



## Robotic Era for Aircraft Assembly

北京航空制造工程研究所 邹方



邹方

工学硕士, 自然科学研究员, 计算机数字控制专业, 就职于北京航空制造工程研究所。多年从事数控系统研制和应用工作。曾获部级科学技术进步二、三等奖; 主持开发了我国首台具有自主知识产权的“柔性多点拉形模具”, 并获得发明专利多项; 目前承担了多项“飞机数字化与柔性装配技术”基础预研课题, 并开展该领域的系统控制与集成技术的研究工作。

\* 十一五总装预研“柔性装配技术”项目资助。

机动、灵巧的自动化设备为飞机柔性装配提供了另一种选择。它舍弃了整体精度而追求局部精度, 并充分利用了飞机部件自身特点, 而且质量轻, 更经济, 可以分配到作业现场或依附到飞机部件上, 不需要大的安装场地; 而且设备的造价变得低廉许多。

国外从 20 世纪 90 年代, 就已经大规模开展飞机的自动化装配技术的研究。根据飞机自动化制孔的特点和要求, 国外著名的飞机装配设备制造厂家生产了许多大型的面向飞机装配的自动化设备。在飞机装配中, 用户定制的机床是根据飞机结构特定的装配要求制造出来的。全作业空间的高精度造就了设备的大型化、高刚性, 但存在质量大、设备笨重、用途太专一的缺点。这些设备有一个共同的特点: 体积庞大、造价昂贵、维护困难, 并且需要配套固定型架或自动托架, 其投资也是巨大的。

由于飞机的装配构件必须进入设备之中, 造成装配件的频繁上下载, 零件多次搬运也不可避免, 此外, 该设备占地大, 厂房面积利用率低, 增加了产品的造价, 同时设备操作人员的培训费用也很高。

自动化装配随着零件尺寸的增大而受到实际限制。有时由于成本原因, 无法使用常规自动化设备来装配大零件, 最后不得不退而采用手动连接大型装配件。机动、灵巧的自动化设备为飞机柔性装配提供了另一种选择。它舍弃了整体精度而追求局部精度, 并充分利用了飞机部件自

身特点,而且质量轻,更经济,可以分配到作业现场或依附到飞机部件上,不需要大的安装场地;而且设备的造价变得低廉许多。

航空制造业广泛使用定制的数控机床进行飞机结构件的加工、制造、装配和质量检验。由于现有机器人刚度和精度低、负载小,使得传统的机器人在飞机装配上的应用水平低。未来机器人需要高精度来满足飞机工件要求、需要柔性来适应不同产品的要求。

航空产品的制造和维护与汽车不同,表现在产品尺寸大小、制造过程精度、产品数量、控制水平不一样,飞机零件、作业通道、结构尺寸大,并且复杂度高,需要作业通道和人的互动。

## 机器人特点

70年代初,全球开发了第一台电气机器人,这项技术在恶劣环境下替代了人工劳动,比如点焊、弧焊和搬运。其目的就是创造一个大的作业空间和巨大的柔性。这些应用场合不需要高精度和平稳性。为了推广应用该技术,采用了串联技术,即每根轴依次连接而成。这项技术的优势在于,可以各个方向移动机器,获得需要的柔性和作业空间;然而,其缺点是没有足够的精度和刚度。

总之,机器人灵巧有余,精度不足。其特点表现为:灵巧,柔性好;精度低,负载能力弱;应用广泛,用途多;体积小,机动性好;环境适应性强,生产效率高;制造成本低,批量大;便于维护,服务成本低。

### 1 几种机器人定义

(1) 机器人工业协会(RIA): 机器人是可改变程编的多功能操作装置,其设计用来搬运物料、零件、工具、专用装置,通过多种程编运动完成多种任务。

(2) 日本机器人协会:

a. 人工装卸装置——具有几个

自由度,用来人工操作;

b. 固定工序机器人——类似固定自动化;

c. 变化工序机器人——类似程编自动化;

d. 归位机器人——人工示教,轨迹跟踪;

e. 数控机器人——操作者交付机器人完成系列任务,而不去示教他们;

f. 智能机器人——感知环境手段,不管周围环境变化,都能顺利完成任务。

机器人与自动化有密切的关系,体现3种层次:

