

# 飞机自动钻铆技术研究现状 及其关键技术\*

喻龙<sup>1</sup>,章易镰<sup>1</sup>,王宇晗<sup>1</sup>,刘钢<sup>2</sup>

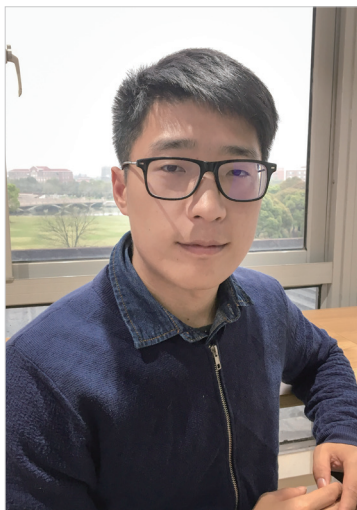
(1.上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240;

2.上海拓璞数控科技有限公司,上海 201111)

**[摘要]** 飞机自动钻铆技术能够实现飞机机身、机翼等处壁板的自动钻铆装配,极大地提高飞机装配质量与装配效率。经过几十年的发展,自动钻铆技术在国外已广泛运用于航空航天制造领域,而国内在这一方面正处于起步阶段,技术水平普遍较低。为此调研国外先进自动钻铆技术的研究应用现状,以 GEMCOR、Electroimpact、BROETJE 三大国外自动钻铆设备供应商为代表,介绍各自技术特点及在自动钻铆技术方面最新的进展。同时,对国内自动钻铆技术的发展进行简要介绍,指出国内在这一技术发展中的问题。此外,对自动钻铆技术中包括高精度定位技术、制孔质量在线检测技术、自动送钉技术、离线编程与仿真技术在内的四大关键技术进行详细分析,总结其研究难点,为国内自动钻铆技术的发展提供参考。

**关键词:** 航空壁板;自动钻铆;高精度定位;制孔质量在线检测;自动送钉;离线编程与仿真

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2017.09.016



喻龙

上海交通大学机械与动力工程学院博士研究生,主要从事航空航天装配设备研制及其主要功能模块研发,包括法向测量与调整、基准孔位置识别与定位及力控制等。

飞机壁板的连接质量对飞机的气动外形及其疲劳寿命有至关重要的影响<sup>[1]</sup>,铆接作为一种传统的机械连接技术,由于其连接可靠、质量轻、成本低等特点被广泛用于航空航天领域<sup>[2]</sup>,因此铆接质量对飞机的安全性能有重要的影响。1988年阿罗哈航空243号班机事故(Aloha Airlines Flight 243 incident)发生的主要原因之一就在于铆接结构的疲劳失效<sup>[3]</sup>。影响铆接质量的主要因素有两个:制孔与铆接。据统计,70%的飞机机体疲劳失效事故源于结构连接部件的疲劳失效,其中80%的疲劳裂纹发生于连接孔处<sup>[4]</sup>。传统的手工制孔质量一致性差,效率低,制孔精度难以保证,铆接连接件的质量受铆接方法、铆接干涉量及铆钉种类等多种因素的影响。手工铆接所提供的铆接力小,铆头尺寸难以控制,成形后铆钉钉杆膨胀量分布不均匀,无法实现均匀干涉配合铆接。

采用自动钻铆技术实现飞机壁板的制孔和铆接是提高飞机装配质量与效率的有效途径<sup>[5]</sup>。资料显示,手工钻铆效率平均为15s/钉,自动钻铆效率最快能达到3s/钉,效率提高5倍;手工铆接铆头高度公差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ,自动钻铆所形成铆头高度公差能达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ,精度提高10倍。自动钻铆设备按结构形式可分为龙门式自动钻铆系统、C型架式自动钻铆系统以及机器人自动钻铆系统。前两种设备刚性好,精度高,提供的铆接力大,可用于开敞性好的大型结构件的自动钻铆;机器人自动钻铆系统成本低,运动灵活,空间利用率高,可达性高,适用于开敞性差的壁板的自动钻铆装配。自动钻铆设备按铆接驱动方式又可分为气动锤铆、伺服压铆和电磁铆接。气动锤铆结构简单,体积小,铆接力小,易于集成,与工业机器人构成机器人自动钻铆系统已成为发展趋势<sup>[6-9]</sup>。伺服

\* 基金项目: 国家重大科技专项(2013ZX04001101)。

压铆采用伺服电机驱动,行星滚珠丝杠传动,可实现高精度、大负载的伺服压铆,较传统的气动铆接具备更高的控制精度与柔性化的速度调节能力<sup>[10]</sup>,能够按照设定的位移曲线或力曲线进行加载,目前已成功取代液压铆接广泛运用在飞机装配中。电磁铆接是在电磁成形工艺的基础上发展起来的一种新型铆接工艺,能够实现钛合金和复合材料的连接,以及大直径和难成形材料铆钉成形<sup>[11-16]</sup>。

本文将以外三大主要自动钻铆系统供应商的产品为例,论述自动钻铆技术研究现状,并对国内自动钻铆技术的发展、应用现状做简要分析,最后总结其研制所需攻克的关键技术。

### 国外自动钻铆技术研究应用现状

自动钻铆技术起源于20世纪50年代,经过几十年的发展,已成为能够自动完成定位、制孔、送钉、铆接及检测功能的先进制造技术。国外自动钻铆设备主要供应商以美国捷姆科(GEMCOR)、EI(Electroimpact)、德国宝捷(BROETJE)、意大利B&C(BISUACH & CARRU)为代表,各公司的典型产品型号及其应用情况如表1所示。此外,西班牙M.TORRES公司、法国ALEMA公司等也在自动钻铆设备方面也有自己的产品<sup>[17]</sup>。

### 1 GEMCOR公司

GEMCOR(通用电气机械公司)是美国最早的自动钻铆设备制造商<sup>[18]</sup>,已有超过75年的历史,也是世界各大飞机制造公司的自动钻铆设备主要供应商之一。经过几十年的发展,GEMCOR已研制出以机身、机翼、发动机吊舱等为加工对象的系列化自动钻铆系统(见图1)。

其中,机身自动钻铆系统最新型号包括G12、G86及G2000。G12采用全5轴CNC系统,集成全电驱动末端执行器、自适应控制气动压脚、自动点胶装置、自动送钉系统及法向测量与调整装置,最大压铆力达到7t,铆钉安装效率19颗/min,能够实现长度达到9.75m的机身壁板自动装配<sup>[19]</sup>。G86在G12的基础上增加了机床尺寸及承载能力,采用G2000的C型架后可用于半机身装配<sup>[20]</sup>。G2000采用7轴CNC系统,可实现180°半机身壁板铆接<sup>[21]</sup>。

