

便携式螺旋轨迹制孔装置的研制

张云志¹,刘华东¹,刘建东¹,陈磊²,方伟²

(1. 中国航空制造技术研究院数字化制造技术航空科技重点实验室,北京 100024;

2. 中国商飞上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所,上海 200436)

[摘要] 飞机装配存在一些特殊的制孔区域,如翼根、垂尾等部位,这些制孔区域或空间狭窄或有一定高度,通常的自动制孔设备和机器人制孔系统难以发挥自身的优势。对此,研制了一种便携式全电动螺旋轨迹制孔装置,该装置具有结构紧凑、方便携带且可依据程序设定的工艺参数对应叠层材料,可自动改变刀具转速、进给速率等特征,能对航空材料实施螺旋铣孔加工。利用所研制的螺旋轨迹制孔装置对 7075-T7351 铝合金叠层材料进行制孔验证,制孔精度等均达到了预期,验证了该新型制孔装置及控制方法的合理性。

关键词: 飞机装配;螺旋轨迹制孔;主轴电机;末端执行器;集成控制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.047



张云志

博士、高级工程师,从事机器人应用环境和自动控制技术以及飞机数字化柔性装配技术研究。

飞机制造过程中,机身、机翼等大部件的制孔正在由人工作业模式向以数控机床制孔和机器人制孔为代表的自动制孔模式转变,这为进一步解放生产力、提高飞机装配效率和质量提供了有力的支撑。但是,由于

飞机装配中存在一些特殊的制孔区域,这些制孔区域有空间狭窄且高空作业的特点,如翼根、垂尾部位等无疑成为自动制孔设备、机器人制孔系统难以施展工作的掣肘区域。同时,该区域通常存在为数不多的大尺寸螺栓连接用孔,给手工钻孔、铰孔作业以及工作质量的保证带来极大的挑战。另外,现代飞机设计普遍采用了轻质高强度材料,这些材料的应用,很好地满足了飞机的设计要求,但也为后续加工带来了一些问题,尤其是钛合金、CFRP 及其叠层材料的制孔,因刀具过热失效、CFRP 层间剥离等,已成为现代飞机制造装配环节中不可忽视的问题之一^[1]。波音、空客在 10 多年前就已导入螺旋轨迹制孔技术来应对这些问题^[2]。迄今,国内外很多院校、研究机构均已展开螺旋制孔技术研究,如瑞典 Novator、浙江大学、天津大学等。在应用层面,除 Novator 之外尚未见报道。

为了有效解决飞机翼根、垂尾、平尾等一些狭窄、有一定高度的作业

空间的制孔问题,并与自动制孔设备、机器人制孔设备等形成互补,本文研制了一种新的便携式全电动螺旋轨迹制孔装置,为操作空间有限的制孔区域提供了有效的制孔手段。

螺旋轨迹制孔原理

螺旋轨迹制孔就是控制刀具在高速旋转的同时沿孔中心轴公转,并使刀具中心点沿给定的螺旋线轨迹运动。螺旋轨迹制孔原理如图 1 所示^[3]。

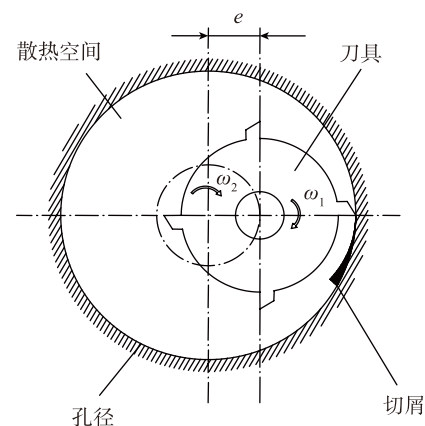


图1 螺旋轨迹制孔原理

Fig.1 Spiral trajectory drilling principle

由于刀具回转中心相对制孔中心存在径向变位 $e(e \neq 0)$, 制孔与刀具间因偏心而形成一定的散热空间, 如图 1 所示, 加之刀具以 ω_1 自转的同时绕孔中心以 ω_2 公转, 必然形成刀刃交替工作的非连续铣削情形, 并产生粉末状切屑。这种铣削方式, 不仅有利于刀具的散热, 降低了传统制孔中刀具因温度累积而造成的刀具过热磨损, 而且因其切削力相对较小, 有效地抑制了 CFRP 层间分离和孔口劈裂、剥离等不良现象的发生。整个制孔过程中产生的粉末状切屑由真空吸屑管道排除, 避免了对孔内表面的划伤, 有利于提高孔内壁的粗糙度。

