

服务机器人小批量定制化生产背景下的柔性制造系统研究

曾 勤

福建汉特云智能科技有限公司 福建福州 350007

摘 要：随着服务机器人应用场景日益多元化与个性化，市场对小批量、多品种的定制化生产需求激增，传统刚性生产线已难以满足其敏捷制造的要求。为应对这一挑战，亟需构建一种高度柔性、智能协同的新型制造系统。该系统以“机器人造机器人”为核心理念，深度融合柔性智能生产线、全生命周期管理软件与先进的物流及仓储体系。通过部署协作机器人（Cobot）于关键预组与装配工位，并采用智能AMR（自主移动机器人）载台替代传统固定式输送线，实现生产链的分离式、模块化布局，从而支持不同型号产品的混线生产和快速换型。同时，依托MES（制造执行系统）与WMS（仓储管理系统）的深度集成，实现从原材料入库、在制品流转至成品出库的全流程数据贯通与实时监控。在此基础上，导入自动化在线检验系统与核心控制器洁净测试环境，确保在提升生产柔性的同时，产品质量与一致性得到有效保障。该研究为服务机器人产业实现高效、经济、高质量的定制化生产提供了系统性解决方案。

关键词：服务机器人；小批量定制化；柔性制造系统；协作机器人；智能AMR；制造执行系统（MES）

引言

当前，服务机器人产业正经历从标准化产品向场景化、个性化解决方案的深刻转型。用户需求的碎片化与多样化，催生了小批量、多品种的生产模式，这对制造体系的敏捷性、适应性和智能化水平提出了前所未有的挑战。传统的自动化生产线因投资大、柔性差、换型周期长，难以适应这种高频次、短周期的订单变化，成为制约服务机器人企业快速响应市场、控制成本的关键瓶颈。

在此背景下，构建一个能够兼顾效率、柔性与质量的新型制造范式成为行业发展的迫切需求。新一代柔性制造系统不再局限于单一设备的自动化，而是强调整个生产生态的智能化协同与数据驱动。其核心在于打破物理产线的刚性约束，通过模块化、可重构的硬件单元与统一的数字化管理平台，实现制造资源的动态调度与优化配置。具体而言，利用协作机器人的人机协同优势，灵活处理复杂装配与预组任务；借助智能AMR构建柔性物流网络，实现物料与在制品的按需、精准配送；并通过部署MES、WMS等工业软件，打通设计、生产、仓储、质检各环节的数据孤岛，形成透明、可控的全生命

周期管理体系。这种深度融合了先进机器人技术、物联网（IoT）与工业软件的柔性制造系统，不仅是提升服务机器人定制化生产效率与质量的核心支撑，更是推动国产智能制造装备与技术迭代升级的重要实践路径。

一、国内外研究现状述评

（一）柔性制造系统（FMS）的理论演进与技术发展

柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）的概念自20世纪60年代末由英国Molins公司首次提出以来，其内涵与外延已历经数次深刻变革。早期的FMS主要指由数控机床、物料搬运系统和中央计算机控制单元构成的自动化生产单元，核心目标是通过减少人工干预来提升多品种、中小批量零件的加工效率。进入21世纪后，随着信息技术的爆炸式发展，FMS的理论框架逐步从单纯的“硬件集成”向“软硬协同、信息驱动”的方向演进。物联网（IoT）、云计算、大数据等新一代信息技术的融入，催生了数字化、网络化的智能FMS，实现了对生产全过程的实时监控、动态调度与优化决策。近年来，人工智能（AI）与数字孪生（Digital Twin）技术的深度应用，更将FMS推向了“自感知、自决策、自执行、自适应”的新高度。当前的研究前沿已不再局限于车间内部的柔性，而是扩展至涵盖产品设计、供应链协同乃至服务全生命周期的广义柔性制造生态，这为应对

