

工业机器人在精密机电部件柔性制造中的应用技术升级

肖 义¹ 徐占丽² 马 铭³

八环科技集团股份有限公司 浙江台州 318050

摘 要：伴随制造业智能化、柔性化转型进程，工业机器人在精密机电部件柔性制造中的核心地位日益凸显。本文系统研究工业机器人在该领域的技术升级路径，剖析当前发展状态与面临挑战，重点阐述高精度感知控制、柔性末端执行器设计、智能编程与示教技术、多机协同作业系统及物联网深度集成等关键技术的突破方向。通过实例佐证应用成效，并展望未来发展趋势，以期提升精密机电部件柔性制造能力提供理论支撑与实践参考。

关键词：工业机器人；精密机电部件；柔性制造；技术升级

引言

在全球制造业结构转型持续深化的背景下，柔性制造已成为增强企业核心竞争力的重要途径^[1]。精密机电部件作为现代工业体系的核心组件，对制造精度与生产柔性的要求极为严格。工业机器人凭借自动化特性、高精度作业能力及高可靠性优势^[2]，发展为精密机电部件柔性制造的核心支撑装备。然而，面对市场需求动态演变与技术迭代加速的现状，工业机器人在该领域的应用正遭遇多重瓶颈，亟需推进技术升级以适配持续升级的生产需求。深入探索工业机器人在精密机电部件柔性制造中的技术升级路径，对提升我国制造工艺水平、驱动制造业高质量发展具备显著实践价值。

一、工业机器人在精密机电部件柔性制造中的应用现状与挑战

1.1 应用现状

1.1.1 应用领域广泛

工业机器人已深度融入精密机电部件柔性制造的众多领域^[3]。在电子信息产业，其凭借高精度特性，执行芯片贴片、电路板焊接等超精密操作。例如在手机制造中，机器人能在狭小空间内精准安装微型电子元件至电路板，显著提升效率和良品率。航空航天领域对发动机叶片等关键部件精度要求严苛，工业机器人凭借卓越的运动控制能力，执行复杂铣削、钻孔等工序，确保符合航空标准。医疗器械行业则利用其制造心脏起搏器、胰岛素泵等设备中的微型部件，保障产品安全可靠。

1.1.2 应用模式多样

当前工业机器人在该领域的应用模式呈现多元化^[4]。单机作业模式下，独立机器人可承担小型精密零件搬运、装配等相对简单的任务。例如，小型电子企业常用单机完成元件从供料到指定位置的快速、精准抓放组装。联机作业模式则将多台机器人与数控机床、检测设备等集成于自动化生产线，实现从原材料加工到成品组装的全流程自动化。如汽车发动机制造中，多台机器人与数控设备协同，高效完成缸体加工、零部件装配及检测等工序，大幅提升效率与一致性。此外，以机器人为核心的柔性制造单元模式，整合自动化仓储、物流及智能控制系统，能依据不同生产任务快速调整流程，支持多品种、小批量的柔性生产。在3C产品制造中，此类单元可迅速切换生产不同型号手机、平板电脑的精密部件^[5]。

1.2 面临的挑战

1.2.1 精度与稳定性要求高

精密机电部件制造对精度和稳定性提出了极高要求。以硬盘磁头制造为例，其关键尺寸精度需达亚微米级，表面粗糙度要求也极高。工业机器人执行此类任务时，除需自身机械结构高精度外，还需克服运动振动、热变形等因素干扰。尽管传统机型精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，但在超精密任务面前仍显不足。加之长时间运行及温湿度等环境变化易导致精度和稳定性波动，持续满足精密制造需求存在困难。

1.2.2 柔性化程度不足

市场对精密机电部件日益增长的多样化和个性化需求，亟需工业机器人具备更高柔性。然而，现有系统在产品快速换型和工艺调整时适应能力有限。一方面，机器人编程与示教过程复杂，新任务需专业人员耗费大量时间调试，难以实现产线快速切换。例如电子设备制造中更换主板型号时，传统机器人可能需数小时甚至数日

作者简介：肖义，性别：男，出生年月日：1991.11.25，籍贯（省市-人）：湖北黄冈，民族：汉，学历：大专，职称：中级工程师，研究方向：机电制造技术。

重新编程调试,严重影响效率。另一方面,末端执行器多为专用设计,通用性差。生产不同类型部件需频繁更换,过程繁琐且成本高,制约了柔性化应用。

1.2.3 智能化水平有待提升

精密机电部件柔性制造要求工业机器人具备更高智能化水平,以实现自主决策和自适应控制。目前,多数机器人主要执行预设程序,缺乏对生产环境变化及质量波动的实时感知与自主调整能力。如在精密装配中,若遇零件尺寸微偏或装配位置误差,机器人往往难以及时察觉并自适应调整,易导致失败或质量下降。此外,其在数据处理与分析方面能力较弱,难以深度挖掘生产数据价值以优化工艺、提升效率。智能制造趋势下,智能化不足已成为限制工业机器人在该领域深化应用的关键因素。

