

协作机器人在飞机组部件装配中的应用研究

代旭东, 李 岚, 史洋洋

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089)

摘 要 随着航空工业的快速发展, 飞机组部件的装配工作面临着日益增长的效率和精度要求。传统装配方式依赖大量人工操作, 不仅耗时耗力, 还存在一定的安全风险, 为了提高装配效率、降低成本并确保装配质量, 协作机器人在飞机制造领域的应用逐渐受到重视。协作机器人以其轻量化设计、友好交互性和感知与适应能力, 为飞机组部件装配提供了新的解决方案。本文对协作机器人在飞机组部件装配中的应用进行了研究, 以为相关人员提供参考。

关键词 协作机器人; 飞机组部件; 装配; 柔性安装; 螺栓安装

中图分类号: TP242; V22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.026

0 引言

协作机器人是一种能够与人类在共同工作空间中直接互动、协同作业的机器人, 具有更高的安全性、友好的交互性以及更强的适应性, 打破人与机器之间的物理隔离, 实现人机紧密合作。协作机器人配备了多种先进的安全防护机制, 通过内置的力传感器, 当机器人与人体接触时, 一旦检测到超过预设安全值, 便会发出警报。协作机器人在飞机组部件装配中的应用具有深远的意义, 能够提升装配效率, 缩短生产周期, 满足航空工业快速增长的市场需求。协作机器人的精准识别和抓取技术、柔性安装技术以及螺栓安装技术等, 能够确保装配精度, 减少装配误差, 提高飞机的整体性能和安全性。协作机器人的应用还能降低人工参与度, 减少因人力因素导致的安全事故, 保障生产人员的安全。

1 协作机器人的特点

1.1 轻量化设计

在轻量化设计方面, 协作机器人通过采用新型材料与优化结构达到机身重量的降低。运用高强度、低密度的碳纤维复合材料替代传统金属材料, 既保证了机械臂的刚性, 又大幅减轻了重量, 使其更易于安装与移动, 降低了能耗。轻量化设计不仅提升了机器人的灵活性, 还减少了因碰撞可能造成的伤害。

1.2 友好交互性

传统工业机器人多依赖预先编程的固定指令执行任务, 而协作机器人则具备更为人性化的交互方式。它能够通过多种传感器, 如视觉、力觉传感器等, 实时感知周围环境与人的动作、姿态, 做出相应的反应。操作人员可通过手势、语音等自然交互方式对机器人

下达指令, 无需复杂的编程知识, 降低操作门槛, 使非专业人员也能轻松上手。

1.3 感知与适应能力

凭借先进的传感器技术与智能算法, 协作机器人能够对周围环境的变化做出快速且准确的响应。它能实时监测工件的位置与形状变化, 自动调整操作路径与力度, 确保加工精度^[1]。在面对复杂多变的环境时, 如服务场景中的动态人流, 协作机器人可以通过传感器获取信息, 利用算法规划出合理的行动路径, 避免碰撞, 实现自主导航。

2 协作机器人在飞机组部件装配中的应用技术

2.1 精准识别与抓取技术

飞机组部件形状复杂、尺寸多样, 且材质各异, 要实现精准识别, 协作机器人需配备高分辨率视觉传感器与深度学习算法。视觉传感器如同机器人的“眼睛”, 快速捕捉部件的轮廓、纹理、位置等信息, 深度学习算法则对这些海量信息进行分析处理, 与预设的标准模型进行比对, 精准识别出目标部件^[2]。在抓取环节, 机器人利用力觉传感器感知抓取力度, 确保在抓取过程中既不会因力度过小导致部件滑落, 又不会因力度过大损伤部件。

在空客 A320 系列飞机的机翼装配车间, ABB 公司的 YuMi 协作机器人承担着关键的部件识别与抓取任务。YuMi 配备了 Basler ace A2040-180 km 高分辨率相机作为视觉传感器, 其分辨率达到 204 万像素, 帧率高达 180 fps, 能以极快速度捕捉部件细节。深度学习算法则基于 NVIDIA DGX-1 人工智能计算平台进行训练, 该平台拥有强大的计算能力, 通过对超过 10 万张不同飞机部件图像的学习, 构建了全面且精准的标准模型数据库。

在装配过程中,视觉传感器开启后,对工作台上多达 50 余种不同机翼部件进行扫描。比如识别机翼大梁连接件时,视觉传感器在 0.1 秒内捕捉到其复杂轮廓、表面粗糙度为 $Ra0.8\ \mu\text{m}$ 的纹理以及在工作台上 X 轴坐标 (100 ± 0.1) mm、Y 轴坐标 (200 ± 0.1) mm、Z 轴坐标 (50 ± 0.1) mm 的位置信息,并以每秒 180 帧的速度将数据传输至机器人控制系统。深度学习算法利用 DGX-1 平台的强大算力,在 50 毫秒内完成分析比对,精准识别出目标部件。

