

# 机器人技术在航空工业中的应用

Applications of Robotics Technology in Aviation Industry

北京航空航天大学机器人研究所 毕树生 梁杰 战强  
沈阳飞机工业集团公司 杜宝瑞 冯子明



毕树生

北京航空航天大学机器人研究所所长,教授/博士生导师,美国 IEEE 会员,中国自动化学会机器人分会理事,中国机械工程学会生物制造分会理事,中国仪器仪表学会微纳器件与系统技术分会理事。承担国家自然科学基金、国家 863 计划项目、国家科技支撑计划项目等课题 10 余项,在国内外重要期刊及学术会议上发表论文 120 余篇。

在竞争日趋激烈的今天,成本和效率同质量一样关键,这就需要采用新技术、新的制造和装配理念、新的管理方法等。机器人技术正好符合精益系统和精益制造的理念,并已在汽车制造业及家电制造业得到了广泛应用,因此近几年在航空制造业中已开始看到机器人的“身影”。

在全球化经济的背景下,航空工业也面临着一系列挑战,降低飞机制造成本、提高飞机性能、加强飞机结构强度是所有飞机制造商共同追求的目标。在竞争日趋激烈的今天,成本和效率同质量一样关键,这就需要采用新技术、新的制造和装配理念、新的管理方法等。机器人技术正好符合精益系统和精益制造的理念,并已在汽车制造业及家电制造业得到了广泛应用,因此近几年在航空制造业中已开始看到机器人的“身影”。

随着机器人的位置精度、负载能

力的提高,以及位置和刚度补偿技术、离线编程工具、实时仿真技术、软件技术的发展,使得机器人可作为一种高效的平台,配以不同的末端执行器、工装、测量等子系统,构成各种不同的机器人柔性自动化系统。这种系统灵活性高,且成本低,能迅速适应产品的变化,所以受到了广大航空企业的关注。

2001 年 6 月 16 日,第 44 届国际航空航天展览会在巴黎开幕。此次巴黎航展揭示了世界航空发展的三大趋势:无人驾驶、超大运力和

广泛引进机器人。航展期间,各大参展商利用一天时间专门对航空工业引进机器人这一发展趋势进行了深入讨论。自此,KUKA、ABB、COMAU 等各大工业机器人公司开始调整自己的发展战略,纷纷将航空制造业作为工业机器人应用的又一主要领域。今天,机器人技术已在飞机大型零部件的自动钻铆、激光焊接、表面材料涂覆、复合材料加工、自动化装配中得到较广泛的应用,并已开始显现效益。

## 机器人技术在航空制造业中的应用

### 1 机器人自动制孔系统<sup>[1-2]</sup>

自动制孔是航空制造领域应用最广泛、最成熟的机器人技术,目前已有成熟产品出现。如 F-16、F-22、F-2 和 T-50 等飞机的垂尾壁板,C-130 飞机的梁腹板,波音 F/A-18E/F 超级大黄蜂后沿襟翼,F-35 飞机机翼上壁板,波音 B-747、C-17 等飞机的机舱地板,A380 机翼壁板等均采用了机器人自动制孔技术。被加工材料涉及钛合金、铝合金、碳纤维复合材料等。

机器人配合多功能钻孔末端执行器及位姿标定系统构成了机器人柔性钻削系统,具体结构形式有 3 种(不包括数控系统):(1) 柔性轨道机器人+制孔末端执行器+监测及标定系统;(2) 自主爬行机器人+制孔末端执行器+监测及标定系统;(3) 工业机械臂+制孔末端执行器+监测及标定系统。第 1、2 类机器人自动制孔系统适合于大型飞机的大型工件或部件的加工,要求工件表面相对平整且曲率变化较小;第 3 类机器人自动制孔系统适合于复杂表面的工件加工,制孔的位置精度较高。