二、工业机器人在精密机电部件柔性制造中的关键技术升级路径

2.1 高精度感知与控制技术升级

2.1.1 新型传感器的应用

工业机器人通过集成激光位移、力控和视觉传感器提升精度。激光位移传感器实时监测工件加工尺寸(如模具制造中的表面精度),偏差数据即时反馈至控制系统。力传感器在精密装配中(如电子微部件)动态调节装配力,防止部件损伤。高分辨率视觉系统结合图像算法(如半导体芯片封装),实现微米级抓取定位。

2.1.2 先进控制算法的优化

自适应控制算法依据工况变化(如材料硬度)自动调整运动参数,保障加工稳定性。预测控制算法通过预判运动轨迹减少高速搬运中的振动冲击。基于深度学习的智能算法通过历史数据训练,在复杂装配场景中自主优化操作路径,提升装配效率。

2.2 柔性化末端执行器技术升级

2.2.1 多功能末端执行器的研发

集成夹持、吸附、焊接等模块的执行器显著提升产线柔性。例如电子制造中,同一执行器可完成手机元件的抓取装配与电路板焊接。部分执行器具备自适应功能,能依据工件特性自动调节夹持力。

2.2.2 快速换装与自适应调整技术

标准化接口实现末端执行器分钟级更换,支持汽车零部件产线的快速转产。自适应技术通过实时感知工件位姿偏差(如精密装配场景),自动微调执行器位置确保精度。

2.3 智能编程与示教技术升级

2.3.1 离线编程与仿真技术

虚拟编程环境可预演机器人轨迹动作,提前识别碰撞风险并优化路径(如新产品工艺设计),避免现场调试损耗。

2.3.2 基于视觉与手势的示教技术

通过动作捕捉(如示教工具轨迹或手势指令)自动生成程序,降低操作门槛。在频繁换产场景中实现快速重编程。

2.4 多机器人协同作业技术升级

2.4.1 协同控制与任务分配算法

分布式控制算法支持多机自主决策(如大型设备组装),避免工作空间干涉。智能任务分配依据机器人特性(精度/负载)调度作业资源。

2.4.2 机器人间通信与协作机制

5G通信保障多机实时数据交互(如装配进度同步)。协作机制使多机器人能协同搬运大型部件,动态调整抓取位姿保障平稳性。

2.5 与物联网融合的技术升级

2.5.1 设备互联与数据交互

物联网网关联通机器人与数控机床/ERP系统,实现生产数据闭环。机器人根据机床进度预置物料,响应订单自动调整生产参数。

2.5.2 基于物联网的远程监控与运维

物联网驱动的远程监控与运维技术革新了工业机器人的管理维护模式。通过在机器人上集成多种传感器,实时采集电机电流、关节温度、振动等运行参数,并借助物联网传输至远程中心。技术人员可远程查看实时状态、实施诊断并发出故障预警。发现异常时,无需亲临现场即可远程调试修复。对于分布各地的工厂,该技术能显著压缩故障响应周期,提升设备利用率。此外,分析海量运行数据有助于优化维护策略,主动更换易损部件以预防故障,降低维护成本,确保其在精密机电部件柔性制造中的可靠运行。

三、工业机器人技术升级在精密机电部件柔性制造中的应用案例

3.1 案例一: 电子企业芯片封装生产线升级

某高端芯片制造企业引入技术升级的工业机器人优化封装产线。关键技术应用包括:

高精度感知与控制:采用亚微米级视觉传感器识别芯片位置及引脚形态,结合自适应控制算法实时调整机器人运动参数,使封装定位精度达 $\pm 0.005\text{mm}$;

柔性末端执行器:专用执行器具备多尺寸芯片抓取、引脚焊接与封装功能,可依据引脚形变自动调节焊接参数;