螺旋轨迹制孔装置设计

根据便携及性能参数可精确调整的原则, 结合难加工材料的制孔工艺需求, 并参考国外公开的部分技术文献, 制定便携电动式螺旋制孔装置设计原则和技术指标。

1 设计原则与技术指标

(1) 以小型轻量化为设计目标, 适合狭窄空间及高空制孔作业。

(2) 利用软件设定主轴运动参数, 对复合叠层材料可根据叠层厚度及材料属性自动改变刀具进给速度及主轴转速。

(3) 刀具中心点能径向调整变位, 以适应多孔径制孔要求。

(4) 具有真空排屑功能, 将制孔产生的切屑及时从制孔区域排除。

便携电动式螺旋制孔装置设计技术指标, 如表 1 所示。

由于篇幅所限, 本文仅就便携式螺旋轨迹制孔装置的关键部件、单元设计和装置的总体构成要素予以介绍。

2 铣削主轴单元

铣削主轴单元是便携式螺旋轨迹制孔装置的核心部件, 该机构的主要功能是使刀具自转的同时绕制孔中心公转, 同时具有刀具径向变

位调整、锁定及电机动力电缆防绕功能, 铣削主轴单元构成要素, 如图 2 所示。

在铣削主轴单元中, 刀具中心点变位由偏心调整单元手动完成, 工作时由特种主轴电机带动机械主轴, 使刀具实现自转。特种主轴电机尾部设置旋转滑环防止公转时电机动力线缆的缠绕, 其转速可根据加工材料种类由控制指令实现变速, 以适应不同材料的制孔工艺对刀具转速的要求。单元中的核心是特种主轴电机, 基于设计原则, 特种主轴电机需要具有大扭矩输出、高转速, 同时要有较小的外形尺寸、重量轻、防线缆缠绕等特征, 此外, 强制冷却的冷风接口会将含有一定浓度油雾的冷风通过该接口直达刀具前端, 起到冷却电

机、刀具和润滑的双重作用。

综上需求, 铣削主轴单元所用特种主轴电机结构设计方案, 如图 3 所示。

为了适应不同材料制孔, 将特种主轴电机设计成 3 段速度控制模式, 高速模式应对铝合金材料加工, 中、低速模式应对钛合金及复合材料加工, 电机主要特性及技术参数如表 2 所示。

根据以上要求, 设计、制作了特种主轴电机样机, 如图 4 所示, 并对照表 2 技术参数项目进行了性能测试。

试验中控制电机速度, 考察了电机在 3 段速度下的输出特性。当电机转速为 1809r/min 时, 输出扭矩为 4.578N·m; 当电机转速为 2584r/

表1 螺旋轨迹制孔装置技术指标

技术指标	参数
螺旋轨迹制孔装置运动轴数	3
轴向进给能力 /mm	65
TCP 最大变位 /mm	5
刀具装卡形式	ER20
公转调范围 / (r·min ⁻¹)	20~80
孔壁粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	1.6/3.2
制孔精度	H8
主机重量 /kg	≤ 18
制孔能力(10mm 刀具)/mm	10.5~20
铣削主轴型号	78SZD13A
铣削主轴额定功率 /kW	0.85

