

# 工业机器人在飞机数字化装配中的应用

## Application of Industrial Robot in Aircraft Digital Assembly

海装驻天津地区军事代表局 秦瑞祥

北京航空制造工程研究所 邹冀华

**[摘要]** 通过对当今工业机器人技术的发展和背景的分析,表明该技术在飞机装配中的重要价值,并分别阐述出智能工业机器人在飞机装配中的八大主要应用环节。指出在发展工业机器人技术应用中的主要关键技术。并对其在航空领域的发展方向 and 趋势进行了展望。

**关键词:** 工业机器人 数字化 装配 集成 生产线

**[ABSTRACT]** Through the analysis of the industrial robot development and background, the technology importance in the aircraft assembly is shown, and its eight main application areas are expatiated separately. The key technologies of its application development are pointed out. At last, the developing direction and trend of the intelligent industrial robot are prospected in the aeronautical manufacture and assembly field.

**Keywords:** Industrial robot Digitization Assembly Integration Production line

随着当今飞机结构设计复杂性的增加及数字化装配技术难度的提高,越来越多地依靠人力手工完成的装配工作或其他复杂制造环节的工作已无法继续按传统的方式实现。而随着集成制造技术发展起来的工业机器人技术,越来越多地开始被航空制造业所关注和运用。

### 1 工业机器人技术的发展

工业智能机器人是一种能自动定位控制的操作机。能搬运材料、零件或操持工具。并且,这种“机械电子装置”正向着智能化方向发展。集成应用于当今飞机数字化柔性装配技术体系中,能适应多种复杂装配环节的工作,可以更加快速、准确地运动和作业。

自从 20 世纪 60 年代初世界第一台机器人在美国问世以来,机器人技术便表现出强大的生命力,迅速发展。但是,目前世界上对于机器人系统的开发,欧洲处于领先地位,机器人年营业额估计达到了 35 亿欧元,占

全球销售额的 33%。机器人自动化系统和相关服务,涉及大约 225 家公司,其年营业额超过了 130 亿欧元,并且以每年 7% 的速率在增长。

我国 20 世纪 80 年代,开始对机器人技术进行研究和开发,目前仍然没有形成完整的自主研发的实用性技术体系。特别是在航空领域,还没有针对飞机装配特定环节的专用机器人/机械臂,我国航空企业所使用的机器人系统绝大多数都是国外采购,国内并无该方面的自主研发设备和技术。并且,由于航空工业的高精度、高效率、低成本等要求,使得该系统技术还未能能在航空专用制造领域中被充分利用。在多自由度专用机械臂技术方面的研究,我国发展起步时间相对较晚,质量性能存在缺点,研究品种比较单调,实用性、专用性价值不高。未来国际上工程实用化工业机器人系统的发展主要包括以下 4 个方面:

(1) 结构的优化设计。结构更加灵巧,新的高强度轻质材料使用,进一步提高其负载/自重比,同时机构进一步向着模块化、可重构方向发展。

(2) 直驱式、多传感器融合、遥控及监控等技术的实用化运用。

(3) 智能化、并联机器人技术发展。多智能体(multi-agent)协调控制技术应用,实现多机械臂、机器人、人机结合协作工作。

(4) 针对高精尖的行业领域开发专用机械臂或机器人系统。

### 2 工业机器人技术在飞机装配中的重要价值

传统的工业机器人已在汽车行业大量应用,具有灵巧柔性好、机动性好、环境适应性强、生产效率高、成本低、便于维护、精度有限、负载能力弱等特点。而精度、刚度和负载的不足,使得其在飞机装配中的应用方面长期受到限制。但随着数字化技术和机器人技术的发展,机器人已演变成一种智能化的设备,出现具有自主性、智能性、移动性、作业性特点的智能机器人。智能机器人技术已能满足飞机装配的需求,作为一种灵巧、高柔性和较低成本的自动化装备,可克服传统数控机床的不足,集成应用于飞机自动化柔性装配系统中,能适应多

种复杂装配环节的工作,可以更加快速、准确地移动、定位、调整和作业(如制孔、测量、铆接、安装、涂胶、焊接等)。目前,智能机器人在国外飞机制造特别是装配领域的应用不断扩大。