机器人自动制孔系统的工作分工由机器人完成末端执行器的精确定位和定姿,由末端执行器完成钻头的旋转及进给,由监测及标定系统对

加工过程及定位精度进行实时测量,整个系统由中央控制器控制工艺顺序,跟踪数据(如刀具寿命和孔径)。末端执行器与传统的数控机床上的动力头相比,最大优势在于它具有压紧装置和实时力反馈装置;其次在于它的独立性和通用性:独立性表现在它本身就是个小型的制孔装置,利用它可进行一些切削实验;通用性表现在它可以配合不同的移动平台构成钻削系统。

机器人自动制孔系统的关键技术包括:

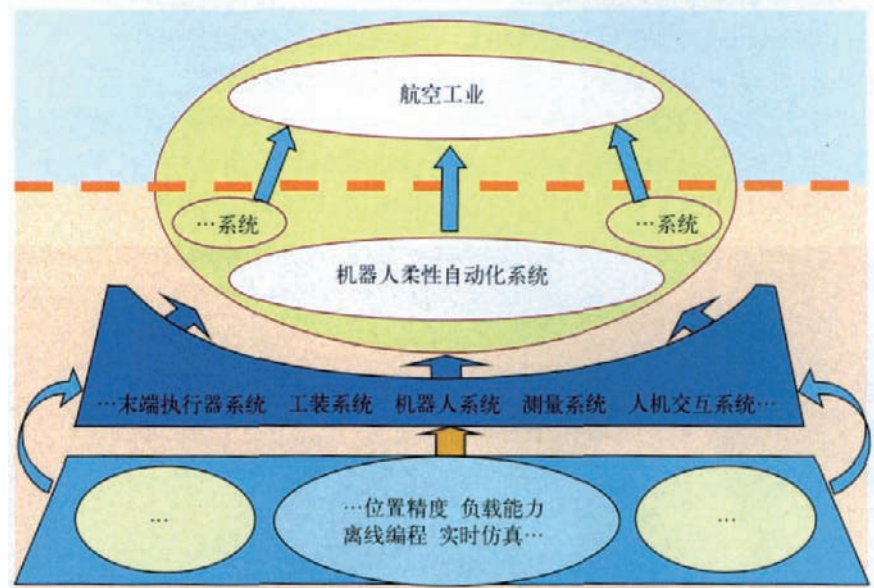
#### (1) 压紧力的设定。

钻削开始之前,机器人将末端控制器上的钻头移动到预定位置和姿态,由末端执行器的压紧装置与被

就使得机器人在钻孔时不用承受动态的力,而只承受一个静态的力,这种设计应保证压紧力大于切削力,以保证系统的稳定性和孔的质量。但这种设计也存在一个缺点,即会造成工件的变形。原因是在钻孔前必须先压紧,而此时作用在工件上的力很大。如何解决这一问题,可以作为未来的一个研究课题。

#### (2) 调整刀具和工件表面的垂直。

被加工件多是大型曲面,在到达指定位置后,需要调整钻头与工件的相对姿态,即保证钻头和工件的垂直。目前一般采用 4 个线性位移传感器(LVDT)或 4 个激光位移传感器来调整钻头和工件的垂直。如何



机器人柔性自动化系统关系图

加工工件接触,并施加一定压紧力。压紧力的主要作用包括:一是补偿重力对末端执行器角度造成的影响;二是消除叠层材料层与层间的间隙,防止层间毛刺的进入;三是使结构紧凑,增加系统的动态刚度。

目前,航空制造业正在应用的机器人自动制孔系统,其压紧力和钻削力是耦合的,这样的设计使得压脚上的力随切削力的增大而减小,而作用在机器人上的力始终是压紧力,这样

利用视觉系统或较少的位移传感器进行钻头的调姿(目的是降低成本,提高效率)也是值得深入探讨的关键技术之一。

#### (3) 位置精度补偿。

制孔的位置精度即法线精度受到机器人运动学模型、负载、安装方式、刚度、末端执行器的机械间隙、刀具的磨损、热效应等因素的影响。如何采用检测、标定、补偿的方式,提高机器人自动制孔的位置及姿态精度