(1) 刚性自动化: 同类型产品,大批量制造,采用固定的操作模式,且从不改变。

(2) 程编自动化: 多品种、中批量,可编程系统可以改变制造工序。

(3) 柔性自动化: 完善优化程编自动化,允许操作步骤快速重构和再编程,常视为“柔性机器人单元”,具有再编程/重组机器人改变工作单元功能。

### 2 应用领域

(1) 工业机器人: 弧/点焊、铣削/制孔、涂胶/密封、激光/水切割、研磨、去毛刺、攻丝、喷涂、装配。

(2) 材料处理(抓放): 堆垛、仓储装卸、零件归类、包装、芯片拾放、危品处理。

(3) 测量机器人: 目标识别、轮廓寻迹、检查、3D注册。

(4) 娱乐机器人: 动画人物、飞行模拟、机器人宠物。

(5) 服务机器人: 残疾人帮助、人工假肢、清扫吸尘、向导。

(6) 军事机器人: 拆除引爆装置、侦察机器人、无人机。

(7) 外科手术机器人: 钻孔、缝合、消毒、器械抓取。

毫无疑问,智能机器人已经是进入柔性自动化高境界的前哨与尖兵。支撑机器人的柔

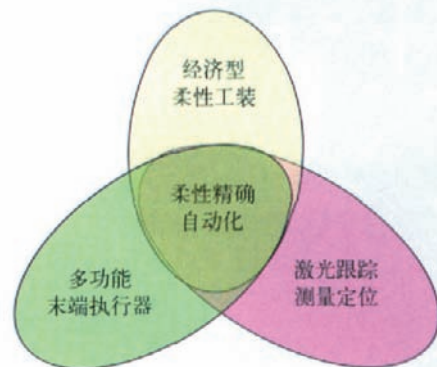
性精确自动化装配还有三大关键技术: 经济型柔性工装技术、多功能末端执行器技术、激光跟踪测量定位技术。

## 关键使能技术

要顺利将工业机器人引入到飞机的制造与装配中,必须解决机器人的精确定位问题。一般工业机器人的最高定位精度只能达到 $\pm 0.3\text{mm}$ ,远低于飞机装配的精度要求。而且其位置精度低,需要补偿。由于机器人作业空间自由度大,而飞机构件内部狭窄,不开敞。在机器人作业之前,需要模拟仿真。机器人作业的对象,需要固定好,由于数量大,成本要求低廉。解决上述难题,需要突破六大使能技术: 低成本可重构柔性工装技术、多功能末端执行器技术、激光跟踪测量定位技术、机器视觉图像处理技术、离线仿真编程技术、动态姿态补偿控制技术。

### 1 激光跟踪测量技术

采用了嵌入式控制,通过一个标准的计算机将机器人和激光跟踪仪集成在一起。TCP定位系统使用激光跟踪系统独立跟踪三坐标( $x, y, z$ )和3个方向( $i, j, k$ )。在钻孔末端执行器上安装了3个“猫眼”反射镜。第4个反射镜用于验证TCP的坐标转换。作为瞬时定位的参考系,这3个反射镜中的任何一个都能被跟踪。监视机器人的实时空间位置,确定它的绝对位置精度,实现飞机小



机器人实现柔性精确自动化装配的关键技术

批量装配的高精度自动化。它可以高精度测量位置与方向,用来监视机器人的位置。在激光跟踪仪的监控下,机器人可进行高精度位置定位。

除了三维激光跟踪仪,近年来出现的室内 iGPS 大尺寸测量也大显身手,优点突出,可以在整个作业空间内建立测量场,一旦布置了 iGPS,在现场添加几台机器人,却不增加额外的测量费用,减少固定工装费用,不像激光跟踪仪那样,需要测量中转站。

## 2 低成本可重构柔性工装技术

在飞机的制造和装配中,工装型架数量多、尺寸大、种类多,是一笔很大开销。机器人的进入,需要有一种可重构的低成本工装设计制造技术。工装采用模块化设计,完成动态模块的定位。通过移动各种动态模块,改变动态模块的格局,构建工装系统。基本模块有:单轴支撑单元、两自由度 CANNON 单元、三自由度的导轨模块、六自由度平台模块、球型关节模块。

## 3 多功能末端执行器设计制造技术

工业机器人只能作为一个柔性的移动平台,要完成不同的工作任务则需要安装不同的操作器。机器人本身的负载能力和刚度有限,要求执行器的质量要轻,尺寸要小。飞机制造装配的作业形式很多,执行器的功能要求多样化、系列化,在工作现场,要求高的工作效率,执行器要可更

