

# 爬行机器人制孔系统在飞机装配中的应用研究<sup>\*</sup>

## Research on Application of Crawler Robot Drilling System in Aircraft Assembly

中航工业北京航空制造工程研究所 甘露 姚艳彬 魏超

**[摘要]** 轻型自动制孔设备以其高柔性、低成本、高效率在飞机装配领域得到了越来越多的应用。爬行机器人制孔除了具备以上特点外,还具有自主移动、安装方便的优点,其应用前景非常广阔,受到了国内外厂家的广泛重视。本文通过分析国内外关于爬行机器人制孔系统的研究现状,总结出相应特点和关键技术,指出爬行机器人制孔系统的发展趋势。

**关键词:** 爬行机器人 自动制孔 飞机装配

**[ABSTRACT]** Light-weight automatic drilling system has wide application in the field of aircraft assembly for its high flexible, low cost, high efficiency. Crawler robot drilling system has the advantages of autonomous mobile and easily installation. The crawler robots drilling system has a bright future for application.

**Keywords:** Crawler robot Automatic drilling Aircraft assembly

精确制孔和精益制造在现代大型飞机的制造和装配中占有十分重要的地位,精益制造就是要求大幅度降低生产制造成本,实现制造过程柔性化,同时满足生产要求。

轻型自动制孔系统用于飞机机身和机翼的自动制孔,与大型自动化制孔设备相比,可最大限度降低飞机装配的制造成本,减少大型自动化制孔设备占地面积和操作维护人员的配备,减少大型装配件的频繁搬运和安装。对于飞机机身和机翼壁板的制孔而言,研制轻量化、可移动的轻型自动制孔系统,将具有明显的性价比优势,以满足低成本自动制孔系统的需求。

目前在飞机装配中应用较多的轻型自动制孔系统包括柔性导轨制孔系统、爬行机器人制孔系统等。爬行机器人制孔系统具有自主移动、操作灵活、成本低的特点,以上特点使得爬行机器人制孔系统在飞机装配领域具有非常广阔的应用前景,受到了国内外飞机制造商的广泛重视,并取得了诸多研究应用成果。

### 1 国内外研究现状

在轻型自动化制孔设备方面,美国波音推出了柔性

导轨制孔系统(如图1),该制孔系统设备的优点是自动化、轻量化、安装方便。缺点是不能自主移动,所以,设备制孔时的设备安装工作量大。基于上述原因,为实现一定范围内的装置的自主移动,爬行机器人可以很好地解决这一问题。目前,国外的很多公司,如:西班牙 Fatronik 公司、法国 Alema Automation 公司、西班牙 MTorres 公司、西班牙 SERRA Aeronautics 公司都针对飞机装配研制了爬行机器人制孔系统,并且在实际的飞机装配中得到了应用。下面对这几个公司的爬行机器人进行分析和比较。

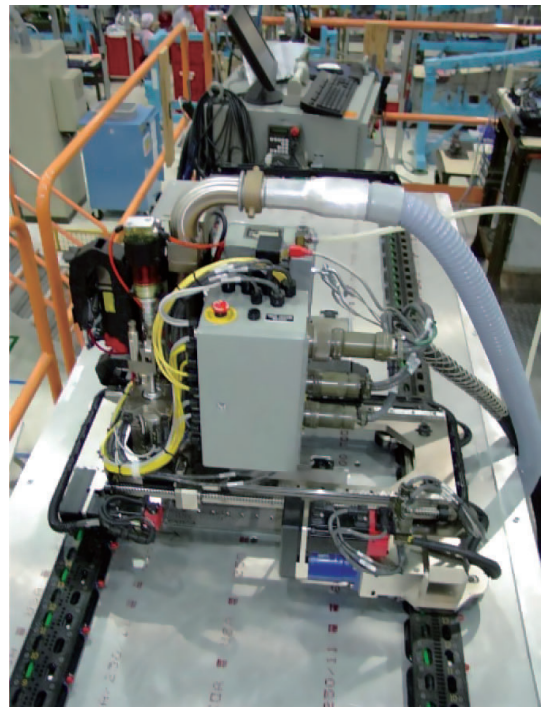


图1 柔性导轨制孔系统

Fig.1 Flexible track drilling system

#### 1.1 Fatronik 爬行机器人制孔系统

为了适应不同曲率半径的飞机壁板表面制孔,西班牙 Fatronik 公司研制了五坐标爬行机器人自动制孔系统。在进行制孔作业时,机器人被吊装到即将装配的组件的位置,机器人通过 12 套真空吸盘吸附固定在产品上,依靠机器视觉系统来完成位置坐标的标定,机器人在其工作空间内完成制孔作业。一旦完成这次作业,机器人可以通过爬行系统自主移动并且重新自动定位到