也是制约制孔质量的关键问题。

## 2 机器人柔性平台<sup>[3]</sup>

飞机的壁板、尾翼、垂翼、舵板等均是复杂曲面,对这些工件进行钻孔、铆接、焊接、切割、涂料等加工操作时,必须要求工件表面与加工工具(钻头、焊枪、激光器等)垂直。有2种方法可实现这种相对位姿的调整:一种是将工件固定不动,将加工工具安装在工业机器人上,通过工业机器人的大范围运动调整加工工具的位置与姿态,使之与被加工工件表面垂直;第二种方法是将被加工工件安装在工业机械臂上,由机械臂调整被加工工件的位置及姿态,而加工工具可以采用传统的机床进行。这种加工系统可实现多工艺自动化,被称之为机器人柔性平台。由于机器人配备了测量设备,可实时确定夹具和工件的位姿,夹具几何结构的改变可在生产过程中被实时确定,避免了定期将夹具从生产过程中取出,因此可实现多过程自动化,缩短制品的生产周

期。

Airbus、KUKA、Metris 和 Delmia 4家公司联合开发了一种机器人柔性平台,用于完成空客某型号飞机工件的柔性加工。该平台的技术创新在于实现了METRIS K-Series Optical CMM测量设备和KUKA机器人的在线动态连接,使机器人实现了位置的闭环控制,提高了机器人的定位精度,再通过集成了Delmia's V5和KUKA's VRC的仿真软件,使得机器人程序的编制更准确更高效。同时还实现了测量设备在虚拟环境的虚拟测量,以使实际环境适应虚拟环境,使得机器人可实现自适应控制,这意味着机器人可以准确地补偿动态负载下的机器人变形、温度波动以及机械的无规则运动引发的定位误差。

## 3 机器人涂覆系统<sup>[4]</sup>

飞机的表面涂层(雷达吸波材料或防结冰涂料)质量对飞机寿命至关重要,尤其是涂层的厚度。厚度公差、

表面光洁度、气孔率、斜度的严格保证对于人工涂覆来说非常困难,而采用用机器人技术则能轻而易举地解决这些问题。目前,世界上最大的机器人涂覆自动化系统是由诺斯罗普·格鲁门公司研制Robotic Aircraft Finishing System (RAFS),它由3个固定在地面的机器人和一个可移动的机器人构成,用于B2轰炸机机体的表面涂覆。

机器人涂覆自动化的优势体现在以下几个方面:

(1) 涂覆的一致性。传统的人工涂覆,需要很多人员在不同区域进行操作,虽然使用的是同样的设备,但却难以保证这些人员具有相同的技术水平,这就必须在涂覆完毕后进行打磨处理,而打磨的费用非常高;机器人涂覆可有效解决这一问题,既保证了涂覆的一致性又控制了成本。

