

工业机器人在机械加工生产线中的集成应用研究

乔石 吴野

必维嘉航检验技术（广东）有限公司

DOI:10.32629/ems.v8i6.20577

[摘要] 随着智能制造技术的不断更新换代，工业机器人凭借自身优异的性能以及广泛的使用，已经成为现代机械加工生产线实现自动化、柔性化、高精度运行不可缺少的重要设备。它大大提高了生产效率和产品质量，也大大降低了人工成本和操作误差，给制造业的智能化转型起到了重要的作用。本文以工业机器人的核心功能定位为起点，对机械加工生产线的硬件和软件集成架构进行系统的阐述，主要论述了四个集成应用场景的适配逻辑和技术实现途径，结合目前快速发展的前沿技术，即人工智能、机器视觉、边缘计算和数字孪生等，从精度优化、能效提升和智能决策这三个方面提出了具体的改进方案，为现代机械加工生产线中机器人集成应用的部署和升级提供具有较高可行性和实践指导意义的参考依据。

[关键词] 工业机器人；机械加工生产线；集成架构；应用场景适配；智能优化

引言

在工业 4.0 以及智能制造的大潮之下，机械加工行业正在面临着高精度、高效能、柔性化生产的需求转变，传统的依靠人工和单一设备进行生产的方式已经不能满足批量定制化生产和质量控制的主要要求^[1]。工业机器人依靠其可编程性、高重复定位精度和多场景适应性，成为解决机械加工生产线瓶颈的关键载体，它同机床、传感器、数字孪生系统深度融合之后，可以达到加工全过程的自动化衔接、动态监控和智能调节的目的。当前工业机器人在机械加工领域已经由单一的物料搬运扩展到了复杂的加工辅助、质量检测、人机协同等各个方向，融合了力控感知、视觉定位、智能算法等先进的技术，使生产线从原来的自动化走向了智能化^[2]。

一、工业机器人在机械加工中的核心功能定位

表 1 工业机器人和典型机械加工工艺的适配参数

加工工艺类型	重复定位精度 (mm)	额定负载 (kg)	末端执行器类型	核心适配要求
合金钢五轴铣削辅助	±0.02	10-20	硬质合金涂层夹具	刀轴倾斜联动，振动抑制
精密零件定位装夹	±0.01	1-5	真空吸盘+视觉定位夹具	3D 视觉引导，压力反馈
工件去毛刺打磨	±0.05	5-10	柔性磨头	力控自适应，轨迹平滑
加工后物料转运	±0.1	20-50	液压夹紧夹具	快速切换，与机床联锁

根据表 1 可知，精密加工任务对于精度的控制要求比较高，而重载转运任务主要是指负载能力及设备联动效率。实际的适配要根据工件材料特性及工艺难点来调整机器人的运动参数和末端配置，以达到最佳的适配效果。

1.2 人机协作模式设计

人机协作模式的设计属于工业机器人融入到机械加工生产线的关键，要打破传统的“物理隔离”的作业方式，使人

1.1 加工任务适配性分析

工业机器人在机械加工中任务适配性的关键在于其运动特性、负载能力和工艺需求三者要准确地匹配起来，根据加工类型、工件特点和精度要求来创建合适的适配体系。不同的加工工艺对于机器人重复定位精度、运动轨迹的平滑度等有不同的要求，铣削等材料去除工艺对刚性和轨迹精度的要求比物料转运高，薄壁件加工要控制夹持力和运动加速度。适应时需要综合考虑机器人关节自由度等因素，采用工艺参数建模和运动仿真优化来达到动态适配的目的^[3]。根据加工任务的特点，选用模块化末端执行器和可重构的运动方案来提高机器人的多规格工件、多工艺类型转换的能力。表 1 给出工业机器人与典型机械加工工艺的适配参数，为任务适配提供数据支撑。

在同一作业空间内与机器人的工作区域进行安全的协同、优势互补^[4]。该模式依据 ISO/TS 15066 标准，创建起一个以主动防护、动态适配为特点的安全体系，依靠力控感知等技术来减小人机接触的风险。在协作的过程中机器人配有各种各样的传感器，实时地检测到人员的情况，并根据人员的位置和接触力采取相应的处理方式，避免出现第二次风险^[5]。同时设计了协作、高效的双模式切换机制，在无人的时机器人

用高效的方式工作，有人员介入的则切换成安全模式，以保证作业的安全。该种模式把人工和机器人结合起来，适合于中小批量、复杂的工件加工，可以提高生产效率和作业安全度。

二、机械加工生产线的系统架构设计

2.1 硬件集成框架

机械加工生产线的工业机器人硬件集成框架是以机器人本体为中心，构建起“机器人、加工设备、感知单元、输送单元”等硬件模块之间互相连接和信号交流的系统。选择多自由度的机器人本体，配上 4-6 轴联动系统，保证运动灵活、定位准确；加工设备为 CNC 机床等，使用工业总线协议同机器人传递信息，实现工件装夹等一系列的自动化连接。感知单元由各种传感器组成，用以实现工件的定位、力反馈、尺寸测量以及设备的状态监测。输送单元使用 AGV 小车等，用