在国内飞机制造特别是飞机装配中应用智能工业机器人技术,具有以下6点战略意义和价值:

(1)提高飞机制造的自动化、数字化和柔性化水平,克服手工装配的局限,实现新一代飞机结构的长寿命、高可靠性和装配质量稳定性要求,满足飞机设计性能技术指标;

(2)通过应用基于机器人的自动化装配系统,提高飞机装配的生产效率和产能,满足批生产要求,实现飞机产品的准时供应,提高市场竞争力;

(3)立足自主创新,突破和掌握自动化装配系统的关键技术,打破国外的技术封锁,形成具有自主知识产权的自动化装配技术体系,提高国内航空产业的国际竞争力;

(4)掌握自动化装配技术关键技术,在国际合作、技术/设备的引进和消化吸收上提供技术基础和保障,掌握主动权;

(5)为国内自动化装配系统的研制打下基础,节省引进费用;

(6)带动国内机器人、数字化技术、自动化装备制造等相关产业的发展,提高国内的技术水平,并可辐射并推动相关产业的高技术化。

由于机器人自身的优势和特点,其经济价值表现在下面11个方面:

- (1)节省场地费;
- (2)节省固定投资;
- (3)机动性好、灵活方便,免除了重复投资;
- (4)生产准备时间短;
- (5)更换不同的执行器,实现多用途;
- (6)维护费用低;
- (7)投资见效快,制造周期短;
- (8)投资回报率高;
- (9)安装调试时间短,生产投入快;
- (10)可重构性好,适于飞机的多品种、小批量生产;
- (11)可在恶劣环境下工作,大大减轻对人体的伤害,从而减轻企业的劳保花费。

### 3 智能工业机器人在飞机装配中的主要应用技术案例

针对飞机装配中的主要工作环节内容,可以分为壁板级装配环节、半壳体装配、部段舱段装配、舱段对接装配和翼身对接装配5大部分。因为机器人可以携带一

定重量的不同功用的末端执行器进行工作,因此这部分中很多工作内容已经或者将来可以借助智能机器人技术进行数字化装配改进。具体包括以下8项主要技术。

#### 3.1 自动化切割

切割机器人能满足切割零件高精度的要求,完成高质量工作,它包括火焰切割、等离子切割和激光切割等。另外,也可以实现对飞机壁板的自动化修边。飞机壁板件在加工成型时总要留有一定的余量,在装配前根据具体配合关系进行切边修整。采用工业智能机器人能够更高效、更便捷、更精准地完成零组件切边工作,如图1所示。从而代替传统的手工修边或笨重的切边机等。



图1 机器人为铝合金组件切边

Fig.1 Robot is cutting edge of Al-alloy components

#### 3.2 机器人自动制孔与连接技术

装配过程中的零组件装配、部件装配和部件对接装配过程都需要进行大量的制孔、铆接等连接工作。先进飞机装配技术已经有了革命性的发展和创新。机器人已经实现自动钻铆、焊接等工作,并逐渐应用于飞机装配中。在大型飞机机身壁板上进行连接,采用人工钻铆方式完成数以万计的紧固件制孔、铆接非常耗时耗力,而采用机器人带动钻铆末端执行器,或采用爬行机器人可以轻松实现,并且效率是人工的6~10倍。

现代飞机大量采用复合材料、钛合金等难加工材料,大型飞机对大尺寸孔的制备精度提出了更高的要求,因此普遍采用自动化制孔技术以满足结构的长寿命、隐身性和互换性的要求。如图2、图3所示,机器人自动制孔系统可用于壁板、翼盒、舱段及大部件对接等方面。

自动化连接按方式分为3种:机械连接、焊接和胶接。图4中为机器人完成发动机短舱上的焊缝工作根据连接对象又可分为零组件的连接、部件的组装及对接总装。对于机器人而言,只需更换一组末端执行器,略微修改工作运动指令程序,即可轻松实现多种连接工作。



