

# 机器人在航天装备自动化装配中的应用研究

## Research on Application of Robot in Space Equipment Automatic Assembly

北京航星机器制造有限公司 黎 田 胡晓雪 姚 为 陈绍勇

**[摘要]** 通过阐述航天装备传统人工装配方式的不足,提出了工业机器人装配方式的重要价值。简要介绍了工业机器人在国内外航空领域的应用现状,分析了航天装备在机械机构、系统组成、产品种类细分程度等方面的特点;针对航天装备装配过程中效率较低的工序,提出了工业机器人应用的研究思路与方向,并列出了需要突破的4项关键技术。最后,对机器人在航天装备自动化装配应用中的发展方向和趋势进行了展望。

**关键词:** 航天装备装配 工业机器人 串联机器人 并联机器人 自主移动机器人 机器视觉

**[ABSTRACT]** Through specifying deficiencies of traditional manual mode of space equipment assembly, the important value of industrial robot assembly mode is proposed. Meanwhile, application status of robot in aviation field at home and abroad is introduced. The characteristics of structure, system composing and product species of space equipment is analyzed. According to inefficiencies of working procedure during space equipment assembling, research ideas and direction of robot application is proposed. The four key technologies needed to be breakthrough are enumerated. In the end, developing direction and trend of robot application in space equipment automatic assembly is prospected.

**Keywords:** Space equipment assembly Industrial robot Serial robot Parallel robot AGV Machine vision

航天装备主要包括运载火箭、各类卫星等。运载火箭等航天装备通常为筒状结构,本文主要研究对象为中小型筒状结构航天装备。这类装备的装配通常包括部装和总装两个环节,部装主要完成舱体口盖的修配、托板螺母及支架的铆接、钻孔、攻丝等工作;总装环节主要完成弹上成件的安装、舱段对接以及总装测试等工作。

目前,国内航天装备的装配大量依靠人工操作,产品装配的质量、装配精度及可靠性、装配周期与操作工

人的经验有较大关系,效率低下。随着新型航天装备对装配精度以及研制周期的要求越来越高,这种生产方式显然已经很难适应未来的发展趋势。

工业机器人的应用,不仅可以提高产品质量与产量,而且对于提高产品生产效率、节约材料消耗以及降低生产成本有着十分重要的意义。随着机器人技术的不断发展,机器人的智能化水平以及运动精度的逐步提高,以及各行业尤其是航空工业对机器人应用经验的不断积累,使得机器人技术在航天装备装配中的应用成为可能。

### 1 工业机器人在航天装备装配中的重要价值

传统的工业机器人在各行业的应用给工业机器人在航天装备装配中的应用打下了基础。将工业机器人应用于航天装备的装配生产,具有重要价值,具体如下:

(1) 提高航天装备装配效率,缩短航天装备生产周期,实现航天装备的快速交付。

(2) 减少航天装备生产过程中人工因素的介入,提高航天装备装配精度与自动化水平,保证产品装配质量一致性,提高交付航天装备的可靠性。

(3) 通过对多机器人协作、机器人手眼视觉、机器人自动导航、车间自主定位等技术应用的研究,为航天装备柔性化智能生产车间建设打下技术与经验基础,以实现未来多型号航天装备的自动化混线生产。

(4) 掌握工业机器人技术在航天装备装配中的应用技术和经验,为拓展工业机器人在航天科技工业中的应用做好技术储备。

### 2 工业机器人在航空及航天领域的应用现状

随着工业机器人绝对定位精度、负载以及结构刚度的不断提高,其灵巧、高效、柔性好等特点吸引了国外各大飞机制造公司,纷纷开始从事机器人自动装配的研究。2001年,波音和 Electroimpact 公司合作研制了一套 ONCE 机器人自动制孔系统用于 F/A-18E/F 战斗机副翼蒙皮骨架的自动制孔、镗窝、孔检测等操作<sup>[1]</sup>。2009年,德国宝捷(Broetje)公司为欧直公司研发了一种新型

生产单元,用于在单通道飞机货舱门内部结构中进行实心铆钉的安装<sup>[2]</sup>。

近年来,国内各航空主机制造厂也纷纷与高校、研究所等展开机器人数字化柔性装配的应用研究。2010年,北京航空航天大学与沈飞合作研制了由ABB标准工业机器人和自主设计的末端执行器组成的机器人自动钻孔系统。2010年,成都飞机工业(集团)有限责任公司(以下简称成飞)设计了一套由工业机器人、地轨和钻孔动力头组成的智能钻孔系统用于壁板类部件/组件/零件自动化装配<sup>[3]</sup>。2012年,南京航空航天大学与成飞针对飞机机翼部件自动制孔需求,合作研制了基于KUKA工业机器人的自动钻孔系统<sup>[4]</sup>。