换、便捷、制造成本低。其次,执行器需要好储存、少维护。

## 4 动态位姿补偿控制技术

离线的校准要利用一些重要的数据来生成静态校准参考模型。当机器人由于选择性的负载而发生偏转时,可预测出位置和方向误差,由此来精确构造模型。然后,在实际的加工循环过程中,利用这个模型作为参考系统来预测和补偿误差,这个更适用于负载不变的重复性过程。通过编程,将机器人移动到空间不同位置,同时记录每个位置,重新计算三脚架腿之间的夹角,并且将操作头转换到实际坐标系中,数据库保存、计算和补偿机器人运动信息。

## 5 离线仿真编程技术

机器人由于灵活、活动空间大、位置求解多,所以机器人的安全编程和校验是系统的重要组成部分。离线仿真能进行实际零件和 NC 程序的加工检查。在虚拟环境中检查零件程序,模拟机器人的动作和运行轨迹,验证其可达性,避免了干涉的发生。

## 6 机器视觉图像识别处理技术

该技术是实现机器人二次精确定位的关键,在实际应用中,一般采用激光扫描器确定基准点,实现质量控制自动化。如基于激光三角法测量是将激光柱投向检测的表面,画一条 40mm 长的激光线,包含了 1024 点。物体表面发射激光束,一个高分辨率的 CCD 相机(加装适当的滤波器和透镜)接受这些不同的点,一台专用的控制处理 PC 机来采集这些反射点。

## 机器人在飞机装配中的应用

飞机产品的全球化,使得许多小型航空供应商从事飞机部件装配。这些提供商拥有大量资本,工厂自动化

投资有保障,满足高性能与低成本要求。通常,这些供应商的能力有限,所以提高生产率、有效安排生产布局、缩小厂房面积是其中的关键。一次性组件生产,不仅无需构建完整部件,而且降低了厂房的要求。与低成本机器人自动化结合,形成了无与伦比的设计竞争力,创造了非常具有吸引力的解决方案。智能机器人凭借自身的优势一旦引入飞机制造业,其应用范围几乎能够涵盖飞机装配的各个方面:制孔、铆接,密封、涂胶,喷漆、打磨,对接、测量,搬用、检查,移动、焊接。

## 1 基于激光跟踪仪控制的机器人制孔

英国空客的自动化与机器人工程集团每年大约要钻 5 亿个孔,其中一半由手工来完成。一般的工业机器人对飞机制造环境而言,精度不够,许多应用的绝对位置精度为  $\pm 0.2\text{mm}$ 。空客公司找到了解决问题的方案,在航空领域引入了一个柔性低廉的机器人平台,推动减少手工操作,满足市场需求。

此机器人平台包括:2 台机器人,协同抬起一个大型机翼组件,在固定的位置上进行制孔和铆接;机器人负责机翼零组件孔的定位,按照 CAD 规定的机翼定位数据完成,能够实现高于原来 10 倍的精度作业。

## 2 机器人装配系统——ONCE

利用工业机器人的大批量、高产出,ONCE 机器人制孔系统作为 F/A-18E/F 副翼的蒙皮骨架的自动制孔、镗窝、孔探测的平台,拥有 5 个子系统:定位系统、工作头、监视系统、编程系统、零件固定的型架;每件有 20000 个紧固件,达到每月 14 件。一个月要完成 280000 个制孔;高质量、可重复,最大限度减少人工干预。

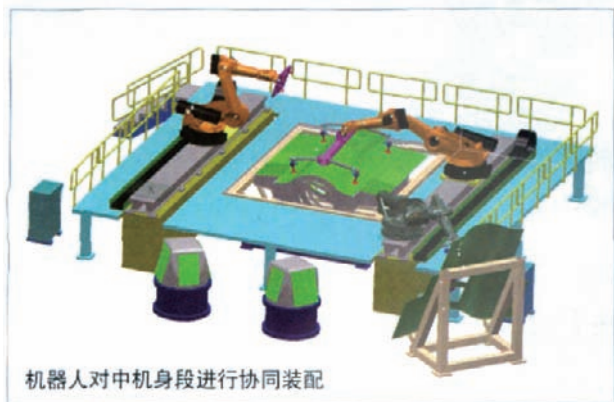
传统机器人精度低、负载能力弱,但通过位置与刚度补偿,可以使它变成一个有效的运动



平台。配置伺服控制的多功能末端执行器,孔定位可以保证在 $\pm 0.06\text{inch}(0.1524\text{cm})$ ,孔镗窝深度精度达 $0.0025\text{inch}(0.00635\text{cm})$ 。