图2 串联机器人制孔  
(图为波音787-41段中机器人辅助机头/前机身装配)  
Fig.2 Series robot drilling

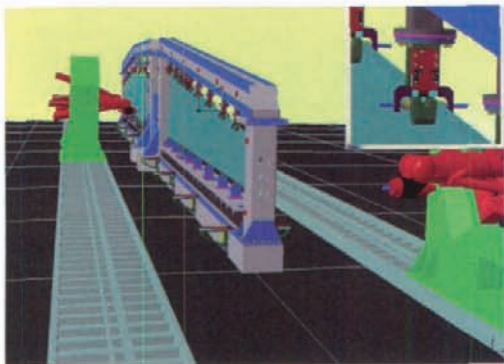


图3 并联机器人自动制孔  
Fig.3 Automatic drilling of parallel robot

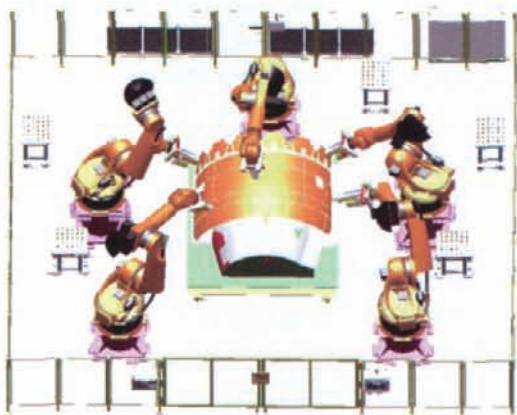


图4 机器人完成发动机短舱上的焊缝工作  
Fig.4 Robots complete the welding on the engine nacelle

### 3.3 测量辅助机器人数字化装配定位

对于占飞机制造工作量 50% 以上的装配工作而言,除了钻铆连接这项重要工作,就是精确定位问题了。现在,可以借助数字化技术及自动化设备来辅助完成。如采用先进高精度测量设备和工业机器人相结合的柔性夹持定位系统。

数字化光学设备以激光跟踪仪为代表,包括激光雷达、数字摄影照相机、iGPS 室内测量系统等。国外各大飞机生产厂商通过对这些技术不断开发,精度已经基本保证在 0.01mm/m 范围内,甚至达到了 0.005mm/m。

对小范围内的零组件的定位,可借助机器人结合测量设备来实现。测量设备可以弥补机器人自身定位精度不足的问题,即在机器人或所夹持工件上设置关键测量点,用不同的高精度光学测量设备对其运动状态、位姿进行监控,机器人按计算的运动轨迹将被装配工件移动到位。如波音 787 的 D-NOSE 组件在钻铆机上就是采用机器人进行搬运的,在零件的定位面上设置几个激光扫描靶标来辅助定位,如图 5 所示。

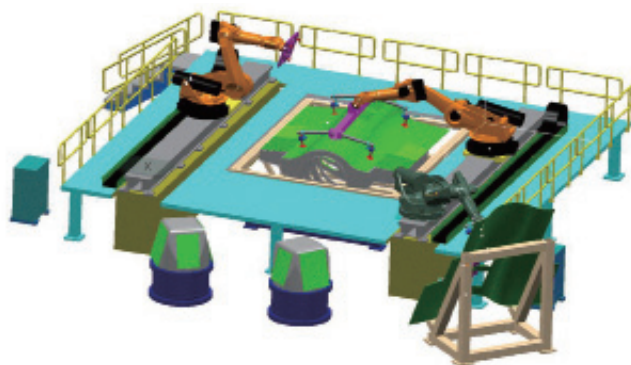


图5 F35后机身壁板用机器人进行定位移动  
Fig.5 Positioning and moving of F35 rear fuselage by using robots

另外,飞机组部段会经常在整个厂房内或者是较大空间范围内进行搬运,对于现代化数字化工厂来说,这个工作极为重要。因为只有高效、快速、合理地组织飞机组部件的调配,才能符合精益制造的原则,达到制造装配的利益最大化。

采用机器人进行搬运和移动飞机产品零部件到准确的装配位置,不仅提高了装配移动定位的准确性和自动化程度,还大大提高了装配制造的效率,节省了人力物力。这已经在波音 787、A380 等项目上使用。借助成熟的 AGV 车或者气垫车设备安装上机器人手臂,并借助 iGPS 导航,可以迅速达到指定位置,准确抓取产品组部件运送并安放在目标位置点,如图 6 所示。