抓取环节,YuMi 协作机器人搭载 ATINano17 六维力/力矩传感器。经过上千次测试,针对该连接件设定的最佳抓取力度范围为 $10\sim15\text{ N}$ 。当机械臂靠近部件时,力觉传感器以 $1\ 000\text{ Hz}$ 的频率实时感知抓取力。一旦力值偏离范围,控制系统在 1 毫秒内调整机械臂动作^[3]。通过这一系列精准操作,装配起始效率提高了 40%,装配准确性从 80% 提升至 95% 以上,加快了 A320 系列飞机机翼的装配进度,保障了产品质量。

2.2 柔性安装技术

在装配飞机部件时,往往需要进行微调以达到最佳的配合精度,协作机器人的柔性安装技术主要通过力控制与自适应调整实现。机器人在接触部件时,力传感器实时反馈接触力的大小和方向,控制系统根据这些信息,自动调整机器人的运动轨迹和施力大小。当遇到装配偏差时,机器人能够凭借自身的柔性关节和先进算法,自适应地调整姿态,确保部件顺利安装^[4]。

在波音 787 梦想客机的机身与机翼连接装配环节,发那科 CRX-10iA 协作机器人发挥了关键作用,其工作范围高达 380° (见图 1)。该机器人配备了先进的 F/T 力传感器,其力分辨率可达 0.01 N ,方向分辨率为 0.01° ,能精准捕捉接触力的细微变化。

装配开始后,当 CRX-10iA 协作机器人抓取机翼部件靠近机身对接处时,力传感器便以 100 Hz 的频率实时监测接触力。在初始接触阶段,设定接触力阈值为 5 N ,当接触力达到该值时,机器人控制系统启动微调程序^[5]。在某次装配中,力传感器反馈 Y 轴方向接触力偏大 2 N ,控制系统依据预设算法,在 50 毫秒内自动调整机器人运动轨迹,沿 Y 轴反向移动 0.2 mm ,同时将施力大小从 8 N 调整为 6 N 。

在对接过程中,若出现装配偏差,CRX-10iA 的柔性关节和独特算法就开始发挥作用。其柔性关节可在 $\pm10^\circ$ 范围内灵活调整,当检测到部件角度偏差为 3° 时,机器人通过算法计算,在 100 毫秒内驱动关节做出相应调整,确保部件顺利对接。经过大量测试,该装配过程中,力控制精度稳定在 $\pm0.5\text{ N}$,角度调整精度可达 $\pm0.5^\circ$ 。

通过这种柔性安装技术,波音 787 客机机身与机翼连接装配的一次成功率从以往传统刚性装配的 70% 提升至 90%,装配时间缩短了 30%,不仅有效避免了部件因装配不当造成的损坏,还极大地提高了装配的质量和稳定性,充分展现了协作机器人柔性安装技术在飞机部件高精度装配中的优势。

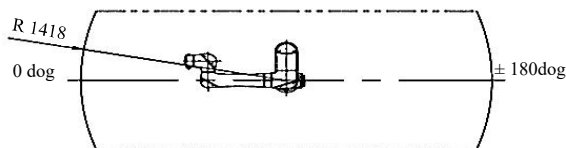


图 1 发那科 CRX-10iA 协作机器人工作范围

2.3 螺栓安装技术

协作机器人在飞机部件装配中的应用技术中,螺栓安装技术是一项关键工艺,其操作流程的精确性和高效性直接影响到飞机结构的稳定性和安全性。

协作机器人通过高精度的视觉识别系统对螺栓安装位置进行定位,视觉系统通常采用高分辨率摄像头和先进的图像处理算法,能够在复杂的环境下准确识别螺栓孔的位置和角度。根据相关研究数据,现代协作机器人的视觉定位精度可达到 $\pm0.02\text{ mm}$,这一精度远高于人工操作的误差范围(通常为 $\pm0.1\text{ mm}$)。

在定位完成后,机器人会根据预设的程序调整机械臂的姿态,确保螺栓与安装孔的对准。在这一过程中,机器人会通过力传感器实时监测螺栓与孔壁的接触力,避免因过大的压力导致部件损坏^[6]。协作机器人在螺栓安装过程中施加的力可以精确控制在 $5\sim10\text{ N}$ 之间,这一范围既能保证螺栓的紧固效果,又不会对部件造成损伤。

在空客 A350 飞机的发动机吊架装配车间,库卡 LBRIiwa 协作机器人承担着关键的螺栓安装任务。该机器人配备了高精度扭矩传感器,扭矩测量精度可达 $\pm0.05\text{ N}\cdot\text{m}$,以及分辨率为 0.1° 的角度监测系统,确保对螺栓安装过程的精确控制(见图 2)。

协作机器人在螺栓紧固过程中采用了智能扭矩控制技术,传统的螺栓安装主要依赖人工操作或简单的电动工具,容易出现扭矩不均匀或过紧、过松的问题,而协作机器人通过集成高精度扭矩传感器和自适应控制算法,能够实现扭矩的精确控制。

在安装过程中,机器人会根据螺栓的规格和材料特性,自动调整扭矩输出,确保每一颗螺栓的紧固力都符合设计要求。在飞机机翼装配中,不同位置的螺栓可能需要不同的扭矩值,协作机器人能够根据预设的参数自动切换扭矩模式,确保安装质量的一致性^[7]。