(2) 产品质量。机器人涂覆有效地消除了涂覆完的再打磨和材料中的气孔。

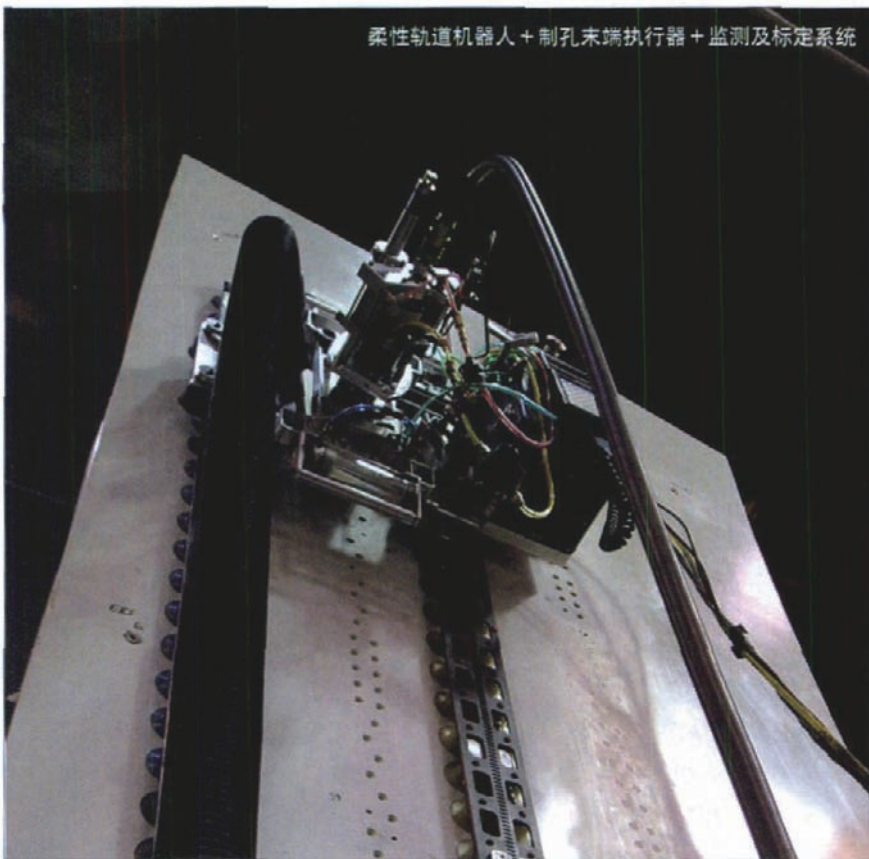
(3) 节省材料。机器人可以实现更为精确的表面涂覆,减少了材料的浪费。

(4) 环保和安全。机器人涂覆有效地降低了处理废料的成本,同时也保证了操作者免受材料粉尘的影响。

机器人涂覆系统占地面积大,要求机器人的数量多,属于大型系统集成,需要做好充分的规划;同时对单个机器人的工作空间、负载能力都有一定的要求。整个系统对机器人的离线编程和虚拟仿真技术要求高,因此在喷涂前需要做好一个合理的轨迹规划和姿态检验,以保证喷涂质量和工作效率。

## 4 机器人复合材料加工系统<sup>[5]</sup>

飞机上的复合材料主要是指碳纤维复合材料,它可使飞机重量更轻、强度更高、耐疲劳耐腐蚀性更好、制造及飞行成本更低。因此现代大型飞机及各式战斗机已开始广泛使



用复合材料,波音 787 的复合材料用量已占到结构重量的 50% 以上。碳纤维的编织、缝合、铺放、胶粘剂及密封剂涂层等需要设备具有较大的工作空间、复杂的运动轨迹及高度的灵活性,因此复合材料的加工给传统材料的加工方式提出了新的挑战,同时也为机器人技术的应用提供了契机。

需要强调的是,机器人进行复合

率,同时它能降低被连接件的重量。焊接技术已成为先进飞机研制不可缺少的支撑技术。将机器人应用到飞机焊接中,可以大大提高焊接速度和焊接质量,降低焊接结构的成本,降低复杂曲面的焊接难度,实现焊接的自动化。机器人可用于点焊、弧焊、激光焊、摩擦搅拌焊等。

摩擦搅拌焊是一种较新的连接



材料加工时,一般要求机器人末端执行器必须有快换功能,如在缝合复合材料时,需要用到 3 种不同的缝纫头,快换装置将缩短更换缝纫头的时间,同时还需要机器人可靠的控制 3 种缝合方法;另外,机器人还要为末端的缝纫头提供高的重复精度和运动协调能力,因为在线断或打结以及针尖严重磨损时,就需要机器人记住当前的位置,并在故障排除后能准确的回到先前发生问题的位置。