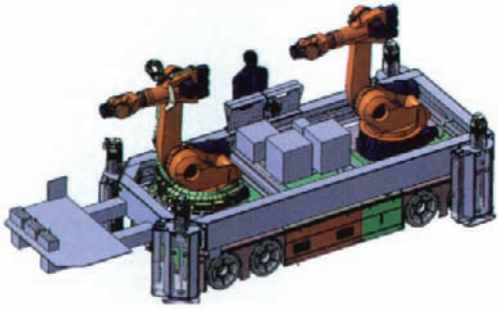


图6 AGV车和机器人手臂组合使用

Fig.6 Combining application of AGV and robot arms

### 3.4 机器人检测、探伤

机器人在检测方面应用也很广泛。第一,进行产品结构的检查(如孔径和外形检测),如图7所示。第二,用于工件内部的检查(如无损探伤),具有速度快、准确度高等特点。第三,由于其可携带多种末端执行机构,因此可以安装测量头(非接触式光学反射镜或接触式探头等),对复杂、隐蔽的产品空间进行测量。这对于具有多种复杂结构零件的产品是极为有用的,如对发动机进气道的测量、安装、检验等。

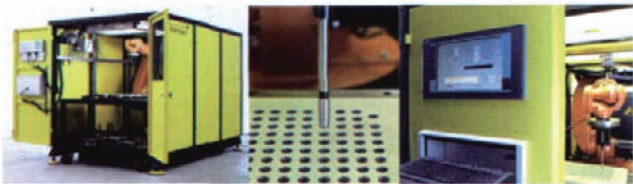


图7 机器人孔检测

Fig.7 Hole inspecting by robot

### 3.5 喷涂

采用智能工业机器人进行多种喷涂工作在制造业已较为广泛。除在汽车、造船业应用外,在航空发动机产品、隐身战机机表材料喷涂等领域也大量使用,具有诸多优势:可以减少喷枪数量30%~40%,提高喷涂速度;操控容易、准确,操作范围广、动作灵活,特别是喷涂较复杂的工件;自动喷枪雾化佳,减少了涂料过喷量,安全防爆设置保证事故隐患的排除。

美国B-2隐形战机的涂覆工作是在加州帕姆代尔的诺·格公司安蒂洛普谷制造中心进行的。考虑到B-2的大尺寸因素,采用的机器人喷涂系统是目前世界上最大的机器人喷涂系统之一,精度可达百万分之一英寸(1英寸=25.4mm)。该系统所包含的4个机器人可提供结构所需的每英寸厚度上千层的涂层。安排每台独立控制的机器人喷涂B-2的某一部分。

### 3.6 自动注胶

在航空制造业中,伴随着钻铆连接等工作发生的,

就是涂胶、注胶的工作。由于飞机气密性的严格要求,每个孔和缝隙处都必须进行注胶和涂密封胶。工作量相当大,而且当钻铆、对接等装配工作自动化之后,如果还采用人工涂胶,不仅效率得不到提高,还浪费了人力物力。采用工业智能机器人后,使涂胶和点胶的工作效率显著提高,并大幅降低了人工成本。而且现在机器人造价也越来越低,一般1台机器人在正常维护下至少运行10年,而按1架飞机的涂胶工作量和年产十几架来算,不用1年即可收回成本。随着大量全自动化涂胶技术的兴起,机器人涂胶系统将具有更加广范的市场前景和发展潜力。

### 3.7 自动化打磨

飞机制造和装配中很多零件都要求高精度制造,其中包括表面打磨和抛光等,工业智能机器人进行这方面的工作具有独特的优势。例如,飞机发动机叶片中一道重要的工序就是表面打磨、抛光,对于外形尺寸重要的零件也要进行一定的表面打磨工作。打磨机器人具有定位精度高、复杂路线设定、打磨受力可控和可在危险环境下持续工作等优点。因此,国外飞机制造过程中已经开始大量使用打磨机器人进行辅助制造和装配工作了。如图8是一台KUKA打磨机器人在对叶盘进行打磨。