协作机器人还具备实时数据记录功能，能够将每一颗螺栓的安装参数（如扭矩值、安装时间等）上传至数据库，为后续的质量追溯和工艺优化提供数据支持。

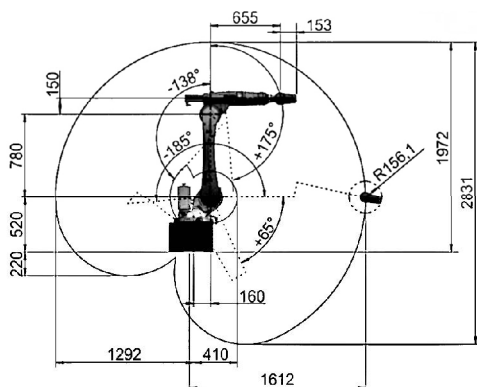


图2 LBRiiwa 协作机器人螺栓安装作业

3 协作机器人在飞机部件装配中的应用展望

3.1 提高装配效率与精度

随着科技的不断进步，协作机器人的硬件性能与软件算法将持续升级，更先进的运动控制技术能够让机器人的动作更加敏捷、精准，减少装配过程中的定位时间与误差。新一代的伺服电机与高精度减速机，可使机器人的重复定位精度达到亚毫米级，提升了部件对接的准确性^[8]。优化的路径规划算法能根据装配任务的复杂程度，自动生成最优的运动轨迹，避免机器人在操作过程中出现不必要的动作，缩短装配周期。在大型飞机机翼装配中，通过协作机器人的精准操作，能将原本需要数小时的装配时间缩短至数分钟，并且装配精度远超人工操作，确保了飞机结构的稳定性与可靠性。

3.2 推动智能化制造水平

未来，协作机器人将深度融合人工智能、物联网等技术，实现装配过程的全自动化与智能化管理。借助深度学习算法，机器人能够对装配过程中的数据进行实时分析，自动识别装配缺陷与潜在问题，并及时进行调整^[9]。通过物联网技术，不同的协作机器人之间以及机器人与其他生产设备之间可以实现数据共享与协同作业，构建一个高度智能化的装配生产线。在飞机发动机装配车间，机器人可以根据其他设备传输的零部件参数信息，自动调整装配策略，实现整个装配流程的无缝衔接，大大提高了生产的智能化水平与协同效率。

3.3 降低生产成本与安全风险

协作机器人的维护成本相对较低，使用寿命长，随着技术的成熟，其采购成本也在逐渐下降。在安全风险方面，协作机器人的安全防护机制不断完善，能够有效避免因人为操作失误导致的安全事故^[10]。通过配备先进的碰撞检测传感器与紧急制动系统，当机器人感知到与人员或其他物体发生碰撞危险时，能立即停止动作，保障人员和设备的安全。在飞机装配这样的复杂环境中，协作机器人的应用降低了安全风险，为企业创造了更安全的生产环境。

4 结束语

通过对协作机器人在飞机部件装配中的应用技术研究发现，协作机器人在提高装配效率、精度和安全性方面具有优势。协作机器人的轻量化设计和友好交互性使其易于控制和操作，保障了操作人员的安全。感知与适应能力则使机器人能够灵活应对各种装配环境，实现高效的人机协作。在飞机部件装配过程中，协作机器人通过精准识别与抓取技术、柔性安装技术和螺栓安装技术等，实现了部件的精准定位和装配，提高了装配质量和效率。

参考文献:

- [1] 刘春锋,曹硕,赵爽,等.移栽式机器人制孔系统在飞机装配中的应用[J].教练机,2021(04):39-45.
- [2] 许波,赵超泽,张玉美,等.飞机起落架全方位移动装配机器人设计与研究[J].航空制造技术,2021,64(05):60-67.
- [3] 刘艳梅,吕笛.飞机装配机器人制孔路径规划与算法研究实现[J].机电工程技术,2022,51(10):61-64.
- [4] 吴志鹏,赵安安,郑炜,等.面向复杂大部件装配的多机器人制造系统运动规划研究进展[J].机械科学与技术,2021,40(06):969-978.
- [5] 沈烨,贾保国,田辉,等.大部件装配中的MRE被动柔顺装置研究[J].现代制造工程,2024(09):34-39.
- [6] 李海伟,潘新,张辉,等.自动制孔技术在某飞机装配中的应用研究[J].航空制造技术,2021,64(21):84-89,95.
- [7] 王斌,张继文,吴丹.基于机器人建模的航空装配测控仿真分析方法[J].清华大学学报:自然科学版,2024,64(04):724-737.
- [8] 董松,郑侃,孟丹,等.大型复杂构件机器人制孔技术研究进展[J].航空学报,2022,43(05):23-40.
- [9] 魏显奎.机器人自动制孔系统应用研究[J].机电信息,2021(20):19-22.
- [10] 张振国,毛建旭,谭浩然,等.重大装备制造多机器人任务分配与运动规划技术研究综述[J].自动化学报,2024,50(01):21-41.