<sup>\*</sup> 航空科学基金项目(20121625008)资助。

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,可以放置在储存站里。

### 1.2 Alema Automation 爬行机器人制孔系统

Alema 研制的爬行机器人(图2)利用真空吸盘吸附在零件表面来爬行或定位,但是由于单纯依靠爬行来精确定位误差过大, Alema 采用了二次定位的方式提高定位精度。爬行机器人在每次行走初次定位之后,视觉系统测量出  $X$  和  $Y$  方向理论值和实际目标值的误差,通过在离线编程软件里已经标定过的目标物,我们可以得出制孔点在设备坐标系中的坐标值,然后  $XY$  伺服调整到精确位置。末端执行器的  $XY$  轴行程可覆盖  $900\text{mm} \times 200\text{mm}$  的面积,所以在这个范围内进行制孔或紧固是不用爬行机器人进行爬行的。爬行机器人的  $Y$  轴可以弯曲,在局部形成了与产品同样的曲率,从而不需要任何的摆动轴调整即可保证末端执行器始终保持在壁板的法线方向。末端执行器使用了气动主轴,换刀时换下整个主轴,然后换上预置主轴。整个设备总重量

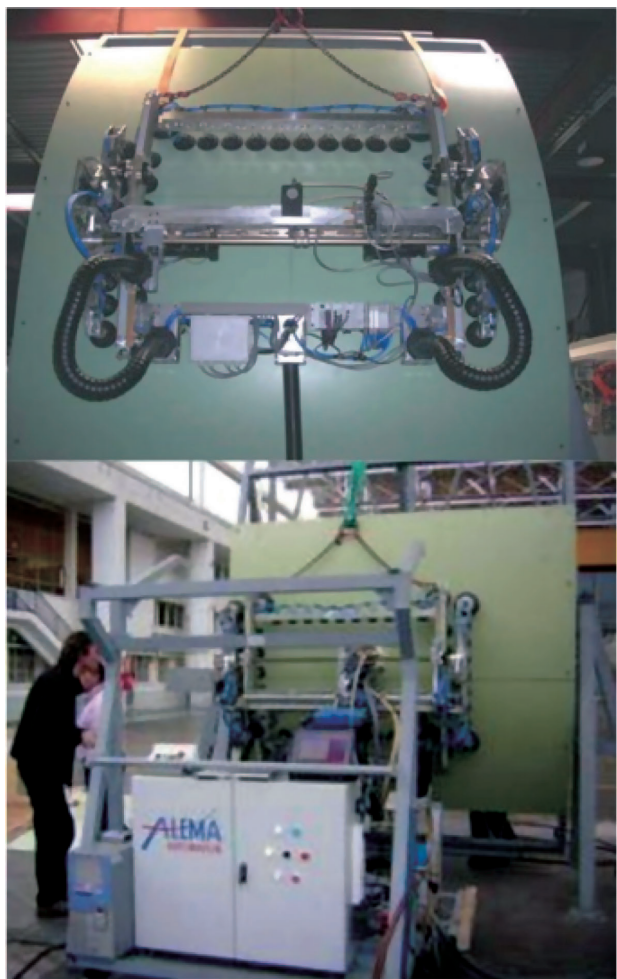


图2 Alema爬行机器人进行机身段制孔

Fig.2 Alema crawler robot on fuselage for drilling

150kg<sup>[1]</sup>。

Alema 爬行机器人通过类似柔性导轨的形式设计了  $Y$  轴,使其不用通过伺服的转动轴来调整制孔法向,但是只能在单曲率的壁板上制孔,使其应用范围受到了限制。