GEMCOR机翼自动钻铆系统能够实现中央翼盒、机翼前缘等处的多规格无头铆钉的自动钻铆。采用“squeeze-squeeze”双挤压的铆接方式,能够保证铆钉沿顶杆方向均匀膨胀<sup>[22]</sup>,增加铆接干涉量,显著提高结构的疲劳寿命,并获得良好的密封性<sup>[23]</sup>。G14为GEMCOR新型机翼自动钻铆系统,用于实现机翼翼梁及中央翼盒等特定机翼部件的装配,如

图2所示。

此外,GEMCOR还研制了发动机短舱自动钻铆系统和机器人钻铆系统,发动机短舱钻铆系统能够实现发动机短舱处多规格材料的铆接,包括铬镍铁合金、钛合金以及碳纤维复合材料等。GEMCOR机器人自动钻铆系统采用双编码器与视觉再同步技术提高机器人运动精度,从而满足飞机机身、登机门等飞机部件的自动钻铆装配。

### 2 EI公司

EI公司成立于1986年,以低压电磁铆接技术为核心,研制了一系列的自动钻铆系统,并已广泛运用在飞机装配中<sup>[11]</sup>。经过30年的发展,EI已经成为世界自动装配领域最具竞争力的公司之一<sup>[24]</sup>。其开发的自动钻铆系统包括E3000~E7000系列及机器人自动钻铆系统。

#### 2.1 E3000~E7000自动钻铆系统

E3000是专用于飞机翼梁自动装配生产线ASAT(Automatic Spar Assembly Tool)<sup>[25-27]</sup>上的自动钻铆系统。为满足不同飞机机翼装配

表1 国外自动钻铆设备主要供应商

公司/国别	产品型号	应用状况
GEMCOR/美国	G12/86/2000 机身装配系统 G14 等机翼装配系统 机器人装配系统	波音 777、787 以及空客 A320 客机机身与机翼及发动机吊舱装配
EI/美国	E3000 翼梁自动装配系统 E4000/6000 机翼装配系统 E5000/7000 机身装配系统 机器人装配系统	波音 777/787、空客 A320/340/380、商飞 ARJ21 等客机翼梁、机身及机翼装配
BROETJE/德国	CPAC C 型架壁板装配系统 FRAC 翼肋装配系统 MPAC 通用壁板装配系统 WPAC 机翼装配系统 RACE 机器人装配系统	波音 777 壁板装配、波音 787 机身装配、商飞 C919 机身装配、空客 A319/321 总装线
B&C/意大利	TJKP SPACE 龙门机器人自动钻铆系统	波音 787 机身装配、空客 A380/340 机身装配、欧洲战机机身装配

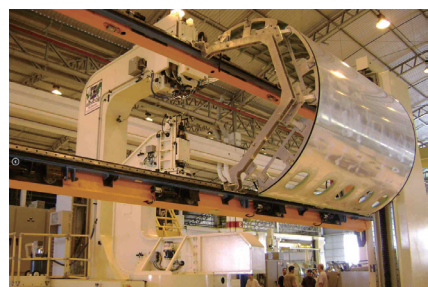


图1 GEMCOR G2000半机身自动钻铆系统  
Fig.1 G2000 half-fuselage fastening system



图2 G14机翼自动钻铆系统  
Fig.2 G14 wing fastening system

需求, EI 已经研制出 6 套自动翼梁装配生产线 ASAT1-ASAT6, 最新的 ASAT6 能够兼容包括钛合金高锁螺栓、有头铆钉、无头铆钉及航空螺母等 100 多种紧固件, 极大地提高了机翼翼梁装配效率。E3000 采用一次装夹夹具 (One-up Assembly Fixture), 集成 BUCA 夹紧系统 (BUCA Clamp-up System)<sup>[28]</sup>、自动送钉技术、孔检测技术、电磁铆接技术 EMR (Electromagnetic Riveter) 等, 能够完成机翼翼梁的高精度装配。

E4000 系列自动钻铆系统用于空客 A320、A340、A380 等飞机机翼壁板的自动钻铆装配, 其加工对象为 NAS1321AD 系列无头铆钉、ABS0550VHK 高锁螺栓以及 EN6114 螺栓。E4000 和 E4320 用于空客 A320 的机翼装配<sup>[29-30]</sup>, E4320 是 E4000 的发展型号, 该设备采用新型低压电磁铆接设备 LVER (Low-Voltage Electromagnetic Riveting), 无头铆钉安装效率为 12 颗/min, 高锁螺栓及螺母安装 8 颗/min。E4150 Flex 能够对超过 30 种不同类型的机翼进行自动钻铆装配<sup>[31]</sup>, 具备高速、高柔性的特点。E4100 用于连接机翼纵梁和机翼壁板, 以及完成机翼搭接接头处的紧固件连接, 实现空客 A340-600 机翼上下壁板的装配。E4380 在前期 E4000 系列机床结构的基础上进行优化, 增加了一个 Z 轴, A 轴和 B 轴的最大行程达到  $\pm 15^\circ$ , 能够实现大曲率壁板自动钻铆装配, 最大紧固件连接直径达 12.7mm, 用于空客 A380 机翼装配<sup>[32]</sup>, 如图 3 所示。

E5000 用于波音 787 机身整体桶段的自动钻铆装配<sup>[33]</sup>。由于机身整体桶段开敞性差, 体积、重量较大, 变形严重, 且紧固件类型复杂, 为此优化铆接作业空间, 采用内外两个分离式的铆头, 通过一套 CNC 控制系统协调控制, 实现机身的高精度装配。此外, 采用偏心式铆头设计, 增

加末端执行器的可达性, 实现传统铆接设备无法完成的铆接<sup>[34]</sup>。

E6000 为新一代机翼自动钻铆系统, 相比于 E4000, 其速度更快, 重量更轻, 采用最新的 LVER 技术, 能够实现对无头铆钉 16 颗/min 的铆接速度。支线客机 ARJ21 的机翼自动装配系统采用的便是 E6000<sup>[35]</sup>。

E7000<sup>[36]</sup> 是 EI 为满足土耳其航空对于大曲率壁板高速装配而研制的最新龙门式机身自动钻铆系统 (见图 4), 号称世界上最快的自动钻铆设备, 其无头铆钉铆接速率达到 20 颗/min。采用 FANUC 定制数控系统及全伺服驱动定位器, 不仅能实现高精度位置控制铆接, 同时能够实现可靠的力控制铆接; 研制的铆钉自动排除装置, 增加了系统的可靠性; 设计了铆钉未入孔检测装置, 防止对壁板造成损伤; 并优化了法向测量、铆钉长度检测、铆头高度检测等智能检测功能。