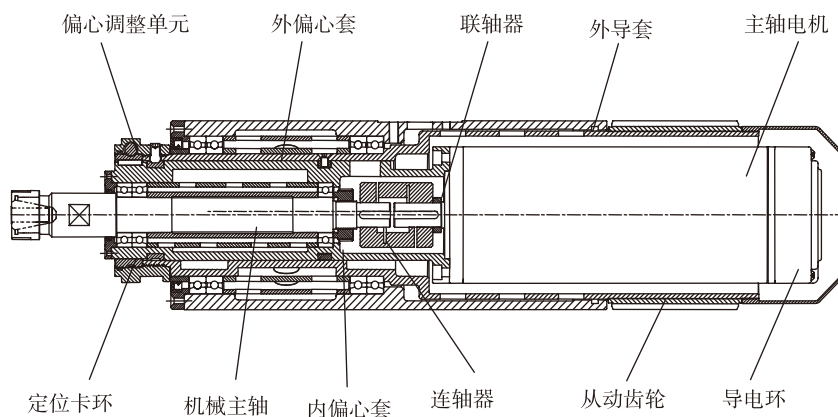


图2 铣削主轴单元
Fig.2 Milling spindle unit

min时,输出扭矩为 $3.515\text{N}\cdot\text{m}$;电机转速为 $4534\text{r}/\text{min}$ 时,输出扭矩为 $1.964\text{N}\cdot\text{m}$ 。在室温 $27\text{ }^\circ\text{C}$ 、无冷却连续运转 8h 温升,测试机壳温度 $28\sim 32\text{ }^\circ\text{C}$ 。测试结果显示,所研制的特种主轴电机的各项性能指标基本上符合设计要求。特种主轴电机输出能力性能测试结果,如图5所示。

3 螺旋轨迹驱动单元

螺旋轨迹驱动单元是实现刀具的公转和精确进给的重要保证机构,主要提供刀具公转动力和轴向进给力,使刀具中心点(TCP)形成螺旋轨迹。该单元封闭在机壳内部,且保证齿轮间的正确啮合,通过对两伺服电机转速的协调控制,可使TCP获得多种螺旋轨迹。螺旋轨迹驱动

单元的组成要素,如图6所示。

4 操作显示单元

操作显示单元用来操作、显示和设定制孔工艺参数。该单元配有启动、急停、参数设定、选择、确定按钮,通过小型高清TFT触摸屏辅助操作,可同时加工过程中刀具的进给量、进给速度及主轴自传/公转速度等参数进行监视。

5 螺旋轨迹制孔装置总成

便携式螺旋轨迹制孔装置内部构造及各单元集成情况,如图7所示。

为了减轻重量,机壳与导向套采用了一体化设计,并采用轻质合金材料制成。采用导向筒内表面烧结高温耐磨涂层方式来保证其优良的耐磨性能。机壳上设置的键槽与连接

器上的滑键配合,保证了铣削主轴单元在导向套内伸缩滑动周向定位。铣削主轴单元在导向套内运动,依赖于螺旋轨迹驱动单元,考虑到刀具偏心测量及安全防护等各种因素,将机顶护罩与操作显示单元合为一体,便携式螺旋轨迹制孔装置总体结构如图8所示。