### 1.3 MTorres 爬行机器人制孔系统

FDH2 是 MTorres 公司爬行机器人制孔系统的第二代产品,它在重量、钻孔、镗窝、定位精度和爬行速度方面拥有更优的设计。FDH2 是一个模块化设计的五坐标制孔系统,带有多功能的末端执行器,可执行制孔、镗窝功能。FDH2 只依靠末端执行器上的视觉定位系统定位,视觉定位系统由照相机、激光传感器和 MTorres 自己研发的控制软件组成视觉定位系统组成,可以很好的保证 FDH2 在飞机零件上的位置,所以机器人并不需要其他的导航系统的支持。为了位置的精细调整,系统还配置离线编程系统,它能自动获取零件的基准,然后可以自动定位的工作区域,定位精度可以达到  $\pm 0.2\text{mm}$  (通过人工视觉系统测量零件上的实际基准后)。

系统的主要部件包括机器人和 1 个带便携式计算机的可移动电器柜。除去电缆,机器人和电器柜的重量约为 50kg。FDH2 机器人系统还可以和外部的安全保障系统连接,从而可以在发生异常情况时保证飞机零件和机器人系统本身的安全。

FDH2 设计用于现有的所有中型(A320 系列)和大型飞机,可用于单曲或双曲率的筒段连接。FDH2 可以在产品的任何位置进行工作,不需要主框架的移动而只依靠设备自身的五坐标运动即可覆盖一定的有效制孔区域,设备换刀采用人工换刀,换刀时间少于 1min。FDH2 的安装也非常简单,只需要 2 名操作者,在 5min 之内就可以完成设备在工作区域内的安装。

FDH2 的制孔主轴转速在 100~12000r/min 内可调,末端执行器压脚压力 0~140kg 可调。在 2 层 10mm 厚的铝板叠层材料的制孔试验中,FDH2 制孔效率能达到 6~8 个/min,垂直度公差能达到  $\pm 0.5^\circ$ ,镗窝精度能达到 0.15mm。依据材料(铝、碳纤维、钛合金)不同,FDH2 的制孔直径能达到  $\phi 4 \sim \phi 10\text{mm}$ <sup>[1]</sup>。

FDH2 拥有 8 个真空吸盘,从而可以保证 FDH2 牢固的吸附在零件上。真空吸盘系统可以控制位置和运动以适应不同的曲率半径。当一个吸盘损坏,其他的吸盘会持续工作,就算所有的吸盘都停止工作,整个机器人仍能够在零件上保持 5min,同时真空系统会发出声音报警。

### 1.4 SERRA Aeronautics 爬行机器人制孔系统

SERRA 公司研制的爬行机器人制孔系统 SAMPA (图3)基于一套独立的五坐标系统,携带可进行制孔和

铤窝的末端执行器。SAMPA可以在任何机身段或双曲率的表面进行制孔,这已经在A380第19段得到了验证(如图4)。SAMPA具有非常好的便携性,2个操作者可以在5min内安装好设备。

SAMPA在产品上的定位使用了iGPS技术,iGPS系统可以识别机器人在整个装配坐标系中的位置,定位精度可达到1mm。iGPS定位完成后,末端执行器的视觉系统可以精确计算出制孔的位置,精度可达到 $20\mu\text{m}$ 。

SAMPA可以在多种材料上进行制孔,在保持主轴扭矩5Nm的情况下,主轴转速可在 $100\text{r}/\text{min}\sim 20000\text{r}/\text{min}$ 之间调整。在10mm碳纤维和10mm铝合金叠层的材料的制孔试验时,设备的制孔效率可达4个/min,孔垂直度可达到 $0.1^\circ$ ,铤窝精度可达到0.1mm,工作时噪声70dB。末端执行器装有压脚和吸尘装置,并且压脚压力为可调的<sup>[1]</sup>。