## 2.2 机器人自动钻铆系统

伴随着工业机器人的快速发展, 机器人自动钻铆系统在航空制造领域扮演着越来越重要的角色。EI 早



图3 E4380 机翼自动钻铆系统  
Fig.3 E4380 wing panel machine

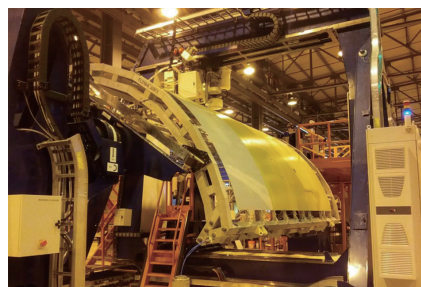


图4 E7000 机身自动钻铆系统  
Fig.4 E7000 fuselage riveting system

在 2001 年就研制了一套机器人自动钻孔系统 ONCE (One-sided Cell End Effector), 用于波音 F/A-18E/F 的机翼后缘襟翼的制孔和铆窝<sup>[37]</sup>。并于 2008 年研制出一台用于波音 787 机翼后缘装配的自动钻铆机器人<sup>[38]</sup>。此后又分别在 2012 年和 2014 年推出新型机器人自动钻铆系统<sup>[39-40]</sup>, 用于实现飞机机翼、机身部段、襟翼等其他飞机部件的高精度制孔、检测与铆接。该机器人采用第二反馈系统, 高阶动力学模型以及集成式 CNC 系统, 使得机器人定位精度达到  $\pm 0.25\text{mm}$ , 满足飞机装配精度需求。此外, 优化设计多功能末端执行器, 实现工件单侧夹紧、自动法向调整、真空排屑、自动送钉、高精度制孔与铆接等先进功能, 极大地扩展了机器人钻铆系统功能, 如图 5 所示。

## 3 BROETJE 自动化公司

BROETJE 自动化公司是全球航空航天领域自动钻铆设备的主要供应商之一, 其自动钻铆设备功能强大, 种类齐全, 广泛运用在空客、波音的装配生产线上, 国产大飞机 C919 机身壁板装配采用的就是 BROETJE 的 MPAC 自动钻铆系统<sup>[41]</sup>。

BROETJE 公司已形成多功能自动钻铆设备体系, 包括 MPAC (Multi Panel Assembly Cell) 通用壁板装配单元<sup>[42-44]</sup>、IPAC (Integrated Panel Assembly Cell) 集成式壁板装配单元<sup>[45]</sup>、CPAC (C-frame Panel Assembly

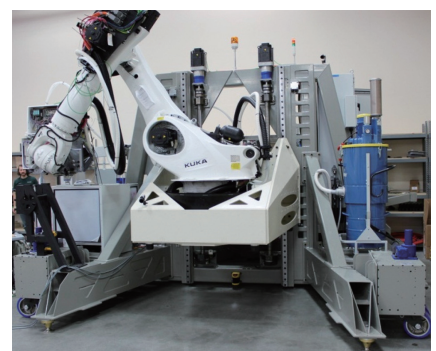


图5 EI 轮式移动机器人自动钻铆系统  
Fig.5 Mobile robot for drilling, inspection and fastening

Cell)C型架式壁板装配单元、RACe (Robot Assembly Cell) 机器人装配单元、WPAC (Wing Panel Assembly Cell) 机翼装配单元等多种壁板自动钻铆系统。其中 MPAC 最具代表性,能够适应不同类型飞机壁板的装配,该系统采用全电驱动铆接系统(AEFS)<sup>[46]</sup>、智能化紧固件输送系统、柔性工装等先进制造技术,保证飞机壁板的高速、高精度装配。AEFS 能够实现飞机部件诸如壁板、桁条、框、筒段等部件的自动钻铆,相比于传统的液压驱动铆接,其加工范围更广、无泄漏危险、维护性更好、铆接效率更高(17颗/min)。智能化紧固件输送系统能够避免卡堵现象,降低设备停机成本;储料盒采用电子编码牌,纪录储料盒中的紧固件信息(型号、直径、长度等),实现紧固件全自动加载;此外,采用智能检测装置,能够实时检测储料盒中紧固件的数量,防止出错(见图6)。

BROETJE 在机器人自动钻铆系统方面也实现了很大突破。2009年, BROETJE 采用标准关节机器人,为欧洲直升机公司(Eurocopter)研制了一台飞机货舱门自动钻铆装配系统 RACe<sup>[47]</sup>。RACe 在 KUKA KR360 工业机器人的基础上,通过机器人校准及压力补偿、网格补偿、温度补偿,使得机器人的定位精度提高到 $\pm 0.3\text{mm}$ 。采用新型多功能末端执行器,集自动制孔、涂胶、送钉、铆接功能于一体,实现飞机货舱门高效率自



图6 MPAC 自动钻铆系统  
Fig.6 Multi panel assembly cell fastening system

动钻铆装配。该系统最大压铆力达到 3t,自动钻铆循环时间为 10.25s。

### 国内自动钻铆技术发展现状

我国早在 20 世纪 70 年代初就对自动钻铆设备进行了相关研制工作,包括沈飞、哈飞及北京航空制造工程研究所等,但受限于工业水平,所研制的自动钻铆设备存在诸多缺陷,使得其无法在航空制造领域广泛运用<sup>[48]</sup>。80 年代后期随着改革开放与转包生产模式的发展,国内各大航空制造厂开始引进国外的自动钻铆设备,并在此基础上与国内高校合作进行自主研发,取得了一定的成果<sup>[24]</sup>。如西飞公司引进了 GEMCOR 公司 G4026SXX-120 自动钻铆机,并在 1995 年与西工大联合研制了机翼托架系统。成飞公司在引进 G4026 型自动钻铆机后,与西南交大联合开发了数控托架系统。随着新支线客机 ARJ21、国产大飞机 C919 等新飞机的研制与生产,以及更广泛的国际合作,国内自动钻铆技术迎来新的发展机遇<sup>[49-58]</sup>,浙大、北航、南航、哈工大、西工大等国内各大高校及相关飞机制造商对自动钻铆技术进行了深入研究,并取得了一定的成就。如北航 2011 年将机器人与自动钻铆技术相结合,开发了用于飞机部件自动装配的机器人制孔系统。成飞 2013 年成功研制出塔式五轴数控法向钻铆系统。南航 2014 年采用龙门结构,设计了 POGO 柱托架调姿系统,并在 UMAC 控制器的基础上开发了自动钻铆机的控制系统。上海拓璞数控依靠在五轴数控加工领域的多年经验,与上海交通大学合作,于 2015 年成功研制出中央翼自动钻铆设备(见图7),该设备集法向测量与调整、自动涂胶、多规格自动送钉、力/位伺服压铆等功能于一体,能够实现对中央翼上壁板处无头铆钉的伺服压铆,其最大压铆力能够达到 10t,自动钻铆循环效率达 8s/颗。



图7 上海拓璞数控中央翼自动钻铆设备  
Fig.7 Central wing panel machine developed by TOPNC

总体来说,虽然我国在自动钻铆技术领域经过多年的发展取得了显著的进步,但由于缺乏对自动钻铆技术的系统研究及高精度机床制造水平较低,所研制的自动钻铆设备精度低、稳定性差、可靠性无法保证,因此还没有广泛应用到实际的飞机装配中,国内自动钻铆技术从研制到实际应用还有很长的路要走。