为了考察螺旋轨迹制孔装置结构设计方法的合理性及其控制方法的有效性,研制了螺旋轨迹制孔装置验证机,如图9所示。

控制系统的设计

1 控制系统硬件构成

便携式螺旋轨迹制孔装置控制系统硬件主要由主控板卡、轴驱动控制器和I/O控制单元3大部分构成。电控系统硬件构成如图10所示。

主控板卡接收输入操作指令后,将操作指令转换为轴运动控制指令^[4],通过RS485总线发送给驱动器^[5],对电机进行位置或速度控制,同时接

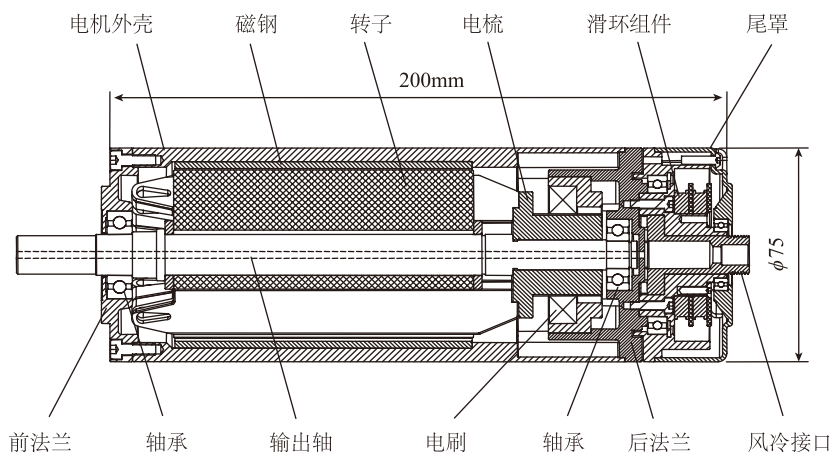


图3 主轴电机结构设计

Fig.3 Structural design of spindle motor

表2 特种主轴电机主要特性及技术参数

特性	技术参数		
电源/频率	单相 220AC / 50Hz		
额定功率/kW	0.85		
额定电压/V	50	65	110
额定电流/A	21	16	9.5
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1800	2500	4500
输出扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	1.8	3.3	4.5
工作温升	$\leq 45\text{ }^\circ\text{C}$ (连续 8h 运转)		
绝缘等级	F		
轴伸跳动/mm	径向 ≤ 0.1		
强制风冷/MPa	$0.8\sim 1$ (后进前出)		
外形尺寸/mm	$\phi 75\times 200$		
电机重量/kg	5.25		



图4 特种主轴电机样机

Fig.4 Special spindle motor prototype



图5 主轴电机输出特性测试结果

Fig.5 Torque test results of spindle motor

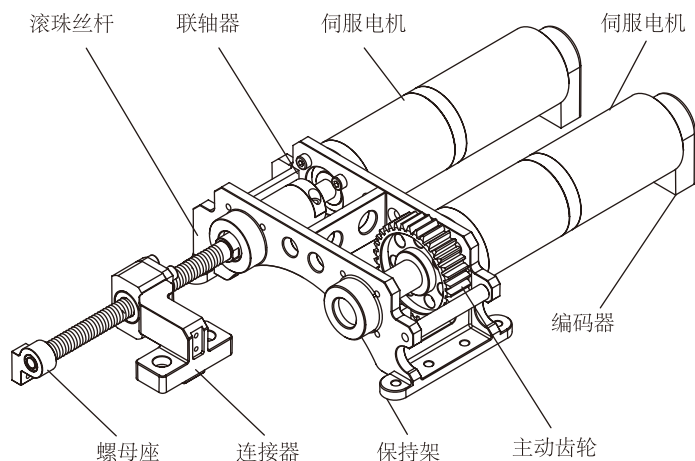


图6 螺旋轨迹驱动单元
Fig.6 Spiral trajectory drive unit

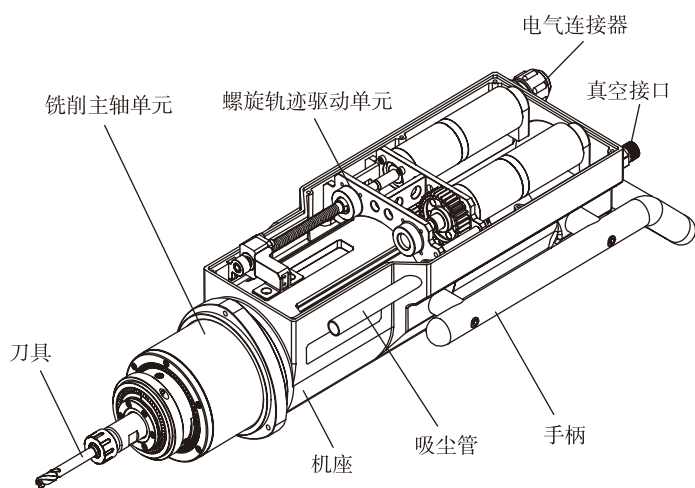


图7 便携式螺旋轨迹制孔装置内部构造
Fig.7 Internal structure of portable spiral trajectory drilling device