相比于机器人技术在其他产业的广泛应用,复合材料产业因传统方法主导而产生的矛盾,正随着机器人在各种工序中的出现而逐渐消失。

##### 5 机器人焊接系统<sup>[5-6]</sup>

在现代飞机制造中,焊接技术的应用越来越多。这种连接方法同铆接相比具有更低的成本和更高的效

方法,但焊接设备较笨重,需要较大的力和力矩,工作空间局多限于二维平面。随着机器人负载能力和刚度的提高,再加上机器人的灵活性,可对复杂的三维轮廓连接,因此机器人摩擦搅拌焊接技术在飞机制造业中的应用前景愈来愈光明。

机器人焊接系统关键在于机器人的离线编程技术和虚拟仿真技术。焊接路径是由大量的中间点构成的,采用离线编程将比传统的示教方法效率更高,焊接路径的规划对提高生产率具有重要意义;利用虚拟仿真技术可以优化焊接路径,使机器人的运动轨迹重复最少,同时可以检验机器人轨迹中是否存在奇异点或外界干涉。

##### 6 机器人装配系统<sup>[7]</sup>

“柔性装配”的概念已经融入航

空制造业,其中工业机器人技术是柔性装配中的主要设备之一。机器人柔性装配系统根据激光辅助定位系统提供的相对位姿关系,在视觉跟踪系统的监视之下,由中央控制器控制机器人完成输送、定位、铆接、螺钉连接等装配工作。工业机器人作为柔性装配系统中一个不可分割的部分,能有效提高装配效率和装配质量、降低装配成本。目前,在 F-16、F/A-18、C-130 等型号飞机装配中,已经看到机器人装配的身影,机器人工作单元主要用于装配系统中工件的输送、定位、制孔和装配。

机器人装配系统的核心技术有:

(1) 虚拟仿真。对整个装配环境和装配过程在虚拟的环境中进行仿真,避免实体装配时可能出现的问题而停下来诊断,节约时间,降低成本。

(2) 定位定姿。在装配之前,由激光干涉仪或光学经纬仪等对被装配工件、装配母体及机器人本身的相对位置及姿态进行标定,以便于机器人进行路径规划。

(3) 实时监视跟踪。由视觉及其他类型传感器实时监控被装配件与周边设备或装配母体之间的位置,并将信号实时发送给机器人,以免意外事故发生。

##### 7 机器人零部件搬运<sup>[5]</sup>

自主导引小车 (Auto-Guided Vehicle, AGV) 已广泛应用于汽车、家电、工程机械等工业领域。同理,由于飞机部件具有种类多、体积大、形状特殊等特点,部件的运输和移动也需要自主的辅助移动平台。作为飞机柔性装配系统中不可分割的一部分,机器人辅助移动平台,可以极大的提高飞机部件的运输和装配效率。

##### 8 机器人表面精整系统<sup>[8]</sup>

表面精整属于零部件的精加工范畴,工艺包括去毛刺、磨削、抛光等,传统人工作业方式容易引起操作者的疲劳,导致零部件的重修率高,

生产效率低,生产成本高。机器人表面精整系统的出现实现了这些工艺的自动化,提高了生产效率和工件的表面质量。

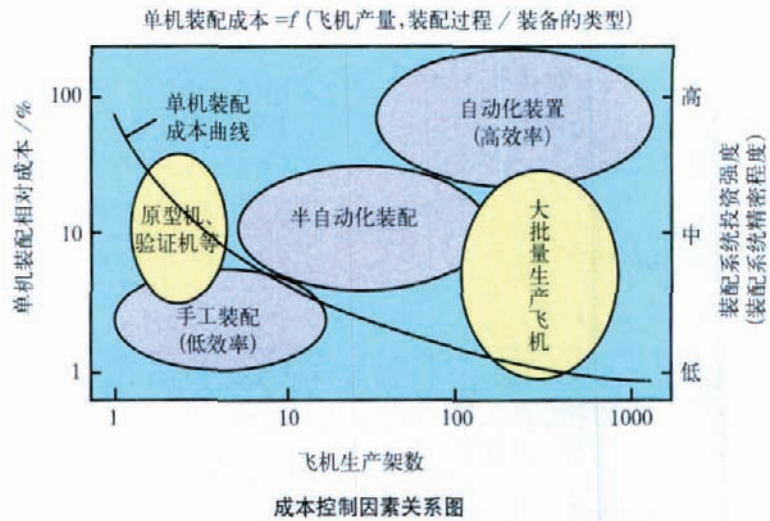
整个系统的关键就是利用反求工程对工件的三维轮廓表面进行建模,通过离线编程和仿真软件优化出合理的工作路径,然后根据这些路径迅速自动生成机器人的控制代码。在某些场合还要求对机器人实施力控制。表面精整工艺复杂,因为其工艺参数主要依靠试验确定,这就需要给使用者一个开放的系统,方便修改各种工艺参数,同时系统还能自动地根据这些变化重新生成机器人控制代码。