### 自动钻铆关键技术

为实现飞机壁板的自动钻铆装配,自动钻铆技术集检测、制孔、铆接等多种功能于一体,涉及高精度定位技术、制孔质量在线检测、自动送钉、离线编程与仿真等多种关键技术。

#### 1 高精度定位技术

高精度定位包括两方面的内容:机床自身定位精度与工件在机床中的定位精度,涉及高刚性机床结构设计与误差补偿技术,壁板法向测量技术,工件视觉自动定位技术。

##### 1.1 高刚性机床结构设计与误差补偿

由于自动钻铆系统承受的负载较大,尤其是压铆过程。一方面,压铆成型所需压铆力较大,如 NAS1321 无头铆钉,其最大压铆力能够达到 5.9t<sup>[59]</sup>;另一方面,托架作为自动钻铆系统的重要组成部分,用于支撑、定位、夹紧飞机壁板,由于其自身尺寸长、重量大,如上海拓璞研制的中央翼自动钻铆设备托架长达 9.5m,自

重达 3t,托架自身变形严重,对加工点位置产生偏差,影响铆接质量,因此对高刚性机床结构与误差补偿技术的研究十分必要。

对于龙门式自动钻铆系统,首先,由于 A、B 角通过旋转轴实现,巨大的压铆力将会传递到旋转轴,使得该轴的静态承载能力、传动间隙处理、动态精度成为难点;其次,由于航空壁板尺寸大,龙门式自动钻铆设备体积也会相应增大,运动过程中会产生巨大惯量,使得其运动控制成为难点,影响机床定位精度<sup>[60]</sup>。此外,对于托架变形补偿,不同姿态下托架变形不同,使得空间姿态下托架变形补偿技术成为难点<sup>[61]</sup>。

对于机器人自动钻铆系统,由于标准机器人的绝对定位精度只有  $\pm 2.5\text{mm}$ ,而典型的航空工业需求的绝对定位精度至少要达到  $\pm 0.3\text{mm}$ <sup>[47]</sup>。尽管目前通过外部测量仪器(如激光追踪仪、室内 GPS 以及视觉测量)及机器人示教模式能够使机器人的精度基本满足要求,但精度测量工具价格昂贵,对工作环境要求较高,而机器人示教模式只能针对单一产品,无法适应产品变化<sup>[62]</sup>。为此需提高机器人的定位精度以满足加工需求。机器人误差主要由机器人运动学模型误差、传动系统误差、热误差及载荷变形误差等组成<sup>[38]</sup>,其精度改善方法主要有机器人标定与误差补偿技术,机器人标定能够建立更精确的机器人运动学模型,但模型只考虑几何参数因素的影响,对于非几何参数因素如传动间隙、环境温度的影响很难考虑<sup>[63]</sup>。误差补偿技术主要有网格补偿<sup>[64]</sup>、载荷变形补偿<sup>[65]</sup>、温度补偿<sup>[66]</sup>以及增加第二反馈<sup>[67]</sup>等。图 8 为 EI 在机器人输出轴位置增加第二反馈后,机器人精度改善情况,可以看出,增加第二反馈后的机器人精度大幅提高,在  $\pm 0.1\text{mm}$  以内。目前,机器人误差补偿方法仍有待完善,机器人精度尚未完全满足飞机装

配的精度要求。

### 1.2 工件视觉自动定位技术

高刚性结构与误差补偿技术是针对机床和机器人自身的定位精度而言,工件视觉自动定位技术则用于精确定位工件在机床或机器人中的位置。由于装配误差,工件在机床坐标系中的位置与离线编程所建立的模型之间存在一定的偏离,为此需要通过测量工件上的定位基准孔确定工件实际位置与理论位置的差值,并根据测量结果进行补偿,从而实现工件的准确定位。常见的视觉测量系统硬件由工业相机、镜头以及环状 LED 光源等组成,如图 9 所示。工件视觉自动定位系统的难点在于视觉系统的标定,即确定相机坐标系与机床坐标系的位置关系,目前的标定方法精度低且过程复杂<sup>[68-70]</sup>,需进一步改进。

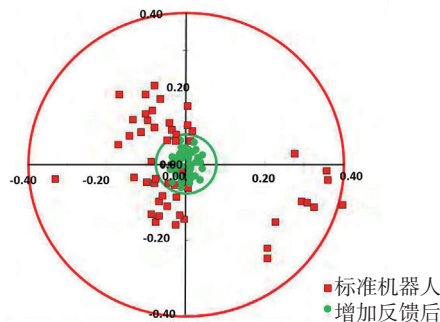


图8 机器人增加第二反馈后精度比较  
Fig.8 Accuracy comparison: standard vs. enhanced

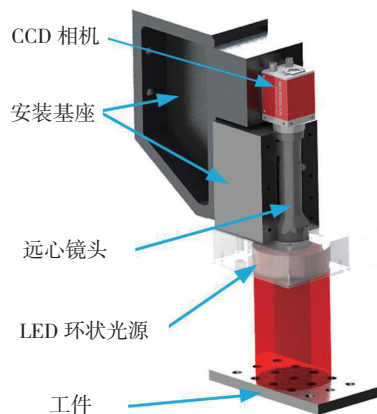


图9 视觉测量系统示意图  
Fig.9 Scheme of vision measurement system

### 1.3 壁板法向测量技术

理论上讲,根据飞机壁板模型能够获得壁板孔位点处的法向,然而由于实际模型与理论模型存在偏差,从而导致孔位点处实际的法向与理论法向存在差异。而孔的垂直度是影响加工孔质量的主要因素之一,它不仅会改变孔的直径,而且影响壁板的铆接质量,导致连接不可靠<sup>[71-72]</sup>。试验表明,当紧固件沿外载荷方向倾斜大于  $2^\circ$  时,疲劳寿命会降低约 47%;倾斜度大于  $5^\circ$  时,疲劳寿命会降低约 95%。因此,孔位点处的法向测量十分重要。国内外学者对曲面的法向测量进行了大量的研究,包括向量叉积法<sup>[73-74]</sup>、二次曲面拟合法<sup>[75]</sup>、三角网格法<sup>[76]</sup>等,但各种方法都存在一定的局限性,如三角网格法,其计算复杂,往往需要测量几十个数据点的坐标,在实际的加工中不具实用性。此外,在向量叉积法中,常采用激光位移传感器进行非接触法向测量,如图 10 所示,  $S_i$  表示激光传感器的位置,红色虚线表示其方向,并假定激光光斑在工件上位于同一平面内,从而使得铆接孔处的法向可由 4 个光斑构成的向量的叉积求得。该方法中传感器的位置与姿态标定是测量的难点,尽管不少研究人员对此提出了新的方法<sup>[77-78]</sup>,但其有效性还有待验证,并且此方法对于传感器的安装有很高的要求,此外该方法对于大曲率壁板的法向测量无能为力。