SAMPA有4组真空吸盘,可保证它牢固地吸附在

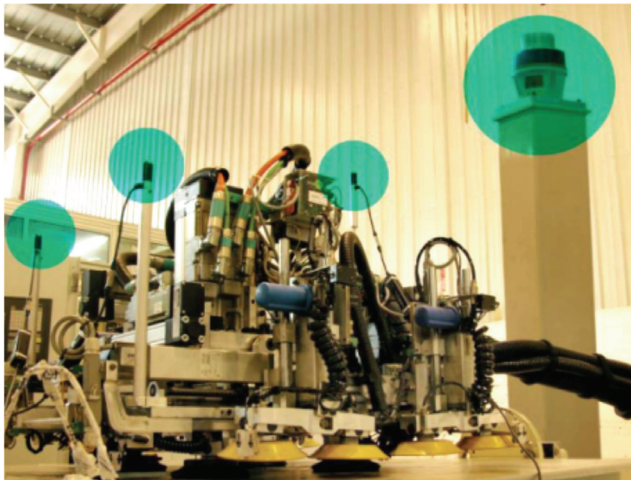


图3 SAMPA爬行机器人制孔系统  
Fig.3 SAMPA crawler robot drilling system

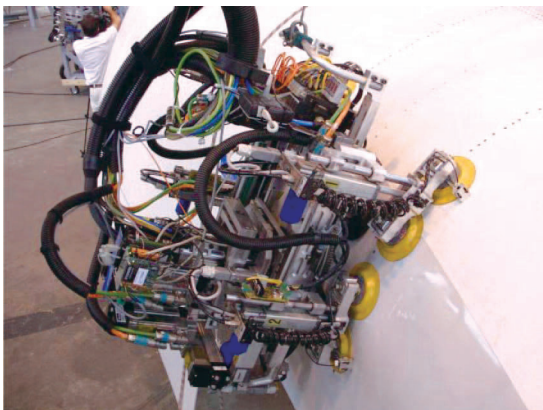


图4 SAMPA用于A380双曲率机身19段装配  
Fig.4 SAMPA working over A380 double curvature section 19

零件表面。当一组吸盘损坏,剩余的吸盘仍能保持吸附,从而使设备保持在正确的位置上,不会有掉下来的危险。当所有真空系统全部失效时,机器人仍能保持吸附至少20min,同时会有声光报警,停止所有制孔作业。

## 1.5 南航研制的爬行机器人制孔系统

国内由南京航空航天大学、上海飞机制造有限责任公司和北京航空航天大学合作研制成功自主移动式自动化制孔系统,如图5所示。该系统也是由自主移动机构、末端执行器(制孔单元)、运动控制系统和集成控制软件组成。其中自主移动机构采用双框八腿真空吸附式的结构,配合特殊的运动补偿机构,实现X、Y、Z和A、B五坐标运动。适用于大部件表面拼接和对接,如机身筒段对接、机翼表面制孔、壁板拼接等<sup>[2-3]</sup>。



图5 南航等研发的爬行机器人制孔系统  
Fig.5 Crawler robot drilling system developed by NUAAC etc.

通过以上综述可以发现,国外已对爬行机器人制孔系统进行了广泛和深入的研究,且已初步应用于飞机装配中。国内相关研究还处于起步阶段,关键技术尚未完全突破且缺少工程化的应用。

## 2 爬行机器人制孔系统主要特点及关键技术

### 2.1 爬行机器人制孔系统主要特点

(1)在零件表面直接定位和自主行走(爬行),可以完成制孔及铆接等多种任务而不要笨重和昂贵的型架。

(2)高柔性,可以在不同构型的零件上进行制孔、铆接、无损探伤等作业。

(3)可多机器人系统同时在一个连接段上进行作业,从而大大提高生产率。

(4)高性价比。

### 2.2 基于真空吸附的行走系统

爬行机器人依靠真空吸盘吸附爬行,要进行真空吸

(下转第86页)

北京航空制造工程研究所以电磁铆接为动力研制出了一套自动钻铆系统样机,该样机的末端执行器上集成了U型射钉装置,系统能够自动完成测量、定位、压紧、制孔、上钉、铆接/安装等操作,图10为基于U型射钉装置的末端执行器。