在航天领域,2011年,北京星航机电设备厂针对航天产品自动对接装配技术应用的可行性进行了分析探讨,并制定了航天产品自动对接装配的技术方案<sup>[5]</sup>。2013年,北京卫星制造厂以卫星固面反射器天线为对象,开展自动化装配技术在航天器产品高精度装配中的应用研究<sup>[6]</sup>。

综上所述,航空领域在机器人装备总装领域的应用研究领先于航天,且在许多方面已经实现了工程应用。我国航天装备总装领域机器人的应用研究起步较晚,目前基本处于方案研究阶段,离工程应用仍有一定的差距。

### 3 航天装备特点分析

航空领域对工业机器人的工程应用经验给航天装备机器人自动化装配应用研究提供了很好的借鉴。然而,航天装配在机械机构、系统组成、产品种类细分程度上与航空领域的装备有着较大差别,在航天领域应用机器人技术实现数字化柔性装配时,也需要针对航天产品装配的特点寻找对应的解决方案。

与航空装备(如飞机等)相比,航天装备具有以下特点:

(1)外形尺寸相对较小,内部空间开敞性较差,机器人通常只能从外部对部件进行操作。因此,在从事机器人自动钻铆研究时,需要重点考虑这类结构形式铆接工作自动化的实现方法。

(2)通常包含一些极度危险的火工品,虽然安全系数较高,但发生爆炸通常危害极大,因此在装备的装配过程中应尽量减少上下起吊等有跌落风险的操作。

(3)航天装备种类较多,产品通常系列化,但不同型号甚至同一系列不同状态的产品结构差异较大,装备的装配生产通常存在多品种、变批量等问题,这要求机器人具有一定的智能,能够通过对产品上的特性标识进行识别而自主选择相应的工作程序。

## 4 工业机器人在航天装备装配中的应用研究

中小型筒状结构航天装备的部装过程主要包括口盖的修锉配装、托板螺母与支架的铆接等,总装过程主要完成设备的安装、舱段的对接以及水平测量、称重、振动试验等工作。其中包含的舱段口盖修配、支架等零件钻铆、部组件对接等工序耗费工时较多,利用工业机器人对这些工序的自动化改造可以大大提高其工作效率。此外,航天装备包含的火工品具有极高的危险性,传统的起吊转运方式有较大的安全隐患,利用自主移动机器人作为部组件的转运工具,可以完全避免起吊操作,提高装配过程的安全性。本文拟对以上4道工序的工业机器人应用进行分析研究。

### 4.1 基于机器视觉技术的口盖切割与配装

产品的部装阶段有大量的口盖需要安装。操作人员装配前需要按照舱体口框的尺寸修锉口盖,修锉工作需要耗费大量工时。

口盖切割机器人可以设计成末端装有高精度CCD相机与口盖切割工具(激光切割器等)的6自由度(或7自由度)工业机器人。机器人将末端相机移动至舱体口框附近,拍摄口框照片并将其传给上位机控制器,控制器通过分析照片计算出口框相对机器人基座的空间三维尺寸参数,并以此为参照,驱动末端切割工具按口框三维形状尺寸运动,加工出与舱体口框相配的口盖。

### 4.2 基于工业机器人的自动制孔

中小型筒状结构航天装备的部件级装配过程中的口盖、支架、连接块等零件的安装均涉及孔的加工。传统的人工打孔方式需要先划线,再打孔,这种方式耗时多、效率低,如完成一个舱段安装孔的加工以及支架等零部件的铆接工作通常需要一名操作者4~6h,甚至更长的时间。这其中以定位和划线操作耗时最长。

装有多功能末端钻孔执行器的工业机器人可以利用舱段的三维数模,快速确定孔位尺寸,完成制孔加工。以舱段上螺纹孔的加工为例,通过视觉识别或者直接输入待加工孔的空间位置,机械臂驱动末端达到加工位姿,首先用钻孔工具(气钻、电钻)加工螺纹底孔,通过工具切换机构将攻丝工具置于加工档位,直接加工出螺纹。显然,与人工加工方法相比,这种方法加工完成的孔的位置与形状的精度要高得多。对于惯导支架等位置精度要求较高的支架安装,可以增加一套具有多个自由度的支撑系统和一套数字化测量系统辅助机器人完成相应操作。支撑系统的控制器、驱动机构与数字测量系统形成调姿闭环系统,通过固定支架或部件,由调姿闭环系统实时调整部件或支架的空间位姿,使支架满足形位公差要求。