### 2 制孔质量在线检测技术

制孔质量对装配质量有重要影响,尤其是制孔直径及铤窝尺寸。随着干涉铆接技术在航空制造领域的广泛使用,对制孔精度有了更高的要求<sup>[23]</sup>,因此研究高精度制孔检测技术十分必要。EI 公司在 2013 年研制了一套接触式孔检测装置,该装置在端部集成了一个孔径规及光学编码器,采用伺服电机驱动,并设计径向浮动装配,避免探针与孔轴不重合时造成探针损坏。该装置能够在 6s 中

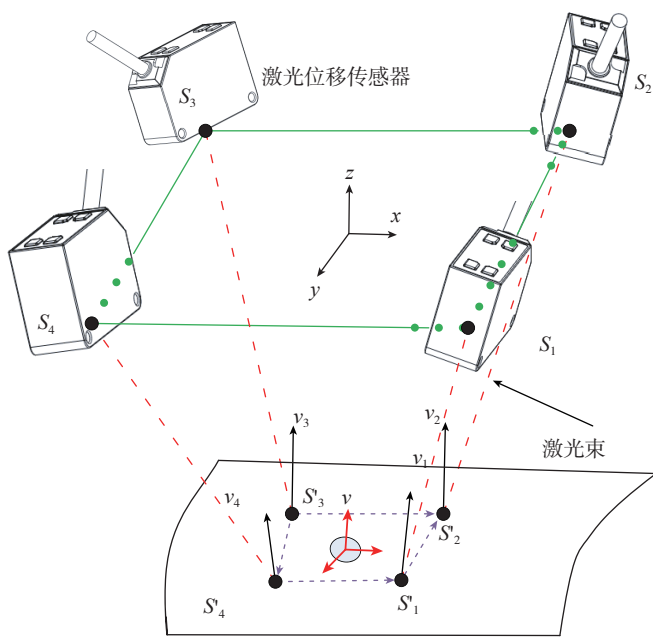


图10 激光位移传感器的法向测量示意图

Fig.10 Normal measurement schematic using laser sensors

获得孔轮廓及镗窝深度信息<sup>[79]</sup>。上海拓璞数控于2016年研制了类似装置,其结构如图11所示,图12为EI公司所研制测孔装置的测量效果。

由于接触式的孔检测技术容易受润滑油及切屑的影响,EI公司又于2014年基于激光轮廓仪,采用

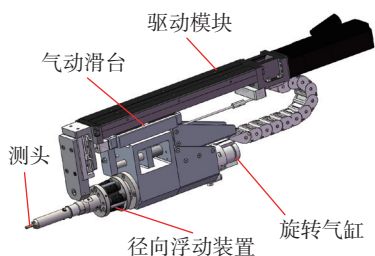


图11 接触式孔检测装置

Fig.11 Contact hole probe device

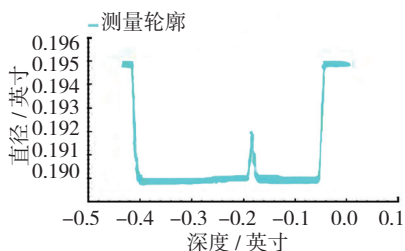


图12 叠层厚度为0.4英寸,间隙为0.02英寸的叠层材料孔检测轮廓

Fig.12 Example hole profile of 0.4" stack-up of 2 plates with a 0.02"gap

Taubin 椭圆拟合算法,研制了一套非接触式的孔检测系统<sup>[80]</sup>。该系统能够快速、高精度获得孔的轮廓信息,其测量示意图如图13所示。

### 3 自动送钉技术

自动送钉技术是将无序、散乱状态的铆钉整齐排列并按照需要依次输送到铆接工位,整个过程包括铆钉的定向、排列、存储、选择、分离及输送<sup>[81]</sup>。自动送钉技术是实现自动钻铆技术的前提,法国AHG紧固件公司提出,自动钻铆机停机故障中由送钉系统造成的因素占了90%<sup>[82]</sup>。自

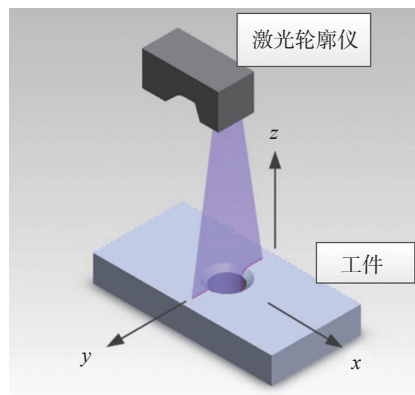


图13 激光轮廓仪孔径测量示意图

Fig.13 Measurement schematic with profilometer

动钻铆技术的难点主要体现在两方面:

(1) 送钉的可靠性保证。高可靠性是自动送钉系统最主要的要求。一方面,卡钉会造成整个自动钻铆系统停机,造成一定的经济损失;另一方面,由于被连接件价格昂贵,送钉出错可能会导致被连接件的破坏。送钉系统的可靠性需对整个送钉系统进行合理设计,包括振动排钉系统、输送系统、插钉系统以及各个系统之间的接口,减少卡钉率;同时增加容错机制,一旦送钉出错,系统可简单、快速恢复。

(2) 多规格铆钉自动送钉系统的设计。由于航空中使用的铆钉规格多样,因此需要自动送钉系统具备兼容多规格铆钉的能力,这就对自动送钉系统的设计提出了更高的挑战。

EI公司在1995年的时候就研制了一套自动送钉系统,能够实现对有头铆钉、无头铆钉及螺母等多种规格紧固件的快速、可靠的自动输送<sup>[83]</sup>。由于部分紧固件还是需要手动输送,为此EI公司在2008年又研制了一套针对少量多规格紧固件的自动送钉系统<sup>[84]</sup>,并与原系统集成,形成了一套完整的自动送钉系统,如图14所示。

法国AHG公司作为全球知名紧固件供应商,同时也提供自动送钉系统,其研制的自动送钉系统F2C2已被广泛用于自动钻铆设备中,宝捷、EI及GEMCOR等知名自动钻铆设备厂商均采用了这套系统。该系统主要由3部分组成:振动盘、装钉系统及输送。送钉系统通过振动盘将无序、无规则的铆钉按照一定顺序依次排列,然后通过输送管道进入装钉系统,由装钉装置将铆钉存储到储料盒中,并按照需要将储料盒放入输送系统中,再由输送系统将铆钉输送至孔内,如图15所示。

国内在自动送钉技术方面的研究主要以西飞、浙大<sup>[53]</sup>及南航<sup>[81,85]</sup>

为代表,并取得了一定的成果。西飞公司自主研发了振动式送钉系统,用于ARJ21机翼装配时提供无头铆钉。浙大针对钻铆加工的需求设计了自动送钉装置,对振动送料器、隔料机构及气动控制回路进行了详细设计。南航设计了一种新型自动送钉系统,能够完成近百种铆钉的自动填充、选择与输送。