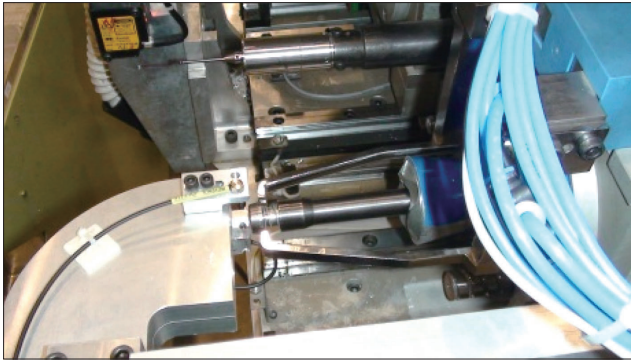


图10 基于U型射钉装置的末端执行器

Fig.10 End effector based on U-shape rivet injector

## 4 发展及建议

上钉是自动钻铆过程的关键环节,而射钉技术在上钉过程中也至关重要。国内在自动钻铆技术研究中,对制孔和铆接技术进行了大量的研究工作,尤其是自动制孔。针对各种材料(复合材料、钛合金、铝合金及复合夹层结构)进行了自动制孔工艺的研究,自动制孔技术已经在工程生产中进行了应用。但在自动上钉技术方面的研究较少,因此必须加强自动上钉技术的研究,将自动制孔和自动铆接链接起来。针对射钉技术及射钉装置的研究开发方面提几点建议:

(1) 加强对国外射钉技术的研究,消化吸收,然后进行适应国内自动钻铆要求的射钉装置的设计开发;

(2) 在射钉装置的设计开发上要充分考虑紧固件的类型及规格,针对不同规格的紧固件进行设计;

(3) 优化自动钻铆系统的工艺流程,对工艺过程的并行性进行分析,提高系统的工作效率。

### 参考文献

[1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册(飞机装配分册). 北京: 航空工业出版社, 1993.  
 [2] 肖庆东, 许国康, 韩洁. 夹钉技术在自动钻铆系统中的应用研究. 航空制造技术, 2011(22):98-104.  
 [3] 许国康, 高明辉, 肖庆东. 电磁铆接技术的发展, 设备研制及应用探讨. 航空制造技术, 2010(23):38-41.  
 [4] 王黎明, 冯潼能. 数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用. 航空制造技术, 2008(11):42-45.  
 [5] Remley D, Rediger J. Slug rivet machine installs 16 rivets per minute drill-rivet-shave. SAE International, 09-ATC-0232.  
 [6] Buchheit C, Zieve P. Horizontal rivet injector design used on

A320 upper panel. SAE International, 2007-01-3783.

[7] Holden R, Haworth P. Automated riveting cell for A320 wing panels with improved throughput and reliability (SA2). SAE International, 07-ATC-208.

(责编 良辰)

(上接第 82 页)

盘的分布设计和吸附力的计算,进行机器人对大曲率半径的自适应结构设计,保证爬行机器人的曲率自适应和可靠吸附。现在爬行机器人的设计行走单元大体上分为内外2个框架,每个框架均配备4个真空吸盘足。出于行走过程中的安全性考虑,内外框架配备2套独立的真空系统,使得任何时候,都能至少有一个框架的4个吸盘足为系统提供足够的吸附力。通过由丝杠驱动的内、外2个框架的轮流移动实现系统在工件上的爬行。框架内部提供X、Y向精确运动以实现一个区域内制孔。

### 2.3 结构的轻量化、高强度设计及制造技术

爬行机器人制孔系统在飞机表面进行制孔,需要其能适应飞机表面的各种曲率变化,并且在不同位置时受力状态会有很大的改变,所以在保证主轴转矩和爬行系统刚性的前提下,尽量减轻系统的质量,使设备运转更为灵巧,解决扭矩、功率和质量之间的矛盾。

### 2.4 高精度定位技术

高精度定位是实现精确制孔的前提和保证,采用基于激光导航的吸附行走至作业区域进行粗定位,基于机器视觉如工业照相机进行精确调整和定位,依照定位数据对执行机构进行位置精确调整。利于仿真及路径规划实现行走机器人的自主行走作业。

## 3 结束语

爬行机器人制孔系统是一种最新的轻型自动化装配系统解决方案,与一般的大型数控自动化装配系统不同,它设备安装简单,简化了安装工作及安装系统所用的工装,因此投入生产前的准备时间大大缩短,应用的灵活性也更高。爬行机器人制孔系统符合飞机装配专用设备轻量化、柔性化、模块化的发展方向。

### 参考文献

[1] Marguet B, Cibiel C, De Francisco Ó. Crawler robots for drilling and fastener installation, an innovative breakthrough in aerospace automation. SAE, 2008, 1: 2292.  
 [2] 王珉. 飞机轻型自动化制孔系统及关键技术. 航空制造技术, 2012(19):40-43.  
 [3] 黄大兴. 飞机装配自主移动式自动制孔系统机构设计. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5):23-26.

(责编 小城)