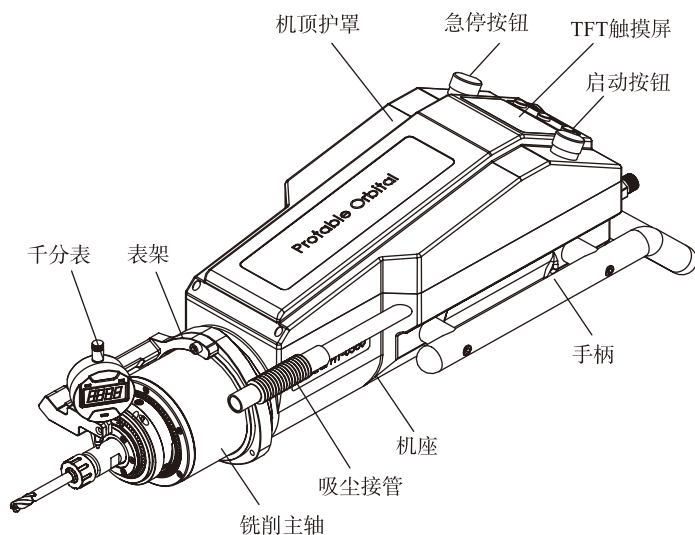


图8 便携式螺旋轨迹制孔装置外观
Fig.8 Appearance of portable spiral trajectory drilling device

收电机驱动器反馈的位置、速度等信息,进行运动协调控制。外部的急停和限位开关信号直接接入驱动器,对操作和制孔过程进行安全保护。便携式螺旋轨迹制孔装置控制系统硬件搭建如图 11 所示。

2 软件系统设计

按照设备的功能,软件系统按以下 5 个功能模块进行设计:

(1) 按键控制功能模块。

设定键: 实现选择、执行和加工参数设定功能。

选择键: 实现参数和数据值的修改。

确定键: 实现参数值或功能修改的最终确定。

(2) 液晶显示功能模块。

实现功能菜单的图形化显示、急停及故障报警功能。出现急停、报警事件时执行故障处理程序。

(3) 485 总线通讯模块。

进行 485 总线初始化,控制主机和各个下位机的数据传输。

(4) 主轴及伺服轴控制模块。

完成主轴控制器和伺服控制器的参数设置和速度、位置的控制。

(5) 参数设置及存储模块。

实现各轴加工参数的设置及数据的存储。



图9 便携式螺旋轨迹制孔装置验证机
Fig.9 Verification machine for portable spiral trajectory drilling device

