业速率,适配精密检测、复杂装配等特殊场景。柔性夹具搭配可编程控制架构,缩短产品换产的停机调试周期,实现产线品类快速切换。

该类集成模式补齐全自动产线柔性欠缺、人工产线作业低效的双重行业短板,兼顾规模化生产效率与定制化生产适配性,契合制造业当下的市场发展主流方向。

3 机电一体化产线集成现存短板与优化路径

3.1 生产线集成落地的突出短板

结合工业一线落地情况来看,多数企业的机电一体化产线集成改造仍存在明显误区。部分企业片面追求设备智能化升级,盲目引入智能机器人、数控设备,却未完成设备间的通信适配与数据互通,导致各类智能设备形成信息孤岛,无法实现协同作业^[3]。设备堆砌式改造不仅无法提升产能,还会增加设备能耗与运维成本。

技术融合适配性不足也是普遍存在的问题。机械结构的运行精度、电子控制系统的响应速度、信息系统的数据传输速率存在匹配偏差,多学科技术无法形成有效协同,系统整体运行稳定性受限。同时,多数生产线缺乏智能化预测维护体系,依旧沿用传统事后维修模式,设备故障突发率较高,容易造成产线停机、产能损耗等问题。

行业复合型人才缺口进一步制约技术集成效果。机电一体化集成作业需要操作人员同时掌握机械运维、电子控制、智能算法基础等多领域知识,现有一线技术人员多为单一技能体系,无法充分发挥集成化产线的全部性能。

3.2 物联网赋能的集成优化实施路径

针对上述落地短板,依托物联网、数字孪生技术优化机电一体化集成体系,可实现生产线全方位提质增效^[4]。设备智能互联改造是优化基础,通过OPCUA、MQTT等工业通用协议,打通PLC、传感器、机器人等各类设备的通信壁垒,构建端、边缘、云三级协同架构,实现设备数据实时共享与协同控制。

数字孪生建模可搭建与物理产线完全同步的虚拟镜像,通过仿真分析优化生产工艺与设备运行参数。提前预判设备磨损、工艺冲突、产能瓶颈等潜在问题,在虚拟空间完成参数调试与方案优化,规避物理试产的资源损耗与停机风险。表2为数字孪生集成优化后的设备运行性能参数变化。

表2 设备运行性能提升幅度

性能指标	优化提升幅度/%
设备综合效率	18
设备使用率	22
故障预判准确率	85

AI动态调度算法的融入,可进一步优化产线三流耦合效果。系统结合生产订单、设备状态、物料库存等多维度数据,通过强化学习模型动态分配生产任务,每5min完成一次生产计划迭代优化,有效应对设备故障、临时插单等突发扰动,实现生产效率、能耗成本、产品质量的多维度平衡。

搭配预测性维护体系,依托振动频谱分析、LSTM神经网络模

型预判设备使用寿命,提前完成零部件更换与设备运维,从根源上降低产线故障停机概率。人才培养体系的同步完善,可通过企业实操培训、校企联合培养模式,培育适配集成化产线的复合型人才,保障技术体系长效落地^[5]。

4 集成应用整体成效分析

经过三流耦合集成优化后的机电一体化智能制造生产线,在生产柔性、运行稳定性、能耗控制、质量管控等多个维度实现全面升级,整体应用成效显著,适配当下制造业智能化、绿色化、柔性化的发展需求。分析产线柔性适配能力优化前后的趋势变化可以发现,技术集成对产线柔性性能的提升效果显著。优化前产线换产时长较长、适配品类有限,柔性水平整体偏低;集成优化后,产线换产效率大幅提升,可适配的产品品类持续增加,柔性适配能力呈稳步上升趋势。

生产效率层面,集成化机电一体化产线可实现作业效率3至5倍的提升,在3C产品组装场景下,单台设备产能可达120件/h,远超人工作业水平。质量管控层面,闭环智能检测体系可彻底规避人工检测误差,产品合格率与质量稳定性大幅提升,实现生产质量的精细化管控。

成本管控层面,在长期运行视角下,智能运维、精准能耗调控、零缺陷生产可有效降低人工成本、设备维护成本与物料损耗成本。柔性生产能力的提升,可帮助企业快速响应市场需求变化,提升订单适配能力与市场核心竞争力。整体来看,机电一体化技术的系统化集成,是制造业转型升级的核心抓手。

5 结束语

机电一体化技术在智能制造生产线的应用价值,核心体现为多技术集成后的三流动态耦合效能,而非单一设备的智能化升级。本文结合工业实操场景,明确技术集成的落地逻辑、应用场景与现存短板,依托物联网、数字孪生提出优化路径。相关研究结论可为制造企业产线智能化改造提供实操参考,助力行业高质量转型发展。

[参考文献]

- [1]徐顺和,诸悦.基于物联网技术的机电一体化生产线优化[J].大众标准化,2026,(4):172-174.
- [2]成佳,赵渭平,马胜强.机电一体化技术在汽车智能制造中的应用研究[J].汽车维修技师,2026,(4):110-111.
- [3]程起苗.机电一体化技术在汽车智能制造中的应用[J].汽车测试报告,2026,(2):4-6.
- [4]鲁鑫,陈哲凯.机电一体化技术在智能制造中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(11):106-108.
- [5]杨佳伟.机电一体化技术在工业自动化中的应用研究[J].科技与创新,2025,(21):216-218+222.

作者简介:

蒋艳琦(1985--),男,汉族,浙江杭州人,本科,工程师,研究方向:机电制造。