同国外相比,国内自动送钉技术还比较落后,国外的自动送钉设备已广泛运用在飞机装配中,其自动化、智能化已达到很高的程度,国内尚在研究阶段,并且所研制的自动送钉系统可靠性、稳定性还有待提高。

#### 4 离线编程与仿真

离线编程<sup>[86-87]</sup>是根据产品的数学模型,从中提取出孔的位置及紧固件类型信息,从而规划机床运动轨

迹,并根据紧固件类型生成自动送钉系统识别的相关指令,实现NC自动编程。离线仿真则是通过运动仿真及加工过程仿真,进行运动干涉检查、轨迹优化及铆接质量分析,检验加工程序的合理性,避免加工过程中造成碰撞,提高自动钻铆效率与钻铆质量。离线编程与仿真一般包括孔位及紧固件类型信息提取模块、数控自动编程模块、刀位文件生成模块和离线仿真模块<sup>[60]</sup>。离线编程与仿真的最大难点在于孔位及紧固件类型信息的提取。首先在建立产品数学模型时就需要导入每个孔位点处紧固件的信息;其次由于飞机上孔位数量巨大、紧固件类型繁多,例如波音747每架有铆钉200万个,伊尔86每架有铆钉148万个<sup>[88]</sup>,其信息的提取与存储工作量巨大。

### 结论

(1)对自动钻铆技术国内外研究应用现状进行了详细的调研,并对国外三大自动钻铆设备供应商最先进的产品进行了介绍。

(2)总结了自动钻铆技术中的四大关键技术,包括高精度定位技术、制孔质量在线检测、自动送钉、离线编程与仿真,并对各技术的研究应用状况作了简要分析。

自动钻铆技术是实现飞机装配自动化的必然途径,可极大地提高装配质量与装配效率。国外在这一领域经过几十年的发展,已形成较成熟的研究体系与实际产品,并广泛运用在航空壁板的自动化装配中。国内则处在研究阶段,许多关键技术尚未突破。伴随着我国大飞机项目的实施,国内自动钻铆技术的发展将会迎来契机,在引进国外先进设备的基础上逆向研究,突破其核心技术,努力提高我国飞机自动化装配水平。

机械连接技术[M].北京:兵器工业出版社,2008.

ZHANG Quanchun, WANG Yubing, QU Lühe, et al. Advanced aircraft mechanical connection technique[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2008.

[2] 贾玉红,何景武.现代飞行器制造工艺学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.

JIA Yuhong, HE Jingwu. Modern aircraft manufacturing process[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.

[3] RIJCK J J M D. Stress analysis of fatigue cracks in mechanically fastened joints: an analytical and experimental investigation[M]. Delft: Delft University of Technology, 2005.

[4] 杜兆才,姚艳彬,王健.机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2015(4):26-31.

DU Zhaocai, YAO Yanbin, WANG Jian. Research status and development trends of robot drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(4):26-31.

[5] 卜泳,许国康,肖庆东.飞机结构件的自动化精密制孔技术[J].航空制造技术,2009(24):61-64.

BU Yong, XU Guokang, XIAO Qingdong. Automatic precision drilling technology of aircraft structural part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24):61-64.

[6] JAYAWEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(2):180-194.

[7] XI F F, YU L, TU X W. Framework on robotic percussive riveting for aircraft assembly automation[J]. Advances in Manufacturing, 2013,13(1):112-122.

[8] EGUTI C C A, TRABASSO L G, VILLANI E, et al. Development of a robotic end-effector of drilling and fasteners inserter for aircraft structures[R]. SAE Technical Papers, 2012.

[9] PLE P, GABORY J F, CHARLES P. Force controlled robotic system for drilling and riveting one way assembly[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2):785-788.

[10] 郑雄.伺服压力机控制系统关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2012.

ZHENG Xiong. Research of key technologies in the control system of servo press[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[11] ZIEVE P B. Low voltage electro-