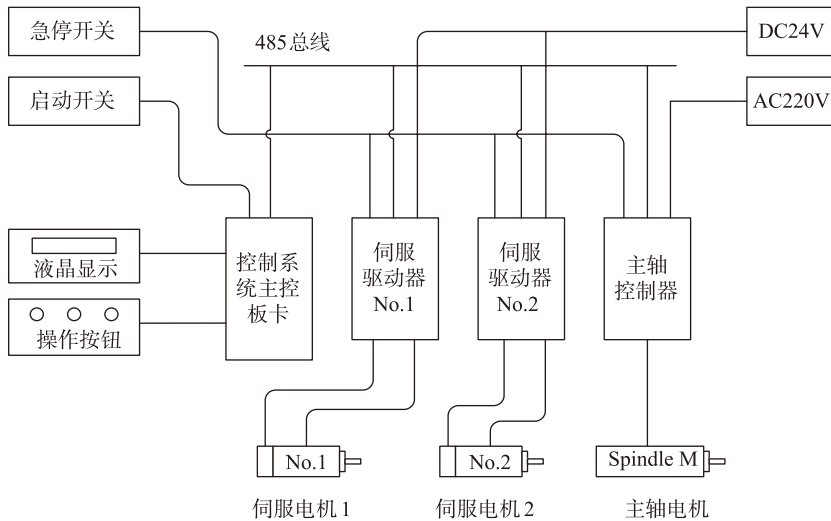


图10 控制系统硬件构成
Fig.10 Hardware structure of control system

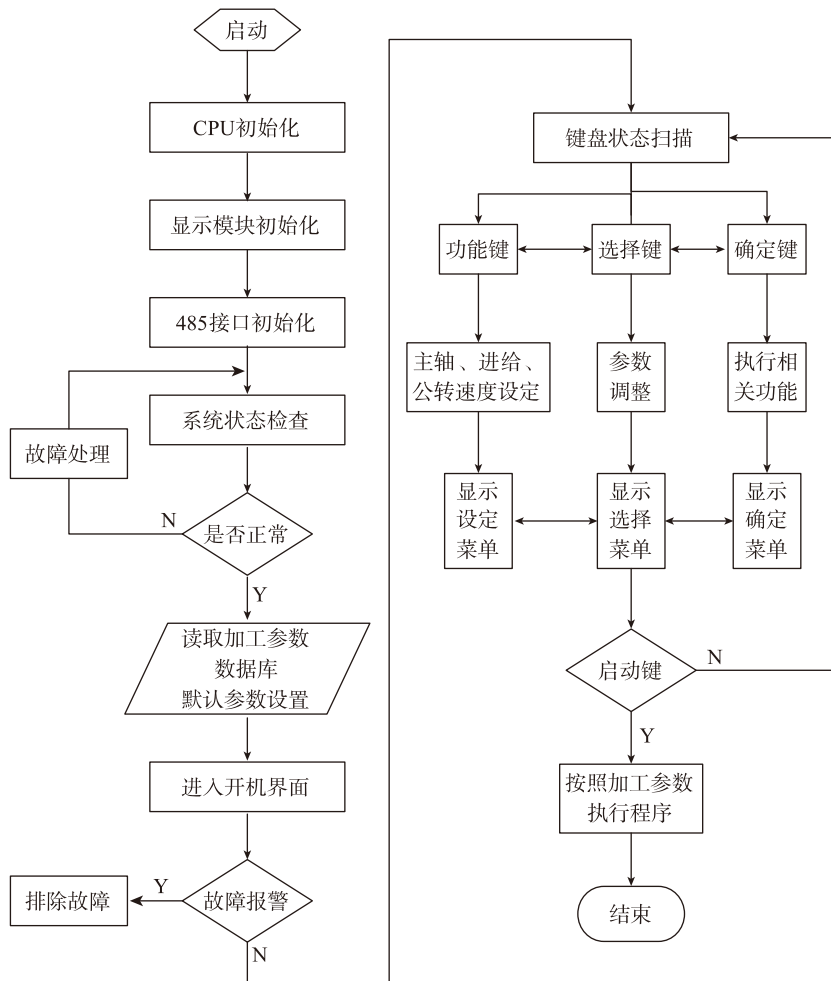


图12 控制软件设计流程
Fig.12 Control software development flow

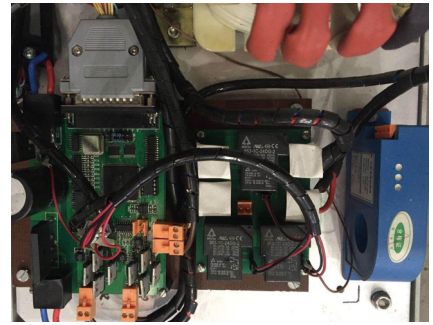


图11 控制系统主控板卡
Fig.11 Control board of control system

便携式螺旋轨迹制孔装置控制软件设计流程如图 12 所示。

控制软件开发基于 ARM 单片机处理器的集成开发环境 IAR Embedded Workbench, 包含项目管理器、编辑器、编译连接工具, 并支持 RTOS 的调试工具, 在该环境下使用 C/ C++ 和汇编语言进行控制软件开发。

