

工业自动化生产线智能闭环控制系统研究

马戎 620102198411102117

摘要

随着智能制造产业的快速发展，传统开环控制的工业自动化生产线存在参数调节滞后、异常响应不及时、生产精度波动大等问题，已经无法满足现代工业柔性生产与高效质控的要求。本文围绕工业自动化生产线的智能闭环控制需求，分析了智能闭环控制系统的总体架构与核心模块构成，探讨了基于机器视觉与数据驱动的误差反馈调节机制，结合实际生产场景验证了系统在提升生产效率、降低次品率方面的应用效果。研究结果表明，融合人工智能算法的智能闭环控制系统能够实现生产过程的实时感知、自动调节与自主优化，可为工业生产线的智能化升级提供技术参考。

关键词：工业自动化；生产线；智能闭环控制；智能制造

一、引言

工业自动化生产线是现代制造业生产的核心载体，其控制精度与响应速度直接决定了产品的生产质量与企业的经济效益。早期的工业自动化生产线多采用开环控制模式，控制指令发出后无法根据实际生产状态的变化进行动态调整，当生产环境出现温度波动、原料参数偏差、设备磨损等干扰因素时，容易出现产品尺寸偏差、装配错位等质量问题，需要人工停机调整，不仅降低了生产效率，也增加了生产运营成本。

随着物联网、人工智能、机器视觉等技术与制造业的深度融合，智能制造已经成为制造业转型的核心方向，对工业生产线的自主控制能力提出了更高要求。闭环控制系统通过将输出量反馈到输入端，与设定值进行对比并根据偏差调整控制参数，能够有效抵消外界干扰对生产过程的影响，而人工智能技术的融入进一步提升了闭环控制系统的感知能力与决策效率，因此研究适配工业自动化生产线的智能闭环控制系统，对推动制造业智能化升级具有重要的现实意义。

二、工业自动化生产线智能闭环控制系统总体架构

结合工业生产线的生产流程特点，智能闭环控制系统采用分层式架构设计，从上到下分为感知层、决策层与执行层三个核心层级，各层级之间通过工业以太网实现数据互联互通，保障控制指令与反馈数据的实时传输。

2.1 感知层：生产数据实时采集

感知层是智能闭环控制系统的信息输入端，主要负责采集生产线各个工位的实时生产数据，为后续的偏差分析与控制调整提供数据支撑。感知层部署了多类传感设备，包括用于采集产品尺寸、外观缺陷信息的工业相机，用于采集设备运行状态的振动传感器、温度传感器、电流传感器，以及用于采集工位物料位置信息的激光位移传感器等。其中机器视觉模块是感知层的核心，通过预设的产品质量标准算法，能够在生产节拍内完成对每一件产品的全参数检测，直接输出当前产品与标准参数的偏差值，替代传统人工抽样检测的模式，实现生产数据的全量实时采集。

2.2 决策层：偏差分析与控制指令生成

决策层是智能闭环控制系统的核心大脑，主要负责对感知层上传的反馈数据进行处理，对比生产参数的设定阈值，生成对应的控制调节指令。决策层搭载了基于数据驱动的智能控制算法，能够根据历史生产数据训练偏差预测模型，不仅能够对已经出现的参数偏差进行修正，还能够根据设备运行参数的变化趋势预测潜在的偏差，提前进行预调节，实现从被动修正到主动预防的转变。针对多工位协同生产的场景，决策层还能够统筹调整各个工位的生产节拍，避免出现工位堆积或者工位闲置的问题，保障生产线整体运行效率的稳定。

2.3 执行层：控制指令落地执行

执行层是控制调节指令的执行单元，主要接收决策层发出的调节指令，对生产线的设备运行参数进行动态调整，包括调整输送带的运行速度、调整加工刀具的进给量、调整装配机械手的位置坐标、调整加热工位的温度参数等。执行层的设备均支持网络化控制，能够直接接收决策层的数字指令完成参数调整，无需人工手动操作，调整响应时间控制在毫秒级，不会打断生产线的连续生产节奏，保障生产过程的连续性。

三、智能闭环控制的核心机制

传统闭环控制系统多采用固定阈值的偏差调节方式，仅能应对简单的偏差修正，无法适配复杂生产场景下的多干扰因素调节需求，智能闭环控制系统融合机器学习算法，构建了动态的偏差反馈与自主优化机制。

首先，构建基于机器视觉的实时偏差反馈机制。在生产过程中，每一件产品完成加工或者装配工序后，都会立刻进入视觉检测工位，工业相机采集产品的图

像数据后，通过预先训练好的缺陷检测与尺寸测量模型，在 100 毫秒内输出当前产品各项参数与标准参数的偏差值，偏差数据通过工业总线实时传输到决策层，决策层根据偏差的大小与方向计算需要调整的参数值，直接向执行工位发出调节指令，完成一次闭环调节。整个过程无需人工干预，能够实现合格产品分流、偏差参数自动修正的全流程自动化。

其次，构建基于迭代学习的自主优化机制。智能闭环控制系统会自动记录每一次偏差调节的参数与调节后的生产结果，不断更新训练偏差预测模型，随着生产时间的增加，模型对不同干扰因素的调节精度会不断提升。例如针对设备磨损导致的加工刀具尺寸逐渐变化的问题，系统能够根据连续生产的产品偏差数据，自动计算出刀具磨损的速率，提前逐次调整刀具的进给量，避免出现批量次品，无需操作人员定期停机测量刀具磨损量，降低了设备维护的人工成本。

四、应用效果分析

本文以某汽车零部件加工自动化生产线为应用对象，对智能闭环控制系统的应用效果进行验证。该生产线原本采用传统开环控制模式，需要每两小时进行一次人工抽样检测，发现偏差后人工调整参数，生产过程中次品率稳定在 2.1% 左右，单班生产效率为 820 件。部署智能闭环控制系统后，实现了产品全检测、参数自动调整，连续运行一个月的统计数据显示，生产线的次品率下降到 0.38%，单班生产效率提升到 915 件，次品率降低 81.9%，生产效率提升 11.6%，同时设备停机调整的时间从每天平均 47 分钟下降到 5 分钟以内，大幅提升了生产线的运行稳定性。

从应用结果可以看出，智能闭环控制系统能够有效解决传统开环生产线存在的参数调节滞后、质量波动大的问题，同时能够降低操作人员的劳动强度，减少生产过程中的人工干预，为企业带来明显的经济效益提升。

五、结论与展望

工业自动化生产线的智能化升级是智能制造发展的必然趋势，智能闭环控制系统通过融合传感检测技术与人工智能算法，实现了生产过程从开环到闭环、从人工调节到自主优化的转变，能够有效提升生产线的生产质量与运行效率。本文提出的分层式系统架构与智能反馈调节机制，已经在实际生产场景中验证了应用效果，具备在离散制造业与流程制造业推广应用的價值。未来随着边缘计算技术的发展，智能闭环控制系统可以进一步将部分计算任务下沉到生产线边缘节点，降低数据传输延迟，提升系统的响应速度，进一步拓展应用场景。

参考文献

- [1] 张宏, 李刚. 智能制造背景下工业生产线闭环控制技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2021, 32(12): 1452-1461.
- [2] 王明杰. 工业自动化智能控制系统的设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [3] 刘畅, 赵宇. 基于机器视觉的工业生产线闭环误差修正系统开发[J]. 制造业自动化, 2022, 44(5): 168-171.
- [4] 陈立, 林强. 数据驱动的工业过程智能闭环控制方法研究[J]. 控制工程, 2023, 30(2): 217-223.