### 4.3 基于自主移动技术的舱段自动转运

航天装备装配生产自动化的实现,不仅需要完成弹体加工及装配的自动化改造,还需实现各工序间产品的自动流转。产品智能转运机器人由底部运动机构、产品定位装置与顶部控制器组成,可以自主移动到需要转运的产品装配工位附近,按照指令将其运送至目标工位附近。顶部控制器是转运机器人的大脑和感知系统,由周向布置的测距传感器(激光传感器或超声传感器)、机器人定位器和控制决策系统组成。机器人定位器接收车间 iGPS 系统的位置指令,并将其发送给控制系统,控制系统规划出一条最优的运动路径驱动转运机器人将产品移至目标工位。测距传感器实时测量机器人与运动路径上障碍的距离并提供给控制器,实现自动避障。美国雷锡恩公司的航天装备智能转运机器人如图 1 所示。由于这种机器人的使用,使得装配过程中所有部组件的转运都实现了“零起吊”(Zero-lift),极大地提高了安全性<sup>[7]</sup>。



图1 雷锡恩公司航天装备智能转运机器人  
Fig.1 Raytheon intelligent transport robot

### 4.4 基于并联机器人技术的舱段自动对接

并联机器人在需要高刚度、高精度、大载荷而无需很大工作空间的领域内得到了广泛应用。中小型筒状结构航天装备舱段对接是一项对精度要求较高的工作,并联机器人的高刚度、高精度特性非常适合用于这类航天装备的舱段对接。机器人末端装有位姿测量传感器,可以测量出两舱段对接面的位姿误差;在运动链内安装力传感器,用以检测对接过程中两舱段的接触应力。

两舱段分别与各自基座连接牢固后,并联机器人末端的位姿测量传感器测量出两舱段的位置与姿态误差,并以此误差为目标,控制器驱动舱段朝待对接舱段运动。当两舱段接触时,产生的接触力通过运动链上的传感器传给控制器,控制器给出对应最小对接应力的轨迹使两舱段完成对接。

与人工对接方式相比,并联机器人对接方式可以更快、更安全地完成舱段对接。这种基于并联机器人技术的柔性化智能对接单元在美国雷锡恩公司已经得到了

成功的应用,其柔性对接单元如图 2 所示。



图2 雷锡恩公司柔性对接单元  
Fig.2 Raytheon flexible assembly unit

## 5 关键技术

工业机器人在汽车装配与飞机装配中的成功应用为它在航天装备装配中的应用提供了技术与实践基础。然而,工业机器人在航天装备装配中的实际应用,仍有许多关键技术问题需要解决。

### 5.1 机器人误差校正技术

使用工业机器人实现航天装备部件的制孔操作,需要机器人具有较高的绝对定位精度。然而,目前工业机器人的绝对定位精度均较差,与其重复定位精度一般相差一个数量级甚至更高<sup>[8]</sup>。常见的工业机器人重复定位精度为 0.1mm 级,其绝对定位精度通常在毫米级。因此,需要利用机器人误差校正技术,提高其末端绝对定位精度。

### 5.2 钻铆多功能末端执行器设计技术

钻铆多功能末端执行器是机器人钻铆的执行机构,用于完成钻孔、镗窝、铆接等任务。不同于标准工业机器人,钻铆多功能末端执行器通常没有标准化的产品,需要根据具体的生产任务、操作对象以及相应的工业机器人进行单独设计。

### 5.3 机器视觉技术

机器视觉技术是机器人技术与照相测量技术的融合。机器视觉的加入,可以很大程度提高机器人操作的智能化水平,使得机器人能够“感知”周围的操作环境。各舱段加工操作程序可以离线写入机器人上位机中,在识别出待加工舱段后,上位机将加工信息导入机器人控制器中,控制器便可以驱动机器人自主完成相应操作。

### 5.4 离线编程技术

机器人对航天装备的装配操作是由离线程序驱动的。离线需要编制的程序主要为各舱段加工内容所需要规划的机器人关节运动轨迹与末端运动轨迹,各传感器模拟信号到数字信号的转换,驱动各关节电机运动的

(下转第 108 页)

框组件装配时,需要重新调整三自由度定位装置。需要打开所有夹紧顶靠装置,工件下架,再根据设计的2个方案来重新定位柔性工装,随后,新的工件上架。根据表2中的方案,选择表1中的运动方式,从工件下架开始模拟计时,分析方式与单一框定位分析方式一样,从而得出表4所示的两个方案不同运动方式所需时间对比。

从表4可以看出,2个方案所需时间差别很大。方案1中,不管选择表3中所示方案的哪一种,所需时间几乎是原来定位过程需要时间的2倍,又根据结构可行性分析,方案一还需要加上合上和再次打开夹紧器的时间。而在方案2中,10个舱门框定位点坐标相差不大, $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 与 $\Delta z$ 都比较小,按照之前给定的速度运动,用时很少,而且不用合上再打开夹紧器。