螺旋轨迹制孔验证

为全面考核研制的螺旋轨迹制孔装置制孔性能, 对 7075-T7351 铝合金叠层(4层 12.7mm 厚铝板, 总厚度实测 50.2mm)进行现场制孔验证, 制孔按 3 组孔径每组 3 个孔(孔径分别为 12.7mm、15.8mm、19.05mm)的方式进行, 图 13 所示为中国商飞验证现场。

现场制孔验证条件: 刀具为直径 $\phi 10\text{mm}$ 国产 4 刃铣刀; 主轴转速为 3000r/min、4000r/min; 公转转速为 30 r/min; 进给速率为 8mm/min。

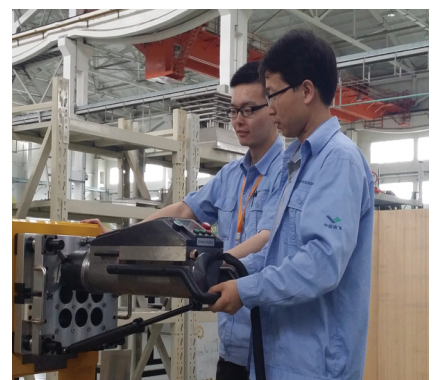


图13 螺旋轨迹制孔装置现场验证
Fig.13 Field verification of the drilling device

对 7075-T7351 铝合金叠层(4层)进行制孔,并测定制孔精度和孔内壁粗糙度。因篇幅所限,表3只列出验证制孔试验中对孔径偏差值及孔壁粗糙度的部分检测结果。

从试验测定结果看,利用研制的便携式螺旋轨迹制孔装置所制的孔,在制孔精度和粗糙度方面均达到预期,基本上能满足航空制造中铝合金材料的制孔要求。试验还显示,螺旋轨迹制孔过程产生的为粉末状金属切屑,可通过真空从排屑管道排出,避免了划伤制孔表面,切屑颗粒大小与刀具运动参数有关,

与孔径大小无关。制孔试验部分结果如图 14 所示。

结论

针对飞机装配中自动制孔设备和机器人不可达的制孔作业区,本文介绍了一种结构紧凑、携带方便且可依据程序设定工艺参数的便携式全电动螺旋轨迹制孔装置的研制过程。该装置采用了特种主轴电机驱动,具有气动马达无可比拟的切削转速、转矩精确控制的优势。通过对多叠层铝合金材料制孔试验,验证了该制孔装置的设计及控制方法的合理性和

有效性。作为一种新型制孔工具,实现了用一种规格的刀具加工多种直径孔的实用功能。验证试验虽然是在 7075-T7351 铝合金叠层上进行,但由于本机具有对刀具转速、转矩和进给速率可精确调整的便利性能,理论上完全可以胜任对钛合金、CFRP 等难加工材料的制孔工作。作为便携式螺旋轨迹制孔装置研究的继续,接下来将进一步深入研究,用实际的制孔试验来证明本制孔装置对钛合金、CFRP 等难加工材料制孔的有效性。

表3 螺旋轨迹制孔装置技术指标

序号	公称值/mm	实测值/mm	偏差值/mm	粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	主轴转速/(r·min ⁻¹)
1	$\phi 12.7$	$\phi 12.712$	0.012	1.85	4000
2	$\phi 12.7$	$\phi 12.716$	0.016	2.45	3000
3	$\phi 12.7$	$\phi 12.715$	0.015	2.34	3000
4	$\phi 15.8$	$\phi 15.812$	0.012	1.55	4000
5	$\phi 15.8$	$\phi 15.815$	0.015	2.35	3000
6	$\phi 15.8$	$\phi 15.818$	0.018	2.33	3000
7	$\phi 19.05$	$\phi 19.065$	0.015	1.62	4000
8	$\phi 19.05$	$\phi 19.070$	0.020	2.44	3000
9	$\phi 19.05$	$\phi 19.072$	0.022	2.38	3000

参考文献

[1] 秦旭达,陈仕茂,刘伟成,等.螺旋铣孔技术在航空装配业中的发展应用[J].航空制造技术,2009,52(6):58-60.
QIN Xuda, CHEN Shimao, LIU Weicheng, et al. Development and application of milling technology in aviation assembly and distribution industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(6): 58-60.