智能编程系统:通过离线编程软件预演封装流程,配合视觉-手势示教技术实现新产品的快速动作切换。

改造后产线效率提升50%,封装良品率由90%升至98%,显著增强企业竞争力。

3.2 案例二：航发叶片智能制造车间实践

某航空航天企业部署多台协同作业机器人进行发动机叶片制造：

协同控制系统：分布式算法实现多机器人无碰撞协作（搬运毛坯/精密铣削/质量检测），任务分配算法优化设备利用率；

物联网融合应用：机器人与数控机床、检测设备及生产管理系统互联，实时获取加工进度并反馈运行数据，实现全流程监控。

技术升级使叶片制造周期缩短30%，加工精度提升一级，满足航空航天领域高精度、短周期的严苛要求。

四、工业机器人在精密机电部件柔性制造中的技术升级趋势

4.1 人工智能与工业机器人的协同演进

人工智能技术将深度赋能工业机器人系统。基于机器学习和深度学习算法，机器人将获得自主优化能力。通过分析生产数据，机器人可自主改进操作流程与控制策略，如在精密装配环节自适应调整路径与力度参数，持续提升精度与效率。自然语言处理技术将实现人机语音交互，操作人员可通过语音指令直接调度生产任务、监控运行状态，大幅简化操作复杂度。同时，人工智能驱动故障预测系统将实时分析运行数据，自主实施故障预判与修复方案，显著增强系统可靠性。

4.2 新型材料与结构的创新应用

碳纤维复合材料凭借高强轻质特性，可显著降低机械臂质量，提升运动响应速度并降低能耗。例如在高速搬运场景中，碳纤维机械臂能有效抑制运动惯性对定位精度的影响。模块化设计成为主流趋势，支持通过快速更换末端执行器与传感器实现功能重组，既提升设备利用率又降低维护成本。柔性关节技术的应用增强环境适应性，当发生碰撞时可通过形变缓冲冲击，在保障安全性的同时避免设备损伤。

4.3 数字孪生技术的深度集成

通过构建物理机器人的虚拟映射模型，实现运行状态的实时监控与动态仿真。技术人员可在虚拟环境中测试新生产工艺，优化运动轨迹与控制参数，避免产线停机风险。例如在承接新部件生产任务前，通过数字孪生系统预演验证最优操作方案。该技术还可优化多机协同系统，在虚拟空间模拟任务分配策略，探索整线效率最大化的资源配置方案。

4.4 小型化与微型化发展路径

为适应微电子封装、医疗器械等领域的精密制造需求，工业机器人正向微型化演进。微型机器人可执行微米级材料沉积、刻蚀等传统设备无法完成的操作。压电

驱动、静电驱动等新型致动技术因其体积小、响应快的特点，成为微型机器人的核心驱动力。配合微型传感器与处理器，可在微观尺度实现精准定位与操作控制。

4.5 绿色节能技术推广

永磁同步电机等高效驱动技术显著降低基础能耗。再生制动能量回收系统可将减速过程的动能转化为电能存储再利用。轻量化设计通过结构优化与新型材料应用减少运动惯量，结合低功耗控制系统进一步降低能耗。可再生能源融合应用（如太阳能供电）正逐步推进，构建可持续制造体系。

结论

工业机器人在精密机电部件柔性制造领域的技术升级，已成为推动制造业智能化与柔性化转型的关键方向。目前相关应用虽取得阶段性成果，但仍需突破精度稳定性、柔性化能力及智能化水平等瓶颈。通过提升高精度感知控制技术、开发柔性末端执行器、优化智能编程与示教系统、强化多机器人协同作业能力以及深化物联网融合等核心升级路径，可显著增强工业机器人在该制造场景下的综合性能。

实践案例表明，技术升级后的工业机器人系统能有效提升生产效率和产品一致性，进而强化企业市场竞争力。未来随着人工智能、新型材料、数字孪生等技术的持续突破，工业机器人将向智能化、高效化、灵活化及绿色化方向演进，为精密机电部件柔性制造开拓更广阔的发展空间。

制造企业需主动布局工业机器人技术升级，加大研发资源投入，加速先进技术的引进与落地应用，持续优化制造体系。政府部门应强化政策引导与支持力度，推动产学研深度融合，加速工业机器人技术的创新突破与产业化进程，为我国制造业高质量发展注入新动能。

参考文献

- [1] 史轩亚, 杜义飞, 范威. 从大规模生产到大规模定制: 制造企业如何跨越鸿沟[J]. 清华管理评论, 2025, (04): 44-51.
- [2] 王敏, 张阳, 梁乾, 等. 并联智能机器人发展现状及前沿应用[J/OL]. 自然杂志, 1-13[2025-07-14].
- [3] 张毛焕, 张伟杰, 王国际. PTFE/PEEK 机器人关节轴承材料的力学性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53 (06): 126-131.
- [4] 李晓慧. 职业本科视角下工业机器人技术专业人才培养模式探索[J]. 柳州职业技术大学学报, 2025, 25 (03): 30-35.
- [5] 李昊杰. 自动制孔工业机器人自标定方法与系统开发[D]. 大连理工大学, 2024.