## 2.4 方案选择

综上所述,可以从时间、效率、工作流程中工装的工艺结构性等方面来评价柔性装配工装运动方案。对于三自由度定位过程,方案3用时最少,效率最高,但稳定性最差;方案1用时最长,效率最低,但稳定性最好;切换框时,方案1用时多,但定位比较精确,方案2用时很少,但精度相对较差。可以根据加工要求和实际情况选择不同的方案,也可以根据需要参照以上的分析对不同的工作过程进行不同方案组合。

## 3 结论

本文介绍了舱门框组件柔性装配工装、工艺及其工作过程,对不同运动方案的工作流程进行了仿真与分析,通过过程仿真可发现零部件运动过程中的碰撞干涉,以便及时调整工艺,避免可能发生的碰撞,为实际工艺过程提供参考;同时总结出不同方案的优劣,为选择不同工作方案提供参照,也为后续铆接过程与分析做好准备。

### 参考文献

- [1] 郭恩明. 国外飞机柔性装配技术. 航空制造技术, 2005(9): 28-30.
- [2] 吴启迪, 严隽薇, 张浩, 等. 柔性制造自动化的原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [3] 熊光楞, 李伯虎, 柴旭东. 虚拟样机技术. 系统仿真学报, 2001(1):114-117.
- [4] 毕利文, 唐晓东, 杨红宇. 飞机数字化装配工艺仿真技术. 航空制造技术, 2008(20):48-50.
- [5] 邹方, 薛汉杰, 周万勇, 等. 飞机数字化柔性装配关键技术及其发展. 航空制造技术, 2006(20):35-38.
- [6] 史耀亮. 飞机的数字化装配工艺设计与仿真. 航空制造技术, 2007(12):95-98.
- [7] 李景新, 郑国磊. DELMIA 系统在飞机装配模拟中的应用研究. 航空制造技术, 2008(11):90-93.

(责编 小城)

(上接第104页)

电机驱动程序等。程序代码执行效率的高低,影响到机器人的操作效率。离线编程技术需要解决航天装备混线自动生产操作程序的编制问题。

## 5.5 自主移动技术

自主移动技术用于产品智能转运机器人。基于测距传感器(超声测距传感器、激光测距传感器等),在机器人的运动轨迹上测量并识别出障碍,并在遇到障碍时重新规划路径,避开障碍物,将产品安全运送至目标工序。自主移动技术需要解决的主要问题是快速、安全地运送产品所需的最优路径的离线与在线规划。

## 6 发展与展望

目前国外先进航空航天装备制造企业(如波音、空客、雷锡恩公司等)已经利用机器人技术和计算机控制技术建立起全自动化的装配生产线或装配车间。国内航空各制造企业也纷纷开展了机器人装配技术的应用研究,并取得了一定的实践经验。这些经验及其与各制造研究所、高校合作研发的发展模式都值得航天领域各制造企业学习。此外,航天装备的机器人自动化装配研究也应该结合自身产品结构、生产方式、安全性要求等特点,研究开发适用于航天装备的机器人自动装配系统。

在此基础上,将各机器人系统有机结合,形成全自动化的柔性装配生产线甚至装配车间是未来发展的必然趋势。同时,应该在航天领域建立相应的机器人自动化装配技术研究平台,交流研发过程中的技术难点,共享资源和成功经验,以加快机器人技术在航天装备装配中工程化应用的速度,为未来我国国防武器装备生产提供高效、先进、可靠的技术保障。

### 参考文献

- [1] Devlieg R, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE(One sided Cell End effector) robotic drilling system. SAE, 2002-01-2626,2002.
- [2] 邓锋. 采用标准关节机器人系统对飞机货舱门结构的自动钻铆. 航空制造技术, 2010(19):32-35.
- [3] 杜宝瑞, 冯子明, 姚艳彬, 等. 用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统. 航空制造技术, 2010(2):47-50.
- [4] 王建, 刘浩, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的制孔末端执行器的设计. 南京航空航天大学学报, 2012,44(S):19-22.
- [5] 魏乐愚, 杨宏青, 荣田. 自动对接装配技术在航天产品对接装配中的应用研究. 航天制造技术, 2011(5):42-44.
- [6] 张明, 喻懋林, 张玉生. 自动化技术在卫星天线高精度装配中的应用研究. 航空制造技术, 2013(20):26-29.
- [7] 胡冬冬, 苏鑫鑫. 雷锡恩公司建成世界最先进的导弹总装厂. 飞航导弹, 2013(2):9-11.
- [8] 许辉, 王振华, 陈国栋, 等. 基于距离精度的工业机器人标定模型. 制造业自动化, 2013,35(6):1-4.

(责编 谷雨)