### 9 机器人测试及检测系统<sup>[5]</sup>

空客运输机 A400M 在不来梅气体动力试验中心进行机翼风洞测试时,根据测试的数据对机翼进行承载面的优化。测试过程是将气压或气流传感器分别安置在机翼的一系列测量点上,通过这些测量点上的压差中可推断出气流的角度,从而判断机翼承载面的合理性。传统的龙门

架式系统因结构复杂,测试传感器支撑轴太多,在测量空间内会造成太多阻力,从而影响到边界气流。采用机器人就可以避免上述缺点,它可以按

车英国公司将该机器人安装在工业机械臂末端,从而进行飞机壁板内部的监测、标准件紧固及密封等。它是一种非破坏性检测技术,维修人员省



照预定轨迹将传感器连续送至预定位置,系统灵活性好,重复精度高。

OCRobotics 公司研制出了一种“snake-arm”机器人。该机器人有 10 节,总长 1800mm,直径 90mm,内孔直径 15mm,有 27 个自由度,结构类似于象鼻子,灵活性很高。空中客

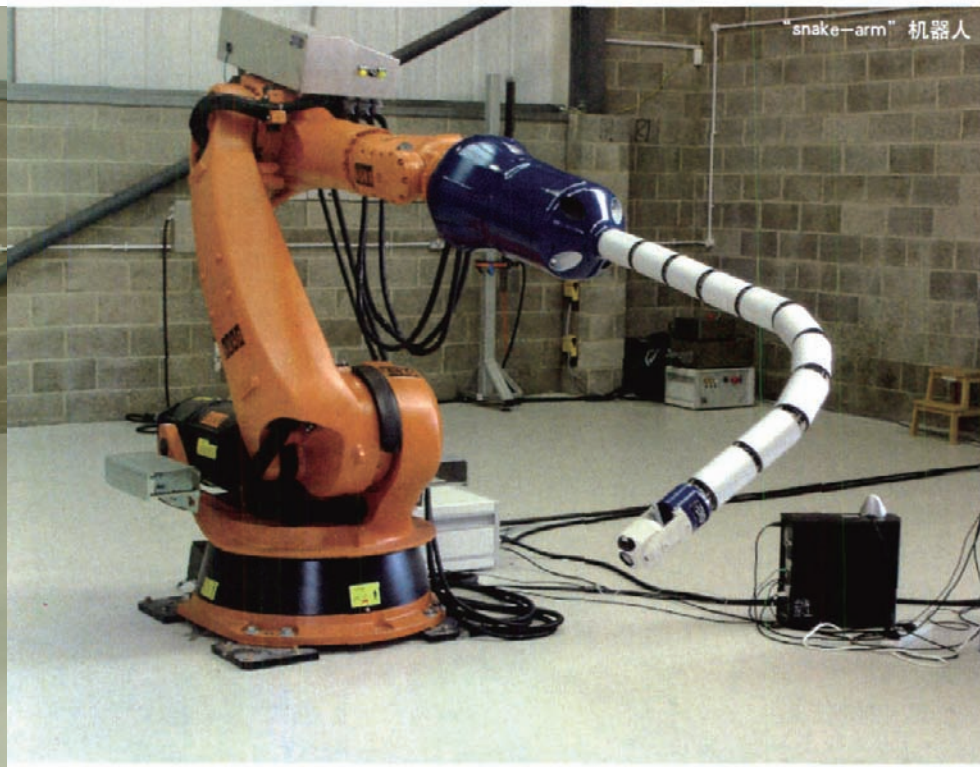
下了拆卸和重组飞机零件以进行检测的麻烦。该机器人除完成内部监测 / 标准件紧固、涂胶等工作外,也可用于飞机部件内腔的走(穿)线、吸屑及吸液、泄漏监测、喷涂焊缝跟踪及检查、去毛刺等工作。