于工件的转运，用 RFID 技术进行定位追溯。硬件集成要重视接口的标准化以及安装精度控制，保证信号传递稳定可靠，给自动运行提供硬件支持。

2.2 软件系统模块划分

机械加工生产线的软件系统按照模块化设计的原则，搭建一体化平台，实现硬件智能化控制和全流程数据驱动。各个模块之间用标准的接口互相传递数据，构成闭环控制系统^[7]。其关键在于用数字孪生技术建立虚拟模型，实现加工仿真优化和动态监控。运动控制模块对运动路径进行优化，保证联动的协调性；路径规划模块改变轨迹，提高作业和避障的能力。数据管理模块用来保存并供工艺优化等使用所用的数据；工艺优化模块依据历史数据对参数进行调节，提升加工精度及效率。各个模块互相配合，完成生产线全流程的智能控制，提高柔性及可扩展性。

表 2 各个软件系统模块功能分析表

模块名称	核心功能	技术支撑	应用价值
运动控制模块	机器人轨迹插补、多轴联动控制、运动参数调节	伺服控制算法、动力学建模	保障运动精度与设备联动协调性
路径规划模块	动态轨迹生成、避障优化、多机器人协同调度	SWO 算法、栅格地图建模	提升作业效率与路径安全性
数字孪生模块	虚拟仿真、状态映射、故障预演	三维建模、实时数据传输	降低试错成本，优化运行参数
数据管理模块	数据采集、存储、追溯与可视化展示	边缘计算、RFID 技术	实现全流程数据驱动管控

根据表 2 模块的功能可知，软件系统要重视兼容性和可扩展性，在保证能兼容各种品牌机器人的基础上，还需留有可以增加新算法和控制功能的接口，以适应生产线技术更新的需求。

三、工业机器人在机械加工生产线中的集成应用场景适配

3.1 复杂曲面加工辅助场景

复杂曲面加工属于机械加工的难点，在航空航天、高端装备领域，工件曲面精度高、形状复杂，单台设备很难完成全部加工任务。工业机器人适应该场景的关键在于与五轴加工中心联动，弥补传统设备在灵活性、作业范围方面的不足，创建起机床主加工、机器人辅助精加工的协同模式。机器人依靠多自由度的运动特性，可以对复杂的曲面进行自适应跟踪加工，配合力控感知技术调节切削力和进给速度，防止过切、欠切，用轨迹平滑算法改善路径，提高表面质量。该场景需要解决的是机器人和加工中心运动的同步性、误差补偿以及干涉避让的问题，用数字孪生仿真来验证联动参数，保证加工稳定性和精度。

3.2 精密零件定位装夹场景

精密零件的加工对装夹定位精度要求很高，传统的手工装夹效率很低，而且容易因操作者的误操作而造成定位偏差，

从而影响到加工的质量。工业机器人在此场景的适应关键在于融合视觉定位、精密夹具和在线测量技术，创建起“自动化定位、精准装夹、实时校验”一体化的装夹系统，达到高精度、高效能、可重复性的装夹目的。机器人依靠视觉系统获得工件的信息，然后用算法精确地将工件定位到加工基准面上，用模块化的精密夹具迅速装夹，采用机床测头在线校验装夹精度的方式，对偏差超标的工件进行自动补偿调整，保证达到加工的要求。

3.3 加工过程质量检测场景

加工过程质量检测可以保证机械加工的精度，从而减少废品率。工业机器人在这一场景里的关键在于代替人工完成高精度、高效率的在线检测，创建起加工、检测、反馈、补偿的质量控制闭环。机器人装有视觉检测模块等设备，可以实时检测工件尺寸等，检测数据传给控制系统和标准值比较，有偏差的工件立即反馈到加工环节，根据参数进行调整或者二次加工来补偿误差。本场景需要兼顾检测精度和加工节奏的匹配，保证不会影响生产线的连续运行，并且积累分析检测的数据，给工艺改进给予支持。

3.4 柔性生产线物料转运场景

柔性生产线要适应多规格、小批量工件的加工要求，物

料转运灵活度和效率决定了生产线的整体效能。工业机器人适合于本场景的主要原因是创建起“多工位联动”“快速切换”和“智能调度”的物料转运系统,使工件从料仓、加工设备、检测区、成品区自动转运,用模块化末端执行器和智能调度算法来满足不同的工件转运要求。机器人与AGV小车、输送线联动,依靠RFID技术追溯和定位工件信息,保证物料转运准确,根据加工节奏动态调节转运速度和路径,防止物料堆积及设备闲置,提高生产线的整体效率。