[2] WHINNEM E, LIPCZYNSKI G. Development of orbital drilling for the Boeing 787[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2008, 1(1): 811-816.

[3] 张云志,刘华东,邹方,等.螺旋轨迹制孔技术在航空制造中的应用[J].航空制造技术,2013,56(22):34-39.
ZHANG Yunzhi, LIU Huadong, ZOU Fang, et al. Development and application of milling technology in aviation assembly and distribution industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(22): 34-39.

[4] 陈先锋.伺服系统控制技术[M].北京:人民邮电出版社,2010.
CHEN Xianfeng. Servo system control technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.

[5] 袁军.双电机同步联动伺服控制系统研究[D].成都:电子科技大学,2011.
YUAN Jun. Research on synchronous servo control system of double motor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.



(a) 制孔情况



(b) 制孔切屑

图14 制孔试验结果

Fig.14 Borehole experimental results

通讯作者:张云志, E-mail: sfzhzyz@vip.sina.com。

Development of Portable Spiral Trajectory Drilling Device

ZHANG Yunzhi¹, LIU Huadong¹, LIU Jiandong¹, CHEN Lei², FANG Wei²

(1. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Institute of Aeronautics Manufacturing Technologies, COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

[ABSTRACT] It is widely acknowledged that some special drilling areas exist in aircraft assembly. For example, the wing root and the vertical tail. Not only are they narrow in space but also require certain height, which makes it difficult to fully harness the advantages, especially in the usual automatic drilling device and robot drilling system. Hence, a portable helical trajectory drilling device was designed in order to solve the problems. This device is compact, portable and could set process parameters according to the program, besides, it may be applied in drilling of aeronautical materials. Moreover, tool feed speed can be changed automatically for multilayer material. In this paper, the authors applied the developed spiral trajectory drilling device to examine the drilling of 7075-T7351 multilayer Al alloy material. It is showed that the accuracy of this device reached the expectation and the rationality of the design and control methods of the new type drilling device was verified.

Keywords: Aircraft assembly; Spiral trajectory drilling; Spindle motor; End effector; Integrated control

(责编 铃兰)

(上接第 41 页)

2013.

[6] 金庆勉, 金加奇. 飞机机身自动对接技术研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 72-75.

JIN Qingmian, JIN Jiaqi. Study on aircraft fuselage automatic joining technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014,

57(19): 72-75.

通讯作者: 王巍, E-mail: wwsh595@163.com。

Research on Docking Technology of Large Aircraft Fuselage

WANG Wei, WANG Chengxin

(Aerospace Engineering College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of low accuracy of the fuselage of large aircraft in China, this paper studies the docking method on the fuselage of a large aircraft. First of all, this paper selects and designs the docking datum of the fuselage and the docking station of the fuselage. Later, in the process of the fuselage docking, using a laser collimator, make the laser collimator light polymerization through artificial adjustment, and the desired data displayed on the digital display table, so as to adjust the body of the aeroplane. Again measuring actual coordinates of fuselage assembly datum using laser tracker, online measurement control system trims fuselage according to the actual coordinates measurement data to meet the requirements of the position of the fuselage and docking. Finally, according to the fine-tuning of the fuselage, the actual sitting value of the measured reference point and the square root of the sum of distance squares of the theoretical coordinates are used to determine whether the fuselage butt meets the standard. The method of fuselage docking in this paper can reasonably control the deviation at the tolerance range. Through the study of large aircraft fuselage docking technology, laser tracker, laser collimator, online measurement software and servo drive device as the main body of online measurement control system, can greatly improve the accuracy of large aircraft fuselage docking.

Keywords: Docking datum Docking equipment; Laser tracker; Laser collimator; Online measurement control system; Docking accuracy

(责编 铃兰)