澳大利亚 BAE SYSTEMS 公司研制的自主爬壁机器人可以通过负压吸附原理使机器人在飞机大型壁板、机翼、尾翼、垂翼等表面爬行,利用其携带的各类传感器检测工件表面的焊缝质量等。

另外,机器人技术在飞机零部件的胶接、表面处理、激光切割、钣金成型等方面也有良好的应用前景。

### 机器人技术在航空制造业中面临的挑战

新型材料的使用、柔性化制造的需求使得航空制造业非常期待机器人技术的融入,同时机器人位置精度的提高、负载能力的增强、实时仿真技术的高速发展也为机器人技术在航空制造业得到青睐提供了机遇。但就目前来说,和汽车及家电制造业一样,机器人技术要在航空制造业中得到广泛应用,还面临很多挑战,这



也是休斯公司、道格拉斯等飞机制造公司对机器人的使用采取谨慎态度的原因之一。

(1) 传统制造工艺面临挑战。我国航空工业主要是通过仿制国外先进产品发展起来的,未能及时开发与更新制造技术。原有的工装及部分加工工艺已成为机器人技术应用于飞机制造的绊脚石。

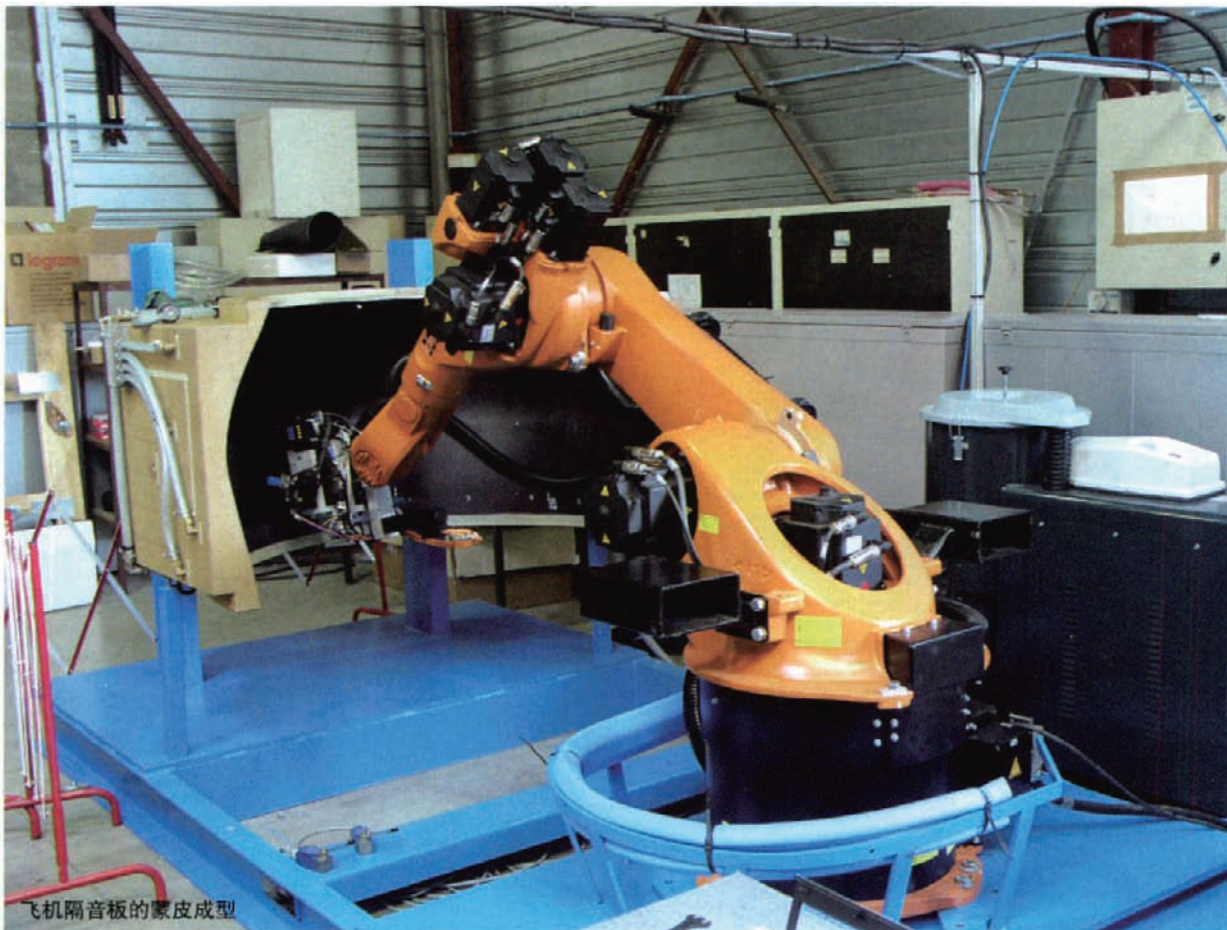
(2) 系统集成技术亟待提高。目前工业机器人及精密测量技术已相对成熟,但由于航空工业的特殊性,不同的加工工件及不同加工材料对机器人末端执行器的结构形式及性能要求千变万化,周边设备的布置方式也不尽相同,因此机器人、末端执行器、测试标定单元、周边设备等子系统的集成融合