### 3 自动制孔爬行机器人

Fatronik 公司研发了一种爬行机器人自动制孔技术,不管什么时候



需要工作,加工车架被放到即将装配的组件的位置,机器人通过它自己的真空吸盘固定在航空产品上。在机器视觉系统的帮助下完成位置坐标的自适应,在机器人工作空间内完成制孔作业。一旦完成这次作业,通过在工件上的移动或爬行系统,机器人可以移动并且重新自动定位到下一个工作空间。一旦整个工件的制孔作业工作完成,就可以从工件上把机器人取下来放置在储存站里。

### 4 自动化过程集成 TLD

自动化过程集成 TLD (TORRESLIGHTDRILL) 由西班牙 M.Torres 开发,它具有 5 轴制孔系统,用户模块化设计,视觉系统由 2 台视觉照相机组成,激光传感器和控制软件保证定位,可编程零件识别用于精确定位调整,8 个真空吸盘和真空供给,确保了 TLD 牢牢吸附于飞机零件表面,最大重量 55kg。制孔材料为铝/复材/钛,生产效率为 6~8 孔/min,制孔直径 6mm、夹层厚度 0~25mm、定位精度 $\pm 0.254\text{mm}$ ,制孔转速 100~10000 r/min、爬行步距 30mm、多种夹层材料编程参数、内置刀具润滑与冷却

系统。

### 5 机身壁板组件装配处理系统

组件处理系统使用 Comau S2 机器人,该机器人装备了可重新配置的终端操作器。这种终端操作器还安装了激光扫描仪,用来定位并测量工作台上的组件。这消除了必须把

部件准确放置这一要求,同时还使得部件的变形得到补偿,而且因为是组件的实际尺寸而不是假设的理想尺寸将被记录并使用。

### 6 蛇形臂机器人

自动化水平的提高会带来意想不到的收益,过多的可

重复的高生产率自动化过程替代了原有的手工技术性装配过程。密封和粘合过程将变成复材构件中至关重要的一环。对于未来飞机产品生产部门来说,这些促使了新的自动化解决方案的发展。此外,如果飞机生产采用了先进的自动化手段,飞机的维护和修理也需要新的工具和手段。蛇形手臂机器人的研发,会最终导致设计和过程的改变,为航空制造业创造相当的经济价值。未来结构件的检查口盖设计将越来越少和小,维护时间也相应减少。

## 应用实例

### 1 翼盒段制造

在线性导轨上布置 2 台协同机器人完成盒段的制孔/镗窝、搬运、装载、修整/加工和测量。系统采用了自适应导航系统精度控制,其末端执行器可以自动更换;系统具有监视控制表面,将主肋结构件装载到梁

上的功能。该系统已于 2007 年 8 月完成翼盒装配。

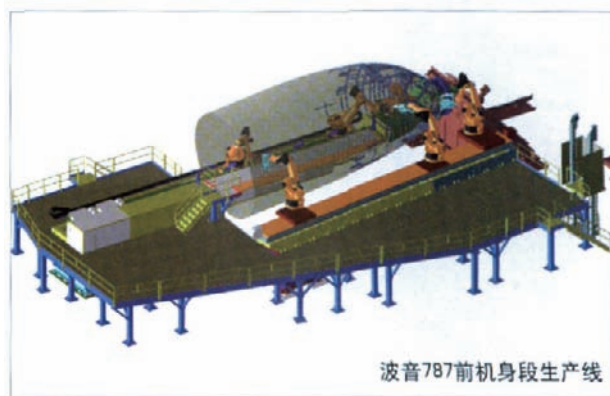
### 2 波音 787-41 段生产系统

该系统布置了 5 台机器人,其中机身外面有 3 台,内部有 2 台,系统完成机身的制孔与铆接。生产线上的机器人必须内外协调工作。机器人末端执行器具有制孔、镗窝、紧固件进给与插入和紧固件衬套孔强化等多种功能,制孔过程中要保证复材夹层的完整性,这就对系统的质量和可靠性提出了更高的要求。

## 几点建议

对飞机装配过程中每个环节进行认真需求分析,评估机器人应用的可行性,并制定切实完整的技术方案。选择军机和民机,进行示范工程试验研究,再逐步推广。

(1) 串联机器人技术已经很成熟,机器人可以向专业公司(KUKA、ABB、FANUC)购买。安装在机器人手臂上的操作器要本着自主研发的思路进行。



(2) 至于爬行机器人,是刚刚兴起的新技术,国外目前还没有工程应用。可以自主设计和制造,是个好的突破方向,意义重大。

(3) 离线程编与仿真,对于机器人来说,至关重要,一定要自主开发。

(4) 大胆启用新型的测量跟踪技术,例如 iGPS 技术,将测量系统与机器人连接起来,从而构成闭环控制。(责编 依然)