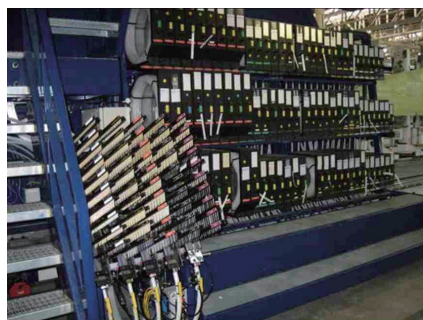


图14 E1自动供钉系统  
Fig.14 Fasteners feeding system



图15 AHG F2C2自动送钉系统  
Fig.15 AHG F2C2 fasteners feeding system

### 参考文献

[1] 张全纯,汪裕炳,瞿履和,等.先进飞

- magnetic riveter[D]. Washington: University of Washington, 1986.
- [12] REINHALL P G, GHASSAEI S, CHOO V. An analysis of rivet die design in electromagnetic riveting[J]. Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 1988, 110(1): 65-69.
- [13] HARTMANN J. Development of the handheld low voltage electromagnetic riveter[R]. SAE Technical Papers, 1990.
- [14] 曹增强, 刘洪. 电磁铆接技术[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 120-123.
- CAO Zengqiang, LIU Hong. Electromagnetic riveting technology[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 120-123.
- [15] 邓将华, 李春峰. 电磁铆接技术研究概况及发展趋势[J]. 锻压技术, 2006, 31(5): 10-14.
- DENG Jianghua, LI Chunfeng. Current status and trends in researches on electromagnetic riveting[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(5): 10-14.
- [16] 邓将华, 李春峰, 于海平, 等. 电磁铆接技术[J]. 锻压技术, 2010, 35(3): 1-6.
- DENG Jianghua, LI Chunfeng, YU Haiping, et al. Electromagnetic riveting technology[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(3): 1-6.
- [17] 张辉. 飞机装配设备及供应商一览[J]. 航空制造技术, 2008(11): 71-73.
- ZHANG Hui. Introduction of aircraft assembly equipment and suppliers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(11): 71-73.
- [18] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用[J]. 航空制造技术, 2005(6): 50-52.
- LOU Ali. The development status of automated drilling and riveting and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(6): 50-52.
- [19] BARTON E, HASLEY D, JACKSON J. G12 automatic fastening launch vehicle[R]. SAE Technical Papers, 2014.
- [20] RUMMELL T. The evolution of all electric fastening systems: G86 to multi-flex[R]. SAE Technical Papers, 2000.
- [21] MANGUS W, MCKEOWN S. G2000 nine axis flexibility to fasten 180 degree fuselage assemblies[R]. SAE Technical Papers, 1996.
- [22] FLAIG R. New wing riveter technologies[R]. SAE Technical Papers, 1999.
- [23] 何文治. 航空制造工程手册: 飞机装配[M]. 第2版. 北京: 航空工业出版社, 2010: 252-264.
- HE Wenzhi. Aviation manufacturing engineering handbook: Aircraft assembly[M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 252-264.
- [24] 赵辉. 基于UMAC的自动钻铆机控制系统研究与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- ZHAO Hui. Research automatic control system of drilling and riveting machine based on UMAC[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [25] BRISBEN S, KNAPP J. 777 automated spar assembly tool-second generation[R]. SAE Technical Papers, 1995.
- [26] HARTMANN J, MACIAS E. ASAT4-enhanced flexibility for the C-17[R]. SAE Technical Papers, 1998.
- [27] ECKSTEIN D, ZIEVE P B, WILKES R. Refurbishment of 767 ASAT drill-rivet-lockbolt machines[R]. SAE Technical Papers, 2010.
- [28] INMAN J, CARBREY B, CALAWA R, et al. A flexible development system for automated aircraft assembly[R]. SAE Technical Papers, 1996.
- [29] ZIEVE P, SMITH A. Wing assembly system for British aerospace airbus for the A320[R]. SAE Technical Papers, 1998.
- [30] HOLDEN R, HAWORTH P, KENDRICK I, et al. Automated riveting cell for A320 wing panels with improved throughput and reliability (SA2)[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [31] TRUETT J A, ASSADI M D, HARTMANN J L, et al. Flexible high speed riveting machine[R]. SAE Technical Papers, 2003.
- [32] ZIEVE P, RUDBERG T, VOGELI P, et al. A two tower riveting machine with a true Z axis[R]. SAE Technical Papers, 2004.
- [33] HIRATSUKA N, OSAWA T, ASSADI M, et al. One piece barrel fastening[R]. SAE Technical Papers, 2007.
- [34] ASSADI M D, BOAD C L, OSAWA T. True offset fastening[R]. SAE Technical Papers, 2006.
- [35] REMLEY D, REDIGER J, HAWORTH P, et al. Slug rivet machine installs 16 rivets per minute drill-rivet-shave[R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [36] STANSBURY E C, BIGONEY B, ALLEN R. E7000 high-speed CNC fuselage riveting cell[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2014, 7(1): 37-44.
- [37] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (one-sided cell end effector) robotic drilling system[R]. SAE Technical Paper, 2002.
- [38] DEVLIEG R, FEIKERT E. One-up assembly with robots[R]. SAE Technical Paper, 2008.
- [39] GRAY T, ORF D, ADAMS G. Mobile automated robotic drilling, inspection, and fastening[R]. SAE Technical Paper, 2013.
- [40] ADAMS G. Next generation mobile robotic drilling and fastening systems[R]. SAE Technical Paper, 2014.
- [41] 陈文亮, 姜丽萍, 王珉, 等. 大型客机铝锂合金壁板自动钻铆技术[J]. 航空制造技术, 2015(4): 47-50.
- CHEN Wenliang, JIANG Liping, WANG Min, et al. Automatic drilling and riveting technology of Al-Li alloy panel of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(4): 47-50.
- [42] 邓锋. MPAC自动钻铆机[J]. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
- DENG Feng. MPAC automatic drilling and riveting machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(6): 26-29.
- [43] DILLHÖFER T, BANKSTON B. MPAC (multi panel assembly cell)[R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [44] O'ROURKE B, ROUNKLES R. Automation for unprecedented production rates[R]. SAE Technical Paper, 2012.
- [45] MAYLÄNDER H, BELLA E. BRÖTJE-integrated panel assembly cell (IPAC) for high speed riveting applications in commercial airplane production[R]. SAE Technical Paper, 1999.
- [46] DILLHOEFER T, O'ROURKE B. All Electric fastening system (AEFS)[R]. SAE Technical Paper, 2007.
- [47] MEHLENHOFF T, VOGL S. Automated fastening of aircraft cargo door structures with a standard articulating robot system[R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [48] 费军. 自动钻铆技术发展现状与应用分析[J]. 航空制造技术, 2005(6): 42-44.
- FEI Jun. The development status of automatic drilling and riveting technology and its application analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(6): 42-44.
- [49] 李少波, 陈翔鹏. 自动钻铆技术的应用和无头铆钉安装[J]. 航空制造技术, 2007(9): 50-52.
- LI Shaobo, CHEN Xiangpeng. The

application of automatic drilling and riveting technology and the installation of slug rivets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007 (9): 50-52.

[50] 陈允全. 自动钻铆机托架变形分析及处理方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

CHEN Yunquan. Research on the analysis of bracket deformation and its handling method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[51] 董一巍, 卜昆, 陈允全, 等. 基于 VC 的自动钻铆机铆接数据库系统的开发[J]. 科学技术与工程, 2007(16): 4088-4093.

DONG Yiwei, BU Kun, CHEN Yunquan, et al. Development of automatic rivet gun's riveting database system based on VC[J]. Science Technology and Engineering, 2007(16): 4088-4093.

[52] 许瑛, 胡小平, 徐华, 等. 基于 Matlab 的飞机自动钻铆机器人运动分析[J]. 制造业自动化, 2009(7): 25-28.

XU Ying, HU Xiaoping, XU Hua, et al. Motion analysis of aircraft automatic drilling and riveting robot based on Matlab[J]. Manufacturing Automation, 2009(7): 25-28.

[53] 李菡. 基于双机器人协同的自动钻铆终端器及其自动供钉装置的设计与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

LI Han. Study on dual-robot-based drilling & riveting end-effector and automated rivet feeding apparatus[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

[54] 武伟让. 大型壳体磁脉冲自动钻铆系统设计和仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

WU Weirang. Design and simulation of an automated drill and rivet system based on EMR for big shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[55] 赵向伟. 计算机辅助自动钻铆技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

ZHAO Xiangwei. Research on technology of computer aided automatic rivet[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[56] 张杨, 高明辉, 周万勇, 等. 自动钻铆系统中工业机器人协同控制技术[J]. 航空制造技术, 2013(20): 87-90.

ZHANG Yang, GAO Minghui, ZHOU Wanyong, et al. Research on industrial robot cooperative control technology for automatic drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20): 87-90.

[57] 凌扬洋, 李西宁, 李卫平, 等. 适应自动钻铆的壁板预装配柔性定位装置设计[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 465-468.

LING Yangyang, LI Xining, LI Weiping, et al. Designing flexible positioning device for aircraft's pre-assembled panel to accommodate drilling and riveting[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(3): 465-468.

[58] 马伟. 五轴自动钻铆定位系统结构与仿真模块开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

MA Wei. Structure design and simulation system development of five-axis riveting automatic positioning system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[59] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 等. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.

LIU Lianxi, LI Xining, WANG Zhongqi, et al. Semi-empirical research on automatic drilling and riveting process of headless rivet[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 77-82.