难度较大,类似于流水线式的生产方式难以形成。况且,目前用于航空制造业的机器人技术集成商还没有,研制开发单位多集中于高校及科研院所。

(3) 现有机器人技术有待提升。现有工业机械臂主要是面向汽车、家电、陶瓷等行业,工作空间相对较小,负载能力较低。如果开发大范围、大负载的工业机械臂,又难以解决高精度与大工作空间的矛盾;另外,大负载大运动范围的工业机器人的示教问题也是航空领域面临的难题之一。

(4) 成本控制问题。在飞机装

配成本、产量、装配自动化水平、装配效率、装配质量(装配精密度)、装配系统投资诸因素之间存在一定的关系<sup>[9]</sup>。整个航空制造业的控制成本问题,不仅仅局限于装配成本。将机器人技术应用于飞机制造业必将带



飞机隔音板的蒙皮成型

动周边设备、工装系统及自动监测系统的提升,因而成本问题就会显现出来,而且自动化程度越高,成本投入就会愈大。如果只是小批量生产,飞机制造引入自动化技术并不是权宜之计。

### 结束语

2007年12月21日,我国国内第一架具有自主知识产权的喷气支线客机下线;2008年6月29日国产新型涡桨支线客机新舟600总装完成;2008年11月,中国航空工业集团公司、中国商用飞机有限责任公司成立,这标志着中国航空工业第一次

以全新的形象站在了世人面前,标志着中国航空工业踏上了注入现代企业制度基因、实施再造的全历程。不可否认,空客、波音等飞机制造商的飞机制造自动化普及率很高,这更加提升了他们的产品竞争力。

中国的大飞机正处于起步阶段,机器人技术在航空制造业中的应用也刚刚起步,北京航空航天大学机器人研究所、北京航空制造工程研究所等科研院所已同相关飞机制造企业联合启动钛合金、复合材料的自动钻铆机器人系统的开发,但离推广应用尚有距离。希望本文能起到抛砖引玉的作用,加速中国机器人柔性自动化系统的研制和发展。

注:本文有参考文献10篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(责编 金卯)