作者简介：曾勤（1979—），男，汉，福州，福建汉特云智能科技有限公司，本科，中级工程师，智能机器人制造及质量控制。

服务机器人等高度复杂产品的定制化生产需求奠定了坚实的理论与技术基础。

（二）服务机器人制造领域的自动化与智能化实践

在全球范围内，服务机器人产业的蓬勃发展正倒逼其制造模式加速向自动化与智能化转型。国际领先企业如波士顿动力、SoftBank Robotics等，在其高端机器人产品的生产中，已广泛应用协作机器人进行精密装配，并构建了高度自动化的测试与校准环境，以确保产品性能的一致性。同时，“灯塔工厂”项目中的诸多案例也展示了如何利用数字主线（Digital Thread）技术，打通从研发到制造的数据流，实现快速的产品迭代与柔性生产。在国内，以优必选、云迹科技、普渡科技等为代表的服务机器人企业，同样在积极探索智能制造路径。部分头部企业开始尝试引入AMR（自主移动机器人）构建柔性物流体系，并部署MES（制造执行系统）以提升生产透明度。然而，相较于汽车、3C电子等成熟领域，服务机器人制造的自动化程度仍处于初级阶段。多数企业的生产线仍高度依赖人工，尤其是在面对小批量、多型号的订单时，缺乏一套系统性的、可快速重构的柔性制造解决方案，导致生产效率低下、质量波动大、成本居高不下，这已成为制约我国服务机器人产业高质量发展的关键瓶颈。

二、服务机器人定制化生产的制造需求与挑战分析

（一）小批量定制化生产模式的核心特征

服务机器人市场正呈现出前所未有的碎片化与个性化趋势。用户不再满足于功能单一的标准品，而是期望机器人能够深度融入特定场景（如酒店迎宾、医院配送、家庭陪伴），提供定制化的功能组合与外观设计。这种市场需求直接催生了“小批量、多品种、快交付”的新型生产模式。其核心特征在于：首先，订单规模显著缩小，单批次产量可能仅为数十台甚至个位数；其次，产品型号繁多且更新迭代速度极快，要求生产线具备极高的敏捷性；再次，生产计划具有高度的不确定性与动态性，需要制造系统能够快速响应插单、急单等突发需求；最后，在追求柔性的同时，必须兼顾严格的成本控制与产品质量稳定性。这种模式彻底颠覆了传统大规模标准化生产的逻辑，对制造系统的资源配置、流程规划、信息协同与人员技能都提出了全新的、更为严苛的要求。

（二）传统制造模式面临的瓶颈

面对上述小批量定制化生产模式，传统的刚性制造模式显得力不从心，其固有瓶颈日益凸显。首先，产线柔性不足是最大痛点。基于固定输送线和专用工装的传

统生产线，一旦产品设计发生变更，便需要耗费大量时间与资金进行物理改造，换型周期长，无法适应高频次的产品切换。其次，信息孤岛严重。设计、工艺、生产、仓储、质检等环节的数据未能有效贯通，导致生产计划与实际执行脱节，物料齐套率低，生产过程不透明，管理决策滞后。再次，过度依赖人工。在装配、检测等关键环节，大量依赖熟练工人的经验操作，不仅效率难以提升，而且产品质量一致性差，极易因人员流动而影响生产稳定。最后，物流系统僵化。传统的AGV或传送带物流模式缺乏灵活性，难以支持多型号产品的混流生产和按需精准配送。

三、柔性制造系统（FMS）的理论演进与内涵拓展

（一）新一代柔性制造系统的内涵与特征

为破解传统制造模式的困局，新一代柔性制造系统应运而生，其内涵已远超早期FMS的范畴。它不再仅仅是一个车间级的自动化单元，而是一个深度融合了先进制造技术、信息技术与管理思想的复杂智能系统。其核心特征体现在三个方面：一是高度的可重构性，即物理设备（如机器人、工装）和逻辑流程（如工艺路线、调度算法）能够根据任务需求进行快速、低成本的重组；二是深度的数据驱动，通过遍布全厂的传感器网络和统一的工业软件平台（如MES、WMS、PLM），实现人、机、料、法、环全要素的实时数据采集、分析与闭环优化；三是人机深度融合，强调协作机器人等智能装备与人类工人形成优势互补的协同作业模式，而非简单的“机器换人”。这种系统以“软件定义制造”为核心理念，通过虚拟世界的精准映射与优化，指导物理世界的高效、柔性运行，从而在根本上解决了小批量定制化生产所面临的效率、柔性与质量的矛盾。

（二）服务机器人制造对FMS提出的新要求

服务机器人作为一种集机械、电子、软件、AI于一体的复杂机电产品，其独特的制造属性对新一代FMS提出了更具针对性的要求。首先，对装配柔性的要求极高。服务机器人通常由底座、机身、头部、手臂等多个模块组成，不同型号间差异巨大，要求装配系统能灵活处理各种尺寸、重量和接口的部件，协作机器人因其安全性和编程便捷性成为理想选择。其次，对智能物流的依赖空前增强。由于产品种类多、批量小，传统的固定物流路径无法满足需求，必须采用AMR等自主导航设备，构建一个能够动态规划路径、按需配送物料的柔性物流网络。再次，对生产环境有特殊需求。核心控制器等精密