图8 打磨机器人

Fig.8 Polishing robot

### 3.8 机器人数字化柔性装配线平台

在飞机总装时,国外各大飞机制造公司均采用了自动化对接装配系统来代替大型的固定装配型架,主要由计算机控制的自动化定位器、激光测量系统(激光跟踪仪、激光雷达或iGPS系统)和控制系统组成,同时,也集成应用了智能工业机器人于连接部位的装配工作上。如图9中,机器人技术可以在对接装配中辅助进行精确定位、装夹、连接、固定、检验等多种工作。这种集成了智能机器人数字化技术的对接平台系统大幅度提高了机体的装配质量,并且通用性强,能够适应不同尺寸的机身、机翼结构,节省大量装配工装。

在世界航空制造业飞速发展的过程中,以上各方面的智能工业机器人技术可以进一步集成,从而形成一套较为完整的、可用于飞机部装或总装的数字化装配生产线。这已逐渐成为新型飞机制造技术先进性的标志和闪亮的市场卖点。



图9 机器人辅助数字化装配平台  
Fig.9 Robot-aided digital assembly platform

#### 4 关键技术

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。一般工业机器人最高的定位精度只有 $\pm 0.3\text{mm}$ ,低于飞机装配的精度要求。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,需要工装很好地固定好,由于数量大,成本要求低。在航空飞机的制造和装配中,工装型架数量多、尺寸大、种类多,是一笔很大的开销。机器人的进入,渴望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。工业机器人只能作为一个柔性的移动平台,作什么,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,首先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,执行器需要易储存、少维护。机器人由于其灵活,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,避免干涉的发生及在屏幕上程序运行的全过程。综合分析,可分为8个方面的关键技术:

(1) 机器人装配系统总体设计技术;

- (2) 飞机复杂结构机器人装配数字化工艺设计技术;
- (3) 多功能末端执行器技术;
- (4) 低成本可重构柔性工装技术;
- (5) 数字化测量辅助机器人系统高精度定位技术;
- (6) 机器人装配系统集成控制技术;
- (7) 机器人装配离线仿真编程与仿真技术;
- (8) 机器人装配系统数字化移动技术。

#### 5 发展与展望

当前,国内外航空技术发展迅猛,特别是国内各大飞机项目已紧锣密鼓展开,军用运输机、民用客机等国家重大项目要求采用更先进的飞机制造技术与国际接轨。工业机器人技术在快速发展这方面表现得尤为突出。一方面,国外在该类项目上的应用已达到实施阶段;另一方面,我国现代飞机制造中的诸多环节都可能应用到先进机器人技术。目前我国各主机厂还普遍以手工装配为主,在自动化装配方面对机器人的需求快速增长,国外各机器人厂商,纷纷开展了一系列的活动,面对如此巨大的市场,我们应该抓住机遇迅速进入市场,以我国重点机型项目为依托,加快、加深工业机器人技术在飞机制造和装配中的应用。以掌握关键技术为中心,从机器人集成技术开始进入工业机器人市场,并掌握自主研发能力和知识产权,在航空制造领域占据技术主导地位。

在以典型飞机结构件自动化和数字化装配为重点的成功研发和应用基础上,可以考虑将各个环节的机器人技术串联起来,形成一条机器人自动装配或制造生产线,将飞机产品的装配移动、调整定位、装夹、钻孔、涂胶、铆接、检漏、对接和搬运等一系列飞机装配环节通过机器人技术联系起来,形成一个智能化、自动化、柔性化程度较高的数字化装配线。同时,还可将这样的技术和生产线向飞机制造的其他阶段推广,从而带动整个飞机制造过程的全价值链的扩展和提升。

当形成成熟机器人制造、装配生产线时,先进机器人技术代表的是更高级别的数字化和自动化程度。将其进一步应用于飞机制造工程各个领域和工作环节中,将使得飞机制造和装配也能像其他一些自动化程度较高的工程行业一样,机器人工作有序、高效、快速。另外,先进工业机器人技术和高自动化装配生产线在航空制造业中的应用经验也可为其他大型制造业(如船舶、航天等)所借鉴,提高其数字化和自动化程度,并且会带动更多的数字化、自动化技术的发展,因而具有更为深远的意义和广阔的发展前景。

(责编 小城)