[60] 王珉, 陈文亮, 郝鹏飞, 等. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2013(1/2): 80-83.

WANG Min, CHEN Wenliang, HAO Pengfei, et al. Aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(1/2): 80-83.

[61] 陈修强, 田卫军, 薛红前. 飞机数字化装配自动钻铆技术及其发展[J]. 航空制造技术, 2016(5): 52-56.

CHEN Xiuqiang, TIAN Weijun, XUE Hongqian. Automatic drilling and riveting technology of aircraft digital assembly and its development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(5): 52-56.

[62] DEVLIEG R. Expanding the use of robotics in airframe assembly via accurate robot technology[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 198-203.

[63] 周炜, 廖文和, 田威, 等. 面向飞机自动化装配的机器人空间网格精度补偿方法研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(19): 2306-2311.

ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei, et al. Robot accuracy compensation method of spatial grid for aircraft automatic assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(19): 2306-2311.

[64] 洪鹏, 田威, 梅东棋, 等. 空间网

格化的机器人变参数精度补偿技术[J]. 机器人, 2015(3): 327-335.

HONG Peng, TIAN Wei, MEI Dongqi, et al. Robotic variable parameter accuracy compensation using space grid[J]. Robot, 2015 (3): 327-335.

[65] 刘志, 赵正大, 谢颖, 等. 考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J]. 机器人, 2015 (3): 376-384.

LIU Zhi, ZHAO Zhengda, XIE Ying, et al. Kinematic calibration and compensation for a robot with structural deformation[J]. Robot, 2015(3): 376-384.

[66] 王一, 任永杰, 郑继贵, 等. 测量机器人在线动态温度误差补偿技术[J]. 光子·激光, 2009, 20 (4): 491-494.

WANG Yi, REN Yongjie, ZHU Jigui. Online and dynamic thermal compensation for measuring robot[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2009, 20(4): 491-494.

[67] DEVLIEG R. High-accuracy robotic drilling/milling of 737 inboard flaps[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2011, 4(2): 1373-1379.

[68] STROBL K H, HIRZINGER G. Optimal hand-eye calibration[C]//Proceedings of 2006 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. IEEE, 2006: 4647-4653.

[69] DANILIDIS K. Hand-eye calibration using dual quaternions[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(3): 286-298.

[70] ILONEN J, KYRKI V. Robust robot-camera calibration[C]// Proceedings of 2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 2011: 67-74.

[71] 李永超. 飞机壁板机器人自动化制孔法向修正技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

LI Yongchao. Research on surface-normal adjustment in robotic drilling for aircraft panel assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[72] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007(1): 96-99.

YUAN Hongxuan. Manufacturing technology of connecting hole in aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(1): 96-99.

[73] HASEGAWA N, OKADA T, SHIMIZU T. Measurement of surface-normal using a range sensor with a pair of wedge-prisms[C]// Proceedings of 2005 IEEE

Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE, 2005: 1744–1749.

[74] 杜兆才. 数字化钻铆的曲面法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2011(22): 108–111.

DU Zhaocai. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22): 108–111.

[75] 应高明, 王仲奇, 康永刚, 等. 飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(23): 1–4.

YING Gaoming, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Study on normal vector measurement method in automatic drilling & riveting of aircraft panel[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(23): 1–4.

[76] PAGE D L, SUN Y, KOSCHAN A F, et al. Normal vector voting: crease detection and curvature estimation on large, noisy meshes[J]. Graphical Models, 2002, 64(3): 199–229.

[77] DU Z C, YAO Y B. Measurement method for evaluating normal direction of surface for digital drilling and riveting[R]. SAE Technical Paper, 2012.

[78] 曲绍君, 邹方. 一种新型飞机曲面壁板自动制孔法向测量方法[J]. 航空制造技术, 2015(21): 134–137.

QU Shaojun, ZOU Fang. A novel method of automatic drilling's normal measurement

for aircraft curved panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(21): 134–137.

[79] SMITH J, KOCHHAR–LINDGREN D. Integrated hole and countersink inspection of aircraft components[R]. SAE Technical Paper, 2013.

[80] MALCOMB J R. Laser profilometry for non-contact automated countersink diameter measurement[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 263–268.

[81] 周振锋, 田威, 廖文和. 面向飞机部件装配生产线的自动送钉系统研究[J]. 航空精密制造技术, 2014(1): 34–37.

ZHOU Zhenfeng, TIAN Wei, LIAO Wenhe. Research on rivets auto-feeding system for aircraft components assembly line[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014(1): 34–37.

[82] 龚辉. 基于工业机器人平台的自动供钉系统设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

GONG Hui. Design and research of automatic rivets feeding system based on industry robots platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[83] RINK P, GIVLER G, STANCIK B R, et al. New generation automated fastener feed systems[R]. SAE Technical Paper, 1995.

[84] BOAD C L, COLEBOURN D. Stick

fastener feed system for large variety & small quantity[R]. SAE Technical Paper, 2008.

[85] TIAN W, ZHOU Z F, LIAO W H. Analysis and investigation of a rivet feeding tube in an aircraft automatic drilling and riveting system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5–8): 973–983.

[86] ZOU C, LIU J H. An off-line programming system for flexible drilling of aircraft wing structures[J]. Assembly Automation, 2011, 31(2): 161–168.

[87] ZHU W D, QU W W, CAO L H, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9–12): 2535–2545.

[88] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 仿真技术在飞机自动钻铆中的应用[J]. 航空制造技术, 2009(24): 84–87.

YIN Junqing, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Application of simulation technology in aircraft automatic drilling and riveting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(24): 84–87.

通讯作者: 王宇晗, 研究员, 研究方向为数控技术、数控装配及复杂曲面数控加工技术, E-mail: yuhan\_wang0309@163.com。

## Research Status of Aircraft Automatic Drilling and Riveting System and Its Key Technology

YU Long<sup>1</sup>, ZHANG Yilian<sup>1</sup>, WANG Yuhan<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai TOPNC Technology Co., Ltd., Shanghai 201111, China)

**[ABSTRACT]** Quality and efficiency of fuselage and wings assembly can be improved significantly by using of automatic drilling and riveting technology. For decades now, this technique has been widely applied in aerospace manufacturing in foreign, while it's just at beginning at home and the poor level for long time. So advanced foreign technologies are invested in this paper, taking GEMCOR, Electroimpact (EI), BROETJE Automation as examples, their features and the latest development are introduced respectively. Meanwhile, the development of automatic drilling and riveting at home is also illustrated briefly, as well as the problems facing in this area. Moreover, the key technologies, including high precision positioning, hole inspection on-line, automatic fastener feeding, off-line programming and simulation are analyzed in detail, which provide reference for the development of automatic drilling and riveting technology at home.

**Keywords:** Aviation panel; Automatic drilling and riveting; High precision positioning; Hole inspection on-line; Automatic fastener feeding; Off-line programming and simulation

(责编 玲犀)