电子部件的组装与测试，往往需要在恒温、恒湿、防静电的洁净环境中进行，这对FMS的环境集成能力提出了挑战。最后，对全流程追溯的要求更为严格。为确保每一台定制化机器人的质量与安全，必须建立从原材料到成品的完整、不可篡改的质量数据链，这要求FMS具备强大的数据采集与追溯能力。

四、支撑服务机器人柔性制造的关键技术

(一) 柔性自动化装备技术

柔性自动化装备是构建新一代FMS的物理基石。其中，协作机器人（Cobot）凭借其安全性高、易于编程、部署灵活等优势，在服务机器人的预组装、底盘合装、线束连接等工序中展现出巨大潜力，能够有效替代重复性高、精度要求严苛的人工作业，同时与工人形成高效的协同关系。自主移动机器人（AMR）则彻底革新了车间物流模式，它们通过激光SLAM或视觉导航，无需铺设固定轨道即可在车间内自由穿梭，作为移动的“载台”或“工作站”，将物料精准配送至各个工位，或将半成品在不同工序间流转，从而实现了“分离式生产链”，极大地提升了产线布局的灵活性与重构速度。此外，模块化、快换式的工装夹具也是不可或缺的一环，它们能够快速适配不同产品的装夹需求，是实现分钟级换型的关键保障。这些装备的有机组合，共同构成了一个物理上高度柔性的生产执行层。

(二) 质量保障与智能服务技术

在高柔性生产环境下，确保产品质量的一致性与可靠性是核心挑战，这离不开先进的质量保障与智能服务技术的支撑。自动化在线检验技术是关键，通过在关键工位部署机器视觉、力/扭矩传感器等，可以对装配到位、螺丝锁付、功能测试等环节进行100%自动化全检，及时发现并拦截缺陷，避免不良品流入下道工序。对于服务机器人的“大脑”——核心控制器，则需要在专门的恒温恒湿防静电洁净测试房内，进行自动化学习与全功能检测，确保其在复杂环境下的稳定运行。在此基础上，智能服务技术为整个制造系统提供了运行保障。综合智能安防系统确保人机共融环境下的作业安全；智能

环保系统对生产过程中的能耗、排放进行监控与优化；而智能物流管理系统（WMS）则与AMR深度协同，实现原材料、在制品、成品的精益化仓储与高效流转。所有这些技术，通过统一的数据平台进行集成，共同构筑起一个既能敏捷响应定制需求，又能牢牢守住质量生命线的现代化柔性制造体系。

结论

在服务机器人产业迈向小批量、多品种定制化生产的新阶段，传统刚性制造模式已难以继。构建以智能化、协同化和数据驱动为核心的新一代柔性制造系统，成为破解效率、成本与质量三重矛盾的关键路径。该系统通过深度融合协作机器人、自主移动机器人（AMR）等柔性自动化装备，打破物理产线的刚性约束，实现快速换型与混线生产；同时，依托制造执行系统（MES）、仓储管理系统（WMS）等工业软件的深度集成，打通全生命周期数据流，为生产决策提供透明化支撑。未来，随着数字孪生、人工智能等技术的进一步融入，柔性制造系统将不仅满足当前定制化需求，更将推动服务机器人制造业向更高水平的智能化与生态化演进。

参考文献

- [1] 李方明. 行业定制开发或成服务机器人又一普及应用的突破口[J]. 机器人产业, 2017, (01): 98-99.
- [2] 王永贵, 高乐伟, 晏丽. 服务主体类型对定制产品购买的影响机制研究[J/OL]. 系统工程理论与实践, 1-19[2026-02-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2267.N.20250515.1116.038>.
- [3] 陈运军. 基于工业机器人的“智能制造”柔性生产线设计[J]. 制造业自动化, 2017, 39(08): 55-57+64.
- [4] 刘全胜. AGV机器人在柔性制造系统中的应用[J]. 中国制造业信息化, 2008, (17): 74-75+77.
- [5] 邵明, 谢存禧, 唐超军. 可重组柔性装配系统发展现状与系统实例[J]. 机械设计与研究, 1999, (03): 68-70+13.