四、工业机器人集成应用优化方向

4.1 精度优化: 误差补偿与标定技术升级

精度是机械加工的主要参数,工业机器人集成应用的精度改善要从误差源头入手,依靠多维误差补偿和精准标定技术来提高运动精度和加工一致性。机器人集成运行存在几何、热、负载等误差源,几何误差是由关节间隙、减速器磨损等机械结构原因造成的,热误差是由于伺服电机发热、切削温升导致部件变形而产生的,负载误差同工件重量、末端执行器负载的变化有关。对以上误差来源,可以使用激光跟踪仪标定机器人的运动学参数、建立误差模型、采用实时补偿算法修正关节的运动参数、控制几何误差在 $\pm 0.005\text{mm}$ 之内;利用红外测温传感器监测机器人本体和加工区域温度的变化,根据热变形规律建立热误差补偿模型,动态调整运动轨迹,抵消温度的影响。此外,对末端执行器刚性的改进,减小弹性变形,结合力控传感器实现负载的自动调节,提高加工精度和稳定性。另外用数字孪生技术对不同的工况下误差的分布进行模拟,并在早期就调整好机器人和加工设备之间的联动参数,从而从根本上减少误差产生的可能性。

4.2 能效优化: 能耗监测与智能调度

在绿色制造理念之下,工业机器人集成应用朝着能效优化发展,关键在于用能耗监测、参数优化和智能调度等方式来降低生产线的总能耗。首先建立基于边缘计算的能耗监测系统,实时采集机器人、加工设备、辅助装置的能耗数据,用可视化分析方法找到高能耗环节及节能潜力点。同时,优化机器人运动及加工工艺参数,使用低能耗的运动轨迹规划算法,合理选择切削参数,比如精加工时采用微量润滑技术代替传统的切削液冷却,减少协同能耗。最后建立多机器人协同调度的能效优化模型,根据任务优先级和设备的能耗特性来动态地分配作业任务,避免设备闲置、重复工作,达到生产线能耗总体最优化的目的^[5]。

4.3 智能优化: AI算法与数字孪生深度融合

工业机器人集成应用智能优化,即将AI算法与数字孪生技术相结合,实现生产线的自主决策、动态优化、故障预知。路径规划阶段,使用蜘蛛蜂优化算法(SWO)、小龙虾优化算法(COA)等新的智能算法取代传统的算法,在动态复杂的环境中快速地生成出最优的轨迹,提高作业效率和路径的安全性。工艺优化环节,利用机器学习模型,依据历史加工、检测、能耗数据,建立工艺参数优化模型,自动调节机器人运动和切削参数,达到加工质量、效率和能耗三者兼顾的目的。设备维护环节,利用数字孪生模型映射出机器人的状态,结合传感器采集到的数据,用AI算法预测出可能存在的问题,并提前进行预警,防止停机,提高设备和生产线的稳定性。另外利用AI视觉识别技术提高机器人的自动工件定位和缺陷检测能力,实现加工的自适应调整以及智能控制。

五、结语

在智能制造的强力推动之下,工业机器人在机械加工生产线上的集成应用已经成为推动行业转型升级的重要力量。根据任务特性精准地进行任务匹配、高效地实现人机协同、合理地设计系统的架构及对多种场景做深入的适配,工业机器人明显提高了生产线的自动化、柔性化和智能化程度。未来,伴随着误差补偿、能效监测、智能算法等技术的不断革新和深度融合,工业机器人集成应用会进一步打破精度、能效和智能的瓶颈,给机械加工行业高质量发展提供强劲的动力。

[参考文献]

- [1] 裘学强. 超长复杂的光伏支撑架自动化焊接工作站系统设计[J]. 粘接, 2026, 53(01): 73-76.
 - [2] 门开显, 孙朋. 面向机械车床加工的智能制造生产线控制系统设计[J]. 模具制造, 2025, 25(12).
 - [3] 李云. 智能化技术在自动化机械加工生产线中的应用[J]. 金属加工(冷加工), 2025, (11): 14-18.
 - [4] 樊建勋, 宋振华, 田旭辉. 机器视觉在多品种小批量航空零件机械加工自动化生产线中的应用研究[J]. 产品可靠性报告, 2025, (09): 48-50.
 - [5] 钟孝, 叶鹏, 杨柳. 船舶管系加工自动化装配和焊接研究[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(09): 11-14.
- 第一作者简介: 乔石, 男, (1990-4), 汉族, 籍贯: 江苏省新沂市, 本科, 副高工程师, 研究方向为机械与质量管理;
- 第二作者简介: 吴野, 女, (1982-4), 汉族, 籍贯: 天津市, 本科, 副高, 研究方向为机械。